

Spettroscopia ottica per studenti universitari e di scuola secondaria superiore

Daniele Buongiorno • URDF, Università degli Studi di Udine, buongiorno.daniele@spes.uniud.it
Marisa Michelini • URDF, Università degli studi di Udine, marisa.michelini@uniud.it

Optical spectroscopy for freshmen and secondary-school students

È stato condotto uno studio per monitorare i ragionamenti spontanei di studenti di scuola secondaria superiore e matricole in biotecnologie a proposito dell'interpretazione di spettri ottici discreti nel contesto di un'attività basata sul laboratorio sperimentale di fisica. Nel quadro di riferimento del Model of Educational Reconstruction, l'esplorazione dei modelli interpretativi spontanei rappresenta una fase importante nel processo di strutturazione di proposte didattiche. Sulla base della letteratura di ricerca, abbiamo strutturato uno studio in cui vengono problematizzate le questioni interpretative sulla base della fenomenologia. I risultati della successiva analisi dati in merito ai ragionamenti degli studenti indicano che i modelli interpretativi microscopici sono utili per sviluppare proposte didattiche con lo scopo di ottenere una comprensione funzionale a proposito della formazione di spettri discreti.

Parole chiave: Spettroscopia ottica, spettri discreti, laboratorio didattico, ricostruzione didattica, modelli spontanei

In the context of a experimental lab activity with freshmen in biotechnology and secondary school students, a study to monitor their reasoning about the interpretation of discrete atomic spectra was conducted. In the framework of the Model of Educational Reconstruction, the exploration of spontaneous interpretative models is an important step in the process of structuring educational proposals. Based on the existing research literature, we designed a study in which interpretative issues are problematized on the basis of phenomenology. The results of the subsequent data analysis regarding students' reasoning points out that the microscopic interpretative models are useful to develop teaching proposals with the aim of obtaining a functional understanding about the formation of discrete spectra.

Keywords: Optical spectroscopy, discrete spectra, educational laboratory, Model of Educational Reconstruction, spontaneous models

177

Strategie e metodologie didattiche nell'insegnamento delle discipline

Spettroscopia ottica per studenti universitari e di scuola secondaria superiore

Introduzione

La fisica moderna è oggi parte integrante di tutti i curricula di scuola secondaria superiore in Europa, ma nella prassi la sua trattazione è ancor oggi più legata a una veloce e superficiale rassegna della storia della fisica agli inizi del ventesimo secolo, piuttosto che ad un approccio disciplinare che fondi una cultura legata alle nuove teorie con gli strumenti ed i metodi della fisica. L'obiettivo di introdurre la fisica moderna nei curricula scolastici è un problema di ricerca aperto, ben studiato per quanto riguarda particolari argomenti, come la meccanica quantistica (Michellini, 2008) o la teoria della relatività (Michellini et al., 2014, p. 1) ma meno trattata da punti di vista più generali, a parte pochi casi (Michellini et al., 2014, 2). L'approccio tradizionale all'insegnamento della fisica, sia a livello di scuola secondaria superiore, sia a livello universitario, prevede una trasmissione di concetti e principi generali, poco correlati ai fenomeni di base e alle problematiche interpretative, ponendo in secondo piano il ruolo attivo degli studenti (Euler, 2003), quando invece è più efficace un loro personale coinvolgimento. La spettroscopia ottica rappresenta un fertile contesto in cui sviluppare proposte didattiche, per vari motivi: l'assorbimento e l'emissione quantizzati di radiazione elettromagnetica, così come gli spettri atomici, sono concetti fondamentali in fisica e rappresentano alcuni dei principali strumenti di indagine basati sull'interazione luce-materia, senza contare la loro validità come contributo sociale alle applicazioni biomediche, astrofisiche e meteorologiche, di conservazione dei beni culturali nonché tecnologiche in generale. La spettroscopia ottica rappresenta un contributo epistemologico-disciplinare alla cultura in fisica come ponte concettuale e storico tra fisica classica e moderna, come contesto in cui comprendere il ruolo dell'energia nell'indagine fisica, come modalità di validazione di modelli interpretativi mediante misure indirette (si pensi al modello atomico o allo studio delle atmosfere stellari) e come codice da interpretare per ottenere informazioni sulle trasformazioni e sugli stati dei sistemi fisici. Essa rappresenta inoltre un grande contributo didattico al quadro interpretativo dell'ottica, alle basi concettuali della fisica moderna e agli strumenti e metodi di raccordo tra esperimento e teoria. La spettroscopia ottica è un argomento poco trattato e generalmente lo è solo a livello universitario o di scuola secondaria superiore, anche se molti aspetti sono adatti ai primi passi nell'educazione scientifica. Nonostante la sua valenza disciplinare, didattica e sociale, non c'è alcuna corrispondenza con una trattazione didattica ugualmente ampia: sulla spettroscopia ottica mancano infatti proposte di percorsi didattici e ancora più rari sono gli studi sui processi di apprendimento basati sulla ricerca. Nello sviluppare proposte didattiche, l'analisi dei nodi di apprendimento è cruciale, e uno studio della letteratura di ricerca didattica sul tema della spettroscopia, per quanto attualmente limitata, mostra che le principali difficoltà di apprendimento riguardano le capacità predittive nei processi di emissione e assorbimento dei modelli quantistici dell'atomo e della radiazione, il legame concettuale tra righe spettrali



