

Buchi nel cielo

Un viaggio nella
Relatività Generale

*« La mente è come un paracadute:
funziona solo se si apre. »*

*« Ero seduto nell'Ufficio brevetti a
Berna quando all'improvviso mi ritrovai a
pensare: se una persona cade
liberamente, non avverte il proprio peso.
Sobbalzai. Questo pensiero semplice mi
colpì profondamente e mi spinse verso
una teoria della gravitazione... »*

Albert Einstein

In questa presentazione illustreremo, nel modo più semplice possibile, in cosa consiste la teoria della **RELATIVITÀ GENERALE**, della quale ricorre quest'anno il centesimo anniversario della prima pubblicazione sugli "Annali di Fisica", avvenuta il 20 marzo 1916:

1916.

№ 7.

ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 49.

1. *Die Grundlage
der allgemeinen Relativitätstheorie;
von A. Einstein.*

Die im nachfolgenden dargelegte Theorie bildet die denkbar weitgehendste Verallgemeinerung der heute allgemein als „Relativitätstheorie“ bezeichneten Theorie; die letztere nenne

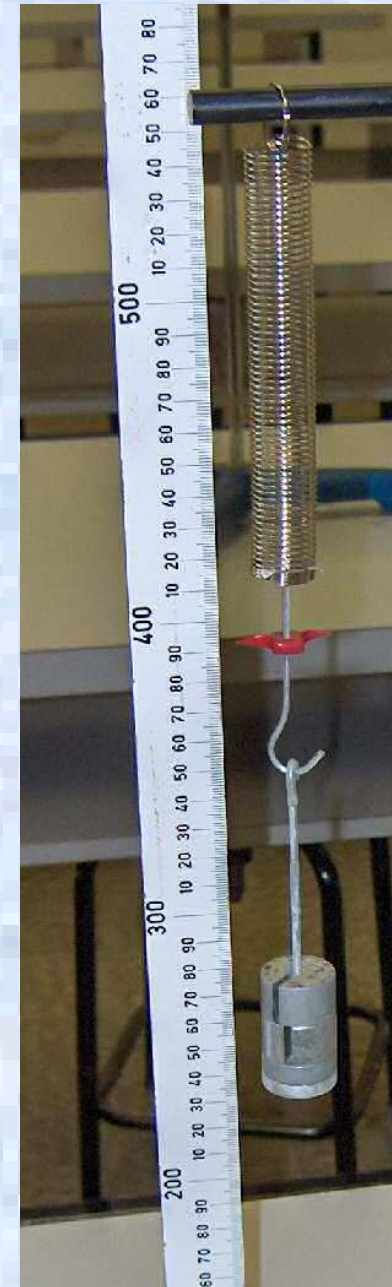
La relatività generale è una teoria della **gravitazione**, dunque occorre anzitutto spiegare cosa si intende con questa parola. L'interazione gravitazionale è una delle quattro interazioni fondamentali note in fisica, ed è responsabile del fatto che tutti i corpi dotati di massa subiscono un'attrazione da parte della Terra chiamata forza peso ("gravis" in latino significa "pesante").

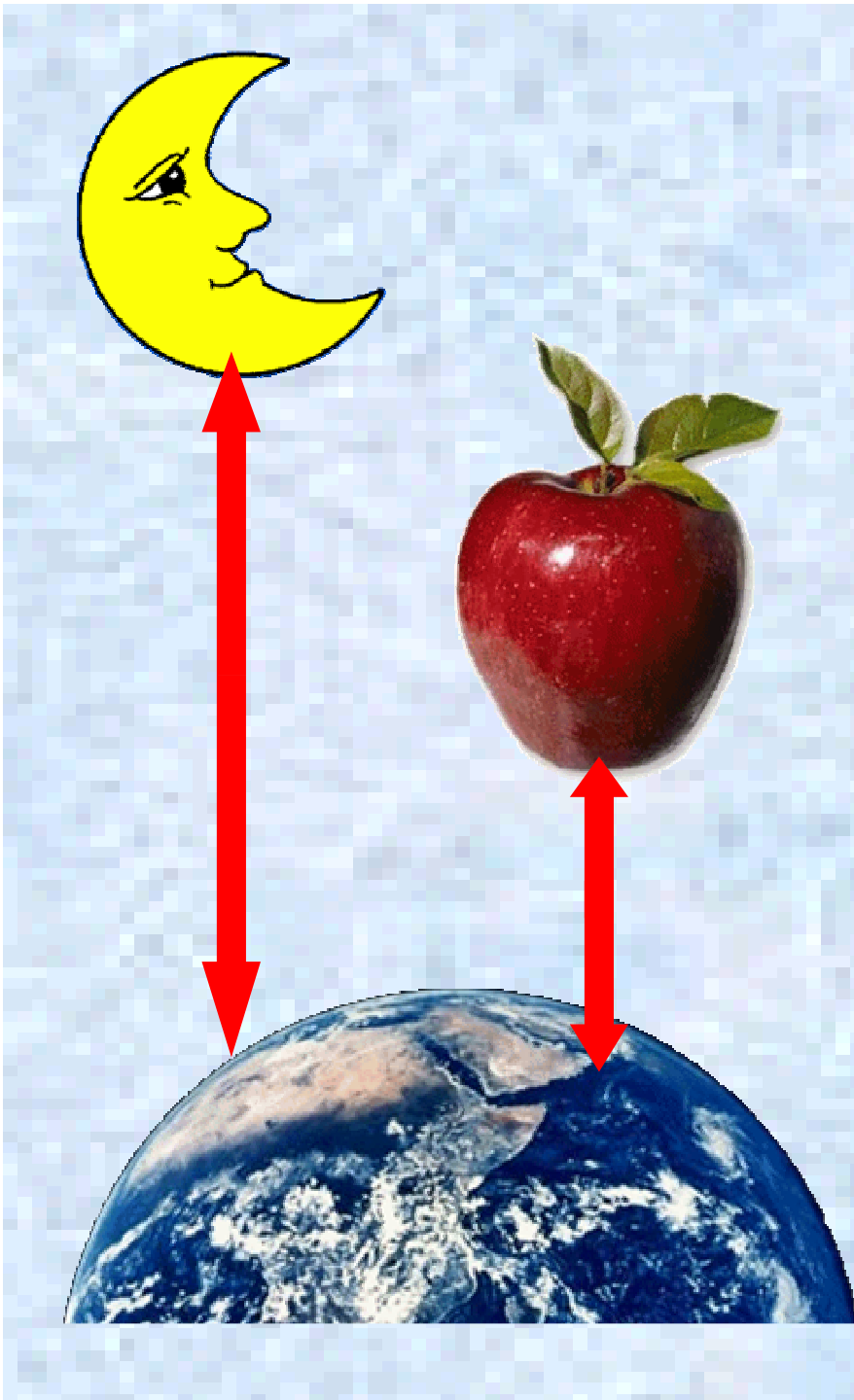
Questa interazione è legata indissolubilmente al nome di **Isaac Newton** (1642-1727), uno dei massimi geni di ogni tempo.



Nel 1687 Newton pubblicò il suo capolavoro "I Principi Matematici della Filosofia Naturale" (cioè della Fisica), in cui spiega come, non solo tra la Terra e il pesetto appeso al dinamometro qui a fianco, ma tra qualunque massa dell'universo, si eserciti una forza che è direttamente proporzionale alle due masse in esame e inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Siccome tale legge ha validità generale nell'intero universo, da allora si parla di **gravitazione universale**.

Secondo una ben nota leggenda, Newton sarebbe arrivato a tale scoperta dopo che gli era caduta una mela sulla testa mentre sonnecchiava sotto un albero...





Il fatto è che, molto probabilmente, NON si tratta di una leggenda, come dimostrerebbe la biografia di Newton scritta dal suo contemporaneo e amico William Stukeley (1687-1765), al quale lo stesso Newton avrebbe confidato: «**Avvenne mentre sedevo in contemplazione, a causa della caduta di una mela.**» Lo scienziato inglese sarebbe così giunto alla conclusione che la forza di gravità esercitata dalla Terra sulla mela è la stessa che costringe la Luna a ruotarle attorno su un'orbita ellittica!

La forza di attrazione reciproca tra il Sole e i pianeti del Sistema Solare, che vedete rappresentati qui sopra in scala, spiega perfettamente il loro moto intorno al Sole, giacché la forza di gravitazione universale coincide con la forza centrifuga che li mantiene su un'orbita circolare, senza bisogno di invocare le « **sfere di cristallo** » immaginate da Aristotele e Tolomeo per sostenere i pianeti!



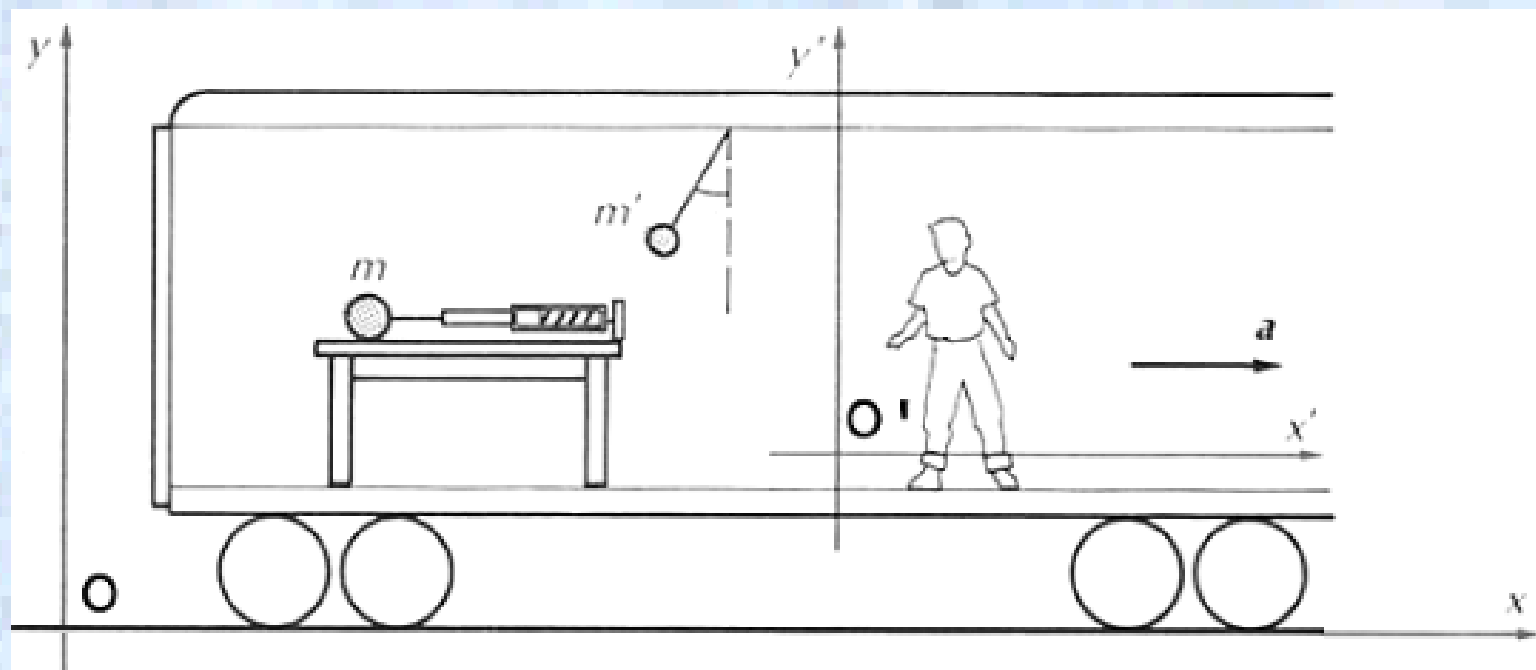
Quella della gravitazione universale è una delle teorie più eleganti e di successo della Fisica Classica, e ottenne la definitiva consacrazione il 23 settembre 1846 quando, utilizzando le idee di Newton, il tedesco Johann Galle scoprì il pianeta **Nettuno** studiando le perturbazioni dell'orbita di Urano.

Nel XX secolo però, con la crisi della Fisica Classica, anche il concetto di "forza di gravità" cominciò ad essere messo in discussione. E il primo a farlo fu **Albert Einstein**, già noto nel mondo scientifico per aver interpretato l'effetto fotoelettrico e per aver ideato, nel 1905, la cosiddetta **Teoria della Relatività Ristretta**.

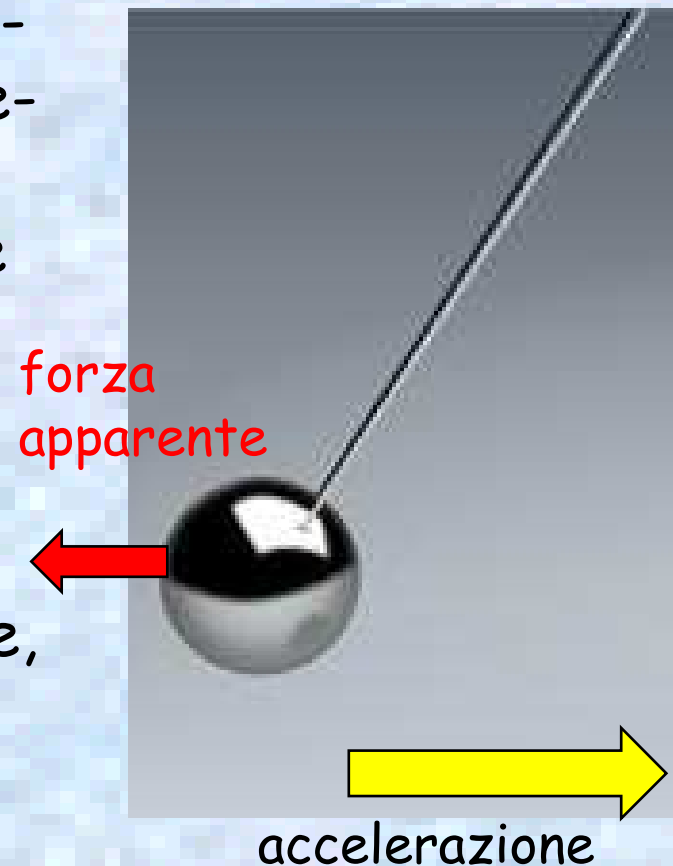
Quest'ultima teoria infatti afferma che nulla nel cosmo può muoversi a velocità **maggiore di quella della luce**. Invece, secondo Newton la forza di gravità ha effetto **istantaneo**: se il Sole si spostasse dalla propria posizione, la forza che esso esercita sulla Terra cambierebbe immediatamente, senza alcun ritardo!



