



Tempo, principio di relatività e simmetrie nella scuola

Realizzato da Vettigli Ivano, matricola N94/342
per il corso “Didattica della fisica”
tenuto dal prof. Balzano Emilio.

Anno accademico 2016-2017

Abstract

“Lo scienziato non studia la natura perché è utile farlo. La studia perché ha piacere di farlo e ha piacere di farlo perché è bella. Se la natura non fosse bella, non interesserebbe conoscerla e non sarebbe interessante vivere. Io non sto parlando, ovviamente, della bellezza che colpisce i sensi, della bellezza delle qualità e delle apparenze. Sono lontano dal disprezzare questa, ma non ha niente a che fare con la scienza. Quello di cui sto parlando è una bellezza più intima che proviene dall’ordine armonico delle sue parti e che la pura intelligenza può cogliere.”
Tratto da “La selezione di fatti ” di Henri Poincaré

Nel seguente lavoro propongo suggerimenti per la costruzione di un curriculum didattico che metta in evidenza come la fisica sia collegata alle altre scienze e come queste siano parte integrante della vita sociale di ogni cittadino.

Tale lavoro poteva essere fatto sviluppando molti temi diversi, ho scelto di partire dai concetti di tempo e spazio per poi parlare del principio di relatività nelle sue varie forme e infine evidenziare il ruolo delle *simmetrie*. Questi sono argomenti “caldi” molto discussi sia fra gli esperti che fra gli amatori, come dimostrano le vendite del libro di Carlo Rovelli *Sette brevi lezioni di fisica* [1].

1 Unità di misura

Il compito dell'educatore è di far ripercorrere allo spirito del bambino la strada dei suoi avi, muovendosi rapidamente attraverso alcuni stadi ma senza sopprimerne alcuno. In questo compito, la storia della scienza deve essere la nostra guida.

La logica e l'intuizione nelle scienze matematiche e nello insegnamento, Henri Poincaré

Uno dei pregiudizi da scardinare, per quanto riguarda l'insegnamento delle discipline scientifiche, è l'idea che queste siano "fredde", che non riguardino l'essere umano e che chi le studia ragiona utilizzando soltanto la logica.

Come elegantemente esposto dal filosofo Arthur Koestler nel libro *I sonnambuli* [2], il legame fra la storia della scienza e la storia della società è indissolubile. Non possono, infatti, esistere scienziati se non in una società dalla quale traggono schemi di pensiero e una società viene plasmata dall'avanzare della scienza e della tecnologia.

Ad esempio, perché le unità di misura delle grandezze sono quello che sono? Le unità di misura delle grandezze fisiche vengono usate con tranquillità dalle persone, eppure il modo in cui sono andate affermandosi è spesso tortuoso. Un esempio particolarmente illuminante da fare agli studenti è l'affermarsi del complesso modo in cui misuriamo gli intervalli temporali. Come esposto nel libro di Michael Hoskin *Storia dell'Astronomia di Cambridge* [3], a spingere l'uomo era la necessità di poter prevedere le stagioni per la raccolta, le migrazioni e così via. L'alternanza giorno-notte è forse quella più evidente di tutte. Per tempi più lunghi abbiamo le fasi lunari, ovvero il numero di notti che la luna impiega per passare da un plenilunio al successivo. Per tempi ancora più lunghi abbiamo gli anni, con l'alternarsi delle stagioni, ma un anno dura in media 365 giorni, mentre un mese lunare dura in media 28-29 giorni, dunque non si può dividere un anno in un numero intero di mesi. I modi per aggirare questo ostacolo sono tanti, quello a cui siamo più abituati è il calendario *Gregoriano*. Tuttavia esistono numerosi altri calendari, come quello *Giuliano*, quello Giapponese e quelli usati dagli antichi popoli come gli Egiziani e i Babilonesi in cui, ad esempio, si aggiungevano *mesi intercalari* ogni volta che ci si accorgeva che il calendario si discostava dalle stagioni. Agli astronomi viene allora affidato il compito di misurare il tempo. Una tale attività è intimamente collegata allo sviluppo dell'intera società. Pensiamo al popolo dell'antico Egitto che per prevedere il periodo di piena del Nilo, che se non previsto con adeguata accuratezza avrebbe portato solo distruzione, osservava la levata eliacca della stella Sirio, ovvero quando la stella torna visibile perché non più mascherata dal sole. È probabile che gli Egizi riconducessero ad un rapporto di causa effetto la levata eliacca di Sirio e

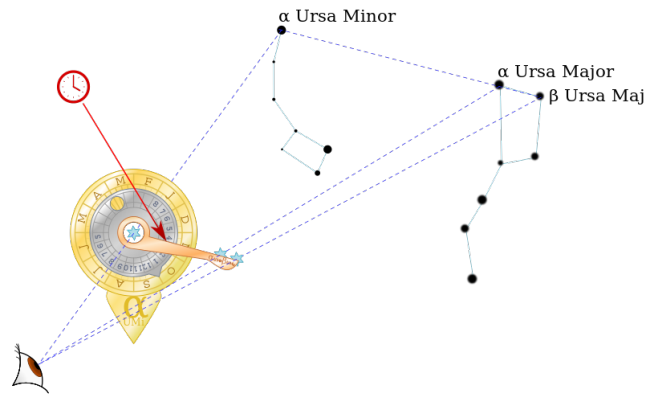


Figure 1: Come funziona un notturnale ©nojhan/Claire Laudy —CC-BY-SA

l'arrivo della stagione delle inondazioni. In realtà questo è un ottimo esempio di come *correlazione non implica causalità*. Infatti è una coincidenza che la levata eliacca di Sirio coincideva con il periodo dell'anno in cui si creavano le condizioni adeguate per il verificarsi delle inondazioni del Nilo.

L'importanza della scienza e della tecnologia nella società non finisce qui. Con lo svilupparsi dell'economia c'era un crescente bisogno di suddividere il giorno e la notte in ore. Pensiamo alle navi che devono scaricare nel porto e salpare nuovamente ad orari prefissati. Ebbene anche le ore non sono sempre state come le conosciamo, prima ad esempio non erano tutte della stessa durata. Per misurare le ore l'uomo si ingegnò, costruendo meridiane e notturnali.

È anche vero che la società influenza gli schemi di pensiero degli scienziati. Ad esempio, i complessi delle piramidi dell'antico Egitto sono costruiti in modo da rappresentare alcune costellazioni nel cielo, come quella di Orione. Questo significa che gli ingegneri dell'epoca furono spinti dalle convinzioni religiose della società a progettare e trovare il modo di costruire edifici allineati in un certo modo rispetto ai punti cardinali.

