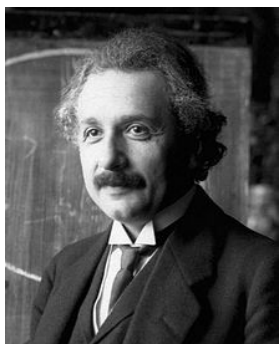


2015-2016

CENTENARIO DELLA RELATIVITA' GENERALE

L'impatto della Relatività



Albert Einstein a partire dal 25 novembre 1915 compie una ulteriore rivoluzione scientifica (dopo quella della Relatività Ristretta del 1905) presentando, attraverso una serie di conferenze all'Accademia prussiana delle Scienze, la Teoria della Relatività Generale su cui oggi poggiano tutte le più moderne teorie ed applicazioni della fisica.

Pochi mesi più tardi, il 20 marzo 1916, Einstein pubblica i dettagli sulla rivista *Annalen der Physik*, in un articolo intitolato *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie* (*La base della teoria della relatività generale*): 54 pagine che avrebbero cambiato

completamente i connotati della fisica e della conoscenza umana in generale.

In effetti è una vera e propria rivoluzione concettuale che ci ha portato a rivedere e ripensare i concetti di spazio, tempo, materia ed energia, cambiando definitivamente la nostra visione del mondo.

L'impatto della Relatività Ristretta e Generale sulle cognizioni classiche basate sulla fisica newtoniana e fino ad allora ritenute certe fu semplicemente devastante. Si trattava di rivedere tutto e di guardare alla realtà con approcci completamente diversi. I nuovi concetti erano così ostici e difficili da penetrare che sembrava impossibile che la natura potesse avere comportamenti così strani ed eccentrici: il dibattito che ne risultò fu lungo e tortuoso ma produsse risultati copiosi ed inebrianti poiché aprì la strada alla conoscenza dell'atomo, del nucleo, della fisica dei quanti, della cosmologia e, in definitiva, di tutte le conoscenze avanzate del secolo scorso e di quello attuale.

Senza la Relatività di Einstein non avremmo visto il grande sviluppo della fisica del mondo macroscopico e microscopico che ben presto si è esteso a tutte le altre scienze, dalla chimica alla medicina, dalla biologia alle neuroscienze con gli enormi sviluppi nel campo dei computer, delle comunicazioni e di tutte le altre applicazioni tecnologiche dei nostri giorni.

Relatività Ristretta

Nelle equazioni di Maxwell del 1865 compariva una velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche che presentava sempre lo stesso valore di 300.000 Km/sec ma non si sapeva rispetto a che cosa. Si scoprirà più tardi che tale costante rappresentava la velocità della luce.

Ma il fatto che la luce avesse sempre la stessa velocità in qualunque sistema di riferimento era incomprensibile ed assurdo poiché, ad esempio, un osservatore fisso

doveva vederla con velocità diverse a seconda di come si muoveva il corpo che la emetteva.

In altre parole se io sono fermo rispetto al raggio luminoso dovrei vederlo venirmi incontro a velocità c (300.000 km/sec), mentre se viaggio verso di esso mi verrebbe incontro a velocità maggiore di c , ed evidentemente a velocità minore di c se mi allontanano. Ma la luce non segue questo modo di ragionare e si presenta sempre con la stessa velocità c .

Si pensò perciò ad un sistema di riferimento privilegiato ed assoluto, l'etere impalpabile ed invisibile, rispetto al quale la luce potesse muoversi appunto a quella velocità sempre uguale.

I ripetuti tentativi di evidenziare questo etere tramite i sofisticati esperimenti di Michelson e Morley risultarono vani per cui agli inizi del XIX secolo la situazione dell'elettromagnetismo e della fisica era piena di punti oscuri.

