Dal microcosmo al macrocosmo

Dall'infinitamente piccolo all'infinitamente grande (o viceversa?) e ritorno

Enrico Predazzi

Accademia delle Scienze di Torino

Dall'infinitamente piccolo all'infinitamente grande (o viceversa?) e ritorno

- **1) Premesse**
- **2) Fisica alle piccole distanze**
- **3) … e cosa capita alle grandi distanze**
- **4) Conclusioni: a che punto siamo?**

disclaimers

- Sul titolo della conferenza…
- Sulla mancanza di formule
- Sulla discorsività di questo incontro

1. Premesse

- XX secolo: «Il secolo della Fisica»
- Verso la fine dell'Ottocento si pensava che la fisica fosse ormai ridotta solo a *fare misure più precise*

  … salvo per due nubi *minori* all'orizzonte e cioè:
- 1) Lo spettro del corpo nero (da cui nascerà la MQ)
- 2) La non invarianza delle eq. di Maxwell per TG

  (da cui nasceranno la Relatività R prima e G poi)

- Alla fine dell'Ottocento, la fisica veniva da tre secoli di sviluppi trionfali cominciati con Galileo e poi continuati con Keplero, Newton, Avogadro, Lagrange, Hamilton ecc. fino a metà Ottocento. Poi, alcune tappe fondamentali nella scienza (e non solo nella fisica)
- **Maxwell 1864** (poco prima **Darwin** [1859] e poco dopo **Mendeleev** [1869])
- **Maxwell è già fisica relativistica:** è la prima unificazione di forze nella fisica che ispirerà quelle del '900

- Seguono grandi progressi in tutte le scienze nella seconda metà dell'Ottocento (siamo in pieno **positivismo**). A cavallo del secolo, in fisica
- **1895 W. Roentgen: Raggi X**
- **1896 H. Becquerel: Radioattività (Maria e Pierre Curie)**
- **1897 Thompson, Wiechert e Kaufmann** scoprono l'elettrone (ma solo Thompson «osa» dire che si tratta di una nuova particella)

alle **lezioni Silliman a Yale nel 1905 Rutherford** (che pure non parla né di Planck né di Einstein) scrive

"The last decade has been a very fruitful period in physical science, and discoveries of the most striking interest and importance have followed one another in rapid succession… The march of discovery has been so rapid that it has been difficult even for those directly engaged in the investigations to grasp at once the full significance of the facts that have been brought to light… The rapidity of this advance has seldom, if ever, been equaled in the history of science".

ciononostante…

- nel 1900, Sir William Thomson (Lord Kelvin) a una riunione della British Society for the Advancement of Science dice: "*There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement." - e la radioattività…*
- E Michelson fa un’affermazione molto simile (su misure alla sesta cifra decimale).

2. Fisica alle piccole distanze - corpo nero

- Corpo nero è definito un corpo che irraggia senza assorbire radiazione (teorema di Kirchhoff del 1859, l'anno di Darwin, di Le Verrier; Planck ha un anno)
- Il sole è un corpo nero per definizione.
- Definizione operativa di corpo nero
- Stefan Boltzmann, legge e teorema di Wien poi '900

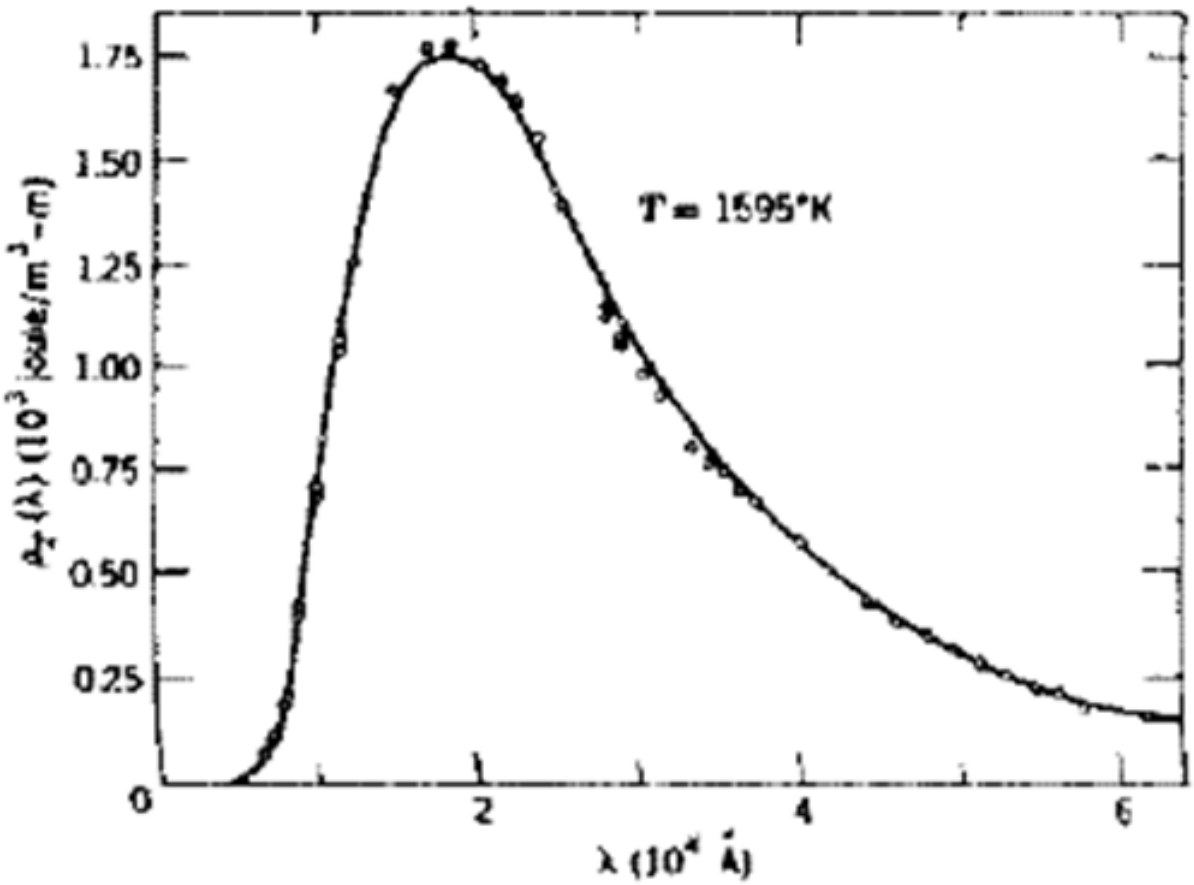
Problema dello spettro del *corpo nero*

- Uno dei problemi della fisica classica (una delle 2 *nuvole* di Lord Kelvin) è la legge di Rayleigh Jeans: crescita con ν^2 dell'intensità $I(\nu)$

$$I(\nu) \sim \nu^2$$

detta *catastrofe ultravioletta* prevede una crescita dell'intensità al crescere di ν che **sperimentalmente** non si verifica (v. figura 1)

Accordo per h≠0 tra dati e formula di Planck



Verso il superamento della fisica classica e la nascita della Meccanica Quantistica

- 1900 (Ottobre e poi Dicembre): Max Planck ipotizza che ogni corpo scaldato emetta per oscillazioni **discrete** di oscillatori elementari che emettono «**quanti** di energia» proporzionali a multipli della frequenza della radiazione emessa