Siccome la Relatività Ristretta si occupa solo di sistemi inerziali, cioè in moto rettilineo uniforme uno rispetto all'altro, Einstein cominciò con il chiedersi che cosa accade nei sistemi che si muovono l'uno rispetto all'altro di moto accelerato. Allo scopo, consideriamo un vagone ferroviario contenente uno studente, un pendolo e una massa collegata a un dinamometro:



Fino a che il vagone si muove di moto uniforme, allo studente chiuso in esso sembra che esso rimanga fermo: egli osserverà il pendolo in posizione assolutamente verticale e il dinamometro segnerà zero Newton. Se questo però prende ad accelerare con accelerazione a , accadranno effetti strani: il pendolo si inclinerà in direzione opposta al moto del vagone, e il dinamometro si allungherà nella stessa direzione. Per chi osserva il vagone dalla strada, semplicemente i due corpi mantengono per inerzia la propria posizione e "rimangono indietro"; ma per lo studente chiuso nel vagone, essi sono soggetti ad una forza inspiegabile, che esiste solo per lui, e per questo è detta **forza apparente**.

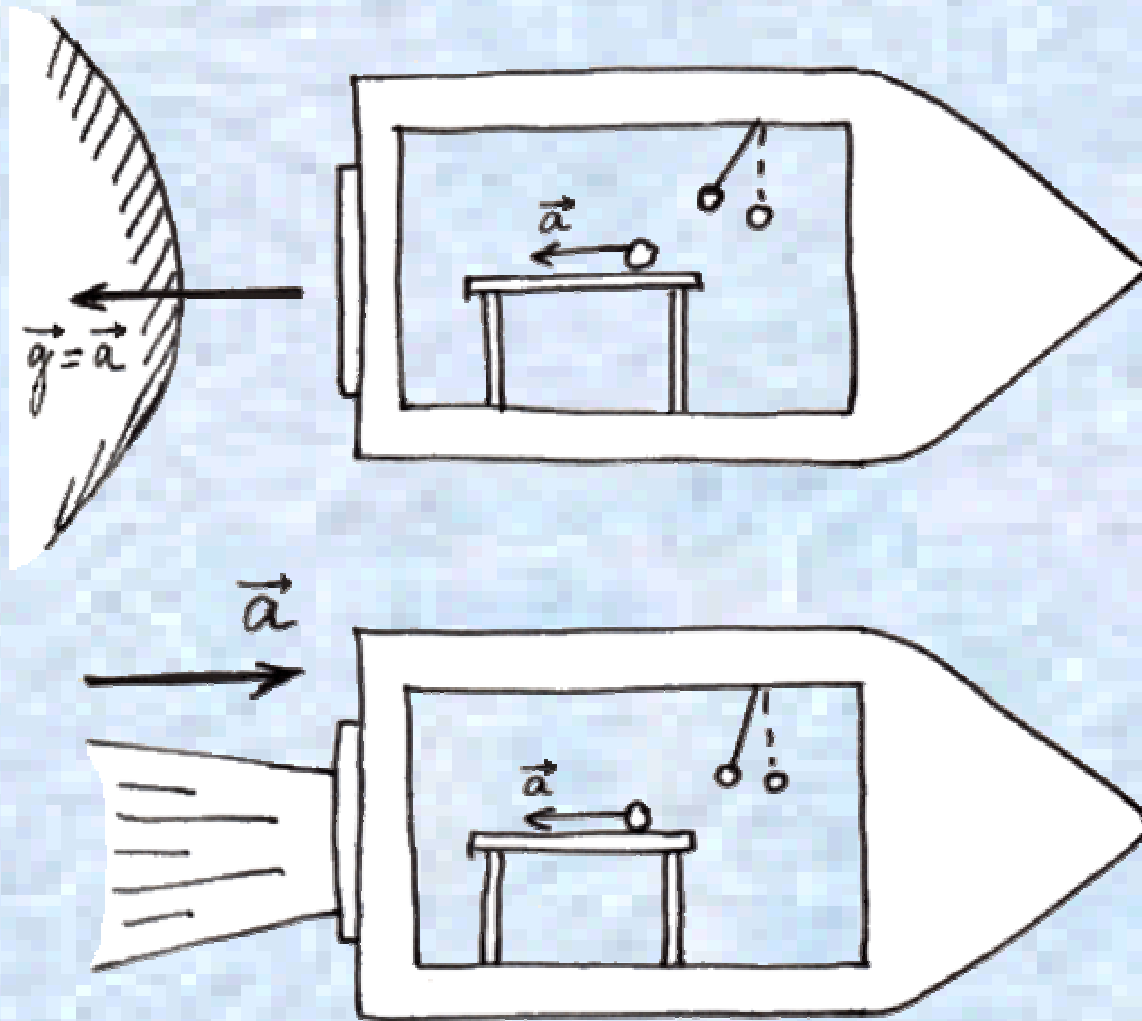




Ma che senso hanno le forze apparenti? Rispetto a quale sistema esse agiscono? Una possibile risposta fu offerta dal fisico e filosofo tedesco **Ernst Mach** (1838-1916), secondo il quale l'inerzia di ogni corpo, e quindi anche ogni forza apparente, è il risultato dell'interazione del corpo stesso con il resto dell'universo ("Principio di Mach").

Einstein si valse delle ricerche di Mach per elaborare la sua teoria gravitazionale, e partì nel 1908 formulando il cosiddetto **Principio di Equivalenza**. Se gli studenti in laboratorio osservano che tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione in una certa direzione, concludono che il loro laboratorio è immerso in un campo gravitazionale. Questa però non è l'unica spiegazione possibile

Si consideri un'astronave posta nello spazio lontanissimo da ogni pianeta. Se gli astronauti dispongono di un dinamometro e di un pendolo, e vedono entrambi muoversi di colpo in una precisa direzione, possono concludere che dietro di loro

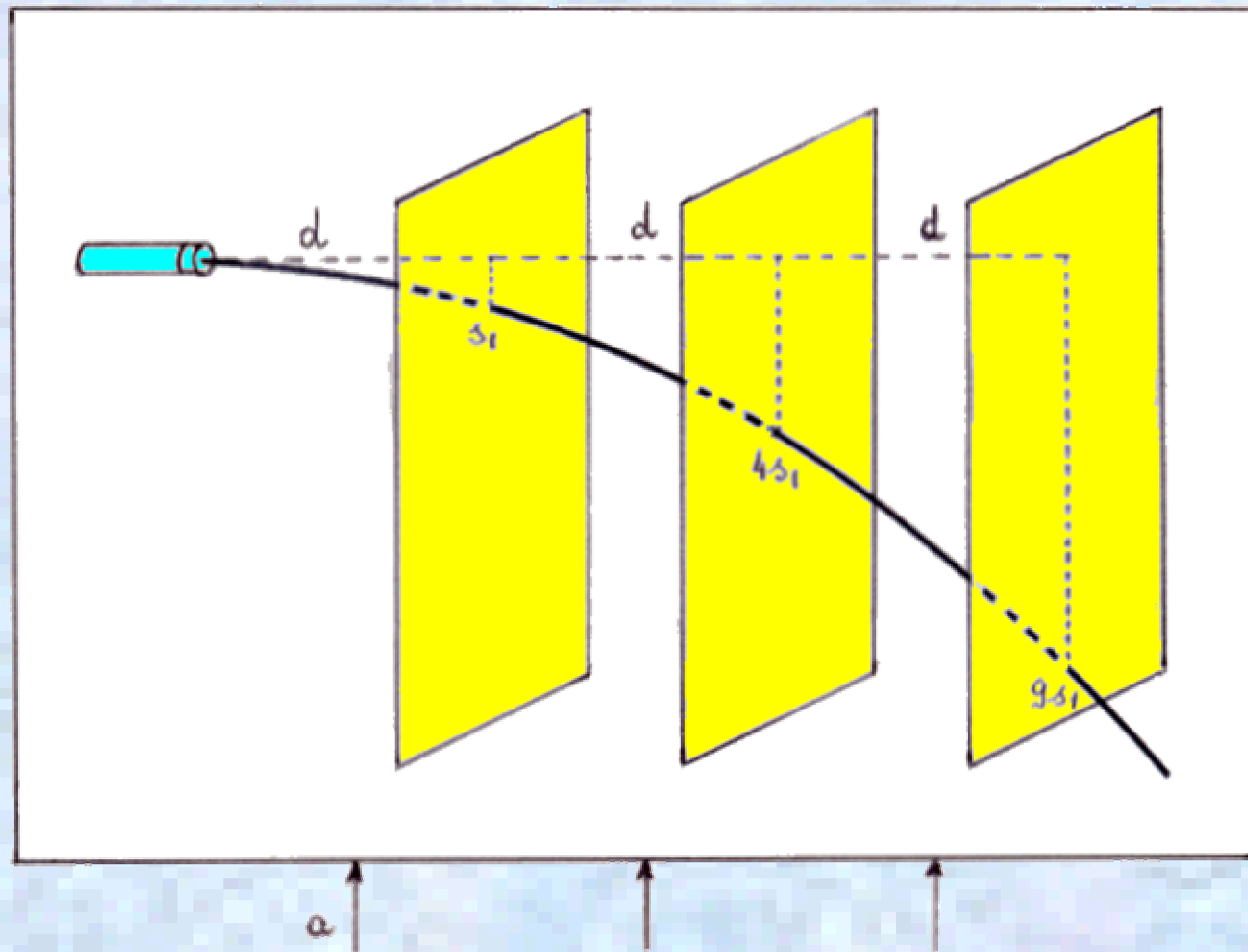


è comparso un pianeta che ha attratto massa e pendolo, Ma ne è proprio sicuro? Come si vede a lato, può darsi che non ci sia alcun pianeta, ma che l'astronave, già in moto con velocità costante, ora abbia acquisito un'accelerazione pari al campo gravitazionale di quel pianeta!

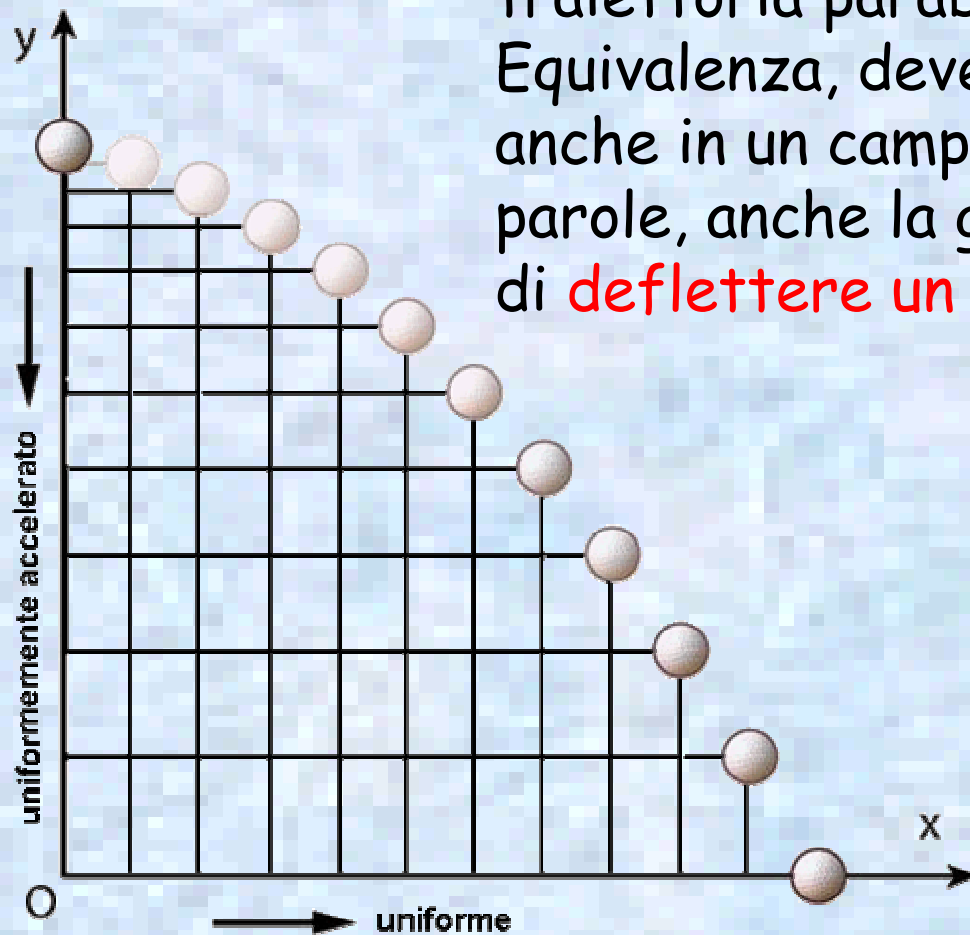
Una delle conseguenze del Principio di Equivalenza sta nel fatto che un campo gravitazionale può essere annullato da un campo di accelerazioni. Pensate alla **Stazione Spaziale Internazionale** (ISS): perché la nostra **Samantha Cristoforetti** volteggiava in essa senza peso? Per l'assenza di gravità? No, altrimenti la ISS non sarebbe rimasta in orbita intorno alla Terra! Invece il campo di accelerazione centrifuga dovuto al moto della ISS per il Principio di Equivalenza è uguale e opposto al campo gravitazionale terrestre, simulando l'assenza di peso!