E' a questo punto che entra in scena Einstein che negli anni precedenti il 1905 è sempre più convinto che la fisica classica di Newton si basa su due assunti errati che devono essere eliminati per mettere le cose a posto:

- che la misura del tempo fra due eventi sia indipendente dal moto di un ipotetico osservatore;

- che la misura dello spazio fra due punti sia indipendente dal moto dell'osservatore.

Con la Relatività Ristretta del 1905, con una azione di semplificazione e genialità, Einstein risolve tutte le difficoltà: prende per buono ciò che tutti rifiutano e cioè che la luce si muove sempre alla stessa velocità (di circa 300.000 Km/sec) rispetto a qualsiasi riferimento, con ciò accettando l'idea che due osservatori in moto uno rispetto all'altro misurano la stessa velocità della luce.

Il grande genio nega quindi la presenza di qualsiasi tipo di etere e assume come postulato l'invarianza della velocità della luce rispetto ad ogni tipo di riferimento risolvendo brillantemente le contraddizioni tra le equazioni di Maxwell ed il principio di relatività galileiano. Completa il lavoro sostituendo le trasformazioni galileiane con quelle di Lorentz.

Ed è proprio qui l'intuizione geniale: se la velocità della luce è la stessa per due osservatori (ad esempio uno fermo a terra e l'altro in moto) ne consegue che lo spazio ed il tempo visti da uno di essi devono necessariamente risultare diversi da quelli visti dall'altro.

In altre parole la luce si muove sempre alla stessa velocità e non tiene conto del movimento dei due osservatori, cosicché il tempo e lo spazio si modificano per permettere ad essa di rimanere costante e di risultare l'unica vera grandezza assoluta, la grande costante della natura.

In tal modo sia l'osservatore fermo che quello in moto vedono la luce viaggiare a 300.000 chilometri al secondo.

Dunque per ognuno dei due osservatori il tempo scorrerà in modo diverso e lo stesso avverrà per lo spazio. Spazio e tempo non sono più assoluti in quanto la luce ne regola le variazioni poiché essa è la grandezza fisica assoluta per eccellenza.

In tal modo le leggi di natura valgono per tutti gli osservatori dell'universo, mentre lo spazio e il tempo dei fenomeni variano in funzione di come si muove un determinato osservatore.

Relatività Generale. Equivalenza gravità-accelerazione

Ma la Relatività Ristretta non soddisfa completamente Einstein poiché essa vale solo per i sistemi inerziali e dunque fa pensare che questi siano in qualche modo privilegiati rispetto a quelli accelerati che non si muovono, cioè, a velocità costante.

Tale privilegio dei sistemi inerziali turba Einstein in quanto toglie completezza ed eleganza alla sua teoria che, nelle sue intenzioni, avrebbe invece dovuto descrivere tutti i fenomeni naturali.

Oltretutto sapeva bene che i moti in natura sono sempre più o meno accelerati, specie in presenza di gravità.

Inoltre la forza di gravità che attrae due masse

 dipende dalla loro distanza: ma questa è un concetto relativo (come visto varia in funzione del moto);

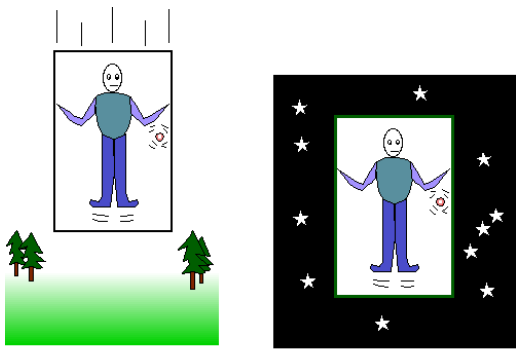
 si propaga in modo istantaneo e quindi a velocità molto maggiore di quella della luce che, come visto, è invariante e pari a circa 300.000 Km/sec.

Il genio è convinto che le leggi della fisica devono essere tali che la loro forma rimanga inalterata rispetto a qualsiasi osservatore e conservino la loro struttura in qualsiasi riferimento, comunque accelerato. Nella sua concezione lineare ed elegante della natura le equazioni della fisica devono per forza di cose risultare invarianti per qualsiasi trasformazione.

