

Esperienze di formazione insegnante a seguito della revisione della seconda prova di maturità nei Licei Scientifici, 2015-2018.

Massimiliano Malgieri

Dipartimento di Fisica, Università di Pavia

Riassunto. È ben noto nella letteratura di ricerca internazionale che nell'insegnamento della Fisica la proposizione di problemi che richiedono solo di "trovare la formula giusta" nella quale inserire i dati per ottenere il risultato richiesto può avere a lungo termine effetti molto negativi, non solo in termini di apprendimento concettuale, ma ancora più in profondità, per quanto concerne le concezioni epistemologiche degli studenti sulla Fisica come disciplina. In questo contributo cerchiamo di fornire un inquadramento di ricerca per il tema della formazione degli insegnanti alla progettazione e risoluzione di esercizi e problemi, a partire dalle esperienze che il gruppo di ricerca dell'Università di Pavia, anche in collaborazione con altre sedi PLS, ha sviluppato a seguito del tentativo di revisione da parte del MIUR della seconda prova dell'esame finale del secondo ciclo di istruzione secondaria.

Abstract. It's a well established fact in the international literature on Physics education that proposing to students exercises and problems which only require to "find the right formula" in which to plug numbers to obtain the correct results can have dramatic long term results, not limited to conceptual learning outcomes, but at a deeper level, involving the epistemological beliefs students hold about Physics as a discipline. In the present article we represent the research framework for the issue of teacher formation on the design and resolution of exercises and problems, taking as a departure point the experiences which the research group at the University of Pavia has developed, also in collaboration with other PLS partners, in response to the attempted revision operated by the ministry of education (MIUR) of the final exam for secondary school.

1. Introduzione

A partire dal 2015 il Ministero dell'Istruzione ha avviato un tentativo di revisione della seconda prova dell'esame finale del secondo ciclo di istruzione per i Licei Scientifici. In una prima fase, tale revisione doveva prevedere, oltre alla più frequente proposizione di una seconda prova centrata sulla fisica anziché sulla matematica, una struttura basata sulla soluzione di uno tra due problemi "contestualizzati" o "esperti" in sostituzione di temi d'esame tradizionali. Questo tentativo, e le simulazioni e prove di esame che ne sono conseguite, hanno ricevuto critiche da più parti; citiamo qui solo quella dell'AIF [1] che giudicava la proposta di revisione di difficile realizzazione, prematura e poco funzionale. Un limite evidente era quello di proporre una rivoluzione di tale portata, che ragionevolmente avrebbe dovuto coinvolgere anche la struttura dei problemi utilizzati nell'insegnamento curricolare, solo a livello dell'esame di Stato. Tale scelta all'epoca veniva tuttavia difesa ed esplicitamente rivendicata da esponenti del MIUR, i quali argomentavano come l'esame finale del secondo ciclo di istruzione secondaria sia l'unico reale volano che il ministero ha a disposizione per produrre un effettivo cambiamento anche, in prospettiva, al livello delle pratiche didattiche quotidiane dei docenti. Appare oggi evidente come molte delle critiche mosse,

sia per quanto riguarda le modalità con cui la revisione veniva attuata, sia rispetto alla qualità, spesso giudicata insufficiente, dei problemi prodotti come testi d'esame, simulazioni ed esempi, fossero fondate. In effetti, negli anni più recenti essa, almeno nella forma radicale nella quale era stata inizialmente proposta, pare non essere più perseguita.

D'altra parte, va riconosciuto alla proposta il merito di aver sollevato un forte dibattito tra i docenti, producendo uno stimolo a riconsiderare con occhio critico gli esercizi e problemi che solitamente vengono proposti agli studenti dai libri di testo, e su tale modello costruiti dai docenti stessi. In effetti, è presumibile che la ragione che ha portato i decisori politici del tempo a impiegare grandi energie per riformare la prova di maturità sia da ricercare nella consapevolezza di quelle carenze degli esercizi proposti nell'insegnamento tradizionale che sono ben note alla ricerca in didattica della Fisica fin dalla sua fondazione. Infatti, i problemi che richiedono solo di "trovare la formula giusta" nella quale inserire i dati per ottenere il risultato desiderato, non solo non costituiscono in alcun modo un affidabile indicatore di apprendimento concettuale, ma possono avere a lungo termine effetti negativi anche al livello delle concezioni epistemologiche degli studenti sulla Fisica come disciplina.

A seguito di questa tentata riforma si è sviluppata una forte richiesta da parte degli insegnanti di formazione professionale sulla progettazione, analisi e risoluzione di problemi del tipo proposto nelle simulazioni, richiesta di cui molte sedi del progetto PLS-Piano Lauree Scientifiche si sono fatte carico. In questo contributo si intende dapprima (Sezione 2) proporre un inquadramento dei diversi temi affrontati dalla ricerca in didattica che concorrono all'interpretazione della questione dei problemi nell'insegnamento, e di seguito (Sezione 3) discutere alcuni esempi di corsi e seminari di formazione per gli insegnanti su questi temi messi in campo dal gruppo di Didattica della Fisica dell'Università di Pavia tra il 2015 e il 2018, spesso in collaborazione con altre Università partner del PLS.

2. Un inquadramento del problema nella ricerca internazionale

Nella letteratura di ricerca, la questione dell'approccio alla progettazione e risoluzione di problemi nella formazione insegnante è stato affrontato direttamente da molti ricercatori. In altri casi, le conclusioni tratte da alcuni studi, pur non direttamente connessi a questo specifico problema, possono contribuire a completarne il quadro interpretativo.

2.1. Le concezioni epistemologiche degli studenti

Una questione chiave è quella relativa alle credenze implicite che gli studenti sviluppano riguardo al fisica come disciplina durante il corso di studi. In un fondamentale lavoro del 1994, D. Hammer [2] ha messo in evidenza come, al di là dei risultati di apprendimento, l'istruzione tradizionale rischi di costruire nello studente un'immagine della disciplina con le seguenti caratteristiche: a) il suo reale contenuto sono le formule, piuttosto che i concetti; b) la sua organizzazione è frammentaria, con modelli costruiti ad hoc e validi caso per caso, senza alcun tipo di coerenza globale o ordinamento gerarchico complessivo; c) la sua fonte è l'autorità (libri di testo, insegnante) ed essa non lascia alcuno spazio per la costruzione e l'esplorazione autonome dello studente.

