

Il contributo della ricerca in Didattica
all'insegnamento della fisica: criteri per la
progettazione di nuovi materiali

Francesco Marchi

2 luglio 2008

Indice

Introduzione	vii
1 Innovare in didattica della fisica: alcuni insegnamenti dal passato	1
1.1 I primi tentativi di cambiamento nell'insegnamento della fisica	2
1.1.1 Il laboratorio al centro: il progetto PSSC	2
1.1.2 La storia della fisica al centro: il progetto PPC	3
1.1.3 Il curriculum al centro	5
1.2 Conclusioni: cosa abbiamo imparato, e in quale direzione muoverci	6
1.2.1 Le difficoltà nella gestione di grandi progetti	6
1.2.2 Il ruolo dell'insegnante e del libro di testo	7
1.2.3 Innovazione nei metodi didattici e riforma dei curricula: il rischio di pericolose derive	8
2 La complessità come scelta culturale e didattica	11
2.1 La complessità della disciplina	11
2.1.1 La fisica come rete di relazioni fra idee, leggi, teorie . . .	11
2.1.2 Una struttura in continua evoluzione	13
2.2 La complessità del processo di apprendimento	14
2.2.1 Insegnare ad orientarsi in un territorio complesso . . .	14
2.2.2 Struttura della disciplina e <i>knowledge organization</i> . . .	15
2.2.3 Oltre il <i>problem solving</i> : margini di arbitrarietà nella definizione di una struttura della disciplina	16
2.3 Insegnare fisica in una società complessa	18

2.3.1	<i>Quale fisica insegnare?</i>	18
2.3.2	La conoscenza nell'era di internet	19
2.3.3	L'impatto cognitivo delle tecnologie sulla "generazione digitale"	20
2.3.4	Tecnologie e "gestione" della complessità	22
3	"Gestire" la complessità: la proposta di un'antologia di fisica online	23
3.1	Testo, ipertesto, web	24
3.1.1	L'ipertesto come evoluzione del testo	25
3.1.2	Il web come strumento per la gestione di ipertesti e il rischio di una deriva "anarchica"	27
3.2	Verso una complessità gestibile: la forma antologia	29
3.2.1	L'antologia come strumento didattico	29
3.2.2	Il discorso scientifico ed umanistico a confronto	30
3.2.3	Peculiarità di un'antologia di fisica	33
3.3	Criteri per la progettazione dell'antologia	35
3.3.1	Criteri per la scelta dei materiali	35
3.3.2	Criteri per l'organizzazione e l'accesso ai materiali	40
4	L'analisi di un contesto fisico specifico: il moto del pendolo	43
4.1	Dimensione disciplinare	45
4.1.1	Peculiarità fisiche dei fenomeni nonlineari	45
4.1.2	Sul ruolo delle approssimazioni in fisica	47
4.1.3	La descrizione <i>energetica</i> e quella <i>spazio-temporale</i>	50
4.1.4	Il pendolo e la descrizione dei fenomeni oscillatori	52
4.2	Dimensione culturale	55
4.2.1	La misura del tempo e l'orologio a pendolo	55
4.2.2	Galileo, il pendolo, e la nascita della scienza moderna	56
4.3	Dimensione cognitiva	60
4.3.1	Le ricerche di Piaget sulla separazione delle variabili	60
4.3.2	Un solo sistema, molti tipi di descrizioni	62

4.3.3	La riflessione di Parnafes e la costruzione dei concetti scientifici	63
4.4	Bilancio di fattibilità	64
	Conclusioni	67
A	Calcolo analitico del periodo di oscillazione del pendolo sem- plice per angoli qualsiasi	71
	Bibliografia	75

Introduzione

The starting point had to be what was then known, but how to proceed from there had to be found by trial and error based on experimental findings, on those parts of the classical theories that seemed untouched by the flood of new experimental results, and on inspired guesses by those faced with intractable problems.

Philip Stehle,
Order, Chaos, Order

Con queste parole, Philip Stehle, nell'introduzione del suo libro "Order, Chaos, Order" [1], descrive la situazione in cui si trovava la fisica sul finire dell'Ottocento, all'alba di quel periodo che George Gamow ha definito come i "trent'anni che sconvolsero la fisica".

Quel periodo, sicuramente, è stato caratterizzato da forti peculiarità rispetto al "normale" svolgimento della storia della fisica; ed è anche caratterizzato da tratti distintivi netti rispetto ad altri momenti, pure di rivoluzioni scientifiche e "cambiamenti di paradigma". Cionondimeno, la rivoluzione che investì la fisica in quegli anni è sicuramente ben rappresentativa delle dinamiche con cui si esplicita il processo di evoluzione della fisica.

In quel periodo, le implicazioni teoriche dei nuovi fatti sperimentali vennero via via chiarite attraverso un fitto intrecciarsi di contributi scientifici. In alcuni di questi contributi si proponevano costruzioni teoriche *semplificatrici*, nelle quali, anche senza comprendere a fondo il perché, si facevano certe assunzioni¹ utili a creare dei primi, "rudimentali", strumenti per orientarsi

¹Vedi, ad esempio, la quantizzazione di Bohr-Sommerfeld.

in un mare di fatti sperimentali non inquadrabili negli schemi allora a disposizione. In altri contributi, invece, venivano proposti successivi raffinamenti di queste prime costruzioni teoriche, e se ne chiarivano i fondamenti più in profondità.

Insomma, la rivoluzione quantistica segna un prepotente ritorno di quelle dinamiche di tipo dialettico fra momenti di *semplificazione* e momenti di *complessificazione* che sono l'essenza ultima del continuo procedere della scienza². Come Galileo, “defalcando gli impedimenti”, aveva dato vita alla scienza moderna, così, agli inizi del Novecento, lo stesso schema metodologico di fondo è stato all'origine di una nuova, importante, rivoluzione scientifica.

Questi processi di successive semplificazioni e complessificazioni sono molto simili a quelli che entrano in gioco nei processi cognitivi relativi all'apprendimento della fisica, e sono perciò un qualcosa che non può essere trascurato nell'insegnamento della disciplina.

Ebbene, sia che le si pensino in chiave storica ed epistemologica, sia da un punto di vista cognitivo, queste dinamiche sono in larga misura trascurate nei tradizionali approcci di insegnamento della fisica³. A ben guardare il problema sta nel delicato passaggio di saperi tra chi si occupa di ricerca in didattica, gli estensori dei materiali e gli insegnanti: la formazione di questi ultimi è riconosciuta come un problema sempre più centrale nell'economia del processo che va dalla “produzione” del sapere scientifico alla sua “diffusione” [2]; per quanto riguarda i libri di testo, invece, è da notare come la maggior parte di essi sembri tenere in poco o nessun conto i risutati della ricerca in didattica [3].

²Anche il titolo del libro di Stehle si riferisce proprio al succedersi di fasi di ordine e fasi di caos nella scienza (in questo caso specifico negli anni tra il 1895 e il 1925), che sono il frutto delle opposte e complementari tendenze di semplificazione e complessificazione dell'opera incessante degli scienziati di ogni tempo.

³Continua, infatti, Stehle ([1], pag. xii):

We tend not to recognize the great successes of theories that had to be abandoned in the light of later information but that were very valuable syntheses of what was then known. The textbooks do not dwell on the false trails and false starts along what turned out to be the road to the future.

Potremmo allora riferire la frase di Stehle, riportata all'inizio del capitolo, alla situazione che abbiamo appena descritto: è il momento di esplorare nuove possibilità didattiche, con procedimenti di “trial and error”, di cercar di scoprire nuove soluzioni, anche battendo in modo coraggioso vie inesplorate (come, per mantenere il parallelismo con la rivoluzione quantistica, fu coraggioso l’“atto di disperazione” con cui Planck introdusse nel 1900 il concetto di quanto), per tradurre i numerosi materiali della ricerca in proposte concrete per gli insegnanti e l’editoria scolastica.

In questa tesi si intende fornire un contributo nella direzione di colmare questo gap tra ricerca in didattica ed editoria scolastica: nello specifico, oggetto della tesi è uno studio di fattibilità di una “antologia di fisica online”.

L’idea di fondo è che i numerosi tentativi che sono stati fatti per rinnovare l’insegnamento della fisica hanno spesso mostrato forti limiti, perché troppo estremi, da due punti di vista:

- dal punto di vista dei contenuti le proposte avanzate si sono rivelate o radicalmente rivoluzionarie, o sostanzialmente conservatrici, più che altro “operazioni di facciata” (come gli inserti biografici e gli approfondimenti in testi dall’impianto assolutamente tradizionale).
- dal punto di vista della portata della proposta queste si sono concretizzate o come progetti di così vasta portata da risultare praticamente ingestibili (PSSC etc.), o troppo modesti per risultare davvero incisivi.

Ormai numerose ricerche in didattica della fisica hanno prodotto evidenze sull’importanza di momenti di vero approfondimento delle idee della fisica, anche da un punto di vista interdisciplinare (storico, filosofico, ...): tali momenti sono necessari tanto per superare le difficoltà degli studenti con la disciplina (misconcezioni, scarse capacità di *problem solving*, ...), sia per trasmetterne loro un’immagine più completa ed integrata rispetto agli altri saperi disciplinari, sia per motivare e stimolare l’attenzione di coloro che possono essere coinvolti per vie di accesso diverse da quelle strettamente vincolate ai contenuti e metodi della fisica.

Valuteremo quindi come poter dare spazio, rispetto agli argomenti tradizionali del curriculum (ma non a loro discapito), a materiali in grado di costituire un approfondimento in tal senso; cercheremo poi di individuare dei criteri con cui selezionare temi, idee e argomenti che possano essere considerati efficaci in relazione all'obiettivo di una significativa formazione scientifica, e dei criteri per poterli organizzare e coordinare fra loro.

Infine, analizzeremo alcuni aspetti pratici relativi al formato da dare a tali materiali: poiché in un'antologia la pluralità di chiavi di lettura dei testi è uno degli aspetti centrali, cercheremo di capire come si possano "far respirare" le varie dimensioni (disciplinari e interdisciplinari) secondo cui si sviluppano e coordinano i vari testi, evitando quell'appiattimento che caratterizza i manuali scolastici tradizionali.

A questo proposito, giungeremo ad individuare nelle nuove tecnologie (ipertesto e web) uno strumento prezioso per l'implementazione della multidimensionalità che caratterizza i materiali raccolti, e in grado di consentire un accesso individualizzato ai saperi disciplinari, e al contempo più profondo e articolato.

Capitolo 1

Innovare in didattica della fisica: alcuni insegnamenti dal passato

I primi tentativi “consapevoli” di intervento, rispetto a metodi e contenuti tradizionali di insegnamento della fisica nella scuola secondaria, si ebbero nel secondo dopoguerra, quando vennero varati alcuni grandi progetti, fra i quali i più imponenti, in quanto a portata e sforzi profusi (in termini di investimenti economici e numero di soggetti e associazioni coinvolte), furono il PSSC (Physical Science Study Committee) e il PPC (Project Physics Course)¹.

Abbiamo detto tentativi “consapevoli”, nel senso che coloro che vi erano coinvolti avevano posto degli obiettivi da raggiungere ben definiti, individuato strategie e costruito strumenti per raggiungerli. Si trattava, però, di progetti che non potevano far tesoro di indicazioni di ricerca, dal momento che la ricerca in didattica della fisica era un settore che doveva ancora nascere, e i pionieri coinvolti nello sviluppo di questi progetti erano, perlopiù, fisici di formazione e di professione².

¹Si prendono in considerazione questi due progetti in quanto emblematici per molti punti di vista: buona parte delle osservazioni che faremo rispetto ad essi possono essere estese a molti dei grandi e piccoli progetti sviluppati negli anni successivi; a tal proposito, si vedano, ad esempio [4]-[19].

²Il primo di questi progetti, il PSSC, si sviluppò soprattutto negli anni fra il 1956 e il 1960, presso l'Università di Boston, mentre è del 1960 il primo Congresso Internazionale

Indubbiamente PSSC e PPC giocarono un ruolo fondamentale nella nascita della didattica della fisica come settore di ricerca, come testimonia soprattutto una certa affinità fra le prime tematiche oggetto di studi di questo nuovo settore di ricerca e certe linee guida che avevano caratterizzato questi grandi progetti, come ad esempio:

- tendenza a spostare l'accento dai *solì contenuti* ai *metodi* della fisica;
- ricerca di un punto di equilibrio fra “*studio teorico*” e *attività sperimentale*;
- ruolo della *storia della fisica* nell'insegnamento e, più in generale, *rapporto della fisica con le discipline umanistiche*.

Nonostante PSSC e PPC possano apparirci oggi, alla luce dei risultati della ricerca in didattica, proposte per alcuni aspetti “datate”, è interessante ripercorrerne in breve le linee essenziali, mettendo in luce le principali riflessioni che gli esiti di questi progetti hanno stimolato nell'ambito della ricerca in didattica.

1.1 I primi tentativi di cambiamento nell'insegnamento della fisica

1.1.1 Il laboratorio al centro: il progetto PSSC

Il progetto PSSC nacque, nella seconda metà degli anni Cinquanta, da un'idea del prof. Jerrold R. Zacharias, allora docente di fisica al MIT, in un periodo in cui gli esiti del secondo conflitto mondiale, e il ruolo che in esso avevano avuto la tecnologia e la scienza, erano ben presenti all'attenzione di coloro che erano alla guida delle grandi potenze, e delle *élites* intellettuali che dovevano indirizzarne lo sviluppo, anche attraverso la formazione di nuove generazioni di scienziati [20].

E' in questo clima che il PSSC si articolò lungo una serie di linee guida che

sull'Insegnamento della Fisica, svoltosi a Parigi sotto l'egida dell'Unione Internazionale di Fisica pura e applicata (IUPAP), nonché dell'UNESCO e dell'OCSE.

dovevano, in ultima analisi, concorrere alla formazione di uno studente che pensasse e si comportasse come uno scienziato di professione³.

Nel complesso, il progetto finì per caratterizzarsi per il forte spazio dedicato all'attività sperimentale di laboratorio. Da un lato va riconosciuto al PSSC il merito di aver rivoluzionato il modo di concepire il laboratorio, e di aver stabilito, in questo senso, un nuovo standard: non più l'esperimento visto come verifica di leggi dedotte, o semplicemente proposte, in classiche lezioni “*ex cathedra*”; ma come strumento d'indagine principe, attraverso il quale si scoprono le leggi della natura.

D'altro canto, come illustrato in vari articoli di rassegna (vedi, ad esempio, [20]), alcuni punti deboli di tale progetto si sono rivelati chiaramente a distanza di qualche tempo. Al di là del grosso impegno economico e logistico, una delle principali lezioni che il PSSC ci ha lasciato è che non esistono obiettivi didattici “validi in assoluto, ovunque e sempre”; in particolare, quelli che questo progetto si era prefissati, appaiono oggi fortemente legati ad un contesto storico-politico ormai superato⁴.

1.1.2 La storia della fisica al centro: il progetto PPC

Il progetto PPC (Project Physics Course) nacque, negli anni Sessanta, come sviluppo di un'idea di James Rutherford, professore di fisica e “science supervisor” in una scuola superiore della California; “le menti” del progetto

³I principali strumenti individuati per raggiungere questo scopo erano:

- presentare la fisica come una “...integrated intellectual activity, not as a set of mechanical rules for solving problems ...” [20];
- riflettere lo spirito di indagine della scienza, in cui sia la teoria che l'esperimento sono visti come processi di successiva approssimazione, e non ci sono verità date o definitive;
- attenzione ai metodi trasversali a tutti gli ambiti della fisica: ordini di grandezza, cambio di scala ...;
- la natura particellare dell'universo come tema unificante.

⁴Nel citato articolo di French [20], si osserva che: “Physics teaching in the high schools has (or should have) a broader aim than to prepare future scientists for their university careers”.

furono lo stesso Rutherford, Gerald Holton, professore di fisica ad Harvard e studioso di storia della fisica, e il professor Fletcher Watson, “science educator” di grande esperienza; come per il PSSC, il numero di persone coinvolte nel progetto, crebbe vertiginosamente negli anni.

Il PPC nacque innanzitutto perché si sentiva l’esigenza di un corso da affiancare al PSSC: un solo corso nazionale per l’insegnamento della fisica era, per l’NSF, troppo poco. Che il PPC nacque come risposta al PSSC è testimoniato da queste parole, tratte dall’introduzione all’edizione italiana del 1978 ([17]):

Da una parte si fa un diverso uso del laboratorio [nel PSSC, rispetto ai corsi tradizionali], dando la prevalenza ad esperienze eseguite direttamente dagli allievi, mentre il numero delle esperienze eseguite dall’insegnante dalla cattedra viene molto ridotto e in alcuni casi si arriva ad abolirle completamente.

... [Il metodo di lavoro] presenta però notevoli limiti, poiché tende ad isolare lo studio della fisica da un *discorso culturale complessivo* e ad aumentare il distacco tra il lavoro che si svolge in laboratorio, dove l’allievo ha sì un comportamento attivo e critico ma tende anche a disperdere la sua attenzione verso molti problemi limitati e contingenti, e il momento della generalizzazione teorica, che rischia di rimanere astratto e dogmatico. La seconda linea di sviluppo, a cui accennavamo prima, nasce proprio dalla necessità di colmare questo distacco e di mettere in evidenza i contenuti “culturali” della scienza. Essa si sviluppa dalla constatazione che le *idee* della fisica non nascono in laboratorio, ma da un’interazione molto complessa tra problematica scientifica e situazione culturale e sociale.

Il PPC nasce perciò anche con l’intento di supplire a quelle carenze che si riscontrarono nel PSSC, nel quale gran parte degli sforzi, e dei materiali prodotti si concentrarono sull’aspetto sperimentale della fisica. Nel PPC trovano invece maggior spazio materiali dedicati a fornire una visione più mul-

tiprospectica e armoniosa della fisica, i “Readers: books of readings, for each of the units, the content ranging from biography to engineering applications to poems referring to science” [21].

1.1.3 Il curricolo al centro

I tentativi di rinnovamento nell’insegnamento della fisica non si sono certo esauriti con i due grandi progetti di cui abbiamo appena parlato. A partire dagli anni Ottanta, il settore di ricerca in didattica della fisica ha avuto una notevole esplosione e molti filoni di ricerca sono andati via via delineandosi. Un importante filone di ricerca è stato quello legato ai tentativi di ristrutturazione del curricolo di fisica ([22], pag.139). La vastità di argomenti affrontati nei curricoli tradizionali, infatti, era vista, da alcuni ricercatori, e lo è tuttora, come un possibile ostacolo ad una profonda comprensione dei concetti, delle leggi e delle teorie della fisica: un desiderio di affrontare tutti gli argomenti standard finisce infatti per soppiantare la spinta ad approfondire veramente gli argomenti affrontati. Insomma, la *quantità* come nemica della *qualità*.

Così, alcune proposte, all’insegna di slogan come “less is more” [13], sono state delineate nella direzione di operare dei tagli rispetto ai programmi tradizionali ([23], [16], [18]), omettendo alcuni argomenti che, per qualche ragione, potevano essere considerati di importanza marginale.

Ad esempio, in un recente articolo pubblicato sull’*American Journal of Physics* [23], Andrew Elby, riferendosi ad una sperimentazione didattica mirata a dar maggiore spazio ad aspetti epistemologici connessi con l’apprendimento della fisica, non esita a dire:

[...] but we skipped momentum, oscillatory motion, electric potential, electric circuits, magnetism, and all of modern physics

Altri tentativi di riforma sono invece andati in una direzione diversa: non una riduzione dei contenuti, ma una “ristrutturazione” del tradizionale programma di fisica (o perlomeno buona parte di esso) in modo alternativo rispetto alla classica organizzazione dei contenuti (vettori, meccanica, termodinamica, elettromagnetismo ...).

Ad esempio, nel progetto KPC (Karlsruhe Physic Course), l'idea guida è stata quella di “modernize the physics syllabus by eliminating obsolete concepts, restructuring the contents and extensively applying a new model, the substance model” [8]. Come il KPC è organizzato attorno ad un “modello”, il modello di “sostanza”, così sono nate proposte di ristrutturazione dei curricula, organizzandoli attorno ad idee centrali della fisica, come ad esempio le leggi di conservazione [16].

