



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "A. RIGHI"

CORSO DI LAUREA IN
PHYSICS

LA DIMENSIONE AFFETTIVA DEL PROCESSO SCIENTIFICO: UN'ANALISI DELLE EMOZIONI EPISTEMICHE IN NIELS BOHR

Relatrice

Prof.ssa Olivia Levrini

Presentata da

Valeria Principato

Correlatrice

Dott.ssa Francesca Riccioni

Sessione Luglio 2026

Anno Accademico 2025/2026

Tesi magistrale
Relatrice: Prof.ssa Olivia Levrini
Correlatrice: Dott.ssa Francesca Riccioni
Bologna – Luglio 2026

La dimensione affettiva del processo scientifico: un'analisi delle emozioni epistemiche in Niels Bohr

Valeria Principato

Laurea magistrale in Physics
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna
Curriculum in Didattica e Storia della Fisica

Abstract

L'*affect* è oggi riconosciuto come una componente rilevante dei processi di costruzione della conoscenza scientifica, ma il suo ruolo nella costruzione di conoscenza da parte degli scienziati resta ancora poco esplorato. Questo studio si propone di indagare quali emozioni epistemiche emergano dalle testimonianze di Niels Bohr e come esse accompagnino le diverse fasi della costruzione della teoria quantistica. Il corpus analizzato è costituito dalle trascrizioni di alcune interviste conservate presso la Niels Bohr Library & Archives dell'American Institute of Physics, nelle quali Bohr riflette sullo sviluppo della fisica atomica e quantistica e sulle proprie esperienze epistemiche. La ricerca adotta una metodologia mista. In una prima fase sono state identificate 193 espressioni-stimolo di carattere emotivo, successivamente associate a una o più categorie di una lista di emozioni epistemiche mediante analisi testuale. Il corpus è stato quindi sottoposto a una *thematic analysis* per ricostruire i principali nuclei tematici e le dinamiche emotive individuate. Infine, un'indagine condotta su un campione di 26 studenti e studentesse del curriculum di Didattica e Storia della Fisica ha permesso di affinare la connotazione emotiva delle espressioni-stimolo, le cui relative emozioni epistemiche sono state inserite quantitativamente nel Circumplex Model of Epistemic Affect (Riccioni 2024): un adattamento del modello di James Russel alle emozioni epistemiche. I risultati evidenziano un'articolata dinamica emotiva che ha caratterizzato l'attività epistémica di Bohr e mostrano una marcata differenza nella *valence* emotiva tra la fase di elaborazione del modello atomico e quella della nascita della meccanica quantistica. Si è ottenuta, infine, una mappatura della dinamica emozionale che ha accompagnato alcune fasi della nascita della teoria della meccanica quantistica, visualizzabile nei grafici realizzati mediante il Circumplex Model.

Indice

Introduzione	7
Capitolo 1 Fattori affettivi ed emozionali nella ricerca in Didattica della Fisica	11
1.1 Rapporto tra emozione e cognizione e obiettivi di apprendimento nella ricerca in Didattica della Fisica sulla dimensione affettiva.....	12
1.2 La metodologia alla base dello studio sulle emozioni epistemiche	17
Capitolo 2 La meccanica quantistica come caso di studio per l'indagine delle emozioni epistemiche	19
2.1 La didattica della meccanica quantistica e le difficoltà di apprendimento	20
2.2 Le attività epistemiche degli scienziati come oggetto di indagine	25
2.3 Presentazione del corpus di analisi	28
Capitolo 3 L'impostazione metodologica dello studio	31
3.1 Analisi testuale individuale e operazione di <i>labeling</i>	31
3.2 Thematic analysis	40
Capitolo 4 Risultati	45
4.1 Risultati della Thematic Analysis	45
4.1.1 Tema A: Cambio di paradigma, la rinuncia della fisica classica	47
4.1.2 Tema B: Influenza dell'ambiente sociale nella ricerca	52
4.1.3 Tema C: Coerenza fra teoria e risultati sperimentali	55
4.1.4 Tema D: Orientamento verso specifici ambiti di studio	58
4.1.5 Tema E: Paradossi, contraddizioni e inconsistenze della old quantum physics	59
4.1.6 Tema F: Approccio epistemologico	66
4.1.7 Tema G: Ruolo costitutivo del linguaggio	71
4.1.8 Conclusione della thematic analysis	76
4.2 Risultati dell'analisi emozionale: <i>labeling</i> tramite sondaggio e utilizzo del Circumplex Model of Epistemic Affect	76
Capitolo 5 Conclusioni	89
Bibliografia	91
Appendici	99
Appendice A – Tabella del totale dei dati raccolti.....	99
Appendice B – Istogrammi delle espressioni stimolo relativi alla survey	104
Appendice C – Circumplex Model of Epistemic Affect relativi agli anni 1911 – 1912 – 1913 – 1914	122

Introduzione

L'American Institute of Physics (AIP) è un'organizzazione scientifica statunitense nell'ambito della quale è stata istituita la Niels Bohr Library & Archives, un archivio storico che raccoglie libri di testo, monografie, fotografie e una vasta collezione di oltre duemila testimonianze orali relative ad alcune delle figure più rilevanti della fisica del Novecento. Tra queste fonti si trovano cinque interviste condotte nel 1962 da Thomas Kuhn e da altri fisici e storici della scienza a Niels Bohr. Le interviste riguardano in particolare il periodo compreso tra il conseguimento del dottorato di Bohr, nel 1911, e lo sviluppo del suo modello atomico. Il valore di queste interviste risiede nel taglio scelto dagli intervistatori, orientato alla ricostruzione di quello che Reichenbach (1938) definisce il contesto della scoperta. Il dialogo non si limita infatti alla ricostruzione dei concetti fisici e dei passaggi teorici che hanno condotto alla formulazione del modello atomico, ma apre anche a una dimensione più informale e privata del processo di costruzione della conoscenza. Ne emerge un racconto scientifico multidimensionale, nel quale aspetti concettuali, storici, sociali, culturali e personali risultano profondamente intrecciati. Per questa ragione, tali testimonianze costituiscono una fonte particolarmente significativa per indagare la dimensione affettiva ed emotiva della costruzione della scienza. Esse permettono infatti di osservare non solo che cosa viene prodotto dalla ricerca scientifica, ma anche come la conoscenza prende forma: attraverso esitazioni, difficoltà, intuizioni, tensioni, relazioni, confronti e coinvolgimento personale. In questo senso, le interviste a Bohr offrono un accesso prezioso a quei processi affettivi che solitamente rimangono in secondo piano nelle narrazioni più canoniche della fisica. Questa prospettiva è oggi particolarmente rilevante per la ricerca in didattica della fisica in generale e per la ricerca in didattica della fisica quantistica, in particolare. La didattica della fisica quantistica si è concentrata molto sulle dinamiche di insegnamento e apprendimento con l'obiettivo di individuare le difficoltà concettuali degli studenti e migliorare le strategie didattiche (Krijtenburg-Lewerissa et al. 2017). Questa impostazione rischia di restituire un'immagine parziale della fisica, oscurando la complessità dei processi attraverso cui la conoscenza scientifica viene elaborata, discussa, modificata e consolidata all'interno della comunità scientifica. Per arricchire tale immagine della scienza, la ricerca in Didattica della fisica ha da tempo riconosciuto il valore della storia e dell'epistemologia della fisica come strumenti per integrare nell'insegnamento conoscenze relative alla cosiddetta *Nature Of Science* (Erduran & Dagher 2014). All'interno di questa prospettiva si colloca anche una linea di ricerca più recente, interessata al ruolo dell'*affect* nei processi epistemici. L'*affect*, inteso come costrutto legato alla dimensione emotivo-

motivazionale, sta ricevendo crescente attenzione nello studio dell'apprendimento e della costruzione della conoscenza in fisica (Jaber et al. 2023). La presente ricerca si inserisce in questo quadro e assume come oggetto specifico di indagine le emozioni epistemiche. Il concetto, introdotto originariamente da Adam Morton (2010), è stato successivamente ripreso da Francesca Riccioni (2024), che ne propone una definizione discorsiva assunta come riferimento per questo studio:

“Le emozioni epistemiche sono dunque quelle emozioni che intervengono nei processi cognitivi e che spesso costituiscono rinforzo o deterrente nella volontà dell’individuo di proseguire nell’apprendimento e, più in generale, nel processo di ricerca, comprensione e costruzione del sapere”. (Riccioni 2024, p. 50)

In questa prospettiva, le emozioni sono definite epistemiche quando intervengono nei processi cognitivi legati all'apprendimento e, più in generale, alla ricerca, alla comprensione e alla costruzione della conoscenza. La domanda che guida lo studio riguarda la natura e il ruolo delle emozioni epistemiche di Bohr in alcune fasi cruciali della nascita della Meccanica Quantistica. L'obiettivo è realizzare una mappatura emozionale di tale processo, in continuità con il lavoro svolto da Riccioni (2024) sulla teoria della Relatività Ristretta, al fine di rendere visibile anche graficamente la dinamica affettivo-epistemica indagata. Le emozioni epistemiche di Niels Bohr sono analizzate anche attraverso alcune interviste condotte a Werner Heisenberg, anch'esse conservate presso la Niels Bohr Library & Archives, nelle quali trovano spazio osservazioni significative sull'attività scientifica di Bohr e sul suo processo emotivo. La testimonianza di Heisenberg è rilevante perché offre un punto di vista esterno, utile a comprendere meglio la personalità di Bohr e le dinamiche affettivo-epistemiche che hanno caratterizzato il suo modo di fare ricerca. Il periodo affrontato da Heisenberg differisce da quello discusso nelle interviste tra Kuhn e Bohr, poiché riguarda gli anni Venti e la vigilia del V Congresso Solvay del 1927. La tesi si articola in tre capitoli. Nel primo capitolo viene presentato il quadro teorico della ricerca entro cui si colloca lo studio, con particolare attenzione al ruolo dell'affettività nella costruzione della conoscenza scientifica (Jaber et al. 2023). Nel secondo capitolo viene ricostruito lo stato dell'arte sulle difficoltà di apprendimento della meccanica quantistica a scuola e nei primi anni di università, con l'obiettivo di mostrare perché la discussione di casi storici possa contribuire a problematizzare tali difficoltà e ad arricchire l'immagine della fisica proposta agli studenti. Nel terzo capitolo si presenta l'approccio metodologico scelto per l'analisi delle interviste e nel quarto capitolo sono riportati i risultati di queste analisi.

Capitolo 1

Fattori affettivi ed emozionali nella ricerca in Didattica della Fisica

La ricerca in didattica della fisica (*Physics Education Research*, PER), nella sua indagine sui processi di insegnamento e apprendimento della disciplina, integra contributi provenienti dalle scienze dell'educazione, dalla psicologia cognitiva e dalla filosofia della scienza (Docktor & Mestre 2014). Nato inizialmente con una forte focalizzazione sugli aspetti cognitivi dell'apprendimento, in particolare sulle concezioni spontanee degli studenti e sui processi di cambiamento concettuale (Posner et al. 1982), questo campo di ricerca ha progressivamente ampliato il proprio orizzonte teorico, riconoscendo che la costruzione della conoscenza scientifica non può essere compresa pienamente se ridotta alla sola dimensione cognitiva. A proposito, ad esempio, dei processi di cambiamento concettuale, un modello eccessivamente razionale, che si concentra soltanto sulla cognizione e ignora i fattori motivazionali ed emozionali, è stato definito “freddo” da Pintrich e i suoi colleghi (Pintrich et al. 1993), nel senso che risulta incompleto e insufficiente ai fini di una profonda comprensione delle dinamiche che sottendono l'apprendimento. Negli ultimi decenni, infatti, è stata rivolta sempre più attenzione al ruolo di fattori emotivi, motivazionali e identitari nei processi di apprendimento della fisica (Jaber & Hammer 2016a, 2016b). Tale sviluppo ha segnato il superamento di una visione essenzialmente cognitivista dell'apprendimento, a favore di una prospettiva in cui *affect*¹ e motivazione vengono riconosciuti come componenti strutturali dell'apprendimento scientifico. In questo contesto si colloca il filone emergente dedicato alle Emozioni Epistemiche, intese come quelle esperienze affettive strettamente connesse ai processi di conoscenza, di comprensione e di costruzione del significato. La letteratura contemporanea riconosce infatti che le emozioni non costituiscono elementi periferici rispetto ai processi cognitivi, ma componenti strutturalmente intrecciate alla costruzione della conoscenza; esse possono sia emergere in risposta a un'attività cognitiva orientata a un obiettivo, sia influenzarne in modo significativo gli sviluppi successivi, interagendo dinamicamente con i processi cognitivi coinvolti nell'apprendimento (D'Mello & Graesser 2012). Anche in ambito neuroscientifico è riconosciuta la funzione neurobiologica delle emozioni, in quanto condizione di possibilità del funzionamento e dello sviluppo del cervello, oltre che della formazione della mente umana

¹ In pedagogia, il termine “affect” è usato per indicare un'ampia varietà di costrutti non cognitivi, tra cui l'emozione, il concetto di sé e le convinzioni (Pekrun & Linnenbrink-Garcia 2012).

come sistema di rappresentazioni della realtà (De Sanctis 2010); Freeman afferma in maniera radicale che “senza emozione non c’è azione” (Freeman 2000, p. 18), intendendo l’emozione come una condizione necessaria dell’azione intenzionale e non come un elemento perturbativo o periferico. In questo quadro, le emozioni assumono un ruolo fondamentale nel favorire o ostacolare le azioni epistemiche, ossia quei processi attraverso cui i soggetti esplorano, valutano, elaborano e costruiscono conoscenza. Come osserva Arango-Muñoz, esse possono essere intese come vere e proprie *mental affordances*, ovvero opportunità cognitive che orientano specifiche forme di attività mentale (Arango-Muñoz 2014). Con le emozioni epistemiche viene messo dunque in luce il legame indissolubile tra emozione e cognizione (Candiotto 2016; Fischer et al. 2014; D’Mello & Graesser 2012): esse infatti stimolano, spingono e incoraggiano l’esplorazione (Morton 2010), rivelandosi indispensabili accanto alle virtù cognitive e fungendo da motivazione verso fini epistemiche (Candiotto 2022; Bortolan 2024). In tale prospettiva, la costruzione della conoscenza appare come un processo intrinsecamente multidimensionale, in cui si intrecciano aspetti cognitivi, metacognitivi, sociali, fisiologici, motivazionali ed emotivi (Pekrun 2018; Pekrun & Linnenbrink-Garcia 2012). All’interno di questo quadro teorico si inserisce il modello elaborato da Lama Jaber – approfondito di seguito – che offre una concettualizzazione specifica del ruolo delle emozioni epistemiche nei processi di costruzione della conoscenza scientifica, in particolare nel campo della didattica della fisica (Jaber et al. 2023). Tale modello fornisce una cornice interpretativa utile per inquadrare, nella ricerca in didattica della fisica, l’esigenza di conoscere a fondo la natura e il ruolo delle emozioni epistemiche, non solo degli studenti che le sperimentano durante l’apprendimento, ma anche degli scienziati che le vivono nel corso del processo di costruzione della conoscenza scientifica. Il presente studio è volto ad esplorare la dinamica emozionale dell’attività epistemica dello scienziato Niels Bohr.

1.1 Rapporto tra emozione e cognizione e obiettivi di apprendimento nella ricerca in Didattica della Fisica sulla dimensione affettiva

Nella rassegna presentata all’interno dell’*International Handbook of Physics Education Research: Learning Physics* nel capitolo *Affect in Physics Learning: entanglement with cognition and learning goals* (Jaber et al. 2023), Jaber espone il suo modello nel quale colloca su un piano bidimensionale (Figura 1) le ricerche riguardanti il ruolo che assume l’affettività nella costruzione della conoscenza scientifica.

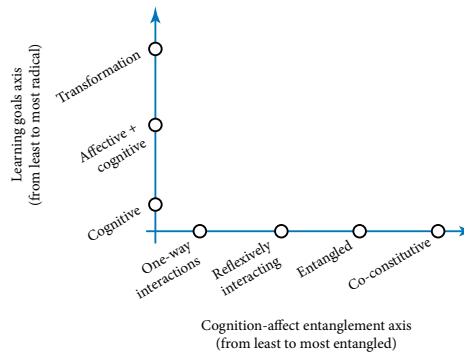


Figura 1: Due assi per collocare la ricerca sull'affect nella Didattica della Fisica. Asse x: intreccio tra la cognizione e l'emozione. Asse y: ruolo dell'affect negli obiettivi di apprendimento. Fonte: Jaber L.Z., Atkins L., Elby A., and Suárez E., *Affect in physics learning: Entanglement with cognition and learning goals*, in *The International Handbook of Physics Education Research: Learning Physics*, edited by M. F. Taşar and P. R. L. Heron (AIP Publishing, Melville, New York, 2023)

Lungo l'asse x si collocano i modelli teorici che vengono utilizzati nella ricerca per indagare la relazione tra l'affect e la cognizione. Sull'estremità sinistra dell'asse sono posti i modelli che mantengono l'affect separato dalla cognizione, o meglio con una interazione tra essi debole o moderata. Classicamente, in questa categoria rientrano gli studi che vanno ad indagare l'interesse degli studenti per la fisica nella fase iniziale di un percorso didattico e come questo interesse possa avere effetti sui progressi nella conoscenza, ovvero in che modo influisca sul rendimento scolastico (Laukenmann et al. 2003; González et al. 2017). Andando avanti lungo l'asse, si trovano modelli che descrivono l'affect come un processo che influenza la sfera cognitiva e l'apprendimento e, viceversa, ne è influenzato. La relazione tra affect e cognizione è qui più dinamica e bidirezionale, si riconosce un ruolo al contesto epistemico e il pensiero e l'apprendimento evolvono sotto l'influenza della sfera emotiva (Gupta et al. 2018). Proseguendo verso destra si situano gli studi che adottano una visione integrata tra affetto e cognizione, superando una distinzione netta tra le due dimensioni. I due processi sono concepiti qui come intimamente connessi e strutturalmente *entangled*, dando luogo a quel filone di ricerca che utilizza una terminologia intrecciata come "affect epistemico": è dunque a questo stadio del modello di Jaber che si collocano gli studi come quello qui presentato, dedicati all'indagine sulle Emozioni Epistemiche. Esempi di emozioni epistemiche sono la curiosità che si può sperimentare di fronte a un fenomeno sconosciuto, la sorpresa suscitata da un risultato inatteso o la frustrazione provocata da un'incoerenza apparentemente irrisolvibile. Tutte queste emozioni sono strettamente intrecciate con l'esperienza disciplinare ed epistemica (Jaber & Hammer 2016b). Spostandosi infine sull'estremità destra del primo asse si arriva agli studi che fanno ricorso a costrutti "co-costituiti" da elementi affettivi e cognitivi, muovendosi entro una prospettiva per cui non solo le due dimensioni si influenzano, ma risultano inseparabili sul piano

analitico. Un modello concettuale che rientra in questo campo è quello dell'*appropriazione* (Levrini et al. 2015), che integra nell'apprendimento, inteso in senso ampio, l'impegno disciplinare degli studenti e la costruzione della loro stessa identità. In quest'ottica, studiare la fisica contribuisce alla strutturazione del proprio modo di percepire il mondo e se stessi, oltre allo sviluppo di un senso estetico della scienza, tradizionalmente associato a discipline umanistiche come storia, arte e letteratura (Wickman 2022).

Il secondo asse del modello riunisce gli obiettivi di apprendimento perseguiti in un dato studio in relazione con la dimensione affettiva, spaziando dai più convenzionali a quelli più trasformativi. Partendo dal basso, si ha una concezione di apprendimento tradizionale, incentrato sull'acquisizione di conoscenze e competenze. La componente affettiva è qui attenzionata in termini motivazionali e funzionali al conseguimento degli obiettivi curriculari: si separa dunque dalla cognizione, ma funge da supporto per la stessa. Avanzando lungo l'asse si trovano gli studi che elevano le emozioni a obiettivi di apprendimento, al pari di quelli cognitivi: non sono solo concepite come strumento per la comprensione concettuale, ma diventano anche oggetto stesso di apprendimento. In questo caso, se certi stati emotivi vengono riconosciuti utili ai fini dell'acquisizione di conoscenza, questi possono venire stimolati intenzionalmente in maniera tale da imparare, oltre al contenuto disciplinare, anche a comprendere cosa si prova nelle diverse fasi di un processo di apprendimento: sviluppare la capacità di sperimentare e saper riconoscere un'emozione epistemica, coltivando quindi l'affect nella scienza, diventa un "obiettivo didattico fondamentale" (Jaber & Hammer 2016a, p. 191). Gli insegnanti potrebbero strutturare l'ambiente di apprendimento coinvolgendo attivamente gli studenti in pratiche scientifiche come l'argomentazione e la costruzione di spiegazioni. Tale modalità di partecipazione favorisce l'emergere di emozioni come l'interesse o il fastidio quando si incontrano contraddizioni o la soddisfazione nella generazione di idee e costruzione di significati (Jaber et al. 2023). Gli studenti, in questo modo, imparano ad affrontare e gestire determinate emozioni in maniera produttiva, reindirizzando l'attenzione laddove necessario. Un esempio di questo processo può verificarsi nel momento in cui ci si sente incerti di fronte a un determinato problema e proprio tale incertezza segnala la necessità di soffermarsi ad approfondire ulteriormente il ragionamento prima di procedere. Le emozioni si rivelano dunque centrali nell'orientare l'attività epistemica (Bortolan 2024). Tra gli studi di questo genere, che si collocano a metà dell'asse y, rientrano quelli sulle emozioni epistemiche, tra cui il presente lavoro. A tal proposito, è interessante evidenziare quanto riportato da Jaber e i suoi colleghi circa la gestione delle emozioni intesa come competenza di uno scienziato: gli autori, infatti,

affermano che studi e biografie di diversi scienziati hanno rivelato che la capacità di affrontare e gestire le emozioni è stato un aspetto centrale del loro lavoro. Jaber e Hammer (2016b) sostengono che l'affect “permea le pratiche disciplinari” (p. 192) e descrivono la consapevolezza emotiva degli scienziati come una sorta di meta-affect che fa parte della loro “competenza e maturità nel campo, [...] evidenziando in particolare il loro apprendimento a vivere le sfide come piacevoli” (Jaber & Hammer 2016b, p. 195). Tale osservazione si rivela pertinente con il presente studio, in cui si andrà ad indagare il “meta-affect” di Bohr, e lo posiziona nella zona del secondo asse appena discussa. Infine, all'estremità superiore dell'asse si trovano quelle prospettive trasformative che mirano a ripensare radicalmente il concetto stesso di apprendimento della fisica. È paradigmatico in tal senso il costrutto precedentemente menzionato di *appropriazione*, per cui la disciplina si interseca con l'identità stessa dello studente, insieme ai suoi interessi e alle sue idiosincrasie (Levrini et al. 2015). In questa prospettiva, i contenuti della disciplina vengono trasformati in qualcosa di personalmente significativo e coerente con la propria narrazione di sé, promuovendo un approccio riflessivo attraverso cui il soggetto “vive” la fisica e trova “spazio per coltivare i propri modi personali e idiosincratici di apprendere una disciplina pur rispettandone il nucleo di regole e vincoli” (Levrini et al. 2015, p. 37).

Se si analizza l'intero piano riconoscendo in esso un modello in cui le due dimensioni lungo gli assi si influenzano a vicenda, si può mappare la mutua relazione tra obiettivi di apprendimento ed entanglement emozione-cognizione come mostrato in Figura 2.

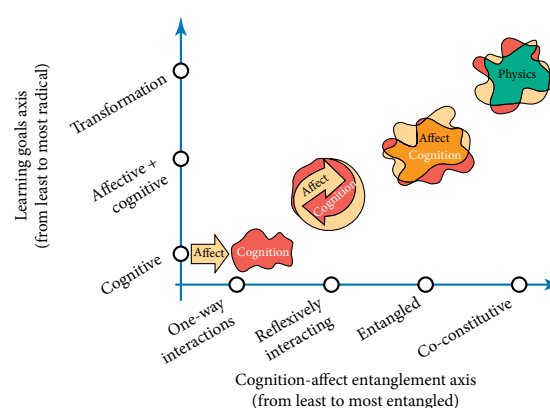


Figura 2: Mappatura della relazione tra modelli di entanglement emozione-cognizione e obiettivi di apprendimento. Asse x: intreccio tra la cognizione e l'emozione. Asse y: ruolo dell'affect negli obiettivi di apprendimento. Fonte: Jaber L.Z., Atkins L., Elby A., and Suárez E., *Affect in physics learning: Entanglement with cognition and learning goals*, in *The International Handbook of Physics Education Research: Learning Physics*, edited by M. F. Taşar and P. R. L. Heron (AIP Publishing, Melville, New York, 2023)

Posto che in linea di principio la relazione fra i due assi può assumere diverse forme, gli autori della rassegna in cui viene presentato tale modello prediligono una rappresentazione in cui la progressione lungo una dimensione si accompagna a una corrispondente progressione lungo l'altra. Negli studi analizzati dagli autori si è osservato infatti che “il grado di intreccio nella modellizzazione della cognizione e dell'affetto da parte dei ricercatori è correlato all'originalità dei loro obiettivi di apprendimento” (Jaber et al. 2023, p. 14-16). In altre parole, più l'affect viene concepito come fattore trasformativo negli obiettivi di apprendimento, più il suo legame con la cognizione diviene indissolubile. Nella ricerca in didattica della fisica, dunque, la dimensione emotiva si configura come un elemento che nelle pratiche di insegnamento e apprendimento può contribuire a concepire in termini non convenzionali la disciplina stessa, oltre al modo di conoscerla e di rapportarsi ad essa. Ciò è possibile cambiando prospettiva sul ruolo dell'affect, riconoscendogli una dignità teorica al pari di quella della cognizione e collocandolo entro una cornice orientata verso obiettivi di apprendimento sempre più trasformativi.

Richiamando le considerazioni fatte circa il posizionamento del presente studio su ciascuno degli assi in Figura 1, lo si può adesso collocare sul piano nella zona della terza icona in Figura 2, in cui affect e cognizione sono interconnessi. Ciò su cui ci si focalizza è il costrutto di Emozione Epistemica, attraverso cui si intende indagare quell'intreccio tra emozione e cognizione in un quadro teorico in cui l'affect epistemico fa parte di tutto ciò che innesca e stabilizza il coinvolgimento disciplinare (Jaber & Hammer 2016b). In particolare, dal momento che la figura protagonista di questo studio è uno scienziato, il filone di ricerca a cui esso si allinea è quello che comprende gli studi che si estendono oltre le dinamiche di classe scolastica, giungendo ad esaminare il ruolo dell'affect nei processi di scoperta e nell'attività epistemica della pratica scientifica esperta (Jaber & Hammer 2016a, 2016b; Riccioni 2024). Studi di questo genere mantengono tuttavia importanti implicazioni per la didattica e si riflettono sull'esperienza degli studenti stessi, rafforzando la prospettiva teorica secondo cui comprendere le esperienze emotive nei processi di costruzione di significato scientifico contribuisce a migliorare l'apprendimento, l'interesse e il coinvolgimento degli studenti nelle discipline scientifiche (Vilhunen et al. 2022). Inoltre, proporre studi che esplorano la dimensione emotiva di uno scienziato o di una scienziata consente di scardinare lo stereotipo, ad essi associato, del genio quasi “disumanizzato” che vive al di fuori del mondo quotidiano. Restituire un volto umano alla fisica, mostrando come la costruzione della conoscenza scientifica sia il prodotto di soggetti inseriti in contesti sociali, relazionali e storici, attraversati da dubbi e difficoltà, rende

la disciplina più accessibile e significativa per gli studenti; in questo modo, infatti, si contrasta la percezione della fisica come sapere astratto, distante dall'esperienza quotidiana e riservato a intelligenze eccezionali (Stanley 2016). Dunque, indagare anche la dimensione emotiva dell'attività scientifica significa favorire una comprensione più autentica sia della pratica della ricerca sia della natura stessa della scienza. Il presente studio si propone infatti di esplorare come si configura la dimensione affettiva e in che modo essa si intrecci a quella cognitiva nelle varie fasi della ricerca scientifica, in uno dei periodi più fecondi della storia della fisica quale il primo quarto del XX secolo.

1.2 La metodologia alla base dello studio sulle emozioni epistemiche

Avere come oggetto di indagine le emozioni significa confrontarsi con un fenomeno intrinsecamente complesso e ambiguo, dai confini concettuali poco nitidi, in cui componenti cognitive, corporee e socioculturali risultano profondamente intrecciate. L'eterogeneità è infatti una delle caratteristiche principali delle emozioni: esse sono difficilmente rilevabili e richiedono, per essere analizzate, una molteplicità di metodologie d'indagine che includono un dialogo tra diverse discipline quali ad esempio la psicologia o le neuroscienze affettive (Pussetti 2011). La sottigliezza e la complessità dei meccanismi che sottendono le emozioni li rendono, proprio perché sfuggono alla consapevolezza, estremamente difficili da analizzare (de Sousa 2009). Pertanto, è opportuno delineare le metodologie d'indagine nel trattare le emozioni come oggetto di studio, dunque i metodi con cui esse possono essere esplorate. In quanto fenomeno multidimensionale, le emozioni possono essere analizzate su più livelli, da quello neurobiologico e fisiologico a quello sociale e culturale. Nel presente studio, che si focalizza più precisamente sulle emozioni "epistemiche", il livello al quale esse vengono indagate è di matrice emergentista: le proprietà e i significati assunti dalle emozioni dipendono dal fatto che sono esperienze significative, socialmente e culturalmente mediate. Le emozioni trattate in questa tesi vanno intese come situate tanto nel contesto dell'indagine scientifica e nello specifico orizzonte storico-culturale in cui essa si è sviluppata, quanto nella dimensione identitaria e personale di Bohr. Esplorare la dinamica emotivo-epistemica di uno scienziato può contribuire ad ampliare la riflessione sui processi affettivi che attraversano la pratica scientifica più in generale; la prospettiva che si offre è specifica e soggettiva, in quanto si va ad indagare l'esperienza di un singolo scienziato, ma si propone di costituire una solida chiave interpretativa per comprendere in che modo la dimensione affettiva ha accompagnato la nascita della teoria quantistica. Uno dei possibili modi per rendere osservabili le dinamiche emotive-epistemiche di un soggetto è ricorrere allo strumento dell'intervista o dell'autodichiarazione dello stesso

relativamente a ciò che sente in risposta a uno stimolo o nel condurre un'attività epistemica. In letteratura, un esempio di indagine basata sull'intervista e sull'analisi linguistica è dato dallo studio del 2018 di Gupta e colleghi, i quali supportano un modello di emozioni ed epistemologie come intrecciate e che si rafforzano reciprocamente in tempo reale, contribuendo a stabilizzare o a modificare specifiche forme di ragionamento. Gli autori studiano le emozioni emergenti di una studentessa in un ambiente di apprendimento specifico; tramite una video-intervista, oltre ad analizzare il linguaggio utilizzato, si possono osservare e valutare le sfumature non verbali (Gupta et al. 2018). La maniera in cui si manifestano le emozioni è infatti variegata e complessa: gli indizi sono talvolta evidenti ed espliciti e altre volte microscopici e impliciti, dati ad esempio dalla comunicazione non verbale come i gesti, il tono della voce e la postura (De Sanctis 2010). Pertanto, per accedere all'esperienza emozionale di un determinato soggetto, è fondamentale che il ricercatore o la ricercatrice che conduce l'indagine abbia familiarità con il mondo vissuto dallo stesso. Saper immergersi nel contesto culturale, sociale, storico e scientifico in cui si sono generate le emozioni del soggetto osservato consente di entrare in risonanza e in empatia con esso, evitando interpretazioni fuori luogo e letture decontestualizzate (Pussetti 2011). I testi che si andranno ad analizzare con una lente emozionale nel presente studio sono delle interviste condotte a Bohr e ad Heisenberg sulla nascita della teoria atomica e della *old quantum physics*, incentrando lo studio soltanto sulla figura dello scienziato danese. La prospettiva di Heisenberg contribuisce ad ampliare lo sguardo sulla dimensione emotiva di Bohr da un punto di vista esterno ma direttamente coinvolto e partecipe del medesimo contesto epistemico. All'analisi di tipo linguistico delle interviste segue un'interpretazione emotiva dei temi discussi in esse, riguardanti la ricerca scientifica allora condotta. Chiarita la base empirica e stabilito il quadro teorico di riferimento, si può ora entrare nel merito del lavoro qui proposto.

Capitolo 2

La meccanica quantistica come caso di studio per l'indagine delle emozioni epistemiche

In questo secondo capitolo, presentiamo lo stato dell'arte circa la ricerca in Didattica della Fisica sull'insegnamento e sull'apprendimento della meccanica quantistica in contesti scolastici e universitari.

Nello specifico, il primo paragrafo di questo capitolo è dedicato a presentare la rassegna di Krijtenburg-Lewerissa e colleghi (Krijtenburg-Lewerissa et al. 2017), la quale presenta i risultati dell'analisi di 74 articoli, riguardanti indagini su concezioni degli studenti, strumenti di ricerca, strategie didattiche e applicazioni multimediali. Presentare e discutere gli ostacoli concettuali generalmente incontrati a scuola e nei primi anni di università consente di riflettere sul ruolo che possa avere affrontare in classe il caso delle difficoltà incontrate da Bohr in fase di scoperta e, dunque, di costruzione di conoscenza. Si distinguerà quindi l'attività epistemica di chi acquisisce una conoscenza accreditata, dall'attività epistemica tipica di chi si occupa della *science in the making* (Latour 1987). In questa maniera si prepara il terreno per il secondo paragrafo, nel quale si chiarisce il posizionamento del presente studio su una nuova linea di ricerca in fase di sviluppo, orientata allo studio delle pratiche di costruzione del sapere scientifico con una specifica lente di indagine costituita dalle emozioni epistemiche. La chiave di lettura con cui viene condotto questo genere di analisi trova il proprio fondamento nel quadro teorico relativo alla dimensione emotiva dei processi epistemici, illustrato nel primo capitolo. Verrà messo in luce il duplice valore, didattico ed epistemologico, di studi analoghi a quello qui presentato, evidenziando non solo quanto essi possano essere preziosi e significativi per l'epistemologia della fisica, ma anche il loro potenziale nel promuovere forme più autentiche ed efficaci di insegnamento e apprendimento della meccanica quantistica.

Infine, nel terzo paragrafo, verranno presentati il corpus di analisi e la fonte dalla quale sono state reperite le interviste oggetto di studio. Saranno quindi delineate le caratteristiche principali delle interviste, contestualizzandole e fornendo gli elementi necessari per comprendere le ragioni della loro selezione ai fini della presente ricerca. In particolare, sarà chiarita la scelta per cui, nell'indagine sulle emozioni epistemiche di Bohr, è stato coinvolto il punto di vista di Heisenberg, rivelatosi una preziosa fonte di testimonianza – alternativa a quella autobiografica – che ha arricchito la cornice interpretativa relativa all'*affect* in Bohr.

2.1 La didattica della meccanica quantistica e le difficoltà di apprendimento

Nella tradizione didattica la teoria della meccanica quantistica è stata considerata un argomento riservato all'istruzione universitaria, sebbene negli ultimi decenni siano stati gradualmente inseriti alcuni concetti fondamentali anche nei curricula della scuola secondaria in diverse nazioni. Tale interesse è motivato non solo dalla centralità della meccanica quantistica nella fisica contemporanea e nelle sue applicazioni tecnologiche, ma anche dal suo valore culturale ed epistemologico. La teoria quantistica rappresenta infatti una delle più profonde trasformazioni concettuali della storia della scienza, avendo richiesto l'abbandono di categorie interpretative classiche fondate su determinismo e causalità. Per questo motivo, la sua introduzione nell'insegnamento viene spesso considerata un'importante opportunità per promuovere una comprensione scientificamente pertinente della natura nell'ottica della meccanica quantistica (Karakostas & Hadzidaki 2005).

In Italia le attuali indicazioni nazionali prevedono l'insegnamento della fisica del XX secolo al quinto anno del liceo, differenziando il grado di approfondimento tra gli indirizzi scientifici e non. Infatti, nelle indicazioni nazionali degli indirizzi non scientifici viene incoraggiata l'introduzione della fisica moderna da un punto di vista prettamente storico, senza entrare necessariamente nei dettagli:

È auspicabile che lo studente possa affrontare percorsi di fisica del XX secolo, relativi al microcosmo e o al macrocosmo, accostando le problematiche che storicamente hanno portato ai nuovi concetti di spazio e tempo, massa ed energia (Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, 2010, pag. 216).

Per quanto riguarda il liceo scientifico, le indicazioni nazionali definiscono con maggiore precisione i contenuti disciplinari da trattare. Relativamente alla fisica quantistica:

Il percorso didattico comprenderà le conoscenze sviluppate nel XX secolo relative al microcosmo e al macrocosmo, accostando le problematiche che storicamente hanno portato ai nuovi concetti di spazio e tempo, massa ed energia. L'insegnante dovrà prestare attenzione a utilizzare un formalismo matematico accessibile agli studenti, ponendo sempre in evidenza i concetti fondanti. [...] L'affermarsi del modello del quanto di luce potrà essere introdotto attraverso lo studio della radiazione termica e dell'ipotesi di Planck (affrontati anche solo in modo qualitativo), e sarà sviluppato da un lato con lo studio dell'effetto fotoelettrico e della sua interpretazione da parte di Einstein, e dall'altro lato con la discussione delle teorie e dei

risultati sperimentali che evidenziano la presenza di livelli energetici discreti nell'atomo. L'evidenza sperimentale della natura ondulatoria della materia, postulata da De Broglie, ed il principio di indeterminazione potrebbero concludere il percorso in modo significativo.
(Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, 2010, pag. 344)²

A seguito dell'inserimento della meccanica quantistica nei curricula scolastici è stato necessario estendere la ricerca in didattica della fisica anche alle difficoltà di ragionamento riscontrate dagli studenti in tale ambito e allo sviluppo di programmi di studio e metodologie didattiche volte a ridurre significativamente tali difficoltà (Singh & Marshman 2015). Al fine di intervenire sui processi di insegnamento è necessario indagare quali aspetti della teoria costituiscono degli ostacoli all'apprendimento; utilizzando la terminologia di Vygotsky, gli insegnanti intervengono nella zona di sviluppo prossimale degli studenti, ove questa è definita come “la distanza tra il livello di sviluppo effettivo, determinato dalla risoluzione autonoma dei problemi, e il livello di sviluppo potenziale, determinato attraverso la risoluzione dei problemi sotto la guida di un adulto o in collaborazione con pari più capaci” (Vygotsky 1978, p. 86). In altre parole, la zona di sviluppo prossimale è quell'area cognitiva in cui il discente non può apprendere in maniera autonoma, ma necessita del supporto dell'insegnante, il quale deve essere consapevole delle competenze acquisite e del grado di conoscenza raggiunto dal soggetto. Conoscere la base di partenza su cui costruire e integrare nuova conoscenza è necessario per far sì che l'insegnante possa progettare un'istruzione efficace e adeguata al livello di conoscenze e competenze degli studenti (Singh & Marshman 2015). Per questo motivo, sono numerose le ricerche in cui vengono esposti e analizzati i risultati di indagini sulle difficoltà di apprendimento riscontrate nella meccanica quantistica introduttiva nella scuola superiore e nei primi anni di università. L'articolo di review di K. Krijtenburg-Lewerissa, H. J. Pol, A. Brinkman e W. R. van Joolingen del 2017 ne raccoglie 74 in merito alla ricerca su concezioni degli studenti, test e strategie didattiche. È interessante, nel contesto del presente studio, presentare alcuni dei maggiori ostacoli concettuali rilevati in ambiente scolastico e universitario; in questo modo è possibile osservare il parallelismo che sorge con alcune delle difficoltà fronteggiate dallo stesso Bohr in fase di scoperta della teoria e utilizzare tale

² Si segnala che il Ministero dell'Istruzione e del Merito ha avviato una revisione delle Indicazioni nazionali per i licei, pubblicando nel 2026 il nuovo testo, destinato a sostituire progressivamente il documento del 2010. Nel caso del liceo scientifico i nuovi obiettivi specifici di apprendimento in merito alla meccanica quantistica differiscono dai precedenti per l'introduzione del concetto di misura, della storia delle scoperte dei raggi X e del nucleo atomico e di elementi di base di fisica atomica e della storia dei modelli atomici; inoltre, lo spettro del corpo nero e la costante di Planck non sono più affrontati esclusivamente in termini qualitativi, ma anche attraverso la relativa formulazione matematica (Ministero dell'Istruzione e del Merito 2025).

parallelismo nell'indagine dei punti critici e delle tensioni epistemiche all'interno di un testo storico, in questo caso le interviste. Primo fra tutti gli ostacoli concettuali, l'emblema dei dilemmi storici quantistici: il dualismo onda-particella. Questo costituì, come si vedrà più avanti, una delle maggiori fonti di preoccupazione e frustrazione per lo scienziato, ritrovandosi davanti a un dilemma di natura ontologica; oggi come allora, la natura duale della luce e della materia mette in crisi chi ne viene a conoscenza, dando spesso luogo alla nascita di idee che portano fuori strada il ragionamento e la comprensione. Dagli studi di Ireson (1999) e Ayene et al. (2011) emerge che per gli studenti vi sono fondamentalmente tre modi di descrivere gli oggetti quantistici: 1) descrizione classica, per cui un oggetto quantistico o è particella o è onda; 2) descrizione mista, per cui viene riconosciuta la coesistenza dei comportamenti di onda e particella, ma la descrizione dell'oggetto viene fatta in termini classici; 3) descrizione quasi-quantistica, in cui gli studenti comprendono che gli oggetti quantistici possono comportarsi sia come particelle che come onde, ma hanno ancora difficoltà a descrivere i fenomeni in modo non deterministico. Uno dei rischi maggiori di una descrizione lontana da quella quantistica corretta è lo sviluppo di convinzioni errate, derivanti dall'inserimento dei nuovi concetti in schemi interpretativi classici. Ad esempio, come riportato da McKagan et al. (2010) e Olsen (2002), diversi studenti delle scuole superiori e universitari credono che il fatto che un elettrone abbia, in certe circostanze, un comportamento ondulatorio significhi che esso sia una particella che percorre una traiettoria sinusoidale: si arriva alla stessa conclusione interpretando erroneamente la funzione d'onda, a cui si attribuisce il ruolo di descrivere il percorso spaziale di un elettrone (Özcan 2011). Oppure, nel caso dell'esperimento della doppia fenditura, una descrizione classica conduce alla convinzione che un singolo fotone o un singolo elettrone, in quanto particelle, non possano produrre un pattern di interferenza (Ireson 1999). Oltre alla natura della luce e della materia, certe idee nascono nel considerare l'interazione fra le due, come ad esempio nello studio dell'effetto fotoelettrico, che spesso viene confuso con la ionizzazione (Asikainen e Hirvonen 2009). Un altro importante concetto da attenzionare nel trattare il dualismo onda-particella è il principio di indeterminazione di Heisenberg. Questo principio riguarda un concetto che in fisica ha subito un'evoluzione radicale nel tempo, riflettendo i profondi cambiamenti avvenuti nella nostra comprensione della natura: l'incertezza. In fisica classica l'incertezza era di tipo sperimentale, legata ai limiti pratici degli strumenti di misura e dello sperimentatore. Con l'avvento della meccanica statistica si iniziò a parlare in termini di probabilità, dando all'incertezza una connotazione epistémica: nel trattare i sistemi costituiti da più particelle si possono fare considerazioni sui valori medi delle quantità che li caratterizzano, ma non si può seguire classicamente il comportamento della singola

particella. Con la meccanica quantistica il significato assunto dalla probabilità è di tipo ontologico e l'incertezza diventa intrinseca nella realtà stessa. Questo è di certo un risultato particolarmente ostico dal punto di vista concettuale, poiché richiede un forte sforzo di astrazione e un distacco dal determinismo, non facile da conciliare con l'intuizione comune. Spesso, infatti, gli studenti tendono a far rientrare l'incertezza quantistica in un quadro classico, rappresentandola come un errore di misurazione dovuto allo strumento o a effetti esterni (Ayene et al. 2011), oppure si pensa che sia dovuta all'alta velocità delle particelle quantistiche (Müller & Wiesner 2002). La difficoltà principale che si frappone tra una comprensione autentica della meccanica quantistica e il soggetto che la studia risiede nell'inevitabile scontro tra la teoria stessa e la conoscenza di senso comune. Per questo motivo, molti degli ostacoli concettuali che generano disorientamento negli studenti possono essere rintracciati, seppur in forme differenti, anche nel percorso di Bohr: ogni essere umano, infatti, fa esperienza del mondo quotidiano macroscopico e matura nel corso del suo sviluppo cognitivo delle intuizioni modellate dall'osservazione di fenomeni classici. La nostra cultura, infatti, nonostante l'avvento della relatività e della meccanica quantistica, è dominata dalla visione del mondo newtoniana. Le categorie newtoniane di spazio e tempo assoluti, materia e causalità sono radicate profondamente nella nostra percezione della realtà, al punto da plasmare il nostro modo di pensare e interpretare il mondo (Mashhadi 1995). La fatica ad accettare il non-determinismo spesso causa un ritorno al ragionamento classico (Michellini et al. 2004), per cui i fenomeni quantistici vengono inseriti nei quadri meccanicistici appresi in precedenza, senza operare quel distacco concettuale che la teoria quantistica richiede. L'origine di tali difficoltà di apprendimento è, per Gil e Solbes, di natura epistemologica, poiché deriva dalla scarsa consapevolezza della portata rivoluzionaria del nuovo paradigma (Gil e Solbes 1993), su cui invece è bene insistere e far leva in contesto scolastico e universitario: infatti, una presentazione lineare e cumulativa della scienza non fa che accentuare tali incomprensioni, inducendo a interpretare le nuove teorie come semplici estensioni di quelle precedenti anziché come autentici cambiamenti di paradigma. Posto che, dunque, la ricerca in didattica della fisica ha evidenziato la tendenza a inquadrare i concetti quantistici entro schemi interpretativi classici, il problema si aggrava ulteriormente quando risultano già consolidate misconcezioni relative alla fisica classica. Steinberg e colleghi hanno analizzato alcuni risultati della propagazione delle difficoltà in ambito classico: ad esempio, nel caso della luce, è emerso che gran parte degli studenti non sviluppa un modello ondulatorio corretto, credendo per esempio che l'ampiezza di un'onda luminosa sia spaziale anziché elettromagnetica. Oppure, nel descrivere il fenomeno della diffrazione, molti parlano di onde che “passano” o “non passano” attraverso una fenditura.

Tali concezioni si riflettono successivamente nella rappresentazione dei fenomeni quantistici: nell'apprendimento della natura corpuscolare della luce resta invariata l'idea del modello spaziale dell'onda, che viene soltanto reinterpretato come traiettoria sinusoidale del fotone (Steinberg et al. 1999). La tendenza a interpretare i fenomeni quantistici attraverso categorie classiche può essere ricondotta, almeno in parte, al ruolo che il ragionamento per analogia svolge nei processi di apprendimento. Le analogie sono strumenti preziosi per l'insegnamento e l'apprendimento in ambito scientifico e pertanto vengono spesso utilizzate per cercare di dare un senso all'ignoto (Duit 1991); soprattutto nel caso di concetti astratti come quelli quantistici, le analogie hanno un forte potere di visualizzazione, cioè consentono di realizzare delle rappresentazioni mentali o grafiche che facilitano la comprensione. Il ragionamento analogico consente di interpretare un nuovo dominio attraverso il trasferimento di strutture relazionali provenienti da domini già noti, favorendo la generazione di inferenze e la costruzione di schemi concettuali più generali (Gentner 1983). Strettamente correlate alle analogie sono le metafore, caratterizzate dalla presenza di elementi in generale apparentemente anomali o letteralmente falsi, che generano un effetto di sorpresa e una tensione cognitiva che può favorire l'attenzione verso aspetti inediti di un concetto e l'attribuzione di nuovi significati (Duit 1991). Tuttavia, analogie e metafore sono "armi a doppio taglio" (Glynn et al. 1989, p. 387): riprendendo la rassegna di Krijtenburg-Lewerissa e colleghi, alcuni studi hanno riportato che le metafore classiche spesso generano fraintendimenti e alimentano un pensiero classico errato poiché vengono interpretate letteralmente. Ad esempio, è stato osservato che i grafici delle buche di potenziale vengono interpretati come oggetti esterni, oppure le funzioni d'onda vengono scambiate con i livelli di energia, probabilmente per l'uso di diagrammi che combinano i due concetti (McKagan et al. 2008). Ricorrere all'uso di metafore o analogie è dunque un'operazione delicata, ma i rischi per l'apprendimento possono essere attenuati esplicitandone i limiti di validità e il dominio entro cui risultano applicabili (Krijtenburg-Lewerissa et al. 2017). Considerandone il potenziale euristico e didattico, si può affermare che in meccanica quantistica il ragionamento analogico sia in larga misura inevitabile, soprattutto per il fatto che nel descrivere i fenomeni si utilizzano termini classici. La questione del ruolo che svolge il linguaggio nell'epistemologia della fisica fu al centro delle riflessioni di Bohr. Come si vedrà in fase di analisi, nel suo percorso di ricerca e di scoperta, Bohr si è trovato davanti alla questione di come si debba parlare degli oggetti quantistici ed è giunto alla conclusione che non si possa fare a meno del vocabolario classico: questo è infatti l'unico strumento di cui disponiamo per descrivere e comunicare l'esperienza. Parlare di fisica quantistica in termini classici, così come utilizzare analogie classiche, è per Bohr indispensabile, purché si pongano

in rilievo i rispettivi limiti e si promuova una riflessione di carattere epistemologico sul rapporto tra linguaggio, descrizione e realtà fisica.

