



Relatività Generale

Danilo Babusci
danilo.babusci@Inf.infn.it

Incontri di Fisica Moderna 2016

Origini della RG

RG trae origine da due esigenze teoriche:

1. estendere il PR ai riferimenti non-inerziali
2. descrivere la gravità

Newton: gravità descritta da due leggi

$$\frac{d^2\vec{x}}{dt^2} = -\vec{\nabla}\Phi(\vec{x})$$

↓
potenziale
gravitazionale

$$\nabla^2\Phi(\vec{x}) = 4\pi G\rho(\vec{x})$$

↓
densità di
massa

i.e., eq.ni non invarianti sotto TL. In particolare, la seconda (Poisson) implica che Φ dipenda istantaneamente da $\rho \rightarrow$ interazione gravitazionale si propaga con velocità infinita.

Principio d'Equivalenza

Osservazione sperimentale (**Galilei**): tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione

- i. (modulo) forza gravitazionale agente su corpo posto sulla superficie terrestre

$$F_g = G \frac{m_g M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2} = m_g g$$

- ii. legge di Newton per corpo di massa inerziale m_i

$$F_i = m_i a$$

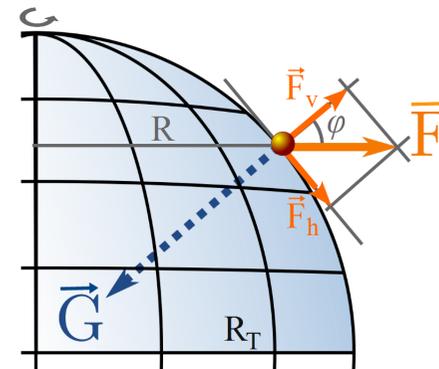
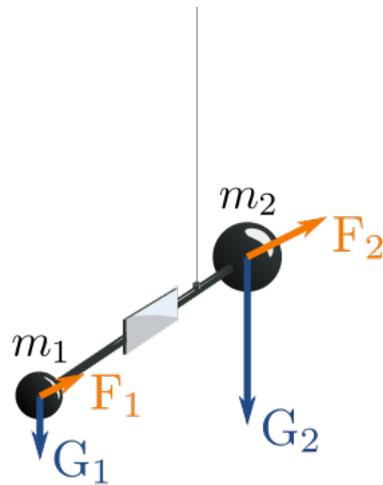
$$F_i = F_g \quad \longrightarrow \quad a = g \frac{m_g}{m_i}$$

a indipendente dalla natura del corpo $\longrightarrow \frac{m_g}{m_i} = \text{costante universale}$

Principio d'Equivalenza

ridefinizione di $G \rightarrow$ $m_i = m_g$ Principio d'Equivalenza (debole)

NB - Newton - esperimenti con pendoli: $\Omega = |m_i - m_g|/m_i < 10^{-3}$
von Eötvös et al. (1890 ÷ 1905) - bilancia di torsione: $\Omega < 3 \times 10^{-9}$



$$\frac{m_{1,i}}{m_{1,g}} \neq \frac{m_{2,i}}{m_{2,g}} \rightarrow \text{torsione filo}$$

Adelberger et al. (2008) - $\Omega < 3 \times 10^{-14}$

Principio d'Equivalenza

$m_i = m_g \rightarrow$ forza gravitazionale \propto massa inerziale dei corpi, i.e., è simile alle forze inerziali presenti in riferimento accelerato somiglianza all'apparenza accidentale, per un “newtoniano”, ma dal profondo significato fisico

Corpo di massa m soggetto all'azione di un campo gravitazionale omogeneo e statico \rightarrow equazione del moto in un dato RI

$$m_i = m_g = m \quad \rightarrow \quad m \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = m \vec{g}$$

trasformazione di coordinate non-galileiana

$$\vec{x}' = \vec{x} - \frac{1}{2} \vec{a} t^2 \quad t' = t$$

$$\rightarrow \quad m \frac{d^2 \vec{x}'}{dt^2} = m (\vec{g} - \vec{a})$$

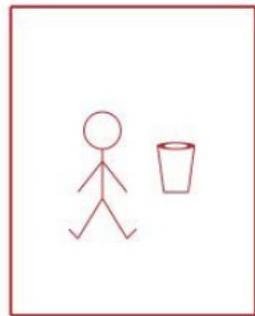
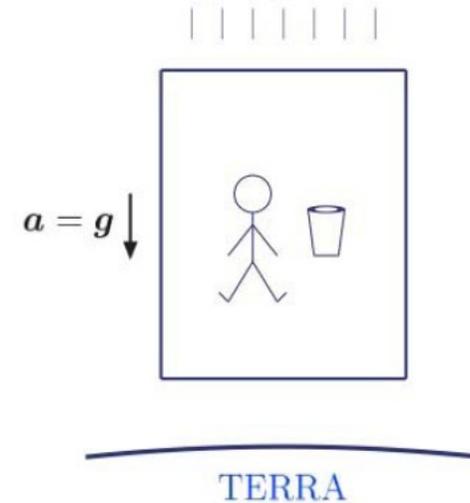
Principio d'Equivalenza

$$\vec{g} = \vec{a} \quad \rightarrow \quad \frac{d^2 \vec{x}'}{dt'^2} = 0$$

i.e., forza gravitazionale cancellata da una forza inerziale

$$\vec{F}_i = -m \vec{g}$$

→ dentro ascensore in caduta libera in campo gravitazionale omogeneo e statico è impossibile rilevare la presenza del campo

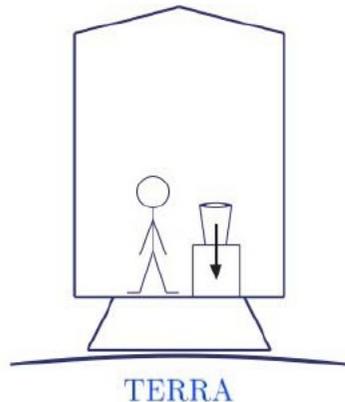
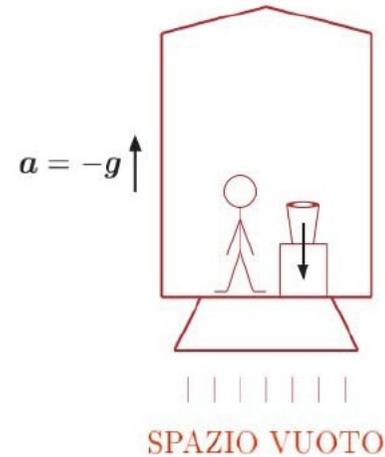


SPAZIO VUOTO

situazione indistinguibile da ascensore lontano da qualunque influenza gravitazionale

Principio d'Equivalenza

allo stesso modo, osservatore all'interno di razzo che accelera nello spazio vuoto con $\vec{a} = -\vec{g}$ vede gli oggetti all'interno del razzo animati, rispetto alle pareti, di accelerazione \vec{g}



non riuscendo, quindi, a fare alcuna distinzione con la situazione in cui il razzo è fermo sulla base di lancio, soggetto al campo gravitazionale terrestre

Principio d'Equivalenza

→ enunciazione del **Principio d'Equivalenza di Einstein (PEE)**

in ogni punto all'interno di un arbitrario campo gravitazionale è possibile scegliere un sistema di coordinate “localmente inerziale” tale che, in un intorno del punto, le leggi della natura assumono la stessa forma che hanno in un riferimento cartesiano non accelerato in assenza di gravità

NB – Quanto piccolo deve essere l'intorno del punto? Rozzamente, piccolo abbastanza da poter ritenere costante il campo gravitazionale all'interno di esso (per una definizione rigorosa occorre una descrizione matematica del campo gravitazionale); **perché solo in un intorno?** → vedi avanti

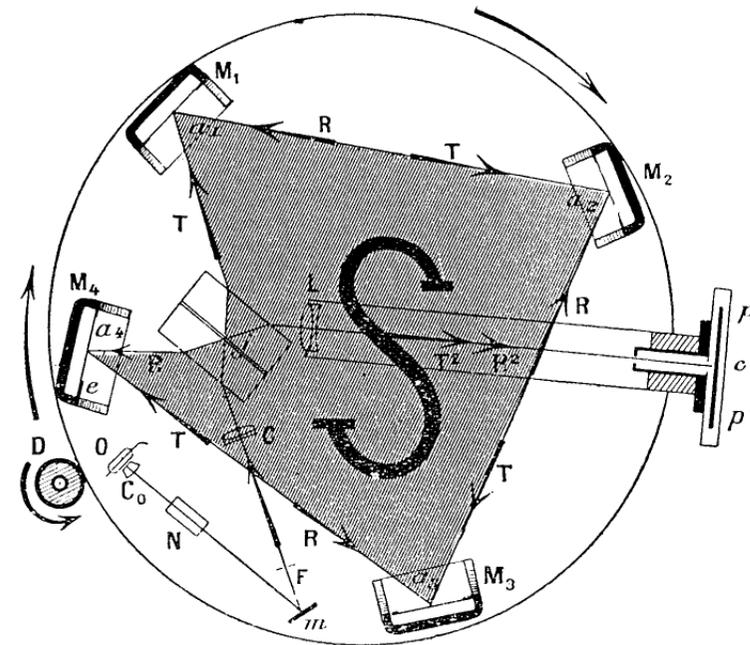
Principio d'Equivalenza

- con la locuzione “stessa forma come in un riferimento cartesiano non accelerato” s’intende quella dettata dalla **RS**
- formulazione del PEE “risuona” con quella dell’assioma di Gauss alla base della geometria non-Euclidea: in ogni punto di una superficie curva è possibile erigere un sistema di coordinate localmente cartesiano in cui le distanze obbediscono alla legge di Pitagora → dobbiamo aspettarci che le **leggi della gravitazione esibiscano forte somiglianza con quelle della geometria degli spazi curvi (Riemann)**
- PEE → gravità è ineludibile: **non esiste oggetto “gravitazionalmente neutro”** rispetto al quale misurare l’accelerazione dovuta alla gravità → la gravità non va interpretata come una forza (i.e., qualcosa che genera accelerazione in proporzione all’inerzia del corpo su cui è applicata)