discrete e livelli atomici quantizzati, e il riconoscimento delle condizioni sperimentali per cui è possibile osservare uno spettro discreto piuttosto che uno continuo. I nodi concettuali, presenti sia tra studenti universitari e di scuola secondaria superiore, ma anche tra insegnanti di scuola secondaria superiore, che emergono riguardano l'associazione dell'energia di una riga spettrale con l'energia di un singolo livello piuttosto che alla differenza in energia tra coppie di livelli (Zollman et al., 2002; Rebello et al., 1998; Ivanjek, 2012; Ivanjek et al., 2015, Korhasan, Wang, 2016; Savall-Alemanly et al., 2016). Esistono difficoltà legate alla quantizzazione dell'energia in un atomo che riguardano l'idea che i fotoni siano sempre assorbiti anche se l'atomo acquista un'energia che non corrisponde a nessuno dei livelli permessi (Savall-Alemanly et al., 2016) oppure l'idea che il livello fondamentale abbia energia nulla e quindi non è chiaro come attribuire significato a valori di energia negativi (Ivanjek et al., 2015; Savall-Alemanly et al., 2016). Nodi concettuali legati alla quantizzazione dell'energia della radiazione riguardano l'idea che un fotone può essere parzialmente assorbito (Savall-Alemanly et al., 2016), che l'intensità della radiazione non è legata al numero di fotoni, ma alla loro energia (Lee, 2002; Savall-Alemanly et al., 2016) e che in uno spettro sia importante il numero di colori distinguibili piuttosto che il numero di righe (Ivanjek et al., 2015). Un'ampia varietà di nodi concettuali è emersa anche a proposito dell'interazione tra atomo e radiazione, in particolare: la radiazione emessa è legata solo allo stato finale o solo a quello iniziale (Savall-Alemanly et al., 2016), le transizioni coinvolgono sempre il livello fondamentale (Ivanjek et al., 2015, Savall-Alemanly et al., 2016), non è rispettato il principio di conservazione dell'energia in quanto l'atomo deve sempre effettuare una transizione tra livelli, anche se l'energia del fotone non lo consente (Savall-Alemanly et al., 2016). Spesso gli studenti utilizzano largamente il modello per orbite di Bohr, associando le orbite ai livelli, interpretando in modo errato la rappresentazione simbolica delle orbite, effettuando banali connessioni tra le righe spettrali (che rappresentano l'unica realtà osservabile) e la struttura microscopica, in particolare emerge l'associazione dell'energia della radiazione, hf , al livello e/o alla riga corrispondente, senza menzionare il concetto di fotone (Korhasan, Wang, 2016). Un altro nodo concettuale riguarda il non considerare il livello fondamentale come livello energetico (Ivanjek et al., 2015). Concetti diversi (riga spettrale, livello energetico, energia del fotone) sono spesso confusi e usati in modo ambiguo nel descrivere i fenomeni e fare predizioni (Ivanjek et al., 2015, Korhasan, Wang, 2016). Anche nei corsi introduttivi di astronomia, dove la spettroscopia gioca un ruolo chiave nell'interpretazione fisica dei fenomeni, esistono difficoltà legate al descrivere il processo di emissione luminosa da parte degli atomi (Bardar et al., 2006).

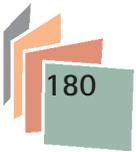
Le difficoltà identificate nelle summenzionate ricerche possono influenzare l'interpretazione che gli studenti fanno di spettri atomici discreti, dal momento che una comprensione funzionale della natura della luce e della struttura atomica sono prerequisiti fondamentali per interpretare correttamente i fenomeni di assorbimento ed emissione di radiazione. Queste studi hanno evidenziato inoltre la persistente presenza di modelli spontanei degli studenti a proposito della formazione di spettri discreti e del loro legame con la struttura quantizzata dell'atomo e tali modelli devono essere superati per raggiungere una visione scientifica dell'argomento (Gilbert et al., 1998).

La ricerca didattica ha evidenziato come la costruzione del legame tra i livelli micro e macroscopico di descrizione dei processi siano aspetti rilevanti per l'apprendimento. È noto come un approccio didattico basato sugli spontanei angoli



di attacco a contenuti specifici a partire dal senso comune e dalle idee spontanee degli studenti sia una condizione necessaria per attivare il processo di apprendimento (Viennot, 2003). È perciò importante identificare ed esplorare le rappresentazioni tramite le quali gli studenti correlano osservazioni macroscopiche (righe spettrali) e mondo microscopico (livelli energetici), in particolare le idee spontanee riguardo gli aspetti interpretativi della struttura microscopica della materia, aspetti centrali anche nello sviluppo storico delle teorie fisiche circa l'interpretazione di spettri atomici (Behrens, 1943).

La nostra Unità di Ricerca in Didattica della Fisica (URDF) presso l'Università degli Studi di Udine si propone di sviluppare un percorso didattico sulla spettroscopia ottica per la costruzione di ponti tra la fisica classica e quella moderna, che veda gli studenti protagonisti di studi sperimentali e interpretativi che ne fondino le basi. Un passo fondamentale nel processo di sviluppo di percorsi didattici è l'esplorazione delle idee spontanee degli studenti. Vengono qui descritti due studi preliminari in cui attività sperimentali mirate permettono di evidenziare i modelli spontanei di studenti universitari e di scuola secondaria superiore circa il legame tra modello a livelli energetici dell'atomo e le emissioni luminose rivelabili con semplici ed economici spettroscopi.



