

ANTONIO MASIERO

IL BIG BANG VISTO DA VICINO: STORIA DI UN SORPRENDENTE UNIVERSO*

Il secolo scorso è stato giustamente definito «il secolo della fisica». Alla fine dell'Ottocento, la Meccanica e l'Elettromagnetismo della Fisica classica sembravano avere ormai stabilito il paradigma scientifico ultimo della descrizione fisica del mondo circostante. E invece, sin dai primi anni del Novecento, cominciarono a farsi strada le due rivoluzionarie teorie che, nel giro di qualche decennio, avrebbero cambiato radicalmente il modo in cui concepiamo l'universo e le sue leggi fisiche: si tratta dell'avvento della Relatività (Ristretta prima e Generale poi) einsteiniana e della Meccanica quantistica nella sua evoluzione sino alla Teoria quantistica dei Campi.

Al contempo, accanto alle già note interazioni fondamentali rappresentate dalla Gravità e dall'Elettromagnetismo, venivano scoperte due nuove forze presenti in Natura: le forze nucleari Debole (responsabile dei decadimenti radioattivi dei nuclei) e Forte (origine della «colla nucleare» che tiene insieme protoni e neutroni nei nuclei).

Tutta la seconda metà del secolo scorso è caratterizzata dalla ricerca (peraltro assai fruttuosa) di una interpretazione unificata di tali interazioni fondamentali della Natura: alla fine degli anni '60 Glashow, Weinberg e Salam propongono una teoria (Modello Standard) in cui le interazioni elettromagnetiche e deboli sono unificate nell'interazione elettrodebole. Poi, a partire dagli anni '70 sino ad oggi, continua la ricerca di una teoria in cui anche le interazioni forti vengano viste quale parte di una «Grande Teoria Unificata» (GUT) insieme a quella elettrodebole. Questo sforzo di trovare un'unità di fondo nella molteplicità delle forze conosce una frontiera ancor più ambiziosa nell'appassionante tentativo di arrivare a una completa interpretazione unificata in cui tutte le interazioni fondamentali, includendo anche la gravitazione, siano fatte derivare da un'unica forza elementare.

Addirittura la cornice teorica della teoria quantistica dei campi appare inadeguata per giungere alla costruzione di quella che è stata definita la «Teoria del Tutto» (*Theory of Everything, TOE*). Ed infat-

* Comunicazione letta il 18 novembre 2011 nell'Odeo Olimpico.

ti, da campi quantizzati che dipendono dal punto spazio-temporale in cui vengono calcolati, si passa alla Teoria di Corda o Stringa (*String Theory*) in cui il punto spazio-temporale è rimpiazzato da una «corda» uni-dimensionale o da una «brana» a più dimensioni.

Se la parola d'ordine per descrivere le forze è ricerca dell'elementare attraverso un'unificazione delle forze fondamentali, questo stesso motore anima lo sforzo di arrivare ai costituenti ultimi della materia di cui siamo fatti e sono fatti gli oggetti che ci circondano: dalla molecola all'atomo, al nucleo e agli elettroni, e ancora ai protoni e neutroni, fino ad arrivare ai quark, si è trattato di un'entusiasmante e sorprendente corsa verso l'elementare e il «semplice» che alla fine ci ha portato a pochissimi costituenti ultimi.

Gli «atomi» di Democrito del XX secolo divengono sei tipi di quark e sei leptoni (tra cui l'elettrone e tre tipi di neutrini). Dodici «mattoni fondamentali» da cui scaturisce la materia ordinaria di cui è fatto il foglio che state leggendo, ma anche una stella lontana in qualche galassia a miliardi di anni luce da noi.

E i due livelli di «elementare» (quello delle interazioni e quello dei costituenti della materia) si sposano proprio nelle teorie unificate sopra accennate: le interazioni fondamentali sono le forze con cui interagiscono tra loro i costituenti ultimi della materia dando luogo a tutte quelle molteplici forme ed espressioni della materia tra cui, al vertice, troviamo l'origine della vita sul nostro pianeta.

