

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze

Corso di Laurea Magistrale in Fisica

Realizzazione di una camera iperspettrale per uso industriale

Relatore:

Prof. Enrico Campari

Correlatori:

Dott. Matteo Lombini

Dott. Giorgio Matteucci

Presentata da:

Vincenzo Montedoro

Sessione **II**

Anno Accademico **2014/2015**

Indice

Abstract	5
Introduzione	6
Capitolo 1 Spettroscopia	7
1.1 Storia della spettroscopia	7
1.2 Radiazioni elettromagnetiche e fenomeni associati	8
1.3 Riflessione e Rifrazione	11
1.4 Interferenza e Diffrazione	13
1.5 Misure di radiazioni elettromagnetiche	16
1.6 Principali configurazioni spettroscopiche	19
1.6.1 Lenti e specchi	19
1.6.2 Prismi e reticoli	21
1.6.3 Sensori	28
1.6.3.1 Rappresentazione di un'immagine digitale	29
1.6.3.2 Sensori CCD e CMOS	31
1.6.3.3 Caratteristiche e limiti dei sensori	35
1.6.4 Sorgenti	38
1.6.5 Filtri	43
1.7 Applicazioni	46
Capitolo 2 Camere iperspettrali	48
2.1 Architettura di camere iperspettrali	48
2.2 Progetto per l'azienda CNI	52
2.2.1 Disegno ottico	52
2.2.2 Calibrazione	57
2.2.2.1 Set e procedimento di calibrazione	57
Capitolo 3 Assemblaggio e risultati	63
3.1 Risultati	68
Conclusioni	75
Appendice A	76
Appendice B	81
Bibliografia	82

Abstract

Il lavoro svolto è stato commissionato dall'azienda CNI, la quale ha richiesto al Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'università di Bologna la costruzione di una camera iperspettrale per uso industriale. In questo elaborato sono descritte le tecniche di progettazione e realizzazione dell'apparato ottico, adatto ad indagare lunghezze d'onda nel range visibile. Questo apparato è composto da un obiettivo focalizzatore, uno spettroscopio e un sensore finale.

La realizzazione pratica dello strumento è stata raggiunta attraverso tre fasi distinte: la calibrazione, l'assemblaggio e i test finali; ciò ha permesso di ottenere risultati in accordo con quelli previsti in fase di progettazione.

Poiché i risultati ottenuti si sono rivelati conformi alle richieste dell'azienda, si è potuto procedere all'applicazione di una particolare copertura della camera iperspettrale. Questo procedimento di copertura e chiusura della camera è stato necessario sia per permettere all'azienda di svolgere test con lo spettroscopio in condizioni di elevata oscurità, sia per preservare i vari elementi ottici da movimenti meccanici esterni.

Terminato così il lavoro, è stata consegnata all'azienda la camera chiusa. Essa sarà testata per l'analisi spettrale di campioni, che passano attraverso una linea illuminata di lunghezza 1 m e ad una distanza di 1,5 m, su un rullo autotrasportatore. In futuro è prevista anche la realizzazione di un'altra camera iperspettrale che indagherà le lunghezze d'onda nel vicino infrarosso.

Introduzione

Lo scopo di questa tesi è quello di descrivere il lavoro di progettazione, calibrazione e costruzione di una camera iperspettrale per uso industriale. Nel primo capitolo sono descritte, le proprietà fisiche e i parametri fondamentali per la creazione di un sistema ottico di questo tipo. Oltre a brevi cenni storici, vengono riportate le configurazioni principali di sistemi spettroscopici e illustrati gli elementi costituenti questo tipo di sistemi. Nel secondo capitolo viene descritta, in particolare, la composizione e il funzionamento di una camera iperspettrale, nonché le applicazioni di questa apparecchiatura in vari campi, sia di ricerca che industriali. Si passa quindi alla trattazione del lavoro svolto praticamente. Inizialmente viene spiegata la complessa procedura di calibrazione, la quale è suddivisa in diversi step, necessari per ottenere i valori posizionali del fascio e le distanze focali dei gruppi ottici. Una volta ottenuti risultati soddisfacenti, sono stati disposti e montati gli elementi ottici, che costituiscono la camera, su una base metallica liscia, e tramite un nuovo sistema ottico, nel quale lo spettroscopio era l'elemento finale, sono state acquisite le immagini utili per il calcolo dei valori di risoluzione spaziale e spettrale. Questi valori sono importanti per determinare la qualità del lavoro svolto. Nel terzo e ultimo capitolo quindi, oltre alla descrizione della fase di assemblaggio e delle modalità di acquisizione nel nuovo sistema ottico, viene trattata anche l'analisi delle immagini e dei risultati ottenuti.

Capitolo 1

Spettroscopia

1.1 Storia della spettroscopia

La scienza che studia la propagazione e le interazioni della radiazione elettromagnetica è conosciuta come ottica. La ragione di questo nome deriva dal solo detector a disposizione all'epoca: l'occhio umano. L'occhio è un incredibile e sensibile detector e nella regione del visibile è stato superato solo questo secolo con lo sviluppo delle moderne tecnologie. Non è sorprendente, tuttavia che le più importanti e fondamentali scoperte nell'ottica siano state fatte dall'osservazione visiva. La natura ondulatoria della luce è stata stabilita dall'osservazione del fenomeno di interferenza, e la natura del vettore del campo di radiazione dall'osservazione dell'effetto di polarizzazione. Il progresso nell'ambito scientifico ha condotto alla realizzazione che l'informazione disponibile per noi dall'osservazione confinata nella regione del visibile era solo una piccola frazione di quello che si è scoperto poi con lo sviluppo delle equazioni del campo elettromagnetico di Maxwell. Queste equazioni rappresentano una sintesi dell'elettrostatica ed elettrodinamica e le loro soluzioni indicano l'esistenza di onde composte dai vettori ortogonali elettrici e magnetici e di una velocità di propagazione identica a quella trovata per la luce. Questa fu un'incredibile sintesi dei vari elementi che sono stati accumulati sotto il nome generale dell'ottica, di cui fa parte anche la scienza della spettroscopia. Quest'ultima è stata scoperta tramite metodi visivi quando l'inglese Isaac Newton ha iniziato ad osservare la luce proveniente dal sole incidente su una delle facce inclinate di un prisma di vetro. La luce rifratta emergente dall'altra faccia inclinata era diretta verso uno sfondo e lì produsse diversi colori nell'intervallo dal rosso al violetto (l'intero spettro visibile). Oltre un secolo più tardi, agli inizi del 1800, si scoprì che da oltre gli estremi dello spettro visibile provenivano raggi invisibili (infrarossi e ultravioletti). In seguito, nei primi anni dell'800, Fraunhofer, uno dei padri della spettroscopia insieme a Bunsen e Kirchhoff, inventò lo spettroscopio e fu il primo ad investigare seriamente sulle righe di assorbimento nello spettro del sole. Per la scienza della spettrografia stessa, tuttavia, il più importante avvenimento fu la graduale realizzazione che ogni punto nello spettro corrisponde a onde di una data lunghezza d'onda, e tramite i fenomeni di interferenza fu possibile determinare una serie di linee spettrali sparpagliate che hanno mostrato che la regione visibile dello spettro corrisponde a lunghezze d'onda tra 400 e 700 nm circa. Dopo il lavoro di Maxwell e le nuove scoperte nel campo della spettroscopia, divenne quindi fondamentale il concetto che lo spettro elettromagnetico si estende dalle radioonde attraverso le regioni infrarosse, visibile e ultravioletta fino ai raggi X e raggi gamma. Nell'ultimo secolo, la spettroscopia è stata studiata in tutte queste regioni e l'osservazione di linee sparpagliate attraverso lo spettro è stata una costante guida sperimentale per i teorici, da Planck e Bohr a Dirac e Lamb, nello sviluppo della meccanica quantistica. La posizione della linea, che identifica una determinata lunghezza d'onda, è stata la quantità principale e non molti fisici si sono interessati alle domande "che significato ha una linea spettrale?" o "qual è il vero significato di lunghezza d'onda?". Queste questioni divennero interessanti nel periodo

seguito la seconda guerra mondiale, quando i fisici e i governi per i quali lavoravano si iniziarono ad interessare alle applicazioni pratiche (belliche) dei concetti e delle strumentazioni scientifiche, le quali permisero l'ideazione del radar e lo sviluppo della radiofrequenza e della spettroscopia a microonde. Al giorno d'oggi, le applicazioni che vedono implicata l'analisi spettroscopica sono molteplici e toccano molteplici campi, da quello puramente scientifico a quello medico, geologico, agroalimentare, e infrastrutturale, per citarne alcuni.

1.2 Radiazioni elettromagnetiche e fenomeni associati

Le radiazioni luminose si presentano come onde elettromagnetiche (natura ondulatoria) e come una serie di pacchetti discreti di energia, i fotoni (natura corpuscolare). Dal punto di vista ondulatorio, le radiazioni (o onde) elettromagnetiche consistono in una forma di energia che si propaga, anche nel vuoto: sono la simultanea propagazione nello spazio delle oscillazioni di un campo elettrico e di un campo magnetico. Ogni radiazione, è caratterizzata dai seguenti parametri:

Frequenza ν : Indica il numero di vibrazioni o oscillazioni nell'unità di tempo e si misura in Hertz (Hz)

Periodo T : Indica il tempo necessario, ad una radiazione, per compiere una oscillazione completa e tornare al punto di partenza. Non è altro che l'inverso della frequenza ($T=1/\nu$) e si misura in secondi (s).

Lunghezza d'onda λ : Indica la distanza tra due punti adiacenti in fase (ad esempio tra due massimi consecutivi) e si misura in m. [$1\mu\text{m}=10^{-6}$ m , $1\text{nm}=10^{-9}$ m, $1\text{Å}=10^{-10}$ m]

Velocità di propagazione c : Indica la velocità con cui si propaga la radiazione elettromagnetica e dipende dal mezzo in cui si propaga la radiazione. Nel vuoto è di circa 300 000 km/s: $C = 3,00 \times 10^8$ m/s

Una radiazione elettromagnetica consiste in 'pacchetti discreti' di energia, come si è detto, la cui energia dipende dalla frequenza, secondo l'equazione: $E = h\nu$ dove h indica la costante di Planck: $h = 6,63 \times 10^{-34}$ Js. Inoltre l'energia di un fotone viene solitamente espressa in elettron-volt ($1\text{eV}=1,6 \times 10^{-19}$ J). Questa relazione indica l'energia associata a ciascun fotone per ogni fascio di frequenza ν , per cui un fascio di luce è più o meno intenso a seconda che porti più o meno fotoni nell'unità di tempo, ma l'energia di ciascun fotone (il quanto di energia), è sempre la stessa per una determinata frequenza della radiazione. Ricordiamo anche che la frequenza è relazionata alla lunghezza d'onda e alla velocità di propagazione mediante la relazione: $\lambda = c\nu$. Esistono quindi vari tipi di radiazione elettromagnetica, che differiscono per la loro lunghezza d'onda (e di conseguenza per la loro frequenza ed energia); sono riassunti nello spettro delle radiazioni elettromagnetiche (Fig. 1.1).

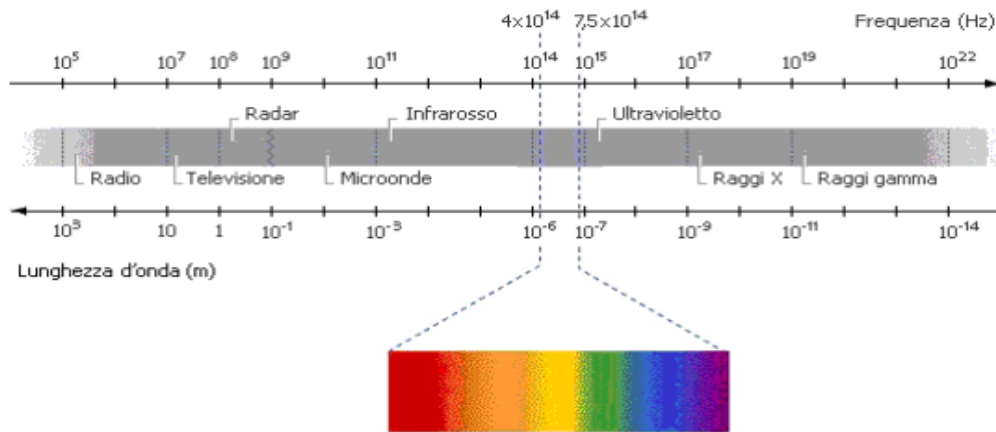


Fig. 1.1 Spettro della radiazione elettromagnetica.

La radiazione visibile rappresenta solo una piccola parte dello spettro elettromagnetico. Alle diverse radiazioni visibili, che differiscono per la loro lunghezza d'onda corrispondono i diversi colori. Come sappiamo quando un raggio di luce bianca colpisce un prisma di vetro viene scomposto in diversi colori e quello che accade è analogo a quanto si osserva nell'arcobaleno o guardando obliquamente la superficie di un CD. La scomposizione ('dispersione') in diversi colori tramite un prisma si spiega in quanto la luce "bianca" è in realtà composta di molteplici radiazioni di diversa frequenza e quindi corrispondenti a tutti i colori. Inoltre quando un raggio di luce passa da un mezzo ad un altro viene deviato, variando la propria velocità di propagazione, (fenomeno detto "rifrazione") e l'entità della deviazione dipende dalla lunghezza d'onda del raggio incidente e dall'indice di rifrazione dei due materiali. La dispersione che osserviamo invece per riflessione sulla superficie di un CD si basa su un altro fenomeno: la diffrazione, collegata all'interferenza delle radiazioni. Una radiazione di un solo colore ottenuta tramite dispersione, caratterizzata da una ben precisa lunghezza d'onda, viene detta monocromatica. Più precisamente, si parla di fascio di luce monocromatica quando esso è costituito da radiazioni di una sola frequenza e lunghezza d'onda. Si parla invece di fascio di luce policromatica quando esso è costituito da radiazioni di frequenza e lunghezza d'onda diverse. La luce bianca proveniente dal sole è policromatica. Per sapere se un fascio di luce è monocromatico o policromatico è sufficiente farlo passare attraverso un prisma: se il raggio rimane unico si può dire che è costituito da radiazioni di una sola frequenza, cioè che è monocromatico, se invece viene scomposto in diversi raggi è policromatico. Inoltre, essendo lo spettro costituito dall'ordinata disposizione delle radiazioni secondo la loro lunghezza d'onda, bisogna fare una distinzione tra uno spettro continuo o discontinuo (a righe o a bande). In uno spettro continuo, infatti, sono presenti le radiazioni di tutte le frequenze; ad esempio la luce 'bianca' emessa da una comune lampadina a incandescenza ha uno spettro continuo (nel visibile). In uno spettro discontinuo si osserva invece la mancanza di alcune radiazioni, come accade ad esempio nello spettro di emissione del sodio, che presenta uno spettro discontinuo (a righe).

La radiazione visibile, come si è detto, rappresenta solo una parte dello spettro ed è quella che il nostro occhio è in grado di percepire; l'apparato visivo umano è sensibile a radiazioni comprese tra i 380nm e i 720nm in modo variabile in funzione delle condizioni di luce. La CIE (International Commission on Illumination) ha definito la risposta spettrale dell'occhio con due curve principali (Fig 1.2): una per le condizioni di luce diurna (forte illuminamento) e un'altra per le condizioni di luce notturna (basso illuminamento). Nel primo caso si parlerà di “visione fotopica” in cui si ha un massimo di sensibilità dell'occhio attorno ai 550nm (luce giallo-verde), nel secondo caso invece di “visione scotopica” in cui il massimo si sposta vicino ai 500nm (luce blu-verde). Se il passaggio tra diverse condizioni di luce è graduale spesso non ci si accorge di questo adattamento dell'occhio, quando invece il passaggio è brusco si verificano fenomeni di abbagliamento o di momentanea perdita di sensibilità dell'occhio per cui sembra tutto buio.

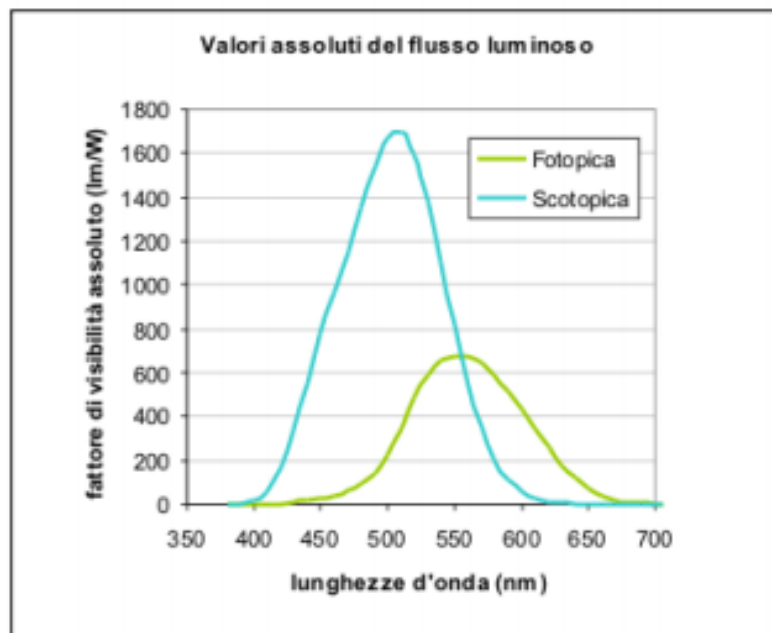


Fig. 1.2 Risposta spettrale dell'occhio alle radiazioni elettromagnetiche

1.3 Riflessione e Rifrazione

Quando la luce colpisce una superficie viene riflessa, assorbita o rifratta in misura diversa a seconda delle caratteristiche del mezzo. Per quanto riguarda il fenomeno di riflessione, nel caso ideale di superficie perfettamente speculare, si ha che l'angolo di incidenza è uguale a quello di riflessione, se invece si ha una superficie perfettamente diffondente la luce verrà diffusa in tutte le direzioni. In realtà molte riflessioni sono frutto della combinazione di questi due fenomeni che non dipendono dalla lunghezza d'onda (Fig. 1.3).

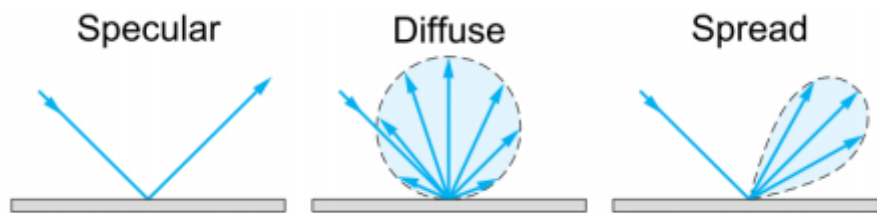


Fig. 1.3 Luce riflessa, diffusa e combinazione di entrambi i fenomeni

La luce non riflessa può essere assorbita dal mezzo, nel qual caso viene smaltita sotto forma di calore, oppure rifratta. Il fenomeno della rifrazione ha origine dal fatto che la velocità delle onde elettromagnetiche in un mezzo che non sia il vuoto è diversa, e sempre minore di c , cambiando da un mezzo all'altro. Il rapporto tra la velocità assoluta c e la velocità relativa v è detto indice di rifrazione e si indica con la lettera n . Se prendiamo un raggio di luce che incide su una superficie di separazione aria/vetro con un angolo θ rispetto alla normale alla superficie, esso viene rifratto nel vetro con un angolo θ' diverso (Fig. 1.4). Questo comportamento è governato dalla legge della rifrazione o di Snell (1):

$$n \sin(\theta) = n' \sin(\theta') \quad (1)$$

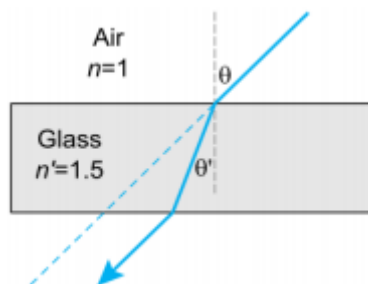


Fig. 1.4 Illustrazione della legge di Snell

L'indice di rifrazione varia in funzione della lunghezza d'onda ed è questo il motivo per il quale si ha la scomposizione della luce bianca in un mezzo trasparente come accade in un prisma (Fig. 1.5a). Sempre quest'ultima relazione ci permette di definire il concetto di angolo limite, quell'angolo cioè oltre il quale la luce incidente viene completamente riflessa nel primo mezzo. Il fenomeno della riflessione totale è sfruttato, ad esempio, nelle fibre ottiche (Fig. 1.5b).

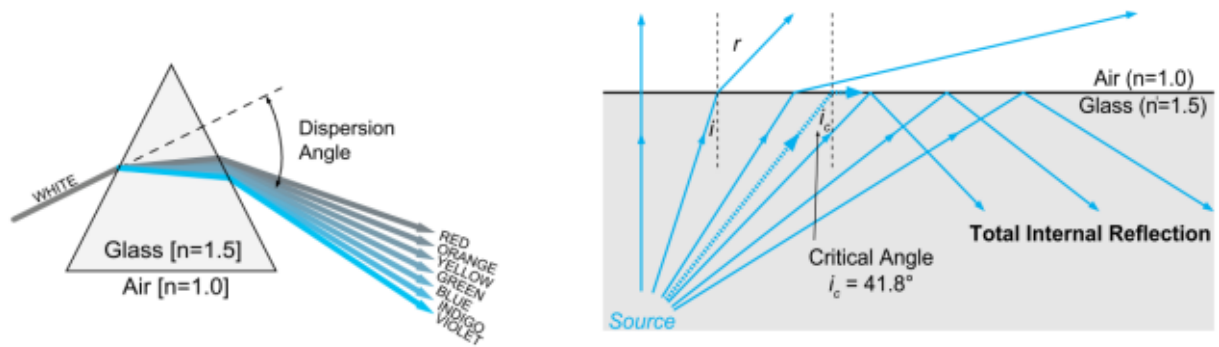


Fig. 1.5a Fenomeno di dispersione all'interno di un prisma. Fig. 1.5b Concetto di angolo limite e riflessione.

1.4 Interferenza e Diffrazione

Una caratteristica molto particolare delle onde, siano esse elettromagnetiche, meccaniche o sonore, è quella di potersi sovrapporre nel mezzo in cui viaggiano senza alterarsi. In ogni punto si avrà quindi un'intensità pari alla somma dei vari contributi presenti: si avranno quindi dei punti in cui i fronti d'onda sono in fase e l'intensità aumenta (li chiameremo punti di massimo o massimi) mentre in altri punti i fronti si sovrapporranno in opposizione di fase e l'intensità decresce (punti di minimo o minimi). Definiamo quindi la differenza di fase tra due sorgenti (2):

$$\delta = k (r_2 - r_1) + (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (2)$$

Essa si compone di due termini: il secondo riguarda la differenza di fase intrinseca tra le due sorgenti, e il primo dipende dalla differenza dei percorsi delle due onde, con k che indica il numero d'onda. Nel caso la differenza di fase intrinseca tra le due sorgenti non cambi nel tempo, e cioè quando abbiano la stessa pulsazione, si dirà che sono coerenti; se inoltre questa differenza è nulla esse si diranno pure sincrone.

Il fenomeno appena descritto prende il nome di interferenza e fu osservata e studiata in laboratorio da Young che riuscì a riprodurla per primo nel 1801. Come si nota in Fig. 1.6, una prima fenditura (a) funge da sorgente puntiforme di onde sferiche, su un secondo schermo (S2) altre due fenditura (b,c), poste simmetricamente all'asse della prima, vedono arrivare contemporaneamente lo stesso fronte d'onda e si comportano a loro volta come sorgenti puntiformi di onde sferiche oltre che sincrone.

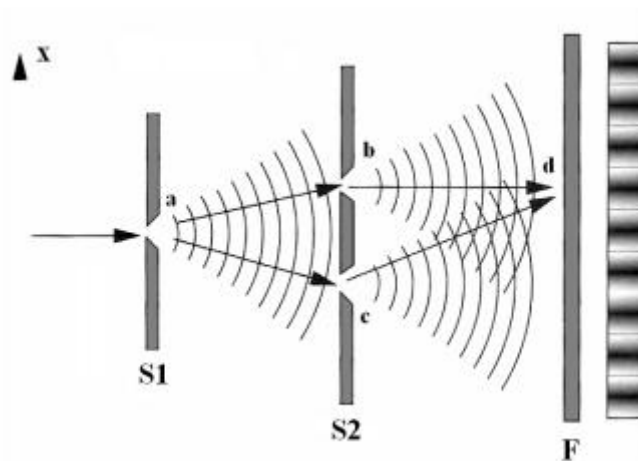


Fig. 1.6 Illustrazione del fenomeno di interferenza di più fronti d'onda sferici

La figura che si crea sull'ultimo schermo è data dall'interferenza dei vari fronti d'onda sferici ed è costituita da fasce chiare alternate a fasce scure: sono le zone in cui l'interferenza si dice costruttiva o distruttiva a seconda che le fasce siano chiare o scure. Si parla di interferenza costruttiva quando la differenza di cammino tra le due sorgenti è un multiplo della lunghezza

d'onda, si parla al contrario distruttiva quando la differenza di cammino è un multiplo semintero della lunghezza d'onda. All'aumentare del numero delle sorgenti, supposte sinusoidali e sincrone, la figura d'interferenza cambia e presenta dei massimi che diremo principali a distanze multiple di λ/d . I massimi secondari sono quelli che vengono a trovarsi tra due massimi principali e hanno ampiezza notevolmente minore. Al limite, per un numero infinito o molto grande di sorgenti, si ottengono dei massimi principali molto stretti a distanze multiple di λ/d e massimi secondari di intensità praticamente nulla nelle altre posizioni (Fig. 1.7).

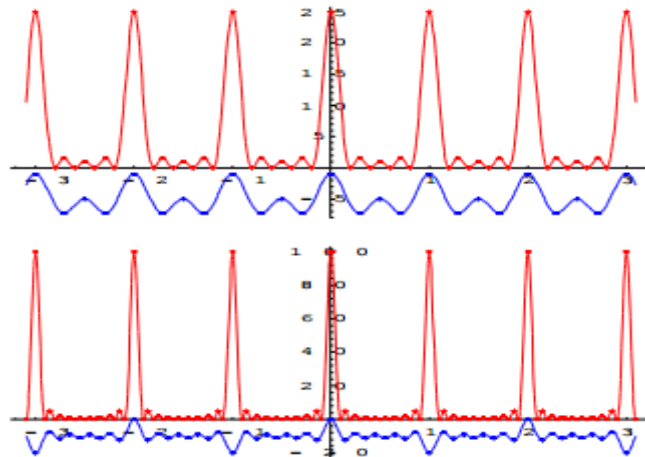


Fig. 1.7 Figure di interferenza. La prima rappresenta la figura di interferenza con un numero di sorgenti limitato. Nella seconda il numero di sorgenti è elevato, tendente all'infinito.

In realtà insieme all'interferenza si verifica sempre anche il fenomeno della diffrazione, quel fenomeno cioè che permette alle onde di propagarsi anche dietro un ostacolo. Il concetto risiede nel fatto non ideale che vede una fenditura abbastanza stretta comportarsi come una sorgente “perfetta” di onde sferiche. La fenditura produce effettivamente onde sferiche ma di intensità decrescente mano a mano che ci si allontana dal suo asse. Lo stesso vale per un oggetto che impedisce al fascio completo di propagarsi, lasciando libero il passaggio solo alle estremità del fascio, che fungono anch'esse da sorgenti. Interferendo, queste sorgenti reali di onde sferiche, permettono l'osservazione delle attenuazioni caratteristiche della diffrazione (Fig. 1.8). Si può calcolare come varia questa intensità in funzione delle dimensioni dell'apertura a , dell'angolo di osservazione θ e della lunghezza d'onda λ (3):

$$I = I_{max} \left(\frac{\text{sen}(k)}{k} \right) \quad \text{con} \quad k = \pi a \text{sen}(\theta)/\lambda \quad (3)$$

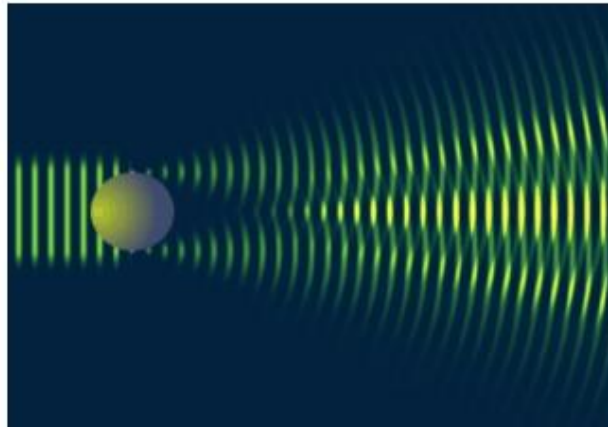


Fig. 1.8 Fenomeno di diffrazione.

L'intensità trasmessa dalla fenditura si annulla nei cosiddetti minimi di diffrazione quando:

$$\text{sen}(\vartheta) = m \lambda/a \quad (4)$$

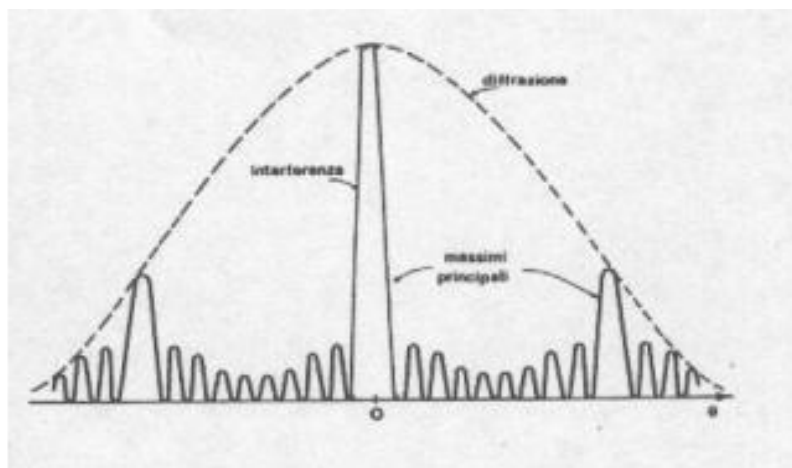


Fig. 1.9 Massimi e minimi delle figure di diffrazione e di interferenza.

e quindi per tutti i valori interi positivi e negativi di m tranne lo zero. La posizione dei primi minimi a destra e sinistra, a $+\lambda/a$ e $-\lambda/a$, permette di definire la larghezza angolare del massimo centrale di diffrazione che è $2\lambda/a$. Si nota che per $a \gg \lambda$ il massimo ha larghezza angolare molto piccola e l'effetto della diffrazione è trascurabile. Tuttavia restringendo la fenditura si può osservare sullo schermo una striscia luminosa che si allarga e delle altre che se ne creano di fianco. Per $a \sim \lambda$ il massimo si allarga fino a $a = \lambda$ e il primo minimo si forma a 90° . Se $a < \lambda$, invece, lo schermo è illuminato interamente. Per quanto riguarda l'intensità dei massimi secondari si può dimostrare che l'80% della potenza arriva nella frangia centrale mentre l'intensità del primo massimo successivo è già appena il 4,5% del massimo principale.

