

Poche sentite parole sul
**Astrofisica Multi-
messenger**
(e onde gravitazionali)

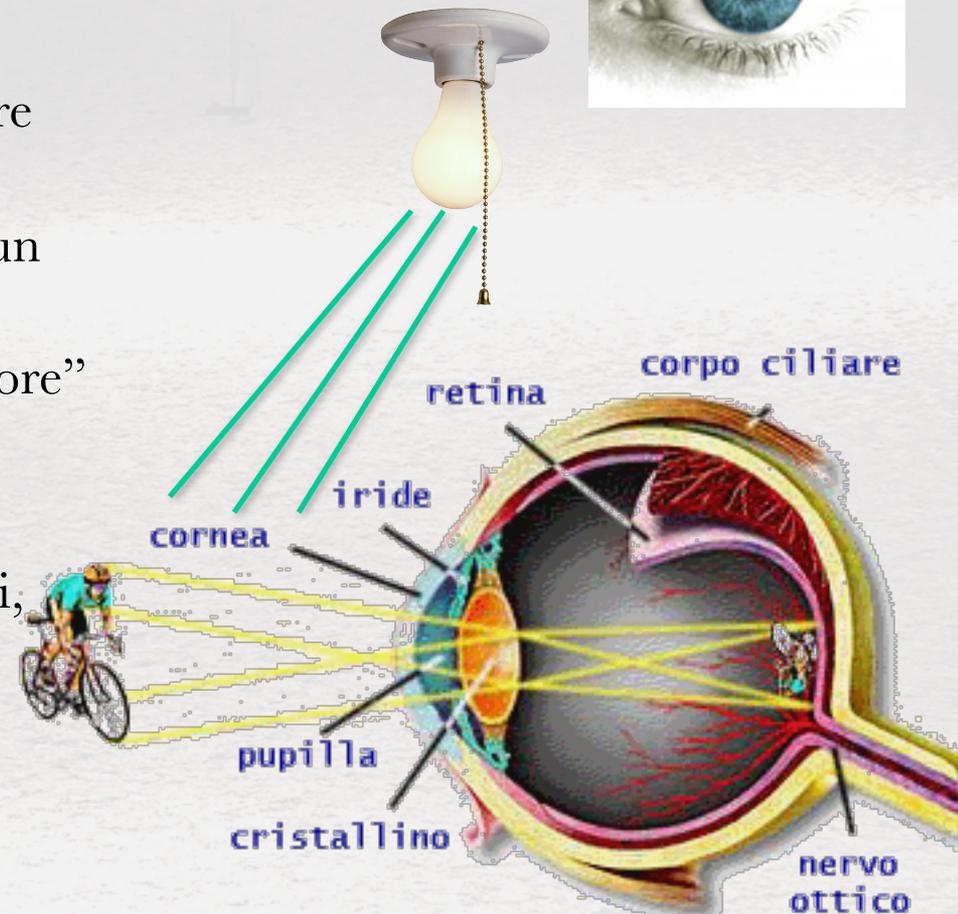
Marco Pallavicini
Università di Genova e INFN

Frascati, 6 ottobre 2017

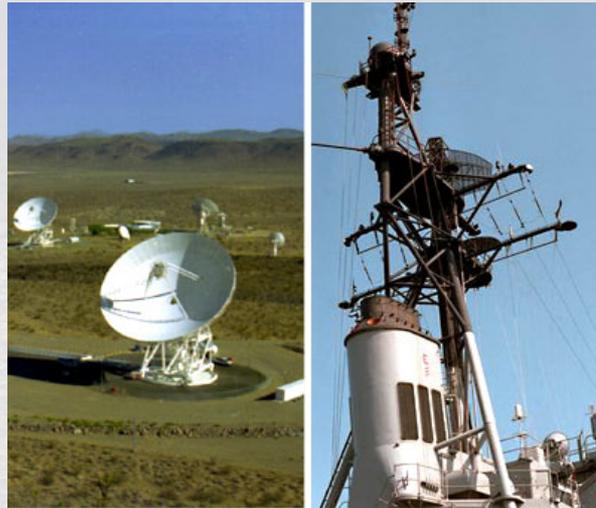
- Osservare il cielo
 - Che cosa vuol dire **“guardare”** ?
- Guardare con:
 - fotoni
 - neutrini
 - raggi cosmici
 - onde gravitazionali

