
LEZIONE GALILEANA

IL CAMBIAMENTO NELL'IMMAGINE DEL MONDO: SPAZIO E TEMPO DOPO EINSTEIN

CARLO ROVELLI

Centre de Physique Théorique, Université de la Méditerranée – Aix-Marseille II

È per me un onore grandissimo tenere una conferenza con una denominazione emozionante come “Lezione Galileiana”. Galileo Galilei è non solo il personaggio che – in parte qui a Firenze – ha gettato le basi della scienza moderna. È lui che ha trovato sperimentalmente la prima legge matematica che regola il movimento dei corpi sulla Terra. Ma è pure, ancora oggi, una fonte di ispirazione vivissima per chi, come me, si occupa di scienza.

Nel titolo di questa mia lezione vi è il nome di Einstein. Come probabilmente sapete – quest’anno se ne è parlato molto – esattamente 100 anni fa, nel 1905, Albert Einstein pubblica una serie straordinaria di articoli, che stanno oggi alla base della fisica del XX secolo -di moltissime delle sue applicazioni che hanno cambiato la nostra vita, dai computers alla bomba atomica, fino al GPS che sta nelle automobili. Einstein è stato scelto da *Time magazine* come l’uomo che più fortemente ha influenzato e caratterizzato il XX secolo. Questi lavori di Einstein del 1905, e la loro continuazione, poco dopo, nel 1915 (quando l’Europa si era già gettata nel baratro che inizia il suo lungo e lento suicidio come potenza dominante nel mondo) mettono in discussione profondamente proprio quella visione galileiana-newtoniana del mondo, che aveva permesso gli immensi risultati della fisica classica, e la cambiano radicalmente. Soprattutto cambiando in profondità le nozioni di *spazio* e di *tempo*, che stanno alla base della costruzione di pensiero galileiana-newtoniana.

A sua volta, il lavoro di Einstein, nonostante il suo successo completo, lascia delle questioni aperte, o per meglio dire apre dei problemi nuovi, problemi che cento anni dopo Einstein non sono ancora del tutto risolti, e il mio lavoro consiste nello studiare possibili soluzioni a questi problemi. Queste soluzioni rimettono in gioco ancora una volta le nozioni di *spazio* e di *tempo*, e approfondiscono ulteriormente, nella direzione individuata da Einstein, ma in modo ancora più radicale, il cambiamento delle nozioni classiche di *spazio* e di *tempo*.

In questa conversazione, vorrei arrivare, alla fine, a raccontare in maniera molto semplice il nocciolo della rivoluzione einsteiniana, e delle ricerche odierne sullo spazio

e sul tempo. In che modo sono cambiati, e stanno cambiando i concetti di spazio e di tempo, rispetto alle nozioni comuni di spazio e tempo o rispetto a quello che la maggior parte di noi ha studiato al liceo nelle poche ore e spesso, a mia memoria, molto poco convincenti ore di fisica.

Prima di arrivare a questo, però, e per poter arrivare a dirvi qualcosa di ragionevole sull'argomento, c'è un altro tema, molto più generale, su cui vorrei centrare questa chiacchierata. È un argomento che mi sembra necessario sia per comprendere che cosa sono queste modificazioni concettuali con le quali 'cambiano' le nozioni di spazio e di tempo, sia, più in generale (credo), per apprezzare a fondo il significato di questa continua e grande avventura intellettuale che è la scienza, cui è dedicato questo mese 'toscano'.

Il punto che vorrei discutere stasera è il seguente. Galileo, con Copernico e Newton hanno rifondato le basi concettuali per comprendere il mondo. La struttura concettuale che hanno messo in piedi si è rivelata di straordinaria efficacia. Non è esagerato dire che il mondo moderno, come lo conosciamo, non avrebbe potuto esistere, senza questa base concettuale. La struttura concettuale galileana-newtoniana è usata quotidianamente per costruire ponti, automobili, televisioni, aerei. Mio padre, che è ingegnere e realizza costruzioni in cemento armato precompresso, usa equazioni che sono derivate direttamente dalle equazioni di Galileo e Newton. Poi Einstein ha cambiato tutto alla base. E oggi queste basi concettuali sono nuovamente rimesse in discussione e stanno cambiando.

Ma allora – questo è il punto che voglio affrontare –, che cosa sappiamo veramente del mondo? In qualche modo, Galileo e Newton si sbagliavano. E anche Einstein in qualche modo si sbagliava, visto che si cambia ancora. Che razza di conoscenza è una conoscenza che non sta mai ferma? Non possiamo mai essere sicuri di nulla? Non possiamo avere una credibile immagine del mondo a cui fare riferimento? Questo è l'argomento principale che vorrei discutere stasera: l'aspetto dinamico, della conoscenza scientifica. Le modifiche delle nozioni di *spazio* e di *tempo*, con Einstein, e dopo Einstein, diventano più comprensibili se viste come esempi, in effetti un esempio primario, forse quello centrale, di questo aspetto dinamico della conoscenza scientifica.

