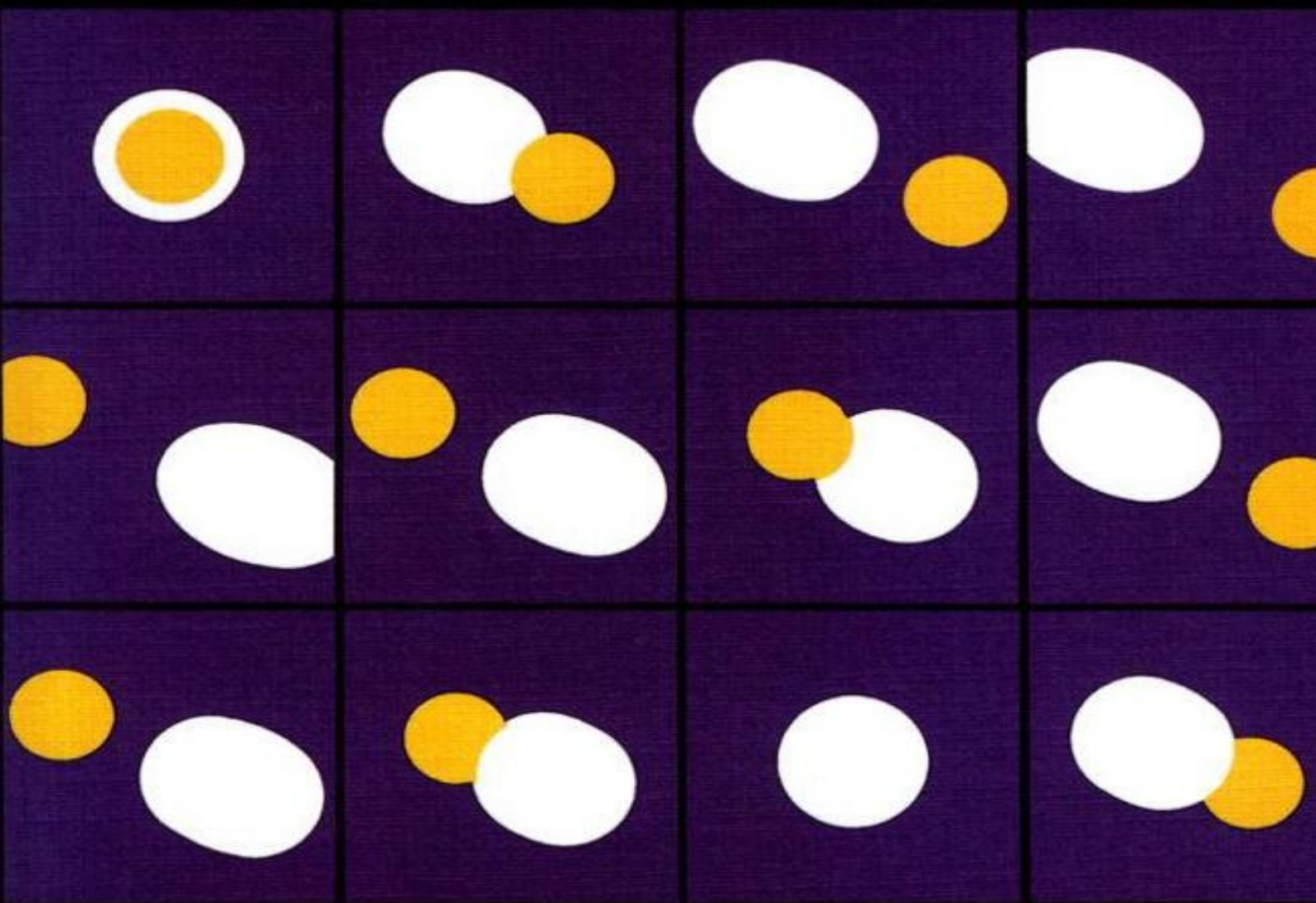


Richard Feynman

LA LEGGE FISICA



Universale Bollati Boringhieri

Richard Feynman

La legge fisica

Bollati Boringhieri

Prima edizione 1971

Ristampa maggio 2010

Titolo originale: *The Character of Physical Law*

Traduzione di Luca Radicati di Bròzolo

© 1971 Bollati Boringhieri editore Torino,

corso Vittorio Emanuele II, 86

Gruppo editoriale Mauri Spagnol

ISBN 978-88-339-0261-6

Schema grafico della copertina di Enzo Mari

www.bollatiboringhieri.it

Stampato in Italia dalla Litografia EST di Settimo Torinese (To)



Prefazione

di L. A. Radicati

Il presente volume è la trascrizione quasi letterale di una serie di conferenze indirizzate a studenti non fisici che Feynman, improvvisando sulla scorta di poche note, tenne nel 1964 all'Università di Cornell. Le conferenze non si proponevano di insegnare la fisica ai non specialisti. Feynman è convinto che nessuna esposizione non matematica “potrà mai far capire la natura a ‘quelli dell’altra cultura’”, e quindi non si mette su questa strada sulla quale tanti altri prima di lui hanno fallito. Quello che si propone è invece di spiegare il metodo che la fisica usa per scoprire le leggi della natura e di far comprendere la motivazione di questa ricerca, per rendere in qualche modo partecipi i profani della bellezza di questa impresa intellettuale e consapevoli della “fortuna che abbiamo di vivere in un’epoca in cui stiamo ancora facendo delle scoperte”.

Se a questo punto il lettore si fosse fatto l’idea che La legge fisica è un libro di filosofia della scienza o di epistemologia, è bene disingannarlo subito. La sola parola filosofia farebbe inorridire Feynman, fisico al cento per cento, innamorato della sua scienza e alle volte, come un vero innamorato, ingenuamente unilaterale. Non che il libro sia ingenuo, tutt’altro. Sarebbe però un vero peccato se il lettore italiano, scandalizzato da certi giudizi ispirati in parte dal gusto del paradosso e anche troppo facilmente confutabili sul piano filosofico, concludesse affrettatamente che si tratta di un’opera di divulgazione superficiale.

Feynman non vuole discutere il valore conoscitivo della fisica come scienza, ma vuole solo mostrarci come essa procede. Ce lo mostra col suo stile immediato e antiretorico, senza vaghe affermazioni qualitative, studiando su esempi concreti il modo in cui si arriva a stabilire le leggi fondamentali. Gli esempi sono tratti dalla fisica di ieri e di oggi e il loro esame è spinto tanto avanti quanto è necessario per studiarne il valore esemplare e fin dove io si può fare senza ricorrere alla matematica. Anche il lettore non specialista può così cogliere l’essenza del metodo della fisica e apprezzare il valore intellettuale di questa costruzione che ha permesso all’uomo di impadronirsi di qualcuno almeno dei segreti della natura. Al lettore più esperto non sfuggiranno le osservazioni sottili, le intuizioni profonde di cui questo libretto, come ogni scritto di Feynman, è ricco: dalla dimostrazione einsteiniana della località delle leggi di conservazione, all’analisi del significato della termodinamica, fino alle osservazioni contenute nelle bellissime pagine finali sul futuro della fisica.

Di una cosa ancora bisogna avvertire il lettore. Feynman, che è uno fra i più grandi dei fisici teorici viventi, ha anche delle doti eccezionali come oratore, e vorrei quasi dire come attore. Le sue conferenze, anche quelle più strettamente scientifiche, hanno una vivacità che è ben raro trovare nei discorsi di uno scienziato. Tale carattere di spontanea improvvisazione è evidentissimo in queste conferenze, esempio tipico dello stile di Feynman, così diverso da quello della nostra tradizione. Stilistica che conserva l’immediatezza dello slang di New York, le sue metafore pittoresche e il più sublime disprezzo per la sintassi e l’eleganza stilistica tradizionale.

Per Feynman la ricerca delle leggi fisiche “è eccitante, è meravigliosa... è come la scoperta dell’America”. Non c’è da stupirsi se in queste condizioni di spirito l’eleganza stilistica perda per un po’ della sua importanza.

Capitolo 1.

La legge della gravitazione, esempio di legge fisica

È strano, ma nelle rare occasioni in cui mi hanno invitato a suonare in pubblico il tamburo,¹ presentatore non ha mai creduto necessario ricordare che mi occupo anche di fisica teorica. Forse perché rispettiamo più le arti delle scienze. Gli artisti del Rinascimento dicevano che l'interesse principale dell'uomo deve essere l'uomo: tuttavia ci sono altre cose interessanti al mondo, e perfino gli artisti apprezzano i tramonti, le onde dell'oceano e il cammino delle stelle attraverso i cieli. Dunque sono delle buone ragioni per parlare qualche volta anche di altro. Quando guardiamo le bellezze della natura, traiamo un piacere estetico dall'osservazione diretta. Tra i fenomeni della natura c'è però anche una struttura, un ritmo che non appare direttamente all'occhio, ma che si rivela solo dopo una paziente analisi; e sono appunto questi ritmi e strutture che chiamiamo *leggi fisiche*. Ciò che vogliamo discutere in questa serie di lezioni è la caratteristica generale delle leggi fisiche; se volete, questo è un livello più alto di generalità che sta al di sopra delle leggi stesse. Più precisamente, quello che vogliamo considerare è la natura e le sue qualità più generali quali appaiono a un'analisi dettagliata.

