

# Storia dell'Astrofisica e della Relatività

**Carlo Luciano Bianco**

ICRANet – International Center for Relativistic Astrophysics Network

Martedì 20 dicembre 2016

# Astro...

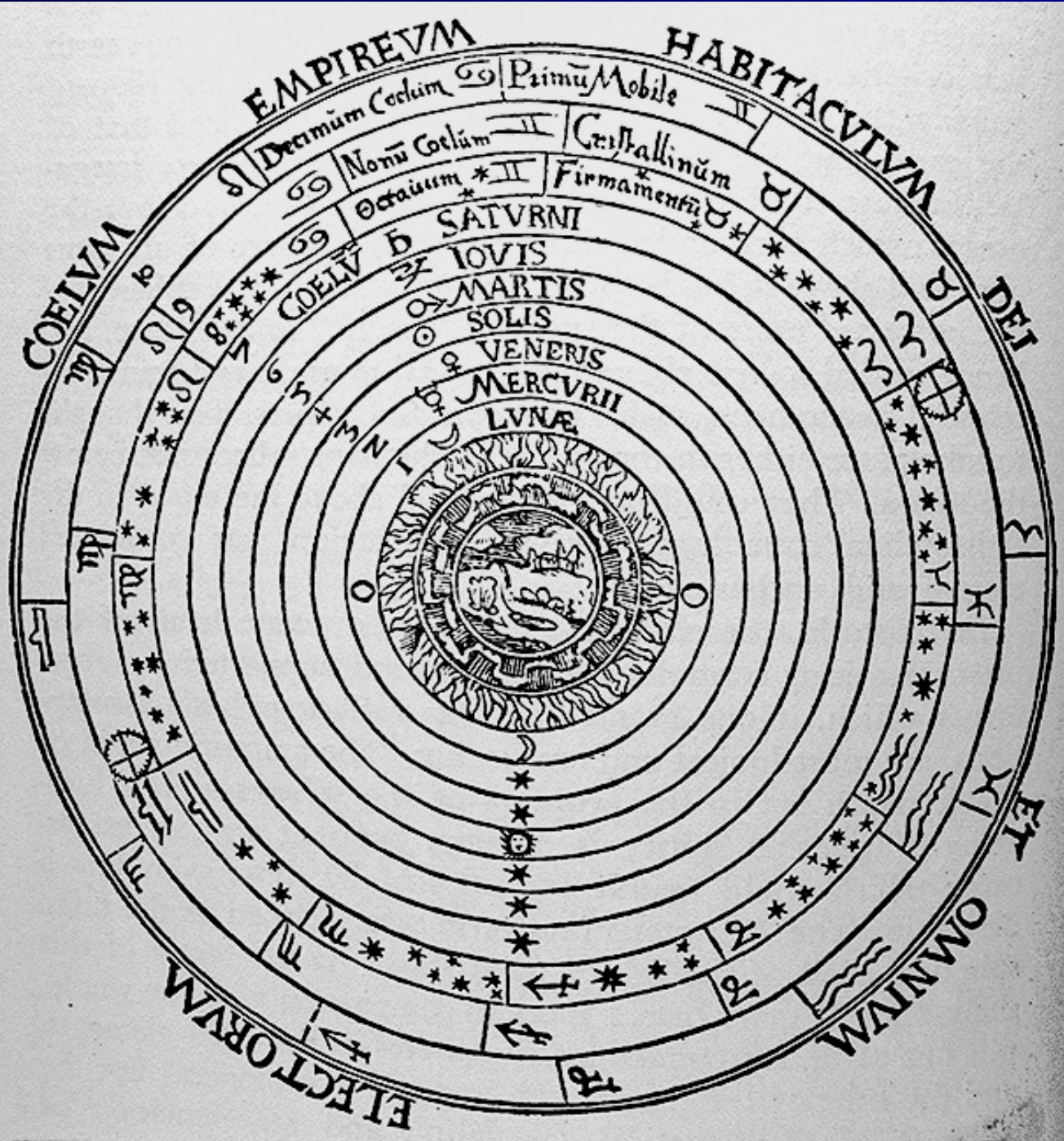
- ... *logia*: a partire dal 10.000 a.C. (circa...)
- ... *nomia*: a partire dal 10.000 a.C. (circa...)
- ... *fisica*: a partire da Galileo in poi

*Demarcazione tra coppie adiacenti non sempre troppo netta...*

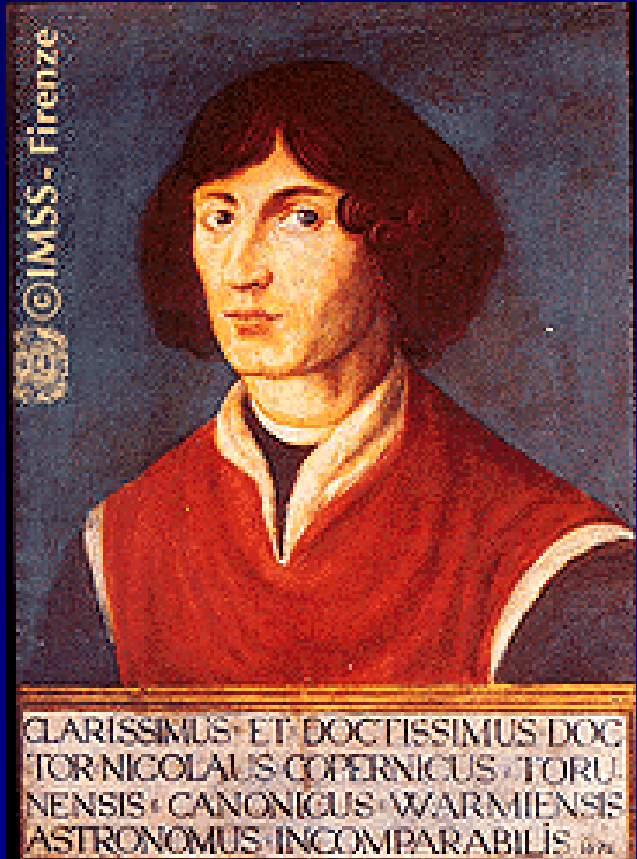
# L'Universo nell'Antichità (<100 a.C.)



# L'Universo di Tolomeo (150 d.C.)



# L'Universo eliocentrico di Copernico (1500)



NICOLAI COPERNICI

net, in quo terram cum orbe lunari tanquam epicyclo contineri diximus. Quinto loco Venus nono mense reducitur, Sextum deniq; locum Mercurius tenet, octuaginta dierum spacio circumcurrens. In medio uero omnium residet Sol. Quis enim in hoc

pulcherimo templo lampadem hanc in alio uel meliori loco poneret, quàm unde totum simul possit illuminare: Siquidem non inepte quidam lucernam mundi, alij mentem, alij rectorem uocant. Trimegistus uisibilem Deum, Sophoclis Electra intuentem omnia. Ita profecto tanquam in folio regali Sol residens circumagentem gubernat Astorum familiam. Tellus quoq; minime fraudatur lunari ministerio, sed ut Aristoteles de animalibus ait, maximam Luna cum terra cognationem habet. Concipit interea à Sole terra, & impregnatur annuo partu. Inuenimus igitur sub hac

Galileo:  
La nascita  
dell'Astrofisica  
(1600)



S I D E R E V S  
N V N C I V S

MAGNA, LONGEQVE ADMIRABILIA  
Spectacula pandens, suspiciendaque proponens  
vnicuique, præsertim verò

PHILOSOPHIS, atq; ASTRONOMIS, quæ à  
GALILEO GALILEO  
PATRITIO FLORENTINO

Patauini Gymnasij Publico Mathematico

P E R S P I C I L L I

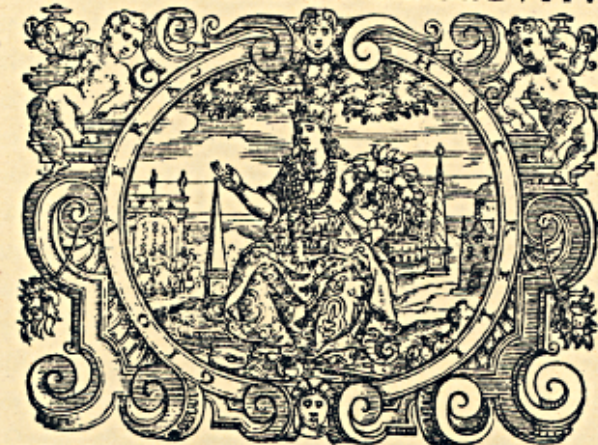
Nuper à se reperti beneficio sunt obseruata in VNÆ FACIE, FIXIS IN-  
NUMERIS, LACTEO CIRCVLO, STELLIS NEBVLOSIS,

Apprime verò in

Q V A T V O R P L A N E T I S

Circa IOVIS Stellam disparibus interuallis, atque periodis, celeri-  
tate mirabili circumuolutis; quos, nemini in hanc vsque  
diem cognitos, nouissimè Author depræ-  
hendit primus; atque

M E D I C E A S I D E R A  
N V N C V P A N D O S D E C R E V I T .



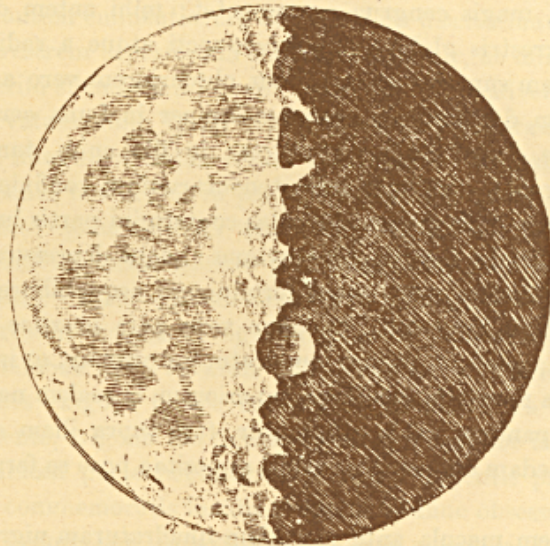
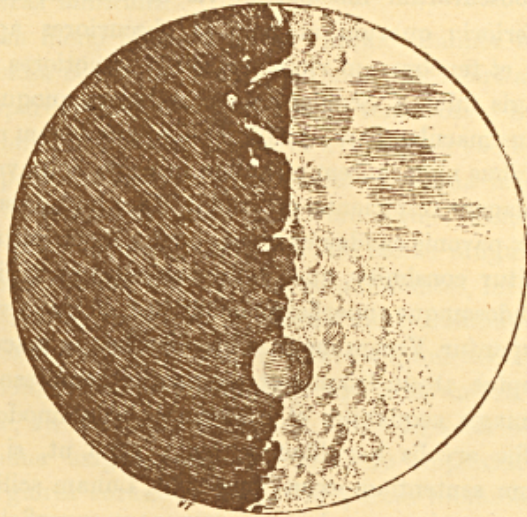
VENETIIS, Apud Thomam Baglionum. M D C X.  
*Superiorum Permissu, & Privilegio.*

# L'altezza delle montagne lunari

66

SIDEREUS NUNCIUS.

montium iuga, ex parte Soli aversa obscuriores apparent, qua vero Solem respiciunt lucidiores extant: cuius oppositum in cavitatibus

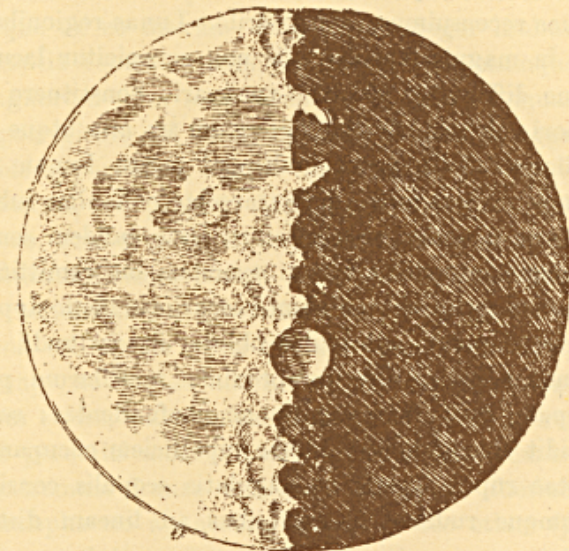
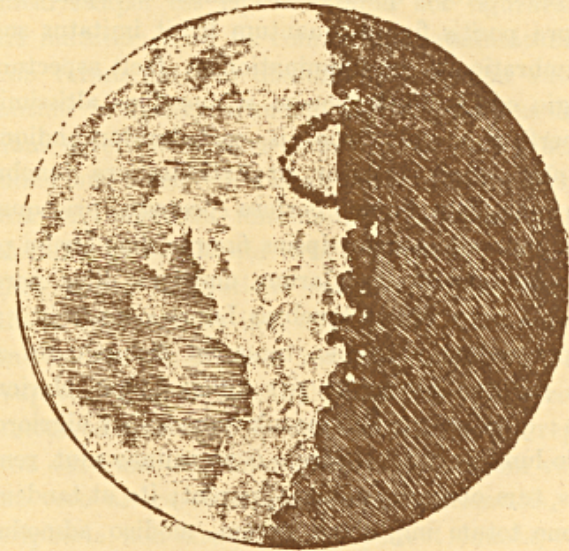


accidit; quarum pars Soli aversa splendens apparet, obscura vero ac umbrosa quae ex parte Solis sita est. Imminuta deinde luminosa superficie, cum primum tota ferme dicta macula tenebris est obducta,

SIDEREUS NUNCIUS.

67

clariora montium dorsa eminenter tenebras scandunt. Hanc duplicem apparentiam sequentes figurae commonstrant.



Unum quoque oblivioni minime tradam, quod non nisi aliqua cum  
3. nisi magna cum —





# Il concetto di “Galassia” come formata da innumerevoli stelle osservate tramite il “Perspicillum”

In altero exemplo sex Stellas Tauri, PLEIADAS dictas, depinximus (dico autem sex, quandoquidem septima fere nunquam apparet) intra

## PLEIADUM CONSTELLATIO.



angustissimos in Caelo cancellos obclusas, quibus aliae, plures quam quadraginta, invisibiles adiacent; quarum nulla ab aliqua ex praedictis sex vix ultra semigradum elongatur: harum nos tantum triginta sex adnotavimus; earumque interstitia, magnitudines, necnon veterum novarumque discrimina, veluti in Orione, servavimus.

Quod tertio loco a nobis fuit observatum, est ipsiusmet LACTEI Circuli essentia, seu materies, quam Perspicilli beneficio adeo ad sensum licet intueri, ut et altercationes omnes, quae per tot saecula philosophos excruciarunt, ab oculata certitudine dirimantur, nosque a verbosis disputationibus liberemur. Est enim GALAXIA nihil aliud, quam innumerarum Stellarum, coacervatim consitarum congeries: in quamcumque enim regionem illius Perspicillum dirigas, statim Stellarum ingens frequentia sese in conspectum profert, quarum complures satis magnae ac valde conspicuae videntur; sed exiguarum multitudo prorsus inexplorabilis est.

At cum non tantum in GALAXIA lacteus ille candor, veluti albicantis nubis, spectetur, sed complures consimilis coloris areolae sparsim per aethera subfulgeant, si in illarum quamlibet Specillum convertas, Stellarum constipatarum coetum offendes. Amplius (quod magis

# M45 – *Le Pleiadi*



# M31 – Galassia di Andromeda



# Il “Principio di Relatività”

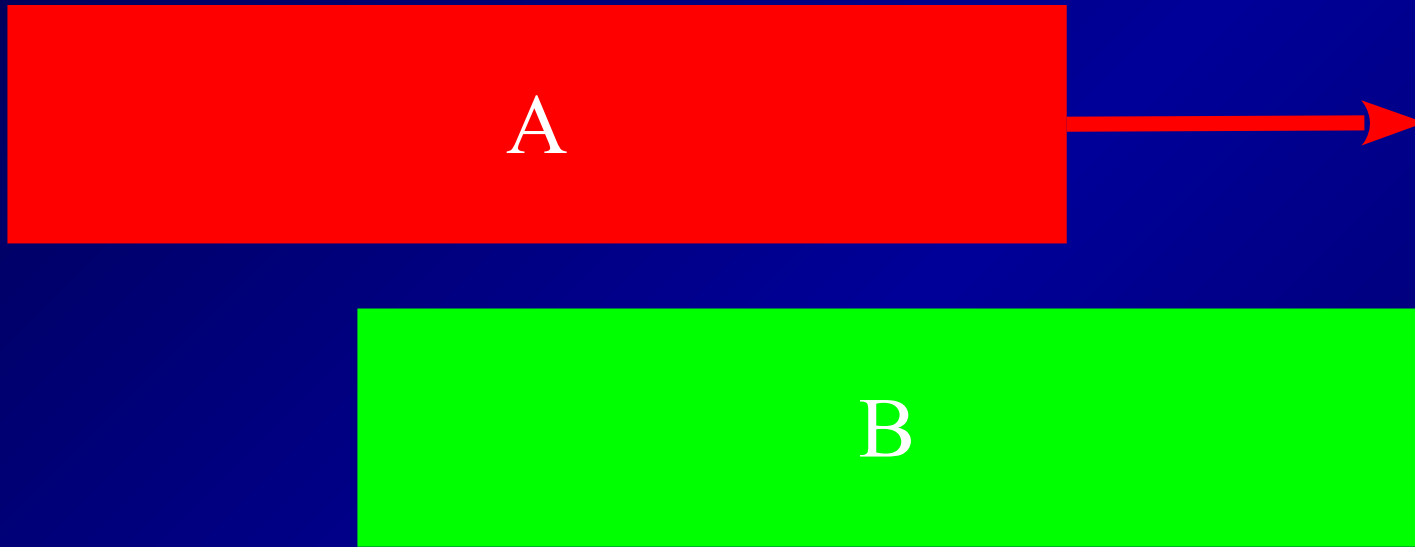
*“Le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali”*

*Galileo Galilei*



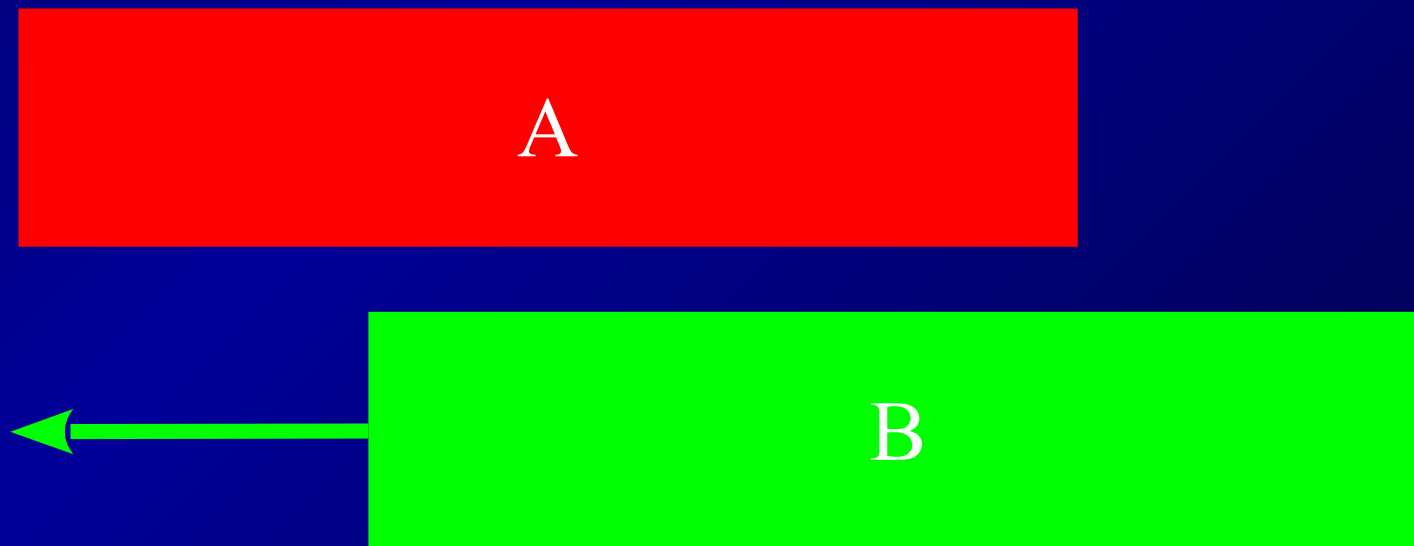
# La Relatività Galileiana

1)



Le due situazioni sono assolutamente equivalenti.