Che cos'è la scienza? Io non penso che la scienza sia un modo di pensare molto *diverso* dal nostro ordinario modo di pensare il mondo. Noi siamo abituati, nella nostra vita quotidiana, a venire in contatto con situazioni nuove, che all'inizio capiamo poco, e poi, lentamente, comprendiamo sempre meglio. Per esempio, arriviamo in una città in cui non siamo stati prima. All'inizio ne abbiamo un'immagine mentale molto vaga, ma poi ci orientiamo sempre di più, ci costruiamo una carta mentale della città in cui siamo, che diventa via via più precisa man mano che abbiamo più dati. In questo processo spesso cambiamo i termini con cui pensare la città. Quando venivo a Firenze le prime volte, pensavo che da un lato della città ci fossero i colli, e mi orientavo (male) così, prima di scoprire che i colli stanno in realtà da più di un lato, e così via.

La *scienza* è semplicemente il processo con cui compiamo questa stessa operazione

di orientarci e comprendere il mondo intorno a noi, non però nell'esperienza di un singolo, ma nell'esperienza accumulata e comune di tutta l'umanità. Più precisamente, è il processo di trovare il modo migliore per pensare e organizzare la moltitudine svariata di fenomeni che sono intorno a noi, in termini *razionali*, basandoci sulla nostra ragione, la nostra capacità di pensare. Questo sforzo rappresenta una straordinaria avventura intellettuale, che attraversa la storia dell'umanità. Ora, due fatti forse sorprendenti e un po' opposti l'uno all'altro hanno caratterizzato questa avventura.

Il primo è che il sogno antico di capire il mondo in termini razionali e sulla base di poche idee semplici e poche leggi semplici lo si è potuto realizzare veramente, e in ambiti estremamente ampi. La ricerca della comprensione razionale del mondo ha in effetti portato alla scienza moderna e alla sua indubitabile efficacia. Questa non solo ha trovato aspetti di ordine dietro alla varietà dei fenomeni, ma, grazie a questa conoscenza, ha cambiato in profondità la vita dell'umanità e ha permesso lo sviluppo della nostra civiltà moderna. Pensare al mondo in termini razionali funziona.

Il secondo, e qui sta il punto centrale, è che la chiave per comprendere il mondo è risultata essere una: la capacità di *liberarci* da idee sbagliate che abbiamo nella testa. Ogni passo avanti nella comprensione del mondo è in piccola o grande parte, un riconoscere che la struttura di pensiero precedente è limitata, è inadatta, è migliorabile. Devo capire che questo mio pregiudizio che a Firenze esistesse un 'lato-colline', come a Verona, dove sono nato, è un'idea sbagliata. Devo cambiarla. Ma io la usavo come riferimento per mettere ordine, per organizzare tutta la mia comprensione della geografia di Firenze. Come faccio a cambiarla? Eh ... devo cambiarla, anche se questo richiede una difficoltà. Cioè, posso anche non farlo, e continuare a pensare al lato-colline di Firenze, ma questo renderà la mia conoscenza di Firenze molto più debole. Se ho il coraggio di gettare via il mio pregiudizio e di accettare una mappa mentale del tutto nuova, capisco meglio, mi oriento meglio, posso fare più cose.

Ora, questo liberarsi da un pregiudizio e accettare una mappa mentale nuova della realtà è risultato essere, nella storia della scienza, un processo continuo. Si continua a imparare *così*. Si continua a capire che abbiamo pregiudizi. Anche se riusciamo a capirne bene molti aspetti, la natura continua ad apparire lo stesso inesauribile. Più comprendiamo del mondo, più scopriamo che c'è molto altro da comprendere: la nostra comprensione del mondo si affina e diventa via via più efficace, ma ... continua a cambiare. Troviamo modi efficaci di pensare il mondo, ma ce ne sono sempre di *più* efficaci. Se vogliamo capire, dobbiamo dunque essere aperti ai nuovi sovversivi, ai nuovi rivoluzionari. La strada della ricerca della conoscenza è lontana dall'essere conclusa.

Ne segue che ogni passo avanti nella comprensione del mondo è una sovversione del modo di vedere precedente e ha quindi qualcosa di sovversivo, qualcosa di rivoluzionario. Ogni volta ridisegniamo da capo il mondo. Cambiamo la grammatica dei nostri pensieri, il quadro della nostra immagine della realtà.

In altre parole, la natura della scienza è la scoperta che la conoscenza non è un'enciclopedia chiusa, ma è un processo. La scienza è la realizzazione della natura

dinamica della conoscenza razionale del mondo.

Vediamo come funziona. Quando nasce la scienza? Be', forse sorprendentemente, la scienza – nel senso che ho detto: come percorso di comprensione razionale del mondo – nasce, almeno per quanto ne sappiamo, in un luogo ed un tempo abbastanza preciso. L'idea che si possa comprendere la natura in modo razionale nasce all'improvviso ventisei secoli fa, nelle luminose città greche sulla costa dell'odierna Turchia, circa sei secoli prima di Cristo. Quindi, alla prima alba del periodo classico della storia greca. Parecchio dopo la guerra di Troia e la scrittura dell'Iliade e dell'Odissea.