Ora, un simile argomento ha una certa tendenza a diventare troppo filosofico proprio perché diventa tanto generale: quando si parla in termini così generali che tutti possano capire, allora l'argomento viene considerato profonda filosofia. Io vorrei essere un po' più specifico e desidererei essere capito in maniera onesta piuttosto che vaga. Perciò in questa prima lezione cercherò di darvi anziché generalità, un esempio di legge fisica, per darvi almeno un esempio di quello di cui sto parlando in modo generale. Così in seguito potrò riferirmi molte volte a questo caso, in modo da rendere concreto un argomento che altrimenti rimarrebbe troppo astratto. Ho scelto come esempio una legge fisica, non so bene perché, la teoria della gravitazione, cioè i fenomeni della gravità. In effetti essa è stata una delle prime leggi a essere scoperta e ha una storia interessante. Potreste dire: “Vedete bene, ma allora è una storia vecchia, vorremmo sentire qualcosa sulla scienza più moderna.” Per me è recente, forse, ma non più moderna. La scienza moderna è esattamente nella stessa tradizione della scoperta della legge della gravitazione. E se vi parlassi di quello che voi chiamate la scienza moderna, vi parlerei soltanto di scoperte più recenti. Non mi dispiace affatto parlarvi della legge della gravitazione, perché nel descrivere la sua storia e i suoi metodi, il carattere della sua scoperta e la sua qualità, io sono assolutamente moderno.

Questa legge è stata chiamata la “più grande generalizzazione compiuta dalla mente umana”, e già dalla mia introduzione potrete immaginare che sono interessato non tanto alla mente umana, quanto alla meraviglia di una natura che può obbedire a una legge tanto elegante e semplice come quella della gravitazione.

Perciò ci concentreremo soprattutto non tanto sulla nostra abilità nel trovarla, ma sull'abilità della natura nell'obbedirvi.

La legge della gravitazione dice che due corpi agiscono l'uno sull'altro con una forza che varia in proporzione inversa al quadrato della distanza tra loro, e che varia in proporzione diretta al prodotto delle loro masse. Matematicamente possiamo scrivere la grande legge con la formula

$$F = G \frac{m m'}{r^2}$$

cioè una costante moltiplicata per il prodotto delle due masse, diviso per il quadrato della distanza. Ora, se aggiungo l'osservazione che un corpo reagisce a una forza accelerando, ossia cambiando ogni secondo la sua velocità in maniera inversamente proporzionale alla sua massa, cioè che la sua velocità varia di più se la massa è più piccola, allora sulla legge della gravitazione ho detto tutto quello che c'è da dire. Tutto il resto è una conseguenza matematica di queste due cose. So che non siete tutti matematici, e che non potete vedere immediatamente tutte le conseguenze di queste due osservazioni, quindi quello che vorrei fare qui è parlarvi brevemente della storia della scoperta, dirvi quali sono alcune delle sue conseguenze, quali effetti la scoperta ha avuto sulla storia della scienza, quali misteri implica tale legge, aggiungere qualche cosa sui perfezionamenti apportati da Einstein, e magari sui rapporti con le altre leggi della fisica.

La storia in breve è questa. Già qualcuno tra gli antichi, osservando il modo in cui i pianeti sembravano muoversi nel cielo, concluse che tutti, insieme alla terra, ruotavano intorno al sole. Questa scoperta fu più tardi rifatta, indipendentemente, da Copernico, dopo che la gente aveva dimenticato che era già stata fatta. Ora, la domanda successiva che si presentava era questa: come girano intorno al sole, esattamente, cioè con che tipo di moto? Si muovono su un cerchio il cui centro è il sole, o seguono qualche altro tipo di curva? A che velocità si muovono? E così via. Per questa scoperta ci volle più tempo. Il periodo dopo Copernico fu un periodo in cui ci furono grandi dibattiti e si discuteva se in effetti i pianeti girassero con la terra intorno al sole, o se invece la terra fosse al centro dell'universo, e via dicendo. Poi un astronomo di nome Tycho Brahe,² trovò un modo per rispondere alla domanda. Pensò che forse sarebbe stata una buona idea guardare molto, molto attentamente il cielo, segnare con cura il punto in cui i pianeti apparivano nel cielo, in modo da poter distinguere l'una dall'altra le due teorie alternative. Questa è la chiave della scienza moderna, e fu l'inizio della vera comprensione della natura — questa idea di guardare le cose, di annotare i particolari, e di sperare che nell'informazione così ottenuta possa trovarsi la chiave per decidere tra le varie interpretazioni teoriche. E così Tycho, un ricco signore che possedeva un'isola vicino a Copenaghen, attrezzò la sua isola con grandi cerchi di ottone e speciali posti di osservazione e registrò una notte dopo l'altra la posizione dei pianeti. È solo attraverso un lavoro paziente come questo, che si può trovare qualcosa.

Quando tutti questi dati furono raccolti, essi vennero in mano a Keplero³ che cercò di analizzare il tipo di movimento che i pianeti compivano intorno al sole. E fece questo con un metodo di tentativi successivi. A un certo punto credette di esserci arrivato; secondo lui giravano intorno al sole in cerchi con il sole fuori centro. Ma poi Keplero notò che un pianeta, credo fosse Marte, si scostava di otto minuti d'arco dalla traiettoria calcolata, e decise che questo era molto di più dell'errore che Tycho Brahe poteva aver fatto, e che la sua non era la soluzione giusta. E così, per la precisione degli esperimenti poté procedere a un altro tentativo e finalmente trovò le tre cose seguenti.

Per prima cosa trovò che i pianeti ruotavano secondo ellissi intorno al sole, con il sole come fuoco. L'ellisse è una curva che tutti gli artisti conoscono perché è un cerchio visto in prospettiva. Anche i bambini la conoscono perché qualcuno ha detto loro che se si mette un anello su uno spago fissato alle estremità, e poi si mette una matita nell'anello, essa disegnerà un'ellisse (fig. 1).

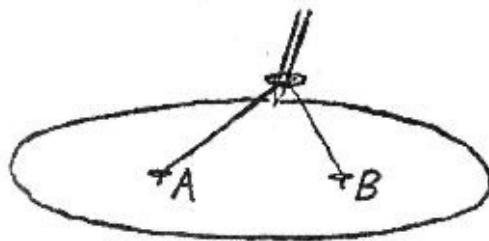


Figura 1

I due punti A e B sono i fuochi. L'orbita di un pianeta intorno al sole è un'ellisse con il sole in uno dei fuochi. La domanda seguente è questa: ruotando sull'ellisse, come si muove il pianeta? Va più in fretta quando è vicino al sole e più adagio quando è più lontano da esso? Keplero trovò una risposta anche per questo (fig. 2). Egli si accorse che se si segna la posizione del pianeta in due istanti, separati da un certo intervallo di tempo, diciamo tre settimane, poi in un altro punto della sua orbita si segnano di nuovo due posizioni ancora separate da tre settimane, e si tracciano le rette (tecnicamente chiamate *raggi vettori*) dal sole al pianeta, l'area compresa tra l'orbita del pianeta e le due rette definite dalle due posizioni del pianeta a distanza di tre settimane è uguale in qualsiasi parte dell'orbita. Cosicché il pianeta deve muoversi più velocemente quando è vicino al sole, e più lentamente quando è lontano, in modo da dare esattamente la stessa area.

Diversi anni dopo, Keplero trovò una terza legge che non riguardava solo il moto di un pianeta singolo intorno al sole, ma dava una relazione fra i movimenti di vari pianeti.

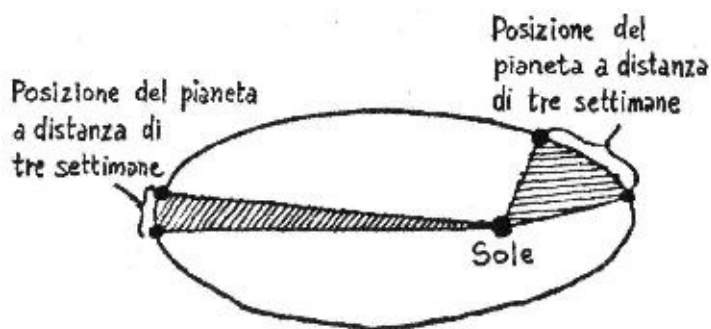


Figura 2

Questa legge dice che il tempo che il pianeta impiega per girare intorno al sole dipende dalla dimensione dell'orbita, e che i tempi variano come la radice quadrata del cubo della dimensione dell'orbita, dove per dimensione dell'orbita si intende il diametro maggiore dell'ellisse. Keplero aveva così trovato queste tre leggi, che possono essere riassunte dicendo che *l'orbita forma un'ellisse, che aree uguali sono percorse in tempi uguali*, e che *il tempo per compiere il giro varia come la potenza tre mezzi della dimensione*, cioè la radice quadrata del cubo della dimensione. Queste tre leggi di Keplero danno una descrizione completa del moto dei pianeti intorno al sole.