Un altro aspetto spesso trascurato, che contribuisce alla errata visione delle scienze come una cosa fine a se stessa, è la dimensione operativa delle scienze. Di fondamentale importanza è descrivere come si possono misurare il tempo e lo spazio. Abbiamo già citato le meridiane e i notturnali, strumenti che possono essere costruiti dagli studenti. In ogni caso, le misure di tempo fino all'invenzione degli orologi atomici sono state legate alle posizioni degli astri. Il moto apparente degli astri sulla sfera celeste è palesemente regolare, ed è stato usato per calibrare gli orologi fin dall'alba dei tempi. Ciò significa che le misure dei tempi corrispondono, in origine, a misure di angoli sulla sfera celeste. Ad esempio, il tempo impiegato dal punto γ , l'intersezione dell'equatore celeste con l'eclittica del sole come mostrata nella figura 2, a tornare nella stessa posizione sulla sfera

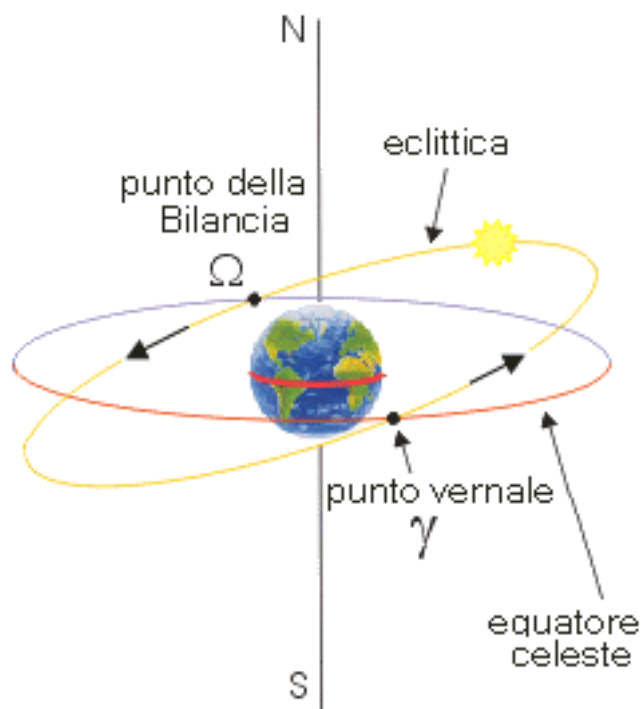


Figure 2: Punto dell'Ariete (o punto vernale o punto γ) e Punto della Bilancia (o punto Ω)- Fonte Wikipedia - Autore ZetaZeti

celeste è il giorno sidereo. Essendo l'anno di 365 giorni circa, che è il tempo impiegato dal sole a percorrere un eclittica, all'antico popolo dei Babilonesi è sembrato conveniente suddividere l'angolo giro in 360 gradi e da ciò derivano le unità di misura sessagesimali, e non decimali, del tempo e degli angoli. Questa circostanza può essere messa in luce proponendo esercizi in cui si chiede di convertire le ore in minuti, i giorni in ore e così via. Ad esempio, quanti minuti sono $2,5h$? E $3,2h$? Questa potrebbe anche essere l'occasione per una digressione matematica sui sistemi numerici diversi da quello decimale, come quello binario.

L'uomo ha successivamente maturato interesse per tempi molto più lunghi e molto più brevi di quelli descritti, a questo proposito il *Physical Science Study Committee*, in seguito PSSC, realizzò una serie di video che iniziano con una rassegna dei tempi più brevi e più lunghi misurati (all'epoca della realizzazione del video) e sui relativi strumenti di misura. Far vedere tali video agli studenti, magari integrando con i progressi fatti dalla scienza e dalla tecnologia fino a questo punto, potrebbe stimolare la loro curiosità a conoscere i limiti della scienza fisica e mettere in luce che vengono continuamente superati. Molti spunti per migliorare la didattica possono essere presi dai libri del PSSC [4].

Per stimolare gli studenti alla speculazione, è possibile chiedergli se c'è un modo di misurare il tempo, così come l'abbiamo descritto fino ad ora e sono abituati a concepirlo, senza misurare posizioni e viceversa. Questo porta molto velocemente a chiedersi cosa siano il tempo e lo spazio e al tentativo di dare una risposta. Abbiamo in precedenza fatto notare che all'origine le misure di tempo erano misure di angoli, ovvero di posizioni angolari, e non c'è modo di misurare un tempo senza passare per una misurazione di posizioni. Allora il tempo e lo spazio non possono che essere intimamente collegati! Mentre è facile dare una definizione operativa di lunghezza, una volta preso un campione di riferimento, è difficile darne una operativa di tempo, basti pensare che lo strumento *orologio* è sempre più complesso di un *metro campione*. Si può allora speculare sul fatto che, nei più recenti lavori di fisica, viene messo in discussione che il tempo sia realmente una grandezza fisica *fondamentale*. Non che questi non debba figurare fra le unità di misura del *SI*, indispensabili per la vita pratica di privati e aziende, ma prendiamo in esempio la temperatura. Essa è, in ultima analisi, una misura dell'energia cinetica media delle molecole del materiale, e non ha senso parlare di temperatura per sistemi non macroscopici. Forse il tempo è simile, manifestandosi come prodotto di interazioni fra parti più elementari dei sistemi che i fisici sono abituati a studiare? La risposta a questa domanda non è ancora chiara e, a mio avviso, non si deve aver paura di dire agli studenti che la comunità scientifica può dividersi e discutere su questi temi, anzi, tali speculazioni attirano l'immaginazione dei ragazzi.

Attività come quella appena descritta potrebbero far interiorizzare lo strumento delle unità di misura agli studenti. Per una definizione di cosa si intende qui per interiorizzare si rimanda al libro di Vygotskij *Pensiero e Linguaggio* [5]. In breve, spesso gli studenti utilizzano le unità di misura senza comprenderle appieno. Ad esempio nel corso della mia attività di tutorato in cui seguo alcuni ragazzi iscritti al primo anno di università nelle materie in cui presentano maggiori difficoltà, mi sono ritrovato a dover spiegare come convertire una misura espressa in *cc* (centimetri cubi) in una espressa in litri. Gli studenti mi hanno saputo dire che un centimetro cubo di acqua equivale a mille millimetri cubi, ma non sapevano spiegarsi “da dove viene questo fatto”. Ho chiesto loro quale grandezza fisica si misura con il litro e le risposte sono state “una capacità”, “uno spazio” e “un volume”. Ho allora chiesto che cosa si misura con i metri, con i metri quadri e con i metri cubi. È così è scattato *il momento wow* in cui gli studenti hanno capito che sono semplicemente due unità di misura diverse per la stessa grandezza fisica. Non che gli studenti non lo sapessero, semplicemente non ci avevano mai fatto caso. Hanno allora accettato con interesse il compito di risolvere l'esercizio in modi diversi, ovvero convertendo la misura non in litri, ma in metri cubi o trasformare i litri in millimetri cubi. In questo modo è stata analizzata la relazione fra le due unità di misura e si è evidenziato che un litro è equivalente ad un decimetro cubo e che questo è estremamente conveniente da un punto di vista pratico, visto che i volumi con i quali si lavora di solito sono di quelle dimensioni. Infine, un altro *momento wow* è scaturito quando, spiegando che km è formato da due lettere, di cui la seconda indica le unità di misura e la prima il multiplo, hanno realizzato che conoscendo la scala dei metri

è possibile ottenere le scale di multipli e sottomultipli di tutte le grandezze. Non che gli studenti non conoscessero le scale di multipli e sottomultipli di varie grandezze, ma non avevano mai pensato alle analogie fra esse. Se ci rifacciamo al lavoro della professoressa Anna Sfard [6], si erano sempre fermati ad un utilizzo *operativo* senza mai passare ad una visione *strutturale*.

2 Cinematica

Il tempo e lo spazio... non è la natura ad imporli su di noi, siamo noi ad imporli sulla natura perchè li troviamo convenienti.