Attenzione, ventisei secoli fa è molto tempo fa, ovviamente, ma non è certo l'inizio della civiltà. Erano già fiorite splendide civiltà in Egitto, in Mesopotamia, a Creta, in India. Anzi, a quel tempo la grande civiltà egiziana esisteva già da più o meno ventisei secoli.

La nascente civiltà greca è però profondamente diversa dalle antiche e grandi civiltà egiziana e mesopotamica che le sono vicine. Queste sono ordinate, stabili e gerarchiche. Il potere è centralizzato e la civiltà si regge sulla conservazione dell'ordine stabilito. Sono civiltà chiuse che entrano in contatto con l'esterno quasi solo in caso di conflitto, di guerra. Il giovane mondo greco, al contrario, è estremamente dinamico, è in evoluzione continua. Non vi è potere centrale. Ogni città è indipendente; e all'interno di ogni città il potere è rinegoziato in continuazione fra i cittadini. Le leggi non sono né sacre né immutabili: sono continuamente discusse, sperimentate e messe alla prova. Le decisioni vengono prese in comune nelle assemblee. L'autorità è soprattutto di chi è in grado di convincere gli altri, attraverso il dialogo e la discussione. Ed è un mondo apertissimo ad assorbire quanto può dalle civiltà vicine. I greci, a differenza degli egiziani e dei persiani, viaggiano moltissimo. In questo clima culturale profondamente nuovo nella storia del mondo, nasce un'idea nuova della politica: la democrazia. L'idea che le decisioni collettive possano emergere dal confronto libero di posizioni diverse. E nasce un'idea nuova della conoscenza: la conoscenza razionale. Questa è una conoscenza dinamica, che evolve, che è continuamente discussa e messa alla prova. Come in politica, l'autorità del sapere viene soprattutto dalla capacità di convincere gli altri della giustezza del proprio punto di vista -- e non dalla tradizione, dal potere, dalla forza o dall'appello a verità immutabili. La critica alle idee acquisite non è temuta; al contrario, è auspicata: è la sorgente stessa del dinamismo, della forza di questo pensiero, la garanzia di continuare a migliorare. È l'alba di un mondo nuovo.

Permettetemi di dire qualche parola in particolare di un personaggio che amo molto, che ritengo essere un gigante della scienza, forse il primo o uno dei primi, e uno dei più grandi scienziati di tutti i tempi: Anassimandro. Concittadino, giovane amico e probabilmente discepolo del grande Talete, il filosofo che per primo aveva posto domande razionali sulla forma e la struttura del mondo, Anassimandro è viaggiatore, uomo di stato, geografo, astronomo e filosofo. Fra le sue molte idee, ce n'è una che cambia la storia del pensiero del mondo.

Tutti i popoli e tutte le civiltà, dai Cinesi ai Maya, dagli Egiziani agli Indiani, dagli

Indiani d'America agli Ebrei, hanno pensato che il mondo fosse fatto dalla Terra *sotto*, e dal Cielo *sopra*. Lo spazio è dunque diviso in due grandi parti: sotto la Terra, sopra il Cielo. Al di sotto della Terra ci deve essere ancora Terra, altrimenti la Terra cascherebbe. Oppure una grande tartaruga che la regge, appoggiata su un elefante, come in certi miti indiani, oppure un grande mare, come aveva provato a ipotizzare Talete. Ma sempre il mondo diviso fra alto e basso, cielo di sopra, terra di sotto. Anassimandro propone un'altra idea: la Terra è un oggetto *che non si appoggia su nulla*. Galleggia nello spazio. Sotto la Terra non c'è nulla: c'è solo altro cielo. Il cielo non è sopra la Terra, bensì intorno alla Terra.

Alla luce di quello che sappiamo oggi, l'idea è giusta. Chi potesse avere qualche dubbio, guardi le bellissime foto della Terra prese dal cielo dagli astronauti. Il nostro caro pianeta blu è proprio un sassone che galleggia nello spazio, e non è appoggiato a nulla. Come ha fatto Anassimandro a capirlo? Be', visto a posteriori, gli indizi erano molti. Si pensi per esempio al Sole, alla Luna e a tutte le stelle che tramontano a ovest e ricompaiono a est: non ci indicano abbastanza chiaramente che devono passare *sotto* la Terra per completare i loro cerchi? E che dunque sotto deve esserci spazio aperto? In effetti, Anassimandro non ha fatto che applicare la stessa intuizione secondo cui, se vediamo un signore sparire dietro una casa e ricomparire dall'altra parte, vuol dire che dietro la casa c'è un passaggio. Allora era facile? No, non lo era, se milioni di uomini in decine di civiltà, non ci avevano pensato.

