

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea Magistrale in Fisica

Il Teatro Scientifico in Didattica della Fisica una attività informale che diventa formale

Relatori:

**Prof.ssa Olivia Levrini
Prof. Marco Giliberti**

Presentata da:

Martina Mulazzi

Correlatore:

Prof.ssa Marina Carpineti

Anno Accademico 2018/2019

Indice

Introduzione	5
1 Il Teatro Scientifico	7
1.1 Perché fare Teatro Scientifico	7
1.2 Stato dell'Arte sul Teatro Scientifico e Approcci Didattici Internazionali .	11
1.3 Il Teatro Scientifico de <i>Lo Spettacolo della Fisica</i>	17
1.3.1 Luce dalle Stelle	21
1.3.2 Il Laboratorio del Piano Lauree Scientifiche (PLS)	24
1.3.3 Il Laboratorio di Teatro Scientifico	26
2 Le radiazioni elettromagnetiche nella didattica delle superiori	27
2.1 Letteratura di riferimento e problemi didattici riguardo alle radiazioni già documentati	27
2.2 Analisi dei questionari sulle radiazioni elettromagnetiche	33
2.3 Le radiazioni elettromagnetiche nei libri di testo delle superiori	46
2.3.1 Radiazione Visibile e Modello di Visione	46
2.3.2 Spettro elettromagnetico in particolare Radiazione Ultravioletta e Infrarosso	51
2.3.3 Interazione radiazione non ionizzante e materia: trasmissione, assorbimento, riflessione ed emissione della radiazione	55
2.3.4 Radiazione Termica: legge di Stefan-Boltzmann e irraggiamento .	57
2.3.5 Corpo Nero, legge dello spostamento di Wien, legge di Planck . .	62
3 Metodologia	66
3.1 Active Learning, metodo inquiry e strategia didattica delle 5E	66
3.2 Attività Informali, Non Formali, Formali	71
3.3 Il Tutorial "Sotto ai nostri occhi"	72
4 Risultati e Conclusioni	75
A Copione commentato di "Luce dalle Stelle"	84

B Il tutorial	120
Bibliografia	275
Ringraziamenti	280

S: [...] Volevamo raccontarvi la storia di un fisico che cammina lungo la spiaggia e vede un bambino, [...] che getta delle pietre piatte sul mare, cercando di farle rimbalzare...

T: Ogni pietra non fa più d'uno due salti, il fisico, si ricorda che anch'egli nella sua infanzia, era molto bravo in quel gioco.

I: Così mostra al bambino come si fa... getta le pietre, uno dopo l'altra, indicando come vadano tenute, con che inclinazione vadano lanciate, a quale altezza sul pelo dell'acqua. Tutte le pietre che il fisico getta fanno molti salti, sette, otto, persino dieci.

T: Sì - dice allora il bambino - fanno molti salti. Ma non è questo che cercavo... fanno cerchi tondi e io invece sto cercando tracce di cerchi quadrati!

S: Il fisico rimane per alcuni istanti senza parole... poi si avvicina al bambino, gli fa i suoi complimenti e gli dice di non scoraggiarsi se i sassi che ha incontrato non lasciano traccia di cerchi quadrati nell'acqua.

L'importante è continuare a cercare le tracce.....

— TRACCE Spettacolo teatrale di M. Carpineti, S. Ghioldi, M. Giliberti, N. Ludwig e A. Rota

Abstract

Oltre a quelle formali a scuola, la società propone sempre più attività di educazione informale (mostre o spettacoli teatrali), cui si aggiungono attività non formali (seminari divulgativi o laboratori pomeridiani). Esistono studi di ricerca sull'efficacia di queste attività, mentre mancano ricerche che valutino le possibilità di integrazione, in un percorso didattico coerente, di attività informali e non formali in un percorso formale (a scuola). A nostra conoscenza, questa integrazione generalmente non avviene e le attività extrascolastiche sono spesso marginali al percorso conoscitivo. Questa tesi di laurea affronta il problema proponendo un esempio di percorso articolato dall'informale al formale sul tema dello spettro elettromagnetico (in particolare su visibile, UV e IR vicino e lontano). Esso parte dalla visione dello spettacolo teatrale "Luce dalle Stelle", di cui sono autori e attori M. Carpineti, M. Giliberti e N. Ludwig dell'Università Statale di Milano e si sviluppa attraverso l'attività non formale del laboratorio "I Colori invisibili ai confini dell'Arcobaleno" del PLS di Milano, nel quale gli studenti di scuola superiore affrontano il tema attraverso attività sperimentali con telecamere IR, UV e termocamere. Queste due attività sono inserite in un percorso formale di tipo inquiry per il triennio della scuola superiore per il quale è stato sviluppato in dettaglio un tutorial per gli insegnanti ed è programmata la sperimentazione in classe per la primavera 2020. Il lavoro di tesi è consistito in: analisi critica del copione dello spettacolo; partecipazione a 4 repliche; sviluppo di un questionario per valutare conoscenze e problemi sull'elettromagnetismo; partecipazione alla progettazione del laboratorio PLS gestendone uno in autonomia e 7 in compartecipazione; progettazione del percorso didattico e del tutorial per gli insegnanti; valutazione dell'efficacia di una attività non formale di teatro scientifico di 20 ore per studenti di scuola superiore.

Introduzione

Negli ultimi anni è emersa la necessità di trovare nuovi stimoli per rendere efficace l'educazione scolastica, in particolare per quanto riguarda le materie scientifiche, tra cui la fisica. Molte sono le proposte informali che mirano ad avvicinare i più giovani alle discipline scientifiche, ad esempio iniziative al cinema, al bar (Caffè della Scienza), a teatro. Altrettante sono le proposte di attività non formali, come gite al museo, a mostre, partecipazione a laboratori pomeridiani e a seminari. Affinché le esperienze non siano autoconclusive, ma possano realmente integrarsi nel processo di apprendimento degli studenti, servono strumenti adeguati che colleghino in modo strutturato le diverse attività, così da poter garantire una continuità tra quanto fatto in classe e all'esterno.

La proposta avanzata da questa tesi è un tutorial per insegnanti, dal titolo "Sotto ai nostri occhi", che permetta di unire coerentemente una attività informale e una non formale, entro un percorso formale a scuola. E' pensato per studenti di quarta o quinta superiore e propone un percorso sulle radiazioni elettromagnetiche.

Tra le attività informali proposte in ambito fisico, si è scelto il teatro scientifico, in particolare uno spettacolo de *Lo Spettacolo della Fisica*, progetto dell'Università Statale di Milano, di cui tre docenti, M. Carpineti, M. Giliberti, N. Ludwig, sono autori e attori, o meglio Ricerc-attori. Lo spettacolo, che è stato il punto di partenza per il tutorial, si intitola "Luce dalle Stelle" ed è pensato per un pubblico di scuola secondaria di secondo grado. Fulcro dello spettacolo è l'osservazione dell'Universo in bande spettrali differenti e l'utilizzo delle stesse radiazioni in esperimenti riproposti sul palco. Accanto alla tematica fisica si propone anche la riflessione su pregi e difetti della comunicazione scientifica e sulla discriminazione di genere.

Il lavoro di tesi è partito dal commento del copione dello spettacolo, che si trova in appendice alla tesi, in cui sono delineati i passaggi fondamentali della rappresentazione e i significati sottesi.

Un secondo "tassello di multimedialità"¹, inteso come utilizzo di mezzi differenti (lezione, lettura di un libro, ecc.) che permettano di capire un concetto, deriva dall'attività di laboratorio. Presso l'Università di Milano è attivo per il progetto Piano Lauree Scientifiche (PLS) un laboratorio sulle radiazioni dal titolo "I Colori Invisibili ai Confini dell'Arcobaleno". Esso affronta tematiche fisiche simili a quelle dello spettacolo. In par-

¹Termine usato da Stefano Oss del *Jet Propulsion Theater* di Trento, da conversazione privata

ticolare si concentra su tre bande spettrali: ultravioletto, vicino e lontano infrarosso. Sono riproposti esperimenti per indagare l'interazione radiazione-materia e la differenza tra illuminazione ed emissione dei corpi, utilizzando telecamere che rivelano radiazioni differenti.

La partecipazione alla progettazione e all'attuazione del laboratorio è stata parte integrante del lavoro di tesi. In particolare un incontro è stato gestito dalla tesista in autonomia, per verificare in prima persona alcuni punti nodali del tutorial e per poterli, nel caso, modificare.

Alcuni esperimenti dello spettacolo e del laboratorio sono stati riproposti nel tutorial per introdurre l'argomento fisico, oppure sono stati ampliati e rivisitati per permettere nuove esperienze e la presentazione di nuovi concetti agli studenti.

La progettazione del tutorial si è basata sulle problematiche didattiche riscontrate in studenti delle superiori riguardo alle radiazioni non ionizzanti e alla percezione dei colori, proponendo attività volte a correggere le concezioni errate. La ricerca in letteratura, l'analisi di testi scolastici e le risposte date a questionari creati appositamente, hanno delineato le concezioni ricorrenti degli studenti di scuola superiore. I suddetti questionari sono stati proposti dopo la visione dello spettacolo e dopo il laboratorio. Le domande vertevano su alcuni argomenti trattati durante le attività e su concezioni già documentate in letteratura, oltre che sul gradimento dell'attività stessa.

Come metodologia didattica alla base del percorso, è stata scelta quella inquiry, perché coinvolge gli studenti attivamente, permettendo un apprendimento significativo dei concetti trattati. Inoltre vi sono molti punti in comune tra lo spettacolo di teatro scientifico e la fase di Engage della strategia didattica detta delle 5E, tra cui il voler incuriosire, il far sorgere domande e far scaturire motivazione e sentimenti positivi per la disciplina.

Tramite un ulteriore laboratorio non formale, il laboratorio di Teatro Scientifico, si sono potuti valutare gli effetti di una proposta di drammatizzazione fatta a studenti delle superiori. Al laboratorio hanno partecipato ragazzi che già avevano assistito allo spettacolo teatrale "Luce dalle Stelle" e che hanno, alla fine, seguito il laboratorio "I Colori Invisibili ai Confini dell'Arcobaleno". L'attività proposta ha previsto la realizzazione da parte dei ragazzi di una breve scena teatrale riguardante un argomento fisico per loro interessante. La maggior parte dei lavori prodotti è stato coerente con quelle che sono le regole del teatro scientifico seguite da *Lo Spettacolo della Fisica* ed è stato evidente in alcuni gruppi e in alcuni studenti una buona padronanza dell'argomento fisico scelto, determinando per qualcuno anche un'efficacia didattica dell'esperienza.

Capitolo 1

Il Teatro Scientifico

1.1 Perché fare Teatro Scientifico

Negli ultimi decenni la ricerca in didattica delle scienze (Science Education) ha cercato di trovare un percorso educativo adatto allo studio delle STEM (Science Technology Engineering and Mathematics) attraverso diversi mezzi e metodologie. Le statistiche sull'interesse dei giovani nei confronti di materie scientifiche dimostrano, in molti stati, livelli elevati di disinteresse. Esempari sono gli Stati Uniti, in cui solamente il 4.4% dei ragazzi scelgono facoltà scientifiche all'università [1], percentuale bassa se comparata ad altri stati come la Cina (31.2%) o la Germania (12.4%) [1]. Il caso americano non è isolato, per questo si cercano le cause di allontanamento dei ragazzi e delle ragazze dall'ambito scientifico. Sembra essere necessario trovare nuove forme di espressione che permettano un interesse e una interiorizzazione maggiore da parte degli studenti nei confronti delle materie scientifiche.

La necessità di creare una generazione consapevole dei nuovi mezzi tecnologici e ingegneristici, con abilità specifiche, quali problem solving e pensiero critico, e con prospettive globalizzanti piuttosto che particolari, è stata identificata già all'inizio degli anni duemila [2]. Con il nuovo secolo, infatti, si sono delineati nuovi problemi legati soprattutto alle nuove tecnologie e alla mancanza di professionisti adeguatamente preparati ad applicarle, a svilupparle e in grado di sopportare il ritmo incalzante di aggiornamento e innovazione delle stesse [2, 3]. La riforma dei programmi scolastici relativi alle materie scientifiche negli ultimi anni ha puntato su un nuovo approccio didattico, in cui si colleghino sinergicamente le diverse discipline (scienza, tecnologia, ingegneria e matematica), ripensando alle unità didattiche in modo da soddisfare gli obiettivi specifici di apprendimento del programma STEM, diversificato in base all'età e al livello scolastico. In questo approccio gli studenti sono stimolati a sviluppare abilità di riconoscimento dei problemi inerenti le STEM, di indagine e analisi dei problemi con prospettive STEM per poter trovare una soluzione e infine di interpretazione e comunicazione dei risultati trovati [2]. In questo

modo gli studenti si avvicinano al metodo scientifico tramite la sua applicazione diretta a problemi concreti, come il cambiamento climatico, l'efficienza energetica, permettendo loro di sviluppare un pensiero critico e una consapevolezza civica a riguardo [2,3].

In Italia l'approccio STEM è stato adottato per arginare il fenomeno, sottolineato anche negli ultimi tempi dai dati OCSE del 2015 [4], per cui i laureati triennali tra 25 e 34 anni posseggono per il 39% dei casi una laurea umanistica, contro il 25% dei laureati in materie STEM, ovvero: scienze naturali, matematica e statistica, tecnologia dell'informazione e della comunicazione, ingegneria, produzione e costruzione. L'interesse per le materie scientifiche non sembra essere elevato come quello per le materie umanistiche.

Si sente il bisogno di restituire una nuova immagine della scienza per favorire un nuovo atteggiamento nei suoi confronti, dare nuove prospettive e nuovi punti di vista, in cui gli studenti possano sentirsi coinvolti, motivati e spinti a farsi domande, per questo viene suggerito un nuovo modello di insegnamento, che tenga conto di elementi nuovi [5]. Secondo alcune ricerche la creatività e l'immaginazione sono gli elementi che mancano di più all'interno delle scuole [5-7]. Ad esempio la fisica viene presentata, a scuola e nei libri di testo, in modo spesso solo ingegneristico, con macchine termiche e vasi comunicanti che, per quanto siano interessanti, tralasciano, però, altri valori quali la meraviglia della scoperta, la bellezza, la passione, l'impegno, la storia, il piacere della ricerca. Gli argomenti fisici sono ricondotti al mondo della tecnica, facendo percepire un senso di esclusione a chi non è interessato a quella realtà. Una percezione delle le nozioni scientifiche come belle, interessanti, utili, può far nascere l'interesse e la curiosità nei confronti della disciplina [6].

Accanto al percorso STEM è nato lo STEAM, in cui la 'A' sta per 'Arts'. Gli obiettivi fondamentali di apprendimento sono comuni tra i due percorsi. Si auspica, infatti, che gli studenti possano acquisire la conoscenza dei concetti base della disciplina, integrare discipline scientifiche diverse, intraprendere un'indagine scientifica con i metodi propri della ricerca (ipotesi, analisi dei dati, interpretazione dei risultati e conclusioni), identificarne le ricadute sociali e culturali, incarnare i valori tratti dalle STEM per diventare cittadini consapevoli e in grado di far fronte alle nuove sfide sociali [2]. In aggiunta a tutto questo il percorso STEAM propone un'ulteriore integrazione delle discipline scientifiche con le discipline artistiche, in modo che si possano ampliare maggiormente gli orizzonti degli studenti, permettendo loro di potenziare al meglio il pensiero creativo [1,8]. L'intenzione dell'approccio STEAM è quello di aumentare l'accessibilità al mondo scientifico, poiché si aprono nuove possibilità di interazione che possono coinvolgere anche chi si sente escluso dal tradizionale percorso STEM [8].

Tra le attività proposte all'interno del percorso STEAM, si trova anche la pratica teatrale, declinata in varie forme [8]. Il teatro scientifico può essere uno strumento per generare negli studenti un sentimento propositivo nei confronti della scienza, facendoli

avvicinare ai concetti tramite la fascinazione e solleticandone la curiosità, destando il bisogno di una conoscenza più approfondita e formale. Può creare motivazione allo studio di materie scientifiche [9], poiché sul palco la scienza può essere rappresentata in ambiti completamente nuovi e inattesi, dimostrando una versatilità raramente presentata nei libri di testo. Il teatro può favorire la contestualizzazione da parte degli studenti grazie alla concretizzazione di concetti visti solo teoricamente a scuola [8] e la loro presentazione da un diverso punto di vista. Gli studenti possono quindi creare collegamenti tra concetti già appresi precedentemente, ma in contesti diversi, e gettare le basi per nuove conoscenze.

Nell'apprendimento di un concetto possono essere coinvolti più stimoli che, sommandosi, determinano la comprensione, l'accrescimento della memorizzazione e dell'interiorizzazione di tale concetto. Gli stimoli sono di vario genere: uditivi, visivi, di partecipazione, di discussione, ma spesso a scuola si tende a utilizzare maggiormente lo stimolo uditivo [1]. Lo studente perlopiù ascolta la spiegazione dell'insegnante e non vi è l'intervento di altri fattori esterni, in particolare il rapporto tra studente e insegnante si configura spesso come autoritario e il linguaggio dominante utilizzato è solamente descrittivo [10]. Tale approccio è giustificato, poiché lo scopo principale della didattica scolastica è fornire allo studente una ben precisa metodologia con cui risolvere determinati compiti.

La scuola potrebbe non garantire agli studenti la creazione di un bagaglio di cultura e di esperienze significativo e duraturo riguardo all'ambito scientifico.

Inoltre poco spazio è lasciato alla riflessione interdisciplinare e, a volte, intradisciplinare [5]¹. Il teatro scientifico, invece, cerca di restituire una visione meno compartimentalizzata del mondo e della cultura.

Il rischio è che la sola spiegazione dell'insegnante e lo studio individuale dello studente finalizzato al passare una verifica scolastica, non creino davvero un sentimento propositivo nei confronti della scienza, escludendo le eccezioni, ma solo una conoscenza nozionistica, spesso dimenticata in breve tempo. La scienza dovrebbe incuriosire e far sorgere domande spontanee, piuttosto che imporre delle risposte, in modo da permettere una indagine veramente significativa per gli studenti. Richiedendo molto tempo da parte degli insegnanti per l'attuazione e la preparazione, metodologie didattiche in cui gli studenti partecipino attivamente alla creazione della propria conoscenza, non sono spesso adottate. Il teatro scientifico potrebbe fungere da 'engage' per proporre attività di active learning in classe riguardo a tematiche scientifiche.

In base a queste considerazioni, agli occhi degli studenti la disciplina scientifica presentata a scuola può avere una sola 'faccia', che spesso è percepita come asettica, poco coinvolgente, procedurale e che non lascia spazio alla creatività. Si ritiene necessario un intervento in questa direzione, che non tralasci le altre 'facce' della scienza, quelle più emotive e artistiche, in modo da far avvicinare e far appassionare autonomamente gli

¹M. Carpineti, M. Giliberti, N. Ludwig in [5] p. 246

studenti alla disciplina.

Ricerche effettuate tramite la tecnica della risonanza magnetica funzionale (fMRI) e ricerche nell'ambito delle neuroscienze [11], hanno dimostrato l'efficacia del teatro come attività che stimola la creatività e la capacità di attuare tecniche di problem-solving e per questo è utilizzato in campo terapeutico per persone con traumi psicologici o disabilità. Sulla base di queste considerazioni si ritiene la drammatizzazione una tecnica adeguata allo studio delle scienze, poiché in grado di favorire meccanismi di concettualizzazione e interiorizzazione oltre che di far emergere un'atteggiamento positivo nei confronti della materia. Inoltre il teatro può ricostruire il legame tra i concetti astratti e decontestualizzati forniti a scuola e il significato vero della ricerca nel mondo reale [5]. Esso permette di "sviluppare la fantasia scientifica" [6], trasferendo nozioni tramite canali diversi da quelli usati tradizionalmente, ovvero attraverso l'emozione e l'affettività. La vicinanza tra fisica e teatro risiede in due aspetti [6]: l'importanza attribuita alla visione nell'ambito della ricerca, il 'vedere' per poter capire meglio o per scoprire un concetto, e il rapporto tra teoria e sua applicazione, ovvero come un concetto viene rappresentato, tramite esperimenti o in uno spettacolo.

Molte ricerche [9, 12–19] hanno riportato risultati positivi per quanto riguarda l'utilizzo all'interno di progetti educativi di forme d'arte come la drammatizzazione. Gli effetti maggiori sono stati l'aumento della creatività, dell'immaginazione, della partecipazione e dell'interesse e motivazione nei confronti delle materie scientifiche. Tale attività può fungere da "empowerment" interno, creare o modificare la concezione sulla scienza e sui suoi contenuti, o esterno, creando collegamenti tra l'ambito scientifico e quello sociale, culturale e storico e le loro influenze mutuali [10].

Il teatro è pensato per spiazzare lo spettatore, incuriosendolo e sottolineando le sue mancanze in ambito scientifico, procurandogli quindi una sensazione di disagio [5]. Solo da questa condizione può cominciare la ricerca personale che spinge l'individuo a confrontarsi con il mondo scientifico.

Per quanto detto fino ad ora, la drammatizzazione può ricadere all'interno di una metodologia didattica IBSE (Inquiry Based Science Education), perché lo studente ha un ruolo attivo nel suo processo di apprendimento ed è spinto a porsi domande autonomamente. Si legge nel libro *Attori del Sapere*: "Farsi domande è la chiave del pensiero critico, ovvero della scienza e dell'educazione; pare anche del teatro"²

Nonostante gli aspetti positivi bisogna sottolineare il fatto che uno spettacolo teatrale non possa sostituirsi a una lezione formale. Inoltre problematicità didattiche specifiche legate a un certo argomento teorico non possono venire risolte andando a teatro o tra-

²Marcello Sala, in "Attori del Sapere" [5] p. 54

mite la drammatizzazione. Deve strutturarsi, in seguito, un percorso più articolato, che permetta un lavoro puntuale e approfondito che si basi e coinvolga l'attività informale. Il contributo maggiore del teatro alla didattica è la sua capacità di lasciare impressioni vivide e la possibilità di presentare la scienza in un altro contesto, permettendone un'indagine da più punti di vista. Tali elementi possono essere integrati nella didattica a scuola per favorire una comprensione significativa degli argomenti trattati.

1.2 Stato dell'Arte sul Teatro Scientifico e Approcci Didattici Internazionali

La drammatizzazione può essere proposta in un contesto scolastico in varie forme, gli studenti possono essere coinvolti come spettatori, oppure attivamente come drammaturghi, registi o attori. Quest'ultima pratica è suddivisa da Braund in tre principali attività [20]: improvvisazione, role-play, scrittura e recitazione di un copione. Nel primo caso gli studenti devono impersonare un ruolo senza preparazione e delineare aspetti e problematicità di un certo argomento scientifico. Nella role-play gli studenti impersonano determinati ruoli e, solitamente, devono riflettere e riportare dibattiti e controversie riguardo temi scientifici con ripercussioni etico-sociali. Infine la stesura e recitazione di un copione da parte degli studenti si concentra su un particolare evento scientifico e, a differenza delle prime due, dà agli studenti più libertà di espressione e permette quindi la creazione di un ambiente favorevole allo sviluppo della creatività [20]. Le tre metodologie di drammatizzazione prevedono un coinvolgimento attivo da parte dello studente, ma vi è anche un diverso approccio che consiste nella visione di una performance teatrale dal vivo.

In letteratura vi sono ricerche che coinvolgono la modalità di role-play e di stesura di un copione, in particolare per implementare metodologie di Social-Scientific Issues (SSI), che coinvolgono la sfera di dibattito sociale sui temi scientifici, e per aumentare il senso di "relatedness" [13], di affinità, degli studenti riguardo ai temi scientifici.

Ne sono esempi i lavori di Archila [12], Duveen e Solomon [21], Verhoeff [18], van Duin [13] e Cheng [19] brevemente descritti di seguito.

La ricerca condotta in Colombia da Archila nel 2017 [12] ha dimostrato che il coinvolgimento di studenti universitari in un'attività di lettura e drammatizzazione improvvisata di parti di un copione può favorire la nascita di un dibattito sui temi trattati in cui gli studenti confrontano la loro opinione con quella del personaggio interpretato. Il tema proposto è di natura etico-sociale e riguarda la responsabilità degli scienziati nell'utilizzo,

negativo o positivo, delle loro scoperte da parte di altri. Come risultato si è delineato nella classe un ambiente favorevole al dibattito e all'argomentazione da parte degli studenti, permettendo loro di compiere un esercizio di tecnica espressiva e di svolgere un ruolo attivo all'interno del dibattito.

Tecniche di role-play vengono affiancate anche ad eventi di tipo storico, utilizzati per far capire agli studenti come un determinato dibattito scientifico abbia influenzato la società di una certa epoca. Esemplificativo è il lavoro di Duveen e Solomon [21] che ha visto impegnati alcuni studenti di una scuola inglese nel riprodurre il dibattito sull'evoluzione delle specie e la selezione naturale tramite un vero e proprio processo di cui hanno dovuto impersonare i testimoni, i giudici e le parti in causa. L'empatia creatasi con il personaggio ha permesso agli studenti di sviluppare in modo alternativo la propria conoscenza sull'argomento, in modo più attivo e consapevole.

Un approccio diverso è stato proposto agli studenti olandesi da Verhoeff e van Duin, nella sua Master Thesis, [13,18] in cui si è fatto scrivere e interpretare loro un copione per riflettere su questioni etico-scientifiche rispettivamente sul tema dei benefici e rischi portati dalle nuove tecnologie in ambito delle neuroscienze e sul tema uomo e ambiente. L'attività in entrambi i casi prevedeva la stesura di un piccolo pezzo teatrale in modo completamente autonomo, senza un'eccessiva supervisione da parte dell'insegnante. I risultati nel primo caso hanno dimostrato un forte coinvolgimento e una profonda riflessione plurilaterale sui temi, seppur solo da un punto di vista sociale e non scientifico o tecnologico. Nel secondo caso si è trovato anche che studenti coinvolti in attività di drammatizzazione sono più motivati ad approfondire gli argomenti trattati rispetto a studenti coinvolti in modo tradizionale. Essi, infatti, non hanno svolto l'attività solamente per motivi estrinseci, ad esempio per avere un bel voto, ma anche per curiosità e per divertimento. Si sono mostrati anche più propensi a sostenere una discussione in classe con gli altri in seguito alla presentazione degli spettacoli.

Attività creative di drammatizzazione, role-play, disegno e scrittura creativa legate alla fisica sono state proposte a classi di scuola secondaria ad Hong Kong [19] con risultati positivi per quanto riguarda l'aumento di interesse e creatività da parte degli studenti, soprattutto grazie alla novità delle attività proposte e grazie al fatto di poter vedere gli argomenti fisici da altri punti di vista.

Presenta un'eccezione alla metodologia di role-play legata all'SSI la tecnica di "acted out simulations" in cui gli studenti impersonano i ruoli di elementi coinvolti in un processo scientifico. Tale attività può anche essere completamente improvvisata dagli studenti e guidata dagli insegnanti. Secondo Braund [11] la personificazione teatrale può essere più coinvolgente e didatticamente utile rispetto all'utilizzo di analogie e metafore, perché permette di creare un'immagine concreta non ambigua di idee astratte nelle menti degli studenti. A tal proposito una ricerca norvegese [17] ha dimostrato la possibilità di in-

trodurre, già a livello di scuola secondaria inferiore, il modello cinetico delle particelle, ritenuto un concetto troppo complesso e con astrazione troppo alta per studenti di quella età (12-16 anni). Grazie all'applicazione di alcune tecniche, tra cui la personificazione da parte degli studenti delle particelle stesse per dimostrare la relazione tra velocità delle particelle e temperatura, e alla discussione finale tra studenti sui processi recitati, alcuni concetti basilari, ad esempio il fatto che la materia sia discreta, sono stati interiorizzati dagli studenti. Anche dopo un mese, infatti, la maggioranza dei ragazzi sosteneva la natura particellare della materia, a differenza dei risultati ottenuti nei questionari condotti prima dello svolgimento delle attività. Si sottolinea, però, la difficoltà espressa da parte di alcuni insegnanti a sostenere questo tipo di insegnamento, poiché, essendo diverso dalla metodologia tradizionale, richiede una adeguata preparazione.

Un'attività di drammatizzazione per bambini di 10-11 anni è stata condotta ed analizzata da Metcalfe et al. nel 2006 [15]. Gli studenti hanno dovuto interpretare fisicamente il comportamento delle molecole di un solido al variare del calore scambiato.

L'atteggiamento degli studenti nello svolgere attività di drammatizzazione, senza distinzione di metodologia, si è dimostrata nella maggior parte dei casi positiva. Molti studenti hanno riferito di essersi divertiti ed entusiasmatisi durante l'attività [9,13,16,17,19], alcuni hanno cambiato la loro idea da negativa a positiva sulla materia scientifica trattata [9,19], altri hanno apprezzato il fatto di vedere uno stesso tema da più punti di vista [18], soprattutto artistico [9]. Anche chi non aveva affinità con il mondo scientifico ha sviluppato interesse e si è sentito coinvolto, grazie al fatto di vedere concretizzati nella vita quotidiana concetti astratti [9,19]. Sentono di aver imparato qualcosa [13] e in alcuni casi i post-test dimostrano un apprendimento più significativo, nonostante non si riscontrino differenze rispetto ad una lezione tradizionale dal punto di vista nozionistico [15]. Gli aspetti positivi hanno contribuito ad un aumento di motivazione degli studenti nei confronti della scienza e ad un loro maggiore coinvolgimento. D'altra parte alcuni studenti si sono dimostrati insofferenti nei confronti della drammatizzazione, soprattutto per quanto riguarda le attività di role-play e scrittura di copione. In alcuni casi, infatti, parte degli studenti ha provato un senso di forte imbarazzo nel doversi esibire davanti ad un pubblico [13,17,18] e ci sono stati alcuni che hanno trovato difficoltà nello svolgere il compito a causa della loro poca attitudine [19]. Altri hanno ritenuto l'attività una perdita di tempo, poco significativa per il loro apprendimento, a volte perché vista come infantile [13,17,19].

Ricerche sulla metodologia IBSE (Inquiry Based Science Education), che può essere ricollegata anche ad alcune attività di drammatizzazione, sottolineano che spesso la sensazione degli studenti differisce da quella che è l'efficacia reale dell'attività. Come riporta l'articolo di Deslauriers et al. [22], nonostante alcuni studenti ritengano di non aver imparato abbastanza dall'attività inquiry, i test di valutazione finale indicano il contrario.

Tuttavia vi sono anche dei rischi. Nel caso di una mancata supervisione da parte del-

l'insegnante, ad esempio, vi è la possibilità che un concetto sia interiorizzato in modo sbagliato dagli studenti, dando luogo a concezioni errate sull'argomento scientifico trattato. Inoltre è possibile che utilizzando le role-play in campo dell'SSI la concentrazione degli studenti sia puntata solamente sull'aspetto etico-sociale dell'argomento e non scientifico [12]. Nel caso di personificazione da parte degli studenti di un personaggio con una certa opinione sull'argomento trattato, è richiesto uno sforzo immaginifico maggiore ai ragazzi/e, con conseguente allargamento di orizzonti, poiché non è detto che l'attore abbia le stesse idee del personaggio. Questo può giovare all'apprendimento di un concetto, ma dall'altra parte può portare dei rischi. Gli studenti potrebbero, infatti, essere fortemente influenzati dall'opinione espressa dal personaggio che interpretano tanto da cambiare le loro idee (critica mossa da Janis (1968) citata nel lavoro di Ødegaard [10]).

Un diverso utilizzo della drammatizzazione è tramite la visione di spettacoli tenuti da attori professionisti. In questo ambito compagnie come *Pandemonia Science Theatre* (Amsterdam) e *Y Touring Company* (Londra) si sono adoperate per offrire un supporto all'SSI. Il primo ha come obiettivo l'ordinare il "caos scientifico" [23] ponendosi tre domande davanti a un argomento scientifico: dove, perché e come. La compagnia ha supportato una ricerca in Science Education nel 2011 [14] sul tema della scienza e della tecnologia del cibo e del loro impatto sociale e dal punto di vista della salute, sotto forma di performance teatrale presentata sia a ragazzi di 15/17 anni che ad esperti nel campo delle scienze sociali, naturali e in campo umanistico. I risultati hanno dimostrato un'interiorizzazione del tema da parte degli spettatori, che hanno potuto confrontare la loro esperienza quotidiana con quella scientifica, si sono posti domande e hanno fatto riflessioni sul tema. Gli esperti hanno confermato la capacità del teatro di creare motivazione, suscitare emozioni, stimolare l'immaginazione e aumentare l'interesse, ma hanno sottolineato la volatilità delle informazioni e delle conoscenze scientifiche, puntualizzando la necessità di una stretta connessione tra lezioni e teatro per legare le emozioni a una parte più strutturata e formale. La compagnia *Y Touring* ha proposto varie opere teatrali sulle implicazioni etiche e sociali di argomenti relativi alla scienza, alcune delle quali sono state basi di partenza per ricerche in campo della didattica scientifica. Entrambe le compagnie, quindi, propongono temi scientifici che possono avere ricadute sulla società. La performance teatrale è sempre seguita da un dibattito tra attori e spettatori sui temi trattati, secondo l'idea del Theatre of Debate. Lo scopo delle compagnie è di avvicinare le persone, bambini e ragazzi soprattutto, al mondo della scienza tramite l'entusiasmo, l'interesse per un argomento scientifico e il coinvolgimento tramite un dibattito.

Accanto a spettacoli con tematiche etico-sociale vi sono anche progetti, di compagnie o di ricercatori universitari, che puntano a mostrare la spettacolarità e la meraviglia della scienza in quanto tale. In particolare ci sono molte attività in campo fisico, ad esempio sono proposti a teatro veri e propri esperimenti di fisica con l'obiettivo di far appassionare alla materia bambini e giovani. La finalità è quella di far vedere agli studenti un

aspetto inedito della fisica, quello artistico, far aumentare la loro motivazione allo studio della materia e far cambiare loro attitudine nei suoi confronti, come dimostrato in una ricerca di Carpineti et al. del 2011 [9].

Nonostante la grande produzione teatrale scientifica, di cui si farà un piccolo excursus senza pretese di completezza in seguito, in letteratura poche ricerche sono state compiute per determinare le ricadute didattiche di tali spettacoli. Molte, invece, sono le ricerche svolte su attività di drammatizzazione in cui gli studenti sono coinvolti direttamente come autori e attori. Si ritiene, quindi, che molto lavoro vada ancora fatto in questa direzione, in modo che il teatro scientifico possa diventare un vero strumento didattico e non solamente un momento di svago per la classe e gli insegnanti, che si conclude una volta terminata la performance.

Un approccio diverso al teatro scientifico, che in particolare sarà analizzato in questa tesi, è quello de *Lo Spettacolo della Fisica* [24], in cui a salire sul palco sono veri fisici, che propongono esperimenti reali attraverso il linguaggio del teatro. Poco spazio è lasciato a temi etico-sociali, poiché potrebbero distogliere l'attenzione dalla vera protagonista dello spettacolo: la fisica. L'iniziativa ha all'attivo sette spettacoli e alcune conferenze spettacolari, rappresentati in tutta Italia e in alcune città Europee. Gli spettacoli sono pensati per fasce di età diversa, dai bambini agli adulti, e sono adatti anche per chi non conosce la fisica. Al teatro de *Lo Spettacolo della Fisica* verrà dato ampio spazio nel prossimo paragrafo.

Oltre a spettacoli teatrali, nel 2015 *Lo Spettacolo della Fisica* ha proposto un percorso didattico (Workshop) sul tema delle oscillazioni e dei modi normali [16], congegnato in modo da unire elementi del teatro con elementi classici della didattica. Nell'attività è stato sottolineato soprattutto l'aspetto misterioso di certi fenomeni, per dare agli studenti spunti di riflessione e per farli ragionare con schemi differenti da quelli scolastici tradizionali e superando alcuni ostacoli cognitivi dati dal formalismo matematico. L'analisi da un punto di vista didattico del workshop ha mostrato effetti positivi sugli studenti e sul loro entusiasmo nei confronti della materia, alcuni hanno eseguito lavori in modo completamente autonomo, senza che venisse richiesto loro dal docente. Inoltre il workshop ha dimostrato quanto sia difficile per gli studenti ragionare in termini fisici, definendo alcuni punti nodali riguardo le difficoltà di comprensione da parte degli studenti e aprendo alla ricerca di possibili soluzioni.

In Italia vi è un grande interesse per il teatro scientifico, in particolare la fisica trova spazio sul palco grazie a compagnie come Arditodesio di Trento con il progetto *Jet Propulsion Theatre* che collabora con fisici dell'Università di Trento [25]. Anche alcuni istituti di ricerca nazionale si sono dedicati al teatro aprire il mondo della scienza alle nuove generazioni, come l'INAF (Istituto Nazionale di Astrofisica) che ha prodotto lo spettacolo "Martina Tremenda" per avvicinare i bambini all'astrofisica e per contrastare problematiche sociali attuali quali gli stereotipi di genere [26]. In molti casi i protagonisti

sono fisici, matematici, o ingegneri, ne sono esempi gli spettacoli di Federico Benuzzi [27], Giorgio Häusermann, che coniuga giocattoli e fisica [28], Gabriella Greison [29], Maria Rosa Menzio, matematica e direttrice artistica di *Teatro e Scienza* di Torino [30], il matematico e scrittore Piergiorgio Odifreddi [31]. Da citare anche il progetto *PACTA-TeatroinMatematica* di Maria Eugenia D'Aquino, attrice e direttrice artistica.

L'interesse per la scienza e per la comunicazione tramite il teatro è sottolineata anche da iniziative come *Teatro delle Meraviglie Festival di Teatro e Scienza*, o il progetto *Teatro Elevato alla Scienza* a cui hanno partecipato il Piccolo Teatro di Milano, la fondazione Tronchetti Provera, la fondazione Veronesi, il Politecnico di Milano e l'Università degli Studi di Milano con *Lo Spettacolo della Fisica*. Per le scuole sono nati progetti come quello di *Scienza Under 18* [5] con l'intenzione di promuovere metodologie alternative, come il teatro, per gettare le basi di una nuova didattica della fisica.

La situazione internazionale dal punto di vista del teatro scientifico non è trascurabile, ad esempio in Illinois è nato insieme ad una collaborazione con il Dipartimento di Fisica dell'University of Illinois at Urbana-Champaign il progetto *Physics Van*, in cui tramite esperimenti accattivanti e spettacolari, si dimostra ai bambini (dai 6 ai 12 anni) come la fisica possa essere divertente e sorprendente e come l'immagine dello scienziato sia diversa da quella che molti pensano. L'attività si struttura come uno spettacolo di breve durata che utilizza oggetti "rumorosi e caotici" (traduzione dall'articolo "Physics Van drives kids to engage in science") per focalizzare l'attenzione del pubblico, come espresso dall'ideatore del progetto e vincitore del titolo Professore dell'Anno nel 2015 professor Mats Selen in un'intervista nel 2019 [32].

A New York vi è un altro progetto chiamato *That Physics Show*, spettacolo eseguito dal professor David Maiullo che punta sulla spettacolarità e sul divertimento legato ad esperimenti, anche estremi, di fisica [33]. La sfida sottostante, come riportato da Maiullo in un'intervista [34], consiste nel rendere la fisica una forma d'arte, risolvendo il divario tra il mondo scientifico e quello artistico.

In Germania, all'Università di Bonn vengono messi in scena spettacoli basati su esperimenti e dimostrazioni fatti dal vivo sul palco. Il progetto è pensato per coinvolgere nella recitazione studenti dell'università del corso di fisica, sotto la guida dei professori Werner Urff e Herbi Dreiner, ideatori dello spettacolo, e di studenti più grandi, e prende il nome di *Physikshow*. L'interesse è sulla fisica delle particelle [35] e l'obiettivo principale è quello di avvicinare bambini, ragazzi e più in generale chiunque non conosca la disciplina, alle recenti scoperte fatte in fisica nucleare, in modo divertente e accattivante. Gli apparati sperimentali e gli argomenti fisici vengono spiegati in modo rigoroso, perché non si vuole perdere il collegamento con il mondo scientifico e si auspica che gli spettatori possano aumentare il loro bagaglio culturale di fisica in seguito alla visione dello spettacolo.

Legate a queste iniziative, però, a differenza de *Lo Spettacolo della Fisica*, non è associato un approfondito lavoro di ricerca in ambito didattico. Anche se al centro vi è la

scienza e non i temi sociali a lei associati, il teatro scientifico è usato in questi casi come uno strumento per dare una forte impressione allo spettatore, che è destinata, però, a consumarsi in breve tempo. Una sorta di teatro scientifico 'usa e getta', capace di dare un piacere momentaneo, ma non in grado, però, di garantire effetti a lungo termine. Tuttavia, se opportunamente integrato in un percorso didattico, lo spettacolo può gettare le basi per un apprendimento davvero significativo della fisica.

1.3 Il Teatro Scientifico de *Lo Spettacolo della Fisica*

Nel 2004 al Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano è nato il progetto *Lo Spettacolo della Fisica*, un'attività promossa dall'Università per la comunicazione della fisica. Gli autori e attori, o Ricerc-attori, sono i professori del Dipartimento Marina Carpineti, Marco Giliberti e Nicola Ludwig. In totale hanno realizzato sette spettacoli, distinti per temi trattati e pubblico a cui si rivolgono, e numerose conferenze spettacolari. Gli spettacoli in totale hanno avuto oltre 420 rappresentazioni e un pubblico di oltre 140.000 persone. Di seguito l'elenco degli spettacoli [9, 24].

- “Facciamo Luce sulla Materia” (2004) di M. Carpineti, S. Ghioldi, M. Giliberti, N. Ludwig e A. Rota, Regia di S. Ghioldi, A. Rota.
Spettacolo per il triennio della scuola primaria
- “Tracce” (2007) di M. Carpineti, S. Ghioldi, M. Giliberti, N. Ludwig e A. Rota, Regia di S. Ghioldi, A. Rota.
Per il triennio della scuola secondaria di secondo grado e per l'università.
- “Luce dalle Stelle” (2009) di M. Carpineti, M. Giliberti, N. Ludwig e S. Sandrelli, Regia di F. Albanese
Per la scuola secondaria di secondo grado
- “Alice nel Paese della Scienza” (2010) di M. Carpineti, M. Giliberti e N. Ludwig, Regia E. Bronzino.
Per studenti di scuola superiore
- “Alice nel Paese dell'Energia” (2012) di M. Carpineti, M. Giliberti e N. Ludwig, Regia E. Bronzino.
Per studenti di scuola superiore
- “Light Mistery” (2015) di M. Carpineti, M. Giliberti e N. Ludwig, Regia E. Bronzino.
per studenti del biennio e triennio di scuola superiore

- “Sotto un'altra Luce” (2015) di M. Carpineti, M. Giliberti, N. Ludwig, Regia di F. Albanese e M. Anaclerio.
Spettacolo per la scuola primaria.

Così come in un poema la metrica rigorosa e matematicamente precisa è sempre accompagnata dalla bellezza dei versi, si pensi alla “Divina Commedia”, anche i concetti fisici, per *Lo Spettacolo della Fisica* hanno intrinsecamente un grande potere evocativo e la capacità di emozionare e meravigliare. Non si fermano, quindi, alle sole formule o alle applicazioni tecnologiche e ingegneristiche. La matematica è certamente il linguaggio della fisica, ma non è immediatamente data, come succede a scuola, anzi, si definisce con il tempo in seguito a una ricerca approfondita. Per questo la formula matematica costituisce l'ultimo ‘tassello’ della ricerca scientifica, la quale parte da una domanda che scaturisce dall'osservazione di un fenomeno (naturale o artificiale) o da un'ipotesi teorica, diventando poi un'indagine attiva per trovare la risposta. La ricerca porta con sé emozioni positive come meraviglia e sorpresa, ma anche negative, come delusione e abbattimento. Tali emozioni raramente si ritrovano nei libri di testo di fisica delle superiori, che puntano soprattutto a presentare formule e teoremi in modo che gli studenti possano usarle immediatamente per risolvere problemi. Citando dalla conferenza spettacolo “Prima Dopo Ora” di Federico Benuzzi: “Uno pensa a ‘Dialogo sopra i massimi sistemi’: ritmo, ironia, riflessioni... e poi pensa ai libri di testo scolastici di oggi: grigi, asettici, monotoni ... e si rende conto che qualcosa non ha funzionato. Cioè, dal punto di vista evuzionistico i libri sono involuti. Perché una materia così bella deve essere tanto ammorbata?”

Data la difficoltà del far scaturire emozioni tramite i concetti, *Lo Spettacolo della Fisica* propone di partire dalle emozioni per motivare e appassionare il pubblico [36].

Alla base della scrittura dei copioni vi è un insieme di scelte che definiscono l'idea alla base del progetto.

L'ottica è quella di un reality theatre in cui gli esperimenti vengono realmente condotti sul palco e se ne discutono le conseguenze e le implicazioni. Ogni esperimento compiuto è seguito dalla spiegazione del principio fisico su cui si basa e si cerca di fare chiarezza sui fenomeni osservati. In “Luce dalle Stelle” [37], ad esempio, si dimostra perché il Sole si vede bianco e non verde, dove ha effettivamente il picco di emissione, utilizzando un esperimento con tre luci sceniche monocromatiche sommate additivamente tra di loro.

Per dare spazio alla fisica come protagonista assoluta dello spettacolo, in tutta la sua complessità e bellezza, sono proposti esperimenti e riflessioni riguardo ai concetti fisici, evitando volutamente tematiche etico-scientifiche, biografie storiche sulle vite di grandi scienziati e rappresentazioni esageratamente spettacolari di esperimenti.

Gli spettacoli si strutturano come rappresentazioni teatrali piuttosto che come conferenze-spettacolo, per favorire una condizione di trasporto emotivo dello spettatore.

In alcuni spettacoli lo spettatore è messo in condizioni tali da essere coinvolto attivamente nella rappresentazione. Alla fine di alcuni spettacoli vi è la possibilità di fare domande ai Ricerc-attori su quanto visto, ad esempio sugli esperimenti messi in scena oppure sui materiali e strumenti utilizzati. In particolare in spettacoli ideati per bambini le domande scaturiscono spontanee, molte sono formulate soprattutto dai più piccoli, un esempio è “Sotto un'altra Luce” [40]. Da qui la necessità di Ricerc-attori che possano rispondere alle domande, anche a quelle più imprevedibili.

Gli spettacoli de *Lo Spettacolo della Fisica* solitamente si strutturano come interazioni tra tre personaggi di cui non si conosce del tutto il background, ma si sa che sono scienziati, fisici in particolare. Spesso sono professori o ricercatori universitari con caratteristiche molto marcate, in modo da poterli classificare in categorie ben precise. Rappresentano, ad esempio, varie metodologie di insegnamento: all'avanguardia oppure più tradizionali [38], precisi e rigorosi, oppure più sperimentali e alternativi [39]. In altri spettacoli impersonano degli atteggiamenti, spesso ambivalenti, mostrati da chi parla di fisica [37], quali l'incomprensibilità, la semplificazione, il narcisismo, la superficialità, ognuno legato, però, a sentimenti positivi come: l'entusiasmo, la chiarezza della sperimentazione, la passione e la bellezza della materia.

Nonostante le differenze, in tutti gli spettacoli emerge il fatto che i personaggi, così come i Ricerc-attori, sono legati alla fisica e che mettono una grande passione in quello che fanno, divertendosi ed emozionandosi.

Le vicende si consumano spesso in poco tempo, seguendo il tempo proprio della rappresentazione [37, 38, 40], a eccezione di “Alice nel paese della Scienza” [39] in cui le vicende teatrali avvengono nell'arco di un trimestre universitario.

Il ritmo è scandito dalle domande e dagli esperimenti messi in atto per rispondere, oppure vi sono momenti di pura estetica, in cui l'attenzione è focalizzata solamente sulla meraviglia e la bellezza di un certo fenomeno.

La storia solitamente parte da un argomento fisico, come le radiazioni elettromagnetiche e le loro applicazioni astrofisiche e quotidiane [37] o le proprietà della radiazione e della materia [40], per svilupparlo in varie modalità. La trattazione degli stati della materia e delle transizioni di fasi proposta da “Sotto un'altra Luce”, ad esempio, vede impegnati i tre Ricerc-attori in un percorso di indagine per ordinare, insieme al pubblico, i concetti di stato della materia. La conclusione è che le classificazioni non sono sempre rigide, come insegnano a scuola, a volte bisogna saper andare oltre.

L'intento de *Lo Spettacolo della Fisica* è di presentare la fisica a teatro mantenendone la sua complessità, senza, quindi, semplificarla o spettacolarizzarla, poiché si correrebbe il rischio di snaturarla. Ogni esperimento, quindi, è spiegato con i termini e i concetti propri della disciplina, evitando, però, presentazioni troppo dettagliate e tecniche, per non incidere sulla teatralità dello spettacolo, configurandolo come una lezione. Si attua una ragionevole via di mezzo, in grado di mostrare la grande potenzialità della fisica di saper

meravigliare utilizzando solamente i suoi elementi costitutivi. In alcuni spettacoli [37] le spiegazioni teoriche sono volutamente portate all'esagerazione, risultando incomprensibili agli spettatori. Ciononostante l'entusiasmo del Ricerc-attore che le enuncia è tale da essere in grado di coinvolgere emotivamente chi ascolta. Il teatro viene utilizzato in questo caso come mezzo per offrire al pubblico uno spaccato veritiero sulla fisica e sul modo di vederla e percepirla dei fisici.

L'attenzione dello spettatore è catturata tramite gli esperimenti, le immagini, le musiche e le narrazioni, ma non si perde mai il contatto con la fisica, che è il fulcro dello spettacolo. Esemplicativa è la scena di "Luce dalle Stelle" in cui uno dei personaggi, a luci abbassate e sulle note di una musica sognante, mima in silenzio i diagrammi di Feynmann, creando una sorta di immagine onirica. Gli strumenti del teatro si fondono a elementi fisici per far scaturire nel pubblico emozioni e per trasportarlo in un'altra dimensione in modo da allontanarlo da concezioni pregresse e stereotipate riguardo la fisica.

Il teatro in generale è in grado di porre gli spettatori in una condizione di fascinazione, grazie al buio in sala, al silenzio, all'immobilità e alla comodità di esser seduti e non in piedi. In particolare nel teatro scientifico il buio impedisce di prendere appunti, in modo da sfavorire l'accostamento dello spettacolo a una lezione. Tolto l'aspetto nozionistico, rimane quello emotivo che scaturisce dalla fisica pura. Le emozioni possono essere di vario genere, propositive, date dal divertimento, oppure disturbanti. Anche queste ultime sono considerate scopo dello spettacolo, perché mettono lo spettatore in una condizione di dubbio e straniamento, in modo che possa rendersi conto vividamente di "non sapere" [6]³ piuttosto che pensare di aver capito. In questo, infatti, il teatro fisico si discosta dalla divulgazione scientifica, che utilizza versioni semplificate dei concetti sminuendo la materia e chi la studia.

Alla base degli spettacoli sono state fatte anche considerazioni sul linguaggio da utilizzare e riguardo la scelta degli attori. Il primo deve essere un ponte tra il linguaggio formale della disciplina e il linguaggio teatrale, in grado di incantare, divertire e trasportare. Il rischio nell'utilizzare un linguaggio puramente fisico è quello di affievolire la teatralità, mentre l'utilizzo di un linguaggio semplicistico e quotidiano rischia di allontanare dallo scopo di fare scienza.

Il linguaggio, come le scelte stilistiche e le tematiche trattate sono diversificate in base alla fascia di età a cui sono rivolti gli spettacoli, secondo l'idea che "gli occhi non possono vedere quello che la mente non è preparata ad accettare" [41]. Spettacoli rivolti a un pubblico di bambini sono più incentrati sulla spettacolarità degli esperimenti, volti a stupire e meravigliare, ad esempio in "Sotto un'altra luce" si impiegano bolle di sapone giganti, azoto liquido, palloncini, laser, specchi, luci colorate, polarizzatori, tutti elementi

³In Ref. [6] p. 81

con un grande impatto visivo. Gli spettacoli pensati per adolescenti contengono, invece, anche tematiche volte a sollecitare il pensiero critico, ad esempio riflessioni sulla buona e cattiva divulgazione scientifica che si delinea accanto a esperimenti con ombre colorate, immagini astronomiche e telecamere in grado di vedere la radiazione invisibile nell'opera "Luce dalle Stelle" [37].

Per quanto riguarda gli attori, la scelta ricade su fisici veri, poiché la fisica portata sul palco è reale. La loro presenza contribuisce a dare autorevolezza e credibilità ai temi trattati, permettendo approfondimenti o spiegazioni significative in un eventuale dibattito finale. Inoltre, per garantire una buona riuscita dello spettacolo teatrale, i fisici sono formati anche nell'ambito della recitazione, da qui il termine 'Ricerc-attori'. In particolare i fisici de *Lo Spettacolo della Fisica* sono professori presso l'Università degli Studi di Milano.

Oltre all'attività teatrale è da qualche anno attivo un Laboratorio di Teatro Scientifico per ragazzi delle superiori presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano, tenuto dagli stessi professori che recitano a teatro. Il laboratorio prevede il coinvolgimento attivo dei ragazzi nella stesura e recitazione di un copione che abbia come tema centrale un argomento fisico. E' richiesto agli studenti di seguire nelle loro opere le stesse idee alla base de *Lo Spettacolo della Fisica*, ad esempio il fatto di non ricadere nella semplificazione della divulgazione o nell'esposizione impersonale di concetti, tipica di una presentazione da convegno.

1.3.1 Luce dalle Stelle

Lo spettacolo analizzato per il lavoro di tesi, di cui il copione commentato si trova in Appendice a pagina 84, si intitola "Luce dalle Stelle" [37] e ha debuttato al *Festival della Scienza di Genova* nel 2009 [9]. I personaggi in scena sono tre fisici e un divulgatore, impegnati a tenere una conferenza sull'osservazione del cielo a diverse frequenze. Accanto a immagini e video astrofisici si susseguono esperimenti che mostrano come le stesse radiazioni utilizzate per rivelare oggetti astronomici possano interagire con oggetti quotidiani. Al centro dello spettacolo vi è la fisica delle radiazioni elettromagnetiche, soprattutto quelle non ionizzanti (infrarosso, vicino e lontano, visibile, ultravioletto) e il loro utilizzo.

Lo spettacolo inizia nel momento in cui gli spettatori entrano in sala, poiché gli attori si aggirano nella platea con aria preoccupata. Si crea un senso di attesa nel pubblico quan-

do in cui i tre fisici decidono di iniziare comunque lo spettacolo nonostante manchi una quarta persona, il divulgatore Danelli. Per tutta la durata dello spettacolo sarà ribadita la mancanza e si rinforzerà il sentimento di attesa. Alla fine il personaggio interverrà solo telefonicamente, proponendo una presentazione divulgativa e sensazionalistica riguardo le scoperte scientifiche di Galileo.

Quando il pubblico ha preso posto, è annunciato l'inizio della conferenza, al posto dello spettacolo che si attendeva di vedere, creando sorpresa. Tuttavia, dopo poco, la situazione diventa paradossale per il tono usato dal primo conferenziere che parla di cose incomprensibili a un pubblico di non esperti, producendo un effetto comico.

I personaggi sono fortemente caratterizzati e rappresentano ognuno un modo diverso di approcciarsi alla comunicazione scientifica. Il Professor Marco Giliberti rappresenta il fisico che, pur mettendoci passione ed entusiasmo, risulta incomprensibile la maggior parte delle volte a un pubblico generico. Utilizza spesso per esprimere un concetto, infatti, il linguaggio matematico, perché capace di spiegare meglio di un linguaggio verbale i significati più profondi della fisica. Nonostante l'incomprensibilità, gli sono affidati alcuni dei momenti poetici dello spettacolo, in cui, in uno stato di trance, accompagnato da musica e luci basse mima ed enuncia alcune formule fisiche.

La Professoressa Marina Carpineti rappresenta la fisica che si preoccupa del pubblico e cerca di rendere comprensibili i concetti spiegati, attraverso esperimenti e applicazioni pratiche delle radiazioni elettromagnetiche trattate, senza banalizzare mai la fisica. Il personaggio sarà anche uno spunto per parlare del ruolo della donna in ambito scientifico. Infatti, i due personaggi maschili avranno un atteggiamento di superiorità nei suoi confronti, interrompendola e rivolgendosi a lei con nomi sbagliati. Alla fine dello spettacolo verrà esplicitato che tale situazione è stata pensata per sottolineare il fatto che in ambito scientifico il valore di una persona si basa sulle sue capacità e non sul genere.

Il Professor Nicola Ludwig rappresenta il fisico egocentrico. Si definisce spesso il massimo esperto in molti ambiti e si indispettisce se non viene preso sul serio. Si mette, però, in gioco volentieri in nome della scienza e le spiegazioni che fornisce sono in parte comprensibili anche per un pubblico di non esperti.

Sebbene abbiano tre personalità molto diverse, ad accomunarli è la grande passione che dimostrano per la fisica e per il loro lavoro.

La finta conferenza propone esperimenti che ripercorrono le diverse bande dello spettro elettromagnetico e immagini di oggetti astrofisici a diverse lunghezze d'onda. Durante lo spettacolo si alternano ritmi e modalità differenti. Nel momento in cui sono proposti esperimenti e spiegazioni, si potrebbe pensare davvero di assistere a una conferenza, nonostante vi siano differenze, quali il luogo, un teatro e non un'aula, l'interazione, anche comica, tra i tre Ricerc-attori, la musica e le luci. In altre scene, invece, il ritmo cambia e i ruoli dei conferenzieri sono stravolti. Uno dei Ricerc-attori, per esempio, parlando dell'iterazione della radiazione visibile con i corpi, improvvisa uno spogliarello in luce

monocromatica rossa.

Il ritmo dello spettacolo cambia ulteriormente in alcune scene, in cui il linguaggio diventa poetico. Ad esempio è mostrato in un video l'evoluzione allo stadio successivo del Sole e la fine del Sistema Solare, descritto dalle parole drammatiche della Ricerc-attrice, che rendono la scena molto forte da un punto di vista emotivo.

In due momenti dello spettacolo lo spettatore viene coinvolto direttamente, poiché i Ricerc-attori girano tra il pubblico e interagiscono con esso. Il ritmo viene nuovamente modificato, soprattutto quando i professori chiedono al pubblico un contributo per dimostrare che spesso anche oggetti del quotidiano hanno elementi invisibili per i nostri occhi, ovvero che le banconote hanno filigrane che assorbono o trasmettono la radiazione nel vicino infrarosso, ma non quella visibile.

L'ultima sorpresa per il pubblico si trova alla fine dello spettacolo, quando i fisici tornano in scena dopo gli applausi per spiegare quattro errori volutamente commessi durante la rappresentazione. Gli errori servono per mettere in guardia il pubblico riguardo ad alcuni atteggiamenti intrapresi da chi spiega la fisica e chi la ascolta. Il primo errore è l'utilizzo di concezioni di senso comune per spiegare un concetto fisico, in questo caso il fatto che i rubinetti dell'acqua fredda siano di colore blu e quelli dell'acqua calda rossi, errato se applicato a livello astrofisico, poiché le stelle più calde appaiono ai nostri occhi di colore blu. Inoltre la scala delle temperature superficiali del diagramma di Hertzsprung-Russell, che rappresenta l'evoluzione stellare in funzione di magnitudine, temperatura superficiale e luminosità rispetto al Sole, non è letta dal conferenziere nel verso corretto, sembra, quindi, che il discorso sui rubinetti giustifichi le sue parole, quando in realtà i dati dicono altro. Lo spettacolo vuole sottolineare l'importanza del non fidarsi delle parole dette da persone, anche se fisici, ma di basarsi sempre sui dati oggettivi presenti, ad esempio, in un grafico.

Il secondo errore riguarda l'esperimento sulle speckles proposto durante lo spettacolo, in cui viene fornita una spiegazione tecnica sul fenomeno osservato che vede come causa la grana del vetro smerigliato posto davanti alla sorgente di luce. In realtà il fenomeno dipende dalle dimensioni dell'area del vetro illuminata. Chi non conosce il fenomeno non può avere mezzi concettuali per riconoscere l'errore, l'unico modo per rendersene conto è lo studio autonomo, oppure il porsi domande critiche. Lo spettacolo, quindi, invita il pubblico a sviluppare un senso critico anche di fronte a discipline o argomenti non conosciuti e soprattutto a porsi domande in base a quanto si può osservare, ad esempio il comportamento dei pianeti osservato da Terra, che non trova risposta con la prima spiegazione.

Il terzo errore riguarda l'utilizzo sbagliato delle analogie, che, se non si fa attenzione, possono accomunare fenomeni che in realtà sono molto differenti. Nello spettacolo, dopo aver visto il comportamento del Silly Putty⁴ sotto una luce ultravioletta e sotto la luce

⁴Marchio Registrato di Crayola LLC, Binney & Smith Company

visibile, si arriva alla conclusione che il colore della luce UV, che ha una coda nell'intervallo visibile associato al blu, si somma al colore arancione del materiale, determinandone una colorazione gialla sotto la lampada UV, in analogia con quanto visto per il fenomeno delle ombre colorate. Questi tre errori sono pensati per fare leva sul pensiero critico del pubblico nei confronti della scienza. In particolare si invitano gli spettatori a non fidarsi ciecamente di chi spiega la fisica, soprattutto nel campo della divulgazione, ma di porsi sempre domande su quanto sentito, senza assimilare in modo passivo concetti, magari sbagliati.

Il quarto errore riguarda un atteggiamento sociale che si trova, purtroppo, in molti ambiti, non solo quello scientifico. Lo spettacolo vuole essere un atto di denuncia alla discriminazione di genere in ambito lavorativo e contro lo stereotipo che vede la fisica come disciplina principalmente per uomini. Si precisa anche, però, che la scienza, rispetto ad altri campi, è un ambito in cui contano maggiormente le capacità effettive e non il genere, l'etnia, la religione, ecc.

Lo spettacolo può sembrare una conferenza spettacolare, in cui le spiegazioni sono accompagnate da dimostrazioni ed esperimenti, ma emerge anche la critica alla 'cattiva' divulgazione scientifica, che mira più all'esoterismo e all'esagerazione piuttosto che al trasmettere concetti scientificamente corretti e al suscitare curiosità, invece che presentare gli argomenti sotto forma di verità assolute.

Lo spettacolo si conclude con una curiosità riguardante il fisico Geoffrey Ingram Taylor, che la Ricerc-attrice più volte nello spettacolo cerca di spiegare, venendo sempre interrotta o zittita dai due colleghi, come atto discriminatorio. Il fisico britannico, grazie a un'immagine dell'esplosione di un ordigno nucleare trovata in un giornale in edicola, riuscì a calcolare l'energia sprigionata, all'epoca segreto mondiale. La curiosità riguardante Taylor lascia spazio a una riflessione: gli occhi di un fisico vedono la realtà in modo diverso rispetto a quelli dei più, permettendogli una indagine più approfondita. Questo riassume anche il senso di tutti gli esperimenti fatti durante lo spettacolo, con cui si sono mostrati oggetti del quotidiano e l'universo a frequenze diverse, solitamente invisibili agli occhi umani. La Ricerc-attrice afferma: "Anche se era sotto gli occhi di tutti [il massimo segreto mondiale], era semplicemente invisibile ai più"

1.3.2 Il Laboratorio del Piano Lauree Scientifiche (PLS)

Accanto ad attività di teatro de *Lo Spettacolo della Fisica*, il Dipartimento di Fisica dell'Università Statale di Milano (UNIMI) appoggia una attività di laboratorio per scuole

superiori mirato all'approfondimento di alcuni argomenti fisici, ad esempio superconduttori e radiazioni non ionizzanti. Il laboratorio rientra nel progetto Piano Lauree Scientifiche (PLS) e verrà indicato in questo lavoro, per non creare ambiguità, con il nome di Laboratorio PLS.

Il laboratorio ideato per l'anno scolastico 2018/2019 dal titolo "I Colori Invisibili ai Confini dell'Arcobaleno" è stato una delle attività, accanto allo spettacolo, su cui si è basata la progettazione del tutorial realizzato come lavoro di tesi.

Il laboratorio non è direttamente correlato allo spettacolo teatrale, ma possono esserci elementi in comune, ad esempio gli argomenti fisici affrontati. La connotazione del laboratorio, rispetto allo spettacolo, è più didattica e meno informale, rientra, infatti, nelle attività dette non formali. In particolare il Laboratorio PLS a cui si fa riferimento nel lavoro di tesi è stato pensato come laboratorio one-shot sull'argomento radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti (vicino e lontano infrarosso e ultravioletto) e interazione radiazione-materia. La durata è stata di 3 ore pomeridiane ed è stato proposto a classi di quarta superiore.

Nell'attività sono presentati una sequenza di esperimenti, con una minima spiegazione teorica. In particolare si utilizzano strumenti, come telecamere che operano in bande diverse da quella visibile, e materiali particolari, ad esempio lastre di policarbonato.

Gli obiettivi didattici principali del laboratorio riguardano i concetti di assorbimento, riflessione (speculare e diffusa), trasmissione ed emissione della radiazione. Si sottolinea anche la differenza tra emissione e illuminazione di un corpo e si accenna al fenomeno della fluorescenza.

Durante l'attività si spiega il funzionamento di telecamere che rivelano radiazioni invisibili all'uomo, restituendo immagini per lui significative. Ad esempio si fa largo uso della termocamera, che rivela la radiazione lontana infrarossa, di una telecamera UV e IR, che rivela il vicino infrarosso. In particolare si puntano le telecamere verso vari materiali, quotidiani e non, per studiarne il loro comportamento a diverse frequenze di osservazione. Puntando la termocamera IR verso una lastra di policarbonato, illuminata da una sorgente di radiazione nel vicino infrarosso, la lastra, opaca nel visibile, trasmette la radiazione IR, apparendo trasparente.

Il laboratorio si auspica di fornire spunti che possano stimolare la curiosità dei ragazzi, facciano sorgere domande e muovano alla ricerca personale, spingendo a uno studio più significativo della fisica.

Per il lavoro di tesi si è preso parte alla progettazione del laboratorio e ne è stata sviluppata una variante, presentata a un gruppo di studenti del triennio di diverse scuole superiori, che hanno preso parte anche al Laboratorio di Teatro Scientifico e hanno visto lo spettacolo "Luce dalle Stelle".

1.3.3 Il Laboratorio di Teatro Scientifico

Da qualche anno all'Università degli Studi di Milano al Dipartimento di Fisica è attivo un laboratorio di Teatro Scientifico che rientra nel progetto Piano Lauree Scientifiche e si struttura in 5 incontri pomeridiani, 20 ore in totale, rivolti a studenti delle superiori di qualsiasi classe. Il laboratorio è tenuto da professori del Dipartimento, che sono anche i Ricerc-attori de *Lo Spettacolo della Fisica*.

Agli studenti vengono presentate nozioni di fisica e di teatro, in previsione di far progettare loro una performance di teatro scientifico.

La composizione del copione è lasciata agli studenti che, divisi in gruppi, devono scegliere un argomento fisico e svilupparlo in una piccola scena teatrale. Sono accettate anche forme artistiche diverse, come scrittura poetica, ballo, composizione di canzoni.

I professori che seguono il laboratorio svolgono un ruolo fondamentale, in quanto correggono nozioni fisiche sbagliate, facendo ragionare gli studenti in modo approfondito sull'argomento scelto, e danno spunti e suggerimenti per quanto riguarda la parte artistica. Non intervengono, invece, dal punto di vista della scelta della modalità teatrale, che viene lasciato completamente in mano agli studenti.

Alla base vi è l'idea⁵ che "l'ipotesi pedagogica è che dover comunicare una conoscenza sviluppi quella conoscenza" [5], ovvero gli studenti si pongono il problema di cosa vogliono che il pubblico recepisca, che idee passino, ma prima di poter far questi ragionamenti scoprono di doversi appropriare del concetto fisico che vogliono comunicare.

I ragazzi coinvolti sono invitati anche a vedere uno spettacolo teatrale de *Lo Spettacolo della Fisica* in modo da avere un esempio concreto di cosa sia il teatro scientifico di fisica. All'interno del laboratorio si sono ripresi alcuni temi e alcuni esperimenti dello spettacolo. E' stata data libertà agli studenti di fare domande riguardo alla performance e sono state poste alcune domande per capire cosa è rimasto loro più impresso e cosa è piaciuto di più e di meno.

Il laboratorio è stato analizzato all'interno del lavoro di tesi, poiché gli studenti hanno svolto il duplice ruolo di spettatori e di attori/compositori permettendo di valutare l'efficacia di un'attività di drammatizzazione nell'ambito della didattica della fisica.

⁵Espressa da Marcello Sala in Ref [5] p. 75)

Capitolo 2

Le radiazioni elettromagnetiche nella didattica delle superiori

2.1 Letteratura di riferimento e problemi didattici riguardo alle radiazioni già documentati

Lo spettacolo teatrale “Luce dalle Stelle” e il laboratorio “I Colori Invisibili ai Confini dell’Arcobaleno” si concentrano sul concetto di radiazione e spettro elettromagnetico. La progettazione del tutorial ha richiesto, quindi, un approfondimento riguardante le problematiche inerenti tali concetti. L’analisi della letteratura ha delineato alcune concezioni errate da parte di studenti delle superiori, che si sono volute chiarire nel percorso formale. Gli elementi dei contesti informali e non formali, hanno fornito un valido aiuto a questo scopo.

Questo paragrafo presenta una panoramica delle ricerche e dei risultati, che si trovano in letteratura, riguardo le idee legate al concetto di radiazione, percezione del colore e radiazione termica.

Riguardo alla radiazione visibile, primo argomento trattato nello spettacolo, vi sono tre problemi principali. Il primo riguarda il concetto di ‘colore’, il secondo la somma additiva e sottrattiva dei colori e il terzo riguarda il fenomeno della visione da parte dell’occhio umano. Lavori svolti da Martinez-Borreguero et al. [42], Haagen [43] e Guesne et al. [44] mostrano che gli studenti ritengono che il colore sia una proprietà assoluta di un corpo. In realtà la percezione che abbiamo del colore dipende dalla capacità di un certo materiale di assorbire e riflettere particolari lunghezze d’onda e dalle caratteristiche dei recettori posti nella retina dell’occhio, che permettono la visione diurna (coni).

Legato all’idea del colore come proprietà di un corpo, c’è spesso la credenza che una radiazione nel visibile monocromatica, percepita colorata, incidente su un oggetto mescoli il proprio colore con quello dell’oggetto, in modo da determinare un colore diverso

dello stesso [42, 43]. Questi risultati portano alla seconda difficoltà, ovvero il fatto di confondere la sintesi additiva con la sintesi sottrattiva della radiazione. Gli studenti attribuiscono alla luce le stesse proprietà studiate per i pigmenti, un esempio si trova nello studio di Chauvet [45] in cui la metà degli studenti intervistati alla domanda: ‘Cosa puoi osservare nel punto di incontro tra un fascio di luce rossa ed un fascio di luce verde?’ risponde ‘marrone’ invece che ‘giallo’. Il risultato mostra che essi tendono ad applicare alla luce quanto imparato per i pigmenti e ragionando in termini di sintesi sottrattiva invece che di sintesi additiva.

Si ritrova anche l’idea [42, 43] che un oggetto assuma il colore della sorgente che lo illumina come se il colore fosse una proprietà intrinseca della luce. In entrambi i casi, sia che il colore sia una proprietà dell’oggetto, sia che faccia parte della sorgente, l’osservatore gioca un ruolo secondario nel processo, a volte di nessun rilievo.

Rappresentazioni simili riguardano il processo di visione. Di particolare importanza è il lavoro svolto da Guesne et al. [44] che ha trovato tre modelli errati tra studenti di 13-14 anni¹.

In base al modello, viene data importanza a uno o due dei tre elementi in gioco: occhio, oggetto e sorgente di radiazione. Il primo modello tiene conto solamente della radiazione, che, essendo presente in modo uniforme in tutto l’ambiente, permette all’occhio di vedere l’oggetto, Figura 2.1. Il secondo modello attribuisce molta importanza all’occhio umano, in quanto è la sua attività a permettere la visione di un oggetto, poiché in grado di reindirizzare la luce verso l’oggetto desiderato, Figura 2.2. Significativa è la rappresentazione che spesso fanno gli studenti dei raggi (freccette) che partono dall’occhio e sono diretti verso l’oggetto da vedere. L’ultimo modello ritiene che solamente l’interazione tra radiazione e oggetto possa determinare la visione da parte dell’occhio. Non è necessario che la radiazione interagisca anche con esso, Figura 2.3. La rappresentazione fisica reale prevede l’interazione di tutti e tre gli elementi, come indicato in Figura 2.4. La radiazione emessa da una sorgente interagisce con un oggetto che la riflette², la assorbe, oppure la trasmette inalterata. La radiazione dall’oggetto interagisce con la retina dell’occhio, dove innesca processi fisiologici che portano alla creazione dell’immagine.

Emerge anche da uno studio [46] che per gli studenti la parola ‘luce’ non è sinonimo di ‘radiazione’. Alcuni pensano che il Sole emetta luce e non radiazione elettromagnetica. La radiazione visibile, quindi non è al pari delle altre radiazioni, quali quella infrarossa o ultravioletta.

¹Si ritiene che tali concezioni restino inalterate anche in età successive, a meno che non vi sia un intervento specifico a riguardo. Quindi nonostante lo studio sia stato fatto su studenti di circa 13-14 anni, è ragionevole pensare che si possa estendere anche a studenti di quarta o quinta superiore (18-19 anni).

²In tutto il lavoro si intenderà con il termine ‘riflessione’ la riflessione diffusiva. Il caso di riflessione speculare verrà opportunamente specificato.

Oltre al colore, anche proprietà ottiche come l'opacità e la trasparenza sono rite-

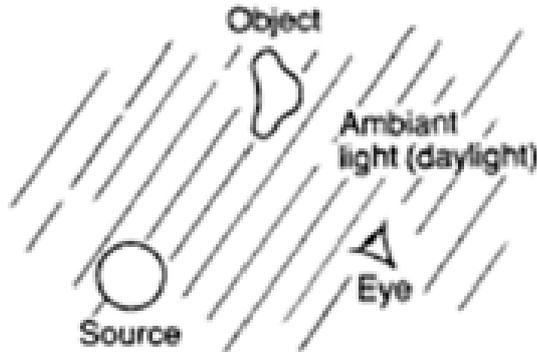


Figura 2.1: A. Modello per cui un oggetto è visibile perché immerso, insieme all'osservatore, in un ambiente illuminato [44].

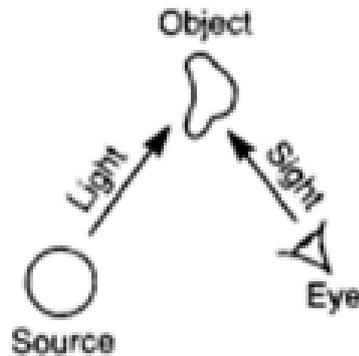


Figura 2.2: B. Modello che ritiene l'occhio un agente attivo all'interno del processo di visione [44].

nute da alcuni studenti assolute e caratteristiche invarianti di un corpo [47]. Ovvero non pensano che vi sia dipendenza delle proprietà ottiche (opacità e trasparenza) dalla banda spettrale della radiazione incidente. Il comportamento ottico dei corpi è valutato solamente in relazione all'interazione tra radiazione visibile e il corpo in esame.

Legato a questo problema vi è la difficoltà nel riconoscere la differenza tra sorgente di radiazione e corpo illuminato dalla stessa, ovvero la differenza tra il fenomeno di emissione

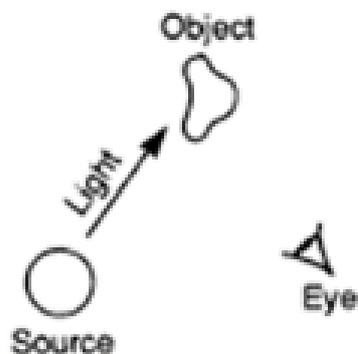


Figura 2.3: C. Modello che ritiene l'occhio in grado di vedere l'oggetto grazie all'interazione tra quest'ultimo e la sorgente [44].

