

Nascita e sviluppo della Relatività Generale

Salvatore Capozziello



Kandinsky, Unbroken Line, 1923



1915

***Un altro annus mirabilis
dopo il 1905!***

***Albert Einstein:
Equazioni del campo gravitazionale***



***David Hilbert:
Azione del campo gravitazionale***



***Emmy Noether:
Leggi di conservazione***

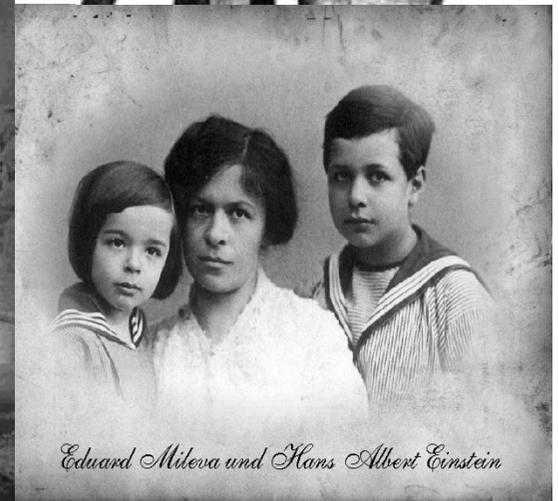
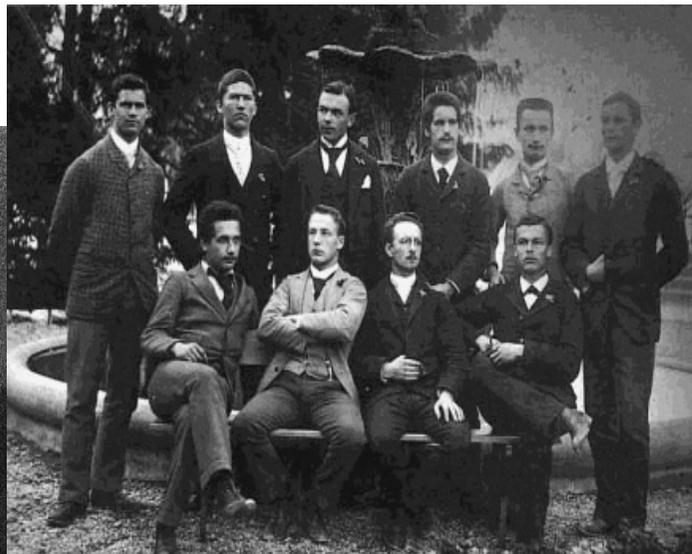
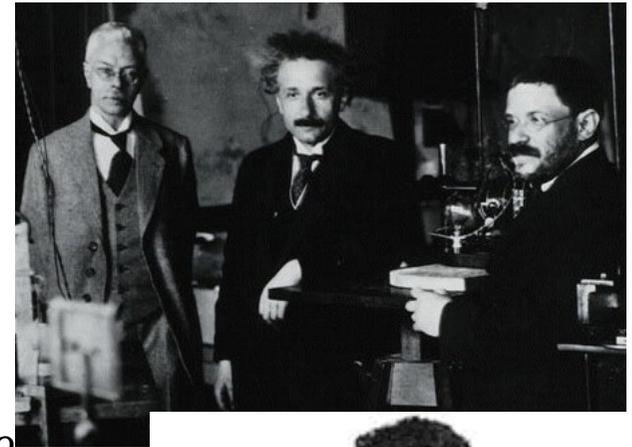
A. Einstein (1879-1955), formazione

- 14 marzo 1879 nasce a Ulm (Baden-Württemberg); cresce a Monaco
- Padre: Hermann imprenditore (elettrochimica)
- Madre: Pauline passione per la musica
- Legato in particolare alla sorella Maja
- Frequenta con poca soddisfazione la scuola
- 1894: la famiglia si trasferisce in Italia: Milano, Pavia, Isola della Scala...resta a Monaco in collegio ma va in vacanza in Italia



Studi e primi lavori

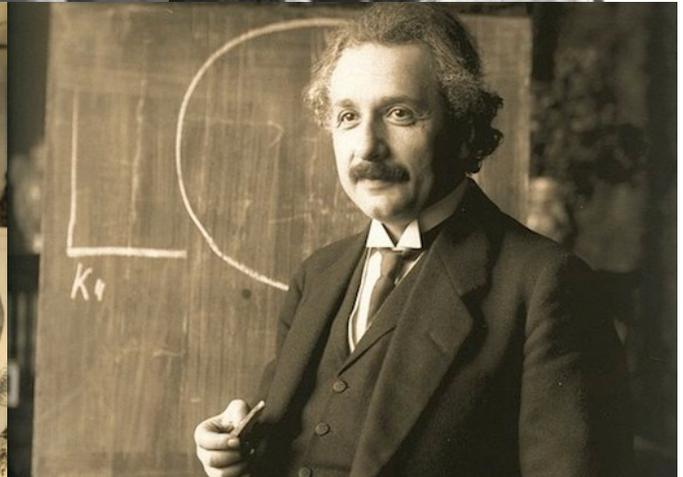
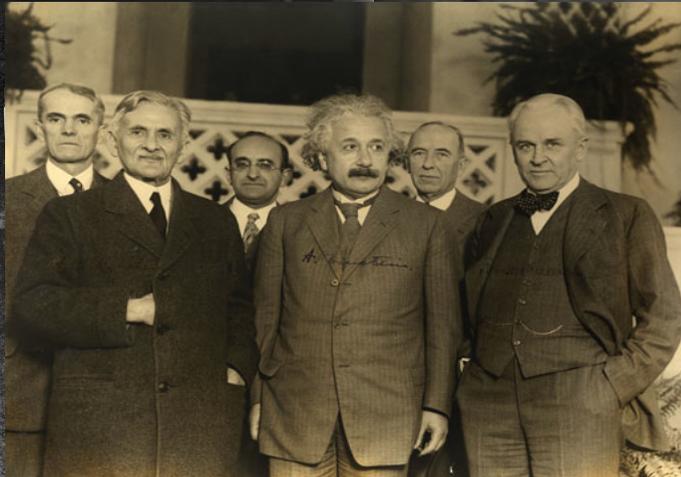
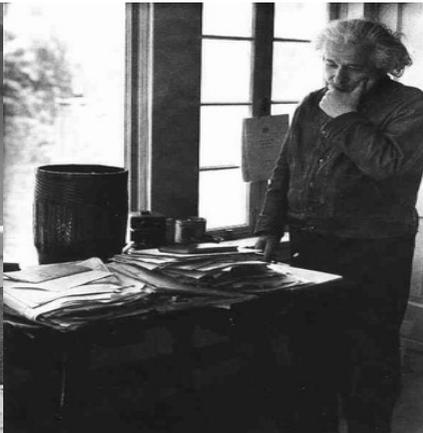
- *1896-1900 Laurea all'Università di Zurigo*
- *1901 cittadinanza svizzera*
- *1903 sposa Mileva Maric (3 figli) – divorzia nel 1919*
- *Impiegato all'Ufficio Brevetti a Berna*
- *1905 annus mirabilis: moto browniano, effetto fotoelettrico, relatività speciale*
- *1908 Privatdozent, Università di Berna*
- *1909 Professore associato, Università di Zurigo*
- *1911 Ordinario, Karl-Ferdinand-Universitaet, Praga*
- *1912 Ordinario, ETH Zurigo*
- *1914 Berlino (direzione Kaiser-Wilhelm-Institut)*



Eduard Mileva und Hans Albert Einstein

Fama e maturità

- *1915 Relatività Generale*
- *1919 spedizione di Eddington; sposa la cugina Elsa*
- *1921 Premio Nobelper la Fisica, effetto fotoelettrico*
- *1933 Princeton, Institute for Advanced Study*
- *1955 muore a Princeton il 18 Aprile*





La **Relatività Generale** è una teoria della gravitazione, formulata da Albert Einstein tra il 1915 e il 1916, dove la geometria dello spazio-tempo è trattata come una grandezza dinamica.

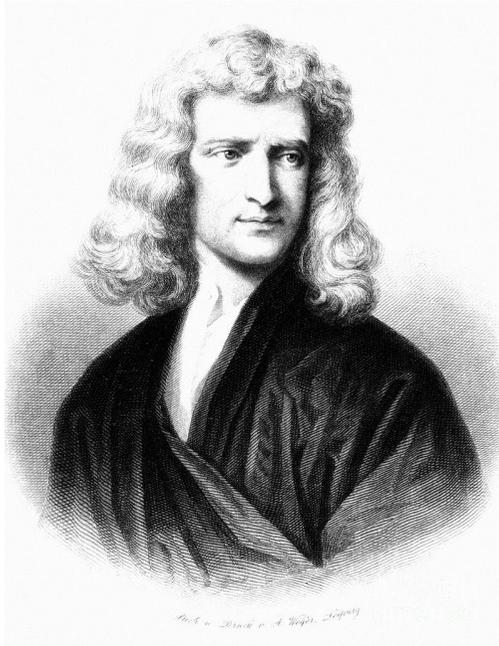
Il fondamento fisico di tale teoria è
il Principio di Equivalenza



Le concezioni dello spazio e del tempo prima di Einstein



Kandinsky, Arch and Point, 1923



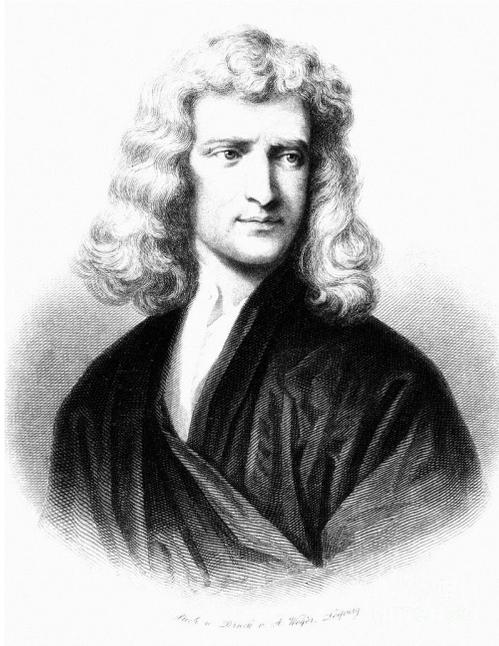
Newton: tempo e spazio sono assoluti

Tempus absolutum verum & Mathematicum, in se & natura sua absq; relatione ad externum quodvis, æquabiliter fluit, alioq; nomine dicitur Duratio; relativum apparens & vulgare est sensibilis & externa quævis Durationis per motum mensura, (seu accurata seu inæquabilis) qua vulgus vice veri temporis utitur; ut Hora, Dies, Mensis, Annus.