Il Principio di Equivalenza ha una conseguenza assolutamente inaspettata. Supponiamo di trovarci in un razzo che si muove con accelerazione elevata, e di avere un fascio di luce che attraversi più schermi fluorescenti, posti a distanza costante, così da lasciare su di essi una traccia visibile:



La luce si muove di **moto rettilineo uniforme**, mentre il laboratorio si muove di **moto rettilineo uniformemente accelerato** ad esso perpendicolare. Come sappiamo, la composizione di questi due tipi di moto dà vita ad un **moto parabolico**: di conseguenza, anche la luce in un campo di accelerazioni segue una



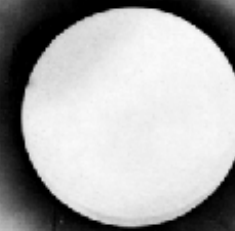
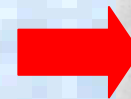
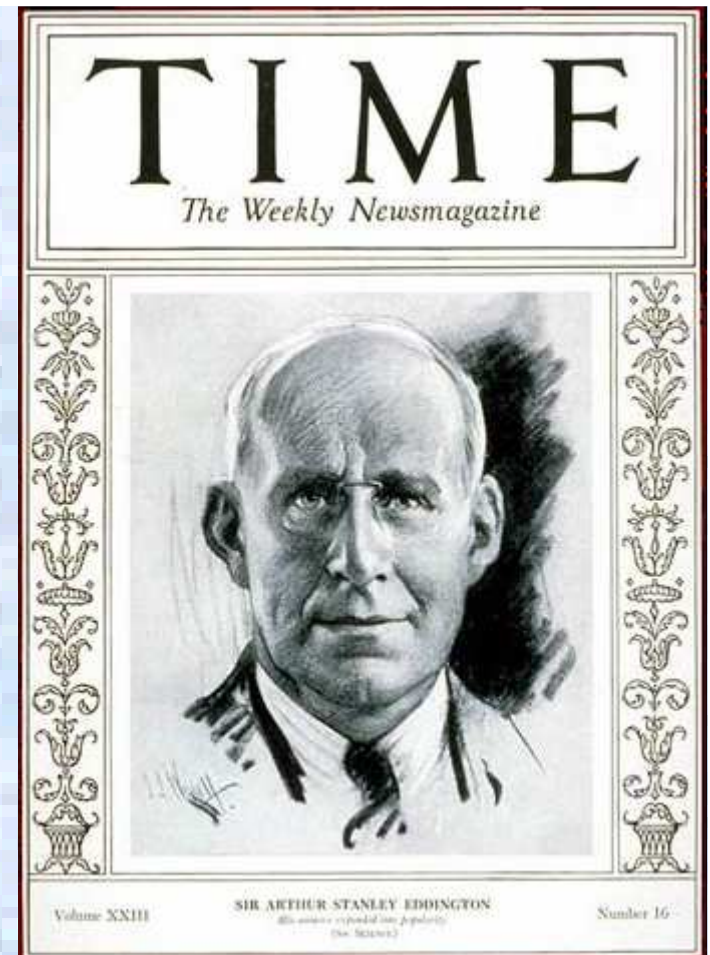
traiettoria parabolica. Ma, per il Principio di Equivalenza, deve accadere la stessa cosa anche in un campo gravitazionale! In altre parole, anche la gravità deve essere in grado di **deflettere un raggio di luce**, altrimenti io avrei trovato un modo per distinguere un campo di gravità da uno di accelerazioni, ed avrei distrutto il Principio. **La luce dunque cade come ogni massa in un campo gravitazionale!**

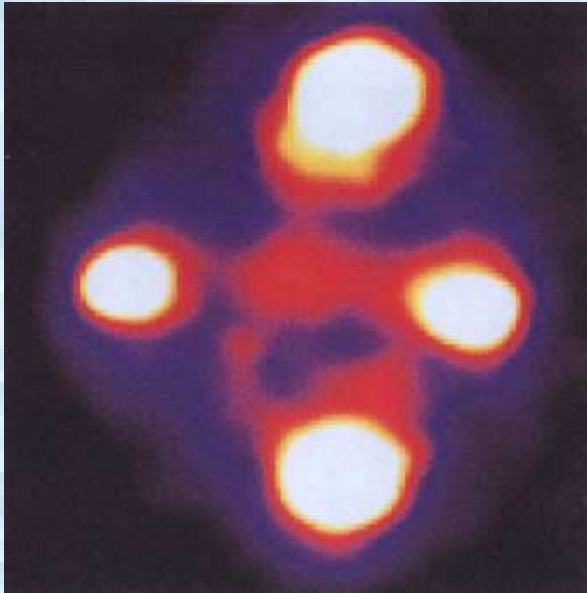
Tuttavia in un secondo la luce percorre **300.000 chilometri**, mentre nello stesso tempo un corpo cade, nel campo gravitazionale terrestre, di soli **4,9 metri**: la deflessione verso il basso della luce dei fari della nostra automobile è perciò troppo piccola per essere osservata, a dispetto della fantasia degli sceneggiatori di "Topolino"!

Considerando però masse maggiori di quella terrestre, ad esempio quella del Sole, e distanze considerevoli, la deflessione potrebbe diventare misurabile. È quello che ha fatto il fisico britannico **Arthur Eddington** (1882-1944), amico di Einstein e suo grande sostenitore.



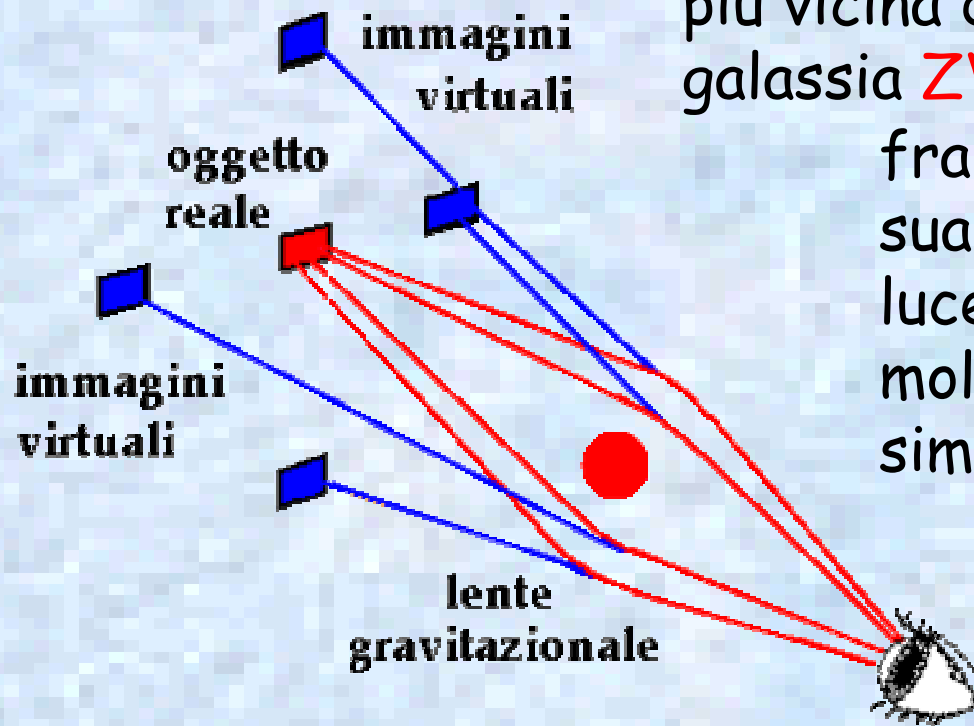
Il 29 maggio 1919 Eddington guidò una spedizione sull'isola di Principe, nel Golfo di Guinea, per studiare una **eclisse totale di Sole** visibile dall'Africa Centrale, l'unica condizione per poter osservare le stelle in vicinanza del Sole, essendo quest'ultimo completamente oscurato dal disco lunare. Eddington e i suoi collaboratori costatarono che la luce delle stelle veniva effettivamente deflessa presso il bordo del disco solare, di un angolo stimato in **1",76**: esattamente quanto previsto dalla teoria einsteiniana della gravitazione. Questa fu la prima grande conferma sperimentale della Relatività Generale.





Un altro fenomeno previsto dalla Relatività Generale è la cosiddetta **lente gravitazionale**. Quello che vedete qui a fianco è il **quasar G2237+0305**, distante da noi un miliardo di anni luce, che ha un'incredibile forma a croce: com'è possibile? In realtà si tratta di una illusione ottica. Una galassia a noi molto più vicina del quasar, in questo caso la galassia **ZW 2237+030**, è interposta fra noi e il quasar più lontano. La

sua grande massa ne curva la luce, in modo da provocare una moltiplicazione dell'immagine, simile a quella causata da una lente di vetro, come si vede qui a sinistra!



Einstein aveva previsto questo fenomeno fin dal 1937, ma esso fu osservato per la prima volta solo il 29 marzo 1980.



Se poi la sorgente luminosa ed il corpo celeste che funge da lente gravitazionale sono posti esattamente sulla stessa linea di vista rispetto all'osservatore, come si vede qui sopra in conseguenza della simmetria circolare della configurazione ottica si osservano non delle immagini multiple della sorgente, disposte a formare una croce, ma addirittura un anello luminoso centrato sulla posizione in cielo della lente gravitazionale: è quello che si chiama un **anello di Einstein!**

Einstein prevede altri fenomeni incredibili e lontani dal senso comune: avvicinandosi a una grande massa, **gli intervalli di tempo di dilatano**: è questo il motivo per cui, nel famoso film "Interstellar", l'astronauta Cooper si avvicina al buco nero **Gargantua** e torna sulla Terra più giovane di sua figlia Murph: vicino a quella massa per lui sono passate solo poche ore, ma per sua figlia sulla Terra sono trascorsi 51 anni!!

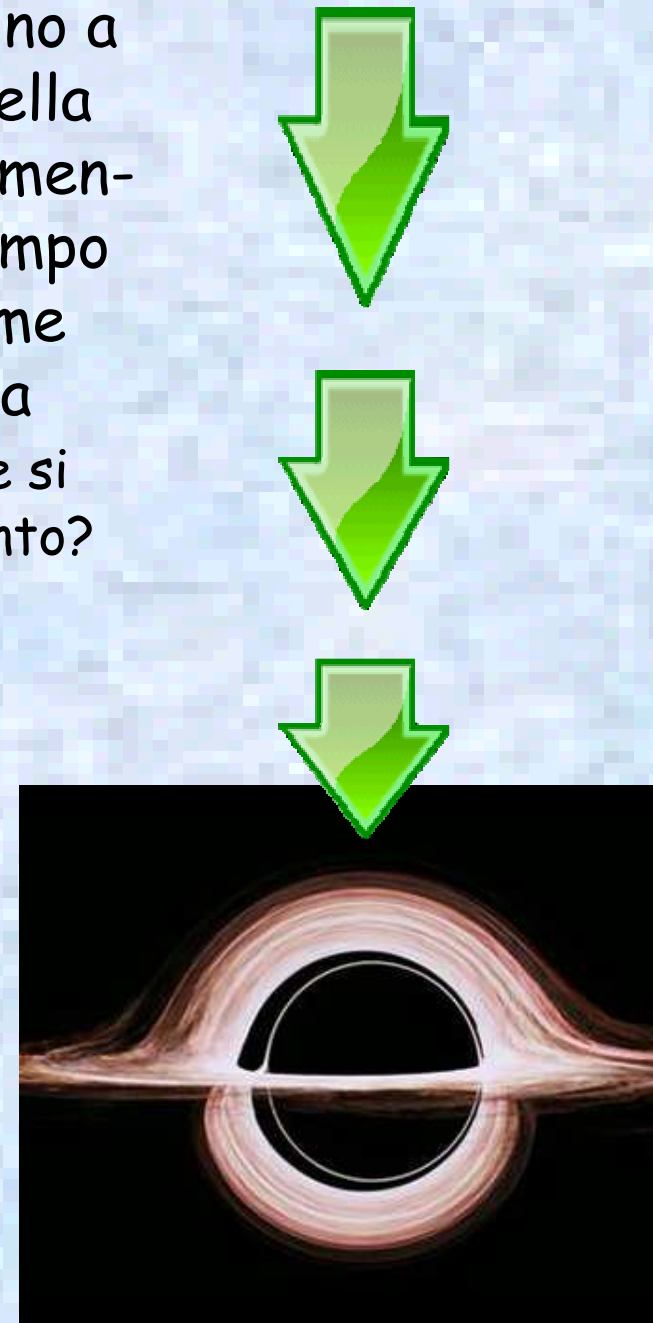


la "Endurance"