1. La ricerca e il quadro di riferimento teorico

L'approccio utilizzato in questa ricerca è di tipo *content-oriented* in quanto viene posta attenzione ai contenuti e a come sono affrontati. Rispetto ad un approccio di tipo *student-oriented*, in cui si pone attenzione principalmente ai ragionamenti cognitivi degli studenti senza valutarne la correttezza formale, è più vicino ad un approccio scientifico in quanto analizza l'efficacia di un intervento didattico nel permettere agli studenti di appropriarsi dei giusti modelli e concetti scientifici. Lo studio qui presentato vuole analizzare qualitativamente i modelli adottati dagli studenti per spiegare una particolare fenomenologia: la formazione degli spettri ottici.

La progettazione di un'attività didattica inizia con la chiarificazione dei contenuti disciplinari, in parallelo a uno studio di tipo storico, dei nuclei fondanti dell'argomento e degli aspetti fenomenologici significativi e con un'analisi dei nodi concettuali degli studenti, per poi arrivare all'analisi del significato educativo dell'argomento e alla sua ricostruzione a scopo didattico, ai fini della progettazione e costruzione di un percorso, usato per monitorare i processi di apprendimento. Il quadro di riferimento della nostra ricerca è il *Model of Educational Reconstruction* (MER, Fig.1) (Duit et al., 2005; Duit et al., 2012) che noi guardiamo anche come modello dell'innovazione didattica.

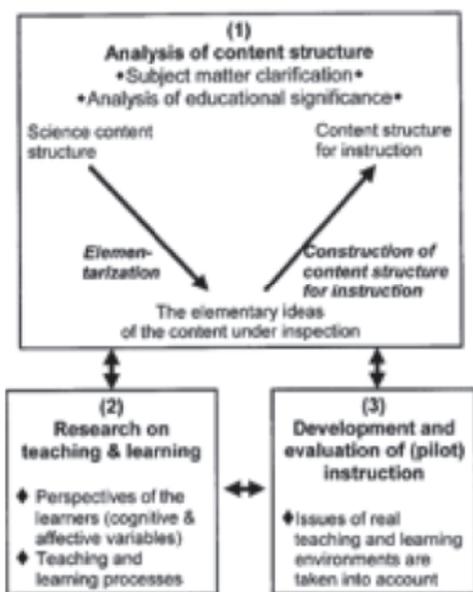


Fig.1: Il *Model of Educational Reconstruction* (Duit et al., 2005)

Nel nostro approccio di ricerca, la strutturazione di un percorso di insegnamento/apprendimento in prospettiva verticale prevede la progettazione di *micro-step* concettuali in cui strategie di apprendimento attivo producono il superamento dei nodi concettuali e l'appropriazione degli elementi disciplinari fondanti. L'esplorazione dei modelli interpretativi spontanei (Gilbert et al., 1998) è quindi una fase importante nel processo di strutturazione di proposte del razionale della proposta didattica. L'analisi delle difficoltà degli studenti e la progettazione di un percorso avvengono in un contesto *Design Based Research* (Anderson, Shattuck, 2012; DBR Collective, 2003; Collins et al., 2004; Van der Akker et al., 2006) in cui i moduli concettuali vengono progettati, sperimentati, valutati e rielaborati ciclicamente in modo da dare un carattere evolutivo e flessibile alla ricerca. Ciascun modulo è affrontato con una metodologia *Inquiry-Based-Learning* (IBL) in cui la problematizzazione avviene mediante attività sperimentale durante la quale allo studente è richiesto di identificare le caratteristiche dei fenomeni e il modo in cui prima si descrivono e poi si interpretano, superando i limiti dell'impostazione didattica tradizionale.

Il problema aperto di come gli studenti universitari e di scuola secondaria interpretano il legame concettuale tra righe spettrali discrete e livelli quantizzati ha ispirato due studi pilota di cui verrà descritto il contesto di ricerca e di cui vengono presentati alcuni risultati emersi dall'analisi di dati raccolti.

2. Studenti universitari - contesto e domande di ricerca

Com'è prassi in ricerca didattica, ci si focalizza su uno specifico aspetto all'interno di una tematica più generale, in questo caso il legame concettuale tra righe spettrali discrete e livelli quantizzati nell'ambito della spettroscopia ottica. In particolare vengono analizzati: 1) le idee spontanee degli studenti a proposito

del legame concettuale tra righe spettrali e livelli energetici e 2) i modelli microscopici che emergono spontaneamente dagli studenti per descrivere emissioni discrete da parte della materia. Il contesto in cui si è svolta la ricerca è un contesto laboratoriale, in cui gli studenti sono attivamente coinvolti in modo operativo e posti di fronte a questioni interpretative legate all'analisi di semplici spettri in termini problematici, per sondare la presenza di nodi concettuali.

L'attività si è svolta in un contesto in cui gli studenti, dopo una breve introduzione teorica, hanno svolto in gruppi un esperimento di spettroscopia ottica in cui prima osservavano le emissioni discrete da una lampada a gas, e poi ne misuravano la lunghezza d'onda tramite un goniometro ottico (Fig. 2). L'esperimento è stato seguito dalla compilazione individuale di un tutorial, basato su quello sviluppato in (Ivanjek et al., 2015) e di un post-test. L'attività qui presentata si pone l'obiettivo di rispondere alle seguenti domande di ricerca:

1. In che modo gli studenti correlano righe spettrali osservate e livelli energetici del sistema emittente?
2. Quale modello viene impiegato per descrivere l'emissione di luce da un atomo?