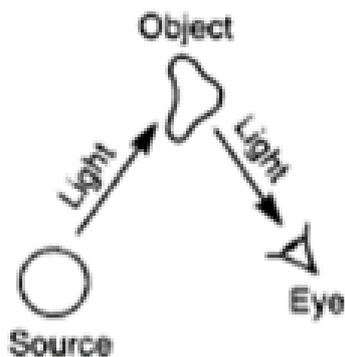


Figura 2.4: Modello corretto del processo di visione [44].

e di illuminazione [48]. Un argomento centrale dello spettacolo è l'osservazione dell'universo e di oggetti quotidiani a varie frequenze. Dalla letteratura emerge la difficoltà degli studenti nell'interpretare le bande dello spettro elettromagnetico. La ricerca condotta da P. J. Emigh e colleghi [49]³ mostra la difficoltà che gli studenti hanno nell'ordinare le bande spettrali in funzione della frequenza o della lunghezza d'onda crescente. Le diverse bande dello spettro elettromagnetico sono spesso riconosciute e suddivise dagli studenti in base al loro campo di applicazione, non rispetto alle loro caratteristiche fisiche [46, 50].

³La ricerca è stata condotta su studenti universitari al secondo anno del corso di Fisica, ma si ritiene che problematiche simili si possano trovare anche in studenti delle superiori, in quanto la trattazione qualitativa del corpo nero, e la seguente trattazione della radiazione termica, non è prevista né a livello di scuola secondaria superiore né all'università, come riportato nella ricerca.

Indagini compiute con studenti delle superiori riportano che molti hanno sentito parlare di radiazioni riferite, ad esempio, alle centrali nucleari, ai cellulari, a elettrodomestici (forni a microonde) e all'ambito medico (raggi-X) [46, 52].

Dalla ricerca emerge anche quanto non sia chiara la differenza tra radiazione ionizzante e non ionizzante, mentre è molto marcata negli studenti la suddivisione in 'buona' e 'cattiva' radiazione [51]. Per più della metà degli studenti intervistati da Neumann e Hopf [46] il termine 'radiazione' ha valenza negativa come mettono in evidenza anche altre ricerche [51, 52] che mostrano come gli studenti tendano a sottolinearne la pericolosità e i rischi, soprattutto riferendosi alla radiazione da decadimento nucleare. Eppure esiste una profonda ambivalenza sul tema, poiché, oltre ai danni, alcuni studenti ne sottolineano anche i benefici [46, 50, 52], ad esempio in campo medico, e la necessità, pensando alla radiazione solare [46, 52]⁴. Dalle interviste con studenti condotte da T. Plotz e M. Hopf [50, 52], emerge un'altra suddivisione delle radiazioni in base alla loro origine. Infatti è molto marcata per gli studenti la loro suddivisione in naturali e artificiali. Queste ultime sono emesse da dispositivi creati dall'uomo e sono ritenute quasi sempre dannose dagli intervistati. Un'idea diffusa tra gli studenti è che le radiazioni siano esclusivamente proprie dell'attività umana e di apparati elettronici. Ad esempio vi è la credenza che allontanandosi dalla città diminuiscano in quantità [46]. Questo fatto probabilmente, come ipotizzato da Plotz e Hopf [50], è dovuto alla loro trattazione scolastica, in cui vengono presentate tramite le loro applicazioni alle nuove tecnologie, e per questo si può pensare che non tutti i corpi siano sorgente di radiazioni, soprattutto gli esseri viventi [50, 52]. Si è trovata anche una interpretazione sbagliata del termine 'radiazione', che per alcuni studenti è sinonimo di 'radioattività' [53].

Riguardo alla banda UV e infrarossa, a cui si fa maggior riferimento nello spettacolo teatrale, nel Laboratorio PLS e nel lavoro di tesi, in letteratura sono state trovate le seguenti concezioni.

Oltre ai raggi X e alle radiazioni dei cellulari, la radiazione UV, come mostra la ricerca di S. Neumann e M. Hopf, sembra essere la più conosciuta dagli studenti delle superiori [46]. In particolare si riconduce allo spettro solare [46], ritenuto da alcuni l'unica sorgente UV [48, 51]. Sono comuni concezioni secondo cui la radiazione UV sia collegata alle scottature e ai tumori della pelle [48], per questo motivo è ritenuta dannosa. In particolare si pensa sia più pericolosa dei raggi-X, ma meno pericolosa se comparata alla radiazione emessa dai cellulari e dal decadimento nucleare [46]. In pochi caratterizzano la pericolosità in termini di dose ed energia trasportata dall'onda elettromagnetica, non vengono fatte nemmeno distinzioni tra UVA, UVB e UVC.

Una ricerca ha evidenziato che spesso gli studenti si riferiscono alla radiazione UV con

⁴I ricercatori hanno sottolineato il fatto che la ricerca sia stata compiuta a Vienna tra studenti madrelingua tedesca e probabilmente questo fatto ha inciso sul risultato, in quanto in tedesco ci si riferisce alla radiazione solare con il termine 'Strahlung', parola usata anche per indicare una radiazione elettromagnetica generica.

termini quali: “luce”, “forti raggi”, “un colore”, “raggi dannosi”, senza ricollegarla direttamente allo spettro elettromagnetico [48].

Inoltre non è immediato per alcuni studenti ritenerla una radiazione invisibile all’occhio umano [46], credono, al contrario, di poter vedere alcuni oggetti grazie all’illuminazione UV [48,51], probabilmente a causa di una concezione errata del fenomeno della fluorescenza.

Lo studio di S. Neumann e M. Hopf mostra anche che la radiazione infrarossa, invece, è ritenuta dagli studenti la meno pericolosa di tutte per l’uomo, anche se comparata con la radiazione visibile [46]. Non tengono conto, però, della dose. Al contrario altre ricerche, al contrario, hanno dimostrato che alcuni studenti ritengono la radiazione infrarossa dannosa [48,51]. Nonostante molti la definiscano una radiazione invisibile per l’uomo [46], alcuni la associano al colore rosso [46,48,51], probabilmente collegandola alle stufe e alle lampade a infrarossi, in cui la colorazione è quella tipica del fenomeno di incandescenza della resistenza metallica. In alcune ricerche si è trovato che molti studenti non sanno identificare la sorgente della radiazione [48], eppure la collegano al calore [49,54]. Emerge, quindi, una distinzione concettuale netta tra radiazione termica e radiazione elettromagnetica, associabile a diverse sorgenti di radiazione.

La radiazione termica è un argomento che presenta alcune problematicità, come hanno rilevato alcune ricerche. Il fenomeno di assorbimento da parte dei corpi è chiaro per molti studenti [53], ma lo sono meno le sue conseguenze. Non si pensa, ad esempio, che la radiazione assorbita venga poi riemessa come radiazione termica dai corpi. La ricerca di Emigh e colleghi [49] ha riscontrato negli studenti il fatto di non sapere che ogni oggetto possa emettere radiazione in base alla propria temperatura. Questo fatto è accompagnato anche dalla difficoltà nel rappresentare graficamente lo spettro di emissione ideale per un determinato corpo, ad esempio una lampadina ad incandescenza, e nel mettere la grandezza corretta sull’asse delle ordinate [49]. Inoltre la relazione tra temperatura e colore percepito, ad esempio nel fenomeno dell’incandescenza o per oggetti astrofisici, non è sempre chiara agli studenti [54].

Secondo lo studio di Besson [47] gli studenti hanno problemi a riconoscere la radiazione termica come un meccanismo di perdita di energia, nonostante siano presentati loro dei fenomeni d’incandescenza. Vi è anche l’idea che un corpo, quando non è più incandescente, diventi un solido opaco e non emetta più radiazione termica [55].

Alcuni problemi legati alla radiazione termica si riflettono anche nella trattazione del corpo nero. Gli studenti, infatti, non hanno sempre chiaro il concetto di spettro di emissione di un corpo e tendono a non ricollegarlo al modello del corpo nero [49]. Un’ulteriore difficoltà degli studenti riguarda l’approssimazione degli oggetti reali come corpi neri [49]. Ricerche su studenti di scuola superiore in Turchia [56], hanno rilevato una tendenza a definire, anche dopo aver studiato la teoria, il corpo nero come un oggetto di forma

sferica, in grado di raffreddare la radiazione che vi incide sopra, oppure di assorbirla e intrappolarla all'interno. Accanto a queste concezioni si trova la tendenza a confondere un corpo nero con un corpo che appare di colore nero [56].

Alcuni dei risultati trovati in letteratura sono stati verificati su degli studenti di scuola secondaria di Milano e provincia tramite questionari, inoltre l'analisi dei manuali scolastici di fisica ha permesso di capire l'origine di alcune loro concezioni errate.

2.2 Analisi dei questionari sulle radiazioni elettromagnetiche

Durante l'attività di tesi, è stato progettato un questionario per determinare se le problematiche riscontrate in letteratura si trovassero anche tra studenti di scuola secondaria superiore di Milano e provincia. Le domande proposte sono inerenti alla radiazione emessa da un corpo, il corpo nero, le radiazioni non ionizzanti e la loro interazione con la materia. Gli argomenti sono

Il questionario è stato proposto in due momenti, dopo lo spettacolo teatrale "Luce dalle Stelle" e dopo lo svolgimento del Laboratorio PLS "I Colori Invisibili ai Confini dell'Arcobaleno", con una leggera modifica. Le domande proposte sono 5 (4 per il questionario del laboratorio) di cui una riguarda il gradimento dell'attività. Inoltre alla fine del laboratorio è stata proposta anche una tabella da compilare da parte degli studenti, per testare la loro comprensione dell'interazione radiazione-materia, sperimentata nel laboratorio. La tabella è riportata in Figura 2.5 Ci sono state 91 risposte da parte del pubblico di 4 rappresentazioni dello spettacolo (totale circa 1121 persone)⁵, di cui 84 studenti di scuola superiore. Data la bassa probabilità che gli studenti autonomamente compilino il questionario alla fine dello spettacolo, per mancanza di tempo e di obbligo, si ritiene che il numero di risposte ottenuto, nonostante corrisponda a meno della metà dei partecipanti, possa essere un buon risultato. Il campione, però, potrebbe non essere rappresentativo delle concezioni medie dei ragazzi.

Delle classi di quarta superiore che hanno partecipato al laboratorio, tre hanno risposto al questionario (47 ragazzi), e in quattro classi hanno risposto alle tabelle, per un totale

⁵Dati riferiti allo spettacolo "Luce dalle Stelle" rappresentato all'Auditorium Levi di Milano nel mese di febbraio del 2019

Completare la tabella

	Visibile	Infrarosso lontano	Infrarosso vicino	UV
Quale materiale è OPACO alla radiazione				
Quale materiale è TRASPARENTE alla radiazione				
Quale materiale RIFLETTE la radiazione di altri oggetti				

Figura 2.5: Tabella proposta agli studenti alla fine del laboratorio “I Colori Invisibili ai Confini dell’Arcobaleno”. I materiali da indicare si riferiscono a quelli visti in laboratorio illuminati da radiazione IR vicina o UV oppure visti tramite la termocamera (IR lontano). Alcune caselle non potevano essere riempite, ma questo agli studenti non è stato detto, per farli ragionare maggiormente su quanto hanno visto.

di 72 compilazioni. Poiché non hanno assistito allo spettacolo teatrale, le domande sono state le stesse, tranne una domanda sul fondo cosmico a microonde, che non è stato trattato nel laboratorio e quindi è stata tolta. Dai questionari e dalle interazioni con i ragazzi durante il laboratorio, sono emerse alcune criticità in accordo con la letteratura di riferimento, elencate di seguito, dopo una breve presentazione delle risposte.

Di seguito la presentazione delle domande e la classificazione delle risposte date dagli studenti. Gli studenti che hanno risposto dopo aver visto lo spettacolo sono suddivisi in base alla classe di appartenenza: prima (32 studenti), seconda (13 studenti), terza (8 studenti), quarta (11 studenti), quinta (20 studenti). Gli studenti che hanno risposto in seguito al laboratorio, sono tutti di quarta superiore (47 ragazzi), per distinguerli dai ragazzi dello spettacolo verranno indicati con ‘Quarta PLS’.

Domanda 1 *La temperatura esterna del Sole (circa 5700° C) è maggiore o minore di quella del fondo cosmico a microonde? Motiva la risposta.*

La temperatura superficiale del Sole è maggiore, poiché il fondo cosmico a microonde ha una emissione caratteristica associata a un corpo con temperatura di circa 3°K.

In totale vi sono state 79 risposte corrette su 84 studenti.

La domanda riguarda un tema presente nello spettacolo. Non si può sapere, però, se la conoscenza degli studenti sia precedente allo spettacolo o se derivi da esso. Inoltre l'informazione sulla temperatura del fondo cosmico a microonde (circa 3°K) è facilmente reperibile in internet.

Le motivazioni alla risposta corretta sono state classificate in base alle risposte ricorrenti. La classificazione si trova in Tabella 1, in cui sono indicate le percentuali⁶ di studenti che per ogni classe ha risposto con quella motivazione. 'Altro' indica risposte

Motivazione alla risposta corretta (<i>esempio</i>)	Prima	Seconda	Terza	Quarta	Quinta
Nessuna motivazione	9.4%	31%	40%	45%	15%
Motivazione con conoscenze basilari di cosmologia (<i>"perché l'universo espandendosi si è raffreddato"</i> <i>"Perché nello spazio fa molto freddo"</i>)	6.3%	8%	-	18%	10%
Risposta tautologica (<i>"Il Sole è più caldo"</i>)	6.3%	8%	-	9.1%	10%
Risposta con informazioni viste o dette nello spettacolo (<i>"La radiazione del fondo cosmico a microonde ha una temperatura di pochi kelvin" "[...] con minuscole fluttuazioni"</i>)	31%	15%	-	9.1%	5%
Confusione tra microonde astronomiche e quelle dei forni (<i>"poiché le microonde sono utilizzate anche dai forni, dunque non saranno mai di temperatura maggiore a quella esterna del sole"</i>)	3.2%	23%	-	-	-
Relazione tra colore e temperatura (<i>"Perché in astrofisica i colori freddi sono associati a elementi di temperatura maggiore"</i>)	-	-	-	-	10%
Altro	44%	15%	60%	18%	50%

Tabella 1

date solamente da uno o due studenti, ritenute outliers dell'analisi, oppure risposte poco chiare.

⁶Le percentuali sono calcolate in base al numero totale di studenti appartenenti alla classe presa in considerazione. Ad esempio le risposte di prima superiore conformi alla prima classificazione sono state 3, che in rapporto al numero totale (32) di studenti di prima ha dato la percentuale 9.4%.

Domanda 2 *Guardati attorno, quale oggetto, secondo te, si comporta come un Corpo Nero? Motiva la risposta.*

La domanda riguarda il corpo nero, argomento generalmente di quinta superiore e di cui si parla nello spettacolo.

La risposta potrebbe essere la seguente: ogni corpo è approssimabile a un corpo nero con una curva di emissione ideale dipendente dalla sua temperatura. Altrimenti un corpo nero è definito nei manuali come un corpo che assorbe qualsiasi frequenza della radiazione incidente, riemettendola interamente, comportandosi come assorbitore ed emettitore perfetto. Nei questionari è stata utilizzata dagli studenti principalmente la seconda motivazione, mai la prima. Alcuni hanno interpretato la domanda in modo sbagliato, pensando fosse richiesto di spiegare perché i corpi appaiono neri ai nostri occhi.

Gli elementi più citati dagli studenti come esempi di corpi neri sono riportati in Tabella 2.

Oggetti	Prima	Seconda	Terza	Quarta	Quinta	Quarta PLS
Lavagna	29%	-	-	-	-	-
Forno	-	31%	-	-	-	-
Un oggetto che si comporta come una cavità	-	-	13%	9.1%	-	-
Vestiti	13%	-	-	-	-	-
Schermo del cellulare /del computer/del televisore	6.3%	-	-	-	-	6.4%
Cellulare/computer	3.1%	-	-	-	-	13%
Un qualsiasi oggetto di colore nero	19%	23%	-	18%	5%	8.5%
Sole	19%	-	-	-	-	32%
Aspirapolvere	3.1%	-	-	-	5%	-
Magnete	-	15%	-	-	-	-
Spugna	-	-	13%	-	-	-
Vetro oscuranti	-	-	-	18%	25%	-
Occhiali da Sole	-	-	-	-	35%	-
Specchio	-	-	-	-	-	6.4%
Metallo/Un oggetto di metallo	-	-	-	-	-	6.4%

Tabella 2

Le motivazioni sono riportate di seguito in Tabella 3.

Motivazione (esempio)	Prima	Seconda	Terza	Quarta	Quinta	Quarta PLS
Risposta lasciata completamente in bianco	9.4%	23%	38%	19%	5%	4.3%
Viene scritto un oggetto, ma non è data la motivazione	3.1%	-	25%	9.1%	10%	4.3%
Utilizzo della definizione manualistica ("Sole: Perché un corpo nero è in grado di assorbire tutta la radiazione elettromagnetica che riceve")	19%	8%	13%	-	5%	15%
Cavità come corpo nero ("Forno: La maggior parte della luce che vi entra non può uscirne")	-	31%	13%	9.1%	-	-
Spiegazione del perché un corpo appare nero ai nostri occhi ("il nero assorbe tutte le onde di luce che compongono i vari colori apparendo nero ai nostri occhi")	31%	-	-	-	20%	-
Il corpo nero assorbe e poi riflette le radiazioni incidenti, invece che emetterle ("Sole: perché tutte le radiazioni che assorbe vengono riflesse")	6.3%	-	-	-	-	-
Modello di visione "Lavagna o schermi: perché le scritte sono visibili solo attraverso la luce"	6.3%	-	-	-	-	-
Il corpo ideale non esiste ("Nessun oggetto è in grado di assorbire tutta la radiazione elettromagnetica")	3.2%	8%	-	9.1%	-	4.3%
Il corpo nero è qualcosa che attira a sé ("Aspirapolvere: perché risucchia tutto ciò che c'è per terra" oppure "Magnete: Perché attira gli oggetti")	3.2%	15%	-	-	5%	-
Corpo nero blocca la radiazione in una direzione, la trasmette in un'altra ("Vetro oscurante: Perché da una parte il vetro è oscurato e dall'altra è trasparente")	-	-	-	9.1%	20%	-
Il corpo nero è una sorgente emettitrice di radiazione (Sole: perché è una sorgente luminosa che emette luce propria.)	-	-	-	-	-	21%
Il corpo nero è in grado di riflettere tutta la radiazione incidente su di lui (Specchio: riflette la luce)	-	-	-	-	-	11%
Risposta tautologica (Lavagna: perché è nera)	-	15%	-	9.1%	-	8.5%
Altro	22%	-	13%	45%	35%	32%

Tabella 3

Domanda 3 Vero o Falso. In una stessa stanza in cui ci sono una pianta e un cellulare alla stessa temperatura, solo il cellulare emette radiazione elettromagnetica. Motiva la risposta.

La risposta corretta è falso, perché entrambi emettono radiazione elettromagnetica (radiazione termica) in base alla loro temperatura. Il cellulare, inoltre, emette e riceve

periodicamente anche un segnale nelle frequenze radio o nelle microonde per mantenersi in contatto con la torre di controllo.

La domanda è stata posta per capire la concezione degli studenti riguardo l'emissione di radiazione da parte dei corpi, in particolare se esiste per loro una differenza tra corpi artificiali e corpi naturali.

Le percentuali di risposte vero-falso sono riportate in seguito in Tabella 4.

Classe	VERO	FALSO
Prima (*)	63%	38%
Seconda	46%	54%
Terza	87.5%	12.5%
Quarta (*)	64%	27%
Quinta	25%	75%
Quarta PLS	23%	77%

Tabella 4

(*) Le percentuali per classe prima e quarta non corrispondono al numero totale di studenti, perché alcuni non hanno risposto.

Le motivazioni sono riportate in Tabella 5 e in Tabella 6, suddivise in categorie. Alcuni studenti hanno scambiato vero e falso, giustificando la risposta 'falso' con una motivazione alla risposta 'vero'. La classificazione delle motivazioni, quindi, è stata svolta correggendo queste sviste, se facilmente riconoscibili come tali. Per questa ragione le percentuali in tabella potrebbero differire da quelle riportate in Tabella 4.

Motivazione alla risposta errata VERO (<i>esempio</i>)	Prima	Seconda	Terza	Quarta	Quinta	Quarta PLS
Nessuna motivazione	6.3%	8%	38%	36%	5%	2.1%
Il cellulare emettere radiazione elettromagnetica perché è stato creato per funzionare in questo modo (<i>"Perché è un oggetto tecnologico"</i>)	6.3%	-	13%	9.1%	10%	2.1%
La radiazione elettromagnetica del cellulare interagisce con la pianta (<i>"la pianta assorbe e riflette le onde elettromagnetiche prodotte dal cellulare"</i>)	22%	-	-	9.1%	-	-
La pianta non emette, può solo assorbire o riflettere la radiazione (<i>"Perché le piante non sono in grado di emettere radiazioni elettromagnetiche ma sono in grado di rifletterle"</i> oppure <i>"Le piante non emettono radiazioni, le assorbono"</i>)	13%	23%	-	-	-	2.1%
Le piante non possono emettere radiazioni (<i>"La pianta non emette radiazioni"</i>)	-	8%	13%	19%	5%	6.4%
Altro	16%	8%	25%	-	5%	11%

Tabella 5

Motivazione alla risposta corretta FALSO (<i>esempio</i>)	Prima	Seconda	Terza	Quarta	Quinta	Quarta PLS
Nessuna motivazione	-	15%	13%	-	5%	-
L'emissione della pianta permette di vederne il colore (<i>"Perché vedo i colori delle piante"</i>)	16%	-	-	9.1%	5%	2.1%
La radiazione della pianta è diversa da quella del cellulare (<i>"La pianta non emette questo tipo di radiazioni"</i>)	-	15%	-	-	-	2.1%
Risposta tautologica (<i>"entrambe emettono radiazione elettromagnetica"</i>)	3.2%	15%	-	-	15%	15%
La temperatura determina l'emissione di radiazione (<i>"Perché trovandosi alla stessa temperatura emettono entrambi onde elettromagnetiche"</i>)	9.4%	8%	-	-	-	11%
L'emissione è caratteristica di tutti i corpi (<i>"Tutti i corpi emettono radiazioni"</i> oppure <i>"anche i corpi viventi emettono radiazioni"</i>)	3.2%	-	-	9.1%	45%	19%
La pianta emette radiazioni perché diffonde (<i>Perché anche la pianta diffonde le radiazioni elettromagnetiche</i>)	-	-	-	-	-	26%
Altro	6.3%	-	-	-	5%	4.3%

Tabella 6

Domanda 4 *Completa la frase: Affinché un corpo possa emettere radiazione termica, deve prima ... la radiazione solare. Motivare la risposta.*

A disposizione quattro possibilità: assorbire, riflettere, rifrangere, trasmettere. Per man-

tenere l'equilibrio termico è necessario che un corpo assorba ed emetta radiazione entro lo stesso intervallo spettrale.

Domanda posta per capire fino a che punto gli studenti delle superiori conoscano l'equilibrio radiativo dei corpi.

Le risposte corrette in base alla classe sono in Tabella 7.

Classe	Risposta corretta
Prima	84%
Seconda	69%
Terza	75%
Quarta	36%
Quinta	75%
Quarta PLS	98%

Tabella 7

Le motivazioni sono riportate il Tabella 8⁷.

Motivazione alla risposta corretta "Assorbimento" (esempio)	Prima	Seconda	Terza	Quarta	Quinta	Quarta PLS
Nessuna motivazione	16% 19%	15% 22%	25% 33%	9.1% 25%	25% 33%	19% 20%
L'energia assorbita dal Sole è usata per produrre/emettere calore ("Ogni corpo per emettere calore deve assorbire l'energia solare")	16% 19%	-	-	-	5% 6.7%	2.1% 2.2%
La radiazione solare è assorbita ed è trasformata in altro ("la radiazione solare deve essere assorbita perché poi subendo delle reazioni chimiche questa viene emessa come radiazione termica")	13% 15%	8% 11%	-	-	-	
Dall'assorbimento della radiazione solare il corpo si scalda e quindi può emettere radiazione termica ("perché, un corpo esposto continuamente a radiazione solare si riscalda e contemporaneamente emette radiazione termica")	9.4% 11%	-	13% 17%	-	5% 6.7%	6.4% 6.5%
Risposta tautologica ("Perché se non la assorbe non può emettere")	9.4% 11%	8% 11%	-	-	-	23% 24%
L'assorbimento è necessario affinché il corpo possieda radiazione da emettere ("Perché altrimenti non ha radiazioni")	6.3% 7.4%	-	25% 33%	9.1% 25%	5% 6.7%	13% 13%
La radiazione è assorbita per essere poi riflessa ("Prima l'assorbe e poi la riflette")	3.2% 3.7%	-	-	-	20% 27%	17% 18%
Altro	13% 15%	39% 55%	13% 17%	19% 50%	15% 20%	17% 18%

Tabella 8

L'analisi delle risposte ha sottolineato qualche criticità, alcune in accordo con la letteratura, altre nuove.

Per quanto riguarda la fisica dei colori, ad esempio, alcuni descrivono il colore come una sorgente che emette o assorbe radiazione elettromagnetica, quando in realtà è il corpo a cui si associa il colore a poter assorbire, emettere o riflettere la radiazione corrispondente alla banda spettrale visibile. Altri reputano il colore un'onda elettromagnetica, oppure una proprietà della radiazione, usando espressioni come "raggi colorati della luce". Il colore trae origine dall'interazione tra radiazione visibile e recettori della retina dell'occhio umano, da cui nasce una percezione di colore. Quindi non è l'onda elettromagnetica a possedere una proprietà di colore e non è del tutto corretto associare a un certo intervallo

⁷La prima percentuale è calcolata rispetto al totale degli studenti di quella classe. Quella sotto rispetto al totale risposte corrette per la stessa classe

spettrale visibile un colore, piuttosto che una percezione cromatica.

Nonostante la difficoltà nel definire cosa sia un colore, molti sanno che la radiazione visibile e i corpi interagiscono principalmente per riflessione. In molte risposte, però, questo concetto è utilizzato come sinonimo di ‘emissione’, dimostrando che gli studenti non conoscono bene la differenza tra i due processi, ne è esemplificativa la risposta “dato che i colori sono radiazione elettromagnetica allora anche la pianta [che appare di colore verde] ne emette [di radiazione elettromagnetica]”. E ancora “il bianco indica grande emissività”, quando in realtà un oggetto appare di colore bianco ai nostri occhi per la sua caratteristica di riflettere la maggior parte della radiazione visibile incidente su di lui e non per la sua capacità di emettere in quella banda spettrale. Macroscopicamente la riflessione è un processo di diffusione della radiazione incidente su un corpo che ha una superficie con determinate proprietà di assorbimento selettivo e trasmissione per una certa banda spettrale. L’emissione, invece, è un processo di perdita di energia per irraggiamento che avviene per bilanciare radiativamente la radiazione assorbita da un corpo, garantendo la conservazione dell’energia. Lo spettro di emissione di un corpo, ovvero il potere emesso per unità di superficie e di tempo in un certo intervallo di frequenze, è detto radiazione termica del corpo e dipende fortemente dalla sua temperatura assoluta e dal suo materiale.

Invece quasi la metà degli studenti non ha chiara la differenza tra i due concetti, in due casi la difficoltà si trova anche nei confronti della banda spettrale dell’ultravioletto, in cui si fa confusione tra corpo illuminato con una lampada UV e sorgente di UV.

La radiazione elettromagnetica è definita dagli studenti in vari modi, tra cui: “onde di luce”, “raggi”, “luce solare”, “radiazione di luce bianca”, “energia solare”, “onde energetiche”. Non vi è quindi una nomenclatura univoca e soprattutto il termine “luce” si trova spesso come sinonimo di “radiazione visibile”, non è esteso ad altre bande spettrali, e non presenta caratteristiche ben definite, per qualcuno è una tipologia di onda e per altri coincide con la radiazione solare. Emerge anche che per gli studenti i termini onda, radiazione ed energia sono collegati, la radiazione elettromagnetica, infatti, può essere trattata con la fisica ondulatoria e le onde trasportano un flusso di energia nell’unità di tempo e superficie, in base all’energia immagazzinata in un punto del campo elettromagnetico. Non emerge, però, se gli studenti abbiano seguito lo stesso ragionamento.

Per quanto riguarda altre radiazioni oltre a quelle visibili, studenti che non hanno partecipato al Laboratorio PLS hanno dimostrato alcune difficoltà, tra cui il riconoscere la radiazione nelle microonde solamente tramite la sua applicazione quotidiana nei forni e non come possibile banda di emissione di una sorgente con temperatura in kelvin molto bassa, ad esempio la radiazione cosmica di fondo a cui è associata una temperatura di circa 3 K.

Riguardo la radiazione cosmica di fondo è stata riscontrata un'altra difficoltà che consiste nell'interpretare i falsi colori restituiti da uno strumento che rivela una radiazione in una banda non visibile all'occhio umano. In due casi, infatti, studenti di quinta superiore hanno affermato che la radiazione cosmica di fondo sia "di colore rosso", dopo aver visto le immagini del satellite Planck, in cui la radiazione proveniente dal piano galattico della Via Lattea sono state rappresentate in rosso.

Il corpo nero circa da metà degli studenti è descritto utilizzando la definizione del libro di testo che lo presenta come un assorbitore perfetto, ma senza saperlo legare realmente a un oggetto quotidiano. Ad esempio nonostante un sesto degli studenti abbia scritto che il Sole e le stelle siano corpi neri, non ne danno una motivazione adeguata. L'emissione di tali oggetti, infatti, non deriva tanto dall'assorbimento della radiazione incidente, ma piuttosto dalla produzione interna di energia per fusione termonucleare, che viene trasportata, con meccanismi di conduzione e convezione, fino allo strato più superficiale della stella dove in parte è dissipata per irraggiamento. Le stelle emettono in un ampio spettro di emissione, che può essere approssimato alla curva di emissione di corpo nero ideale, in modo che la funzione dipenda solamente dalla temperatura assoluta del corpo. Grazie a questa approssimazione si può ricavare la temperatura superficiale assoluta (T) del corpo in base alla frequenza di picco (ν_{max}), massimo della funzione, grazie alla legge dello spostamento di Wien:

$$\nu_{max} = 5.88 \cdot 10^{10} T \quad [Hz] \quad (2.1)$$

La definizione di corpo nero come assorbitore perfetto, quindi, non è del tutto significativa per oggetti astronomici e quotidiani. Questi ultimi sono anch'essi approssimabili a corpi neri per valori alti del coefficiente di emissività (ϵ). Il coefficiente è il rapporto, preso un certo intervallo spettrale, tra potenza emessa per unità di superficie dal corpo in questione rispetto alla potenza emessa da un corpo ideale alla stessa temperatura e ha un valore compreso tra 0 e 1, con $\epsilon = 1$ per un corpo nero.

In cinque casi il corpo nero è descritto come una cavità, elemento reale con comportamento più vicino al comportamento ideale, per cui la definizione di assorbitore perfetto è significativa.

Si è riscontrata la tendenza comune ad associare un corpo nero a un oggetto di colore nero nel visibile e ad un oggetto che ha una superficie opaca e quella opposta trasparente alla radiazione visibile, ad esempio un vetro oscurante della macchina. La prima concezione è stata espressa da circa un quarto degli studenti, principalmente di prima superiore, mentre la seconda idea ha trovato spazio in una ventina di ragazzi, soprattutto di classe quinta.

Il corpo nero è associato anche a un oggetto in grado di assorbire ed emettere radiazioni tramite componenti elettroniche, come un cellulare o un televisore, che sottende l'idea di artificialità della radiazione elettromagnetica. La concezione si lega anche a un'ulteriore

problematicità, il fatto di non ritenere qualsiasi corpo un emettitore di radiazioni. Tra una pianta e un cellulare quasi la metà degli studenti afferma che solamente il cellulare emani radiazioni elettromagnetiche e di questi circa un quarto ritiene che solo oggetti artificiali possano emettere. Probabilmente è dovuto al fatto che quando si pensa alla radiazione emessa da un cellulare si intende in primo luogo il segnale radio, o nella banda delle microonde, emesso e ricevuto dal dispositivo, per permettergli di stabilire un collegamento con la torre di controllo della rete cellulare, e non la sua radiazione termica dipendente dalla sua temperatura. Nel secondo caso i due elementi, se posti nello stesso ambiente, in equilibrio termico tra loro, e quindi alla stessa temperatura, emetterebbero nello stesso intervallo di frequenze, ovvero l'infrarosso lontano, corrispondente, secondo la legge dello spostamento di Wien, a una temperatura pari a quella ambientale (circa 298/300 K).

In un caso uno studente afferma che la pianta “non è radioattiva” confondendo il termine radioattività, decadimento di atomi instabili, con l'emissione di radiazione elettromagnetica da parte di un corpo con una data temperatura, radiazione termica.

La pianta, per alcuni, può solamente assorbire le radiazioni dell'apparecchio elettronico, senza o con emissione delle stesse. Per altri anche la pianta è in grado di emettere radiazione, altrimenti non si spiegherebbe il colore verde e la capacità dell'occhio di vederla, confondendo il processo di emissione con quello di riflessione della radiazione. In particolare è ricorrente l'idea che un corpo dopo aver assorbito la radiazione incidente, la rifletta, invece che emetterla. Probabilmente la confusione nasce dalla poca chiarezza riguardo al meccanismo della visione, ovvero il fatto che gli occhi rilevano la radiazione visibile riflessa dai corpi. L'unico momento in cui si riceve solo radiazione emessa direttamente da un corpo è il caso di sorgenti con picco di emissione nella banda visibile, come il Sole o una lampadina alogena.

In pochi casi, solo due, al contrario di quanto riscontrato in letteratura, è stato espressamente formulato un giudizio riguardo la pericolosità delle radiazioni, in questo caso, del cellulare, ritenendole nocive se assorbite da un essere vivente.

Una decina di studenti ha associato la radiazione elettromagnetica all'elettricità, affermando che solamente un apparecchio elettronico, come un cellulare, possa emettere radiazione, in quanto “il cellulare [se comparato a una pianta] è l'unico a usare l'elettricità”.

Per quanto riguarda la radiazione termica non è chiaro agli studenti il fenomeno del bilanciamento radiativo tra assorbimento ed emissione di radiazione da parte di un corpo in equilibrio termodinamico.

Inoltre si trova una incoerenza di termini, poiché molti utilizzano il termine “calore” per indicare la radiazione termica, ad esempio “la pianta emette calore”. Il calore è una modalità di trasporto dell'energia non radiativo, quindi non è del tutto corretto in fisica associare i due termini. Probabilmente l'esperienza quotidiana favorisce questa concezione. Si pensi, ad esempio, alla sensazione di calore percepita sulla pelle se si viene irraggiati dal Sole. Si crea in questo caso una situazione di instabilità tra i due sistemi,

ambiente e pelle, in cui un sistema riceve una quantità maggiore di energia rispetto all'altro. È necessario modificare le condizioni di equilibrio per garantire la conservazione dell'energia assorbita ed emessa tra i due sistemi, poiché la prima è in quantità maggiore rispetto alla seconda. Da questo fenomeno scaturisce la sensazione di riscaldamento della pelle.

In una decina di casi emerge l'idea che la radiazione assorbita da un corpo, ad esempio lo spettro di emissione solare, e la radiazione termica emessa dallo stesso non siano fenomeni ugualmente riconducibili a propagazioni delle perturbazioni del campo elettromagnetico, ma abbiano origini differenti. Qualcuno parla di "trasformazione chimica", qualcuno di "conversione" o "trasmutazione" della radiazione solare assorbita da un corpo in radiazione emessa dallo stesso. In un caso lo studente confonde l'emissione termica da parte di una pianta con il processo di fotosintesi in cui la radiazione solare è convertita in energia chimica e ossigeno.

Una concezione che si trova in una decina di questionari, è il fatto che solamente corpi caldi possano emettere radiazione termica. Uno studente inserisce tra questi anche la luce che è ritenuta "calda" e da cui i corpi possono assorbire "calore".

Le tabelle fatte compilare durante il laboratorio, invece, hanno rivelato che una presentazione sequenziale dell'interazione tra diverse bande spettrali, il vicino e lontano infrarosso e l'ultravioletto, e diversi materiali, permette ai ragazzi di contestualizzare meglio i concetti di assorbimento, trasmissione e riflessione speculare. I ragazzi hanno anche avuto modo di sperimentare in modo pratico la differenza tra i fenomeni di illuminazione ed emissione, ma non vi sono stati riscontri significativi nei questionari sulla comprensione di tale differenza.

L'analisi dei questionari ha mostrato che le mancanze più importanti dei ragazzi riguardano il meccanismo della visione e dei colori, la radiazione termica e il fenomeno di bilanciamento radiativo, argomenti trattati già dai primi anni di scuola superiore⁸. Il corpo nero, la legge dello spostamento di Wien, l'interazione tra radiazioni e materia sono argomenti di quinta Liceo Scientifico, secondo i programmi dei libri di testo, ma anche studenti di quinta hanno mostrato lacune a riguardo.

⁸Per scuola superiore si intende soprattutto Liceo Scientifico, che presenta un programma di fisica, in base ai testi scolastici analizzati, più completo rispetto a Istituti Tecnici e Licei di altre tipologie.

2.3 Le radiazioni elettromagnetiche nei libri di testo delle superiori

2.3.1 Radiazione Visibile e Modello di Visione

Nella maggior parte dei libri di testo analizzati [57–63] si è osservato che le caratteristiche della radiazione visibile e il modello di visione sono presentate, nei manuali per classi di terza Liceo Scientifico, principalmente nel capitolo sull’ottica geometrica e fisica. Quest’ultimo si trova alla fine dell’unità didattica sui fenomeni ondulatori, dopo il capitolo sulle onde sonore. La radiazione visibile viene ripresa da molti libri [59–61, 63–65] anche nel capitolo sull’elettromagnetismo, affrontato nei testi di quinta Liceo Scientifico. In tale capitolo si classificano le onde elettromagnetiche in bande spettrali in base alla frequenza, o lunghezza d’onda, e si delineano nuovamente le caratteristiche della radiazione visibile, tra cui l’estensione convenzionale dell’intervallo⁹:

$$400 \text{ THz} \leq \nu \leq 760 \text{ THz}, \text{ o altrimenti } 360 \text{ nm} \leq \lambda \leq 750 \text{ nm}$$

Nel momento in cui è introdotto per la prima volta l’argomento ‘luce’, quindi, si conosce già il concetto di onda, ovvero una perturbazione che si propaga nel tempo e nello spazio, di lunghezza d’onda (λ), di velocità di propagazione dell’onda (v), di frequenza (indicata con f nei libri di testo delle superiori) e di periodo (T). Questi ultimi due elementi sono stati trattati anche in relazione ai fenomeni periodici, argomento del biennio scientifico. Inoltre si conosce la relazione tra f , λ e v :

$$v = f \cdot \lambda \quad [ms^{-1}] \quad (2.2)$$

Dalle onde sonore deriva il concetto di intensità acustica (I), o sonora, definita come il rapporto tra potenza del suono (energia nell’unità di tempo P) e superficie (A) attraversata:

$$I = P/A \quad [Wm^{-2}] \quad (2.3)$$

e i fenomeni di interferenza e riflessione di onde sonore. L’equazione 2.3 sottende il concetto di trasporto di energia da parte di un’onda, poiché la potenza si riferisce a un’energia nell’unità di tempo.

La presentazione degli argomenti di ottica geometrica e fisica si struttura in modo simile per alcuni libri di testo analizzati [57–60]. In una prima parte è descritta la luce come un’onda e viene introdotta l’approssimazione di propagazione rettilinea, per cui è ipotizzato che la dimensione di un ostacolo lungo il percorso dell’onda sia trascurabile rispetto alla lunghezza d’onda di quest’ultima. In questo modo si può tralasciare il comportamento ondulatorio, introducendo la modellizzazione ‘a raggi’ della radiazione. I raggi si

⁹Valori presi dal manuale di Cutnell “Elementi di Fisica” [66] capitolo sulle equazioni di Maxwell e le onde elettromagnetiche.

propagano in linea retta e permettono di descrivere i fenomeni di riflessione speculare e rifrazione da un punto di vista geometrico. La velocità di propagazione dell'onda è pari alla velocità della luce nel vuoto ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$) oppure, se si propaga in un mezzo, dipende dalla relazione:

$$v = c/n \quad [ms^{-1}] \quad (2.4)$$

in cui n è l'indice di rifrazione del mezzo. Alcuni testi [58,60,61] specificano fin da subito il fatto che la luce abbia anche una natura corpuscolare. Nella prima parte sono introdotti i concetti di sorgente e di corpo illuminato, con esempi relativi alla radiazione visibile e alla visione dell'occhio umano. Il modello di visione è esplicitato solo da alcuni manuali [57,59,60,62], in altri rimane sottinteso. Segue la distinzione tra riflessione speculare e diffusione, determinata in base alle caratteristiche della superficie del corpo irraggiato. Secondo il rapporto tra dimensioni delle irregolarità della superficie (d) e lunghezza d'onda incidente, infatti, si ha riflessione in una direzione privilegiata ($d < \lambda$), oppure in una direzione qualsiasi entro una zona emisferica sovrastante il punto di interazione ($d > \lambda$). I corpi sono suddivisi in opachi, trasparenti e traslucidi, in base alla loro interazione con la radiazione visibile. Si studiano poi i fenomeni di riflessione e rifrazione e le leggi associate, ad esempio la legge di Snell-Cartesio che lega l'indice di rifrazione agli angoli di incidenza e rifrazione di un raggio che si propaga in due mezzi differenti. Legato alla rifrazione vi è il fenomeno della dispersione della radiazione visibile, in particolare è citato da alcuni libri [57,59,60] l'esperienza del prisma di Newton. L'argomento introduce una dipendenza tra lunghezza d'onda della radiazione incidente e indice di rifrazione del mezzo. I colori sono quindi presentati come componenti della radiazione visibile (o luce bianca), ognuna caratterizzata da una diversa lunghezza d'onda e quindi deviata con un diverso angolo di rifrazione θ all'interno del prisma. In particolare è sottolineato il fatto che maggiore è la lunghezza d'onda, minore è la deviazione del raggio rispetto alla normale alla superficie del prisma.

Alcuni libri [59,60,62] precisano che un corpo appare di un determinato colore a causa della diffusione dello spettro non assorbito, in particolare esso appare bianco nel caso in cui diffonda tutto lo spettro visibile, nero altrimenti.

Nella seconda parte sull'ottica fisica è espressa la relazione tra frequenza e lunghezza d'onda per un'onda elettromagnetica:

$$f = c/\lambda \quad [Hz] \quad (2.5)$$

Vengono poi presentati i fenomeni di interferenza e diffrazione per un'onda elettromagnetica, utilizzando anche analogie con onde piane di altra natura, ad esempio onde sulla superficie dell'acqua.

Indagando in senso didattico come gli argomenti precedentemente citati siano trattati nei manuali scolastici, si sono notate alcune criticità.

Innanzitutto si è osservato che la trattazione della visione e dei colori (sintesi additiva e sottrattiva) trova poco spazio. I concetti vengono condensati in una singola frase [57–61], oppure non se ne fa cenno. Per quanto riguarda la radiazione visibile, da un’analisi generale appare evidente la discontinuità nella trattazione del tema, che si riscontra anche per le radiazioni non visibili, come si vedrà più avanti. L’argomento ‘luce’ è trattato prima di introdurre formalmente le onde elettromagnetiche e lo spettro elettromagnetico, che avverrà solamente nei manuali di quinta, senza alcun rimando ai capitoli precedenti. La trattazione separata della radiazione visibile rispetto alle altre onde elettromagnetiche, potrebbe dare l’impressione che sia una banda privilegiata e con proprietà e caratteristiche diverse. È opportuno tener presente che altri tipi di radiazioni, ad esempio le microonde, hanno proprietà simili di riflessione, rifrazione, interferenza e diffrazione. Una presentazione introduttiva delle diverse bande spettrali e delle caratteristiche generali delle onde elettromagnetiche potrebbe aiutare a superare questa concezione. Anche l’utilizzo di esperimenti¹⁰ riguardo l’ottica geometrica e fisica di bande spettrali diverse da quella visibile, potrebbe dare un’idea di unitarietà tra le radiazioni elettromagnetiche. Infatti, nonostante nomi e comportamenti diversi nell’interazione con la materia, tutte le radiazioni rappresentano lo stesso fenomeno fisico, ovvero onde elettromagnetiche in grado di trasportare energia e quantità di moto, generate dalla perturbazione del campo elettromagnetico e che si propagano ortogonalmente alla direzione di variazione di campo elettrico e magnetico. Sicuramente la radiazione visibile è importante per la vita quotidiana, dato che l’evoluzione ha favorito l’adattamento dell’occhio umano affinché potesse rivelare e processare principalmente lo spettro visibile, ma non è l’unica direzione in cui ha operato l’evoluzione. Ad esempio altre specie hanno sviluppato recettori sensibili a lunghezze d’onda dell’ultravioletto, le api, e dell’infrarosso lontano, individui della famiglia delle Crotalinae, come i serpenti a sonagli.

Nei libri analizzati si definisce la radiazione visibile in vari modi come ‘onde luminose’ [58–60], con cui vengono definite anche altre bande spettrali oltre a quella visibile, ‘raggio luminoso’ [59], ‘luce visibile’ [58], ‘raggi del Sole’ [58], ‘spettro luminoso’ [58]. Il termine esatto, che potrebbe essere introdotto fin da subito per evitare confusione è ‘radiazione visibile’, nonostante il termine ‘luce’ non sia errato. Quest’ultimo, infatti, è un termine che, teoricamente parlando, potrebbe essere utilizzato in modo più generale rispetto all’utilizzo che se ne fa nei manuali scolastici e nel quotidiano. Si potrebbe usare per tutte le bande spettrali, poiché ci si riferisce alla costante universale c come velocità della luce nel vuoto. Potrebbe essere utile introdurre un discorso generale sulle radiazioni elettromagnetiche e poi concentrarsi sulla radiazione visibile. Oppure proporre un percorso in cui si presentano tutte o molte bande spettrali, compresa la radiazione visi-

¹⁰Si può far passare un fascio di microonde per una fenditura singola o doppia e assistere alla diffrazione o interferenza della radiazione, tramite opportuni rivelatori. Anche il fenomeno della riflessione e rifrazione possono essere indagati con le microonde. In particolare la rifrazione si osserva ponendo davanti al fascio un materiale plastico, che risulta opaco nel visibile.

bile, in modo consecutivo (come è stato fatto nello spettacolo e nel tutorial descritti in questa tesi), ma trattando ognuna singolarmente. Parlare in un primo momento di luce e introdurre poi il termine ‘radiazione’ potrebbe creare confusione, soprattutto tenendo conto del connotato negativo che assume a volte questa parola. La radiazione visibile, inoltre, ha la caratteristica di essere formata da “[...] una sovrapposizione di diversi colori dello spettro” [60]. In alcuni libri si trova confusione nell’introdurre l’argomento dei colori. A volte il termine ‘colore’ è usato come sinonimo di lunghezza d’onda o di frequenza [57, 59–61, 67], si legge, ad esempio, la seguente frase nel libro “Fisica: Lezioni e Problemi”: “[...] l’indice di rifrazione dipende dal colore della luce incidente”. Un’altra fonte di incomprensione, in contrapposizione a quanto si trova sui libri, può nascere dall’utilizzo quotidiano del termine ‘colore’, spesso associato alle proprietà di un oggetto e pensato come intrinseco, quando in realtà si riceve dall’oggetto uno spettro di più frequenze che sono interpretate dall’occhio in modo univoco, restituendo un colore. Il colore, quindi, non è una grandezza fisica, non è nemmeno una proprietà intensiva della materia, come si legge in “Fisica per la Scuola Superiore” (pagina 183), o della radiazione visibile, ma dell’occhio umano. Quest’ultimo, infatti, grazie ai fotorecettori diurni (coni), ha una sensibilità diversa alle varie lunghezze d’onda del visibile e permette di associare un colore a un corpo in base allo spettro di radiazione che giunge ad esso da quel corpo. Se da un punto provengono più lunghezze d’onda, l’occhio non è in grado di distinguere simultaneamente le singole λ , per questo compie una sintesi additiva su di esse.

Sintesi additiva e sottrattiva non vengono accennate nei libri di testo delle superiori presi in considerazione per questo lavoro. In uno dei libri [58] si è trovato il termine ‘sintesi’ riferito alla composizione della radiazione visibile nella spiegazione dell’esperimento di Newton di dispersione con il prisma. La luce è percepita come ‘bianca’ dall’occhio umano, perché nel medesimo punto della retina incide uno spettro contenente contemporaneamente tutte le lunghezze d’onda. L’occhio, quindi, mette in atto una sintesi additiva di tutte le λ , restituendo la percezione del bianco. Chiamandola luce bianca, senza dare spiegazione in termini di sintesi additiva, si rischia di far credere agli studenti che la luce abbia proprietà di colore, rinforzata dall’utilizzo ricorrente di termini quali ‘luce colorata’ [58], ‘luce rossa’ [57], “l’energia (di una certa banda del visibile) [...] dipende dal suo colore” [65].

Il concetto di ‘sorgente di luce’ in alcuni libri [57, 59, 60] è introdotto antecedentemente all’argomento elettromagnetismo, similmente ai termini ‘luce’ e ‘colore’. Anche in questo caso viene dato un ruolo centrale alla percezione umana, rischiando di dare l’idea che una sorgente sia solamente qualcosa che appare ed emette radiazione nel visibile. Questa concezione è incrementata anche dal fatto che nei libri sono forniti esempi di sorgenti quali: il Sole, una lampadina, il fuoco, passando il concetto che le sorgenti di radiazione siano tutti e soli elementi brillanti per l’occhio umano e soprattutto siano oggetti inanimati naturali o artificiali. In realtà ogni corpo con una temperatura è una

sorgente in una certa banda spettrale. Il corpo umano, ad esempio, è sorgente di radiazione infrarossa con picco di emissione nell'intervallo di lunghezze d'onda di 3-14 μm [68].

Per quanto riguarda la monocromaticità delle sorgenti non viene precisato il carattere ideale e modellizzato del termine, in quanto nel mondo reale non esistono sorgenti puramente monocromatiche, dato che ogni sorgente o corpo reale emette, o riflette, uno spettro di radiazione elettromagnetica, ovvero un intervallo di frequenze, detto larghezza di banda, che può essere più o meno ampio. Nei libri di testo delle superiori considerati si parla di radiazione non monocromatica, soprattutto riferita alla radiazione visibile [58], ma non si definisce cosa sia una sorgente monocromatica. In particolare si ritrova il termine usato negli esercizi [57], senza specificare nella teoria che il fenomeno viene modellizzato per poter risolvere i problemi diminuendone la complessità.

Il meccanismo di visione è accennato in molti libri [57–60] e rappresentato con immagini simili a quella in Figura 5, in cui l'occhio ha chiaramente la funzione di rivelatore della radiazione. Benché la freccia che congiunge la sorgente con il corpo illuminato sia intuitiva, per quanto detto in precedenza, non è chiaro il motivo per cui un'altra freccia congiunga il corpo illuminato e l'occhio. Non sono introdotti i fenomeni di riflessione e assorbimento della radiazione visibile da parte del corpo. Potrebbe, quindi, non essere chiaro come il modello rappresentato in Figura ?? si possa legare al fatto che il mondo si veda a colori e soprattutto come si possa ricollegare con un discorso più generale in cui si prenda in considerazione l'interazione con altre bande spettrali. Infine è pratica comune di alcuni libri [58–61, 65] utilizzare come riferimento per vari argomenti la lunghezza d'onda al posto della frequenza, per caratterizzare una radiazione elettromagnetica. Tale trattazione può avere dei rischi, in quanto la lunghezza d'onda, in base all'indice di rifrazione, cambia il suo valore se il fenomeno avviene in un mezzo, mentre la frequenza rimane costante.

La differenza tra il comportamento invariante della frequenza e dipendente dal mezzo della lunghezza d'onda potrebbe essere esplicitata mostrando esperimenti a supporto di tale affermazione, il prisma di Newton è esemplificativo. Si potrebbe anche proporre il seguente esercizio, in cui venga ricavata la λ dalla formula della velocità di propagazione dell'onda nel mezzo. L'esercizio è il seguente:

$$\begin{cases} \nu_{mezzo} = \frac{c}{n} = \lambda_{mezzo} \cdot f \\ f = \frac{c}{\lambda_{vuoto}} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\Rightarrow \lambda_{mezzo} = \frac{\lambda_{vuoto}}{n} \quad [m] \quad (2.7)$$

Inoltre si potrebbe utilizzare, fin da subito e quando possibile, la frequenza al posto di λ , in modo da garantire una trattazione indipendente dal mezzo di propagazione dell'onda elettromagnetica.

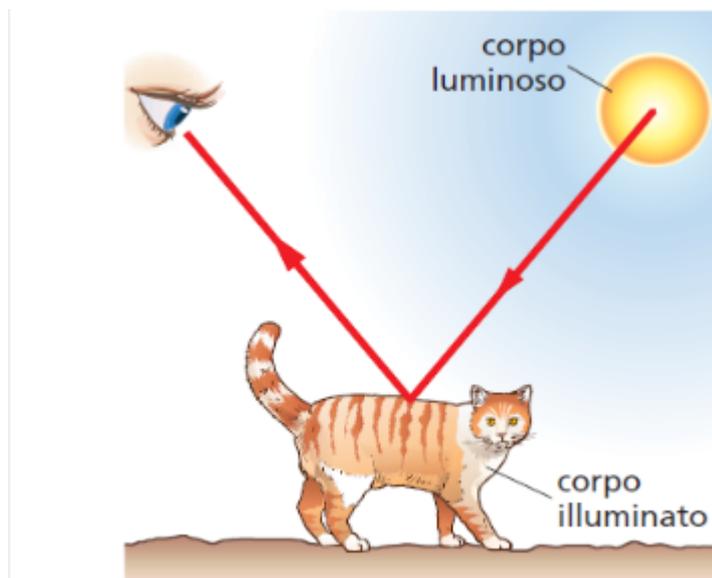


Figura 2.6: Immagine del modello di visione come rappresentato nel libro “L’Amaldi 2.0 - Capitolo 17” [60]

2.3.2 Spettro elettromagnetico in particolare Radiazione Ultravioletta e Infrarosso

Nei libri di testo di Liceo Scientifico [59–61, 63, 65, 66], la classificazione delle onde elettromagnetiche, con caratteristiche simili, in bande ben distinte da intervalli di λ e ν , è chiamato spettro elettromagnetico. Gli studenti di liceo che si avvicinano a tale argomento, generalmente, hanno già trattato le leggi dell’elettromagnetismo, riassunte nelle equazioni di Maxwell, e le caratteristiche delle onde elettromagnetiche. Qualche libro [20] [21] parla di onde elettromagnetiche già nel capitolo dell’ottica geometrica e fisica dei libri di terza superiore, quando viene introdotta la radiazione visibile.

Dagli argomenti affrontati in terza, gli studenti conoscono anche le proprietà dei fenomeni ondulatori e la relazione 4, che coinvolge le grandezze che caratterizzano un’onda: λ , f e c . Dovrebbero sapere, quindi, che la radiazione, perturbazione del campo elettromagnetico, si propaga in modo ondulatorio alla velocità c nel vuoto. Sanno anche, dalla fisica ondulatoria, che un’onda trasporta energia e quantità di moto. Il modulo e la direzione del flusso di energia associato a un’onda elettromagnetica, o la potenza irradiata per unità di superficie nell’unità di tempo, è il vettore di Poynting (S). Nei libri scolastici è indicato con I (intensità dell’onda elettromagnetica), modulo del vettore

S :

$$I = c \epsilon_0 E^2 = c / \mu_0 B^2 \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (2.8)$$

con ϵ_0 costante dielettrica del vuoto, μ_0 permeabilità magnetica del vuoto, E modulo del campo elettrico e B modulo del campo magnetico.

Nei libri scolastici, prima dello spettro elettromagnetico, viene spiegato come si genera un'onda elettromagnetica, ovvero grazie a cariche accelerate che determinano la variazione del campo elettrico e magnetico. Inoltre è spiegato come si possano produrre onde in laboratorio tramite un circuito oscillante LC (induttore-condensatore), in cui la corrente è variabile nel tempo. Alcuni libri [59–61, 64] citano l'antenna come esempio di emettitore e ricevitore di radiazione elettromagnetica.

Lo spettro elettromagnetico viene trattato da molti dei libri analizzati come parte conclusiva del capitolo sulle onde elettromagnetiche. La presentazione è simile per molti libri, con una breve introduzione, seguita da un'immagine rappresentante la divisione in intervalli di lunghezza d'onda e frequenza. Alcuni libri [58–60, 64, 67] a ogni banda associano anche la figura di un elemento correlato alla banda spettrale presa in considerazione. Infine vi è la presentazione dettagliata di ogni banda, esplicitandone l'intervallo di lunghezza d'onda e frequenza e alcune applicazioni. La spiegazione della polarizzazione della radiazione conclude il capitolo.

Dall'analisi dei libri si è osservato che l'immagine legata allo spettro elettromagnetico non sempre risulta significativa per scopi didattici. Nel libro “Fisica! Pensare l'Universo” [67] si ritrova a pagina 67 una rappresentazione poco chiara dello spettro elettromagnetico, esemplificativa, però, di molte problematiche che si riscontrano sull'argomento nei libri di testo. Le bande spettrali sono accompagnate da disegni che dovrebbero permettere un collegamento immediato della radiazione in questione con l'esperienza quotidiana. Eppure le immagini rischiano di creare confusione agli studenti nell'identificare cosa sia sorgente di quella radiazione e cosa, invece, la utilizzi per il suo funzionamento. In particolare nel libro citato precedentemente si crea ambiguità usando immagini di antenne, televisori e radio associate alla radiazione radio. Questi dispositivi non sono generatori di radiazione, ad eccezione delle antenne irraggianti, ma piuttosto la ricevono e la trasformano, o la decodificano, in un segnale differente. La radiazione visibile è rappresentata, al contrario delle altre, tramite lo spettro dei colori rifratti da un prisma, una ulteriore suddivisione della banda visibile. La rappresentazione di una lampadina a incandescenza o del Sole potrebbe esser più significativa, in quanto entrambi emettono principalmente in quella banda spettrale. Inoltre la suddivisione non è compiuta per altre bande, quali la banda dell'infrarosso, che potrebbe essere divisa tra vicino e lontano infrarosso (fa eccezione il testo del Walker [64]), o la banda ultravioletta, in cui si potrebbe fare la distinzione tra UVA, UVB e UVC. Accanto all'intervallo della radiazione ultravioletta, invece, è raffigurata una persona su una sdraio, a indicare che gli UV stimolano l'aumento di produzione di melanina da parte delle cellule del derma umano, per proteggerlo dal-

l'insorgere di danni cutanei. Si perde anche in questo caso la coerenza di intenti, poiché l'interazione della radiazione UV con la pelle umana non ha nulla a che vedere con l'origine o l'applicazione tecnologica della radiazione stessa. Si poteva optare anche in questo caso per una rappresentazione del Sole, sorgente anche di ultravioletti, o di una lampada di Wood (luce nera). Alcune radiazioni, invece, non hanno disegni affiancati, ad esempio la radiazione gamma, o, in un altro libro [60], la radiazione infrarossa e microonde. La mancanza potrebbe portare gli studenti a pensare che quelle bande non abbiano sorgenti o applicazioni utili. Invece la radiazione gamma è generata da sorgenti astrofisiche oppure è prodotta nel processo di annichilazione tra particella e sua antiparticella. Le microonde sono generate nei forni a microonde da un dispositivo chiamato magnetron, mentre la radiazione infrarossa è generata da una sigaretta accesa, nel caso di radiazione vicino infrarossa, o da un qualsiasi corpo a temperatura ambiente o di qualche decina di gradi superiore, se si parla di lontano infrarosso. In questa categoria rientra anche l'uomo, che potrebbe essere una adeguata rappresentazione di una sorgente nel lontano infrarosso, ma non è citato nei libri presi in considerazione.

Trovano ampia trattazione le applicazioni tecnologiche e ingegneristiche delle radiazioni spettrali, dando l'idea che siano proprie solamente di oggetti artificiali e inanimati. In particolare della radiazione ultravioletta è sottolineata la pericolosità per l'uomo in molti libri [60, 61, 64–66], ma pochi parlano dei danni in relazione alla dose assunta. Nessun cenno è fatto all'utilizzo della radiazione UVC come germicida.

I libri analizzati, ad eccezione del libro “Fisica per la Scuola Superiore” [58], non propongono la classificazione delle radiazioni in ionizzanti e non ionizzanti, ovvero con energia tale da poter ionizzare un atomo interagendo con esso. In alcuni testi [59, 60, 67] si definisce la radiazione gamma come radiazione ionizzante, senza specificarlo per le altre bande spettrali. Si ritiene che la classificazione possa essere introdotta già dalle superiori, perché aiuterebbe gli studenti a sviluppare un pensiero critico riguardo alla pericolosità delle radiazioni, fornendo loro dei criteri oggettivi su cui basare il loro giudizio e con cui interpretare il tono, spesso sensazionalistico, dell'attualità.

Quasi tutti i libri analizzati compiono una trattazione microscopica per spiegare l'origine delle radiazioni elettromagnetiche presentate. Spesso, però, la trattazione semplifica argomenti molto più ampi e si confonde con la trattazione macroscopica. Ad esempio per quanto riguarda la radiazione infrarossa, nel libro “Fisica! Pensare l'Universo” [67] si legge: “La radiazione infrarossa si origina principalmente per emissione termica. Tutti i corpi, infatti, a causa dell'agitazione termica delle molecole, irradiano energia elettromagnetica nell'infrarosso”. Questa frase può essere fuorviante per gli studenti, dato che non sono chiare sia le interconnessioni causa-effetto tra radiazione infrarossa, radiazione termica e agitazione delle molecole che i livelli di lettura microscopica-macroscopica. Infatti la prima parte si riferisce a un fenomeno macroscopico, ovvero l'emissione di radiazione termica da parte dei corpi, mentre la seconda si riferisce a un piano microscopico, in quanto l'agitazione termica causa l'emissione. Non è spiegato, però, perché i corpi emettano radiazione e perché la banda di emissione sia proprio quella infrarossa.

Infatti non vengono presi in considerazione il fattore scatenante dell'emissione, ovvero l'assorbimento di radiazione elettromagnetica, la ricerca di un equilibrio radiativo e il rapporto tra banda del picco di emissione e temperatura. Inoltre, non avendo ancora trattato il fenomeno della quantizzazione, il concetto di emissione da parte di molecole a causa della loro eccitazione e diseccitazione è privo di significato fisico, al di là delle concezioni di senso comune associate.

Una considerazione simile può essere fatta anche per quanto riguarda il fenomeno della fluorescenza, citata in alcuni libri [67] in relazione all'interazione della radiazione ultravioletta con alcuni materiali. L'emissione di radiazione visibile avviene, infatti, in seguito all'assorbimento della radiazione ultravioletta da parte degli atomi della sostanza, che causa il passaggio di elettroni a un livello quantico superiore. Per fenomeni di diseccitazione non radiativa, però, gli elettroni transitano a livelli quantici inferiori e quindi si diseccitano emettendo radiazione nello spettro del visibile.

Le bande spettrali sono caratterizzate da valori differenti di frequenza, o lunghezza d'onda, ma fanno tutte parte dello stesso fenomeno fisico, ovvero propagazioni di perturbazioni di campo elettrico e magnetico. Nonostante questo ci si riferisce ad esse, anche in un ambito quotidiano, in modi diversi, chiamandole 'onde', 'radiazioni', 'raggi', 'luce', come succede nel testo dell'Amaldi [60], rischiando di creare delle divisioni nette piuttosto che un'unificazione. Potrebbe risultare utile per una comprensione più significativa dell'argomento chiamare, almeno in fase introduttiva, tutti gli intervalli 'radiazioni' oppure 'luce', in modo da favorire anche una continuità con quanto visto in precedenza nell'ottica geometrica sulla radiazione visibile.

Infine una problematica fondamentale si riscontra nella frammentazione delle bande spettrali lungo l'intero percorso scolastico, come già accennato per la radiazione visibile e come si vedrà più avanti per la radiazione infrarossa. Ad esempio alcune radiazioni, come le microonde, sono riprese nei capitoli finali dei testi di quinta Liceo Scientifico, riguardanti la cosmologia e l'astrofisica [64,67]. Utilizzando un'organizzazione differente dei contenuti potrebbero risolversi alcuni dei problemi qui discussi, in particolare se la trattazione della radiazione visibile avvenisse insieme a quella delle altre bande spettrali, e non prima, si inserirebbe in un quadro generale, perdendo la sua posizione privilegiata. L'introduzione allo spettro e alle onde elettromagnetiche si ritiene possa essere accennata anche in terza superiore, nel capitolo sull'ottica geometrica e fisica, in modo da sottolineare il fatto che la trattazione valga per tutte le radiazioni elettromagnetiche.

2.3.3 Interazione radiazione non ionizzante e materia: trasmissione, assorbimento, riflessione ed emissione della radiazione

Nei libri di testo di Liceo Scientifico non si trovano molti riferimenti all'interazione radiazione-materia. Alla parola 'interazione' non è assegnato un significato specifico, ma in alcuni casi [58, 59] è creata un'immagine mentale di un raggio che colpisce un corpo, come se si trattasse di un urto meccanico.

Gli studenti possono avere un'idea generale del significato di 'trasmissione', 'assorbimento' e 'riflessione', poiché ritornano in vari capitoli, soprattutto nel programma dedicato al triennio del Liceo Scientifico.

Dal capitolo sull'ottica geometrica e fisica nel libro di terza liceo si conoscono i termini di 'opacità' e 'trasparenza', in relazione al comportamento di corpi interposti a un fascio di radiazione. Inoltre si parla spesso di mezzi trasparenti nella descrizione del fenomeno della rifrazione [57, 58, 60, 62], in quanto il raggio di luce si propaga in mezzi di indice di rifrazione diverso, ma con alta trasmittanza alla lunghezza d'onda della radiazione. La trasmittanza in questo caso è il coefficiente che indica il rapporto tra il flusso di radiazione trasmesso dal corpo e flusso totale di radiazione incidente, e dipende dalla banda spettrale di osservazione, ma non è utilizzato nei libri scolastici.

Il fenomeno dell'assorbimento è trattato da un punto di vista energetico nel capitolo sulla termodinamica [58, 61]. Si legge, ad esempio, che le macchine termiche assorbono energia da una sorgente a temperatura maggiore e la cedono ad una sorgente a temperatura minore dopo aver compiuto lavoro sul sistema. La loro è una trasformazione ciclica dove vale la conservazione dell'energia assorbita e ceduta, in modalità calore e lavoro, dalla macchina. L'assorbimento è inteso, quindi, come una acquisizione di energia da parte di un corpo, causato dalla sua differenza di temperatura rispetto a un altro corpo e secondo le regole imposte dal secondo principio della termodinamica. Il fenomeno dell'assorbimento da un punto di vista radiativo è trattato nel capitolo sull'ottica geometrica [60, 62], in particolare in relazione alla sensazione di colore. L'assorbimento selettivo da parte di un corpo di alcune bande spettrali e la riflessione di altre, infatti, influisce sulla percezione da parte dell'uomo del suo colore.

Il fenomeno della riflessione è introdotto con le onde sonore, nel libro di terza Liceo Scientifico, tramite due esempi: l'eco e le onde stazionarie. Solamente più avanti con le onde elettromagnetiche il termine acquista due diverse accezioni. Infatti, in base alla direzione di propagazione del raggio riflesso, si distingue tra riflessione speculare e diffusa, descritte nel primo paragrafo. Nel capitolo sull'ottica geometrica di molti libri di testo [57–62] il termine 'riflessione' è utilizzato principalmente per indicare la riflessione speculare e non quella diffusa. Alcuni libri [57, 59, 60] esplicitano la relazione tra diffusione e la capacità dell'occhio di poter vedere il mondo circostante, poiché l'occhio rivela principalmente la radiazione diffusa, quella che non è stata assorbita o trasmessa dello spettro incidente su

di un corpo.

La trattazione, quindi, presenta delle discontinuità e non vi è nessun libro tra quelli analizzati che riservi un paragrafo per la spiegazione, anche solamente fenomenologica, dei tre concetti, in relazione all'interazione tra radiazione e materia. Non si trova nemmeno nel capitolo sullo spettro elettromagnetico [59, 63, 65, 66], affrontato in quinta Liceo Scientifico, in cui i concetti potrebbero essere ampliati sulla base delle conoscenze acquisite: teoria delle onde elettromagnetiche, caratteristiche delle diverse bande spettrali, conservazione dell'energia trasportata dall'onda incidente su un corpo.

Dall'analisi dei testi sono emerse alcune criticità, che verranno spiegate in seguito.

I termini di opacità e trasparenza sono definiti nei libri in relazione alla radiazione visibile [57, 59, 60], non sono utilizzati per altre bande spettrali. Per questo può crearsi nell'immaginario degli studenti l'idea che le caratteristiche di trasparenza e opacità di un oggetto siano assolute e determinate a partire dalla nostra percezione in banda visibile. Il concetto di trasparenza, inoltre, non è definito in termini di rapporto tra flusso di radiazione trasmesso e incidente, ma in modo più semplicistico, come capacità intrinseca di un corpo di farsi attraversare dalla radiazione [57, 58, 60]. In generale i libri di testo riportano come esempi più comuni di corpi trasparenti i seguenti elementi: l'acqua, il vetro [58–60, 62], il cristallino dell'occhio [61], le lenti ottiche [57, 58, 60], associando la trasparenza solamente all'esperienza umana. L'utilizzo anche di frasi come “sostanza trasparente” [60] rafforza il concetto che la trasparenza sia una proprietà assoluta del corpo, non dipendente, quindi, dalla lunghezza d'onda di riferimento. L'opacità di un corpo a un determinato intervallo di lunghezze d'onda dipende dalle sue caratteristiche spettrali di assorbimento e di riflessione. Nei libri di testo analizzati si definisce solo come la capacità del corpo di bloccare la radiazione e di non lasciarsi attraversare [58, 60].

Si rischia di passare l'idea che la radiazione visibile si discosti dalle altre radiazioni e che sia in una posizione privilegiata, dato che determina la suddivisione assoluta dei corpi in trasparenti e opachi. Invece alcuni materiali possono avere comportamenti nettamente differenti se illuminati da radiazioni diverse, ad esempio il cristallino trasmette la radiazione visibile, ma assorbe la radiazione ultravioletta ed è altamente riflettente alla radiazione nel vicino infrarosso. L'acqua e il vetro sono opachi alla radiazione nel vicino e lontano infrarosso, la Coca Cola, invece, è trasparente alla radiazione nel vicino infrarosso, nonostante sia opaca nel visibile. Nei libri di testo delle superiori citati si trova poco o niente di queste considerazioni.

L'unica eccezione a quanto detto in precedenza, si trova in alcuni libri [59, 60, 66] dove si accenna all'assorbimento da parte dell'atmosfera terrestre della radiazione infrarossa e delle finestre spettrali in cui è trasparente, associando questi termini a bande spettrali diverse da quella visibile.

Rimane il rischio, però, che questo fenomeno venga ritenuto un caso a parte per gli studenti, che non contribuisca a far nascere in loro l'idea che ogni corpo, anche oggetti di uso quotidiano ed esseri viventi, abbia una curva di trasmissione, assorbimento e riflessione

in funzione della lunghezza d'onda o della frequenza, come succede per l'atmosfera.

Si pensa che sia utile, in base a quanto riscontrato nei libri di testo, soffermarsi maggiormente sul tema dell'interazione radiazione-materia e sul diverso comportamento che assumono i materiali se illuminati con radiazioni elettromagnetiche diverse. Esempio è l'approccio attuato dallo spettacolo e dal Laboratorio PLS descritti in questo lavoro in cui si è presentato il diverso comportamento di materiali e oggetti del quotidiano se inquadrati con una telecamera operante nel vicino e lontano infrarosso e nell'ultravioletto¹¹.

Una trattazione formale che utilizzi questo metodo, però, richiederebbe l'introduzione dei coefficienti spettrali di assorbimento (α_ν), trasmittanza (τ_ν) e riflettanza (ρ_ν), che indicano il rapporto tra il flusso incidente di radiazione e il flusso, rispettivamente, assorbito, trasmesso o riflesso da un certo corpo, in base alle sue proprietà e alla frequenza di osservazione. La somma dei coefficienti deve restituire il flusso incidente iniziale. In mancanza di questa informazione, gli studenti potrebbero non percepire l'aspetto complementare e simultaneo di questi fenomeni d'interazione, che risiede nella conservazione dell'energia trasportata dal flusso di radiazione incidente:

$$\alpha_\nu + \tau_\nu + \rho_\nu = 1 \quad (2.9)$$

L'Equazione 2.9 si può anche scrivere utilizzando la grandezza intensità (I) definita nell'Equazione 2.8:

$$\alpha_\nu I_\nu + \tau_\nu I_\nu + \rho_\nu I_\nu = I_{\text{incidente}} \quad (2.10)$$

2.3.4 Radiazione Termica: legge di Stefan-Boltzmann e irraggiamento

La radiazione termica è trattata solitamente nei libri del biennio del Liceo Scientifico, in cui un capitolo è dedicato alla termologia, a volte ripreso il terzo anno con la termodinamica.

Nei capitoli dei libri analizzati [59–61, 63, 69] si introduce la radiazione termica in modo simile, definendo innanzitutto i concetti di temperatura (T) e calore (Q). La prima è presentata come una variabile macroscopica di stato, inizialmente viene tralasciata la sua trattazione microscopica, che la lega all'energia cinetica media traslazionale delle particelle di un gas ideale. Il calore è presentato come una variabile di processo, coinvolta nella modalità di scambio di energia tra corpi a temperatura diversa. La legge fondamentale della termologia è introdotta per fornire la relazione tra il calore scambiato da

¹¹La termocamera rivela il lontano infrarosso di cui molti oggetti ed esseri viventi sono sorgenti, le telecamere UV e vicino infrarossa, invece, necessitano una illuminazione degli oggetti con le rispettive radiazioni per poter restituire immagini significative.

un corpo e la variazione della sua temperatura (ΔT):

$$Q = c_s m \Delta T \quad [J] \quad (2.11)$$

in cui c_s è il calore specifico del corpo, m la massa del corpo e T la sua temperatura. È definito, poi, il concetto di equilibrio termico, o principio zero della termodinamica, enunciato in questo modo: se ciascuno dei due sistemi A e B è in equilibrio termico con un terzo sistema C, allora anche A e B sono in equilibrio termico tra loro.

Il capitolo procede presentando le diverse modalità di propagazione del calore, tra cui l'irraggiamento, scambio di energia dovuto a onde elettromagnetiche, ed enunciando la legge di Stefan-Boltzmann. La legge instaura la dipendenza della potenza emessa da un corpo nel tempo (P) dalla quarta potenza della sua temperatura e si trova scritta nei manuali scolastici in questo modo:

$$P = e \sigma A T^4 \quad [W] \quad (2.12)$$

con e chiamata emittività (o emissività), σ pari alla costante di Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$) e A la superficie radiante del corpo. Gli studenti, quindi, già dal biennio scientifico sono a conoscenza del fatto che un corpo emetta radiazione in base alla propria temperatura e che vi possa essere uno scambio di energia tra copri non a contatto e non in equilibrio termico tramite il meccanismo dell'irraggiamento. Nel momento in cui è formalizzata la radiazione termica nei libri di testo, non si introducono la legge dello spostamento di Wien, mostrata in precedenza, e la funzione di Planck. Quindi, nonostante sia spiegato in termologia il motivo per cui un corpo emetta radiazione (la sua temperatura), nulla è detto sull'intensità massima di radiazione emessa e sullo spettro di emissione.

