

Perché insegnare la Fisica con l'approccio ISLE*

VALENTINA BOLOGNA
Dipartimento di Fisica
Università di Trieste
valentina.bologna@phd.units.it

FRANCESCO LONGO
Dipartimento di Fisica
Università di Trieste
francesco.longo@ts.infn.it

ABSTRACT

Physics textbooks affect teaching methods. They provide teachers with content management, curriculum design, and materials to build students' learning abilities and have a crucial role in the teaching-learning process, as teachers recognise. However, Physics textbooks sometimes limit teachers' efforts to innovate Physics teaching strategies. "College Physics - Explore and Apply" is a Physics textbook based on the ISLE (Investigative Science Learning Environment) approach. This book is more than a simple textbook: it illustrates a completely new approach towards Physics and presents an innovative teaching-learning Physics process. Teachers who have adopted this approach and the associate textbook will never go back to the oldest teaching methods.

PAROLE CHIAVE

DIDATTICA DELLA FISICA / PHYSICS EDUCATION; DIDATTICA LABORATORIALE / LABORATORY EDUCATION;
 AMBIENTE DI APPRENDIMENTO / LEARNING ENVIRONMENT; METODOLOGIE D'INDAGINE / INQUIRY METHOD;
 CONOSCENZA DEL CONTENUTO PER L'INSEGNAMENTO / CONTENT KNOWLEDGE FOR TEACHING.

1. IL LIBRO DI TESTO

Chiunque muove i suoi primi passi nel mondo dell'insegnamento, incontra come primo ausilio didattico il libro di testo in adozione. Questo accade pressochè nell'insegnamento di tutte le discipline a qualsiasi livello di istruzione, ma sembra che il contributo offerto dal manuale nella costruzione della professionalità docente sia particolarmente rilevante nell'ambito delle discipline scientifiche soprattutto

* *Title: Why teaching Physics through ISLE approach.*

nella Scuola secondaria di secondo grado¹. Il libro di testo gioca infatti molteplici ruoli e offre molti vantaggi a supporto dell'attività didattica², a patto che:

- scansioni gli argomenti curricolari e il tempo da dedicarvi in unità di lavoro;
- regoli l'organizzazione dell'approfondimento tematico-concettuale;
- offra una sequenza dettagliata di procedure didattiche da mettere in atto a beneficio di uno svolgimento efficace del programma;
- costruisca la conoscenza dello studente anche in prospettiva epistemologica;
- indirizzi il docente alla tipologia più appropriata di verifiche da somministrare agli studenti, che naturalmente dovrebbero essere coerenti con il percorso formativo preventivamente sviluppato in classe.

Tuttavia, man mano che l'esperienza professionale del docente aumenta, si scatena un conflitto tra l'insegnante e il libro di testo. Mentre il neofita talvolta non ne può fare a meno, il docente esperto difficilmente trova in esso un supporto totalmente corrispondente sia dal punto di vista della trattazione dei contenuti sia per la tipologia degli esercizi proposti.

Questo accade perchè l'esperienza didattica *si nutre* del processo di crescita professionale dell'insegnante, dei suoi tentativi sistematici di migliorare il suo approccio metodologico, in modo da renderlo più efficace al fine di superare le difficoltà di apprendimento degli studenti che emergono chiaramente nella valutazione.

La separazione tra l'insegnante e il libro di testo è inevitabile soprattutto quando egli constata nei suoi discenti un apprendimento di tipo meramente *procedurale* e una scarsa propensione all'*argomentazione*³, indotti dalla costruzione del contenuto e dalla tipologia degli esercizi proposti nel manuale.

1.1 IL LIBRO DI TESTO DI FISICA

Nell'ultimo decennio gli editori hanno dedicato molte risorse per confermare e forse

¹ Cfr. MITHANS, GRMEK 2020.

² Cfr. AWASTHI 2006; SHERMAN, WALKINGTON, HOWELL 2016.

³ Cfr. BOLOGNA, PERESSI 2022a.

in alcuni casi riaffermare il ruolo-chiave che il libro di testo ha nell'insegnamento e nell'apprendimento della Fisica.

Innovazione grafica, impaginazione efficace, organizzazione multimediale del testo e introduzione di approfondimenti ed esercizi in lingua inglese sono solo alcune delle novità proposte. Il libro cartaceo è spesso corredato da risorse on-line aggiuntive, arricchendo l'offerta didattica e proponendo il materiale come supporto metodologico a integrazione delle TIC⁴ nei processi di insegnamento.

Purtroppo, però, nella prassi didattica un corredo così ampio di materiali e risorse rimane molto spesso inutilizzato e poco integrato nello svolgimento delle lezioni, dove il libro di testo è il punto di riferimento dell'agire didattico.

Andando ad esaminare l'evoluzione temporale di un libro di testo molto usato nella Scuola italiana (cfr. Figura 1)⁵, emergono alcuni aspetti estremamente interessanti di come sia stata orientata l'organizzazione concettuale.

Autore	Anno	Volumi
Fermi, Persico	1945	1
Amaldi, E. e G.	1953	3
Amaldi, E. e G.	1972-73	3
Amaldi, E. G. e U.	1983-84	3
Amaldi, U.	1991	2
Amaldi, U.	1997-99	3
Amaldi, U.	2007-08	3
Amaldi, U.	2020	3

Figura 1. Elenco dei libri di testo esaminati nella ricerca per osservarne l'evoluzione temporale⁶. Nell'editoria italiana la casa editrice Zanichelli è l'unica per la quale sia stato possibile tracciare l'evoluzione storica di un suo libro per l'insegnamento della Fisica nella Scuola secondaria di secondo grado dalla fine della Seconda guerra mondiale ad oggi.

⁴ Acronimo: Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione.

⁵ Cfr. SEGATO 2021.

⁶ Cfr. SEGATO 2021.

Ci sono due aspetti particolarmente rilevanti che si evincono nel confronto storico dei volumi ogni volta che ne è stata fatta una riedizione aggiornata (7 riedizioni in 67 anni, pressapoco una riedizione a decennio): il primo riguarda la progressiva riduzione del testo scritto rispetto alla trattazione del contenuto nella sua formulazione matematica, affidando a questa rappresentazione un ruolo centrale per la comprensione del concetto e la sua descrizione (cfr. Figura 2). Il secondo coinvolge la tipologia di esercizi e di problemi (cfr. Figura 3).



Figura 2. Esempio di impaginazione e organizzazione del contenuto a confronto: a sinistra un libro di testo di Fisica del 1959 (edizione originale del 1945)⁷ a destra uno del 2020⁸.

Quello che si evidenzia è che il primo aspetto, caratterizzante l'organizzazione del contenuto, influenza anche la raccolta di esercizi di fine capitolo, dove vengono enfatizzati gli aspetti matematici della comprensione concettuale del fenomeno fisico⁹.

⁷ Cfr. FERMI, PERSICO 1959.

⁸ Cfr. AMALDI 2020.

⁹ Cfr. BOLOGNA, LEBAN 2022.