E' così che nel 1907 Einstein ha una delle intuizioni più rivoluzionarie della storia della Fisica, che più tardi definirà il "pensiero più felice della mia vita":

"Ero seduto su una sedia dell'ufficio brevetti di Berna quando all'improvviso un pensiero mi ha attraversato la mente: se una persona è in caduta libera, non avverte il suo stesso peso.

Ero sbigottito. Questo semplice pensiero mi fece una profonda impressione. Mi spinse a viva forza verso la teoria della gravitazione".



Things falling freely in a gravity field all accelerate by the same amount, so they move the same way as if they were in a region of zero gravity — "weightlessness"!

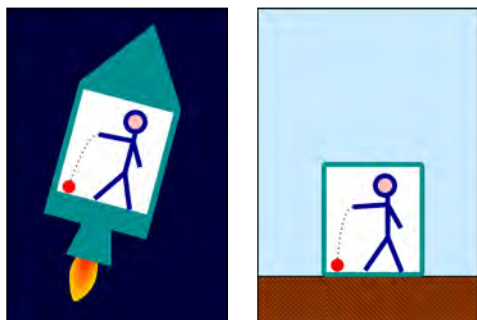
Dunque una persona in caduta libera (per esempio, una persona in un ascensore che precipita oppure un astronauta all'interno di una navicella in caduta verso la terra,) non sente la forza di gravità: in entrambi i casi l'osservatore supporrebbe di essere in assenza di gravità.

Ciò significa che se, all'interno di quella navicella o di quell'ascensore, una persona lasciasse libera di muoversi una moneta questa rimarrebbe ferma alla stessa altezza e non cadrebbe sul pavimento.

La stessa cosa avverrebbe in una zona remota dello spazio libera da ogni effetto gravitazionale dove l'astronauta verrebbe a trovarsi in assenza di forze esterne, quindi in un vero e proprio sistema di riferimento inerziale.

La persona nell'ascensore, nonostante sia immerso nel campo gravitazionale della Terra, non ha alcun modo per rivelarlo e trae la conclusione di trovarsi in assenza di forze.

Se invece si trovasse nello spazio lontano dentro una navicella che riceve una spinta



costante e lasciasse una moneta, la vedrebbe cadere sul pavimento come se fosse sulla Terra e sentirebbe a tutti gli effetti la presenza di un campo gravitazionale.

Quindi si può affermare che per qualsiasi fenomeno fisico l'effetto di un campo gravitazionale è equivalente a quello di una accelerazione costante (Principio di equivalenza).

Ovvero le leggi della meccanica sono esattamente le stesse nei sistemi inerziali e in quelli in caduta libera.

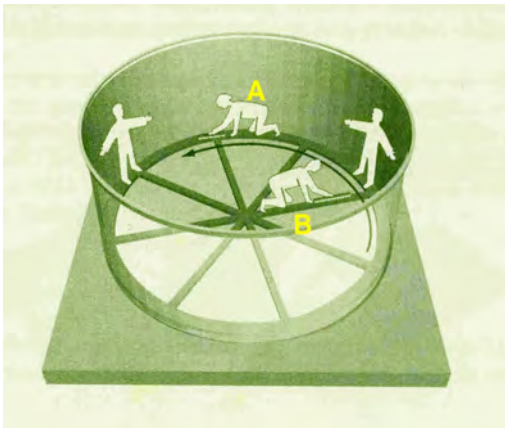
La gravità è indistinguibile da qualsiasi altra accelerazione.

Così il genio tedesco supera brillantemente il privilegio dei sistemi inerziali poiché i sistemi accelerati non sono poi così eccezionali da rimanere esclusi in una visione unificante delle leggi di natura.