Il risultato è che le frange dovute all'interferenza sono tanto più strette quanto più alto è il numero delle fenditure e la loro intensità è modulata dalla diffrazione.

Non tutti i fenomeni che si osservano quando la radiazione elettromagnetica interagisce con la materia sono spiegabili con le leggi dell'elettromagnetismo classico fondato sulle leggi di Maxwell. Ad esempio le radiazioni emesse da sostanze allo stato gassoso eccitate che presentano uno spettro di emissione a righe o il calcolo dello spettro continuo di un corpo portato ad alte temperature non trovano una spiegazione plausibile nella fisica classica. In questi casi risulta necessario l'uso di una trattazione quantistica, dalla quale diviene evidente la doppia natura corpuscolare e ondulatoria della radiazione elettromagnetica.

1.5 Misure di radiazioni elettromagnetiche

Quando si ha a che fare con misure che riguardano le radiazioni elettromagnetiche, si può considerare una legge che definisce il rapporto tra l'intensità della luce emessa da una sorgente e il quadrato della distanza (5) (Fig. 1.10a).

$$E = I/d^2 \quad (5)$$

Questa legge può essere usata solo nei casi in cui la sorgente reale sia riconducibile ad una sorgente puntiforme.

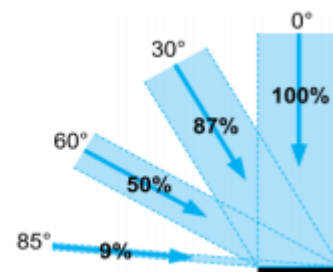
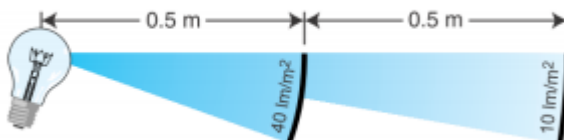


Fig. 10a Energia della radiazione proveniente da una sorgente. Fig. 1.10b Legge di Lambert.

Un'altra relazione importante, riguardante radiazioni elettromagnetiche, è la legge del coseno di Lambert (6). Essa dice che l'irradianza e l'illuminamento che investono una superficie variano con il coseno dell'angolo di incidenza (Fig. 1.10b).

$$E_0 = E \cos(\vartheta) \quad (6)$$

Questo fatto si spiega osservando che la sezione del fascio luminoso sufficiente ad illuminare una stessa superficie diminuisce all'aumentare dell'inclinazione rispetto all'asse della superficie stessa. Si definisce, inoltre, una superficie lambertiana quella superficie che da una diffusione uniforme della radiazione incidente così che la radianza sia la stessa in tutte le direzioni. Va ricordato anche che una grandezza geometrica fondamentale in questo ambito è l'angolo solido, o steradiano che è definito come quell'angolo con vertice al centro della sfera che taglia una superficie di questa di area pari al quadrato del raggio (7)(Fig.1.11).

$$\Omega = A/r^2 \quad (7)$$

In molte applicazioni la superficie sferica può essere approssimata con una piana per agevolare i calcoli. Questa forzatura non comporta grandi errori se l'angolo solido è minore di 0,03sr (~1%). Per quanto riguarda altre misure, il flusso radiante, o il flusso luminoso, se pesato con la risposta fotonica dell'occhio umano, è una misura di potenza emessa dalla sorgente e si esprime quindi in watt (W), o lumen (lm). L'irradianza, o illuminamento, invece, è una misura di flusso per unità di area o densità di flusso, invece la radianza, o luminanza, è una misura di densità di flusso per angolo solido. Per una sorgente estesa la radianza è indipendente dalla distanza perchè l'aumento dell'area osservata cancella l'effetto della legge del quadrato della distanza. Inoltre l'irradianza E a qualsiasi distanza da una sorgente estesa è legata alla radianza L della stessa sorgente attraverso la seguente relazione che dipende solo dall'angolo θ (8):

$$E = \pi L \sin^2(\theta/2) \quad (8)$$

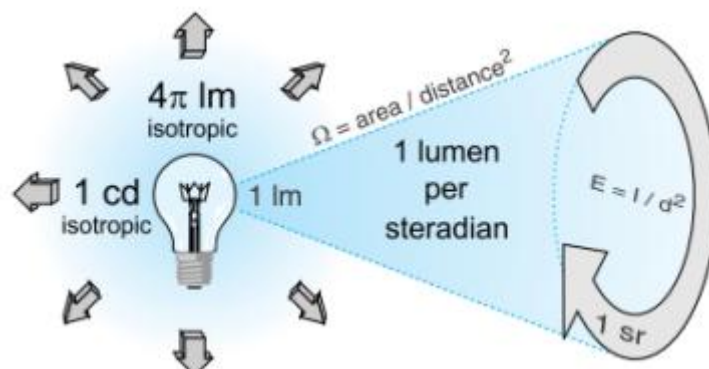


Fig. 1.11 Illustrazione delle caratteristiche della luce uscente da una sorgente.

Portando l'attenzione sulla spettroscopia, esistono molti modi per classificare strumenti spettroscopici. Si possono considerare in base ai principi fisici che applicano, per il loro funzionamento in rifrazione, diffrazione o interferenza o anche in base alle operazioni che possono eseguire: analisi accurate di sorgenti sconosciute, osservazioni astronomiche, analisi

di spettri di emissione, ecc. A riguardo, due concetti fondamentali riguardanti la spettroscopia, di qualsiasi tipo essa sia, sono il potere risolutivo e la luminosità dello strumento. Il concetto di potere risolutivo è facile da comprendere se facciamo riferimento a un monocromatore. Questo strumento seleziona e trasmette un determinato range di lunghezze d'onda dello spettro assorbendo o riflettendo tutte le altre. Se il range selezionato va da $\lambda - \Delta \lambda / 2$ a $\lambda + \Delta \lambda / 2$ il potere risolutivo dello strumento è un numero adimensionale definito dalla relazione (9):

$$R = \lambda / \Delta \lambda \quad (9)$$

Questo modo di definire la capacità di discriminare due segnali molto vicini nasce dal criterio di Rayleigh. Prendendo ad esempio una risoluzione di 1nm, sarà impossibile distinguere segnali con una differenza sulle lunghezze d'onda inferiore a tale valore. La risoluzione di uno spettrografo a reticolo è funzione della dispersione data dal reticolo, espressa in nm/mm, e della qualità ottica dello strumento nel suo complesso. La dispersione a sua volta dipende dalla densità delle incisioni sul reticolo e dalla lunghezza focale dello strumento: a parità di lunghezza focale si raddoppia la dispersione raddoppiando la densità delle incisioni. L'aumento di risoluzione portato da queste considerazioni è solo teorico in quanto ci possono essere delle limitazioni ottiche che degradano la qualità dell'immagine come ad esempio delle aberrazioni. Per quanto riguarda la luminosità, diversamente dal significato che ha il termine in fotometria, nell'ambito dei monocromatori essa dà un'informazione sulle performance di un sistema ottico in termini di quantità di luce che riesce ad attraversare lo strumento. Dipende dalla sezione d'ingresso, definita dalla fenditura d'entrata del segnale luminoso, e dall'angolo solido entro il quale lo strumento recepisce il segnale secondo la relazione $L = A \Omega$, con A = sezione d'ingresso e Ω = angolo solido sotteso dall'apertura. Un'altra caratteristica importante è l'apertura numerica, o pupilla d'entrata, del sistema ottico, più è grande e più luce può entrare nel sistema aumentando così la sensibilità dello strumento. D'altra parte, più grande è l'apertura e peggiore sarà la qualità dell'immagine poichè si fanno sentire maggiormente gli effetti di aberrazione (che potrebbero essere evitati con l'uso di diaframmi regolabili o riducendo l'apertura del sistema ottico).

1.6 Principali configurazioni spettroscopiche

Consideriamo quali sono gli elementi di base che compongono un sistema ottico di dispersione della luce:

- Un obiettivo che ha il compito di riprodurre l'immagine della sorgente.
- Un'apertura d'ingresso per la luce che di solito consiste in una fenditura rettangolare lunga e stretta, che seleziona una "striscia dell'immagine della sorgente.
- Un elemento collimatore che serve a rendere paralleli i raggi entranti da un punto dell'apertura d'ingresso, si tratta spesso di lenti o specchi anche se in alcuni casi la sua funzione è inglobata nell'elemento dispersivo (reticoli concavi).
- Un elemento dispersivo, un prisma o un reticolo, che altera l'intensità e la direzione del fascio di luce originale.
- Un elemento focalizzatore per formare un'immagine dell'apertura in un determinato piano focale.
- Un'apertura d'uscita che può essere un'altra fenditura o un sensore, posta sul piano focale.

La scelta dello strumento da utilizzare in un determinato esperimento può dipendere da diversi fattori anche non prettamente tecnici come la disponibilità di un determinato apparecchio o le possibilità economiche. Tecnicamente si dovrebbe scegliere lo strumento più adatto per il particolare obiettivo che si vuole raggiungere: misurare una sorgente molto luminosa con elevata risoluzione o una sorgente debole a bassa risoluzione e magari variabile o transitoria. Tra gli spettrografi più utilizzati vi è lo spettrografo a reticolo con movimento controllato elettronicamente. Procedendo nella lista troviamo il Fabry-Perot etalon, che non ha parti in movimento, e poi lo spettrometro di Michelson e gli spettrometri a compensazione di campo. Vediamo ora, in particolare, gli oggetti che più caratterizzano uno spettroscopio.

1.6.1 Lenti e Specchi

Lenti e specchi sono tra i principali strumenti che costituiscono i sistemi ottici utilizzati per convogliare la luce all'interno degli strumenti di misura. Le superfici che la luce incontra sono dette catottriche o specchi quando su di esse avviene principalmente riflessione. Uno specchio si ottiene depositando su di un substrato portante un sottile strato superficiale ($\sim 10^{-6}m$) di materiale riflettente. La maggior parte degli specchi comuni sono costruiti depositando su un vetro una sottile lamina di alluminio o argento i quali riflettono molto bene le lunghezze d'onda del visibile. Con i mezzi attuali è possibile costruire specchi di piccole dimensioni di forme diverse: più comunemente si trovano specchi piani, sferici concavi o convessi, ma ci sono anche specchi cilindrici, parabolici. Una lente, invece, è costituita da uno o più mezzi, il più possibile trasparenti, attraversati dalla luce che viene rifratta. Quest'ultima serve per catturare e concentrare, o far divergere, i raggi di luce provenienti da una sorgente così da

crearne un'immagine reale o virtuale, rimpicciolita o ingrandita, secondo le esigenze del sistema ottico. Si distinguono secondo la curvatura delle due superfici e principalmente sono usati i tipi biconcava, piano-convessa, menisco, piano-concava.

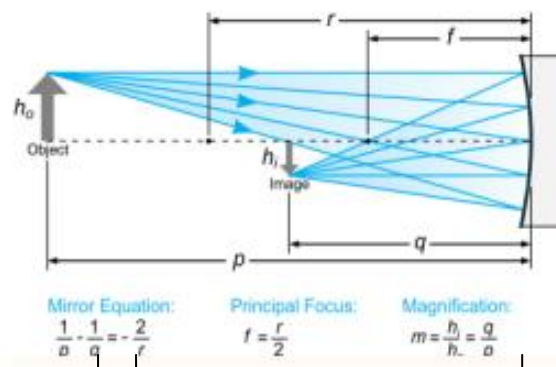


Fig. 1.12 Disegno ottico dei parametri fisici che caratterizzano una lente.

La ricostruzione delle immagini da parte delle lenti non è perfetta, in generale più l'apertura è grande, o più ci si discosta da un'ottica parassiale, più l'immagine sarà distorta. L'apertura definisce l'angolo di accettazione entro il quale uno strumento è in grado di raccogliere la luce, il quale solitamente è dato dal rapporto tra il diametro della lente d e la sua distanza focale l .

Lavorando con specchi e lenti si ha spesso a che fare con diversi tipi di distorsioni. Tra le distorsioni più importanti che possiamo riscontrare, ricordiamo l'aberrazione cromatica, l'aberrazione sferica, l'aberrazione coma e l'astigmatismo. L'aberrazione sferica è dovuta al fatto che la superficie sferica non è la superficie ideale per costruire una lente, anche se è la più semplice da realizzare, e quindi i raggi lontani dall'asse della lente vengono focalizzati a distanza differente rispetto a quelli più vicini. L'aberrazione cromatica, invece, deriva dal diverso angolo con cui vengono rifratti raggi paralleli di diverse lunghezze d'onda attraverso il materiale costituente la lente, in pratica ogni lunghezza d'onda viene focalizzata in un punto diverso dell'asse della lente. L'aberrazione coma, dal latino chioma o cometa, si ha quando un fascio di raggi passanti per la lente ad una certa distanza dal centro, e con una determinata angolazione, è focalizzato in una forma ad anello sul piano focale e la sovrapposizione di questi diversi anelli origina una forma a V da cui il nome caratteristico. L'astigmatismo, infine, è un errore rifrattivo generato dalla diversa curvatura delle lenti sui piani verticale e orizzontale (Fig. 1.13).

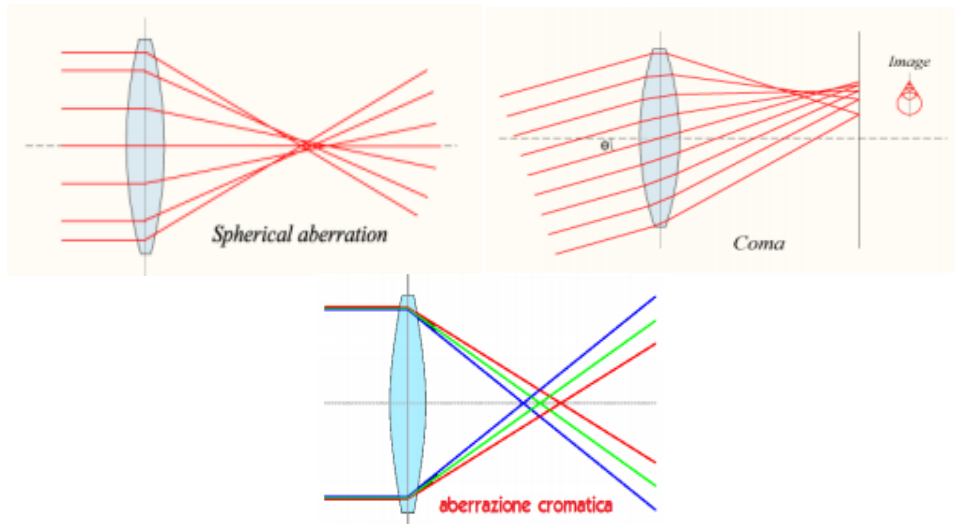


Fig. 1.13 Illustrazione dei fenomeni di aberrazione sferica, aberrazione coma e aberrazione cromatica.

1.6.2 Prismi e Reticoli

In ottica la dispersione è il fenomeno fisico che causa la separazione di onde elettromagnetiche in componenti spettrali con diverse lunghezze d'onda, a causa della dipendenza della velocità dell'onda e dell'indice di rifrazione dalla lunghezza d'onda, nel mezzo attraversato. Un mezzo che possiede queste caratteristiche nei confronti dell'onda in propagazione è detto dispersivo. Tra gli elementi dispersivi, quelli maggiormente utilizzati sono i prismi o i reticoli. In ordine di importanza, dal punto di vista storico, senz'altro il primo è stato il prisma (frutto dell'osservazione di Newton). In Fig. 1.14a è mostrato un sistema ottico con un fascio parallelo della luce incidente che riempie una delle facce inclinate del prisma.

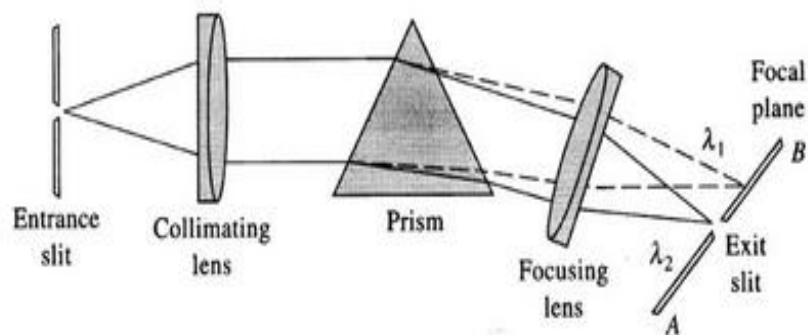


Fig. 1.14a Sistema ottico di uno spettrometro con un prisma come elemento dispersivo.

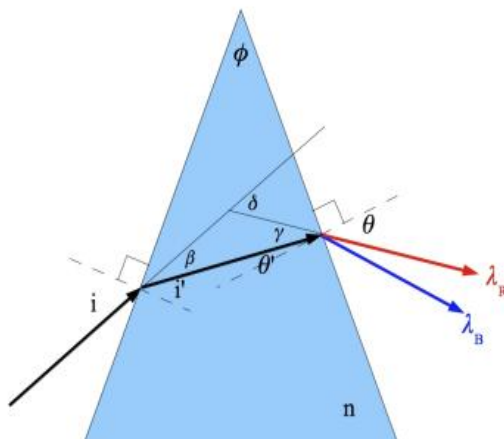


Fig. 1.14b Parametri caratteristici di un prisma.

Il prisma è posto al centro del supporto di uno spettrometro con il raggio di luce incidente disposto in un modo tale che il raggio rifratto sia alla deviazione minima. Questo prisma (Fig.1.14b) è definito dal suo angolo al vertice ϕ e dal suo indice di rifrazione n . Consideriamo un raggio luminoso che incide su una faccia del prisma con un angolo i rispetto alla normale alla superficie. Il raggio viene rifratto con un angolo i' all'interno del prisma e chiamiamo β l'angolo di deviazione del raggio incidente. Il raggio rifratto diventa raggio incidente per un'altra faccia del prisma e esce da esso rifratto una seconda volta. Siano θ' l'angolo di incidenza e θ l'angolo di rifrazione. Inoltre sia γ l'angolo di deviazione per questo raggio e δ l'angolo di deviazione globale fra la direzione del raggio che incide sul prisma e la direzione del raggio che esce dal prisma. Inizialmente immagineremo una radiazione monocromatica. Ciò può essere prontamente mostrato dalla legge di Snell (1). Tramite questa legge si può vedere che l'angolo di rifrazione della luce in un prisma dipende dall'indice di rifrazione del materiale di cui è composto il prisma. Dato che l'indice di rifrazione varia in dipendenza dalla lunghezza d'onda, ne segue che anche l'angolo con cui la luce viene rifratta varia con la lunghezza d'onda, causando una separazione angolare dei colori nota anche come dispersione angolare. Il raggio, inoltre, deve essere deflesso attraverso un angolo tale che il fronte d'onda uscente sia cofasale, ovvero che abbia la stessa fase ovunque sul fronte d'onda.

Un altro modo di guardare all'operazione del prisma è dire che l'interferenza tra l'infinito numero di fasci nel quale il fascio iniziale è diviso dalle facce inclinate è completamente distruttivo a tutti gli angoli della deviazione eccetto uno. In altre parole il prisma è un interferometro che genera un infinito numero di fasci, ma poiché c'è solo un angolo di deviazione, l'energia è concentrata dalla seconda lente su un singolo punto. Per ciò che riguarda poi la risoluzione disponibile con un dato prisma in una data regione spettrale, consideriamo, in Fig. 1.14a una fenditura perpendicolare al piano. Più ampia è la fenditura minore è la risoluzione perché le immagini formate da ogni componente della radiazione saranno sovrapposte, infatti, il pattern di diffrazione prodotto sul sensore o sul piano focale, in

generale, è principalmente determinato dagli effetti dell'apertura rettangolare della fenditura di ingresso. La risoluzione, in generale, è un concetto un po' più complicato da definire esplicitamente ma una definizione spesso usata è quella suggerita da Reyleigh, ovvero si può dire che uno strumento risolve due linee "monocromatiche" quando il primo massimo del pattern di diffrazione di una corrisponde al primo minimo (zero) dell'altra e viceversa.

Come già detto, oltre al prisma un altro elemento dispersivo è il reticolo di diffrazione. Anche per quanto riguarda il reticolo, si ha separazione di una luce policromatica nelle sue componenti. La luce incidente viene dispersa in modo tale che ad ogni angolo di osservazione corrisponda una diversa lunghezza d'onda. Questo fenomeno di dispersione è dovuto all'interferenza e alla diffrazione, generati dalla struttura regolare del reticolo, i quali possono essere prodotti agendo su una delle seguenti proprietà della materia che li costituisce: trasparenza, riflettività, indice di rifrazione, direzione dell'asse ottico. I primi reticoli ad alta risoluzione si costruivano per incisione con punte di diamante utilizzando delle guide molto precise e di difficile fabbricazione. Nel 1899, Henry Joseph Grayson progettò una macchina per produrre reticoli di diffrazione, riuscendo ad ottenere 120.000 linee per pollice (2,54 cm). Lo sviluppo successivo delle tecniche fotolitografiche permise di ottenere reticoli a partire da una figura di interferenza olografica. I reticoli olografici hanno delle scanalature sinusoidali e possono non essere efficienti come quelli ottenuti con il metodo precedente. Un altro metodo per la produzione di reticoli di diffrazione usa un gel fotosensibile inserito tra due substrati di supporto. Il gel viene sottoposto ad uno stampo olografico e poi viene sviluppato, ciò implica che questi reticoli solitamente hanno un'efficienza più alta e una resistenza maggiore all'umidità, al calore e alle sollecitazioni meccaniche, ed infine permettono di ottenere fenditure dalla forme complicate. La dispersione angolare e l'efficienza di un reticolo dipendono dalla densità delle incisioni, dal loro numero e dall'angolo caratteristico (angolo di blaze) con il quale viene inciso (di solito tra 15° e 30°) (Fig. 1.15). Generalmente un elemento dispersivo reticolare si comporta meglio di un prisma in quanto è più efficiente e da una dispersione lineare che definisce come un intervallo spettrale viene rappresentato sul piano focale di uno spettrometro (conseguenza di un numero finito di fasci diffratti).

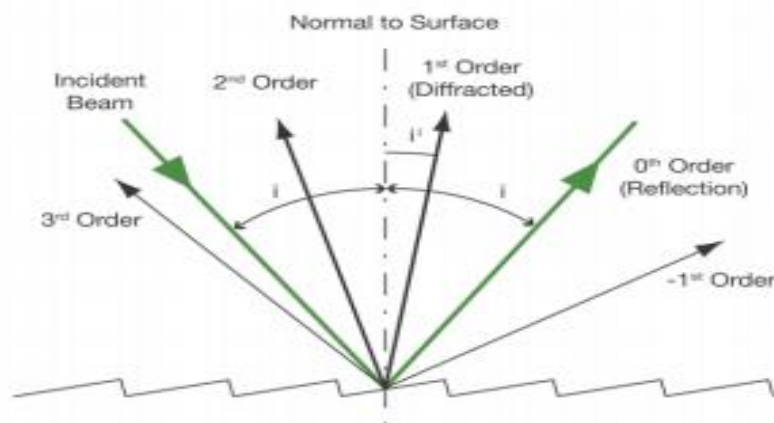


Fig. 1.15 Angoli caratteristici della diffrazione della luce da parte di un reticolo.

Consideriamo un reticolo piano fatto di M scanalature molto strette, o perfettamente riflettente (reticolo di riflessione) o perfettamente trasmittente (reticolo a trasmissione), separate da regioni che sono non riflettenti e strettamente opache. Consideriamo quindi gli M fasci in cui il fascio incidente è diviso dal reticolo. In Fig. 1.16 vediamo un fascio parallelo della radiazione di frequenza ν incidente a un angolo ϑ e consideriamo un fronte d'onda che lascia il reticolo a un angolo ϕ . Il fascio parallelo diffratto verrà poi focalizzato dalla lente in un punto e ogni punto corrisponderà un particolare valore di ϕ .

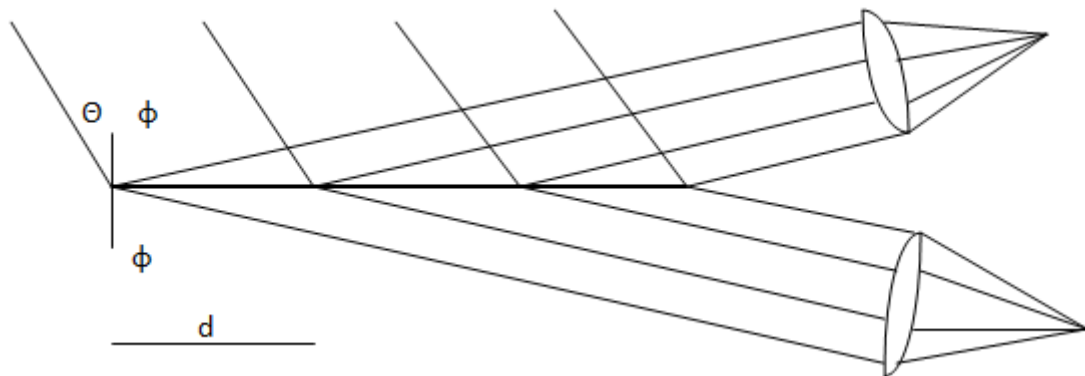


Fig. 1.16 Diffrazione e focalizzazione di un fascio incidente su un reticolo.

Si può notare che l'intensità nel piano dell'immagine proviene dalla radice quadrata dell'intensità del campo elettrico in quel punto e poi sommando i contributi degli M fasci. Infine tramite l'uso del teorema di De Moivre si ottiene:

$$I(\phi) \sim I(0) \left[\frac{\text{sen} \frac{1}{2}(M\delta)}{\text{sen} \frac{1}{2}\delta} \right]^2 \quad (10)$$

L'intensità lungo le linee dell'immagine mostra massimi più grandi quando il denominatore scompare, ovvero quando:

$$d(\text{sen}\vartheta - \text{sen}\phi) = m\lambda \quad \text{con } m=0\pm 1\pm 2.. \quad (11)$$

L'effetto del numeratore, invece, è rendere i massimi sparpagliati. Infatti maggiore è N più separati sono i massimi. Quando $m=0$ (ordine zero) l'angolo ϑ deve uguagliare l'angolo ϕ e dunque non c'è dipendenza dalla frequenza e, se il reticolo è irradiato con radiazione policromatica, tutta la potenza sarà rappresentata nello stesso spot. Se m è diverso da zero,

comunque, si fanno considerazioni molto differenti e frequenze differenti sono rappresentate su spot differenti nello stesso ordine. Il risultato è quello che chiamiamo “spettro”.

I reticoli usati nei moderni spettrometri sono reticoli chiamati “echellette” caratterizzati da una serie periodica di scanalature di forma triangolare, che sono la causa della dispersione richiesta. La Fig. 1.17 mostra la sezione trasversale di una superficie reticolare.

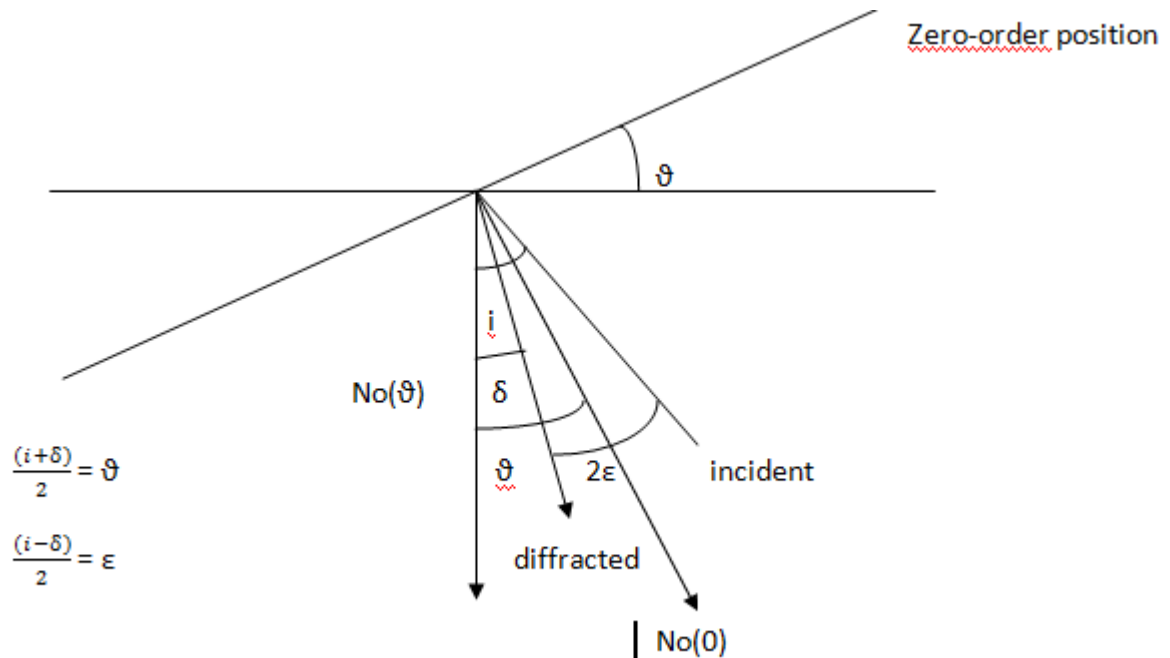


Fig. 1.17 Sezione trasversale di una superficie reticolare.