(1) $E_n = nh\nu$

dove, pensa Planck, fatti i conti si farà andare h a zero (si porrà h=0)

La formula di Planck

$$J(\nu, T) = h\nu^3/c^3 \quad 1/(e^{h\nu/kT} - 1)$$

Per piccoli ν ($\nu \rightarrow 0$)

$$J(\nu) \sim \nu^2$$ **(Legge classica Rayleigh Jeans)**

Per grandi ν ($\nu \rightarrow \infty$)

$$J(\nu) \sim \nu^3 \quad e^{-h\nu/kT}$$ **(Legge di Wien)**

- Le cose vanno molto diversamente:

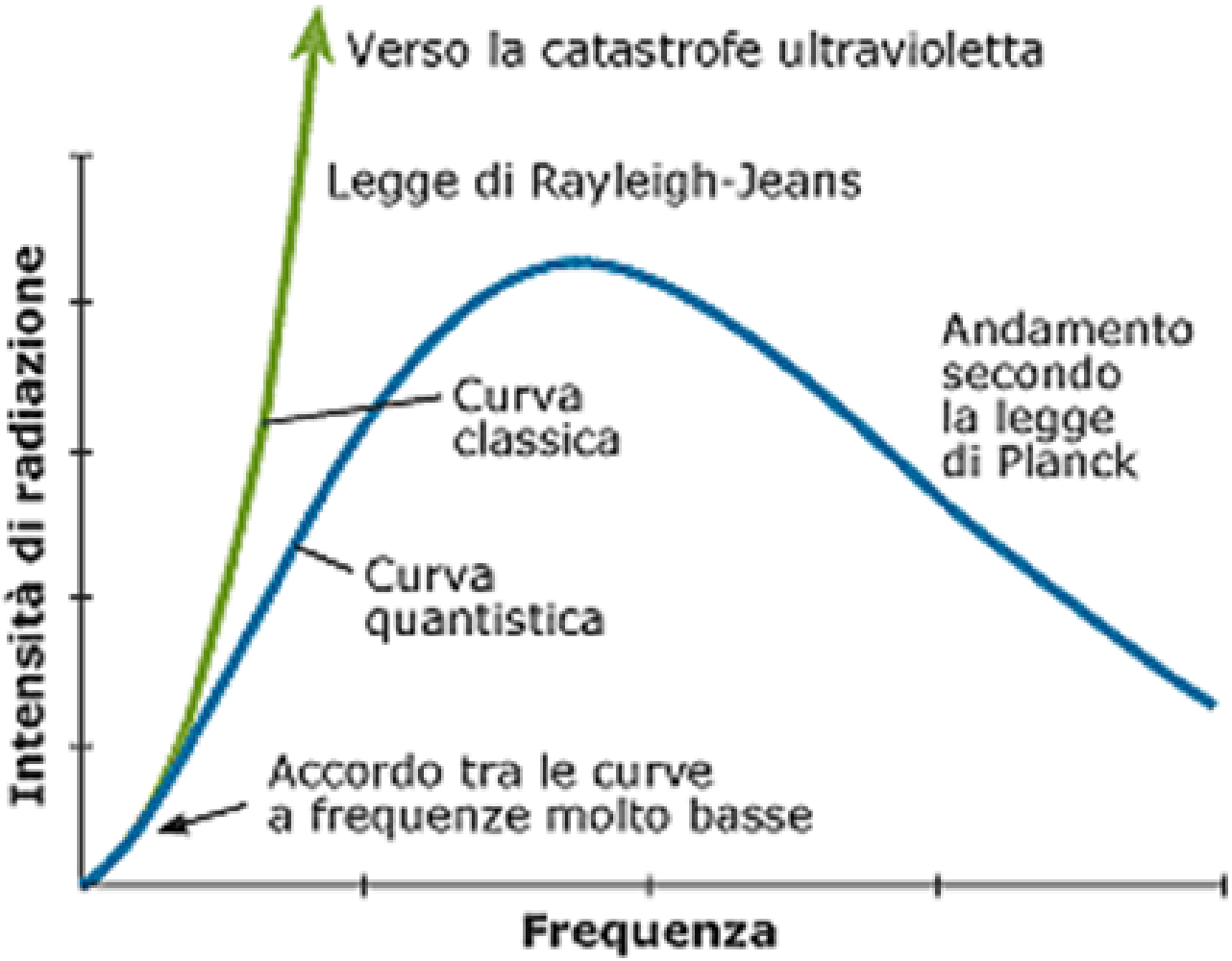
per un valore ben preciso di h (una “azione” come dimensioni) e cioè

$$h = 6{,}626\ 269\ 57(29) \bullet 10^{-34}\ \text{Joule} \bullet \text{sec}$$

l’accordo tra i dati sperimentali e la formula che ottiene Planck è ottimo (v. fig.1)

Ponendo h = zero, si ritrova la discrepanza della fisica classica tra dati e teoria e si ritrova la «**catastrofe ultravioletta**» cioè il crescere come ν^2 della intensità (v. fig.2)

Limite h→ 0 e catastrofe ultravioletta



Da un punto di vista fisico,

- Per la legge di Einstein sull'effetto fotoelettrico (1905), l'energia di un fotone di frequenza ν è

$$E = h\nu$$

- Una crescita dell'intensità di emissione con la frequenza $\approx \nu^2$, porterebbe ad una violazione della conservazione dell'energia ("catastrofe")
- Ma la legge di Einstein $E = h\nu$ è del 1905 mentre la congettura di Planck è del 1900).
- **Che grandioso inizio di secolo!**

Verso una nuova fisica

- Notare la “piccolezza” delle grandezze in questa nuova fisica rispetto a quelle del mondo in cui viviamo dove, per esempio, si ha a che fare con “azioni” dell’ordine del Joule per secondo e non (vedi “h”) di

$$10^{-34} \text{ Joule} \bullet \text{sec}$$

- **La nuova fisica (MQ) tratterà con grandezze infinitesime (ma non nulle) rispetto a quelle studiate nella fisica classica.**
- **Con $h \rightarrow 0$ si ritrovano le leggi della fisica classica**

Nasce il quanto di azione

- e la fisica si discretizza:

$$E = nh\nu$$

Altro che «*Natura non facit saltus*»! (Darwin, Planck)

- La prima nuvola di Lord Kelvin si dissolve con la

Meccanica Quantistica

- Ci vorranno 25 anni per giungere ad una definizione "completa" dei paradigmi della MQ (oggigiorno in revisione) che non saranno accettati facilmente

Convegno solvay 1911

Dal 30 ottobre al 3 novembre 1911, nelle sale dell'Hotel Metropole di Bruxelles, si tenne il primo "Conseil Solvay", di fatto la prima conferenza internazionale di fisica mai organizzata al mondo.
Nel 1927 (secondo Solvay) si dibatte sulla nuova MQ