La domanda seguente era questa: che cosa fa girare i pianeti intorno al sole? Al tempo di Keplero alcuni rispondevano a questo problema dicendo che dietro ad essi c'erano degli angeli che battendo ali spingevano i pianeti lungo l'orbita. Come vedrete la risposta non è troppo lontana dal vero. L'unica differenza è che gli angeli stanno in una diversa direzione e che le loro ali spingono verso l'interno.

Allo stesso tempo Galileo stava analizzando le leggi del moto degli oggetti normali che stanno sulla terra. Studiando queste leggi e facendo un certo numero di esperimenti per vedere come delle palle scorrono su piani inclinati e come oscillano i pendoli e così via, Galileo scoprì un grande principio chiamato *principio di inerzia*, che è il seguente: se su un oggetto non agisce nessuna forza

se esso si muove con una certa velocità su una linea retta, esso continuerà ad andare con la stessa velocità esattamente sulla stessa retta per sempre. Per quanto questo possa sembrare incredibile chiunque ha cercato di far rotolare una palla per sempre, se questa idealizzazione è giusta, ossia se non c'è nessuna influenza esterna, come l'attrito del pavimento ecc., la palla continuerebbe a muoversi davvero con velocità uniforme.

Il passo seguente fu fatto da Newton che discusse questo problema: "Quando non va in linea retta allora che cosa fa?" Egli rispose in questo modo: c'è bisogno di una forza per cambiare in qualsiasi modo una velocità. Per esempio, se state spingendo una palla nella direzione in cui si sta muovendo essa accelererà. Se vi accorgete che cambia direzione, allora la forza deve essere stata laterale. La forza può essere misurata dal prodotto di due effetti. Quanto cambia la velocità in un piccolo intervallo di tempo? Questo si chiama accelerazione, e quando è moltiplicata per un coefficiente chiamato la massa del corpo, o anche il suo coefficiente di inerzia, le due cose insieme rappresentano la forza. Questa si può misurare. Per esempio, se si ha una pietra attaccata a una corda e la si fa girare in cerchio sopra la testa, ci si accorge che si deve tirare, e la ragione è che, sebbene la velocità non stia cambiando mentre questa gira, cambia la sua direzione; deve quindi esserci una forza che tira perennemente verso l'interno, e questa è proporzionale alla massa. Cosicché se prendiamo due oggetti diversi e facciamo ruotare prima l'uno e poi l'altro intorno alla testa alla stessa velocità e misuriamo le forze nei due casi, troviamo che esse sono diverse nella stessa proporzione in cui sono diverse le masse. Questo è un modo di misurare le masse per mezzo delle forze necessarie a variare la velocità.



Figura 3

Da questo Newton vide che, per prendere un esempio semplice, se un pianeta sta girando intorno al sole, *non occorre nessuna forza per mantenere il suo moto laterale, cioè tangenziale*; se non ci fosse nessuna forza continuerebbe semplicemente a muoversi liberamente. Ma in effetti il pianeta non continua a muoversi liberamente, e più tardi si viene a trovare non dove sarebbe andato se non ci fosse nessuna forza, ma più in giù verso il sole (fig. 3). In altre parole, la sua velocità, il suo moto, è stata piegata verso il sole. Così quello che gli angeli devono fare è battere le ali sempre in direzione del sole.

Il moto, però, che fa andare il pianeta in linea retta non ha nessuna ragione conosciuta. Il motivo per cui le cose continuano a muoversi per sempre non è mai stato trovato; cioè non si conosce l'origine della legge di inerzia. Sebbene gli angeli non esistano, il moto rettilineo uniforme esiste, e per ottenere l'operazione di caduta occorre una forza. Apparve subito chiaro che l'origine della forza era nel sole. In effetti Newton fu capace di dimostrare che l'affermazione che aree uguali sono percorse in tempi uguali è una conseguenza diretta della semplice idea che tutti i cambiamenti di velocità sono diretti esattamente verso il sole, anche nel caso ellittico. Nella prossima lezione potrò farvi vedere in dettaglio come funziona la cosa.

Da questa legge Newton confermò l'idea che la forza è in direzione del sole, e sapendo come i periodi dei diversi pianeti variano con la distanza dal sole, fu possibile determinare come quella forza diventi più debole a distanze diverse. Egli riuscì a determinare che la forza deve variare inversamen-

al quadrato della distanza.

~~Fin qui Newton non aveva detto niente di nuovo, perché aveva solo affermato due cose che Keplero aveva già detto in un linguaggio diverso. Una è esattamente equivalente all'affermazione che la forza è in direzione del sole, e l'altra è esattamente equivalente all'affermazione che la forza è inversamente proporzionale al quadrato della distanza.~~

Poco prima però erano stati visti al telescopio i satelliti di Giove che ruotavano intorno ad esso quasi come se il tutto costituisse un piccolo sistema solare, in cui i satelliti erano attratti da Giove. Anche la luna è attratta dalla terra esattamente nello stesso modo, e le ruota intorno. Sembrava quasi che ogni cosa fosse attratta da ogni altra, e così si giunse all'affermazione generale che ogni corpo attrae ogni altro corpo. Se è così, la terra deve attirare la luna come il sole attira il pianeta. Ma si è scoperto che la terra attira ogni corpo, e difatti voi siete tutti attaccati alle vostre sedie, nonostante desideriate galleggiare per aria. L'attrazione degli oggetti sulla terra era ben conosciuta nei fenomeni di gravitazione, e l'idea di Newton fu che la gravitazione che teneva la luna in orbita fosse la stessa che attirava gli oggetti verso la terra.

È facile valutare di quanto la luna cada in un secondo, perché si conoscono le dimensioni dell'orbita, si sa che la luna ci mette un mese per girare intorno alla terra, e se si calcola la distanza che percorre in un secondo, si può valutare quanto l'orbita lunare è caduta al di sotto della linea retta su cui si sarebbe trovata se non si muovesse come effettivamente si muove. La distanza è 0,135 centimetri. La luna è sessanta volte più lontana dal centro della terra di noi; noi siamo a seimila chilometri dal centro, la luna a trecentomila, cosicché, se la legge dell'inverso del quadrato è giusta, un oggetto alla superficie della terra dovrebbe cadere in un secondo di centimetri $0,135 \times 3600$ (quadrato di 60) perché nell'arrivare fino alla luna la forza è stata indebolita di 60×60 dalla legge dell'inverso del quadrato. Ora, $0,135 \times 3600$ centimetri sono all'incirca 4,9 metri, e già dalle misure di Galileo si sapeva che i corpi cadono sulla superficie della terra di 4,9 metri in un secondo. Questo dunque voleva dire che Newton era sulla strada giusta, e che non si poteva tornare indietro, perché un nuovo fatto, prima totalmente indipendente, il periodo dell'orbita della luna e la sua distanza dalla terra, era connesso a un altro fatto, cioè alla lunghezza dello spazio percorso in un secondo da un corpo che cade sulla superficie della terra. Questa era una verifica straordinaria della validità dell'intuizione di Newton.

Inoltre Newton ottenne numerosi altri risultati. Riuscì a calcolare quella che avrebbe dovuto essere la forma dell'orbita se la legge fosse stata quella dell'inverso del quadrato, e trovò che in effetti era un'ellisse, prendendo, per così dire, due piccioni con una fava. Per giunta un certo numero di fenomeni ebbe una spiegazione ovvia. Il primo era quello delle maree. Le maree erano dovute all'attrazione della luna sulla terra e sulle sue acque. A questo si era già pensato qualche volta in precedenza, ma era la difficoltà che se la luna attirava l'acqua facendola diventare più alta dalla parte da cui si trovava la luna stessa, ci sarebbe stata una sola marea al giorno (fig. 4), mentre invece sappiamo che ci sono due maree all'incirca ogni dodici ore, cioè due al giorno.



