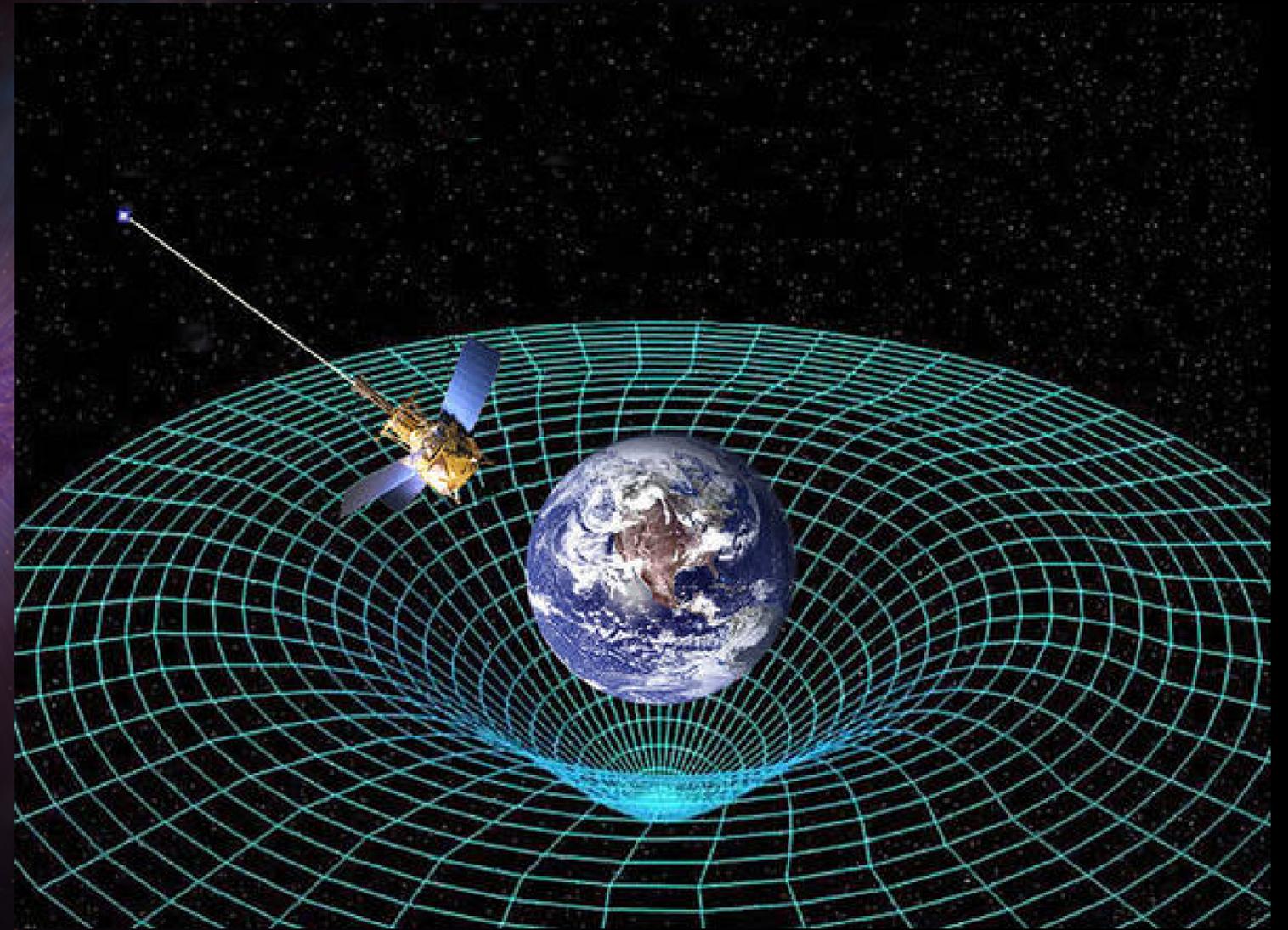


RELATIVITÀ GENERALE E CURVATURA DELLO SPAZIO-TEMPO



LA RELATIVITÀ GENERALE

primo principio della *relatività ristretta*

"Le leggi della fisica sono le stesse
in tutti i sistemi di riferimento
inerziali"