Proseguendo con gli ostacoli all'apprendimento, un altro concetto da menzionare è chiaramente l'atomo di Bohr. Spesso i libri di testo scolastici offrono una rappresentazione del modello atomico di Bohr come un sistema microplanetario, in cui gli elettroni si muovono su orbite circolari nelle vicinanze del nucleo (Mashhadi 1995). Una tale schematizzazione può essere fuorviante, poiché può indurre a credere che le orbite siano spaziali, evocando troppo la struttura planetaria, e a tralasciare il vero cambiamento radicale introdotto da Bohr: la natura prevede dei salti discreti tra diversi livelli di energia ammessi. L'atomo di Bohr permette di capire come avviene il meccanismo di assorbimento ed emissione della radiazione, non intende descrivere come è organizzato l'atomo spazialmente. La ricerca ha dimostrato che gli studenti non tengono in considerazione i postulati quantistici, dal momento che, considerando sufficiente il modello planetario, non comprendono la necessità di introdurre la quantizzazione (Taber 2005). Inoltre, si tende a restare ancorati alla descrizione planetaria dell'atomo di Bohr perché è in linea con una visione classica del mondo (Petri & Niedderer 2013); molte difficoltà, infatti, sono legate all'incapacità di mettere in relazione il comportamento delle entità quantistiche con la realtà fisica (Krijtenburg-Lewerissa et al. 2017).

Alla luce di queste considerazioni, la meccanica quantistica risulta essere un terreno particolarmente fertile per lo studio della costruzione e del progressivo affinamento di modelli interpretativi sempre più coerenti con il modello scientifico, proprio perché comporta il superamento di nozioni classiche profondamente radicate e l'adozione di nuove categorie per descrivere la realtà fisica. Tale caratteristica la rende un contesto rilevante sia dal punto di vista didattico sia per la riflessione sui processi di costruzione della conoscenza scientifica. La ricerca in didattica della fisica quantistica, come riportato attraverso la rassegna discussa, concentra l'indagine sulle difficoltà dei soggetti che apprendono a scuola o all'università; dunque, si focalizza sullo studio dei processi di apprendimento e sulle strategie didattiche volte a migliorare e agevolare la comprensione.

2.2 Le attività epistemiche degli scienziati come oggetto di indagine

Lo studio qui presentato si colloca sul filone della ricerca in didattica della fisica incentrata sull'attività epistemica degli scienziati. L'attenzione viene rivolta alla storia e ai processi di costruzione della conoscenza scientifica, attraverso l'indagine delle modalità con cui i protagonisti della ricerca hanno elaborato i concetti che oggi costituiscono oggetto di

insegnamento. Si distingue così l'attività epistemica di acquisizione della conoscenza, tipica di chi apprende a scuola o all'università, dall'attività epistemica che caratterizza la produzione stessa della conoscenza scientifica, propria degli scienziati che scoprono, formulano teorie e contribuiscono all'avanzamento della ricerca scientifica. Come osserva Latour (1987), comprendere la produzione della conoscenza scientifica richiede di entrare “dalla porta sul retro della *science in the making*, non attraverso il più grandioso ingresso della *ready made science*” (Latour 1987, p. 4). Nel caso della fisica, questa linea di ricerca ha recentemente dato origine a studi che utilizzano materiali storici per esplorare le attività epistemiche degli scienziati e il ruolo svolto da elementi cognitivi e affettivi nella costruzione della conoscenza. In questa prospettiva si colloca, ad esempio, il lavoro di Riccioni sulla teoria della Relatività Ristretta e sulle emozioni epistemiche di Albert Einstein (Riccioni 2024). Analogamente, il presente studio si propone di analizzare le emozioni epistemiche di Niels Bohr che emergono dalle testimonianze dello stesso e da quelle di Werner Heisenberg relativamente alla nascita della meccanica quantistica, assumendo tali fonti come una finestra privilegiata sui processi epistemiche coinvolti nella costruzione della teoria. Il valore di studi di questo genere si rivela sia su un piano didattico che epistemologico. Sotto il profilo didattico, studiare la storia della fisica e con essa i processi di costruzione di conoscenza, consente di assicurare una maggiore fedeltà alla complessità intrinseca nello sviluppo scientifico. Imparare la complessità di un processo epistemico può essere rassicurante per chi si trova a fare tentativi, commettere errori e avere ripensamenti, mostrando come tali pratiche siano parte integrante dell'attività scientifica e siano dunque condivise dagli stessi scienziati (Stanley 2016). Spesso, anche se sempre meno, i libri di testo, i media o i libri divulgativi veicolano un'immagine stereotipata della figura dello scienziato, elevandolo a genio dotato di capacità straordinarie. In *Even Einstein struggled: effects of learning about great scientists' struggles on high school students' motivation to learn science*, Lin-Siegler e colleghi riferiscono di aver esaminato 21 libri di testo scientifici utilizzati nelle scuole pubbliche di New York, da cui è stata rilevata una marcata scarsità di informazioni sugli scienziati, alimentando una concezione mitizzata degli stessi e ponendo l'attenzione quasi esclusivamente sui contenuti disciplinari. Ad esempio, nel libro *Conceptual Physics* di Hewitt, Einstein viene descritto come “la mente più potente del ventesimo secolo e una delle più potenti che siano mai vissute. [...] Era il più diverso da qualsiasi altro uomo” (Hewitt 2006, p. 687). Rappresentazioni di questo genere non fanno altro che proporre un quadro non realistico della scienza, oscurando le naturali difficoltà e fallimenti riscontrati da qualsiasi scienziato prima dei suoi successi: ne consegue il rischio di disincentivare studenti e studentesse ad intraprendere studi scientifici, poiché indotti a credere

che studi del genere siano riservati a chi possiede capacità eccezionali. Un approccio didattico promettente per accrescere la motivazione e l'interesse per le discipline scientifiche consiste nel raccontare storie di difficoltà: come riferito da Lin-Siegler e colleghi (2016), le narrazioni hanno la capacità di influenzare profondamente atteggiamenti, convinzioni e comportamenti, poiché favoriscono il coinvolgimento emotivo e orientano l'interpretazione degli eventi. In particolare, le storie che descrivono ostacoli, fallimenti e vulnerabilità risultano particolarmente efficaci, in quanto consentono di identificarsi con i protagonisti e di riconoscere, nelle loro esperienze, elementi simili ai propri percorsi di apprendimento. È auspicabile in tal senso che gli scienziati e le scienziate diventino dei modelli di riferimento con cui studenti e studentesse possano identificarsi e stabilire una connessione emotiva (Lin-Siegler et al. 2016; Jaber & Hammer 2016b). È in quest'ottica che studi come quello qui proposto hanno un valore didattico, poiché pongono al centro dell'indagine la vulnerabilità e in generale l'umanità dello scienziato, che si manifesta nello sperimentare un ampio spettro di emozioni, le quali assumono un ruolo significativo nell'indagine scientifica (Silva 2022; Kyza et al. 2025).

Sul piano epistemologico, il valore offerto da uno studio di questo genere risiede nella possibilità di osservare la conoscenza scientifica nel suo costruirsi attraverso le pratiche epistemiche di coloro che hanno contribuito al progresso, mettendo in luce il rapporto tra la dimensione cognitiva e quella emotiva. L'analisi delle testimonianze degli scienziati circa il loro operato e il relativo stato d'animo permette di ricostruire le complesse dinamiche epistemiche caratterizzate da incertezze, contraddizioni, tentativi e dibattiti. La storia della fisica, in questa prospettiva, non costituisce una fonte di esempi o aneddoti sulle vite personali degli scienziati, ma un prezioso strumento con il quale indagare la natura stessa della conoscenza scientifica e i processi mediante i quali essa viene generata (Stanley 2016).

Come osserva Pussetti, una metodologia utile per accedere alle riflessioni che i soggetti elaborano sulla propria esperienza e sulla propria espressione emozionale consiste nell'utilizzo di testimonianze orali e narrazioni autobiografiche, raccolte ad esempio mediante interviste. L'interesse in questo tipo di ricerca non consiste tanto nell'indagare stati interiori inconsci, quanto nel cogliere le concezioni e le riflessioni che gli individui formulano in merito alla propria esperienza emotiva (Pussetti 2011). Le interviste costituiscono pertanto una fonte privilegiata per esplorare la dimensione emotivo-epistemica dell'attività scientifica. Nel prossimo paragrafo vengono presentate le interviste che sono state utilizzate come corpus di analisi per lo studio delle emozioni epistemiche di Bohr.

2.3 Presentazione del corpus di analisi

La fonte da cui ho reperito le interviste analizzate è l'AIP: American Institute of Physics. Si tratta di un'organizzazione scientifica statunitense fondata nel 1931, originariamente per sopperire alla carenza di finanziamenti per la ricerca causata dalla Grande Depressione. I principali esponenti della fisica statunitense, con il sostegno economico della Chemical Foundation, fondarono un'organizzazione per "il progresso e la diffusione della conoscenza della fisica e della sua applicazione al benessere umano". L'obiettivo dell'AIP è dunque quello di promuovere, diffondere e servire le scienze fisiche a beneficio dell'umanità. Gli Archivi per la Storia della Fisica Quantistica comprendono, tra i materiali della loro collezione di storia orale, registrazioni e trascrizioni di interviste condotte con circa un centinaio di fisici atomici e quantistici. I temi trattati riguardano il contesto familiare dei soggetti intervistati, l'origine del loro interesse per la fisica, la formazione ricevuta, le figure che hanno maggiormente influenzato il loro percorso scientifico e le loro carriere. Vengono inoltre discusse le influenze sociali sulle attività di ricerca e il quadro della fisica atomica, nucleare e quantistica nel periodo in cui essi lavorarono. Le discussioni su questioni scientifiche si riferiscono a lavori svolti nei primi tre decenni del XX secolo, con particolare attenzione alla scoperta e all'interpretazione della meccanica quantistica negli anni Venti.³

Il mio studio è incentrato sulla figura di Niels Bohr. I testi studiati e analizzati sono quattro delle cinque interviste condotte dai fisici e storici della scienza T. Khun, L. Rosenfeld, E. Rudinger e A. Petersen allo scienziato danese tra il 31 ottobre e il 17 novembre del 1962. A questi ho deciso di aggiungere anche alcune interviste effettuate a Werner Heisenberg da T. Kuhn e J. Heilbron tra novembre dello stesso anno e luglio dell'anno successivo: in particolare, delle tredici interviste ad Heisenberg sono state esaminate le interviste I, IV, VI, VIII, IX, X, XI, XII. Questa scelta è motivata dalla preziosità di informazioni ricavate dai racconti del fisico tedesco, essendo stato a stretto contatto con Bohr per circa vent'anni. I due, infatti, si conobbero a Gottinga durante una conferenza nel 1922 e due anni dopo Heisenberg si trasferì a Copenhagen dove cominciò a lavorare presso l'istituto di Bohr, dando inizio a una collaborazione particolarmente fruttuosa. Heisenberg trovò in Bohr una personalità affascinante e stimolante per il suo modo di riflettere e discutere circa le questioni della allora nascente meccanica quantistica.

In questo contesto, le testimonianze di Heisenberg risultano particolarmente significative, poiché permettono di integrare una prospettiva esterna nella comprensione della figura e del

³ American Institute of Physics, *Archive for History of Quantum Physics Oral History Collection*, Niels Bohr Library & Archives.

ruolo scientifico di Bohr. Attraverso il confronto tra queste diverse fonti, è possibile ricostruire non solo aspetti biografici, ma anche le dinamiche intellettuali e relazionali che hanno caratterizzato lo sviluppo della meccanica quantistica. Le interviste, infatti, non si limitano a fornire dati storici, ma offrono uno spaccato del modo in cui Bohr affrontava emotivamente i problemi scientifici, privilegiando il dialogo e il confronto critico. Questo approccio emerge vividamente nei ricordi di Heisenberg, che sottolinea come le discussioni con Bohr fossero spesso lunghe e complesse, ma al tempo stesso fondamentali per chiarire concetti teorici ancora in fase di definizione. Il rapporto tra i due fisici rappresenta un caso particolarmente interessante per riflettere sul ruolo che le relazioni interpersonali possono assumere nei processi di costruzione della conoscenza scientifica. La collaborazione tra i due fu caratterizzata da un confronto continuo e da una profonda sintonia intellettuale, che consentiva a ciascuno di comprendere e valorizzare le idee e le intuizioni dell'altro. In relazioni intellettuali di questo genere può svilupparsi una forma di “empatia epistemica”, definita da Jaber et al. (2024) come “la capacità di sintonizzarsi e apprezzare l’esperienza intellettuale ed emotiva altrui nell’ambito di un’attività epistemica, ovvero un’attività incentrata sulla costruzione, il perfezionamento e la critica delle affermazioni di conoscenza all’interno di una disciplina” (Jaber et al. 2024, p. 143). Tale forma di empatia può quindi esercitare un’influenza diretta sul percorso stesso della ricerca scientifica, incidendo significativamente sui processi di costruzione della conoscenza: questo è parte di ciò che emerge dalle interviste ad Heisenberg, le cui parole su Bohr riflettono tale dinamica di empatia epistemica che orienta l’attività di ricerca. L’analisi congiunta di questi materiali consente quindi di mettere in luce il ruolo centrale di Bohr non solo come scienziato, ma anche come guida intellettuale per una generazione di fisici. Allo stesso tempo, permette di evidenziare come il contributo di figure come Heisenberg sia stato strettamente intrecciato a questo contesto di collaborazione e scambio continuo. In definitiva, l’obiettivo di questo studio è quello di esaminare tali fonti per comprendere a fondo la figura di Bohr e il ruolo giocato dalle sue emozioni epistemiche nel processo di elaborazione teorica che ha portato alla formulazione della meccanica quantistica.

I periodi temporali a cui si riferiscono i soggetti intervistati sono differenti: a Bohr vengono poste domande relative alla fase immediatamente successiva al suo dottorato, in particolare agli anni 1911-1914, nei quali formula il suo modello atomico, presentato nella famosa trilogia *On the constitution of atoms and molecules* del 1913. Heisenberg, invece, è testimone dello stato della fisica quantistica negli anni Venti e, in particolare, per ciò che concerne il presente studio, dello stato emotivo di Bohr in quel periodo di forti cambiamenti.

Sin dall'inizio dello studio, è stato necessario tener presente che le fonti di riferimento, essendo trascrizioni di interviste registrate, non sono state concepite come un prodotto di letteratura scientifica; in quanto fonti non coeve, non è assicurata la massima completezza e accuratezza. Inoltre, dal momento che le interviste sono state condotte a Bohr e ad Heisenberg separatamente, i campioni di dati sono intrinsecamente diversi. Non soltanto per la differenza di arco temporale discusso, ma anche perché mentre Bohr parla in prima persona, Heisenberg offre il suo personale punto di vista sullo scienziato danese, in particolare sul suo stato emotivo per ciò che riguarda questa analisi. Si tratta dunque di due livelli diversi di testimonianza: uno diretto e autobiografico, l'altro mediato, interpretativo e soggetto a possibili *bias* della prospettiva. Un altro filtro che si aggiunge è dato dal fatto che i soggetti intervistati discutono di eventi che risalgono a più di quaranta anni prima rispetto al momento dell'intervista; questo potrebbe costituire un secondo *bias*, cioè il passato potrebbe aver subito distorsioni nel modo in cui è stato ricordato. Dunque, non si possono ritenere i ricordi delle guide completamente affidabili per eventi così lontani nel tempo. Ciononostante, le interviste in esame si sono rivelate un terreno particolarmente fertile per il mio studio, anche e soprattutto per il taglio impostato dagli intervistatori, i quali hanno posto varie domande interessate all'aspetto emotivo della ricerca oltre alla narrazione dei fatti, di cui ne riporto alcune a titolo di esempio: "Ha parlato anche di come si sentiva riguardo alla questione?", "ti sei preoccupato di...?", "quante persone [...] rimasero profondamente turbate?", "Anche Bohr ne fu molto impressionato?".

Questo ha senza dubbio facilitato la costruzione della lente di indagine per analizzare le interviste, la quale è proprio orientata alla dimensione affettiva; più precisamente, si va a indagare quello "spazio" che vede l'intersezione tra la dimensione affettiva e quella epistemica. Alla luce di queste considerazioni, le interviste a Bohr e ad Heisenberg possono essere considerate un corpus adatto per indagare la dimensione emotivo-epistemica della costruzione della meccanica quantistica. Il capitolo successivo presenterà dunque la metodologia adottata per l'analisi del materiale testuale e per la successiva mappatura delle emozioni epistemiche.

Capitolo 3

L'impostazione metodologica dello studio

Con il presente capitolo si entra nel vivo dell'analisi del corpus di interviste selezionato, con l'obiettivo di esplorare il profilo emotivo-epistemico che emerge dal racconto retrospettivo di Bohr e dalle testimonianze di Heisenberg relative ai momenti cruciali dello sviluppo della teoria quantistica. Lo studio è stato strutturato come un percorso articolato in più fasi, che coinvolgono strumenti qualitativi e quantitativi, al fine di restituire una comprensione il più possibile ricca e sfaccettata del materiale raccolto. Dapprima sono state analizzate le interviste individualmente ricercando segmenti testuali dal valore emotivo-epistemico, successivamente sottoposti a un'attività di *labeling* mediante l'associazione di una o più emozioni epistemiche. L'analisi è poi proseguita con una *thematic analysis*, finalizzata a interrogare il materiale testuale in maniera più approfondita, ricercando pattern ricorrenti, nuclei di significato e strutture interpretative capaci di spiegare a cosa si ricolleghino le emozioni epistemiche individuate e in quali contesti epistemici esse prendano forma. L'obiettivo complessivo non è dunque soltanto identificare quali emozioni epistemiche emergano nei testi, ma comprendere anche il loro ruolo all'interno dell'esperienza cognitiva e scientifica di Bohr, mettendo in luce il rapporto tra vissuto emotivo, costruzione teorica e pratica della ricerca.

3.1 Analisi testuale individuale e operazione di *labeling*

I testi analizzati sono quattro interviste condotte a Bohr e otto ad Heisenberg. Il primo passo è stato quello di andare a individuare nel testo delle espressioni linguistiche che veicolassero delle emozioni legate alla ricerca scientifica. Queste espressioni linguistiche vengono chiamate “espressioni stimolo” perché sono utilizzate per elicitare, riconoscere e associare un'emozione epistemica specifica (Riccioni 2024). La modalità attraverso cui cercare nel testo questo tipo di espressioni ha previsto l'utilizzo di tre marker, ovvero delle caratteristiche che offrono dei criteri per discriminare tra le varie espressioni quelle che hanno una natura che rientra nella dimensione emotivo-epistemica. In particolare, i marker su cui mi sono basata sono quelli generati da Francesca Riccioni nella sua tesi di laurea magistrale, intitolata “Mappatura emozionale della genesi della teoria della relatività ristretta”:

1. Marker A: *sound* emotivo

Si sono cercate quelle espressioni stimolo che fornivano in maniera esplicita delle emozioni, come ad esempio: **interessato, infelice, gioia, preoccupato, ansioso**.

2. Marker B: contestualità epistemica radicata nel contesto epistemico - disciplinare - scientifico

Attraverso il Marker B si va ad effettuare una selezione più precisa filtrando quelle espressioni stimolo individuate dal Marker A, in maniera tale che si considerino valide per il presente studio esclusivamente quelle legate alla ricerca scientifica, dunque quelle che portano con sé la disciplina, il lato “epistemico” delle espressioni ricercate. Il Marker B serve quindi a contestualizzare l’emozione individuata facendo affidamento a ciò che riguarda la conoscenza. Inoltre, può essere utile laddove un’espressione di carattere evidentemente epistemico celi implicitamente un lato emotivo. Un esempio di questo genere di espressioni stimolo è: “era una cosa ovvia che l’atomo di Rutherford fosse instabile”, dove si può notare facilmente che nel discutere di un argomento di ricerca, quale il modello atomico planetario, traspare un senso di convinzione/certezza appartenente alla dimensione emotiva del soggetto, più precisamente nella parola **ovvia**.

3. Marker C: fluidità sintattica

Questo Marker è necessario per la tipologia di indagine condotta e per il carattere qualitativo dei dati, ovvero le espressioni stimolo. È necessario avere, oltre a un “filtro” psicologico rappresentato dal Marker A e uno epistemico quale il Marker B, un criterio con il quale ci si possa svincolare dalla rigida struttura sintattica e diventi possibile una perlustrazione più fluida. Avere dei dati così eterogenei e non strutturati richiede un’analisi che poggi su una buona conoscenza della disciplina e dei temi affrontati, in maniera tale che si possa raggiungere quello che risulta essere la chiave per estrapolare informazioni riconducibili a emozioni epistemiche: empatizzare con lo scienziato. Solo mettendosi nei panni di Bohr e conoscendo le fasi del suo studio personale e lo stato della fisica dell’epoca è stato possibile individuare nei testi quelle espressioni linguistiche, divenute “stimolo”, da elevare a dati dell’analisi.

Dunque, la lente di lettura attraverso cui sono state esaminate le interviste è costituita dai tre marker appena esplicitati. Un’espressione individuata da uno dei marker diventa un’ottima candidata per ritenerla “espressione stimolo” dello studio, soprattutto se rispecchia le caratteristiche proprie di un’intersezione tra i marker. Stare nella disciplina, quindi effettuare un’analisi al contempo linguistica e scientifica, consente di poter muoversi agilmente in testi come quelli esaminati nel presente studio, che non sono opere letterarie, bensì trascrizioni di interviste informali; un terreno così fluido e dinamico richiede una certa solidità nell’analisi,

data per l'appunto dai criteri stabiliti dai marker e dalla conoscenza dei contenuti scientifici discussi.

Questi ultimi, come anticipato prima, riguardano due periodi cruciali della vita scientifica di Niels Bohr: la nascita del modello atomico e la fase embrionale dell'interpretazione di Copenhagen della meccanica quantistica. Di seguito si riportano i macro-contenuti delle interviste per dare un'idea iniziale del contesto della scoperta; una trattazione più approfondita verrà effettuata in una fase successiva dello studio. Prima, però, è opportuno fornire alcune precisazioni: nell'elenco puntato che riassume i contenuti delle interviste il numero identifica l'intervista, mentre la lettera B/H indica il soggetto intervistato, con evidente riferimento a Bohr e Heisenberg⁴.

Le interviste ad Heisenberg sono molto dense e ricche di riferimenti che interessano vari scienziati; dunque, ai fini di illustrare i relativi temi discussi, sono stati considerati soltanto i passaggi che vedevano Bohr come protagonista. Per ragioni espositive, queste interviste sono state accorpate in due gruppi: uno comprende la prima, la quarta e la sesta, l'altro riunisce le restanti, dall'ottava alla dodicesima.

Si procede ora a una sintesi dei contenuti delle interviste.

- Intervista 1B: Bohr inizia a raccontare il suo lavoro a partire dal 1911, anno in cui consegue il dottorato in fisica con una tesi sulla teoria elettronica dei metalli. Iniziò ad interessarsi alla teoria quantistica con lo studio della legge di Planck per lo spettro del corpo nero; un anno dopo conobbe Rutherford e il suo modello atomico, la cui instabilità lo spinse a pensare a un modello che resolvesse questo problema. Lo studio della struttura atomica gli chiarì le idee sulle leggi di spostamento radioattivo, l'esistenza degli isotopi e la formazione degli spettri atomici. In sintesi, l'intervista mostra alcuni punti fondamentali nel passaggio dalla fisica classica alla *old quantum physics*: un processo fatto di intuizioni e nuove interpretazioni dei dati sperimentali.
- Intervista 2B: Bohr racconta la sua esperienza poco soddisfacente a Cambridge, dove lavorava con Thomson, con cui non riuscì a instaurare un buon rapporto. Decise quindi di trasferirsi a Manchester per lavorare con Rutherford; lì, grazie anche al contributo di Hevesy, sviluppò rapidamente l'idea degli isotopi, comprendendo che le proprietà chimiche dipendono dagli elettroni mentre le differenze di massa riguardano il nucleo.

⁴ In seguito, ci si riferirà alle espressioni stimolo raccolte dalle interviste "B" e "H" come, rispettivamente, *set 1* e *set 2*.

Questa intuizione chiarì la legge di spostamento radioattivo e mise in discussione il ruolo dei pesi atomici. Bohr si convinse profondamente della validità del modello nucleare di Rutherford, pur riconoscendone l'instabilità nella fisica classica, che richiedeva un cambiamento teorico radicale. Lavorò quindi per integrare queste idee con la teoria quantistica. Viene sottolineato anche il ruolo delle discussioni con altri scienziati, tra cui Moseley, contribuendo all'affermazione del numero atomico come principio fondamentale per ordinare gli elementi. In sintesi, l'intervista mostra come, nelle prime settimane a Manchester, Bohr sviluppò intuizioni decisive su isotopi, struttura atomica e superamento della fisica classica.

- Intervista 3B: Bohr racconta le difficoltà incontrate dopo la pubblicazione del suo primo articolo, inizialmente accolto con scarso interesse e, soprattutto a Göttinga, persino ostilità. Sottolinea come molti non avessero compreso il senso del suo lavoro, in particolare il ruolo del principio di corrispondenza. Riflette anche sul rapporto con Rutherford, di cui riconobbe la forte personalità, ma osserva che non era particolarmente interessato alla teoria quantistica. Bohr evidenzia come, a Manchester, non esistesse una visione chiara della struttura dettagliata dell'atomo, e come fosse stato lui a comprendere pienamente l'instabilità del modello classico. Ripercorre poi i dubbi iniziali riguardo ai lavori di Nicholson, superati progressivamente, e sottolinea il ruolo centrale degli isotopi e degli spettri atomici. In particolare, lo spettro dell'idrogeno rappresentò una svolta decisiva, permettendogli di "leggere" la struttura dell'atomo.
- Intervista 4B: Bohr riflette sullo sviluppo delle sue idee dopo il 1913, sottolineando l'importanza dell'articolo di Einstein del 1917, che introdusse un approccio probabilistico alle transizioni atomiche, in continuità con le sue intuizioni sugli spettri. Tuttavia, Bohr afferma che inizialmente non pensava in termini probabilistici, ma era convinto della correttezza del suo modello. Evidenzia come fenomeni come gli spettri dell'idrogeno e dell'elio fossero per lui immediatamente chiari, mentre altri scienziati restavano scettici. Sottolinea il ruolo della correzione dovuta alla massa del nucleo per spiegare piccole differenze tra spettri simili, collegandola anche al concetto degli isotopi. Il lavoro sperimentale, in particolare quello di Moseley, contribuì a rafforzare queste idee. Bohr racconta anche i tentativi di spiegare gli effetti Stark e Zeeman, mostrando come il suo modello potesse fornire risultati almeno qualitativi. Ribadisce che la comprensione della struttura atomica doveva emergere dallo studio degli spettri e che, nonostante le difficoltà teoriche, era profondamente convinto di essere sulla strada giusta.

- Interviste 1 – 4 – 6H: Heisenberg mette in luce le profonde differenze tra Bohr e Arnold Sommerfeld nel modo di affrontare le difficoltà della prima teoria quantistica. Mentre Sommerfeld appare tollerante verso le incoerenze, fiducioso che possano essere risolte in futuro, Bohr è descritto come profondamente inquieto e insoddisfatto, costantemente impegnato a raggiungere una piena chiarezza concettuale. Heisenberg insiste sul fatto che Bohr soffriva per le contraddizioni della teoria, vivendo una tensione continua tra il grande successo empirico (come nel caso dell'effetto Stark o del sistema periodico) e la consapevolezza della sua insufficienza teorica. Questo atteggiamento si riflette nel suo metodo, fondato sul dialogo serrato, sull'analisi critica e sulla ricerca di concetti adeguati prima ancora che di formalismi matematici. Rispetto all'approccio più matematico di Born e a quello più accomodante di Sommerfeld, Bohr privilegiava una riflessione di tipo quasi filosofico, volta a comprendere come la natura potesse evitare contraddizioni e paradossi come il dualismo onda-particella. Heisenberg sottolinea inoltre il ruolo dell'intuizione e dell'immaginazione di Bohr, capaci di orientare la ricerca pur in assenza di dimostrazioni rigorose. Questo insieme di tensione emotiva, esigenza di chiarezza e apertura ai problemi irrisolti costituisce, secondo Heisenberg, il tratto distintivo dell'ambiente di Copenaghen e un elemento decisivo per la nascita della nuova meccanica quantistica.
- Interviste 8 – 9 – 10 – 11 – 12H: Heisenberg approfondisce il modo in cui Bohr affrontò la costruzione e l'interpretazione della meccanica quantistica dopo l'elaborazione dei nuovi formalismi matematici. Pur riconoscendo l'enorme importanza della meccanica delle matrici e della meccanica ondulatoria, Bohr rimase inquieto di fronte al fatto che il formalismo non risolvesse automaticamente il problema del linguaggio e della comprensione concettuale. Per lui, infatti, non bastava ottenere risultati corretti: era necessario chiarire come la natura potesse evitare vere contraddizioni. Heisenberg sottolinea la distinzione tra "incoerenza" e "paradosso": la prima rende una teoria insostenibile, mentre il secondo può essere accettato se inserito in un quadro teorico coerente. Le discussioni con Schrödinger, Einstein, Pauli e lo stesso Heisenberg mostrano un Bohr ancora tormentato dalla necessità di trovare parole adeguate per descrivere fenomeni che sfuggivano ai concetti classici. In questo contesto maturarono il principio di indeterminazione e la complementarità, ma anche dopo il 1927 Bohr continuò a interrogarsi sui problemi di misura e sul rapporto tra conoscenza, linguaggio e realtà fisica. Il quadro che emerge è quello di uno scienziato guidato da una profonda

esigenza di chiarezza, ma anche da un'inquietudine epistemica costante, capace di trasformare il disagio teorico in uno stimolo decisivo per la ricerca.

Una volta selezionate le espressioni stimolo nelle diverse interviste, la fase successiva ha previsto l'assegnazione di un'emozione epistemica a ciascuna espressione, sulla base della definizione di emozione epistemica costruita operativamente da F. Riccioni:

“Le emozioni epistemiche sono dunque quelle emozioni che intervengono nei processi cognitivi e che spesso costituiscono rinforzo o deterrente nella volontà dell'individuo di proseguire nell'apprendimento e, più in generale, nel processo di ricerca, comprensione e costruzione del sapere”. (Riccioni 2024, p. 50)

Per la scelta delle emozioni epistemiche si è fatto riferimento alla lista stilata dalla Dott.ssa Riccioni, che comprende un totale di ventisei emozioni, elencate nella seguente tabella:

Emozioni Epistemiche
Ammirazione
Ansia
Concentrazione
Confusione
Convinzione/Certezza
Curiosità
Determinazione
Divertimento
Esitazione
Euforia
Frustrazione
Gioia
Gratitudine
Incertezza
Incredulità
Insoddisfazione
Interesse

Meraviglia
Ottimismo
Passione
Perplessità
Pessimismo
Preoccupazione
Soddisfazione
Sorpresa
Tormento/Inquietudine

Tabella 1: Lista delle emozioni epistemiche.

Come spiegato dalla Dott.ssa nella sua tesi di laurea magistrale, “la lista è stata costruita, in prima istanza, con emozioni epistemiche che classicamente vengono utilizzate in letteratura, in sinergia con l’interrogazione dell’intelligenza artificiale rispetto a emozioni che intervengono in processi di problem solving” (Riccioni 2024, p. 65). Nella fase di *labeling*, ovvero di associazione di un’emozione epistémica della lista ad ogni espressione stimolo, si è sentita l’esigenza di ampliare l’elenco aggiungendo l’emozione epistémica “fiducia”. Tramite l’utilizzo dei marker sono state individuate alcune espressioni che avevano un *sound* emotivo riconducibile a una sorta di *feeling of direction* (Riccioni 2024), a sua volta associata al concetto di fiducia epistémica. Le espressioni stimolo che hanno mostrato questo tono comune hanno subito condotto al senso di fiducia, senza la necessità di consultare la lista di emozioni. In altre parole, a sollecitare l’aggiunta di un’altra emozione epistémica alla lista non è stata l’assenza di un’opzione adatta per il tipo di espressioni stimolo a cui ci riferisce, bensì la spontanea e naturale associazione personale della *fiducia* alle espressioni incentrate da un punto di vista semantico e concettuale a un senso di “sentire” o “credere” in qualcosa anche senza avere certezze. Concentrandosi dunque su come il linguaggio veicola un concetto o un’idea, espressioni del tipo:

- “uno semplicemente andava, anche senza crederci, al caso in cui...”
- “si sentiva che si poteva, usando la teoria quantistica in qualche modo, farne uscire qualcosa”
- “ho sentito che c’era una possibilità che fosse sicuramente giusto”
- “lui semplicemente sapeva che doveva esserci una connessione”
- “lui sentiva in maniera davvero forte che ci dovesse essere qualcosa lì”

risultano intrise di una sensazione mista a speranza, ottimismo e sicurezza, proprio come la fiducia. Un approfondimento più dettagliato della nuova emozione epistemica sarà affrontato in una fase successiva dell'analisi, quando sarà necessario valutarla in termini di valence e arousal (Russell 1980).

L'operazione di *labeling* prevedeva inizialmente l'associazione di una sola emozione epistemica ad ogni espressione stimolo, ma durante il processo per alcune espressioni non è stato facile limitarsi a una singola categoria. Instaurare una connessione tra un'espressione linguistica e un'emozione epistemica è già di per sé un'operazione soggettiva e delicata, guidata da un sentire e un intuire personali. Il dialogo tra il testo e il lettore che lo analizza non è un'attività oggettiva, è invece influenzata dalla struttura cognitiva e psicologica di chi conduce la ricerca (Russell 1980; Saldaña 2013). Per questo motivo ho lasciato spazio a più di un'emozione epistemica per quelle espressioni stimolo che richiedevano una maggiore flessibilità e uno sguardo più ampio nel trovare un posto tra le categorie di emozioni epistemiche.

Il passo successivo è stato contare la frequenza con cui si presentava ciascuna emozione: laddove per una singola espressione siano state associate due emozioni epistemiche invece di una sola, non è stata contata la coppia, bensì si è sommata un'unità alle singole categorie di emozioni. In altre parole, se ad esempio ad una espressione è stato associato sia *determinazione* sia *interesse*, non è stata contata una volta la coppia "determinazione-interesse", ma è stato aggiunto 1 alla frequenza di *determinazione* e 1 alla frequenza di *interesse*. In questo modo la somma totale delle emozioni epistemiche individuate risulta maggiore del totale delle espressioni stimolo. Esplicitando i valori numerici, per le interviste a Bohr sono state estrapolate 117 espressioni stimolo, per un totale di 123 emozioni epistemiche, mentre per le interviste ad Heisenberg si hanno 76 espressioni stimolo e 86 emozioni epistemiche. In realtà è da precisare che quattro delle espressioni e quattro delle relative emozioni del secondo set di dati (le interviste ad Heisenberg) appartengono al primo set (le interviste a Bohr), ma dal momento che si riferiscono al periodo degli anni Venti, sono state accorpate alle interviste condotte ad Heisenberg, poiché la distinzione tra i set è data dall'arco temporale discusso con gli intervistatori.

Dopo aver contato la frequenza con cui è comparsa ciascuna emozione, ho stilato per ciascun set una tabella di tutte le emozioni in ordine di frequenza decrescente e ho costruito dei diagrammi a torta per osservare le frequenze percentuali, che vengono mostrati di seguito.

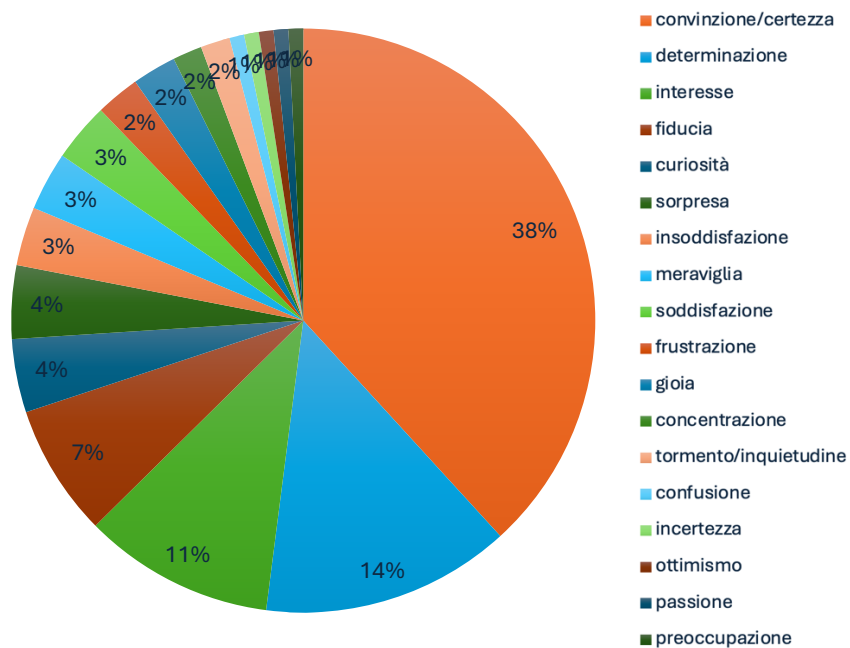


Figura 3: Diagramma a torta del set 1. Le diverse porzioni sono ordinate in senso orario a partire dalla sommità del diagramma e seguono l'ordine riportato nella legenda.

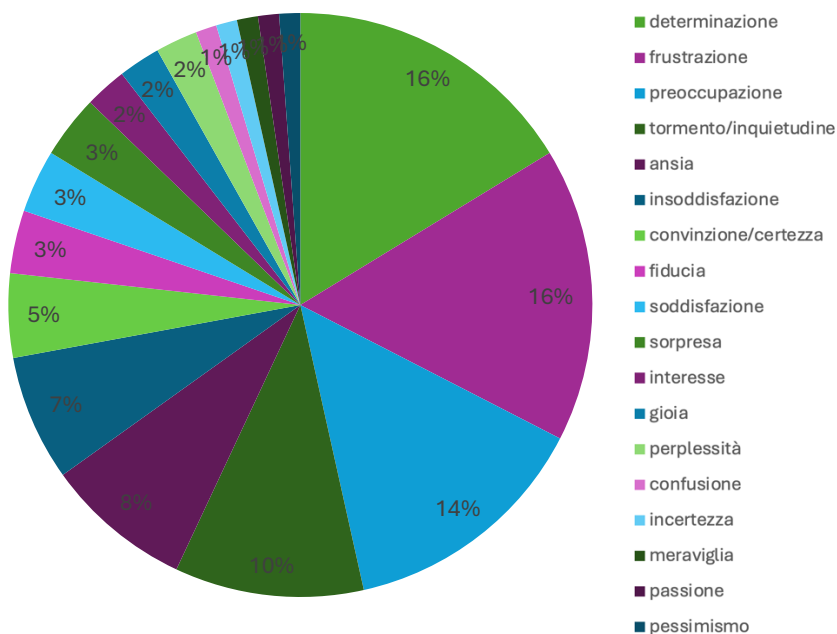


Figura 4: Diagramma a torta del set 2. Le diverse porzioni sono ordinate in senso orario a partire dalla sommità del diagramma e seguono l'ordine riportato nella legenda.

Osservando i diagrammi, si può notare facilmente una forte contrapposizione tra la valenza emotiva nei due periodi in esame. Il primo set, infatti, mostra una netta prevalenza di emozioni positive quali convinzione/certezza, interesse, fiducia; nel secondo set, invece, le percentuali

maggiori sono attribuite a frustrazione, preoccupazione, tormento/inquietudine, ansia. È da notare che la determinazione si configura in entrambi i set come una *dispositional mental state* (Riccioni 2024) o *trait emotion* (Shuman & Scherer 2014), ricoprendo una sezione importante in entrambi i diagrammi, con un 14% nel primo e un 16% nel secondo. Ciò sta a significare che, nonostante complessivamente lo stato emotivo di Bohr sia notevolmente cambiato tra i primi anni della sua carriera da scienziato e il decennio successivo, il sentimento di determinazione è rimasto costante, accompagnandolo in ogni fase della sua ricerca. Nel caso di Niels Bohr, l'emozione epistemica della determinazione sostiene e orienta l'attività di ricerca, configurandosi come un elemento centrale della sua sfera emotiva. Essa si manifesta sia nei momenti di fiducia, sicurezza e soddisfazione, sia nelle fasi più critiche, caratterizzate da frustrazione, inquietudine e preoccupazione. Si potrebbe sostenere dunque che la determinazione sia stato un tratto distintivo della personalità di Bohr, che ha permeato la sua struttura cognitiva ed epistemica guidandolo nel suo studio della natura.

Guardando ai due archi temporali in esame e posto che la determinazione sia l'unica emozione epistemica ad essersi mantenuta stabile e persistente, è interessante chiedersi a questo punto perché la condizione emotivo-epistemica dello scienziato sia cambiata così tanto nell'arco di un decennio.

3.2 Thematic analysis

La domanda di ricerca in questa fase è: a cosa si ricollegano le diverse emozioni epistemiche? In altre parole, ci si chiede cos'è che ha suscitato in Bohr un'emozione piuttosto che un'altra nelle varie fasi della sua ricerca?

Per rispondere a tale domanda ho utilizzato la metodologia della *thematic analysis*, formalizzata e sistematizzata da V. Braun e V. Clarke nel loro articolo *Using thematic analysis in psychology*. La *thematic analysis* è un metodo analitico qualitativo, ampiamente utilizzato in psicologia, che offre un approccio teoricamente fondato, benché flessibile, all'analisi di dati qualitativi (Braun & Clarke 2006). I dati della presente ricerca, essendo espressioni linguistiche, sono dati qualitativi che richiedono procedure codificate di triangolazione per controllarne la significatività e rendere il processo di analisi trasparente e controllabile dall'esterno (Braun & Clarke 2006). È dunque parte del processo l'esplicitazione delle scelte che si compiono nell'applicazione del metodo (Braun & Clarke 2006; Saldaña 2013). Prima di entrare nel merito dell'analisi della presente ricerca, descriverò le sei fasi che costituiscono la struttura della metodologia utilizzata, illustrate nella seguente tabella.

Phase	Description of the process
1. Familiarizing yourself with your data:	Transcribing data (if necessary), reading and re-reading the data, noting down initial ideas.
2. Generating initial codes:	Coding interesting features of the data in a systematic fashion across the entire data set, collating data relevant to each code.
3. Searching for themes:	Collating codes into potential themes, gathering all data relevant to each potential theme.
4. Reviewing themes:	Checking if the themes work in relation to the coded extracts (Level 1) and the entire data set (Level 2), generating a thematic 'map' of the analysis.
5. Defining and naming themes:	Ongoing analysis to refine the specifics of each theme, and the overall story the analysis tells, generating clear definitions and names for each theme.
6. Producing the report:	The final opportunity for analysis. Selection of vivid, compelling extract examples, final analysis of selected extracts, relating back of the analysis to the research question and literature, producing a scholarly report of the analysis.

Tabella 2: Le sei fasi della *thematic analysis*. Fonte: Braun & Clarke, *Using thematic analysis in psychology*, 2006.

Il primo step coincide con il passo effettuato al principio del presente studio, ovvero la lettura delle interviste e l'estrapolazione dei dati, rappresentati dalle espressioni stimolo. Una volta aver raccolto i dati, ancora prima di associare un'emozione epistemica a ciascuno di essi, ho strutturato una tabella nella quale ho annotato accanto ad ogni espressione il contesto in cui era immersa, quindi il significato che assumeva in quel preciso punto dell'intervista, oltre al periodo storico di riferimento. In questa maniera, leggendo più volte le espressioni selezionate, collocandole nel contesto della scoperta e dell'intervista, è stato possibile familiarizzare con i dati e selezionare quelle espressioni linguistiche candidate ad essere espressioni stimolo che andavano "raccolte" e quelle che invece era più opportuno scartare.

La generazione dei codici iniziali nella *thematic analysis* consiste nell'identificare caratteristiche dei dati, da un punto di vista semantico oppure considerando significati latenti, che risultano interessanti e utili ai fini della ricerca condotta. In generale, il *coding* consiste nell'identificare ed etichettare segmenti di testo che contengono informazioni rilevanti rispetto alla ricerca. Ogni etichetta o "codice" rappresenta un concetto, un tema potenziale o una caratteristica dei dati. Esistono principalmente due modi di effettuare questo processo: uno induttivo (bottom-up) e uno deduttivo (top-down). L'approccio induttivo consiste nel fatto che le caratteristiche identificate sono fortemente connesse ai dati stessi (Patton 1990), ovvero i codici emergono dai dati senza categorie predefinite. Viceversa, nella maniera "top-down", i codici si basano su teorie, concetti o domande di ricerca definiti in partenza. La scelta tra un approccio induttivo e uno teorico riguarda la domanda di ricerca e il motivo per cui si codificano i dati (Braun & Clarke 2006). Nel caso dello studio delle emozioni epistemiche di Bohr, la fase di coding dei dati è stata di tipo deduttivo, dal momento che, come già detto, la lettura e l'analisi

delle espressioni stimolo sono state effettuate alla luce della domanda: “a quale emozione epistemica rimanda questa espressione?”. Tale domanda è stata costruita a partire da uno studio precedente (Ricconi 2024) che aveva individuato una prima lista di emozioni: per questo motivo, ero partita dall’idea che il secondo step della Tabella 2 corrispondesse all’operazione di *labeling* usando i codici già generati nel lavoro di Ricconi (2024), ovvero l’associazione di una o più emozioni epistemiche alle espressioni stimolo che costituiscono il set di dati. Le etichette, dunque, in questo caso sono proprio le emozioni epistemiche. Nel terzo passo in Tabella 2 si è reso necessario un lavoro bottom-up sul testo: invece di raccogliere i codici in potenziali temi – come generalmente previsto dalla *thematic analysis* – si è avviato un processo di ricerca dei temi direttamente dai dati. Ciò è dovuto al fatto che in questo caso la generazione di temi può aver luogo soltanto cercando pattern e nuclei di senso più ampi direttamente tra le espressioni stimolo; naturalmente, si è tenuto in considerazione anche il contesto da cui esse sono state estratte, in maniera tale da avere una comprensione più accurata del significato assunto dalle espressioni nel quadro discorsivo dell’intervista.

L’apporto personale compiuto all’interno della metodologia, non previsto dunque a priori da una delle fasi, è consistito nel creare una circolarità dinamica tra i dati, i codici e i temi. Mentre in generale la *thematic analysis* può essere visto come un processo lineare del tipo:

$$\text{dati} \rightarrow \text{codici} \rightarrow \text{temi}$$

nel presente studio si intende ottenere una struttura ciclica e più dinamica. In Figura 5 viene rappresentata visivamente quest’idea.

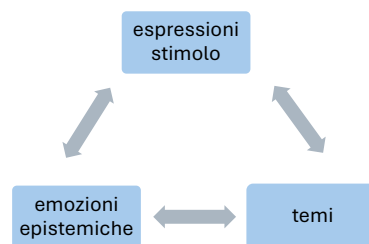


Figura 5: Rappresentazione della dinamica circolare tra espressioni stimolo, emozioni epistemiche e temi.

Ciò che è stato fatto, nel concreto, è consistito nel riordinare le espressioni stimolo raggruppandole secondo l’emozione epistemica a cui erano state associate, continuando a considerare separatamente i due set di dati (interviste a Bohr e interviste ad Heisenberg). In sostanza, ho elencato sotto ciascuna emozione tutte le espressioni stimolo ad essa riferite. In questo modo è stato più agevole cercare pattern ricorrenti o somiglianze all’interno di ciascun gruppo di emozioni: infatti, chiamando ad esempio un gruppo di emozioni “gruppo A”, è naturale che le espressioni stimolo appartenenti al gruppo A abbiano qualcosa in comune,

quantomeno per il fatto di essere state associate alla stessa categoria di emozione epistemica. Ciò non significa però che i temi generati siano confinati all'interno di ciascun gruppo, o in altri termini che a un tema corrisponda una sola emozione: per esempio, un pattern che si riconosce dentro al gruppo A, può essere riconosciuto anche nel gruppo B e/o nel gruppo C. È proprio in questa maniera che si viene a creare una circolarità tra dati, codici e temi. Per l'appunto, dare origine a dei temi non sulla base dei codici ma dei dati, quindi studiando le espressioni stimolo, restituisce automaticamente una connessione tra i temi stessi e i codici, alias le emozioni epistemiche.

