

Insegnare relatività ristretta a scuola: esigenze degli insegnanti e proposte innovative

A. De Ambrosis

Dipartimento di Fisica "A. Volta", Università di Pavia, Italy

O. Levrini

Dipartimento di Fisica, Università di Bologna, Italy

Riassunto. L'articolo riguarda uno studio effettuato sui dati raccolti in attività svolte con un gruppo di insegnanti di fisica in un contesto di formazione a distanza riguardante temi di fisica moderna (Master IDIFO, Progetto Lauree Scientifiche). Lo studio ha consentito di mettere a fuoco la complessità del processo mediante il quale insegnanti di scuola secondaria giungono a far proprie proposte di insegnamento innovative, a confrontarle con altre e a formulare in modo autonomo percorsi realizzabili in classe. Il caso considerato è quello della proposta di Taylor e Wheeler per l'insegnamento della Relatività che gli insegnanti hanno analizzato e confrontato con quella di Resnick, a loro più nota. In particolare, sono state ricostruite le tappe del percorso di *appropriazione* seguito dal gruppo di insegnanti e, sulla base dei risultati ottenuti, formulate alcune ipotesi circa le caratteristiche che proposte innovative dovrebbero possedere per essere accolte e utilizzate in modo critico dagli insegnanti.

Abstract. This paper deals with a study carried out with a group of high-school physics teachers engaged in a Master course on the teaching of modern physics (Master IDIFO, Progetto Lauree Scientifiche).

The study allowed us to focus on the complexity of the process the teachers have to go through in order to master innovative proposals, to compare them with more traditional ones and to design their own path for the class work. In particular, Taylor and Wheeler's approach for teaching special relativity has been analyzed, discussed and compared with Resnick's proposal, already known by most of the teachers involved in the study. Data collected during the work allowed us to reconstruct the path followed by the group of teachers in order to get hold of the new approach. Some hypotheses on the characteristics an innovative proposal should have to be accepted and critically used by teachers are proposed.

1. Introduzione

Il problema del miglioramento dell'insegnamento Fisica del '900 a scuola è un tema centrale nell'ambito della ricerca in Didattica della Fisica a livello nazionale ed internazionale ormai da parecchi anni.

In questo articolo ci concentreremo sul problema specifico relativo all'individuazione delle caratteristiche che dovrebbe avere una proposta d'insegnamento innovativa affinché essa possa essere presa in considerazione, analizzata e utilizzata in modo proficuo e culturalmente significativo da insegnanti di scuola secondaria superiore. Nell'affrontare questo problema, ci limiteremo al caso dell'insegnamento della relatività ristretta.

In particolare, saranno riportati i principali risultati di uno studio condotto in un contesto di formazione a distanza (Master IDIFO) in cui è stata analizzata e discussa la proposta di Taylor e Wheeler presentata nel testo “La fisica dello spazio-tempo” [1] e sono stati approfonditi i problemi scaturiti da questa analisi.

Tale proposta è stata presentata agli insegnanti con l’obiettivo di fornire loro gli strumenti culturali e professionali necessari non soltanto per coglierne le peculiarità rispetto ad altre proposte, ma anche per riconoscerla come espressione di una possibile interpretazione della teoria e del suo insegnamento. L’idea di fondo del lavoro condotto — e di questo articolo — è che faccia parte della professionalità degli insegnanti stabilire i criteri specifici per la scelta e/o la progettazione di percorsi da realizzare in classe, affinché questi possano adattarsi al meglio al contesto della scuola e della classe, nonché allo stile d’insegnamento. In questa prospettiva, si ritiene che la ricerca in Didattica della Fisica abbia il compito di elaborare materiali e realizzare contesti di formazione efficaci per guidare gli insegnanti ad *appropriarsi* ⁽¹⁾ di una pluralità di proposte, così da poterne valorizzare consapevolmente sia le specificità sia gli aspetti di complementarità ⁽²⁾. Come sarà illustrato nel seguito, con il termine “appropriazione” non si intenderà tanto (o soltanto) il far propria una serie di strategie didattiche e di comunicazione per la traduzione in classe di una proposta, quanto (e soprattutto) un processo orientato a cogliere i presupposti di fondo che caratterizzano la proposta stessa come ricostruzione disciplinare in prospettiva didattica. In questo caso particolare, per favorire il processo di appropriazione della proposta di Taylor e Wheeler, gli insegnanti sono stati guidati a confrontarla con la proposta formulata da Resnick [4], ancora oggi principale riferimento per insegnanti e autori di libri di testo ⁽³⁾.

I risultati ottenuti con lo studio oggetto di questo articolo mostrano alcuni aspetti, secondo noi, rilevanti del problematico cammino che gli insegnanti devono intraprendere per appropriarsi di proposte didattiche innovative, confrontarle con altre ed acquisire strumenti culturali e professionali orientati ad una progettazione autonoma di percorsi da realizzare in classe.

Prima di presentare lo studio effettuato e i risultati ottenuti, saranno illustrate alcune peculiarità della proposta di Taylor e Wheeler, nonché quelle caratteristiche che, secondo noi, la rendono un esempio di proposta innovativa rispetto alla proposta formulata da Resnick.

⁽¹⁾ Il concetto di *appropriazione* è analizzato da P. Guidoni. Al proposito si veda Balzano *et al.* [2].

⁽²⁾ Problemi specifici affrontati dalla ricerca in Didattica della Fisica nell’elaborazione di materiali e approcci per l’insegnamento della relatività ristretta sono analizzati e discussi in De Ambrosis *et al.*, [3].

⁽³⁾ In Italia esistono due importanti esperienze realizzate al fine di contribuire ad un miglioramento dell’insegnamento della Relatività a livello di scuola secondaria superiore: l’Iniziativa Relatività, impresa condotta da G. Cortini (1973-1979) [5, 6] che ha coinvolto numerosi ricercatori e insegnanti e la proposta formulata da Fabri [7]. In questo contesto si è scelto di limitare l’analisi alle due proposte statunitensi per la loro diffusione a livello internazionale e perché sono sufficienti ad introdurre il problema che intendiamo presentare. Indicheremo in nota le principali differenze delle due proposte italiane rispetto a quelle statunitensi.

2. La proposta di Taylor e Wheeler a confronto con la proposta di Resnick

A partire dagli anni '60 fino ad oggi, la proposta formulata da Resnick e quella elaborata da Taylor e Wheeler hanno rappresentato, a livello nazionale e internazionale, i principali riferimenti per l'insegnamento della relatività ristretta seppur con diverse fortune in termini di diffusione e utilizzo. Infatti, a differenza del grande successo ottenuto dalla proposta di Resnick fin dalla sua formulazione, quella di Taylor e Wheeler si è configurata come un riferimento culturale d'élite almeno fino alla sua versione del 1992.

La proposta di Resnick si caratterizza come una presentazione della teoria effettuata ripercorrendo l'evoluzione storica e in coerenza con l'approccio operazionista riconosciuto nei lavori originali di Einstein [8, 9]. La tesi sostenuta è che la relatività sia "una teoria della misura" e tale tesi è argomentata utilizzando il linguaggio algebrico delle trasformazioni di Lorentz illustrato, per evidenziarne il significato fisico, con i classici esperimenti mentali di Einstein. Lo sforzo richiesto allo studente è quello di immaginare un mondo popolato da regoli, orologi, treni che si muovono a velocità prossime a quelle della luce e di accettare, come conseguenza dell'invarianza della velocità della luce, il fatto che misure di lunghezze e di intervalli di tempo non siano più assolute ma dipendenti dal sistema di riferimento rispetto al quale si effettuano le misure stesse. Particolare attenzione è rivolta alle evidenze sperimentali che hanno motivato e corroborato la necessità di rivedere le basi concettuali della cinematica e della dinamica classiche ⁽⁴⁾.

Il successo della proposta di Resnick è probabilmente attribuibile, oltre che alla lucidità e coerenza con cui la presentazione della teoria si sviluppa, alla scelta di ripercorrere alcune tappe dell'evoluzione storica, solitamente accolta e accettata dagli insegnanti come strategia didattica efficace per ammorbidire l'impatto con una teoria che porta a scardinare concetti di base riguardanti spazio e tempo. Anche l'approccio operazionista, benché criticato da molti filosofi e fisici come versione semplicistica di empirismo, ha un forte potere persuasivo per l'immagine di concretezza che restituisce.