Tra le questioni messe in luce da Hammer, in particolare la prima assume una rilevanza centrale quando si considera il tema dei problemi ed esercizi. In effetti, si può dire che la dialettica esercizio-teoria proposta dall'insegnamento tradizionale è *il momento*

chiave nel quale la concezione della fisica come disciplina consistente essenzialmente di formule cresce, si sviluppa e prospera. Infatti, è vero che lo studente a scuola può ascoltare la spiegazione dell'insegnante, nella quale i modelli matematici sono proposti come formalizzazione di relazioni causa-effetto e spiegazioni di natura concettuale; ed è vero che ha a disposizione il libro di testo, che riporta gli stessi contenuti. Tuttavia, la parte predominante della sua esperienza diretta con la fisica, nonché, e forse soprattutto, della sua valutazione dell'apprendimento, coinvolgono abilità molto diverse dalla comprensione concettuale. Tali abilità si riducono, in sostanza, alla capacità di analizzare molto superficialmente la struttura linguistica di un esercizio di Fisica, concentrandosi in particolare su poche parole-chiave e su informazioni quali i nomi e i simboli assegnati alle grandezze in gioco, e di scoprire quale, tra le varie formule contenute nel libro di testo permetterà di ottenere il risultato voluto ⁽¹⁾.

Mettiamo anche in evidenza alcune altre osservazioni di Hammer che possono essere molto importanti per gli insegnanti e per i ricercatori nel contesto della formazione alla risoluzione e al progetto di esercizi e problemi. La prima è che la critica alle strategie risolutive degli esercizi basate esclusivamente o primariamente sulla ricerca di una formula è una conclusione relativamente recente della riflessione didattica; ancora negli anni '80, esistevano libri di testo di Fisica nei quali venivano dati agli studenti espliciti consigli su come impostare la ricerca della formula adatta risolvere un certo esercizio, attraverso un'elencazione delle grandezze note e ignote. In questo contesto, appare più chiaro che si tratta di ribaltare un'impostazione che è stata non solo accettata, ma data per scontata, per moltissimi anni. La seconda [4] è che alcune lamentele molto comuni che provengono dai docenti di scuola secondaria riguardo l'atteggiamento e le capacità dei loro studenti potrebbe essere in realtà dovuto, più che a mancanza di applicazione, a radicate credenze epistemologiche costruite riguardo la disciplina. Per esempio, un'osservazione comune è che gli studenti appaiono mancare di buonsenso, in quanto se a causa di un errore numerico nell'applicazione di una formula il risultato ottenuto nella risoluzione di un esercizio è completamente irrealistico, gli studenti tendono comunque ad accettarlo acriticamente. Secondo Hammer, il reale problema non è che gli studenti manchino di buonsenso, ma piuttosto che ritengono il buonsenso del tutto irrilevante per la fisica come disciplina. Un'analoga lamentela è quella che gli studenti non leggono, o non comprendono, il libro di testo. Anche qui, in effetti, l'interpretazione più probabile è che gli studenti ritengano ciò che è scritto nella maggior parte del libro di testo del tutto irrilevante, in quanto consistente di paragrafi privi di una vera funzione se non quella di connettere fra loro, fornendo solo la parvenza narrativa della coerenza, i reali contenuti del libro, ossia le formule.

Altri ricercatori hanno analizzato più in profondità la relazione tra i risultati messi in luce da Hammer e lo specifico contesto della risoluzione di problemi. Citiamo come esempio lo studio di Hegde e Meera [5] nel quale studenti universitari del primo e secondo anno, inseriti in un corso di studi trasversale di scienze matematiche, fisiche e chimiche, sono messi di fronte ad un problema standard di Fisica che tuttavia richiede l'utilizzo di una formula che è altamente probabile essi non ricordino. Gli studenti

⁽¹⁾ Si può notare, di passaggio, come una situazione del tutto analoga sia stata messa in evidenza da molti anni anche nella didattica della Matematica, ad esempio attraverso il concetto di *contratto didattico* di Guy Brousseau [3]: lo studente, quando si trova di fronte ad un esercizio di matematica proposto dall'insegnante, ha alcune certezze totali, dotate di altrettanta forza come provenissero dalla stipula di un formale contratto: l'esercizio può essere risolto; la sua risoluzione richiede di svolgere dei calcoli; tali calcoli devono includere tutti, e solo, i dati presenti nel testo dell'esercizio.

che non riescono a procedere con la risoluzione vengono indirizzati dai tutor attraverso istruzioni successivamente sempre più specifiche. Lo studio non solo conferma che l'attività che viene percepita dagli studenti come primaria e centrale per iniziare a lavorare su un problema è la ricerca di una formula, ma fornisce altri elementi di preoccupazione. In effetti, a quanto riportano gli autori, nemmeno la descrizione narrativa della formula espressa in termini di proporzionalità fra grandezze è, nella maggior parte dei casi, sufficiente rimuovere il blocco che impedisce di cominciare a lavorare sul problema; per molti studenti, questo avviene solo quando la formula è enunciata dai tutor in forma simbolica chiusa. Questo risultato enfatizza la difficoltà degli studenti non solo a rappresentare i fenomeni fisici in termini di concetti, relazioni e modelli, ma anche a comprendere le descrizioni verbali delle relazioni tra grandezze fisiche, che essi possono arrivare a concepire come pure operazioni matematiche tra simboli. Il tema qui si intreccia con quello relativo all'importanza di condurre gli studenti a verbalizzare e argomentare le spiegazioni fisiche, che sarà toccato nella Sezione 2.4.

2.2. Il modo di pensare del fisico

Altri ricercatori si sono dedicati a studiare le strategie di approccio ad un problema adottate dai fisici esperti, al fine di promuovere l'adozione di tali strategie ad obiettivo della formazione dei docenti. In effetti, è stato osservato che nella maggioranza dei casi gli studenti universitari indirizzati su percorsi di formazione insegnante non hanno esperienza di ricerca in Fisica, e quindi, la loro esperienza nella risoluzione di problemi si limita a quelli affrontati all'interno di corsi universitari, i quali, tuttavia, tipicamente sono basati sulla stessa filosofia *plug and chug* ("inserisci in numeri e gira la manovella") di quelli per la scuola secondaria. Pertanto, i futuri insegnanti non hanno alcun modo di costruire le abilità avanzate nella risoluzione di problemi, derivanti dall'affrontare domande meno strutturate e preconfezionate, tipiche dei fisici esperti, se queste abilità non vengono costruite e stimolate all'interno dei percorsi di formazione.