3. Studenti universitari - campione e metodologia

Lo studio ha coinvolto un gruppo di matricole in biotecnologie iscritte al corso di studi presso l'Università di Udine (N=56). Al momento dell'attività di laboratorio, prevista dal corso, gli studenti avevano seguito un corso introduttivo su atomi e molecole, struttura atomica dell'atomo di idrogeno, orbitali atomici, numeri quantici, ottica geometrica e ondulatoria con particolare attenzione alla diffrazione. L'attività è stata ripetuta in due pomeriggi tra novembre e dicembre 2015 per dar modo a tutti gli studenti di partecipare ed è stata divisa in quattro momenti:

Breve lezione introduttiva e riepilogativa (10 min) prima dell'esperimento a proposito dei seguenti argomenti: differenti tipi di sorgenti luminose (dal corpo nero al laser), spettri continui e discreti (sottolineando l'esistenza di una struttura energetica a livelli discreti per rendere conto degli spettri atomici), diffrazione con leggi dei massimi e minimi per rendere conto delle caratteristiche di un pattern di diffrazione prodotto da un reticolo, descrizione dell'attività (strumentazione e scopo);

Attività di laboratorio (circa 1 ora): gli studenti hanno condotto l'esperimento divisi in gruppi di circa 3 componenti. L'attività consisteva nell'osservare gli spettri discreti dei vari ordini prodotti dall'interazione con un reticolo di diffrazione della luce emessa da una lampada a scarica di gas. Un goniometro ottico (Fig. 2) permette la misura degli angoli a cui ciascuna componente cromatica veniva diffratta. Da queste misure di angoli, gli studenti, utilizzando la formula del reticolo¹ hanno ricavato la lunghezza d'onda relativa al colore osservato e l'hanno convertita in energia ricordando che: con h costante di Planck e c velocità della luce;

1 Nella formula $d \sin \theta = m \lambda$ indica il passo del reticolo, θ è l'angolo a cui viene rifratto un particolare colore rispetto all'asse ottico, m l'ordine dello spettro in cui compare la riga misurata, e la lunghezza d'onda corrispondente.

Uno specifico tutorial., basato su quello sviluppato e descritto in (Ivanjek et al., 2015) è stato sottoposto agli studenti in maniera individuale. Il tutorial rappresenta uno strumento di lavoro che focalizza l'attenzione dello studente su uno specifico percorso concettuale problematico e in questo caso, è stato concepito come uno strumento di indagine, piuttosto che come supporto all'attività di laboratorio. Ha lo scopo di guidare i ragionamenti degli studenti attraverso un processo induttivo al fine di scoprire le giuste relazioni tra le energie delle righe spettrali e le energie dei livelli nel semplice caso dell'atomo di idrogeno, scoprire che il livello energetico con energia zero è il maggiore tra tutti e che i livelli diventano sempre più fitti man mano che aumenta l'energia. Il tutorial è concepito anche per aiutare gli studenti a riconoscere che l'energia massima e quella minima registrate in uno spettro corrispondono, rispettivamente alla differenza di energia massima e minima tra i livelli. Il tutorial è composto da 9 quesiti a risposta aperta e gli studenti sono stati esortati ad argomentare le loro risposte.

Un post-test, è stato sottoposto agli studenti, in maniera individuale, a distanza di circa due mesi dall'attività di laboratorio. In esso venivano richiamate le questioni già affrontate nel tutorial., utilizzando 7 differenti domande chiave a risposta aperta: in esso venivano testate le abilità degli studenti ad associare una riga spettrale con una transizione specifica tra due livelli energetici e la capacità di tracciare qualitativamente uno schema dei livelli energetici a partire da un dato spettro a righe. 45 studenti hanno compilato il post-test.

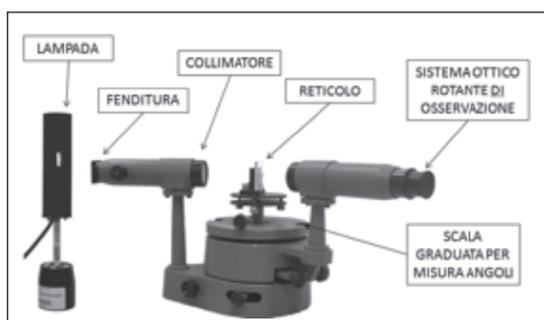


Figura 2: L'esperimento del goniometro ottico

La luce emessa dalla lampada viene collimata e fatta incidere perpendicolarmente a un reticolo di diffrazione. Le varie componenti cromatiche si sparpiano angolarmente il sistema ottico rotante permette di misurare gli angoli corrispondenti

4. Studenti universitari - analisi dati

I dati raccolti, ovvero le risposte degli studenti, sono stati analizzati in maniera qualitativa (Mayring, 2004; Otero, Harlow, 2009), dal momento che l'attività didattica condotta è stata inevitabilmente influenzata da fattori sociali e ambientali complessi, difficilmente esprimibili e quantificabili in modo quantitativo. In particolare gli aspetti presenti nelle risposte sono stati utilizzati per creare delle ampie categorie, definite operativamente, per identificare il numero di aspetti non mutuamente esclusivi presenti nelle argomentazioni a ciascuna risposta, i vari tipi di aspetti notati e i referenti concettuali che sottendono i modelli interpretativi. Le risposte e i disegni di ogni studente sono stati quindi classificati in queste categorie fondate sia sulle domande di ricerca (note a priori)