Questo enorme progresso della Fisica nucleare e subnucleare del secolo scorso è stato reso possibile dagli straordinari passi in avanti compiuti dalla Fisica sperimentale, in particolare con la costruzione di sempre più potenti macchine acceleratrici, sino ad arrivare alla macchina in grado di raggiungere le energie più alte che mai si siano verificate in urti tra particelle elementari, il collisore LHC al laboratorio CERN di Ginevra. Il punto cruciale che sta alla base del successo di queste macchine nella nostra esplorazione del microcosmo è dato dall'uguaglianza tra energia e massa secondo la nota relazione di Einstein in cui l'energia è pari al valore della massa moltiplicato per il quadrato della velocità della luce. Maggiore è l'energia presente nelle collisioni grazie all'altissima velocità acquisita dalle particelle (elettroni in collisione con antielettroni o positroni; oppure protoni contro protoni o antiprotoni o elettroni) accelerate mediante campi elettromagnetici negli acceleratori e maggiore è la massa di nuove particelle che possono essere create negli urti trasformando l'energia cinetica delle particelle accelerate nella massa di tali nuove particelle. È così che abbiamo potuto produrre artificialmente particelle elementari quali i quark pesanti o il bosone W (la cui scoperta ha assicurato il premio Nobel a Carlo Rubbia).

Il grande e tumultuoso progresso della Fisica delle particelle ed interazioni elementari trova uno dei suoi pilastri nella profonda correlazione tra simmetria e invarianza delle leggi della Natura. Recentemente la redazione della rivista *Asimmetrie* dell'Istituto Nazionale di Fisica nucleare (INFN) mi ha chiesto di scrivere un'introduzione sul ruolo della simmetria nello sviluppo della Fisica moderna. Riellaboro qui una parte del materiale, preparato per tale rivista in collaborazione con il dott. Massimo Pietroni della Sezione di Padova dell'INFN.

La simmetria permea un po' tutta la nostra vita e il nostro rapporto con il mondo esterno, dai primi anni di vita in cui sperimentiamo la simmetria di piante, animali, oggetti, musica, disegni, fino a quando un giorno entriamo nell'Alhambra di Granada o ci soffermiamo davanti ai quadri di Escher, il «pittore dei matematici», o ascoltiamo una sonata di Bach. Ma la simmetria non è solo qualcosa che ricaviamo guardando ciò che ci circonda e che cerchiamo di riprodurre in vario modo nelle nostre espressioni artistiche, qualcosa che ci produce quel misto di piacere e stupore che sta dietro la sensazione di armonia. La simmetria diventa per noi anche strumento potentissimo di conoscenza; nelle parole di Weinberg, nella sua Dirac Memorial lecture del 1986: «*At the deepest level, all we find are symmetries and responses to symmetries*».

Ma cos'è una simmetria? In essenza, possiamo dire che è l'espressione di una «uguaglianza tra cose»: cose che possono essere o differenti oggetti o parti diverse di uno stesso oggetto, oppure, tali «cose» possono essere costituite da uno stesso oggetto che si presenta sempre nello stesso modo *prima* e *dopo* una qualche operazione che abbiamo compiuto su di lui. Estendendo il concetto da un oggetto a quello di sistema fisico (che può essere una particella elementare, un atomo, una molecola, un vaso cinese della dinastia Ming, un pianeta o l'intero universo), diciamo che questo possiede una certa simmetria quando rimane esattamente lo stesso dopo che abbiamo effettuato una trasformazione o *cambiamento* su di esso. Ritornando al classico vaso cinese di tante storie, questo si presenta sempre lo stesso dopo che lo ruotiamo sul tavolo su cui poggia: diciamo che il vaso è *invariante* sotto una qualunque rotazione attorno all'asse di simmetria che è la linea immaginaria che passa attraverso il centro del vaso e perpendicolare al tavolo (ahimè, una volta che abbiate scheggiato il vaso da qualche parte, questa simmetria si perde, «è rotta», e una rotazione del vaso non passerà inosservata alla guardia del museo). In sostanza, quindi, la simmetria è un'*invarianza* di un sistema fisico sottoposto a un cambiamento, chiamato *trasformazione di simmetria*. Notate che se il vaso del nostro esempio ha una base

