

# *Einstein 100 anni dopo*

Dopo il 1915: l'Universo e altri dettagli

## **La nascita della cosmologia scientifica**

La creazione della RG ha tra le sue conseguenze la nascita della *cosmologia scientifica*.

Non è possibile fare qui una storia della cosmologia, che come problema esiste dai primi tempi delle civiltà umane (e poi non saprei farla).

Possiamo però vedere a che punto stavano le cose nel 1915.

## Una divagazione: Galassia e Via Lattea

La *Via Lattea* (o *Galassia*, dal greco), come striscia lattiginosa che appare in cielo, ovviamente è nota da millenni.

Quale fosse la sua costituzione rimase a lungo un mistero, e fu oggetto di miti e leggende.

La prima indicazione scientifica risale a Galileo, che nel *Sidereus Nuncius* (1610) descrive ciò che ha visto col suo cannocchiale.

Ecco la traduzione:

*Ciò che in terzo luogo abbiamo osservato è l'essenza, ovvero la materia, della stessa Via Lattea, che con l'aiuto del cannocchiale può essere resa del tutto evidente: sì che dalla visione diretta verranno risolte tutte le controversie che travagliarono per tanti secoli i filosofi, e saremo così liberati da queste discussioni verbose.*

*È infatti la Galassia null'altro che una congerie d'innumerabili stelle raccolte insieme; e in qualunque regione di essa si diriga il cannocchiale, sempre si mostra un'ingente quantità di stelle, molte delle quali sono abbastanza grandi e luminose; ma la moltitudine di quelle più deboli è assolutamente insondabile.*

L'apparire come striscia mostra che questa “congerie” deve avere forma piatta, e che noi la vediamo dall'interno.

Ma ancora agli inizi del '900 niente si sapeva circa le sue dimensioni, e sulla posizione in essa del sistema solare.

Era idea comune fra gli astronomi e fra gli scienziati in genere, che l'Universo dovesse identificarsi con la Galassia.

## Gli “oggetti non stellari”

Erano noti numerosi “oggetti non stellari”, ossia che al telescopio non apparivano puntiformi, come le stelle, ma variamente estesi o “nebulosi”.

Un primo catalogo, che ne comprende 110, era stato compilato da Messier a fine '700.

Il *New General Catalogue* (NGC) coi supplementi arrivava a circa 13000.

Questi oggetti formano un insieme assai eterogeneo. In terminologia moderna includono:

- nebulose planetarie
- resti di supernova
- nebulose di gas e polvere
- ammassi aperti
- ammassi globulari
- galassie “esterne”.

## Un passo avanti: le cefeidi

Nel 1912 Henrietta Lewis pubblica la *relazione periodo-magnitudine* delle *cefeidi*.

Si tratta di una classe di variabili regolari, il cui *periodo* è strettamente correlato alla *magnitudine assoluta*.

Ne segue che le misure del periodo e della magnitudine apparente permettono di risalire alla *distanza*.

Con le cefeidi si arriva a misurare distanze fino a 50 Mpc (150 milioni di a-l).

Rapidamente si determinano forma e dimensioni della Galassia: diametro attorno a 120000 a-l.

Si vede pure che il sistema solare è in una posizione periferica: circa 27000 a-l dal centro.

## Il “grande dibattito”

Rimane aperto il problema degli oggetti non stellari: molti sono certamente galattici, ma restano incognite natura e distanza delle “nebulose”.

Negli anni '20 si svolgerà il “grande dibattito”, che si concluderà a favore del carattere *extragalattico* di quelle che prenderanno il nome generico di “galassie”.

Esempio: nel 1924 Hubble riesce a individuare delle cefeidi nella “nebulosa di Andromeda” (M31).

Ne ricava la distanza: 2.5 Mal (milioni di anni-luce).





## Galassia e galassie

A questo punto, vista la distanza di M31, assai maggiore del diametro della Galassia, è certo che si tratta di un oggetto *extragalattico*.

Successivamente la stessa cosa accadrà per molte altre “nebulose”, che dopo di allora verranno chiamate “galassie”.

In questo modo si allargherà di molto la scala dell'Universo, inizialmente creduto coincidere con la Galassia.

Nel secolo trascorso da allora questa scala si è accresciuta di ordini di grandezza: dai *milioni* di a-1 di M31 siamo passati ai *miliardi* degli oggetti più lontani oggi visibili.

## Una parentesi terminologica

Abbiamo dunque le “galassie” (nome comune, che indica tutta una *classe* di oggetti).

Poi abbiamo la “Galassia”: nome proprio, che si riferisce a quella che viene anche chiamata “Via Lattea” (“Milky Way” in inglese).

Personalmente preferisco riservare il termine “Via Lattea” a ciò che *si vede* in cielo, alla pari con le costellazioni.

Riservo invece “Galassia” alla struttura fisica: un immenso ammasso di stelle, gas, polveri...

## **Dicevamo: cosmologia scientifica**

Prima della RG non esiste la possibilità di un approccio *scientifico* al problema cosmologico.

La teoria di E. consente

- di chiedersi qual è la struttura geometrica dello spazio-tempo: statico? in evoluzione?
- di costruire *modelli di universo*
- di cercare quali dati di osservazione si possono usare per confermare o smentire i vari modelli.



## **Che cosa vuol dire “applicare la RG all'Universo”?**

Occorrono prima di tutto alcune ipotesi di base:

- l'Universo è “tutto quello che c'è” (è una definizione)
- esiste quindi uno “spazio-tempo globale”, che in certo senso coincide con l'Universo, o meglio con la sua *storia*
- l'Universo contiene “materia”
- secondo la RG la materia determina la “geometria” dello spazio-tempo.

Quindi, fatte queste ipotesi, la soluzione delle equazioni di Einstein determina la *struttura e l'evoluzione* dell'Universo.