1.2 Conclusioni: cosa abbiamo imparato, e in quale direzione muoverci

1.2.1 Le difficoltà nella gestione di grandi progetti

Il progetto PSSC nacque come un “massive and coordinated team effort of the kind that had been so successful in major scientific projects - such as the development of radar - during World War II” ([20]); anche il PPC, come il PSSC, richiese l'investimento di una gran quantità di fondi e di tempo per potersi sviluppare, e coinvolse un numero di persone enorme.

Da un lato, l'interazione fra un gran numero di persone, spesso provenienti da ambiti diversi, e con competenze diversificate “was an ideal combination - Jim [Rutherford], an excellent high school teacher; Fletcher [Watson], a top science educator who would take on, for example, the evaluation of the several pilot editions revised, year by year, for several years; and myself [Gerald Holton], to keep an eye on getting the physics and history of science right” [21]; d'altro canto, però, la gestione di simili progetti, soprattutto per quando riguarda la possibilità di sfruttare appieno la varietà di materiali prodotti (filmati, attrezzature sperimentali, letture supplementari ...), si rivelò un'impresa molto ardua. Inoltre, una delle variabili fondamentali, la “variabile” insegnanti, si rivelò particolarmente critica: non ci si poteva limitare a produrre materiali ricchi e stimolanti, ma era necessario formare insegnanti in grado di poterli gestire. Insomma, oltre a notevoli costi di avvio, tali progetti necessitavano di forti investimenti *in itinere* per essere mantenuti

in vita; uno dei principali curatori del PPC, Gerald Holton, individua infatti nel taglio ai finanziamenti alla scienza sotto la presidenza Nixon una delle ragioni di crisi del PPC [21].

1.2.2 Il ruolo dell'insegnante e del libro di testo

Altro importante insegnamento dei progetti PSSC e PPC è stata la consapevolezza che le competenze richieste ad un insegnante per sfruttare al massimo le potenzialità, e la ricchezza dei materiali proposti, sono molto alte, molto maggiori di quelle richieste per un corso tradizionale: sia in termini disciplinari, sia, in generale, in termini organizzativi. Questo, sia a causa della gran *quantità* dei materiali proposti, sia a causa della loro *varietà*: filmati, schede di approfondimento, esperimenti di laboratorio . . .

E' allora che ci si chiede ([21]):

By now, an obvious problem will have occurred to you: How in heaven's name can a teacher handle all this wealth with his or her usual mediocre or even good preparation?

A questa domanda, tuttavia, è necessario trovare una risposta, visto che ([20]):

Finally, and not surprisingly, the years have made clear that the crucial ingredient for the success of any educational innovation is the classroom teacher.

A dispetto di filmati, esperienze di laboratorio e simili, ([20]):

. . . what one comes back to again and again is the dominance of the textbook. The reasons are familiar: it is relatively cheap, it defines a ready-made path for the instructor and it entails no expensive investment for classroom space or equipment.

1.2.3 Innovazione nei metodi didattici e riforma dei curricula: il rischio di pericolose derive

I grandi progetti di revisione dell'insegnamento (PSSC, PPC e KPC) ci hanno mostrato come tentativi troppo decisi rischino di radicalizzarsi su posizioni difficilmente condivisibili a largo spettro e di difficile trducibilità in classe. Sull'altro fronte, i progetti di ristrutturazione dei curricula si sono caratterizzati per scelte altrettanto forti, che hanno comportato l'eliminazione di argomenti facenti parte dei piani di studio tradizionali, o la loro rilettura secondo punti di vista molto particolari. Queste proposte, spesso, ed emblematico è il caso del KPC, sono il frutto di riflessioni maturate in un clima di stretta interazione fra ricerca in didattica e ricerca in fisica; in particolare, nel caso del KPC, si è trattato del tentativo di trasposizione, a livello di scuola secondaria, di alcune idee e risultati delle ricerche della "scuola tedesca" di Falk e colleghi [9]⁵. E' legittimo dubitare che si possa ricostruire la fisica intorno al concetto di "sostanza", e ancor di più che un piano di studi articolato attorno a tale modello possa avere la stessa efficacia didattica di uno tradizionale.

Riguardo la possibilità di riorganizzazione interna della fisica, a scopi didattici, si è espresso in modo critico Strnad, in un articolo di critica al progetto KPC, pubblicato sull'*European Journal of Physics* nel 2000 [9]. Scelte come quelle del KPC sembrano deboli, in quanto poggiano su una visione della fisica come un insieme di conoscenze facilmente riorganizzabili secondo nuovi schemi concettuali, trascurando le intricate vicende storico-epistemologiche che hanno portato alla costruzione della fisica così come è oggi, e che altro non è che una provvisoria cristallizzazione di idee e teorie, suscettibile di cambiamenti alla luce di nuovi fatti sperimentali o rivoluzioni concettuali⁶.

⁵Qualcosa di simile si può dire riguardo alla proposta di Curtis di "reinventare" l'insegnamento della fisica sulla base di concetti e metodi che hanno conosciuto un forte sviluppo nella fisica atomica [?].

⁶Riportiamo di seguito alcune linee di un articolo di Herrmann [8], uno dei principali ricercatori impegnati nel KPC, illuminanti riguardo lo spirito di fondo del progetto:

The historical development of physics has followed an intricate path. When teaching, we have in the past imposed this path on our students, although

Per quanto riguarda invece il rapporto tra fisica, storia della fisica e didattica, è particolarmente interessante un articolo di Eylon e Reif [24], in cui si illustrano i risultati di alcune ricerche sperimentali che mostrano una netta correlazione fra le strutture gerarchiche secondo cui sono organizzati i materiali sottoposti allo studio degli studenti, e le conoscenze/competenze da essi acquisite: se nella presentazione si privilegia un approccio di tipo storico, gli studenti avranno maggiori competenze in tal senso, senza mostrare particolari “benefici” su un piano strettamente disciplinare; viceversa, se si privilegia un approccio disciplinare, le competenze di tipo storico-critico saranno penalizzate. In altri termini [24]: “no hierarchical organization is universally superior for all tasks”.

Alla luce delle riflessioni fin qui fatte, sembra possibile concludere che è ancora oggi, più che mai, aperto il problema di quali materiali sia opportuno progettare (quali contenuti, scelte di base, formati) affinché questi possano contribuire in modo significativo alle pratiche d’insegnamento: materiali che al contempo tengano conto di risultati della ricerca in didattica della fisica e della realtà della scuola.

La nostra proposta didattica di un’antologia di fisica online, come illustreremo nei prossimi capitoli, cerca di dare un contributo ad affrontare questo problema.

there are shorter and easier ways of achieving the same goals. We have tried to eliminate such historical burdens from the physics syllabus.

Capitolo 2

La complessità come scelta culturale e didattica

In questo capitolo saranno illustrati alcuni aspetti che riteniamo irrinunciabili per poter rinnovare l'insegnamento della fisica e contribuire in modo significativo alla diffusione della cultura scientifica.

Nel formulare la nostra proposta didattica, ci baseremo soprattutto su alcuni risultati di ricerca che, quasi in controtendenza rispetto a quanto si è ritenuto per molti anni, mostrano come l'apprendimento di questa disciplina possa esser favorito affrontando in modo opportuno e consapevole la *complessità* relativa alla disciplina stessa, alle sue relazioni con altri campi del sapere e ai processi cognitivi coinvolti nel suo apprendimento.

2.1 La complessità della disciplina

2.1.1 La fisica come rete di relazioni fra idee, leggi, teorie

La riflessione sulla natura complessa del pensiero scientifico (e della fisica in particolare) è divenuta, negli ultimi anni, un argomento sempre più cen-

trale nella ricerca in didattica; questa riflessione è divenuta un'esigenza per rispondere a domande come le seguenti ([25]):

Qual è il tipo di messaggio che permette di passare, insieme all'informazione, strumenti culturali che aiutino i cittadini ad orientarsi in questo mondo sempre più dispersivo e complesso? Qual è la soglia di semplicità sotto la quale la conoscenza scientifica si riduce ad una banale collezione di nozioni in cui sparisce il senso complessivo del pensiero scientifico? E, soprattutto, quanto è perseguibile, oggi, l'obiettivo di trasmettere il messaggio che riflettere sulla scienza per capirla può essere un'impresa affascinante che vale la pena intraprendere, anche se richiede attenzione, pazienza e fatica?

La scienza è “complessa sia a livello di contenuti, sia a livello di dinamiche di costruzione”. Nascondere agli studenti tale complessità significa, in un certo senso, non dar loro l'occasione di “intuire” che cosa sia la scienza, né di cimentarsi con difficoltà che potrebbero stimolare intellettualmente e/o favorire un reale percorso di crescita. Ma, ovviamente, occorre individuare dei modi affinché tale complessità sia da loro gestibile. Un modello di ricostruzione didattica della fisica, che esplicitamente intende sottolineare la valenza culturale della fisica come disciplina complessa, è quello elaborato da un gruppo di ricerca israeliano, guidato da Igal Galili.

Essi sottolineano come la fisica, in quanto disciplina, sia definita da un “orizzonte disciplinare” (ovvero dei confini, piuttosto netti, che la separano da altre discipline in quanto a oggetto di indagine, obiettivi e metodi) e da una struttura e delle regole interne, ([26], pag.238):

[...] what makes an aggregate of knowledge a discipline? That something should be related to all of its components. That something is the *structure* of the discourse (an arrangement of statements in a hierarchical and meaningfully related manner) that establishes a discipline.

L'insieme delle relazioni fra le grandezze fisiche, sia visto all'interno degli specifici domini in cui è tradizionalmente suddivisa la disciplina, sia visto

in modo trasversale rispetto ad essi, è molto fitto, e non è facile (e forse nemmeno possibile) proporre una ricostruzione univoca. Proprio per questo motivo la prima forma di complessità che riteniamo sia importante prendere in considerazione sorge all'interno della *dimensione disciplinare*.

2.1.2 Una struttura in continua evoluzione

In realtà, è possibile dimostrare come la fisica sia “strutturabile” in tanti modi diversi: ogni possibile struttura ha un valore che dipende dai fini che si propone, ed una validità che è destinata ad evolversi nel tempo (emblematica la rottura fisica classica-fisica moderna e la rivoluzione che ha comportato in termini di gerarchie fra concetti). Per comprendere le peculiarità della fisica come disciplina, e le relazioni tra le sue idee, diventa allora opportuno accendere una dimensione culturale, eventualmente chiamando in causa ragioni e metodi che pertengono anche ad altri domini del sapere (filosofia su tutti), e contesti storico-culturali complessi. E' a questo che Galili e colleghi si riferiscono con il termine “disciplina-cultura”; ed è così che si manifesta una forma di complessità da ricondurre ad una *dimensione interdisciplinare* della fisica [26]:

The existence of several complementary structures without a unified hierarchy challenges the main tenet of the structuralist dogma (unique nucleus, unique all-embracing structure) regarding physics, which loses its image of a formally rigid, unique construct. This physics might seem less “whole” or even less “scientific” to some people.

In ogni caso, prosegue Galili, questo non significa che la fisica sia una babele di conoscenze non correlate tra loro; semplicemente, i legami che sussistono non sono né immediati né banalmente individuabili dagli studenti [26]:

For example, the conflicting pictures created by mechanics and thermodynamics are related (but not reconciled) by means of statistical physics, which incorporates elements of mechanics, as well

as such from thermodynamics. Classical and relativistic mechanics could be related by weak relativistic approximation. Similarly quantum mechanics has a quasi-classical approximation in its arsenal.

2.2 La complessità del processo di apprendimento

2.2.1 Insegnare ad orientarsi in un territorio complesso

La complessità dei contenuti disciplinari si riflette in modo deciso sulla natura complessa del processo che porta alla loro acquisizione.

Anche un concetto “elementare” di fisica (velocità, accelerazione, campo...) è per lo studente che apprende il risultato di un complesso ed incessante processo di astrazione, analisi e confronto tra fenomeni, analisi e sintesi di idee e concetti precedentemente elaborati, raffinamenti successivi delle teorie. In un recente articolo, diSessa [27] parla a questo proposito di “hyper-richness”, distinguendo una “initial hyper-richness”, propria degli studenti, e del modo in cui essi affrontano situazioni e contesti fisici complessi¹, e una “final hyper-richness”, propria degli esperti, in cui i concetti “are inherently rich, and require extended learning so as to be robustly applicable across the relevant scientific ranges of use” [27]. Insomma, i processi di costruzione del sapere scientifico “si condensano” in un qualcosa (concetto, legge, teoria) che pertanto risulta intrinsecamente ricco di sfumature e sfaccettature, che l’esperto finisce spesso per dimenticare², ma che immancabilmente si presentano nel momento in cui lo studente si trova coinvolto nel processo di apprendimento.

La ricerca in didattica, negli ultimi anni, si è sempre più concentrata sull’analisi di queste problematiche, in cui la complessità può originarsi da un singolo

¹Più propriamente, diSessa parla di: (1) situational hyper-richness, where situations support many different interpretations; (2) parametric hyper-richness, where students are sensitive to differences that, eventually, they will need to learn to ignore or “see through”.

²Si pensi all’opera di Mach, che ha analizzato ed esplicitato alcuni assunti della teoria newtoniana, la cui problematicità era stata messa in secondo piano per moltissimi decenni.

concetto, da un “territorio complesso” in cui una fenomenologia singola può essere letta da più prospettive [27] e/o dal confronto fra teorie contrapposte [28].

E’ così che fenomeni anche apparentemente semplici agli occhi di un esperto si configurano come estremamente ricchi e problematici nel momento in cui li andiamo a leggere con gli occhi di chi sta apprendendo la disciplina [27]:

...a pendulum is “simple” in that it is a linear system, and it hardly consists of many parts. Still, epistemologically, oscillatory motion may be experienced by students as complex territory, being a tangle of alternative aspects on which to focus attention. This section presents an approach that brings this complexity into play by engaging students in activities in which they need to figure out relations and to coordinate multiple foci of attention in order to achieve coherent understanding of the phenomena.

Il problema della didattica, quindi, può esser visto come quello di individuare criteri non per eliminare la complessità, ma per “gestirla” [52]:

Learning involves coordinating perception and conception in a complex territory, not by simplifying the territory, but by organizing ways of looking at that territory

2.2.2 Struttura della disciplina e *knowledge organization*

Se, da un lato, il singolo concetto fisico, e il singolo contesto fenomenologico, come abbiamo visto, possono essere sede di una implicita complessità, a maggior ragione essa si manifesterà nel momento in cui si prenda in considerazione la struttura della disciplina su una scala più estesa.

Della relazione fra struttura della disciplina e capacità cognitive degli studenti si è occupata la psicologia cognitiva da tempo; più specificamente, si è indagata la relazione tra le strutture secondo cui la conoscenza è organizzata nella memoria di un individuo e la sua capacità di orientarsi in domini semanticamente ricchi, come certamente lo è la fisica [29], [30], [32].

Le ricerche citate si sono focalizzate principalmente sul rapporto tra *knowledge organization*³ e capacità di *problem solving*, mostrando come la mera presenza di conoscenze sia una condizione necessaria, ma non sempre sufficiente per il raggiungimento di risultati soddisfacenti in termini di capacità di soluzione di situazioni problematiche complesse. Infatti, la presenza di certe conoscenze non implica automaticamente la capacità di richiamarle nel momento in cui questo sia richiesto: in questo compito di “recupero” gioca un ruolo fondamentale il modo in cui la conoscenza è organizzata nelle strutture mentali dell’individuo [33]. Questi risultati di carattere generale valgono in particolare per la fisica, ambito di indagine che ha focalizzato l’attenzione di ricerche in cui si è notato, conformemente al quadro generale, che studenti abili nell’attività di problem solving dispongono di schemi di classificazione dei problemi più completi ed adeguati [29].

2.2.3 Oltre il *problem solving*: margini di arbitrarietà nella definizione di una struttura della disciplina

Fra i risultati delle ricerche precedentemente citate, particolarmente interessante è il fatto che i cosiddetti esperti, in molti casi, abbiano riportato punteggi relativamente bassi nel compito di classificare problemi secondo schemi risolutivi. A tal proposito, dobbiamo tenere in considerazione che gli esperti dispongono di una visione dei fenomeni dell’elettromagnetismo (era questo l’ambito delle ricerche condotte) sicuramente più ampia rispetto a quella dei *novices*, e le loro conoscenze includono leggi e concetti più generali e astratti di quelli insegnati a studenti del primo anno (era questo il *target* cui era stato somministrato il test).

Pertanto le “categorie concettuali” a cui essi fanno riferimento possono essere

³Preferisco d’ora in poi mantenere il termine inglese: le due possibili traduzioni “organizzazione del sapere” ed “organizzazione della conoscenza” hanno, a mio avviso, sfumature leggermente diverse: la prima sembra riferirsi ad una presunta organizzazione “universalmente valida”, “enciclopedica” del sapere umano; la seconda richiama maggiormente l’organizzazione mentale di ciascun individuo, intendendo appunto per “conoscenza” l’insieme di conoscenze del singolo. Perciò, usando il termine originale, intendiamo riferirci ad entrambe queste sfumature.

più generali, o, comunque, non coincidere con quelle considerate come metro di riferimento da parte degli autori dell'articolo.

In secondo luogo, poi, è da notare come ogni procedimento di classificazione sia sempre in qualche misura soggettivo, dal momento che le categorie concettuali adottate da un individuo possono non coincidere con quelle di un altro; in particolare è importante sottolineare come le categorie adottate dagli autori facciano esplicito riferimento a “problem schemata”, ossia fossero intrinsecamente legate all'aspetto di problem-solving.

Se da un lato, come riportato nell'articolo, “hierarchical and problem-type-centered cognitive structures are not mutually exclusive”, non necessariamente si ha una perfetta sovrapposizione di questi due tipi di strutture. Come già sottolineato in precedenza (vedi 1.2.3), non esiste un'organizzazione gerarchica “universale” superiore per qualsiasi tipo di compito.

Interpretiamo questo risultato come un ulteriore indizio della complessità della fisica, e di questo è necessario tener conto nel formulare la una proposta didattica coerente con l'intento di promuovere una formazione non tecnica, ossia volta ad incrementare la capacità di soluzione di problemi più o meno specifici, ma piuttosto una formazione di più ampio respiro, basata sulla visione della fisica come “disciplina-cultura”.

In tale direzione si è mosso il gruppo di ricerca in didattica della fisica del Weizmann Institute, che in varie ricerche ha messo in evidenza una serie di conseguenze di un insegnamento frammentario della fisica [4], [5]:

- Scarsa capacità di comprensione delle idee centrali.
In particolare, molti studenti non sanno differenziare fra un concetto generale e i suoi esempi, attribuendo al concetto generale attributi specifici di un esempio particolarmente comune [4].
- Scarsa capacità di richiamare conoscenze acquisite.
“Many students complain that a few years after the completion of their studies, their knowledge of physics is reduced to a number of formulas and some vague labels that represent concepts they learned in class.” [4].

2.3 Insegnare fisica in una società complessa

2.3.1 *Quale fisica insegnare?*

Uno dei principali sintomi dell'inadeguatezza di molti attuali curricula di fisica è la scarsa capacità di destare un qualche interesse nei giovani che affrontano lo studio di questa disciplina. Questo scarso interesse è, in gran parte, conseguenza della forte distanza fra le loro esigenze e quello che lo studio della fisica (almeno, com'è impostato tradizionalmente) può loro offrire.

Gran parte degli attuali programmi di insegnamento risente fortemente di impostazioni date molti anni or sono, e pertanto non sono in grado di cogliere i bisogni di una società profondamente cambiata [34]:

The predominant aim of science courses of the 1960s was to provide a basis of knowledge for future specialism in science, in a period of confidence in the social benefits of science, and when the “white heat of technological revolution” was seen as requiring ever-growing numbers of scientists to sustain and develop our industrial productivity. In contrast, contemporary analysis of the labour market would suggest that our future society will need a larger number of individuals with a broader understanding of science both for their work and to enable them to participate as citizens in a democratic society.

Nella società attuale è necessario preparare cittadini in grado di confrontarsi con le numerose questioni che la scienza ci pone davanti: questioni etiche, ambientali, sociali. Per poterle affrontare con consapevolezza, e per poter operare poi delle scelte fondate, è necessario che i cittadini del futuro abbiano gli strumenti per partecipare consapevolmente al dibattito pubblico, che siano in grado di confrontarsi con testi scientifici non specialistici, che capiscano i metodi, i punti di forza, e i limiti della scienza.

