

Publicato nel Giornale di Astronomia-Marzo 2000-Volume 26 – n.1 (suppl.) da pagina 24 a pagina 31

La gravità

R. Bedogni, - Osservatorio Astronomico di Bologna

Introduzione

Il problema del significato del concetto di “peso”, attribuito ai corpi materiali, fu dibattuto sin dall’antichità. Già Aristotele notò che *“ogni movimento verso il basso di un corpo d’oro o di piombo, o di ogni altro materiale, dotato di peso è tanto più veloce quanto più esso è grande”*. Questa idea fissò il significato della gravità pre-galileiana e venne, generalizzata nell’assunto che tutti i corpi, siano essi di metallo, di legno od altro materiale, cadono nello stesso modo verso il basso.

A queste conclusioni giunse anche Galileo in seguito alle famose esperienze del moto dei gravi su di un piano inclinato ed all’esperienza, peraltro apocrifia, della caduta dei gravi dalla torre di Pisa. In termini un po’ più scientifici possiamo così riassumere le conclusioni a cui giunse Galileo: *“se lasciamo cadere un sasso oppure una piuma, facendo astrazione dall’effetto di resistenza dell’aria, entrambi gli oggetti seppure differenti per composizione chimica e struttura fisica, raggiungono il suolo allo stesso istante”*.

La gravità Newtoniana



Figura 1

L’aver capito l’importanza del concetto di massa, pose però Newton al di sopra dei suoi predecessori e contemporanei. Galileo, infatti, non distinse fra peso e massa, e Huygens usò indifferentemente i due termini in tutti i suoi lavori. Newton si rese invece conto che il “peso” non è una proprietà invariabile del corpo, come fino ad allora si era ritenuto, bensì variabile, e che ad ogni corpo è inerente una proprietà quantitativa che ne determina il movimento ed è diversa dal peso: la “massa”. *Venivano così per la prima volta distinti i concetti di massa e di peso.*

I maggiori successi della meccanica newtoniana si ebbero nella definitiva comprensione del moto dei pianeti nel Sistema Solare. Prima quindi di approfondire ulteriormente il problema della gravità, alla luce della Legge di Gravitazione Universale di Newton, facciamo un passo indietro e vediamo come

erano descritti i moti dei pianeti nei principali sistemi pre-newtoniani, quello geocentrico ed eliocentrico.

L'ipotesi geocentrica ed eliocentrica

I pianeti propriamente detti sono facilmente riconoscibili sulla volta celeste in quanto sono più brillanti delle stelle e, cosa che ne facilita il riconoscimento, si trovano sempre in una delle costellazioni dello Zodiaco. È possibile distinguerli, a seconda della rapidità con cui si muovono sulla Sfera Celeste, in *pianeti inferiori* e *pianeti superiori*.

Già gli antichi osservarono che il moto di Mercurio e Venere, rispetto al Sole, avviene lungo una direzione comune, nella fascia dello Zodiaco, quella dell'Eclittica, ma ora con moto *diretto*, ora con moto *retrogrado*. Non si accorsero però della presenza di *fasi* planetarie. È interessante notare come Venere e Mercurio (sebbene di difficile osservazione per Mercurio) presentino le stesse fasi della Luna in quanto entrambi riflettono la luce solare nello stesso modo del satellite della Terra. A questa importante conclusione giunse per la prima volta Galileo in seguito ad osservazioni mediante l'uso del cannocchiale delle fasi di Venere.

Non molto diverso dal moto dei pianeti inferiori è quello dei pianeti superiori, Marte, Giove e Saturno. Questo portò a produrre un comune modello interpretativo, in modo da ricondurre la complessità di quanto osservato nella Sfera Celeste ad un unico schema.

Qual'è la macchina celeste che con il suo funzionamento, fa sì che un osservatore al centro della Sfera celeste osservi i moti planetari nel modo in cui appaiono?

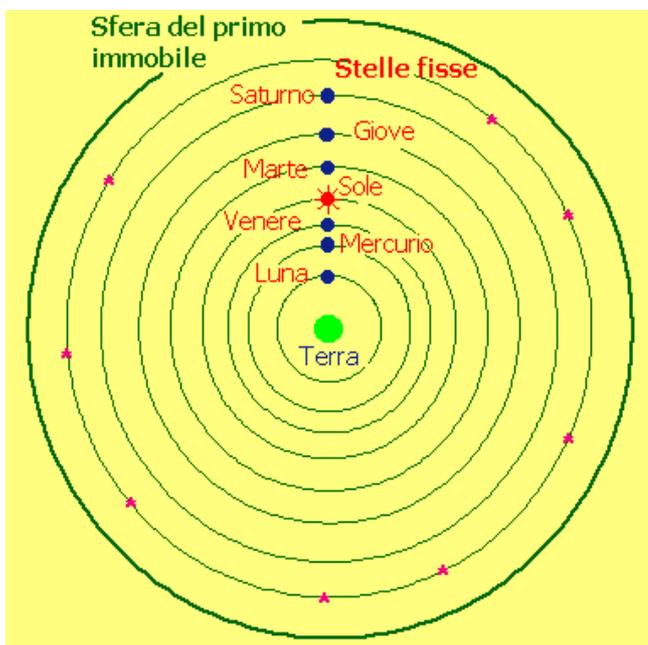


Figura 2 (Il Sistema Geocentrico)

Per rispondere a questa domanda bisognava formulare delle ipotesi, riguardanti i moti dei pianeti, cioè costruire dei modelli del "mondo" (*il Sistema Solare*) che rendessero conto, per quanto possibile, di tutte le apparenze. Non era difficile spiegare il moto diurno della Sfera celeste, bastava supporre che tutto il firmamento: Stelle, Sole, Luna e gli altri corpi celesti, fossero portati intorno alla

Terra da una sfera cristallina, mobile di moto uniforme ed imperniata ai poli celesti.