Spatium absolutum natura sua absq; relatione ad externum quodvis semper manet simile & immobile; relativum est spatii hujus mensura seu dimensio quælibet mobilis, quæ a sensibus nostris per situm suum ad corpora definitur, & a vulgo pro spatio immobili usurpatur: uti dimensio spatii subterranei, aerei vel cælestis definita...

Newton, Principia (1687)- (definitiones)

**Spazio e tempo:
SENSORIUM DEI**



Newton: tempo e spazio sono assoluti

Un'importante conseguenza è che un osservatore appartenente ad un sistema di riferimento inerziale non può associare una velocità assoluta o una direzione assoluta al proprio moto nello spazio, ma può solo considerare velocità e direzione relative ad altri corpi.

“Le leggi fisiche sono invarianti rispetto alle trasformazioni di Galileo”.

*Le trasformazioni galileiane sono simmetrie di traslazione nello spazio:
 $x' = x - v_0 t$; $y' = y$; $z' = z$; $t' = t$.*

Leibniz: tempo e spazio inintelligibili

Si plures ponantur existere rerum status, nihil oppositum involventes, dicentur existere simul. Et ideo quicquid existit alteri existenti aut simul est aut prius aut posterius. Si eorum quae non sunt simul unum rationem alterius involvat, illud prius, hoc posterius habetur



(I) **Tempus** est ordo existendi eorum quae non sunt simul.

(II) **Spatium** est ordo coexistendi seu ordo existendi inter ea quae sunt simul.

(III) **Situs** est coexistentia modus.

(IV) **Motus** est mutatio situs

Leibniz, Initia rerum (1715)

SPAZIO: ordine delle cose coesistenti. **TEMPO:** ordine delle cose successive

SENZA LE “COSE” LO SPAZIO ED IL TEMPO NON ESISTONO!

Kant: tempo.....

*Nessuno può pensare a un "prima" e a un "dopo" se non accetta l'idea che esiste una realtà, il **tempo**, che gli permette di farlo.*

*Senza **tempo** non esistono i fenomeni; senza fenomeni invece il tempo sussiste.*

*Il **tempo** ha una sola dimensione e i diversi tempi non sono insieme ma successivi (come diversi spazi non sono successivi ma insieme).*

*Il **tempo** non è un concetto universale ma una forma pura dell'intuizione sensibile, che lo percepisce come un insieme.*

*L'infinità del **tempo** unico è a fondamento delle quantità determinate di **tempo**.
Quella infinità può essere solo intuita, mentre queste quantità possono essere comprese in maniera concettuale.*



Kritik der reinen Vernunft (1781)



Kant: spazio....

*E' impossibile pensare a un oggetto senza lo **spazio** che lo contenga, mentre si può pensare a uno **spazio** vuoto. Su questa argomentazione si fonda - secondo Kant - la **geometria**.*

*Sul piano metafisico noi possiamo pensare allo **spazio** come a una grandezza infinita, che rende possibile un numero infinito di rappresentazioni. La rappresentazione dell'universo ha la connotazione della "infinità" non per un ragionamento logico, ma semplicemente perché non si è in grado di dimostrarne la finitezza. Da questa antinomia, **la Filosofia è inadatta a porre questioni cosmologiche!***

Kritik der reinen Vernunft (1781)

Le geometrie non euclidea



Kandinsky, Composition VIII, 1923

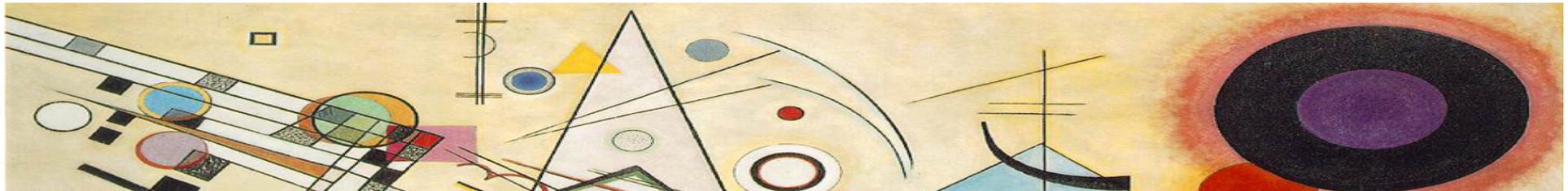
Euclide: la geometria assoluta



- **GEOMETRIA** come relazione.
- *Procede per definizioni, postulati ed assiomi, con un'esposizione che è rimasta classica.*
- *Lo spazio piatto o euclideo è quello in cui per un punto passa una ed una sola parallela ad una retta data (V postulato).*
- *Lo spazio euclideo può essere definito a partire dall'invariante della distanza (Teorema di Pitagora):*
 - $$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$
- *Fino al XIX secolo, tale spazio è identificato con lo **SPAZIO FISICO**.*

Le geometrie non euclidee creano problemi alla fisica newtoniana e alla filosofia kantiana.

Lo spazio-tempo newtoniano è lo spazio euclideo: la linea lungo la quale l'interazione gravitazionale istantanea si propaga nel vuoto è una retta euclidea.



Per Kant, lo **spazio euclideo** è quello in cui percepiamo i fenomeni della natura. E' una **“forma di intuizione a priori”** la cui struttura è data una volta per sempre dalla natura delle nostre facoltà cognitive: **esiste perciò una sola geometria** capace di descrivere questa struttura, che nessuna scoperta empirica può modificare.



- *Le basi per le geometrie non euclidee sono poste da **Lobacevskij, Bolyai e Gauss**, che dimostrano la non necessità del quinto postulato di Euclide (due rette parallele restano sempre equidistanti).*
- *Il formalismo metrico per spazi non-euclidei è sviluppato da **Riemann**.*
- *Per più di cinquanta anni, tale formalismo non è considerato **applicabile alla realtà fisica**, fino all'avvento della **Relatività Generale**.*

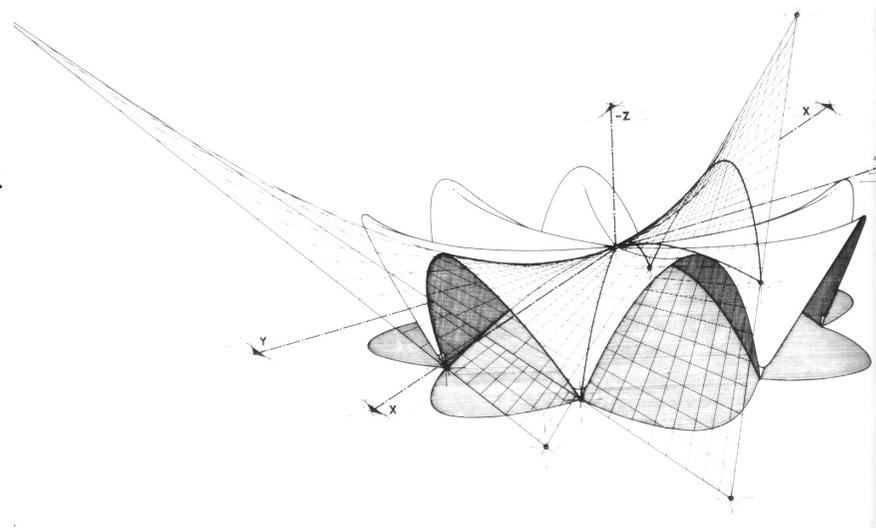


Gauss: Theorema egregium

- *Si superficies curva in quamcumque aliam superficiem explicatur, mensura curvaturae in singulis punctis invariata manet.*

Disquisitiones generales circa superficies (1827)

- **La curvatura è una proprietà intrinseca**, cioè può essere misurata "da dentro".
- Le superfici sono **classificabili** in base alla curvatura a seconda che abbiano curvatura costante (sfera, piano, cilindro) o variabile.
- Esistono superfici a **curvatura negativa**



Riemann: la geometria differenziale



- Nel 1854, pubblica *”Sulle ipotesi che stanno alla base della geometria”*, in cui introduce la geometria ellittica e rivoluziona la scelta dell’oggetto della geometria introducendo la metrica. Nasce la geometria differenziale.
- Intuisce che: **“La geometria dell’Universo è determinata dalla distribuzione degli oggetti astronomici”**
- L’applicazione più evidente della geometria differenziale è la Relatività Generale, a cui fornisce gli strumenti matematici.
- Sono fondamentali anche le opere di **Bianchi, Ricci Curbastro e Levi-Civita.**

Prima della Relatività Generale

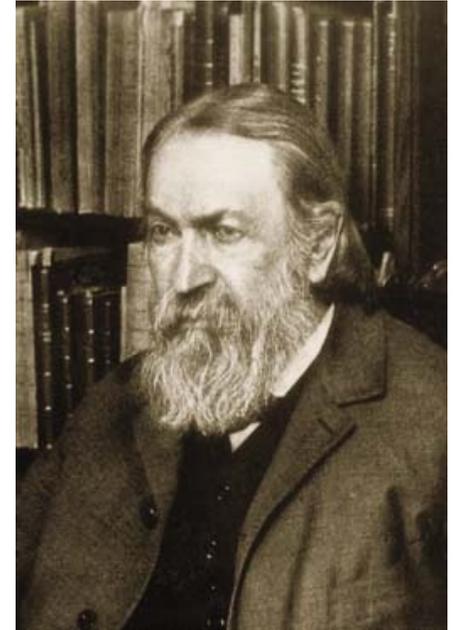


Kandinsky, Blue Painting 1924

Il principio di Mach

Mach osserva la necessità di descrivere le leggi fisiche in funzione di un qualsiasi osservatore, opponendosi alla pretesa d'introdurre uno spazio assoluto (il Sensorium Dei) che di fatto è presente nel modello newtoniano mediante il concetto di osservatore inerziale.