2.3.2 La conoscenza nell'era di internet

Oggi il vero problema è come trovare, selezionare, valutare criticare, organizzare e infine creare informazioni. Sono queste le competenze di cui dobbiamo dotarci per essere insegnanti e il modo migliore per trasmetterle agli studenti è chiedere loro di fare, in prima persona, esattamente quelle cose.

Michael Wesch,
[http://admaiora.blogs.com/maurolupi/2008/04/web-20—
vito-d.html](http://admaiora.blogs.com/maurolupi/2008/04/web-20-vito-d.html)

Abbiamo parlato, in alcuni paragrafi precedenti, di complessità della fisica e di complessità dei processi cognitivi coinvolti nel suo apprendimento. La complessità, questo termine sempre più impiegato in ambiti diversi nella nostra società (e anche per questo difficile da definire), sembra, più che una caratteristica propria di alcune aree del sapere, un paradigma in grado di descrivere in modo profondo molte realtà diverse. Una delle cause dell'emergere di questo paradigma è il proliferare di conoscenze in molti settori disciplinari, sempre più difficili da gestire e da inquadrare in schemi classici. Così, un altro aspetto di cui tener conto, nella formulazione di una proposta didattica "attuale", è il ruolo della conoscenza (in senso lato) nella nostra società, e i modi di rapportarsi con essa, che sicuramente hanno subito una profonda evoluzione anche rispetto a pochi decenni fa.

Viviamo in una società in cui una gran quantità di informazioni, soprattutto grazie ad internet, è facilmente a disposizione di tutti; per cui necessariamente devono cambiare gli obiettivi dell'insegnamento rispetto ad un modello in cui la pura trasmissione di conoscenze era il compito principale dell'insegnante ([35], pag.17):

Nella società dell'informazione, nella quale più sfumati appaiono i confini tra i saperi e le culture, non si può dilatare all'impazzata la mappa dei saperi, né si può avere la pretesa di individuarne un principio ordinatore o gerarchico; mentre appare obsoleta la stessa idea di trasmissione di un patrimonio culturale alle nuove

generazioni, ricomposto intorno a un'idea forte com'era per esempio, all'inizio del secolo, quella di formare nella scuola all'idea di nazione. “Oggi - scrive Tullio De Mauro - dobbiamo dare bussole, dobbiamo dare punti cardinali. Serve acquisire e far acquisire la capacità di muoversi entro lo spazio culturale in cui ci collochiamo. Serve dare la capacità, la voglia e il gusto di sapersi muovere tra le forme più immediate di cultura, quelle più vicine a noi e le forme più remote e aliene, tra le forme più rudimentalmente immediate e le forme più complessamente costruite, tra le forme affidate a questa o a quella tipologia di produzione e ricezione, dalla manualità alla lettura, dalla visualità e plasticità al silente e astratto ragionare”.

Sulla stessa linea d'onda sono le seguenti parole, tratte da un'intervista di *Repubblica* a Edgar Morin (25 aprile 2008, pag.49):

Occorre occuparsi dell'insegnamento. La riforma della conoscenza e del pensiero potrà concretizzarsi solo attraverso una riforma dell'insegnamento, una problematica a cui ho dedicato *La testa ben fatta* e *I sette saperi necessari all'educazione del futuro*. Il nostro sistema d'insegnamento separa le discipline e spezzetta la realtà, rendendo di fatto impossibile la comprensione del mondo e impedendoci di cogliere quei problemi fondamentali che sono sempre globali.

2.3.3 L'impatto cognitivo delle tecnologie sulla “generazione digitale”

I nuovi modi di rapportarsi con la conoscenza, incentivati da importanti rivoluzioni tecnologiche, hanno avuto un forte impatto soprattutto sulle nuove generazioni, i cosiddetti *digital natives*, abituati a confrontarsi in modo naturale con internet (e le nuove forme di comunicazione in genere) e con le sue forme di organizzazione/modalità di fruizione della conoscenza. L'impatto a livello di atteggiamento cognitivo comincia ad essere oggetto di

studio di alcune ricerche; Marc Prensky sintetizza il divario che separa *digital natives* da *digital immigrants* (ossia adulti e insegnanti, che non sono “nati in un mondo digitale”), in dieci punti (cit. in [37]):

velocità contratta vs velocità tradizionale, elaborazione parallela vs lineare, accesso random all’informazione vs lineare, attitudine grafica vs testuale, connessione vs isolamento, attività vs passività, orientamento al gioco vs al lavoro, al risultato immediato vs all’attesa, alla fantasia vs alla realtà, amicizia vs diffidenza verso la tecnologia

Tra le conseguenze di questi nuovi atteggiamenti cognitivi, e soprattutto del *multitasking*, ossia lo svolgimento di più attività contemporaneamente (studiare, chattare, ascoltare musica . . .), c’è l’indebolimento dell’area della riflessione [37]:

La riflessione è quel processo che ci consente di effettuare generalizzazioni, di creare “modelli mentali” a partire dalla nostra esperienza. In questo mondo accelerato, c’è sempre meno tempo per la riflessione. Una delle sfide più interessanti per il mondo dell’educazione sarebbe allora quella di insegnare ai digital natives a riflettere e pensare criticamente, ma ciò andrebbe fatto utilizzando i loro linguaggi.

Pertanto, bisogna fare attenzione ad affermazioni, che suonano in realtà come luoghi comuni, del tipo: “i ragazzi di oggi sono più svegli di quelli delle generazioni precedenti”. E’ vero, sì, che la capacità di muoversi fra diversi tipi di linguaggio e stimoli sensoriali è sicuramente più sviluppata nelle nuove generazioni, tuttavia dobbiamo guardare con attenzione, e forse con preoccupazione, al rovescio della medaglia, ossia al fatto che i nuovi mezzi possono contribuire fortemente all’indebolimento di certe abilità cognitive ([36], pag.87):

Oltre che essere attivate o riprodotte internamente, le abilità possono anche essere disattivate o “corto-circuitate” dall’impiego del mezzo. In questo caso si blocca l’esercizio dell’abilità in quanto

i risultati vengono offerti già completi, come ad esempio accade quando si presenta agli alunni una flow chart di eventi storici in forma già ordinata: in questi casi si fa loro risparmiare fatica ma si paralizza la loro abilità di raffigurazione grafica.

Pertanto anche l'impiego di strumenti tecnologici nelle pratiche didattiche deve essere valutato con particolare attenzione ([36], pag.182):

Scrivere e leggere possono diventare attività più attraenti, ad esempio aggiungendo a scritte e a disegni immagini in movimento. Ma alunni abituati a leggere con i sussidio di un'animazione non avvertiranno difficoltà maggiori quando dovranno passare a leggere testi senza supporto visivo? L'eccessiva semplificazione alla comprensione, che il computer potrebbe favorire consentendo ad esempio di evocare dei disegni corrispondenti a termini di difficile significato, potrebbe in realtà risultare controproducente.

2.3.4 Tecnologie e “gestione” della complessità

Negli ultimi paragrafi abbiamo affrontato la questione del rapporto fra tecnologie e stili cognitivi perché, anch'essa, ci sembra collegata con il tema della complessità. Se da un lato le tecnologie possono essere di aiuto allo studente nella gestione di un contesto complesso (come viene mostrato in [27]), dall'altro, come abbiamo appena visto, esse possono portare ad un indebolimento di certe capacità cognitive di chi apprendere. Pertanto, nell'introduzione di supporti tecnologici alla didattica, è necessario ricercare un giusto equilibrio fra “benefici” e “rischi” di tali sussidi; questi strumenti devono essere sfruttati per innescare processi di apprendimento significativi, e non per disincentivare l'impegno dello studente.

Nel prossimo capitolo affronteremo più in dettaglio la questione, mostrando come i tradizionali libri di testo ostacolino l'innescare di un approccio didattico più ricco, in quanto eccessivamente “lineari” e strutturati in modo troppo rigido, mentre l'utilizzo indiscriminato di risorse ipertestuali, non sufficientemente strutturate, rischi spesso di sfociare nell'eccesso opposto di una complessità che lo studente non è in grado di fronteggiare.

Capitolo 3

“Gestire” la complessità: la proposta di un’antologia di fisica online

Nel capitolo precedente abbiamo cercato di esplicitare possibili “declinazioni” del termine “complessità”, mostrando come essa riguarda tanto la dimensione cognitiva quanto quella disciplinare del processo di apprendimento della fisica. Abbiamo scelto di puntare sul “paradigma della complessità”, come strumento guida per l’ideazione di una proposta didattica pensata per contribuire a colmare il divario fra la ricerca in didattica e le pratiche di insegnamento tradizionali. Tale scelta è suggerita, da un lato, dal bisogno di “accompagnare” dinamiche cognitive che, come abbiamo visto, non sono mai semplici o lineari; dall’altro, dal desiderio di individuare prassi e contenuti didattici in grado di essere sufficientemente articolati da risultare stimolanti per gli studenti.

Si tratta, adesso, di individuare delle forme e dei contenuti disciplinari specifici che si prestino particolarmente alla traduzione in proposte concrete di queste scelte di fondo.

In questo capitolo si proporranno dei criteri-guida nella scelta di materiali adatti alla creazione di un ambiente di apprendimento complesso, e se ne discuteranno possibili modalità di organizzazione. In particolare, metteremo

a confronto le potenzialità di forme di presentazione tradizionali (testo stampato) con quelle offerte dalle nuove tecnologie (ipertesto e web). Arriveremo ad individuare nella forma “antologia” uno strumento, che caratterizzeremo sia dal punto di vista dei contenuti che della loro organizzazione, in grado di consentire l’implementazione efficace di un ambiente di apprendimento complesso.

3.1 Testo, ipertesto, web

Parecchie e differenziate sono le possibili forme in cui i saperi disciplinari sono prodotti, organizzati, trasmessi. L’analisi delle forme di produzione, organizzazione, gestione dei saperi è oggetto di indagine di varie discipline e sottodiscipline, più o meno recenti, che vanno dalla semiologia alla critica letteraria, dall’architettura dell’informazione alla filosofia dell’ipertesto [38], [39]. Noi ci concentreremo sul rapporto fra testo e ipertesto, cercando di capire quali possano essere i punti di forza di ciascuno di questi due mezzi in prospettiva didattica: la scelta del testo didattico e della sua forma di presentazione deve essere guidata, da un lato, dalla tipologia dei contenuti che si vogliono trasmettere, dall’altro, dai fini specifici che ci si propongono nell’insegnamento.

I tradizionali libri di testo di fisica in adozione nelle scuole, sono, perlopiù, caratterizzati da una trattazione “lineare” dei contenuti, che si manifesta sia nella scelta dei materiali, sia nella loro organizzazione¹. Queste caratteristiche dei testi sono il frutto di scelte sostenute dalla convinzione di fondo che, per rendere la fisica comprensibile, essa debba essere semplificata il più possibile. Questa operazione di semplificazione può, sì, favorire la memorizzazione da parte dello studente; e il testo strutturato secondo criteri “lineari” può costituire un manuale di facile consultazione. Tuttavia, la ricerca in didattica ci ha mostrato che i percorsi di comprensione non sono né dritti né univoci. Ed è questa quasi banale evidenza che impone di ripensare ai ma-

¹La fisica, in tali testi, è presentata come “a compendium of knowledge delivered in a linear sequence of disciplines: mechanics, hydrodynamics, thermodynamics, electromagnetism, optics and atomic physics” [40].

teriali affinché questi siano in grado di aiutare l'insegnante nella creazione di un ambiente di apprendimento che possa favorire l'innescare di un processo cognitivo e di costruzione di saperi articolato, che ricalchi e guidi le reali dinamiche di apprendimento della disciplina.

Alcuni vincoli intrinseci del medium "libro stampato" sono oggi superabili grazie a forme di organizzazione/fruizione dei materiali quali l'ipertesto (e il web in particolare): l'ipertesto consente la possibilità di un accesso ai contenuti, che potremmo definire "multilineare", che nel libro stampato è inibita a priori. Anche la forma ipertesto, tuttavia, ha dei limiti (come tutti i media): questa multilinearità, se non "disciplinata", rischia di sfociare in una babele di voci, in un caos ingestibile, in cui orientarsi si fa sempre più difficile. E' così che, se il libro stampato si caratterizza per il rischio di un'eccessiva "linearizzazione" e semplificazione delle modalità di accesso ai suoi contenuti, l'utilizzo del web rischia di essere una fonte di complessità ingestibile, che mette a disagio chi voglia confrontarsi con essa². In assenza di una riflessione sulla gestione dell'informazione e dei contenuti sul web, è facile incorrere nel rischio di trasformare il meccanismo dei link, e le possibilità offerte dalla multimedialità in un gioco fine a se stesso, in cui la spettacolarità e l'intrattenimento diventano obiettivi principali rispetto alla trasmissione di conoscenze.

3.1.1 L'ipertesto come evoluzione del testo

Sebbene tutti abbiano un'idea di cosa sia un ipertesto, una sua definizione rigorosa non è facile. Del resto, nemmeno una rigorosa definizione di "testo" è impresa facile, come testimonia una gran quantità di studi riguardanti il problema [44], [45].

Un ipertesto può essere definito come un testo in cui siano presenti rimandi (link) ad altri testi, ed eventualmente a materiali multimediali (filmati, tracce audio, immagini ...).

²E' per far fronte a questo tipo di problemi che nell'ambito del webdesign, negli ultimi anni, si sono diffusi termini come information architecture [41], web usability [42], information ecology [43], che corrispondono a strumenti in grado di creare un web davvero di qualità e "a misura d'utente".

Ora, si nota subito come questa definizione sia piuttosto vaga: anche in un testo “tradizionale” sono presenti rimandi ad altri testi. In primo luogo, si pensi ai riferimenti bibliografici presenti praticamente in ogni testo, perlomeno in quelli di natura saggistica. Ma si può andare oltre. Il termine “rimandi” (o “collegamenti”) è molto generico: non è forse vero che l’Ulisse di Joyce è fitto di rimandi all’Odissea di Omero (collegamenti intertestuali)? Non è forse vero che nel Nuovo Testamento ci sono continui riferimenti al Vecchio Testamento (collegamenti infratestuali)? Al di là di riferimenti piuttosto “facili da cogliere” come questi, ci possono essere poi riferimenti più “difficili”, che solo l’erudito, che conosce una gran quantità di testi, riesce ad individuare, o magari riferimenti più “soggettivi”: ad esempio, per qualcuno possono esserci, nel pensiero di Schopenhauer, dei forti richiami a testi orientali, mentre per altri questi collegamenti possono non essere poi così evidenti. In ogni caso, la presenza di vari tipi di collegamenti, fa sì che ogni testo sia un ipertesto.

Nella pratica, con il termine ipertesto, ci si riferisce al caso in cui il testo in questione sia presente su un computer, e i rimandi siano link attivabili tramite un semplice click del mouse. Innanzitutto, in questa accezione, il rimando diventa così un qualcosa di “già progettato” da parte dell’autore dell’ipertesto. Inoltre, c’è una differenza di tipo “operativo” sulla possibilità di muoversi fra un testo e l’altro nel caso si abbia un ipertesto su pc: su un supporto tradizionale (testo stampato), per poter leggere un passo di un libro citato in bibliografia è necessario recuperare quel testo (in libreria, in biblioteca . . .), interrompendo così l’operazione di lettura; nel caso di un ipertesto, questa operazione “costa soltanto un click”, e, di fatto, “salda” il nuovo testo con il precedente, senza interrompere la lettura. Ebbene, questa differenza, pur essendo di carattere puramente “operativo”, ha, evidentemente, degli effetti sostanziali sul rapporto fra lettore e testo e più in generale sulla modalità di fruizione di contenuti: infatti, nell’evoluzione tecnologica, anche differenze quantitative modificano radicalmente stili e strutture cognitive dell’uomo. Il fatto che i confini fra testo e ipertesto siano, in una certa misura, “sfumati”, ha suggerito la possibilità di fare tentativi di produrre dei materiali che stessero “a metà strada”: in particolare, prodotti dalla vocazione spic-

catamente ipertestuale implementati su carta stampata; e, per contro, libri tradizionali, ossia in cui i contenuti sono privi di rimandi espliciti (interni o esterni al testo), trasferiti “di sana pianta” su pc. Il processo di “negoiazione dei ruoli” tra testo stampato e ipertesto, come del resto ogni processo di definizione di confini di pertinenza fra media, è stato un processo lento, tuttora in corso, ma che ha portato, almeno in parte, a capire quali strade siano da evitare, ossia quali siano le forme che sicuramente mal si adattano a certi tipi di contenuto. Così, da un lato, la fruizione di “testi lineari tradizionali” si è dimostrata molto più efficace sul supporto tradizionale costituito dal libro a stampa. Dall’altro lato, i tentativi di produrre materiali dalla struttura fortemente ipertestuale in un formato cartaceo si è rivelata un’operazione frustrante e che conduce, nella maggior parte dei casi, a risultati insoddisfacenti: il web è il luogo ideale in cui vive un ipertesto.

3.1.2 Il web come strumento per la gestione di ipertesti e il rischio di una deriva “anarchica”

Come detto, il web si è rivelato il supporto ideale per dar vita al sogno di Vannevar Bush, che, nel libro “As we may think” [46], gettò le basi, almeno teoriche, del concetto moderno di ipertesto. Pian piano si sono andati definendo standard che hanno portato ad una certa stabilizzazione di alcuni elementi tipici di un sito web. Tuttavia, il processo di assestamento è ancora in corso: se un libro stampato 20 anni fa non è, nella forma, troppo dissimile da uno stampato un mese fa, è sufficiente dare un’occhiata a siti progettati anche solo 10 anni fa per capire l’enorme distanza che ci separa da essi, e avere un’idea dei tempi tipici di evoluzione del web, almeno in questa fase della sua storia.

Appurato che il web è ancora un medium in piena evoluzione, e pertanto non è facile poter analizzare in modo del tutto obiettivo tendenze e processi che caratterizzano il suo sviluppo, ci sono alcuni aspetti che paiono segnalare una sua “deriva” di tipo “anarchico”. Si stanno infatti diffondendo, sempre più, forme di organizzazione dei contenuti che ne rendono difficile l’esplo-

razione sistematica: a schemi di tipo gerarchico, nella progettazione dei siti e dei database, si stanno sostituendo forme “più fluide”, come ad esempio le cosiddette “*folksonomies*”, ossia metodi di classificazione meno sistematici, in cui i singoli utenti (folks) attribuiscono delle “etichette ” (tag) che caratterizzano quello specifico contenuto, e che ne consentono il successivo recupero. Queste nuove forme di classificazione presentano notevoli aspetti problematici, sotto studio da parte di numerose ricerche [47]. Inoltre, sono sempre più numerosi i blog, siti in cui l’informazione è prodotta e gestita da utenti qualsiasi, e non da specialisti del “*knowledge management*”, con un conseguente abbassamento del livello qualitativo. Si assiste ad un proliferare di metadati³, che va ad aggiungersi al proliferare di informazione che ha contraddistinto la prima fase del web, portando così da un “information overload” ad un “metadata overload”.

Insomma, stiamo attraversando una fase alla fine della quale il web rischia di esser caratterizzato sempre più da una dispersività e da una tale mole di informazioni che nemmeno motori di ricerca sempre più potenti riusciranno a gestire [48]. E’ così che si parla sempre più spesso di ecologia dell’informazione, intesa come tentativo di porre ordine in un mezzo che, a fronte di grandi potenzialità, richiede uno sforzo, senza precedenti nella storia della cultura, per poter essere efficacemente “domato”.

Nei prossimi paragrafi proveremo a delineare le caratteristiche di una forma di scelta e organizzazione dei materiali che contenga in sé le potenzialità del testo scritto e dell’ipertesto, limitando al contempo i limiti intrinseci dell’uno e dell’altro. Chiameremo questa forma antologia, e ne descriveremo nel dettaglio criteri che proponiamo per la sua realizzazione.

³Un metadato (dal greco meta- “oltre, dopo” e dal latino datum “informazione” - plurale: data), letteralmente “dato su un (altro) dato”, è l’informazione che descrive un insieme di dati. Un esempio tipico di metadati è costituito dalla scheda del catalogo di una biblioteca, la quale contiene informazioni circa il contenuto e la posizione di un libro, cioè dati riguardanti i dati che si riferiscono al libro.
(<http://it.wikipedia.org/wiki/Metadato>)

3.2 Verso una complessità gestibile: la forma antologia

3.2.1 L'antologia come strumento didattico

Perché esistono numerose antologie di letteratura (italiana o straniera) e di filosofia, mentre non esistono, nel panorama dell'editoria scolastica, antologie di fisica? C'è forse qualche peculiarità che caratterizza le discipline cosiddette "umanistiche" e il loro insegnamento rispetto alle materie scientifiche che rende impensabile proporre un'antologia di testi per le materie scientifiche? Oppure questa "frattura" fra "le due culture" (per usare una nota espressione di C.P. Snow) è qualcosa che deriva da modi di guardare ad esse, magari storicamente fondati, ma che non hanno una validità atemporale e, per così dire, costitutiva?