Le principali critiche rivolte all'approccio di Resnick riguardano l'eccessiva semplificazione con cui è presentata la ricostruzione storica [11], ma soprattutto i limiti

⁽⁴⁾ L'Iniziativa Relatività [5] condivide con l'impostazione di Resnick la scelta di preferire un linguaggio algebrico, di porre l'accento sugli effetti relativistici e di prestare molta attenzione agli aspetti sperimentali (esperimenti di Bertozzi sul valore limite della velocità della luce, di Frish e Smith sulla misura del tempo di decadimento dei muoni in volo, di Hafele e Keating e di Michelson e Moreley). La principale differenza rispetto alla proposta di Resnick consiste nella scelta di non seguire un percorso storico e di introdurre la necessità di rivedere le basi concettuali della fisica classica partendo da una discussione dell'esperimento di Bertozzi e, dunque, dall'evidenza sperimentale dell'esistenza in natura di una velocità limite e recuperando in appendice la dimensione storica mediante una discussione dei risultati dell'esperimento di Michelson e Morely [6]. Per approfondimenti circa gli esperimenti di Bertozzi e di Frish e Smith si veda il PSSC (e i due filmati relativi ad essi) [10]. Per una trattazione dettagliata ed approfondita da un punto di vista didattico dell'esperimento di Hafele e Keating si veda il testo di Fabri [7], mentre per una descrizione in forma problematica dell'esperimento di Michelson e Moreley ci si può riferire ad un esercizio relativo al Capitolo 3 del testo di Taylor e Wheeler [1].

che il linguaggio algebrico-operazionista mostra nella direzione di aprire verso la relatività generale e nell'evidenziare la struttura formale sulla quale basare la dinamica relativistica.

La scelta di privilegiare il linguaggio geometrico è alla base della proposta elaborata da Taylor e Wheeler. Questa proposta si configura come una vera e propria ricostruzione a-storica della teoria effettuata alla luce della relatività generale, ovvero col fine esplicito di evidenziare gli aspetti concettuali che si sono mostrati maggiormente fecondi nello sviluppo successivo della fisica: la struttura quadridimensionale e gli aspetti invarianti, tra i quali, soprattutto, il quadrintervallo e il quadri-impulso ⁽⁵⁾.

Il punto di forza della proposta risiede nella profonda ed elegante coerenza interna nonché nella lucidità con cui si costruiscono strumenti potenzialmente fecondi per capire la relatività generale.

Lo sforzo che la comprensione del testo richiede si pone a diversi livelli: accettare che le giustificazioni della necessità e dell'efficacia delle scelte siano ritrovabili principalmente *a posteriori* (a quadro concettuale costruito nella sua globalità); acquisire familiarità con un linguaggio quadridimensionale e con uno spazio astratto nel quale le ordinarie misure effettuate con orologi e regoli sono rappresentate da *proiezioni* su particolari sottospazi della *distanza invariante* spaziotemporale; individuare strumenti espliciti per confrontare la proposta con ciò che si trova nei libri di testo (solitamente vicini all'approccio di Resnick).

Le due proposte, costruite su precise scelte d'approccio e di linguaggio, non solo mettono l'accento su concetti diversi (ad esempio gli effetti relativistici o le grandezze invarianti) ma implicano anche letture molto diverse delle teorie che hanno storicamente preceduto e seguito la relatività ristretta. In particolare, la proposta di Resnick consente, nella sua trasposizione didattica, di ricordare la fisica classica alla fisica relativistica senza grosse fratture, introducendo nel panorama consueto "gli effetti relativistici" e "le nuove definizioni delle grandezze dinamiche" quasi come anomalie che si verificano solo ad altissime velocità. L'approccio geometrico di Taylor e Wheeler invece, basando l'intera proposta su nuova geometria spazio-temporale e sulle grandezze invarianti, pone fin dall'inizio il problema del raccordo con la fisica classica (e il suo formalismo) e ne impone una rivisitazione.

Anche per quello che riguarda la relazione tra relatività ristretta e generale le due proposte si differenziano nettamente. Nella proposta di Resnick la relatività generale è presentata come teoria costruita generalizzando il principio di relatività a tutti i sistemi di riferimento. Nella proposta di Taylor e Wheeler, invece, la relatività generale emerge non tanto come *teoria dell'inerzia*, quanto come *teoria geometrica della gravitazione*. In altre parole, la relatività "ristretta" è, per Taylor e Wheeler, una teoria il cui campo di validità è limitato al caso di "assenza di gravitazione", ovvero una teoria valida soltanto in sistemi locali in caduta libera, perché in essi e

⁽⁵⁾ La proposta di Fabri condivide con Taylor e Wheeler la scelta di privilegiare il linguaggio geometrico e, in modo ancora più accentuato e argomentato, l'obiettivo di presentare relatività ristretta e relatività generale in modo unitario [7].

solo in essi sono eliminabili gli effetti gravitazionali. Senza dirlo esplicitamente le due proposte scelgono di prendere una posizione piuttosto netta circa il problema ancora molto aperto sul significato della generalizzazione del principio di relatività a sistemi di riferimento diversi da quelli solitamente considerati inerziali [12].

Le considerazioni svolte mettono in evidenza che il processo di ricostruzione disciplinare della fisica moderna in prospettiva didattica implica prese di posizione circa:

- il significato che si attribuisce alla teoria anche in relazione alla sua collocazione all'interno della disciplina e all'evoluzione della conoscenza;
- i problemi interpretativi ancora aperti sui fondamenti delle teorie;
- gli aspetti che si intendono sottolineare della fisica (ad esempio il ruolo del formalismo e la scelta di un formalismo rispetto ad un altro oppure il ruolo di esperimenti reali ed esperimenti mentali).

Dal punto di vista più strettamente didattico diventa fondamentale anche individuare e costruire:

- le strategie comunicative che si ritengono maggiormente efficaci per rendere accettabile una proposta;
- le strategie didattiche che si intendono favorire affinché il percorso seguito possa integrarsi in un percorso di crescita cognitiva degli studenti, anche alla luce dei risultati di ricerca ottenuti sulle principali difficoltà che lo studio di una teoria pone.

Rispetto a questi punti le due proposte di riferimento non appaiono immediatamente trasparenti e questo, a nostro parere, ne rende problematica la confrontabilità da parte degli insegnanti di scuola secondaria. Di conseguenza, diventa altrettanto problematica la possibilità, da noi auspicata, che gli insegnanti siano in grado di progettare autonomamente percorsi a loro congeniali.

Nel seguito questo problema verrà approfondito partendo dai risultati di una esperienza condotta con insegnanti in servizio all'interno del Master IDIFO (Innovazione Didattica In Fisica e Orientamento), organizzato in correlazione con il Progetto di Rilevante Interesse Nazionale F21 e con il Progetto Lauree Scientifiche ⁽⁶⁾.

3. Lo studio

3.1. Il contesto

Il Master IDIFO è dedicato ad insegnanti di scuola secondaria superiore e riguarda temi di fisica moderna. Iniziato nella primavera del 2006 e tuttora in corso, il Master prevede una interazione a distanza docenti-studenti mediante una piattaforma

⁽⁶⁾ Il Master IDIFO è un Master universitario di II livello (AA 2005-2006, 2006-2007) proposto nell'ambito del Progetto Lauree Scientifiche del MIUR, come iniziativa congiunta delle seguenti Unità di Ricerca in Didattica della Fisica partecipanti al progetto PRIN F21 (coordinatore nazionale: P. Guidoni): Bologna, Milano, Milano-Bicocca, Napoli "Federico II", Palermo, Pavia, Torino, Roma "La Sapienza", Udine (capofila), nonché le seguenti università cooperanti con le Unità di Ricerca: Bari, Bolzano, Lecce, Modena e Reggio Emilia, Trento, Trieste.