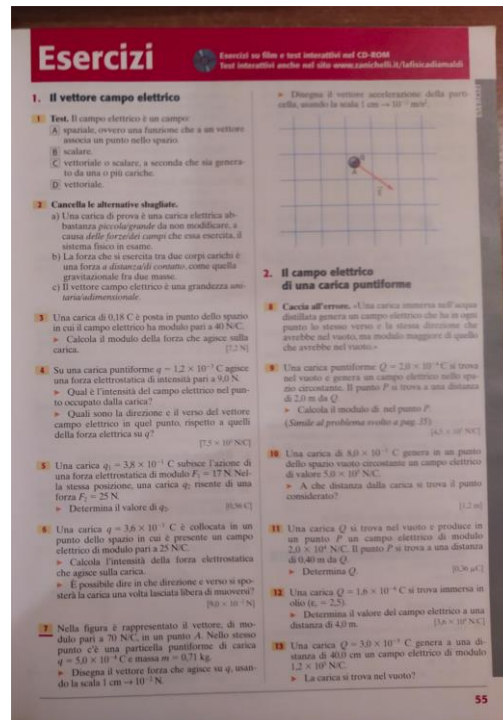
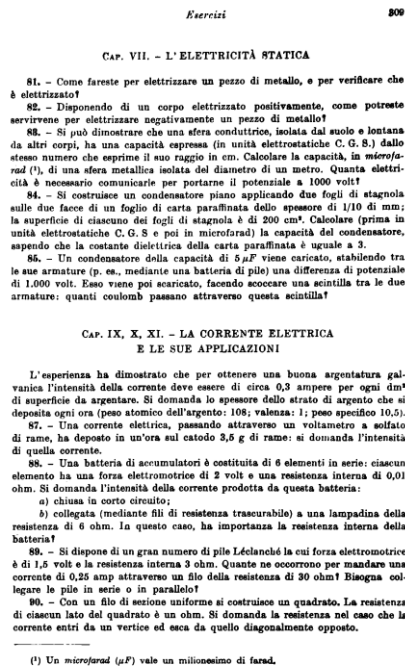


Figura 3. Esempio di impaginazione e organizzazione degli esercizi di fine capitolo a confronto: a sinistra un libro di testo di Fisica del 1959 (edizione originale del 1945)¹⁰ - gli esercizi si limitavano a una sola pagina -, a destra un libro del 2007¹¹ (la prima pagina di esercizi su circa venti complessive).

Appare quindi chiaro che, anche dal punto di vista dell'evoluzione storica del libro di testo, vi sia una certa direzionalità didattica nella presentazione del contenuto che guida il processo di costruzione della conoscenza attraverso gli aspetti di modellizzazione matematica e di concettualizzazione quantitativa¹². Queste caratteristiche sono senz'altro presenti nell'epistemologia disciplinare¹³, ma un loro uso preferenziale (o forse anche esclusivo) elude e nasconde alcune peculiarità proprie delle scienze sperimentali: l'osservazione della realtà e il processo ipotetico-deduttivo¹⁰.

Una certa influenza del libro di testo sulla didattica può essere identificata anche osservando gli schemi prevalenti di interazione matematico-fisica che caratterizza gli insegnanti della Scuola secondaria di secondo grado¹⁴. Infatti, il PCK¹⁵ del docente

¹⁰ Cfr. FERMI, PERSICO 1959.

¹¹ Cfr. AMALDI 2007.

¹² Cfr. BOLOGNA, PERESSI 2022a; SEGATO 2021.

¹³ Cfr. SIN 2014.

¹⁴ Cfr. BOLOGNA et al. 2022.

¹⁵ Acronimo: *Pedagogical Content Knowledge* (cfr. SHULMAN, 1986). Il concetto è traducibile in lingua italiana come "Conoscenza Pedagogica del Contenuto" (cfr. BOLOGNA 2021).

di Fisica¹⁶, sia esperto o agli inizi della sua attività professionale, è caratterizzato dalla prevalenza di uno schema di tipo applicativo¹⁷, che ben rispecchia la struttura didattica costruita dal libro di testo.

Questo schema enfatizza le relazioni matematiche tra le grandezze fisiche in termini algebrici e risolutivi di situazioni problematiche, con il rischio di indirizzare l'apprendimento (soprattutto quello di studenti in difficoltà) verso l'acquisizione mnemonica di formule e procedure¹⁸ e limitare lo sviluppo di competenze di argomentazione e ragionamento. Se dunque il libro di testo ha un ruolo chiave dal punto di vista didattico perché influenza esplicitamente la costruzione della conoscenza fisica, è proponibile che per cambiare il modo di insegnare la Fisica si possa operare attraverso l'innovazione stessa del libro di testo. In questo modo il manuale non solo è strumento a supporto dell'apprendimento ma una guida per la progettazione didattica del processo di insegnamento, in una prospettiva che effettivamente garantisce una comprensione concettuale significativa¹⁹.

Di seguito viene dettagliatamente delineato un esempio efficace di approccio didattico magistralmente orchestrato in un libro di testo²⁰. Sebbene si tratti di un manuale per i corsi introduttivi di Fisica *algebra-based*²¹ per l'università americana, nell'ultimo decennio si sta ampiamente diffondendo in tutto il mondo non solo a livello di istruzione superiore ma anche per la Scuola secondaria di secondo grado.

2. L'APPROCCIO ISLE IN UN LIBRO DI TESTO

ISLE è l'acronimo inglese di *Investigative Science Learning Environment*²¹; la traduzione che mantiene nel modo più appropriato il significato anglosassone è «ambiente di apprendimento per l'indagine scientifica». Gli autori hanno volutamente utilizzato il termine *investigative* che esplicita l'azione dello studente nel processo di apprendimento.

¹⁶ Cfr. ETKINA 2010; BOLOGNA, PERESSI 2022b.

¹⁷ Cfr. LEHAVI et al. 2017.

¹⁸ Cfr. BOLOGNA, LEBAN 2022.

¹⁹ Cfr. ETKINA 2015.

²⁰ Cfr. ETKINA, BROOKES, PLANINSIC 2021.

²¹ Cfr. ETKINA, PLANINSIC, VAN HEULEVEN 2019.

L'accezione *investigative*, dal punto di vista didattico, è più forte di *inquiry*, termine utilizzato in un altro ambiente di apprendimento basato sull'indagine denominato IBSE²². L'*inquiry* denota il processo di risoluzione di un problema attraverso la ricerca e l'indagine ponendosi domande; *inquiry* deriva dal francese *enquerre*, che a sua volta viene dal latino *in quaerere* che significa proprio “chiedere o cercare”, mentre *investigative* deriva dalla parola latina *investigatus* che è il participio passato di *investigare* che significa “rintracciare o indagare” e che evidenzia l'atto di esser stato indagato. *Investigative* quindi amplifica il significato del processo approfondito di investigazione attraverso l'esame sistematico e l'esame dei fattori che hanno influenzato l'oggetto di indagine.

