**Aggiornamento degli insegnanti di fisica su temi di fisica contemporanea: e la fisica computazionale?**

**Physics teachers' professional development in contemporary physics: what about computational physics?**

**Giorgio PASTORE, Maria PERESSI**

*Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Trieste, Trieste, Italia*

**Riassunto**

La fisica computazionale non è riducibile a “fare i conti col computer”. Da almeno una trentina d’anni si è affermata nell’ambito della ricerca in fisica la consapevolezza che essa costituisce una terza metodologia, complementare a teoria ed esperimento.

Nonostante le potenzialità dal punto di vista didattico siano notevoli e la “curva di apprendimento” molto meno ripida che per altri ambiti della ricerca contemporanea, la presenza di tematiche di fisica computazionale nei programmi di aggiornamento resta episodica e l’utilizzo curricolare da parte degli insegnanti possibile ma non privo di difficoltà. In questo contributo useremo la nostra esperienza più che decennale in questo campo ponendola nel contesto del tema dell’aggiornamento su tematiche di fisica moderna e sviluppi della ricerca contemporanea.

L’intervento si concentrerà su due aspetti principali.

Da un lato la valenza formativa e di creazione di competenze dell’approccio computazionale anche su argomenti di fisica moderna. Su questo fronte è interessante vedere come si possano rendere accessibili a livello laboratoriale argomenti di ricerca contemporanea, dalla teoria dei sistemi dinamici caotici ai metodi di Quantum Monte Carlo, dalla Materia Oscura al moto browniano, alla crescita di superfici. Va inoltre sottolineata la valenza della fisica computazionale come opportunità di sviluppo delle competenze digitali di *coding* in un contesto altamente significativo e sinergico con Matematica e Fisica, ma anche con altre Scienze.

Dall’altro verranno valutate le precondizioni, le dinamiche e le difficoltà di penetrazione di concetti e approcci assenti nei curricula di formazione dei docenti, anche di quelli laureati in Fisica.

**Abstract**

Computational physics cannot be reduced to "math with the computer." For at least thirty years, the awareness that it constitutes a third methodology, complementary to theory and experiment, has established itself in the field of research in physics. Its potential from an educational point of view is considerable and the "learning curve" much less steep than for other areas of contemporary research. However, the presence of computational physics issues in the professional development programs of physics teachers remains episodic and its curricular use is possible but not without difficulties. In this contribution we will use our more than ten-year long experience in this field, placing it in the context of the theme of professional development on modern physics issues and on developments in contemporary research. The paper will focus on two main aspects. On the one hand, the training and skill-building value of the computational approach. On this front it is interesting to see how topics of contemporary research can be made accessible, from the theory of chaotic dynamical systems to Quantum Monte Carlo methods, from Dark Matter to Brownian motion, to the growth of surfaces. The value of computational physics should also be emphasized as an opportunity for the development of digital coding skills in a highly significant and synergistic context with Mathematics and Physics, but also with other Sciences. On the other hand, the preconditions, and difficulties of computational concepts and approaches, absent in the training curricula of teachers, including those with a degree in Physics, will be briefly discusssed.

1. **Introduzione**

Il tema dell'aggiornamento degli argomenti di fisica affrontati nelle scuole secondarie di secondo grado è un problema complesso che sarebbe semplicistico pensare di risolvere allo stesso modo con cui per esempio si risolve il problema di non arrestare lo studio della storia agli eventi precedenti la I guerra mondiale. Per continuare con l'esempio, la principale differenza tra fisica e storia, è che per la prima le indicazioni nazionali per i licei e i quadri di riferimento relativi all'esame di stato prevedono che "Al termine del percorso liceale … lo studente avrà acquisito le seguenti competenze: … affrontare e risolvere semplici problemi di fisica usando gli strumenti matematici adeguati al suo percorso didattico; …". Il Quadro di riferimento per la Fisica e le Scienze, sugli argomenti e approfondimenti di Fisica Moderna pone come *abilità relative ai contenuti*: "Saper illustrare almeno un aspetto della ricerca scientifica contemporanea o dello sviluppo della tecnologia o delle problematiche legate alle risorse energetiche". Per la Storia, le Indicazioni Nazionali pongono come obiettivo la conoscenza dei "… principali eventi e le trasformazioni di lungo periodo della storia dell’Europa e dell’Italia, dall’antichità ai giorni nostri, nel quadro della storia globale del mondo …". È evidente come l'evoluzione della fisica negli ultimi cento anni, anche dal punto di vista della evoluzione degli strumenti matematici utilizzati per formulare le teorie, ponga di fronte a difficoltà diverse da quella della storia nel tentativo di trattare argomenti sviluppatisi nell' ultimo secolo.