2)



## ... e quindi:

- **Non esiste un sistema di riferimento privilegiato (assoluto), ma tutti i sistemi inerziali sono equivalenti tra di loro. Nel passaggio da un sistema di riferimento all'altro si applicano le trasformazioni di Galileo.**
- **Contrariamente a quanto si pensava prima, non esiste uno "spazio assoluto".**

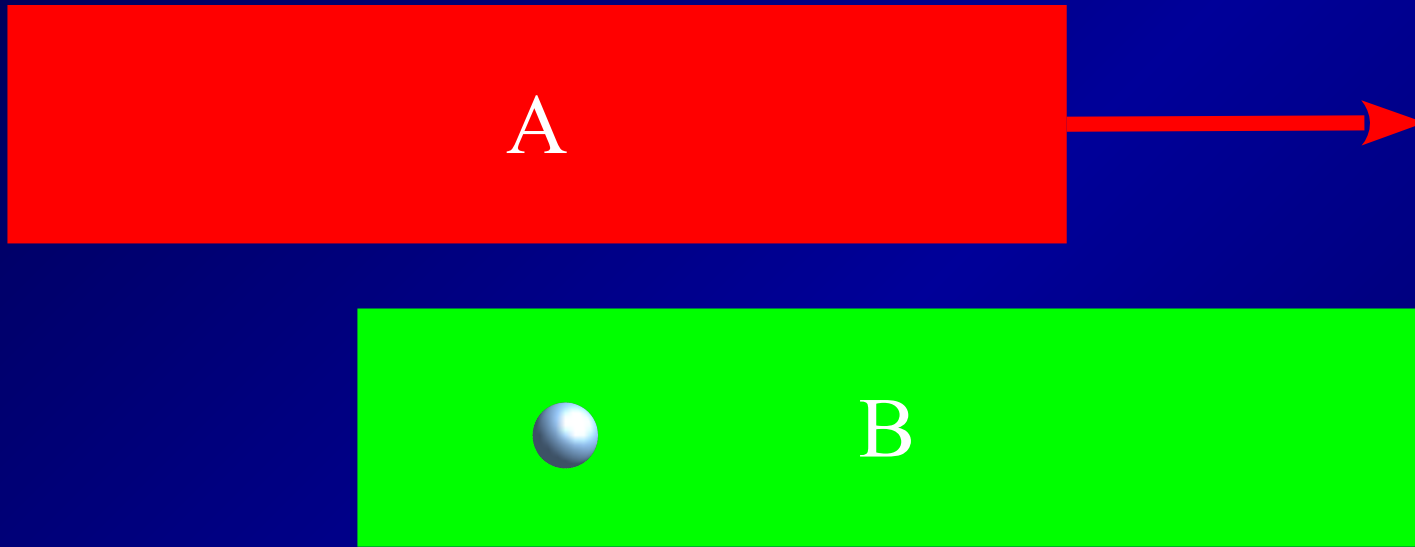
# Brevi richiami su campo elettrico e campo magnetico (1800)

- Una carica elettrica in quiete genera un campo elettrico.
- Una carica elettrica in movimento genera un campo magnetico.



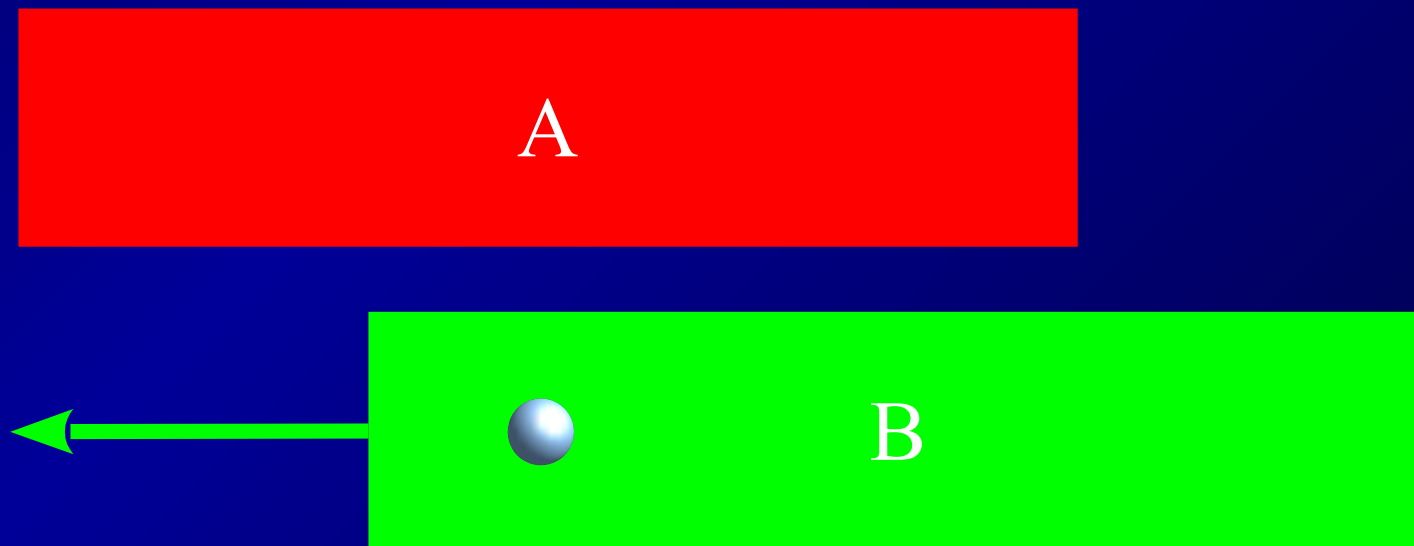
# La Relatività Galileiana / 2

1)



B vede un campo elettrico, A vede un campo magnetico!

2)



... e quindi:

- I fenomeni elettrici e magnetici **NON** rispettano il principio di relatività galileiana!

... in altre parole, *“sono cavoli amari”*...

## ... e allora:

- Esiste forse un sistema di riferimento privilegiato?
- Esiste forse uno “spazio assoluto”?

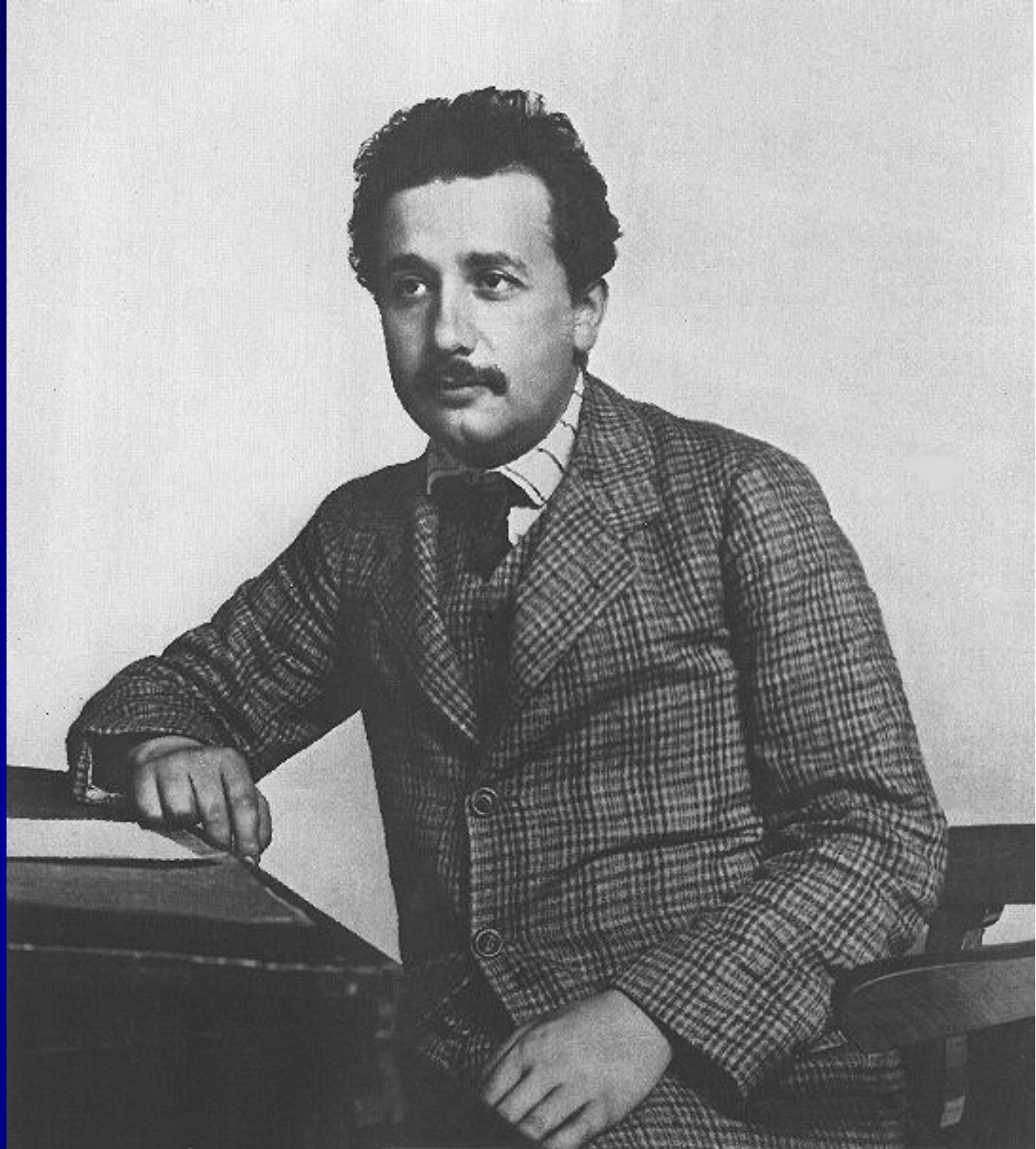
Si ipotizzò l'esistenza di un fluido, chiamato “etere”, che riempisse tutto l'universo. Il sistema di riferimento privilegiato per l'elettromagnetismo era quello in cui l'etere era in quiete.

*Intervallo...*

# L'esperimento di Michelson & Morley (1887)

- La luce era pensata come una vibrazione dell'etere.
- Si volevano misurare le variazioni della velocità di propagazione della luce sulla Terra causate dal moto della Terra all'interno dell'etere.
- Nessuna variazione della velocità della luce fu però mai osservata.

**Einstein**  
**1905**



# Einstein (1905)

Postuliamo che la velocità della luce abbia sempre lo stesso valore in ogni sistema di riferimento.

Le trasformazioni di Galileo non sono più valide.

Le trasformazioni di Lorentz invece vanno bene.

Nelle trasformazioni di Lorentz compare anche il tempo, e vi compare accoppiato alle coordinate spaziali!

# Il “Principio di Relatività Speciale”

*“Tutte le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali e sono covarianti per trasformazioni di Lorentz”*

*Albert Einstein*

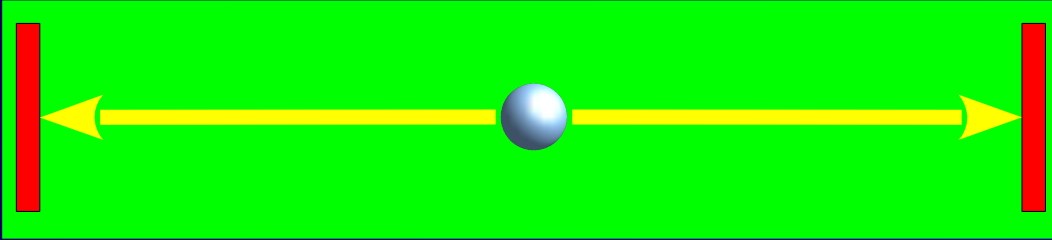


## ... e quindi:

- Spazio e tempo non sono in realtà cose diverse, ma solo le diverse componenti dello spazio-tempo quadridimensionale.
- Campo elettrico e campo magnetico sono in realtà due diverse manifestazioni del campo elettro-magnetico, che rispetta il principio di relatività speciale.
- Non esiste uno spazio-tempo assoluto, quindi, in particolare, non esiste un tempo assoluto.
- Nessun segnale può propagarsi a velocità maggiore di quella della luce.

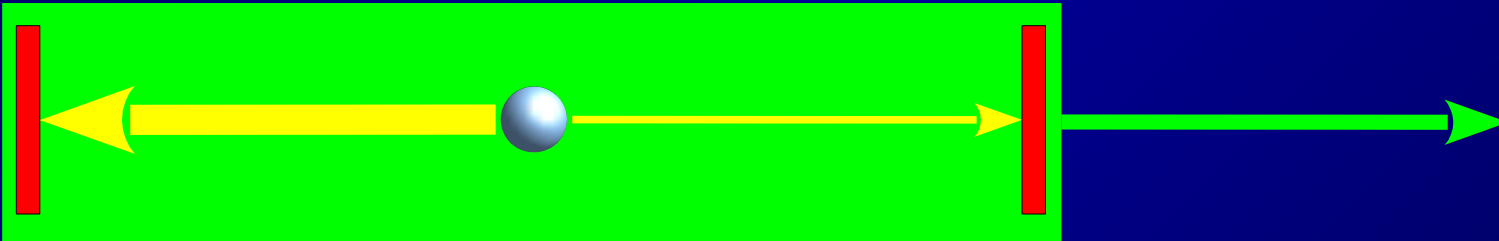
# Simultaneità

1)



La luce emessa dalla lampadina raggiunge entrambi gli schermi nello stesso istante

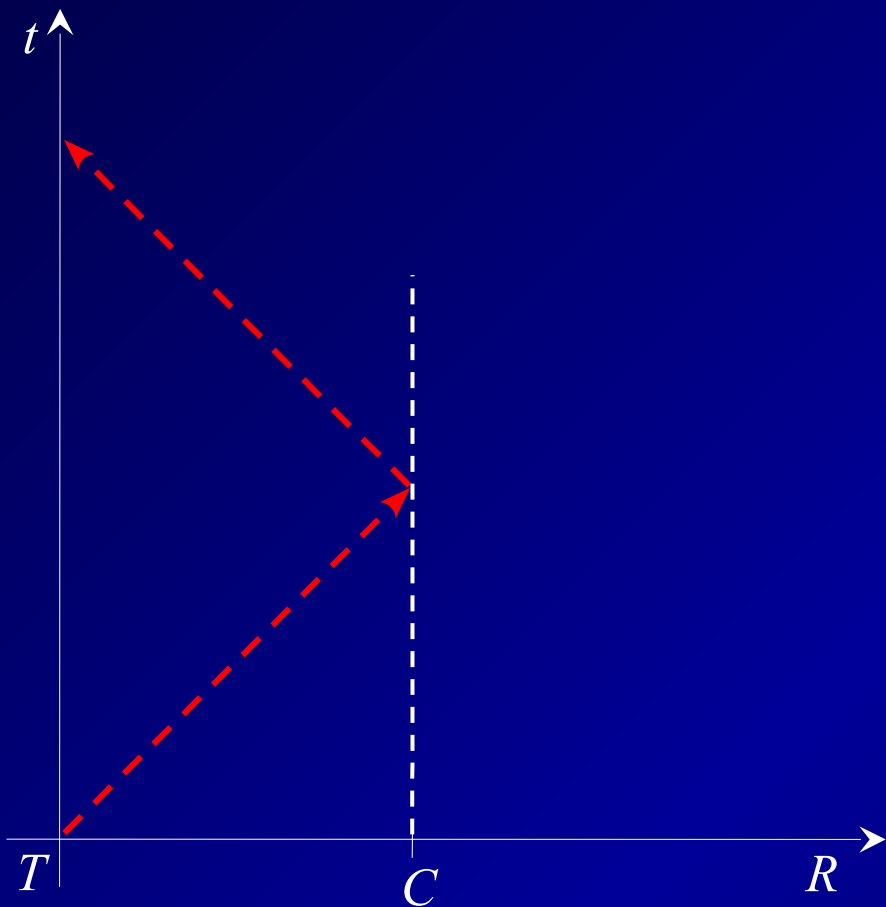
2)



La luce emessa dalla lampadina raggiunge prima lo schermo di sinistra (che le va incontro) e poi quello di destra (che le sfugge)

**Il fatto che due eventi siano o meno simultanei dipende dal sistema di riferimento!**

# Il "Paradosso dei Gemelli"



– Un gemello parte dalla Terra (T) e si dirige con un'astronave verso Canopo (C) ad una velocità prossima a quella della luce.