Ciò era pienamente conforme a quanto si osservava.

Alla base di questo “sistema” sta il principio della circolarità ed uniformità dei moti celesti, uno dei cardini delle concezioni aristoteliche. Il modello mentale era quello, per dirla con Platone, di *subordinare le leggi fisiche a principi divini e trascendenti salvando i fatti*, cioè di ricondurre le *apparenze*, costituite dalle vistose irregolarità dei moti planetari, alla *realtà* di un moto che si supposeva *dover essere* circolare ed uniforme, in quanto perfetto, senza inizio e senza fine.

Nel Sistema Geocentrico, così chiamato appunto perché la Terra è immobile al centro dell’Universo, ogni corpo celeste è solidale ad una sfera che ruota con moto uniforme attorno alla Terra. Le stelle *fisse* sono incastonate alla Sfera Celeste e ruotano con essa.

Si trattava di una grandiosa costruzione geometrica, capace di rappresentare in modo completo, *particolareggiato ed anche quantitativo*, tutti gli aspetti del cielo e di prevedere il corso di quei corpi celesti denominati *planeti*. Esso venne proposto già da Ipparco e rielaborato più tardi, nel secondo secolo d.C., dall’astronomo alessandrino Tolomeo, nell’opera tradotta e tramandata dagli arabi col nome di *Almagesto* da cui il nome di Sistema Tolemaico.

In questo contesto ed in un clima culturale particolare, appare nel 1543 il *De Revolutionibus Orbium Coelestium* di Nicolò Copernico (1473-1543), nel quale è introdotto il Sistema Eliocentrico. Tale ipotesi era stata, per la verità, già formulata nel passato da Aristarco di Samo, ma i tempi non erano ancora maturi per accoglierla.

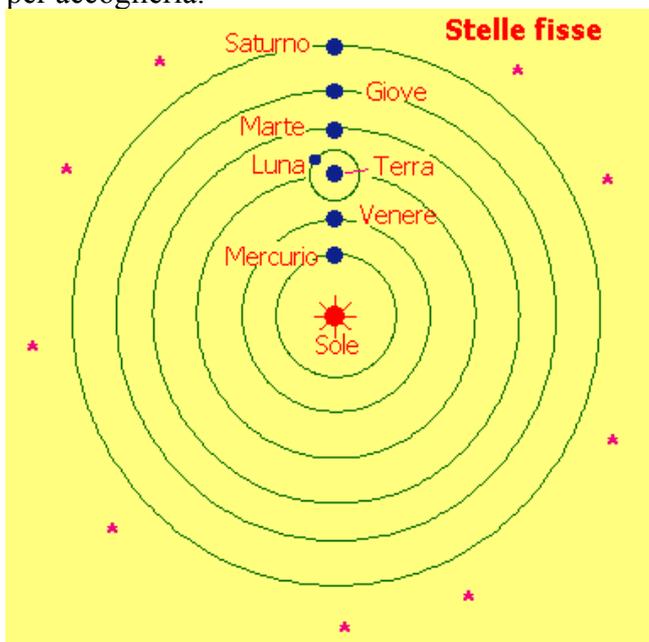


Figura 3 (Il Sistema Eliocentrico)

Copernico pone il Sole al centro dell’Universo ed i pianeti Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove e Saturno, in ordine di distanza crescente, che compiono rivoluzioni intorno al Sole su orbite circolari. La Terra, inoltre, viene dotata di un

movimento di rotazione su se stessa in senso antiorario, in modo da spiegare l'apparente rotazione diurna della Sfera celeste nel verso orario. La Luna, infine, è dotata di un moto di rivoluzione intorno alla Terra, il che ne spiega le fasi.

Già dalla descrizione *qualitativa*, con il disegno, la concezione copernicana ha il grande vantaggio di una maggiore semplicità rispetto a quella tolemaica. Da un punto di vista *quantitativo*, con l'ausilio di precisi calcoli matematici, la nuova ipotesi si concilia con le osservazioni e permette di rendere conto di tutte le *apparenze* meglio ancora del Sistema Tolemaico ed in maniera assai più semplice.

La concezione copernicana offre una più accettabile visione fisica ed abolisce il privilegio di centralità conferito alla Terra. Scrive Thomas Khun che: "*il De Revolutionibus costituì la miccia di una rivoluzione che esso aveva a mala pena delineato. È un testo che provoca una rivoluzione più che un testo rivoluzionario*" In alcuni casi (*es. il sistema Sole-Terra*) la costruzione copernicana è più complessa di quella tolemaica. Questa complicazione verrà superata da Keplero, alcune decine di anni dopo Copernico, con l'introduzione d'orbite ellittiche e costanza della velocità areolare.