Dal punto di vista cinematico, il movimento di un corpo è un concetto relativo: occorre precisare l'osservatore rispetto al quale il moto viene riferito.



Ad esempio, quando si parla di moto della Terra si intende rispetto al Sole, che sarà l'osservatore; ma risulta altrettanto lecito parlare di moto del Sole rispetto all'osservatore Terra.

Nel sistema solare risulta più agevole e conveniente per la descrizione del moto dei pianeti, scegliere il riferimento solare e quindi la visione Copernicana del moto, ma non esiste una ragione di principio per preferire una scelta rispetto all'altra.

Non si può, dunque, affermare che sia scientificamente errato, come affermato da Galileo nelle sue lettere, il passo della Bibbia in cui Giosué (1180 a.C.) esclama: **«Fermati, o Sole, su Gabaon, e tu, Luna, sulla valle di Aialon! E il Sole si fermò e la Luna ristette, fino a che il popolo si fu vendicato dei suoi nemici» (Gs 10, 12).**

La teoria della Relatività Ristretta o Speciale



Kandinsky, composition X 1938

- 
- *Einstein si pone il problema di definire in maniera precisa e priva di ogni riferimento metafisico i concetti di spazio e tempo:*
 - *Tutte le grandezze della fisica devono essere definite in modo univoco tramite un processo di misura.*
 - *Il tempo è ciò che misuriamo con un orologio.*
 - *Lo spazio è ciò che misuriamo con un sistema di determinazione delle distanze (es. raggi di luce).*

 - *Si giunge alla conclusione che:*
 - *due eventi, contemporanei per un osservatore, possono non essere tali per un altro.*

 - *eventi che accadono nello stesso tempo, ma in luoghi diversi, possono essere giudicati accadere in tempi diversi da un osservatore esterno in moto.*

Lo spazio-tempo della Relatività Speciale

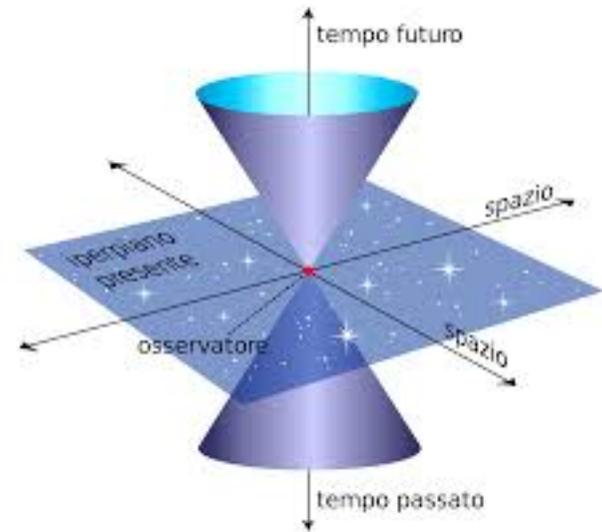
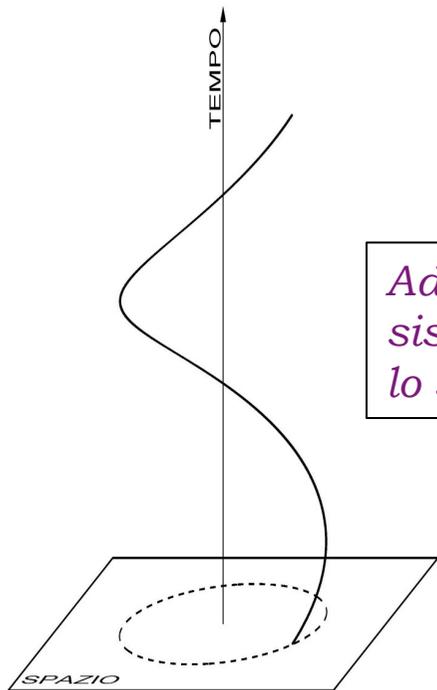


- **Costanza della velocità della luce** conduce al valore relativo della contemporaneità: la distanza spaziale tra due eventi può dar luogo ad una separazione temporale tra gli eventi stessi.
- *Diversa valutazione delle distanze e dei tempi da parte di due osservatori in moto relativo.*



interpretazione geometrica è dovuta a
Hermann Minkowski

Ad ogni riferimento va associato un sistema di quattro coordinate, tre per lo spazio e una per il tempo



Il Principio di Relatività Speciale

- Il **principio di relatività di Galileo** stabilisce l'equivalenza di tutti i sistemi di riferimento inerziali per descrivere i fenomeni meccanici. Un osservatore su un veicolo in moto con velocità costante non ha alcuna possibilità di dire, in base ad esperimenti meccanici, se egli si trovi in uno stato di quiete o di moto.
- La **relatività speciale** estende l'equivalenza dei riferimenti inerziali a tutti i fenomeni fisici (e.s. quelli elettromagnetici).
- **La velocità limite è quella della luce.**
- La **composizione delle velocità** ha sempre quella della luce come velocità massima grazie alle **trasformazioni di Lorentz**.

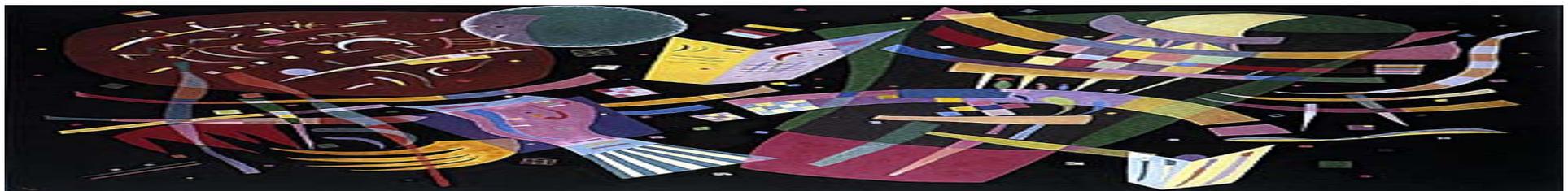
PROBLEMA:

E SE C'E' L'ACCELERAZIONE?

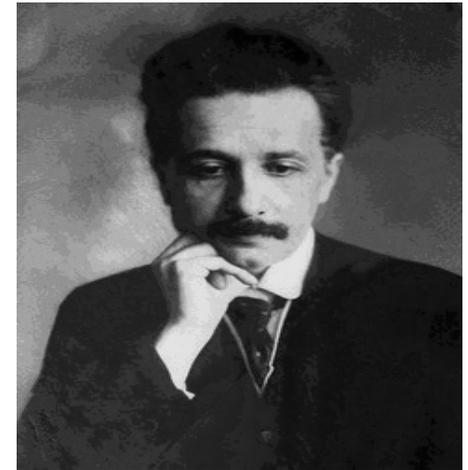


Accelerazione e spazio-tempo

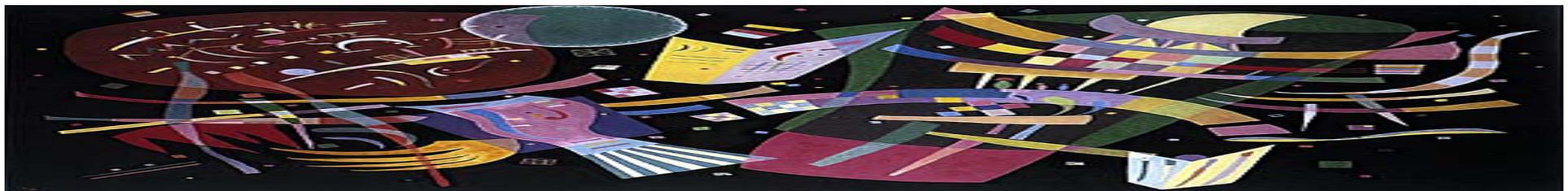
- *La distinzione fra moto accelerato e non accelerato non si può eliminare in qualche modo?*
- *Esiste un modo univoco per distinguere un moto accelerato da un moto non accelerato?*
- *Esiste un criterio assoluto sulla base del quale tutti gli osservatori che si muovono di moto rettilineo uniforme possano stabilire se un corpo accelera o no?*
- *Se la traiettoria seguita da un corpo nello spazio-tempo è una **linea retta** allora **non c'è accelerazione**.*
- *Se ha una **forma che non sia una linea retta** allora **c'è accelerazione**.*
- ***Le forme geometriche delle traiettorie nello spazio-tempo sono un criterio assoluto per stabilire se qualcosa sta accelerando o no!***