Le complesse *equazioni di campo* che Einstein ottiene descrivono il campo gravitazionale e valgono in un riferimento qualsiasi.

Relatività Generale. Spaziotempo curvo

Nel 1912 Einstein si rende conto che le relazioni della geometria euclidea non sono valide per un osservatore in moto accelerato.



Infatti l'osservatore B che misura il raggio di una piattaforma rotante trova lo stesso valore di quando essa era ferma. Viceversa l'osservatore A misura una circonferenza più lunga poiché il suo righello è più corto in quanto nella direzione del moto subisce la contrazione di Lorentz.

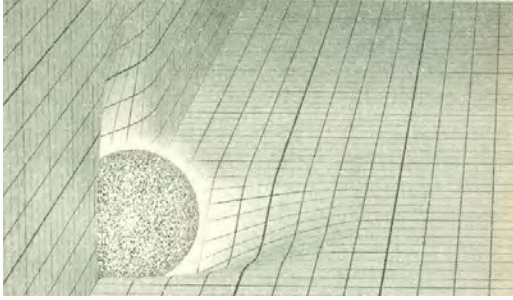
Dunque, la piattaforma si è incurvata.

In aggiunta i punti della piattaforma sono in moto accelerato (accelerazione centrifuga) e, in base al principio di equivalenza è come se si trovassero in un campo gravitazionale che cresce lungo il raggio.

In effetti se la giostra si trovasse nello spazio remoto una persona che camminasse sulla parete cilindrica percepirebbe sui piedi la stessa pressione che sentirebbe sulla terraferma. Lo stesso vale per una persona sdraiata sulla parete stessa.

La forza centrifuga dovuta alla rotazione viene avvertita proprio come una forza di gravità e pertanto Einstein conclude affermando che un campo gravitazionale è equivalente ad uno spazio (meglio uno *spaziotempo*) curvo.

A questo punto occorre sottolineare che Einstein ci ha insegnato anche che niente può esistere in un certo punto dello spazio senza esistere contemporaneamente in un determinato tempo. Spazio e tempo sono intrecciati insieme a formare la flessibile struttura a 4 dimensioni dell'universo che chiamiamo *spaziotempo* e che è impossibile da immaginare poiché il nostro universo sensoriale è limitato alle 3 dimensioni dell'esperienza quotidiana.



In conclusione un campo gravitazionale incurva lo spaziotempo: ed è così che Einstein intuisce che la gravità è una forza profondamente diversa dalle altre perché dipende dal sistema di riferimento.

Tanto che se fermo la rotazione la gravità sparisce e l'osservatore sulla giostra nello spazio remoto non sente più nessuna pressione sotto i piedi.

Quindi la gravità non è una forza come le altre ma

una proprietà dello spaziotempo e questo non è piatto, bensì incurvato, distorto dalla presenza della massa.

In altri termini le masse presenti nell'universo incurvano il tessuto dello spaziotempo come pesi posti su un tappeto elastico creano degli avvallamenti tanto più profondi quanto maggiori sono i pesi.

La curvatura del tempo significa che in presenza di un corpo di grande massa il tempo scorre più lentamente.



I corpi, quindi, non si muovono sotto l'azione di una *forza* gravitazionale, ma si muovono liberamente seguendo i profili di uno spaziotempo curvo.

La Terra si muove lungo la sua orbita non perché soggetta ad una forza esercitata dal Sole, una misteriosa azione a distanza come si riteneva ai tempi di Newton.

In realtà il Sole incurva lo spaziotempo imponendo al nostro pianeta una traiettoria che ci appare curva dal nostro punto di vista, ma che è invece perfettamente rettilinea nello spaziotempo quadridimensionale.

La struttura matematica della Relatività Generale è costituita da un sistema di 10 equazioni che stabiliscono il modo in cui la materia incurva lo spazio-tempo: *le equazioni di campo*.

Partendo dalla distribuzione delle masse, le soluzioni delle equazioni di campo danno la struttura geometrica dello spaziotempo, cioè la specifica forma dell'universo nello spazio e nel tempo.

