

Il contributo concettuale della storia nell'apprendimento della fisica: il caso della spettroscopia ottica

Daniele Buongiorno, Marisa Michelini – Unità di Ricerca in Didattica della Fisica, Università degli Studi di Udine – buongiorno.daniele@spes.uniud.it, marisa.michelini@uniud.it

Abstract: In the context of a PhD research project in physics education, within IDIFO6 project, we are studying a vertical path on optical spectroscopy as research based proposal according with the new curricular guidelines of Ministry of Education, introducing modern physics in secondary school curriculum. The research is carried out in the theoretical framework of the Model of Educational Reconstruction by means of instruments and methods of the Design-Based Research in order to design teaching/learning intervention modules and analyze students' learning processes. Literature underline and our research confirm that one of the main conceptual knots in that area is the link between a light spectrum and its physical meaning with respect to atomic models, in particular the conceptual connection between the energies of the lines in a discrete spectrum and the energetic levels of the emitting atom. In order to overcome learning difficulties emerged in the literature and in our preliminary research findings, we designed a tutorial adopting Balmer's approach to the problem of finding a law for optical spectrum of hydrogen atom emissions. The Rydberg's law founded the Bohr hypothesis for the hydrogen atom. Einstein's idea of photon offers an alternative perspective in the interpretation. The tutorial, used in three different research based intervention modules appears a fertile way to overcome conceptual difficulties in student reasoning.

Keywords: physics education, educational reconstruction, optical spectroscopy, atomic models.

1. Introduzione

Il ruolo della storia nell'insegnamento/apprendimento della fisica si configura come multi-prospettico, dal momento che coinvolge elementi differenziati che fondano il rapporto tra didattica e storia. Strategie e materiali, in particolare, si basano sul rapporto tra le due discipline e riguardano: (a) la riproduzione di esperimenti storici; (b) lo studio di testi originali; (c) l'approfondimento di aspetti interpretativi mediante integrazione di narrazioni; (d) una riflessione critica sui contenuti problematici, i nodi concettuali, le alternative teoriche nei passaggi cruciali dello sviluppo delle idee, oltre che (e) i riferimenti a inventari e/o documentazioni (De Maria, Ianiello 2006; Bevilacqua 1983). Contributi particolarmente

fertili della storia della fisica per la didattica sono quelli che riguardano gli aspetti epistemici, culturali e metodologici (Galili, 2018) e quelli che permettono di approfondire le idee spontanee ed i nodi concettuali, che spesso coincidono con interpretazioni provvisorie o parziali storicamente documentate. Queste ultime offrono un patrimonio di argomentazioni per sfide intellettuali che educano al pensiero scientifico e lo collocano nella corretta prospettiva di evoluzione di interpretazioni ciascuna con potenzialità e limiti.

Un ambito tematico significativo in cui la storia della fisica ha un potenziale ruolo diretto nell'apprendimento è la spettroscopia ottica che, sia dal punto di vista storico che concettuale, rappresenta un ponte tra la fisica classica e quella moderna. L'assorbimento e l'emissione quantizzati di radiazione sono infatti concetti fondamentali della moderna fisica teorica, rappresentando alcuni tra i principali strumenti investigativi basati sull'interazione luce-materia. La spettroscopia ottica rappresenta un contesto metodologico in cui il ruolo dell'energia nelle analisi fisiche è fondante, uno strumento di validazione dei modelli interpretativi attraverso misure indirette, una modalità attraverso cui interpretare un codice per ottenere informazioni sugli stati e i cambiamenti di un sistema fisico e un contesto sperimentale che permette di evidenziare il legame tra modello a livelli energetici dell'atomo e le relative emissioni luminose.

Abbiamo messo a punto un percorso didattico sulla spettroscopia ottica per studenti degli ultimi anni di scuola superiore, in cui alcuni elementi storici fondanti sono stati impiegati a sostegno dei concetti fisici affrontati, per il superamento delle principali difficoltà di apprendimento riscontrate in letteratura (Korhasan, Wang 2016; Ivanjek 2012; Ivanjek *et al.* 2015a; Ivanjek *et al.* 2015b; Savall-Aleman *et al.* 2016; Zollman *et al.* 2002). In questo lavoro se ne presentano le caratteristiche generali, evidenziando le basi teoriche dell'approccio di ricerca seguito, oltre a discutere i principali risultati emersi dalle sperimentazioni di ricerca condotte con studenti di scuola secondaria superiore.