Le Leggi di Keplero e la Gravitazione Universale

La prima ed importante verifica della validità del Sistema Copernicano, venne da Keplero che poté utilizzare osservazioni di Marte molto precise fatte dal suo maestro Tycho Brahe (1546-1601). Dopo vari tentativi, fatti nel corso di dieci anni di lavoro, Keplero pervenne in modo empirico alla formulazione delle tre leggi che portano il suo nome:

I^a Legge di Keplero: *I pianeti descrivono intorno al Sole delle orbite ellittiche, di cui il Sole occupa uno dei fuochi.*

Con questa legge cade il principio della circolarità dei moti planetari. Inoltre le orbite descritte dai pianeti acquistano identità fisica rispetto alle circonferenze tolemaiche, enti puramente geometrici.

II^a Legge di Keplero: *Le aree descritte dal raggio vettore di ciascun pianeta sono proporzionali ai tempi impiegati a descriverle; ossia, il raggio vettore di un pianeta descrive aree uguali in tempi uguali*

Come conseguenza di questa legge, un pianeta si muove più velocemente quando è più vicino al Sole (perielio) e più lentamente quando è più lontano (afelio). Questa legge segna la caduta del principio dell'uniformità dei moti planetari.

III^a Legge di Keplero: *I quadrati dei tempi di rivoluzione dei pianeti intorno al Sole sono proporzionali ai cubi dei semiassi maggiori delle rispettive orbite.*

Ne segue che la velocità media di un pianeta sulla propria orbita è tanto minore quanto più esso è lontano dal Sole.

Le leggi di Keplero descrivono compiutamente il moto dei pianeti, ma non ne risalgono alle cause. Perché i pianeti circolano intorno al Sole, anziché allontanarsene in linea retta? Perché un corpo qualsiasi lasciato cadere precipita al suolo mentre questo non accade ai pianeti (Terra compresa) che non precipitano

sul Sole?

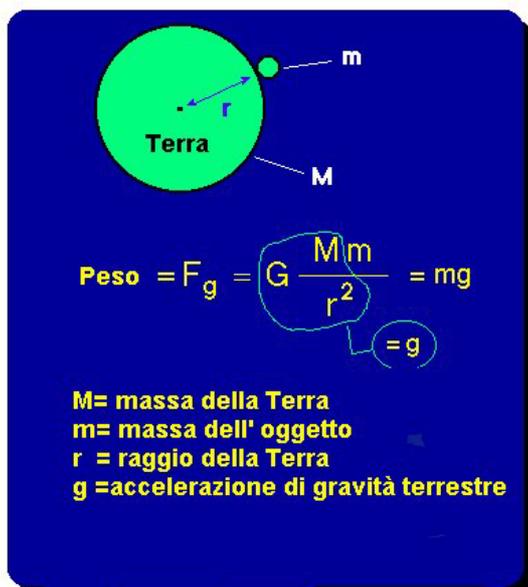


Figura 4

I gravi in caduta libera con moto accelerato, ma pure i pianeti costretti a muoversi intorno al Sole e la Luna intorno alla Terra, provano l'esistenza di forze centrali che deviano i corpi materiali dalla condizione di moto rettilineo uniforme.

Nel 1684 Newton fu in grado di enunciare la Legge di Gravitazione Universale: *due punti materiali qualsiasi si attraggono lungo la loro congiungente con una forza direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza.*

In formula, dette m_1 ed m_2 le masse dei due corpi, d la loro distanza ed F la forza agente, si ha:

$$F = G(m_1 m_2) / d^2,$$

dove G è la costante di Gravitazione

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{Kg}^2$$

La Legge di Gravitazione è stata definita "Universale" in quanto la forza che regola la caduta dei gravi sulla Terra ed il moto dei pianeti nel cielo è la stessa. *I cieli non sono più imperturbati e regolati da leggi divine, ma soggiacciono alle stesse leggi che regolano i fenomeni terrestri.* Con l'opera di Newton (i cui risultati furono pubblicati nel 1687 nell'opera *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*) alla *visione del mondo* che salva la realtà metafisica, si sostituisce una *visione del mondo* che descrive la realtà attraverso *leggi fisiche*, di valore universale, che hanno come banco di prova *l'esperimento*. La Storia ci dice che questo passaggio non fu indolore.

La Scoperta di nuovi Pianeti

La Meccanica Celeste dopo il grande sviluppo del calcolo differenziale legato all'opera d'illustri matematici (Newton, Leibniz, Lagrange, Laplace, Poincaré, solo per citarne alcuni) si sviluppò sino a diventare una delle massime espressioni della fisica moderna. La possibilità di determinare in modo esatto le orbite dei pianeti nel Sistema Solare fu uno dei maggiori successi della fisica "deterministica".