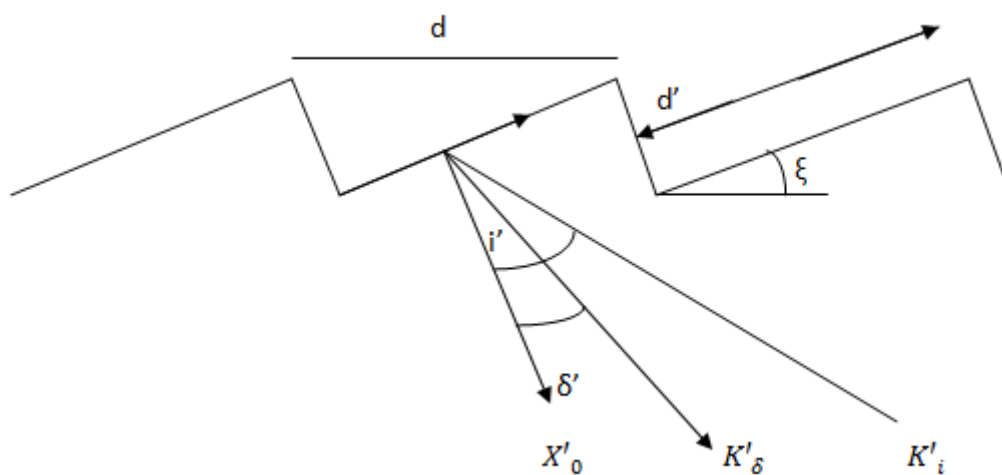


Fig. 1.18 Orientazione delle scanalature di un reticolo (angolo di blaze).

Il reticolo echellette può essere descritto in termini di due caratteristiche sovrapposte. La prima è la periodicità della disposizione delle scanalature, la seconda è la regolare orientazione di queste (Fig. 1.18). La prima caratteristica è responsabile delle direzioni della diffrazione, la seconda è responsabile della distribuzione dell'intensità in queste direzioni. Viene fatta l'assunzione che la lunghezza d'onda λ della luce sia minore rispetto alla costante reticolare d e che l'angolo del gradino sia molto piccolo. Consideriamo, usando le coordinate del sistema riportato in Fig. 1.17, la prima caratteristica, ovvero le direzioni dell'interferenza costruttiva della luce, che sono, come già detto, una conseguenza della periodicità delle scanalature. Inoltre, prendiamo in considerazione, per il momento, una luce incidente monocromatica parallela, la cui luce diffratta sarà osservata sul piano focale. La costante reticolare, ovvero la larghezza delle scanalature, è indicata dalla d , $N_0(\vartheta)$ è un vettore normale al piano del reticolo nella sua posizione di ordine zero, $\vartheta = 0$, in cui la posizione di ordine zero significa che non c'è path di differenza tra la luce incidente e quella diffratta, il che vuol dire che sono entrambe nella stessa direzione. Per quanto riguarda la convenzione angolare, vediamo che è definita nel modo seguente: tutti gli angoli misurati alla destra di N_0 sono positivi, quelli a sinistra sono considerati negativi. La condizione per l'interferenza costruttiva è che il path di differenza tra i raggi provenienti da scanalature adiacenti deve essere un multiplo intero di λ (12),

$$m\lambda = d \cos(90 - i) + d \cos(90 - \delta) ; \quad m\lambda = 2d \sin \frac{1+\delta}{2} \cos \frac{i-\delta}{2} \quad (12)$$

dove m è un intero positivo o negativo, chiamato ordine della diffrazione. Impiegando gli angoli ϑ e ε come mostrato in Fig. 1.17 otteniamo la seguente relazione:

$$m\lambda = 2d \sin \vartheta \cos \varepsilon \quad (13)$$

Dall'equazione (13) vediamo che la lunghezza d'onda per la quale l'interferenza costruttiva avviene è una funzione dell'angolo di rotazione ϑ nella forma di un seno se l'angolo 2ε è preso costante. Estendiamo adesso la discussione sull'intensità della distribuzione che è anche una conseguenza dell'orientazione periodica delle scanalature. La distribuzione dell'intensità della luce diffratta può essere descritta in buona approssimazione come il prodotto di due fattori:

$$I = S(\vartheta)^2 f(\vartheta)^2 \quad (14)$$

in cui

$$S(\vartheta)^2 = \frac{\text{sen}^2[M(\frac{A}{2})]}{\text{sen}^2(\frac{A}{2})} \quad (15)$$

M indica il numero totale di scanalature e Δ indica la differenza di fase di raggi di luce successivi, $S(\vartheta)^2$ descrive la distribuzione di intensità, appunto causata dalla periodicità della disposizione delle scanalature del reticolo. Si ottiene $S(\vartheta)^2$ dalla somma di raggi di luce successivi (tenendo conto della differenza di fase) e dalla radici quadrata dell'ampiezza ottenuta. Descriviamo inoltre la forma analitica del fattore $f(\vartheta)$ dell'equazione (14). Questo fattore è una conseguenza di una particolare caratteristica delle scanalature del reticolo, chiamato profilo zigzag. Il calcolo di $f(\vartheta)$ usa il sistema di coordinate presenti in Fig. 1.18, le quali sono ruotate di un angolo di step ξ rispetto alle coordinate del sistema della Fig 1.17. La normale alla superficie delle scanalature è indicata da \mathbf{X}_o' , e \mathbf{Y}_o' è un vettore unità nel piano della scanalatura. Gli angoli i' e δ' identificano gli angoli della luce incidente e diffratta, rispettivamente, e \mathbf{K}_i' e \mathbf{K}_δ' sono i vettori d'onda ($|\mathbf{K}_i'|=|\mathbf{K}_\delta'|=k=2\pi/\lambda$) associati ai fasci incidente e diffratto. Il risultato della formula di Kirchoff, in termini di angoli ϑ, ε e ξ è come segue:

$$f(\vartheta)^2 = \text{const}(\vartheta, \varepsilon, \xi, \lambda) \frac{\text{sen}^2[kd' \text{cos} \varepsilon \text{sen}(\vartheta - \xi)]}{[kd' \text{cos} \varepsilon \text{sen}(\vartheta - \xi)]^2} \quad (16)$$

in cui $\text{const}(\vartheta, \varepsilon, \xi, \lambda)$ è una funzione non importante per la discussione. L'intensità può essere espressa ora come:

$$I \propto \frac{\text{sen}^2[Mkd \text{cos} \varepsilon \text{sen}(\vartheta)]}{\text{sen}^2[kd \text{cos} \varepsilon \text{sen} \vartheta]} \frac{\text{sen}^2[kd' \text{cos} \varepsilon \text{sen}(\vartheta - \xi)]}{[kd' \text{cos} \varepsilon \text{sen}(\vartheta - \xi)]^2} \quad (17)$$

dove usiamo il segno di proporzionalità per indicare che abbiamo ommesso i fattori costanti. Il primo fattore dell'equazione (17), della forma $[\frac{\text{sen}(My)}{\text{sen} y}]^2$ descrive l'effetto della disposizione periodica delle scanalature sulla distribuzione di intensità. Notiamo che il termine possiede il massimo principale a $y = m\pi$, in cui $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$. L'altezza di questi massimi dipende da M^2 (il quadrato del numero di scanalature) mentre la mezza larghezza è proporzionale a $1/M$. Per quanto riguarda il secondo fattore dell'equazione (17), si può dire della forma $(\text{sen} x/x)^2$ e si assume uguale all'unità per $x=0$ ed invece risulta minimo se $x = \pi n$, $n=\pm 1, \pm 2, \dots$. Quindi per una determinata lunghezza d'onda, alla quale il primo fattore dell'equazione (17) risulta avere un massimo, e per un angolo di step fissato, vedremo soddisfatta l'uguaglianza $\xi = \vartheta$, che implica un valore del secondo fattore pari all'unità. Questo particolare angolo è chiamato "blaze" del reticolo. Si ha allora il massimo del primo fattore corrispondente al primo ordine ($m=1$) è a $(kd \text{cos} \varepsilon \text{sen} \vartheta) = \pi$, mentre gli altri massimi si trovano a $(kd \text{cos} \varepsilon \text{sen} \vartheta) = m\pi$ ($m \neq 1$) e inoltre che tutti i minimi del secondo fattore sono situati a $(kd \text{cos} \varepsilon \text{sen}(\vartheta - \xi)) = n\pi$ ($n \neq 0$), che è approssimativamente il luogo in cui sono situati gli altri massimi del primo fattore, ovvero $(kd \text{cos} \varepsilon \text{sen} \vartheta) = m\pi$ ($m \neq 1$). Queste relazioni sono valide per tutte le coppie di λ e ϑ dell'equazione (13). Considerando la coppia particolare per il quale il secondo fattore diventa unità dalla scelta $\xi = \vartheta$, e conseguentemente, che il massimo al primo ordine è osservato a una lunghezza d'onda che corrisponde alla posizione blaze del reticolo, λ_b , in questo modo si ottiene che circa il 90% della radiazione incidente viene diffratto nel primo ordine e le

energie disponibili del reticolo sono concentrate quasi completamente in un solo ordine di diffrazione. Questo è vero quanto più l'angolo di incidenza è vicino a quello di blaze.

Per il caso di luce policromatica la situazione è piuttosto simile. In questo caso, dovremmo trovare un certo range di lunghezze d'onda centrate al valore di blaze $\lambda = \lambda_b$ per le quali quasi tutta l'energia può essere concentrata nel primo ordine. In generale, la concentrazione della luce diffratta di ordine n prende posto a $\lambda = \lambda_b/n$. Conseguentemente, gli n ordini di luce diffratta sono osservati a n differenti angoli (un reticolo echelette sopprime tutti tranne uno). La distribuzione di intensità dello spettro di secondo ordine intorno all'angolo di blaze ξ è più stretta rispetto a quella dello spettro del primo ordine. Ciò può essere notato sostituendo il valore $k = 2\pi/(\lambda/2)$ per $k = 2\pi/\lambda$ nel secondo fattore dell'equazione (17), e si vedrà quindi che la differenza angolare tra il massimo principale e il primo minimo sarà diminuita.

1.6.3 Sensori

Negli ultimi anni le tecniche di misura delle radiazioni si sono evolute passando dall'utilizzo delle tradizionali pellicole fotografiche a sistemi di imaging digitale. Il sistema che registra l'immagine è uno dei componenti più critici in molti esperimenti e quindi capire e conoscere il processo con cui un'immagine viene registrata e le possibili scelte che si possono fare può permettere di ottenere risultati migliori. Diamo ora breve descrizione dei principali tipi di sensori oggi largamente diffusi e delle loro principali caratteristiche. Le camere per uso scientifico si basano sulla tecnologia del sensore utilizzato: CCD, EMCCD, CMOS, ICCD. Tutte hanno dei punti di forza e altri di debolezza. I sensori scientifici più diffusi sono quelli a CCD (charged couple device) che si possono trovare in tre architetture principali: Full Frame, Frame Transfert e Interline. Facciamo ora una breve panoramica sui diversi parametri che caratterizzano un sensore, prima di analizzarli a fondo:

- La risposta spettrale è una caratteristica importante di un sensore, la quale identifica l'efficienza nella conversione dei fotoni in elettroni in funzione della lunghezza d'onda, espressa di solito in termini di Quantum Efficiency (QE) o A/w .
- La sensibilità di una camera è invece la minima quantità di luce che si può rilevare e dipende principalmente dal rumore di fondo del sensore.
- Il rumore è dovuto al processo di amplificazione, alla temperatura del sensore e al rumore stesso del segnale la cui ampiezza aumenta col quadrato del segnale stesso.
- Il range dinamico che il sensore è in grado di raggiungere, cioè il rapporto tra il massimo e il minimo valore che possono essere registrati nella stessa scansione. Dipende dal numero di bit del convertitore utilizzato.
- Il livello di saturazione del sensore (FWC) limita la possibilità di osservare segnali intensi ed è quindi una caratteristica importante per alcune applicazioni. Quando il sensore satura si perde linearità e si può verificare il fenomeno del blooming che consiste nel travaso della carica in eccesso in una determinata regione (pixel) in quelle adiacenti.

- Il rapporto segnale/rumore (SNR) è un indice della bontà e qualità della misura.
- Il Frame Rate di una camera è la massima velocità con cui delle immagini possono essere lette digitalizzate e salvate in sequenza, dipende dalla quantità di pixels che si utilizzano e dalle modalità di lettura.

Le camere digitali hanno una regione minima detta pixel entro la quale i fotoni incidenti sono convertiti in elettroni. Le sue dimensioni definiscono il limite per la risoluzione spaziale del sensore, che determina la capacità di distinguere due oggetti a contrasto elevato, anche se questa dipende comunque da altri fattori come, ad esempio, la qualità delle lenti. Contrasto e risoluzione sono caratteristiche di un sensore che vengono ricondotte in un'unica funzione detta Modulation Transfert Function (MTF).

1.6.3.1 Rappresentazione di un'immagine digitale

L'immagine fisica continua $f(x,y)$ generata dal sistema ottico o in generale da qualunque altro sistema di acquisizione (radar, raggi x, infrarosso, sonar, chimico, ecc.) rappresenta l'informazione di intensità luminosa (o livelli di grigio) in ciascun punto (x,y) del piano bidimensionale $g(i,j)$. Questi valori di intensità luminosa si trovano in corrispondenza della griglia di campionamento definita da $(i\Delta x, j\Delta y)$, dove Δx e Δy rappresentano gli intervalli di campionamento rispettivamente lungo l'asse delle x e l'asse delle y . Dal processo di quantizzazione è generata l'immagine digitale $I(i,j)$ con i valori digitali dell'intensità luminosa $g(i,j)$ riportati per ciascun elemento (i,j) dell'immagine (pixel). Il valore di ciascun pixel $I(i,j)$ rappresenta l'elemento discreto digitale dell'immagine digitalizzata e questo valore non è altro che il valore medio dell'intensità luminosa corrispondente ad una cella della griglia con superficie rettangolare di dimensioni $\Delta x \times \Delta y$. L'insieme dei pixel $I(i,*)$ rappresenta la colonna i -ma dell'immagine digitale, mentre la riga j -ma è rappresentata dai pixel $I(*,j)$. L'immagine digitale I risulta una buona approssimazione dell'immagine continua originale f se sono scelti in modo adeguato i seguenti parametri: gli intervalli di campionamento Δx e Δy , e l'intervallo dei valori di intensità I assegnati a ciascun pixel nella fase di quantizzazione. Riguardo la qualità dell'immagine è necessario descrivere le proprietà di risoluzione spaziale, risoluzione radiometrica (o di intensità luminosa o di colore), risoluzione temporale e risoluzione spettrale.

Nello specifico, la risoluzione spaziale indica come l'intero sistema di acquisizione sia capace di risolvere i più piccoli dettagli degli oggetti della scena osservata, e dipende dalle varie componenti del sistema di acquisizione complessivo: ambiente, sistema ottico, sistema di digitalizzazione. La scelta della risoluzione spaziale del pixel e quindi dell'intera immagine digitale è strettamente legato alle varie applicazioni. Esistono numerosi sistemi di acquisizione che possono digitalizzare immagini da 256×256 pixel fino a $8K \times 8K$ pixel a seconda della necessità. In un'immagine digitale i dettagli geometrici della scena appaiono come variazione di intensità luminosa (radianza) presente tra pixel adiacenti. Se tali pixel corrispondenti non registrano variazioni di livelli significativi, le strutture geometriche non sono risolte e possiamo affermare che la risoluzione spaziale è scarsa. Questo concetto di

risoluzione spaziale è strettamente correlato al concetto di frequenza spaziale che indica con quale rapidità variano i valori dei pixel spazialmente. Come già accennato, la qualità di un sistema di acquisizione immagini dipende dalla sua capacità di riprodurre fedelmente le strutture spaziali degli oggetti conservando le variazioni di luminosità delle strutture stesse osservate. La risoluzione spaziale e radiometrica esprimono in termini quantitativi il concetto espresso di qualità del sistema. La risoluzione radiometrica è detta anche contrasto ed indica la differenza di luminosità tra aree diverse di un oggetto e tra oggetti diversi, ovvero rappresenta la minima differenza di intensità che un sensore può rilevare tra due valori di energia raggiante. Ogni volta che un'immagine è acquisita su un film o da un sensore, la sua sensibilità alle radiazioni elettromagnetiche determina la risoluzione radiometrica. Migliore è la risoluzione radiometrica di un sensore, più sensibile è nel registrare piccole differenze nell'energia riflessa o emessa. La risoluzione del sistema di formazione dell'immagine combina i due aspetti ossia il contrasto degli oggetti ed i dettagli geometrici a scale diverse. Nel processo di formazione dell'immagine si vede che un elemento dell'oggetto assimilato ad una sorgente di luce puntiforme proiettato dal sistema ottico nel piano immagine diventa un disco luminoso descritto da $h(x,y)$ la PSF (point spread function). L'immagine complessiva dell'oggetto, attraverso il processo di convoluzione, è ottenuta in ciascun punto come sovrapposizione di dischi luminosi che si sommano linearmente. Anche con un sistema ottico di alta qualità, con piccole aberrazioni, un punto luminoso dell'oggetto è proiettato nel piano immagine come un'area luminosa estesa, a causa dell'effetto della diffrazione che limita la risoluzione spaziale dell'immagine. Per quantificare il livello di risoluzione massima possibile, consideriamo due punti luminosi dell'oggetto di uguale intensità, e valutando nel piano immagine quale può essere la distanza minima tra i centri delle rispettive aree luminose circolari descritti dalla PSF sapremo quale sarà la risoluzione massima. Il criterio di Rayleigh suggerisce che due punti luminosi sono ancora separati nel piano immagine se il centro di un disco si trova sul primo minimo del disco corrispondente all'altro punto luminoso (Fig. 1.19). La separazione angolare minima solvibile, quindi, è data da (18):

$$\Delta\phi_{\min} = \Delta\theta = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (18)$$

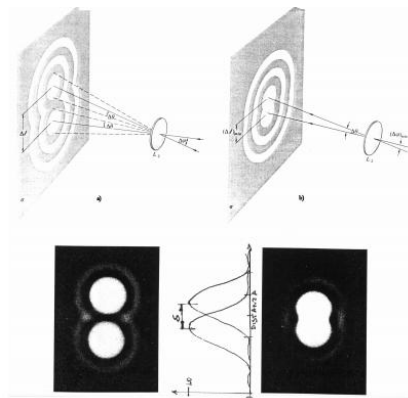


Fig. 1.19 Risoluzione di due punti luminosi.

L'altro aspetto che influenza la risoluzione dell'immagine, il contrasto o la modulazione dell'intensità luminosa definita come:

$$M = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (19)$$

La modulazione esprime una misura quantitativa di come il sistema ottico proietta l'energia luminosa dell'oggetto nel piano immagine.

Oltre a risoluzione radiometrica e risoluzione spaziale, sono importanti per definire la qualità dell'immagine anche la risoluzione spettrale quella temporale. La prima indica il numero di bande di acquisizione e la loro ampiezza. Migliore è la risoluzione spettrale, più sottile è l'intervallo di lunghezze d'onda per una particolare banda. La seconda indica l'abilità di catturare la dinamica della scena nel caso di oggetti in movimento. In questo caso viene considerato il parametro frame rate che definisce la velocità di acquisizione di una o più sequenze di immagini (numero di frame al secondo).

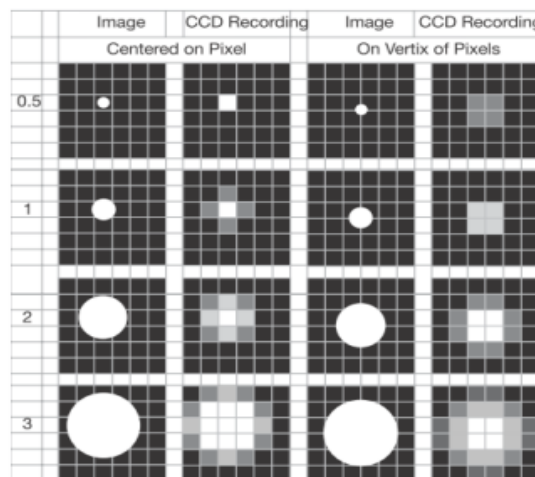


Fig. 1.20 Risoluzione in pixel. Differenza tra immagine reale e registrata tramite un sensore CCD.

1.6.3.2 Sensori CCD e C-MOS

Come già accennato, i sensori scientifici più diffusi sono quelli a CCD, i quali si dividono in: Full Frame, Frame Transfert e Interline. La forma più semplice di sensore è il Full Frame CCD (Fig. 1.21) in cui la zona sensibile alla luce è completamente esposta. La lettura dei dati avviene traslando una riga alla volta l'intera matrice di pixel verso i readout register che a loro volta trasferiscono un pixel per volta al convertitore. Questo processo viene detto scansione progressiva ed è il primo sistema ad essere stato utilizzato. Un problema di questo tipo di sensori è che le ultime righe ad essere lette rimangono esposte per un tempo superiore a quello previsto e in misura diversa rispetto alle altre righe. Il sistema più comune per ovviare al problema è utilizzare uno shutter per coprire il sensore quando non deve rimanere esposto

alla luce. Gli shutter sono componenti meccaniche, quindi sottoposti a usura, e più aumentano le dimensioni più sono lenti nel movimento contribuendo a diminuire il frame rate del sistema. L'alternativa oggi è usare un Frame Transfert CCD che, oltre a evitare l'utilizzo di uno shutter meccanico, è utilizzato efficacemente nelle più svariate condizioni di misura.

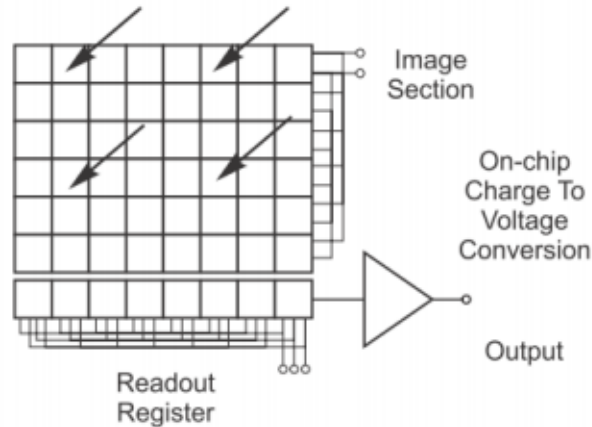


Fig. 1.21 Full Frame CCD.

Nel Frame Transfert CCD (Fig. 1.22), invece, non c'è uno shutter meccanico ma un sensore diviso in due parti uguali, una sempre esposta alla luce e un'altra coperta da uno schermo opaco; l'immagine rilevata dalla parte esposta viene immediatamente trasferita nella parte coperta del sensore e di lì poi letta attraverso il readout register. In questo modo la parte sensibile del sensore non resta esposta più del dovuto se non per il breve tempo necessario a spostare l'informazione nella parte nascosta del sensore. Per il resto hanno le stesse caratteristiche di un normale CCD a parte il costo che, avendo un sensore di dimensioni praticamente doppie rispetto al necessario, risulta maggiore.

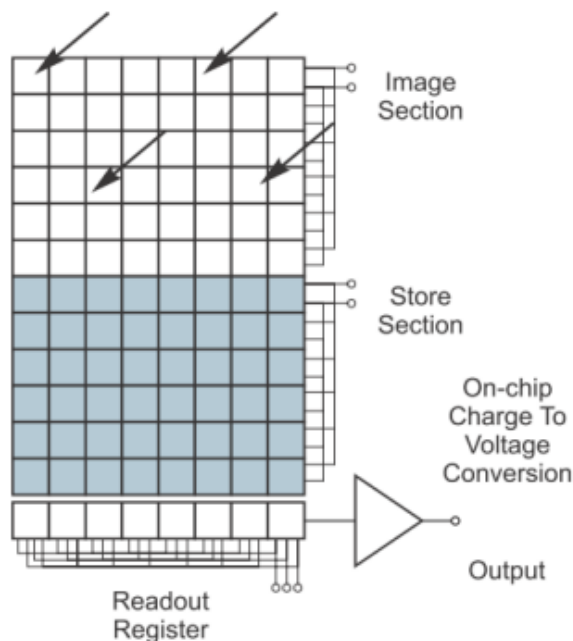


Fig. 1.22 Frame Transfert CCD.

Infine, i sensori con architettura Interline CCD (Fig. 1.23) funzionano con lo stesso principio del Frame Transfert ma consentono frame rate più alti. Questa maggiore velocità è dovuta alla minore strada che le cariche fanno per essere spostate nella zona coperta del sensore costituita da colonne di pixel dette Interline Masks. In questo modo basta traslare le colonne esposte di un solo pixel con evidente vantaggio per la velocità. Questa architettura ha come difetto la riduzione della zona utile del sensore e della risoluzione a parità di superficie esposta, problema che viene in parte risolto utilizzando delle microlenti.

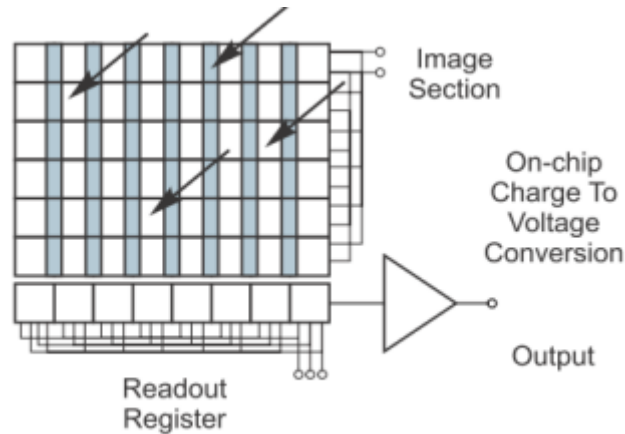


Fig. 1.23 Interline CCD.

Gli Electron Multipling CCD (EMCCD), invece, sono un tipo relativamente nuovo di sensori che permettono una maggiore sensibilità a livelli molto bassi di segnale. Gli Intensified CCD (ICCD) combinano un amplificatore e un CCD e sono anch'essi adatti per rilevare segnali deboli. Inoltre l'intensificatore permette di raggiungere tempi di esposizione molto brevi.

Per quanto riguarda invece i sensori C-MOS; Il sensore attivo C-MOS, o Active Pixel Sensor, è un sensore d'immagine che, a differenza del CCD, contiene gran parte delle funzionalità necessarie in ogni singolo pixel, sfruttando appunto la tecnologia C-MOS. Sebbene l'idea di un pixel con amplificatore incorporato esistesse già negli anni '70, solo negli ultimi decenni si è dato avvio alla fabbricazione di tali sensori proprio grazie ai continui sviluppi di integrazione dei circuiti C-MOS che hanno permesso agli APS di diventare competitivi, sia dal punto di vista prestazionale che da quello commerciale, nei confronti dei diretti concorrenti CCD. Il sensore è costituito da un circuito integrato e una matrice di pixel. Ciascuno di questi contiene un sensore di luce e un amplificatore di segnale. Inoltre, sempre nello stesso circuito integrato, sono allocati anche un convertitore analogico digitale e un controllore digitale. La luce arriva attraverso le lenti dell'obbiettivo e viene elaborata dal filtro di colore prima di raggiungere la matrice di pixel. Una volta che la luce filtrata raggiunge la matrice, ogni singolo pixel converte la luce in una tensione amplificata che verrà elaborata dal resto del sensore. Le principali parti di un sensore C-MOS sono: il filtro di colori, la matrice di pixel, il controllore digitale e il convertitore analogico digitale (Fig. 1.24).

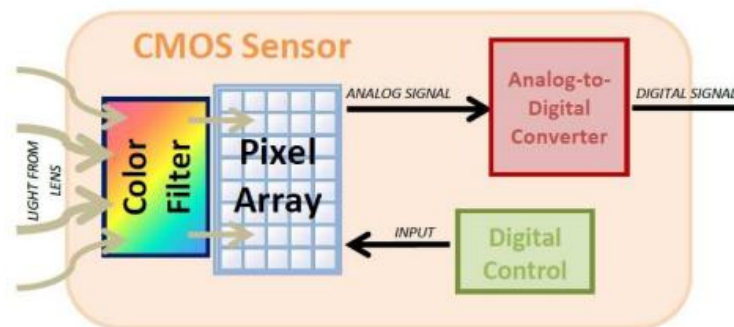


Fig. 1.24 Descrizione degli elementi costituenti un sensore C-MOS.

Nonostante i CCD e gli APS siano entrambi sensori d'immagine digitale che sfruttano l'effetto fotoelettrico, essi si differenziano per le tecniche di elaborazione dei dati e per quelle di costruzione. Le differenze si evidenziano già nell'architettura dei due sensori. Nel CCD il sensore è costituito dai filtri di colore, dalla matrice di pixel e dall'amplificatore, mentre le funzioni restanti, come il controllore digitale e il convertitore A/D, sono esterne al sensore, implementate su un circuito stampato di appoggio al sensore. I sensori CMOS invece implementano tutte le funzioni sopracitate e altre nello stesso chip del sensore, permettendo quindi un risparmio di spazio e lasciando spazio nel circuito stampato per altre applicazioni e strumenti di elaborazione. Questa differenza strutturale comporta anche diverse tipologie di output ad ogni livello del sensore. Il segnale analogico nei CCD compare all'uscita del sensore, mentre il segnale digitale, risultato finale che si vuole ottenere, verrà ottenuto solo all'esterno del sensore. Il sensore CMOS invece all'uscita fornisce già un segnale digitale, proprio grazie al fatto che il convertitore analogico digitale è normalmente inglobato nel sensore stesso. I due sensori si differenziano anche per la velocità di trasferimento dell'informazione all'interno della matrice: nei CCD si trasmette, in generale, di pixel in pixel per poi giungere al nodo di uscita. È necessario quindi un po' di tempo perché ciascun pixel trasmetta la propria carica al nodo di uscita. Ogni singolo pixel di un CMOS ha invece accesso diretto al nodo di uscita, mediante l'attivazione di opportuni pass-transistor (interruttori). Questo procedimento richiede certamente un minor tempo rispetto a quello necessario dai CCD e quindi si traduce in un maggiore frame rate. Parte dei vantaggi finora elencati del CMOS sono dovuti in parte al fatto che ogni pixel possiede un proprio amplificatore. Ma questa caratteristica, oltre che vantaggi porta anche svantaggi, per esempio nell'uniformità dell'immagine. Un elevato numero di amplificatori, come nel CMOS comporta una maggiore possibilità di differenze di guadagno, anche leggere, che ha come conseguenza una maggiore disomogeneità nell'immagine. Un altro svantaggio dei sensori CMOS è quello relativo all'area disponibile per la rilevazione di luce: comprendendo al suo interno molte funzionalità di elaborazione e controllo di segnale, il sensore ha a disposizione un minor spazio da dedicare alla fotoricezione, a differenza del CCD che sfrutta praticamente tutta la sua area a tale fine. Inoltre si può osservare che i sensori CCD complessivamente sono affetti da minor rumore rispetto ai sensori CMOS, e di conseguenza il loro range dinamico risulta leggermente più ampio.