Entrando più nel dettaglio della genesi dei temi, è importante insistere sul termine “generare” e non parlare di temi che “emergono” dai dati. Un resoconto dei temi che emergono o che vengono scoperti trasmette una rappresentazione passiva del processo di analisi, negando il ruolo attivo del ricercatore (Braun & Clarke 2006). È invece proprio chi conduce la ricerca che identifica schemi e produce dei temi, selezionando tra i dati ciò che è di interesse ai fini della ricerca. Ciò è possibile grazie al framework teorico che fornisce la base di partenza su cui progettare e sviluppare una ricerca. Infatti, conoscere la disciplina, ossia i contenuti di fisica affrontati nelle interviste, sapere che ruolo avesse lo scienziato nel contesto storico e sociale in cui si trovava e avere una solida lente di analisi con la quale esaminare i testi, consente di avere quella padronanza necessaria per addentrarsi in un campo così vasto e aperto a diverse interpretazioni.

Prima di passare in rassegna i temi generati per ciascun set di dati, è bene soffermarsi a specificare *cosa* sia un tema. In letteratura non ne esiste una definizione univoca, ma se ne parla in diverse maniere per esprimere in fin dei conti lo stesso concetto. Per Saldaña in generale un tema è una frase o una proposizione estesa che identifica di cosa tratta un'unità di dati e/o cosa significa (Saldaña 2013). DeSantis e Ugarriza propongono una definizione per cui “un tema è un'entità astratta che conferisce significato e identità a un'esperienza ricorrente (strutturata) e alle sue varie manifestazioni. In quanto tale, un tema cattura e unifica la natura o la base dell'esperienza in un insieme significativo” (DeSantis & Ugarriza 2000, p. 362). Al suo livello manifesto, un tema funziona come un modo per categorizzare un insieme di dati in “un argomento implicito che organizza un gruppo di idee ricorrenti” (Auerbach & Silverstein 2003, p. 38). E ancora, per Rubin e Rubin, i temi sono affermazioni in quanto (nel ruolo di) idee presentate dai partecipanti durante le interviste che riassumono ciò che sta accadendo, spiegano cosa sta succedendo o suggeriscono perché qualcosa viene fatto in un certo modo (Rubin & Rubin 2012). Butler-Kisber suggerisce che questo processo di generazione dei temi consiste nell'estrarre letteralmente “affermazioni significative” dai dati, “formulare significati” su di

essi attraverso le interpretazioni del ricercatore, raggruppare questi significati in una serie di temi organizzati e infine elaborare i temi attraverso una ricca descrizione scritta (Butler-Kisber 2010). L'obiettivo di questa terza fase della thematic analysis è quello di fornire, attraverso i temi proposti, una comprensione concettuale e teorica del fenomeno (Mishra e Dey 2022), dove per "fenomeno" in questo caso intendiamo il rapporto tra le espressioni stimolo e le emozioni epistemiche; nella presente ricerca si vuole comprendere, infatti, perché un'espressione stimolo è connessa a una determinata emozione, e qual è il tema generale in cui rientra l'espressione con la relativa "etichetta emotiva".

Nel capitolo seguente vengono riportati i risultati dell'analisi tematica. A questi seguiranno i risultati dell'analisi specifica mirata a perseguire l'obiettivo di questa tesi, ovvero mostrare come si configura la dinamica emozionale di Niels Bohr nei due periodi affrontati.

A questo fine è stato applicato il modello Circumplex Model of Affect progettato dallo psicologo James Russell negli anni Ottanta (Russell 1980), nella versione rielaborata da Riccioni. Per rendere più solida l'estrazione delle emozioni epistemiche sono stati coinvolti 26 studenti e studentesse del curriculum di Didattica e Storia della Fisica. Ulteriori aspetti metodologici di questa seconda fase saranno descritti nel capitolo 4.

Capitolo 4

Risultati

In questo capitolo si illustrano i risultati dell'analisi tematica, ovvero i temi generati per i due set di dati, e dell'analisi delle emozioni epistemiche mediante la survey.

4.1 Risultati della Thematic Analysis

Per quanto riguarda le interviste a Bohr, i temi che ho riconosciuto esaminando le espressioni stimolo sono i seguenti:

- A. Cambio di paradigma, la rinuncia della fisica classica
- B. Influenza dell'ambiente sociale nella ricerca
- C. Coerenza fra teoria e risultati sperimentali
- D. Orientamento verso specifici ambiti di studio

Invece, dalle interviste ad Heisenberg, i temi generati sono:

- E. Paradossi, contraddizioni e inconsistenze della old quantum physics
- F. Approccio epistemologico
- G. Ruolo costitutivo del linguaggio

È bene specificare che non tutte le espressioni stimolo sono rientrate in almeno uno dei temi. Per alcune di esse non sono stati individuati pattern significativi e di conseguenza non sono state ricondotte ad alcun tema. Le espressioni stimolo che non rientrano in alcun tema saranno comunque oggetto di indagine nelle fasi seguenti dello studio, al di fuori della *thematic analysis*. La mappa tematica che è consigliato strutturare nella fase 4 della Tabella 2 è mostrata di seguito. In verde sono evidenziati i temi del set 1, in azzurro i temi del set 2.

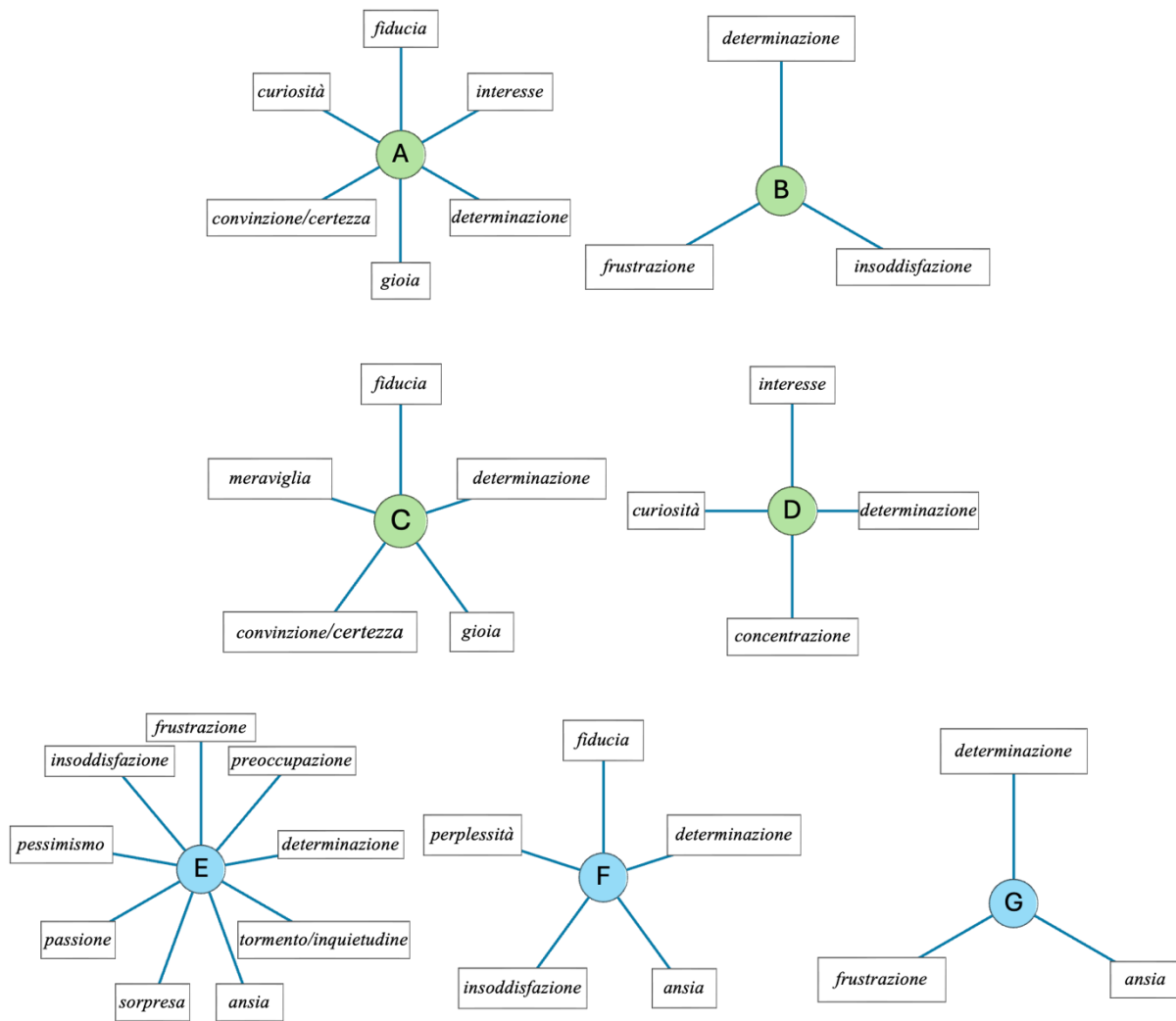


Figura 6: Mappa tematica.

In generale, secondo le procedure della *thematic analysis*, i temi vengono generati raggruppando i codici e di conseguenza la mappa tematica viene realizzata mostrando tale connessione “tema-codici”. Nonostante in questo studio, come esposto in precedenza, i temi siano stati generati a partire dai dati, la mappa tematica in Figura 6 rispetta l’indicazione della fase 4 in Tabella 2, esplicitando come si collegano i temi alle emozioni epistemiche. In questo modo, si chiude il cerchio che instaura una dinamica di dialogo reciproco tra le espressioni stimolo, le emozioni epistemiche e i temi sviluppati, come illustrato in Figura 5.

Una maniera alternativa di visualizzare il rapporto tra i temi e le emozioni epistemiche ad essi correlate, è quella che segue in Tabella 3, dove l’attivazione emotiva viene rappresentata attraverso un sistema binario: 0 indica l’assenza di attivazione, mentre 1 ne segnala la presenza.

	A	B	C	D	E	F	G
ansia	0	0	0	0	1	1	1
concentrazione	0	0	0	1	0	0	0
convinzione/certezza	1	0	1	0	0	0	0
curiosità	1	0	0	1	0	0	0
determinazione	1	1	1	1	1	1	1
fiducia	1	0	1	0	0	1	0
frustrazione	0	1	0	0	1	0	1
gioia	1	0	1	0	0	0	0
insoddisfazione	0	1	0	0	1	1	0
interesse	1	0	0	1	0	0	0
meraviglia	0	0	1	0	0	0	0
passione	0	0	0	0	1	0	0
perplexità	0	0	0	0	0	1	0
pessimismo	0	0	0	0	1	0	0
preoccupazione	0	0	0	0	1	0	0
sorpresa	0	0	0	0	1	0	0
tormento/inquietudine	0	0	0	0	1	0	0

Tabella 3: Rapporto tra i temi e le emozioni epistemiche. 0: assenza di attivazione, 1: presenza di attivazione.

Confermando con lo step 5 la scelta della definizione di ogni tema, si prosegue con l'ultima fase della *thematic analysis*, ovvero l'esplorazione e l'approfondimento di ciascun tema.

4.1.1 Tema A: Cambio di paradigma, la rinuncia della fisica classica

Il 1962 non è soltanto l'anno in cui Thomas Kuhn intervista Bohr ed Heisenberg, ma coincide anche con la pubblicazione della sua opera più celebre: *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*. È da questo lavoro che è stato mutuato il termine “paradigma”, impiegato nel titolo del presente tema, sia per la ovvia pertinenza con il concetto qui discusso, sia per valorizzare il ruolo dell'intervistatore nella costruzione del contesto discorsivo delle interviste oggetto di questa indagine. Non stupisce infatti che uno dei temi generati dall'analisi delle parole di Bohr sia così strettamente connesso alla tematica elaborata da Kuhn nel suo studio sulle rivoluzioni scientifiche. Risulta particolarmente interessante e affascinante il posizionamento di Bohr di fronte alla questione della nascita di idee in contrasto con la fisica classica. Per indagarlo, si cerca di rispondere alla domanda: “come si colloca Bohr rispetto alla rottura della continuità?”. La risposta si può ben intuire dalle emozioni epistemiche attivate rispetto al tema in questione (Tabella 3): convinzione/certezza, curiosità, determinazione, fiducia, gioia, interesse. Tali

emozioni evidenziano un atteggiamento decisamente positivo con il quale lo scienziato si è posto di fronte alle novità dell'epoca, che vale la pena di approfondire.

Nella prospettiva kuhniana il progresso scientifico non avviene in modo lineare e cumulativo, bensì attraverso una dinamica discontinua caratterizzata dall'alternanza fra fasi di stabilità, la cosiddetta "scienza normale"⁵, e momenti di rottura; questi ultimi sono costituiti da passaggi da un paradigma ad un altro, ove con il termine "paradigmi" Kuhn intende le "conquiste scientifiche universalmente riconosciute, le quali, per un certo periodo, forniscono un modello di problemi e soluzioni accettabili a coloro che praticano un certo campo di ricerca" (Kuhn 1962, p. 10). Durante il periodo di scienza normale, gli scienziati operano all'interno di un paradigma consolidato, cercando di risolvere problemi senza metterne in discussione i presupposti fondamentali: in questa fase, la continuità rappresenta un valore cruciale per la ricerca, poiché garantisce stabilità, coerenza e produttività. Tuttavia, dopo un certo periodo di tempo accade che la natura violi le aspettative suscitate dal paradigma che regola la scienza normale e ciò si traduce con una scoperta, da parte dello scienziato, che apre una fase di crisi che può condurre a una rivoluzione scientifica. In questo passaggio si verifica l'abbandono del vecchio paradigma e l'adozione di uno nuovo, incompatibile con il precedente, determinando una trasformazione radicale del modo di interpretare la realtà. Ne consegue che, pur essendo la continuità un valore fondamentale nella pratica quotidiana della scienza, il motore del progresso scientifico è dato dalla rottura della stessa.

Calandoci nel contesto delle interviste in esame, i fatti discussi da Bohr che mettono in luce il suo posizionamento rispetto alla suddetta questione risalgono a un momento cruciale nella storia della teoria atomica: la scoperta del nucleo atomico da parte di Ernest Rutherford. Partendo dallo studio sulla diffusione delle particelle alfa, nel 1911 Rutherford postula l'esistenza di un nucleo di carica positiva concentrato al centro dell'atomo, di cui ne costituisce la maggior parte della massa. La struttura atomica di Rutherford è riconosciuta come una pietra miliare della fisica del XX secolo, sebbene all'epoca non suscitò un particolare interesse, al punto che non fu nemmeno menzionata durante la prima Conferenza Solvay del 1911 (Giliberti & Lovisetti 2024). Senza alcun dubbio, però, il nuovo modello atomico aveva sostituito quello di Thomson definitivamente. Tuttavia, rimaneva un problema molto serio: quello della disposizione e del movimento degli elettroni. Inizialmente, Rutherford non se ne curò: "La questione della stabilità dell'atomo proposto non deve essere considerata in questa fase, poiché

⁵ "scienza normale" significa una ricerca stabilmente fondata su uno o su più risultati raggiunti dalla scienza del passato, ai quali una particolare comunità scientifica, per un certo periodo di tempo, riconosce la capacità di costituire il fondamento della sua prassi ulteriore.", *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, T. Kuhn, p. 29.

essa dipenderà ovviamente dalla struttura microscopica dell'atomo e dal movimento delle parti cariche che lo compongono" (Rutherford 1911, p. 671). È qui che si inserisce Bohr, addentrandosi con coraggio in quei dettagli davanti ai quali Rutherford preferì tacere. Il problema fondamentale riguardava la questione dell'instabilità dell'atomo, data dal fatto che, sulla base di ipotesi classiche, una carica in movimento su un'orbita, soggetta ad accelerazione, avrebbe dovuto emettere continuamente radiazione, finendo per collassare sul nucleo. Le ipotesi da cui parte Bohr, invece, sono di natura quantistica: viene dato un ruolo centrale al quanto d'azione introdotto un decennio prima da Max Planck. Bohr evidenzia l'inadeguatezza della fisica classica e spiega la possibilità di introdurre la costante di Planck nella descrizione dell'atomo con il fatto che, senza di essa, non sembra esserci alcuna ragione per cui le dimensioni degli atomi siano quelle che sono (Giliberti & Lovisetti 2024). È tramite h , insieme alla massa m e alla carica e dell'elettrone, che Bohr può fissare le grandezze che caratterizzano i moti degli elettroni sulle orbite nel modello atomico di Rutherford (Peruzzi 2022).

Nel suo articolo pionieristico sviluppato in tre parti, *On the constitution of atoms and molecules*, Bohr afferma che: "Il risultato della discussione di queste questioni sembra essere un riconoscimento generale dell'inadeguatezza dell'elettrodinamica classica nel descrivere il comportamento di sistemi di dimensioni atomiche. Qualunque sia la modifica apportata alle leggi del moto degli elettroni, sembra necessario introdurre nelle leggi in questione una quantità estranea all'elettrodinamica classica, ovvero la costante di Planck, o come viene spesso chiamata, il quanto elementare di azione. Con l'introduzione di questa quantità, la questione della configurazione stabile degli elettroni negli atomi cambia sostanzialmente, poiché questa costante ha dimensioni e grandezza tali che, insieme alla massa e alla carica delle particelle, può determinare una lunghezza dell'ordine di grandezza richiesto" (Bohr 1913, p. 2).

La base assiomatica del programma di ricerca di Bohr consisteva nei seguenti cinque postulati fondamentali, riportati alla fine del suo articolo (Bezerra 2003):

1. L'energia irradiata non è emessa (o assorbita) nel modo continuo previsto dall'elettrodinamica classica, ma soltanto durante il passaggio dei sistemi da uno stato "stazionario" a un altro stato differente.
2. L'equilibrio dinamico dei sistemi negli stati stazionari è governato dalle leggi della meccanica classica; tali leggi non si verificano durante le transizioni dei sistemi tra diversi stati stazionari.
3. La radiazione emessa durante la transizione del sistema da uno stato stazionario a un altro è omogenea, e la relazione tra la frequenza ν e la quantità totale di energia emessa è data da $E = h\nu$, essendo h la costante di Planck.

4. I diversi stati stazionari di un sistema semplice costituito da un elettrone che orbita intorno a un nucleo positivo sono determinati dalla condizione per cui il rapporto tra l'energia totale emessa durante la formazione della configurazione e la frequenza di rivoluzione dell'elettrone sia uguale a un multiplo intero di $h/2$. Ammettendo che l'orbita dell'elettrone sia circolare, questa ipotesi equivale a supporre che il momento angolare dell'elettrone intorno al nucleo sia uguale a un multiplo intero di $h/2\pi$.
5. Lo stato "permanente" di un sistema atomico – cioè lo stato in cui l'energia emessa è massima – è determinato dalla condizione per cui il momento angolare di ciascun elettrone intorno al centro della sua orbita sia uguale a $h/2\pi$.

Questa costruzione di ipotesi che abbracciano un campo appena nato, viene attuata da Bohr con una naturalezza e una convinzione a quel tempo rare. A testimoniare la rarità di questo atteggiamento è lo stesso Bohr, che nella terza intervista riferisce a proposito di Rutherford: "non credo che sapesse poi molto sulla meccanica quantistica. Credo di saperne molto di più io, capite? ... Negli anni precedenti mi ero interessato molto alla meccanica quantistica. [...] è stato molto interessante ascoltare quello che diceva [sul Congresso Solvay]. Però non ricordo che abbia detto qualcosa di preciso; ha solo detto che era strano. Ma non credo che lo prendesse sul serio, capite? Forse sì, ma intendevo solo dire che non era qualcosa su cui lavorare per lui"; e ancora, parlando dell'atomo: "Ero solo io, vedi, ad avere ben chiaro (che fosse davvero instabile)". Bohr insiste sul fatto che nemmeno Rutherford era così convinto della struttura atomica da lui stesso postulata.

Nella prima intervista Bohr mostra espressamente la sua convinzione in parole come: "sapevo benissimo che la teoria quantistica era molto valida. [...] La teoria quantistica doveva essere presa sul serio." Dunque, in una comunità in cui, secondo Kuhn, gli scienziati di norma non mirano ad inventare nuove teorie, e anzi si mostrano spesso intolleranti verso quelle inventate da altri (Kuhn 1962), Bohr accoglie felicemente la novità, dimostrando quell'apertura mentale che per Barber è uno dei valori più forti dello scienziato (Barber 1961). Proseguendo con gli esempi dai testi analizzati, riporto adesso una domanda posta da Kuhn nella prima intervista con la rispettiva risposta di Bohr:

Kuhn: "Quando dice che sapeva che la teoria quantistica andava presa sul serio... Può spiegarci meglio cosa le sembrava essere il punto cruciale di questa teoria?"

Bohr: "Per ottenere la formula di Planck bisognava apportare una modifica sostanziale alla teoria classica; questo è il punto.

Nella seconda intervista Bohr è ancora più deciso: "Era chiaro che avevamo qualcosa da cui non potevamo procedere in alcun altro modo se non attraverso un cambiamento radicale". Bohr

parla di cambiamento radicale come necessità. Rompere con la fisica classica e addentrarsi in una strada completamente nuova e oscura non era un possibile tentativo: era l'unica via per continuare a fare scienza. In *Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics* Bohr, ricordando il suo primo incontro con Einstein avvenuto nel 1920, mette in luce la loro differenza di atteggiamento e prospettiva. Mentre Einstein era restio ad abbandonare i concetti di continuità e causalità, per Bohr questa rinuncia “sembrava essere l'unica via percorribile per procedere con l'immediato compito di coordinare le molteplici prove riguardanti i fenomeni atomici, che si accumulavano giorno dopo giorno nell'esplorazione di questo nuovo campo del sapere” (Bohr 1949, p. 4).

Riprendendo le parole di Kuhn nel suo libro: “Proprio perché la nascita di una nuova teoria comporta la rottura con una tradizione di prassi scientifica e introduce una prassi nuova che si svolgerà secondo regole differenti ed entro un differente universo di discorso, è probabile che essa abbia luogo soltanto quando si ha la sensazione che la precedente tradizione sia andata irrimediabilmente fuori strada” (Kuhn 1962, p. 112). Questa sensazione era evidentemente molto viva in Bohr, al punto da vivere il cambiamento in corso con notevole entusiasmo, dichiarato nella quarta intervista: “Fu una grande gioia, perché si scoprì qualcosa che non poteva essere spiegato in modo ordinario”.

Nelle ultime pagine de *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* troviamo un'osservazione di Kuhn che calza bene con l'atteggiamento di Bohr a proposito del cambiamento di paradigma: “Colui che abbraccia un nuovo paradigma fin dall'inizio, lo fa spesso a dispetto delle prove fornite dalla soluzione di problemi. Egli deve, cioè, aver fiducia che il nuovo paradigma riuscirà in futuro a risolvere i molti vasti problemi che gli stanno davanti, sapendo soltanto che il vecchio paradigma non è riuscito a risolverne alcuni. Una decisione di tal genere può essere presa soltanto sulla base della fede. [...] Vi deve essere qualcosa che dia, almeno a pochi scienziati, la sensazione che la nuova proposta è sulla strada giusta” (Kuhn 1962, pp. 190-191). La sensazione di cui parla Kuhn, questa sorta di *feeling of direction*⁶, è stata indubbiamente presente in Bohr nel transito dal paradigma della fisica classica a quello della allora nascente teoria quantistica. È dunque Bohr stesso, con le sue parole che ho riportato dalle interviste, a rispondere alla domanda posta all'inizio di questo paragrafo.

⁶ Da Riccioni 2024.

4.1.2 Tema B: Influenza dell'ambiente sociale nella ricerca

Il tema in questione raccoglie soltanto cinque espressioni stimolo del set 1, ma vale la pena soffermarsi. In seguito al conseguimento del dottorato in fisica, Bohr si trasferì a Cambridge per lavorare con J.J. Thomson e dopo qualche mese partì per Manchester, dove iniziò a collaborare con Rutherford. In alcune delle lettere spedite al fratello Harald Bohr nel periodo di Cambridge, troviamo testimonianza del suo stato d'animo del tempo, confermato successivamente nelle interviste con Kuhn. Infatti, in una lettera datata 29 settembre 1911 leggiamo:

“Caro Harald!

Sto così bene. Ho appena parlato con J.J. Thomson e gli ho spiegato il meglio possibile la mia opinione sulle radiazioni, il magnetismo ecc. Non immagini quanto sia stato per me parlare con un uomo simile. È stato incredibilmente gentile con me, abbiamo parlato di tantissime cose e credo che abbia trovato senso in ciò che dicevo. Ora leggerà il libro e mi ha invitato a pranzo con lui al Trinity College domenica, così potremo discuterne ulteriormente. Puoi immaginare quanto io sia felice. [...] Thomson mi ha consigliato, se le spese non fossero un problema troppo grande, di diventare “membro dell'università” e iscrivermi a un College. In tal caso, avrei accesso a tutto, potrei partecipare agli sport degli studenti, prendere in prestito tutti i libri, seguire tutte le lezioni e, soprattutto, incontrare molte più persone. Se diventassi membro del Trinity College, sarei tra le persone più importanti a Cambridge: Thomson, Darwin, Hardy, Littlewood... e ogni giorno potrei pranzare con loro. [...] Harald!

Non immagini quanto sia bello vedere il proprio nome conosciuto.” (Bohr 1911a)

Bohr inizia il suo soggiorno a Cambridge con grande entusiasmo. Nella seconda intervista, quando Kuhn chiede a Bohr il motivo per il quale si fosse recato lì per la ricerca post-dottorato, egli rispose: “Prima di tutto, avevo condotto questo importante studio sulla teoria dell'elettrone. Consideravo [...] Cambridge il centro della fisica e Thomson un uomo straordinario”. Tuttavia, questa promettente collaborazione non si concretizzò, perché Thomson non era entusiasta del giovane danese. (Giliberti & Lovisetti 2024). Poco più di tre settimane dopo la prima lettera, infatti, Bohr ne manda un'altra in cui aggiorna il fratello sui suoi rapporti con Thomson:

“Thomson finora non è stato così facile da trattare come pensavo il primo giorno. [...] è così impegnato con tante cose e così concentrato sul proprio lavoro che è molto difficile riuscire a parlare con lui. Non ha ancora avuto tempo di leggere la mia dissertazione, e non so ancora se accetterà la mia critica.” (Bohr 1911b)

Cinquanta anni dopo Bohr confermerà nella seconda intervista con Kuhn che a Cambridge si sentiva davvero infelice e non imparò molto, anche per lo scarso interesse che c'era lì nei confronti della teoria quantistica.

“Disse di essere un grande ammiratore di Thomson e che l'ultima cosa che voleva fare era criticare Thomson o turbarlo in alcun modo. Tuttavia, Bohr desiderava ulteriori chiarimenti su alcune caratteristiche dei modelli atomici di Thomson, ma all'epoca non conosceva molto bene l'inglese e non era in grado di esprimersi con la cortesia che avrebbe voluto. Thomson, dal canto suo, non prese bene le sue domande. Thomson pensò di essere criticato e si arrabbiò. Questo turbò molto Bohr e credo che questo episodio gli abbia lasciato un segno indelebile. Penso che abbia continuato a turbarlo per tutta la vita” (Dirac 1977, pp. 135-136).

Da queste osservazioni emerge come le dinamiche interpersonali possano incidere in modo significativo sulla pratica scientifica. Il caso di Bohr a Cambridge mostra infatti come l'assenza di un'interazione efficace con Thomson abbia limitato le possibilità di confronto e sviluppo teorico. Nel corso del Novecento, diversi autori hanno messo in discussione l'idea che la scienza sia un'attività puramente individuale e razionale, evidenziandone invece la natura profondamente sociale. Una posizione interessante è quella di Ludwik Fleck, secondo cui “la cognizione è l'attività umana più condizionata socialmente e la conoscenza è la creazione sociale per eccellenza” (Fleck 1979, p. 42), poiché il pensiero scientifico si sviluppa sempre all'interno di un collettivo di pensiero⁷ che orienta non solo le interpretazioni, ma anche le possibilità stesse di formulazione dei problemi. In questo senso, l'interazione tra scienziati non rappresenta un elemento accessorio, ma una condizione epistemica fondamentale. Citando ancora Fleck: “il collettivo di pensiero fornisce anche il "veicolo" specifico per lo sviluppo storico di qualsiasi campo di pensiero, nonché per il determinato bagaglio di conoscenze e livello culturale. [...] Una conversazione stimolante tra due persone crea presto una condizione in cui ciascuna esprime pensieri che non sarebbe stata in grado di produrre né da sola né in compagnia di altre persone.” (Fleck 1979, pp. 39, 44). È proprio questa condizione che sembra essere mancata nell'interazione fra Bohr e Thomson: un ambiente in cui c'è un libero scambio di idee e opinioni. Le ragioni di questa assenza sono probabilmente dovute a quanto anticipato in precedenza, ovvero la scarsa conoscenza della lingua inglese da parte di Bohr e la conseguente difficoltà comunicativa con il fisico britannico. Oltre alle barriere linguistiche, Thomson non era in generale propenso a ricevere critiche e per Bohr questo fu deludente. A

⁷ Una comunità di persone che si scambiano idee o mantengono un'interazione intellettuale. (Fleck 1979, *Genesis and Development of a Scientific Fact*, p. 39)

sostegno di questa ricostruzione, cito testualmente le sue parole in un passaggio della seconda intervista:

“Fu una delusione che Thomson non fosse interessato a sapere che i suoi calcoli non erano corretti. Anche quella fu colpa mia. Non avevo una grande conoscenza dell'inglese e, quindi, non sapevo come esprimermi. E potei solo dire che era sbagliato. E lui non era interessato all'accusa che fosse sbagliato. E in realtà si arriva a questa cosa – se leggete attentamente il mio articolo – per cui è più difficile dire cosa sia corretto, capite? Ci furono davvero tanti errori. Ma quello che voglio dire è che Thomson era un genio che in realtà mostrò la strada a tutti. Poi qualche giovane avrebbe potuto migliorare un po' alcune cose. Ma non era questo che interessava a Thomson.”

Una delle emozioni epistemiche che ho associato ad alcune espressioni stimolo da cui è stato generato il presente tema e che si connettono a quanto appena discusso è dunque “insoddisfazione”. Quest’ultima è seguita da “determinazione”, identificata nell’espressione: “a Manchester ero preparato e pronto per buttarmi a capofitto nel lavoro”. Infatti, quando Bohr si trasferisce a Manchester e inizia a lavorare con Rutherford, l’atmosfera cambia completamente. In una lettera del 12 giugno 1912 spedita al fratello, leggiamo:

“Puoi immaginare quanto sia stimolante stare qui: ci sono così tante persone con cui parlare, e tra loro ci sono quelli che hanno la maggiore competenza in queste cose, e il Prof. Rutherford mostra un interesse così reale ed efficace per tutto ciò che considera significativo. Negli ultimi anni ha elaborato una teoria sulla struttura degli atomi, che sembra essere molto più solidamente fondata di tutto ciò che si era visto finora.” (Bohr 1912)

È il termine “stimolante” che è indice di un ambiente diverso dal precedente, nel quale Bohr si inserisce con profonda motivazione, soprattutto per il tipo di ricerca che si conduceva lì, incentrata sulla questione della radioattività e sulla recente scoperta del nucleo atomico da parte di Rutherford. Infatti, è a Manchester che Bohr formula il suo modello dell’atomo ed è proprio nella stessa lettera menzionata prima che afferma:

“Un paio di giorni fa ho avuto una piccola idea utile per la comprensione dell’assorbimento dei raggi alfa (è andata così: un giovane matematico di qui, C. G. Darwin – nipote del vero Darwin – ha appena pubblicato una teoria in merito a questo problema, e io ho pensato che non solo non era del tutto corretta dal punto di vista matematico – sebbene l’errore fosse piccolo – ma che era decisamente insoddisfacente nella concezione di fondo, e ho elaborato una piccola teoria in proposito, che, anche se non è granché, può forse fare un po’ di luce su certi fatti connessi alla struttura degli atomi). Ho in mente di pubblicare molto presto un piccolo articolo su questo argomento.” (Bohr 1912)

La “piccola idea” su una “piccola teoria” costituiva l’embrione del modello atomico di Bohr destinato a diventare uno dei punti di svolta della fisica atomica del Novecento.

L’ambiente sociale dunque non rappresenta l’unico motore dello sviluppo di nuove teorie, ma certamente costituisce un fattore che incide in maniera significativa sulla ricerca scientifica, stimolandone o inibendone l’evoluzione.

4.1.3 Tema C: Coerenza fra teoria e risultati sperimentali

Il presente tema riunisce emozioni come convinzione/certezza, fiducia, determinazione, gioia e meraviglia. Esso nasce dalla vasta gamma di espressioni stimolo in cui si è trovato un pattern ricorrente di evocazione di chiarezza e assenza di dubbio di fronte a momenti in cui si è manifestata coerenza tra le ipotesi teoriche e i risultati sperimentali. Bohr, infatti, in tutte e quattro le interviste del set 1 rievoca insieme a Kuhn il suo percorso di studio in quegli anni e mette in luce i passaggi cruciali della sua esperienza epistemica. Tra questi ritroviamo l’esser venuto a conoscenza della scoperta di Rutherford sul nucleo atomico, le informazioni ricevute da G. C. de Hevesy sulle sostanze radioattive e sulle leggi di spostamento e gli scambi intellettuali con H. Moseley e C. G. Darwin, favoriti dal contesto di Manchester. Quello che fece Bohr fu addentrarsi in quelle problematiche sperimentali che riguardavano la struttura atomica e tentare di risolverle cercando un allineamento coerente tra i diversi elementi in gioco. Ad esempio, Bohr stesso afferma nella terza intervista con Kuhn: “appresi che c'erano più sostanze che posti nella tavola periodica, e così arrivai a questa storia degli isotopi.” All’epoca, infatti, non si conosceva il concetto di numero atomico e D. Mendeleev originariamente ordinò gli elementi sulla base del loro peso atomico in maniera crescente. “Quest'ordine aveva dovuto essere leggermente modificato in un paio di casi per mantenere la tavola utile. Moseley dimostrò che se invece era organizzata in ordine di carica nucleare (cioè, secondo il [...] numero atomico) non erano necessarie modifiche. [...] Il lavoro di Moseley non alterò in modo significativo la tavola di Mendeléev, in altre parole, ma certamente fissò gli elementi in essa contenuti nella loro posizione definitiva.” (Asimov 1972, p. 624). A Manchester una figura di riferimento importante per Bohr fu Hevesy, grazie al quale arricchì il proprio bagaglio di conoscenze sulla radioattività. Nella seconda intervista Bohr afferma quanto segue: “Hevesy mi disse che ci sono più sostanze radioattive di quante ne possano essere contenute nella tavola periodica. E questo non lo sapevo. Ma per me fu la prova assoluta: allora si avevano gli isotopi. [...] Vedete, fui io ad avere l'idea degli isotopi.” Per accuratezza storica, è bene precisare che

la scoperta degli isotopi e la coniazione del termine stesso è attribuita a F. Soddy, il quale in una lettera datata 4 dicembre 1913 e pubblicata dalla rivista inglese *Nature*, scrisse:

“Per quanto mi riguarda personalmente, ciò ha portato a una grande chiarificazione delle mie idee e potrebbe essere utile ad altri, sebbene senza dubbio ci sia poca originalità. La stessa somma algebrica delle cariche positive e negative nel nucleo, quando la somma aritmetica è diversa, dà ciò che io chiamo "isotopi" o "elementi isotopici", perché occupano la stessa posizione nella tavola periodica. Sono chimicamente identici e, salvo per le poche proprietà fisiche che dipendono direttamente dalla massa atomica, sono anche fisicamente identici.” (Soddy 1913)

Bohr probabilmente non intendeva tanto assegnare a se stesso il merito di aver scoperto gli isotopi, quanto invece porre l'accento sul grado di chiarezza che possedeva di fronte alla questione. L'esistenza del nucleo atomico e di elementi con stessa carica ma massa atomica diversa, condussero Bohr direttamente alla convinzione del fatto che gli spettri fossero prodotti esclusivamente dagli elettroni. Il nucleo atomico non aveva nessuna influenza sulle righe spettrali. La causa dell'emissione venne dunque attribuita agli elettroni; Bohr si spinse oltre, spiegandone anche il motivo con le sue ipotesi sulla struttura atomica e in particolare con l'idea dei salti tra i diversi livelli energetici. Nel ripercorrere questi passaggi durante le interviste, lo scienziato esprime una fortissima convinzione con espressioni del tipo: “Ero assolutamente convinto di ciò”, “l'intera faccenda era chiara”, “non ci potevano essere dubbi”, “per me era ovvio”. Le espressioni stimolo di questo genere, a cui ho associato prevalentemente l'emozione *convinzione/certezza*, come illustrato nel diagramma in Figura 3 costituiscono il 38% del totale dei dati, perciò meritano una particolare attenzione. La chiarezza mentale e l'insistenza sull'assenza di dubbio sembrano emergere precisamente nei momenti in cui si realizza una concordanza tra i diversi fattori – modelli teorici e dati empirici. Tale coerenza viene vissuta dallo scienziato come una evidenza immediata della validità delle proprie ipotesi teoriche. A tale proposito, è utile richiamare il terzo capitolo del libro *Science as social knowledge* in cui Helen E. Longino approfondisce proprio il tema di “evidenza e ipotesi”. Come osserva l'autrice, “noi facciamo inferenze, accettiamo o respingiamo ipotesi oppure valutiamo la loro relativa accettabilità sulla base dell'evidenza. L'evidenza e le relazioni probatorie sono al centro dell'inferenza e del ragionamento su questioni empiriche” (Longino 1990, p. 38). Il testo sostiene che la relazione tra evidenza empirica e ipotesi non sia né immediata né intrinsecamente oggettiva, bensì mediata da un insieme di credenze di fondo (*background assumptions*) che orientano il processo inferenziale. Gli stati di fatto, considerati isolatamente, non determinano in modo univoco quale ipotesi essi supportino; acquisiscono valore

evidenziale solo alla luce di ulteriori convinzioni relative alle connessioni, regolarità o relazioni causali tra i fenomeni. Ne consegue che uno stesso dato empirico può essere legittimamente interpretato come evidenza a favore di ipotesi differenti, o persino tra loro incompatibili, come illustrato dall'autrice con numerosi esempi tratti dalla storia della scienza. In questo senso, l'accettazione delle ipotesi risulta sempre contestuale, dipendendo dal quadro teorico e dalle assunzioni preliminari adottate, e non può fondarsi su un criterio di evidenza assoluto e neutrale. Tuttavia, tale impostazione non implica un abbandono della razionalità scientifica: al contrario, essa viene ridefinita come coerenza interna tra evidenza e sistema di credenze di base, pur riconoscendo che queste ultime possono variare e influenzare in modo significativo gli esiti del ragionamento. "Le convinzioni di fondo funzionano in un certo modo perché sono credenze o presupposti riguardanti connessioni (reali o presunte, correlazionali o causali) tra particolari tipi di stati di cose e altri tipi (di stati di cose)" (Longino 1990, p. 44). In questa prospettiva, l'esperienza epistemica descritta da Bohr acquista una maggiore intelligibilità. Le espressioni di certezza e di assenza di dubbio che emergono nelle interviste non indicano semplicemente una fiducia immediata nei dati empirici, ma riflettono il grado di coerenza raggiunto tra tali dati e il sistema di credenze di fondo attraverso cui essi vengono interpretati. È soltanto alla luce di specifiche assunzioni – come l'idea che gli elettroni siano i responsabili delle emissioni spettrali o che la struttura atomica debba essere spiegata in termini di livelli energetici discreti – che i dati acquisiscono un significato evidenziale preciso e convergono verso una determinata ipotesi teorica. In questo senso, il riferimento di Longino consente di interpretare le emozioni di convinzione e chiarezza non come semplici reazioni psicologiche, ma come indicatori epistemici di un allineamento riuscito tra evidenza e assunzioni di fondo. L'"assenza di dubbio" di cui parla Bohr coincide quindi con una condizione di elevata coerenza interna del sistema interpretativo adottato, piuttosto che con l'esistenza di un rapporto diretto e neutrale tra dati e ipotesi. La sensazione di evidenza immediata può dunque essere compresa non come garanzia di oggettività assoluta, ma come esperienza soggettiva di coerenza interna tra i diversi elementi del suo quadro teorico e i risultati empirici disponibili. Tale coerenza non elimina la possibilità di interpretazioni alternative, ma rende una specifica interpretazione particolarmente persuasiva per il soggetto che la adotta. Alla luce di queste considerazioni, il caso di Bohr mostra come il vissuto epistemico dello scienziato, in termini di certezza e assenza di dubbio, non possa essere separato dal contesto concettuale entro cui si colloca il suo ragionamento. L'evidenza, lungi dall'essere un dato neutrale, emerge come il prodotto di una relazione dinamica tra osservazione, teoria e credenze di fondo.

4.1.4 Tema D: Orientamento verso specifici ambiti di studio

Il tema in questione è stato generato a partire da tutte quelle espressioni stimolo in cui Bohr manifestava un particolare interesse nei confronti di specifiche problematiche. Vi rientrano espressioni come “ero arrivato ad interessarmi così profondamente ad altre cose”, “è stato davvero molto interessante ascoltare le sue osservazioni sull'incontro di Solvay”, “dissi a Rutherford che mi sarebbe piaciuto venire a lavorare e anche imparare qualcosa sulla radioattività”, “ho approfondito molto l'argomento per quanto riguarda l'assorbimento e l'emissione”, le quali sono state codificate con emozioni epistemiche di interesse, curiosità, determinazione e concentrazione. Bohr evidenzia una marcata direzionalità del proprio interesse epistemico, incentrato sulla fisica atomica e sulla nascente fisica quantistica, con particolare attenzione alla radioattività e, ovviamente, alla struttura atomica. Questo orientamento selettivo appare strettamente connesso sia al contesto scientifico in cui Bohr era immerso, sia alle opportunità di interazione con figure chiave e con specifici problemi sperimentali. L'interesse di uno scienziato, in generale, non è soltanto una disposizione psicologica individuale, ma si configura come una componente strutturale della pratica scientifica, che orienta la selezione dei problemi e delle strategie di indagine. Dal punto di vista più propriamente cognitivo, l'interesse può essere interpretato come un meccanismo di focalizzazione dell'attenzione e di allocazione delle risorse cognitive. Secondo la distinzione proposta da Hidi e Renninger, l'interesse si sviluppa progressivamente, passando da forme situazionali, attivate dal contesto, a forme individuali più stabili e durature (Hidi & Renninger 2006). Nel caso di Bohr, le espressioni stimolo appartenenti al tema in questione sembrano collocarsi a un livello intermedio tra queste due dimensioni: da un lato, il suo interesse è chiaramente stimolato da specifiche circostanze, come l'incontro e il confronto con altri scienziati a seguito del suo trasferimento a Cambridge e successivamente a Manchester; dall'altro, esso evolve rapidamente in una direzione più stabile, orientando in modo sistematico il suo programma di ricerca. Inoltre, l'orientamento verso specifici ambiti può essere letto anche alla luce delle analisi di Kuhn, secondo cui la scienza normale si sviluppa all'interno di paradigmi che definiscono quali problemi siano rilevanti e degni di essere indagati. In questo quadro, l'interesse di Bohr per la struttura atomica e per i fenomeni spettrali non appare come una scelta puramente individuale, ma come una risposta a tensioni e anomalie interne al paradigma allora emergente della fisica atomica. Tuttavia, ciò che viene fuori dalle interviste è che tale orientamento non è semplicemente imposto dal contesto paradigmatico, ma è vissuto soggettivamente come attrazione e coinvolgimento cognitivo, contribuendo così a modellare il percorso epistemico dello scienziato. In virtù di queste considerazioni, le espressioni di

interesse individuate nelle interviste possono essere interpretate come indicatori epistemici di un processo di selezione e delimitazione del campo di indagine. Esse segnalano non solo ciò che Bohr considerava rilevante, ma anche il modo in cui il suo impegno cognitivo si distribuiva tra le diverse possibilità di ricerca. In questo senso, l'orientamento verso specifici ambiti di studio appare come una componente fondamentale dell'esperienza epistemica, in quanto contribuisce a definire le traiettorie lungo cui si sviluppa la costruzione teorica.

4.1.5 Tema E: Paradossi, contraddizioni e inconsistenze della old quantum physics

Il tema E apre l'indagine sul secondo set di dati, dove si manifesta chiaramente un profondo cambiamento nello stato d'animo dello scienziato. Ricordiamo che il riferimento temporale adesso è cambiato, le interviste trattano del periodo degli anni Venti e il soggetto intervistato che fa da testimone del coinvolgimento emotivo di Bohr è Heisenberg. Un'espressione stimolo estrapolata dalla sesta intervista del set 2 riassume bene ciò che si osserverà nel presente tema e quanto esso si discosti dai precedenti: "Bohr iniziò a sviluppare quello stato mentale in cui ha iniziato a preoccuparsi dei problemi". Sono infatti le emozioni di ansia, frustrazione, insoddisfazione, pessimismo, preoccupazione e tormento/inquietudine a caratterizzare maggiormente questo tema, seguite con una minore frequenza da sorpresa, passione e determinazione. Le principali emozioni epistemiche in questione, di valenza prettamente negativa, sono dovute a tutto ciò che non "funzionava" nella *old quantum physics*: i paradossi, le contraddizioni e le inconsistenze. Durante gli anni Venti "le apparenti contraddizioni insite nella teoria quantistica si facevano sentire in modo sempre più acuto" (Bohr 1949, p. 4). La vecchia teoria quantistica, infatti, dava risultati incompatibili tra loro. Sebbene risultasse valida per alcune predizioni, come le frequenze e le posizioni delle righe spettrali, produceva anche risultati errati in fenomeni fondamentali come, ad esempio, la dispersione: questo era uno dei segni che il modello atomico a carattere ibrido costituito da orbite classiche e quantizzazione delle variabili dinamiche del moto elettronico era concettualmente sbagliato. Il concetto di orbita è proprio uno dei motivi di forte preoccupazione per Bohr: nella sesta intervista ad Heisenberg, infatti, viene riportato quanto segue:

"Da una parte, si vede un elettrone muoversi in una camera a nebbia, quindi c'è qualcosa di simile a un'orbita elettronica. Lo si può semplicemente vedere. Allo stesso tempo, si pone la domanda: "Esiste un'orbita elettronica nell'atomo di idrogeno oppure no?". L'elettrone c'è, non c'è dubbio, perché può uscire. L'elettrone si muove? Se sì, qual è la frequenza in quell'orbita? Se no, perché l'orbita è presente nella camera a nebbia? Quindi, questo tipo di

preoccupazioni erano, per Bohr, della natura più problematica. Semplicemente non sapeva cosa dire al riguardo e ne era insoddisfatto.”

Una delle caratteristiche più problematiche della vecchia teoria quantistica, che fu poi eliminata nel passaggio alla meccanica quantistica moderna, era proprio che gli elettroni avessero traiettorie ben definite (Duncan & Janssen 2014). L'orbita elettronica fu uno dei concetti che vennero abbandonati nella meccanica quantistica di qualche anno dopo, a favore di una riformulazione basata esclusivamente su grandezze osservabili. Fu per disperazione che la vecchia teoria quantistica della quantizzazione orbitale fu abbandonata a metà degli anni Venti e si iniziò a ricercare nuovi principi, arrivando alla scoperta della meccanica matriciale da parte di Heisenberg (Bucher 2007).

Il tormento interiore generale di Bohr era dovuto al fatto che sebbene la sua teoria fosse stata davvero sorprendente e avesse fornito diverse spiegazioni a questioni che fino ad allora non avevano trovato risposta, presentava comunque certi limiti. Per usare le parole di Bucher, “il modello di Bohr è stato il più grande colpo di scena nella fisica quantistica” (Bucher 2008, p. 7). Questo era infatti riuscito a descrivere correttamente l'atomo di idrogeno e gli atomi idrogenoidi, fornendo una base teorica alla formula di Balmer ancora ai tempi empirica (Balmer 1885); postulando l'esistenza di orbite stazionarie in cui l'elettrone non irradia, il modello garantiva la stabilità dell'atomo; inoltre, gettò le basi per l'estensione del modello da parte di Sommerfeld, il quale riuscì a sua volta a ricavare la corretta espressione della struttura fine delle righe dello spettro dell'idrogeno e a spiegare l'effetto Stark lineare⁸. Nonostante i suoi notevoli successi, il modello di Bohr presentava limiti profondi, che ne rivelarono il carattere provvisorio e concettualmente problematico. In primo luogo, la teoria risultava applicabile in modo soddisfacente solo all'atomo di idrogeno (e, più in generale, ai sistemi idrogenoidi). Essa falliva nel descrivere atomi più complessi, nei quali le interazioni tra più elettroni rendevano impossibile mantenere il modello di orbite semplici e quantizzate. Un limite particolarmente significativo riguardava l'incapacità di trattare le intensità delle righe spettrali. Sebbene il modello fosse in grado di prevedere correttamente le frequenze delle transizioni, esso non forniva alcun criterio per determinare la probabilità dei processi di emissione e assorbimento, né la distribuzione dell'intensità tra le diverse righe. Analogamente, mancava una descrizione coerente della polarizzazione della radiazione, segno dell'assenza di una teoria completa dell'interazione tra materia e campo elettromagnetico, e, per l'appunto, “il problema

⁸ L'effetto Stark lineare fu spiegato, indipendentemente, anche da Epstein e Schwarzschild nel 1916.

dell'interazione tra materia e radiazione costituiva un ostacolo formidabile per la fisica di quell'epoca" (Bezerra 2003, pp. 493-494).