circolare (è un vaso, cioè, di tipo cilindrico) l'invarianza suddetta è per rotazioni di un qualunque angolo, comunque piccolo: in questo caso la simmetria viene detta *continua*. Se invece il vaso fosse, diciamo, esagonale, l'invarianza sarebbe presente solo per rotazioni di 60 gradi (o suoi multipli); in questo caso parliamo di simmetria *discreta*. Se poi pensiamo che ci sia un vaso in ogni punto dello spazio e che l'angolo di cui ruotiamo il vaso sia diverso per ogni vaso, cioè la trasformazione dipenda dal punto in cui la si realizza, allora diciamo che la simmetria continua è *locale* o *di gauge*.

Ma tutto questo resterebbe una delizia da matematici se non intervenisse prepotentemente, in questa storia della connessione tra simmetria e nostra ambizione di “capire” il mondo circostante, Emmy Noether, probabilmente la più grande matematica sinora vissuta e di cui si parlerà più estesamente più avanti. Il suo teorema del 1915 stabilisce che in corrispondenza ad ogni simmetria continua delle leggi fisiche vi è una *legge di conservazione*, cioè esiste una quantità fisica misurabile (ad es. l'energia totale di un sistema fisico isolato) che non cambia durante un qualunque processo fisico, vale a dire esiste una *quantità conservata*. È notevole che vale anche il viceversa: ogni qualvolta scopriamo che in Natura esiste una qualche quantità che è conservata nei processi fisici (ad es. la carica elettrica), deve esistere una simmetria continua rispettata da tutte le leggi fisiche.

È il teorema di Noether che costituisce la vera promozione dello studio delle simmetrie dall'ambito estetico–matematico a quello fisico. Le tre grandi leggi di conservazione della Fisica ci dicono che in un sistema fisico «lasciato in pace», cioè a cui non si applichino forze esterne, qualunque processo succeda al suo interno, per quanto complesso, non potrà mai variare l'energia, la quantità di moto e il momento angolare totali. Secondo quanto ci dice la signora Noether, in corrispondenza devono esistere tre simmetrie continue della Natura. In effetti si scopre che sono le tre grandi simmetrie spazio–temporali dell'universo (invarianza delle leggi fisiche per traslazioni spazio–temporali e rotazioni spaziali). Per capire, o intuire almeno, come mai esista questo legame così profondo e per certi versi misterioso, vale la pena di fare un piccolo contro esempio che prendiamo dal libro *Symmetry and the beautiful universe* di Ledermann e Hill. Supponete che la legge di gravità non rimanesse la stessa al passare del tempo (violazione dell'invarianza temporale). Ad es., ogni martedì mattina per tre ore la forza di gravità diminuisce per poi tornare al suo valore normale. A questo punto, sarebbe il caso di correre a Wall Street per offrire le azioni di una centrale idroelettrica che pompa l'acqua in alto ogni martedì mattina facendola poi ridiscendere in un altro momento della settimana (produciamo energia “gratis” sfruttando il

fatto che la legge di conservazione dell'energia è ora violata). Probabilmente nessun fisico comprerebbe queste azioni (anche se non si sa mai...): nessun esperimento ha mai rivelato la benché minima violazione delle tre leggi di conservazione menzionate. E la nostra fiducia (o fede) che queste siano vere è così forte che nella notte del 4 dicembre 1930 il famoso e "prudente" fisico Wolfgang Pauli compie un atto di drammatica spregiudicatezza (per quel tempo!): ipotizza che esista una particella nuova che nessuno aveva mai visto pur di non far variare l'energia in un processo di decadimento di un nucleo. Qualche anno dopo quell'oggetto misterioso venne trovato: è il neutrino! La nostra fiducia nella simmetria ci aveva permesso di ipotizzare l'esistenza di un mattone fondamentale dell'universo e la Natura ci ricompensava mostrandosi in sintonia con il nostro pensiero.