Grande era però il grado di difficoltà legato alla determinazione dei parametri dell'orbita di un pianeta se raffrontato alle limitatezze degli strumenti di calcolo. Tra i pochi "strumenti matematici" a disposizione degli astronomi vi erano le tavole dei logaritmi e delle funzioni trigonometriche. I calcoli della determinazione delle orbite (ma anche quelli del sorgere o tramontare del Sole e della Luna) richiedevano mesi, se non anni, di duro lavoro. Ciò che oggi è possibile effettuare (il calcolo delle Effemeridi) con un normale "Personal Computer", solo il secolo scorso fu una autentica sfida alle risorse di calcolo dei matematici e fisici dell'epoca. Nel secolo XIX^{esimo}, la conoscenza del moto delle orbite dei pianeti conosciuti, da Mercurio ad Urano, permise di prevedere l'esistenza di nuovi non ancora osservati sulla volta celeste.

Dopo la scoperta d'Urano si andò a determinarne l'orbita scoprendo, nel 1830, una differenza tra le previsioni e la posizione vera di 20" (secondi d'arco) circa. Dal momento che la posizione di un pianeta nella sua orbita non dipende solo dall'attrazione gravitazionale del Sole ma anche dall'azione combinata degli altri pianeti, si diffuse in breve la certezza che la posizione d'Urano fosse sbagliata, perché non si era tenuto conto dell'attrazione di un corpo celeste situato ancora più lontano dal Sole.

Per identificare l'oggetto che produceva la perturbazione sull'orbita d'Urano occorreva conoscerne la posizione in cielo; il che richiedeva la soluzione di un'enorme quantità di calcoli effettuati tramite la teoria delle perturbazioni. Adams a Cambridge e Le Verrier a Parigi eseguirono i calcoli per determinare la posizione del nuovo pianeta utilizzando le posizioni note di Giove, Saturno ed Urano. A questo punto la mano passò agli astronomi che andarono a ricercarne la posizione predetta dai calcoli teorici.

La sera del 23 settembre 1846, l'astronomo Galle notò la presenza di un astro relativamente brillante dove la carta del cielo non riportava nulla. Encke, con il grande telescopio equatoriale dell'osservatorio di Berlino, notò che il nuovo corpo aveva la forma di un disco e che durante la notte presentava un moto significativo rispetto alle stelle di fondo. La posizione vera del nuovo pianeta risultava distare solo 55' dalla posizione indicata da Le Verrier e di circa il doppio da quella indicata da Adams: al nuovo pianeta fu dato il nome di Nettuno. In seguito si capì che se la ricerca del pianeta avesse avuto luogo qualche anno più tardi, date le incertezze sulla sua posizione teorica, difficilmente lo si sarebbe trovato.

Alla fine del secolo scorso P. Lowell pose mano al problema delle residue perturbazioni dell'orbita di Nettuno. In conseguenza dello studio delle perturbazioni di Nettuno, ecco che nel 1915 si dedusse la presenza di un pianeta di massa uguale a 6,5 masse terrestri ad una distanza di 42 U.A. nella costellazione dei Gemelli. Contemporaneamente allo studio dell'orbita di Nettuno nei primi anni del secolo furono quindi esaminate migliaia di fotografie del cielo prese nei pressi del piano dell'eclittica al fine di determinare in modo diretto l'esistenza di un nuovo pianeta.

Lowell morì nel 1916 e solo nel 1929 fu ripresa la ricerca del pianeta non ancora noto. Nel 1930 Tombaugh, nel momento in cui la costellazione dei Gemelli era in opposizione al Sole, trovò il nuovo pianeta assai vicino alla posizione definita da Lowell e gli venne dato il nome di Plutone. Dal momento però che le dimensioni erano troppo piccole rispetto a quelle previste rimase per molto tempo il dubbio

che si trattasse veramente del pianeta di Lowell.

Il programma di ricerca continuò così fino al 1943, e fu esteso ad una vastissima zona di cielo ma nessun altro astro (nemmeno più piccolo di Plutone) fu scoperto. Nel frattempo l'accumularsi dei dati sulle posizioni di Urano e Nettuno permise di ridurre il numero delle perturbazioni di cui tenere conto. La massa di Plutone, che era stata prevista maggiore di quella effettivamente trovata, venne ricalcolata si riducendola ad un valore inferiore a quella terrestre. La scoperta poi di un satellite di Plutone permise una più corretta valutazione della massa riducendola ulteriormente al valore di $0,0026 M_T$ (masse terrestri).

Il fatto curioso, in questa fortunata previsione, è che la massa effettivamente osservata non avrebbe potuto in nessun modo influenzare le orbite di Urano e Nettuno, per cui risultò incomprensibile come mai Plutone fosse stato trovato proprio nel punto previsto da Lowell.



Figura 5

La gravità di Einstein

Lo sviluppo ed il superamento della gravità newtoniana, si ebbero agli inizi del XX^{esimo} secolo con Einstein e la Relatività Generale. Senza entrare nel dettaglio di una teoria fisico-matematica tanto complessa indichiamo alcuni dei punti principali su cui essa è basata. La gravità è interpretata come effetto geometrico, in quanto la *materia* presente nell'Universo determina la *curvatura dello spazio-tempo*. Le equazioni di Einstein esprimono semplicemente la relazione fra la curvatura da un lato e la materia ed energia dall'altro.