Nei libri analizzati che trattano l'argomento [59, 60, 64, 66, 69] la radiazione termica, oltre che nella parte di termologia, è ripresa con lo spettro elettromagnetico e nella parte introduttiva alla meccanica quantistica, come spettro di emissione di corpo nero.

La trattazione, quindi, è ripresa più volte nel corso del programma proposto dai testi, senza, però, creare continuità tra quanto detto in precedenza e i nuovi elementi presentati. Inoltre spesso vi è la tendenza ad accumunare la radiazione termica con la radiazione infrarossa. In un libro [59], ad esempio, il fenomeno è chiamato "radiazione infrarossa", dando l'idea che la radiazione termica cada solamente nella banda infrarossa dello spettro.

In termologia si trova il collegamento tra temperatura e colore di un materiale, ad esempio Amaldi scrive [69]: "Se scaldiamo un pezzo di metallo [...] verso i 1300 K si colora di rosso" e poi "i corpi caldi emettono luce visibile", in cui non è precisato rispetto a cosa i corpi possano essere ritenuti caldi e soprattutto perché emettano proprio radiazione visibile. L'emissione dei corpi viene presentata quasi come monocromatica, nonostante avvenga in uno spettro di frequenze molto ampio. La relazione non è chiara, perché

ancora mancano le basi teoriche, infatti non si conosce la relazione tra temperatura e frequenza del picco di emissione (legge dello spostamento di Wien). L'unica legge formalmente presentata è la legge di Stefan-Boltzmann. Il termine e (emittività o emissività) della legge non viene definito in termini di rapporto tra potenza totale emessa dal corpo preso in considerazione e quella emessa da un corpo ideale alla stessa temperatura, ma solo attribuendogli un valore pari a 1 “se un corpo è nero” [69]. Non sapendo ancora cosa sia un corpo nero, è naturale che gli studenti associno il termine a un oggetto che appare nero ai nostri occhi, piuttosto che al suo significato più generale, problematica che si trova anche in letteratura [56] e dai questionari.

In molti libri la spiegazione della radiazione infrarossa si basa sulla sua relazione con la temperatura. Si mostrano [59,60,67] immagini termografiche e si descrivono come immagini in infrarosso che mettono in evidenza la distribuzione di temperatura di un corpo. Questa presentazione è più ingegneristica che fisica, poiché lo strumento, la termocamera, rileva la potenza emessa per unità di superficie che incide su un pixel¹² del rivelatore, non la temperatura. Soltanto grazie a un algoritmo la termocamera può ricavare una temperatura dalla radiazione rivelata, in base alla dipendenza tra potenza emessa e temperatura. Va sottolineato, però, che la relazione temperatura-potenza emessa per corpi reali non è sempre immediata, poiché dipende fortemente dal tipo di materiale, a cui sono assegnate emissività diverse. Ad esempio la termocamera restituisce un valore di temperatura inferiore a quello reale per materiali metallici, quali l'alluminio e il ferro, poiché, se lucidi, la loro emissività nel lontano infrarosso è circa 0.1-0.2 e la riflettanza molto elevata. Questa precisazione non si trova nei libri di testo analizzati. Un'altra applicazione tecnologica delle radiazioni nel lontano infrarosso che si ritrova in alcuni testi [60,66], è l'utilizzo di termometri da orecchio che rivelano la radiazione per misurare la temperatura corporea. Non è chiaro da dove abbia origine la radiazione, poiché nei libri non si cita l'uomo come sorgente.

Per quanto riguarda il trasferimento di energia mediante onde elettromagnetiche, ovvero l'irraggiamento, vi sono molte problematiche all'interno dei libri di testo delle superiori. Di seguito alcune considerazioni didattiche sulla teoria presente nei libri e alcuni concetti che non vengono trattati dalla maggior parte dei libri analizzati.

Innanzitutto si trova l'ambiguità tra i concetti di temperatura e calore. Il calore è trattato principalmente come una 'sostanza' trasferita tra corpi, tramite il fenomeno dell'irraggiamento [59,69]. Il calore è descritto fisicamente come una modalità di trasmissione dell'energia, alternativa al lavoro, che si applica soprattutto a meccanismi non radiativi di trasferimento. Inoltre, seguendo il percorso dei libri riguardo l'irraggiamento, non trovano spiegazione fenomeni come la sensazione di calore percepita stando al Sole oppure la sensazione di fresco percepita stando all'ombra, dovuti all'assorbimento o alla

¹²I pixel della termocamera sono dei micro-bolometri con resistenza variabile che, in base all'intensità di radiazione nel lontano infrarosso ricevuta, si deforma e restituisce un valore che viene processato da un algoritmo per ottenere una temperatura.

cessione di energia per irraggiamento da parte della pelle per raggiungere l'equilibrio termico con l'ambiente. Per sottolineare che l'irraggiamento sia, insieme a conduzione e convezione, una forma di trasferimento dell'energia tra due corpi a temperatura differente, è opportuno associarlo in primo luogo all'energia. La lettura in chiave energetica del primo principio della termodinamica permette di interpretare l'irraggiamento anche in termini di scambio energetico¹³. Infatti si può scrivere la variazione di energia interna di un sistema (ΔU) come una variazione di energia ceduta (E_{out}) e acquisita (E_{in}) dal sistema:

$$\Delta U = E_{in} - E_{out} \quad [J] \quad (2.13)$$

ΔU è definita dal primo principio della termodinamica, espresso nei manuali delle superiori con la seguente relazione:

$$\Delta U = Q - W \quad [J] \quad (2.14)$$

in cui Q è il calore acquisito dal sistema dall'ambiente e W è il lavoro compiuto dal sistema sull'ambiente esterno (data la convenzione del segno). In condizione di equilibrio termico: $E_{in} = E_{out}$, non varia quindi l'energia interna e non vi è scambio di energia. I termini E_{in} ed E_{out} possono anche essere interpretati, rispettivamente, come radiazione assorbita e radiazione emessa dal sistema a cui è associata una ΔU .

L'energia netta trasmessa per irraggiamento è la differenza tra l'energia irradiata su una superficie e l'energia radiata dalla stessa superficie. La radiazione emessa da un corpo dipende dalla quarta potenza della sua temperatura, secondo la legge di Stefan-Boltzmann, quindi l'energia netta trasmessa (ΔI) si può calcolare con la formula:

$$\Delta I = e_1 \sigma (T_2^4 - T_1^4) \quad [W/m^2] \quad (2.15)$$

in cui T_1 rappresenta la temperatura del corpo di area A_1 ed emissività e_1 , mentre T_2 è la temperatura del corpo di area A_2 e con comportamento da emettitore ideale ($e = 1$), ad esempio il Sole, e σ è la costante di Stefan Boltzmann. Nei libri di testo non è formalizzato questo concetto, nonostante metta in evidenza l'importanza nel processo della differenza tra le temperature dei corpi. Come si vede dalla formula, tale differenza permette di determinare a quale corpo sarà prelevata maggiore energia e quale ne assorbirà di più, in base alla loro potenza emessa per unità di superficie.

L'irraggiamento, quindi, è il risultato della ricerca di un equilibrio radiativo tra energia assorbita ed energia emessa da un corpo. Da un punto di vista macroscopico, il corpo con potenza emessa maggiore per unità di superficie irraggiando un secondo corpo con temperatura, e quindi potenza, minore ne determina una variazione di temperatura. Questo

¹³Il seguente formalismo è tratto dal lavoro di G. Tasquier "Leading secondary school students to face the disciplinary, epistemological and societal challenges of climate change: design and analysis of multi-dimensional teaching/learning experiences - Chapter 2: Conceptual Path on Climate Change", 2015

perché il secondo corpo riceve un flusso di energia maggiore del suo flusso radiante e si riscalda, di una quantità ricavabile dall'Equazione 2.15, per compensare il fenomeno. Una volta raggiunto l'equilibrio tra i due corpi e una temperatura di equilibrio, il processo si arresta in uno stato stazionario, in cui il flusso radiato da un corpo è uguale a quello irraggiato sullo stesso. La legge di Kirchhoff per la radiazione termica, accennata raramente nei libri di testo, esprime questo concetto uguagliando il coefficiente di assorbanza con il coefficiente di emittività (o emissività): $\alpha_\nu = e_\nu$, entrambi dipendenti dalla frequenza di osservazione.

I concetti espressi fino ad ora vengono toccati, ma non approfonditi, parlando dell'effetto serra e del ruolo giocato dalla radiazione infrarossa in alcuni libri [59,60]. Se l'argomento fosse ampliato anche ad altre situazioni e ad altri elementi, ad esempio se si prendesse come riferimento l'uomo, potrebbe essere un buon punto di partenza per introdurre in modo accurato l'irraggiamento, la radiazione termica e la legge di Stefan-Boltzmann, oltre che esplicitarne il collegamento, dato che non emerge sempre in modo chiaro dai libri.

Un altro fatto riguardante il processo di irraggiamento è che la direzione del trasferimento possa avvenire, seppure con efficienza minima e trascurabile, in direzione opposta rispetto a quella definita dal secondo principio della termodinamica, ovvero dal corpo con temperatura maggiore a quello con temperatura minore. I libri di testo analizzati non riportano questo fatto, che differenzia l'irraggiamento dagli altri meccanismi. Dicono solamente che nel processo di irraggiamento, i corpi, al contrario di quanto succede in altri meccanismi di trasferimento, non è necessario che siano a contatto e possono essere circondati dal vuoto o da un mezzo trasparente alla banda spettrale irraggiata.

Un esercizio che potrebbe essere efficace per introdurre l'argomento dell'irraggiamento, e i concetti che ne derivano, si trova nel libro "Termodinamica e Trasmissione del Calore - Terza edizione" [70]¹⁴, riportato in seguito. L'esercizio ha il pregio di far comprendere con un esempio semplice e legato a una situazione quotidiana il rapporto tra temperatura e potenza emessa da un corpo e il fenomeno dello scambio di energia per irraggiamento tra due corpi.

Durante l'estate o l'inverno si prova, rispettivamente, una sensazione di calore o di freddo in casa, nonostante la temperatura del termostato sia mantenuta sempre allo stesso valore costante (22° C). Questa sensazione è dovuta allo scambio di energia per irraggiamento tra il nostro corpo e l'ambiente circostante.

La temperatura corporea media della pelle di una persona si suppone essere circa 30° C, mentre le pareti e gli oggetti della casa sono a una temperatura di 25° C in estate e di circa 10° C in inverno. La quantità di calore scambiata tra la pelle di una persona e gli oggetti della stanza in estate sarà la differenza tra la potenza emessa dalla pelle per unità di superficie e la potenza emessa dagli oggetti. Potenza emessa dal corpo per unità di

¹⁴L'esercizio è stato ripreso apportando qualche modifica.

superficie secondo la legge di Stefan-Boltzmann e tenendo conto che la pelle ha emissività di 0.95:

$$I_{emessa} = e_{\lambda} \sigma T_{corpo}^4 \quad [W/m^2] \quad (2.16)$$

Potenza emessa dagli oggetti della stanza e assorbita dal corpo, tenendo conto che per la legge di Kirchhoff l'emissività ϵ è uguale all'assorbanza α :

$$I_{assorbita} = \alpha_{\lambda} \sigma T_{oggetti}^4 = e_{\lambda} \sigma T_{oggetti}^4 \quad [W/m^2] \quad (2.17)$$

L'energia netta scambiata in estate ($T_{oggetti} = 298 K$) è:

$$\Delta I = e_{\lambda} \sigma (T_{corpo}^4 - T_{oggetti}^4) = 0.95 \cdot 5,6705 \cdot 10^{-8} (303^4 - 298^4) = 29 \quad W/m^2 \quad (2.18)$$

L'energia netta scambiata in inverno ($T_{oggetti} = 283 K$) è:

$$\Delta I = e_{\lambda} \sigma (T_{corpo}^4 - T_{oggetti}^4) = 0.95 \cdot 5,6705 \cdot 10^{-8} (303^4 - 283^4) = 109 \quad W/m^2 \quad (2.19)$$

In inverno, quindi, il corpo, che ha temperatura maggiore, cede all'ambiente ogni secondo un'energia pari a $109 W/m^2$. La cessione produce sulla pelle una sensazione di freddo.

Per una trattazione chiara e sequenziale, si potrebbe riprendere la radiazione termica e il meccanismo di irraggiamento dopo aver presentato la radiazione del lontano infrarosso, banda di emissione della maggior parte dei corpi terrestri, tra cui l'uomo. In questa ottica, la legge di Stefan Boltzmann potrebbe essere scritta, poiché già a conoscenza della fenomenologia delle onde, anche in questo modo, utilizzando la relazione 2.3:

$$I = e \sigma T^4 \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (2.20)$$

2.3.5 Corpo Nero, legge dello spostamento di Wien, legge di Planck

La maggior parte dei libri di testo analizzati non trattano la fenomenologia del corpo nero.

Il corpo nero è presentato generalmente nei libri di quinta Liceo Scientifico come introduzione alla meccanica quantistica. La struttura del paragrafo è simile per molti dei manuali analizzati. In un primo momento è presentato il corpo nero come cavità, con due eccezioni [63,67], affiancando alla spiegazione l'immagine della cavità in cui è assorbita e riflessa la radiazione incidente, approssimata a un raggio che si propaga in modo rettilineo. Viene data la definizione di corpo nero come un assorbitore, ed emettitore, perfetto. Si delinea visivamente lo spettro di emissione del corpo nero tramite un grafico intensità (I)-lunghezza d'onda (λ) rappresentante una o due curve di emissione (funzioni di Planck) di corpi a temperatura diversa. Nessuno tra i libri analizzati si riferisce alla curva di emissione con il termine 'funzione di Planck', o ne mostra, in un qualsiasi

momento della trattazione, la formulazione matematica. Alcuni libri [63,67] lungo l'asse delle ordinate pongono la grandezza $I/\Delta\lambda$, a indicare che il valore misurato dell'intensità emessa è relativo a un intervallo di lunghezze d'onda ($\Delta\lambda$) di larghezza ben definita, piuttosto che a una singola lunghezza d'onda. Il limite a zero della dimensione degli intervalli $\Delta\lambda$ restituisce la funzione continua dello spettro di emissione di un corpo.

In questa parte si esplicita la dipendenza dalla temperatura della curva di emissione di un corpo nero. Solo qualche libro fa cenno alla dipendenza dal tipo di materiale dell'emissione di corpi reali, legata al coefficiente di emissività (o emittività) e .

La dipendenza dell'area sottesa alla curva di emissione dalla temperatura del corpo nero, ovvero il fatto che all'aumentare della temperatura aumenta anche l'area sottesa, viene citato in alcuni libri [61,64], ma nessuno di quelli analizzati riprende la legge di Stefan-Boltzmann, Equazione 2.12, argomento di biennio di Liceo Scientifico. La legge, infatti, graficamente rappresenta l'area sottesa e matematicamente può essere ricavata come integrale sull'intero spettro delle frequenze della funzione di Planck. In seguito nel capitolo è introdotta la relazione tra temperatura e lunghezza d'onda del picco tramite la legge dello spostamento di Wien, che determina la proporzionalità inversa tra lunghezza d'onda di picco e temperatura del corpo preso in considerazione:

$$\lambda_{picco} T = 2.90 \cdot 10^{-3} \quad [m \cdot K] \quad (2.21)$$

Infine è esposto il problema della catastrofe ultravioletta, per cui con la fisica classica non è possibile formalizzare quanto visto sperimentalmente dell'emissione di corpi neri. I libri riportano il grafico in cui sono comparate la curva di emissione di corpo nero sperimentale e la curva prevista dalla teoria di Rayleigh e Jeans, in cui la potenza emessa per unità di superficie diverge all'infinito per lunghezze d'onda tipiche degli ultravioletti. La parte conclusiva del capitolo è dedicata alla discretizzazione dell'interazione radiazione-materia, tramite l'ipotesi di Planck della quantizzazione dell'energia della radiazione. In particolare si introduce il quanto di energia, quantità minima di energia, di cui le energie E_n assorbite o emesse da cariche elettriche oscillanti sono multipli:

$$E_n = n h f \quad [J], \quad n = 0, 1, 2, 3 \quad (2.22)$$

in cui f è la frequenza di oscillazione e h è la costante di Planck ($h = 6.63 \cdot 10^{-34} J \cdot s$).

La trattazione presenta alcune criticità a livello didattico, analizzate in seguito.

Innanzitutto il corpo nero è presentato in due modi differenti: come un corpo ideale o come una cavità [59,64,67]. Nel caso in cui non venisse specificato il fatto che la cavità sia quanto di più vicino a un corpo nero ottenibile in laboratorio, si rischia di creare ambivalenza nel termine, che da una parte verrebbe associato a qualcosa di ideale, quindi impossibile da riprodurre, e dall'altra a un oggetto tangibile.

Inoltre la rappresentazione della cavità come oggetto sferico o quadrato con un piccolo foro da cui entra la radiazione [59,61,64]. La rappresentazione rischia di dare l'idea che

sia l'oggetto forato a comportarsi come un corpo nero, soprattutto se si usano espressioni come "la luce entra in un corpo nero" [64], quando in realtà è solamente il foro ad avere un comportamento ideale, non tutto l'oggetto. Tale spiegazione potrebbe non essere immediata, andrebbe quindi esplicitata.

Lo spettro di emissione di corpo nero non si ricollega alla radiazione termica e non è definito formalmente come la distribuzione spettrale di Planck $I(\lambda, T)$, che associa a ogni intervallo di frequenza, o lunghezza d'onda, un certo valore di intensità. La relazione non si trova espressa in forma matematica, pur conoscendo l'ipotesi di Planck e la costante di Planck h . La formula potrebbe essere utile per proporre alcuni esercizi di calcolo come collegamento tra gli insegnamenti di fisica e matematica, soprattutto per classi di quinta Liceo Scientifico. Ad esempio è interessante calcolare la potenza totale (I_{totale}) emessa da un corpo su tutte le frequenze, come integrale della funzione di Planck, per ricavare la legge di Stefan-Boltzmann, trattata nel capitolo sulla termologia [59, 61, 67]. Il calcolo risulta:

$$I_{totale} = \int_0^{\infty} \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1} d\nu = \frac{2\pi k_B^4 T^4 \pi^4}{c^2 h^3 15} = \frac{2\pi^5 k_B^4 T^4}{15 c^2 h^3} \quad (2.23)$$

In cui c è la velocità della luce nel vuoto, k_B è la costante di Boltzmann e T è la temperatura del corpo considerato. Sostituendo le costanti si ottiene la costante di Stefan-Boltzmann, nonché la legge.

Un altro esercizio è il calcolo del massimo della funzione di Planck, in modo da ottenere la lunghezza d'onda massima di emissione, approssimando il calcolo a lunghezze d'onda piccole:

$$\frac{dB_\lambda(T)}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left[\frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T}} \right] = 0 \quad (2.24)$$

che risulta:

$$\lambda_{max} T = \frac{hc}{5k_B} \quad (2.25)$$

Si è osservato che la trattazione nei libri di testo solitamente predilige l'utilizzo della lunghezza d'onda, dipendente dal mezzo in cui si propaga l'onda elettromagnetica, piuttosto che della frequenza, invariante. Ad esempio la rappresentazione grafica dello spettro [59, 61, 64, 67] si trova in funzione della lunghezza d'onda, così come la legge dello spostamento di Wien, associata al grafico, predilige una relazione tra lunghezza d'onda di picco e temperatura assoluta del corpo emettitore.

Lo spettro di emissione di un corpo, oltre alla frequenza di osservazione, dipende da: temperatura e proprietà del materiale da cui è composto il corpo. Nei libri di testo analizzati si è notato che viene esplicitata la prima, poiché si parla soprattutto di corpi

ideali per cui l'emissione dipende solamente dalla temperatura, ma si tralascia la seconda caratteristica, importante per corpi reali. Questi ultimi e le loro proprietà, infatti, non trovano spazio nella maggior parte della trattazione manualistica delle superiori. Lo spettro di emissione reale non è presentato accanto a quello ideale, quindi si potrebbe pensare che sia caratteristico solamente dei corpi ideali. Nel libro "Fisica Modelli Teorici e Problem Solving" [64] si trova una suddivisione dei corpi reali in "corpi che assorbono la maggior parte della luce" e "corpi altamente riflettenti e brillanti" indicando che i primi sono buone approssimazioni di corpi ideali, mentre i secondi no. Dato che le proprietà di assorbimento e riflessione di un corpo sono fortemente dipendenti da λ (o da ν) non è opportuno utilizzarle per suggerire una suddivisione generale. In alternativa sarebbe utile una classificazione dei corpi reali in base al valore alto o basso dell'emissività e in una certa banda spettrale, ad esempio il lontano infrarosso.

In generale si ritiene necessaria una trattazione più fenomenologica del corpo nero, che permetta agli studenti di comprendere qualitativamente le sue proprietà e il problema che aprì, poi, alla meccanica quantistica.

Capitolo 3

Metodologia

3.1 Active Learning, metodo inquiry e strategia didattica delle 5E

Alla base delle scelte operate per costruire il tutorial vi è l'approccio didattico di active learning detto IBSE (Inquiry Based Science Education), in particolare la strategia didattica della sequenza detta delle 5E. La metodologia inquiry trova fondamento nella teoria cognitiva dell'apprendimento costruttivista. Quest'ultimo pone le basi per una didattica incentrata sul coinvolgimento attivo dello studente e che si ponga il problema di come integrare le nuove conoscenze fornite a lezione con quelle già possedute dal ragazzo. I punti di svolta fondamentali dell'approccio costruttivista riguardano la valorizzazione delle conoscenze a priori degli studenti, il prediligere l'approfondimento degli argomenti piuttosto che la quantità e il prendere in considerazione stili di apprendimento diversi dei ragazzi [71]. Si ignora spesso, nel processo educativo, il bagaglio conoscitivo preesistente che accompagna lo studente durante tutta il suo percorso scolastico, ritenendo che la conoscenza possa essergli infusa, come un liquido in un vaso inizialmente vuoto [71]¹. Un'attività di indagine da parte degli studenti che crei domande, permetta osservazioni e sperimentazioni e la conseguente analisi dei dati, è mostrato essere più efficace per un apprendimento significativo. È importante, inoltre, considerare l'eterogeneità degli studenti e i loro diversi stili di apprendimento, ovvero i diversi modi di selezionare, memorizzare e interiorizzare i concetti.

La metodologia inquiry incarna tutti questi elementi [72]. Cosa si intende per inquiry venne definito nel 1996 negli Stati Uniti da The National Science Education Standards (NSES), che lo ritenne uno strumento fondamentale da inserire nella didattica scientifica scolastica di ogni grado [73].

Il metodo inquiry si sviluppa per riproporre in classe elementi che caratterizzano modi di

¹In [71] p. 67 “Many educators see ‘children as raw material to be stamped into shape, an empty urn into which stuff called knowledge is to be poured’ (O’Brien 1989:360)”

fare ricerca scientifica attuati dagli scienziati, attraverso la proposta agli studenti di una serie di attività, tra loro collegate. In questo modo possono costruirsi una conoscenza significativa dei concetti trattati. Le attività riguardano l'osservazione di un fenomeno, il porsi domande la formulazione di ipotesi, la ricerca di risposte (tramite risorse di vario genere), la pianificazione di esperimenti e l'acquisizione di dati, che in seguito vengono analizzati, interpretati e comunicati a terzi.

Nonostante l'indagine da parte degli studenti sia svolta in autonomia, all'insegnante spetta un ruolo da facilitatore [71], che crei in classe un ambiente favorevole all'apprendimento e che sproni e motivi gli studenti verso domande e indagini più approfondite, collaborando e partecipando con loro alle attività. L'insegnante seleziona il materiale didattico, che sia adatto al concetto da far sviluppare, all'età e alla preparazione degli studenti. Si predilige una guida autorevole che lavori insieme agli studenti al loro ritmo di apprendimento e che favorisca l'integrazione dei nuovi concetti in schemi preesistenti, in modo peculiare per ogni studente, piuttosto che una autoritaria che imponga un'interpretazione assoluta.

La metodologia viene utilizzata per promuovere attitudini positive nei confronti della scienza, quali curiosità, creatività, meraviglia, stupore e il saper utilizzare gli strumenti propri della scienza per spiegare fenomeni naturali [71]. Serve anche per allontanare da eventuali pregiudizi e stereotipi legati alla scienza, quali il camice bianco dello scienziato e l'idea che la scienza abbia tutte le risposte. In particolare si cerca di trasmettere la concezione della scienza come una disciplina dinamica, che propone spiegazioni condivise ai fenomeni, naturali, senza, però, alcuna pretesa di validità assoluta. Gli studenti possono confrontarsi direttamente con il metodo scientifico per vederne e riconoscerne specificità ed efficacia e rendersi conto autonomamente, ad esempio, che servono le domande giuste e molti tentativi per ottenere una risposta significativa per un fenomeno osservato e che tale risposta potrebbe non essere definitiva alla risoluzione del problema. Bybee [71] propone tre approcci da applicare per raggiungere questi obiettivi: il lavoro di gruppo, le attività di sperimentazione e un diverso utilizzo dei libri di testo e delle lezioni frontali. Grazie al lavoro in piccoli gruppi, gli studenti possono sviluppare la capacità di collaborazione, con i compagni e con l'insegnante, di comunicazione, esponendo le proprie opinioni e i propri risultati ad altri, e di confronto. Lo studente può verificare la propria comprensione di un certo concetto e, grazie all'attività di gruppo, può arricchire o modificare la propria concezione, confrontandosi con quella degli altri. Gli studenti all'interno del gruppo a turno occupano vari ruoli, in modo che vengano responsabilizzati riguardo al proprio apprendimento e a quello degli altri membri del gruppo, favorendo interazioni costruttive e condivisione di idee e strumenti. L'active learning si realizza anche tramite attività di laboratorio e con l'attuazione di strategie di problem solving, tra loro strettamente collegati. Gli studenti intervengono in prima persona nella costruzione della loro conoscenza, cercando autonomamente metodi per la risoluzione di un problema. L'attività che funge da stimolo non si presenta come una serie di azioni guidate e spiegate in dettaglio da eseguire puntigliosamente, ma un problema aperto risolvibile in vari modi.

La strategia di problem solving permette agli studenti di acquisire nuovi concetti e di rapportarli a quelli già posseduti, creando nuovi collegamenti e relazioni. Anche libri di testo e lezioni frontali possono essere significativi se non si toglie centralità allo studente e alla sua interpretazione individuale. I libri di testo e le lezioni possono essere un supporto per approfondire e fare collegamenti tra concetti diversi, ma non possono essere mezzi con cui fornire i concetti stessi. Elementi importanti nella lettura, così come nel discorso dell'insegnante, sono le pause, che danno il tempo agli studenti di riflettere sulle informazioni presentate. L'insegnante, inoltre, può fornire 'categorie organizzanti' per catalogare la conoscenza acquisita durante le attività inquiry.

L'insegnante non si delinea solamente come facilitatore, ma anche come valutatore, poiché la valutazione delle conoscenze apprese dagli studenti è parte integrante della didattica. La valutazione non ha luogo solamente durante una verifica scolastica, ma si sviluppa lungo tutto l'arco dell'insegnamento, dall'osservazione e dall'ascolto degli studenti durante le attività in classe. Lo scopo principale dei test, secondo una concezione costruttivista, è quello di fornire all'insegnante un riscontro riguardo al suo operato e alla sua metodologia di insegnamento, la parte valutativa dello studente ha un ruolo secondario. Offre, quindi, spunti per modifiche alla didattica, in base ai punti critici trovati. Durante le attività gli studenti possono crearsi, ognuno secondo la propria visione del mondo, un pensiero critico riguardo la scienza come realizzazione dell'intelletto umano e riguardo la relazione tra scienza e società. Per sviluppare questo tipo di pensiero lo studente necessita di conoscere come venga impiegata la scienza e allenare alcune 'habits of mind', letteralmente abitudini mentali, proprie alla scienza. Tra le 'habits of mind' scientifiche si trova, ad esempio, il fatto di fornire soluzioni solamente sulla base di prove valide. Inoltre lo studente acquisisce la consapevolezza dei limiti e delle possibilità della scienza di spiegare il mondo e cambia le proprie capacità nei confronti della disciplina, ottenendo nuove abilità e conoscenze. La scienza, infatti, influisce sulla società e sulla percezione che una persona ha di sé, modifica il modo in cui si guarda il mondo, restituendo nuovi punti di vista [71]².

La mancanza di tempo rispetto alle ore scolastiche a disposizione, è il problema maggiormente percepito dagli insegnanti nell'applicazione di una metodologia IBSE. Bybee [71], nel proporre l'IBSE, sottolinea che il suo utilizzo possa rendere più efficace il tempo destinato alle materie scientifiche. Il motivo è che le conoscenze scientifiche, per essere apprese in modo approfondito, hanno bisogno di tempo e molta pratica da parte degli studenti. In particolare prediligendo attività inquiry al posto di lezioni tradizionali, in cui solo l'insegnante parla e gli studenti ascoltano passivi.

Il metodo didattico di cui parla Bybee [71] si struttura in alcune fasi di apprendimento che seguono parallelamente le fasi tradizionali del metodo scientifico (osservazione, in-

²In [71] p. 26 "Science and technology affect our system of beliefs - the way we think about ourselves, others, and the world around us."

dividuaione di un problema, ipotesi, verifica sperimentale, analisi dei dati, conferma o meno dell'ipotesi, nuova ipotesi se non vi è la conferma, oppure comunicazione dei risultati, ulteriori verifiche, formulazione di un principio). La strategia didattica è chiamato ciclo 5E, in quanto prevede cinque fasi diverse, ma correlate una all'altra, e può essere la base di partenza per progettare una lezione, oppure una intera unità didattica. Il modello è pensato con valenza universale, valido non soltanto per studenti, ma anche per insegnanti e professionisti, inoltre la sua applicazione può avere luogo in classe, in laboratorio oppure in luoghi informali, ad esempio un museo, un parco, in casa. Il tutorial, che costituisce il lavoro di tesi, è stato costruito sulla base di questo modello. Infatti ogni attività didattica proposta si sviluppa principalmente in cinque fasi che prevedono una prima parte di coinvolgimento dello studente, una seconda parte di sperimentazione e di ricerca di una spiegazione per i fenomeni osservati, una terza parte di verifica della validità della regola trovata e infine una verifica delle conoscenze acquisite.

Nel momento in cui si decide di utilizzare un ciclo 5E, si determina un tema e uno scopo non troppo ambizioso, che gli studenti avranno indagato e approfondito alla fine del ciclo. Ad esempio, nel tutorial, che costituisce il lavoro di tesi, uno degli obiettivi che si è scelto di affrontare è la sintesi additiva e la percezione del colore.

Dopo aver definito l'obiettivo, si affrontano tutte le fasi del ciclo, che sono le seguenti:

- **Engage:** fase in cui si vogliono coinvolgere gli studenti, catturando la loro attenzione, ad esempio attraverso brevi esperimenti e attività che siano collegati agli obiettivi definiti all'inizio del percorso. L'attività è pensata per incuriosire e far scaturire domande spontanee, base per la futura indagine, a cui verrà data risposta alla fine del ciclo. Un reale coinvolgimento da parte degli studenti è fondamentale per garantire un apprendimento significativo. Per questo motivo si sceglie un'attività che sia per gli studenti d'impatto e che metta in discussione quanto già sanno. L'insegnante in questa prima fase può verificare quale sia la conoscenza a priori degli studenti e valutarne possibili concezioni errate.

Nel tutorial, ad esempio, si mostra agli studenti che l'immagine su una carta da gioco di seme rosso (non una figura) sparisce se guardata con il filtro dicroico rosso³.

³Un filtro dicroico è un filtro interferenziale in grado di minimizzare l'assorbimento della radiazione incidente, per evitare la deformazione strutturale, e consentire la trasmissione di radiazione quasi monocromatica. La struttura è composta da due o più lastre sottili piane e parallele di vetro separate da uno strato di aria, o altro dielettrico, e con facce interne semiriflettenti, per permettere la riflessione interna della radiazione incidente rifratta. Il principio fisico sottostante è l'interferenza da lamine sottili. Per un certo angolo di incidenza della radiazione incidente su una lastra del filtro, in base alla distanza tra le lastre e in base al rapporto tra gli indici di rifrazione dei mezzi attraversati, il filtro permette di selezionare una sola lunghezza d'onda, poiché solo tale radiazione determina una interferenza costruttiva tra le componenti riflesse dalle lastre del filtro. Grazie a questo fenomeno la radiazione trasmessa dal filtro è ritenuta quasi monocromatica. Le componenti non trasmesse vengono riflesse dal filtro. Si parla di filtro dicroico 'rosso' intendendo il filtro che riflette solamente la radiazione corrispondente all'intervallo

In questo modo è introdotto in modo accattivante il tema e si generano domande a cui si risponderà in seguito.

- **Explore:** la fase prevede che gli studenti conducano una attività, ad esempio un esperimento, relativa al tema scelto e determinata a partire dalle domande scaturite nella fase di Engage. Il materiale è messo a disposizione dall'insegnante e si cerca di indagare quanto visto nella fase precedente. Gli studenti iniziano l'indagine con osservazioni, raccolta di dati e analisi degli stessi. Rapportano le esperienze con quanto conosciuto a priori e sperimentato in precedenza. L'insegnante in questa fase è un facilitatore che sceglie i materiali e le attività adeguate per guidare i ragazzi. Inoltre il docente lavora in collaborazione con gli studenti, indagando e scoprendo insieme a loro. I ragazzi possono iniziare a costruirsi una spiegazione del fenomeno indagato.

Per esempio nel tutorial gli studenti hanno a disposizione un filtro dicroico verde e uno blu, con cui possono osservare la carta da gioco e alcuni cartoncini colorati. L'osservazione della carta da gioco i filtri verde e blu restituisce in entrambi i casi un'immagine nera con sfondo, rispettivamente, verde e blu, a differenza di quanto accade con il filtro dicroico rosso con cui l'immagine sparisce.

- **Explain:** fase in cui gli studenti concettualizzano quanto osservato e analizzato in precedenza e cercano di trarne una legge o un modello con caratteristiche esplicative. In questo modo possono focalizzare la loro attenzione su un unico aspetto delle attività svolte, un concetto o un fenomeno, organizzando in modo più strutturato le osservazioni e i dati ottenuti precedentemente. Ogni studente propone la propria ipotesi alla classe e a sua volta confronta le sue idee con quelle degli altri. Da questa procedura si ricavano dei feedback e dei nuovi punti di vista, che permettono di arrivare insieme, studenti e insegnanti, a una spiegazione unanime. In questo modo nuove conoscenze sono integrate con quelle precedenti degli studenti. In questa fase è richiesto che gli studenti utilizzino il linguaggio formale fisico.

Ad esempio nel tutorial sono invitati a proporre un modello che spieghi perché la carta da gioco abbia un comportamento diverso se visto con i tre filtri dicroici rosso, blu e verde. I risultati vengono condivisi con la classe e si cerca, in base a quanto esposto da ognuno, una spiegazione che possa essere condivisa da tutti.

- **Extend:** quanto ipotizzato nella fase precedente viene testato e gli studenti progettano altri esperimenti e osservazioni per definire se il modello abbia caratteristiche predittive. Inoltre si testa se vi sia stata realmente integrazione dei nuovi concetti con i preesistenti. Gli insegnanti incoraggiano ad applicare ad altri ambiti

visibile legato alla percezione del rosso.

e in situazioni differenti i concetti trovati, valutando la capacità degli studenti e la validità di quanto ipotizzato. In questo modo i ragazzi possono approfondire e irrobustire la propria conoscenza, oppure confutare quanto ipotizzato, poiché non applicabile ad altre situazioni.

Ad esempio, nel momento in cui, guardando altri cartoncini con i filtri dicroici rosso, blu e verde, non è soddisfatto il modello sulla visione del colore precedentemente trovato, allora occorre compiere ulteriori osservazioni e realizzare nuovi esperimenti per trovare un nuovo modello. In questo caso il processo ritorna alla fase di Explore e si utilizzano, al posto dei filtri e dei cartoncini, tre luci quasi monocromatiche, una rossa, una blu e una verde e si indagano ulteriori fenomeni per capire come il colore di un corpo dipenda dall'osservazione in una certa banda dello spettro visibile.

- **Evaluate:** ultima fase che permette agli studenti di valutare le loro capacità e conoscenze apprese durante il percorso e permette all'insegnante di valutare i loro progressi. In realtà il processo di valutazione da parte dell'insegnante avviene durante tutto il percorso, e si basa sull'osservazione del lavoro svolto dai ragazzi.

Il tutorial propone principalmente delle schede con esercizi riguardanti gli argomenti trattati nelle singole fasi del ciclo 5E. Ad esempio propone un esercizio per testare se gli studenti abbiano capito la differenza tra sintesi additiva e sottrattiva e un altro per valutare la loro comprensione della fisica dei colori e del perché i corpi appaiono colorati.

3.2 Attività Informali, Non Formali, Formali

I contesti di apprendimento, come definiti dalla Commissione delle Comunità Europee nel 2000 tramite il “Memorandum sull'istruzione e la formazione permanente” [74], sono classificati entro tre categorie: formali, non formali e informali.

L'apprendimento formale avviene nei luoghi di istruzione, scuole e classi, ed è finalizzato all'ottenimento di un diploma alla fine del percorso di formazione. Le attività sono organizzate e supervisionate da un insegnante, che esprime anche una valutazione sugli studenti. Nel lavoro di tesi è stato sviluppato un percorso formale, il tutorial in Appendice 2 (pagina 120), pensato per la scuola superiore e riguardante la trattazione di un argomento di fisica in modo trasversale tra più unità didattiche e longitudinale tra più discipline.

Il contesto non formale si può realizzare al di fuori dei luoghi formali di apprendimento, in un laboratorio o un'aula legati ad altri istituti. Si occupano di una specifica competenza o di un certo argomento e non sono necessariamente guidati dagli insegnanti della

classe coinvolta. Solitamente non prevede una valutazione finale e le attività possono essere svolte dagli studenti o dai coordinatori. Ne è un esempio il Laboratorio PLS descritto nel primo capitolo, sotto-paragrafo “Laboratorio PLS”, che è stato progettato per coinvolgere gli studenti in modo più strutturato, rispetto a un’attività informale, e più dinamico, rispetto a un’attività formale.

Le attività informali sono spesso svolte al di fuori di luoghi di istruzione, possono avere una qualsiasi locazione, musei, laboratori, parchi. In particolare in questo lavoro si è presa in considerazione un’attività svolta a teatro, lo spettacolo teatrale “Luce dalle Stelle”. Le intenzioni de Lo spettacolo della Fisica nel caratterizzare tale attività sono definite nel primo capitolo della tesi, paragrafo “Il teatro scientifico de Lo Spettacolo della Fisica”. Attività di questo tipo non prevedono una valutazione da parte dell’insegnante, hanno principalmente una componente emotiva e di divertimento, piuttosto che nozionistica e concettuale.

Entrambe le attività, informale e non formale, sono contestualizzate in un percorso formale definito all’interno del tutorial “Sotto ai nostri occhi”.

3.3 Il Tutorial “Sotto ai nostri occhi”

La visione di uno spettacolo teatrale non può essere un evento autoconclusivo per una classe, come scritto nel libro “Attori del Sapere” [5]⁴. È necessaria una continuità anche a scuola, in cui concetti, esperimenti e idee possano essere riprese, per poter fare riflettere gli studenti e per dare origine a “pezzi di curriculum scolastico” [5]. Altrimenti le emozioni suscitate durante l’attività informale rischiano di rimanere sterili e di scomparire dopo poco tempo, senza lasciare nessuna traccia. Al contrario esse possono fungere da motore per l’apprendimento formale. Una didattica significativa contestualizza le emozioni positive scaturite a teatro e le canalizza, affinché possano diventare per gli studenti motivazione a conoscere e approfondire concetti fisici, creando una conoscenza strutturata e duratura.

Il tutorial è stato creato con lo scopo di integrare una attività informale, lo spettacolo teatrale “Luce dalle Stelle”, in un percorso formale, passando anche per un’attività non formale, il Laboratorio PLS. Si struttura come una guida dettagliata che possa fungere da supporto a insegnanti che vogliano riprendere a scuola i temi, gli esperimenti e i fenomeni presentati nello spettacolo e nel laboratorio. In totale il tutorial è formato da tre attività, tra loro interconnesse, descritte brevemente in seguito:

⁴In [5] p. 189 a cura di Emilia Franchini e Pietro Danise

- Attività 1 - Cosa vedono i nostri occhi: si concentra sulla radiazione visibile e sulla sua interazione con l'occhio umano e con i corpi. L'obiettivo è che gli studenti acquisiscano una maggiore consapevolezza dell'origine dei colori e del modello di visione.
- Attività 2 - Vedere con altri occhi: riguarda alcune radiazioni non ionizzanti (ultravioletto, vicino e lontano infrarosso) e la loro interazione con la materia. Vengono indagati i processi di assorbimento, trasmissione e riflessione, diffusa e speculare. In particolare l'obiettivo è quello di rendere lo studente consapevole della differenza tra illuminazione ed emissione di un corpo.
- Attività 3 - Emissione e Spettri: vengono trattate la radiazione termica e la fenomenologia del corpo nero. Gli studenti si avvicinano ai concetti di termologia, come la legge di Stefan-Boltzmann, e alla curva di emissione di corpi ideali e non, funzione di Planck per un corpo nero e coefficiente di emissività. In particolare possono determinare come l'emissione di un corpo e la frequenza massima di emissione dipendano dalla temperatura del corpo in considerazione.

Coerentemente con la metodologia inquiry del ciclo 5E il percorso didattico proposto nel tutorial si basa su attività suddivise in più fasi in base alla strategia adottata. Gli studenti hanno un ruolo attivo in tutte le fasi, in cui è richiesto loro di compiere sperimentazioni, acquisire dati e fare ipotesi su eventuali modelli per spiegare i fenomeni. Inoltre possono apprendere, da un punto di vista pratico e fisico, il funzionamento di alcuni strumenti, quali telecamere che operano in banda diversa da quella visibile.

Gli argomenti proposti nelle attività sono tratti dallo spettacolo teatrale "Luce dalle stelle". La scelta di trattarne in modo più approfondito alcuni è stata presa in base alla letteratura di riferimento sulle concezioni dei ragazzi e bambini sulle radiazioni non ionizzanti e sui colori e dall'analisi di questionari e libri di testo⁵.

Caratteristiche e obiettivi di apprendimento del tutorial sono indicati nella prima sezione del lavoro in Appendice 2⁶.

Le attività sono pensate per scuola secondaria di secondo grado, classe quinta o eventualmente quarta, allineandosi al percorso proposto nei manuali scolastici di fisica per Liceo Scientifico.

Argomenti come la fisica dei colori, le caratteristiche della radiazione visibile, il funzionamento dell'occhio e della visione, le proprietà delle radiazioni infrarosse e ultraviolette e l'irraggiamento, spesso non sono trattati, o sono trattati in modo poco adeguato, nei libri di fisica delle superiori. Questi concetti riguardano fenomeni che fanno parte della quotidianità e vengono accennati o dati per scontati in corsi di laurea scientifici, oppure completamente evitati in altri corsi. Per questo si ritiene opportuno un approfondimento

⁵Secondo capitolo di questo lavoro

⁶In Appendice 2 vedere "Caratteristiche del tutorial" e "Obiettivi di Apprendimento"

a livello, almeno, di istruzione secondaria.

Inoltre una buona conoscenza dello spettro elettromagnetico, dell'interazione radiazione materia e della termologia, può aiutare studenti che debbano affrontare l'esame di stato. Infatti, come si evince dal quadro di riferimento ministeriale degli esami di stato per Licei Scientifici [75], la seconda prova di Fisica prevede argomenti quali: le onde elettromagnetiche, il corpo nero e la legge di Planck.

Capitolo 4

Risultati e Conclusioni

Il tutorial si è delineato in seguito alla presa visione di 4 rappresentazioni dello spettacolo “Luce dalle Stelle” e alla partecipazione a 7 attività del Laboratorio PLS. Collateralmente a queste esperienze il lavoro ha previsto anche la conduzione di un laboratorio PLS e la partecipazione a 5 incontri del Laboratorio di Teatro Scientifico, che ha fornito risultati interessanti. Il lavoro ha dato origine, oltre che al tutorial in Appendice 2 (pagina 120), anche a un questionario e al copione commentato dello spettacolo, che si trova a pagina 84.

Di seguito alcuni commenti e osservazioni riguardo ai risultati ottenuti durante il lavoro svolto per la tesi. In particolari saranno riportati commenti riguardo lo spettacolo “Luce dalle Stelle”, il Laboratorio PLS, il tutorial e il laboratorio di Teatro Scientifico.

Le rappresentazioni teatrali hanno avuto luogo tra il 13 e il 15 di febbraio del 2019. Tra il pubblico si sono alternate scuole superiori, principalmente di Liceo Scientifico, e scuole medie. Più della metà delle scuole coinvolte hanno sede a Milano, le restanti provengono dalla sua provincia o dalle province di Pavia, Como, Alessandria, Monza Brianza e Varese.

Il pubblico presente in sala alle quattro rappresentazioni è stato in media di circa 300 persone, di cui 20-40 non studenti (insegnanti e pubblico generico). Il totale di partecipanti è stato 1226 persone di cui 1124 studenti.

Da una prima valutazione generale, in base alle impressioni scaturite seguendo lo spettacolo in platea, gli studenti si sono mostrati in media interessati e attenti, a volte, però, poco partecipi nelle scene di interazione tra pubblico e Ricerc-attori.

In occasione dello spettacolo è stato creato un questionario con lo scopo di valutare le concezioni a priori degli studenti sulla fisica delle radiazioni, il gradimento dell’attività e per sapere se alcuni argomenti presentati a teatro siano rimasti impressi o meno agli studenti, ad esempio temperatura della radiazione cosmica di fondo e spettro di corpo nero. Il questionario, quindi, è stato pensato in modo tale che fosse valido al di là dello



Figura 4.1: *Immagine della platea presente a una rappresentazione dello spettacolo “Luce dalle Stelle”*

spettacolo, ma con alcuni concetti in comune anche alla rappresentazione. Al questionario hanno risposto, dopo lo spettacolo, 84 studenti di scuola superiore e i risultati sono già stati discussi nel Capitolo 2.

Le problematiche si sono dimostrate simili a quelle riportate in letteratura, ad esempio la concezione che solo oggetti artificiali possano emettere radiazione, la confusione tra riflessione ed emissione dei corpi.

Vi sono, però, alcuni punti di distacco, ad esempio a differenza di quanto trovato da ricerche in didattica, pochi studenti delle superiori hanno sottolineato la pericolosità legata al termine ‘radiazioni’. Molti ne hanno riconosciuto la quotidianità, legando il termine a elementi come telefoni cellulari, forni a microonde, computer.

L’esigua quantità di risposte ai questionari, circa l’8% degli studenti partecipanti, determina la poca rappresentatività dei risultati riguardanti il gradimento dello spettacolo. E’ comunque stato possibile cogliere alcuni elementi, riportati in seguito, che hanno caratterizzato il piccolo campione preso in esame, senza la pretesa di validità generale.

Nel questionario è stato chiesto di valutare lo spettacolo rispetto a una scala da 1 a 5, in cui 1 vuol dire ‘molto poco’ e 5 ‘moltissimo’. Il gradimento massimo (pari a 5), a quanto riportano i questionari, è stato espresso soprattutto da ragazzi di prima superiore (12.5% degli studenti di prima) e di quinta (25% degli studenti di quinta). Il punteggio

più basso, pari a 1, è stato assegnato dal 4% degli 84 studenti totali di scuola superiore che hanno risposto, soprattutto appartenenti alla classe prima, quinta e quarta. Si è notato che in seguito a uno spettacolo con alcuni problemi tecnici riguardanti l'audio, le valutazioni sono state meno eterogenee e più concentrate su valori bassi, soprattutto 2. L'impossibilità di seguire al meglio la performance potrebbe averne inficiato il gradimento degli spettatori, rendendo tali opinioni poco significative per una considerazione dell'efficacia dello spettacolo. Questo intento esula in tutti i casi dallo scopo della tesi.

Le poche risposte al questionario potrebbero essere dovute ad alcune problematiche nella sua somministrazione. Tra le cause possibili vi sono la richiesta di compilazione alla fine dello spettacolo e la mancata comunicazione con gli insegnanti nella richiesta di feedback nei giorni successivi allo spettacolo. Un ulteriore elemento di criticità potrebbe derivare dall'utilizzo di un questionario online, creato con Moduli Google e distribuito tramite un link. Nonostante sia facilmente raggiungibile da qualsiasi dispositivo collegato a una rete internet, la compilazione online del questionario potrebbe essere stata una limitazione per alcuni insegnanti e alcuni studenti.

Si auspica in futuro di poter risolvere eventuali ostacoli alla somministrazione del questionario, ad esempio consegnandolo in formato cartaceo, in modo che possa diventare uno strumento utile per compiere valutazioni dello spettacolo.

Per il lavoro di tesi è stata prodotta una versione commentata del copione. Essa è stata pensata come ulteriore aiuto, insieme al tutorial, per insegnanti che in classe vogliono riprendere l'esperienza fatta a teatro.

Qualche settimana dopo lo spettacolo, è stato possibile intervistare una ventina di studenti, i quali hanno ritenuto in generale interessante la rappresentazione. Qualcuno ha provato stupore e curiosità nel vedere applicati concetti studiati solo teoricamente a scuola. Circa la metà ha riconosciuto un errore dei tre commessi volutamente durante la performance. L'errore è lo stesso per tutti e riguarda la relazione colore-temperatura. Si trova nella frase del Ricerc-attore che presenta il diagramma di Hertzsprung-Russell¹: “[...] qua abbiamo le stelle giganti azzurre con le temperature più basse, qua quelle come il nostro sole che emette luce giallastra e alle temperature più alte osserviamo chiaramente le giganti rosse”. La lettura dell'asse delle ascisse del diagramma, in cui si trova espressa la temperatura superficiale delle stelle in kelvin, può facilmente smascherare l'errore. Le giganti azzurre, infatti, hanno temperatura superficiale maggiore rispetto alle giganti rosse, come riportato dal grafico. Nonostante alcuni studenti si siano accorti dell'errore, quasi tutti si sono rimessi in discussione, pensando di avere un ricordo sbagliato. L'altra metà non si è accorta dell'errore, oppure ha pensato che il Ricerc-attore si fosse realmente

¹Il Diagramma Hertzsprung-Russell, detto anche Diagramma HR, rappresenta lo stadio evolutivo delle stelle in base alla loro magnitudine, temperatura superficiale, luminosità rispetto al Sole e classe spettrale. La temperatura superficiale si trova sull'asse delle ascisse e presenta valori invertiti rispetto alla rappresentazione tradizionale, ovvero crescono da destra verso sinistra.

sbagliato. Nessuno ha pensato a una incompetenza da parte del Ricerc-attore.

Uno studente ha affermato di aver capito meglio, grazie allo spettacolo, il fenomeno della somma additiva dei colori. Qualcuno ha ritenuto difficile riuscire a seguire tutte le spiegazioni dello spettacolo, soprattutto se fatte da uno dei tre personaggi. Quest'ultimo è stato pensato proprio per risultare incomprensibile a un pubblico generico o di studenti di scuola superiore, in quanto le sue spiegazioni richiedono una conoscenza di livello universitario della fisica. Alcuni studenti, quindi, erano convinti che le sue spiegazioni dovessero essere capite.

Il Laboratorio PLS "I Colori Invisibili ai Confini dell'Arcobaleno" ha coinvolto solo classi di quarta superiore. Si è svolto tra febbraio e maggio presso un laboratorio del Dipartimento di Matematica dell'Università Statale di Milano ed è stato proposto alle scuole come attività pomeridiana di 3 ore. In totale hanno partecipato sette classi, in sette pomeriggi differenti, per un totale di circa 130 studenti. Le classi sono state principalmente di Liceo Scientifico di Milano o altra provincia (Varese e Lodi) e un Istituto di Bergamo. Nessuna delle classi coinvolte ha visto a teatro lo spettacolo "Luce dalle Stelle".

Gli studenti si sono dimostrati per lo più attenti e interessati, in media poco responsivi alle domande fatte dai coordinatori del laboratorio. Alla fine dell'attività è stato proposto loro di compilare il questionario descritto nel Capitolo 2 e la tabella, anch'essa mostrata nel Capitolo 2. Anche in questo caso il numero di studenti che ha risposto al questionario è stato inferiore alla metà degli studenti totali, determinando una statistica poco significativa per valutare il gradimento dell'attività. L'unica considerazione che si può proporre è il fatto che le valutazioni siano state nella maggior parte positive, tra 4 e 3, su una scala da 1 a 5. Nessuno ha dato un punteggio estremamente negativo. Andranno fatte sicuramente altre ricerche e andranno apportate probabilmente modifiche al laboratorio, ma i risultati sull'apprezzamento restituiscono una visione in generale positiva del lavoro compiuto.

Inoltre, feedback positivi arrivano da alcuni tra i professori che hanno partecipato con la loro classe al laboratorio, che hanno detto di aver apprezzato l'attività. In particolare, a detta loro, per gli studenti è stata un'opportunità per vedere concretizzati in esperimenti pratici concetti visti solo teoricamente a scuola e per esplorare nuovi fenomeni. Inoltre qualcuno ha ritenuto interessante la possibilità di vedere all'opera strumenti che difficilmente sono disponibili a scuola, ad esempio la termocamera.

I professori hanno riferito di aver ricevuto feedback positivi dai ragazzi, che si sono divertiti, hanno potuto vedere fenomeni nuovi e alcune esperienze sono rimaste impresse. Due professori riportano come l'esperimento sull'assorbimento della radiazione UV da parte della crema solare sia rimasta impressa, anche dopo mesi². Nonostante ai ragazzi sia

²Durante l'esperienza a un/a ragazzo/a della classe è stato chiesto di applicare su un lato del viso un po' di crema solare protezione 50. In seguito il/la ragazzo/a, munito/a di opportuni occhiali protettivi,

piaciuto il laboratorio, è stata riferita da alcuni insegnanti la mancata interiorizzazione delle nozioni fisiche presentate da parte degli studenti. Il mancato feedback da parte degli studenti a scuola può essere una ulteriore conferma del fatto che sia necessario ricollegare le attività non formali ad un percorso strutturato, per dar loro continuità. Tra le motivazioni avanzate dai professori una riguarda il fatto che il tempo impiegato (3 ore) fosse maggiore rispetto alla capacità di attenzione dei ragazzi.

Risultati interessanti derivano dall'attività di laboratorio di Teatro Scientifico, in cui è stata proposta agli studenti una attività di drammatizzazione. Il laboratorio analizzato in questo lavoro si è svolto da gennaio a maggio del 2019 presso il Dipartimento di Fisica dell'Università Statale di Milano e ha coinvolto classi di terza, quarta e quinta superiore di Liceo Scientifico e Classico. Per un totale di 25 studenti di diverse età. Il laboratorio ha impegnato i ragazzi una volta al mese per quattro ore pomeridiane. Sono stati svolti 5 incontri in totale, di cui l'ultimo a teatro.

Le ore del laboratorio sono state fatte rientrare nel progetto di Alternanza Scuola-Lavoro per gli studenti del triennio. Il percorso ha previsto anche la partecipazione degli studenti agli spettacoli "Sotto un'altra Luce" [40] e "Luce dalle Stelle" de *Lo Spettacolo della Fisica*, un'uscita guidata al Piccolo Teatro Grassi e la partecipazione a un laboratorio PLS (quello citato in questo lavoro).

Tra le motivazioni a seguirlo che spiccano di più tra gli studenti ci sono: l'interesse e la curiosità per il connubio tra fisica e teatro e il fatto di voler vedere la fisica da un altro punto di vista, nonostante il laboratorio non sia stato scelto volontariamente da alcuni dei partecipanti. Tra i ragazzi pochi conoscevano il Teatro Scientifico. Per quanto riguarda le capacità teatrali, solo alcuni avevano già seguito corsi di teatro nella loro vita, altri si sono avvicinati al teatro per la prima volta in questa occasione. Per quanto riguarda la fisica, qualcuno partiva già con un atteggiamento positivo nei suoi confronti, altri no.

Gli studenti hanno lavorato in gruppi di 4/6 persone con lo scopo di produrre una performance teatrale, basata su un argomento fisico e tramite una qualsiasi modalità di espressione: recitazione, canto, poesia, ballo.

Quattro gruppi hanno proposto una scena di prosa. Un gruppo, invece, ha scritto una poesia sulla concezione della fisica. Due studenti hanno preferito lavorare singolarmente, uno ha scritto un monologo sulla fisica, l'altro una poesia.

In generale i ragazzi hanno saputo lavorare in gruppo, ma vi sono state alcune difficoltà iniziali. La stesura del copione, ad esempio, è stata opera di un solo membro del gruppo in molti casi, senza la partecipazione e il controllo da parte degli altri. Nelle scene di

è stato/a illuminato/a con radiazione UV e ripreso/a con la telecamera UV. Lo strumento ha restituito una immagine visibile in scala di grigi in cui la parte del viso del/la ragazzo/a senza crema appariva grigia, quella con la crema, completamente nera. Tra tutti gli esperimenti questo è quello che ha fatto scaturire più sorpresa tra gli studenti.

prosa alcuni gruppi non hanno saputo congegnare al meglio i ruoli, in modo che gli attori interagissero tra loro il più possibile. Ad esempio una delle rappresentazioni prevedeva in una prima versione una scena in cui un'attrice parla e scrive alla lavagna, mentre gli altri attori ascoltano in disparte senza intervenire.

Tra i temi trattati vi sono stati: il principio di indeterminazione, il tempo, il paradosso di Zenone (dialogo fisica-filosofia), l'arcobaleno, l'evoluzione stellare.

Le attività proposte in laboratorio riguardano sia la fisica che la recitazione. Ad esempio accanto a esercizi teatrali sulla coordinazione e lo spazio, sono proposte conferenze su temi fisici di interesse degli studenti. Quest'anno è stato possibile proporre loro un approfondimento sull'astrofisica e sulla cosmologia, in quanto molti hanno mostrato curiosità per questi argomenti. Circa la metà degli studenti ha contribuito con domande, osservazioni, ragionamenti. In particolare alcuni hanno provato a interpretare i concetti con parole loro, ad esempio uno studente ha riformulato la concezione del tempo relativistico con queste parole: "È come il supereroe Flash che vede tutti lenti o fermi quando corre".

I lavori proposti dagli studenti sono stati a loro volta un'opportunità per approfondire un certo argomento. Una ragazza, ad esempio, ha approfondito autonomamente la fisica legata al fenomeno dell'arcobaleno, studiandone anche miti e leggende, oltre che la fisica della rifrazione.

Un altro esempio riguarda l'approfondimento dei concetti di fisica quantistica, tra cui il principio di indeterminazione e la sovrapposizione di stati. Un gruppo, infatti, ha scritto un copione basandosi sul paradosso del gatto di Schrödinger, partendo inizialmente da idee errate³ e arrivando a una versione finale basata sull'idea corretta, grazie anche all'intervento dei professori del laboratorio. I ragazzi, infatti, a ogni incontro sono stati invitati a presentare il loro lavoro alla classe e ai professori, e a correggerlo, per la volta successiva, con le nuove concezioni acquisite. I professori hanno segnalato le parti fisiche poco chiare o mal interpretate dagli studenti, facendoli riflettere sulle concezioni errate del loro lavoro. Gli studenti sono stati in grado di sistemare le loro opere creando versioni finali prive degli errori iniziali. Nessun gruppo ha perpetuato concezioni sbagliate.

Sono stati segnalati dai professori anche errori stilistici riguardo la presentazione degli argomenti fisici nella scena. I ragazzi sono stati invitati a modificare parti del copione in cui la presentazione dell'argomento fosse più didascalica piuttosto che teatrale. Un gruppo, ad esempio, in una prima versione ha spiegato dettagliatamente il Paradosso di Zenone⁴, come se stesse tenendo una conferenza sull'argomento, piuttosto che uno

³Secondo gli studenti, la descrizione probabilistica della meccanica quantistica deriva solamente dall'impossibilità di avere strumenti adeguati per poter studiare le caratteristiche reali di un sistema, senza perturbarlo.

⁴Il paradosso è detto anche Paradosso di Achille e la Tartaruga e ritiene che Achille non raggiungerà mai la Tartaruga se a quest'ultima viene dato un vantaggio alla partenza, nonostante sia più lenta. La giustificazione deriva dal fatto che nell'istante in cui Achille raggiunge la posizione iniziale della

spettacolo.

È stata proposta agli studenti anche un'attività ponte tra il laboratorio e lo spettacolo "Luce dalle Stelle", che i ragazzi hanno visto. L'attività consisteva nel leggere in gruppo alcuni brani tratti dallo spettacolo e rispondere alle domande: Quali temi scientifici sono trattati? Che messaggio viene dato? Dare un'interpretazione del perché si sono fatte quelle scelte. I brani riguardavano la radiazione ultravioletta, infrarossa vicina e lontana e radiazione visibile, declinata nella percezione dei colori.

Alcuni hanno riferito di esser venuti a conoscenza, grazie l'attività, della suddivisione della banda dell'infrarosso (vicino e lontano). Qualche gruppo ha identificato nel brano dei pezzi relativi alla relazione tra temperatura ed emissione. Chi aveva il brano in cui si parlava della legge di Stefan-Boltzmann, che lega la potenza emessa per unità di superficie alla quarta potenza della temperatura, ha affermato, invece, di non aver trovato la relazione. Ha destato interesse tra gli studenti la domanda, proposta nello spettacolo, "[...] che forma hanno realmente le cose?"⁵. Tra i commenti scaturiti dalla discussione a riguardo, se ne ripropongono due, fatti da due studentesse: "La realtà è diversa se la vediamo con l'infrarosso, non è un'altra realtà, è solo che noi non la vediamo" e "È come se facessi una foto di me con altre fotocamere, ad esempio se faccio una radiografia vedo sempre me stessa, ma vedo le ossa".

Dopo la discussione sulla visione a diverse lunghezze d'onda, tre ragazze hanno scritto spontaneamente una breve scena in cui hanno reinterpretato il tema del brano a loro assegnato. Nella scena hanno immaginato di utilizzare telecamere diverse, ad esempio una termocamera, per guardare il mondo, coniugando efficacemente l'argomento fisico alla pratica teatrale. Sono state in grado di cogliere il tema e lo hanno rivisitato utilizzando parole ed espressioni loro, dimostrando di aver interiorizzato l'argomento, anche da un punto di vista fisico. È da sottolineare il fatto che queste ragazze durante il laboratorio sono rimaste spesso in disparte, partecipando poco alle attività. Si ritiene, quindi, che la loro iniziativa sia basata su un reale interesse per l'argomento. La scena proposta dalle studentesse ha anche destato domande da parte di un ragazzo che si è incuriosito riguardo alle telecamere in grado di rivelare radiazione diversa da quella visibile. In questo caso, quindi, si è innescato un meccanismo a catena per cui la performance rappresentata da studenti ha generato curiosità nei ragazzi che hanno assistito come pubblico.

Gli studenti in generale si sono mostrati attivi ed entusiasti, proponendo le loro idee e i loro ragionamenti, rivelandosi creativi nello scrivere e rappresentare copioni e poesie.

Tartaruga, essa si è mossa in avanti, distanziandolo ulteriormente. Il paradosso ha origine dal fatto di ritenere il tempo infinito. Ponendo, invece, una distanza e un tempo finiti tra la partenza e l'arrivo, Achille supererà la Tartaruga, risolvendo il paradosso.

⁵Durante lo spettacolo viene mostrata l'immagine della Galassia M82, detta Galassia Sigaro, a causa della sua forma nel visibile. Accanto è mostrata l'immagine della stessa galassia in banda ultravioletta. Nella seconda immagine la galassia ha una forma diversa, somigliante a un gabbiano ad ali spiegate. Da questo confronto deriva la domanda

Hanno saputo lavorare in gruppo e sono stati attenti durante le rappresentazioni degli altri, dando consigli e ponendo domande ai loro compagni, non solo sullo stile, ma anche sulla fisica.

Durante il loro lavoro hanno sperimentato cosa voglia dire ‘fare fisica’, in quanto si sono messi in gioco, in base alle loro preferenze e alle loro concezioni, hanno riflettuto sulla fisica e hanno approfondito un argomento. In seguito alla correzione da parte dei professori del laboratorio, si sono nuovamente documentati, alla luce delle nuove concezioni, e hanno modificato i loro lavori, qualcuno stravolgendo completamente l’idea iniziale.

La partecipazione maggiore e più entusiasta è stata da parte di ragazzi che, a detta del loro professore di fisica, non hanno mai mostrato particolare interesse per la materia e presentano voti scolastici medio-bassi. Inoltre, studenti che sembravano meno presi dal laboratorio, in alcuni momenti si sono dimostrati interessati e hanno fatto domande, in particolare durante la conferenza sull’astrofisica.

Alcuni studenti avevano aspettative molto basse sul laboratorio, ma si sono ritenuti soddisfatti alla fine dell’attività.

Alla maggior parte degli studenti il laboratorio è piaciuto. I ragazzi hanno mostrato un grande impegno nello scrivere e nell’interpretare i copioni. Questo ha implicato un approfondimento dei temi fisici trattati nei loro spettacoli, che è stato possibile anche grazie all’intervento dei professori. La prospettiva lasciata dal laboratorio è stata definita da una studentessa come segue: “Ho letto articoli su come gli scienziati rovinino la bellezza (con la razionalizzazione), invece ho capito che non è così, [la fisica] è un altro modo di vedere”. Il commento segue quello che è stato il tema ricorrente del laboratorio, ovvero la fisica come finestra che apre verso nuove versioni della realtà, altrimenti invisibili per l’uomo.

Un consiglio riguardo al laboratorio scaturito quasi all’unanimità dai ragazzi è quello di dare lo stesso spazio riservato alla fisica anche al teatro, poiché molti hanno sentito la mancanza di basi teatrali accanto a quelle fisiche.

In conclusione il lavoro di tesi ha affrontato la creazione di un percorso didattico formale, che si è delineato assistendo a rappresentazioni dello spettacolo di teatro scientifico “Luce dalle Stelle” e prendendo parte alla progettazione e presentazione del laboratorio “I Colori Invisibili ai Confini dell’Arcobaleno”. Per una valutazione quantitativa delle esperienze informali e non formali è stato progettato e testato un questionario. Si propone in questa tesi anche una versione commentata del copione dello spettacolo, che possa fungere da ulteriore supporto per una integrazione scolastica dell’attività informale.

Il tutorial creato in questo lavoro si presenta come un nuovo approccio alla didattica della fisica per quanto riguarda il tema delle radiazioni, poiché si ripropone di integrare i contesti informale e non formale, descritti in precedenza, in un percorso coerente. In questo modo lo spettacolo e il laboratorio one shot non sono attività marginali all’ap-

prendimento dei concetti fisici, senza alcuna correlazione con l'attività scolastica, ma ne sono parte integrante e necessaria per un apprendimento significativo.

Per capire l'efficacia e l'applicabilità del tutorial saranno necessarie sperimentazioni in classe, previste per la primavera del 2020. Il tutorial verrà, quindi, affinato in base ai risultati delle sperimentazioni e se ne potrà determinare la validità dal punto di vista didattico. Durante il lavoro è stato possibile anche valutare didatticamente un'attività di drammatizzazione proposta a studenti delle superiori, tramite il laboratorio di Teatro Scientifico. L'attività ha fornito risultati positivi per quanto riguarda l'efficacia di un percorso di teatro scientifico applicato allo studio della fisica. Gli studenti, infatti, sembrano aver approfondito e capito i concetti fisici che hanno messo in scena. Alcuni hanno anche riproposto dei concetti fisici trattati nello spettacolo "Luce dalle Stelle", reinterprestandoli in modo personale e secondo il loro modo di pensare e di vedere il mondo, senza troppi errori nei contenuti fisici. Gli studenti hanno partecipato attivamente e con entusiasmo, anche chi non era molto interessato ogni tanto è intervenuto. Si sono dimostrati creativi, poiché ogni performance è stata originale, diversa dalle altre, personale, con pochi errori di fisica. Si è notato un grande impegno da parte loro, hanno fatto varie versioni dei loro lavori e hanno seguito le precisazioni dei professori del laboratorio e i consigli dei compagni. Alcuni hanno dimostrato di aver approfondito l'argomento fisico utilizzato nella scena teatrale. Qualche lavoro ha presentato una tematica fisico-filosofica, nessuno tematiche etico-scientifiche, nella maggior parte l'argomento fisico è stato il fulcro dello performace.

Non sarebbe stato possibile senza un intervento da parte dei professori, che hanno fatto in modo di riportare l'attenzione dei ragazzi sulla fisica, o sul linguaggio teatrale, e hanno chiarito loro delle concezioni errate sui fenomeni fisici affrontati. Lavori di ricerca presenti in letteratura hanno chiesto agli studenti di creare copioni riguardo a temi etico-scientifici [18]. La novità del laboratorio consiste nell'aver fatto creare agli studenti lavori solamente su temi fisici, tralasciando problematiche e dibattiti ad essa legate.

Appendice A

Copione commentato di “Luce dalle Stelle”

LUCE DALLE STELLE

Ultime modifiche 24/11/2017

Autori

Marina Carpineti, Marco Giliberti, Nicola Ludwig, Stefano Sandrelli.

PERSONAGGI

Professor Marco Giliberti, fisico: G

Professoressa Marina Carpineti, fisico: C

Professor Nicola Ludwig, fisico: L

Commento: Ogni personaggio impersona un atteggiamento legato al mondo della scienza, in particolare della comunicazione scientifica, ed esprime una doppia natura con lati positivi e negativi.

Il Professor Marco Giliberti rappresenta il fisico che mette talmente tanta passione ed entusiasmo in quello che spiega, da cadere in uno stato di *trance* in alcuni momenti dello spettacolo. Il linguaggio che lo accompagna è, molte volte, quello puntuale della matematica, che riesce a spiegare meglio di un linguaggio verbale i significati più profondi della fisica, ma risulta poco comprensibile a chi non conosce, o conosce solo a un livello scolastico superiore, la materia. Eppure, nonostante la sua incomprensibilità, sono affidati a lui i momenti più poetici dello spettacolo.

La Professoressa Marina Carpineti impersona la ricercatrice che si preoccupa del pubblico e cerca di rendere il più comprensibile possibile le sue spiegazioni tramite l'utilizzo di esperimenti e dimostrazioni pratiche e di un linguaggio più comune, senza banalizzare la fisica.

Durante il corso dello spettacolo, però, viene maltrattata dai due fisici uomini, che si rivolgono a lei con nomi sbagliati, ridono di lei e la interrompono mentre parla. Come si vedrà al termine dello spettacolo, il comportamento tenuto dai due personaggi maschi nei suoi confronti, è stato scelto per far percepire direttamente al pubblico l'ingiustizia di un atteggiamento di questo genere. Alla fine dello spettacolo si mostrerà che la scienza, quella vera, è esente da questo tipo di discriminazioni. Questo è uno degli errori inseriti appositamente all'interno dello spettacolo di cui si parla al termine di questo paragrafo.

Il Professor Nicola Ludwig è lo stereotipo del fisico egocentrico. Le sue frasi iniziano spesso con un "Io" e ci tiene a precisare di essere il massimo esperto in molte discipline. È anche il più permaloso, infatti quando non viene preso sul serio, viene contraddetto o viene messo alle strette esce di scena offeso. Nonostante questo si mette in gioco volentieri in nome della scienza e dimostra sempre grande passione per quello che fa. Il linguaggio che utilizza è comprensibile anche a chi non ha molta esperienza in campo fisico.

Sebbene abbiano tre personalità molto diverse, ad accomunarli tutti è la passione per quello che fanno e per la fisica, di cui riconoscono in primo luogo la bellezza.

Infine il Divulgatore Danelli è un personaggio che si mostra solo alla fine dello spettacolo e impersona il divulgatore scientifico che si occupa principalmente di sensazionalismo piuttosto che di scienza. Utilizza un linguaggio alla portata di tutti, ma che risulta a volte semplicistico o addirittura sbagliato. Benché tenda all'esagerazione, gli viene dato spazio in libreria ed in programmi televisivi come opinionista scientifico, con il rischio di creare un'idea sbagliata della scienza nell'opinione pubblica.

Nello spettacolo sono stati volutamente commessi tre errori, quattro contando l'atteggiamento di G. e L. nei confronti di C., come accennato in precedenza. Gli errori vogliono far riflettere il pubblico sulle 'trappole' della comunicazione scientifica, in cui può cadere chiunque non conosca l'argomento in questione. L'invito finale è quello di non fidarsi ciecamente di chi parla di fisica,

nonostante sia un professore, ma di ascoltare in modo critico e verificare quanto sentito. Gli errori saranno relativi a tre aree: la lettura dei dati, la semplificazione attraverso gli esperimenti pratici e l'analogia per dedurre nuove ipotesi.

Accanto a questi punti di attenzione, vi è un ulteriore spunto di riflessione riguardante la discriminazione compiuta dai Ricerc-attori uomini nei confronti della collega donna. Il loro comportamento, per tutto lo spettacolo, sarà irrispettoso e autoritario, seguendo le impronte di una infondata credenza per cui le donne siano meno portate degli uomini nelle materie scientifiche. L'errore vuole anche porre l'accento sul fatto che

ABBIGLIAMENTO

C: Pantaloni e maglia neri.

G: Camicia bianca con sotto maglietta nera, pantaloni scuri, cellulare in tasca.

L: Camicia bianca pantaloni scuri, cellulare in tasca (sotto si scoprirà una tutina rossa con maglietta bianca con scritto "Ludwig" in rosso).

SCENA I: La luce dalle stelle

Commento: La prima scena introduce i tre personaggi principali dello spettacolo (Professor Marco Giliberti, Professoressa Marina Carpineti, Professor Nicola Ludwig, da ora in poi G., C. e L.) e dà un'idea delle loro personalità peculiari. Si configura subito lo spettacolo come una conferenza scientifica in cui si indagherà la luce proveniente dalle stelle, parlando delle diverse lunghezze d'onda che compongono la radiazione che giunge fin sulla Terra e che può essere riprodotta in laboratorio (o su un palco). Fin dall'inizio si crea un senso di attesa per l'arrivo di un quarto personaggio (il Divulgatore Danelli) che, però, non arriverà mai, come il pubblico scoprirà verso la fine.

[Sullo sfondo un telo di proiezione. Davanti, due tavoli ai lati con sopra: lavagna luminosa, grosso laser banchetto ottico per esperimento speckles, lampade UV, bacchette fluorescenti, prisma e proiettore da diapositive. Sotto il tavolo di sinistra: vetro smerigliato. Sotto il tavolo di destra: vaso dewar. Dietro le quinte boccia di vetro, cappellini, guanti, Schweppes. A lato del tavolo una lavagna a fogli. Sulla lavagna è appeso un camice bianco con un cellulare nella tasca. Un pannello nero di plexiglas copre parzialmente il foglio della lavagna. Sulla parte scoperta si legge la scritta "LUCE"]

[Con il pubblico che entra in teatro gli attori si aggirano preoccupati, facendo telefonate e creando allarme generale.]

G *[sale sul palco]*: Buona sera, sono molto imbarazzato, ma come sapete qui con noi avrebbe dovuto esserci Salvatore Danelli, che avrete senz'altro visto più volte in televisione. Purtroppo non arriva e non riusciamo a trovarlo, d'altra parte gli esperimenti li abbiamo qui pronti e cominciamo a dire due cose intanto che lo aspettiamo.