Ma è con l'avvento della Meccanica quantistica nel secolo scorso che il legame tra simmetria e conoscenza (non solo descrizione) della Natura trova il suo momento più alto e affascinante: la simmetria "crea" le interazioni (cioè le forze) fondamentali presenti nell'universo fin dal Big Bang e le particelle che trasmettono queste interazioni, i loro "messaggeri".

Da *descrizione* di ciò che è presente nelle leggi fisiche, la simmetria diviene essa stessa "*creatrice*" della realtà che ci circonda nei suoi elementi fondanti, vale a dire le interazioni fondamentali e il modo di comportarsi rispetto a tali forze dei costituenti ultimi della materia. Vediamo di illustrare questo straordinario ruolo della simmetria con un esempio che possa esserci abbastanza familiare.

Supponiamo di voler descrivere un elettrone. Nella Fisica classica «descriverlo» significa individuare la posizione x nello spazio che esso occupa al tempo t . Nell'ambito quantistico invece l'elettrone viene descritto da un'onda che ha al tempo t nel posto x ha una certa ampiezza $\Psi(x,t)$, chiamata funzione d'onda dell'elettrone. L'ampiezza è legata alla probabilità di trovare il nostro elettrone in x al tempo t . Per raffigurarci un po' la situazione, potremmo pensare a tanti vasi cinesi, uno in ogni punto x , contenenti una quantità d'acqua diversa l'uno dall'altro. L'ampiezza $\Psi(x,t)$ corrisponde all'altezza a cui arriva l'acqua nel vaso che sta in x . Ora, se facciamo una rotazione di un angolo, diverso a seconda del vaso considerato, e prendiamo una fotografia dopo queste rotazioni, naturalmente questa deve darci un'immagine dei vari vasi uguale a quella di partenza. Così pure nella descrizione quantistica dell'elettrone la probabilità di trovare l'elettrone in x al tempo t non cambia se «ruotiamo» $\Psi(x,t)$ di un angolo dipendente da x . Questa «rotazione» è scritta tra virgolette perché non è una usuale rotazione spaziale come quella dei vasi cinesi. È una rotazione in uno «spazio interno» astratto che non ha

nulla a che fare con lo spazio-tempo percepito dai nostri sensi. A questo punto, se, analogamente all'invarianza per rotazioni dei vasi, chiediamo che la Fisica sia la stessa quando ruotiamo $\Psi(x,t)$, abbiamo una clamorosa sorpresa. Anche se la rotazione non provoca un cambiamento dell'ampiezza, tuttavia essa cambia un'altra caratteristica dell'onda-elettrone: la sua frequenza (o, se volete, la sua lunghezza d'onda). Ora, quantisticamente la frequenza (lunghezza d'onda) è legata all'energia (quantità di moto) dell'elettrone. Ma, allora, siamo di nuovo nella situazione di Pauli: se vogliamo insistere nella conservazione dell'energia (o della quantità di moto), scopriamo che l'elettrone *non* può essere da solo, deve esistere *qualcun altro* che compensi lo squilibrio nell'energia dell'elettrone quando abbiamo ruotato la sua funzione d'onda. Addirittura, è così grande la potenza della simmetria che riesce a fornirci un identikit pressoché completo del misterioso accompagnatore dell'elettrone: si tratta di una particella di massa rigorosamente nulla, che non ha carica elettrica, ma interagisce con particelle cariche e che ha una proprietà delle particelle, chiamata spin, che è diversa da quella dell'elettrone e che corrisponde proprio alla polarizzazione della luce. Ebbene sì, questa particella "creata" dall'imposizione della simmetria di gauge non è nient'altro che il *fotone*, la particella «messenger» del campo elettromagnetico, se volete è proprio la luce. Per dirla con Lederman e Hill, *when She invented gauge symmetry, God said: "Let there be light"* (quando inventò la simmetria di gauge, Dio disse: «Sia fatta la luce»).