Una massa che ivi si muove modifica istante per istante la forma dello spaziotempo e pertanto è costretta a seguire i nuovi percorsi che essa stessa ha causato e che si modificano man mano che procede, in un processo senza fine.

Appare quindi evidente come queste equazioni siano alla base di tutta la cosmologia moderna.

Naturalmente anche i raggi di luce sono vincolati a seguire i profili incurvati dello spaziotempo ed è proprio questa caratteristica che fornisce la prima prova sperimentale della validità della teoria. Infatti nel 1919 un'eclissi solare permette di misurare con precisione la curvatura dei raggi luminosi provenienti da un gruppo di stelle lontane (ladi) a causa della presenza del Sole: la misura corrisponde perfettamente ai calcoli fatti da Einstein.

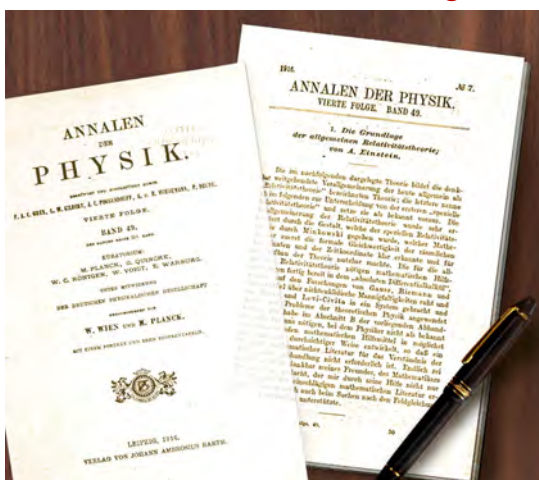
L'azione della gravità, infine, non è istantanea: la perturbazione che distorce lo spaziotempo si propaga a velocità finita (velocità della luce).

E' chiaro che emerge un universo del tutto nuovo in cui luce, materia e energia, spazio e tempo non sono cose separate e quindi collegate da leggi esterne ma sono aggregati in

un *unicum* che regola le loro mutue relazioni ed in cui nessuno può esistere senza l'altro in quanto sono i costituenti stessi della realtà.

Appendice

1. Relatività e Cosmologia

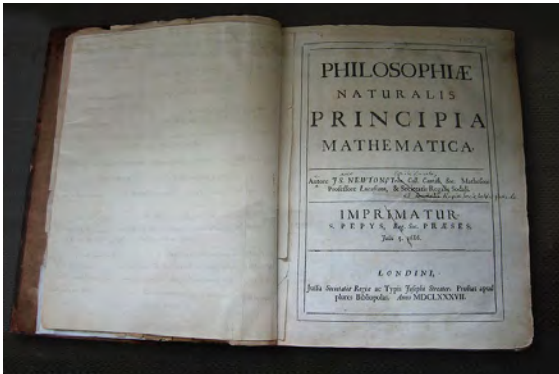


a Relatività Generale fu pubblicata il 20 marzo 1916 sulla storica e prestigiosa rivista scientifica *Annalen der Physik*.

Gli scienziati di tutto il mondo poterono così studiarla ed assimilarla cercando di risolvere le difficilissime equazioni di campo in casi semplici per applicarla agli aspetti ancora sconosciuti della realtà naturale.

E' in questo modo che negli anni successivi cominciò a muovere i primi passi quella che sarebbe poi diventata una branca rilevante della fisica: la Cosmologia.