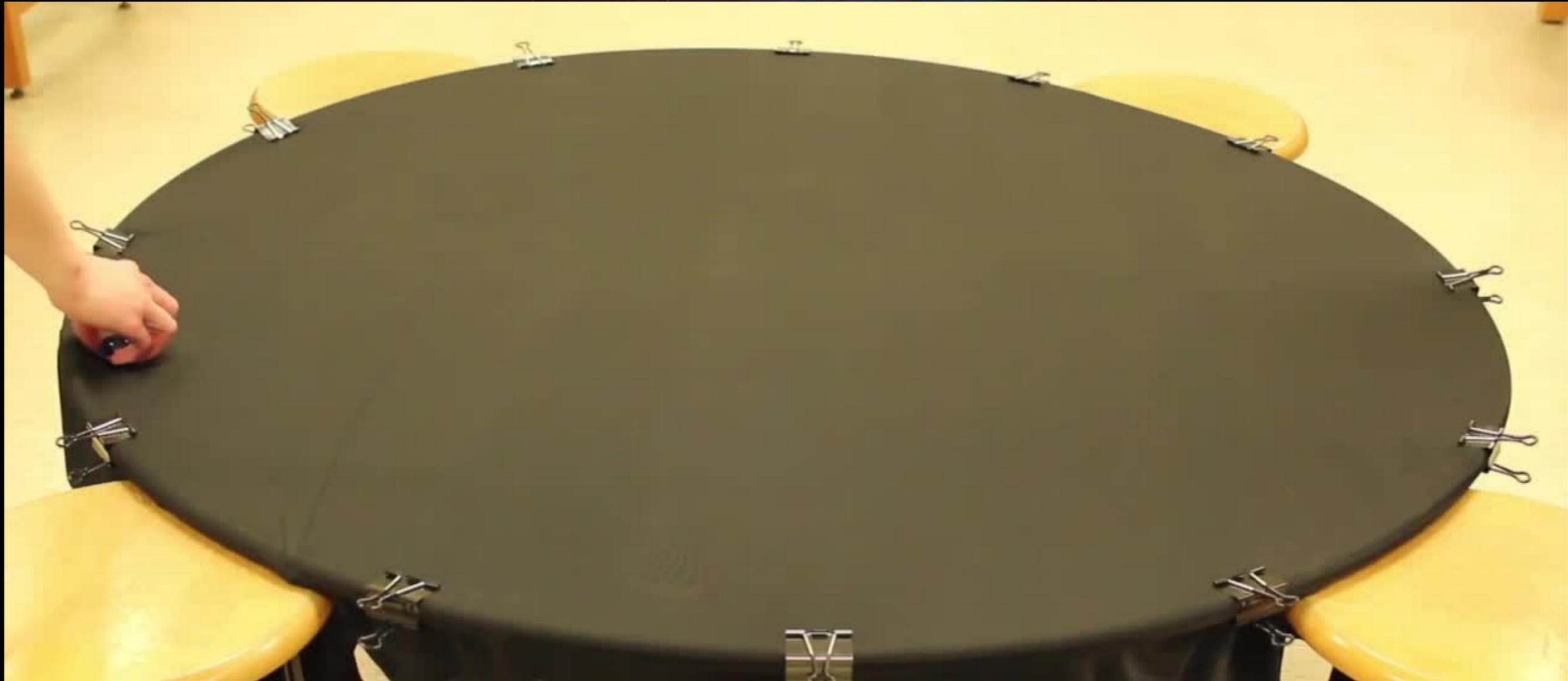
1905

principio di *relatività generale*

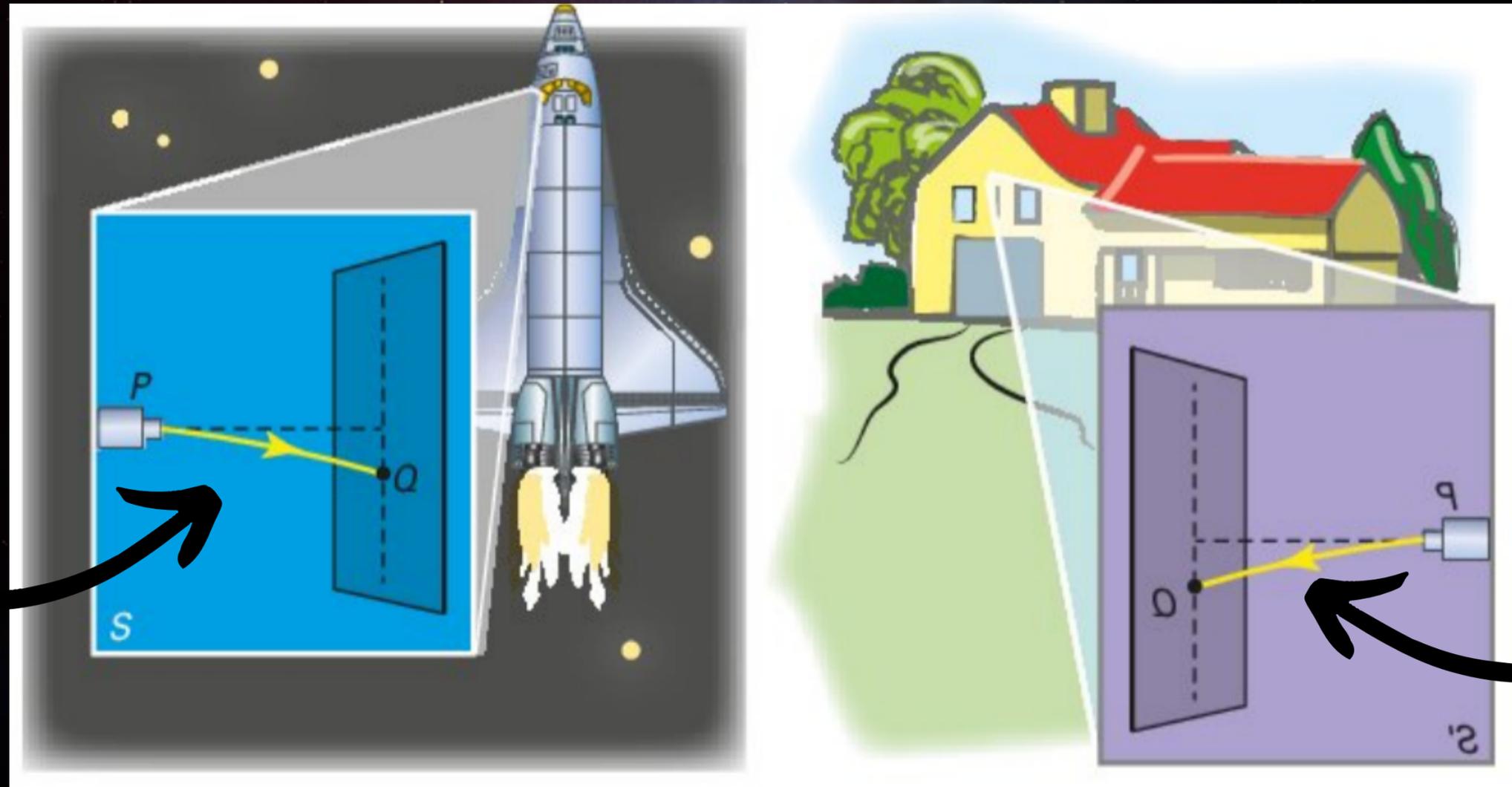
"Le leggi della fisica hanno la
stessa forma in tutti i sistemi di
riferimento"



VECCHIO MODELLO DELL'UNIVERSO: NEWTON

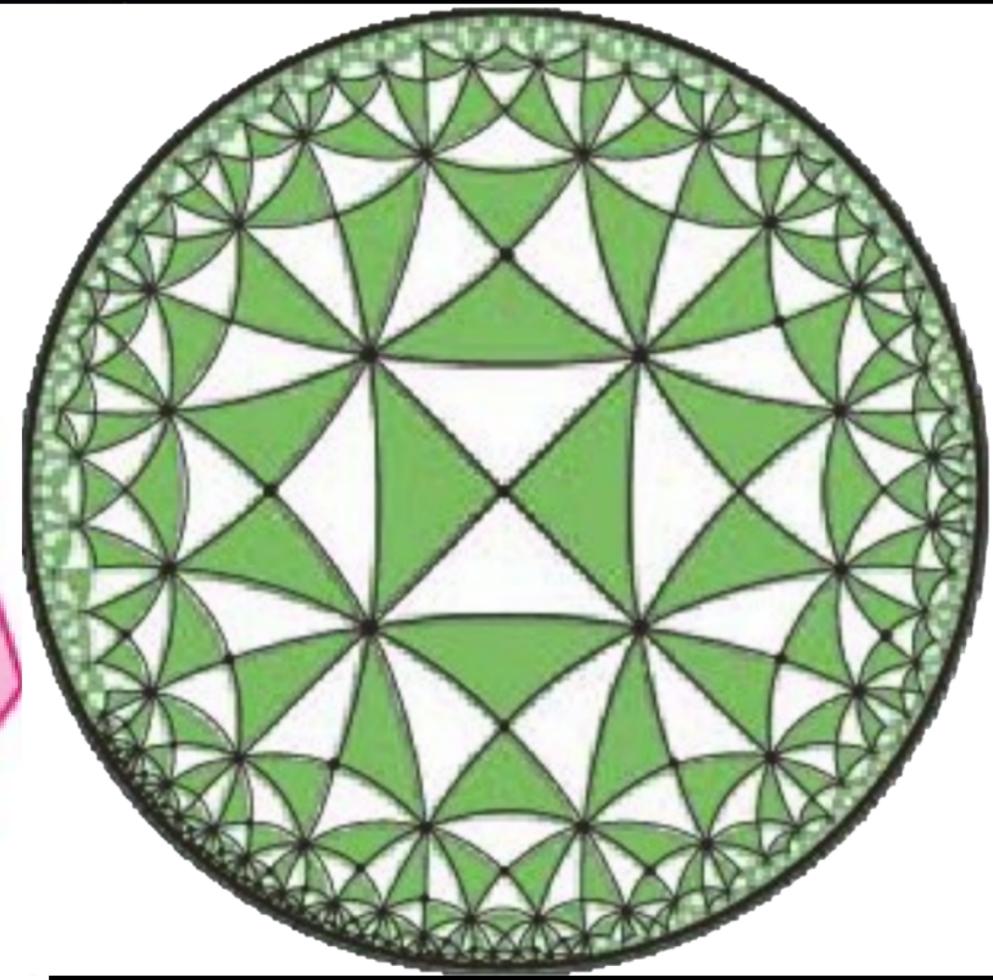
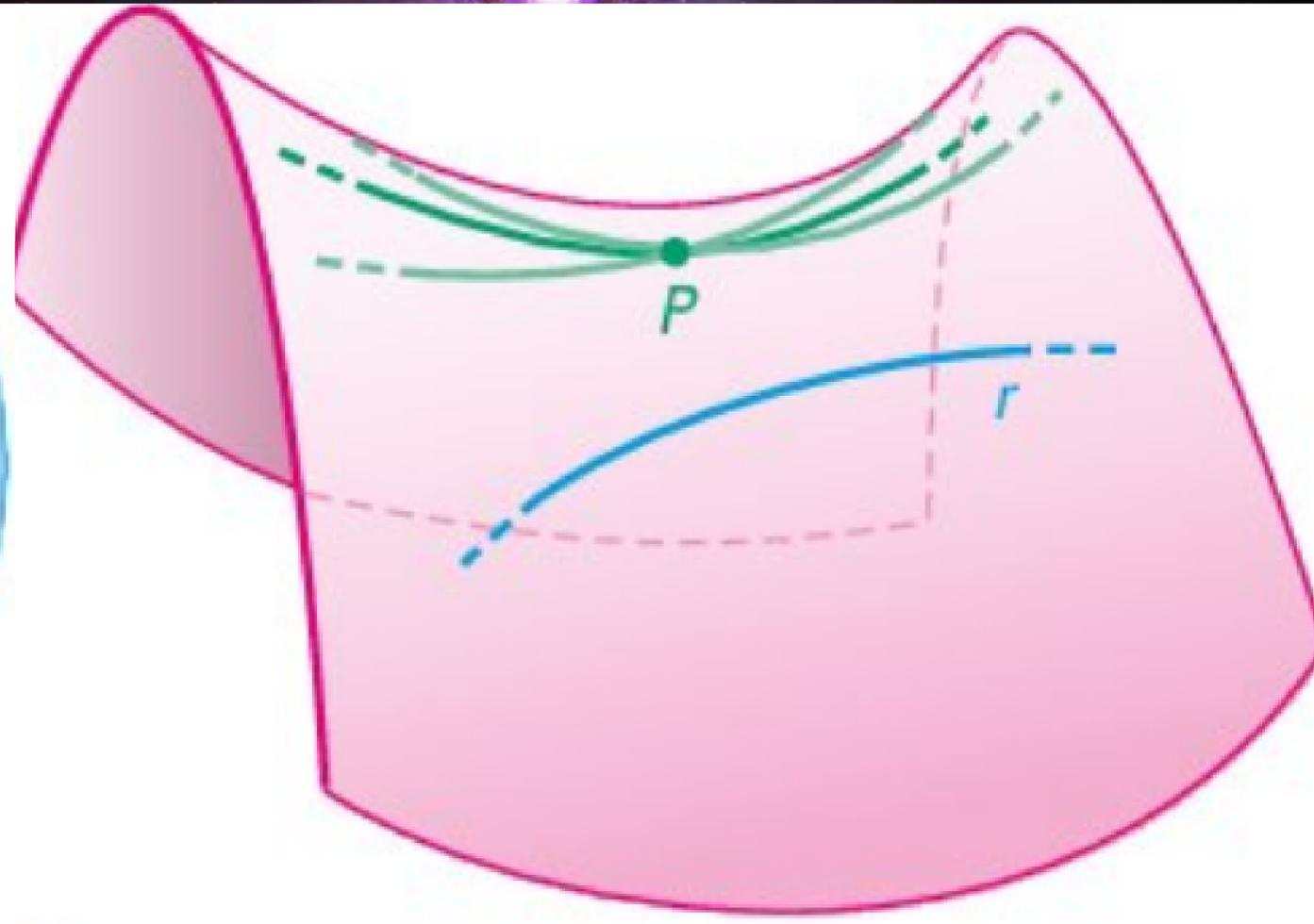
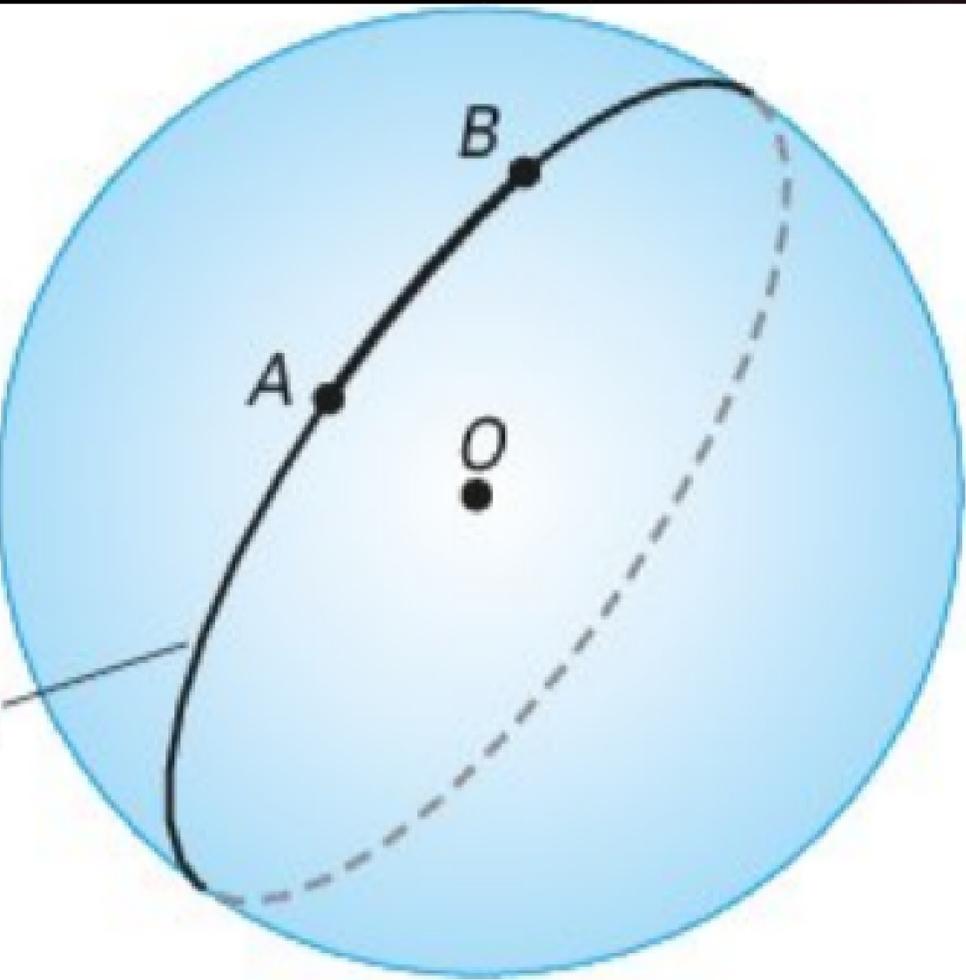