1.6.3.3 Caratteristiche e limiti dei sensori

Approfondiamo il discorso riguardo le caratteristiche principali che identificano un sensore. La risposta spettrale del sensore dipende dalla facilità con cui i fotoni a diverse lunghezze d'onda vengono assorbiti nella regione di svuotamento di ogni singolo pixel. Infatti solo in questa regione i fotoni possono essere convertiti in cariche elettriche successivamente rimosse attraverso l'applicazione di un campo elettrico e trasferite ai registri di lettura. I fotoni che arrivano sul ccd devono prima attraversare la regione degli elettrodi di gate (Fig. 1.25a) attraverso i quali viene applicata la tensione che crea il campo elettrico necessario allo spostamento delle cariche. La struttura del gate può assorbire o riflettere fotoni soprattutto alle lunghezze d'onda intorno ai 350nm. Al contrario, le lunghezze d'onda più elevate, dal rosso in poi, riescono più facilmente a passare la regione di svuotamento senza essere intercettati; sopra i 1100nm è praticamente impossibile vedere qualcosa con i comuni sensori al silicio e bisogna attrezzarsi con diodi al germanio o InGaAs (indio-gallio-arsenio). Le perdite di efficienza dovute agli elettrodi di gate possono essere eliminate usando i sensori “a rovescio”, cioè illuminando la parte opposta del sensore e non direttamente la giunzione dove ci sono gli elettrodi. L'utilizzo dei cosiddetti backilluminated CCD (Fig. 1.25b) risulta vantaggioso se il substrato su cui è montata la giunzione è trasparente alla radiazione che si vuole esaminare. Queste complicazioni realizzative portano a dei vantaggi, ma risultando i sensori più costosi ne limitano l'utilizzo alle applicazioni più spinte o particolari, ad esempio negli studi su radiazione UV la quale risente molto della presenza degli elettrodi di gate.

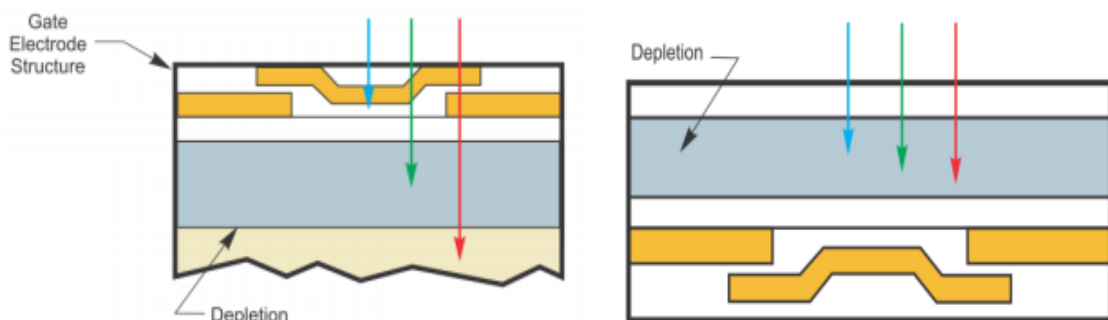


Fig. 1.25a Sezione degli elettrodi che i fotoni attraversano nel sensore prima di raggiungere la depletivo region. Fig. 1.25b Sezione di Backilluminated CCD

Per quanto riguarda il rumore; una luce che incide sul sensore produce una determinata risposta in termini di segnale, tuttavia in assenza di luce incidente si registra comunque segnale in uscita dalla camera cui faremo riferimento come “rumore di fondo” o background dell'immagine. E' facile immaginare che se un segnale ha intensità inferiore al rumore di fondo sarà difficile distinguerlo e comunque nel caso si riuscisse a misurarlo sarebbe affetto da un errore molto grande. Per questo è bene conoscere le fonti di questo rumore che sono principalmente tre: rumore relativo alla lettura dei dati, rumore termico, rumore intrinseco del segnale. Sull'ultimo non possiamo dire nulla in quanto intrinseco nel segnale stesso. Il rumore dovuto alla lettura dei dati dipende altresì da diversi fattori: in primis dal processo di amplificazione del segnale e dalla sua conversione. La tecnica moderna ha permesso di

ridurre questo tipo di rumore ma resta valido un concetto fondamentale secondo cui più veloce è la lettura dei dati e maggiore sarà il rumore introdotto. Sensori con rumore molto basso, definiti Low Noise CCD, esistono e hanno velocità di trasferimento dei dati volutamente molto basse, sono chiamati anche con il termine slow scan ccd proprio in virtù di questa loro caratteristica. L'ultima importante fonte di rumore è la temperatura del sensore che da origine al cosiddetto "dark noise", tradotto rumore scuro o segnale scuro, in quanto si ha emissione di fotoni di lunghezza d'onda tipicamente infrarossa. Si tratta di radiazione emessa da tutti i corpi con temperatura superiore allo zero assoluto secondo la legge di Stefan-Boltzmann. Anche in questo caso la tecnica ha permesso notevoli miglioramenti grazie all'introduzione di sistemi di raffreddamento in grado di portare i sensori a temperature di circa 173K (circa 100°C sotto lo zero Celsius) ottenendo delle performance molto buone. Comunemente si tratta di celle di Peltier o di sistemi a circolazione d'acqua. Ed infine il range dinamico di una camera, il quale è tipicamente definito come il rapporto tra la full well capacity (FWC) e il rumore e si riferisce alla capacità di registrare nella stessa scansione segnali deboli e molto intensi. La FWC è la massima carica che un pixel può contenere; se tale limite viene superato il sensore satura in quella zona e si ha degradazione del segnale: la carica in eccesso si sposta nei pixel adiacenti in un processo noto come blooming. La camera non reagisce più linearmente ai segnali e ne risulta compromessa la misura globale. Camere con pixel di dimensioni maggiori hanno una minore risoluzione spaziale ma una dinamica molto maggiore, il che può risultare importante per alcune applicazioni. Essendo un ccd disegnato per spostare facilmente le cariche in verticale verso i registri di lettura, sarà più facile osservare fenomeni di blooming che coinvolgono pixel adiacenti sulla stessa colonna piuttosto che su tutto il sensore. Alcuni sensori sono progettati per ridurre questo fenomeno intrinsecamente con sistemi che drenano gli eccessi di carica prima che possano trasferirsi ai pixel adiacenti, ma sono sistemi che possono ridurre l'efficienza del sensore. Un metodo per ovviare al problema è quello di sommare in sequenza scansioni non sature in alcun punto fino ad ottenere la sensibilità desiderata ai segnali deboli (aumenta il range dinamico).

Quando si ha a che fare con sensori, di qualsiasi tipo, bisogna tener conto dei molteplici fenomeni che possono influenzare la formazione e la memorizzazione di un'immagine. Fra i fenomeni attribuibili al sistema ottico rientrano, ad esempio, le aberrazioni, le vibrazioni, i difetti dell'ottica, i riflessi delle superfici, ecc. Alcuni fenomeni che influenzano l'imaging sono attribuibili al rivelatore. Tra questi sono di particolare rilevanza quelli legati alla suddivisione delle immagini in "pixel". Questo si verifica tutte le volte in cui l'immagine viene raccolta da un rivelatore costituito da un array lineare o bidimensionale di sensori indipendenti. Gli array lineari vengono spesso utilizzati nelle camere termiche per la visione nell'infrarosso e raccolgono l'immagine mediante una scansione. Gli array bidimensionali non hanno bisogno di scansioni (sono del tipo "staring", che, cioè, vedono contemporaneamente tutti i punti dell'immagine). Di questo tipo sono i comuni CCD, usati nelle telecamere e nelle moderne macchine fotografiche digitali. Quando si fa l'immagine, ad esempio, di una riga rettilinea, orientata in modo pressoché parallelo agli array di pixel che costituiscono l'array bidimensionale, la riga può essere interamente contenuta entro una singola riga o colonna. In questo caso l'immagine ricostruita della riga non può che avere la larghezza minima dei pixel

che l'hanno raccolta. Se, però, l'immagine della riga si trova a cavallo fra due righe o colonne parallele di pixel, l'immagine ricostruita è larga quanto le due righe o colonne, ma il segnale viene distribuito fra le due righe o colonne parallele e, nella ricostruzione, l'immagine della riga appare più larga e meno intensa. Un fenomeno ancora più complesso si ha quando l'immagine della riga è leggermente inclinata rispetto alle righe o alle colonne del sensore bidimensionale. In questo caso si formano quelle che si chiamano le frange di Moirè o di combinazione: l'immagine sarà interamente contenuta, in alcune zone, all'interno di singoli pixel, ed occuperà due pixel adiacenti in altre zone. Questo fenomeno è sempre presente quando, nell'immagine, sono presenti variazioni nette di intensità, come, ad esempio, nell'immagine dei bordi di un oggetto. Il fenomeno, noto con il nome di "aliasing"⁽⁹⁾, è ampiamente trattato negli studi riguardanti l'"image processing". Dalla teoria del campionamento si ricava che la massima frequenza spaziale risolvibile è, teoricamente, uguale alla metà della frequenza con la quale si campiona l'immagine (criterio di Nyquist). In altre parole, per ricostruire in modo corretto l'immagine di una zona nella quale è presente una rapida variazione di intensità luminosa (come, ad esempio, il bordo dell'immagine di una lama), il numero di pixel in cui deve essere registrata la zona deve essere almeno doppio del numero di parti in cui è possibile distinguere le variazioni di intensità nella stessa zona. Se si vuole risolvere in 10 punti lungo uno degli assi una zona dell'immagine, è necessario che il numero di sensori su cui si forma l'immagine della zona interessata sia di almeno 20 pixel indipendenti. E' quindi, errato pensare che, se un CCD è costituito da 1.000.000 di pixel totali, la risoluzione ottenibile è pari a 1/1.000.000 della parte di immagine coperta dal CCD. In realtà il numero di elementi risolti non può superare i 500.000. In pratica altri fenomeni consigliano di disporre di un numero di pixel almeno 4 volte superiore al numero di punti da risolvere. Esistono tecniche (di campionamento e di processing) che permettono di migliorare la situazione ma difficilmente il criterio di Nyquist può essere eluso. Un fenomeno analogo si verifica anche temporalmente: se il rivelatore campiona un'immagine con una certa cadenza temporale (rate), il rate con cui l'oggetto del quale si fa l'immagine non deve superare la metà di quella di campionamento. Come ulteriore esempio, si consideri una sorgente che emette impulsi di radiazione con una certa frequenza temporale F; se il rivelatore che la osserva campiona l'immagine con la stessa frequenza temporale, la sorgente potrebbe apparire continua, sempre al massimo di intensità, o al minimo, o a un valore intermedio. Se il campionamento avviene ad una frequenza almeno doppia, non potrà mai succedere che la sorgente appaia solo al minimo o solo al massimo di intensità, anche se difficilmente sarà possibile ricostruire il reale andamento dell'intensità. Solo aumentando la frequenza di campionamento, si potrebbe eliminare anche questo inconveniente.

1.6.4 Sorgenti

Le sorgenti di luce sono impiegate nei sistemi ottici ed elettroottici perché la funzione di questi ultimi è di raccoglierne le radiazioni e modificarne qualche caratteristica, assorbendo o riflettendo parte di queste, per il raggiungimento degli scopi per i quali sono stati progettati. Le sorgenti di luce di interesse per l'ottica comprendono non solo quelle che emettono "luce" in senso stretto, cioè la radiazione "visibile", ma anche tutte quelle che emettono radiazioni a lunghezze d'onda per le quali sono utilizzabili i sistemi ottici. Lo spettro delle lunghezze d'onda normalmente utilizzate con i sistemi ottici vanno dai raggi X (0.1 nm) al medio infrarosso (30 μm). Le caratteristiche delle sorgenti che hanno maggiore interesse dal punto di vista dell'ottica sono:

- Lo spettro delle radiazioni emesse;
- la "radianza" (L), espressa, in unità radiometriche, in $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$, oppure, in unità fotometriche (riferite, ci, a quello che vede l'occhio) la "luminanza" (nella vecchia terminologia "brillanza") espressa in $\text{lumen sr}^{-1} \text{cm}^{-2}$;
- la distribuzione di densità di radianza (o di luminanza) sulla superficie della sorgente (ϕ -emittanza in w cm^2);
- l'intensità " I " (watt/sr), che è la potenza divisa per l'angolo solido di emissione. L'angolo, in steradiani, deve essere quello effettivamente raccolto, se quest'ultimo è minore di quello emesso.
- le dimensioni e la forma della parte che emette la radiazione;
- la distribuzione angolare della radiazione emessa.

Le sorgenti più comunemente utilizzate sono:

- le lampade ad incandescenza;
- le lampade a scarica in gas;
- i vari tipi di laser;
- i led;
- i corpi neri (nell'infrarosso).

Le lampade ad incandescenza sono costituite da un filamento resistivo immerso in un gas (inerte), riscaldato per effetto Joule al passaggio della corrente che le alimenta (Fig. 1.26a). La massima temperatura che può raggiungere il filamento è limitata dal rischio che il filamento stesso sublimi, interrompendo la continuità elettrica e depositando il vapore del metallo sulle pareti interne dell'involucro trasparente che contiene il gas ed il filamento, attenuando o annullando la sua trasparenza. Le lampade "alogene" sono lampade ad incandescenza nelle quali il gas in cui è immerso il filamento è in grado di combinarsi con il tungsteno del filamento evaporato e di ridepositarlo sul filamento stesso (Fig. 1.26b). In questo modo la temperatura raggiunta può essere maggiore senza che il filamento sublimi. L'involucro che contiene il gas è più piccolo di quello delle normali lampade ad incandescenza e, di

conseguenza, più vicino al filamento; la temperatura raggiunta dall'involucro è molto alta e , inoltre, per evitare rotture, questo è realizzato in quarzo. Ciò porta, anche, ad una maggiore trasparenza nella zona dell'ultravioletto. Una caratteristica delle lampade ad incandescenza è che emettono radiazione in tutte le direzioni. La densità di radianza è, normalmente, uniforme, almeno nelle zone lontane dai terminali elettrici, e naturalmente la radianza è uniforme lungo il "filamento", mentre gli spazi compresi fra le spire del filamento hanno radianza nulla.

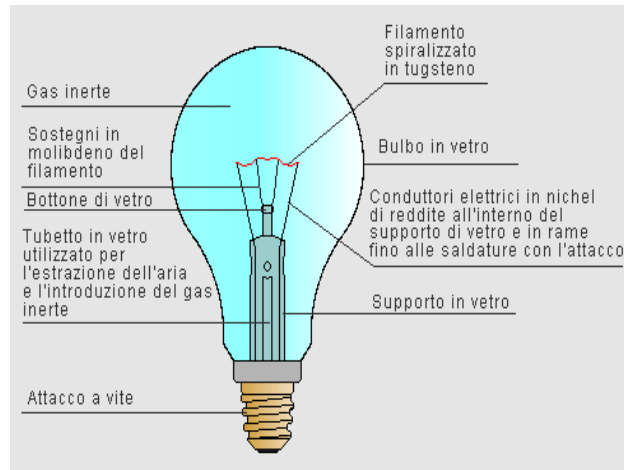


Fig. 1.26a Lampada ad incandescenza.

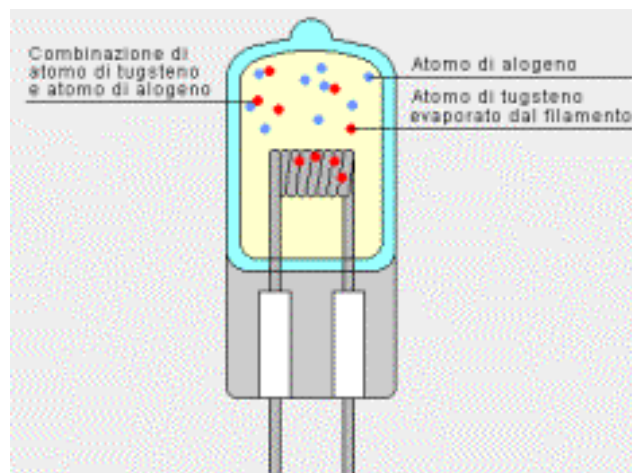


Fig. 1.26b Lampada alogena.

Nelle lampade a scarica in gas, un arco fra due elettrodi eccita il gas che riempie un bulbo trasparente (Fig. 1.27). A seconda del tipo e della pressione del gas, varia in modo significativo lo spettro e la radianza delle sorgenti. La radiazione viene emessa in tutte le direzioni e la densità di radianza varia fortemente con il tipo di lampada.

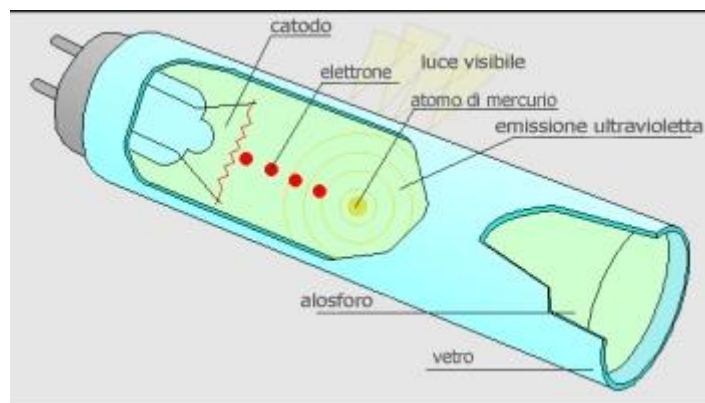


Fig. 1.27 Lampada a scarica in gas.

I laser sono sorgenti le cui caratteristiche principali, dal punto di vista dei sistemi ottici o elettroottici, sono l'elevatissima radianza, la monocromaticità della radiazione emessa (quindi, la lunghezza di coerenza della radiazione), la sua forte direzionalità, l'elevata densità di energia che è possibile ottenere (su piccole superfici) mediante la focalizzazione della radiazione, la grande collimazione del fascio di radiazione emessa in molti tipi di laser e le elevatissime potenze che si possono ottenere, grazie alla brevissima durata degli impulsi nei quali è possibile concentrare tutta l'energia. Esistono molti tipi di laser, con caratteristiche molto diverse fra loro (lunghezza d'onda, larghezza di banda e, quindi, lunghezza di coerenza, energia media ed energia per impulso, regime temporale: CW (Continuous-Wave in continua) o ad impulsi, dimensioni e forma del fascio emesso, distribuzione di intensità, divergenza, a stato solido, liquidi, a gas, ecc.). Una differenza sostanziale, dal punto di vista dell'ottica, è la distribuzione nello spazio dell'energia emessa. Mentre, ad esempio, alcuni laser a gas possono emettere radiazione con divergenza massima dell'ordine di 0.5 mrad (Fig. 1.28b), la maggior parte dei laser a diodo emettono un fascio fortemente asimmetrico e di grande angolo. Infatti nei laser a diodo la radiazione viene emessa attraverso una sottile fenditura la cui larghezza può essere di pochi μm e la lunghezza di centinaia di μm (Fig. 1.28a). Questo fa sì che, su un asse perpendicolare alla fenditura, la diffrazione dia luogo ad una forte divergenza (decine di gradi), mentre su un asse parallelo alla fenditura la divergenza può scendere a pochi mrad. Questo fenomeno ha, come ulteriore conseguenza, l'emissione di fasci astigmatici, nei quali, cioè, mentre nei raggi che giacciono su piani perpendicolari alla fenditura il punto comune da cui apparentemente nascono si trova molto vicino alla superficie di emissione, i raggi che giacciono su piani paralleli alla fenditura hanno il punto comune molto più interno. Se si fa un'immagine della sorgente, si formano due immagini separate, distanziate longitudinalmente: quando una è a fuoco, la seconda è fuori fuoco. Molti laser a diodo commerciali sono forniti di opportuni sistemi ottici che riducono la divergenza del fascio emesso, spesso ne correggono la forma (da ellittica a circolare) e, talvolta, ne correggono l'astigmatismo. Una caratteristica dei laser, importante specialmente ai fini della sicurezza per gli occhi, è che la sorgente è sempre riconducibile ad un punto di piccole dimensioni: ogni volta che la radiazione viene focalizzata, la densità di energia può raggiungere valori elevatissimi.

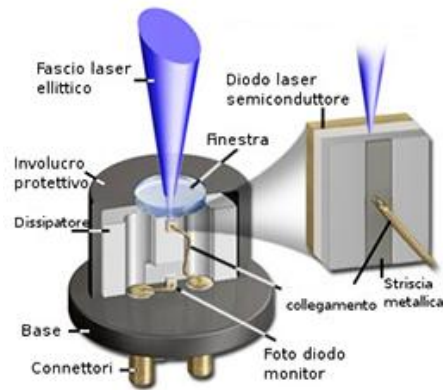


Fig. 1.28a Laser a diodo.

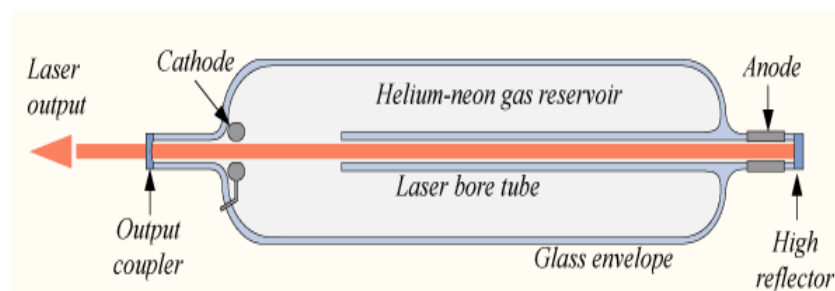


Fig. 1.28b Laser a gas.

I led sono diodi analoghi ai laser a diodo, ma emettono la radiazione da superfici maggiori, con bande spettrali molto più larghe (brevi lunghezze di coerenza) e con divergenze molto maggiori (Fig. 1.29). I corpi neri sono sorgenti che cercano, per quanto possibile, di realizzare le condizioni di emissione che rispettino le condizioni imposte dalle leggi di Plank: la distribuzione spettrale della radiazione emessa dipende, in modo noto, dalla temperatura di una superficie portata alla temperatura voluta. Sono sorgenti di particolare interesse nell'infrarosso perché, alle temperature che possono raggiungere senza danneggiarsi (al massimo a temperature di poco superiori a 1000°C), la parte di spettro che emettono si trova in quella regione.

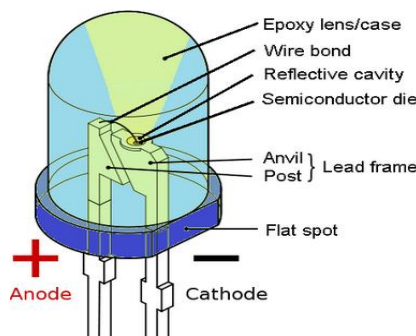


Fig. 1.29 Struttura di una sorgente led.

In particolare, volendo approfondire, bisogna dire che le lampade ad incandescenza, si comportano, dal punto di vista spettrale, in modo molto simile a corpi neri ad alta temperatura. Grazie all'alta temperatura del filamento, possono emettere grandi quantità di energia nello spettro visibile; lo spettro, tuttavia, non è molto simile a quello solare, perché le temperature necessarie (di circa 6000 °K) non sono raggiungibili. Inoltre le emissioni nell'ultravioletto (comunque scarse) e nell'infrarosso sono, di solito, assorbite dall'involucro di vetro, il cui spettro di trasparenza normalmente comprende le lunghezze d'onda fra 0.4 e 2.5 μm . Si deve notare che le radiazioni assorbite dal vetro, specialmente nell'infrarosso, lo fanno riscaldare e trattandosi un materiale fortemente assorbente nell'infrarosso, la sua emissività negli stessi intervalli spettrali (cioè l'efficienza con cui possono ri-emettere sotto forma di radiazioni infrarosse, l'energia assorbita) è molto elevata. Di conseguenza, se si osserva una lampadina accesa con un sistema ottico dotato di un rivelatore adatto per la osservazione delle immagini di oggetti nelle bande spettrali dell'infrarosso al di sopra di 2.5 μm (ad esempio con una camera termica), non si vede solo il filamento, ma anche l'involucro di vetro. Lo spettro visibile, emesso dalle lampade ad incandescenza è continuo (cioè, a differenza dell'emissione di molte lampade con scarica elettrica in gas, non è a "righe") e la radiazione emessa da questo tipo di sorgente non è polarizzata. Di queste caratteristiche si deve tenere conto in fase di progettazione ottica, perché lo spettro emesso è molto più largo e con una distribuzione molto diversa dalla curva "fotopica", che descrive la sensibilità spettrale dell'occhio umano. Se il sistema ottico è destinato alla formazione di immagini che riproducano quanto osservato con gli occhi, se ne deve tenere conto, sia perché se il rivelatore utilizzato non è l'occhio umano e potrebbe avere uno spettro di sensibilità più esteso e registrare segnali che l'occhio non può vedere, sia perché il sistema ottico, pur essendo cromaticamente corretto, di solito non lo è in zone spettrali esterne allo spettro visibile. La conseguenza potrebbe essere che il rivelatore viene investito da un segnale fuori fuoco, che può degradare in modo significativo l'immagine raccolta. Infine, la radiazione emessa dalle sorgenti laser è particolarmente ricca dal punto di vista dei fenomeni ottici cui può dare luogo; la maggior parte di essi è una diretta conseguenza della grande lunghezza di coerenza (banda spettrale stretta) di cui sono dotate molte sorgenti laser. Una grande lunghezza di coerenza significa che, se la radiazione laser per effetto della diffusione prodotta da un oggetto che illumina, raggiunge lo stesso punto dopo aver percorso cammini ottici diversi, può interferire (purché la differenza di cammino ottico sia minore della lunghezza di coerenza). L'interferenza si traduce in vistose variazioni di intensità del segnale, che possono verificarsi a distanze fra punti più o meno grandi (un esempio tipico sono le frange di interferenza prodotte dagli interferometri). Uno degli effetti più vistosi dell'interferenza è il fenomeno degli "speckles". Quando si osserva una superficie diffondente illuminata da una radiazione dotata di grande lunghezza di coerenza, la superficie appare coperta da molti puntini luminosi, intervallati da zone nere: è il fenomeno degli speckles. Se la zona illuminata della superficie non è liscia, ma è costituita da rilievi irregolari grandi rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione che la illumina, da ciascun punto delle irregolarità si diffonde parte della radiazione, con una fase diversa da un punto all'altro. Se un sistema ottico raccoglie la radiazione per formare un'immagine della zona illuminata, nel caso ideale, di un sistema ottico con risoluzione infinita, di ciascun punto fa un'immagine indipendente. Nella realtà, però, un sistema ottico di risoluzione infinita non esiste, sia per

effetto della diffrazione, che delle aberrazioni, dei difetti di costruzione e degli errori di messa a fuoco. Se la zona della superficie che contribuisce alla minima dimensione risolta nell'immagine, è costituita da almeno due punti da cui parte la radiazione diffusa, quando i due contributi della radiazione diffusa vengono fatti convergere nel punto-immagine risolto, interferiscono, dando luogo ad una intensità che dipende dalla fase e dall'ampiezza relativa: se sono in fase, le ampiezze si sommano (se le ampiezze sono uguali, l'intensità del punto luminoso diviene quattro volte l'intensità che avrebbe ciascuno dei punti separatamente), se sono in opposizione di fase, si sottraggono reciprocamente; in tutte le condizioni di fase o di ampiezze intermedie, danno luogo ad immagini di intensità intermedia. Quindi, all'interno di una zona risolta dell'immagine fatta dal sistema ottico, esiste una parte della radiazione che si somma in fase, una parte in opposizione di fase ed il resto in condizioni intermedie. Le dimensioni di ciascuna "speckle" dipendono dalla risoluzione del sistema ottico. Quindi, in definitiva, diciamo che gli speckles sono causati da una costruttiva e distruttiva interferenza dai ritorni degli elementi che diffondono all'interno di una cella di risoluzione.

1.6.5 Filtri

Un filtro ottico è uno strumento, comunemente usato in fotografia e in molti strumenti ottici, che trasmette selettivamente la luce con particolari proprietà (una particolare lunghezza d'onda, una gamma di colore o di luce), bloccando invece le rimanenti. Possono essere suddivisi in diverse tipologie:

- I filtri ad assorbimento sono di solito fabbricati in vetro a cui sono stati aggiunti vari materiali o inorganici o organici. Questi componenti assorbono alcune lunghezze d'onda della luce lasciandone passare altre. A volte si utilizzano materiali plastici (spesso policarbonato o acrilico) per produrre filtri di gel, più leggeri e meno costosi di quelli vitrei.
- I filtri a riflessione sono fabbricati rivestendo uno strato di vetro con uno strato ottico e riflettono le porzioni di luce non volute della sorgente. Sono particolarmente indicati per lavori scientifici ad alta precisione, dato che la banda del filtro può essere selezionata con estrema precisione. Sono però molto più delicati e costosi dei filtri ad assorbimento. Di solito questi filtri sono denominati filtri diecrici e possono essere utilizzati in strumenti come i prismi diecrici per separare un fascio di luce in un singolo componente cromatico.
- I filtri monocromatici consentono il passaggio di una sola lunghezza d'onda, e quindi di un solo colore.
- I filtri infrarosso (IR) sono pensati per bloccare le lunghezze d'onda nell'area dell'infrarosso e lasciar passare la luce visibile. Vengono spesso utilizzati in strumenti o apparecchiature con lampade ad incandescenza (ad esempio proiettori) per evitare il surriscaldamento. Vi sono anche filtri per il vicino infrarosso, utilizzati per

compensare l'alta sensibilità di alcuni CCD a queste lunghezze d'onda. In ambito fotografico i filtri infrarosso possono essere utilizzati per ottenere particolari effetti grafici, non replicabili tramite programmi di photoediting. I filtri più utilizzati per questa tipologia di fotografia hanno tipicamente la caratteristica di bloccare tutta la luce visibile fino ai 600nm, 750nm oppure 900nm.