Il valore della scienza, Henri Poincaré

Osservando gli oggetti intorno a noi è evidente che le cose si muovono, ovvero cambiano posizione. In prima istanza possiamo evitare di affrontare il problema delle cause del moto e ci possiamo concentrare sulle descrizioni di quest'ultimo. Gli astri si prestano particolarmente bene a questo tipo di studio, in quanto i loro moti godono di particolari regolarità. Essi sono anche un buon esempio di come sia più "semplice" ottenere risultati *scientifici* cercando una pura descrizione, che cercando le cause dei moti. Mentre già gli antichi Babilonesi sapevano prevedere i moti dei pianeti, le eclissi e così via, solo nel diciassettesimo secolo, con Newton, si sono avute descrizioni che possiamo accettare come scientifiche sulle cause dei moti planetari. Dunque studiare la cinematica significa "accontentarsi" di descrivere come stanno le cose e in questa fase gli studenti non si devono preoccupare di altro, quasi fosse più un esercizio di modellizzazione matematica che un esercizio di fisica.

Quando si introduce la cinematica, spesso nel biennio delle scuole superiori, si dà per scontato che gli studenti abbiano dimestichezza con la variabile *tempo*. Come esposto da *Luis Radford* nell' articolo "SIGNIFYING RELATIVE MOTION Time, Space and the Semiotics of Cartesian Graphs "[7] anche il filosofo Kant descriveva il tempo come una intuizione a priori. Nello stesso articolo si scardina questa convinzione, presentando alcuni esercizi trovati in testi risalenti al medioevo.

Analizziamo il seguente problema tratto dall'articolo:

Un campo è lungo 150 feet. Ad una estremità c'è un cane e all'altra una lepre. Il cane percorre 9 feet con un salto mentre la lepre 7 feet. Quanti feet saranno percorsi dal cane che insegue e dalla lepre inseguita prima che quest'ultima sia raggiunta? [Alcuino di York. Regno di Northumbria, 735 - Tours, 804]

La soluzione è 75 salti perché ad ogni salto la distanza diminuisce di 2 feet. Ma in questo ragionamento il tempo non è mai stato utilizzato in modo esplicito, rimane nascosto nell'assunzione che i salti avvengono contemporaneamente.

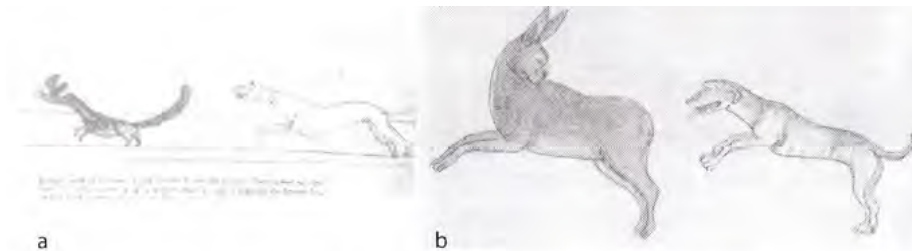


Figure 3: a) Il disegno che accompagna il problema di Alcuin. b) Il disegno che accompagna il problema di dell'Abacco

Un altro esercizio proposto è il seguente:

Una volpe è 40 passi avanti ad un cane. Ogni 3 passi del cane sono 5 della volpe. Quanti passi deve compiere il cane per raggiungere la volpe?
(dell'Abacco come tradotto da Arrighi nel 1964 p. 78)

Sapendo che $3c = 5v$ e usando la regola del 3 (applicando una proporzione) otteniamo $5c = (8+1/3)v$. Questo significa che ogni 5 passi (di cane) il cane recupera $3+1/3$ passi (di volpe). Applicando nuovamente la regola del tre alla proporzione:

$$5[PassiCane] : (3 + 1/3)[PassiVolpe] = x[PassiCane] : 40[PassiVolpe] \quad (1)$$

E otteniamo $x = 60$ passi di cane.

Anche in questo caso la variabile tempo non viene esplicitata, e sebbene questo metodo ci possa sembrare alquanto involuto, è così che si risolvevano i problemi nel medioevo e dunque il concetto di variabile temporale è un qualcosa che non deve essere dato per scontato, ma deve essere costruito insieme agli studenti.

Radford propone a questo punto delle esperienze da fare con i sensori di movimento per introdurre il concetto di moti relativi e lo strumento del piano cartesiano.

Una mia proposta che non ho ancora avuto modo di attuare per aiutare gli studenti che vengono introdotti alla cinematica a comprendere e utilizzare la variabile temporale è quello di proporre problemi simili ai seguenti:

Allo stadio i tifosi battono le mani a tempo per incitare la squadra di casa. Un difensore, dopo aver recuperato palla, effettua un lungo lancio in avanti per far salire la squadra e la palla avanza di 5 metri ogni volta che i tifosi battono le

mani. Se la palla cada a terra dopo 8 battiti, quanto spazio ha percorso la palla?

Allo stadio i tifosi battono le mani a tempo per incitare la squadra di casa. Un difensore, dopo aver recuperato palla, effettua un lungo lancio in avanti per far salire la squadra, e la palla avanza di 50 metri. Se durante il lancio i tifosi hanno battuto le mani 8 volte, quanto è andata veloce la palla?

Questi problemi sono ricchi di assunzioni implicite e discutere su queste assunzioni può essere un'ottima attività di classe. Ad esempio, chi ci dice che i tifosi battano le mani *a tempo*, dove noi non abbiamo ancora definito in modo chiaro cosa sia il tempo? Si può allora mettere in evidenza che abbiamo bisogno di orologi più precisi, come un pendolo che abbia periodo un secondo, ma dobbiamo stabilire che per orologio *migliore* intendiamo un orologio che metta meglio in evidenza la periodicità dei moti. Possiamo chiederci se il lancio avviene in avanti o in diagonale, e tante altre domande di questo tipo, ma il linguaggio in cui è espresso il problema è pensato in modo da aiutare i ragazzi a capire quali siano gli aspetti trascurabili e quali quelli fondamentali per la corretta descrizione della situazione.

Una volta chiariti questi concetti e fatto emergere il concetto di variabile temporale, proporrei il problema seguente:

Un centrocampista effettua un cross in avanti: se la palla viaggia ad una velocità di 13 metri al secondo e rimane in aria per 5 secondi, a che distanza dal difensore cadrà la palla?

Accanto al centrocampista c'è un compagno di squadra che inizia a correre in avanti per agevolare la manovra offensiva. Dopo quanti secondi vedrà cadere la palla?

Se il compagno di squadra si muove ad una velocità di 6 metri al secondo non riuscirà a raggiungere il punto in cui cade la palla e dovrà percorrere ancora una certa distanza prima di raggiungere il punto in cui la palla cade al suolo. A quanti metri ammonta tale distanza?

Nel momento in cui gli studenti capiscono che l'osservatore in moto e l'osservatore in movimento vedono la palla cadere a terra nello stesso istante, ma che la distanza dalla palla è diversa e calcolabile sottraendo lo spazio percorso dal giocatore in movimento, conviene organizzare un festa con dolci bevande: hanno infatti scoperto le trasformazioni di Galilei!

Supponendo che il moto si svolga tutto in una dimensione abbiamo infatti:

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad (2)$$

Con i ragazzi si deve discutere del fatto che passare dalle x alle x' significa

cambiare il sistema di riferimento, e che queste equazioni sono valide solo quando v è costante, ovvero è un numero che possiamo sostituire nella prima equazione per avere il nuovo valore x' . Nell'esercizio precedente, x è la distanza (o posizione) a cui il centrocampista vede cadere la palla, x' la distanza (o posizione) a cui cade rispetto al suo compagno di squadra.