Perché era così difficile trovare questa idea? Perché è un'idea che rivoluziona in profondità l'immagine del mondo. Gli uomini sono attaccati alle loro idee, e non le cambiano facilmente. Pensano sempre di sapere già tutto. Le idee nuove fanno paura perché sconcertano. Non è sconcertante, se ci pensate bene, l'idea che la Terra non sia appoggiata a nulla? Perché non cade? La domanda, evidentemente è stata posta subito ad Anassimandro, e noi conosciamo la sua risposta: perché le cose non cadono «verso il basso», le cose cadono «verso la Terra»; e dunque la Terra non ha nessuna direzione particolare verso cui cadere se non verso se stessa. Ancora una volta, alla luce della nostra comprensione del mondo di oggi, la risposta di Anassimandro è esatta. Ma è sconcertante: Anassimandro ridisegna completamente il quadro concettuale della comprensione umana dello spazio, della Terra, della gravità che fa cadere i corpi. Sulla base di osservazioni, per giustificarle meglio, propone una nuova carta del mondo, una carta concettuale diversa. Un'idea profondamente nuova di come sia organizzato lo spazio. Non più lo spazio diviso in due, un sopra e un sotto, sopra Cielo, sotto Terra, e le cose che cadono dal sopra al sotto, bensì uno spazio fatto di cielo, all'interno del quale sta sospesa la Terra, in cui le cose cadono verso la Terra. È un'immagine del mondo migliore e più generale di quella che la precedeva. Questa è la scienza.

Purtroppo il libro scritto da Anassimandro non lo abbiamo più, e quello che sappiamo di lui è solo quello che dicono di lui altri scrittori greci i cui testi sono rimasti, per esempio Aristotele. Resta di lui solo un breve frammento, un po' misterioso, che dice:

*Le cose nascono l'una dall'altra e periscono l'una nell'altra,
secondo necessità.
Esse si rendono giustizia fra loro e riparano le loro ingiustizie
secondo l'ordine del tempo.*

Molto è stato letto in queste poche linee oscure. Probabilmente esse esprimono un'altra grandissima idea che risale ad Anissimandro: l'idea che gli eventi non avvengono per caso. Avvengono guidati da una necessità, secondo leggi che governano il loro svolgersi nel tempo: «secondo l'ordine del tempo».

Mancano ancora ad Anissimandro molte idee essenziali per costruire la scienza, e forse quella più importante è l'intuizione che il linguaggio appropriato per descrivere il mondo è la matematica. Questa intuizione appare però subito, nella generazione successiva, in Italia, a Crotona, dove insegna Pitagora, e si sviluppa la scuola pitagorica. La scuola pitagorica ha un influsso immenso sulla cultura occidentale ed è un po' la culla in cui cresce la scienza. Come Pitagora, o chi per esso in questo periodo, possa avere avuto questa intuizione immensa che il linguaggio corretto per descrivere il mondo, per prevedere il comportamento delle cose del mondo, fosse la matematica – “il numero” come si diceva in ambito pitagorico –, io non lo so, e non lo capisco. Resta il fatto che l'intuizione era non solo giusta, ma è l'intuizione grazie alla quale esiste la scienza.

Poco dopo è Platone, del quale finalmente abbiamo moltissimi testi, a formulare e sviluppare a fondo questa intuizione. La verità non è immediatamente accessibile, è velata. Tuttavia non è irraggiungibile. Il mondo deve essere comprensibile in modo razionale. Per comprenderlo, la strada è la ricerca razionale, la discussione, il dialogo, lungo, continuo, incessante, nel corso del quale le nostre idee cambiano, dal confronto con i dati sensibili e le une con le altre, fino a che vediamo, su una questione, la chiarezza. Il linguaggio segreto in cui le leggi della natura sono scritte è matematico. Queste sono, praticamente citate alla lettera, parole della Settima Lettera di Platone, e sono un po' il credo della scienza. È il 'catechismo' al quale tutta la ricerca scientifica si è ispirata.

Quel che è straordinario in questa ricetta pitagorico-platonica per la conoscenza è che ... non è che a quel tempo funzionasse granché. Era più una speranza. Eppure, proprio questa speranza si è realizzata.

La prima grandissima realizzazione di questo progetto è l'astronomia alessandrina. Che è una splendida costruzione teorico matematica che permette di comprendere, e di prevedere esattamente il movimento di tutte le cose visibili nel cielo. Ci sono voluti secoli per realizzarla, ma il risultato è stupefacente. Noi abbiamo ancora il libro di Tolomeo, l'*Almagesto*, ed è emozionante il fatto che voi potete aprire questo libro, studiare le tecniche, fare qualche calcolo, sui dati raccolti in questo libro e prevedere che il 3 ottobre 2005 a Firenze, di mattina, ci sarà un'eclisse di sole. È straordinario. C'è scritto qui. Duemila anni fa.