Purtroppo, alle petizioni di principio delle Indicazioni Nazionali e ai Quadri di riferimento non è seguito uno sforzo adeguato di preparazione, lasciando al processo di formazione degli insegnanti in servizio il compito non facile di colmare il *gap* tra preparazioni di base dei laureati in matematica e fisica e contenuti della fisica contemporanea. Fortunatamente, la sempre maggior coscienza del ruolo sociale della ricerca ha motivato enti di ricerca, associazioni ed altre istituzioni ad intervenire con una offerta di aggiornamento nei confronti di studenti e docenti. Il Piano Lauree Scientifiche prevede ormai da diversi anni attività di formazione degli insegnanti, favorendo il processo di trasmissione di nuovi contenuti dall'ambito della ricerca universitaria alla pratica scolastica.

La ricchezza di attività formative in atto non deve però far dimenticare le difficoltà dell'operazione. Va anche segnalato come talvolta le iniziative si adeguino più ai canoni della divulgazione che della formazione. E questo aggiunge difficoltà a difficoltà. La divulgazione dei risultati della ricerca contemporanea non sempre è compatibile con la formazione di reali competenze, anche al livello minimo descrittivo, sia tra studenti, sia tra docenti. In assenza di un livello minimo di padronanza della materia, il docente, come lo studente, non sarà in grado di separare gli aspetti metaforici da quelli reali presenti nella divulgazione. La crescente letteratura scientifica sulle misconcezioni generate dalla divulgazione (“pop-sci”) testimonia la presenza di un fenomeno reale[1].

Un secondo aspetto collegato alla divulgazione e i suoi effetti è la presenza dominante di alcuni temi della fisica contemporanea a scapito di altri, dominanza che si fa sentire anche nelle tematiche di vera formazione disciplinare e nella stessa richiesta di aggiornamento da parte degli insegnanti. L'innegabile fascino di argomenti come la cosmologia moderna, la teoria delle stringhe, i buchi neri, le onde gravitazionali o le interpretazioni della meccanica quantistica, oscurano temi altrettanto importanti, anche per la vita quotidiana, come la teoria quantistica delle proprietà elettroniche, i sistemi dinamici, la meccanica statistica o la fisica dei sistemi complessi.

I problemi più frequenti relativi a iniziative di aggiornamento su tematiche di fisica contemporanea sono in gran parte riconducibili ai seguenti punti:

* + 1. grande divario rispetto alla formazione di base dell'insegnante, anche laureato in fisica, che rende difficile il raggiungimento di quel livello minimo di *disciplinary knowledge* su cui diviene possibile costruire una *pedagogical content knowledge*;
    2. tempo limitato per l'aggiornamento e spesso non valorizzato;
    3. in alcuni casi, iniziative di aggiornamento poco efficaci o di bassa qualità sul piano pedagogico.

All'interno di queste problematiche, la proposta che portiamo avanti da diversi anni di formazione/aggiornamento specifico nell'ambito della fisica computazionale vuole essere un esempio di formazione su temi di fisica contemporanea meno affetta dai problemi sopra menzionati e con l'evidente vantaggio di costruire automaticamente competenze.

1. **Fisica computazionale**

La fisica computazionale è una metodologia della ricerca contemporanea, collocabile sullo stesso piano della fisica sperimentale e di quella teorica. Condivide con questi due approcci tradizionali alcune caratteristiche. Da un lato, richiede un'analisi dei risultati analoga al trattamento dei dati sperimentali, con una simile richiesta di controllo di incertezze sui risultati di diversi tipi. Dall'altro, è basata su algoritmi derivanti dalle equazioni di una teoria e richiede una buona padronanza di questa e dei metodi numerici utilizzati per risolvere numericamente le equazioni.

A volte, chi non ha mai avuto esposizione ai metodi della fisica computazionale la può intendere come "fare i conti col computer". Questo punto di vista è però fortemente riduttivo. Inserire i valori numerici dei dati in una formula non è fisica computazionale più di quanto possa essere fisica sperimentale leggere la temperatura su un termometro. Piuttosto, come la fisica sperimentale inizia con l'analisi di fattibilità e la progettazione dell'apparato di misura, nonché le metodologie di analisi dei dati, e la fisica teorica con la scelta della modellizzazione matematica più adeguata, la fisica computazionale richiede entrambe le competenze, con il software che gioca un ruolo equivalente ad uno strumento di misura, con tutte le necessità di messa a punto, controllo e taratura.