Un tema di grande importanza che è stato identificato nell'ambito di questo filone di ricerca è quello delle "rappresentazioni multiple". Secondo Van Heuleven [6], la capacità di rappresentare un problema assegnato in diversi modi, preliminarmente a, o in parallelo con, il suo sviluppo matematico, traendo conclusioni qualitative da tali rappresentazioni, è una caratteristica fondamentale del modo di ragionare degli esperti. Le rappresentazioni, costruite a partire dall'enunciato verbale del problema, possono includere disegni schematizzati della situazione fisica, nei quali gli "esperti" si concentrano solo sulle caratteristiche rilevanti del problema; oppure grafici e diagrammi più formalizzati, come quelli di corpo libero, i grafici delle grandezze cinematiche e di quelle termodinamiche, rappresentazioni circuitali e in termini di linee di campo, e molte altre. A partire dal lavoro precedentemente citato, molti autori hanno studiato l'utilizzo delle multiple rappresentazioni nel problem solving, confermando in generale che la capacità degli studenti di utilizzare diverse rappresentazioni visive come ausilio del ragionamento è positivamente correlata sia al successo nella risoluzione dei problemi, sia all'apprendimento concettuale profondo [7]. Tuttavia, è anche ben noto che gli studenti oppongono forti resistenze all'integrazione di rappresentazioni grafiche/diagrammatiche che possano essere di ausilio nel ragionamento qualitativo all'interno delle loro strategie di risoluzione dei problemi. Le ragioni non vanno trovate solo nell'abitudine consolidata a strategie di risoluzione meccanica, ma anche nelle difficoltà e nodi concettuali addizionali che tali multiple rappresentazioni portano con se. Solo per fare alcuni esempi, una corposa letteratura si è sviluppata sulle difficoltà specifiche degli studenti nel comprendere ed utilizzare i grafici in cinematica; le rap-

presentazioni dei circuiti elettrici; le costruzioni delle immagini in ottica geometrica; i disegni delle linee di campo; e praticamente ogni altro tipo di rappresentazione grafica comunemente utilizzata in fisica.

Quello delle rappresentazioni multiple è quindi di un problema di formazione professionale estremamente complesso, che implica che l'insegnante venga abituato per prima cosa ad adottare in prima persona questa strategia nella risoluzione dei problemi, cosa non è affatto scontata in molti dei modelli correnti di formazione iniziale dei docenti; ed in seguito che sia messo in grado di introdurre queste strategie in modo continuativo e non episodico nella pratica didattica, anche attraverso la progettazione di problemi atti a guidare lo studente progressivamente nell'adozione di rappresentazioni multiple. Inoltre, nel fare questo è essenziale che il docente sia consapevole delle difficoltà, fraintendimenti e misconcezioni che possono nascere o emergere in associazione con l'utilizzo di una data rappresentazione, e delle associazioni e piste di ragionamento tipiche che gli studenti utilizzano per costruirle, al fine di utilizzare queste risorse per migliorare l'efficacia della propria didattica.

Un'altra caratteristica del modo con cui gli esperti affrontano i problemi è l'abitudine a classificare e categorizzare le richieste contenute nei problemi secondo schemi organizzativi molto diversi da quelli adottati dagli studenti inesperti [6, 8]. Mentre i principianti raggruppano i problemi per categorie rifacendosi soprattutto a uno schema temporale sequenziale degli argomenti affrontati, gli esperti adottano una categorizzazione più profonda, corrispondente ad una organizzazione di alto livello della disciplina nella quale i principi di conservazione hanno un ruolo centrale. È stato anche messo in evidenza [9] che una strategia di approccio ai problemi tipica degli esperti, specialmente nel caso di testi che sfuggano ad una rapida interpretazione intuitiva, è quella di considerare i casi limite, ossia raffigurarsi mentalmente le situazioni in cui una o più grandezze tendano a zero, o ad infinito. Gli ultimi due risultati di ricerca sono generalmente considerati meno direttamente rilevanti per la formazione degli insegnanti, in quanto collegati piuttosto ad un approccio globale all'insegnamento della disciplina. La seconda osservazione, tuttavia, si intreccia con la questione dell'identificazione dei limiti di validità nell'applicazione dei modelli utilizzati nei problemi, che sarà considerata, insieme ad altri aspetti relativi allo sviluppo del senso critico dei docenti, nella prossima sezione.

2.3. I problemi di Fisica e lo sviluppo del senso critico degli studenti

La capacità di sviluppare il senso critico degli studenti è tra le competenze più importanti di un insegnante di discipline scientifiche. Recentemente, documenti di indirizzo generale sia dell'Unione Europea [10] sia del governo federale degli Stati Uniti [11] hanno messo l'accento sullo sviluppo del pensiero critico come un obiettivo chiave per la formazione degli scienziati del XXI secolo. Il senso critico è un'attività complessa, e negli ultimi trent'anni la sua natura, e le abilità che la compongono, sono state molto studiate dalla letteratura psico-pedagogica. Un'analisi che trova ampia condivisione nella comunità scientifica è quella di Ennis [12]. Ennis distingue le abilità che compongono il pensiero critico secondo la seguente classificazione:

1) Abilità coinvolte nella chiarificazione dei problemi:

- identificare il focus: il problema centrale, la domanda e/o la conclusione principale;
- analizzare le argomentazioni;
- domandare informazioni al fine di chiarire il problema, o rispondere a tali richieste;
- definire i termini, fornire un giudizio sulle definizioni, tener conto delle possibili ambiguità;

- identificare le assunzioni omesse o nascoste.
- 2) Abilità coinvolte nella raccolta di elementi per una decisione:
 - valutare la credibilità di una fonte;
 - fare osservazioni dirette, e valutare i resoconti o relazioni di osservazioni altrui.
 - 3) Abilità coinvolte nella produzione di inferenze:
 - ragionare per deduzione, e fornire un giudizio sulle deduzioni altrui;
 - ragionare per induzione, e fornire un giudizio sulle induzioni altrui, riguardo le conclusioni esplicative, le ipotesi aggiuntive o la modifica delle ipotesi iniziali, le generalizzazioni.
 - 4) Abilità coinvolte nel ragionamento ipotetico e nell'integrazione delle competenze:
 - saper ragionare anche prendendo in considerazione premesse, ipotesi, nessi causali o altre affermazioni con i quali non si concorda o sui quali si è in dubbio, senza che tale disaccordo o dubbio interferisca con il ragionamento;
 - integrare le varie abilità e disposizioni al fine di prendere e difendere una decisione.

Il tema dello sviluppo del pensiero critico è molto spesso collegato, nella letteratura in didattica, a quello dei problemi. La ragione principale è che, come abbiamo più volte ricordato, la maggior parte dei problemi che agli studenti viene richiesto di risolvere, tanto nella scuola secondaria quanto in ambito universitario, sono problemi chiusi, che si assume abbiano un'unica risposta corretta; il sistema fisico che costituisce il contesto del problema è spesso descritto in maniera grossolana, con l'omissione di assunzioni e dettagli critici, quasi come se l'autore stesso dell'esercizio avesse in mente di fornire solo le informazioni strettamente necessarie perché lo studente capisca come deve operare; le richieste sono riportate in forma prescrittiva e acritica. Nell'applicarsi ripetutamente sempre e solo a problemi di questo tipo, lo studente può costruire una concezione della scienza come di un corpo di conoscenza codificata che deve solo essere memorizzata e ripetuta. In ogni caso, questo tipo di problemi non è certamente di alcun aiuto nello sviluppo del senso critico, e anzi può avere l'effetto di soffocarlo. La ricerca in didattica si è concentrata pertanto soprattutto in due direzioni: 1) sviluppare la capacità degli insegnanti di applicare in prima persona il pensiero critico verso ciò che i libri di testo propongono, in particolare riguardo agli esercizi e problemi, risolti o meno, dissezionandoli tenendo presenti alcune delle abilità individuate da Ennis e sopra menzionate (la validità delle argomentazioni, le assunzioni omesse o nascoste e la loro ragionevolezza, la compatibilità con l'esperienza osservativa, le possibili ambiguità nei termini utilizzati); 2) indirizzare gli insegnanti alla costruzione di problemi in grado di aiutare gli studenti nello sviluppo del senso critico, come ad esempio problemi *aperti* [13]; problemi *contestualizzati*, ossia inseriti in contesti autentici che possano essere accessibili o di interesse per lo studente (contesto personale, della comunità, globale, storico) [14]; problemi spesso con un forte carattere longitudinale (che coinvolgono diverse aree della disciplina) e interdisciplinare.

