

Fisica quantistica e relatività: un esempio di due lavori di maturità sui fondamenti concettuali della fisica teorica del XX secolo

di Christian Ferrari*

Siamo nel mese di ottobre 2003 e da due mesi ho cominciato a insegnare fisica al Liceo di Locarno; parlando con i colleghi di materia, nasce l'idea di collaborare all'organizzazione dei lavori di maturità (LAM). Da due mesi ho lasciato il Politecnico Federale di Losanna, dove ho appena concluso la tesi di dottorato nel campo della fisica matematica, più specificatamente occupandomi di aspetti matematici della meccanica quantistica. Mi domando quindi quali soggetti potrei proporre ad allievi del secondo biennio liceale. Cosciente del fatto che, per motivarli, è necessario proporre soggetti intriganti e innovativi, mi dico che affrontare lo studio di alcuni aspetti recenti (1964-2004) della meccanica quantistica è probabilmente una sfida da lanciare. Per non restringere troppo il campo d'indagine, intitolò il LAM «Fisica teorica del XX secolo», così da permettere anche la trattazione di argomenti un po' più classici come la teoria della relatività. Il 6 dicembre ha luogo l'incontro informativo con gli allievi e noto l'interesse di alcuni di loro. A febbraio 2004 il LAM di fisica, in collaborazione con il collega di materia Gianni Boffa, viene avviato e io mi ritrovo con due allievi interessati alla fisica quantistica e uno alla relatività generale.

Mi soffermerò sul lavoro di Nicola Ghiringhelli, «Fisica quantistica: dalla delocalizzazione al teletrasporto passando per la non località», e di Enea di Dio, «Dalla relatività ai buchi neri», poiché affrontano temi rappresentativi dei due campi fondamentali della fisica del XX secolo, la fisica quantistica e la relatività. Occorre dire però che anche la ricerca del terzo allievo, Tiziano Zamaroni, «Fisica quantistica: delocalizzazione e crittografia quantistica», è da considerarsi un buon lavoro.

La sfida è lanciata, alcuni colleghi sono un po' perplessi sulla riuscita del LAM, visti i soggetti proposti, in particolare quello di Nicola, ma ciò non mi preoccupa.

Sia con Nicola sia con Enea si è subito creato un modo di lavorare molto positivo; entrambi si sono dimostrati da subito molto decisi a raggiungere l'obiettivo: per Nicola capire come funziona il teletrasporto, per Enea che cosa succede in prossimità di un buco

nero. Evidentemente i loro obiettivi a febbraio sono tutt'altro che vicini, e anche il sottoscritto ha qualche dubbio sulla possibilità di arrivare così lontano, non tanto per la difficoltà del soggetto, bensì per il tempo a disposizione.

Per avviare questi due LAM, mi sono reso subito conto di non poter contare sulle conoscenze fisiche acquisite dagli allievi nel corso del loro curriculum liceale e quindi, per snellire la fase iniziale, ho scritto due corsi introduttivi, sulla fisica quantistica e sulla relatività. Parallelamente Nicola ed Enea hanno svolto una ricerca bibliografica che hanno poi sfruttato nel loro lavoro; in particolare quella di Enea si è rivelata da subito molto vasta.

A maggio 2004 i lavori procedono bene: Enea ha studiato le basi della relatività ristretta e generale, in particolare la struttura causale, il cosiddetto *cono di luce*, e l'influsso della materia sulle proprietà geometriche dello spazio-tempo. Nicola dal canto suo ha imparato un po' di algebra lineare, strumento matematico essenziale per la fisica quantistica e ha afferrato gli aspetti fondamentali di questa teoria applicandoli a un esempio, il cosiddetto *spin* $1/2$. Nello stesso mese mi arriva una e-mail di Valerio Scarni, un vecchio amico del Politecnico di Losanna, che ora si occupa di ricerca fondamentale in fisica quantistica presso il Groupe de physique appliquée (GAP) all'università di Ginevra e dirige a distanza, nell'ambito del progetto nazionale Maturity Work, alcuni lavori di maturità nei cantoni di Ginevra e Friburgo. Mi propone di partecipare con Nicola a un piccolo workshop sulla fisica quantistica in occasione del quale gli allievi presenteranno una parte del loro lavoro; ne parlo con Nicola e a metà maggio siamo in uno chalet a Mayens de Sion in Vallese. L'esperienza è doppiamente positiva: Nicola fa un'ottima presentazione e io discuto con Valerio sulle ultime novità in campo scientifico.