Dal punto di vista epistemologico entrambi gli ambienti di apprendimento favoriscono la costruzione della conoscenza attraverso il “fare scienza” in modalità socio-costruttivista²³. La differenza sostanziale tra i due è la seguente: l'ISLE è un approccio olistico dove il contenuto tradizionale (cioè quello che tradizionalmente è inserito nei curricula scolastici) diventa il contesto nel quale gli studenti imparano a pensare come i fisici. Nell'IBSE, invece, viene amplificato il processo metodologico a preferenza di quello didattico che, una volta sostenuto il momento di *engaging*²⁴, sostanzialmente non differisce da modalità tradizionali di costruzione del contenuto come descritte nei libri di testo normalmente adottati.

*College Physics - Explore and Apply*²⁵ è un libro di testo che aiuta gli studenti a imparare la fisica facendo fisica e supporta gli insegnanti a insegnarla utilizzando l'approccio ISLE che, attraverso un apprendimento attivo (*Active Learning*²⁶), promuove una comprensione concettuale della fisica e del processo scientifico profonda e duratura²⁷ (cfr. Figura 4). Il connotato “profonda e duratura” è significativamente rilevante proprio perché si differenzia dal “superficiale e temporaneo” tipico dell'apprendimento mnemonico-procedurale.

²² Acronimo: *Inquiry Based Science Education* (cfr. BYBEE 1989).

²³ Cfr. VYGOSKY 1934.

²⁴ Cfr. BYBEE 1989.

²⁵ Cfr. ETKINA, BROOKES, PLANINSIC, VAN HEULEVEN 2019b; EXPLORE AND APPLY PHYSICS... in Siti web.

²⁶ Cfr. ETKINA 2015; ETKINA, BROOKES, PLANINSIC 2021.

²⁷ Cfr. BUGGÉ, ETKINA 2020.

Non appena l'insegnante muove i primi passi, si trova di fronte a un nuovo impianto concettuale che gli consente di riappropriarsi della disciplina con una maggior consapevolezza epistemologica anche superiore a quella maturata durante il proprio percorso di studi, la formazione professionale iniziale e in servizio²⁸.

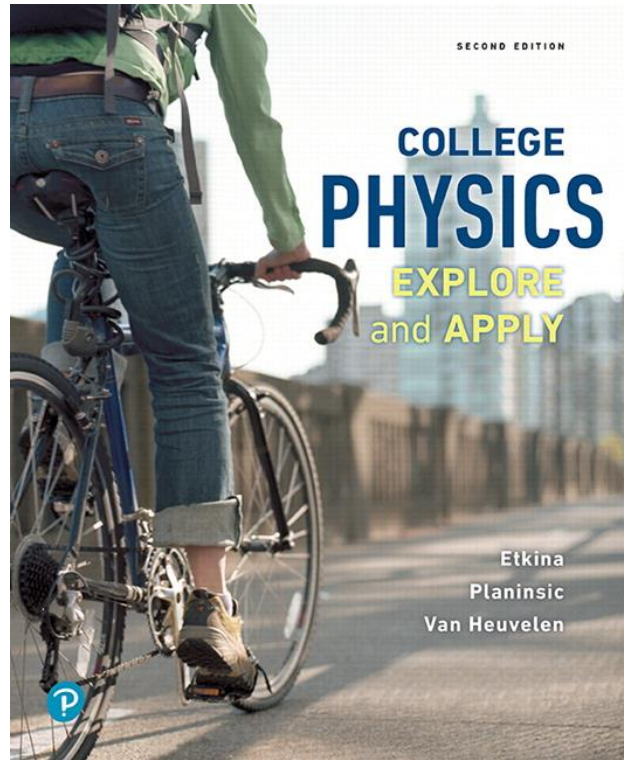


Figura 4. La copertina del libro di testo *College Physics - Explore and Apply*²⁹ e gli autori (da sinistra Eugenia Etkina, Gorazd Planinsic e Alan Van Heuvelen).

Dal punto di vista del docente l'effetto più significativo di questo cambiamento concettuale è quello di appropriarsi della disciplina in modo da dipanare e guidare chiaramente nello studente il processo di concettualizzazione che avviene attraverso l'agire didattico. Questo è estremamente importante soprattutto per gli insegnanti

²⁸ Cfr. ETKINA, GREGORCIC, VOKOS 2017.

²⁹ Cfr. ETKINA, BROOKES, PLANINSIC, VAN HEULEVEN 2019a.

che non hanno avuto proprio una formazione “fisica” ma “matematica” (come spesso accade nella scuola secondaria di secondo grado italiana). L'adozione di questo approccio consente loro di delineare, a tratti molto chiari e sostanziali, le differenze epistemologiche disciplinari che poi corrispondono nella prassi a didattiche diverse nell'insegnamento proprio di ciascuna disciplina.

2.1 ISLE: UN ESEMPIO DI APPROCCIO INTENZIONALE

L'ISLE si propone due obiettivi principali:

- aiutare gli studenti ad apprendere la fisica coinvolgendoli in pratiche che rispecchiano i processi e le procedure che i fisici sperimentano nello sviluppo e nell'applicazione delle conoscenze fisiche (ciò significa che tutto quello che accade in classe e a casa in relazione all'apprendimento della fisica da parte degli studenti rispecchia le attività in cui sono impegnati gli scienziati);
- migliorare il benessere, la motivazione e la perseveranza degli studenti. Ciò significa che le decisioni che l'insegnante prende durante la pianificazione, l'attuazione e la valutazione dell'insegnamento della fisica sostengono la crescita intellettuale ed emotiva degli studenti (*mindset growth*³⁰).

Nell'ISLE questi due obiettivi principali corrispondono esattamente a due *intenzionalità*³¹, proprie di questo insegnamento, che individuano come gli studenti imparano la fisica e come si sentono mentre la imparano³². Le due intenzionalità si traducono in:

- coinvolgere gli studenti nel “fare” fisica mentre la imparano;
- usare la fisica per aiutare gli studenti a crescere e a potenziare *scientific habits of mind* (che letteralmente tradotto significa «abitudini mentali scientifiche»), corrispondenti a quelle abilità scientifiche (dall'inglese *scientific abilities*) che nel processo di costruzione di conoscenza sviluppano la competenza disciplinare³³.

³⁰ Cfr. ETKINA, BROOKES, PLANINSIC 2021.

³¹ Cfr. MACMILLAN, GARRISON 1988.

³² Cfr. BROOKES, ETKINA, PLANINSIC 2020.

³³ Cfr. ETKINA et al. 2006. Nell'accezione anglofona l'*abilità* è un termine con un significato più ampio che evidenzia il processo messo in atto per raggiungere un obiettivo che, in questo caso, corrisponde, nel lungo termine, allo sviluppo di competenze disciplinari specifiche (cfr. SCIENTIFIC ABILITIES ... in Siti web).

L'una è a supporto dell'altra perché se ci si pone come obiettivo che gli studenti costruiscano la conoscenza pensando come i fisici, devono essere motivati a impegnarsi in questo processo. Devono sentire che essi stessi possono creare conoscenza e che questa conoscenza è significativa e utile per la loro vita. Nessuno è escluso (o deve sentirsi escluso) dal processo di sviluppo della conoscenza e devono essere minimizzati gli ostacoli alla conoscenza della fisica indotti dal modo in cui questa viene insegnata.

2.2 IL CICLO ISLE

Per raggiungere i suoi obiettivi l'approccio ISLE si caratterizza, come in un bricolage, dalla commistione sinergica e integrata di diverse prospettive teoriche per l'apprendimento della fisica, sintetizzabili nei seguenti punti³⁴.