Allora... direi di entrare subito in argomento e di iniziare a parlare della luce che proviene dalle stelle. Infatti, la maggior parte della luce nel nostro universo nasce proprio nelle stelle; e nasce nelle stelle perché queste sono corpi caldissimi e, come ben sapete, i corpi caldi emettono luce.

Cominceremo quindi col capire perché le stelle sono calde...

Sono calde perché al loro interno si sviluppano reazioni nucleari... e queste, come facilmente potete intuire, sono dovute ai nucleoni che interagiscono fra loro. Vi chiederete: come sono nati i

nucleoni? Lo capiremo alla luce del modello del Big Bang: siccome tutti gli adroni hanno una massa $Mc^2 > 100\text{MeV}$, quando la temperatura kT dell'universo è scesa al di sotto di questo valore... cioè dopo circa 10^{-4} secondi, quasi tutti gli adroni, con l'unica eccezione di neutroni e protoni e delle loro antiparticelle cominciano a decadere in leptoni, fotoni e nucleoni che, come senz'altro sapete, sono abbastanza stabili da lasciare un piccolo residuo, nonostante si annichilino con le loro antiparticelle.

Commento: Introduzione al tema generale dello spettacolo, la luce dalle stelle. La prima domanda è: Perché le stelle sono calde e perché generano luce? Sembra una domanda semplice, in realtà, come sottolinea il Ricerc-attore con la sua spiegazione, la trattazione è complessa e richiede conoscenze di fisica nucleare avanzata. Già dalla prima scena si è quindi catapultati nel mondo della fisica, senza mezze misure, tramite il linguaggio specifico della materia che si esprime con unità di misura, grandezze e costanti come: “MeV”, “kT”, “ Mc^2 ”. G. dà per scontate queste nozioni, perché il suo linguaggio per essere chiaro deve essere rigoroso e non cambiare in base al pubblico a cui si rivolge, perché la fisica non cambia in base a chi la studia. Non si rende conto che concetti per lui ormai consolidati, per altri potrebbero risultare incomprensibili. L'utilizzo di intercalari: “Come ben sapete”, “come facilmente potete intuire” vogliono provocare un senso di inadeguatezza nel pubblico, che avrà capito poco o nulla della spiegazione e avrà difficoltà a seguire il ragionamento. In particolare l'introduzione può avere un duplice effetto: mettere gli spettatori in uno stato mentale di “attenzione” oppure in uno stato di “scollegamento”. Ovvero le persone cercheranno di prestare attenzione come si fa a scuola o in università alle nozioni presentate, oppure si concentreranno su altri elementi, lasciandosi coinvolgere emotivamente dalla musica, dall'espressione poetica dei concetti e dall'entusiasmo di G. Quest'ultima condizione è ciò che si auspica per il pubblico dello spettacolo.

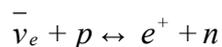
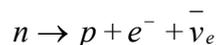
[Intanto C. entra a margine del palco e si accosta educatamente a G. alzando il ditino.]

Commento: C. fin da subito cerca di riportare G. al mondo “reale”

G: *[Rivolto a C]* ... Ancora solo due concetti...

Così che, come è facile capire, a una energia minore, diciamo di 20 MeV, solo circa un miliardesimo del numero dei protoni originali è sopravvissuto a formare la materia che conosciamo, che poi dà quindi luogo alle reazioni nucleari che abbiamo appena nominato. Insomma, potete facilmente intuire che dopo circa 1 secondo, trascurando l'immenso numero di leptoni e fotoni, i prodotti del Big Bang erano neutroni e protoni, la cui abbondanza relativa era determinata, ovviamente, dalle interazioni deboli:

[Va alla lavagna luminosa e comincia a scrivere sul lucido. L nel frattempo è salito.]



C: *[nervosamente parlottando con L. lamenta il livello troppo specialistico dell'eloquio di G.]*

[L. Concorda e tenta di capire come deviare il discorso con eleganza]

G: *[Rivolto a C e L.]* Shhh! Altrimenti i signori fanno fatica a seguirmi! *[Rivolto al pubblico.]* Al procedere dell'espansione dell'universo, come tutti sapete, i nucleoni diventano non relativistici, e così possiamo calcolare molto facilmente il rapporto neutroni-protoni all'equilibrio utilizzando la conosciutissima e semplice statistica classica di Boltzmann.

Commento: Le formule ed i concetti fisici espressi da G. sono del tutto corretti, non c'è alcun intento di semplificazione.

[C. parte, L la trattiene e raggiunge G.]

L: Carissimo Marco vedi, è tutto molto interessante e come sempre nelle tue esposizioni estremamente chiaro, tuttavia, ecco quando ti ho scritto quell'SMS non avevo abbastanza caratteri e ... ecco non siamo a quella conferenza per i dottorandi di astrofisica della SISSA di Trieste, ma in effetti siamo a **** (citare la manifestazione/teatro) e il pubblico è leggermente... ecco, diciamo meno preparato, ti chiederei di semplificare, sì insomma, di cambiare un attimo il linguaggio.*[Torna a destra da C.]*

G: Va bene, allora andiamo direttamente alle fonti: usiamo il linguaggio proprio della meccanica quantistica. Was besagt die Quantentheorie? Sie sagt die Wellenstrahlung ist kein kontinuierlicher Fluss von Energie. Sie bestehet aus einzelnen Teilen oder stoßen, die große dieser Energie Päckchen ist proportional der Schwingunzahl. Niels Bohr wendete die Quantentheorie als erster auf das Atom an.

C: *[sottovoce ma decisa a L.]* Basta!

L: Ferma, ferma. Ci penso io...

L: *[Torna da G. e lo interrompe.]* Marco è arrivato un pacco in laboratorio!

G: Quale?

L: Ti ricordi quel giochino, ehm...il modellino che avevamo ordinato quando ancora c'erano i soldi?

G: Sì, quel del 2005!

L: ... con le palline, i bastoncini.

G: Quelli per costruire i modelli atomici

L: Sì!

G: Anche il Benzene?

L: Siiii è arrivato, è di là. Vieni, vieni a giocare.

Commento: questa scena esaspera lo straniamento di G, sempre più appassionato della sua materia, ma sempre più scollegato dal mondo esterno.

Scena II: La conferenza

C: *[Sola sul palco.]* Bene, come avrete capito, oggi siamo qui per una conferenza che si intitola "Luce dalle Stelle" in cui vi parleremo dell'osservazione del cielo alle varie lunghezze d'onda. Per introdurre l'argomento avevamo pensato di mostrarvi delle immagini e in attesa di cominciare direi di partire con quelle:

*[Parte musica con proiezione di slide, la prima riporta il titolo
"LUCE DALLE STELLE"
e le successive sono foto astronomiche.
Sfuma la musica e finiscono le slide.]*

Commento: È introdotto il tema della conferenza (e dello spettacolo) con un linguaggio diverso, ma più comprensibile rispetto a quello usato da G. Il tema sarà infatti lo studio della radiazione proveniente dalle stelle rilevata a lunghezze d'onda diverse. Le stelle emettono radiazione a varie lunghezze d'onda, poiché non è possibile avere delle stelle sul palcoscenico si studieranno degli esperimenti che prevedono l'utilizzo di quelle lunghezze d'onda.

C: Direi adesso di dare un inizio più ufficiale e di fare le presentazioni almeno di chi c'è. Si occupa di radiazione infrarossa, la applica allo studio dei monumenti, degli sportivi e anche degli animali... ECCO A VOI IL PROFESSOR NICOLA LUDWIG!...

[L. entra trionfante accogliendo gli applausi e coprendo con le braccia C. che cerca di attirare la sua attenzione e di farsi presentare.]

L: Ah, sì, certo. Bravissima la mia collega, si occupa di ... ehm non lo so, ma è bravissima e soprattutto bella. La professoressa Carpineti!!!

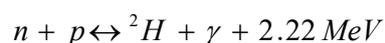
Commento: Entra in gioco il tema della discriminazione. L. dimentica il nome della collega C. e ne sottolinea le qualità estetiche piuttosto che quelle lavorative/accademiche. Come si è detto, questo aspetto verrà sviluppato e stigmatizzato nell'ultima parte dello spettacolo ma fino alla fine lo spettatore assiste a questo comportamento come se fosse normale.

C: *fermando gli applausi* Ehm, Carpineti.

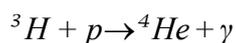
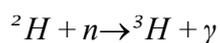
L: Come? Ah sì certo... Carpinetti!

C: Carpineti... una t sola ... E poi naturalmente, lo avete già conosciuto, si occupa di fisica teorica ma capisce anche qualche esperimento ... ECCO A VOI IL PROFESSOR MARCO GILIBERTI!

G: *[entra spedito e si inserisce tra C. e L. e senza soluzione di continuità riprende a parlare]* Grazie, grazie! Ma torniamo al nostro discorso: *[si porta alla lavagna luminosa]* insomma, stavamo dicendo *[scrive sul lucido la seguente formula]:*



[mentre scrive] neutrone più protone danno deuterio più gamma più due punto ventidue MeV! Ricordatevi questo numero. E si arriva così alla produzione dell'elio. Vediamo: deuterio più neutrone danno il trizio più gamma e il trizio più un protone danno l'elio. *[Intanto Scrive]*



Commento: Intanto che scrive, G. copre con il corpo la proiezione della lavagna luminosa, in modo che il pubblico non possa leggere. Il Ricerc-attore è talmente preso dalla spiegazione che dimentica di stare parlando a un pubblico.

C: *[Rivolta a L. mentre G. scrive.]* Impossibile! *[E spinge L. verso G.]*

L: *[Corre da G. trattandolo come un pazzo e lo interrompe assecondandolo.]* Sì sì certo contiamo insieme: elio 3 elio 4 elio 5, elio 6, no quello no non esiste... L: *[Porta fuori scena G.]*

G: Elio 7, elio 8.

Scena III: Speckle, come la luce stellare interagisce con l'atmosfera terrestre

C: Finalmente sola! Il mio collega si è fatto prendere un po' la mano...Ora vi parlerò della luce dalle stelle a modo mio, facendo un esperimento! Vi spiegherò un fenomeno straordinario che probabilmente vi sarà capitato di notare e di cui forse vi sarete chiesti l'origine. Guardando le stelle avrete notato che la luce che ci arriva è intermittente e forse sapete che questo dipende dalle turbolenze dell'atmosfera che la luce deve attraversare, ma magari non vi è chiaro in che modo. Ora vi mostrerò un esperimento grazie al quale simulerò quello che accade alla luce dalle stelle che attraversa la nostra atmosfera. Ecco è tutto qui sul tavolo...

[G. e L. intanto rientrano ciascuno con una banana in mano e sbocconcellandola si posizionano a destra e sinistra del tavolo.]

Commento: Sono poste le seguenti domande: Cosa succede quando la luce dalle stelle attraversa l'atmosfera terrestre? Come arriva a noi la luce stellare? Perché a volte è intermittente? C. vuole dare la risposta con un esperimento. L'ingresso dei due colleghi che la interrompono con il loro comportamento irrispettoso è uno dei tanti elementi di "maltrattamento" che si troveranno durante tutto lo spettacolo. L'utilizzo della banana come frutto è una metafora dell'arretratezza culturale di L. e G. che ancora attribuiscono alla donna un ruolo inferiore all'interno della comunità scientifica.

C: *[Rivolta verso G. e L.]* Ma cosa fate? Un po' di rispetto! Ora che parlo io voi venite qui a fare merenda! *[Toglie loro le banane]* Se non avete niente da fare, venite ad aiutarmi a spiegare al nostro pubblico in cosa consiste l'esperimento!

[Suadente, rivolta al pubblico.] Per simulare la luce che arriva dalle stelle ci serve prima di tutto una sorgente di luce e per questo useremo un laser. *[C. prende dal tavolo un lungo laser cilindrico nero]* Ecco, questo è un laser. Ludwig tieni il laser. *[Porge un laser a L.]* Per motivi tecnici che non sto a spiegarvi ci serve anche una lente *[rivolta a G.]*: Giliberti tu fai la lente. *[G. fa la lente piegandosi in avanti, con le braccia penzoloni e le mani incrociate, allargando le braccia davanti alla pancia come per fare una lente.]*

Infine per simulare le disomogeneità dell'atmosfera useremo un vetro smerigliato *[prende un grosso vetro smerigliato]* che altro non è se non un materiale trasparente con delle irregolarità di spessore. Quindi riassumiamo: abbiamo un laser, una lente...

[si accorge che G è piegato in avanti.] Giliberti, però la lente deve intercettare il fascio *[G. si gira verso C., mettendo il sedere verso il laser tenuto da L.]*

E poi il vetro smerigliato.

G: *[Rendendosi conto del laser che L. gli sta infilando interrompe C.]*: Ma insomma! Io sono un docente universitario e sono qui a $\pi/2$ a fare la lente con...! *[L. indietreggia e nasconde il laser]* Forse è il caso che ve lo spieghi io con la legge dei punti coniugati e una semplice trasformata di Fourier..!

Commento: Elemento di comico grottesco, presa in giro di chi vuole spiegare la scienza semplificando troppo. L' "essere a $\pi/2$ " davanti alla scienza è il *leitmotiv* di tutto lo spettacolo. Significa che senza avere una nostra conoscenza degli argomenti fisici siamo in balia di altri che possono raccontarci le cose in modo sbagliato o in modo troppo semplicistico. Si capirà meglio questo concetto nella scena con il Divulgatore Danelli. G. pensa che solo la matematica possa spiegare in modo preciso e chiaro il fenomeno delle speckles. che viceversa C. vuole mostrare in tutta la sua bellezza convinta della sua potenza evocativa.

C: No no no, ti prego. Faccio l'esperimento! *[corre dietro al banco.]* Per simulare il caso particolare della luce dalle stelle che attraversa le disomogeneità atmosferiche guardiamo cosa accade alla luce di questo laser quando attraversa una regione perturbata, simulata dal vetro smerigliato. Cosa vedete? La luce è stata diffusa. Sullo schermo vedo una regione uniformemente illuminata. Ma guardate cosa vede un osservatore quando guarda verso la sorgente di luce.

Questo è proprio il nostro punto di vista quando guardiamo le stelle. La luce che arriva a noi ha attraversato l'atmosfera e, come quella che attraversa il vetro smerigliato, è stata diffusa. Però quando noi guardiamo verso l'alto non ce ne accorgiamo. Ma ora guardiamo l'esperimento già preparato qui sul tavolo, dove ho usato un vetro con una smerigliatura più grossolana che meglio simula l'atmosfera. *[Accende il laser e lo schermo sullo sfondo si riempie di macchie di luce sul fondo buio.]* Guardate che meraviglia: quando la smerigliatura è grossa, proprio come lo sono le disomogeneità dell'atmosfera, la luce diffusa ci appare maculata con zone molto luminose e zone buie distribuite nello spazio in modo irregolare.

Quelle macchioline sono dette "speckles" e sono il risultato di complessi fenomeni di interferenza costruttiva e distruttiva tra le onde elementari diffuse in tutte le direzioni dalle asperità del vetro. Prima non le notavamo perché il vetro aveva una smerigliatura fine mentre il vetro montato sull'esperimento ha una smerigliatura più grossa.

[G., L. indicano con la mano le speckles sullo schermo.]

G *[comincia a contarle e si dirige sognante verso il laser]*: 1, 2, 3, vediamo quante ce ne sono; ce ne saranno 4-500 al metro quadro. Sono aree di coerenza che seguono una statistica poissoniana, le cui dimensioni medie sono date da quelle del disco di Airy...

$$\sin\theta = 1.22 \frac{\lambda}{d}$$

Commento: Quanto spiegato da G. riguarda la dimensione delle speckles, che ha un valore caratteristico definito tramite la legge di Airy. La formula, infatti, restituisce la dimensione angolare del disco di Airy (θ), in cui la d al denominatore rappresenta la dimensione dell'area illuminata e λ la lunghezza d'onda della radiazione. In questo caso, però, la formula risulta del tutto incomprensibile.

C: Sì, Giliberti... sono tantissime! [*C. fa girare su sé stesso G. e lo spinge indietro verso lo schermo*] Ma torniamo alla luce dalle stelle che è intermittente. Il motivo è che le disomogeneità nell'atmosfera non restano ferme. Ora guardate cosa succede quando metto in movimento il vetro smerigliato. Le speckles cominciano a muoversi [*G. e L. girano su sé stessi in fase con le speckles*] e di conseguenza quando guardiamo una stella davanti ai nostri occhi si avvicinano zone luminose e zone buie e noi vediamo la stella che si accende e che si spegne, che si accende e che si spegne che si accende e che si spegne.

Commento: G. e L. sono presi dalla meraviglia e dallo stupore quando C. fa vedere loro l'esperimento. G. accenna alle leggi fisiche che sottendono il fenomeno delle speckles. Questo vuol dire che, nonostante i fisici conoscano la matematica e la fisica dietro ad un fenomeno, non vuol dire che per loro il fenomeno perda la sua bellezza. G. e L. sono addirittura emozionati dall'esperimento.

L'esperimento di C., però, benché sembri intuitivo e sia spiegato con sicurezza, racchiude in sé il primo errore inserito appositamente nello spettacolo. Si tratta di un errore che il pubblico non può neanche intuire perché estremamente tecnico e consiste nel fatto che la dimensione delle speckles non dipende dalla dimensione della grana del vetro smerigliato, ma dalla dimensione dell'area illuminata dal vetro. In alcuni modelli astrofisici, le stelle, poiché molto lontane dalla Terra, possono essere approssimate con sorgenti puntiformi. La luce che attraversa l'atmosfera dà luogo al fenomeno delle speckles, che sono molto grandi per la proporzionalità inversa tra dimensione della sorgente e dimensione delle speckles. Come di consueto, le spiegazioni teoriche di G. sono corrette, ma incomprensibili e questo pone il problema della semplificazione di un argomento complesso, che può introdurre errori. Il senso di questo errore verrà chiarito alla fine dello spettacolo.

G: Ma si spenga un po' lei!

G: Comunque brava Marina! È davvero bello, proprio bello e interessante questo esperimento, e convincente!

C: Grazie...!

L [*barcollando*]: Cara Marina questa dimostrazione così illuminante ha un difettuccio però non ti devi vergognare, succede a tutti anche ai grandi. Lo diceva anche l'altrettanto esimio collega Albert Einstein: le proposizioni della fisica sono precise nella misura in cui non si riferiscono alla realtà e si riferiscono alla realtà solo nella misura in cui sono imprecise.

G: Certo, questo introduce il problema della modellizzazione in fisica.

C: Sì, lui la fa difficile! Semplificando: se dovessi portare una stella sul tavolo incontrerei un po' di difficoltà e così devo rinunciare a una parte di realtà.

G: Tutto sta a distinguere gli effetti primari da quelli secondari.

L: Per essere concreti: hai sbagliato due cose! Primo le stelle non emettono luce laser

C: certo, non hanno una luce coerente e collimata

L: [*ridendo sarcasticamente*] Secondo, veramente pacchiano, non esistono stelle verdi!

Commento: In particolare bisogna capire quali siano gli effetti primari, da tenere, e gli effetti secondari, da eliminare, ma la differenza tra questi due elementi non è conosciuta a priori. Si inizia da ipotesi per arrivare infine al modello generale sempre valido. A scuola c'è la tendenza a non soffermarsi sull'aspetto modellistico di alcuni problemi fisici. Si sottintende spesso la modellizzazione all'interno di un enunciato o in una spiegazione di un fenomeno, anche nei libri di testo ufficiali, creando ambiguità nella comprensione.

C: Certo! Le stelle sono bianche!

G: Questo è legato al problema della visione notturna, è una questione di coni e bastoncelli: i bastoncelli sono impiegati per la visione scotopica, monocromatica, sono più sensibili alla luce ma non lo sono ai colori.

L: Non esattamente. Sembrano bianche, ma a un osservatore attento, soprattutto per comparazione, appaiono delle tonalità sul rosso piuttosto che sull'azzurro.

C: Ma magari l'astrofisica del XX secolo può aiutare il nostro pubblico a comprendere meglio...

L: Certo l'astrofisica del XX secolo ha determinato con chiarezza la relazione che esiste fra il colore di una stella e la sua temperatura superficiale. Beppe se per favore agevolami con la slide...

Scena IV: Perché le stelle non sono verdi?

L: Questo è il diagramma di Hertzsprung-Russell. Sull'asse orizzontale è riportata la temperatura delle stelle e su quello verticale la loro luminosità [*G. segue le spiegazioni sulla slide con un puntatore laser*] seguendo lo stradone principale è possibile seguire i differenti tipi di stelle in una popolazione, dove le differenti posizioni dipendono dalla massa. Osservate, comunque che a ogni temperatura è associato un colore prevalente: qua abbiamo le stelle giganti azzurre con le temperature più basse, qua quelle come il nostro sole che emette luce giallastra e alle temperature più alte osserviamo chiaramente le giganti rosse...

Commento: Qui si trova il secondo errore che compare nello spettacolo. L. gioca su una concezione di senso comune nella nostra società per cui oggetti caldi hanno un colore tendente al rosso, mentre oggetti freddi hanno colore azzurro/blu. Basti pensare al fuoco o ai metalli incandescenti che hanno alte temperature e appaiono di colore rosso. L. commette un errore nell'illustrare il diagramma di Hertzsprung-Russell, che verrà spiegato alla fine. Nonostante gli spettatori abbiano davanti agli occhi il grafico con tutti i dati necessari, possono rimanere intrappolati, come avviene se si segue ciecamente quello che dice il relatore senza verificare. L. gioca anche sul fatto che l'asse delle temperature superficiali del diagramma ha valori invertiti rispetto ad altri grafici, ovvero i valori aumentano da destra verso sinistra e non viceversa. Il motivo di questa convenzione ha origini storiche poiché il diagramma originario di Hertzsprung e Russel aveva in ordinata la magnitudine stellare e in ascissa la classe spettrale (O, B, A, F, ...) senza sapere ancora a cosa corrispondessero. In seguito si è capito che passando da una classe spettrale ad una successiva, la temperatura superficiale delle stelle nella prima classe era maggiore rispetto alla temperatura delle stelle nella seconda classe e questo valeva per ogni salto di classe spettrale e per ogni stella della classe.

Attualmente si mantiene per convenzione la scala delle temperature invertite per permettere continuità con il diagramma iniziale.

G: *[Tirando fuori dalla tasca il cellulare interrompe L. perché riceve una telefonata]* Scusate, scusate... la vibrazione. Pronto! **L se ne va nel pubblico offeso** Ciao Stefano!... Certo, certo... ancora? Ma quando finisci in RAI?...Va bene, OK, fai in fretta però, Sì...sì ...sì...

C: *[rivolta al pubblico]* Vi prego di scusarci... E' Danelli. Forse sta arrivando...

G: Si ciao ciao, baci, baci... *[attacca il telefono e si rivolge al pubblico]* Infatti, era Danelli. E' ancora in RAI. Ha detto di lasciar perdere le stelle, che l'esperto è lui, e di parlare piuttosto del colore che su questo ne sappiamo di più...

Commento: Il divulgatore si configura già da ora come un personaggio egocentrico che si dà molta importanza a causa della fama acquisita tramite programmi televisivi.

Scena V: Cosa emettono le stelle e come sappiamo la loro temperatura

L: *[dalla platea torna sul palco]* Beh certo bravo Danelli che sa riconoscere gli scienziati di valore, in effetti io sono uno dei massimi esperti mondiali di colore, ho anche organizzato dei congressi molto importanti. Questo fenomeno che lega la temperatura di un oggetto al tipo, al colore della radiazione emessa, si chiama spettro di corpo nero e ci consente di poter valutare la temperatura di oggetti lontanissimi come le stelle, e soprattutto senza doverci mettere un termometro dentro... Marina lo spettro fallo tu.

Commento: Si cerca ancora dare una risposta alla domanda: Perché le stelle non sono verdi? L e C. e G. proporranno due esperimenti, G. parlerà anche di una legge teorica per rispondere (la legge dello spostamento di Wien).

Viene anche introdotto il concetto di corpo nero. Le stelle possono essere approssimate a corpi ideali che emettono radiazione su uno spettro ampio di lunghezze d'onda, con una forma caratteristica, si definiscono quindi corpi neri. Confrontando tale curva di emissione con una particolare funzione, detta funzione di Planck per il corpo nero (ideale), è possibile ricavare la temperatura della stella. La temperatura ricavata, però, è solamente la temperatura superficiale dell'astro, corrisponde allo strato più esterno. In particolare il picco della curva di emissione (molto simile ad una campana) determina l'intensità massima in cui la stella emette. Se il picco cade nella banda visibile, allora alla stella sarà possibile associare un colore, da qui la notazione "stella blu" e "stella rossa".

C: *[Perplessa]* Ah! Io?!

[L. si volge a parlare con G. dando le spalle a C. che si mette un camice bianco in testa e avanza come un fantasma:]

C: UUUUH UUUUH

G.: *[allibito e seccato]* Ma Marina...!

C: *[Guardando G. e L. in cerca di comprensione.]* Ma dai! Era una battuta! Corpo nero, spettro...

G: Ma per favore un po' di dignità. Ci penserò io, non si può trattare il pubblico così. Beppe per favore dovremmo avere una slide. *[Viene proiettata una slide con lo spettro elettromagnetico in scala logaritmica]* Questo è lo spettro elettromagnetico, una funzione che ad ogni frequenza della radiazione associa la densità di energia per unità di... frequenza appunto. La porzione centrale del diagramma, che come tutti vedete è in scala logaritmica, è la regione della radiazione visibile ai nostri occhi, al di là, verso destra troviamo gli infrarossi e le onde radio, e verso sinistra gli ultravioletti, i raggi X e i gamma prodotti nelle reazioni nucleari dal riassetto dei livelli energetici dei nucleoni nella buca di potenziale data dal residuo dell'interazione forte...

Commento: questa scena, in cui C. si mette un telo in testa per simulare uno spettro, è l'unica presa in giro della fisica di tutto lo spettacolo. La battuta non è presa bene da L. e G. che restano inorriditi e rimproverano duramente C. Questo gesto vuole significare che la fisica deve essere presa seriamente, se la si vuole conoscere e la si vuole spiegare ad un certo livello di profondità.

G. introduce lo spettro elettromagnetico con indicate le diverse lunghezze d'onda e le diverse frequenze. Introduce anche le bande spettrali che si indagheranno durante lo spettacolo: visibile, infrarossi, ultravioletti.

C: Giliberti! Avrò anche fatto una battutaccia, ma tu non puoi complicare tutto. Fallo vedere! E' un esperimento così celebre!

Commento: C. riporta G. alla realtà e sottolinea il fatto che alle sue parole complicate possa essere associato un esperimento più d'impatto, perché conosciuto da molti.

L: *[Prendendo in mano un grande prisma in plexiglas.]* Ma certo!!! L'esperimentum crucis di Isaac Newton! Il più bell'esperimento della fisica

G: Ma dai Nicola, lo sanno tutti che il più bell'esperimento di tutti i tempi è l'esperimento della doppia fenditura. *[Rivolto al pubblico]* Provate anche voi, digitate su google esperimento più bello della fisica e lo trovate subito.

Commento: L'esperimento a cui fa riferimento G. è l'esperimento di interferenza di elettroni singoli condotto nel 1976 da tre fisici (Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli e Giulio Pozzi) a Bologna, ma già teorizzato come esperimento "mentale" negli anni '20. La rivista "Physics World" in seguito ad un sondaggio tenuto tra i lettori, gli diede il titolo di "esperimento più bello della fisica" nel 2002. L'esperimento consiste nel porre una sorgente di elettroni davanti a due fenditure, per studiare la figura che si forma su uno schermo (rivelatore) posto dietro le fenditure. Il risultato mostra che, quando si fanno passare molti elettroni dalle fenditure, essi si distribuiscono secondo una figura di interferenza, come fa la luce (onde elettromagnetiche), e non solo in due zone, corrispondenti alle due fenditure, come farebbero delle palline. A differenza dell'interferenza delle onde, però, la figura lasciata dagli elettroni sullo schermo non è continua, ma è formata da tanti puntini distinguibili, l'insieme dei quali crea le frange di interferenza. L'esperimento mostra quindi la doppia natura ondulatoria e corpuscolare degli elettroni, che non sono né l'uno, né l'altro ma sono oggetti nuovi, difficili da accumunare all'esperienza quotidiana, sono detti "oggetti quantistici".

L: Sarà google ma non è crucis! 1666! Un giovanissimo Newton fugge da Londra ammorbata dalla peste e si rifugia in campagna dove studia ottica. E studia questo oggetto, il prisma! La scomposizione della luce bianca era già nota da più di 200 anni, ma Newton fa un esperimento pazzesco: oltre a scomporla la ricompone.

C *[interrompe]*: Ma facciamo l'esperimento al nostro pubblico, per favore!

L: Certo. *[Mette il prisma davanti a una lama di luce bianca e sullo schermo si proietta un meraviglioso arcobaleno.]* Quello che osservate sullo schermo è la scomposizione nelle sue diverse componenti, cioè i colori, insomma lo spettro, della luce di una lampadina a circa 3000 gradi. Ma voi vi chiederete: ma come si può cambiare la temperatura della lampadina?

C e G *[si guardano perplessi]*: Ma come si può cambiare la temperatura della lampadina?

L: Con un variatore di temperatura!

[C. e G. si guardano perplessi]

L: sì insomma, un variatore di tensione con il quale cambio la temperatura della lampadina facendo variare la tensione elettrica. *[Diminuendo la tensione diminuisce l'intensità della proiezione e si modificano i colori dell'arcobaleno]* Ecco, come vedete, girando questa rotellina abbasso la temperatura e scompaiono prima il viola, poi il blu, infine il verde.

C: Ma stai spegnendo la luce!

L: Sì, ma è un problema di intensità relative, Marina: il rosso lo vedi ancora, mentre gli altri colori si sono molto più attenuati.

C: Sì ma tu eri partito dalle stelle che non possono essere verdi. Cosa c'entra tutto questo?

L: Ma Marina osserva quello che succede spostandosi da destra a sinistra in questo spettro. Cosa vedi dalla tua parte?

C.: Il Blu

L.: E cosa vedi dalla tua parte Marco

G.: Il rosso

L.: Bene come nelle giganti azzurre, ma il verde no perché sta in mezzo agli altri due colori che gli si accompagnano sempre; quindi quello che noi vediamo è sempre una somma di colori e... per questo non ci sono stelle verdi!

Commento: Il funzionamento del variatore deriva dalle leggi fondamentali dell'elettronica, per cui la tensione è proporzionale alla resistenza di un conduttore (per la legge di Ohm) che a sua volta dipende dalla temperatura dello stesso. In realtà è la resistività a essere dipendente dalla temperatura, ma, poiché la resistività elettrica è proporzionale alla resistenza, l'assunzione è corretta. Le lampadine a incandescenza tradizionali hanno solitamente un filamento di tungsteno che al variare della tensione varia la sua resistenza e quindi varia la sua temperatura.

La variazione della temperatura determina la variazione dell'intensità della lampadina poiché, secondo la legge dello spostamento di Wien, si sposta il picco di emissione di quest'ultima. L'emissione di un corpo si può immaginare come una curva a campana incentrata su un valore di massima intensità. Se la temperatura aumenta si vedono meglio le parti blu/viola dell'arcobaleno generato con il prisma, poiché rappresentano il nuovo picco di emissione, mentre le altre

componenti scendono verso le code della curva a campana e diminuiscono quindi la loro intensità. Se la temperatura diminuisce si vedono meglio le zone rosse, mentre le altre si affievoliscono.

C.: Sì ma perché proprio il verde no?

Commento: L' esperimento mostra come la temperatura è collegata al picco di emissione visibile e come sono posti i colori uno rispetto all' altro, ma non risponde alla domanda. Si accenna alla "somma di colori", che verrà spiegata meglio da G. in seguito.

L.: Insomma basta! Di preciso questo non lo ricordo... **L se ne va offeso dietro le quinte a cambiarsi**

Commento: L. ammette di non saper dare una risposta adeguata alla domanda. In questo caso incarna l' atteggiamento degli insegnanti che, sentendosi messi alle strette, si pongono sulle difensive, piuttosto che accettare la sfida intellettuale del nuovo quesito.

C: Ma dai, era semplicissimo, bastava fare un esperimento!!!

G: ve lo faccio vedere io [*si porta al mixer dei tre fari di luci colorate, rosso, verde e blu*] se abbiamo una stella relativamente fredda, diciamo intorno a i 2500 gradi, essa emetterà principalmente luce rossa [*accende a 2/3 di potenza il faro rosso*], come le giganti rosse. Poi aumentando la temperatura a 5-6000 gradi, come per il sole, ci sarà emissione anche in luce verde [*accende a tutta potenza il faro verde. La luce proiettata sullo schermo, data dalla somma di rosso e verde, è gialla.*]

G: [*C. si mette in mezzo e si vedono tre ombre una nera, una verde e una rossa.*] Come si vede dalle ombre: il giallo è somma di rosso e di verde.

Aumentando ancora la temperatura abbiamo emissione anche nel blu e le stelle appaiono bianche. [*Accende a tutta potenza il faro blu e la luce sullo schermo diventa bianca.*]

[*C. si rimette nella luce a fare le ombre e appaiono ombre rosse, verdi, blu, ma anche gialle, magenta e azzurre*]

G: E sopra i 15.000 gradi, invece, l' emissione nel rosso è molto bassa; ecco togliamo il rosso [*spegne il faro rosso e la luce diventa azzurra*] e troviamo stelle dal colore azzurro, come le giganti azzurre. [*C. si mette ancora tra i fari e lo schermo*]

C'è anche il verde, ma il nostro occhio percepisce azzurro...come d' altronde si capisce e forse sarebbe stato più chiaro, dalla ben nota legge dello spostamento di Wien:

$$T\lambda_{max} = \text{costante}$$

Commento: G. per la prima volta propone un esperimento per spiegare la teoria. La fisica teorica non è antitetica alla fisica sperimentale, sono entrambe facce diverse della stessa medaglia. G. accetta l' importanza degli esperimenti, così come C. e L. non rinnegano la parte teorica della fisica. A riprova di questa affermazione C. non interrompe G. quando inizia a spiegare la legge dello spostamento di Wien.

L' esperimento presentato da G. e C. è chiamato anche "ombre colorate" e utilizza il concetto di sintesi additiva, ovvero la sintesi di luci di lunghezza d' onda e intensità diversa che opera il nostro sistema visivo e che ci fa vedere, ad esempio, una luce gialla quando si sovrappongono una luce rossa e una verde.

In questo fenomeno risiede la risposta alla domanda: Perché non ci sono stelle verdi? Stelle che hanno una temperatura tale da avere un picco di emissione alla lunghezza d' onda associata al colore

verde, emetteranno anche nella regione del rosso e del blu, con intensità minore, ma non trascurabile. Al nostro occhio arrivano contemporaneamente la luce con lunghezza d'onda del rosso, del verde e del blu. La somma additiva di queste tre luci è interpretato dal nostro sistema visivo come una luce bianca, per questo non siamo in grado di vedere stelle di colore verde.

Scena VI: La morte del Sole

Commento: In questa scena si interromper il flusso di informazioni rompendo la quarta parete tra attori e pubblico e si ha l'interazione diretta tra i fisici e gli spettatori. A scatenare l'interazione una domanda, a cui si chiede di dare risposta: Quanto è un miliardo? Posta per far rendere conto le persone in modo concreto di quanto il tempo in astrofisica sia diverso dal tempo sulla Terra e per farli ragionare sul concetto di "numero".

[C. intanto è sconsolata]

G *[se ne accorge e chiede]*: Marina, ma cosa c'è?

C: È che a questo punto è il caso di dirglielo...

G: Dirgli che?

C: Che anche il nostro sole cambierà temperatura e quindi colore

G: è certo anche il sole ... *[con le due dita fa il segno della benedizione]* ma diglielo tu.

C *[desolata inizia]*: Dopo che le reazioni di fusione all'interno del nucleo si saranno arrestate, il sole collasserà fintantoché le pressioni interne saranno così alte da innescare nuove reazioni di fusione...

A quel punto il sole ricomincerà ad espandersi e a raffreddarsi. **Ecco cosa succederà al nostro sole.**

[Parte filmato

che mostra l'espansione del sole e la sua trasformazione in una gigante rossa. G. e C. si volgono a guardare il filmato tenendosi la mano sulla spalla.]

C: Quando la gravità riesce a equilibrare nuovamente la pressione interna, l'espansione si arresta. La stella è diventata gigante: una gigante rossa...

Quando il sole sarà diventato così enorme, Mercurio Venere e anche la nostra Terra non esisteranno più, inghiottiti dalla gigante rossa, saranno ritornati materia disgregata e indistinta, parte del guscio infuocato della stella. E da quel giorno su Marte, il pianeta ormai più vicino al sole, l'alba non sarà più la stessa...

[Il filmato termina con l'immagine desolante di un pianeta buio dal cui orizzonte sorge un enorme Sole rosso cupo, che invade tutto il cielo, ma ormai non illumina più.]

G *[al pubblico]* paura, eh?...Tranquilli tutto ciò avverrà fra 5 miliardi di anni. Sapete quanto è un miliardo? *[G. scende nel pubblico e fa contare fino a dieci una persona, cronometrando]*: Ci ha messo x secondi. Quanto tempo ci vuole per contare fino a 100?

C [*interrompe*]: Ma Marco, il problema è malposto. Pensa quando si arriva a 7.549.763...

G: ci hai messo x secondi

C: Ecco! Non è così semplice. Bisogna fare una stima tenendo conto che man mano che andiamo avanti ci mettiamo sempre di più a dire un singolo numero. Insomma è stato fatto un conto e per arrivare a un miliardo servono 99 anni.

Insomma, solo per contare fino a un miliardo serve una vita intera e pure piuttosto lunga.

G: senza mangiare, senza bere né niente!

C: Pensate cosa può voler dire vivere 5 miliardi di anni. Chissà cosa sarà successo al nostro mondo, magari gli stessi uomini non esisteranno più... Però peccato...perché secondo me sarebbe interessante vivere in un mondo illuminato da una gigante rossa.

G: Direi che saremmo in un mondo tutto rosso... Un mondo a luci rosse. In fondo potrebbe non essere male, anzi, direi molto interessante...

Scena VII: Un mondo monocromatico

Commento: Inizia la scena con una fase di engage che possa essere d'impatto per il pubblico. L'esagerazione è pensata proprio per colpire gli spettatori e per cambiare per un attimo il ritmo. Il protagonista della scena è L., il personaggio più egocentrico che si dimostra essere anche il più eccentrico. La pratica di engage degli spettatori viene utilizzata anche in didattica, per introdurre gli studenti a un nuovo argomento facendo nascere in loro la curiosità e suscitando dei sentimenti positivi e propositivi nei confronti della disciplina.

[Tutto diventa rosso e parte la musica. Entra L. indossa una parrucca rossa, balla facendo uno spogliarello.

C. ed G. spiazzati lo guardano.]

C: Ma, ma che! spegnete la musica! *[Accende la luce della lavagna luminosa su tavolo a sinistra e rivolta a L.]* Ma cosa fai? Uno spogliarello durante una conferenza!!!! Questo non è un postribolo!

L: *[Isterico, poi pomposo e sempre con la parrucca]* Professoressa Carpineti! Come osa interrompere un esperimento scientifico di questa portata! Lei continua a fraporsi fra me e il premio Nobel. Stavo facendo una dimostrazione di visione in luce monocromatica. Spenga la luce bianca.

[C. spegne la lavagna luminosa.]

L: Cosa legge?

C: Niente.

L: Accenda la luce bianca. Ora cosa legge?

C: *[guardando la maglietta di L.]* Ludwig...!

L: Certo. Infatti sono illuminato da luce bianca che, come abbiamo visto precedentemente, contiene tutti i colori, che vengono riflessi dalla maglietta bianca mentre la scritta rossa riflette solo il rosso. Il contrasto mi permette quindi di leggere la scritta. Riproviamo. *[C. accende e spegne la luce bianca della lavagna luminosa.]* In luce rossa le scritte rosse e la maglietta bianca riflettono la stessa quantità di luce, vede? E appaiono quindi all'occhio indistinguibili.

C.: Va bene...però io l'avrei presentato in modo più sobrio...

Scena VIII: Il mondo dell'Infrarosso

Commento: Fino ad ora si è parlato di radiazione visibile e di come viene percepita dall'occhio umano (i colori), nella prossima scena, invece, si passa alla trattazione dell'infrarosso.

Dato che le scoperte scientifiche non sono indipendenti dal contesto storico in cui vengono fatte, come spesso si pensa, in questa scena è riproposta una riflessione sulla connessione tra storia e didattica scientifica. La storia aiuta a ripercorrere la strada che fisici del passato hanno intrapreso prima di giungere a risultati che da noi oggi vengono dati per scontati. Ripercorrere la strada che un fisico del passato ha intrapreso prima di arrivare a un risultato può aiutare a riordinare le idee e dare un esempio concreto del metodo scientifico. In particolare si possono ricostruire le domande che lo scienziato si fece all'epoca e che lo portarono a compiere studi ed esperimenti mirati. La storia è condita anche di particolari abbastanza irrilevanti che tuttavia sono tipici delle narrazioni che non possono limitarsi al solo fatto fondamentale, ma lo inseriscono in un contesto più generale.

In questa scena si parla della radiazione vicino infrarossa partendo dall'esperimento storico di Herschel e arrivando poi a proporre lo stesso esperimento rivisitato in chiave moderna (come si vedrà nella scena successiva).

G: *[Rispondendo al cellulare che ha in tasca.]* Scusate scusate: la vibrazione! Ciao Salvatore!...

L se ne va offeso in mezzo al pubblico Ma figurati!... Eravamo in una situazione di luce monocromatica che simulava il mondo illuminato da una gigante rossa... No no, non stavamo facendo i bischeri, anzi!... Ancora?... Va bene va bene, non preoccuparti arriva quando puoi...Sì, va bene. Dice che lui a questo punto parlerebbe di infrarossi. Allora ciao, ciao, ciao, baci...

L: Ma certo! Io sono uno dei massimi esperti al mondo di radiazione infrarossa. Ho appena organizzato un congresso con persone serissime. Innanzi tutto dovete sapere che siccome non si vedono sono stati frutto di una scoperta davvero casuale.

[I due cominciano a rivestirlo come un bimbo]

Nel 1801 Sir Friederich William Herschel, che fu anche un grandissimo astronomo, pensate: quello che scoprì l'esistenza delle stelle doppie, il primo a ipotizzare la struttura della Via Lattea, lo scopritore del pianeta Urano!, bene sir Friederich William Herschel stava facendo un esperimento con il suo prisma, un prisma proprio come quello di Newton, solo che... 140 anni dopo, con maggiore precisione, facendo delle misure quantitative. Questo per cercare di misurare la quantità di energia che conteneva ogni colore dello spettro della radiazione solare. E come avrà fatto a misurare l'energia?

C, G : *[a lui]* E come avrà fatto a misurare l'energia?

L.: Chiedetevelo

C.G. : *[tra loro]* E come avrà fatto a misurare l'energia?

Commento: In questo scambio di battute si ironizza su un atteggiamento che si ritrova nelle spiegazioni fisiche, ovvero la tendenza suggerire le domande al pubblico invece che farle scaturire spontaneamente.

L: Ma con un termometro! Misurava la temperatura che raggiungeva un termometro esposto alle varie parti dello spettro visibile, cioè mettendo il termometro nei vari raggi colorati.

E siccome faceva delle misure accurate insieme ai suoi assistenti, spese tutta la mattina in misure e arrivò l'ora della pausa pranzo. Quindi si recò in mensa e siccome era un bravo fisico mise il termometro a lato dei fasci colorati in modo che vi fossero le stesse condizioni ambientali, ma il termometro non fosse illuminato. Arrivato in mensa scoprì che c'era lo sciopero, perché dovete sapere che a quei tempi si poteva ancora scioperare... Sir Friedrich Wilhelm Herschel andò su tutte le furie e si mise a litigare col responsabile della mensa...

C *[consultandosi con gli occhi con G.]* ...sì ma scusi, cosa c'entra?

L: Professoressa Carpineti! Non si può fare scienza senza avere delle minime basi storiche. Forse è per questo che lei non fa carriera! Infatti fu proprio a causa di questo ritardo che tornato in laboratorio trovò che il termometro si era notevolmente scaldato; e quindi cosa dedusse, lui che era un grande scienziato? Dovevano esserci dei raggi che non erano visibili! E come li chiamò se stavano dopo il rosso, secondo voi?

Commento: Nella risposta di L. a C. si ritrova il maltrattamento perpetrato durante tutto lo spettacolo nei confronti della ricercatrice.

G: *[Togliendogli la parrucca ambiguo]* Non so... tvansvosso?

L: *[Riprendendosela Seccamente.]* No! E li chiamò infrarossi proprio perché stavano dopo il rosso.

Scena IX: Vedere il vicino infrarosso

Commento: In questa scena si indaga la regione spettrale del vicino infrarosso. In particolare nella prima parte viene riproposto l'esperimento di Herschel, con una telecamera che vede nel vicino infrarosso al posto dei termometri.

C: Ma non lo possiamo vedere?

L: *[Entusiasta.]* Ma certo, eccolo: sir Frederick William Herschel! Che naso, che orecchie e ... che parrucca!

[G. fa partire una diapositiva che mostra un ritratto di Herschel.]

C: Ma NO! Intendevo l'infrarosso!

L: Ma certo! Lei Vada alla telecamera e riprenda lo spettro. Lei invece professore prenda quel pannello nero, lo incurvi leggermente e proceda a coprire le differenti bande colorate di cui è costituito lo spettro.

[C. si posiziona vicino alla telecamera che proietta sullo schermo ciò che riprende, G. prende un pannello di plastica nero e procede a coprire le differenti bande colorate di cui è costituito lo spettro, partendo dal violetto.]

L: Ecco vedete cosa accade? Il caro ed esimio collega, con il pannello nero che non riflette la luce sta oscurando le fasce di colori dello spettro del prisma, prima il blu poi il verde, quindi il giallo e infine il rosso, ecco professore si fermi lì, al limitar del rosso. *[G. si ferma e L. indica l'immagine ripresa dalla telecamera.]* Vedete che, scomparso ogni colore alla nostra visione, la telecamera continua a vedere una sottile striscia di luce, bianca ovviamente perché l'infrarosso non ha colore. E ora professoressa prenda quel cilindretto nero e se lo metta davanti all'occhio.

Commento: La luce infrarossa appare bianca, perché, essendo invisibile all'occhio umano, non corrisponde ad alcun colore, la telecamera associa alla radiazione infrarossa un livello di grigio proporzionale alla sua intensità.

C: Questo? *[C. prende il tappo infrarosso della telecamera e se lo mette sopra un occhio, chiude anche l'altro occhio e fa la cieca.]*

L: Cosa vede?

C: Niente! *[Vagando tentoni sul palco.]*

L: Sì, brava, ora lo appoggi sulla lavagna luminosa *[C. a occhi chiusi cerca a tentoni la lavagna.]* Apra l'altro occhio... ecco brava ora accenda la lavagna, sì, col ditino, brava. Ora tutti possono vedere che effettivamente attraverso quel cilindro di plastica nera non passa alcuna luce. Eppure... Ora giustapponga quel tappo nero all'obiettivo della telecamera, sa cosa vuol dire giustapporre cara collega? Metta, brava, così si può verificare che quello che vediamo è effettivamente proprio infrarosso; infatti quel materiale è totalmente opaco al nostro occhio, ma lascia passare il famoso baffo di luce che abbiamo visto poc'anzi oltre il rosso. Vedete? Metta, tolga, metta, tolga...

Commento: L'esperimento con il cilindro nero mostra che i materiali opachi nel visibile possono comportarsi diversamente, esser trasparenti in questo caso, se visti ad altre lunghezze d'onda.

[C. copre e scopre l'obiettivo della telecamera con il filtro IR. Quando il filtro è davanti all'obiettivo spariscono i colori dello spettro e rimane solo una striscia bianca che a occhio non si vede.]

L: *[canticchiando]* e infra e rosso e infra e rosso. *[Prende per mano Marina e cominciano a ballonzolare.]*

Scena X: L'infrarosso in astrofisica

Commento: In questa scena G. mostra una serie di immagini relative allo stesso oggetto astronomico, ovvero un buco nero supermassiccio, ma a diverse lunghezze d'onda. La disattenzione

di C. nel mettere le slide ha lo scopo di mostrare come una stessa sorgente si possa vedere anche a lunghezze d'onda diverse.

G. si dimostra nuovamente incapace di mettersi nei panni del pubblico, che sa poco o nulla su questo argomento, dando per scontato che tutti riescano a distinguere la lunghezza d'onda delle immagini mostrate, enfatizzando così gli errori compiuti da C.

Dopo la sequenza di slide riguardo lo stesso oggetto, seguono una serie di immagini astronomiche nell'infrarosso proposte una dopo l'altra, in un crescendo di entusiasmo da parte di G. che culmina con l'enunciato della funzione di Planck e con la teoria dell'emissione di corpo nero. G. durante la spiegazione va come in trance, preso dalla bellezza e dalla completezza delle formule.

G: Ma torniamo al nostro fil rouge...anzi, bisognerebbe dire fil infrarouge. Infatti grazie all'IR si possono rivelare ammassi di materia fredda altrimenti invisibile all'occhio umano, Marina fai partire le nostre splendide e immaginifiche slide delle stelle in IR per favore.

[C. fa partire le slide. La prima mostra una piccola porzione di cielo buio con qualche stella.]

G: Mh... Proprio bellissima questa non mi pare... Marina, però, ti avevo detto in infrarosso; ci si accorge subito che questa slide è nel visibile... Va beh... *[con tono sempre più eccitato]* vediamo una porzione di cielo che sembra insignificante. Sembra innocuo, ma al suo centro c'è un buco nero supermassiccio. Pensate: un oggetto con una massa da un milione a un miliardo di masse solari! La materia attratta dalla potentissima forza di gravità comincia a roteare e per la conservazione del momento angolare si forma così un disco, chiamato disco di accrescimento. L'attrito fra le varie porzioni di materia genera temperature così alte - Marina la slide per favore-

[C. cambia slide]

G: hm... questa è negli X... Dicevamo che la materia raggiunge la temperatura di milioni o miliardi di gradi, molto maggiori dei quelle all'interno del nostro sole. Insomma la materia si ionizza e emette negli X, come vedete.

A queste temperatura la materia che ruota è allo stato di plasma e produce un forte campo magnetico.

[C. mette un'altra slide]

G: Ecco, questa è in infrarosso finalmente. La materia che si muove all'interno di questo campo magnetico produce una grandissima quantità di radiazione, per esempio di radiazione infrarossa che rivela nella nostra slide getti di materia che vengono espulsi e guidati dalle linee di campo... Guardate, guardate l'immensa e calda porzione del cielo attorno al buco nero... Altra slide

[C. mette un'altra slide]

G: Questa è una meravigliosa foto di galassie che collidono, un urto gigantesco! Guardate le stelle risucchiate dai campi gravitazionali dell'una e dell'altra galassia. L'altra Marina, per favore.

[C. mette un'altra slide]

G: Questi sono gas e polveri abbastanza caldi da emettere nell'infrarosso e diventare così luminosissimi nell'infrarosso, ma non così caldi da risplendere tanto da rendersi visibili... nel visibile... Clicca ancora...

Commento: Non è fatta distinzione tra infrarosso vicino ($0.75 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 5 \mu\text{m}$, Near Infrared) e lontano ($15 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 10^3 \mu\text{m}$, Far Infrared).

[C. mette un'altra slide]

G: Questa è la galassia di Andromeda in infrarosso, la potremmo dire la nostra sorella galassia, a spirale anche lei; meravigliosa. Più avanti la vedremo anche in altre lunghezze d'onda.

[C. mette le altre slide una dopo l'altra del cielo visto in radiazione IR.]

G: [Mentre passano le slide, con tono delirante, ma con leggerezza.] L'emissione di radiazione da parte delle stelle è regolata dalla ben nota formula dello spettro di corpo nero:

$$I(\nu)d\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu$$

Ricavata nel 1900 da Planck dopo i fondamentali lavori di Wien e la legge di Stefan-Boltzmann.

[C. ed L. lo raggiungono]

G: Per favore un po' di silenzio! Dicevamo: che l'energia totale emessa da un corpo nero, che poi è l'integrale da 0 all'infinito di $I(\nu)d\nu$, è proporzionale a T alla quarta con una costante di proporzionalità... e

[L. lo risveglia con uno schiocco]

G.: Ma che succede...dove sono? Cosa stavo dicendo?

C: [Prendendo la parola!] Cosa stavo dicendo io...A proposito di cose oscure vi stavo racconterò di ciò che riuscì a scoprire nel 1945 un fisico di nome Geoffrey Ingram Taylor leggendo una rivista comprata in edicola...un numero di life....

Commento: Primo di una serie di tentativi che farà C., resi vani da G. e L. che continueranno ad interromperla, cercando di spiegare un fatto storico legato alla fisica, che risulterà sempre pertinente agli argomenti affrontati.

L: [interrompendola.] Torniamo con i piedi per terra, io da esperto di infrarossi su questo pianeta...

C: Ma insomma ma perché non mi fai finire?!? [offesa va davanti alla lavagna dove la raggiunge G. per consolarla.]

Scena XI: Vedere sotto i dipinti

Commento: Nella scena è descritta la tecnica della Riflettografia, utilizzata nell'ambito dei beni culturali. La scena si struttura come una riappacificazione tra l'ambito umanistico e l'ambito fisico. In particolare l'utilizzo della radiazione infrarossa funge da ponte tra queste due discipline (l'arte e la fisica), portando vantaggi ad entrambe.

Vengono condotti ulteriori esperimenti per far vedere come la radiazione vicino infrarossa interagisce con alcuni materiali (pigmenti dei vestiti, una lastra nera, pigmenti per la pittura, carboncino), soprattutto per confrontare le diversità rispetto alla loro interazione con la radiazione

visibile. In tutto lo spettacolo la discussione sui dati astronomici offre lo spunto per parlare delle proprietà delle radiazioni nelle varie lunghezze d'onda.

L: Con questa telecamera vi mostrerò i miei due esimi colleghi che son degli ottimi scienziati. *[Inquadra C. e G. che sono davanti alla lavagna.]* Quello che osservate è fondamentalmente un mondo in bianco e nero e vi chiederete: come mai è un mondo in bianco e nero?

C.e G: Come mai è un mondo in bianco e nero?

L: ...È in bianco e nero perché nell'infrarosso il nostro occhio non vede e quindi non può distinguere colori diversi. Per la verità è più bianco che nero, come vedete. Per esempio guardate la mia collega. Le abbiamo detto che la portavamo a teatro e lei cos'ha fatto? Si è vestita tutta elegante, di nero con la collanina colorata... e invece guardatela... una mummia egizia coperta di cenci bianchi. *[In effetti sullo schermo i vestiti neri appaiono perfettamente bianchi.]* E il mio collega? Oggi si è messo la magliettina bianca della salute!

G: Ma no è nera. *[Poi guardando lo schermo.]* Ah in effetti è bianca.

L: Quello che stiamo osservando è che i pigmenti di cui sono intrise le misere vesti dei miei colleghi nell'infrarosso sono trasparenti.

G: Beh, non esattamente, se no si vedrebbe il nostro corpo sotto i vestiti!

Commento: I pigmenti dei vestiti sono trasparenti per la radiazione vicino infrarossa, che dunque viene completamente riflessa, per questo alla telecamera che rivela l'infrarosso, appaiono bianchi.

L: Nel vostro caso è una fortuna che non si veda sotto i vestiti!

[C. e G. se si allontanano offesi borbottando e liberando la vista della lavagna.]

L: È una proprietà che hanno molti pigmenti e inchiostri. Su su esimi colleghi ricomponetevi e guardate la lavagna. Cosa leggete?

C: *[Guardando la lavagna.]* Luce.

G: *[Guardando lo schermo.]* Stelle! Qui sullo schermo c'è scritto stelle!

[In effetti sulla lavagna la scritta luce non si legge e non si vede il pannello nero, ma al suo posto si legge la scritta stelle su fondo bianco.]

C: Ma qui sulla lavagna luce!

G: *[Guardando la lavagna.]* Vero! È proprio interessante questa cosa!

Commento: La scritta luce è coperta da un pannello di policarbonato, un materiale che ha la proprietà ottica di apparire nero nel visibile (assorbe tutta la radiazione visibile), mentre nel vicino infrarosso è trasparente, ovvero la radiazione infrarossa passa inalterata attraverso l'oggetto. Questo esperimento spiazza il pubblico, che con gli occhi vede una scritta che risulta invisibile alla telecamera, ma che in compenso vede una scritta dove l'occhio vede solo una lastra nera.

L: Carissima collega ora la prego: ...serve la sua preziosa collaborazione: non faccia niente. Ora miei esimi spettatori facciamo insieme un esperimento. **L [scopre la telecamera con un fazzoletto e con fare pomposo]** Cercate di immaginare, certo con un immenso sforzo, che la mia cara collega sia una madonna rinascimentale di incommensurabile bellezza, vestita delle più splendide vesti. E che il tempo l'abbia occultata con una patina nera, la tipica patina del tempo. Bene Prof. Giliberti vada a fare la patina del tempo, prenda in mano quella lastra nera e occulti la collega. così... e a questo punto... **arriva lo scienziato infrarosso, sguaina la telecamera infrarossa pure [lei toglie il fazzoletto]. E la salva.**

Ed è proprio ciò che si può ottenere con questa tecnica detta riflettografia infrarossa applicata allo studio di quadri e dipinti antichi e moderni. Ed è proprio quello che faccio nel mio laboratorio. Guardate queste slide che ho portato.

[G. proietta una slide che mostra un particolare della Deposizione di Cristo di Giovanni Bellini]

L: Vedete, sono famosi quadri del Rinascimento italiano. Sotto il dipinto come lo vedono i nostri occhi spesso invece si celano delle versioni precedenti o dei pentimenti, che compaiono evidenti nell'immagine infrarossa. Questo è un quadro esposto alla pinacoteca di Brera a Milano Giovanni Bellini un giovane Bellini, alle sue prime opere, osservate ora cosa ci ha svelato la riflettografia infrarossa. *[Mostra slide con stesso quadro ma carboncino]*

L: Ecco guardate, l'artista ha lavorato in modo dettagliatissimo, disegnando a tratteggio tutte le zone chiaroscurali, mettendo in risalto un gioco di luci e ombre ancora più spettacolare e raffinato rispetto a quello visibile nella pittura a olio. Tenete a mente questo autore perché ci torneremo. Quello che abbiamo visto è un esempio stupendo di quello che viene detto disegno preparatorio precedente all'esecuzione finale dell'opera, ma ora vedremo un esempio ancora più sorprendente e divertente.

[G. cambia slide. La nuova immagine è composta di due riquadri. Uno dei due mostra un particolare di un quadro, il secondo mostra il disegno preparatorio svelato dalla telecamera IR]

L: Questo che vedete è un dettaglio di un quadro rappresentante la Crocifissione. L'autore è un Fiammingo, Hans Memling, e oggi si trova ai musei civici di Vicenza. Quello che potete osservare nelle immagini è un cosiddetto Pentimento. L'autore cioè è intervenuto con un cambiamento stilistico fra la prima versione tracciata a schizzo sulla tavola e la versione finale dipinta. Vedete che sotto al manto appare la mano destra del santo che indicava il Cristo *[G. indica col puntatore laser la mano destra del santo]* e che sopra la mano sinistra, oltre all'agnello c'era un libro *[G. indica col puntatore laser la mano sinistra]*.

L: Poi probabilmente è passato un teologo che ha corretto la prima versione disegnata occultando il libro.

[G. cambia slide. Il quadro è la Madonna con bambino di Giovanni Bellini]

L: Ed ecco qua ancora il nostro Giovanni Bellini in un quadro sempre esposto a Brera, ma l'autore ora è un vecchio furbacchione. Ha ampliato la bottega e ha uno stuolo di ragazzetti che gli completano le opere e quindi con mano esperta si limita a tratteggiare pochi elementi essenziali. *[G. cambia slide. Si vede il disegno preparatorio molto più stilizzato che nei casi precedenti. G indica*

col puntatore laser i pochi tratti essenziali]. Osservate il pannello del manto raffinato, ma tracciato in modo deciso con pochi tratti essenziali.

C: e chissà quanto costano queste ricerche...

L: ...eh infatti a questo punto ci sarebbe la raccolta fondi per la ricerca...Colleghi volete aiutarmi?

Scena XII: Gli infrarossi per vedere l'invisibile

Commento: Si propone al pubblico, come in precedenza un momento di coinvolgimento. In questo modo il ritmo narrativo dello spettacolo varia e vengono presentati problemi inerenti la ricerca scientifica, quale la scarsità di fondi

[Quando è possibile C. e G. scendono in platea. Parte una improvvisazione con il pubblico che termina quando uno dei due esibisce una banconota da 50 euro. Altrimenti i 50 euro li fornisce C.]

L: Bravissimo! Un applauso al generoso spettatore che sta finanziando la ricerca...!

[C. va alla telecamera]

L: Ecco inquadrati la banconota. Fochetti fochetti dottoressa. Non vede come è sfocata la banconota? Ecco, osservate: nella proiezione la banconota appare completamente bianca, anzi non completamente, vedete? L'ultima parte, quella con lo zero, si vede ancora; penserete: è una banconota falsa! E invece no! Quello che stiamo osservando è un artificio inventato dalle banche centrali per evitare le falsificazioni: la banconota è realizzata con pigmenti che nel visibile sono indistinguibili, mentre nell'infrarosso sono totalmente diversi; in questa parte trasparenti e in questa ancora visibili. Ora giro la banconota e vedete, rimangono visibili solo le cifre del numero di serie, mostrando così proprio le diverse caratteristiche dei diversi tipi di inchiostro. Soddisfatta? *[Intasca la banconota...C. si imbarazza ma tace]* così se studierete fisica, potrete sempre imparare a fare i falsari o scoprire segreti nascosti.

C: Straordinario! A proposito di segreti nascosti. Forse è giunto il momento di raccontarvi ciò che riuscì a scoprire nel 1945 un fisico di nome Geoffrey Ingram Taylor leggendo una rivista comprata in edicola...una rivista famosa...Life

G: *[Con tono di sufficienza]* Ma cosa dici? Stiamo parlando di infrarossi! Vogliamo dare un filo logico alla nostra presentazione?

C. *[al pubblico]* Non mi fanno mai parlare, sono di un'invasione... *[va al tavolo a sinistra]*

Scena XIII: Luce dal passato

Commento: Nella scena G. presenta al pubblico la radiazione comica di fondo (CMB), la luce più antica che giunge a Terra dall'Universo. La banda a cui ci si riferisce con la CMB è quella delle microonde.

Nelle prime scene, parlando del colore delle stelle, si è parlato del rapporto tra lunghezza d'onda corrispondente al colore e temperatura superficiale dell'astro, qui si estende lo stesso concetto a

radiazioni nella banda delle microonde (banda della CMB). Le immagini utilizzate sono quelle ottenute con la missione Planck dell'Agenzia Spaziale Europea. G. si lascia trasportare dalla spiegazione rendendosi nuovamente incomprensibile per il pubblico.

G: Dopo la presentazione dell'esimio collega mi sembra che siate pronti per sentire parlare di osservazione di una radiazione che è rimasta nascosta fino agli anni '60. In particolare vi parlerò della radiazione cosmica di fondo scoperta nel 1965 da Penzias e Wilson, che come tutti sapete hanno poi preso il nobel nel 1978, e prevista precedentemente teoricamente da George Gamow. Quella che vedete in questa slide è la mappa del fondo cosmico, il corpo nero per eccellenza a 2.7 kelvin ottenuta da WMAP, Wilkinson Microwave Anisotropy Probe... E come sapete certamente è oggi in corso una mappatura ancora più accurata con l'esperimento Planck nel quale l'Italia è fortemente impegnata.

Ma tornando alla nostra slide; quello che vedete è una foto dell'universo in fasce, pensate: appena 380.000 anni dopo il big bang, quando la radiazione si è disaccoppiata dalla materia. All'inizio la temperatura era enorme, ma con l'espansione dell'universo questo gas di fotoni si è raffreddato fino a meno di 3K. Esso permea l'universo in maniera pressoché isotropa, tuttavia ci sono delle piccolissime anisotropie che ci rivelano i semi delle strutture presenti oggi nell'universo. La slide alle mie spalle ci mostra queste anisotropie [*Viene mostrata una slide con la mappatura dell'intera volta celeste a falsi colori con piccole macchioline colorate rincipalmente verdi e blu e qualcuna rossa e una striscia centrale orizzontale irregolare rossa*], lo spettro delle fluttuazioni in temperatura in funzione della scala angolare θ . Quando osserviamo nella direzione del versore \hat{q} quello che rileviamo, come voi mi insegnate, è un segnale proiettato sulla sfera celeste; per questo possiamo sviluppare le fluttuazioni $\delta T/T$ che stiamo misurando sulla base delle armoniche sferiche Y_{lm} , che come ben sapete costituiscono un sistema ortonormale completo sulla sfera.

Sottratto il contributo galattico e quello di dipolo dovuto al moto dell'intero sistema solare verso l'ammasso della Vergine con una velocità di 370 km/s rispetto al fondo cosmico, rimangono anisotropie dell'ordine di 10^{-5} e che si leggono, ovviamente, dallo sviluppo:

$$\frac{\delta T}{T}(\hat{q}) = \sum_l \sum_m a_l^m Y_{lm}(\hat{q})$$

C: [*Che nel frattempo l'ha raggiunto insieme a L.*] Molto interessante e anche molto chiaro... A proposito di cose che non si capiscono. L'esempio che vi volevo portare è quello di un fisico di nome Geoffrey Ingram Taylor che nel 1945 leggendo la rivista life comprata in edicola...non certo una pubblicazione...

G: Se mi aveste lasciato finire...! Marina per favore...

[*C. proietta la slide del fondo cosmico misurato da Planck*]

G: Guardate com'è fine... Va bene... allora cerchiamo nella maniera più semplice di capire come si è generata questa radiazione cosmica di fondo. Come tutti sapete la metrica nel nostro universo evolve secondo le famosissime equazioni di Einstein:

$$R_{\nu}^{\mu} - \frac{1}{2} g_{\nu}^{\mu} R = 8\pi T_{\nu}^{\mu}$$

[*con passione ed enfasi*] Otto capite?! È meraviglioso quell'otto!

C: Scusa... ma mi sembra doveroso semplificare. Per intenderci quell'immagine è stata registrata con le microonde. Sapete? Le stesse dei forni...

G: *[Saltando e accucciandosi a terra.]* Ma che esempi terra terra quando stavamo parlando di stelle!

Commento: C. interviene nella spiegazione di G. traducendo i concetti astratti in esperienze che il pubblico può aver fatto nella sua vita, parlando di forni e, più avanti, di cellulari. G. rimprovera C. per aver semplificato troppo un argomento troppo complesso come la CMB.

C: *[Furibonda.]* Adesso basta! Ogni volta che parlo mi interrompete. Sapete cosa vi dico? Ce l'ho anch'io un telefono *[estrae un cellulare dalla tasca]* E anche i telefonini funzionano con le microonde! E ora me ne vado e telefono a chi so io. Addio! *[E se ne va stizzita. Rincorsa da L.]*

L: *[Rincorrendola fuori scena.]* Ma dai, Marina non fare così, sempre a offendersi ...

Commento: Per la prima volta C. si ribella al maltrattamento, uscendo dalla scena infastidita. Ma nonostante questo, la sua condizione non cambierà nelle scene successive.

Scena XIV: Luce che genera altra luce

Commento: In questa scena è mostrato il fenomeno della fluorescenza. La prima parte della scena è quasi del tutto muta, perché la potenza evocativa del fenomeno è tale da permettere un immediato coinvolgimento emotivo dello spettatore. Le uniche parole sono quelle di G. che leggono una formula scritta su una lavagna con inchiostro fluorescente.

Esistono materiali che, se illuminati con luce ultravioletta, invisibile all'occhio umano, la assorbono riemettendo radiazione visibile. Questo è il fenomeno della fluorescenza.

Nella seconda parte G. spiega il fenomeno della fluorescenza in termini quantistici, risultando incomprensibile, ma dimostrando un grande entusiasmo e grande passione. Si parlerà di un materiale particolare, il Silly Putty, e verrà commesso volutamente un errore riguardo la sua fluorescenza caratteristica.

G: *[Rimasto solo.]* Ma come? Dovevamo parlare anche dei raggi ultravioletti! Allora pazienza, adesso comincio io. *[Accende le lampade ultraviolette, indossa gli occhiali di protezione.!]* Parleremo ora della radiazione ultravioletta che il nostro occhio non vede e che si trova oltre lo spettro visibile dalla parte opposta rispetto all'infrarosso Ma ecco!
[travasa un liquido fluorescente rosa in un grande cilindro. Il tutto, illuminato da luce ultravioletta, risplende con colori accesi.]

G: Guardate che meraviglia! Questi liquidi sembrano illuminati dall'interno, illuminati dalla luce ultravioletta sembrano brillare di luce propria.

[Va alla lavagna a fogli, gira il foglio presente e trova un foglio sul quale, con evidenziatori fluorescenti giallo e arancione, è scritta l'equazione seguente]

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} (\nabla^2 + U) \psi$$

[C. e L. rientrano nell'oscurità. C. ha indossato il camice e porta due coppe enormi con un liquido azzurrino, L. guanti e cappellino con un boccione di vetro trasparente pieno di un liquido giallo e si posizionano al tavolo a destra]

G: Si tratta di un effetto quantistico che può facilmente essere spiegato a partire dall'equazione di Schrödinger: "i acca tagliato di psi su di ti, uguale meno acca tagliato su due emme laplaciano più u psi". Quello che ci interessa è risolvere l'equazione agli stati stazionari e, soprattutto trovare gli autovalori dell'hamiltoniano, che ci daranno i livelli permessi dell'atomo.

[L. lo richiama con un fischio, G. Li raggiunge I due brindano e bevono in silenzio. C. va a e torna con I blocco di materiale malleabile di aspetto simile al pongo (Silly Putty ®). Illuminato dalle luci ultraviolette è giallo brillante]

G. Vedete Questo materiale si chiama Silly Putty. Si tratta di un materiale interessantissimo con curiose proprietà meccaniche. È un fluido non newtoniano, ma non voglio addentrarmi in spiegazioni troppo complesse. Ti dirò solo che reagisce alle sollecitazioni in modo molto simile a quello del mantello terrestre... Ma guardate il colore!

Giallo limone vero? *[Si accende la luce bianca e il blocco cambia colore e diventa arancione.]*
Ma... *[La scena si ripete alcune volte.]*

Ma è semplice: il colore che vedete è dato dallo stesso tipo di fenomeno che avete osservato prima quando la somma di rosso e verde dava la sensazione del giallo, che come colore spettrale sta proprio in mezzo al rosso e al verde. Così questo oggetto è arancione e ad esso si somma un colore, l'ultravioletto, che il nostro occhio non riesce a vedere, ma che sommato all'arancione dà un colore spettrale che, come prima, sta in mezzo ai due. Anche in questo caso è giallo, ma come vedete è un giallo limone brillante. *[Spegne le lampade ultraviolette.]* Ma insomma... noi dobbiamo parlare di stelle! Basta giocare con queste stupidaggini. Vi propongo di far vedere delle osservazioni delle stelle con gli UV.

Commento: L'analogia tra fenomeni apparentemente simili, perché coinvolgono i colori e le luci, ma fondamentalmente diversi, può portare a errori, come si dimostra in questa parte dello spettacolo in cui si trova il terzo errore. Viene mostrato un materiale particolare, Il Silly Putty, nome commerciale di un materiale plasmabile con proprietà non newtoniane. Il tema dei fluidi non newtoniani viene solo accennato e non approfondito. Il Silly Putty utilizzato nello spettacolo ha una pigmentazione fluorescente con la particolarità di risultare arancione nel visibile e giallo quando è illuminato dall'ultravioletto. Sotto luci tradizionali il materiale riflette la radiazione visibile corrispondente al colore arancione, apparentoci, quindi, di un altro colore. La spiegazione proposta nella scena è errata, perché confonde il fenomeno della sintesi additiva con il fenomeno dell'interazione tra radiazione e materia. La sintesi additiva, infatti, si caratterizza per radiazioni visibili che vengono rilevate dai nostri occhi, quali i fari colorati utilizzati sul palco. Invece il fenomeno che ci permette di determinare il 'colore' di un oggetto è dato dall'interazione tra radiazione visibile e il corpo in questione, che assorbe selettivamente alcune frequenze, diffondendo o trasmettendo le altre.

Scena XV: L'ultravioletto dall'Universo

Commento: Sequenza di immagini di oggetti astrofisici visti nell'ultravioletto. La sequenza culmina con una domanda che vuole essere uno spunto per una riflessione più profonda: Qual è la vera forma delle cose? Infatti l'immagine della galassia M 82 (detta Galassia Sigaro) nell'ottico e nell'ultravioletto restituisce due forme differenti dello stesso oggetto astrofisico. Cambiando il rivelatore con cui si guarda il mondo, è possibile cambiare punto di vista e ci si rende conto che la realtà a cui si è abituati non è assoluta.

È un esempio di come la fisica tocchi anche l'ambito filosofico, oltre che quello storico e artistico.

[C. proietta slide di stelle in ultravioletto]

G: Osservare il cielo all'ultravioletto, vuol dire osservare gli oggetti più caldi, quindi quando puntiamo i nostri telescopi sensibili all'ultravioletto verso il cielo vediamo solo le stelle più calde e perciò vediamo un cielo più vuoto.

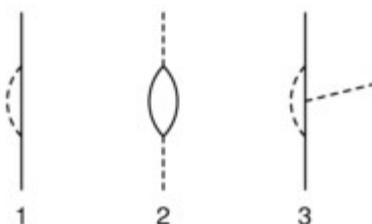
Questa slide mostra la galassia di Andromeda nell'ultravioletto: è stata ottenuta componendo 330 singole immagini riprese dal telescopio orbitante della NASA *Swift* nel 2008. È la più dettagliata immagine di Andromeda nell'ultravioletto mai ottenuta. Si possono vedere circa 20.000 sorgenti, dominate da stelle giovani e molto calde, densi ammassi stellari che emettono radiazione ultravioletta in grande quantità. Marina la prossima per favore.

Questa è la galassia "Sigaro" guardate che differenza con la stessa, ripresa nel visibile: nel visibile ha una forma a sigaro, per l'appunto, mentre in UV sembra un gabbiano. A questo punto viene da chiedersi: che forma hanno realmente le cose? *[Altra slide.]*

[Si susseguono un paio immagini ogni secondo circa. Musica.]

G: Comunque...ma credo che a anche a voi siano venute in mente le divergenze ultraviolette. Non c'entrano tantissimo, ma come fare a non pensarci... Sono date dalla presenza di integrali divergenti nella elettrodinamica quantistica. Come certamente sapete si chiamano ultraviolette proprio perché sono dovute alle particelle virtuali associate a modi normali di frequenza elevata. E' notevole pensare che poco più di 60 anni fa Feynman, Schwinger e Tomonaga riuscirono a dimostrare, indipendentemente tra loro, che i responsabili delle divergenze erano solo tre diagrammi.

[Mima nell'aria i seguenti diagrammi]



Commento: G., dopo aver spiegato le immagini all'ultravioletto, riprende il linguaggio preciso e puntuale della fisica per poi passare ad un linguaggio non verbale, in cui mima i diagrammi di Feynman. Gli spettatori sono invitati a seguirlo nel suo sogno onirico, tramite la musica e i giochi di luce.

[L. e C. intanto mormorano. Mentre G. sta mimando l'ultimo diagramma parte un laser show con le scritte "Feynman, Tomonaga, Schwinger" che prosegue per 3 minuti. Musica]

Scena XVI: Luce dalle persone

Commento: Si introduce una diversa banda dell'infrarosso, quella dell'infrarosso lontano. L'intervallo spettrale del lontano infrarosso (detto anche Far Infrared, FIR) si estende da 8μm ai

$10^3 \mu\text{m}$ ($0.3 \text{ THz} \leq \nu \leq 20 \text{ THz}$). È la banda principale di emissione di corpi a temperatura ambiente ed esseri viventi a sangue caldo, tra cui l'uomo.