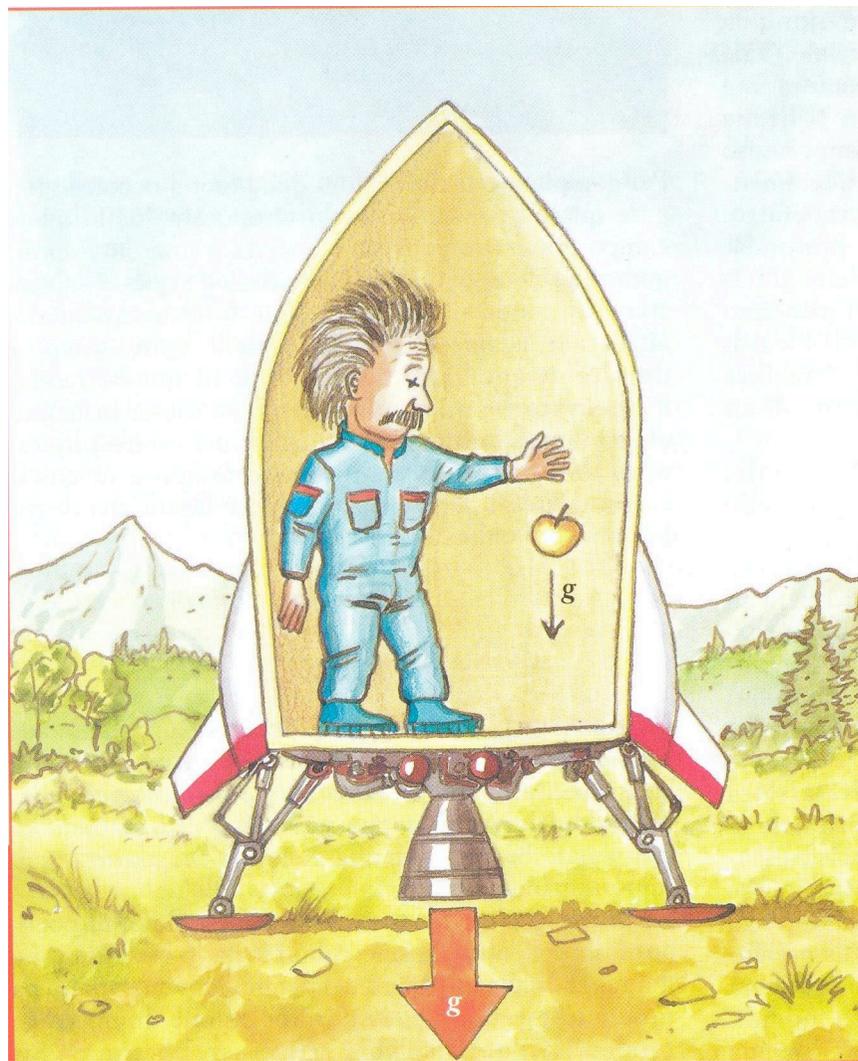
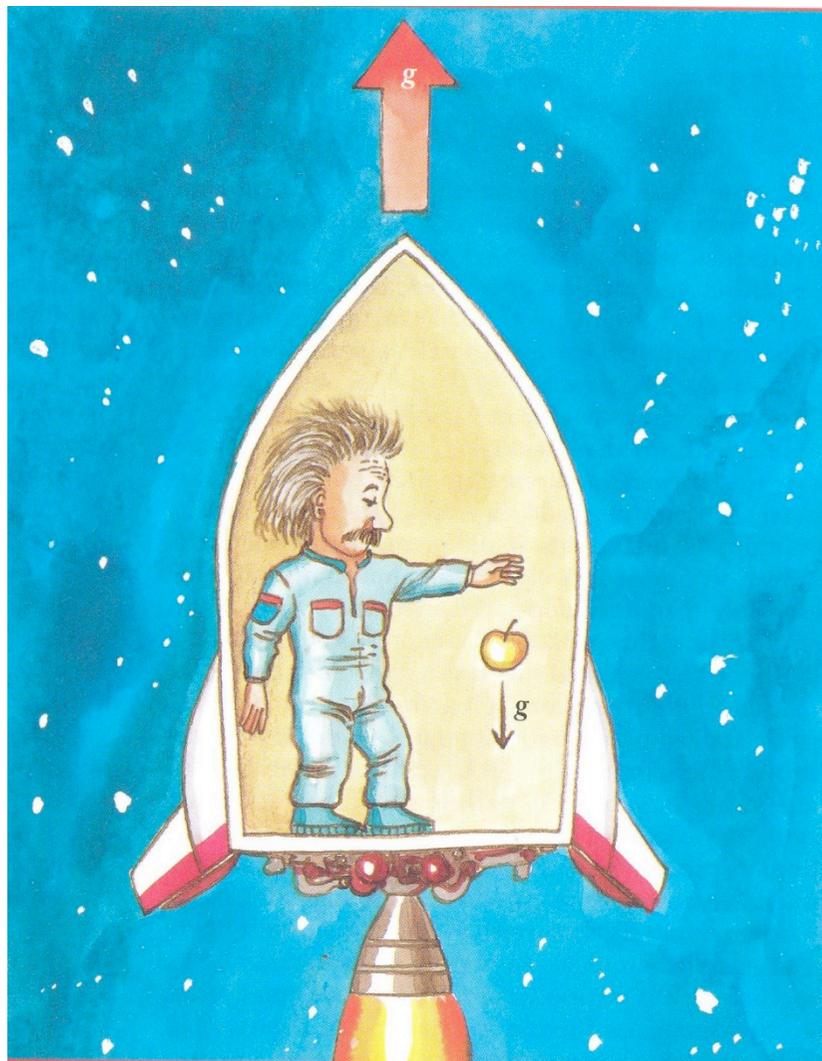
Accelerazione e Gravità



- *Einstein ha un' intuizione straordinaria.*
- *Gli effetti dell'accelerazione sono indistinguibili dagli effetti della gravità!*
- *Viaggiatore lontano da campi gravitazionali, si muove su una linea retta.*
- *Viaggiatore che accelera è come se sentisse la presenza di un campo gravitazionale.*
- *Localmente, l'accelerazione equivale ad un campo gravitazionale!*
- Questo fatto estende il **Principio di Equivalenza di Galileo**
- $$m_i = m_g$$



Accelerazione e Gravità



Accelerazione e Gravità



Se l'astronave precipita in caduta libera, chi si trova nella cabina si sentirà senza peso, esattamente come si sentono gli astronauti nello spazio vuoto. In altre parole, l'accelerazione dell'astronave che precipita può annullare completamente gli effetti della gravità.

Accelerazione e Gravità

Einstein unifica tutti i tipi di moto.

- *Lo stato di quiete è indistinguibile da quello di moto rettilineo uniforme.*
- *L'accelerazione non è diversa dalla quiete se non per la presenza di un campo gravitazionale.*

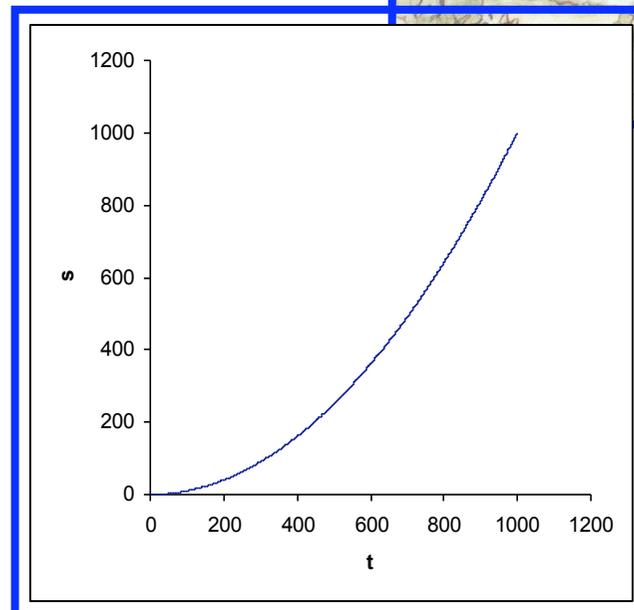
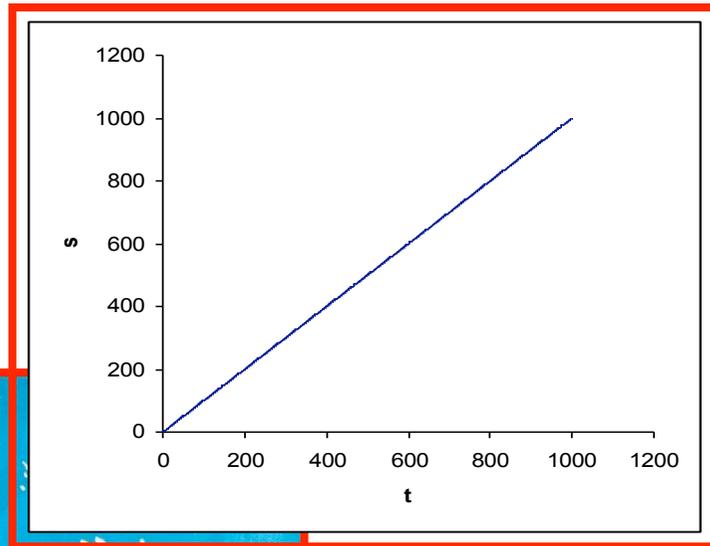
“Tutti gli osservatori inerziali (cioè tutti gli osservatori che non sperimentano l'effetto di alcun tipo di forza) si muovono lungo le geodetiche dello spaziotempo”.