TABELLA I. – *Articolazione del modulo di Relatività nel Master IDIFO.*

A	Concetti fondanti per un percorso di base di relatività	<ul style="list-style-type: none"> ripercorrere e approfondire le conoscenze di base di relatività in prospettiva d'insegnamento; riconoscere le peculiarità di proposte innovative.
	Ricostruire la relatività in prospettiva didattica: la proposta di Taylor e Wheeler	
B	Le interpretazioni di Einstein e Minkowski a confronto e le attuali proposte didattiche	<ul style="list-style-type: none"> analizzare e discutere le “radici storiche” delle principali proposte didattiche; riflettere sulle implicazioni epistemologiche di alcune scelte didattiche.
	Verso la relatività generale: possibili interpretazioni del principio di equivalenza	
C	Laboratorio di didattica sulla proposta di relatività	<ul style="list-style-type: none"> approfondire temi emersi come rilevanti ai fini di una progettazione di percorsi.

informatica che consente lo scambio agevole di materiale, la realizzazione di forum, la scrittura collaborativa di documenti. Il modulo di Relatività è stato progettato e realizzato con l'obiettivo generale di fornire ai corsisti criteri per la progettazione di interventi didattici alla luce dei principali risultati di ricerca in Didattica della Fisica.

Esso è costituito da cinque insegnamenti in rete (tenuti dagli autori), ciascuno dei quali articolato in sezioni. Attività correlate sono state svolte in presenza nell'ambito del workshop tenuto a Udine nel settembre 2006 (un seminario tenuto da S. Bergia e attività sperimentali proposte da G. Pegna).

Si è scelto di condurre il lavoro con gli insegnanti, organizzando i 5 insegnamenti in rete essenzialmente in tre blocchi (tabella I).

Il blocco A è incentrato su un'analisi di “Fisica dello Spazio-tempo” di Taylor e Wheeler (nella versione italiana del 1994). Tale scelta è motivata dal fatto che si tratta di un testo sufficientemente complesso da essere in grado di stimolare riflessioni a diversi livelli (disciplinare, epistemologico, didattico) e, dunque, secondo noi, particolarmente adatto per una riflessione tra insegnanti, indipendentemente dalla sua diretta spendibilità in classe.

Il blocco B riguarda l'analisi di materiali originali prodotti dal gruppo di ricerca in Didattica della Fisica dell'Università di Bologna nell'ambito di Progetti di Rilevante Interesse Nazionale (FFC e F21, coordinati a livello nazionale da P. Guidoni). Nel contesto del Master l'analisi di tali materiali ha l'obiettivo di fornire agli insegnanti alcuni strumenti concettuali per analizzare le radici storiche e i presupposti epistemologici della proposta di Taylor e Wheeler e per poterla confrontare criticamente con la più nota proposta di Resnick.

Nel blocco C, avviato contestualmente al blocco B e realizzato mediante lavori di gruppo, gli insegnanti sono invitati ad approfondire alcuni temi problematici emersi

nel lavoro precedente nonché ad individuare criteri generali per la progettazione di interventi in classe.

Nella tabella I è riportato uno schema che riassume i temi degli insegnamenti indicandone alcuni obiettivi specifici.

Per ciascuna sezione di ogni insegnamento è stata seguita la stessa modalità di lavoro:

- analisi di materiale (i capitoli del testo di Taylor e Wheeler, articoli di Einstein e Minkowski, articoli di commento ai lavori originali, articoli di ricerca didattica) da effettuare seguendo una griglia di analisi;
- produzione, nel tempo stabilito, di un breve documento con i risultati dell'analisi in forma di domande utili a focalizzare gli aspetti considerati fondamentali;
- rielaborazione dei risultati in un quadro sintetico d'insieme (effettuata da due corsisti volontari);
- discussione nel Forum avviata e condotta su alcuni fili di discussione individuati.

In Appendice sono riportati come esempio la griglia relativa ai capitoli 3 e 4 del Taylor e Wheeler e i relativi fili individuati per la discussione.

Questa modalità di lavoro, stabilita fin dall'inizio, ma consolidatasi via via che l'esperienza prendeva forma, aveva come obiettivi quelli di favorire la circolazione delle idee, di non forzare, ma orientare e fare evolvere la discussione mantenendo il gruppo compatto, nonché di favorire la massima libertà di utilizzo e partecipazione nei forum.

Il modulo di Relatività è stato seguito attivamente da una ventina di studenti, di cui, prima del Master:

- 1 studente non aveva mai studiato relatività nel corso del suo iter di formazione universitaria e le sue conoscenze derivavano da una lettura personale di libri di testo di scuola secondaria superiore;
- 1 studente aveva studiato relatività soltanto nell'ambito di un insegnamento della Scuola di Specializzazione all'Insegnamento Secondario;
- 7 studenti avevano seguito un insegnamento di relatività a livello universitario;
- tutti gli altri studenti avevano studiato relatività a livello universitario nell'ambito di insegnamenti di base e/o non specifici di relatività (ad esempio, Fisica Generale, Meccanica Razionale o Istituzioni di Fisica Teorica).

Al termine dei lavori condotti nel blocco A e nel blocco B i corsisti hanno risposto a un questionario, proposto per raccogliere le loro riflessioni sull'attività svolta e per orientare il lavoro successivo.

3.2. Obiettivi dello studio e scelte metodologiche

Nel corso del modulo è apparso evidente come l'appropriazione della proposta di Taylor e Wheeler non sia stata immediata, ma abbia richiesto da parte dei corsisti un cammino per certi versi faticoso, ma per molti altri stimolante. La reazione generale destata dal testo è stata così decisa da spingerci a condurre uno studio specifico finalizzato a:

- ricostruire le tappe principali del cammino di appropriazione;

- analizzare il processo di messa in fase degli aspetti salienti della proposta con le aspettative degli insegnanti;
- individuare le caratteristiche che una proposta innovativa deve possedere affinché essa sia motivante, rilevante e fruibile per insegnanti.

Le scelte effettuate di impostazione didattica, mirate a favorire le interazioni tra i corsisti, hanno permesso di ottenere una considerevole mole di dati relativi alle dinamiche collettive di gruppo.

È su questi dati che si basa l'analisi che presentiamo, volta ad evidenziare l'evoluzione dei modi di vedere e degli atteggiamenti dominanti che hanno condizionato la maturazione della riflessione.

3.3. Risultati, ovvero le tappe di un percorso di appropriazione

Il primo risultato ottenuto dall'analisi dei dati raccolti è l'individuazione di *tre tappe* nell'evoluzione dell'atteggiamento complessivo del gruppo di insegnanti di fronte al problema di cosa significhi innovare l'insegnamento della relatività a scuola:

- 1) *L'ingresso nel gioco, ovvero la costruzione dell'atteggiamento con cui guardare al problema;*
- 2) *Il gioco e le sue regole, ovvero la costruzione di criteri per "capire" la proposta di Taylor e Wheeler;*
- 3) *Il dietro le quinte del gioco, ovvero il problema dell'appropriazione di una proposta innovativa.*

1) *L'ingresso nel gioco*

Questa prima tappa, che ha coinciso all'incirca con l'analisi dei capitoli 1 e 2 del testo di Taylor e Wheeler (approssimativamente tre settimane), è caratterizzata da un cambiamento nei modi dominanti di guardare ad una proposta innovativa come quella in esame. In particolare, si è passati da un atteggiamento "impaziente" volto a confrontare sistematicamente e puntualmente la proposta con le proprie esperienze personali (come insegnanti e come studenti), ad un atteggiamento di esplicito e condiviso riconoscimento dell'esistenza di nodi disciplinari problematici che non ammettevano soluzioni locali e immediate.

L'impatto iniziale alla proposta, caratterizzato da un diffuso atteggiamento di resistenza e perplessità nel farsi coinvolgere personalmente in una riflessione ad ampio raggio, si manifesta con un utilizzo generalizzato di criteri di valutazione molto locali e con la formulazione immediata di proposte alternative a quelle del testo.

“Una delle prime domande che mi sono fatto dopo la lettura del primo capitolo è stata quella del punto di partenza. Credo che in una classe normale sia opportuno partire da un problema reale, per esempio l’esperimento di MM, altrimenti penso che si possa generare un bel po’ di confusione soprattutto tra gli studenti meno coinvolti. In sostanza penso sia opportuno un punto di partenza ‘esterno’ rispetto alla discussione di Taylor e Wheeler.” (D)

“Sarebbe interessante sviluppare, a partire dagli spunti del testo e dalle nostre considerazioni, dei percorsi didattici reali, stile unità di apprendimento in cui si esplicitano per esempio, i tempi, la classe di riferimento ed altri dettagli, che limitano poi moltissimo, l’universo delle cose che vorremmo fare e degli obiettivi che vorremmo raggiungere.” (F1).