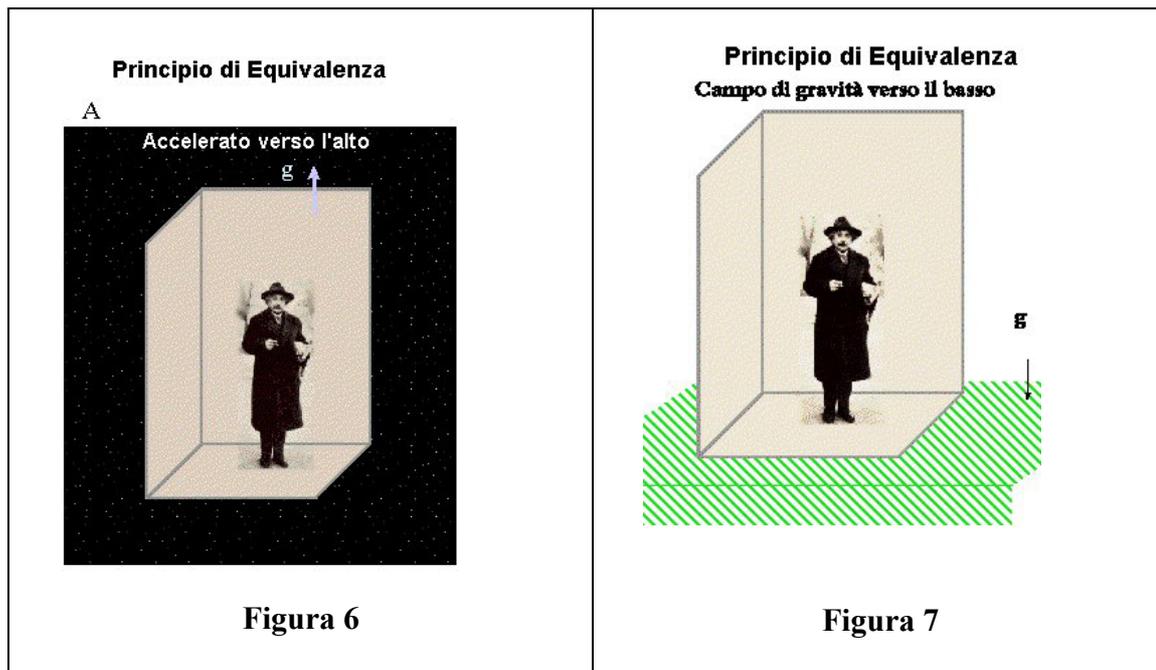
Lo *spazio-tempo* è un'entità a quattro dimensioni (tre spaziali + una temporale) che sostituisce lo *spazio* ed il *tempo assoluti* della teoria newtoniana. Non solo lo spazio ed il tempo non sono più assoluti ma sono pure intrinsecamente connessi !

Ciò che rende particolarmente difficile questa teoria è una sorta di "anello di retroazione". Vale a dire: la curvatura dello spazio-tempo è determinata dalla

distribuzione della materia ed energia distribuita nell'Universo, che a sua volta è governata dalla curvatura dello spazio-tempo stesso ! dà un'interpretazione della gravità comprensiva della teoria di Newton, che rimane peraltro valida come caso particolare laddove le masse che generano la gravità (ad esempio nel Sistema Solare) non sono troppo grandi.

Il principio d'equivalenza

Le ragioni che indussero Einstein a costruire la Relatività Generale, si possono spiegare, nei loro principi di base, ricorrendo a degli esperimenti ideali. Il più importante è noto come *l'ascensore di Einstein*.



Tutti gli oggetti cadono al suolo con la stessa accelerazione, già questo era noto a Galileo. Immaginiamo ora un ascensore all'ultimo piano di un grattacielo e supponiamo che non vi sia aria in esso. Di colpo si spezza il cavo portante e la cabina inizia a cadere liberamente con *accelerazione costante*. Contemporaneamente una persona che si trova nel suo interno, lascia cadere un sasso ed una piuma. La forza di gravità attrae allo stesso modo sia i due oggetti che l'ascensore, per cui la velocità relativa tra sasso e piuma è nulla. *In altre parole sia il sasso che la piuma non arrivano a toccare il fondo dell'ascensore, dal momento che quest'ultimo sta cadendo con la loro stessa accelerazione.* L'uomo all'interno della cabina potrebbe quindi a buon diritto affermare di trovarsi in una zona dello spazio *lontana dall'azione gravitazionale* di stelle e pianeti, dal momento che i due oggetti lasciati a se stessi rimangono sospesi a mezz'aria.