sia sugli aspetti emersi dalle risposte e dalle interviste (notati a posteriori). La definizione di ogni categoria è stata formulata in base alle risposte scritte degli studenti che vi appartengono per renderla quanto più possibile simile ad esse. Alla luce di ciò, i dati sono stati analizzati e classificati in categorie provvisorie, che nel corso dell'analisi sono state modificate. Le categorie definitive hanno permesso l'interpretazione qualitativa dei dati, che si è basata sull'analisi delle frequenze delle categorie 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. La metodologia dell'analisi qualitativa ha reso possibile attribuire significato ai dati per poi renderlo comunicabile al fine di inferire alcune conseguenze generalizzando i risultati ottenuti. Viene qui riportata l'analisi delle risposte a due domande del tutorial e a una del post-test, scelte tra tutte perché hanno prodotto la maggiore significatività in termini di presenza di nodi concettuali.

La lettura che gli studenti fanno di uno spettro in cui compaiono righe colorate può essere analizzata dal punto di vista della domanda del tutorial in cui gli studenti vengono posti di fronte allo spettro ottico dell'idrogeno (serie di Balmer, Fig. 3) e a un dialogo ipotetico tra due studenti in cui il primo afferma che la riga rossa corrisponde allo stato fondamentale perché, tra tutte, è quella con minor energia, mentre il secondo afferma che la riga rossa corrisponde al livello con energia più alta dell'atomo di idrogeno perché ha la maggior lunghezza d'onda. Nella serie di Balmer dell'idrogeno la riga rossa corrisponde alla transizione tra i due livelli più vicini in energia coinvolti e, chiedendo un parere agli studenti su tali affermazioni, la domanda vuole sondare la loro interpretazione del legame tra righe e livelli. Le risposte degli studenti con le relative argomentazioni sono riportate in Tab.1.



Figura 3: Spettro ottico dell'idrogeno

In una domanda del tutorial viene chiesto agli studenti se sono d'accordo nell'affermare che la riga rossa (num. 5) corrisponde al livello fondamentale perché tra tutte è quella con meno energia

Dall'analisi delle risposte emerge che 17 studenti esprimono esplicitamente disaccordo con l'affermazione che le righe spettrali corrispondono ai livelli energetici, argomentando che ogni riga è il risultato di un salto o di una variazione energetica. 14 studenti, viceversa, in maniera implicita o esplicita si trovano in accordo con tale affermazione. 20 studenti esprimono esplicitamente disaccordo con l'affermazione specifica che la riga rossa corrisponde allo stato fondamentale, mentre 27 di loro si trovano d'accordo, appellandosi all'argomentazione semplicistica circa il legame tra lunghezza d'onda ed energia. La maggior parte degli studenti non mostra infatti alcun problema nel descrivere le relazioni tra energia, lunghezza d'onda (λ) e colore, ma solo una piccola minoranza (3) affermano esplicitamente che tale relazione si riferisce all'energia delle righe e non all'energia dei livelli, mentre 2 studenti affermano che tale relazione è riferita sia ai livelli che alle righe.

AFFERMAZIONE	ACCORDO (A) DISACCORDO (D) NUM STUDENTI	ARGOMENTAZIONE (ESEMPI)
"Una riga osservata corrisponde a un livello energetico."	(A) 14/56	"Le righe dello spettro rappresentano livelli con energia sempre maggiore."
	(D) 17	"Le righe rappresentano un salto tra due livelli energetici e non un livello singolo."
"La riga rossa corrisponde al livello fondamentale."	(A) 27	"La frequenza è inversamente proporzionale a λ secondo la formula $E=hf=hc/\lambda$. Dunque la banda 5 rispetto alla 1 presenta energia minore ovvero si troverà molto più vicino al nucleo. Possiamo dire che la banda 5, tra tutte, rappresenta il livello fondamentale dell'atomo."
	(D) 20	"Dallo spettro che vedo non posso identificare il livello fondamentale con energia maggiore poiché il colore che vedo identifica solo una variazione di energia e quindi un salto di livello."
" $E=hf$ si riferisce ai livelli."	(A) 2	"La correlazione tra energia e frequenza è espressa come $E=hf$ e inoltre $c=\lambda f$ [...]. Il colore rosso corrisponde ad una lunghezza d'onda maggiore e dunque ad una frequenza ed un'energia minore, quindi può corrispondere al livello di energia fondamentale per l'atomo di idrogeno."
	(D) 3	"Tale formula si riferisce all'energia della radiazione e quindi la riga all'estrema destra è quella con minor energia."



Tabella 1: Risposte degli studenti universitari alla domanda del tutorial considerata (la riga rossa corrisponde al livello fondamentale perché tra tutte è quella con meno energia?)