## Un chiarimento

Ho usato la parola “materia”. È un uso corrente tra i fisici, ma è pericoloso perché può essere frainteso da un “layman” (inesperto, non addetto).

Tanto più che esiste, in un linguaggio fisico un po' antiquato e nella divulgazione, un dualismo: *materialenergia*.

Ancor più pericoloso, perché ricorda un antico dualismo filosofico: *materialspirito* (*res extensa* e *res cogitans* per Cartesio).

Niente di tutto questo.

Non mi posso dilungare, ma nel contesto della RG “materia” significa tutto ciò che *appartiene al mondo fisico*: particelle, campi (che del resto sono due diversi modi di descrivere la stessa cosa).

## Ritorno allo spazio-tempo

Abbiamo visto che secondo Minkowski la RR realizza un'*integrazione* fra spazio e tempo: lo spazio-tempo è una struttura unica, che possiamo separare in *spazio* e *tempo*. [figura?]

Però questa separazione avviene *in modo diverso* nei diversi rif. inerziali. [figura?]

Quindi il tempo non è più *assoluto*, perché eventi simultanei in un rif. non lo sono in un altro e viceversa.

Ma in ciascun rif. lo spazio rimane ancora *euclideo*, e rimane lo stesso a tempi diversi. [figura?]

## Lo spazio-tempo *curvo*

La volta scorsa ho energicamente (autoritariamente) mostrato che cosa lo spazio-tempo curvo *non è*.

Ora debbo aggiungere qualcosa: non è possibile una descrizione *geometrica* (con figure) di uno spazio-tempo *curvo*.



Questo per una serie di ragioni:

- è già difficile rappresentare su un piano (foglio, schermo) uno spazio 3D *euclideo*
- per lo spazio-tempo le dimensioni non sono 3, ma 4: tre di spazio più una di tempo
- si può a volte semplificare, disegnando *due sole* dimensioni spaziali invece di tre
- questo può parzialmente funzionare per lo spazio-tempo di Minkowski, che non è euclideo (ha una distanza particolare) ma è *pseudo-euclideo*
- ma uno spazio-tempo *curvo* è più complicato: 3+1 dimensioni, neppure pseudo-euclideo.

## Che si fa allora?

La risposta è: si rinuncia alla geometria in senso classico e si ricorre alle *coordinate*.

Di conseguenza equazioni, formule...

Questo approccio ai tempi di Einstein aveva già quasi un secolo di vita.

Comincia con Gauss, che agli inizi dell'800 fonda una teoria generale delle *superfici*: nel 1828 dimostra il suo *theorema egregium*, che caratterizza in modo generale la *curvatura* di una superficie.

Il suo allievo Riemann nel 1854 estende il lavoro di Gauss a spazi con numero qualunque di dimensioni.

Qualcosa che a quel tempo appariva un tipico esempio di astrazione matematica: qualcosa che non aveva alcuna relazione col mondo reale.

(E invece...)

In particolare Riemann dimostra che in più di due dimensioni la semplice curvatura gaussiana va sostituita da qualcosa di molto più complesso, che avrebbe in seguito ricevuto il nome di  *tensore di Riemann* .

Altri seguono: Christoffel, Ricci Curbastro, Levi-Civita...

Quest'ultimo contemporaneo di Einstein, che ebbe con lui un'ampia corrispondenza.

È tutta questa matematica che Einstein si trova a dover studiare e padroneggiare, per poter costruire la RG.

Ricordate?

*... la parte più sottile della quale avevo finora considerato, nella mia dabbenaggine, un puro lusso.*

## Però...

... non dovete credere che la situazione sia senza speranza.

Avevo detto, aprendo questa serie d'incontri:

*... le idee fondamentali sono accessibili senza sforzo eccessivo, anche a chi sia in possesso di un cultura di livello liceale.*

E ora non mi voglio smentire.

Resta vero che chi voglia capire a fondo la RG, e non sia un Gauss o un Einstein, ha bisogno di un tirocinio che comprende *almeno* un corso di laurea (magistrale) in fisica.

Ed è anche vero che *non tutti* i laureati (magistrali) in fisica conoscono a fondo queste cose.

Sono però convinto che sia possibile arrivare alle *idee fondamentali* per una via più breve.

Lo dico perché ho lavorato in questa direzione, cercando di procedere per gradi, senza matematica sofisticata, scegliendo esempi sufficientemente semplici.

Credo che si possa fare, anche se non è alla comune divulgazione che dovete rivolgervi.

Chi volesse provarcisi, può guardare (studiare!)

<http://www.sagredo.eu/Q16>

## Torniamo all'Universo

Nel 1917 Einstein pubblica un articolo in cui propone un suo modello di Universo.

Il modello si basa su diverse ipotesi:

- Universo *statico*
- a *curvatura costante*, ossia uguale in tutti i punti dello spazio a un dato tempo
- *curvatura positiva*, quindi di estensione finita.

La prima ipotesi non ha una vera giustificazione; è piuttosto un presupposto metafisico: che l'Universo sia *eterno e immutabile*.

La seconda equivale a supporre l'Universo *spazialmente omogeneo*.

È un'ipotesi di *semplicità*, che verrà mantenuta in tutti i modelli cosmologici successivi, e poi denominata *principio cosmologico*.

Può sembrare che sia in contrasto con l'evidenza: l'Universo non è affatto uguale in tutti i punti, visto che esistono *concentrazioni* di materia (galassie ecc.) e spazi sostanzialmente *vuoti*.

La giustificazione è che si può ritenere (a quel tempo non se ne sapeva niente) che *su grande scala*, in media, non ci siano differenze.

È caratteristico che nella costruzione del modello Einstein si curi pochissimo delle *conoscenze osservative*.