Deflessione della luce

- piattaforma rotante: raggio luminoso inviato dal centro verso il bordo → **forza di Coriolis**: traiettoria della luce risulta incurvata rispetto alla piattaforma

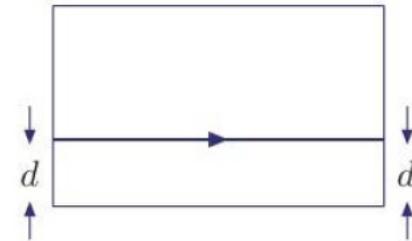
NB – esperimento di **Sagnac (1913)**: interferometro del tipo MM montato su piastra rotante → un fascio si muove nel verso di rotazione, l'altro in senso contrario → frange d'interferenza la cui posizione dipende dalla velocità angolare della piastra



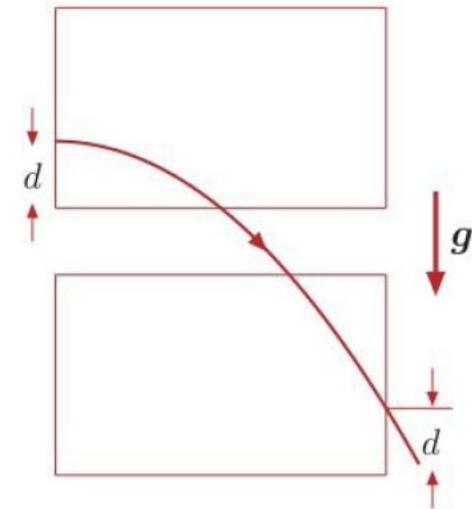
Deflessione della luce

➤ Laboratorio in caduta libera nel campo gravitazionale della Terra (supposto omogeneo): raggio luminoso che viaggia da una parete all'altra

- osservatore all'interno del laboratorio → luce si propaga in linea retta, i.e. secondo le leggi della **RS**



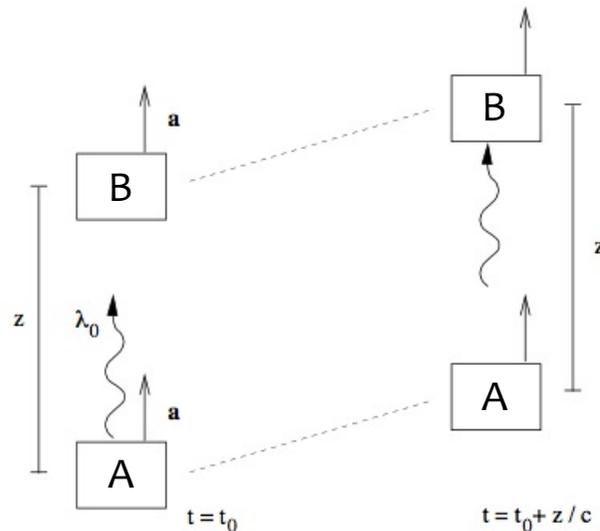
- osservatore a Terra → cabina ha accelerazione **g** verso il basso: luce ha la stessa accelerazione → la sua traiettoria risulta curva



NB – effetto piccolissimo: per 1 km di percorso orizzontale, deflessione di 0.1 nm → evidente su distanze astronomiche

Redshift gravitazionale

- Due astronavi, separate da distanza z , ciascuna in moto con accelerazione a in regione di spazio distante da qualunque campo gravitazionale



t_0 : astronave A emette raggio di luce con lunghezza d'onda λ_0 che raggiunge astronave B dopo tempo (nel nostro riferimento di Terra)

$$\Delta t = \frac{z}{c}$$

Redshift gravitazionale

in questo intervallo di tempo le astronavi guadagnano velocità aggiuntiva

$$\Delta v = a \Delta t = \frac{a z}{c}$$

→ raggio di luce che raggiunge astronave B, per effetto Doppler, ha lunghezza d'onda aumentata (“arrossamento”) di:

$$\Delta \lambda = \lambda_0 \frac{\Delta v}{c} = \lambda_0 \frac{a z}{c^2}$$

PEE → stessa cosa avviene in **campo gravitazionale uniforme**

Torre di altezza z sulla Terra: osservatore dentro cabina chiusa (= no modo di sapere dove si trova) in cima rivela fotoni emessi da sorgente radioattiva posta alla base della torre

Redshift gravitazionale

→ nessun modo di distinguere questa situazione da quella delle due astronavi → fotone emesso con λ_0 viene rivelato con lunghezza d'onda spostata verso il rosso di ($a = g$):

$$\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{g z}{c^2} \quad (\star)$$

NB – effetto osservato sperimentalmente per la volta da **Pound & Rebka** nel 1960 rivelando i fotoni da 14.4 keV emessi da una sorgente di ^{57}Fe posta in cima alla torre da 22.5 m del laboratorio di fisica dell'università di Harvard

Redshift gravitazionale consente di capire come gli orologi sono influenzati dal campo gravitazionale

Redshift gravitazionale

Dotiamo osservatore in cima e quello a terra di orologi identici
→ intervallo di tempo tra due creste successive dell'onda misurati dai due orologi

- alla base: $\Delta t_0 = \frac{\lambda_0}{c}$
- in cima: $\Delta t_1 = \frac{\lambda_1}{c} = \frac{\lambda_0 + \Delta\lambda}{c}$

(★) → $= \frac{\lambda_0}{c} \left(1 + \frac{g z}{c^2} \right)$

i.e. $\Delta t_1 = \Delta t_0 \left(1 + \frac{g z}{c^2} \right)$

Redshift gravitazionale

i.e., ritmo dell'orologio in cima alla torre appare più veloce

gravità = tempo che scorre con velocità differenti in punti diversi; caduta avviene da punti in cui il tempo scorre più velocemente verso punti in cui il tempo scorre più lentamente

l'attrazione verso il basso che avvertiamo non è altro che il tasso differenziale di tempo tra punti situati “in alto” e punti situati “in basso”

Esempio: fattore di dilatazione temporale nell'esperimento di Pound-Rebka

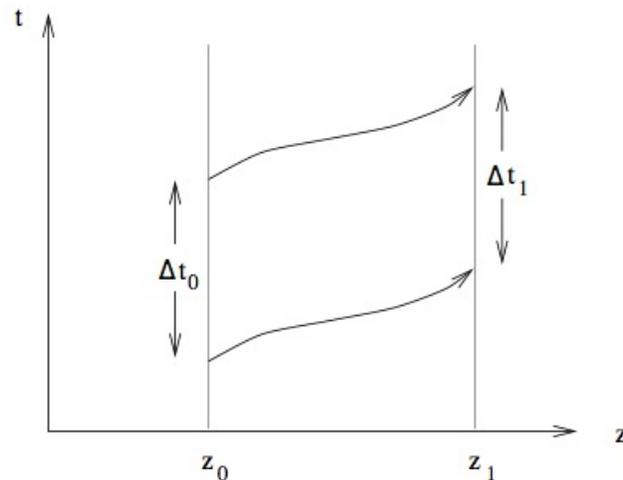
$$\frac{\Delta t_{\text{cima}} - \Delta t_{\text{base}}}{\Delta t_{\text{base}}} = \frac{9.8 \times 22.5}{(3 \times 10^8)^2} \simeq 2.5 \times 10^{-15}$$

i.e., effetto estremamente piccolo nelle circostanze ordinarie: chi vive in un attico è più vecchio di chi vive in cantina: 8 μs/100 anni

Redshift gravitazionale

Ipotesi: campo gravitazionale statico \rightarrow le linee d'universo di testa e coda di singola onda devono essere congruenti (rappresentati con generiche curve perché non pretendo di sapere quali cammini sono).

geometria semplice: $\Delta t_0 = \Delta t_1 \rightarrow \Delta t_0 < \Delta t_1$ può interpretarsi affermando che la **geometria attraversata dai fotoni era curva**



Redshift gravitazionale

GPS: 24 satelliti che orbitano intorno alla Terra in 12 ore (6 piani orbitali)

Satelliti trasportano orologi atomici che misurano il tempo proprio τ_s con una accuratezza di **1 parte su 10^{13}** , su un periodo di alcune settimane.