A queste domande proviamo a rispondere nei prossimi paragrafi, cominciando proprio dalla definizione del termine "antologia"⁴:

antología: s.f. [dal gr. *ανθολογία* propr. "raccolta di fiori", comp. di *άνθος* "fiore" e *-λογία* dal tema di *λέγω* "scegliere"]. - Raccolta di passi in prosa o in versi di vari autori (solitamente di quelli ritenuti più significativi) di una letteratura, di un'epoca, di un genere o di un gusto particolare, o anche scelta di pagine di un solo autore: *a. della lirica greca; a. della poesia italiana delle origini; a. della prosa scientifica del Seicento; a. carducciana*. Analogam., ma meno com., con riferimento alla produzione musicale e artistica, volume che raccoglie brani di vari musicisti o di un singolo compositore (*a. della musica barocca; a. verdiana*), o riproduzioni di una scelta di pitture, sculture, ecc. di uno o più artisti (*a. della pittura senese; a. degli affreschi di Giotto*); anche, scelta dei film particolarmente significativi di un periodo della storia del cinema o della produzione di un solo regista, ripresen-

⁴La seguente definizione è presa dal dizionario Treccani online: http://www.treccani.it/site/lingua_linguaggi/consultazione.htm

tati in proiezione rievocativa: *a. dei film neorealistici; a. felliniana*. Fig., *una pagina da antologia*, di esemplare squisitezza e perfezione formale.

Già la definizione riportata tradisce un'inclinazione del termine verso un suo impiego in ambito "umanistico", relativo soprattutto alle discipline letterarie e artistiche in genere. Tuttavia, non c'è motivo per cui l'operazione di "raccolta di passi di vari autori" si debba applicare esclusivamente ad autori di opere letterarie o artistiche.

La realizzabilità di antologie relative a discipline scientifiche è testimoniata *de facto* da molti ottimi testi di questo tipo, destinati, ahimé, esclusivamente ad un pubblico specialistico, o che abbia comunque una preparazione scientifica che va oltre quella di uno studente di scuola secondaria. Ci riferiamo a testi come il libro di Philip Stehle già citato nell'introduzione [1], o a quello di Stefano Bordoni "*Elevermo questa congettura*" [49], o ancora a "*Time for science education*" di Michael R. Matthews [55].

In tutti questi libri sono riportati ampi passi di testi, articoli, discussioni di "autori" ormai divenuti dei classici del pensiero scientifico. I testi proposti riguardano, nel primo caso il passaggio tra la fisica classica e la fisica quantistica; la teoria della relatività ristretta nel libro di Bordoni; il moto del pendolo in quello di Matthews. Questi libri, a rigore, non possono essere definiti delle vere e proprie antologie: i materiali "originali" che vengono citati sono più una testimonianza per corroborare un filo del discorso da essi, almeno in parte, indipendente, piuttosto che essere essi stessi l'oggetto di un'analisi, come potrebbe essere in una più classica antologia. Cionondimeno, lo spazio destinato a passi di "autori classici" è assai più ampio che rispetto alla maggior parte dei testi di fisica; tali passi sono collocati in una loro prospettiva storica e culturale e per questo ci sentiamo di prendere i libri di cui stiamo parlando come degli ottimi modelli per l'ideazione di un'antologia di fisica.

3.2.2 Il discorso scientifico ed umanistico a confronto

Come dicevamo, il vero problema è la carenza di simili testi nel panorama dell'insegnamento della fisica a livello secondario. Questo "vuoto editoriale"

è sicuramente riconducibile a modi di concepire le discipline scientifiche, e il loro insegnamento, ormai consolidati, e per questo difficili da mettere in discussione.

Per l'insegnamento delle discipline umanistiche, è prevalente la prassi di seguire un percorso di tipo storico (storia della letteratura, della filosofia), ed "accompagnarlo" con la lettura di testi classici (che si tratti di libri interi, come ad esempio "I Promessi Sposi" o la "Divina Commedia", o di brani più brevi, raccolti in antologie).

Per le discipline scientifiche la situazione è completamente diversa: né si segue lo svolgimento degli eventi e delle scoperte lungo il corso della storia, né si affronta la lettura dei classici della letteratura scientifica, anche perché, solitamente, non si considera il fatto che, anche nella fisica, oltre al nocciolo di conoscenze accreditate ed accettate dalla comunità scientifica, esiste una dimensione interpretativa delle teorie fisiche.

Al di là di possibili connessioni e analogie tra cultura scientifica e cultura umanistica è però fuori dubbio che le discipline scientifiche e quelle umanistiche hanno caratteristiche che le distinguono nettamente, per quanto concerne obiettivi, metodi, struttura.

Per cominciare, le materie scientifiche si prestano particolarmente ad un insegnamento "di tipo deduttivo", in cui i contenuti disciplinari sono guardati *sub specie aeternitatis*, più che *sub specie historiae*, come avviene invece per le materie umanistiche: mentre le verità della scienza si propongono come valide in ogni tempo e in ogni luogo, le teorie della storia, della filosofia, della sociologia (e via discorrendo) sono fortemente radicate in contesti storico-culturali ben definiti.

Questa differenza viene vista, secondo il paradigma positivista, come riconducibile ai diversi "stadi evolutivi" in cui si trovano i vari campi del sapere umano: ci sono scienze "più evolute" (le varie scienze naturali), e scienze (le "scienze dell'uomo") che devono ancora sviluppare metodi di indagine che le portino al livello delle prime⁵.

⁵Più nello specifico, secondo il positivismo, esiste una gerarchia fra le scienze, che vede più in alto quelle "affette da un minor grado di empiricismo", ossia quelle più altamente codificate in forma assiomatico-deduttiva, più matematizzate, e le cui teorie abbiano un raggio di applicazione il più possibile universale. Per Comte, l'astronomia è la prima

I progressi conseguiti dalle discipline che hanno via via adottato il metodo scientifico moderno sono innegabili, sia su un piano teorico-conoscitivo, sia da un punto di vista pratico-applicativo. E' indubbio che il processo di "scientifizzazione" del sapere umano deve andare avanti, anche se dovrà, oggi più che mai, essere riadattato ad un quadro disciplinare che sta significativamente cambiando, con lo sviluppo di discipline "trasversali" alle tradizionali aree del sapere, quali le neuroscienze, l'informatica umanistica o la bioetica. I confini fra le discipline tradizionali cominciano infatti ad apparire più sfumati; l'organizzazione e gerarchizzazione tradizionale dei saperi comincia a non esser più in grado di contenere spinte e problemi di ricerca che necessitano di essere inquadrati in nuove strutture e nuovi schemi concettuali.

In questo quadro di "riassestamento", riteniamo abbia senso riprendere una riflessione sul rapporto fra l'insegnamento delle discipline umanistiche e delle discipline scientifiche.

La necessità, nello studio e nella didattica delle discipline umanistiche, di seguire percorsi di tipo storico è riconducibile all'importanza di ricostruire i contesti in cui si collocano riflessioni filosofiche, opere artistiche, eventi storici che sono il loro oggetto di studio. Per capire il pensiero di Kierkegaard, per saper "leggere" un quadro di Klimt, per comprendere le cause dello scoppio della Grande Guerra, è necessario tratteggiare un quadro storico-culturale-sociale in cui si collocano questi "fenomeni"; è necessario tessere una fitta rete di relazioni interne alle singole discipline, ma anche in modo trasversale rispetto ad esse. Questo è tanto più vero quanto maggiore è la complessità interna del "fenomeno" sotto indagine; in particolare, un'operazione di tipo "ermeneutico" si rende necessaria quando il "fenomeno" si discosta maggiormente da idee e conoscenze più facilmente alla portata degli studenti. Così, da questo punto di vista, è in una certa misura lecito affermare che la lettura dell'Ulisse di Joyce è più complessa di quella di un racconto giallo di Simenon.

Discorso non troppo diverso si può fare riguardo alla fisica. I meccanismi di

scienza ad aver raggiunto lo "stadio positivo", seguita da fisica, chimica, biologia, e infine dalla sociologia.

evoluzione della disciplina hanno portato alla creazione di teorie e quadri concettuali ben distanti da quello che può essere compreso e gestito in maniera più immediata dagli studenti. A ben vedere, come abbiamo sottolineato in particolare in 2.2.1, la complessità dei processi cognitivi riguarda anche quelli che possono venir considerati i concetti “più semplici” della fisica. Tuttavia, è evidente che questa problematicità emergerà in modo più critico quando si vadano ad affrontare argomenti che poggiano su un background di conoscenze più vasto, e che sono il frutto di interazioni tra un gran numero di spinte intellettuali. In particolare, la fisica moderna si presta particolarmente ad un discorso di questo tipo dal momento che la sua comprensione sembra essere favorita quando è ricostruita in una forma multiprospettica in grado di creare un ambiente di apprendimento articolato e ricco [27].

In sintesi, in una ricostruzione della fisica in chiave didattica, può essere utile prendere a prestito metodi e approcci tradizionalmente utilizzati nell’ambito delle discipline umanistiche, dal momento che anche la fisica presenta forme di complessità per certi versi simili a quelle che si riscontrano in discipline apparentemente lontane da essa.

3.2.3 Peculiarità di un’antologia di fisica

L’antologia di fisica vuol essere uno strumento che consente di innescare pratiche di apprendimento di tipo “complesso”, tenendo in considerazione possibili insegnamenti provenienti dalle discipline umanistiche, ma anche, ovviamente, valutando le peculiarità disciplinari della fisica.

Rispetto alla definizione generale riportata nel paragrafo precedente, in un’ottica didattica, per antologia intenderemo una raccolta di materiali, più o meno eterogenei nella tipologia, con le seguenti caratteristiche:

- Nessuna pretesa di esaustività. Un tradizionale manuale di letteratura, ad esempio, si propone di essere esaustivo rispetto alla storia della letteratura; uno di fisica di esserlo rispetto all’insieme delle conoscenze disciplinari (almeno quelle base). L’antologia non ha questa pretesa, e pertanto è uno strumento da affiancare al manuale tradizionale.

- E' una raccolta di materiali ben organizzata, ben strutturata. Rispetto ad un testo tradizionale, non si ha necessariamente una fruizione sequenziale, ma è possibile una molteplicità di accessi (generalmente guidata dall'insegnante).

Noi però stiamo pensando ad un'antologia *di fisica online*: tenendo conto, sia delle peculiarità disciplinari, che di quelle relative al formato (ipertestuale), ne precisiamo le caratteristiche nei seguenti termini più specifici:

- Il supporto.
Vogliamo enfatizzare l'aspetto relativo alla molteplicità di accessi. E' più strutturata di un sito web⁶; tuttavia essendo la sua forma di tipo ipertestuale, consente in modo più immediato quella molteplicità di accessi che anche in un'antologia tradizionale è possibile, ma deve essere condotta da un insegnante esperto che abbia una forte padronanza della disciplina e dei materiali presenti nell'antologia stessa. Nel nostro caso, la forma ipertestuale è un mezzo che può aiutare l'insegnante, ma anche gli studenti, ad orientarsi fra i materiali.
- Tipologia dei materiali.
Rispetto ad un'antologia di letteratura sono presenti non solo "testi originali", ma materiali più eterogenei, ad esempio: saggi di critica storico-epistemologica, testi divulgativi, materiali multimediali, guide al laboratorio, materiali di ricerca in didattica (es. transcript di discussioni fra studenti ...).
- Modalità di organizzazione dei contenuti.
In un'antologia tradizionale i materiali sono quasi sempre organizzati o per temi, o secondo un criterio storico. Noi ci faremo guidare da criteri più propriamente disciplinari, che descriviamo nei prossimi paragrafi, e ispirati al "paradigma della complessità".

⁶Molti sono i siti web lacunosi dal punto di vista dell'organizzazione dei contenuti; in particolare, in riferimento a siti destinati alla didattica della fisica, prenderemo come emblematico il sito Hyperphysics [50].

3.3 Criteri per la progettazione dell'antologia

3.3.1 Criteri per la scelta dei materiali

Nel capitolo 2 abbiamo analizzato la complessità del processo di insegnamento/apprendimento della fisica, individuando le “origini” di questa complessità nei processi cognitivi in gioco, nelle peculiarità strutturali della disciplina, nel rapporto fra la disciplina e altre aree del sapere umano. Parleremo a questo proposito di “dimensioni” (o di “prospettive”) relative all'insegnamento/apprendimento della fisica:

- Dimensione disciplinare-strutturale: relativa all'apprendere *la fisica*, in particolare vista come rete di concetti e teorie che “interagiscono” fra loro.
- Dimensione culturale-interdisciplinare: relativa all'apprendere *sulla fisica/intorno alla fisica*, vista come particolare prodotto culturale interconnesso con altre aree del sapere umano.
- Dimensione cognitiva: relativa all'apprendere *dalla fisica*, ovvero centrata sulla complessità dei processi cognitivi (potremmo dire che questa dimensione si riferisce all'apprendere ad apprendere).

I temi di fisica scelti per l'antologia dovranno pertanto prestarsi ad essere analizzati/affrontati da queste tre prospettive. In questo senso è possibile costruire attorno ad essi un ambiente di apprendimento complesso, in cui materiali didattici, che enfatizzano maggiormente l'una o l'altra delle tre dimensioni, confluiscono fra loro in un unico contesto di apprendimento, che ne consente l'estrinsecazione e l'interazione al tempo stesso.

Come abbiamo messo in evidenza nel capitolo 1, proposte didattiche focalizzate sullo sviluppo di una sola delle tre dimensioni si sono rivelate efficaci solo in parte. Ad esempio, il progetto PPC, che si proponeva di “mettere in evidenza i contenuti ‘culturali’ della scienza” [17], ha finito per “appiattirsi” su quella dimensione. Ancora, progetti come il KPC, in cui viene posta grande attenzione ad aspetti “strutturali” della fisica (relazioni fra concetti, idee trasversali rispetto ai domini della disciplina . . .), si sono spesso rivelati

poco attenti alle altre due dimensioni: in essi l'aspetto culturale della fisica è finito in secondo piano, o è stato totalmente trascurato; sul piano cognitivo, invece, l'importanza centrale dello studente nel processo di apprendimento è stata marginalizzata rispetto a quella della disciplina, vista come "panacea" delle difficoltà degli studenti (insomma, la logica era: "se 'strutturiamo bene' i contenuti, gli studenti impareranno sicuramente").

La necessità di sviluppare in modo equilibrato le tre dimensioni relative all'insegnamento/apprendimento della fisica, è già stata messa in evidenza in un Documento del Gruppo di Studio AIF-SIF [51], in cui si affermava, riguardo all'insegnamento della fisica:

Dovrà essere privilegiata la ricerca di nuclei disciplinari fondanti ai quali ancorare percorsi didattici culturalmente significativi e riflessioni sul significato culturale delle scienze, affinché emergano come discipline caratterizzate da una propria *struttura interna*, da specifici metodi di indagine e dall'uso di *particolari linguaggi*, nonché da una loro fecondità in una *dimensione culturale* più ampia di interconnessione con altre discipline.

Dimensione disciplinare Nel capitolo 2 abbiamo parlato di "struttura della fisica" a proposito dell'insieme di relazioni attraverso cui sono organizzati, in una rete complessa, i concetti, le teorie, i domini, che costituiscono il *corpus* del sapere disciplinare. Abbiamo anche illustrato come sia importante, da un punto di vista didattico, sottolineare gli aspetti strutturali della fisica⁷; infatti, diverse ricerche [4], [5] hanno provato che studenti che concepiscono la fisica come un insieme di idee fra loro disconnesse dimostrano anche:

- Scarsa capacità di comprensione delle idee centrali.
- Scarsa capacità di richiamare conoscenze acquisite.
- Scarse competenze di *problem solving*.

⁷Karplus intitola un suo articolo [15] proprio: "Educational aspects of the structure of physics"

Così, considereremo un particolare “tema” come possibile contesto adatto all’esplicitazione di aspetti strutturali della disciplina quando sarà possibile, relativamente alla sua descrizione in termini di grandezze fisiche, mettere in luce una rete di relazioni fra queste grandezze, significativa sia rispetto allo specifico tema in questione, sia, in generale, rispetto ad altre fenomenologie fisiche.

Proprio in questa direzione si è mosso il gruppo di ricerca in didattica della fisica del Weizmann Institute di Rehovot, che ha proposto, in una serie di articoli, diversi moduli didattici in cui l’analisi “sinottica” (cioè attraverso contesti fisici e domini diversi) di particolari concetti fisici consente di mettere in evidenza analogie, gerarchie, e, più in generale, relazioni fra di essi. Ad esempio, in un articolo dal titolo significativo “From fragmented knowledge to a knowledge structure: linking the domains of mechanics and electromagnetism” [5], si mostra come i concetti fisici di forza e di campo siano uno strumento efficace per proporre una visione più coerente ed unitaria di fenomeni che, in approcci didattici tradizionali, restano strettamente confinati nei rispettivi domini di pertinenza (meccanica ed elettromagnetismo). Più in generale, possiamo concludere che un tema o contesto è in grado di sottolineare aspetti strutturali della fisica quando:

- Si presta ad essere analizzato in modo trasversale rispetto a due o più domini. Ad esempio il caso appena citato relativo ai concetti di forza e campo, trasversali rispetto a meccanica ed elettromagnetismo. O ancora, il tema “fenomeni oscillatori”, che si presta ad inquadrare in uno schema fisico-matematico unitario sistemi meccanici (pendolo, oscillazioni di un sistema massa-molla ...) e di circuiti elettrici (circuito RLC, RC ...).
- Concetti o grandezze, che entrano in gioco nella descrizione fisica di quel contesto, sono andati incontro ad un’evoluzione storica particolarmente significativa. Ad esempio il concetto di “forza”, dalle concezioni di tipo aristotelico, alla concezione newtoniana, al suo significato in relazione a teorie di campo. O ancora, il concetto di particella, da concezioni atomistiche, alla visione quantistica (in cui “compaiono” onde

di materia nella descrizione di particelle), a visioni più recenti nelle quali entrano in gioco strumenti matematici piuttosto astratti, quali, ad esempio, la teoria dei gruppi.

- Si è configurato in modo netto un confronto fra modelli contrapposti. Ad esempio la disputa fra modello ondulatorio e modello corpuscolare della luce. O ancora, la discussione sull'energia vista come *impetus* o come *vis viva*.

Dimensione culturale Le interazioni della fisica con altre aree del sapere umano, e con contesti storico-sociali-tecnologici in genere, sono state, storicamente, e sono tuttora, molto forti, fino a condizionare, in una qualche misura, l'evoluzione stessa della disciplina. Si pensi al peso dell'*auctoritas* aristotelica come ostacolo allo sviluppo della scienza prima di Galileo; al ruolo delle tecnologie nella Seconda Guerra Mondiale e alla sua influenza sugli indirizzi di ricerca in fisica; all'importanza di certe convinzioni filosofiche ed epistemologiche nell'opera di molti grandi scienziati.

Considereremo un particolare tema di fisica come particolarmente significativo, relativamente alla dimensione culturale-interdisciplinare quando:

- La sua portata culturale, e le sue implicazioni, trascendono i confini della fisica. Ad esempio, l'immagine del mondo tratteggiata da Laplace, con il suo "demone", è un'immagine di ordine, predicibilità, stabilità, che deve sicuramente aver toccato "l'immaginario collettivo" dell'epoca. O ancora, il clamore destato dalla pubblicazione dei *Principia* di Newton, che, magari riproposti in versioni adattate ad un pubblico non specialistico, arrivarono ad essere argomento di discussione in molti salotti culturali dell'epoca.
- Il suo delinarsi e il suo sviluppo sono fortemente intrecciati a contesti storico-culturali-sociali ben definiti. Ad esempio, le profonde trasformazioni dei linguaggi della fisica agli inizi del Novecento, che procedono parallelamente a simili rivoluzioni nei linguaggi delle arti visive, della letteratura, della musica. O ancora, i possibili influssi sul pensiero e

sull'opera del giovane Einstein di un contesto sociale, la Berna del primo Novecento, in cui il problema della misura del tempo rivestiva un ruolo assai importante nella vita di un impiegato dell'Ufficio Brevetti.