Un ulteriore caratteristica della fisica computazionale è la possibilità di realizzare per via software modellizzazioni numeriche basate su elementi semplici ma dal comportamento complesso al punto da dar luogo a *fenomeni emergenti* non prevedibili direttamente dall'analisi del modello. Situazione molto lontana rispetto al mero verificare i risultati numerici. Storicamente le "sorprese" computazionali sono state numerose, ad iniziare con il famoso lavoro di Fermi, Pasta e Ulam [2,3] che ha rivoluzionato le idee sul comportamento dei sistemi hamiltoniani integrabili debolmente perturbati, passando per la scoperta che un sistema di sfere rigide cristallizza ad una densità lontana da quella di massimo impacchettamento per solo effetto entropico[4], alla simulazione degli effetti di scontri tra galassie[5] o di strutture su larga scala nell'universo[6] e alla capacità di prevedere i risultati di esperimenti sulla struttura atomica ed elettronica dei materiali[7].

Anche se meno presenti nella divulgazione, i risultati della fisica computazionale non sono meno interessanti ed affascinanti. In ogni caso dal punto di vista della divulgazione, la fisica computazionale condivide gli stessi problemi di tutta la ricerca contemporanea. Il divario tra conoscenze di base e risultati è notevole e le tecniche della divulgazione si scontrano contro limiti notevoli. Tuttavia, dal punto di vista della formazione degli insegnanti, le tematiche della Fisica computazionale presentano diversi vantaggi, pur se accompagnate da una minore preparazione da parte degli insegnanti, in media.

Partiamo dal problema della preparazione di base dei laureati in Matematica e in Fisica relativamente alla fisica computazionale. Rispetto al problema dei laboratori, in cui laureati in matematica e in fisica partono da un bagaglio universitario di competenze enormemente sbilanciato a favore dei laureati in fisica, almeno dal punto di vista delle competenze informatiche di base necessarie, la differenza di formazione tra le due classi di laureati non è ugualmente sbilanciata. Inoltre, in media, anche i laureati in fisica non sempre hanno esperienze curricolari sufficientemente significative nel campo della fisica computazionale. L'approccio tradizionale consiste spesso nell'insegnare l'utilizzo di un linguaggio di programmazione di alto livello, implementando alcuni algoritmi di base. Tuttavia aver già avuto un'esperienza diretta di programmazione rappresenta un indubbio vantaggio per poter muovere i primi passi nella fisica computazionale.

Ritorneremo sulle difficoltà. Qui vogliamo sottolineare ancora una volta i vantaggi trasversali relativi alla formazione in questo campo. In effetti la fisica computazionale permette in modo naturale un approccio educativo e non divulgativo. La possibilità di riproporre in piccolo, attraverso *toy model* o situazioni semplificate molte delle tematiche della ricerca sotto forma di esperienze da fare, prima ancora che da apprendere, e con una strumentazione estremamente diffusa (il computer) rappresenta un indubbio vantaggio.

L'approccio computazionale richiede una decostruzione e ricostruzione algoritmica del problema con benefici evidenti sulla comprensione e sullo sviluppo di competenze. Permette anche di lavorare in modo sinergico tra matematica e fisica, sfruttando anche l'approccio numerico come scorciatoia per superare difficoltà legate all'introduzione di strumenti analitici sofisticati. Tra l'altro, questo permette di dare un'immagine aggiornata del rapporto tra discipline. Sono anche da notare le possibilità offerte dall'approccio computazionale per far da ponte tra teoria ed esperienze in laboratorio. Basti pensare alla possibilità di integrare numericamente le equazioni del moto di un pendolo anche in regime di grandi oscillazioni. Infine costituisce uno strumento in grado di dare accesso a problemi di frontiera mediante l'applicazione di concetti sviluppati all'interno del curricolo. Molti di questi vantaggi sono ormai riconosciuti e documentati in letteratura[8,9].

Un'ultima osservazione, eventualmente da approfondire in altra sede, riguarda la posizione ottimale della fisica computazionale come occasione per sviluppare vere competenze di *coding* in un contesto altamente significativo.

1. **Precondizioni, esperienze e difficoltà.**

Come procedere in pratica nella formazione degli insegnanti su tematiche di fisica computazionale? La strada maestra, irrinunciabile è mediante formazione diretta, in modalità laboratoriale, su esempi di applicazioni computazionali selezionati. Esempi che potranno anche essere riproposti, con i dovuti adattamenti, nel lavoro in classe o che potranno essere utilizzati solo per la loro valenza formativa, lasciando completa libertà sui temi da sviluppare in classe. Il carattere metodologico della fisica computazionale in questo caso gioca a favore. Va però osservato che non tutti gli argomenti di fisica si prestano ugualmente ad una rivisitazione computazionale con gli studenti. Occorre imparare a scegliere, sulla base di una valutazione di fattibilità che deve tener conto e partire dalle caratteristiche della classe con cui si lavora.