– Raggiunta Canopo, l'astronave torna verso la Terra, sempre alla velocità della luce

– All'arrivo, il gemello rimasto ad aspettare sulla Terra sarà molto più vecchio di quello che ha viaggiato.

Ma, se il sistema è simmetrico, perché non il viceversa?

Perché il sistema non è realmente simmetrico!

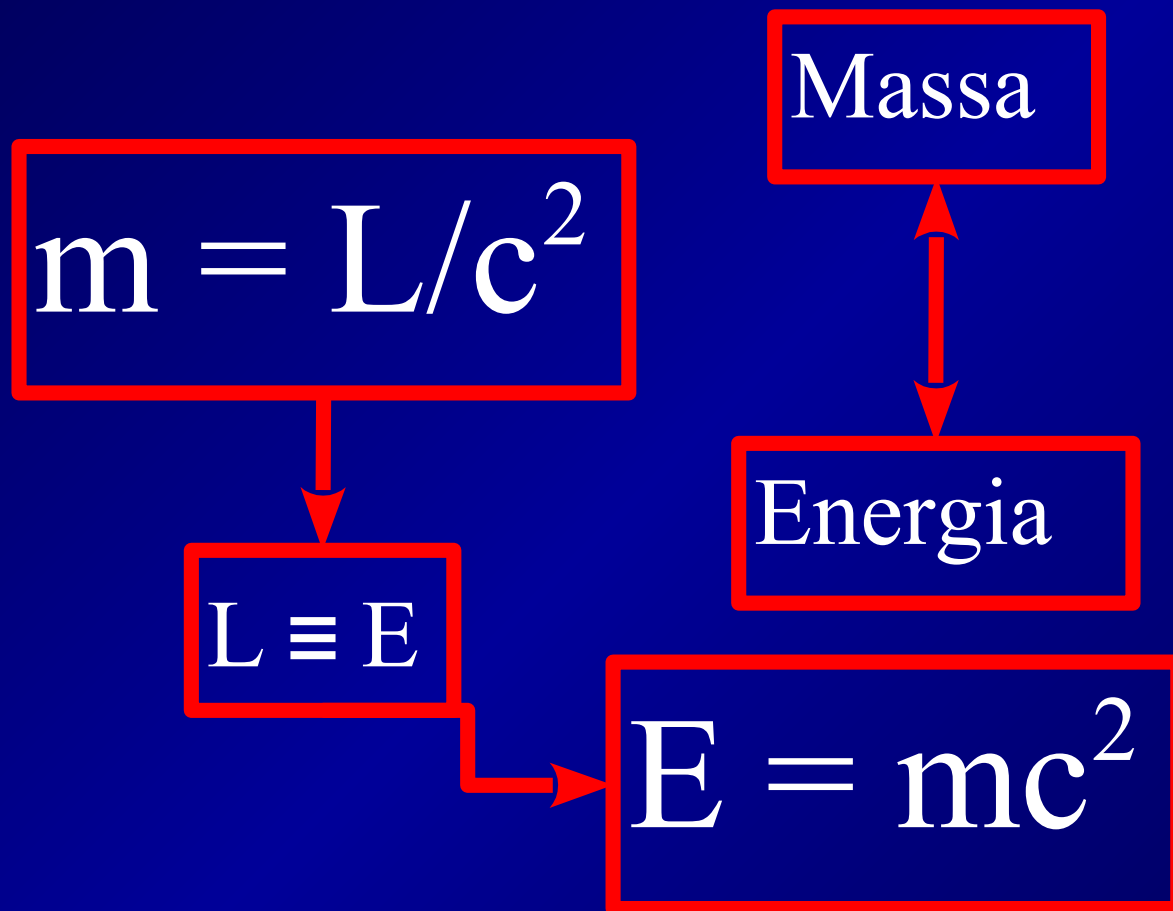
# Misurare le distanze

- **Non si può stendere un righello da qui ad alpha centauri!**
- **Le distanze le misuriamo indirettamente osservando la luce emessa.**
- **Ma la luce si propaga a velocità finita. Quindi, noi di fatto misuriamo la distanza che la sorgente aveva nel momento in cui ha emesso quella particolare radiazione.**
- **Per una sorgente distante 1 milione di anni luce, noi misuriamo la distanza da dove noi siamo ora che quella sorgente aveva 1 milione di anni fa!**

# Connessione Causale

- Due regioni dello spazio-tempo si dicono causalmente connesse se un segnale può andare dall'una all'altra.

... e quella cosa di  $E = mc^2$  che sta su tutti i poster di Einstein?



“Se un corpo emette una energia  $L$  sotto forma di radiazione, la sua massa diminuisce di un fattore  $L/c^2$ ”.

*Albert Einstein*

$$E = mc^2$$

Neglecting magnitudes of fourth and higher orders we may place

$$K_0 - K_1 = \frac{1}{2} \frac{L}{c^2} v^2.$$

From this equation it directly follows that:--

*If a body gives off the energy  $L$  in the form of radiation, its mass diminishes by  $L/c^2$ . The fact that the energy withdrawn from the body becomes energy of radiation evidently makes no difference, so that we are led to the more general conclusion that*

The mass of a body is a measure of its energy-content; if the energy changes by  $L$ , the mass changes in the same sense by  $L/9 \times 10^{20}$ , the energy being measured in ergs, and the mass in grammes.

It is not impossible that with bodies whose energy-content is variable to a high degree (e.g. with radium salts) the theory may be successfully put to the test.

# Casi in cui verifichiamo $E = mc^2$

- Fiammiferi
- Accendini
- Caminetti
- Automobili
- Aeroplani
- ...
- ...
- ... ecc. ecc. ecc.



*Intervallo...*

# Marcel Grossman (1913)

ENTWURF EINER  
VERALLGEMEINERTEN RELATIVITÄTSTHEORIE  
UND EINER  
THEORIE DER GRAVITATION

I. PHYSIKALISCHER TEIL

VON

ALBERT EINSTEIN

IN ZÜRICH

II. MATHEMATISCHER TEIL

VON

MARCEL GROSSMANN

IN ZÜRICH

EG

Dr. Walther Gortlach  
Physikalisches Institut der  
Universität Tübingen

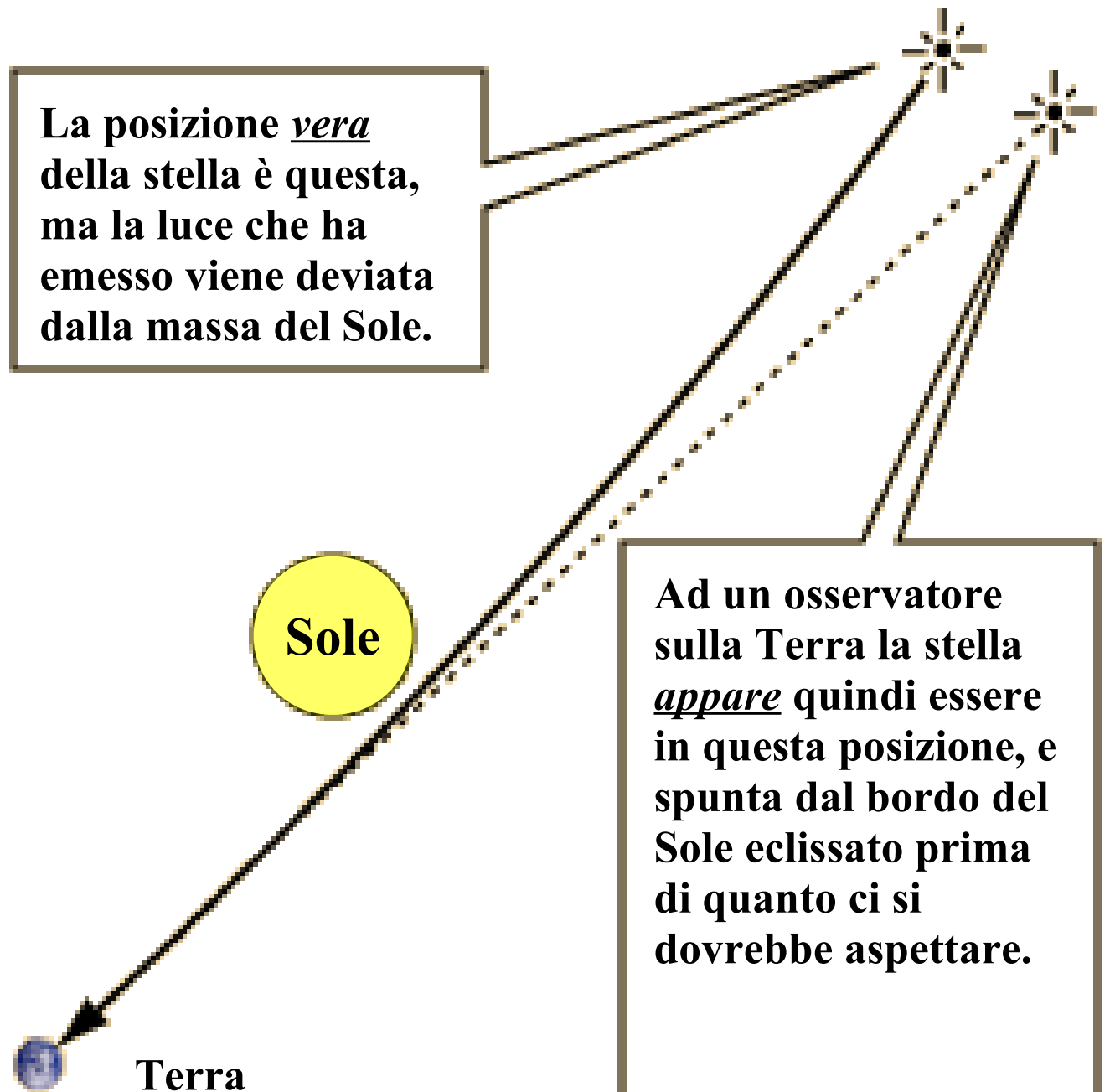
LEIPZIG UND BERLIN  
DRUCK UND VERLAG VON B. G. TEUBNER  
1913



# La Relatività Generale (1916)

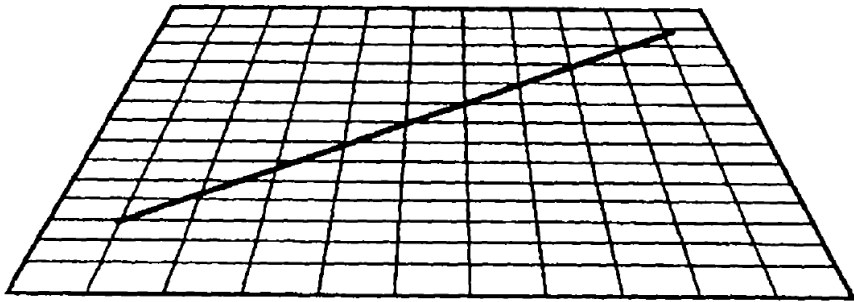
- Le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento
- Lo spazio-tempo ha una curvatura che è “plasmata” dalla materia in esso presente.

# Deflessione della luce

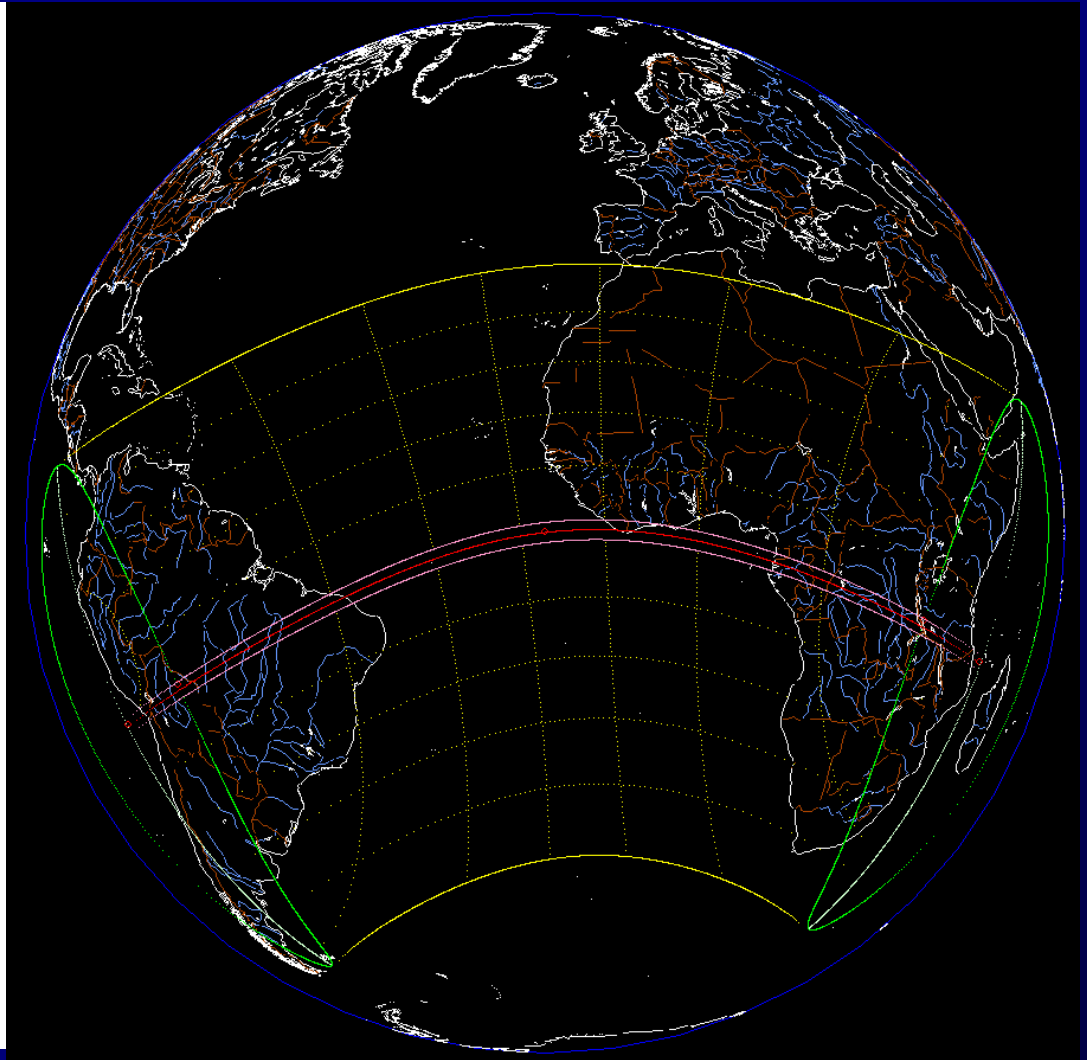
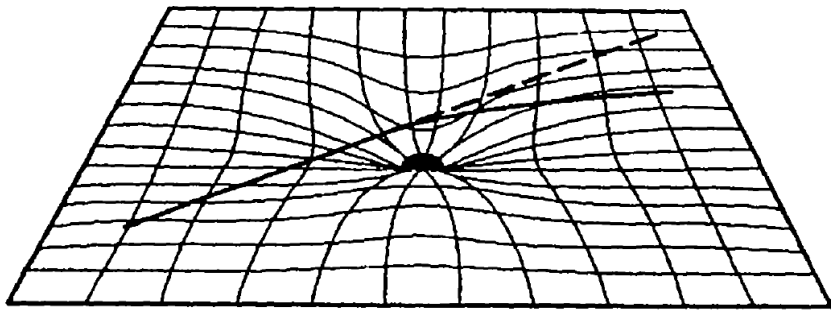