Nel corso dell’analisi dei primi due capitoli e sulla base di nostre esplicite richieste di tenere separati problemi risolvibili a breve, medio e lungo termine, i corsisti maturano progressivamente la disponibilità a farsi coinvolgere e una forte curiosità verso la ricerca/costruzione di criteri generali di valutazione della proposta.

In questa fase avviene un cambiamento significativo nei modi con cui gli insegnanti si riferiscono agli studenti e alla propria esperienza personale come criteri di valutazione di una proposta.

Al primo impatto il riferimento a supposte difficoltà degli studenti è infatti l’argomento principe per non affrontare direttamente questioni che non tornano o per discriminare ciò che torna (rispetto alla propria esperienza di studente, oltre che di insegnante) da ciò che non torna.

“Volevo porre un altro problema e cioè quello dell’età dello studente e della familiarità con la fisica. Ho spesso preferito introdurre la relatività in quinta dopo l’elettromagnetismo, non solo perché mi interessava mantenere un percorso storico, ma anche perché parliamo di studenti che si avvicinano per la prima volta alla fisica, al suo metodo e al suo modo di indagare la natura. Pertanto affrettare l’introduzione della relatività speciale (inoltre da collegarsi a quella generale come T e W fanno) dopo la meccanica e prima dell’elettromagnetismo lo trovo dannoso...” (A1)

Un’altra convinzione largamente condivisa in questa prima fase è l’efficacia di un approccio storico:

“Posso senz’altro condividere l’approccio geometrico di TW, ma comunque introdurrei prima l’argomento con un ‘cappello’ storico, evidenziando le problematiche e gli esperimenti che hanno portato alla definizione della teoria.” (N)

Alla fine della discussione del secondo capitolo il capire/non capire degli studenti è visto in tutt’altro modo: come motivazione per la quale vale la pena riflettere sulla disciplina e riguardarla da una prospettiva diversa dall’usuale, ovvero da una prospettiva più attenta alla crescita culturale complessiva degli studenti oltre che alla comprensione locale di concetti specifici.

“Come presentare la fisica moderna agli alunni? Quali tra esperimenti mentali, paradossi, esperimenti reali, deduzioni matematiche, racconti, scegliere di modo che l'alunno possa seguire agevolmente facendosi anche una idea ragionevole (e non distorta) dei metodi propri della ricerca in Fisica?” (F2)

Si vede da numerosi interventi come il tener conto degli studenti diventi ora sorgente di domande e non un modo per chiudere le questioni.

D'altra parte, se inizialmente l'esperienza personale costituiva il riferimento più autorevole in base al quale veniva riconosciuto dai corsisti il ruolo “addolcente” e “motivante” della storia e il ruolo “persuasivo” dell'esperimento di Michelson e Morley, la discussione nel forum sul secondo capitolo fa emergere un nuovo modo di guardare alla propria esperienza personale come internamente problematica e/o limitata (non esaustiva): si riconoscono problemi di incoerenza locale (ad esempio il problema della definizione dei sistemi di riferimento inerziali, il significato del principio di inerzia) e di discontinuità (soprattutto con la relatività generale); e ci si accorge di limiti, in certi casi, a livello di conoscenza specifica dell'argomento e, in altri, a livello interpretativo.

“Qualcuno (non ricordo chi) ha posto un problema: se abbiamo sempre detto ai ragazzi che classicamente (vedi Amaldi) un sistema accelerato non è inerziale come possiamo poi fargli capire che un ascensore in caduta libera è equivalente ad esso? Se definisco questa stanza un SR inerziale come posso dire ai ragazzi che l'ascensore in caduta libera lo è. Mentre è scontato farlo per una navicella lontana da qualunque interazione gravitazionale. L'ascensore subisce l'attrazione gravitazionale e dunque (direbbero i ragazzi) perché se lascio una sferetta in esso non cade??. . . .È difficile spiegarsi in questo contesto ma spero che qualcuno abbia capito quanto ho detto.” (A1)

“Sia io che S. avremmo bisogno di chiarire definitivamente la questione su impianto Newtoniano (circolarità tra prima legge e sistemi inerziali) ed i sistemi in volo libero o locali. Ammettiamo di non averla probabilmente capita fino in fondo, ma non vorremmo lasciarla cadere prima di esserci confrontati con qualcuno.

Arrivo alla domanda: come sono in relazione le due impostazioni? Newton è comunque una premessa al discorso oppure l'impostazione del 'sistema in volo libero' permette in qualche modo non dico di sostituirsi a tale impianto ma di superarlo? . . .” (M1)

Nell'evolversi della discussione appare come l'analisi dei primi due capitoli del testo porti a valutare positivamente l'ingresso in campo di elementi che aumentano la complessità dell'area tematica in discussione e a considerarli non come un ostacolo, ma come un potenziale aiuto per favorire la comprensione propria e degli studenti.

Ci è sembrato che i principali motori del processo siano stati:

- alcuni aspetti peculiari del testo, come la scelta di nodi concettuali particolarmente importanti e problematici sui quali basare la ricostruzione didattica della teoria (il concetto di sistema in volo libero, il problema della continuità con la relatività generale e il problema del reticolo e la sincronizzazione degli orologi) e scelte

comunicative efficaci (il racconto di Verne “Dalla Terra alla Luna” per introdurre il nuovo punto di vista sui sistemi di riferimento inerziali);

- alcuni aspetti specifici della dinamica del gruppo.

In relazione a quest’ultimo punto hanno svolto un ruolo cruciale:

- a) La presenza all’interno del gruppo di diverse voci e di disequilibri in grado di innescare un processo di evoluzione della riflessione, alimentato da meccanismi di auto-regolazione nati nel gruppo senza la necessità di interventi di forzatura dall’esterno. Nella discussione sono emersi almeno tre ruoli: lo sguardo libero ed esterno (libero da esperienze personali di studi approfonditi sul tema o di esperienze consolidate di insegnamento); ruolo promotore e/o sostenitore di posizioni non abituali; ruolo di diffidenza, che ancorava la riflessione a situazioni di classe. Tale diversità di ruoli, invece di essere causa di spaccature o incomprensioni interne, ha permesso di non perdere mai di vista la multidimensionalità dei problemi oggetto di discussione.
- b) Scelte di gestione/orientamento della discussione non “interventiste” ma finalizzate a dare ritmo alle dinamiche o fornire indicazioni che permettessero di distinguere problemi risolvibili nell’immediato da problemi a lungo termine, per i quali il proseguimento dell’analisi avrebbe fornito ulteriori contributi. In particolare crediamo che abbiano svolto un ruolo significativo le griglie di lettura del testo e i fili di discussione da noi proposti per i forum come sintesi dei problemi più significativi emersi dai documenti di analisi del testo prodotti dai corsisti. Questi strumenti, infatti, hanno permesso, non solo di stabilire i punti di partenza comuni, ma anche di costruire un contenitore spazio-temporale della discussione nel breve, medio e lungo periodo che ha consentito di porre i temi di discussione su diversi piani di analisi.

In sintesi, riteniamo che i risultati principali di questa prima parte di lavoro siano stati:

- la messa in fase dell’intero gruppo con la complessiva accettazione del fatto che valesse la pena analizzare in profondità la proposta,
- la complessiva disponibilità ad uno sforzo di medio-lungo termine,
- la complessiva fiducia nel fatto che ci sarebbero stati tempi e modi per sviluppare i tanti problemi emersi.

2) Il gioco e le sue regole

La seconda fase di lavoro (durata all’incirca cinque settimane) corrisponde al completamento dell’analisi del testo di Taylor e Wheeler ed è caratterizzata dalla ricerca di parametri di misura globali e complessivi della proposta.

Il criterio dello studente come “grandezza e unità di misura” unica e prioritaria per valutare una proposta è definitivamente superato e, progressivamente, vengono accantonati anche criteri generici quale la valutazione del livello di astrazione della proposta rispetto a quelle più tradizionali.