Sempre nella sesta intervista ad Heisenberg, troviamo un'altra espressione indicativa di uno stato d'animo segnato dalla frustrazione:

"[Bohr] Si rese conto che l'intera teoria, da un lato, aveva avuto un enorme successo, e dall'altro, era fondamentalemente sbagliata. E questa era una contraddizione molto difficile da sopportare, soprattutto per un uomo che aveva formulato la teoria. Così, si interrogava continuamente su questo problema. Si chiedeva sempre: "Cosa è successo? Ho commesso un errore? Cosa si potrebbe cambiare nella teoria? Funziona così bene qui eppure contiene ancora delle contraddizioni"."

Nella lettura retrospettiva di Heisenberg, Bohr era già consapevole, al momento della pubblicazione del suo primo articolo, che la sua teoria si discostava profondamente dalla struttura chiusa e armonica della fisica classica, accettando con audacia l'idea che la natura non fosse descrivibile in termini semplici; a seguito del notevole successo iniziale del modello, per qualche anno aveva trascurato questo aspetto, probabilmente nella speranza di poter ricondurre la teoria entro un quadro coerente. Una valutazione a posteriori mostra però che tale obiettivo era irraggiungibile senza l'introduzione di nuovi concetti fondamentali. Infatti, come riportato nell'articolo *Rise and premature fall of the old quantum theory*: "le lacune della vecchia teoria quantistica risiedono nella sua negligenza di tre proprietà delle particelle: il loro spin, la loro natura ondulatoria e le loro statistiche quantistiche" (Bucher 2008, p. 1). Nel medesimo articolo l'autore sottolinea che in ogni caso "la vecchia teoria quantistica sarebbe crollata, probabilmente un po' più tardi, a causa della sua descrizione spaziale dell'atomo eccessivamente semplificata e irrealistica, o più in generale, per la sua incapacità di tenere conto della natura ondulatoria della materia." (Bucher 2008, p. 28).

Riprendendo un'espressione stimolo selezionata nella prima intervista e associata all'emozione epistemica *preoccupazione*, Heisenberg afferma espressamente che: "Bohr era profondamente preoccupato per il dualismo tra onde e particelle". Questo è uno dei punti cruciali ed emblematici dei paradossi della meccanica quantistica. Il dualismo onda-particella emerge infatti dal tentativo di conciliare due descrizioni tra loro incompatibili della realtà microscopica: da un lato, la radiazione elettromagnetica, descritta dalla teoria classica come un fenomeno ondulatorio continuo; dall'altro, i processi di emissione e assorbimento, che sembravano richiedere una descrizione discreta in termini di quanti di energia. Questa tensione si estendeva anche alla materia, in cui l'elettrone, concepito originariamente come particella localizzata,

mostrava proprietà ondulatorie nei fenomeni di interferenza e diffrazione. Per Bohr, la difficoltà non consisteva soltanto nel dover utilizzare due modelli diversi, ma nel fatto che tali modelli risultavano mutuamente esclusivi dal punto di vista classico: un'entità non può essere simultaneamente un'onda estesa nello spazio e una particella localizzata. Questa incompatibilità metteva in crisi i concetti fondamentali della fisica classica di traiettoria, localizzazione e causalità deterministica.

La “preoccupazione” di Bohr, così come ricordata da Heisenberg, riflette dunque la consapevolezza che non si trattasse di una lacuna temporanea, ma dell'indizio di una trasformazione radicale necessaria nel modo di descrivere i fenomeni fisici. Essa anticipa infatti lo sviluppo del principio di complementarità, attraverso il quale Bohr tenterà di superare il dualismo attraverso una sua reinterpretazione: il dilemma tra il carattere corpuscolare e ondulatorio della luce e della materia era per Bohr evitabile solo attraverso il punto di vista della complementarità (Bohr 1937). Tale principio fu introdotto dallo scienziato nel 1927 in occasione della conferenza di Como e ulteriormente sviluppato durante il quinto congresso Solvay dello stesso anno. Nella sua formulazione iniziale il principio emergeva dall'analisi delle condizioni di possibilità dell'atto di misura. L'autore di *Complementarity and Scientific Rationality* riporta che Bohr era “certamente preoccupato dell'osservazione”, degli esperimenti – su ciò che si può dire del regno microscopico sulla base di esperimenti.” (Saunders 2005, pp. 5-6), confermando quanto percepito e riferito da Heisenberg nelle interviste. Durante la conferenza a Como Bohr osservò che la definizione precisa dello stato di un sistema richiederebbe il suo completo isolamento, ma ciò renderebbe impossibile ogni osservazione. Viceversa, l'osservazione implica un'interazione con il sistema che ne altera lo stato, impedendone una determinazione univoca e compromettendo il concetto classico di causalità. Ne consegue che le descrizioni spazio-temporali, legate all'atto di misura, e quelle causali, legate all'evoluzione deterministica, non possono essere simultaneamente applicate. Dunque, la comprensione logica di regolarità fondamentali, fino ad allora insospettite, che governano i fenomeni atomici ha richiesto il riconoscimento che non è possibile operare una netta separazione tra il comportamento indipendente degli oggetti e la loro interazione con gli strumenti di misura che definiscono il sistema di riferimento (Bohr 1949). Esse costituiscono piuttosto aspetti complementari e mutuamente esclusivi della descrizione dei fenomeni quantistici.

Nelle parole di Bohr:

“Da un lato, la definizione dello stato di un sistema fisico, come comunemente inteso, presuppone l'eliminazione di tutte le perturbazioni esterne. Ma in tal caso, secondo il

postulato quantistico, qualsiasi osservazione sarà impossibile e, soprattutto, i concetti di spazio e tempo perderanno il loro senso immediato. D'altro canto, se per rendere possibile l'osservazione si ammettono determinate interazioni con opportuni strumenti di misurazione, non appartenenti al sistema, una definizione univoca dello stato del sistema non è più possibile e non si può parlare di causalità nel senso comune del termine. La natura stessa della teoria quantistica ci obbliga quindi a considerare il coordinamento spazio-temporale e la pretesa di causalità, la cui unione caratterizza le teorie classiche, come caratteristiche complementari ma esclusive della descrizione, che simboleggiano rispettivamente l'idealizzazione dell'osservazione e della definizione.” (Bohr 1931, p. 54)

Successivamente, Bohr illustrò la complementarità prima in termini di dualismo onda-particella per la luce, e poi per la materia:

“Come nel caso della luce, anche nella questione della natura della materia, nella misura in cui aderiamo ai concetti classici, ci troviamo di fronte a un inevitabile dilemma che deve essere considerato come la stessa espressione dell'evidenza sperimentale. Infatti, anche qui non abbiamo a che fare con rappresentazioni contraddittorie, bensì complementari dei fenomeni, che solo insieme offrono una generalizzazione naturale del modo classico di descrivere.” (Bohr 1931, p. 56)

Le descrizioni ondulatoria e corpuscolare non sono simultaneamente applicabili, bensì complementari, ciascuna valida in specifiche condizioni sperimentali. Il modo con cui si manifesta il mondo microscopico restituisce un'immagine di ambiguità, come affermato da Bohr in *Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics*: “un elemento essenziale di ambiguità è coinvolto nell'attribuire attributi fisici convenzionali agli oggetti atomici, come risulta evidente dal dilemma riguardante le proprietà corpuscolari e ondulatorie di elettroni e fotoni, dove abbiamo a che fare con immagini contrastanti, ciascuna delle quali si riferisce a un aspetto essenziale dell'evidenza empirica” (Bohr 1949, p. 7). Questa prospettiva è efficacemente riassunta nel celebre motto di Bohr, “*Contraria sunt complementa*”, adottato nel 1947 come emblema del proprio pensiero filosofico (Figura 7).



Figura 7: Lo stemma personale di Bohr con il motto "contraria sunt complementa" e il simbolo del Taijitu ripreso dalla cultura cinese; è conservato in Danimarca presso il Castello di Frederiksborg.

In questo modo viene messo in discussione uno dei principi fondamentali della logica, ovvero il principio del terzo escluso: i contrari possono essere considerati complementari. Dunque, il dualismo onda-particella segna il passaggio da una concezione oggettiva e deterministica della natura a una visione in cui il ruolo dell'osservazione e delle condizioni sperimentali diventa essenziale, aprendo la strada a una riformulazione epistemologica della fisica.

Le difficoltà appena discusse emerse nella vecchia teoria quantistica costituiscono il cuore del famoso dibattito tra Bohr ed Einstein avvenuto in occasione del quinto congresso Solvay tenutosi a Bruxelles nel 1927. Nelle ultime tre interviste Heisenberg racconta di questo confronto definendolo “una vera lotta”. La discussione tra i due scienziati si incentrò sull’analisi di esperimenti mentali che Einstein propose con l’intento di dimostrare l’inconsistenza della meccanica quantistica (Peruzzi 2022). Heisenberg ricorda che:

“Di solito, la mattina a colazione, Einstein avrebbe inventato un nuovo esperimento con il quale avrebbe potuto definitivamente confutare la teoria, e avrebbe detto: "Bene, ecco, potete confutarla. Certamente non funziona". Allora Bohr sarebbe andato in preda alla disperazione e avrebbe discusso la questione, e la sera, di nuovo, Bohr sarebbe stato dalla parte vincente.

Avrebbe detto: "Bene, questa è l'interpretazione e vedete che può funzionare". Einstein sarebbe andato in preda alla disperazione e la mattina dopo sarebbe tornato con un nuovo esempio”

Due espressioni stimolo provenienti dalla undicesima intervista e collezionate nel presente tema indicano lo stato ansioso di Bohr nel rispondere ai tentativi di confutazione della teoria da parte di Einstein: “Bohr era, ovviamente, molto ansioso di districare la questione”, “era Bohr che desiderava ardentemente dare la risposta corretta entro la tarda serata”. Le argomentazioni di Einstein ruotavano attorno alla convinzione che la teoria quantistica non fosse completa e alla

negazione della natura probabilistica della realtà fisica. Einstein, da convinto sostenitore del realismo scientifico, non riusciva ad accettare la posizione epistemologica di Bohr, secondo il quale la fisica non ha lo scopo di scoprire ciò che la natura è, bensì la fisica si occupa di ciò che della natura *si può dire* (Petersen 1963). Due orientamenti divergenti che generarono una tensione feconda, destinata a segnare in modo duraturo lo sviluppo della fisica del Novecento, contribuendo a chiarire i fondamenti concettuali della meccanica quantistica e a delinearne le implicazioni filosofiche.

Tra ciò su cui insisteva maggiormente Einstein vi era l'incompletezza della teoria quantistica e il suo carattere non logicamente chiuso. Essa, infatti, non era indipendente da una teoria meno generale che ne costituisce un caso limite, ossia la fisica classica. Il modello di riferimento per Einstein era chiaramente la teoria della relatività, fondata su principi fondamentali autonomi rispetto alla meccanica classica, la quale emerge come caso limite: nella relatività ristretta per velocità molto inferiori a quella della luce, nella relatività generale per campi gravitazionali deboli. La formulazione dei principi fondamentali della meccanica quantistica è invece per natura impossibile senza il ricorso alla meccanica classica. Citando G. Peruzzi, "La meccanica quantistica, infatti, pur contenendo la meccanica classica come buona approssimazione dei fenomeni quando le azioni in gioco sono molto più grandi del quanto d'azione h , ha bisogno della meccanica classica per la sua stessa fondazione, come dimostra la necessità di usare oggetti classici (gli strumenti di misura) per ottenere informazioni dal mondo microfisico" (Peruzzi 2022, p. 21). Mentre per Einstein questo carattere della quantistica era soltanto provvisorio e superabile con una teoria completa, per Bohr era perfettamente in linea con la sua concezione di progresso della conoscenza scientifica (Peruzzi 2022): in altre parole, era indizio di una nuova struttura della realtà fisica, che andava riformulata radicalmente dai suoi fondamenti.

Per concludere l'approfondimento del tema E riporto un'espressione stimolo che non rientra in alcun tema, ma è interessante da recuperare dal corpus dei dati per offrire l'idea del sospiro di sollievo tirato dai fisici che difendevano la cosiddetta interpretazione di Copenhagen a conclusione del quinto congresso Solvay. Nella nona intervista Heisenberg ricorda quanto segue:

"[...] fu così emozionante perché era un tentativo di confutare la teoria e poi finalmente si vide che il tentativo era fallito. A quel punto, questo gruppo, Bohr, Ehrenfest, Pauli e io, sentivamo di essere sulla strada giusta, di avere un buon concetto e di non avere più problemi di chiarezza. Quindi eravamo tutti abbastanza contenti e sentivamo che ormai la partita era vinta."

Sebbene si tratti di un episodio circoscritto in un contesto complicato e in un arco temporale piuttosto ampio, nel quale Bohr e gran parte dei fisici del tempo condividevano uno stato emotivo prettamente negativo, è affascinante questa piccola parentesi di soddisfazione e fiducia; è una di quelle espressioni con cui si riesce a cogliere in modo particolarmente vivido il clima intellettuale del periodo e ad evidenziare come il progresso scientifico sia il prodotto di tensioni, confronti e momenti di temporanea stabilizzazione.

4.1.6 Tema F: Approccio epistemologico

L'ansia, la determinazione, la fiducia e la perplessità sono le emozioni epistemiche che caratterizzano il tema dell'approccio epistemologico dello scienziato. I tratti essenziali propri della maniera di porsi di Bohr di fronte alla conoscenza sono facilmente intuibili dalle seguenti espressioni stimolo, che riporto a titolo esemplificativo:

- *“Bohr insisteva sempre per la completa chiarezza”*
- *“Bohr era un uomo che voleva sempre raggiungere il massimo grado di chiarezza”*
- *“Bohr avrebbe portato la questione fino in fondo, fino al punto in cui si trovava proprio di fronte al muro”*
- *“Bohr cercava sempre di arrivare al nocciolo della questione in modo definitivo”*
- *“Le preoccupazioni di Bohr non si placavano facilmente con gli schemi matematici perché diceva: “Nemmeno lo schema matematico aiuta. Voglio prima capire come la natura evita effettivamente le contraddizioni”. ”*
- *“[...] non aveva dimostrato nulla matematicamente, sapeva solo che quella era più o meno la connessione”*

Nelle prime due espressioni è esplicita la tendenza verso l'assoluta chiarezza sia nella comprensione sia nella spiegazione di un fenomeno o di una teoria. Le successive due mostrano l'esigenza di sviscerare le questioni fino al nocciolo, conducendo l'indagine al limite estremo, dove ogni ulteriore avanzamento diventa impossibile senza una chiarificazione completa⁹. Dalle ultime si evince invece la priorità attribuita al senso fisico rispetto al formalismo matematico. Tali tre caratteristiche della postura epistemica di Bohr sono naturalmente connesse le une con le altre e ruotano attorno al concetto di “comprensione”, sul quale vale la

⁹ È interessante a tal proposito richiamare nuovamente l'articolo “Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics”, dove Bohr ricorda con piacere: “la preoccupazione di Einstein è stata quindi ancora una volta un graditissimo stimolo ad esplorare gli aspetti essenziali della situazione” (Bohr, 1949). Bohr si sentiva stimolato dalla preoccupazione di Einstein e dalle obiezioni che sollevava, proprio perché in questo modo andava a sviscerare la questione fino ai suoi nuclei essenziali.

pena soffermarsi. In filosofia della scienza la questione di come si collochi la comprensione nel quadro cognitivo ed epistemico di un soggetto o, più in generale, della comunità scientifica, non è sempre stata centrale. In *Nature and the Greeks* Schrödinger esplora le radici filosofiche greche della scienza moderna, sostenendo che una caratteristica fondamentale della scienza è che la natura sia comprensibile: “Su una di queste caratteristiche fondamentali non ci possono essere dubbi. È l’ipotesi che la manifestazione della Natura possa essere compresa. È la prospettiva non spiritualista, non superstiziosa, non magica. Si potrebbe dire molto di più al riguardo. In questo contesto bisognerebbe discutere le domande: cosa significa realmente la comprensibilità e in che senso, se non altro, la scienza fornisce spiegazioni?” (Schrödinger 1954, p. 90). Schrödinger osserva che i filosofi, da Hume a Mach fino ai positivisti, hanno negato che la scienza spieghi realmente: per loro, le teorie scientifiche sono solo descrizioni economiche dei fatti osservabili, non vere spiegazioni (de Regt et al. 2009). Schrödinger però contesta questa posizione: anche da un punto di vista positivista, la scienza non si limita a descrivere, ma mette in luce relazioni tra fenomeni, e questo può essere definito “comprensione”. Con Hempel e Oppenheim, negli anni ’50 il tema della spiegazione torna centrale nella filosofia della scienza; tuttavia, Hempel era ancora restio a parlare di “comprensione”, perché la considerava un concetto psicologico e pragmatico, irrilevante e non adatto alla filosofia “logica” della scienza. Nel libro *Scientific Understanding: Philosophical Perspectives*, in particolare nel capitolo intitolato “Understanding and Scientific Explanation”, gli autori riportano quanto segue: “Secondo Hempel, il segno distintivo della conoscenza scientifica è la sua natura oggettiva, e i filosofi della scienza dovrebbero quindi cercare di fornire una descrizione oggettivista della scienza, e in particolare della spiegazione scientifica, e pertanto dovrebbero ignorare gli aspetti pragmatici come la comprensione e l’intelligibilità.” (de Regt et al. 2009, p. 23), intendendo con “pragmatico” ciò che si riferisce ad agenti umani e che riguarda una relazione a tre termini tra la spiegazione, il fenomeno e la persona che usa la spiegazione per giungere alla comprensione del fenomeno (de Regt et al. 2009). Una visione oggettivista della scienza è ben lontana dal pensiero bohriano, che invece insiste sul ruolo costitutivo delle condizioni di osservazione, sul carattere contestuale della descrizione fisica e sull’impossibilità di separare completamente il contenuto della teoria dal modo in cui essa viene impiegata e compresa all’interno della pratica scientifica. Da Bohr fu avanzata la proposta di ridefinire il concetto di “oggettività” in termini della “richiesta epistemologica di descrizioni comunicabili in modo inequivocabile dei risultati osservazionali” (Folse 2001, p. 1); il che è naturalmente in linea con la chiarezza comunicativa che lo scienziato perseguiva. Quando nel 1927 lo scienziato nominò per la prima volta il concetto di complementarità a proposito del

coordinamento spazio-temporale e della causalità, sottolineò che “questa situazione ha conseguenze di vasta portata” (Bohr 1931, p. 54). Henry J. Folse, in *Bohr's Conception of the Quantum Mechanical State of a System and Its Role in the Framework of Complementarity*, suggerisce che tra le suddette conseguenze vi era il fatto che nel nuovo quadro teorico che si stava delineando Bohr spostò l’“oggettività” dalla dimensione ontologica che le era stata data dal meccanicismo classico a una dimensione epistemologica: l'oggettività si fonda su “basi epistemiche, su ciò che siamo giustificati ad accettare o credere, piuttosto che ontologiche” (Folse 2001, p. 10).

In linea con il pensiero di Bohr si colloca l’approccio contestuale alla comprensione scientifica proposto da de Regt e Dieks in *A Contextual Approach to Scientific Understanding*. Secondo gli autori, il raggiungimento della comprensione è uno degli obiettivi generali della scienza, sebbene le modalità con cui raggiungerla possano essere molteplici sulla base di variabili come l’epoca storica o le differenze di obiettivi a livello meso o micro¹⁰. Posto dunque che la scienza miri alla comprensione, ciò che è cruciale per conseguirla sono le teorie scientifiche. de Regt e Dieks puntano a una caratterizzazione generale della comprensione scientifica in grado di tenere in considerazione la variabilità degli specifici standard di intelligibilità impiegati nella pratica scientifica (de Regt & Dieks 2005). Essi affermano che avere una teoria intellegibile è una condizione necessaria e sufficiente per la comprensione scientifica e propongono i seguenti criteri:

- CUP (Criterion for Understanding Phenomena): Un fenomeno P è compreso se e solo se esiste una teoria T di P che sia intelligibile (e soddisfi i consueti requisiti logici ed empirici).
- CIT (Criterion for the Intelligibility of Theories): Una teoria scientifica T è intelligibile per lo scienziato S (nel contesto C) se e solo se S è in grado di riconoscere le conseguenze qualitativamente caratteristiche di T senza eseguire calcoli esatti.

La condizione di porre in secondo piano i “calcoli esatti” risuona bene con la priorità attribuita da Bohr al senso fisico delle teorie rispetto al formalismo matematico, dove la comprensione consiste nella capacità di afferrare le conseguenze qualitative più che nella manipolazione tecnica delle equazioni. Un approccio che si muove dal formalismo matematico a una descrizione della natura era l’esatto opposto del *modus operandi* filosofico di Bohr (Folse 2001). Come riportato da Folse in *Bohr's Conception of the Quantum Mechanical State of a*

¹⁰ Vi sono tre livelli su cui analizzare l'attività scientifica: il livello macro della scienza nel suo insieme; il livello meso delle comunità scientifiche; e il livello micro dei singoli scienziati (de Regt & Dieks 2005).

System and Its Role in the Framework of Complementarity, lo stesso approccio è stato proposto da Fuchs in una lettera a David Mermin, dove osserva:

“Il punto, a mio avviso, non è partire dallo spazio di Hilbert complesso, dall'evoluzione unitaria, dalla regola del prodotto tensoriale per combinare i sistemi, dall'identificazione delle misurazioni con operatori hermitiani, ecc., e dimostrare che il punto di vista di Bohr è coerente con tutto ciò. Piuttosto, si tratta di partire dal punto di vista di Bohr (o da una sua variante) e vedere che la precisa struttura matematica della teoria quantistica deve derivarne. Perché complesso invece che reale? Perché unitario, piuttosto che semplicemente lineare? Anzi, perché lineare? Perché prodotto tensoriale invece di somma tensoriale? E così via. Quando saremo in grado di rispondere a queste domande, allora comprenderemo veramente la complementarità.” (Fuchs 2001, p. 177)

Nello stesso articolo l'autore richiama *Causality and Complementarity* di Bohr del 1937, dove lo scienziato riflette sulla limitata validità del quadro della descrizione causale ordinaria:

“Tuttavia, una revisione ancora più approfondita del problema dell'osservazione si è resa necessaria in seguito alla scoperta del quanto d'azione universale, che ci ha insegnato che l'intero modello di descrizione della fisica classica, inclusa la teoria della relatività, conserva la sua adeguatezza solo finché tutte le quantità d'azione che entrano nella descrizione sono grandi rispetto al quanto di Planck. Quando ciò non accade, come nel campo della fisica atomica, appaiono nuove uniformità che non possono essere inserite nel quadro della descrizione causale ordinaria. [...] In effetti, questa circostanza ci presenta una situazione, per quanto riguarda l'analisi e la sintesi dell'esperienza, completamente nuova in fisica e ci costringe a sostituire l'ideale di causalità con un punto di vista più generale, solitamente definito complementarità. I tipi di informazione apparentemente incompatibili sul comportamento dell'oggetto in esame che otteniamo attraverso diverse configurazioni sperimentali non possono chiaramente essere messi in relazione tra loro nel modo usuale, ma possono, in quanto ugualmente essenziali per una descrizione esaustiva di tutta l'esperienza, essere considerati "complementari" tra loro.” (Bohr 1937, pp. 84-85)

Folse mette in luce che la linea di ragionamento di Bohr prende le mosse interamente dal postulato quantistico e dalla sua posizione filosofica generale rispetto alla necessità di rivedere i quadri concettuali con l'espansione dell'esperienza in nuovi ambiti. Bohr, infatti, non fa minimamente appello al formalismo di Heisenberg o Schrödinger o alle proprietà di una rappresentazione o di un modello matematico: “Bohr vide nelle relazioni di indeterminazione

la conferma di un punto di vista a cui era giunto principalmente attraverso l'analisi concettuale" (Folse 2001, p. 8).

Oltre alle espressioni stimolo appartenenti al presente tema, all'interno delle interviste esaminate vi sono dei passaggi interessanti a tal proposito. Nella prima, ad esempio, Heisenberg afferma di aver imparato più da Bohr che da chiunque altro quel nuovo tipo di fisica teorica che era quasi più sperimentale che matematica, e aggiunge:

"Egli non affrontava mai i problemi dal punto di vista matematico, ma da quello fisico. [...] In seguito bisogna certamente tradurre i concetti in forme matematiche, ma questo è poi più o meno un processo banale che deve essere risolto. La cosa primaria, invece, è che bisogna trovare le parole e i concetti per descrivere una situazione fisica insolita, che è molto difficile da comprendere. E io ebbi la sensazione che lì vi fosse un vero filosofo, che cercava proprio di ottenere i concetti mediante i quali si possono trattare le cose. È abbastanza facile parlare degli esperimenti; si vede una riga spettrale qui, si osserva questa intensità, ma bisogna trovare le connessioni — come è collegata l'intensità alla riga, e come la relazione di dispersione è collegata alla posizione della riga, e così via."

Nella sesta intervista troviamo invece:

"Bohr avrebbe sempre detto, «Beh, prima dobbiamo capire come funziona la fisica. Solo quando avremo compreso completamente di cosa si tratta, potremo allora sperare di rappresentarla mediante schemi matematici.»"

Un'altra testimonianza significativa la si individua nell'ottava intervista:

"Non era tanto interessato a uno schema matematico particolare. In particolare, non era affatto incline a dire: «Prendiamo, per esempio, la meccanica a matrici e limitiamoci a svilupparla; in questo modo dovremmo ottenere tutte le risposte corrette». Piuttosto pensava: «C'è uno strumento matematico — la meccanica a matrici. Ce n'è un altro — la meccanica ondulatoria. E potrebbero essercene ancora altri. Ma dobbiamo prima arrivare al fondo dell'interpretazione filosofica»."

Tali considerazioni di Heisenberg concludono la discussione del tema sull'approccio epistemologico, mostrando come, nel pensiero di Niels Bohr, la comprensione scientifica non abbia risieduto nell'eleganza del formalismo matematico, bensì nella chiarificazione concettuale del contenuto fisico delle teorie, entro i limiti imposti dall'esperienza e dalle condizioni di osservazione.

4.1.7 Tema G: Ruolo costitutivo del linguaggio

“Siamo sospesi nel linguaggio” è la posizione epistemologica di Bohr descritta da Pais in *Ritratti di scienziati geniali* (Pais 2012): queste poche parole, con le quali apro la discussione dell’ultimo tema, trasmettono un’immagine fortissima della condizione strutturale della conoscenza nell’ottica bohriana. Il tema del ruolo del linguaggio nello studio dell’ottica epistemica di Bohr non poteva non presentarsi, data l’elevata rilevanza che lo scienziato attribuiva alla parola e al suo utilizzo; ciò si connette bene con la sua costante ricerca di chiarezza trattata nel tema F. Infatti, alcune espressioni stimolo del tema precedente sono le stesse che hanno contribuito alla genesi di quello presente, come ad esempio:

- “Bohr insisteva sempre per la completa chiarezza”
- “Bohr voleva la completa chiarezza alla fine”
- “Bohr era un uomo che voleva sempre raggiungere il massimo grado di chiarezza”

In queste espressioni ci si riferisce a una chiarezza linguistica, data dall’esigenza di una comunicazione efficace della scienza, e in esse ho personalmente riconosciuto emozioni epistemiche quali *determinazione* e *ansia*: la determinazione è legata all’impegno nell’esprimersi in maniera limpida, l’ansia invece alla consapevolezza di non riuscire pienamente a farlo. Lo stile comunicativo di Bohr era infatti particolarmente sofisticato, al punto che, come ricordato da Heisenberg nella sesta intervista, Dirac un giorno disse: “Beh, Bohr avrebbe potuto diventare un poeta. Beh, si impegna così tanto con la lingua e la migliora sempre. È nato davvero come poeta. Avrebbe dovuto scrivere poesie”. Di certo Bohr non poteva che essere d’accordo con Dirac, come confermò indirettamente egli stesso: “Quando si parla di atomi, il linguaggio può essere usato solo come nella poesia. Anche il poeta non si preoccupa tanto di descrivere i fatti quanto di creare immagini e stabilire connessioni mentali” (Heisenberg 1971, p. 41).

La sua riflessione sul linguaggio, però, non si limitava a una questione di perfezionismo in termini espressivi. Essa andava ben oltre, andando a collocarsi su un livello autenticamente epistemologico e filosofico. È la *frustrazione* l’emozione epistemica che ho associato alle seguenti espressioni stimolo che rimandano a questo tipo di riflessione, che dagli anni Venti in poi ha permeato il pensiero scientifico-filosofico di Bohr:

- “Si rese conto anche che non avevamo ancora risolto il problema di trovare le parole giuste.”
- “Il problema era che persino Bohr, a quel tempo, si rendeva conto che non avevamo ancora le parole giuste per descrivere la cosa.”

- *“Fu proprio in questa fase dello sviluppo che ci si abituò gradualmente all'idea che non saremmo mai riusciti a uscire da quell'atmosfera di disperazione e sconforto perché non avevamo mai le parole per descrivere veramente la cosa.”*

La vecchia teoria quantistica stava cambiando l'ontologia dei fenomeni fisici e con essa l'epistemologia della fisica, mettendo in discussione l'atto stesso di descrizione, studio e comprensione attraverso le parole. Heisenberg, nella nona intervista, fa una riflessione sul dilemma del linguaggio, condivisa negli anni Venti dai suoi contemporanei, tra cui naturalmente Bohr:

“Il linguaggio naturale è molto debole, ma è molto più stabile del linguaggio scientifico. Il linguaggio scientifico è un linguaggio preciso, in cui si conosce il significato di ogni parola. E proprio nel momento in cui diventa molto preciso, o addirittura perfetto, non si sa quanto esso si avvicini alla natura. Pertanto, ci si trova sempre in questo dilemma. Se si usa un linguaggio preciso, cioè un linguaggio che può essere trasformato in matematica, non si sa come questo schema matematico si inserisca nella natura. Non si sa se si riesce a cogliere la natura. Oppure, se si usa il linguaggio naturale, per definizione si sa di averla compresa, perché questo è l'unico utilizzo del linguaggio naturale. In quel caso si sa di poter entrare in contatto con la natura, ma allo stesso tempo ci si rende conto che è piuttosto vaga e che non si potrà mai renderla del tutto precisa. Credo che questa tensione sia inevitabile, non si può evitarla. Questa è stata forse l'esperienza più significativa di questi mesi: la consapevolezza, maturata gradualmente, che si dovrà sempre convivere con questa tensione.”

Fu dunque in maniera graduale che si sviluppò tale consapevolezza, destinata a segnare profondamente la riflessione dei fondatori della meccanica quantistica. Non si trattava semplicemente di scegliere tra due registri espressivi, ma di riconoscere che ciascuno di essi comportava guadagni e perdite: da un lato, la precisione formale del linguaggio matematico, capace di garantire rigore ma non necessariamente aderenza immediata alla natura; dall'altro, la familiarità del linguaggio ordinario, che permette una forma di comprensione intuitiva, ma al prezzo di una irriducibile vaghezza. Nello stesso periodo i positivisti miravano a fondare la conoscenza su un linguaggio puramente osservativo, composto da enunciati “incorreggibili” direttamente riferiti ai dati dell'esperienza e privi di interpretazioni soggettive. Questo progetto, tuttavia, si rivelò fallimentare: non può esistere un vocabolario neutro che rispecchi immediatamente la realtà. Di conseguenza, positivisti, pragmatisti e realisti popperiani finirono per riconoscere una posizione convenzionalista, secondo cui la scelta del linguaggio scientifico dipende da criteri pragmatici e non da un fondamento ultimo (Folse 2001).

Sorge naturalmente in questo quadro un richiamo al punto di vista del filosofo Ludwig Wittgenstein, il quale, nel suo *Tractatus Logico-Philosophicus* mette in luce che i limiti del linguaggio indicano i limiti del mondo, e non viceversa. Wittgenstein sostiene che i contenuti della scienza non sono indipendenti dall'attività umana, ma rappresentano piuttosto una particolare costruzione del mondo. In opposizione al realismo scientifico classico, secondo cui la scienza descriverebbe oggetti esterni e indipendenti dalla mente, egli rifiuta l'idea di una continuità metafisica tra linguaggio naturale e linguaggio scientifico, negando che quest'ultimo possa avere un accesso privilegiato a una realtà "in sé". (Peruzzo Júnior & Valle 2014; Peruzzo Júnior 2018). In *Wittgenstein and the sciences*, l'autore afferma che "Wittgenstein faceva parte di un'antica tradizione che concepiva il linguaggio come riferimento, ovvero come il nostro modo di riferirci alle cose del mondo" (Peruzzo Júnior 2022, p. 145) e riporta che nel *Tractatus* Wittgenstein sostiene che il linguaggio costituisce la totalità delle proposizioni, così come il mondo è la totalità dei fatti semplici. Sebbene esistano proposizioni elementari e fatti ultimi non ulteriormente scomponibili, la loro comprensione dipende dall'identificazione dei nomi che li designano. In altre parole, anche se la realtà è concepita come composta da fatti e oggetti, questi risultano accessibili solo attraverso il sistema linguistico disponibile (Peruzzo Júnior 2022).

È a tale proposito di "linguaggio disponibile" che si colloca coerentemente la visione di Bohr sulla necessità imprescindibile di trattare la fisica quantistica in termini classici. Nelle interviste ad Heisenberg si trovano vari riferimenti alla questione dell'utilizzo del linguaggio classico per trattare anche i fenomeni quantistici. Lo scienziato intervistato fece infatti una riflessione su come, a differenza della relatività, nella teoria quantistica il linguaggio non si sia mai adattato allo schema matematico; l'unica maniera in cui avrebbe potuto adattarsi, secondo quanto dimostrato dai matematici, sarebbe stata quella di pagare il prezzo di rinunciare alla logica aristotelica. Per Heisenberg e i suoi contemporanei era chiaro che "l'unica cosa sensata da fare era usare le vecchie parole e ricordarsi sempre dei loro limiti". Nella stessa intervista egli riporta quanto già, a questo punto dell'analisi, ci si può aspettare: "Bohr ha sviluppato più ampiamente di chiunque altro l'idea che si debba parlare di fenomeni della meccanica quantistica in termini classici".

Come riportato da Giliberti e Loviseti (2024), all'inizio dell'estate del 1922 Bohr condusse una lezione all'Università di Gottinga, durante la quale osservò che:

“Non può esserci una descrizione esaustiva della struttura dell'atomo; tutte queste descrizioni devono necessariamente basarsi su concetti classici che non sono più validi. Vedete, chiunque cerchi di sviluppare una teoria del genere sta davvero tentando l'impossibile. Infatti,

intendiamo dire qualcosa sulla struttura dell'atomo, ma ci manca un linguaggio che ci permetta di farci capire. Siamo nella stessa situazione di un marinaio naufragato su un'isola remota, dove le condizioni sono radicalmente diverse da qualsiasi cosa abbia mai conosciuto e dove, per giunta, gli indigeni parlano una lingua completamente sconosciuta. Deve assolutamente farsi capire, ma non ha alcun mezzo per farlo. In una situazione del genere, una teoria non può "spiegare" nulla nel senso scientifico stretto del termine. Tutto ciò che può sperare di fare è rivelare le connessioni e, per il resto, lasciarci brancolare nel buio come meglio possiamo.” (Heisenberg 1971, p. 41)

Al congresso internazionale di Fisica tenutosi nel settembre 1927 a Como, durante una conferenza ribadì che per quanto i fenomeni quantistici trascendano la portata della spiegazione fisica classica, è necessario utilizzare termini classici. Bohr fa leva sul fatto che *“con la parola "esperimento" ci riferiamo a una situazione in cui possiamo dire agli altri cosa abbiamo fatto e cosa abbiamo imparato e che, pertanto, la descrizione dell'assetto sperimentale e dei risultati delle osservazioni deve essere espressa in un linguaggio inequivocabile con un'adeguata applicazione della terminologia della fisica classica”* (Bohr 1949, p. 7). Un punto cruciale da tenere bene a mente in questa riflessione, è che non bisogna sottovalutare la differenza fondamentale tra le leggi che interessano la fisica atomica e le esperienze quotidiane (Bohr 1937). Il nostro linguaggio nasce infatti da ciò con cui abbiamo a che fare a livello macroscopico durante l'esperienza di vita umana, motivo per cui, secondo Bohr, solo i concetti ordinari possono essere utilizzati nel rendere le osservazioni comunicabili, riproducibili e quindi scientificamente significative.

Camilleri & Schlosshauer, in *Niels Bohr as Philosopher of Experiment: Does Decoherence Theory Challenge Bohr's Doctrine of Classical Concepts?*, puntualizzano che la dottrina di Niels Bohr sulla primazia dei concetti classici è essenzialmente una tesi epistemologica. La principale preoccupazione di Bohr, sottolineano gli autori, era quella di articolare un'epistemologia dell'esperimento, non un'epistemologia della teoria quantistica; in questa prospettiva, il cosiddetto “taglio” tra apparato di misura e sistema quantistico non deriva da considerazioni ontologiche o dinamiche, ma da esigenze funzionali legate alla pratica sperimentale. Gli strumenti di misura, per poter svolgere la loro funzione epistemica, devono ammettere una descrizione classica; di conseguenza, anche quando si parla di oggetti quantistici, si ricorre inevitabilmente alla terminologia e al quadro concettuale della fisica classica. Il problema centrale della meccanica quantistica non consiste quindi, per Bohr, nell'interpretazione del formalismo, ma nella possibilità stessa della conoscenza sperimentale degli oggetti quantistici. In questo senso, la sua riflessione si configura come un tentativo di

elaborare un'epistemologia dell'esperimento, fondata sulla consapevolezza che non è più possibile distinguere nettamente tra il comportamento dell'oggetto e la sua interazione con gli strumenti di misura, pur restando tale distinzione una condizione necessaria per ogni descrizione scientifica (Camilleri & Schlosshauer 2015). Come osservato da Don Howard, "la dottrina dei concetti classici si rivela più fondamentale per la filosofia della fisica di Bohr rispetto a dottrine più note, come la complementarità" (Howard 1994, p. 202).

Per citare ancora una volta direttamente Bohr e porre enfasi sull'argomento, si considerino le seguenti sue affermazioni: "Per quanto gli effetti quantistici trascendano la portata dell'analisi fisica classica, la descrizione dell'assetto sperimentale e la registrazione delle osservazioni devono sempre essere espresse in un linguaggio comune integrato dalla terminologia della fisica classica" (Bohr 1948, p. 313); "l'interpretazione univoca di qualsiasi misurazione deve essere essenzialmente inquadrata in termini di teorie fisiche classiche, e dobbiamo affermare che in questo senso il linguaggio di Newton e Maxwell rimarrà il linguaggio dei fisici per sempre" (Bohr 1931, p. 692); "Non concordo pienamente con la tua enfasi sulla necessità di sviluppare concetti "nuovi". Non solo, per quanto ne so, finora non abbiamo indizi per una tale riorganizzazione, ma i "vecchi" concetti esperienziali mi sembrano inseparabilmente connessi con il fondamento della capacità umana di visualizzare" (Bohr 1985, p. 465).

È a quest'ultimo concetto che si lega spontaneamente il tema del linguaggio: la visualizzabilità. Tale questione ha giocato un ruolo centrale negli anni Venti ed è stata ampiamente dibattuta in particolare da Bohr, Heisenberg e Schrödinger. Mentre Bohr era dogmatico sull'impossibilità di un'interpretazione classicamente visualizzabile dei fenomeni quantistici (Saunders 2005) ed era pronto a una rinuncia radicale alla visualizzazione (Bohr 1937), Schrödinger era un forte sostenitore della posizione opposta, per cui "capire" significava riuscire a "visualizzare". Quest'ultimo, infatti, identificava l'intelligibilità di una teoria con la visualizzabilità nello spazio e nel tempo, sostenendo che "non possiamo realmente modificare il nostro modo di pensare nello spazio e nel tempo, e ciò che non possiamo comprendere al suo interno non possiamo comprenderlo affatto" (Schrödinger 1928, p. 27); egli era infatti fermamente convinto che l'*Anschaulichkeit*¹¹ fosse una condizione necessaria per l'intelligibilità delle teorie (de Regt 2017). In generale, secondo de Regt, la visualizzabilità è uno strumento e una guida utile per raggiungere la comprensione scientifica (de Regt 2017), ma la meccanica quantistica, durante il suo sviluppo, lasciò sempre meno spazio alla visualizzazione, il che fu una seria limitazione dell'intuizione fisica (Bucher 2008). Nel 1922 Bohr scrisse una lettera al filosofo Harald

¹¹ Termine tedesco che indica la possibilità di generare un'immagine chiara di un fenomeno e, quindi, "visualizzarlo".

Høffding, da cui si evince la sua posizione sulla necessità di consapevolezza dell'inadeguatezza delle immagini: "il mio punto di vista personale è che queste difficoltà sono di un tipo tale da lasciare ben poco spazio alla speranza di poter realizzare una descrizione spaziale e temporale che corrisponda alle nostre usuali impressioni sensoriali" (Bohr 1922). Dunque, sebbene Bohr trovasse imprescindibile l'utilizzo della terminologia classica per rendere comunicabile l'analisi dei fenomeni quantistici, era pienamente consapevole dei limiti imposti dal linguaggio, che conducevano inevitabilmente a un'impossibilità di realizzare immagini capaci di restituire una fedele rappresentazione della realtà quantistica.

4.1.8 Conclusione della thematic analysis

L'impiego della *thematic analysis* si è rivelato fondamentale per condurre un'esplorazione metodologicamente fondata delle interviste. La metodologia adottata ha infatti permesso di sviscerare i temi generati in tutta la loro complessità, interrogando in maniera sistematica non soltanto ciò che viene esplicitamente affermato dai soggetti intervistati, ma anche le strutture di significato, le dinamiche epistemiche e le sfumature emotive che attraversano il discorso. Mediante il continuo movimento tra espressioni stimolo, emozioni epistemiche ed elaborazione dei temi, è stato possibile sviluppare un'analisi ampia e articolata delle interviste, ricostruendo il modo in cui le emozioni epistemiche si manifestano e si intrecciano alla riflessione scientifica di Bohr.

È bene ricordare che questa fase dell'analisi si è basata su una personale scelta delle emozioni epistemiche da attribuire alle varie espressioni stimolo; pertanto, i temi generati e con essi i risultati dell'analisi sono da ritenersi un prodotto esclusivamente individuale.

4.2 Risultati dell'analisi emozionale: *labeling* tramite sondaggio e utilizzo del Circumplex Model of Epistemic Affect

Per giungere all'obiettivo di questa tesi, ovvero mostrare come si configura la dinamica emozionale di Niels Bohr nei due periodi affrontati, è necessario affinare l'analisi e addentrarsi nelle interviste con una lente che offra ancora più nitidezza.

A tale scopo, è stato utilizzato un altro modello di analisi emozionale, con il quale è stato possibile esaminare ogni singola espressione stimolo, offrendo loro una connotazione emotiva più delineata. Il modello a cui ci si riferisce è il Circumplex Model of Affect progettato dallo psicologo James Russel negli anni Ottanta (Russell 1980). Secondo tale modello, le emozioni

possono essere rappresentate in uno spazio bidimensionale, su un piano definito dalle due coordinate di Valence e Arousal (Figura 8).

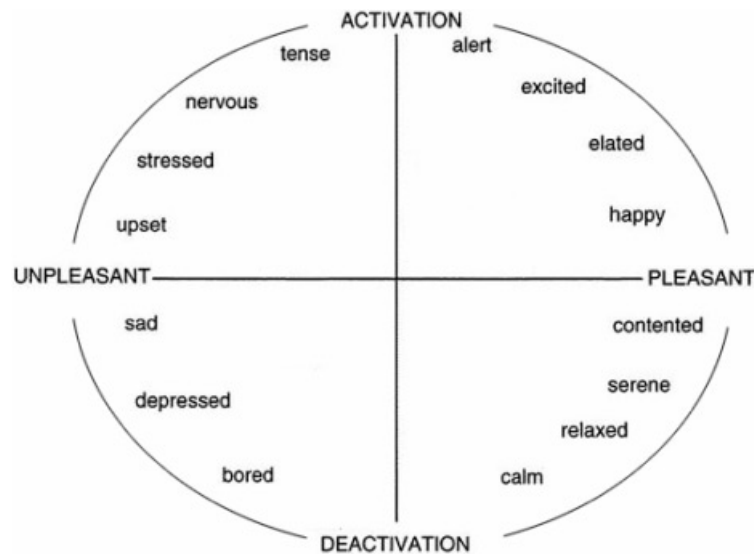


Figura 8: Rappresentazione grafica del Circumplex Model of Affect, in cui l'asse delle ascisse rappresenta la dimensione della Valence e quello delle ordinate rappresenta la dimensione dell'Arousal (o attivazione). Fonte: Posner J., Russel J.A., Peterson B.S., 2005, *The circumplex model of affect: An integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology*, Development and Psychopathology.

La dimensione della Valence rappresenta il grado in cui uno stato affettivo viene percepito come piacevole o spiacevole. Essa si dispone lungo un continuum che va da una polarità negativa, associata a emozioni come tristezza, frustrazione o paura, fino a una polarità positiva, legata a stati di piacere, gioia o soddisfazione. La valence permette di distinguere il tono emotivo generale di un'esperienza, indicando se essa viene valutata dal soggetto come gradevole o sgradevole. La dimensione dell'arousal, invece, rappresenta il livello di coinvolgimento fisiologico e psicologico associato a uno stato emotivo. Tale dimensione varia tra livelli di bassa attivazione, caratterizzati da calma, rilassamento o inattività, e livelli elevati di eccitazione, tensione o vigilanza. L'arousal indica l'intensità energetica e il grado di risposta del sistema fisiologico dell'organismo. Emozioni come entusiasmo, eccitazione o rabbia presentano generalmente un arousal elevato, poiché implicano una forte attivazione cognitiva e fisiologica; al contrario, stati emotivi come tranquillità, noia o soddisfazione sono associati a livelli più bassi di attivazione. Ogni emozione può essere interpretata come una combinazione lineare di queste due dimensioni (Posner et al. 2005) sul piano in Figura 8, con scale che vanno da -1 a 1 per entrambe le coordinate.

Il Circumplex model of Affect è un modello applicabile a generici *affective states* (Russell & Barrett 1999), mentre nel presente studio ci si focalizza su emozioni confinate nel contesto della conoscenza; è per questo motivo che si è fatto uso del Circumplex model of Epistemic Affect

(CMEA) proposto da Riccioni (Riccioni 2024) e mostrato in Figura 9: in esso sono rappresentate le emozioni epistemiche della lista in Tabella 1.

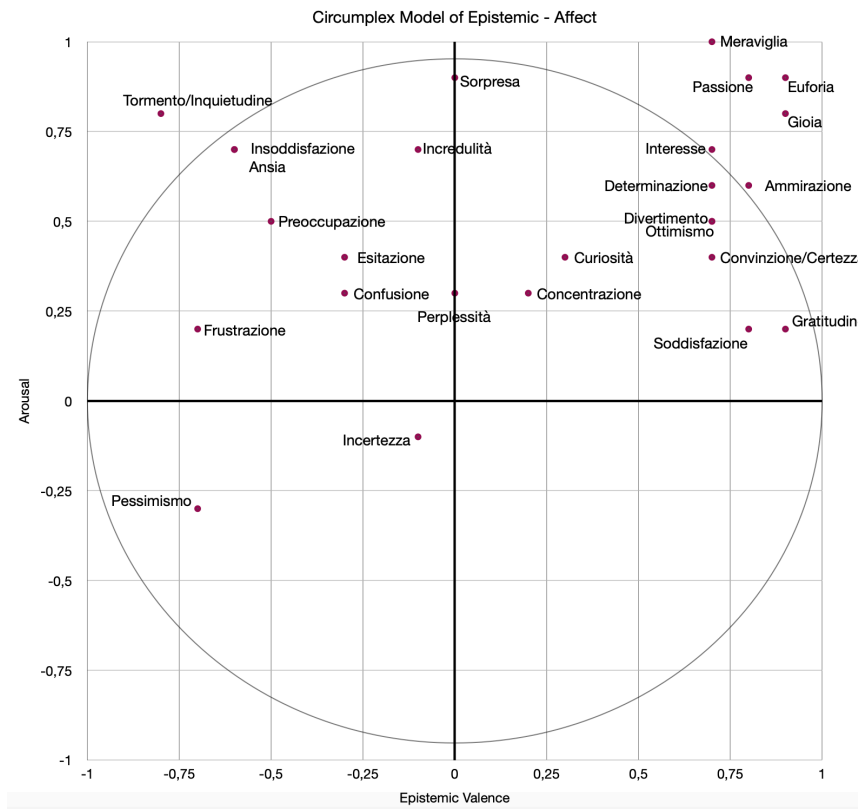


Figura 9: Rappresentazione grafica del Circumplex Model of Epistemic Affect. Fonte: Riccioni F., 2024, *Mappatura emozionale della genesi della Teoria della Relatività Ristretta*.

Come anticipato in precedenza, nel presente studio la lista delle emozioni epistemiche è stata ampliata tramite l'aggiunta della categoria "fiducia"; a questo punto è dunque opportuno esplicitarne la collocazione nel CMEA mediante la determinazione delle relative coordinate di Valence e Arousal.

