

Il documento è protetto da copyright. E' vietato qualsiasi ulteriore atto di utilizzazione (re-immissione in rete, diffusione, riproduzione in copia) senza la dovuta autorizzazione o citazione della fonte di provenienza.  
Pippo Panasci [www.duenote.it](http://www.duenote.it)

## La relatività generale

Immaginiamo di trovarci in un'astronave senza oblò soggetta esattamente all'accelerazione di  $1\text{ G}$ , l'equivalente della gravità terrestre. Potremmo dire se ci troviamo nello spazio o sulla Terra? La risposta è: no. Se lasciamo cadere una palla nell'astronave, la palla, nella nostra visione delle cose, «cade» sul pavimento. Se potessimo osservare questo evento da un sistema di riferimento stazionario esterno all'astronave, diremmo che il pavimento ha accelerato verso l'alto e ha colpito la palla stazionaria. Ma all'interno della nostra astronave chiusa ermeticamente vediamo la palla cadere, esattamente come farebbe sulla Terra. Nessun esperimento potrebbe dirci se ci troviamo su un'astronave che si muove di moto accelerato o se siamo stazionari sulla Terra. Accelerazione e gravità devono dunque essere equivalenti a un qualche livello profondo, e quella che noi chiamiamo gravità deve essere un effetto del nostro sistema di riferimento. Questa equivalenza è la tesi centrale della teoria di Einstein.

L'idea centrale della relatività generale è che chi si trovi in un sistema di riferimento accelerato (come un'astronave) sperimenta esattamente gli stessi effetti che normalmente sono associati alla forza di gravità. Einstein vide una connessione fra variazioni nel moto (nelle quali Newton avrebbe esercitata dai magneti deve essere regolata in modo da tener conto dell'accrescimento della massa delle particelle.

Ogni volta che si usa una di queste macchine, si ha una conferma delle predizioni della teoria della relatività. Similmente, gli acceleratori operano manipolando lunghi raggruppamenti di particelle. Man mano che le particelle si accelerano, tali raggruppamenti si accorciano, e la macchina è regolata in modo da tener conto di questo effetto. Così, il fatto stesso che gli acceleratori funzionino è una conferma della previsione della contrazione delle lunghezze.

Infine, il 20 per cento circa di tutta l'energia elettrica negli Stati Uniti è prodotta da reattori nucleari. I reattori funzionano perché le reazioni nucleari convertono piccole quantità di massa in grandi quantità di energia, in accordo con la famosa formula di Einstein. L'equivalenza di materia ed energia è dunque confermata ogni giorno dalle nostre centrali termonucleari.

## Alcune osservazioni filosofiche sulla relatività

Sotto molti aspetti, per quanto grandi siano i risultati pratici che derivano dalla teoria della relatività, le conseguenze filosofiche non sono meno importanti. La relatività fu la prima delle teorie moderne che rivoluzionarono la vecchia concezione newtoniana, meccanicistica, del mondo. La relatività sostituisce osservatori di ugual dignità all'approccio classico, secondo il quale tutte le leggi erano riferite a un singolo sistema di riferimento corretto, quello dell'«occhio di Dio». Ma la relatività non ha gettato Newton nella pattumiera della storia. Essa ha semplicemente esteso la nostra conoscenza in ambiti mai investigati da Newton, nei quali vigono velocità dell'ordine di quella della luce. Quando applichiamo le equazioni della relatività alle velocità modeste di cui si è occupata in passato la meccanica di Newton, otteniamo gli stessi risultati quantitativi. Einstein non ha dunque sostituito Newton, ma si è limitato a espanderne l'opera includendola in una prospettiva più vasta.

Newton direbbe che fra le due sfere si esercita una forza di attrazione (come la gravità), mentre Einstein interpreterebbe lo stesso fenomeno in modo diverso.

Egli direbbe che la presenza della sfera di piombo ha incurvato lo spazio attorno a sé e che questa curvatura ha determinato un mutamento nel moto della biglia d'acciaio.

Per Einstein non ci sono forze nel senso newtoniano, ma solo mutamenti nella geometria dello spazio.

Nell'interpretazione relativistica del sistema solare, quindi, il Sole incurva lo spazio intorno a sé e i pianeti si muovono in questo spazio come biglie che rotolano all'interno di una tazza. In realtà, se ci serviamo delle equazioni della relatività per calcolare che cosa accada alla griglia originaria di linee rette quando gettiamo su di essa una massa, troveremo che le linee originarie si sono deformate in curve ellittiche chiuse: proprio le traiettorie seguite dai pianeti. Un buon modo per tenere a memoria la distinzione fra le teorie di Newton

e di Einstein consiste nel ricordare che

**Per Newton il moto è lungo linee curve in uno spazio piano**

*mentre*

**Per Einstein il moto è lungo linee rette in uno spazio curvo.**

Einstein credeva che non solo la gravità ma tutte le forze sarebbero state infine spiegate in questo modo geometrico. Egli spese infatti la seconda metà della sua vita nella ricerca, che peraltro si rivelò vana, di una teoria unificata delle forze. Il progresso verso quest'obiettivo sarebbe diventato possibile solo dopo che si fosse sviluppato un altro modo ancora di descrivere le forze: quello attraverso lo scambio di particelle elementari. La relatività generale rimane quindi un capitolo splendido ma isolato nella storia della scienza; la teoria di Einstein incluse in sé e soppiantò la gravità newtoniana, e sarà a sua volta superata da una teoria della gravità quantistica.