Photographie Benjamin Couprie
28, Avenue Louise, Bruxelles
R. H. FOWLER
A. PICCARD E. HENRIOT ED. HERZEN TH. DE DONDER E. SCHROEDINGER W. PAULI W. HEISENBERG L. BRILLOUIN
P. EHRENFEST E. VERSCHAFFELT
P. DEBYE M. KNUDSEN W. L. BRAGG H. A. KRAMERS P. A. M. DIRAC A. H. COMPTON L. V. DE BROGLIE M. BORN N. BOHR
I. LANGMEIR M. PLANCK MADAME CURIE H. A. LORENTZ A. EINSTEIN P. LANGEVIN CH. E. GUYE C. T. R. WILSON
O. W. RICHARDSON

Le tappe successive della MQ

- **1905 Einstein (energia del fotone E=hv) risolve i problemi dell'effetto fotoelettrico (Premio Nobel nel 1921)**
- **1909 Geiger e Marsden (scattering)**
- **1912 Atomo di Rutherford**
- **1913 Modello di Bohr dell'atomo**
- **1922 de Broglie wavelength λ=h/p (dualismo onda-corpuscolo**
- **1924 Bohr e altri: interpretazione di Copenhagen**
- **1925,6 eq . Schrödinger e Heisenberg**
- **1927 Heisenberg principio d'indeterminazione**
- **1928 Dirac (MQ e RS) →antimateria**
- **1932 Anderson scopre l'antielettrone**
- **1935 "Paradosso" EPR (Einstein, Podolsky e Rosen)**
- **Anni '70 e '80 diseg. di Bell e esperimenti di Aspect et al.**

E oggi?

- **Oggi i risultati sperimentali nati dalla verifica di Aspect et al. delle diseguaglianze di Bell, dalla conseguente non località della M.Q. e dall'entanglement con relativo teletrasporto, hanno aperto la strada a una nuova rivoluzione quantistica che si proietta verso una crittografia non decrittabile e dalla computazione quantistica**
- **Una arzilla centenaria in gran salute (Lederman)**

Riassumendo sulla Meccanica Quantistica

- **La fisica dell'*infinitamente piccolo* .** La MQ vale su distanze dell'atomo (Ångstrom 10^{-10} m) e del nucleo (Fermi 10^{-15} m).
- Al di sotto (< $10^{-17,-18}$ m), intervengono fenomeni (fisica nucleare, quark ecc. di cui non parleremo)
- Dualismo onda-corpuscolo e interpretazione probabilistica (*spirito di Copenhagen)*
- MQ passa tutti i test sperimentali (là dove il confronto è possibile) e poi, rivisitando il paradosso EPR,
- Fenomeni nuovi di MQ dagli anni '70: **entanglement**, **non località** (diseg. Bell, esp. Aspect) poi **crittografia** e **computazione quantistica** ma anche nanoscienze
- **Una seconda rivoluzione quantistica cent'anni dopo**

3. … e cosa capita alle grandi distanze?

- La *seconda nuvola* di Lord Kelvin: le equazioni di Maxwell del 1864 non si comportano come le equazioni della meccanica che sono invarianti per il cambiamento “classico” di sistema di riferimento (“Trasformazioni di Galileo”) ma per un nuovo tipo di trasformazioni (“Trasformazioni di Lorentz”)
- La Relatività Generale (cent’anni in questi giorni) domina i fenomeni alle grandi distanze

… ma perché “grandi distanze”?

I fenomeni elettromagnetici si svolgono alla velocità della luce e cioè interessano le grandi distanze dell’Universo (13 miliardi anni luce).
Le eq. Di Maxwell sono le prime equazioni che si applicano ai fenomeni che avvengono alla velocità della luce; **è già una fisica relativistica!**

Molti tentativi infruttuosi di conciliare meccanica classica e equazioni di Maxwell. Poi:

1905 Einstein: teoria della relatività ristretta per i fenomeni che avvengono alla velocità della luce

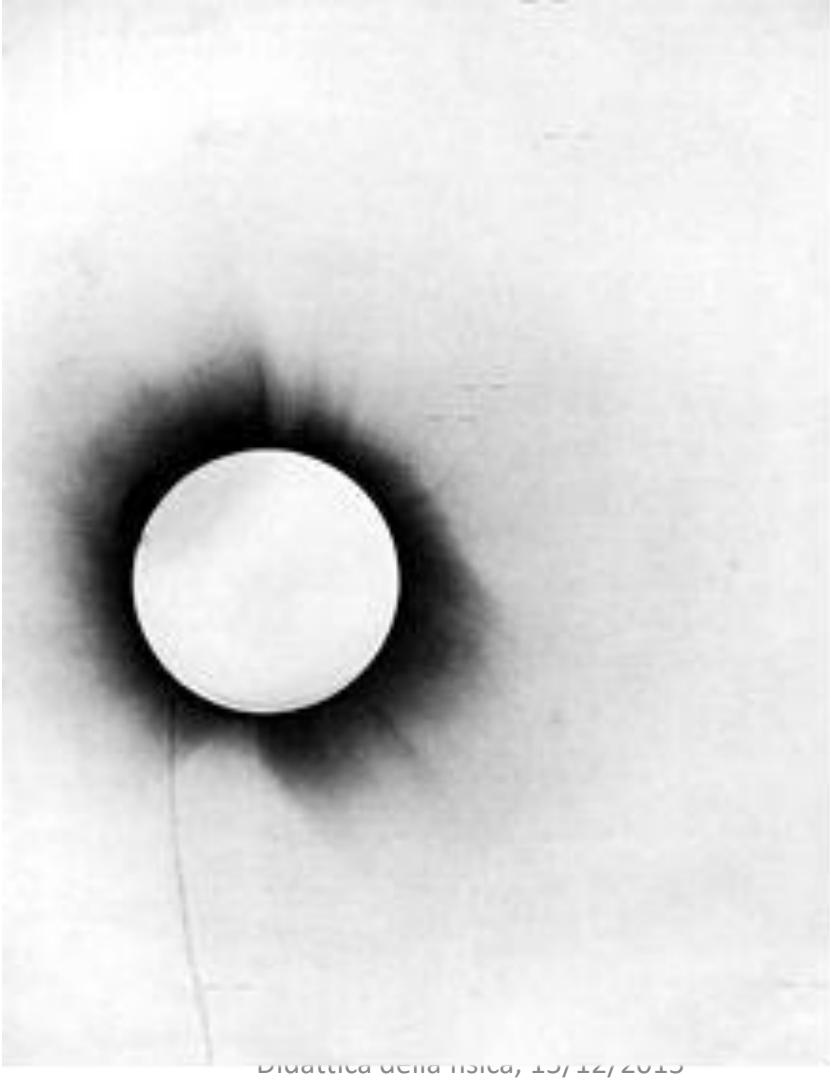
- **c = 299 792,458 km/s**

Quando c→ ∞ si ritrovano le leggi della meccanica classica (come per MQ quando h→0)

1915 Einstein: Relatività Generale . La gravitazione non è più una forza e diventa fenomeno di curvatura dello spazio dovuto alla materia (J. A. Wheeler sintetizza: «***La materia dice allo spazio come curvarsi, lo spazio dice alla materia come muoversi***») ; spiega precessione perielio di Mercurio e prevede fenomeni totalmente nuovi fra cui la deflessione della luce da parte della materia