Analizziamo cosa succede ad un raggio di luce in due diversi sistemi di riferimento



Soluzione rivoluzionaria del problema

GEOMETRIE NON EUCLIDEE



Nuovo modello: la *deflessione* gravitazionale della luce

Geometria dello spazio-tempo

Equazione di campo: $G = k^*t$

NEL 1916 EINSTEIN INDICAVA TRE CONSEGUENZE DELLA CURVATURA DELLO SPAZIO-TEMPO:

- precessione del perielio dei pianeti nel moto di rivoluzione attorno al Sole;

- deviazione gravitazionale del raggio luminoso

- dilatazione gravitazionale del tempo



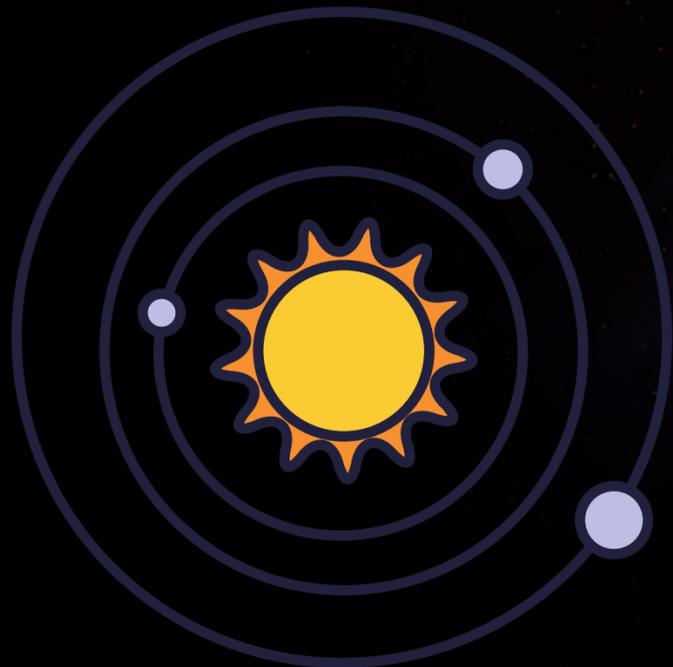
CONSEGUENZE E CONFERME SPERIMENTALI DELLA RELATIVITA' GENERALE



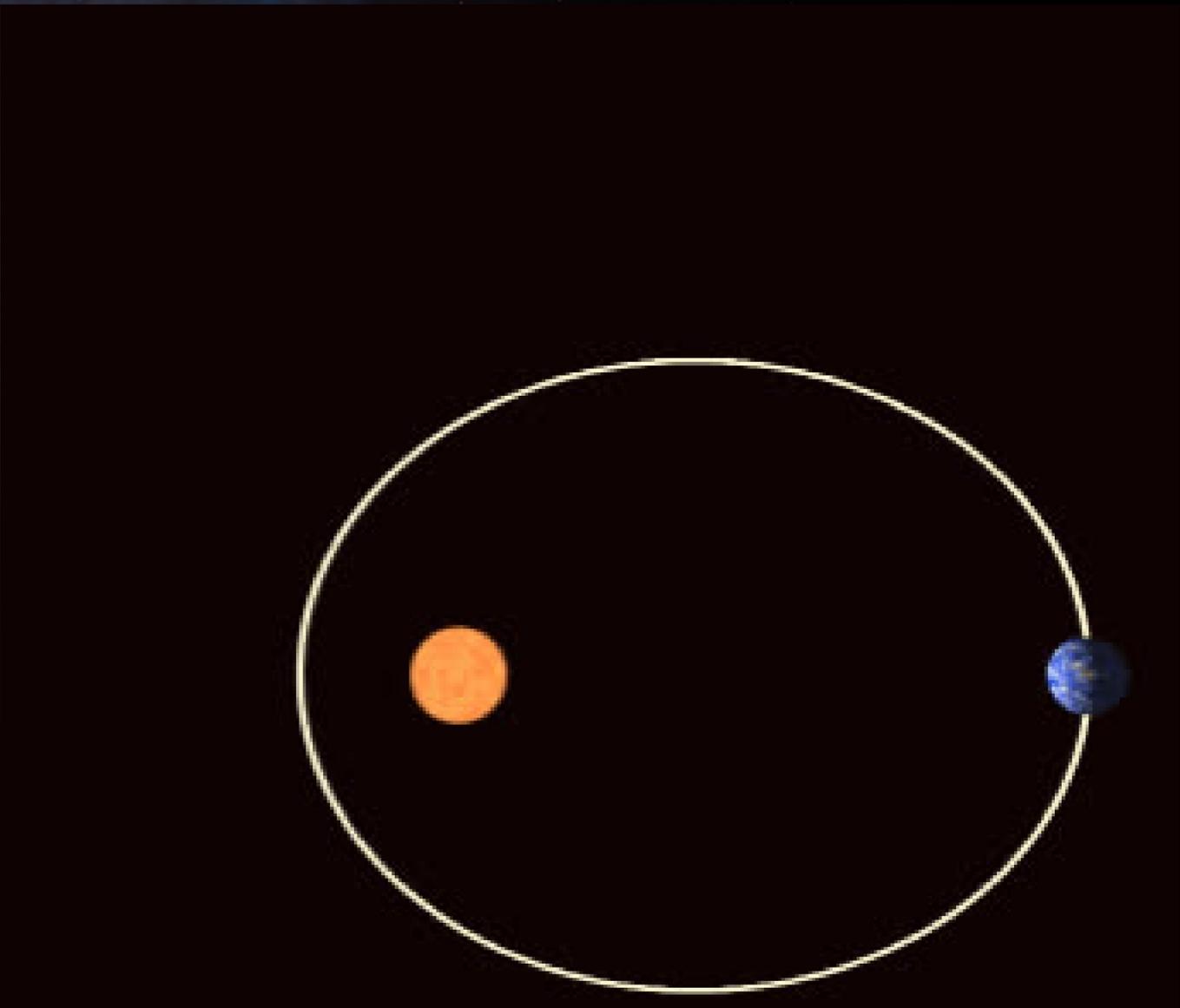
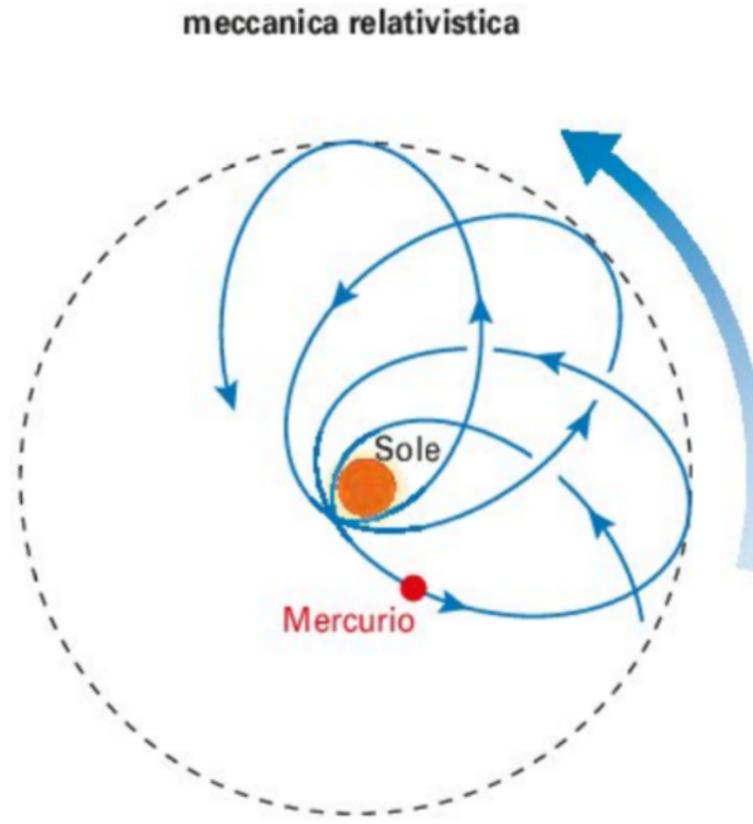
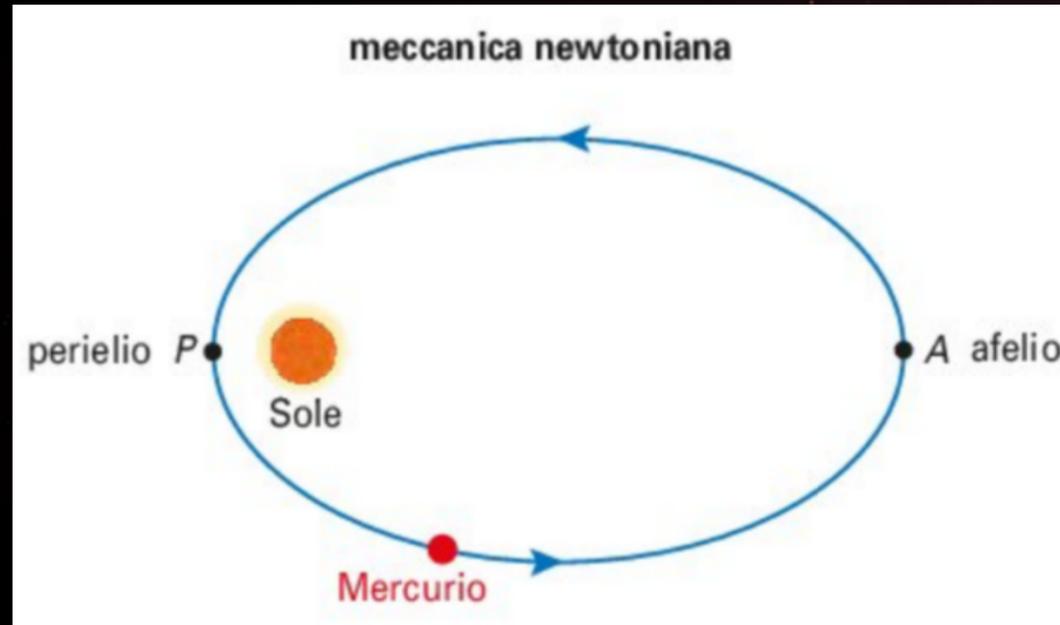
PRECESSIONE DEL PERIELIO DEI PIANETI NEL MOTO DI RIVOLUZIONE ATTORNO AL SOLE