- Quanto guardiamo un oggetto, ciò che davvero facciamo è:

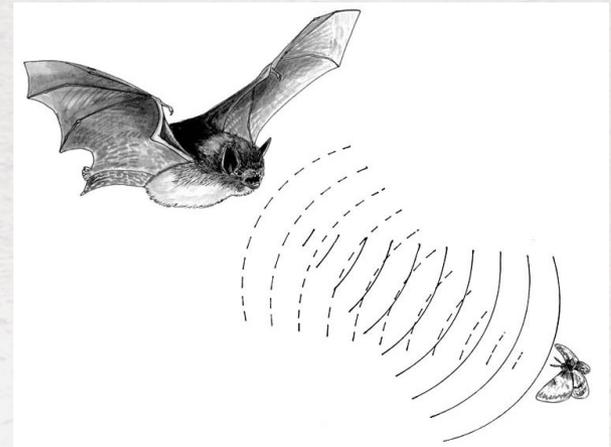
- A) Lanciamo contro l’oggetto dei fotoni luminosi
- B) Questi fotoni sono riflessi, oppure assorbiti e ri-emessi, dall’oggetto
- C) Raccogliamo questi fotoni con un sistema di lenti e/o specchi
- D) li riveliamo con un “foto-rivelatore”
- Se l’oggetto per sue caratteristiche proprie emette da solo questi fotoni, noi ci limitiamo a raccogliarli (A non serve)



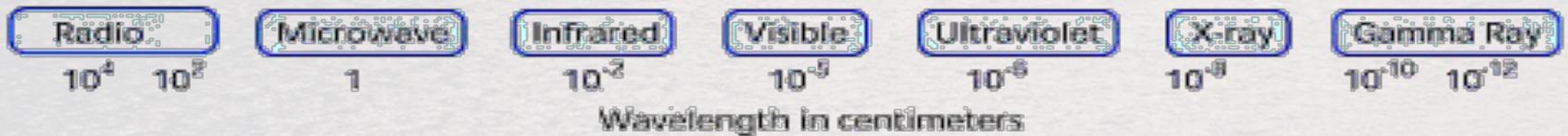
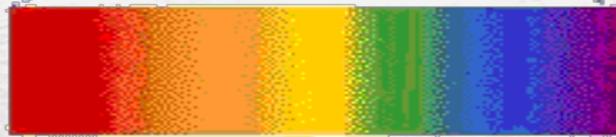
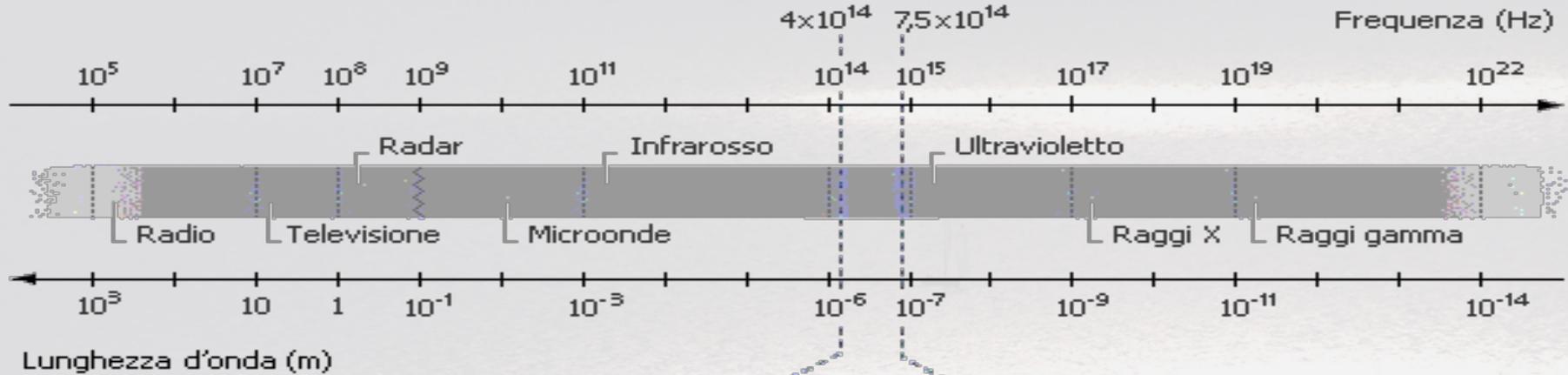
- I fotoni non devono essere necessariamente nello spettro visibile
 - Alcune specie di serpenti vedono nel vicino infrarosso
 - Il RADAR