- *Il primo osservatore però percorre una linea retta nello spaziotempo mentre il secondo percorre una traiettoria curva*

- *Ma la linea più breve fra due punti è sempre una linea retta ??*
- *NO, se siamo in presenza di un campo gravitazionale, la geometria può NON ESSERE EUCLIDEA!*



Geometria e Gravità



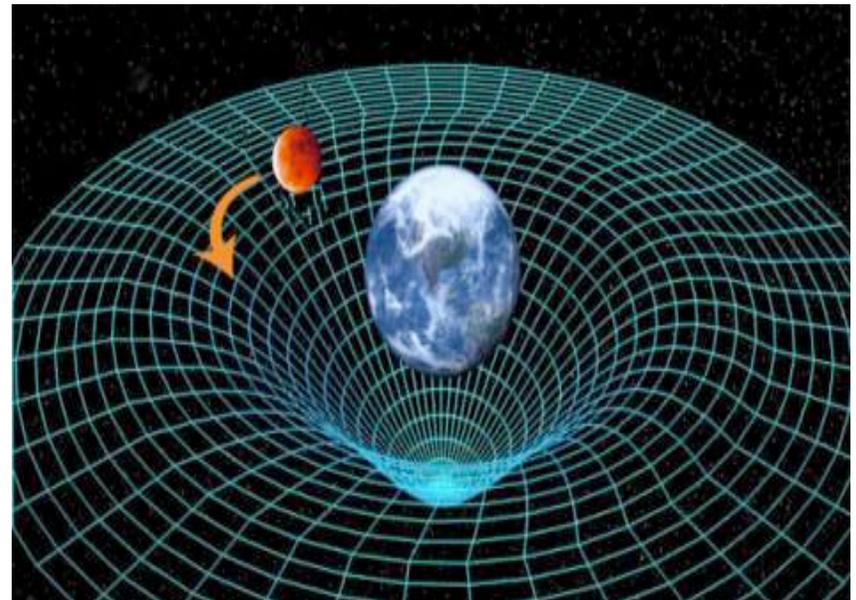
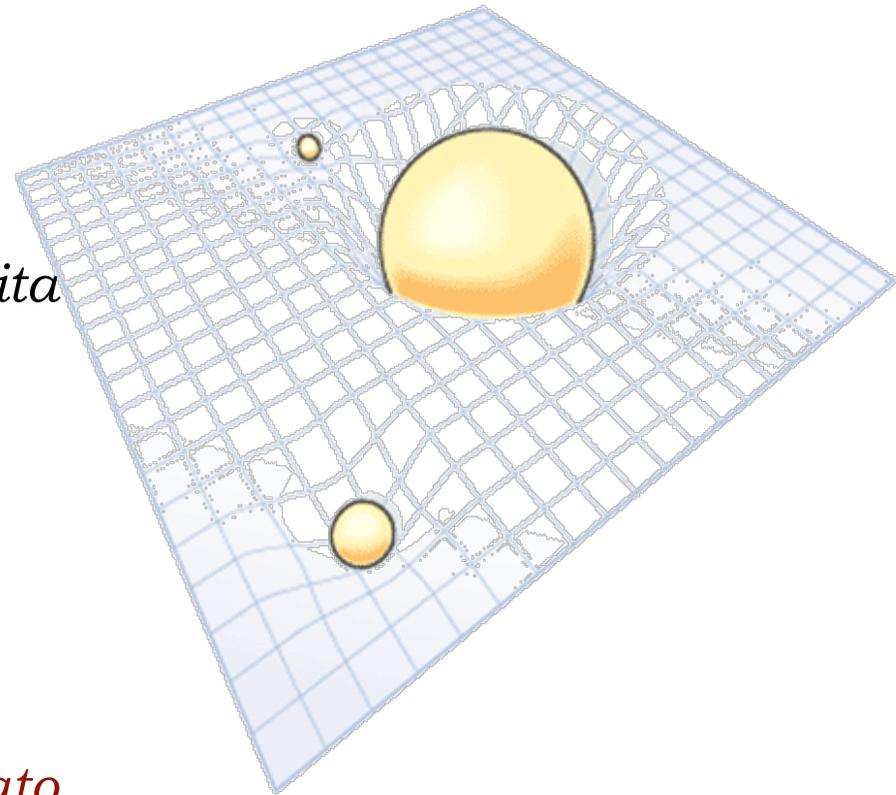
Geometria e Gravità

- Einstein interpreta la presenza del **campo gravitazionale** non come dovuto ad un effettivo campo di forza, ma ad una **curvatura** dello spaziotempo.
- Gli **osservatori inerziali** si muovono sempre secondo le linee più brevi dello spaziotempo (**geodetiche**), ma i risultati delle misure si discostano da quelli previsti dalla geometria euclidea a causa di un'intrinseca curvatura dello spaziotempo, provocata dalla presenza di una massa gravitazionale.
- L'azione gravitazionale, ad esempio, del Sole o della Terra non si esplica attraverso un'azione fisica sui corpi materiali, bensì sotto forma di una modifica geometrica dello spaziotempo.
- Le modifiche indotte nello spaziotempo dalla presenza delle masse gravitazionali ci consentono di **interpretare geometricamente la gravitazione**.
- Tutto ciò è valido grazie al **PRINCIPIO di EQUIVALENZA**
- **La struttura geodetica e la struttura metrica dello spaziotempo coincidono!!!**



Geometria e Gravità

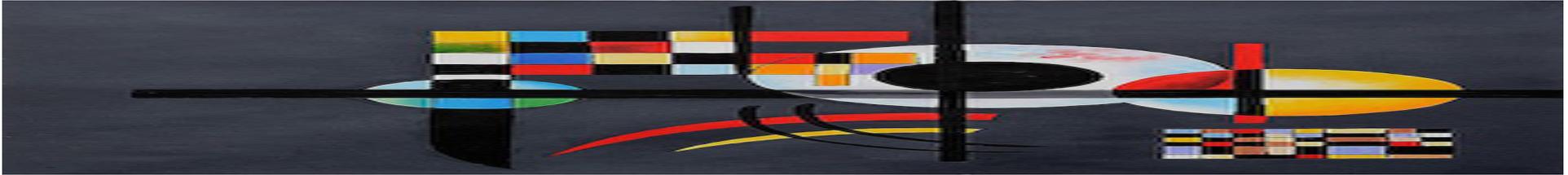
- La *forza* di Newton è sostituita dalla curvatura.
- In uno *spaziotempo incurvato* dalle masse, i corpi si muovono per la *legge d'inerzia* e seguono *linee geodetiche*.



Le equazioni del campo gravitazionale



Kandinsky, Gravitation 1935



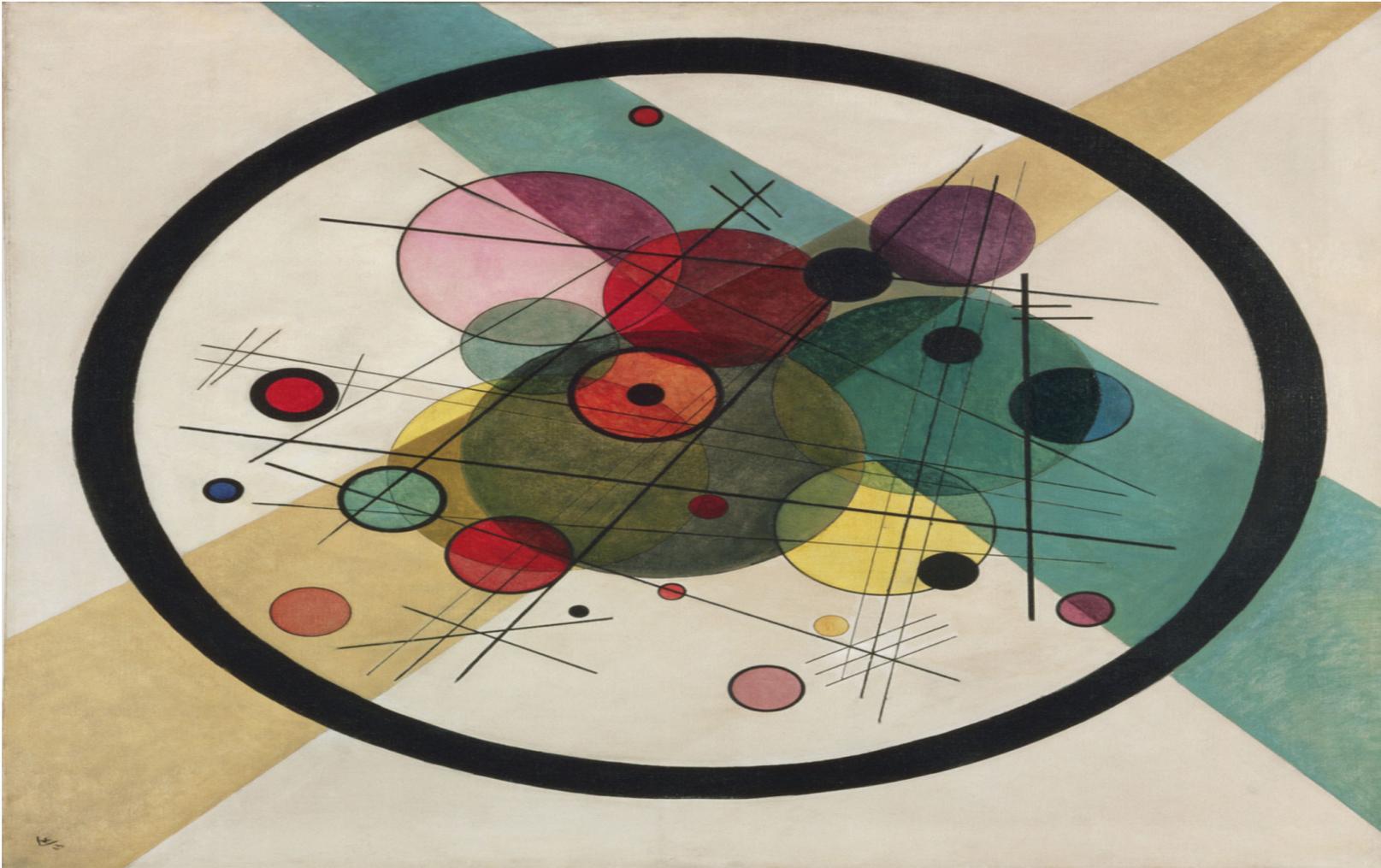
Tra il 1915 e il 1916, gli *Annalen der Physik* pubblicano la teoria geometrica del campo gravitazionale che generalizza quella di Newton per qualsiasi sistema di riferimento