in base alla relatività generale le orbite descritte da tutti i pianeti non conservano la loro posizione ma ruotano nella stessa direzione del moto del pianeta.

Questo fenomeno è noto anche come **precessione del perielio**.

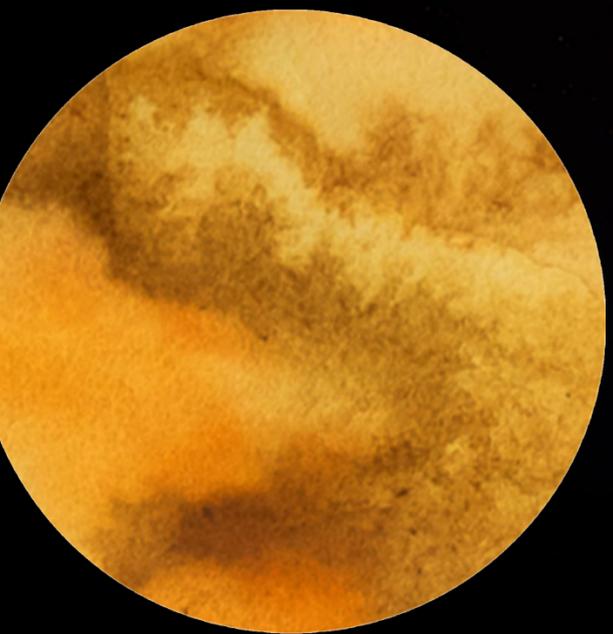


PRECESSIONE DEL PERIELIO DEI PIANETI NEL MOTO DI RIVOLUZIONE ATTORNO AL SOLE



DILATAZIONE GRAVITAZIONALE DEL TEMPO

Nel 1925 le misure di un astronomo statunitense Walter S. Adams, confermarono che la luce proveniente da una stella è soggetta al **red shift gravitazionale**, uno spostamento dello spettro elettromagnetico verso il rosso a causa del campo gravitazionale.