Figura 4

C'era anche un'altra corrente di pensiero che era giunta a un'altra conclusione. Secondo questa teoria, era la terra che veniva tirata via dall'acqua dall'attrazione lunare. Newton fu il primo a comprendere quello che accadeva, e cioè che la forza della luna sulla terra e sull'acqua è la stessa alla stessa distanza e che l'acqua in y è più vicina alla luna, mentre l'acqua in x è più lontana da essa della terra solida. L'acqua è attirata verso la luna più della terra in y e meno in x , di modo che questa combinazione di queste due figure produce una doppia marea. In effetti la terra fa esattamente come la luna, cioè si muove in cerchio. Che cosa equilibra la forza della luna sulla terra? Il fatto che mentre la luna percorre un cerchio per equilibrare la forza della terra, anche questa percorre un cerchio, il cui centro si trova all'interno della terra, e in questo modo bilancia l'attrazione della luna. Ambedue girano intorno al centro comune, cosicché le forze sono bilanciate per la terra, ma l'acqua è attirata dalla luna meno in x e più in y cosicché sporge da ambedue le parti. In questo modo furono spiegate le maree, e anche il fatto che ce ne fossero due al giorno. Molte altre cose divennero chiare; la terra è rotonda in conseguenza dell'attrazione di tutte le sue parti verso l'esterno, non è però esattamente rotonda perché ruota su sé stessa di modo che la parte più esterna viene spinta un po' in fuori; e così per la stessa ragione il sole e la luna sono rotondi e così via.

Man mano che la scienza si sviluppò e le misure divennero più precise, le prove della legge di Newton divennero più stringenti. Le prime verifiche precise interessarono le lune di Giove. Attraverso accurate osservazioni sul modo in cui ruotavano in lunghi periodi di tempo, si sarebbe dovuto avere la conferma del fatto che tutto andava secondo le previsioni di Newton, ma questo risultò non essere vero. Sembrava che le lune di Giove apparissero qualche volta otto minuti in anticipo e qualche volta otto minuti in ritardo rispetto al tempo calcolato secondo le leggi di Newton. Si osservò che esse erano in anticipo sull'orario quando Giove era vicino alla terra e in ritardo quando esso era lontano, una circostanza assai strana. Roemer,⁴ che aveva fiducia nella legge della gravitazione, giunse all'interessante conclusione che ci vuole del tempo perché la luce viaggi dalle lune di Giove alla terra e che quello che stiamo guardando quando guardiamo le lune non è come esse sono adesso, ma come erano tanto tempo fa, tanto quanto ne ha impiegato la luce per arrivare qui. Quando Giove è vicino a noi occorre meno tempo perché la luce ci giunga, e quando esso è più lontano ci vuole più tempo; cosicché Roemer dovette correggere le osservazioni per le differenze di tempo, e per il fatto che erano in anticipo o in ritardo. In questo modo fu in grado di determinare la velocità della luce e questa fu

prima dimostrazione che essa non è un segnale che si propaga istantaneamente.

~~Voglio richiamare la vostra attenzione su questo fatto particolare perché esso fa vedere che quando una legge è giusta, essa può essere usata per trovarne un'altra. Se noi abbiamo fiducia in una legge, qualcosa sembra essere sbagliato, essa può suggerirci un altro fenomeno. Se non avessimo conosciuto la legge della gravitazione avremmo impiegato molto più tempo per trovare la velocità della luce perché non avremmo saputo che cosa ci dovevamo aspettare dai satelliti di Giove. Questo processo è sviluppato in una valanga di scoperte, ognuna delle quali ha fornito i mezzi per molte altre scoperte. È stato l'inizio di una valanga che si è prolungata per quattrocento anni in un processo continuo, e che sta ancora rotolando giù a gran velocità.~~

Venne fuori anche un altro problema, cioè che i pianeti non dovevano veramente muoversi lungo ellissi, perché secondo le leggi di Newton essi non sono attratti solo dal sole, ma si attirano anche un po' a vicenda, solo un poco, ma anche questo poco è qualcosa, e altererà leggermente il moto. Giove, Saturno e Urano erano i più grandi pianeti allora conosciuti, e fu calcolata la piccola differenza dell'orbita reale dall'ellisse perfetta di Keplero, causata dall'attrazione degli altri pianeti. Alla fine dei calcoli e delle osservazioni fu notato che Giove e Saturno si muovevano secondo le previsioni, mentre Urano faceva qualcosa di bizzarro. Un'altra occasione in cui le leggi di Newton avrebbero potuto essere colte in fallo; ma coraggio! Due astronomi, Adams e Leverrier,⁵ che fecero questi calcoli indipendentemente e quasi esattamente allo stesso tempo, suggerirono che il moto di Urano fosse dovuto a un pianeta non ancora visto, e scrissero lettere ai rispettivi Osservatori dicendo: "Puntate il vostro telescopio, guardate là e troverete un pianeta." "Assurdo — disse uno degli Osservatori — questo tipo se ne sta lì con carta e matita e viene a dirci dove trovare un pianeta nuovo." L'altro Osservatorio era più... beh, l'amministrazione era diversa, e trovarono Nettuno!

Più recentemente, all'inizio del ventesimo secolo, si vide che il moto del pianeta Mercurio non era esattamente giusto. Questo causò un sacco di guai, e non fu spiegato fino a che Einstein non dimostrò che le leggi di Newton erano leggermente imprecise e che dovevano essere modificate.

Il fatto è questo: fino a che punto vale la legge? Si estende anche al di fuori del nostro sistema solare? Nella tavola 1 faccio vedere che la legge della gravitazione è valida su una scala più larga del sistema solare. Questa è una serie di tre fotografie di una cosiddetta stella doppia. Per fortuna nella fotografia c'è una terza stella cosicché potete vedere che esse stanno veramente ruotando e che nessuno ha girato le lastre, cosa che è molto facile nelle fotografie astronomiche. Le stelle stanno effettivamente ruotando, e nella figura 5 potete vedere l'orbita che descrivono. È evidente che si attraggono a vicenda, e che stanno ruotando in un'ellisse nel modo previsto. Sono una successione di posizioni in vari momenti, con un moto orario. Sarete contenti fino a che non noterete, se non ve ne siete già accorti, che il centro non è un fuoco dell'ellisse, ma che è abbastanza lontano.

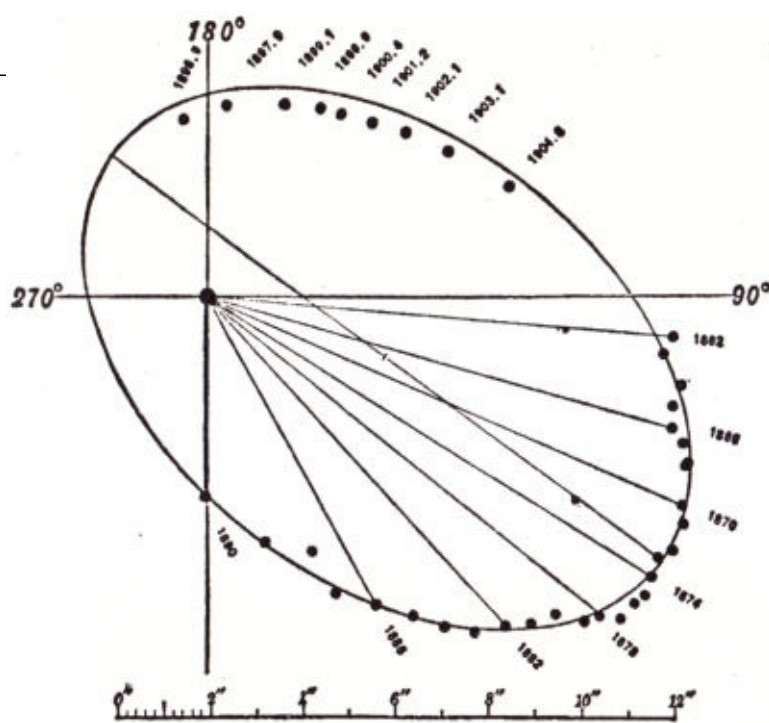


Figura 5

E così c'è qualcosa che non funziona nella legge? No, Dio non ci ha presentato questa orbita frontalmente; essa è inclinata di uno strano angolo. Se prendete un'ellisse di cui avete segnato il fuoco e tenete il foglio di carta a un certo angolo e guardate la sua proiezione, troverete che il fuoco non deve essere necessariamente il fuoco dell'immagine proiettata. Sembra così perché l'orbita è inclinata nello spazio.