Riguardo il primo dei due indirizzi di ricerca sopra menzionati, è impossibile prescindere dall'enorme contributo di Viennot (vedi Ref. [15] per un articolo recente che sintetizza anche le conclusioni dei molti studi precedenti) che, negli anni, ha studiato le dinamiche intellettuali di insegnanti futuri e in servizio posti di fronte a situazioni nelle quali era necessario esercitare senso critico, traendone un vero e proprio paradigma interpretativo. In generale, si osserva una radicata riluttanza degli insegnanti, futuri o in servizio, a criticare quanto proposto dai libri di testo, in termini di spiegazione o di procedimento risolutivo per un dato problema. Questa riluttanza può assumere diverse forme, anche a seconda del livello di competenza individuale in una certa area della disciplina: ad esempio un docente che non si senta molto sicuro nella particolare area trattata potrebbe esibire una *critica ritardata*, ossia il rifiuto di muo-

vere alcuna critica al testo fino a che non sarà più esperto sull'argomento; ma questo avviene anche se le incoerenze o incompletezze dell'argomentazione sono ampiamente alla sua portata; al contrario per docenti molto esperti nell'argomento specifico Viennot riscontra con grande frequenza l'*anestesia dell'esperto*, ossia il rifiuto di criticare la spiegazione perché risulta familiare e ben nota, perché si riconosce la validità della conclusione o risultato; oppure perché si conosce una diversa e più completa spiegazione, ma si ritiene che quella proposta dal testo, a dispetto di ogni sua mancanza, possa essere adeguata per gli studenti (*anestesia per sostituzione*). Complessivamente, i lavori di Viennot forniscono un quadro molto preoccupante riguardo la capacità degli insegnanti di Fisica di attivare il proprio senso critico, e richiamano l'attenzione sull'importanza di includere nei percorsi di formazione dei docenti attività volte allo sviluppo del pensiero critico, ed in particolare quelle concernenti l'analisi critica dei libri di testo.

Il secondo degli indirizzi di ricerca sopra menzionati, ossia la necessità di formazione degli insegnanti alla costruzione e utilizzo di problemi atti a sviluppare il senso critico degli studenti, costituisce il vero centro del tema di questo contributo. Si può infatti argomentare che la proposta del MIUR di rivedere la struttura della seconda prova dell'esame finale del secondo ciclo avesse come fonte di ispirazione, per quanto discutibili siano stati poi i temi effettivamente proposti, proprio i numerosi richiami presenti nella letteratura e sopra citati riguardo l'utilizzo nella didattica di problemi aperti, multidisciplinari, inseriti in contesti autentici, che includano la necessità di argomentare le proprie deduzioni e induzioni.

Molte delle proposte individuate dalla ricerca come atte a stimolare il senso critico degli insegnanti, e formarli all'adozione di uno stile di insegnamento che aiuti gli studenti a sviluppare il proprio senso critico, sono basate su strategie di apprendimento cooperativo. In questo tipo di approcci, i docenti in formazione o in servizio affrontano i problemi proposti, o costruiscono testi su temi assegnati, in un contesto di lavoro in gruppi. In questo modo si intende anche introdurre e consolidare modelli di insegnamento *inquiry-based* e *problem-based*, che idealmente dovrebbero essere adottate regolarmente dai docenti nella didattica. Talvolta l'attività proposta è una combinazione o ibrido tra la soluzione e la formulazione di problemi, ad esempio in Ref. [16] il modello prevede la formulazione iniziale, da parte del docente o formatore, di un problema in forma vaga e mal posta. In una prima fase, gli studenti lavorano in gruppi per formulare il problema in modo strutturato, introducendo se necessario ipotesi aggiuntive, con il docente che funge da facilitatore. In una fase successiva, i gruppi si scambiano i problemi così prodotti, e si dedicano a trovarne le soluzioni. In generale, un elemento ricorrente nelle strategie di formazione insegnante basate su questo tipo di approcci è la presenza di problemi inseriti in contesti autentici, ma incompleti o con dati mancanti (del tipo di quelli talvolta indicati dai fisici come problemi "alla Fermi"), che richiedono agli studenti di introdurre assunzioni ragionevoli o estrapolazioni basate sull'esperienza.

Alcuni autori hanno tuttavia argomentato che lo sviluppo del senso critico degli studenti non possa essere ottenuto solo offrendo, magari episodicamente, problemi inseriti nell'ambito di attività molto articolate e che richiedono un significativo lavoro di preparazione e ricerca, ma che vada continuamente stimolato, ad esempio affiancando costantemente agli esercizi tradizionali alcuni esercizi di altro tipo, che possono però essere ottenuti in modo relativamente semplice dall'insegnante attraverso modifiche minori di quelli proposti dai libri. Merhar [17] ne propone quattro tipologie: *problemi con soluzioni irrealistiche* che costringono gli studenti a confrontare i risultati con

l'esperienza e valutare la plausibilità dei dati ⁽²⁾; *problemi con dati incoerenti* che conducono a contraddizioni; *problemi con più soluzioni* compatibili con la domanda posta (questo tipo di problemi compaiono per la verità, sebbene raramente, nei libri di testo); *problemi con dati estranei* che intralciano gli studenti nella ricerca della formula corretta per raggiungere il risultato. Questo tipo di proposte hanno il merito di prendere in considerazione il fatto che l'insegnamento nella scuola secondaria spesso procede con tempi contingentati, e ritmi talvolta frenetici; che il carico di lavoro degli insegnanti è estremamente elevato, e che oltre alle "grandi soluzioni" che richiedono un sostanziale investimento di tempo e lavoro, sono estremamente utili anche i piccoli accorgimenti, che possono cambiare a cambiamenti nel modo di pensare degli studenti graduali, ma significativi sul lungo periodo.