- I filtri ultravioletto (UV) bloccano le radiazioni ultraviolette lasciando passare la luce visibile. Dato che le pellicole fotografiche e i sensori digitali sono sensibili all'ultravioletto (che abbonda nella luce diurna) mentre l'occhio umano non lo è, questo tipo di luce, non filtrata, può generare un'immagine finale differente da quanto osservato all'atto della ripresa; portando, ad esempio, aberrazioni delle superfici maggiormente riflettenti o a soggetti lontani "nebbiosi".
- I filtri a densità neutra sono di colore grigio o leggermente riflettenti, hanno un'attenuazione costante sulle lunghezze d'onda visibili e sono usati per ridurre l'intensità della luce riflettendone o assorbendone una porzione. Sono specificati dalla densità ottica del filtro, che è il negativo del logaritmo base 10 del coefficiente di trasmissione. Sono utilizzati per effettuare esposizioni lunghe, ad esempio per eliminare i soggetti in movimento durante l'esposizione o rendere omogeneamente liscia e velata l'acqua di una cascata o di uno specchio d'acqua fotografati in piena luce.
- I filtri passa-alto sono filtri di vetro colorato che attenuano le lunghezze d'onda inferiori e lasciano passare le superiori. La lunghezza d'onda di taglio (λ_t) è quella lunghezza d'onda per cui la luce è attenuata di $1/e$ ($\approx 36\%$). La λ_t dipende dalle caratteristiche fisiche (spessore e indice di rifrazione) dello strato sottile di materiale depositato (coating) sulla superficie del vetro. Questo tipo di filtri viene spesso utilizzato per eliminare la componente ultravioletta della luce, come nei filtri per macchine fotografiche, oppure nel caso di λ_t maggiori per trasmettere solo la componente infrarossa della luce, come nei filtri dei telecomandi per gli elettrodomestici.
- I filtri passa-basso si comportano in modo esattamente opposto ai filtri passa-alto, lasciando passare solamente le lunghezze d'onda inferiori e bloccando le superiori. Questo tipo di filtro viene spesso utilizzato per eliminare la componente infrarossa della luce oppure nel caso di λ_t inferiori per fare passare solo gli ultravioletti ed eliminare la componente visibile, come nel caso dei filtri per lampade UV.
- I filtri polarizzatori bloccano la luce a seconda della sua polarizzazione. Sono spesso composti di materiali come Polaroid e sono utilizzati per gli occhiali da sole e in fotografia. Sono composti da lamelle spaziate tra loro dell'ordine della lunghezza d'onda della luce incidente, e impediscono o smorzano la luce riflessa lungo la direzione ad esse ortogonale. La riflessione, specialmente per l'acqua e le superfici bagnate, è parzialmente polarizzata, e parte di questa luce riflessa viene bloccata, consentendo ad esempio ad un pescatore di vedere oltre la superficie dell'acqua. Due filtri polarizzatori sovrapposti ed oppostamente orientati danno un effetto di quasi totale oscuramento dell'immagine.

Molti sistemi per la classificazione dei filtri si basano sulle proprietà spettrali complessive, sul materiale e sul tipo di radiazione che i filtri trasmettono o attenuano. Qui di seguito sono elencate alcune classi di filtri tra quelle che più interessano chi lavora nel campo scientifico:

A taglio netto: consentono un passaggio brusco tra le regioni di alta e bassa trasmissione.

Onde corte: trasmettono le onde più corte e respingono le più lunghe.

Onde lunghe: trasmettono le onde più lunghe e respingono le più corte.

Passa-banda: trasmettono o respingono una banda limitata di lunghezze d'onda.

Monocromatici: singolarmente o combinati, isolano una sola linea spettrale (o una brevissima porzione di linee spettrali) emessa da una sorgente lineare.

Conversione: trasformano la risposta spettrale o la distribuzione dell'energia spettrale di un misuratore selettivo o di una sorgente luminosa in quella di un'altra sorgente luminosa.

Densità neutra: attenuano la radiazione essenzialmente allo stesso modo con tutte le lunghezze d'onda nella regione visibile dello spettro.



Fig. 1.30 Illustrazione dell'azione di un filtro sulla radiazione elettromagnetica.

1.7 Applicazioni

La spettroscopia è fondamentale per quanto riguarda lo studio delle proprietà degli elementi, il quale è uno dei campi in cui viene maggiormente utilizzata. Gli spettri emessi da gas rarefatti eccitati sono a righe e non continui. In pochi anni si passò dal modello dell'atomo di Rutherford (1911) a quello di Bohr che prevedeva la quantizzazione dell'energia dell'elettrone. Quando un elettrone ruotando intorno al proprio nucleo ad un determinato livello energetico n viene colpito da un fotone con energia sufficientemente elevata, "salta" ad un livello energetico superiore e l'atomo risulta eccitato. Non essendo questa situazione una configurazione ottimale di minima energia, l'atomo si diseccita naturalmente e l'elettrone ritorna al suo livello originale cedendo l'energia in eccesso con un fotone di lunghezza d'onda corrispondente al salto energetico tra i due stati quantici. Ecco il motivo per cui gli spettri di emissione di molte sostanze sono discreti, contengono cioè solo lunghezze d'onda relative a salti energetici ben determinati. L'energia può essere assorbita (spettro di assorbimento) o emessa (spettro ad emissione). Questo scambio di energia ΔE tra due livelli energetici in un atomo, è relazionata alla frequenza della radiazione assorbita o emessa tramite l'equazione:

$$E' - E'' = \Delta E = h\nu \quad (20)$$

in cui h è la costante di Planck e ν è la frequenza in cicli per secondo. E' è l'energia totale dell'atomo nel suo stato più alto di n , e E'' è il valore per lo stato più basso. La quantità $h\nu$ è l'energia del fotone, in seguito emesso o assorbito. I valori dei livelli energetici corrispondenti ai principali numeri quantici (n), identificativi del livello, sono: E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 . Alcuni degli atomi eccitati perdono quindi l'energia in eccesso rispetto al livello inferiore ($n=1$, ground state) ed emettono una radiazione con frequenze $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4$:

$$E_2 - E_1 = h\nu_1 ; E_3 - E_1 = h\nu_2 ; E_4 - E_1 = h\nu_3 \quad (21)$$

Queste frequenze differenti sono dovute al passaggio della luce attraverso un prisma o un reticolo di diffrazione e la separazione della radiazione nelle sue componenti di frequenze diverse ci dà lo spettro degli elementi.

Il fenomeno è stato poi studiato da diversi scienziati, che hanno dato il nome alle serie di salti che fanno riferimento ai primi quattro livelli energetici: Lyman, Balmer, Paschen e Brackett (Fig. 1.31). La serie di Balmer fu la prima ad essere osservata poiché è nel visibile (atomo di idrogeno).

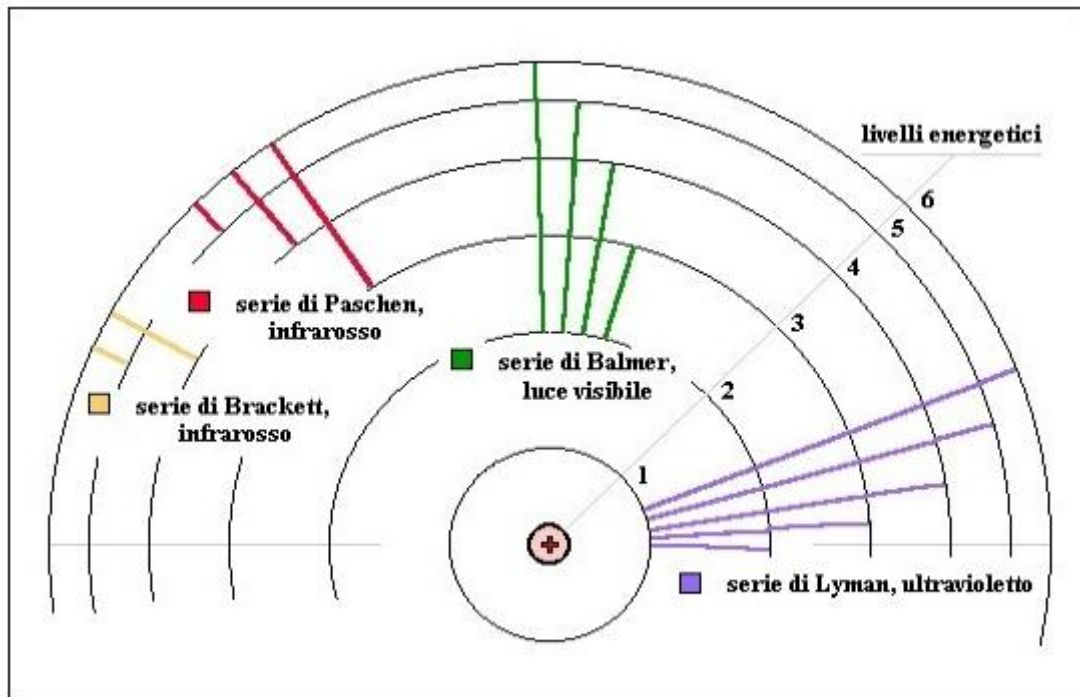


Fig. 1.31 Illustrazione delle serie principali

Tuttavia il nostro interesse riguarda l'uso della spettroscopia per la costruzione di camere iperspettrali.

La tecnica di imaging iperspettrale (HSI) raccoglie le informazioni di una "immagine target" in un ampio range dello spettro elettromagnetico, dai raggi ultravioletti al lontano infrarosso. Queste informazioni facilitano l'identificazione di oggetti e non solo, infatti tramite la tecnica dell'imaging iperspettrale è possibile anche svolgere una classificazione e quantificazione con elevato grado di precisione. In una camera iperspettrale, l'ottica anteriore cattura l'immagine della luce riflessa da un segmento di linea del "campione target" sulla fenditura d'ingresso dello spettrografo. Questa luce viene dispersa in diverse lunghezze d'onda dai reticoli all'interno dello spettrografo e poi catturata dal sensore come immagine bidimensionale $[X, \lambda]$, in cui X rappresenta la posizione spaziale e Y rappresenta la dimensione spettrale. L'imaging iperspettrale è una tecnologia non distruttiva, senza contatto, ideale per una vasta gamma di applicazioni. Ad esempio, l'HSI nella regione spettrale SWIR (short wave infrared) fornisce informazioni dettagliate sulla composizione chimica di composte, cosa impossibile con l'imaging tradizionale. La tecnologia HSI può essere d'aiuto nel rilevare preventivamente ed intervenire per tempo nel caso di molte patologie potenzialmente letali. L'HSI può essere utilizzata in odontoiatria per rilevare carie senza la necessità del trapano o di radiografie, aiutare gli agricoltori a monitorare lo stato delle colture, per il rilevamento di merci contraffatte e la valutazione della qualità dei prodotti alimentari.

Capitolo 2

Camere Iperspettrali

I sistemi di ripresa e analisi iperspettrali rappresentano una tecnica dalle grandi potenzialità, nel campo delle analisi ambientali. Alla base dei sistemi di telerilevamento iperspettrale vi è la proprietà fisica degli oggetti di emettere o riflettere radiazione su varie bande, oltre a quella visibile, con intensità variabile in funzione delle proprie caratteristiche chimico-fisiche. I radiometri iperspettrali misurano la radiazione riflessa in molte bande strette e contigue, ovvero per ogni banda di misura è acquisita una immagine, per ciascuna delle quali un pixel rappresenta la riflettanza (rapporto tra intensità del flusso radiante riflesso e intensità del flusso radiante incidente), ad una precisa lunghezza d'onda, della regione di un oggetto vista da quel pixel. Dall'analisi dei dati raccolti dal sensore iperspettrale, anche mediante la combinazione dei dati acquisiti su diversi canali, si possono elaborare immagini in falsi colori rappresentative delle caratteristiche delle superfici indagate. Tra gli impieghi tipici di questa tecnica citiamo, ad esempio, la mappatura termica del territorio, ottenibile dall'analisi delle bande dell'infrarosso e l'individuazione di specifiche sostanze o componenti, tramite la ricerca della "firma spettrale" propria del materiale oggetto di interesse.

2.1 Architettura dei sistemi iperspettrali

Il telerilevamento iperspettrale è nato a metà degli anni '80 ed è stato utilizzato inizialmente soprattutto a scopo geologico per poter studiare minerali e rocce, ma di recente il suo utilizzo è stato allargato al monitoraggio dell'ambiente, in particolare allo studio dell'atmosfera, della vegetazione, dell'acqua e degli incendi boschivi, e alla classificazione della copertura del suolo o a supporto e monitoraggio dell'agricoltura.

In generale i sistemi iperspettrali sono realizzati seguendo uno schema piuttosto semplice, associando ad una camera digitale con un detector bidimensionale uno spettrografo ad immagine (Fig. 2.1), proponendo così uno strumento in grado di caratterizzare sia la distribuzione spettrale che quella spaziale della radiazione proveniente dalla superficie osservata. La configurazione prevede un'ottica rifrattiva standard per focalizzare l'immagine della scena osservata e, in corrispondenza del piano focale di tale ottica, la sezione di ingresso dello spettrografo, costituita da una stretta fenditura. Lo spettrografo, quindi, scompone la radiazione focalizzata sulla fenditura nelle sue componenti spettrali, disperdendo quelle nella banda di interesse secondo la direzione ortogonale a quella di sviluppo della fenditura. L'immagine formata sul detector, posto all'uscita dello spettrografo, è rappresentativa della distribuzione di radianza, (descrive la quantità di radiazione elettromagnetica (riflessa o trasmessa) da una superficie di area unitaria, e diretta verso un angolo solido unitario in una direzione indicata), lungo la direzione di sviluppo della fenditura e della relativa

composizione spettrale nella direzione perpendicolare. Quindi, l'allineamento del detector, ovvero della camera, con lo spettrografo, che richiede un'attenta calibrazione delle due parti, consente di associare a righe e colonne delle immagini acquisite il significato di asse di risoluzione spaziale e spettrale dello strumento.

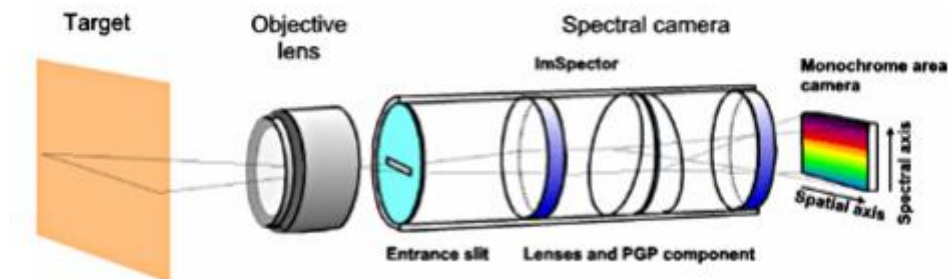


Fig. 2.1 Componenti e schema funzionale delle camere iperspettrali.

Tra le diverse regioni spettrali, tre vengono utilizzate principalmente nel telerilevamento (infrarosso, visibile, ultravioletto) e sono acquisite da sensori digitali con diverse risoluzioni spettrali, geometriche, radiometriche e temporali. Per risoluzione spettrale, come abbiamo già visto, si intende il numero delle bande rilevate e la loro larghezza: maggiore è il numero di bande, e di conseguenza minore la loro larghezza, maggiore sarà la capacità di identificare gli oggetti ripresi in base alle loro caratteristiche di riflettanza. Il numero di bande rilevate dal sensore utilizzato differenzia il telerilevamento iperspettrale dal più comunemente utilizzato telerilevamento multispettrale. Con quest'ultimo vengono acquisite immagini in un numero limitato di bande distinte, ampie e solitamente non contigue. I sensori iperspettrali, al contrario, riescono a rilevare numerosi intervalli di lunghezze d'onda molto stretti e ravvicinati tra loro, quasi a realizzare l'analisi di tutto lo spettro elettromagnetico. Inoltre le immagini iperspettrali, ovviamente, forniscono informazioni molto più dettagliate sulla scena di una normale telecamera a colori, che acquista solo tre diversi canali spettrali corrispondenti ai colori primari visivi rosso, verde e blu. Quindi, imaging iperspettrale aumenta notevolmente la capacità di classificare gli oggetti nella scena in base alle loro proprietà spettrali.

Una singola immagine iperspettrale può essere rappresentata come un cubo di dati in cui le informazioni spaziali sono raccolte sul piano X-Y e le informazioni spettrali sono rappresentate lungo l'asse Z (Fig. 2.2).

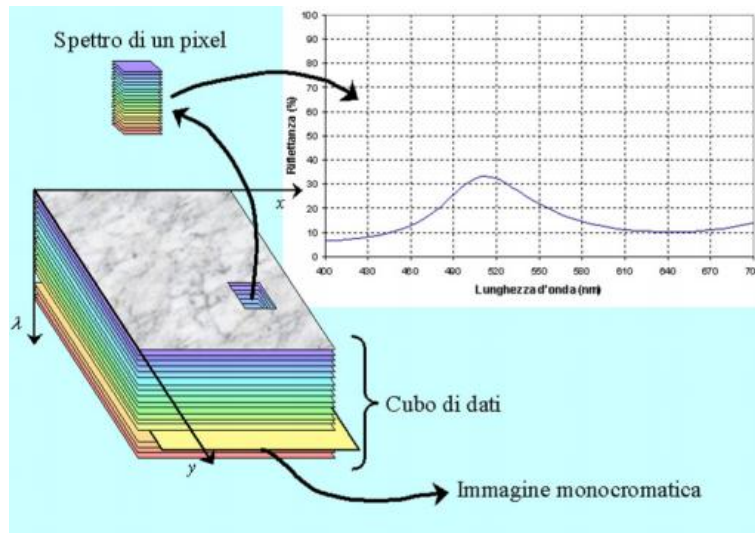


Fig. 2.2 Cubo di dati iperspettrale

Un cubo iperspettrale è costituito da un insieme di immagini a strati uno sopra l'altro. Ogni immagine rappresenta una particolare banda di lunghezze d'onda e in un'immagine iperspettrale, ogni pixel è costituito da uno spettro su una regione spettrale appropriata. Ogni oggetto ha una caratteristica unica tra le diverse bande di lunghezza d'onda. Questa caratteristica unica è la sua "firma spettrale". Per esempio, confrontando la firma spettrale di "oggetti target" sconosciuti con quella di sostanze note, la composizione chimica dell'"oggetto target" può essere identificata. La tecnica dell'imaging iperspettrale consente non solo l'identificazione di oggetti, ma anche la loro classificazione e quantificazione con elevato grado di precisione. Tali sistemi iperspettrali impiegano la tecnica "push-broom". In questa tecnica, la firma spettrale di un pixel per le molte migliaia di pixel in una linea spaziale (swath) attraverso l'area target, viene registrata al momento. La seconda dimensione spaziale è costruita nel tempo registrando un passaggio dopo l'altro (Fig. 2.3).

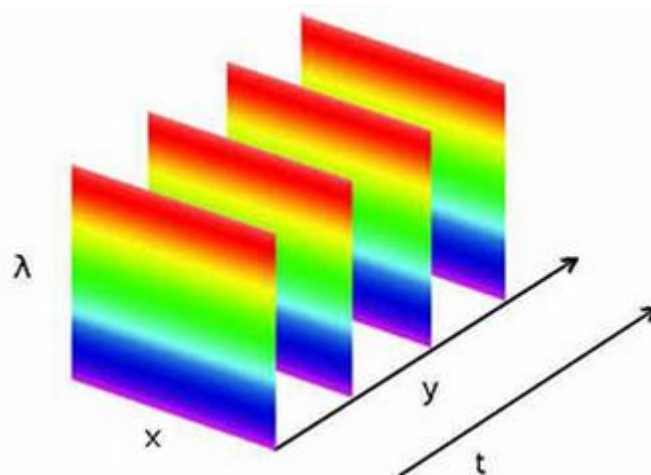


Fig. 2.3 Rappresentazione delle dimensioni spaziale e spettrale delle immagini acquisite.

Questa tecnica "push-broom" permette l'acquisizione simultanea di tutte le bande spettrali. Come è stato detto, le tre componenti principali di una camera iperspettrale "push-broom" sono un sensore (2D detector array), uno spettrografo per imaging e un obiettivo, e si ha che l'ottica anteriore cattura l'immagine della luce riflessa da un segmento di linea del "campione target" sulla fenditura d'ingresso dello spettrografo, questa luce viene dispersa in diverse lunghezze d'onda dai reticoli all'interno dello spettrografo e la luce dispersa è catturata dal sensore come immagine bidimensionale $[X, \lambda]$. Per catturare l'intera immagine, occorre effettuare istantanee di ogni linea in tutta l' "area target". Sincronizzando il movimento tra la camera, l' "oggetto target" e l'acquisizione, si possono catturare diverse linee dell'oggetto e quindi generare l'ipercubo $[X, Y, \lambda]$ dove Y rappresenta la seconda dimensione spaziale. Tra i vantaggi della tecnica "push-broom" c'è quello di ridurre il carico di illuminazione, infatti ogni linea dell' "area target" deve essere illuminata una per volta. Ciò riduce moltissimo il carico termico sul campione rispetto ad altre tecniche di imaging. I sistemi HSI "push-broom" sono ideali per misure online con oggetti in movimento. Questi sistemi possono essere trasferiti direttamente dai laboratori di R&D alla linea di produzione nel settore industriale, senza modifiche al sistema. Ad esempio, un sistema di questo tipo, può essere utilizzato per lo smistamento della frutta in movimento su un nastro trasportatore.

2.2 Progetto per l'azienda CNI

Il lavoro di progettazione e costruzione di questo spettrografo è stato commissionato dal gruppo CNI, che comprende varie aziende ed in particolare la CNI informatica che si occupa di sistemi di automazione per macchine automatiche. Questi sistemi comprendono oltre a controlli numerici, anche software aggiuntivi progettati per aumentare e organizzare la produzione delle macchine dei loro clienti. Tra i software, utilizzati in diversi settori, vi sono: CAD-CAM che permette la realizzazione di disegni parametrici e la loro traduzione in programmi CNC, ottimizzatori in grado di migliorare ed accelerare il processo produttivo della macchina automatizzata e software di supervisione di linea.

2.2.1 Disegno ottico

Di seguito viene presentato il disegno ottico di uno spettrografo in cui la sorgente, relativamente vicina, viene proiettata, tramite un obiettivo, in un piano focale intermedio in cui è presente una fenditura che seleziona essenzialmente una sola direzione (Fig. 2.4). Nella direzione perpendicolare a quella della fenditura la luce viene dispersa sul piano focale, dopo essere passata attraverso un collimatore, in base alla lunghezza d'onda mediante un reticolo di dispersione posizionato tra due differenti obiettivi. La luce che verrà misurata sarà quella rifratta dal reticolo nell'ordine di dispersione ($M=1$) e saranno scartati gli ordini successivi per evitare fenomeni di sovrapposizione e quindi un peggioramento delle immagini acquisite.

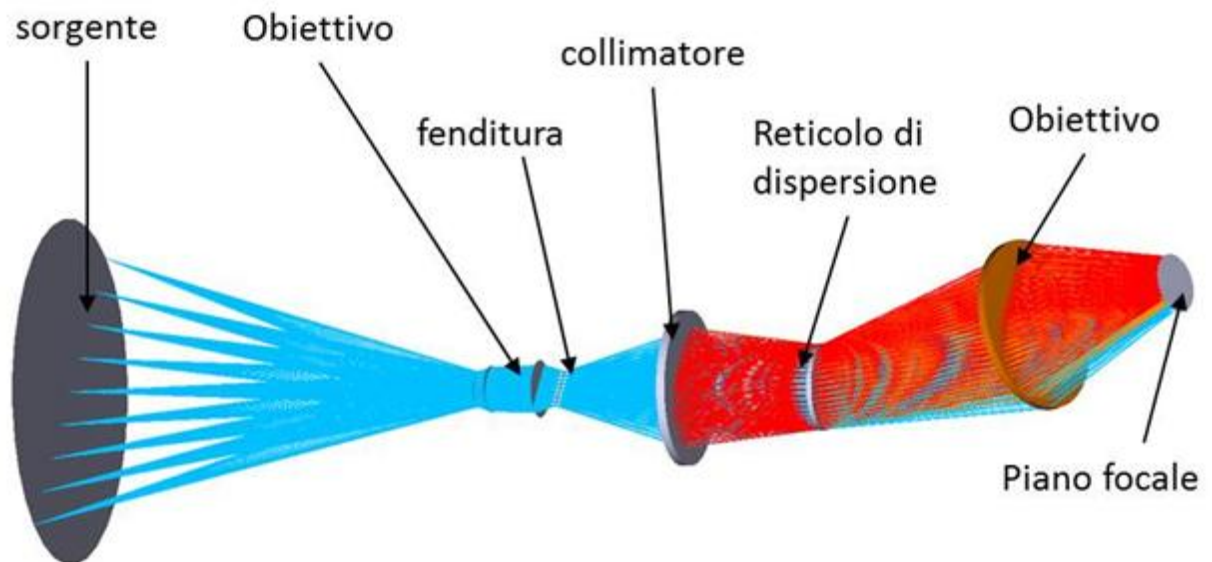


Fig. 2.4 Disegno ottico dello spettrografo.

Le principali grandezze riguardanti lo spettrografo sono riportate nella seguente tabella (Tab. 1).

Parametri	Dimensione
Dimensione sorgente	1000mm
Distanza sorgente	1500mm
Lunghezze d'onda di lavoro	$450\text{nm} < \lambda < 950\text{nm}$
Diametro pupilla di entrata	2mm
Dimensione fenditura	10.55mm x 0.1mm
Dimensione reticolo di dispersione	12.7mm x 12.7mm x 3mm
Densità reticolo di dispersione	300linee/mm
Dimensione immagine sul piano focale	11.7mm
Dispersione immagine su piano focale	7.1mm

Tab. 1 Valori dei parametri degli elementi ottici utilizzati per lo spettrografo.

Tramite il software Zemax per la progettazione di sistemi ottici è stato possibile ottenere una rappresentazione, vista dall'alto (Fig. 2.5), del sistema ottico dello spettrografo (vista lungo la direzione della fenditura) e una vista lateralmente (Fig. 2.6) (lungo la direzione della dispersione delle lunghezze d'onda).

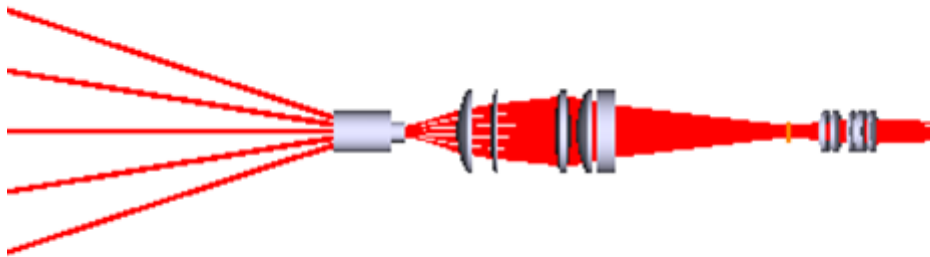


Fig. 2.5 Punto di vista dall'alto del sistema ottico.



Fig. 2.6 Punto di vista laterale del sistema ottico.

Tra le varie componenti, le lenti che compongono i vari sottosistemi sono generalmente singoletti piano-concavi o piano convessi. L'elevato numero di lenti utilizzate permette di avere valori di risoluzione adeguati, che si potrebbero avere altrimenti solo tramite dispositivi richiesti appositamente per questo sistema. Infatti, un'ottimizzazione riguardante i raggi di curvatura ed i materiali componenti le ottiche porterebbe sicuramente ad un miglioramento della qualità ottica finale o ad una diminuzione del numero delle ottiche totali ma richiederebbe una manifattura ad hoc con conseguente aumento di costo e di tempo di consegna.

Per quanto riguarda l'obiettivo, di seguito viene mostrato il file ZEMAX ricevuto dalla Edmund Optics (Fig. 2.7). Le lenti che lo costituiscono non sono visibili ma sono rappresentate da due "black box". All'interno dell'obiettivo c'è la pupilla di entrata del sistema ottico, il cui diametro è di 2mm. Questo gruppo ottico crea un piano focale intermedio in cui è situata la fenditura, la quale, posta sull'asse ottico ha dimensione di 10.55mm x 0.1mm.