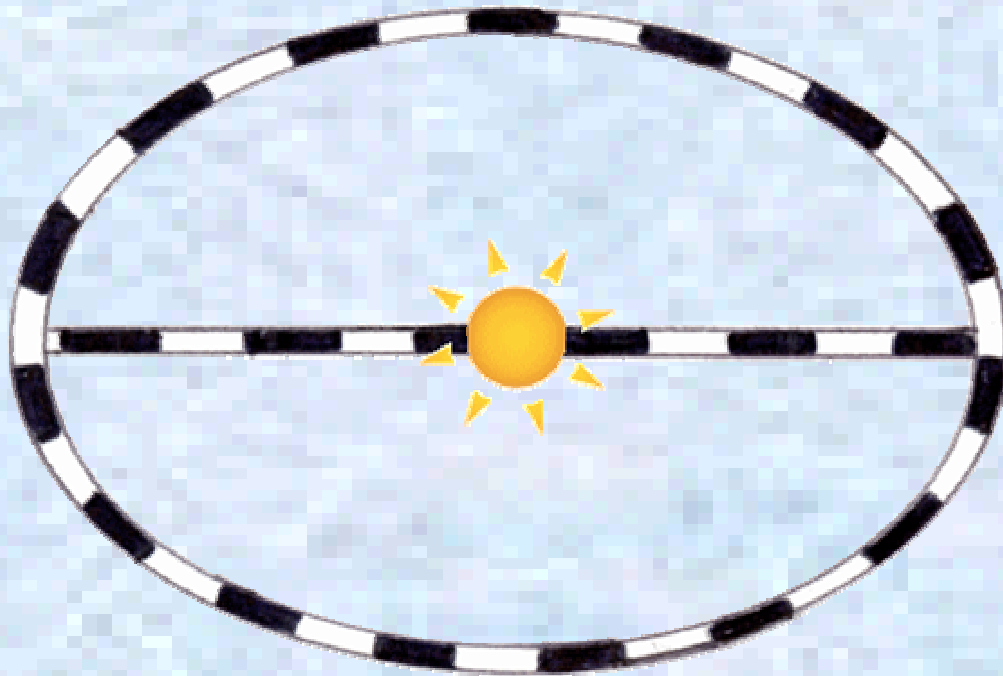
Gargantua

Se gli intervalli di tempo si dilatano vicino a una grande massa, siccome la velocità della luce è la stessa in ogni sistema di riferimento, ne consegue che, scendendo in un campo gravitazionale, le aste si accorciano, come dimostra lo schema a fianco, che utilizza ancora il buco nero "Gargantua". Ma come si può verificare sperimentalmente questo assunto? La freccia più in alto è più lunga di quella più vicina al buco nero, ma se la porto più vicina a Gargantua, la sua lunghezza si contrae e diventa lungo quanto l'altra. Con questo sistema perciò non potremo verificare un bel niente. E allora?

Ricorriamo a un « **esperimento mentale** »: supponiamo che un geometra con poteri sovrumani voglia misurare il diametro D dell'orbita terrestre...



...lo fa adoperando delle aste, tutte lunghe un metro. Con le stesse aste, poi, misura anche la circonferenza C dell'orbita. Eseguendo il rapporto tra le misure così ottenute, egli trova:



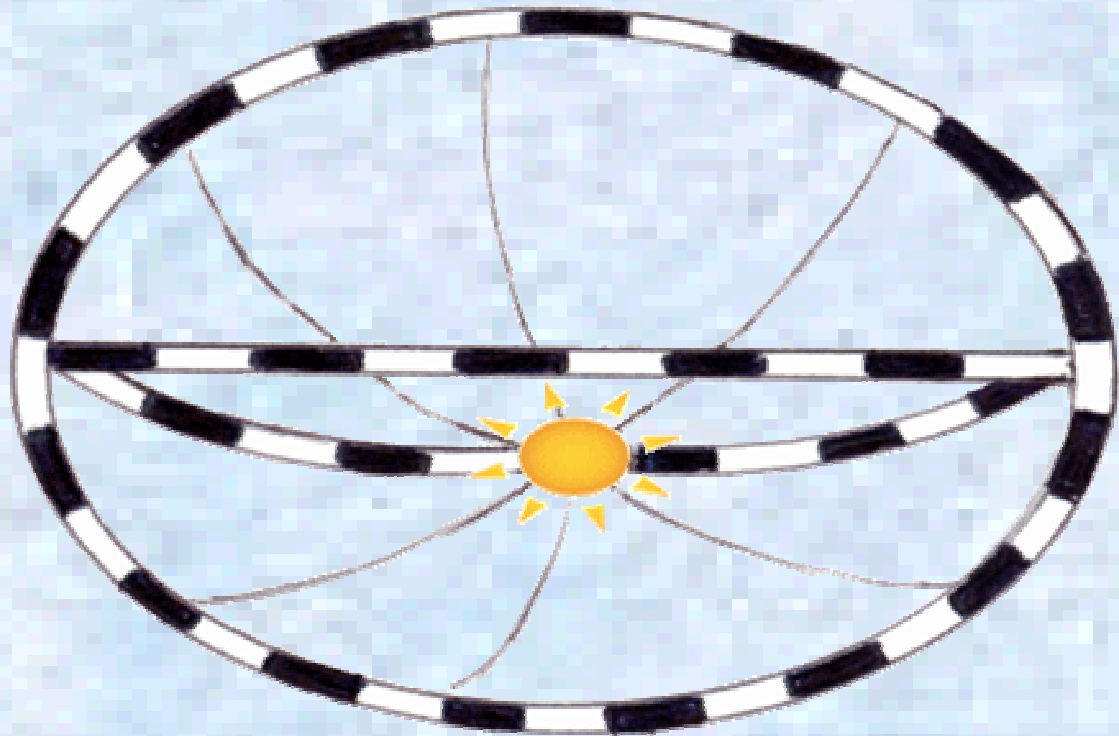
$$\frac{C}{D} = 3,1415924853\dots$$

Ma tale rapporto (**pi greco**) secondo le previsioni della geometria euclidea dovrebbe essere:

$$\frac{C}{D} = 3,1415926536\dots$$

Per la prima volta, dunque, **Euclide ha fallito**: aveva previsto che il rapporto tra circonferenza e diametro di un cerchio fosse uguale a π , ed invece si è registrato un errore di circa 60 parti per miliardo! Come si spiega tale discrepanza?

Perché la geometria euclidea non vale più? Perché le aste che vengono allineate per misurare il diametro, essendo dirette secondo le linee di forza del campo gravitazionale del Sole, subiscono la massima contrazione gravitazionale, e quindi occorrono più regoli di quanti ne occorrerebbero nel caso in cui la massa solare non esistesse. Invece, i regoli usati per la circonferenza sono perpendicolari alle linee di forza, e quindi la loro contrazione è nulla. Per questo il rapporto C/D risulta minore del classico valore di π greco. Ecco perché, nello spazio interplanetario, la geometria euclidea non vale più. La Relatività Generale di Einstein ha fatto cadere un'altra testa illustre!



Dante Alighieri sembra aver anticipato ancora una volta gli sviluppi della Fisica moderna quando, ormai giunto alla fine del suo viaggio ultraterreno, ci dice:

« Qual è il geometra che tutto s'affige
per misurar lo cerchio, e non ritrova,
pensando, quel principio ond'elli indige,
tal era io a quella vista nova... »
(Par. XXXIII, 133-136)



(il "principio" di cui il geometra "indige",
cioè "manca", per riuscire a misurare il cerchio, è proprio il π)
Il risultato ottenuto si può spiegare anche in un altro modo.
Supponiamo di scavare una buca per terra e di porre su di
essa un bastoncino. Due file di formiche attraversano la buca,
una sul bastoncino teso fra due estremi opposti e l'altra sul
fondo. Se partono insieme, la prima schiera precederà la
seconda, perché il tragitto più breve tra due punti è quello
rettilineo. Se però la buca è ampia e poco profonda...

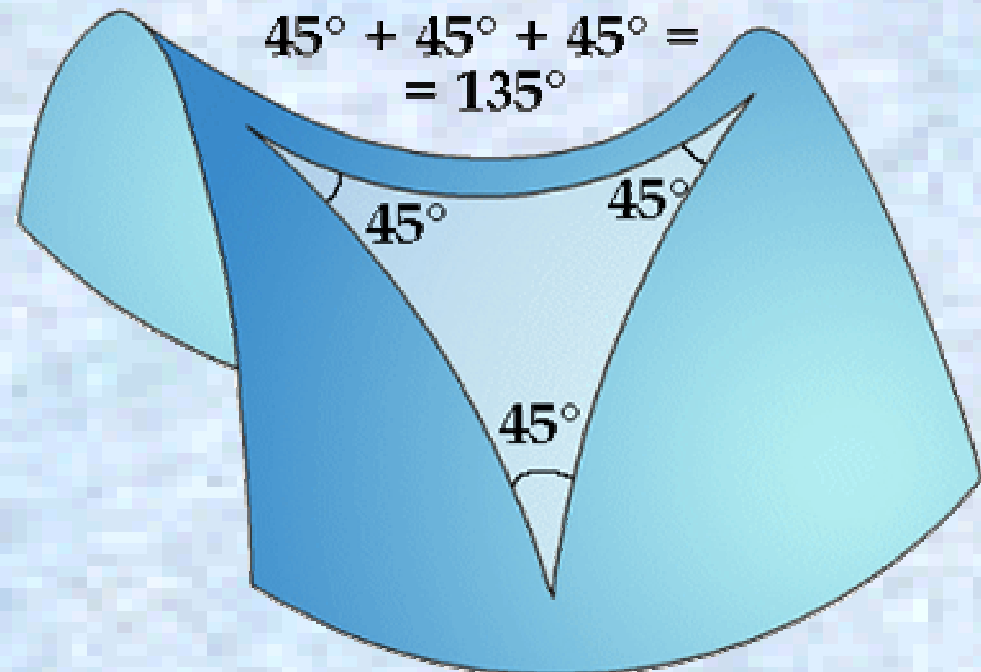
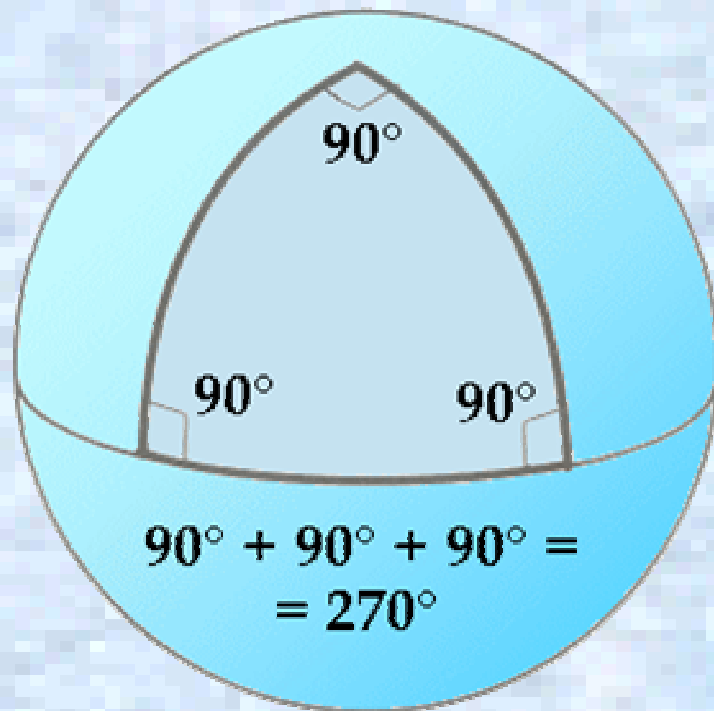
...anche la seconda fila di formiche crederà di aver percorso il diametro della buca. In effetti lo ha fatto, ma... in un diverso sistema di riferimento! Quindi, il risultato della diminuzione del valore di pi greco rispetto alle misurazioni teoriche può anche essere espresso dicendo che **lo spazio si è curvato!**

Questo nuovo modo di interpretare il campo gravitazionale è rivoluzionario. Se una formica geometra misurasse con opportuni regoli la circonferenza della buca ed il suo diametro sul bastoncino, troverebbe esattamente il rapporto π . Se invece misurasse il rapporto C/D sul fondo della buca, troverebbe con stupore che $C/D > \pi$, esattamente come abbiamo fatto noi. Ciò può essere descritto in un altro modo: **la massa "deforma" lo spazio circostante, e ci costringe a cambiare la geometria necessaria a descriverlo.**

**a
bug's
life**



Per un noto teorema della geometria euclidea, se misuriamo gli angoli di un triangolo disegnato su un piano, troviamo che **la loro somma è esattamente 180°** . Invece se il triangolo è disegnato su una sfera, tale somma è **maggiore di 180°** ! Per esempio, il triangolo formato da due meridiani perpendicolari e dall'equatore ha tre angoli retti, e la somma dei suoi angoli interni è di **270°** , come si vede qui sotto a sinistra!