2.4. I problemi di Fisica e lo sviluppo delle capacità argomentative degli studenti

Un aspetto molto interessante e, almeno negli obiettivi, condivisibile delle simulazioni messe in campo dal Ministero al tempo della tentata riforma della seconda prova era l'accento sulla valutazione delle capacità argomentative degli studenti. Le griglie di valutazione proposte per le prove assegnate, infatti, assegnavano un peso rilevante alle giustificazioni o argomentazioni che gli studenti proponevano per connettere tra loro i vari passaggi matematici della soluzione proposta oppure, in alcune simulazioni, alle risposte estese che venivano esplicitamente richieste. Si trattava di un'innovazione significativa, che tuttavia coglieva impreparati tanto gli insegnanti quanto gli studenti, entrambi abituati, ciascuno nel proprio ruolo, ad una valutazione dicotomica del tipo corretto/errato. Veniva talvolta ricordato come molti studenti, e fra questi anche studenti eccellenti, fossero stati abituati a riportare le soluzioni ai problemi di fisica nel modo più sintetico possibile, scrivendo solo i passaggi matematici strettamente necessari alla comprensione della strategia di risoluzione, e raramente aggiungendo considerazioni e argomentazioni. In effetti, anche in questo caso si può dire che il problema principale della riforma proposta non era la validità dei suoi obiettivi generali, ma il tentativo di imporre tali obiettivi solo nel momento valutativo finale dell'istruzione secondaria, senza averli adeguatamente perseguiti negli anni precedenti.

Il tema del miglioramento della qualità dell'argomentazione degli studenti non è indipendente da quanto già esposto nelle sezioni precedenti; esso è infatti intrecciato con le concezioni epistemologiche degli studenti, l'acquisizione del modo di pensare del fisico, lo sviluppo del senso critico. Tuttavia, la questione ha anche una specificità a se stante, e infatti negli ultimi anni la letteratura di ricerca in didattica delle scienze ha dedicato molta attenzione alle strategie per lo sviluppo delle capacità argomentative, e alle difficoltà che gli studenti incontrano quando viene loro richiesto di verbalizzare ed esprimere le loro idee riguardo la fisica, tanto nell'ambito di un dibattito (argomentazione esterna) quanto in quello della spiegazione della loro risposta ad una domanda di tipo scientifico, o giustificazione della risoluzione di un problema (argomentazione interna). Oltre ad essere collegate ad un apprendimento concettuale profondo, le capacità argomentative giocano un ruolo nello sviluppo della cittadinanza attiva, in particolare per quanto riguarda le questioni socio-scientifiche [19], e nel consolidamento dell'identità dello studente come scienziato [20]. Non va dimenticata,

⁽²⁾ Un esempio è il seguente esercizio, proposto in Ref. [18]: "Una bambina ha una massa di 30 kg. La bambina prende in una mano un palloncino gonfiato con gas elio che fornisce una spinta di Archimede pari a 100 N e sale su una bilancia. Quanto sarà il peso misurato dalla bilancia?"

inoltre, la complessa relazione che esiste tra l'apprendimento nell'ambito di strategie didattiche di stampo costruttivista come l'*inquiry-based learning* e le capacità argomentative [21]: infatti, da un lato tali strategie forniscono l'ambiente ideale perchè lo studente possa sviluppare e affinare le proprie capacità argomentative; ma dall'altro esse, in certa misura, *richiedono*, per essere fruttuose per l'apprendimento, che lo studente possieda la capacità di verbalizzare nel linguaggio specifico della scienza le proprie idee, e tendono ad escludere dal processo di apprendimento quegli studenti che mancano delle capacità argomentative per confrontarsi positivamente con gli altri membri del gruppo.

Il tema dell'argomentazione nella didattica della fisica è molto vasto e tocca solo marginalmente l'ambito dei problemi. Limitandoci a questo, ricordiamo che da tempo la ricerca ha prodotto strumenti atti a misurare e, quindi, valutare, la qualità dell'argomentazione degli studenti nella risposta a domande di tipo scientifico. Uno dei più utilizzati, e l'unico che discutiamo in questo lavoro, sono le domande e le corrispondenti griglie di valutazione che si rifanno al paradigma dell'Integrazione delle Conoscenze (*Knowledge Integration*, o KI). La KI è una teoria che rappresenta la cognizione degli studenti nei termini di idee molteplici, diverse e talvolta contraddittorie che essi formano sui fenomeni scientifici, e sui collegamenti che essi creano tra queste idee nel momento in cui viene loro richiesto di produrre una argomentazione [22]. Nella prospettiva della KI l'argomentazione è una parte cruciale del processo di apprendimento; infatti l'apprendimento delle scienze avviene quando gli studenti sono sollecitati ad articolare e verbalizzare le proprie idee riguardo gli argomenti del curriculum, aggiungono nuove idee normative al loro repertorio, sviluppano criteri scientifici per fare distinzioni tra le idee, e infine, costruiscono una visione più coerente della scienza come risultato dell'integrazione varie idee scientifiche. A differenza dei quesiti normalmente proposti nella letteratura per sondare le difficoltà degli studenti, che sono normalmente a risposta multipla (con distrattori scelti fra le difficoltà più comuni precedentemente individuate dalla ricerca), i quesiti proposti dalla KI richiedono di produrre spiegazioni o argomentazioni di una certa complessità (si tratta solitamente di quesiti a risposta aperta, oppure a risposta multipla con spiegazione) nelle quali, al livello della migliore risposta immaginata dal docente o ricercatore che produce il quesito, dovrebbero intervenire un certo numero di idee e concetti fisici, connessi fra loro con ragionamenti di tipo scientifico. Le griglie della KI valutano, quindi, la qualità dell'argomentazione scientifica degli studenti come capacità di 1) far emergere diverse idee scientifiche per produrre una spiegazione, e 2) legarle tra loro attraverso connessioni e ragionamenti scientificamente validi. L'adozione nell'insegnamento di problemi di questa tipologia, potrebbe consentire da un lato di aiutare gli studenti a sviluppare le proprie capacità di argomentazione interna; e dall'altro all'insegnante, di avere un feedback progressivo su quanto il proprio stile di insegnamento sia efficace nel raggiungimento di questo obiettivo.

3. Alcune proposte messe in campo dal PLS

3.1. Corso " Uso dei problemi nell'insegnamento della Fisica"

Il corso è stato attivato dal gruppo di ricerca in didattica dell'Università di Pavia come risposta alla richiesta diretta di formazione su questo tema da parte di alcuni insegnanti coinvolti in attività del PLS. Esso si è svolto in due edizioni, negli A.A. 2016-17 e 2017-18, con una durata di 10 ore, e in entrambe le edizioni ha coinvolto

circa 20 partecipanti. Dal punto di vista delle metodologie didattiche, il corso alterna lezione frontale, lavoro di gruppo sull'analisi e la riformulazione o modifica di problemi selezionati, discussione in grande gruppo. Non era richiesta una prova finale. Il focus principale di questa iniziativa di formazione era sull'analisi critica dei problemi posti da varie fonti; sono stati inclusi sia esercizi e problemi estratti da una rassegna dei libri di testo, specialmente del quinto anno, sia simulazioni e temi assegnati nel passato come seconda prova di Fisica all'esame di maturità, come quelle relative alla sperimentazione Brocca. Un tema centrale riguardava le strategie didattiche atte a favorire lo sviluppo del pensiero critico degli studenti attraverso i problemi, e in questo senso sono state discusse con gli insegnanti alcune delle proposte della ricerca presentate nella Sezione 2.3.