Cosa in parte giustificata dalla scarsità di queste, ma più che altro da un approccio *deduttivo*: parto da alcuni principi *semplici e chiari*, e vedo che cosa ne segue.



La terza ipotesi va prima capita nel suo significato, e poi bisognerà vedere come si giustifica.

Stiamo parlando dello spazio 3D: che cosa vuol dire “a curvatura costante”?

Possiamo farcene un'idea togliendo una dimensione, ossia pensando a una semplice *superficie*.

Allora è facile: la superficie di una *sfera* è appunto a curvatura costante.

Nella simbologia matematica, la sfera è indicata con  $S^2$ , lo spazio di Einstein è un  $S^3$ .

Sapendo questo, si sa (si dimostra) che esistono *tre tipi* di spazi 3D a curvatura costante: a curvatura *positiva*, *nulla* o *negativa*.

Il primo è  $S^3$ , il secondo è il comune spazio euclideo.

Il terzo è più difficile da descrivere, ma non importa perché ha in comune con lo spazio euclideo una proprietà che Einstein vuole escludere: sono spazi infiniti (il termine matematico corretto è “non compatti”).

Perché li vuole escludere non è semplice da spiegare.

In parte perché è meno semplice studiare le sue equazioni in uno spazio così fatto.

Ma c'è anche una ragione fisica, connessa col *principio di Mach*, di cui non posso parlare.

## Il “termine cosmologico”

Sta di fatto che Einstein opta per  $S^3$ .

E a questo punto arriva una sorpresa spiacevole: sotto queste ipotesi, le sue equazioni *non ammettono nessuna soluzione*.

Ma Einstein è così convinto della validità di quelle ipotesi, che piuttosto di abbandonarle preferisce *modificare le equazioni*.

Aggiunge un termine, che verrà poi chiamato “termine cosmologico”, e così ottiene che le equazioni abbiano soluzione, con le condizioni poste.

Potrebbe venire un dubbio: ma se si modificano le equazioni che avevano già avuto successo nelle tre verifiche classiche, non *buttiamo all'aria* quel successo?

La risposta è sottile, e richiederebbe dei calcoli...

Detto in poche parole: la modifica, importantissima su scala cosmologica, risulta del tutto *trascurabile alla scala del sistema solare*.

## Eppur si muove...

Mentre Einstein ha scelto la via di modificare le equazioni, altri teorici preferiscono studiarle come le aveva scritte in origine, senza spaventarsi se richiedono un Universo non statico.

Vanno ricordati Friedmann (russo, 1922) e Lemaître (belga, 1927).

Nel 1929 il colpo di scena: l'astronomo Hubble, che stava misurando galassie lontane col più grande telescopio allora esistente (250 cm, Monte Wilson) pubblica le sue osservazioni.

Dimostrano un moto di *allontanamento* delle galassie, con *velocità proporzionale alla distanza*.

È questa la *legge di Hubble*.

L'interpretazione è immediata: l'Universo non è statico, ma *si espande*.

## **La più grande cantonata della mia vita**

Fu questo il commento che Einstein fece in seguito...

Saputo della scoperta di Hubble, abbandonò il termine cosmologico, che aveva introdotto *obtorto collo*, e tornò alle “vecchie” equazioni.

## La legge di Hubble

La velocità di allontanamento di una galassia è proporzionale alla sua distanza:

$$v = H d.$$

$H$  è la *costante di Hubble*.

Per determinare  $H$  occorre misurare, per una data galassia, la distanza  $d$  e la velocità  $v$ .

Non posso fermarmi a spiegare come si misurano; dico solo che delle due, contro ciò che si potrebbe credere, *la più difficile* da misurare (ancor oggi) è *la distanza*.

Proprio a causa di un errore sistematico nelle distanze, il valore inizialmente dato da Hubble per  $H$  era fortemente sbagliato in eccesso.

Oggi si assume  $H \approx 70$  (km/s)/Mpc.

## La legge di Hubble

La velocità di allontanamento di una galassia è proporzionale alla sua distanza:

$$v = H d.$$

$H$  è la *costante di Hubble*.

Oggi si assume  $H \approx 70$  (km/s)/Mpc.

Spieghiamo.

$H$  è il rapporto fra una velocità (km/s) e una distanza (Mpc).

Che cosa significa Mpc? È l'abbreviazione di “megaparsec”, ossia milioni di parsec.

Il parsec è l'unità di distanza correntemente usata in astronomia, che non sto a definire. Ricordo solo che vale circa  $3.26 \text{ a.l.}$

## Un esempio

Per M31 (galassia di Andromeda) abbiamo  $d = 0.78$  Mpc, quindi

$$v = H d = 55 \text{ km/s.}$$

Invece la misura diretta fornisce  $v = -300$  km/s.

Il segno  $-$  indica che M31 *si avvicina* a noi, non si allontana!

Questo esempio mostra che bisogna stare attenti: la legge di Hubble fornisce una velocità *media*, alla quale si sovrappongono le *velocità peculiari* delle singole galassie, che quando fanno parte di un *ammasso* interagiscono tra loro e si muovono in modi complicati.

Ecco perché per scoprire l'espansione fu necessario un grande telescopio, che permetteva di vedere galassie lontane: per quelle più vicine i moti peculiari *prevalgono* sul moto di espansione, mentre per quelle lontane questo è *più grande*.



## Un'obiezione...

... che si sente spesso.

Se tutto si espande, anche le galassie, anche i pianeti, anche le distanze fra gli atomi ... come possiamo accorgerci dell'espansione?

Risposta: *non è vero* che tutto si espande.

Per es. un *corpo solido* non si espande, perché le forze di attrazione tra gli atomi lo tengono a una dimensione fissa.

Anche il sistema solare non si espande, perché l'azione gravitazionale del Sole è molto più importante dell'espansione cosmica.