2. Impostazione ed approccio della ricerca

L'approccio di ricerca segue il quadro teorico del Model of Educational Reconstruction (MER) (Duit *et al.* 2005; Duit *et al.* 2012) in cui si rivisita in termini problematici lo specifico contenuto ricostruendolo successivamente in prospettiva didattica. Tale approccio si fonda sui seguenti aspetti: (a) individuazione della rilevanza disciplinare dell'oggetto di studio; (b) analisi delle difficoltà e dei nodi concettuali nello specifico ambito disciplinare e delle sfide interpretative che hanno contraddistinto storicamente lo sviluppo delle idee (Behrens 1943; Banet 1966; Hindmarsh 1967; Banet 1970); (c) ricostruzione in chiave didattica dei concetti fondanti; (d) progettazione e sperimentazione basata sulla ricerca di percorsi di insegnamento/apprendimento. Questo approccio si integra sia con la ricerca empirica sui ragionamenti degli studenti (Lijnse, 1995), sia con la Design-Based Research (DBR) (DBR Collective 2003; Collins *et al.* 2004; Anderson, Shattuck 2012) nella progettazione di materiali didattici, ma anche nella ricerca-azione in una dialettica collaborativa tra scuola e università (Lijnse 1995; Di Sessa 2004; Michelini *et al.* 2016). Non viene preso in considerazione solo il contenuto disciplinare (Fischer, Klemm 2005), ma si pone attenzione agli specifici angoli di attacco e ai dettagli critici a cui si

appella la conoscenza di senso comune per interpretare la fenomenologia (Viennot 1996) studiando allo stesso tempo in termini dinamici i ragionamenti degli studenti (Michelini 2010) e trovando nuovi approcci alla conoscenza della fisica (Viennot 1996; McDermott 2006; Michelini 2010). La scelta è quella di evitare ogni riduzionismo al fine di offrire percorsi formativi coerenti in prospettiva culturale (Galili 2018), in cui viene data importanza sia alla fondazione dei concetti di base, sia ai metodi e le applicazioni caratteristici della ricerca in fisica, costruendo personali apprendimenti, che si integrano nei programmi scolastici di fisica in percorsi verticali, che fungono da corridoi didattici (Di Sessa 2004; Meheut, Psillos 2004) delle traiettorie di apprendimento individuali, con modalità di appropriazione dei concetti per micro-step concettuali (Michelini 2010).

Nel caso specifico descritto in questo lavoro si è già fatto riferimento alla rilevanza della spettroscopia ottica nella storia della conoscenza scientifica come fondamento della meccanica quantistica. L'interpretazione di spettri ottici richiede un'ipotesi sulla struttura energetica della materia emittente, in particolare il modello a livelli energetici, secondo il quale ogni sistema capace di emettere luce può avere solo determinati stati discreti di energia e che l'energia della radiazione emessa corrisponde a una variazione dell'energia del sistema emittente.

Studi di ricerca didattica hanno evidenziato che sia studenti di scuola secondaria superiore che universitari tendono ad associare l'energia di una riga spettrale con l'energia di un singolo livello piuttosto che alla differenza in energia tra coppie di livelli (Rebello *et al.* 1998; Zollman *et al.* 2002), in particolare nei corsi introduttivi di astronomia, dove la spettroscopia gioca un ruolo chiave, esistono difficoltà legate al descrivere il processo di emissione luminosa da parte degli atomi (Bardar *et al.* 2006). Tra gli studenti universitari emerge un'idea per la quale l'energia della radiazione è legata all'intensità piuttosto che al colore (Lee 2002). Il problema dell'associazione concettuale tra righe spettrali e livelli energetici è emerso in diversi studi a livello universitario (Korhasan, Wang 2016; Ivanjek 2012; Ivanjek *et al.* 2015a; Ivanjek *et al.* 2015b), in cui si riporta come gli studenti associno l'energia di una riga con l'energia di un livello, non considerino il livello fondamentale un livello energetico, oppure pensino che il livello fondamentale sia coinvolto in ogni transizione. Le stesse ricerche mostrano come gli studenti necessitino maggior padronanza del ruolo delle condizioni sperimentali grazie alle quali uno spettro discreto è formato per gestirne l'interpretazione. In altri lavori (Savall-Aleman *et al.* 2016) emerge come sia studenti (universitari e di scuola secondaria superiore) sia insegnanti hanno difficoltà nel predire il modo in cui intervengono nei processi di emissione e assorbimento il modello quantistico dell'atomo e quello della radiazione. Queste ricerche hanno evidenziato la persistente presenza di modelli spontanei degli studenti a proposito della formazione di spettri discreti e del loro legame con la struttura quantistica dell'atomo che devono essere superati per raggiungere una visione scientifica dell'argomento (Gilbert *et al.* 1998a; Gilbert *et al.* 1998b). L'approccio scelto affronta direttamente questi nodi oltre che affrontare il formalismo matematico essenziale per la comprensione del fenomeno con le seguenti domande di ricerca:

RQ1) Come avvalersi della storia delle idee per costruire una proposta didattica che aiuti a superare i principali nodi di apprendimento della spettroscopia ottica?