Poi alla scienza greca succede qualcosa di estremamente inquietante. Il grande sviluppo di conoscenze, non solo nell'astronomia, ma anche nella geometria, nell'ottica,

nella statica, nella medicina, e in molti altri campi, sostanzialmente si arresta, si affloscia e in gran parte si perde. Questo comincia a succedere con l'imporsi dell'impero romano, in cui la conoscenza razionale del mondo già viene meno, ma poi si accentua in modo quasi violento con la presa di potere del Cristianesimo. Il primo Cristianesimo, si scaglia con violenza contro questo processo di conoscenza razionale del mondo. La conoscenza è una sola ed è rivelata. Non c'è spazio per nient'altro. Di fatto, tutto si assopisce, o continua ma a ritmo estremamente più lento, solo dopo l'espansione dell'Islam nei paesi musulmani, e in India, dopo che l'influsso delle idee scientifiche greche arriva in India.

La ripresa vivace del processo avviene invece dieci secoli dopo questo assopimento, con il Rinascimento europeo. Il Rinascimento si apre con un immenso sforzo di recupero del patrimonio di antiche conoscenze. L'Europa già dal Trecento si apre ad assorbire ciò che viene dall'Islam; ed è come sempre, dall'apertura all'esterno che viene vitalità e forza nuova. Anzi, dal Duecento, da quando Federico II, invece di intraprendere la crociata contro l'Islam che aveva voluto Innocenzo III, e sulla quale il papato continuava ad insistere, si mette invece d'accordo per una soluzione pacifica con il Sultano del Cairo, Malik Al Kamil (la reazione del papato fu di dichiarare Federico «nemico della religione, perché invece di portare guerra agli infedeli aveva portato loro la pace») e decide di invitare in Europa intellettuali e sapienti arabi. È così che la cultura europea si riapre e il 'rinascimento' si prepara.

È una lezione che forse ha valore ancora oggi: la ricchezza di una civiltà non è nei suoi riflessi identitari e nel suo chiudersi, confrontarsi, o peggio entrare in conflitto con altre civiltà: è nella capacità di lasciarsi influenzare e di assorbire ciò che viene dalle altre civiltà; e in generale dalla diversità.

In particolare, nel Cinquecento viene studiato l'*Almagesto* di Tolomeo e, per la prima volta dopo venti secoli, qualcuno ha il coraggio non solo di ristudiare l'antico sapere, ma di ricominciare la strada che quel sapere ha creato, e quindi di rimettere in discussione di nuovo quel sapere: il modo autentico per essere fedeli alla conoscenza è metterla in dubbio. Un oscuro canonico polacco, che ha studiato in Italia e ha vissuto una vita solitaria in Polonia immerso nei suoi studi, si cala a fondo nello studio dell'*Almagesto* e, dalla sua approfondita conoscenza, propone di cambiare a fondo, ancora una volta, l'immagine del mondo. Si tratta, ovviamente, di Niccolò Copernico. Ancora una volta il mondo cambia a fondo: non più sfere intorno alla Terra, ma pianeti che girano intorno al Sole.

Il grandissimo omaggio che il Rinascimento fa a Tolomeo non è nello studiarlo e migliorarlo un po'. Questo lo avevano già fatto gli studiosi islamici e indiani. È ritrovarne lo spirito profondo, criticandolo. Tolomeo aveva costruito il suo sistema mettendo in dubbio un assioma di Aristotele: che i pianeti viaggiassero a velocità costante sulle loro orbite (nel sistema di Tolomeo la velocità non è costante). Bene, Copernico riprende lo spirito profondo della scienza Greca: gli assiomi, le regole, non si rispettano: si cambiano.

Una delle maggiori conseguenze della rivoluzione copernicana è una semplice deduzione che segue dal sistema copernicano, che è Galileo a realizzare pienamente, un secolo dopo Copernico. La scienza antica aveva realizzato in maniera piena il programma pitagorico-platonico di trovare le leggi matematiche che regolano il moto di tutte le cose, *solo* per i cieli. Non per la terra. Il moto delle terrestri non era prevedibile con precisione. Questo era stato giustificato a posteriori dicendo che la sostanza di cui sono fatti i cieli era diversa della sostanza di cui sono fatte le cose nel mondo 'sublunare'. Ora però, ragiona Galileo, SE la terra è un pianeta come gli altri, ALLORA le cose sulla terra non possono essere fatte di una sostanza diversa di quelle della luna e dei pianeti. E se la luna e i pianeti seguono leggi matematiche ALLORA anche gli oggetti sulla terra devono seguire leggi matematiche. Il programma pitagorico-platonico si deve applicare anche agli oggetti terrestri. E se ha funzionato così bene per i cieli, funzionerà anche per la terra. Con questa straordinariamente audace motivazione intellettuale, Galileo si mette alla ricerca di leggi matematiche per descrivere i movimenti di oggetti sulla terra. Le cerca, e le trova, scoprendo la legge matematica che descrive come cadono i corpi. Ed è un trionfo immenso.

Il trionfo è ancora più immenso nella generazione successiva: Newton, che nasce l'anno in cui muore Galileo, combina le leggi del moto dei corpi sulla terra e quelle del cielo, e mostra che tutte seguono da una semplicissima coppia di equazioni. È la piena realizzazione, dopo venti secoli, del sogno di Pitagora e Platone: il mondo descritto dalla matematica. Il futuro, in linea di principio, è perfettamente prevedibile in modo razionale.