L'apprendimento della fisica:

- consiste in una serie di attività che generano conoscenza, in cui gli studenti, in qualità di scienziati, giocano una serie intricata ma comunitariamente ben compresa di “giochi epistemici”³⁵; in questi giochi sono coinvolti in attività di sperimentazione e di ragionamento induttivo e ipotetico-deduttivo;
- è un'attività cognitiva: “fare fisica” implica la costruzione di significato attraverso l'uso di rappresentazioni multiple (traduzione dell'inglese *Multiple Representations*³⁶);
- è un'attività di tipo socioculturale: gli studenti partecipano alla comunità di coloro che apprendono, condividendo il lavoro durante il processo di costruzione della conoscenza;
- dovrebbe favorire l'inclusione tra pari e non la differenziazione per livelli di conoscenza disciplinare.

Per ottemperare a tutte queste prospettive teoriche, l'ISLE itera in continuazione nel percorso curriculare e nell'affrontare i diversi contenuti disciplinari un ciclo per

³⁴ Cfr. ETKINA, BROOKES, PLANINSIC 2021.

³⁵ Cfr. COLLINS, FERGUSON 1993.

³⁶ Cfr. MUNFARIDAH, AVRAAMIDOU, GOEDHART 2021.

l'apprendimento che opera coerentemente con i presupposti teorici e li organizza nel processo didattico (cfr. Figura 5).

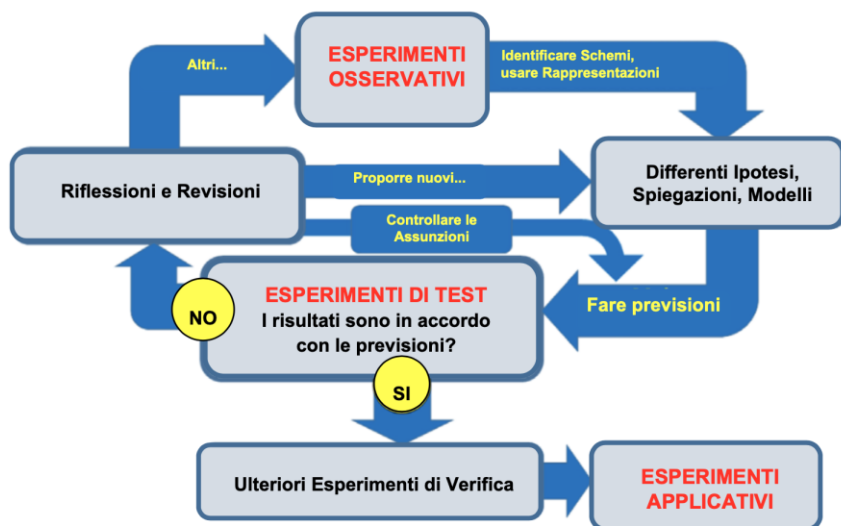


Figura 5. Il ciclo ISLE (adattamento dall'immagine originale con il permesso degli autori)³⁷.

Il processo di apprendimento inizia nella parte superiore del ciclo con l'osservazione e la raccolta di dati da semplici *esperimenti osservativi* (nell'approccio ISLE chiamati *observational experiments*). Dall'osservazione della realtà si passa all'identificazione di schemi/modelli (*patterns*) utilizzando rappresentazioni appropriate (*multiple representations*). Lo sviluppo di esperienze o modelli matematici indirizza al controllo in esperimenti di test (*testing experiments*) attraverso un approccio di tipo ipotetico-deduttivo che consente di confermare o confutare le ipotesi/spiegazioni/modelli (*hypotheses/explanations/models*) elaborati. Il processo di verifica prevede la progettazione dell'esperimento e la formulazione di una previsione (*predictions*) basata sulla spiegazione della relazione in esame, per poi confrontare il risultato con la previsione, facendo eventualmente nuove assunzioni (*assumptions*). In caso di corrispondenza, sono necessari ulteriori test, mentre in caso di mancata corrispondenza inizia il processo di revisione. Qualsiasi esperimento può diventare un esperimento osservativo quando si verifica un

³⁷ Cfr. ETKINA, BROOKES, PLANINSIC 2021.

risultato inaspettato. Allo stesso tempo evolve in un esperimento applicativo (*application experiments*) per validare la conoscenza, utilizzando nuovamente le rappresentazioni multiple.

Il ciclo caratterizza il processo di apprendimento più che quello didattico; è quindi da intendersi come una sequenza, non necessariamente sempre identica nei vari contesti didattici, di attività messe in atto dal docente al fine di garantire la costruzione concettuale nello studente. L'alternanza tra gli aspetti di carattere sperimentale fa sì che l'insegnamento della fisica si riappropri del suo significato epistemologico di scienza che parte dall'esperienza della realtà intessuta con la descrizione matematica come una delle possibili rappresentazioni del fenomeno (e non come quella proposta in modo esclusivo agli studenti).

Per comprendere come “lavora” il ciclo nel processo didattico è necessario chiarire il glossario dei termini che lo caratterizzano e poi vederlo in opera nel percorso curricolare (anche semplicemente leggendo un capitolo del libro).

2.3 IL GLOSSARIO ISLE

La terminologia specifica utilizzata in questo approccio arricchisce il contenitore dove un insegnante si muove per la costruzione della conoscenza. Il “fare fisica” passa per il coinvolgimento fattivo degli studenti nell'attività sperimentale.

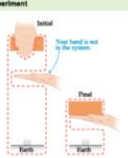



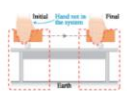

Nel ciclo ISLE questo coinvolgimento viene esplicitato nelle tre tipologie di attività proposte: *esperimenti osservativi*, *esperimenti di test* ed *esperimenti applicativi*. Queste tre tipologie si differenziano in modo sostanziale dalla tipologia di attività sperimentali a cui si è abituati far riferimento e adottare nella pratica didattica: queste attività possono generalmente essere denotate con l'appellativo “dimostrative” (*demo experiments*, da *demonstration*).

Mostrare un fenomeno, raccogliere dati per verificare una relazione matematica che già si conosce sono esperimenti dimostrativi e purtroppo non hanno molto a che fare con il lavoro del fisico vero e proprio. Inoltre, costruiscono parzialmente la conoscenza

e di solito la dimostrano. Il che può senz'altro consolidare e potenziare la comprensione di un fenomeno ma non sta propriamente alla base della sua costruzione concettuale. Questo è un punto rilevante che differenzia l'approccio ISLE da altri approcci *inquiry-based*³⁸, dove, molto spesso, nella pratica sperimentale, lo studente viene guidato nell'esperimento dimostrativo. Invece, le tre tipologie identificate nell'ISLE pongono lo studente al centro dell'agire sperimentale, proprio come accade allo scienziato.