Verrà spiegato che la termocamera misura la temperatura, per quanto questa affermazione possa esser corretta per l'uomo, per gli animali a sangue caldo e per molti oggetti, non vale per tutti i materiali. Lo strumento in realtà rileva la potenza emessa per unità di superficie da un corpo e le attribuisce un colore particolare (per convenzione) ed una certa temperatura (calcolata da un algoritmo).

[L. punta la termocamera verso G. la cui immagine termica compare proiettata sullo schermo.]

C: *[Si avvicina a G. e lo interrompe]* Caro collega! Complimenti! Come sempre sei interessantissimo e... chiarissimo e ora anche... luminoso! Guarda lì *[Gli indica la ripresa dalla termocamera.]*

G: Ma Siamo noi! Tutti colorati e a macchie!

L: E voi vi chiederete: ma perché siamo colorati? Perché siamo a macchie?

G, C: Ma perché siamo colorati? Perché siamo a macchie?

L: *[riprende G con la termocamera e spiega]* Dunque dovete sapere che questa è una termocamera, una telecamera che misura a distanza la temperatura dei corpi. Vede, nel buio più assoluto, la radiazione emessa dai vostri corpi. Rosso più caldo, blu più freddo come nei rubinetti, blu per l'acqua fredda e rosso per la calda. Per esempio può aiutarci a capire se il nostro pubblico è ancora vivo. In più sto conducendo da qualche anno una ricerca straordinaria, una ricerca sulla correlazione tra temperatura ed emozioni... dei conigli ... sono animali molto emotivi! Ma si tratta di una ricerca segretissima.

Commento: L. parlando dei colori mostrati dalla termocamera fa riferimento ad una convenzione applicata alle immagini. Le rappresentazioni possono, però, essere molteplici. L'immagine restituita dalla termocamera può anche essere a colori invertiti o in scala di grigi.

C: A proposito di cose segretissime! Vi racconterò di ciò che riuscì a scoprire nel 1945 un fisico di nome Geoffrey Ingram Taylor leggendo una rivista comprata in edicola.
[viene nuovamente interrotta.]

G: Marina, no no, ora questo non c'entra niente... Ecco! Invece è opportuno ora fare una piccola puntualizzazione: questa interessante tecnologia mostrata dagli esimi colleghi mi permette di introdurre un ulteriore modo di guardare l'universo: l'infrarosso termico.

Vi faccio notare che l'immagine a microonde della radiazione cosmica di fondo, mostrata prima, era a 3 K, mentre io sono a 300 K; e parte della materia mostrata in alcune delle precedenti slide è resa visibile proprio grazie alle riprese in IR lontano.

Scena XVII: Il Divulgatore

Commento: Scena che, al di là della sua impostazione comica, ha l'intento di far riflettere sulla divulgazione e sul suo ruolo nel mondo d'oggi. Si placa l'attesa creata all'inizio ed è introdotto il

personaggio del divulgatore scientifico Stefano Danelli. Egli, non avendo neanche il tempo di presentarsi di persona, cercherà di condurre la sua parte di conferenza al telefono. La sua presentazione su Galileo Galilei dovrebbe spiegare le scoperte astronomiche compiute dallo scienziato, che tramite la luce proveniente dall'Universo riuscì a scoprire lune di altri pianeti e a dare un fondamento sperimentale all'eliocentrismo gettando le basi per una rivoluzione del pensiero. In realtà l'intervento del divulgatore risulta banale e pieno di sensazionalismi privi di basi scientifiche. Il personaggio, in tono supponente, approfitta di ogni spunto valido per parlare di sé stesso e dei suoi lavori di bassa divulgazione.

[A L. Vibra il cellulare e Risponde]

L: Sii? Salvatore? *Ai due* è Danelli- Come? Non ce la fai a venire? In viva voce? Sì va bene...

[C. Porge il cellulare al Tecnico che lo collega ad un filo (Traccia 11)]

S: *[dal cellulare]* Pronto? Pronto? Pronto mi sentite! Sono in ritardo, scusate! Ho pensato di farvi questa telefonata altrimenti non ne uscivamo più...Buongiorno Marianna

C: Marina, non Marianna. Marina.

S: Sì, ma certo: Marina! Marianna...ci conosciamo da dieci anni cosa vuoi che importino i nomi adesso! ...Guglielmo... Guglielmo! Ma che sorpresa...

G: Marco, io sono Marco.

S: E poi Mario! Ci sei anche tu!

L: Nicola, Nicola.

S: Nicola, certo. Ma che simpatici che siete...allora dai Allora, carissimi, non perdiamo altro tempo! Ecco la presentazione di Curve nello spazio. Episodio I: i monti di Venere".

C: Veramente abbiamo qui le slide che ci hai mandato tu, quelle su Galileo, non ricordi?

S: Eh? Come? Ah! Sì certo! ho anche realizzato un documentario di grande successo su Galileo Galilei, il famoso documentario trasmesso anche dalla BBC: Susanna? Fai una cosa adesso, mi dai una mano tu con le immagini?

C: Marina, Per favore, Marina

S: Ma non importa...i nomi non sono mai stati importanti...i nomi non contano! Su forza Cominciamo, allora? Prego, signorina. Prima slide...

[Inizia la Presentazione con slide su Galileo comandate da C. Slide 1: copertina.]

S: Che bella slide! E' Proprio una bella slide! Vedete? E' proprio il dito medio della mano destra, di Galileo, è certamente il dito che toccò e strinse il cannocchiale; fu staccato dai resti di Galileo nel '700. Quel dito ci indica il cielo, ci invita ad osservare le sue meraviglie! Come dico nel mio libro pubblicato di recente...Ma cambiamo immagine.

[Slide 2: mondo terrestre e mondo celeste.]

S: Ed ecco qui chiarissima la Terra era posta al centro del cosmo, L'idea Tolemaica, la terra al centro corrottabile, mentre tutto il resto era incorrottabile. Tutto girava intorno alla terra ed era tutto un immenso giramento di palle, per così dire. Tutto questo universo che girava, una sull'altra ...Eh sì poi di questo ne parlo diffusamente nel mio libro, quello fresco di stampa "Le stelle sono tante...Milioni di Milioni". Prendevo appunto il titolo dall'immensa quantità di stelle che ci sono in giro...Ma andiamo alla prossima slide...Signora...Signorina.

[Slide 3: la supernova di Keplero.]

Ecco: qui siamo nel 1604, Keplero stava osservando il cielo nella costellazione del Boote e notò una stella che nei giorni precedenti non c'era. L'interesse per questo fenomeno fu straordinario: anche da Padova, Galileo osservò la stella nova. Solo nell'ottobre dell'anno successivo Galileo s'accorse che questa stella cominciava piano piano a scomparire...fino a scomparire definitivamente. Ecco l'evento che dal nostro punto di vista scientifico è fondamentale cercare di capire adesso: Chi ha fatto scomparire la stella. Chi ha fatto scomparire la stella? Fu forse opera degli alieni? Questa è la domanda che noi ci poniamo. *[Stop Traccia 11]*

G: Mi scusi, sa? Ma leggiamo l'originale così non rischiamo incomprensioni *[apre un libro e legge]*: "Lux quaedam peregrina, die decima mensis octobris anni huius millesimi sexcentesimo-quarti, primum in sublimi conspecta est".
[Riprende Traccia 11]

S.: Pronto pronto! Guardate che io vi sentivo. Grande Franco! Ottimo inglese! Certo Furio Certo! In ogni caso, nella mia opera "Nel folto di lunghe trecce bionde", dedicato alla costellazione della Chioma di Berenice, è tutto spiegato in grande dettaglio...

[Slide 4. Copertina del Sidereus Nuncius.]

S: Ma cosa...cosa state mostrando ma cosa...cosa state...Ma come fate a sapere della mia ultima pubblicazione? Quella è la copertina del mio ultimo libro! *(ride sonoramente)* Mi avete fatto uno scherzo!

C, G e L: ma chi ce l'ha mandato questo? / L: Guarda che è quello di Galileo, del 1610!

C: ...Sì...dove si legge che nel 1609 Galileo ebbe notizia di un certo fiammingo che, a quanto si diceva, aveva costruito un "occhiale" che permetteva di vedere vicini anche oggetti molto lontani.

[Slide 5: il cannocchiale.]

S: E sì, sono questi appunto, i temi del mio ultimo libro "Cannocchiali Cannoli Cannoni": ma che cosa fumava Galileo?". Questa è proprio un'analisi su cosa studiava Galileo negli ultimi anni della sua vita.

[Slide 6: Quadro raffigurante Galilei che porta il cannocchiale al doge.]

S: Ma chi sono questi? Quest'immagine non fa parte della mia conferenza...cos'è questa pagliacciata! Cosa mi fate vedere un balletto in costume? Pronto! Pronto! *[Stop Traccia 11.]*

L: Ma questo è il doge di Venezia. È che, ieri come oggi, gli scienziati avevano bisogno di fondi per fare le loro scoperte... anche in questo Galileo si mostrò moderno come un ricercatore di oggi... Galileo si recò dal Doge a vendergli il cannocchiale! Era uno strumento importante, sostenne il Galileo. Per esempio per difendersi dai pirati. Le navi veneziane, osservando il mare con quello strumento, avevano la possibilità di vedere navi pirata molto prima che queste vedessero loro. E di mettersi in salvo. *[Riprende traccia 11]*

S.: Erano veri! Ma andiamo avanti... Attenzione signori uno scoop! Osservate lì in basso: macchie ematiche! Sangue sul testo originale di Galileo. Come mai queste macchie ematiche? Sono stati forse i Pigmei? Sono stati forse i templari? Del resto anche Marte è rosso, come mai quest'attinenza fra il pianeta rosso Marte e il sangue...! Questo è proprio il titolo della prossima puntata dedicata a Galileo: "Assassinio su Marte" e messa in onda da Tele Racconto. Ma andiamo avanti. Signorina Giovanna Carpinetti prego...

*[Slide 8: pagina del Sidereus Nuncius con cielo stellato.
Slide 9: le lune di Giove.]*

S: Oh questo è interessante, parliamo del 7 gennaio del 1610, Galileo osservò che intorno al pianeta Giove si trovavano tre piccoli puntini...Tre piccoli puntini intorno al pianeta Giove. A volte passavano dalla destra alla sinistra del pianeta per poi tornare a destra. Galileo concluse che non potevano essere se non lune che ruotavano intorno a Giove! Questa è la fine del sistema Tolemaico. E come finì il sistema Tolemaico? pianeta Giove? Furono i Templari? Furono i Terroristi? Furono i Pigmei? E qual è la connessione tra le tracce ematiche ed il pianeta rosso Marte? Come mai? Pronto...pronto...si si pron...To? La supernova? È la...

[Slide 10: Foto multispettrale della Supernova di Keplero SN1604]

S: Ooooh! Pronto con Chi Parlo? È la supernova? La Supernova? *[Si sente un vento sibilante]*
[Stop Traccia 11]

C: Per prima si rianima: E pensate che questa era proprio la supernova che vide Galileo...Beh... mi aggancerei a quest'immagine per raccontarvi ciò che riuscì a scoprire nel 1945 un fisico di nome Geoffrey Ingram Taylor leggendo una rivista comprata in edicola.

L: *[Mettendo a tacere C.]* Non c'è più tempo, Marina!

C: Ma perché? Sì che c'è tempo!

[Musica]

L: Ascolta...

[L. porta fuori C.]

Scena XVII: Cosa c'è prima dell'ultravioletto?

Commento: Quest'ultima scena serve per concludere la carrellata sulle tipologie di "luce" che arriva sulla Terra dalle stelle e per mandare a casa gli spettatori con la consapevolezza che in astronomia

si utilizzano anche altri strumenti (onde gravitazionali e raggi cosmici) per avere informazioni dall'Universo, non solamente la radiazione elettromagnetica.

G: *[Eccitato.]* Rimane a questo punto ancora da parlare del cielo in onde radio e anche negli X, per non parlare dei gamma ray burst. Per la verità l'astronomia moderna non si limita più a guardare il cielo utilizzando le onde elettromagnetiche, per esempio con l'esperimento Auger si studiano i raggi cosmici di grandissima energia che giungono sulla Terra ed è stato finora confermato il ben noto cut off GZK.

[L. irrompe in scena, spegne la proiezione e corre da G. e lo trascina via mentre lui continua imperterrito ...]

...che prevede che i raggi cosmici di energia maggiore di 5×10^{19} eV interagiscano con i fotoni della radiazione cosmica di fondo per produrre pioni tramite la risonanza delta il fotone della radiazione di fondo più il protone cosmico mi dà la Δ^+ che decade in p più π^0 , oppure in n più π^+ . E questo processo continua fino quando l'energia del protone cosmico scende al di sotto della soglia di produzione dei pioni.

[La musica si alza. Buio. Il pubblico pensa che lo spettacolo sia finito.

C., G., L., S tornano sul palco per gli applausi. L. interrompe gli applausi con braccia aperte.]

Scena XIX: Gli errori di Luce

Commento: In questa ultima parte i Ricerc-attori escono dai loro personaggi e spiegano l'intento dello spettacolo e del perché siano stati commessi volutamente tre errori, dandone le risposte corrette. Spiegheranno anche il significato sotteso al maltrattamento di C. da parte dei due colleghi e sarà rivelata la notizia su Taylor che C. cercava di raccontare venendo sempre interrotta.

Lo spettacolo ha lo scopo di far riflettere sui pericoli che si possono incorrere nell'ascoltare chi divulga e chi parla di scienza, soprattutto se non si è in grado di giudicare quanto viene detto. Gli errori commessi volutamente durante la rappresentazione non sono immediatamente identificabili per un pubblico nella media. Esplicitando alla fine gli errori, i Ricerc-attori esplicitano anche la condizione in cui si trovano gli spettatori. Essi sono inermi davanti alle informazioni fisiche che vengono date loro, non possono fare altro che fidarsi di chi, in campo fisico, ha una maggiore autorità.

L'unico modo per capire cosa voglia dire essere vulnerabili, è trovarsi in prima persona in questa condizione. Questo è il motivo per cui gli errori sono stati commessi e per cui vengono spiegati alla fine dello spettacolo.

L'invito finale è quello di farsi domande, informarsi, studiare, per porsi in modo critico davanti a chi comunica fisica, per evitare i pericoli della comunicazione e non essere, quindi, a ' $\pi/2$ ' davanti ad essa.

G: Ora, molto brevemente vi vogliamo dire solo due parole perché in questo spettacolo gli autori hanno volutamente inserito alcuni errori. Lo hanno fatto per porre l'attenzione su alcuni punti riguardanti la comunicazione scientifica. Vi diremo quali sono gli errori che abbiamo commesso, vi daremo la spiegazione corretta e vi diremo, caso per caso, su quale punto vorremmo spingere la riflessione.

L: Il primo errore, forse il più evidente almeno se conoscete un po' di astronomia è stata la scorretta lettura del diagramma HR. *[G. proietta la slide col diagramma HR e segue l'asse orizzontale con puntatore laser.]* Infatti io ho letto il grafico in modo consueto cioè attribuendo all'asse orizzontale valori progressivamente crescenti procedendo da sinistra verso destra. È del tutto naturale e quindi

non vi sarà parso un errore, eppure bastava leggere i numeretti riportati lungo l'asse per rendersi conto che i valori erano invertiti rispetto a quanto andavo dicendo. Le temperature più alte, infatti, si collocano verso sinistra all'origine degli assi e poi vanno progressivamente decrescendo spostandosi verso destra. Grazie a questa erronea lettura ho spiegato in modo volutamente scorretto una classe di fenomeni celesti, facendo anche ricorso a un inganno culturale: la percezione intuitiva che i corpi caldi siano rossi mentre quelli freddi siano blu. E ho quindi concluso che le stelle giganti blu sono più fredde di quelle giganti rosse. Ho dato una spiegazione scientifica di un fenomeno in modo opposto a quello corretto, facendo ricorso a un grafico e appoggiandomi al senso comune rispetto all'idea di colori caldi e freddi, e anche per esempio al colore dei rubinetti dell'acqua.

Questo primo esempio vuole mostrare come l'attenzione dello spettatore possa cadere più facilmente sulle parole del conferenziere che sui dati che egli mostra. Anche in presenza di dati corretti, nel nostro caso il grafico HR, la comunicazione si fonda più sulla fiducia nello speaker che sulla lettura diretta dei dati. In sostanza, anche senza alterare i dati è possibile, soprattutto se ci si appoggia su luoghi comuni o percezioni intuitive della realtà, fornire spiegazioni non corrette dei fenomeni presentati. Certe discussioni politiche ne sono un buon esempio.

C: Un altro errore l'ho fatto io nello spiegarvi il motivo per il quale la luce dalle stelle ci appare intermittente. Vi ho detto che la dimensione delle speckles, queste macchioline che compaiono sullo schermo quando poniamo il vetro smerigliato sul cammino del laser, dipendono solo dalla grana della smerigliatura del vetro, come se fossero la proiezione delle irregolarità. Questo è falso. La dimensione delle "speckles", pressappoco uguale per tutte nonostante la distribuzione di intensità sia piuttosto irregolare, non ha nulla a che vedere con la grana della smerigliatura, ma dipende solo dalla dimensione della regione illuminata: tanto più piccolo il puntino di luce sul vetro smerigliato, tanto più grandi le speckles.

Per dimostrarvelo posso usare la lente di cui non vi avevo spiegato lo scopo. Se allontano o avvicino il vetro smerigliato al fuoco della lente posso intercettare il fascio laser in punti in cui ha diametri diversi. Ora faccio diminuire il diametro. Guardate! Le "speckles" diventano sempre più grandi. Ora lo faccio aumentare e le speckles diventano piccolissime. Quasi invisibili.

Tornando al parallelo con le stelle possiamo immaginarle come piccoli punti di luce posti davanti all'atmosfera le cui disomogeneità agiscono come il vetro smerigliato. Le speckles prodotte sono molto grandi e davanti ai nostri occhi si alternano zone buie e zone illuminate e questo comporta che vediamo le stelle che si accendono e si spengono.

Ora che sappiamo che le dimensioni delle speckles dipendono solo dalla dimensione del punto di luce, possiamo usare questa spiegazione anche per un altro fenomeno, che certamente conoscete ma che io avevo sapientemente taciuto: la luce che ci arriva dai pianeti non è intermittente, ma fissa.

Infatti da Terra vediamo i pianeti più grandi delle stelle. Riferendoci al nostro esperimento questa situazione coincide con il caso che dà luogo a speckles piccolissime: i nostri occhi sono colpiti simultaneamente da un numero molto elevato di speckles e il loro movimento non viene percepito, così vediamo il pianeta splendere con intensità costante.

Ma perché questo errore? La spiegazione era così tecnica che non avevate modo di accorgervi che era sbagliata. Già. E questo è il punto. Si può essere ingannati da chi esprime concetti difficili con sicurezza. Pur non essendo in grado di seguire il suo discorso siamo portati a fidarci delle conclusioni. In questo caso l'errore era abbastanza innocuo perché ci diceva qualcosa di vero, ma con una spiegazione costruita ad hoc. Avrebbe però potuto essere più insidioso e portarvi a credere qualcosa di completamente falso. Di fronte a errori di questo tipo siamo molto indifesi. Può sembrare avvilente e in parte lo è, ma è molto meglio esserne consapevoli che non saperlo.

Possediamo solo un'arma e ci conviene usarla sempre: il nostro senso critico, ossia la nostra capacità di porci domande. La correttezza di una spiegazione scientifica è provata dal fatto che spiega anche altri fenomeni simili (per esempio la spiegazione corretta spiega perché la luce dei pianeti è

fissa, mentre quella inizialmente proposta non lo faceva). L'unico modo per smascherare una spiegazione tecnica e complessa come questa era farsi una domanda in più e chiederne conto.

L: Infatti, una vera spiegazione scientifica per essere corretta non può limitarsi a spiegare ciò per cui è stata proposta, ma deve essere in grado di andare oltre, di spiegare altro, di prevedere ciò che non possiamo vedere. Un esempio più semplice e paradossale è la numerologia, presi dei numeri a caso, per esempio le estrazioni del lotto, è sempre possibile trovare una legge matematica o una descrizione numerologica che li lega, tuttavia questa legge descrittiva non vi permetterà mai di prevedere il prossimo numero estratto!

G: Io vi ho volutamente ingannato a proposito del cambiamento di colore che subivano quei blob quando passavano da luce bianca a luce ultravioletta. Vi ho detto che così come luce rossa più luce verde ci danno la sensazione del giallo allo stesso modo l'arancione del blob insieme all'ultravioletto ci danno una sensazione di colore corrispondente ad un colore spettrale con frequenza intermedia tra quella dell'ultravioletto e quella dell'arancione. Peccato che l'arancione del blob è il colore di un pigmento quando è illuminato da luce bianca e non, invece una luce monocromatica...

La spiegazione era plausibile. Volutamente errata e basata su un principio di somiglianza con un altro esperimento precedentemente visto e interpretato correttamente. Nell'analizzare le analogie bisogna stare attenti anche alle differenze! Qui si vuole deliberatamente ingannare.

Tutti noi, scienziati compresi ovviamente, non abbiamo strumenti in moltissimi campi della conoscenza umana e, perciò, c'è un forte rischio di manipolazioni culturali su temi di grande impatto sociale, forti per così dire. Abbiamo voluto mostrarvi come è facile, per tutti, essere presi in trappola. Molto meglio essere consapevoli di questo, che vuol dire per esempio anche sapere di non avere strumenti per fare una scelta consapevole e ragionata, che pensare invece di averli, gli strumenti, e concretamente essere invece a pigreco mezzi, così come me prima, in balia di chi vuole farci pensare qualcosa...

Per l'uso della divulgazione": il valore della comunicazione della scienza dipende – ancora oggi, nell'epoca della Comunicazione Globale – soprattutto dal suo contenuto. Anche dalla forma, è chiaro, ma certamente non solo dalla forma. Insomma, il sapiente è lui – gli altri non sono portatori di conoscenza, ma solo contenitori vuoti: pubblico che impara ascoltandolo.

Anche in questo caso un avvertimento: attenzione all'autorità di chi parla in pubblico. Siate sempre critici, in ogni momento. È un classico caso di comunicazione a una direzione sola: chi è sul palco o di fronte alle telecamere è più forte nel sostenere un'opinione di quanto non sia un membro del pubblico. Insomma, come sempre, il cervello deve essere acceso!

L: Infine abbiamo commesso un ultimo errore, gravissimo questo, perché coinvolge direttamente una persona, la nostra collega Marina. Come avete visto, durante lo spettacolo l'abbiamo trattata malissimo, in quanto scienziata femmina e quindi non degna di considerazione.

C: Oggi è il 25 novembre, giornata riconosciuta in buona parte del mondo per ricordare e denunciare il maltrattamento fisico e psicologico su donne e bambine. Da anni simbolo della giornata sono le scarpe rosse e io per questo oggi le indosso. Abbiamo voluto introdurre nello spettacolo questo orrore, seppure in tono scherzoso e in forma di gioco, per ricordare le maggiori difficoltà che le donne incontrano nel lavoro rispetto agli uomini. Spesso sono discriminate o sminuite e comunque quasi sempre non sono trattate al pari dei loro colleghi uomini.

L: Una piccola nota positiva riguarda la scienza perché almeno quello è un ambito dove conta ciò che si sa più che ciò che si è. La forza della scienza risiede proprio nel non fare distinzioni sulla base del colore della pelle, del genere, della religione eccetera.

G.: Allora le facciamo un regalo?

L.: Certo a lei ed al nostro pubblico...Quindi per risarcimento a Marina e a tutto il pubblico, le facciamo dire finalmente cosa scopri ...

C: Nel 1945 un fisico di nome Geoffrey Ingram Taylor leggendo una rivista comprata in edicola vide le foto di una delle prime esplosioni nucleari avvenuta in New Mexico. Dalle foto stimò il raggio del fungo atomico in funzione del tempo e facendo alcune considerazioni sulle grandezze fisiche da cui dipendeva la dimensione del fungo (l'istante dal momento dell'esplosione, la densità dell'aria e l'energia rilasciata) e usando una formula matematica semplicissima, riuscì a ricavare proprio l'energia sprigionata dall'esplosione. Insomma, sulla rivista Life, che chiunque poteva comprare in edicola, era stato pubblicato inconsapevolmente il massimo segreto mondiale. Anche se era sotto gli occhi di tutti, era semplicemente invisibile ai più.

E perché il discorso c'entrava anche con le super novae? Perché lo stesso approccio proposto da Taylor per le esplosioni nucleari è molto usato in astrofisica (noto come Sedov-Taylor solution) per stimare quantitativamente gli esiti delle esplosioni di supernovae.

FINE

Appendice B

Il tutorial

Sotto ai nostri occhi

Un percorso formale sulle radiazioni elettromagnetiche
visibili, infrarosse e ultraviolette

Martina Mulazzi

Indice

I	Obiettivi, Concetti, Metodologia	4
0.1	Introduzione	5
0.2	Attività Formali - Non Formali - Informali	6
0.3	Prerequisiti	8
0.4	Caratteristiche del tutorial	9
0.5	Obiettivi di Apprendimento	10
0.6	Articolazione dei contenuti	12
0.7	Come usare il tutorial	12
0.8	Materiale a supporto del tutorial	15
II	Attività	19
1	Attività 1 - Cosa vedono i nostri occhi	20
1.1	Engage	23
1.2	Explore	27
1.3	Explain	28
1.4	Extend	29
1.5	Explore - parte 2	30
1.6	Explain - parte 2	33
1.7	Extend - parte 2	34
1.8	Approfondimento: RGB, CMY e funzionamento di monitor e stampanti	37
1.9	Approfondimento: L'occhio come un rivelatore di radiazione	40
1.10	Collegamento con la Filosofia: La realtà vera e la forma delle cose	44
1.11	Evaluate	46
2	Attività 2 - Vedere con altri occhi	47
2.1	Engage	49

2.2	Explore	52
2.3	Approfondimento: Funzionamento delle telecamere non nel visibile	55
2.4	Explain	57
2.5	Extend	58
2.6	Explore - parte 2	60
2.7	Explain - parte 2	64
2.8	Collegamento con l'Arte - Le Tecniche di Analisi e Restauro dei Beni Culturali	65
2.9	Extend	70
2.10	Explain - parte 3	72
2.11	Evaluate	73
3	Attività 3 - Emissione e Spettri	74
3.1	Engage	78
3.2	Explore	81
3.3	Explain	83
3.4	Extend	83
3.5	Explain - Parte 2	86
3.6	Explore - Parte 2	87
3.7	Explain - Parte 3	90
3.8	Approfondimento - Come funziona la termocamera	91
3.9	Explore - Parte 3	93
3.10	Approfondimento: Perché non ci sono stelle verdi	97
3.11	Approfondimento - L'Effetto Serra	98
3.12	Approfondimento - Cenni di Astrofisica e la radiazione di corpo nero	100
3.13	Collegamenti Matematici -	104
3.14	Evaluate	111
III	Appendice	112
3.15	Attività per studenti con Discromatopsia	113
4	Bibliografia	151

Tabella 1
Elenco simboli e nomi usati nel tutorial

Laboratorio PLS	Laboratorio “I Colori invisibili ai confini dell’arcobaleno” che rientra nel Progetto Piano Lauree Scientifiche (vedere paragrafo “Attività Formali - Non Formali - Informali”)
Spettacolo	Spettacolo teatrale tenuto da professori dell’Università Statale di Milano Dipartimento di Fisica, dal titolo “Luce dalle Stelle” (vedere paragrafo “Attività Formali - Non Formali - Informali”)
Ricerc-attore/Ricerc-attrice	Nome dato agli attori dello Spettacolo. Essi, infatti, sono contemporaneamente attori e fisici che lavorano in Università.
§	Simbolo che precede la Bibliografia di riferimento degli argomenti teorici.
⇒ Appendice	Indica che una scheda didattica si trova in Appendice alla pagina indicata.
***	Note per l’insegnante: approfondimenti sulla fisica degli esperimenti e dei fenomeni visti nelle attività, soluzioni degli esercizi e risposte alle domande
T Violetto	Attività riservate a classi che hanno visto lo Spettacolo
L Blu	Attività riservate a classi che hanno partecipato al Laboratorio PLS.

Parte I

Obiettivi, Concetti, Metodologia

0.1 Introduzione

Questo lavoro vuole essere un supporto per insegnanti che intendono affrontare a scuola argomenti di fisica dei colori, radiazione elettromagnetica, termografia e leggi associate (legge dello spostamento di Wien, legge di Planck e di Stefan-Boltzmann), fino ad arrivare a introdurre il corpo nero.

Dato che i manuali scolastici prevedono la trattazione di questi argomenti al quinto anno del Liceo Scientifico, il percorso è pensato per classi quinte, eventualmente per classi quarte come introduzione alla fisica del quinto anno.

Sono state riscontrate alcune problematiche in letteratura riguardo l'apprendimento di tali argomenti [1–12] e [18–21]¹.

Inoltre si ritiene che una buona conoscenza dello spettro elettromagnetico, dell'interazione radiazione materia e della termografia possa aiutare gli studenti ad affrontare l'Esame di Stato. Infatti, come si evince dal quadro di riferimento ministeriale degli esami di stato per Licei Scientifici, la seconda prova di Fisica prevede argomenti quali: le onde elettromagnetiche, il corpo nero e la legge di Planck².

La metodologia di riferimento per progettare le attività del percorso è quella definita *inquiry*, in particolare declinata nella strategia didattica definita delle 5E [22], in cui si susseguono all'interno dell'attività cinque fasi ben distinte, chiamate: fase di *Engage*, fase di *Explore*, fase di *Explain*, fase di *Extend* e fase di *Evaluate*.

Le fasi permettono una proposta didattica diversa da quella tradizionale, in cui i concetti vengono trasferiti dall'insegnante agli studenti tramite lezioni frontali in cui i ragazzi principalmente hanno il ruolo di ascoltatore passivo. Potrebbe non esserci, quindi una reale interiorizzazione da parte dei ragazzi degli argomenti trattati. Lo scopo della metodologia *inquiry*, come del tutorial, è quello di stimolare la curiosità degli studenti, in modo che possano nascere domande spontanee, piuttosto che dare a priori risposte a quesiti non posti.

Per permettere una didattica di questo tipo è necessario usare strumenti e ambienti diversi, quali il laboratorio e, nel nostro caso, il teatro, sia per

¹Referenze più precise sono indicate all'inizio di ogni Attività. Inoltre ci si è basati su alcune problematiche riscontrate in esperienze di laboratorio svolte presso l'Università Statale di Milano Dipartimenti di Fisica con classi di quarta superiore.

²Ulteriori informazioni al sito: <https://www.miur.gov.it/web/guest/il-quadro-di-riferimento-della-seconda-prova-di-fisica-per-gli-esami-di-stato-dei-licei-scientifici>

definire attività di tipologia differente che per favorire forme diverse di apprendimento.

0.2 Attività Formali - Non Formali - Informali

Di seguito una breve descrizione della metodologia adottata per il tutorial, ovvero l'approccio didattico di *active learning* detto IBSE (*Inquiry Based Science Education*) e la strategia didattica della sequenza 5E³. La metodologia viene utilizzata per promuovere attitudini positive nei confronti della scienza, quali curiosità, creatività, meraviglia, stupore e il saper utilizzare gli strumenti propri della scienza per spiegare fenomeni naturali [22]. Serve anche per allontanare da eventuali pregiudizi e stereotipi legati alla scienza, quali il camice bianco dello scienziato e l'idea che la scienza abbia tutte le risposte. In particolare si cerca di trasmettere la concezione della scienza come una disciplina dinamica, che propone delle spiegazioni ai fenomeni naturali, ma senza alcuna pretesa di validità assoluta. Gli studenti possono provare in prima persona ad applicare il metodo scientifico e vederne l'efficacia, in modo da rendersi conto autonomamente, ad esempio, che servono le domande giuste e molti tentativi per ottenere una risposta significativa per un fenomeno osservato e che tale risposta potrebbe non essere definitiva alla risoluzione del problema.

Il metodo didattico si struttura in alcune fasi di apprendimento [22] che seguono parallelamente le fasi tradizionali del metodo scientifico (osservazione, individuazione di un problema, ipotesi, verifica sperimentale, analisi dei dati, conferma o meno dell'ipotesi, nuova ipotesi se non vi è la conferma, oppure comunicazione dei risultati, ulteriori verifiche, formulazione di un principio). La strategia didattica è chiamata ciclo 5E, in quanto prevede cinque fasi diverse, ma correlate una all'altra, e può essere la base di partenza per progettare una lezione, oppure una intera unità didattica. Il modello è pensato per valere non soltanto per studenti, ma anche per insegnanti e professionisti, inoltre la sua applicazione può avere luogo in classe, in laboratorio oppure in luoghi informali, ad esempio un museo, un parco, in casa, a teatro.

³Per approfondire vedere l'articolo di Bybee [22] oppure il lavoro di tesi "Il Teatro Scientifico in Didattica della Fisica, una attività informale che diventa formale", capitolo "Metodologia"

Per ogni attività viene delineato un obiettivo didattico che gli studenti avranno indagato approfonditamente alla fine del percorso.

Le fasi sono le seguenti:

- **ENGAGE:** fase in cui si vogliono coinvolgere gli studenti sul tema scelto, catturando la loro attenzione, ad esempio con un esperimento. L'attività è pensata per incuriosire e far scaturire domande spontanee, che troveranno risposta nella futura indagine. L'insegnante in questa prima fase può verificare quale sia la conoscenza a priori degli studenti e valutarne possibili concezioni errate.
- **EXPLORE:** la fase prevede una indagine basata su quanto visto in precedenza, solitamente tramite attività di laboratorio. Gli studenti iniziano l'indagine con osservazioni, raccolta di dati e analisi degli stessi. Rapportano le esperienze con quanto conosciuto a priori e sperimentato in precedenza. L'insegnante in questa fase è un facilitatore che sceglie i materiali e le attività adeguate per guidare i ragazzi verso i nuovi concetti. Inoltre il docente lavora in collaborazione con gli studenti, indagando e scoprendo insieme a loro. I ragazzi possono iniziare a costruirsi una spiegazione del fenomeno indagato.
- **EXPLAIN:** fase in cui gli studenti concettualizzano quanto osservato e analizzato in precedenza e cercano di trarne una legge o un modello con caratteristiche esplicative. Possono organizzare in modo più strutturato le osservazioni e i dati ottenuti precedentemente. Sono introdotti il linguaggio formale scientifico e i contenuti fisici.
- **EXTEND:** quanto ipotizzato nella fase precedente viene testato e gli studenti progettano altri esperimenti e osservazioni per definire la predicibilità del modello. Gli insegnanti incoraggiano ad applicare ad altri ambiti e in situazioni differenti i concetti trovati, valutando la capacità degli studenti e la validità di quanto ipotizzato. In questo modo i ragazzi possono approfondire e irrobustire la propria conoscenza, oppure confutare quanto ipotizzato, poiché non applicabile ad altre situazioni.
- **EVALUATE:** ultima fase che permette agli studenti di valutare le loro capacità e conoscenze apprese durante il percorso e permette all'insegnante di valutare i loro progressi.

I contesti di apprendimento, come definiti dalla Commissione delle Comunità Europee nel 2000 tramite il "Memorandum sull'istruzione e la formazione permanente" [23], sono classificati entro tre categorie: formali, non formali e informali. Scopo del tutorial è proporre un percorso per la scuola, che unisca

un'attività informale (spettacolo teatrale) e una non formale (laboratorio) in un percorso formale.

Il percorso può essere svolto indipendentemente dalle altre due attività.

I contesti presi in considerazione per questo lavoro sono:

- Attività Informale: Spettacolo teatrale “Luce dalle Stelle” de “Lo Spettacolo della fisica”⁴
- Attività Non Formale: Laboratorio “I colori invisibili ai confini dell’arcobaleno”, che rientra nel progetto Piano Lauree Scientifiche (PLS) ed è attivo al Dipartimento di Fisica dell’Università Statale di Milano (UNIMI)⁵.
- Attività Formale: “Sotto ai nostri occhi” il tutorial che seguirà a pagina 20.

0.3 Prerequisiti

Nel percorso non si intende spiegare o fare esperienze sulla natura ondulatoria delle radiazioni. Si suppone infatti che tale argomento sia già stato affrontato dagli studenti, infatti spesso verranno utilizzati i concetti di lunghezza d’onda e di frequenza, tipici delle onde, ma non ci saranno attività volte a definirne, ad esempio, la relazione.

Un altro argomento che non verrà trattato è la quantizzazione della radiazione. Non si parlerà, quindi, di fotoni e non verrà usata la formula che lega il quanto di energia alla frequenza e alla costante di Planck. Anche la trattazione del corpo nero sarà da un punto di vista puramente fenomenologico.

⁴Per approfondire il teatro scientifico de “Lo Spettacolo della Fisica” si rimanda all’articolo [25]. Per informazioni sugli spettacoli e prenotazioni vedere il sito al link <http://spettacolo.fisica.unimi.it/>

⁵Informazioni al sito del PLS gestito dall’Università Statale di Milano <http://www.fisica.unimi.it/ecm/home/pubblico-e-divulgazione/stages-corsi-e-laboratori>

0.4 Caratteristiche del tutorial

I criteri e le modalità utilizzate per creare questo tutorial sono presentati di seguito.

- Progettare attività basate sull'*Active Learning* e sulla metodologia *inquiry* per quanto riguarda l'argomento fisico delle radiazioni elettromagnetiche (ultravioletto, infrarosso vicino e lontano e visibile) e della termografia, legando approcci formali, non formali e informali.
- Attenzione alle difficoltà specifiche degli studenti (riprese all'inizio di ogni Attività) per favorire un apprendimento significativo superando i problemi riscontrati in letteratura.
- Favorire una visione non frammentaria delle diverse bande dello spettro elettromagnetico (soprattutto radiazione visibile, ultravioletta, vicina e lontana infrarossa), sottolineando, però, le profonde diversità esistenti tra loro.
- Usare un approccio principalmente sperimentale alla materia, per far acquisire agli studenti dimestichezza con l'ambiente laboratoriale e il metodo sperimentale.
- Permettere una visione interdisciplinare degli argomenti fisici trattati, collegandoli ad altre materie scolastiche, quali: arte, matematica, filosofia e astrofisica.
- Collegare aspetti fisici e aspetti quotidiani (ad esempio il funzionamento dei monitor, delle stampanti, l'effetto serra⁶).
- Proporre attività di gruppo per stimolare la capacità degli studenti di cooperare e di riferire i propri risultati agli altri in modo rigoroso e usando termini specifici della materia.

⁶In particolare si invita a leggere il lavoro svolto da P. Onorato, P. Mascheretti e A. DeAmbrosis "*Home made' model to study the greenhouse effect and global warming*" ed il "Chapter 2 - *Conceptual Path on Climate Change*" del lavoro di G. Tasquier et al. "*Leading secondary school students to face the disciplinary, epistemological and societal challenges of climate change: design and analysis of multi-dimensional teaching / learning experiences*"

0.5 Obiettivi di Apprendimento

Le capacità concettuali e metodologiche che gli studenti possono maturare con questo tutorial sono elencate di seguito.

Si tenga presente che gli obiettivi di contenuto e le competenze saranno riportate in modo dettagliato per ogni attività.

• Obiettivi Concettuali

1. Intendere come la radiazione visibile interagisce con la materia determinandone il 'colore'.
2. Sapere i concetti di sintesi additiva, sottrattiva e complementarietà dei colori.
3. Comprendere il modello corretto di visione.
4. Conoscere i valori di lunghezza d'onda e frequenza delle bande spettrali prese in considerazione (visibile, vicino e lontano infrarosso e ultravioletto).
5. Apprendere le diverse proprietà e le caratteristiche comuni delle varie bande dello spettro elettromagnetico e come esse interagiscono con la materia, con particolare riguardo ai concetti di: riflessione, trasmissione, assorbimento ed emissione della radiazione.
6. Saper definire i concetti di base di termografia, ovvero riconoscere il fenomeno della radiazione termica, sapere chi la emette, a che lunghezza d'onda e perché viene emessa.
7. Sapere descrivere qualitativamente il corpo nero.
8. Saper scrivere e conoscere il significato fisico di leggi quali: la legge dello spostamento di Wien, la legge di Planck, la legge di Stefan-Boltzmann (anche con il termine di emissività).

• Obiettivi Concettuali secondari

1. Aver chiaro il funzionamento di un rivelatore che opera in bande spettrali del visibile e non.
2. Saper riportare esperienze e nozioni fisiche sulle radiazioni nella vita di tutti i giorni, ad esempio il funzionamento dei monitor di cellulari e televisori e l'effetto serra.

• Obiettivi Epistemologici

1. Saper riconoscere modelli fisici, ad esempio il modello di corpo nero.
2. Saper riportare l'argomento fisico ad una visione d'insieme, soprattutto tramite collegamenti interdisciplinari.

- **Obiettivi Metodologici e Sperimentali**

1. Saper utilizzare strumenti come termocamere, telecamere UV e vicino infrarosse, sapere quali informazioni restituiscono queste apparecchiature e su quali principi fisici si basano per il loro funzionamento.
2. Saper applicare strumenti matematici quali proporzionalità inversa o diretta, derivate ed integrali.
3. Saper utilizzare simulazioni online per fare esperimenti virtuali, in particolare si userà una simulazione presa dal sito PHET Colorado.

0.6 Articolazione dei contenuti

Il tutorial propone una serie di attività da svolgere con gli studenti a scuola in orario curricolare o extracurricolare, a discrezione del docente. E' suddiviso in tre Attività principali, ognuna formata da cinque o più fasi distinte. All'inizio di ogni Attività vi sono dei piccoli paragrafi con indicazioni riguardo agli obiettivi prefissati, alle problematiche collegate e al materiale da utilizzare.

Di seguito è riportato uno schema generale della struttura di un'Attività:

1. Obiettivi generali
2. Obiettivi di contenuto
3. Testi di riferimento suggeriti
4. Principali problemi che riscontrano gli studenti
5. Materiale necessario
6. Fasi
 - (a) *Engage*
 - (b) *Explore*
 - (c) *Explain*
 - (d) *Extend*
 - (e) *Evaluate*

0.7 Come usare il tutorial

In questo paragrafo vengono spiegate in dettaglio le varie parti che compongono le Attività.

Per ogni Attività sono indicati gli **Obiettivi Generali** e gli **Obiettivi di Contenuto**. I primi indicano quali competenze individuali verranno affinate da parte degli studenti, i secondi, invece, definiscono quali argomenti saranno trattati. Il simbolo § precede la bibliografia di riferimento degli argomenti.

Sulla base della metodologia qui adottata [22], le attività sono suddivise

in più fasi: *Engage, Explore, Explain, Extend* ed *Evaluate*.

Ogni attività presenta una sezione chiamata PRINCIPALI PROBLEMI CHE RISCOVTRANO GLI STUDENTI in cui si esplicitano le maggiori difficoltà documentate in letteratura o emerse in laboratori didattici svolti presso l'Università Statale di Milano, valutati tramite questionari.

Laddove sia necessario dare una spiegazione di un fenomeno o dei risultati di un esperimento, vi saranno delle note contrassegnate dal simbolo * * * per separare informazioni riservate esclusivamente agli insegnanti dalle attività da svolgere con gli studenti. Tali informazioni è opportuno non fornirle direttamente ai ragazzi, in quanto le esperienze proposte sono studiate in modo da fare arrivare autonomamente gli studenti alle stesse conclusioni.

Le parti di **Approfondimento** presenti in alcune attività, non sono pensate come esperienze facoltative, ma prevedono esperimenti, collegamenti, o curiosità su argomenti visti nell'attività stessa. In queste parti si trovano anche gli aspetti interdisciplinari, obiettivi del tutorial.

Alla voce Punto di Attenzione si evidenziano le problematiche, concettuali e tecniche, che potrebbero insorgere nello svolgimento delle attività, dandone una possibile soluzione.

Al punto Materiale necessario si trova l'elenco degli strumenti e dei materiali che servono per svolgere l'attività. Alcuni lavori richiedono l'utilizzo di schede didattiche (\Rightarrow Appendice) per guidare gli studenti a svolgere le esperienze proposte.

In Appendice sono presenti anche le schede di valutazione da proporre agli studenti alla fine di ogni sezione o alla fine del percorso.

L'ordine delle attività è il seguente:

1. Attività 1 - Cosa vedono i nostri occhi
2. Attività 2 - Vedere con altri occhi
3. Attività 3 - Emissione e Spettri

Si consiglia di non modificare o invertire l'ordine delle Attività e delle fasi al loro interno, poiché pensate come consecutive una all'altra e per questo conoscenze apprese in una fase o attività saranno date per scontate nella

successiva.

Dato che il tutorial vuole configurarsi come un *framework* che unisca quanto visto nell'attività informale del teatro e nell'attività non formale del Laboratorio PLS, ma anche come entità a sé stante, sarà precisato nelle varie sezioni quali parti sono specifiche per il collegamento. In particolare i riquadri di colore **violetto**, preceduti dalla lettera 'T', indicheranno parti legate allo spettacolo, mentre i riquadri **blu**, preceduti dalla lettera 'L', indicheranno parti legate al Laboratorio PLS.

Tali parti colorate sono pensate solamente per classi che abbiano partecipato allo Spettacolo o al Laboratorio PLS o a entrambi.

Per rendere il percorso accessibile a tutti, a pagina 113 sono riportate delle indicazioni che l'insegnante potrà attuare se in classe ci sono casi di discromatopsia (visione bicromatica o monocromatismo).

0.8 Materiale a supporto del tutorial

Ogni Attività richiederà l'utilizzo di alcuni strumenti, oggetti, materiali specifici. L'insieme di questi elementi per ogni Attività verrà chiamato "kit didattico" o più semplicemente "kit". Tutti i kit sono composti da oggetti facilmente reperibili o acquistabili a prezzi contenuti. Per comodità ci si riferirà ai kit nella sezione "Materiale necessario" con i seguenti nomi:

- KIT #1
 - Filtri dicroici: filtri di spessore 1mm e dimensioni 110mm(altezza)x160mm(lunghezza) di colore: blu, rosso, verde. Quantità: 3 di ogni tipo.
 - Portalampane con attacco E27, per scrivania (con appoggio), orientabile (con paralume), con interruttore. Quantità: 3
 - Cartoncini rigidi quadrati di dimensione 200x200mm di colore: rosso, verde, blu, giallo, magenta, ciano, arancione, marrone, viola. Quantità: 4 per ogni colore. In Figura 1 e Figura 2 il colore magenta e ciano.
 - Cartoncino bianco A2 (420x594mm). Quantità: 1
 - Una carta da gioco di seme rosso con un numero e non una figura.

NOTE Al posto dei filtri dicroici possono essere utilizzate delle gelatine di forma rettangole e dimensione 200x90mm. Ne andranno sovrapposte due o tre dello stesso colore. I colori necessari sono: blu, rosso e verde.

NOTE Se non si ha a disposizione una parete bianca libera in alternativa al cartoncino bianco si può usare un telo bianco, alto e largo quanto una persona.

- KIT #2
 - Luci colorate con attacco E27. Colore luce: rosso, verde, blu. Quantità: 1 per ogni colore.
 - Telo nero di stoffa di dimensioni 1500x1000mm

NOTE Munirsi di eventuale prolunga per attaccare le luci.

- KIT #3

- Telecamera UV con attacco USB tipo C. Quantità: 5
- Telecamera vicino infrarosso con attacco USB tipo C. Quantità: 5
- Telecamera lontano infrarosso (termocamera) con attacco USB tipo C. Quantità: 5
- Tablet con ingresso USB tipo C. Quantità: 5
- Lampadina alogena con attacco E27. Quantità: 2
- Lampadina UV con attacco E27, 40 W con picco di emissione a 365 nm. Quantità: 1
- Lampadina vicino infrarossa con picco di emissione a 850 nm e attacco E27. Quantità: 1
- Portalampade da scrivania, con interruttore e attacco E27. Quantità: 4
- Occhiali di protezione dalla radiazione UV. Quantità: 30
- Lastra di policarbonato di dimensioni 200x150mm del tipo PER-SPEX. Quantità: 5
- Scatole di dimensione pari o superiore a quella delle lampadine. Materiale consigliato: cartone. Quantità: 4

NOTE Al posto della lampadina vicino infrarossa può essere usata una torcia vicino infrarossa.

● **KIT #4**

- Termocamera per riprese nel lontano infrarosso con attacco USB tipo C. Quantità: 5
- Set di quadrati di dimensione 100x100mm di materiale diverso. Quantità: 1 o 2 per ogni materiale e una quindicina di materiali diversi.
- Quadrato di legno di dimensione 100x100mm. Quantità: 10
- Piastra elettrica da cucina con intensità regolabile. Quantità: 5
- Pentola con coperchio di acciaio inossidabile, di dimensioni: 200mm(larghezza)x300mm(lunghezza)x150mm(altezza). Quantità: 5
- Pinze per prendere oggetti caldi. Quantità: 5
- Termometro da contatto. Quantità: 5

- Metro o righello. Quantità: 5
- Bilancia. Quantità: 5
- KIT #5
 - Set di scatole cubiche di materiale diverso e di dimensione 100x100x100 mm con una parete removibile con un foro al centro di una parete di 20 mm di diametro. Quantità: 1 per ogni materiale

Inoltre saranno disponibili tramite un link ad una cartella condivisa di Drive degli spezzoni di filmato presi dallo spettacolo “Luce dalle Stelle”, da utilizzare nel percorso qui presentato. Per agevolarne l'utilizzo, ogni filmato è numerato. La cartella condivisa si trova al sito <https://drive.google.com/open?id=1SEChmQXG-GJsNbLbMUmI0UGGHwFCe4FT>



Figura 1
Colore del cartoncino magenta (RGB: 255, 0, 255)

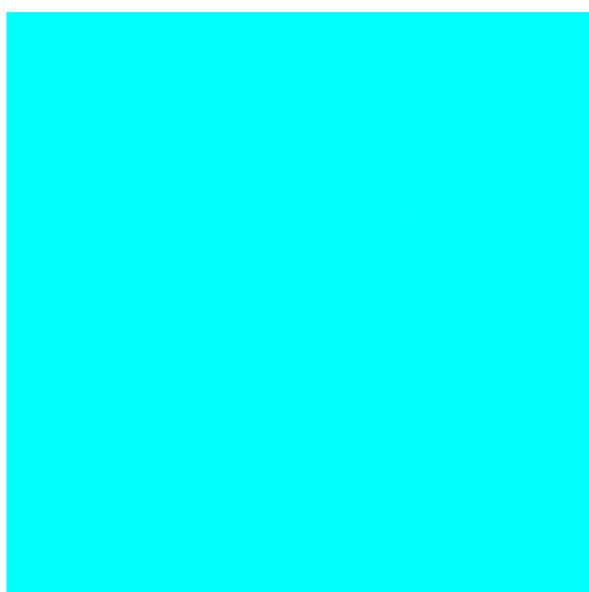


Figura 2
Colore del cartoncino ciano (RGB: 0, 255, 255)

Parte II

Attività

Attività 1 - Cosa vedono i nostri occhi

Obiettivi generali: Si testano le capacità degli studenti di:

- fare previsioni su un certo fenomeno non ancora osservato, sulla base di fenomeni visti in precedenza;
- predire modelli sulla base di quanto sperimentato;
- concatenare eventi in modo logico, basandosi sull'analogia e sul confronto, ad esempio una volta trovate delle regole, ci si aspetta un certo comportamento da parte di oggetti nuovi sulla base delle regole trovate;
- utilizzare strumenti, ad esempio i filtri dicroici, per ipotizzare fenomeni fisici partendo dalla conoscenza del funzionamento degli stessi;
- applicare conoscenze di senso comune a un contesto scolastico e compararlo con la realtà fisica, ad esempio la nozione che un oggetto bianco sia tale perché riflette tutte le lunghezze d'onda del visibile.

Obiettivi di contenuto:

- Radiazione visibile
- Intensità spettrale e percezione dei colori
- Sintesi additiva e sottrattiva dei colori
- Fisiologia dell'occhio: funzionamento dei coni
- Riflessione e assorbimento della radiazione visibile
- Fenomeno delle ombre colorate

- Sistema RGB e CMY
- Funzionamento di monitor (*pixel*) e stampanti
- Modello di visione
- Funzionamento di un rivelatore di radiazione

§L. Gunther (2012), *The Physics of Music and Color*. Massachussets: Springer — Libro di livello fisico universitario, in lingua inglese, poco accessibile a studenti delle superiori. I capitoli di interesse sono principalmente il Capitolo 13 e Capitolo 14, sulla visione a colori e sulla fisica dei colori.

PRINCIPALI PROBLEMI CHE RISCOVTRANO GLI STUDENTI :

- Molti studenti ritengono che il colore sia una proprietà assoluta di un certo corpo [3–5]. Invece la percezione che abbiamo del colore dipende dalla capacità di un certo materiale di assorbire e riflettere certe lunghezze d'onda. La visione e in particolare la percezione del colore, è un processo anche fisiologico, in cui entrano in gioco i fotorecettori (coni) che permettono la visione diurna.
- Comune è per alcuni studenti l'idea che un oggetto prenda il colore della sorgente che lo illumina come se il colore fosse una proprietà intrinseca della luce [3, 4].
- Spesso gli studenti attribuiscono alla luce le stesse proprietà studiate per i pigmenti¹ mostrando problemi nella comprensione del processo di sintesi additiva dei colori [6].
- Si trova [3, 4] la credenza che una luce colorata incidente su un oggetto mescoli il proprio colore con l'oggetto, in modo da determinare un colore diverso dello stesso.

¹Si parla di questo problema nell'articolo di Chauvet del 1996 [6], in cui la metà degli studenti intervistati rispondono 'marrone' invece che 'giallo' ad una domanda simile alla seguente: 'Cosa puoi osservare nel punto di incontro tra un fascio di luce rossa ed un fascio di luce verde?', applicando alla luce quando imparato sulla combinazione di pigmenti. Ragionano in termini di sintesi sottrattiva invece che di sintesi additiva.

- Molti hanno una rappresentazione errata del modello di visione. E' difficile trovare tra gli studenti una rappresentazione che preveda una interazione tra tre elementi: sorgente, oggetto e occhio umano. Solitamente solo uno o due elementi sono tirati in causa [5]. In particolare non è spesso chiaro il modello cosiddetto *Sender-Receiver* di visione [4, 5], ovvero che l'occhio rivela solamente la radiazione visibile che incide su di esso dopo esser stata riflessa da un corpo, oppure la radiazione emessa da una sorgente, ad esempio una lampadina. Senza questa condizione il processo di visione non sarebbe possibile.
- La parola 'luce' a volte non è sinonimo di 'radiazione' [7]. Alcuni studenti pensano che il Sole emetta luce e non radiazione elettromagnetica. La radiazione visibile, quindi non è al pari delle altre radiazioni, quali quella infrarossa o ultravioletta.

Materiale necessario:

- KIT #1
- KIT #2
- Scheda didattica con tabella ⇒ Appendice pagina 116
- VIDEO 1
- VIDEO 2
- Testo ⇒ Appendice pagina 117

Attenzione: Nel caso di studenti con discromatopsia si consiglia di svolgere l'Attività facendo riferimento alle indicazioni a pagina 113

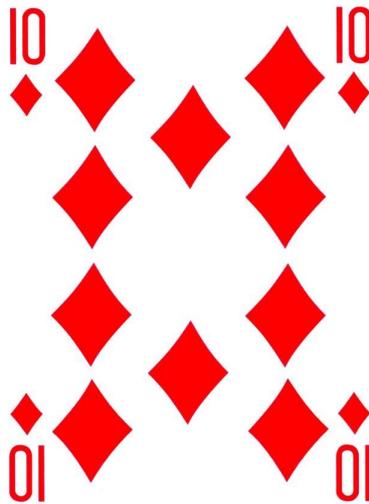


Figura 1.1

Esempio di carta da gioco da usare nell'attività, vanno bene anche altre carte basta che il seme sia rosso e che non sia una figura.

1.1 Engage

Punto di Attenzione Da qui in avanti si parlerà di 'filtro rosso' riferendosi al filtro dicroico² che riflette la radiazione corrispondente al rosso. Sulla cattedra viene steso il telo nero su cui vengono messi separati tra loro: la carta da gioco coperta, il cartoncino rosso ed il cartoncino bianco. Dopo una breve introduzione sul funzionamento dei filtri dicroici, viene posta alla classe la domanda "Come vedrò il cartoncino con il filtro rosso?", con riferimento al cartoncino bianco. Gli studenti guarderanno a turno il cartoncino. con il

²Un filtro dicroico è un filtro interferenziale in grado di minimizzare l'assorbimento della radiazione incidente, per evitare la deformazione strutturale, e consentire la trasmissione di radiazione quasi monocromatica. La struttura è composta da due o più lastre sottili piane e parallele di vetro separate da uno strato di aria, o altro dielettrico, e con facce interne semiriflettenti, per permettere la riflessione interna della radiazione incidente rifratta. Il principio fisico sottostante è l'interferenza da lamine sottili, che si ritrova anche nelle bolle di sapone o nelle pozze d'acqua in cui un sottile strato di benzina galleggia sulla superficie. Per un certo angolo di incidenza della radiazione incidente su una lastra del filtro, in base alla distanza tra le lastre e in base al rapporto tra gli indici di rifrazione dei mezzi attraversati, il filtro permette di selezionare una sola lunghezza d'onda, poiché solo tale radiazione determina una interferenza costruttiva tra le componenti riflesse dalle lastre del filtro. Grazie a questo fenomeno la radiazione trasmessa dal filtro è ritenuta quasi monocromatica. Le componenti non trasmesse vengono riflesse dal filtro.

filtro dicroico rosso davanti agli occhi.

Si consiglia di compiere l'esperimento in una stanza ben illuminata.

Il cartoncino bianco si vedrà di colore rosso e gli studenti potrebbero pensare che sia dovuto al filtro che modifica la visione e la percezione del colore e non al processo di riflessione della radiazione da parte dell'oggetto.

Viene poi fatto vedere, sempre con il filtro rosso, agli studenti il cartoncino rosso. Il colore del cartoncino rimane inalterato. Non stupisce questo fenomeno, perché ci si aspetta che il colore di un oggetto non cambi, se cambiano le 'lenti' con cui si guarda il mondo, dato che il colore è percepito dagli studenti come una proprietà intrinseca dell'oggetto.

Infine si gira la carta da gioco e si chiede agli studenti di guardare con il filtro rosso l'oggetto.

*** Ci si aspetta che l'esperimento stupisca i ragazzi, poiché l'immagine sparisce assumendo lo stesso colore dello sfondo (rosso).

Il motivo è che il bianco riflette tutte le lunghezze d'onda del visibile, quindi riflette anche il rosso, ed i disegni rossi riflettono solamente la lunghezza d'onda legata al rosso. Con il filtro dicroico rosso, quindi, la carta apparirà solamente di colore rosso.

Punto di Attenzione Al posto di filtri dicroici si potrebbero utilizzare delle 'gelatine' fotografiche colorate, che, hanno trasmittanza molto elevata a una certa lunghezza d'onda del visibile, in base ai pigmenti che contengono, e assorbono selettivamente, o riflettono, la radiazione restante. Nel caso si usassero questi strumenti, si tenga conto che il disegno potrebbe non sparire completamente, si consiglia, quindi, di utilizzare due gelatine rosse sovrapposte.

T **Visione del breve filmato (VIDEO 1) sulla luce monocromatica preso dallo spettacolo, in cui uno dei Ricerc-attori improvvisa uno 'spogliarello' sotto ad una luce rossa. Il Ricerc-attore indossa una calzamaglia ed una parrucca rosse ed una maglia bianca ed il palco è illuminato solamente con il faro rosso. All'accendersi di tutte le luci la maglia mostra la scritta "Ludwig" colorata di rosso, e per questo invisibile precedentemente.**

Una volta resa completamente buia la stanza, si passa alla seconda fase di *Engage*, accendendo la lampadina rossa (avvitata precedentemente al portalampana) e ponendola ad una certa distanza dal cartoncino bianco, poi spegnendola e accendendo quella verde davanti allo stesso cartoncino.

Domanda per gli studenti: “Secondo voi se accendo le due lampade contemporaneamente, che colore ottengo?”. Poiché gli studenti tendono a confondere i concetti di sintesi sottrattiva e additiva, potrebbero rispondere in base alle conoscenze acquisite sui pigmenti ‘marrone’, oppure ‘bianco’ o potrebbero non avere idee [6]. Dopo aver raccolto i pareri degli studenti, viene mostrato loro l’esperimento, ma non data la risposta.

Lo schermo, prima bianco, si colora di giallo. Poiché l’effetto potrebbe non essere molto evidente, è consigliato porre un oggetto, ad esempio una penna o una matita, davanti allo schermo diventato di colore giallo, così che compaiano due ombre colorate, una rossa e una verde, mentre lo schermo resta colorato di giallo.

Nessuna spiegazione viene data per ora a riguardo.

*** Questo fenomeno è chiamato “ombre colorate” ed è molto simile al fenomeno per cui si forma l’ombra nera, in cui un corpo posto davanti a una sorgente blocca la radiazione proveniente da essa, riflettendola o assorbendola. Nel caso in cui vi siano due sorgenti, ad esempio una rossa e una verde, dietro al corpo non si forma una sola ombra, ma tre³.

In Figura 1.2 si distinguono quattro zone chiamate A, B, C e D, spiegate in seguito in dettaglio:

- Zona A: La luce verde viene bloccata dal corpo prima che riesca a raggiungere lo schermo. La luce rossa, invece, passa inalterata, poiché non incontra alcuno ostacolo. La zona, quindi, si colora solamente di rosso, determinando un’ombra rossa.
- Zona B: La luce rossa viene bloccata dal corpo, invece la luce verde passa inalterata. Si crea quindi un’ombra verde.

³Lo stesso fenomeno si può ottenere anche utilizzando una luce blu al posto della luce verde o della luce rossa, oppure utilizzando tutte e tre le luci (rossa, verde e blu). In quest’ultima disposizione sullo schermo appariranno sette ombre colorate dietro all’oggetto (ombra rossa, blu, verde, ciano, magenta, gialla, nera). Lo schermo, inoltre, tornerà ad apparire bianco, poiché la somma additiva della luce blu, rossa e verde risulta nella luce bianca. In generale ogni volta che l’oggetto blocca una certa radiazione con una certa frequenza, la sua ombra assume la colorazione del complementare della radiazione bloccata. Si intende coppia di colori complementari due colori che sommati additivamente danno il bianco. Prendendo in considerazione ad esempio il caso con tre sorgenti, se la luce blu non arriva allo schermo si forma l’ombra gialla, infatti il giallo è il colore complementare del blu.

- Zona C: In questo punto entrambe le luci non arrivano allo schermo, perché bloccate prima dal corpo. Quindi si crea un'ombra nera, quella che si ritrova anche nell'esperienza comune.
- Zona D: Lo schermo e la porzione di ambiente illuminata appaiono di colore giallo, somma additiva di luce rossa e verde. Questo perché lo schermo bianco, in grado di riflettere qualsiasi radiazione visibile, riflette contemporaneamente la luce rossa e la luce verde che riceve, apparendo di colore giallo per il fenomeno della sintesi additiva.

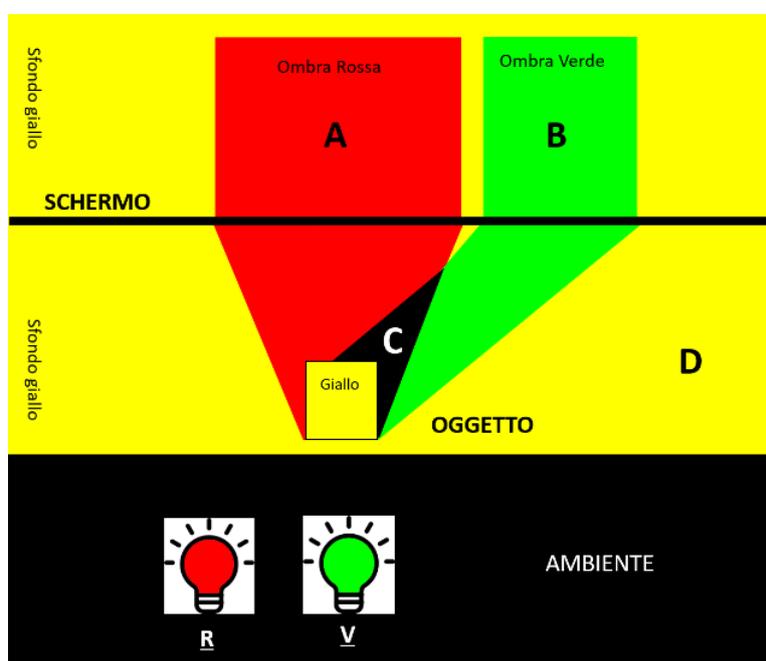


Figura 1.2

Esperimento delle ombre colorate, in cui un oggetto è interposto tra le luci e il cartoncino bianco.

Punto di Attenzione Porre l'oggetto ad una distanza intermedia tra lo schermo e le sorgenti. Altrimenti, se fosse troppo vicino allo schermo, ci sarebbe una sovrapposizione delle ombre e si vedrebbe solamente l'ombra nera. Questo perché l'oggetto bloccherebbe contemporaneamente tutte e tre le sorgenti.

1.2 Explore

Viene distribuita ad ogni studente la scheda \Rightarrow Appendice a pagina 116, da completare man mano che sono svolti gli esperimenti, inserendo negli spazi bianchi il colore che si vede guardando un determinato cartoncino colorato (rosso, verde, blu, ecc.) con ognuno dei tre filtri dicroici.

Con la stessa modalità utilizzata nella fase precedente, ovvero facendo guardare a turno tutti gli studenti attraverso il filtro dicroico, si chiede di guardare gli stessi oggetti (i due cartoncini e la carta) visti in precedenza con il filtro rosso, con gli altri due filtri (verde e blu). Con il filtro verde si vedrà il cartoncino bianco di colore verde, il cartoncino rosso di colore nero e la carta si vedrà verde con i disegni neri.

*** Questo perché il filtro dicroico verde trasmette solamente la lunghezza d'onda corrispondente al colore verde, quindi se messo davanti all'occhio arriva alla retina solo la componente riflessa pari a quella lunghezza d'onda.

Lo stesso accade con il filtro dicroico blu, il cartoncino bianco si vede blu, il cartoncino rosso si vede nero e la carta si vede con disegno nero su sfondo blu.

Sono poi poste agli studenti delle domande in cui si chiede loro di fare previsioni sulla base di quanto visto fino ad ora nella fase di *Engage* con il filtro dicroico rosso e nella prima parte della fase di *Explain*.

Le domande sono, in ordine:

1. “Se guardassi un cartoncino blu con un filtro dicroico blu ed un cartoncino verde con un filtro dicroico verde, come li vedrei? ”
2. “Se guardassi il cartoncino blu ed il cartoncino verde con il filtro dicroico rosso come li vedrei?”

*** Le risposte corrette sono:

1. I cartoncini blu e verde osservati, rispettivamente, con filtro dicroico blu e verde, restano inalterati per lo stesso motivo per cui il cartoncino rosso resta rosso se visto con il filtro dicroico rosso. Questo per la proprietà dei materiali di riflettere la lunghezza d'onda corrispondente al blu, o al verde, o al rosso.
2. Osservando con il filtro dicroico rosso i cartoncini blu e verde, essi risultano neri. Vale anche il viceversa, ovvero guardando il cartoncino

rosso con il filtro blu e poi verde, esso appare nero.

La prova pratica smentisce o conferma le previsioni date dagli studenti.

Punto di Attenzione Gli studenti potrebbero pensare che il colore delle luci si sommi al colore degli oggetti cambiando il colore degli stessi se guardati con i filtri [4], quindi fare queste esperienze mette in discussione la credenza di senso comune.

1.3 Explain

Si chiede agli studenti di fare osservazioni a riguardo dei fenomeni osservati in precedenza e di presentare una spiegazione del fenomeno da proporre alla classe.

*** Dalle esperienze precedenti si potrebbe osservare che:

1. guardando con i filtri dicroici oggetti con lo stesso colore del filtro, essi non subiscono alterazioni nel loro colore.
2. Oggetti di colore bianco appaiono dello stesso colore del filtro con cui sono osservati.
3. Appaiono neri, invece, oggetti di colore diverso da quello del filtro con cui li guardo.

L'ambizione è che gli studenti predicano un modello di questo tipo: Vedo il colore di un oggetto solamente se è contenuto nello spettro della radiazione che il filtro dicroico trasmette (corrispondente alla percezione del colore rosso, verde o blu)⁴.

⁴E' stato appurato, tramite analisi di libri scolastici di Fisica, quali "L'Amaldi", e da alcune attività laboratoriali, che gli studenti di scuola secondaria di secondo grado hanno l'idea che il bianco contenga lo spettro di tutte le radiazioni visibili. Per questo motivo si ritiene che l'esperimento con il cartoncino bianco non crei problemi nella predizione del modello.

Per adesso si è lavorato con i tre colori: rosso, verde e blu e con il bianco.

1.4 Extend

In questa fase si estendono le conoscenze maturate fino ad ora ad altri colori. Si espongono alcuni cartoncini gialli sulla cattedra coperta dal telo nero e si chiede agli studenti: “In base alle regole trovate, secondo voi cosa succederebbe se guardassi con il filtro dicroico rosso un cartoncino giallo?”

I ragazzi sono invitati a fare ipotesi riguardo a questo nuovo fenomeno. In base al modello ipotizzato in precedenza si potrebbero aspettare di vedere il cartoncino nero, poiché il giallo non è contenuto in nessuno spettro di radiazione trasmesso dai filtri dicroici.

e far passare a turno il filtro dicroico rosso agli studenti, in modo che tutti possano guardare un cartoncino.

Quello che vedranno è il cartoncino giallo diventare rosso, contrariamente a quanto modellizzato prima, nella fase di *Explain*. *** Dato che il colore giallo è dato dalla somma additiva della luce rossa e verde, la radiazione corrispondente alla percezione del colore rosso sarà riflessa normalmente dall’oggetto e sarà trasmessa dal filtro, mentre la radiazione corrispondente al verde, sarà bloccata dal filtro. Per questo motivo l’oggetto, se guardato con il filtro dicroico rosso, apparirà rosso e non nero.

Si confrontano le differenze tra le previsioni fatte in precedenza e il risultato sperimentale.

Si chiede agli studenti, poi, di predire cosa vedranno, secondo loro, guardando il cartoncino giallo con il filtro verde. La predizione è subito testata e il cartoncino giallo apparirà verde.

*** Accade perché il cartoncino riflette la lunghezza d’onda corrispondente al colore verde.

Infine si chiede ai ragazzi di pensare a come apparirà il cartoncino con il filtro dicroico blu. In base a quanto visto precedentemente con gli altri due filtri si potrebbero aspettare di vedere il cartoncino assumere una colorazione blu. Invece l’esperimento pratico smentisce questa ipotesi ed il cartoncino appare nero.

Punto di Attenzione Guardando il cartoncino giallo con il filtro verde e ros-

so e vederlo rispettivamente di colore verde e rosso, potrebbe portare a pensare che il giallo sia un particolare colore che prende la tonalità del filtro con cui lo si guarda, perché di colore ‘chiaro’ e quindi simile al bianco come comportamento. Guardandolo con il filtro blu, invece, lo si vede nero, destabilizzando tale credenza.

Sul telo nero sulla cattedra, in ambiente illuminato, porre alcuni cartoncini di colore magenta e ciano e chiedere agli studenti di guardare, a turno, i cartoncini prima con il filtro dicroico rosso, poi blu e infine verde, e dire cosa vedono.

*** Il cartoncino magenta si vedrà rosso con il filtro rosso, blu con il filtro blu e nero con il filtro verde, poiché somma di rosso e blu. Il cartoncino ciano si vedrà blu con il filtro blu, verde con il filtro verde e nero con il filtro rosso, poiché somma di verde e blu.

Punto di Attenzione I cartoncini magenta e ciano si comportano similmente al giallo se visti con i tre filtri dicroici, ovvero riflettono un colore se guardati con due filtri, ma appaiono neri se guardati con il terzo, si evince che il comportamento del giallo non è particolare e non può essere accomunato al bianco.

1.5 Explore - parte 2

Partendo da concezioni di senso comune derivanti dall’istruzione scolastica e non⁵, secondo cui un oggetto appare bianco se riflette la radiazione solare visibile (nero se la assorbe), si cerca di fare arrivare i ragazzi al concetto di riflessione della radiazione. Viene loro posta la domanda seguente: “Ricordate il comportamento del cartoncino bianco? In base ai vostri ricordi, perché

⁵Ad esempio nel libro delle superiori “L’Amaldi”, edito da Zanichelli nel 2010, al capitolo 17 i cui si parla della luce si ritrova la dicitura: ‘Un corpo bianco diffonde tutti i colori, mentre un corpo nero li assorbe tutti’ a pagina 441. Il termine ‘diffusione’ è utilizzato in questo libro come sinonimo di ‘riflessione’, per differenziare il fenomeno di interazione tra radiazione e materia con il fenomeno della riflessione speculare.

Ritrovata anche nelle risposte ad alcuni questionari riguardanti il tema ‘radiazione’.

Da attività di laboratorio tenute con ragazzi e ragazze delle superiori, alla domanda: “Perché alcuni oggetti appaiono di colore bianco e nero nel visibile?” hanno risposto in molti che il nero assorbe ‘tutto’ ed il bianco riflette ‘tutto’, nonostante non precisino a che tipo di radiazione si riferiscano.

un oggetto ci appare di colore bianco? Come interagisce la luce con esso?”

*** E' così introdotto il termine 'riflessione', fondamentale per il percorso.

Gli studenti potrebbero usare autonomamente il termine, ma, nel caso non succedesse, è consigliato guidarli a questa conclusione senza fornire direttamente la risposta.

Per consolidare il concetto si può anche far vedere un esperimento in cui si accendono contemporaneamente tre lampadine di colore rosso blu e verde davanti allo schermo, dando un'illuminazione bianca.

E' poi posta questa domanda agli studenti:

“Perché allora il cartoncino bianco appare dello stesso colore del filtro? Ad esempio, perché se uso il filtro rosso vedo il cartoncino bianco anch'esso rosso?”

*** La risposta è che il cartoncino bianco sta riflettendo la radiazione visibile che gli arriva, ovvero solamente la radiazione corrispondente alla lunghezza d'onda del rosso.

Partendo da questa nuova concezione si pongono le domande:

1. “Perché allora il cartoncino rosso si vede rosso?”
2. “Perché alcuni cartoncini visti con certi filtri diventano neri?”
3. “Perché il cartoncino giallo si vede rosso con il filtro rosso e verde con il filtro verde?”

*** Le risposte sono:

1. Il cartoncino rosso riflette la radiazione corrispondente al colore rosso e quindi appare inalterato se visto con il filtro rosso.
2. Nella seconda domanda è introdotto il concetto di 'assorbimento' della radiazione da parte dei corpi. Un cartoncino appare nero se guardato con un certo filtro, perché assorbe una lunghezza d'onda corrispondente a quella della radiazione trasmessa da quel filtro.
3. Per rispondere alla terza domanda ci si può ricollegare all'esperimento con le lampadine visto nella seconda parte della fase di *Engage*, in cui

si è visto che la somma della luce rossa e verde dà come risultato una luce gialla. Da questo gli studenti possono ipotizzare che rosso e verde sono i due componenti principali del colore giallo. Per questo motivo con il filtro rosso il cartoncino giallo appare rosso, riflette la componente rossa ma non quella verde, e con il filtro verde appare verde, riflette la componente verde ma non quella rossa.