Lo stesso è vero per la Galassia, e anche per gli ammassi di galassie (esempio di M31).

Solo a *scala cosmica* (molti Mpc, molti milioni o miliardi di a-l) l'espansione diventa dominante.

## Capire l'espansione è difficile

C'è un equivoco sempre in agguato...

Consiste nel vedere l'espansione come il moto di allontanamento di oggetti *immersi in un ordinario spazio euclideo*.

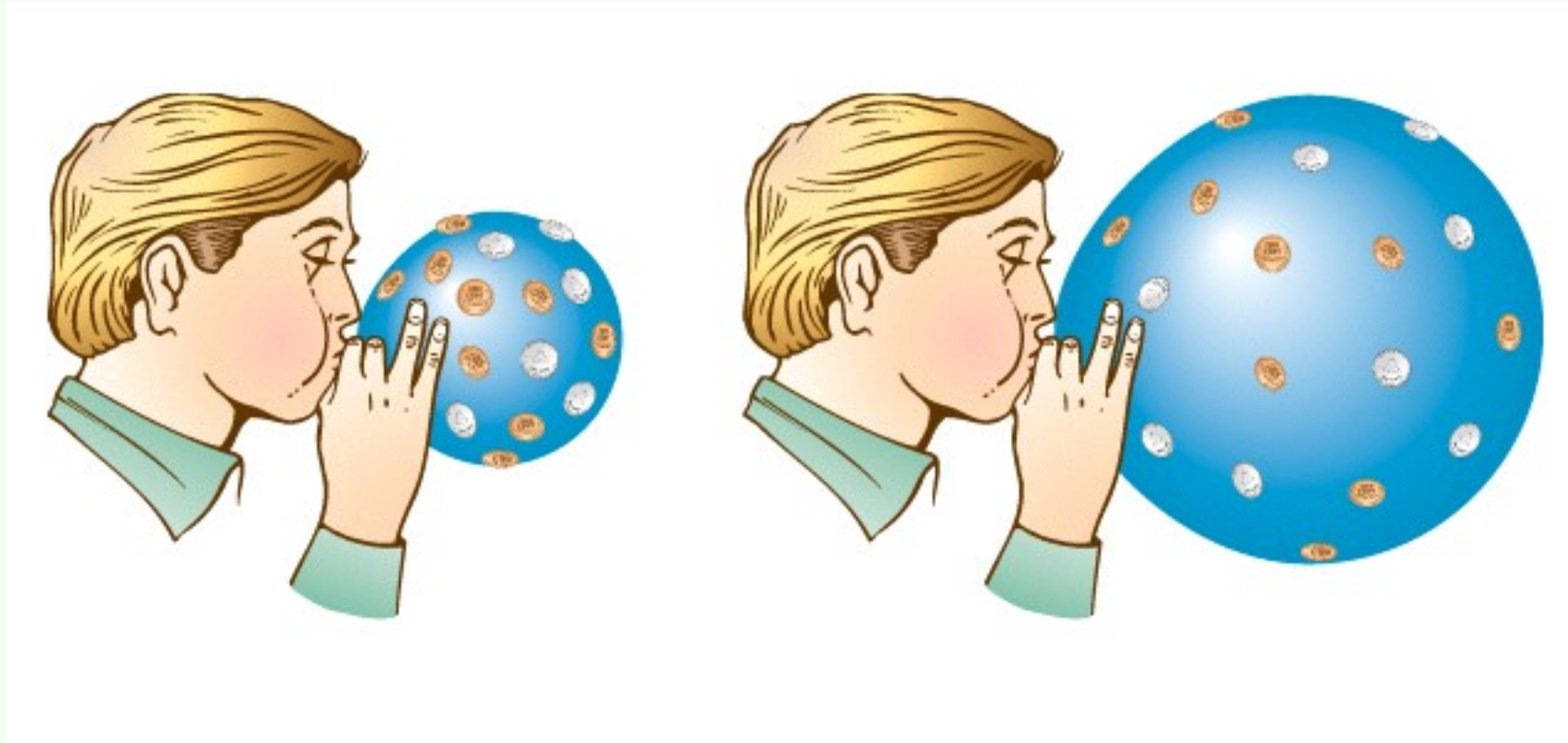
Ossia, pensare l'Universo come una *grande palla* che occupa *una parte dello spazio*, e si allarga nel tempo.

Invece, non c'è spazio “al di là” dell'Universo: *l'Universo è tutto lo spazio*.

Per aiutare (?) il profano sono stati escogitati dei modellini, che sono di due tipi:

- il palloncino che si gonfia
- il panettone che lievita.

## Il palloncino che si gonfia



## Il panettone che lievita



## Il palloncino che si gonfia

Richiede di capire che lo spazio è ridotto alla sola superficie del pallone: 2D invece di 3D.

Le monete incollate sulla superficie (le galassie) mentre il palloncino si dilata *si allontanano* tra loro ma non diventano *più grandi*.

Non c'è un centro (?): *nessuna galassia occupa un posto centrale*.

Però è difficile sfuggire a quello che ci dice l'intuizione: in realtà il palloncino sta in uno spazio 3D, e *ha un centro*: il centro della sfera.

Forse si vuol dire che fuori (dentro? sopra?) dello spazio 3D delle galassie c'è un “iperspazio” 4D?

Non è questo che si vuole suggerire: non c'è nessun iperspazio (e non bisogna confondersi con la “quarta dimensione” costituita dal tempo...

## Il panettone che lievita

Qui l'Universo sarebbe il panettone, i chicchi di uvetta le galassie.

Mentre il panettone lievita i chicchi *si allontanano* ma *non crescono*.

Lo spazio occupato dal panettone è *tridimensionale*.

Difetti:

1) Il panettone è in 3D, ma occupa uno spazio *limitato*: fuori c'è il *vuoto*.