È difficile sottostimare l'effetto della scoperta della meccanica di Galileo e Newton. Onde evitare fraintendimenti: non è che non siano esistite civiltà senza scienza. Ci sono state grandi e splendide civiltà, in cui lo sviluppo della conoscenza razionale del mondo, nel senso che ho detto, era scarso o assente. L'impero romano ne è in larga misura un esempio. Ma certo erano molto diverse dalla nostra attuale. E, senza voler dare giudizi di valore, erano civiltà in cui la vita media non è arrivata a superare i trent'anni e in cui la stragrande maggioranza degli uomini e delle donne erano miseri contadini che lavoravano la terra dall'alba al tramonto. Il mondo in cui viviamo, gli standard di vita e la tecnologia odierna non esisterebbero senza il processo di conoscenza razionale testimoniato nell'opera di Galileo e Newton.

Galileo e Newton, trovano dunque le leggi matematiche per descrivere il mondo fisico. Per esprimere in forma generale e coerente queste leggi matematiche, che Galileo aveva iniziato a trovare, Newton deve cambiare le carte in tavola e riorganizzare l'immagine del mondo in maniera sostanziale. Deve cambiare il concetto di spazio.

Cos'è lo spazio?

Newton introduce l'idea di uno spazio vuoto e regolare, descritto dalla geometria di Euclide, entro il quale si muovono tutte le cose. Lo spazio newtoniano ha una struttura rigida, come una tavola liscia, che fa da palcoscenico sul quale avvengono i fatti del

mondo, da contenitore del mondo. Questa idea newtoniana dello spazio ci è familiare perché l'abbiamo studiata a scuola e l'abbiamo usata per risolvere i problemi di fisica (quelli con le coordinate cartesiane x , y e z ...). Lo spazio come contenitore del mondo. Ma non è l'unica idea possibile di spazio e neppure l'idea tradizionale dominante. Nella maggior parte del pensiero occidentale prima di Newton, un'altra idea era stata più comune: l'idea che non esiste uno spazio davvero vuoto. Un bicchiere vuoto è in realtà un bicchiere pieno d'aria. Esistono solo le cose, che, per così dire, riempiono tutto, e le relazioni spaziali sono solo le relazioni che dicono quale cosa è in contatto con quale altra.

L'idea che lo spazio in sé non esiste è stata comune da Aristotele fino a Cartesio (non ostante il fatto che sia stato lo stesso Cartesio a sviluppare l'impiego sistematico delle coordinate, poi usate da Newton per descrivere lo spazio vuoto). I cieli di Dante che circondavano la Terra, per esempio, erano sfere piene, incastrate l'una nell'altra, non spazi vuoti.

Newton, con un'operazione caratteristica della grande scienza, abbandona l'idea aristotelico-cartesiana del mondo 'pieno' di cose (forse ispirato dalla scoperta di Keplero che non ci sono le sfere celesti) e la sostituisce con l'idea di un mondo vuoto ove corrono libere delle masse, soggette alle forze. Non si pensi che Newton abbia fatto questo cambiamento a cuor leggero. Tutta la prima parte del grande libro di Newton, i *Principia*, è dedicata a discutere le ragioni e i vantaggi di questo nuovo punto di vista. Il mondo di Newton è dunque uno spazio vuoto, come una tavola di legno, su cui corrono pianeti e oggetti.

Questa immagine del mondo resta più o meno la stessa per secoli, ma con un piccolo ma fatale cambiamento, che avviene nell'Ottocento, con il lavoro di Faraday e Maxwell, che capiscono che il modo migliore per spiegare l'elettricità e il magnetismo è pensare che esistano i *campi* elettrici e magnetici. I campi sono entità diffuse in tutto lo spazio, Faraday li immagina come delle linee di ragnatela sottili e fittissime che riempiono tutto. Queste linee portano dappertutto le forze elettriche e magnetiche. La luce è una vibrazione sottilissima di queste linee, onde che corrono velocissime sulle tele di ragno.

All'inizio del ventesimo secolo Einstein studia la forza di gravità e capisce che anche la forza di gravità deve essere l'effetto di un campo. Introduce dunque il *campo gravitazionale*, che è simile al campo elettrico: un insieme di linee che, come le linee di Faraday, riempie tutto. Analogamente al campo elettrico, il campo gravitazionale oscilla ed ondeggia. Le sue onde sono oggi cercate attivamente. Vicino a Pisa è in costruzione un grande osservatorio, chiamato VIRGO, per captarle. Ma nello studiare questo nuovo campo, Einstein fa una scoperta eccezionale: capisce che lo *spazio di Newton*, la tavola rigida, e questo nuovo *campo gravitazionale*, sono in realtà la stessa cosa. In altre parole, la tavola rigida introdotta da Newton per rendere conto dello spazio in realtà non è rigida per niente: non è nient'altro che il campo gravitazionale stesso. Così, con Einstein si abbandona lo spazio-tavola di Newton e si ritorna alla concezione dello

spazio precedente: non esiste un vero spazio vuoto e fisso entro cui avvengono le cose. Esistono solo cose, particelle e campi, e tra questi il campo gravitazionale: i campi vivono, per così dire, uno sull'altro.