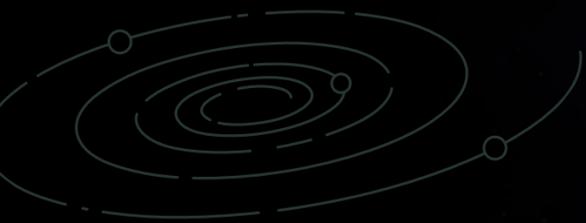


SPAZIO E TEMPO NON SONO
INDIPENDENTI



DILATAZIONE GRAVITAZIONALE DEL
TEMPO

RED SHIFT GRAVITAZIONALE

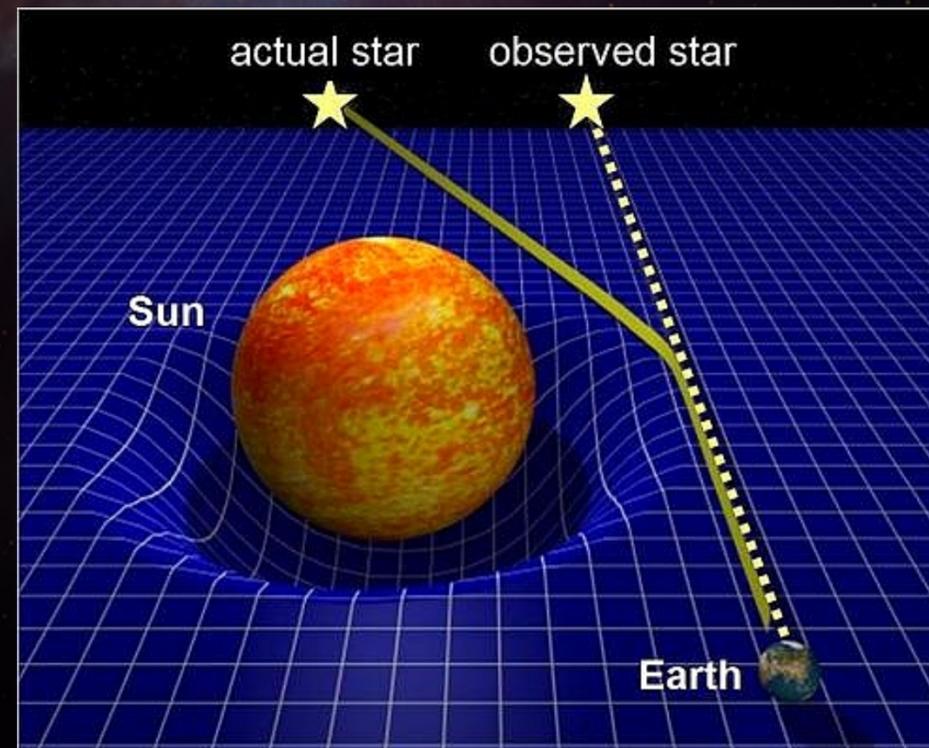


**What is Gravitational Redshift in
General Relativity?**

DEVIAZIONE GRAVITAZIONALE DI UN RAGGIO LUMINOSO

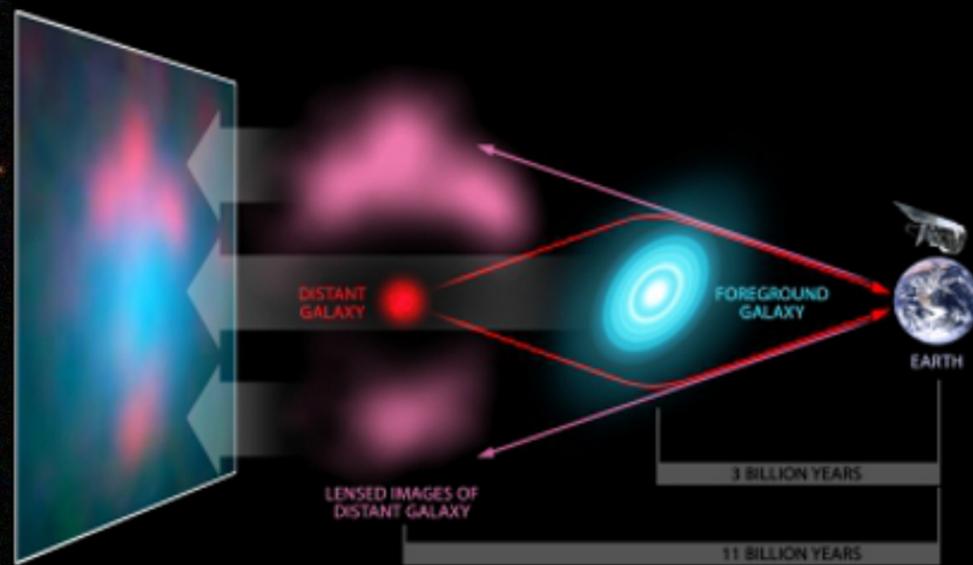
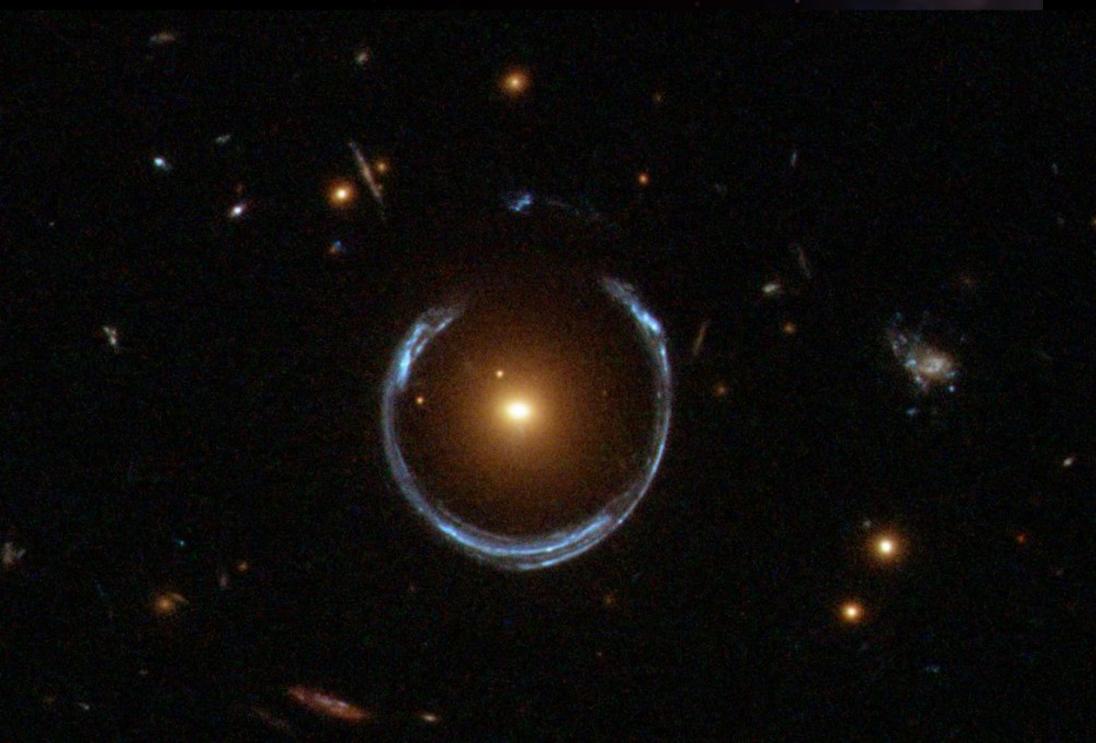
Di questa conseguenza abbiamo ben tre osservazioni:

La prima è che Einstein prevede che **la luce proveniente da una stella subisce una deviazione a causa del campo gravitazionale del Sole**. Nel 1919 venne tutto verificato da una spedizione di astronomi guidata da Eddington che fotografò la zona di cielo circostante il Sole durante un'eclissi e ripetendo la foto qualche mese dopo.



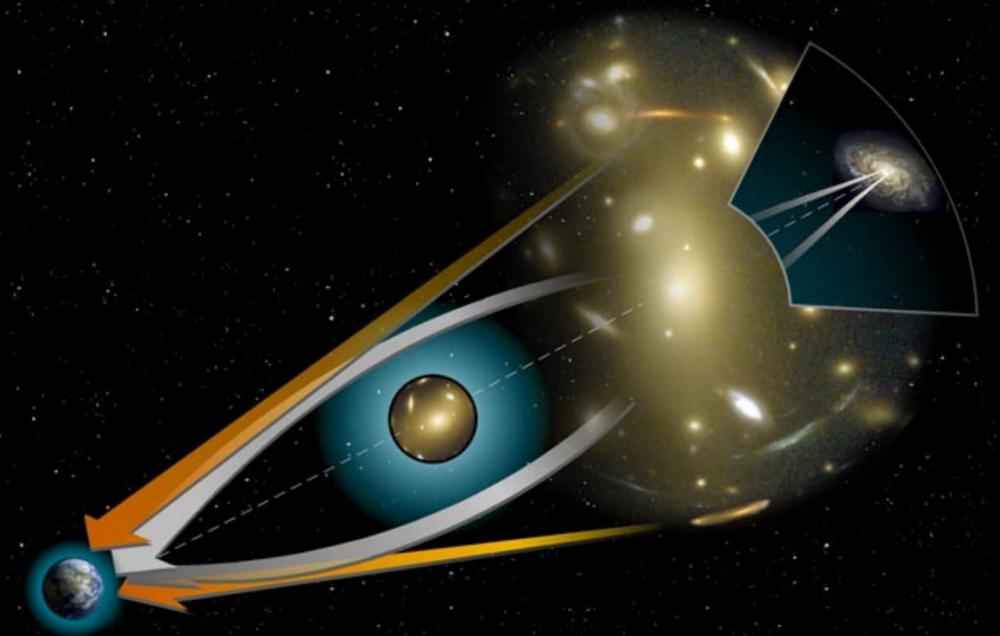
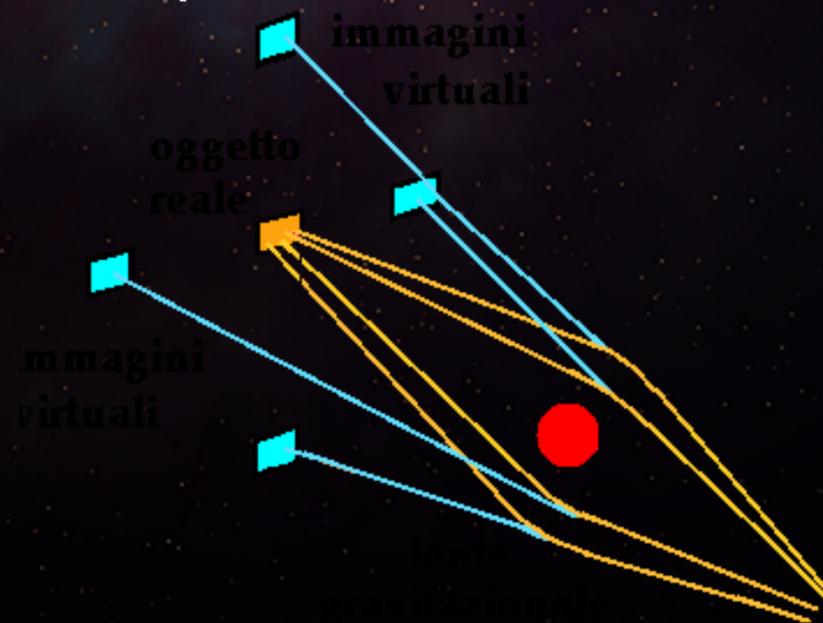
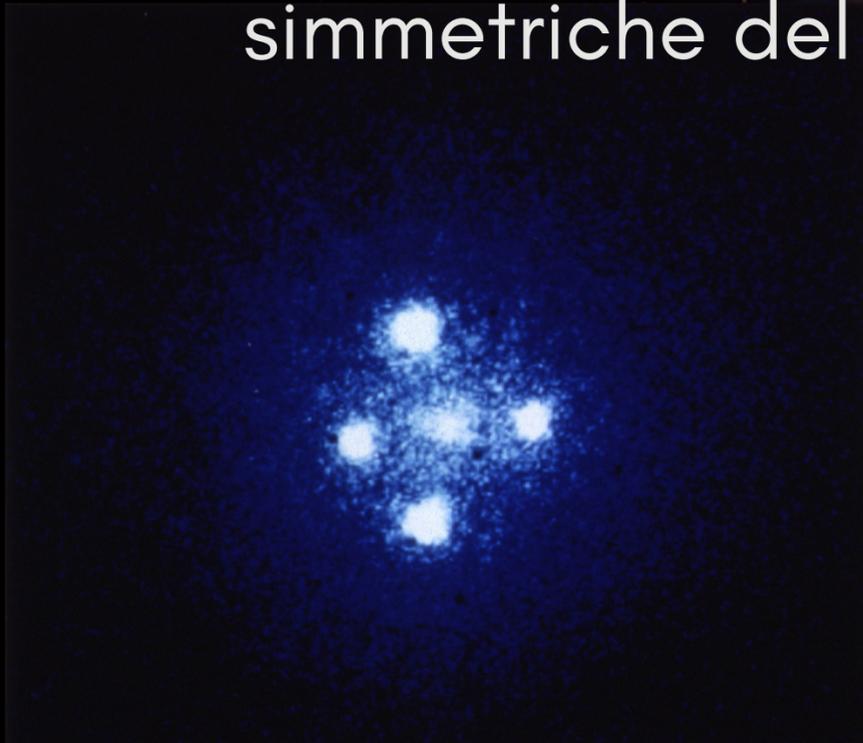
DEVIAZIONE GRAVITAZIONALE DI UN RAGGIO LUMINOSO

La seconda osservazione proviene da un'ipotesi nella quale Einstein affermava che la luce di una stella A, allineata perfettamente dietro una stella B di grande massa avrebbe subito un fenomeno detto **deflessione** apparendo come un **anello luminoso della stella**. Il fenomeno fu poi fotografato dal telescopio spaziale Hubble e passò alla storia con il nome di **lente gravitazionale**



DEVIAZIONE GRAVITAZIONALE DI UN RAGGIO LUMINOSO

L'ultima osservazione riguarda la famosa **Croce di Einstein**, fenomeno rilevato nel 1980. L'immagine è del **quasar** (nucleo galattico attivo estremamente luminoso) G2237 + 0305 distante 8 miliardi di anni luce la cui luce viene deviata dalla galassia ZW2237 + 030 che funge da lente gravitazionale, trovandosi sul percorso quasar-Terra alla distanza di 400 milioni di anni luce. Le deviazioni subite portano a immagini simmetriche del quasar che possono essere doppie, triple o quaduple.