# La deflessione della luce delle stelle durante l'eclissi solare del 29-05-1919

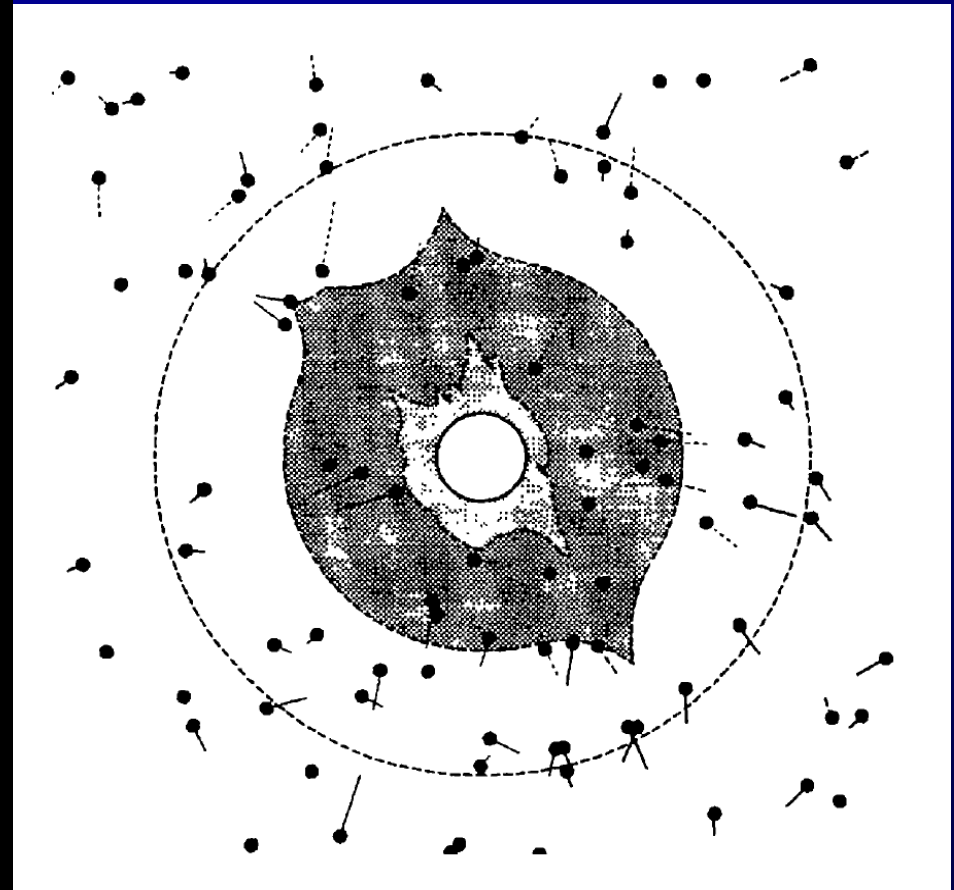
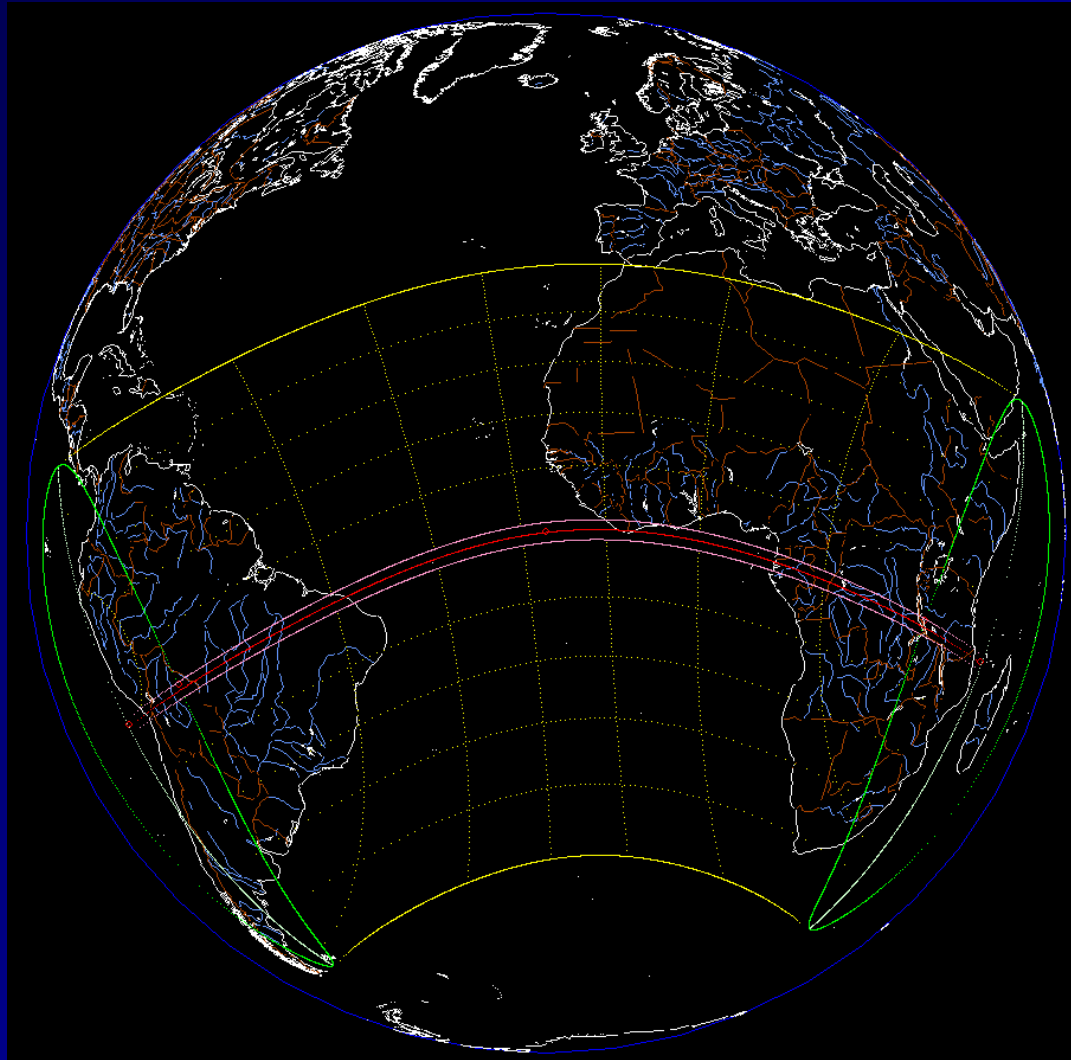
(a)



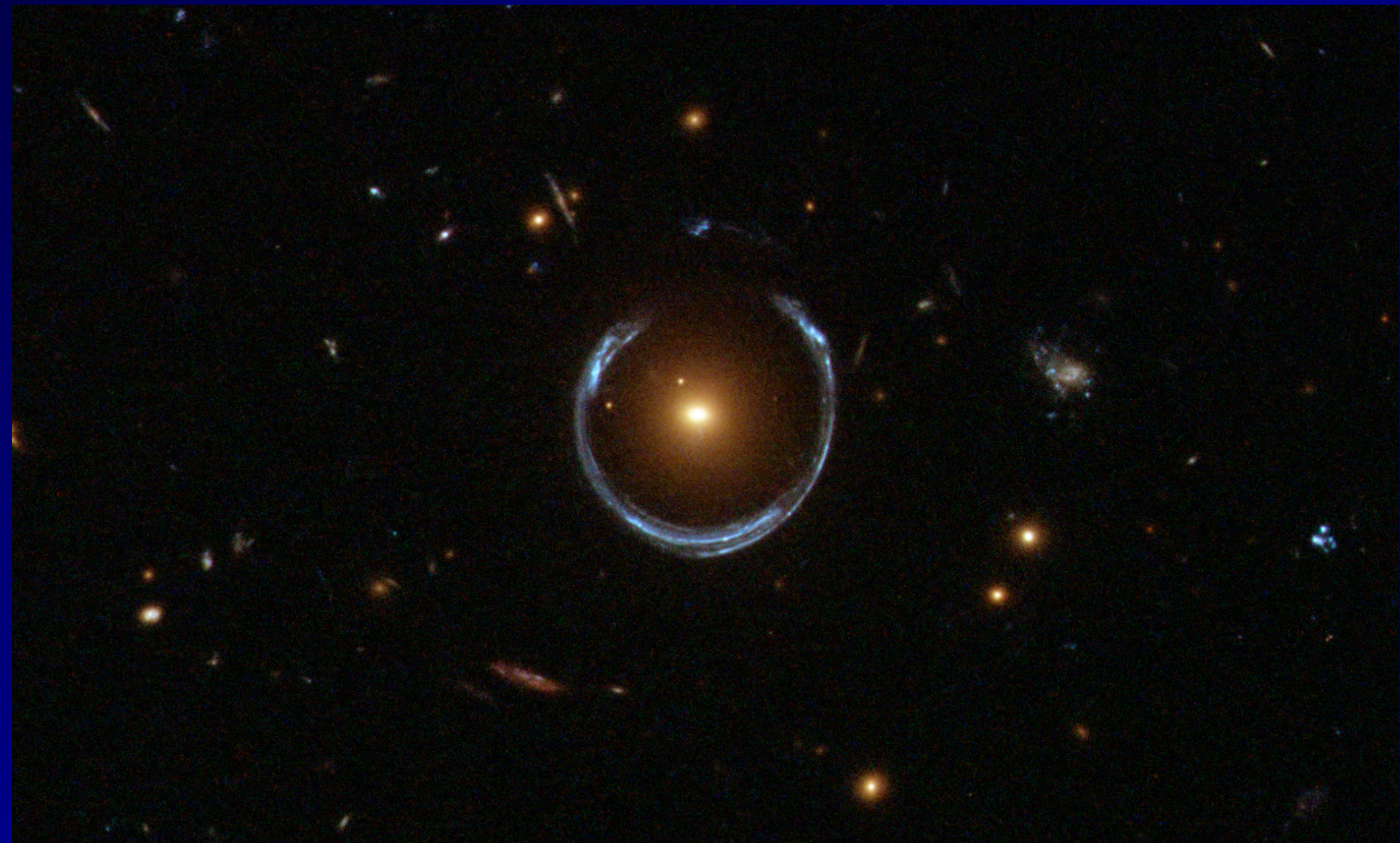
(b)



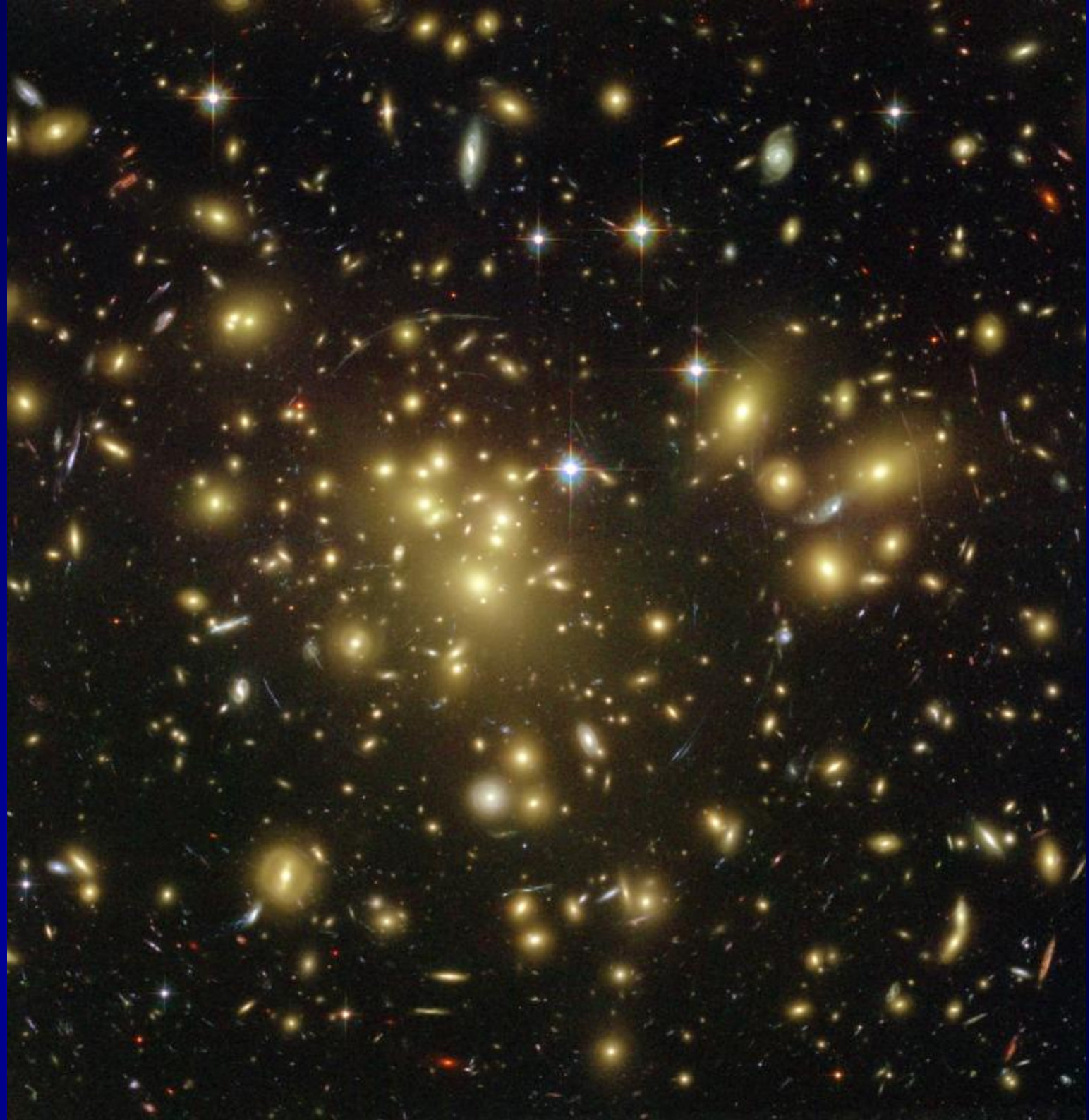
# La deflessione della luce delle stelle durante l'eclissi solare del 29-05-1919



# “Anello di Einstein”



**Galaxy Abell  
1689's  
"Gravitational  
Lens" Magnifies  
Light of Distant  
Galaxies  
(Hubble Space  
Telescope)**

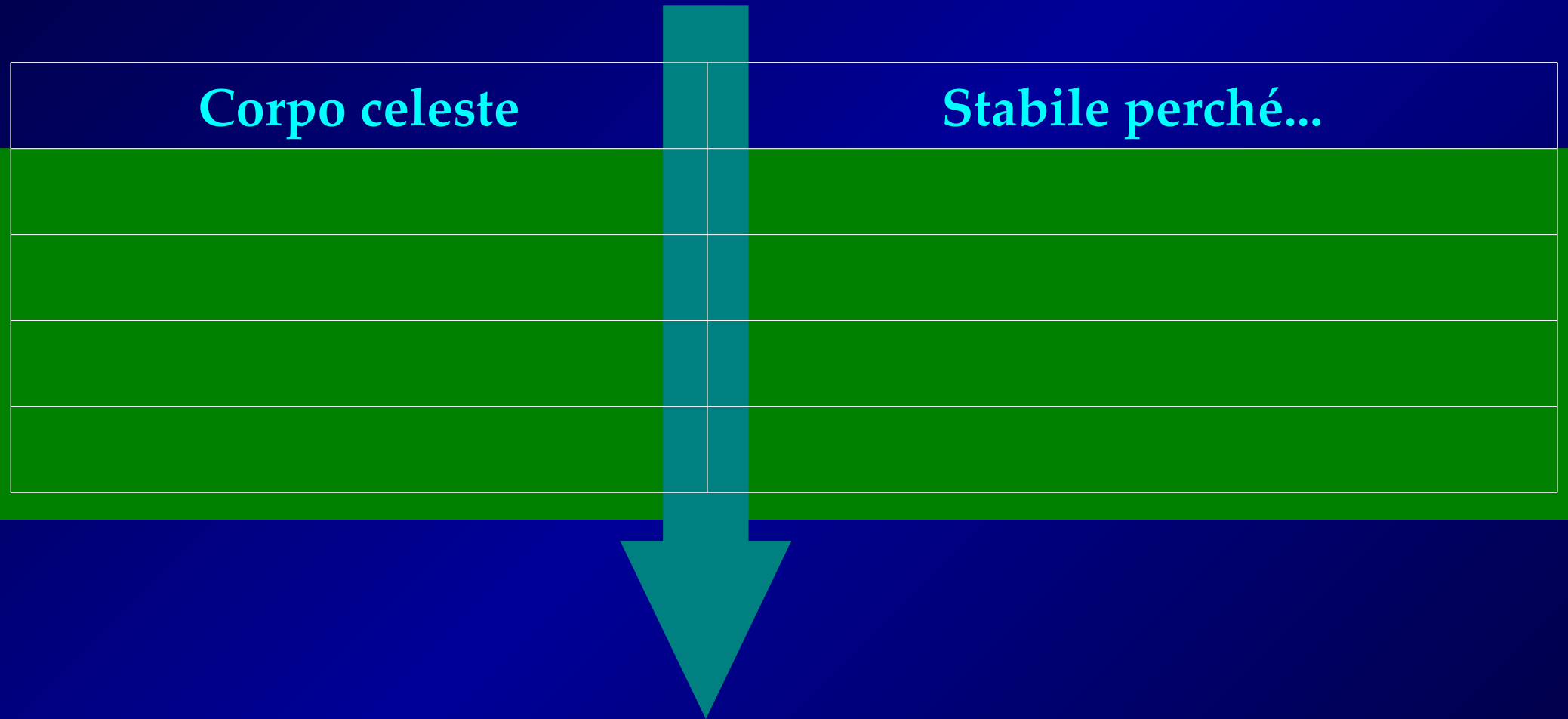




# Stabilità vs. Collasso Gravitazionale

Corpo celeste

Stabile perché...