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -8\pi G T_{\mu\nu}$$

CURVATURA = MASSA-ENERGIA



Prove sperimentali della Relatività Generale



Kandinsky, Cerchi in un cerchio 1923

Precessione del perielio di Mercurio

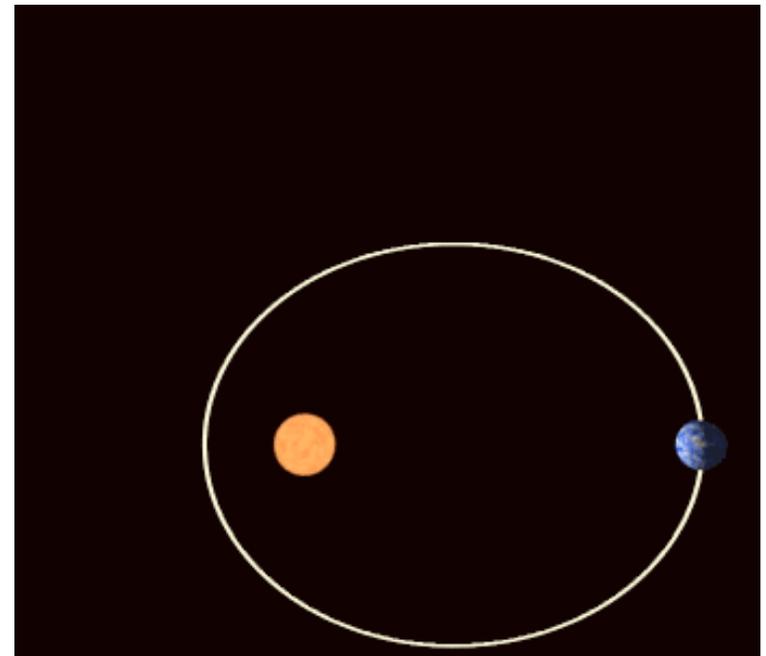
Il perielio avanza di 574" al secolo.

Di questi, 531" sono dovuti a perturbazioni gravitazionali da parte di altri pianeti, soprattutto Venere, Terra e Giove

La differenza, 43" al secolo, è spiegata dalla Relatività Generale

In una lettera che Einstein scrive, verso la fine del 1915, a Sommerfeld dice:

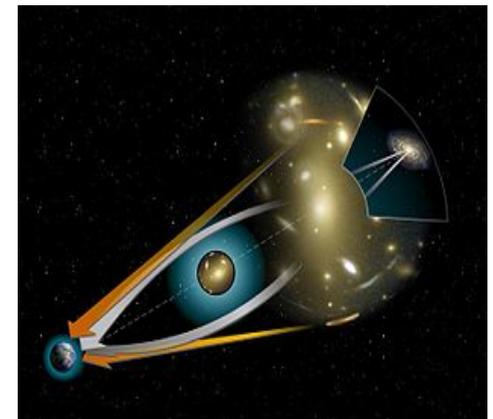
“L'ultimo mese è stato uno dei più intensi della mia vita. Quello che mi rende così felice non è solo il fatto che la teoria di Newton si ottiene come prima approssimazione, ma che la precessione del perielio di Mercurio si ottiene come seconda approssimazione”



Deflessione della luce

- *Nel 1919, durante un'eclissi di Sole, l'equipe guidata da Arthur Eddington osservò che la luce delle stelle nei pressi del disco solare era leggermente deviata, dato che le stelle apparivano in posizioni spostate rispetto al caso in cui erano osservate usualmente.*
- *Newton e Laplace avevano già previsto l'effetto. Ma il calcolo di Einstein è ESATTO!*
- *La **lente gravitazionale** è un fenomeno caratterizzato dalla deflessione della radiazione emessa da una sorgente luminosa a causa della presenza di una massa posta tra la sorgente e l'osservatore.*

Campo gravitazionale si comporta come un mezzo otticamente attivo.



Spostamento verso il rosso

- *Einstein prevede, nel 1907, lo spostamento verso il rosso delle righe spettrali dovuto al campo gravitazionale deducendolo dal **Principio di Equivalenza**.*
- *... è lo spostamento relativo in frequenza di un'onda elettromagnetica dovuto alla forza di gravità di un oggetto compatto.*
- *Definitivamente verificato nel 1959 da **Pound** e **Rebka** che misurano lo spostamento relativo verso il rosso di due sorgenti situate in cima e alla base della torre Jefferson all'Università di Harvard utilizzando l' **effetto Mössbauer** su atomi di ferro.*
- *Primo esperimento di precisione di verifica della Relatività Generale.*



La Cosmologia



Kandinsky Several Circles, 1926

La Cosmologia

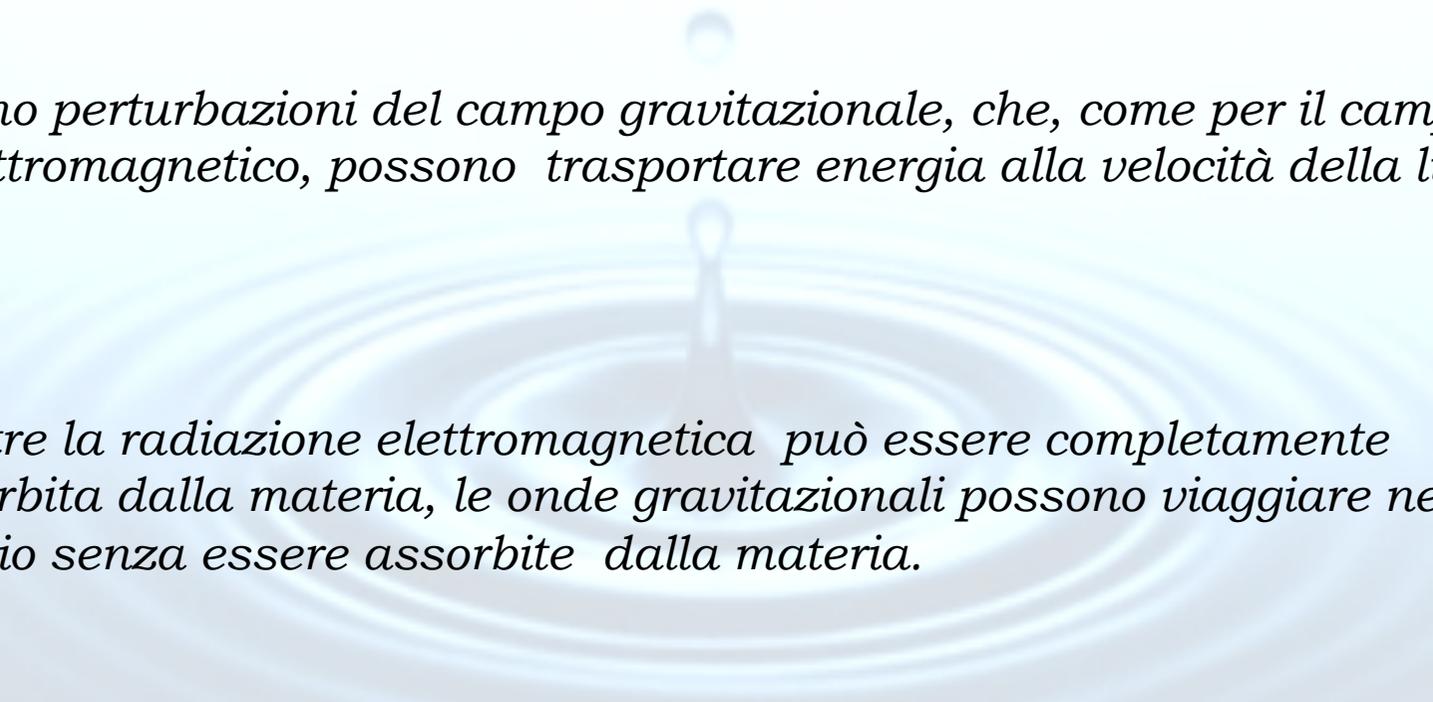
- *Ottobre 1917:*
“Considerazioni cosmologiche sulla Teoria della Relatività Generale”
- *Cosmo come sistema dinamico!*
- *Cosmologia non più tra le “dottrine metafisiche”.*
- *Edwin Hubble scopre l’espansione cosmologica (1924).*
- *Friedmann, Lemâitre, Robertson e Walker formulano il modello cosmologico in espansione. Teoria del Big Bang (1927-30).*
- *Nucleosintesi primordiale (1960-65).*
- *Radiazione di fondo cosmico (1964-65).
Cosmo come sistema Termodinamico!*
- *Struttura a larga scala (1970-1980).*
- *Dark Energy (1998 a oggi).*



“La Prova regina”: Le Onde gravitazionali

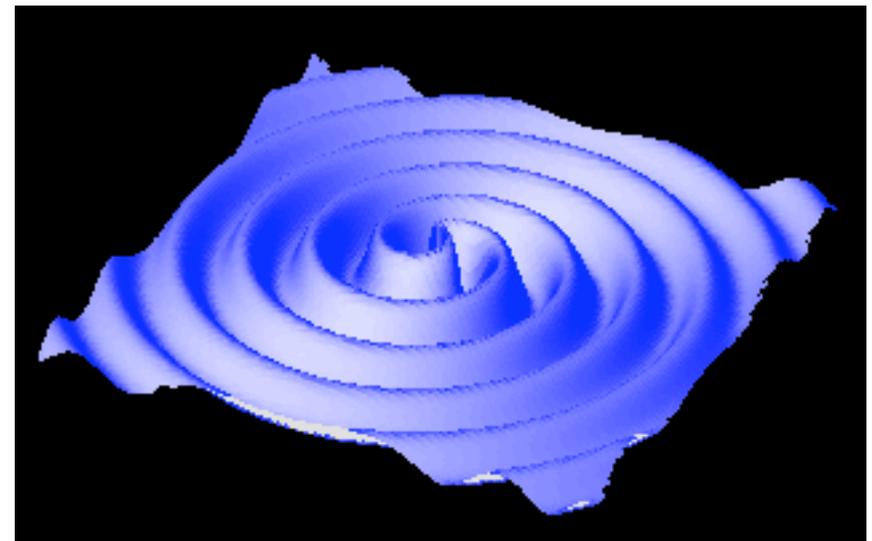
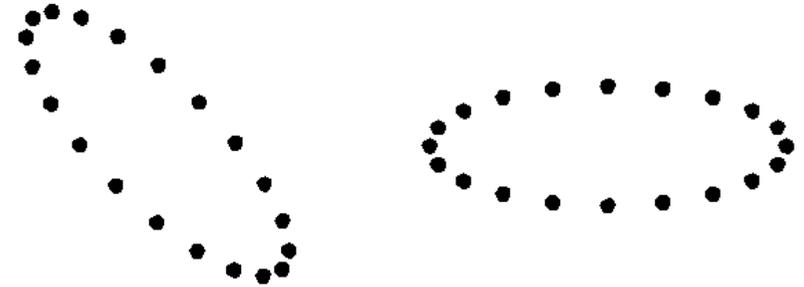