2. Spazio e tempo assoluti di Newton



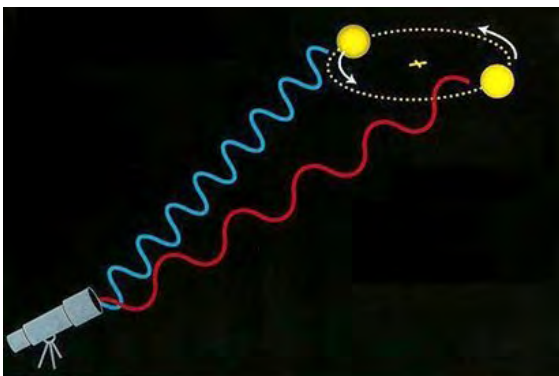
Introdotta da Newton (1642-1727) nel famoso *"Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica"* del 1687, ecco le celebri definizioni di spazio e tempo che tanto hanno influenzato il nostro senso comune e si sono talmente radicate nella gente da rendere ancora oggi problematica la comprensione della Relatività:

"Il tempo assoluto, vero, matematico, per sua natura senza relazione con alcunché di esterno, scorre uniformemente".

"Lo spazio assoluto, per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, rimane sempre uguale e immobile".

Dunque, spazio e tempo *assoluti* che esistono indipendentemente da noi che osserviamo: ci sono e basta, costituiscono la scena passiva dove avvengono gli eventi.

3. La nascita della Cosmologia

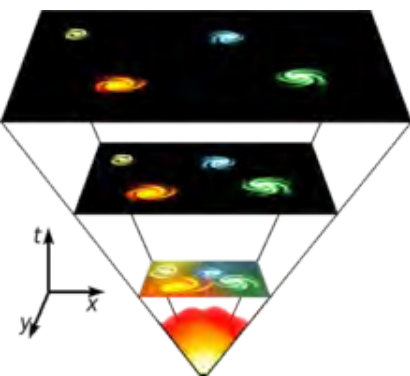


Nel 1922 il matematico russo Alexandr Fridman risolve le equazioni di campo di Einstein e trova che l'universo non è statico e, essendo in evoluzione, ha avuto verosimilmente un inizio. La cosa viene avvertita da Einstein che però un anno dopo concorda.

Edwin Hubble nel 1929 scopre che le galassie si allontanano reciprocamente con velocità proporzionale alla loro distanza ed ottiene la

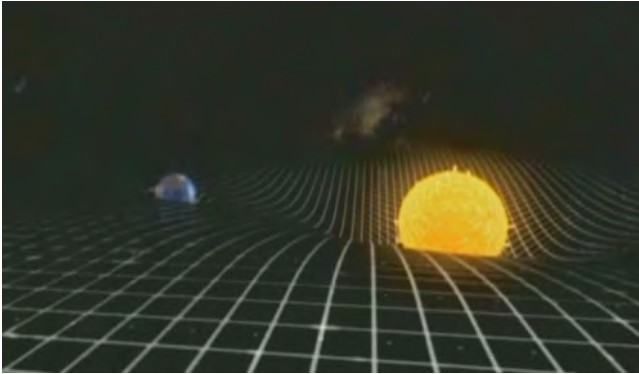
verifica sperimentale dell'espansione dell'universo.

4. La Teoria del Big Bang



Nel 1927 l'abate George Lemaitre costruisce il primo modello cosmologico di universo in espansione proponendo che esso avesse avuto inizio in uno stato di elevatissima densità. L'idea viene ripresa e perfezionata negli anni '40 da un allievo di Fridman, George Gamow, che formula una teoria che descrive la fuoruscita istantanea ed "esplosiva" di tutta la materia che avrebbe costituito l'universo: la Teoria del Big Bang, che viene modificata ed arricchita nei decenni successivi fino a diventare la base dell'attuale Cosmologia.