- RQ2) In che modo gli elementi storici introdotti nel percorso didattico aiutano il superamento dei nodi concettuali individuati in letteratura, in particolare, come contribuisce sul piano didattico l'esperire il vissuto di Balmer e Rydberg di fronte agli spettri ottici più semplici?
- RQ3) In che termini gli studenti descrivono un modello atomico, che renda conto degli spettri osservati?

3. La proposta didattica

Il percorso sviluppato si pone come ponte tra la fisica classica e quella moderna allo scopo di far guadagnare agli studenti competenza nel processo di interpretazione di spettri ottici confrontando ipotesi interpretative con gli esiti sperimentali (Michelini 2010). In particolare, l'obiettivo è quello di superare il modello classico di atomo rappresentato in termini di orbite "alla Bohr" in favore di un modello più generale a livelli energetici.

Una riflessione sui diversi ruoli dei tre campi dell'ottica: sorgenti, fenomeni di propagazione e interazione luce-materia apre alla prospettiva di lettura in termini energetici dell'interazione luce-materia da prima e delle sorgenti successivamente. Il meccanismo della visione, basato sulla interazione luce-materia, pone il problema di interpretare il colore degli oggetti mediante i meccanismi di assorbimento selettivo e nano-strutturazione. I ragionamenti di Newton (Newton 1993) sulla dispersione della luce bianca sono stati sfruttati in termini di questioni problematiche per comprendere il significato del meccanismo di dispersione e sono stati posti come spunto per ricercare altri meccanismi dispersivi. Uno studio sperimentale permette di individuare le leggi fenomenologiche della diffrazione e il ruolo disperdente di un reticolo nell'analisi di luce policromatica. Una rassegna delle principali sorgenti di luce aiuta a caratterizzare la luce emessa in termini di colore e intensità e ad identificare i diversi meccanismi di emissione luminosa come risultato di una trasformazione energetica. I meccanismi additivi e sottrattivi di percezione del colore pongono il problema dell'esistenza e dell'origine di luce intrinsecamente colorata e della composizione primitiva della luce emessa da ogni sorgente. L'esplorazione della luce emessa da diverse sorgenti con semplici spettroscopi a reticolo evidenzia l'esistenza di spettri continui, a bande e discreti. Lo studio dello spettroscopio e delle sue parti pone il problema del ruolo del reticolo e della fenditura nella formazione degli spettri osservati. Il ruolo identificativo delle sostanze allo stato gassoso tramite saggi alla fiamma evidenzia l'importante ruolo dello spettro nel riconoscimento degli elementi e sono stati presentati come esperienza per riconoscere le modalità tramite cui una sorgente di luce può essere caratterizzata dal colore della luce che emette. Un esempio emblematico è rappresentato dalla scoperta del cesio, del rubidio (Kirchhoff, Bunsen 1860) e dell'elio per via spettroscopica, esperienza narrata per consolidare il ruolo di uno spettro come "carta d'identità" degli elementi. La legge fenomenologica di Stefan-Boltzmann (Stefan 1879; Boltzmann 1884), l'identificazione dei poteri emissivo e assorbente e la dipendenza del loro rapporto solo della temperatura orientano all'analisi del processo di emissione all'aumentare della potenza fornita ed emessa da una sorgente incandescente. Tali evidenze fenomenologiche permettono di assegnare un ruolo ai dati

sperimentali in termini problematici per porre il problema interpretativo dell'emissione luminosa. La scoperta della radiazione infrarossa ad opera di Herschel, nell'anno 1800, e della radiazione ultravioletta ad opera di Ritter l'anno successivo consolida l'idea che l'emissione di radiazione può avvenire oltre il visibile ad energie diverse e abitua a vedere i colori dello spettro come radiazioni con diverse energie, aventi diverse interazioni con la materia e diversi effetti: riscaldamento, penetrazione e ionizzazione. Tali esperienze storiche sono richiamate con il ruolo di identificare la luce in termini più generali di radiazione ad ampio spettro, non solo visibile, e per identificare effetti differenziati che possono essere ricercati nell'interazione luce-materia. La natura quantistica della luce in termini di fotoni di energia corrispondente al colore e intensità corrispondente al numero poggia sull'analisi dell'effetto fotoelettrico e sulla misura della tensione di soglia di LED di diverso colore. L'analisi di tale effetto è stata utilizzata per fondare l'idea del fotone in base alle proprietà manifestate sul piano sperimentale. Il lavoro di Balmer (1885) ispira la proposta operativa dell'analisi delle regolarità delle posizioni delle righe nello spettro dell'idrogeno e la redazione della legge fenomenologica che descrive la posizione delle prime quattro righe della serie omonima: $\lambda_n = 364.6 \cdot \left(\frac{n^2}{n^2-4}\right) nm$ (in cui $n=3, 4, 5, 6$). La lettura in chiave energetica di tale formula, dovuta a Rydberg (Bohr, 1985): $E_{2,n} = 13.6 \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) eV$ (in cui $n=3, 4, 5, 6$) ispira l'ipotesi di descrizione dei sistemi emittenti in termini di stati energetici permessi e dell'emissione come diseccitazioni energetiche discrete. I lavori di Balmer prima, e di Rydberg poi, sono stati proposti come problem solving per ripercorrerne i significati e per esplicitare il processo di emissione in termini energetici tramite il legame tra livelli e righe spettrali. L'interpretazione viene consolidata tramite esercizi interpretativi e mediante misure di energia emessa da lampade a scarica di gas con un goniometro ottico, da LED con un semplice dispositivo di tragguardazione con un reticolo di diffrazione e tramite l'utilizzo di uno spettrometro digitale che permette misure in emissione e in assorbimento.

