

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea Magistrale Interateneo in Astronomia

Tesi di Laurea Magistrale

Un approccio spettroscopico alla fisica moderna. Una proposta
didattica per il Liceo Scientifico

Relatore:
prof.ssa Ornella Pantano

Laureando:
Rosaria De Michele

Correlatore:
Dr.ssa Marta Carli

Anno Accademico 2018-2019

Indice

1	La Fisica Moderna e l'Astronomia nella scuola secondaria di secondo grado	7
1.1	La Fisica quantistica nella scuola	8
1.2	Il ruolo dell'Astronomia	9
1.3	Competenze e obiettivi di apprendimento	10
2	Le difficoltà di apprendimento della fisica quantistica e alcune proposte didattiche	15
2.1	Difficoltà di apprendimento	16
2.2	Proposte e approcci didattici	18
2.3	Difficoltà e misconcezioni sull'interpretazione degli spettri atomici . . .	21
2.4	Una proposta didattica per l'interpretazione degli spettri atomici . . .	22
3	Il progetto didattico	25
3.1	Contesto della ricerca	25
3.2	Criteri per la progettazione	26
3.3	Struttura del percorso	29
3.3.1	I lezione: pre-test	30
3.3.2	II lezione: attività di laboratorio	32
3.4	III lezione: post-laboratorio	39
3.5	Post-test	40
3.6	Valutazione del percorso didattico	40
4	Risultati	43
4.1	Pre-test individuale	43
4.2	Pre-test di gruppo	55
4.3	Quaderni di laboratorio	61
4.4	Post-laboratorio	72
4.5	Griglia di osservazione	79
4.6	Post-test	79
5	Discussione e conclusioni	91
A	Pre-test	99
B	Schede di laboratorio	101

Abstract

Con l'entrata in vigore della riforma Gelmini del 2010, le Indicazioni Nazionali per le scuole secondarie di secondo grado hanno subito diversi cambiamenti. Quelli di particolare interesse in questa tesi sono quelli che riguardano le linee guida di Fisica nei licei scientifici: l'introduzione della Fisica Moderna tra gli argomenti imprescindibili e l'accorpamento dell'Astronomia all'interno della Fisica come sua applicazione. Scopo di questa tesi è proporre e realizzare un progetto didattico in una classe quinta liceo scientifico avente come focus l'interpretazione degli spettri atomici, che rappresenta uno dei punti fondamentali della Fisica Quantistica, utilizzando anche applicazioni astronomiche. Tale proposta è stata sviluppata a partire dai risultati della ricerca in didattica della fisica, in particolare rispetto alla didattica laboratoriale e alle difficoltà che incontrano gli studenti nella comprensione degli spettri atomici. L'elemento centrale del progetto didattico è stato quindi un'attività laboratoriale in cui gli studenti si sono cimentati nella costruzione di uno spettroscopio che hanno potuto utilizzare per osservare individualmente gli spettri di sorgenti diverse. Attraverso l'uso di una scheda guida per l'esperienza laboratoriale, si è condotti gli studenti a raggiungere in modo attivo la comprensione fisica del fenomeno. La valutazione del percorso didattico è stata fatta utilizzando una metodologia pre/post-test, delle griglie di osservazione e l'analisi delle schede di lavoro prodotte dagli studenti. Sulla base di questi si può dire che alla fine del percorso il 70 % degli studenti ha compreso in maniera qualitativa il processo di emissione di fotoni da parte di un atomo, contro il 23 % ottenuto nel pre-test. Sull'aspetto quantitativo il 75 % della classe mostra ancora delle difficoltà, in particolare nell'associare il fotone al corretto salto energetico, probabilmente perché durante il post-laboratorio non tutti i gruppi hanno avuto tempo per concludere la riflessione in maniera autonoma. In un'ottica di approfondimento della ricerca, si potrà considerare la possibilità di fare interviste individuali per comprendere in maniera più profonda le difficoltà degli studenti.

Introduzione

Negli ultimi due secoli la conoscenza scientifica e lo sviluppo tecnologico ad essa associato sono cresciuti in maniera esponenziale, portando a enormi cambiamenti nella vita quotidiana di ogni singolo individuo. Basti pensare a quanto per noi oggi siano scontate quelle comodità che fino a cinquant'anni fa erano solo fantascienza: ognuno di noi ha a portata di mano dispositivi tecnologici, come cellulari e computer, frutto di ricerche scaturite dalla fisica quantistica. Il modo stesso di vedere la realtà è cambiato: concetti basilari come lo spazio e il tempo sono stati stravolti dalla teoria della relatività di Einstein, la quale, ad esempio, ha permesso la nascita del GPS e il progredire degli studi astrofisici e cosmologici. La Fisica Moderna ha dimostrato che il mondo macroscopico a cui siamo abituati non è altro che un'approssimazione della realtà, offrendoci così nuove consapevolezze e con esse nuovi campi di ricerca, ma anche nuovi quesiti che hanno influenzato il pensiero umano, esplicitato dai lavori di filosofi e artisti del XX secolo. Il ruolo di tali ricerche è stato quindi fondamentale per lo sviluppo della società come la conosciamo oggi e la scuola non poteva sottrarsi dall'impegno di presentarlo alle nuove generazioni. Così il MIUR (Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca) nel 2010 ha apportato delle modifiche alle Indicazioni Nazionali [Miur, 2010] nell'ambito scientifico soprattutto dei Licei Scientifici, che non si fermano più alle scoperte del XIX secolo con l'elettromagnetismo ma proseguono fino alla Fisica del XX secolo, con particolare attenzione alla meccanica quantistica, alla relatività ristretta e al rapporto tra scienza e tecnologia. La complessità degli argomenti da trattare però rappresenta un sfida difficile per gli insegnanti di Fisica che devono presentare in tempi ristretti concetti astratti e contro-intuitivi, come quelli proposti dalla Fisica Moderna, in modo chiaro ed efficace. E come in ogni ambito l'ostacolo ha rappresentato una spinta ulteriore verso il cambiamento. La ricerca nel ramo della didattica della Fisica, già presente in Europa da qualche decennio, si è intensificata anche in Italia. Le ricerche nazionali e internazionali hanno riguardato, ad esempio, le difficoltà degli studenti nell'apprendimento di vari concetti e aspetti della Fisica Moderna e i vari approcci con cui è possibile introdurre in modo efficace tali ambiti della Fisica (per una sintesi si veda ad esempio Besson and Malgieri [2018]).

Contemporaneamente è diventato un tema delicato quello delle competenze da sviluppare negli studenti. Infatti si sente forte la necessità di avere una scuola che adotti una prospettiva di sviluppo di competenza personale, piuttosto che limitarsi alla trasmissione di conoscenze. In quest'ottica, le conoscenze disciplinari diventano "strumenti culturali" all'interno di un processo più globale di sviluppo della persona. Lo studente deve essere protagonista attivo di questo processo [Porcarelli, 2016]. Riprendendo un'affermazione di Plutarco, *gli allievi non sono vasi da riempire ma*

fuochi da accendere.

Il laboratorio allora diventa il luogo privilegiato per sviluppare non solo conoscenze e abilità, ma anche competenze trasversali come quelle sociali e civiche attraverso il lavoro di gruppo, lo spirito di iniziativa e la consapevolezza e l'espressione culturale che costituiscono anche tre delle otto *competenze chiave* definite nel quadro dell'Unione Europea del 2006. Inoltre la Fisica Moderna, con il suo esplorare e rivedere in modo anche radicale concetti fondamentali come lo spazio, il tempo, la causalità, si pone come uno strumento culturale fondamentale per lo sviluppo di una comprensione più profonda del mondo e quindi, in ultima analisi, per la crescita personale. Sempre con la riforma Gelmini anche l'insegnamento dell'Astronomia ha cambiato la sua posizione: non è più una parte del programma di Scienze della Terra, ma rientra in quello di Fisica, sottoforma di approfondimento applicativo e facoltativo di quest'ultima. Stretto è infatti il legame tra queste due discipline, riconosciuto già dall'epoca di Galileo. Fu proprio quest'ultimo che, osservando la Luna utilizzando il cannocchiale, scoprì che essa ha lo stesso aspetto della Terra e intuì che le leggi che regolano il comportamento dei corpi sulla Terra sono le stesse che regolano l'Universo. L'obiettivo basilare dell'Astronomia è infatti la ricerca delle leggi fisiche che regolano l'immenso laboratorio, non modificabile ma solo osservabile, nel quale ci troviamo immersi: l'Universo.

L'attuale posizionamento dell'insegnamento dell'Astronomia valorizza dunque questo collegamento, ma d'altra parte porta con sé il rischio di togliere spazio e valore culturale all'astronomia, relegandola ad applicazione facoltativa nel già denso curriculum di Fisica; questo può portare a una scarsa conoscenza dell'Astronomia, soprattutto quella di base [Ghetti, 2017]. È dunque importante portare avanti una riflessione didattica su come utilizzare al meglio l'Astronomia all'interno dell'insegnamento di Fisica, valorizzando anche le competenze degli insegnanti laureati in Fisica o Astronomia e offrendo strumenti anche a quei docenti (es. laureati in Matematica) che invece non hanno una preparazione specifica in ambito astronomico. Scopo di questa tesi è proporre un progetto didattico per il quinto anno liceo scientifico che permetta di affrontare uno degli aspetti più rilevanti della Fisica Moderna, riconosciuto anche dalla ricerca come possibile approccio all'insegnamento della meccanica quantistica: l'interpretazione degli spettri atomici discreti. L'approccio didattico utilizzato è stato di tipo attivo, ovvero gli studenti sono stati chiamati a "sperimentare" in prima persona i fenomeni fisici tramite lezioni in laboratorio e riflessioni di gruppo.

Per inquadrare la proposta didattica all'interno degli obiettivi previsti dal Ministero, nel primo capitolo sono riportate le Indicazioni Nazionali. In particolare, verrà messo in luce il profilo delle competenze dello studente al termine del Liceo Scientifico e gli obiettivi specifici di apprendimento, sia per quanto riguarda la Fisica quantistica, sia per quanto riguarda l'Astronomia.

Alcuni degli approcci proposti dalla ricerca in didattica della fisica per introdurre gli studenti alla meccanica quantistica, con i relativi pro e contro, sono descritti nel capitolo 2. In esso sono illustrate anche le difficoltà e alcune misconcezioni riscontrate e analizzate dai ricercatori.

La proposta didattica sviluppata nel lavoro di tesi è presentata nel capitolo 3. Essa è composta di quattro parti: il pre-test, il laboratorio, un tutorial post-laboratorio, e

il post-test. Il primo questionario ha avuto diverse funzioni: da una parte ha permesso di verificare se negli alunni con cui si è lavorato erano presenti le misconcezioni comuni trovate dai ricercatori, dall'altra ha permesso di introdurre gli studenti nell'argomento richiamando alla mente concetti già studiati in altre discipline, come la struttura dell'atomo in chimica, così da utilizzare anche in modo efficace l'interdisciplinarietà. L'attività in laboratorio ha previsto invece la costruzione per ciascuno studente di uno spettroscopio semplice ma efficace che permettesse loro di osservare gli spettri di diverse sorgenti luminose, tra cui alcuni spettri atomici. Tale attività è stata accompagnata dalla compilazione di un quaderno di laboratorio per favorire l'attività riflessiva e metacognitiva, l'organizzazione delle osservazioni e il lavoro di gruppo. Il post-laboratorio aveva come obiettivo di guidare gli studenti all'interpretazione qualitativa e quantitativa del fenomeno attraverso domande-guida a partire dall'esperienza laboratoriale. La scheda è stata costruita tenendo conto delle principali difficoltà degli studenti riguardanti gli spettri atomici emerse dalla letteratura ed è stata seguita da un momento di ricapitolazione. Il post-test invece è costituito da una domanda strutturata in più sotto-domande, costruite riprendendo gli argomenti del pre-test, inserita nel compito somministrato dall'insegnante al termine dell'intera unità di apprendimento sulla fisica moderna.

I risultati ottenuti sono presentati nel capitolo 4, mentre l'ultimo capitolo è dedicato a una riflessione finale, in particolare sulle applicazioni astronomiche.

1. La Fisica Moderna e l'Astronomia nella scuola secondaria di secondo grado

L'entrata in vigore nell'anno scolastico 2010/2011 della Riforma Gelmini [Miur, 2010] ha previsto un riordino degli argomenti di Fisica e Astronomia in particolare per il Liceo Scientifico e l'opzione Scienze Applicate. Tra queste, due tra le più rilevanti riguardano l'introduzione di argomenti di Fisica Quantistica e il ruolo dell'Astronomia all'interno del curriculum. Tali modifiche hanno portato a un ripensamento e riorganizzazione delle attività didattiche e quindi, necessariamente, anche a una specifica riflessione didattica, teorica e sperimentale, all'interno della quale si inserisce questo lavoro di tesi.

Con l'emanazione dell'*autonomia scolastica* [Miur, 1999] è stato abbandonato il concetto di "programma" scolastico inteso in senso tradizionale ed è stata lasciata più libertà ai docenti nella gestione delle discipline. Resta tuttavia la necessità di garantire agli studenti di tutte le scuole italiane la stessa formazione, dato un certo indirizzo scolastico. Tale riferimento comune è rappresentato dalle Indicazioni Nazionali redatte dal MIUR, che contengono alcune linee guida sugli argomenti da svolgere e sono le scuole che autonomamente, all'interno di queste linee guida, attraverso il lavoro dipartimentale, stabiliscono l'offerta formativa. Si lascia quindi spazio sulla scelta del percorso didattico da usare, in modo da permettere una personalizzazione dell'insegnamento al fine di mettere gli alunni "*in condizione di raggiungere gli obiettivi di apprendimento e di maturare le competenze proprie dell'istruzione liceale e delle sue articolazioni*" [Miur, 2010], ma anche di andare incontro a quelli che sono i loro interessi [Porcarelli, 2016]. Le Indicazioni Nazionali esistono per ciascun grado scolastico e, nel caso delle scuole secondarie superiori, si differenziano tra gli Istituti professionali, gli Istituti tecnici e i Licei. La loro realizzazione è avvenuta con percorsi diversi e le più recenti per la scuola secondaria sono del 2010, varate dal ministro Gelmini. Quelle di maggiore interesse per questa tesi sono le Indicazioni Nazionali dei Licei, che contengono una parte generale e poi una serie di allegati per ciascun tipo di liceo. Ogni allegato poi specifica, per ciascuna disciplina l'oggetto di insegnamento in quel tipo di liceo, delle "linee generali e competenze" che descrivono il profilo culturale generale dello studente in riferimento alla disciplina, e degli "obiettivi specifici di apprendimento" che specificano nel dettaglio temi e argomenti che dovrebbero essere proposti in ciascuna fase (primo biennio, secondo biennio, quinto anno). La struttura delle Indicazioni Nazionali fa riferimento a un

modello di progettazione didattica per competenze e non per obiettivi, in cui al centro della programmazione sta la crescita dello studente come persona, attraverso lo sviluppo di competenze ampie, alle quali gli obiettivi di apprendimento specifici possono contribuire. Tale impianto prende spunto anche dalle raccomandazioni stilate da diversi enti europei come l'OCSE (*Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico*) e il Parlamento Europeo.

Nella progettazione dei percorsi didattici è pertanto necessario fare riferimento alle Indicazioni Nazionali in vigore, individuando le competenze e gli obiettivi specifici di apprendimento che la proposta didattica concorre a sviluppare. Nei paragrafi seguenti vengono mostrati in dettaglio alcuni punti delle Indicazioni Nazionali che sono stati presi in considerazione per la costruzione del progetto didattico, per quanto riguarda i contenuti sia della Fisica quantistica che dell'Astronomia. Una riflessione più approfondita sulla progettazione per competenze invece viene riportata nel paragrafo 1.3.

1.1 La Fisica quantistica nella scuola

Con il decreto sul Riordino dei Licei varato nel 2010, gli anni di insegnamento della Fisica nei licei scientifici sia tradizionali che con opzione Scienze Applicate sono saliti da tre a cinque. Questo ha permesso l'introduzione della Fisica Moderna tra gli argomenti fondamentali da trattare nel percorso scolastico insieme alla meccanica classica, alla termodinamica, all'ottica e all'elettromagnetismo, che erano già presenti. Precedentemente infatti, la Fisica del XX secolo era facoltativa perché i pochi anni di insegnamento a disposizione permettevano, al più, di accennarla al termine del programma del quinto anno.

Poiché uno dei compiti della scuola è quello di toccare temi culturalmente e socialmente rilevanti, il ministero non poteva sottrarsi ancora a lungo da un aggiornamento delle Indicazioni Nazionali. Si è compreso che la Fisica Moderna, per quanto fosse complessa, meritasse, viste le ripercussioni culturali e tecnologiche che ha comportato negli ultimi decenni, di essere introdotta almeno qualitativamente. Il campo coperto dalla Fisica del XX secolo è però molto vasto e si è deciso di dare spazio in particolar modo alle teorie fondamentali della relatività e della Fisica quantistica. La formazione scolastica non ha né l'obiettivo né la possibilità di scendere nei dettagli di tali teorie; ciò che si propone in questo caso invece è fornire le chiavi di lettura per comprenderne le profonde modificazioni culturali che esse hanno comportato e i principi fisici su cui si fonda la maggior parte della tecnologia attuale.

Per quanto riguarda i licei scientifici le Indicazioni sono molto dettagliate sui temi della Fisica Moderna da toccare. Nel caso della Fisica Quantistica, l'approccio da seguire suggerito è di tipo semi-storico e spinge sull'aspetto qualitativo più che su quello quantitativo:

"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 dei 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.

La dimensione sperimentale potrà essere ulteriormente approfondita con attività da svolgersi non solo in laboratorio didattico della scuola, ma anche presso laboratori di Università ed enti di ricerca, aderendo anche a progetti di orientamento. " [Miur, 2010]

Coerentemente i contenuti irrinunciabili che il ministero ha pubblicato all'interno del *Quadro di riferimento* in vista della prova scritta di Fisica all'esame di Stato per i licei scientifici sono: l'emissione di corpo nero e l'ipotesi di Planck, l'effetto fotoelettrico (esperimento di Lenard e spiegazione di Einstein) , l'effetto Compton, il modello dell'atomo di Bohr e l'interpretazione degli spettri atomici, l'esperimento di Franck-Hertz, la lunghezza d'onda di De Broglie, il dualismo onda-particella, i limiti di validità della descrizione classica, la diffrazione e l'interferenza degli elettroni, il principio di indeterminazione [Miur, 2015].

Per quanto riguarda tutti gli altri licei di indirizzo non scientifico, le Indicazioni restano ancora molto vaghe e presentano solo un invito a trattare questi argomenti: *"E' 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 e energia"*[Miur, 2010].

1.2 Il ruolo dell'Astronomia

Con la Riforma Gelmini, il ruolo occupato dall'Astronomia nelle scuole secondarie di secondo grado è passato in secondo piano. Infatti nei Licei l'insegnamento dell'Astronomia ha perso buona parte dello spazio di cui godeva all'interno del curriculum di Scienze della Terra ed ha assunto principalmente una forma applicativa della Fisica non obbligatoria: il tempo a disposizione per trattare argomenti astronomici è molto ridotto ed è a discrezione dell'insegnante.

Leggendo le linee guida dei licei si può osservare che compare un accenno di Astronomia nel primo biennio di tutti gli indirizzi con i moti della Terra all'interno del programma di Scienze della Terra. Dal secondo biennio la si ritrova all'interno del programma di Fisica con le leggi di Keplero e con un approfondimento a livello storico-filosofico sul dibattito cosmologico del XVI e XVII secolo. Per il quinto anno le Indicazioni cambiano tra i licei con indirizzo scientifico (scientifico tradizionale e opzione scienze applicate) e tutti gli altri. Per i primi, si fa riferimento all'astrofisica e alla cosmologia come possibili tematiche che possono essere approfondite per interesse dello studente, ma le Indicazioni non scendono ulteriormente in dettaglio. Per i secondi, c'è solo un invito a trattare argomenti della fisica del XX secolo, *"relativi al microcosmo e/o al macrocosmo"*, ma principalmente da un punto di vista storico. Certamente il poco tempo a disposizione rappresenta un grosso ostacolo per gli argomenti facoltativi. Nel caso dei Licei scientifici le ore annuali previste di Fisica sono 66 nel biennio e 99 nel triennio, mentre per gli altri licei restano 66 soltanto nel triennio. Come risultato del poco tempo dedicato agli argomenti astronomici, gli studenti alla fine della scuola secondaria di secondo grado mostrano parecchie lacune anche sull'Astronomia di base [Ghetti, 2017].

D'altro canto, gli agganci che si possono trovare tra l'Astronomia e il percorso di Fisica sono molteplici e in questa ricerca gioca un ruolo essenziale la figura del professore, il suo background, le sue competenze e i suoi interessi. Nel caso particolare della meccanica quantistica e dello studio della dualità della luce si può usare certamente la spettroscopia come ponte tra queste due discipline. Lo spettro solare ad esempio offre diverse applicazioni, tra cui l'introduzione della teoria del corpo nero; nel caso di questa tesi è stato utilizzato come esempio di sorgente a spettro continuo. Ulteriori collegamenti con la spettroscopia in Astronomia sono presentati nel capitolo 5.

1.3 Competenze e obiettivi di apprendimento

Come accennato sopra, nella loro stesura le Indicazioni Nazionali si riferiscono a un modello di progettazione per competenze. La riflessione e la discussione su cosa si debba intendere per competenza sono ampie ed è difficile trovare una definizione univoca. Tale riflessione mira a mettere in luce il fatto che l'obiettivo della scuola dovrebbe essere non tanto - o non solo - l'acquisizione di conoscenze e abilità, ma una crescita personale che comprende gli strumenti culturali necessari senza limitarsi ad essi. Un soggetto competente è quindi in grado di mobilitare ed orchestrare le proprie risorse cognitive, volitive e relazionali, interne ed esterne, per affrontare efficacemente situazioni nuove in contesti reali.

Il contesto originario del discorso sulle competenze è quello del mondo del lavoro e la riflessione è partita a livello europeo. Diverse organizzazioni europee, che si occupano dello sviluppo economico, hanno rivolto la loro attenzione sui sistemi educativi. Questo è dovuto principalmente al fatto che in questi ultimi decenni è risultato evidente che l'aumento di disoccupazione in Europa fosse correlata con i bassi livelli di istruzione ed educazione. Uno dei primi progetti in cui si è cercato di dare una definizione di competenza è DeSeCo (*Definition and Selection of Competencies*), lanciato nel 1997 dall'OCSE al fine di migliorare i sistemi educativi europei. In esso si parla di *competenze chiave* definite come: quelle competenze individuali, importanti per tutti gli individui, che sono essenziali in diversi ambiti della vita e che contribuiscono a una vita "realizzata" e al buon funzionamento della società. Nel testo pubblicato nel 2002 [Ryken and Salganik, 2002], l'OCSE sottolinea che, sebbene le capacità cognitive e le conoscenze base siano elementi critici, è importante non restringere l'attenzione a queste componenti di una competenza, ma includere altri aspetti come la motivazione, l'atteggiamento, l'emozione e altre componenti sociali correlate. Nel progetto DeSeCo le competenze chiave vengono raggruppate in tre ampie categorie:

1. usare strumenti in modo interattivo,
2. interagire in gruppi eterogenei,
3. agire in autonomia.

Sebbene questi tre costrutti siano correlati, ciascuno di essi ha uno specifico focus. Nel mirino della prima categoria c'è l'interazione di un individuo con il mondo

attraverso strumenti fisici e socio-culturali (incluso il linguaggio e le discipline accademiche tradizionali); il secondo punto sottolinea l'interazione dell'individuo con l'altro "diverso"; mentre il terzo è sulla relativa autonomia e identità.

Alla luce del Consiglio europeo di Lisbona tenutosi nel 2000, anche l'Unione Europea ha proposto una definizione di *competenze chiave* all'interno della Raccomandazione fatta dal Parlamento Europeo e del Consiglio dell'Unione Europea [UE, 2006], molto simile a quella dell'OCSE: *le competenze chiave sono quelle di cui tutti hanno bisogno per la realizzazione e lo sviluppo personali, la cittadinanza attiva, l'inclusione sociale e l'occupazione*. L'obiettivo prefissato dall'UE era di raggiungere un'economia "basata sulla conoscenza, in grado di realizzare una crescita economica sostenibile con nuovi e migliori posti di lavoro e una maggiore coesione sociale".¹

In tale documento sono delineate in particolare otto competenze chiave, di cui si riconosce pari importanza *"poiché ciascuna di esse può contribuire a una vita positiva nella società della conoscenza"*:

1. comunicazione nella madrelingua;
2. comunicazione nelle lingue straniere;
3. competenza matematica e competenze di base in scienza e tecnologia;
4. competenza digitale;
5. imparare a imparare;
6. competenze sociali e civiche;
7. spirito di iniziativa e imprenditorialità;
8. consapevolezza ed espressione culturale.

A causa della successiva crisi economica europea, questa Raccomandazione è stata revisionata e modificata nel 2018, sottolineando la necessità di sviluppare anche capacità di adattamento ai cambiamenti, di risoluzione di problemi, di cooperare e di potenziare il pensiero critico, la creatività e l'autoregolamentazione.

Dal 2004 al 2008 l'Unione Europea ha inoltre lavorato per la costruzione del *Quadro Europeo delle Qualifiche* (EQF), al fine di promuovere la mobilità transfrontaliera dei cittadini, ponendo degli standard definiti e accettati da tutti i Paesi, e di spingere ciascun Paese membro a una ammodernizzazione dei sistemi d'istruzione e formazione. Nella *Raccomandazione del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 aprile 2008 sulla costituzione del Quadro europeo delle qualifiche per l'apprendimento permanente* si distinguono otto livelli di conoscenze, abilità e competenze, in una scala crescente di autonomia. L'attenzione è posta sui *risultati di apprendimento*, che sono definiti come: "descrizione di ciò che un discente conosce, capisce ed è in grado di realizzare al termine di un processo d'apprendimento. I risultati sono definiti in termini di conoscenze, abilità e competenze"[CE, 2009]. In tale documento le competenze sono descritte non solo in termini di "comprovata capacità di utilizzare

¹Le Conclusioni della presidenza del Consiglio europeo di Lisbona del 23-24 marzo 2000 si trovano al seguente URL: http://www.europarl.europa.eu/summits/lis1_it.htm

conoscenze e abilità", ma anche di "capacità personali, sociali e/o metodologiche, da saper mettere in atto in situazioni di lavoro o di studio e nello sviluppo personale e professionale". Quindi per quanto le normative europee seguano un approccio funzionalista, lasciano spazio alla dimensione esistenziale, anche se non sempre esplicitato [Porcarelli, 2016].

Nello specifico, per quanto riguarda l'Italia la riflessione sulle competenze si inserisce in una tradizione pedagogica di tipo personalista, esplicitata soprattutto dalla riforma Moratti in cui si identifica il "ragazzo competente" attraverso il suo "profilo educativo, culturale e professionale". Tale impostazione è tuttora visibile nelle Indicazioni Nazionali del primo ciclo, in cui si afferma che l'istruzione debba essere in vista dell'educazione dello studente e abbia come obiettivo l'insegnare a *saper essere*.

Per quanto riguarda invece il secondo ciclo, le riforme successive hanno modificato in parte questa impostazione recependo maggiormente le normative europee. Esistono tuttavia profonde differenze tra le Indicazioni Nazionali degli Istituti Tecnici e quelle dei Licei. Mentre per i primi c'è un forte riferimento alle competenze trasversali e in particolare alle competenze chiave, per i Licei le competenze trasversali (come quelle metacognitive, relazionali e attitudinali) rappresentano solo un esito indiretto delle competenze disciplinari specifiche. Alcune di queste ultime sono:

- *Aver acquisito un metodo di studio autonomo e flessibile, che consenta di condurre ricerche e approfondimenti personali e di continuare in modo efficace i successivi studi superiori, naturale prosecuzione dei percorsi liceali, e di potersi aggiornare lungo l'intero arco della propria vita*
- *Essere consapevoli della diversità dei metodi utilizzati dai vari ambiti disciplinari ed essere in grado valutare i criteri di affidabilità dei risultati in essi raggiunti*
- *Saper compiere le necessarie interconnessioni tra i metodi e i contenuti delle singole discipline*
- *Saper sostenere una propria tesi e saper ascoltare e valutare criticamente le argomentazioni altrui*
- *Acquisire l'abitudine a ragionare con rigore logico, ad identificare i problemi e a individuare possibili soluzioni*
- *Essere in grado di leggere e interpretare criticamente i contenuti delle diverse forme di comunicazione.*

Nel Quadro di Riferimento della II prova di Fisica dell'esame di Stato dei Licei Scientifici si possono poi trovare le competenze disciplinari che devono essere prese in considerazione nel momento della valutazione finale dello studente e su cui quindi è bene porre attenzione:

- *essere in grado di esaminare una situazione fisica formulando ipotesi esplicative attraverso modelli o analogie o leggi*

- *essere in grado di formalizzare matematicamente un problema fisico e applicare gli strumenti matematici e disciplinari rilevanti per la loro risoluzione*
- *essere in grado di interpretare e/o elaborare dati, anche di natura sperimentale, verificandone la pertinenza al modello scelto*
- *essere in grado di descrivere il processo adottato per la soluzione di un problema e di comunicare i risultati ottenuti valutandone la coerenza con la situazione problematica proposta. [Miur, 2015]*

Ciò che si desume quindi dalle varie normative nazionali e internazionali che sono state accennate sopra, gli obiettivi di apprendimento che un insegnante deve porsi come mete non devono riguardare solo l'assimilazione di conoscenze e lo sviluppo di abilità per applicarle e utilizzarle, ma anche lo sviluppo di capacità personali e sociali che li conduca a un livello crescente di autonomia e responsabilità. A tal fine, la progettazione didattica non può dunque prevedere principalmente lezioni frontali in cui gli alunni recepiscono informazioni in modo passivo, ma piuttosto deve renderli "protagonisti" nel processo di apprendimento e aiutarli a organizzare la conoscenza già esistente, in modo da costruire una conoscenza scientificamente valida [De Beni et al., 2001, Asikainen and Hirvonen, 2009]. Un tale tipo di approccio è definito dai pedagogisti come "insegnamento-ponte" [Porcarelli, 2016]. E' molto importante allora utilizzare, quando possibile, il vantaggio che presentano le materie scientifiche di poter visualizzare e/o sperimentare i fenomeni da comprendere in laboratorio. Allo stesso tempo diventa essenziale la personalizzazione del percorso formativo, che non si intende l'insegnamento individualizzato diverso per ciascun alunno, ma piuttosto la pianificazione di percorsi formativi calibrata sulla base delle capacità e dei bisogni e degli interessi specifici degli studenti che compongono una classe, dopo aver fatto una sintetica analisi della loro situazione di partenza. "Personalizzare" significa anche ricordare che non tutti apprendono allo stesso modo e che quindi è giusto presentare un argomento sotto diversi aspetti e forme.

Nel caso specifico della Fisica, gli obiettivi di apprendimento non consistono soltanto nella comprensione degli argomenti disciplinari elencati sopra, ma devono prevedere l'insegnamento di come venga fatta la ricerca e come si sviluppi la conoscenza scientifica [Stadermann et al., 2019]. Questo elemento è considerato fondamentale per lo sviluppo del pensiero critico negli studenti dalla maggior parte dei ricercatori ed è valorizzato in maniera dettagliata tra le competenze disciplinari specifiche riportate sopra. L'acquisizione di un'ulteriore chiave di lettura della realtà tramite lo studio della Fisica quantistica acquista allora un valore aggiunto. In particolare la spettroscopia rappresenta un prezioso mezzo per sviluppare le competenze disciplinari specifiche, essendo uno dei pochi argomenti della Fisica quantistica che si presta bene ad attività laboratoriali accessibili nelle scuole superiori [Stadermann et al., 2019]. Questo è uno dei motivi per cui è stato scelto come argomento per il progetto didattico presentato in questa tesi. Si tenga conto inoltre che l'esame di Stato di tutte le scuole superiori è stato recentemente modificato con l'entrata in vigore della riforma della Buona Scuola (*Decreto legislativo, 13/4/2017, n. 62, articolo 17, commi 3 e 4*), che prevede ora solo due prove scritte, di cui la seconda ha per oggetto una o più discipline caratterizzanti il corso di studio; in particolare

per i Licei Scientifici la seconda prova potrà consistere in una prova di Fisica oppure di una prova mista matematica-fisica: questo è un punto fondamentale che spinge gli insegnanti ancora di più a dedicare spazio alla Fisica Moderna.

Altra competenza da sviluppare nei ragazzi che traspare dai documenti ministeriali è quella di saper affrontare lavori di gruppo, che sono ottimi momenti di confronto tra pari e che richiedono collaborazione. La scelta di far lavorare i ragazzi insieme è considerata valida anche dai pedagogisti, che ritengono uno strumento efficace per migliorare il loro apprendimento.

2. Le difficoltà di apprendimento della fisica quantistica e alcune proposte didattiche

Date le difficoltà intrinseche che la Fisica Moderna presenta, per molto tempo si è evitato di introdurla nelle scuole superiori perché considerata inaccessibile per gli studenti. Sulla spinta delle Raccomandazioni europee che hanno proposto con enfasi un'ammodernizzazione dell'istruzione, a partire dal 2005 molte nazioni europee, tra cui appunto l'Italia, hanno comunque deciso di inserire nei curricula scolastici la Fisica del XX secolo. Con la sua introduzione nelle scuole, i ricercatori della didattica della fisica, che già si occupavano di trovare proposte didattiche che la rendessero accettabile, hanno intensificato la ricerca. Prova di questo è lo spazio che è stato dedicato su tale tema nel congresso annuale GIREP (International Research Group in Physics Education) tenutosi a Budapest a luglio di quest'anno, dove si è sottolineata l'importanza di riformare le metodologie di insegnamento della Fisica Moderna, tenendo conto dei risultati della ricerca in didattica della fisica [Michellini, 2019]. L'importanza di questo tema a livello internazionale è testimoniata dal fatto che, sempre in questa occasione, si è tenuto un workshop volto alla creazione di un gruppo tematico di GIREP proprio su *Teaching and Learning Quantum Physics in Secondary School*. Anche in Italia ci si sta adoperando per trovare soluzioni; lo dimostra il recente congresso della SIF (Società italiana di Fisica)¹ tenutosi nei giorni 23-27 settembre 2019 a L'Aquila: anche qui sono stati presentati lo stato dell'arte sull'insegnamento della fisica quantistica, le questioni aperte e le sfide per il futuro. La ricerca italiana tiene conto anche dei temi considerati fondamentali dal ministero ovvero: i principi fondamentali della quantistica (la dualità onda-particella, il principio di indeterminazione di Heisenberg e le predizioni probabilistiche), la teoria atomica di Bohr, i fenomeni e le applicazioni (la radiazione di corpo nero, gli spettri atomici discreti, l'interazione tra luce e materia e la natura ondulatoria della materia) e le conseguenze filosofiche ed epistemologiche [Miur, 2010].