1919 Eddington : validità sperimentale della RG

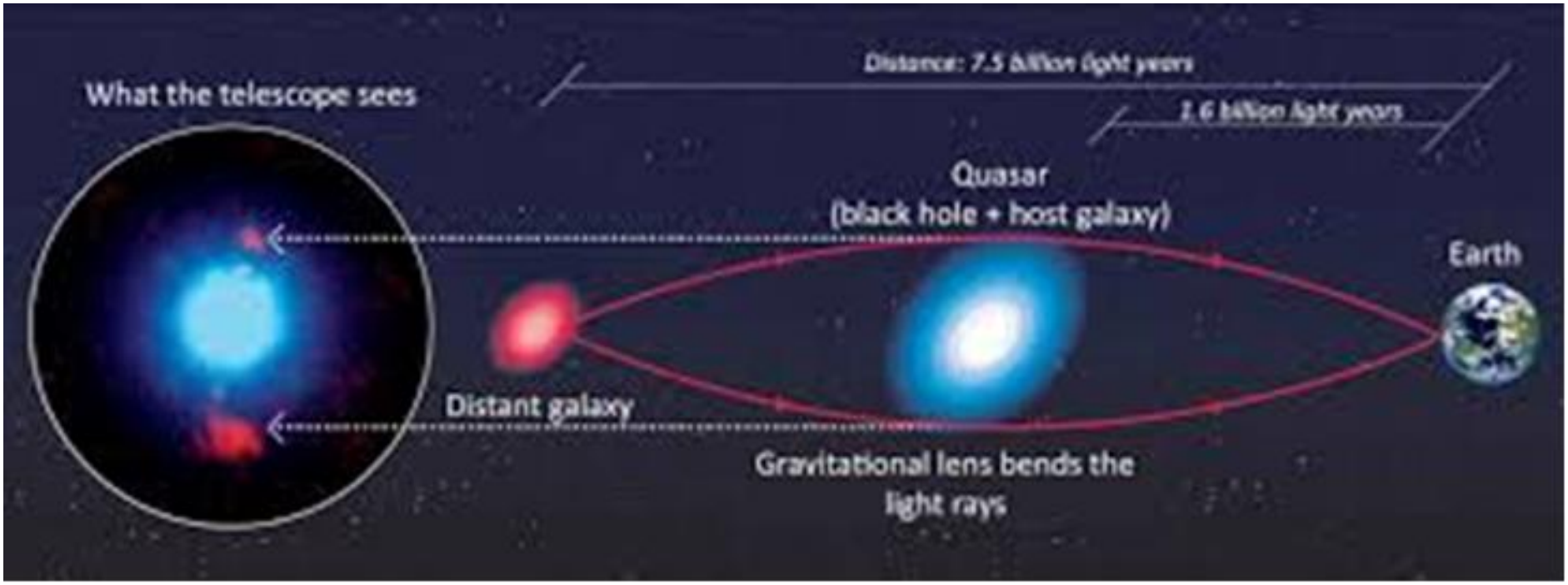
Una delle foto di Eddington (1919)