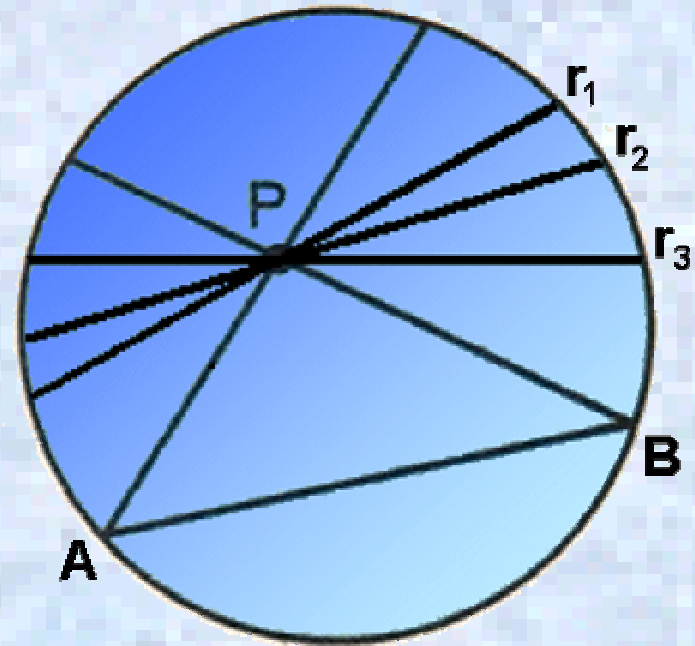


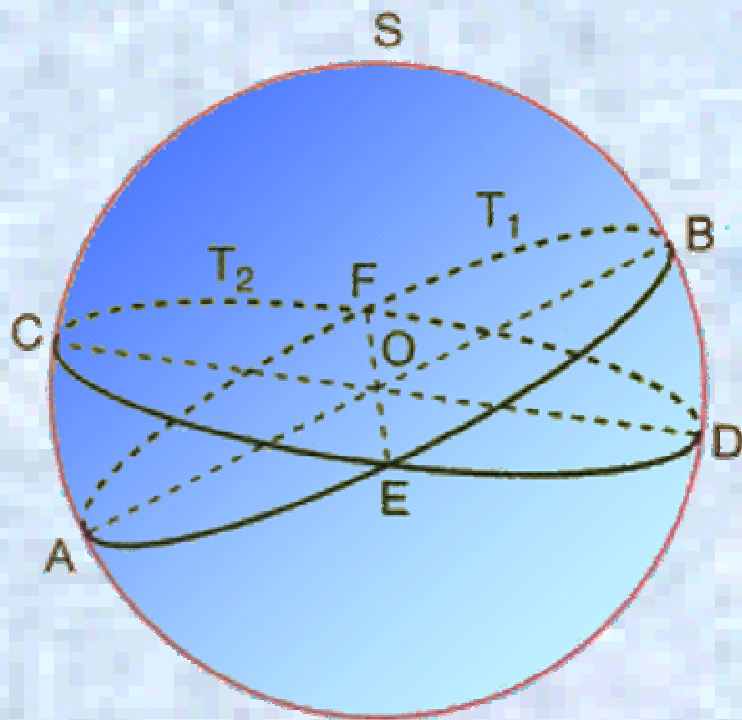
Se invece misuriamo tale somma in un triangolo disegnato su una superficie a sella, come quella a destra, si trova che anche essa risulta minore di 180° . Per esempio, su tale superficie può essere disegnato un triangolo con tre angoli di 45° , la cui somma degli angoli interni vale perciò **135°** !

EUCLIDES
AB OMNI NĒVO VINDICATUS;
SIVE
CONATUS GEOMETRICUS
QUO STABILIUNTUR
Prima ipsa universae Geometriae Principia.
AUCTORE
HIERONYMO SACCHERIO
SOCIETATIS IESU
In Ticinensi Universitate Mathematicos Professore.
OPUSCULUM
EX.^{MO} SENATUI
MEDIOLANENSI
Ab Auctore Dicitum.
MEDIOLANI, MDCCLXXXIII.
Ex Typographia Pauli Antonii Montani. Superiorum permiffi.

Girolamo Saccheri (1667-1733) fu il primo a postulare l'esistenza di altre geometrie, dette **NON EUCLIDEE**, in cui valgono postulati diversi da quelli che noi studiamo nei nostri corsi di Matematica. In particolare, il russo **Nikolaj Lobachevskij** (1793-1856) e l'ungherese **Janos Bolyai** (1802-1860) nel 1832 costruirono una geometria in cui per un punto passano infinite rette parallele a una retta data, e non una sola, come fissato da Euclide!

Come realizzare in pratica questa strampalata geometria? Basta chiamare "piano" quello che per Euclide è un **cerchio**, e "retta" ogni **corda** dello stesso cerchio. Se definisco "**rette parallele**" due corde del cerchio che non si intersecano mai, ci si rende conto che per il punto P passano infinite "rette parallele" alla "retta" AB , perché non la intersecano mai! Questa nuova geometria viene chiamata **iperbolica**. Si può dimostrare che in essa valgono ancora molti teoremi della geometria euclidea: ad esempio gli angoli opposti al vertice sono congruenti, ma non è più vero che la somma degli angoli interni di un triangolo è pari a 180° : è invece sempre **minore di 180°** . È possibile invece realizzare in pratica una geometria non euclidea in cui per un punto fuori di una retta non passa nessuna parallela a una retta data?





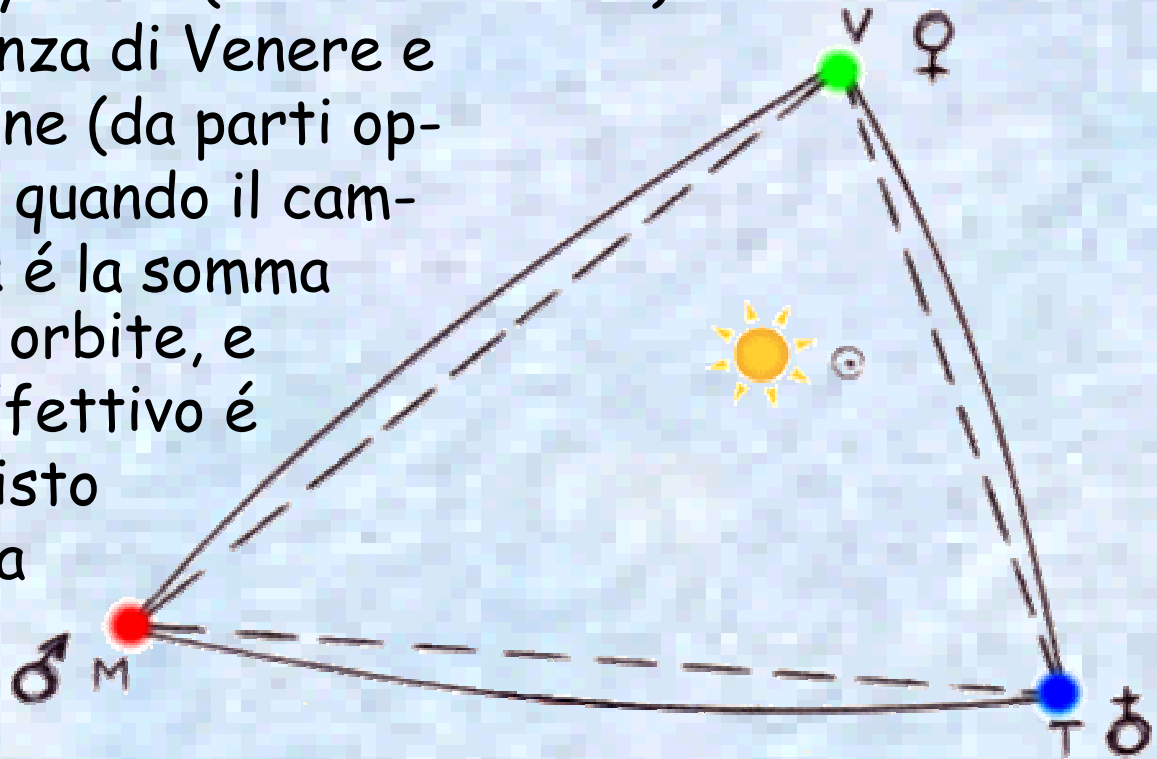
Sì, è possibile, e ci riuscì nel 1854 Bernhard Riemann (1826-1866). Egli chiamò "piano" quella che per Euclide è la superficie di una sfera S , e "rette" i suoi cerchi massimi, ad esempio T_1 e T_2 . Come si vede, nessun cerchio massimo può evitare di intersecarne un altro, e dunque le rette parallele non esistono più, in accordo con il "nuovo" postulato di Riemann!

Non è difficile dimostrare che in questa geometria non esistono triangoli simili, salvo quando sono anche congruenti, e che la somma degli angoli interni di un triangolo è sempre **maggiore di 180°** . Tale geometria viene detta **ellittica**.

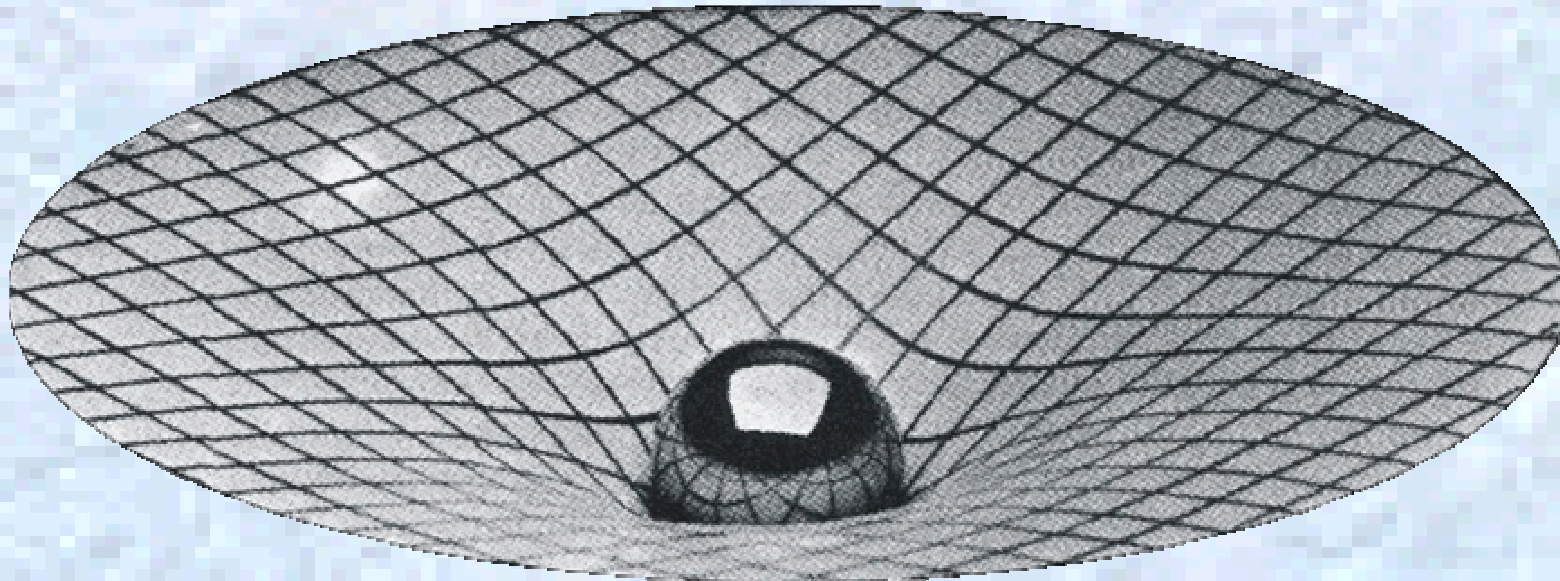
Come si vede, le geometrie non euclidee vanno costruite su superfici curve, non più piane. La sfera viene chiamata una superficie **a curvatura positiva**, quella a forma di sella è invece una superficie **a curvatura negativa**.

Ora, se congiungiamo la Terra, Venere e Marte con tre segmenti e misuriamo gli angoli del triangolo che ha per vertici questi tre pianeti, si giunge ad una scoperta sconvolgente: la loro somma risulta maggiore di 180° ! Ciò significa che la massa del Sole conferisce allo spazio circostante una **curvatura positiva**. Una verifica sperimentale rigorosa di questo fatto fu compiuta dall'astrofisico americano **Irwin Shapiro** (1929-) con il radiotelescopio di Haystack (Massachusetts).

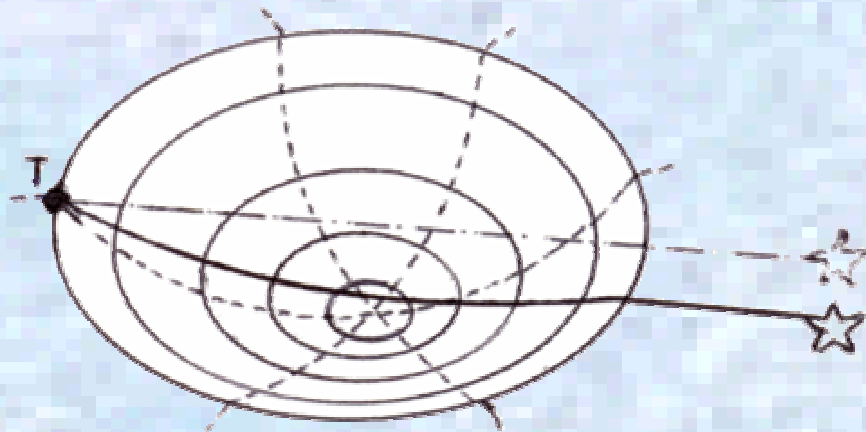
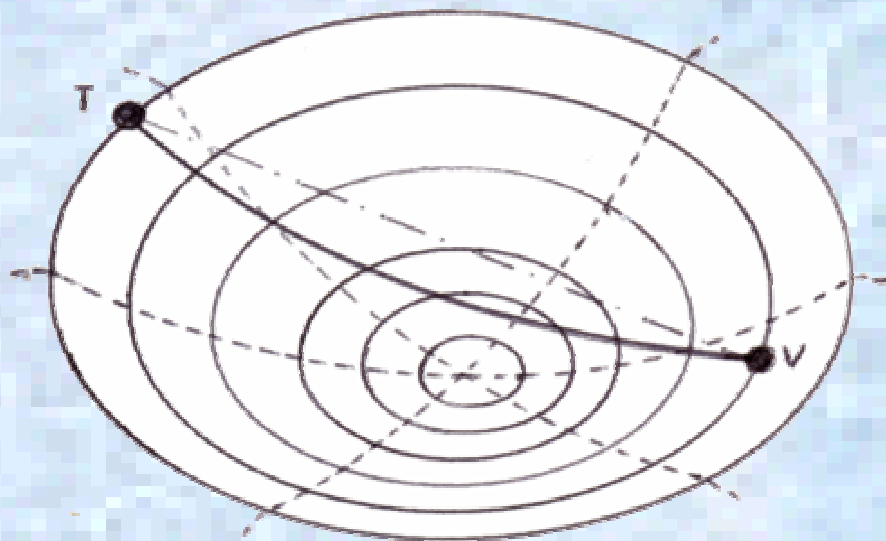
Shapiro misurò la distanza di Venere e della Terra in opposizione (da parti opposte rispetto al Sole), quando il cammino delle onde RADAR è la somma dei due raggi delle loro orbite, e trovò che il cammino effettivo è maggiore di quello previsto dalla geometria euclidea di circa **36 Km**. Quale miglior conferma?