Causa di questo superamento è stata probabilmente un’accesa discussione che, a partire dai limiti e potenzialità didattiche degli esperimenti mentali, ha portato alla luce profondi disaccordi all’interno del gruppo non solo su cosa sia concreto e cosa

astratto ma anche su quali forme di astrazione siano necessarie per capire la fisica e quali siano inutili complicazioni che possono allontanare gli studenti.

“Tra di noi non siamo completamente in accordo, [due di noi] ritengono che gli esperimenti mentali siano mediamente più difficili da comprendere di quelli ‘reali’, perché presuppongono non solo di seguire un ragionamento logico-deduttivo astratto (quasi sempre impostato per assurdo), ma anche la capacità di cogliere le contraddizioni a cui esso porta. [Mentre un altro] ritiene invece che gli esperimenti mentali siano tutto sommato comprensibili al pari di quelli reali. Bisogna però sottolineare che in RR, anche gli esperimenti reali possono essere solo raccontati, non eseguiti ‘personalmente’ e quindi devono essere semplicemente accettati con atto di fede.” (N, A2, B)

“Concordo [...] sul fatto che gli studenti non comprendono facilmente ‘esperimenti pensati’ sia per una scarsa attitudine alla comprensione del testo sia perché hanno scarse capacità logico deduttive astratte. Sono convinta della grossa valenza didattica degli esperimenti reali e quindi credo che se si abitua-no gli studenti agli esperimenti dall’inizio del corso di studi magari è possibile farli riflettere su esperimenti mentali.” (S)

“Per ciò che riguarda la capacità di astrazione mi sembra che in certi settori, come quello relativistico, non so se comportino maggior difficoltà di comprensione gli esperimenti mentali o quelli reali che raccontano di muoni in volo. Al di là di ciò la valenza didattica dei due è differente: personalmente credo che gli studenti dovrebbero essere educati al ragionamento mentale per prospettarsi e visualizzare situazioni che li aiutino a costruirsi dei significati.” (M2)

La discussione ha portato a mostrare, con stupore di qualcuno, la complessità del tema e la poca efficacia della contrapposizione tra concretezza e astrazione come argomento indiscutibilmente vincente per confrontare la qualità di proposte diverse.

La ricerca di parametri di misura globali e complessivi, cuore di questa fase, ha consentito successivamente di focalizzare la discussione sull’idea di *coerenza* di una proposta. Gli scambi di idee su questo punto hanno messo a fuoco il problema che sarebbe poi diventato il *leit motiv* del lavoro successivo e della maggior parte delle proposte di sperimentazione sviluppate dai corsisti: che cosa significa progettare e realizzare un percorso coerente? Quali caratteristiche lo rendono tale? Rispetto a che cosa può essere valutata la sua coerenza?

Questi interrogativi si sviluppano a partire dal seguente scambio di opinioni che sottolinea le difficoltà di raccordo tra una trattazione tradizionale dei contenuti e una innovativa e fa emergere, per contrasto, l’esigenza di pensare ad un percorso coerente fin dall’inizio e a cosa significhi coerenza.

“Credo che la difficoltà più grossa che uno studente possa incontrare nell’approccio alla relatività proposto da TW sia il fatto che moltissimi concetti che ha già appreso in precedenza, vengono proposti in modo radicalmente diverso; il lavoro che lo studente deve compiere per risistemare e riorganizzare le sue conoscenze alla luce della nuova impostazione è notevole; non ci si può attendere che una simile ‘rivoluzione’ passi senza difficoltà o resistenze. Come fare fronte a questo problema? Forse un’idea potrebbe essere di abituare gli studenti a guardare alle cose sempre da più prospettive differenti, a non cristallizzare le conoscenze secondo schemi prefissati, ma ad imparare ad interpretarle di volta in volta secondo chiavi di lettura alternative. Certo, raggiungere un simile obiettivo richiede un notevole investimento di tempo ed energie, ma potrebbe valerne la pena.” (S)

“Il problema della coerenza non sussisterebbe se si ridefinissero tutti i concetti fisici, fin dal primo, nei termini di TW. Bisognerebbe definire il sistema inerziale come sistema in volo libero [...] fin dalle leggi di Newton [...]. Ma tutto questo a quale prezzo?” (N, A2, B)

“come la vedo io, fino al cap. 3 TW hanno lasciato l’impressione di preparare il terreno per una quadratura che è al di là da venire. Nel cap. 4 si sono per la prima volta ‘lasciati andare’ con il racconto in modo da permettere di cogliere le prime conseguenze di tutto il discorso. I problemi di coerenza dunque effettivamente ci sono in tutto il periodo di costruzione iniziale. E si possono risolvere solo a valle di un percorso. I problemi di coerenza tuttavia non ci sarebbero se il percorso fosse affrontato a partire da una domanda di conoscenza iniziale suscitata negli studenti. A quel punto quelle curiosità sarebbero la ragione alla trattazione, ed i problemi di coerenza sarebbero risolti a priori.” (M1)

“Per riuscire a cogliere la coerenza di un’impostazione è necessario avere interiorizzato a fondo i significati della teoria ben al di là della loro espressione formale, comporta averli sviscerati, averne indagato le conseguenze, aver acquisito padronanza di prospettive interpretative differenti, significa avere il quadro da un lato di ciò che ha condotto a certe ipotesi e dall’altro di dove queste possano condurci. Mi pare che il compito non sia semplice per noi docenti.” (M2)

Da qui prende il via un processo che permette di fare emergere, nel corso dell’intero modulo, diverse posizioni, più o meno esplicite, circa la coerenza di un percorso:

- Coerenza come “longitudinalità logica” — un percorso coerente dovrebbe configurarsi come un unico percorso che attraversi la fisica, dalla fisica classica alla fisica moderna, senza bruschi salti concettuali e, dunque, come il risultato di una radicale ri-costruzione a-storica condotta alla luce della fisica contemporanea.
- Coerenza come “longitudinalità storica” — il percorso è visto come una progressiva costruzione di conoscenza che, nell’esplicitare i salti concettuali presenti anche

nella storia, può aiutare gli studenti ad acquisire consapevolezza dell'esistenza di un pluralità di prospettive.

- Coerenza come “unificabilità di tutta la fisica su base metodologica” — l'aspetto unificante o in grado di dare coerenza ad un intero percorso di studio della fisica è, per alcuni, la sua caratterizzazione metodologica. Come scrive qualcuno:

“Penso che il problema della coerenza sia da intendersi come fondamentale, ma allo stesso tempo come insolubile... Penso dunque che la vera coerenza sia da ricercare nell'insegnamento che fa cardine intorno a una cosa sola 'il metodo sperimentale', intorno al quale è possibile far ruotare descrizioni diverse, ma tutte 'coerenti' con esso.” (M3)

- Coerenza come “ricostruzione della fisica su concetti e categorie fondamentali” (ad esempio la descrizione spaziotemporale o, come qualcuno dice, le mappe spaziotemporali oppure categorie quali causalità, determinismo, oggettività-intersoggettività).

È sulla base di una consapevolezza di questo tipo che alcuni corsisti rivedono il giudizio inizialmente molto negativo su un approccio di tipo geometrico:

“... diventa necessario introdurre (le mappe spazio-temporali) ed utilizzarle per collocare un evento. ... Quanti di noi prima avevano mai pensato che il libro appoggiato sulla scrivania sta descrivendo una linea verticale nella mappa spazio temporale? (immobile nello spazio allo scorrere nel tempo?) È la prima volta che ci ho pensato anche io (grazie agli autori) e questo ha aperto in me una nuova capacità di 'visualizzare' gli oggetti elevandoli al ruolo di eventi. Il libro che mi è accanto è un oggetto. Il libro che mi è accanto fermo in questo istante diviene un evento. Tutto questo diventa essenziale per comprendere e quasi affascinante per lo studente. Pertanto stabilire quanto ci sia di reale e quanto di rappresentato appare poco rilevante alla luce dei vantaggi che questa nuova consapevolezza (fondata sulle mappe spazio-temporali e sul concetto di evento) offre.” (A3)

La discussione sulla coerenza ha permesso di portare il gruppo a riconoscere esplicitamente e in modo deciso l'efficacia e la necessità di una ridefinizione della geometria spaziotemporale per capire la dinamica (capitoli 7 e 8 di Taylor e Wheeler [1]). Infatti, la chiarezza con cui il linguaggio quadridimensionale permette di far luce sulla dinamica relativistica ha, alla fine dell'analisi, fornito un'esplicita giustificazione per le radicali scelte dal testo fin dall'inizio. Tuttavia il problema rimane aperto: come rivedere l'insegnamento dei concetti-base della dinamica classica alla luce di questa nuova consapevolezza?