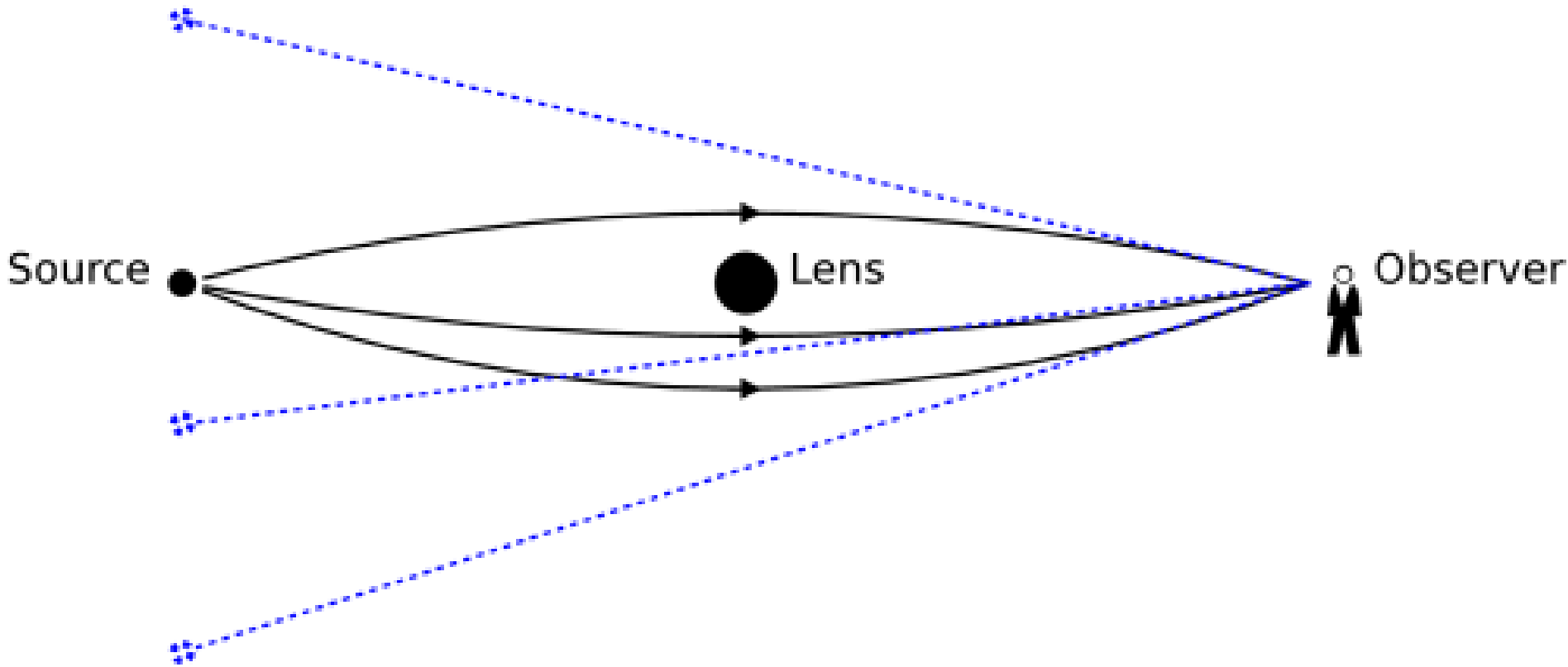


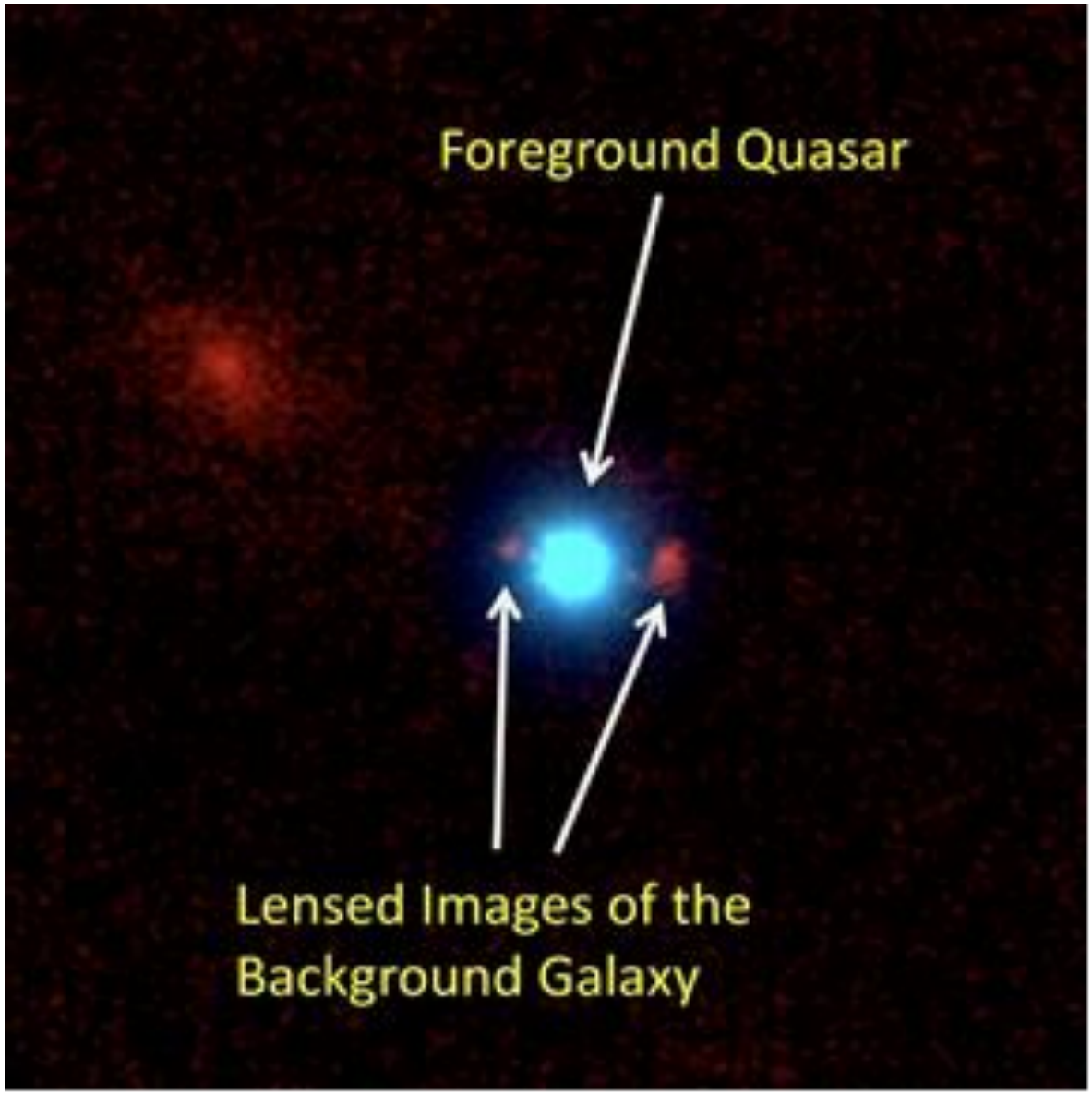
6 Novembre 1919

- Riunione congiunta Royal Society e Royal Astronomical Society presentazione delle fotografie
- 7 Novembre: London Times
- 10 Novembre: New York Times *Lights all askew in the Heavens* (La teoria di Einstein trionfa)
- 1 Dicembre: Eddington a Einstein: *All England has been talking about your theory*
- 14 Dicembre: Berliner Illustrirte Zeitung (*Una nuova celebrità nella storia*)