E per una distanza maggiore? Nella foto, questa forza è tra due stelle; si estende anche a distanze maggiori di due o tre volte il diametro del sistema solare? Nella tavola 2 (*sopra*) abbiamo un oggetto che ha un diametro centomila volte più grande del sistema solare e contiene un numero enorme di stelle. La grande macchia bianca non rappresenta una massa compatta; sembra così per l'incapacità degli strumenti a risolverlo, ma sono invece piccolissimi punti come le altre stelle, ben separati gli uni dagli altri, che non si toccano, e ognuno dei quali va avanti e indietro in questo grande ammasso globulare. È una delle cose più stupende del cielo, meraviglioso come le onde del mare e i tramonti. La distribuzione di questo materiale è perfettamente chiara. Quello che tiene unita questa galassia è l'attrazione gravitazionale delle stelle tra loro. La distribuzione del materiale e il senso della distanza ci permette di trovare all'incirca qual è la legge delle forze tra le stelle... e, naturalmente, viene fuori che è più o meno l'inverso del quadrato. Tuttavia l'accuratezza in questi calcoli e misure è ben lontana dall'essere così grande come per il sistema solare.

La gravità si estende anche più lontano. Quell'ammasso era solo un piccolissimo punto nel grande galassia a spirale mostrata nella tavola 2 (*sotto*), ed è chiaro che anche qui l'oggetto è tenuto insieme da una qualche forza, e l'unico candidato plausibile è la gravitazione. Quando arriviamo a queste dimensioni non abbiamo nessun modo di controllare la legge dell'inverso del quadrato, ma non sembra esserci dubbio che in questi grandi agglomerati di stelle la gravità si estenda anche su queste distanze (queste galassie hanno dimensioni che variano dai cinquanta ai centomila anni luce da un'estremità all'altra, mentre la distanza dalla terra al sole è di solo otto minuti luce). Nella tavola 2 (*sopra*) c'è la prova che si estende anche più lontano. Questo è quello che si chiama un ammasso di galassie; sono tutte in un gruppo analogo all'ammasso di stelle, ma questa volta ad essere ammassate sono quei piccoli oggetti della tavola 2 (*sotto*).

Fin qui, questo è un decimo, forse un centesimo della dimensione dell'universo, fino a dove

abbiamo una prova diretta che le forze della gravitazione si estendono. Così la gravità della terra non ha alcun limite, anche se potrete leggere sui giornali che qualche cosa esce dal campo della gravitazione. Esso diventa sempre più debole in maniera inversamente proporzionale al quadrato della distanza, cioè si divide per quattro ogni volta che si raddoppia la distanza, fino a che si perde nella confusione dei forti campi di altre stelle. Insieme alle stelle che sono nelle sue vicinanze attira altre stelle per formare una galassia, e tutte insieme attirano altre galassie per formare un ammasso di galassie. Così il campo gravitazionale della terra non finisce mai, ma si estingue molto lentamente secondo una legge precisa, probabilmente fino ai confini dell'universo.

La legge della gravitazione è diversa da molte altre leggi. Evidentemente è molto importante nell'economia, nel macchinario dell'universo; ci sono molti casi in cui la gravità ha le sue applicazioni pratiche per quello che concerne l'universo. Tuttavia, e qui sta la sua peculiarità, la conoscenza delle leggi della gravità ha relativamente poche applicazioni in confronto alle altre leggi della fisica. Questo è un caso in cui ho scelto un esempio non tipico. Tra parentesi, è impossibile, scegliendo un qualsiasi cosa, sceglierne una che non sia in qualche modo non tipica: questa è la meraviglia del mondo. Le uniche applicazioni della conoscenza di questa legge che mi vengono in mente, sono nella prospezione geofisica, nella predizione delle maree, e ora, più modernamente, per stabilire i movimenti dei satelliti e delle sonde che mandiamo su, e così via; e infine, oggi, per calcolare le predizioni delle posizioni dei pianeti, che hanno grande utilità per gli astrologi che pubblicano le predizioni sugli oroscopi dei settimanali. È un mondo strano quello in cui viviamo, in cui tutti i progressi del sapere sono usati soltanto per continuare le sciocchezze che sono esistite per duemila anni.

Devo menzionare i casi importanti in cui la gravitazione ha un vero effetto sul comportamento dell'universo, e uno di questi casi è la formazione di nuove stelle. La tavola 3 (sotto) è una nebulosa gassosa nella nostra stessa galassia: non è un agglomerato di stelle, ma una massa di gas. Le macchiette sono punti in cui il gas è stato compresso, o attratto da sé stesso. Forse il fenomeno comincia con qualche tipo di onda d'urto, ma poi procede per effetto della gravità che attira il gas sempre più verso il centro, cosicché grandi masse di gas e polvere si radunano e formano delle palle; e mentre cadono verso il centro, il calore generato dalla caduta le incendia e diventano stelle. Nella tavola 4 abbiamo un'indicazione della creazione di nuove stelle.

È in questo modo che nascono le stelle, quando il gas si comprime troppo per effetto della gravitazione. Ogni tanto, quando esplodono, esse sparpagliano da tutte le parti polvere e gas, e questi si riuniscono di nuovo per formare nuove stelle: sembra quasi il moto perpetuo.

Ho già mostrato che la gravitazione si estende a grandi distanze, ma secondo Newton ogni cosa è attratta da ogni altra. È proprio vero che due oggetti si attraggono? Possiamo fare una prova diretta senza aspettare di vedere se i pianeti si attraggono a vicenda? Una prova diretta fu fatta da Cavendish,⁶ con l'apparato che vedete indicato nella figura 6. L'idea era di appendere a una sottilissima fibra di quarzo una sbarra con due sfere, e poi di porre due altre grandi sfere di piombo ai lati, vicino ad esse nella posizione indicata. Per l'attrazione delle sfere si produce una torsione della fibra, assai piccola perché la forza gravitazionale tra gli oggetti ordinari è veramente molto piccola. Tuttavia fu possibile misurare la forza tra le due sfere; Cavendish chiamò il suo esperimento "pesare la terra". Con l'insegnamento pedante e minuzioso di oggi non permetteremmo mai ai nostri studenti di dire questo; dovremmo dire "misurare la massa della terra".

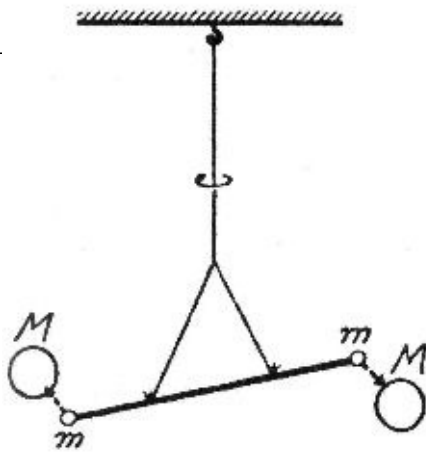


Figura 6

Con un esperimento diretto Cavendish poté misurare la forza, le due masse, e la distanza, e così determinò la costante di gravità G . Voi direte: “Va bene, ma qui abbiamo la stessa situazione. Sappiamo qual è la forza di attrazione, e la massa dell'oggetto attratto, sappiamo a che distanza siamo, ma non sappiamo né la massa della terra, né la costante, solo la combinazione.” Misurando la costante, e conoscendo le leggi sull'attrazione della terra, si può determinare la sua massa.

Indirettamente questo esperimento fu la prima determinazione di quanto fosse pesante e massiccio il pianeta su cui stiamo.

Trovare questo è un'impresa straordinaria, e credo che fu questo il motivo per cui Cavendish chiamò il suo esperimento “pesare la terra” invece di “determinare la costante dell'equazione gravitazionale”. Egli, incidentalmente, stava pesando il sole e ogni altra cosa allo stesso tempo, perché l'attrazione del sole è conosciuta nello stesso modo.

Un'altra verifica molto interessante della legge di gravitazione è determinare se l'attrazione è esattamente proporzionale alla massa. Se l'attrazione è esattamente proporzionale alla massa e la reazione alla forza, i movimenti prodotti dalle forze, cioè i cambiamenti di velocità, sono inversamente proporzionali alla massa. Ciò significa che in un campo gravitazionale due oggetti con massa diversa cambieranno la loro velocità allo stesso modo; o che due oggetti, nel vuoto, qualunque sia la loro massa cadranno a terra nello stesso modo. Questo è il vecchio esperimento di Galileo dalla torre di Pisa. Vuol dire, per esempio, che un oggetto dentro un satellite artificiale ruoterà intorno alla terra sullo stesso tipo di orbita di uno al di fuori, e così apparentemente galleggerà. Il fatto che la forza sia esattamente proporzionale alla massa e che le reazioni siano inversamente proporzionali alla massa ha questa interessantissima conseguenza.