Dopo aver passato un certo tempo ad analizzare diversi tipi di moto, è tempo di fare il grande salto fra la cinematica, puramente descrittiva, e la dinamica che cerca sempre di descrivere il moto, ma includendo le cause che lo generano.

3 Meccanica classica

Se tutte le parti dell'universo sono interconnesse in una certa misura, ogni fenomeno non sarà l'effetto di una singola causa, ma il risultato di un numero infinito di cause; in altre parole, è conseguenza dello stato dell'Universo il momento precedente.

La misura del tempo, Henri Poincaré

Nella divina commedia il poeta Dante Alighieri recita *l'amor che move il sole e l'altre stelle*, suggerendo che a muovere gli astri sia l'amore. Questa è a tutti gli effetti una proposta per spiegare il moto degli astri celesti, tuttavia non può essere considerata *scientifica* per la semplice ragione che non ci consente di formalizzare il sistema e fare previsioni! Qualcuno può affermare che *è così che vuol l'amore* qualsiasi sia il moto effettuato. Una proposta scientifica invece è stata avanzata da Newton. La proposta è che tutti i corpi dell'universo sono dotati di una certa massa e che si attraggono con una forza inversamente proporzionale al quadrato delle distanze e direttamente proporzionale al prodotto delle masse. Detto in altri termini, tutti i moti degli astri, presenti, passati e futuri, possono essere dedotti con accuratezza limitata solo dalle possibilità di calcolo e dalla precisione delle misure applicando le equazioni

$$\begin{cases} F = ma \\ F_G = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \end{cases} \quad (3)$$

Questa idea semplice, che riesce a descrivere in modo accurato molti fenomeni fisici, è stata uno dei più grandi successi della storia della fisica e anche se in tempi recenti è stata sostituita dalla Relatività Generale, una teoria più *vicina alla realtà* nel senso inteso da Roger Penrose nel suo libro "La strada che porta alla realtà" [8], viene ancora applicata in numerose situazioni in cui riesce a descrivere con accuratezza impressionante i fenomeni fisici.

Alla scoperta della gravità viene generalmente legato l'aneddoto della mela

caduta sulla testa di Newton. In realtà l'idea di un *forza gravitazionale* aleggiava nell'aria già da tempo. Nel libro *Astronomia Nova* Keplero scrive "La Gravità è la mutua tendenza dei materiali affini all'unità o al contatto (come anche la forza magnetica), ed è tale che la terra attrae una pietra molto più che la pietra attiri la terra" (traduzione personale dalla versione inglese come riportata da Koestler.).

Per comprendere appieno questa proposta è però necessario comprendere cosa sono la massa e la forza. La forza può essere relativamente semplice da introdurre con i ragazzi. Facendo attenzione alla presunta *misconcezione* secondo cui la forza viene pensata come proporzionale alla velocità e non all'accelerazione, basta far notare ai ragazzi che per cambiare la loro velocità gli oggetti devono essere spinti, situazione che possono modellizzare ipotizzando l'azione di una forza. Molto probabilmente il concetto di *grandezza vettoriale* e le basi dell'algebra vettoriale sono già state date, ma questa è un'occasione per riprendere tali argomenti e mostrare che lo strumento *vettore*, una volta appreso e interiorizzato, può essere sfruttato per descrivere cose anche molto diverse fra loro. Spiegare cosa sia la massa potrebbe essere meno semplice. La spiegazione che più mi ha colpito, risalente ai miei anni di liceo, è che la massa è *memoria*. Un oggetto in qualche modo *ricorda* il suo stato di moto e oppone una resistenza, ovvero un'*inerzia* quando cerchiamo di cambiarlo. Che la massa inerziale e quella gravitazionale siano in realtà la stessa cosa è un interessante problema storico e può essere un modo per introdurre il pendolo a torsione, uno strumento descritto anche nel video del PSSC, che consente ai fisici di fare esperimenti molto raffinati. Tale strumento fra l'altro è ancora ampiamente utilizzato, ad esempio nel laboratorio di *Fisica Sperimentale della Gravitazione* della nostra università dove viene usato per testare alcune componenti del sistema che andrà nello spazio per il progetto internazionale *ELISA*, con il quale si cercheranno di rilevare onde gravitazionali dallo spazio.

Infine, nell'introdurre le forze c'è la possibilità di fare speculazioni con gli studenti, possiamo infatti chiedere cosa si intenda per *interazioni a distanza*. Come descritto dallo stesso Newton in una lettera a Bentley, riportata nel già citato libro di Koestler di cui riporto un breve passaggio da me tradotto: "Che la materia inanimata dovrebbe, senza la mediazione di qualcosa che non sia materiale, operare e modificare altra materia senza mutuo contatto è inconcepibile".

Un modo alternativo di presentare le forze, a mio avviso più elegante, è quello presentato nel *corso di fisica di Karlsruhe*, i cui volumi si possono trovare al sito web <http://www.job-stiftung.de/index.php?il-corso-di-fisica-di-karlsruhe>.

Per introdurre la quantità di moto senza avere il concetto di forza, l'ideale sono gli esperimenti descritti nel PSSC con i carrelli, in cui gli oggetti si urtano. Si può allora intendere che, durante gli urti, i carrelli si *scambino quantità di moto*. In questo quadro teorico di riferimento, una forza non è altro che una *corrente di quantità di moto* che si trasferisce dai corpi più veloci a quelli meno veloci. In questo modo si realizza anche un collegamento molto evidente fra la meccanica e le altre branche della fisica come la fluidodinamica e lo studio dei circuiti elettrici. Inoltre, partendo da questo concetto di quantità di moto che si trasferisce, è possibile introdurre l'esercizio con più carrelli collegati da

molle che generano onde stazionarie, risulterà infatti che si sta studiando un effetto scenico di come i vari carrelli si trasmettano la quantità di moto tramite le molle. Anche in questo caso la massa può essere introdotta semplicemente come l'inerzia alla variazione di moto.

A questo punto si può stabilire un ponte non solo fra varie aree della fisica, ma anche con tutte le altre scienze. Abbiamo detto che la quantità di moto si trasmette da un corpo all'altro, e possiamo trattarla *come* un fluido che si conserva. Ovviamente questa è solo un'analogia, non ci sono evidenze che ci suggeriscano l'esistenza di un fluido di quantità di moto ma, dal punto di vista logico e matematico, i due fenomeni possono essere descritti in modo simile. Può essere utile, come proposto nel corso di fisica di Karlsruhe, iniziare proprio con la fluidodinamica. La quantità di moto si trasmette e, se gli attriti sono trascurabili, si *conserva*. Utilizzare la conservazione della quantità di moto per risolvere esercizi, e far vedere come trattare i casi in cui c'è attrito, porta naturalmente ad apprezzare la potenza di questo modo di ragionare, assolutamente trasversale in tutte le scienze. Questa è allora l'occasione adatta per introdurre il concetto di Energia, l'altra grandezza meccanica soggetta a conservazioni.

Inizialmente la conservazione dell'energia e della quantità di moto possono essere presentate come fatti sperimentali, lavorando con i carrelli e diminuendo il più possibile l'attrito in un primo momento e poi aggiungendo volontariamente l'attrito, mostrando che la quantità di moto e l'energia si perdono attraverso esso e quest'ultima diventa calore.