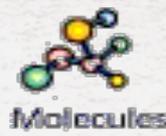
- I pipistrelli “vedono” con le onde acustiche
 - SONAR



- Vi sono molti motivi per “guardare” il cielo con sonde diverse dalla luce visibile
 - Fotoni di frequenza diversa portano informazioni fisiche diverse sull’oggetto da osservare
 - Non sempre la Galassia e’ trasparente alla luce visibile
 - Polvere e gas interstellare non lo sono
 - Alcuni oggetti non emettono luce visibile, ma fotoni di altre frequenze
 - Buchi neri, stelle di neutroni, radio-galassie, quasars
 - La materia densa non è trasparente ai fotoni
 - Altri oggetti, come i neutrini o le onde gravitazionali, ci possono dire qualcosa di ambienti inaccessibili come il centro di una stella in una esplosione di supernova o un nucleo galattico attivo o di una stella di neutroni

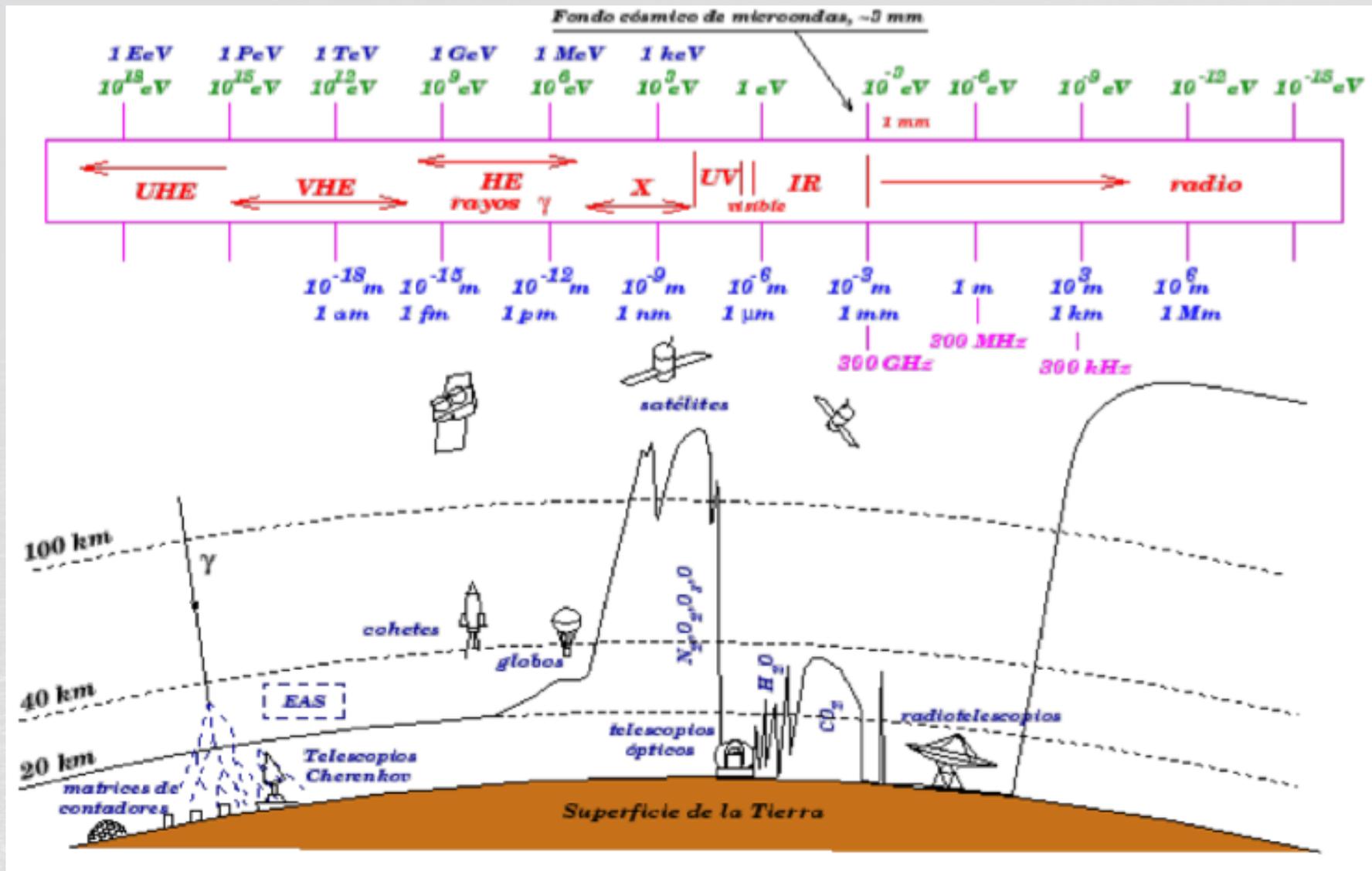


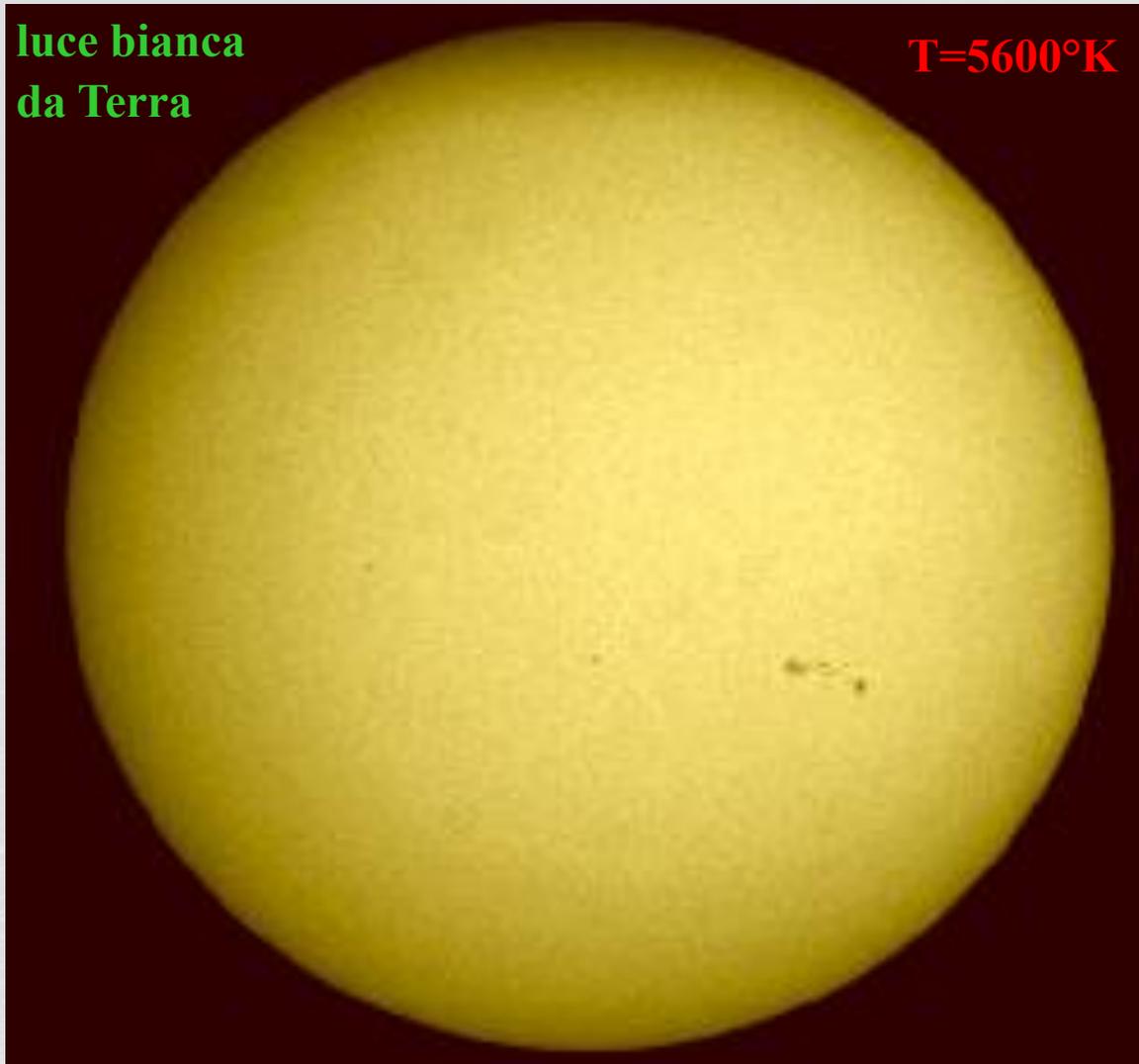
About the size of...