Può quindi essere introdotto agli studenti il concetto di sintesi additiva. Nella fase di *Engage* si è visto che ponendo un oggetto tra uno schermo bianco e due luci (una rossa e una verde) si formano due ombre colorate, una di verde e l'altra di rosso. Tale esperimento può esser ampliato aggiungendo anche una luce blu ed interponendo un oggetto o una mano tra le luci e lo schermo. In alternativa, nel caso in cui non sia possibile svolgere l'esperimento, si può far vedere il video al sito: <https://www.youtube.com/watch?v=ksS-FJ3B8Og>, in cui una pallina è posta davanti a tre fari di luce rossa, blu e verde, e dietro alla pallina si formano ombre colorate, in base a quale luce è tenuta accesa. Se tutte e tre le luci sono accese, le ombre sono sette, di colore: rosso, verde, blu, magenta, ciano, giallo e nero.

Visione del secondo video (VIDEO 2) preso dallo spettacolo, in cui sul palco vengono accesi i tre fari con luce rossa, blu e verde e la Ricercatrice passa davanti alla parete illuminata creando ombre colorate. L'esperimento si può riprodurre in classe in versione ridotta, oppure, se si dispone di una parete bianca abbastanza grande e spoglia, come nello spettacolo. Si accendono contemporaneamente tutte e tre le luci (rossa, verde e blu) verso uno schermo bianco o verso il muro e si interpone una mano, un oggetto o un corpo tra questi due elementi.

Inoltre si può chiedere agli studenti di spiegare, alla luce di quanto visto fino ad ora, cosa succede al materiale arancione *Silly Putty* (chiamato 'blob' nello spettacolo) se visto in luce bianca o in luce ultravioletta.

T Riguardo a questo è stato commesso un errore nello spettacolo, infatti si utilizza un'analogia con la sintesi additiva delle luci per spiegare perché il materiale in luce bianca appare arancione, mentre in luce ultravioletta appare giallo brillante. Il cambiamento non è dovuto alla somma additiva tra il colore dell'oggetto e la luce ultravioletta. Sotto ad una luce bianca, l'oggetto riflette le lunghezze d'onda corrispondenti al colore arancione, mentre assorbe tutte le altre lunghezze d'onda visibili. Se sotto ad una luce ultravioletta, invece, avviene un fenomeno diverso, detto fluorescenza, che gli studenti, a meno di conoscenze pregresse, non conoscono ancora approfonditamente. Si invita l'insegnante a rimandare la spiegazione di tale fenomeno e concentrarsi solamente sull'interazione tra l'oggetto e la radiazione.

La domanda da porre a questo punto è: "Cosa succede al cartoncino magenta e ciano se guardati con i tre filtri dicroici?"

*** La risposta è che il cartoncino magenta riflette rosso e blu, assorbendo il verde. Il cartoncino ciano, invece, riflette blu e verde, assorbendo il rosso.

1.6 Explain - parte 2

In base a quanto trovato in precedenza e ai nuovi fenomeni introdotti, quello della riflessione e dell'assorbimento della radiazione visibile da parte dei corpi, è opportuno modificare il modello precedentemente proposto per spiegare il fenomeno.

Gli studenti sono invitati a esporre le loro ipotesi alla classe.

*** Sarebbe auspicabile che gli studenti cambiassero il modello precedente con un modello simile al seguente: In base alle proprietà intrinseche di un corpo, esso rifletterà o assorbirà lo spettro corrispondente a una certa banda di lunghezze d'onda. Poiché lo spettro della luce bianca contiene tutte le lunghezze d'onda della radiazione visibile, in condizioni di luce naturale l'oggetto assume un certo colore, grazie alla sua capacità di riflettere particolari lunghezze d'onda. Se, invece, si guarda lo stesso oggetto con un filtro dicroico, allora vedrò solamente lo spettro che è trasmesso dal filtro e che l'oggetto è in grado di riflettere.

1.7 Extend - parte 2

Si applica quanto imparato fino ad ora ad altri colori, come l'arancione, il viola, il marrone. Per ogni colore è chiesto agli studenti: "Cosa rifletterà e cosa assorbirà?"

Gli studenti, dopo aver fatto le previsioni, possono verificare quanto previsto guardando i rispettivi cartoncini con i tre filtri dicroici, oppure utilizzando l'applicazione al sito:

<https://www.physicsclassroom.com/Physics-Interactives/Light-and-Color/RGB-Color-Addition/RGB-Color-Addition-Interactive>
L'applicazione può essere utilizzata dall'insegnante e mostrata alla classe tramite proiettore, oppure può essere scaricata da ogni studente sul proprio cellulare o computer.

*** Con tale applicazione è possibile verificare che colori diversi da giallo, magenta e ciano si ottengono modificando la quantità (o intensità) dei tre colori rosso, verde e blu.

L'ultima domanda dell'attività, a cui non viene data risposta ora, è:
"Abbiamo visto cosa si vede in visione monocromatica, con dei filtri che trasmettono solo una certa lunghezza d'onda del visibile, un colore. Cosa vedrei se, invece che radiazione visibile, usassi filtri che trasmettono altre radiazioni?"

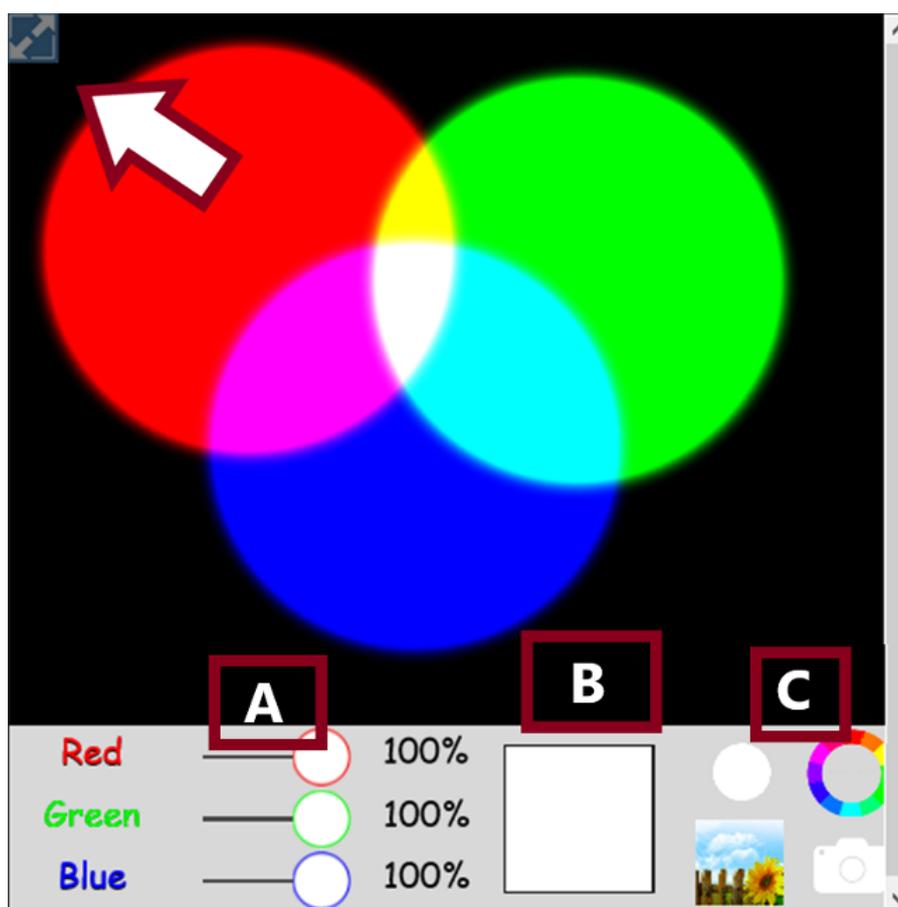


Figura 1.3
Interfaccia dell'applicazione al sito Physics Simulation at the Physics Classroom

Funzionamento dell'applicazione

L'applicazione, se utilizzata da computer, può essere ingrandita cliccando con il mouse sull'icona con le frecce diagonali in alto a sinistra, indicato da una freccia bianca in Figura 1.3. Per uscire da tale visualizzazione basta premere il tasto *ESC* della tastiera.

All'apertura dell'applicazione appaiono tre circonferenze di colore rosso, blu e verde. Spostandole con il mouse e sovrapponendole o separandole si ottengono altri colori. Ad esempio sovrapponendo il rosso ed il verde si ottiene il giallo. Sovrapponendo tutti e tre le circonferenze si ottiene il bianco nell'intersezione.

In basso, al punto **A** vi sono dei cursori circolari con a fianco una percentuale. Spostando a destra o a sinistra il cursore variano le intensità delle

luci. Ad esempio, cambiando le percentuali della luce rossa, si diminuisce l'intensità della circonferenza rossa e nell'intersezione con le altre due circonferenze appaiono colori diversi. Nell'intersezione con il blu apparirà il viola, nell'intersezione con il verde apparirà un verde più chiaro.

Ci si può aiutare anche con il quadrato in basso al centro, al punto **B** in cui appare il colore dell'intersezione delle tre circonferenze sullo schermo.

Punto di Attenzione E' possibile che per motivi di percezione visiva il colore nell'intersezione e quello nel quadrato appaiano diversi. In realtà sono uguali, ma a causa dell'accostamento di diversi colori possono esserci problemi di percezione. Ad esempio, impostando il colore rosso al 51%, il verde al 63% e il blu al 100%, si ottiene un colore nell'intersezione tra i tre cerchi che sembra più chiaro di quello nel quadrato.

Riportando l'intensità del rosso al 100% e diminuendo l'intensità del verde, apparirà nell'intersezione con il blu un colore azzurro chiaro, mentre nell'intersezione con il rosso l'arancione. L'intersezione tra tutti e tre è invece rosa chiaro.

Diminuendo l'intensità del blu e lasciando al 100% le altre, si ottiene nell'intersezione con il verde un verde chiaro ed un fucsia nell'intersezione con il rosso.

Il grigio si ottiene nel punto di incontro dei tre colori portando tutte le intensità al 50%.

Il marrone si ottiene nell'intersezione tra rosso al 50% e verde al 20%, dopo aver portato all'intensità minima il blu.

In basso a destra al punto **C** vi è la possibilità di cambiare visualizzazione dei tre colori, oltre che come circonferenze intersecanti, infatti, possono essere rappresentati con archi di circonferenza, oppure come livelli diversi di una stessa immagine. Il loro funzionamento è identico a quanto visto per le circonferenze.

1.8 Approfondimento: RGB, CMY e funzionamento di monitor e stampanti

L'approfondimento è pensato come collegamento tra i concetti fisici, visti nell'Attività 1, ed il mondo contemporaneo, in particolare il mondo tecnologico. Dato che ognuno oggi possiede un cellulare o un qualunque dispositivo dotato di interfaccia con l'utente, si ritiene possa essere interessante sondare più in profondità cosa siano i 'colori' per questi strumenti, scoprendo che alla fine non operano in modo totalmente diverso dall'occhio umano⁶.

Nella prima parte dell'Approfondimento ci si concentra sul modello RGB e sul funzionamento dei monitor. Dopo una breve introduzione sulla composizione degli schermi (*pixel*, loro quantità e loro caratteristiche), si propongono alcune attività agli studenti.

Le attività di seguito elencate possono essere svolte tutte, oppure solo alcune. Anche una sola può essere sufficiente.

- Cercare di vedere i singoli pixel di un monitor e le tre luci che li compongono, ingrandendo lo schermo con, ad esempio, una lente di ingrandimento molto potente.
- Proporre agli studenti di trovare autonomamente modalità con cui nel quotidiano si riescano a percepire i pixel.
* * * Due esempi: il primo consiste nel far cadere una goccia molto piccola sullo schermo di un *tablet* o cellulare, che funge da lente con grande magnificazione, e permette di vedere i *pixel* suddivisi nelle loro tre luci. Il secondo consiste nel fare una foto ad una zona bianca dello schermo, preferibilmente di un computer, ottenendo un'immagine che, se ingrandita, rivela una griglia di quadratini, ovvero i *pixel*.

⁶I monitor di apparecchi elettronici (cellulari, *tablet*, televisioni, PC) basano il loro funzionamento sul sistema visivo umano, utilizzando una versione digitale della teoria tricromatica, in cui molti dei colori possibili sono creati come combinazione di tre luci, ognuna con un certo livello di intensità. L'elemento di base dei monitor è il *pixel* (*picture element*), a sua volta formato da tre luci che emettono luce rossa, verde e blu in intensità regolabile in base al colore desiderato. I livelli di intensità, o livelli di colore, del monitor sono definiti in base ai bit con cui esso lavora. Ad esempio un monitor a 8 bit avrà a disposizione 2^8 , ovvero 256, livelli di rosso, blu e verde, e può rappresentare circa 17 milioni di colori diversi, combinando questi livelli tra loro a formare terne di valori che univocamente identificano un certo colore. La distanza tra le singole luci all'interno dei *pixel* è talmente piccola da non poter essere risolta dal nostro occhio, che vede, dunque, il colore rappresentato e non le singole luci. Questo sistema, per come opera, è chiamato RGB (Red Green Blue).

E' possibile, ingrandendo l'immagine, anche distinguere in un singolo quadratino tre zone colorate diversamente.

- Facendo vedere, per analogia, un'immagine composta da tante immagini (un esempio al sito web: <https://www.picturemosaics.com/photomosaics/gallery/>) in cui i colori si creano utilizzando immagini con tonalità simili più intense rispetto alle altre. Questo è proprio il principio su cui si basano i *pixel* per rappresentare tutti i colori.
- Per analogia si può far vedere agli studenti il gioco dei chiodini colorati con alternati colori rosso, verde e blu, e mostrare che la matrice di *pixel* funziona proprio così, modificando però l'intensità di ogni luce in base al colore che si vuole ottenere.

L'approfondimento prevede anche una parte sul funzionamento delle stampanti per introdurre un altro modello di colore: il CMY. Anche in questo caso si punta molto sul riportare al quotidiano concetti fisici riguardanti il colore, per vedere che concetto ha di 'colore' uno strumento come una stampante⁷. In Figura 1.4 è mostrato come la stampante dispone gli inchiostri per ottenere il colore blu, verde e rosso.

Si chiede agli studenti: "Abbiamo parlato di sintesi additiva delle luci, in cui luci di colore diverso si sommano per dare origine ad una nuova percezione di colore. In una sintesi sottrattiva, secondo voi, cosa succede? In che senso le luci si 'sottraggono'?"

*** La sintesi è detta sottrattiva, perché la percezione di colore è ottenuta 'sottraendo' alla luce bianca, nel momento in cui essa interagisce con il materiale, un primario additivo. Nel caso della stampante, ad esempio, l'inchiostro ciano, depositato sul foglio bianco, ha la proprietà di assorbire parte

⁷Le stampanti lavorano basandosi sulla sintesi sottrattiva, poiché sovrappongono quattro diversi inchiostri su di un foglio bianco. Il sistema è definito CMY (Cyan Magenta Yellow) che sono i colori degli inchiostri utilizzati. Dato che il nero non si può ottenere dalla sintesi dei tre pigmenti, è necessario, per una stampa adeguata, aggiungere anche questo inchiostro. Il sistema così formato è chiamato CMYK. Per rappresentare un certo colore questo sistema attribuisce una specifica direzione agli inchiostri ciano, magenta, giallo e nero e poi imprime sul foglio punti con dimensioni diverse, in base all'intensità che deve attribuire a ognuno dei colori. Questo perché l'occhio percepisce un elemento piccolo come meno saturo e quindi con intensità minore.

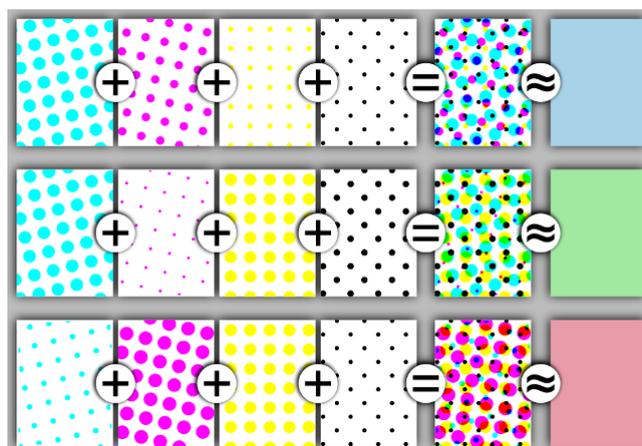


Figura 1.4

Come vengono mescolati gli inchiostri in una stampante per creare alcuni colori.

[Immagine presa da *Wikipedia*]

dello spettro della radiazione visibile incidente su di esso, la parte restante è riflessa dando origine alla sensazione di colore.

L'obiettivo è far arrivare autonomamente gli studenti a trovare un significato per il fenomeno di sintesi sottrattiva, ma se così non fosse sarebbe opportuno un aiuto da parte dell'insegnante.

Per capire meglio il funzionamento della stampante si consiglia di mostrare l'immagine al sito: https://en.wikipedia.org/wiki/CMYK_color_model#/media/File:Halftoningcolor.svg, uguale alla Figura 1.4.

Nell'immagine è rappresentato in dettaglio come gli inchiostri ciano, magenta, giallo e nero vengono applicati sul foglio bianco, quando la stampante deve creare immagini colorate.

A titolo informativo, la sovrapposizione tra gli inchiostri può essere riprodotta con le tempere di colore ciano, magenta e giallo, come mostrato in Figura 1.5. L'immagine rappresenta la base della tecnica pittorica puntinista e può essere facilmente riprodotta con le tempere.

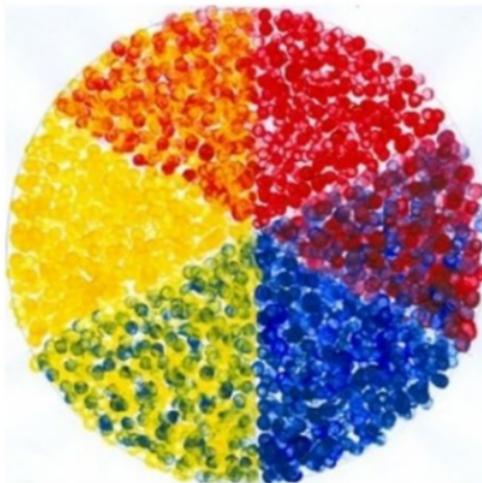


Figura 1.5

Ruota cromatica con 6 colori ottenuti per sovrapposizione di puntini di colore magenta, ciano e giallo.

[Immagine presa dal sito: <https://www.educateart360.com/uploads/1/2/6/2/12625485/pointillism.pdf>]

1.9 Approfondimento: L'occhio come un rivelatore di radiazione

Per collegare una parte di quanto visto in questa prima attività con quello che si vedrà nell'attività successiva e per precisare il modello di visione detto *Sender-Receiver*, che spesso gli studenti non hanno chiaro [4, 5], si inserisce questo approfondimento.

Tale approfondimento si concentra su come l'occhio umano riesca a vedere corpi non emettitori di radiazione nel visibile, tralasciando la visione diretta di sorgenti.

Il meccanismo di visione, per cui la radiazione visibile interagisce con un corpo e viene rivelata dall'occhio, non è sempre chiaro agli studenti, che hanno in mente modelli differenti, basati spesso sul senso comune e non su una realtà fisica. I modelli principali trovati in letteratura [5] sono⁸:

⁸Va precisato che i modelli qui descritti sono stati trovati in una ricerca svolta con studenti dai 13 ai 14 anni. Si suppone che tali concezioni restino inalterate anche in età successive, a meno che non vi sia un intervento specifico a riguardo

A. L'oggetto e l'osservatore sono immersi nello stesso ambiente che è illuminato in modo uniforme (senza sorgenti). Essendoci questa illuminazione globale l'occhio può vedere. La radiazione è l'unico elemento fondamentale del modello, mentre l'occhio e l'oggetto non hanno nessun ruolo. Rappresentazione in Figura 1.6.

B. L'occhio ha un ruolo attivo nel processo di visione, non è ritenuto un rivelatore di radiazione, quindi all'osservatore è dato un ruolo centrale all'interno del processo, perché direziona la luce verso l'oggetto. Significativa è l'immagine mentale che molti studenti hanno, ovvero quella di raggi (freccie) che partono dall'occhio e sono direzionati verso l'oggetto da vedere. Rappresentazione in Figura 1.7.

C. La radiazione proveniente dalla sorgente interagisce con l'oggetto e permette all'occhio di vedere. Non è necessario che la luce raggiunga l'occhio. Rappresentazione in Figura 1.8.

La corretta rappresentazione del modello è in Figura 1.9.

Come attività si propongono agli studenti tre brevi esperienze, ognuna

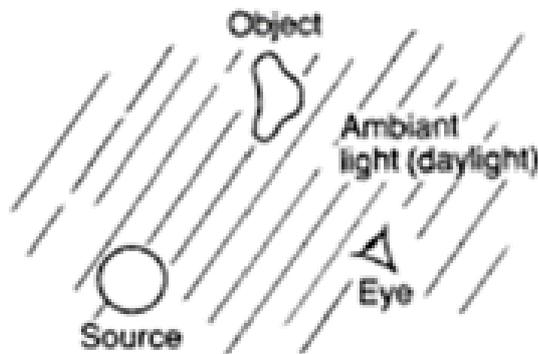


Figura 1.6

A. Modello per cui un oggetto è visibile perché immerso, insieme all'osservatore, in un ambiente illuminato.

volta a sfatare uno dei modelli errati di visione. Gli esperimenti possono

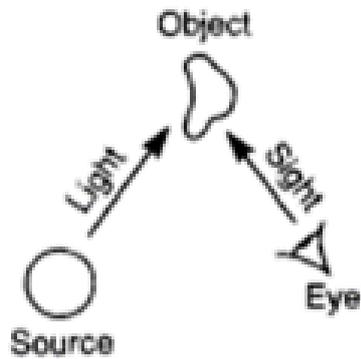


Figura 1.7

B. Modello che ritiene l'occhio un agente attivo all'interno del processo di visione.

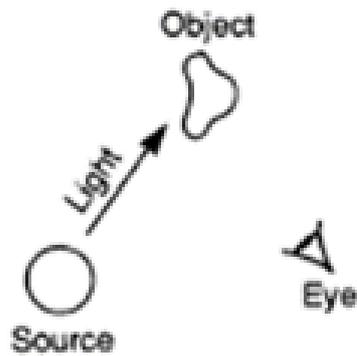


Figura 1.8

C. Modello che ritiene l'occhio in grado di vedere l'oggetto grazie all'interazione tra quest'ultimo e la sorgente.

essere mentali oppure fatti vedere dal vivo in classe.

- Se fosse vero il modello **A.** in Figura 1.6, allora in un ambiente completamente buio in cui viene puntato una luce bianca solamente su un oggetto, quest'ultimo non dovrebbe essere visibile all'occhio umano, perché l'ambiente attorno non è illuminato. Invece l'oggetto è visibile. Quindi la visione non dipende solamente dall'illuminazione dell'ambiente.

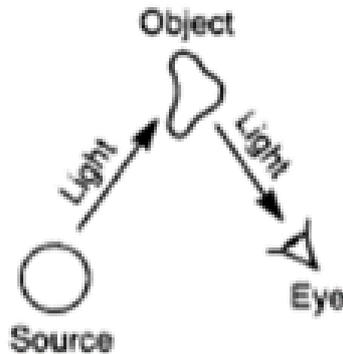


Figura 1.9
Modello corretto del processo di visione

- Se fosse vero il modello **B.** in Figura 1.7, in cui l'occhio ha un ruolo attivo, allora ponendo ad una grande distanza dall'osservatore, in una stanza completamente buia, una luce bianca, in modo che illumini, non direzionalmente, una certa zona, oggetti vicini all'osservatore dovrebbero apparire colorati, come se fossero illuminati. Invece restano scuri, l'occhio non proietta la luce verso gli oggetti. Questo vuol dire che non bastano la luce e gli occhi per poter vedere.
- Se il modello **C.** in Figura 1.8 fosse vero, allora, ponendo in una stanza completamente buia uno schermo colorato opaco alla radiazione visibile tra due osservatori ed illuminando l'oggetto con una luce bianca, ma solo dalla parte di un osservatore, anche il secondo dovrebbe vedere lo schermo colorato. Questo, però, non avviene ed il secondo osservatore vede lo schermo scuro, allora solo l'oggetto non è sufficiente per garantire la visione da parte dell'occhio.

Quindi sono necessari tutti e tre questi elementi (occhio, oggetto e sorgente) per poter vedere. La loro azione combinata garantisce il meccanismo di visione.

1.10 Collegamento con la Filosofia: La realtà vera e la forma delle cose

Nello spettacolo a un certo punto viene mostrata una carrellata di immagini di oggetti astronomici nell'ultravioletto, soffermandosi su un oggetto in particolare (in Figura 1.10), descritto dalle parole del Ricerc-attore riportate in seguito:

G: [...] Questa è la galassia 'Sigaro' guardate che differenza con la stessa, ripresa nel visibile: nel visibile ha una forma a sigaro, per l'appunto, mentre in UV sembra un gabbiano. A questo punto viene da chiedersi: che forma hanno realmente le cose?

T

La domanda finale vuole far riflettere su come cambia la realtà cambiando semplicemente il rivelatore di radiazione, oppure, in altre parole, cambiando gli 'occhiali' con cui si guarda il mondo.

Dopo la lettura del testo e dopo aver mostrato l'immagine della galassia nel visibile e nell'ultravioletto agli studenti, si può proporre loro una riflessione, riportata in seguito.

Punto di Attenzione L'immagine nel visibile e nell'ultravioletto si possono trovare accostate al sito *UIT Images/Pictures from Astro1*: <https://archive.stsci.edu/uit/project/Astro1/m82.gif>

L'argomento trattato nell'Attività 1, ovvero il fatto di guardare il mondo in luce monocromatica o in generale con altri filtri o rivelatori (come si vedrà nell'Attività 2) e di scoprire una realtà diversa da quella conosciuta, si collega con la "Teoria delle lenti colorate" definita a partire dal pensiero del filosofo Immanuel Kant.

Si consiglia il seguente esercizio da proporre agli studenti: leggere i testi (\Rightarrow Appendice a pagina 117) tratti dal lavoro di Kant e da altri filosofi, che hanno interpretato il pensiero kantiano successivamente, e di trovare punti in comune con la fisica trattata fino ad ora.

*** Ad esempio, le idee principali che provengono dalla fisica, ma che si possono ritrovare anche nelle idee filosofiche sono:

- mettendo dei filtri dicroici davanti agli occhi cambia la percezione che abbiamo del colore degli oggetti;

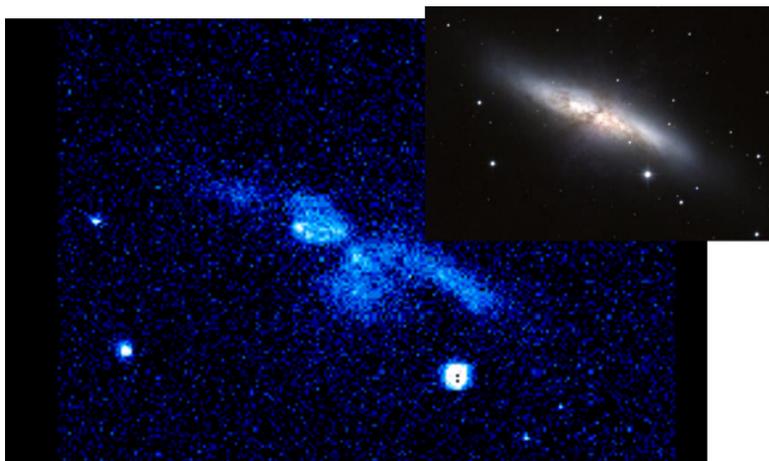


Figura 1.10

Immagine nel visibile (in alto a destra) e nell'ultravioletto della galassia chiamata Galassia Sigaro (per la sua forma nel visibile), oppure M82.

L'immagine è la stessa dello spettacolo "Luce dalle Stelle".

[Credits: ASTRO1]

- con i filtri dicroici davanti agli occhi non si può definire a priori il colore che un oggetto assumerebbe alla luce naturale;
- il colore di un oggetto non è una proprietà intrinseca, è determinato dalla luce che incide su di esso e dal sistema in uso di rivelazione della luce;
- in base al rivelatore utilizzato si vede il mondo in modo diverso.

*** Nell'Attività 2 si vedranno alcuni oggetti in altre lunghezze d'onda e si osserverà che il loro comportamento a volte differisce molto rispetto a come si comportano nel visibile. Si consiglia, quindi, di riproporre la ricerca di punti in comune anche dopo aver svolto la seconda attività.

Punto di Attenzione Si consiglia, per eventuali approfondimenti o per ampliare l'argomento, laddove possibile, una collaborazione con un esperto nel campo della Filosofia.

1.11 Evaluate

Scheda di valutazione \Rightarrow Appendice pagina 118.

Soluzione \Rightarrow Appendice a pagina 121.

Attività 2 - Vedere con altri occhi

Obiettivi generali: Si mette alla prova la capacità degli studenti di:

- fare previsioni su un certo fenomeno fisico non ancora sperimentato;
- analizzare una situazione fisica quando è svolto un esperimento;
- confrontare una previsione con quanto osservato in un esperimento, capirne le differenze e motivarle;
- presentare agli altri le conclusioni ottenute.

Obiettivi di contenuto:

- Spettro elettromagnetico: generalità
- Radiazione ultravioletta: proprietà e caratteristiche peculiari
- Radiazione vicina infrarossa: proprietà e caratteristiche peculiari
- Radiazione lontana infrarossa: proprietà e cenni di termografia
- Sorgenti di Radiazione e Illuminazione dei corpi
- Interazione radiazione-materia: assorbanza, trasmittanza e riflettanza
- Funzionamento di telecamere che non operano nel visibile
- Riflettografia come tecnica di restauro e analisi per i beni culturali

§A. Richards (2001), *Alien Vision - Exploring the Electromagnetic Spectrum with Imaging Technology* - Second edition. Washington: SPIE Press — Testo alla portata di studenti delle superiori, in lingua inglese, in cui si parla,

a livello approfondito, dell'interazione tra varie radiazioni e la materia. In particolare gli argomenti utili ai fini di questo tutorial sono trattati nell'introduzione e nei seguenti capitoli. Capitolo 1 *Infrared and Ultraviolet: The edges of the Rainbow*, Capitolo 2 *Thermal Imaging: We All Glow in the Dark* e Capitolo 6 *Sweeping through the Spectrum: Comparative Imagery*

§Gargano, M., Cavaliere, F., Viganò, D., Galli, A., & Ludwig, N. (2017). *A new spherical scanning system for infrared reflectography of paintings*. *Infrared Physics & Technology*, 81, 128-136. — Articolo in inglese con alcune informazioni riguardo la tecnica riflettografica. In particolare vi sono informazioni sui tipi di rivelatori di radiazione nel vicino infrarosso e alcuni studi compiuti utilizzando la riflettografia. Si possono approfondire il metodo di scansione, detto *spherical scanning*, e di *post-processing* utilizzati per compiere gli studi. L'articolo è a portata degli studenti di quarta e quinta superiore, ma contiene anche informazioni che esulano dagli obiettivi di questo tutorial.

PRINCIPALI PROBLEMI CHE RISCOVTRANO GLI STUDENTI :

- Gli studenti spesso non conoscono le proprietà e le caratteristiche delle diverse bande dello spettro elettromagnetico [9] e a volte non sono in grado di metterle in ordine di lunghezza d'onda crescente [10]
- Molti ritengono caratteristiche quali la trasparenza, l'opacità ed il colore come proprie dell'oggetto considerato, pensano quindi che siano assolute e non legate alla banda spettrale di osservazione [11]
- Poca chiarezza riguardo alla distinzione tra i fenomeni di emissione e di illuminazione, gli studenti spesso non sanno distinguere tra i due fenomeni [1]
- Alcuni studenti ritengono che solamente oggetti artificiali (come cellulari e forni a microonde) possano emettere radiazione elettromagnetica, quando in realtà ogni corpo è sorgente di radiazione [12, 13]

Materiale necessario:

- KIT #3
- Schede didattiche per l'Attività 2 ⇒ Appendice pagina 123, 124, 125, 127, 129

- Scheda con lo spettro elettromagnetico ⇒ Appendice pagina 122
- VIDEO 3

Attenzione: Per la sicurezza degli studenti servono gli occhialini protettivi quando viene accesa la lampadina UV. Inoltre è opportuno accertarsi che tra gli studenti non vi siano ragazzi/e con fotosensibilità alla radiazione UV.

NOTA: Da ora in avanti si utilizzeranno per indicare la radiazione nel vicino infrarosso, lontano infrarosso e ultravioletto gli acronimi, rispettivamente, NIR (*Near Infrared*), FIR (*Far Infrared*) e UV (Ultravioletto). Si intenderà con, ad esempio, “telecamera UV” una telecamera in grado di rilevare la radiazione nell’ultravioletto e di rielaborare il segnale in modo da creare un’immagine comprensibile per l’occhio umano.

2.1 Engage

Si propongono alcune alternative per quanto riguarda questa prima fase.

1. Se la scuola dispone di un cortile e la situazione meteorologica lo permette, l’insegnante può portare fuori gli studenti e far vedere loro come appare la loro faccia se vista con la telecamera UV. Per questa attività è necessario collegare ai *tablet* le telecamere UV del kit. Non si ritiene necessario ai fini dell’esperienza nascondere ai ragazzi il fatto che la telecamera rilevi l’ultravioletto.

Punto di Attenzione Troppa luce potrebbe saturare il sensore della telecamera determinando un’immagine completamente bianca. Si consiglia, quindi, di posizionarsi in zone non troppo illuminate dalla luce solare.

2. Nel caso in cui non ci fosse un cortile, allora lo stesso esperimento può essere compiuto in classe, basta che sia un ambiente abbastanza illuminato dalla luce naturale e non artificiale. Gli strumenti necessari sono gli stessi dell’attività al punto 1.
3. Se non vi è la possibilità di compiere una delle attività al punto 1 e 2, allora si può usare come introduzione all’argomento per i ragazzi il

video preso dallo spettacolo “Luce dalle Stelle” (VIDEO 3). Nel filmato l’arcobaleno, formato dalla dispersione della luce visibile tramite un prisma di vetro, viene osservato con una telecamera nel vicino infrarosso. Si coprono man mano tutte le bande colorate con uno schermo nero. Nel visibile una volta coperte tutte le bande (dal viola al rosso) la luce sparisce, nel vicino infrarosso, invece, resta una striscia di luce bianca di fianco al rosso, corrispondente ad una radiazione invisibile per l’occhio umano.

L’esperimento sarebbe meglio riproporlo in classe dal vivo, creando un arcobaleno abbastanza grande con una luce bianca intensa collimata che contenga anche l’infrarosso (ad esempio una lampada alogena) e un prisma e utilizzando una lastra opaca alla radiazione visibile (plexiglas nero) e una telecamera che vede nel NIR¹.

4. T

Se la classe ha assistito allo Spettacolo, ha già visto esperimenti con la telecamera che vede nel NIR. Non ha visto, invece, come appare il mondo ad una telecamera UV, si possono quindi riproporre gli esperimenti ai punti 1 e 2.

Inoltre si può far rivedere alla classe l’esperimento mostrato nel filmato (NOME FILE), illustrato al punto 3, sullo schermo o dal vivo.

¹Nello Spettacolo per ottenere lo spettro della luce visibile è stata utilizzata la luce di un proiettore di diapositive a cui è stato rimosso il filtro per l’infrarosso. Davanti alla luce, sul piano delle diapositive, sono stati messi due cartoncini neri ricoperti di alluminio, per evitarne il surriscaldamento, disposti in modo da formare una piccola fenditura. Davanti al proiettore è stato posto un prisma per ottenere lo spettro visibile.

Se la classe ha già partecipato al Laboratorio PLS potrebbe avere fatto questa attività. Si può riproporre oppure far vedere altri oggetti alla telecamera UV, ad esempio si può vedere un tarassaco, o un girasole. Entrambi, infatti, appaiono in UV molto diversi rispetto a come sono nel visibile, presentano una parte centrale scura (nel girasole è molto più estesa di come appare nel visibile) e una parte esterna più chiara, la differenza è molto marcata. Si può vedere se funzionano davvero una crema solare o un fondotinta con protezione per l'UV, applicandoli sul viso e riprendendo le zone con la telecamera UV. Le zone con la crema risulteranno scure, addirittura nere, rispetto al resto.

5. L

In alternativa si può usare, invece che la telecamera UV, la telecamera che rivela radiazione NIR. Con questo strumento sono molto d'impatto le foglie, oppure gli occhi e i vestiti. Gli occhi e le foglie appaiono bianchi (le foglie anche molto luminose); sui vestiti stampe e decorazioni scompaiono e indumenti neri nel visibile appaiono bianchi alla telecamera NIR.

*** Gli occhi si vedono bianchi perché la retina riflette tutta la radiazione NIR. Le foglie appaiono bianche perché hanno una riflettanza (percentuale di luce riflessa su quella incidente) maggiore nella radiazione NIR piuttosto che nella radiazione visibile. I vestiti, invece, riflettono la radiazione infrarossa se sono di tessuto sintetico (poliestere), la assorbono se sono, ad esempio, di pelle.

Questi esperimenti sono pensati per far rendere conto i ragazzi di come le cose cambino aspetto se guardate in un'altra banda spettrale, in questo caso in radiazione UV, o NIR, piuttosto che in radiazione visibile.

Punto di Attenzione E' importante che la telecamera sia usata in condizioni di illuminazione naturale, senza fonti di luce artificiale o di luci UV (L oppure luce NIR). In modo da evidenziare il fatto che nell'ambiente circostante la radiazione invisibile è sempre presente, poiché l'emissione solare è composta anche da altre lunghezze d'onda oltre a quelle del visibile, come la radiazione UVA (che ha lunghezza d'onda con valore da circa 315 nm a circa 400 nm) e la radiazione NIR (da circa 780 nm a circa 2500 nm). Queste informazioni, però, è bene che non siano ancora dette agli studenti, poiché in questa prima fase si cerca di generare interesse nei ragazzi evitando il contenuto nozionistico.

2.2 Explore

Dopo aver visto gli esperimenti, si consigliano le seguenti domande per dare origine a una discussione in classe su quanto visto:

“Cosa vuol dire il termine ‘radiazione invisibile’? Che radiazioni conosci invisibili all’occhio umano? Che differenza c’è tra un fiore, o un viso, o una foglia, o un vestito visto con una telecamera che rileva le radiazioni UV o NIR e una che rivela solo la radiazione visibile?”

Dopo la discussione in classe su tali domande, si consiglia una suddivisione degli studenti in gruppi da 4 o 5 persone. Ad ogni gruppo è consegnato: una telecamera UV, una NIR e una scheda (\Rightarrow Appendice pagina 123).

La ‘Parte 1’ della scheda può essere compilata dai ragazzi in circa 10 minuti. Si suggerisce all’insegnante di mettere sulla cattedra tre lampadine in modo casuale e di accenderle, mentre i ragazzi completano la scheda. E’ opportuno non precisare subito agli studenti quale sia la loro banda di emissione.

*** Le lampadine sono: la lampadina UV, la lampadina NIR e una delle due lampadine alogene.

Punto di Attenzione Per evitare che le lampadine illuminino troppo la stanza, si consiglia di porle in scatole con l’apertura rivolta verso i ragazzi, come in Figura 2.1.

Nella seconda parte dell’attività, una volta date alcune istruzioni pratiche sull’utilizzo delle telecamere e dopo aver fatto indossare agli studenti gli occhialini protettivi, si spegne la luce dell’aula e si tirano giù le tapparelle, creando un ambiente abbastanza buio, ma non troppo, per permettere il corretto utilizzo delle telecamere, e si chiede loro di puntare prima il rivelatore di vicino infrarosso e poi il rivelatore nell’ultravioletto, tralasciando la termocamera, verso le lampadine. Sulla scheda (\Rightarrow Appendice pagina 124) va scritto cosa vedono e vanno confrontate le immagini ottenute con le diverse telecamere e con il visibile, rispondendo per iscritto alla ‘Parte 2’.

Con la telecamera nel vicino infrarosso si vedrà tutto buio, tranne la lampadina infrarossa, che si vedrà intensamente luminosa. Con la telecamera UV, invece, si vedrà un bagliore provenire dalla lampadina UV, il resto sarà scuro.

L’ultima domanda della ‘Parte 2’ è la seguente: “Da quanto visto fino ad ora,



Figura 2.1

Esempio di preparazione dell'esperimento: la lampadina viene messa in una scatola con apertura rivolta verso gli osservatori.

quale potrebbe essere, secondo voi, una 'sorgente di radiazione'? Fare esempi sulla base di quanto visto." E' opportuno che non abbia, per adesso, una conferma o una smentita da parte dell'insegnante, poiché, come si vedrà nella fase successiva, saranno gli studenti a ipotizzare una spiegazione o una definizione del termine.

Punto di Attenzione Le lampadine nell'infrarosso e nell'UV potrebbero emettere anche nel visibile rispettivamente luce rossa e blu, i ragazzi quindi potrebbero pensare che siano lampade colorate, che emettono solo nel visibile. Puntare le tre telecamere sensibili a lunghezze d'onda diverse sulle lampadine smentisce questa credenza, poiché si vedono le lampadine abbaglianti, quanto lo è la lampadina alogena nel visibile, ma in lunghezze d'onda non visibili all'uomo. Si rendono quindi conto che il colore visto non è l'emissione principale delle lampadine, perché la luminosità è più forte in altre bande spettrali.

Punto di Attenzione Osservando le lampadine con la telecamere nel vicino infrarosso e nell'ultravioletto, potrebbero vedersi un po' luminose anche le lampade alogene, questo è normale, perché lo spettro di emissione di tali lampadine cade anche in quelle regioni.

*** In base all'esperienza maturata tramite laboratori su questi argomenti

con studenti del triennio, un problema riscontrato è il non saper distinguere tra emissione e riflessione. Si pensa che la visione delle cose e dei loro colori da parte dell'occhio sia dovuta all'emissione degli stessi e non alla riflessione della radiazione solare non assorbita. Vedere le lampadine essere molto intense in bande diverse da quella visibile, ma simile alla luminosità della lampadina alogena nell'esperienza quotidiana, dovrebbe porre l'accento sul cosa voglia dire essere una sorgente.

Nella terza parte di questa fase, dopo aver dato agli studenti la scheda (\Rightarrow Appendice pagina 122²) con l'immagine dello spettro elettromagnetico, si chiede loro di ordinare le lampadine secondo la lunghezza d'onda crescente, in base a parametri qualitativi, ovvero con quale telecamera le lampadine sono più brillanti e hanno luce più intensa, come osservato precedentemente.

*** Alla fine le tre lampadine saranno disposte, seguendo la lunghezza d'onda crescente, in questo modo: la lampada alogena visibile al centro con la lampada UV a sinistra e la lampada NIR a destra. Questo esercizio è fatto per far acquisire agli studenti un'immagine immediata di come siano poste le radiazioni (UV, visibile e NIR) l'una rispetto all'altra.

Punto di Attenzione Si sceglie la lunghezza d'onda come parametro per ordinare le lampadine e non la frequenza, perché la rappresentazione più frequente degli spettri elettromagnetici, almeno sui libri di testo delle superiori, è con la lunghezza d'onda. Anche le curve di emissione termica vengono spesso rappresentate con la lunghezza d'onda in ascissa, piuttosto che con la frequenza.

²L'immagine viene dal sito http://arching.files.wordpress.com/2009/02/787px-em_spectrumsvg1.png?w=550&h=294 ed è stata liberamente modificata.

2.3 Approfondimento: Funzionamento delle telecamere non nel visibile

L Nel caso la classe avesse assistito al Laboratorio PLS, questa parte potrebbe esser stata già trattata.

L'approfondimento ha lo scopo di esplicitare in che modo una telecamera con sensibilità a lunghezze d'onda invisibili per l'uomo possa restituire una immagine visibile. In questo modo non si lascia credere ai ragazzi che quello che vedono nello schermo dello strumento sia davvero la radiazione rilevata, piuttosto che una rielaborazione dell'informazione acquisita.

T Nello spettacolo si sono viste alcune telecamere che operano in *range* di frequenze diversi da quello del visibile, come la telecamera nel vicino e lontano infrarosso. Nella fase di *Engage* si è riproposta la scena (VIDEO 3), in cui con uno schermo nero nel visibile si coprono i colori di un arcobaleno, mentre con la telecamera nel vicino infrarosso si inquadra l'arcobaleno e appare, di fianco al rosso, un arco di luce bianca. Ora si pone agli studenti la seguente domanda: "La radiazione visibile la percepiamo colorata, ma cosa succede alle radiazioni invisibili? Ad esempio, di che colore è il vicino infrarosso? E l'ultravioletto?"

*** Ovviamente l'occhio umano non può attribuire un colore a queste radiazioni, poiché fuori dal suo *range* di sensibilità, ma le telecamere che si usano per rivelare queste radiazioni restituiscono un'immagine visibile e per farlo usano varie metodologie.

Chiedere agli studenti:

1. "Secondo voi la radiazione UV e infrarossa si possono vedere a occhio nudo? "
2. "Cosa vedo sullo schermo usando la telecamera UV (o NIR)?"
3. "Perché le immagini della telecamera UV (o NIR) le vedo in livelli di grigio? Cosa vuol dire innanzitutto 'livelli di grigio'?"
4. "Che differenza c'è tra il funzionamento dell'occhio e quello di una telecamera UV o NIR? E tra l'occhio ed una telecamera visibile?"

*** Risposte:

1. Generalmente non si possono vedere la radiazione UV e infrarossa, poiché l'occhio è sensibile principalmente alla radiazione visibile³.
2. Le telecamere sono dei dispositivi digitali che permettono di ottenere immagini più significative per l'uomo, elaborando la radiazione incidente a lui invisibile. I rivelatori digitali operano grazie ad alcuni elementi: l'ottica che raccoglie la radiazione incidente ed è formata da *pixel* e componenti elettroniche, che rielaborano la radiazione, associando un livello specifico della scala di conversione dello strumento in base all'intensità luminosa (o flusso luminoso) in input su ogni *pixel*. Una telecamera UV, ad esempio restituisce un'immagine in bianco e nero in cui il nero rappresenta la minima intensità possibile (l'assenza di radiazione incidente su quel *pixel*) e il bianco rappresenta invece il massimo di intensità ricevuta. Opera allo stesso modo anche la telecamera NIR⁴.
3. Vedo le immagini della telecamera UV (o NIR) in livelli di grigio, perché l'occhio non è in grado di rilevare la radiazione UV (o NIR) e quindi non può associarle una percezione di colore. La telecamera collega univocamente una certa intensità di radiazione ricevuta ad un livello di grigio, per questo l'immagine è in scala di grigi.
4. L'occhio e la telecamera visibile funzionano in modo molto simile, perché entrambi sono rivelatori specializzati per una certa banda spettrale. Invece l'occhio e le telecamere UV e vicino infrarosso non sono in grado di percepire la stessa banda spettrale.

³In caso di danneggiamento o assenza del cristallino, però, si può percepire l'ultravioletto. L'occhio, però, perde la capacità di messa a fuoco. Questa condizione si chiama afachia e ne era affetto, ad esempio, Claude Monet, dopo essersi fatto operare per cataratta.

⁴Dato che le telecamere UV e infrarosse trasformano la radiazione incidente in un segnale diverso, a volte sono chiamati 'trasformatori'. Il termine è, però, ambiguo in fisica, benché sia utilizzato nel linguaggio comune e venga utilizzato a volte dagli studenti stessi, come constatato in attività svolte con studenti delle superiori. Quindi in questo lavoro si utilizzerà solo la parola 'rivelatore' per non creare confusione.

2.4 Explain

Momento di confronto in cui ogni gruppo può esporre alla classe le risposte date prima di fare l'esperimento (risposte alla 'Parte 1') e quanto risposto nella 'Parte 2' in base alle osservazioni fatte. Si può partire dall'ultima domanda della scheda 'Parte 2': "Da quanto visto fino ad ora, quale potrebbe essere, secondo voi, una 'sorgente di radiazione' ? Fare esempi sulla base di quanto visto." per favorire in classe una discussione che porti gli studenti a ipotizzare una definizione per il termine 'sorgente di radiazione'.

Si ipotizzano⁵ delle definizioni del tipo: "Qualcosa che genera luce" oppure "Qualcosa che emette luce".

Se così non dovesse essere, è opportuno che vi sia un aiuto da parte dell'insegnante per guidarli verso una definizione simile, senza dare loro la risposta direttamente.

*** Si auspica, alla fine, una definizione del tipo: Una sorgente è un corpo che emette onde elettromagnetiche in una certa banda spettrale.

In particolare ci si aspetta⁶ che gli studenti pensino per la maggior parte che solamente oggetti artificiali emettano radiazione.

⁵In base ad attività di laboratorio svolte con ragazzi e ragazze di varie classi e varie scuole superiori, da cui è emerso che conoscevano il termine letterale, ma non applicato direttamente alla fisica. Alla domanda hanno dato risposte come: "Qualcosa che genera", "Una fonte di calore", "Qualcosa che emette luce", "Una fonte di radiazioni"

⁶In base alla letteratura di riferimento [12,13] e ai risultati di questionari somministrati a studenti delle superiori con domande mirate.

2.5 Extend

Nello Spettacolo si è visto in due scene come si comporta la lastra di polycarbonato con la radiazione NIR. Nella prima scena si inquadra con la telecamera NIR una lavagna, divisa in due parti verticalmente, come si vede nella Figura 2.2. A occhio nudo, nella parte sinistra si vede la scritta 'LUCE', mentre a destra vi è appoggiata una lastra di colore nero (la lastra di polycarbonato). La telecamera, invece, rivela sotto la lastra la scritta 'STELLE'. Scompare invece la scritta 'LUCE'. Nella seconda scena la Ricerc-attrice pone la lastra nera davanti al volto e viene inquadrata con la telecamera NIR. Nel visibile la lastra non lascia intravedere nulla, come si vede in Figura 2.3, invece nel vicino infrarosso la lastra si comporta come un vetro trasparente.

T

Svolgere l'attività descritta in seguito, tenendo conto solamente del fatto che la domanda "Ponete la lastra di polycarbonato davanti alla lampadina nel vicino infrarosso e guardatela con la telecamera nel vicino infrarosso, cosa succede? Cosa si vede, invece, guardandola con la telecamera UV? È quello che vi aspettavate di vedere?" della scheda didattica ⇒ Appendice pagina 125 può essere compilata dagli studenti sulla base di quanto ricordano dello Spettacolo. La scena può anche essere ripetuta in classe. In Figura 2.2 e in Figura 2.3 sono mostrate foto delle due scene prese dallo Spettacolo.

Punto di Attenzione Sul palco la radiazione NIR è prodotta dai fari che, oltre alla luce visibile, emettono anche luce in quella banda spettrale. In classe è necessario illuminare in modo diretto la lastra di polycarbonato con la luce che emette solo NIR (con un picco a circa 850 nm), perché le lampade generalmente presenti a scuola hanno una componente infrarossa troppo piccola.

Dopo aver posto la lastra di polycarbonato davanti alla lampada alogena accesa, si chiede ai ragazzi di rispondere alla prima domanda della 'Parte 3' della scheda didattica ⇒ Appendice 125: "Provate a mettere una lastra di polycarbonato davanti alla lampadina alogena accesa (radiazione visibile) e guardate cosa succede. Cosa vi aspettate di vedere posizionando la stessa lastra davanti alle altre lampadine e guardando con le rispettive telecamere (ad esempio metterla davanti alla lampadina UV e guardarla con la telecamera UV e lo stesso con il vicino infrarosso)? Cosa succede, invece, se si guarda con la telecamera nel vicino infrarosso la lampadina UV con davanti la lastra di polycarbonato e, viceversa, si guarda con la telecamera UV la lampada nel vicino infrarosso con davanti la lastra? Motivare la risposta."

*** La lastra si vedrà nera nel visibile, poiché opaca a tale radiazione. La lampadina alogena non si vede.

Si fa poi la stessa operazione con la lampadina UV e si chiede agli studenti di utilizzare la telecamera UV e la telecamera NIR per rispondere alla seconda domanda: “Ponete la lastra di policarbonato davanti alla lampadina UV e guardatela con la telecamera UV, cosa succede? Cosa si vede, invece, guardandola con la telecamera NIR? È quello che vi aspettavate di vedere?”

*** Anche nell’UV la lastra apparirà nera, dietro non sarà possibile vedere la lampadina. Guardandola, invece, con la telecamera NIR, se la lampadina emette anche radiazione infrarossa oltre che UV, si vedrà la lampadina come se non ci fosse la lastra davanti.

In seguito si pone la lastra davanti alla lampadina NIR. Gli studenti osservano con la rispettiva telecamera e rispondono alla terza domanda: “Ponete la lastra di policarbonato davanti alla lampadina nel vicino infrarosso e guardatela con la telecamera nel vicino infrarosso, cosa succede? Cosa si vede, invece, guardandola con la telecamera UV? È quello che vi aspettavate di vedere?”

*** Con la telecamera nel vicino infrarosso la lampadina si vedrà come se non avesse nulla davanti. La radiazione, quindi, arriva inalterata al rivelatore. Con la telecamera UV, invece, la lastra apparirà nera e non si vedrà nulla dietro.

L’ultima domanda della ‘Parte 3’ ovvero: “Si può chiamare la lastra di policarbonato una ‘sorgente di radiazione’ in base alla definizione data in precedenza a questo termine? Se sì, in che banda spettrale? Motivare la risposta. Se necessario, fare qualche esperimento di verifica in base a quanto visto prima.” consiste nell’applicare la definizione data in precedenza di ‘sorgente di radiazione’ alla lastra di policarbonato, nel caso facendo qualche esperimento (ad esempio spegnendo la luce e le lampadine e provando ad inquadrare la lastra con le due telecamere).

*** La risposta è che non si può applicare questa definizione alla lastra.

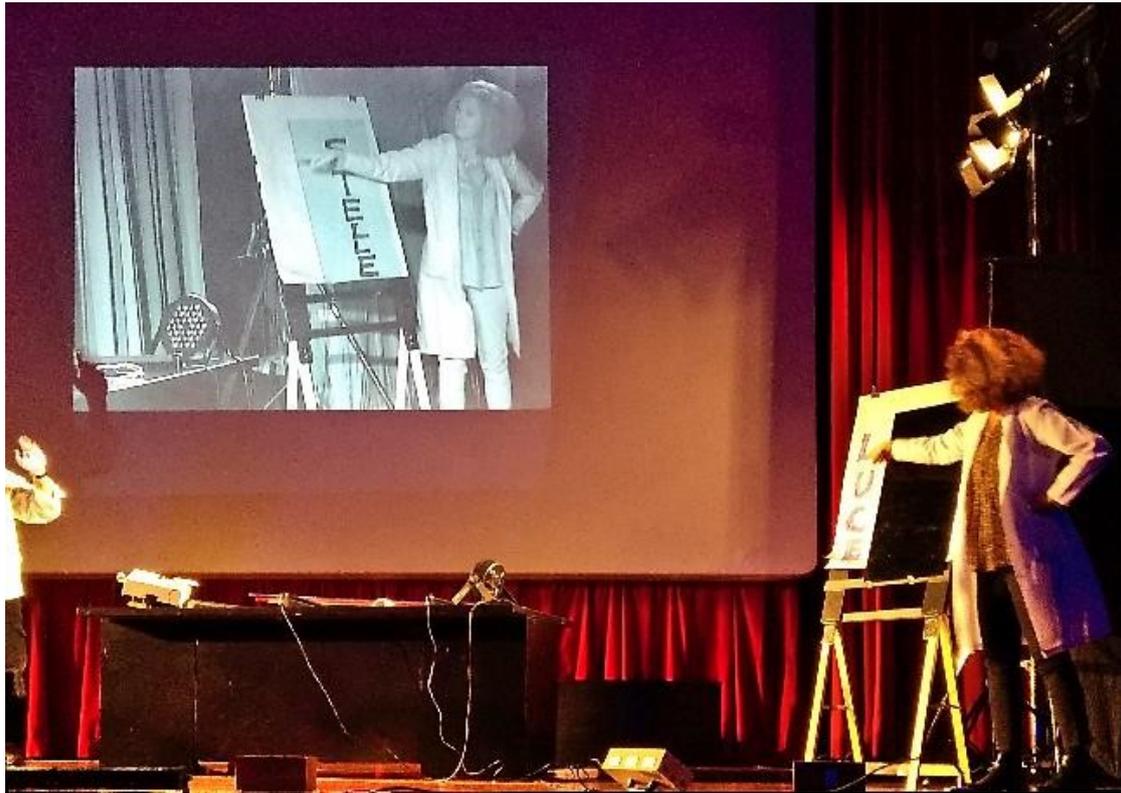


Figura 2.2

Prima scena dello spettacolo in cui viene utilizzata la telecamera NIR per vedere la lastra di polycarbonato.

2.6 Explore - parte 2

Una volta appurato che una lastra di polycarbonato non è una sorgente di radiazione, si cerca di capire quali siano le proprietà di questo materiale.

Nel Laboratorio PLS sono stati mostrati alcuni comportamenti di materiali diversi se illuminati con una certo tipo di radiazione elettromagnetica e visti con una telecamera sensibile alla medesima lunghezza d'onda. Quindi i concetti di 'trasmissione' 'assorbimento' e 'riflettanza' potrebbero già essere noti agli studenti. Le seguenti esperienze permettono ai ragazzi di approfondire maggiormente questo argomento. Le domande della scheda didattica ⇒ Appendice pagina 127 e le successive attività per trovare i concetti di assorbimento e riflettanza potrebbero essere riferite a quanto visto in laboratorio.

fa compilare agli studenti solo la prima domanda della 'Parte 4' della scheda



Figura 2.3

Seconda scena dello spettacolo in cui si vedono le proprietà di interazione tra radiazione NIR e la lastra di policarbonato.

didattica: “Pensando al comportamento della lastra di policarbonato illuminata dalla radiazione NIR, che definizione potrebbe essere data a una grandezza chiamata TRASMITTANZA?”

Si introduce così il concetto di ‘trasmittanza’.

*** La trasmittanza è il rapporto tra la frazione di flusso radiante incidente trasmesso dal materiale rispetto al flusso totale incidente. E’ legata alla lunghezza d’onda della radiazione incidente e alle caratteristiche intrinseche del corpo.

I ragazzi sono invitati/e a ragionare su questo concetto in base a quanto hanno visto in precedenza con la lastra di policarbonato posta davanti alla lampada NIR.

Dopo aver confrontato le risposte date dai vari gruppi, si raggiunge una definizione comune e si procede con le altre domande della scheda.

La seconda domanda propone un ragionamento e un'interpretazione di due grafici di trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda, presentati in Figura 2.4 e Figura 2.5. Gli studenti per poter rispondere alle domande della scheda hanno bisogno dello spettro elettromagnetico \Rightarrow Appendice pagina 122.

*** Nelle didascalie vengono spiegate le caratteristiche di questi grafici, a cui gli studenti dovranno arrivare autonomamente.

La terza domanda è la seguente: “Come si comporta la lastra di policar-

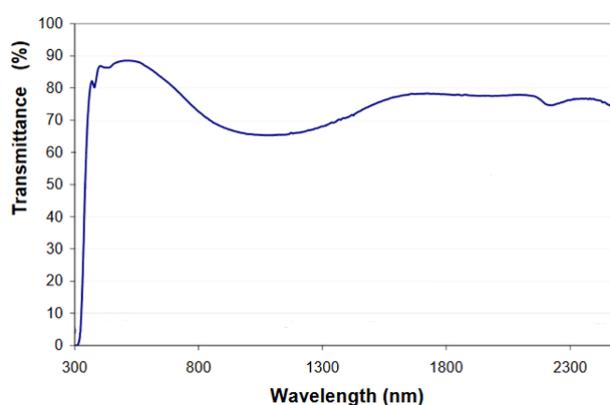


Figura 2.4

Grafico di trasmittanza in funzione di una banda di lunghezze d'onda da 300 nm a circa $2,4 \mu\text{m}$ del vetro denominato float, usato, ad esempio, per le finestre. È riconoscibile perché la percentuale maggiore di luce trasmessa (quasi il 90%) cade nella regione della radiazione visibile (circa da 400 a 700 nm). Infatti il vetro di una finestra appare trasparente ai nostri occhi. La trasmittanza è minima, o nulla nelle lunghezze d'onda dell'ultravioletto e ha una diminuzione nella regione del vicino infrarosso. Ha un valore costante (pari all'80%) oltre i 1500 nm, regione del medio e lontano infrarosso.

[Immagine al sito:

http://www.windat.org/Windatdocuments/doc/WinDat_N4.03APP_2_Module-2_Window_Component_Characteristics_28.07.04.pdf]

bonato nelle altre lunghezze d'onda viste? Come sarà la trasmittanza in quei casi? E cosa succederà alla radiazione incidente?” e prevede una risposta in base al comportamento della lastra visto nella fase precedente.

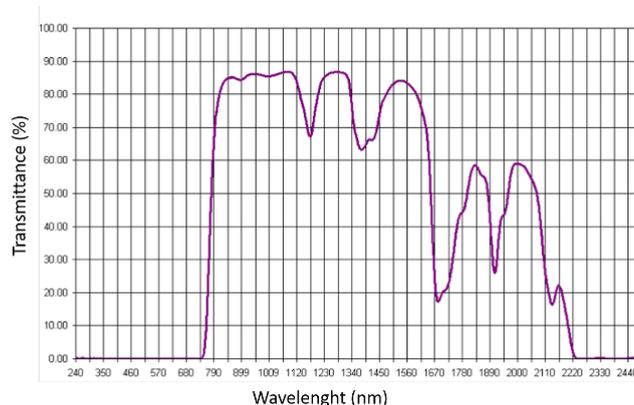


Figura 2.5

Grafico di trasmittanza in funzione di una banda di lunghezze d'onda da 240 nm a circa $2,4 \mu\text{m}$ della lastra di policarbonato (ACRYLITE® extruded 9K020 IRT Black). La caratteristica riconoscibile immediatamente è la trasmittanza massima (circa l'85%) nella banda del NIR, nulla, invece, nel visibile e nel FIR.

[Immagine al sito:

<https://www.acrylite.net/product/acrylite/downloads/1213g-light-transmission-and-reflectance-tech-data.pdf>]

*** La lastra nel visibile e nell'UV non permette la trasmissione di radiazione rispettivamente visibile e UV. Quindi la trasmittanza in quei casi è indicativamente nulla. Inoltre l'Attività 1 utilizza il concetto di 'assorbimento' della radiazione visibile, quindi per analogia gli studenti potrebbero ricollegare il fatto che la lastra di policarbonato è nera nel visibile perché assorbe la radiazione incidente, introducendo autonomamente il concetto di 'assorbanza'.

Dopo una discussione di classe sulla risposta alla terza domanda, si può introdurre agli studenti il concetto di 'assorbanza', ovvero una grandezza che indica la percentuale della radiazione incidente assorbita da un corpo e quindi non trasmessa.

Si chiede agli studenti: "Ricordate quanto visto nell'Attività 1. Cosa succede alla radiazione visibile che incide su un corpo per determinarne il colore nel nostro sistema visivo?"

*** La radiazione visibile interagisce con il corpo venendo assorbita o riflessa in parte. La componente rilevata all'occhio è quella riflessa. Quindi

una certa lunghezza d'onda può anche venire riflessa dai corpi.

In questo modo è introdotto il concetto di 'riflettanza'.

*** La riflettanza indica la percentuale di radiazione elettromagnetica riflessa⁷ dalla superficie rispetto alla radiazione totale incidente.

2.7 Explain - parte 2

Gli studenti sono invitati a trovare un modello con cui spiegare i fenomeni descritti in precedenza. Si può proporre loro anche di ipotizzare un eventuale schema del fenomeno.

*** Il modello dell'interazione radiazione-materia prevede che la radiazione elettromagnetica in un certo intervallo spettrale subisca macroscopicamente un processo di assorbimento, o riflessione, oppure trasmissione, in base alle caratteristiche peculiari del corpo. La percentuale di radiazione elettromagnetica assorbita, riflessa o trasmessa rispetto al flusso incidente totale, si indica rispettivamente con il termine assorbanza, riflettanza e trasmittanza. Alcuni corpi sono sorgenti, altri interagiscono solo se illuminati dalla radiazione.

Lo schema sarà simile a quello in Figura 2.6.

⁷In questo lavoro chiamiamo, come è usuale in ottica, 'riflessione' anche la riflessione non speculare, sinonimo in alcuni libri del termine 'diffusione'.

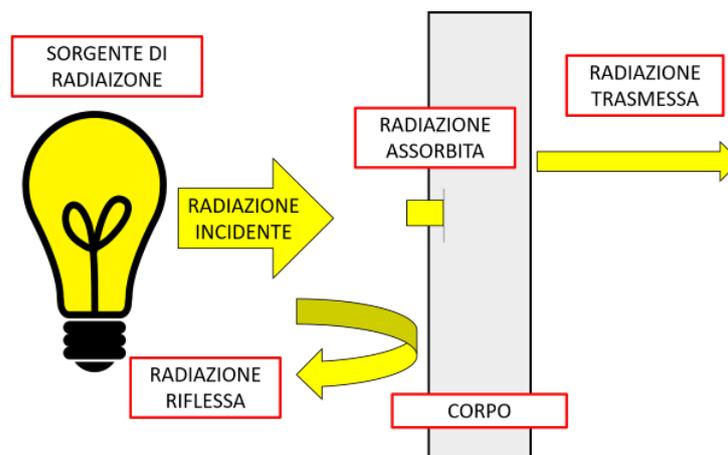


Figura 2.6

Schema di interazione tra una radiazione qualsiasi a una certa lunghezza d'onda e un corpo qualunque.

2.8 Collegamento con l'Arte - Le Tecniche di Analisi e Restauro dei Beni Culturali

Preso uno studio riflettografico⁸ su un'opera della Pinacoteca di Brera a Milano, si può proporre agli studenti un confronto tra l'immagine riflettografica e l'opera nel visibile. Si chiede loro di tracciare un ipotetico e generico grafico di trasmittanza, assorbanza e riflettanza per l'opera presa in considerazione.

Il dipinto può essere scelto dall'opera di P.C. Marani "Sotto la Pelle di Bramante e Bramantino: Radiografie e Riflettografie dei dipinti di Brera, Urbino e Madrid", con testo al sito: <https://core.ac.uk/download/pdf/55218232.pdf>.

⁸La Riflettografia è una tecnica utilizzata nell'ambito della conservazione e restauro dei beni culturali. Essa prevede l'illuminazione delle opere d'arte tramite una luce NIR e l'analisi dell'immagine, detta riflettografica, generata da una telecamera operante nella medesima lunghezza d'onda. Si utilizza la radiazione NIR, perché la pittura ad olio è trasparente a tale radiazione, nonostante sia opaca alla radiazione visibile, mentre il carboncino del disegno preparatorio è opaco ad entrambe le bande spettrali.

T

Si consiglia di scegliere il dipinto di cui ipotizzare il grafico di trasmittanza, assorbanza e riflettanza da uno dei tre utilizzati per lo Spettacolo: “Madonna con Bambino” di Giovanni Bellini (Figura 2.8), “Pietà” dello stesso pittore (Figura 2.9) e “Crucifixion” di Hans Memling tenuto alla Pinacoteca civica di Vicenza (Figura 2.7).

Inoltre può essere utile leggere il copione associato alle immagini ⇒ Appendice pagina 134 in cui vengono spiegate le basi della tecnica di Riflettografia e le informazioni che si possono trarre dalle immagini riflettografiche.

L

Nel Laboratorio PLS si è visto un dipinto con una telecamera sensibile alla luce nel vicino infrarosso. Sotto i pigmenti, trasparenti alla radiazione, sono apparsi i tratti a carboncino. Si consiglia di proporre agli studenti di disegnare il grafico di riflettanza, trasmittanza e assorbanza di pigmenti e carboncino riferito a quel dipinto.



Figura 2.7

In alto particolare della riflettografia del quadro del Fiammingo Hans Memling intitolato "Crucifixion". In basso particolare del dipinto nel visibile. Molto evidente è la presenza di un particolare (l'agnello) alla sinistra del santo, spostato poi sulla sua mano nell'opera finita. Si nota anche che la mano destra del santo nell'opera conclusa è stata coperta con un drappo, mentre nel disegno preparatorio è scoperta. L'ipotesi è che i cambiamenti furono imposti al pittore da chi commissionò il quadro.

[Immagini e informazioni dall'opera teatrale "Luce dalle Stelle" di M. Carpineti, M. Giliberti e N. Ludwig. Il quadro si trova presso la Pinacoteca Civica di Vicenza]



Figura 2.8

Riflettografia dell'opera dal titolo "Madonna con Bambino" di Giovanni Bellini. Da notare il disegno preparatorio del vestito della Vergine, soprattutto il drappeggio. Il bambino, invece, ha un disegno meno accurato, le linee sono più marcate e semplici. Questa differenza nel disegno preparatorio significa che l'artista commissionò ad un altro pittore (probabilmente della sua scuola) il disegno del bambino. [Immagine e informazioni dall'opera teatrale "Luce dalle Stelle" di M. Carpineti, M. Giliberti e N. Ludwig.]



Figura 2.9

In alto riflettografia completa della "Pietà" di Bellini, in basso particolare dei volti. Il disegno preparatorio è molto evidente, in particolare l'ombreggiatura è molto marcata rispetto al dipinto. [Immagini e informazioni dall'opera teatrale "Luce dalle Stelle" di M. Carpineti, M. Giliberti e N. Ludwig.]

2.9 Extend

Una volta presentate le tre grandezze spettrali: trasmittanza (T_λ), assorbanza (A_λ) e riflettanza (R_λ), si può mostrare agli studenti la loro relazione, qui definita 'la regola ART', che corrisponde a un'equazione di bilancio energetico⁹:

$$A_\lambda + R_\lambda + T_\lambda = 1 \quad (2.1)$$

I tre coefficienti dipendono dalla lunghezza d'onda, perché, in base alla banda spettrale utilizzata, cambiano le proprietà ottiche dei materiali.

Fino qui si è parlato dell'interazione tra radiazione e materia. Nel prossimo paragrafo si utilizzerà un altro rivelatore (la termocamera) e si cercherà di capire meglio cosa voglia dire emettere radiazione.

Ad ogni gruppo è consegnata una termocamera del kit e la 'Parte 5' e 'Parte 6' della scheda didattica, \Rightarrow Appendice pagina 129 e pagina 130.

L Nel Laboratorio PLS è stata presentata la termocamera e si sono fatti esperimenti con questo strumento. Si consiglia di chiedere agli studenti di applicare il concetto di 'sorgente di radiazione' a queste esperienze. Si potrebbe anche far compilare agli studenti la scheda della 'Parte 5' (\Rightarrow Appendice pagina 129) sulla base dei ricordi del laboratorio, discutendo le risposte con tutta la classe. In seguito è possibile passare direttamente alla successiva 'Parte 6' della scheda didattica.

Viene aggiunta alle tre lampadine una quarta lampadina senza dire ai ragazzi in che banda emette.

*** La lampadina è la seconda alogena, che, a differenza della prima, è tenuta spenta. Si fa questa scelta per indurre i ragazzi a pensare che essa emetta in una lunghezza d'onda diversa da quella del visibile.

Si chiede agli studenti di rispondere per iscritto alla prima domanda della 'Parte 5' della scheda didattica, in cui è richiesto di applicare la definizione data in precedenza di 'sorgente di radiazione': "Sapendo che la termocamera vede la radiazione infrarossa detta 'lontana', cosa vi aspettate di vedere

⁹Dato che ogni coefficiente è adimensionale e ha valore compreso tra 0 e 1, oppure tra 0% e 100%, la somma dei tre è posta uguale a 1, uguale al flusso incidente ricevuto dal corpo.

puntando la termocamera verso le lampadine? Quale lampadina avrà intensità maggiore? Applicate la definizione data in precedenza di ‘sorgente di radiazione’.”

In seguito, a luci spente e tapparelle abbassate, si chiede loro di puntare la termocamera verso le lampadine ancora accese e di rispondere alle altre domande. Il tempo consigliato è di circa 10 minuti.

Punto di Attenzione Si avrebbe lo stesso effetto se la stanza fosse illuminata da luce artificiale o solare. E’ stato scelto di farlo a luce spenta in questa fase, per creare un’analogia con gli esperimenti fatti in precedenza. Per esperienza precedente, i ragazzi dovrebbero aspettarsi di vedere con la termocamera solo la sorgente di radiazione di FIR.

*** Con la termocamera si vedrà tutta la stanza illuminata, a falsi colori. In particolare le lampadine risulteranno tutte colorate, di colori diversi in base alle impostazioni e alla calibrazione dello strumento, e tutte con la stessa intensità. Inoltre ogni oggetto della stanza sarà visibile, nonostante il buio, e avrà un certo colore. La maggior parte degli elementi della stanza, però, avrà la stessa tonalità, perché tutti immersi nello stesso ambiente alla stessa temperatura e quindi in equilibrio termico l’uno con l’altro.

Distribuire, poi, la ‘Parte 6’ della scheda didattica, ⇒ Appendice pagina 130 e far compilare agli studenti. Il tempo consigliato è di circa 10/15 minuti.

*** Si vedrà che, nonostante le luci accese, la termocamera restituisce le stesse immagini. Le altre telecamere, invece, no. Con la telecamera UV si vedrà molto brillante la lampadina che emette nell’ultravioletto e probabilmente, solo nel caso in cui la luce sia quella naturale, si vedrà illuminato anche l’ambiente, poiché la luce solare contiene anche radiazione UVA (ultravioletto vicino). Il fenomeno è diverso da quello della termocamera, però, perché l’immagine restituita a luci accese e spente è diversa. Nel caso della telecamera UV, essa vede la luce solare come una sorgente di radiazione UV, al pari della lampadina, e vede l’interazione tra la radiazione e la materia, che cambia in base ai corpi illuminati a alla quantità e incidenza di radiazione. Nel caso della termocamera, essa vede le sorgenti di infrarosso lontano, ma, poiché la maggior parte dei corpi nell’ambiente emette in questa banda spettrale, vedrà soprattutto l’emissione piuttosto che l’interazione.

La telecamera NIR con la luce naturale vedrà l’interazione tra la radiazione solare e i corpi nell’ambiente, perché il Sole emette anche nel vicino infra-

rosso, ma le immagini della telecamera con e senza luce sono diverse. Nel caso si utilizzi la luce artificiale, si vedrà molto poco con le telecamere UV e NIR.

In base alle immagini prese a luci accese e spente con le varie telecamere, si intuisce che la termocamera ha un comportamento diverso rispetto alle altre due telecamere (UV e vicino infrarosso). Infatti essa restituisce sempre la stessa immagine, le altre due, invece, restituiscono immagini diverse.

Dopo una breve discussione sui risultati, si può chiedere agli studenti: “E’ ancora valida la definizione data in precedenza di ‘sorgente di radiazione?’” La definizione sembra non essere più applicabile al caso della termocamera, perché non vi è nulla che “emette/genera luce”, dato che ogni oggetto si comporta allo stesso modo e nessuno si comporta come una lampadina alogena nel visibile.

*** In realtà la definizione è corretta, bisogna solamente capire in modo più approfondito cosa mostra la termocamera. A logica si dovrebbe interpretare questo fenomeno come il fatto che ogni elemento della stanza, le lampadine comprese, sono delle sorgenti di infrarosso lontano. In particolare si nota anche che le persone sono sorgenti di radiazione FIR.

2.10 Explain - parte 3

In base a quanto visto fino ad ora, gli studenti sono invitati a ipotizzare un modello a partire dalla quarta domanda della ‘Parte 6’ della scheda: “In base alle differenze riscontrate nelle immagini con l’ambiente illuminato e buio, dove pensate stia avvenendo un fenomeno di INTERAZIONE tra la radiazione e la materia e dove un fenomeno di EMISSIONE di radiazione? ”

*** Quello che si auspica è che vengano fuori delle considerazioni di questo tipo: La radiazione propria di un qualsiasi corpo è emessa in una certa banda spettrale. Un corpo non emettitore di una certa banda, se illuminato con tale radiazione, per sue proprietà intrinseche, interagirà trasmettendo, assorbendo o riflettendo, in parte o totalmente, la lunghezza d’onda in questione.