2) Esiste un *centro*: i diversi chicchi stanno in *posizioni diverse*, alcuni più vicini al centro, altri al margine.

## Come se ne esce?

Opinione personale: le analogie, le metafore, possono solo *trarre in inganno*.

Lo strumento per capire esiste, e si chiama *matematica*.

L'aveva già capito Galileo:

*La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, e altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.*

(*Il Saggiatore*, 1623)

Intendiamoci: matematica non significa necessariamente formule complicate, equazioni...

Significa anzitutto *concetti precisi, definizioni chiare*, capacità di *astrazione*.

La mia lettura del brano di Galileo è questa.

Quando ci troviamo di fronte a situazioni del mondo reale che vanno *al di là* della nostra esperienza comune, i concetti che ci siamo formati in modo quasi inconsapevole *non sono più adeguati*.

Ma per fortuna l'umanità nel suo sviluppo intellettuale ha creato uno *strumento* potentissimo, che permette di padroneggiare anche quelle situazioni, ed è appunto la *matematica*.

È così che possiamo capire un Universo in espansione: non coi palloncini e i panettoni...



## Se il nostro tema ...

... fosse la cosmologia, avremmo ancora parecchie cose da dire:

- passato e futuro dell'universo
- la radiazione di fondo a microonde
- il big bang
- l'inflazione
- la formazione degli elementi
- la formazione delle galassie
- ...

Ma (per mia fortuna) il nostro tema è Einstein e la RG, quindi posso limitarmi a un solo argomento, dove Einstein ha ancora avuto un parte rilevante.

## Le onde gravitazionali

La prima previsione di questo fenomeno è ancora dovuta a Einstein (1916).

Detto in termini (troppo) semplici, si tratta di *vibrazioni* dello spazio-tempo, provocate dal *moto violento o periodico* di masse.

Un'analogia non troppo sbagliata si può fare col caso elettromagnetico.

Una carica elettrica in *moto accelerato* emette un'onda e.m. che si propaga a distanza, *trasportando energia*.

Einstein prevede che lo stesso dovesse accadere nel caso *gravitazionale*, e fornì anche una formula sull'*energia emessa*.

## Un'idea controversa

L'idea di Einstein non fu accolta con favore unanime; al contrario, fu *molto discussa*.

Non mancavano i fisici teorici che *non credevano* all'esistenza delle onde gravitazionali: la stessa idea di possibili vibrazioni dello spazio-tempo era contestata.

Si può dire che ancor oggi la questione non sia chiusa, in attesa di una rivelazione *diretta*.

## Una scoperta fortunata

Nel 1974 Hulse e Taylor scoprono un sistema formato da due *stelle di neutroni*, una delle quali è una *pulsar*.

Il periodo orbitale è di circa 8 ore.

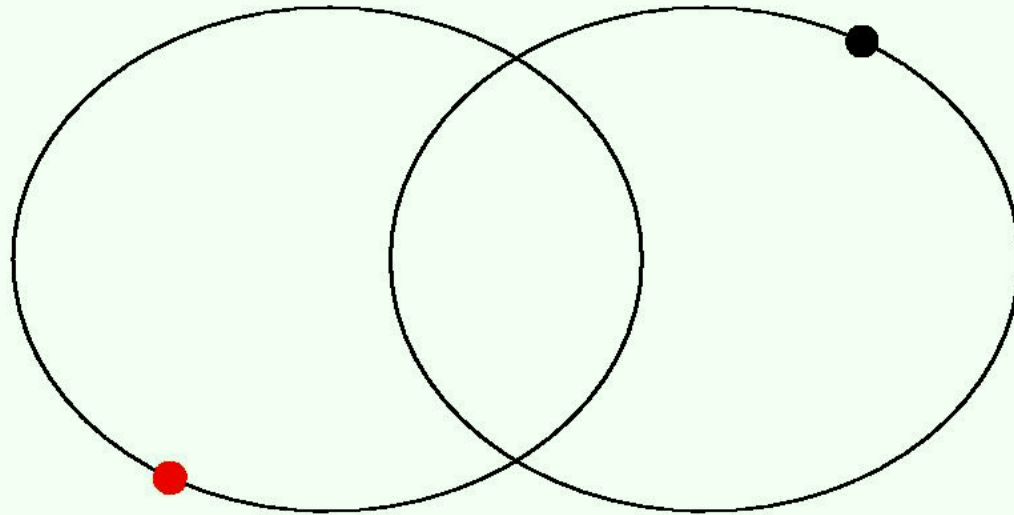
Ricordiamo: una stella di neutroni è uno dei possibili *stadi finali* dell'evoluzione stellare.

Si tratta di stelle di massa non molto maggiore del Sole, formate quasi esclusivamente di neutroni (a parte uno strato superficiale) e con dimensioni ridottissime: tipicamente  $10 \div 20$  km di raggio.

Le stelle di neutroni in genere *ruotano su se stesse* molto rapidamente, con periodi anche dell'ordine del *centesimo di secondo*.

Una *pulsar* (“pulsating radio star”) è una stella di neutroni da cui riceviamo *lampi periodici* di radiazione.

Nel caso del sistema B1913+16 una sola delle due stelle è una pulsar, e la frequenza dei lampi *varia periodicamente*, il che permette di capire che si tratta di una sorgente in moto orbitale (periodo 8 ore, come detto).



In realtà il periodo orbitale è noto con altissima precisione:

7.751938773864 ore

ma *non è costante*: decresce di 76.5  $\mu\text{s}$  per anno.