Observational Experiment Table 7.2

Negative and zero work

Observational experiment	Analysis
<p>Experiment 1. A hand holds a block high above a piece of chalk (the initial state) and then releases it. Your hand catches and stops the block (the final state). The block's potential to break the chalk is greater in the initial state than in the final state.</p> 	<p>The direction of the force exerted by your hand on the block is opposite the block's displacement and reduced the system's potential to break the chalk.</p> 
<p>Experiment 2. A cart is moving fast (the initial state) toward a piece of chalk taped on the wall. While it is moving, you push lightly on the moving cart opposite the direction of its motion, causing it to slow down and stop (final state). The cart's potential to break the chalk is greater in the initial state than in the final state.</p> 	<p>The direction of the force exerted by your hand on the cart is opposite the cart's displacement and caused the moving cart to slow down and stop, thus reducing its potential to break the chalk.</p> 
<p>Experiment 3. Your hand is slowly moving a block to the right, keeping the block just above the hallway. The block passes above the piece of chalk on the left (initial state) and then over the piece of chalk on the right (final state). The block is not close to the chalk in both states to break it.</p> 	<p>The direction of the force exerted by your hand on the block is perpendicular to the block's displacement and caused no change in the block's potential to break the chalk.</p> 
<p>Patterns</p> <ul style="list-style-type: none"> • In Experiments 1 and 2, the direction of the external force exerted on the object in the system is opposite the object's displacement, and the system's ability to break the chalk decreases. • In Experiment 3, the direction of the external force exerted on the object in the system is perpendicular to the object's displacement, and the system's ability to break the chalk is unchanged. 	

Watch Negative and zero work

Figura 6. Descrizione di un esperimento osservativo per introdurre il concetto di lavoro tratto dal libro *College Physics*³⁹.

Esperimenti osservativi (*observational experiments*): è un esperimento in cui si indaga un fenomeno raccogliendo dati qualitativi o quantitativi senza specifiche aspettative sul risultato. Non si fanno previsioni sull'esito: gli esperimenti osservativi sono propriamente “esperimenti che generano ipotesi e spiegazioni” e suggeriscono la ricerca di uno schema/modello ricorrente che descriva la fenomenologia osservata (cfr. Figura 6)⁴⁰.

³⁸ Cfr. BYBEE 1989.

³⁹ Cfr. ETKINA, PLANINSIC, VAN HEULEVEN 2019.

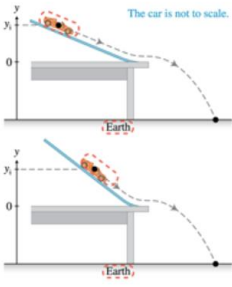
⁴⁰ Cfr. ETKINA, PLANINSIC, VAN HEULEVEN 2019.

Esperimenti di test (*testing experiments*): è un esperimento il cui risultato si può prevedere in base all'ipotesi/spiegazione che si sta testando. Per questo andrebbero denominati "esperimenti di test delle ipotesi". Un esperimento di test conferma/confuta l'ipotesi, non la previsione. Un esperimento di test non può dimostrare la correttezza dell'ipotesi (se il suo risultato corrisponde alla previsione), ma può confutarla (se il risultato non corrisponde alla previsione).

È importante che lo studente si affacci a questo modo di ragionare sulla realtà perché gli offre l'opportunità di elaborare ipotesi e previsioni con la possibilità che la conferma e la confutazione fanno parte del processo e non hanno lo stesso valore del "giusto/sbagliato" che contraddistingue l'esperimento dimostrativo e rispetto al quale lo studente si sente inevitabilmente giudicato in termini di correttezza di esecuzione e di risultato ottenuto (cfr. Figura 7).

Testing Experiment Table 7.3

Is the energy of an isolated system constant?

Testing experiment	Prediction	Outcome
<p>You have a toy car and a frictionless track. The bottom of the track sits near the edge of a table. You can tilt the track at different angles to vary its steepness. When the car reaches the end of the track, it flies horizontally off the table. Where should you release a car on the track so the car always lands the same distance from the table regardless of the slope of the track?</p> 	<p>Consider car + Earth as the system. The initial state is just before we release the car and the final state is just as the car leaves the horizontal track. For the car to land on the floor at the same distance from the table's edge, the car needs to have the same horizontal velocity and hence the same kinetic energy when leaving the track. If energy is constant in the isolated system, to get the same kinetic energy at the bottom of the track, the car-Earth system must have the same initial gravitational energy when it starts. Since the gravitational potential energy depends on the separation between the car and Earth, the car should start at the same vertical elevation independent of the tilt angle of the track, $y_1 = h$. Our prediction is based on the assumption that the gravitational potential energy of the system is only converted to the kinetic energy of the car and not to internal energy.</p>	<p>When released from the same vertical height with respect to the table, the car lands the same distance from the table.</p>
<p>Conclusion</p> <p>The outcome of the experiment matches the prediction and thus supports our hypothesis that the energy of an isolated system is constant.</p>		

👁 Watch *Is the energy of an isolated system constant?*

Figura 7. Descrizione dell'esperimento per verificare l'ipotesi se l'energia di un sistema isolato è costante, tratto dal libro *College Physics*⁴¹.

⁴¹ Cfr. ETKINA, PLANINSIC, VAN HEULEVEN 2019.

Esperimenti applicativi (*application experiments*): è un esperimento con l'obiettivo di risolvere un problema pratico o di determinare il valore di qualche grandezza fisica utilizzando le relazioni/modelli che non sono stati confutati da esperimenti di verifica multipli. Si possono anche chiamare “esperimenti di applicazione di ipotesi multiple” (in Figura 8 si può osservare l'esempio di un esperimento applicativo: lo studente “raccolge” le informazioni fisiche guardando il video e le traduce con diverse rappresentazioni).



Figura 8. Immagine tratta dal video che riproduce l'esperimento di applicazione dove la trasformazione di energia potenziale gravitazionale in cinetica consente alla *gravity car* di mettersi in moto (cfr. <<https://www.youtube.com/watch?v=O4j5bUxfLIc>>).

È molto importante che il lessico utilizzato dal docente nell'attività didattica sia chiaramente definito e non abbia ambiguità di significato. Per questo motivo nel glossario della terminologia ISLE vengono univocamente esplicitati i seguenti termini, propri dell'agire scientifico sperimentale.

Descrizione (*description*): è una dichiarazione di ciò che è stato osservato in un esperimento senza spiegarlo (qualitativamente o quantitativamente). Risponde alla domanda: “Che cosa è successo?”. Si può descrivere con parole, immagini, diagrammi, ecc.

Spiegazione (*explanation*): è una dichiarazione di una possibile ragione per cui qualcosa è accaduto nell'esperimento. Risponde alle domande “perché” o “come”.

Una spiegazione può contenere un meccanismo ipotetico di come è accaduto qualcosa. Può essere di diverse tipologie: meccanicistica (che esplicita “come” sia avvenuto) oppure causale (che esplicita la relazione causa-effetto e abbozza la risposta al “perché”).

Ipotesi (*hypothesis*): può essere considerata come un sinonimo di spiegazione. Esiste una pluralità di ipotesi che possono addurre a una certa spiegazione. Quello che è importante sottolineare è che l'ipotesi deve essere necessariamente verificata con un atto sperimentale (*testing experiment*) ed è confutabile.