Correzioni giornaliere impostate da Terra estendono l'accuratezza su periodi più lunghi. Periodicamente, satelliti inviano a terra segnale a microonda in cui sono codificati istante e coordinata spaziale dell'emissione

Effetti relativistici di dilatazione temporale: $\delta = \left| \frac{\tau_s - t}{t} \right|$

$$\boxed{\text{RS}} \quad \delta \simeq \frac{1}{2} \frac{v_s^2}{c^2} \quad v_s = 3.9 \times 10^4 \text{ km/s} \quad \rightarrow \quad \delta \simeq 8.4 \times 10^{-11}$$

$$\boxed{\text{RG}} \quad \delta = \frac{\Phi_s - \Phi_T}{c^2} = \frac{G M_{\oplus}}{R_s c^2} \quad R_s \simeq 2.7 \times 10^4 \text{ km} \quad \rightarrow \quad \delta \simeq 1.6 \times 10^{-10}$$

propagazione segnale satellite: 30 cm/ns \rightarrow **2 m** di accuratezza nella localizzazione implicano circa **6 ns**: vengono superati, se non tengo conto degli effetti relativistici, in **meno di 1 minuto**

Equivalenza vs Uguaglianza

PEE: termine fondamentale è **intorno**, i.e. equivalenza tra il campo inerziale e il campo gravitazionale è **locale**.

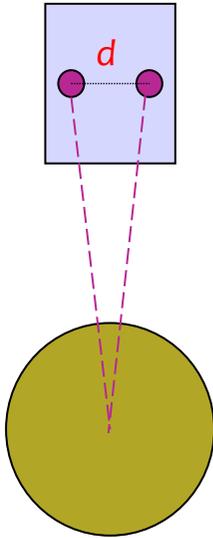
Affermare che i due campi sono equivalenti non significa sostenere che sono la stessa cosa. Due differenze sostanziali:

1. la sorgente del campo inerziale è data dal passaggio da un riferimento inerziale ad uno non-inerziale, mentre la sorgente del campo gravitazionale è data da una distribuzione di massa-energia.
2. campo inerziale è globalmente uniforme, quello gravitazionale non lo è: le sue linee di forza convergono verso la sorgente

→ i due campi sono indistinguibili solo localmente, non globalmente

Equivalenza vs Uguaglianza

Esempio: masse all'interno di ascensore in caduta libera.



ciascuna massa cade direttamente verso il centro della Terra; poiché questa non è piatta ma (circa) sferica, l'orizzonte locale al disotto di una particella è leggermente angolato rispetto a quello dell'altra → traiettorie delle due particelle leggermente convergenti → al procedere della caduta un osservatore all'interno dell'ascensore rivelerà un (lento) **moto, di avvicinamento dei due corpi.**

NB - $d = 1 \text{ m}$ → convergenza $\approx 16 \text{ }\mu\text{m}$ ogni 100 m di caduta

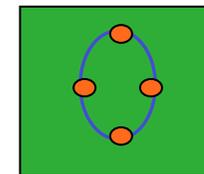
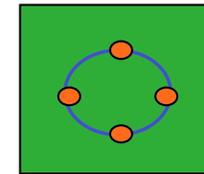
moto relativo tra particelle in caduta libera non è dovuto a mutua attrazione, ma è in risposta alla gravità esterna.

Forze di Marea

Caratteristiche dell'effetto:

- **differenziale**, i.e., causato dalla non uniformità del campo gravitazionale
- **non-locale**, i.e., aumenta con la distanza d tra le masse

Esempio: anello flessibile dentro ascensore in caduta libera
particella più in basso è più vicina alla Terra → sente una forza di gravità più intensa → cade più rapidamente; particella più in alto soggetta a forza più debole → cade meno velocemente. Quelle esterne si avvicinano lentamente tra loro → **distorsione forma** dell'anello durante la caduta: si appiattisce ai lati e si allunga lungo la verticale



Forze di Marea

NB - Situazione è analoga a quella che si verifica nel sistema Terra-Luna. La gravità della Luna in un punto della superficie terrestre non esercita una forza netta in quanto Terra e Luna sono ciascuna in caduta libera nel campo dell'altra. Però, **la variazione nel campo lunare attraverso il volume della Terra è osservabile**: lato della Terra momentaneamente più vicino alla Luna lo è di circa 12,000 km, per cui la gravità lunare differisce del 6 % tra punto più vicino e più lontano → oceano in punti differenti della superficie terrestre cade verso la Luna con velocità diverse → **maree**

le forze gravitazionali differenziali sono forze di marea

come rappresentare un forza di marea?

Gli effetti mareali sono molto più complicati di quelli indotti da un semplice campo vettoriale, quale il campo elettrico

Forze di Marea

Esempio: piccolo cubo di materia all'interno dell'ascensore in caduta libera nel campo della Terra

- faccia inferiore del cubo, in quanto più vicina alla sorgente della gravità, tende a cadere più velocemente di quella superiore → **allungamento verticale**
- facce laterali del cubo tendono a cadere secondo traiettorie convergenti verso il centro della Terra → **compressione**

→ forze uguali e contrarie agenti perpendicolarmente ad ogni coppia di facce che tendono a dilatare o comprimere il cubo → **3 componenti**

Forze di Marea

In una configurazione di campo gravitazionale più complicata potrebbero manifestarsi anche forze che tendono a torcere il corpo e a tranciarlo (**deformazione di taglio**).

→ su generica faccia del cubo ci saranno forze parallele alla superficie che tendono a deformarla e ruotarla rispetto alla faccia opposta; in questa superficie 2-dimensionale, la forza netta può essere descritta in termini di due sole componenti.

faccia opposta: forze uguali e contrarie di modo che nessuna forza risultante agisca sul centro di massa del cubo (sarebbe una forza di gravità diretta e non una mareale) → 3 coppie indipendenti di componenti vettoriali: una coppia per ciascun doppietto di facce contrapposte → **6 componenti**

Quindi, in totale, **9 componenti vettoriali indipendenti**

Forze di Marea

→ non posso descrivere tale forza in termini di un campo vettoriale, ma ho bisogno di un oggetto più complicato: forza mareale è descritta da un **campo tensoriale**

NB - oggetto a $3 \times 3 = 9$ componenti in uno spazio a 3 dimensioni ? ad esempio, prodotto per componenti di 2 vettori

$$\begin{aligned} \vec{a} &= (a_1, a_2, a_3) \\ \vec{b} &= (b_1, b_2, b_3) \end{aligned} \quad \rightarrow \quad T = \begin{pmatrix} a_1 b_1 & a_1 b_2 & a_1 b_3 \\ a_2 b_1 & a_2 b_2 & a_2 b_3 \\ a_3 b_1 & a_3 b_2 & a_3 b_3 \end{pmatrix}$$

Forze di Marea

spaziotempo 4-dimensionale → così come il campo e.m. richiede un vettore 4-dimensionale (**potenziale vettore**), la gravità relativistica richiede un **tensore** a $4 \times 4 = 16$ componenti (in realtà, nella teoria di **Einstein**, per motivi di simmetria, **solo 10 di queste componenti sono indipendenti**).

Gravità deforma tutti gli anelli in caduta libera allo stesso modo → descrizione di tale deformazione in termini di forze è inutilmente complicata: la **deformazione è soltanto un effetto geometrico** e non meccanico, i.e., **deformazione dovuta a caduta in assenza di forze attraverso una geometria distorta**

Lampada nell'ascensore: traiettoria del fascio di luce non è “curvata” da una forza, ma è naturalmente “curva” a causa della geometria della regione di spazio-tempo attraverso cui essa si propaga.

Relatività Generale

Einstein - la gravità è interpretabile non come forza ma come manifestazione della geometria dello spaziotempo

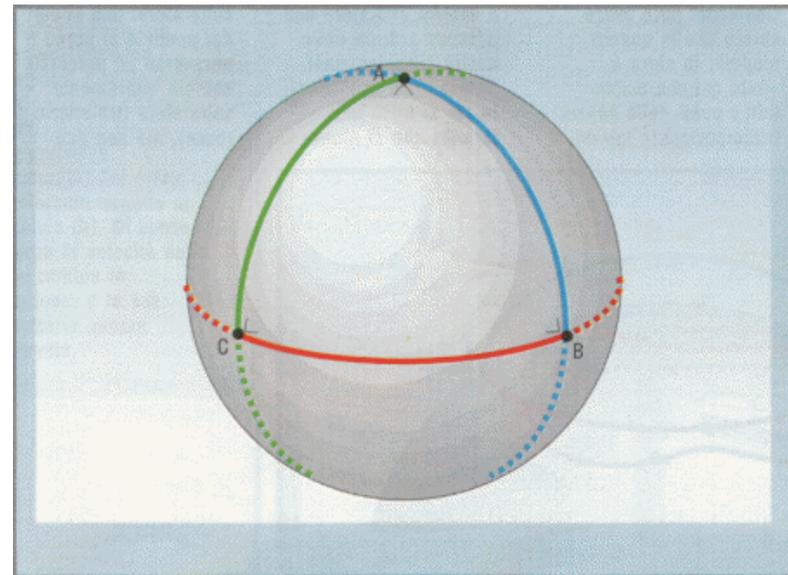
Nella gravità relativistica scompaiono totalmente le forze gravitazionali. Lo spaziotempo è curvato o distorto e le particelle in caduta seguono la traiettoria più rettilinea possibile (**geodetica**) attraverso lo spazio-tempo di fondo curvo. Geodetiche vicine possono convergere o divergere riproducendo l'effetto delle forze di marea.