L'emissione propria di radiazione di un corpo si chiarirà meglio nell'attività successiva.

2.11 Evaluate

Scheda di Valutazione \Rightarrow Appendice a pagina 131.

Soluzioni \Rightarrow Appendice a pagina 133.

Attività 3 - Emissione e Spettri

Obiettivi generali: Alla fine gli studenti avranno acquisito la capacità di:

- leggere ed interpretare grafici: riconoscere la relazione tra le variabili e trovare una legge fisica;
- trarre conclusioni fisiche da quanto osservato;
- compiere calcoli con le relazioni date;
- utilizzare una simulazione online ed estrapolarne concetti fisici;
- costruire un grafico a partire da una tabella di dati acquisiti da una simulazione;
- usare strumenti matematici quali derivate e integrali.

Obiettivi di contenuto:

- Radiazione Termica
- Grandezze Radiometriche
- Corpo Nero, aspetti qualitativi
- Distribuzione spettrale di Planck e sue approssimazioni
- Comportamento radiativo dei corpi reali: Emissività
- Legge di Kirchhoff per la radiazione termica
- Legge di Stefan-Boltzmann
- Trasmissione dell'energia per Irraggiamento

- Legge dello Spostamento di Wien
- Funzionamento della Termocamera
- Cenni di Astrofisica

§D.P. DeWitt Gene.D.Nutter (1988), *Theory and Practice of Radiation Thermometry*. United States of America: Jhon Wiley & Sons, Inc. — Testo tecnico di livello universitario/specialistico, in lingua inglese, con spiegazioni dettagliate sul funzionamento e le tecniche di calibrazione dei rivelatori per la radiazione termica. Di particolare interesse teorico il Capitolo 1 e il Capitolo 2, sulla radiazione termica e le sue proprietà, il Capitolo 4, in cui viene spiegato il principio di funzionamento dei rivelatori di radiazione termica. Informazioni sui problemi e loro risoluzioni riguardo all'utilizzo del rivelatore di radiazione termica con un oggetto di alluminio sono discusse nel Capitolo 17. Alcune informazioni sulle immagini termografiche sono presentate nel Capitolo 20.

§D. Halliday R. Resnick K. S. Krane (2004), *Fisica 2 - Quinta Edizione*. Rozzano (MI): C.E.A. Casa Editrice Ambrosiana — Testo di livello universitario, in lingua italiana. La parte sulla radiazione termica e la radiazione di cavità è adatta anche a studenti delle superiori, ma non è approfondita a sufficienza. Si trova al Capitolo 45 *La Natura della Luce* sottocapitolo 45.2 *Radiazione Termica*

§R. Siegel J.R. Howell (1981), *Thermal Radiation Heat Transfer - Second Edition*. USA: Hemisphere Pub. Corp — Testo di livello universitario ingegneristico, in lingua inglese, con spiegazioni e dimostrazioni alla portata anche di ragazzi di quinta e quarta superiore. Di particolare interesse riguardo alla radiazione termica i capitoli 1, 2, 3, e alcuni concetti sullo scambio radiativo presi dai capitoli 6, 7.

§Y.A. Çengel (2009), *Termodinamica e Trasmissione del Calore - Terza Edizione*. Milano: McGraw-Hill — Libro universitario ingegneristico, in lingua italiana. Sono trattati in modo approfondito la trasmissione di energia per irraggiamento (con esempi riportati alla vita quotidiana), le grandezze radiometriche, il corpo nero e le sue proprietà. Comprensibile anche ad un livello di scuola superiore.

§H.D. Baehr K. Stephan (1998), *Heat and Mass Transfer*. Springer Verlag — Libro universitario ingegneristico, in lingua inglese, adatto in alcune parti anche ad una trattazione scolastica di secondo grado. In particolare

interessano i capitoli: 1.1.5, 1.1.6, 5 (solo parte del paragrafo 5.5).

§Hannu Karttunen, Pekka Kröger, e al. (2007), *Fundamental Astronomy - Fifth Edition*. Springer Verlag — Libro astrofisico di livello universitario, in lingua inglese, in cui sono raccolte le nozioni di base per l'astrofisica. Si possono trovare spiegati e trattati matematicamente e fisicamente molti argomenti tra cui: il Diagramma di Hertzsprung-Russel, la radiazione cosmica di fondo (trattata in modo poco approfondito), la legge di Planck e i passaggi matematici per ricavare la legge dello spostamento di Wien e di Stefan-Boltzmann, oltre che i passaggi per ricondursi da una trattazione in lunghezza d'onda ad una in frequenza.

PRINCIPALI PROBLEMI CHE RISCOVTRANO GLI STUDENTI:

- Per gli studenti non è sempre immediato riconoscere che ogni corpo a una certa temperatura emette radiazione elettromagnetica [12]
- Problematiche emergono dall'utilizzo del termine "corpo nero" per indicare un assorbitore (ed emettitore) perfetto. Infatti molti studenti, che abbiano trattato o meno tale argomento a scuola, pensano che il corpo nero sia un qualunque oggetto di colore nero [18, 19]¹. L'aggettivo "nero", infatti, non si riferisce a una proprietà ottica del corpo, ma piuttosto alla sua capacità di assorbire tutta la radiazione incidente su di esso.
- Alcuni studenti usano l'espressione "contenere radiazione" per indicare che un corpo ha assorbito radiazione, ma non pensano alle conseguenze di questo fenomeno, non prendendo in considerazione la riemissione [21]
- Vi è la tendenza, anche dopo la spiegazione teorica, a collegare il corpo nero con un oggetto di forma sferica [19], ma le proprietà di corpo nero non dipendono dalla forma.

Materiale necessario:

- KIT #1

¹Evidenze simili si ritrovano anche nell'esperienza documentata tramite questionari distribuiti dopo la visione dello Spettacolo a studenti di varie classi e scuole.

- KIT #4
- KIT #5
- Scheda didattica ⇒ Appendice pagina 135
- Scheda didattica ⇒ Appendice pagina 136
- Scheda con l'immagine del diagramma HR ⇒ Appendice pagina 138
- Computer con installato Flash Player in numero pari al numero di gruppi
- Simulazione sulla radiazione termica del PHET Colorado, al sito: <https://phet.colorado.edu/it/simulation/legacy/blackbody-spectrum>, quella che richiede *Adobe Flash Player* e non la versione in HTML 5
- Scheda didattica ⇒ Appendice pagina 140
- Scheda con lo spettro elettromagnetico ⇒ Appendice pagina 122
- **Copione ⇒ Appendice pagina 139**
- VIDEO 4

3.1 Engage

T In una scena dello Spettacolo si è mostrata una immagine termografica del pubblico. E' stato puntato lo strumento verso la platea ed è stata proiettata sullo schermo dietro ai Ricerc-attori l'immagine ottenuta nel FIR, come mostrato in Figura 3.1. Si ripropone in questa prima fase la stessa esperienza ampliandola con ulteriori osservazioni.

L Nel Laboratorio PLS sono state compiute varie osservazioni con la termocamera. Lo strumento è stato puntato verso persone, ambienti, muri e alcuni oggetti specifici come l'acqua, una lastra di alluminio, una caffettiera e un recipiente di vetro. Alcune esperienze proposte di seguito potrebbero già esser state presentate agli studenti durante il laboratorio. Si consiglia, tuttavia, di riproporle nuovamente, poiché potrebbero esserci elementi diversi nella classe rispetto al laboratorio.

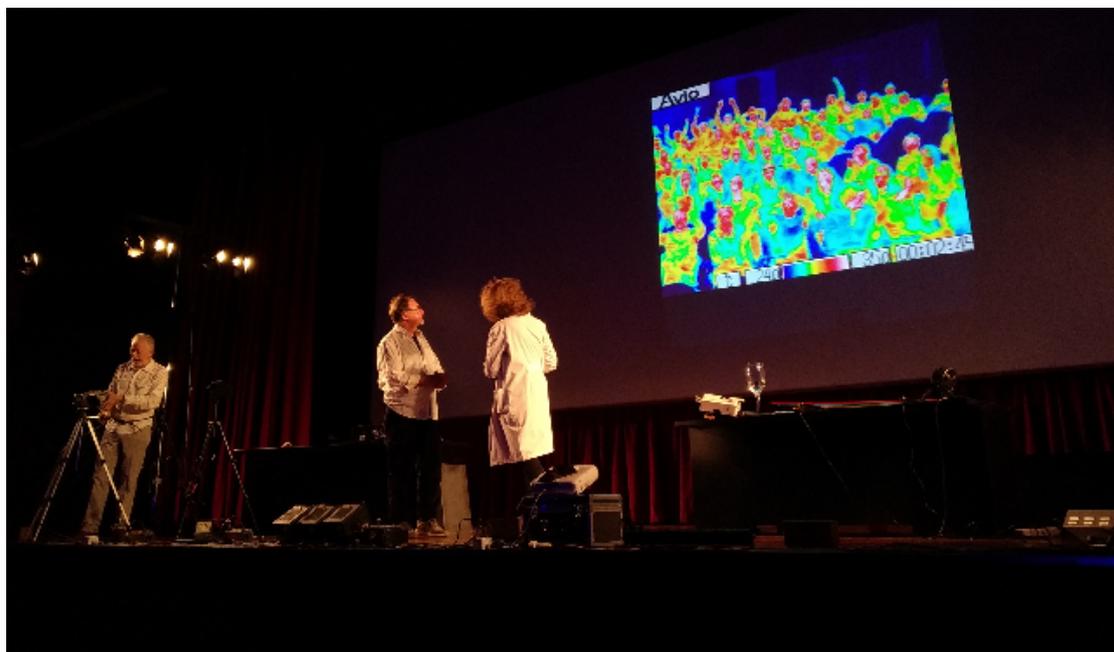


Figura 3.1

Scena presa dallo spettacolo "Luce dalle Stelle", in cui i Ricerc-attori puntano la termocamera verso il pubblico.

Dopo aver diviso gli studenti in gruppi e dopo aver consegnato a ogni gruppo una termocamera si chiede agli studenti di osservare la stanza e in particolare le persone con lo strumento.

Punto di Attenzione E' opportuno rimuovere dal visore della termocamera qualsiasi riferimento alla temperatura (scala cromatica delle temperature e indicatori). Questo perché al momento non si vuole creare la falsa credenza che la termocamera misuri direttamente la temperatura degli oggetti, dato che questa affermazione da un punto di vista fisico e tecnico è imprecisa, dal momento che la termocamera rivela la potenza emessa per unità di superficie dai corpi, da cui ricava la temperatura. Inoltre per alcuni materiali molto riflettenti, questa affermazione non è corretta. Questo gli studenti lo vedranno nelle fasi successive.

Le persone appariranno colorate sul visore della termocamera, ma differenti rispetto all'ambiente circostante. L'ambiente sullo sfondo sarà principalmente di colore omogeneo, diverso da quello delle persone. Interessante notare il diverso comportamento degli occhiali da vista rispetto al volto che li indossa.

*** Le lenti degli occhiali sono opache alla radiazione FIR, quindi non appaiono trasparenti, perché assorbono o riflettono tale radiazione. Essi mostrano un colore diverso alla termocamera, perché emettono una radiazione diversa, dato che sono più freddi rispetto al volto e non vanno in equilibrio termico con esso. Il motivo è che il punto di contatto tra il naso e la montatura è molto piccolo, inoltre, se fatti di un materiale plastico, non sono buoni conduttori di calore e a maggior ragione non si riscaldano completamente, ma solo nel punto di contatto.

*** L'ambiente si trova approssimativamente in equilibrio termico, molti oggetti (muri, tavoli, sedie, pavimento, soffitto, finestre, ecc.) hanno la stessa temperatura (quella ambientale) in base al principio zero della termodinamica. La termocamera, quindi rileva da parte di questi oggetti la stessa emissione termica.

Ci si può soffermare su alcuni elementi della stanza, ad esempio le luci, accese e poi spente, quadri elettrici, tubi del riscaldamento o canaline elettriche, indicatori di uscite di sicurezza, dispositivi tecnologici (proiettore, computer, cellulare).

Tutti questi elementi, soprattutto se accesi o funzionanti, potrebbero avere un colore diverso sul visore della termocamera rispetto all'ambiente circostante, ad esempio rispetto ai muri dove sono attaccati.

*** Le lampade (con lampadina alogena o lampadina a incandescenza) ri-

sultano di colore diverso rispetto al soffitto a cui sono attaccate, perché per emettere luce il filamento di tungsteno è riscaldato, trasformando energia elettrica in energia termica, fino a oltre 3000 K. Per le leggi della radiazione termica a corpi con temperatura di quell'ordine di grandezza è associato un picco di emissione di radiazione termica nel visibile.

Lampade a fluorescenza (dette al neon) avranno un comportamento simile, dovuto alle temperature raggiunte dallo strumento per far vaporizzare il liquido (solitamente mercurio) contenuto all'interno e poter così innescare il processo per emettere luce.

Se le lampade sono state spente da poco, mantengono per qualche minuto l'alta temperatura prima di raffreddarsi e di andare in equilibrio termico con la stanza. Per questo motivo, anche se spente, potrebbero vedersi con la termocamera colorate diversamente rispetto al soffitto.

*** Le canaline, poiché contengono fili elettrici, sono riscaldate dal passaggio di corrente elettrica. Quest'ultima, passando per il conduttore avente una certa resistenza, determina una trasformazione di energia da elettrica a termica (effetto Joule), che è scambiata in modalità calore con l'ambiente. Si produce, quindi, un aumento di temperatura delle canaline.

I tubi per il riscaldamento, invece, sono attraversati da aria calda, che scambia energia in modalità calore con il materiale dei tubi, scaldandolo. La loro emissione termica, quindi, è diversa rispetto a quella del muro a cui sono attaccati.

Se a disposizione, puntare con la termocamera anche degli elementi metallici (cartelli di sicurezza del laboratorio, armadi, tavoli). Tali elementi avranno nel FIR un comportamento simile a quello degli specchi nel visibile.

*** I metalli hanno grande riflettanza e bassa emissività nel FIR. Tendono quindi a riflettere specularmente la radiazione termica dell'ambiente circostante.

Punto di Attenzione Per ora si fanno valutazioni sulla base del colore mostrato dal visore della termocamera e non si utilizza una grandezza fisica più precisa, perché ancora non si è parlato agli studenti di emissione termica e della relazione che ha con la temperatura.

3.2 Explore

Nell'Attività 2 si è parlato di sorgenti di radiazione e si è visto che la stanza, alcuni oggetti e le persone sono sorgenti di radiazione FIR, perché la termocamera mostra la stessa immagine sia in condizioni di illuminazione, sia al buio. Nella fase di *Engage* si sono visti tanti altri elementi con la termocamera, tutti sorgenti di lontano infrarosso. In questa fase si cercherà di indagare la natura dell'emissione dei corpi.

L I concetti e la teoria che si propongono in questa prima fase (relazione tra la potenza emessa per unità di superficie e la temperatura nella legge di Stefan-Boltzmann) sono già stati trattati nel Laboratorio PLS. Si ritiene, però, che far svolgere l'esperienza ai ragazzi possa aiutarli a inserire le attività viste in laboratorio in un quadro più generale.

Viene mantenuta la divisione in gruppi della fase precedente.

Si distribuiscono a ogni gruppo due quadrati di legno (100x100 mm), un termometro, un metro, una bilancia, un pentolino e una piastra. I gruppi dovrebbero già avere la termocamera dall'attività precedente.

Agli studenti possono essere poste le seguenti domande:

“Abbiamo visto nell'Attività 2 e utilizzando la termocamera nella fase precedente, che i corpi emettono in bande diverse dello spettro elettromagnetico. Ma perché un corpo emette in primo luogo? Intanto definiamo una grandezza fisica che ci permetta di quantificare la radiazione totale emessa da un corpo. Tale grandezza è detta potenza emessa per unità di superficie, definita anche intensità I , e si misura in W/m^2 . Quindi l'intensità ci dice quanta radiazione è emessa da un'area di un metro quadro del corpo preso in considerazione.”

Si distribuisce la scheda didattica \Rightarrow Appendice pagina 135 a ogni gruppo e si chiede di rispondere alla prima domanda della “Parte 1” mentre si aspetta che uno dei due quadrati di legno si riscaldi.

1. “Che differenze vi aspettate di vedere guardando con la termocamera i due quadrati di legno, quello a temperatura ambiente e quello riscaldato?”

Punto di Attenzione Il pezzo di legno impiega dai 10 ai 15 minuti per riscaldarsi in modo omogeneo. Si consiglia quindi di metterlo a scaldare all'inizio della fase di *Engage*, così che sia pronto al momento giusto.

Per essere riscaldato in modo omogeneo, si consiglia di porre il pezzo di legno dentro al pentolino sulla piastra accesa.

Una volta riscaldato il pezzo di legno, gli studenti possono rispondere alle altre domande della scheda, in un tempo consigliato di 10 minuti

2. “Osservate con la termocamera i due quadrati di legno contemporaneamente, ponendoli vicini ma non a contatto. Cosa osservate? E che differenze ci sono guardandoli con la termocamera e guardandoli a occhio nudo?”
3. “La termocamera riceve la potenza emessa per unità di superficie (I) nel lontano infrarosso dal corpo preso in considerazione, quali grandezze fisiche potrebbero influenzare le differenze riscontrate tra i due quadrati osservati con la termocamera? Fare misurazioni a riguardo con gli strumenti a disposizione e riportare calcoli, commenti e ipotesi.”

2. Il visore della termocamera mostra che i quadrati hanno colori diversi (o intensità di grigio se l'immagine è in bianco e nero).
La termocamera assegna un colore diverso a un corpo in base alla potenza ricevuta dalla sua superficie. Il colore varia in base alla scala cromatica utilizzata dallo strumento. In questo caso la potenza emessa dal legno riscaldato è diversa rispetto a quella del legno a temperatura ambiente.
3. Dal punto di vista della forma, nulla è cambiato, il quadrato scaldato non si è deformato. Il calcolo del volume restituisce un valore uguale per entrambi i pezzi di legno. La bilancia registra lo stesso peso per entrambi. Il termometro, invece, dà un valore diverso.

Punto di Attenzione Evitare in tutti i passaggi di toccare i quadrati di legno poco prima di compiere la misura, per non modificarne la temperatura scambiando energia per contatto.

Punto di Attenzione In realtà scaldando il materiale il suo volume potrebbe aumentare, a causa del fenomeno di dilatazione termica. Tale variazione è osservabile misurando lo spessore del pezzo di legno con un calibro, mentre con il metro non si riscontrano differenze troppo evidenti.

3.3 Explain

Ogni gruppo è invitato a dare un significato a quanto visto in precedenza e discutere, poi, quanto proposto con gli altri. *** Sarebbe auspicabile che gli studenti ipotizzassero una spiegazione simile alla seguente: Esiste una relazione tra potenza emessa per unità di superficie e temperatura del corpo preso in considerazione, che determina la variazione della potenza emessa all'aumentare della temperatura.

3.4 Extend

T Nella scena dello Spettacolo in cui si punta la termocamera verso il pubblico, come mostrato in Figura 3.1, il Ricerc-attore spiega che la termocamera “Serve per misurare a distanza la temperatura” e accenna a esperimenti fatti sui conigli per vederne le emozioni. La scena può esser ripresa in classe proponendo agli studenti la lettura del copione che si trova in \Rightarrow Appendice a pagina 137.

Dato che il ricavare autonomamente la proporzionalità tra potenza emessa per unità di superficie e temperatura alla quarta potenza non è immediato, per la mancanza di misure quantitative, si suggerisce di fornire ai ragazzi la seguente relazione:

$$I \propto T^4 \quad (3.1)$$

in cui I si esprime come il rapporto tra potenza e superficie, quindi ha come unità di misura W/m^2 , mentre T è la temperatura misurata in kelvin.

Una volta appurato che la temperatura è l'unica grandezza, tra quelle misurate in precedenza, che fa la differenza tra la potenza emessa dal quadrato di legno riscaldato e quello a temperatura ambiente, e una volta trovata la relazione 3.1, si può introdurre il concetto di ‘Radiazione Termica’.

Punto di Attenzione In questo momento va bene che gli studenti sappiano solamente la proporzionalità tra I e T e non la legge di Stefan-Boltzmann, che verrà definita successivamente completa con il termine di emissività.

Si propongono agli studenti calcoli veloci basati su questa relazione:

1. “Quanta potenza per unità di superficie irraggia una persona?”
2. “Quanto emette una persona, in più o in meno, rispetto a un tavolo a temperatura ambiente (a parità di superficie)? ”
3. “Sebbene non sia realistico, ma solo da un punto di vista teorico, se un corpo potesse avere una temperatura pari allo zero assoluto quanta radiazione termica emetterebbe?”

*** Risposte:

1. Il calcolo si compie prendendo la temperatura media di una persona (36°C), trasformandola in Kelvin (309°C) ed elevando questo numero alla quarta potenza, ottenendo: $I \approx 9 \cdot 10^9 \approx 10^{10} \text{ W/m}^2$.
2. Un oggetto a temperatura ambiente (temperatura di circa 25°C cioè 298 K) emette una potenza $I \approx 8 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$. Quindi il rapporto tra i due risultati sarà: $\frac{10^{10}}{8 \cdot 10^9} = 0,125 \cdot 10 \approx 1,3$
La persona emette più del tavolo a temperatura ambiente a parità di superficie.
3. Un corpo ipotetico a temperatura di 0 K non emetterebbe radiazione termica.
In realtà nessun corpo può raggiungere lo zero assoluto. La domanda serve solamente per vedere che gli studenti abbiano chiaro il fatto che la temperatura e l'emissione sono legate.

Si pone la seguente domanda: “Ogni corpo emette radiazione termica come conseguenza della propria temperatura, si dice che irraggia, in quali occasioni ci accorgiamo dell'irraggiamento secondo voi? Pensate a quando siete

all'aperto in una giornata estiva.”

*** Nel quotidiano ci si rende conto dell'irraggiamento quando si è sotto al Sole e viene trasferita energia alla nostra pelle con conseguente aumento di temperatura. Tale fenomeno è percepito come una sensazione di calore sulla pelle.

Si passa poi all'applicazione della relazione trovata ad altri materiali, tramite l'utilizzo della termocamera.

L Nonostante nel Laboratorio PLS siano già stati fatti alcuni esperimenti sul comportamento dei materiali (metallo, vetro, acqua) se visti alla termocamera, si ritiene opportuno rivedere meglio in un contesto scolastico questi esperimenti.

Ad ogni gruppo si distribuiscono due schede didattiche uguali (⇒ Appendice pagina 136) e 4/5 materiali (quadrantini 100x100 mm di materiali diversi), in modo casuale.

Punto di Attenzione Sull'interfaccia della termocamera è opportuno che sia presente la scala cromatica dei colori e un puntatore che indichi una temperatura.

Dalle esperienze precedenti gli studenti hanno visto che la termocamera rileva l'intensità irraggiata dai corpi, dipendente dalla quarta potenza della temperatura del corpo stesso. Non dovrebbe stupire, quindi, il fatto che il puntatore e la scala indichino una temperatura.

Con la termocamera gli studenti inquadrano ognuno di questi materiali a temperatura ambiente e vedono la temperatura segnata sul visore, spostando il puntatore sull'immagine dell'oggetto desiderato. Si chiede loro di misurare la stessa grandezza con un termometro.

Una volta compiute le misurazioni, i quadrantini si scambiano, in modo da permettere a ogni gruppo di osservare tutti i materiali a disposizione.

Si consiglia di inserire i dati in una delle due schede in ⇒ Appendice a pagina 136 affinché si possano poi confrontare.

In seguito si chiede agli studenti di mettere gli oggetti sulla piastra (a potenza intermedia), ponendoli all'interno del pentolino, per circa una decina di minuti. Una volta tolti dal contenitore i materiali e posti su un piano, si prenda nota, nella tabella della seconda scheda didattica (⇒ Appendice pagina 136), della temperatura segnata sulla termocamera e sul termometro. Alla fine si pone la seguente domanda agli studenti: “Avete trovato delle dif-

ferenze tra i vari materiali?”

e si propone una discussione e un confronto tra i gruppi dei risultati trovati.

Punto di Attenzione Per velocizzare la procedura di riscaldamento si consiglia di mettere a scaldare i materiali durante la fase precedente di *Explain*.

Punto di Attenzione Dopo aver tolto i materiali dalla sorgente di calore, è importante la velocità nel compiere le operazioni di misura, poiché tendono a raffreddarsi molto velocemente. Inoltre una misura con i due strumenti (termocamera e termometro) il più possibile contemporanea della temperatura garantisce un confronto migliore e più veritiero tra i due sistemi di misurazione.

Questo accorgimento è fondamentale se si vuole trovare una differenza sostanziale di temperatura, ad esempio, per il polistirolo.

Si vedrà che la termocamera per molti oggetti restituisce una temperatura comparabile con quella misurata dal termometro. L'unica differenza la fanno i materiali lucidi, come i metalli, per i quali la termocamera dà una temperatura minore di quella misurata con il termometro e di quella percepita al tatto (soprattutto dopo averli riscaldati).

*** Il motivo è che i metalli, soprattutto se lucidi, hanno un coefficiente di riflessione molto alto e l'emissività molto bassa. Ma questo gli studenti lo scopriranno nelle attività successive.

Punto di Attenzione Se i metalli sono ossidati, il loro comportamento è simile ai materiali non metallici. La temperatura misurata con la termocamera e con il termometro, quindi, sarà molto simile.

3.5 Explain - Parte 2

Si può proporre agli studenti una discussione su quanto visto nella fase precedente, per trovare un'interpretazione del fenomeno osservato, in base a quanto ipotizzato nella fase di *Explain* precedente. *** Una possibile interpretazione è la seguente: La potenza emessa per unità di superficie non dipende solamente dalla temperatura di un corpo, ma anche da un'altra proprietà che è diversa in base al materiale di cui è composto il corpo stesso. In

particolare materiali metallici emettono una potenza per unità di superficie minore rispetto a materiali non metallici.

3.6 Explore - Parte 2

L La Legge di Stefan-Boltzmann potrebbe già essere stata introdotta nel Laboratorio PLS, così come il termine di emissività. Si può allora proporre agli studenti il seguente calcolo. Nell'esperienza precedente si è notata una variazione sostanziale nei materiali metallici.

A questo punto può essere utile introdurre agli studenti il termine di 'emissività'. Si può mostrare loro la tabella con indicate le diverse emissività dei materiali utilizzati nell'attività precedente (\Rightarrow Appendice pagina 88) oppure una generica tabella delle emissività, con indicati molti materiali, e vedere se le differenze riscontrate nella tabella del laboratorio sono simili. In rete si trovano molte tabelle, una tra le tante all'indirizzo: https://www.pointvet.it/web/media/libri_pvi/Tab_emissivita.pdf Potrebbe essere utile chiedere agli studenti una valutazione delle principali caratteristiche delle tabelle.

*** Nella tabella si vede che molti materiali hanno emissività intorno a 0.90, pochi (soprattutto metalli), invece, hanno valori più bassi.

Proporre agli studenti questa valutazione: "Ricordando la regola ART, se la riflettanza nel FIR dell'alluminio, ad esempio, è pari a 0.90, come risulteranno le altre grandezze?"

*** La trasmittanza sarà pari a 0, perché il materiale è opaco alla radiazione. La regola ART allora diventa:

$$A_{IR} + R_{IR} + T_{IR} = 1 \quad \Rightarrow \quad A_{IR} + 0.90 + 0 = 1 \quad \Rightarrow \quad A_{IR} = 0.10$$

L'assorbanza risulta pari a 0.10, ovvero il 10% della radiazione incidente viene assorbita dal materiale.

Guardando la tabella di emissività dell'alluminio si può notare che il valore trovato per l'assorbanza ad una certa lunghezza d'onda è uguale a quello dell'emissività.

*** Tale considerazione equivale alla legge di Kirchhof per l'irraggiamento² per cui:

$$A_\lambda = \epsilon_\lambda \quad (3.2)$$

Se la legge non fosse più valida, ad esempio se l'assorbanza fosse maggiore dall'emissività o viceversa, non ci sarebbe più l'equilibrio e il corpo si riscalderebbe o si raffredderebbe.

Si può completare la relazione trovata in precedenza in questo modo:

$$I = \epsilon \sigma T^4 \quad (3.3)$$

in cui σ è la costante di proporzionalità, detta di Stefan-Boltzmann, che vale $5.67 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} K^{-4}]$ ed ϵ è il termine di emissività.

La relazione 3.3 è chiamata Legge di Stefan-Boltzmann.

Domanda: "Cosa vuol dire che un corpo ha emissività pari a 1? Secondo voi ci sono oggetti quotidiani con questa caratteristica?"

*** In base alla legge con l'equazione 3.2, l'assorbanza dell'oggetto con emissività 1 è pari a 1, quindi assorbe tutta la radiazione incidente, senza trasmetterla o rifletterla per la legge ART. Nel visibile questo si tradurrebbe in un oggetto di colore nero. Senza approssimazioni non esistono nella realtà oggetti con emissività e assorbanza pari a 1, poiché anche oggetti che vediamo neri riflettono o trasmettono altre lunghezze d'onda. Gli studenti potrebbero non arrivare a quest'ultima conclusione³, ma ritenere un qualsiasi oggetto nero come un assorbitore ed emettitore perfetto. In questo caso riproponendo l'esperimento visto in precedenza con il policarbonato, in cui esso appare nero nel visibile, ma trasparente nel vicino infrarosso, si mette

²Secondo la legge di Kirchhof il rapporto tra l'emittanza spettrale e l'assorbimento spettrale relative a un corpo è uguale a una funzione universale, dipendente solamente della temperatura del corpo e della lunghezza d'onda di riferimento. La funzione non dipende, invece, dalla natura del materiale preso in esame, nonostante i due termini di emissione e assorbimento separatamente lo siano. La relazione vale per corpi in equilibrio termico, che non variano la loro temperatura in seguito a scambi di energia e si esprime: $\frac{M_{\lambda,em}(T)}{\alpha_\lambda} = M_{\lambda,cn}(T)$ in cui $M_{\lambda,em}(T)$ è l'emittanza di una sorgente e si misura in $[W \cdot m^{-2} \mu m^{-1}]$, mentre α_λ è l'assorbanza spettrale, grandezza adimensionale e $M_{\lambda,cn}$ è l'emittanza totale di un corpo ideale.

³Sulla base di risposte a questionari e di ricerche in letteratura, in cui i ragazzi identificano il corpo nero (e le sue proprietà) con un oggetto di colore nero nel visibile

in crisi questa credenza. Oppure basti pensare ad alcuni vestiti che nel visibile sono neri, ma appaiono bianchi nel vicino infrarosso, perché riflettono la radiazione. Questi sono tutti esempi di corpi assorbitori nel visibile, ma riflettenti in altre lunghezze d'onda, quindi non corpi neri perfetti. Da qui la necessità di specificare la lunghezza d'onda di emissione nel termine A_λ e nel termine ϵ_λ .

Vengono poste su un tavolo delle scatole cubiche di materiale diverso a cui è stata rimossa la parete rimovibile (KIT #5). Si chiede, poi, ai ragazzi di spiegare in base alla legge appena introdotta (equazione 3.3) cosa succederebbe se si inquadrassero con la termocamera le scatole.

*** In base a quanto visto in precedenza, gli studenti possono intuire che le scatole, essendo di materiale diverso, avranno emissività diverse. A grandi linee potranno dire che la termocamera assocerà una temperatura minore rispetto a quella misurata con il termometro alle scatole di metallo, mentre per le scatole non metalliche in molti casi indicherà una temperatura molto simile a quella misurata con il termometro.

Gli studenti sono poi invitati a inquadrare le scatole con la termocamera.

*** Lo strumento mostrerà che quanto è stato previsto in precedenza è veritiero.

Si aggiunge la parete mancante alle scatole, che presenta un foro centrale, e si pone nuovamente agli studenti la domanda precedente: “Cosa vi aspettate di vedere con la termocamera?”

Dopo aver dato le loro risposte, gli studenti possono inquadrare le scatole con la termocamera.

Inoltre si può mostrare agli studenti l'immagine in \Rightarrow Appendice a pagina 149 in cui si vede una scatola di alluminio fatta scaldare e vista poi con la termocamera.

Appare evidente come la zona del foro sia molto luminosa, ed emetta molto di più rispetto all'esterno della scatola. Inoltre la potenza emessa dal foro di ogni scatola è la stessa.

Punto di Attenzione Se è a disposizione un fornello, l'esperimento può essere riproposto anche in classe, mettendo a scaldare solo le scatole metalliche, in un ambiente ben areato. Si consiglia di raggiungere una temperatura pari a circa 60/80°C e di fare la ripresa abbastanza velocemente. Bisogna

inoltre stare attenti a evitare eventuali riflessioni speculari sulla scatola nel momento in cui si osservano alla termocamera.

3.7 Explain - Parte 3

Si chiede agli studenti di proporre una spiegazione in base al confronto tra quanto predetto e quanto osservato con la termocamera. * * * Sarebbe opportuno che gli studenti proponessero una spiegazione simile alla seguente: Cavità, anche se costituite esternamente da materiali a bassa emissività (un metallo) si comportano come se fossero indipendenti dal tipo di materiale. Nel foro, quindi, l'emissività è trascurabile, pari a 1, in modo da scrivere il potere emesso totale per unità di superficie in questo modo:

$$I = \epsilon\sigma T^4 \quad [W/m^2]$$

3.8 Approfondimento - Come funziona la termocamera

L Nel Laboratorio PLS è già stato spiegato come funzionano le termocamere. Di seguito due esercizi che, invece, non sono stati proposti.

Dopo aver spiegato brevemente i principi su cui si basa la termocamera per compiere la misura⁴, ad esempio il funzionamento dei microbolometri si chiede agli studenti: “Come fa, secondo voi, la termocamera a sapere la temperatura di un oggetto se misura solo la potenza emessa?”

⁴La termocamera è in grado di associare una temperatura ai corpi inquadrati tramite un algoritmo, partendo dalla loro potenza emessa rivelata. Per poter restituire valori veritieri è stata calibrata in termini di radiazione emessa da un corpo nero a temperatura nota. Si basa sulla quantità di radiazione (in questo caso I), assorbita da microbolometri, che danno un certo segnale in base alla variazione di lunghezza delle resistenze. I microbolometri sono elementi costituiti da una resistenza sensibile alla temperatura e hanno lo stesso ruolo che giocano i *pixel* nelle telecamere visibili. Se non viene appositamente calibrata, la termocamera applica di *default* a ogni oggetto una emissività pari a un certo valore (tra 0.9 e 1). Da questa impostazione nasce, per alcuni materiali di emissività minore, il disaccordo tra la temperatura misurata da questo strumento e dal termometro. Materiali comuni (legno, la plastica, la pelle) hanno emissività molto alte, vicine al valore di *setting*. Invece materiali metallici, per la loro caratteristica lucidità, hanno emissività più bassa. La radiazione rivelata è somma di radiazione emessa dal corpo e di radiazione riflessa (radiazione ambientale o irradianza di una sorgente). La termocamera è solitamente utilizzata nell'industria per rilevare la temperatura dei materiali. Nel tutorial sarà, invece, utilizzata con uno scopo diverso, ovvero per misurare la potenza emessa da un materiale e per identificarne le differenze con altri materiali. Infatti per conoscere la temperatura esatta di un corpo, rilevando la radiazione emessa da esso, bisogna conoscere innanzitutto le condizioni ambientali in cui si trova e poi bisogna conoscere l'andamento della sua emissività ϵ in funzione della lunghezza d'onda di osservazione. Le misurazioni possono essere compromesse da effetti ambientali, quali: riflessioni da sorgenti esterne che incidono sul corpo preso in esame (detta radiazione di background) e fenomeni di assorbimento, emissione o diffusione da parte dell'atmosfera. Il primo effetto è di disturbo soprattutto a temperature basse, per questo le misure termometriche è meglio compierle su campioni riscaldati, per diminuire il contributo della radiazione ambientale. In alternativa, conoscendo la radianza emessa da una certa sorgente, è possibile impostare lo strumento di misura in modo che sottragga tale radianza riflessa dalla radianza rivelata, per ottenere il valore emesso dal corpo. Il secondo effetto avviene perché tra lo strumento di misura e il corpo da misurare vi è una colonna di aria, che può assorbire, emettere o diffondere la radiazione. Le correzioni per questi effetti in condizioni normali si trovano di *default* nelle impostazioni dello strumento. Per condizioni anomale, ad esempio composizione o concentrazioni diverse di gas nell'aria, è necessario cambiare manualmente tali impostazioni e modificare alcuni parametri.

*** La temperatura si ricava dalla legge di Stefan-Boltzmann.

In realtà l'algoritmo con cui la termocamera misura la temperatura dopo aver rilevato la potenza emessa non utilizza la legge di Stefan-Boltzmann, ma per non entrare troppo nei dettagli si suggerisce di tralasciare con gli studenti questa precisazione.

In seguito si può proporre la domanda: "Se so la temperatura di un oggetto misurata con il termometro, la sua temperatura misurata dalla termocamera e l'emissività di *setting* della termocamera, come faccio a sapere l'emissività del materiale?"

*** La soluzione deriva dal seguente calcolo:

La temperatura misurata dalla termocamera so che posso scriverla, dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$T_{termocamera} = \sqrt[4]{\frac{I_{vera}}{\epsilon_{setting}\sigma}} \quad (3.4)$$

Dove $\epsilon_{setting}$ rappresenta l'emissività impostata a priori sulla termocamera, solitamente uguale a 1. La potenza emessa che arriva alla termocamera, però, è quella reale emessa dall'oggetto ed è indicata con I_{vera} . Secondo la legge di Stefan-Boltzmann essa vale:

$$I_{vera} = \epsilon_{vera}\sigma T_{vera}^4 \quad (3.5)$$

Quindi l'equazione 3.4 diventa sostituendo 3.5:

$$T_{termocamera} = \sqrt[4]{\frac{\epsilon_{vera}\sigma T_{vera}^4}{\epsilon_{setting}\sigma}} \quad (3.6)$$

Semplificando e portando fuori dalla radice quarta si ottiene:

$$T_{termocamera} = T_{vera} \sqrt[4]{\frac{\epsilon_{vera}}{\epsilon_{setting}}} \quad (3.7)$$

Da questa equazione si ricava la ϵ_{vera}

$$\epsilon_{vera} = \frac{T_{termocamera}^4}{T_{vera}^4} \epsilon_{setting} \quad (3.8)$$

Adesso dovrebbe essere più chiaro agli studenti come la potenza emessa dai corpi è legata alla loro temperatura. Ricollegandosi allo Spettacolo si può chiedere agli studenti di spiegare l'affermazione del Ricerc-attore: “[La termocamera] Serve per misurare a distanza la temperatura”.

T

*** Questa affermazione vale in buona approssimazione per molti materiali, ma non per tutti. Dipende, infatti, da un altro parametro legato al tipo di materiale. Ad esempio la termocamera riesce a misurare in modo corretto la temperatura dei mammiferi, come i conigli, e dei materiali non lucidi come legno, tessuto, plastica, metallo opaco e altri.

Esercizio: Una caffettiera di alluminio dopo esser stata utilizzata ha una temperatura misurata con il termometro di 150°C , mentre la termocamera le attribuisce una temperatura di 20°C . La termocamera ha impostato un'emissività pari a 0.90. Quale sarà l'emissività vera della caffettiera?

*** *Soluzione*

Si sostituiscono nell'equazione 3.8 i valori:

$$T_{vera} = 150 + 273 = 423K$$

$$T_{termocamera} = 20 + 273 = 293K$$

$$\epsilon_{setting} = 0.90$$

Si ottiene:

$$\epsilon_{vera} = \frac{293^4}{423^4} \cdot 0.90 = 0.21 \quad (3.9)$$

Le tabelle di emissività⁵ indicano un valore di emissività per l'alluminio indicativamente tra 0.10 e 0.20, quindi il risultato ottenuto è coerente con la letteratura.

3.9 Explore - Parte 3

In questa fase si vedono altri spettri di emissione di oggetti ritenuti corpi ideali (con emissività pari a 1) e si cercano altre leggi per caratterizzarli.

⁵Ad esempio vedere la tabella al sito http://www.pointvet.it/web/media/libri_pvi/Tab_emissivita.pdf

Prima di proporre l'attività è bene spiegare agli studenti cosa sia rappresentato e come funzioni la simulazione. Di seguito una breve guida.

Funzionamento dell'applicazione

L'applicazione necessita di Flash Player per poter funzionare. Una volta avviata, appare una schermata nera con un grafico ed alcuni comandi, come si vede in Figura 3.2. Il grafico ha sulle ascisse la lunghezza d'onda con uni-

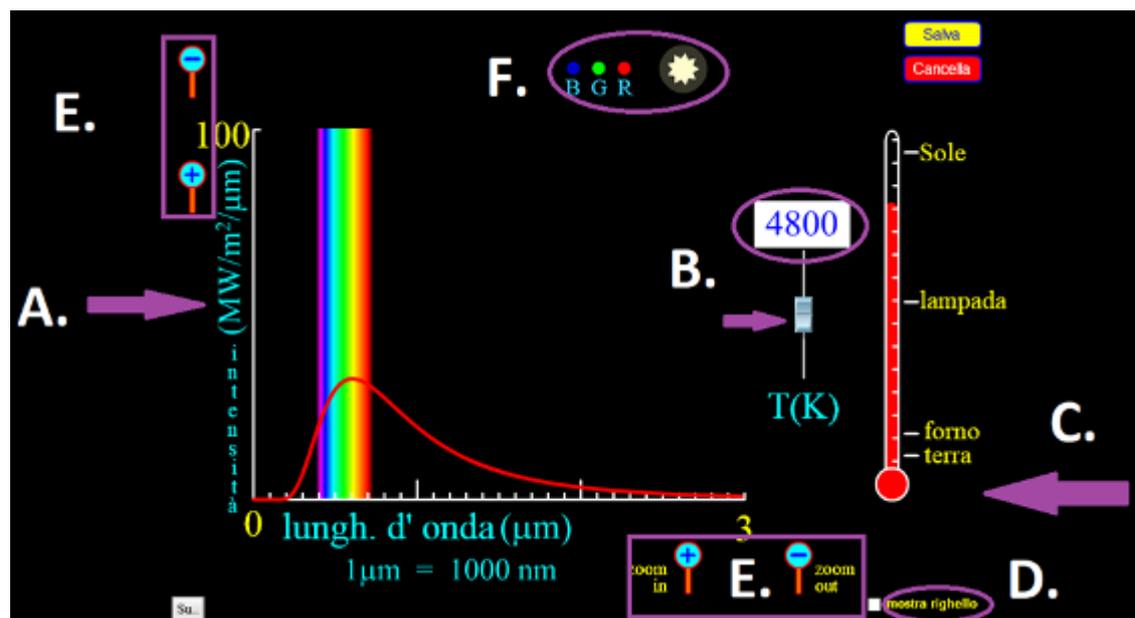


Figura 3.2

Schermata iniziale della simulazione al sito del PHET Colorado con indicati tramite lettere bianche e cerchi o frecce di colore viola i principali comandi che si utilizzeranno nell'attività e che gli studenti dovranno sapere usare.

tà di misura dei micron (μm), mentre sulle ordinate ha l'intensità misurata in $MW/m^2/\mu m$ (punto A.). Quest'ultima grandezza indica la potenza emessa da un metro quadro di superficie dell'oggetto preso in considerazione ed in un certo intervallo di lunghezza d'onda (μm), poiché a lunghezze d'onda diverse può avere differente emissione. Infatti l'intensità deriva dalla funzione di Planck calcolata a ogni intervallo di lunghezza d'onda pari ad $1\mu m$. Sulla destra della schermata (punto B.) si può variare la temperatura in Kelvin dell'oggetto sia muovendo in verticale il cursore, sia digitando nel rettangolo bianco la temperatura desiderata. All'estrema destra (punto C.),

la barra, simile a una colonna di mercurio del termometro, offre la possibilità di confrontare la temperatura scelta con quella di altri oggetti conosciuti (il Sole, la Terra, un forno e una lampada a incandescenza), oltre che di trovare le grandezze relative a questi elementi.

In basso a destra (punto D.) vi è una casella di controllo con la scritta ‘mostra righello’. Cliccando la casella appare un righello graduato utile per definire meglio a quale valore di lunghezza d’onda si trova il picco di emissione.

Ai margini degli assi cartesiani (punto E.) i comandi ‘zoom in’ e ‘zoom out’ servono per scalare il grafico in modo da vedere meglio la funzione.

In alto (punto F.) in corrispondenza dei valori RGB è indicato il colore assunto dall’oggetto se ha una certa temperatura ed emette in una certa lunghezza d’onda di picco.

Punto di Attenzione Gli input numerici possono essere anche valori decimali (la separazione deve essere un punto).

La simulazione ha dei limiti nei valori delle grandezze. Il cursore della temperatura a destra (punto B.) raggiunge come valore massimo quello di 9255 K ed un valore minimo di 300 K, ma, inserendo i valori da tastiera nel rettangolo bianco, i limiti sono molto più estesi. Il limite inferiore della temperatura è di 0.1 K, quello superiore non è definito. E’ importante notare, però, che più il numero inserito è grande, più la simulazione è lenta e il risultato non è definito. Si consiglia, quindi, di non superare l’ordine di grandezza di 10^5 .

La lunghezza d’onda massima raggiunta dalla simulazione è di 98304 μm , andare oltre provoca il blocco dell’applicazione. Il valore minimo, invece, è di 0.375 μm , valori più piccoli diventano illeggibili.

Ogni gruppo dovrebbe avere a disposizione un computer con la simulazione del PHET, una scheda didattica (\Rightarrow Appendice a pagina 140) e una scheda con lo spettro elettromagnetico (\Rightarrow Appendice). Il tempo consigliato per rispondere alle domande è di 25 minuti.

Dibattito in classe a partire dall’ultima domanda: “Perché il Sole si vede di colore giallo nonostante il suo picco di emissione sia nel verde?”

Soluzione della tabella \Rightarrow Appendice a pagina 142.

La fase di *Explore*-Parte 3 si può concludere riproponendo agli studenti una scena dello Spettacolo, di cui il copione \Rightarrow Appendice pagina 139. Il brano è preso da un discorso fatto dal Ricerc-attore riguardo alla radiazione cosmica di fondo, in cui illustra l'immagine in Figura 3.3 che si trova al sito dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) nella sezione riservata alla missione Planck: <http://sci.esa.int/planck/60500-plancks-view-of-the-cosmic-microwave-background/>

* * * Storicamente dalla rilevazione della CMB (*Cosmic Microwave Background*) e dalla sua trattazione come emissione di picco di un corpo nero, è stata ricavata una temperatura di 3 K. Gli studenti hanno ricavato la legge dello spostamento di Wien. Possono quindi ricollegare quanto trovato a questo argomento astrofisico.

T * * * Nel testo vi sono concetti che potrebbero non esser stati trattati a scuola. Ad esempio il concetto di isotropia e anisotropia, che potrebbero essere introdotti velocemente agli studenti. Riguardo alle fluttuazioni in temperatura si può dire che le macchioline arancioni rappresentano punti più caldi, mentre quelle azzurre e blu indicano zone più fredde.

Si può mostrare agli studenti il video della missione Planck al sito: <http://sci.esa.int/planck/43109-mapping-the-cmb-with-planck-hd-version/>. Si vede nel video come il satellite Planck abbia generato l'immagine in Figura 3.3.

* * * L'immagine finale mostrata nel video è leggermente diversa da quella in Figura 3.3, i colori sono differenti e vi è una striscia rossa orizzontale che prende tutta la larghezza della figura. I colori diversi sono dovuti a una diversa scala cromatica utilizzata per generare l'immagine a falsi colori, la striscia, invece, rappresenta il piano della Via Lattea.

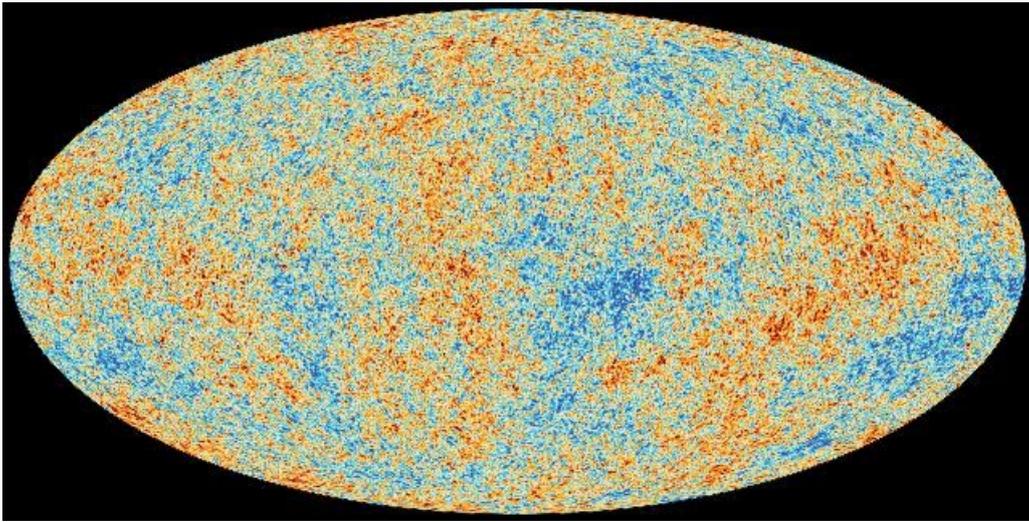


Figura 3.3

Radiazione Cosmica di Fondo misurata dal satellite Planck dell'ESA

[Credits: ESA/Planck Collaboration

[https:](https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/03/Planck_CMB)

[//www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/03/Planck_CMB\]](https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/03/Planck_CMB)

3.10 Approfondimento: Perché non ci sono stelle verdi

T Nel caso la classe avesse visto lo Spettacolo, tale problema è già stato trattato. Si può rinfrescare la memoria ai ragazzi tramite il video (VIDEO 4) in cui è riproposta la scena e la spiegazione. Nella scena vengono accese contemporaneamente una luce di colore rosso e una di colore verde. La somma additiva dà come risultato una luce gialla. E' aggiunta, poi, anche la luce blu in modo da ottenere una luce bianca. Si può riproporre l'esperimento in classe, descritto di seguito.

Si può proporre alla classe un esperimento per vedere come si comportano le stelle⁶.

⁶Il fenomeno dipende dallo spettro che compone la luce definita 'bianca' e dalla capacità di percepire i colori degli occhi. Il colore verde è associato a una lunghezza d'onda intermedia tra la radiazione associata al rosso (650-720 nm, valori presi dal libro: "The Physics of Music and Color" di L. Gunther) e quella associata al blu (455-490 nm), se un oggetto ha un

Serviranno le tre luci (rossa, verde e blu) del KIT #1 per questo esperimento. Mostrando lo spettro del Sole, si accende la luce verde (in analogia con il picco di emissione del Sole) e la si proietta verso uno schermo bianco (o nero) oppure una parete. Poi si accende la luce rossa e infine quella blu, poiché il Sole emette radiazione visibile corrispondente anche a quelle lunghezze d'onda.

Sullo schermo apparirà una luce gialla (somma additiva di rosso e verde) e poi una luce bianca quando accesa anche la luce blu.

3.11 Approfondimento - L'Effetto Serra

Legato al concetto di radiazione termica vi è un argomento di dibattito quotidiano, ovvero il problema dell'Effetto Serra.

Essendo un tema di attualità molto sentito in questi anni, si consiglia di compiere questa attività in classe.

Le seguenti informazioni sono espresse agli studenti: la radiazione termica del Sole viene riflessa (circa il 30%) da nubi, ghiaccio, neve e sabbia, oppure assorbita (il restante 70%) dall'atmosfera, dai mari e dalle terre emerse.

In base a quanto visto precedentemente, la radiazione solare assorbita dalla superficie terrestre e da oggetti, o esseri viventi, contribuisce ad aumentarne la loro temperatura, in funzione del raggiungimento di una temperatura di equilibrio. Questi elementi emettono a loro volta radiazione termica (principalmente nel lontano infrarosso) che si propaga nell'atmosfera e raggiunge lo spazio.

Nell'atmosfera vi sono gas (detti gas serra) con proprietà tali da riuscire ad assorbire la radiazione diretta verso l'esterno dell'atmosfera. L'assorbimen-

picco di emissione nella lunghezza d'onda del verde (circa 500 nm) vuol dire che avrà delle code più o meno accentuate di intensità non trascurabile anche nella banda spettrale del rosso e del blu. La luce che proviene dall'oggetto non è quindi monocromatica, come la luce di un laser verde, ma è formata da uno spettro di lunghezze d'onda. Nel caso del Sole, la radiazione è emessa a intensità maggiore nella regione del verde, ma anche nella regione del rosso e in parte anche nella regione del blu, per questo motivo viene percepito di colore bianco, risultato della somma additiva dei colori spettrali verde, rosso e blu, compiuta dai nostri occhi. Va sottolineato che il laser precedentemente citato non fa parte di questo argomento, poiché la sua non è emissione termica, ma dovuta ad altri meccanismi.

to e la conseguente riemissione della radiazione da parte dei gas, determina meccanismi per cui aumenta la temperatura globale dell'atmosfera.

Grazie a questo effetto si è sviluppata la vita sulla Terra.

Oggi si parla molto dell'Effetto Serra in termini negativi, perché l'attività umana sta incrementando la concentrazione di gas serra nell'atmosfera e la temperatura globale sta aumentando.

Per un approfondimento in senso didattico di questo argomento si rimanda al lavoro di G. Tasquier et al. "Chapter 2 - *Conceptual Path on Climate Change*" preso da "Leading secondary school students to face the disciplinary, epistemological and societal challenges of climate change: design and analysis of multi-dimensional teaching/learning experiences" in cui sono proposte attività per gli studenti. In particolare è proposta la costruzione di un modello di Effetto Serra per spiegare perché e come cambia la temperatura se varia la composizione dell'atmosfera.

3.12 Approfondimento - Cenni di Astrofisica e la radiazione di corpo nero

Nello Spettacolo è stato introdotto in una scena il Diagramma di Hertzsprung-Russell⁷ e volutamente è stato commesso un errore nella spiegazione del grafico. In ⇒ Appendice a pagina 138 si trova il brano tratto dallo Spettacolo in cui parlano del diagramma e la sua rappresentazione. Si consiglia di proporre agli studenti la lettura del copione e trovare nuovamente l'errore e riflettere sul ribaltamento di prospettiva che ne deriva.

L'errore commesso è nella frase: “[...] le stelle giganti azzurre con le temperature più basse, qua quelle come il nostro sole che emette luce giallastra e alle temperature più alte osserviamo chiaramente le giganti rosse”.

T Quindi secondo il Ricerc-attore stelle più calde appaiono di colore rosse, mentre le più fredde appaiono blu, quando in realtà è il contrario. Può essere fuorviante il fatto che la scala delle temperature sia decrescente spostandosi verso la destra del grafico.

L'errore si lega alle conoscenze di senso comune che derivano dalla nostra esperienza sulla Terra in cui per l'immaginario collettivo il freddo è associato al colore blu e il caldo al colore rosso, si pensi, ad esempio, ai rubinetti dei lavandini. Inoltre si ha esperienza di oggetti ad alta temperatura che assumono una colorazione rossa, come il fuoco, le braci, il metallo incandescente. Nel mondo astrofisico questo non vale più, poiché le temperature sono molto maggiori (o minori) di quelle sperimentate sulla Terra nella vita quotidiana.

Da qui nasce il ribaltamento di prospettiva: oggetti che sulla Terra sono ritenuti molto caldi, nello spazio sarebbero tra gli oggetti più freddi. Anche il Sole è tra le stelle più fredde se comparata con le giganti blu.

E' posta agli studenti la domanda: “Si è visto che i corpi emettono, sono sorgenti, in una certa banda spettrale, ad esempio una persona emette nel FIR, una lampadina a incandescenza nel visibile, ecc. Il Sole, però, posso vederlo anche in altre lunghezze d'onda⁸, perché?”

A sostegno di questa affermazione si consiglia di far vedere agli studenti un

⁸I rivelatori astronomici rilevano solo la radiazione emessa, non illuminano gli oggetti osservati. Le immagini prese, quindi, sono da attribuire a emissioni solari.

video del *Solar Dynamics Observatory* della NASA dal titolo “Jewel Box Sun” all’indirizzo: <https://www.youtube.com/watch?v=kS57VH3QN1g&feature=youtu.be>.

In Figura 3.4 sono rappresentate le undici immagini utilizzate nel filmato, con rispettiva lunghezza d’onda di acquisizione. In alto a sinistra l’immagine del Sole nel visibile.

Queste immagini raccontano che il Sole non emette solo in una banda spet-

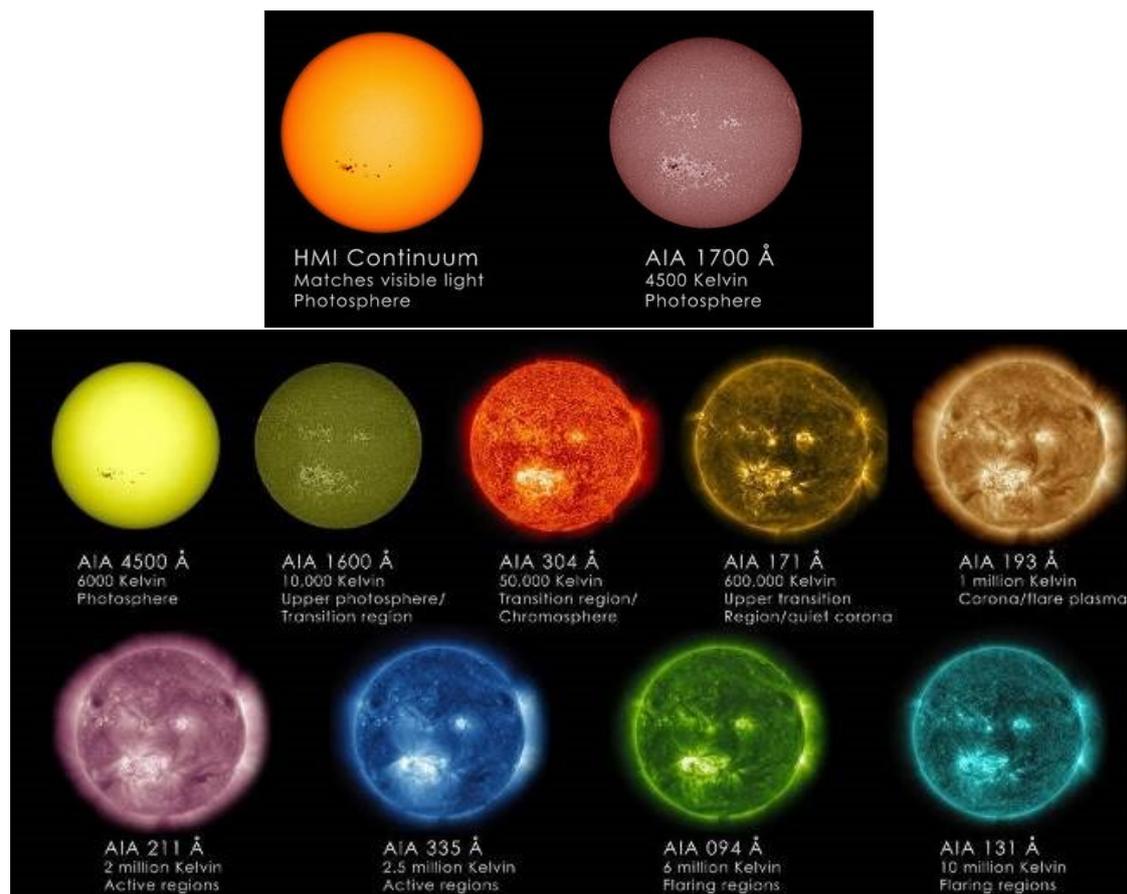


Figura 3.4

Undici immagini del Sole a lunghezze d’onda diverse, che vanno dal visibile e all’ultravioletto. Ogni immagine è correlata ad una zona della superficie o dell’atmosfera solare e ha associata una certa temperatura. Le immagini sono rese più significative attribuendo loro un colore (ad esempio il verde indica la lunghezza d’onda di 9.4 nm, nel lontano ultravioletto).

[Immagine presa dal sito di SDO NASA:

<https://www.nasa.gov/content/goddard/how-sdo-sees-the-sun>]

trale (quella visibile), ma emette uno spettro di radiazione esteso a più lunghezze d'onda. Per questo nella fase di *Engage* dell'Attività 2 è stato possibile usare le telecamere UV solamente con l'illuminazione solare.

*** Nelle attività seguenti si vedranno i dettagli della curva di emissione solare.

Si introduce agli studenti la funzione matematica che descrive l'intensità, in questo caso solare, a una certa lunghezza d'onda, ovvero la funzione di Planck. E' necessario sottolineare, però, che alla base vi è un'ipotesi formulata a priori, ovvero che il Sole si comporta come un corpo ideale, con emissività, e quindi assorbimento, uguale a 1, detto anche corpo nero. La legge si è scelto di presentarla in funzione della lunghezza d'onda e non della frequenza della radiazione:

$$L_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1} \quad (3.10)$$

dove T è la temperatura del corpo (del Sole in questo caso), λ è la lunghezza d'onda a cui si osserva, k_B è la costante di Boltzmann che vale $1.380 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$. La costante h è detta costante di Planck ($6.626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$) e c indica la velocità della luce nel vuoto ($\sim 3 \cdot 10^8 m/s$).

Nello Spettacolo sono proposte due immagini della galassia di Andromeda (M31), una nell'ultravioletto data da una somma di immagini prese a lunghezze d'onda di: 192.8 nm, 224.6 nm, 260 nm (Figura 3.7) e l'altra nell'infrarosso (lontano) a lunghezza d'onda di 24 μm (Figura 3.6). L'insegnante può far notare agli studenti che le immagini sono in falsi colori.

Lo spettro di emissione della galassia è diverso da quello di una stella, approssimabile ad un corpo ideale, ci si chiede, allora, cosa determini la sua emissione a lunghezze d'onda diverse. La domanda può essere posta agli studenti, insieme alla richiesta di un confronto tra le due immagini e l'immagine visibile (Figura 3.5) di Andromeda.

Le immagini si possono prendere dal sito: <https://apod.nasa.gov/apod/ap101027.html> (immagine UV comparata all'immagine ottica) e <https://apod.nasa.gov/apod/ap060609.html> (immagini infrarossa).

*** Le differenze che si notano maggiormente sono:

T

- Nell'immagine visibile l'emissione più evidente è data dalle stelle e dal centro galattico.
- Nell'ultravioletto i punti più luminosi (circa 20 000 sorgenti) sono in corrispondenza di stelle di temperatura abbastanza alta da emettere in questa banda. Nei bracci della galassia ci sono molte sorgenti di UV invisibili nell'ottico. Alcune stelle sono più luminose rispetto al visibile (un esempio sul lato sinistro dell'immagine), mentre altre sono meno luminose (in basso sulla destra).
- Nell'infrarosso i bracci che nel visibile appaiono scuri sono forti emettitori. La causa di questa diversità è la presenza della polvere, opaca nel visibile, ma emettitrice di radiazione infrarossa lontana. Altre sorgenti nell'infrarosso sono stelle vecchie. I punti più luminosi (in alto ed in basso) sono due galassie compagne di Andromeda.

L'emissione di una galassia dipende, quindi, da più elementi, le stelle sono le principali (Andromeda ha circa 10^{12} stelle), ma è necessario tener conto anche della polvere, che si comporta anch'essa come corpo nero. Le stelle, però, contribuiscono maggiormente alla massa ed all'emissione nella banda visibile della galassia.

Si può proporre agli studenti un'immagine nel visibile della Via Lattea, in Figura 3.8, che dovrebbe essere molto luminosa per la presenza delle stelle. Si nota, invece, che l'immagine appare oscurata in vari punti.

T * * * In letteratura [20] si trova che la natura di questo oscuramento non è chiara agli studenti. Alcuni pensano sia causato dalla materia oscura, quando, invece, la causa principale è la polvere, presente in grande quantità nelle galassie. In base a quanto trovate precedentemente per Andromeda dovrebbero essere in grado di spiegare questo fenomeno.

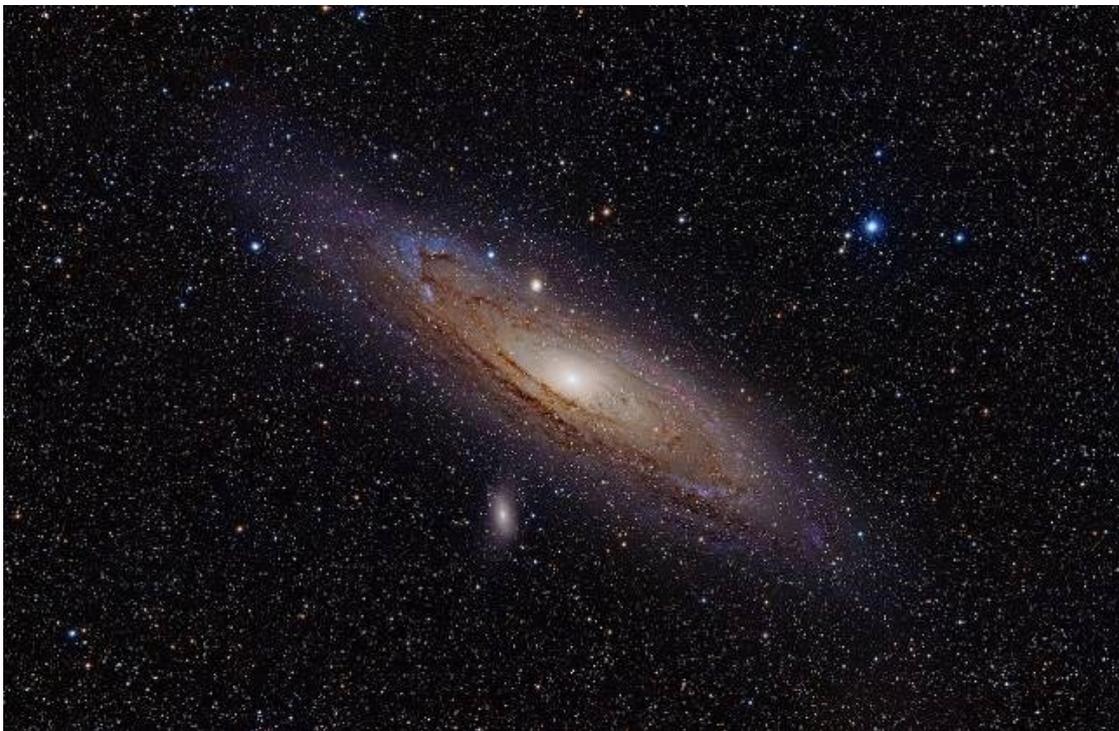


Figura 3.5

Immagine della Galassia di Andromeda (M31) presa nella banda ottica.

[Immagine presa da Wikipedia

https://it.wikipedia.org/wiki/Galassia_di_Andromeda]

3.13 Collegamenti Matematici -

Agli studenti possono esser proposti i seguenti esercizi.



Figura 3.6

Immagine della Galassia di Andromeda (M31) presa nella banda infrarossa lontana ad una lunghezza d'onda di $24 \mu\text{m}$ dal fotometro Spitzer.

[Credits: Telescopio Spaziale Spitzer

<http://www.spitzer.caltech.edu/images/1634-ssc2006-14a1-Andromeda>]



Figura 3.7

Immagine della Galassia di Andromeda (M31) presa nella banda UV (somma di tre immagini prese a lunghezze d'onda di 192.8 nm, 224.6 nm, 260 nm) presa da Swift Spacecraft Ultraviolet / Optical Telescope

[Credits: NASA/Swift/ immagine UVOT

<https://svs.gsfc.nasa.gov/10485>]



Figura 3.8

Immagine della Via Lattea, la nostra galassia, presa nella banda ottica di lunghezze d'onda.

[Immagine presa da Wikipedia al sito

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Milky_Way_multispectral_SMIL.svg alla voce 'optical']

Esercizio 1: La derivata della legge di Planck Trovare il massimo della funzione di Planck per un corpo ideale a temperatura fissata T e analizzare il risultato trovato.

Indicazioni: Tenendo conto della formula della funzione di Planck 3.10 per un corpo ideale, applicare l'approssimazione di Wien per lunghezze d'onda piccole:

$$\lambda \ll \frac{hc}{k_B T} \quad (3.11)$$

che porta a:

$$\frac{hc}{\lambda k_B T} \gg 1 \quad \Rightarrow \quad e^{hc/\lambda k_B T} \gg 1$$

Quindi si può scrivere il secondo fattore della funzione di Planck come:

$$\frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1} \approx \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T}} \quad (3.12)$$

I valori delle costanti in gioco sono:

$$k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \quad J \cdot K^{-1}$$

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \quad J \cdot s$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \quad m/s$$

*** *Soluzione*

$$\frac{dB_\lambda(T)}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left[\frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T}} \right] = 0 \quad (3.13)$$

La derivata della funzione di Planck rispetto alla lunghezza d'onda è (secondo le regole di derivazione di prodotto tra funzioni e dell'inverso della funzione e di funzione esponenziale):

$$\begin{aligned} \frac{dB_\lambda(T)}{d\lambda} &= \frac{-10hc^2}{\lambda^6} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T}} + \frac{-e^{hc/\lambda k_B T} \cdot \left[-\frac{hc k_B T}{(\lambda k_B T)^2} \right]}{(e^{hc/\lambda k_B T})^2} \cdot \frac{2hc^2}{\lambda^2} = \\ &= \frac{1}{(e^{hc/\lambda k_B T})^2} \left(-10hc^2 e^{hc/\lambda k_B T} + \frac{2h^2 c^3}{\lambda^7 k_B T} e^{hc/\lambda k_B T} \right) \end{aligned}$$

Raccogliendo diventa

$$\begin{aligned} \frac{2hc^2 e^{hc/\lambda k_B T}}{\lambda^6 (e^{hc/\lambda k_B T})^2} \left(-5 + \frac{hc}{\lambda k_B T} \right) &= \\ = \frac{2hc^2}{\lambda^6 e^{hc/\lambda k_B T}} \left(-5 + \frac{hc}{\lambda k_B T} \right) \end{aligned}$$

Se si pone uguale a zero si possono fare alcune considerazioni sui singoli fattori. Il primo fattore ha denominatore diverso da zero per l'approssimazione di Wien. Il numeratore non può essere zero perché prodotto di quantità costanti positive (h e c).

Quindi si andrà a studiare solamente il secondo fattore.

$$\begin{aligned} -5 + \frac{hc}{\lambda k_B T} &= 0 \\ \Rightarrow \frac{hc}{\lambda k_B T} &= 5 \\ \Rightarrow \lambda_{max} &= \frac{hc}{5k_B T} \end{aligned}$$

La lunghezza d'onda trovata è quella corrispondente al massimo della funzione. Se si scrive il risultato portando le incognite (λ e T) a sinistra, si

ottiene:

$$\lambda_{max}T = \frac{hc}{5k_B} \quad (3.14)$$

Sostituendo le costanti si ottiene:

$$\lambda T = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{5 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23}} \sim 2.88 \cdot 10^{-3} \quad [m \cdot K]$$

Questo risultato è proprio la legge di Wien trovata nell'attività precedente. Quindi il massimo trovato derivando la funzione di Planck rispetto ad una certa lunghezza d'onda equivale alla lunghezza d'onda del picco di emissione di un corpo ideale a temperatura T .

Esercizio 2: Passare dalla funzione di Planck in lunghezza d'onda a quella in frequenza La funzione di Planck può essere scritta sia in termini di lunghezza d'onda che in termini di frequenza, in questo modo:

$$B_\lambda d\lambda = B_\nu d\nu \quad (3.15)$$

Ricavare l'espressione della funzione di Planck in termini di frequenza, ricordando la relazione che c'è tra λ e ν .

*** *Soluzione*

La relazione tra λ e ν è:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (3.16)$$

Ma nell'uguaglianza 3.15 c'è anche il termine $d\lambda$. Quindi non basta sostituire la relazione 3.16 all'equazione 3.10 della Planckiana in funzione della lunghezza d'onda, bisogna aggiungere un pezzo in più, che tenga conto dell'intervallo di lunghezze d'onda che si sta prendendo in considerazione.

$$d\lambda = -\frac{c}{\nu^2} d\nu \quad (3.17)$$

Sostituendo 3.16 e 3.17 in 3.10:

$$B_\nu d\nu = \frac{2hc^2}{\frac{c^5}{\nu^5}} \frac{1}{(e^{hc/\nu k_B T} - 1)} \cdot \left(-\frac{c}{\nu^2}\right) d\nu \quad (3.18)$$

Il meno può essere tralasciato, poiché la relazione tra λ e ν è di proporzionalità inversa, all'aumentare delle lunghezze d'onda, quindi, diminuiscono le frequenze e viceversa. Infatti se si integrasse tra λ_1 e λ_2 in cui $\lambda_2 > \lambda_1$ la funzione e si trasformasse la lunghezza d'onda in frequenza si otterrebbe un integrale tra ν_1 e ν_2 , ma stavolta con $\nu_2 < \nu_1$. Il meno fa invertire gli estremi dell'integrale in modo da ritornare ad una situazione in cui l'estremo inferiore abbia un valore minore dell'estremo superiore.

Quindi si ottiene:

$$\begin{aligned} B_\nu d\nu &= \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{(e^{h\nu/k_B T} - 1)} d\nu \\ \Rightarrow B_\nu &= \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{(e^{h\nu/k_B T} - 1)} \frac{d\nu}{d\nu} \\ \Rightarrow B_\nu &= \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{(e^{h\nu/k_B T} - 1)} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Punto di Attenzione Nel caso in cui agli studenti non venisse in mente di sostituire il termine $d\lambda$ si ritiene opportuno riprendere in classe questo calcolo

Esercizio 3: L'integrale della legge di Planck Data la formula del flusso emesso da un corpo ideale con temperatura T ad una certa frequenza per unità di angolo solido e di intervallo di frequenza (equazione 3.19), determina la potenza totale emessa da quel corpo per unità di superficie.

Indicazione: Integrare la funzione di Planck indipendente dalla direzione di emissione, ovvero moltiplicata per π .

Tenere a mente l'integrale:

$$\int_0^\infty \frac{y^3}{e^y - 1} dy = \frac{\pi^4}{15} \quad (3.20)$$

*** *Soluzione*

Si integra sull'intero spettro elettromagnetico la funzione di Planck moltiplicata per π :

$$\begin{aligned} I_{totale} &= \int_0^{\infty} \pi B_{\nu}(T) d\nu = \\ &= \int_0^{\infty} \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1} d\nu \end{aligned} \quad (3.21)$$

Sostituzione di:

$$x = \frac{h \nu}{k_B T} \quad (3.22)$$

$$dx = \frac{h}{k_B T} d\nu \quad (3.23)$$

L'integrale quindi diventa, applicando le sostituzioni:

$$\begin{aligned} I_{totale} &= \int_0^{\infty} \frac{2\pi (x k_B T)^3}{c^2 h^3} \frac{1}{e^x - 1} \frac{k_B T}{h} dx = \\ &= \int_0^{\infty} \frac{2\pi x^3 k_B^4 T^4}{c^2 h^3} \frac{1}{e^x - 1} dx \\ &= \frac{2\pi k_B^4 T^4}{c^2 h^3} \int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \end{aligned} \quad (3.24)$$

Utilizzando l'integrale suggerito nella consegna dell'esercizio si ottiene:

$$I_{totale} = \frac{2\pi k_B^4 T^4}{c^2 h^3} \frac{\pi^4}{15} = \frac{2\pi^5 k_B^4 T^4}{15 c^2 h^3} \quad (3.25)$$

Si sostituiscono le costanti:

$$I_{totale} = \frac{2(3.14)^5 (1.38 \cdot 10^{-23})^4}{15 (3 \cdot 10^8)^2 h^3} T^4 = 0.565 \cdot 10^{-6} T^4 \approx 5.7 \cdot 10^{-8} T^4 \quad (3.26)$$

La costante che moltiplica la quarta potenza della temperatura corrisponde alla costante di Stefan-Boltzmann, che può essere espressa tramite le costanti fondamentali in questo modo:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15 c^2 h^3} \approx 5.7 \cdot 10^{-8} \quad (3.27)$$

3.14 Evaluate

Scheda di valutazione \Rightarrow Appendice a pagina 149.