Come spiegano i ricercatori, molti sono i fattori da tenere in conto nella progettazione di un percorso didattico efficace, ancor più nel caso in cui si debbano trattare argomenti non banali come quelli appena elencati; la scelta di un approccio didattico adeguato può giocare un ruolo fondamentale nel raggiungimento dell'obiettivo di un apprendimento profondo. Il ruolo dell'insegnante non è infatti quello di esporre in maniera semplificata la disciplina universitaria, ma deve fare una vera e propria

¹<https://congresso.sif.it/day/2019-09-26/time/09:00%20-%2012:30>

rielaborazione dei contenuti. Besson and Malgieri [2018] la definisce *trasposizione didattica*, il cui risultato è una costruzione intermedia tra la fisica dello scienziato e quella dell'allievo. Questa operazione è complessa e di conseguenza bisogna fare attenzione alle deformazioni e ai tagli che si fanno in maniera critica.

Le proposte didattiche fatte dai ricercatori negli anni per risolvere le varie questioni sono molteplici e ciascuna presenta i suoi pro e contro. Nel paragrafo 2.1 sono presentate le principali difficoltà riconosciute dai ricercatori; nel paragrafo 2.2 sono presentate alcune proposte didattiche; mentre nei paragrafi 2.3 e 2.4 si illustrano contengono rispettivamente le difficoltà e le proposte didattiche riguardanti nello specifico la spettroscopia.

2.1 Difficoltà di apprendimento

L'insegnamento della Fisica quantistica presenta molteplici difficoltà intrinseche che risiedono principalmente nella condizione necessaria di "cambiare modo di pensare, ragionare e immaginare la realtà" [Besson and Malgieri, 2018]. Chi si approccia alla fisica quantistica infatti dovrebbe accettare di mettere in discussione idee comuni su aspetti fondamentali e fare lo sforzo di leggere la realtà con una visione completamente nuova. Ma l'approccio generale è quello di cercare di interpretare i fenomeni quantistici con la chiave di lettura classica, che però risulta inadeguata. Tale comportamento è dovuto a una caratteristica fondamentale del processo cognitivo di apprendimento, che è quella di essere "costruttivo": l'elaborazione delle nuove informazioni avviene sulla base di quanto già si conosce [De Beni et al., 2001, Taber, 2004, diSessa, 1993]. La difficoltà di apprendimento della quantistica quindi dipende molto dalla misura in cui ci si aggrappa alle conoscenze della fisica classica e quanto si tende ad utilizzarle per interpretare il mondo quantistico [Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017].

Le principali difficoltà di apprendimento sono quindi riconducibili al contrasto che nasce tra le idee e i metodi del mondo classico e di quello quantistico. Una delle conseguenze di questo fatto è l'assenza di riferimenti macroscopici che permettano di visualizzare la realtà microscopica Besson and Malgieri [2018]. I fenomeni quantistici non sono infatti riportabili a un qualcosa di già noto nella fisica classica ed è spesso impossibile creare una loro rappresentazione fedele senza fare semplificazioni distorcenti, che possano condurre a concezioni errate, dette anche *misconcezioni*²,

²Il termine "misconcezione" è un termine classico usato nella didattica della fisica per indicare un'interpretazione errata di un principio o fenomeno fisico, rilevata come tipicamente espressa dagli studenti in base a osservazioni sperimentali. Oggi, a livello di ricerca si sta abbandonando questo termine in favore di epistemologie più "fine grained" della fisica [diSessa, 1993]. Sempre più studi infatti mettono in evidenza che le difficoltà di interpretazione degli studenti sui fenomeni fisici non vengono dal possesso di teorie alternative stabili e coerenti, ma emergono dall'uso incoerente di idee intuitive più semplici (di per sé né corrette, né scorrette: ad esempio "un maggiore sforzo produce un maggiore effetto") in maniera fortemente dipendente dal contesto. In quest'ottica, quella che si rileva come "misconcezione" emergerebbe come una "coordinazione" inappropriata di tali idee intuitive, rafforzata dall'uso ripetuto nella quotidianità o dall'istruzione precedente. Nel contesto di questa tesi, pur essendo consapevoli di tali teorie e riconoscendone la validità, usiamo il termine "misconcezione" in senso fenomenologico, ossia come qualità osservabile emergente del ragionamento degli studenti in base agli strumenti usati nello studio. Per rilevare una struttura

che possono essere anche molto radicate nel ragionamento degli studenti. Un esempio tipico che permette di capire questo punto è la comprensione della cosiddetta "dualità onda-particella". Con questa espressione si indica il duplice comportamento che presentano gli oggetti quantistici³, sia come onde che come particelle. Attraverso molti esperimenti è stato dimostrato infatti che sia la luce che le "particelle" quantistiche in alcune circostanze si comportano come un'onda (si pensi ai fenomeni di interferenza e alla formazione dello spettro) e in altre invece mostrano proprietà particellari (si pensi ai fenomeni collisionali e all'effetto fotoelettrico). Questa doppia natura espressa in termini classici crea confusione negli studenti perché sono portati a immaginare il fenomeno, ad esempio, con una biglia che descrive una traiettoria sinusoidale[Pospiech, 1999].

Un ulteriore ostacolo che sfocia dal contrasto col mondo classico è la descrizione in termini probabilistici dei sistemi quantistici che deve andare a sostituire il concetto di traiettoria, ben saldo nella mente degli studenti. Risulta allora chiaro perché gli studenti accettino di buon grado il modello atomico di Bohr, facilmente raffigurabile utilizzando l'analogia con un sistema planetario, dove il nucleo sostituisce il Sole e gli elettroni si trovano al posto dei pianeti su orbite ellittiche ben definite, ma trovino difficile da comprendere gli orbitali nel modello atomico di Schrödinger, che sono invece definiti come zone con alta probabilità di trovare un elettrone.

Altro concetto di difficile comprensione è la discretizzazione delle grandezze, ossia l'assunzione di soli certi valori da parte di quantità fisiche, come l'energia, che gli studenti hanno studiato essere continue nella fisica classica. Questo, ad esempio, rende non scontata la comprensione dei salti energetici degli elettroni all'interno dell'atomo, che avviene esclusivamente grazie a particolari energie dei fotoni.

Altra difficoltà, che connette e racchiude in qualche modo le precedenti, è la contro-intuitività dei concetti quantistici che causa un rifiuto dei principi fondamentali della quantistica e quindi una rielaborazione e re-interpretazione dei fenomeni osservati, con l'intento di farli quadrare negli standard classici. Questa reazione è un effetto del processo di apprendimento, in particolare alla necessità che si ha di avere una certa risonanza con quanto già si conosce [Taber, 2004]. Ne è una prova la faticosa accettazione del principio di indeterminazione di Heisenberg, che afferma l'impossibilità di definire simultaneamente variabili correlate che descrivono gli oggetti quantistici, come posizione e velocità, al di sotto di una certa soglia di incertezza. Questa teoria viene spesso interpretata dagli studenti come conseguenza degli errori di misura intesi in senso classico (per esempio strumentali oppure per la difficoltà di captare le particelle che si muovono ad alta velocità o per via delle loro piccole dimensioni), piuttosto che come proprietà intrinseca dei sistemi quantistici [Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017].

Per fornire una descrizione esatta dei fenomeni quantistici sarebbe allora necessario ricorrere al formalismo matematico, che però è molto complesso e inaccessibile agli studenti delle scuole superiori, se non utilizzando nuovamente delle approssimazioni. Da qui la scelta della maggior parte delle nazioni europee, per esempio nel caso dell'atomo, di non inserire negli obiettivi di apprendimento l'equazione di Schrodinger,

più fine della conoscenza e dei meccanismi di ragionamento degli studenti sarebbero necessari dati qualitativi più ricchi, ad esempio interviste individuali.

³Con questo termine ci si riferisce sia i fotoni che le particelle quantistiche, come gli elettroni

ma piuttosto fermarsi alla descrizione matematica fornita da Bohr per i livelli energetici dell'atomo valida per la prima colonna degli elementi della tavola periodica [Stadermann et al., 2019]. Il livello di formalismo da raggiungere per riuscire a dare una visione soddisfacente della quantistica nelle scuole è però ancora un tema di discussione nella ricerca didattica.

Alcune ricerche hanno dimostrato che bisogna fare attenzione nel non sopravvalutare la descrizione matematica dei fenomeni quantistici, perché una buona capacità nell'utilizzare il formalismo matematico non è necessariamente indice di una comprensione profonda dei concetti quantistici [Ke et al., 2005]. Altre invece hanno dimostrato quanto sia possibile eliminare tecnicismi inutili e introdurre in forma accettabile il formalismo, così da poter toccare punti altrimenti inaccessibili della quantistica [Pospiech, 1999]. Un'ulteriore difficoltà sollevata da Giliberti [2011] è quella dell'incapacità attuale degli scienziati di definire come "tagliare" il mondo classico da quello quantistico anche usando il formalismo matematico, cosa che invece accade con la relatività [Lodovico, 2015]. Un fattore aggiuntivo che può condurre gli studenti a delle lacune nell'apprendimento della quantistica è anche una carenza nella comprensione di concetti base della fisica classica [Taber, 2004]. Ad esempio, un'errata comprensione della quantità di moto può rappresentare un ostacolo per un'elaborazione corretta della lunghezza d'onda di de Broglie [Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017]. Alcuni studi dimostrano che la buona comprensione di temi come l'elettromagnetismo, i circuiti elettrici e le onde, gioca un ruolo fondamentale nell'apprendimento, come nel caso dell'effetto fotoelettrico [Asikainen and Hirvonen, 2009].

Tutti questi fattori quindi possono contribuire a lasciare un'idea frammentaria e incoerente dei concetti quantistici che rendono gli alunni confusi, sospettosi e increduli nei confronti della Fisica quantistica.

2.2 Proposte e approcci didattici

La letteratura di ricerca sulla didattica della fisica quantistica offre svariati approcci metodologici per presentare tale disciplina agli studenti delle scuole superiori, sviluppati con l'intento di offrire possibili soluzioni alle problematiche sopra illustrate. Uno dei maggiori temi di discussione tra i ricercatori è il ruolo che gioca il bagaglio di conoscenze di Fisica classica nell'apprendimento della quantistica, poiché è evidente che la principale fonte di problemi è il conflitto che si crea tra queste due chiavi di lettura della realtà differenti. In letteratura si possono riconoscere in particolare due linee di pensiero: da una parte c'è chi sostiene che tali conoscenze ostacolano la comprensione della visione data dalla quantistica, dall'altra parte, invece, c'è chi sostiene l'importanza di mantenere una certa continuità con le conoscenze che hanno gli studenti. Per questo motivo i primi propongono di sottolineare il taglio netto tra questi due modi di leggere la realtà [Kalkanis et al., 2003, Giliberti, 2011], spingendo verso la teoria quantistica dei campi, o addirittura affermano che bisognerebbe omettere il più possibile riferimenti alla fisica classica e ai modelli storici intermedi appartenenti alla "vecchia teoria dei quanti" [Fischler and Lichtfeldt, 1992]. I secondi sono invece favorevoli all'introduzione dei nuovi argomenti a partire proprio da quest'ultima [Levrini and Fantini, 2013] o tenendo conto della possibilità di una

parziale riorganizzazione delle conoscenze precedenti dei ragazzi [di Sessa, 2018]. Una ricerca interessante sull'influenza che ha la fisica classica sull'apprendimento della quantistica è stata condotta da Ke et al. [2005], il quale è giunto alla conclusione che non sono i riferimenti alla fisica classica a rafforzare o meno le misconcezioni nei ragazzi, ma piuttosto suggerisce di puntare sulla sperimentazione di fenomeni che mostrano comportamenti non classici. Infatti, anche nel caso in cui il professore elimini ogni analogia alla fisica classica, tale passaggio avviene in modo spontaneo nella mente dello studente. Ke et al. [2005] suggeriscono anche di "fornire contesti didattici che spingano gli studenti verso un conflitto cognitivo. Ad esempio, potrebbe essere richiesto loro di applicare sia i modelli classici che quelli quantistici per spiegare i fenomeni quantistici. Come risultato troveranno che i concetti classici non sono in grado di spiegare il comportamento subatomico".

In linea con la seconda filosofia di pensiero si trova l'approccio tradizionale, chiamato *semi-storico*, che è quello suggerito anche dalle Indicazioni Nazionali. Esso punta a presentare la "vecchia teoria dei quanti", la quale nella storia scientifica ha fatto da intermediario tra la fisica classica e la nuova teoria quantistica. È definito "semi-storico" perché presenta, principalmente in maniera qualitativa, quegli esperimenti chiave svolti all'incirca tra il 1900 e il 1925, che hanno condotto alla nascita della teoria quantistica seguendo come filo conduttore l'ordine cronologico. Tra gli argomenti trattati si trovano, ad esempio, il problema della radiazione di corpo nero, l'effetto fotoelettrico, l'effetto Compton, l'interpretazione degli spettri atomici, l'ipotesi ondulatoria di de Broglie, il dualismo onda-corpuscolo e il principio di Heisenberg [Besson and Malgieri, 2018]. La fisica quantistica è presentata come un insieme di risultati sperimentali e modelli sviluppatasi sull'ipotesi comune dell'esistenza dei "quanti", grandezze quantizzate da introdurre necessariamente per spiegare alcuni fenomeni osservati. Il vantaggio principale di tale approccio è che il confronto tra la fisica classica e quella quantistica semplifica il passaggio dall'una all'altra, perché permette di partire da un qualcosa di noto, elemento riconosciuto importante nel processo di apprendimento. Inoltre, attraverso la successione temporale, rende chiaro lo sviluppo logico seguito nella ricerca, in particolare come si fa a sapere che le cose vadano in un certo modo e perché le altre possibilità siano state scartate [Besson and Malgieri, 2018]. Essendo poi una trattazione perlopiù qualitativa, la matematica utilizzata è semplice e accessibile agli studenti delle scuole superiori. Tale approccio offre anche una certa interdisciplinarietà, avendo un facile accesso a riflessioni su questioni storiche, filosofiche ed epistemologiche che aiuta a raggiungere una più approfondita comprensione dei concetti quantistici principali [Stadermann et al., 2019, Asikainen and Hirvonen, 2009].

L'intenzione è quindi quella di riconoscere gli studenti nella stessa condizione di passaggio tra la visione classica e quella quantistica che hanno vissuto gli scienziati con le prime scoperte. Tale approccio, per questi aspetti positivi, è quello più tradizionalmente utilizzato e generalmente lo si trova nei libri di testo, appoggiato anche dagli studiosi rimasti scettici sulla possibilità di presentare in modo più dettagliato la fisica quantistica alle scuole superiori [Besson and Malgieri, 2018]. Questo metodo però presenta anche degli aspetti negativi. Infatti la "vecchia fisica dei quanti" non è una vera teoria e come tale non potrebbe essere preso come riferimento per la comprensione [Giliberti, 2011]. La frammentazione concettuale con cui vengono

illustrati i vari argomenti, dove l'unico filo conduttore sembra quello temporale delle scoperte, può rappresentare un ostacolo alla composizione di un quadro organico della teoria e lasciare delle lacune che lo studente tenderà a colmare con proprie interpretazioni basate sulle sue conoscenze di fisica classica. Questi tentativi naturalmente risulteranno insoddisfacenti e renderanno gli studenti scettici nei confronti dell'intera fisica quantistica. Il continuo riferimento alla fisica classica non permette una separazione tra le due realtà diventando terreno fertile per le misconcezioni più comuni descritte in precedenza. Inoltre, l'approccio storico non affronta il nucleo concettuale e formale delle nuove teorie quantistiche, non sottolineando la nuova visione della realtà.

Una proposta didattica per la quantistica che rientra nella visione di continuità tra il "vecchio" e il "nuovo" è quella che arriva dall'Università di Bologna, che rappresenta una rivisitazione di quanto indicato dalle linee guida ministeriali. Il lavoro svolto da Levrini and Fantini [2013] parte dall'intenzione di dimostrare che non sono necessarie iper-semplificazioni per rendere accessibile la quantistica agli studenti. Anzi, la complessità che caratterizza la materia può essere trasformata in una sfida culturale, divenendo così significativo per i ragazzi. L'assunzione di partenza di questa ricerca è che il processo di apprendimento/insegnamento è significativo se riesce a combinare in maniera produttiva le conoscenze disciplinari di fisica con il mondo reale e il sistema cognitivo di chi apprende. Questa è esplicitata attraverso tre criteri guida che rappresentano la base di una buona progettazione didattica:

- "La multi-prospettiva: gli stessi contenuti fisici (fenomenologie) sono analizzati da diverse prospettive così da incoraggiare connessioni multiple tra i contenuti e i percorsi concettuali;
- la multi-dimensionalità: le diverse prospettive e le multiple connessioni sono analizzate e confrontate anche per le loro peculiarità filosofiche ed epistemologiche, così come per le loro relazioni con esperimenti e formalismo;
- la longitudinalità: il "gioco" del modellamento dei fenomeni quantistici è sistematicamente analizzato e paragonato con i modelli già incontrati dagli studenti durante lo studio di altri argomenti di fisica (meccanica classica, relatività speciale e termodinamica)."Levrini and Fantini [2013]

Questi autori non presentano gli argomenti seguendo un solo filo logico prefissato, ma attraverso i dibattiti creano connessioni trasversali che aiutano a comporre un quadro più organico della teoria, evitando così la frammentazione concettuale a cui conduce l'approccio semi-storico. Il loro percorso inoltre permette di andare oltre alla "teoria dei quanti", toccando il nucleo concettuale della meccanica quantistica e introducendo il formalismo matematico in una maniera che risulti utile e non un semplice tecnicismo. Resta il fatto che il formalismo matematico mostra i suoi limiti per la comprensione dei concetti quantistici e la visualizzazione dei fenomeni sembra ancora un fattore imprescindibile nel processo di apprendimento di alcuni studenti.

2.3 Difficoltà e misconcezioni sull'interpretazione degli spettri atomici

Alcune di queste difficoltà sono state osservate e documentate anche rispetto all'argomento degli spettri atomici [Ivanjek et al., 2015a] e sono state sviluppate proposte didattiche per guidare gli studenti a un'interpretazione corretta [Ivanjek et al., 2015b]. Poiché l'apprendimento è un processo costruttivo, nel senso che le nuove informazioni vengono elaborate sulla base di quelle già presenti in memoria, tali misconcezioni possono causare una distorsione delle nuove informazioni ed in genere sono difficili da sradicare. E' quindi bene conoscerle nel momento in cui si vuole progettare un percorso didattico efficace.

Nel caso specifico dell'interpretazione degli spettri atomici, tema trattato nel progetto didattico illustrato nel prossimo capitolo, sono state svolte molteplici ricerche nel mondo della didattica della fisica che hanno condotto all'individuazione delle difficoltà e delle misconcezioni più comuni. Qui di seguito vengono illustrate quelle di maggior interesse per questa tesi.

Per quanto riguarda la struttura atomica, come già detto sopra, le false analogie con la fisica classica dettate dal modello planetario dell'atomo di Bohr costituiscono un grosso ostacolo alla rinuncia di questo modello a favore di quello di Schrödinger. Questo attaccamento è dovuto sia dal fatto che è facilmente visualizzabile, avendo appunto un riferimento macroscopico dato dai sistemi planetari, sia perché gli studenti lo considerano valido in termini fisici e, di conseguenza, non comprendono la necessità di introdurre un nuovo modello atomico tendendo a confondere i termini orbitali, orbite e gusci concentrici come sinonimi [Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017, Taber, 2004]. Per lo stesso motivo, molti studenti non considerano necessario introdurre una quantizzazione dei livelli energetici [Taber, 2004].

Le misconcezioni più comuni sugli spettri atomici, riscontrate nel lavoro di Ivanjek et al. [2015a], riguardano "l'incompleta o la scorretta comprensione di come i livelli energetici e le transizioni degli elettroni siano tra loro relazionati agli spettri discreti". Le incomprendimenti emerse sono:

1. l'energia di un fotone emesso durante il salto energetico dell'elettrone da un livello con energia superiore a uno inferiore nell'atomo viene associato all'energia del livello piuttosto che alla differenza energetica fra due livelli
2. la transizione tra due livelli vicini è data da due righe vicine e non dalla riga con la lunghezza d'onda λ maggiore, cioè più debole
3. il numero di colori presenti nello spettro è usato come indicatore del numero di transizioni, piuttosto che il numero di righe
4. il livello fondamentale non viene considerato un livello energetico
5. le transizioni si possono avere solo con il livello fondamentale, cioè non considerano la possibilità di avere transizioni tra stati eccitati

6. l'emissione di un fotone non viene relazionata a un cambio del livello energetico dell'elettrone all'interno dell'atomo, in particolare da un livello con energia maggiore a uno con energia minore. [Ivanjek et al., 2015a]

Gli studenti inoltre dimostrano una tendenza nell'uso improprio della terminologia specifica, indicatore anche di una confusione a livello concettuale [Ivanjek et al., 2015a].

Queste difficoltà non devono essere sottovalutate; infatti come dimostra una ricerca condotta da Bardar et al. [2006] con LSCI, risulta che il 75 % degli studenti universitari di astronomia, anche dopo il corso, non capiscono il processo di emissione e di assorbimento della luce [Ghetti, 2017].

2.4 Una proposta didattica per l'interpretazione degli spettri atomici

Una proposta didattica, sullo specifico tema dell'interpretazione degli spettri atomici, arriva da Ivanjek et al. [2015b], elaborata a partire dai risultati ottenuti dalla loro ricerca sulle misconcezioni più frequenti negli studenti, che sono state illustrate nel paragrafo precedente.

Essi hanno organizzato il lavoro in tre parti: un pre-test, un tutorial e un post-test. Il pre-test è stato somministrato dopo alcune lezioni introduttive ed è stato utilizzato sia come strumento per individuare le misconcezioni sia per focalizzare l'attenzione dei ragazzi sulle questioni che verranno affrontate nel tutorial. In quest'ultimo si cerca di guidare lo studente nel riconoscere le inconsistenze tra le loro predizioni e i modelli scientifici e condurli nel ragionamento per risolverle. In particolare, l'attenzione è posta sui passaggi di ragionamento necessari per arrivare a mettere in relazione le righe spettrali con le transizioni degli elettroni tra i livelli energetici dell'atomo. A tal proposito, nel primo esercizio vengono riproposte le più comuni idee scorrette in un dialogo tra due ipotetici studenti. Agli alunni viene richiesto di esprimere un parere e di commentarlo senza ricevere correzioni da parte dell'insegnante. Nei due esercizi successivi lo studente viene guidato a trovare le relazioni tra le lunghezze d'onda λ e il diagramma dei livelli di energia, in modo da condurlo a comprendere che l'emissione è dovuta alla transizione tra due livelli energetici. In particolare, sono state date loro le λ corrispondenti alle righe presenti nello spettro ed è stato chiesto loro di calcolare le energie dei fotoni che li hanno prodotti. Fatto ciò, hanno dovuto trovare una relazione tra le energie dei fotoni e i livelli energetici e in base ai risultati hanno dovuto spiegare cosa succede nell'atomo quando viene emesso un fotone. Con ulteriori esercizi si cerca di far trovare la relazione tra le righe e le transizioni, mostrando loro che più il salto energetico è piccolo, e quindi i livelli sono vicini, più vuol dire che ci si trova su alti stati energetici eccitati. Si fa quindi calcolare E_1/E_n in modo da arrivare alla relazione $E_1/E_n = n^2$. Il passaggio successivo è disegnare un diagramma dei livelli energetici qualitativamente corretto. Questo approccio pratico mostra la sua efficacia già a metà del tutorial, quando viene richiesto agli studenti di rivedere il primo esercizio: molti mostrano la capacità di riconoscere i propri errori capendone la causa. A questo punto si procede con il post-test in cui vengono poste delle domande in linea con il pre-test, ma più difficili:

sono pensate in modo che lo studente non possa rispondere in modo mnemonico e sono stati aggiunti distrattori per verificare se le difficoltà svelate nel pre-test siano state superate o meno. La verifica dell'apprendimento è stata fatta attraverso il confronto dei due test e mostra effetti positivi sulla comprensione degli spettri atomici, arrivando in alcuni casi al 90 % delle risposte corrette nel post-test.

Questa proposta didattica sembra quindi confermare i risultati di Ke et al. [2005] sull'importanza di far sperimentare delle esperienze di quantistica, che è uno dei motivi per cui il lavoro di Ivanjek et al. [2015b] è stato preso in considerazione nel progettare il percorso didattico proposto in questa tesi.

3. Il progetto didattico

3.1 Contesto della ricerca

L'idea di un progetto didattico sulla fisica moderna, e in particolare sull'interpretazione degli spettri atomici, nasce nel contesto del progetto COLLABORA ("a COMMunity of Learners on LABORAtory work")[Carli and Pantano,2019, in preparazione], un percorso di formazione per insegnanti in servizio promosso dal Gruppo di Ricerca in Didattica della Fisica dell'Università di Padova (GRAPE DFA) e svoltosi tra maggio 2018 e giugno 2019. In particolare, il progetto è stato al centro del piano di ricerca-azione di una delle insegnanti partecipanti, Maria Rosa Fontolan, insegnante di matematica e fisica presso il Liceo Scientifico "Paleocapa" di Rovigo. Di seguito, presentiamo brevemente il progetto per meglio inquadrare il contesto in cui è nata la proposta didattica. Il progetto COLLABORA nasce come percorso di formazione e aggiornamento volto ad approfondire il ruolo importante del laboratorio nell'apprendimento della fisica. Il percorso è stato quindi sviluppato secondo la metodologia formativa della comunità di apprendimento (Community of Learners), riconosciuta come particolarmente efficace nel promuovere l'innovazione e lo sviluppo delle competenze in didattica della fisica. Questa metodologia riconosce chi apprende come costruttore attivo della propria conoscenza di cui diventa parzialmente responsabile. Ogni membro è infatti contemporaneamente apprendista ed insegnante perché è chiamato a condividere con gli altri le proprie conoscenze. Il ruolo del docente in questo contesto è quello di avviare e guidare le attività, facendo in modo che si rimanga focalizzati sugli obiettivi da raggiungere. Lavorando in un ambiente collaborativo come questo non vengono acquisite solo nuove conoscenze disciplinari, ma vengono sviluppate anche competenze metodologiche, progettuali e sociali [Ligorio, 1994]. Proprio su questa linea di pensiero si è sviluppato il progetto COLLABORA. I punti sulle quali è stato principalmente costruito il percorso sono:

1. cercare di creare una connessione tra contenuti, pratica e ricerca; è stato quindi scelto un macro argomento disciplinare all'interno del quale è stata contestualizzata una riflessione sul lavoro pratico; gli insegnanti sono stati chiamati a ricercare, analizzare e sviluppare strumenti da utilizzare nella progettazione dell'insegnamento;
2. guidare gli insegnanti a formulare un piano di ricerca-azione, aiutandoli nella ricerca della letteratura di riferimento e nel progettare e realizzare un'attività;
3. rafforzare in positivo la credenza degli insegnanti che il lavoro pratico nelle scuole deve essere uno degli obiettivi principali;

4. organizzare il percorso di una durata considerata sufficiente per seminare, far pratica, creare fiducia e legami sociali;
5. la costituzione di una comunità di apprendimento composta da ricercatori e partecipanti, allo scopo di condividere esperienze e di supportarsi a vicenda; da una parte i ricercatori dovrebbero mantenere la comunità viva e attiva, dall'altra i partecipanti dovrebbero avere l'opportunità di interagire anche al di fuori degli incontri stabiliti. [Carli and Pantano,2019,in preparazione]

Tenendo conto del punto 4, il percorso è stato strutturato della durata di un anno e ha previsto quattro incontri introduttivi tra maggio e settembre 2018 e successivamente un incontro mensile da ottobre 2018 ad aprile 2019. Il percorso si è concluso a maggio 2019 con la presentazione finale dei workshop degli insegnanti. Durante il percorso è stato infatti chiesto ai partecipanti di proporre e realizzare un piano di ricerca-azione collegato ai contenuti del corso e alla centralità del laboratorio, ideando sequenze di insegnamento e apprendimento e sviluppando strumenti per mettere in pratica i risultati della ricerca in classe. Il macro argomento disciplinare di quest'anno è stato "onde e loro applicazioni", di cui si sono trattati in particolare i sotto-temi: proprietà delle onde, radiazione elettromagnetica (inclusi i fenomeni luminosi) e applicazioni tecnologiche delle onde.

La sperimentazione della professoressa Fontolan, in cui rientra appunto questo progetto di tesi, riguardava la possibilità di creare un modulo "inquiry-based", allo scopo di utilizzare il laboratorio come fulcro della progettazione di un percorso didattico. Con l'espressione *inquiry-based learning* (IBL) si intende infatti "un insieme di strategie educative in cui gli studenti seguono metodi e azioni simili a quelle di scienziati professionisti al fine di costruire la conoscenza"[Pedaste et al., 2015]. Il valore di questa metodologia sta non solo nel permettere agli studenti di apprendere con interesse e motivazione facendo leva sulla scoperta, ma anche di stimolare la crescita di competenze disciplinari specifiche come le capacità di identificare i problemi, di formulare domande e ipotesi, di formulare ed eseguire esperimenti, di raccogliere ed analizzare i dati, di presentare i risultati e di estrarne delle conclusioni. Nonostante le innumerevoli dimostrazioni da parte del mondo della ricerca della didattica degli enormi effetti positivi di un approccio simile sull'apprendimento dello studente, il suo utilizzo è ancora limitato nelle scuole a livello mondiale [Crawford, 2014]. Si faccia attenzione che per "attività in laboratorio" o "lavoro pratico" si intende attività che sono intraprese in prima persona dagli studenti, individualmente o in piccoli gruppi, e non attività svolte dall'insegnante che rendono gli alunni semplici spettatori [Millar, 2010].

3.2 Criteri per la progettazione

Alla progettazione del percorso presentato in questa tesi hanno contribuito l'autrice stessa, la dottoressa Marta Carli e la professoressa Ornella Pantano (Gruppo di Ricerca in Didattica della Fisica e dell'Astronomia) e la professoressa Fontolan. La sperimentazione è avvenuta nella classe V del Liceo Scientifico - indirizzo tradizionale "P. Paleocapa" di Rovigo, dove la professoressa Fontolan insegna matematica e fisica

da cinque anni. La classe in questione era composta da 20 alunni. La costruzione del percorso è stata organizzata nei mesi di aprile e maggio 2019, mentre il progetto è stato messo in atto nell'ultima fase dell'anno scolastico, tra il 18 maggio e il 5 giugno 2019.

Come si è visto nel primo capitolo, le Indicazioni Nazionali non entrano nel dettaglio sul tipo di approccio da seguire nell'insegnamento della Fisica Moderna, anche se sembra favorire quello semi-storico. Questo vuol dire che è lasciata una certa libertà al docente sulla scelta del percorso che vuole seguire per presentare gli argomenti. Nel progettare il percorso si è cercato di tenere in considerazione:

- l'esigenza della docente e della programmazione scolastica;
- la metodologia IBL;
- i suggerimenti didattici presenti in letteratura.

Nel programmare il percorso si è quindi tenuto conto della centralità del ruolo del laboratorio al fine sia di suscitare interesse e curiosità nei ragazzi, attivandoli emotivamente e rendendo significativo per loro ciò che apprendono, sia di agevolare un apprendimento attivo attraverso la sperimentazione personale e concreta dei fenomeni come suggerito abbondantemente in letteratura (solo per citarne alcuni Ke et al. [2005], Pedaste et al. [2015]).

Nell'approccio IBL che è stato scelto come modello di riferimento sono identificate 5 fasi: l'orientamento, la concettualizzazione, l'indagine, la conclusione e la discussione. La prima fase prevede l'esplorazione del fenomeno allo scopo di aiutare lo studente a partire con il nuovo argomento su cui indagare scientificamente. La fase di 'concettualizzazione' comprende sia il porsi delle domande sia il generare ipotesi verificabili sul fenomeno allo scopo di pianificare l'indagine scientifica successiva. Con il termine 'indagine' ci si riferisce allo studio pianificato del fenomeno e quindi include: l'osservazione e la sperimentazione, la raccolta e l'interpretazione dei dati e la loro analisi. Nelle fasi finali bisogna poi estrarre le conclusioni dai dati, comunicarle agli altri e discuterne insieme [Pedaste et al., 2015].

Sulla stessa linea si trova la metodologia ISLE ("Investigative Science Learning Environment") proposta dal gruppo di Eugenia Edkina et al. della Rutgers University. In questa metodologia si sottolinea l'importanza di creare un ambiente di apprendimento che ricalchi, almeno in parte, l'ambiente di ricerca tipico dell'indagine scientifica. L'obiettivo è rendere gli studenti protagonisti attivi dell'attività laboratoriale, favorendo un contatto più profondo con i concetti e le pratiche scientifiche, in contrasto con la prassi spesso usata a scuola in cui gli studenti si limitano a eseguire delle procedure prestabilite simili a ricette di cucina. Alcuni elementi caratterizzanti della metodologia ISLE sono:

- l'uso di diverse tipologie di esperimenti (osservativi, di test, applicativi) per sperimentare processi sia di tipo induttivo, sia ipotetico-deduttivo;
- una sottolineatura dell'importanza di usare diverse rappresentazioni dei fenomeni fisici (grafici, equazioni, diagrammi, spiegazioni verbali, disegni, etc.);

- un focus sulle abilità scientifiche, sviluppate attraverso rubriche che possono essere usate sia per la valutazione, sia per orientare il lavoro degli studenti.

Durante il percorso COLLABORA, gli insegnanti sono entrati a contatto con la metodologia ISLE che è stata usata come riferimento in alcune proposte laboratoriali. La scelta sul tema da trattare è caduto sull'interpretazione degli spettri atomici per varie ragioni:

- è uno dei pochi argomenti della Fisica quantistica che permette sperimentazioni fattibili nelle scuole superiori e che rende quindi la disciplina meno astratta, fattore di indiscutibile importanza per la comprensione profonda di una disciplina così complessa e teorica [Ke et al., 2005, Stadermann et al., 2019];
- è uno dei fatti sperimentali che hanno segnato la crisi della fisica classica, in particolare dei livelli energetici dell'atomo [Ivanjek et al., 2015a, Stadermann et al., 2019];
- permette facili agganci della Fisica quantistica all'Astronomia;
- rientra nel tema proposto da COLLABORA "onde e loro applicazioni".