- ✧ Due palle da golf lanciate su due percorsi paralleli. Finché green rimane piatto, loro posizione relativa non cambia. Se il green non è piatto, però, le palle possono essere deflesse in modo da allontanarsi (se incontrano una collinetta), o avvicinarsi (se incontrano una buca): distorsione della geometria piatta causa variazione nella posizione relativa di particelle vicine, proprio come se agisse una forza mareale.

Relatività Generale

- ✧ Equivalente delle linee rette sulla superficie terrestre sono i **meridiani**. Queste particolari geodetiche si intersecano tutte ai poli. Se due aerei, separati da una certa distanza, decollano entrambi dall'equatore e volano in direzione Nord seguendo i rispettivi meridiani, ciascun pilota riterrà il proprio aereo in viaggio lungo una traiettoria esattamente rettilinea. **Sebbene essi partano volando paralleli, lentamente convergeranno e alla fine collideranno al polo Nord.**

Se i piloti fossero convinti che la Terra è piatta, essi sarebbero costretti a spiegare questa convergenza come dovuta ad una misteriosa forza mareale esterna che li spinge l'uno verso l'altro. In realtà, l'effetto è da attribuirsi alla curvatura della superficie terrestre



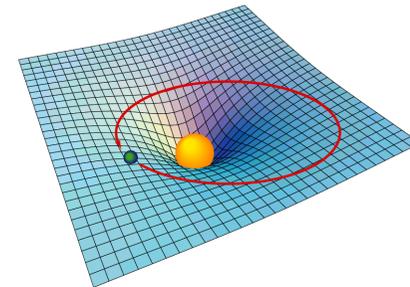
Newton vs Einstein

Newton: gravità è una forza



la Terra si muove su orbita **curva** intorno al Sole perché la gravità solare la costringe ad allontanarsi dal suo cammino rettilineo naturale

Einstein: gravità è curvatura



massa-energia del Sole distorce geometria spaziotempo vicino alla Terra e questa si muove liberamente lungo cammino il più possibile rettilineo (\approx **ellisse**) in questo ambiente deformato

Equazioni di Einstein

forza mareale descrivibile in termini di un tensore a più componenti → curvatura dello spazio-tempo deve essere descritta in termini di un tensore: il **tensore di Riemann**

NB – qui la precisa definizione di tale tensore non ci interessa: troppo complicata; si tratta di un oggetto a 20 componenti indipendenti che riassume in sé tutte le informazioni geometriche relative a come lo spaziotempo è curvato nelle differenti direzioni

curvatura dello spaziotempo nell'esempio dell'anello flessibile in caduta libera è determinata dalla presenza di una sorgente di campo gravitazionale, per cui anche questa deve essere descritta in termini di un tensore: il **tensore energia-impulso**

Equazioni di Einstein

→ equazioni di campo (Einstein):

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

geometria
spaziotempo

stress, energia, impulso
della sorgente

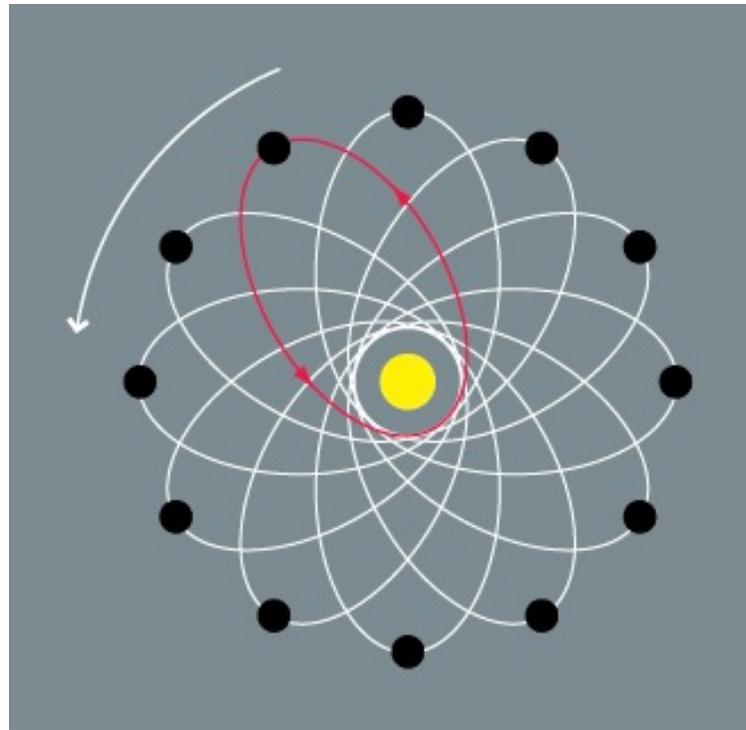
NB - $\frac{8\pi G}{c^4} \sim 10^{-43} \text{ N}^{-1}$ caratterizza la rigidità dello spaziotempo
(il suo inverso legato al modulo di elasticità)

lo spaziotempo dice alla materia come muoversi;
la materia dice allo spaziotempo come curvarsi

Verifiche sperimentali

1. Orbita di Mercurio

precessione lenta del perielio di circa $43''$ di arco/secolo

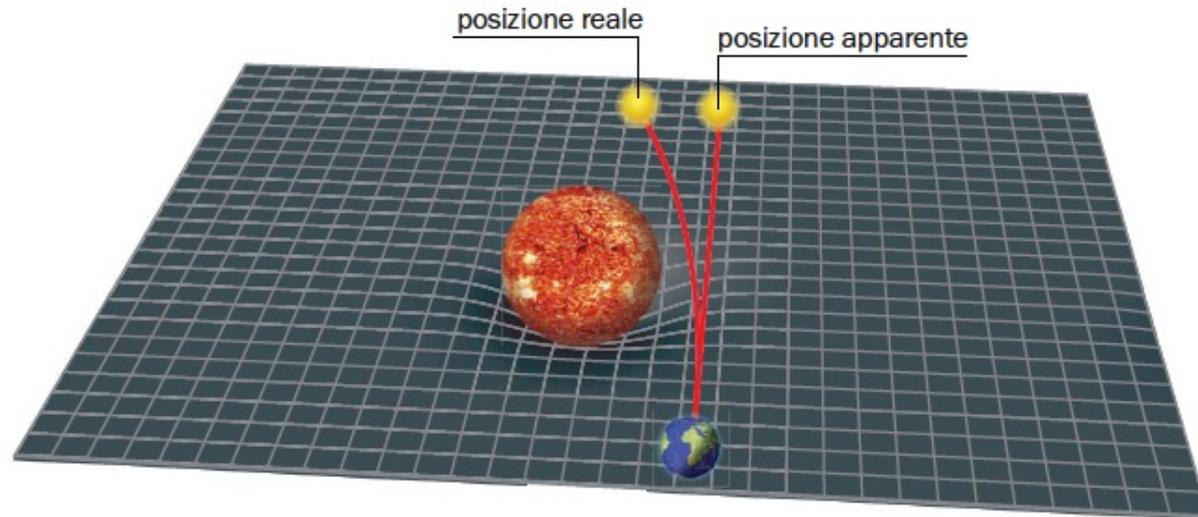


RG perfettamente in accordo con le osservazioni

Verifiche sperimentali

2. Curvatura della Luce

Osservata per la prima volta nel 1919 da **Eddington** durante eclisse di Sole



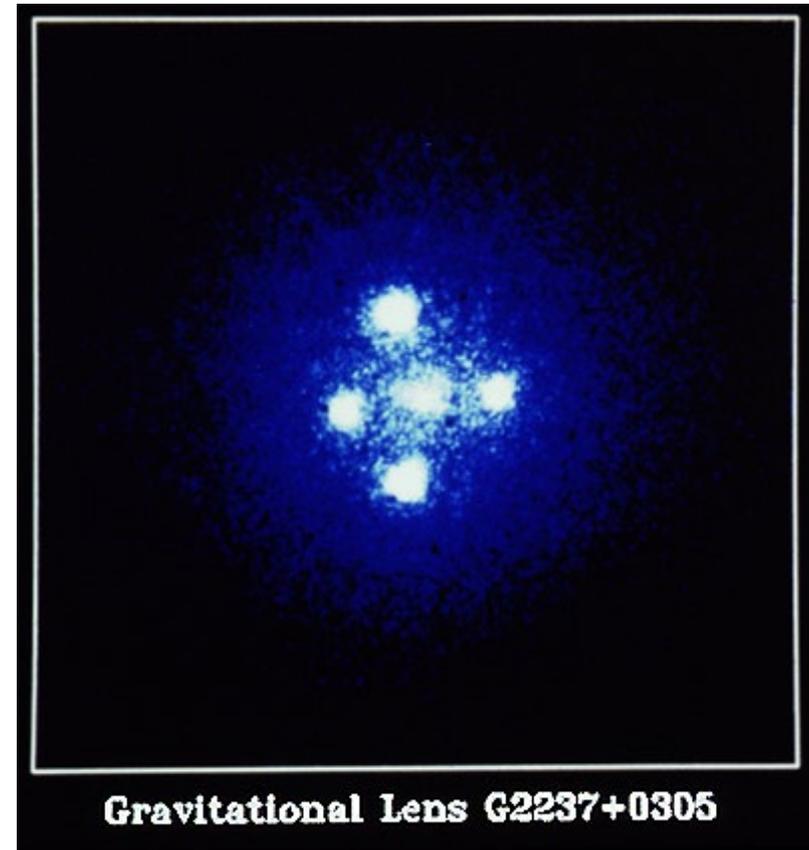
Spostamento posizione apparente della stella in accordo con predizione della **RG** → **Gravitational Lensing**