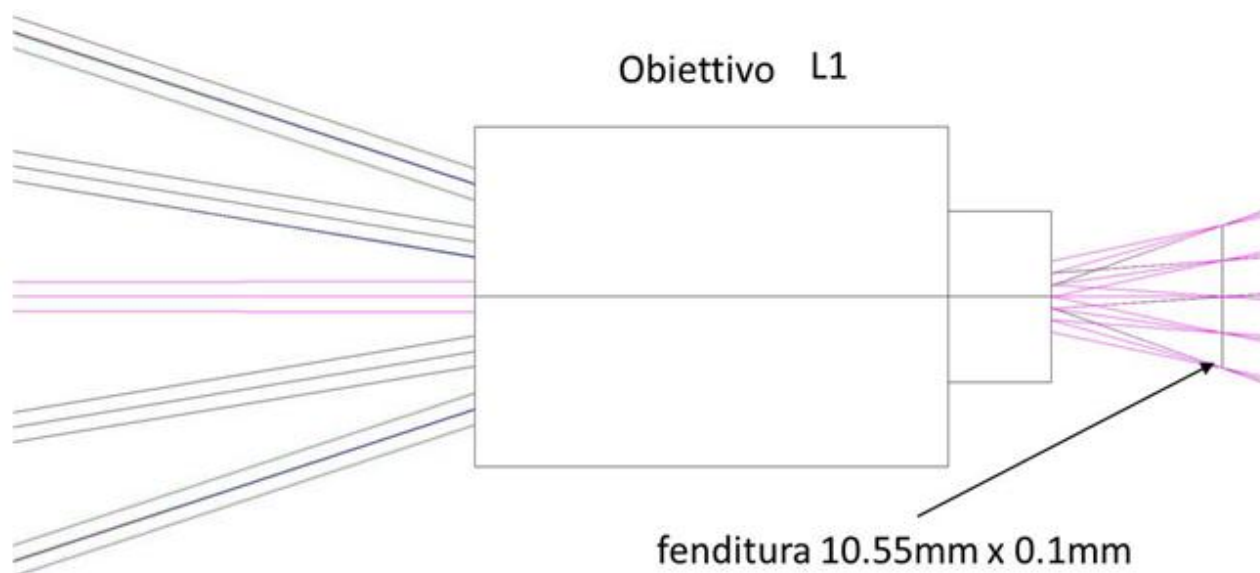


Fig. 2.7 Particolare laterale dell'obiettivo focalizzatore.

Possiamo riportare, quindi, la sezione laterale dello spettrografo in cui sono evidenziati gli elementi ottici che lo compongono (Fig. 2.8), con un particolare dell'ultimo gruppo di lenti e dell'angolazione del sensore e del reticolo rispetto a questo (Fig. 2.9).

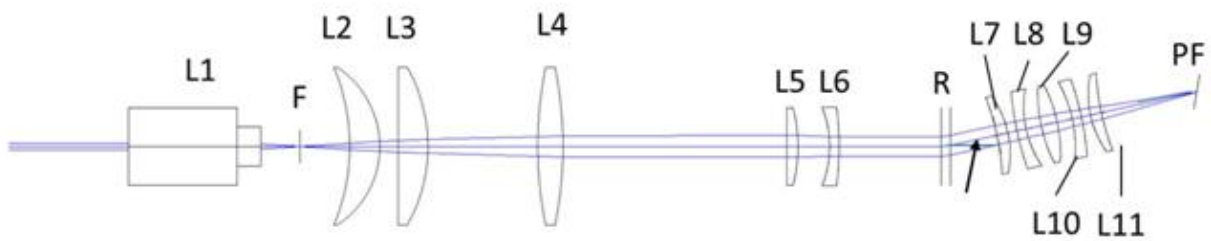


Fig. 2.8 Sezione laterale della camera iperspettrale. Sono evidenziati gli elementi ottici costituenti.

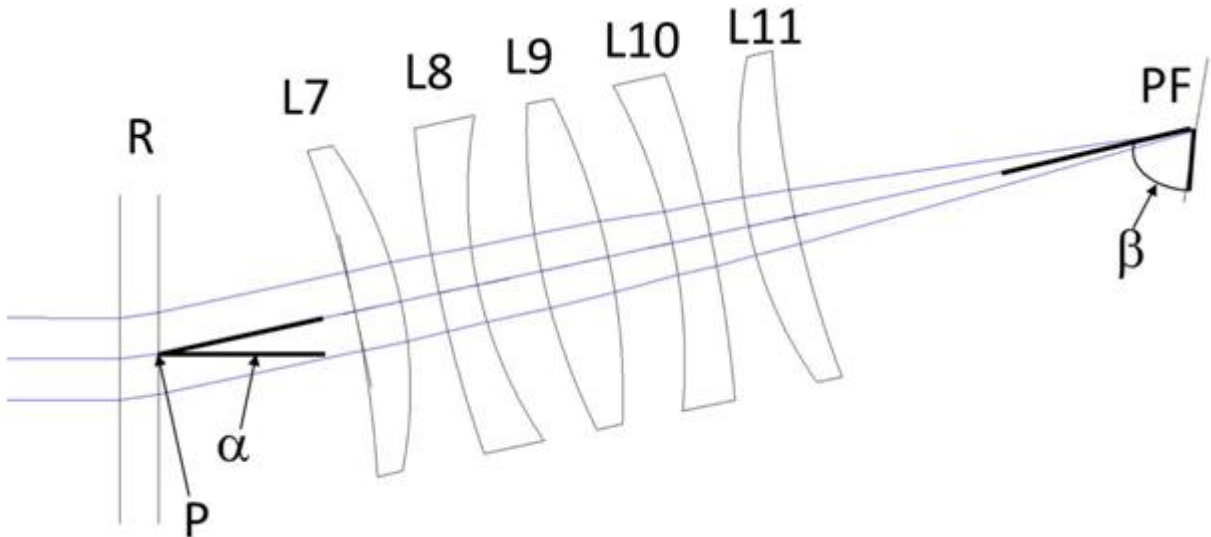


Fig. 2.9 Particolare del reticolo, dell'ultimo gruppo di lenti e del sensore.

Come è possibile osservare dalla prima figura, la componente ottica iniziale L1 rappresenta l'obiettivo che ha la funzione di focalizzare il fascio sorgente in F, ovvero nel punto in cui è presente la fenditura. La fenditura seleziona una porzione del piano focale sul quale è posta, e la radiazione transitata incontra la prima serie di lenti L2, L3, L4, separata dal secondo gruppo L5, L6, ma il cui compito, insieme, è quello di rendere parallelo il fascio divergente. A questo punto il fascio parallelo raggiunge il reticolo R e da questo viene rifratto in una direzione con una particolare angolazione α a seconda della lunghezza d'onda che lo caratterizza. L'ultimo gruppo di lenti L7, L8, L9, L10, L11, inclinato rispetto agli altri obiettivi a causa della diversa angolazione del fascio, focalizza quest'ultimo sul piano focale PF in cui è presente il sensore, il quale, a sua volta, è inclinato di un angolo β . Il punto P indica l'altezza dell'asse ottico alla lunghezza d'onda centrale (700nm) all'uscita del reticolo. In [Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.](#) è mostrata la parte finale dello spettrografo. Dopo l'obiettivo il piano focale in cui è posto il rivelatore è inclinato rispetto all'asse delle lenti che lo precedono in modo da poter minimizzare la dimensione delle immagini della fenditura alle diverse lunghezze d'onda di lavoro. I colori si riferiscono a tre diverse lunghezze d'onda, la minima a 450nm (colore verde) la mediana a 700nm (colore blu) e la massima a 950nm (colore viola).

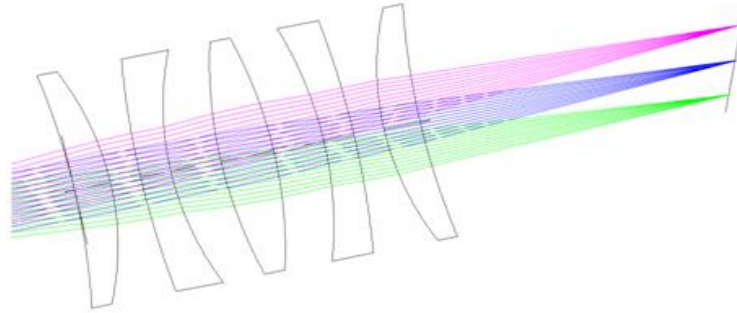


Fig. 2.10 Particolare dell'ultimo obiettivo con tre diverse lunghezze d'onda focalizzate sul sensore inclinato.

Le dimensioni di ogni elemento costituente lo spettrografo sono riportate nella seguente tabella (Tab. 2).

		Fornitore	Codice	*Spessore	* Distanza da elemento successivo	Dimensione	
				mm	mm	mm	
	Sorgente				1500	1000	
L1	Obiettivo	<u>Edmund Optics</u>	67714	42.5	12.63		
F	Fenditura				16	10.55x0.1	
L2	Lente	<u>Thorlabs</u>	LE1076	9.7	5.8	50.8	
L3	Lente	<u>Thorlabs</u>	LA1050	9.69	35.3	50.8	
L4	Lente	<u>Thorlabs</u>	LB1106	8.12	72.05	50.8	
L5	Lente	<u>Thorlabs</u>	LA1251	3.6	10.25	25.4	
L6	Lente	<u>Thorlabs</u>	LF1822	3	32.87	25.4	
R	Reticolo di dispersione	<u>Edmund Optics</u>	49575	3	15.33	12.7x12.7	
L7	Lente	<u>Thorlabs</u>	LE1234	3.59	3	25.4	
L8	Lente	<u>Thorlabs</u>	LF1822	3	5	25.4	
L9	Lente	<u>Thorlabs</u>	LB1471	5.24	5	25.4	
L10	Lente	<u>Thorlabs</u>	LF1547	3	3	25.4	
L11	Lente	<u>Thorlabs</u>	LE1234	3.59	32.7	25.4	
PF	Detector					11.3x7.1	
*Gli spessori e le distanze sono calcolate lungo l'asse ottico							
P=0.42mm							
$\alpha = 12.12^\circ$							
$\beta = 21.57^\circ$							

Tab. 2 Parametri dimensionali e tipologia degli elementi ottici del sistema.

Per quanto riguarda le caratteristiche del detector, se ne parlerà ampiamente in seguito. I valori del punto P e degli angoli α e β sono stati calcolati tramite il software Zemax, con il quale si è trovato anche la dimensione delle immagini sul piano focale, che è di circa $60\mu\text{m}$, corrispondenti ad una risoluzione spaziale di circa 10mm , su una linea illuminata dalla sorgente di lunghezza 1 m ad una distanza di $1,5\text{ m}$ ed una risoluzione spettrale di circa 7nm . Si ricordi però che il disegno presentato è costituito da elementi ottici reali ma perfetti.

2.2.2 Calibrazione

Il lavoro pratico di calibrazione, costruzione del sistema ottico, acquisizione di immagini e dati e misurazioni relative si è svolto, interamente, in un laboratorio di ottica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna. La costruzione del sistema, sul banco ottico, si è evoluta in vari step, col fine di portare a termine la calibrazione di ogni singolo elemento nel migliore dei modi. Oltre alle diverse componenti ottiche, per ottenere una calibrazione idonea e dei risultati soddisfacenti, sono stati utilizzati due software distinti. Il primo dei due, Vimba Viewer, collegato tramite un cavo per il trasferimento dati al sensore, ha permesso l'acquisizione delle immagini utili per la calibrazione e lo sviluppo del sistema. Il secondo, IDL, è stato necessario per analizzare le varie immagini acquisite e, quindi, trarne fuori i risultati indispensabili per la costruzione della Camera Iperspettrale. La descrizione più in dettaglio di questi due software sarà trattata in seguito e nelle apposite appendici.

2.2.2.1 Set up e procedimento di calibrazione

Innanzitutto va precisato che le componenti ottiche che costituiscono il sistema ottico e quelle appartenenti alla camera iperspettrale sono state scelte in dipendenza a motivi economici e a tempi di consegna, nonché a scelte commerciali dell'azienda che ha richiesto il lavoro. Le componenti ottiche principali utilizzate per la calibrazione del sistema comprendono un laser ad helio-neon, un collimatore, un diaframma, due specchi completamente riflettenti e un sensore C-MOS. Prima di tutto, prendiamo in considerazione la sorgente, ovvero il laser ad helio-neon, il quale genera un fascio di $0,6\text{ mm}$ di diametro e della lunghezza d'onda di 630 nm , con 2mW di potenza e una divergenza di $1,3\text{ mrad}$. Per sorreggere e impostare precisamente la posizione del laser sono stati usati degli appositi sostegni; ciò ha implicato, però, la necessità di sollevare l'intero sistema ottico di circa 8 cm affinché tutti gli elementi si trovassero sullo stesso piano, così da misurare correttamente la posizione dell'asse ottico. Inoltre, poiché è stata necessaria anche una completa mobilità del collimatore, degli specchi e del sensore, questi sono stati posti su stage lineari mobili muniti di micrometri, col fine di avere una precisione più alta possibile. L'utilizzo dei due specchi è strettamente collegato al fatto che la lunghezza del banco ottico di 1200 mm , inferiore alla lunghezza ideale del sistema calcolata durante la progettazione, non permette una disposizione lineare degli

elementi, ma rende indispensabile la riflessione del fascio, causando, di conseguenza, maggiori difficoltà durante le operazioni di calibrazione. Di seguito viene riportata la disposizione completa degli elementi usati per la calibrazione (Fig. 2.11).

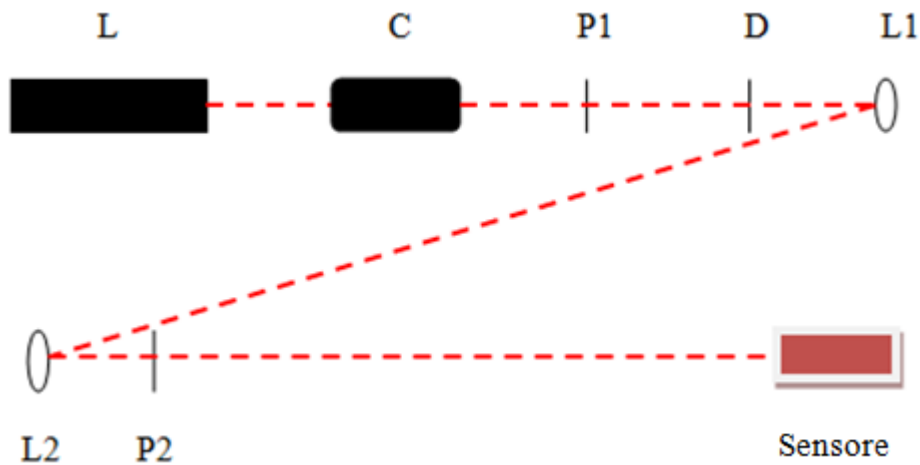


Fig. 2.11 Disposizione degli elementi nel sistema ottico di calibrazione.

Dopo aver disposto nelle posizioni rappresentate in figura tutti gli elementi, si è iniziato il processo di calibrazione, che, come già accennato è diviso in diverse fasi. Il primo step riguarda il centraggio del fascio, e per raggiungere questo obiettivo è stato necessario rendere il fascio parallelo, al banco ottico, all'uscita di ogni elemento. In seguito all'accensione del sensore CMOS (Manta 235), che ha una risoluzione di 1936x1216 pixel (ogni pixel misura 5,86 μm), collegato ad un alimentatore Omron da 24V, e al computer mediante un cavo di trasferimento dati, è stato possibile acquisire immagini tramite il software, Vimba 1.3. L'acquisizione tramite un semplice cavo dati, tuttavia, limita la velocità (frame rate) con cui le immagini vengono prese, che in questo caso è di 5 frame al secondo (sui 51 fps di frame rate massimo permessi dal sensore), e questo comporta tempi più lunghi e non una completa libertà di acquisizione. Con un frame rate costante o di poco variabile non è stato possibile ottimizzare il tempo di integrazione, tuttavia sono stati acquisiti comunque tutti i frame necessari per la calibrazione. L'azienda CNI avrà la possibilità ottenere risultati migliori utilizzando un modo più veloce per acquisire immagini, aumentando il frame rate. Per fare in modo che l'allineamento fosse preciso, e quindi che ogni elemento fosse posizionato nel modo corretto, sono state fatte acquisizioni di immagini della posizione del fascio partendo, inizialmente, dalla singola sorgente laser L, togliendo il collimatore C, e agendo sul sostegno regolabile così da rendere il fascio parallelo. Dopo aver posizionato correttamente la sorgente, si è introdotto il collimatore (20X beam expander) e agendo anche su di esso utilizzando manualmente i micrometri si è giunti ad una posizione sufficientemente accurata, trovata tramite l'analisi delle immagini. Questo primo step di calibrazione che prevede il centraggio del fascio è stato portato a termine seguendo una serie di procedimenti. Per prima cosa, la posizione del fascio è stata inizialmente indagata ad occhio su una superficie millimetrata spostata in diverse posizioni: davanti il primo specchio L1, subito dopo il secondo L2 e davanti al sensore. Una volta che, alla vista, il fascio è sembrato piuttosto centrato, sono state

effettuate le acquisizioni, spostando il sensore, dalla sua posizione alla posizione P2 e viceversa. Per ogni posizione sono state acquisiti 10 frame, i quali, tramite una procedura ad hoc del software IDL (chiamata da noi `beam_collimation`), sono stati sommati, col fine di migliorare la qualità dell'immagine e aumentarne l'intensità. Tramite una funzione della procedura (chiamata `click_on_max`) è stato possibile trovare le coordinate del fascio con precisione, per ogni punto in cui si è posto il sensore, e ciò ha permesso, confrontando i valori trovati, di riconoscere la centratura o meno dello spot luminoso. La centratura del fascio deve avvenire sia lungo l'asse x che lungo l'asse y; in particolare lungo l'asse y è stato necessario tener conto del tilt del collimatore, ovvero della rotazione di quest'ultimo attorno a determinati assi, infatti tramite micrometri di cui è accessoriato il sostegno del collimatore è stato possibile agire sul tilt per limitare la divergenza del fascio e renderlo il più parallelo possibile al piano ottico. Queste acquisizioni sono state fatte con il diaframma D chiuso e con un filtro tra sorgente e collimatore per limitare l'eccessiva intensità e la diffusione della radiazione. Al termine di questo primo lavoro di calibrazione del sistema sono stati ottenuti dei buoni risultati di centratura su x e su y, con delle differenze di posizione del fascio trascurabili su distanze intorno ai 70 cm (Tab. 3).

Differenza di posizione lungo l'asse x	Differenza di posizione lungo l'asse y
0,05 mm	0,02 mm

Tab. 3 Differenza di posizione del fascio lungo gli assi x e y.

Avendo terminato il primo step utile per la calibrazione, il passo successivo è stato la misurazione dei valori delle distanze focali degli obiettivi, le cui lenti componenti sono state assemblate in precedenza. Prima di iniziare i procedimenti necessari per trovare le focali, sono state prese immagini ponendo il sensore nella sua posizione originale e acquisendo sempre 10 frame per posizione, spostando la camera tramite un micrometro con uno step di 5 mm per un totale di 7 posizioni. In questo modo si è potuto allineare correttamente il sensore, seguendo la direzione del fascio. A questo punto, si è passati a disporre, a qualche centimetro dalla camera, il primo obiettivo preso in considerazione (il terzo gruppo di lenti seguendo il fascio ottico) su un sostegno che gli garantisse l'altezza ideale, ovvero la stessa del sensore. Per trovare la posizione del fuoco sono stati usati dei filtri polarizzatori, a densità variabile, questo perché la quantità di luce del laser che arrivava al sensore, a seconda del tipo di misura, era dipendente dalla dimensione del diaframma e, fissato il diaframma, si poteva attenuare inserendo uno o più filtri evitando così la saturazione della luce o la mancanza di questa. Dopo aver controllato l'altezza dell'obiettivo rispetto a quella del sistema e la centratura del fascio, considerando sempre il diaframma chiuso, è stato possibile iniziare l'acquisizione per la misurazione della distanza focale. In questo caso, l'acquisizione delle immagini, ha richiesto l'apertura del diaframma e l'uso di una placca metallica forata, montata su un

micrometro nel punto P2 del sistema, tra lo specchio L2 e l'obiettivo. Inizialmente si è cercato di trovare manualmente, analizzando la grandezza dello spot nelle immagini, il fuoco dell'obiettivo, avvicinando e allontanando lo stesso dal sensore. Una volta trovata la posizione, che ad occhio è sembrata ideale, si è seguito un determinato procedimento per l'acquisizione. Sono stati presi 50 frame per posizione del sensore, le quali sommandole col software IDL hanno permesso un migliore identificazione degli spot luminosi nelle immagini. La posizione del foro selezionato sulla placca metallica, che funge da diaframma in movimento, è stato posizionato nella direzione del fascio in asse, sul punto di 0 mm del micrometro del proprio sostegno, e per questa impostazione si è acquisito per 6 punti diversi, con uno step di 2 mm, spostando il micrometro del sensore (facendo attenzione di passare attraverso la posizione del fuoco). A questo punto, si è posto la placca con il foro fuori asse (fascio sempre parallelo ma fuori asse), impostandola a 5 mm, e si è acquisito allo stesso modo del fascio in asse. Di seguito sono riportati, come esempio, i valori delle coordinate dello spot luminoso sul sensore per questa prima indagine sul primo obiettivo indagato (Tab. 4). Per le indagini successive si è utilizzata una procedura IDL apposita (chiamata da noi *fit_linea*), che calcola direttamente la distanza tra fascio in asse e fascio fuori asse.

FASCIO IN ASSE (micrometro placca 0 mm)		FASCIO FUORI ASSE (micrometro placca 5 mm)		POSIZIONE SENSORE	DISTANZA TRA FASCIO IN ASSE E FASCIO FUORI ASSE
X0 (mm)	Y0 (mm)	X1 (mm)	Y1 (mm)	(mm)	D (mm)
5,06	5,24	4,99	5,22	1	0,07
5,33	5,27	5,21	5,25	3	0,13
5,17	5,3	5,42	5,26	5	0,26
5,2	5,29	5,62	5,28	7	0,43
5,19	5,33	5,85	5,31	9	0,67
5,18	5,36	6,01	5,36	11	0,83

Tab. 4 Valori delle coordinate dello spot luminoso sul sensore.

I valori della distanza D sono stati calcolati considerando la nota formula della distanza euclidea. Tramite la procedura del software IDL, sono stati plottati, i valori della distanza tra D con i valori di posizione del sensore, e fittando questi punti si è trovato un valore angolare tra fascio in asse e fascio fuori asse di $6,281^\circ$, rispetto ad un angolo, calcolato tramite Zemax, di $6,199^\circ$. In seguito è stata ripetuta l'acquisizione considerando uno step del micrometro del sensore di 1 mm, in modo da avere immagini per 11 punti differenti. Quindi, il valore angolare finale trovato è stato di $6,208^\circ$. Questo valore è stato indispensabile per calcolare la distanza focale dell'obiettivo, la quale, si ricorda, è unica per un gruppo di lenti (come se identificassero una sola lente). Ciò che succede fisicamente si può osservare nella figura seguente (Fig. 2.12).

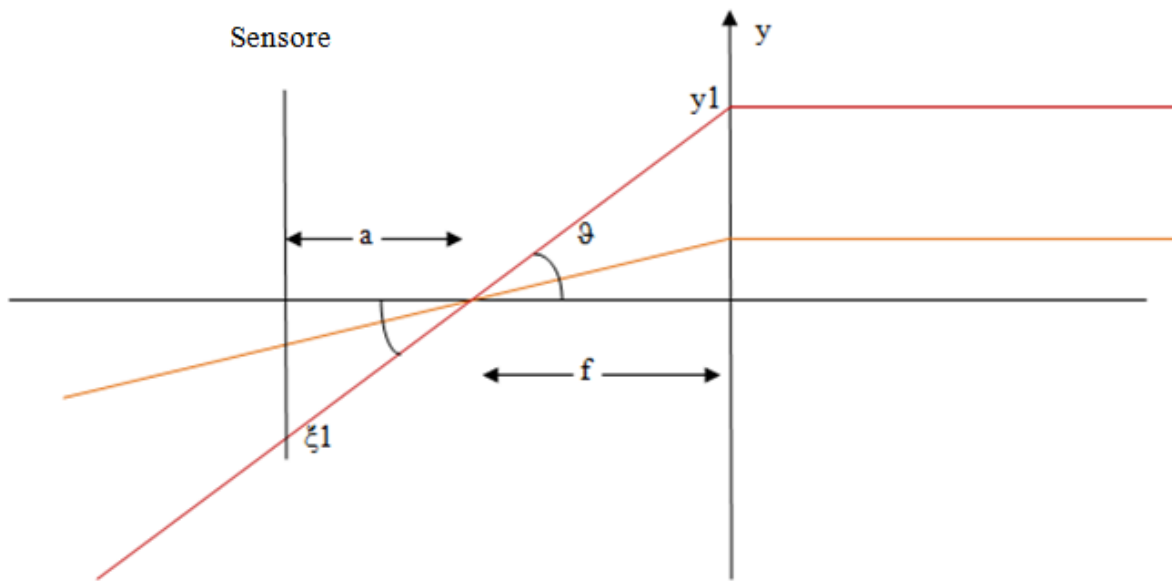


Fig. 2.12 Illustrazione dei parametri fisici del sistema ottico.

Le radiazioni fuori asse ottico formano un angolo ϑ con quelle in asse, e grazie a quest'angolo è possibile calcolare la distanza focale f tramite la relazione (22):

$$y = f \operatorname{tg}\vartheta \quad (22)$$

e quindi

$$f = \frac{y}{\operatorname{tg}\vartheta} \quad (22)$$

Per cui, per il primo gruppo di lenti indagato (terzo obiettivo seguendo il fascio), si è trovato un valore di distanza focale di 45,97 mm, rispetto al valore previsto con Zemax di 46,23 mm.

Per quanto riguarda il secondo gruppo di lenti preso in considerazione (il secondo obiettivo seguendo la direzione del fascio) è stato ripetuto lo stesso procedimento di acquisizione. In questo caso però la maggiore distanza focale ha reso necessaria la disposizione dell'obiettivo a circa un metro di distanza dal sensore. Tuttavia non disponendo di un banco ottico abbastanza lungo, si è posto il gruppo tra i due specchi L1, L2 del sistema, come è possibile vedere nella figura seguente (Fig. 2.13).

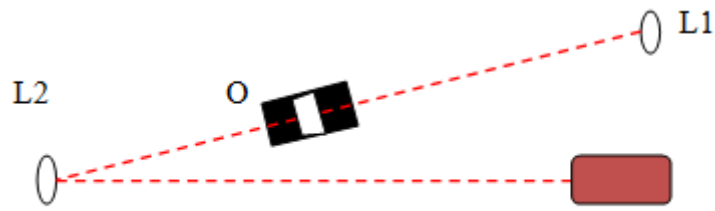


Fig. 2.13 Disposizione del secondo gruppo di lenti nel sistema ottico.

I frame acquisiti sono stati 50 per ogni posizione del sensore. Per la prima indagine i punti in cui è stato disposto la camera sono stati 6 con uno step di 5 mm, e si è trovato un valore angolare di $0,246^\circ$ che comporta, dalla relazione già vista, un valore di distanza focale pari a 1164,5 mm. Per la seconda indagine si è usato un foro con diametro maggiore, presente sulla placca metallica, per diminuire la dispersione e osservare meglio lo spot. In questo caso le posizioni del sensore sono state 5, con uno step di 3 mm. Il valore angolare trovato in questa seconda indagine è risultato $0,220^\circ$, che implica un fuoco a 1302,2 mm, piuttosto simili ai valori previsti di $0,222^\circ$ di angolo e 1301 mm di distanza focale.

Per quanto riguarda il terzo gruppo, poiché la distanza focale prevista era molto corta, non è stato possibile, materialmente, riuscirlo a misurare con lo stesso sistema utilizzato per gli altri due. Per motivi di tempo abbiamo deciso di montare ugualmente questo gruppo di lenti nello spettrografo pensando che il loro montaggio fosse in specifica come accaduto per gli altri due gruppi.

Capitolo 3

Assemblaggio e risultati

Terminata la complessa fase di calibrazione, i gruppi ottici e gli altri elementi che, da progettazione, costituiscono il sistema ottico finale, ovvero l'obiettivo iniziale, la fenditura, il reticolo e il sensore, sono stati accuratamente montati, su una piastra liscia, rispettando le distanze e le posizioni descritte nel precedente capitolo. La camera iperspettrale in seguito all'assemblaggio completo è mostrata nelle seguenti figure (Fig. 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5).

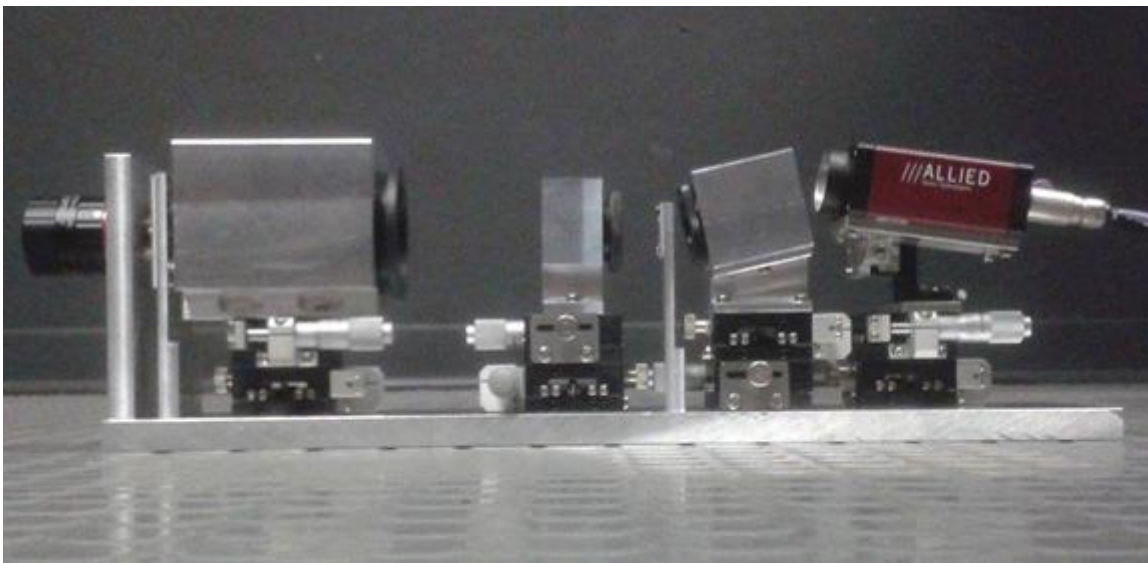


Fig. 3.1 Punto di vista laterale della camera iperspettrale completa.



Fig. 3.2 Punto di vista dall'alto della camera iperspettrale completa.