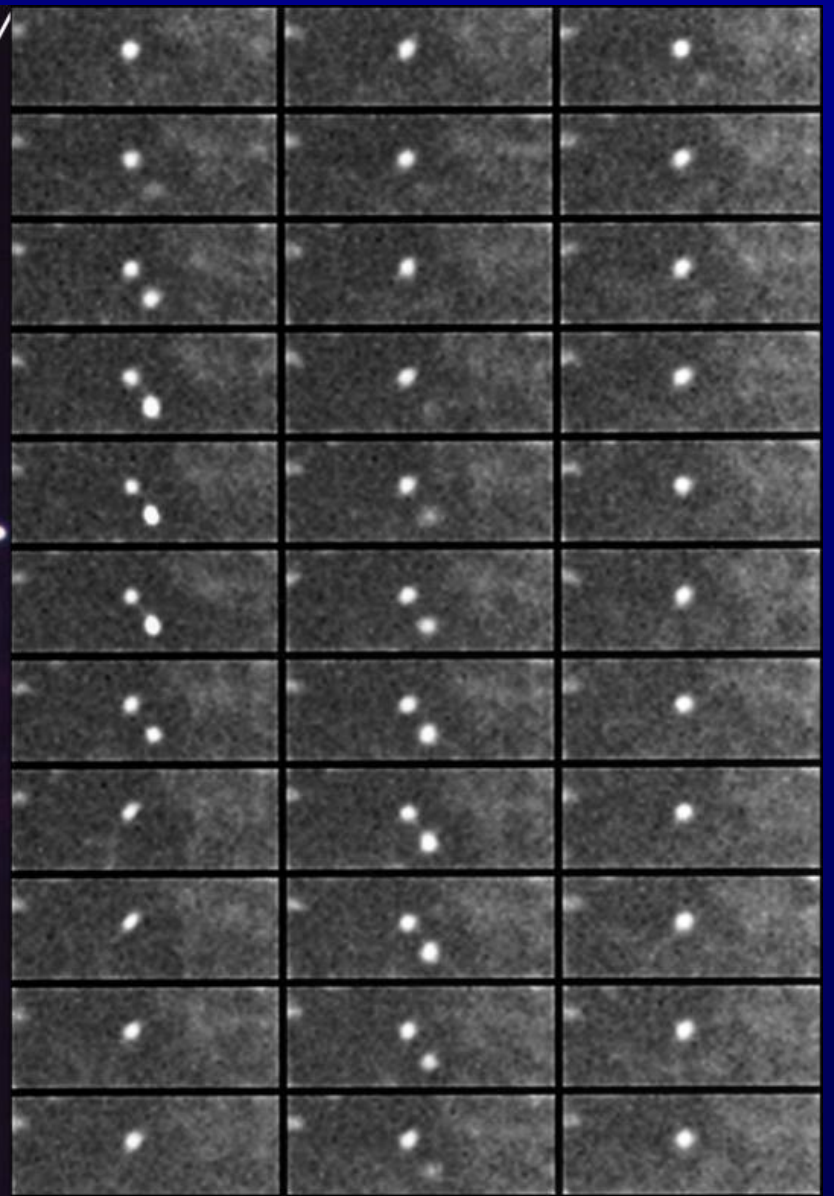
La massa aumenta  
dall'alto verso il basso

# M1 - La Nebulosa del Granchio



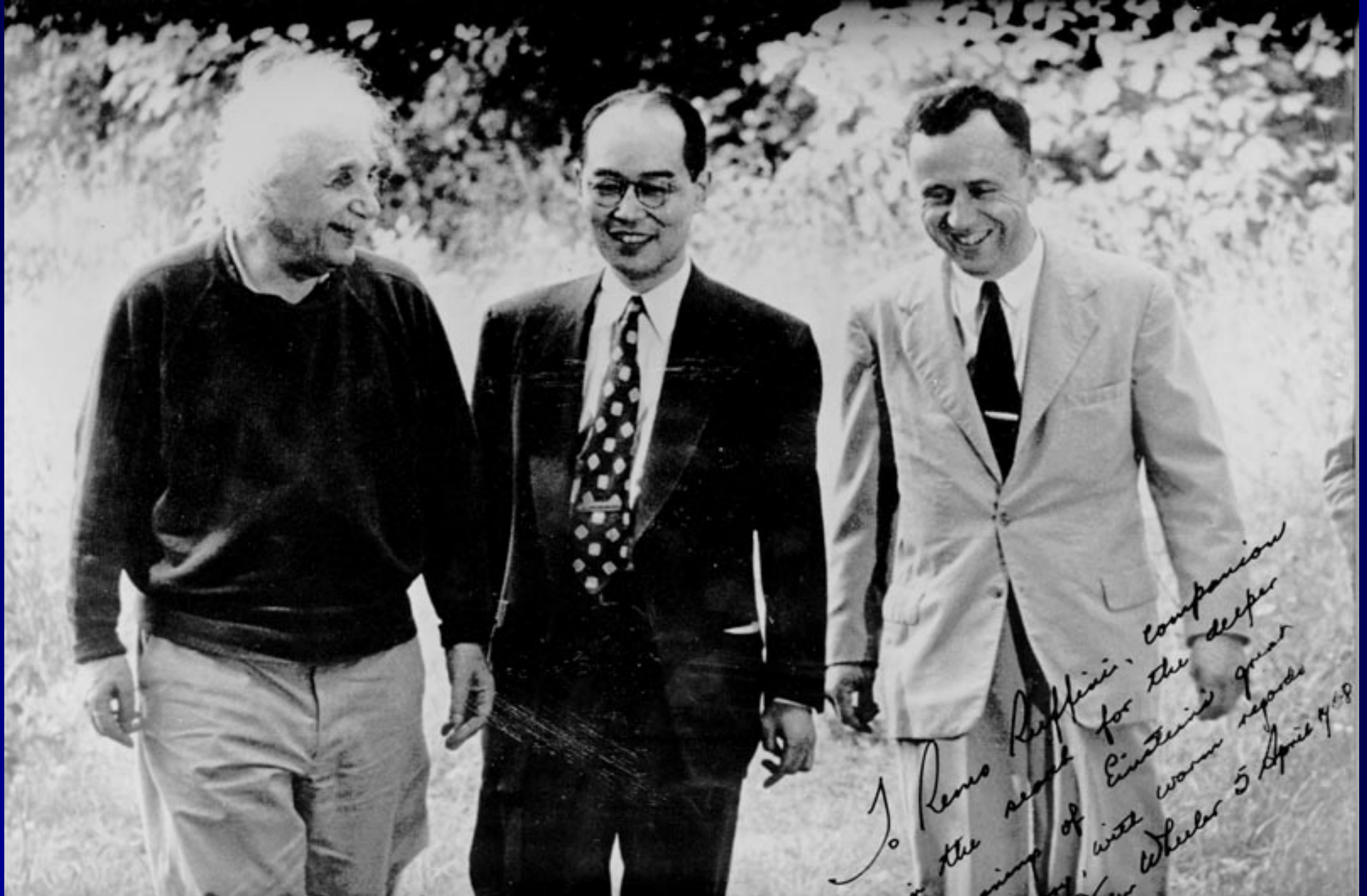
**Residuo della  
Supernova esplosa  
nel 1054 d.C,  
osservata dagli  
astronomi cinesi  
dell'epoca.**

# La Pulsar in M1



# Einstein, Yukawa e Wheeler:

## La nascita dell'Astrofisica Relativistica



# Introducing the black hole

(1971)

According to present cosmology, certain stars end their careers in a total gravitational collapse that transcends the ordinary laws of physics.

Remo Ruffini and John A. Wheeler

The quasistellar object, the pulsar, the neutron star have all come onto the scene of physics within the space of a few years. Is the next entrant destined to be the black hole? If so, it is difficult to think of any development that could be of greater significance. A black hole, whether of "ordinary size" (approximately one solar mass,  $1 M_{\odot}$ ), or much larger (around  $10^8 M_{\odot}$  to  $10^{10} M_{\odot}$ , as proposed in the nuclei of some galaxies) provides our "laboratory model" for the gravitational collapse, predicted by Einstein's theory, of the universe itself.

A black hole is what is left behind after an object has undergone complete gravitational collapse. Spacetime is so strongly curved that no light can come out, no matter can be ejected and no measuring rod can ever survive being put in. Any kind of object that falls into the black hole loses its separate identity, preserving only its mass, charge, angular momentum and linear momentum (see figure 1). No one has yet found a way to distinguish between two black holes constructed out of the most different kinds of matter if they have the same mass, charge and angular momentum. Measurement of these three determinants is permitted by their effect on the Kepler orbits of test objects, charged and uncharged, in revolution about the black hole.

How the physics of a black hole looks depends more upon an act of choice by the observer himself than anything else. Suppose he decides to follow the collapsing matter through its collapse down into the black hole. Then he will see it crushed to indefi-

nitely high density, and he himself will be torn apart eventually by indefinitely increasing tidal forces. No restraining force whatsoever has the power to hold him away from this catastrophe, once he crossed a certain critical surface known as the "horizon." The final collapse occurs a finite time after the passage of this surface, but it is inevitable. Time and space are interchanged inside a black hole in an unusual way; the direction of increasing proper time for the observer is the direction of decreasing values of the coordinate  $r$ . The observer has no more power to return to a larger  $r$  value than he has power to turn back the hands on the clock of life itself. He can not even stay where he is, and for a simple reason: no one has the power to stop the advance of time.

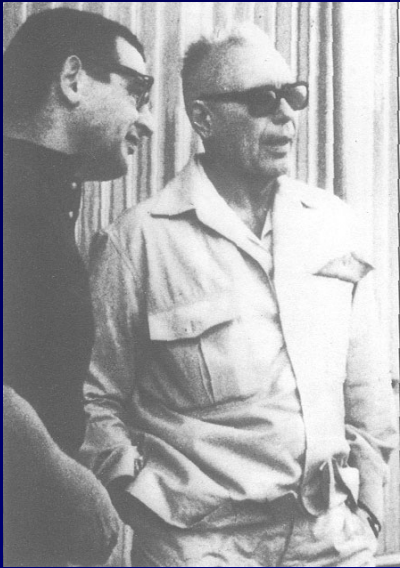
Suppose the observer decides instead to observe the collapse from far away. Then, as price for his own safety, he is deprived of any chance to see more than the first steps on the way to collapse. All signals and all information from the later phases of collapse never escape; they are caught up in the collapse of the geometry itself.

That a sufficient mass of cold matter will necessarily collapse to a black hole (J. R. Oppenheimer and H. Snyder,<sup>1</sup>) is one of the most spectacular of all the predictions of Einstein's standard 1915 general relativity. The geometry around a collapsed object of spherical symmetry (nonrotating!) was worked out by Karl Schwarzschild of Göttingen, father of the American astrophysicist Martin Schwarzschild, as early as 1916. In 1963 Roy Kerr<sup>2</sup> found the geometry associated with a rotating collapsed object. James Bardeen has recently emphasized that all stars have angular momentum and that most stars—or star cores—will have so much angular momentum that the black hole formed upon collapse will be rotating at the

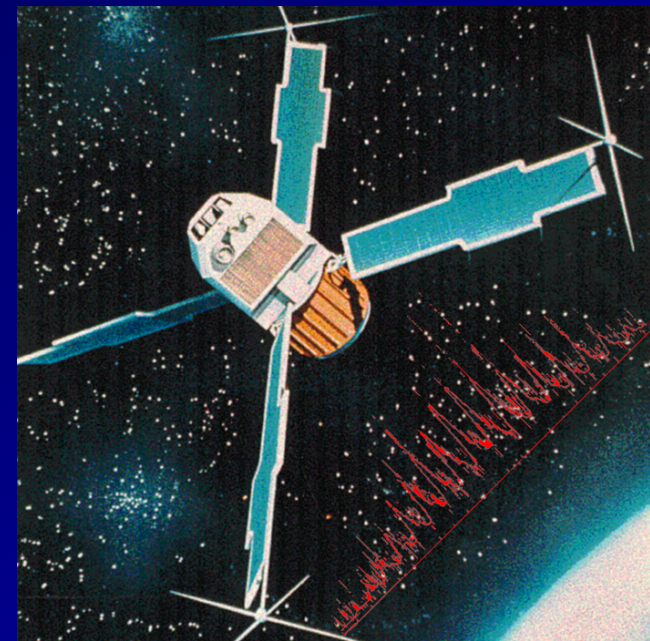
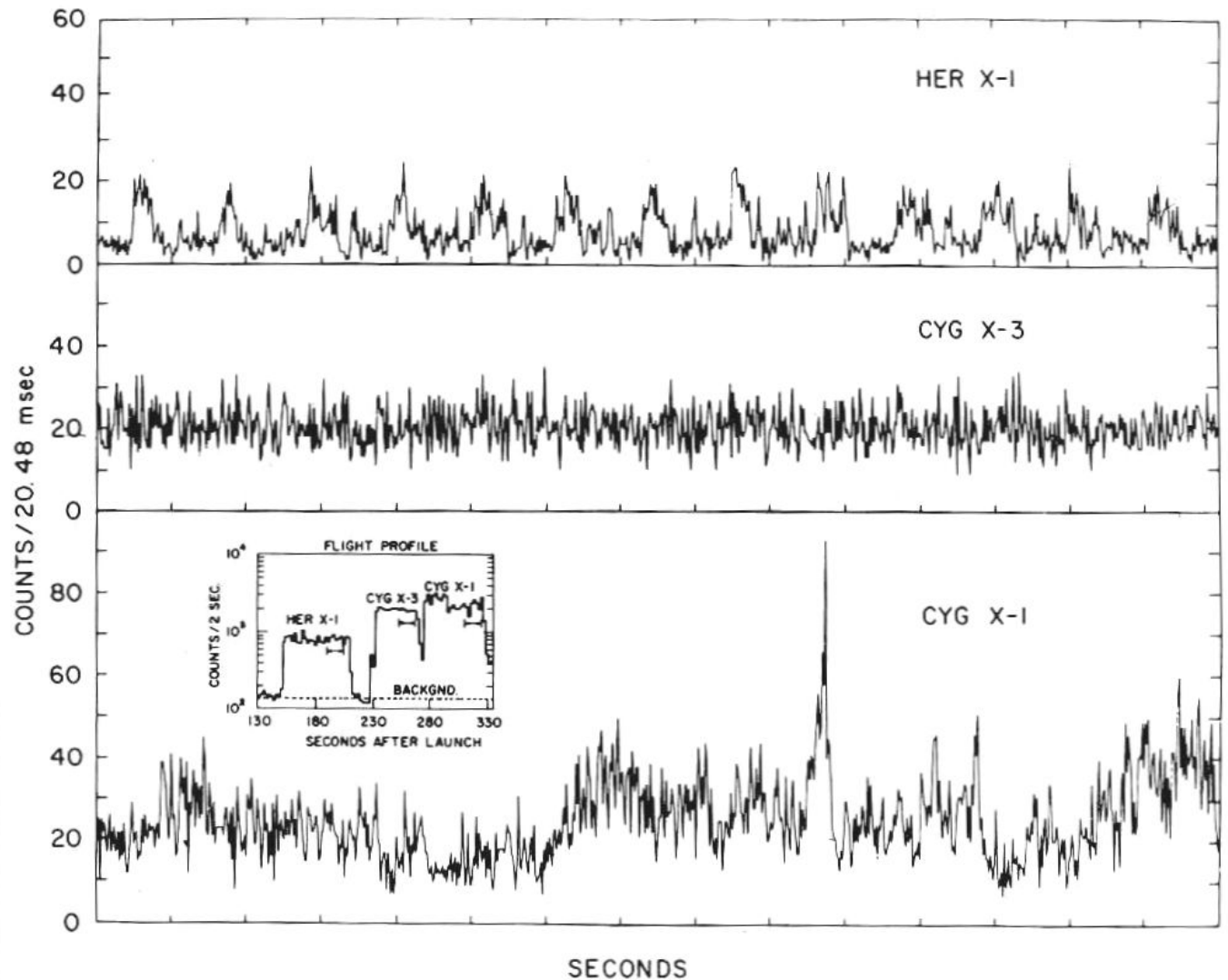
Remo Ruffini and John Wheeler are both at Princeton University; Wheeler, currently on leave from Princeton, is spending a year at Cal Tech and Moscow State University.



# Il satellite "Uhuru" (1970)



## La scoperta delle binarie X

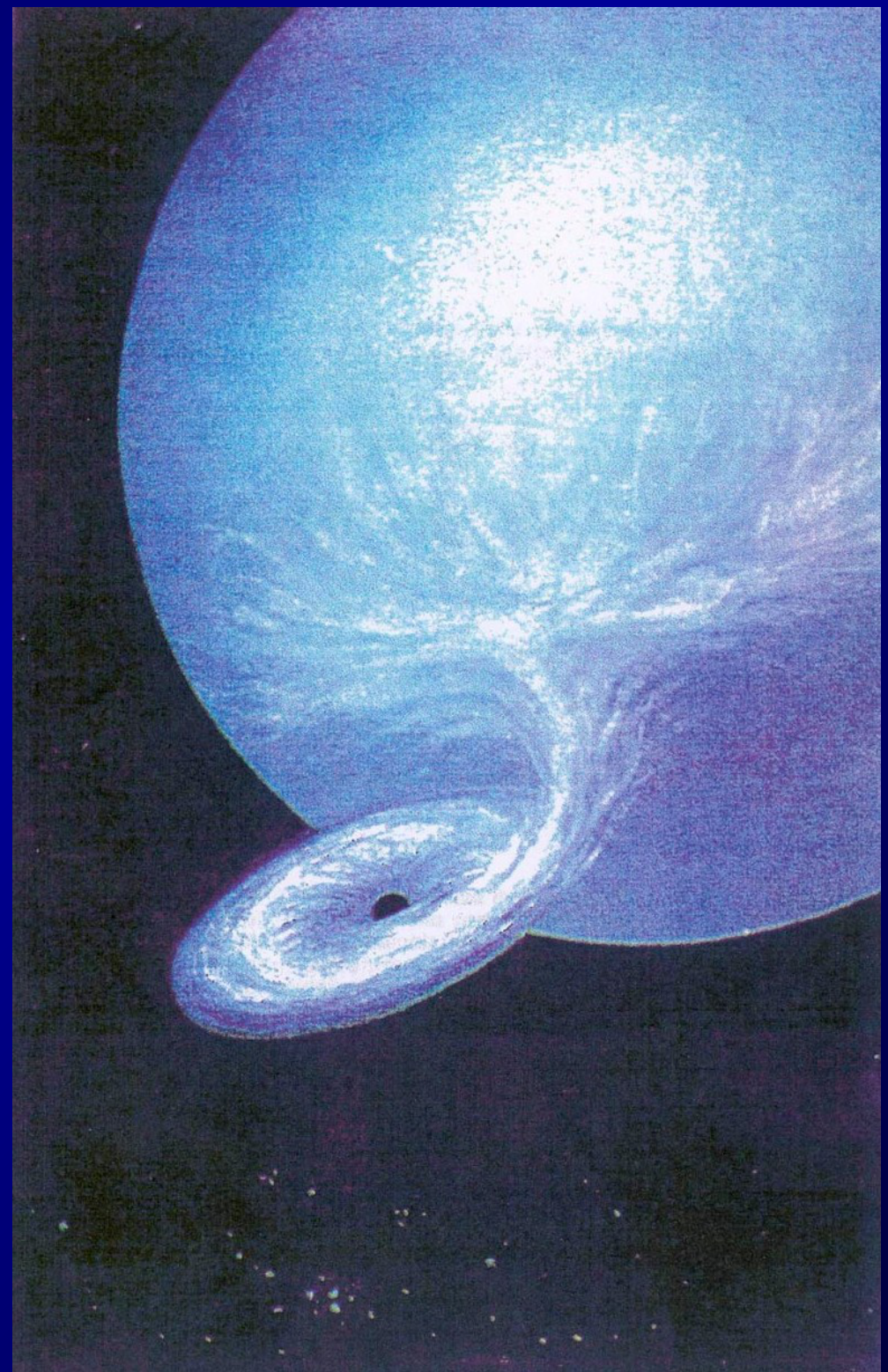


# Cygnus X-1:

## La prima identificazione di un Buco nero (1973)

L'emissione X è dovuta al  
materiale che il Buco nero  
attrae dalla stella compagna.