C'è ovviamente, un modo più elegante di spiegare la conservazione di queste leggi. Rifacendoci al libro sulla meccanica di Landau [9], immaginiamo di avere un oggetto in quiete. Se vi fosse una direzione privilegiata nello spazio, l'oggetto inizierebbe a muoversi in quella dimensione e così la sua quantità di moto cambierebbe. Ma allora, possiamo dire che la conservazione della quantità di moto deriva dall'omogeneità dello spazio, cioè dal fatto che non ci sono direzioni privilegiate in cui muoversi. Infatti, se nella regione di spazio considerata è presente un campo gravitazionale, gli oggetti si muoveranno spontaneamente verso il centro di attrazione.

In modo analogo, la conservazione dell'Energia può essere fatta derivare dalla concezione che il tempo è omogeneo. In un sistema meccanico siamo infatti in grado di risalire allo stato del sistema in tempi passati con la stessa facilità con cui effettuiamo previsioni sui moti futuri. Questo perché l'energia totale di un sistema si conserva. In ultima analisi, anche se non viene presentato in modo formale, si potrebbe discutere con gli studenti, in modo anche speculativo, del teorema di Emmy Noether, ovvero che *ad ogni simmetria della lagrangiana, ovvero ad ogni trasformazione continua delle coordinate generalizzate q e \dot{q} (ed eventualmente del tempo t) che lascia inalterata la lagrangiana $L(q, \dot{q}, t)$, corrisponde una quantità conservata.*

Ricordiamo che la lagrangiana è una funzione che caratterizza un sistema fisico, ad esempio per un sistema meccanico è la differenza fra energia cinetica ed energia meccanica. Dalla lagrangiana è possibile derivare tutte le proprietà di un sistema fisico utilizzando il principio di minima azione (o principio variazionale di Hamilton) il quale afferma che un sistema fisico in moto tra due punti segue

un cammino che, tra tutti i percorsi possibili, è quello che minimizza la somma (l'integrale azione) dei valori della lagrangiana valutata in tutti i punti del cammino.

Questa è anche un'occasione per ribadire che la scienza non è un settore preferenziale per le persone di sesso maschile, anzi le donne hanno dato contributi fenomenali, l'unica ragione per la quale sono in numero minore rispetto agli scienziati maschi è il forte svantaggio sociale di cui sono vittime. Questo è uno dei tanti modi, alcuni già citati, di come la società influenzi il percorso scientifico. Se si fa credere alle persone che non potranno diventare esperti in discipline scientifiche, queste non lo diventeranno mai e cominceranno a pensare che sia contro la loro stessa natura. Viceversa, se dalla scienza arrivano esempi di persone che vincono i pregiudizi, forse questo può contribuire ad una maggiore equità nella nostra società.

A questo punto si può passare ad un altro concetto trasversale, quello delle simmetrie. Come si comportano le leggi della meccanica, quando applichiamo le trasformazioni di Galilei, ovvero quando passiamo da un sistema di riferimento ad un'altro cambiando osservatore? Banalmente, si verifica che rimangono le stesse.

Simmetria significa proprio questo. Si può introdurre il concetto usando le figure geometriche, ad esempio i quadrati. Se si ruota un quadrato di 90° questo apparirà uguale a prima, diremo allora che è simmetrico rispetto a rotazioni di angoli retti. Le leggi della meccanica sono allora simmetriche rispetto alle trasformazioni di Galilei. Con questa affermazione intendiamo dire che i moti accelerati rimangono moti accelerati, i moti uniformi rimangono moti uniformi e così via. Possiamo mettere in evidenza che i valori numerici delle grandezze fisiche possono, anzi, sicuramente differiranno in sistemi di riferimento differenti. Ad esempio un oggetto fermo al suolo non ha energia nè cinetica nè potenziale. Se, per esempio, ci spostiamo su un treno e lo vediamo sfrecciare a 100 chilometri orari, questo avrà un'energia ben diversa da zero!

Le trasformazioni di Galilei sono quello strumento che ci permette di confrontare risultati fra osservatori diversi, perché ci dice in che misura le leggi della fisica sono uguali per tutti gli osservatori in sistemi di riferimento inerziali. In definitiva parliamo di *relatività Galileiana*.

4 Meccanica relativistica

Attraverso la logica dimostriamo,
ma attraverso l'intuizione
scopriamo. Saper criticare è bene,
saper creare è meglio

*Definizioni matematiche ed
educazione, Henri Poincaré*

Sembrerebbe che, durante il nostro discorso sulla meccanica, ci siamo dimenticati del tempo e che abbiamo dato per scontato che obbedisse alle nostre

intuizioni, in particolare quella che tutti i giocatori in un campo di calcio vedono cadere un pallone a terra nello stesso istante. In realtà tutta la meccanica regge su questa ipotesi, in quanto tutta la meccanica è simmetrica rispetto alle trasformazioni di Galilei e ogni qualvolta ragioniamo su un problema la facciamo tacitamente.

In genere dopo la meccanica si studia la fluidodinamica, che ho già suggerito di studiare come primo argomento, e la termodinamica, con la quale possiamo continuare ad assumere che l'universo sia *Newtoniano* e continuando a parlare di Energia e di leggi di conservazione. La rottura arriva con l'elettromagnetismo quando, una volta completato il quadro fenomenologico, si introduce la soluzione al problema dell'azione a distanza, ovvero il concetto di campo. Quest'ultimo potrebbe essere già stato introdotto quando si è parlato della gravità, in ogni caso ricordiamo che il campo elettrico si definisce come la forza che agisce su una carica q , mentre il campo magnetico è generato da corpi magnetici o cariche in movimento. Si giunge infine alle famose equazioni di Maxwell che nel vuoto assumono la forma

$$\begin{cases} \nabla \cdot E = \rho/\epsilon_0 \\ \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times B = \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t}. \end{cases} \quad (4)$$

Ricordiamo che $\nabla \cdot E$ è la divergenza del campo elettrico, ovvero la somma delle derivate parziali delle componenti del campo elettrico E nello spazio. La prima equazione (legge di Gauss) ci dice che il campo elettrico *esce* dalle cariche positive ed *entra* nelle cariche negative. Abbiamo, infatti, che per una carica positiva la somma delle derivate parziali nelle componenti spaziali è positiva, essendo ϵ_0 la costante dielettrica del vuoto positiva, e dunque le linee di campo risultano divergenti rispetto alla carica. In modo analogo la seconda equazione ci dice che il campo magnetico è *solenoidale*, ovvero le linee sono chiuse e non esistono monopoli magnetici. Queste prime due equazioni possono anche essere ricavate dalle altre due, ma vengono riportate per l'informazione immediata che danno sui campi. La terza equazione (legge di Faraday-Neumann-Lenz) mette in relazione il *rotore* di E con la derivata del campo magnetico. Il rotore di un campo vettoriale è un *operatore* che descrive in ogni punto la rotazione infinitesima del campo. Quando il rotore è diverso da zero il campo non è conservativo e il lavoro su una traiettoria chiusa non è nullo, in altre parole si genera una differenza di potenziale. Infine, la quarta equazione (legge di Ampère-Maxwell) mette in relazione il rotore del campo magnetico con la derivata del campo elettrico e completa l'unificazione di questi due campi.