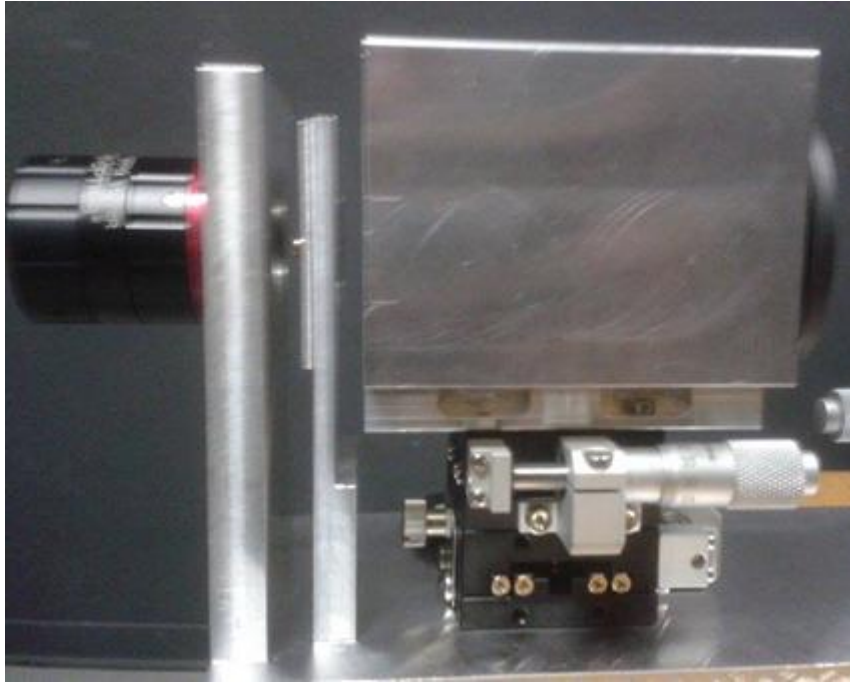


Fig. 3.3 Particolare di obiettivo focalizzatore, fenditura e primo gruppo di lenti.

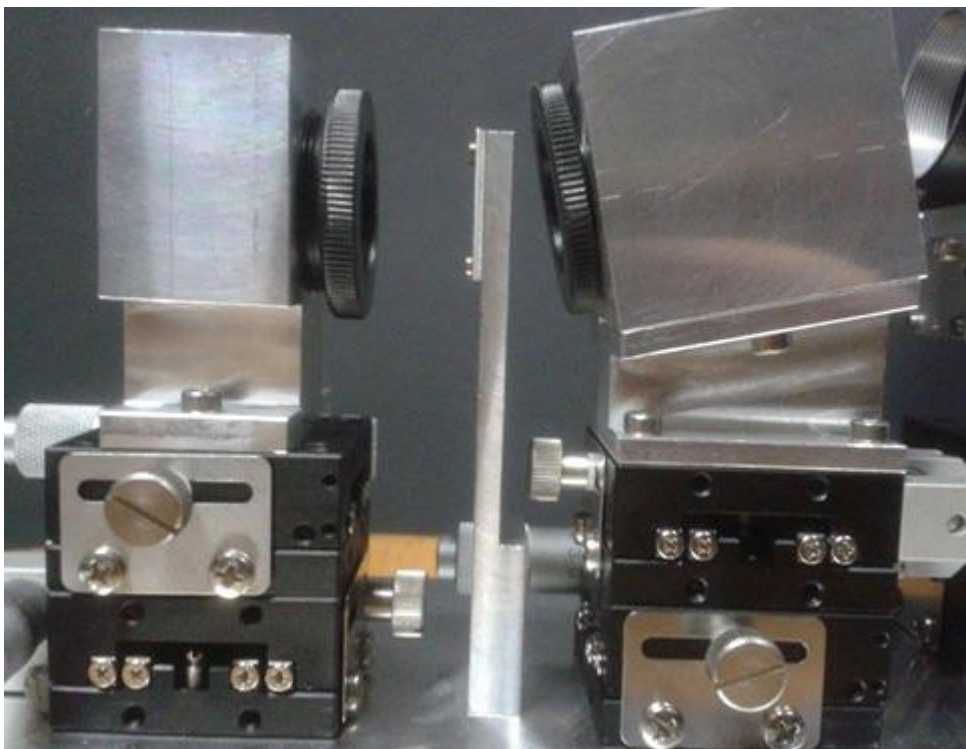


Fig. 3.4 Particolare del secondo gruppo di lenti, reticolo e ultimo gruppo di lenti.

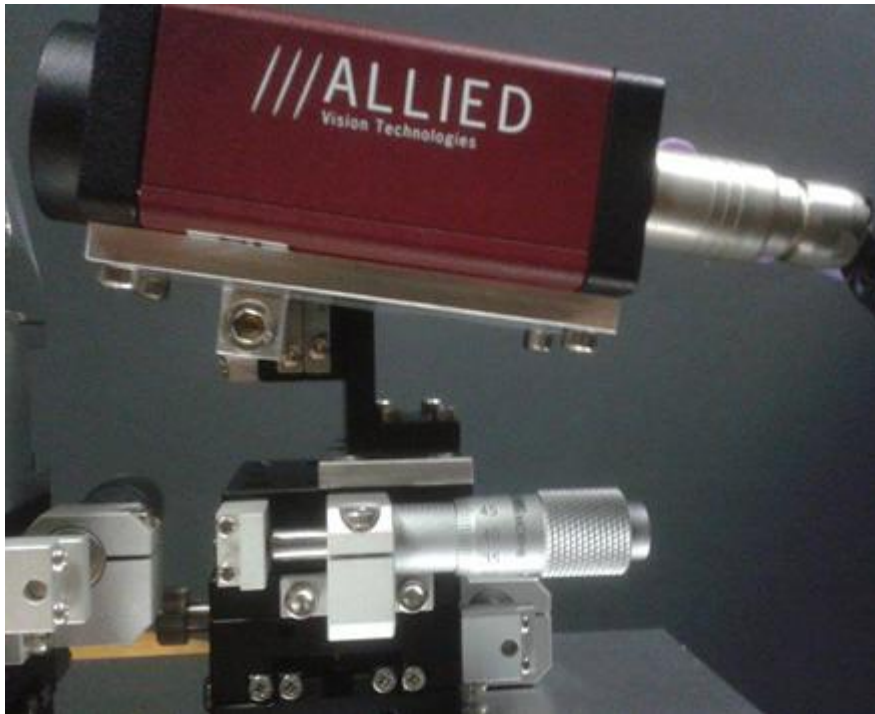


Fig. 3.5 Particolare del sensore inclinato e montato su apposito sostegno con micrometro.

Per testare la camera e sapere se l'assemblaggio degli elementi è avvenuto correttamente, si è composto un nuovo sistema ottico. Tramite ciò è stato possibile calcolare i valori di risoluzione spaziale e spettrale nelle immagini acquisite, indispensabili, in quanto caratterizzano la buona riuscita o meno del lavoro svolto. Di seguito viene descritto il nuovo sistema ottico per la misurazione dei valori di risoluzione (Fig. 3.6).

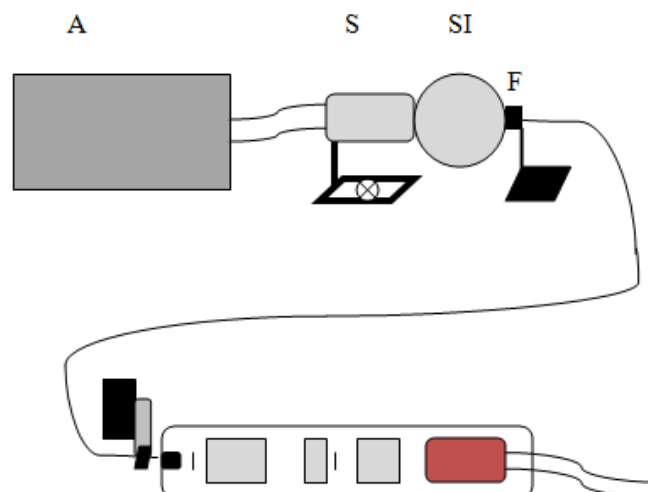


Fig. 3.6 Descrizione del sistema ottico per ottenere dei valori di risoluzione.

La sorgente S, ovvero una lampada ad incandescenza provvista di riflettore, viene alimentata da un K.E.R.T. system 150/1, un alimentatore A in corrente continua con una portata di 5 A e 20 V. La radiazione riflessa all'interno del tubo riflettore causa un aumento della temperatura che potrebbe rendere inservibile la sorgente, facendo saltare la lampadina. Per sopperire a questo problema, al di sotto della sorgente è stata montata una ventola in corrente continua da 12 V. La radiazione luminosa poi passa, attraverso un foro, all'interno di una sfera integratrice SI, ovvero una sfera cava con superficie interna diffondente che consente la riflessione della luce. La superficie interna della sfera è costituita da un trattamento ottico a diffusione la cui funzione è quella di garantire l'integrazione e omogeneizzazione della radiazione luminosa emessa. Per uscire dalla sfera integratrice la luce passa attraverso un altro foro, in prossimità del quale è posto un estremo di una fibra ottica F inserita in un apposito sostegno. Inoltre, interposto tra la sfera e la fibra vi è un filtro passa-banda per selezionare determinate lunghezze d'onda. L'altro estremo della fibra si trova di fronte la fenditura, su di un sostegno regolabile tramite micrometro, ad una distanza di pochi mm e centrato ad occhio sulla apertura. Al momento, per testare la camera, l'obiettivo è stato smontato, in quanto la luce viene portata direttamente dalla fibra ottica fino alla fenditura e non c'è bisogno di un elemento focalizzatore.

Le fibre ottiche sono filamenti di materiali vetrosi o polimerici, realizzati in modo da poter condurre al loro interno la luce (propagazione guidata). Le fibre ottiche sono classificate come guide d'onda dielettriche, in altre parole, permettono di convogliare e guidare al loro interno un'onda elettromagnetica di lunghezza d'onda dall'infrarosso all'ultravioletto con perdite estremamente limitate. Ciò che avviene è un fenomeno di riflessione interna, per cui la discontinuità dell'indice di rifrazione tra i materiali del nucleo e del mantello della fibra intrappola la radiazione luminosa finché questa mantiene un angolo abbastanza radente (Fig. 3.7).

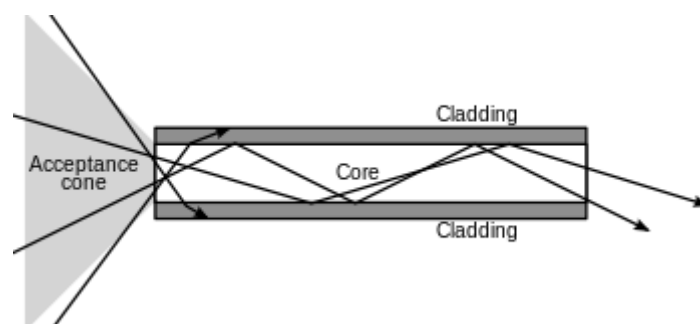


Fig. 3.7 Percorso della radiazione all'interno della fibra ottica.

All'interno di una fibra ottica il segnale può propagarsi in modo rettilineo oppure essere riflesso un numero molto elevato di volte. Il modo di propagazione rettilineo si dice di ordine zero. Le fibre monomodali consentono la propagazione di luce secondo un solo modo e hanno

un diametro del core compreso tra 8 μm e 10 μm , quelle multimodali consentono la propagazione di più modi, e hanno un diametro del core di 50 μm o 62.5 μm . Il cladding ha tipicamente un diametro di 125 μm . Le fibre multimodali sono più economiche, ma subiscono il fenomeno della dispersione intermodale, per cui i diversi modi si propagano a velocità leggermente diverse, e questo limita la distanza massima a cui il segnale può essere ricevuto correttamente. Le fibre monomodali di contro hanno un prezzo molto più elevato rispetto alle multimodali, ma riescono a coprire distanze e a raggiungere velocità nettamente superiori. La fibra ottica utilizzata in questo caso è una fibra multimodale.

Per quanto riguarda i filtri, né sono stati utilizzati diversi e per diverse lunghezze d'onda: 455 nm, 505 nm, 589 nm, 700 nm, 855 nm. L'uso di diversi filtri è stato necessario per controllare la risoluzione a diverse lunghezze d'onda nel range richiesto dall'azienda da 450 a 900 nm. Ognuno di questi filtri essendo passa-banda lascia passare un determinato range di lunghezze d'onda e non una singola, questo genera la dimensione, lungo l'asse Y, dello spot sullo schermo, ovvero influenza la risoluzione spettrale. Se il filtro lasciasse passare una singola lunghezza d'onda vedremmo una singola linea nell'immagine. La larghezza del range di lunghezze d'onda che il filtro fa passare si può conoscere tramite la FWHM (full width half maximum) dell'immagine lungo l'asse verticale. Di seguito si riporta, come esempio, lo spettro di trasmissione del filtro a 455 nm (Fig. 3.8).

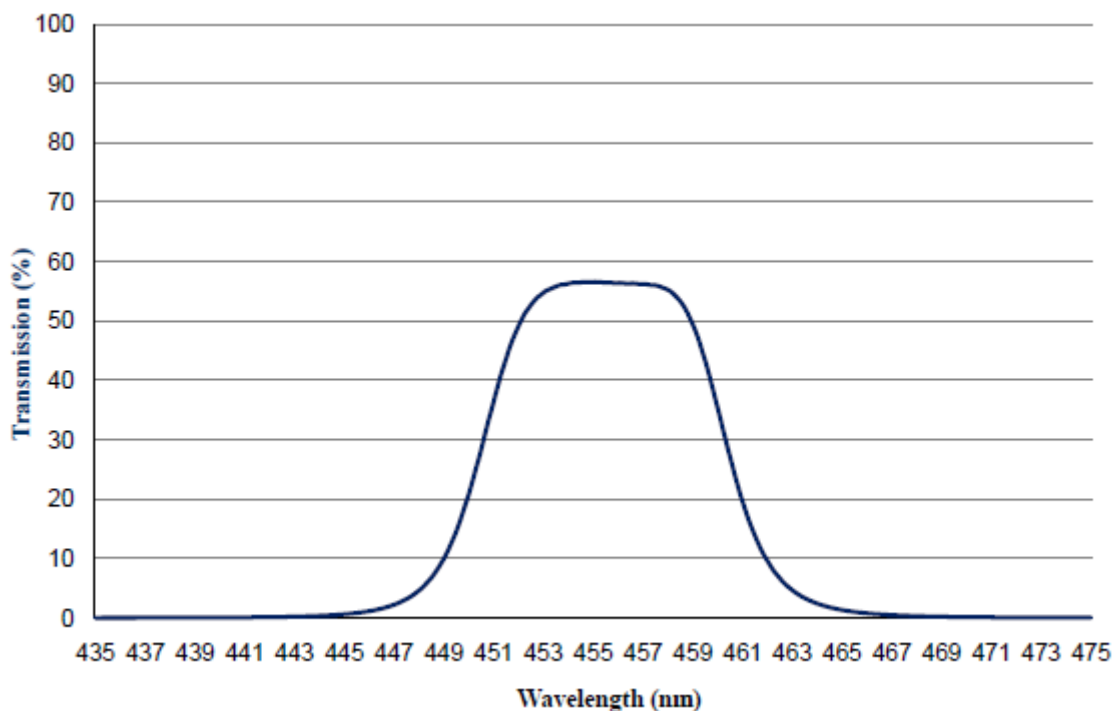


Fig. 3.8 Grafico dello spettro di trasmissione del filtro a 455 nm.

Ogni filtro ha una FWHM di 10 nm, che caratterizza, come già detto, la risoluzione spettrale dello spot.

3.1 Risultati

Come prima cosa è stata controllata, la posizione e l'intensità dello spot sullo schermo, utilizzando per la prima il micrometro di cui è provvisto il sostegno dell'estremo della fibra ottica in prossimità della fenditura e per il secondo le manopole dell'alimentatore, il quale si è impostato a 20 V e 1,8 A, per evitare di superare la portata della lampada ad incandescenza. Ciò che si poteva osservare, senza filtri era una linea dello spessore dell'ordine di qualche decina di micron e lunga l'intero asse Y dello schermo (1216 pixel), ovvero il range da 450 a 900 nm. Dopo aver impostato la posizione della fibra e l'intensità della luce, il passo successivo è stato trovare la posizione del fuoco del sistema ottico completo. Per conoscere la posizione del fuoco è stato necessario misurare la dimensione dello spot con il filtro a 700 nm montato sul sostegno tra la sfera integratrice e la fibra ottica. Ciò è stato possibile usando il micrometro del sostegno del sensore, spostando quest'ultimo avanti e indietro. Per ciascuna delle 7 posizioni, in cui si è posto il sensore, sono stati acquisiti 50 frame e tramite la procedura IDL apposita è stato trovato il valore FWHM della dimensione su x dello spot. Di seguito si riportano i valori delle posizioni e delle FWHM e il plot di questi (Tab. 5)(Fig. 3.9).

Posizioni micrometro del sensore (mm)	Valori FWHM (pixel)
1,00	3,90
1,15	3,39
1,25	3,12
1,30	3,04
1,35	3,07
1,45	3,24
1,75	5,17

Tab. 5 Valori delle posizioni e delle FWHM degli spot luminosi.

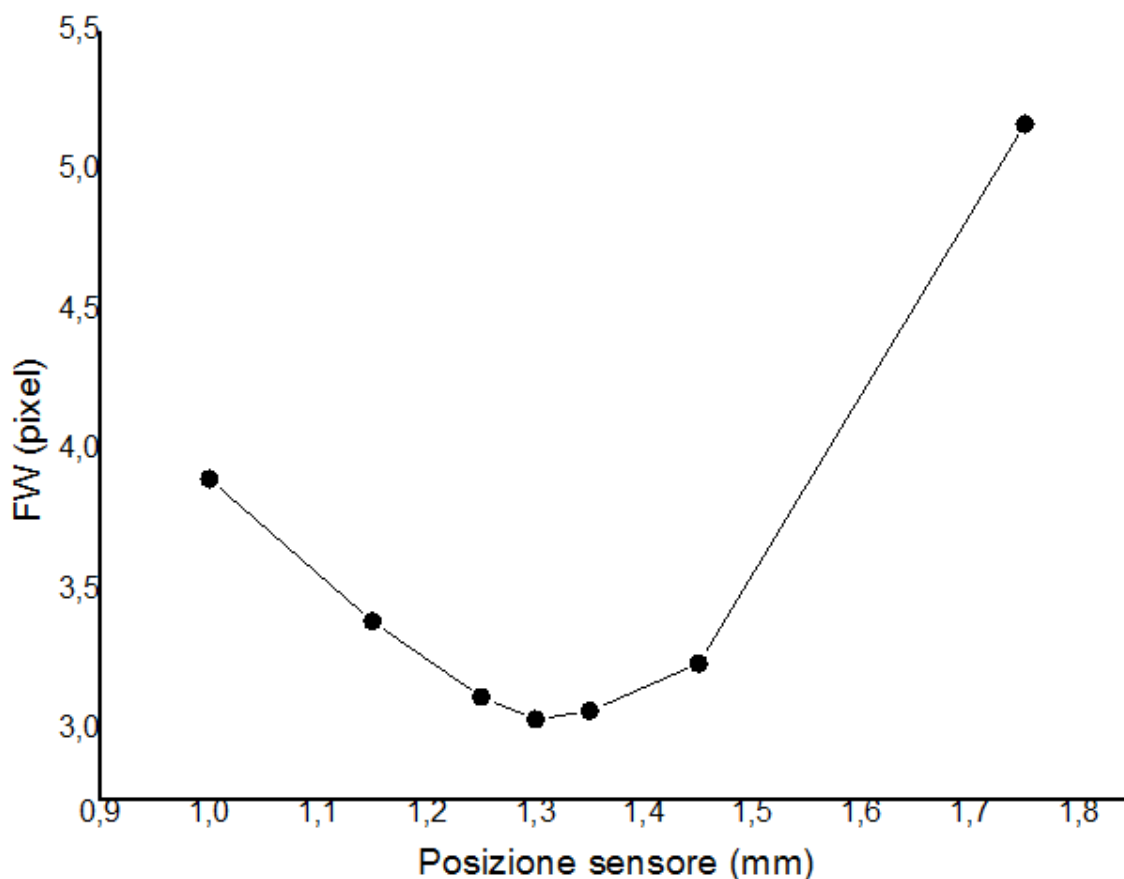


Fig. 3.9 Plot dei valori di FWHM in funzione di quelli di posizione.

Lo spot di dimensione minore identifica la distanza focale del sistema. In questo caso lo spot di dimensione più piccola ha una FWHM di 3,04 pixel, ovvero 17,6 μm . Inoltre è stato necessario anche controllare che con qualsiasi filtro montato lo spot fosse dentro lo schermo e, utilizzando il micrometro che sposta il sensore lungo l'asse Y, si è impostato lo spot con filtro a 700 nm a 3,28 mm sul sensore (più o meno il centro, considerando che 700 si trova poco oltre la metà nel range 450-900 nm).

Avendo impostato tutti i parametri necessari, si è iniziato ad acquisire le immagini per ottenere i valori di risoluzione. La procedura di acquisizione si è svolta prendendo immagini con i 5 filtri, quindi in 5 range di lunghezza d'onda diversa, e spostando il micrometro della fibra ottica parallelamente alla fenditura, da destra a sinistra e viceversa, con uno step di 1 mm per 10 posizioni. In questo modo sono stati acquisiti frame con lo spot in 50 diverse posizioni sul sensore, e di ogni spot si è trovata la posizione in x e y e la FWHM tramite la solita procedura. Di seguito sono riportati questi valori suddivisi in 3 tabelle diverse (Tab. 6, 7, 8).

FWHM (pixel)										
Pos. Fibra (mm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
455	0	0	0,7	2,39	2,56	2,77	2,26	1,4	0	0
505	0	2,78	4,23	3,8	3,6	3,3	3,18	3,55	3,3	0
589	2,52	5,59	4,83	3,97	3,71	3,65	3,68	4,14	4,15	1,45
700	4,17	4,33	4,03	3,51	3,4	3,31	3,26	3,54	3,36	2,85
855	0	2,51	2,56	2,71	2,81	2,63	2,19	1,49	0,8	0

Tab. 6 Valori della FWHM degli spot luminosi registrati.

Pos X (mm)										
Pos. Fibra (mm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
455	0	0	9,08	8,06	7,02	6	4,98	3,96	0	0
505	0	10,05	9,05	8,03	7,02	6,01	4,98	3,97	2,96	0
589	11,06	10,06	9,04	8,03	7,02	6,02	5,02	4,01	3	1,98
700	11,07	10,05	9,04	8,03	7,03	6,04	5,04	4,05	3,05	2,04
855	0	10,05	9,05	8,06	7,07	6,09	5,1	4,13	3,14	0

Tab. 7 Valori della posizione sull'asse x degli spot registrati.

Pos Y (mm)										
Pos. Fibra (mm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
455	0	5,13	6,92	6,97	6,98	6,98	6,98	6,97	0	0
505	0	6,2	6,21	6,22	6,22	6,22	6,22	6,21	6,2	0
589	5	5,01	5,03	5,04	5,04	5,03	5,03	5,02	5,02	5,01
700	3,33	3,35	3,36	3,37	3,38	3,38	3,37	3,36	3,35	3,33
855	0	0,97	0,99	1	1,01	1,01	1	1	0,98	0

Tab. 8 Valori della posizione sull'asse y degli spot registrati.

Gli zeri in alcune celle sono dati che il sensore non riesce a registrare e indicano i valori degli spot nelle regioni più vicine ai vertici dello schermo, o meglio nelle regioni più vicine ai bordi del sensore. Questo problema è dovuto al fatto che l'efficienza del sensore nelle regioni al limite diminuisce notevolmente, ma dipende anche dalla lunghezza d'onda che si sta acquisendo. Infatti l'efficienza varia a seconda della lunghezza d'onda e diminuisce spostandosi verso i gli estremi del range preso in considerazione (450-900) (Fig. 3.10).

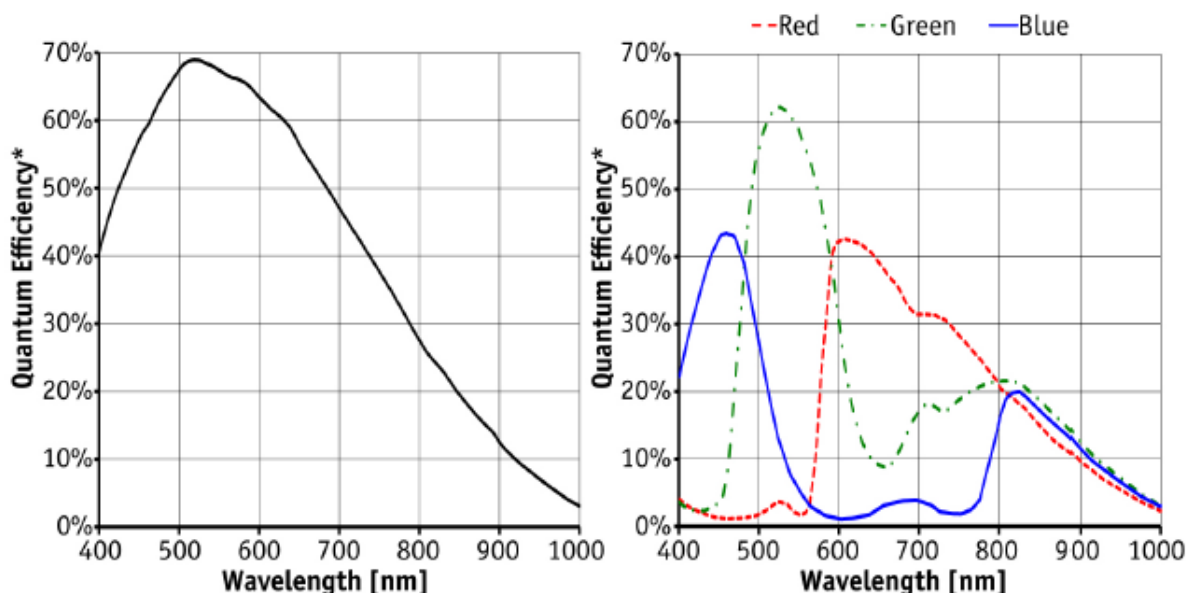


Fig. 3.10 Efficienza quantica del sensore in funzione della lunghezza d'onda.

Nei due grafici si osserva l'efficienza quantica in assenza di filtri; in presenza di filtri l'efficienza diminuisce di circa il 10%. Per risolvere il problema sarebbe necessaria una sorgente di maggiore intensità.

Detto ciò, dai valori trovati per ogni posizione in cui è stata spostata la fibra, si è potuto calcolare, tramite IDL con la procedura gauss2dfit che fa una gaussiana bidimensionale dei dati, i valori di risoluzione spaziale per quanto riguarda gli spot con i filtri a 589 e 700 nm. Poiché per gli altri filtri, a causa dell'efficienza come visto, mancano dei valori, sono stati presi in considerazione solo i filtri di lunghezze d'onda più al centro nel range considerato, di cui si possiedono anche i dati nelle ragioni più ai bordi. Si riportano di seguito i valori e i grafici di risoluzione, con l'intensità in funzione dei micron (Tab. 9)(Fig. 3.11, 3.12).

Risoluzione spaziale con filtro a 589 nm (calcolando la FWHM)	Risoluzione spaziale con filtro a 700 nm (calcolando la FWHM)
51 μm	46 μm

Tab. 9 Valori di risoluzione spaziale trovati per i filtri a 589 nm e 700 nm.

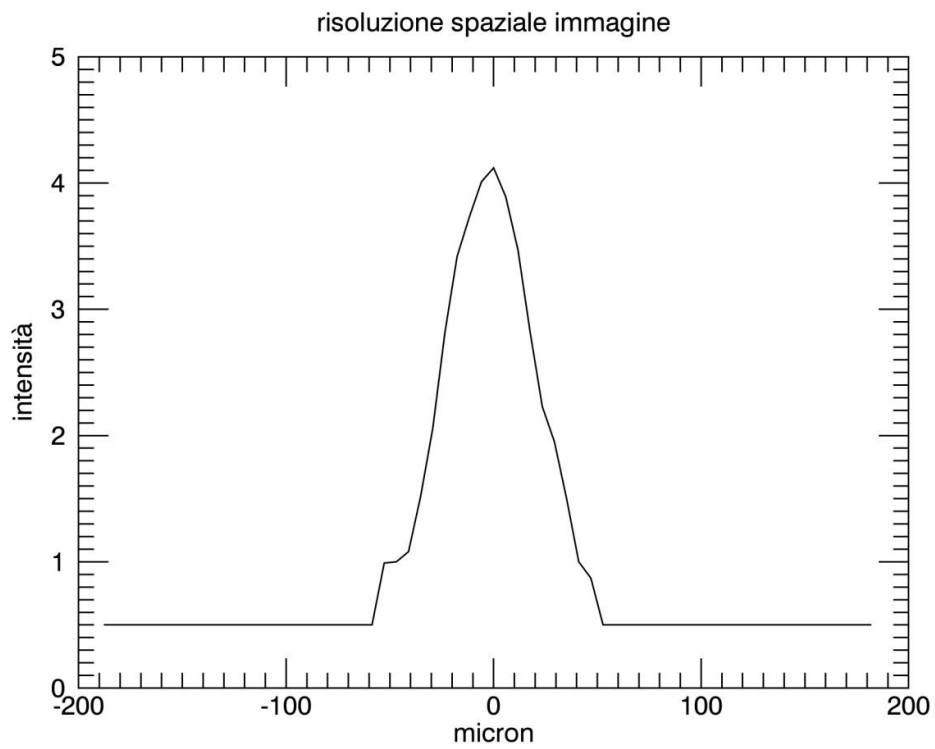


Fig. 3.11 Grafico della gaussiana della risoluzione spaziale per il filtro a 589 nm.