Dopo aver mostrato i valori dei sette livelli energetici più bassi per l'atomo di idrogeno, nella prossima domanda presa in considerazione, agli studenti è chiesto di disegnare tali livelli rispettando qualitativamente posizioni relative e distanze, in riferimento anche allo spettro osservato. Dai dati emerge che la rappresentazione maggiormente utilizzata (29) corrisponde alla classica rappresentazione "per orbite di Bohr" (Fig. 4a). Un numero non trascurabile di studenti (17) utilizza una rappresentazione "per livelli" sviluppati o in orizzontale o in verticale (Figg. 4b, 4c). 4 studenti utilizzano più rappresentazioni contemporaneamente, in particolare (Fig. 4d) accoppiano una struttura a orbite con una struttura a livelli (2) oppure (Fig. 4e) una struttura a orbite e una sorta di istogramma (2). Tra gli studenti che rappresentano i livelli tramite orbite, risulta in particolare che la maggior parte (14) ne disegna 7, corrispondenti ai livelli riportati nella tabella mostrata precedentemente, mentre un numero inferiore di studenti ne disegna 6 (1) (Fig. 4f) oppure 5 (2) (Fig. 4g) per giustificare le 5 righe osservate nello spettro. 2 studenti disegnano salti senza alcun riferimento, mentre 2 studenti riportano anche lo spettro risultante (Fig. 4h). Tra gli studenti che utilizzano una rappresentazione "per livelli", la maggior parte (9) disegna 7 livelli, mentre il resto degli studenti ne disegna in numero arbitrario o senza riferimenti allo spettro mostrato.

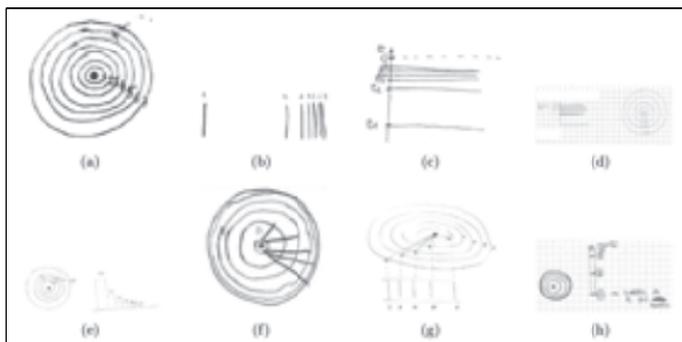


Figura 4: Livelli energetici dell'atomo di idrogeno: rappresentazioni degli studenti universitari nel tutorial

Nella domanda del post-test considerata, agli studenti è mostrato lo spettro dell'idrogeno di Fig. 5 ed è chiesto loro di individuare il numero minimo di livelli necessari per giustificare la presenza delle righe che si osservano, facendone un disegno.



Figura 5: Spettro dell'idrogeno mostrato agli studenti universitari nel post-test. L'energia cresce verso destra

Di fronte allo spettro discreto dell'idrogeno in cui compaiono sei righe raggruppate in tre serie (che è ciò che si osserva se i livelli coinvolti sono i quattro più bassi) gli studenti disegnano un numero di livelli pari a 6 (8/45 studenti) associando una riga a un livello, 7 (6) associando una riga a un livello e aggiungendo il fondamentale, 3 (5) riferiti alle tre serie osservate, 7 (3) associati a quanti intervalli sono osservati nello spettro, 3 (10) non giustificando la risposta e 4 (2) per rendere correttamente conto delle sei emissioni osservate (Fig. 6). Anche in questo caso la maggior parte degli studenti utilizza la rappresentazione "per orbite" di Bohr (25) piuttosto che una rappresentazione "per livelli" (13).

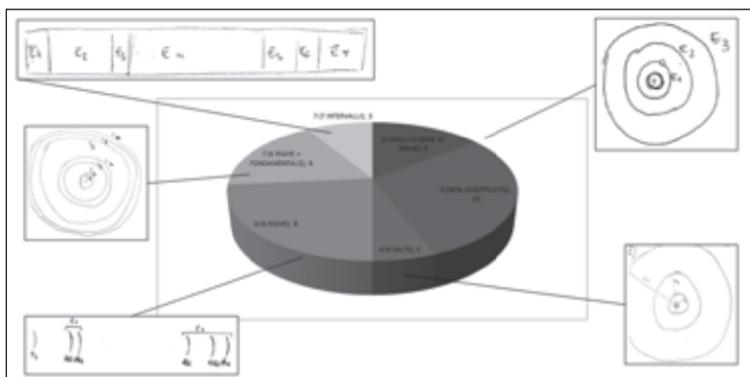


Figura 6: Livelli energetici dell'atomo di idrogeno: rappresentazioni degli studenti universitari nel post-test.

6. Studenti di scuola secondaria superiore - contesto e domande di ricerca

L'attività con gli studenti di scuola secondaria superiore si è svolta nel medesimo contesto laboratoriale descritto in precedenza: dopo una breve introduzione teorica, hanno svolto in gruppi l'esperimento del goniometro ottico, seguito dalla compilazione individuale dello stesso tutorial sottoposto agli studenti universitari, ma non del post-test. Le domande di ricerca sono le medesime.

7. Studenti di scuola superiore - campione e metodologia

Il campione consiste in N=66 studenti di scuola secondaria superiore, selezionati dai rispettivi insegnanti tra gli alunni con maggior interesse verso la fisica delle classi quinte di tre Licei Scientifici della provincia di Treviso. L'attività è stata condotta in un pomeriggio nel mese di novembre 2015. L'attività è stata divisa in tre momenti:

1. Breve lezione introduttiva (10 min) a proposito dei seguenti argomenti: differenti tipi di sorgenti luminose (dal corpo nero al laser), spettri continui e discreti (sottolineando l'esistenza di una struttura energetica a livelli discreti per rendere conto degli spettri atomici), diffrazione con leggi dei massimi e minimi per rendere conto delle caratteristiche di un pattern di diffrazione prodotto da un reticolo, descrizione dell'attività (strumentazione e scopo);
2. Attività di laboratorio (circa 1 ora): gli studenti hanno condotto l'esperimento divisi in gruppi di circa 3 componenti
3. Compilazione individuale del tutorial.