*(Leach & Ruffini, 1973)*

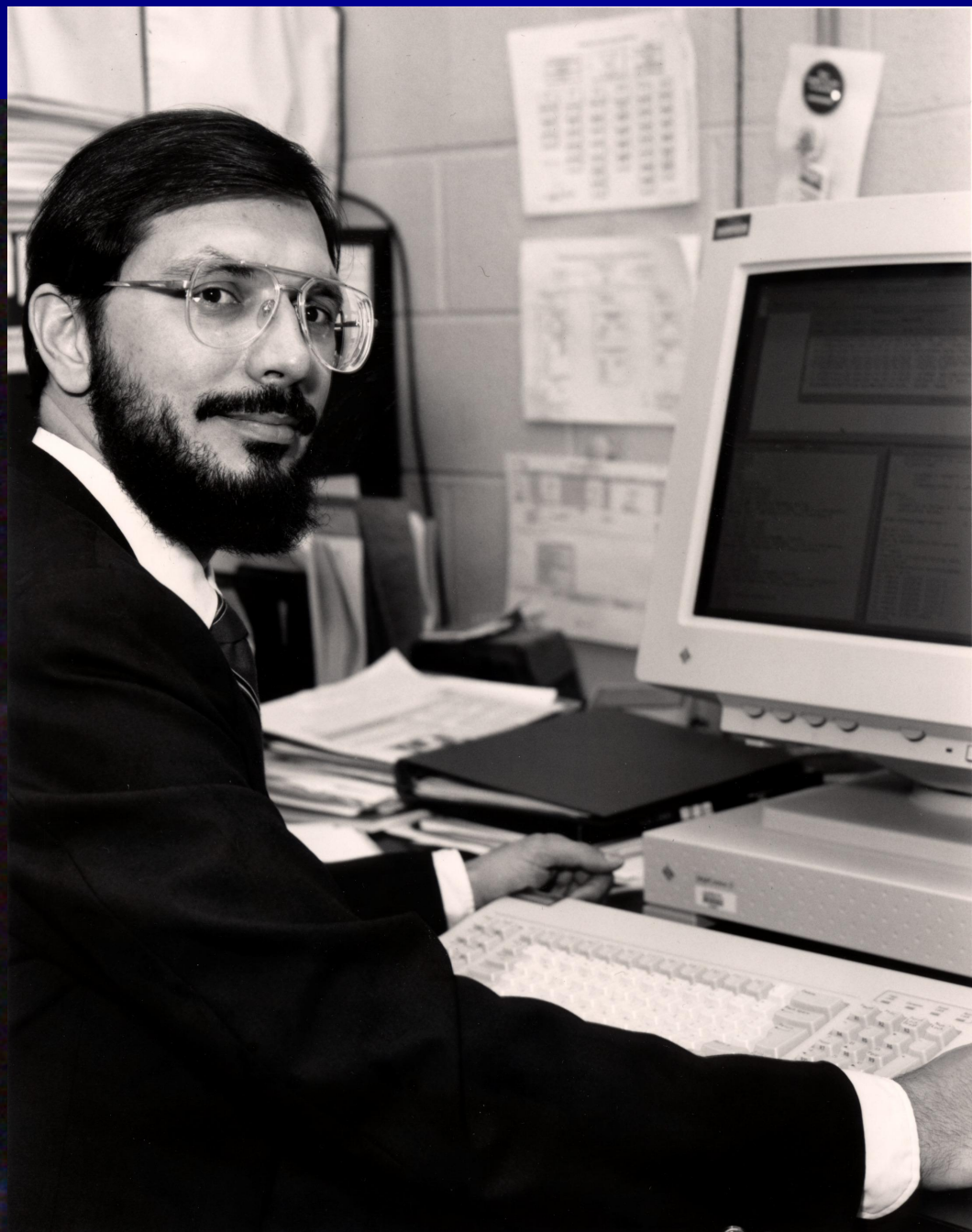


# Le Onde Gravitazionali

- Abbiamo detto che una massa crea una curvatura nello spazio-tempo.
- Se la massa si muove in un determinato modo, la curvatura si modifica di conseguenza.
- Questa variazione della curvatura si propaga come un'onda a velocità finita.
- Previste teoricamente dalla Relatività Generale, la loro esistenza è stata dimostrata grazie alla scoperta da parte di Joseph Hooton Taylor, Jr. e Russell Hulse della prima pulsar binaria con il radiotelescopio di Arecibo nel 1974.