Quanto è preciso questo risultato? Ciò fu misurato con un esperimento da Eötvös,⁷ nel 1909, molto più recentemente e più accuratamente da Dicke,⁸ ed è conosciuto con la precisione di una parte su 10 miliardi. Le forze sono esattamente proporzionali alla massa. Com'è possibile misurare con questa precisione? Supponiamo di voler misurare se è vero per l'attrazione del sole. Sapete che il sole ci sta attirando tutti, e attira anche la terra, ma supponiamo che vogliate sapere se l'attrazione è direttamente proporzionale all'inerzia. L'esperimento fu fatto la prima volta con legno di sandalo, poi furono usati piombo e rame ed ora è fatto con polietilene. La terra gira intorno al sole, cosicché le cose sono lanciate fuori dall'inerzia, e lo sono proporzionalmente ad essa. Ma sono attratte dal sole proporzionalmente alla massa, per la legge dell'attrazione. Cosicché se sono attratte dal sole in una proporzione diversa da quella in cui sono lanciate fuori dall'inerzia, una sarà tirata verso il sole, l'altra sarà sospinta via da esso, di modo che, attaccandole alle estremità opposte di una sbarra appesa a un'altra fibra di quarzo di Cavendish, il sistema girerà verso il sole. In effetti, entro questi limiti

precisione, non gira, per cui sappiamo che l'attrazione del sole è direttamente proporzionale all'effetto centrifugo, che è l'inerzia; per questo la forza di attrazione di un oggetto è direttamente proporzionale al suo coefficiente d'inerzia, cioè, in altre parole, alla sua massa.

Un'altra cosa particolarmente interessante è che la legge dell'inverso del quadrato appare anche in altri casi, per esempio nelle leggi dell'elettricità. Anche l'elettricità esercita delle forze inversamente proporzionali al quadrato della distanza, questa volta tra cariche, e qualcuno forse crederà che questa abbia qualche significato profondo. Nessuno è mai riuscito a spiegare l'elettricità e la gravità con due aspetti differenti di una stessa cosa; oggi le nostre teorie fisiche, le leggi fisiche, sono un'immensa moltitudine di parti diverse e di pezzi che non si collegano molto bene insieme. Non abbiamo una struttura da cui tutto è dedotto, ma vari pezzi che non stanno ancora bene insieme. Questo è il motivo per cui in queste lezioni, invece di potervi dire ciò che è *la legge* della fisica, devo parlarvi delle cose che sono comuni alle varie leggi anche se non comprendiamo le connessioni che ci sono fra esse. Una cosa strana, tuttavia, è che ci siano delle cose che sono uguali in ambedue. Ora torniamo all'elettricità.

La forza varia inversamente al quadrato della distanza, ma la cosa che colpisce è l'enorme differenza nell'intensità tra le forze elettriche e gravitazionali. Chi vuole unificare l'elettricità e la gravitazione troverà che la prima è molto più potente della seconda, ed è difficile credere che abbiano la stessa origine. Come posso dire che una cosa è più potente di un'altra? Dipende da quanta carica e da quanta massa si hanno. Non si può parlare di quanto sia forte la gravità dicendo “prendo un pezzo di una determinata dimensione”, perché siete *voi* che scegliete la dimensione. Se cerchiamo di prendere una cosa che ci dà la natura — un suo numero puro che non ha nulla a che vedere con i centimetri, anni o un'altra delle nostre dimensioni — possiamo fare in questo modo. Se prendiamo una particella fondamentale come un elettrone — ogni altra particella darà un numero diverso, ma tanto per dare una idea diremo elettroni — due elettroni sono due particelle fondamentali, e si respingono in maniera inversamente proporzionale al quadrato della distanza a causa dell'elettricità, e si attraggono nello stesso modo a causa della gravità.

Ora ci domandiamo: qual è il rapporto tra la forza gravitazionale e quella elettrica? Questo è illustrato nella figura 7: il rapporto tra la repulsione elettrica e l'attrazione gravitazionale è dato da un numero con quarantadue cifre. Ora, proprio in questo c'è un mistero molto profondo. Da dove potrebbe venir fuori un numero così enorme? Se ci fosse una teoria che spiega l'origine di queste due forze, come potrebbe giustificare questa sproporzione? Quale equazione ha, come soluzione per due tipi di forze, una di attrazione e una di repulsione, un rapporto così fantastico?

Alcuni hanno cercato un rapporto così grande anche altrove, sperando, per esempio, di trovare un altro numero enorme; e, se volete un numero grande, perché non prendere il rapporto fra il diametro dell'universo e quello di un protone? Per quanto possa sembrare strano anch'esso è un numero con quarantadue cifre. E così è stata fatta l'ipotesi interessante che questo rapporto sia uguale a quello tra la dimensione dell'universo e il diametro del protone. Ora l'universo si sta espandendo col tempo, ciò significa che anche la costante gravitazionale sta cambiando; sebbene questa sia una possibilità, non vi è però alcuna evidenza che indichi che questo avvenga realmente.

Ma il fatto più impressionante è che la gravità è semplice: è facile enunciare i principi in maniera completa senza lasciare nessuna incertezza. È semplice e perciò è meravigliosa. È semplice nel suo schema; non voglio dire che sia semplice nella sua azione (i moti dei vari pianeti e le perturbazioni dell'uno e dell'altro possono essere assai complicati da calcolare, e seguire come si muovono tutte quelle stelle in un ammasso globulare va ben al di là delle nostre possibilità). La legge è cioè complicata nelle sue azioni, ma il disegno di base, e la struttura che sta sotto il tutto, è semplice. Questo è comune a tutte le nostre leggi; risultano essere semplici, anche se nelle loro effettive azioni sono complesse.

E infine viene l'universalità della legge gravitazionale, e il fatto che essa si estende su distanze così enormi. Newton, occupandosi del sistema solare, *poté* predire quello che sarebbe successo nell'esperimento di Cavendish, dove il piccolo modello del sistema solare, due sfere che si attraevano, doveva essere ingrandito dieci milioni di volte per diventare il sistema solare. E poi, ingrandendo quel modello ancora dieci milioni di volte, troviamo galassie che si attraggono esattamente con la stessa legge. La natura usa solo i fili più lunghi per tessere i suoi disegni, di modo che ogni piccolo pezzo di stoffa rivela lo schema dell'intera tappezzeria.

Capitolo 2.

La relazione tra matematica e fisica

Quando si pensa alle applicazioni della matematica alla fisica, è perfettamente naturale credere che la matematica sarà utile quando sono coinvolti grandi numeri in situazioni complesse. In biologia, per esempio, l'azione di un virus su un batterio non è matematica. Se si osserva al microscopio un piccolo virus che si muove, si vede che certe volte trova un punto su un batterio di forma irregolare — hanno tutti forma diversa — e vi spinge dentro il suo DNA, mentre altre volte questo non avviene. Però, se facciamo l'esperimento con milioni e milioni di batteri e di virus, possiamo imparare molto su questi ultimi prendendo delle medie. Possiamo usare la matematica nel fare la media, per vedere quali nuovi caratteri i virus sviluppano nei batteri, e con quale percentuale; in questo modo possiamo studiare la genetica, le mutazioni e così via.

Per prendere un esempio più semplice, immaginate un'enorme scacchiera per giocare a dama. L'effettiva operazione di una qualsiasi mossa singola non è matematica (o per lo meno la sua matematica è molto semplice). Ma potreste immaginare che su una scacchiera immensa, con moltissime pedine, si potrebbe fare un'analisi delle mosse migliori, o delle mosse buone o di quelle cattive, con un ragionamento profondo che richiederebbe che qualcuno si fosse messo lì e ci avesse pensato attentamente. Questa allora diventa matematica e implica il ragionamento astratto. Un altro esempio è l'uso dei calcolatori. Se avete un interruttore che è aperto o chiuso, non c'è niente di molto matematico, sebbene i matematici amino cominciare da lì i loro ragionamenti. Ma per calcolare cosa farà un sistema molto grande con i suoi complicati circuiti, c'è bisogno della matematica.

Vorrei dire subito che la matematica ha un'applicazione importantissima in fisica nella discussione di fenomeni dettagliati in situazioni complicate, quando si conoscano le regole fondamentali del gioco. Questo è un punto cui dedicherei la maggior parte del tempo se stes parlo solo della relazione della matematica e della fisica. Ma poiché questa fa parte di una serie di conferenze sul carattere della legge fisica, non ho tempo per discutere quello che accade in situazioni complicate, e passerò subito invece a un altro problema, cioè il carattere delle leggi fondamentali.

Se torniamo al nostro gioco di dama, le leggi fondamentali sono quelle secondo cui si muovono le pedine. La matematica può essere applicata nella situazione complessa per prevedere qual è una buona mossa da fare in una determinata circostanza. Però occorre ben poca matematica a causa del carattere fondamentalmente semplice delle leggi di base, che in questo caso possono essere espresse semplicemente in italiano.