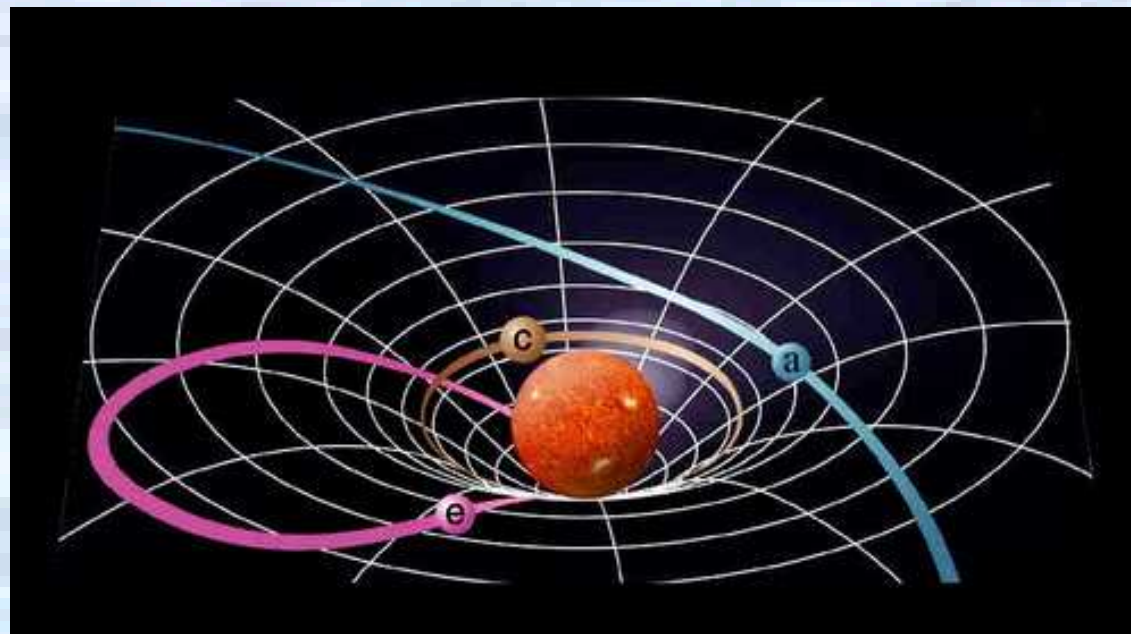
Tutti sanno che, in una superficie piana, e quindi in uno spazio euclideo, il cammino più breve tra due punti (detto **geodetica**) è un segmento di retta. Ma, se le masse sono in grado di modificare in modo evidente la geometria dello spazio circostante, questo varrà anche per le geodetiche, che muteranno in maniera sensibile! Se gioco a biglie sulla superficie piana del mio letto, una volta lanciate esse si muoveranno lungo traiettorie pressoché rettilinee, cioè lungo le geodetiche. Ma se sulla coperta pongo una pallina d'acciaio, con il suo peso essa deforma la superficie piana, incurvandola verso il basso, così:



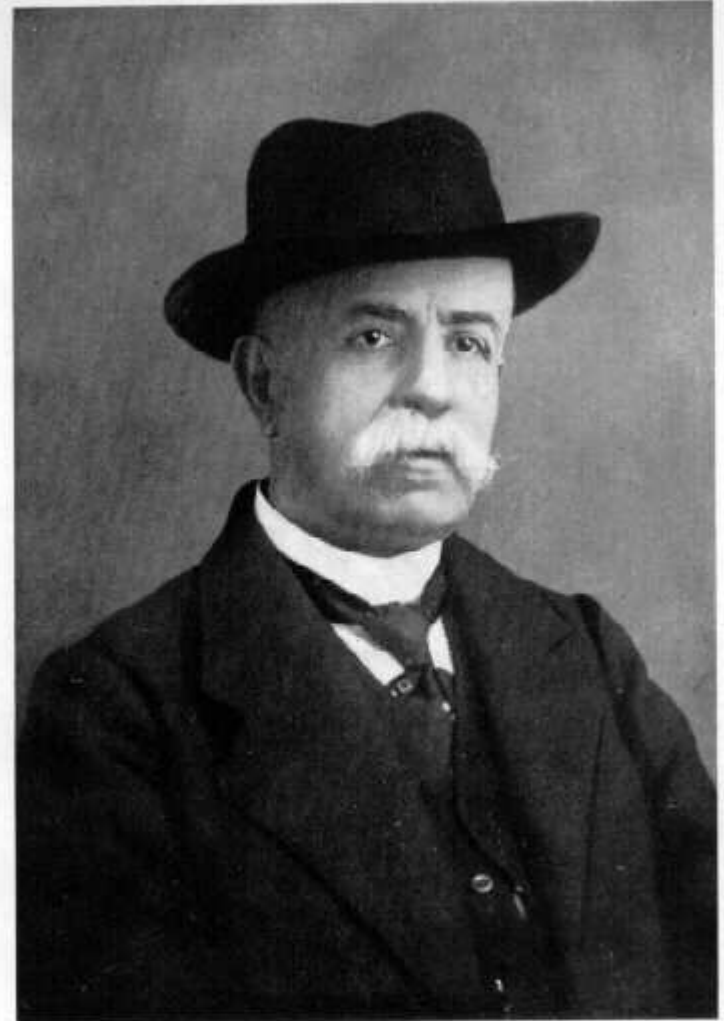
Se si lancia una biglia su questa coperta incurvata, la sua traiettoria **non sarà più rettilinea ma curva**, apparendo accelerata ed attratta dalla biglia centrale. In pratica i pianeti sono in moto intorno al sole perchè, nello spazio incurvato dalla fortissima gravità dell'astro, essi seguono le geodetiche della sua geometria non euclidea, che non sono più linee rette! La curvatura dello spazio causata dalla gravità può spiegare benissimo anche la **curvatura dei raggi di luce** di cui si è già parlato: non sono essi che si incurvano, ma lo spazio in cui viaggiano, continuando a seguire le "nuove" geodetiche dello spazio!



Come già successo con la Relatività Ristretta, Einstein cambiò completamente la prospettiva dalla quale guardare l'universo. Isaac Newton infatti descrisse i moti dei corpi nello spazio ipotizzando che **tra due masse si eserciti una forza**, e dimostrando che essa porta i pianeti ad orbitare intorno al Sole. Invece Einstein tolse di mezzo qualunque interazione reciproca: il pianeta non segue una traiettoria ellittica perchè è attratto dal Sole, ma perchè quest'ultimo con la sua massa deforma la geometria dello spazio-tempo, e nella nuova geometria la geodetica non è più una linea retta!



Tutto ciò si può sintetizzare efficacemente affermando che Albert Einstein ha **geometrizzato la gravitazione universale**, trasformandola da una descrizione **dinamica** (cioè sotto forma di forza) ad una puramente **geometrica**. Questa è la maggiore fra tutte le intuizioni di Einstein, tanto che il fisico Richard P. Feynman ebbe a commentare: « **Non riesco proprio a capire come abbia fatto a venirgli in mente!** » Ma Einstein non sarebbe mai arrivato ad una tale intuizione, senza l'aiuto del matematico romagnolo **Gregorio Ricci Curbastro** (1853-1925), fondatore del calcolo differenziale assoluto, una nuova branca della matematica con la quale Einstein fu in grado di descrivere la nuova struttura non euclidea dello spazio-tempo incurvato!



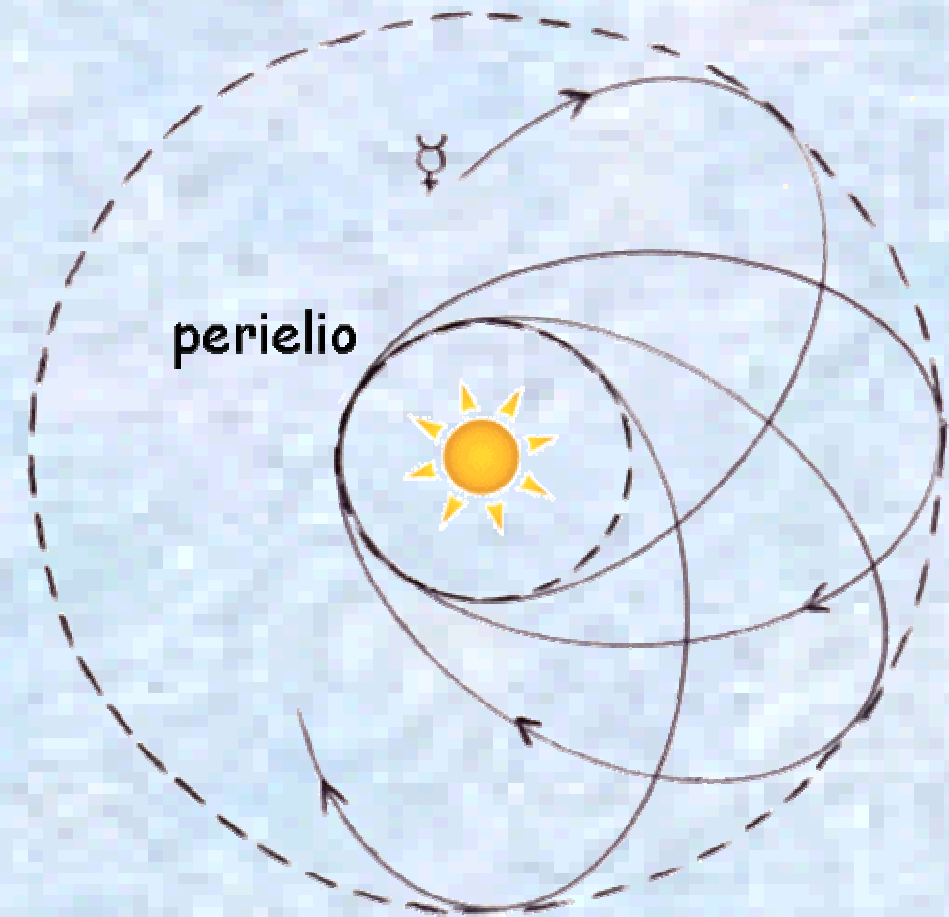
Gregorio Ricci Curbastro

La deflessione della luce e l'effetto della lente gravitazionale ha permesso di tracciare una mappa precisa della **distribuzione della massa nell'universo**, e si è visto che effettivamente la maggior parte della materia non è visibile con alcun tipo di telescopio: è la conferma dell'esistenza della **materia oscura**, introdotta per spiegare come mai la velocità di rotazione delle galassie sia diversa da quella calcolata tenendo conto della loro massa visibile. **Fabiola Gianotti** (1960-), dal 1 gennaio 2016 direttore generale del



rettore generale del **CERN** di Ginevra, assumendo la carica ha dichiarato che la sua priorità consisterà proprio nella ricerca delle sfuggenti particelle (**WIMP**) che costituiscono la materia oscura grazie al grande acceleratore **LHC!**

Una sola prova sperimentale della relatività generale era nota prima della sua formulazione da parte di Einstein: la **precessione del perielio di Mercurio**, fenomeno che consiste nella lenta rotazione del perielio del primo pianeta attorno al Sole. Il moto orbitale di questo pianeta assomiglia insomma ad una stella di Natale, piuttosto che ad un'ellisse o ad un'altra linea chiusa. Tale fenomeno, come oggi sappiamo, è proprio di tutti i pianeti, ma a quei tempi quello di Mercurio era l'unico noto, essendo esso stesso di lievissima entità: appena 43" in un secolo. Nell'ottocento tale precessione era spiegata con l'esistenza di un ulteriore pianeta più vicino al Sole, detto **Vulcano**, invisibile a causa del fulgore solare, che perturberebbe l'orbita di Mercurio.



Durante l'eclisse solare totale del 29 luglio 1878, **James Craig Watson** (1838-1880), direttore dell'Osservatorio di Ann Arbor (Michigan), affermò di aver visto un pianeta sconosciuto molto vicino al punto in cui i calcoli avevano previsto che avrebbe dovuto trovarsi Vulcano, ma la scoperta non fu confermata da ulteriori osservazioni. Di esso si impossessarono poi astrologi, maghi e seguaci di dottrine esoteriche, screditando l'ipotesi Vulcano. Nel 1916, infine, Einstein dimostrò che la precessione del perielio di Mercurio è dovuta ad una particolare soluzione delle equazioni della Relatività Generale. Era la pietra tombale sulla leggenda di Vulcano? No, perché **Gene Roddenberry** (1921-1991), creatore dell'universo di **Star Trek**, ha dato il nome di Vulcano all'immaginario pianeta patria del celeberrimo **Mister Spock!**



A proposito di Star Trek, è stato questo franchise a rendere popolare nel mondo il cosiddetto "motore a curvatura", ma pochi sanno che esso funziona proprio grazie alla Relatività Generale. Anziché accelerare per coprire grandi distanze, si potrebbero infatti... **accorciare le distanze medesime**. Questo risultato potrebbe essere ottenuto generando una distorsione spaziotemporale in grado di contrarre lo spazio davanti all'astronave e dilatarlo dietro di essa. Una formica che cammina



lungo un elastico teso fra due chiodi deve percorrere una distanza assai minore se l'elastico viene accorciato davanti alla formica e allungato dietro di essa, seguendola nel suo moto. Lo stesso vale per l'Enterprise...