Per quanto riguarda il riferimento alle Indicazioni Nazionali, il progetto contribuisce al raggiungimento dei seguenti traguardi di sviluppo delle competenze:

- *Saper sostenere una propria tesi e saper ascoltare e valutare criticamente le argomentazioni altrui;*
- *Acquisire l'abitudine a ragionare con rigore logico, ad identificare i problemi e a individuare possibili soluzioni;*
- *Essere in grado di leggere e interpretare criticamente i contenuti delle diverse forme di comunicazione. [Miur, 2010]*

Per quanto riguarda gli obiettivi specifici di apprendimento, sempre in riferimento alle indicazioni ministeriali, possiamo individuare i seguenti:

- *essere in grado di esaminare una situazione fisica formulando ipotesi esplicative attraverso modelli o analogie o leggi;*
- *essere in grado di formalizzare matematicamente un problema fisico e applicare gli strumenti matematici e disciplinari rilevanti per la loro risoluzione;*
- *essere in grado di interpretare e/o elaborare dati, anche di natura sperimentale, verificandone la pertinenza al modello scelto. [Miur, 2015]*

I risultati di apprendimento attesi da parte dello studente sono:

- saper descrivere e rappresentare con un diagramma la struttura dei livelli energetici dell'atomo, anche quantitativamente per l'atomo di H;

Data	Argomenti e attività	ore
18/5	pre-test (individuale e di gruppo) e discussione	1 h
20/5	attività di laboratorio di spettroscopia	2 h
21/5	post-laboratorio e ricapitolazione/concettualizzazione finale	1 h + 1 h
05/6	post-test all'interno della verifica	1 h

Tabella 3.1: Struttura del percorso

- collegare le transizioni tra livelli energetici all'emissione di un fotone, calcolando l'energia di quest'ultimo;
- saper descrivere le caratteristiche fondamentali dello spettro di emissione di un atomo, interpretandolo in termini della struttura energetica dell'atomo stesso;
- saper descrivere il funzionamento di un semplice spettroscopio.

3.3 Struttura del percorso

La progettazione iniziale del percorso prevedeva un totale di 4 ore, di cui 1 per il pre-test e introduzione all'argomento, 2 per l'attività in laboratorio, 1 per il post-laboratorio e discussione finale, da svolgersi rispettivamente nei giorni 18, 20 e 21 maggio 2019. Alcune fasi del percorso hanno richiesto però più tempo del previsto, e quindi l'attuazione effettiva del percorso è quella mostrata in tabella 3.1. Il percorso si è concluso il 5 giugno con il post-test che è stato inserito all'interno della verifica di classe.

Come fulcro del percorso è stata posta l'attività di laboratorio seguendo in buona parte le fasi caratteristiche dell'IBL: una prima fase esplorativa ed osservativa del fenomeno con generazione di ipotesi, una fase di indagine scientifica che ha previsto la raccolta, l'interpretazione e l'analisi dei dati e una fase di confronto per giungere alle conclusioni. L'interpretazione concreta di queste fasi e il livello di "apertura" dell'inquiry (quanto gli studenti vengono guidati o lasciati liberi di sperimentare) non sono univoci [Crawford, 2014] e dipendono dal contesto. In particolare, per studenti con scarsa esperienza di IBL, si suggerisce di mantenere non troppo basso il livello di guida (scaffolding), pur evitando il ricorso a strategie tipo "ricetta di cucina" [Millar, 2010]. Per questo, per ogni fase sono state strutturate delle schede di lavoro con domande guida, in parte ispirate allo stile di ISLE, per portare l'attenzione degli studenti sugli aspetti rilevanti da considerare, senza però ridurre la sperimentazione all'applicazione di una procedura prestabilita.

Il percorso didattico ha avuto inizio con un pre-test per due ragioni [Ivanjek et al., 2015b]:

- richiama alla memoria degli studenti concetti studiati in precedenza, anche in più discipline, correlati all'argomento nuovo che si vuole introdurre;
- verifica le effettive conoscenze di partenza degli alunni.

Il primo punto è funzionale a un'efficace attivazione del processo cognitivo che, come si è già detto, è costruttivo e quindi cerca legami tra le nuove informazioni e le conoscenze già presenti in memoria. Il secondo punto è altrettanto importante, sia perché permette di individuare alcune lacune e misconcezioni dello specifico gruppo-classe, sia perché costituisce un punto di partenza specifico rispetto al quale confrontare la valutazione finale. Quest'ultima (post-test) è stata effettuata all'interno della verifica di classe, che verteva sull'intero percorso di fisica moderna e quindi comprendeva anche altri argomenti. Le domande della verifica relative al percorso oggetto di questa tesi sono state concordate con la professoressa per allinearle con i risultati di apprendimento individuati in fase di progettazione e per poterle confrontare con il pre-test. Inoltre, per la valutazione dell'efficacia del percorso didattico sono state considerate altre due fonti di dati: (1) una griglia di osservazione compilata dall'autrice di questa tesi durante il laboratorio, e (2) l'analisi delle schede di lavoro compilate dagli studenti.

Le attività sono state organizzate perlopiù in lavori di gruppo, mentre per il test iniziale è stata prevista sia una fase individuale, per il confronto con il post-test, sia una fase successiva di gruppo, per favorire processi collaborativi di costruzione della conoscenza. Per ottenere una certa validità interna dei risultati di ricerca si è chiesto agli studenti di mantenere la stessa composizione dei gruppi per tutti e tre i giorni, per quanto fosse possibile date le assenze di alcuni alunni.

I fac-simile delle schede che sono state consegnate agli studenti in classe sono mostrate in appendice.

Come si noterà nel prossimo paragrafo la sfida di questo percorso è stata riuscire a mettere insieme la loro conoscenza frammentaria, fornendo gli strumenti adatti agli studenti per correggere e/o completare autonomamente le proprie conoscenze di partenza attraverso l'esperienza in laboratorio e conducendoli verso la comprensione dell'interpretazione degli spettri atomici.

3.3.1 I lezione: pre-test

La prima ora di lezione è stata dedicata principalmente al pre-test ed è stata strutturata in tre momenti:

1. svolgimento individuale del pre-test (20 minuti);
2. confronto sulle risposte in gruppi da 4-5 persone ed elaborazione di risposte di gruppo (10 minuti);
3. confronto delle risposte tra i vari gruppi guidato dalla docente, con osservazione dei fenomeni di diffrazione e interferenza in laboratorio (30 minuti).

Per la costruzione di un pre-test efficace siamo partiti da:

1. l'individuazione dei concetti chiave dell'argomento che abbiamo voluto introdurre;
2. l'individuazione di quali tra quelli del punto precedente sono già stati introdotti, almeno parzialmente;

3. lo studio delle misconcezioni più comuni ad essi collegati trovati in letteratura.

Per quanto riguarda il primo punto, sono stati riconosciuti come argomenti chiave per comprendere la spettroscopia e il suo ruolo nella meccanica quantistica: le sorgenti di luce, i fenomeni di scomposizione della luce, il concetto di spettro, la struttura dell'atomo e il processo di emissione di fotoni dagli atomi.

Nel programma di Fisica precedente al percorso, svolto sempre dalla prof.ssa Fontolan, gli studenti avevano già trattato:

- i processi di diffrazione e interferenza all'interno del programma di ottica geometrica di Fisica del quarto anno;
- l'elettromagnetismo, con accenni alle sorgenti di luce e agli spettri, nel quinto anno.

Inoltre, gli studenti avevano già incontrato la struttura dell'atomo nel programma di chimica del secondo anno, con l'insegnante di Scienze.

Nessuno degli argomenti del pre-test è quindi completamente nuovo per gli studenti, anche se i diversi concetti sono stati incontrati in momenti, contesti e livelli di approfondimento molto diversi tra loro e comunque mai in maniera coordinata. Per quanto riguarda le difficoltà tipiche degli studenti, si è fatto riferimento alle difficoltà e alle misconcezioni recuperate in letteratura, che sono state illustrate in dettaglio nel capitolo precedente.

All'inizio della lezione si è presentato il pre-test ed è stato chiarito ai ragazzi che non avrebbero ricevuto alcuna valutazione su di esso, per evitare che temessero di rispondere e in generale per favorire un clima sereno. Le domande e la loro impaginazione sono state strutturate in modo che gli studenti potessero elaborare le risposte anche attraverso grafici e disegni. Il numero delle domande è stato pensato in modo tale che fosse possibile completarlo individualmente nel tempo prestabilito. Le domande che sono state proposte sono le seguenti:

1. *Fai degli esempi di sorgenti di radiazione elettromagnetica. Come si differenziano l'una dall'altra?*
2. *Come potresti fare per separare le componenti della luce emessa da una sorgente? Indica quali strumenti useresti e come agiscono sulla radiazione (quali fenomeni fisici sfruttano)*
3. *Che cos'è uno spettro in fisica? Sai fare degli esempi di spettri? A cosa può servire rilevare uno spettro?*
4. *Come rappresenteresti un atomo? Fai il disegno e descrivilo.*
5. *Un atomo è in grado di cedere energia sottoforma di radiazione elettromagnetica? Se pensi di sì, prova a disegnare uno schema per mostrare come e commentalo.*

Ogni domanda fa riferimento a un singolo concetto chiave e si è cercato di formularla con un linguaggio chiaro evitando ambiguità.

Tutti i test compilati, sia quelli individuali che di gruppo, sono stati raccolti solo alla fine della lezione in modo da lasciare la possibilità agli studenti di avere sotto mano le proprie risposte nel dibattito con gli altri componenti del gruppo. Per non rischiare di invalidare i risultati ottenuti dall'analisi dei due test, si è però chiesto ai ragazzi di non apportare correzioni al questionario svolto individualmente durante il confronto con i compagni.

In tutte e tre le fasi gli studenti non hanno ricevuto commenti o correzioni dalla docente, perché l'intenzione era quella di condurli verso le risposte corrette attraverso il percorso didattico. Fa eccezione la domanda 2, in quanto comprendere la scomposizione della luce non era un obiettivo del percorso didattico ma piuttosto un prerequisito per poter comprendere il funzionamento dello spettroscopio da usare in laboratorio. Alla fine dell'ora dopo la discussione di gruppo, è stato quindi ritagliato del tempo per andare in laboratorio e mostrare visivamente ai ragazzi la scomposizione della luce tramite un prisma e un reticolo di diffrazione.

3.3.2 II lezione: attività di laboratorio

Gli obiettivi disciplinari individuati per la seconda lezione erano:

- riconoscimento dell'esistenza di sorgenti emettenti spettri continui, discontinui o discreti;
- riconoscimento del legame che esiste tra gli spettri discreti e gli elementi chimici;
- riflessione sulla natura degli spettri in maniera qualitativa.

La lezione si è svolta completamente in laboratorio in due ore, separate dall'intervallo e dalla lezione di un'altra disciplina. Questa attività didattica ha incluso 3 delle fasi proposte da IBL:

1. esplorazione e osservazione del fenomeno, con uno spettroscopio "home-made";
2. generazione di ipotesi;
3. raccolta, interpretazione e analisi dei dati.

Tutto il percorso è stato guidato tramite schede di laboratorio che sono mostrate in appendice B. I ragazzi hanno lavorato in gruppo per tutta l'esperienza. A ciascun gruppo è stato richiesto esplicitamente di redigere un diario di laboratorio, dove riportare in modo ordinato le loro risposte a tutte le domande delle schede-guida, i dati raccolti, i disegni utili, le domande che emergevano e le loro conclusioni. Con tale lavoro si è cercato di stimolare i ragazzi ad usare diversi tipi di descrizioni dei fenomeni, sia a parole sia tramite disegni sia con grafici.

Per prima cosa, nello specifico (vedi anche figura 3.1), è stato chiesto ai ragazzi di osservare l'ambiente circostante e di individuare, annotare e descrivere tutte le sorgenti di luce (visibile) presenti. Oltre alle sorgenti già presenti nella stanza (illuminazione esterna, illuminazione artificiale, lampadine, etc.) sono state predisposte altre sorgenti, ad es. torce LED, un puntatore laser (con l'indicazione ai ragazzi di



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Fisica
e Astronomia
Galileo Galilei

G
R
A
P
E
Gruppo di ricerca
in Didattica della Fisica
e dell'Astronomia

Laboratorio sugli spettri/1

Qui di seguito trovate le indicazioni per svolgere il laboratorio. Documentate tutto il percorso su dei fogli a parte, sui quali scriverete il titolo del laboratorio, la data e il nome dei componenti del gruppo. Nella documentazione riportate le vostre risposte a tutte le domande, i dati raccolti, i disegni utili, le domande che emergono e le vostre conclusioni.

Materiali: fogli bianchi, materiale per spettroscopio (vedi retro), pastelli colorati.

Per prima cosa osservate l'ambiente in cui vi trovate.

1. Quali sorgenti di luce sono presenti in questa stanza o all'esterno?
2. Come vi appaiono osservandole a occhio nudo?
3. Cosa vi aspettate di osservare usando uno spettroscopio?

Organizzate le vostre risposte in una tabella.

4. Costruite ora lo spettroscopio individualmente seguendo le indicazioni riportate sul retro.
5. Iniziate a osservare le sorgenti con lo spettroscopio. L'illuminazione ambientale influisce su ciò che vedete? Trovate un modo per verificarlo ed eventualmente discutete come eliminare l'effetto.
6. Per ciascuna delle sorgenti individuate sopra, descrivete cosa osservate attraverso lo spettroscopio sia a parole, sia con un disegno. Confrontate le vostre osservazioni con le ipotesi fatte inizialmente.
7. Secondo voi, ciò che vedete è lo spettro completo? Motivate la risposta.

non osservarlo direttamente ma solo riflesso su uno schermo bianco), e due lampade spettrali contenenti rispettivamente di idrogeno (H) ed elio (He). Per quanto riguarda queste ultime, in questa fase non si sono date informazioni ai ragazzi circa il contenuto specifico, dicendo solo che contenevano un gas di un elemento chimico. Si è poi chiesto ai ragazzi di fare delle previsioni su come si aspettavano di vedere le sorgenti tramite uno spettroscopio. Si è quindi proposta ai ragazzi la costruzione individuale di uno spettroscopio con cartoncino nero e reticolo di diffrazione a trasmissione (quest'ultimo fornito dal DFA). L'idea dello spettroscopio fatto con materiale facilmente reperibile e a basso costo è stata presa e rielaborata dal lavoro di Onorato et al. [2015]. Per la costruzione dello spettroscopio è stata fornita una scheda specifica (vedi appendice B); lo strumento ottenuto è a forma di parallelepipedo, avente alle basi da una parte una fenditura con apertura di 1-2 mm e dall'altra il reticolo di diffrazione a trasmissione di 500 tratti/mm, che fa da elemento dispersore. Ciò che si ottiene è mostrato in figura 3.2.

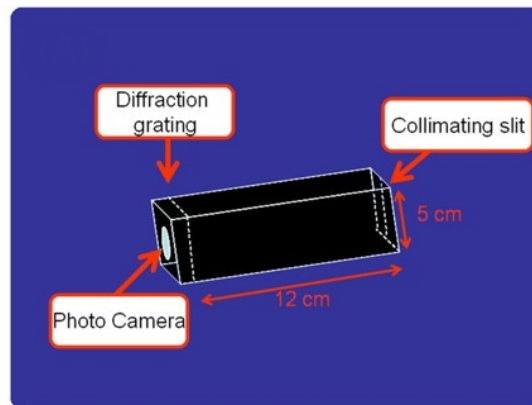


Figura 3.2: Immagine dello spettroscopio recuperata dall'articolo di Onorato et al. [2015].

Una volta costruito, lo strumento può essere fissato alla fotocamera del cellulare per raccogliere le immagini. Due esempi di spettri ottenuti con uno spettroscopio fatto in questo modo sono mostrati in figura 3.3.

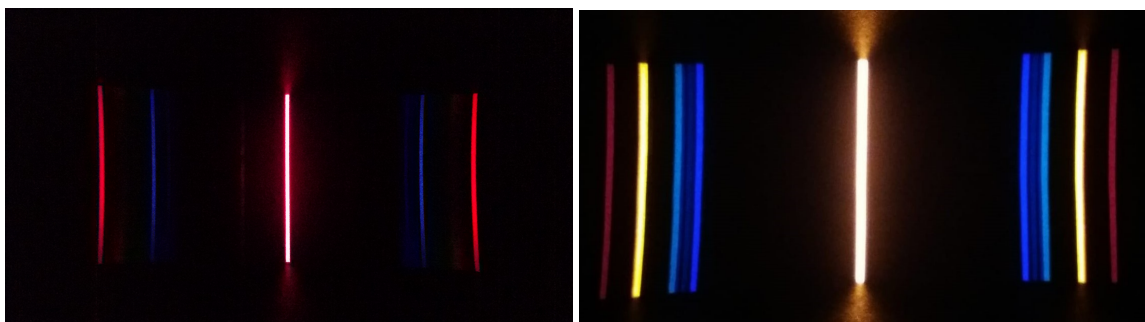


Figura 3.3: A sinistra lo spettro dell'idrogeno e a destra quello dell'elio, ottenuti tramite lo spettroscopio costruito a mano e avendo come sorgenti le lampade dei rispettivi elementi.

In questa seconda fase di osservazioni, si è fatto riflettere i ragazzi sulle condizioni sperimentali, ad esempio sul possibile disturbo causato dalla luce ambientale (la luce

proveniente dal sole e l'illuminazione del laboratorio) quando si osservano tutte le altre sorgenti nel laboratorio, in modo da indurli a oscurare le finestre e a spegnere l'illuminazione della stanza. Si è poi chiesto di verificare le ipotesi fatte in precedenza e di riportare sul diario di laboratorio alcuni degli spettri osservati. Per motivi di tempo, è stato richiesto di disegnarne solo tre, i cui spettri fossero significativamente diversi tra loro.

Per stimolare la riflessione sul fatto che ci potrebbero essere frequenze che non vediamo e non solo quelle che cadono nella banda del visibile, è stata posta come domanda:

7. Secondo voi, ciò che vedete è lo spettro completo? Motivate la risposta



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Fisica
e Astronomia
Galileo Galilei

G
R
A
P
E
Gruppo di ricerca
in Didattica della Fisica
e dell'Astronomia

Laboratorio sugli spettri/2

Continuate a documentare il vostro percorso sul quaderno di laboratorio, riportando le vostre risposte a tutte le domande, i dati raccolti, i disegni utili, le domande che emergono e le vostre conclusioni.

Materiali: fogli bianchi, pastelli colorati.

Confrontate tra loro gli spettri osservati.

1. Quali differenze ci sono tra gli spettri delle varie sorgenti che avete osservato? Potreste classificarli in qualche modo?
2. Basandovi sulle vostre osservazioni, qual è secondo voi la caratteristica degli spettri degli elementi chimici?
3. Confrontate tra loro qualitativamente gli spettri degli elementi chimici osservati. Quali analogie ci sono e quali differenze?

Vi viene ora consegnata la scheda *Tavola periodica "spettrale"*, che rappresenta la parte visibile degli spettri degli elementi della tavola periodica.

4. Usate la *Tavola periodica "spettrale"* per individuare gli elementi presenti nelle lampade.
5. Dopo aver formulato delle ipotesi sugli elementi presenti, chiedete all'insegnante la scheda *Riconoscere gli spettri atomici* e seguite le indicazioni sulla scheda.
6. Rileggete qual è la caratteristica più importante che avete osservato riguardo gli spettri degli elementi chimici. Cosa potete concludere rispetto alle caratteristiche della luce emessa da questi atomi?

A questo punto si è quindi cercato di guidarli a riconoscere l'esistenza di spettri continui e di spettri discreti e di associare questi ultimi alle sorgenti composte da elementi chimici. L'ulteriore passo concettuale che si è cercato di far fare è di notare come gli spettri di elementi differenti presentassero righe differenti e come questa informazione fosse utile per riconoscere gli elementi chimici (vedi figura 3.4). La prosecuzione più ovvia del laboratorio sarebbe l'analisi quantitativa degli spettri raccolti: questo è possibile, con accuratezza sufficiente per il livello di scuola secondaria, anche con strumenti freeware, come Tracker. Attraverso questo software, è possibile registrare una calibrazione in lunghezza d'onda fatta su uno spettro noto (oppure sull'immagine di due laser di lunghezza d'onda nota) e riportarla sullo spettro da analizzare, purché le due immagini siano sovrapponibili. Tuttavia in questo caso, per motivi di tempo e tecnici, non è stato possibile prevedere questo momento di elaborazione all'interno del percorso didattico¹. Si è quindi optato per un'alternativa più veloce che preservasse comunque l'obiettivo didattico, cioè associare ciascuno spettro in maniera univoca a un elemento chimico. Nello specifico, è stata consegnata una particolare tavola periodica (vedi appendice B) che presenta gli spettri di ogni elemento ed è stato chiesto, attraverso il confronto con gli spettri osservati, di riconoscere quali erano gli elementi chimici presenti nelle due lampade a gas.

Nell'ultima parte del laboratorio sono state consegnate ai ragazzi altre due schede che riportavano l'elemento chimico e alcune lunghezze d'onda di quattro spettri atomici, di cui due coincidenti con quelli studiati poco prima (vedi figure 3.5 e 3.6).

In questo modo gli studenti hanno potuto verificare le loro ipotesi precedenti e cimentarsi con un riconoscimento "facilitato". Ciò che è stato chiesto di fare, inoltre, è di tracciare per ogni spettro il grafico dell'intensità luminosa (I) in funzione della lunghezza d'onda (λ) in maniera qualitativa. L'obiettivo di questo passaggio era far riflettere gli studenti sul legame tra l'immagine fotografica di uno spettro e la sua rappresentazione grafica (in particolare il grafico intensità- λ), pur non facendo considerazioni quantitative sull'intensità luminosa dato che non avevamo la possibilità di misurarla con gli strumenti a disposizione. Il passaggio è comunque importante, perché molte ricerche in didattica della fisica mostrano che l'uso, la costruzione e l'interpretazione dei grafici, pur fondamentale in fisica, sono spesso problematici per gli studenti [Stefanel, 2019]. In particolare, nelle schede è stato chiesto agli studenti di disegnare un grafico che fosse quantitativo in lunghezza d'onda (informazione contenuta nella scheda stessa) e qualitativo in intensità (individuare le zone luminose come picchi di intensità, differenziando qualitativamente le righe di intensità evidentemente diversa).

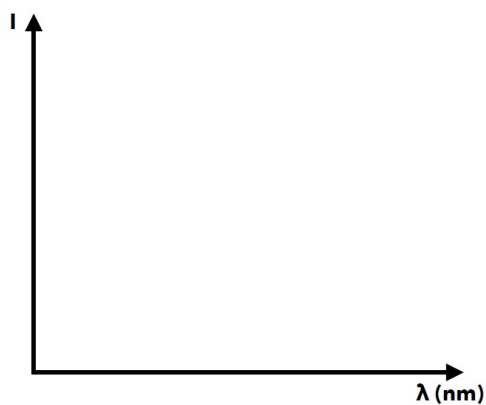
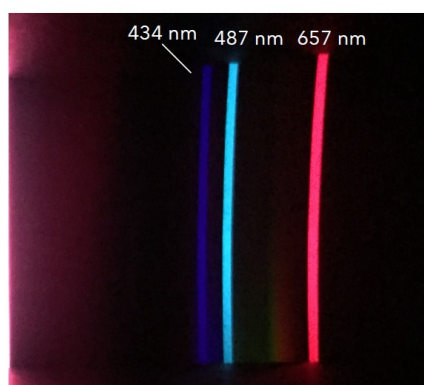
¹In un'ottica di riprogettazione, è sicuramente da valutare la possibilità di dedicare un tempo più lungo all'analisi dati, magari a scapito di qualche altro argomento del programma di fisica, per poter svolgere l'attività di laboratorio in maniera ancora più completa e significativa. Tuttavia, se si fa questa scelta, sarebbe auspicabile che i ragazzi e l'insegnante avessero già una conoscenza del software (utilizzabile per molte altre applicazioni di laboratorio), in modo da dedicare il tempo in classe all'effettiva analisi dati e non ai tecnicismi del programma.



Riconoscere gli spettri atomici

Qui sotto riportiamo gli spettri degli elementi chimici che potrebbero essere presenti nelle lampade. Confrontateli con quelli osservati e identificate gli elementi contenuti effettivamente nelle lampade. Poi, nel diagramma accanto a ciascuno spettro trovato, tracciate il grafico dell'intensità luminosa (I) in funzione della lunghezza d'onda (λ): le unità di misura usate per l'intensità luminosa possono essere arbitrarie (cioè, in y il grafico avrà valore solo qualitativo), mentre per la lunghezza d'onda si devono riportare i valori quantitativi.

Idrogeno (H)



Elio (He)

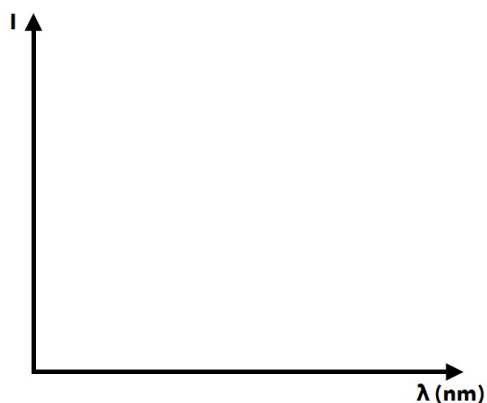
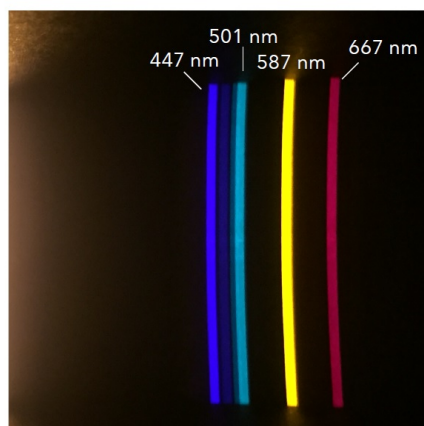
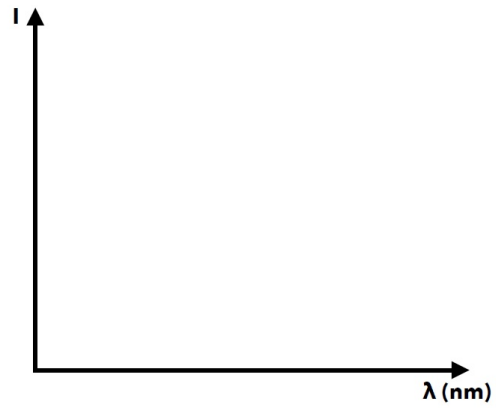
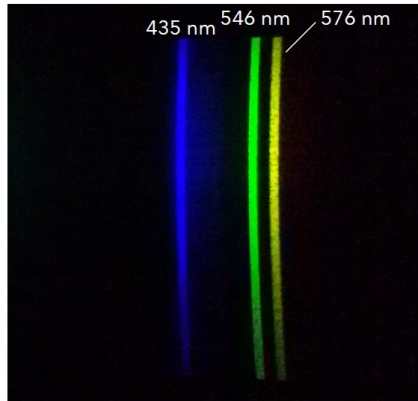


Figura 3.5: Scheda assegnata ai ragazzi per la rappresentazione grafica degli spettri osservati.



Mercurio (Hg)



Neon (Ne)

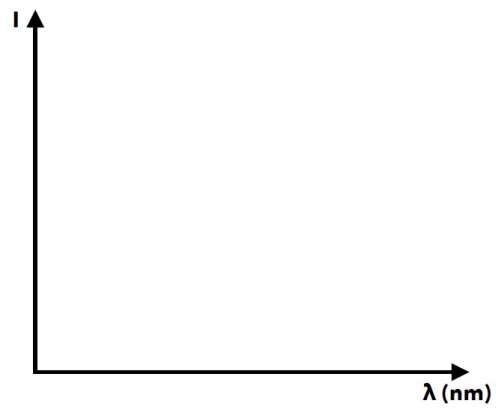
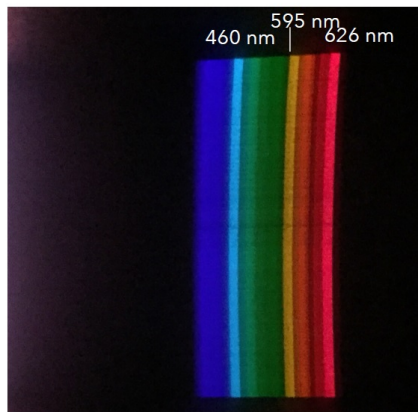


Figura 3.6: Scheda assegnata ai ragazzi per la rappresentazione grafica degli spettri di altri due elementi.

3.4 III lezione: post-laboratorio

La terza lezione è stata costruita in modo da fare l'elaborazione dei dati raccolti in laboratorio. L'obiettivo del post laboratorio è stato quindi collegare gli spettri osservati (in particolare, le lunghezze d'onda degli spettri di emissione di H ed He) prima alle energie del fotone, e poi questa ai salti energetici. La scheda è stata costruita prendendo spunto dal tutorial di Ivanjek et al. [2015b], che a sua volta si basava sulle principali difficoltà riscontrate negli studenti riguardo agli spettri atomici [Ivanjek et al., 2015a], elencate nel capitolo precedente.

Come nelle lezioni precedenti, la riflessione è stata svolta dividendosi nei cinque gruppi ed è stata guidata attraverso una scheda di lavoro. Con le prime due domande si è cercato di far riflettere i ragazzi sul legame che c'è tra lo spettro discreto emesso da un elemento chimico e la sua struttura atomica quantizzata. Nello specifico sono stati guidati a fare due passaggi chiave per collegare lo spettro osservato alla struttura energetica dell'atomo. Per prima cosa è stato chiesto loro di ricordare il legame che c'è tra lunghezza d'onda (o frequenza) ed energia del fotone $E = hc/\lambda$ (o $E = h\nu$). A voce è stato richiesto loro di applicare questa relazione per trovare i valori dell'energia dei fotoni corrispondenti alle lunghezze d'onda consegnati loro il giorno precedente. Per seconda cosa sono stati spinti a cercare il collegamento tra quanto sapevano sulla struttura dell'atomo e l'energia del fotone.

Con la terza e quarta domanda si è cercato di lavorare sul diagramma dei livelli energetici dell'atomo di idrogeno, da calcolare quantitativamente usando la formula di Bohr: $E = (-13.6eV)\frac{Z^2}{n^2}$. In particolare, è stato chiesto loro di calcolare le energie dei primi 10 livelli dell'atomo di idrogeno e di usare il diagramma per rispondere alle seguenti domande:

- A. *Quali livelli sono coinvolti nelle formazione delle righe? Disegnate le transizioni elettroniche corrispondenti, spiegando come avete proceduto.*
B. *Quale riga corrisponde a un salto energetico tra livelli più lontani tra loro? Quale corrisponde a un salto tra livelli più vicini? Perché?*

Infine, si è ripresa una delle domande poste nel pre-test che riguardava l'utilità pratica degli spettri.

Per concludere il percorso, i ragazzi sono stati guidati in una ricapitolazione/ concettualizzazione finale, partendo dalle loro risposte alle domande della scheda di lavoro post-laboratorio e utilizzando anche immagini e passaggi del loro libro di testo [Cutnell et al., 2015], proiettato sulla LIM, in modo da fornire una guida per lo studio. Lo scopo di questo passaggio era offrire a tutti una sintesi corretta e dare significato al percorso collegando l'esperienza al quadro teorico. In particolare, (1) si è chiarito il passaggio tra lo spettro di frequenza osservato, le energie dei fotoni corrispondenti alle righe di emissione e le transizioni elettroniche, mostrando come questo implichi la necessità di livelli energetici discreti dell'atomo; e (2) si è illustrato anche quantitativamente il diagramma dei livelli energetici dell'atomo di idrogeno, collegando lo spettro osservato ai corretti salti energetici e sottolineando il significato del segno negativo dell'energia degli stati legati.

3.5 Post-test

Il post-test è stato inserito all'interno della verifica di classe, svoltasi 15 giorni dopo l'ultimo incontro, al termine dell'intera unità di apprendimento sulla fisica moderna. Gli studenti hanno avuto a disposizione un'ora per svolgere tutto il compito. Le domande sono state poste in modo da verificare il raggiungimento degli obiettivi di apprendimento che ci si era posti, e in particolare stabilire in che misura ogni ragazzo sa:

- descrivere e rappresentare con un diagramma la struttura dei livelli energetici dell'atomo, anche quantitativamente per l'atomo di H;
- collegare le transizioni tra livelli energetici all'emissione di un fotone, calcolando l'energia di quest'ultimo;
- descrivere le caratteristiche fondamentali dello spettro di emissione di un atomo, interpretandolo in termini della struttura energetica dell'atomo stesso;
- descrivere il funzionamento di un semplice spettroscopio.

Le domande del post-test ripercorrevano esattamente questi obiettivi:

1. *Disegna il diagramma dei livelli energetici dell'atomo di idrogeno per i primi 5 livelli, calcolando i valori numerici in eV.*
2. *Rappresenta sul diagramma le transizioni elettroniche che, tra quelle possibili considerando questi 5 livelli, corrispondono alle emissioni del fotone:*
 - A. *con più energia*
 - B. *con meno energia.*
3. *Calcola le lunghezze d'onda dei fotoni corrispondenti a queste transizioni. In quale regione dello spettro elettromagnetico si trovano?*
4. *Che tipo di spettro produrrà questo atomo? Descrivilo a parole collegandolo alla struttura dell'atomo e spiega come potresti fare per rivelarlo.*

La prima e l'ultima domanda consentono anche di fare un confronto sui miglioramenti rispetto al pre-test individuale.

3.6 Valutazione del percorso didattico

Al fine di valutare l'efficacia del percorso didattico, l'autrice di questa tesi ha assistito a tutte e tre le lezioni e ha utilizzato tre diversi strumenti di raccolta dati: il materiale scritto dagli studenti, le griglie di osservazione e la registrazione audio della discussione finale. Il primo comprende: i pre-test individuale e di gruppo, il diario di laboratorio di gruppo, il post-laboratorio di gruppo e il post-test-individuale. È stata compilata una griglia di osservazione per ogni lezione che è stata predisposta per focalizzare l'attenzione principalmente sull'atteggiamento individuale e sulle dinamiche di gruppo nelle varie attività proposte. La griglia utilizzata (vedi tabella 4.23)

è stata rielaborata a partire da quella proposta da un'altra partecipante al percorso COLLABORA, la professoressa Lucia Gabelli (insegnante di fisica all'ITIS "Severi" di Padova), per il proprio progetto di ricerca-azione. La griglia della prof.ssa Gabelli era stata a sua volta concordata con il Gruppo di Ricerca. Per questo progetto, alcune voci della griglia sono state modificate, tolte o aggiunte per adattarla al nostro progetto. La registrazione audio invece ha permesso di riascoltare con attenzione la partecipazione dei ragazzi nella fase di discussione finale con la docente.