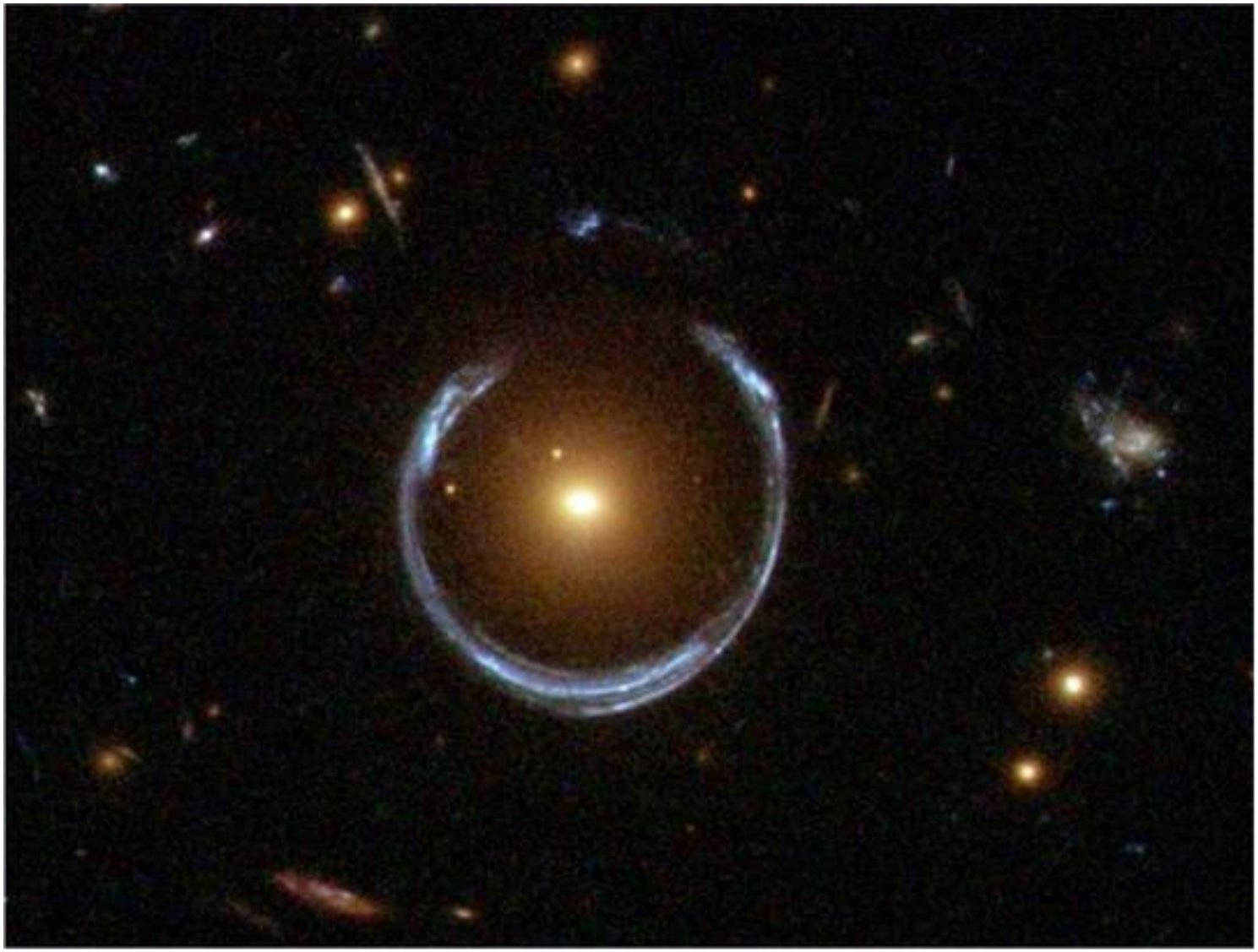
Principio della lente gravitazionale



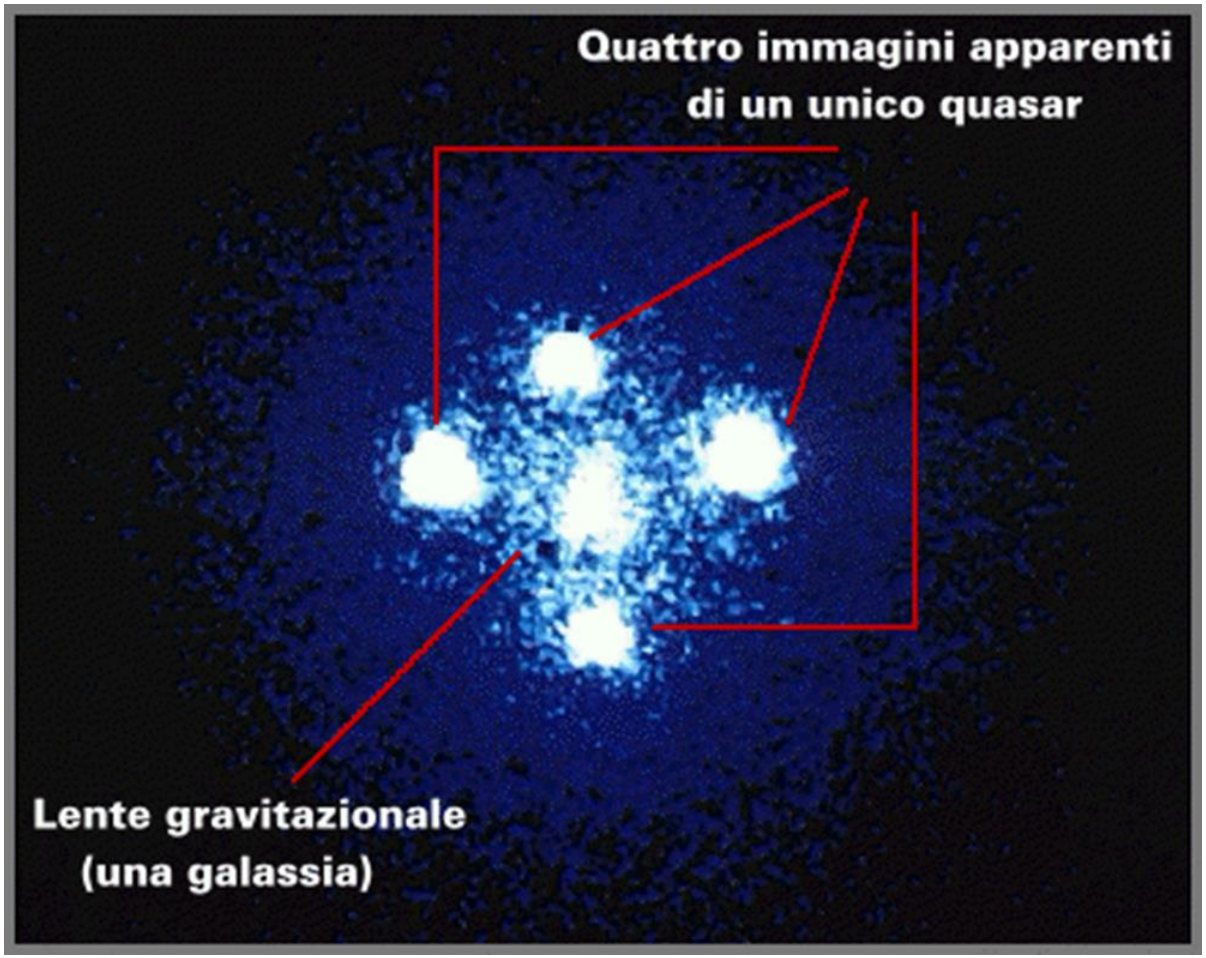

Source
Lens
Observer


Foreground Quasar
Lensed Images of the
Background Galaxy

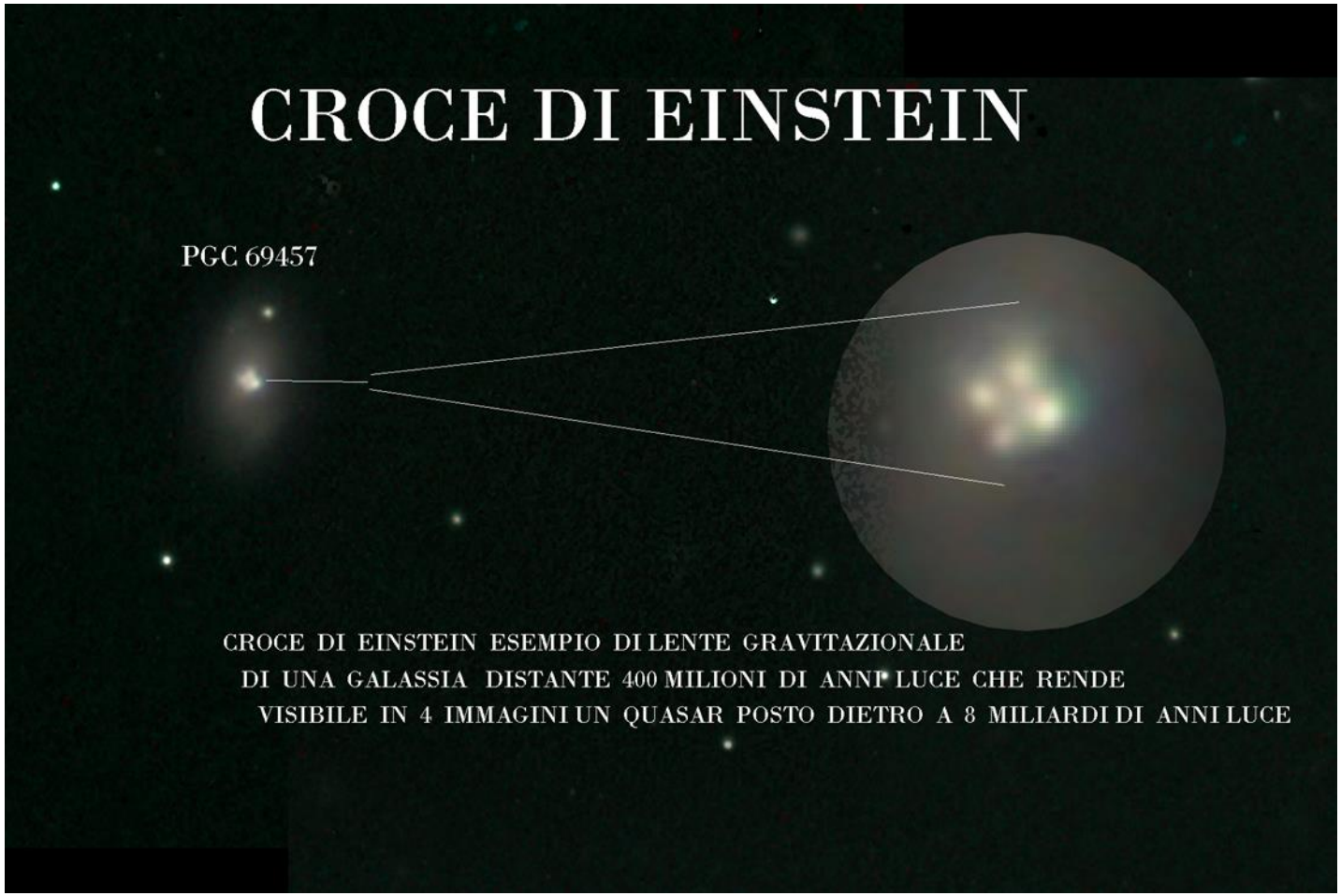
Galassia lontana e anello di Einstein



Galassia lente per quasar lontano «Croce di Einstein»