Un motore in grado di ottenere questo risultato viene chiamato **propulsore a curvatura (warp drive)**: secondo il film "**Star Trek: Primo Contatto**", il primo volo a curvatura della storia sarebbe avvenuto il 5 aprile 2063 sopra il Montana. Inutile dire che i motori a curvatura, forse la prima applicazione ingegneristica della Relatività Generale, sono oggi del tutto irrealizzabili, vista l'impossibilità pratica di creare una distorsione spaziotemporale controllata, sia per l'immensa energia necessaria allo scopo (nella saga di Star Trek si usano motori ad **antimateria**, fuori della nostra portata). Per parecchio tempo ancora dovremo accontentarci di vedere sfrecciare l'Enterprise sugli schermi TV, prima di poter davvero arrivare là dove nessuno è mai giunto prima...



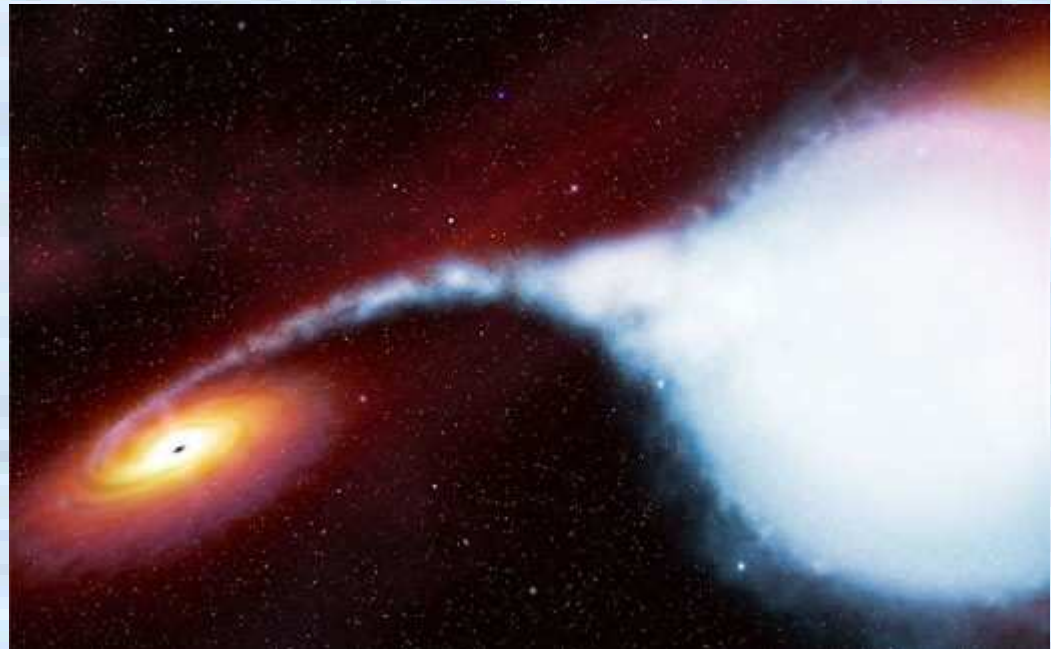
Una menzione particolare merita il matematico e astronomo tedesco **Karl Schwarzschild** (1873-1916), il quale, poco prima di morire nell'immenso carnaio della Prima Guerra Mondiale a soli 42 anni, pubblicò una particolare soluzione delle equazioni della Relatività Generale. Essa dimostra la possibilità che la **velocità di fuga** da una massa, cioè la velocità necessaria per uscire dal suo campo gravitazionale, superi la velocità della luce. Se ciò avviene, nulla, neppure la luce può lasciare quella



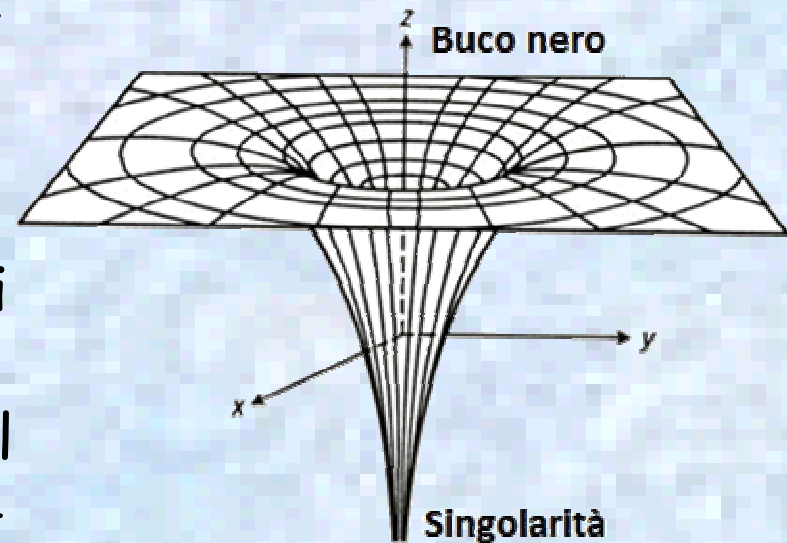
massa, che si ritira in un completo isolamento dentro il cosiddetto "**orizzonte degli eventi**". Un astro la cui velocità di fuga supera la velocità della luce prende il nome di **buco nero**. Tale termine fu coniato dall'americano **John Archibald Wheeler** (1911-2008), che si è ispirato - anche in questo caso! - a una puntata di "Star Trek". Ma una stella con queste caratteristiche può esistere veramente? Molti a lungo pensarono di no...

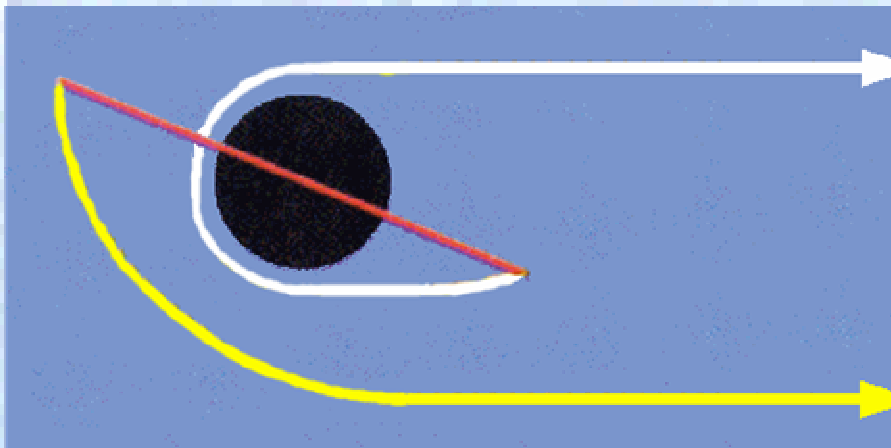
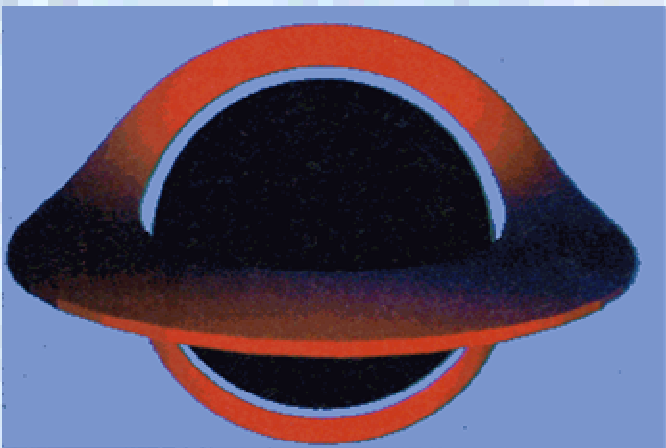
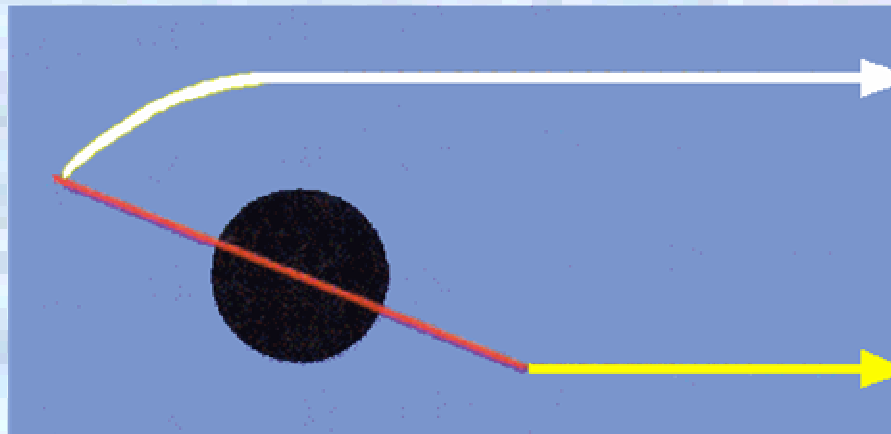
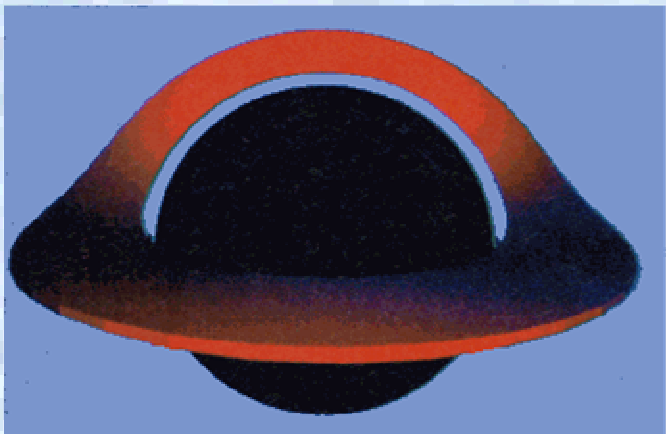
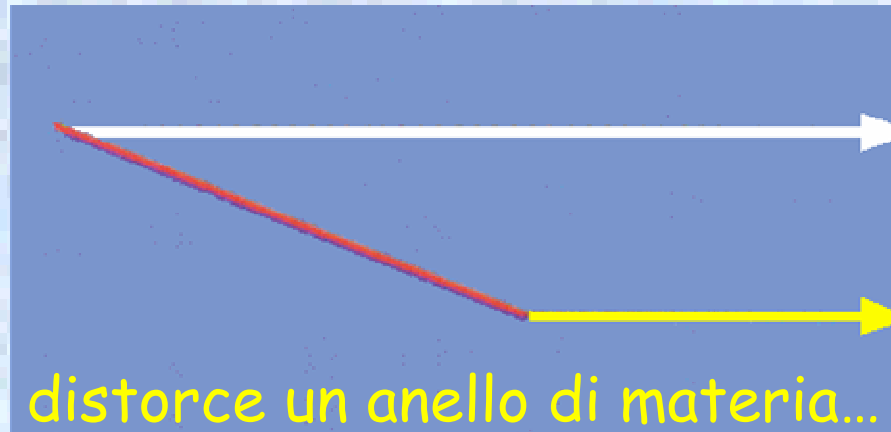
...Infatti la velocità di fuga da un corpo celeste è tanto maggiore quanto maggiore è la massa e quanto minore è il suo raggio, cioè quanto più è **denso**, come Schwarzschild ha dimostrato. Una stella come il nostro **Sole**, che ha un diametro pari ad **un milione e 391 mila chilometri**, dovrebbe ridursi ad un raggio di appena **6 km**, per degenerare in un buco nero! Un simile astro sarebbe così denso, che un cucchiaino della sua materia peserebbe **20 miliardi di tonnellate!!!**

Eppure, la scoperta nel 1964 di un'intensissima sorgente di raggi X chiamata **Cygnus X-1** è compatibile solo con l'esistenza di un buco nero compagno di una stella supergigante che la "cannibalizza", strappandole materia con la sua eccezionale forza di gravità. Come è possibile?



Una stella brilla perché al suo interno la **forza peso** degli strati più esterni è controbilanciata dalla **pressione di radiazione** delle reazioni nucleari che hanno luogo al suo interno. Quando però il "combustibile" nucleare comincia a scarseggiare, la forza peso ha la meglio e la stella "**collassa**" riducendo sempre più il proprio raggio. A un certo punto la pressione è tale che gli **elettroni** degli atomi sono spinti contro i **protoni**; la reazione nucleare tra di essi dà vita a dei **neutroni**, e nasce una **stella di neutroni**, caldissima e densissima. Se la massa iniziale della stella supera le **100 masse solari**, tale stella diventerà così piccola e densa da trasformarsi in un buco nero. La sua straordinaria gravità distorce in modo incredibile le traiettorie dei raggi di luce, tanto da permettere di vedere anche ciò che c'è dietro di esse, come si vede nelle immagini seguenti, e lo spazio viene curvato al punto da dare vita ad un "pozzo gravitazionale" di profondità infinita!





E non è finita: nel 1973 **Stephen Hawking** (1942-) dimostrò che questi "buchi nel cielo" (come sono stati definiti i buchi neri) non sono poi così "neri" come si potrebbe immaginare. Infatti la meccanica quantistica insegna che il vuoto è instabile: si formano in continuazione **coppie particella-antiparticella**, e se una di esse si forma proprio sull'orizzonte degli eventi, la prima è inghiottita dal buco, l'altra invece se ne va. Conclusione: i buchi neri prima o poi evaporano, generando la cosiddetta "**radiazione di Hawking**". Ma occorre un tempo lunghissimo: oltre **10^{66} anni!** Un buco nero evapora così lentamente che la sua temperatura superficiale è di appena **60 nanoKelvin**. Se evapora, possiede un'entropia; ma come può averla un corpo perfettamente sferico? Quest'ultimo problema, nessuno finora è ancora riuscito a risolverlo; forse ce la farà uno di voi!