Innanzitutto, è necessario chiarire cosa si intende per "fiducia epistémica". Per come il concetto è emerso durante la fase di analisi testuale, la fiducia sembra articolarsi in due dimensioni complementari: da un lato, una fiducia rivolta al soggetto conoscente, dunque alle proprie capacità cognitive e interpretative; dall'altro, una fiducia orientata verso l'oggetto della conoscenza, ossia verso la validità, la coerenza o la promettente fecondità epistémica di un'idea teorica. In particolare, nelle parole di Bohr, la prima dimensione emerge in espressioni come "è stata un'immensa fortuna che un uomo come me si sia imbattuto nello spettro dell'idrogeno"; la seconda, invece, appare in "l'intera faccenda era strana, ma ero completamente sicuro che fosse giusta", "ho sentito che c'era una possibilità che fosse sicuramente giusto" oppure "uno sentiva che poteva, usando la teoria quantistica in qualche modo, tirar fuori qualcosa da lì". Nel

set 2, Heisenberg afferma che “lui [Bohr] semplicemente sapeva che doveva esserci una connessione”, espressione che restituisce efficacemente il senso di fiducia epistemica nei confronti della struttura profonda del problema fisico indagato.

Per Anna Bortolan, la fiducia epistemica in sé stessi può essere concepita, in chiave fenomenologica, come un orientamento affettivo di fondo che struttura l’esperienza cognitiva e affettiva del soggetto, modulando l’insorgenza, lo sviluppo e la configurazione di altre emozioni epistemiche e, di conseguenza, influenzando le modalità attraverso cui il soggetto si rapporta a sé stesso, agli altri e al mondo nell’attività conoscitiva. La fiducia epistemica è dunque essa stessa una delle condizioni di possibilità per l’esperienza di emozioni epistemiche in generale (Bortolan 2024). Questa emozione si rivela pertanto fondamentale per la vita epistemica: confidare in se stessi a livello epistemologico porta ad essere più efficaci nel raggiungere gli obiettivi epistemiche, aumentando quindi le probabilità di successo (Dormandy 2024). Dunque, la fiducia epistemica emerge come una dimensione fondamentale dell’attività conoscitiva: non soltanto una disposizione cognitiva, ma anche una struttura affettiva e normativa che contribuisce a orientare il rapporto del soggetto con il sapere e con i propri processi di comprensione.

La seconda dimensione della fiducia epistemica è strettamente imparentata con la “sensazione di correttezza”: una sensazione metacognitiva che ci induce a credere di sapere qualcosa prima ancora di essere in grado di recuperare ciò che sappiamo (de Sousa 2009). Tale sensazione si riscontra spesso nelle parole di Bohr, come si evince dalle espressioni riportate sopra e dalle seguenti altre: “uno era convinto a priori che l’intera faccenda fosse corretta” e “tutta questa storia era in una sorta di nebbia: non si riusciva a capire bene di cosa si trattasse. Ma tutti avevano la sensazione che dovesse esserci qualcosa del genere.” La sensazione di sapere, secondo de Sousa, è coinvolta nella conoscenza e nell’inferenza ed è paragonabile alla sensazione di “avere qualcosa sulla punta della lingua” (de Sousa 2009), che rimanda all’idea di vicinanza a un obiettivo epistemico. Quest’idea è presente anche in *Personal Knowledge* di Polanyi, in cui l’autore descrive “il principio che determina le scelte euristiche nel processo di ricerca scientifica come una sensazione crescente di vicinanza a una verità nascosta, come quella che ci guida nel brancolare nel buio alla ricerca di un nome dimenticato” (Polanyi 1958, p. 326). Nel lessico di Polanyi, l’“impegno euristico” indica il coinvolgimento epistemico attraverso cui il ricercatore persegue una certa direzione teorica perché percepisce che essa possa condurre a una comprensione autentica della realtà, anche quando non possiede ancora prove definitive o una formulazione completa. Posto che “le implicazioni di una nuova conoscenza non possono mai essere conosciute al momento della sua nascita”, segue che “in

ogni atto di conoscenza entra un contributo tacito e appassionato della persona che conosce ciò che viene conosciuto” e questa risulta essere una componente necessaria di ogni conoscenza (Polanyi 1958, pp. 328-329). Tale prospettiva è coerente con la sensazione di fiducia nei confronti dell’oggetto epistemico – sia esso una teoria, un’ipotesi o un certo concetto – che viene percepito come promettente e significativo. La fiducia epistemica appare dunque intimamente connessa alla possibilità stessa della scoperta scientifica, poiché consente di mantenere un orientamento verso la comprensione anche quando gli strumenti teorici disponibili risultano ancora incompleti o insufficienti.

Resta ora da caratterizzare la “nuova” emozione epistemica in termini delle coordinate del CMEA: a tale scopo, segue una riflessione sul concetto di fiducia prendendo come termini di paragone alcune emozioni epistemiche ad esso vicine da un punto di vista semantico e concettuale, e di cui si conoscono già i valori di valence e arousal.

La fiducia è un’emozione epistemica che si può ritenere generalmente positiva (valence > 0) e moderatamente attivante (arousal medio-basso), dal momento che implica una certa sicurezza nella conoscenza o negli sviluppi futuri senza tuttavia comportare uno stato di elevata eccitazione. Nell’effettuare una triangolazione con le emozioni epistemiche riportate in Tabella 1, è possibile quindi considerare soltanto quelle che occupano la porzione destra del piano, ovvero quelle a valenza positiva. Tra queste, possono essere scartate le emozioni semanticamente più distanti da “fiducia”. Da tale scrematura, il campo si restringe a: concentrazione, convinzione/certezza, determinazione, interesse, ottimismo e soddisfazione. Si potrebbe interpretare la fiducia epistemica come una configurazione affettiva composita, risultante dalla combinazione delle suddette emozioni, le quali, insieme, generano il senso di *feeling of direction*¹². Le rispettive coordinate delle sei emozioni epistemiche sono: (0.2, 0.3), (0.7, 0.4), (0.7, 0.6), (0.7, 0.7), (0.7, 0.5), (0.8, 0.2). In prima approssimazione, è stata dunque effettuata una media tra le coordinate di valence e le coordinate di arousal, ottenendo come risultato (0.6, 0.5) per la fiducia. Per rafforzare il mio argomento, è stata interrogata l’intelligenza artificiale: la letteratura recente, infatti, suggerisce che strumenti basati su modelli linguistici come GPT possano essere impiegati in modo metodologicamente valido per compiti di classificazione emozionale e valutazione affettiva del testo, purché tali procedure vengano accompagnate da adeguate verifiche critiche (Rathje et al. 2024). Pertanto, dopo aver condiviso la precedente riflessione sulla concettualizzazione della fiducia epistemica, ho fornito all’AI l’intera lista di emozioni epistemiche insieme alle rispettive coordinate e le ho chiesto di

¹² Riccioni 2024.

determinare, su tale base, un range orientativo per le coordinate della fiducia. La risposta ha confermato la validità della stima effettuata mediante la media: infatti, per la valence è stato proposto un range medio-alto, tra 0.6 e 0.7, mentre per l'arousal il range è risultato compreso tra 0.4 e 0.5. Le motivazioni di tale stima risultano affidabili se si conduce un ragionamento indirizzato a “pesare” le emozioni. Infatti, se si sostiene, in termini generali, che la fiducia sia:

- più positiva di *concentrazione*;
- meno statica di *convinzione/certezza*;
- più moderata di *determinazione*;
- meno eccitante di *interesse*;
- più attiva di *soddisfazione*;
- meno positiva di *ottimismo*;

si trova una buona concordanza tra le diverse coordinate. Il grafico in Figura 9 può adesso essere completato con l'inserimento del punto di coordinate (0.6, 0.5).

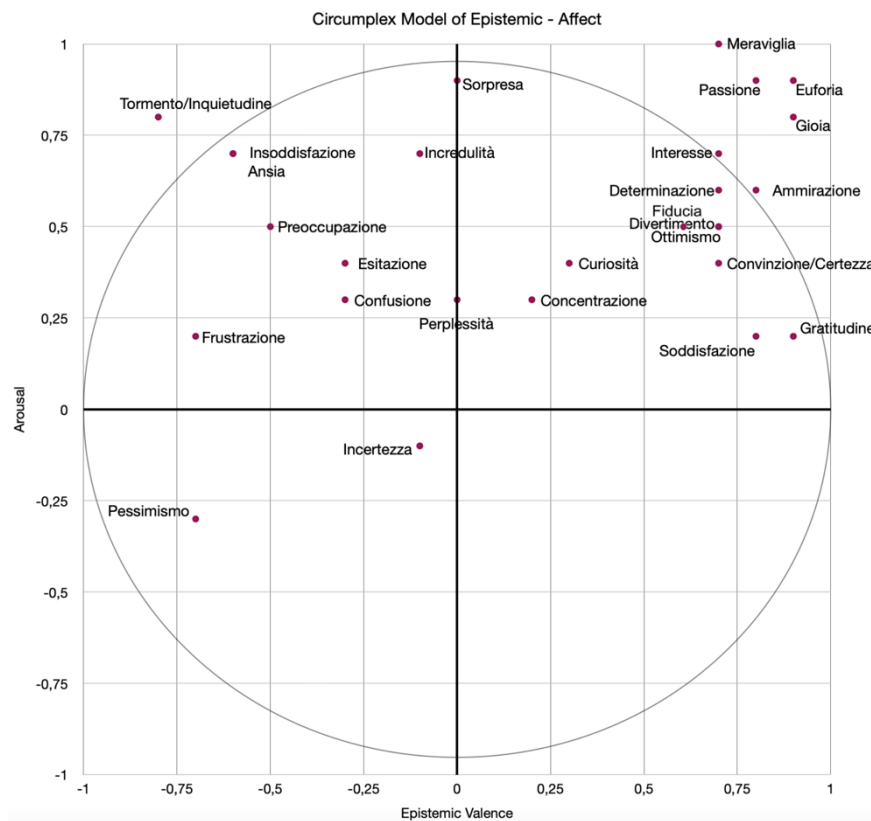


Figura 10: Rappresentazione grafica del Circumplex Model of Epistemic Affect con l'aggiunta del punto “Fiducia”, di coordinate (0.6, 0.5).

Di seguito si riporta la tabella con ciascuna categoria di emozione epistemica e le relative coordinate.

Emozioni Epistemiche	Valence	Arousal
Ammirazione	0.8	0.6
Ansia	-0.6	0.7
Concentrazione	0.2	0.3
Confusione	-0.3	0.3
Convinzione/Certezza	0.7	0.4
Curiosità	0.3	0.4
Determinazione	0.7	0.6
Divertimento	0.7	0.5
Esitazione	-0.3	0.4
Euforia	0.9	0.9
Fiducia	0.6	0.5
Frustrazione	-0.7	0.2
Gioia	0.9	0.8
Gratitudine	0.9	0.2
Incertezza	-0.1	-0.1
Incredulità	-0.1	0.7
Insoddisfazione	-0.6	0.7
Interesse	0.7	0.7
Meraviglia	0.7	1
Ottimismo	0.7	0.5
Passione	0.8	0.9
Perplexità	0	0.3
Pessimismo	-0.7	-0.3
Preoccupazione	-0.5	0.5
Soddisfazione	0.8	0.2
Sorpresa	0	0.9
Tormento/Inquietudine	-0.8	0.8

Tabella 4: Lista delle emozioni epistemiche con le rispettive coordinate di Valence e Arousal.

A questo punto dell'analisi è stato necessario rendere più rigorosa l'attività di *labeling* che in precedenza era stata fatta autonomamente, così da rendere la categorizzazione emotiva delle espressioni meno soggetta all'interpretazione individuale. Per questo motivo, è stata creata una survey suddivisa in 6 task su un campione di 26 studenti e studentesse, tra cui alcuni neolaureati, del corso di laurea magistrale in Didattica e Storia della Fisica. La scelta della suddivisione in più task è motivata dalla elevata quantità di dati raccolti dalle interviste, per cui è stato opportuno proporre diversi sondaggi di durata variabile, organizzati nella stessa maniera in cui sono stati presentati nel paragrafo 3.1 i contenuti delle interviste: i primi quattro corrispondono rispettivamente alle quattro interviste a Bohr; il task 5 riguarda la prima, la quarta e la sesta intervista del set 2, il task 6 le rimanenti cinque. I sondaggi sono stati proposti ai 26 soggetti sotto forma di task a scelta multipla tramite sei moduli, assegnati a seguito della presentazione dello studio. In Appendice B sono riportati tutti i dati raccolti.

Il titolo di ogni x^{13} task era: "Task x: Associa l'espressione stimolo alla categoria Emozione Epistemica".

La consegna, invece, variava leggermente a seconda del set di dati. Per il set 1:

"Il testo si riferisce a un'intervista del 1962 dei fisici e filosofi della scienza Thomas Kuhn e Leon Rosenfeld a Niels Bohr sullo sviluppo della teoria atomica e sulla nascita del suo modello atomico. All'interno del testo sono state individuate alcune espressioni linguistiche, denominate "espressioni stimolo", che possono essere connesse a specifiche emozioni, le cosiddette Emozioni Epistemiche.

Le Emozioni Epistemiche sono quelle emozioni legate al processo di ricerca, comprensione e costruzione del sapere. Le espressioni stimolo che rimandano a tali emozioni sono state sottolineate ed evidenziate: si richiede di associare ciascuna espressione stimolo a una o più categorie di emozioni epistemiche tra quelle proposte.

L'indagine è oggetto di una tesi di Laurea Magistrale in Physics. I dati saranno raccolti in forma anonima e verranno utilizzati unicamente per scopi di ricerca. I dati saranno trattati da persone specificamente autorizzate, con e senza l'uso di apparecchiature automatizzate. I dati raccolti e archiviati per la realizzazione dello studio in questione, saranno trattati in modo aggregato e saranno conservati per 10 anni."

Per il set 2 la consegna differiva solo nella prima parte:

"Il testo si riferisce ad alcune interviste del 1962 del fisico e filosofo della scienza Thomas Kuhn a Werner Heisenberg sullo sviluppo della teoria quantistica degli anni Venti."

¹³ Dove x varia fra 1 e 6.

E nell'aggiunta di:

“È da precisare che l'indagine è incentrata sulla figura di Niels Bohr; pertanto, le espressioni stimolo e di conseguenza lo stato emotivo che si studia è quello di Bohr, che in questo caso viene raccontato da Heisenberg.”

Di seguito alla consegna è stato indicato il tempo medio richiesto per ciascun sondaggio.

Task 1: Associa l'espressione stimolo alla categoria Emozione Epistemica

Il testo si riferisce a un'intervista del 1962 dei fisici e filosofi della scienza Thomas Kuhn e Leon Rosenfeld a Niels Bohr sullo sviluppo della teoria atomica e sulla nascita del suo modello atomico. All'interno del testo sono state individuate alcune espressioni linguistiche, denominate “espressioni stimolo”, che possono essere connesse a specifiche emozioni, le cosiddette Emozioni Epistemiche.

Le Emozioni Epistemiche sono quelle emozioni legate al processo di ricerca, comprensione e costruzione del sapere. Le espressioni stimolo che rimandano a tali emozioni sono state sottolineate ed evidenziate: si richiede di associare ciascuna espressione stimolo a una o più categorie di emozioni epistemiche tra quelle proposte.

L'indagine è oggetto di una tesi di Laurea Magistrale in Physics. I dati saranno raccolti in forma anonima e verranno utilizzati unicamente per scopi di ricerca. I dati saranno trattati da persone specificamente autorizzate, con e senza l'uso di apparecchiature automatizzate. I dati raccolti e archiviati per la realizzazione dello studio in questione, saranno trattati in modo aggregato e saranno conservati per 10 anni.

Tempo richiesto: 15 min

Figura 11: Template del Task 1.

Ciascuna intervista è stata suddivisa in sezioni in base alle espressioni stimolo individuate e di seguito ad ogni sezione è stata proposta la lista di categorie di emozioni epistemiche da selezionare. Ogni sondaggio è stato progettato in modo da consentire la scelta di una o più categorie per ogni espressione stimolo, in maniera tale da garantire una maggiore ricchezza interpretativa, ritenuta necessaria per rispettare la varietà di sfaccettature emotive che si possono cogliere da un'espressione linguistica. Per ogni espressione stimolo è stato ottenuto un istogramma di frequenze (Figura 12) dove la somma delle frequenze risulta, per i motivi appena esposti, superiore al numero dei partecipanti ai sondaggi. Ai fini della costruzione dei due grafici finali, per ciascuna espressione stimolo è stata infine considerata come dato da inserire nel CMEA la categoria di emozione epistemica che presentava la frequenza più alta. La realizzazione della survey si è rivelata dunque utile per ottenere per ogni espressione una caratterizzazione emotiva univoca e attendibile statisticamente.

[...] nel 1913 accaddero anche altre cose, in particolare la scoperta dell'effetto Stark. **Fu una scoperta davvero drammatica** e ci chiedemmo cosa si potesse fare con esso.

 copia grafica

26 risposte

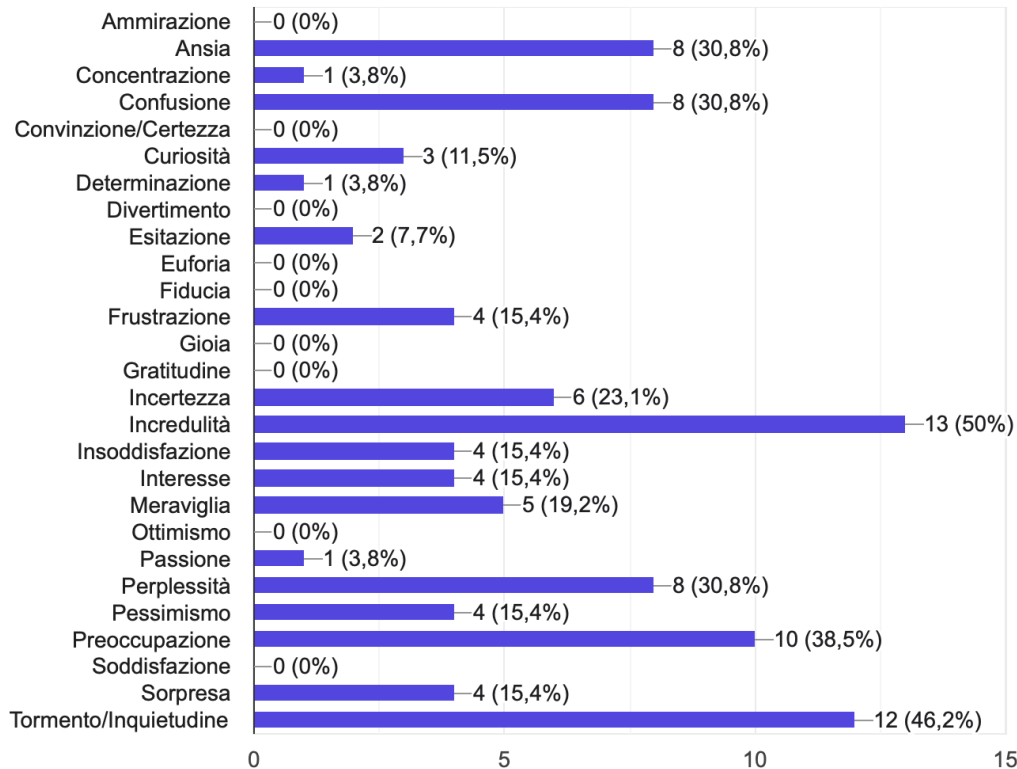


Figura 12: Istogramma relativo all'associazione di emozioni epistemiche a un'espressione stimolo del task 1.

Dai dati ottenuti (il cui totale è riportato nella tabella in Appendice A) sono stati realizzati due *Circumplex Model of Epistemic Affect*, uno per il primo set (Figura 13) e l'altro per il secondo (Figura 14), in cui si può osservare la dinamica emozionale di Bohr relativa rispettivamente alle prime teorie atomiche del Novecento e agli albori della nascita della meccanica quantistica.

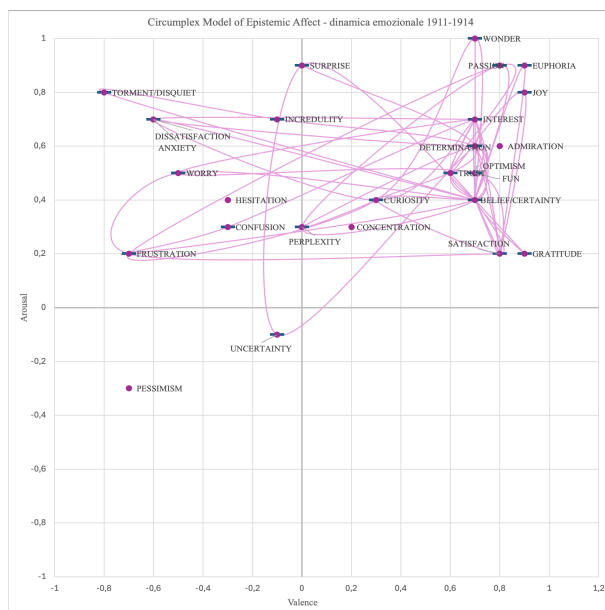


Figura 13: Dinamica emozionale della genesi della teoria atomica quantistica all'interno del Circumplex Model of Epistemic Affect.

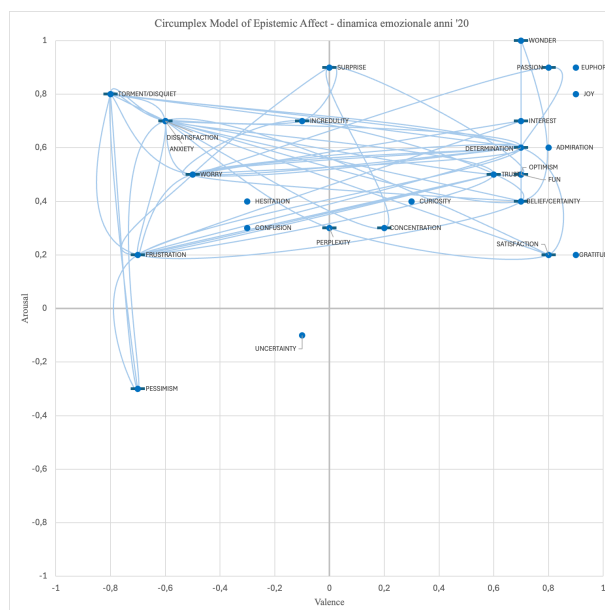


Figura 14: Dinamica emozionale della nascita della teoria della Meccanica Quantistica all'interno del Circumplex Model of Epistemic Affect.

Attraverso una ricostruzione storica è stato possibile ordinare le espressioni stimolo di ciascuna intervista in base all'anno di riferimento. Nel caso del set 1 la collocazione cronologica è risultata più agevole e precisa, per cui è stato possibile associare ciascuna espressione ad un periodo annuale definito tra il 1911 e il 1914 (in Appendice C si trovano i Circumplex Model of Epistemic Affect relativi a ciascun anno). Per quanto riguarda il set 2, invece, dal momento che l'arco temporale trattato è più ampio e l'andamento discorsivo nelle interviste è più fluido

e meno focalizzato su eventi specifici, la ricostruzione cronologica è da ritenersi meno accurata. Ad esempio, alcune espressioni stimolo, in quanto estrapolate da un discorso esplicitamente riferito al V Congresso Solvay, sono state facilmente riconducibili all'anno 1927; altre, invece, relative allo stato emotivo generale dei primi anni Venti, sono state collocate entro un intervallo temporale più esteso.

Ordinando cronologicamente le diverse espressioni, è stato possibile graficare separatamente Valence e Arousal per i due set di dati insieme al rispettivo trend, ai fini di osservarne lo sviluppo nel tempo (Figura 15 e Figura 16).

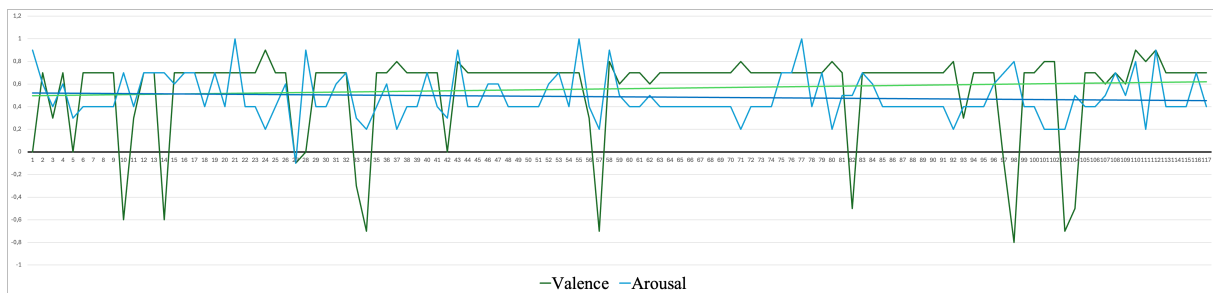


Figura 15: Andamento della Valence e dell'Arousal nel periodo tra il 1911 e il 1914.

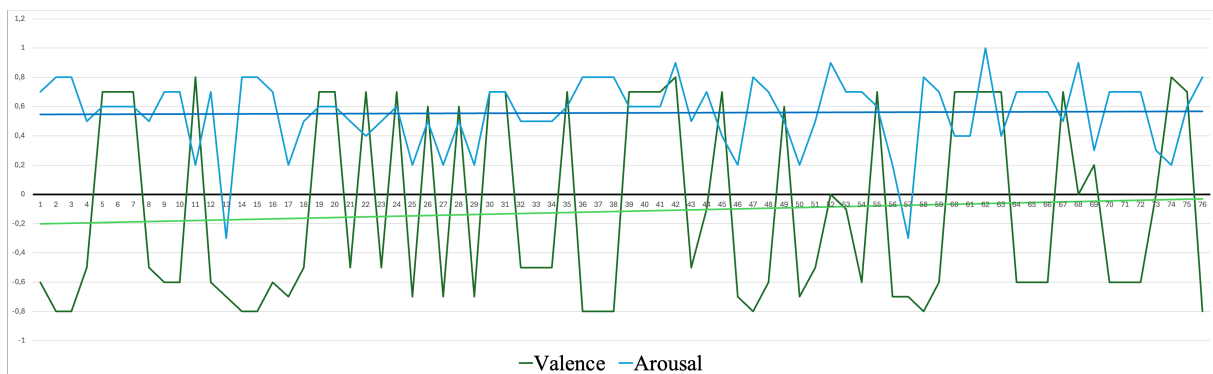


Figura 16: Andamento della Valence e dell'Arousal nel periodo tra il 1920 e il 1930.

Osservando i due grafici si nota che l'Arousal risulta leggermente decrescente nel primo periodo, mentre resta pressoché costante nel secondo: in entrambi i casi il trend si colloca tra i valori 0,4 e 0,6, indicando un'attivazione emotiva complessivamente medio-alta. Per quanto riguarda la Valence, invece, seppure in entrambi i casi sia crescente, appare evidente un brusco cambiamento tra un periodo e l'altro. Mentre nel grafico relativo al primo set il trend della Valence risulta positivo, in un range tra 0,4 e 0,6, nel secondo grafico esso si colloca al di sotto dello 0. Questo risultato conferma quanto evinto in fase iniziale dell'analisi, in seguito all'operazione di *labeling* individuale e alla realizzazione dei diagrammi in Figura 3 e in Figura

4. Dai diagrammi, infatti, era stata già osservata la contrapposizione tra la valenza emotiva positiva del primo periodo e quella negativa del secondo, adesso verificata e mostrata in Figura 15 e Figura 16.

I grafici del Circumplex Model of Epistemic Affect e i grafici dell'andamento della Valence e dell'Arousal consentono di osservare qualitativamente la dinamica emozionale che ha caratterizzato l'attività epistemica di Bohr. Tuttavia, è opportuno sottolineare che si tratta di valutazioni approssimative e inevitabilmente influenzate dalla soggettività di ciascuno dei partecipanti al sondaggio che hanno contribuito alla caratterizzazione emotiva delle espressioni stimolo. Infatti, al fine di realizzare una mappatura emozionale tramite il modello Circumplex, è stato necessario rendere tale caratterizzazione univoca, sebbene nella maggior parte dei casi lo spettro emotivo emerso fosse naturalmente più ampio. La pluralità di emozioni che concorrono a connotare ogni espressione si può osservare in Appendice B, dove sono illustrati tutti gli istogrammi di frequenze relativi ai sei sondaggi proposti. Nella maggior parte dei casi si nota infatti quanto variegata sia stata la scelta delle emozioni associabili a un'espressione stimolo, soprattutto laddove l'espressione non era stata individuata tramite il Marker A e dunque non presentava un contenuto emotivo esplicito. In un unico caso, relativo alla quinta espressione della prima intervista a Bohr, è risultato un pareggio di frequenza, in particolare per le emozioni "confusione" e "perplexità". Pur non essendo equivalenti, le due emozioni sono semanticamente vicine; pertanto, ho scelto personalmente di selezionare la seconda emozione, ritenendola più adatta all'espressione stimolo in questione. Inoltre, le emozioni di confusione e perplexità presentano lo stesso valore di Arousal (0,3), mentre la Valence risulta pari a -0,3 per la confusione e pari a 0 per la perplexità: per questo motivo, la scelta dell'una o dell'altra non avrebbe alterato significativamente i risultati, trattandosi peraltro di un caso isolato.

La complessità delle emozioni epistemiche potrebbe essere considerata seguendo la proposta di Riccioni (2024), secondo cui ogni espressione stimolo è associabile a un'emozione epistemica complessa, che può essere rappresentata come un vettore n -dimensionale nello spazio vettoriale delle emozioni epistemiche di base. In particolare, "nel Circumplex Model of *Epistemic Affect* ogni emozione epistemica complessa sarebbe quindi collocata nello spazio bidimensionale tramite le solite coordinate di Valence e Arousal, ma allo stesso tempo rappresentata da una sfera 26-dimensionale a indicarne la complessità locale" (Riccioni 2024, p. 85). Per ragioni di rigore metodologico, si precisa che l'estensione di tale formalismo richiede un adeguamento della dimensionalità dello spazio vettoriale considerato, che in questo caso risulta pari a 27 avendo ampliato la lista di categorie di emozioni epistemiche.

Capitolo 5

Conclusioni

In conclusione, quanto emerso dall'analisi delle interviste ha permesso di ricostruire una possibile mappatura emozionale di alcune fasi del percorso che condusse alla nascita della Meccanica Quantistica, considerata un caso esemplare di crisi delle categorie concettuali preesistenti e, dunque, un terreno particolarmente fertile entro cui indagare i processi di costruzione della conoscenza. La teoria della Meccanica Quantistica è infatti considerata uno degli esempi più significativi di discontinuità e rottura concettuale nella storia della scienza, poiché comporta il superamento di nozioni classiche profondamente radicate e l'adozione di nuove categorie interpretative per descrivere la realtà fisica. Tale caratteristica la rende un campo rilevante per lo studio delle dinamiche cognitive in un contesto epistemico, conferendole un significativo valore epistemologico. In questo studio, i processi di costruzione della conoscenza sono stati esplorati attraverso una prospettiva che considera la dimensione emotiva come loro parte integrante. Pertanto, le Emozioni Epistemiche sono state riconosciute come strumenti di conoscenza e componenti costitutive dell'attività epistemica, centrali nell'orientare e nel sostenere la ricerca scientifica. Le fonti utilizzate si sono rivelate privilegiate per l'indagine qui proposta, offrendo non solo la narrazione autobiografica di Bohr, ma anche un punto di vista esterno – quello di Heisenberg – che ha consentito di arricchire l'analisi fornendo spunti interessanti alla riflessione. Un contributo originale della tesi è stata la proposta di ampliamento della lista di emozioni epistemiche stilata da Francesca Riccioni, mediante l'aggiunta di “fiducia” come categoria a sé stante. Tale estensione si è resa necessaria per rappresentare in una maniera più appropriata alcune espressioni emerse dall'analisi delle interviste. La scelta metodologica della *thematic analysis* si è rivelata particolarmente adeguata al tipo di dati raccolti e perfettamente in linea con la domanda di ricerca di questa tesi, volta all'esplorazione della configurazione della dinamica emozionale di Bohr nei due periodi storici discussi. Infatti, disponendo di espressioni linguistiche come dati dello studio, successivamente associate a delle emozioni epistemiche, un metodo qualitativo spesso utilizzato nelle indagini di natura psicologica non poteva che risultare consona, in virtù della flessibilità richiesta da questo genere di analisi. La genesi dei temi a partire dalle espressioni stimolo, a loro volta correlate alle emozioni epistemiche, ha dato luogo a una dinamica di interconnessione fra i tre elementi; in questo modo, è stato possibile esplorare in profondità il materiale testuale, interpretando criticamente i pattern riconosciuti tra i dati e portando alla luce il ruolo delle

emozioni epistemiche come elemento strutturante dell'esperienza conoscitiva descritta nelle interviste. L'analisi è proseguita con un'indagine statistica su un campione di 26 studenti e studentesse del corso di laurea in Didattica e Storia della Fisica al fine di garantire rigore metodologico e di rendere più accurata la connotazione emotiva delle espressioni stimolo, inizialmente effettuata in maniera individuale. Conclusa l'operazione di *labeling* tramite la survey, è stato possibile realizzare dei grafici della dinamica emozionale di Bohr mediante l'impiego del Circumplex Model of Epistemic Affect, implementato dalla Dott.ssa Riccioni sulla base del modello di Russell relativo all'*affect* generico. L'integrazione della dimensione epistemica ha configurato il modello come uno strumento di natura interdisciplinare che nel presente lavoro è stato fondamentale per mappare le dinamiche emozionali in un contesto di produzione di conoscenza scientifica. L'interdisciplinarietà è infatti un punto di forza per l'argomento affrontato in questa tesi, che vede una combinazione di dimensioni psicologiche, scientifiche e storiche che ha garantito una comprensione più ampia e articolata del fenomeno studiato. Tale convergenza di prospettive ha infatti permesso di cogliere aspetti che difficilmente sarebbero emersi adottando un unico punto di vista disciplinare. È stata dunque valorizzata la complessità delle dinamiche coinvolte nella costruzione della conoscenza scientifica, intesa non soltanto come un processo cognitivo, ma anche come un'esperienza profondamente umana, storicamente situata e affettivamente connotata. Questa ricerca ha dunque raggiunto gli obiettivi prefissati e ha messo in luce le potenzialità di un approccio metodologico misto – tra un'analisi tematica e una mappatura sistematica delle dinamiche emozionali mediante il Circumplex Model of Epistemic Affect – rivelatosi efficace per l'indagine delle emozioni epistemiche e promettente in vista di futuri studi nel medesimo ambito.

Bibliografia

- American Institute of Physics. (s.d.). *Archive for History of Quantum Physics oral history collection*. Niels Bohr Library & Archives.
- Arango-Muñoz, S. 2014. The nature of epistemic feelings, *Philosophical Psychology*, 27:2, 193–211.
- Asikainen, M. A. & Hirvonen, P. E. 2009. A study of pre- and inservice physics teachers' understanding of photoelectric phenomenon as part of the development of a research-based quantum physics course, *Am. J. Phys.* 77, 658.
- Asimov, I. 1972. *Asimov's biographical encyclopedia of science and technology. The lives and achievements of 1195 great scientists from ancient times to the present, chronologically arranged*. Doubleday & Company, Inc., Garden City, NY
- Auerbach, C. F., & Silverstein, L. B. 2003. *Qualitative data: An introduction to coding and analysis*. New York: New York University Press.
- Ayene, M. Kriek, J. and Damtie, B. 2011. Wave-particle duality and uncertainty principle: Phenomenographic categories of description of tertiary physics students' depictions, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 7, 020113.
- Balmer, J. J. 1885. *Notiz über die Spectrallinien des Wasserstoffs. Annalen der Physik und Chemie*, 261(5), 80–87.
- Barber, B. 1961. *Resistance by scientists to scientific discovery. Science*, 134(3479), 596–602.
- Bezerra, V. A. 2003. *Schola quantorum: progresso, racionalidade e inconsistência na antiga teoria atômica. Parte I: desenvolvimento histórico, 1913–1925*. *Scientiae Studia*, 1(2), 177–213.
- Bohr, N. 1911a. *Letter from Niels Bohr to Harald Bohr*. In *The Bohr Letters*. Tekstnet.
- Bohr, N. 1911b. *Letter from Niels Bohr to Harald Bohr*. In *The Bohr Letters*. Tekstnet.
- Bohr, N. 1912. *Letter from Niels Bohr to Harald Bohr*. In *The Bohr Letters*. Tekstnet.
- Bohr, N. 1913. 'I. On the constitution of atoms and molecules', *Philosophical Magazine Series 6*, 26: 151,1-25
- Bohr, N. 1922. Letter to Høding, quoted in Favrhøldt (1992, 24–25).
- Bohr, N. 1931. *Atomtheorie und Naturbeschreibung* (Springer, Berlin). Translated as *Atomic Theory and the Description of Nature* (Cambridge University Press, Cambridge, 1934).
- Bohr, N. 1937. *Causality and complementarity. Philosophy of Science*, 4(3), 289–298.
- Bohr, N. 1948. "On the notions of causality and complementarity" *Dialectica* 2, 312–319. Reprinted in *Niels Bohr Collected Works, Vol. 7: Foundations of Quantum Physics II (1933–1958)*, J. Kalckar, ed. (North-Holland, Amsterdam, 1996), pp. 330–337.
- Bohr, N. 1949. *Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics*. In P. A. Schilpp (Ed.), *Albert Einstein: Philosopher-scientist* (pp. 200–241). The Library of Living Philosophers.

- Bohr, N. (1962a) Interview of Niels Bohr by Thomas S. Kuhn, Leon Rosenfeld, Aage Petersen, and Erik Rudinger on 1962 October 31. Session I. Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA (www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4517-1)
- Bohr, N. (1962b) Interview of Niels Bohr by Thomas S. Kuhn, Leon Rosenfeld, Aage Petersen, and Erik Rudinger on 1962 November 1. Session II. Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA (www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4517-2)
- Bohr, N. (1962c) Interview of Niels Bohr by Thomas S. Kuhn, Leon Rosenfeld, Aage Petersen, and Erik Rudinger on 1962 November 7. Session III. Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA (www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4517-3)
- Bohr, N. (1962d) Interview of Niels Bohr by Thomas S. Kuhn, Leon Rosenfeld, Aage Petersen, and Erik Rudinger on 1962 November 14. Session IV. Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA (www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4517-4)
- Bohr, N. 1985. *Collected Works*, Vol. VI, J. Kalckar, ed. (North Holland, Amsterdam).
- Bortolan, A. 2024. *Epistemic emotions and self-trust*. Synthese.
- Braun, V. & Clarke, V. 2006. *Using thematic analysis in psychology*, *Qualitative Research in Psychology*, 3:2, 77-101
- Bucher, M. 2007. *Coulomb oscillations as a remedy for the helium atom*.
- Bucher, M. 2008. *Rise and premature fall of the old quantum theory*.
- Butler-Kisber, L. 2010. *Qualitative inquiry: Thematic, narrative, and arts-informed perspectives*. London: Sage.
- Camilleri, K. & Schlosshauer, M. 2015. *Niels Bohr as philosopher of experiment: Does decoherence theory challenge Bohr's doctrine of classical concepts?* *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 49, 73–83.
- Candiotto, L. 2016. Extended affectivity as the cognition of primary intersubjectivity. *Phenomenology and Mind*, 11, 232–241.
- Candiotto, L. 2022. Epistemic emotions and co-inquiry: A situated approach. *Topoi*, 41(5), 839–848.
- de Regt, H. W. & Dieks, D. 2005. *A contextual approach to scientific understanding*. *Synthese*, 144(1), 137–170.
- de Regt, H. W. Leonelli, S. & Eigner, K. (Eds.). 2009. *Scientific understanding: Philosophical perspectives*. University of Pittsburgh Press.
- de Regt, H. W. 2017. *Visualizability and intelligibility: Insight into the quantum world*. In *Understanding scientific understanding* (pp. 226–259). Oxford University Press.
- De Sanctis, O. 2010. Ruolo e funzioni delle emozioni. In O. De Sanctis (Ed.), *Teorie delle emozioni*, 28–38. Università degli Studi Suor Orsola Benincasa.

- DeSantis, L. Ugarriza, DN. 2000. *The concept of theme as used in qualitative nursing research*. West J Nurs Res. 22(3):351-72.
- de Sousa, R. 2009. *Epistemic feelings*. *Mind & Matter*, 7(2), 139–161.
- Dirac, P.A.M. 1977, *Recollections of an exciting era*. In: Weiner C (ed) Proceedings of the international school of physics “Enrico Fermi”, Course LVII. Varenna on Lake Como, Villa Monastero, 31st July–12th August 1972. Academic Press, New York and London, pp 109–146.
- D’Mello, S. & Graesser, A. 2012. Dynamics of affective states during complex learning. *Learning and Instruction*, 22(2), 145–157.
- Dormandy, K. (2024). *Epistemic self-trust: It’s personal*. *Episteme*, 21(1), 34–49.
- Docktor, J. L. & Mestre, J. P. 2014. Synthesis of discipline-based education research in physics. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 10(2), 020119.
- Duit, R. 1991. *On the Role of Analogies and Metaphors in Learning Science*. *Science Education*, 75(6), 649–672.
- Duncan, A. Janssen, M. 2014. *The Stark effect in the Bohr–Sommerfeld theory and in Schrödinger’s wave mechanics*. Archive for History of Exact Sciences.
- Erduran, S., & Dagher, Z. R. (2014). *Reconceptualizing the Nature of Science for Science Education: Scientific Knowledge, Practices and Other Family Categories*. Dordrecht: Springer.
- Fischer, F. Kollar, I. Ufer, S. Sodian, B. Hussmann, H. Pekrun, R. Neuhaus, B. Dorner, B. Pankofer, S. Fischer, M. Strijbos, J.-W. Heene, M. & Eberle, J. 2014. Scientific reasoning and argumentation: Advancing an interdisciplinary research agenda in education. *Frontline Learning Research*, 2(3), 28–45.
- Folse, H. J. 2001. *Bohr’s conception of the quantum mechanical state of a system and its role in the framework of complementarity*.
- Freeman, W. J. 2000. Emotion is essential to all intentional behaviors. In M. D. Lewis & I. Granic (Eds.), *Emotion, self-organization, and development*, 209–235. Cambridge University Press.
- Fuchs, C. A. 2001. *Notes on a Paulian Idea: Foundational, Historical, Anecdotal & Forward-Looking Thoughts on the Quantum (Selected Correspondence)*, quant-ph/0105039, p. 177.
- Gentner, D. 1983. *Structure-mapping: A theoretical framework for analogy*. *Cognitive Science*, 7(2), 155–170.
- Gil, D. & Solbes, J. 1993. *The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science*, International Journal of Science Education, Vol. 15, No.3, pp. 255-260.
- Giliberti, M. Lovisetti, L. 2024. *Old quantum theory and early quantum mechanics: A historical perspective commented for the inquiring reader*. Springer.
- Glynn, S. M. Britton, B. K. Semrud-Clikeman, M. & Muth, K. D. 1989. Analogical reasoning and problem solving in science textbooks. In J. A. Glover, R. R. Ronning, & C. R. Reynolds (Eds.), *A handbook of creativity: Assessment, research and theory*. New York: Plenum.
- González, A., M. V. C. Fernández, P. V. Paoloni et al. 2017. Hope and anxiety in physics class: Exploring their motivational antecedents and influence on metacognition and performance. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(5), 558-585.

- Gupta, A. Elby, A. & Danielak, B. A. 2018. Exploring the entanglement of personal epistemologies and emotions in students' thinking. *Physical Review Physics Education Research*, 14(1), 010129.
- Heisenberg, W. 1962. Interview of Werner Heisenberg by Thomas S. Kuhn, and John Heilbron on 1962 November 30. Session I. Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA (www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-1)
- Heisenberg, W. 1963a. Interview of Werner Heisenberg by Thomas S. Kuhn on 1963 February 13. Session IV. Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA (www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-4)
- Heisenberg, W. 1963b. Interview of Werner Heisenberg by Thomas S. Kuhn on 1963 February 19. Session VI. Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA (www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-6)
- Heisenberg, W. 1963c. Interview of Werner Heisenberg by Thomas S. Kuhn on 1963 February 25. Session VIII. Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA (www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-8)
- Heisenberg, W. 1963d. Interview of Werner Heisenberg by Thomas S. Kuhn on 1963 February 27. Session IX. Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA (www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-9)
- Heisenberg, W. 1963e. Interview of Werner Heisenberg by Thomas S. Kuhn on 1963 February 28. Session X. Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA (www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-10)
- Heisenberg, W. 1963f. Interview of Werner Heisenberg by Thomas S. Kuhn, and John Heilbron on 1963 July 5. Session XI. Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA (www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-11)
- Heisenberg, W. 1963g. Interview of Werner Heisenberg by Thomas S. Kuhn, and John Heilbron on 1963 July 12. Session XII. Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA (www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-12)
- Heisenberg, W. 1971. *Physics and beyond: encounters and conversations*. Translated by Arnold J. Pomerans. Harper & Row, New York
- Hewitt, P. G. 2006. *Conceptual Physics* (12th ed.). Pearson Addison Wesley.
- Hidi, S. Renninger, K. A. 2006. *The four-phase model of interest development*. *Educational Psychologist*, 41(2), 111–127.
- Howard, D. 1994. *What makes a classical concept classical? Toward a reconstruction of Niels Bohr's philosophy of physics*. In: Niels Bohr and Contemporary Philosophy. Vol. 158 of Boston Studies in the Philosophy of Science. Kluwer, Dordrecht, pp. 201–229.
- Ireson, G. 1999. A multivariate analysis of undergraduate physics students' conceptions of quantum phenomena, *Eur. J. Phys.* 20, 193.
- Jaber, L. Z., L. Atkins, A. Elby, E. Suárez et al. 2023. Affect in physics learning: Entanglement with cognition and learning goals. In M.F. Taşar & P. R. L. Heron (eds.), *The international*

- handbook of physics education research: Learning physics, 14–1 – 14–26. New York: AIP Publishing LLC Melville.
- Jaber, L. Z. & Hammer D. 2016a. Engaging in science: A feeling for the discipline. *Journal of the Learning Sciences*, 25(2), 156–202.
- Jaber, L. Z. & Hammer, D. 2016b. Learning to feel like a scientist. *Science Education*, 100(2), 189–220.
- Karakostas, V. & Hadzidaki, P. 2005. Realism vs constructivism in contemporary physics: The impact of the debate on the understanding of quantum theory and its instructional process, *Sci. Educ.* 14, 607.
- Krijtenburg-Lewerissa, K. Pol, H. J. Brinkman, A. & van Joolingen, W. R. 2017. *Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education*. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010109.
- Kuhn, T. S. 1962, trad.1969. *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*. Torino: Einaudi.
- Kyza, E. A. Varda, C. Yoon, S. A. Shim, J. Zhang, W. Leung, V. Nguyen, Z. Törmänen, T. Järvenoja, H. Teo, C. L. Chan, C. Ong, A. Tran, T. C. Polman, J. L. Tabak, I. Reznick, N. Radinsky, J., & Hammer, D. (2025). *Exploring the Intersection of Emotions and Epistemic Engagement*. In *Proceedings of the 19th International Conference of the Learning Sciences (ICLS 2025)* (pp. 2287–2295). International Society of the Learning Sciences.
- Latour, B. 1987. *Science in Action: How to Follow Scientists and Engineers Through Society*. Harvard University Press.
- Laukenmann, M., M. Bleicher, S. Fuß, M. Gläser-Zikuda, P. Mayring, C. von Rhöneck et al. 2003. An investigation of the influence of emotional factors on learning in physics instruction. *International Journal of Science Education*, 25(4), 489–507.
- Levrini, O. Fantini, P. Tasquier, G. Pecori, B. Levin, M. et al. 2015. Defining and operationalizing appropriation for science learning. *Journal of the Learning Sciences*, 24(1), 93–136.
- Lin-Siegler, X. Ahn, J. N. Chen, J. Fang, F.-A. & Luna-Lucero, M. 2016. *Even Einstein struggled: Effects of learning about great scientists' struggles on high school students' motivation to learn science*. *Journal of Educational Psychology*, 108(3), 314–328.
- Longino, H. E. 1990. *Science as social knowledge: Values and objectivity in scientific inquiry*. Princeton University Press.
- Mashhadi, A. 1995. *Advanced Level Physics Students' Conceptions of Quantum Physics*. Paper presented at Ninth Annual Meeting of the Singapore Educational Research Association, Singapore, 22–24 novembre 1995.
- McKagan, S. B. Perkins, K. K. Dubson, M. Malley, C. Reid, S. LeMaster, R. & Wieman, C. E. 2008. Developing and researching PhET simulations for teaching quantum mechanics, *Am. J. Phys.* 76, 406.
- McKagan, S. B. Perkins, K. K. & C. E. Wieman, C. E. 2010. Design and validation of the quantum mechanics conceptual survey, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 6, 020121.
- Michellini, M. Ragazzon, R. Santi, L. & Stefanel, A. 2004. Discussion of a didactic proposal on quantum mechanics with secondary school students, *Nuovo Cimento C* 27, 555.