Per una trattazione più estesa delle equazioni di Maxwell si può consultare [10], mentre per un'introduzione *pratica* all'analisi vettoriale si può consultare [11]. Le equazioni di Maxwell non sono invarianti rispetto alle trasformazioni di Galilei. In particolare, la velocità della luce c dovrebbe essere la stessa in tutti i sistemi di riferimento. Ricordiamo che è semplice ottenere l'equazione delle

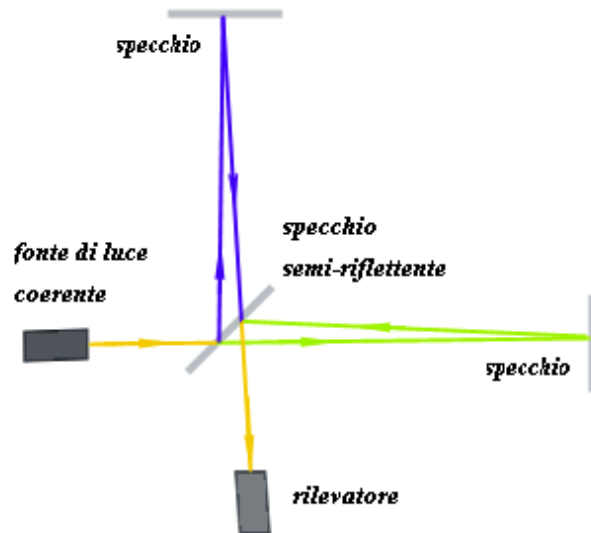


Figure 4: Schema dell'interferometro di Michelson - Immagine presa da Wikipedia, autore Snowdog

onde dalle equazioni di Maxwell facendo il rotore delle ultime due equazioni e quindi le equazioni di Maxwell ci dicono che la luce è un'onda di campi elettrici e magnetici che si propagano alla stessa velocità in tutti i sistemi di riferimento. A questo punto può essere stimolante una parentesi storica da discutere con i ragazzi. Gli scienziati dell'epoca erano convinti della correttezza della meccanica, proprio come probabilmente lo sono gli studenti a questo punto. Dunque l'ipotesi più ragionevole sembra essere quella che le onde luminose debbano propagarsi in qualche mezzo, che gli scienziati chiamarono etere, e che la velocità della luce c sia rispetto a questo etere, che costituisce così un sistema di riferimento privilegiato. Vennero allora provati tanti esperimenti per misurare il moto della terra rispetto all'etere, ma fallirono tutti, al punto che si gli scienziati iniziarono a credere che ci fosse una cospirazione cosmica in atto che gli impedisse di rilevare l'etere. Come disse Poincaré, una cospirazione cosmica è a sua volta una legge di natura. A tale proposito si può proporre di ripetere l'esperienza di Michelson-Morley utilizzando le microonde.

L'esperimento originale consiste nel misurare la velocità della luce in due direzioni ortogonali sfruttando un interferometro come mostrato in figura 4. Il fascio di luce viene diviso e poi fatto convergere nuovamente per formare una figura di interferenza. Ruotando l'apparato si dovrebbero notare delle differenze nelle frange a causa della diversa velocità della luce, ma così non è.

Come spieghiamo il fatto che la luce sembra viaggiare con la stessa velocità

sia quando la vediamo venire verso di noi sia quando la vediamo muoversi in direzione ortogonale al nostro moto? Ovviamente non possiamo con le trasformazioni di Galilei e a fornire una risposta fu Lorentz. Egli propose quelle che sono oggi note come trasformazioni di Lorentz

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{array} \right. \quad (5)$$

Queste equazioni si riducono a quelle di Galilei se v è trascurabile rispetto a c , ma rendono conto del fatto che c è una costante universale.

Per una descrizione più completa dell' esperimento, delle trasformazioni di Lorentz e delle considerazioni che seguono si può consultare [12].

Riprendendo il discorso delle simmetrie, possiamo vedere queste trasformazioni come rotazioni, rotazioni di uno spazio a quattro dimensioni. La *magia* è nella trasformazione dello spazio in tempo e del tempo in spazio attraverso queste rotazioni. Questo significa che possiamo vedere lo spazio e il tempo come un'unica struttura quadridimensionale, dove le distanze sono definite mediante la metrica di Minkowski. Si passa allora da una visione *operativa* di spazio e di tempo, legate ai metodi di misurazione, ad una visione *strutturale* di spazio-tempo.

Una volta che gli studenti sono convinti del fatto che la velocità della luce sia la stessa in tutti i sistemi di riferimento, si può suggerire che tutta la fisica deve essere rivista alla luce di questo principio. L'altro principio che consideriamo fondamentale per la fisica è quello della relatività, ovvero osservatori diversi devono arrivare alle stesse leggi fisiche per gli stessi fenomeni, come esplicitato nei paragrafi precedenti. In un certo senso, questo significa che la fisica e le scienze in generale studiano qualcosa che deve essere oggettivo, cioè cercano di giungere a conclusioni condivisibili da chiunque studi gli stessi fenomeni. Eppure questa necessità di oggettività viene chiamata *principio di relatività*.

Utilizzando questi due principi si possono introdurre i noti esperimenti mentali di Einstein. Si può introdurre una definizione operativa di tempo basata sugli orologi di luce, si può dimostrare che se l'orologio è in movimento segnerà tempi più lunghi utilizzando solamente il teorema di Pitagora e si può dimostrare che non esiste la contemporaneità degli eventi, cosa che generalmente si realizza immaginando un laser che spara luce ai due lati di una navicella, che colpiranno le pareti in tempi diversi per osservatori in sistemi di riferimento diversi.

Siamo allora destinati a non poter giocare a calcio, in quanto non saremo mai d'accordo su quando una palla tocca terra? Ovviamente no, questi fenomeni sono tutti trascurabili per velocità molto più piccole di quella della luce e si

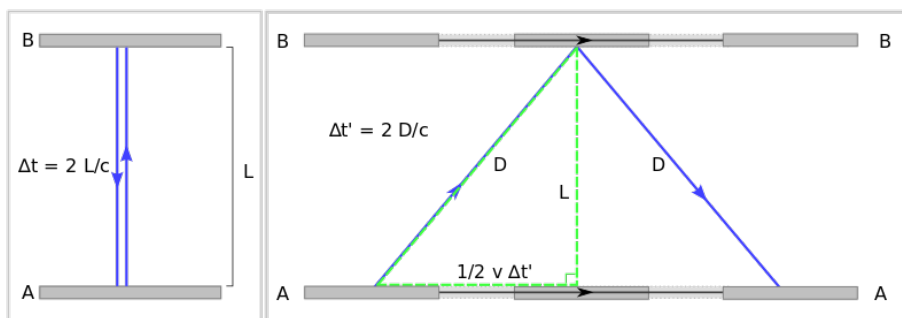


Figure 5: Un orologio di luce funziona mediante la riflessione di un raggio di luce fra due specchi. Se in quiete rispetto all'osservatore, la luce deve percorrere una distanza di $2L$. Se l'orologio è in moto dovrà percorrere distanze maggiori, ma siccome la velocità della luce è costante il tempo risulterà dilatato. - Immagine presa da Wikipedia, autore Sacamol

possono riprendere gli esercizi di cinematica e meccanica già svolti per mostrare che è praticamente impossibile misurare le differenze.

Una nuova occasione per speculazioni si presenta a questo punto, possiamo infatti chiederci se un evento A che precede un evento B in un dato sistema di riferimento diventi successivo all'evento B in un altro sistema di riferimento. In poche parole possiamo chiederci se si possa violare il principio di causa-effetto. Ebbene no, uno schizzo del cono di luce nel piano di Minkowski alla pagina seguente mostra che ciò non è possibile, almeno nell'ambito di questa teoria.