Esempi concreti tratti dall'esperienza più che decennale[10-12] fatta presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Trieste con insegnanti e classi della secondaria di secondo grado comprendono temi come:

* + - approcci deterministici a sistemi dinamici regolari e caotici;
    - diffusione e moto browniano;
    - visualizzazione di orbitali atomici modellati con metodi stocastici;
    - ricostruzione di figure di diffrazione in ottica ondulatoria;
    - approcci stocastici all’evoluzione di sistemi dinamici su reticolo;
    - ottica geometrica in mezzi con indice di rifrazione variabile (miraggi e fibre ottiche);
    - effetti della presenza di materia oscura nei moti delle galassie[13,14];
    - modello atomico di Rutherford;
    - modelli di crescita di superfici.

Si tratta di temi in parte adattati da trattazioni sviluppate in letteratura per il livello universitario, in parte sviluppati in modo originale. In alcuni casi si è partititi da nostre proposte, successivamente adattate al contesto scolastico, in altri il tema e l'implementazione sono stati sviluppati autonomamente da insegnanti per le loro classi, estendendo poi l’esperienza in contesti diversi con altri studenti (ad esempio, negli *stage* pomeridiani di orientamento per gli ultimi anni delle Scuole Superiori proposti a gennaio-febbraio presso il nostro Dipartimento di Fisica o in occasione di *Scuole* o *Stage estivi residenziali*). In un caso (visualizzazione di orbitali atomici modellati con metodi stocastici) l'input iniziale è arrivato da una studentessa.

Dal punto di vista della proposta agli studenti, si tratta di temi che si prestano a diversi livelli di approccio computazionale, dal semplice utilizzo di un programma in cui occorre modificare l'input, alla scrittura da zero di un codice in un linguaggio di programmazione. Dal punto di vista della formazione insegnanti, passare per la codifica è invece essenziale come condizione per poter padroneggiare lo strumento software, anche nel caso si opti per una proposta agli studenti minimale dal punto di vista della codifica. Tuttavia anche così sono possibili approcci semplificati o approcci più completi. L'ideale sarebbe quello di poter dare formazione su un linguaggio di programmazione che consenta di fare pratica diretta di tutti gli aspetti del ciclo di sviluppo di un software La scelta del linguaggio non è critica, e, all'interno di linguaggi di alto livello può essere basata su quello meglio noto (se c'è). Altri parametri possono influire sulla scelta. Nel corso della nostra esperienza abbiamo proposto programmi scritti in Pascal/Delphi, Java, C++ e Python.

Come esempio di cosa voglia dire un approccio di fisica computazionale, consideriamo l'argomento "sistemi dinamici regolari e caotici". La fisica dei sistemi caotici è presente anche nella divulgazione. Docenti e studenti possono aver sentito parlare dell'effetto farfalla e dell'amplificazione di piccole perturbazioni. La fisica dei biliardi regolari e caotici si presta molto bene ad una presentazione della distinzione tra dinamica caotica e non caotica mediante un approccio computazionale. La fisica di base è quella di urti elastici contro le pareti, ovvero le leggi della riflessione dell'ottica geometrica. Anche la complessità dell'urto contro un bordo di forma ellittica è completamente all'interno delle conoscenze curricolari di uno studente liceale (tutto quel che serve è l'equazione della retta tangente in un punto e la condizione di ortogonalità tra rette). Dal punto di vista algoritmico occorre iterare un numero controllato di volte i) la determinazione del prossimo istante e punto di collisione di un punto materiale (la biglia) contro la parete, ii) la soluzione dell'equazione della tangente nel punto di collisione, iii) l’applicazione delle leggi degli urti elastici dopo aver decomposto il vettore velocità in una componente parallela e una perpendicolare alla retta tangente. Con questo semplice algoritmo, e un approccio *inquiry based*, è possibile esplorare la dipendenza del tipo di dinamica dalla forma del biliardo. Ancora più importante, è possibile sviluppare nello studente un atteggiamento critico nei confronti dei risultati, sollecitandolo a fare ipotesi da verificare mediante la sperimentazione numerica.

Il ruolo dell'insegnante deve essere di guida in questa esplorazione, aiutando lo studente a raffinare le domande e ad esaminare criticamente le risposte sperimentali. La preparazione necessaria da parte dell'insegnante è di gran lunga meno specialistica di una piena formazione sulla fisica dei sistemi dinamici, mentre richiede un po' di esperienza sul controllo numerico delle cause di incertezza, in questo caso specificamente sul ruolo degli errori di arrotondamento nei metodi numerici. Va notato che si tratta di una formazione trasversale riutilizzabile in qualsiasi altro contesto dominato da algoritmi numerici.