Verifiche sperimentali

Croce di Einstein

Immagine di un quasar appare “moltiplicata” per la presenza di una galassia che si trova interposta tra la Terra e la posizione del quasar

gravitational lensing utilizzato per rivelare concentrazioni estese di **materia oscura** di natura astrofisica

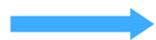


Onde Gravitazionali

Fisica Newtoniana: spaziotempo come griglia concettuale infinitamente rigida → onde gravitazionali non possono esistere: velocità e densità d'energia infinita

Relatività Generale: coefficiente d'accoppiamento finito tra la curvatura dello spaziotempo e la distribuzione di massa-energia che produce tale curvatura

$$\frac{8 \pi G}{c^4} \sim 10^{-43} \text{ N}^{-1}$$



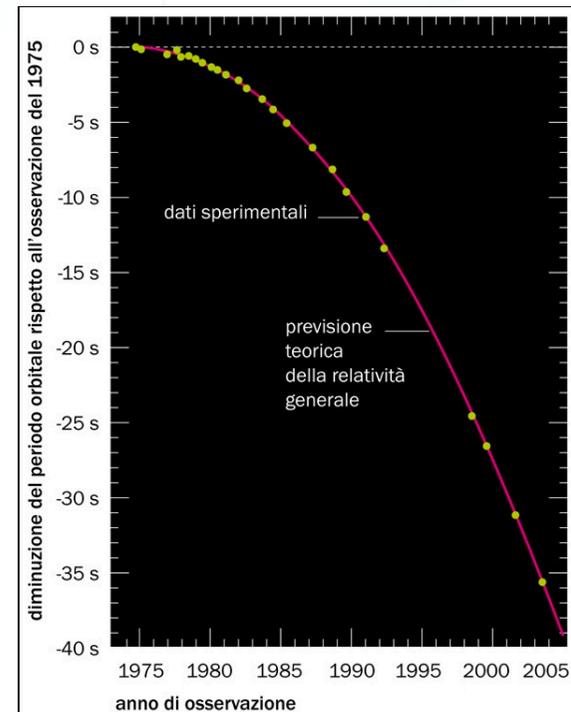
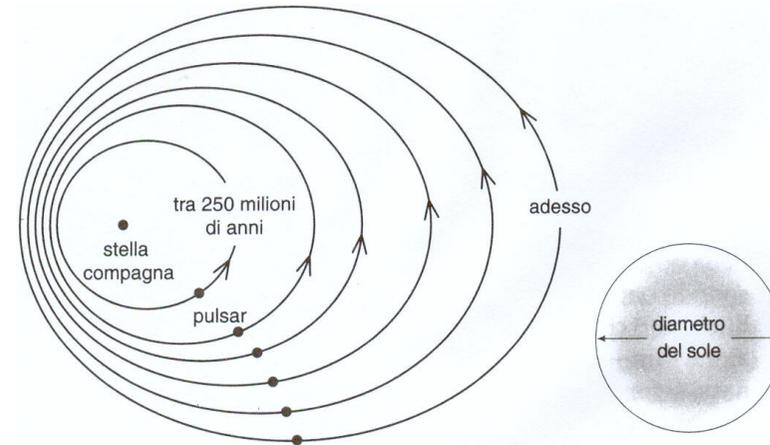
- ✓ **Fisica newtoniana** applicabile in molte situazioni reali
- ✓ **Onde Gravitazionali:** generazione fortemente inibita; rivelazione estremamente difficile

Onde Gravitazionali

evidenza indiretta

Sistema binario **PSR 1913+16**:
pulsar in orbita attorno a NS
misura periodo di ripetizione
degli impulsi radio \rightarrow periodo
orbitale T della pulsar

Hulse & Taylor: osservazione
del sistema per 17 anni $\rightarrow T$
diminuisce con ritmo previsto
dall'ipotesi che la pulsar perda
energia per emissione di O.G.