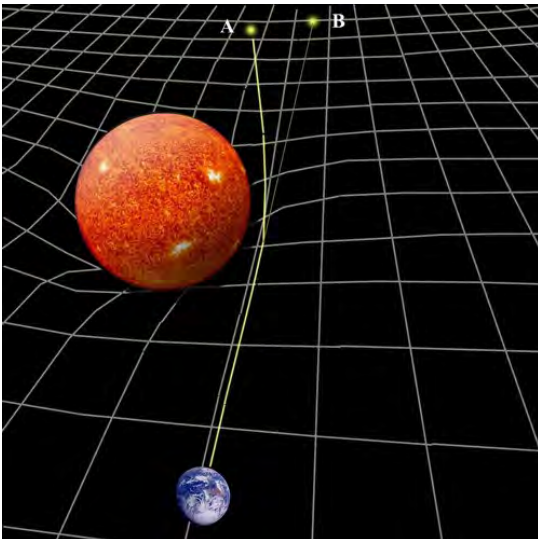
5. Rappresentazione dello spaziotempo



I reticoli incurvati e deformati forniscono una rappresentazione suggestiva anche se non reale dello spaziotempo: tuttavia rendono l'idea e permettono di visualizzarne la curvatura.

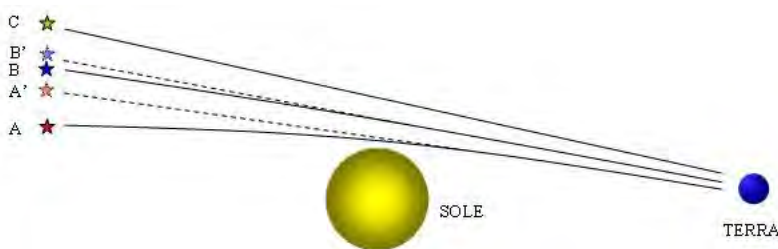
Nell'immagine la Terra che orbita nella deformazione spaziotemporale del Sole mentre si trascina dietro la sua.

6. Curvatura dei raggi di luce



Un raggio di luce proveniente dalla stella A viene curvato passando nelle vicinanze del campo gravitazionale del Sole e la stella viene osservata nella posizione apparente B.

7. Eclissi del 29 maggio 1919

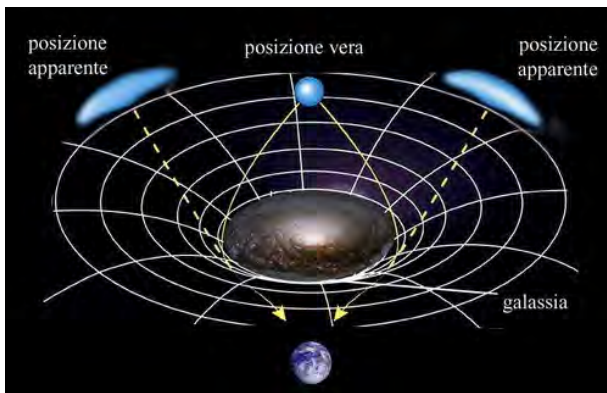


Arthur Eddington fotografa le stelle intorno al Sole mentre esso e' oscurato, in modo da poterne confrontare le distanze con quelle mostrate da una fotografia notturna eseguita, ovviamente, in un diverso periodo dell'anno in cui il Sole

non c'e'.

I calcoli prevedono una deflessione di 1,75 secondi di arco. Due misure di Eddington trovano $1,98 \pm 0,16$ e $1,61 \pm 0,40$. La coincidenza è clamorosa: i raggi di luce risultano incurvati e la Relatività Generale riceve la prima conferma sperimentale.

8. Lenti gravitazionali



Sono molto importanti in astronomia poiché permettono di vedere corpi celesti nascosti dietro galassie o altri corpi massivi. Si chiama lente gravitazionale poiché i raggi luminosi provenienti da un oggetto distante vengono deviati, come fa una lente, dal campo gravitazionale (ad esempio di una galassia) che si trova interposta lungo la linea di vista. In questo caso si formano due o più immagini apparenti dell'oggetto distante che svelano perciò la sua esistenza.