Dimensione cognitiva I risultati di alcune indagini sperimentali, sulle modalità con cui gli studenti si rapportano con una data fenomenologia fisica, ci mostrano che anche contesti “piuttosto semplici”, come ad esempio il moto di un oscillatore armonico, possono essere fonte di confusione e difficoltà nella gestione cognitiva del processo da parte degli studenti. Ci riferiamo qui, ad esempio, alle ricerche di Parnafes e colleghi sui fenomeni oscillatori [52], in cui:

... the learning environment was designed in a way that provoked some confusions and puzzlements by selecting oscillators that are different and similar in certain ways, and by asking questions that brought out contrasting ways of looking at the phenomena.

Del resto, le difficoltà degli studenti nel “separare le variabili in gioco”, e nell'individuare e definire dei concetti fisici utili per una sua descrizione, erano già state messe in luce, molti decenni or sono, nei classici studi di Piaget e Inhelder [107], con particolare riferimento al contesto fisico del moto di un pendolo semplice.

Come viene mostrato nei lavori di ricerca appena citati, un tema o contesto è in grado di enfatizzare gli aspetti relativi alle dinamiche cognitive di apprendimento quando:

- E' possibile guardare alle fenomenologie ad esso riconducibili da una pluralità di punti di vista (“a tangle of alternative aspects on which to focus attention” [52]), non sempre facili da conciliare fra loro⁸.

⁸Come sottolinea Parnafes nel suo articolo [27]: “The complexity of experience gets ordered by scientific concepts. Graphical representations can possibly facilitate and scaffold the organization of experience by privileging certain classes of information (e.g., by highlighting particular aspects of a phenomenon, such as velocity, period, etc.)” In ogni caso, il processo che porta a porre ordine nell'esperienza, tramite l'introduzione di concetti fisici che fungono appunto come organizzatori della realtà, è un processo cognitivamente articolato.

3.3.2 Criteri per l'organizzazione e l'accesso ai materiali

Le ricerche più recenti nell'ambito delle scienze dell'apprendimento si sono caratterizzate, rispetto alle idee degli anni Ottanta e Novanta, per una maggiore consapevolezza rispetto ai limiti di approcci di indagine, e di progettazione di materiali educativi, troppo "rigidi". In un contributo pubblicato sul "Cambridge Handbook of the Learning Sciences", Confrey parla di "conceptual corridors" per l'apprendimento dei contenuti disciplinari e di "conceptual trajectories" attraverso questi corridoi ([22], pag.145):

The *conceptual corridor* is a theoretical construct describing the possible space to be navigated successfully to learn conceptual content. During any particular set of episodes of teaching, that is, a design experiment, students will traverse a particular *conceptual trajectory* through the corridor. Experimental design requires capturing data that document the nature of one or more particular trajectories and the variants. Teachers need a sense of what possible fruitful pathways a student can negotiate . . .

Questo modello fornisce importanti indicazioni operative per chi si occupa di progettazione didattica; in particolare, continua Confrey:

From this theoretical perspective, effective instruction depends on how well one engineers the conceptual corridor, such that the likelihood of fruitful trajectories is increased.

. . . Successful navigation of the conceptual corridor should produce conceptual tools that then assist a student in moving into and through the next corridor

La nostra proposta di un'antologia di fisica, sulla scorta di queste indicazioni, si caratterizza per la possibilità di molteplici accessi ai suoi contenuti, accessi identificabili con le *conceptual trajectories* di cui parla Confrey. In particolare, proponiamo di organizzare la navigazione secondo questi possibili schemi:

- Per tema. I materiali presenti nell'antologia sono raccolti attorno a temi e argomenti di fisica che possiamo considerare come particolarmente

significativi, in quanto in grado di consentire lo sviluppo attraverso le tre dimensioni di cui abbiamo parlato. Così, all'interno di uno specifico tema, ad esempio "il pendolo", sarà possibile costruire "conceptual trajectories" che si snodino attraverso materiali che vanno ad enfatizzare la dimensione disciplinare, quella culturale e quella cognitiva della fisica.

- Per dimensione. Può anche essere interessante decidere di concentrarsi su una particolare dimensione ed analizzarla attraverso diversi temi. Ad esempio possiamo pensare di voler studiare, relativamente alla dimensione disciplinare, il significato e le applicazioni delle leggi di conservazione. L'antologia dovrà consentire allora di esplorare questo argomento attraverso contesti diversi, ad esempio riferiti a temi di meccanica, di elettromagnetismo e così via. Una navigazione di questo tipo sembra poter attagliarsi bene alle diverse tipologie di studenti ("filosofo", "practitioner", "critico") di cui parla Galili in un recente articolo [27].

In questo schema in cui la didattica è vista come lo svilupparsi di traiettorie di apprendimento attraverso corridoi concettuali, anche il ruolo dell'insegnante, e il tipo di materiali di cui egli ha bisogno, sono soggetti, necessariamente, a delle trasformazioni ([22], pag.145):

teachers need guidance on documented ways to organize corridors,
not as rigid curricular sequences, but rather as intellectual spaces
through which students progress

In questo quadro, possiamo pensare di progettare un'ulteriore, possibile, modalità di esplorazione dei materiali dell'antologia, nella fattispecie una diversificazione delle modalità di accesso in base alla:

- Tipologia di utente. Le esigenze di insegnanti e studenti, rispetto ai materiali didattici, come visto, sono diverse. In un ambiente digitale, come in un sito internet, potrebbe essere particolarmente facile organizzare i contenuti in modo diverso a seconda che a fruirne siano insegnanti o studenti; in particolare, in una ipotetica "sezione insegnanti" del

nostro sito, potremmo inserire articoli di ricerca in didattica, forum di discussione fra insegnanti, transcript relativi a discussioni fra studenti.

Capitolo 4

L'analisi di un contesto fisico specifico: il moto del pendolo

In questo capitolo si prenderà in considerazione un possibile tema della nostra antologia, “il pendolo”, e si riporteranno i risultati di uno studio effettuato al fine di:

- Individuare aspetti (disciplinari, culturali, cognitivi) del tema in questione rilevanti dal punto di vista didattico
- Individuare articoli di ricerca, memorie originali, applet per PC etc., come strumenti significativi per l'approfondimento di tali aspetti
- Valutare se lo schema proposto per la scelta e l'organizzazione dei materiali dell'antologia, basato sulle tre dimensioni necessarie per la costruzione di un ambiente di apprendimento complesso, si presti effettivamente ad essere tradotto su un piano operativo, ed eventualmente in quali direzioni esso possa/debba essere modificato e/o raffinato.

Il pendolo pertanto, così come è stato analizzato e come sarà presentato in questo capitolo, costituisce, da una parte, un modo per dare concretezza a quanto detto nei precedenti capitoli, dall'altra, una sorta di “banco di prova” della nostra proposta didattica.

Abbiamo scelto di prendere in considerazione il tema del pendolo perché

ci sembra un buon esempio rispetto al problema sollevato nel primo capitolo, quello del *gap* fra i risultati e le proposte della ricerca in didattica e i libri di testo tradizionalmente adottati nelle scuole.

In questi ultimi, infatti, lo spazio dedicato alla trattazione di questo argomento è quasi sempre molto scarso. Per quanto riguarda l'analisi del pendolo come sistema fisico specifico, solitamente, ci si limita a proporre la formula che esprime il periodo delle oscillazioni libere di un pendolo semplice nel limite delle piccole oscillazioni, senza peraltro darne una derivazione, o comunque un'interpretazione qualitativa soddisfacente ([55], pag.4; 295). Il pendolo compare poi, incidentalmente, all'interno di altri problemi e contesti: il pendolo balistico nello studio delle leggi di conservazione, il pendolo come strumento per la determinazione della costante di accelerazione gravitazionale g , i pendoli a cui si possono sospendere due cariche elettriche che si respingono fra loro (una sorta di elettroscopio). La ricerca in didattica della fisica, invece, ha da tempo cominciato ad analizzare questo sistema fisico più nel dettaglio e da una pluralità di punti di vista, producendo una gran quantità di materiali, come ad esempio percorsi didattici, guide ad attività di laboratorio, animazioni al PC, che costituiscono, potenzialmente, una fonte preziosa per l'insegnamento di questo argomento.

Suddivideremo le nostre proposte in paragrafi diversi a seconda delle dimensioni che entrano in gioco. Le tre dimensioni, come anche i materiali ad esse relativi hanno tuttavia dei margini sfumati, e pertanto tale operazione di classificazione, spesso, sarà più una scelta finalizzata a rendere la nostra proposta il più possibile chiara che non qualcosa di rigido e assolutamente determinato. Del resto consideriamo la possibilità di connessioni/sovrapposizioni tra le diverse dimensioni come un'ulteriore conferma della necessità di pensare a materiali articolati anche nella forma, in grado di far risuonare fra di loro le diverse dimensioni relative all'insegnamento della fisica. Abbiamo discusso di questo, da un punto di vista generale, nei capitoli precedenti; adesso vedremo come le interrelazioni fra le diverse dimensioni entrano in gioco in un contesto fisico specifico.

In corrispondenza di ogni sezione sarà anche fornita una guida ai materia-

li reperibili e riportati in bibliografia, nella stessa forma che usiamo qui di seguito per dare indicazioni su aspetti generali del pendolo.

Guida ai riferimenti generali sul pendolo

- Il pendolo nei libri di testo scolastici tradizionali: [53].
L'analisi proposta in questo articolo si riferisce alle scuole di Grecia e di Cipro; tuttavia, il quadro generale delineato è ben indicativo del ruolo riservato a questo argomento nei testi di molti altri paesi.
- Risultati di ricerca in didattica relativi al pendolo: [54]-[57].
Il progetto internazionale IPP (International Pendulum Project) [54] è un progetto creato da un gruppo di ricerca australiano guidato da Michael R. Matthews, anche autore del libro “*Time for Science Education*” [55]. Due numeri speciali della rivista *Science & Education* sono stati interamente dedicati al pendolo [56]. Preziose sono poi le indicazioni bibliografiche raccolte da Colin Gauld in un articolo consultabile sul sito dell'IPP [57].

4.1 Dimensione disciplinare

4.1.1 Peculiarità fisiche dei fenomeni nonlineari

Uno dei temi trasversali rispetto ai domini della fisica di maggiore portata culturale è quello della linearità: linearità di relazioni algebriche, linearità di equazioni differenziali, linearità di spazi vettoriali. Tale linearità, per quanto non esplicitata nei tradizionali libri di testo, è il fondamento matematico di manifestazioni fisiche estremamente importanti, che vanno dallo studio delle forze elastiche (che modellizzano il comportamento delle classiche molle studiate in meccanica), fino al principio di sovrapposizione in meccanica quantistica, passando per i fenomeni ondulatori e l'ottica. Come riporta Omnès [94]: “Come premessa alla discussione delle sottigliezze della meccanica quantistica, molti autori concordano su ciò che in un certo senso la rende straordinariamente semplice: è una teoria lineare”. E proprio sfrut-

tando la linearità della teoria è stata recentemente formulata una proposta per l'insegnamento della meccanica quantistica a livello di scuola secondaria [92]. Ma da che cosa è caratterizzato il comportamento lineare di un sistema fisico? E da che cosa quello di un sistema nonlineare?

Il pendolo è un esempio particolarmente interessante per mostrare le differenze fenomenologiche fra queste due classi di sistemi. Per capire cosa caratterizza un sistema lineare può essere di grande aiuto anche capire che cosa caratterizza uno nonlineare: un modo infatti per illustrare proprietà fisiche può essere quello di analizzarle *per contrasto*, stabilendo quali sono i confini di validità di un modello, quali siano i suoi limiti di applicabilità.

Lavori recenti in didattica della fisica hanno mostrato come il pendolo possa essere studiato a vari livelli di difficoltà e da diversi punti di vista, così da poter ritenere ragionevole progettare attività rivolte anche a studenti di scuola secondaria superiore. Ad esempio, come discuteremo qui di seguito, anche un semplice pendolo forzato, di non troppo complicata “gestione” come apparato sperimentale, e il cui comportamento è retto da equazioni piuttosto semplici, esibisce comportamenti tipicamente nonlineari, emblematici di sistemi fisici ben più complessi.

I tradizionali libri di testo in adozione nelle scuole superiori, come detto, trattano il moto del pendolo esclusivamente nel regime di “piccole oscillazioni”: in tale regime la relazione fra la forza di richiamo e l'angolo di spostamento dalla posizione di equilibrio è di tipo lineare e tale è, di conseguenza, l'equazione differenziale del moto.

Un interessante modello in cui si va oltre tale limite, mostrando le peculiarità fisiche che discendono dalla nonlinearietà, è quello descritto da Weltner e colleghi in un articolo pubblicato su *Science & Education* [72]. Nel sistema studiato da questi ricercatori, proprio a causa della dipendenza del periodo di oscillazione (ovvero della frequenza propria del sistema) dall'ampiezza di oscillazione, sono possibili fenomeni “esotici” per un classico sistema lineare: sono possibili infatti due diversi modi di oscillazione stabili; e, inoltre, sono possibili transizioni discontinue fra questi modi, fenomeno noto con il termine di *jump effect*. L'analisi formale dettagliata di un simile sistema è fuori

dalla portata di studenti di scuola secondaria¹ ([89], pag.137); in ogni caso, il fenomeno si presta bene ad un'analisi qualitativa, che può essere condotta su un grafico in cui è rappresentata l'ampiezza delle oscillazioni forzate in funzione della frequenza della forzante. Tale grafico può essere proposto agli studenti come risultato di esperimenti condotti da altri; o, alternativamente, si può proporre un'attività di laboratorio su un apparato analogo a quello utilizzato da Weltner e colleghi, che però non è di semplice realizzazione. Sicuramente, un prerequisito per la trattazione di questo sistema è la conoscenza degli elementi fondamentali che intervengono nella descrizione di sistemi soggetti ad oscillazioni forzate [90]; tuttavia, rispetto ad altri sistemi nonlineari, e rispetto ad altri tipi di fenomenologie ad essi relative, l'analisi qui proposta non richiede l'introduzione di strumenti matematici particolarmente sofisticati (sezioni di Poincaré, attrattori ...), utilizzati in numerosi articoli di ricerca [74], [77].

La particolarità fisica dei fenomeni di bistabilità, che consideriamo di grande rilevanza culturale e didattica, consiste nel fatto che, diversamente da quanto accade per la maggioranza dei sistemi fisici "ordinari", in un sistema bistabile viene meno quella relazione di univocità fra due grandezze che caratterizza la maggior parte dei fenomeni fisici (relazione di Ohm tra potenziale elettrico e corrente, seconda legge di Newton tra forza e massa, relazione tra ampiezza di oscillazione e periodo in un fenomeno armonico ...). Questa caratteristica ci richiama subito alla mente il fenomeno dell'isteresi nei materiali ferromagnetici, che pertanto potrebbe essere richiamato in contiguità con la trattazione del presente sistema, proprio per mettere bene in chiaro questa dicotomia univocità/non univocità di relazioni tra grandezze fisiche.

4.1.2 Sul ruolo delle approssimazioni in fisica

Educare gli studenti al processo di schematizzazione/idealizzazione tipico della fisica è un problema tutt'altro che banale, come documentato da molta letteratura. La fisica che si studia nei libri di testo propone mondi in

¹Può, forse, essere affrontata in una classe che abbia una solida preparazione in analisi matematica; tuttavia, la gestione di difficoltà derivanti sia dalla matematica, sia da un contesto fisico "particolare", rischia di andare oltre le reali possibilità degli studenti.

cui i pendoli hanno corde inestensibili, prive di massa, e compiono sempre piccole oscillazioni; le carrucole sono sempre perfettamente lisce; i carrelli si muovono senza attrito; e gli oggetti cadono in assenza d'aria. In questo mondo il pendolo oscilla in modo isocrono indefinitamente. Ma questo rimane, per gli studenti, un mondo finto, tutt'al più riproducibile in asettici laboratori di fisica, lontani dalla realtà e dai fenomeni di cui si fa quotidianamente esperienza. Aiutare gli studenti a creare connessioni tra ciò che vedono e percepiscono e ciò che la fisica formalizza significa dare significato fisico e culturale a ciò che solitamente viene chiamato "approssimare", e soprattutto significa capire cosa è in fisica un modello matematico.

Del resto, sebbene molti testi tradizionali non lo mettano in luce in modo sufficientemente chiaro, nessun pendolo reale compie oscillazioni esattamente isocrone; sono isocrone, casomai, le soluzioni matematiche di un modello in cui $\sin \theta$ è stato approssimato con θ nell'equazione del moto (θ è l'angolo di oscillazione rispetto alla posizione di equilibrio), cioè quando siamo nel regime di "piccole oscillazioni". Ma cosa significa "piccole oscillazioni"? Quanto "piccole" devono essere queste oscillazioni affinché tale approssimazione sia "valida"? Nel sollevare queste domande, e nel cercare di darvi delle risposte, si vanno ad affrontare questioni metodologiche fondamentali della fisica².

L'analisi del periodo di oscillazione in funzione dell'angolo massimo di oscillazione può essere affrontata da un punto di vista teorico, da un punto di vista sperimentale, o, meglio, da entrambi.

Ricavare la formula analitica che esprime $T(\theta_0)$ non è banale, anche perché è un problema che richiede strumenti dell'analisi che soltanto classi di speciali licei sperimentali arrivano a trattare nel corso dell'ultimo anno (calcolo di integrali, sviluppi in serie di Taylor, equazioni differenziali). Poiché comunque riteniamo sia un esercizio molto interessante dal punto di vista fisico-matematico, lo riproponiamo nel dettaglio nell'Appendice A³, pensando che

²Sotto questo aspetto, che tocca il ruolo dei modelli in fisica, e del loro rapporto con la realtà che essi si propongono di descrivere, è evidente il collegamento con aspetti epistemologici, e insomma con quella che abbiamo chiamato "dimensione culturale".

³Anche a questo proposito potremmo parlare, perché no, di dimensione "culturale" della fisica: stiamo infatti utilizzando in modo esplicito strumenti matematici assai "sostanziosi",

possa essere materiale rivolto a studenti particolarmente interessati.

Lo studio sperimentale del moto per grandi angoli, invece, può essere alla portata di molti più studenti. Tale studio può essere infatti realizzato sfruttando le potenzialità delle nuove tecnologie di acquisizione, che consentono una misura diretta del periodo o una misura della posizione angolare in funzione del tempo sufficientemente precisa per poter mettere in evidenza la dipendenza del periodo dall'ampiezza di oscillazione [61]-[64].

Confrontando i dati raccolti sperimentalmente con quelli previsti dalla formula teorica (ricavata secondo il procedimento indicato in appendice, o semplicemente proposta agli studenti senza dimostrazione), è possibile portare avanti una discussione sul senso delle approssimazioni in fisica [82], rispondendo a domande del tipo: “Quale significato fisico ha la formula completa? Fino a che ordine dello sviluppo (livello di approssimazione) è necessario/ci interessa/ha senso andare avanti? Perché? Che cosa determina la scelta del livello di approssimazione che ci interessa?”. In questo modo si può mettere in evidenza che “an approximation should never yield unmeasurable information” [82]. Come sottolinea Anderson nel suo articolo, il pendolo è un sistema fisico che si presta particolarmente bene a questo tipo di riflessioni, dal momento che, anche utilizzando apparati sperimentali piuttosto semplici, è possibile ottenere dei livelli di precisione che richiedono l'utilizzo di correzioni alla formula “standard” $T = 2\pi\sqrt{l/g}$; e non è difficile apportare migliorie tali che richiedono di considerare termini ulteriori nello sviluppo in serie dell'espressione del periodo al fine di ottenere accordo fra previsione teorica e dati sperimentali. Infine, è possibile considerare ulteriori raffinamenti del modello, ad esempio stimando l'effetto degli attriti, e ricavare così formule ancora più accurate da confrontare con i dati sperimentali.