Alla fine dell'anno scolastico arrivo alla conclusione che sia Enea sia Nicola hanno materiale a sufficienza per scrivere un buon LAM. Ora resta la parte più difficile. Per Enea si tratta di capire come la materia distorca lo spazio-tempo in prossimità di una concentrazione enorme di materia,

ossia un buco nero, in particolare perché esiste una distanza critica a partire dalla quale nessuno può tornare indietro, un po' come una sorta di «inferno astrofisico» in cui è permesso entrare ma non uscire. Nicola deve invece studiare, e capire, i sistemi quantistici in cui l'oggetto di studio è composto di una coppia di particelle che si trovano in uno stato detto *entangled* per il quale un analogo non esiste in fisica classica, e rappresenta il cuore della teoria quantistica. In poche parole si tratta di un sistema composto di due particelle che però devono essere interpretate come un tutt'uno, nel senso che le proprietà della prima dipendono da quelle della seconda, e questo indipendentemente dalla distanza tra di esse (per esempio una a Parigi e l'altra a New York), e una qualsiasi modifica subita da una influenza istantaneamente l'altra (senza però permettere la trasmissione di informazione). L'esistenza di questa proprietà sta alla base del teletrasporto ideato teoricamente nel 1993 da Bennet e collaboratori, realizzato in laboratorio sul volgere del secolo, e da non confondere con quello della serie televisiva Star Trek!

Ecco come Nicola ne spiega il funzionamento:

«Si tratta di «scomporre» un oggetto, nel nostro caso una particella, e di «ricomporlo» in un altro luogo. In altre parole il teletrasporto consiste nel trasferire le proprietà di una particella a un'altra, tramite una terza particella «mediatrice». Attualmente la distanza tra la stazione di trasmissione e quella di ricezione non supera il chilometro, per motivi tecnologici. Per illustrare i principi fondamentali di questo fenomeno consideriamo un esempio semplificato, ma di facile comprensione. Immaginiamo che Alice, sulla Terra, voglia teletrasportare un oggetto C a Bob, che si trova su Marte. La strumentazione minima è di due «cabine», il cui interno sia perfettamente isolato dal mondo esterno. Nella cabina sulla Terra, Alice inserisce l'oggetto e della «materia ausiliaria» (particella A). Questa «materia ausiliaria» deve avere un «gemello» (particella B) su Marte, che deve essere dotato di una proprietà per noi insolita, ma possibile nel mondo quantistico: se si modifica la «materia ausilia-

ria» sulla Terra, anche la «materia ausiliaria» su Marte si modifica istantaneamente (in termini quantistici ciò significa che le particelle A e B sono *entangled*). Alice preme ora un pulsante, che fa interagire l'oggetto C da teletrasportare con la «materia ausiliaria» A sulla Terra. Durante questo processo Alice perde la struttura del suo oggetto, perché deve fare una misura sulle particelle A e C, che ha appena fatto interagire (lo impongono le leggi della meccanica quantistica) e le caratteristiche del suo oggetto vengono istantaneamente trasferite alla materia gemella B, su Marte. Per completare il trasferimento Alice deve ancora inviare in maniera tradizionale (per esempio via radio) alla cabina di Bob il risultato della misura che ha effettuato sulla Terra. A questo punto il trasferimento è completo e si accende una spia: Bob può aprire la cabina e prendere l'oggetto. Abbiamo quindi visto che in realtà quello che viene trasferito non è la materia che forma l'oggetto, ma le sue caratteristiche.»

Settembre 2005: ecco una bella sorpresa! Nicola mi chiede se posso trovare alcuni articoli scientifici pubblicati nelle migliori riviste internazionali quali *Nature* e *Physical Review Letter (PRL)*, poiché il materiale gli sembra interessante. In un primo momento sono un po' scettico perché queste riviste sono spesso tecniche, ma poi mi dico che *Nature* è a largo spettro e gli *abstract* di PRL sono comprensibili. Quindi mi attivo per fornirgli il materiale. Nicola ha azzecato la ricerca bibliografica, che gli permette di consultare contributi di prim'ordine e nel contempo di cominciare ad abituarsi all'idea che la lingua ufficiale della scienza è l'inglese.