4. Risultati

Nel seguente capitolo sono riportate tutte le risposte degli studenti riportate nel seguente ordine: pre-test individuale, pre-test di gruppo, schede di laboratorio, scheda post-laboratorio. Prima di presentare i risultati del post-test, sono riportate le griglie di osservazione completate durante le tre lezioni, dove si riportano anche le varie dinamiche di gruppo che sono state osservate. All'inizio di ogni sezione è presentato il riepilogo. Il numero dei partecipanti è variato nel corso delle lezioni e di conseguenza la composizione dei gruppi ha subito delle variazioni nelle tre giornate. Alla prima lezione c'erano 17 studenti che sono stati divisi in 4 gruppi (3 da quattro componenti e 1 da cinque componenti). Alla seconda lezione erano presenti 19 studenti di cui tre studenti non presenti alla lezione precedente. Si è deciso allora di creare un quinto gruppo che non fosse però formato da tutti i nuovi componenti, in modo da avere qualcuno che fosse stato introdotto nell'argomento; si è reso quindi necessario un ri-arrangiamento dei gruppi, cercando comunque di fare le minime modifiche possibili. Alla prima ora della terza lezione la classe era di 19 studenti, ma con la presenza del quinto elemento del gruppo 3 e l'assenza del quarto componente del gruppo 2; nella seconda ora di lezione invece era presente la classe al completo.

4.1 Pre-test individuale

Al test individuale hanno partecipato 17 studenti. Come si potrà osservare dalle risposte degli studenti presentate qui di seguito, per la maggior parte della classe, in generale, sono presenti diverse idee confuse o incomplete sugli argomenti studiati in precedenza. Sono stati riscontrati alcuni problemi con la terminologia; in molti casi e in più domande, i ragazzi hanno infatti menzionato fenomeni relativi alla radioattività, probabilmente tratti in inganno dai termini "radiazione" e "sorgente", anche se era specificato che si parlava di *radiazione elettromagnetica* e *sorgenti di radiazione elettromagnetica*. I ragazzi hanno anche avuto difficoltà a identificare le sorgenti di luce. Infatti, 10 studenti su 17 non riescono a scrivere più di due esempi di sorgenti e solo 4 studenti menzionano la lampadina. Come conseguenza, quasi metà della classe ha avuto difficoltà a indicare le differenze che ci sono tra le sorgenti. Per quanto riguarda la scomposizione della luce, solo 7 studenti su 17 hanno esplicitamente parlato di scomposizione della luce per lunghezze d'onda o frequenze, a cui si aggiungono altri cinque che hanno menzionato la rifrazione o la diffrazione, ma senza commentarle; gli altri invece associano la scomposizione ad altri fenomeni. In particolare due studenti fanno anche qui dei riferimenti alla radioattività, mentre

un'altra ragazza parla della polarizzazione. Nessuno invece si spinge a descrivere o rappresentare il fenomeno di diffrazione.

Sullo spettro, per quanto avessero studiato da poco lo spettro di corpo nero, le idee sembrano ancora poco chiare: anche se la maggior parte della classe ricorda l'informazione sulla lunghezza d'onda, solo uno studente fa un esplicito riferimento a una seconda grandezza che varia con la frequenza. Nessuno però esplicita tale grandezza che può essere l'intensità luminosa o l'energia.

Per quanto riguarda la rappresentazione dell'atomo, come previsto dalla letteratura (vedi per esempio Krijtenburg-Lewerissa et al. [2017], Taber [2004]), quasi tutti gli studenti fanno un ibrido di modelli atomici, in particolare tra quello di Bohr, con gli elettroni sulle orbite ben definite (circolari o ellittiche), e quello di Schrodinger, con gli elettroni negli orbitali. Si ritrova spesso inconsistenza tra la descrizione a parole e il disegno. Molti, ad esempio, parlano di orbitali ma poi rappresentano gli elettroni su orbite circolari o ellittiche. Solo tre studenti mostrano una certa coerenza tra il disegno e la descrizione. Interessante è il caso di Leonardo, che descrive a parole il sistema planetario di Bohr ma disegna gli elettroni su orbite che hanno la forma che richiama quella degli orbitali s e p .

Per quanto riguarda il processo di emissione, solo quattro studenti hanno pensato al salto dell'elettrone tra due livelli energetici dell'atomo, ma nessuno di loro ha sia descritto che disegnato in maniera corretta il processo. La maggior parte ha pensato invece al decadimento radioattivo e qualcun altro ai processi collisionali, ma non collegandolo a un successivo salto energetico dell'elettrone; questi ultimi avevano in mente principalmente l'idea di un urto tra particelle classiche, come si può intuire dai disegni associati dai ragazzi.

I dati e commenti che seguono sono stati ricavati dalle risposte scritte degli studenti e non da colloqui individuali. Per questo, in alcune risposte si è riscontrata un'ambiguità che non è stato possibile chiarire ulteriormente.

Domanda 1

La prima domanda aveva l'intento di esplorare l'idea di sorgente di radiazione elettromagnetica che avevano gli studenti per verificare se gli studenti identificassero differenze in termini di frequenza o intensità.:

Fai degli esempi di sorgenti di radiazione elettromagnetica. Come si differenziano l'una dall'altra?

L'argomento è stato affrontato in lezioni precedenti dalla professoressa Fontolan, precisando che si definisce sorgente un corpo che emette luce propria.

Gli esempi più comuni fatti dagli studenti sono stati: Sole, microonde, lampadine, strumenti per la radiografia e la risonanza. Alcuni studenti hanno scritto anche "corpo con calore" (Giovanni) e "oscillazione di una carica" (Michele), (tutte le risposte sono mostrate in tabella 4.1).

Dieci studenti su 17 non sono stati in grado di scrivere più di due esempi di sorgenti di radiazioni elettromagnetiche, tre dei quali non ne hanno scritta alcuna. Il motivo della difficoltà che emerge dalle risposte sembra legata alla scorretta comprensione dell'espressione "radiazione elettromagnetica". Tre studenti ad esempio hanno ri-

Tabella 4.1: In tabella sono elencate tutte le risposte degli studenti. Si ricorda che le domande erano a risposte aperte, quindi ciascuno studente ha scritto più sorgenti. La colonna a destra indica il numero di studenti che ha dato quella determinata risposta.

SORGENTE	n
Sole	10
microonde	4
lampadina	4
strumenti per risonanza e radiografia	4
radio	3
decadimento radioattivo	2
scarica elettrostatica (fulmine)	2
campo magnetico terrestre	2
torcia	1
LED	1
faro	1
TV	1
forno a microonde	1
corpo con calore	1
oscillazione di una carica	1
antenna RAI	1
particelle α , β e muoni	1
infrarossi	1
nessuna risposta	1

Tabella 4.3: Nella seguente tabella sono elencate tutte le risposte degli studenti riguardo a ciò che differenzia una sorgente dall'altra. Si noti l'alto numero di studenti che non hanno dato una risposta.

DIFFERENZA TRA LE SORGENTI	n
nella lunghezza d'onda e/o nella frequenza	5
nell'intensità	2
nella diversa differenza di potenziale che c'è ai capi della sorgente	1
nei fenomeni fisici che generano radiazione	1
naturale/artificiale	1
nella traiettoria percorsa dalle particelle	1
nessuna risposta	7

collegato questa espressione alla radioattività nominando come sorgenti l'atomo al momento del decadimento radioattivo oppure le particelle α e β e i muoni. Due studenti invece hanno pensato al campo magnetico terrestre. Quattro studenti hanno menzionato delle regioni spettrali come sorgenti, anche se resta il dubbio se alcuni di loro facessero riferimento agli omonimi apparecchi elettronici (es. microonde), mentre uno solo ha pensato all'antenna televisiva che è effettivamente un apparecchio che trasmette onde radio.

Per quanto riguarda la differenza esistente tra le sorgenti cinque studenti hanno fatto riferimento alla diversa lunghezza d'onda e/o frequenza, mentre due hanno pensato alla diversa intensità e uno ai fenomeni fisici che generano radiazione (tabella 4.3). Riguardo a quest'ultima si riporta di seguito la risposta data dallo studente:

"Lampadina: la corrente riscalda il filamento e ad una certa temperatura questo emette radiazioni visibili.

Oscillazione di una carica: induce il cambiamento di campo elettrico e campo magnetico nello spazio circostante e si genera un'onda elettromagnetica". (Michele)

Per quanto non l'abbia scritto esplicitamente, Michele sembra voler sottolineare la differenza tra radiazione termica e non termica. Un altro studente classifica le sorgenti come "naturali e artificiali", proponendo quindi una classificazione non basata su una proprietà fisica (è la tipica classificazione che viene proposta alla scuola primaria), ma contemporaneamente differenzia le sorgenti anche in base alla regione dello spettro elettromagnetico in cui emettono, anche se mostra alcune credenze errate o incomplete (ad es. circa la regione di emissione del Sole):

"Delle fonti di radiazione elettromagnetica possono essere il Sole oppure una lampadina, al neon ad esempio anche se ce ne sono molte altre. Esse si differenziano per il fatto che nel Sole la luce è naturale e arriva con una quantità molto grande sulla Terra con vari tipi di radiazione (dalla luce visibile agli ultravioletti), mentre la seconda produce luce artificiale e solo luce visibile. Secondo me, quindi, si differenziano in base all'intensità della radiazione." (Enrico)

Uno studente identifica la differenza delle sorgenti "per la traiettoria che fanno" le particelle α , β e muoni; la sua risposta errata può essere facilmente collegabile alla confusione tra radioattività e fenomeni elettromagnetici di cui abbiamo accennato sopra, probabilmente attivata dai termini "sorgente" e "radiazione".

Tabella 4.4: Nella seguente tabella sono presentate le risposte degli studenti per quanto riguarda i fenomeni che permettono di scomporre la radiazione emessa da una sorgente. Nella seconda colonna sono riportati il numero di studenti che ha risposto in quel modo.

SCOMPOSIZIONE DELLA LUCE	
FENOMENO	n
rifrazione	8
diffrazione	3
incidenza sulla lastra da parte solo di alcuni elettroni	1
riflessione solo di alcune lunghezze d'onda	1
passaggio attraverso materiali solo di alcune componenti	1
polarizzazione della luce	1
selezione di alcune lunghezze d'onda (filtro)	1
nessuna risposta	2

Tabella 4.5: Elenco delle risposte degli studenti per quanto riguarda quali strumenti si possano usare per scomporre la luce. Nella prima riga sono riportati i vari termini utilizzati per indicare lo stesso strumento, tenendo conto del fenomeno descritto. La seconda colonna indica il numero di studenti che ha risposto in quel modo.

SCOMPOSIZIONE DELLA LUCE	
STRUMENTI	n
prisma di Newton(o tetraedro di vetro o cristallo o cristallo traslucido)	7
reticolo di diffrazione	2
polarizzatore	2
lastre intagliate	1
con lenti o lamine che riflettono solo radiazioni di una certa λ	1
cromatografia	1
lastra di piombo	1
esperimento di Bohr con lamine metalliche	1
nessuna risposta	3

Domanda 2

La seconda domanda del pre-test vuole indagare le conoscenze degli studenti circa la scomposizione della luce. La domanda è propedeutica alla costruzione dello spettroscopio che sarà fatta durante il laboratorio e in particolare ha lo scopo di far riflettere gli studenti sugli elementi che potrebbero comporlo:

Come potresti fare per separare le componenti della luce emessa da una sorgente? Indica quali strumenti useresti e come agiscono sulla radiazione (quali fenomeni sfruttano).

Le lezioni tenute dalla professoressa Fontolan sull'argomento in quarta superiore sono state svolte principalmente con lezioni frontali; in effetti, è stato anche presentato un esperimento per mostrare la validità delle leggi teoriche del reticolo di diffrazione, ma gli studenti non avevano avuto modo di sperimentare in prima persona.

Il fenomeno fisico più menzionato nelle risposte è stato la rifrazione, mentre al se-

condo posto c'è la diffrazione. Non tutti hanno però associato il giusto strumento al fenomeno corretto. Una ragazza ad esempio menziona la diffrazione descrivendo invece la polarizzazione della radiazione. Alcuni studenti anche in questo caso sembrano ricollegare il termine radiazione non alla luce ma a fasci di particelle. Ad esempio Enrico cerca di descrivere l'esperimento di Rutherford anche se lo associa a Bohr e parla di elettroni invece che di particelle α ; anche Valentina sembra ricollegare il fenomeno alla radioattività parlando di lastre di piombo. Un altro studente ancora ha accennato a lastre intagliate, che effettivamente sono corrette (si pensi al CD) ma, mancando una descrizione del fenomeno, lascia il dubbio se abbia ben chiaro o meno a cosa si riferisca. Elisabetta parla di lamine o lenti che riflettono solo determinate lunghezze d'onda, facendo pensare che abbia in mente i filtri ottici, ma dalla risposta non è possibile affermare con certezza a cosa si riferisca. Quattro studenti hanno invece descritto in maniera più o meno corretta il fenomeno di rifrazione, collegando la separazione angolare all'indice di rifrazione, che a sua volta dipende dalla lunghezza d'onda.

Per quanto riguarda quale strumento usare per scomporre la luce, sette ragazzi hanno descritto o disegnato il prisma di Newton, anche se non tutti hanno utilizzato la giusta terminologia, chiamandolo nelle maniere più svariate (es. cristalli traslucidi, tetraedro di vetro, prisma vitreo). Uno studente ha nominato la 'cromatografia', ma quando gli è stato chiesto durante la discussione a cosa si riferisse non è stato in grado di rispondere.

Domanda 3

Nella terza domanda si è cercato di raccogliere le conoscenze iniziali degli studenti circa il concetto di spettro:

Che cos'è uno spettro in fisica? Sai fare degli esempi di spettri? A cosa può servire rilevare uno spettro?

La definizione di spettro che la docente aveva dato loro nelle lezioni precedenti era: grafico frequenza - energia o densità di energia. Le risposte degli studenti a riguardo sono state delle più svariate (vedi tabella 4.12). Undici di loro fanno esclusivamente riferimento alla lunghezza d'onda o alla frequenza, ma nessuno di loro accenna all'energia o alla densità di energia: in generale sembra che nessuno riconosca queste quantità come informazioni ricavabili dallo spettro. Solo Marcello ha parlato di una grandezza dipendente dalla frequenza, definendo quindi lo spettro come "*scala di valori di una data grandezza a seconda della frequenza che assume*", ma non ha specificato quale. Un'altra definizione che si avvicina a quella corretta è quella di Maria Vittoria che ha scritto "*è l'insieme delle emissioni di radiazioni provenienti da una sorgente*", ma questa volta manca il riferimento alle lunghezze d'onda. Per Michele invece lo spettro raggruppa le onde che appartengono alla stessa banda spettrale. Per quanto riguarda gli esempi, sette studenti hanno elencato alcune bande spettrali. Ancora una volta sembra che non sia chiaro per tutti che la radiazione elettromagnetica includa la luce. Matteo S., ad esempio, parla di spettro elettromagnetico e spettro di luce come se fossero due cose separate (4.6). Diletta accenna invece all'interferenza tra due onde ma non spiega a cosa faccia riferimento. Una concezione

Tabella 4.6: Nella seguente tabella sono elencati tutti gli esempi di spettri fatti dagli studenti. Uno studente ha fatto la distinzione tra luce e spettro elettromagnetico come se fossero due cose distinte, per questo motivo queste due voci sono state messe separatamente nella tabella.

ESEMPI DI SPETTRI	n
1 o più bande spettrali	7
spettro elettromagnetico	6
luce	4
luce stellare	1
spettro atomico	1
interferenza tra 2 onde	1
nessuna risposta	1

Tabella 4.7: Elenco dei possibili usi degli spettri fatti dai ragazzi; molti non sono stati in grado di rispondere a questa domanda.

UTILITÀ DEGLI SPETTRI	n
per individuare i vari tipi di onde	3
per individuare la composizione chimica della sorgente	2
per individuare la temperatura della sorgente	1
per capire come variano le onde e.m. nei vari fenomeni naturali	1
per capire il tipo di emissione	1
nessuna risposta	11

errata, pervenuta dall'esempio fatto da Sofia, è che la luce rossa è ad alta frequenza. Questa idea errata, riconosciuta in letteratura [Bardar et al., 2006], deriva dall'associazione comune del colore rosso al caldo (più energetico) e il blu al freddo (meno energetico).

Sull'utilità dello spettro solo 6 ragazzi su 17 hanno provato a rispondere. La risposta più esaustiva è stata data da Giovanni che ha scritto che può servire sia a capire la composizione chimica sia la temperatura delle sorgenti, ad esempio delle stelle. Altri invece hanno pensato all'individuazione di diverse onde, probabilmente riferendosi alle diverse lunghezze d'onda.

Domanda 4

Con il quarto quesito si è indagato sul modello atomico che avevano in mente gli studenti:

Come rappresenteresti un atomo? Fai un disegno e descrivilo.

Questo argomento è stato presentato loro nel programma di chimica in seconda superiore. In accordo con la letteratura (si veda ad esempio Krijtenburg-Lewerissa et al. [2017], Taber [2004]), la maggior parte degli studenti ha fatto confusione tra il modello di Schrödinger e il modello di Bohr descrivendo e/o disegnando degli ibridi. Gli studenti che menzionano gli orbitali sono 8; 4 di questi li descrivono come zone con più alta probabilità di trovare l'elettrone, ma solo 2 di loro non disegnano gli

elettroni su orbite-traiettorie (mostrati in figura 4.1). Tutti gli altri invece pongono gli elettroni o su orbite ellittiche come nel modello di Bohr (vedi figura 4.2 in alto) o su traiettorie che richiamano la forma degli orbitali s e p (vedi figura 4.2 in basso).

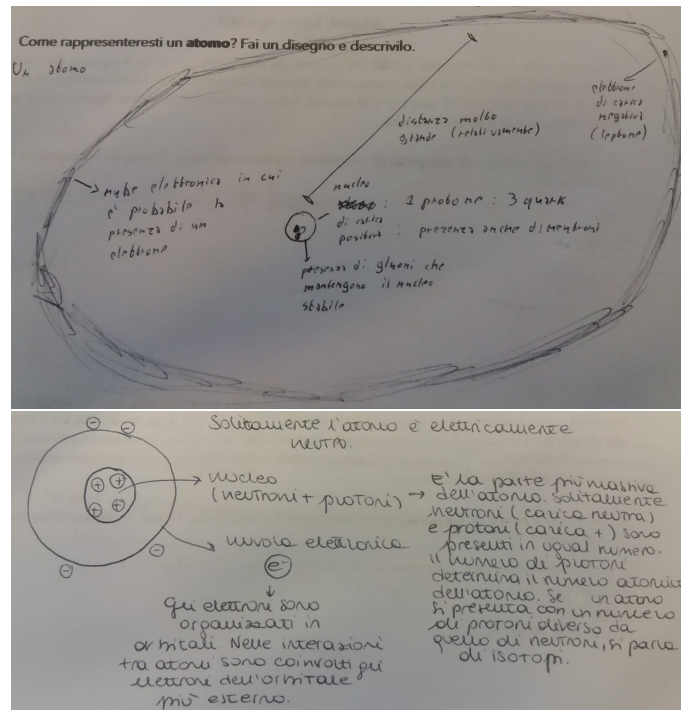


Figura 4.1: Nelle due foto sono rappresentate le uniche due risposte che parlano di orbitali e che non presentano gli elettroni sopra a delle righe che rappresenterebbero le traiettorie degli elettroni. In basso è riportata la risposta di Diletta che paragona gli orbitali a nuvole elettroniche e disegna gli elettroni al di fuori di un guscio. In alto invece è presentata la risposta di Giovanni che ha cercato di raffigurare l'orbitale come una zona non ben definita intorno al nucleo.

Dei restanti 9 componenti della classe, solo 4 hanno parlato di orbite. A tal proposito, interessante è la risposta di Leonardo che ha descritto il modello planetario di Bohr, ma poi per l'atomo di Berillio ha disegnato le orbite riproducendo la forma degli orbitali s e p (vedi figura 4.3). Degli altri cinque, una ha parlato di gusci, un'altra di anelli e gli altri hanno solo accennato all'esistenza degli elettroni intorno al nucleo.

In totale quindi sono 14 gli alunni che hanno disegnato gli elettroni su traiettorie determinate e in base alle loro caratteristiche si possono dividere in tre categorie, come riassunto in tabella 4.8: orbite ellittiche concentriche (7 studenti, come la figura 4.2 in alto), orbite ellittiche a distanze non ben definite tra loro (5 studenti, di cui un disegno è riportato in figura 4.4) e traiettorie sia ellittiche sia a forma di otto (2 studenti i cui disegni sono mostrati nel pannello in basso della figura 4.2 e nella figura 4.3). Ulteriori differenze che si notano tra i disegni sono che tre studenti hanno disegnato solo un orbita e che solo 9 su 17 hanno avuto l'accortezza di disegnare un atomo neutro con pari numero di protoni ed elettroni. Inoltre 8 studenti su 17 hanno disegnato i protoni e i neutroni racchiusi in una membrana come se fosse il nucleo di una cellula.

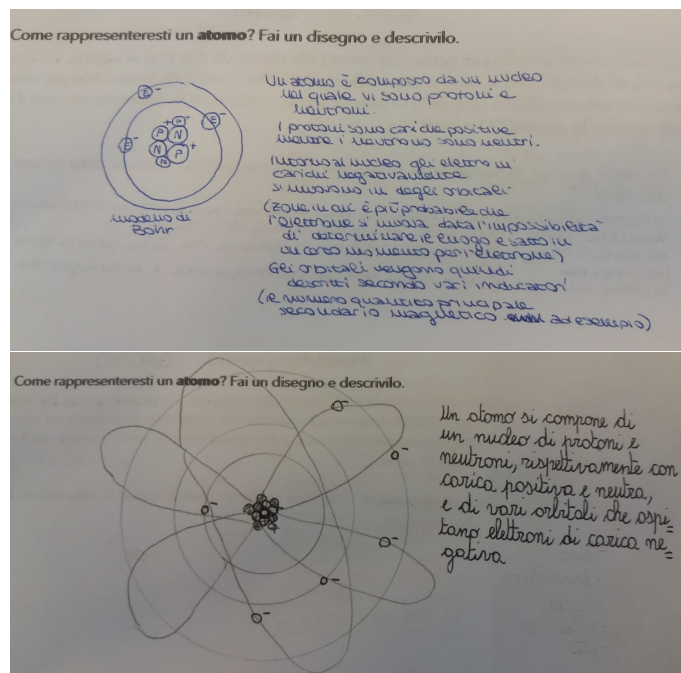


Figura 4.2: In alto: disegno e descrizione fatta da Angelica. In basso: la risposta di Giacomo. Nel disegno, Angelica ha esplicitato che si tratta del modello di Bohr, ma nella descrizione parla degli orbitali. Invece Giacomo riproduce la forma degli orbitali s e p ma le rende traiettorie ponendo gli elettroni sulle linee.

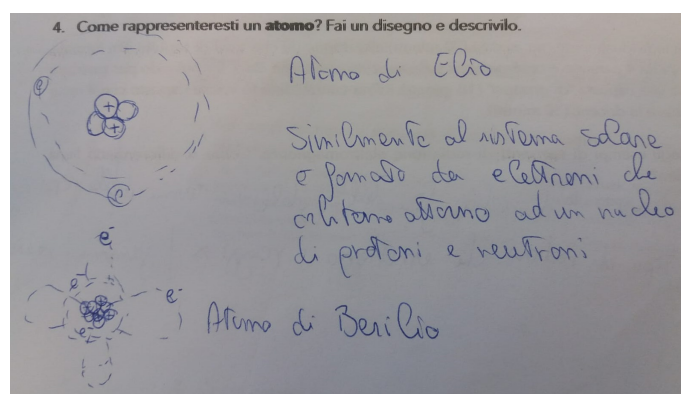


Figura 4.3: Disegno e descrizione fatta da Leonardo. Si noti come il disegno sia incoerente con la descrizione, dove ha scritto: "similmente al sistema solare è formato da elettroni che orbitano attorno ad un nucleo di protoni e neutroni"; in particolare per il berillio ha cercato di raffigurare gli orbitali s e p nonostante abbia parlato di orbite simili a quelle del sistema solare.

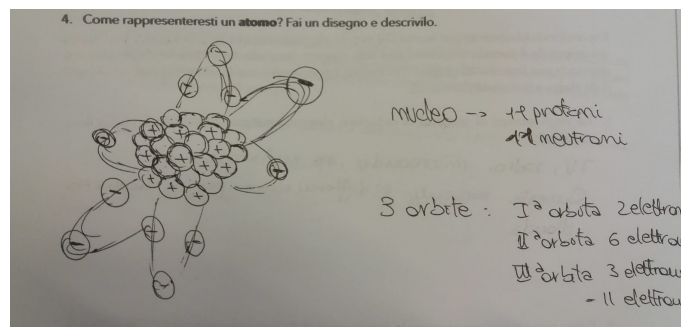


Figura 4.4: Disegno di Stefano. Ha rappresentato gli elettroni su orbite che sembrano trovarsi tutte a pari distanza dal nucleo. Si noti il modo in cui ha cercato di riempire le orbite: sembra riprendere il riempimento degli orbitali s e p.

Tabella 4.8: In tabella è riportata una schematizzazione della rappresentazione grafica dell'atomo da parte di tutti gli studenti. Si noti come ci siano state interpretazioni diverse del modello di Bohr, alcune delle quali fanno pensare a un mescolamento con il modello di Schrodinger.

MODELLO ATOMICO		
	DISEGNO	n
modello di Bohr con orbite	ellittiche o circolari concentriche	7
	ellittiche a distanze non definite	5
	ellittiche e a forma di 8	2
modello di Schrödinger con orbitali	nube elettronica	2
altro		1

Domanda 5

Nella quinta domanda si è cercato di capire se gli studenti riconoscessero l'atomo come emettitore di fotoni e, nel caso affermativo, se visualizzassero nel modo corretto il processo:

Un atomo è in grado di cedere energia sotto forma di radiazione elettromagnetica? Se pensi di sì, prova a disegnare uno schema per mostrare come e commentalo.

Questo argomento è stato trattato sempre nell'area disciplinare di chimica, ma non in maniera approfondita. Tutte le risposte sono riportate in tabella 4.9. Come prova della confusione che crea la parola "radiazione", ancora una volta sette studenti menzionano il decadimento radioattivo, ma nessuno di loro è riuscito a fare una rappresentazione grafica. Quattro alunni invece hanno pensato giustamente alle collisioni come fenomeno in cui l'atomo riceve energia che poi espelle sotto forma di radiazione. Non sembrano però aver capito che l'emissione di fotoni avvenga comunque per un salto energetico dell'elettrone tra due livelli: tre di loro infatti hanno disegnato la collisione come urto tra particelle classiche senza fare nessun riferimento ai livelli energetici all'interno dell'atomo (vedi figura 4.5).

Il quarto ragazzo che ha pensato alle collisioni, invece, ha menzionato il fenomeno di annichilimento come processo che libera calore e radiazione elettromagnetica, ma non ha fatto rappresentazioni grafiche. Sono stati cinque gli alunni che hanno invece pensato ai salti energetici dell'elettrone all'interno dell'atomo; di questi solo due

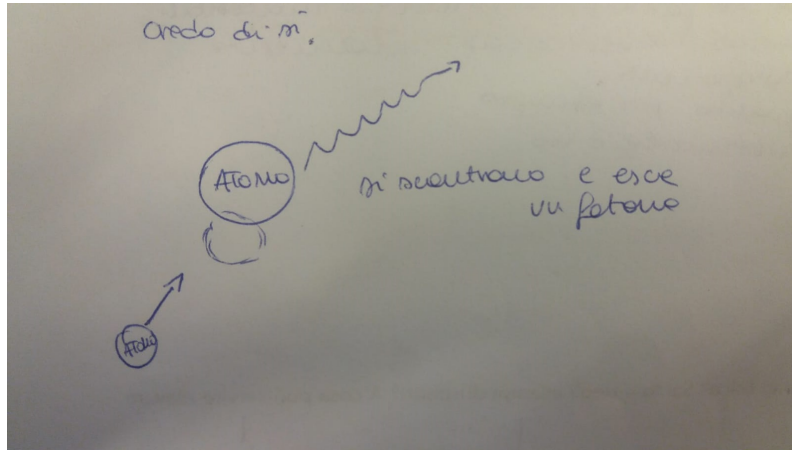


Figura 4.5: Descrizione e disegno di Valentina, che mostra come un atomo possa cedere energia sottoforma di radiazione elettromagnetica dopo aver subito un urto con un'altra particella; gli atomi sono stati rappresentati come biglie classiche.

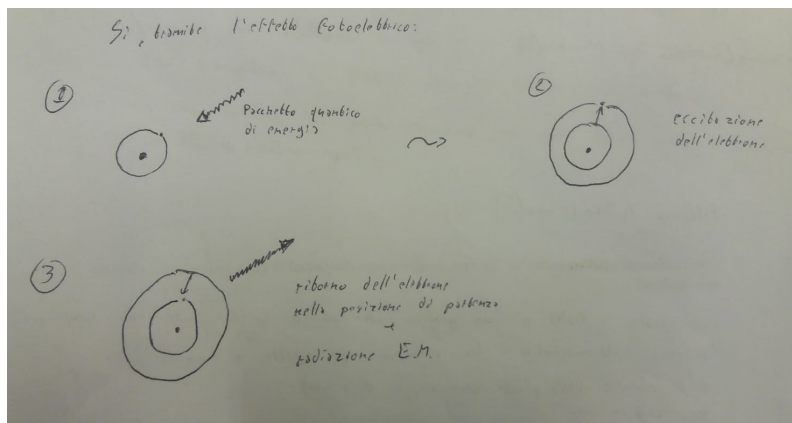


Figura 4.6: Descrizione e disegno di Giovanni, che mostra l'eccitazione di un atomo per assorbimento di un fotone e la diseccitazione con l'emissione del fotone: la descrizione è corretta ma non si tratta dell'effetto fotoelettrico, come lui scrive.

hanno fatto disegni chiari e corretti: Giovanni, che ha rappresentato il processo di eccitazione e diseccitazione dell'atomo, e Leonardo, che ha disegnato il processo di ionizzazione e ricombinazione (i due schemi sono rispettivamente mostrati in figura 4.6 e 4.7). Si noti come manchi una certa correlazione tra i processi rappresentati e quelli descritti, anche se processo e disegno, presi singolarmente, sono corretti.

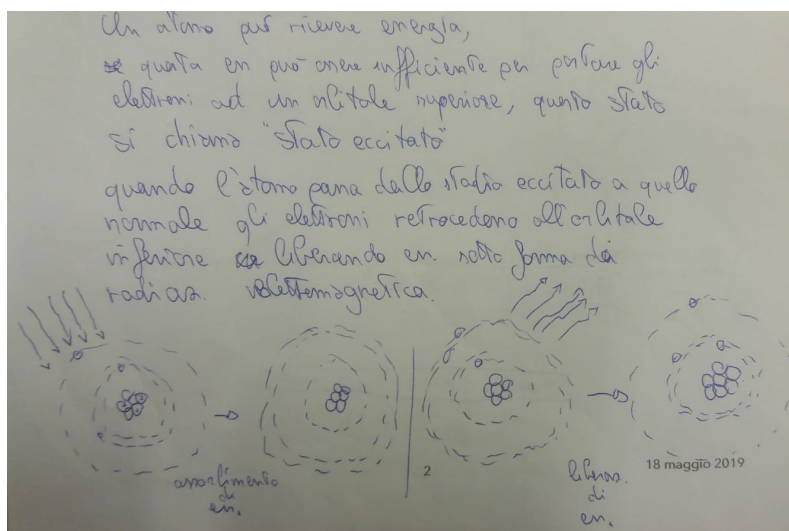


Figura 4.7: Descrizione e disegno di Leonardo: nella descrizione parla dell'eccitazione e della diseccitazione, mentre nel disegno è rappresentata la ionizzazione e ricombinazione dell'atomo.

Tra gli altri tre che accennano al salto energetico dell'elettrone tra i livelli dell'atomo, due non completano la risposta e il terzo ha sbagliato il verso del processo; secondo Michele, infatti, quando l'atomo assorbe energia l'elettrone cade a un livello più interno, quindi più vicino al nucleo (vedi figura 4.8). Questa concezione errata è stata ritrovata anche in altri lavori [Ghetti, 2017, Bardar et al., 2006]; resta la necessità di indagare su quale sia il ragionamento degli studenti che rispondono in questo modo.

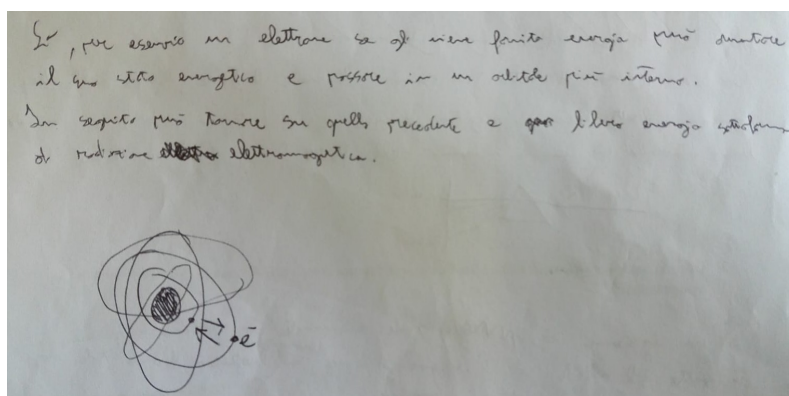


Figura 4.8: Descrizione e disegno di Michele, che scrive: "Se, per esempio un elettrone se gli viene fornita energia può aumentare il suo stato energetico e passare in un orbitale più interno. In seguito può tornare su quello precedente e libera energia sotto forma di radiazione elettromagnetica."

Tabella 4.9: In tabella sono elencate in maniera schematica le descrizioni a parole e le corrispondenti caratteristiche dei disegni.

PROCESSO DI EMISSIONE		
DESCRIZIONE	DISEGNO	n
- decadimento radioattivo	- assente	7
- dopo una collisione	- urto tra particelle classiche	3
- dopo una collisione che comporta un annichilamento	- assente	1
	- eccitazione e diseccitazione con verso del salto corretto	1
- salto dell'elettrone tra livelli energetici	- ionizzazione e ricombinazione con verso del salto corretto	1
	- eccitazione e diseccitazione con verso del salto errato	1
	- assente	1
- assente	- diseccitazione con verso del salto corretto	1
- nessun commento alla risposta affermativa	- assente	1
- assente	- non chiaro	1

4.2 Pre-test di gruppo

Per il pre-test di gruppo, gli studenti sono stati divisi in tre gruppi da quattro componenti e un gruppo da cinque. Ciò che si nota nel confronto tra le risposte individuali e quelle di gruppo, è che per la maggior parte la risposta scelta coincide con quella più corretta tra quelle proposte individualmente dai membri del gruppo.