Consideriamo ora la situazione opposta: la cabina viene posta in una zona dello spazio dove non agiscono forze gravitazionali, ad esempio in una navetta spaziale in orbita terrestre. Supponiamo inoltre che la cabina venga "tirata" verso l'alto sempre con *accelerazione costante* tramite una fune collegata al soffitto. *Se la persona all'interno dell'ascensore lascia andare la piuma ed il sasso essi rimarranno al loro posto dal momento che nessuna forza agisce su di loro.* Il pavimento però si sta muovendo verso l'alto e, prima o poi, raggiungerà i due

oggetti. La persona all'interno dell'ascensore, ignorando la situazione esterna, può credere di trovarsi *dentro un campo gravitazionale* dal momento che, lasciando andare la piuma ed il sasso, essi "cadono" sul pavimento contemporaneamente. La persona stessa inoltre "sente" il proprio peso a causa del pavimento che spinge contro i piedi.

Si può quindi affermare che: gli effetti di un'*accelerazione costante* su di un osservatore sono equivalenti a quelli di un *campo gravitazionale uniforme* sullo stesso osservatore supposto in quiete. In questo consiste il famoso **principio di equivalenza** formulato da Einstein nel 1911.

Sono state effettuate diverse verifiche sperimentali del *principio di equivalenza* sono state effettuate, le principali prendono in considerazione due tipi di esperimenti: la bilancia gravitazionale ed il red-shift gravitazionale. Il grado di precisione con cui è stato verificato il *principio d'equivalenza* è talmente elevato da risultare uno dei pilastri dell'intera fisica moderna.

L'inerzia ed il principio di Mach

Un altro dei tratti caratteristici della Relatività Generale, riguarda l'introduzione dello spazio-tempo e la perdita della possibilità di dare un senso fisico al concetto di spazio assoluto.

La prima legge del moto di Newton, afferma che ogni corpo tende a mantenere il proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme. *La seconda legge del moto* stabilisce che: ogni corpo possiede quindi un'inerzia espressa dalla sua massa **m**, che si oppone agli agenti esterni (le forze **F**) che tendono ad alterare il suo stato dinamico ed a fornirgli un'accelerazione **a**.

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{a}$$

Ad esempio quando partiamo in automobile, impieghiamo un certo tempo a raggiungere la velocità di crociera perché il veicolo tende a rimanere fermo. Viceversa, se freniamo bruscamente, impieghiamo del tempo a fermarci del tutto perché l'automobile tende a mantenere la velocità di crociera.

La seconda legge del moto Newton vale però solo per "sistemi di riferimento inerziali" che sono quei sistemi privi di accelerazione. La Terra non è un sistema di riferimento inerziale perché ruota su se stessa ed intorno al Sole. Anche il Sole però non costituisce un sistema inerziale in quanto ruota nella Galassia, e la Galassia nel Gruppo Locale etc.. Sembra proprio che non si riesca a trovare un sistema di riferimento "fisso", il cosiddetto spazio assoluto di Newton, in cui le leggi del moto (incluso anche *la terza legge del moto*, il principio di azione e reazione) siano verificate con la massima precisione.

La difficoltà inerente al concetto di spazio assoluto non era naturalmente sfuggita al genio di Newton: ma egli credette di averla risolta con il famoso esperimento del secchio rotante. Se un secchio pieno d'acqua è messo in rotazione attorno al suo asse verticale, dapprima l'acqua rimane ferma senza partecipare alla rotazione delle pareti del recipiente e la sua superficie rimane intatta. Successivamente, man mano che la rotazione del secchio si trasmette all'acqua, questa comincia a ruotare manifestando un rialzamento della superficie libera al bordo ed una depressione al centro. Dunque all'inizio l'acqua ruota rispetto al secchio ma "in realtà" (cioè rispetto allo spazio assoluto) è in quiete perché la sua superficie è piana;

successivamente essa è ferma rispetto alle pareti ma "in realtà" ruota perché la sua superficie s'incurva. Secondo Newton esperimenti di questo tipo permettono di distinguere tra moti relativi e moti assoluti.

Berkeley prima e Mach poi contestarono questo modo di vedere le cose. Se escludessimo le stelle fisse, sostenevano, l'acqua del secchio non s'incurverebbe mai escludendo così la possibilità di individuare lo spazio assoluto. Il succo del loro ragionamento è il seguente: noi non possiamo dire se un corpo si muova di moto uniforme o se stia fermo, a meno che non vi sia un secondo corpo rispetto al quale misurare la velocità del primo. Questo vale anche per un corpo accelerato. Infatti, in assenza di un secondo corpo di riferimento, non siamo in grado di dire se un oggetto percorra una traiettoria curva o rettilinea, e se varia o meno la sua velocità.

Principio di Mach: "le masse laggù determinano l'inerzia qua".

L'inerzia, cioè la proprietà di continuare a muoversi di moto uniforme finché non viene disturbato da una forza, non può essere una proprietà intrinseca al corpo, ma deve essere determinata dalla sua interazione con le altre masse dell'Universo; tolte via queste masse, anche l'inerzia sparirebbe perché non si vede rispetto a cosa il corpo potrebbe accelerare o rallentare il suo moto.

Lo spazio-tempo relativistico

Rivolgendosi a Charlie Chaplin dopo la prima di un suo film A. Einstein gli disse: "*Lei è famoso perché è capito da tutti io sono invece famoso perché solo pochi mi comprendono*"

La teoria delle Relatività Generale, ha mostrato che per costruire un sistema di riferimento adatto all'Universo è necessario collegare lo spazio con il tempo. Lo *spazio-tempo* che ne risulta è a quattro dimensioni tre delle quali spaziali e la restante temporale. Ogni punto dello *spazio-tempo* è quindi individuato da quattro coordinate che definiscono un "evento".