Fino a questo punto abbiamo parlato solo della cinematica relativistica, per introdurre la meccanica relativistica basta fornire agli studenti il concetto di massa a riposo. Ricordiamo che la massa di un oggetto in movimento è data da $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ e l'equazione di Newton assume la forma

$$F = \frac{\dot{p}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (6)$$

Queste equazioni ci dicono che se un oggetto fermo ha una certa massa, un oggetto in movimento aumenta la sua massa. Situazioni di questo tipo non si presentano solo nella fisica relativistica, potrebbe essere stato utile aver trattato, durante lo studio della meccanica, esercizi sul moto dei razzi. In ogni caso i corpi in movimento aumentano la loro massa, questo suggerisce un collegamento fra la massa di un oggetto e l'energia. Ed in effetti abbiamo l'equazione

$$E = \sqrt{(m_0 c^2)^2 + (pc)^2} \quad (7)$$

che per un corpo a riposo si riduce alla celebre equazione $E = mc^2$. Scritta

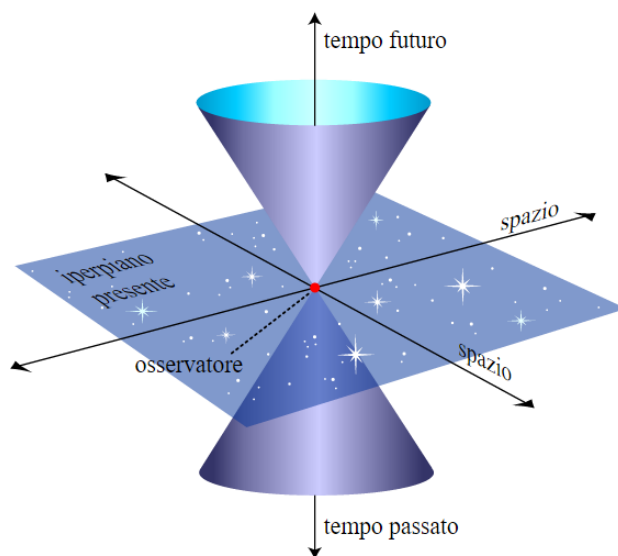


Figure 6: Cono di luce nello spazio tempo di Minkowski. Il cono in alto comprende i punti che possono essere raggiunti dall'osservatore nell'origine viaggiando alla velocità della luce, quello in basso i punti dai quali si poteva raggiungere l'osservatore nell'origine degli assi muovendosi alla velocità della luce. Il principio di causalità può essere anche visto come una conseguenza della definizione di norma dei quadriettori spazio-tempo $|A|^2 = -(A^0)^2 + (A^1)^2 + (A^2)^2 + (A^3)^2$ - Immagine presa da Wikipedia, autore Ylebru

in generale, però, ci dice di più. Possiamo infatti pensare ad un triangolo avente come lati i termini dell'equazione ed infatti quello scritto è proprio il teorema di Pitagora per un simile triangolo. Applicando le disuguaglianze triangolari giungiamo al risultato che la velocità di un corpo potrà eguagliare quella della luce solo se la massa è nulla, cosa a cui potevamo arrivare anche ragionando sul fatto che con il tendere della velocità del corpo a quella della luce la massa tende ad infinito, a meno che non sia nulla.

Dette in questo modo queste formule corrono il rischio di sembrare troppo *calate dall'alto*. Un modo per rendere la meccanica relativistica più abbordabile potrebbe essere quello di portare gli studenti all'università a svolgere attività come quelle proposte dal dottore Campajola Luigi e dal dottore Casolaro Pierluigi in cui si esegue una verifica sperimentale dell'equivalenza fra massa ed energia sfruttando gli acceleratori di particelle. Tale proposta è reperibile fra il materiale didattico presso l'indirizzo www.docenti.unina.it/emilio.balzano.

Questo può essere anche modo di introdurre i sofisticati acceleratori di particelle, seppur tralasciando i dettagli tecnici. In questo modo i ragazzi possono affacciarsi alle attività che i fisici compiono nei laboratori e li aiuta a percepire come più concrete le discipline studiate.

5 Cosmologia

Gli assiomi della geometria non sono che definizioni travestite. Pertanto, cosa pensare della domanda: è vera la geometria euclidea? Essa non ha alcun senso. Così come non ha senso domandarsi se il sistema metrico sia vero e siano falsi gli altri sistemi di misura; o se le coordinate cartesiane siano vere, e false quelle polari. Una geometria non può esser più vera di un'altra; può solo essere più comoda.

La scienza e l'ipotesi, Henri Poincaré

A questo punto la fisica sembra essersi allontanata molto dal senso comune e dall'intuito. Eppure, esperienze come quella proposta dal dott. Campajola e dal dott. Casolaro possono ridare alla fisica la dimensione pratica che essa effettivamente ha.

A questo punto si può discutere con i ragazzi di cosa debba e cosa non debba essere una scienza. L'obiettivo non è certo quello di dare definizioni assolute, ma di rendere ognuno consapevole di quelle che sono le sue idee. Ad esempio, molto spesso uno dei primi argomenti dei corsi di studio scientifici riguarda il

metodo sperimentale così come descritto da Galileo Galilei. Gli aggettivi che meglio descrivono una definizione di scienza basata sul metodo sperimentale sono probabilmente *artificioso* e *antiquato*. Artificioso perché la storia ci insegna che il percorso è molto più tortuoso di come descritto, antiquato perché esistono anche scienze in cui l'esperimento, così come inteso da Galilei, non è realizzabile. Pensiamo alla cosmologia, che dalla scoperta di Hubble dell'espansione dell'universo ha assunto sempre più il carattere di scienza osservativa, ma dove non è possibile realizzare esperimenti per riprodurre in laboratorio il big bang. Pensiamo all'informatica e alla matematica, dove gli esperimenti non possono certo essere di natura empirica. Pensiamo all'economia. Eppure è solo la sinergia di tutte queste discipline che spinge in avanti la società umana.

Fino a questo punto si è parlato di un principio di relatività, ma solo fra osservatori su sistemi di riferimento inerziali. Ci si può chiedere allora se persone che viaggiano con accelerazioni diverse debbano osservare leggi fisiche diverse. Ovviamente, sarebbe soddisfacente ottenere una teoria fisica che sia invariante anche per queste trasformazioni più generali che vanno sotto il nome di *omeomorfismi*.

In particolare è necessario aprire una parentesi sulle geometrie non Euclidee. In realtà la geometria su superfici curve non è meno intuitiva di quella su superfici piane, basti pensare a tutti i problemi di cartografia da sempre affrontati dall'umanità. Magari collaborando con il docente di matematica, si può investigare con i ragazzi cosa succede quando non si assume più il quinto postulato di Euclide, e si può discutere di cosa succede al *teorema della tartaruga*, ovvero si può parlare di trasporto parallelo.

In questo modo, possiamo tornare ad un problema che avevamo sollevato durante il percorso di meccanica, ovvero quello dell'azione a distanza. Ora abbiamo un nuovo strumento per affrontarlo, possiamo infatti dire che i corpi non si attraggono a distanza, ma influenzano lo spazio *localmente*. La gravità rende quella che altrimenti sarebbe una superficie (in quattro dimensioni) piatta in una superficie curva, in cui le linee rette che seguono gli oggetti diventano geodetiche. Anche i pianeti, in questo senso, non fanno che seguire le loro geodetiche. A questo punto l'obbiettivo del fisico è quello di trovare la geometria che assume lo spazio-tempo e a fornire un'equazione per studiarla fu Einstein

$$R_{\mu\nu} + \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}. \quad (8)$$

In questa equazione $R_{\mu\nu}$ è il tensore metrico, $g_{\mu\nu}$ è la metrica dello spazio tempo, ovvero la nostra incognita, R è lo scalare di Ricci, Λ è la costante cosmologica e $T_{\mu\nu}$ è il tensore energia impulso. Per una trattazione più estesa sia della relatività generale che delle geometrie non Euclidee si può consultare [13]. Purtroppo non è possibile introdurre concetti che necessitano di strumenti matematici così sofisticati alle scuole superiori, sarebbe invece un'esercizio importante nelle università, che aiuta a vedere il mondo con occhi diversi.