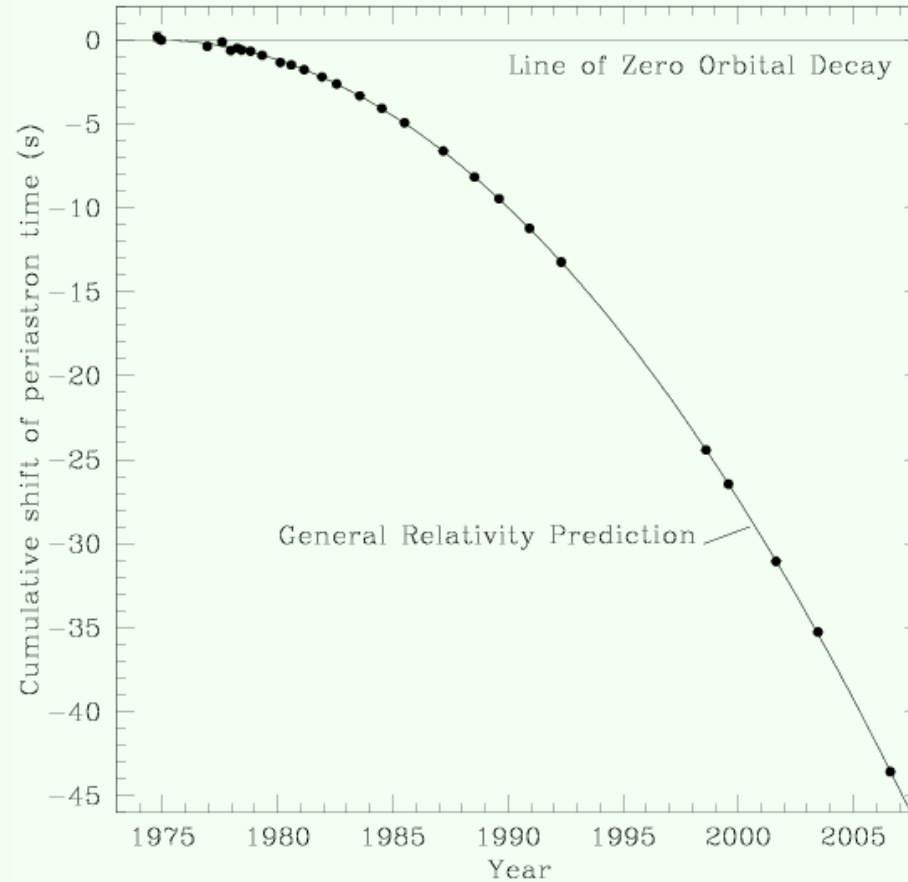
Se il periodo decresce, vuol dire che le due stelle si avvicinano, quindi che *l'energia* del sistema *diminuisce*.

A che cosa può essere dovuta questa perdita di energia?

Dopo un esame accurato, Hulse e Taylor non trovarono altra spiegazione che l'emissione di *onde gravitazionali*.

L'evoluzione della binaria fu seguita per molti anni, confrontando la variazione di periodo osservata con quella prevista dalla formula di Einstein.

Ecco il risultato:



Nel 1993 a Hulse e Taylor fu assegnato il Nobel per la fisica.

Possiamo dunque dire che è provata l'esistenza delle onde gravitazionali?

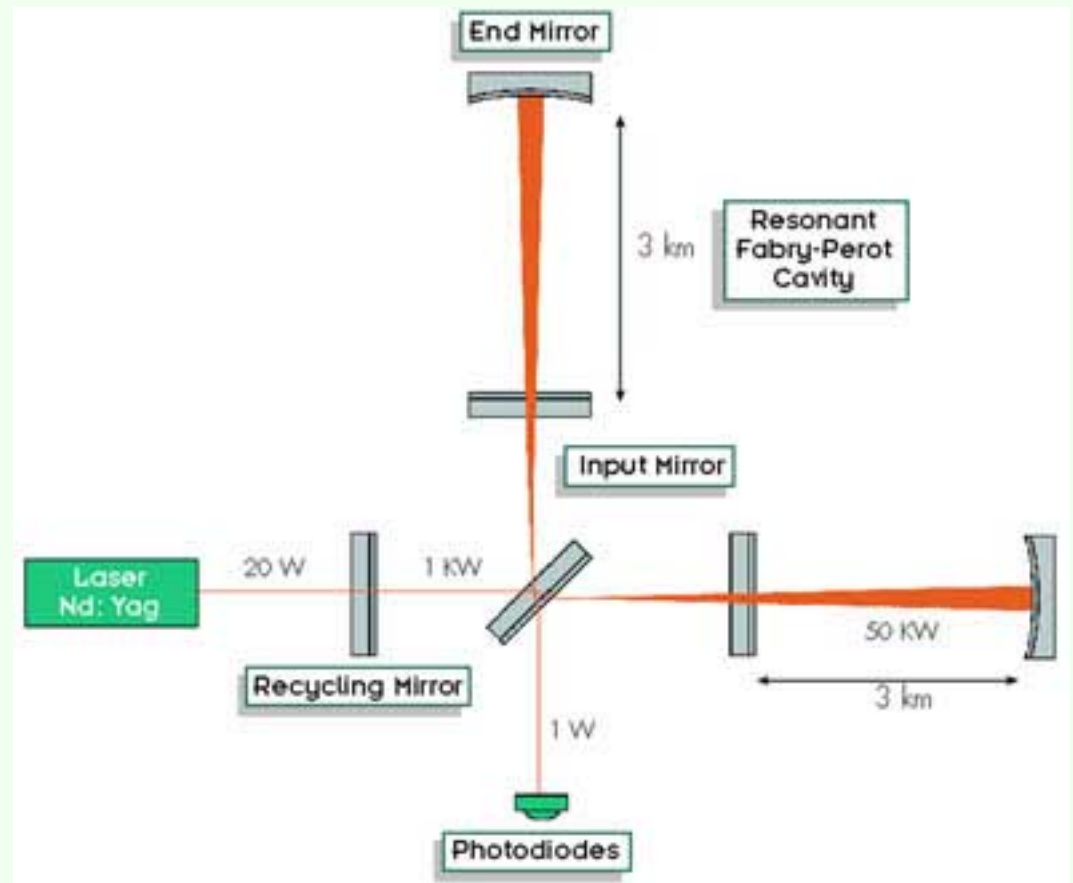
I critici dicono *no*, perché si tratta solo di una prova *indiretta*.