- Mishra, S. & Dey, A.K. 2022. *Understanding and identifying 'themes' in qualitative case study research*. South Asian Journal of Business and Management Cases, 11(2), 145–160.
- Morton, A. 2010. Epistemic emotions. In Peter Goldie (ed.), *The oxford handbook of philosophy of emotion*, 385 – 400. Oxford: Oxford Academic.
- Müller, R. & Wiesner, H. 2002. Teaching quantum mechanics on an introductory level, Am. J. Phys. 70, 200.
- Olsen, R. V. 2002. Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway, Int. J. Sci. Educ. 24, 565.
- Özcan, Ö. 2011. Pre-service physics teachers' comprehension of wave function, and operator concepts in quantum mechanics, Int. J. Phys. Sci. 6, 2768.
- Pais, A. 2012. *Ritratti di scienziati geniali*. Bollati Boringhieri.
- Patton, M.Q. 1990. *Qualitative evaluation and research methods*, 2nd ed. Sage.
- Pekrun, R. & Linnenbrink-Garcia, L. 2012. Academic emotions and student engagement. In S. L. Christenson, A. L. Reschly, & C. Wylie (Eds.), *Handbook of research on student engagement*, 259–282. Springer.
- Pekrun, R., Muis, K. R., Frenzel, A. C., & Goetz, T. (2018). *Emotions at school*. Routledge.
- Peruzzi, G. 2022. *Niels Bohr (1885–1962), one of the architects of modern physics. Il Nuovo Saggiatore*, 38(5–6), 9–23.
- Peruzzo, Júnior L. Valle, B. 2014. *O limite proposicional como elemento de transição no pensamento de Wittgenstein*. Revista de Filosofia Aurora, v. 26, n. 39, pp. 693-715, jul./dez.
- Peruzzo, Júnior L. 2018. Wittgenstein, *Certeza y la Dicotomía Hecho-Valor*. Cognitio-Estudios, v. 15, n. 2, p. 204-214, jul./dez.
- Peruzzo, Júnior L. 2022. *Wittgenstein and the sciences*. Revista de Filosofia Aurora, Curitiba, v. 34, n. 63, p. 141-154, out./dez.
- Petersen, A. 1963. *The philosophy of Niels Bohr*. Bull Atomic Scientists 19(7):8–14.
- Petri, J. & Niedderer, H. 1998. A learning pathway in high-school level quantum atomic physics, International Journal of Science Education, 20:9, 1075-1088.
- Pintrich, P. R. Marx, R. W. & Boyle, R. A. 1993. Beyond cold conceptual change: The role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change. *Review of Educational Research*, 63(2), 167–199.
- Polanyi, M. 1958. *Personal knowledge: Towards a post-critical philosophy*. University of Chicago Press.
- Posner, J. Russel, J.A. Peterson, B.S., 2005. *The circumplex model of affect: An integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology*, *Development and Psychopathology* 17, 715–734.
- Posner, G. J., K. A. Strike, P. W. Hewson, W. A. Gertzog et al. 1982. Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science education*, 66(2), 211-227.

- Pussetti, C. 2011. Emozioni. In C. Pennacini (Ed.), *La ricerca sul campo in antropologia: Oggetti e metodi*, 257–286. Carocci.
- Rathje, S. Mirea, D.-M. Sucholutsky, I. Marjeh, R. Robertson, C. E. & Van Bavel, J. J. 2024. *GPT is an effective tool for multilingual psychological text analysis*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 121(34), e2308950121.
- Riccioni, F. 2024. *Mappatura emozionale della genesi della teoria della relatività ristretta*. Tesi di Laurea Magistrale – Alma Mater Studiorum, Università di Bologna.
- Rubin, H. J. & Rubin, I. S. 2012. *Qualitative interviewing: The art of hearing data*. 3rd ed. Thousand Oaks, CA: Sage.
- Russell, J. A. 1980. A circumplex model of affect. *Journal of personality and social psychology*, 39(6), 1161.
- Russell, J. A. & Barrett, L. F. 1999. *Core affect, prototypical emotional episodes, and other things called emotion: Dissecting the elephant*. *Journal of Personality and Social Psychology*, 76(5), 805–819.
- Rutherford, E. 1911. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *Lond Edinb Dublin Philos Mag J Sci* 21(125):669–688
- Saldaña, J. 2013. *The coding manual for qualitative researchers*. 2nd ed. London: SAGE.
- Saunders, S. 2005. *Complementarity and Scientific Rationality*. *Found Phys* 35, 417–447.
- Schrödinger, E. 1928. *Space-time structure*. Cambridge University Press.
- Schrödinger, E. 1954. *Nature and the Greeks*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Shuman, V. & Scherer, K. R. 2014. *Concepts and structures of emotions*. In P. A. Alexander, R. Pekrun, & L. Linnenbrink-Garcia (Eds.), *International Handbook of Emotions in Education* (pp. 13–35). Routledge.
- Silva, L. 2022. Epistemic Emotions Justified. *Philosophies*, 7, 104.
- Singh, C. & Marshman, E. 2015. Review of student difficulties in upper-Level quantum mechanics, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 11, 020117.
- Soddy, F. 1913. *Nature* 92, 399–400; 423.
- Stanley, M. 2016. Why should physicists study history? *Physics Today*, 69(7), 38–44.
- Steinberg, R. Wittmann, M. C. Bao, L. & Redish, E. F. 1999. *The influence of student understanding of classical physics when learning quantum mechanics*. Paper presented at the Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching (NARST), Boston, MA.
- Su, R., Jiang, Z. & Wei, B. (2025). *Representations of Nature of Science in Science Textbooks: A Systematic Review*. *Science & Education*, 34, 585–607.
- Taber, K. S. 2005. Learning quanta: Barriers to stimulating transitions in student understanding of orbital ideas, *Sci. Educ.* 89, 94.
- Vilhunen, E. Lavonen, J. Chiu, M.-H. Juuti, K. & Salmela-Aro, K. 2023. Epistemic emotions and observations are intertwined in scientific sensemaking: A study among upper secondary physics students. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 21, 1545–1566.

- Vygotsky, L. 1978. *Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes* (Harvard University Press, Cambridge, MA).
- Wickman, P. O., V. Prain, R. Tytler R. et al. 2022. Aesthetics, affect, and making meaning in science education: An introduction. *International Journal of Science Education*, 44(5), 717-734.
- Wittgenstein, L. 2002. *Tractatus Logico-Philosophicus*. London, New York: Routledge.

Appendici

Appendice A – Tabella del totale dei dati raccolti

INTERVISTA 1 B			
n.	Espressione stimolo	Emozione epistémica associata individualmente	Emozione epistémica associata tramite i sondaggi
1	I found that there were a lot of errors in the earlier things	sorpresa	sorpresa
2	I went into it very carefully	curiosità	determinazione
3	I found out a lot of very curious things	sorpresa	curiosità
4	I went into it very thoroughly as regards the absorption and emission	determinazione, concentrazione	determinazione
5	it comes out that there is a paradox	sorpresa	perplexità
6	I knew very well that the quantum theory was (very valuable)	fiducia	convinzione/certezza
7	the quantum theory had to be taken seriously	convinzione/certezza	convinzione/certezza
8	To get Planck's formula one had to make a definite change in the classical theory; that is the point.	convinzione/certezza	convinzione/certezza
9	I only felt and showed that this was no way of getting out of the difficulties	determinazione	convinzione/certezza
10	That gave the reason to really think of a definite model of the atom	determinazione	determinazione
11	That was very interesting	interesse	interesse
12	it was mixed	confusione	confusione
13	It was terrible, you see, but it was so	frustrazione	frustrazione
14	it was clear	convinzione/certezza	convinzione/certezza
15	there was no doubt about anything	convinzione/certezza	convinzione/certezza
16	immense possibilities of simplicity	ottimismo	convinzione/certezza
17	it wasn't taken seriously at all. So I thought I'd better do it myself	determinazione	determinazione
18	I worked on enormous problems	determinazione	soddisfazione
19	I just saw how it had to be arranged	convinzione/certezza, determinazione	ottimismo
20	dramatic question of helium	tormento	preoccupazione
21	very interesting thing	interesse	interesse
22	So it had to be something	determinazione, ottimismo	determinazione
23	That was really the main reason	convinzione/certezza	convinzione/certezza
24	I make it completely correct and no doubt	convinzione, certezza	convinzione/certezza
25	it was clear	convinzione/certezza	convinzione/certezza
26	I was absolutely convinced of it	convinzione/certezza	convinzione/certezza
27	I felt that everything fell in line	convinzione/certezza	convinzione/certezza
28	I felt that everything now was (aligned)	convinzione/certezza	convinzione/certezza
29	the whole thing was clear	convinzione/certezza	convinzione/certezza
30	things came very interestingly	interesse	interesse
31	very difficult problem	frustrazione	interesse
32	And I discovered it, you see. Other people knew about it, but I discovered it for myself	soddisfazione	soddisfazione
33	I felt now we'll just see how the spectrum comes	determinazione	curiosità
34	I just felt it was different	insoddisfazione, curiosità	convinzione/certezza
35	I was quite clear	convinzione	convinzione/certezza
36	I felt that we had something to go on	determinazione	determinazione
37	a very dramatic thing	tormento	incredulità
38	the theory was essential right	convinzione/certezza	convinzione/certezza

INTERVISTA 2 B			
n.	Espressione stimolo	Emozione epistémica associata individualmente	Emozione epistémica associata tramite i sondaggi
1	I felt rather unhappy in Cambridge	insoddisfazione	insoddisfazione
2	I told Rutherford that I would like to come up and work and also get to know something about radioactivity	curiosità	curiosità
3	should be glad also to know something about radioactivity	curiosità	interesse
4	I had come to be so deeply interested in other things	interesse	interesse
5	I didn't learn much at Cambridge	insoddisfazione	insoddisfazione
6	I was prepared in Manchester and ready to throw myself into the work	determinazione	determinazione
7	it was really me who got the idea of the isotopes	soddisfazione	soddisfazione
8	I just believed it	convinzione/certezza	convinzione/certezza
9	Hevesy told me that there are more radioactive substances than there is room for them in the periodic table. And that I didn't know. But that was, to me, absolute evidence of this: that then one had the isotopes.	convinzione/certezza	convinzione/certezza
10	this is a very interesting thing	interesse	interesse
11	it immediately followed that	convinzione/certezza	convinzione/certezza
12	I felt that it was a complete accident with the atomic weights	convinzione/certezza	perplexità
13	I got into it really deeply	determinazione	passione
14	from that moment I understood	convinzione/certezza	convinzione/certezza
15	I was sure that it would be the final proof of his atom	convinzione/certezza	convinzione/certezza
16	I then also worked in between just to see how it fitted in with the quantum	determinazione	determinazione
17	It was clear [...] that we had something from which we could not proceed at all in any other way than by radical change	curiosità, determinazione	determinazione
18	it was clear	convinzione/certezza	convinzione/certezza
19	There could be no doubt, you see. There might have been doubt in many minds — but there was no doubt about it	convinzione/certezza	convinzione/certezza
20	when I came into these things, I really understood what there was to understand about it.	interesse, determinazione	convinzione/certezza
21	two substances which are isotopes [...] is obvious that the spectra are the same	convinzione/certezza	convinzione/certezza
22	it was actually the reason that I felt we have now got some knowledge of the atom, and now we must see how it fits	determinazione	determinazione
23	There can be no doubt	convinzione/certezza	convinzione/certezza
24	had absolutely certain	convinzione/certezza	convinzione/certezza
25	every word in any of their papers was obvious to me	convinzione/certezza	convinzione/certezza
26	this was what we were waiting for	gioia	convinzione/certezza
27	But a wonderful thing really was the solution. ... Then the solution — epistemologically — settled on the distinction between the wave and the ' particles.	meraviglia	meraviglia
28	this complementary point of view is really obvious, you see — it's completely obvious.	convinzione/certezza	convinzione/certezza

INTERVISTA 3 B			
n.	Espressione stimolo	Emozione epistémica associata individualmente	Emozione epistémica associata tramite i sondaggi
1	there are a lot of difficulties	frustrazione	preoccupazione
2	That I knew, you see; that is the point.	convinzione/certezza	convinzione/certezza
3	and this is not to praise — but it's done very well in this part three.	soddisfazione	soddisfazione
4	I just also anticipate their results	soddisfazione	soddisfazione
5	that was the pain	insoddisfazione	frustrazione
6	very much bothered by the apparent contradictions between your results [di Bohr] and Nicholson's	preoccupazione	tormento/inquietudine
7	I am now much more clear	convinzione/certezza	convinzione/certezza
8	it was very interesting really to hear his remarks about the Solvay meeting	interesse	interesse
9	In the former years I had been very interested in the quantum	interesse	interesse
10	It was only me, you see, who just was clear (that it was really unstable).	convinzione/certezza	convinzione/certezza
11	I was just interested in seeing, first of all, that it was unstable	interesse	interesse
12	it was an obvious thing that it was unstable	convinzione/certezza	convinzione/certezza
13	That was a most extraordinary thing that you should get every line in the spectra exactly the same in different elements	meraviglia	meraviglia
14	I took it for granted that that was the explanation of a very large part of the study of the radioactive substances	convinzione/certezza	convinzione/certezza
15	that was also a clean thing	convinzione	convinzione/certezza
16	it was then extreme luck that a man like me got into the hydrogen spectrum and so on	determinazione, fiducia	gratitudine
17	all these things were absolutely trivial	convinzione/certezza	convinzione/certezza
18	I was taking things seriously	determinazione	determinazione
19	I felt that this thing — that we got into the hydrogen spectrum — might have been an accident	incertezza	incertezza
20	it was a revelation that one could, out of the hydrogen spectrum, read the actual happening	sorpresa	sorpresa
21	I certainly knew the solution	convinzione/certezza	convinzione/certezza
22	It was completely right	convinzione/certezza	convinzione/certezza

INTERVISTA 4 B			
n.	Espressione stimolo	Emozione epistémica associata individualmente	Emozione epistémica associata tramite i sondaggi
1	(we) didn't think it was so difficult	fiducia	fiducia
2	the thing was completely clear to me. It was not clear in all the points — but it was completely clear that it was right	convinzione/certezza	convinzione/certezza
3	I was just taking the view that this is obvious	convinzione/certezza	convinzione/certezza
4	it was obvious to me	convinzione/certezza	convinzione/certezza
5	also equally obvious	convinzione/certezza	convinzione/certezza
6	there has certainly never been any trouble in my mind	convinzione/certezza	convinzione/certezza
7	it was so obvious	convinzione/certezza	convinzione/certezza
8	an obvious thing to say	convinzione/certezza	convinzione/certezza
9	It's an obvious thing	convinzione/certezza	convinzione/certezza
10	the nice thing	gioia	soddisfazione
11	One was convinced before hand that the thing was right	fiducia	convinzione/certezza
12	the whole thing was obvious	convinzione/certezza	convinzione/certezza
13	I considered the whole thing as completely obvious	convinzione/certezza	convinzione/certezza
14	I was very interested in it	interesse	interesse
15	a very interesting thing	interesse	interesse
16	so wonderfully	meraviglia	meraviglia
17	so convinced	convinzione/certezza	convinzione/certezza
18	that was a very interesting thing	interesse	interesse
19	one just went, without believing it	fiducia	fiducia
20	a great amount of joy	gioia	gioia
21	it fit it not exactly, but it fit it as exactly as one wanted it	fiducia	soddisfazione
22	that was an extraordinary thing	gioia	euforia
23	I never doubted it	convinzione/certezza	convinzione/certezza
24	I was interested	interesse	interesse
25	the whole thing was completely clear to me	convinzione/certezza	convinzione/certezza
26	The wonderful thing	meraviglia	meraviglia
27	we felt that now we have a system very different from anything which could give a spectrum, and yet it still has [one]	sorpresa	curiosità
28	it was just terrible	concentrazione	frustrazione
29	I was living for these things	passione	passione
30	one felt that one could, by using the quantum theory in some way, get something out of it	fiducia	fiducia
31	all these things were very simple; they were obvious	convinzione/certezza	convinzione/certezza
32	the whole thing is odd, but I was completely sure that it was right	fiducia	convinzione/certezza
33	I felt that there was a possibility which was surely right	fiducia	fiducia

INTERVISTA 1 H			
n.	Espressione stimolo	Emozione epistémica associata individualmente	Emozione epistémica associata tramite i sondaggi
1	worried	preoccupazione	preoccupazione
2	to urge always for complete clarity	determinazione, ansia	determinazione
3	Bohr wanted complete clarity to the end	determinazione	determinazione
4	deeply worried about the dualism between waves and Particles	preoccupazione	preoccupazione
5	there can be no doubt the quadratic Stark effect must be correct	convinzione/certezza	convinzione/certezza
6	one of the founders of quantum theory was deeply worried by its difficulties	preoccupazione	preoccupazione
7	Bohr had always to go to the bottom	determinazione	determinazione
8	and he saw that there was a serious difficulty	frustrazione	frustrazione

INTERVISTA 4 H			
n.	Espressione stimolo	Emozione epistemica associata individualmente	Emozione epistemica associata tramite i sondaggi
1	he had not proved anything mathematically, that he just knew that this was more or less the connection	fiducia	fiducia
2	Bohr was always very clear about the small degree of clarity he had. One could see from the way he talked that he took things extremely seriously and at the same time he saw that he could not really prove the things	frustrazione	frustrazione
3	He only knew that must be the connection	fiducia	fiducia
4	Bohr had not tried to go ahead at this point. He had found that it was too difficult	frustrazione	frustrazione

INTERVISTA 6 H			
n.	Espressione stimolo	Emozione epistemica associata individualmente	Emozione epistemica associata tramite i sondaggi
1	he was certainly interested in these intensity ratios	interesse	interesse
2	this paper on the fluorescence was also ... by this interest	interesse	interesse
3	mainly to avoid the worst inconsistencies and contradictions	ansia	preoccupazione
4	he was so worried about what came out	preoccupazione	preoccupazione
5	Bohr was more worried than anybody else about the inconsistencies of quantum theory	preoccupazione, tormento	preoccupazione
6	he always tried really to understand what is behind all these difficulties	determinazione	determinazione
7	Bohr really suffered from it	tormento	tormento/inquietudine
8	Bohr couldn't talk anything else	tormento	tormento/inquietudine
9	He in some way directly suffered from this impossibility to penetrate into this very "unanschaulich", unreasonable behavior of nature	tormento/inquietudine	tormento/inquietudine
10	he was a man who really wanted always to go to the last degree of clarity	determinazione	determinazione
11	He would never stop before the end	determinazione	determinazione
12	Bohr would follow the thing out to the very end, just to the point where he was just at the wall	determinazione	determinazione
13	there was nobody who had thought so deeply about the problems of quantum theory as Niels Bohr	passione	passione
14	Bohr was terribly worried and he was always in a state of despair about quantum theory and so on	preoccupazione, tormento	preoccupazione
15	with Bohr, one got into the real desperate problems, into those dreadful difficulties	determinazione	determinazione
16	take these difficulties so seriously	determinazione	determinazione
17	he wanted first to understand how contradictions are avoided, how things are connected	determinazione	determinazione
18	Bohr would always worry about the final inconsistencies of the whole thing	preoccupazione	preoccupazione
19	But Bohr was not satisfied before '27, before this uncertainty business came up. Bohr's worries were not easily satisfied by mathematical schemes because he would say, "Even the mathematical scheme does not help. I first want to understand how nature actually avoids contradictions."	insoddisfazione	insoddisfazione
20	these kind of worries were, for Bohr, of the most troublesome nature. He just didn't know what to say about it and was unhappy about it.	insoddisfazione	insoddisfazione
21	he did realize that essentially his models were a correct description of what happened	soddisfazione	soddisfazione
22	Bohr didn't have a real explanation of the closed shells, and he only could get pictures which sounded reasonable, but he didn't really understand.	confusione	insoddisfazione
23	he developed that state of mind where he did start worrying about problems	preoccupazione	ansia
24	He did see that the whole theory, on the one hand, was extremely successful, and on the other hand, was fundamentally wrong. And that was a contradiction which is very difficult to bear, especially for a man who has formulated the theory. So he was in a continuous inner discussion about this problem.	tormento/inquietudine	tormento/inquietudine
25	He always worried, "What has happened? Did I make a mistake? What could one change in the theory? It works so well here and still it contains contradictions."	preoccupazione, tormento, frustrazione	tormento/inquietudine
26	only later on he got back into the worries	preoccupazione	preoccupazione

INTERVISTA 8 H			
n.	Espressione stimolo	Emozione epistemica associata individualmente	Emozione epistemica associata tramite i sondaggi
1	Bohr was a bit uneasy about the whole thing	inquietudine	insoddisfazione
2	He felt very strongly, "Well, there must be something in it"	fiducia, determinazione	fiducia
3	he also saw that one had not solved the problem of using the right words	frustrazione	frustrazione
4	he was very much worried and then hoped that one should, from the mathematical scheme, learn what it was all about	preoccupazione	preoccupazione
5	Still, of course, it made an enormous impression on Bohr that one could now do the calculation	sorpresa	sorpresa
6	he was so much impressed by these paradoxes which were apparently unavoidable	ansia, sorpresa	incredulità
7	Bohr was then terribly anxious to get to the bottom of things	ansia	ansia
8	Bohr would always try to go definitely to the bottom	determinazione	determinazione
9	The trouble was that even Bohr at that time, of course, realized that we had not the right words yet to describe the thing	frustrazione	frustrazione
10	Probably Bohr has thought of the possibility that the paradoxes would remain as inconsistencies.	pessimismo, frustrazione	pessimismo
11	we both were in a kind of despair	frustrazione	tormento/inquietudine
12	Bohr was a bit upset about it because he still felt that it was not quite clear what I had written — not in every way clear	frustrazione	insoddisfazione

INTERVISTA 9 H			
n.	Espressione stimolo	Emozione epistemica associata individualmente	Emozione epistemica associata tramite i sondaggi
1	Bohr was very strongly convinced	convinzione/certezza	convinzione/certezza
2	It was just in this stage of development that one gradually became accustomed to the idea that we never really can get out of this atmosphere of despair and hopelessness because we never have words by which we can really do the thing	frustrazione	pessimismo
3	In so far now, this group, Bohr, Ehrenfest, Pauli, and myself, felt that they were on the right track, that they had a good concept and no lack of clarity anymore. So we were all quite happy and felt that now the game was won	gioia, soddisfazione	ottimismo

INTERVISTA 10 H			
n.	Espressione stimolo	Emozione epistemica associata individualmente	Emozione epistemica associata tramite i sondaggi
1	we found ourselves just tortured by this kind of dilemma	frustrazione	tormento/inquietudine
2	People were just in despair that nature could behave in such a strange way	frustrazione	tormento/inquietudine
3	He realized at the same time that this was really not satisfactory. Somehow it didn't work out as he wanted it	insoddisfazione	insoddisfazione
4	Bohr tried to avoid the complete contradiction. Actually Bohr did not succeed in avoiding it. For instance, in this discussion which I had with Bohr in 1922, it became clear in our discussion that you could not make the cut at this point	insoddisfazione	frustrazione
5	That made, apparently, some impression on Bohr to see that this cut couldn't be upheld	frustrazione	frustrazione
6	I would say that the tension grew very rapidly and the despair always became bigger and bigger and people would say, "Well, how hopeless is this situation?"	tormento/inquietudine	tormento/inquietudine
7	to use the words of Bohr, how difficult it was even for nature to avoid contradictions	frustrazione	tormento/inquietudine

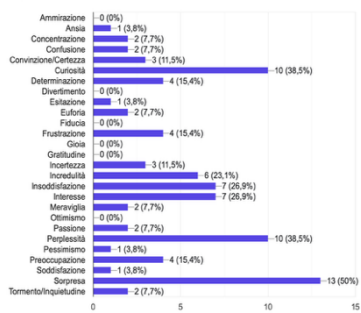
INTERVISTA 11 H			
n.	Espressione stimolo	Emozione epistemica associata individualmente	Emozione epistemica associata tramite i sondaggi
1	I felt a bit uneasy about it. So did Bohr	preoccupazione	insoddisfazione
2	Bohr was a bit surprised that one could use it that way; of course then he agreed about it	sorpresa	sorpresa
3	Bohr was thinking more and more about the dualism	determinazione	concentrazione
4	Bohr was, of course, most anxious to untangle the thing	ansia	ansia
5	it was Bohr who was very eager to give the correct answer by at least late in the evening	ansia	ansia
6	Bohr does not stop doing measurement problems at that stage of the game	determinazione, ansia	determinazione
7	Bohr felt that the problems had not been solved	insoddisfazione	insoddisfazione
8	He was not too happy about this idea of Uncertainty Relation and so on	perplexità	insoddisfazione
9	Bohr got more and more dissatisfied and he would discuss it over and over again	insoddisfazione	insoddisfazione

INTERVISTA 12 H			
n.	Espressione stimolo	Emozione epistemica associata individualmente	Emozione epistemica associata tramite i sondaggi
1	Bohr perhaps in the first moment did not feel exactly that way	incertezza	perplexità
2	but I think later on he saw quite well that this was an illustration that he wanted	soddisfazione	soddisfazione
3	the great paradox both for Bohr and for all of us in this discussion was always how can a concept, which in some way means our knowledge of something, be an objective property of the thing	perplexità	incredulità

Appendice B – Istogrammi delle espressioni stimolo relativi alla survey

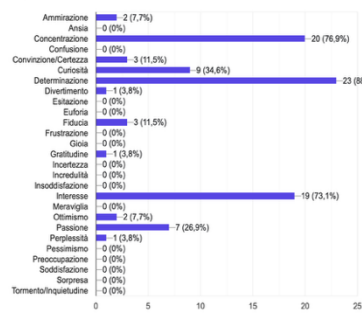
Prima di andare in Inghilterra, mi ero preparato scrivendo questo libro sulla teoria elettronica dei metalli. [...] Mi ero impegnato, sulla base della teoria...erto che c'erano molti errori nei lavori precedenti.

26 risposte



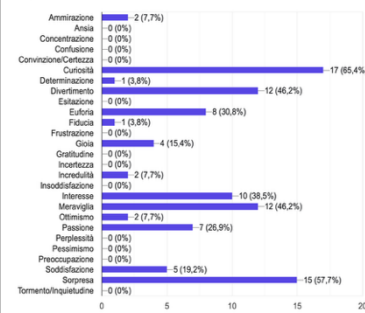
Il suggerimento venne da Christiansen, e poi lo approfondii con molta attenzione. Gran parte del materiale era presente nel compito d'esame, ma poi...troni e ioni. Li scoprii molte cose molto curiose.

26 risposte



Il suggerimento venne da Christiansen, e poi lo approfondii con molta attenzione. Gran parte del materiale era presente nel compito d'esame, ma poi...troni e ioni. Li scoprii molte cose molto curiose.

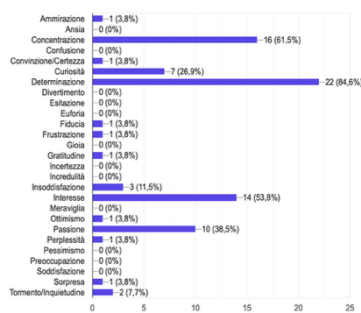
26 risposte



Intervista 1B - 1

Jeans e Rayleigh avevano dimostrato che, se si considera la teoria classica, si ha una distribuzione di energia, che in realtà non è una distribuzione di...a teoria quantistica doveva essere presa sul serio.

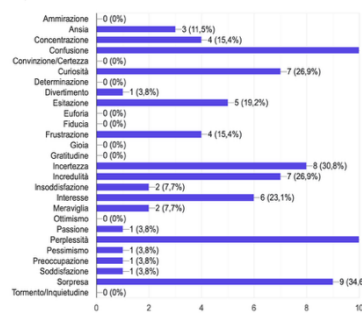
26 risposte



Intervista 1B - 2

Jeans e Rayleigh avevano dimostrato che, se si considera la teoria classica, si ha una distribuzione di energia, che in realtà non è una distribuzione di...a teoria quantistica doveva essere presa sul serio.

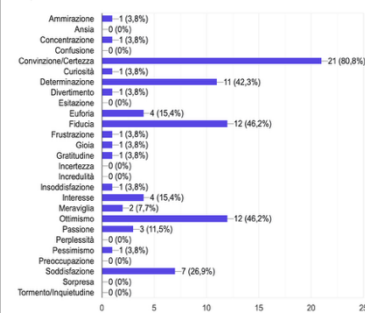
26 risposte



Intervista 1B - 3

Jeans e Rayleigh avevano dimostrato che, se si considera la teoria classica, si ha una distribuzione di energia, che in realtà non è una distribuzione di...a teoria quantistica doveva essere presa sul serio.

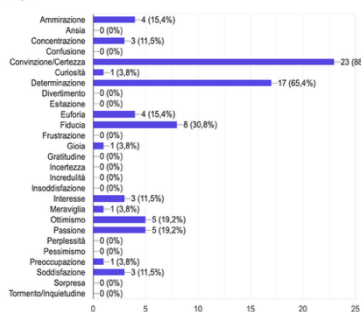
26 risposte



Intervista 1B - 4

Jeans e Rayleigh avevano dimostrato che, se si considera la teoria classica, si ha una distribuzione di energia, che in realtà non è una distribuzione di...a teoria quantistica doveva essere presa sul serio.

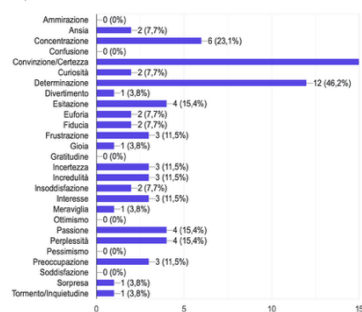
26 risposte



Intervista 1B - 5

Per ottenere la formula di Planck bisognava apportare una modifica sostanziale alla teoria classica; questo è il punto. E, quindi, questa questione, in cui...erna dell'atomo? Era terribile, capite, ma era così.

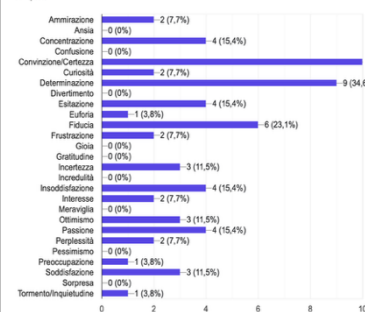
26 risposte



Intervista 1B - 6

Per ottenere la formula di Planck bisognava apportare una modifica sostanziale alla teoria classica; questo è il punto. E, quindi, questa questione, in cui...erna dell'atomo? Era terribile, capite, ma era così.

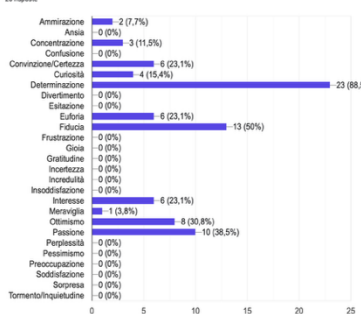
26 risposte



Intervista 1B - 7

Per ottenere la formula di Planck bisognava apportare una modifica sostanziale alla teoria classica; questo è il punto. E, quindi, questa questione, in cui...erna dell'atomo? Era terribile, capite, ma era così.

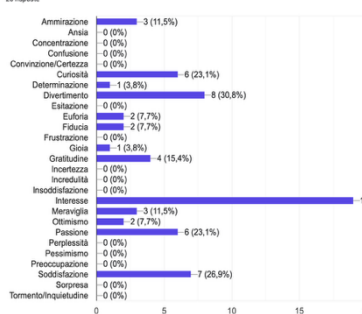
26 risposte



Intervista 1B - 8

Per ottenere la formula di Planck bisognava apportare una modifica sostanziale alla teoria classica; questo è il punto. E, quindi, questa questione, in cui...erna dell'atomo? Era terribile, capite, ma era così.

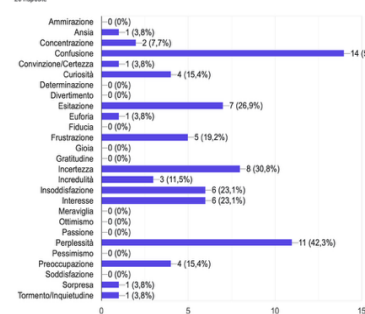
26 risposte



Intervista 1B - 9

Per ottenere la formula di Planck bisognava apportare una modifica sostanziale alla teoria classica; questo è il punto. E, quindi, questa questione, in cui...erna dell'atomo? Era terribile, capite, ma era così.

26 risposte



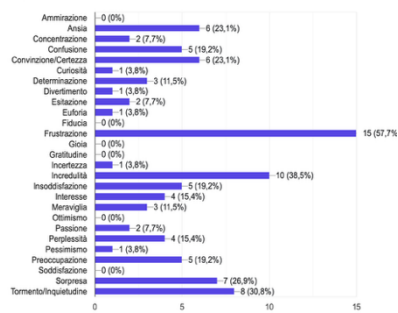
Intervista 1B - 10

Intervista 1B - 11

Intervista 1B - 12

Per ottenere la formula di Planck bisognava apportare una modifica sostanziale alla teoria classica; questo è il punto. E, quindi, questa questione, in cui ...era dell'atomo'. Era terribile, capite, ma era così.

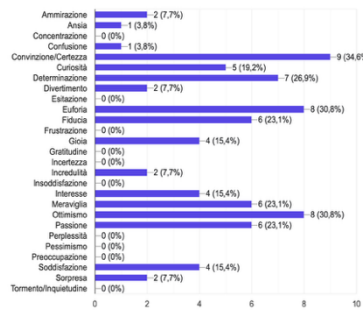
26 risposte



Intervista 1B - 13

Vedi, è una cosa molto curiosa perché - vedi, Rutherford (aveva già molto da fare). Stava scrivendo un grosso libro. Come ho scritto nell'articolo, poco ...rio. Così pensai che fosse meglio farlo io stesso.

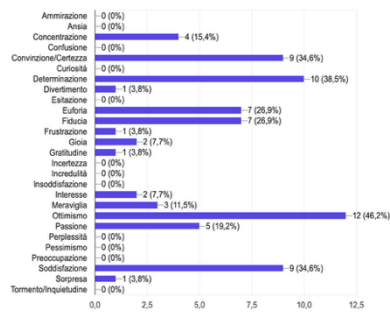
26 risposte



Intervista 1B - 16

Sì, ma vedi, ho lavorato su problemi enormi. Ho pensato a tutto. Ho scritto un articolo molto breve, in realtà. Ho persino lavorato sul magnetismo, perch...a.) Questa è stata davvero la ragione principale.

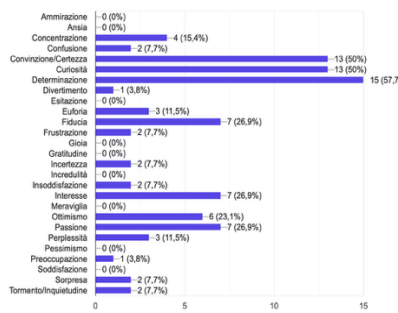
26 risposte



Intervista 1B - 19

Sì, ma vedi, ho lavorato su problemi enormi. Ho pensato a tutto. Ho scritto un articolo molto breve, in realtà. Ho persino lavorato sul magnetismo, perch...a.) Questa è stata davvero la ragione principale.

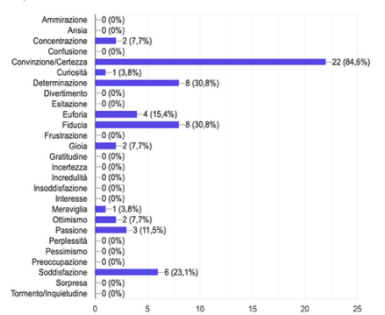
26 risposte



Intervista 1B - 22

[...] il punto era che ora avevamo i dati precisi, ora era chiaro che il numero di elettroni corrispondeva al numero nella tavola periodica di Mendeleeff. Sì, quello era il punto. Quindi non c'erano più dubbi.

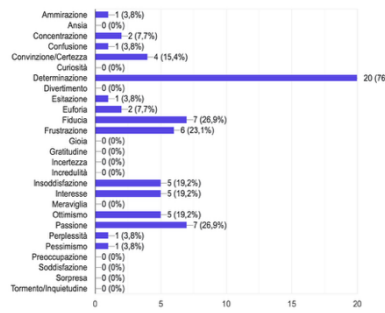
26 risposte



Intervista 1B - 14

Vedi, è una cosa molto curiosa perché - vedi, Rutherford (aveva già molto da fare). Stava scrivendo un grosso libro. Come ho scritto nell'articolo, poco ...erio. Così pensai che fosse meglio farlo io stesso.

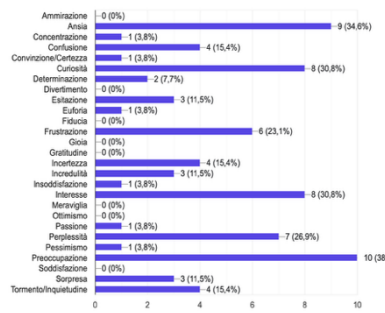
26 risposte



Intervista 1B - 17

Sì, ma vedi, ho lavorato su problemi enormi. Ho pensato a tutto. Ho scritto un articolo molto breve, in realtà. Ho persino lavorato sul magnetismo, perch...a.) Questa è stata davvero la ragione principale.

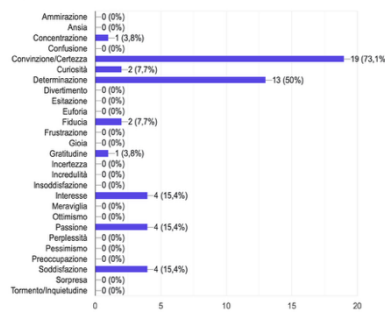
26 risposte



Intervista 1B - 20

Sì, ma vedi, ho lavorato su problemi enormi. Ho pensato a tutto. Ho scritto un articolo molto breve, in realtà. Ho persino lavorato sul magnetismo, perch...a.) Questa è stata davvero la ragione principale.

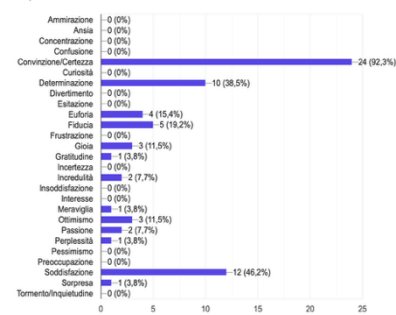
26 risposte



Intervista 1B - 23

[...] il punto era che ora avevamo i dati precisi, ora era chiaro che il numero di elettroni corrispondeva al numero nella tavola periodica di Mendeleeff. Sì, quello era il punto. Quindi non c'erano più dubbi.

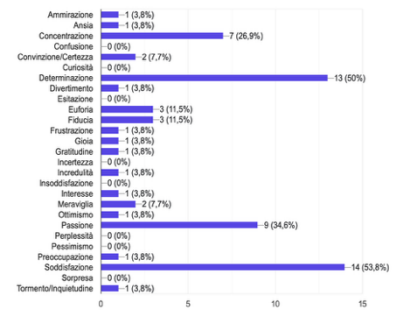
26 risposte



Intervista 1B - 15

Sì, ma vedi, ho lavorato su problemi enormi. Ho pensato a tutto. Ho scritto un articolo molto breve, in realtà. Ho persino lavorato sul magnetismo, perch...a.) Questa è stata davvero la ragione principale.

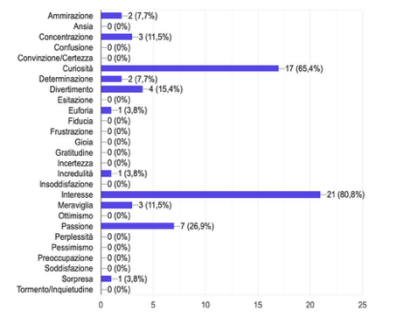
26 risposte



Intervista 1B - 18

Sì, ma vedi, ho lavorato su problemi enormi. Ho pensato a tutto. Ho scritto un articolo molto breve, in realtà. Ho persino lavorato sul magnetismo, perch...a.) Questa è stata davvero la ragione principale.

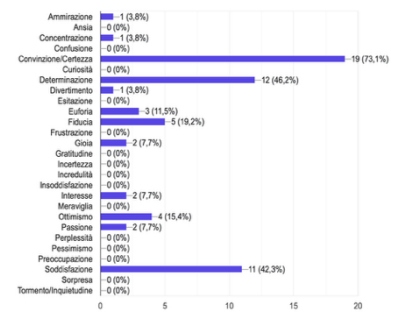
26 risposte



Intervista 1B - 21

Rosenfeld: Quando parlai di un fattore due, allora, c'è effettivamente, nel suo primo articolo, un punto in cui compare un fattore due, introdotto in u...ne corretta e senza alcun dubbio sul fattore due.

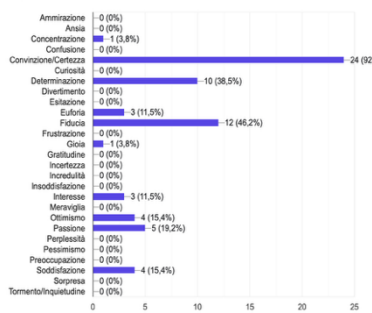
26 risposte



Intervista 1B - 24

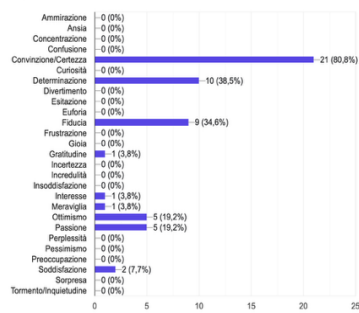
Kuhn: Signore, era convinto della probabile validità dell'atomo di Rutherford fin dal primo ascolto? Bohr: Sì. Ne ero assolutamente convinto. P.riore sviluppo della struttura a strati dell'atomo.

26 risposte



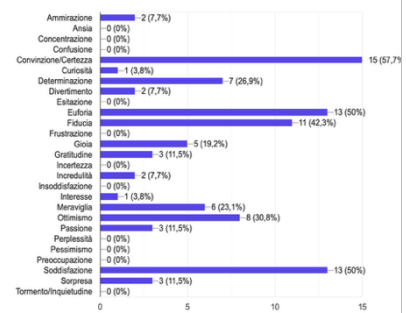
Kuhn: Signore, era convinto della probabile validità dell'atomo di Rutherford fin dal primo ascolto? Bohr: Sì. Ne ero assolutamente convinto. P.riore sviluppo della struttura a strati dell'atomo.

26 risposte



Kuhn: Signore, era convinto della probabile validità dell'atomo di Rutherford fin dal primo ascolto? Bohr: Sì. Ne ero assolutamente convinto. P.riore sviluppo della struttura a strati dell'atomo.

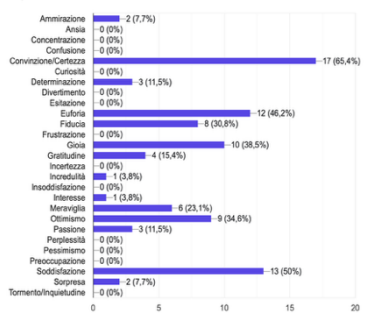
26 risposte



Intervista 1B - 25

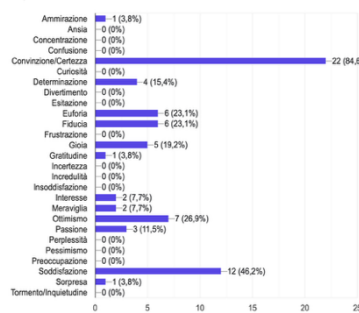
Kuhn: Signore, era convinto della probabile validità dell'atomo di Rutherford fin dal primo ascolto? Bohr: Sì. Ne ero assolutamente convinto. P.riore sviluppo della struttura a strati dell'atomo.

26 risposte



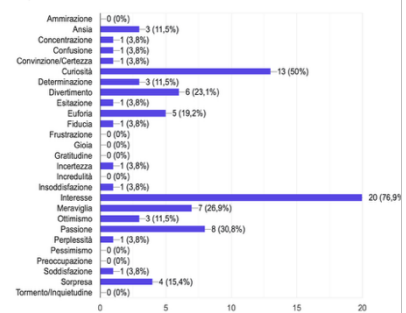
Kuhn: Signore, era convinto della probabile validità dell'atomo di Rutherford fin dal primo ascolto? Bohr: Sì. Ne ero assolutamente convinto. P.riore sviluppo della struttura a strati dell'atomo.

26 risposte



Kuhn: Signore, era convinto della probabile validità dell'atomo di Rutherford fin dal primo ascolto? Bohr: Sì. Ne ero assolutamente convinto. P.riore sviluppo della struttura a strati dell'atomo.

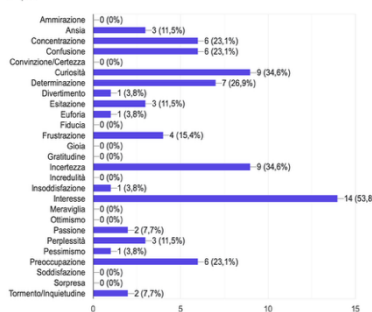
26 risposte



Intervista 1B - 28

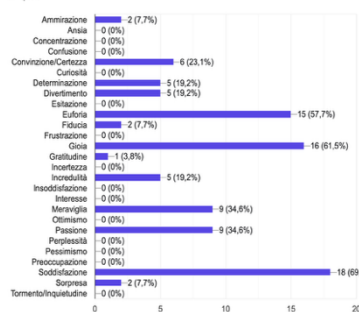
Gli spettri rappresentavano un problema molto complesso. C'erano due scuole di pensiero diverse: quella inglese e quella degli spettroscopisti. Si pe...ho pensato: "Vediamo come si sviluppa lo spettro".

26 risposte



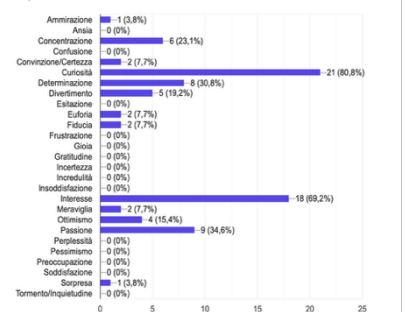
Gli spettri rappresentavano un problema molto complesso. C'erano due scuole di pensiero diverse: quella inglese e quella degli spettroscopisti. Si pe...ho pensato: "Vediamo come si sviluppa lo spettro".

26 risposte



Gli spettri rappresentavano un problema molto complesso. C'erano due scuole di pensiero diverse: quella inglese e quella degli spettroscopisti. Si pe...ho pensato: "Vediamo come si sviluppa lo spettro".

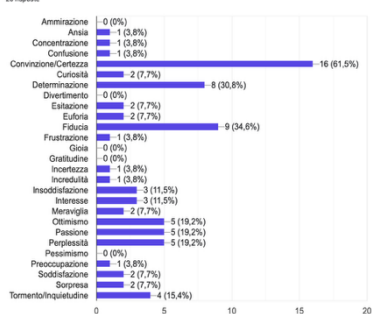
26 risposte



Intervista 1B - 31

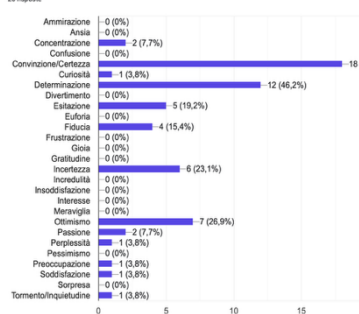
[...] il problema era nuovo. Punto e basta. Thomson aveva usato lo stesso calcolo di Darwin, ma Darwin aveva usato l'atomo di Rutherford. E io sent... Darwin era apparentemente d'accordo, e così via.

26 risposte



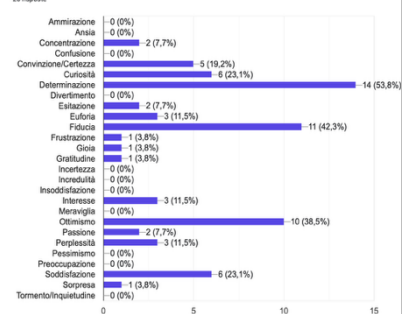
Ma vede, prima di tutto, come ho anche detto nella Rutherford Lecture, ero abbastanza sicuro che l'intera questione fosse in qualche modo regolata... la sensazione che avessimo una base di partenza.

26 risposte



Ma vede, prima di tutto, come ho anche detto nella Rutherford Lecture, ero abbastanza sicuro che l'intera questione fosse in qualche modo regolata... la sensazione che avessimo una base di partenza.

26 risposte



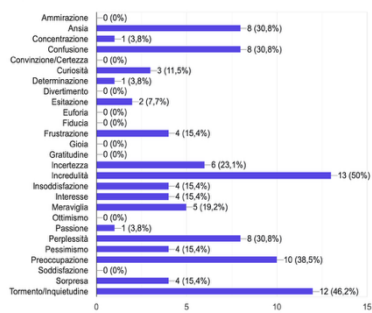
Intervista 1B - 34

Intervista 1B - 35

Intervista 1B - 36

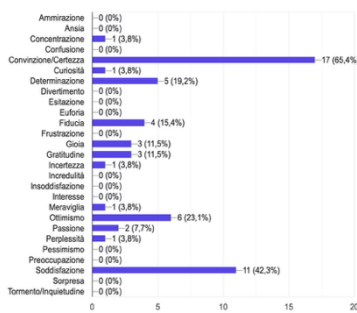
[...] nel 1913 accaddero anche altre cose, in particolare la scoperta dell'effetto Stark. Fu una scoperta davvero drammatica e ci chiedemmo cosa ci potesse fare con esso.