La riflessione sul significato e le peculiarità di questo gioco dialettico di adattamento tra i fatti e le forme elaborate dalla fisica per capirli, è ovviamente trasversale a tutta la fisica. Questo gioco può trovare manifestazioni particolarmente interessanti da un punto di vista didattico qualora sia discusso

e stiamo perciò esplorando le relazioni fra la fisica e un'altra disciplina, la matematica, che tradizionalmente e “costituzionalmente” è separata dalla fisica da una linea molto sottile.

ed approfondito in riferimento a tappe fondamentali nella costruzione di un modo di guardare per modelli in fisica: ci riferiamo ad esempio, al modello di gas perfetto a confronto con il modello di Van der Waals, alle resistenze ohmiche a confronto con le resistenze nonlineari, e così via. Tale discorso, inoltre, se inserito nel contesto più ampio del processo dialettico fra teoria ed esperimento, può essere approfondito qualora si introduca la fisica moderna (relatività e meccanica quantistica) a partire dalla necessità di affrontare “problemi di confine” tra diversi modelli presenti nella fisica classica ad inizio Novecento [92].

4.1.3 La descrizione *energetica* e quella *spazio-temporale*

I tradizionali libri di testo sono caratterizzati da una presentazione degli argomenti rigidamente sequenziale, che è spesso di ostacolo all’eplicitazione delle relazioni fra le grandezze fisiche o fra i metodi della fisica, che risultano “confinati” nei capitoli o paragrafi in cui questi vengono trattati⁴.

In particolare, nel caso della meccanica, è molto forte la confusione fra gli *scopi* di quest’area della fisica e i *metodi* che vengono impiegati nella soluzione dei problemi. Lo scopo “principe” della meccanica è quello di “prevedere lo stato fisico del sistema ad ogni istante di tempo futuro, assegnato lo stato all’istante di tempo attuale, e le leggi di forza che ne determinano l’evoluzione”. Esso, in particolare, si articola nei seguenti: “descrivere geometricamente la traiettoria percorsa dal punto materiale (o dai punti) che costituisce il sistema”; “descrivere come questa traiettoria viene percorsa nel tempo (legge oraria)”; “prevedere lo stato finale a seguito di un processo ‘impulsivo’, come nel caso di urti”. I principali metodi per risolvere tali problemi sono: la seconda legge di Newton; le leggi di conservazione (impulso, energia, momento angolare).

⁴Sentir dire ad uno studente frasi del tipo: “Ma l’energia è prima o dopo l’impulso?”; “Questo problema è sull’energia?” è piuttosto disarmante, ma come sa chi insegna, non è infrequente. Queste ipotetiche parole pronunciate da (non troppo ipotetici) studenti sono un chiaro segnale delle conseguenze dell’“approccio per compartimenti stagni” dell’insegnamento tradizionale.

Proprio per chiarire la distinzione fra gli scopi e i metodi della meccanica, pensiamo possa essere utile analizzare uno stesso fenomeno da più punti di vista.

In particolare, nel caso del pendolo, può essere interessante mettere a confronto una descrizione *spazio-temporale*, in cui si analizza l'evoluzione temporale delle principali variabili cinematiche (posizione, velocità, accelerazione), ed una descrizione di tipo *energetico*, in cui, analizzando grafici di $T(x)$, $U(x)$, $E(x)$ ⁵. Nella seconda descrizione la variabile tempo “scompare”, mentre è più immediata la descrizione di aspetti qualitativi del moto (limitatezza, relazione tra ampiezza del moto ed energia del sistema . . .), di evidente interesse anche in altri sistemi fisici diversi dal pendolo⁶ (moto kepleriano, e in generale moti descrivibili tramite potenziali unidimensionali) [83], [84], [89].

Un confronto fra un'analisi di tipo spazio-temporale ed una di tipo energetico si presta ad evidenziare aspetti relativi alla struttura della disciplina (v. capitolo 3.3.1) per almeno due motivi:

- Concetti come l'energia e temi come i principi di conservazione sono strutturalmente trasversali rispetto a diversi domini della fisica, nel senso che acquistano significato o val la pena insegnarli a scuola *proprio in quanto applicabili a diversi contesti*. Detto in altre parole, questi concetti richiedono, per essere compresi, l'analisi della loro applicabilità in diversi contesti [4], [93].
- Il confronto stesso fra le due tipologie di descrizione è un tema longitudinale rispetto all'evoluzione della fisica. Basti infatti pensare al fatto che l'importanza relativa dei due tipi di descrizione è notevolmente cambiata nello svilupparsi della meccanica, parallelamente con lo spostamento dell'attenzione dalla “forza” alle grandezze fisiche “azione” ed “energia”, testimoniata dal passaggio dal formalismo newtoniano a quello lagrangiano e hamiltoniano. In particolare, con l'avvento della meccanica quantistica, la grandezza “azione” diventa centrale in quanto è proprio

⁵Evidentemente con “T”, “U”, “E”, indichiamo rispettivamente l'energia cinetica, quella potenziale, quella meccanica.

⁶Una descrizione di tipo qualitativo basata su considerazioni energetiche è interessante in particolar modo in sistemi non trattabili analiticamente in modo esatto.

essa ad essere soggetta *in primis* a delle condizioni di quantizzazione. Il rapporto fra la descrizione spazio-temporale e quella energetica, d'altro canto, subisce un'evoluzione significativa, dal momento che questi due tipi di descrizione sono, in meccanica quantistica, inconciliabili, come espresso dal principio di complementarità di Bohr e sintetizzato nelle relazioni di indeterminazione di Heisenberg [87].

4.1.4 Il pendolo e la descrizione dei fenomeni oscillatori

La descrizione del moto del pendolo come prototipo di fenomeno oscillatorio è un altro aspetto che rende il pendolo un tema significativo per la sua valenza disciplinare, vista la sua potenziale trasversalità rispetto ai domini della fisica.

Le considerazioni che possono essere fatte relativamente alla descrizione di diverse “tipologie di pendolo” (pendolo forzato, pendolo soggetto ad oscillazioni libere, pendolo smorzato) possono essere riportate, *mutatis mutandis*, alla descrizione dei circuiti elettrici elementari (RLC forzato, LC, RLC). L'analogia che sussiste fra queste due classi di sistemi è profonda, e può essere messa in luce da diversi punti di vista, a seconda degli strumenti matematici di cui è in possesso la classe, o a seconda degli obiettivi specifici dell'insegnante.

Da un punto di vista più elementare, tale analogia potrebbe essere suggerita agli studenti da un semplice confronto di grafici che rappresentano le grandezze di principale interesse nei due sistemi: lo spostamento angolare nel caso del pendolo e la corrente elettrica (o, alternativamente, la quantità di carica) nel caso dei circuiti. In questo modo si possono stabilire le seguenti corrispondenze: pendolo libero \leftrightarrow circuito LC; pendolo smorzato \leftrightarrow circuito RLC . . .

Si può poi passare ad una descrizione qualitativa dei processi che avvengono nei due tipi di sistemi e mostrare le profonde analogie che tra essi sussistono. Nelle oscillazioni di un pendolo libero si ha continua conversione di energia potenziale in energia cinetica e viceversa; analogamente, in un circuito LC, si ha un continua conversione fra energia magnetica accumulata nel campo

presente nel solenoide ed energia elettrica del campo elettrico presente tra le armature del condensatore. Nel caso si prenda in considerazione la resistenza dell'aria, il pendolo libero sarà soggetto a smorzamento: sarà ancora presente lo scambio di energia fra i due “modi”, come descritto sopra, ma in più si avrà dissipazione di energia per attrito; un processo analogo avverrà in un circuito RLC in cui il calore sarà dissipato nella resistenza elettrica per effetto Joule. Quando sia poi introdotto un meccanismo forzante, si avrà un ingresso di energia nel sistema, con modalità simili nel caso meccanico del pendolo e in quello elettrico dei circuiti.

L'analogia può essere spinta oltre, fino ad istituire dei collegamenti fra le grandezze meccaniche e quelle elettriche (massa \leftrightarrow induttanza; posizione \leftrightarrow carica elettrica . . .); e, ancora più oltre, chiamando in causa anche grandezze idrauliche o acustiche [78].

L'analogia, se usata in modo appropriato, è un potente strumento sia per la scienza, che per il suo insegnamento [79], in quanto in grado di illustrare relazioni fra concetti appartenenti a domini fenomenologicamente distanti, e di consentire la costruzione dei concetti stessi ad un livello “più elevato”, di cui i vari esempi particolari sono diverse “proiezioni” [5].

Guida ai materiali

- Relazione tra periodo e angolo di oscillazione: [58]-[71].

I riferimenti mostrano che la relazione fra ampiezza massima di oscillazione e periodo è stata oggetto di studi che vanno almeno dagli anni Sessanta fino ad oggi. In molti di questi lavori l'approccio è marcatamente sperimentale, nel senso che lo scopo è quello di realizzare apparati in grado di controllare in modo sempre più preciso la corrispondenza fra modello teorico e risultati sperimentali. Per quanto riguarda il calcolo teorico della dipendenza del periodo, il testo di Marion e Thornton [71] è il riferimento principale.

- Nonlinearità nel moto del pendolo: [72]-[73].

Di particolare interesse didattico questi due lavori in cui si mostrano le principali peculiarità fisiche dei fenomeni nonlineari, con un occhio

di riguardo alla didattica della disciplina. Altri tipi di pendolo manifestano un comportamento di tipo caotico ([71], pag.163): pendoli accoppiati, doppio pendolo, pendolo in campo magnetico ...; tuttavia, l'esempio proposto da Weltner ci sembra essere il miglior compromesso tra gestibilità cognitiva del fenomeno e ricchezza dei risultati illustrati.

- Il pendolo nella ricerca in fisica: [74]-[77].
Con il fiorire degli studi sui fenomeni nonlineari, il pendolo ha conosciuto, per così dire, una seconda giovinezza. Numerosi sono i lavori di ricerca in cui si affrontano ad un livello specialistico le molte sfaccettature di questo sistema: lavori correlati alla teoria del controllo dei sistemi, alla teoria dei sistemi caotici ...
- L'analogia tra tipi di pendolo e circuiti elettrici: [78]-[81].
Nel classico manuale di fisica di Berkeley [81] è portata avanti in modo particolarmente coerente ed illuminante l'analogia tra sistemi oscillanti di tipo meccanico e circuiti elettrici. I riferimenti [79], [80] analizzano il procedimento dell'analogia più in generale, da un punto di vista cognitivo [80], e in relazione alla fisica e al suo insegnamento [79].
- Il pendolo e l'approssimazione in fisica: [82].
Non sono molti i lavori in cui si discute in modo così esplicito il problema delle approssimazioni in fisica, che spesso, anche nei libri di testo, è molto trascurato, e demandato all'opera del singolo insegnante.
- Studio di moti in potenziali unidimensionali: [83]-[84].
Il pendolo semplice è un sistema unidimensionale in cui l'energia si conserva e la cui equazione del moto, pertanto, può essere, almeno formalmente, integrata per quadratura. Questo procedimento si può applicare a molti altri sistemi unidimensionali, come viene illustrato nei riferimenti qui citati.
- Descrizione spazio-temporale vs descrizione energetica e meccanica quantistica: [85]-[87].
Come abbiamo sottolineato in 4.1.3, la relazione fra descrizione spazio-

temporale e descrizione energetica di un sistema fisico diventa particolarmente interessante in relazione al principio di complementarità e alle relazioni di indeterminazione. Nei riferimenti qui citati è possibile approfondire più nel dettaglio questi problemi.

- Miscellanea: [88]-[94].

Una serie di riferimenti di possibile interesse in relazione a diversi aspetti collegati al tema del pendolo.

4.2 Dimensione culturale

4.2.1 La misura del tempo e l'orologio a pendolo

Non di rado, la ricerca “pura” si intreccia con quella “applicata” e con la tecnologia. Nel caso del pendolo, questo intreccio è molto forte e passa attraverso il problema pratico della misurazione del tempo; l'introduzione degli orologi a pendolo, in versioni sempre più raffinate, ha segnato un forte balzo in avanti in questo ambito tecnologico [55]. Le riflessioni teoriche sull'isocronismo delle oscillazioni hanno suggerito di usare tale sistema come “campione di misura” per l'unità di tempo. Altrettanto importanti sono stati gli stimoli forniti alla riflessione teorica da problemi pratici e all'apparenza squisitamente tecnici: la ricerca di una curva isocrona, trovata poi da Huygens nella cicloide, è strettamente collegata all'indagine tecnica dedita alla costruzione di orologi sempre più precisi. Il tema del rapporto fra il pendolo e il problema della misura del tempo, insomma, ben si presta ad un'analisi che investe quella che abbiamo chiamato “dimensione culturale” della fisica.

Il tema del tempo e della sua misura suggerisce poi un possibile percorso “per dimensioni” attraverso altri contesti fisici, potenziali argomenti della nostra antologia. Pensiamo in particolare ad un percorso che tratti dell'evoluzione degli strumenti di misura del tempo attraverso i secoli, dalle meridiane dell'antichità ai moderni orologi atomici.

4.2.2 Galileo, il pendolo, e la nascita della scienza moderna

Le riflessioni sul moto del pendolo semplice occupano un posto molto importante nell'opera di Galileo. Esse richiamano a più riprese altre riflessioni e risultati ottenuti dal grande scienziato pisano, in particolare quelli in relazione al moto sul piano inclinato (che, a loro volta, sono fitti di riferimenti a risultati di tipo geometrico). Ma, soprattutto, le riflessioni di Galileo sul pendolo si inseriscono in modo organico all'interno del "metodo", quello galileiano, che sarebbe diventato il metodo della scienza moderna. In particolare, in questi lavori, Galileo deriva i principali risultati cercando di cogliere l'essenza del fenomeno fisico, astraendo dagli "accidenti" ed "impedimenti" che erano l'ostacolo che la filosofia della natura aristotelica aveva fino allora opposto alla nascita della scienza in senso moderno. E' evidente perciò quale sia la valenza culturale di una riflessione sull'opera e sul metodo galileiano, in quanto metodo della scienza moderna. Tale metodo, peraltro, è ricco di sfumature interessanti da un punto di vista epistemologico, e non è da opporre in modo semplicisticamente manicheo a quello aristotelico. Se, infatti, proprio grazie ad esso, Galileo ottenne risultati molto importanti, è proprio a causa di un suo utilizzo poco ponderato che egli erroneamente attribuì ad "accidenti" le discrepanze fra i dati sperimentali e la sua teoria che prevedeva l'esatto isocronismo (anche per grandi angoli) delle oscillazioni del pendolo ([55], pag.247).

Gli studi di Galileo sul pendolo sono interessanti da una molteplicità di punti di vista. Particolarmente interessante è il tema della retorica scientifica di Galileo e della fisica più in generale. Da un lato, Galileo è considerato, oltre che grande figura di scienziato, un classico della letteratura scientifica, per lo stile chiaro, pulito ed elegante della sua argomentazione, al punto che passi della sua opera (su tutti il classico brano del "gran navilio", in cui si introduce il concetto di relatività), sono inseriti in diverse antologie di letteratura italiana. Dall'altro, il suo stile merita di essere analizzato in più stretta connessione con la sua riflessione e i suoi risultati di scienziato. Particolarmente illuminante su tale connessione è il carteggio con il suo protettore,

l'aristotelico Guidubaldo Del Monte, con il quale si confrontò su questioni che riguardavano, nello specifico, il moto del pendolo, ma che tuttavia erano cruciali in relazione alla disputa fra Galileo e la scuola aristotelica nei suoi aspetti più profondi. In una famosa lettera del 1602 (v. [55], pag.102), Galileo afferma che due pendoli, fatti oscillare a partire da angoli iniziali diversi, si manterranno isocroni per 500 o anche 1000 oscillazioni. Questa affermazione suona di primo acchito falsa, per diversi motivi: come si è già detto (e mostrato), l'isocronismo, che a rigore vale soltanto come caratteristica del modello matematico del pendolo per piccoli angoli, non sussiste per un pendolo reale che oscilla a grandi angoli. Perdi più, tale affermazione non è nemmeno "plausibile": Galileo infatti non può aver visto un pendolo compiere 500 o 1000 oscillazioni, dal momento che gli strumenti a sua disposizione sarebbero andati incontro a smorzamenti per attrito in un breve arco di tempo, e, molto probabilmente, non sarebbero stati in grado di compiere nemmeno 100 oscillazioni prima di fermarsi⁷.

E' su questi aspetti che Guidubaldo, all'idea dell'isocronismo proposta da Galileo, si ribella con un'argomentazione che riteneva definitiva e indiscutibile, perché basata su "puri" e "crudi" dati osservativi [100]:

Del Monte kept saying to Galileo that the pendulums he tested were not isochronic: cork and brass ones did not have the same period, all pendulums came to a halt within two or three dozen oscillations. Galileo kept replying that these results applied only to actual pendulums, and that if ideal ones were studied (were friction, air resistance, and the weight of the string were eliminated), then they would indeed be found to be isochronic. Galileo arrived at his law of isochrony by mathematical (specifically geometrical) calculation. Del Monte asserted that the mathematics were fine, but it was not physics: physics was to be about the real world, not an ideal one.

⁷Questo fatto è stato messo in evidenza in diverse ricostruzioni storiche dell'esperimento di Galileo [102].

Cionondimeno, Galileo non esita ad affermare l'isocronismo del pendolo e, nonostante le critiche, affermazioni di questo tipo hanno rappresentato le fondamenta della fisica moderna rispetto al pensiero aristotelico di Guidubaldo. Infatti gli argomenti di Galileo nella celebre disputa sono emblematici del diverso modo di osservare e intendere il ruolo della matematica da parte di un pioniere della nuova fisica, che concilia "sensate esperienze e certe dimostrazioni", rispetto ad un esponente della vecchia visione aristotelica empirica. Come dice Koyré [105], "Fare fisica nel *nostro* senso del termine - non nel senso che Aristotele dava a questo vocabolo - vuol dire applicare al reale le nozioni rigide, esatte e precise della matematica e, in primo luogo, della geometria. Impresa paradossale, se mai ve ne furono, poiché la realtà, quella della vita quotidiana in mezzo alla quale viviamo e stiamo, non è matematica. E neppure matematizzabile. Essa è il dominio del movente, dell'impreciso, del 'più o meno', del 'pressapoco'. [...] Ora, è attraverso lo strumento di misura che l'idea dell'esattezza prende possesso di questo mondo, e che il mondo della precisione arriva a sostituirsi al mondo del 'pressapoco' ".

La fisica nel nostro senso del termine nasce costituzionalmente come interfaccia delicatissima tra il mondo reale pieno di *impedimenta* e il mondo vuoto astratto della matematica: un'interfaccia delicatissima che è importante far cogliere fin da subito agli studenti per farli entrare in modo consapevole nel gioco della modellizzazione tipico della fisica, dove il processo di schematizzazione e di approssimazione (come già sottolineato precedentemente) sia percepito come costitutivo della conoscenza e non come un limite o una manchevolezza, quale lo pensava Guidubaldo e, con lui, il cartografo di Borges nel celebre brano de *L'artefice* ironicamente intitolato "Sul rigore della scienza" [106]:

In quell'Impero, l'Arte della Cartografia raggiunse tale Perfezione che la mappa d'una sola Provincia occupava tutta una Città, e la mappa dell'impero, tutta una Provincia. Col tempo, codeste Mappe Smisurate non soddisfecero e i Collegi dei Cartografi er-
essero una Mappa dell'Impero, che uguagliava in grandezza l'Impero e coincideva puntualmente con esso. Meno Dedite allo Studio della Cartografia, le Generazioni Successive compresero che

quella vasta Mappa era Inutile e non senza Empietà la abbandonarono alle Inclemenze del Sole e degl'Inverni. Nei deserti dell'Ovest giacciono abbandonate le Rovine della Mappa, abitate da Animali e Mendicanti; in tutto il Paese non rimane altra reliquia della Disciplina Geografica.

Riprendendo il punto accennato prima, sicuramente può meritare un approfondimento e/o essere un altro dei fili di una navigazione “per dimensione”, il ruolo delle scelte retoriche nella scienza, soprattutto nell'affermazione delle nuove teorie, in cui i confini fra “quello che si dice”, e “come lo si dice” sono spesso assai sfumati. Si pensi, ad esempio, al rapporto fra l'opera di Lorentz e quella di Einstein riguardo la teoria della relatività ristretta: sebbene Lorentz avesse già derivato praticamente tutte le formule che sarebbero poi apparse nei lavori successivi di Einstein, il quadro concettuale in cui egli le propone è profondamente diverso da quello, innovativo, delineato da Einstein. Sicuramente, in quest'ultimo scienziato, c'è una consapevolezza più profonda della fisica che “sta dietro a tali formule”; ma, probabilmente, anche lo stile particolarmente limpido con cui egli espresse certe idee contribuì a farlo definire come il “fondatore della relatività”, a scapito di scienziati, come Lorentz stesso, o come il francese Henri Poincaré, che pure erano giunti a risultati non troppo distanti da quelli conseguiti dal grande fisico tedesco.