Previsione (*prediction*): è una dichiarazione del risultato atteso dall'esecuzione di un particolare esperimento (prima di condurlo) ed è basata sull'ipotesi che si sta verificando. Offre l'informazione su cosa dovrebbe accadere in un particolare esperimento stante l'ipotesi assunta. La previsione, quindi, non è un'ipotesi, ma deve essere fatta in base all'ipotesi da testare che esiste solo con l'atto di essere verificata sperimentalmente⁴².

Assunzione (*assumption*): è un fattore della situazione fisica che si sceglie di ignorare o di assumere come vero, che semplifica la relazione tra le grandezze fisiche in gioco, il modello di descrizione o l'esecuzione dell'esperimento.

Modello (*model*): è una versione semplificata di un oggetto, di un sistema, di un'interazione o di un processo in fase di studio; nel modello vengono trascurate alcune caratteristiche della realtà che però non ne cambiano significativamente la descrizione fisica. In molti casi i termini modelli/ipotesi/spiegazioni vengono utilizzati come sinonimi.

2.4 ISLE E CURRICULUM DISCIPLINARE

L'ambiente ISLE è un approccio omnicomprensivo (traduzione di *holistic*, termine utilizzato dagli autori per definirlo) all'insegnamento della Fisica. Esso include gli aspetti rilevanti e caratterizzanti l'apprendimento scientifico. Per ottemperare a ciò, propone attività da realizzare in classe, laboratori didattici, valutazioni formative e

⁴² Un'ipotesi può essere smentita da una serie di esperimenti di verifica. Può rivelarsi sbagliata. Una previsione, tuttavia, è sbagliata solo quando non deriva dall'ipotesi testata. Se il risultato dell'esperimento di verifica non corrisponde alla previsione, non significa che la previsione sia sbagliata. Significa solo che l'ipotesi su cui si basava la previsione era sbagliata o che erano state trascurate alcune ipotesi. In questo caso si dice che la previsione non corrisponde al risultato dell'esperimento.

sommative, compiti da assegnare a casa e molto altro ancora⁴³. L'approccio ISLE non costituisce un curriculum, ma il materiale proposto può consentire di progettare un curriculum disciplinare, seguendo i nuclei tematici fondamentali della disciplina e integrandoli in un contesto di sviluppo didattico concettualmente coerente. Questo significa che esso è adattabile a qualsiasi curriculum e a livelli di istruzione differenti, purché, ovviamente, vengano mantenute le caratteristiche proprie dell'approccio⁴⁴. Tale flessibilità è garantita dallo sviluppo concettuale attraverso le attività sperimentali che consentono di manipolare e declinare i contenuti nella prospettiva della costruzione della conoscenza dalla concettualizzazione qualitativa a quella quantitativa.

La messa in atto di questo processo didattico risponde a una specifica esigenza di apprendimento: quella di coinvolgere gli studenti in un "complete learning cycle" (ciclo completo dell'apprendimento) così come è stato definito da Zull⁴⁵ ormai vent'anni fa (cfr. Figura 9) «*The more brain areas we use, the more neurons fire and the more neural networks change - and thus the more learning occurs*».⁴⁶

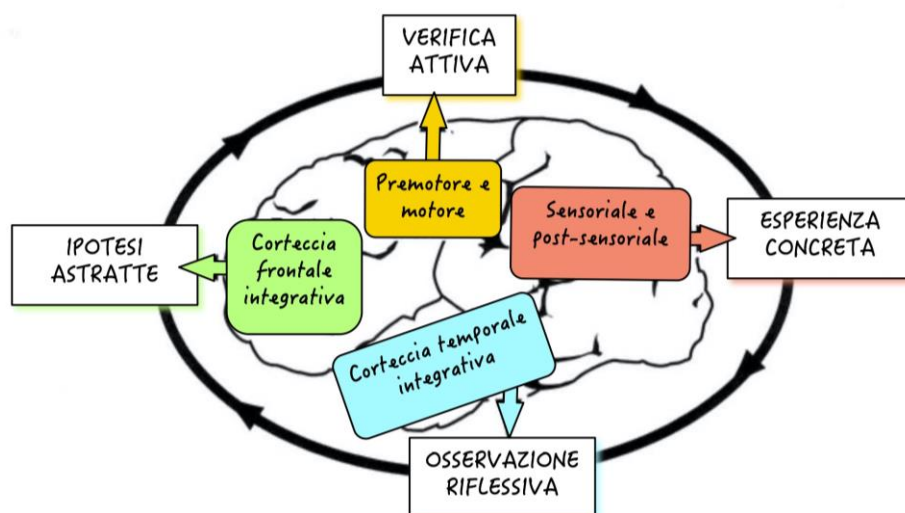


Figura 9. Adattamento all'italiano del ciclo completo dell'apprendimento di J. E. Zull (2004)⁴⁷.

⁴³ Cfr. ETKINA, BROOKES, PLANINSIC, VAN HEULEVEN 2019a, ETKINA, BROOKES, PLANINSIC, VAN HEULEVEN 2019b. Tutti i materiali didattici sono disponibili agli indirizzi presenti nella sezione Siti web.

⁴⁴ Cfr. BOLOGNA, LONGO, PERESSI 2022; ETKINA, BROOKES, PLANINSIC, VAN HEULEVEN 2019a, 2019b. Tutti i materiali didattici sono disponibili agli indirizzi presenti nella sezione Siti web.

⁴⁵ Cfr. ZULL 2002, 2004.

⁴⁶ Trad. it.: «più aree cerebrali utilizziamo, più neuroni si attivano e più le reti neurali si modificano, e quindi maggiore è l'apprendimento».

⁴⁷ Cfr. ZULL, 2004.

L'approccio ISLE soddisfa esattamente questo requisito perché le attività sono sviluppate nel processo didattico del suo ciclo (cfr. Figura 5) in modo da richiedere l'attivazione cognitiva a tutti i livelli.

Inoltre, a garanzia che vi sia un consolidamento concettuale da parte degli studenti, vengono loro offerte tutte le possibili risorse semiotiche che, coordinate in vari modi, consentono loro di dare senso al mondo fisico. Esse consistono in diagrammi e illustrazioni, equazioni e grafici, parole e testi scritti, ma anche attività cinestetiche ed esperienze concrete come attività laboratoriali. Tutte queste appartengono e definiscono l'insieme della molteplicità delle rappresentazioni del fenomeno fisico⁴⁸. È stato dimostrato sperimentalmente che richiedere agli studenti di coordinare più rappresentazioni migliora la comprensione di un certo fenomeno, rispetto agli studenti che, nel loro processo di apprendimento, sono guidati a utilizzare una sola rappresentazione⁴⁹, prevalentemente quella matematica.

Le rappresentazioni multiple vengono in questo modo utilizzate come “cassetta degli attrezzi” per sviluppare negli studenti la *competenza argomentativa*, perché supportano la costruzione del ragionamento. Consentono, poi, un'esplorazione degli aspetti induttivi che soggiacciono alla descrizione di un fenomeno fisico, ne aprono l'orizzonte cognitivo e ne supportano correttamente la strutturazione concettuale.