Quanto la variabile tempo sia essenziale nella descrizione dell'Universo appare evidente dal fatto che noi *oggi* (in conseguenza della finitezza della velocità della luce) osserviamo oggetti, in quanto lontani, vecchi di milioni e miliardi di anni. Scrutando l'Universo abbiamo sotto gli occhi il passato; tanto più remoto quanto più lontani sono i corpi celesti che si osservano.

Il *principio d'equivalenza* rappresenta il cardine, insieme al *principio di Mach*, su cui è costruita la Relatività Generale. In modo un po' provocatorio si può affermare, seguendo le idee guida di Einstein, che *la gravità non esiste*. L'effetto di un qualsiasi corpo materiale è quello di "incurvare" lo spazio intorno a sé. Tale "curvatura" fa deviare i corpi dalla loro traiettoria rettilinea provocando in questo modo quella che noi chiamiamo *attrazione gravitazionale*.

Due oggetti dal peso tanto diverso, come una piuma ed un sasso, cadono a terra con la stessa accelerazione in quanto essi semplicemente si muovono in uno spazio curvo che deflette le loro traiettorie in uguale misura.

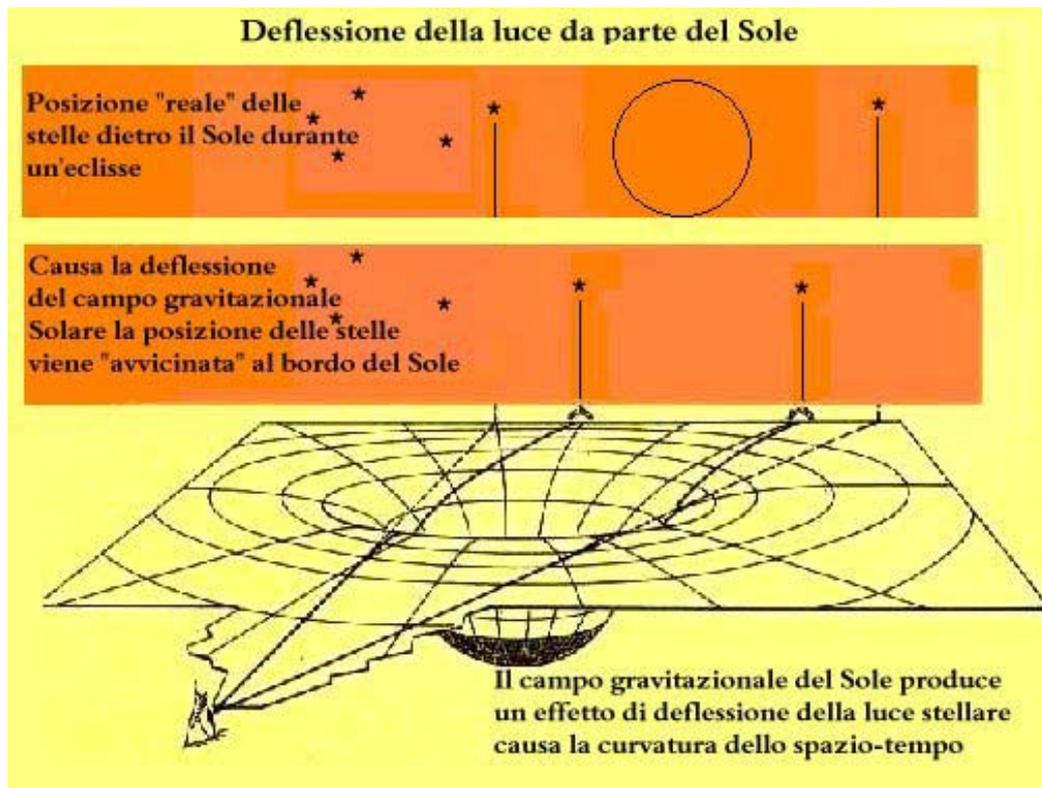


Figura 8

Nel 1905 con l'avvento della teoria della Relatività Ristretta fu stabilita da Einstein un'equivalenza (da non confondersi con il "principio" di equivalenza) tra massa ed energia tramite la celebre formula: $E = m \cdot c^2$. Ne risulta che la massa è una forma di energia molto concentrata; per cui se la gravità agisce sulle masse allora deve agire anche sull'energia.

Vediamo come l'azione gravitazionale di un corpo massiccio, ad esempio il Sole, possa essere messa in evidenza utilizzando le traiettorie dei raggi luminosi. Supponiamo di scattare, di notte tramite un telescopio, una foto di una zona del cielo in modo da stabilire la posizione di una serie di stelle ed assumiamo queste come le loro posizioni "vere". Cerchiamo ora di osservare le stesse stelle in un differente periodo dell'anno, in cui esse si trovano alla portata del nostro telescopio ma di giorno; ad esempio durante un'eclissi di Sole ! I raggi di luce di queste stelle devono allora, passando vicino al bordo del Sole, essere deflesse dal suo campo gravitazionale.