Per quanto riguarda le domande sulle sorgenti, tutti i gruppi riescono a scartare le risposte errate (a parte qualche esempio). Anche nella seconda domanda tutti menzionano almeno uno dei fenomeni tra la rifrazione e la diffrazione e quasi tutti lo associano allo strumento corretto. Nella domanda relativa allo spettro tutti i gruppi riescono a inserire almeno una parola chiave per la definizione: tre gruppi su quattro esplicitano l'informazione sulla frequenza, uno dei quali parla anche di una seconda grandezza dipendente da essa. Per quanto riguarda gli esempi e l'utilizzo dello spettro sembra avere un'idea chiara solo il gruppo 1, dove Giovanni condivide le sue conoscenze con i compagni, aggiungendo altri utilizzi alla sua risposta individuale. Sulla domanda della struttura atomica, in generale resta una certa inconsistenza tra disegno e descrizione a parole e persistono modelli ibridi tra Bohr e Schrödinger. Interessante è il confronto costruttivo che invece c'è stato tra i componenti del gruppo 1 che li ha condotti a rappresentare in maniera corretta il modello di Schrödinger.

Per quanto riguarda la cessione di energia da parte dell'atomo, due gruppi restano fermi sul decadimento radioattivo e due sulla transizione dell'elettrone tra i livelli energetici, di cui uno dei quattro propone ancora la collisione ma parlando di annichilimento.

Tabella 4.10: Risposte di gruppo per quanto riguarda la prima domanda del pre-test.

SORGENTI DI RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA		
GRUPPO	ESEMPI	DIFFERENZE
1	qualsiasi corpo con calore, forno a microonde, Sole (raggi UV), lampadina	per lunghezza d'onda e frequenza
2	TV, radio, microonde, infrarossi, luce solare	per lunghezza d'onda e frequenza
3	Sole, atomi (nucleo che decade), macchina per raggi x	per lunghezza d'onda, frequenza e intensità
4	lampadina, oscillazione di una carica che induce un cambiamento di campo elettrico e magnetico	per lunghezza d'onda e fenomeno fisico di emissione

Tabella 4.11: Risposte di gruppo per quanto riguarda la seconda domanda del pre-test.

SCOMPOSIZIONE DELLA LUCE		
GRUPPO	STRUMENTO	FENOMENO FISICO
1	cristallo di Newton	separazione delle onde di diversa frequenza
2	reticolo di diffrazione e cromatografia	/
3	lamine che schermano solo alcune lunghezze d'onda e prisma di Newton	rifrazione e diffrazione
4	prisma di cristallo/vetro/acqua	rifrazione

Domanda 1

Nonostante singolarmente gli studenti avessero dato le risposte più svariate, il confronto li ha aiutati ad eliminare alcune risposte sbagliate: quasi tutti gli esempi sono corretti (vedi tabella 4.10) e tutti i gruppi sono giunti alla conclusione che le sorgenti si differenziano per le lunghezze d'onda che emettono. I gruppi 3 e 4 hanno inoltre aggiunto rispettivamente le differenze per intensità e per processo di emissione, come alcuni componenti dei rispettivi gruppi avevano proposto individualmente.

Domanda 2

Anche nella seconda domanda c'è stato un netto miglioramento tra le risposte individuali e quelle di gruppo (tutte le risposte di gruppo sono riportate in tabella 4.11).

Il primo gruppo ha scelto come strumento di scomposizione della luce il cristallo di Newton e, anche se non ha nominato il fenomeno fisico, ha sottolineato che è in grado di separare le lunghezze d'onda: la risposta individuale di due componenti del gruppo che proponeva il polarizzatore è stata quindi scartata.

Del secondo gruppo due componenti avevano menzionato il reticolo di diffrazione e due il fenomeno di rifrazione: la risposta collettiva che hanno dato è stata il reticolo di diffrazione ma disegnando il prisma di Newton, dando l'impressione di aver confuso i due strumenti. Inoltre hanno riproposto la cromatografia di uno dei componenti ma, come già detto sopra, nella discussione di classe finale nessuno dei componenti sapeva di preciso di cosa si trattasse.

Il terzo gruppo ha nominato entrambi i fenomeni fisici (diffrazione e rifrazione) ma ha scelto come strumenti il prisma di Newton e le "lamine che schermano solo alcune λ ", non specificando a cosa si riferissero per quest'ultimo. Sono quindi riusciti a scartare la proposta del componente che pensava all'esperimento di Rutherford.

Tutti i componenti del quarto gruppo rientravano tra chi ha menzionato e/o descritto il fenomeno di rifrazione, quindi hanno riproposto questa risposta in gruppo, elencando i diversi materiali che potrebbero effettivamente produrre rifrazione (cristallo, vetro, acqua).

Domanda 3

Le risposte dei gruppi su cosa sia lo spettro restano ancora diverse tra loro. Tutti e quattro i gruppi hanno ricopiato la risposta riconosciuta più valida di uno dei componenti (vedi tabella 4.12). Tutti i gruppi, escluso il 4, esplicitano l'informazione data dallo spettro sulla composizione in frequenze di un'onda. Nessuno ancora menziona l'energia anche se, sotto suggerimento di uno dei loro componenti, il gruppo 2 accenna a una grandezza che va con la frequenza.

Per quanto riguarda gli esempi solo il gruppo 1 ha fatto riferimento a una sorgente in particolare, ossia quella stellare proposta da Giovanni, mentre i gruppi 2 e 3 hanno semplicemente nominato lo spettro elettromagnetico, risposta più comune dei singoli componenti; il gruppo 4 invece ha menzionato lo 'spettro del visibile', che era stato proposto da due componenti. Sull'utilizzo dello spettro solo il gruppo 1 ha dato una risposta elaborata che si è arricchita anche grazie al confronto: nessuno individualmente aveva infatti accennato all'effetto Doppler. Anche il gruppo 4 accenna alla possibilità di riconoscere il corpo emettente tramite lo spettro, anche se non specifica che si riferisce a livello chimico, riproponendo la risposta di uno degli elementi del gruppo (vedi tabella 4.13). Il gruppo 3 non ha risposto, mentre il gruppo 2 ha ripreso la risposta di Diletta.

Domanda 4

Sulla quarta domanda continuano a comparire le stesse concezioni errate comparse nelle risposte individuali, anche se riescono a scartare alcune proposte sbagliate.

Il primo gruppo è quello che sembra aver più chiara l'idea di orbitale, disegnando l'atomo con delle aree tratteggiate che rappresentano gli orbitali e specificando che sono descritti dai numeri quantici (vedi figura 4.9 in alto a sinistra): anche se non accennano alla probabilità, non disegnano l'elettrone su traiettorie. La risposta di questo gruppo nasce da un confronto costruttivo tra i vari componenti, infatti ognuno fornisce il suo contributo (le 4 proposte individuali sono quelle mostrate nelle figure: 4.1 nel pannello superiore, nelle due figure 4.2 e nella figura 4.3).

Tabella 4.12: In questa tabella sono riportate le risposte di tutti gli studenti individuali e di gruppo, in modo da evidenziare come siano evolute le risposte dopo il confronto. Del gruppo 1 hanno risposto solo in due a questa domanda.

SPETTRO

DEFINIZIONE INDIVIDUALE	GRUPPO	DEFINIZIONE DI GRUPPO
-------------------------	--------	-----------------------

<ul style="list-style-type: none"> - insieme delle onde elettromagnetiche ordinate secondo frequenza o lunghezza d'onda - grafico che indica le frequenze che compongono un'onda elettromagnetica - scala di valori di una data grandezza a seconda della frequenza che essa assume - insieme delle componenti monocromatiche di un fascio di radiazione policromatica - comprende tutte le possibili radiazioni elettromagnetiche - insieme delle componenti della luce con differente λ - rilevazione di fenomeni che altrimenti non sarebbero osservabili - insieme di valori di frequenze o altre grandezze studiate su diversi tipi di onde elettromagnetiche, messe in ordine crescente o decrescente, in modo da capire come variano nei vari fenomeni naturali - insieme di onde di frequenza differente che, se emesse nello stesso istante, costituiscono un fascio luminoso unitario all'interno del quale essi sono indistinguibili - formato da tante onde di lunghezze d'onda differenti - strumento che permette di decomporre la luce - "schema" delle componenti della luce emessa da un corpo - insieme di onde accomunate da qualcosa (appartenenza alla stessa banda spettrale) - insieme delle emissioni di radiazioni provenienti da una sorgente - scala di valori 	<p>1</p> <p>2</p> <p>3</p> <p>4</p>	<p>grafico che indica le frequenze che compongono un'onda elettromagnetica</p> <p>scala di valori distribuita a seconda delle frequenze di una data grandezza</p> <p>insieme di onde con frequenze e lunghezze d'onda differenti</p> <p>insieme delle emissioni di radiazioni che provengono da una sorgente</p>
---	-------------------------------------	--

Tabella 4.13: Risposte di gruppo sui sotto-quesiti della domanda 3.

SPETTRO		
GRUPPO	ESEMPI	UTILIZZO
1	spettro delle stelle	per individuare la composizione chimica, la temperatura e la velocità delle stelle rispetto alla Terra
2	spettro elettromagnetico	/
3	spettro elettromagnetico	per differenziare le onde
4	spettro del visibile	capire che tipo di corpo è e quali onde emette

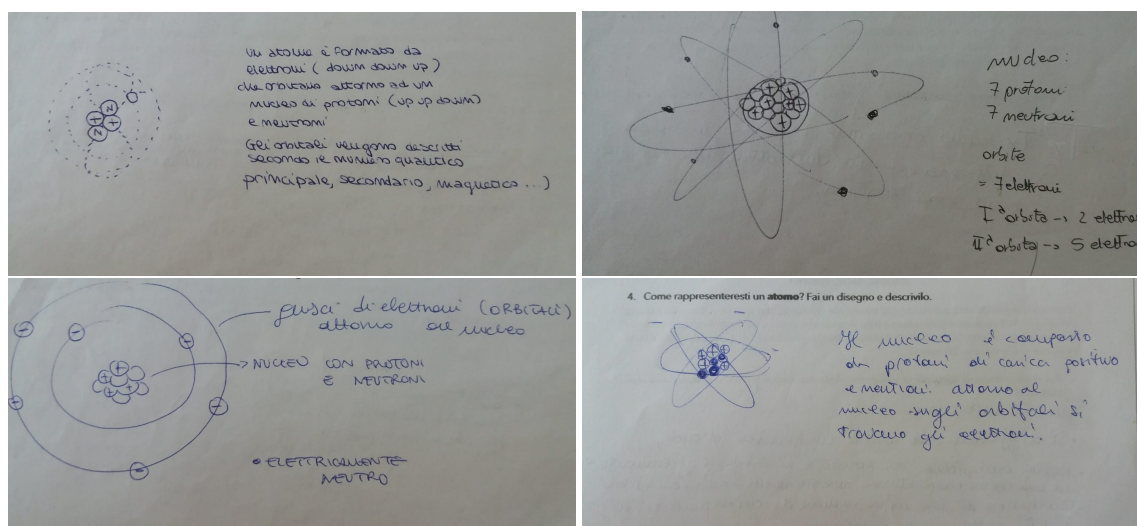


Figura 4.9: Disegno dell'atomo dei quattro gruppi: in alto a sinistra quello del gruppo 1, in alto a destra l'atomo del gruppo 2, in basso a sinistra quello del gruppo 3 e in basso a destra quello del gruppo 4. Si noti la somiglianza con le rappresentazioni riportate sopra di alcuni membri dei gruppi.

Tabella 4.14: Riassunto delle risposte di gruppo sulla struttura dell'atomo.

STRUTTURA DELL'ATOMO		
GRUPPO	DESCRIZIONE	DISEGNO
1	- modello di Schrödinger (orbitali descritti dai numeri quantici)	- modello di Schrödinger con elettroni non su orbite
2	- ibrido dei modelli di Bohr e Schrödinger	- modello di Bohr con elettroni su orbite ellittiche a pari distanza dal nucleo
3	- modello di Schrödinger (orbitali descritti come gusci)	- modello di Bohr con elettroni su orbite ellittiche a diverse distanze
4	- modello di Schrödinger	- modello di Bohr con elettroni su orbite ellittiche a pari distanza dal nucleo

Il secondo gruppo conferma il modello planetario di Stefano (figura 4.4) a cui hanno aggiunto una parete al nucleo: gli elettroni quindi restano su orbite ben determinate, idea che apparteneva a tutti i componenti (vedi figura 4.9 in alto a destra).

Nel gruppo tre, quattro componenti su cinque avevano descritto a parole in modo corretto gli orbitali e solo Diletta aveva avuto cura di non disegnare gli elettroni sulle linee (vedi figura in alto 4.1). Nella risposta collettiva descrivono gli orbitali come gusci ma disegnano gli elettroni su orbite ellittiche intorno al nucleo (vedi figura 4.9 in basso a sinistra).

Il gruppo quattro, come il secondo, non scende nel dettaglio sul descrivere gli orbitali, ma disegnano orbite ellittiche a distanza non chiara dal nucleo, riproponendo il disegno di Michele (figura in basso 4.6), ma con dei miglioramenti: questa volta gli elettroni vengono indicati solo con dei segni negativi, senza indicare in modo determinato la posizione degli elettroni, e il nucleo non lo rappresentano come una sfera ma come un insieme di protoni e neutroni (vedi figura 4.9 in basso a destra). Questa volta solo un gruppo ha disegnato il nucleo racchiuso in una parete e ha parlato di orbite invece che di orbitali. L'inconsistenza tra descrizione e disegno resta per i gruppi 3 e 4 (vedi tabella 4.14).

Domanda 5

I gruppi si dividono principalmente tra quelli che propongono il decadimento radioattivo e quelli che invece propongono i salti energetici dell'elettrone. Il primo gruppo ha riproposto la risposta di Giovanni: lo schema è corretto ma non rappresenta l'effetto fotoelettrico come scrivono (figura 4.6). Nel secondo gruppo tutti i singoli componenti avevano proposto il processo di decadimento radioattivo e quindi come risposta collettiva l'hanno riproposta ma sottolineando il loro dubbio a riguardo aggiungendo un punto interrogativo.

Il terzo gruppo ha ripresentato un pò le risposte di tutti i componenti senza riuscire a fare una selezione critica, accennando sia al decadimento radioattivo sia alle collisioni tra particelle. In particolare hanno riproposto l'annichilimento tra due particelle di segno opposto, come menzionato da Enrico.

Tabella 4.15: Risposte di gruppo sulla cessione di energia da parte dell'atomo.

PROCESSO DI EMISSIONE		
GRUPPO	DESCRIZIONE	DISEGNO
1	- salto dell'elettrone tra i livelli energetici	- coerente, anche se non rappresenta l'effetto fotoelettrico come scrivono
2	- decadimento radioattivo	- assente
3	- dopo una collisione tra particelle di carica opposta che comporta un annichilamento - decadimento radioattivo	- urto classico tra particelle - assente
4	- salto dell'elettrone tra i livelli energetici	- coerente, ma con verso errato del transito

Il quarto gruppo ha ripreso la risposta di Michele (vedi figura 4.8), non correggendo il suo errore sulla direzione errata della diseccitazione dell'elettrone (vedi tabella 4.15).

4.3 Quaderni di laboratorio

Per la lezione in laboratorio il lavoro è stato organizzato principalmente in gruppo; essendo in 19, come si è detto sopra, oltre a lasciare quasi invariati i quattro gruppi della lezione precedente è stato formato un quinto gruppo in modo tale che però non avesse tutti i componenti nuovi. A ciascun gruppo è stato chiesto di documentare tutto il percorso su dei fogli che andassero a costituire il loro "quaderno di laboratorio". Come propone la metodologia inquiry-based, il laboratorio ha previsto una fase di osservazione delle sorgenti, di ipotesi, poi delle fasi di raccolta e interpretazione dati con successiva fase di confronto. Tutti i gruppi hanno lavorato in maniera attiva e interessata, tanto che alcuni studenti hanno preferito perdere alcuni minuti dell'intervallo per continuare a lavorare. Attraverso l'osservazione di diverse sorgenti di luce, tutti i gruppi sono riusciti a riconoscere due tipologie di spettri: continuo e discreto. Per quest'ultimo nessuno ha usato il termine 'righe', ma piuttosto 'bande verticali' o 'colori separati'. Interessante è l'interpretazione delle zone oscure degli spettri discreti da parte del gruppo 4 che le ha definite 'bande nere', come se rappresentassero un colore piuttosto che un'assenza di luce.

Grazie alla guida delle schede, tutti i gruppi hanno compreso che gli spettri discreti sono generati dagli atomi e che ciascun elemento chimico produce uno spettro diverso in colori e/o intensità.

Solo due gruppi hanno esplicitamente scritto la causa del legame tra spettri discreti ed elementi chimici, ma solo il gruppo 5 ha parlato di 'energia quantizzata'.

Non in tutti i gruppi si è raggiunta una scelta comune sui grafici da tracciare per gli spettri atomici. Abbiamo individuato a posteriori quattro categorie di grafico disegnate dagli studenti:

1. *a punti*: per ogni lunghezza d'onda osservata, è stato segnato un punto nel piano cartesiano in corrispondenza di un'intensità diversa da zero, in alcuni casi cercando di riprodurre le differenze osservabili di intensità (figura 4.10 pannello A);
2. *a punti collegati*: come nel caso precedente, ma i punti sono stati collegati l'uno all'altro con una spezzata senza tenere conto delle zone a intensità nulla (figura 4.10 pannello B);
3. *a "delta"*: ogni riga dello spettro è stata rappresentata con una singola linea verticale in corrispondenza della lunghezza d'onda, tipo delta di dirac, in alcuni casi cercando di riprodurre le diverse intensità (figura 4.10 pannello C);
4. *a profilo di intensità*: sotto questa categoria vanno le rappresentazioni più simili a quella che si otterrebbe tracciando effettivamente un profilo di intensità (figura 4.10 pannello D).

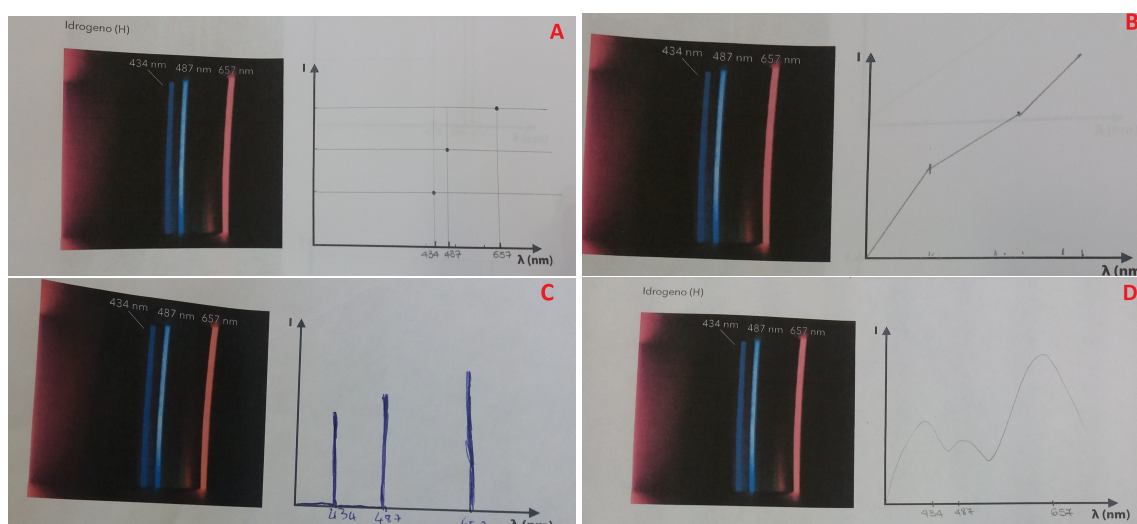


Figura 4.10: Nelle figure sono rappresentate le quattro tipologie di spettri tracciati dagli studenti nel caso dell'idrogeno. Nel pannello A hanno semplicemente indicato con un punto l'intensità luminosa riconosciuta per ciascuna lunghezza d'onda. Nel pannello B sono stati prima individuati i punti corrispondenti alle intensità di ciascuna frequenza e poi sono stati uniti in modo da ottenere un grafico continuo. Nel pannello C, invece dei punti sono state usate delle righe di altezza diversa. Nel pannello D, è mostrato invece la tipologia con grafico continuo (anche se lo spettro era a righe). I pannelli B e D appartengono a due componenti del gruppo 4, quello A al gruppo 3 e quello C al gruppo 5.

Nella maggior parte dei grafici comunque hanno cercato di rispettare in maniera qualitativa la differenza di intensità che si osservava tra le righe degli spettri.

Dalla risposta a una delle domande della scheda si comprende che nessun gruppo si pone il problema se quello che osservano sia lo spettro completo o meno, perché principalmente tutti pensano in termini solo della banda del visibile; anzi proprio per questo, sembra che nessuno comprenda il significato di spettro "completo". Questa concezione ritorna esplicita nel post-laboratorio, quando gli studenti si

scontrano con la realtà che le righe che osservano non coincidono con il salto allo stato fondamentale, che esiste ma cade nell'ultravioletto.

Si nota inoltre una certa differenza nell'organizzazione del quaderno di laboratorio tra i gruppi che avevano almeno una componente femmina (1,3 e 4) e i gruppi composti da soli maschi (2 e 5): i primi hanno tabulato tutte le risposte per ogni singola sorgente in maniera ordinata, mentre i secondi hanno risposto a tutte le domande in maniera generica.

Risposte alla prima scheda di laboratorio

La prima fase di osservazione è stata guidata attraverso le seguenti tre domande:

- *Quali sorgenti di luce sono presenti in questa stanza o all'esterno?*
- *Come vi appaiono osservandole a occhio nudo?*
- *Cosa vi aspettate di osservare usando uno spettroscopio?*

Come si può notare dalla tabella 4.16, tutti i gruppi hanno scritto almeno 8 esempi di sorgenti, molti di più di quelli scritti individualmente nel test, probabilmente perché si è usata l'espressione sorgenti "di luce" piuttosto che "di radiazione elettromagnetica"; le descrizioni che ne fanno riguardano principalmente il colore e/o l'intensità. Nel dettaglio:

- il gruppo 1 ha descritto singolarmente alcune sorgenti per colore
- il gruppo 2 ha solo scritto in modo generico che le sorgenti hanno intensità differenti
- il gruppo 3 per ciascuna sorgente ha indicato sia il colore che l'intensità e per il Sole hanno aggiunto che appariva con luce diffusa
- il gruppo 4 ha scritto per ogni sorgente il colore e l'intensità, aggiungendo per la lampadina a incandescenza il fatto che era in grado di scaldare
- il gruppo 5 ha scritto solo il colore di alcune di quelle che ha elencato

Per quanto riguarda la terza domanda è interessante la distinzione che fa il gruppo 2 tra le fasce cromatiche e le bande di diffrazione: probabilmente questa differenza ha origine dal fatto che ricordano la figura di diffrazione monocromatica raffigurata spesso nei libri e non riconoscono la possibilità di formare uno spettro tramite il reticolo di diffrazione. I gruppi 3 e 4 invece hanno fatto ipotesi su alcune singole sorgenti come riportato in tabella 4.17; in particolare il gruppo 3 si aspetta un "ampio spettro" da tutte le sorgenti di luce bianca, mentre dalle sorgenti di altri colori si aspettano di vedere lo stesso colore con cui appaiono ma deviato angularmente. Il gruppo 5 ha scritto in modo generico che si aspetta una scomposizione in colori di alcune sorgenti e di altre no.

La seconda fase di esplorazione da fare con lo spettroscopio è stata guidata dalle seguenti domande:

Tabella 4.16: Elenco di tutte le sorgenti proposte dai cinque gruppi. Si noti come il numero sia cresciuto per tutti i gruppi rispetto al pre-test.

n	ESEMPI DI SORGENTI				
	GRUPPO 1	GRUPPO 2	GRUPPO 3	GRUPPO 4	GRUPPO 5
1	luce al neon delle lampade del soffitto	Sole	Sole	neon	lampade al neon
2	luce naturale dalle finestre	neon	lampadina al neon	lampada spettrale (viola)	finestra
3	luce al LED di un orologio digitale	LED	lampada spettrale 1	lampada spettrale (arancione)	torcia
4	luce di segnalazione che la presa di corrente è attiva	laser	lampada spettrale 2	proiettore	laser
5	luce del proiettore	telefono	laser	puntatore laser	lampada spettrale viola
6	luce della pila	pila	lampada da tavolo	torcia	lampada spettrale gialla
7	luce del dispositivo salvavita	lampada spettrale	proiettore	torcia del telefono	lampada da tavolo
8	luce del telefono con o senza modalità "night mode"	proiettore	cellulare	lampada	prese da tavolo
9	luce del puntatore laser	lampada		luce di emergenza	
10	luce della lampada a incandescenza			Sole	
11	lampada spettrale viola				
12	lampada spettrale rosa				

Tabella 4.17: Risposte riguardo alle aspettative sulle sorgenti viste attraverso lo spettroscopio. I gruppi 2 e 5 hanno risposto in modo generico; il gruppo 3 ha scritto l'aspettativa per ogni sorgente che ha elencato, scrivendo una delle due caratteristiche menzionato in tabella; il gruppo 3 ha risposto solo per le due sorgenti indicate qui in tabella; il gruppo 1 invece ha saltato questa domanda.

GRUPPO	ASPETTATIVE ALLO SPETTROSCOPIO
1	/
2	luce divisa in più fasce cromatiche oppure in più bande di diffrazione
3	per le sorgenti a luce bianca → ampio spettro per sorgenti con luce di altri colori → stesso colore ma fascio deviato
4	neon → arcobaleno laser → rosso
5	luce di alcune divise in vari colori e di altre no

Tabella 4.18: Le risposte riportate in tabella sono quelle scritte dai ragazzi nel quaderno di laboratorio. Tra i tre gruppi che hanno risposto, si noti la risposta di carattere scientifico data dal gruppo 3.

GRUPPO	ILLUMINAZIONE AMBIENTALE
1	/
2	sì, l'illuminazione ambientale influisce su ciò che vediamo; spegnendo la luce lo verificiamo
3	sì, sicuramente la luce ambientale influisce: infatti con la luce accesa lo spettro del laser aveva anche altri colori, mentre con la luce spenta solo il rosso
4	/
5	sì, basta chiudere le finestre

- *Iniziate a osservare le sorgenti con lo spettroscopio. L'illuminazione ambientale influisce su ciò che vedete? Trovate un modo per verificarlo ed eventualmente discutete come eliminare l'effetto.*
- *Per ciascuna delle sorgenti individuate sopra, descrivete cosa osservate attraverso lo spettroscopio sia a parole, sia con un disegno. Confrontate le vostre osservazioni con le ipotesi fatte inizialmente.*
- *Secondo voi, ciò che vedete è lo spettro completo? Motivate la risposta.*

Sulla questione della luce ambientale, solo tre gruppi su cinque hanno risposto e di questi solo il gruppo 3 ha fatto una verifica accurata della propria affermazione (vedi risposte in tabella 4.18): l'idea di usare la loro aspettativa sullo spettro del laser come verifica di tale affermazione ha permesso loro di raggiungere una conclusione con un certo rigore scientifico.

Le descrizioni su come osservano le sorgenti attraverso lo spettroscopio si limitano all'elencazione dei colori osservati e se questi sono disposti in maniera continua o se sono separate. Nessuno parla di righe, ma piuttosto usano i termini "colori" o "bande verticali" separate; il gruppo 1 parla di "bande allungate": sembrano interpretare la presenza di una "banda" come uno "stiramento" orizzontale di una singola riga (a una specifica lunghezza d'onda), più che come molte righe (molte

lunghezze d'onda) vicine. Di seguito sono riportati gli spettri fatti dai cinque gruppi di due o tre sorgenti dalla figura 4.11 alla 4.15, avendo scelto di mostrare principalmente gli spettri delle lampade a gas. I gruppi 1 e 2 hanno tenuto conto del fatto che attraverso lo spettroscopio si osservavano due spettri simmetrici rispetto alla fenditura rappresentando rispettivamente o una delle due parti, specificando quale lato hanno considerato, o disegnando entrambi le parti. I gruppi 2 e 5 non hanno specificato di quali sorgenti abbiano fatto lo spettro. Interessante è il caso del gruppo 4 che ha rappresentato le zone buie dello spettro come bande di colore nero, come se costituissero una componente della luce (vedi figura 4.14).

Per quanto riguarda se quello che osservano sono gli spettri completi delle sorgenti, per il gruppo 1 e 2 "completo" è sinonimo di "continuo" e pertanto hanno indicato come tali tutti gli spettri non a righe. Il gruppo 3 invece ha scritto che nei casi che hanno scelto nessuno è completo, ma tra quelli che hanno illustrato uno l'hanno indicato come spettro continuo, quindi non è chiaro cosa significhi per loro 'completo'. Gli altri due gruppi invece non hanno risposto a questa domanda.

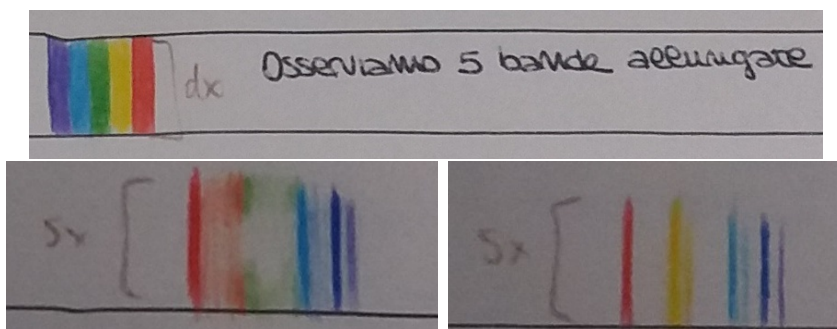


Figura 4.11: Spettri di tre sorgenti disegnati dal gruppo 1. Lo spettro in alto è quello della lampada a neon; i due spettri in basso sono delle due lampade spettrali: a sinistra quella catalogata come viola (a idrogeno) e a destra quella rosa (ad elio). I riferimenti 'sinistra' o 'destra' che sono presenti in foto si riferiscono a quale dei due spettri simmetrici hanno riprodotto, riconoscendo l'importanza nell'ordine dei colori.

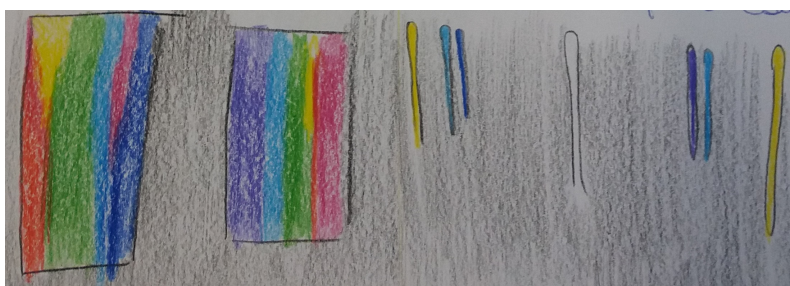


Figura 4.12: Spettri di due sorgenti disegnati dal gruppo 2. Non hanno specificato a quali fonti di luce corrispondono. A differenza del gruppo 1, essi hanno rappresentato i due spettri simmetrici che si osservano attraverso lo spettroscopio per ciascuna sorgente.

Risposte alla seconda scheda di laboratorio

Il primo tris di domande della seconda scheda aveva l'obiettivo di guidare gli studenti nel confronto tra gli spettri:

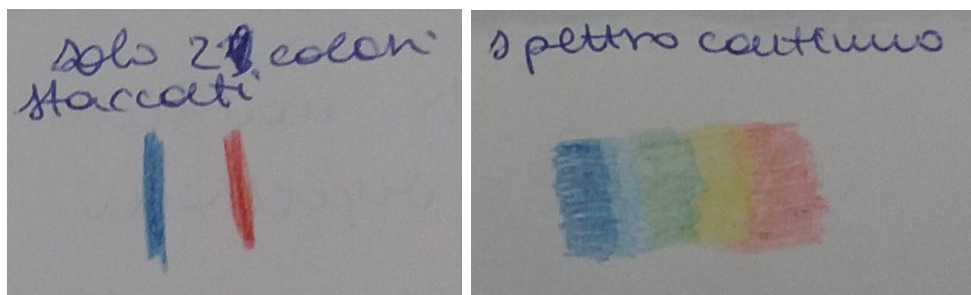


Figura 4.13: Spettri di due sorgenti disegnati dal gruppo 3. A sinistra è lo spettro che le ragazze hanno osservato della lampada viola (idrogeno), di cui hanno osservato "solo due colori staccati"; a destra è rappresentato lo spettro della lampada a incandescenza, che hanno giustamente definito continuo.

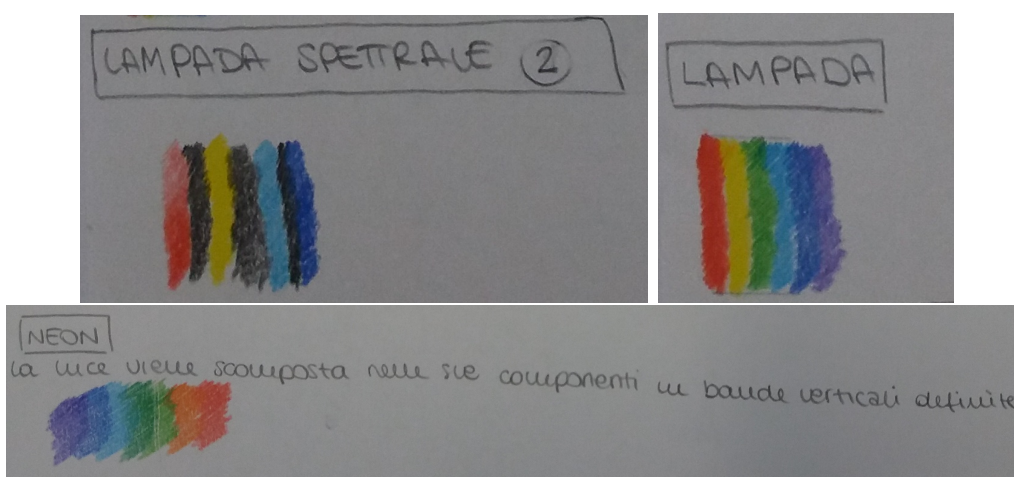


Figura 4.14: Disegni e descrizioni fatte dal gruppo 4 di tre spettri che hanno osservato. In alto a sinistra lo spettro di una lampada spettrale (elio); in alto a destra lampada a incandescenza; in basso luce al neon, di cui scrivono: " la luce viene scomposta nelle sue componenti in bande verticali definite". Da notare come abbiano rappresentato le zone buie dello spettro a righe della lampada spettrale con bande nere come se fosse una componente.



Figura 4.15: Il gruppo 5 non ha indicato la sorgente di cui ha fatto lo spettro; hanno rappresentato uno spettro continuo e uno a righe.