Quanto ottenuto è veramente un mirabile risultato, quasi il sogno della scuola pitagorica, la potenza del numero che plasma la realtà, che si avvera dopo 25 secoli: la richiesta «geometrica» di una certa simmetria che agisce su uno «spazio nuovo» origina l'interazione elettromagnetica. Ma, allora, viene spontaneo chiedersi: non potremmo ripetere questa alchimia, e cioè cercare di imporre nuove simmetrie in nuovi spazi interni, arrivando ad originare le altre interazioni fondamentali esistenti in Natura?

In effetti, introducendo una nuova simmetria di gauge (suggerita dagli esperimenti) che agisce in un nuovo spazio interno, si vide che era possibile "originare" una nuova interazione fondamentale, quella relativa alle forze responsabili dei decadimenti radioattivi dei nuclei (interazioni deboli). Si presentava però un problema apparentemente insormontabile: le simmetrie di gauge predicono inequivocabilmente che i messengeri delle corrispondenti interazioni siano a massa nulla (come lo è il fotone delle interazioni elettromagnetiche). D'altra parte, i messengeri delle interazioni deboli sono dei «fotoni» molto pesanti chiamati W e Z (il W è proprio la nuova particella la cui scoperta valse il premio Nobel a Carlo Rubbia). Sembra che siamo fini-

ti nel tipico vicolo cieco: convinti dal successo dell'elettromagnetismo, vogliamo che esista una simmetria di gauge per descrivere la radioattività, ma al tempo stesso non vogliamo che la presenza di questa simmetria ci conduca a W e Z di massa nulla in contrasto con quello che troviamo nei nostri acceleratori. E allora? Esiste una via d'uscita e si chiama *rottura spontanea di simmetria*. Un esempio per capirci: prendete una matita e ponetela sulla sua punta perpendicolarmente alla superficie del tavolo. Questo sistema possiede una simmetria di rotazione attorno all'asse lungo la matita. Ora sappiamo che la situazione è altamente instabile: in pochi attimi, una qualunque inevitabile piccola perturbazione (il famoso battito d'ali di una farfalla in Australia) farà cadere la matita. Lungo quale direzione? Non lo sappiamo, ma una volta caduta è chiaro che vi è una direzione "privilegiata" e si è perduta l'invarianza per trasformazioni di rotazione di cui sopra. Qui abbiamo un sistema fisico che possiede una certa simmetria, ma lo stato in cui si viene a trovare alla fine e che minimizza l'energia del sistema non possiede più la simmetria di simmetria. Un altro esempio ancora più interessante. Prendete una calamita: supponete di poterla guardare con uno speciale microscopio che vi permette di vedere i piccoli «magnetini» che la compongono. Se portate la vostra calamita ad una temperatura abbastanza alta, trovate che la calamita non è più «buona», cioè non è più magnetizzata, non attira più gli oggetti ferrosi e vedreste che, in corrispondenza a ciò, i suoi magnetini sono disposti in modo del tutto casuale per cui il sistema è del tutto invariante per rotazioni spaziali. Se ora fate scendere la temperatura, arrivate ad una soglia critica a cui, improvvisamente, tutti i magnetini di cui è composta la calamita si allineano lungo una stessa direzione. Come per la caduta della matita, anche in questo caso ogni direzione è del tutto equivalente all'altra, ma una volta che una direzione è stata scelta dai magnetini non c'è più l'invarianza per rotazioni che era presente a temperatura maggiore di quella critica. Nuovamente, il sistema fisico non è cambiato, ma al di sotto della temperatura critica la disposizione del sistema (lo «stato» del sistema, come diciamo in Fisica) che minimizza l'energia non possiede la simmetria di partenza: la simmetria per rotazione spaziale è stata qui rotta spontaneamente.