8. Studenti di scuola superiore - analisi dati

Anche in questo caso, i dati raccolti, ovvero le risposte scritte degli studenti, sono stati analizzati in maniera qualitativa (Otero, Harlow, 2009): gli aspetti presenti nelle risposte sono stati utilizzati per creare delle ampie categorie, definite operativamente, per identificare il numero di aspetti non mutuamente esclusivi presenti nelle argomentazioni a ciascuna risposta. Viene qui riportata l'analisi delle risposte a una sola domanda del tutorial, quella che permette di analizzare la lettura che gli studenti fanno di uno spettro in cui compaiono righe colorate e in cui si chiede di commentare l'affermazione "la riga rossa corrisponde al livello fondamentale perché tra tutte è quella con meno energia". Le risposte degli studenti con le relative argomentazioni sono state classificate come nel caso precedente e sono riportate in Tab. 2.

AFFERMAZIONE	ACCORDO (A) DISACCORDO (D) NUM STUDENTI	ARGOMENTAZIONI (ESEMPI)
"La riga rossa corrisponde al livello fondamentale."	(A) 54/66	"La frequenza è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda, quindi la riga rossa, che ha lunghezza d'onda maggiore, corrisponde al livello fondamentale."
	(D) 10	"È impreciso affermare che [la riga rossa] corrisponde al livello fondamentale in quanto un'emissione di luce avviene in corrispondenza di un salto di livello energetico."
"Una riga osservata corrisponde a un livello energetico."	(A) 5	"La riga 5 rappresenta il primo livello energetico più basso per poter eccitare un elettrone."
	(D) 6	"Un'emissione di luce avviene nel momento in cui si ha un salto di livello energetico."
"E=hf si riferisce ai livelli."	(A) 7	"Secondo la formula $E=hc/\lambda$ si tende al livello fondamentale quanto più grande è la lunghezza d'onda."
	(D) 2	"La formula indica l'energia della luce rilasciata da un elettrone nel passaggio da un livello superiore a uno inferiore, non indica l'energia di un livello."

Tabella 2: Risposte degli studenti di scuola superiore alla domanda del tutorial considerata (la riga rossa corrisponde al livello fondamentale perché tra tutte è quella con meno energia?)

9. Discussione

Dall'analisi delle risposte degli studenti, sia universitari che di scuola secondaria superiore, alla prima domanda del tutorial, emerge un'idea, nella forma di associazione spontanea, per cui una riga di emissione rappresenta direttamente un livello energetico del sistema emittente. Questa rappresentazione che gli studenti fanno degli spettri atomici è anche presente a livello storico, in quanto le prime interpretazioni di spettri discreti associavano un singolo modo energetico, o una singola vibrazione armonica, ad una riga spettrale (Behrens, 1943). La rappresentazione dei livelli energetici ottenuta dall'osservazione di uno spettro è il punto chiave di questa ricerca: i disegni che gli studenti universitari producono nel tutorial e nel post-test confermano una tendenza ad associare una riga spettrale ad un livello energetico. Tale tendenza è più marcata nel post-test in quanto non viene fornita nessuna tabella con i valori numerici dei livelli energetici. Di fronte a uno spettro a righe, gli studenti universitari che hanno partecipato allo studio disegnano spontaneamente una struttura a livelli che ricalca le regolarità osservate. Come emerso in precedenti ricerche le evidenze raccolte sembrano confermare la tendenza a correlare una singola emissione spettrale con un singolo livello energetico e mostrano una difficoltà a correlare i due tipi di referenti. La difficoltà nell'associazione concettuale tra una singola emissione spettrale e un singolo li-

vello energetico potrebbe essere correlata ad altri due importanti esiti: all'attribuzione di energia nulla al livello fondamentale che risulta coinvolto in tutte le transizioni, e/o ad un uso improprio del termine "livello energetico".

10. Conclusioni

Nel quadro di riferimento del *Model of Educational Reconstruction* la trattazione didattica della spettroscopia ottica implica un'analisi dei nodi di apprendimento e dei modelli interpretativi spontanei da parte degli studenti. È stato strutturato uno studio in cui vengono problematizzate le questioni interpretative legate all'analisi di semplici spettri discreti. Due attività di laboratorio sperimentale sono state condotte presso l'Università di Udine nei mesi di novembre e dicembre 2015 con studenti universitari e di scuola secondaria superiore: la prima attività ha coinvolto 56 studenti iscritti al primo anno di biotecnologie e la seconda ha coinvolto 66 studenti di alcuni licei scientifici veneti. Dopo una breve trattazione di ottica fisica, tutti gli studenti hanno misurato in gruppi alcune lunghezze d'onda presenti nello spettro discreto di emissione di varie lampade a scarica di gas tramite il classico esperimento del goniometro ottico, in cui è possibile ricavare la lunghezza d'onda da una misura di angolo. L'attività è stata accompagnata da un tutorial individuale e nel caso degli studenti universitari da un post-test. In entrambi i casi, i risultati danno indicazioni in merito all'utilità delle attività proposte, ai nodi concettuali presenti e ai modelli interpretativi spontanei.