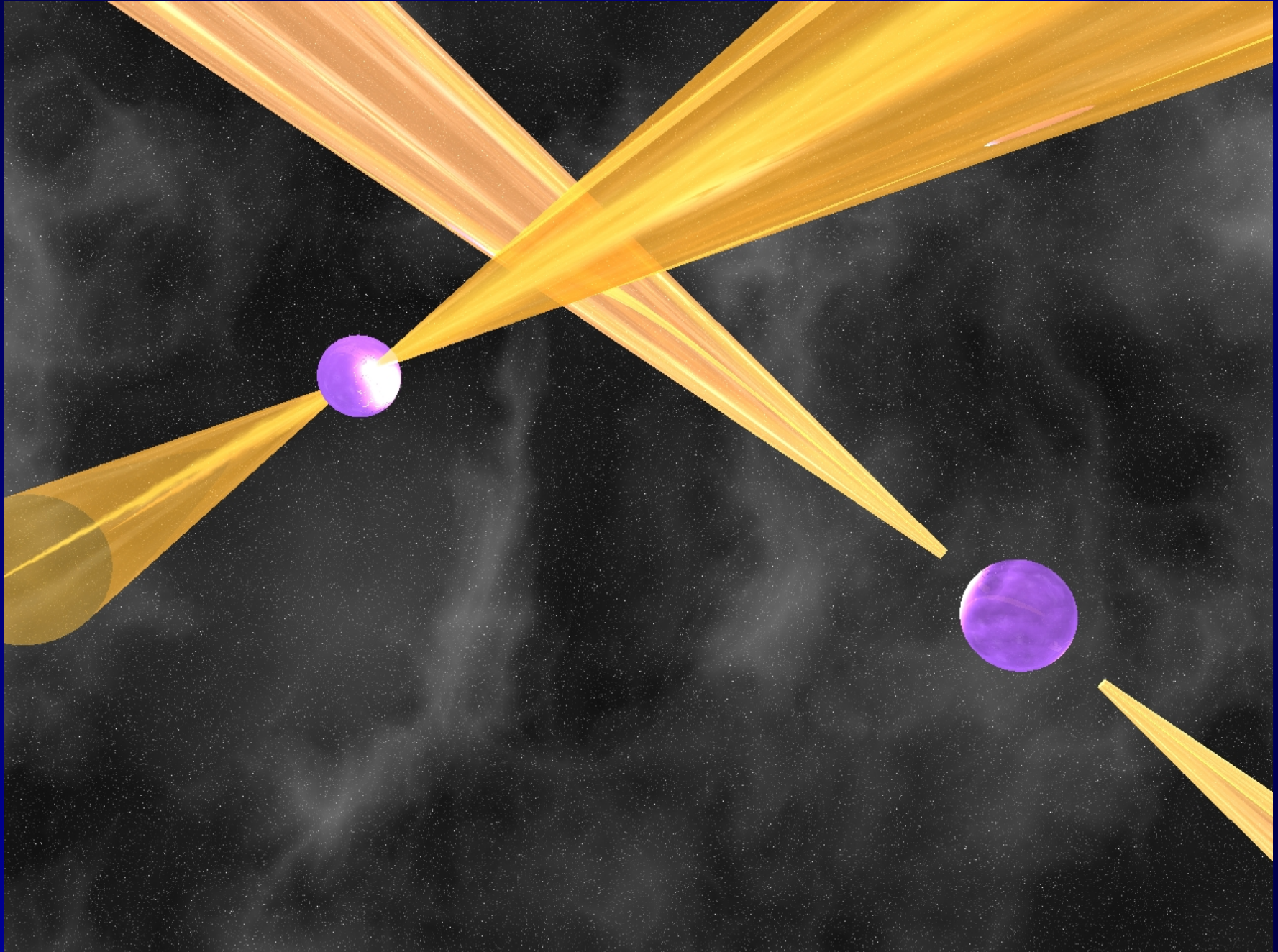
# Taylor & Hulse



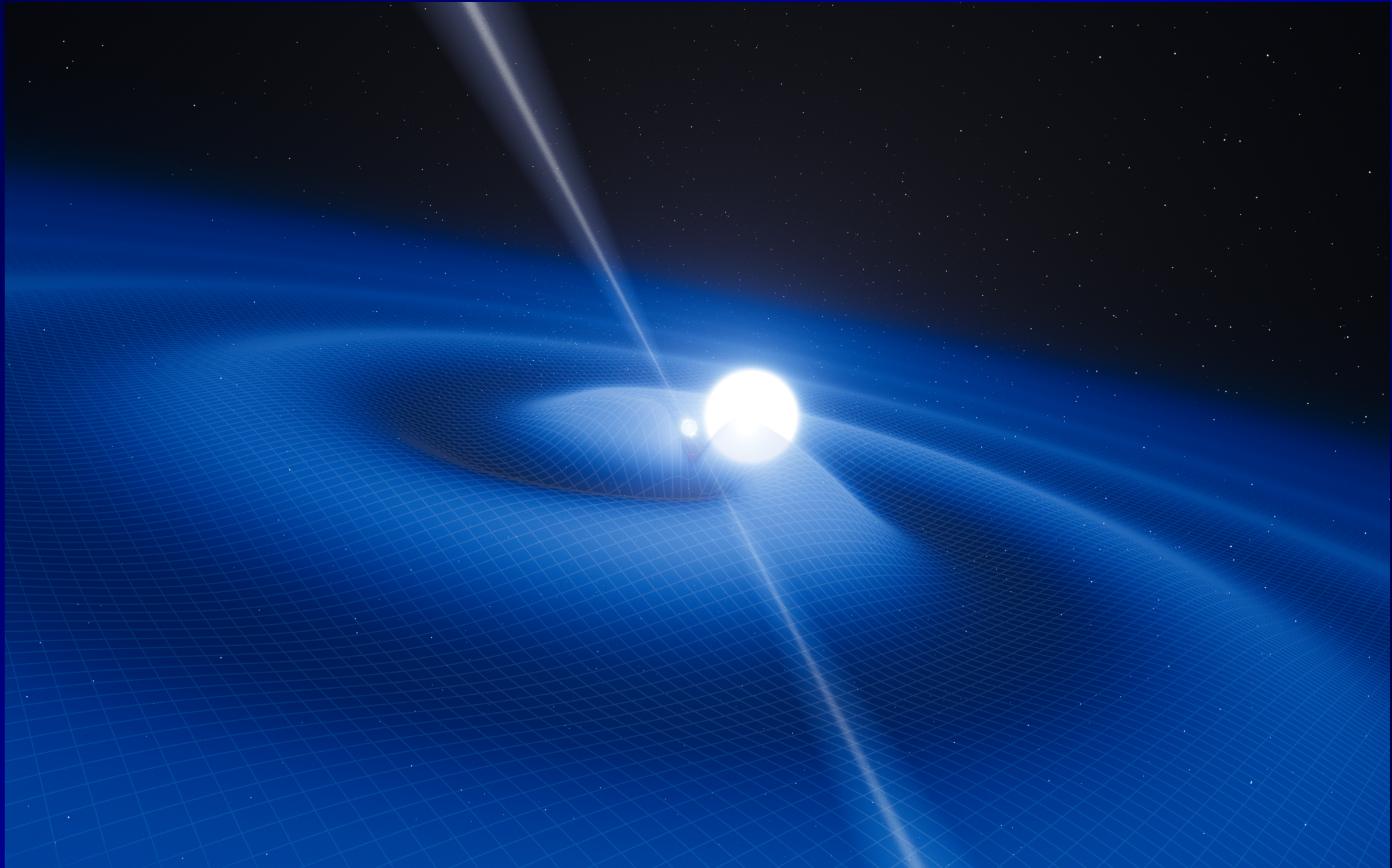
# Il radiotelescopio di Arecibo



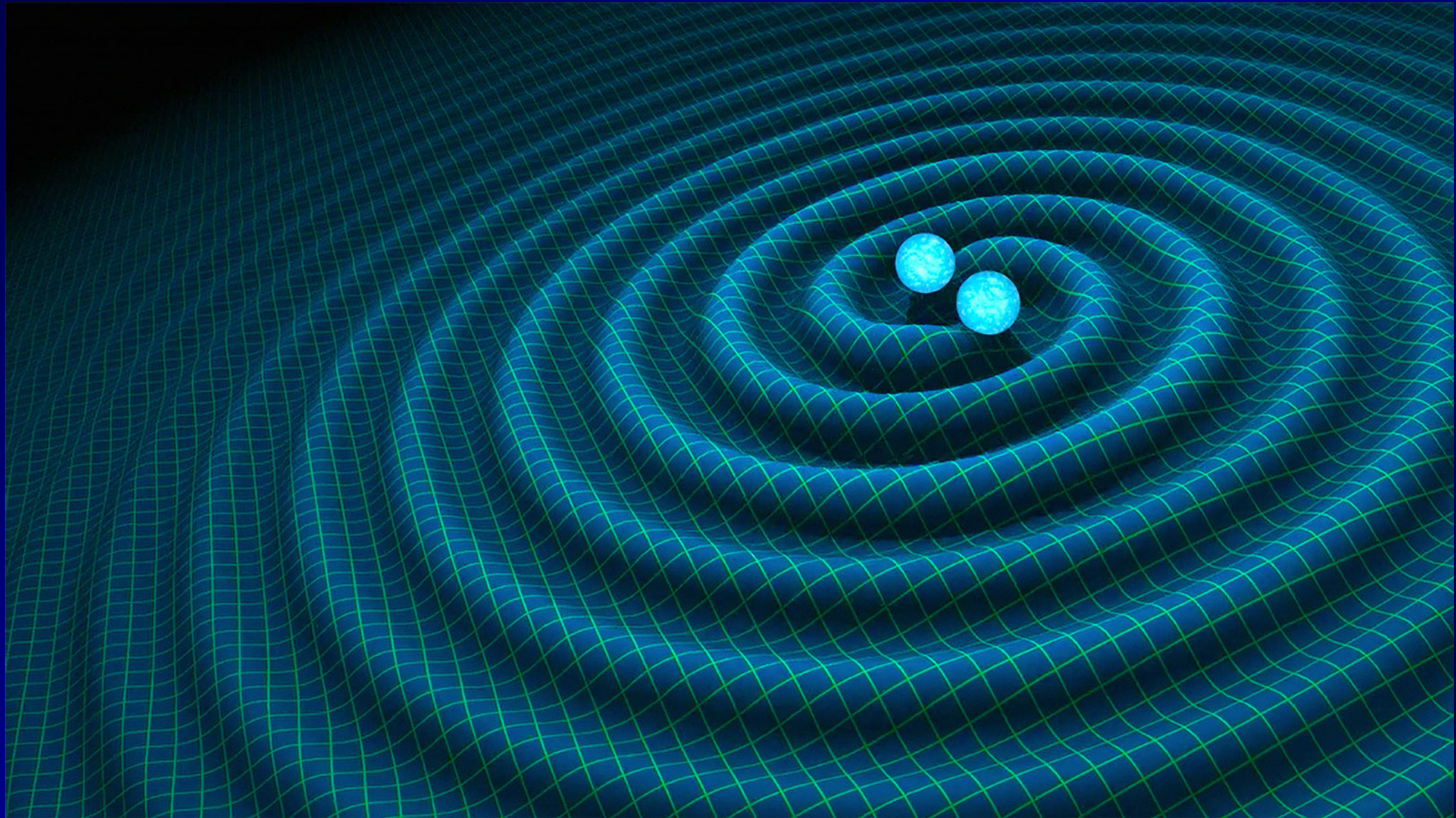
# Una Pulsar binaria



# ... e le relative onde gravitazionali

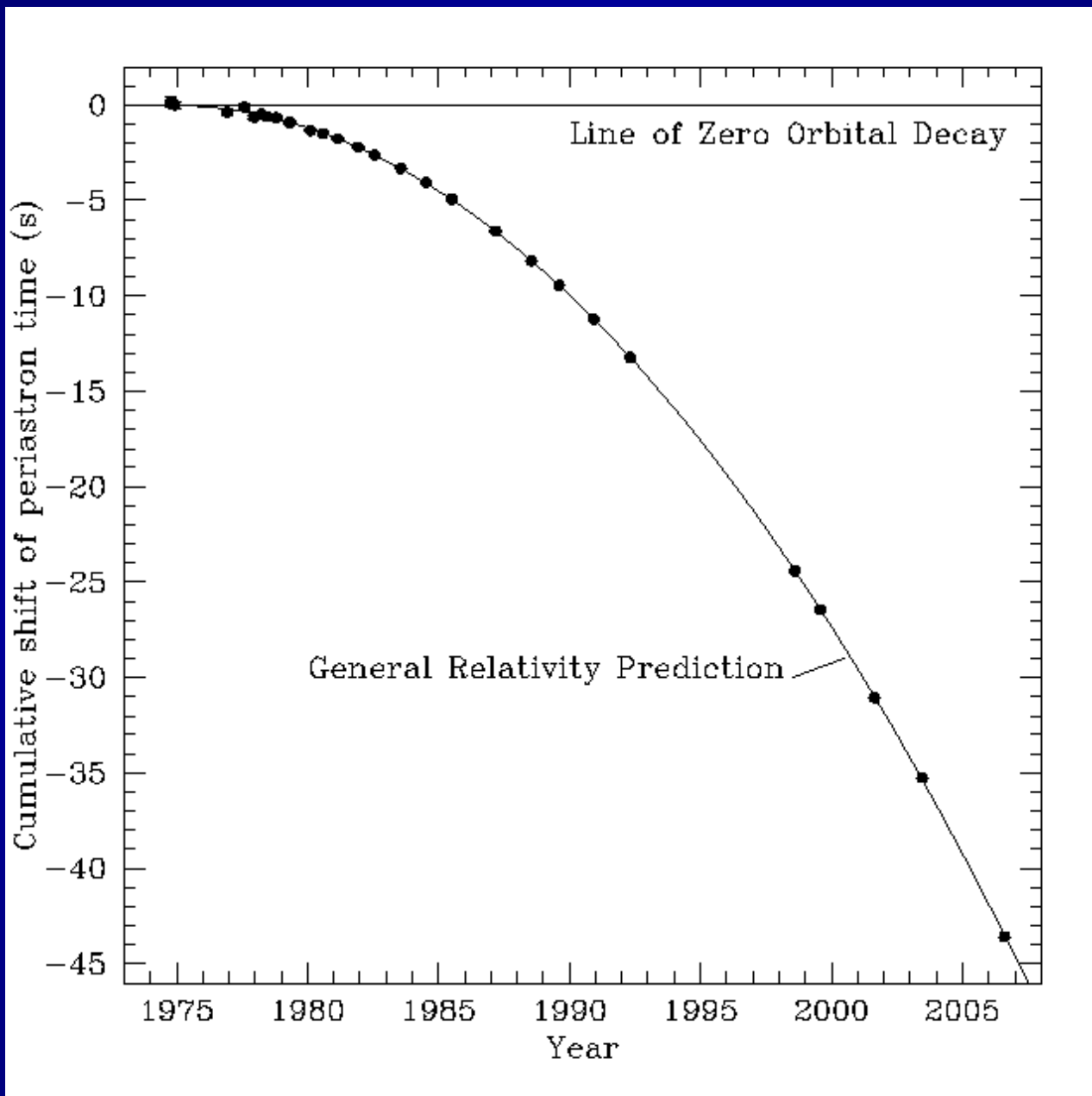


**... e le relative onde gravitazionali**

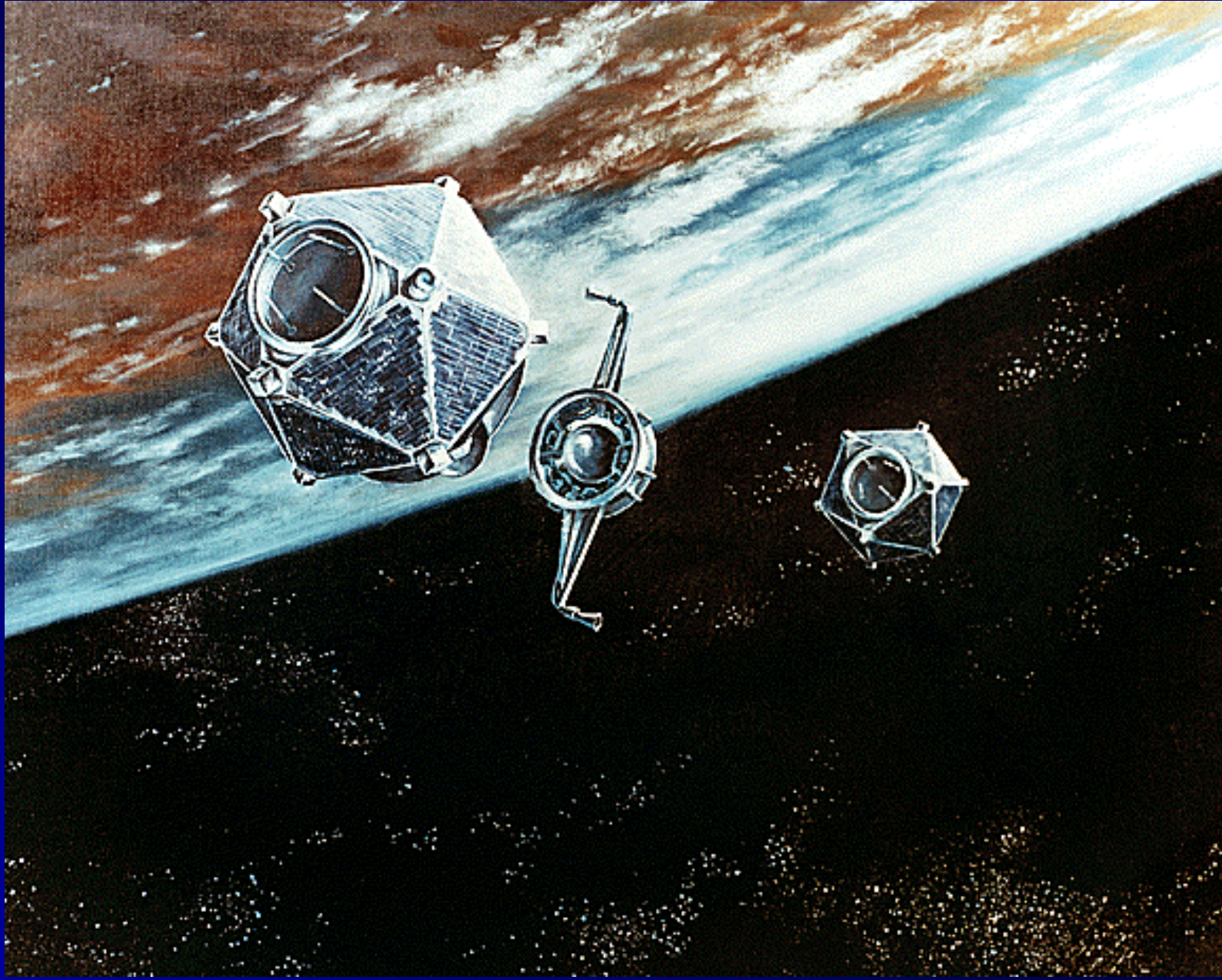


# La variazione del periodo dell'orbita

- Emettendo onde gravitazionali, le pulsar binarie perdono energia e quindi il periodo dell'orbita cambia.
- La variazione osservata del periodo dell'orbita è in perfetto accordo con la quantità di onde gravitazionali che la teoria preveda che debbano essere emesse.



# I Satelliti Vela: La scoperta dei Gamma-Ray Bursts (anni '60-'70)



# I Satelliti Vela:

## La scoperta dei Gamma-Ray Bursts

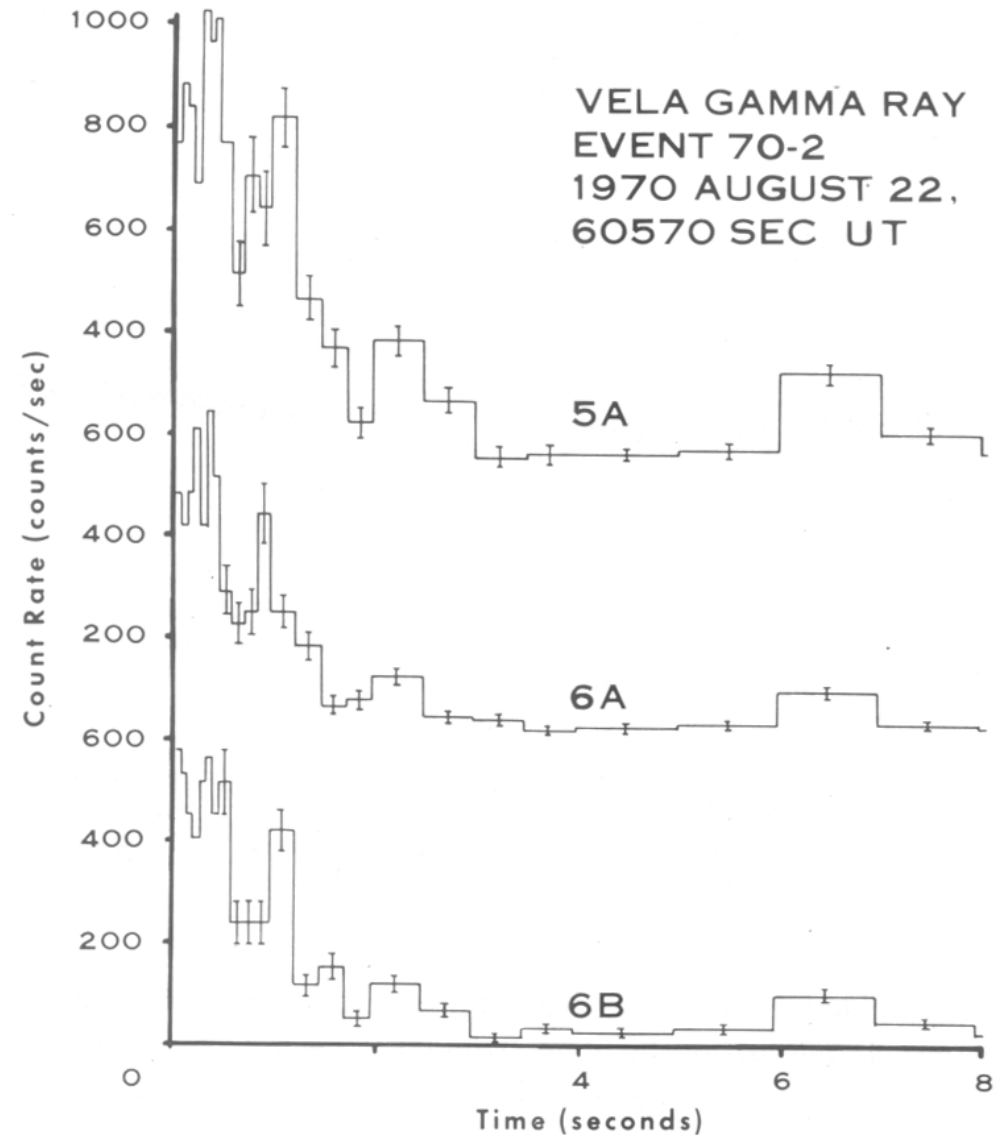
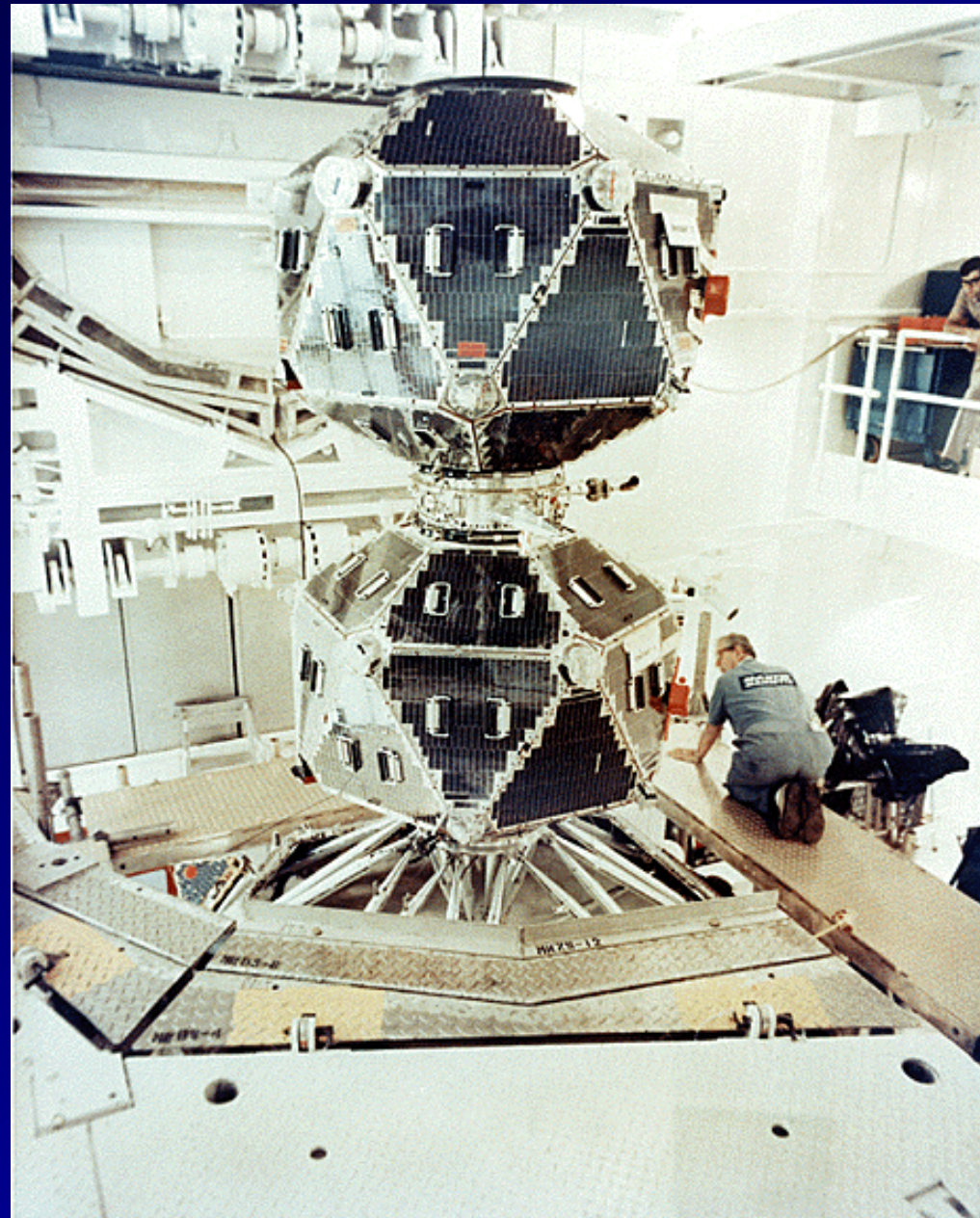


Fig. 5. Event 70-2, on 1970 August 22, beginning 60571 s UT.