La cosa strana della fisica è che anche per formulare le leggi fondamentali abbiamo bisogno della matematica. Darò due esempi, uno in cui non ne abbiamo bisogno, e uno in cui invece ne abbiamo bisogno. Primo: c'è una legge in fisica chiamata legge di Faraday, che dice che nell'elettrolisi la quantità di materiale che è depositata è proporzionale alla corrente e al tempo in cui passa la corrente. Questo significa che la quantità di materiale depositato è proporzionale alla carica che attraversa il sistema. Tutto questo sembra molto matematico, ma quello che sta effettivamente accadendo è che gli elettroni che percorrono il filo portano ciascuno una carica. Per prendere un esempio particolare, per depositare un dato atomo è necessario che passi un elettrone, cosicché il numero di atomi depositati è necessariamente uguale al numero di elettroni che passano, dunque proporzionale alla carica che

scorre lungo il filo. Così questa legge che sembra matematica non ha come sua base niente di molto profondo, e non richiede nessuna reale conoscenza di matematica. Che per depositare un atomo su un metallo necessario un elettrone è in un certo senso una affermazione matematica, ma non è certamente il tipo di matematica di cui sto parlando qui.

D'altra parte, prendete la legge di Newton per la gravitazione, che ha gli aspetti che ho discusso la volta scorsa. Vi ho dato l'equazione

$$F = G \frac{m m'}{r^2}$$

proprio per rendervi evidente la velocità con cui i simboli matematici possono trasmettere l'informazione. Ho detto che la forza è direttamente proporzionale al prodotto delle masse dei due oggetti, e inversamente al quadrato della distanza tra loro. Ho anche detto che i corpi reagiscono alle forze cambiando di velocità, o cambiando il loro moto nella direzione della forza, proporzionalmente alla forza e inversamente alle loro masse. Queste sono certo parole esatte e non era strettamente necessario che scrivessi l'equazione. Ciò nonostante è in un certo senso matematica, e ci domandiamo come questa possa essere una legge fondamentale. Che cosa fa il pianeta? Guarda il sole, vede quanto è distante e decide di calcolare sulla sua addizionatrice interna l'inverso del quadrato della distanza che gli dice come si deve muovere? Questa non è certamente una spiegazione del meccanismo della gravitazione! Potreste voler guardare più in là, e varie persone hanno cercato di farlo. A Newton fu detto, a proposito della sua teoria: "Ma non vuol dire niente, non ci dice niente." Ed egli rispose così: "Vi dice *come* si muove. Questo dovrebbe esser sufficiente. Vi ho detto come si muove, e non perché." Ma la gente spesso è insoddisfatta senza un meccanismo, e io vorrei descrivere una teoria, fra le tante che sono state inventate, proprio del tipo che potreste volere voi. Questa teoria suggerisce che l'effetto è il risultato di un gran numero di azioni, ciò che spiegherebbe perché è matematica.

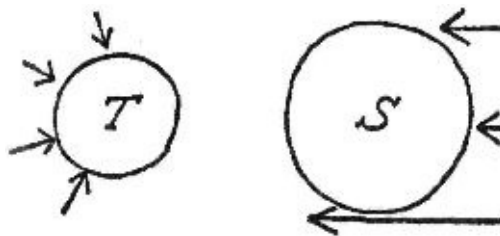


Figura 8

Supponiamo che nell'universo, in ogni parte, ci siano moltissime particelle, che ci attraversano con grandissima velocità. Esse arrivano ugualmente da tutte le direzioni, passandoci vicino, e ogni tanto ci colpiscono come in un bombardamento. Noi e il sole siamo praticamente trasparenti per loro, ma non completamente, e alcune di esse ci colpiscono. Guardate dunque quello che succederebbe (fig. 8). S è il sole e T la terra. Se non ci fosse il sole, le particelle bombarderebbero la terra da tutte le parti, producendo con i loro urti degli impulsi. Questo non farebbe muovere la terra in una direzione particolare perché esse arriverebbero tanto da una parte come dall'altra, dall'alto come dal basso. Invece, essendoci il sole, le particelle che arrivano da quella direzione sono in parte assorbite dal sole, perché alcune lo colpiscono ma non lo attraversano. Perciò il numero di quelle che vengono dalla direzione del sole verso la terra è minore di quello delle particelle che vengono dalle altre parti, perché trovano un ostacolo, il sole. È facile vedere che più lontano è il sole, più piccola è la proporzione delle particelle provenienti da tutte le direzioni che vengono assorbite. Il sole apparirà p

piccolo, anzi più piccolo proprio inversamente al quadrato della distanza. Perciò sulla terra ci sarà un impulso verso il sole che varia inversamente con il quadrato della distanza. E questo sarà il risultato un gran numero di operazioni molto semplici, cioè dei colpi, uno dopo l'altro da tutte le direzioni. Per questo la stranezza della relazione matematica sarà molto ridotta, perché l'operazione è molto più semplice che il calcolare l'inverso del quadrato della distanza. Questo modello, con le particelle che colpiscono da tutte le direzioni, fa il calcolo per voi.

L'unico guaio in questo schema è che, per altre ragioni, non funziona. Ogni teoria che si inventa deve essere analizzata in *tutte* le sue possibili conseguenze, per vedere se predice qualche altra cosa. In questo schema predice invero qualcos'altro. Se la terra si muove, più particelle la colpiranno davanti che dietro. (Se correte nella pioggia, una maggiore quantità di acqua vi colpisce la faccia che la parte posteriore della testa, perché state correndo verso la pioggia.) Così, se la terra si muove, essa corre contro le particelle che vengono verso di essa, e via da quelle che la rincorrono dal di dietro. Così più particelle la colpiranno dalla parte anteriore che da quella posteriore, e ci sarà una forza che si oppone al suo moto. Questa forza rallenterebbe la terra nella sua orbita, e il suo moto non sarebbe certo durato i tre o quattro miliardi di anni (almeno) durante i quali essa ha ruotato intorno al sole. Così questa è la fine della teoria. “Era piuttosto buona — voi direte — e per un po' ci eravamo liberati della matematica. Forse noi potremmo inventarne una migliore.” Può darsi che possiate, perché nessuno conosce la risposta definitiva, ma finora, dal tempo di Newton, nessuno ha ancora inventato un'altra descrizione teorica del meccanismo matematico che sta dietro a questa legge che non dica la stessa cosa, o che non renda la matematica più difficile, o che non predica dei fenomeni errati. Oggigiorno dunque, non esiste nessun altro modello della teoria della gravitazione in un'altra forma che non sia quella matematica.

Se questa fosse l'unica legge a carattere matematico, la cosa sarebbe curiosa e anche un po' fastidiosa. Ma quello che veniamo a scoprire è diverso: più investighiamo, più leggi troviamo, più profondamente penetriamo nella natura, più la malattia persiste: ognuna delle nostre leggi è un'affermazione puramente matematica, in un linguaggio piuttosto astruso e complesso. L'enunciato di Newton della legge della gravitazione è una matematica abbastanza semplice. Diventa sempre più astrusa e difficile a mano a mano che andiamo avanti. Perché? Non ne ho la più pallida idea. Adesso il mio scopo è solamente di parlarvi di questo fatto. In questa lezione mi propongo solo di mettere in evidenza il fatto che è impossibile spiegare onestamente e fare apprezzare le bellezze delle leggi della natura a chi non ha una profonda conoscenza della matematica. Mi dispiace, ma sembra proprio essere così.

Voi mi potreste dire: “Allora, se non c'è nessuna spiegazione della legge, almeno ci dica *che cosa* sia la legge. Perché non dirla a parole invece che a simboli? La matematica è solo un linguaggio, e non vogliamo poterlo tradurre.” In effetti, con pazienza, posso farlo, e credo di averlo in parte fatto. Potrei andare un po' oltre e spiegare più dettagliatamente che l'equazione significa che se la distanza è doppia, la forza è un quarto e così via: potrei cambiare tutti i simboli in parole. In altre parole potrei essere gentile con i profani che se ne stanno lì ad aspettare che io spieghi loro qualcosa. Ci sono autori che si sono fatti una fama per la loro abilità nello spiegare al profano nel suo linguaggio questi argomenti difficili e astrusi. Così il profano passa da un libro all'altro nella speranza di evitare la complessità che alla fine subentrano, anche con il miglior espositore di questo tipo. Ma più si legge, più la confusione aumenta e ci si trova di fronte a un'affermazione complicata dopo l'altra, una cosa difficile da capirsi dopo l'altra, tutte apparentemente slegate fra di loro. Il tutto diventa oscuro, e il lettore spera che forse in un altro libro ci sarà una spiegazione... L'autore ce l'ha quasi fatta, forse un altro ce la farà del tutto.