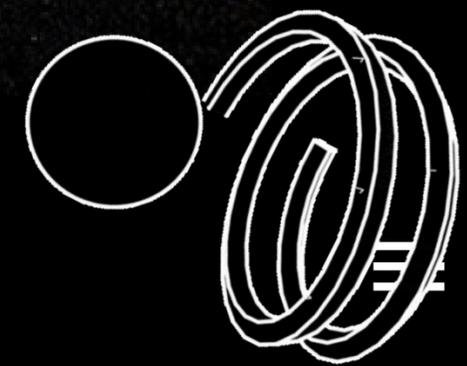
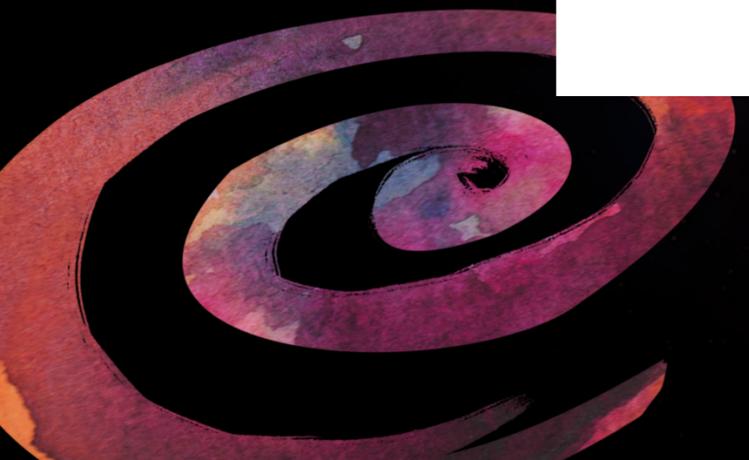
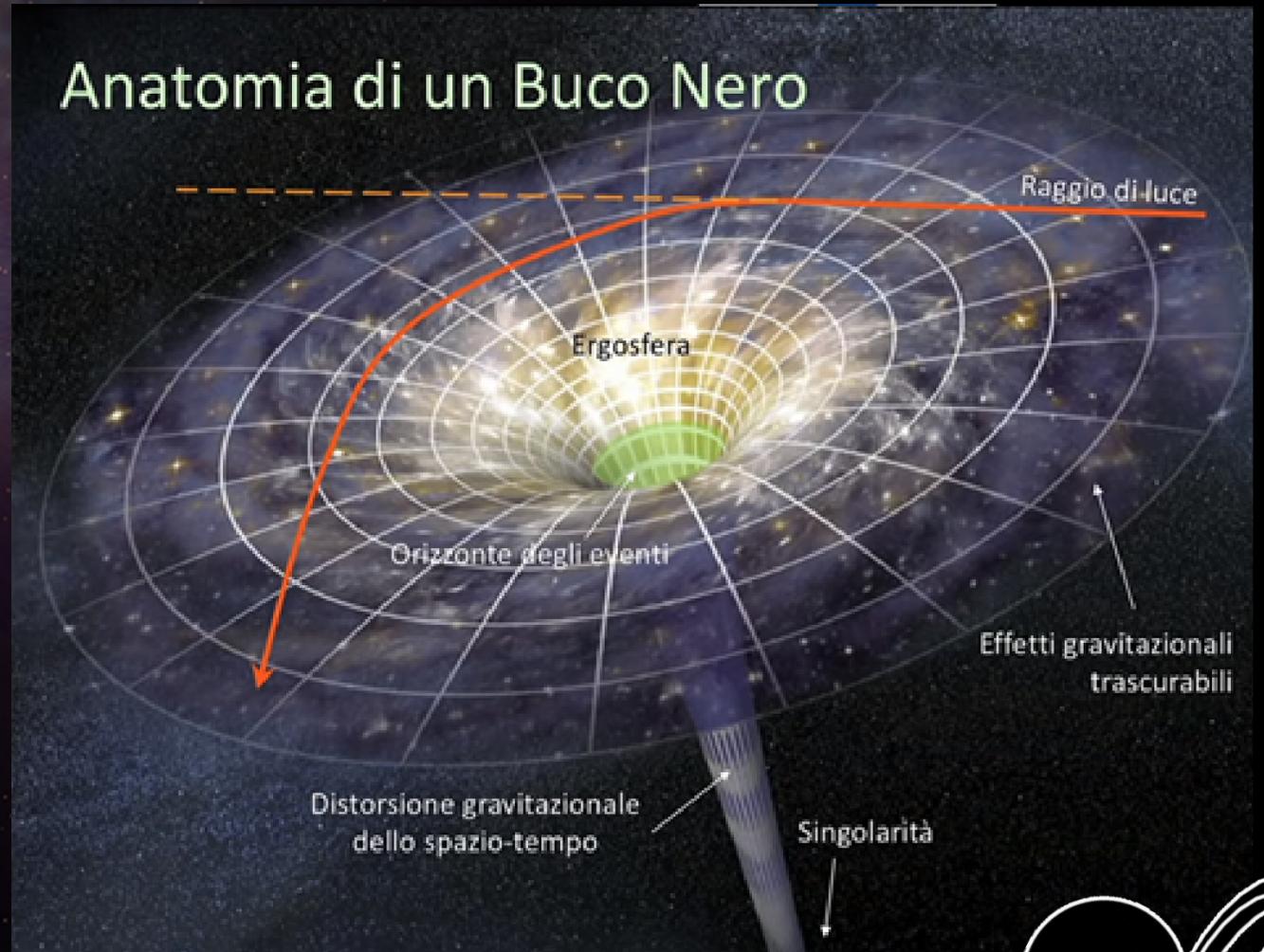
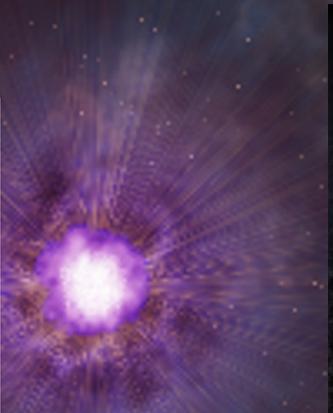


BUCHI NERI



sono tra i più misteriosi e affascinanti elementi dell'Universo

$$E_c + U = \text{cost} \rightarrow \frac{1}{2}mv^2 - G \frac{M+m}{r} = \text{cost}$$
$$\frac{1}{2}mv^2 - G \frac{M * m}{r} = 0$$
$$v_f = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$
$$r = \frac{2GM}{c^2}$$