9. Buchi neri

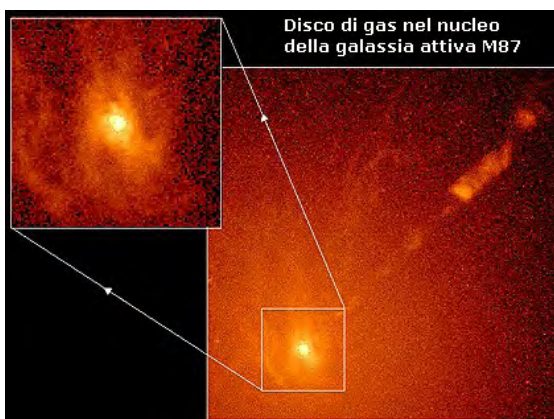


Nel 1916 Karl Swarzschild comincia ad analizzare le equazioni di Einstein e si accorge che era possibile che un oggetto con straordinaria massa, sotto la forza della propria gravità, si contraesse fino ad intrappolare anche la luce.

Una stella morente con massa superiore a 12 masse solari in genere collassa in un buco nero che provoca una curvatura dello spaziotempo (singolarità) talmente marcata da inghiottire

qualunque tipo di particelle nelle vicinanze compresa la luce e da fermare lo scorrere del tempo.

10. Galassie attive



Si ritiene che al centro di grosse galassie vi sia tanta materia che le stelle che si formano sono così vicine che si fondono a formare un buco nero.

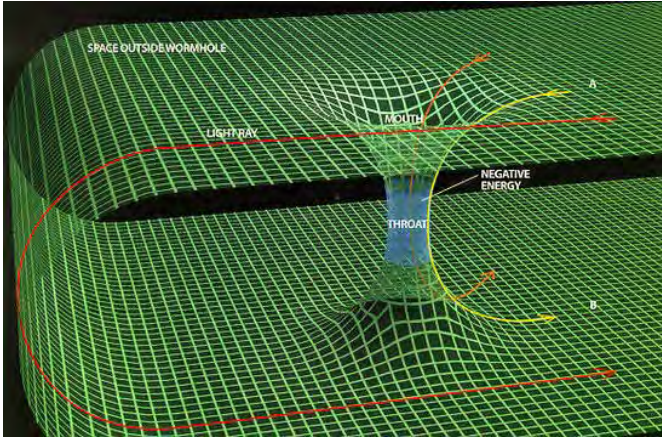
Enormi buchi neri, equivalenti a centinaia di milioni e talvolta miliardi di stelle, costituiscono il nucleo di molte galassie.

Un esempio molto noto è la gigantesca galassia ellittica M87 nella costellazione della Vergine, a

50 milioni di Anni Luce, che ospita un buco nero con massa 6 miliardi di volte quella del Sole.

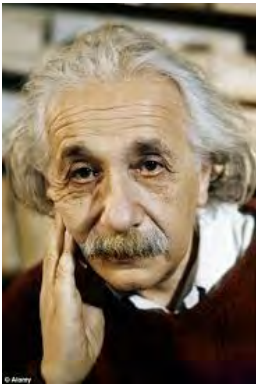
Il buco nero della nostra galassia Via Lattea è di circa 4 milioni di masse solari.

11. Cunicoli spaziotemporali



Le equazioni della relatività Generale ammettono soluzioni che descrivono strutture che formano ponti (cunicoli) fra regioni diverse dello stesso universo o fra universi distinti. Tale tunnel provocherebbe notevoli deformazioni spaziotemporali e permetterebbe di viaggiare fra punti diversi in molto minor tempo rispetto ad un viaggio attraverso lo spazio normale.

12. Messaggio di Einstein ai posteri



Il messaggio che nel 1934 Einstein scrisse ai posteri su richiesta di un famoso editore americano:

*“ Cari posteri,
se non siete diventati più giusti, più pacifici e in genere più razionali di quanto siamo (o eravamo) noi, allora andate al diavolo!
Con questo mio pio augurio, sono (fui) vostro
Albert Einstein ”*

Giuseppe Torti
Colleferro, dicembre 2015