In sintesi, i risultati complessivi del lavoro di analisi del testo sono i seguenti:

- sono stati riconosciuti i problemi specifici che la proposta di Taylor e Wheeler affronta apertamente e risolve, a differenza di un approccio tradizionale (come le nuove relazioni tra i concetti di massa, energia e quantità di moto, il problema dell'individuazione di un sistema di riferimento inerziale e l'apertura verso la relatività generale);
- sono stati costruiti strumenti globali di valutazione di una proposta e, sulla base

di quelli, è stata individuata la specificità della coerenza della proposta di Taylor e Wheeler;

- sono stati messi a fuoco problemi di coerenza con l'insegnamento della fisica classica ed è emersa l'esigenza di come ripensarla alla luce delle nuove consapevolezze.

Alla fine del lavoro, c'è stato un generale accordo circa la validità della proposta, come i seguenti commenti mostrano.

“Un altro elemento che mi ha colpito è la libertà che hanno TW nell'affrontare la relatività svincolandosi dagli approcci più tradizionali (in particolare quello storico).” (P)

“Ritengo che il contributo più importante e più significativo sia quello di aver rivisitato questa teoria in un quadro organico e ben strutturato al punto tale da eliminare l'apparente 'stravaganza' degli effetti relativistici che traspare in un approccio tradizionale.” (L)

“Ritengo che il contributo più importante che questo volume mi abbia dato sia una visione della relatività ristretta in chiave prettamente geometrica, visione che mi ha permesso di 'intuire' i fili successivi di sviluppo nella relatività generale. Penso che questo sia importante perché mi ha stimolato nel proseguire lo studio verso la relatività generale appunto, ambito senza il quale la relatività ristretta risulta sicuramente banalizzata.” (M3)

Tuttavia è anche emerso che si tratta di una proposta basata su una serie di ipotesi (didattiche ed epistemologiche) implicite ed è stato sottolineato che la non esplicitazione di tali presupposti può ostacolare un confronto diretto con altre proposte e, in un certo senso, obbliga il lettore a seguire un filo di ragionamento univoco e ad accesso unico.

“La proposta appare in qualche modo unilaterale. [...] Avverto tuttavia una qualche forma di diffidenza (forse solo istintiva) rispetto alla questione. Come se fossimo di fronte ad una sorta di forzatura nella ricerca di una eccessiva intelligibilità nelle relazioni tra le diverse grandezze fisiche.” (M1)

“Devo mettere a fuoco meglio quali sono le ipotesi su cui si basa l'approccio di TW: ho come la sensazione che vi siano ipotesi non proprio esplicitate o che mi sono persa io lungo la strada... In generale mi piacerebbe consolidare la comprensione dell'impianto generale e metterlo a confronto con gli altri in circolazione...” (A3)

Reazioni di questo tipo toccano un punto importante per interpretare i processi di apprendimento e i criteri con i quali gli insegnanti valutano proposte innovative: l'intelligibilità dei contenuti non è una condizione sufficiente per capire una proposta innovativa al punto di sentirsela propria; occorre possedere anche strumenti per problematizzarla, smontarla e ri-montarla, scavando nei suoi presupposti epistemologici e cognitivi (a quale immagine di fisica e di apprendimento fa riferimento), confrontandola

con altre possibili (specialmente con le proposte tradizionali) e modellandola sulle proprie esigenze di apprendimento e/o insegnamento.

3) *Il dietro le quinte del gioco*

Il problema di come favorire il processo di appropriazione della proposta di Taylor e Wheeler, affrontato in questa terza tappa, ha per noi significato cercare modi per rispondere a richieste su diversi piani:

- richiesta di approfondimenti specifici su temi particolarmente di rottura rispetto all'insegnamento tradizionale della meccanica classica,
- richiesta di trovare o costruire materiali didattici di sostegno,
- richiesta di indagare sulle scelte di fondo per poter confrontare la proposta con gli approcci più tradizionali.

Le attività del Laboratorio (blocco C) sono state pertanto organizzate in modo da dare uno spazio, gestito essenzialmente dai corsisti con lavori di gruppo, per rispondere alle prime due esigenze.

Alla terza richiesta si è invece cercato di rispondere con l'insegnamento “La proposta di Taylor e Wheeler e le interpretazioni di Einstein e Minkowski a confronto” (blocco B) e sono le attività svolte in questo ambito che prenderemo in considerazione nel seguito.

Questo insegnamento ha infatti rappresentato il contesto nel quale è stato analizzato il dietro le quinte della proposta e si è interpretata la distanza percepita tra questa e l'approccio più tradizionale di Resnick.

L'insegnamento è stato incentrato su un'analisi delle memorie originali di Einstein “L'elettrodinamica dei corpi in movimento” (1905) e di Minkowski “Spazio e tempo” (1908), condotta al fine di trovare le radici storiche delle due principali proposte didattiche.

Filo conduttore dell'analisi è stato il dibattito sui concetti di spazio e tempo in fisica, e le diverse interpretazione della relatività proposte da Einstein e Minkowski sono state rilette come contributi a tale dibattito [13,14].

L'insegnamento si è articolato in 3 sezioni:

- il dibattito sui concetti di spazio e tempo in fisica classica — analisi di brani tratti dai Principia di Newton e analisi delle critiche “classiche” rivolte alla visione newtoniana (in particolare di Leibniz e Mach);
- la visione di Einstein in “L'elettrodinamica dei corpi in movimento” e analisi della sua eredità nell'insegnamento (con riferimento all'approccio operazionista di Resnick);
- la visione di Minkowski in “Spazio e tempo” e analisi delle sue implicazioni per l'insegnamento.

Le attività di questa fase sono esplicitamente orientate a mostrare la coesistenza di diverse rappresentazioni della teoria fin dalla sua nascita e quanto la scelta di valorizzarne una nell'insegnamento (a partire dall'insegnamento universitario) sia stata il frutto, più o meno contingente, di un particolare clima culturale. Dalla discussione è emerso quanto tale scelta abbia avuto forti implicazioni sul piano didattico, dal momento che ha innescato un processo di *sterilizzazione* a fini didattici di una specifica

interpretazione, facendone via via dimenticare le motivazioni culturali di fondo e la sua peculiarità rispetto ad altre possibili. Il risultato di questa perdita della dimensione interpretativa è stata l'affermazione di un approccio dominante sterilizzato, che può essere ricondotto alla proposta di Resnick, e la implicita formulazione di criteri di valutazione degli altri approcci in termini di "distanza da" quello assunto, spesso per abitudine o per fiducia, come "il migliore" (o il più "naturale").

"Credo che [la 'sterilizzazione'] non costituisca solo una perdita di occasioni ma anche una particolare opzione epistemologica, della quale purtroppo credo di essere ben imbevuto (e da cui faccio fatica a liberarmi): e cioè dell'idea che in Fisica non ci sia spazio per problematizzare, per avere punti di vista diversi, immagini diverse del mondo, sembra che questo sia concesso solo alla ricerca di frontiera, mentre sembra che per questioni di fisica classica debba essere tramandata una sola immagine del mondo. E questo rischia di accadere anche alla RR visto che oramai è già centenaria..." (C2)

Che valesse la pena riflettere in modo critico sul prevalere di un approccio sull'altro è diventato chiaro, nel corso del Master, alla luce dell'efficacia dell'approccio di Taylor e Wheeler per capire in profondità alcuni concetti chiave, della sua coerenza interna, nonché della sua peculiarità di aprire verso la visione oggi maggiormente accreditata (quella ritenuta "ortodossa") della relatività generale: l'interpretazione "geometrodinamica" di Wheeler [12].