## Le antenne per onde gravitazionali

I tentativi di rivelazione diretta datano da oltre 50 anni.

Sfortunatamente è difficile costruire rivelatori efficienti per queste onde.

Attualmente sono in funzione diverse antenne *interferometriche*, in Giappone, USA e anche in Italia, a poco più di 20 km da qui, nel comune di Cascina (VIRGO).







Queste antenne dovrebbero rivelare eventi impulsivi, come *l'esplosione di una supernova*.

Però nella Galassia si tratta di eventi *rari*: l'ultima supernova apparve nel 1604 (fu vista da Galileo e Keplero) dopo quella del 1572, vista da Tycho Brahe.

Occorre quindi che le antenne siano sufficientemente *sensibili* per rivelare anche *supernovae extragalattiche*.

Dopo un periodo di attesa infruttuosa, tanto VIRGO quanto LIGO (USA) sono state potenziate, e dovrebbero essere all'inizio di un *lavoro in collaborazione*.

Questo è importante, perché una rivelazione in *coincidenza* da due antenne dà maggiore garanzia che non si tratti di un *evento spurio*, dovuto a disturbi vari.

## A che punto siamo?

Cento anni per una teoria non sono molti: le grandi teorie della fisica, come la meccanica newtoniana o l'elettromagnetismo di Maxwell, sono insegnate e praticate ancor oggi.

Le nuove teorie, come appunto la RG o la QED (elettrodinamica quantistica) sono nate per *estendere* le vecchie a nuovi campi di fenomeni, ma non le hanno cancellate.

E però lecito chiedersi: come sta la RG?

Ci sono fatti nuovi che non spiega? Ci sono difficoltà della teoria?

## **A che punto siamo?**

Ci sono alcune cose che non si spiegano:

- la “materia oscura”
- la cosiddetta “energia oscura”.

Un altro aspetto poco chiaro è l' “inflazione”.

C'è poi il problema delle singolarità e quindi l'esigenza di “quantizzare la gravità”.

Vediamo con ordine.

## La materia oscura

Con questo termine s'intendere della materia di cui vediamo solo l'effetto *gravitazionale*.

È necessaria per spiegare in dettaglio la *rotazione delle galassie*.

Anche il modello cosmologico oggi accettato ne richiede la presenza, e non in piccola quantità: oltre 4 volte la materia visibile.

Sono state fatte numerose *ipotesi* sulla sua costituzione e anche ricerche *sperimentali*, ma per ora *senza risultati*.

## **Il termine cosmologico, alias “energia oscura”**

Il “termine cosmologico” fu inserito da Einstein nel 1917 nelle sue equazioni, e rinnegato pochi anni dopo, alla scoperta dell'espansione.

È resuscitato in tempi più recenti, in quanto necessario per interpretare i dati cosmologici.

Nella nuova veste ha cambiato nome: viene ora chiamato col nome fantascientifico (?) di “energia oscura”.

Il cambiamento di nome corrisponde a una diversa *interpretazione*.

Per Einstein era una *modifica nelle equazioni*.

Oggi viene inteso come un ulteriore *componente invisibile* della materia presente nell'Universo.

Non esiste però *nessuna spiegazione* su che cosa sia: i tentativi fatti sono lontani dal produrre risultati.



Opinione personale: il nuovo nome non mi piace, per ragioni filosofiche.

Ho già accennato a un uso improprio del termine “energia”, come *sostanza* più che come *grandezza fisica*.

“Energia oscura” va ancora in questa direzione, con l'aggravante dell'ambiguità presente nell'attributo.

Oscura in quanto *non direttamente osservabile* (questa è fisica).

Ma anche oscura in quanto *misteriosa* o addirittura *negativa, tenebrosa...*

Finché se ne parla tra fisici, è un gioco innocuo.

Ma poi c'è chi prende sul serio il sottinteso...

## L'inflazione

Sta a significare una fase di *rapidissima espansione* dell'Universo, subito dopo il big bang.

L'idea è stata introdotta negli anni '70-'80 per risolvere alcune difficoltà dei modelli cosmologici in relazione alla proprietà osservate.

(Purtroppo non posso spiegare di più: troppo complicato...)

Però lo *status teorico* dei modelli inflazionari non è mai stato chiaro.

Sembrano richiedere un'interazione tra RG e teorie quantistiche di campo, che nessuno ha scritto in modo preciso.



## Il problema delle singolarità

Le soluzioni della RG in molti casi contengono delle “singolarità”: detto alla buona, sono punti dello spazio-tempo dove le distanze vanno a zero, la densità a infinito.

Esempi: *big bang* e *buchi neri*.

Attenzione: qui non stiamo discutendo se nella realtà queste cose esistano davvero. Il problema è *interno* alla teoria.

Sembra anche che le singolarità non siano una particolarità di alcune soluzioni, ma una *necessità teorica*: questo dimostrarono Hawking e Penrose, circa 40 anni fa.

Ma il problema non è l'esistenza delle singolarità: è *un altro*.

Osserviamo che la RG è una teoria *classica*, ossia ignora tutti gli *effetti quantistici*.

(Come tutte le teorie fisiche precedenti.)

La cosa è giustificata, perché questi effetti sono generalmente trascurabili nell'ambito dove la RG trova impiego: alle *grandi scale*, dal sistema solare in su.