Croce di Einstein



Con la relatività generale

- Einstein risolve un apparente paradosso sulla gravità fin dalle prime intuizioni di Newton. Cosa è la forza di gravità che dice che i corpi materiali si attraggono? È il campo gravitazionale ma questo, a sua volta, non è altro che lo spazio stesso. La stella (per es. il Sole) piega lo spazio intorno a sé e il pianeta (la Terra, per es.) non gira intorno ma va diritta per uno spazio che si incurva. Come nel celebre esempio della pallina che gira e cade nell'imbuto. Le equazioni della RG saranno proprio relative al tensore di Riemann e *prevedono* l'espansione dell'Universo prevista da Friedman e Lemaitre che Hubble trova sperimentalmente nel 1929.

Un commento istruttivo

- Per molto tempo era convinzione assoluta fosse impossibile trovare un'applicazione pratica della Relatività Generale;
- troppo astratte le sue previsioni sulla vita di tutti i giorni, troppo grandi le scale delle distanze coinvolte (luce in un secondo da luna e in 8 minuti dal sole)
- **SBAGLIATO!** Il GPS è l'applicazione pratica nella vita di tutti i giorni. Senza correzioni di RG gli errori sarebbero dell'ordine di 10 km (1μsluce ≈ .2 km e variazioni di misura tempo di 38 μsluce)

Prove della relatività generale

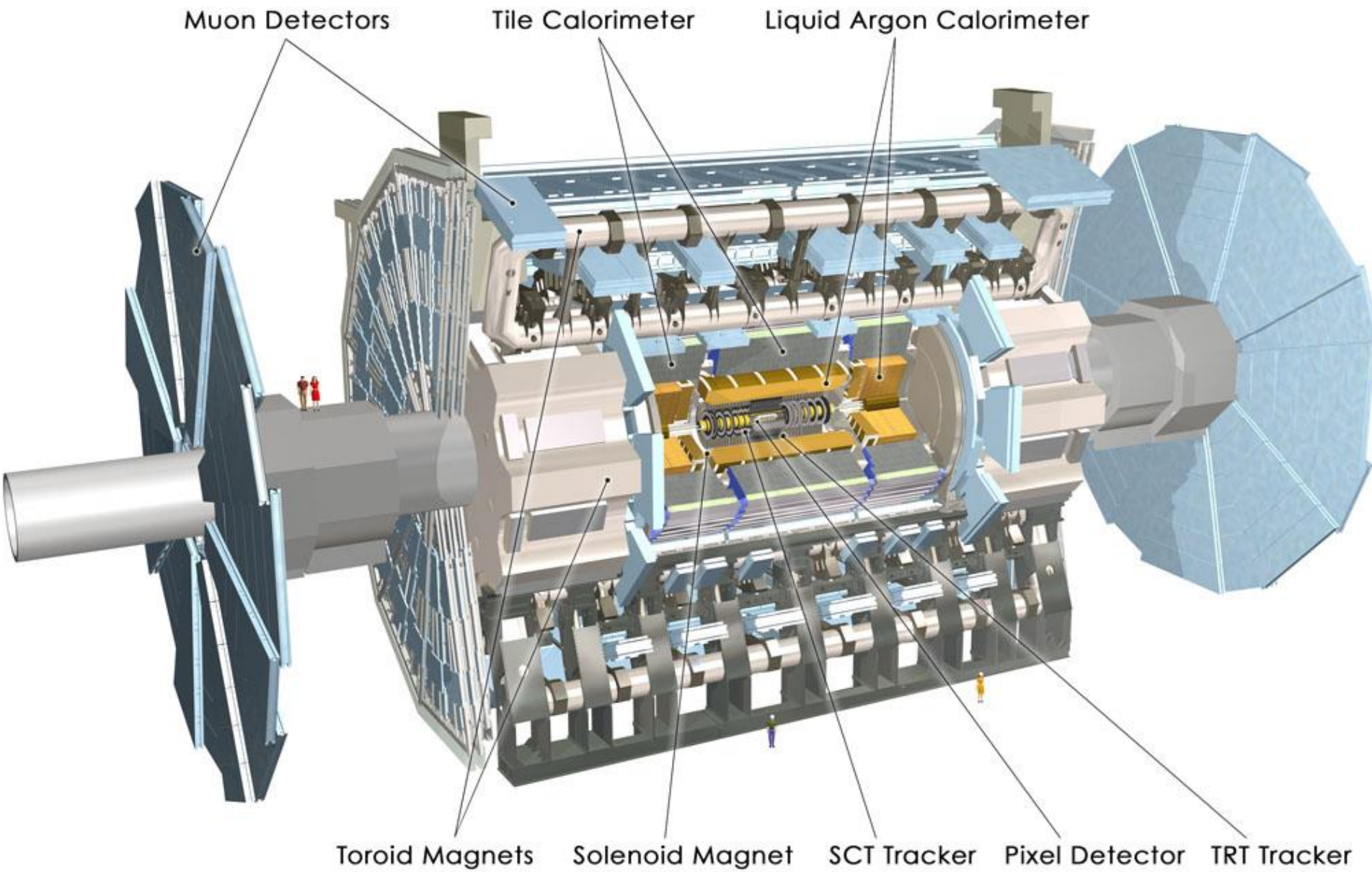
- 1) Precessione del perielio di Mercurio
- 2) Deflessione della luce
- 3) Variazione misura tempo con altezza
- 4) Buchi neri (M87 – 6.6 miliardi di soli)
- 5) Onde gravitazionali
- 6) Wormholes

- La relatività generale è quella che permette di studiare i fenomeni a grandi distanze
- Nasce una nuova disciplina: ASTROFISICA stelle/galassie e numero di Avogadro
- Uno straordinario numero di fenomeni nuovi vengono osservati: **raggi cosmici, espansione dell'Universo, Big Bang, giganti rosse e nane blu, quasar, stelle a neutroni, gamma ray bursts, supernove, buchi neri, materia oscura, energia del vuoto** ecc. ecc.