Questa è la grande scoperta di Einstein.

Oggi il grande problema aperto è di conciliare con la meccanica quantistica la visione einsteiniana dello spazio come campo gravitazionale. La meccanica quantistica è la scoperta che i campi hanno una struttura granulare: per esempio il campo elettrico, osservato su piccolissima scala, si rivela essere formato da sciami di particelle: i fotoni. Nello stesso modo il campo gravitazionale, e cioè lo spazio, deve avere una struttura granulare. Ci dovrebbero quindi essere 'atomi di spazio' o 'quanti di spazio'.

Una delle teorie ipotetiche che vengono oggi esplorate per capire questa struttura quantistica è la gravità quantistica 'a loop', che permette di calcolare la struttura granulare dello spazio, cioè le caratteristiche di questi 'quanti di spazio'. I *loop* sono gli atomi di spazio e hanno la forma delle ragnatele immaginate da Faraday. Ma questo spazio quantizzato, granulare, fatto di *loop*, non è più il *contenitore del mondo* come per Newton; è un campo come un altro, uno dei diversi costituenti del mondo.

E il tempo? Il tempo da cui era partito Anassimandro per trovare un principio di ordine nel mondo? Il tempo che entra in tutte le equazioni della fisica come 'variabile indipendente' rispetto alla quale tutto il resto viene calcolato? Anche il tempo sta subendo un profondissimo ripensamento.

Che cos'è dunque il tempo?

Che cos'è la variabile T che entra nelle equazioni della fisica? La risposta sembra facile: è quella cosa che misurano gli orologi. Ma che cos'è un orologio? Per stabilire la sua legge $x = -1/2 g t^2$, Galileo aveva bisogno di un orologio che misurasse T . Egli stesso aveva contribuito in maniera essenziale alla nascita dell'orologio moderno, comprendendo che le oscillazioni di un pendolo durano tutte lo stesso tempo. Oggi, virtualmente ogni orologio contiene un pendolo, meccanico o elettronico. La leggenda vuole che Galileo si rendesse conto che le oscillazioni del pendolo durano tutte lo stesso tempo mentre era a Pisa, nella Cattedrale, osservando le lente oscillazioni di un grande e bellissimo candelabro, che è tuttora nella cattedrale. Secondo la leggenda, durante una cerimonia religiosa dalla quale evidentemente non era molto preso, Galileo conta i battiti del suo cuore durante ogni lenta oscillazione del candelabro, e si rende conto che le oscillazioni durano tutte lo stesso numero di battiti. Ha scoperto l'*isocronia* delle oscillazioni del pendolo, e una chiave per misurare il tempo.

Ma c'è un problema evidente. Qualche tempo dopo, un qualunque medico poteva misurare l'alterazione dei battiti del cuore di un malato, usando un orologio, e dunque un pendolo. Dunque si misura l'oscillazione del pendolo con i battiti, e i battiti con il pendolo ... Non è un circolo vizioso? Stiamo misurando il tempo o stiamo solo misurando diversi fenomeni uno rispetto all'altro?

Ancora una volta è Newton, il grandissimo inglese, che mette ordine in questa

confusione concettuale. All'inizio del suo capolavoro, con cristallina chiarezza spiega che non c'è nessun modo per misurare direttamente il tempo, però possiamo *ipotizzare* che esista una variabile che non misuriamo mai direttamente, che è il tempo, e scrivere le equazioni del moto rispetto a questa variabile non osservabile. Possiamo allora scrivere le equazioni del pendolo che ci diranno come evolve l'ampiezza del pendolo, chiamiamola A , nel tempo T . Dunque scriveremo la funzione $A(T)$. E scriveremo un'altra variabile, chiamiamola $B(T)$ che conta i battiti del cuore nel tempo T , e così via per ogni variabile fisica. La teoria ci permetterà di calcolare tutte queste funzioni $A(T)$, $B(T)$, $C(T)$, $D(T)$... Quello che noi osserveremo tuttavia non saranno mai queste funzioni ma la variazione *relativa* delle variabili l'una rispetto all'altra: per esempio l'ampiezza del pendolo in funzione dei battiti $A(B)$, che si può ottenere dalla teoria combinando le funzioni $A(T)$ e $B(T)$. Dunque il tempo non lo si vede mai, ma si ipotizza che esista e 'scorra': si studia il cambiamento relativo dei fenomeni l'uno rispetto all'altro e lo si descrive matematicamente come evoluzione rispetto a un tempo inosservabile. Fin qui, Newton.

Ma oggi la teoria di Newton non è più sufficiente. Dobbiamo basarci sulla relatività generale di Einstein e sulla meccanica quantistica. Ora, accade che se si prendono le equazioni della relatività generale e si combinano con le equazioni della meccanica, la variabile tempo T scompare del tutto.