25 risposte



[...] quell'articolo serviva solo a dimostrare che la teoria era sostanzialmente corretta. Ma c'erano, di continuo, piccoli miglioramenti.

25 risposte

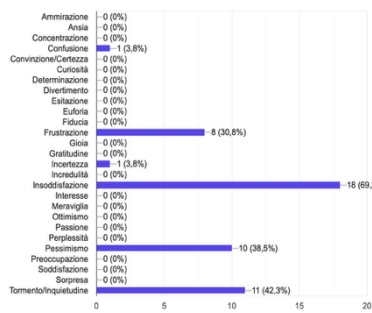


Intervista 1B - 37

In realtà mi sentivo piuttosto infelice a Cambridge. [...] Invitò Rutherford, e io parlai con lui.

Parlammo del Congresso Solvay, dal quale Rutherford...levò anche imparare qualcosa sulla radioattività.

25 risposte

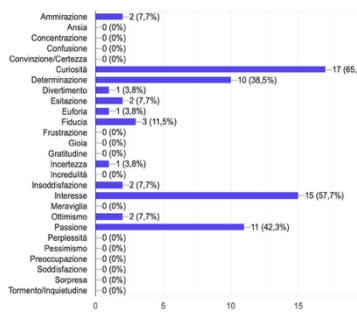


Intervista 1B - 38

In realtà mi sentivo piuttosto infelice a Cambridge. [...] Invitò Rutherford, e io parlai con lui.

Parlammo del Congresso Solvay, dal quale Rutherford...levò anche imparare qualcosa sulla radioattività.

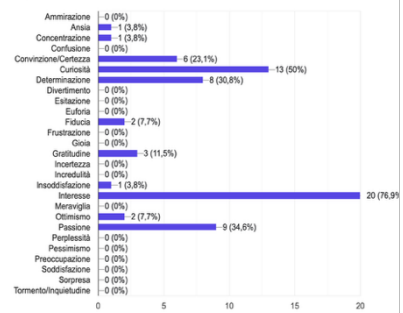
25 risposte



In realtà mi sentivo piuttosto infelice a Cambridge. [...] Invitò Rutherford, e io parlai con lui.

Parlammo del Congresso Solvay, dal quale Rutherford...levò anche imparare qualcosa sulla radioattività.

25 risposte

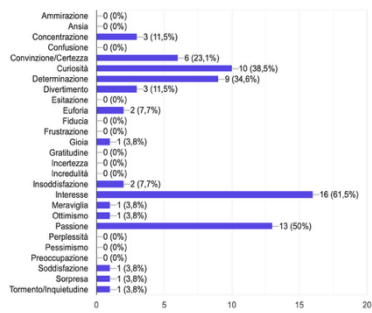


Intervista 2B - 1

In realtà mi sentivo piuttosto infelice a Cambridge. [...] Invitò Rutherford, e io parlai con lui.

Parlammo del Congresso Solvay, dal quale Rutherford...levò anche imparare qualcosa sulla radioattività.

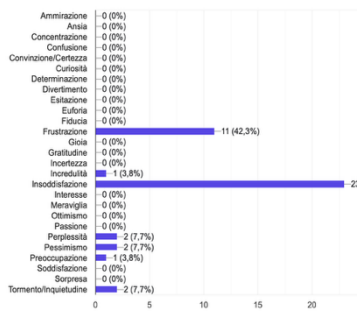
25 risposte



Intervista 2B - 2

[...] Non ho imparato molto a Cambridge. Ma a Manchester ero preparato e pronto a buttarmi a capofitto nel lavoro, capisco.

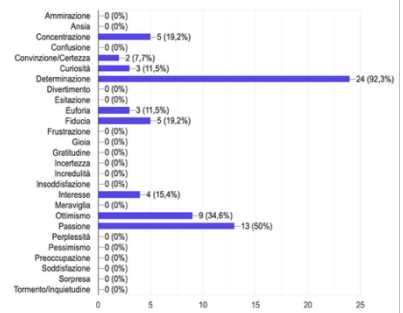
25 risposte



Intervista 2B - 3

[...] Non ho imparato molto a Cambridge. Ma a Manchester ero preparato e pronto a buttarmi a capofitto nel lavoro, capisco.

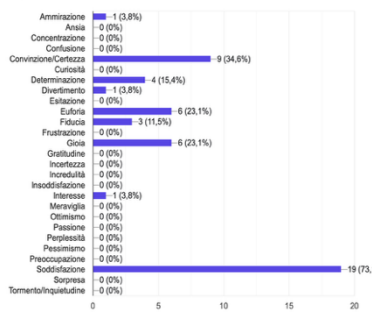
25 risposte



Intervista 2B - 4

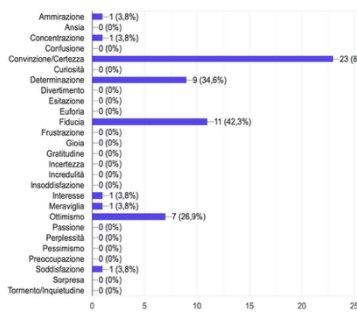
Ci fu una discussione tra me e Thomson a Birmingham, un anno dopo. Vedete, fui io ad avere l'idea degli isotopi; e il convinsi anche a condurre gli esperimenti, e poi, naturalmente, la cosa venne alla luce.

25 risposte



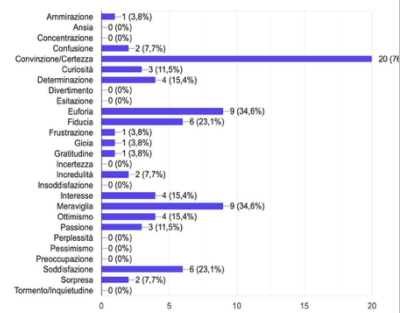
Kuhn: Non c'era nessuno a Cambridge che prendesse sul serio l'atomo di Rutherford? Lei fu l'unico a reagire positivamente? Bohr: Sì, ma vede, io non r...zioni, e quelle informazioni le ottenni da Hevey.

25 risposte



Hevey mi disse che ci sono più sostanze radioattive di quante ne possano essere contenute nella tavola periodica. E questo non lo sapevo. Ma per me fu... tor, certi limiti, ci si poteva aspettare di tutto.

25 risposte



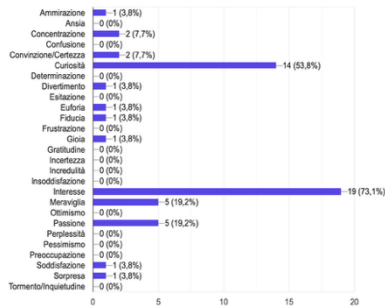
Intervista 2B - 7

Intervista 2B - 8

Intervista 2B - 9

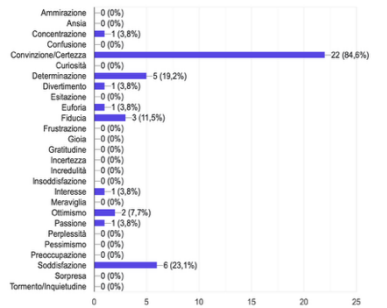
Hevesy mi disse che ci sono più sostanze radioattive di quante ne possano essere contenute nella tavola periodica. E questo non lo sapevo. Ma per me fu...tro certi limiti, ci si poteva aspettare di tutto.

26 risposte



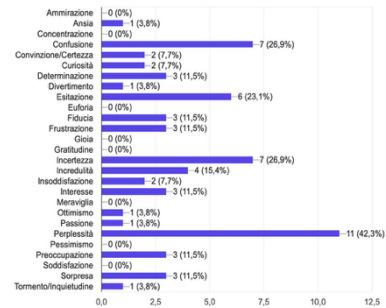
Hevesy mi disse che ci sono più sostanze radioattive di quante ne possano essere contenute nella tavola periodica. E questo non lo sapevo. Ma per me fu...tro certi limiti, ci si poteva aspettare di tutto.

26 risposte



Hevesy mi disse che ci sono più sostanze radioattive di quante ne possano essere contenute nella tavola periodica. E questo non lo sapevo. Ma per me fu...tro certi limiti, ci si poteva aspettare di tutto.

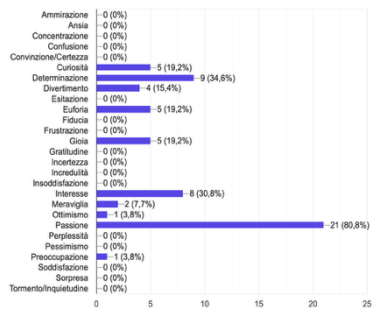
26 risposte



Intervista 2B - 10

Hevesy mi disse che ci sono più sostanze radioattive di quante ne possano essere contenute nella tavola periodica. E questo non lo sapevo. Ma per me fu...tro certi limiti, ci si poteva aspettare di tutto.

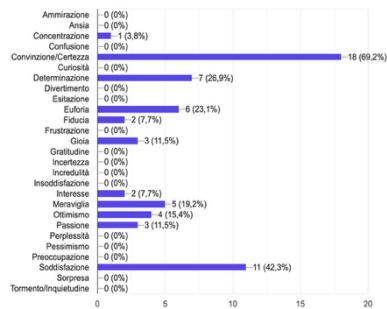
26 risposte



Intervista 2B - 11

Quando andai a Cambridge, Thomson in realtà non credeva in queste cose. Pensava che esistessero delle combinazioni chimiche e che si p...queste due cose. E da quel momento ho capito.

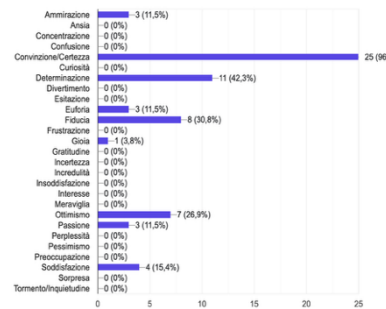
26 risposte



Intervista 2B - 12

Rutherford [...] pensava che questa scarsa evidenza sull'atomo nucleare non fosse abbastanza certa per trarne tali conseguenze. E io gli dissi che...molte menti, ma su questo non c'era alcun dubbio.

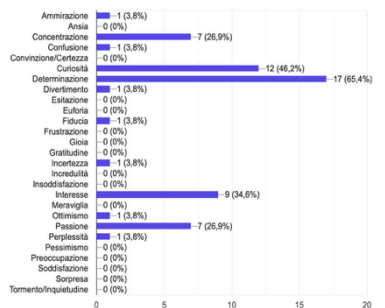
26 risposte



Intervista 2B - 13

Rutherford [...] pensava che questa scarsa evidenza sull'atomo nucleare non fosse abbastanza certa per trarne tali conseguenze. E io gli dissi che...molte menti, ma su questo non c'era alcun dubbio.

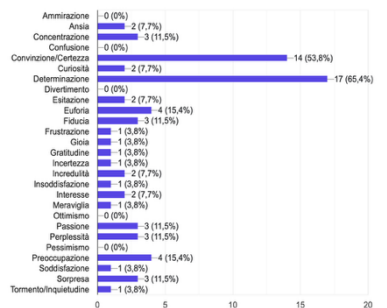
26 risposte



Intervista 2B - 14

Rutherford [...] pensava che questa scarsa evidenza sull'atomo nucleare non fosse abbastanza certa per trarne tali conseguenze. E io gli dissi che...molte menti, ma su questo non c'era alcun dubbio.

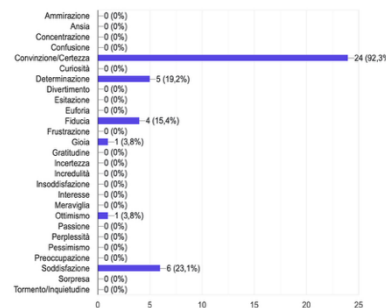
26 risposte



Intervista 2B - 15

Rutherford [...] pensava che questa scarsa evidenza sull'atomo nucleare non fosse abbastanza certa per trarne tali conseguenze. E io gli dissi che...molte menti, ma su questo non c'era alcun dubbio.

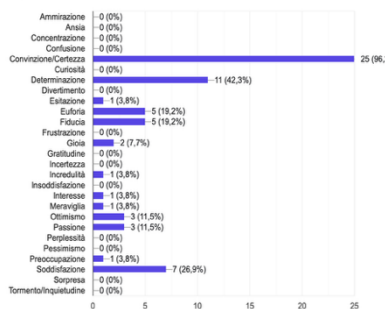
26 risposte



Intervista 2B - 16

Rutherford [...] pensava che questa scarsa evidenza sull'atomo nucleare non fosse abbastanza certa per trarne tali conseguenze. E io gli dissi che...molte menti, ma su questo non c'era alcun dubbio.

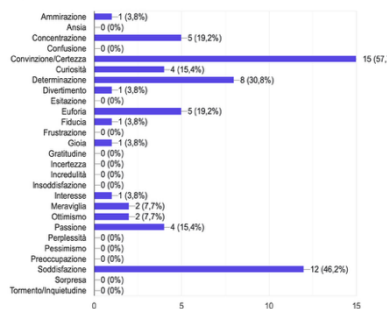
26 risposte



Intervista 2B - 17

L'unico punto che sento fortemente è questo: quando mi sono avvicinato a queste cose, ho capito davvero cosa c'era da capire. Non c'era nessun altro...ssi. Deve essere esattamente lo stesso in tutto.

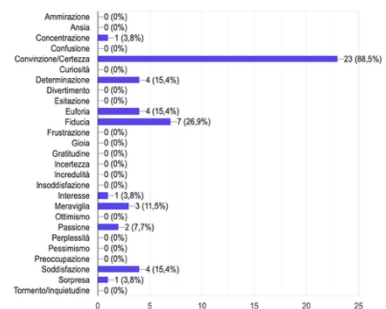
26 risposte



Intervista 2B - 18

L'unico punto che sento fortemente è questo: quando mi sono avvicinato a queste cose, ho capito davvero cosa c'era da capire. Non c'era nessun altro...tessi. Deve essere esattamente lo stesso in tutto.

26 risposte



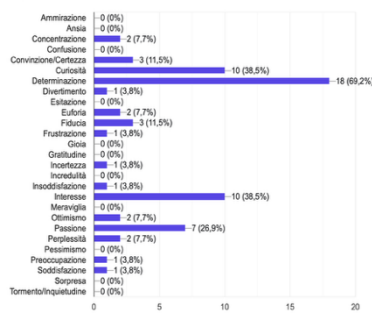
Intervista 2B - 19

Intervista 2B - 20

Intervista 2B - 21

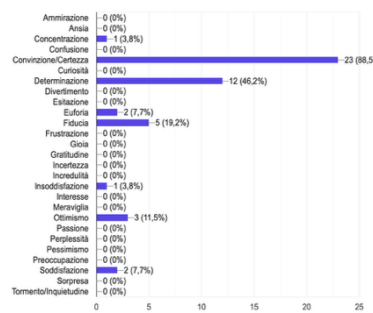
[...] se non mi fossi occupato di questo problema degli isotopi, non avrebbe fatto alcuna differenza quando alla fine sono arrivato all'atomo di idrogeno... lavoro enorme, e in realtà ho provato molte cose.

26 risposte



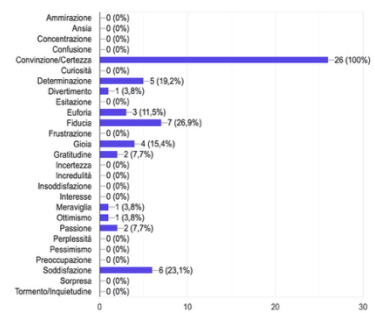
Ho conosciuto Moseley in parte durante questa discussione sull'ordine di importanza del nichel e del cobalto in base al loro peso atomico. Il nichel e il rancarlo? È quello fu l'inizio dei suoi esperimenti.

26 risposte



E poi giunsi a una visione più semplice, e ebbi la certezza assoluta della legge degli isotopi e dello spostamento.

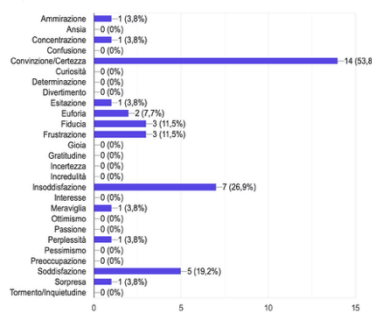
26 risposte



Intervista 2B - 22

Quando Heisenberg e Dirac vennero qui, fecero cose meravigliose, ma ogni parola in ognuno dei loro articoli mi sembrava ovvia. Non che l'avessi in...are è davvero ovvio, vedi - è assolutamente ovvio.

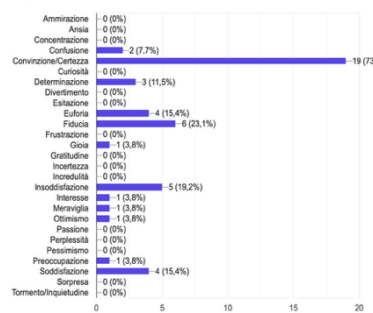
26 risposte



Intervista 2B - 23

Quando Heisenberg e Dirac vennero qui, fecero cose meravigliose, ma ogni parola in ognuno dei loro articoli mi sembrava ovvia. Non che l'avessi in...are è davvero ovvio, vedi - è assolutamente ovvio.

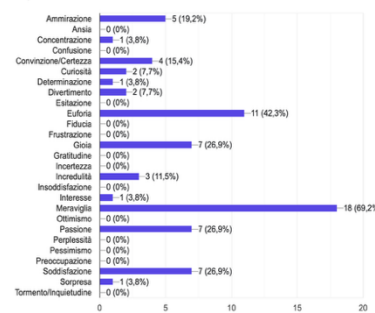
26 risposte



Intervista 2B - 24

Quando Heisenberg e Dirac vennero qui, fecero cose meravigliose, ma ogni parola in ognuno dei loro articoli mi sembrava ovvia. Non che l'avessi in...are è davvero ovvio, vedi - è assolutamente ovvio.

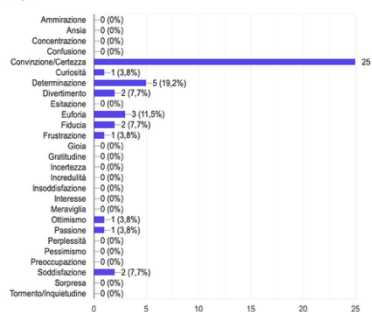
26 risposte



Intervista 2B - 25

Quando Heisenberg e Dirac vennero qui, fecero cose meravigliose, ma ogni parola in ognuno dei loro articoli mi sembrava ovvia. Non che l'avessi in...are è davvero ovvio, vedi - è assolutamente ovvio.

26 risposte



Intervista 2B - 26



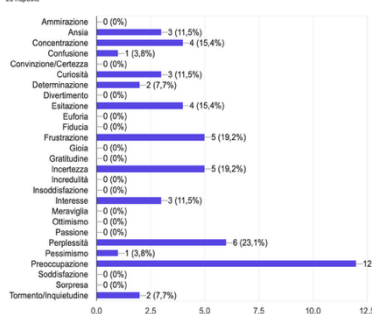
Intervista 2B - 27



Intervista 2B - 28

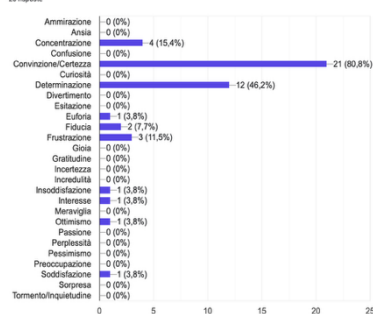
Ora, pensavo che dovremmo parlare un attimo del problema generale, perché in esso si annidano molte difficoltà. Quando uscì il mio primo articolo, ...ri venisse contaminata da un articolo di quel tipo.

26 risposte



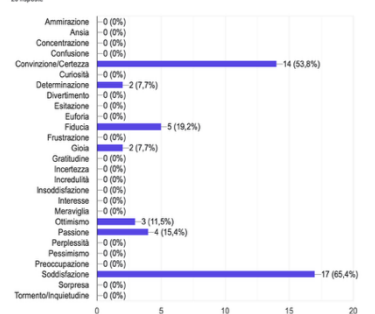
Poi viene fornita questa formula che ho dato all'inizio, senza spiegarne il significato, ma semplicemente affermando che era la formula corretta: "Vedremo più avanti come funziona in realtà".

26 risposte



Poi nella terza (parte), o come la si voglia chiamare, si approfondisce l'argomento dal punto di vista degli spettri. [...] Ora ne parlo in termini molto generici...pone l'idea classica, si ottiene la corrispondenza.

26 risposte



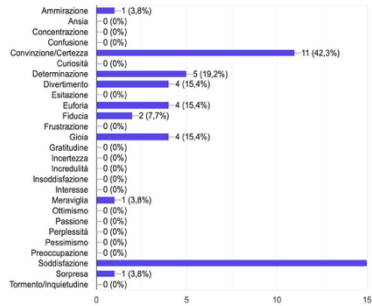
Intervista 3B - 1

Intervista 3B - 2

Intervista 3B - 3

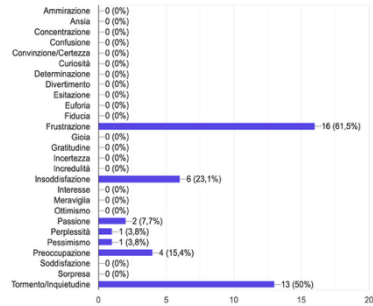
Vedete, il lavoro di Franck e Hertz è stato il primo, credo, del '14. ... Ora non so dove trovarlo, ma potete cercare. Ma anticipavo anche i loro risultati, ... lo stazionario - allo stato stazionario successivo.

26 risposte



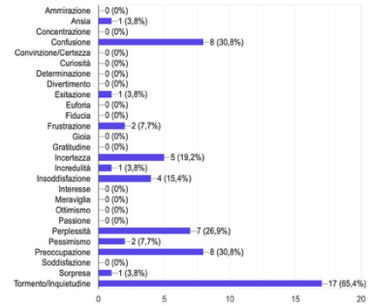
Ma poi, nel mezzo - e solo in pochi punti - ci sono alcune osservazioni su Nicholson in cui dico semplicemente che potrebbe prendere in considerazione... nel successivo; questo è stato il dolore, vedi.

26 risposte



Kuhn: Signore, si ricorda a che punto si è convinto definitivamente che non ci fosse nulla di vero? Perché, sa, c'è quella lettera molto interessante a R...a ha contribuito a prendere sul serio la questione.

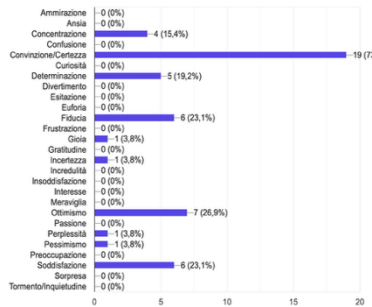
26 risposte



Intervista 3B - 4

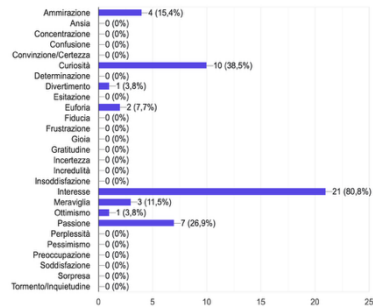
Questa è una lettera del 31 gennaio 1913, indirizzata al professor Rutherford. "Ora ho le idee molto più chiare sui fondamenti delle mie considerazioni e c...ri delle nebulose stellari e della corona solare."

26 risposte



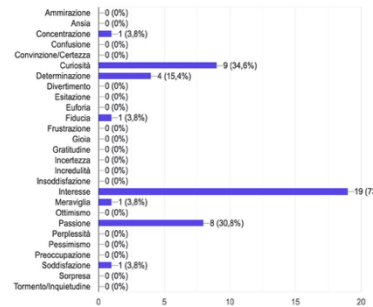
Ora, naturalmente, Rutherford era, proprio come Thomson, davvero impressionante, e anche di più; vedete, Rutherford aveva una personalità fortissima...dire che non era qualcosa su cui lavorare per lui.

26 risposte



Ora, naturalmente, Rutherford era, proprio come Thomson, davvero impressionante, e anche di più; vedete, Rutherford aveva una personalità fortissima...dire che non era qualcosa su cui lavorare per lui.

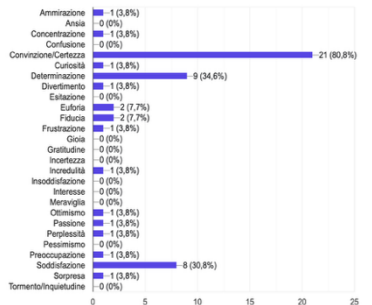
26 risposte



Intervista 3B - 7

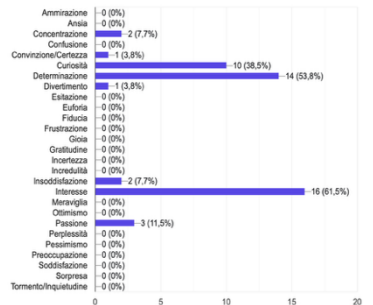
"Qual era lo stato dell'atomo di Rutherford durante il periodo del tuo soggiorno a Manchester? Era, ad esempio, già chiaro che il nucleo fosse carico po... avere ben chiaro (che fosse davvero instabile).

26 risposte



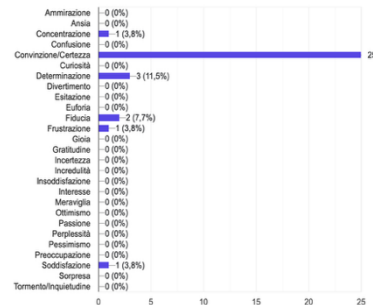
Poi ero interessato a vedere, prima di tutto, che era instabile. Ora, chiunque avrebbe potuto vedere che era instabile; era una cosa ovvia che fosse instab...luti solo pochi giorni per chiarire la situazione.

26 risposte



Poi ero interessato a vedere, prima di tutto, che era instabile. Ora, chiunque avrebbe potuto vedere che era instabile; era una cosa ovvia che fosse instab...luti solo pochi giorni per chiarire la situazione.

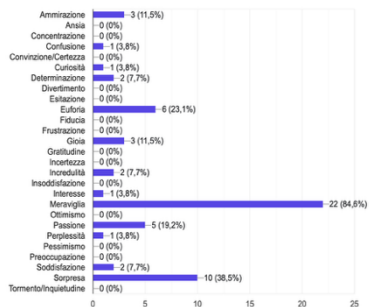
26 risposte



Intervista 3B - 10

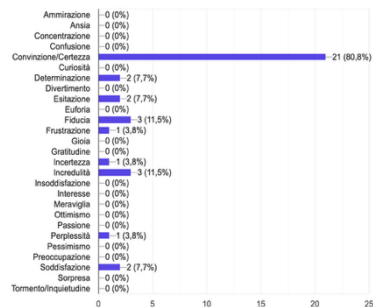
Poi ero interessato a vedere, prima di tutto, che era instabile. Ora, chiunque avrebbe potuto vedere che era instabile; era una cosa ovvia che fosse instab...luti solo pochi giorni per chiarire la situazione.

26 risposte



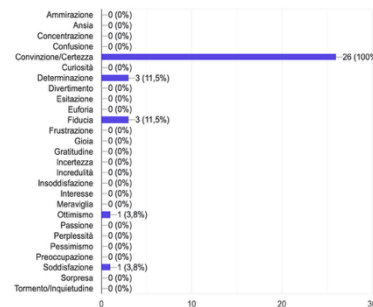
Poi ero interessato a vedere, prima di tutto, che era instabile. Ora, chiunque avrebbe potuto vedere che era instabile; era una cosa ovvia che fosse instab...luti solo pochi giorni per chiarire la situazione.

26 risposte



Poi ero interessato a vedere, prima di tutto, che era instabile. Ora, chiunque avrebbe potuto vedere che era instabile; era una cosa ovvia che fosse instab...luti solo pochi giorni per chiarire la situazione.

26 risposte



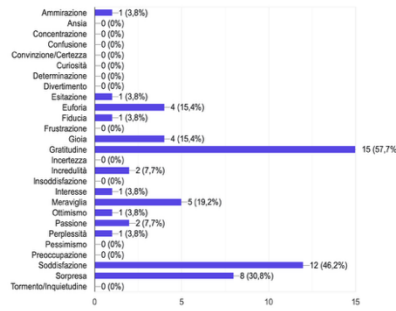
Intervista 3B - 13

Intervista 3B - 14

Intervista 3B - 15

Era un lavoro puramente teorico, ed è stata una fortuna enorme che uno come me sia riuscito ad arrivare allo spettro dell'idrogeno e così via. Sareb...go, perché il problema non era ancora stato risolto.

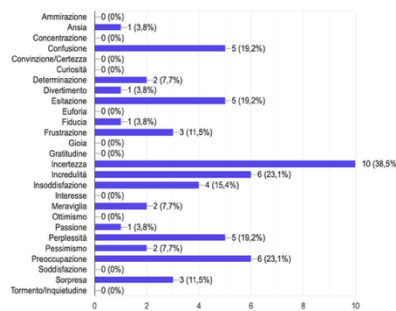
25 risposte



Intervista 3B - 16

Sì, ma vede, tutte queste cose erano assolutamente banali. Non lo erano a Manchester. Ma si stava pensando di provare a usare le idee di Planck in rel...l'idrogeno - poteva essere stata un caso fortuito.

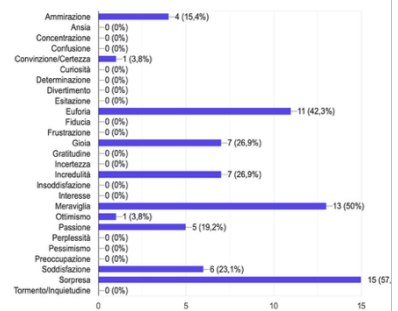
25 risposte



Intervista 3B - 17

Ed è stata una rivelazione scoprire che si poteva, dallo spettro dell'idrogeno, leggere ciò che stava realmente accadendo.

25 risposte



Intervista 3B - 20

Ma poi si trattava solo di dire che ora otteniamo la formula di Planck. All'inizio diciamo solo che vedremo cosa succede. Ma, quando ho scritto questo...o degli stati e non del processo di transizione.

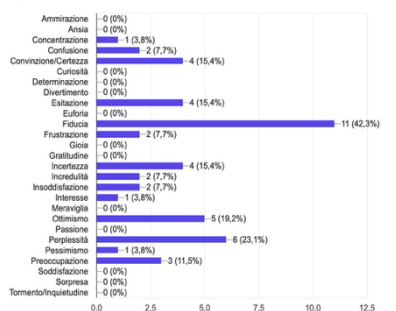
25 risposte



Intervista 3B - 22

La cosa successiva che accadde fu - credo nel 1917 - l'articolo di Einstein, in cui Einstein adottava esattamente la stessa opzione. Sosteneva che gli...vò cinque anni dopo - o forse quattro anni dopo.

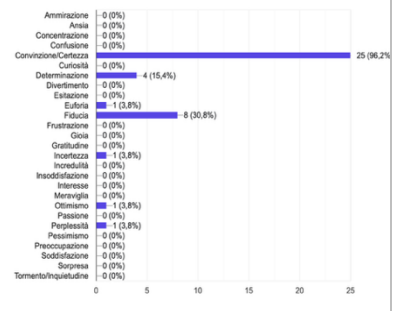
25 risposte



Intervista 4B - 1

Vede, per me era tutto assolutamente chiaro. Non era chiaro in tutti i punti, ma era assolutamente chiaro che fosse giusto, capisce. Quindi partivo dal pr...anto riguarda gli spettri dell'idrogeno e dell'elio.

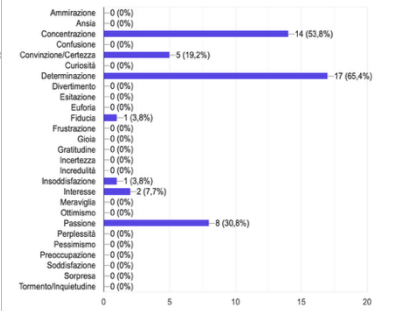
25 risposte



Intervista 4B - 2

Sì, ma vede, tutte queste cose erano assolutamente banali. Non lo erano a Manchester. Ma si stava pensando di provare a usare le idee di Planck in rel...l'idrogeno - poteva essere stata un caso fortuito.

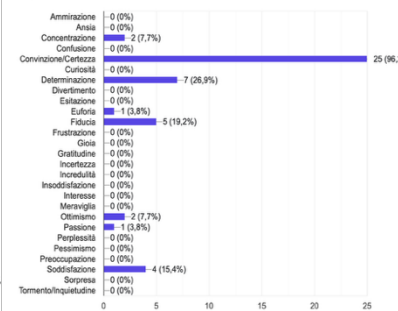
25 risposte



Intervista 3B - 18

Ma poi si trattava solo di dire che ora otteniamo la formula di Planck. All'inizio diciamo solo che vedremo cosa succede. Ma, quando ho scritto questo...o degli stati e non del processo di transizione.

25 risposte



Intervista 3B - 21

Ma poi si trattava solo di dire che ora otteniamo la formula di Planck. All'inizio diciamo solo che vedremo cosa succede. Ma, quando ho scritto questo...o degli stati e non del processo di transizione.

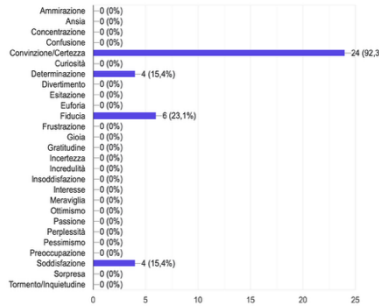
25 risposte



Intervista 4B - 3

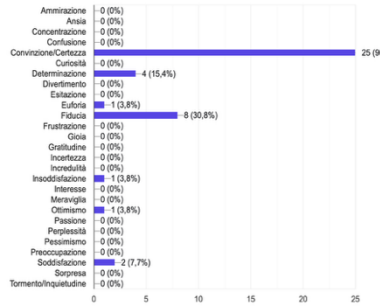
Vede, per me era tutto assolutamente chiaro. Non era chiaro in tutti i punti, ma era assolutamente chiaro che fosse giusto, capisce. Quindi partivo dal pr...anto riguarda gli spettri dell'idrogeno e dell'elio.

26 risposte



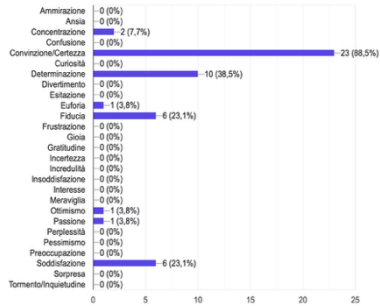
Vede, per me era tutto assolutamente chiaro. Non era chiaro in tutti i punti, ma era assolutamente chiaro che fosse giusto, capisce. Quindi partivo dal pr...anto riguarda gli spettri dell'idrogeno e dell'elio.

26 risposte



Vede, per me era tutto assolutamente chiaro. Non era chiaro in tutti i punti, ma era assolutamente chiaro che fosse giusto, capisce. Quindi partivo dal pr...anto riguarda gli spettri dell'idrogeno e dell'elio.

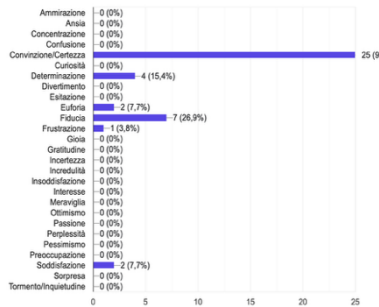
26 risposte



Intervista 4B - 4

Kuhn: Avevi intuito fin dall'inizio la possibilità di utilizzare la correzione di massa come hai fatto? Bohr: No, no. Ma era così ovvio. Se hai due ...Uno era convinto a priori che la cosa fosse giusta.

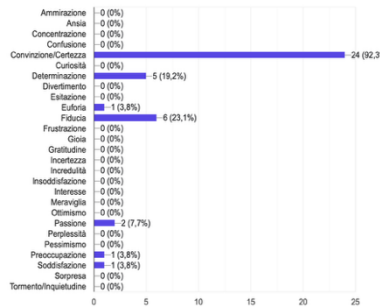
26 risposte



Intervista 4B - 5

Kuhn: Avevi intuito fin dall'inizio la possibilità di utilizzare la correzione di massa come hai fatto? Bohr: No, no. Ma era così ovvio. Se hai due ...Uno era convinto a priori che la cosa fosse giusta.

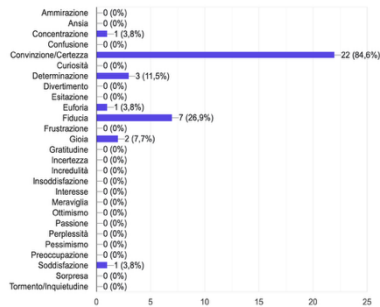
26 risposte



Intervista 4B - 6

Kuhn: Avevi intuito fin dall'inizio la possibilità di utilizzare la correzione di massa come hai fatto? Bohr: No, no. Ma era così ovvio. Se hai due ...Uno era convinto a priori che la cosa fosse giusta.

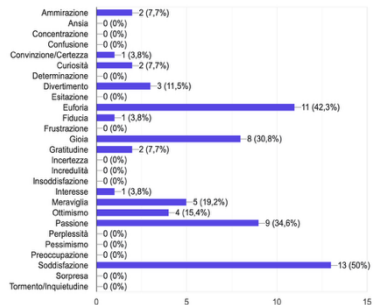
26 risposte



Intervista 4B - 7

Kuhn: Avevi intuito fin dall'inizio la possibilità di utilizzare la correzione di massa come hai fatto? Bohr: No, no. Ma era così ovvio. Se hai due ...Uno era convinto a priori che la cosa fosse giusta.

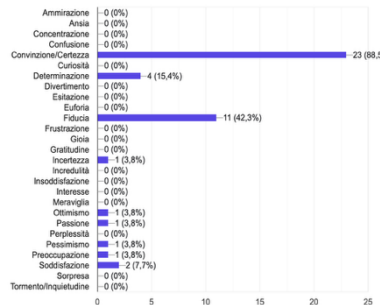
26 risposte



Intervista 4B - 8

Kuhn: Avevi intuito fin dall'inizio la possibilità di utilizzare la correzione di massa come hai fatto? Bohr: No, no. Ma era così ovvio. Se hai due ...Uno era convinto a priori che la cosa fosse giusta.

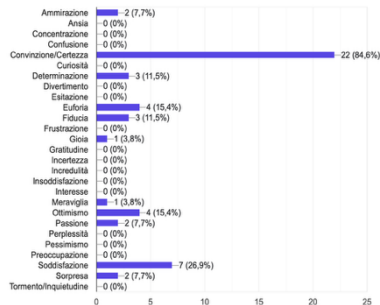
26 risposte



Intervista 4B - 9

Non so quando l'ho capito; Non so se ho visto prima lo spettro dell'idrogeno o se ho visto queste cose, ma è successo più o meno nello stesso periodo...a così meravigliosamente agli isotopi, capisci?

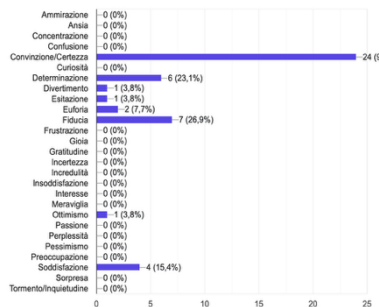
26 risposte



Intervista 4B - 10

Non so quando l'ho capito; Non so se ho visto prima lo spettro dell'idrogeno o se ho visto queste cose, ma è successo più o meno nello stesso periodo...a così meravigliosamente agli isotopi, capisci?

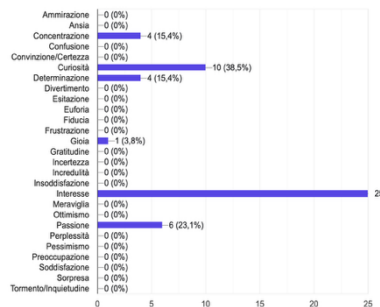
26 risposte



Intervista 4B - 11

Non so quando l'ho capito; Non so se ho visto prima lo spettro dell'idrogeno o se ho visto queste cose, ma è successo più o meno nello stesso periodo...a così meravigliosamente agli isotopi, capisci?

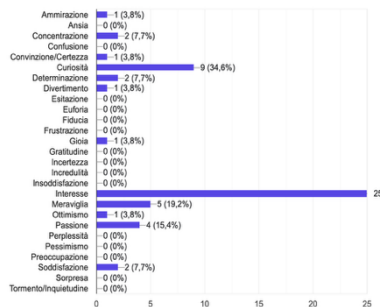
26 risposte



Intervista 4B - 12

Non so quando l'ho capito; Non so se ho visto prima lo spettro dell'idrogeno o se ho visto queste cose, ma è successo più o meno nello stesso periodo...a così meravigliosamente agli isotopi, capisci?

26 risposte



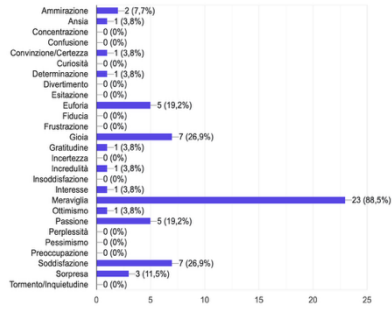
Intervista 4B - 13

Intervista 4B - 14

Intervista 4B - 15

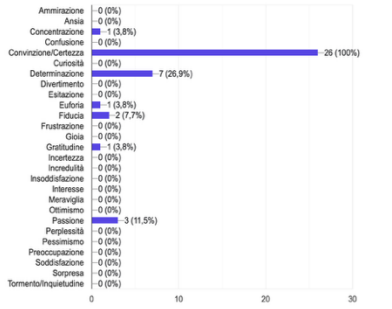
Non so quando l'ho capito; Non so se ho visto prima lo spettro dell'idrogeno o se ho visto queste cose, ma è successo più o meno nello stesso periodo...a così meravigliosamente agli isotopi, capisco?

25 risposte



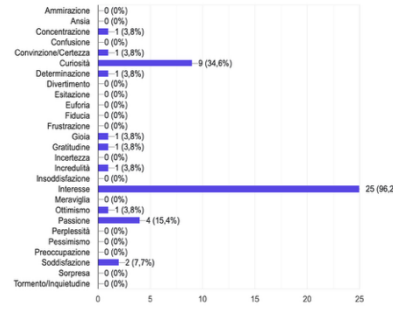
Rutherford era sempre molto impegnato. Ma era semplicemente meraviglioso perché dedicava il suo tempo. Aveva queste forti convinzioni riguardo...interferire quando una persona era così convinta.

25 risposte



Il mio articolo era molto diverso dagli altri. Quando si trattava di lavoro sperimentale, fu Rutherford a dire: "Devi pubblicarlo il prima possibile", o qualco...e Stark. E questa era una cosa molto interessante.

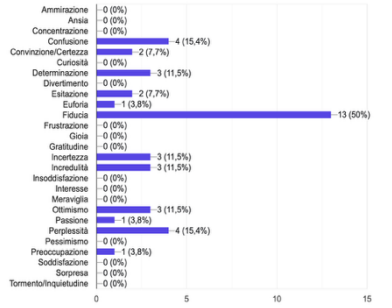
25 risposte



Intervista 4B - 16

Ma il punto è che si era appena capito che c'erano delle possibilità, e in realtà anche quantitativamente, di dire che le orbite possono gi...he non poteva essere spiegato in modo ordinario.

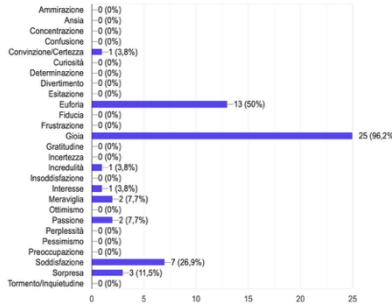
25 risposte



Intervista 4B - 17

Ma il punto è che si era appena capito che c'erano delle possibilità, e in realtà anche quantitativamente, di dire che le orbite possono gi...he non poteva essere spiegato in modo ordinario.

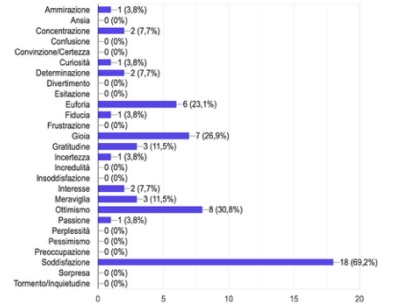
25 risposte



Intervista 4B - 18

Questi esperimenti furono condotti con i raggi positivi, dove le particelle hanno una velocità. E i risultati combaciavano; non perfettamente, ma esatt...mai dubitato; questo era il punto fondamentale.

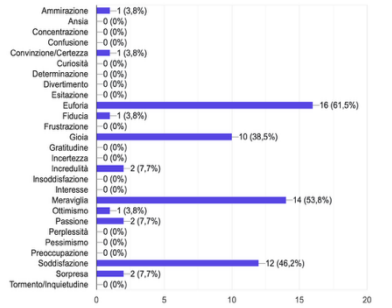
25 risposte



Intervista 4B - 19

Questi esperimenti furono condotti con i raggi positivi, dove le particelle hanno una velocità. E i risultati combaciavano; non perfettamente, ma esatt...mai dubitato; questo era il punto fondamentale.

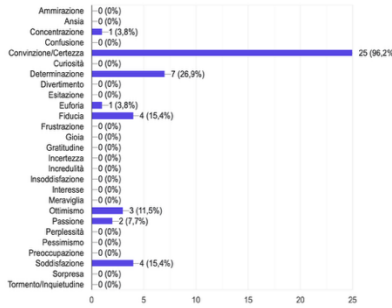
25 risposte



Intervista 4B - 20

Questi esperimenti furono condotti con i raggi positivi, dove le particelle hanno una velocità. E i risultati combaciavano; non perfettamente, ma esatt...mai dubitato; questo era il punto fondamentale.

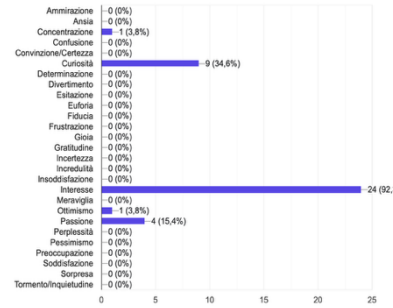
25 risposte



Intervista 4B - 21

Kuhn: Ma è chiaro che nel '12 stavate già pensando all'atomo di Rutherford. Bohr: Sì, ne parlai anche io. Sapevano che ero interessato, quindi si rivolsero a me.

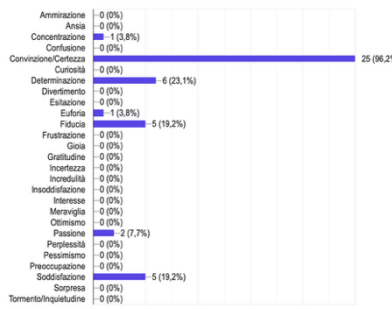
25 risposte



Intervista 4B - 22

Ma per me era tutto perfettamente chiaro.

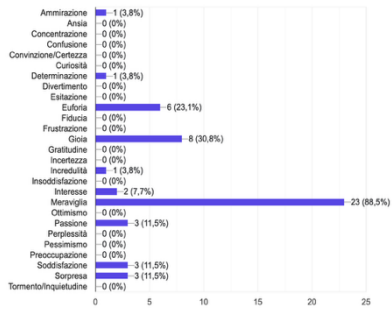
25 risposte



Intervista 4B - 23

Quindi, per cominciare, era completamente diverso perché il mio lavoro riguardava la questione di come ottenere uno spettro da un sistema che non lo...sedeva uno. E quindi, bisognava fare qualcosa.

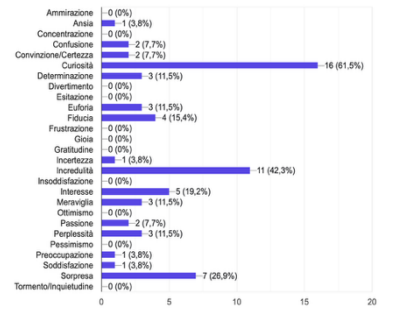
25 risposte



Intervista 4B - 24

Quindi, per cominciare, era completamente diverso perché il mio lavoro riguardava la questione di come ottenere uno spettro da un sistema che non lo...sedeva uno. E quindi, bisognava fare qualcosa.

25 risposte



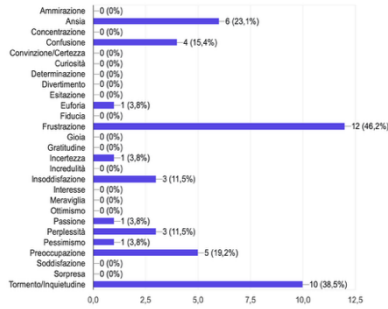
Intervista 4B - 25

Intervista 4B - 26

Intervista 4B - 27

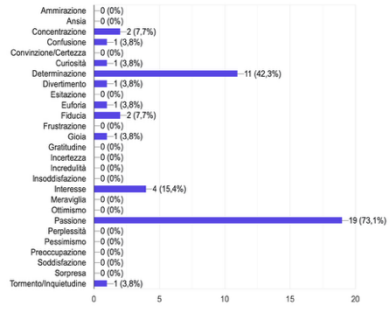
Io e mia moglie ci siamo sposati nel '12, siamo andati lì nel '13 e abbiamo incontrato Hevesy e [...] E fu probabilmente in quel periodo che conobbi Mosel...ndo, e quindi pensavo di non potermi arrendere.