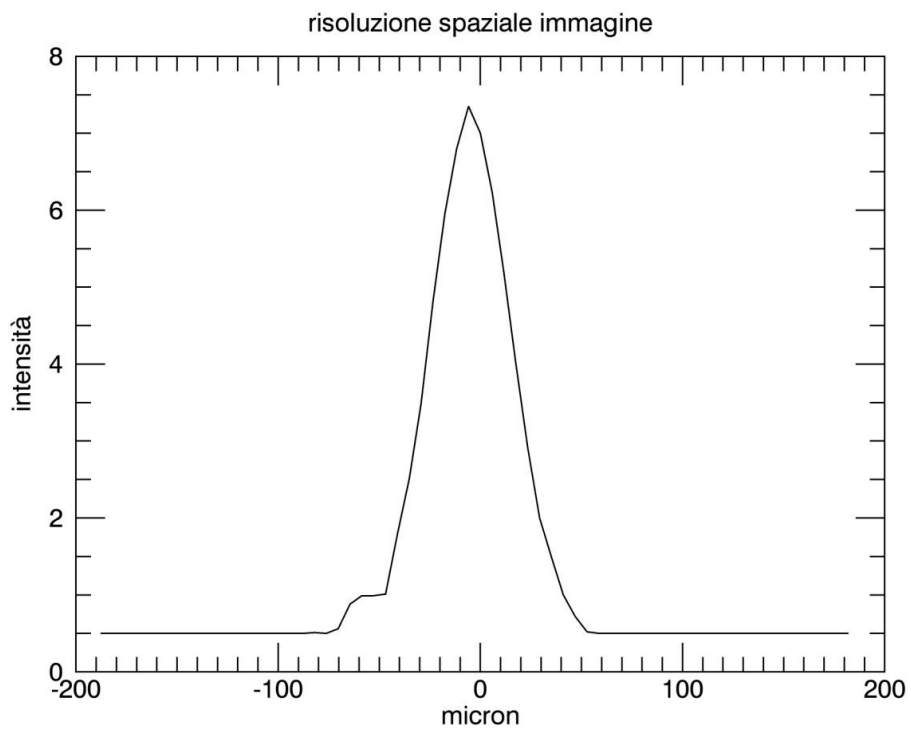


Fig. 3.12 Grafico della gaussiana della risoluzione spaziale per il filtro a 700 nm.

Come esempio, riporto le immagini zoomate degli spot a 589 e 700 nm, nella posizione 4 della fibra, e l'immagine originale dello spot a 700 (Fig. 3.13a, 3.13b, 3.14).

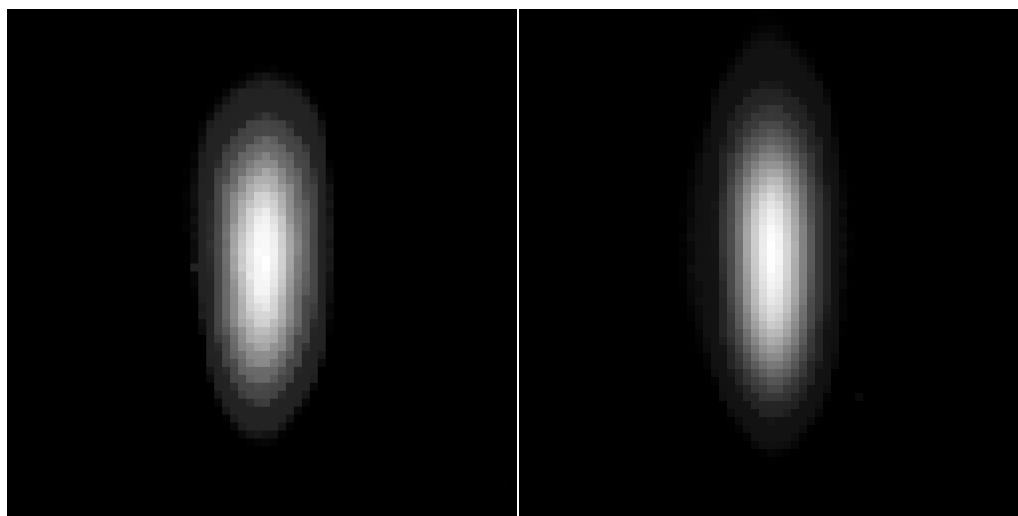


Fig. 3.13a,b Immagini zoomate dello spot in posizione centrale con filtri a 589 e 700 nm

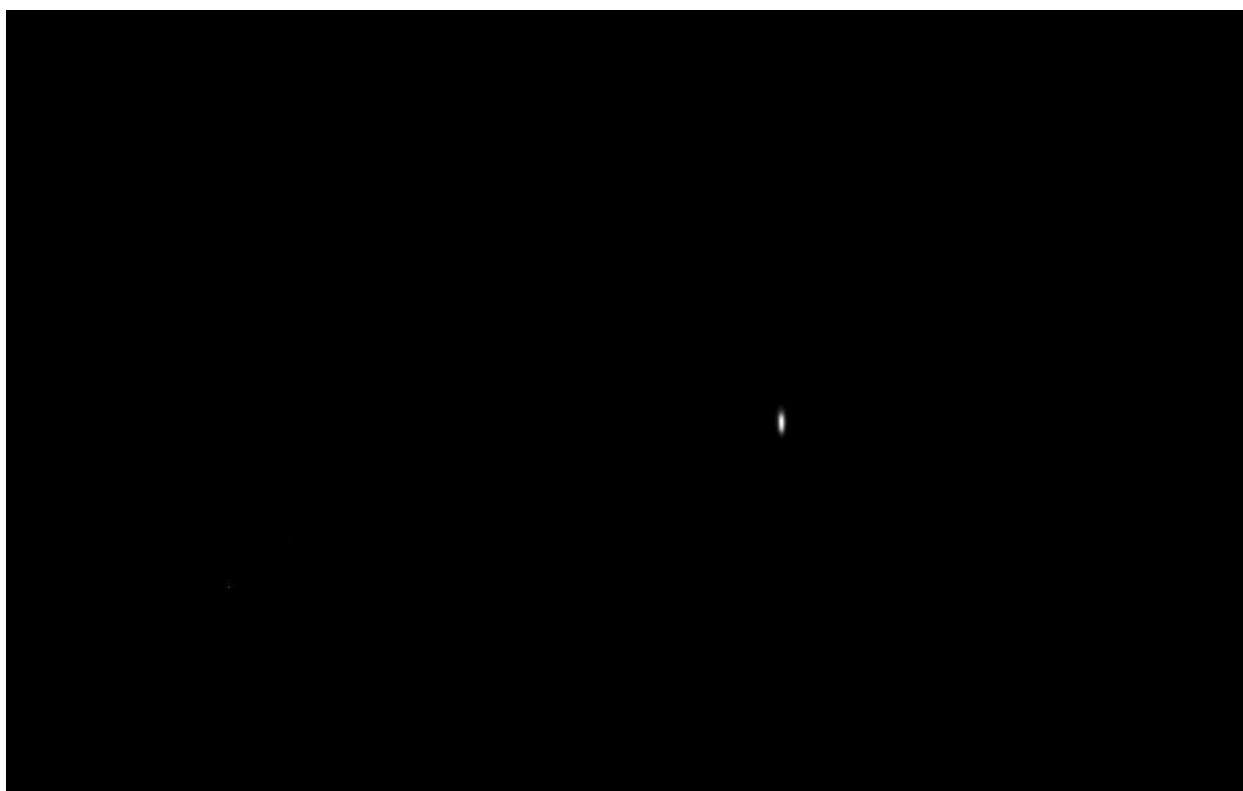


Fig. 3.14 Immagine dello spot originale con filtro a 700 nm.

Considerando che il valore di risoluzione spaziale è di circa $50\ \mu\text{m}$ su $11\ \text{mm}$ di larghezza del sensore, l'azienda avrà una risoluzione di $0,5\ \text{mm}$ su $1\ \text{m}$ di distanza illuminata dalla radiazione della sorgente.

Per quanto riguarda la risoluzione spettrale non si è potuto misurarne con precisione i valori in quanto sono stati usati dei filtri passa-banda, i quali lasciano passare $10\ \text{nm}$ e non una singola lunghezza d'onda. Tuttavia, si è potuto stimare un valore di risoluzione spettrale di circa $3\ \text{nm}$, considerando lo spot uniforme in tutte le direzioni, ovvero un di forma circolare. Infatti considerando il rapporto tra la risoluzione spaziale di $50\ \mu\text{m}$ e la dimensione di un pixel di $5,8\ \mu\text{m}$, si ottiene un valore di $8\ \text{pixel}$, che diviso per $2,8\ \text{pixel/nm}$, proveniente dal rapporto tra le dimensioni in pixel dell'asse y del sensore (1216) e i nanometri del range di lunghezze d'onda considerate (450), ci dà i $3\ \text{nm}$ sopra citati.

Questi valori di risoluzione spaziale e spettrale non coincidono perfettamente con quelli previsti tramite Zemax semplicemente per il fatto che in questo caso sono stati considerati gli spot centrali trascurando quelli ai bordi. Per questo motivo i valori di risoluzione misurati risultano leggermente migliori rispetto a quelli calcolati, per i quali si è tenuto conto anche degli spot situati nelle regioni ai bordi della superficie indagata.

Conclusioni

I risultati ottenuti, oltre ad essere molto simili ai valori previsti nella fase di progettazione con il software Zemax, soddisfano anche le richieste dell'azienda. La camera iperspettrale, infine, è stata collocata saldamente su una piastra di alluminio a forma di L e con un'altra piastra della stessa forma, avvitata ad incastro con la prima, è stata chiusa lateralmente e dall'alto. Per quanto riguarda la parte anteriore e posteriore, sono stati fatti degli appositi "tappi" di materiale plastico. Il "tappo" anteriore è caratterizzato da una singola apertura circolare necessaria per l'uscita l'obiettivo focalizzatore; su quello posteriore, invece, sono stati creati due fori vicini per l'uscita del cavo dell'alimentatore del sensore e per il cavo del trasferimento dati. Questo procedimento di copertura e chiusura della camera è stato necessario sia per permettere all'azienda di svolgere dei test con lo spettroscopio in condizioni di elevata oscurità, sia per preservare i vari elementi ottici da movimenti meccanici esterni. Terminato così il lavoro, è stata consegnata la camera chiusa all'azienda, la quale testerà la camera nelle condizioni di lavoro per le quali è stata richiesta, ovvero l'analisi spettrale di oggetti, posti su un rullo autotrasportatore, che passano attraverso una linea illuminata di lunghezza 1 m e ad una distanza di 1,5 m. Concludendo, è previsto in futuro la realizzazione di un'altra camera iperspettrale che indaghi le lunghezze d'onda nel vicino infrarosso.

Appendice A

Si riporta di seguito la procedura `beam_collimation` implementata per l'analisi delle immagini e dei dati relativi agli spot luminosi. Dopo averla compilata la procedura viene eseguita. Nell'eseguibile gli viene dato il numero di frame per ogni sottocartella, il nome delle sottocartelle da analizzare e i parametri che si vogliono conoscere. Questa procedura viene eseguita su una cartella contenente sottocartelle (una per ogni posizione di acquisizione); Quello che fa è sommare tutti i frame presenti in una sottocartella e mostrare l'immagine "sommata", in falsi colori, poi utilizzando `click_on_max` permette di cliccare su quello che sembra il centro di intensità dello spot. Infine fa una gaussiana bidimensionale dei dati e utilizzando i comandi `print, xc; print, yc; print, fw;` ci da i valori di posizione su x e y, e la dimensione fw.

```
pro beam_collimation, nima, npos, dimsub, gauss=gauss, xc, yc, fw

path="C:\Users\vincenzo.montedoro\Desktop\Immagini camera\4 nov\ldo\855\"
path1="C:\Users\vincenzo.montedoro\Desktop\Immagini camera\4 nov\bkg"
dimx=1936
dimy=1216
m=n_elements(npos)
imatot=fltarr(dimx, dimy, m)

bkgt=fltarr(dimx, dimy)
for i=1, nima do begin

nameima=strcompress(string("\VimbaImage_0_0_ris_"+strcompress(string(i), /rem)+".bmp"))
;nameima+=strcompress(string(npos[j]), /rem)+"mm\VimbaImage_0_0_"+strcompress(string(npos[j]), /rem)+"altfas_"+strcompress(string(i), /rem)+".bmp"
bkg=total(read_bmp(path1+nameima), 1)
bkgt=bkgt+bkg
endfor
bkgt=bkgt/nima

for j=0, m-1 do begin
imat=fltarr(dimx, dimy)
for i=1, nima do begin

nameima=strcompress(string(npos[j]), /rem)+"\VimbaImage_0_0_ris_"+strcompress(string(i), /rem)+".bmp"
;nameima+=strcompress(string(npos[j]), /rem)+"mm\VimbaImage_0_0_"+strcompress(string(npos[j]), /rem)+"altfas_"+strcompress(string(i), /rem)+".bmp"

imat=total(read_bmp(path+nameima), 1)

imat=imat+ima
endfor
imat=imat/nima
imatot[:, :, j]=imat-bkgt
endfor
```

```

xx=fltarr(m)
yy=fltarr(m)
for j=0,m-1 do begin
    window,0,xs=dimx/2,ys=dimy/2
    im=imatot[*,*,j]
    tvscl,congrid(im,dimx/2,dimy/2)
    click_on_max,im,x,y,/mark,BOXSIZE=1
    xx[j]=x
    yy[j]=y
endfor

device,decompose=0
loadct,39
fw=fltarr(m)
xc=fltarr(m)
yc=fltarr(m)
aa=fltarr(7,m)
for j=0,m-1 do begin
    im=imatot[*,*,j]
    fie=sub_array(im,dimsub,reference=[xx[j],yy[j]],LX=lx,LY=ly)
    if keyword_set(gauss) then begin
        cc=gauss2dfit(fie,a,/tilt)
        xc[j]=a[4]+lx
        yc[j]=a[5]+ly
        fw[j]=a[2]
        ;fie=cc
    endif else begin
        c = centroid(fie)
        xc[j]=c[0]+lx
        yc[j]=c[1]+ly
    endelse
    ; stop
    print,max(im)
    ;if max(im) gt 7600 then stop
endfor

plot,xc*0.00586-mean(xc)*0.00586,findgen(8)-3.5,/iso
xc=xc*0.00586
yc=yc*0.00586
end

```

Come esempio viene mostrata una immagine “sommata”, in falsi colori (Fig. 4.1), sulla quale viene utilizzata la funzione `click_on_max`.

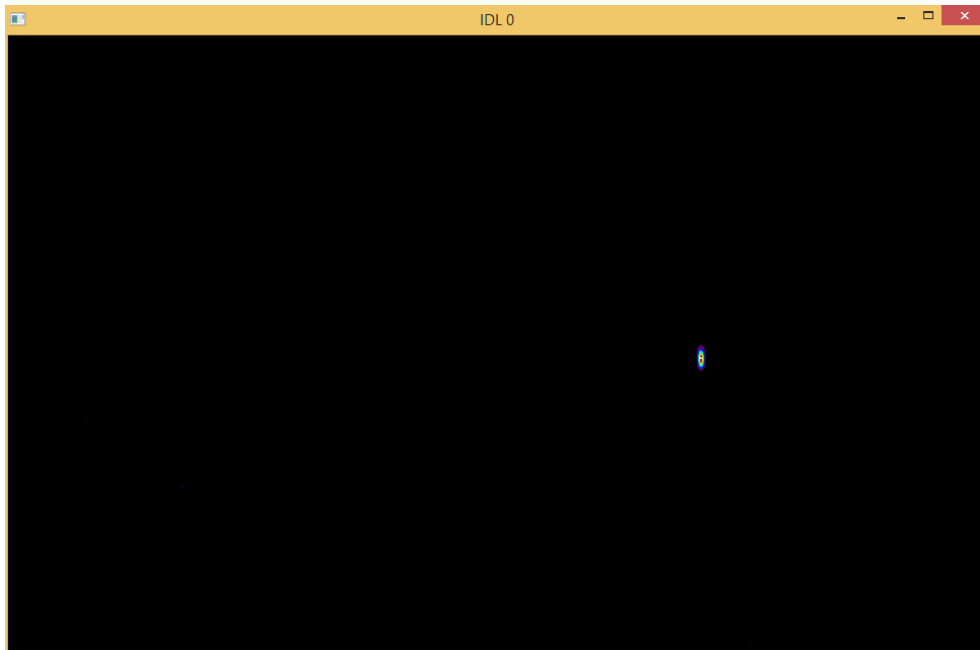


Fig. 4.1 Immagine in falsi colori su cui viene usata la funzione `click_on_max`.

Un'altra procedura utilizzata è `fit_linea` necessaria per determinare i valori angolari, tra fascio in asse e fascio fuori asse, con i quali sono state calcolate le distanze focali.

`Fit_linea`

```
pro fit_linea, pos, xc0, yc0, xc1, yc1

n=n_elements(xc1)
dd=fltarr(n)
for i=0,n-1 do begin
  d=distance(xc0[i],yc0[i],xc1[i],yc1[i])
  if xc0[i] lt xc1[i] then dd[i]=-d else dd[i]=d
endfor

p=plot(pos,dd,sym_object="+")

l=linfit(pos,dd)
q=plot(pos,pos*l[1]+l[0],color="blue",/overplot)

print,l[1]*180/!pi
stop
end
```

Di seguito vengono riportate, come esempio, le immagini di spot, in asse e fuori asse (Fig. 4.2, 4.3), con il sensore nella stessa posizione e il fit trovato tramite la procedura (Fig. 4.4), da cui si ottiene il valore angolare cercato.

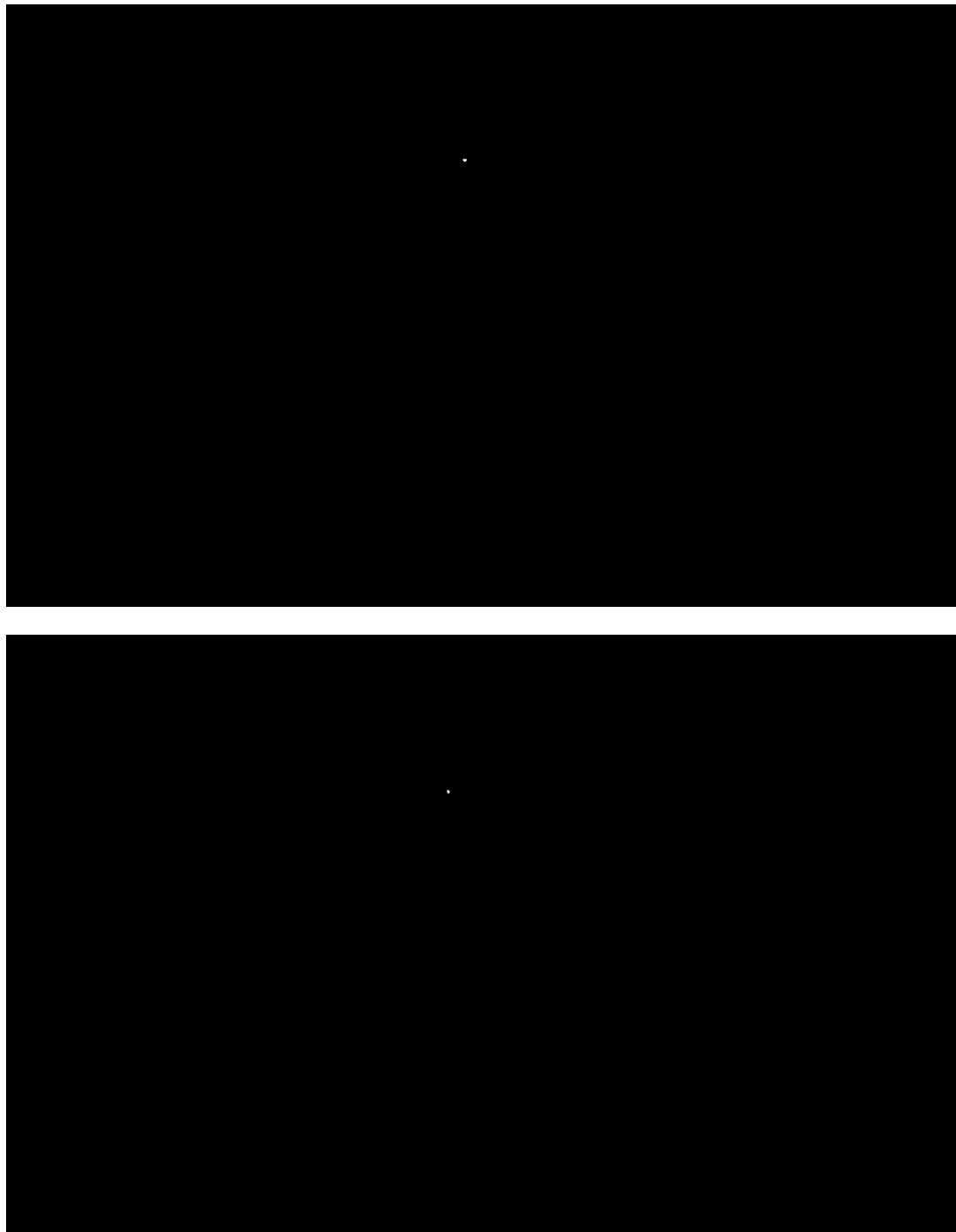


Fig. 4.2, Fig. 4.3 La prima immagine rappresenta lo spot luminoso di un fascio fuori asse ottico. La seconda immagine rappresenta lo spot di un fascio in asse.

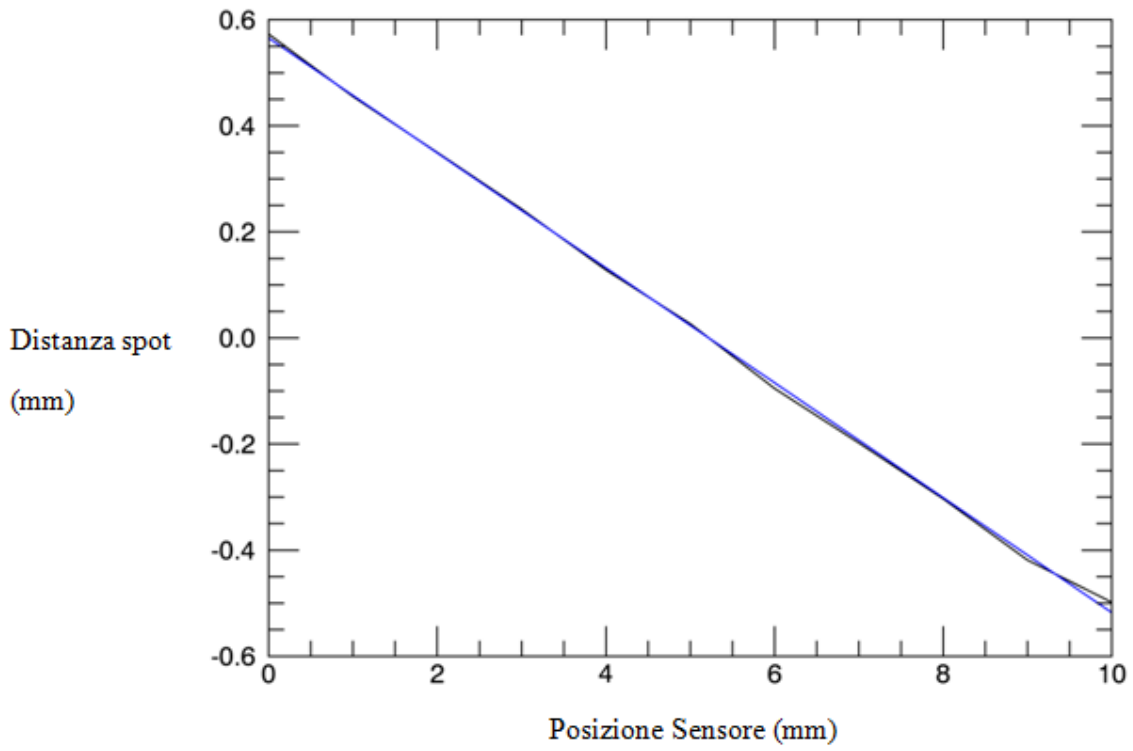


Fig. 4.4 Fit lineare dei valori di distanza tra gli spot del fascio in asse e del fascio fuori asse, in funzione della posizione della posizione del sensore.

Appendice B

Oltre al software IDL per l'analisi delle immagini, l'altro software utilizzato è stato Vimba Viewer 1.3, collegato direttamente al sensore e necessario per l'acquisizione delle immagini stesse. Di seguito viene riportata la schermata di controllo di questo software (Fig. 4.5).

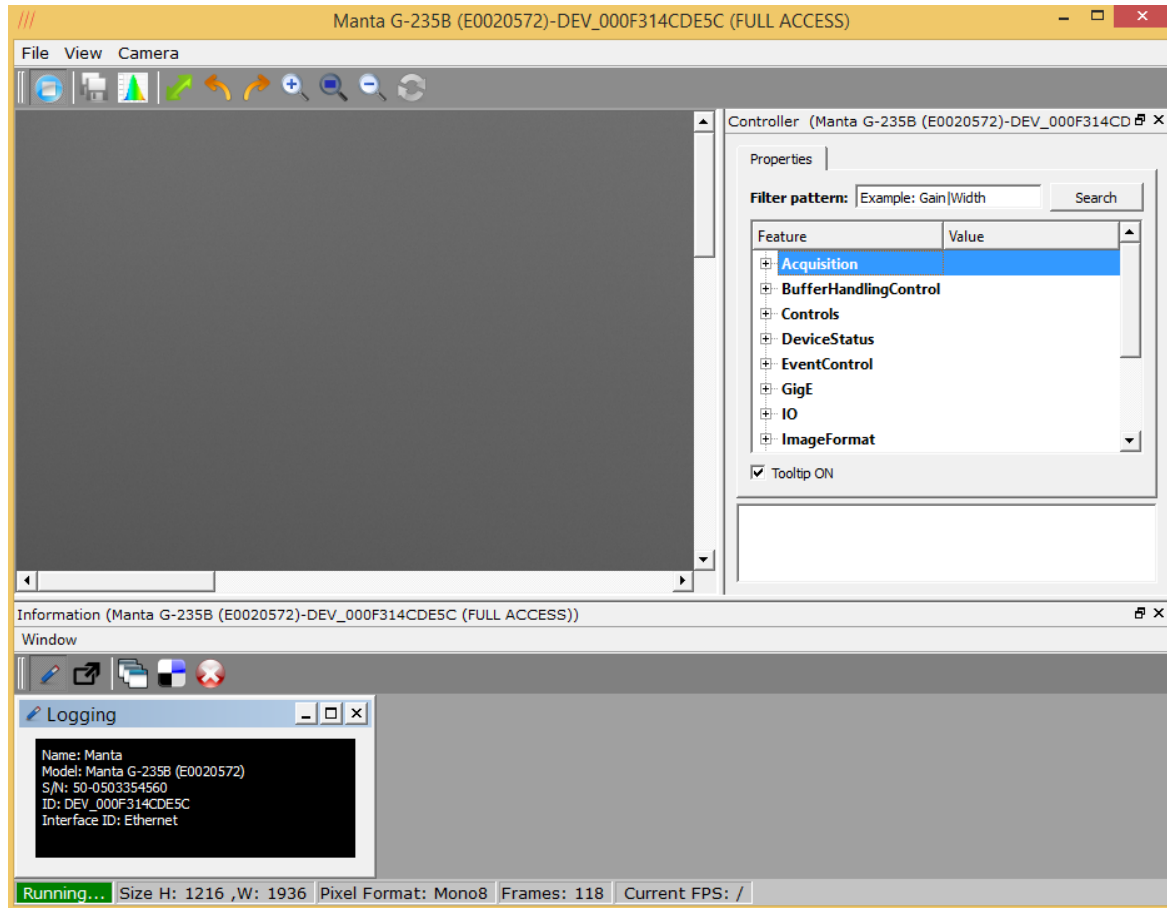


Fig. 4.5 Schermata di controllo del software Vimba Viewer 1.3.

Sul pannello di controllo delle proprietà, sulla destra della schermata, è possibile impostare i parametri di acquisizione, dal formato delle immagini al tempo di integrazione. Per stabilire il numero di frame da acquisire e le modalità di salvataggio è necessario utilizzare la schermata mostrata qui sotto (Fig. 4.6).

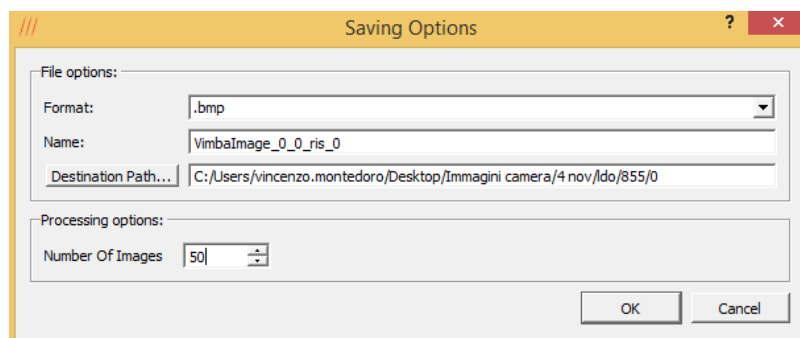


Fig. 4.6 Schermata per il salvataggio delle immagini

Bibliografia

S. Walker, H. Straw, Spectroscopy-1; Atomic, Microwave and Radio frequency Spectroscopy, Chapman and Hall LTD.

G.W. Chantry, Submillimetre Spectroscopy, Academic Press (National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex).

K.D. Möller, W.G. Rothschild, Far-Infrared Spectroscopy, Wiley Interscience.

A. Ryer, The Light Measurement Handbook, International Light Technologies.

Y. Ohno, Photometric standards, OSA Handbook of Applied Photometry.

Andor Technology, Digital Camera Fundamentals.

M. Johnson, Photodetection and Measurement: Maximizing Performance in Optical System, Mcgraw – Hill.

J. L. Domanchin & J. R. Gilchrist, Choosing a Spectrometer.

J.M. Lerner, A. Thevenon, The Optics of Spectroscopy Tutorial, Jobin Yvon Horiba.

C. Palmer, Diffraction Grating Handbook, Newport Corporation.

J.F. James, R.S. Sternberg, *The Design of Optical Spectrometers*, Chapman and Hall.

G. Antonioli, F. Fermi, C. Oleari, R. Reverberi, *Scanner ottico iperspettrale per la spettroscopia d'immagine*, in: A.Raggi, *Tecnologie Multispettrali. Aspetti teorici ed applicativi*.

MicroImages, Inc., *Introduction to Hyperspectral Imaging*.