Kandinsky, Composition VI, crash of a tidal wave of colliding forms .. 1913

- 
- *La teoria di Einstein prevede l'esistenza di **onde gravitazionali***
 - *Sono perturbazioni del campo gravitazionale, che, come per il campo elettromagnetico, possono trasportare energia alla velocità della luce.*
 - *Mentre la radiazione elettromagnetica può essere completamente assorbita dalla materia, le onde gravitazionali possono viaggiare nello spazio senza essere assorbite dalla materia.*
 - *A causa della debolezza dell'interazione gravitazionale, la loro rivelazione risulta straordinariamente difficile.*

Caratteristiche delle Onde Gravitazionali

- *Due polarizzazioni.*
- *Natura quadrupolare.*
- *Generate da effetti mareali di oggetti astrofisici.*
- *Buchi neri, stelle di neutroni, collasso gravitazionale, stelle binarie coalescenti.*

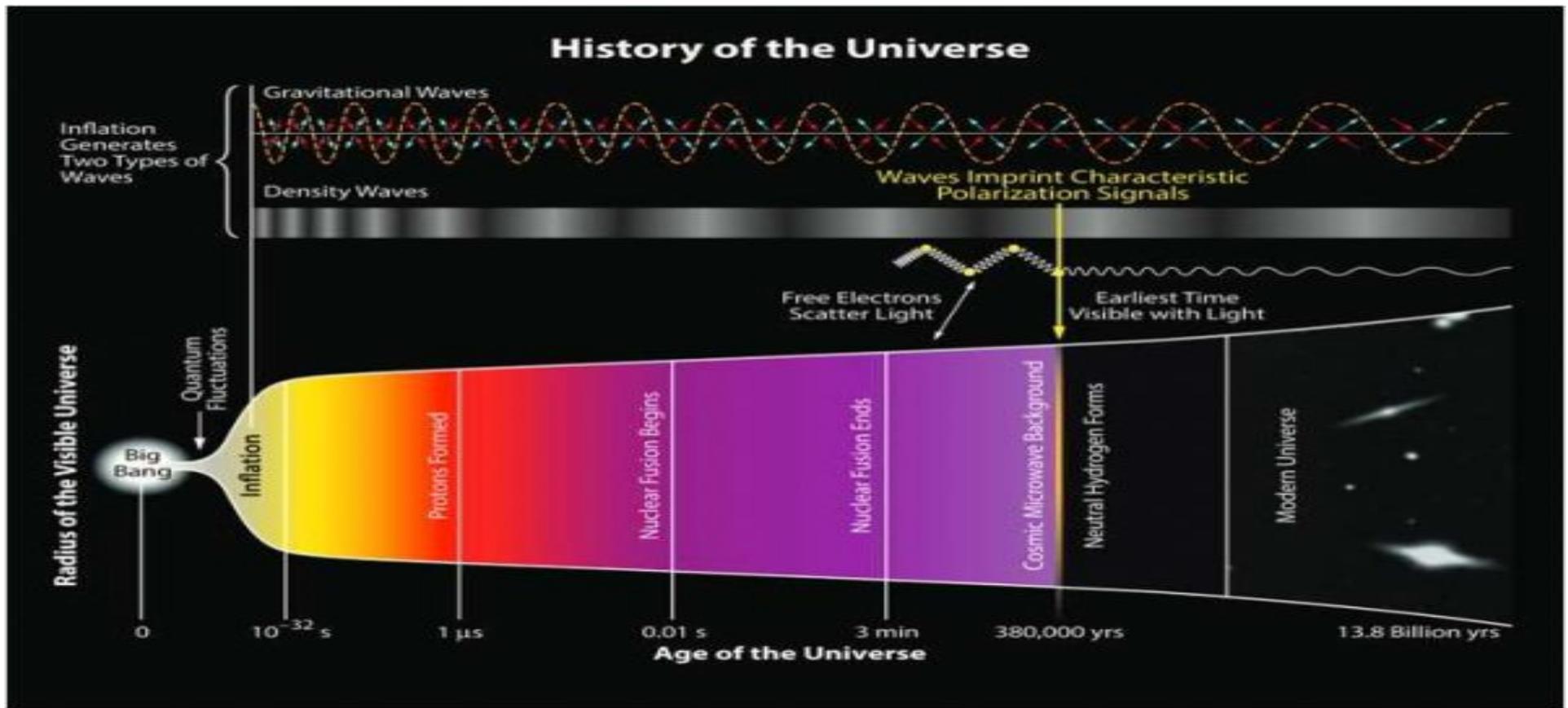


Ricerca di onde gravitazionali nel mondo



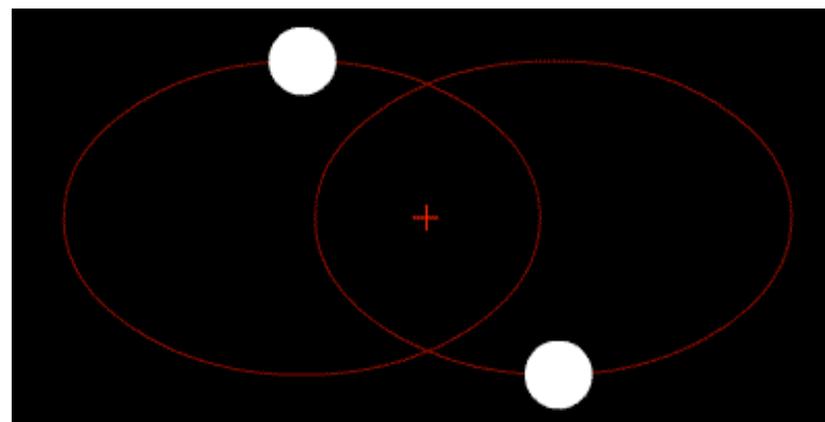
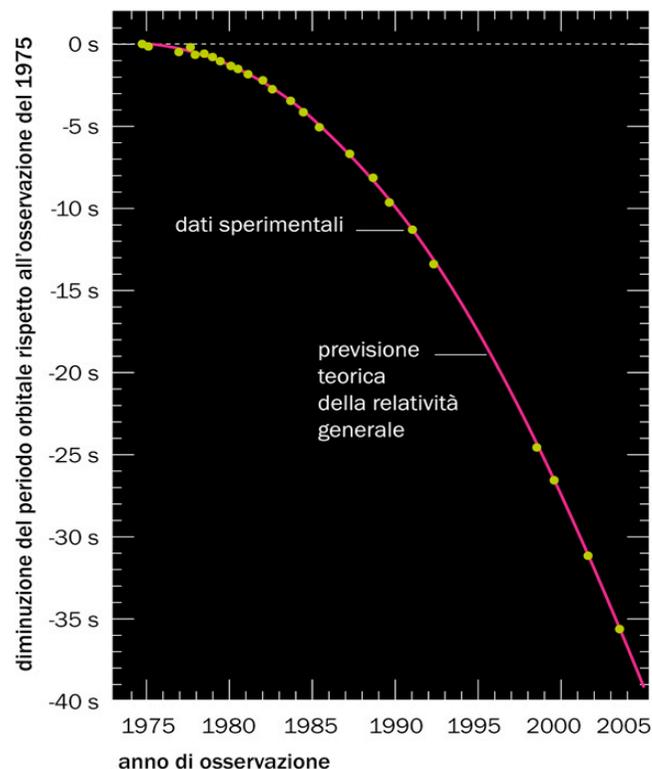
A cosa servono le onde gravitazionali ?

- *Verifica diretta della Relatività Generale*
- *Ci darebbero una “fotografia” dell’universo a tutte le epoche*