Questo significa, esagerando l'effetto, che bisogna spostare il telescopio in modo che punti verso il bordo del Sole sebbene la posizione "vera" delle stelle sia quella dietro il Sole. In altri termini ne risulterà una differenza tra la loro posizione "vera" e la posizione "apparente".

Nel caso del Sole l'effetto previsto dalla Relatività Generale è molto piccolo: 1.7 " secondi d'arco. È proprio quanto, Sir A. Eddington, riuscì a misurare nel 1919 verificando clamorosamente la teoria di Einstein.

Mercurio è il più piccolo dei pianeti "terrestri" che comprendono anche Venere,

Terra e Marte. Il diametro del pianeta è circa un terzo di quello della Terra mentre la quantità di luce ricevuta dal Sole è, data la minore distanza, circa 6.67 volte maggiore di quella della Terra. La sua orbita è fortemente inclinata sull'eclittica, caratteristica questa condivisa solo con il pianeta più esterno Plutone, infatti la sua eccentricità è molto elevata (0.2056) per cui al perielio la sua distanza dal Sole è di 46 milioni di km mentre all'afelio risulta di 76 milioni di km.

Il perielio della sua orbita precede molto lentamente. Gli astronomi del secolo scorso, ritenevano la Meccanica Newtoniana inadeguata per spiegare tale precessione arrivando persino a sospettare l'esistenza di un altro pianeta (chiamato Vulcano) vicino alla sua orbita. Solo la Teoria della Relatività Generale di Einstein spiegò tale discrepanza (di 40" secondi di arco per secolo) rinunciando all'esistenza di Vulcano. La corretta spiegazione della precessione del perielio è stata un'altra importante verifica di tale rivoluzionaria teoria.

Conclusioni

I successi e le applicazioni della Relatività Generale non si esauriscono qui. Di straordinaria importanza per la fisica moderna sono i *modelli cosmologici* che forniscono una visione inedita ma soprattutto completa dell'evoluzione dell'intero Universo. Da non dimenticare inoltre sono le previsioni teoriche riguardanti gli oggetti compatti che hanno trovato nell'astrofisica degli oggetti collassati (nane bianche, stelle i neutroni e buchi neri) un'importante controparte osservativi, ma questi argomenti vanno ben al di là di questa semplice e limitata trattazione.

Ringraziamenti: si ringraziano A. D'Ercole dell'Osservatorio Astronomico di Bologna e F. Zavatti del Dipartimento di Astronomia dell'Università degli studi di Bologna per la preziosa collaborazione offerta nella stesura del testo.

Bibliografia introduttiva e divulgativa

1. P. Bergmann, *L'enigma della Gravitazione*, Edizioni Scientifiche e Tecniche Mondadori (EST), (1978).
2. N. Booth, *Il Sistema Solare*, Ed. Zanichelli, (1996).
3. Braccisi, *Esplorando l'universo*, Collana le Ellissi, Ed. Zanichelli, (1988).
4. Braccisi, G. Caprara, M. Hack, *Alla scoperta del Sistema Solare*, Ed. Illustrati Mondadori, (1993).
5. P. Davies (a cura di), *La Nuova Fisica*, Ed. Bollati Boringhieri, (1992).
6. H. Georgi, *Una teoria unificata delle particelle e delle forze*, Le Scienze, nr 95, (luglio 1976).
7. S. Hawking, *Dal Big Bang ai Buchi Neri*, Ed. Rizzoli, (1988).
8. S. Hawking, *La meccanica quantistica dei Buchi Neri*, Le Scienze, nr 105, (maggio 1977). (1988)
9. J. N. Islam, *Il destino ultimo dell'Universo*, Collana le Ellissi, Ed. Zanichelli, (1988).
10. S. Kaufmann, *Galassie e Quasar*, Ed. Sansoni, (1984).
11. T. Khun, *La Rivoluzione Copernicana*, Einaudi, (1972)

12. K. Nèman, *Cacciatori di Particelle* , Ed. Bollati Boringhieri, (1986).
13. M.S. Longair, *Our evolving Universe* , Ed. Cambridge Press, (1996).
14. C.C. Petersen and J.C. Brandt , *Hubble Vision (Astronomy with the Hubble Space Telescope)*, Ed. University Cambridge Press, (1995).
15. M. R. Robinson, *L'Universo* , Ed. Zanichelli, (1992).
16. D.W. Sciama, *Cosmologia Moderna*, Edizioni Scientifiche e Tecniche Mondadori (EST), (1977).
17. S. Weinberg, *I primi tre minuti* , Ed. Mondadori, (1986).

Trattati d'Astronomia e Cosmologia

18. L. Gratton, *Introduzione all'Astrofisica*, Volumi I e II, Ed. Zanichelli, (1982).
19. W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler, *Gravitation*, Ed. Freeman and Company, (1973).
20. J.V. Narlikar, *La struttura dell'Universo*, Ed. Einaudi, (1984).
21. Ünsold, *Il Nuovo Cosmo*, Ed. Piccin, (1969).