Ebbene, possiamo pensare di descrivere le interazioni deboli in termini di una simmetria (di gauge) rotta spontaneamente. Ma che cosa provoca questa rottura? Ecco che entra in scena il «deus ex machina» della situazione, il famoso *bosone di Higgs*. La sua energia (quello che noi tecnicamente chiamiamo il *potenziale di Higgs*) viene minimizzata da valori del campo di Higgs che rompono spontaneamente la simmetria collegata alle interazioni deboli (ma non quella

connessa all'elettromagnetismo). Quello che succede ha dell'incredibile, eppure la fantastica macchina che ha preceduto LHC al CERN di Ginevra, l'acceleratore di elettroni e anti-elettroni (positroni) LEP (insieme con un analogo acceleratore presente nel laboratorio SLAC di Stanford in California), ci ha detto a chiare lettere che è proprio vero: alcune delle componenti del bosone di Higgs nel momento della rottura spontanea di simmetria vengono "ingoiate" dal W e dallo Z per fornire la loro massa, mentre rimane un'unica componente fisica, quella che noi comunemente chiamiamo il bosone di Higgs e che contiamo di produrre ed identificare a LHC (*meccanismo di Higgs*). Questa "sintonia" tra una delle più audaci speculazioni della mente umana imperniata sul concetto di simmetria e ciò che esiste realmente in Natura ha qualcosa di affascinante e misterioso: è lo stupore che accomuna gli uomini di scienza (e non solo loro, naturalmente) da quando Galileo parlò del grande libro della Natura scritto a caratteri matematici (creati dalla nostra mente) a quando Dirac ammise che: «Il matematico è impegnato in un gioco di cui si scrive da solo le regole, mentre il fisico gioca con le regole fornite dalla natura. Ma con il passare del tempo appare sempre più evidente che le regole che un matematico trova interessanti sono proprio le stesse scelte dalla natura».

Tornando all'esempio della calamita che riscaldiamo, abbiamo visto che la simmetria presente in un certo sistema fisico dipende dalla temperatura e quindi dall'energia a cui si trova. E se il sistema fisico fosse l'intero universo e la temperatura a cui si trova segnasse il raffreddamento progressivo dal caldissimo Big Bang iniziale al «freddo» (un paio di gradi Kelvin) del nostro attuale universo? Nel caso della calamita, quando la temperatura va sopra un certo valore critico, il sistema acquista una simmetria (quella per rotazione spaziale dei magnetini che lo compongono) che viene invece "rotta" quando la temperatura scende al di sotto di tale soglia critica: il sistema-calamita sperimenta due *fasi* diverse a seconda della sua temperatura. Così, se noi seguiamo il sistema fisico-universo man mano che si raffredda a partire dal Big Bang, constatiamo che esso passa attraverso fasi diverse in corrispondenza alle quali simmetrie di gauge delle sue interazioni fondamentali sono esatte (a temperatura più alta) o spontaneamente rotte (a temperatura più bassa). Più ci avviciniamo al momento iniziale del Big Bang più il grado di simmetria dell'universo aumenta. Potremmo speculare che l'universo parta al Big Bang con un'unica grande simmetria di gauge che descrive in modo unificato tutte le interazioni fondamentali e poi nel suo raffreddamento «parti» di questa grande simmetria iniziale siano rotte spontaneamente dando luogo alla differenziazione tra le varie interazioni (elet-

tromagnetiche, deboli, forti, gravitazionali) che oggi noi vediamo. Addirittura la simmetria diverrebbe qui la trama ultima più profonda che caratterizza l'universo e la sua intera evoluzione. Einstein spese gli ultimi anni della sua vita alla ricerca di una teoria «finale» che potesse descrivere in modo unificato e simmetrico (unità) le varie interazioni (molteplicità) dell'universo che ci circonda. Forse, la simmetria è uno di quei «pensieri» fondamentali di cui Einstein ci parla nella sua famosa provocazione: «Non sono interessato a capire questo o quel dettaglio, ma a capire quelli che erano i pensieri di Dio quando creò il mondo».