Nell'analisi critica degli esercizi dei libri di testo, la linea guida principale era quella di portare alla luce, chiarire e eventualmente integrare il rapporto tra sistema fisico e modello matematico che si dava spesso come sottinteso nei testi analizzati, al fine di evitare, o quantomeno limitare il più possibile, il processo per il quale lo studente appare invitato a cercare una soluzione basata unicamente sull'applicazione di una o più formule, ampiamente discusso nella Sezione 2.1. In questo senso, la via maestra era quella di esplicitare il modello matematico che si presumeva dovesse essere utilizzato nell'esercizio; identificare assunzioni nascoste che consentivano di adottare tale modello (es. quelle relative al gas perfetto, al fluido ideale, all'approssimazione di Fraunhofer...); analizzare la consistenza di tali assunzioni con il contesto del problema e provare a riformularlo, problematizzando l'aderenza del sistema al modello o provando a esplorare le conseguenze della rimozione di una o più assunzioni.

Infine, nel corso sono state discusse strategie validate dalla ricerca per la valutazione della qualità dell'argomentazione degli studenti, come le domande e griglie della Knowledge Integration (vedi Sezione 2.4). Sono stati introdotti alcuni esempi di item e griglie di questo tipo prodotte dalla ricerca, mostrando anche in che modo possano essere costruiti problemi complessi centrati su nodi concettuali identificati dalla ricerca, permettendo di indagare i modelli mentali degli studenti. Sono state discusse possibili strategie per trasformare esercizi standard in problemi che richiedano un'argomentazione complessa, e ponendo l'accento sull'importanza di portare gli studenti a *verbalizzare* le spiegazioni ed i modelli fisici, sia in forma orale sia in forma scritta, fin dai primi anni dell'insegnamento liceale.

3.2. Corso "L'approccio dei cammini di Feynman: aspetti applicative e problemi"

Il corso si è svolto nell'A.A. 2017-18 ed è stato organizzato dall'unità di ricerca di Pavia all'interno del Master per docenti IDIFO-6 coordinato dall'Università di Udine [23]. Si trattava del proseguimento di un corso di base sull'approccio di Feynman per l'insegnamento della meccanica quantistica nella scuola secondaria. Vi hanno partecipato 5 insegnanti-studenti del Master, con un impegno complessivo di 2 CFU. La prova finale riguardava la costruzione di un problema significativo, atto ad essere utilizzato come simulazione di seconda prova dell'esame di maturità, sul tema della fisica quantistica. Il corso si è svolto interamente online, con interazioni principalmente in modalità asincrona, sia via e-mail, sia attraverso altri strumenti messi a disposizione dalla piattaforma Moodle dell'Università di Udine, ma si sono svolti anche periodici incontri in modalità sincrona.

Il tema di questo corso riguardava l'utilizzo di temi di fisica quantistica come seconda prova d'esame. Dopo una prima parte dedicata all'analisi critica di problemi, esercizi e prove esistenti, il corso virava decisamente sulle competenze di costruzione di problemi: ai partecipanti veniva richiesto di scegliere situazioni fisiche che coinvolgessero

aspetti di fisica quantistica, anche tratte dalla letteratura di ricerca disciplinare, e che fossero adatte ad una modellizzazione matematica significativa al livello della scuola secondaria. Il problema, presentato brevemente nella successiva sotto-Sezione 3.2.1 dell'assenza praticamente totale di modelli matematici "versatili" e generali nell'insegnamento della fisica quantistica nella scuola secondaria, veniva risolto ricorrendo all'approccio dei cammini di Feynman, ma non solo: infatti, gli studenti che stavano contemporaneamente approfondendo l'approccio a due stati in altri corsi IDIFO potevano proporre, in alternativa, modellizzazioni basate su tale formalismo.

Una questione centrale e ricorrente in questo corso era quella delle "rappresentazioni multiple" (vedi Sezione 2.2). Nell'ambito dell'analisi critica dei problemi esistenti, ma anche in fase di progettazione, veniva spesso discusso il ruolo della rappresentazione, in particolare grafica, in fisica quantistica. Il tema della *visualizzazione* dei fenomeni quantistici è molto dibattuto in letteratura [24], in quanto data la natura della disciplina, che si trova quasi a livello di fondamento epistemologico lontana dall'esperienza sensoriale e dalla rappresentabilità intuitiva (si ricordi il dibattito tra Schrödinger e Heisenberg centrato sulla possibilità di visualizzare i fenomeni quantistici [25]), il rischio che gli studenti sviluppino incomprensioni o difficoltà relative all'interpretazione delle rappresentazioni visive, che è sempre presente nella didattica della Fisica, risulta aggravato entrando nel campo della teoria quantistica. In questo senso, è stato svolto nel corso un lavoro di analisi di gran parte delle tecniche di visualizzazione usate in fisica quantistica come supporto al ragionamento, e alla didattica: schemi di apparati; disegni dei "molti cammini"; rappresentazione delle ampiezze complesse, o degli stati stessi, come vettori; grafici di livelli energetici; rappresentazioni della funzione d'onda nei fenomeni di tunnelling o di confinamento; rappresentazioni dirette degli oggetti quantistici; diagrammi di Feynman, rappresentazioni grafiche dell'atomo di Bohr come modello "planetario". Per ciascuna di queste tecniche sono state discusse le caratteristiche (a partire dalla distinzione tra rappresentazioni della realtà, o del modello matematico), l'utilità e i possibili rischi da tenere presenti nell'insegnamento. La riflessione originata da questo corso è stata ampia e profonda: tanto i lavori di riflessione e analisi richiesti come prove intermedie, quanto i problemi costruiti come prova finale sono stati di alta qualità; i partecipanti hanno inserito elementi qui trattati nell'ambito delle sperimentazioni in classe che venivano richieste al fine del completamento del Master IDIFO; e in un caso si sono raggiunti risultati di ricerca di una certa rilevanza [26].

3.2.1. La questione dei problemi di meccanica quantistica nella scuola secondaria

Il tema dell'uso dei problemi nell'insegnamento della meccanica quantistica nella scuola secondaria ha caratteristiche peculiari, perché quanto contenuto nei libri di testo, che si rifanno alle Indicazioni Nazionali, non mette gli insegnanti in grado di costruire e utilizzare con gli studenti un nucleo minimo della teoria, ma fornisce, quanto a modelli matematici, soltanto un insieme abbastanza povero di formule relative a casi specifici. Di conseguenza, per l'insegnante che proceda l'approccio pseudo-storico usualmente adottato dai libri di testo, è abbastanza difficile ideare problemi diversi da quelli che richiedano soltanto l'uso di alcune formule, oppure l'enunciazione o discussione di una parte della teoria relativa a tali formule (vedi gli esempi relativi alla sperimentazione Brocca). In effetti, analizzando gli esercizi proposti dai libri di testo, si osserva il replicarsi delle stesse poche tipologie, che sono presentati in forma praticamente identica da un libro all'altro.