- *Quali differenze ci sono tra gli spettri delle varie differenze che avete osservato? Potreste classificarlo in qualche modo?*
- *Basandovi sulle vostre osservazioni, qual è secondo voi la caratteristica degli spettri degli elementi chimici?*
- *Confrontate tra loro qualitativamente gli spettri degli elementi chimici osservati. Quali analogie ci sono e quali differenze?*

Tutte le risposte sono riportate in tabella 4.19. Si noti come tutti i gruppi riconoscano i colori come elemento di confronto tra gli spettri e come solo i gruppi 1 e 4 facciano riferimento anche all'intensità. Per il gruppo 4 ritorna il discorso sulle 'bande nere' che ribadiscono in modo chiaro. Tutti i gruppi, escluso il 4, menziona esplicitamente la distinzione tra spettri continui e non continui. Questi ultimi in particolare vengono associati alle lampade spettrali e quindi agli elementi chimici. Il gruppo 1 scrive esplicitamente che *"ogni elemento ha il suo spettro"* e tutti sembrano d'accordo sul fatto che ciò che differenzia gli spettri degli elementi chimici sono i colori presenti. Da notare come in questa fase tutti parlino di "colori" o "bande", a parte il gruppo 5 che invece parla di frequenze.

Con le successive due domande si è cercato di rendere esplicito a tutti gli studenti che tutti gli elementi chimici producono uno spettro a righe e che sono tutti diversi l'uno dall'altro facendoli lavorare con una tavola periodica che li mostrava per ciascun elemento.

- *Usate la tavola periodica "spettrale" per individuare gli elementi presenti nelle lampade*
- *Rileggete qual è la caratteristica più importante che avete osservato riguardo gli spettri degli elementi chimici. Cosa potete concludere rispetto alle caratteristiche della luce emessa da questi atomi?*

I riconoscimenti degli elementi chimici fatti dai gruppi sono mostrati in tabella 4.20. Si noti come tutti i gruppi siano riusciti a riconoscere l'elio (anche se il gruppo 3 ha fatto diverse ipotesi), mentre per l'idrogeno sono stati solo due gruppi a individuarlo. All'ultima domanda hanno risposto solo i gruppi 3 e 5, le cui risposte sono riportate qui di seguito rispettivamente:

"non tutti riflettono gli stessi colori, anzi riflettono solo alcune λ : non ho le λ che non riflette (infatti non è luce bianca)".

"Gli atomi emettono fotoni solo a certe frequenze, perché ricevono ed emettono energia quantizzata".

Il gruppo 3 menziona il processo di riflessione piuttosto che quello dell'emissione, mostrando una certa confusione nella terminologia. Il gruppo 5 invece fa un'affermazione corretta sulla quantizzazione dell'energia.

Scheda di laboratorio: riconoscere gli spettri atomici

Nell'ultima scheda di laboratorio, come descritto in precedenza, si è cercato di far lavorare i ragazzi sulla rappresentazione grafica dello spettro, chiedendo loro di passare dalla foto dello spettro (nella quale erano state riportate le lunghezze d'onda

Tabella 4.19: Risposte delle prime tre domande della seconda scheda di laboratorio.

GRUPPO	CLASSIFICAZIONE DEGLI SPETTRI	CARATTERISTICA SPETTRALI	ANALOGIE E DIFFERENZE DEGLI SPETTRI ATOMICI
1	<ul style="list-style-type: none"> - continuità e distanza tra le bande di colore - presenza o meno di colori - intensità (colori più o meno accesi) 	bande facilmente distinguibili	ogni elemento ha il suo spettro
2	<ul style="list-style-type: none"> - lo spettro della lampada (a incandescenza) è continuo e contiene una più vasta gamma di colori; mentre gli spettri del neon e delle lampade spettrali presentano bande separate e una gamma cromatica più ristretta 	<ul style="list-style-type: none"> bande separate con una gamma cromatica più ristretta 	<ul style="list-style-type: none"> - analogie: bande cromatiche separate - differenze: colori diversi
3	<ul style="list-style-type: none"> alcuni spettri sono continui e contengono più colori, altri invece sono costituiti da bande singole oppure da un solo colore (es. spettro del laser) - nitidezza - colori 	non sono continui	<ul style="list-style-type: none"> - analogie: non hanno colori intermedi tra le bande - differenze: colori diversi
4	<ul style="list-style-type: none"> - ampiezza dello spettro - larghezza delle bande - presenza o meno di bande nere e larghezza delle stesse 	ben, definite, strette e inframmezzate da aree nere	
5	<ul style="list-style-type: none"> - alcune sono continue, altre emettono solo a certe frequenze 	emettono solo certe frequenze	emettono a frequenze diverse

Tabella 4.20: Nella seguente tabella sono riportati i riconoscimenti dei due spettri atomici che hanno osservato gli studenti in laboratorio utilizzando la tavola periodica, mostrata in appendice B. Viola e arancione sono i colori con cui apparivano le due lampade spettrali ad occhio nudo.

RICONOSCIMENTO DELLE LAMPADE SPETTRALI		
GRUPPO	VIOLA (idrogeno)	ARANCIONE (elio)
1	boro	elio
2	idrogeno	elio
3	idrogeno	elio/boro/magnesio
4	tantalio	elio
5	berillio	elio

Tabella 4.21: Nella tabella sono riportate le tipologie utilizzate. I gruppi per le quali sono indicate più tipologie sono quelli che non sono riusciti a trovare un accordo e ciascun elemento ha voluto consegnare la sua scheda. Le tipologie a cui si fa riferimento sono quelle riportate in figura 4.10.

GRUPPO	TIPOLOGIA SPETTRALE			
	A	B	C	D
1			x	
2			x	
3	x (3 studentesse)		x (1 studentessa)	
4		x (1 studentessa)		x (3 studentesse)
5			x	

delle righe presenti) a un grafico $I-\lambda$, lasciando solo qualitativa l'indicazione delle intensità (vedi figure 3.5 e 3.6).

I gruppi 3 e 4 non sono riusciti a raggiungere un accordo comune e quindi hanno presentato diverse proposte per gruppo. Come detto sopra, ci sono state quattro diverse tipologie di riproduzione qualitativa degli spettri atomici, mostrati in figura 4.10.

La tipologia A è stata riprodotta da tre studentesse del gruppo 3: esse hanno cercato di indicare il valore dell'intensità qualitativa corrispondente a ciascuna riga dello spettro. La tipologia B è stata realizzata solo da un componente del gruppo 4, che ha indicato per ciascuna riga il punto dell'intensità che riteneva opportuno e poi ha unito i punti, in modo da ottenere una linea continua. La più comune è stata la tipologia C, proposta dai gruppi 1 e 2, 5 e da una componente del gruppo 3. Tre componenti del gruppo 4 hanno invece utilizzato la tipologia D, rappresentando lo spettro discreto con linee continue e non portando mai a zero l'intensità. Anche i componenti di uno stesso gruppo che hanno utilizzato la stessa tipologia, hanno però rappresentato intensità diverse. Nelle figure 4.16, 4.17 e 4.18 sono mostrati degli esempi per ciascun gruppo.

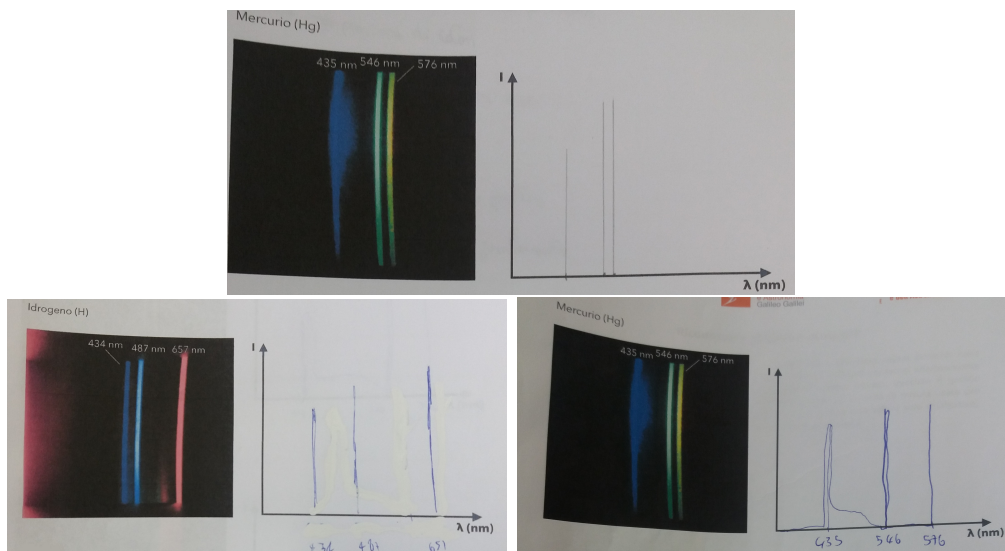


Figura 4.16: Alcuni dei grafici intensità-lunghezza d'onda dei gruppi 1(in alto),2(in basso a sinistra) e 5(in basso a destra). Per tutti gli elementi chimici hanno utilizzato la stessa tipologia.

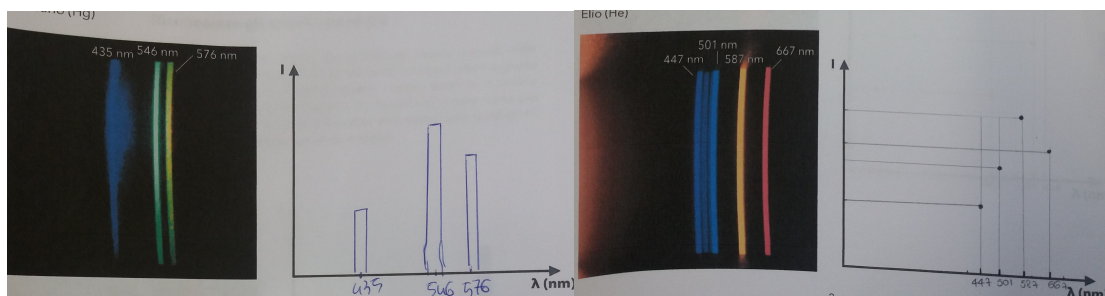


Figura 4.17: Due esempi di grafici del gruppo 3: Valentina ha scelto di usare delle righe, mentre le altre tre componenti hanno usato punti.

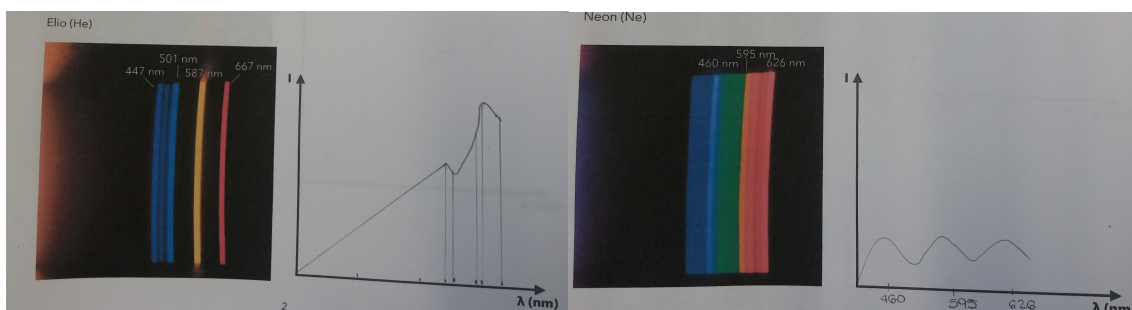


Figura 4.18: Due esempi di grafici del gruppo 4; la tipologia "a profilo di intensità" è quella usata maggiormente tra le componenti del gruppo, ma ciascuna di esse l'ha tracciata in maniera differente.

4.4 Post-laboratorio

La fase del post-laboratorio consisteva nell'elaborazione quantitativa e nell'interpretazione dei dati raccolti in laboratorio.

Come previsto in letteratura [Ivanjek et al., 2015a], tutti i gruppi hanno cercato di associare il valore del livello energetico dell'atomo all'energia del fotone, piuttosto che la differenza dell'energia dei due livelli coinvolti nella transizione. L'inconsistenza tra i valori ottenuti ha permesso loro di comprendere in maniera efficace questo punto. Un'altra concezione errata che sono riusciti a superare è che le transizioni non avvengono solo tra un livello eccitato e lo stato fondamentale; quasi tutti sono rimasti sorpresi nello scoprire che le righe che cadono nella banda del visibile non sono transizioni con lo stato fondamentale ma corrispondono al salto tra due livelli eccitati. Questa scoperta ha fatto sì che alcuni si siano posti il problema che lo spettro che osservano non è effettivamente completo perché ci sono delle righe, come quelle nell'ultravioletto dovute alle transizioni verso il livello fondamentale, che cadono al di fuori della banda del visibile.

Per nessun gruppo è risultato naturale fare un diagramma dei livelli e alcuni hanno chiesto aiuto. Tre gruppi su cinque hanno cercato di fare un grafico ponendo in ascissa il numero quantico principale e in ordinata il valore del livello energetico, mentre gli altri due hanno provato a creare un istogramma dove però non è chiaro cosa rappresenti l'altezza delle tacche. Queste osservazioni riconducono alla riflessione - molto attuale nella ricerca - sull'uso delle diverse rappresentazioni (diagrammi, grafici, equazioni, etc.) nella didattica della fisica [Geyer and Kuske-Janßen, 2019]. Infatti, i ragazzi, di fronte alla richiesta di una rappresentazione grafica (più specificamente, Geyer la classificherebbe come "pittorica-simbolica"), hanno cercato di ricondurla a un tipo di rappresentazione grafica nota, piuttosto che cercare di costruire una rappresentazione adatta. Questi dati indicano la necessità di lavorare già alla scuola secondaria sulla capacità di utilizzare (interpretare, usare, produrre) diversi tipi di rappresentazioni per descrivere un fenomeno fisico.

Per mancanza di tempo, non tutti sono riusciti a rispondere alle ultime domande.

Domanda 1 e 2

Con le prime due domande si è cercato di condurre i ragazzi a riflettere sul legame che esiste tra gli spettri discreti, l'emissione di alcune lunghezze d'onda soltanto e la struttura degli atomi:

- *Considerate la seguente affermazione: "Il fatto che negli spettri degli elementi chimici siano presenti solo alcune righe significa che gli atomi possono emettere solo fotoni con certe energie". Commentatela e se siete d'accordo giustificala facendo riferimento a quanto vale l'energia di un fotone*
- *Come si potrebbe spiegare quanto osservato? Formulate un'ipotesi usando quello che sapete sull'atomo e usando il concetto di conservazione dell'energia. Nella vostra spiegazione includete sia una descrizione a parole sia una rappresentazione grafica.*

Per quanto riguarda la prima domanda, tutti i gruppi sono riusciti a connettere che emettere solo certe lunghezze d'onda corrisponde ad emettere fotoni solo di certe energie, utilizzando la relazione $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$. Il gruppo 5 usa l'espressione "l'energia del fotone è quantizzata": l'espressione in sé è però scorretta, perché non è l'energia "del fotone" a essere quantizzata, ma l'energia in generale, e il fotone è il quanto di energia. Forse intendevano dire questo, ma non è una conclusione deducibile dagli spettri atomici, viene piuttosto dal problema del corpo nero; ciò che più probabilmente volevano dire è che gli atomi emettono solo fotoni a certe energie. I gruppi 2 e 4 non hanno risposto, mentre si riportano qui di seguito quanto scritto dagli altri tre gruppi:

GRUPPO 1: *"Si spiega col fenomeno dell'effetto fotoelettrico: l'atomo eccitato libera energia sottoforma di fotoni diversi a seconda dell'atomo dal quale provengono".*

GRUPPO 3: *"Quando passa corrente si crea una differenza di potenziale che dà energia all'atomo, nel quale quindi gli elettroni si eccitano caricandosi di energia e passano all'orbitale superiore per poi tornare al loro orbitale sottostante liberando energia sottoforma di fotoni che percepiamo come luce visibile. Si conserva perché una volta acquistata energia dalla corrente poi la libera con i fotoni".*

GRUPPO 5: *"Quando un atomo assorbe energia, assorbe a "pacchetti" necessari per aumentare lo stato quantico degli elettroni degli orbitali più esterni e questa energia sarà emessa dagli atomi sottoforma di fotoni".*

Come si vede, il gruppo 1 ha ripreso la propria risposta al processo di emissione della domanda del pre-test. Il gruppo 3 ha invece cercato di spiegare come funziona una lampada spettrale (il tubo a scarica); anche se rimane una certa ambiguità nell'uso del termine "orbitale", colgono comunque l'idea che sono le transizioni elettroniche, in particolare le diseccitazioni, a liberare energia sottoforma di fotoni. Anche il gruppo 5 collega l'emissione di fotoni alle transizioni elettroniche, pur rimanendo delle ambiguità nel linguaggio.

Domande 3 e 4

Nella seconda parte della scheda è stata prevista una fase più quantitativa: è stata fornita agli studenti la formula approssimativa di Bohr, $E = (-13.6eV)\frac{Z^2}{n^2}$ dove Z è il numero atomico e n il numero quantico principale, per il calcolo dell'energia dei livelli all'interno degli atomi idrogenoidi ed è stato richiesto loro di calcolare i primi 10 livelli dell'atomo di idrogeno e di porli su una scala di valori. Tutti i gruppi hanno calcolato correttamente i valori dell'energia dei livelli, non trascurando il segno negativo, ma tutti hanno avuto difficoltà nel porli su una scala di valori. Tutti i gruppi hanno cercato di creare o un grafico cartesiano (gruppi 1,3 e 5) o una sorta di istogramma (gruppi 2 e 4). In figura 4.20 sono mostrati i diagrammi-grafici proposti dai gruppi 1 e 3: si noti come abbiano unito tutti i punti trovati. Il gruppo 1, inoltre, non ha indicato cosa c'è sugli assi. Per quanto riguarda gli istogrammi realizzati dai gruppi 2 e 4, hanno usato il numero quantico principale come base delle



Figura 4.19: Ipotesi formulata dal gruppo 4 su come avviene l'eccitazione di un atomo con successiva emissione di fotone. Il fenomeno di eccitazione lo collegano a una differenza di potenziale posta ai due lati di un atomo. È come se avessero cercato di riportare a livello microscopico un circuito, dove l'atomo occupa il posto di una resistenza.

tacche, mentre non è chiaro cosa abbiano posto come loro altezza. Nella figura 4.21 è riportato solo quello del gruppo 2, perché il gruppo 4 l'ha parzialmente cancellato dopo aver cambiato idea su come rappresentarlo.

I gruppi 4 e 5, dopo aver chiesto aiuto ai docenti, hanno modificato il grafico avvicinandosi all'aspetto del diagramma dei livelli: il risultato è riportato in figura 4.22.

I risultati più interessanti per questa ricerca sono stati ottenuti tramite il quarto quesito:

4. Usate il diagramma appena disegnato per spiegare lo spettro dell'atomo di idrogeno che avete osservato.

A. Quali livelli sono coinvolti nella formazione delle righe? Designate le transizioni elettroniche corrispondenti, spiegando come avete proceduto.

B. Quale riga corrisponde a un salto energetico tra livelli più lontani tra loro? Quale corrisponde a un salto tra livelli più vicini? Perché?

Per fare quanto richiesto nel punto A, tutti i gruppi hanno calcolato l'energia dei fotoni corrispondenti alle lunghezze d'onda delle righe nel visibile dell'idrogeno (questi valori erano stati già dati loro con la scheda del laboratorio) utilizzando $E = h\nu$. A questo punto, quello che hanno cercato di fare tutti i gruppi è stato di associare tali valori alle energie dei livelli calcolate prima con la formula di Bohr con pari energia: questo modo di ragionare è proprio quello che è stato ritrovato nella ricerca di Ivanjek et al. [2015a]. Anche i gruppi che nella prima domanda avevano risposto correttamente su come avvenisse il processo di emissione da parte dell'atomo e che avevano parlato di salto energetico tra due livelli, non rispondono in maniera coerente alla domanda quantitativa e vanno alla ricerca di un singolo livello energetico da associare all'energia del fotone. Tutti i gruppi hanno quindi dichiarato la loro perplessità nel non riuscire a trovare le associazioni tra livelli e fotoni ai docenti, che

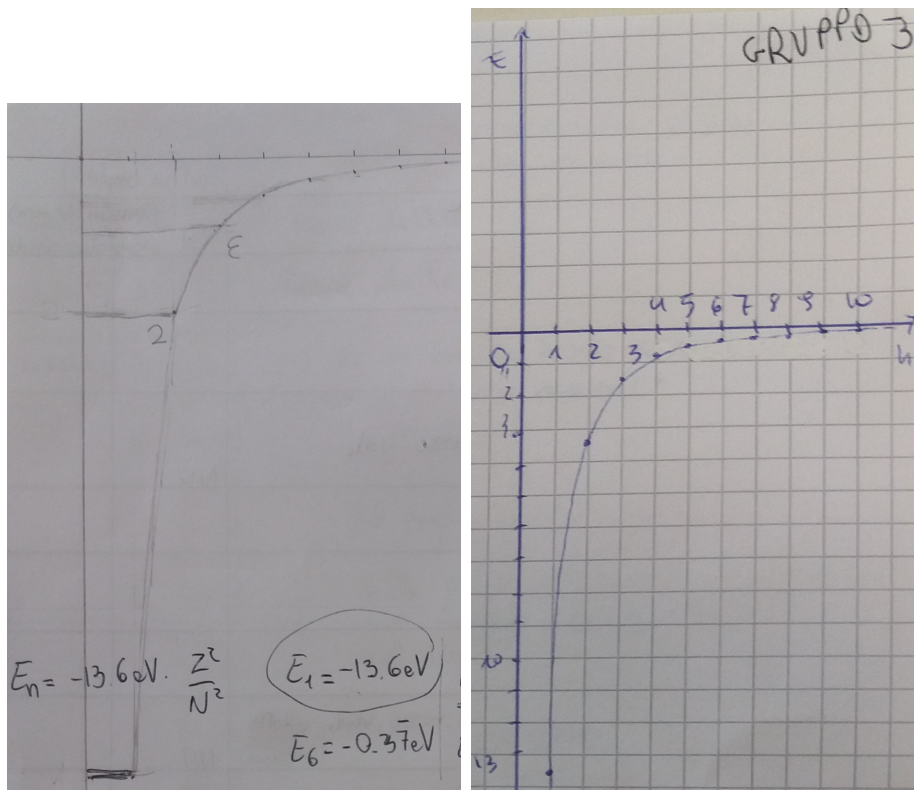


Figura 4.20: Diagrammi-grafici dei livelli proposti dai gruppi 1 e 3 risèttivamente a sinistra e a destra; si noti come abbiano unito i punti allo scopo di ottenere un grafico. Il gruppo 3, a differenza del gruppo 1, ha indicato chiaramente cosa ha posto sui grafici.

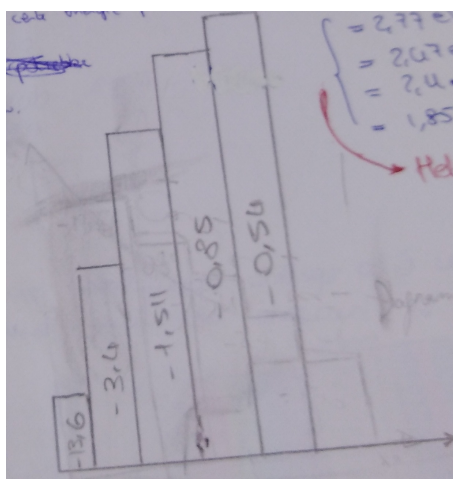


Figura 4.21: Istogramma proposto dal gruppo 2 come diagramma dei livelli energetici; hanno posto come base delle tacche i numeri quantici, mentre non è chiaro cosa rappresenti la loro altezza.

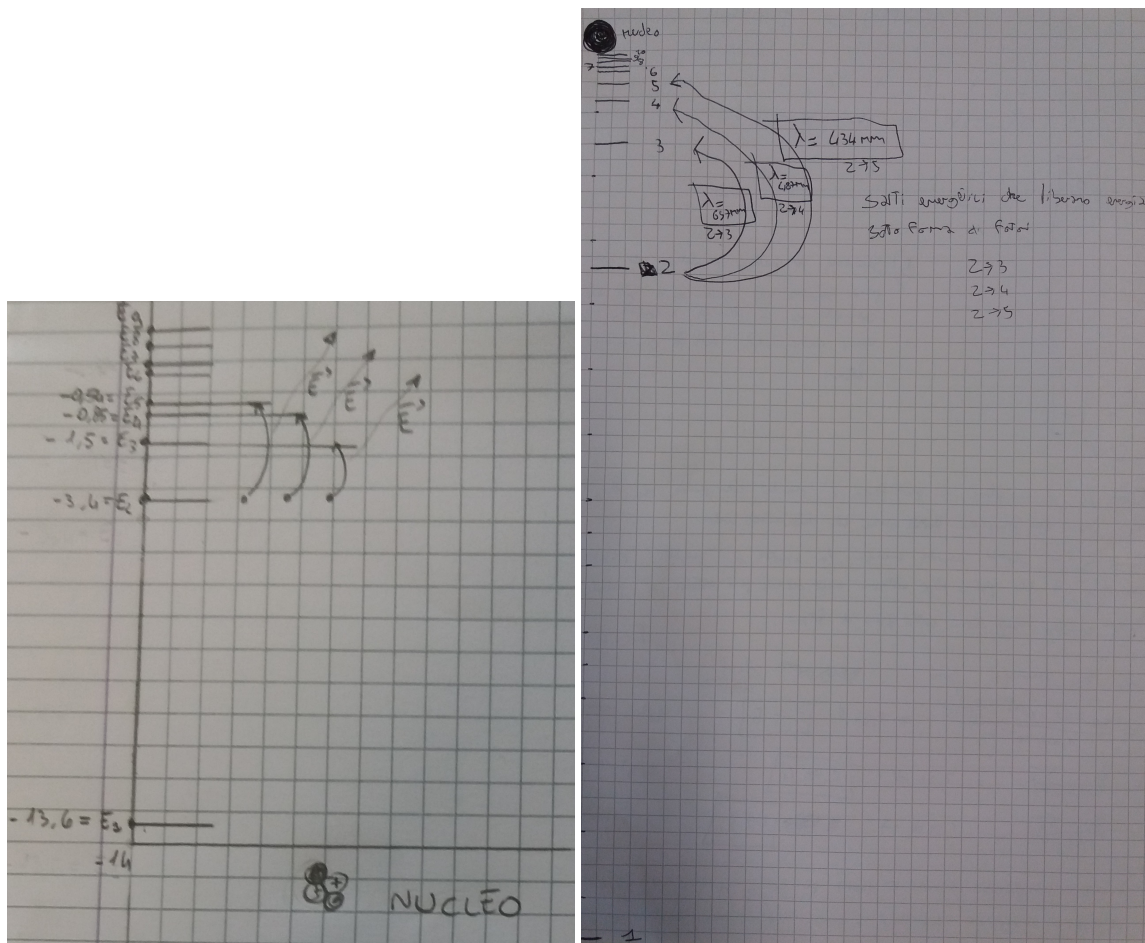


Figura 4.22: Seconda proposta sia del gruppo 4 che del gruppo 5 rispettivamente a sinistra e a destra. Qui i livelli energetici sono stati rappresentati con dei tratti. Si noti come il gruppo 4 abbia rappresentato il nucleo vicino al livello energetico corrispondente al numero quantico principale $n = 1$, mentre il gruppo 5 lo abbia posto verso il livello con n maggiore. Entrambi i gruppi hanno indicato le transizioni corrette corrispondenti alle righe spetrali osservate dell'idrogeno, ma entrambi hanno anche sbagliato il verso della diseccitazione.

Tabella 4.22: Nella seguente tabella sono riportate le transizioni tra i livelli riconosciute dai vari gruppi e quali righe dello spettro dell'idrogeno secondo gli studenti corrispondevano alla transizione tra livelli vicini e quale tra livelli lontani. Per mancanza di tempo nessun gruppo è riuscito a rispondere a tutte le domande in modo completo. I gruppi 2 e 3 hanno risposto in modo generico alla domanda del punto B, parlando in generale senza riferirsi alle righe osservate. Solo il gruppo 5 ha risposto in tema alla domanda su quale fosse la riga dell'idrogeno osservata corrispondente al salto energetico maggiore dell'elettrone.

GRUPPO	TRANSIZIONI COINVOLTE	SALTO TRA LIVELLI LONTANI	SALTO TRA LIVELLI PIÚ VICINI
1	$E_3 - E_2 \rightarrow \lambda = 657 \text{ nm}$: riga rossa $E_4 - E_2 \rightarrow \lambda = 487 \text{ nm}$: riga azzurra $E_5 - E_2 \rightarrow \lambda = 434 \text{ nm}$: riga blu	/	/
2	l'energia del fotone è la differenza di energia tra due livelli (non hanno esplicitato i livelli coinvolti)	tra i livelli 1 e 2	tra i livelli 4 e 5
3	$E_3 - E_2 =$ energia riga rossa	/	$E_{10} - E_9$
4	$E_2 - E_3 \rightarrow \lambda = 657 \text{ nm}$ $E_2 - E_4 \rightarrow \lambda = 487 \text{ nm}$ $E_2 - E_5 \rightarrow \lambda = 434 \text{ nm}$	/	/
5	$E_2 - E_3 \rightarrow \lambda = 657 \text{ nm}$ $E_2 - E_4 \rightarrow \lambda = 487 \text{ nm}$ $E_2 - E_5 \rightarrow \lambda = 434 \text{ nm}$	$E_2 - E_5$	/

hanno cercato di guidarli nelle riflessioni fatte nelle lezioni precedenti. Dopo l'input dei docenti gli studenti hanno quindi calcolato le differenze tra le energie dei livelli energetici, riuscendo a questo punto ad associare correttamente le energie dei fotoni con specifici salti energetici. I gruppi 1 e 3 indicano correttamente il verso del salto (es. $5 \rightarrow 3$), mentre i gruppi 4 e 5 scelgono il verso errato (es. $3 \rightarrow 5$), errore già riscontrato nelle domande precedenti. Il gruppo 2 invece non specifica il verso della transizione. I gruppi 4 e 5 hanno rappresentato anche il diagramma dei livelli energetici parzialmente corretto (in figura 4.22 è riportato quello del gruppo 4): entrambi però indicano le transizioni in emissione nel verso errato anche nel diagramma.

Per mancanza di tempo non tutti sono riusciti a rispondere al punto B. I gruppi 2 e 3 hanno risposto senza fare tutti i calcoli del punto precedente, di conseguenza la loro risposta è stata generica, basata sulla distanza dei livelli energetici calcolati nei punti precedenti. In particolare, nella discussione finale, il gruppo 3 confessa di aver perso tempo nel cercare la lunghezza d'onda del fotone emesso nel salto energetico maggiore: questo perché non avevano ben rappresentato il diagramma dei livelli. L'unico gruppo che ha risposto almeno parzialmente a questa domanda è stato il gruppo 5, che ha indicato la lunghezza d'onda 434 nm come quella corrispondente al salto energetico maggiore: la lunghezza d'onda è corretta, ma l'errore del verso

della transizione permane.

Dalla constatazione che tra i livelli energetici coinvolti nei salti dell'elettrone non rientrava il livello fondamentale, ha fatto sorgere l'interesse di alcuni alunni del gruppo 1 e 5 sul perché non avessero osservato le righe corrispondenti appunto alle transizioni con tale livello. Questo ha permesso loro di rendersi conto che lo spettro nella banda del visibile è solo una parte di quello totale e che, ad esempio, non avevano modo di osservare la radiazione nell'ultravioletto emessa dalla lampada a idrogeno, trovando la risposta alla domanda posta nel laboratorio sulla completezza dello spettro. Questa osservazione è stata poi ritrovata nelle risposte del post-test dei due studenti che hanno chiesto spiegazioni.

Un'idea errata che è emersa nei gruppi 1 e 5 è che confondono l'energia del fotone con l'intensità luminosa della riga nello spettro.

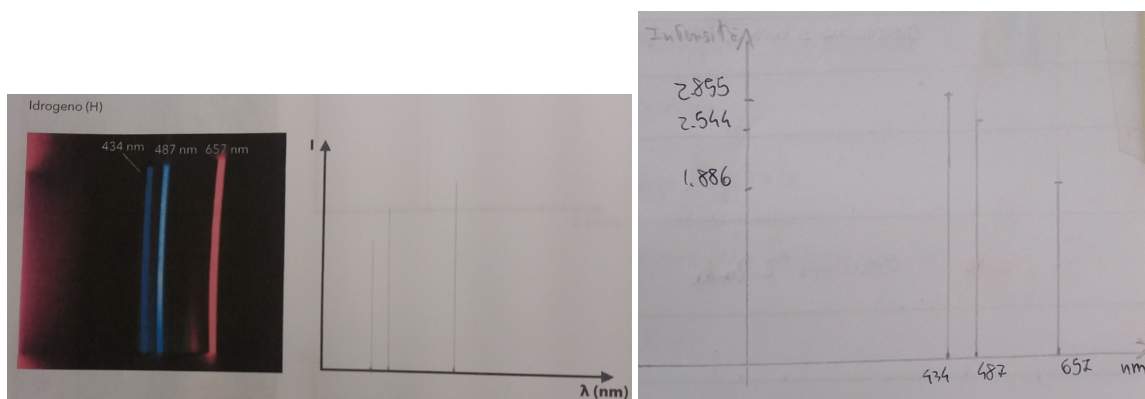


Figura 4.23: Nella figura a destra è presentata una seconda proposta allo spettro dell'idrogeno fatta dal gruppo 1, modificando l'altezza delle righe: non più in base all'intensità con cui appare la riga nello spettro, ma in base all'energia dei fotoni.

Domanda 5

Con la domanda 5 si è cercato di fare un confronto con la domanda posta nel pre-test:

5. Alla luce dell'esperienza fatta, come rispondereste alla domanda iniziale: a cosa potrebbe servire rilevare uno spettro? Spiegate e provate a immaginare un'applicazione pratica nella scienza o nella tecnologia.

Per mancanza di tempo questa domanda è stata saltata dai gruppi 2, 3 e 4. Il gruppo 1 e 5 hanno invece scritto rispettivamente:

GRUPPO 1: *"rilevare uno spettro serve ad individuare gli elementi presenti nei materiali attraverso l'individuazione dell'energia derivante dal salto elettronico attraverso i vari orbitali".*

GRUPPO 5: *"Studiare lo spettro prodotto da una sorgente può servire a individuare gli elementi coinvolti e i livelli energetici che sono responsabili dell'emissione dei fotoni".*

Visto che le risposte provengono principalmente dagli stessi gruppi che avevano risposto correttamente nel pre-test, in questo caso non è stato possibile verificare se c'è stato un miglioramento nella comprensione degli utilizzi dello spettro.

4.5 Griglia di osservazione

Come documentazione dell'atteggiamento individuale e delle dinamiche di gruppo che si sono verificate durante le varie lezioni, sono riportate di seguito le griglie di osservazione compilate dall'autrice di questa tesi. Nella tabella 4.23 sono mostrati i vari indicatori presi in considerazione; per ciascuno di essi vengono descritti quattro livelli diversi di attivazione e partecipazione, che crescono andando dal livello 1 al livello 4.