L'approccio basato sulla fenomenologia e le domande poste agli studenti hanno permesso il salto da un piano descrittivo a uno interpretativo, stimolando i loro ragionamenti al livello microscopico. Ciò dimostra che integrare attività di osservazione/sperimentazione con domande mirate all'interpretazione delle osservazioni stimola gli studenti a svolgere un ruolo attivo nell'utilizzare un modello nello sviluppo di idee e spiegazioni. L'attività basata sull'interpretazione di fenomeni fisici osservati ha consentito la produzione di modelli interpretativi spontanei che descrivono la struttura energetica di sorgenti che producono uno spettro discreto, anche se a volte limitandosi a dedurre le osservazioni dalla teoria dell'atomo di Bohr.

La varietà di modelli usati dagli studenti, l'esperimento proposto e le strategie utilizzate rappresentano una risorsa didattica su cui costruire percorsi concettuali basati sulla ricerca e specifici inquiry dal momento che a partire da semplici esplorazioni è possibile fondare le basi interpretative dei processi microscopici nella fisica moderna, superando il limite della pura misura di laboratorio.

Riferimenti bibliografici

- Anderson T., Shattuck J. (2012). Design-Based Research: A Decade of Progress in Education Research? *Educational Researcher*, 41(1), pp. 16-25.
- 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. *Astron. Educ. Rev.*, 4(2), pp. 20-27.
- Behrens C.E. (1943). Atomic Theory from 1904 to 1913. *Am. J. of Phys.*, 11, pp. 60-66.
- Collins A., Joseph D., Bielaczyc K. (2004). Design research: Theoretical and methodological issues. *The Journal of the Learning Science*, 13(1), pp. 15-42.
- Design-Based-Research Collective. (2003). Design-based research: An emerging paradigm for educational inquiry. *Educational Researchers*, 32(1), pp. 5-8.



- Duit R., Gropengießer H., U. Kattmann, (2005). Towards science education research that is relevant for improving practice: The Model of Educational Reconstruction. In H. E. Fischer (Ed.), *Developing Standards in Research on Science Education* (pp. 1-9). London, Taylor & Francis.
- Duit R., Gropengießer H., U. Kattmann, Komorek M., Parchmann I. (2012). The Model of Educational Reconstruction - a framework for improving teaching and learning science. In D. Jorde, J. Dillon (Ed.), *Science Education Research and Practice in Europe* (pp. 13-37). Rotterdam, Sense Publishers.
- Euler M. (2003). Quality development: Challenges to physics education. In M. Michelini (Ed.), *Quality development in teacher education and training, GIREP selected paper book* (pp. 17-29). Udine, Forum publisher.
- Gilbert J.K., Boulter C., Rutherford M. (1998). Models in explanations, part 1: Horses for courses? *Int. J. of Sc. Ed.*, 20(1), pp. 83-97.
- Gilbert J.K., Boulter C., Rutherford M. (1998). Models in explanations, part 2: Whose voice, whose ears? *Int. J. of Sc. Ed.*, 20(2), pp. 187-203.
- Ivanjek L. (2012). An investigation of conceptual understanding of atomic spectra among university students. Ph.D. dissertation, University of Zagreb.
- Ivanjek L., Shaffer P.L., McDermott L.C., Planinic M., Veza D. (2015). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory spectroscopy. I. Identifying student difficulties with atomic emission spectra, *Am. J. of Phys.*, 83(1), pp. 85-90.
- Ivanjek L., Shaffer P.L., McDermott L.C., Planinic M., Veza D. (2015). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory spectroscopy. II. Addressing student difficulties with atomic emission spectra. *Am. J. of Phys.*, 83(2), pp. 171-178.
- Korhasan N.D., Wang L. (2016). Students' mental models of atomic spectra. *Chem. Educ. Res. Pract.* 17, pp. 743-755.
- Lee S. (2002). *Students' understanding of spectra*, Ph.D. dissertation, Kansas State University.
- Mayring P. (2004). Qualitative content analysis. In Flick U., von Kardoff E., Steinke I. (Ed.), *A companion to qualitative research*. London: Sage.
- Michelini M. (2008). Approaching the theory of QM: the first steps towards a coherent synthesized interpretation with a supporting formalism. In R. Jurdana-Sepic et al. (Ed.), *Frontiers of Physics Education, Girep - Epec book of selected contributions* (pp. 93-101). Rijeka: Zlatni.
- Michelini M., Pugliese E., Santi L. (2014a). Mass from Classical Physics to Special Relativity: Learning Results. In Tasar F. (Ed.), *Proceedings of The WCPE* (pp. 141-154). Istanbul: Pegem Akademi.
- Michelini M., Santi L., Stefanel A. (2014b). Teaching modern physics in secondary school. *Proceedings of Science (FFP14)* 231, 15-18 July 2014.
- Otero V.K., Harlow D.B. (2009). Getting started in qualitative physics education research. *PER Central*.
- Rebello N.S., Cumararatunge C., Escalada L.T., Zollman D.A., Donnelly D. (1998). Simulating the spectra of light source. *Computer in Physics*, 12(1), p. 28.
- Savall-Aleman 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. *Phys. Rev. ST Phys. Ed. Res.*, 12(1), pp. 010132-1-010132-1.
- Van der Akker J., Gravemeijer K., McKennedy S., Nieveen N. (Ed.) (2006). *Educational Design Research*. London and New York: Routledge.
- Viennot L. (2003). Relating research in didactics and actual teaching practice: impact and virtues of critical details. In D. Psillos et al. (Ed.), *Science Education Research in the Knowledge-Based Society*.
- Zollman D.A., Rebello N.S., Hoggs K. (2002). Quantum mechanics for everyone: Hands-on activities integrated with technology. *Am. J. Phys.*, 70(3), pp. 252-259.