La situazione diventa diversa se si segue un approccio basato sulla ricerca che permetta agli insegnanti di avere a disposizione un nucleo teorico limitato, ma adattabile a diverse situazioni sperimentali. In questo caso, è possibile costruire problemi più

complessi, più significativi e meno convenzionali, anche prendendo spunto da articoli di ricerca, recenti o storici. Nel caso del corso descritto nella presente Sezione, la scelta primaria era quella dell'approccio di Feynman, e del suo apparato di interpretazione, rappresentazione e modellizzazione dei fenomeni [27, 28] ma, come sopra accennato, la stessa cosa è possibile anche utilizzando diversi approcci costruiti dalla ricerca in didattica, come quello a due stati [29].

3.3. Workshop sui problemi in previsione della II prova nell'ambito del corso insegnamento/apprendimento della fisica quantistica

Questo corso sull'insegnamento/apprendimento della fisica quantistica è stato organizzato nell'A.A. 2016/17 dal gruppo di ricerca in Didattica dell'Università di Bologna; esso includeva un workshop, della durata di 8 ore, sull'analisi e costruzione di problemi, al quale il gruppo di Pavia ha contribuito per la parte riguardante l'analisi critica di problemi esistenti (in forma di seminario interattivo della durata di circa 4 ore). Hanno partecipato circa 50 insegnanti, con un utilizzo prevalente di strategie di lavoro di gruppo descritte nel seguito; la prova finale consisteva nella costruzione di uno o più problemi significativi (per gruppo) sul tema della fisica quantistica.

In questa esperienza, uno degli elementi più significativi è stato l'approccio metodologico. Il corso è stato infatti organizzato sul modello di esperienze internazionali volte a connettere il tema dei problemi con quello delle strategie atte a sviluppare il senso critico degli studenti, passate in rassegna nella Sezione 2.3. Nello specifico, è stata qui adottata una strategia di apprendimento cooperativo conosciuta come "jigsaw classroom" [30] che prevede la divisione dei partecipanti in gruppi in gruppi di diverso tipo e con diversi obiettivi in diverse fasi. Inizialmente, si formano i "gruppi-base", ciascuno composto di 5-6 membri, i cui compiti sono divisi in diverse parti, ciascuna delle quali viene affidata ad uno o due membri del gruppo. Nel caso specifico, i compiti consistevano nell'analisi secondo diverse "dimensioni" (matematica, modelli, epistemologia, storiografia) di un argomento di fisica dei quanti scelto tra effetto fotoelettrico, effetto Compton, atomo di Bohr. Il partecipante che approfondisce un dato aspetto del problema ne diventa un "esperto", ed in una seconda fase i gruppi base si scompongono, mentre si compongono i "gruppi esperti", nei quali coloro che hanno approfondito una particolare dimensione discutono fra loro mettendo in comune quanto le rispettive riflessioni. Nella parte finale dell'attività, che può svolgersi, come in questo caso, nell'arco di più incontri, i gruppi base si ricompongono, vi è la restituzione al gruppo base da parte degli esperti di quanto appreso nei rispettivi gruppi esperti.

Un aspetto da mettere in evidenza in questo corso era il focus sulla multidimensionalità: l'obiettivo era aiutare i docenti a incorporare diverse prospettive (storia, matematica, epistemologia, modellizzazione) nella costruzione di problemi. L'analisi di testi storici e storico-filosofici, molto presente nel corso, ed il loro approfondimento nei gruppi esperti rispondeva ad obiettivi legati alla NOS (Nature of Science) ed anch'essi strettamente collegati, anche se non esplicitamente menzionati nella Sezione 2.3 al tema dello sviluppo del senso critico. L'idea era quella di portare i docenti a conoscere di prima mano l'autentica storia della disciplina, nella sua complessità e con le sue controversie, in un momento cruciale del suo sviluppo, anziché rifarsi alla *quasi-storia* [31] presentata in quasi tutti i libri di testo, che può essere definita [32] come *"una storia mitica appositamente preparata che ha come fine l'indottrinamento [degli*

studenti] su alcuni metodi punti di vista metodologici e didattici” ⁽³⁾. Per quanto riguarda la parte di critica degli esercizi e problemi di fisica quantistica esistenti, i temi, sebbene dispiegati in un arco temporale molto minore, rispecchiavano quanto esposto nella Sezione 3.2. Dati i vincoli temporali, la proposta messa in campo forniva una panoramica delle questioni specifiche relative alla formulazione dei problemi in fisica quantistica, con un focus sul tema delle rappresentazioni multiple.

4. Conclusioni

Abbiamo discusso alcune proposte messe in campo dal PLS-Piano lauree scientifiche tra il 2015 e il 2018 in risposta alle esigenze degli insegnanti di formazione sul tema dei problemi, discutendo preliminarmente un possibile quadro di riferimento che, riunendo diversi aspetti individuati dalla letteratura di ricerca in didattica, permette di interpretare il tema dell'utilizzo dei problemi nell'insegnamento. Le proposte hanno avuto carattere altamente professionalizzante e hanno permesso di affrontare temi di grande importanza, che pensiamo vadano a buon diritto considerate come elementi centrali della conoscenza pedagogica dei contenuti (PCK) [34] relativa alla professione di docente di Fisica. Gli insegnanti hanno potuto apprezzare l'importanza di esercitare il senso critico sulle proposte dei libri di testo, riconoscere dettagli mancanti e assunzioni nascoste nelle formulazioni proposte; si sono confrontati, sia nel momento dell'analisi sia in quello della progettazione, con il problema delle multiple rappresentazioni e con quello della complessa relazione tra la fisica e la modellizzazione matematica; hanno fatto esperienza nella progettazione di problemi collegati ai nodi concettuali e alle difficoltà note degli studenti; di problemi che richiedono spiegazioni e argomentazioni complesse; di problemi che integrino diverse prospettive e dimensioni (storica, epistemologica, matematica...). È stato possibile discutere con gli insegnanti l'importanza dell'utilizzo dei problemi nell'insegnamento ben al di là dell'acquisizione di padronanza algoritmica con le formule, come strumenti per aiutare gli studenti a sviluppare il loro senso critico, a comprendere il ruolo delle rappresentazioni nel ragionamento fisico, a migliorare le loro capacità argomentative.

La nostra esposizione si è limitata a quei corsi organizzati dal gruppo di ricerca dell'Università di Pavia, o nei quali esso ha avuto un ruolo diretto di partecipazione, ma molte attività con caratteristiche probabilmente simili sono state organizzate, nel periodo indicato, da altre sedi PLS, in risposta alle richieste di formazione provenienti dai docenti. Oggi, con l'arretramento del Ministero sulle proposte di revisione della seconda prova, tale domanda è scemata, ma, come speriamo si aver argomentato in modo esaustivo, il tema dell'utilizzo dei problemi nell'insegnamento rimane di fondamentale importanza e la comunità del PLS, in coerenza con la propria missione, ha il dovere di farsene carico.