26 risposte



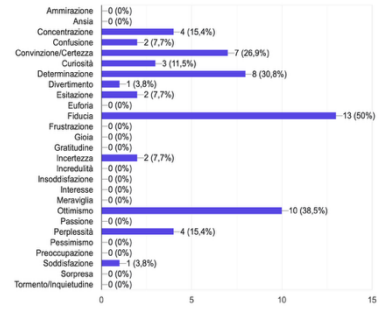
Io e mia moglie ci siamo sposati nel '12, siamo andati lì nel '13 e abbiamo incontrato Hevesy e [...] E fu probabilmente in quel periodo che conobbi Mosel...ndo, e quindi pensavo di non potermi arrendere.

26 risposte



In un modo o nell'altro la conoscenza dell'atomo doveva emergere dagli spettri. Ed è un'ottima cosa che sia successo. Ma prima bisogna fare questa pr... tutto cambi, capisci, quando si vide lo spettro.

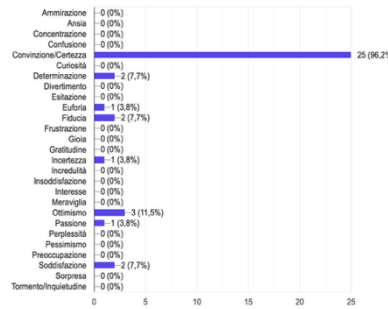
26 risposte



Intervista 4B - 28

[...] tutte queste cose erano molto semplici; erano ovvie. Vedete, l'intera faccenda è strana, ma ero assolutamente certo che fosse giusta. Non sapevo c...ra una possibilità che era sicuramente corretta.

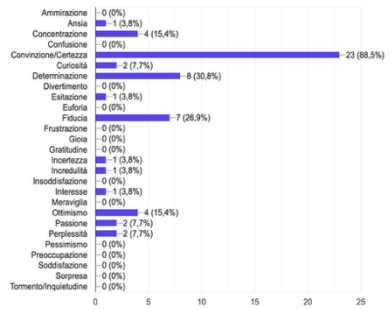
26 risposte



Intervista 4B - 29

[...] tutte queste cose erano molto semplici; erano ovvie. Vedete, l'intera faccenda è strana, ma ero assolutamente certo che fosse giusta. Non sapevo c...ra una possibilità che era sicuramente corretta.

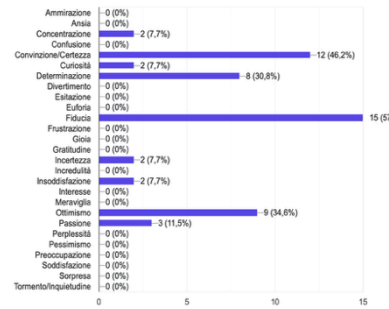
26 risposte



Intervista 4B - 30

[...] tutte queste cose erano molto semplici; erano ovvie. Vedete, l'intera faccenda è strana, ma ero assolutamente certo che fosse giusta. Non sapevo c...ra una possibilità che era sicuramente corretta.

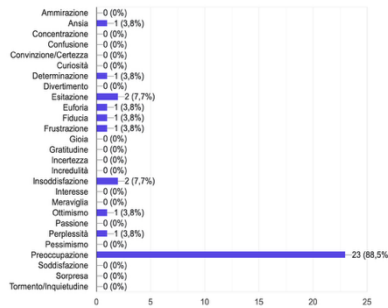
26 risposte



Intervista 4B - 31

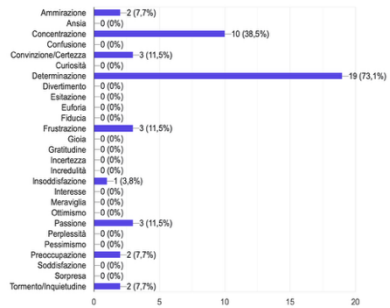
Kuhn: Lei afferma che Sommerfeld, naturalmente, si rese conto dell'incoerenza della teoria quantistica. Heisenberg: Sì. Kuhn: [...] Sommerfeld...occupato dalle difficoltà di quanto lo fosse Bohr.

26 risposte



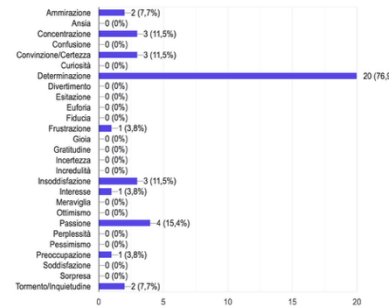
Si. Direi forse che Sommerfeld non era un uomo come Bohr; che insisteva sempre per la completa chiarezza. Voglio dire, in un certo senso pensava: "...da qualche parte le due cose vanno di pari passo".

26 risposte



Si. Direi forse che Sommerfeld non era un uomo come Bohr; che insisteva sempre per la completa chiarezza. Voglio dire, in un certo senso pensava: "B...h, c'è una difficoltà; dobbiamo sperare nel futuro".

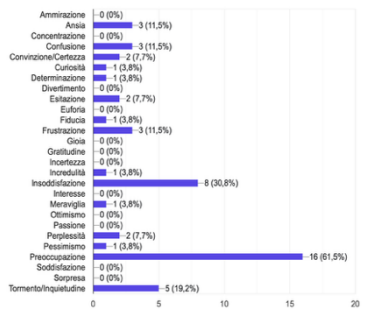
26 risposte



Intervista 1H - 1

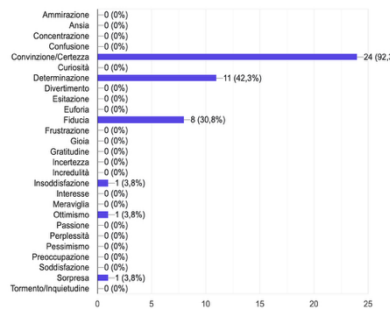
Si. Direi forse che Sommerfeld non era un uomo come Bohr; che insisteva sempre per la completa chiarezza. Voglio dire, in un certo senso pensava: "... dualismo tra onde e particelle come lo era Bohr.

26 risposte



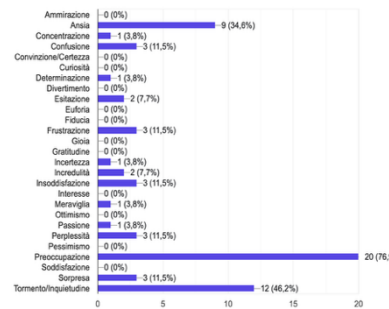
[...] nell'estate del '22 [...] Bohr aveva tenuto una conferenza sull'effetto Stark quadratico dell'idrogeno. Si trattava di un articolo di Kramers...tico, calcolato da Kramers, debba essere corretto".

26 risposte



Fui subito colpito dalla differenza tra il suo modo di vedere la teoria quantistica e quello di Sommerfeld. Per la prima volta mi resi conto che uno... e si rese conto che esisteva una seria difficoltà.

26 risposte



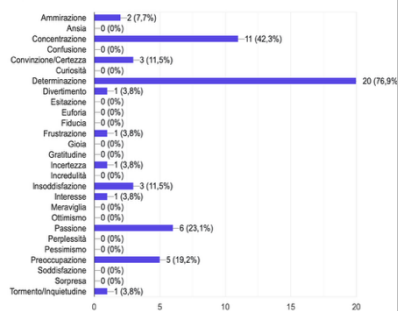
Intervista 1H - 4

Intervista 1H - 5

Intervista 1H - 6

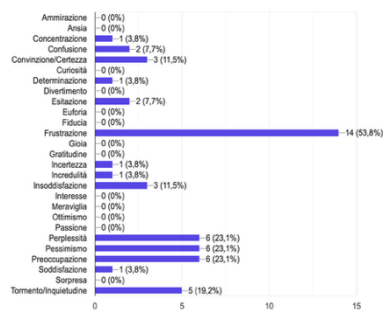
Fui subito colpito dalla differenza tra il suo modo di vedere la teoria quantistica e quello di Sommerfeld. Per la prima volta mi resi conto che uno...e si rese conto che esisteva una seria difficoltà.

25 risposte



Fui subito colpito dalla differenza tra il suo modo di vedere la teoria quantistica e quello di Sommerfeld. Per la prima volta mi resi conto che uno...e si rese conto che esisteva una seria difficoltà.

25 risposte

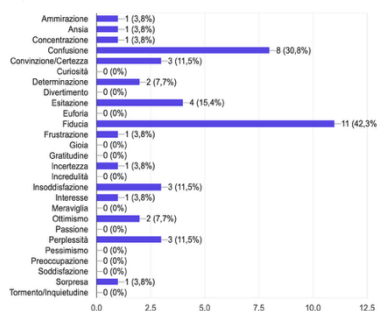


Intervista 1H - 7

Intervista 1H - 8

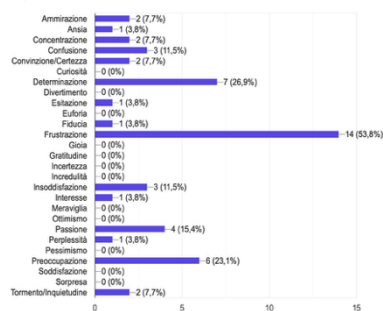
Beh, innanzitutto direi che una novità per me è stata la possibilità di parlare e pensare a questi problemi in un modo molto diverso da come li pensa... ovviamente, non sapeva perché fossero chiari.

25 risposte



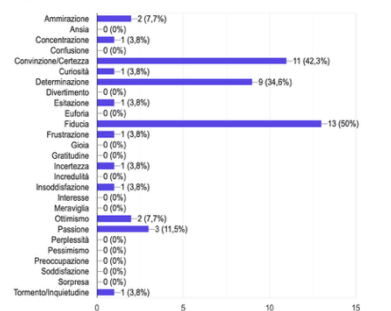
A volte si aveva la sensazione che queste spiegazioni non fossero molto buone, e lui stesso lo ammetteva. Bohr era sempre molto chiaro riguardo...deva conto di non poterle dimostrare realmente.

25 risposte



Sapeva solo che quella doveva essere la connessione. L'intensità della sua immaginazione mi fece un'enorme impressione. L'intensità con cui conosceva...per un giovane che voleva fare qualcosa di suo.

25 risposte



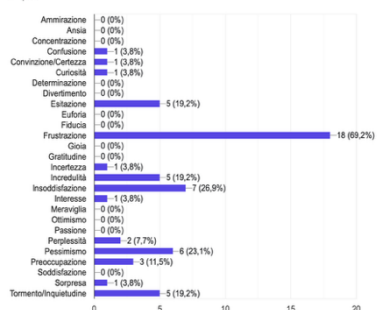
Intervista 4H - 1

Intervista 4H - 2

Intervista 4H - 3

Perché lì per la prima volta ho pensato: "Beh, questo è di nuovo un punto in cui forse posso andare avanti da solo", sai, perché Bohr non aveva provato...o in poi volevo fare qualcosa con la dispersione.

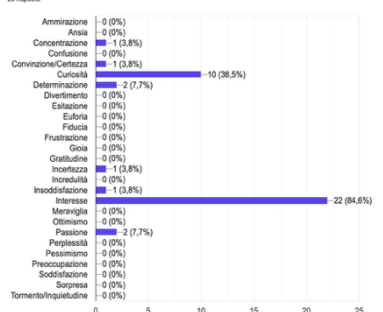
25 risposte



Intervista 4H - 4

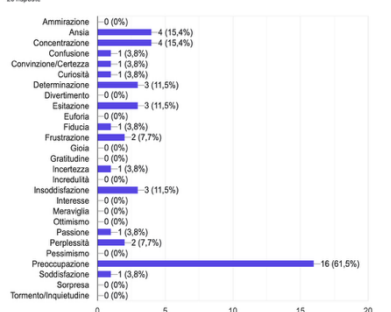
Beh, sì, era certamente interessato a questi rapporti di intensità e credo che anche questo articolo sulla fluorescenza fosse, ovviamente, frutto di quest...me si potessero evitare i peggiori disaccordi. [...]

25 risposte



Beh, sì, era certamente interessato a questi rapporti di intensità e credo che anche questo articolo sulla fluorescenza fosse, ovviamente, frutto di quest...me si potessero evitare i peggiori disaccordi. [...]

25 risposte

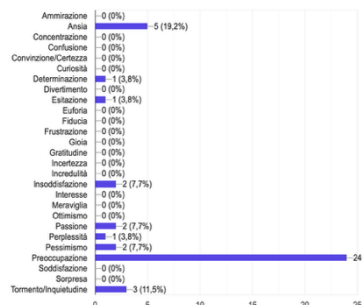


Intervista 6H - 1

Intervista 6H - 2

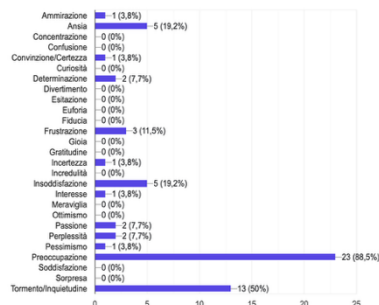
Intervista 6H - 3

Beh, sì, era certamente interessato a questi rapporti di intensità e credo che anche questo articolo sulla fluorescenza fosse, ovviamente, frutto di quest...me si potessero evitare i peggiori disaccordi. [...] 26 risposte



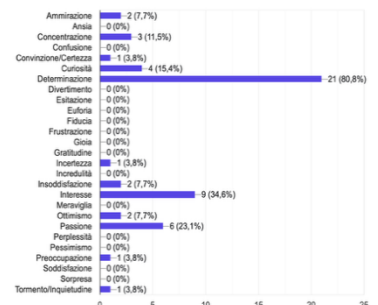
Intervista 6H - 4

[...] Direi che lo stile di Bohr era chiaramente questo: Bohr era più preoccupato di chiunque altro per le incongruenze della teoria quantistica. Quindi cerca...offriva davvero, e non riusciva a parlare d'altro. 26 risposte



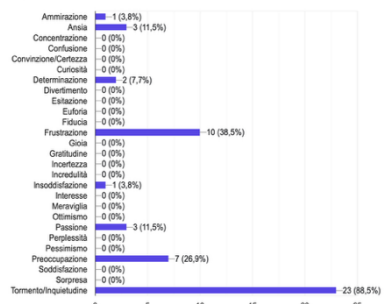
Intervista 6H - 5

[...] Direi che lo stile di Bohr era chiaramente questo: Bohr era più preoccupato di chiunque altro per le incongruenze della teoria quantistica. Quindi cerca...offriva davvero, e non riusciva a parlare d'altro. 26 risposte



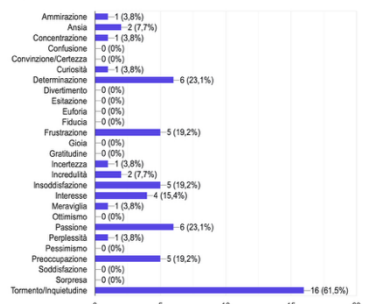
Intervista 6H - 6

[...] Direi che lo stile di Bohr era chiaramente questo: Bohr era più preoccupato di chiunque altro per le incongruenze della teoria quantistica. Quindi cerca...offriva davvero, e non riusciva a parlare d'altro. 26 risposte



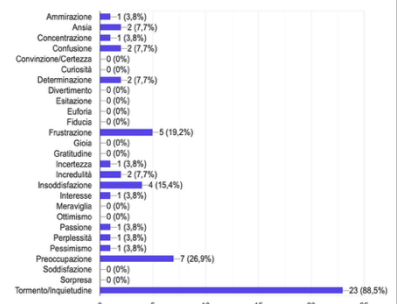
Intervista 6H - 7

[...] Direi che lo stile di Bohr era chiaramente questo: Bohr era più preoccupato di chiunque altro per le incongruenze della teoria quantistica. Quindi cerca...offriva davvero, e non riusciva a parlare d'altro. 26 risposte



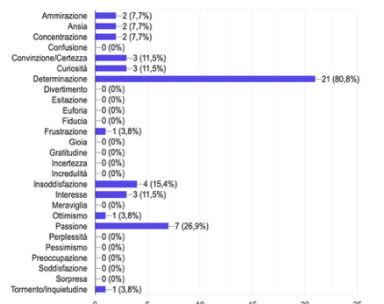
Intervista 6H - 8

Ogni volta che si faceva una passeggiata con Bohr - a volte veniva invitato nella sua casa di campagna e facevo lunghe passeggiate con lui - dis...veramente quanto fosse temibile la situazione. 26 risposte



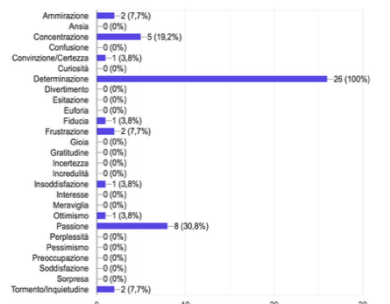
Intervista 6H - 9

Ma questo era l'intero atteggiamento filosofico di Bohr: era un uomo che voleva sempre raggiungere il massimo grado di chiarezza. Non si sarebbe mai f...to, naturalmente, mi fece una forte impressione. 26 risposte



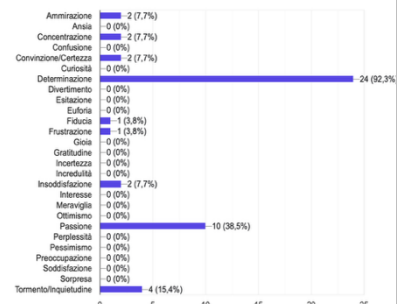
Intervista 6H - 10

Ma questo era l'intero atteggiamento filosofico di Bohr: era un uomo che voleva sempre raggiungere il massimo grado di chiarezza. Non si sarebbe mai f...to, naturalmente, mi fece una forte impressione. 26 risposte



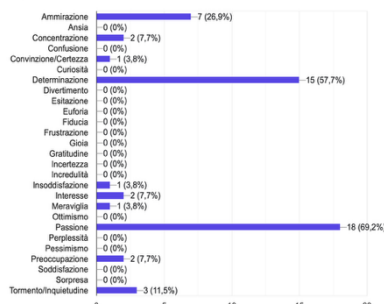
Intervista 6H - 11

Ma questo era l'intero atteggiamento filosofico di Bohr: era un uomo che voleva sempre raggiungere il massimo grado di chiarezza. Non si sarebbe mai f...to, naturalmente, mi fece una forte impressione. 26 risposte



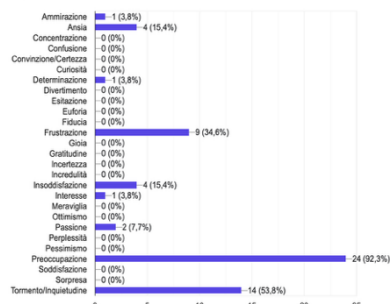
Intervista 6H - 12

Ma questo era l'intero atteggiamento filosofico di Bohr: era un uomo che voleva sempre raggiungere il massimo grado di chiarezza. Non si sarebbe mai f...to, naturalmente, mi fece una forte impressione. 26 risposte



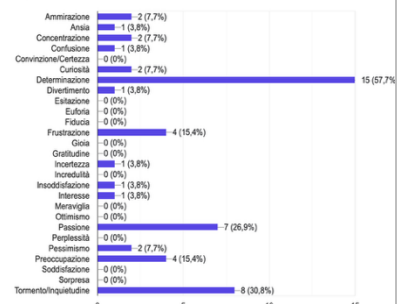
Intervista 6H - 13

Kuhn: Cosa puoi dirmi di Hans Kramers? Questo è il grande problema: tutto quel periodo da quando Kramers si unisce a Bohr. E anche Kramers stesso...difficoltà così seriamente come faceva Bohr. [...] 26 risposte



Intervista 6H - 14

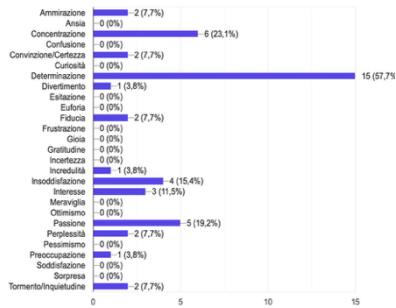
Kuhn: Cosa puoi dirmi di Hans Kramers? Questo è il grande problema: tutto quel periodo da quando Kramers si unisce a Bohr. E anche Kramers stesso...difficoltà così seriamente come faceva Bohr. [...] 26 risposte



Intervista 6H - 15

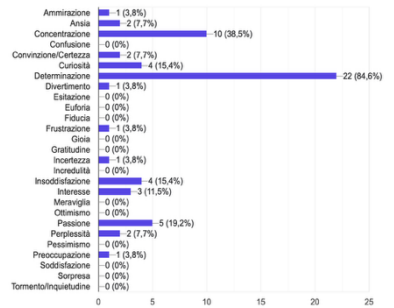
Kuhn: Cosa puoi dire di Hans Kramers? Questo è il grande problema: tutto quel periodo da quando Kramers si unisce a Bohr. E anche Kramers stesso... difficoltà così seriamente come faceva Bohr. [...]

26 risposte



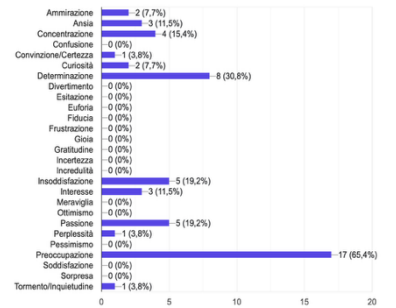
L'approccio di Bohr a Copenaghen sarebbe stato diverso. Bohr si sarebbe chiesto: "Come può la natura evitare le contraddizioni? Ora conosciamo il...eno con lo sviluppo della meccanica quantistica.

26 risposte



L'approccio di Bohr a Copenaghen sarebbe stato diverso. Bohr si sarebbe chiesto: "Come può la natura evitare le contraddizioni? Ora conosciamo il...eno con lo sviluppo della meccanica quantistica.

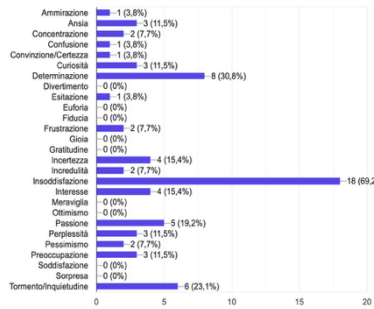
26 risposte



Intervista 6H - 16

Nel mio primo articolo sulla meccanica quantistica, e nell'articolo di Schrödinger che era stato pubblicato, era chiaro già allora, anche per Bohr, ch...peva cosa dire al riguardo e ne era insoddisfatto.

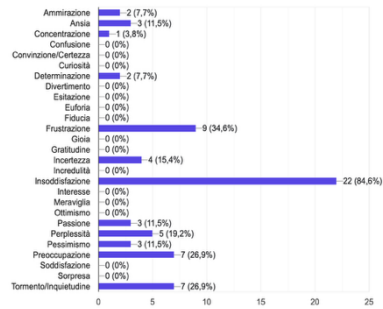
26 risposte



Intervista 6H - 17

Nel mio primo articolo sulla meccanica quantistica, e nell'articolo di Schrödinger che era stato pubblicato, era chiaro già allora, anche per Bohr, ch...peva cosa dire al riguardo e ne era insoddisfatto.

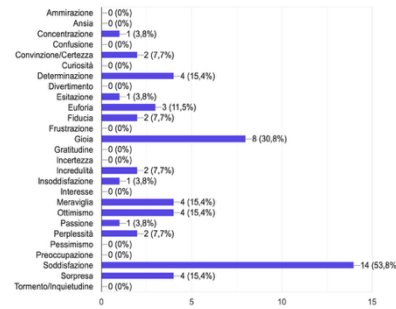
26 risposte



Intervista 6H - 18

Kuhn: Lei afferma che il problema del fotone preoccupava molto Bohr nel 1923 e nel 1924, ma non sembra che lo avesse particolarmente a cuore prima...openaghen e a Göttinga durante queste lezioni.

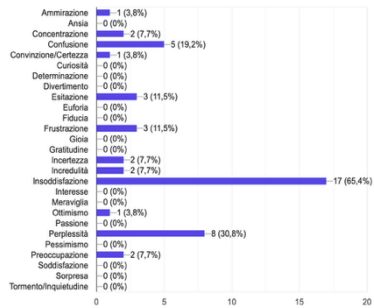
26 risposte



Intervista 6H - 19

Kuhn: Lei afferma che il problema del fotone preoccupava molto Bohr nel 1923 e nel 1924, ma non sembra che lo avesse particolarmente a cuore prima...openaghen e a Göttinga durante queste lezioni.

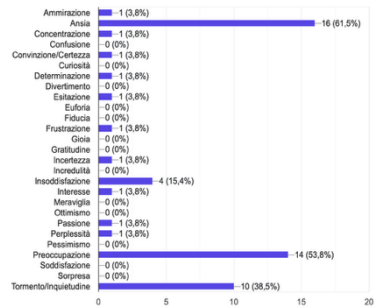
26 risposte



Intervista 6H - 20

Kuhn: Lei afferma che il problema del fotone preoccupava molto Bohr nel 1923 e nel 1924, ma non sembra che lo avesse particolarmente a cuore prima...openaghen e a Göttinga durante queste lezioni.

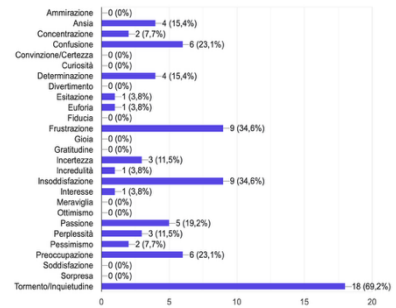
26 risposte



Intervista 6H - 21

Si rese conto che l'intera teoria, da un lato, aveva avuto un enorme successo, e dall'altro, era fondamentalmente sbagliata. E questa era una contr...tark, e solo in seguito tornò a preoccuparsene.

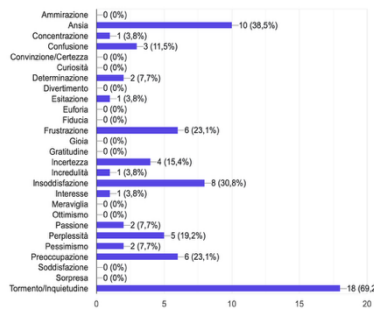
26 risposte



Intervista 6H - 22

Si rese conto che l'intera teoria, da un lato, aveva avuto un enorme successo, e dall'altro, era fondamentalmente sbagliata. E questa era una contr...tark, e solo in seguito tornò a preoccuparsene.

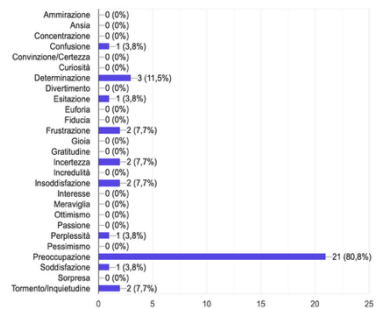
26 risposte



Intervista 6H - 23

Si rese conto che l'intera teoria, da un lato, aveva avuto un enorme successo, e dall'altro, era fondamentalmente sbagliata. E questa era una contr...tark, e solo in seguito tornò a preoccuparsene.

26 risposte



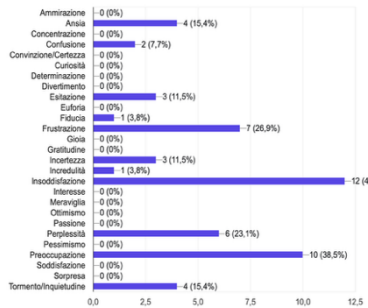
Intervista 6H - 24

Intervista 6H - 25

Intervista 6H - 26

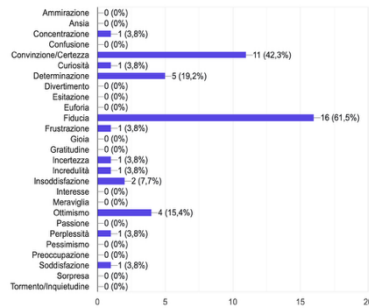
Bohr, direbbe, era un po' a disagio con tutta la faccenda. Sentiva fortemente: "Beh, ci deve essere qualcosa di vero", ma allo stesso tempo si rendeva... almeno matematicamente, la soluzione corretta.

26 risposte



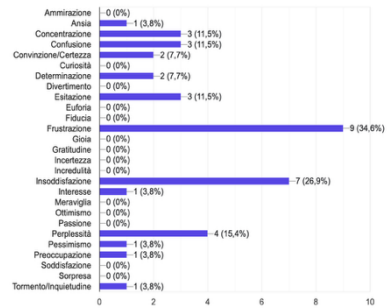
Bohr, direbbe, era un po' a disagio con tutta la faccenda. Sentiva fortemente: "Beh, ci deve essere qualcosa di vero", ma allo stesso tempo si rendeva... almeno matematicamente, la soluzione corretta.

26 risposte



Bohr, direbbe, era un po' a disagio con tutta la faccenda. Sentiva fortemente: "Beh, ci deve essere qualcosa di vero", ma allo stesso tempo si rendeva... almeno matematicamente, la soluzione corretta.

26 risposte



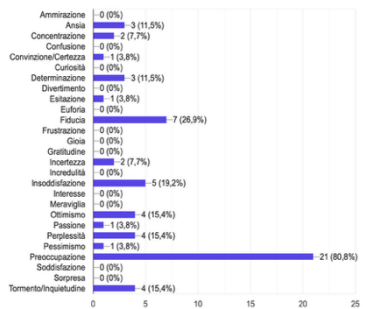
Intervista 8H - 1

Intervista 8H - 2

Intervista 8H - 3

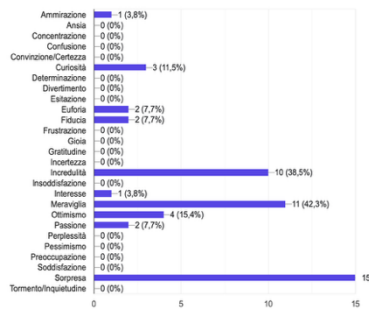
Bohr, direbbe, era un po' a disagio con tutta la faccenda. Sentiva fortemente: "Beh, ci deve essere qualcosa di vero", ma allo stesso tempo si rendeva... almeno matematicamente, la soluzione corretta.

26 risposte



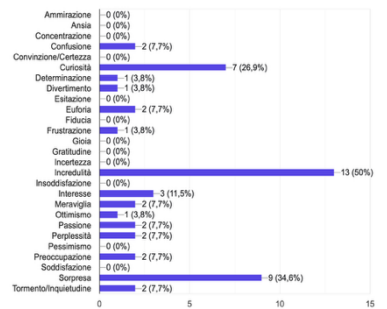
Bohr, direbbe, era un po' a disagio con tutta la faccenda. Sentiva fortemente: "Beh, ci deve essere qualcosa di vero", ma allo stesso tempo si rendeva... almeno matematicamente, la soluzione corretta.

26 risposte



Direi che forse bisognerebbe distinguere tra due parole che sembrano molto vicine tra loro. Una parola è "incoerenza" e l'altra è "paradosso". Era c... soluzione. Un'incoerenza non può mai funzionare.

26 risposte



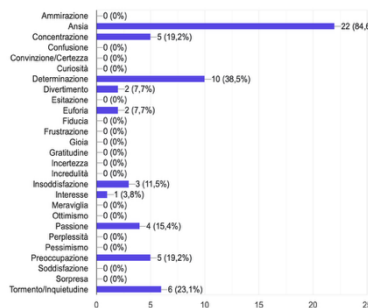
Intervista 8H - 4

Intervista 8H - 5

Intervista 8H - 6

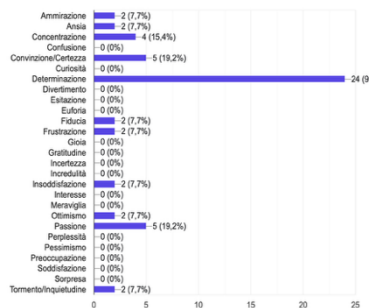
Le ho parlato della visita di Schrödinger a Copenaghen nell'autunno del 1926 e di come Bohr costresse Schrödinger ad ammettere che non si pot...tà che i paradossi rimanessero come incoerenze.

26 risposte



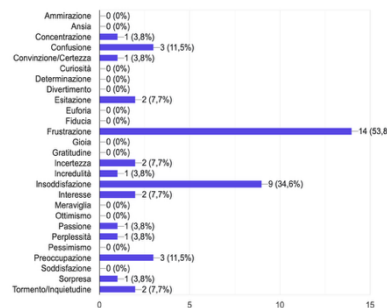
Le ho parlato della visita di Schrödinger a Copenaghen nell'autunno del 1926 e di come Bohr costresse Schrödinger ad ammettere che non si pot...tà che i paradossi rimanessero come incoerenze.

26 risposte



Le ho parlato della visita di Schrödinger a Copenaghen nell'autunno del 1926 e di come Bohr costresse Schrödinger ad ammettere che non si pot...tà che i paradossi rimanessero come incoerenze.

26 risposte



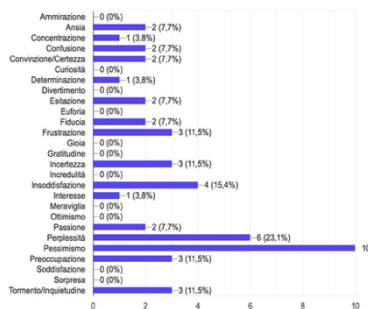
Intervista 8H - 7

Intervista 8H - 8

Intervista 8H - 9

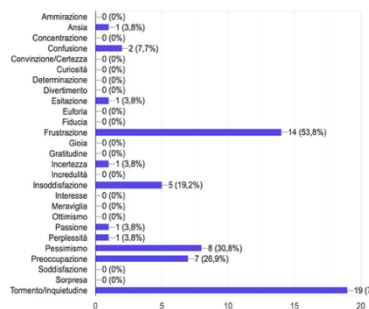
Le ho parlato della visita di Schrödinger a Copenaghen nell'autunno del 1926 e di come Bohr costresse Schrödinger ad ammettere che non si pot...tà che i paradossi rimanessero come incoerenze.

26 risposte



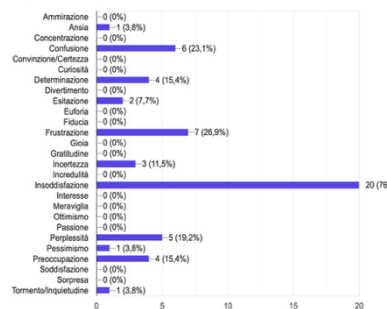
Ogni volta che Bohr riusciva a fornire un esempio in cui non riuscivo a trovare la risposta, era chiaro che non avevo compreso la situazione reale. Cre...va che, in qualche modo, dovesse essere giusto.

26 risposte



Ogni volta che Bohr riusciva a fornire un esempio in cui non riuscivo a trovare la risposta, era chiaro che non avevo compreso la situazione reale. Cre...va che, in qualche modo, dovesse essere giusto.

26 risposte



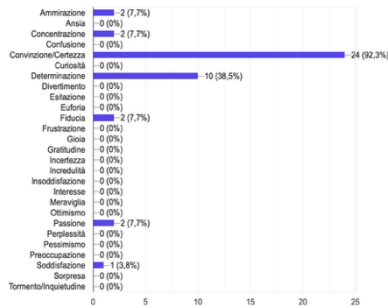
Intervista 8H - 10

Intervista 8H - 11

Intervista 8H - 12

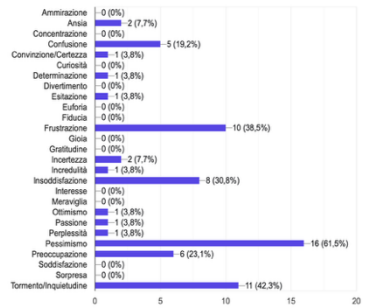
Per cominciare, ero piuttosto critico e ho accennato a questa questione del fattore 2 che non funzionava - il fattore Thomas. Ho visto che Bohr n...ttore 2, con cui abbiamo sempre avuto problemi."

26 risposte



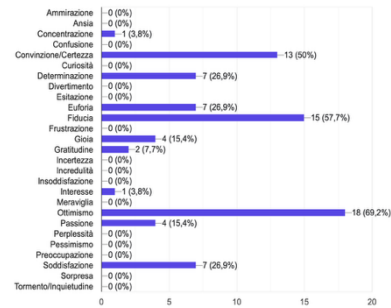
Beh, ciò che è chiaramente in quell'articolo è il mio equivoco sul fatto che non si potessero usare le parole "posizione" e "velocità" nello stesso modo in cui la fisica classica, vaghi ma pur sempre utili.

26 risposte



L'incontro di Bruxelles fu quello in cui si discusse davvero i dettagli e dove si dovette lottare. Li Einstein si impegnò a fondo per confutare la teoria...olto contenti e sentivamo che la partita era vinta.

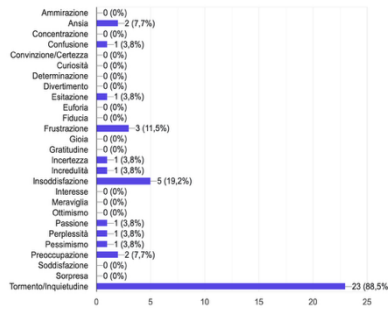
26 risposte



Intervista 9H - 1

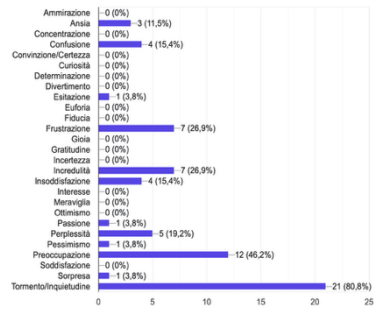
Beh, direi che è ancora diffusa l'idea che il modello ondulatorio sia una parte essenziale della natura. Nel modello ondulatorio, ovviamente, tutto...etti. Ma cosa significa questo "in qualche modo"?

26 risposte



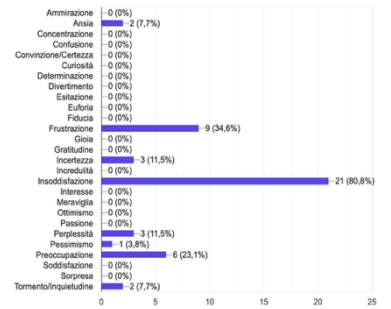
Questo dilemma tra contraddizione e paradosso si era accumulato, per così dire, e aveva creato un'uniforme tensione in un gruppo piuttosto numero...resentato un cambiamento enorme e improvviso.

26 risposte



Bohr, ad esempio, nel suo modello atomico, ha usato proprio questa idea di discontinuità per spiegare un fatto essenziale, vale a dire la stabilità...ava come voleva. Ma non si poteva fare altrimenti.

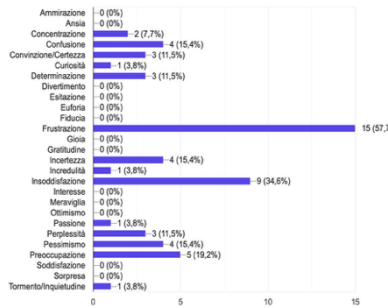
26 risposte



Intervista 10H - 1

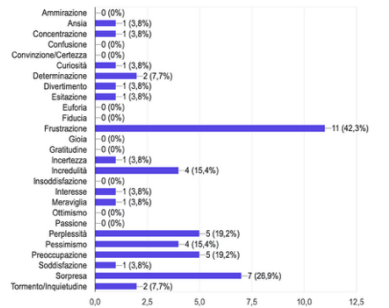
Quindi possiamo dividere la fisica in due parti. Una parte è la meccanica e la meccanica newtoniana è perfettamente corretta anche per gli elettroni. L'altra è semplicemente incoerente e inutilizzabile.

26 risposte



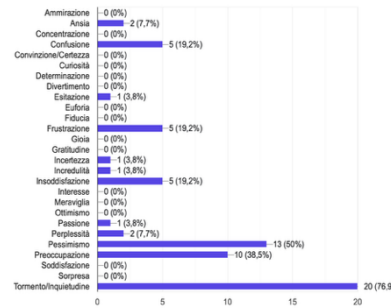
Credo che Bohr, forse non per la prima volta, proprio in quel momento comprese che la separazione che aveva sempre cercato di attuare tra elettrodinami...addizioni, per così dire, deve cercare di evitarle.

26 risposte



Credo che Bohr, forse non per la prima volta, proprio in quel momento comprese che la separazione che aveva sempre cercato di attuare tra elettrodinami...addizioni, per così dire, deve cercare di evitarle.

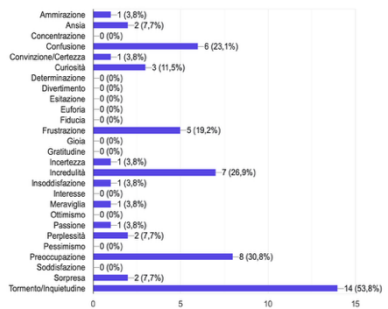
26 risposte



Intervista 10H - 4

Credo che Bohr, forse non per la prima volta, proprio in quel momento comprese che la separazione che aveva sempre cercato di attuare tra elettrodinami...addizioni, per così dire, deve cercare di evitarle.

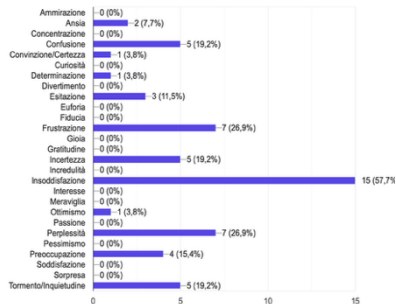
26 risposte



Intervista 10H - 7

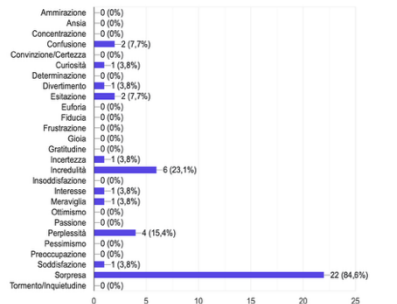
Ora, grazie alla teoria delle trasformazioni, avevamo questa completa flessibilità; potevamo passare da uno schema all'altro e persino a un terzo schema. ...n. po' a disagio. Lo stesso valeva per Bohr, direi.

26 risposte



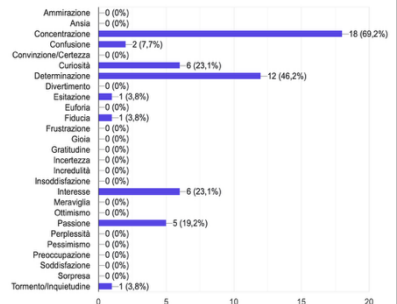
Queste relazioni di indeterminazione non erano una novità assoluta per tutti; erano qualcosa che tutti si aspettavano. Solo questa particolare formulazione in quel modo; naturalmente poi fu d'accordo.

26 risposte



Kuhn: [...] Parte del disaccordo che si verificò quell'anno riguardava il fatto che Bohr stava riflettendo sempre di più sul dualismo [...]

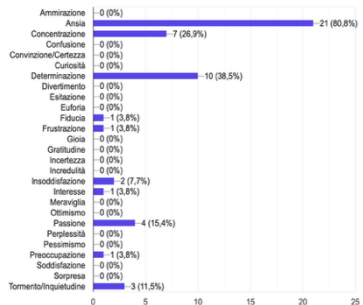
26 risposte



Intervista 11H - 1

Beh, Bohr era ovviamente molto ansioso di districare la questione, ma credo che si trattasse di una sorta di scontro con alcune persone che avevano ???... di dare la risposta corretta, almeno entro sera.

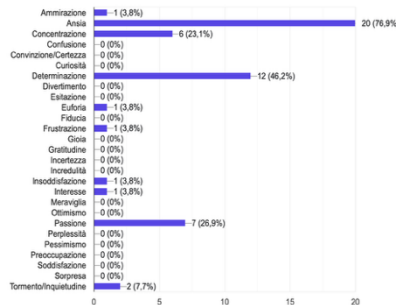
26 risposte



Intervista 11H - 2

Beh, Bohr era ovviamente molto ansioso di districare la questione, ma credo che si trattasse di una sorta di scontro con alcune persone che avevano ???... di dare la risposta corretta, almeno entro sera.

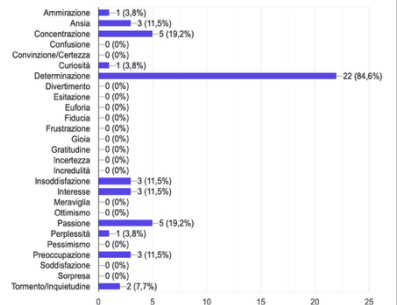
26 risposte



Intervista 11H - 3

Kuhn: Beh, dopo Solvay, hai parlato in modo molto efficace di come si sia spostato l'onere della responsabilità e ora spettasse alla controparte pres... tu stesso non abbia fatto molto altro dopo il '27.

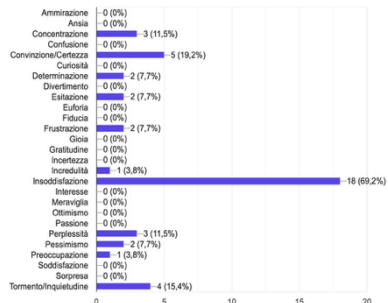
26 risposte



Intervista 11H - 4

Beh, in realtà era proprio così. Come sapete, per alcune settimane ci fu un disaccordo piuttosto acceso tra me e Bohr, e si creò una certa tensione. ...continuava a discuterne, sapete, quel genere di cose.

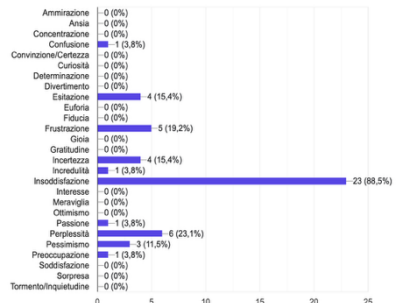
26 risposte



Intervista 11H - 5

Beh, in realtà era proprio così. Come sapete, per alcune settimane ci fu un disaccordo piuttosto acceso tra me e Bohr, e si creò una certa tensione. ...continuava a discuterne, sapete, quel genere di cose.

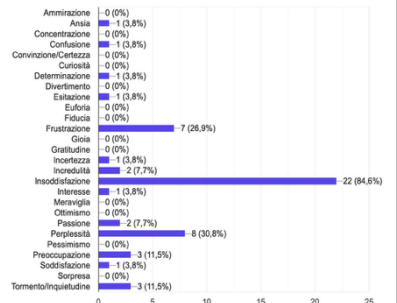
26 risposte



Intervista 11H - 6

Beh, in realtà era proprio così. Come sapete, per alcune settimane ci fu un disaccordo piuttosto acceso tra me e Bohr, e si creò una certa tensione. ...continuava a discuterne, sapete, quel genere di cose.

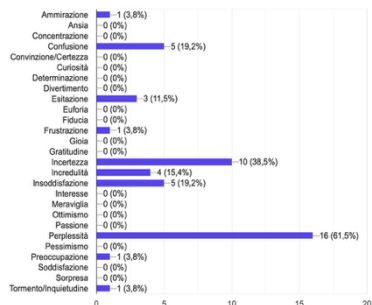
26 risposte



Intervista 11H - 7

Ho cercato di spiegare a Bohr che questi articoli di Klein-Jordan-Wigner erano solo un'ottima illustrazione di ciò che lui voleva con la complementazione...nissimo che questa era l'illustrazione che voleva.

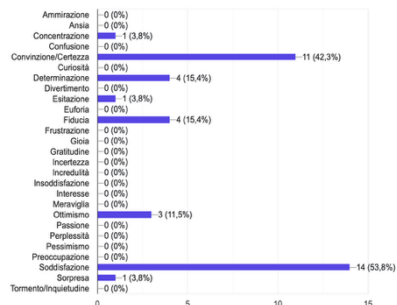
26 risposte



Intervista 11H - 8

Ho cercato di spiegare a Bohr che questi articoli di Klein-Jordan-Wigner erano solo un'ottima illustrazione di ciò che lui voleva con la complementazione...nissimo che questa era l'illustrazione che voleva.

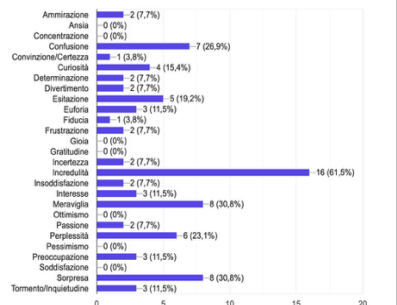
26 risposte



Intervista 11H - 9

Bohr enfatizzò la complementarità tra temperatura ed energia in modo estremo. Egli disse: "Non appena conosco la temperatura, il concetto di energia... questa cosa altro che questa singola proprietà."

26 risposte



Intervista 12H - 1

Intervista 12H - 2

Intervista 12H - 3

**Appendice C – Circumplex Model of Epistemic Affect relativi agli anni 1911 – 1912 –
1913 – 1914**