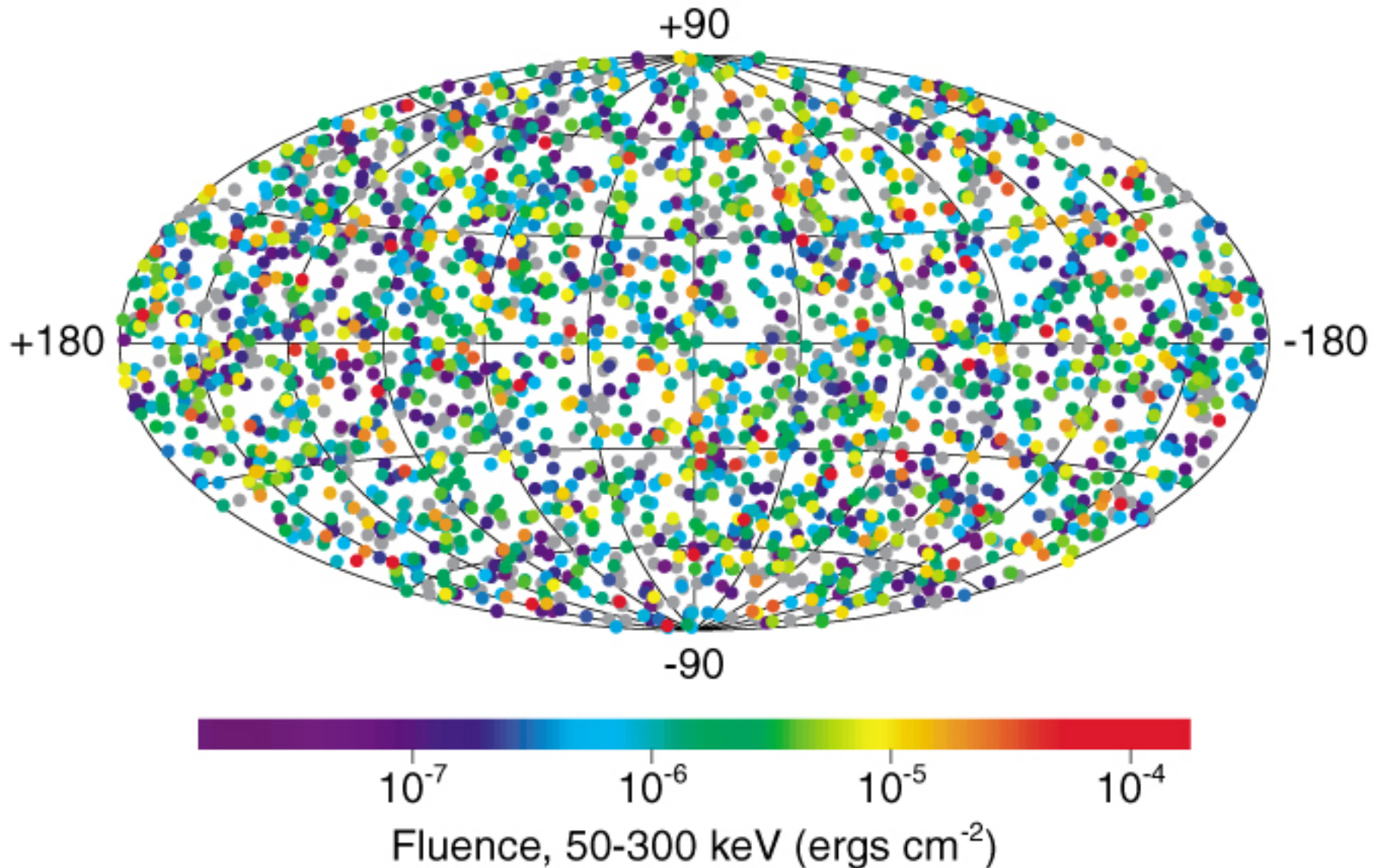


# CGRO: L'isotropia dei GRB (anni '90)



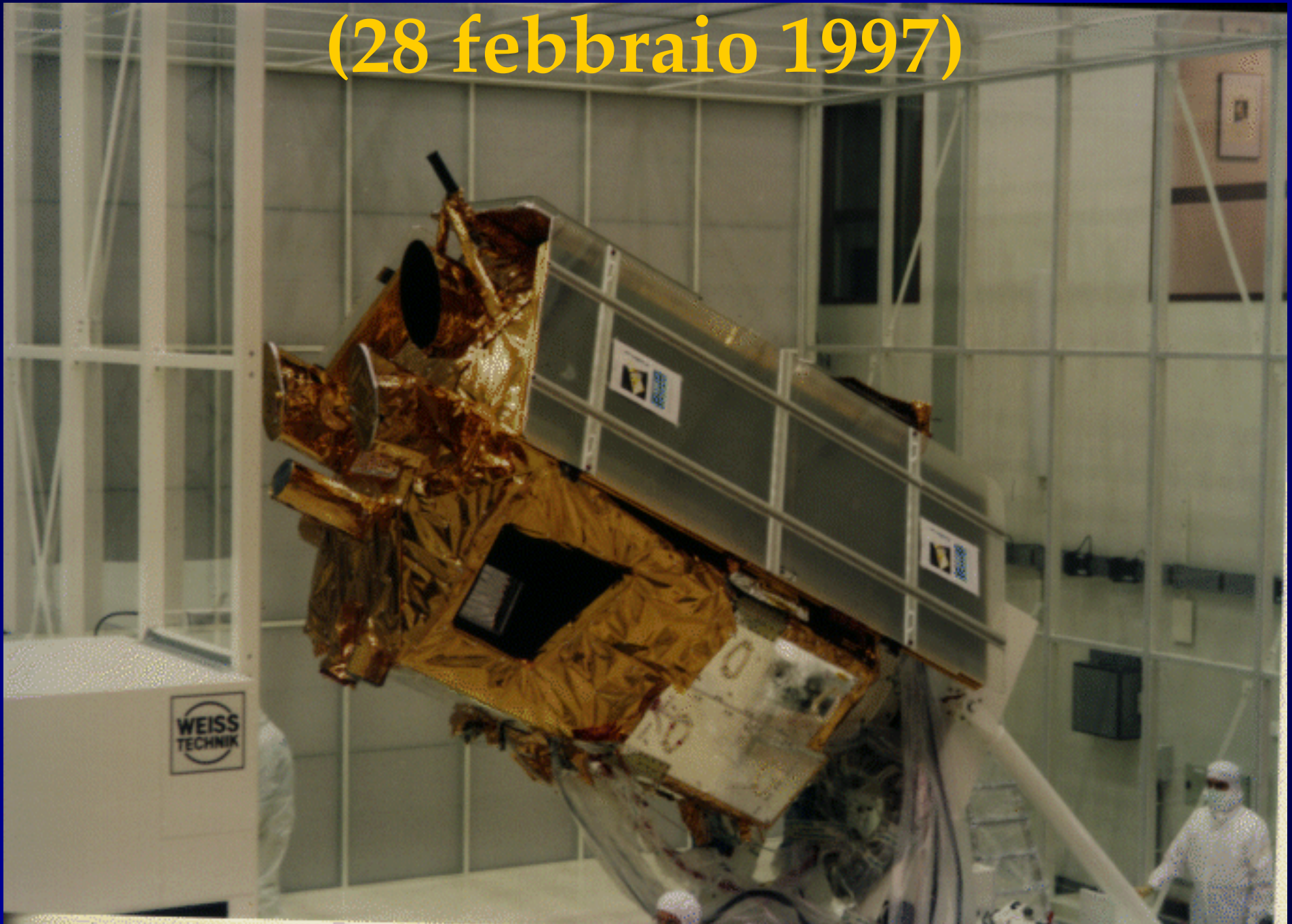
# CGRO: L'isotropia dei GRB

## 2704 BATSE Gamma-Ray Bursts

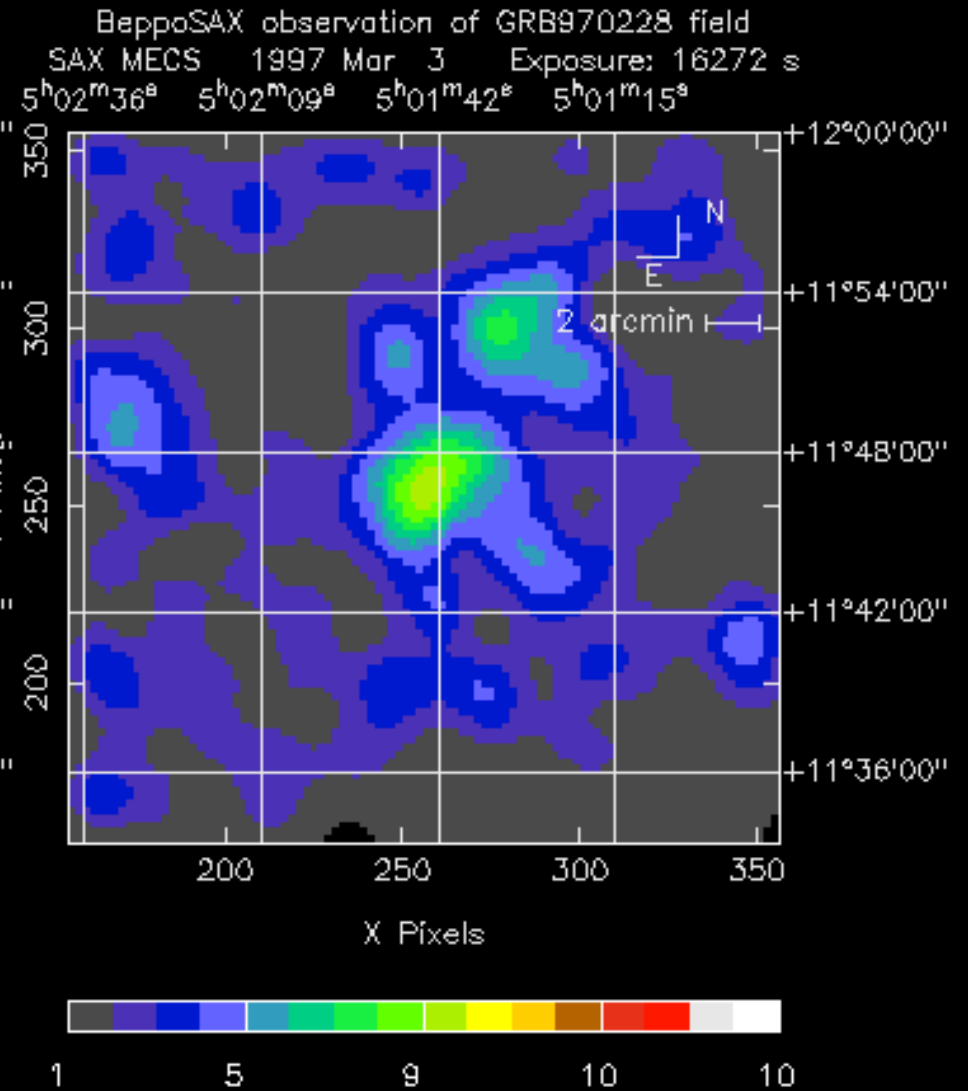
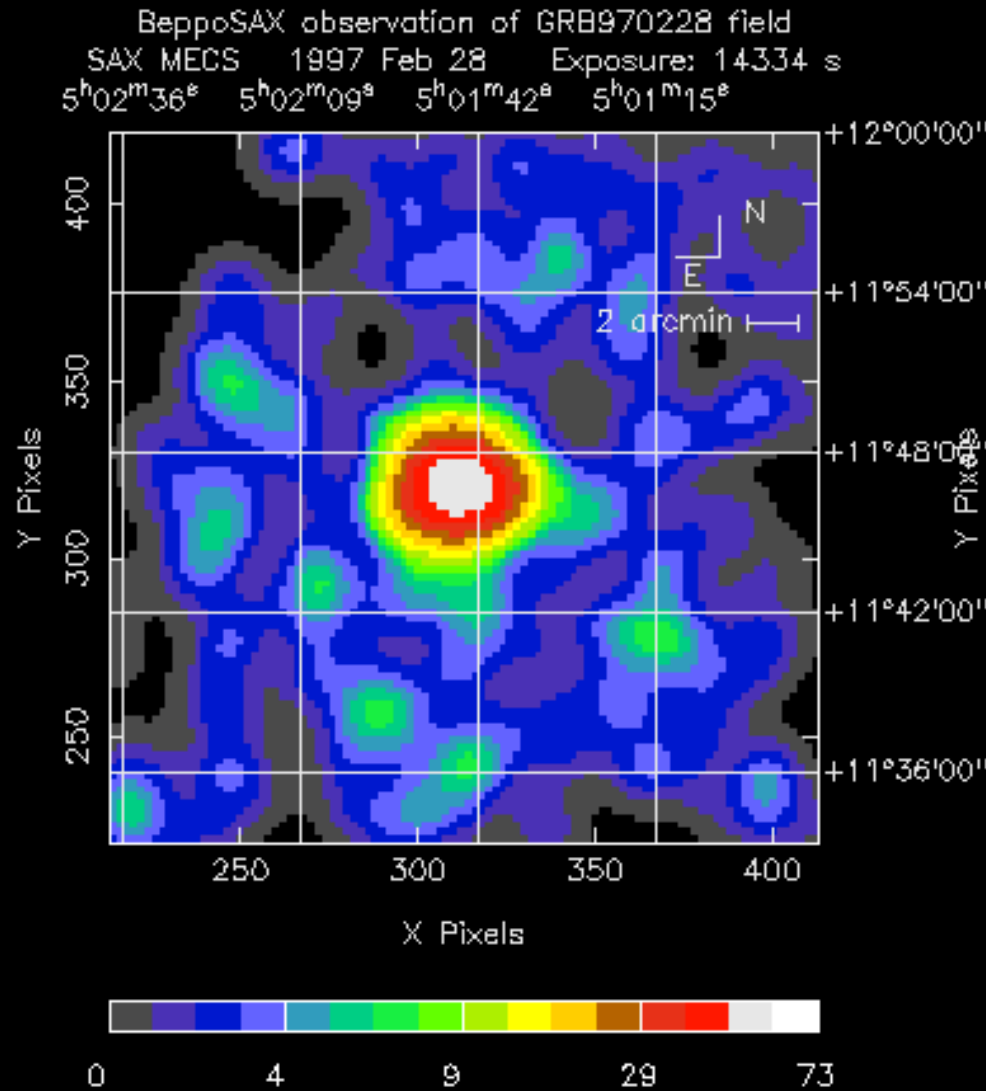


# BeppoSAX: la scoperta dell'afterglow

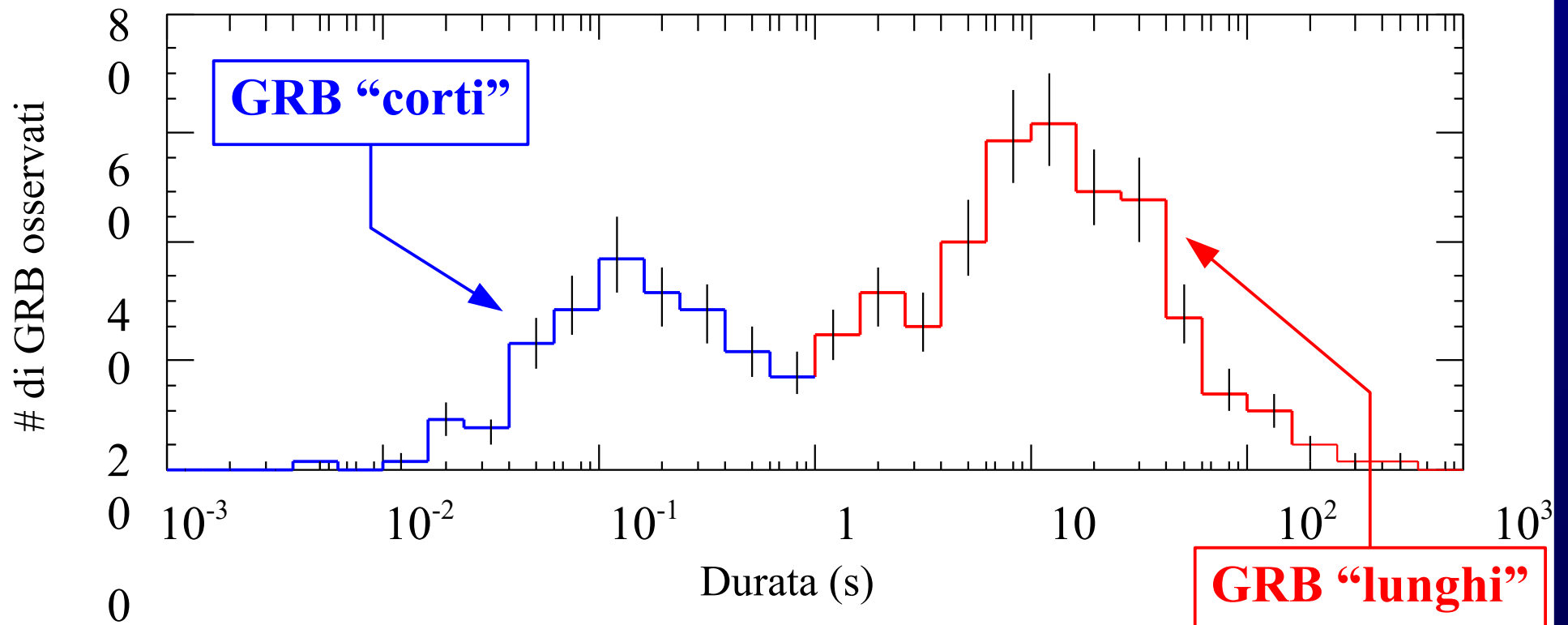
(28 febbraio 1997)



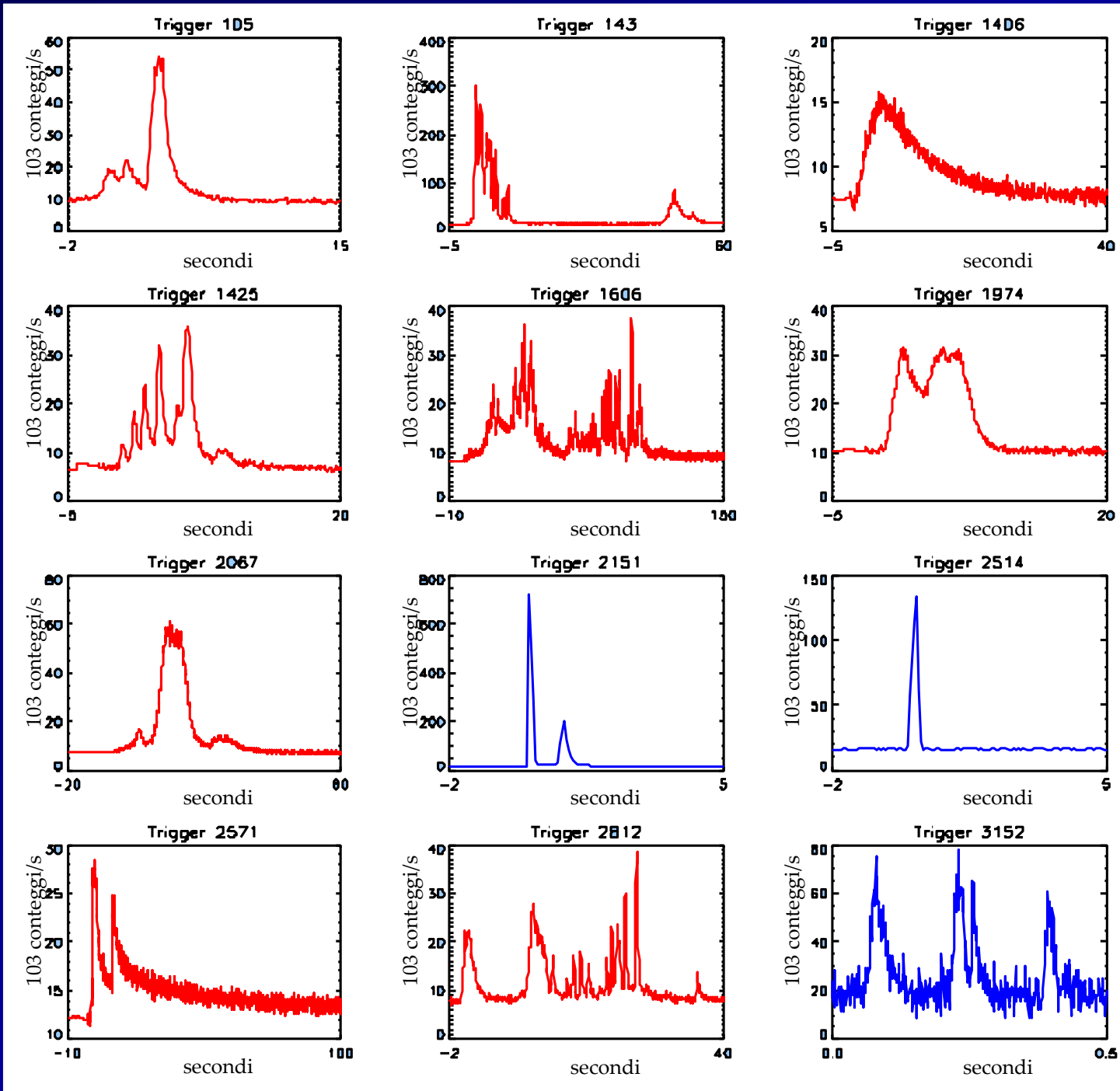
# BeppoSAX: la scoperta dell'afterglow



# L'istogramma delle durate



# La variabilità delle curve di luce



# *I Buchi neri sono "vivi"!*

$$m^2 = \left( m_{ir} + \frac{e^2}{4m_{ir}} \right)^2 + \frac{L^2}{4m_{ir}^2},$$

$$S = 16\pi m_{ir}^2,$$

$$\frac{L^2}{4m_{ir}^4} + \frac{e^4}{16m_{ir}^4} \leq 1,$$

$$\delta S = 32\pi m_{ir} \delta m_{ir} \geq 0.$$

**La Formula di Massa**



**Christodoulou, Ruffini, 1971**