Tipicamente, un processo di formazione per questo tipo di attività, anche nel caso più sfavorevole in cui si parta da un linguaggio di programmazione non conosciuto, può essere basata su un *crash course* *hands-on* sulla scala di pochi incontri, seguiti da un'attività più orientata allo sviluppo laboratoriale di un singolo progetto. Ovviamente l'obiettivo non è di formare programmatori con attività limitate a una decina di ore, ma di iniziare col dare gli strumenti per comprendere, utilizzare in modo critico e modificare codici già messi a punto, costruendo, per chi lo desiderasse, le competenze per sviluppare una maggior autonomia operativa.

Anche in questa modalità, una delle maggiori difficoltà è quella del tempo che può verosimilmente essere dedicato a questo tipo di formazione. Qui purtroppo ci si scontra con condizioni al contorno date dalla normativa vigente che rende comunque difficile creare opportunità favorevoli. Pertanto un approccio più completo resta riservato a quei pochi disponibili ad investire tempo personale e/o già in possesso delle competenze per farlo. Le esperienze fin qui svolte mostrano la fattibilità del progetto ma anche l'assenza di strumenti per facilitare il lavoro dei docenti che volessero approfondire.

**Conclusioni**

La nostra conclusione è per una sicura fattibilità e utilità di una sistematica formazione su tematiche di fisica computazionale. Tuttavia l'obiettivo deve restare quello di alto profilo di dare le competenze per una crescita individuale autonoma piuttosto che fornire soluzioni pre-confezionate da usare e far usare in modo acritico. Solo così sarà possibile trarre i massimi benefici dall'approccio computazionale. Una messa a sistema di questo approccio potrebbe trarre ovvi benefici da standardizzazioni (p.es. dalla presenza di vere competenze di *coding* pre-esistenti) con una base di conoscenza comune di un linguaggio di programmazione (quale che sia). Tuttavia siamo convinti che l'assenza di un quadro omogeneo di questo tipo non precluda le possibilità di implementazione, essendo l'aspetto algoritmico, e non le scelte sui linguaggi, il vero cardine della proposta.

**Ringraziamenti**

È un piacere ringraziare tutti i colleghi e i docenti di scuola secondaria con cui abbiamo interagito in questi anni. Non pensiamo di far torto a nessuno se dedichiamo un ringraziamento speciale al prof. Armando Pisani per le stimolanti interazioni e discussioni durante tutte le fasi di questo cammino e per aver condiviso la sua esperienza anche con studenti e colleghi di altre classi e scuole assieme a noi durante gli *Stage* di orientamento.

**Bibliografia**

[1] Stein M, Larrabee T G, e Barman C R, *J. Elem. Sci. Educ.*, **20** (2008) 1.

[2] Fermi E, Pasta J, Ulam S, e Tsingou M, *Los Alamos preprint, Document LA-1940*, (1995).

[3] Ford J, *Phys. Rep.*, **213** (1992) 271.

[4] Alder B J, e Wainwright T E, J*. Chem. Phys.* **33**, (1960) 1439.

[5] Aarseth S J, e Fall S M, *Ap. J.* **236** (1980) 43.

[6] Klypin A A, Trujillo-Gomez S, e Primack J,  *Ap. J.* **740** (2011) 102.

[7] Martin R M , *Electronic structure: basic theory and practical methods*. Cambridge university press (2020).

[8] Orban C M, e Teeling-Smith R M, *Phys. Teach.*, **58 (**2020) 247.

[9] Spencer R L, *Am. J. Phys.* **73** (2005) 151.

[10] Pastore G, e Peressi M, *La Fisica nella Scuola Anno XLIII – Suppl. al N.4,* **(2010)** 169.

[11] Pastore G, e Peressi M, in *Proposte didattiche sulla fisica moderna - Strumenti per una didattica laboratoriale*, a cura di M. Michelini , Udine (2011), p. 111.

[12] Pastore G, e Peressi M, in *Proceedings of MPTL-14 (Multimedia in Physics Teaching and Learning)*, Udine (Italy), (2009)

[13] Pisani A, https://docplayer.it/56234312-Esercizio-costruiamo-una-simulazione-in-java-usando-ejs-armando-pisani-i-s-i-s-dante-alighieri-go-pls-fare-scienza-con-il-computer-a-s.html

[14] Pisani A, https://www.compadre.org/OSP/document/ServeFile.cfm?ID=11512&DocID=2444