4. Le sperimentazioni: contesto, campione e metodologia

156 studenti provenienti da classi quarte hanno seguito il percorso di spettroscopia ottica per un totale di 8 ore, di cui 79 con un modulo di intervento formativo di tipo "master-class" presso l'università (68 provenienti da un liceo scientifico, MA e 11 provenienti da un ISIS, MB), 21 con una sperimentazione in classe (SC), 32 in una scuola estiva nazionale per talenti (SEFM) e 24 tramite un modulo proposto come attività di alternanza scuola-lavoro (MOD). Le diverse sperimentazioni sono state condotte nell'ambito del progetto IDIFO6 (Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento)¹ del Progetto Lauree Scientifiche.

In un approccio di tipo DBR, le caratteristiche di ogni intervento didattico, che comunque mantiene il carattere del percorso descritto, sono iterativamente riviste e ricalibrate. I percorsi differiscono quindi per la presenza di elementi che possono facilitare l'appropriazione dei concetti; in particolare nella sperimentazione MA viene presentata

¹ [Progetto IDIFO6]. URL: <<http://www.fisica.uniud.it/URDF/laurea/idifo6.htm>> [data di accesso: 22/6/2019].

la formula empirica di Rydberg espressa in numero d'onda ($1/\lambda$) per poi convertirla in energia; nella sperimentazione MB viene presentata agli studenti la stessa formula direttamente espressa in energia evitando un approccio di tipo ondulatorio, mentre nelle restanti sperimentazioni, si approfondisce l'analisi, partendo da uno studio dei coefficienti di Balmer, per poi ricavare la formula di Rydberg in numero d'onda e infine in energia. Gli studenti sono stati protagonisti con i loro ragionamenti nel rivivere i passaggi concettuali nello sviluppo delle interpretazioni: dalla formula empirica di Balmer al modello a livelli energetici. È da sottolineare che il percorso proposto agli studenti si discosta leggermente dal reale sviluppo storico delle idee: Rydberg non è a conoscenza del lavoro di Balmer quando sviluppa i suoi risultati; la nostra prospettiva didattica valorizza elementi storici a sostegno dei concetti. In comune a tutte le sperimentazioni la discussione sulla questione chiave del segno negativo dell'energia totale del sistema.

Il monitoraggio degli apprendimenti degli studenti viene effettuato con un tutorial in itinere con la stessa struttura del percorso proposto, e con test di uscita, talvolta accompagnato dallo stesso test in ingresso (McDermott 2006; Michelini 2010). Il tutorial ha la funzione di stimolare il ragionamento degli studenti sugli aspetti cruciali per l'interpretazione attraverso domande di tipo Inquiry-Based Learning (IBL) (McDermott 2006). Il test di uscita è stato fatto compilare in classe dagli insegnanti coinvolti e gli esiti discussi, nell'ambito della collaborazione scuola-università. Si presentano e discutono in questa sede soltanto i dati relativi all'ultima parte del percorso ed in particolare alla interpretazione del processo emissivo in relazione agli spettri ottenuti nelle attività sperimentali.

5. Analisi dati e discussione

L'analisi dei dati è stata condotta con metodi qualitativi della ricerca empirica sulle spiegazioni ed i ragionamenti degli studenti: le risposte e i disegni di ogni studente sono stati classificati in categorie fondate sulle domande di ricerca specifiche, ma gli aspetti presi in considerazione non si sono fondati solamente su di esse, decise a priori, ma anche su aspetti significativi emersi dalle risposte stesse. Le categorie individuate hanno permesso l'interpretazione dei dati, che si è basata sull'analisi delle frequenze delle categorie non mutuamente esclusive individuate e sulla loro definizione operativa in base alle risposte degli studenti. Al fine di interpretare risposte o disegni non particolarmente chiari, a volte si è reso necessario fare affidamento a frasi o altri indizi (anche grafici) presenti in risposte a domande differenti.