⁽³⁾ Si noti che più autori hanno messo in evidenza come le più grossolane deformazioni storiche operate dai libri di testo compaiono proprio nel contesto della ricostruzione di aspetti cruciali della vecchia fisica dei quanti, ed in particolare l'effetto fotoelettrico [33] e il corpo nero. La stessa formulazione del concetto di *quasi-storia* di Whitaker partiva proprio dall'analisi delle ricostruzioni su questi argomenti [31]. Inquadrando le cose in questa prospettiva, l'importanza del lavoro svolto dal gruppo di Bologna risalta con ancora maggiore evidenza.

Ringraziamenti

L'autore desidera ringraziare il gruppo di ricerca dell'Università di Bologna, e in particolare Olivia Levrimi e Giulia Tasquier, per aver messo a disposizione materiali e documenti relativi all'iniziativa di formazione descritta nella Sezione 3.3.

Bibliografia

- [1] MERONI, A., La seconda prova di Fisica nell'Esame di Stato. In *La seconda prova di fisica nell'Esame di Stato (XIV Convegno Orlandini)*
- [2] HAMMER, D., Epistemological beliefs in introductory physics. *Cognition and Instruction*, **12(2)** (1994) 151–183.
- [3] BROUSSEAU, G., Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, **7 (2)** (1986) 33–115.
- [4] HAMMER, D., Student resources for learning introductory physics. *American Journal of Physics*, **68(S1)** (2000) S52–S59.
- [5] HEGDE, B., MEERA, B. N., How do they solve it? An insight into the learner's approach to the mechanism of physics problem solving. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, **8(1)** (2012) 010109.
- [6] VAN HEUVELEN, A., Learning to think like a physicist: A review of research-based instructional strategies. *American Journal of physics*, **59(10)** (1991) 891–897.
- [7] ROSENGRANT, D., ETKINA, E., VAN HEUVELEN, A., An overview of recent research on multiple representations. *AIP Conference Proceedings*, **883(1)** (2007) 149–152..
- [8] CHI, M. T., FELTOVICH, P. J., GLASER, R., Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive science*, **5(2)** (1981) 121–152..
- [9] SINGH, C., When physical intuition fails. *American Journal of Physics*, **70(11)** (2002) 1103–1109..
- [10] EUROPEAN COMMISSION, *Science education for responsible citizenship, Report EUR 26893 (EN chair H. Hazelkorn, Brussels, 2015.)*
- [11] NGSS LEAD STATES, *Next generation science standards: For states, by states. (National Academy Press, Washington DC, 2013)*
- [12] ENNIS, R. H., *Critical Thinking (Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996)*
- [13] HAGER, P., SLEET, R., LOGAN, P., HOOPER, M., Teaching critical thinking in undergraduate science courses. *Science and Education*, **12(3)** (2003) 303–313..
- [14] CARVALHO, C., FIUZA, E., CONBOY, J., FONSECA, J., SANTOS, J. S., GAMA, A. P., SALEMA, M. H., Critical thinking, real life problems and feedback in the sciences classroom. *Journal of Turkish Science Education*, **12(2)** (2015) 21–31.
- [15] VIENNOT, L., DÉCAMP, N., Activation of a critical attitude in prospective teachers: From research investigations to guidelines for teacher education. *Physical Review Physics Education Research*, **14(1)** (2018) 010133.
- [16] SUJANEM, R., POEDIJASTUTI, S., JATMIKO, B., The Effectiveness of problem-based hybrid learning model in physics teaching to enhance critical thinking of the students of SMAN. *Journal of physics: conference series*, **1040(1)** (2018) 012040.
- [17] MERHAR, V. K., Nontraditional problems. *The Physics Teacher*, **39(6)** (2001) 338–340.
- [18] ERCEG, N., AVIANI, I., MEŠIĆ, V., Probing students' critical thinking processes by presenting ill-defined physics problems. *Revista mexicana de física E*, **59(1)** (2013) 65–76.
- [19] ERDURAN, S., Methodological foundations in the study of argumentation in science classrooms. In *Argumentation in science education (Springer, Dordrecht 2007)* 47–69
- [20] CROSS, D., TAASOOSHIRAZI, G., HENDRICKS, S., HICKEY, D. T., Argumentation: A strategy for improving achievement and revealing scientific identities. *International Journal of Science Education*, **30(6)** (2008) 837–861..

- [21] KOLSTØ, S. D., RATCLIFFE, M., Social aspects of argumentation. In *Argumentation in science education* (Springer, Dordrecht 2007) 117–136
- [22] LINN, M. C., The knowledge integration perspective on learning and instruction. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences*. (Cambridge University Press, New York 2006) 243–264
- [23] MICHELINI, M., SANTI, L., STEFANEL, A., E-learning in teacher professional development in innovation and formative guidance on modern physics: the case of IDIFO Master’s Programs. *Journal of e-Learning and Knowledge Society*, **9(2)** (.) 2013.
- [24] LEVRINI, O., FANTINI, P., Encountering productive forms of complexity in learning modern physics. *Science & Education*, **22(8)** (2013) 1895-1910..
- [25] DE REGT, H. W., Erwin Schrödinger, Anschaulichkeit, and quantum theory. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, **28(4)** (2009) 461—481.
- [26] SUTRINI, C., MALGIERI, M., DE AMBROSIS, A., Bubble: Experimenting with Feynman’s sum over paths approach in the secondary school. *Il nuovo cimento C*, **42(5)** (2019) 1–10..
- [27] MALGIERI, M., ONORATO, P., DE AMBROSIS, A., Insegnare la fisica quantistica a scuola: un percorso basato sul metodo dei cammini di Feynman. *Giornale di fisica*, **56(1)** (2015) 45..
- [28] MALGIERI, M., ONORATO, P., DE AMBROSIS, A., Test on the effectiveness of the sum over paths approach in favoring the construction of an integrated knowledge of quantum physics in high school. *Physical Review Physics Education Research*, **13(1)** (2017) 010101..
- [29] MICHELINI, M., RAGAZZON, R., SANTI, L., STEFANEL, A., Proposal for quantum physics in secondary school. *Physics Education*, **35(6)** (.) 406.
- [30] ARONSON, E., BLANEY, N., STEPHAN, C., SIKES, J., SNAPP, M., *The jigsaw classroom*. (Sage Publications, Beverly Hills 1978)
- [31] WHITAKER, M. A. B., History and quasi-history in physics education. I. *Physics education*, **14(2)** (1979) 108.
- [32] KRAGH, H., A sense of history: history of science and the teaching of introductory quantum theory. *Science & Education*, **1(4)** (1992) 349–363.
- [33] KLASSEN, S., The photoelectric effect: Reconstructing the story for the physics classroom. *Science & Education*, **20(7)** (2011) 719–731.
- [34] SHULMAN, L., Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. *Harvard educational review*, **57(1)** (1987) 1–23.