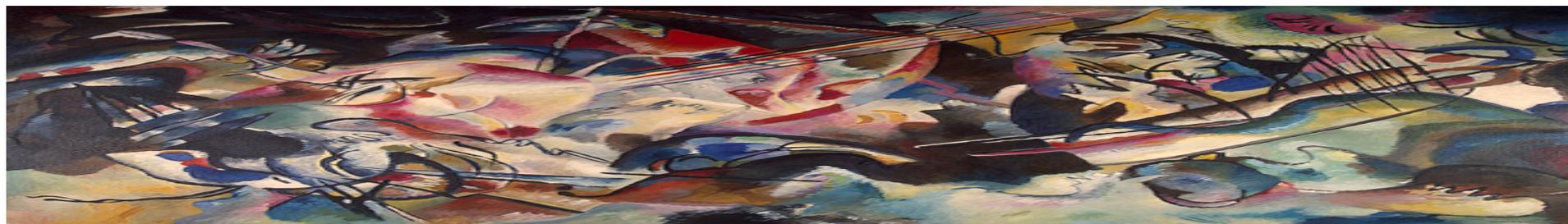


PSR1913+16: una conferma indiretta

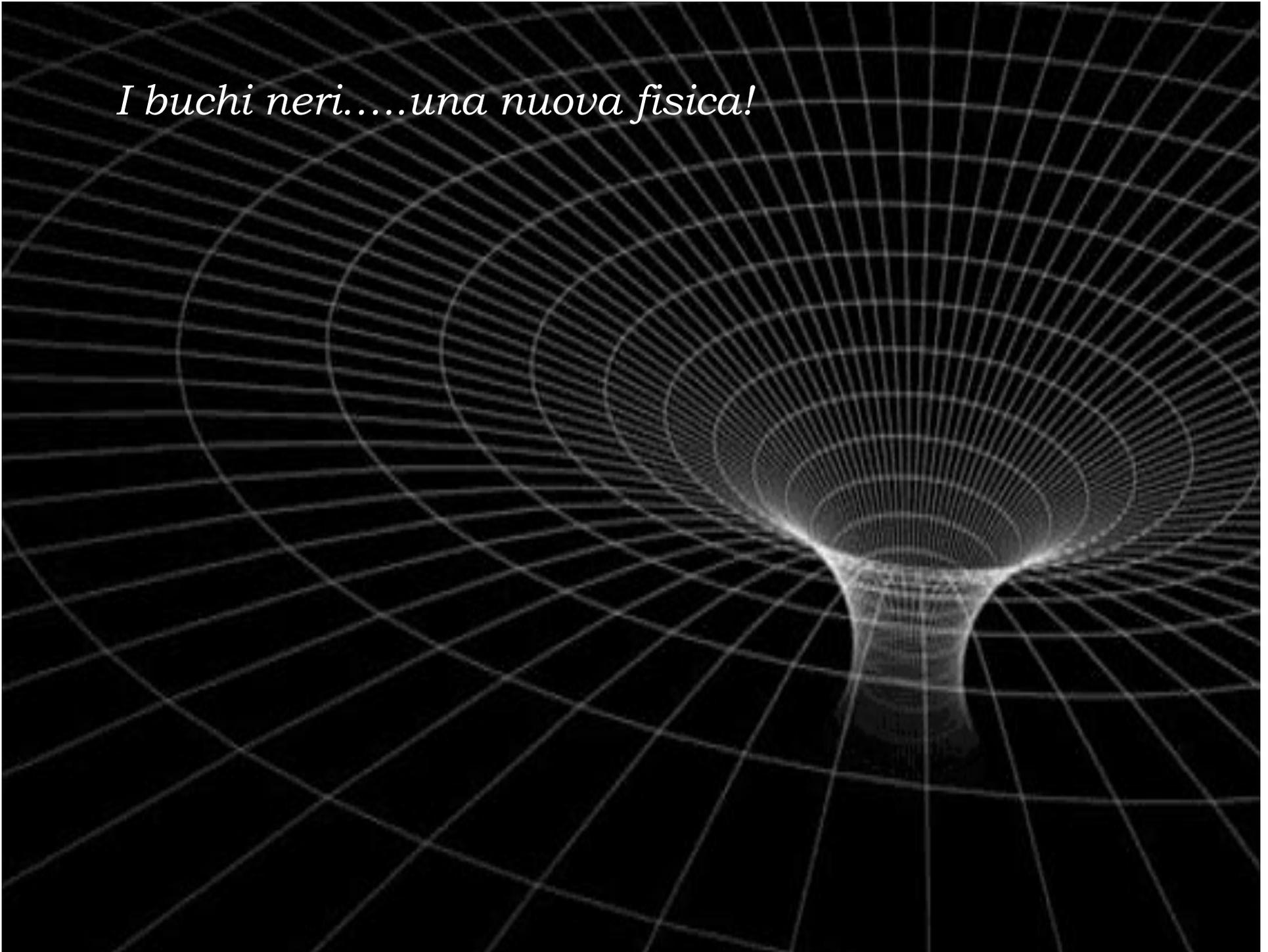
Una conferma, seppure indiretta, dell'emissione di onde gravitazionali si deve all'osservazione della pulsar binaria PSR1913+16, scoperta da **Hulse e Taylor** nel 1974.

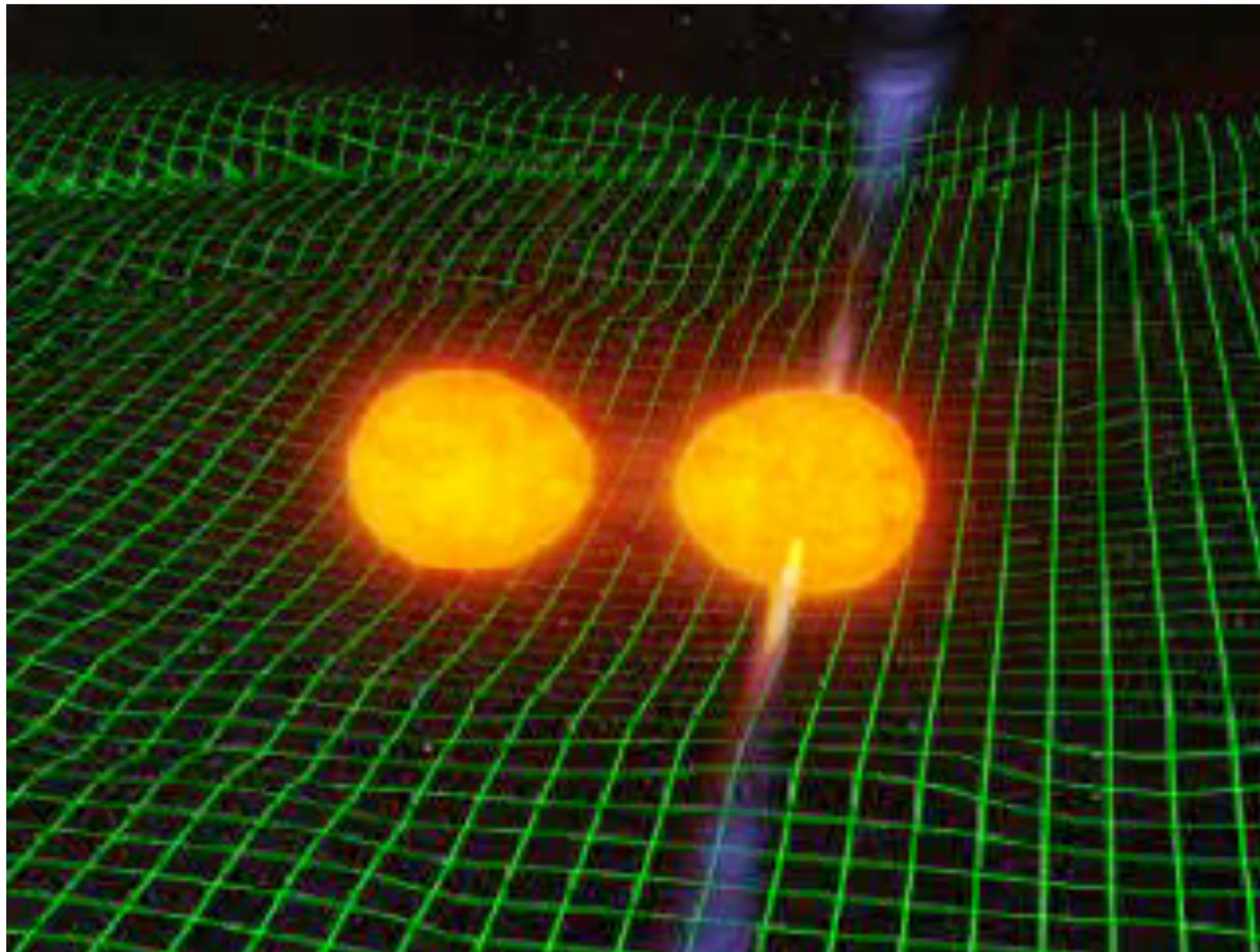


L'emissione di onde gravitazionali riduce l'energia del moto orbitale: le due stelle tendono ad avvicinarsi l'una all'altra di alcuni metri all'anno e la periodicità degli impulsi radio diminuisce di una quantità che possiamo misurare esattamente.



I buchi neri....una nuova fisica!





Oltre Einstein



Kandinsky: Giallo -Rosso - Azzurro (1925)

- *Il contenuto dell'universo è, oggi, in gran parte sconosciuto*
- *La situazione è molto "**dark**", mentre le osservazioni sono precise. La **Relatività Generale** non ci dà tutte le risposte.*



Perchè estendere la Relatività Generale?

- *E' in disaccordo con molti dati osservativi alle scale dell'**infrarosso** (scale astrofisiche e cosmologiche, basse energie).*
- *Non è rinormalizzabile e non può essere quantizzata alle scale dell'**ultravioletto** (alte energie, scale microscopiche).*
- *Presenta singolarità (es. singolarità iniziale del Big Bang e buchi neri).*
- ***Dark Energy** e **Dark Matter** sintomo dell'inadeguatezza della Relatività Generale alle scale galattiche e cosmologiche.*

MOLTI PROBLEMI APERTI!!!!





*“... Ci sono quelli che inventano **Fluidi Occulti** per capire le leggi della natura. Giungono a conclusioni che non sono altro che **sogni e chimere**, trascurando la vera costituzione delle cose Ma ci sono quelli che, dalla semplice osservazione della natura, sono in grado di dedurre **nuove leggi** ”*

*Dalla Prefazione dei PRINCIPIA (II Edizione del 1713)
di Isaac Newton, scritta da Mr. Roger Cotes*



Albert Einstein: Fisica e Filosofia

*“Spesso si è detto, e certamente non senza giustificazione, che l’uomo di scienza è un filosofo mediocre. Non sarebbe allora meglio che i fisici lasciassero ai filosofi il “filosofare”? Questa può essere la cosa migliore in un’epoca in cui il fisico credesse di avere a propria disposizione un solido sistema di concetti e leggi basilari ben fondate e senza dubbi; ma questo non è possibile in un’epoca come la nostra in cui i fondamenti della fisica sono divenuti problematici. Oggi, l’esperienza ci obbliga a cercare nuovi e più solidi fondamenti, quindi lo scienziato non può lasciare al filosofo la considerazione critica dei fondamenti teorici; **“lo scienziato sa meglio e sente più nettamente dove la scarpa fa male!”**”*