Si riportano in questa sede gli esiti relativi alle domande riguardanti l'analisi di significato delle formule di Balmer e Rydberg, nonché la modellizzazione dei livelli atomici.

La sfida di ricavare la successione di Balmer delle prime 4 lunghezze d'onda delle righe della serie visibile dell'idrogeno $\lambda_n = k \cdot c_n = k \cdot \left(\frac{n^2}{n^2-4}\right)$ con $k=364.6 \text{ nm}$ a partire dai coefficienti numerici c_n da lui stesso trovati (9/5, 16/12, 25/21 e 36/32) è stata proposta nelle sperimentazioni SC, MOD e SEFM. La categorizzazione emersa dalle risposte degli studenti è riassunta nella Tab. 1.

Sperim.	Num stud.	D=N-4 (a)	N=n ² (b)	(a)+(b)	Formule alternative	n=0, 1, ...	n=1, 2, ...	n=3, 4, ...
SC	21 (tutorial)	11	1	7	-	-	-	-
MOD	24 (pre)	9	2	1	1	1	1	-
	24 (post)	-	-	18	-	-	-	8
SEFM	32 (pre)	-	3	27	5	3	5	12
	31 (post)	-	-	31	-	-	-	15

Tab. 1. Ricavare la formula empirica di Balmer a partire dalla conoscenza dei coefficienti c_n . D=denominatore, N=numeratore. La prima riga riporta gli aspetti notati dagli studenti (categorie), come emersi nelle loro risposte.

La maggior parte degli studenti non ha difficoltà a trovare la regola empirica che descrive la successione dei coefficienti, ma nessuno sottolinea la peculiarità che la variabile sia un numero naturale piuttosto che reale (la formula di Balmer è una successione $N \rightarrow R$, non una funzione $R \rightarrow R$). Viene data importanza al primo valore della variabile indipendente n per poi ricavare la formula generale: partendo da $n=0$ o $n=1$ piuttosto che dal corretto $n=3$ la formula si complica inutilmente. Tale pregiudizio è superato dopo il percorso.

Un tutorial o la presenza di un post-test sostengono l'acquisizione di una competenza di lettura dei significati sottesi da relazioni puramente formali e la correlazione con gli elementi che rendono tali relazioni significative, al di là della pura espressione numerica.

Una volta che la formula di Balmer viene espressa in energia, risulta chiaro come l'energia associata ad ogni emissione (riga) corrisponda ad una differenza tra due termini energetici: $E_{2,n} = R \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$. Agli studenti viene chiesto di interpretare il processo di emissione alla luce di questa evidenza. All'evidenza che l'energia di una riga sia pari ad una differenza di due termini energetici, aspetto messo in evidenza come significativo da 8 studenti in totale, viene attribuito un significato solo da una minoranza di studenti, in termini di energie quantizzate dei livelli (3 studenti) o delle righe (1 studente), di passaggio livello dell'elettrone (1 studente) una variazione di stato del sistema emittente (1 studente). I risultati sono favoriti nel post test della sperimentazione SEFM, in cui 10 studenti associano l'energia delle righe ad una variazione di stato del sistema emittente. Emerge una difficoltà a interpretare una relazione empirica allo scopo di giustificare un processo fisico: solo una minoranza di studenti evidenzia l'importanza che compaia esplicitamente una differenza, ma l'associazione tra le energie permesse al sistema emittente e le energie effettivamente emesse non emerge, neanche alla luce del principio di conservazione dell'energia. Le considerazioni fatte dagli studenti riguardano, nei pochi casi documentati, osservazioni sul fatto che le grandezze in gioco siano quantizzate.

La richiesta di rappresentare i livelli energetici caratteristici del sistema atomico dati i valori di energia fa emergere diversi modelli, rappresentati in Tab 2.

Sperim.	Num stud.	Livelli	Orbite	Grafico
MA	68 (tutorial)	31	4	-
MB	11 (tutorial)	1	1	8
SC	21 (tutorial)	4	9	14
MOD	24 (tutorial)	4	-	4

Tab. 2. Rappresentazione dei livelli energetici (per la definizione operativa delle categorie si veda Fig. 1).



Fig. 1. Modelli utilizzati dagli studenti per rappresentare i livelli energetici. Da sinistra a destra: modello “a livelli”, modello “a orbite”, modello “a grafico”.