Guida alla bibliografia

- Il pendolo nell'opera di Galileo: [95]-[103].
L'opera di Galileo è un ottimo punto di partenza per un'analisi della storia degli studi sul pendolo. Tuttavia, l'utilizzo di testi originali in chiave didattica, in questo caso più che in altri, richiede un'attenta riflessione su questi testi, magari aiutata da articoli di critica e di approfondimento: nel cercare di ricostruire i fili del ragionamento di Galileo, ripercorrendo i numerosi richiami attraverso brani della sua opera, si deve portare avanti un'operazione filologica molto attenta, per evitare di proporre ricostruzioni falsate o inattendibili da un punto di vista storico (v. [55], pag.110).

Molte interessanti proposte sono state fatte riguardo la ricostruzione in laboratorio di apparati sperimentali classici ([55], pag.306), [102].

- Il pendolo e il problema della longitudine: [104].

Un tema strettamente collegato a quello della misura del tempo tramite orologi a pendolo è quello della determinazione della longitudine, trattato ampiamente da Matthews ([55], cap.2), e ancor più nel classico lavoro di Dava Sobel [104].

- Aspetti filosofici ed epistemologici del moto del pendolo: [55].

Per quanto riguarda aspetti filosofici ed epistemologici correlati con il tema del pendolo, rimandiamo nuovamente a [55], in particolare ai capitoli 9 e 10.

4.3 Dimensione cognitiva

4.3.1 Le ricerche di Piaget sulla separazione delle variabili

Lo studio della dipendenza del periodo di oscillazione di un pendolo semplice dalle variabili che descrivono il sistema è stato oggetto di ormai classiche ricerche di Piaget sull'evoluzione degli stadi cognitivi, dal bambino all'adolescente. Nel loro testo "De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent" [107], Piaget e Inhelder analizzano la formazione delle strutture logiche nel passaggio dall'età infantile a quella adolescenziale, suddividendo questo percorso di sviluppo in vari stadi, ciascuno caratterizzato dall'acquisizione di una particolare abilità cognitiva. In particolare, ciò che viene chiesto a bambini ed adolescenti è di studiare la dipendenza del periodo di oscillazione dai seguenti fattori: la lunghezza, il peso, l'ampiezza di oscillazione, lo slancio impresso dal soggetto stesso. Il pendolo si presta bene come strumento per analizzare la capacità del soggetto di dissociare i vari fattori ed escludere quelli "inoperanti", ovvero quelli che non hanno influenza sul fenomeno o

sulla grandezza (il periodo in questo caso) in questione.

Per Piaget e Inhelder, è possibile individuare quattro stadi di evoluzione, che vanno dall'età di 6-7 anni a quella di 15 anni circa.

In una prima fase, il soggetto “non perviene né ad una lettura esatta dell'esperienza, né ad evitare delle espressioni contraddittorie tra loro. Soprattutto si constata come intervenga continuamente nei movimenti del pendolo senza poter dissociare lo slancio che imprime dai movimenti indipendenti dalle sue azioni”. Successivamente (8-10 anni circa), “i soggetti del secondo stadio sono capaci di seriare le lunghezze, le altezze, etc., e di giudicare obiettivamente le differenze di frequenza: cosicché possono giungere a stabilire delle corrispondenze esatte dal punto di vista dell'esperienza bruta, ma non arrivano a dissociare i fattori, ad eccezione dello slancio”. Fra i 12 e i 13 anni circa, il soggetto “non sa ancora provocare egli stesso in modo sistematico queste combinazioni; in altri termini le operazioni formali sono già abbastanza delineate per permettere certe inferenze, ma non ancora abbastanza organizzate per poter funzionare come degli schemi anticipatori”. Infine, intorno ai 15 anni, i soggetti giungono “a dissociare tutti i fattori in gioco con il metodo consistente nel farne variare uno solo alla volta e nel mantenere ‘ogni altra cosa invariata’ ”. Insomma, alla fine di questo processo evolutivo, gli studenti giungono a possedere il metodo “*ceteris paribus*”, così centrale nel processo di costruzione ed evoluzione del sapere scientifico.

Nonostante le tante critiche rivolte a Piaget, in relazione soprattutto all'ineluttabilità del passaggio attraverso i vari stadi e alla corrispondenza tra questi e le fasce di età (oggi più che mai non rispettati nei processi di crescita dei bambini), molti aspetti relativi ai risultati di queste ricerche costituiscono ancora un'ottima guida per l'impostazione di attività di laboratorio riguardanti il pendolo (ma anche applicabili ad altri temi). Si pensi infatti ai tradizionali approcci, in cui quasi sempre si propone agli studenti un problema sulla falsariga del seguente: “Studiare la dipendenza del periodo dalla lunghezza del filo”. Si pensi a simili approcci e li si confronti con possibili percorsi in cui l'insegnante, seguendo le orme dell'opera di Piaget, cerca di far mettere in evidenza agli studenti, in modo autonomo, i fattori in gioco nella determinazione del periodo del pendolo. E' evidente allora quanto, anche un

esperimento all'apparenza "semplice", sia ricco da un punto di vista cognitivo, ed è proprio tale ricchezza che l'insegnante deve cercare di far emergere e di gestire assieme agli studenti, guidandoli da uno stato di "initial hyper-richness" ad uno stato di "final hyper-richness", per riprendere dei termini discussi nel capitolo 2.2.1.

4.3.2 Un solo sistema, molti tipi di descrizioni

Come sottolineato nel capitolo 2.2, una delle fonti di complessità di un dato contesto fisico è la pluralità di prospettive da cui si può guardare ad esso. Molteplici sono anche le possibili tipologie di descrizione che si possono dare del sistema e della sua evoluzione temporale. Se ne può dare una elementare descrizione verbale, come la seguente: "La massa parte da una certa altezza, poi scende fino ad un'altezza minima, poi risale; poi, di nuovo, scende; e così via". Si può arrivare, "all'atro estremo", ad esempio descrivendo il moto del pendolo nel formalismo della meccanica hamiltoniana. Sono possibili anche numerose descrizioni "intermedie", sia di tipo verbale, che grafico, che formale-analitico.

Troppo spesso, nella pratica didattica tradizionale, si trascura la possibilità di attivare questi diversi "registri", e si finisce per descrivere un fenomeno in un solo modo, e ad un unico livello di profondità. La ricerca in didattica ha mostrato che, al contrario, l'interazione fra diverse tipologie di descrizione è un ottimo sussidio ad una più profonda comprensione del fenomeno studiato. In particolare, secondo noi, nel caso del pendolo, può essere significativo far analizzare agli studenti rappresentazioni cartesiane di coppie di grandezze fisiche diverse, prendendo in considerazione anche scelte inusuali rispetto a quelle classicamente adottate: $v(x)$, $a(x)$, $E(t)$. . . Lo sforzo cognitivo richiesto agli studenti nella "lettura ed interpretazione" di questi grafici è tutt'altro che banale, e proprio tale sforzo può essere il punto di partenza di una maggiore consapevolezza e padronanza sia del fenomeno fisico specifico, sia delle grandezze fisiche (e delle loro rappresentazioni) attraverso cui se ne può dare una descrizione. In particolare, in questo modo, è possibile anche affrontare esplicitamente problemi noti alla ricerca, come la confusione che molti studen-

ti fanno tra un grafico di tipo spazio-temporale e grafici che rappresentano la traiettoria del moto [108]. E' possibile poi contribuire ulteriormente al processo di acquisizione di conoscenze robuste affiancando, alle suddette descrizioni, animazioni che riproducono il moto del pendolo su PC, e pongono esplicitamente a confronto tipologie diverse di rappresentazioni.

4.3.3 La riflessione di Parnafes e la costruzione dei concetti scientifici

Nel paragrafo precedente abbiamo parlato delle relazioni che esistono tra le grandezze fisiche utilizzabili nella descrizione del moto di un pendolo. Tuttavia, come sottolineato in 2.2.1, la ricerca in didattica ha mostrato come anche la definizione di quelle grandezze, prima ancora delle relazioni che fra esse sussistono, sia un processo cognitivo complesso. Proprio il contesto del pendolo (e più in generale dei moti armonici) è stato preso in considerazione da Parnafes per mostrare che le idee di uno studente riguardo al concetto di velocità (“fast” in inglese) sono piuttosto confuse: il termine, infatti, viene visto dagli studenti in una delle possibili seguenti accezioni [27]:

- Average linear velocity - the distance the bob makes in a unit of time.
- Instantaneous velocity - during one cycle the bob travels in many different velocities (zero velocity in the ends, accelerating towards the middle and then decelerating, and when traveling back it has negative velocity).
- The duration of the motion decay - how fast the pendulum comes to a stop.
- The frequency - many students say that the short-string pendulum is faster because there are more beats (cycles) per unit time.

Anche in questo caso, l'insegnante dovrebbe cercare di guidare lo studente attraverso un “territorio complesso”, facendolo passare da uno stato di “initial hyper-richness” ad uno di “final hyper-richness”. E anche qui, l'utilizzo di

simulazioni al PC opportunamente progettate, come viene mostrato nell'articolo, può essere uno strumento particolarmente adatto ad accompagnare lo studente in questa operazione.

Guida ai materiali

- L'analisi del moto del pendolo: [107]-[109].
Per quanto riguarda l'analisi di aspetti cognitivi relativi all'insegnamento/apprendimento del moto del pendolo, i principali riferimenti sono i già citati lavori di Piaget e Inhelder, e quelli, più recenti, di Parnafes e di Bond.
- Animazioni e simulazioni al pc: [110]-[114].
Numerosi sono i siti internet che propongono simulazioni relative al moto di un pendolo, sfruttando delle applicazioni note come applet, in cui è possibile l'interazione dell'utente, che può ad esempio cambiare i parametri fisici (lunghezza del filo, massa, ...) del sistema simulato. Spesso le applet proposte differiscono per un certo numero di aspetti (quali parametri si possono variare, quali rappresentazioni del moto vengono mostrate ...). Particolarmente interessante ed originale ci è sembrato il sito [114], in cui viene proposta un'analisi nel piano delle fasi, in cui si tiene conto della nonlinearità del pendolo.

4.4 Bilancio di fattibilità

Nel corso del capitolo abbiamo mostrato, anche facendo riferimento alla ricca letteratura di ricerca sul tema, come il pendolo si presti bene ad essere analizzato secondo le tre dimensioni relative all'insegnamento della fisica di cui abbiamo parlato nel capitolo 3.

Dal punto di vista *disciplinare*, il pendolo costituisce un interessante contesto che permette di affrontare questioni di notevole importanza, sia nell'ambito della meccanica, sia relativamente ad altri domini della fisica. In particolare, abbiamo analizzato: la dicotomia lineare/nonlineare e le manifestazioni

fisiche peculiari che ne derivano; il tema delle approssimazioni e del loro utilizzo in fisica; le possibili modalità di descrizione/rappresentazione di un sistema fisico (nella fattispecie quella spazio-temporale e quella energetica); i fenomeni oscillatori e la loro modellizzazione, nel pendolo e nei circuiti elettrici elementari.

Dal punto di vista *culturale*, abbiamo accennato al problema della misura del tempo, in relazione all'innovazione tecnologica costituita dall'invenzione dell'orologio a pendolo. Abbiamo poi parlato del ruolo della modellizzazione in fisica, con particolare riferimento all'opera di Galileo, a confronto con la "scuola" aristotelica, e dell'uso della retorica scientifica, sempre in riferimento a Galileo.

Da un punto di vista *cognitivo*, abbiamo visto che la determinazione della dipendenza del periodo dalle grandezze fisiche che descrivono il sistema è un problema che viene affrontato in modi diversi a seconda delle diverse abilità cognitive; che l'analisi di una pluralità di rappresentazioni (grafiche e non) delle relazioni tra le variabili può aiutare a comprendere più a fondo il fenomeno sotto studio; che la "costruzione" dei concetti fisici da parte dello studente è un'operazione tutt'altro che banale, e che può avere un valido sussidio nell'utilizzo di mezzi tecnologici quali simulazioni al computer e applet.

Possiamo pertanto concludere che i criteri individuati permettono di organizzare efficacemente il materiale esistente sul pendolo al fine di strutturare una possibile sezione dell'antologia.

Conclusioni

La ricerca svolta per questo lavoro di tesi si è concentrata sulla individuazione di criteri per la selezione e la presentazione di contenuti di fisica nel formato di una antologia online. A conclusione del lavoro, vorremmo evidenziare che l'utilizzazione di un materiale di questo tipo non può non avere conseguenze significative sia nello stile di insegnamento dell'insegnante, sia in quello di apprendimento degli studenti.

Come abbiamo ampiamente discusso nel capitolo 2, la scelta didattica di esplorare la complessità della fisica, e dei processi connessi al suo apprendimento, richiede all'insegnante un'operazione di mediazione fra gli studenti e le conoscenze disciplinari, molto più forte che nelle tradizionali prassi didattiche. Abbiamo individuato nel formato ipertestuale un possibile sussidio a questa operazione di mediazione. Tuttavia, nella progettazione della struttura e delle modalità di interazione con questo formato, è necessario definire dei vincoli precisi per rendere la complessità un punto di forza, piuttosto che di debolezza, della nostra proposta. In particolare, riteniamo che i seguenti punti siano delle caratteristiche imprescindibili del sito destinato a raccogliere i materiali dell'antologia:

- Molteplicità di accessi (ovvero diverse modalità di consultazione), per evitare che la complessità dei materiali si cristallizzi semplicemente in una varietà di percorsi didattici predefiniti.
- Qualità e quantità di link interni, per dare la possibilità di navigare lungo percorsi variamente costruiti: alcuni più ovvi che possono servire

allo studente per ricostruire quelli proposti a lezione dall'insegnante, altri meno ovvi che richiedono una messa in forma da parte dell'utente⁸.

- Possibilità di contribuire al miglioramento e all'arricchimento del contenuto e della sua struttura, attraverso forme di comunicazione tra utenti, come forum, gruppi di discussione, mailing list. L'impiego di forum di discussione in siti dedicati alla didattica è già stato sperimentato in diverse occasioni, con risultati più che soddisfacenti [116].

In questo contesto cambia necessariamente anche il ruolo dell'insegnante, che non può più limitarsi a fornire un insieme di conoscenze disciplinari, ma che deve diventare una sorta di tutor, con i seguenti compiti⁹:

- *Stimolare la partecipazione degli studenti*, creando agganci tra il materiale e le esigenze/domande/interessi della classe, che possono anche differire in modo assai netto fra uno studente e l'altro: in questo senso si va verso una maggiore interazione fra insegnanti e studenti, e verso una individualizzazione del processo di insegnamento/apprendimento.
- *Incentivare un'educazione alla consultazione*, sviluppando la capacità di muoversi fra testi di natura diversa. Questo aspetto è largamente trascurato all'interno dell'insegnamento tradizionale, in cui già il libro di testo costituisce potenzialmente uno strumento da esplorare anche in modo non necessariamente sequenziale (si ricordi quanto già detto in 3.1.1). La scarsa attenzione dedicata allo sviluppo della capacità di muoversi fra i capitoli di un libro, o fra diversi libri, è il riflesso, su larga scala, della scarsa attenzione rivolta all'esplicitazione dei collegamenti e richiami fra diversi argomenti e domini della disciplina.
- *Favorire la formazione di capacità di gerarchizzazione e organizzazione delle informazioni*. Queste capacità sono necessarie soprattutto per af-

⁸Al tempo stesso si deve evitare un eccessivo proliferare di link "deboli", ossia troppo banali da un punto di vista disciplinare. Il sito Hyperphysics [50] è, a nostro avviso, un esempio di quanto l'inserimento di un gran numero di link, non sufficientemente ponderati da un punto di vista didattico, incentivi una navigazione dei materiali del sito di tipo "zapping", con il conseguente decadimento del livello di attenzione ed approfondimento dei contenuti.

⁹Cfr. [36], [37].

frontare un mezzo come il web, in cui ci si può smarrire di fronte alla quantità di informazione disponibile, ma anche, facilmente, può capitare di imbattersi in informazioni di dubbia affidabilità, o comunque, imprecise. L'antologia online potrebbe così costituire un primo esempio di contesto in cui gli studenti si trovano di fronte informazioni strutturate in modo complesso, e in cui pertanto potrebbero imparare a muoversi e orientarsi autonomamente.

- *Fornire allo studente strumenti strategici* che possano metterlo in grado di acquisire e gestire autonomamente nuove conoscenze.

Queste competenze non fanno parte del profilo professionale tradizionale degli insegnanti e come tali devono essere oggetto di formazione. Tuttavia, a differenza dei grandi progetti nati negli anni Sessanta, per i quali una inadeguatezza nella formazione degli insegnanti era condizione per il loro fallimento, una proposta didattica come quella configurata dall'antologia appare meno fragile nel passaggio dalla sua progettazione alla sua utilizzazione in classe. In particolare tale proposta, oltre a non entrare in rotta di collisione con un insegnamento tradizionale, né coi vincoli strutturali che la scuola deve rispettare (orari e luoghi di insegnamento), ammette ampi margini di re-interpretazione da parte dell'insegnante. In questo senso può funzionare essa stessa come materiale per un percorso graduale e personalizzato di autoaggiornamento.

Appendice A

Calcolo analitico del periodo di oscillazione del pendolo semplice per angoli qualsiasi

La determinazione dell'espressione analitica per la relazione tra il periodo del moto e l'ampiezza massima di oscillazione, nel caso di un pendolo semplice, può essere fatta tramite integrazione per quadratura. In questo caso, infatti, come del resto per ogni sistema ad un grado di libertà descrivibile tramite un potenziale $U(x)$, è possibile sfruttare la conservazione dell'energia meccanica per scrivere una relazione (spesso non esprimibile in termini di funzioni elementari) tra il periodo dei moti limitati e l'energia del sistema.

Si consideri, infatti, il problema unidimensionale di una particella di massa m , che si muove in un potenziale $U(x)$, con energia totale $E = T + U$, T essendo l'energia cinetica. Possiamo scrivere allora:

$$\frac{1}{2}m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = E - U(x)$$

Con semplici passaggi otteniamo:

$$\frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{2}{m}} \sqrt{E - U(x)} \quad \Longrightarrow \quad dt = \sqrt{\frac{m}{2}} \frac{1}{\sqrt{E - U(x)}} dx \quad (\text{A.1})$$

Abbiamo così “separato le variabili” x e t .

Per certi valori dell’energia, che cambiano a seconda dello specifico sistema che stiamo considerando, l’equazione $U(x) = E$, sul cui significato fisico torneremo a breve, potrà avere una, due, o anche infinite soluzioni.

Ad esempio, nel caso di moto kepleriano (descrivibile con un potenziale unidimensionale dipendente dal raggio dell’orbita), per certi valori dell’energia avremo un’unica soluzione (o meglio due degeneri), corrispondente al caso ideale di moto perfettamente circolare; per valori più alti avremo due soluzioni, corrispondenti alle configurazioni fisiche di afelio e perielio di moti su orbite ellittiche; per valori ancora maggiori dell’energia avremo un’unica soluzione, corrispondente al punto di massimo avvicinamento di moti non limitati di tipo iperbolico (o parabolico nel caso ideale di energia nulla all’infinito).

Consideriamo adesso più in dettaglio il caso di moti limitati, e siano $x_1(E)$ ed $x_2(E)$ le due soluzioni (principali) di $U(x) = E$, ossia i cosiddetti punti di inversione del moto. Il moto compiuto fra x_1 e x_2 è oscillatorio e, “tenendo conto della proprietà generale di reversibilità, il tempo del moto da x_1 ad x_2 è uguale al tempo del moto inverso da x_2 ad x_1 . Di conseguenza, il periodo delle oscillazioni T , cioè il tempo impiegato dal punto per andare da x_1 ad x_2 e ritornare in x_1 , è uguale al doppio del tempo necessario per percorrere il segmento x_1x_2 ” ([89], pag.58); perciò, integrando la (A.1) fra i due estremi x_1 e x_2 si avrà:

$$T(E) = \sqrt{2m} \int_{x_1(E)}^{x_2(E)} \frac{dx}{\sqrt{E - U(x)}} \quad (\text{A.2})$$

La determinazione della forma analitica esplicita di questa espressione dipende dalla nostra capacità di calcolare l’integrale che compare nella formula trovata.