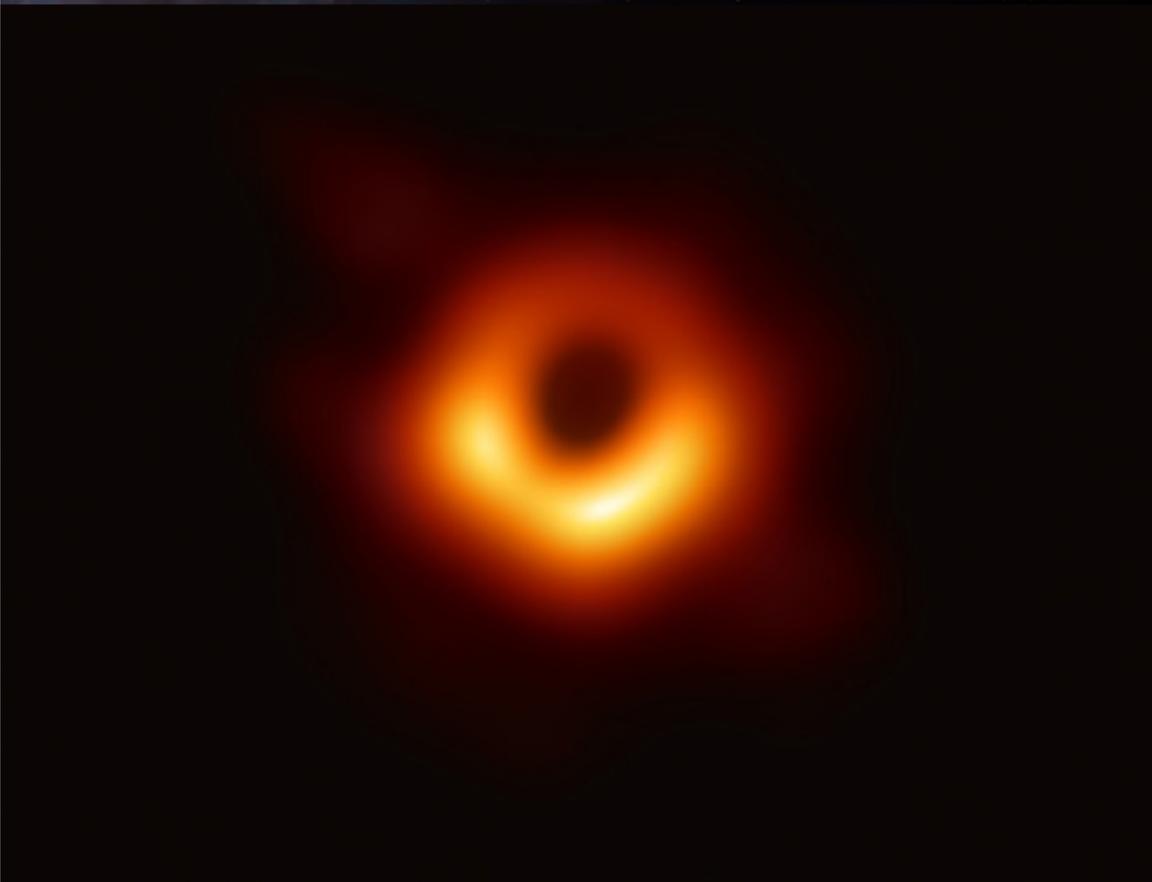
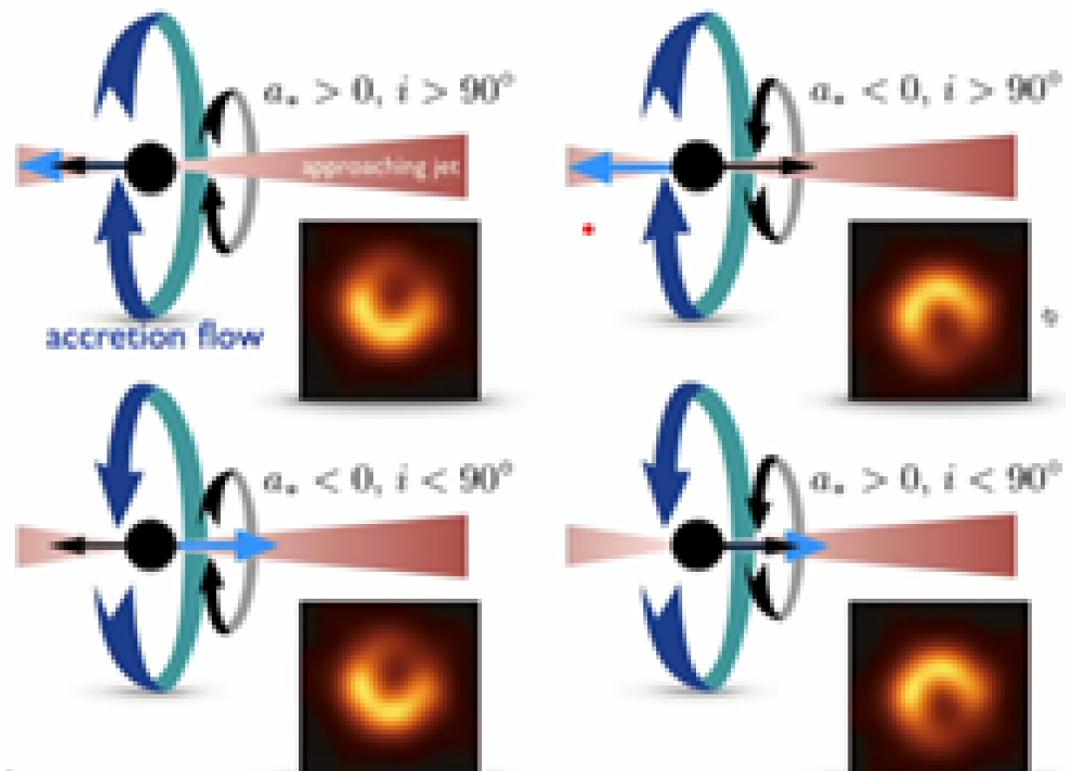


"LA FOTO DEL SECOLO"

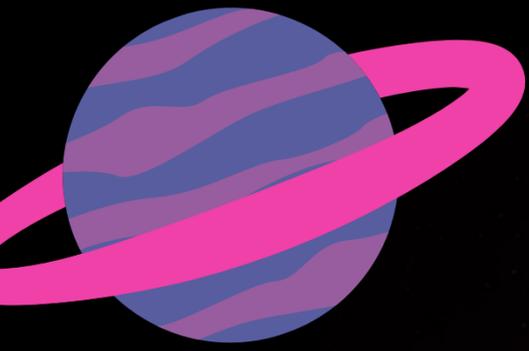
il soggetto è il buco nero supermassiccio della galassia M87
EVENT HORIZON TELESCOPE, 10 APRILE 2019



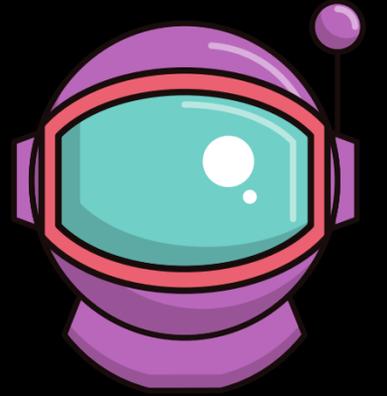
Rotazioni e asimmetrie



$$\theta = \lambda / D_{\max} = 25 \mu\text{a.s.}$$



COSMOLOGIA



ricerca di un **modello**

cosmologico coerente



stazionario

illimitato



non

stazionario in

espansione

ONDE GRAVITAZIONALI

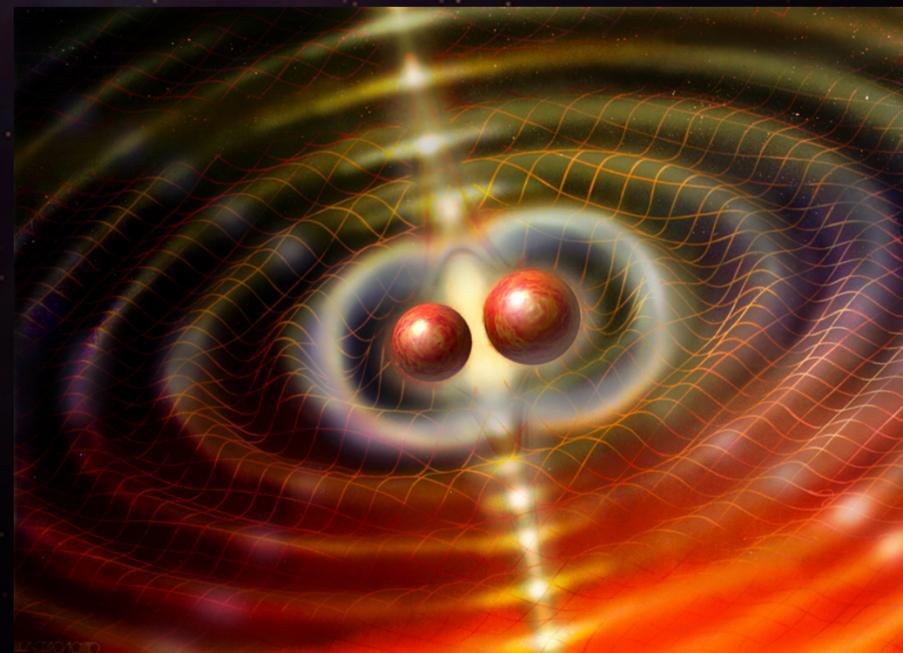
L'onda gravitazionale è una perturbazione dello spaziotempo che si propaga con carattere ondulatorio.

Si generano da fenomeni cosmici in cui enormi masse variano la loro distribuzione in modo repentino: la formazione di un buco nero, il collasso tra due stelle, con l'esplosione di una supernova è una radiazione a tutti gli effetti

collaborazione LIGO/VIRGO:

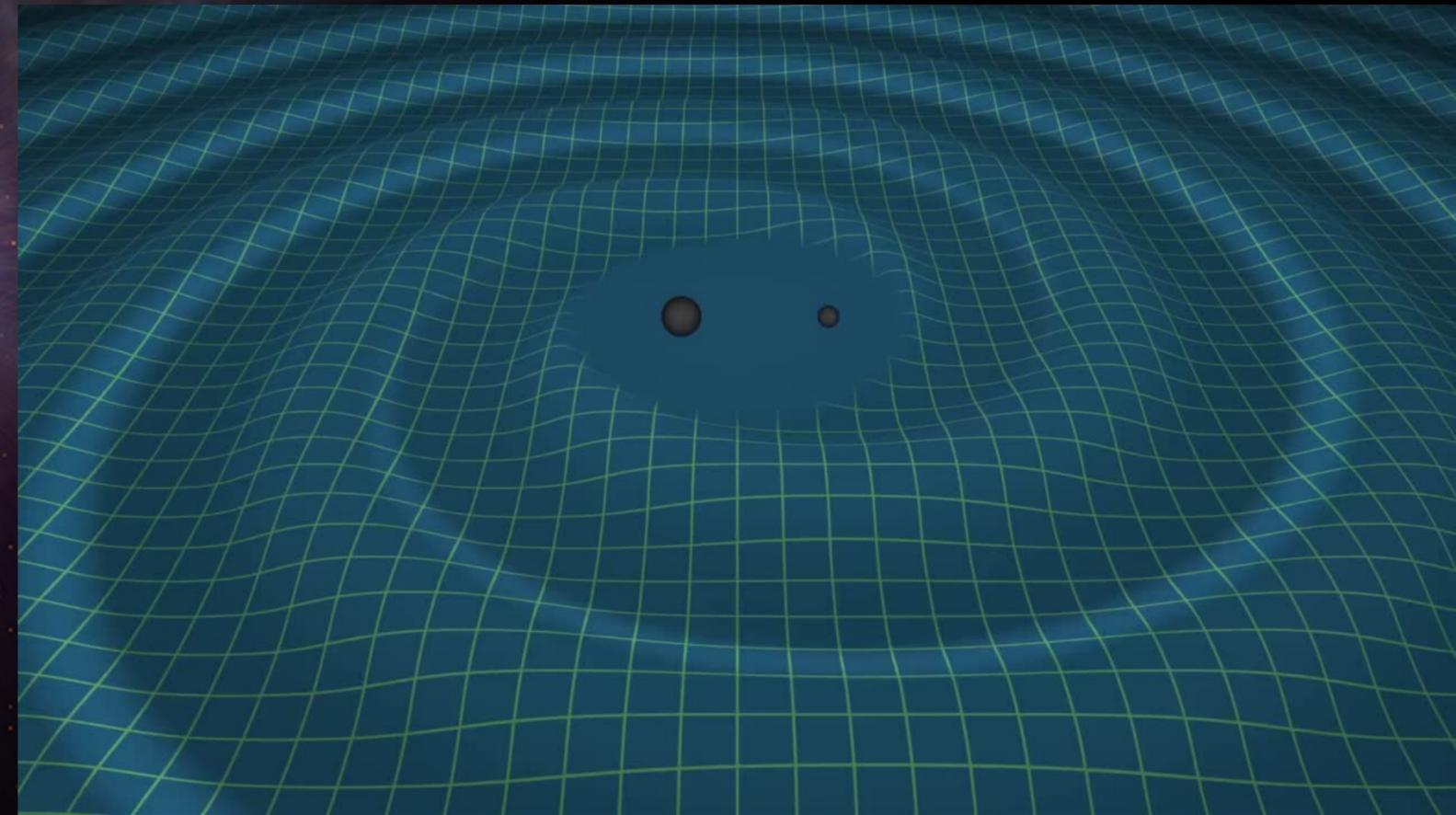
realizzazione dei primi rilevatori di onde gravitazionali

la fusione di due buchi neri ha dato origine a un'emissione di energia sotto forma di onde gravitazionali.

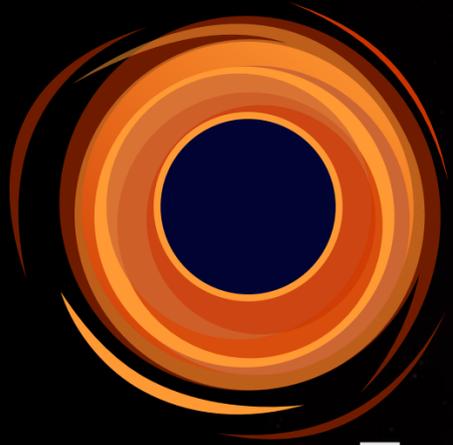


ONDE GRAVITAZIONALI

1. si propagano nella struttura geometrica dello spazio modificando la distanza spaziotemporale tra due punti vicini facendola oscillare intorno ai valori di riferimento.
2. In base alle equazioni della **Relatività Generale**, la velocità delle onde gravitazionali \equiv la velocità della luce c .
3. sono sempre onde trasversali: le distorsioni provocate localmente dal passaggio di un'onda sono sempre perpendicolari alla sua direzione di propagazione.
4. la loro equazione è tensoriale (10 componenti), poiché deve tener conto di tutte le possibili dipendenze della distanza dalle coordinate



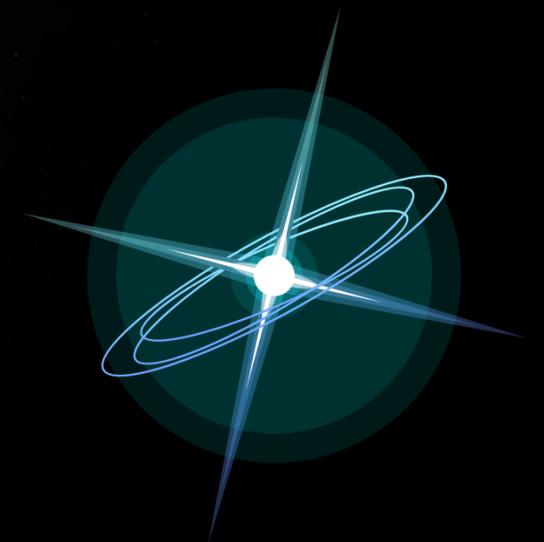
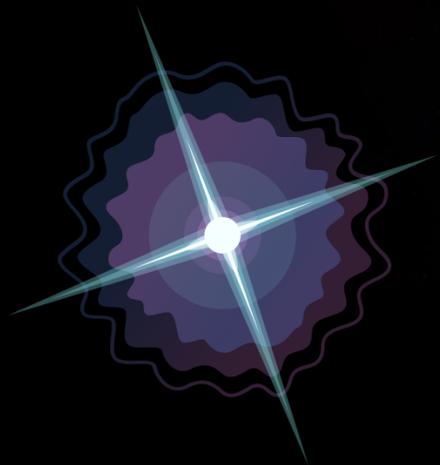
TEORIE SULLA MECCANICA DI TALI DISTORSIONI



Teoria tensoriale di Einstein
onda quadrupolare e
un insieme di dieci valori, detti potenziali
gravitazionali per descrivere il campo
gravitazionale in un punto dello spazio



Teoria scalare
un solo valore per ogni punto
dello spazio



LE ONDE GRAVITAZIONALI POSSONO ESSERE GENERATE DA:

sistemi binari di stelle; pulsar; esplosioni di supernove;
buchi neri in formazione; una stella di neutroni giunta a

maturità

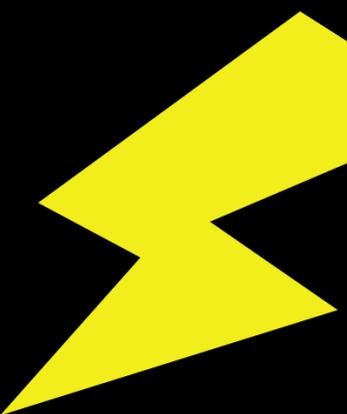
fonte diversa



timbro diverso

nascita di una stella di neutroni dall'esplosione di una
supernova: annunciata dalla trasformazione dello 0,1%
della massa iniziale in onde gravitazionali. Timbro: di tipo
pulsato.

Il rilevamento di onde gravitazionali provenienti da una
supernova permetterebbe di confermare la previsione di
Einstein riguardo alla loro velocità: se le onde gravitazionali
e quelle luminose venissero rilevate simultaneamente,
avremmo una conferma diretta che le onde gravitazionali si
propagano alla velocità della luce



Bergmann: principio di equivalenza avrebbe impedito l'utilizzo di qualsiasi strumento di rilevazione, poiché parte attiva nell'esperimento. Anche **Eddington**, **Einstein** e altri studiosi ritennero *improbabile intercettare tali onde*.

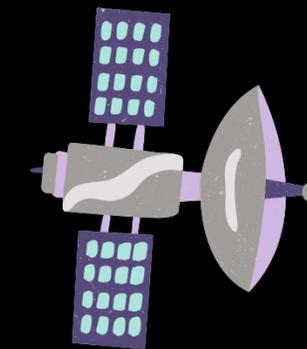
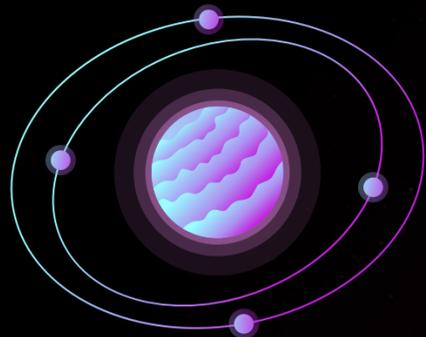
Teoria: un'esplosione o un'implosione simmetrica di masse, o anche il solo movimento rotazionale di un oggetto, anche di notevoli dimensioni, non possano generare onde gravitazionali poiché privi di accelerazioni.

Sofisticati strumenti furono poi messi in atto nel **progetto VIRGO**, con l'utilizzo di raggi laser riflessi per individuare le interferenze e la tecnologia dell'ultra alto vuoto.

Da molti anni sono anche operanti **rivelatori risonanti criogenici**

Funzionano sull'assunzione che ogni modo di vibrazione di un corpo risonante con momento di quadrupolo non nullo, come il modo fondamentale longitudinale di un cilindro, possa essere eccitato dal passaggio di un'onda gravitazionale. Qualora un'onda gravitazionale passasse attraverso il rivelatore, provocherebbe una sorta di distorsione con un incremento della distanza fra le masse di test in una direzione e una diminuzione nell'altra

CONFERME DIRETTE E INDIRETTE



conferma diretta:

11 febbraio 2016 annuncio da parte della collaborazione VIRGO e LIGO della prima verifica sperimentale dell'esistenza delle onde gravitazionali a causa della fusione di due buchi neri

conferma indiretta:

l'osservazione di un sistema di stelle binario, tramite l'osservazione di una coppia di stelle di neutroni che ruotano l'una attorno all'altra e destinate a fondersi grazie all'aumento della loro velocità angolare.