Precedenti studi (Buongiorno 2017) hanno evidenziato come la trattazione del modello di Bohr seguendo una progressione storica delle idee ha dato luogo ad una generale dipendenza degli studenti da una rappresentazione per orbite. Abbiamo perciò evitato una trattazione del modello di Bohr che descrive le orbite come i livelli energetici; purtuttavia emerge come gli studenti manifestino difficoltà ad abituarsi a guardare ad un modello interpretativo in termini più generali di livelli energetici.

Un’analisi più dettagliata dei modelli utilizzati dagli studenti permette di evidenziare quali referenti concettuali che emergono dalle formule empiriche di Balmer e Rydberg sono stati utilizzati per rappresentare quantitativamente i livelli energetici (Tab. 3).

Sperim.	Num stud.	Livelli					Orbite		Grafico				
		Distanze		Riferimenti			Distanze		Tipo		Riferimenti		
		cost	$1/n^2$	$E < 0$	$E > 0$	Assenti	cost	$1/n^2$	Continuo	discreto	$E < 0$	$E > 0$	Assenti
MA	68 (tutorial)	10	22	19	5	8	2	2	-	-	-	-	-
MB	11 (tutorial)	-	-	1	-	-	1	-	8	-	8	-	-
SC	21 (tutorial)	-	5	1	-	4	4	2	10	1	10	-	1
MOD	24 (tutorial)	-	4	2	-	2	-	-	3	-	-	3	-

Tab. 3. Rappresentazione dei livelli energetici - analisi dettagliata per la definizione operativa delle categorie si veda Fig. 2.

Vari modelli sono presenti (a orbite, a livelli, a grafico) e spesso mancano di riferimenti quantitativi sui valori e sulla scala delle energie, che spesso sono viste come positive. L’assegnazione di significato a valori di energia negativi per un sistema legato va affrontata esplicitamente.

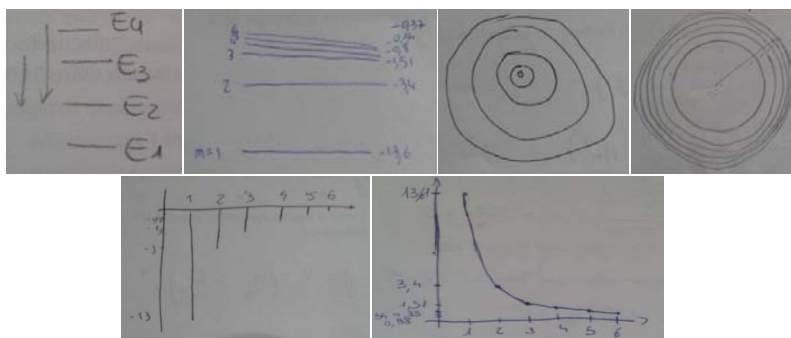


Fig. 2. Analisi dettagliata dei modelli utilizzati dagli studenti, esempi. Da sinistra in alto in senso orario: modello “a livelli” con distanze costanti senza riferimenti; modello “a livelli” con distanze decrescenti (tipo $1/n^2$) e riferimenti alle energie negative; modello “a orbite” con distanze costanti; modello “a orbite” con distanze decrescenti (tipo $1/n^2$); modello “a grafico” continuo e riferimenti alle energie positive; modello “a grafico” discreto e riferimenti alle energie negative.

Nella sperimentazione SEFM è stata esplicitamente indirizzata la questione di che cosa rappresentassero i livelli energetici in un modello atomico, tramite una domanda che presupponesse una risposta verbale piuttosto che grafica. La caratterizzazione dei livelli energetici avviene per lo più tramite una definizione che implica una localizzazione spaziale. Nel pre-test i referenti concettuali sono le orbite (13/32), lo spazio dove risiedono gli elettroni (4/32), gli orbitali (2/32) o la distanza dal nucleo (1/32). Le proprietà degli elettroni in termini di energia (3/32), di eccitazione (3/32) o di energia dell'orbitale di appartenenza (1/32) sono presenti nelle argomentazioni degli studenti, così come interpretazioni in termini di energia caratteristica dei fotoni emessi (1/32) o indirettamente in termini di differenze di energie tra livelli che corrispondono alle energie emesse (1/32). L'analisi del post test ha evidenziato che un'ampia maggioranza di studenti acquisisce competenze nel caratterizzare i livelli atomici in termini di proprietà degli elettroni e di energie caratteristiche piuttosto che in termini di localizzazione spaziale: permangono infatti i referenti concettuali di spazio dove risiedono gli elettroni (4/31), distanza dal nucleo (3/31), orbite (2/31) e orbitali (2/31). Le proprietà degli elettroni sono viste in termini di eccitazione (9/31), energie (5/31), non emissione (4/31) e energie degli orbitali (1/31). Emergono descrizioni in termini di valori di energie che il sistema può assumere (6/31), energie la cui differenza è quella emessa (5/31) o in termini di energia dei fotoni (1/31).