E l'analisi del dietro le quinte, retrocedendo al punto in cui l'approccio operazionista e quello geometrico alla relatività si sono storicamente affermati e ricostruendo i presupposti culturali delle diverse proposte didattiche, ha permesso di ricollocarle sullo stesso piano e, quindi, di confrontarle non come alternative ortodosse/eterodosse ma come scelte didattiche che nascono da una visione complessiva della teoria (comprese scelte metafisiche e visioni circa il ruolo che si attribuisce alla teoria nell'insegnamento). Questa consapevolezza può consentire di leggere criticamente non solo le proposte contenute nei libri di testo, ma anche le proprie scelte didattiche, togliendo ad esse il carattere assoluto che, spesso implicitamente, tendono ad assumere.

Come bilancio complessivo del lavoro fatto nell'ambito dei blocchi A e B, riportiamo uno dei risultati che ci ha colpito di più ed è stato indicato da un corsista nel questionario finale: *"Mi ha colpito molto una certa 'armonia' nelle discussioni a carattere epistemologico che di solito invece innescano rigidità nelle prese di posizione."* (M1)

Infatti, oltre all'alto livello degli elaborati e delle discussioni che si sono svolte, è stato interessante il tono che si è utilizzato, perché non è semplice potersi confrontare in modo appassionato senza arrivare a scontri tra posizioni irriducibili.

Certo *"sull'armonia penso che il mezzo abbia un certo peso, nel senso che prima di scrivere si riflette, si rilegge, si lima, mentre in un discussione in presenza 'verba volant'"* (F3), ma crediamo che il tono sia dovuto anche (e soprattutto) alla consapevolezza diffusa che via via si è fatta strada circa la complessità dei problemi che si devono affrontare se si vuole innovare l'insegnamento della fisica moderna (e, quindi, della fisica classica):

“spesso il confronto con gli altri è servito a chiarire la propria posizione, o a stimolare una riflessione personale su un nuovo tema. Il tono pacato forse è dipeso anche dalla complessità delle questioni, rispetto alle quali è difficile sostenere di avere una idea conclusiva.” (P)

Quanto lontane sono ormai le proposte di cambiamento suggerite nel primo forum! E quanto, alla fine, l’esperienza personale come studente e come insegnante è cambiata:

“Se si fosse raccontata la fisica già pronta essa non avrebbe avuto lo stesso gusto. Insomma, c’è fatica, ricerca e studio dietro questa disciplina, ci sono percorsi intrapresi e mai conclusi, altri abbandonati per ‘pregiudizi’, perché ignorarlo e non lasciare che facciano parte integrante della didattica. La personalizzazione serve a noi docenti come agli studenti e certamente esalta l’interesse per quanto appreso, e questo, un insegnante lo sa, già basterebbe di per sé!” (A1)

“A mio parere la de-personalizzazione della conoscenza scientifica è una ‘scelta’ ormai consolidata nell’ambito dell’insegnamento della Fisica. Mi ha fatto molto piacere riflettere su queste questioni poiché mi ha permesso di meditare sulla didattica secondo un’ottica quasi mai utilizzata. Io risponderei in questo modo: secondo il nostro modo di affrontare la disciplina (anche considerando gli insegnamenti pregressi) pensiamo sicuramente di rendere la fisica comprensibile agli studenti; tuttavia abbiamo il grosso problema di creare motivazione e ‘passione’ per la disciplina: da questo punto di vista, forse, un approccio più ‘personalizzato’ ci potrebbe essere d’aiuto.” (L)

4. Riflessioni conclusive

Le tappe del cammino di appropriazione da parte di insegnanti di una proposta come quella di Taylor e Wheeler, ricostruite nello studio presentato, indicano un generale passaggio da un atteggiamento diffuso di diffidenza verso aspetti di rottura rispetto alle proposte più tradizionali ad una successiva accettazione della sfida proposta dal testo.

In particolare c’è stata una profonda evoluzione del modo di porsi di fronte al problema dell’insegnamento della relatività, che ha portato il gruppo di insegnanti ad una consapevole e feconda condivisione della necessità di distinguere obiettivi raggiungibili a breve-medio-lungo periodo ai quali corrispondono (riprendendo liberamente da Posner *et al.* [15]) diversi criteri di valutazione di una proposta:

- comprensibilità dei contenuti (intelligibilità della proposta) — emersa anche dalle analisi locali;
- portata culturale ed educativa della proposta (rilevanza) — emersa da valutazioni complessive frutto di analisi globali;
- spendibilità in classe (fecondità didattica) — emersa dopo approfondimenti e riflessioni mirate a capire quali criteri si possono utilizzare nella scelta e nella costruzione di un percorso didattico.

Un aspetto interessante è stata la progressiva individuazione e focalizzazione di *problemi veri*, ovvero di nodi irrisolti sui quali la ricerca è ancora aperta e per i quali il contributo degli insegnanti è fondamentale:

- con quali criteri analizzare i presupposti impliciti di proposte di ricostruzione di un'area disciplinare in prospettiva educativa in modo da renderle fruibili e confrontabili tra di loro?
- quali aspetti è opportuno valorizzare per la progettazione di percorsi didattici culturalmente rilevanti e cognitivamente percorribili per studenti di scuola secondaria superiore?

Il primo problema è emerso con chiarezza particolarmente nel lavoro relativo al blocco B (Le interpretazioni di Einstein e Minkowski a confronto...). L'analisi dei dati raccolti in questa fase ha mostrato come il confronto tra proposte di insegnamento diverse diventi significativo e fruttuoso quando vengono chiariti i presupposti epistemologici e culturali alla base della particolare ricostruzione didattica di cui le proposte sono espressione. Questo rende più facile per gli insegnanti una analisi critica dei libri di testo e consente di riconoscerne eventuali incoerenze, cortocircuiti e forzature.

Il secondo problema, relativo alla progettazione di percorsi didattici, sarà oggetto di un futuro lavoro di ricerca. Gli insegnanti impegnati nel Master stanno al momento costruendo percorsi per il lavoro in classe e ne stanno progettando la realizzazione in specifici contesti scolastici. L'analisi dei dati che stiamo raccogliendo in relazione a questa fase consentirà di mettere a fuoco una tappa fondamentale del cammino intrapreso e di riflettere ulteriormente sull'intero percorso di formazione.

In conclusione, il lavoro condotto sembra confermare l'idea che per favorire l'appropriazione di approcci innovativi per l'insegnamento della relatività fino alla loro traduzione in proposte realizzabili in classe sia necessario:

- Analizzare e ripensare i percorsi di riferimento in modo tale che siano riconoscibili non solo come espressione di una particolare scelta di sviluppo concettuale, ma anche come espressione di una specifica scelta epistemologica, formale ed interpretativa, fisicamente sensata, della teoria. In questo modo i percorsi acquistano nuove dimensioni (uno *spessore*).
- Confrontare i percorsi su piani più complessi e variegati della sola intelligibilità interna, in modo che una loro valutazione comparativa possa essere effettuata in termini di *diverse possibilità* e non di *alternative* vicendevolmente escludentesi.
- Individuare, sulla base dei risultati di ricerca in Didattica della Fisica, i concetti cruciali per la comprensione della teoria, che rappresentano nodi attraverso i quali ogni percorso deve passare e più percorsi devono incrociarsi. Tali concetti sono ad esempio quelli di evento/fenomeno, di sistema di riferimento/sistema di coordinate, di invarianza/dipendenza dal sistema di riferimento [15–21].

In questo modo l'idea di percorso si amplia e si trasforma nella costruzione di un "territorio complesso" dove più percorsi possono intrecciarsi ed organizzarsi come una *rete* sufficientemente complessa da favorire, sia da parte di insegnanti sia da parte degli studenti, scelte individuali e culturalmente stimolanti che, seppur rispettose del sapere consolidato, possano integrarsi nel proprio processo di costruzione della conoscenza.

Appendice

Griglia di discussione dei capitoli 3 e 4 del testo “Fisica dello Spazio-tempo” di Taylor e Wheeler

I principi della relatività speciale e loro conseguenze

Premessa

Nel capitolo 3 si ridiscutono i postulati alla base della relatività e se ne mettono in evidenza le conseguenze sulla visione dello spazio-tempo.

L'esistenza di una grandezza che lega tra loro la dimensione spaziale e quella temporale — il “quadrintervallo” — e che rimane invariante al variare del riferimento inerziale è ora ricavata dal principio di relatività e dal principio di invarianza della velocità della luce.