Soluzioni \Rightarrow Appendice a pagina 150.

Parte III

Appendice

3.15 Attività per studenti con Discromatopsia

A seguire alcune procedure da attuare in caso vi siano ragazzi/e affetti/e da discromatopsia, condizione che in Italia si riscontra nel 7/8% degli uomini e nello 0.4/0.5% delle donne italiane⁹.

Dal momento che la discromatopsia si presenta come visione bicromatica (protanopia, alterazione o mancanza dei coni L, deuteranopia, alterazione o mancanza dei coni M, tritanopia, alterazione o mancanza dei coni S) o acromatopsia (monocromatismo in bianco e nero o monocromatismo dei coni blu, detto BCM¹⁰), è necessario prendere in considerazione più fattori per creare un percorso alternativo.

Le indicazioni generali per insegnanti¹¹ sono:

- dove possibile indicare sempre, a parole o tramite etichette, il colore degli oggetti che si utilizzano;
- è importante che un/a ragazzo/a affetto/a da discromatopsia lavori in coppia o in gruppo con altri studenti non affetti da tale disturbo;
- dove possibile utilizzare immagini in bianco e nero;
- usare il più possibile la luce naturale, ma fare attenzione che non sia abbagliante;
- puntare su un forte contrasto tra colori diversi, se possibile usare linee divisorie tra colori;
- abbinare al colore una particolare *texture*, o un simbolo.

⁹Dati presi dal sito <https://www.iapb.it/daltonismo>

¹⁰Abbreviazione per *Blue Cone Monochromatism*

¹¹Prese dal sito *Colour Blind Awareness* nato per sensibilizzare, soprattutto nelle scuole e negli ambienti di lavoro, al tema della discromatopsia e per dare suggerimenti e consigli per rendere il più possibile accessibile il mondo a persone affette da questa condizione. Il documento con le indicazioni generali per gli insegnanti si trova all'indirizzo <http://www.colourblindawareness.org/wp-content/uploads/2010/07/BEST-PRACTICE-AND-ACCREDITATION-FOR-SCHOOLS.pdf>.

Altre informazioni sono prese da un documento più specifico sull'insegnamento delle STEM (*Science, Technology, Engineering and Mathematics*) in presenza di questa condizione, al sito: https://www.iop.org/publications/iop/2017/file_69322.pdf

Il percorso alternativo per studenti affetti da discromatopsia prevede:

- lavori di gruppo anche in Attività che non lo prevederebbero;
- utilizzo di oggetti con etichette indicanti il colore;
- laddove non sia possibile mettere un'etichetta, ad esempio in fasi di *Engage* in cui si perderebbe l'effetto sorpresa, si consiglia di darle solamente al/alla ragazzo/a affetto da discromatopsia, per garantirgli/le comunque la comprensione dell'attività;
- utilizzo di oggetti con colori 'puri', non sfumature o gradazioni di tonalità;
- utilizzo di telecamere con impostazioni in bianco e nero del monitor .

In caso di dubbio, si consiglia all'insegnante di informarsi, prima di iniziare il tutorial, riguardo alla tipologia di discromatopsia che presenta il/la ragazzo/a.

Inoltre online esistono varie simulazioni di effetti di discromatopsia, che permettono all'insegnante di avere un'idea sulle problematiche specifiche degli alunni daltonici, un esempio al sito: <https://www.color-blindness.com/coblis-color-blindness-simulator/>

In Figura 3.9 sono riportate immagini ottenute con la simulazione.

Particolare riguardo dovrà essere posto alla tutela della *privacy* dello/a studente/ssa affetto/a da discromatopsia. Non cambiare le impostazioni delle attività nel caso il/la ragazzo/a non abbia esplicitamente messo al corrente l'insegnante della sua difficoltà.



(a) Visione tricromatica



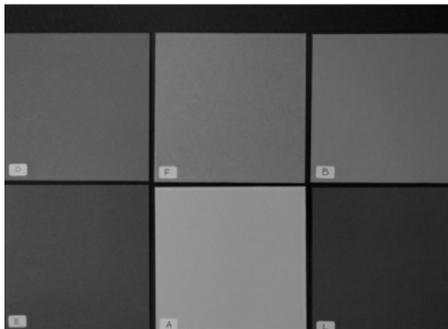
(b) Protanopia



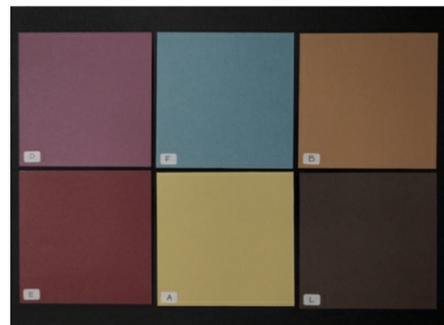
(c) Deuteranopia



(d) Tritanopia



(e) Monocromatismo



(f) BCM

Figura 3.9

*Visione di cartoncini colorati nelle varie tipologie di discromatopsia, ottenute tramite simulazione online. L'immagine 3.9a rappresenta il colore reale dei cartoncini. [Immagine presa dalle istruzioni sull'utilizzo del kit didattico *Guess the Colour!*]*

FILTRI	FILTRO ROSSO	FILTRO VERDE	FILTRO BLU
ROSSO			
VERDE			
BLU			
GIALLO			
MAGENTA			
CIANO			
BIANCO			
NERO			

“Non c'è dubbio che ogni nostra conoscenza incomincia dall'esperienza. [...] Noi non conosciamo se non il nostro modo di percepirli [gli oggetti], che ci è peculiare, e che non è né anche necessario che appartenga ad ogni essere, sebbene appartenga a tutti gli uomini. Noi abbiamo da fare solamente con esso. [...] Quindi [la forma] possiamo conoscerla solo a priori, ossia prima di ogni reale percezione, e perciò la chiamiamo intuizione pura [...]”

(I. Kant, *Critica della ragion pura*)

“Se gli uomini invece degli occhi avessero delle lenti verdi, dovrebbero ritenere che tutto ciò che vedono sia verde [...]. Così è con l'intelletto: non possiamo decidere se ciò che chiamiamo la verità sia davvero tale, e non un'apparenza.”

(Heinrich von Kleist, *Lettera a Wilhelmine von Zenge 22 Marzo 1801*)

“[...] le cose sembrano essere così perché la natura dell'apparenza dipende dal soggetto allo stesso modo in cui, se abbiamo degli occhiali blu, tutto sembra essere blu. Le categorie di Kant sono gli occhiali colorati della mente; le verità a priori sono le false apparenze prodotte da quegli occhiali. Inoltre, dobbiamo sapere che tutti hanno occhiali dello stesso tipo e che il colore degli occhiali non cambia mai.”

(Traduzione da: Russell, B. (1913). The Philosophical Importance of Mathematical Logic. *Monist*, 23(4), 481–493.)

ATTIVITA' 1 – Cosa vedono i nostri occhi – SOLUZIONE VALUTAZIONE

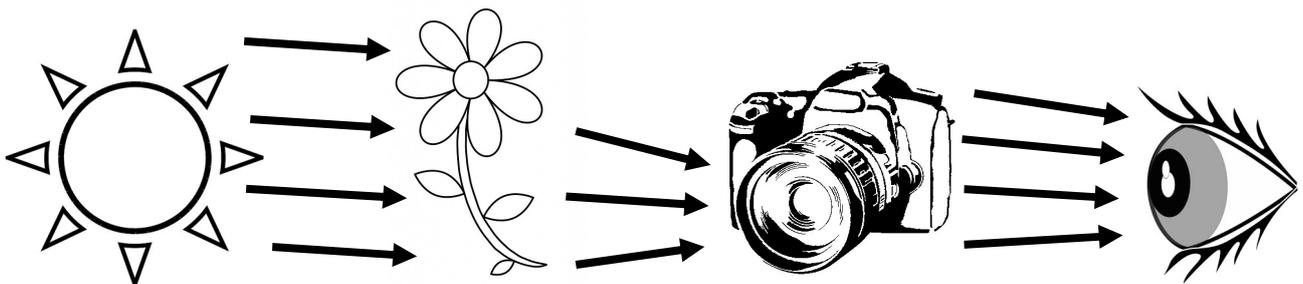
1. La sentenza è FALSA. Il colore di un oggetto non può esser dovuto alla sintesi additiva del suo colore con quello di una luce (visibile o ultravioletta). Infatti solamente le luci si possono sommare additivamente per dare origine a percezioni diverse di colore. Il colore di un oggetto, ad esempio di una tempera, può variare mescolando insieme due o più tempere, creando un colore diverso. In questo caso si parla di sintesi sottrattiva.
2. Gli strumenti necessari per ricreare il fenomeno delle ombre colorate sono: tre lampade di luce rossa, blu e verde e uno schermo bianco da porre dietro all'oggetto. In alternativa le lampade possono essere solo due (blu e rossa, oppure verde e rossa, oppure blu e verde), con una sola il fenomeno non si manifesta.

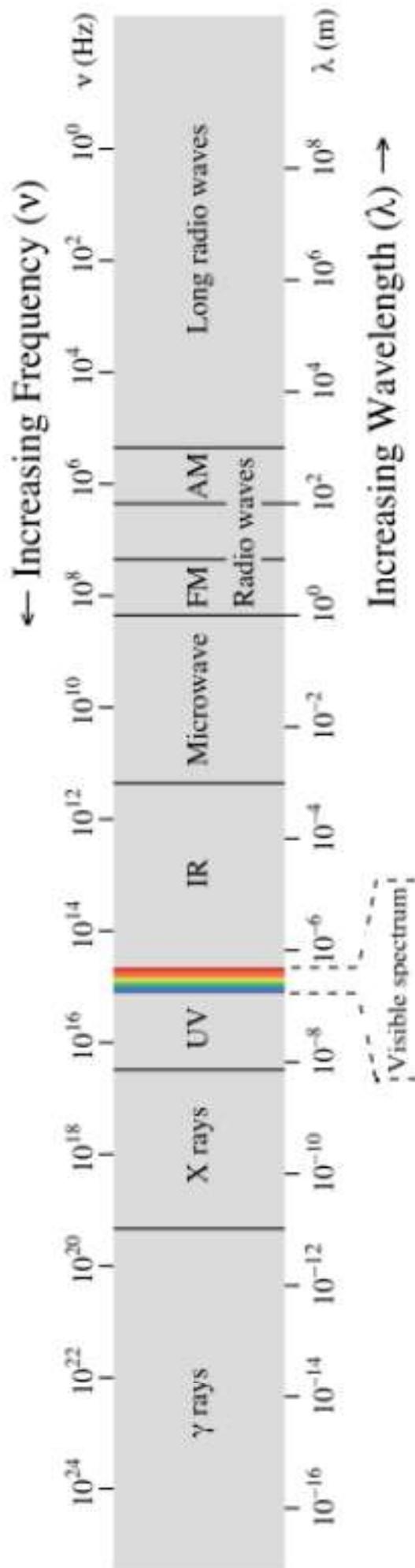
Nel caso di tre luci si formeranno 7 ombre: rossa, verde, blu, gialla, magenta, ciano e nera. Se le luci fossero due, invece, le ombre sarebbero tre, due dello stesso colore delle due luci e una nera.

Le ombre colorate si formano perché nel momento in cui si interpone un oggetto tra la sorgente di luce e lo schermo, esso blocca la radiazione proveniente da una delle lampadine, o da due lampadine o da tutte e tre le lampadine. In questo caso l'ombra sullo schermo assume la colorazione della luce non bloccata. Se viene bloccata una sola luce, allora l'ombra acquisirà il colore dato dalla somma additiva delle due luci rimaste inalterate.

Il filtro dicroico verde farà vedere la scena in modo leggermente diverso. La matita arancione rifletterà una percentuale minore di verde rispetto a un oggetto bianco o a un oggetto che appare di colore verde. Per questo si vedrà colorato di un verde meno intenso. Si vedranno solamente le ombre di colore verde, giallo e ciano. Queste ultime due avranno un colore verde, poiché giallo e ciano sono somma additiva rispettivamente di rosso e verde e blu e verde. Le ombre di colore rosso, blu e magenta appariranno nere, poiché non riflettono il verde. L'ombra nera resterà inalterata. Lo schermo si colorerà di verde, poiché il bianco riflette tutte le lunghezze d'onda.

3. La luce bianca proveniente dal Sole (radiazione visibile) interagisce con l'oggetto che a sua volta direziona parte della radiazione verso la macchina fotografica e viene rilevata da quest'ultima. L'occhio è in grado di rilevare l'immagine visibile che si crea nell'obbiettivo della macchina fotografica.





ATTIVITA' 2 - Vedere con altri occhi

Parte 2

1. Puntate la telecamera che opera nel vicino infrarosso verso le lampadine. Cosa si vede?

.....
.....
.....
.....

2. Che differenza c'è con quello che vedono i nostri occhi?

.....
.....
.....
.....

3. Puntate la telecamera che opera nell'ultravioletto verso le lampadine. Cosa si vede?

.....
.....
.....
.....

4. Che differenze ci sono con l'immagine precedente? E con quello che vedono i nostri occhi?

.....
.....
.....
.....
.....
.....

5. Da quanto visto fino ad ora, quale potrebbe essere, secondo voi, una "sorgente di radiazione"? Fare esempi sulla base di quanto visto.

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

ATTIVITA' 2 - Vedere con altri occhi

Parte 4

1. Pensando al comportamento della lastra di policarbonato illuminata dalla radiazione vicino infrarossa, che definizione potrebbe essere data a una grandezza chiamata TRASMITTANZA?

.....

.....

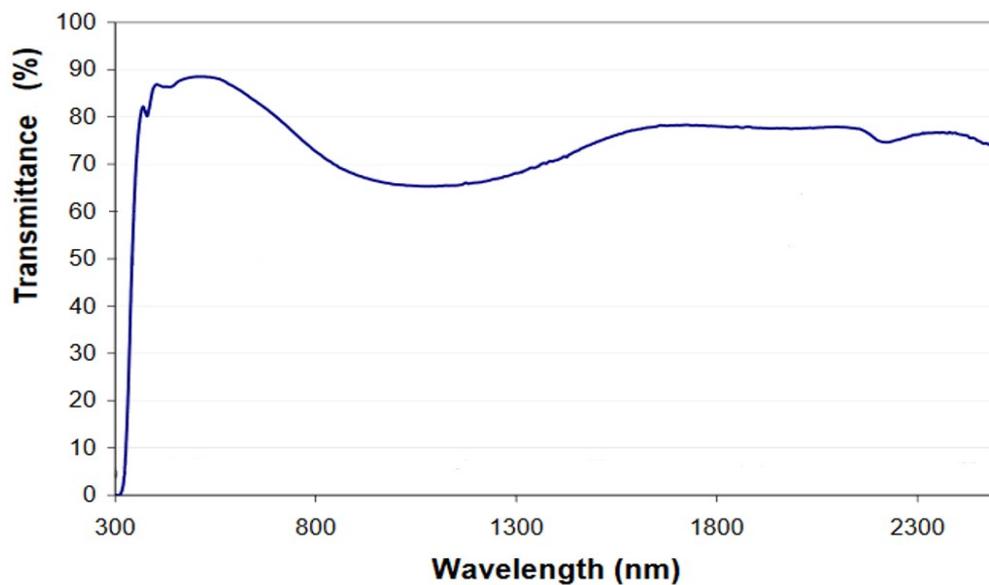
.....

.....

.....

2. Confrontate i due grafici seguenti, che rappresentano l'andamento della grandezza fisica chiamata TRASMITTANZA al variare della lunghezza d'onda (da circa 300 nm a circa 2,4 micron). Uno dei due grafici è riferito al comportamento della lastra di policarbonato, l'altro a quello del vetro usato per le finestre (vetro *float*), collegate il grafico al materiale e motivatene la risposta.

A.



Il grafico **A** appartiene a:

Perché:

.....

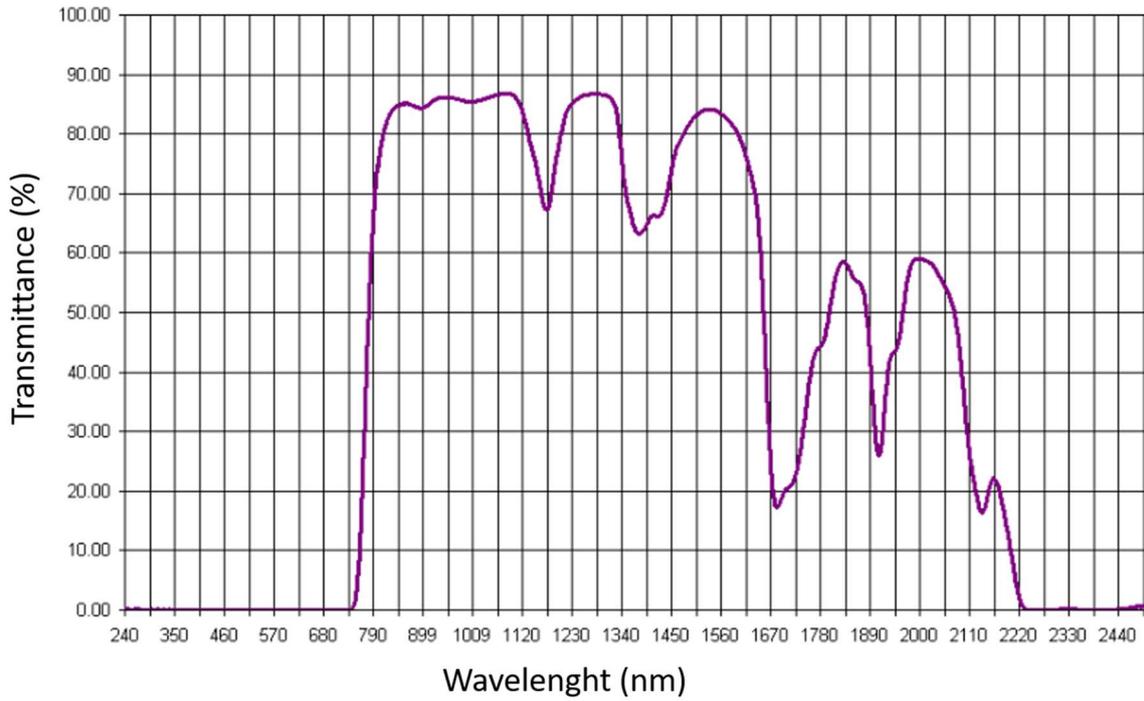
.....

.....

.....

.....

B.



Il grafico **B** appartiene a:

Perché:

.....

3. Come si comporta la lastra di policarbonato nelle altre lunghezze d'onda viste? Come sarà la trasmittanza in quei casi? E cosa succederà alla radiazione incidente?

.....

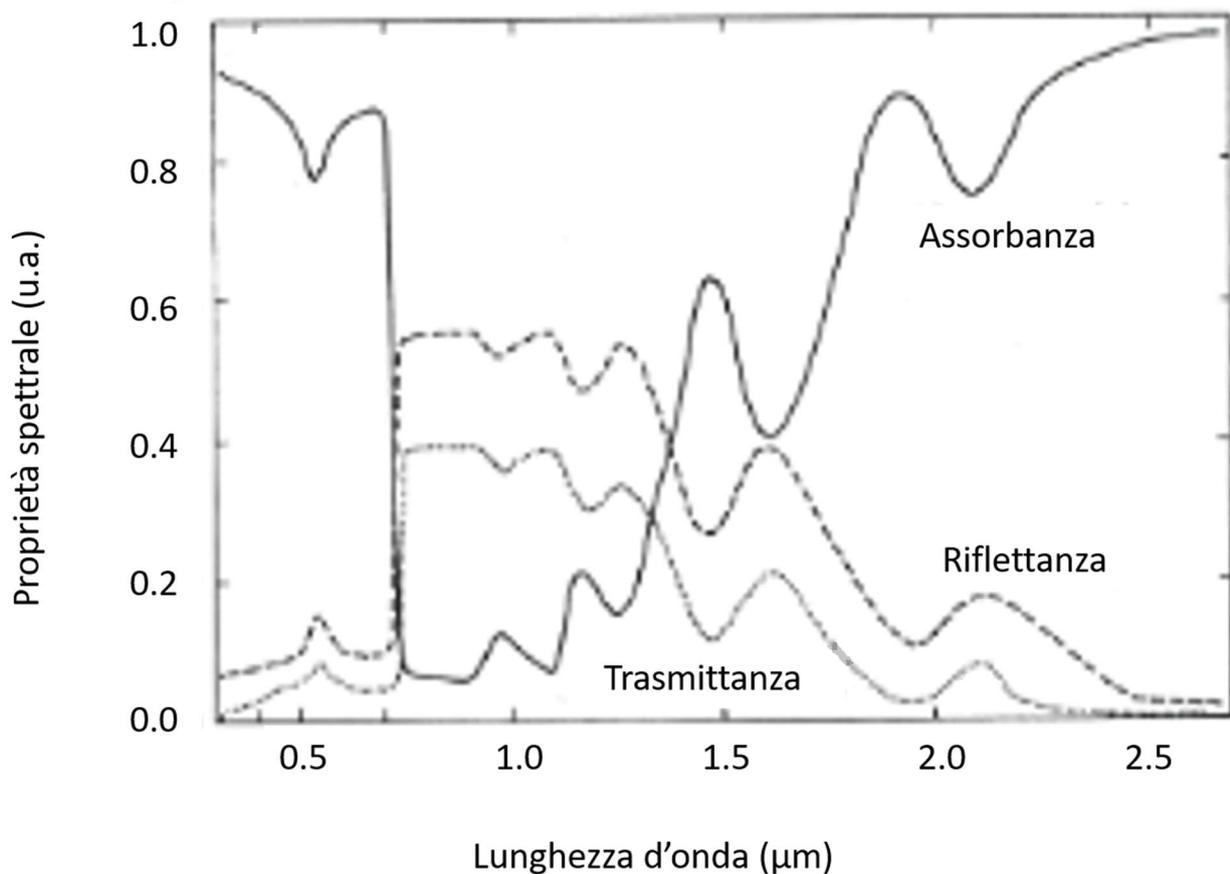
ATTIVITA' 2 - Vedere con altri occhi - VALUTAZIONE

1. Dati gli spettri in figura relativi ad una foglia (comportamento medio di più specie), determinare la percentuale di radiazione visibile (~ 500 nm)

- TRASMESSA:
- ASSORBITA:
- RIFLESSA:

E la percentuale di radiazione NIR (~ 1000 nm):

- TRASMESSA:
- ASSORBITA:
- RIFLESSA:



A 500 nm e 1000 nm la relazione ART tra le grandezze è rispettata? Perché?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

ATTIVITA' 2 - Vedere con altri occhi– SOLUZIONE VALUTAZIONE

1. La prima domanda si basa su un grafico preso al sito: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/4-approximation-spectral-properties-leaf-following-graph-shows-absorption-transmission-ref-q28707218>

Ad una lunghezza d'onda di circa 1000 nm (vicino infrarosso) le proprietà spettrali della foglia sono:

$$T = 0.35$$

$$A = 0.10$$

$$R = 0.55$$

La somma è pari a 1 quindi la relazione è rispettata.

Ad una lunghezza d'onda di circa 500 nm (visibile) le proprietà spettrali della foglia sono:

$$T = 0.05$$

$$A = 0.85$$

$$R = 0.10$$

La loro somma è pari a 1 quindi la relazione ART è rispettata.

2. La foglia nel visibile appare verde, questo vuol dire che riflette la lunghezza d'onda corrispondente al colore verde (circa 500 nm). La restante radiazione incidente è assorbita, mentre una piccola frazione è trasmessa. Per questo se si guarda una foglia in controluce in parte si riesce a vedere quello che le sta dietro.
La radiazione vicino infrarossa è riflessa per la maggior parte dalla foglia, poca è assorbita. È trasmessa più radiazione rispetto al visibile.

L: Carissima collega ora la prego: serve la sua preziosa collaborazione: non faccia niente. Ora miei esimi spettatori facciamo insieme un esperimento. **L copre la telecamera con un fazzoletto e con fare pomposo** Cercate di immaginare, certo con un immenso sforzo, che la mia cara collega sia una madonna rinascimentale di incommensurabile bellezza, vestita delle più splendide vesti. E che il tempo l'abbia occultata con una patina nera, la tipica patina del tempo. Bene Prof. Giliberti vada a fare la patina del tempo, prenda in mano quella lastra nera e occulti la collega. così...

e a questo punto... **arriva lo scienziato infrarosso, sguaina la telecamera infrarossa pure lei toglie il fazzoletto. E la salva.**

Ed è proprio ciò che si può ottenere con questa tecnica detta riflettografia infrarossa applicata allo studio di quadri e dipinti antichi e moderni. Ed è proprio quello che faccio nel mio laboratorio. Guardate queste slide che ho portato.

G. proietta una slide che mostra un particolare della Deposizione di Cristo di Giovanni Bellini

L: Vedete, sono famosi quadri del Rinascimento italiano. Sotto il dipinto come lo vedono i nostri occhi spesso invece si celano delle versioni precedenti o dei pentimenti, che compaiono evidenti nell'immagine infrarossa. Questo è un quadro esposto alla pinacoteca di Brera a Milano Giovanni Bellini un giovane Bellini, alle sue prime opere, osservate ora cosa ci ha svelato la riflettografia infrarossa. *Mostra slide con stesso quadro ma carboncino*

L: Ecco guardate, l'artista ha lavorato in modo dettagliatissimo, disegnando a tratteggio tutte le zone chiaroscurali, mettendo in risalto un gioco di luci e ombre ancora più spettacolare e raffinato rispetto a quello visibile nella pittura a olio. Tenete a mente questo autore perché ci torneremo. Quello che abbiamo visto è un esempio stupendo di quello che viene detto disegno preparatorio precedente all'esecuzione finale dell'opera, ma ora vedremo un esempio ancora più sorprendente e divertente.

G cambia slide. La nuova immagine è composta di due riquadri. Uno dei due mostra un particolare di un quadro, il secondo mostra il disegno preparatorio svelato dalla telecamera IR

L: Questo che vedete è un dettaglio di un quadro rappresentante la Crocifissione. L'autore è un Fiammingo, Hans Memling, e oggi si trova ai musei civici di Vicenza. Quello che potete osservare nelle immagini è un cosiddetto Pentimento. L'autore cioè è intervenuto con un cambiamento stilistico fra la prima versione tracciata a schizzo sulla tavola e la versione finale dipinta. Vedete che sotto al manto appare la mano destra del santo che indicava il Cristo *G indica col puntatore laser la mano destra del santo* e che sopra la mano sinistra, oltre all'agnello c'era un libro *G indica col puntatore laser la mano sinistra.*

L: Poi probabilmente è passato un teologo che ha corretto la prima versione disegnata occultando il libro.

G cambia slide. Il quadro è la Madonna con bambino di Giovanni Bellini

L: Ed ecco qua ancora il nostro Giovanni Bellini in un quadro sempre esposto a Brera, ma l'autore ora è un vecchio furbacchione. Ha ampliato la bottega e ha uno stuolo di ragazzetti che gli completano le opere e quindi con mano esperta si limita a tratteggiare pochi elementi essenziali. *G cambia slide. Si vede il disegno preparatorio molto più stilizzato che nei casi precedenti. G indica col puntatore laser i pochi tratti essenziali.* Osservate il panneggio del manto raffinato, ma tracciato in modo deciso con pochi tratti essenziali.

ATTIVITA' 3.1 – Emissione e Spettri

Parte 2

	Materiale	Temperatura misurata con il termometro	Temperatura indicata sulla termocamera
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			

L: *Punta la termocamera verso G la cui immagine termica compare proiettata sullo schermo.*

C: *Si avvicina a G e lo interrompe* Caro collega! Complimenti! Come sempre sei interessantissimo e...chiarissimo e ora anche... luminoso! Guarda lì *Gli indica la ripresa dalla termocamera.*

G: Ma Siamo noi! Tutti colorati e a macchie!

L: E voi vi chiederete: ma perché siamo colorati? Perché siamo a macchie?

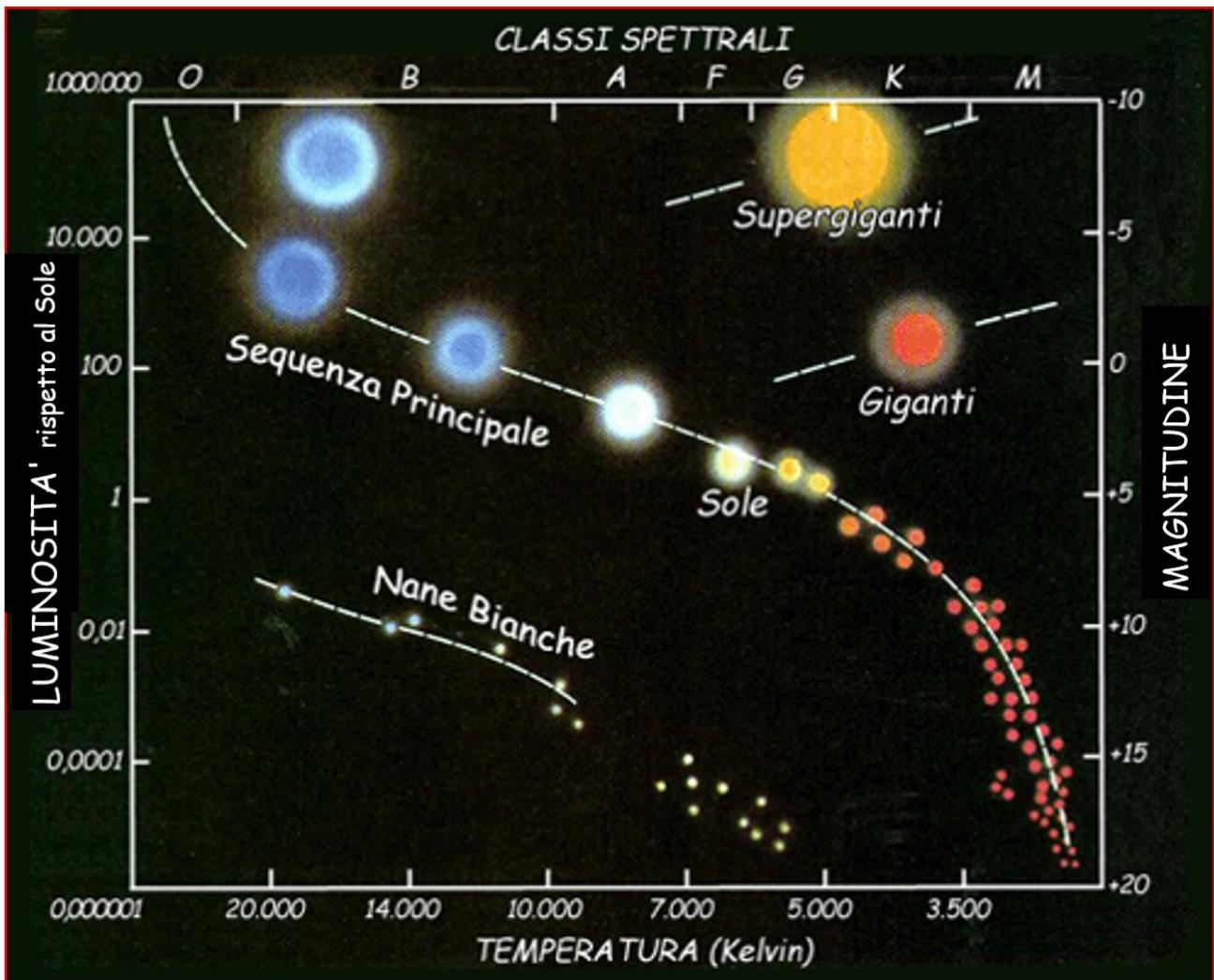
G, C: Ma perché siamo colorati? Perché siamo a macchie?

L: *riprende G con la termocamera e spiega* Dunque dovete sapere che questa è una termocamera, una telecamera che misura a distanza la temperatura dei corpi. Vede, nel buio più assoluto, la radiazione emessa dai vostri corpi. Rosso più caldo, blu più freddo come nei rubinetti, blu per l'acqua fredda e rosso per la calda. Per esempio può aiutarci a capire se il nostro pubblico è ancora vivo. In più sto conducendo da qualche anno una ricerca straordinaria, una ricerca sulla correlazione tra temperatura ed emozioni... dei conigli ... sono animali molto emotivi! Ma si tratta di una ricerca segretissima.

[...]

G: [...] è opportuno ora fare una piccola puntualizzazione: questa interessante tecnologia mostrata dagli esimi colleghi mi permette di introdurre un ulteriore modo di guardare l'universo: l'infrarosso termico. Vi faccio notare che l'immagine a microonde della radiazione cosmica di fondo, mostrata prima, era a 3 K, mentre io sono a 300 K; e parte della materia mostrata in alcune delle precedenti slide è resa visibile proprio grazie alle riprese in IR lontano.

L: Questo è il diagramma di Hertzsprung-Russell. Sull'asse orizzontale è riportata la temperatura delle stelle e su quello verticale la loro luminosità [...] seguendo lo stradone principale è possibile seguire i differenti tipi di stelle in una popolazione, dove le differenti posizioni dipendono dalla massa. Osservate, comunque che a ogni temperatura è associato un colore prevalente: qua abbiamo le stelle giganti azzurre con le temperature più basse, qua quelle come il nostro sole che emette luce giallastra e alle temperature più alte osserviamo chiaramente le giganti rosse...



[Liberamente modificato da: <http://www.astrofiliastriumcaeli.it/GLOSSARIO/>]

G: [...] mi sembra che siate pronti per sentire parlare di osservazione di una radiazione che è rimasta nascosta fino agli anni '60. In particolare vi parlerò della radiazione cosmica di fondo scoperta nel 1965 da Penzias e Wilson, che come tutti sapete hanno poi preso il Nobel nel 1978, e prevista precedentemente teoricamente da George Gamow. Quella che vedete in questa slide è la mappa del fondo cosmico, il corpo nero per eccellenza a 2.7 Kelvin ottenuta da WMAP, Wilkinson Microwave Anisotropy Probe... E come sapete certamente è oggi in corso una mappatura ancora più accurata con l'esperimento Planck nel quale l'Italia è fortemente impegnata.

Ma tornando alla nostra slide; quello che vedete è una foto dell'Universo in fasce, pensate: appena 380.000 anni dopo il Big Bang, quando la radiazione si è disaccoppiata dalla materia. All'inizio la temperatura era enorme, ma con l'espansione dell'universo questo gas di fotoni si è raffreddato fino a meno di 3K. Esso permea l'Universo in maniera pressoché isotropa, tuttavia ci sono delle piccolissime anisotropie che ci rivelano i semi delle strutture presenti oggi nell'universo. La slide alle mie spalle ci mostra queste anisotropie, lo spettro delle fluttuazioni in temperatura in funzione della scala angolare θ .

ATTIVITA' 3.2 – Emissione e Spettri

Nella tabella sottostante si trovano tre informazioni:

- I. Il nome di un oggetto/essere vivente preso in considerazione
- II. La temperatura dell'oggetto/essere vivente in Kelvin
- III. La lunghezza d'onda del picco di emissione dell'oggetto/essere vivente in metri

1. Utilizzando la simulazione del PHET al sito: <https://phet.colorado.edu/it/simulation/blackbody-spectrum> determinare:
 - a) La temperatura e la lunghezza d'onda del picco di emissione di una persona, scrivere i valori ed in quale regione dello spettro elettromagnetico si trova il picco.
 - b) La temperatura e la lunghezza d'onda del picco di emissione di una lampadina ad incandescenza, scrivere i valori ed in quale regione dello spettro elettromagnetico si trova il picco.
 - c) La lunghezza d'onda del picco di emissione della stella *Pistol Star*, che è una stella ipergigante blu situata nella costellazione del Sagittario ed ha una temperatura superficiale di 11 527°C, scrivere il valore e determinare in quale regione dello spettro elettromagnetico si trova.
 - d) La lunghezza d'onda del picco di emissione di uno zampirone, che ha temperatura solitamente di 700°C, scrivere il valore e determinare in quale regione dello spettro elettromagnetico si trova.

Nome	Temperatura (K)	Lunghezza d'onda del picco (m)

2. Disegnare nello spazio sottostante un grafico con l'andamento della temperatura al variare della lunghezza d'onda del picco.

3. Trovare con la simulazione:

- La temperatura di qualcosa di cui si sa la lunghezza d'onda del picco di emissione.

e

- La lunghezza d'onda del picco di emissione di qualcosa di cui si sa la temperatura.

E mettere i dati nei riquadri sotto.

Nome	Temperatura (K)	Lunghezza d'onda del picco (m)

4. Disegnare qui sotto un grafico come quello disegnato al punto 2, ma aggiungendo, ai dati già presenti, i dati trovati al punto 3. Che relazione c'è tra le x e le y del grafico?

.....

5. Dove si sposta il valore della lunghezza d'onda di picco dello spettro di emissione all'aumentare della temperatura?

.....

6. A che lunghezza d'onda si trova il picco di emissione termica del Sole? In quale banda dello spettro elettromagnetico cade?

.....

7. Perché il Sole si vede di colore giallo/biancastro?

.....

ATTIVITA' 3.2 – Emissione e Spettri – SOLUZIONE

1. **ATTENZIONE:** Le lunghezze d'onda devono essere portate in metri e le temperature in Kelvin per poter trovare la relazione corretta dimensionalmente tra le due grandezze.
- Una persona ha temperatura sui 36°C (309 K) ed un picco di emissione a 9 μm ($9.0 \cdot 10^{-6}$ m). L'emissione termica di una persona avviene principalmente nella banda del lontano infrarosso.
 - Una lampada ad incandescenza ha temperatura di circa 3000 K e picco di emissione della lunghezza d'onda a 900 nm ($9.0 \cdot 10^{-7}$ m). L'emissione termica di una lampada a incandescenza avviene nel visibile.
 - Pistol Star ha temperatura superficiale di 11 800 K e picco di emissione di radiazione termica a 240 nm ($2.4 \cdot 10^{-7}$ m). L'emissione termica della stella è nell'ultravioletto lontano.
 - Lo zampirone ha temperatura di 700° C (973 K) e lunghezza d'onda del picco di emissione a 3.0 μm ($3.0 \cdot 10^{-6}$). L'emissione termica di uno zampirone è nel vicino infrarosso.

Nome	Temperatura (K)	Lunghezza d'onda del picco (m)
Persona	309	$9.0 \cdot 10^{-6}$
Lampada incandescenza	3 000	$9.0 \cdot 10^{-7}$
Pistol Star	11 800(*)	$2.4 \cdot 10^{-7}$
Zampirone	973 (**)	$3.0 \cdot 10^{-6}$

2. Grafico della temperatura in funzione della lunghezza d'onda del picco di emissione. L'andamento è iperbolico, tipico di una relazione di proporzionalità inversa, poiché se una grandezza aumenta, l'altra cala dello stesso fattore moltiplicativo. Ad esempio se la temperatura si dimezza, la lunghezza d'onda del picco raddoppia. Un esempio in Figura 1.

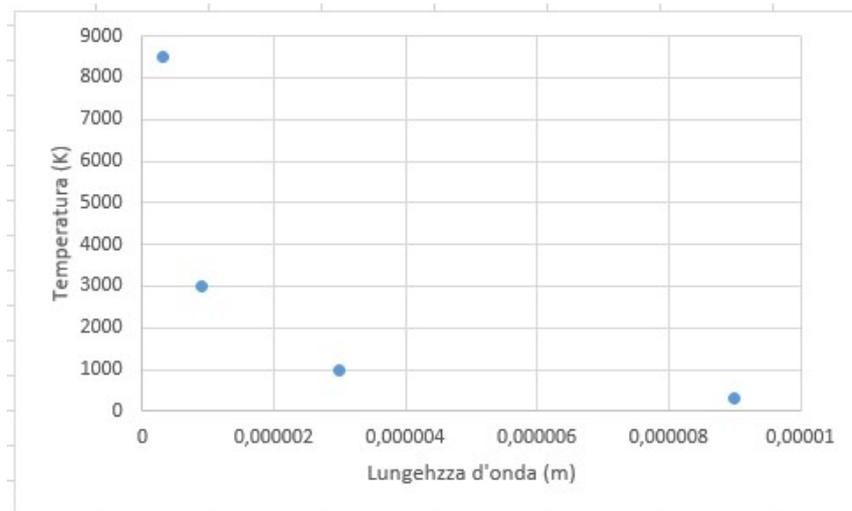


Figura 1 Grafico con inseriti i dati della tabella

3. Altri due elementi possono essere oggetti della stanza, di cui si sa la temperatura o la lunghezza d'onda di picco di emissione a priori, oppure si può partire dalla simulazione e definire una temperatura o una lunghezza d'onda di picco che non siano legati a oggetti reali o conosciuti. Esempi:
- Un telefonino a temperatura ambiente (25°C, ovvero 298 K), mettendo tale valore nella simulazione si ottiene una lunghezza d'onda di picco di circa 10 μm (1.0 * 10⁻⁷ m). Il cellulare per la sua temperatura emette nell'infrarosso termico (lontano infrarosso).
 - Impostando nella simulazione la massima temperatura possibile (di 9200 K) si ottiene un picco di emissione nell'ultravioletto a 0.31 μm (3.1*10⁻⁷ m).
 - Impostando la temperatura di 3 K, si ottiene un picco di emissione di circa 950 μm (9.5*10⁻⁴ m), quasi nelle microonde.
 - Un cavallo ha una temperatura in media di 38°C, quindi 311 K. Mettendo questo valore nella simulazione la sua emissione ha picco ad una lunghezza d'onda di 9.1 μm (9.1 * 10⁻⁶ m), quindi nel lontano infrarosso.
 - Partendo da una lunghezza d'onda sullo spettro in fotocopia (che ha ogni gruppo), entro i limiti imposti dalla simulazione, si determina che temperatura avrebbe un oggetto con quel picco di emissione termica. Ad esempio mettendo nella simulazione il picco della funzione ad una lunghezza d'onda di 600 nm (ovvero 6.0 * 10⁻⁷ m), indicata sullo spettro, si trova, nel rettangolo bianco a destra, una temperatura di 4700 K. L'emissione sarà principalmente nel visibile e di colore rosso.
 - Sulla barra all'estrema destra nella simulazione sono indicati alcuni elementi, manovrando il cursore del termometro è possibile raggiungere le temperature di questi oggetti. Spostando il cursore verso l'alto, la barra rossa all'estrema destra si alza. Una volta definita la temperatura si può definire la lunghezza d'onda del picco (ad esempio un forno caldo ha temperatura di circa 615 K e quindi ha picco di emissione a circa 4.5 μm, ovvero 4.5 * 10⁻⁶ m nel medio infrarosso).
4. La relazione tra le x e le y è di proporzionalità inversa. Moltiplicando tra loro i valori di temperatura e lunghezza d'onda del picco trovati per ogni oggetto, infatti, si ottiene sempre la stessa costante, pari a circa 2.8 * 10⁻³ m·K, entro un errore di ± 0.1*10⁻³ m·K. Questa è proprio la costante della legge di Wien, che si scrive:

$$\lambda_{picco} = \frac{2.8 \cdot 10^{-3}}{T} [m]$$

5. Il valore della lunghezza d'onda del picco di emissione, se aumenta la temperatura, si sposta verso la sinistra dello spettro. È una conseguenza della legge di Wien.
6. I parametri del Sole sono già disponibili all'interno della simulazione nella colonna all'estrema destra. La temperatura è di 5700 K, che corrisponde ad una lunghezza d'onda del picco di emissione di $0.51 \mu\text{m}$ ($5.1 \cdot 10^{-7} \text{ m}$). Utilizzando la fotocopia dello spettro elettromagnetico, disponibile per ogni gruppo, si vede che l'emissione principale del Sole cade nel visibile in corrispondenza della lunghezza d'onda del verde.
7. [Risposta completa nel tutorial al paragrafo "Argomenti Attività 3"]

NOTE

(*) *Pistol Star* è una stella ipergigante blu della costellazione del Sagittario. Ha una massa compresa tra 80 e 150 M_{\odot} (masse solari) ed una temperatura superficiale di 11 800 K, che la rende approssimabile ad un corpo nero con picco di emissione nelle lunghezze d'onda dell'ultravioletto lontano. La sua posizione nella Via Lattea è vicino al centro galattico, ad una distanza di 25 000 anni luce dal Sole.

(**) Nell'articolo: "Mosquito coils-Part II. Studies on the action of mosquito coil smoke on mosquitoes" di Maciver, D. R. (Pyrethrum Post 1964 Vol.7 No.3 pp.7-14 pp. ref.22), si afferma che la temperatura dello zampirone è maggiore di 700°C. Qui si è preso come riferimento un valore di 700°C (973 K).

L'articolo si trova sul sito:

<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19661000787>

SCHEDA EMISSIVITA' DEI MATERIALI USATI NELLA TERZA ATTIVITA'

	MATERIALI	EMISSIVITA' (ε) Letteratura¹	EMISSIVITA' (ε) Sperimentale
	Legno	0.95	0.93
	Polistirolo	0.60	0.60
	Fibra di Carbonio	0.98 (Carbonio pressato e con superficie piena) 0.83 - 0.85 (Composto di fibra di carbonio) ²	0.90 (Probabilmente perché fatto da 2 strati)
	Ferro ossidato	0.64 - 0.78	0.65

	<p>Tessuto Sintetico</p>	<p>0.75-0.85³ (Poliestere)</p>	<p>0.93</p>
	<p>Tessuto (generico)</p>	<p>0.95⁴</p>	<p>0.93</p>
	<p>Tessuto di Fibra di Vetro</p>	<p>0.80-0.98⁴</p>	<p>0.93</p>
	<p>Piastrella di Gres</p>	<p>0.90-0.935⁵</p>	<p>0.93</p>
	<p>Plastica (PLA)</p>	<p>0.90-0.97</p>	<p>0.93</p>

	Bitume/ Asfalto	0.93	0.93
	Gesso	0.98	0.93
	Porfido (pietra)	0.94 ⁴	0.93

(¹) I dati tabulati sono stati presi principalmente dalle tabelle: “Table of Emissivity of Varoious Surfaces”, MIKRON ; e da: https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html

(²) Valore medio preso da:

“Carbon fiber composite characterization in adverse thermal environments”; Joshua A. Hubbard, Alexander L. Brown, Amanda B. Dodd, Sylvia Gomez-Vasquez, and Ciro J. Ramirez; SANDIA REPORT; SAND2011-2833; Unlimited Release; Printed May 2011.

Disponibile al link: <https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2011/112833.pdf>

(³) Dal sito: <https://www.optotherm.com/emiss-table.htm>

Per quanto riguarda il poliestere: l'emissività misurata risulta maggiore rispetto a quella tabulata, questo può dipendere dall'angolazione a cui si osserva il tessuto con la termocamera.

(⁴) Dal sito: http://www.pointvet.it/web/media/libri_pvi/Tab_emissivita.pdf

(⁵) Dal sito: <http://www.metra.ch/PDF/Emissivity.pdf>

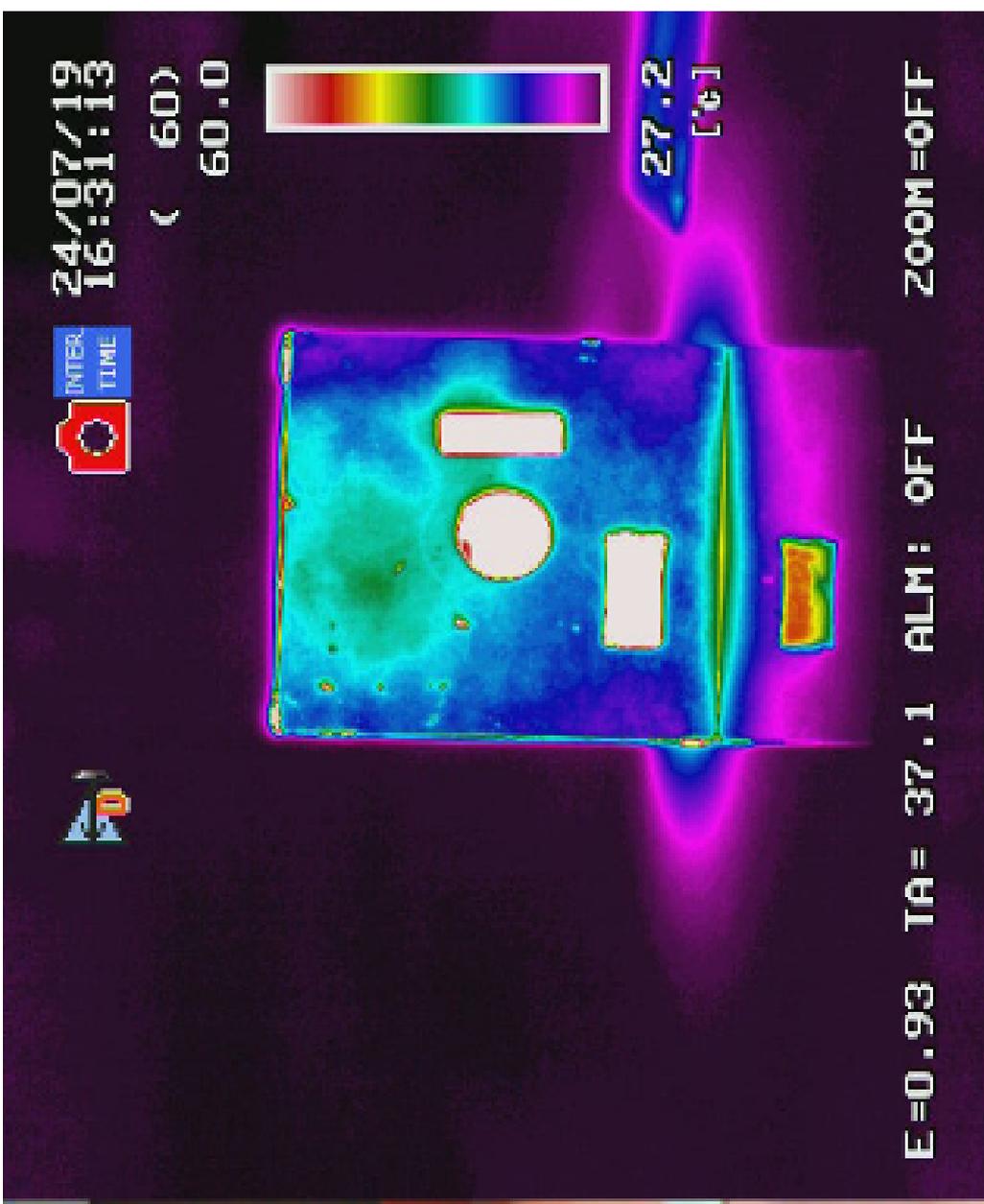


Figura 3.10

Scatola di Alluminio con coperchio forato riscaldata a circa 70°C con attaccati due pezzi di nastro isolante come indicatori della temperatura raggiunta dal corpo. A sinistra l'immagine presa nel visibile, a destra presa con la termocamera.

ATTIVITA' 3 – Emissione e Spettri – VALUTAZIONE

1. PERCHE' i corpi emettono radiazione elettromagnetica?

.....
.....
.....
.....
.....

2. QUANTA potenza emettono i corpi?

.....
.....
.....
.....
.....

3. QUALE radiazione elettromagnetica emettono i corpi?

.....
.....
.....
.....
.....

4. Determina la temperatura superficiale del Sole sapendo che la sua potenza totale emessa è di $3,65 \cdot 10^{26} \text{ W}$. (Il Sole si suppone essere una sfera ed un emettitore ideale con raggio in media pari a $6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$)

ATTIVITA' 3 – Emissione e Spettri – SOLUZIONE VALUTAZIONE

1. Un corpo, se ha una temperatura maggiore di 0 K, emette radiazione elettromagnetica, detta radiazione termica.
2. I corpi emettono, secondo la legge di Stefan Boltzmann, una potenza per unità di area su tutte le lunghezze d'onda dipendente dalla quarta potenza della temperatura. Se il corpo non è ideale si deve tener conto anche dell'emissività del corpo ad una certa lunghezza d'onda.
3. I corpi emettono uno spettro continuo di radiazione dipendente principalmente dalla temperatura e dalla lunghezza d'onda o dalla frequenza, descritto dalla funzione di Planck. La legge di Wien permette di calcolare, sapendo la temperatura del corpo in questione, la lunghezza d'onda del picco di emissione.
4. La potenza totale emessa è il prodotto tra la potenza emessa per unità di superficie con la superficie del corpo emettitore. Allora la potenza emessa per unità di superficie è:

$$I = \frac{P_{TOT}}{4\pi R^2} = \frac{3.65 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4\pi (6.96 \cdot 10^{26} \text{ m})^2} = 6.00 \cdot 10^7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Dalla legge di Stefan Boltzmann con costante di proporzionalità pari a

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

Si calcola la temperatura superficiale del Sole:

$$T_{SOLE} = \sqrt[4]{\frac{I}{\sigma}} = 5703 \text{ K} \sim 5700 \text{ K}$$

Bibliografia

- [1] *Invisible Misconceptions: Student Understanding of Ultraviolet and Infrared Radiation* Libarkin, Julie C.; Asghar, Anila; Crockett, C.; Sadler, Philip; Astronomy Education Review . Dec2011, Vol. 10 Issue 1, p49-60. 12p.
- [2] L. Gunther (2012), *The Physics of Music and Color*. Massachussets: Springer
- [3] Martinez-Borreguero, G., Pérez-Rodríguez, Á. L., Suero-López, M. I., & Pardo-Fernández, P. J. (2013). Detection of Misconceptions about Colour and an Experimentally Tested Proposal to Combat them. *International Journal of Science Education*, 35(8), 1299-1324
- [4] C. Haagen (2014) *Chapter 3: Physics Teaching and Learning at Secondary Level - Simple Experiments Supporting Conceptual Understanding of Body Colour*, Proceeding of the GIREP-MTPL 2014 International Conference, pp. 251-258, Palermo: C. Fazio and R.M. Sperandeo Mineo
- [5] *Children's ideas in science - Chapter 2: Light* Guesne E., Driver R., Tiberghien A., Milton Keynes : Open University Press, 1985.
- [6] *Teaching Colour: designing and evaluation of a sequence* Françoise Chauvet (1996), *European Journal of Teacher Education*, 19:2, 121-136, DOI:[10.1080/0261976960190204](https://doi.org/10.1080/0261976960190204)
- [7] *Students' Conceptions About 'Radiation': Results from an Explorative Interview Study of 9th Grade Students* Neumann, S. & Hopf, M., *J Sci Educ Technol* (2012), vol. 21 Issue 6, p. 826-834. <https://doi.org/10.1007/s10956-012-9369-9>
- [8] *Students' conceptions on white light and implications for teaching and learning about colour* Claudia Haagen-Schützenhöfer 2017 *Phys. Educ.* 52 044003
- [9] *Students' conceptions of radiation and what to do about them* Thomas Plotz 2017 *Phys. Educ.* 52 014004. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/52/1/014004>
- [10] *Student Understanding of Blackbody Radiation and Its Application to Everyday Objects* Paul J. Emigh, Gina Passante, and Peter S. Shaffer;

- Physics Education Research Conference 2013 ; Pages 137-140; <https://doi.org/10.1119/perc.2013.pr.022>
- [11] *Paradoxes of thermal radiation* U Besson 2009 Eur. J. Phys. 30 995. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/30/5/008>
- [12] *Students' Misconceptions about Invisible Radiation* T.Plotz, M.Hopf, Electronic Proceedings of the ESERA 2015 Conference. Science education research: Engaging learners for a sustainable future., ed J Lavonen, et al. (Helsinki, Finland: University of Helsinki) pp 95-100.
- [13] *Two concepts of radiation. A case study investigating existing pre-conceptions.* T.Plotz, M.Hopf International Journal of Science and Mathematics Education, v4 n4, p447-459, 2016.
- [14] M. Braund, «Electric drama to improve understanding in science,» *School Science Review*, vol. 81, pp. 35-41, 1999.
- [15] Gargano, M., Cavaliere, F., Viganò, D., Galli, A., & Ludwig, N. (2017). *A new spherical scanning system for infrared reflectography of paintings.* *Infrared Physics & Technology*, 81, 128-136.
- [16] Ludwig, N., Bonizzoni, L., Caccia, M., Cavaliere, F., Gargano, M., Viganò, D., ... & Galli, A. (2017, June). *Giotto Unveiled: New Developments in Imaging and Elemental Analysis Techniques for Cultural Heritage.* In Congress of the Department of Physics (pp. 57-66). Springer, Cham.
- [17] Bonizzoni, L., Bruni, S., Gargano, M., Guglielmi, V., Zaffino, C., Pezzotta, A., ... & Ludwig, N. (2018). *Use of integrated non-invasive analyses for pigment characterization and indirect dating of old restorations on one Egyptian coffin of the XXI dynasty.* *Microchemical Journal*, 138, 122-131.
- [18] *Student Understanding of Blackbody Radiation and Its Application to Everyday Objects*; Paul J. Emigh, Gina Passante, and Peter S. Shaffer; Physics Education Research Conference 2013; Pages 137-140; <https://doi.org/10.1119/perc.2013.pr.022>
- [19] *Turkish Students' Perception about the Black Body Radiation, Photoelectric Effect and Compton Scattering Phenomena*; Ali Riza Akdeniz; *Journal of Studies in Education* 2015, Vol. 5, No. 3 ; <https://doi.org/10.5296/jse.v5i3.8109>
- [20] *Using astronomical photographs to investigate misconceptions about galaxies and spectra: Question development for clicker use*; H. Lee, S. Schneider; *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 11, 020101; Published 13 July 2015; <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.020101>
- [21] *School students' understanding of key ideas about radioactivity and ionizing radiation*; R. Millar; *Public Understanding of Science* 1994, vol 3, No 1, p 53-70 ; <https://doi.org/10.1088/0963-6625/3/1/004>

- [22] R. W. Bybee e et al, «Science and Technology Education for the Elementary Years: Frameworks for Curriculum and instruction,» Office of Educational Research and Improvement (ED), Andover, Massachusetts Washington, D.C., 1989.
- [23] Documento di Lavoro dei Servizi della Commissione - Memorandum sull'istruzione e la formazione permanente, Bruxelles 30.10.2000: Commissione delle Comunità Europee, https://archivio.pubblica.istruzione.it/dg_postsecondaria/memorandum.pdf.
- [24] M. Carpineti, M. Cavinato, M. Giliberti, N. Ludwig, L. Perini, E. Veronesi *The Perception of Physics in Secondary School Students near Milan. An analysis related to "Tracks", a Physics Show for Secondary School*. Università Statale di Milano, Dipartimento di Fisica
- [25] M. Carpineti, M. Cavinato, M. Giliberti, N. Ludwig and L. Perini, *Theatre to motivate the study of physics*, Jcom10(01) (2011) A01.
- [26] A. Richards (2001), *Alien Vision - Exploring the Electromagnetic Spectrum with Imaging Technology* - Second edition. Washington: SPIE Press

Bibliografia

- [1] M. Land, “Full STEAM Ahead: The Benefits of Integrating the Arts Into STEM,” *Proc Comput Sci*, vol. 20, pp. 547–552, 2013.
- [2] R. Bybee, “Advancing STEM Education: A 2020 Vision,” *Technology and Engineering Teacher; Reston*, vol. 70, no. 1, pp. 30–35, 2010.
- [3] H. Gonzalez and J. Kuenzi, “Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Education: A Primer,” *Congressional Research Service, Library of Congress*, 2012.
- [4] “OECD (2017), Education at a Glance 2017: OECD Indicators.” Prospetto per l’Italia al sito: <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/eag-2017-54-en.pdf?expires=1573750998&id=id&accname=guest&checksum=25ED5BA319288DFC7C66827143A79BA7>.
- [5] *Scienza Under 18, Attori del Sapere. Un progetto di teatro, scienza e scuola. A cura di G. Bertini, E. Franchini, P. Samek Lodovici, N. Vitali.* Milano: Scienza Express, 2011.
- [6] M. Giliberti, *Fisica a Teatro.* Ariccia (RM): MMXIV ARACNE editrice int.le S.r.l., 2014.
- [7] K. Robinson and L. Aronica, *Scuola creativa. Manifesto per una nuova educazione.* Erickson, 2016.
- [8] V. A. Segarra, B. Natalizio, C. Falkenberg, S. Pulford, and R. M. Holmes, “STEAM: Using the Arts to Train Well-Rounded and Creative Scientists,” *Journal of Microbiology & Biology Education*, vol. 19, no. 1, 2018.
- [9] M. Carpineti, M. Cavinato, M. Giliberti, N. Ludwig, and L. Perini, “Theatre to motivate the study of physics,” *Jcom*, vol. 10(01), 2011.
- [10] M. Ødegaard, “Dramatic Science. A Critical Review,” *Studies in Science Education*, vol. 39, no. 1, pp. 75–101, 2003.

- [11] M. Braund, "Drama and learning science: An empty space?," *British Educational Research Journal*, vol. 41, no. 1, pp. 102–121, 2015.
- [12] P. A. Archila, "Using Drama to Promote Argumentation in Science Education: The Case of "Should've"," *Science & Education*, vol. 26, no. 3-4, pp. 345–375, 2017.
- [13] D. van Duin, "The use of drama in secondary education to increase motivation for learning about environmental issues," Master's thesis, Master programme Science Education and Communication Utrecht University, 2019.
- [14] N. F. Wieringa, J. A. A. Swart, T. Maples, L. Witmond, H. Tobi, and H. J. V. der Windt, "Science theatre at school: Providing a context to learn about socio-scientific issues," *International Journal of Science Education, Part B: Communication and Public Engagement*, vol. 1, no. 1, pp. 71–96, 2011.
- [15] R. J. A. Metcalfe, S. Abbott, P. Bray, J. Exley, and D. Wisnia, "Teaching Science Through Drama: an empirical investigation," *Research in Science & Technological Education*, vol. 2:1, pp. 77–81, 1984.
- [16] S. R. Barbieri, M. Carpineti, M. Giliberti, E. Rigon, M. Stellato, and M. Tamborini, "'good vibrations' a workshop on oscillations and normal modes," *Il Nuovo Cimento C*, vol. 38 (8), 2015.
- [17] J. Tveita, *Helping Middle School Students to learn the Kinetic Particle Model*. NY: Misconceptions Trust, 1993. In The Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics.
- [18] R. Verhoeff, "The Use of Drama in Socio-Scientific Inquiry-Based Learning," *Cognitive and Affective Aspects in Science Education Research, Vol: Contributions from science education research*, no. 3, pp. 117–126, 2017.
- [19] V. M. Y. Cheng, "Developing Physics learning activities for fostering student creativity in Hong Kong context," *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, vol. 5, issue 2, article 1, 2004.
- [20] M. Braund, "Electric drama to improve understanding in science," *School Science Review*, vol. 81, pp. 35–41, 1999.
- [21] J. Duveen and J. Solomon, "The Great Evolution Trial: Use of Role-Play in the Classroom," *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 31, pp. 575–582, Issue 5, 1994.
- [22] L. Deslauriers, L. S. McCarty, K. Miller, K. Callaghan, and G. Kestin, "Measuring actual learning versus feeling of learning in response to being actively engaged in

- the classroom,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, no. 39, pp. 19251–19257, 2019.
- [23] B. Spoon, “Het ’waar, waarom en hoe’ van Pandemonia Science Theatre Nederland.” Traduzione: Il “dove, perché e come” del Pandemonia Science Theater Nederland [Online] Available: <http://www.nopapers.nl/teater/0/t0016/>.
- [24] Lo Spettacolo della Fisica. <http://spettacolo.fisica.unimi.it/>.
- [25] Jet Propulsion Theatre. <http://www.jetpropulsiontheatre.org/>.
- [26] Astrokids INAF, “Avventure nello spazio con Martina Tremenda.” <http://astrokids.inaf.it/lo-spettacolo/>.
- [27] Federico Benuzzi. <http://www.federicobenuzzi.com/>.
- [28] Giorgio Häusermann. <http://www.asconoscienza.ch/?p=1045>.
- [29] Gabriella Greison. <https://greisonanatomy.com/descrizione-monologhi/>.
- [30] Maria Rosa Menzio, Teatro e Scienza. http://www.teatroescienza.it/chi_sono.htm.
- [31] Piergiorgio Odifreddi. <http://www.piergiorgiodifreddi.it/>.
- [32] O. Zhang, “The Daily Illini - Physics Van drives kids to engage in science.” [Online]. Available: <https://dailyillini.com/features/2019/03/25/physics-van-drives-kids-to-engage-in-science/>, 2019.
- [33] That Physics Show. <https://www.thatphysicsshow.com/blank-ctxn>.
- [34] C. Nguyen, “The Daily Targum - Rutgers staff member discusses performing physics off-Broadway, building classroom demonstrations.” [Online]. Available: <https://www.dailytargum.com/article/2019/03/rutgers-staff-member-discusses-performing-physics-off-broadway-building-classroom-demonstrations>, 2019.
- [35] H. K. Dreiner, M. Becker, M. Borzyszkowski, M. Braun, A. Faßbender, J. Hampel, M. Hansen, *et al.*, ““What’s (the) Matter?”, A Show on Elementary Particle Physics with 28 Demonstration Experiments,” 2016. arXiv:1607.07478 [physics.pop-ph].
- [36] N. Ludwig and M. Carpineti, “Fisica e Teatro: una scommessa vinta dal Laboratorio SAT, Scienzainrete.” [Online]. Available: <https://www.scienzainrete.it/contenuto/articolo/Fisica-e-Teatro-una-scommessa-vinta-dal-Laboratorio-SAT>, 2010.

- [37] Spettacolo teatrale “Luce dalle Stelle” di M. Carpineti, M. Giliberti, N. Ludwig e S. Sandrelli, regia di F. Albanese. (2009). <http://spettacolo.fisica.unimi.it/index.php/a-homepage-section/>.
- [38] Spettacolo teatrale “Light Mistery” di M. Carpineti, M. Giliberti, N. Ludwig, regia di E. Bronzino. (2015). <http://spettacolo.fisica.unimi.it/index.php/a-homepage-section/>.
- [39] Spettacolo teatrale “Alice nel Paese della Scienza” di M. Carpineti, M. Giliberti, N. Ludwig, regia di E. Bronzino. (2010). <http://spettacolo.fisica.unimi.it/index.php/a-homepage-section/>.
- [40] Spettacolo teatrale “Sotto un'altra Luce” di M. Carpineti, M. Giliberti, N. Ludwig, regia di F. Albanese e M. Anaclerio. (2015). <http://spettacolo.fisica.unimi.it/index.php/a-homepage-section/>.
- [41] Spettacolo teatrale “Tracce” di M. Carpineti, S. Ghioldi, M. Giliberti, N. Ludwig, A. Rota, regia di S. Ghioldi, A. Rota. (2007). <http://spettacolo.fisica.unimi.it/index.php/a-homepage-section/>.
- [42] G. Martinez-Borreguero *et al.*, “Detection of Misconceptions about Colour and an Experimentally Tested Proposal to Combat them,” *International Journal of Science Education*, vol. 35(8), pp. 1299–1324, 2013.
- [43] C. Haagen, *Proceeding of the GIREP-MTPL 2014 International Conference*, ch. Chapter 3: Physics Teaching and Learning at Secondary Level - Simple Experiments Supporting Conceptual Understanding of Body Colour, pp. 251–258. Palermo, C. Fazio and R.M. Sperandeo Mineo, 2014.
- [44] E. Guesne, R. Driver, and A. Tiberghien, *Children's ideas in science*, ch. Chapter 2: Light. Milton Keynes : Open University Press, 1985.
- [45] F. Chauvet, “Teaching Colour: designing and evaluation of a sequence,” *European Journal of Teacher Education*, vol. 19:2, pp. 121–136, 1996.
- [46] S. Neumann and M. Hopf, “Students' Conceptions About ‘Radiation’: Results from an Explorative Interview Study of 9th Grade Students,” *J Sci Educ Technol*, vol. 21, Issue 6, pp. 826–834, 2012.
- [47] U. Besson, “Paradoxes of thermal radiation,” vol. 30, no. 5:995.
- [48] J. C. Libarkin, A. Asghar, C. Crockett, and P. Sadler, “Invisible Misconceptions: Student Understanding of Ultraviolet and Infrared Radiation,” *Astronomy Education Review*, vol. 10, Issue 1, pp. 49–60, 2011.

- [49] P. J. Emigh, G. Passante, and P. S. Shaffer, “Student Understanding of Blackbody Radiation and Its Application to Everyday Objects,” in *Paper presented at the Physics Education Research Conference 2013*, (Portland, OR), pp. 137–140, 2013.
- [50] T. Plotz and M. Hopf, “Two concepts of radiation. a case study investigating existing preconceptions,” *International Journal of Science and Mathematics Education*, vol. 4, no. 4, pp. 447–459, 2016.
- [51] T. Plotz, “Students’ conceptions of radiation and what to do about them,” *Phys. Educ.*, vol. 52, no. 1, 2017.
- [52] T. Plotz and M. Hopf, “Students’ Misconceptions about Invisible Radiation,” in *Electronic Proceedings of the ESERA 2015 Conference. Science education research: Engaging learners for a sustainable future* (J. Lavonen *et al.*, eds.), (Helsinki, Finland: University of Helsinki), pp. 95–100, 2015.
- [53] R. Millar, “School students’ understanding of key ideas about radioactivity and ionizing radiation,” *Public Understanding of Science*, vol. 3, no. 1, pp. 53–70, 1994.
- [54] H. Lee and S. Schneider, “Using astronomical photographs to investigate misconceptions about galaxies and spectra: Question development for clicker use,” *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, 2015. arXiv:1508.00711 [physics.ed-ph].
- [55] E. Ozdemir, “Comics in modern physics: Learning blackbody radiation through quasi-history of physics,” *Studies in Educational Research and Development*, vol. 1, no. 1, pp. 41–59, 2017.
- [56] A. R. Akdeniz, “Turkish Students’ Perception about the Black Body Radiation, Photoelectric Effect and Compton Scattering Phenomena,” *Journal of Studies in Education*, vol. 5, no. 3, 2015.
- [57] G. Ruffo, *Fisica: Lezioni e Problemi*. Bologna: Zanichelli editore S.p.A, 2010.
- [58] G. Troiano and G. Rocci, *Fisica per la Scuola Superiore - seconda edizione*. archivio online, 2019.
- [59] U. Amaldi, *La Fisica di Amaldi - Idee ed esperimenti*. Bologna: Zanichelli editore S.p.A, 2007.
- [60] U. Amaldi, *L’Amaldi 2.0*. Bologna: Zanichelli editore S.p.A., 2010.
- [61] J. S. Walker, *Dalla meccanica alla Fisica Moderna*. Milano - Torino: Pearson Italia, 2014.

- [62] F. Bagatti, E. Corradi, A. Desco, and C. Ropa, *Conoscere la Materia - Seconda edizione*. Bologna: Zanichelli editore S.p.A, 2010.
- [63] A. Caforio and A. Ferilli, *Fisica! Le regole del gioco*. Milano: Mondadori Education S.p.A., 2012.
- [64] J. S. Walker, *Fisica Modelli Teorici e Problem Solving 3*. Milano-Torino: Pearson Italia, 2016.
- [65] M. Macchioro, “Fisica C3: Magnetismo, Relatività, Quantistica, Radioattività - Progetto Educationalab,” 2013.
- [66] J. D. Cutnell and K. W. Johnson, *Elementi di Fisica*. Bologna: Zanichelli editore S.p.A., 2010.
- [67] A. Caforio and A. Ferilli, *Fisica! Pensare l’Universo 3 - Edizione LAB 5*. Milano: Mondadori Education S.p.A., 2015.
- [68] A. Richards, *Alien Vision - Exploring the Electromagnetic Spectrum with Imaging Technology - 2nd ed.* Washington : SPIE, 2011.
- [69] U. Amaldi, *Estensione online de ‘L’Amaldi.verde’ e ‘L’Amaldi.blu’*. Bologna: Zanichelli editore S.p.A., 2014.
- [70] Y. A. Çengel, *Termodinamica e trasmissione del calore - Terza edizione*. Milano : McGraw-Hill, 2009.
- [71] R. W. Bybee *et al.*, *Science and Technology Education for the Elementary Years: Frameworks for Curriculum and Instruction*. Office of Educational Research and Improvement (ED), Andover, Massachusetts Washington, D.C., 1989.
- [72] L. B. Duran and E. Duran, “The 5e Instructional Model: A Learning Cycle Approach,” *The Science Education Review*, vol. 3(2), pp. 49–58, 2004.
- [73] M. Carpineti, P. Childs, J. Dittmar, I. Eilks, D. Fortus, M. Giliberti, *et al.*, *Teaching the TEMI way - How using mysteries supports science learning - Second Edition*. TEMI-Teaching Enquiry with Mysteries Incorporated, 2015.
- [74] Documento di Lavoro dei Servizi della Commissione - Memorandum sull’istruzione e la formazione permanente. Bruxelles 30.10.2000: Commissione delle Comunità Europee, https://archivio.pubblica.istruzione.it/dg_postsecondaria/memorandum.pdf.
- [75] Quadro di Riferimento per Fisica dei Licei Scientifici 2015. Ministero dell’Istruzione dell’Università e della Ricerca (MIUR), <https://www.miur.gov.it/web/guest/il-quadro-di-riferimento-della-seconda-prova-di-fisica-per-gli-esami-di-stato-dei-licei-scientifici>.

Ringraziamenti

Il primo ringraziamento va alla Relatrice prof.ssa Levrini, che mi ha supportato nella scelta della tesi e mi ha aiutata da lontano, e al Relatore prof. Giliberti e la Correlatrice M. Carpineti, che mi hanno accolta con entusiasmo a Milano e mi hanno aiutato tanto in questi mesi, facendomi crescere sia accademicamente che come persona.

Grazie ovviamente alla mia mamma e al mio papà, che ci sono sempre stati, mi hanno calmata nei momenti di agitazione, mi hanno supportato e sopportato, la mamma che è stata sveglia con me la notte prima della consegna, il papà che mi ha aiutato a cercare telecamere infrarosse per tutta Parma.

Grazie a mio fratello per quel messaggio il giorno della consegna.

Grazie ad Alessandro che con pazienza ha letto tutta la tesi, mettendo virgole e togliendo "studenti".

Grazie alla nonna Adriana, per il suo sorriso, soprattutto nei momenti di sconforto. Grazie alla nonna Nella, non meno importante, che ha acceso sicuramente una candolina per me.

Grazie alla zia Marina, allo zio Fabrizio e allo zio Claudio, semplicemente perché sono la mia famiglia.

Grazie a Elisa, che è stata attenta a non attaccarmi l'influenza le settimane prima della consegna.

Grazie alle mie amiche e ai miei amici, perché, nonostante in questo periodo li abbia trascurati e a volte trattati anche male, mi sono stati comunque vicini.

Grazie ai professori Marco ed Enrico che mi hanno aiutato per la tesi e mi hanno coinvolta nella progettazione del laboratorio.

Grazie al gruppo mensa di Milano che mi ha fatto compagnia e mi ha fatto sentire a casa in questi mesi di tirocinio.

Grazie a tutti quelli che ho sicuramente dimenticato

E infine grazie al teatro, perché luogo di magia e meraviglia, capace di sorprendermi sempre, che mi ha permesso di vivere questa bellissima avventura, non senza ostacoli, ma con molte soddisfazioni.

Cala il Sipario

[FINE]