Nel caso specifico del pendolo, in cui il potenziale è $U(\theta) = mgl(1 - \cos \theta)$, l’espressione A.2, in funzione dell’angolo massimo di oscillazione θ_0 (che è costante durante il moto, essendo l’energia conservata), può essere scritta

così:

$$T(\theta_0) = 2\sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^{\theta_0} \frac{d\theta}{\sqrt{\sin^2(\theta_0/2) - \sin^2(\theta/2)}} \quad (\text{A.3})$$

dove θ_0 è legato all'energia totale dalla seguente relazione:

$$E = U(\theta_0) = mgl(1 - \cos \theta_0)$$

che esprime il fatto che nel punto di massima oscillazione l'energia totale coincide con quella potenziale, essendo nulla l'energia cinetica. Introducendo le nuove variabili

$$z = \frac{\sin \theta/2}{\sin \theta_0/2} \quad k = \sin \theta_0/2$$

è possibile ricondurre l'integrale A.3 ad un'espressione in cui compare un integrale ellittico completo di prima specie:

$$I = \int \frac{dz}{\sqrt{1 - k^2 z^2}} \frac{1}{\sqrt{1 - z^2}}$$

A questo punto, possiamo sviluppare in serie di Taylor il fattore $(1 - k^2 z^2)^{-1/2}$ (è qui che entra in gioco il limite delle piccole oscillazioni), ottenendo:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - k^2 z^2}} = 1 + \frac{k^2 z^2}{2} + \dots$$

Adesso possiamo quindi scrivere:

$$I = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 z^2}} \left[1 + \frac{k^2 z^2}{2} + \dots \right] dz = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{1 - z^2}} dz + \int_0^1 \frac{k^2 z^2}{2\sqrt{1 - z^2}} dz + \dots = I_0 + I_1 + \dots$$

Il primo integrale, una volta reinserite le costanti fisiche che avevamo provvisoriamente tralasciato nel calcolo, dà origine alla formula standard delle piccole oscillazioni, $T = 2\pi\sqrt{l/g}$; i termini successivi sono le correzioni all'isocronismo.

E' possibile calcolare gli integrali relativi ad ordini successivi dello sviluppo in serie, riconducibili ad integrali di funzioni trigonometriche, ed ottenere

infine la seguente espressione formale per il periodo di oscillazione [117]:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\left\{1 + \sum_{j=1}^{\infty}\left[\frac{(2j-1)!!}{(2j)!!}k^{2j}\right]\right\} \quad (\text{A.4})$$

Bibliografia

- [1] Stehle, P. *Order, Chaos, Order. The Transition from Classical to Quantum Physics*, Oxford University Press, 1994
- [2] “How to be top”, *The Economist*; Oct, 18th; riferimento internet: http://www.economist.com/world/international/displaystory.cfm?story_id=9989914
- [3] Grimellini Tomasini, N.; Levrini, O.; Casadio, C.; Clementi, M.; Medri Senni, S.; “Insegnare Fisica per nuclei fondanti: un esempio riferito al concetto di spazio”, *La Fisica nella Scuola*, XXXII, (4), 1999

Capitolo 1

- [4] Bagno, E.; Eylon, B-S.; “From problem solving to a knowledge structure: An example from the domain of electromagnetism”, *Am.J.Phys.*, **65** (8), August 1997
- [5] Bagno, E.; Eylon, B-S.; Ganiel, U.; “From fragmented knowledge to a knowledge structure: Linking the domains of mechanics and electromagnetism”, *Phys.Educ.Res., Am.J.Phys.Suppl.*, **68** (7), July 2000
- [6] Van Heuvelen, A.; “Overview, Case Study Physics”, *Am.J.Phys.*, **59** (10), October 1991
- [7] Balzano, E. et. al. (2005), “A Research on the Conceptual Organisation of Physics’ Curriculum and Standards”; Proceedings of Durban

- ICPE2004, What Physics Should We Teach?, ISBN 1-86888-359, pp 107-115.
- [8] Herrmann, F.; “The Karlsruhe Physics Course” *Eur.J.Phys.*, **21** (2000) 49-58
- [9] Strnad, J.; “On the Karlsruhe physics course”, *Eur.J.Phys.*, **21**, L33-L36, (2000)
- [10] Herrmann, F.; “Reply to Comment by J Strnad ‘On the Karlsruhe physics course’”, *Eur.J.Phys.*, **22** (2001) L9-L10
- [11] Maddox, J.; “The Nuffield Physics Project”, *Phys.Educ.*; 1, 3-7 (1966)
- [12] diStefano, R.; “The IUPP evaluation: What we were trying to learn and how we were trying to learn it”, *Am.J.Phys.*, **64** (1), 49-57 (1996)
- [13] Coleman, L.A.; Holcomb, D.F.; Rigden, J.S.; “The Introductory University Physics Project 1987-1995: What has it accomplished?”, *Am.J.Phys.*, **66** (2), February 1998
- [14] Manogue, C.; Krane, K.S.; “Paradigms in Physics: Restructuring the Upper Level”; *Phys.Tod.*, September 2003, 53-58
- [15] Karplus, R.; “Educational aspects of structure of physics”, *Am.J.Phys.*, **49** (3), March 1981
- [16] Perry, B.; Miller, C.; “A Unified Approach to Introductory Physics Based on The Conservation Laws”, *Am.J.Phys.*, **38** (8), August 1970
- [17] PPC, The Project Physics Course, ediz.it. a cura di Vittorio Zanetti, Zanichelli editore, Bologna (1978), ediz.orig. 1970
- [18] Burkhardt, H.; “System physics: A uniform approach to the branches of classical physics”; *Am.J.Phys.*, **55** (4), April 1987
- [19] Rigden, J.S.; “What are the important ideas of physics?”, *Am.J.Phys.*, **53** (4), April 1985

- [20] French, A.P.; “Setting new directions in physics teaching: PSSC 30 years later”; *Phys.Tod.*, September 1986, 30-34
- [21] Holton, G.; “The Project Physics Course, Then and Now”; *Science & Education*, 12: 779-786
- [22] Confrey, J.; “The Evolution of Design Studies as Methodology”, pp. 135-152, in Sawyer, K. (edited by) (2006), *The Cambridge Handbook of The Learning Sciences (TCHLS)*, Cambridge University Press.
- [23] Elby, A.; “Helping physics students learn how to learn”, *Phys.Educ.Res., Am.J.Phys.Suppl.*, **69** (7), July 2000
- [24] Eylon, B-S.; Reif, F.; “Effects of Knowledge Organization on Task Performance”; *Cog.Inst.*, **1**:1, 5-44

Capitolo 2

- [25] Fantini, P.; Grimellini Tomasini, N.; Levrini, O.; “L’irriducibile complessità del pensiero scientifico: ostacolo o sfida per la diffusione della cultura scientifica?”, *Ensenanza de las ciencias*, 2005, **Número Extra**, VII Congreso
- [26] Galili, I.; Tseitlin, M.; “Physics Teaching in the Search for Its Self”, *Science & Education* (2005) 14: 235-261
- [27] Levrini, O.; Parnafes, O.; Bamberger, J.; diSessa, A.A.; Hammer, D.; “The essential nature of complexity in learning”, submitted to *J.Learn.Sc.*
- [28] Kalman, C.S.; Aulls, M.W.; “Can an Analysis of the Contrast Between pre-Galilean and Newtonian Theoretical Frameworks Help Students Develop a Scientific Mindset?”; *Science & Education*, **12**: 761-772, 2003

- [29] Chi, M.T.; Feltovich, P.J.; Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, **5**, 121-152
- [30] Chi, M.T.; Glaser, R.; Rees E. (1982). Expertise in problem solving. In R.J. Sternberg (ed.), *Advances in the psychology of human intelligence* (pp. 7-77). Hillsdale, NJ: Erlbaum
- [31] deJong, T.; Ferguson-Hessler, M.G.M; “Cognitive structures of good and poor novice problem solvers in physics”; *J.Educ.Psych.*, 1986, **78**, 4, 279-288
- [32] Larkin, J.H. (1979). Processing information for effective problem solving. *Engineering Education*, 285-288
- [33] Perfetto, G.A., Bransford J.D., Franks, J.J. (1983). Constraints on access in a problem solving context. *Memory and Cognition*, **11**, 24-31
- [34] Millar, R.; Osborne, J.; “Beyond 2000: Science education for the future”; Report of a seminar series funded by the Nuffield Foundation, 1998
- [35] Sasso, A.; Toselli, S.; (a cura di); *La scuola nella società della conoscenza*, Bruno Mondadori, 1999
- [36] Calvani, A.; *Dal libro stampato al libro multimediale. Computer e formazione.*, La Nuova Italia Editrice, Scandicci (Firenze), ottobre 1990
- [37] Calvani, A. (a cura di); *Tecnologia, scuola, processi cognitivi*, Franco Angeli Editore (2007)

Capitolo 3

- [38] Gnoli, C.; Marino, V.; Rosati, L.; *Organizzare la conoscenza. Dalle biblioteche all'informazione per il web*, Tecniche Nuove, 2006

- [39] Cevolini, A.; *De arte excerpenti. Imparare a dimenticare nella modernità*, Olschki, 2006
- [40] Galili, I.; Tseitlin, M.; “Changes in physics curriculum for prospective physics teachers as implied by the cultural change and the crisis in physics education”
- [41] Rosenfeld, L.; Morville, P.; *Information architecture for the world wide web*, O'Reilly, 2nd ed. 2002
- [42] Krug, S.; *Don't make me think. Un approccio di buon senso all'usabilità web*, Tecniche Nuove, 2006
- [43] Boscarol, M.; *Ecologia dei siti web*, HOPS, 2006
- [44] Eco, U.; *Opera aperta*. Tascabili Bompiani, febbraio 1985
- [45] Simone, R.; *La terza fase. Forme di sapere che stiamo perdendo*. Gius. Laterza & Figli, 2000
- [46] Bush, V.; “As we may think”, *The Atlantic monthly*, July 1945
- [47] Quintarelli, E.; Resmini, A.; Rosati, L.; “Facetag”, EuroIA 2006, Berlin; <http://facetag.org/download/facetag-slides-september-2006.pdf>
- [48] http://www.usatoday.com/tech/columnist/andrewkantor/2007-06-14-internet-organization_N.htm
- [49] Bordoni, S.; *Eleveremo questa congettura ... Percorso storico verso la teoria della Relatività Ristretta*. La Goliardica Pavese, 1995
- [50] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- [51] Bonera, G.; Brasini, L.; Grimellini Tomasini N.; Haber R.; Romagnino C. (1997), *L'educazione delle scienze sperimentali nella nuova scuola con particolare riferimento all'insegnamento della Fisica*, La Fisica nella Scuola, XXX, n.4, Suppl.1997 e Il Nuovo Saggiatore, **13**, 5-6, pp.35-43

- [52] Parnafes, O.; “Coordinating perception and conception in a complex territory - the case of natural harmonic oscillator”, com.pers.

Capitolo 4

Riferimenti generali

- [53] Koliopoulos, D.; Constantinou, C.; “The Pendulum as Presented in School Science Textbooks of Greece and Cyprus”; *Science & Education*, **14**: 59-73 (2005)
- [54] <http://www.arts.unsw.edu.au/pendulum/>
- [55] Matthews, M.R.; *Time for science education*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2000
- [56] Matthews, M.R.; Gauld, C.F.; Stinner, A. (eds.); *Science & Education*, Volume 13, Nos. 4-5, July 2004, & Nos.7-8, November 2004. Disponibili anche in un unico volume: Matthews, M.R.; Gauld, C.F.; Stinner, A. (eds.): 2005, *The Pendulum: Scientific, Historical, Philosophical and Educational Perspectives*, Springer, Dordrecht
- [57] <http://www.arts.unsw.edu.au/pendulum/bibliography.html>

Dimensione disciplinare

- [58] Hall, D.E.; Shea M.J.; “Large-amplitude pendulum experiment: Another approach”; *Am.J.Phys.*, **45**(4), April 1977
- [59] Zheng, T.F.; Mears, M.; Hall, D.; Pushkin, D.; “Teaching the nonlinear pendulum”; *The Physics Teacher*, **32**, April 1994

- [60] Lima, F.M.S.; Arun, P.; “An accurate formula for the period of a simple pendulum oscillating beyond the small angle regime”; *Am.J.Phys.* **74**(10), October 2006
- [61] Fulcher L.P.; Davis B.F.; “Theoretical and experimental study of the motion of the simple pendulum”; *Am.J.Phys.*, **44**(1), January 1976
- [62] Schery, S.D.; “Design of an inexpensive pendulum for study of large-angle motion”; *Am.J.Phys.* **44**(7), July 1976
- [63] Zilio, S.C.; “Measurement and analysis of large-angle pendulum motion”; *Am.J.Phys.* **50**(5), May 1982
- [64] Lewowski, T.; Wozniak, K; “The period of a pendulum at large amplitudes: a laboratory experiment”; *Eur.J.Phys.* **23** (2002), 461-464
- [65] Molina, M.I.; “Simple linearizations of the simple pendulum for any amplitude”; *Phys.Teach.* **35**, Nov.1997
- [66] Kidd, R.B.; Fogg, S.L.; “A simple formula for the large-angle pendulum period”; *Phys.Teach.*, **40**, February 2002
- [67] Simon, R.; Riesz, R.P.; “Large amplitude simple pendulum: A Fourier analysis”, *Am.J.Phys.*, **47** (10), Oct.1979
- [68] Denman, H.H.; “Amplitude-Dependence of Frequency in a Linear Approximation to the Simple Pendulum Equation”; *Am.J.Phys.*, **27** (7), October 1959
- [69] Cadwell, L.H.; Boyko, E.R.; “Linearization of the simple pendulum”, *Am.J.Phys.*, **59** (11), November 1991
- [70] Curtis, R.K.; “The simple pendulum experiment”; *Phys.Teach.*, January 1981
- [71] Marion, J.B.; *Classical Dynamics of Particles and Systems*, 2nd ed. (Harcourt Brace Janovich, San Diego, 1970)

- [72] Weltner, K.; Esperidiao, A.S.C.; Silva Andrade, R.F.; Miranda, P.; “Introduction to the Treatment of Non-Linear Effects Using a Gravitational Pendulum”, *Science & Education*, **13**, 613-630 (2004)
- [73] Recchi, M.; *Uno studio sperimentale di un particolare tipo di pendolo di torsione: implicazioni culturali e didattiche*, Tesi di Laurea in Fisica, Rel. Grimellini Tomasini Nella, Università di Bologna, A.A. 1999-2000
- [74] Hastings, S.P.; McLeod, J.B.; “Chaotic Motion of a Pendulum with Oscillatory Forcing” *The American Mathematical Monthly*, Vol. 100, No. 6, (Jun. - Jul., 1993), pp. 563-572
- [75] Permann, D.; Hamilton, I.; “Self-similar and erratic transient dynamics for the linearly damped simple pendulum”, *Am.J.Phys.*, **60** (5), May 1992
- [76] Sagdeev, R.Z.; *Nonlinear Physics: From the Pendulum to Turbulence and Chaos*; Routledge, 1988
- [77] Broer, H.W.; Hoveijn, I.; van Noort, M.; “A reversible bifurcation analysis of the inverted pendulum”, *Physica D*, **112** (1998) 50-63
- [78] http://fisicaondemusica.unimore.it/Analogie_in_fisica.html
- [79] Kipnis, N.; “Scientific Analogies and Their Use in Teaching Science”, *Science & Education* (2005) 14: 199-233
- [80] Gentner, D.: 1989, “The Mechanism of Analogical Learning”, in Vosniadu S. & Ortony, A. (eds.), *Similarity and Analogical Reasoning*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 199-241.
- [81] AA.VV.; *La Fisica di Berkeley. Vol.6: Onde*; ed.it. Zanichelli, Bologna, 1972
- [82] Anderson, J.L.; “Approximations in Physics and the Simple Pendulum”, *Am.J.Phys.*, **27** (3), March 1959
- [83] Picasso L.E.; *Lezioni di Fisica Generale 1*, Edizioni ETS, Pisa, 1998

- [84] Goldstein, H.; *Meccanica Classica*, Zanichelli, Bologna, 1971
- [85] <http://plato.stanford.edu/entries/qt-uncertainty>
- [86] Boffi, S.; *Il principio di indeterminazione*, Università degli Studi di Pavia, febbraio 1990
- [87] Pospiech, G.; “Uncertainty and complementarity: the heart of quantum physics”, *Phys.Educ.*, **35** (6), November 2000
- [88] Sconza, A.; *Esperimenti didattici di fisica*, Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Fisica “G.Galilei”, luglio 2002
- [89] Landau, L.D.; Lifschitz, E.M.; *Fisica teorica 1. Meccanica*; Editori Riuniti, 1976
- [90] Rosati, S.; *Fisica Generale*; Casa Editrice Ambrosiana - Milano, 1978
- [91] Newburgh, R.; “The Pendulum: a Paradigm for the Linear Oscillator”; *Science & Education*, **13**: 297-307, 2004
- [92] Tarsitani, C.; *Introdurre la Meccanica Quantistica come teoria di sistemi lineari*, dispense Master IDIFO, 2006
- [93] Doménech, J.L. et al.; “Teaching of energy issues: a debate proposal for a global reorientation”, *Science & Education* (2007), 16: 43-64
- [94] Omnès, R.; *Understanding Quantum Mechanics*, 1999, Princeton

Dimensione culturale

- [95] Erlichson, H.; “Galileo to Newton - A Liberal-Arts Physics Course”; *The Physics Teacher*, **35**, Dec. 1997
- [96] Erlichson, H.; “Galileo’s Pendulums and Planes”, *Annals of Science*, **51** (1994), 263-272

- [97] Erlichson, H.; “Galileo’s Pendulum”; *The Physics Teacher*, **37**, Nov.1999
- [98] Galilei, G.; *Opere*; a cura di Ferdinando Flora, Riccardo Ricciardi editore
- [99] Brunetti F. (a cura di); *Galilei*; Classici UTET, 1996 (prima ediz. 1964)
- [100] Matthews, M.R.; “History, Philosophy and Science Teaching: A Reapprochement”, *Studies in Science Education*, **18**, 25-51 (1990)
- [101] Gauld, C.; “The Treatment of the Motion of a Simple Pendulum in some Early 18th Century Newtonian Textbooks”; *Science & Education*, **13**: 321-332, 2004
- [102] Naylor, R.; “Galileo’s simple pendulum”; *Physis*, **16** (1974), 23-46
- [103] Bonera, G.; *Galileo oggi. Spunti didattici e letture tratte dai lavori di Galileo*, Università degli Studi di Padova, La Goliardica Pavese, 1995
- [104] Sobel, D.; *Longitude: the true story of a lone genius who solved the greatest scientific problem of his time*, Walker & Co., New York, 1995
- [105] Koyré, A.; *Dal mondo del pressapoco all’universo della precisione*, Einaudi, 2000
- [106] Borges, J.L.; *L’artefice*, Adelphi, 1999

Dimensione cognitiva

- [107] Piaget, J.; Inhelder, B; *De la logique de l’enfant à la logique de l’adolescent*; ediz. it. 1980, Giunti
- [108] McDermott, L.C.; Rosenquist, M.L.; van Zee, E.H. (1987); “Student difficulties in connecting graphs and physics: Examples from kinematics”, *Am.J.Phys.*, **55** (6), 503-523
- [109] Bond, T.G.; “Piaget and the Pendulum”; *Science & Education*, **13**: 389-399, 2004

[110] <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/index.php?topic=11>

[111] <http://www.walter-fendt.de/ph11e/pendulum.htm>

[112] <http://www.mth.kcl.ac.uk/jrs/poncelet/pendulums.htm>

[113] <http://www.lon-capa.org/mmp/kap13/cd363a.htm>

[114] <http://www.math.ubc.ca/feldman/demos/pendulum.html>

Capitolo 5

[115] Levrini, O. et al. (2007) *Sviluppo di idee-quadro nell'insegnamento e nella comunicazione della fisica (SiQiC)*, proposta di progetto PRIN (com. pers.)

[116] Forum di discussione di Levrini, O.; master IDIFO Udine

Appendici

[117] Fasano, A.; Marmi, S.; *Meccanica analitica*; Bollati Boringhieri, 2002