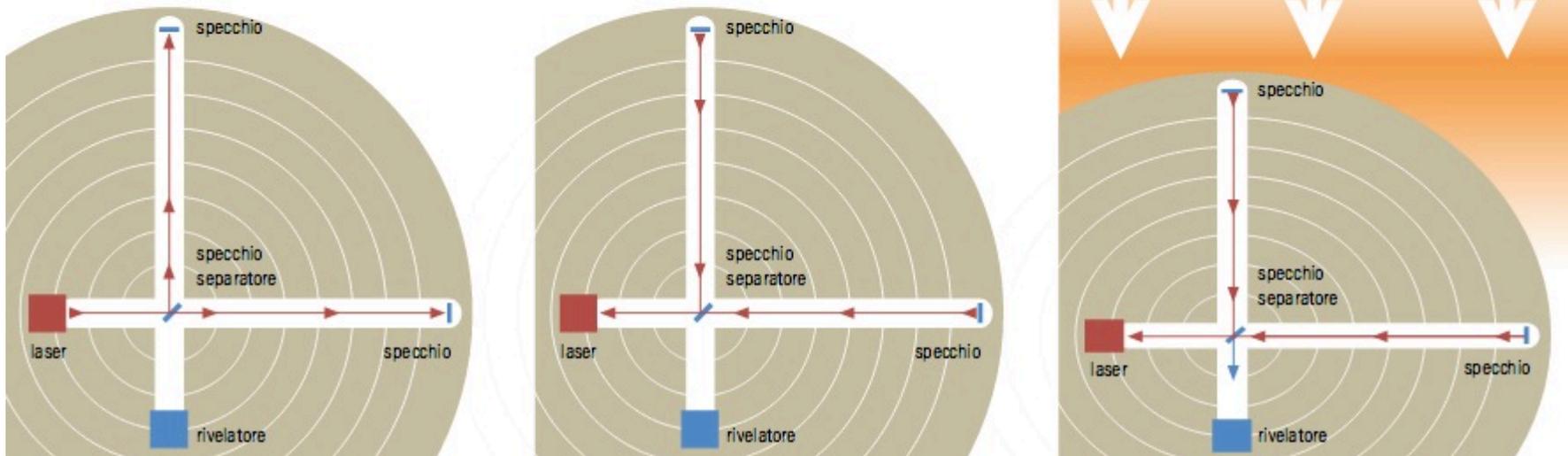
Interferometri

Come funziona l'interferometro

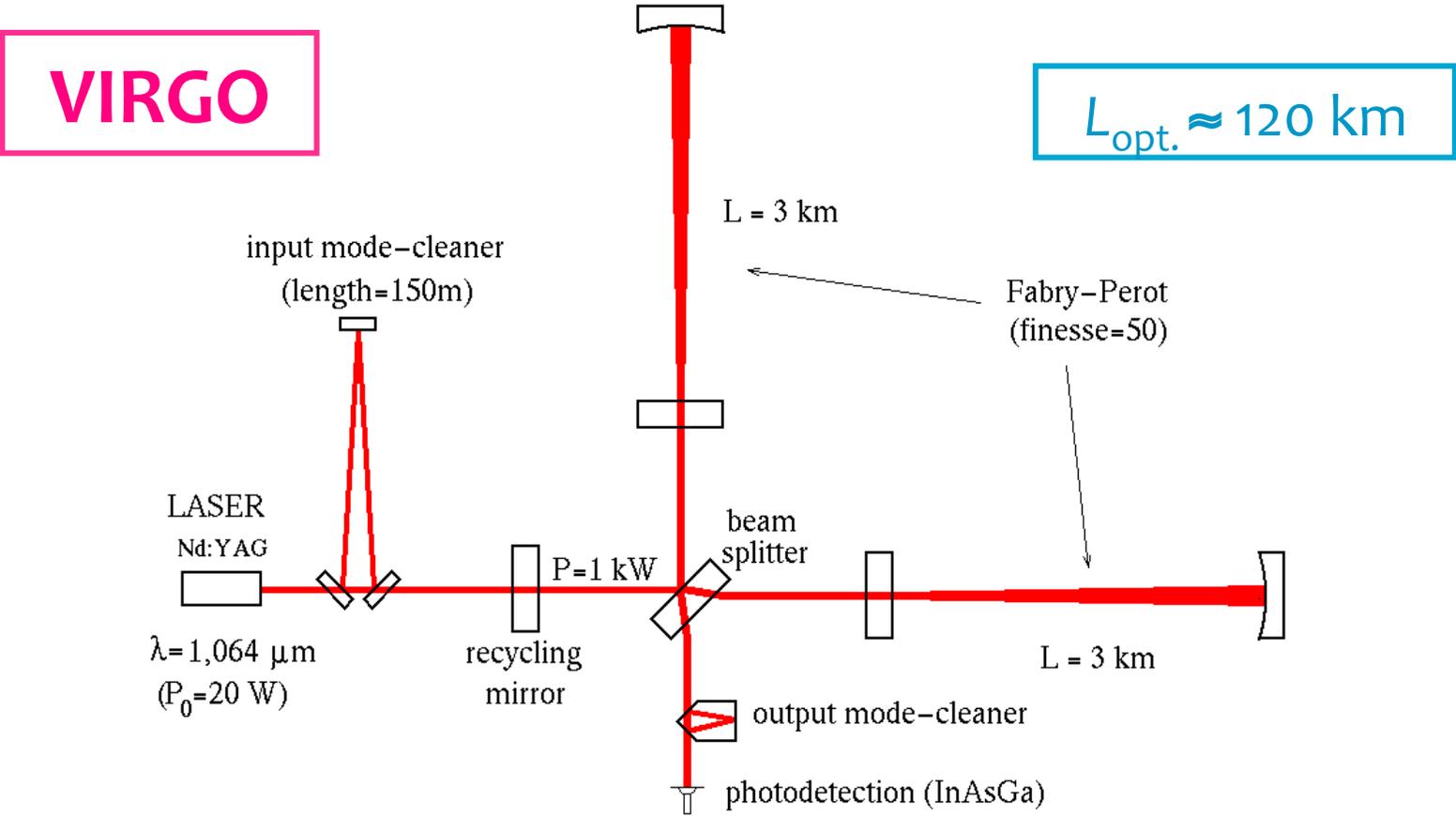
I due fasci di luce laser, provenienti dai due bracci, vengono ricombinati (in opposizione di fase) in maniera che, normalmente, non arrivi luce sul rivelatore.

Quando un'onda gravitazionale arriva produce un'infinitesima variazione (più piccola del nucleo di un atomo) della lunghezza dei due bracci (uno si allunga e l'altro si accorcia).

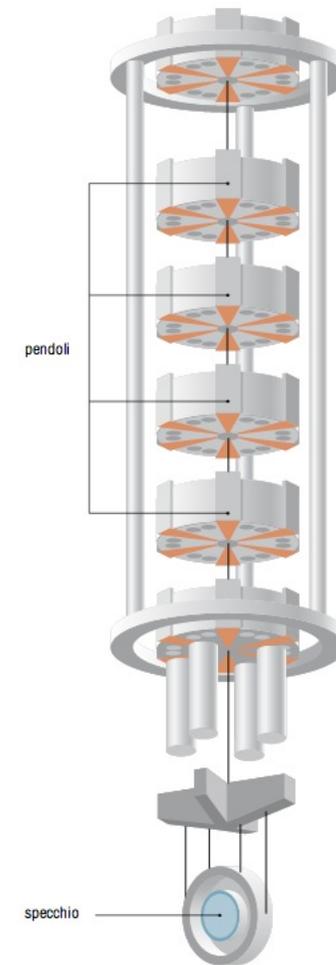
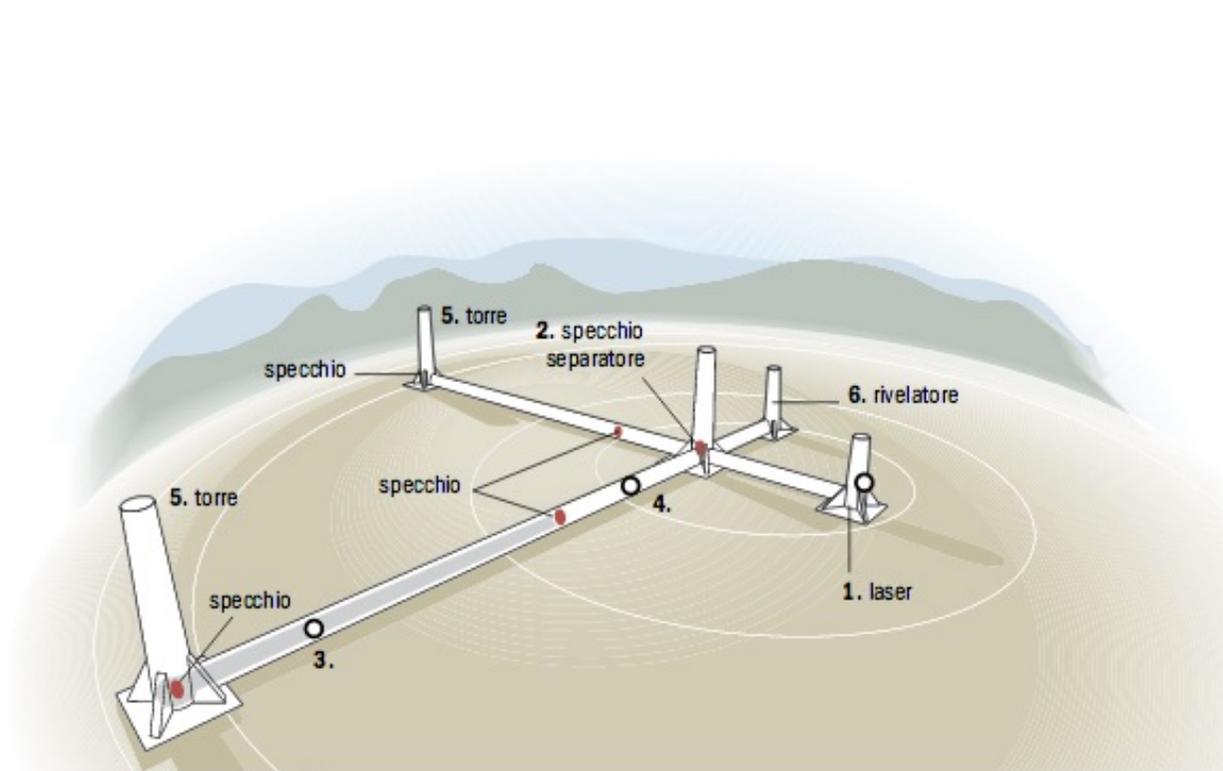
La variazione, causata dalla distanza tra gli specchi, induce uno sfasamento tra i fasci di luce e quindi dell'intensità di luce osservata dal rivelatore. Il segnale che il rivelatore osserva è correlato all'ampiezza dell'onda gravitazionale.