Però questo non è più vero *vicino a una singolarità*, e si crea così una situazione paradossale:

- la RG prevede le singolarità
- vicino a una singolarità sono importanti effetti quantistici
- quindi la RG *non può valere* vicino a una singolarità.

## Quale soluzione?

La soluzione può essere solo una *nuova teoria*, che includa RG e MQ: quella che si chiama “quantizzare la gravità”.

La ricerca è in corso da decenni, secondo due filoni principali.

Il più noto (perché ha ricevuto molta pubblicità) è la *teoria delle stringhe*: terribilmente complicata, non ha prodotto risultati verificabili.

Infatti le previsioni dichiarate sono per *molti ordini di grandezza* fuori delle attuali possibilità sperimentali.

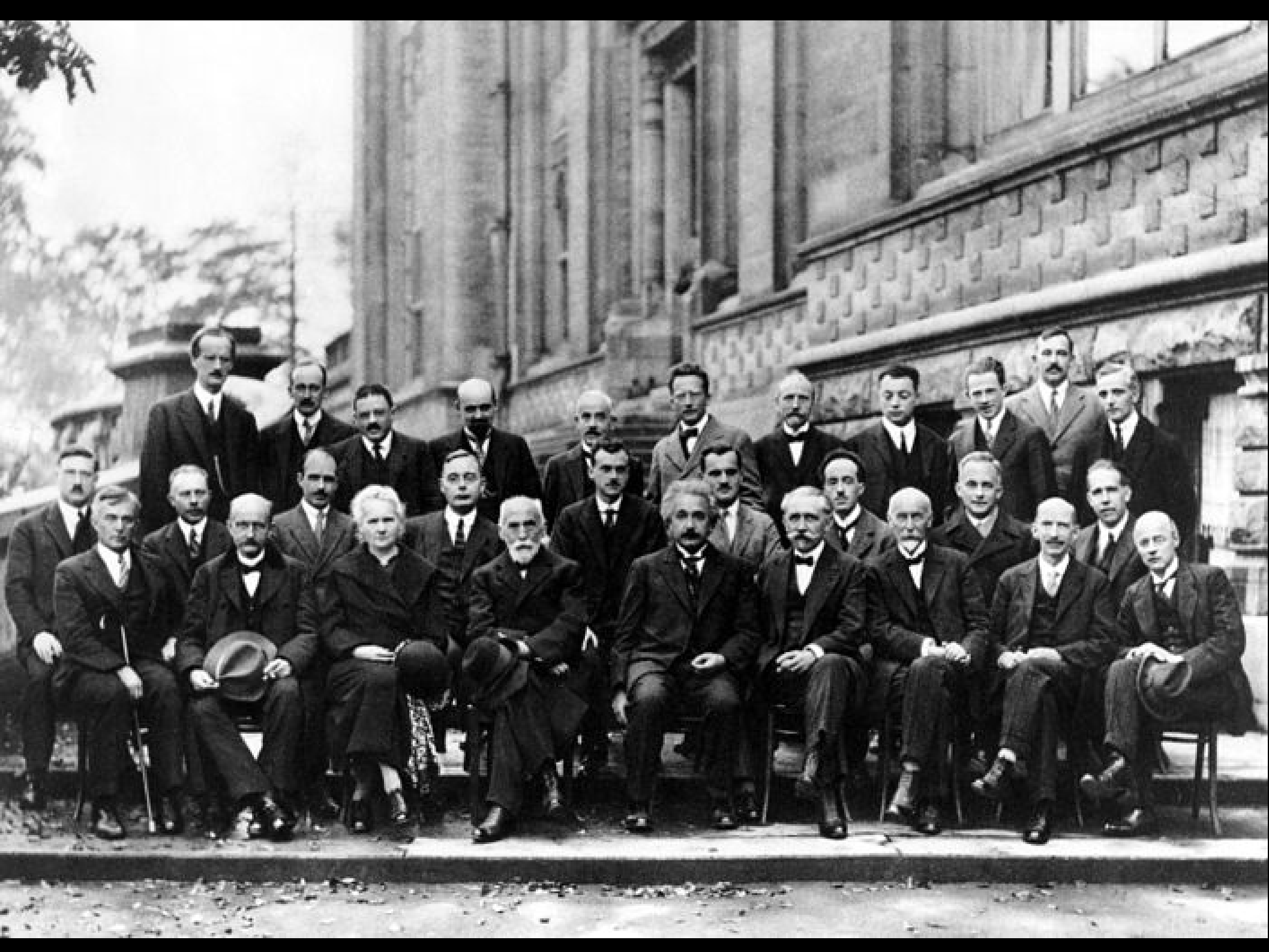
Esiste poi la LQG (“loop quantum gravity”): anche questa parecchio complicata; forse più elegante, ma a uno stadio meno avanzato.

Se posso aggiungere un'opinione personale: forse sono entrambi vicoli ciechi: occorrono idee *interamente nuove*, come lo sono state 100 anni fa la RG e poi la MQ.

Facile a dirsi...

**Per finire...**

... vi mostro una foto,



## Per finire...

... vi mostro una foto, scattata nel 1927, al quinto Convegno Solvay.

Erano presenti i maggiori fisici del tempo, per più della metà premi Nobel, per discutere di “*elettroni e fotoni*”.

Vedete la posizione di Einstein, che non era il più vecchio, ma era riconosciuto il più grande.

Ora che siamo alla fine, avete potuto avvicinare *una parte* del contributo dato da Einstein alla fisica.

Avete visto il coraggio intellettuale nel porsi problemi immensi per complessità e per portata.

La tenacia nel perseguire idee nuove, in certi casi contro la visione corrente e sempre più avanti di quella.

La capacità di vedere in modo diverso cose che tutti avevano davanti agli occhi.

Questo (ma non solo questo) è stato Albert Einstein.