Si conferma così la validità e l'efficacia dell'idea di intervallo invariante che nel capitolo iniziale era stata introdotta sulla base di una semplice analogia con la geometria euclidea.

Il capitolo 4 costituisce un banco di prova delle idee che si vanno costruendo, una sorta di esercitazione impostata sul racconto di una situazione limite.

Obiettivi dell'analisi

Punti da mettere a fuoco nell'analizzare il capitolo sono

1. il passaggio dal principio di relatività di Galileo al principio di relatività di Einstein;
2. la relatività della simultaneità: potenzialità e limiti dell'esperimento mentale del treno per mettere in evidenza il significato della relatività della simultaneità; l'importanza della nuova idea di osservatore;
3. l'invarianza dell'intervallo: cosa significa dimostrarne l'esistenza?
4. il racconto come strumento di analisi di situazioni fisiche complesse;
5. il ruolo degli esperimenti e la loro proponibilità a studenti di scuola secondaria: l'esperimento di Hafele e Keating;
6. le possibili reazioni alla lettura del testo;
7. gli eventuali problemi di comprensione del testo.

Oltre ad alcuni esercizi di “allenamento” (dal 3.1 al 3.6) proponiamo di esaminare criticamente e risolvere i problemi 3.7 e 3.11. Per quest'ultimo è disponibile la versione pdf dell'articolo dell'“American Journal of Physics” che l'ha ispirato.

I problemi 3.12 e 3.13 propongono rispettivamente un'analisi dell'esperimento di Michelson- Morley e dell'esperimento di Kennedy-Thorndike e sono quindi un utile complemento alla lettura del testo.

Si suggerisce di esaminarne almeno uno dei problemi 3.14, 3.15, 3.16 che sollecitano una riflessione sulla velocità della luce nel vuoto come velocità limite.

Consegne di lavoro

Produrre nel tempo stabilito un breve documento che contenga:

- a) i risultati dell'analisi in forma di domande utili a focalizzare gli aspetti considerati fondamentali e stimolare una discussione collettiva;
- b) domande che scaturiscono dall'analisi degli esercizi/problemi suggeriti nella griglia.

Ciascuno studente sarà tenuto ad inserire il documento prodotto nella cartella “elaborati studenti” relativa alla sezione 3 entro l'1 giugno.

Le domande, riorganizzate dai due studenti responsabili per questa sezione, verranno da loro inserite nella cartella “riorganizzazione elaborati” entro il 4 giugno.

La discussione finale nel forum sarà martedì 6 giugno.

Fili di discussione per avviare e orientare il Forum sui Capitoli 3 e 4:

Come già detto, la riorganizzazione degli elaborati fatta da Silvia e Martino e la sintesi che loro propongono sono un ottimo punto di partenza per la discussione. Per questo suggeriamo a tutti di leggere attentamente almeno il quadro sintetico che delineano.

Dei tanti punti emersi, suggeriamo di aprire le seguenti linee di discussione:

1. il passaggio dal principio di relatività di Galileo al principio di relatività di Einstein;
2. invarianza delle leggi fisiche;
3. relatività della simultaneità e nuova idea di osservatore;
4. esperimenti mentali ed esperimenti reali;
5. il problema della coerenza rispetto alle scelte di fondo.

Ringraziamenti – Questo lavoro si inserisce nell’ambito delle ricerche svolte nel Progetto di Rilevante Interesse Nazionale FIS 21 (coordinatore nazionale P. Guidoni) e rappresenta il risultato di una collaborazione sviluppata tra le Unità di ricerca di Bologna e di Pavia. Desideriamo in particolare ringraziare: Nella Grimellini Tomasini per l’importante contributo di idee fornito negli studi che stanno alla base del materiale prodotto dal Gruppo di Bologna e utilizzato in questo contesto; Michela Clementi, Paola Fantini, Marta Gagliardi e Paolo Mascheretti per i preziosi commenti e suggerimenti alla stesura del lavoro. Un ringraziamento anche a Marisa Michelini, Direttrice del Master, ai corsisti e a tutti i colleghi che ne hanno permesso la realizzazione.

Bibliografia

- [1] TAYLOR E. F. e WHEELER J. A., *Spacetime Physics* (Freeman and Company, New York) 1992 (la prima versione della proposta risale al 1966). Traduzione italiana *Fisica dello Spazio-tempo* (Zanichelli, Bologna) 1996.
- [2] BALZANO E., GUIDONI P. e MINICHINI C., “I modi del pensare: comune, fenomenologico, per modelli”, in *Approcci e proposte per l’insegnamento-apprendimento della fisica a livello preuniversitario, dal progetto PRIN F21*, a cura di GUIDONI P. e LEVRINI O. (Forum Editrice, Udine) in corso di stampa.
- [3] DE AMBROSIS A., GRIMELLINI TOMASINI N. e LEVRINI O., *Approcci a confronto per l’insegnamento della relatività*, in *Approcci e proposte per l’insegnamento-apprendimento della fisica a livello preuniversitario, dal progetto PRIN F21*, a cura di GUIDONI P. e LEVRINI O. (Forum Editrice, Udine) in corso di stampa.
- [4] RESNICK R., *Introduction to Special Relativity* (John Wiley & Sons, Inc., New York, London) 1968, Traduzione italiana *Introduzione alla Relatività Ristretta* (Casa Editrice Ambrosiana, Milano) 1979.
- [5] CORTINI G. *et al.*, Iniziativa relatività: “Vedute recenti sull’insegnamento della relatività ristretta ad un livello elementare”, *Quad. G. Fis.*, II, n. 4 (1977) 13.
- [6] CORTINI G., *La relatività ristretta* (Loescher, Torino) 1978.
- [7] FABRI E., “Insegnare relatività nel XXI secolo: dal ‘navilio’ di Galileo all’espansione dell’Universo”, *Quaderno 16 La Fisica nella Scuola*, 2005 (la prima versione della proposta è del 1989).
- [8] BRIDGMAN P. W., *La Logica della Fisica Moderna* (Bollati Boringhieri, Torino) 1927.
- [9] BRIDGMAN P. W., “Le teorie di Einstein e il punto di vista operativo”, in *Albert Einstein: scienziato e filosofo*, a cura di SCHILPP P. A. (Boringhieri, Torino) 1949.
- [10] AA.VV., *Fisica – A cura del PSSC* (Zanichelli, Bologna) 1981.

- [11] HOLTON G., *L'immaginazione scientifica* (Einaudi, Torino) 1983.
- [12] LEVRINI O., "Reconstructing the basic-concepts of General Relativity from an educational and cultural point of view", *Science & Education*, **11**, No. 3 (2002) 263.
- [13] LEVRINI O., Relatività ristretta e concezioni di spazio, *G. Fis.*, **40** (1999) 205.
- [14] LEVRINI O., "The substantialist view of spacetime proposed by Minkowski and its educational implications", *Science & Education*, **11**, No. 6 (2002) 601.
- [15] POSNER G. J., STRIKE K. A., HEWSON P. W. e GERZOG W. A., Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change, *Science Education*, **66** (1982) 211.
- [16] DE AMBROSIS A., *La relatività speciale nel curriculum della scuola secondaria superiore*, relazione su invito XCI Congresso Nazionale SIF, Catania (2005).
- [17] DI SESSA A. A. e LEVRINI O., "How Students Learn from Multiple Contexts and Definitions: Proper Time as a Coordination Class", inviato a *Phys. Rev. PER* (2007).
- [18] SCHERR R. E., SHAFFER P. S. e VOKOS S., "Students understanding of time is special relativity: Simultaneity and reference frames," *Am. J. Phys.*, **69** (S1), (2001) S24.
- [19] SCHERR R. E., SHAFFER P. S. e VOKOS S., "The challenge of changing deeply held student beliefs about the relativity of simultaneity," *Am. J. Phys.*, **70** (12), (2002) 1238.
- [20] SCHERR R. E., "Modeling student thinking: An example from special relativity", *Am. J. Phys.*, **75** (3), (2007) 272.
- [21] VILLANI A. e PACCA J. L. A., "Students' spontaneous ideas about the speed of light", *Int. J. Sci. Educ.*, **9** (1987) 55.