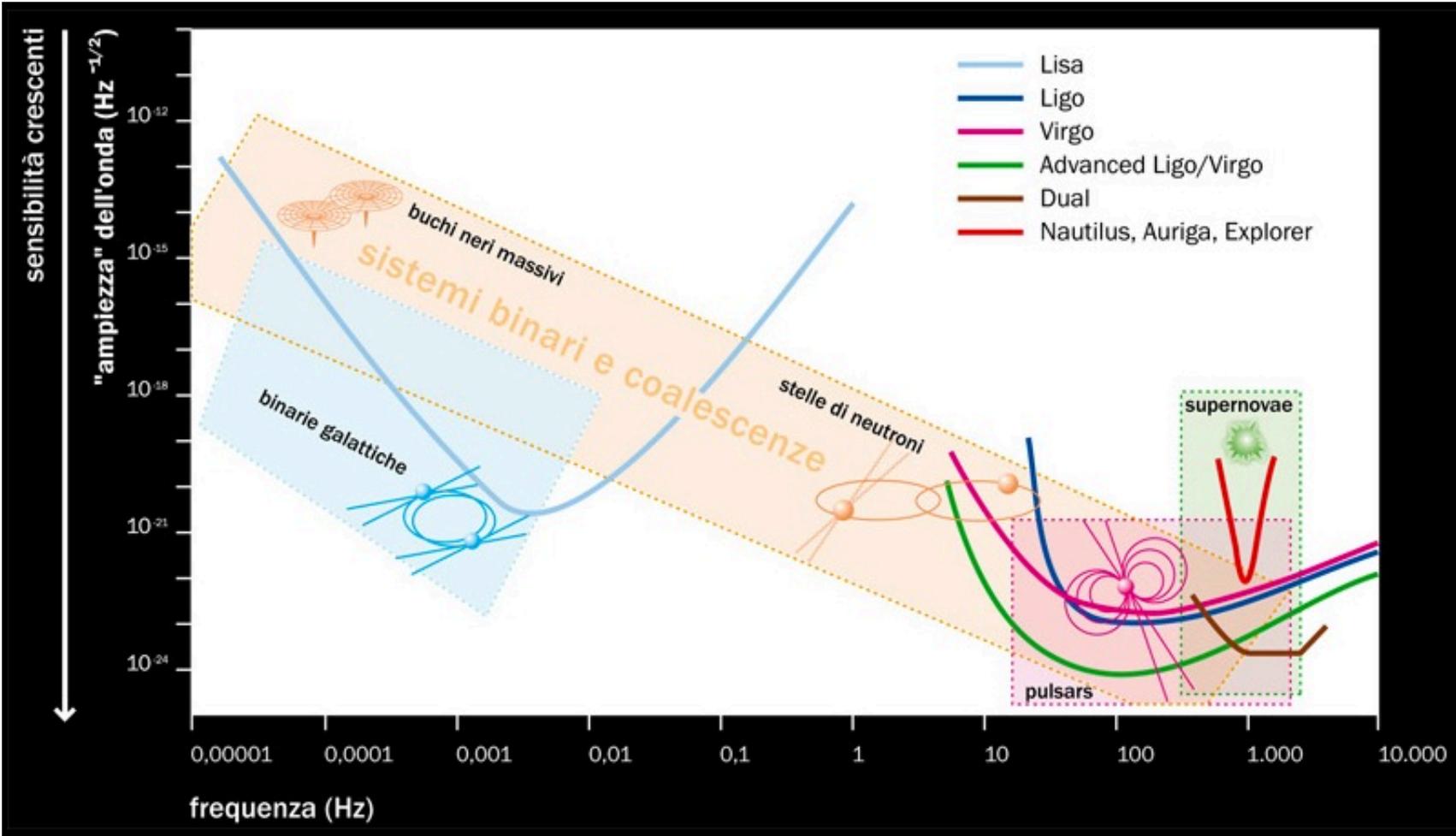
Interferometri



Interferometri



Interferometri



INFN - CNRS

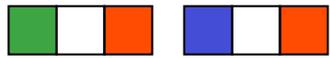


 VIRGO

Cascina (Pisa)

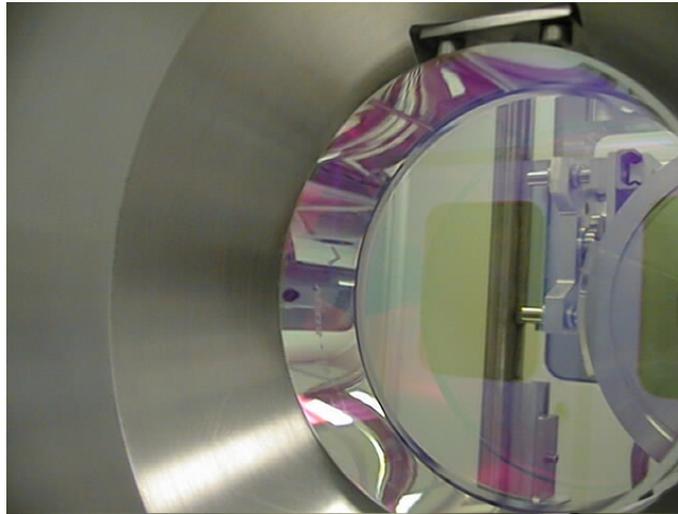


INFN - CNRS

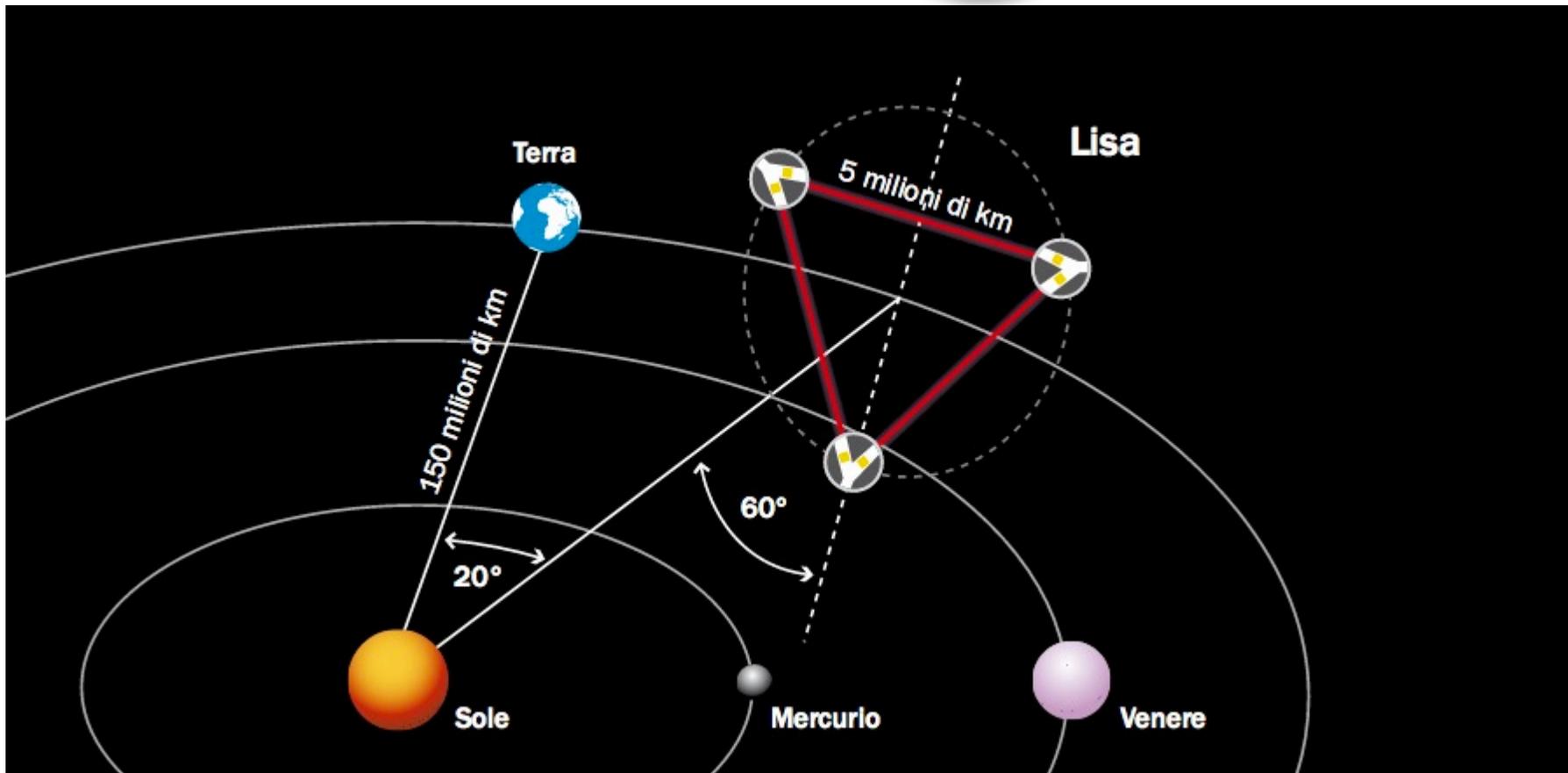
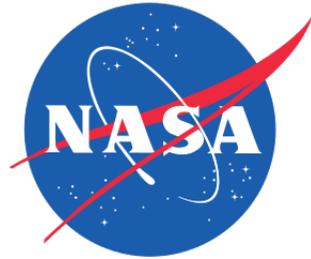