### **Conferme della relatività generale**

Diversamente dalla relatività ristretta, la relatività generale non ha il sostegno di un gran numero di prove sperimentali. Le ragioni di questa mancanza di prove sono in parte teoriche e in parte tecniche. Come la relatività ristretta, anche la relatività generale comprende in sé la fisica di Newton. Per fenomeni «normali», quotidiani, la relatività generale fa predizioni che sono virtualmente le stesse della teoria newtoniana della gravitazione. Potremo perciò distinguere fra le due teorie in un contesto di laboratorio solo se saremo in grado di compiere misurazioni estremamente precise. Solo in presenza di masse grandissime o su distanze piccolissime la curvatura dello spazio diventa così pronunciata da permettere l'evidenziarsi di differenze significative fra le due teorie, ma queste condizioni non sono accessibili agli sperimentatori.

Esistono solo tre esperimenti classici a conferma della relatività generale:

- 1) la forma precisa delle orbite planetarie;
- 2) la deflessione della luce in prossimità del bordo del disco solare; e
- 3) lo spostamento verso il rosso dovuto all'attrazione gravitazionale.

Poiché le orbite dei pianeti sono ellittiche, c'è un punto in cui un pianeta si avvicina maggiormente al Sole. Chiamiamo questo punto il peri elio (dal greco, per «vicino al Sole»). In una situazione newtoniana semplice, il perielio si troverebbe sempre nello stesso punto dello spazio, ossia l'orbita non si sposterebbe. In realtà molte forze cooperano nello spingere un po' più avanti il perielio di un pianeta ogni volta che esso compie una rivoluzione. L'azione più importante è quella dovuta agli effetti gravitazionali degli altri pianeti, e specialmente di Giove. Prima che Einstein pubblicasse la sua teoria, l'avanzamento misurato del perielio di Mercurio superava il valore predetto di circa 43 secondi d'arco ogni secolo. La relatività generale prediceva che l'incurvamento (piccolissimo) dello spazio a opera della massa del Sole avrebbe prodotto esattamente questo avanzamento del perielio.

Questa «retroazione» fu giustamente considerata un grande trionfo per la teoria.

Oggi gli scienziati si servono del rilevamento radar per compiere determinazioni estremamente accurate delle posizioni orbitali dei pianeti; sono stati misurati gli spostamenti del perielio per Venere, per la Terra e per Marte e si è trovato che, come nel caso di Mercurio, i loro valori corrispondono esattamente alle previsioni della relatività generale. Questa è probabilmente la conferma più persuasiva della teoria disponibile a tutt'oggi.

La verifica più famosa della relatività generale concerne la deflessione di raggi di luce nel loro passaggio in prossimità del bordo del disco solare. La misurazione, nel corso di un'eclisse di Sole nel 1919, di questo effetto previsto dalla teoria catapultò Einstein in una posizione di preminenza internazionale. Oggi si esegue questo esperimento usando onde radio in luogo della luce, e quasar invece di stelle come sorgenti della radiazione. Le onde radio possono essere captate in qualsiasi giorno (esse non sono occultate dalla luce del Sole), cosicché gli scienziati possono condurre questo test quando vogliono, senza dover attendere la prossima eclisse di Sole. Le misurazioni concordano con le predizioni della relatività, con un margine d'errore inferiore all'uno per cento: un'altra conferma notevole della teoria.

Infine, la relatività prevede che quando un fotone si allontana da una sorgente gravitazionale (come un razzo che si allontani dalla superficie della Terra), consumi nel corso di tale moto una parte della sua energia. In ciò il fotone non è diverso da una palla da baseball, la quale rallenta il suo moto man mano che sale. Poiché, però, il fotone deve continuare a muoversi alla velocità della luce, la sua perdita di energia ci si manifesta nella forma di un aumento della lunghezza d'onda della luce (o, che è lo stesso, di una diminuzione della sua frequenza): ossia come uno spostamento verso il rosso. Perciò il fascio di luce di un faro visto da un aereo sarà leggermente più rosso che visto da terra. Come le altre due predizioni, anche

questa è stata confermata sperimentalmente.

Per più di mezzo secolo ci sono stati solo tre test della relatività generale, ma ognuno di essi ha portato qualche elemento a sostegno. Come vedremo, però, questa situazione di scarsità di conferme sperimentali sembra destinata a cambiare, e potremo attenderci nuovi risultati nel futuro prossimo. Rimane ovviamente da vedere se essi apporteranno o no nuove conferme, ma noi saremmo pronti a scommettere che, quando tutto questo polverone si sarà dissipato, Einstein conserverà la sua preminenza.