I valori per ciascun indicatore che sono stati dati ai gruppi sono riportati nella tabella 4.24. Per quanto riguarda i primi due indicatori, la partecipazione e l'attenzione di tutti è stata in media alta. Soprattutto nella lezione in laboratorio l'interesse di tutti era molto alto, tanto che i ragazzi non si sono resi conto che era suonata la campanella che indicava l'intervallo e qualcuno ha continuato a lavorare alla costruzione dello spettroscopio; anche nella ripresa nell'ora successiva, nel rientrare in laboratorio la docente ha trovato tutti gli studenti già nell'atto di lavorare. C'è stata una maggiore disattenzione invece nella lezione del post-laboratorio, a causa della verifica di inglese che avrebbero dovuto sostenere tra le due ore di lezione di fisica. Per quel che riguarda la collaborazione e la partecipazione, le più elevate si sono osservate tra i componenti del gruppo 1 e 3, anche se quest'ultimo non ha trovato accordo su alcune domande come per la rappresentazione degli spettri; nel gruppo 5 invece era principalmente un singolo studente (Michele) che conduceva il lavoro e rispondeva alle domande, sia per il poco interesse che mostravano gli altri due componenti, sia perché sembrava restio nel cercare collaborazione da parte degli altri; inoltre chiedevano aiuto al gruppo 4 durante il laboratorio perché non avevano fatto foto agli spettri. L'interazione con l'insegnante è sempre stata abbastanza scarsa: a parte per chiedere informazioni sulla procedura, non ponevano molte domande. Anche i riferimenti disciplinari sono in media scarsi e/o scorretti, come si può vedere dalle varie risposte mostrate sopra. Per quanto riguarda l'atteggiamento, sicuramente le schede li hanno guidati a seguire pratiche alquanto scientifiche.

Tra gli studenti che hanno partecipato meno all'intera attività c'è Matteo, del gruppo 2: già al pre-test individuale cercava aiuto dal compagno di banco, ma anche nelle attività successive non prestava attenzione a ciò che il gruppo faceva. Uno studente che invece ha mostrato elevato interesse e ha cercato di dare il massimo, ad esempio creando un "quaderno di laboratorio" molto curato, è stato Leonardo G. del gruppo 1. Queste considerazioni individuali sono state riportate perché, come vedremo, torneranno utili per l'interpretazione dei risultati del post-test.

4.6 Post-test

Per quanto riguarda il post test, nel complesso si possono notare dei miglioramenti oggettivi nella comprensione del processo di emissione di radiazione elettromagneti-

Tabella 4.23: Griglia di osservazione utilizzata nei tre giorni di lezione

	Indicatore	1	2	3	4
A	FOCALIZZAZIONE SUL COMPITO	completamente off-task	prevalentemente off-task	prevalentemente on-task	completamente on-task
B	PARTECIPAZIONE ATTIVA	la partecipazione globale è scarsa	la partecipazione globale è passiva (eseguono)	la partecipazione globale è a tratti attiva, a tratti passiva	la partecipazione globale è attiva
C	COLLABORAZIONE	lavorano individualmente senza cercare il confronto con gli altri	si confrontano poco, solo se costretti o per esigenze tecniche	si confrontano, ma fanno fatica a costruire idee in modo collaborativo	c'è scambio di idee, l'approccio è collaborativo
D	PARTECIPAZIONE DI TUTTI	Alcuni membri non contribuiscono (non sanno cosa stanno facendo gli altri)	Alcuni membri assumono una posizione direttiva, altri esecutiva	Tutti contribuiscono e collaborano, ma alcuni lavorano meno di altri o solo a tratti	Tutti i membri del gruppo contribuiscono e collaborano durante tutto il laboratorio
E	INTERAZIONE CON L'INSEGNANTE	Non cercano il confronto con l'insegnante e, se sollecitati, non rispondono	Tendenzialmente non cercano il confronto con l'insegnante, ma se sollecitati rispondono	Interagiscono con l'insegnante per avere conferme o per porre domande procedurali	Interagiscono costruttivamente con l'insegnante anche rispetto ai contenuti
F	ATTEGGIAMENTO	Cercano di "fare giusto" oppure cercano subito nel libro	Accettano di mettersi in gioco, ma sembrano a disagio nel non avere indicazioni "direttive"	Attivano alcune pratiche scientifiche (es. pianificare l'indagine, trovare un collegamento con la teoria, argomentare)	Sono autonomi e attivano le pratiche scientifiche corrette secondo le necessità
G	PORRE DOMANDE	Non pongono domande	Pongono domande solo al fine di completare il compito assegnato	Pongono domande appropriate, ma principalmente procedurali	Pongono domande al fine di comprendere i contenuti
H	RIFERIMENTI DISCIPLINARI	Nel discorso non emergono riferimenti disciplinari	I riferimenti disciplinari sono rari e/o scorretti	Nel discorso emergono riferimenti disciplinari, ma con qualche incertezza	Il discorso è ricco di riferimenti disciplinari

Tabella 4.24: Nella seguente tabella sono riportati i valori delle tre griglie completate nelle tre giornate di lezione. Le lettere della prima colonna fanno riferimento agli indicatori della tabella sopra riportata 4.23. Legenda: *PT*= pre-test, *L*= laboratorio, *PL*= post-laboratorio, *NP*= non pertinente. Manca la colonna del pre-test del gruppo 5, perché si è formato solo dalla seconda lezione.

GRUPPO	1			2			3			4			5		
	PT	L	PL	PT	L	PL	PT	L	PL	PT	L	PL	PT	L	PL
A	4	4	3	3	3	2	4	4	4	3	3	3	/	3	2
B	4	4	3	3	4	2	4	4	3	3	4	3	/	4	2
C	4	4	4	2	2	2	3	4	4	2	3	3	/	2	2
D	4	3	3	3	2	2	3	4	4	3	3	2	/	1	1
E	1	3	4	1	2	2	1	3	3	1	2	2	/	2	3
F	NP	3	3	NP	3	2	NP	3	2	NP	3	2	/	3	3
G	1	3	4	1	3	3	1	3	3	1	3	3	/	2	2
H	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	/	3	3

ca da parte dell'atomo e nella riproduzione del diagramma dei livelli. Sono solo 6 gli studenti che sembrano non aver ancora superato importanti concezioni errate, come quella di associare l'energia di un livello all'energia del fotone. Questi alunni sono però tra quelli che hanno collaborato meno nei lavori di gruppo e che tendevano a distrarsi. Pervengono ancora difficoltà nell'individuazione delle transizioni che producono fotoni più energetici e meno energetici e questo sottolinea l'importanza di lasciare più tempo alla riflessione su questo punto. Sulla domanda di come rilevare uno spettro quasi tutti hanno menzionato lo spettroscopio e molti di loro hanno descritto la sua composizione oltre che quella delle lampade spettrali osservate in laboratorio. Alcuni studenti, come Michele e Giovanni, hanno poi arricchito le loro risposte aggiungendo osservazioni apprese nel post-laboratorio, in particolare il fatto che lo spettro che hanno osservato è solo una porzione di quello totale perché altre righe prodotte cadono in bande diverse da quella del visibile.

Domanda 1

La prima domanda è stata posta per verificare la capacità di riprodurre il diagramma dei livelli mostrato in classe e per vedere quanti trascurassero il segno negativo dei valori dell'energia:

1. Disegna il diagramma dei livelli energetici dell'atomo di idrogeno per i primi 5 livelli, calcolando i valori numerici in eV.

A differenza delle risposte del post-laboratorio, questa volta tutta la classe è stata in grado di disegnare il diagramma dei livelli in maniera corretta, a parte Niccolò e Riccardo che hanno sbagliato in partenza la formula di Bohr nel calcolo delle energie dei livelli e Rachele, che ha invece rappresentato il piano cartesiano ponendo in ordinata le energie e in ascissa le lunghezze d'onda: ha fatto quindi confusione tra il diagramma dei livelli e lo spettro. Tutti hanno avuto anche l'accortezza di mettere il segno negativo alle energie, a parte Giacomo che a volte non l'ha indicato e Sofia che invece non l'ha messo già a partire dalla formula di partenza.

Domanda 2

Come secondo quesito si è variata parzialmente la domanda 4 del post-laboratorio, per verificare che gli studenti avessero compreso che le transizioni avvengono per salti energetici tra due livelli e che maggiore è il salto, maggiore è l'energia del fotone emesso:

2. Rappresenta sul diagramma le transizioni elettroniche che, tra quelle possibili considerando questi 5 livelli, corrispondono alle emissioni del fotone:

A. con più energia

B. con meno energia.

In questo caso si sono riscontrate delle difficoltà: solo 7 studenti hanno individuato in modo corretto i livelli dell'atomo coinvolti nelle transizioni corrispondenti alle emissioni dei fotoni più energetici e meno energetici. Di seguito sono riportati gli errori commessi:

1. quattro studenti hanno uguagliato l'energia dei fotoni all'energia dei livelli, piuttosto che alla differenza di energia tra due livelli
2. tre studenti hanno preso in considerazione solo le righe della serie di Lyman e quindi solo le transizioni che coinvolgevano lo stato fondamentale (hanno quindi individuato correttamente la transizione più energetica)
3. tre studenti hanno considerato solo le transizioni tra livelli consecutivi (in questo caso hanno quindi selezionato correttamente la transizione meno energetica)
4. una studentessa ha considerato tra i livelli quello a energia nulla, corrispondente all'atomo ionizzato
5. due studenti non hanno risposto

Per quanto riguarda il primo errore, è chiaro che non tutti hanno compreso il punto che si è cercato di sottolineare tanto nel post-laboratorio, probabilmente a causa della loro bassa partecipazione al lavoro di gruppo: infatti i quattro studenti in questione appartengono a quattro gruppi differenti (tra cui Matteo del gruppo 2 citato tra i commenti della griglia di osservazione), ma nessuno è del gruppo 1, dove invece tutti hanno partecipato attivamente. Una dei quattro studenti è Rachele, il cui errore non è segnato in tabella 4.25 perché ha calcolato alcune lunghezze d'onda, ma non rispondendo alla domanda.

Sulla seconda e terza tipologia d'errore bisognerebbe indagare in modo più approfondito sulla causa che li ha portati a fare questa selezione. Quello che si nota però è che tra i 6 studenti che hanno fatto questi errori, quattro appartengono ai gruppi 2 e 3 che non erano riusciti a concludere la scheda del post-laboratorio, in particolare non avevano avuto tempo per fare i calcoli richiesti nella domanda 4, che era simile a quella riproposta nel post-test. Per quanto riguarda l'errore di Angelica si potrebbe considerare dovuta a una distrazione nella lettura della domanda, perché le risposte successive sono coerenti e corrette con questa sua scelta.

Sul verso della transizione correlata all'emissione, hanno sbagliato o non l'hanno rappresentato sul diagramma in 8 studenti; di questi, tre hanno però scritto le transizioni in formule in modo corretto. Tra questi ultimi rientra Michele che nel suo pre-test aveva sbagliato il verso delle transizioni, mentre nel post-test ha scritto nel verso corretto i calcoli, anche se poi non le ha rappresentate anche nel diagramma. Giovanni, invece, rendendosi conto che scrivendo nel verso sbagliato il valore dell'energia era negativo, per sopperire al problema ha messo il valore assoluto alla differenza delle energie dei livelli. Tuttavia, non è possibile fare riferimento a misconcezioni riportate in letteratura per questa domanda.

Inoltre ci sono stati due studenti, Niccolò e Sofia, che non hanno risposto alla domanda; uno dei due studenti ha però calcolato correttamente alcune lunghezze d'onda di quattro transizioni che però non erano tra quelle richieste nella traccia.

Domanda 3

Nella terza domanda si è cercato non solo di verificare che ricordassero la relazione del fotone tra l'energia e la lunghezza d'onda, ma anche che avessero chiaro che un elemento chimico può emettere fotoni appartenenti a bande differenti a quella del visibile:

3. Calcola le lunghezze d'onda dei fotoni corrispondenti a queste transizioni. In quale regione dello spettro elettromagnetico si trovano?

Con questa domanda si è potuto verificare anche se gli studenti avessero un'idea degli ordini di grandezza delle lunghezze d'onda delle varie regioni dello spettro elettromagnetico.

Dieci studenti hanno calcolato correttamente o comunque coerentemente le lunghezze d'onda delle transizioni scelte nel punto precedente. Escludendo i quattro studenti che non hanno considerato la differenza tra due livelli e i due che non hanno risposto al punto precedente, gli errori fatti da due studentesse (Diletta e Aurora) sono solo a livello di calcoli numerici, ma le formule erano scritte in modo corretto. Elisabetta invece ha completamente saltato questo punto, forse perché non ricordava la formula da usare. Gli errori di Enrico sono stati quelli di scambiare il ruolo del fotone più energetico e quello meno energetico e di sbagliare la scrittura in notazione scientifica di uno dei valori, avendo dimenticato uno zero. Tra quelli che hanno uguagliato l'energia del fotone all'energia di un livello, c'è chi ha comunque applicato il valore dell'energia sbagliato alla formula corretta del calcolo della lunghezza d'onda; in questo modo due studenti (Rachele e Matteo) hanno trovato valori negativi alle lunghezze d'onda.

Solo 8 studenti sono riusciti ad associare in maniera coerente le lunghezze d'onda trovate con la banda spettrale corrispondente. Tra questi è stato considerato anche Enrico, sebbene abbia chiamato la banda infrarossa con il termine "ultrarossa". Incoerente è la risposta di Michele che inserisce il fotone della transizione $E_5 - E_4$ nella banda dei raggi γ invece che in quella dell'infrarosso (IR): sembra confondere l'elevata lunghezza d'onda con l'elevata energia, anche se in realtà dai calcoli aveva ottenuto che questa transizione era meno energetica. Michele e Riccardo sono

comunque gli unici che fanno l'errore di associare la lunghezza d'onda più lunga all'energia più alta.

Domanda 4

Con la quarta domanda si è indagato sulla comprensione qualitativa del fenomeno e del funzionamento dello spettroscopio e risulta quella fondamentale per il confronto con i risultati del pre-test individuale:

4. Che tipo di spettro produrrà quest'atomo? Descrivilo a parole collegandolo alla struttura dell'atomo e spiega come potresti fare per rilevarlo.

Tutti (escludendo i tre studenti che non hanno risposto a questa domanda) hanno riconosciuto che gli spettri atomici sono a righe, ma la terminologia utilizzata non è sempre stata corretta. Solo 9 studenti hanno scritto esplicitamente "spettro a righe" (ma nel descriverlo hanno comunque parlato di bande o fasce), altri tre l'hanno definito discontinuo, mentre tutti gli altri hanno parlato soltanto in termini di bande o fasce. Marcello e Valentina invece fanno un uso improprio del termine "incompleto" per indicare che lo spettro è discreto. Sofia e Angelica ripetono l'errore fatto in laboratorio dal gruppo 4 che consisteva nel descrivere le zone buie dello spettro come bande scure. Angelica scrive una cosa interessante, anche se non completamente corretta: "*Questo atomo produrrà uno spettro non continuo poiché emette solamente determinate lunghezze d'onda minori di $9.11 \times 10^{-8} \text{ m}$* ". L'errore sta nello scrivere "minori di" poiché la lunghezza d'onda in modo inversamente proporzionale all'energia, ma il suo ragionamento è corretto, perché la λ che ha indicato è quella corrispondente alla ionizzazione dell'atomo di idrogeno, che è appunto la più energetica. Un'altra osservazione corretta fatta sia da Giovanni che da Michele è che ciò che si vede attraverso lo spettroscopio da loro usato corrisponde alla serie di Balmer che cade nella banda del visibile, mentre altre righe che costituiscono comunque lo spettro dell'idrogeno non sono osservabili perché cadono in altre bande; questi due studenti infatti avevano espresso la loro perplessità alle docenti durante il post-laboratorio nello scoprire che le righe osservate corrispondevano a transizioni tra due livelli eccitati e non con il livello fondamentale, come loro credevano, riuscendo così a superare una loro "concezione a priori".

Escludendo i tre studenti che non hanno risposto, tutti relazionano l'emissione dei fotoni all'atomo in maniera più o meno corretta. In particolare, sono in 10 a parlare esplicitamente di emissione di fotoni con specifiche frequenze nel momento in cui avviene un salto dell'elettrone tra due livelli energetici all'interno dell'atomo. Per quanto riguarda la spiegazione dell'emissione di radiazione elettromagnetica da parte dell'atomo c'è quindi stato un netto miglioramento rispetto al pre-test. Perché tutti raggiungano questa consapevolezza, con una rappresentazione anche visiva, si potrebbe in un futuro lavoro mostrare la simulazione dell'emissione di luce da parte di una lampadina al neon, con programmi come quello presente nel sito indicato in nota¹.

Sulla modalità di rilevazione di uno spettro, solo tre studenti non hanno almeno

¹<https://phet.colorado.edu/en/simulation/discharge-lamps>

menzionato lo spettroscopio; di questi, Niccolò e Matteo non hanno scritto nulla, mentre Aurora parla di rilevamento di corrente di elettroni tramite un reticolo di diffrazione, risposta che lascia un pò perplessi perché ha risposto in maniera quasi corretta a tutte le altre domande. Aurora individua quindi correttamente l'elemento fondamentale dello spettroscopio, pur senza nominare il nome dello strumento, ma poi parla di una "corrente di elettroni" il cui significato rimane oscuro in quanto non sono mai state fatte misure elettroniche in questa esperienza. Può darsi che Aurora faccia confusione con il funzionamento del tubo a scarica, oppure che confonda elettroni e fotoni, o altro ancora: con i dati a disposizione non è possibile interpretare in modo più approfondito questa risposta. Tra quelli che hanno invece risposto correttamente, c'è chi ha parlato dell'esperienza in laboratorio, descrivendo anche il funzionamento delle lampade spettrali che hanno osservato.

In tabella 4.29 sono riportate le valutazioni sul post-test per ciascuno studente date dalla docente Fontolan che si basano su criteri differenti da quelli da noi utilizzati, riportati nella tabella 4.28. Tenendo conto che i punteggi sono in ventesimi, la sufficienza si può considerare raggiunta con i punteggi superiori o uguali a 12. Secondo la docente, 14 ragazzi su 20 hanno raggiunto la sufficienza, di cui la metà ha preso un punteggio dal 16 in su e coincidono con gli studenti che sono stati riconosciuti come i più attivi in tutte le attività svolte. Le sei insufficienze gravi appartengono ai ragazzi o che hanno cercato di associare le energie dei fotoni alle energie di singoli livelli o che non hanno risposto a buona parte delle domande.

Tabella 4.25: In questa tabella sono presentate le risposte alle domande 1 e 2 del post-test. Dove è segnato "ok" si intende che la risposta data dallo studente è corretta. A e B si riferiscono alle due richieste della domanda 2, quindi indicano rispettivamente la differenza di energia calcolata per la transizione più energetica e quella meno energetica, nell'ordine calcolato dagli studenti.

STUDENTI(GRUPPO)	DOMANDA 1			DOMANDA 2	
	CALCOLO DEI LIVELLI	SEGNO AI LIVELLI	NEGATIVO	VERSO TRANSIZIONE- NI (nel grafico)	A B
Angelica (I)	ok		ok	ok	$E_\infty - E_1$ $E_\infty - E_5$
Giacomo(I)	ok	non sempre presente		ok	$E_5 - E_1$ $E_5 - E_4$
Giovanni(I)	ok		ok	entrambi i versi	$E_1 - E_5$ $E_4 - E_5$
Leonardo(I)	ok		ok	verso errato	$E_1 - E_5$ $E_4 - E_5$
Niccolò(II)	formula errata		ok	ok	
Matteo(II)	ok		ok	ok	livello n=5 $E_2 - E_1$ $E_5 - E_4$
Stefano(II)	ok		ok	verso errato	$E_2 - E_1$ $E_5 - E_4$
Marcello(II)	ok		ok	ok	$E_2 - E_1$ $E_5 - E_4$
Enrico(III)	ok		ok	ok	$E_5 - E_1$ $E_5 - E_4$
Rachele(III)	diagramma errato		ok	non segnate	
Elisabetta(III)	ok		ok	ok	$E_5 - E_1$ $E_2 - E_1$
Diletta(III)	ok		ok	ok	$E_5 - E_1$ $E_2 - E_1$
Valentina(III)	ok		ok	entrambi i versi	$E_5 - E_1$ $E_5 - E_4$
Aurora(IV)	ok		ok	ok	$E_5 - E_1$ $E_5 - E_4$
Maria V. (IV)	ok		ok	ok	$E_5 - E_1$ $E_2 - E_1$
Sofia(IV)	ok		errato	non segnato	
Adele(IV)	ok		ok	ok	livello n=infitto $E_5 - E_4$
Michele(V)	ok		ok	non segnato	$E_5 - E_4$
Riccardo(V)	sbagliato i calcoli		ok	verso errato	livello n=1 $E_5 - E_4$
Leonardo B. (V)	ok		ok	ok	$E_2 - E_1$ $E_5 - E_4$

Tabella 4.26: Nella seguente tabella sono mostrate in modo sintetico le risposte degli studenti alle domande 3 e 4 del post-test; A e B si riferiscono alle omonime richieste della domanda 2. Affianco ai nomi sono indicati i gruppi di appartenenza nelle lezioni precedenti. IR=infrarosso, UV=ultravioletto.

STUDENTI(GRUPPO)	DOMANDA 3			DOMANDA 4			
	$\lambda(A)$ [m]	$\lambda(B)$ [m]	BANDA(A)	BANDA(B)	TIPOLOGIA SPETTRO	INTERPRETAZIONE	STRUMENTAZIONE
Angelica (I)	9.11×10^{-8} m	2.28×10^{-6}	visibile	visibile	non continuo, con bande di colori diversi alterate a bande scure, con $\lambda < 9.11 \times 10^{-8}$	rappresentano i possibili valori di energia emessa dall'atomo	spettroscopio che cattura le onde emesse dall'atomo
Giacomo(I)	9.48×10^{-8}	4.05×10^{-6}	UV	IR	a righe, formato da righe chiare di vario colore separate	salto dell'elettrone da orbitale instabile a uno più stabile	spettroscopio a reticolo di diffrazione
Giovanni(I)	949×10^{-10}	4.00×10^{-6}	UV	UV	non continuo, con alcune bande chiare nel visibile, ma ce ne sono anche alcune che non cadono nel visibile perché troppo (o troppo poco) energetiche incomplete	il salto dell'elettrone tra orbitali produce fotoni solo di determinate energie e quindi frequenze	spettroscopio a reticolo di diffrazione
Leonardo(I)	9.5×10^{-8}	4.00×10^{-6}	UV	IR		l'energia che acquisisce l'atomo la riemette sotto forma di onda e.m. quando l'elettrone torna allo stato fondamentale	spettroscopio a reticolo di diffrazione
Niccolò(II)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Matteo(II)	-9.11×10^{-8}	-2.30×10^{-6}	UV	IR	a fasce di colore molto sottili	rispetta i livelli energetici dell'atomo di Bohr	spettroscopio
Stefano(II)	1.21×10^{-7}	4.05×10^{-6}	UV	IR	discontinuo, visibili solo determinate fasce cromatiche		spettroscopio a reticolo di diffrazione
Marcello(II)	1.2×10^{-7}	4.00×10^{-6}	visibile	IR	a righe, mostra solo righe chiare	un'insieme di atomi produce onde e.m.	spettroscopio o lampade spettrali
Enrico(III)	4.00×10^{-6}	94×10^{-8}	ultrarossi	UV	a righe (è continuo per i solidi)	gas a bassa pressione a cui viene applicata una differenza di potenziale: l'atomo eccitato emette quando torna allo stato fondamentale	spettrometro
Rachele(III)	✓	✓	✓	✓			
Elisabetta(III)	✓	✓	✓	✓	a righe, che compaiono nel visibile	il salto energetico dell'elettrone assume solo valori discreti	spettroscopio a reticolo di diffrazione
Diletta(III)	9.48×10^{-8}	1.21×10^{-7}	visibile	visibile	a righe, non continuo	l'energia degli elettroni che ruotano intorno al nucleo è quantizzata, allora lo è anche quella rilasciata nel salto da un orbitale all'altro	spettroscopio (non devono essere presenti altre sorgenti di luce)
Valentina(III)	9.48×10^{-8}	4.00×10^{-6}	raggi x	IR	non completo, a bande distinte	l'atomo di idrogeno emette energie e.m. alle frequenze di due colori	spettrometro

Tabella 4.27: Come in tabella 4.26

DOMANDA 3				DOMANDA 4			
STUDENTI(GRUPPO)	$\lambda(A)$ [m]	$\lambda(B)$ [m]	BANDA(A)	BANDA(B)	TIPOLOGIA SPETTRO	INTERPRETAZIONE	STRUMENTAZIONE
Aurora(IV)	9.5×10^{-8}	1.11×10^{-6}	raggi x	IR	a righe, sia in emissione che in assorbimento	emesse solo frequenze corrispondenti a salti energetici che l'elettrone compie da un orbitale inferiore a uno superiore	rilevamento di corrente di elettroni con reticolo di diffrazione
Maria V.(IV)	9.49×10^{-8}	1.21×10^{-7}	UV	UV	a righe: successione di righe su sfondo nero	fotoni emessi quando l'elettrone passa da un livello energetico maggiore a uno inferiore; il gas si può eccitare ponendolo a bassa pressione e applicando differenza di potenziale per transizione elettronica da un'orbita all'altra	reticolo di diffrazione
Sofia(IV)	\	\	\	\	non a fasce continue: fasce nere alternate a fasce colorate	per transizione elettronica da un'orbita all'altra	spettroscopio a reticolo di diffrazione
Adele(IV)	\	0.911×10^{-7}	\	UV	\	\	spettroscopio che scompone la luce nel visibile
Michele(V)	9.48×10^{-8}	4.00×10^{-6}	UV	raggi γ	a righe, fotoni solo a certe λ	per la struttura dell'atomo di bohr: l'energia dell'atomo è quantizzata e i passaggi dell'elettrone da uno stato più energetico a uno meno energetico non sono continui; sono eventi esterni che forniscono energia per eccitare l'elettrone	spettroscopio a reticolo di diffrazione, con cui osservo solo la serie di Balmer che cade nel visibile
Riccardo(V) Leonardo B.(V)	9.11×10^{-8} 2.21×10^{-7}	4.55×10^{-7} 4.05×10^{-6}	IR UV	visibile IR	a fasce verticali a righe di emissione	la struttura dell'atomo di Bohr prevede orbitali quantizzati che hanno certe energie; si osservano le frequenze emesse dal gas a bassa pressione a cui è applicata una differenza di potenziale	spettroscopio dispositivo con reticolo di diffrazione e fenditura

Tabella 4.28: In questa tabella sono presentati i parametri usati dalla professoressa Fontolan per la valutazione dei post-test degli studenti. L'ultima colonna indica il punteggio corrispondente a ciascun descrittore.

	INDICATORE	DESCRITTORE	P
A	Analizzare Esaminare la situazione problematica proposta e individuando gli aspetti significativi del fenomeno e formulando le ipotesi esplicative attraverso modelli o analogie o leggi	Coglie solo alcuni aspetti non significativi	1
		Coglie alcuni degli aspetti significativi	2
		Coglie gli aspetti significativi fondamentali e formula le ipotesi esplicative con alcune imprecisioni	3
		Coglie gli aspetti significativi e formula le relative ipotesi esplicative	4
		Coglie tutti gli aspetti e formula le ipotesi esplicative corrette	5
B	Sviluppare il processo risolutivo Formalizzare situazioni problematiche e applicare i concetti e i metodi matematici e gli strumenti disciplinari rilevanti per la loro risoluzione, eseguendo i calcoli necessari	Non sviluppa alcun processo o sviluppa il processo ma commette gravi errori	1
		Formalizza qualche situazione fondamentale ma commette diversi errori	2
		Formalizza le situazioni problematiche in modo parziale. Utilizza in modo impreciso il formalismo matematico giungendo a risultati solo in parte corretti	3
		Formalizza le situazioni problematiche fondamentali applicando senza errori rilevanti concetti e metodi matematico-fisici	4
		Formalizza la maggior parte delle situazioni problematiche senza errori oppure formalizza tutte le situazioni problematiche con qualche imprecisione	5
		Formalizza le situazioni problematiche in modo completo. Applica correttamente il formalismo matematico-fisico giungendo a risultati corretti	6
C	Interpretare, rappresentare, elaborare i dati Interpretare e/o elaborare i dati proposti e/o ricavati, anche di natura sperimentale, verificandone la pertinenza al modello scelto. Rappresentare e collegare i dati adoperando i necessari codici grafico-simbolici	Non interpreta, non rappresenta, non elabora alcun dato o, se lo interpreta, lo elabora in modo parziale e frammentario, senza individuare il modello opportuno	1
		Interpreta in modo parzialmente corretto i dati, elabora con imprecisioni, fornendo un modello parzialmente corretto	2
		Interpreta correttamente i dati essenziali, elabora con qualche imprecisione, fornendo un modello sostanzialmente corretto	3
		Interpreta correttamente i dati, elabora in modo completo, fornendo un modello adeguato	4
		Interpreta in modo pienamente corretto i dati, elabora in maniera completa e precisa, fornendo il modello più pertinente	5
D	Argomentare Descrivere il processo risolutivo adottato, la strategia risolutiva e i passaggi fondamentali. Comunicare i risultati ottenuti valutandone la coerenza con la situazione problematica proposta e utilizzando i linguaggi specifici disciplinari	Non argomenta o argomenta in modo non coerente o errato	1
		Argomenta in modo parziale o con un linguaggio non sempre appropriato	2
		Argomenta in modo abbastanza completo anche se non approfondito e con un linguaggio sostanzialmente corretto	3
		Argomenta in modo chiaro, completo e con linguaggio specifico	4

Tabella 4.29: Valutazioni date dalla professoressa Fontolan per ciascuno studente in base alla tabella 4.28. Nell'ultima colonna è indicato il voto in ventesimi.

VALUTAZIONI DELLA PROFESSORESSA					
STUDENTE (GRUPPO)	A	B	C	D	PUNTEGGIO FINALE /20
Angelica (I)	3	4	3	3	13
Giacomo (I)	5	5	4	3	17
Leonardo G. (I)	5	6	4	3	18
Giovanni (I)	4	6	4	3	17
Marcello (II)	3	4	3	2	12
Niccolò (II)	2	2	2	2	8
Stefano (II)	3	3	3	2	11
Matteo (II)	2	3	2	2	9
Enrico (III)	3	6	4	2	15
Rachele (III)	3	3	2	3	11
Elisabetta (III)	3	3	3	3	12
Diletta (III)	5	5	3	3	16
Valentina (III)	5	5	4	2	16
Aurora (IV)	5	6	4	3	18
Maria V. (IV)	4	4	3	3	14
Sofia (IV)	4	3	2	3	12
Adele (IV)	2	3	2	2	9
Michele (V)	5	5	4	4	18
Riccardo (V)	2	2	2	2	8
Leonardo B, (V)	3	5	3	2	13

5. Discussione e conclusioni

Questo elaborato di tesi propone un progetto didattico, che è stato realizzato in una classe V Liceo Scientifico, su come trattare l'interpretazione degli spettri atomici, uno dei temi imprescindibili del curriculum di Fisica Quantistica, in chiave *inquiry based learning* (IBL). L'obiettivo principale della tesi era quello di verificare che un approccio laboratoriale consentisse agli studenti di comprendere in maniera più appropriata temi complessi come quelli presentati dalla Fisica Moderna, sviluppando anche competenze disciplinari specifiche, come richiesto dalla riforma Gelmini (D.M. n.211,2010). Per quanto la maggior parte dei ricercatori della didattica della fisica sia stata favorevole al riammodernamento apportato da tale riforma con l'introduzione della Fisica del XX secolo, rimane la consapevolezza delle difficoltà che presenta tale disciplina. La Fisica quantistica risulta infatti alquanto astratta e difficilmente comprensibile, poiché la sua interpretazione vale solo nel mondo microscopico, non permettendo visualizzazioni dei fenomeni, spesso contro-intuitivi, in una maniera non approssimata. In particolare si riconosce come sorgente di molte difficoltà il conflitto che nasce tra la visione classica e quella quantistica. Però, come ad esempio ha dimostrato lo studio di Ke et al. [2005], a fare la differenza nel processo di apprendimento di tale disciplina non è tanto il confronto tra la visione classica e quella quantistica, che sorge spontaneo nella mente del ragazzo, essendo la prima parte integrante della sua esperienza quotidiana, ma piuttosto la quantità di sperimentazione dei fenomeni quantistici che si propone agli studenti. Anche per quanto riguarda nello specifico l'interpretazione degli spettri atomici, sono molti gli studi che hanno cercato le difficoltà di apprendimento e le misconcezioni con cui si approcciano gli studenti a tale argomento, come il lavoro di Ivanjek et al. [2015a], che è stato preso in particolare considerazione nella progettazione del percorso didattico proposto in questa tesi.

In linea con la filosofia di pensiero di Ke et al. [2005] per quanto riguarda la centralità del laboratorio nella didattica, rientra la metodologia IBL promossa anche dal progetto COLLABORA, del quale fa parte la proposta illustrata in questa tesi. L'elemento centrale del nostro progetto didattico è stato quindi un'attività laboratoriale in cui gli studenti si sono cimentati nella costruzione di uno spettroscopio che hanno poi potuto usare per osservare individualmente gli spettri di sorgenti diverse. Attraverso l'uso di schede guida per l'esperienza laboratoriale, si sono condotti gli studenti a raggiungere in modo attivo la comprensione fisica del fenomeno.

I risultati dei pre-test hanno confermato alcune difficoltà riconosciute in letteratura; in particolare sono state individuate diverse idee confuse o incomplete sugli argomenti studiati in precedenza [Besson and Malgieri, 2018], oltre che una difficoltà nella terminologia [Ivanjek et al., 2015a]. Per quanto riguarda la rappresentazione

dell'atomo, come previsto dalla letteratura (es. Krijtenburg-Lewerissa et al. [2017]), quasi tutti gli studenti creano un ibrido di modelli atomici, in particolare tra quello di Bohr e quello di Schrodinger. Inoltre il processo di emissione da parte dell'atomo è stato associato, in maniera parzialmente corretta, a un salto dell'elettrone tra livelli energetici solo da 4 studenti su 17.

Per i quattro obiettivi di apprendimento che ci si era posti nella progettazione del percorso (paragrafo 3.2), verificati tramite il post-test, si è riscontrato che:

- l'85 % della classe è stata in grado di rappresentare con un diagramma la struttura dei livelli energetici dell'atomo di idrogeno, anche quantitativamente;
- il 70 % degli studenti è riuscita a collegare qualitativamente le transizioni tra livelli energetici all'emissione di un fotone, mentre solo il 25 % ha collegato in modo corretto anche quantitativamente le due grandezze;
- l'85 % ha descritto le caratteristiche fondamentali dello spettro di emissione di un atomo (anche se è presente una carenza nella terminologia), interpretandolo in termini della struttura energetica dell'atomo stesso;
- il 55 % dei ragazzi sa descrivere (almeno parzialmente) il funzionamento di uno spettroscopio, a cui si aggiunge un 25 % che lo riconosce come strumento per osservare spettri.