Il tempo, forse, a livello fondamentale, non esiste. Per capire meglio il mondo, forse bisogna rinunciare sia all'idea dello spazio come *contenitore del mondo*, sia all'idea del tempo *lungo il quale avvengono i fenomeni*. E bisogna un'altra volta imparare a pensare il mondo da capo, questa volta, in un certo senso, senza né spazio né tempo.

Forse lo 'scorrere' del tempo, come è stato suggerito, non è che un'apparenza macroscopica, dovuta alla grossolanità della nostra percezione macroscopica, e dunque, in ultima analisi, alla nostra ignoranza dello stato microscopico del mondo intorno a noi. Così, ventisei secoli dopo la posizione della regola fondamentale della fisica: studiare come cambiano le cose secondo l'ordine del tempo, oggi la fisica è forse in procinto di cambiare anche la sua prima regola del gioco. Si butta la nozione di tempo, e ci si chiede, più semplicemente, come cambino le cose le une rispetto alle altre.

Possiamo veramente pensare il mondo in modo atemporale? Possiamo veramente costruire un'immagine fondamentale del mondo, compatibile con la nostra esperienza, in cui spazio e tempo non sono elementi fondamentali? La risposta, oggi, non è chiara. Siamo qui ai margini estremi della nostra conoscenza del mondo fisico. Idee che vengono esplorate, che ancora non sappiamo se si riveleranno efficaci. Ma questa è una delle direzioni fondamentali lungo la quale si sta cercando.

Torniamo all'inizio: è credibile tutto questo? Sì e no. Non lo è, nel senso che non è una verità finale. Forse domani si troverà un modo diverso e migliore, più efficace, per capire il mondo. Ma è più credibile di tutte le alternative finora pensate. L'idea di Anassimandro del sasso che galleggia nello spazio era rudimentale. Ma era molto migliore dell'idea terra-sotto/cielo-sopra. L'odierna immagine scientifica del mondo è

credibile perchè è la migliore e più efficace comprensione del mondo che abbiamo fino ad ora. Non è credibile perché è assolutamente giusta, ma perché è la migliore trovata fin qua.

Questa è un'immagine della scienza in rivoluzione permanente, sempre sospesa fra la conoscenza e il dubbio, che è profondamente diversa dall'immagine ottocentesca della scienza trionfante e certa di sé. L'idea ottocentesca di una scienza fatta di assolute certezze è diventata facile preda di attacchi, da parte di varie forme di irrazionalismo e antiscientismo. Le critiche erano e sono giuste, ma irrazionalismo e antiscientismo ci portano indietro, non avanti. Ci portano a credenze sbagliate, non a un sapere più solido.

Oggi questo irrazionalismo antiscientifico è all'attacco. Un esempio tratto dalla cronaca recente: si critica la teoria dell'evoluzione invocando proprio l'apertura culturale. È una sonora sciocchezza, perché se è vero che nulla è mai assolutamente certo, è anche vero che tutte le alternative odierne all'evoluzionismo, esaminate serenamente non poggiano sulla razionalità, ma su un fideismo acritico.

Il Novecento ci ha insegnato questo: il sapere non è mai acquisito una volta per tutte, è invece un processo dinamico. Ciò non toglie valore al sapere scientifico. Al contrario, ne è il fondamento stesso. È la forza immensa, e anche la magia, di un pensiero che ha la forza di rimettere costantemente in discussione i propri stessi fondamenti, di aggiornare di continuo la propria visione del mondo.

Vorrei concludere riallacciandomi alle parole finali della introduzione del programma di questa manifestazione, che dicono che questa bellissima manifestazione, *Pianeta Galileo*, è organizzata

*... nella convinzione che ... sia un'opportunità importante per la società civile,
per la formazione dell'individuo, per l'affermazione dell'idea stessa di democrazia.*

Vorrei accettare questo stimolo, questa sfida, e ritornare all'inizio, alla nascita della scienza nella civiltà greca, dove scienza e democrazia nascono insieme, dallo stesso spirito. Lo spirito della razionalità serena, dell'intelligenza e del dialogo. Questo spirito di dialogo e razionalità è uno dei pilastri su cui si è costruito il nostro mondo. Ma non è sempre dominante. Tutt'altro. È fragile, estremamente fragile. Nei secoli, è stato sotto attacco, ed è stato spesso sconfitto. Dall'arroganza del potere, dalla forza delle armi, da chi ha cercato di controllare lo spazio pubblico del dibattito e dell'informazione. E soprattutto dalle certezze di chi crede di essere il solo depositario della verità assoluta. Queste forze, nei secoli hanno spesso ucciso lo spirito della democrazia e hanno più volte represso lo spirito libero della ricerca della conoscenza. Io non penso che queste siano difficoltà del passato.

La storia del pensiero ci insegna che democrazia, spirito critico e ragione sono vicine, e sono sempre fragili. Penso che la battaglia fra la ragione e l'arroganza del potere sia oggi aperta più che mai.