Ma io non credo che sia possibile, perché la matematica *non* è semplicemente un'altra lingua. La matematica è un linguaggio più il ragionamento; un linguaggio più la logica, è cioè uno strumento per ragionare. In effetti è una grande raccolta dei risultati dell'attento ragionamento di varie persone. Per mezzo di essa è possibile collegare un'affermazione a un'altra. Per esempio, posso dirvi che la forza diretta verso il sole, e posso anche dirvi, come ho già fatto, che il pianeta si muove in modo che, traccio una retta dal sole al pianeta, e ne traccio un'altra dopo un tempo definito, come tre settimane, l'area che è percorsa dal pianeta è esattamente uguale a quella che sarà percorsa nelle tre settimane seguenti, e così via mentre ruota intorno al sole. Posso spiegare in dettaglio queste affermazioni, ma non posso spiegare perché dicono la stessa cosa. Le complessità evidentemente enormi della natura con tutte le sue strane leggi e regole, ognuna delle quali vi è stata attentamente spiegata, sono in realtà legate in maniera molto stretta. Tuttavia se non apprezzate la matematica non potete capire, tra una grande varietà di fatti, che la logica vi permette di passare da uno all'altro.

Sembrerebbe incredibile che io possa dimostrare che aree uguali sono percorse in tempi uguali se le forze sono dirette verso il sole. Così, se me lo permettete, vi darò una dimostrazione per farvi vedere che le due cose sono veramente equivalenti, in modo da farvi comprendere più che il solo enunciato delle leggi.

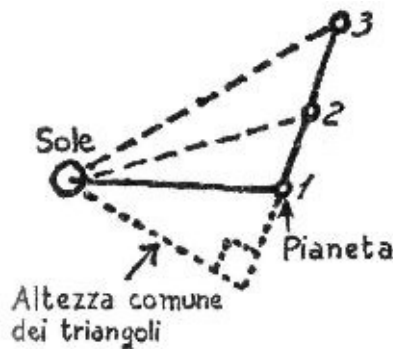
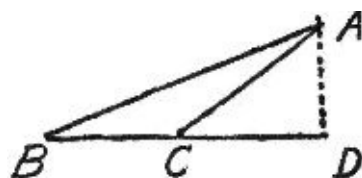


Figura 9

Vi farò vedere che le due leggi sono collegate in modo che il solo ragionamento vi porterà dall'una all'altra, e che la matematica è solo un ragionamento organizzato. Allora comprenderete la bellezza della relazione fra le due affermazioni. Dimostrerò che se le forze sono dirette verso il sole, aree uguali sono spazzate in tempi uguali.

Cominciamo dal sole e da un pianeta (fig. 9), e immaginiamo che a un certo momento il pianeta sia nella posizione 1. Esso si sta muovendo in modo tale, che, diciamo, un secondo più tardi esso è arrivato nella posizione 2; se il sole non esercitasse una forza sul pianeta, questo, per il principio d'inerzia di Galileo, continuerebbe ad andare in linea retta. Così, dopo lo stesso intervallo di tempo nel secondo seguente esso percorrerebbe esattamente la stessa distanza, e arriverebbe nella posizione 3. Cominciamo a dimostrare che se la forza *non* c'è, aree uguali sono percorse in tempi uguali. Vi ricordo che l'area del triangolo è metà della base per l'altezza, e che l'altezza è la distanza del vertice dalla base. Se il triangolo è ottuso (fig. 10), allora l'altezza è la verticale AD e la base è BC . Ora confrontiamo le aree che sarebbero percorse se il sole non esercitasse nessuna forza (fig. 9). Le due distanze 1-2 e 2-3 sono uguali, ricordatelo.



Resta da vedere se le due aree sono uguali. Considerate il triangolo formato dal sole e dai punti 1 e 2. Qual è la sua area? È la base 1-2, moltiplicata per metà dell'altezza, cioè del perpendicolare dalla base a S. E per l'altro triangolo, quello del moto da 2 a 3? La sua area è la base 2-3 per la metà dell'altezza da S. Questi due triangoli hanno la stessa altezza, e, come ho fatto notare, stessa base, per cui hanno la stessa area. Fin qui tutto bene. Se non ci fosse nessuna forza esercitata dal sole, aree uguali sarebbero percorse in tempi uguali. Ma la forza del sole c'è. Durante l'intervallo 1-3 il sole sta tirando e cambiando il moto in varie direzioni verso sé stesso. Per avere una buona approssimazione prenderemo la posizione centrale, o posizione media, in 2, e diremo che tutto l'effetto durante l'intervallo 1-3 è stato di cambiare il moto di una certa quantità nella direzione della linea 2-S (fig. 11).

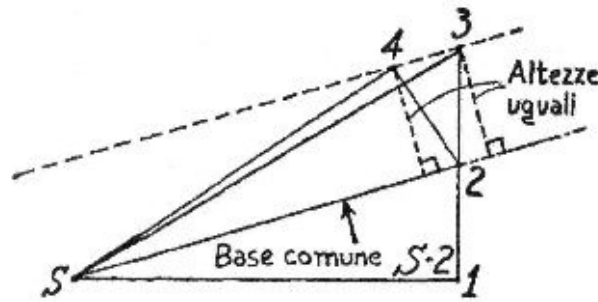


Figura 11

Ciò significa che le particelle che si sarebbero mosse sulla retta 1-2, e, se non ci fosse stata forza, avrebbero continuato a muoversi sulla stessa linea nel secondo seguente, a causa dell'influenza del sole hanno alterato il loro moto di una certa quantità parallela alla retta 2-S; il moto seguente è dunque una composizione di quello che il pianeta vorrebbe fare e del cambiamento che gli è stato impresso dall'azione del sole. Così in effetti il pianeta non va a finire nella posizione 3, ma nella posizione 4. Ora vorremmo confrontare le aree dei triangoli S23 e S24, e vi farò vedere che sono uguali. Hanno la stessa base S-2. Hanno anche la stessa altezza? Certamente, perché sono compresi fra rette parallele. La distanza da 4 alla retta S-2 è uguale alla distanza da 3 alla retta S-2 (prolungata). Perciò l'area del triangolo S24 è uguale a quella di S23. Ho dimostrato prima che S12 e S23 hanno area uguale, così sappiamo ora che S12 = S24. Così nel moto orbitale effettivo dei pianeti le aree percorse nel primo e nel secondo sono uguali a quelle percorse nel secondo seguente. Perciò, col ragionamento, possiamo vedere una connessione tra il fatto che la forza è in direzione del sole e il fatto che le aree sono uguali. Non è ingegnoso? L'ho preso direttamente da Newton: viene tutto dai *Principia*, il diagramma e il resto. Solo le lettere sono diverse, perché egli scriveva in latino, mentre io ho usato i numeri arabi.

Nel suo libro Newton dava tutte le sue dimostrazioni in forma geometrica. Oggi non usiamo più questo tipo di ragionamento, ma piuttosto un ragionamento analitico con simboli. Richiede una notevole abilità tracciare i triangoli giusti, accorgersi delle aree, e calcolare come si deve fare. Ci sono stati però stati dei perfezionamenti nei metodi di analisi, che oggi sono più veloci e più efficienti. Vogliamogli farvi vedere come procede la dimostrazione con la notazione della matematica moderna, dove per dedurre il risultato non si fa niente altro che scrivere un sacco di simboli.

Vogliamo parlare della velocità areolare, cioè la velocità a cui cambia l'area, e la rappresentiamo con una A con un punto sopra. L'area cambia quando il raggio gira, ed è la componente della velocità perpendicolare al raggio, moltiplicata per il raggio, che ci dà la velocità areolare. Così questa è il prodotto dei vettori che rappresentano la distanza radiale e la velocità, ossia la velocità con c

- [*click The Craft of Poetry: Dialogues on Minimal Interpretation pdf, azw \(kindle\)*](#)
- [read Android Cookbook \(Oreilly Cookbooks\) book](#)
- [download online What If?: The Unofficial Companion to Randall Munroe's Book with More Not-So-Absurd Questions and Their Scientific Answers pdf, azw \(kindle\), epub](#)
- [Programming Entity Framework: Code First pdf, azw \(kindle\)](#)
- [**And the Bride Wore Plaid \(Talisman Ring, Book 4\) online**](#)
- [The Enigma of Capital: And the Crises of Capitalism pdf, azw \(kindle\), epub, doc, mobi](#)

- <http://transtrade.cz/?ebooks/The-Craft-of-Poetry--Dialogues-on-Minimal-Interpretation.pdf>
- <http://cambridgebrass.com/?freebooks/Android-Cookbook--Oreilly-Cookbooks-.pdf>
- <http://fortune-touko.com/library/What-If---The-Unofficial-Companion-to-Randall-Munroe-s-Book-with-More-Not-So-Absurd-Questions-and-Their-Scienti>
- <http://junkrobots.com/ebooks/The-Valley--the-City--the-Village--Library-of-Wales-.pdf>
- <http://cavalldecartro.highlandagency.es/library/And-the-Bride-Wore-Plaid--Talisman-Ring--Book-4-.pdf>
- <http://academialanguagebar.com/?ebooks/A-Companion-to-Foucault--Blackwell-Companions-to-Philosophy-.pdf>