L'utilizzo del referente concettuale “orbita” denota una difficoltà a capire cosa rappresentano i livelli; inoltre gli orbitali sono visti come una distribuzione spaziale piuttosto che come una distribuzione di probabilità.

6. Conclusioni

La proposta didattica sulla spettroscopia ottica qui presentata contribuisce a costruire negli studenti l'identità del fisico, implementando alcuni aspetti storici legati alla storia della spettroscopia a sostegno dei concetti affrontati. Essa è stata progettata, messa a punto e sperimentata in diversi contesti nel quadro di riferimento del Model of Educational Reconstruction (MER) e con metodologie Design-Based Research (DBR).

Il ruolo della storia della fisica nel percorso è stato molteplice e differenziato, in termini di questioni problematiche, quali i ragionamenti di Newton sulla natura della luce bianca, di esperienze narrate per consolidare il ruolo degli spettri nell'analisi di sostanze tramite saggi alla fiamma, di assegnazione di ruolo ai dati sperimentali per porre il problema dell'interpretazione dei meccanismi che emettono luce, di problem solving per la ricerca di interpretazioni nelle formule empiriche di Balmer e Rydberg (RQ1).

Un approccio di tipo storico aiuta gli studenti a superare i principali nodi di apprendimento emersi in letteratura, in particolare il legame concettuale tra emissioni discrete e livelli energetici quantizzati. Strumenti interpretativi, quali le righe come differenze di energia come emergono dalla formula di Balmer-Rydberg, piuttosto che la luce intesa in senso generale di radiazione piuttosto che di fotoni o onde sono utilizzati dagli studenti per interpretare spettri ottici e relativi meccanismi di emissioni alla base (RQ2).

I modelli atomici utilizzati dagli studenti per descrivere l'emissione di radiazione si dividono principalmente nella tipologia "a orbite di Bohr", probabilmente retaggio degli ambienti scolastici e largamente utilizzato per la sua immediata applicabilità e intuitività, e nella tipologia più astratta e generale "a livelli energetici". Riferimenti quantitativi sono spesso assenti e gli studenti si mantengono su un piano qualitativo (RQ3). Emerge la necessità di un approfondimento chiarificatore riguardo le profonde differenze concettuali tra i due modelli; a tal proposito è necessario introdurre nel percorso la trattazione e interpretazione di spettri atomici diversi da quelli caratteristici dell'atomo di idrogeno o di atomi idrogenoidi, in cui la corrispondenza tra orbite e livelli è diretta.

Bibliografia

- Anderson T., Shattuck J. (2012). "Design-Based Research: A Decade of Progress in Education Research?". *Educational Researcher*, 41 (1), pp. 16-25.
- Balmer J.J. (1885). "Notiz uber die Spectrallinien des Wasserstoffs". *Annalen der Physik*, 261 (5), pp. 80-87.
- Banet L. (1970). "Balmer's Manuscripts and the Construction of His Series". *American Journal of Physics*, 38 (7), pp. 821-828.
- Banet L. (1966). "Evolution of the Balmer series". *American Journal of Physics*, 34 (6), pp. 496-503.
- Bardar E.M., Prather E.E., Brecher K., Slater T.F. (2006). "The Need for a Light and Spectroscopy Concept Inventory for Assessing Innovations in Introductory Astronomy Survey Courses". *Astronomy Education Review*, 4 (2), pp. 20-27.
- Behrens C.E. (1943). "Atomic Theory from 1904 to 1913". *American Journal of Physics*, 11, pp. 60-66.