Ciò non significa che non si può parlare di tali argomenti con i ragazzi, anche perché la televisione e YouTube lo faranno lo stesso. Però si può dare ai ragazzi la capacità di analizzare in modo critico le notizie che gli vengono fornite da

questi canali di apprendimento. Ad esempio spesso viene ripetuto che l'universo è in espansione. Ma cosa significa? Dove si espande se è esso stesso l'universo? La risposta, una volta studiato un minimo di geometria non Euclidea, è abbastanza semplice: è la metrica che sta cambiando. Il modo stesso in cui misuriamo le distanze sta cambiando. Un'analogia utile potrebbe essere la superficie di un palloncino che viene gonfiato, e nel mentre tutti i punti del palloncino si allontanano.

Potrebbe nuovamente sembrare che a questo punto la fisica ha perso il suo carattere pratico. Eppure è proprio la teoria della relatività generale che ci consente di far funzionare il GPS e di spiegare una differenza tra il moto predetto e quello misurato del pianeta Mercurio, problema che era rimasto irrisolto da secoli!

A questo punto, è impossibile elencare tutte i possibili spunti speculativi di discussione che si possono aprire con gli studenti. Ad esempio, è possibile ritrovare la fisica di Newton partendo da quella di Einstein? Ma soprattutto, è possibile superare la fisica di Einstein?

In effetti, ciò che molti ricercatori cercano di fare oggi è proprio superare la fisica di Einstein che in alcuni casi fallisce nel dare risposte. Si può parlare, a livello divulgativo anche in una classe, di buchi neri e big bang. Si può speculare su cosa significhi parlare di tempo, e di cosa c'era prima del big bang, ovvero da cosa sia stato generato, prima che l'universo e quindi il tempo stesso ci fosse!

Alle frontiere della fisica c'è il tentativo di unificare la teoria della relatività generale, qui brevemente accennata, con la meccanica quantistica di cui non si era ancora fatta menzione. Il dibattito anche sulla possibilità che questa sia la strada giusta è aperto, ed è importante che gli studenti sappiano che la comunità scientifica raramente è d'accordo su cosa sia importante fare e come farlo, quindi un'idea lontanissima da quella di macchine perfette che ragionano usando solo la logica!

Come è stato anticipato nella prima sezione si mette in discussione anche la possibilità stessa che il tempo non sia che il risultato dell'interazione di tante componenti di un sistema complesso, si veda ad esempio l'articolo divulgativo di Natalie Wolchover *Quantum Gravity's Time Problem* reperibile all'indirizzo www.quantamagazine.org/20161201-quantum-gravitys-time-problem/

6 Conclusione e ringraziamenti

In conclusione, spero che le attività, sia pratiche che speculative, proposte portino gli studenti ad avere un rapporto più sano con la fisica e con le scienze in generale. Anche gli studenti più volenterosi in genere non riescono a vedere le scienze come un corpo unico e tanto meno a vedere l'influenza che hanno nella loro vita. Una programmazione didattica che segue questi suggerimenti, si propone di dare agli studenti più possibilità di costruire significato, e di dare un senso alle ore spese in aula e davanti ai libri.

Ho cercato di mantenere un giusto equilibrio fra i risvolti pratici che possono avere nella vita quotidiana le scienze e l'intrigo delle speculazioni teoriche. La

verità è che le applicazioni pratiche si possono realizzare anche senza la teoria e la teoria si può studiare senza applicazioni. I ponti si costruivano prima dello sviluppo della statica, anche se questo discorso non vale per tutte le tecnologie, ad esempio quelle informatiche. La teoria senza le applicazioni è quello che in effetti viene insegnato ai ragazzi nei banchi di scuola. Quello di strutturare conoscenze pratiche in conoscenze teoriche è, dal mio punto di vista, l'esercizio più importante per uno studente di scienze, un esercizio che gli permette di comprendere la realtà che lo circonda.

Solo a distanza di anni riesco a comprendere le parole di un mio compagno di classe del liceo che, durante una discussione con i professori, asserì che la scuola ci *priva* di più della metà della nostra vita da ragazzi. Purtroppo molto spesso è così, l'obbiettivo di un docente però dovrebbe essere quello di ribaltare questa situazione, dovrebbe essere quello di arricchire più della metà della vita dei ragazzi. La scuola deve essere qualcosa che li forma come persone, che faccia comprendere loro la società, che non può essere compresa senza comprendere la scienza. Solo una volta compresa la società i ragazzi potranno trovare il loro posto, ed essere felici di essere stati a scuola.

Vorrei infine ringraziare il prof. Balzano Emilio, per l'impegno e la cura dedicati al corso di didattica della fisica, ma ancora più desidero ringraziare tutti i compagni di corso, in quanto sono state le discussioni a far maturare in me idee nuove. Un ringraziamento speciale va ai miei amici, il dott. Achille Damasco ed il dott. Giuseppe Bausilio per il loro contributo e per il fruttuoso scambio di idee durante la revisione di questo lavoro.

References

- [1] C. Rovelli. *Sette brevi lezioni di fisica*. Adelphi eBook. Adelphi, 2014.
- [2] Arthur Koestler. *The Sleepwalkers: A History of Man's Changing Vision of the Universe*.
- [3] M. Hoskin. *Storia dell'astronomia di Cambridge*. Superbur scienza. Rizzoli, 2001.
- [4] U. Haber-Schaim. *PSSC Physics*. Kendall/Hunt, 1991.
- [5] L. Vygotskij. *Pensiero e linguaggio*. Giunti Editore, 2007.
- [6] Anna Sfard. On the dual nature of mathematical conceptions: Reflections on processes and objects as different sides of the same coin. *Educational Studies in Mathematics*, 22(1):1–36, 1991.
- [7] L. Radford. Signifying relative motion: Time, space and the semiotics of cartesian graphs. *Mathematical Representations at the Interface of the Body and Culture (pp. 45-69)*., 2009.
- [8] R. Penrose. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. Vintage Series. Vintage Books, 2007.

- [9] L.D. Landau and E.M. Lifshits. *Fisica teorica*. Number v. 1 in Editori Riuniti Univ. Press. Editori Riuniti University Press, 2010.
- [10] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker. *Fundamentals of Physics*. Halliday & Resnick Fundamentals of Physics. John Wiley & Sons Canada, Limited, 2010.
- [11] M.L. Boas. *Mathematical Methods in the Physical Sciences*. Wiley, 2005.
- [12] R.P. Feynman, R.B. Leighton, and M.L. Sands. *The Feynman Lectures on Physics*. Number v. 1 in The Feynman Lectures on Physics. Addison-Wesley, 1963.
- [13] C.W. Misner, K.S. Thorne, and J.A. Wheeler. *Gravitation*. Number pt. 3 in Gravitation. W. H. Freeman, 1973.