Quanto ho cercato di tratteggiare nelle note precedenti sul connubio simmetria- realtà fisica ci ha portato molto lontano dal mondo di Galileo e dal suo orizzonte scientifico. Eppure, è proprio nel geniale lascito galileiano alla Fisica dei secoli successivi che troviamo l'essenza del ruolo della simmetria, specchio, ma addirittura origine, delle forze più fondamentali operanti nell'universo. Oggi, grazie alla ricerca condotta negli esperimenti all'acceleratore LHC, noi contiamo di arrivare a vedere le prime tracce di una Fisica nuova, non contenuta nel Modello Standard. Questa Fisica, come sopra accennato, ha operato nell'acceleratore per eccellenza, il primissimo universo in cui energie e temperature in gioco erano altissime. Forse, è proprio questa nuova Fisica che ci potrà finalmente dettagliare di che cosa sia fatta più dell' 80% della materia presente nell'Universo. In altre parole, LHC ci permetterà di ricostruire o per lo meno di avvicinarci a capire le condizioni particolari presenti tra i costituenti fondamentali frazioni di secondo dopo il Big Bang: l'unità della Natura, sottolineata più volte dal pensiero galileiano, trova compimento in questa ricerca in cui microcosmo (Fisica delle particelle elementari) e macrocosmo (cosmologia) vengono tra loro a «identificarsi». Questo rappresenta uno degli avamposti più avanzati della ricerca in Fisica: si tratta della cosiddetta «via astroparticellare» alla nuova Fisica, un campo di ricerca che vede numerosi gruppi di fisici sperimentali e teorici impegnati nei più prestigiosi Istituti al mondo (e, fra questi, anche il nostro gruppo operante al Dipartimento di Fisica e Astronomia «G. Galilei» dell'Università di Padova).

L'esplorazione astroparticellare, a cavallo tra Fisica delle particelle e cosmologia, ci ha condotti in meno di un secolo ad una visione profondamente nuova dell'universo, sia nei suoi costituenti che nella sua evoluzione.

Partiamo da una prima domanda: di che cosa è fatto l'universo, o, per essere più precisi, quali sono le componenti principali dell'energia presente nell'intero universo? A prima vista, verrebbe da pensare che, grazie alla relazione tra materia ed energia della famosa equa-

zione einsteiniana $E = mc^2$, la risposta stia nella presenza della materia presente nell'universo. Qui già troviamo una prima sorpresa: come detto sopra, buona parte della materia (aggregata gravitazionalmente in galassie, ammassi e superammassi di galassie) non è costituita da atomi (e quindi protoni, neutroni, elettroni) come tutti noi e gli oggetti che ci circondano. Ma, ancora più sorprendentemente, all'inizio di questo secolo, osservando supernove a distanze sempre più grandi, abbiamo capito che l'universo si sta espandendo accelerando in questa sua espansione. Il «motore» di tale inaspettata espansione di crescente velocità è una forma di energia (non aggregata gravitazionalmente nelle galassie), uniformemente distribuita nello spazio universale. Ad essa abbiamo attribuito il nome di «Energia Oscura»: oscura non solo nel senso tecnico che non emette radiazione, ma anche perché la sua origine rappresenta uno dei più profondi misteri dell'universo in cui viviamo. L'energia oscura rappresenta circa il 70% del budget energetico dell'universo. La materia oscura ha circa un quarto di tale budget, mentre la nostra «cara» ordinaria materia fatta di atomi, non è che un piccolo 5% del totale. In definitiva, da questo quadro emerge una visione del mondo sconvolgente: ben 95% di esso è fatto da «qualcosa» che ci è completamente ignoto. È il «lato oscuro» dell'universo. Quanto risultano vere e profetiche le commoventi parole che, a mo' di testamento, Galilei scrisse, vecchio e ammalato, poco prima della sua morte:

«[...] qui sono stati rivelati, riguardo a questa nuova ed eccellente scienza, di cui il mio lavoro è solo l'inizio, strade e strumenti dei quali altre menti, più acute della mia, esploreranno gli angoli più remoti».