### **I buchi neri**

La previsione più spettacolare della relatività generale è quella dell'esistenza dei buchi neri. Per comprendere lo strano comportamento di un buco nero, torniamo all'analogia del foglio di plastica teso su un'intelaiatura e della sfera di piombo. Immaginiamo di avere un modo per aggiungere sempre più massa alla sfera senza accrescerne il volume. All'aumentare del peso della sfera, la deformazione del foglio di plastica diventerebbe sempre più pronunciata. Infine, in conseguenza della deformazione sempre più pronunciata della plastica, la sfera potrebbe infossarsi tanto da essere separata dal resto della superficie. Il foglio di plastica, deformandosi, potrebbe addirittura richiudersi su se stesso, avvolgendo del tutto la sfera e sottraendola alla vista, così che un osservatore vedrebbe solo un foglio di plastica apparentemente regolare.

Esattamente nello stesso modo, la relatività prevede che una massa abbastanza grande, concentrata in un volume abbastanza piccolo, distorce lo spazio circostante in modo così spinto che una parte dello spazio si chiude su se stessa lasciando dietro di sé il resto dello spazio apparentemente normale. Di una massa che si sia comportata in questo modo si dice che ha formato un buco nero. Possiamo concepire un buco nero come un oggetto di massa e densità così grandi che nulla, neppure la luce, possiede abbastanza energia per staccarsi dalla sua superficie. Una volta che qualcosa sia caduto in un buco nero, non potrà mai più riemergere. Un materiale che assorba tutta la luce che cade in esso è nero, ed è questa la ragione per cui questi corpi hanno ricevuto il loro nome così sinistro.

I teorici pensano che esistano due tipi di buchi neri. Uno è lo stato finale dell'implosione che si accompagna alla morte di stelle di massa molto grande. Si suppone che questi oggetti, del diametro di un chilometro e mezzo o più, siano disseminati nella Galassia un po' come vecchie automobili da demolire ai margini di strade di campagna. Potrebbero esistere anche buchi neri «quantistici», ipotetici oggetti più piccoli di particelle elementari, che alcuni teorici pensano esistano all'interno del nucleo.

Attualmente non possediamo prove conclusive a conferma dell'esistenza né dell'uno né dell'altro tipo di buco nero, anche se esistono un certo numero di candidati almeno per la varietà astronomica. La difficoltà consiste nel fatto che, per definizione, non si può «vedere» un buco nero attraverso l'osservazione di radiazioni elettromagnetiche. Qualsiasi radiazione investa il buco nero ne viene assorbita, per non riapparire mai più. Tutto ciò che si può fare è cercare di scoprire effetti indiretti causati dall'azione gravitazionale di un buco nero. Si possono cercare, per esempio, deflessioni in raggi di luce passati in prossimità di un buco nero, oppure potrebbe accadere di osservare raggi x emessi da materia accelerata durante la sua caduta nel buco nero. Un'altra possibilità è quella di cercare sistemi di stelle doppie che si comportino come se uno dei due membri fosse un buco nero.

Noi concordiamo con alcuni astronomi, i quali sospettano che vari sistemi astronomici ben studiati contengano buchi neri. Probabilmente una dimostrazione soddisfacente della loro identità è solo questione di tempo. Più problematici rimangono i buchi neri quantistici, e i teorici dovranno determinare meglio molte delle loro proprietà previste prima che si possa intraprendere un serio sforzo sperimentale per trovarli.

### ***Frontiere della relatività***

La relatività, nonostante la sua apparenza vistosa, è oggi una parte della fisica seria e consolidata. Essa è diventata uno strumento che cosmologi e fisici usano per capire le origini dell'universo e la struttura elementare della materia, più che un campo di studio in sé e per sé. Almeno sotto questo aspetto, assomiglia alla scienza newtoniana.

L'unico settore che potrebbe essere definito un'area di frontiera è quello della verifica sperimentale della relatività generale. Questo campo è attivo proprio oggi perché i progressi nel campo dell'elettronica permettono finalmente agli sperimentatori di misurare molte delle differenze estremamente piccole che si suppone esistano fra la relatività generale e la fisica newtoniana.

Tra i futuri test a conferma della relatività generale, il più sorprendente sarà forse un esperimento che dovrebbe essere eseguito su un satellite alla metà degli anni novanta. Progettato e sviluppato nel corso di una ventina d'anni, questo esperimento si fonda sulla rotazione di sfere di quarzo prodotte con la massima accuratezza. La relatività prevede che, in presenza della rotazione della Terra, l'asse di rotazione di queste



sfere presenterà piccole oscillazioni, che potranno essere misurate. Questo esperimento richiede una precisione sorprendente. Le sfere di quarzo devono avere una perfezione geometrica tale che, se potessero essere ingrandite fino a raggiungere le dimensioni della Terra, le loro «montagne» più alte non dovrebbero superare i 30 cm

Nel corso del prossimo decennio saranno tentati una serie di questi tipi di esperimenti di alta precisione, e i fisici potranno avere infine verifiche esatte delle predizioni della relatività generale. Se qualche esperimento non dovesse confermare la teoria, ci saranno grandi novità. Se invece la teoria sarà confermata, avremo il lusso di sapere che la teoria regge ancora. Nell'uno come nell'altro caso, il risultato sarà il benvenuto