3. L'APPROCCIO ISLE: UNO SGUARDO OLTRE IL LIBRO DI TESTO

Da qualsiasi prospettiva ci si avvicini all'approccio ISLE si rimane affascinati e allo stesso tempo incuriositi. Dal punto di vista della ricerca didattica, l'ISLE risponde coerentemente alla necessità pedagogico-didattica di implementare nell'insegnamento della fisica un'innovazione che strutturalmente scardini declinazioni contenutistiche basate sostanzialmente sul linguaggio matematico.

Nel panorama delle metodologie basate sull'indagine sperimentale (*inquiry-based*) sviluppa chiaramente un percorso di apprendimento in cui la centralità dello

⁴⁸ Cfr. MUNFARIDAH, AVRAAMIDOU, GOEDHART 2021; BOLOGNA, LEBAN 2021.

⁴⁹ Cfr. ETKINA, PLANINSIC, BROOKES 2021.

studente è realmente messa in atto⁵⁰. Lo studente è guidato nell'acquisizione delle conoscenze con l'intenzionalità di renderlo protagonista dell'agire didattico e del "fare fisica" come nel processo scientifico vero e proprio. Questo migliora l'atteggiamento verso la disciplina, superando quelle difficoltà che la rendono così "faticosa" per la maggior parte degli studenti della Scuola secondaria di secondo grado.

Dal punto di vista dell'insegnamento, quando si inizia a muovere i primi passi nella sperimentazione dell'approccio, quanto accade è ancora più significativo.

È molto difficile per un docente allontanarsi dal libro di testo in adozione nelle proprie classi. È difficile per due motivi sostanziali: in primo luogo per garantire agli studenti di avere un appiglio se non è ben chiaro quanto spiegato in classe. In secondo luogo, per consolidare l'apprendimento attraverso gli esercizi e i problemi di fine capitolo. Se dunque il docente che sperimenta l'ISLE abbandona il suo libro di testo, significa che l'approccio supera le garanzie che il libro stesso offriva.

L'hanno vissuto così alcuni docenti di scuole secondarie di secondo grado del Friuli-Venezia Giulia. Nonostante le difficoltà derivanti da una didattica affaticata in conseguenza della situazione emergenziale in atto, nell'anno scolastico appena trascorso (2021-22) una ventina di docenti di scuole secondarie si sono cimentati nella sperimentazione dell'approccio.

C'è chi l'ha fatto estesamente, chi ha provato solo un modulo didattico, chi invece ha deciso che durante quest'anno avrebbe intanto studiato i materiali e partecipato ai Workshop di formazione organizzati dal Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Trieste, nell'ambito delle attività di ricerca del progetto *Early Physics*⁵¹.

Nessuno escluso: tutti coloro che hanno dato "un'occhiata" oltre il proprio libro di testo non tornano più indietro: perché funziona, perché vedono la luce negli occhi dei loro studenti⁵², perché essi stessi si sentono di aver migliorato la loro padronanza disciplinare in termini di conoscenza del contenuto per l'insegnamento (*Content*

⁵⁰ Cfr. ETKINA, BROOKES, PLANINSIC 2021.

⁵¹ Cfr. BOLOGNA, LONGO, PERESSI 2022.

⁵² Cfr. SHERIN, JACOBS, PHILIPP 2011.

*Knowledge for Teaching*⁵³). Il prossimo passo da fare consiste nel tradurre i materiali, in modo tale che anche nel nostro Paese i docenti di fisica abbiano un nuovo punto di riferimento in un nuovo libro di testo basato sull'approccio ISLE. Un libro adatto non solo agli studenti del liceo scientifico, ma anche a quelli del liceo classico, del liceo delle scienze umane, dell'istituto tecnico e di quello professionale. Perché la Fisica è per tutti. Nessuno escluso.

BIBLIOGRAFIA

AMALDI U.

2007, *La Fisica di Amaldi*. Vol. 1-3, Bologna, Zanichelli Editore.

2020, *Il nuovo Amaldi per i licei scientifici. Blu*. Vol. 1-3, Bologna, Zanichelli Editore.

AWASTHI J. R.

2006, «Textbook and its evaluation», *Journal of NELTA*, n. 11 (1-2), pp. 1-10.

BYBEE R. W.

1989, *Science and technology education for the elementary years: frameworks for curriculum and instruction*, Washington, *The National Center for Improving Instruction*.

BOLOGNA V.

2021, «Ripensare alla didattica: scenari e prospettive per l'insegnamento della Fisica», *QuaderniCIRD*, 22, pp. 85-102, scaricabile dall'indirizzo web: <<https://doi.org/10.13137/2039-8646/33407>>.

BOLOGNA V., LEBAN S. P.

2022, «Il puzzle dei problemi: L'utilizzo delle rappresentazioni multiple come aiuto ai docenti nella costruzione di percorsi didattici», *Giornale di Fisica*, n. LXIII (PLS-Fisica-SPI), pp. 99-108, scaricabile dall'indirizzo web: <<https://doi.org/10.1393/gdf/i2022-10432-2>>.

BOLOGNA V., PERESSI M.

2022a, «Does an Early Physics approach exist?», *Il Nuovo Cimento C*, n. 45, n. 214, scaricabile all'indirizzo web: <<https://doi.org/10.1393/ncc/i2022-22214-5>>.

2022b, «Interazione tra Matematica e Fisica: Schemi prevalenti nel PCK dei docenti di Fisica e costruzione di esercizi e problemi», *Giornale di Fisica*, n. LXIII (PLS-Fisica-SPI), pp. 241-250, scaricabile all'indirizzo web: <<https://doi.org/10.1393/gdf/i2022-10443-y>>.

BOLOGNA V., LONGO F., PERESSI M.

2022, «Insegnare la Fisica partendo dai processi di apprendimento», *QuaderniCIRD*, 24, pp. 142-149.

BOLOGNA V., LONGO F., PERESSI M., SORZIO P.

2022, «Monitoring PCK Physics Teachers Strategies for Math and Physics Languages Integration: the teacher footprint», *J. Phys.: Conf. Ser.*, n. 2297, pp. 012034 (1-8), scaricabile all'indirizzo web: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2297/1/012034>>.

⁵³ Cfr. ETKINA, GITOMER, IACONANGELO, PHELPS, SEELEY, VOKOS 2018.

BROOKES D. T., ETKINA E., PLANINSIC G.

2020, «Implementing an epistemologically authentic approach to student-centered inquiry learning», *Phys. Rev. Sp. Top.: Phys. Ed. Res.*, vol. 16, pp. 1-22, scaricabile all'indirizzo web: <<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.020148>>.

BUGGÉ D., ETKINA E.

2020, «The long-term effects of learning in an ISLE approach classroom», *Physics Education Research Conference, PERC 2020*, pp. 63-68, scaricabile all'indirizzo web: <<http://doi.org/10.1119/perc.2020.pr.Bugge>>.

COLLINS A., FERGUSON W.,

1993, «Epistemic forms and epistemic games: Structures and strategies to guide inquiry», *Educ. Psychol.*, vol. 28(1), pp. 25-42, scaricabile dall'indirizzo web: <<http://umdberg.pbworks.com/w/file/fetch/94889045/Collins%26Ferguson.pdf>>

ETKINA E.