FENOMENI A PICCOLE E GRANDI DISTANZE

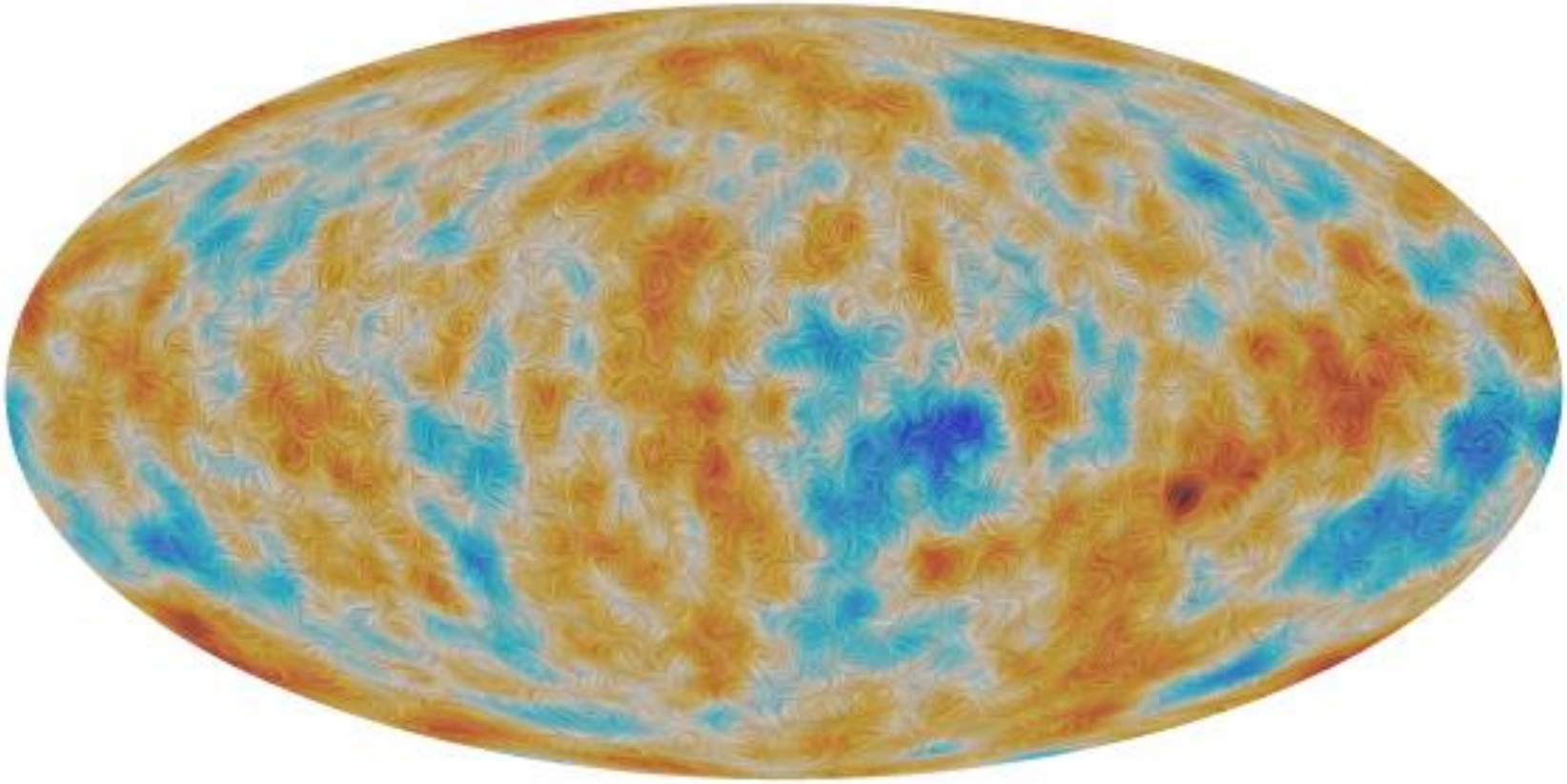
- **La fisica del Novecento si è sviluppata nel presupposto che i fenomeni alle piccole distanze e quelli alle grandi distanze fossero del tutto scorrelati fra loro:**
- fisica delle particelle da un lato, astrofisica dall'altro.
- Negli ultimi decenni ci si è resi conto che non è vero:
- **Il big bang nasce su distanze microscopiche dove vale la MQ ma si sviluppa sulla grandi distanze tipiche della RG!**
- **BIG SCIENCE ma big sul serio (ATLAS, HUBBLE)**
- **La miglior indicazione è data dalla Unificazione delle forze ma è sempre BIG SCIENCE (due esempi)**

Atlas al CERN



Hubble telescope

Luce polarizzata dal Big Bang



Unificazione delle forze in fisica

- Einstein spende decenni nel (vano) tentativo di unificare relatività ed elettromagnetismo
- La fisica della seconda metà del Novecento ha unificato tutte le forze conosciute (salvo gravità)
- Prima (anni '60) sulla falsariga delle unificazione di elettricità e magnetismo e dovuti a Maxwell), unificazione di elettromagnetismo ed interazioni deboli prima (teoria elettrodebole - anni ’60-’70) poi interazioni forti (QCD anni ’80-’90).
- Molte verifiche sperimentali e può oggi essere considerata acquisita in via definitiva.

E la gravitazione?

- Manca invece tuttora una unificazione che includa anche la gravitazione che ci renderebbe conto in maniera unitaria simultaneamente dei fenomeni dell'infinitamente piccolo e dell'infinitamente grande (ultimi 30 anni di Einstein).
- Quando questa avverrà, la contemporanea azione di MQ e relatività potrà finalmente essere compresa.

In compenso l’astrofisica

- È diventata una disciplina sperimentale a pieno titolo e ha aperto campi straordinariamente eccitanti: dopo l’espansione dell’Universo, citando a caso, abbiamo avuto materia oscura, buchi neri, supernove, quasars, stelle a neutroni (incluse quelle che non irradiano nel visibile) per arrivare all’energia del vuoto (o energia oscura che qualcuno chiama anche quintessenza)

LA TEORIA DEL TUTTO? Supergravità?

- Molti se non tutti i fisici ritengono debba esistere una teoria in cui coesistano le leggi della MQ e della RG per cui perderebbe senso chiedersi cosa succede a piccole distanze come se non si riflettesse su quello che succede alle grandi distanze.
- Si parla, di Teoria del tutto, di stringhe, di gravitazione quantistica, di wormholes….

Per il momento ne siamo ancora lontani ma forse neppure tanto

- Ciò che un tempo era speculazione astratta dei filosofi oggi è oggetto delle elucubrazioni teoriche dei fisici e domani lo sarà delle loro osservazioni sperimentali.
- La nostra comprensione delle leggi della natura è, tutto sommato, solo all'inizio

4. Conclusioni: A che punto siamo?

- La fisica ha unificato tutte le interazioni alle piccole distanze (int. forti, elettromagnetiche e deboli) ma
- MANCA L'UNIFICAZIONE DELLA MQ CON LA GRAVITAZIONE (che Einstein ha inutilmente perseguito negli ultimi 30 anni della sua vita)
- **LHC cerca proprio di ricostruire i primissimi passi dell'Universo quando MQ e RG coesistevano**

Non è la prima volta

- Non è la prima volta che la fisica si trova di fronte ad alternative e novità da riassorbire nei suoi paradigmi (parabola di Galileo, ellisse di Keplero, elettricità e magnetismo ecc.).
- Ne è sempre seguita una unificazione che ha portato a grandi e imprevedibili avanzamenti della nostra comprensione del mondo

quindi

- Io non ho dubbi sul fatto che i fisici riusciranno a capire come coesistono MQ e RG: stringhe? Più dimensioni? Wormholes?
- C'è chi, prudenzialmente (o per convinzione personale) pensa che la risposta l'abbia data già Dante quando dice:

- State contente, umana gente, al quia
  ché, se possuto aveste veder tutto,
  mestier non era parturir Maria.