VIRGO

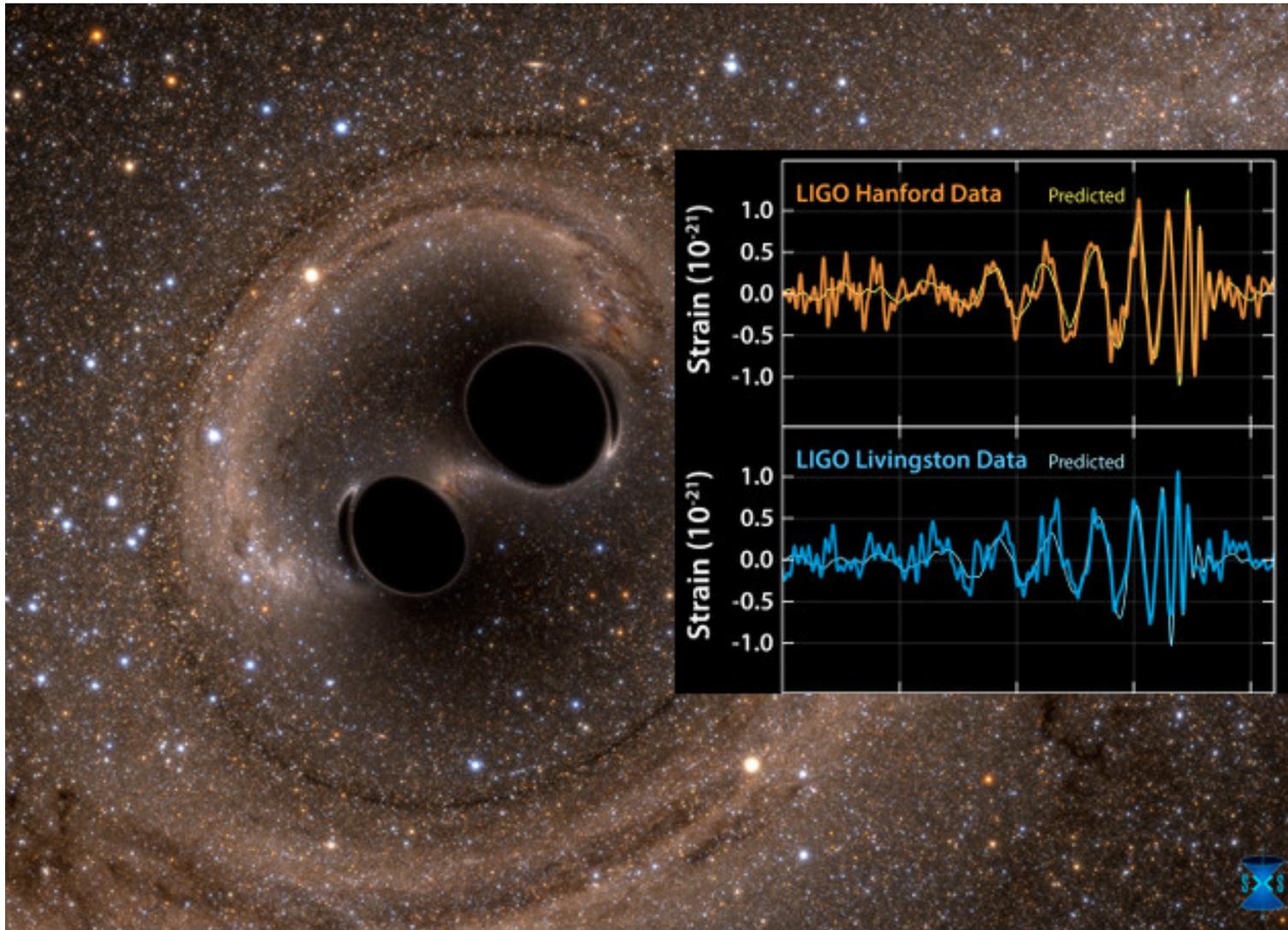
$L = 3 \text{ Km}$



LISA



GW150914



QFT

RG: gravità non è una forza ma curvatura dello spaziotempo
→ seria difficoltà concettuale quando si applica **MQ** alla gravità secondo tecniche sviluppate nel caso dell'interazione elettromagnetica (**QED**).

QED: primo esempio di **teoria quantistica di campo (QFT)**:
entità fondamentali sono i campi → particelle sono eccitazioni (“quanti”) dei campi

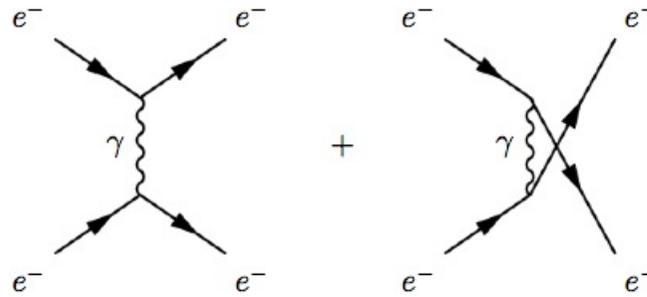
Calcoli teorici in **QFT** → **diagrammi di Feynman**: rateo di un processo = somma su tutte le (infinite) possibili modalità di realizzazione del processo stesso

Esempio - collisione di 2 elettroni

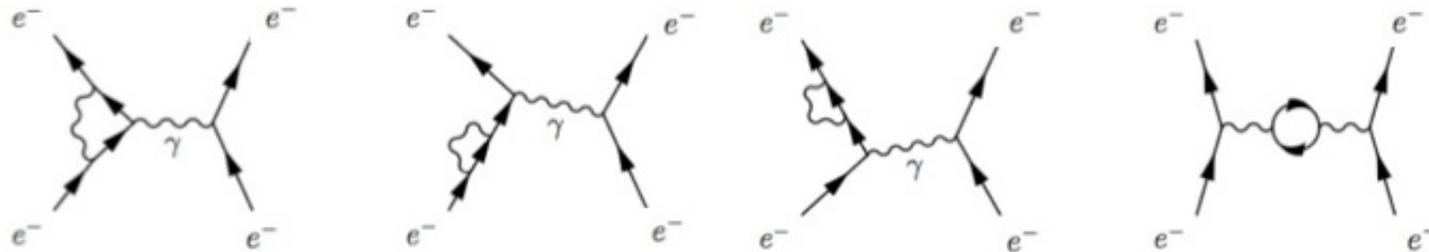
parto da 2 elettroni liberi a cui aggiungo effetto di:

QED

1. scambio di un fotone (virtuale)



2. scambio di 2 fotoni (alcuni) + conversione del fotone scambiato in coppia particella-antiparticella



3. ... e via complicando ...

QED

Infinite modalità distinte → impossibile fare calcoli esatti

QED: forza di debole intensità → contributi principali al calcolo del rateo provengono dai diagrammi più semplici → risultati in ottimo accordo con le osservazioni sperimentali

NB – l'idea funziona solo perché possibile partire da 2 elettroni liberi

problema: calcolo diagrammi più complicati fornisce risultato infinito

soluzione (fine anni '40): a patto di definire con cura la massa e la carica elettrica dell'elettrone (**rinormalizzazione**) si dimostra matematicamente che ogni diagramma infinito positivo è accompagnato da uno infinito negativo → **nella somma si cancellano** (Feynman, Schwinger, Tomonaga)

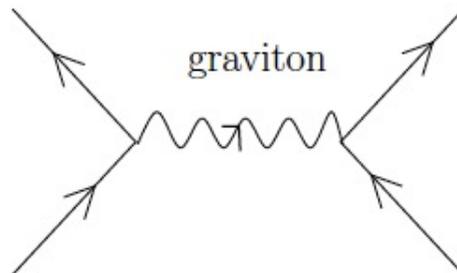
QGD

Questo approccio non funziona nella caso della gravità → ?

Gravità come curvatura dello spaziotempo → assenza di gravità = spaziotempo piatto + l'effetto di corpi materiali che si scambiano **gravitoni** → **QGD** ... ma è lecito procedere come nella **QED**?

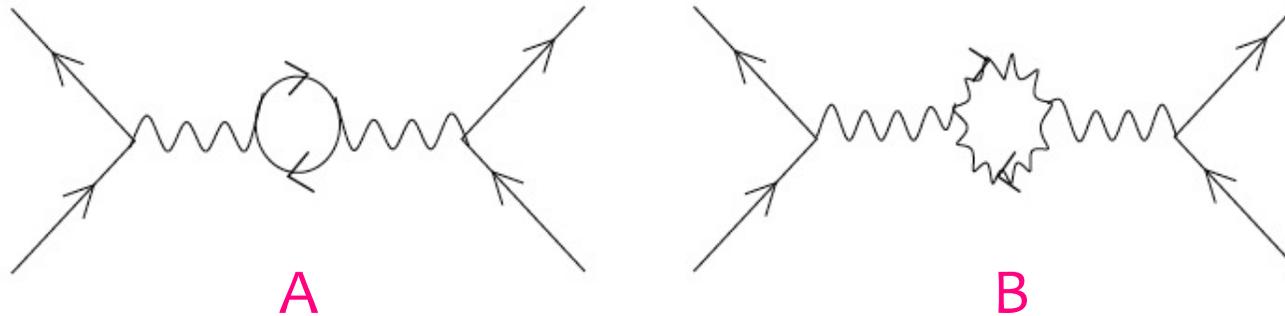
NO, per la gravità la **rinormalizzazione** non funziona

Elettroni che si scambiano gravitoni → all'ordine più basso:



QGD

... all'ordine successivo:



- A** – gravitone si trasforma in coppia di particelle virtuali (analogo diagramma in **QED**)
- B** – gravitone si trasforma in coppia di gravitoni virtuali (no analogo in **QED**); “carica” gravitazionale è l'**energia** → gravità trasporta energia per cui s'accoppia con se stessa

NB – **QED**: sorgente = carica elettrica; fotone neutro
→ campo e.m. non s'accoppia con se stesso

QGD

Calcolo dei diagrammi **A** e **B**: otteniamo valore infinito (come nella **QED**)

QED – si parte dalla teoria con un certo n. di parametri (massa, carica, ...) e, aggiustando i loro valori, otteniamo risultati finiti per tutte le quantità fisiche rilevanti

QGD – si parte con, e.g. 2 parametri, e calcolando **B** si conclude che è necessario introdurre nuovo parametro → nuova teoria con 3 parametri genera diagrammi extra di valore infinito → resi finiti introducendo 4[^] parametro ...

→ nulla può essere predetto poiché necessario conoscere il valore di un n. infinito di parametri per descrivere la fisica, i.e. **QGD** è **non-rinormalizzabile**

QGD

... ultima osservazione

Questo approccio parte dallo spaziotempo piatto e aggiunge l'effetto della gravità per correzioni successive.

È una procedura corretta, nel caso della gravità? Forse **NO**
Forse spaziotempo piatto è esso stesso approssimazione di grande scala e a livello microscopico abbiamo bisogno di una descrizione diversa.

In questo caso, la non-renormalizzabilità della **QGD** non è un problema grave: non dobbiamo seguire un approccio **perturbativo** (i.e., aggiungere ad 1 numeri via via più piccoli), ma guardare alla gravità in un modo completamente diverso, **non-perturbativo**