2010, «Pedagogical content knowledge and preparation of high school physics teachers», *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, vol. 6, pp. 020110(1-26), scaricabile dall'indirizzo web: <<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.6.020110>>.

2015, «Millikan award lecture: Students of physics – Listeners, observers, or collaborative participants in physics scientific practices?», *American Journal of Physics*, vol. 83, pp. 669-679, scaricabile dall'indirizzo web: <<https://doi.org/10.1119/1.4923432>>.

ETKINA E., BROOKES D. T., PLANINSIC G.

2021, «The Investigative Science Learning Environment (ISLE) approach to learning physics», *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1882, pp. 012001(1-13), scaricabile dall'indirizzo web: <<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1882/1/012001>>.

ETKINA E., PLANINSIC G., VAN HEULEVEN A.

2019, *College Physics: Explore and Apply*, 2nd Edition, USA, Pearson.

ETKINA E., GREGORCIC B., VOKOS S.

2017, «Organizing physics teacher professional education around productive habit development: A way to meet reform challenges», *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, vol. 13, pp. 010107 (1-16), scaricabile dall'indirizzo web: <<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010107>>.

ETKINA E., BROOKES D., PLANINSIC G., VAN HEUVELEN A.

2019a, *Instructor's Guide for College Physics: Explore and Apply*, 2nd ed., San Francisco (CA), Pearson.

2019b, *Active Learning Guide for College Physics: Explore and Apply*, 2nd ed., San Francisco (CA), Pearson.

ETKINA E., GITOMER D., IACONANGELO C., PHELPS G., SEELEY L., VOKOS S.

2018, «Design of an assessment to probe teachers' content knowledge for teaching: An example from energy in high school physics», *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, vol. 14, pp. 010127(1- 20), scaricabile dall'indirizzo web: <<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010127>>.

ETKINA E., VAN HEULEVEN A., WHITE-BRAHMIA S., BROOKES D. T., GENTILE M., MURTHY S., ROSENGRANT D., WARREN A., 2006, «Scientific abilities and their assessments», *Phys. Rev. Sp. Top.: Phys. Ed. Res.*, vol. 2, pp. 1-15, scaricabile dall'indirizzo web: <<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.2.020103>>.

FERMI E., PERSICO E.

1945 (1959), *Fisica per le scuole superiori*, Bologna, Zanichelli Editore.

LEHAVI Y., BAGNO E., EYLON B. S., MUALEM R., POSPIECH G., BOHM U., KREY O., KARAM R.
2017, *Classroom Evidence of Teachers' PCK of the Interplay of Physics and Mathematics*, in T. GRECZYLO, E. DEBOWSKA (eds), «*Key Competences in Physics Teaching and Learning. Springer Proceedings in Physics*», vol. 190, pp. 95-104, Cham-AG, Springer, scaricabile dall'indirizzo web: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44887-9_8>.

MACMILLAN C. J. B., GARRISON J. W.
1988, «*A Logical Theory of Teaching: Erotetics and Intentionality*», Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

MITHANS M., GRMEK M.
2020, *The Use of Textbooks in the Teaching-Learning Process*, in A. LIPOVEC, J. BATIČ, E. KRANJEC (eds.), «*New Horizons in Subject-Specific Education: Research Aspects of Subject-Specific Didactics*», pp. 201-228, Maribor, University of Maribor - University Press, scaricabile dall'indirizzo web: <<https://doi.org/10.18690/978-961-286-358-6.10>>.

MUNFARIDAH N., AVRAAMIDOU L., GOEDHART M.
2021, «*The Use of Multiple Representations in Undergraduate Physics Education: What Do we Know and Where Do we Go from Here?*», *EURASIA J. Math. Sci. Tech. Ed.*, vol. 17(1), pp. em1934(1-19), scaricabile dall'indirizzo web: <<https://doi.org/10.29333/ejmste/9577>>.

SEGATO S.
2021, «*Il concetto di campo nei testi per il liceo, da Fermi ai giorni nostri*», Tesi di Laurea Magistrale in Fisica, Università di Trieste, Corso di Laurea Magistrale in Fisica, Relatore: Prof. F. Longo, Correlatore: Prof.ssa V. Bologna, a. a. 2020/21, scaricabile dall'indirizzo web: <<http://hdl.handle.net/20.500.12072/91403>>.

SHERIN M. G., JACOBS V. R., PHILIPP R. A.
2011, *Mathematics Teacher Noticing - Seeing Through Teaches' Eyes*, New York and London, Routledge.

SHERMAN M. F., WALKINGTON C., HOWELL E.
2016, «*Brief report: A comparison of symbol-precedence view in investigative and conventional textbooks used in algebra courses*», *Journal for Research in Mathematics Education*, n. 47 (2), pp. 134-146, scaricabile dall'indirizzo web: <<https://doi.org/10.5951/jresmetheduc.47.2.0134>>.

SHULMAN L.
1986, «*Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching* », *Educational Research*, vol. 15(2), pp. 4-14, scaricabile dall'indirizzo web: <<http://www.jstor.org/stable/1175860>>.

SIN C.
2014, «*Epistemology, Sociology, and Learning and Teaching in Physics*», *Sci. Ed.*, vol. 98(2), pp. 342-365, scaricabile dall'indirizzo web: <<https://doi.org/10.1002/sce.21100>>.

VYGOTSKY L. S.
1934/1987, «*Thinking and speech*», in R. W. RIEBER, A. S. CARTON (eds.), *The collected works of L. S. Vygotsky*, 1, New York (NY, USA), Plenum, pp. 37-285.

ZULL J. E.
2002, «*The Art of Changing the Brain: Enriching the Practice of Teaching by Exploring the Biology of Learning*», Sterling (VA), Stylus Publishing.
2004, «*The Art of Changing the Brain*», *Educational Leadership*, vol. 62(1), pp. 68-72, scaricabile dall'indirizzo web: <http://www.ascd.org/ASCD/pdf/journals/ed_lead/el200409_zull.pdf>.

SITI WEB

EXPLORE AND APPLY PHYSICS: FACEBOOK GROUP PAGE OF USERS OF THE BOOK COLLEGE PHYSICS BY ETKINA E. ET AL., 2019
<<https://www.facebook.com/groups/320431092109343>>, sito consultato il 27.6.2022.

GORAZD PLANINSIC, FMF UL – CANALE YOUTUBE
<<https://www.youtube.com/channel/UCs4Qaa6-gfZ5AHhwyojPMQg/videos>>, sito consultato il 27.6.2022.

ISLE – INVESTIGATIVE SCIENCE LEARNING ENVIRONMENT
<<http://www.islephysics.net>>, sito consultato il 22.6.2022.

PHYSICS TEACHING TECHNOLOGY RESOURCES
<<http://videos.islephysics.net/>>, sito consultato il 27.6.2022.

PUM – PHYSICS UNION MATHEMATICS
<<http://pum.islephysics.net/>>, sito consultato il 27.6.2022.

SCIENTIFIC ABILITIES (OF THE RUTGERS PHYSICS AND ASTRONOMY EDUCATION RESEARCH GROUP)
<<https://sites.google.com/site/scientificabilities/introduction?authuser=0>>, sito consultato il 27.6.2022.