La soluzione di Schwarzschild delle Equazioni di Einstein è la più semplice in grado di descrivere un buco nero statico, ma il neozelandese **Roy Patrick Kerr** (1934-) nel 1963 ne ha trovata un'altra, oggi detta **soluzione di Kerr-Newman**, che descrive un buco nero rotante. Tale soluzione prevede che un buco nero rotante ha non uno ma **DUE** orizzonti degli eventi; solo attraversando il secondo non si può più tornare indietro. In teoria, entrando nel volume tra i due orizzonti degli eventi, detta **ergosfera**, a patto di resistere alle terribili forze mareali del buco nero, è possibile fuoriuscire...

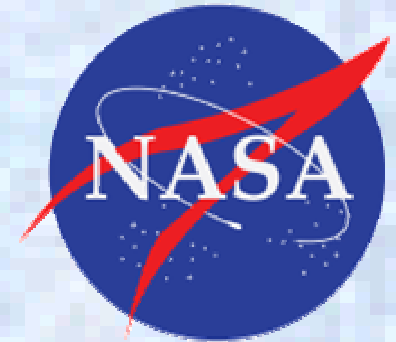


getto di raggi X da un buco nero rotante

in un altro spazio e in un altro tempo! In altre parole, un buco nero di Kerr potrebbe costituire una vera e propria **macchina del tempo**, o potrebbe condurci addirittura in un **universo parallelo!**

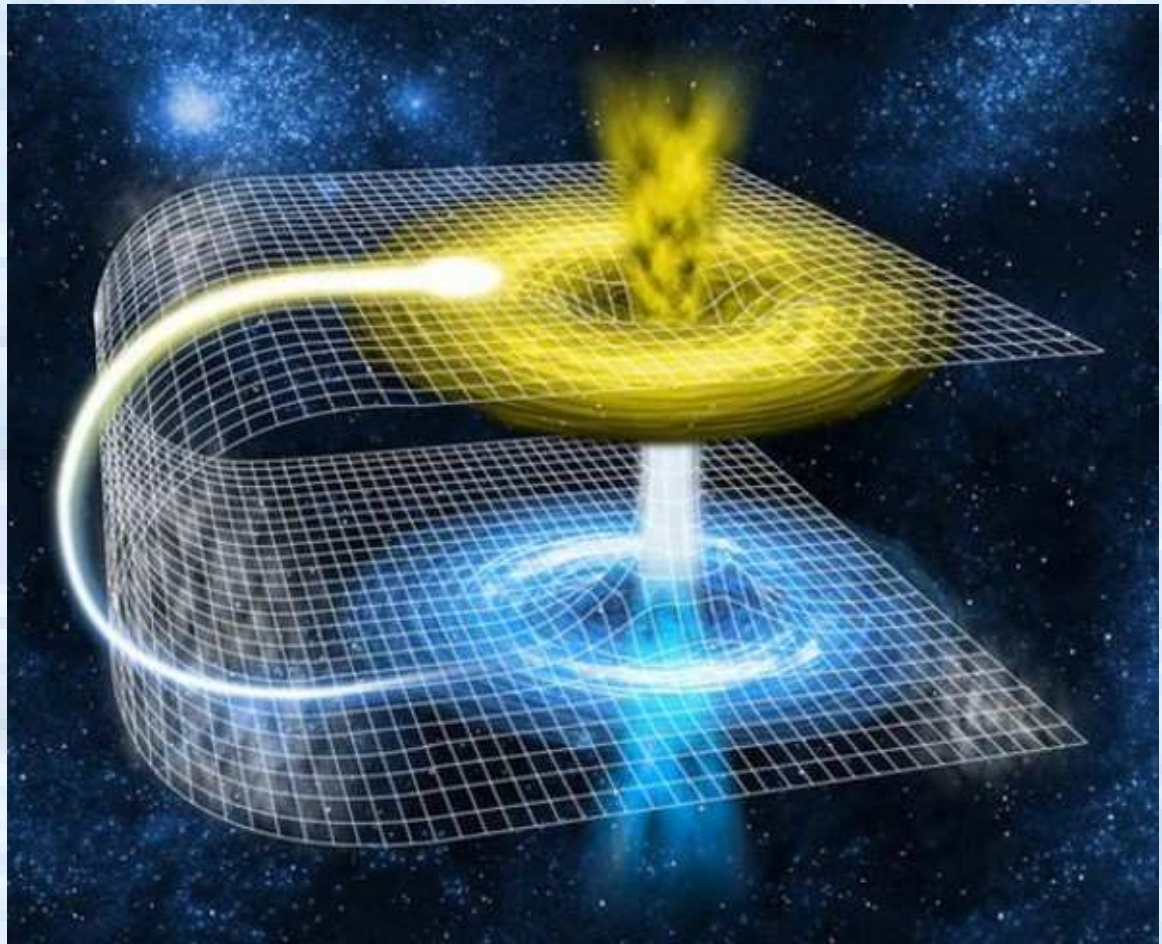


Accanto: l'effetto di "lente gravitazionale" prodotto da un buco nero contro uno sfondo stellato per effetto della deflessione della luce prevista dalla Relatività Generale
(foto NASA)
Sembra davvero un... buco nel cielo!



Ma non basta: oggi sappiamo che, quanto maggiore è la massa di un buco nero, tanto minore può essere la sua densità quando si forma. Ad esempio, la densità di un buco nero generato dal collasso di una massa 100.000 volte maggiore di quella del Sole può non essere superiore a quella dell'acqua. Un oggetto di massa ancor maggiore potrà collassare già ad una densità assai minore. Continuando ad estrapolare, si scopre con sorpresa che la densità richiesta per formare un buco nero di massa pari a quella del nostro universo sarà pressappoco uguale alla... densità media dell'universo osservabile! Quindi, anche **l'intero nostro universo sarebbe un... buco nero!**

In collaborazione con il fisico israeliano **Nathan Rosen** (1909-1995), Albert Einstein teorizzò l'esistenza dei cosiddetti "**cunicoli di Einstein-Rosen**" o "**wormhole**", per l'analogia con le gallerie scavate da un verme dentro una mela. In pratica, si tratta di due pozzi gravitazionali sul modello di quelli prodotti da due buchi neri, così profondi da comunicare tra di loro. Essi "**bucherebbero**" il tessuto dello spazio-tempo, mettendo in collegamento tra di loro due regioni assai lontane dell'universo. La loro esistenza non è mai stata dimostrata, ma essi permetterebbero di coprire in un tempo brevissimo distanze siderali per noi altrimenti incolmabili. Infatti, nell'universo del solito Star Trek...



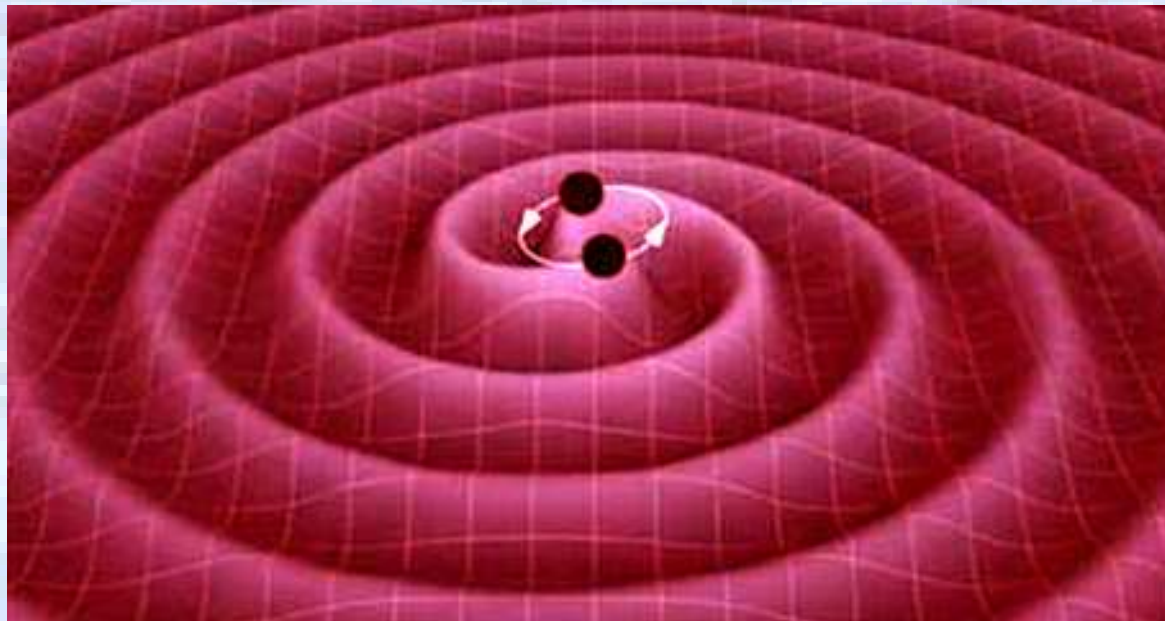
...un **tunnel spaziale** al largo del pianeta **Bajor** permette di collegare fra di loro due quadranti molto distanti della nostra Galassia!

Recentissimi studi avvicinano i wormhole al fenomeno dell'**entanglement** o correlazione tra particelle quantistiche, che anche se separate e portate ai due lati opposti dell'universo conservano le stesse proprietà, come è stato dimostrato sperimentalmente: secondo **Kristan Jensen** e **Andreas Karch** dell'University of Victoria, in Canada, esse altro non sarebbero che due facce della stessa medaglia viste attraverso il tunnel che unisce una coppia di buchi neri. In altre parole l'entanglement sarebbe la rappresentazione **in 3 dimensioni** (senza la gravità) di quello che i wormhole sarebbero in un universo **a 4 dimensioni**, compresa la gravità. Se ciò fosse provato, Relatività Generale e Meccanica Quantistica potrebbero forse mostrarsi formulazioni diverse di una stessa teoria!



da Star Trek, Deep Space 9

Prima di chiudere, un'altra importante considerazione, che ci spalanca le porte verso la Fisica del Futuro. Ogni nostra considerazione in questo excursus è partita dal fatto che anche l'interazione gravitazionale, secondo quanto scoperto da Einstein, non può superare la velocità della luce. Ma allora, come la luce, anche tale interazione deve... propagarsi per onde! Si parla di **onde gravitazionali**, ed esse non si propagano in un mezzo materiale, ma nel tessuto stesso dello spazio-tempo! In tal caso la distanza lineare e l'intervallo di tempo tra due eventi oscillerebbe, e le geodetiche diventerebbero addirittura delle **sinusoidi**!



I fenomeni cui siamo abituati, dai fenomeni vulcanici alle eruzioni solari, non sono in grado di produrre onde gravitazionali perchè queste ultime sono debolissime (la gravitazione è 10^{38} volte meno intensa della forza elettromagnetica!) Tuttavia, nell'universo vi sono fenomeni in grado di generarle: violente **esplosioni di supernovae**, ma non solo. A un miliardo e 300 milioni di anni luce da noi **due buchi neri** in rapida rotazione l'uno attorno all'altro, di masse pari a **29 e 36 masse solari**, sono collassati in un unico buco nero pari a **62 masse solari**. La differenza di massa è stata irraggiata proprio sotto forma di onde gravitazionali, che sono state captate l'11 febbraio 2016 dall'**interferometro LIGO** (vedi foto accanto), in Louisiana, che è stato in grado di "vedere" una distorsione di soli **10^{-18} m** su una distanza di tre chilometri! (il nucleo di un atomo misura 10^{-15} m) Potenza del genio umano.





Il 3 dicembre 2015, alle ore 5.04 in Italia, con un razzo VEGA è stato lanciato con successo dal poligono spaziale di **Kourou** (nella Guyana francese) il satellite **Lisa Pathfinder**, satellite europeo con cui inizia l'ambizioso progetto **eLisa** (evolved Laser Interferometer Space Antenna), innovativo osservatorio spaziale delle onde gravitazionali che dovrebbe essere completato entro il 2034 per un costo complessivo di 2 miliardi di euro. Lisa Pathfinder si è posizionato a 1,5 milioni di chilometri da noi, dove la forza di gravità del Sole e della Terra si annullano reciprocamente. La missione è stata realizzata con il contributo del 13 % dell'**Agenzia Spaziale Italiana** (Asi) e di molti enti di ricerca e aziende italiane, e potrebbe rivoluzionare il nostro modo di studiare l'universo.

Ma questo non è il solo traguardo che ci attende. Ci sfugge ancora il **gravitone**, particella quantistica che dovrebbe mediare l'interazione gravitazionale...

L'Albert Einstein Memorial a Washington



...E non è tutto. La gravità come è stata concepita da Einstein funziona bene **su scala planetaria e galattica**, ma non **su scala subatomica**, dove si applica la meccanica quantistica. Oggi il compito di fisici e cosmologi consiste nel cercare una teoria in grado di conciliare la Relatività Generale con la Meccanica Quantistica: una **Teoria del Tutto**, insomma. Forse quelli tra voi che sceglieranno di studiare Fisica delle Particelle avranno modo di partecipare in prima persona a questa avvincente sfida che attende le nostre menti.



Ipotetica partita a poker tra Newton, Einstein e Stephen Hawking immaginata in una puntata della sesta stagione del telefilm "Star Trek, The Next Generation"

« La recente scoperta delle onde gravitazionali rappresenta un regalo speciale per il centesimo anniversario della Relatività Generale. È il sigillo finale sulla meravigliosa teoria che ci ha lasciato il genio di Einstein, ed è anche una scoperta che premia il gruppo di scienziati che ha perseguito questa ricerca per decenni, e alla quale l'Italia ha dato un grande contributo. »

Fernando Ferroni, presidente dell'INFN