A metà ottobre, i miei ormai compagni di avventura sono prossimi al risultato finale, e da settembre io leggo e do suggerimenti su come migliorare la loro relazione scritta: si tratta di osservazioni formali, dato che lo sviluppo dei due lavori è seguito da vicino, in particolare ogni calcolo, ogni dimostrazione sono stati dapprima sviluppati dagli allievi e poi discussi assieme. A mo' di esempio ricordo il calcolo di Nicola del protocollo di teletrasporto. Gli ho detto: «Leggi l'articolo del 1993 sul teletrasporto e cerca di risviluppa-

re i calcoli mancanti, credo sarà utile fare un cambiamento di base, ma vedi tu...»; la settimana dopo è arrivato con diverse scartoffie e mi ha detto: «nei miei calcoli c'è un errore; deve esserci un meno al posto di un più». Gli ho fatto risviluppare i calcoli e, voilà, a serata inoltrata, abbiamo scoperto l'errore di segno.

La data di consegna arriva: Nicola e Enea mi presentano due lavori che giudicherò eccellenti, per la qualità dei risultati, dei rapporti, della modalità di lavoro e della presentazione orale.

Ma la storia di questi LAM non finisce qui, perché essi vengono scelti, assieme ad altri quattro, quali finalisti per il concorso indetto in occasione dei 150 anni del Politecnico Federale di Zurigo (ETHZ) per il miglior LAM di fisica. Alla giornata di presentazione, entrambi suscitano un'ottima impressione sia per il poster sia per la padronanza dei concetti fondamentali dimostrata di fronte alla giuria dell'ETHZ. Nicola vince il premio, ex aequo con un allievo del Liceo di Bellinzona che ha sviluppato un lavoro di robotica. Una bella soddisfazione per l'allievo, ma anche per il docente!

I miei contatti con il GAP di Ginevra, nel frattempo, mi permettono di organizzare una visita ai laboratori di questo istituto, tra i più all'avanguardia nel campo della fisica quantistica. A metà maggio ci rechiamo quindi a Ginevra, dove gli allievi possono confrontarsi con la realtà sperimentale delle teorie con le quali, per quasi un anno, hanno avuto a che fare.

Questo LAM mi ha permesso da una parte di vivere una bellissima e arricchente esperienza, dall'altra di dimostrare che la fisica quantistica è un soggetto che è sicuramente possibile trattare anche al liceo, in quarta, nell'ambito dell'opzione specifica FAM (fisica e applicazioni della matematica) o, in qualche caso, nell'opzione complementare «fisica». Finora la fisica quantistica è rimasta ai margini dell'insegnamento liceale, pur rappresentando una parte fondamentale della rivoluzione scientifica del XX secolo, e quindi culturalmente importante, e pur aprendo prospettive a implicazioni tecnologiche interessanti, per esempio nell'ambito della sicurezza dati (il primo servizio di

crittografia quantistica commerciale è stato adottato dal Canton Ginevra nel settembre 2004).

Evidentemente una presentazione della fisica quantistica a livello liceale necessita di una riflessione profonda: partendo dal presupposto che ciò è possibile, è necessario ideare percorsi didattici adeguati alle diverse classi. Ad esempio, nell'ambito dell'opzione complementare «fisica», è opportuno optare per un corso centrato quasi unicamente sugli aspetti concettuali ed epistemologici, empirici e tecnologici; mentre in un corso FAM, oltre agli elementi appena citati, si possono analizzare pure gli aspetti matematici. Infatti, la fisica quantistica si presta molto bene a un coordinamento tra gli strumenti matematici dell'algebra lineare, sviluppabili nel corso FAM, e la teoria fisica, cosa che per altri settori della materia è più difficile. Si potrà scegliere una linea simile a quella seguita da Nicola nella fase introduttiva, che necessita degli strumenti dell'algebra lineare, e che dal punto di vista fisico permette di situare la teoria quantistica in un contesto più generale, trasversale e unificante. Ciò sfrutta un'idea abbastanza semplice: per studiare ogni sistema è necessario scegliere grandezze fisiche relative ad esso e interessanti da analizzare, e per farlo bisogna avere informazioni sul sistema.

La consultazione dei due LAM descritti è possibile alla pagina web: http://www.liceolocarno.ch/Liceo_di_Locarno/materie/fisica/index.html

* Docente di fisica presso il Liceo di Locarno