Dal confronto tra pre- e post-test, in particolare sul processo di emissione di fotoni da parte dell'atomo, si può quindi notare un notevole miglioramento, per quanto restino ancora delle incomprensioni a livello quantitativo. Infatti compaiono ancora delle carenze nell'associazione dei fotoni più energetici e meno energetici alle transizioni degli elettroni tra livelli energetici diversi, una volta dato il numero di livelli disponibili. Questa persistente difficoltà potrebbe essere legata al tempo a disposizione nella fase di post-test che non ha permesso a tutti i gruppi di riflettere sulle domande finali della scheda del post-laboratorio. Ciò che è risultato efficace nel processo di apprendimento è il conflitto cognitivo raggiunto nel momento in cui gli studenti si sono resi conto che nessuna energia dei livelli atomici coincideva con le energie dei fotoni trovati in precedenza: in questo modo l'impossibilità di trovare correlazioni tra le due quantità ha permesso di mettere chiaramente in discussione il loro ragionamento di partenza e di accettare con cognizione di causa la correzione. Gli studenti che hanno riportato i risultati più bassi nella fase di post-test corrispondono a coloro che hanno partecipato meno attivamente alle lezioni in laboratorio e post-laboratorio.

In accordo con quanto già ottenuto da Bardar et al. [2006], questi risultati fanno capire quanto sia importante parlare di spettri stellari solo dopo aver approfondito la formazione e l'interpretazione dello spettro di emissione o di assorbimento di un elemento.

La metodologia IBL, e quindi l'approccio didattico attivo, si è dimostrata vincente perché, oltre a suscitare interesse nei ragazzi, ha permesso di osservare nel concreto uno degli effetti della natura quantizzata e ha permesso loro di ritrovarsi davanti ad alcune "concezioni a priori" che sono riusciti così a superare. Questi "ostacoli" superati sono stati ritrovati espressi in maniera convinta in alcune risposte del post-test.

Ad esempio, i due studenti che durante il post-laboratorio, nel cercare le transizioni corrispondenti alle righe dell'idrogeno osservate, hanno notato con perplessità che ciò che osservavano non erano transizioni verso lo stato fondamentale ma verso un altro stato eccitato, hanno riportato questa conoscenza acquisita nel post-test. Anche il confronto tra il pre-test individuale e quello di gruppo ha dimostrato come lavorare insieme abbia favorito l'apprendimento in alcune fasi del percorso didattico, oltre che promuovere lo sviluppo di competenze sociali.

Il valore di questa metodologia sta non solo nel permettere agli studenti di apprendere con interesse e motivazione facendo leva sulla scoperta, ma anche nello stimolare la crescita di competenze disciplinari specifiche come le capacità di identificare i problemi, di formulare domande e ipotesi, di formulare ed eseguire esperimenti, di raccogliere ed analizzare i dati, di presentare i risultati e di estrarne delle conclusioni. Inoltre questo approccio permette di evitare l'insegnamento "a sezioni"; ad esempio in questo caso ha permesso di riprendere il fenomeno della diffrazione, studiato l'anno precedente, e di vederne un'applicazione nello studio di un altro argomento. Si sottolinea inoltre l'aiuto che possono offrire i pre-test nella progettazione di un percorso didattico che sia personalizzato sulle difficoltà della classe in questione.

In un'ottica di riprogettazione, è sicuramente da valutare la possibilità di dedicare un tempo più lungo all'analisi dati, per poter svolgere l'attività di laboratorio in maniera ancora più completa e significativa; si potrebbe anche pensare di aggiungere una riflessione sull'informazione dell'intensità che si ricava dagli spettri, risultata non ben compresa dagli studenti. Ricerche future dovrebbero tener conto della possibilità di fare anche interviste individuali agli studenti, in modo da poter analizzare in maniera più approfondita i loro ragionamenti.

Altro strumento di ricerca che si potrebbe utilizzare è quello di porre domande anche a risposta multipla, inserendo tra le scelte dei "distrattori" che riprendano "concezioni a priori" che sono state riscontrate comuni in letteratura tra gli studenti. Sempre in un'ottica di riprogettazione, si potrebbe prevedere un lavoro di approfondimento specifico su alcuni temi di Astronomia. Infatti la spettroscopia ha giocato, e gioca tuttora, un ruolo importante nello studio dei corpi celesti e le sue applicazioni in questo campo sono molteplici, come per l'investigazione della loro composizione chimica, per l'individuazione della loro temperatura, per il calcolo della loro velocità relativa rispetto alla Terra. Anche la classificazione delle stelle è fatta a partire dagli spettri che le caratterizzano.

Per le applicazioni astronomiche da presentare in una quinta liceo scientifico sicuramente il Sole costituisce un protagonista oltre che un esempio classico di "corpo nero". Il suo spettro continuo può essere utilizzato ad esempio per spiegare in cosa consiste la cosiddetta "catastrofe dell'ultravioletto", evidenziando come in esso sia contenuta l'informazione sulla quantizzazione della radiazione elettromagnetica, tanto quanto in uno spettro discreto.

Un altro utilizzo potrebbe essere quello di mostrare spettri di stelle di diverse classi spettrali: in questo modo infatti è possibile evidenziare come l'andamento dell'intensità con la lunghezza d'onda cambi al variare della classe della stella e come questa informazione venga riportata dallo spettro, ma non in maniera correlata all'energia del singolo fotone, come alcuni gruppi hanno proposto nel post-laboratorio.

Inoltre si potrebbe lavorare con le righe di assorbimento che si osservano negli spettri

per raggiungere lo stesso risultato ottenuto in laboratorio, ossia individuare gli elementi chimici che si trovano tra noi e la sorgente; in particolare si potrebbe mostrare come gli elementi chimici emettano e assorbano fotoni sempre con la stessa energia, perché collegati al salto energetico dell'elettrone all'interno dell'atomo. Inoltre, visto che molti hanno accennato nel pre-test alle collisioni tra atomi come processi che causano emissione di fotoni, si potrebbe mostrare come le righe ottenute da fenomeni collisionali siano riconoscibili negli spettri, perché "righe proibite", ovvero righe che si possono osservare solo in emissione perché corrispondenti a salti energetici non permessi per assorbimento di fotoni perché non rispettano le regole di selezione. Un altro studio di interesse attuale che si potrebbe spiegare agli studenti è quello sulle atmosfere dei pianeti attraverso l'uso degli spettri della stella ospite nelle fasi dei transiti dei pianeti, allo scopo di riuscire a individuare la clorofilla, che rappresenta una traccia di vita sul pianeta.

Una proposta didattica da utilizzare potrebbe essere l'assegnare delle letture per casa che tocchino ambiti diversi, da fare in gruppo e da presentare poi agli altri compagni, in modo da mostrare l'importanza della quantistica in vari ambiti, tra cui l'astronomia, con lo scopo di rendere l'apprendimento significativo. Ancora meglio sarebbe lasciar cercare agli studenti legami della fisica quantistica con il loro quotidiano perché, come dice il pedagogista Porcarelli [2016], è fondamentale "ricollegare i mondi vitali di quanti hanno generato i tesori del sapere con i mondi vitali degli allievi".

Il percorso ha quindi mostrato come sia possibile, anche nelle scuole superiori, introdurre argomenti di fisica moderna che possono essere usati come aggancio all'astronomia, valorizzando il laboratorio come luogo di sviluppo di competenze sia disciplinari che trasversali. Ha dimostrato anche come lavorare in un ambiente collaborativo, piuttosto che competitivo, sia produttivo. Questo percorso ha dimostrato come sia possibile rendere piacevole e allo stesso tempo efficace l'apprendimento di una disciplina che interessa poco agli studenti (nessuno dei ragazzi della classe con cui si è lavorato ha infatti scelto di proseguire gli studi alle facoltà di Fisica o Astronomia, e solo pochi hanno scelto di continuare in materie di ambito scientifico). La proposta didattica inoltre è stata in grado di suscitare interesse e di stimolare la crescita dell'insegnante stessa, che ha condiviso con i colleghi la sua esperienza. La docente Fontolan, infatti, dopo il percorso ha acquistato delle lampade spettrali e uno spettrogoniometro, mettendoli a disposizione dei suoi colleghi di fisica e chimica ed esprimendo l'interesse, sia suo che quello dei suoi colleghi, nell'approfondire l'esperimento facendo anche misure d'intensità e formandosi ulteriormente sull'argomento.

Bibliografia

- M. A. Asikainen and P. E. Hirvonen. A study of pre- and inservice physics teachers' understanding of photoelectric phenomenon as part of the development of a research-based quantum physics course. *American journal of Physics*, 77:658–666, 2009.
- E.M. Bardar, E.E. Prather, K. Brecher, and T.F Slater. Development and validation of the light and spectroscopy concept inventory. *Astronomy Education Review*, 5: 103–113, 2006.
- U. Besson and M. Malgieri. Insegnare la fisica moderna. proposte e percorsi didattici. Carrocci editore, 2018.
- CE. Commissione Europea istruzione e cultura. Quadro europeo delle qualifiche per l'apprendimento permanente (EQF). *Lussemburgo: Ufficio delle pubblicazioni ufficiali delle Comunità europee*, 2009.
- B. A. Crawford. From inquiry to scientific practices in the science classroom. *Handbook of Research on Science Education Routledge*, 26:515–541, 2014.
- J.D. Cutnell, K.W. Johnson, D. Young, and S. Stadler. I problemi della Fisica, vol.3. Zanichelli Bologna, 2015.
- R. De Beni, F. Pazzaglia, A. Molin, and C. Zamperlin. Psicologia cognitiva dell'apprendimento. aspetti teorici e applicazioni, 2001.
- Andrea A. di Sessa. A Friendly Introduction to “Knowledge in Pieces”: Modeling Types of Knowledge and Their Roles in Learning. In: G. Kaiser et al. (eds.), *Invited Lectures from the 13th International Congress on Mathematical Education*. 5:65–84, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72170-5_5.
- A. A. diSessa. A history of conceptual change research. In: *the Cambridge handbook of the learning sciences*. Keith Sawyer, 1993.
- E. Edkina, A. Van Heuvelen, S. Brahmia, and et al. ISLE, Investigative Science Learning Environment. <https://www.islephysics.net/people.php>.
- H. Fischler and M. Lichtfeldt. Modern physics and students' conceptions. *International Journal of Science Education*, 14:181–190, 1992.

- M.A. Geyer and W. Kuske-Janßen. Mathematical representations in physics lessons. In: Mathematics in physics education (di Pospiech, Michelini e Eylon). *Springer*, pages 195–231, 2019.
- Agnese Ghetti. Metodi e strumenti per una didattica attiva dell’astronomia nella scuola secondaria. Master’s thesis, Università degli studi di Padova, 2017.
- Marco Giliberti. Theories as crucial aspects in quantum physics education. *Frontiers of Fundamental Physics [FFP12]*, 2011.
- L. Ivanjek, P. S. Shaffer, L. C. McDermott, M. Planinic, and D. Veza. Research as a guide for curriculum development: An example from introductory spectroscopy. Identifying student difficulties with atomic emission spectra. *American Journal of Physics*, 83:85–90, 2015a.
- L. Ivanjek, P. S. Shaffer, L. C. McDermott, M. Planinic, and D. Veza. Research as a guide for curriculum development: An example from introductory spectroscopy. Addressing student difficulties with atomic emission spectra. *American Journal of Physics*, 83:171–178, 2015b.
- G. Kalkanis, P. Hadzidaki, and D. Stavrou. An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science Education*, 87: 257–280, 2003.
- J. L. Ke, M. Monk, and R. Duschl. Learning introductory Quantum Physics: Sensorimotor experiences and mental models. *International Journal of Science Education*, 27:1571–1594, 2005.
- K. Krijtenburg-Lewerissa, H. J. Pol, A. Brinkman, and W. R. van Joolingen. Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Physical Review Physics Education Research*, 13:010109, 2017.
- O. Levrini and P. Fantini. Encountering productive forms of complexity in learning modern physics. *Science & Education*, 22:1895–1910, 2013.
- M.B. Ligorio. Community of Learners. Strumenti e metodi per imparare collaborando. 1994. <https://core.ac.uk/download/pdf/54812480.pdf>.
- Luca Lodovico. Processi di appropriazione nello studio della fisica quantistica: analisi di una sperimentazione didattica in una quinta liceo scientifico. Master’s thesis, Università degli studi di Bologna, 2015.
- Marisa Michelini. Intervento al congresso GIREP. 2019. <https://girep2019.hu/speakers/presenters/prof-dr-marisa-michelini/>.
- R. Millar. Practical work. In: Good practice in science teaching: what research has to say. *Open University Press*, J. Osborne and J. Dillon:108–134, 2010.
- Miur. Autonomia delle Istituzioni didattiche. *D.P.R. n. 275/1999*, 1999. <https://archivio.pubblica.istruzione.it/argomenti/autonomia/documenti/regolamento.htm>.

- Miur. Indicazioni Nazionali riguardanti gli obiettivi specifici di apprendimento, d.m. 7 ottobre 2010, n.211. 2010. http://www.indire.it/lucabas/lkmw_file/licei2010/indicazioni_nuovo_impaginato/_decreto_indicazioni_nazionali.pdf.
- Miur. Quadro di Riferimento della II prova di Fisica dell' esame di Stato per i Licei Scientifici. 2015. <https://miur.gov.it/>.
- P. Onorato, M. Malgieri, and A. De Ambrosis. Measuring the hydrogen Balmer series and Rydberg's constant with a home made spectrophotometer. *European journal of Physics*, 36:058001, 2015.
- M. Pedaste, M. Mäeots, L. A. Siiman, T. de Jong, and et al. Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle. *Educational Research Review*, 14:47–61, 2015.
- Andrea Porcarelli. Progettare per competenze. basi pedagogiche e strumenti operativi. Diogene Multimedia, 2016.
- G. Pospiech. Teaching the EPR–Paradox at high school? *Physics Education*, 34: 311–317, 1999.
- D. S. Ryken and L. H. Salganik. Definition and selection of competences (DeSeCo): theoretical and conceptual foundations: strategy paper. 2002. <https://www.voced.edu.au/content/ngv%3A9408>.
- H. K. E. Stadermann, E. van den Berg, and M. J. Goedhart. Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. *Physical Review Physics Education Research*, 15:010130, 2019.
- Alberto Stefanel. Graph in physics education: From representation to conceptual understanding. In: *Mathematics in Physics Education* (di Pospiech, Michellini e Eylon). *Springer*, pages 75–102, 2019.
- K. S. Taber. Learning Quanta: Barriers to stimulating transitions in student understanding of orbital ideas. *Wiley InterScience* (www.interscience.wiley.com), pages 94–116, 2004.
- UE. Raccomandazione del Parlamento europeo e del Consiglio del 18 dicembre 2006 relativa a competenze chiave per l'apprendimento permanente (2006/962/CE). *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, allegato*, L394:10–18, 2006.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Fisica
e Astronomia
Galileo Galilei

GRUPPO
di ricerca
in Didattica della Fisica
e dell'Astronomia

4. Come rappresentaresti un **atomo**? Fai un disegno e descrivilo.

5. Un atomo è in grado di **cedere energia** sotto forma di radiazione elettromagnetica? Se pensi di sì, prova a disegnare uno schema per mostrare come e commentalo.

B. Schede di laboratorio



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Fisica
e Astronomia
Galileo Galilei

G
R
A
P
E
Gruppo di ricerca
in Didattica della Fisica
e dell'Astronomia

Laboratorio sugli spettri/1

Qui di seguito trovate le indicazioni per svolgere il laboratorio. Documentate tutto il percorso su dei fogli a parte, sui quali scriverete il titolo del laboratorio, la data e il nome dei componenti del gruppo. Nella documentazione riportate le vostre risposte a tutte le domande, i dati raccolti, i disegni utili, le domande che emergono e le vostre conclusioni.

Materiali: fogli bianchi, materiale per spettroscopio (vedi retro), pastelli colorati.

Per prima cosa osservate l'ambiente in cui vi trovate.

1. Quali sorgenti di luce sono presenti in questa stanza o all'esterno?
2. Come vi appaiono osservandole a occhio nudo?
3. Cosa vi aspettate di osservare usando uno spettroscopio?

Organizzate le vostre risposte in una tabella.

4. Costruite ora lo spettroscopio individualmente seguendo le indicazioni riportate sul retro.
5. Iniziate a osservare le sorgenti con lo spettroscopio. L'illuminazione ambientale influisce su ciò che vedete? Trovate un modo per verificarlo ed eventualmente discutete come eliminare l'effetto.
6. Per ciascuna delle sorgenti individuate sopra, descrivete cosa osservate attraverso lo spettroscopio sia a parole, sia con un disegno. Confrontate le vostre osservazioni con le ipotesi fatte inizialmente.
7. Secondo voi, ciò che vedete è lo spettro completo? Motivate la risposta.



Costruzione di uno spettroscopio

In questa esperienza, useremo un **reticolo di diffrazione** per osservare gli spettri di diverse sorgenti di luce. Seguite le istruzioni e usate i materiali forniti per costruire il vostro spettroscopio individuale. Nel costruirlo, cercate di capire la funzione di ogni elemento.

Materiale:

- Reticolo a trasmissione (passo: 500 tratti/mm);
- Sagoma dello spettroscopio su cartoncino nero (corpo principale + due mascherine per le facce laterali: una con un segno a metà e una con un quadrato disegnato al centro);
- Forbici, cutter, righello;
- Nastro isolante nero + nastro adesivo opaco.

Step 1: Per realizzare il **corpo principale** dello spettroscopio, piegate la sagoma lungo i segni aiutandovi con un righello e chiudetela con il nastro nero, formando un parallelepipedo.

Step 2: Per realizzare la **fenditura**, tagliate a metà una delle due mascherine ed eliminate gli angoli. Poi piegate le linguette e fissate le due parti su una delle due basi del parallelepipedo con il nastro isolante nero, in modo da lasciare tra le due metà un'apertura di 1-2 mm. Se necessario, rinforzate la struttura con dell'altro nastro isolante.

Step 3: Per realizzare il **supporto per il reticolo**, nell'altra mascherina ritagliate con il cutter una finestrella centrale di circa 2 cm x 2 cm, seguendo la traccia. Attaccate il reticolo sulla finestrella con il nastro adesivo. Eliminate gli angoli della mascherina, piegatene le linguette e appoggiatela sull'altra base del parallelepipedo. **Attenzione:** Controllate di aver orientato la mascherina nel modo corretto (con i tratti del reticolo paralleli alla fenditura) osservando una sorgente: puntate lo spettroscopio verso la sorgente (con la fenditura dalla parte della sorgente) e guardate cosa vedete attraverso il reticolo. Se è montato correttamente, dovrete vedere lo spettro lateralmente. In caso contrario vedrete solo un bordo colorato sopra e sotto la fenditura. Se necessario, girate di 90 gradi la mascherina con il reticolo e ricontrollate. Quando avete individuato l'orientamento corretto, fissate la mascherina allo spettroscopio usando il nastro isolante nero.

Step 4: Valutate la qualità delle immagini che osservate: lo spettro è nitido, si vede bene? Se così non fosse la fenditura potrebbe non essere illuminata uniformemente. In questo caso attaccate un pezzo di nastro adesivo opaco sopra la fenditura per diffondere la luce e riprovate.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Fisica
e Astronomia
Galileo Galilei

G
R
A
P
E
Gruppo di ricerca
in Didattica della Fisica
e dell'Astronomia

Laboratorio sugli spettri/2

Continuate a documentare il vostro percorso sul quaderno di laboratorio, riportando le vostre risposte a tutte le domande, i dati raccolti, i disegni utili, le domande che emergono e le vostre conclusioni.

Materiali: fogli bianchi, pastelli colorati.

Confrontate tra loro gli spettri osservati.

1. Quali differenze ci sono tra gli spettri delle varie sorgenti che avete osservato? Potreste classificarli in qualche modo?
2. Basandovi sulle vostre osservazioni, qual è secondo voi la caratteristica degli spettri degli elementi chimici?
3. Confrontate tra loro qualitativamente gli spettri degli elementi chimici osservati. Quali analogie ci sono e quali differenze?

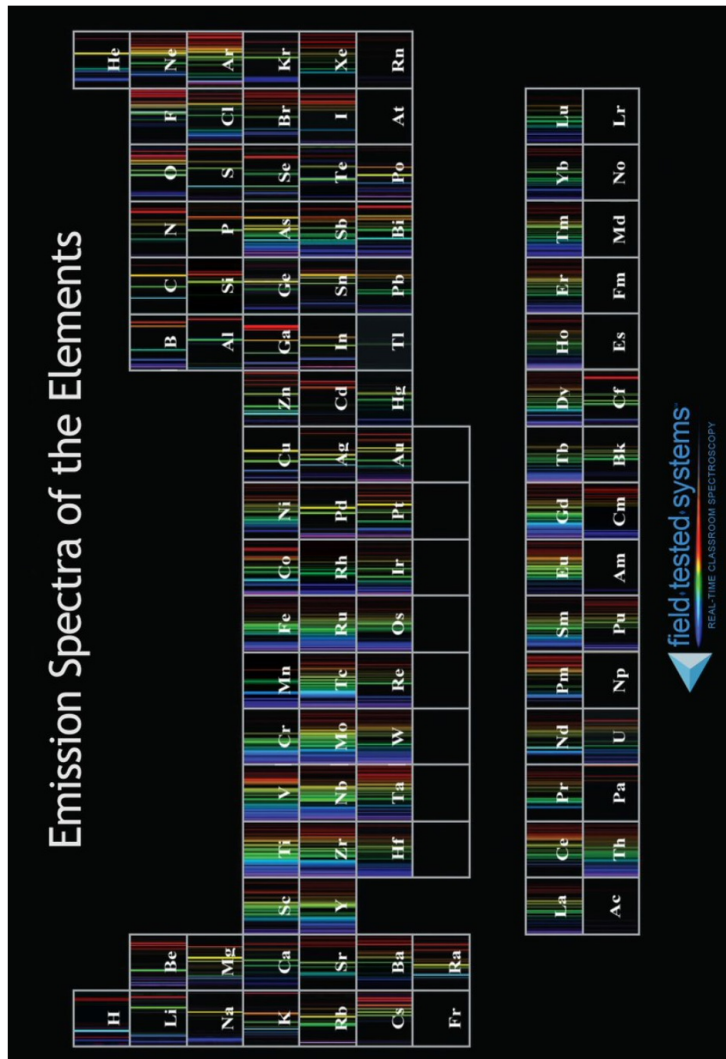
Vi viene ora consegnata la scheda *Tavola periodica "spettrale"*, che rappresenta la parte visibile degli spettri degli elementi della tavola periodica.

4. Usate la *Tavola periodica "spettrale"* per individuare gli elementi presenti nelle lampade.
5. Dopo aver formulato delle ipotesi sugli elementi presenti, chiedete all'insegnante la scheda *Riconoscere gli spettri atomici* e seguite le indicazioni sulla scheda.
6. Rileggete qual è la caratteristica più importante che avete osservato riguardo gli spettri degli elementi chimici. Cosa potete concludere rispetto alle caratteristiche della luce emessa da questi atomi?



Tavola periodica "spettrale"

Confrontate gli spettri osservati con quelli degli elementi chimici, riportati in questa tavola periodica. Riuscite a individuarne alcuni?

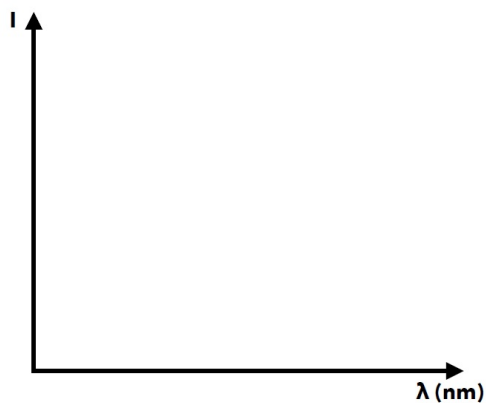
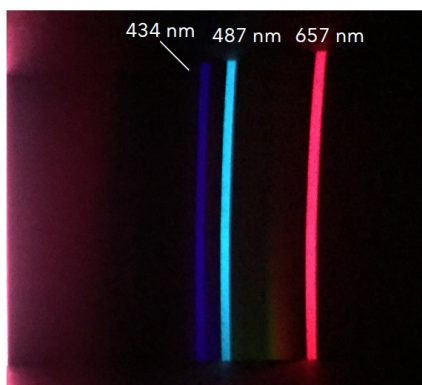




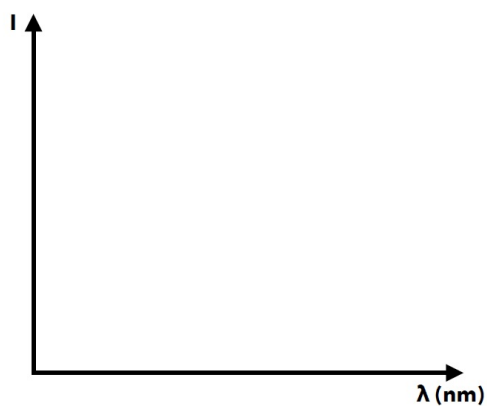
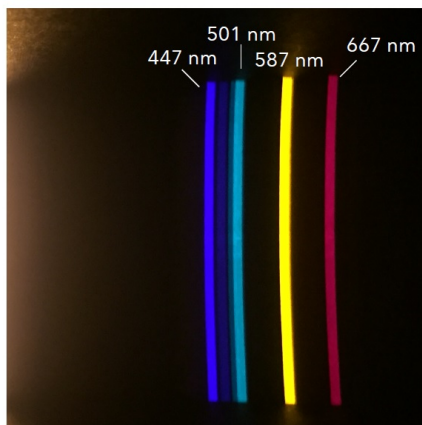
Riconoscere gli spettri atomici

Qui sotto riportiamo gli spettri degli elementi chimici che potrebbero essere presenti nelle lampade. Confrontateli con quelli osservati e identificate gli elementi contenuti effettivamente nelle lampade. Poi, nel diagramma accanto a ciascuno spettro trovato, tracciate il grafico dell'intensità luminosa (I) in funzione della lunghezza d'onda (λ): le unità di misura usate per l'intensità luminosa possono essere arbitrarie (cioè, in y il grafico avrà valore solo qualitativo), mentre per la lunghezza d'onda si devono riportare i valori quantitativi.

Idrogeno (H)



Elio (He)





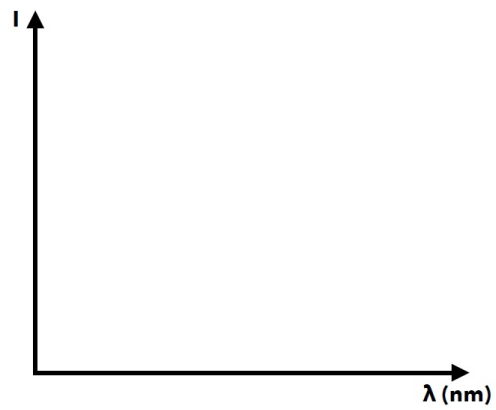
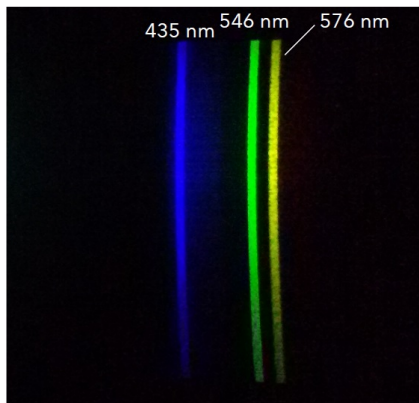
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



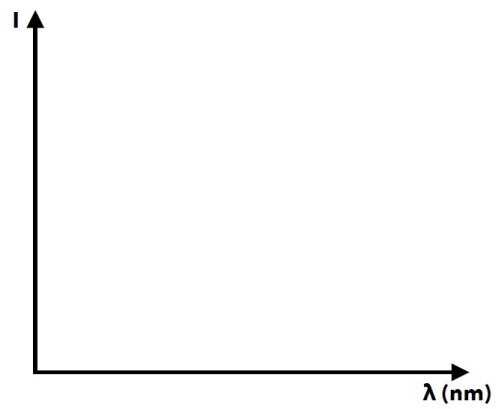
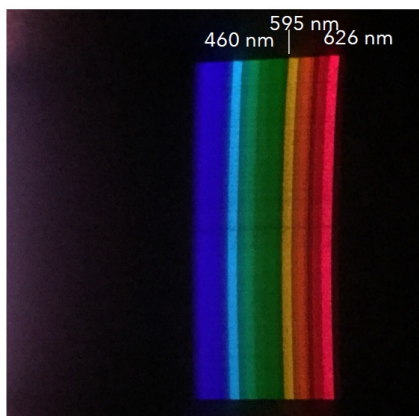
Dipartimento
di Fisica
e Astronomia
Galileo Galilei

GRUPPO DI RICERCA
in Didattica della Fisica
e dell'Astronomia

Mercurio (Hg)



Neon (Ne)



C. Scheda post-laboratorio



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Fisica
e Astronomia
Galileo Galilei

GRUPPO DI RICERCA
in Didattica della Fisica
e dell'Astronomia

Dallo spettro all'atomo

Rispondete a queste domande in un foglio che aggiungerete al quaderno di laboratorio.

1. Considerate la seguente affermazione: "Il fatto che negli spettri degli elementi chimici siano presenti solo alcune righe significa che gli atomi possono emettere solo fotoni con certe energie". Commentatela e se siete d'accordo giustificala facendo riferimento a quanto vale l'energia di un fotone (NB: Attenzione alle unità di misura).
2. Come si potrebbe spiegare quanto osservato? Formulate un'ipotesi usando quello che sapete sull'atomo e usando il concetto di conservazione dell'energia. Nella vostra spiegazione includete sia una descrizione a parole, sia una rappresentazione grafica.

Il fisico Niels Bohr elaborò un modello atomico da cui ricavò questa formula per i livelli energetici, corrispondenti agli stati legati dell'elettrone:

$$E_n = - (13.6\text{eV}) \frac{Z^2}{n^2}$$

dove Z è il numero atomico e n è un numero intero ($n=1, 2, 3, \dots$). L'unità di misura usata è l'elettronvolt (simbolo eV; $1\text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19}\text{ J}$). Come potete notare, le energie sono negative: questo esprime il fatto che l'elettrone è legato al nucleo: $E=0$ corrisponde allo stato in cui l'elettrone non è più legato all'atomo (così si ottiene uno ione positivo).

3. Calcolate i primi 10 livelli energetici per l'atomo di idrogeno e disegnateli in scala secondo il loro valore.
4. Usate il diagramma appena disegnato per spiegare lo spettro dell'atomo di idrogeno che avete osservato.
 - A. Quali livelli sono coinvolti nella formazione delle righe? Disegnate le transizioni elettroniche corrispondenti, spiegando come avete proceduto.
 - B. Quale riga corrisponde a un salto energetico tra livelli *più lontani* tra loro? Quale corrisponde a un salto tra livelli *più vicini*? Perché?
5. Alla luce dell'esperienza fatta, come rispondereste alla domanda iniziale: a cosa potrebbe servire rilevare uno spettro? Spiegate e provate a immaginare un'applicazione pratica nella scienza o nella tecnologia.

Simbolo	Nome	Valore
h	Costante di Planck	$4,13 \times 10^{-15}\text{ eV} \cdot \text{s}$
c	Velocità della luce	$3 \times 10^8\text{ m/s}$

Ringraziamenti

Ringrazio prima di tutto il Signore per il dono della vita, senza la quale tutto ciò che ho vissuto non sarebbe mai esistito. Lo ringrazio perché in questi ultimi due anni mi ha dimostrato come, facendo semplicemente l'atto di fede di lasciarmi guidare da Lui invece che cercare di fare di testa mia, operi meravigliosamente intorno a me e sia in grado di trasformare la mia vita in uno stupendo capolavoro. Ringrazio Nicola, testimonianza viva e vera dell'amore del Signore per me ogni giorno, per la sua pazienza e il suo supporto morale che non sono mai mancati in questi due anni di studio; lo ringrazio per esserci sempre stato soprattutto nei momenti più belli e più brutti. Lo ringrazio perché non si è mai tirato indietro alle mie richieste d'aiuto, ma allo stesso tempo non mi ha mai assecondato e ha sempre cercato di spronarmi a superare i miei limiti e a migliorarmi. Lo ringrazio anche perché mi ha aiutato spesso nello studio, anche se gli argomenti non erano molto di suo interesse. Lo ringrazio davvero tanto per l'aiuto che mi ha dato nella stesura della tesi, offrendosi di aiutarmi a sistemare la forma italiana a qualsiasi ora del giorno e della notte, anche dopo 8 ore di lavoro, sopportando i miei sbalzi d'umore e le mie crisi dovute alla stanchezza. Insomma, il Signore me lo ha mandato già santo XD. Ringrazio la mia famiglia che mi ha supportato e sopportato in questi anni di studio, in particolare ringrazio mia madre che con il suo amore premuroso non mi ha mai fatto mancare nulla a livello affettivo e mi ha sempre fatto sentire il suo appoggio e il suo sostegno. Ringrazio ciascun componente della famiglia per la spensieratezza che hanno cercato di darmi quando avevo bisogno di svagarmi, per tutti i giochi da tavola fatti e le risate. Ringrazio inoltre Francesca per aver voluto studiare per quanti più esami possibili insieme, la nostra diversità ci ha permesso di migliorarci a vicenda. La ringrazio per la sua amicizia vera e per il suo sostegno che non è mai mancato, per le litigate costruttive che fanno sempre bene, ma anche per le risate e le chiacchierate. Ringrazio Giada, Filippo, Lorenzo, Vito, Federico, Chiara F., Chiara T. e tutti gli altri compagni di corso con cui sono felice di aver condiviso questi ultimi due anni di studio (ringrazio anche la mensa Pio X, che mi ha nutrito in questi anni XD). Ringrazio anche tutta la Missione Belem che mi ha sempre sostenuto con la preghiera, in particolare Paola che mi ha sempre fatto sentire anche il suo supporto e la sua vicinanza in questi mesi di studio intenso. Ringrazio anche tutti quelli della pastorale di strada, in particolare Elisa, che nonostante i suoi mille impegni c'è sempre stata. Ringrazio l'interessamento e la passione della mia correlatrice Marta, che mi ha aiutato nello sviluppo di questo progetto e alla sua riuscita. Ringrazio la professoressa Pantano per avermi dato la possibilità di svolgere questo tipo di tesi e per la professoressa Fontolan di essersi fidata di noi e di avermi permesso di svolgere questo progetto didattico nella sua classe. Ringrazio inoltre il professor Ciroi per

la sua disponibilità. Ringrazio inoltre anche tutti i professori che in questi anni di studio mi hanno trasmesso le loro conoscenze e la loro passione, spero a mia volta di riuscire a trasmetterle ai miei futuri studenti.