- Bevilacqua F. (1983). *Storia della fisica: un contributo per l'insegnamento della fisica*. Milano: FrancoAngeli.
- Bohr N. (1985). *Rydberg's discovery of the spectral laws*, in Kalckar, J., *Collected works*. 10. Amsterdam: North-Holland Publ. Cy., pp. 373–379.
- Boltzmann L. (1884) “Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie”. *Annalen der Physik und Chemie*, 258 (6), pp. 291-294.
- Buongiorno D. (2017) “Optical spectroscopy for biotechnology students”. *Il Nuovo Cimento*, 40C (106), pp. 1-12.
- Collins A., Joseph D., Bielaczyc K. (2004). “Design research: Theoretical and methodological issues”. *The Journal of the Learning Science*, 13 (1), pp. 15-42.
- De Maria M., Ianiello M.G. (2006). *Storia e didattica della fisica, strumenti per insegnare*. Roma: Aracne.
- Design-Based Research Collective (2003). “Design-based research: An emerging paradigm for educational inquiry”. *Educational Researchers*, 32 (1), pp. 5-8.
- Di Sessa A. (2004). *Contextuality and coordination in conceptual change*, in Redish E., Vicentini M., *Proceedings of the international School of Physics “Enrico Fermi”*: *Research on Physics Education* (Varenna on Lake of Como, July 15-25, 2003). Amsterdam: IOS Press/Italian Physics Society, pp. 137-156.
- Duit R., Gropengießer H., Kattmann U. (2005). *Towards science education research that is relevant for improving practice: The Model of Educational Reconstruction*, in H. E. Fischer, *Developing Standards in Research on Science Education*. London: Taylor & Francis, pp. 1-9.
- Duit R., Gropengießer H., Kattmann U., Komorek M., Parchmann I. (2012). *The Model of Educational Reconstruction - a framework for improving teaching and learning science*, in Jorde D., Dillon J., *Science Education Research and Practice in Europe*. Rotterdam: Sense Publishers, pp. 13-37.
- Fischer H. E., Klemm K. (2005). “Framework for Empirical Research on Science Teaching and Learning”. *Journal of Science Teacher Education*, 16, pp. 309-349.
- Galili I. (2018). *Scientific Knowledge as a Culture: A Paradigm for Meaningful Teaching and Learning of Science*, in Matthews M.R. (ed.), *History, Philosophy and Science Teaching: New perspectives*. Cham: Springer, pp. 203-234.
- Gilbert J.K., Boulter C., Rutherford M. (1998a). “Models in explanations, part 1: Horses for courses?”. *International Journal of Science Education*, 20 (1), pp. 83-97.
- Gilbert J.K., Boulter C., Rutherford M. (1998b). “Models in explanations, part 2: Whose voice, whose ears?”. *International Journal of Science Education*, 20 (2), pp. 187-203.
- Hindmarsh W.R. (1967), *Atomic Spectra*. Oxford: Pergamon Press.
- Ivanjek L. (2012). *An investigation of conceptual understanding of atomic spectra among university students*. (Ph.D. Thesis). University of Zagreb.
- Ivanjek L., Shaffer P.S., McDermott L.C., Planinic M., Veza D. (2015a). “Research as a guide for curriculum development: An example from introductory spectroscopy. I. Identifying student difficulties with atomic emission spectra”. *American Journal of Physics*, 83 (1), p. 85.
- Ivanjek L., Shaffer P.S., McDermott L.C., Planinic M., Veza D. (2015b). “Research as a guide for curriculum development: An example from introductory spectroscopy. II. Addressing student difficulties with atomic emission spectra”. *American Journal of Physics*, 83 (2), p. 171.

- Kirchhoff G., Bunsen R. (1860). "Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen". *Annalen der Physik*, 186 (6), pp. 161-189.
- Korhasan N.D., Wang L. (2016). "Students' mental models of atomic spectra". *Chemistry Education Research and Practice*, 17, pp. 743-755.
- Lee S. (2002). *Students' understanding of spectra*. (Ph.D. Thesis in Philosophy). Kansas State University.
- Lijnse P.L. (1995). "Developmental research as a way to an empirically based didactical structure of science". *Science Education*, 79, pp. 189-199.
- McDermott L.C. (2006). "Preparing K-12 teachers in physics. Insights from history, experience, and research". *American Journal of Physics*, 74, pp. 758-762.
- Meheut M., Psillos D. (2004). "Teaching-learning sequences". *International Journal of Science Education (IJSE)*, 26 (5), pp. 515-535.
- Michelini M. (2010). *Building bridges between common sense and physics description*, in Menabue L., Santoro G., *New Trends in STE*. Bologna: CLUEB, pp. 257-274.
- Michelini M., Santi L., Stefanel A. (2016). *Teaching physics in secondary school*, in Kajfasz E., Masson T., Triay R. (eds.), *Proceedings of FFP14* (Marseille, July 15-18, 2014). Marseille: PoS, p. 231.
- Newton I. (1993). "A new theory about light and colors". *American Journal of Physics*, 61 (2), pp. 108-112. Reprint of the first publication (1672).
- Rebello N.S., Cumaratunge C., Escalada L.T., Zollman D.A., Donnelly D. (1998). "Simulating the spectra of light source". *Computer in Physics*, 12 (1), p. 28.
- Savall-Alemany F., Domènech-Blanco J.L., Guisasola J., Martínez-Torregrosa J. (2016). "Identifying student and teacher difficulties in interpreting atomic spectra using a quantum model of emission and absorption of radiation". *Physics Review ST Physics Education Research*, 12 (1), p. 01013.
- Stefan J. (1879) "Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur". *Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, Vienna, 79, pp. 391-428.
- Viennot L. (1996). *Raisonnement en physique*. Paris-Bruxelles: De Boeck Université.
- Zollman D.A., Rebello N.S., Hogg K. (2002). "Quantum mechanics for everyone: Hands-on activities integrated with technology". *American Journal of Physics*, 70 (3), p. 252.