- Perché tanti nomi per gli “stessi” fotoni ?
 - Radio, Microonde, Infrarossi, Luce, UV, X, γ
- Perché l’interazione fra fotoni e materia dipende dalla lunghezza d’onda, e la fisica coinvolta è molto diversa
 - Storicamente, alcune di queste “radiazioni” sono state scoperte prima di riconoscere che si trattava delle stesse onde elettromagnetiche a frequenze non ancora esplorate
 - Con fotoni di lunghezza d’onda diversa vedo cose diverse!

- Onde radio
 - Emesse da cariche in moto collettivo. Nubi di gas carico, jets
- Raggi infrarossi
 - Emessi da corpi caldi. Stelle, gas interstellare. Non assorbiti dalla polvere
- Luce visibile
 - E' la frequenza che corrisponde alle transizioni atomiche e molecolari
 - Luce: le molecole organiche hanno energie di legame simili ai fotoni luminosi
- Raggi ultravioletti
 - Atomi fortemente ionizzati, materia ad alta temperatura.
- Raggi X
 - Particelle cariche veloci, materia estremamente ionizzata, temperature altissime
- Raggi γ
 - Fenomeni nucleari e legati alle particelle elementari

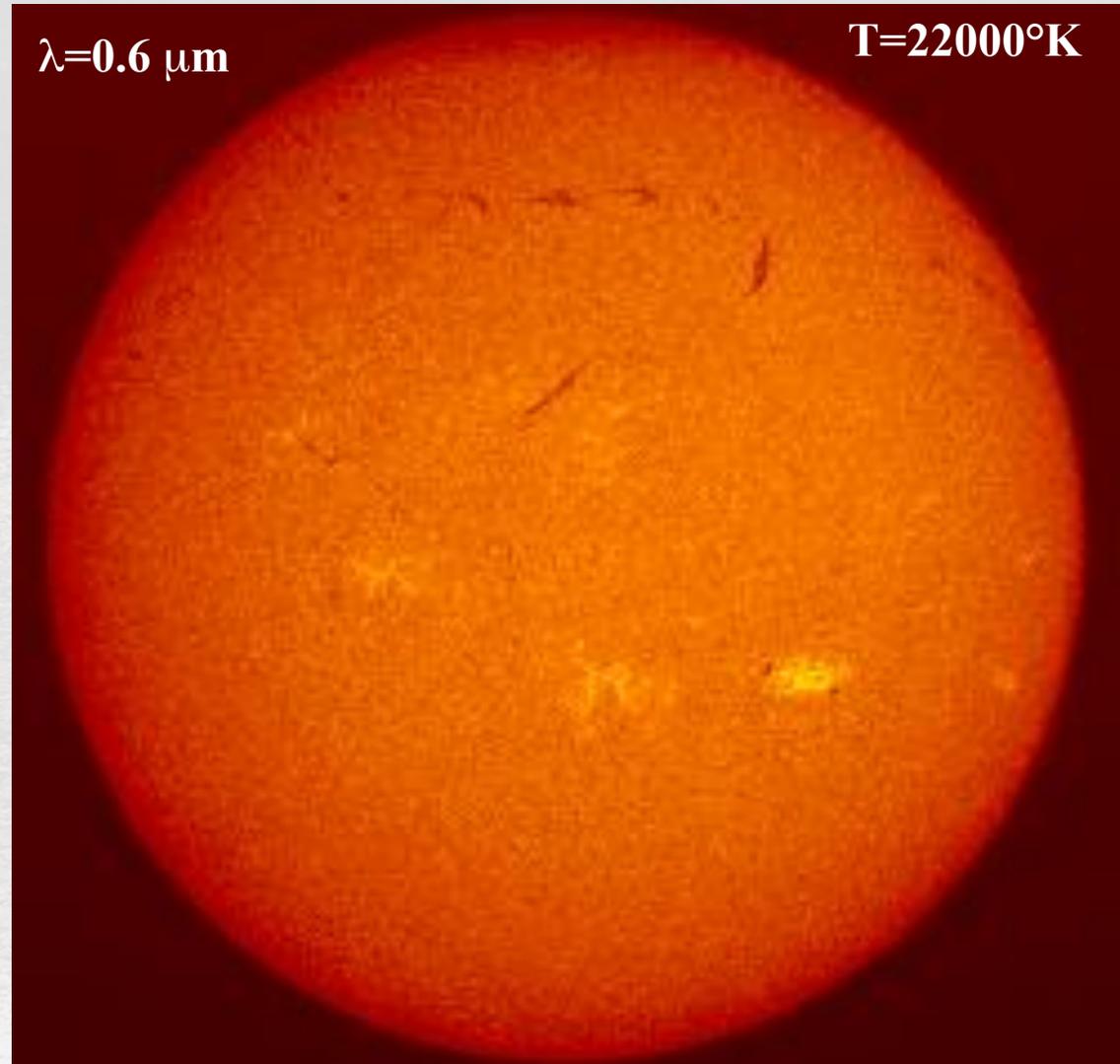




**Luce visibile
filtrata**

**Si evidenziano le
prime strutture
sulla superficie**

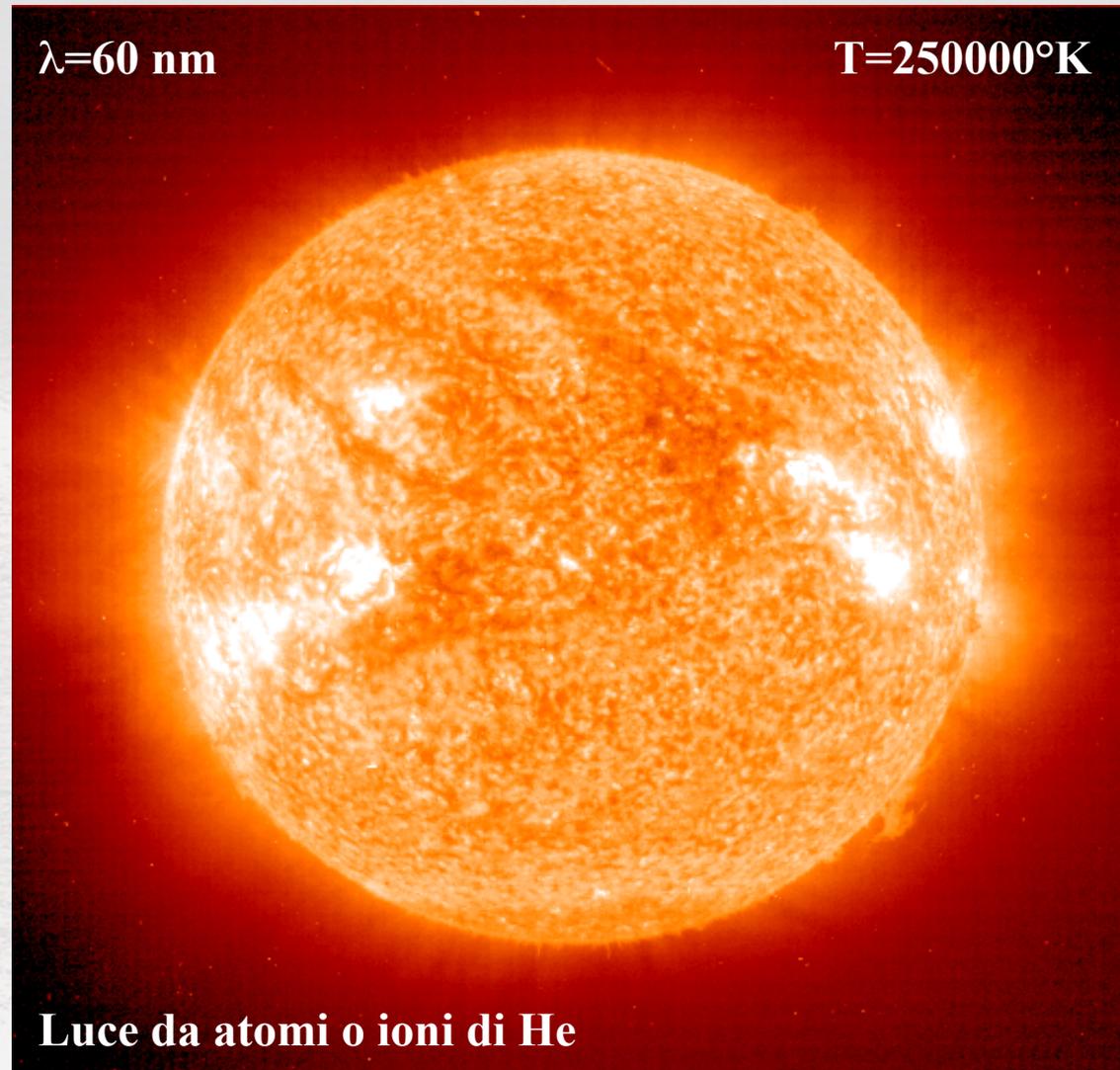
**Osservazioni da
Terra**

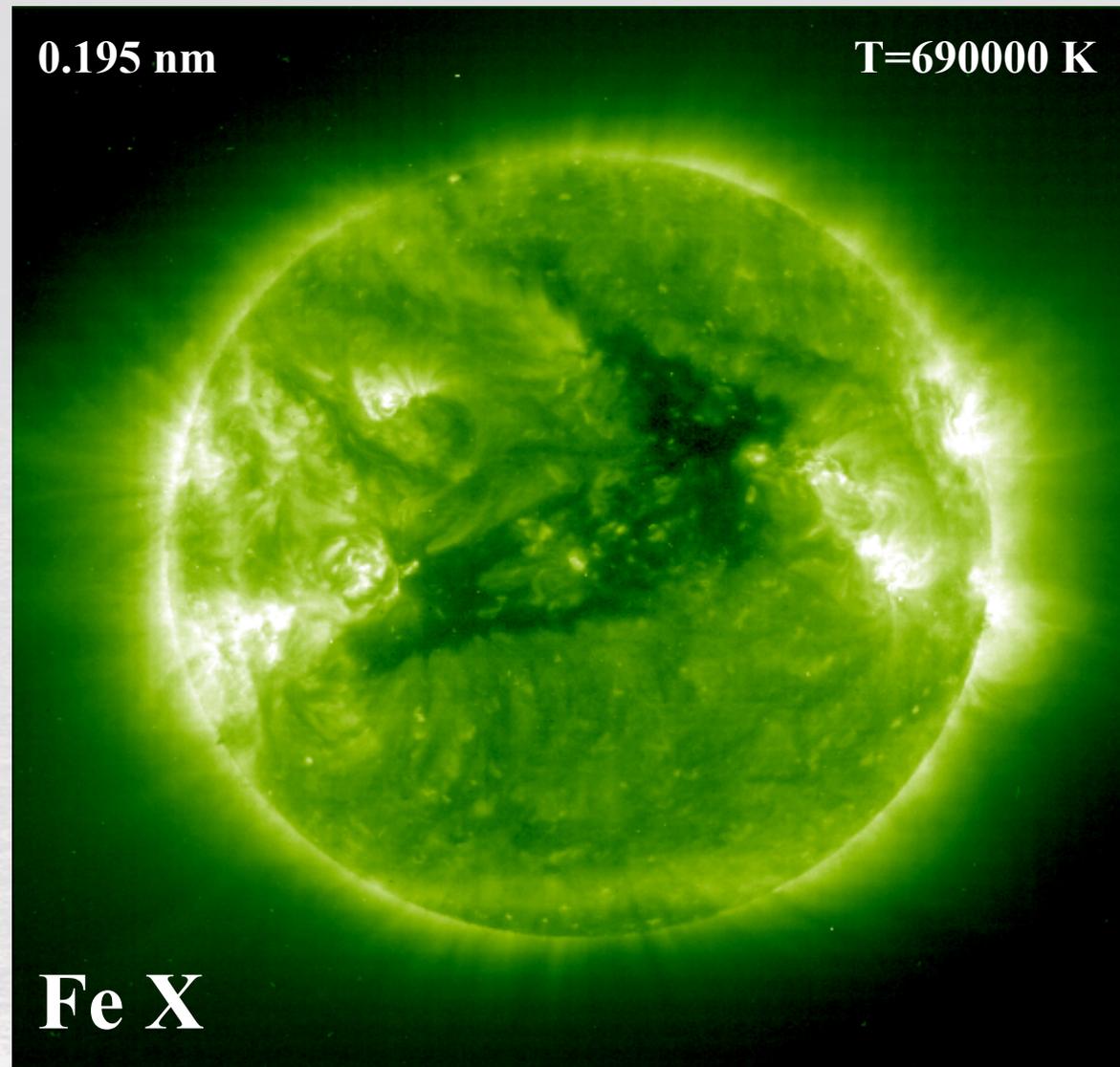


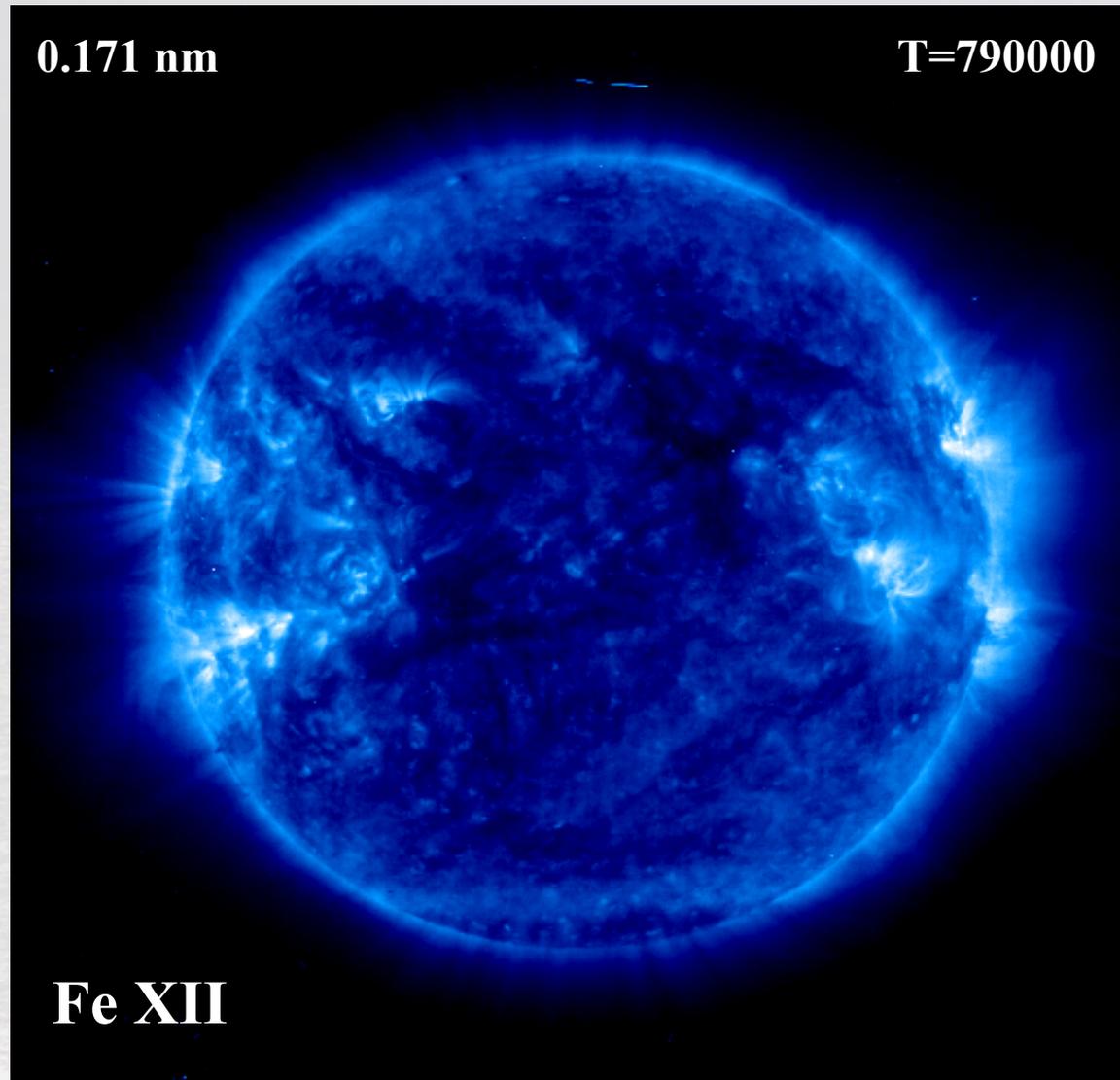
Ultravioletti “vicini”

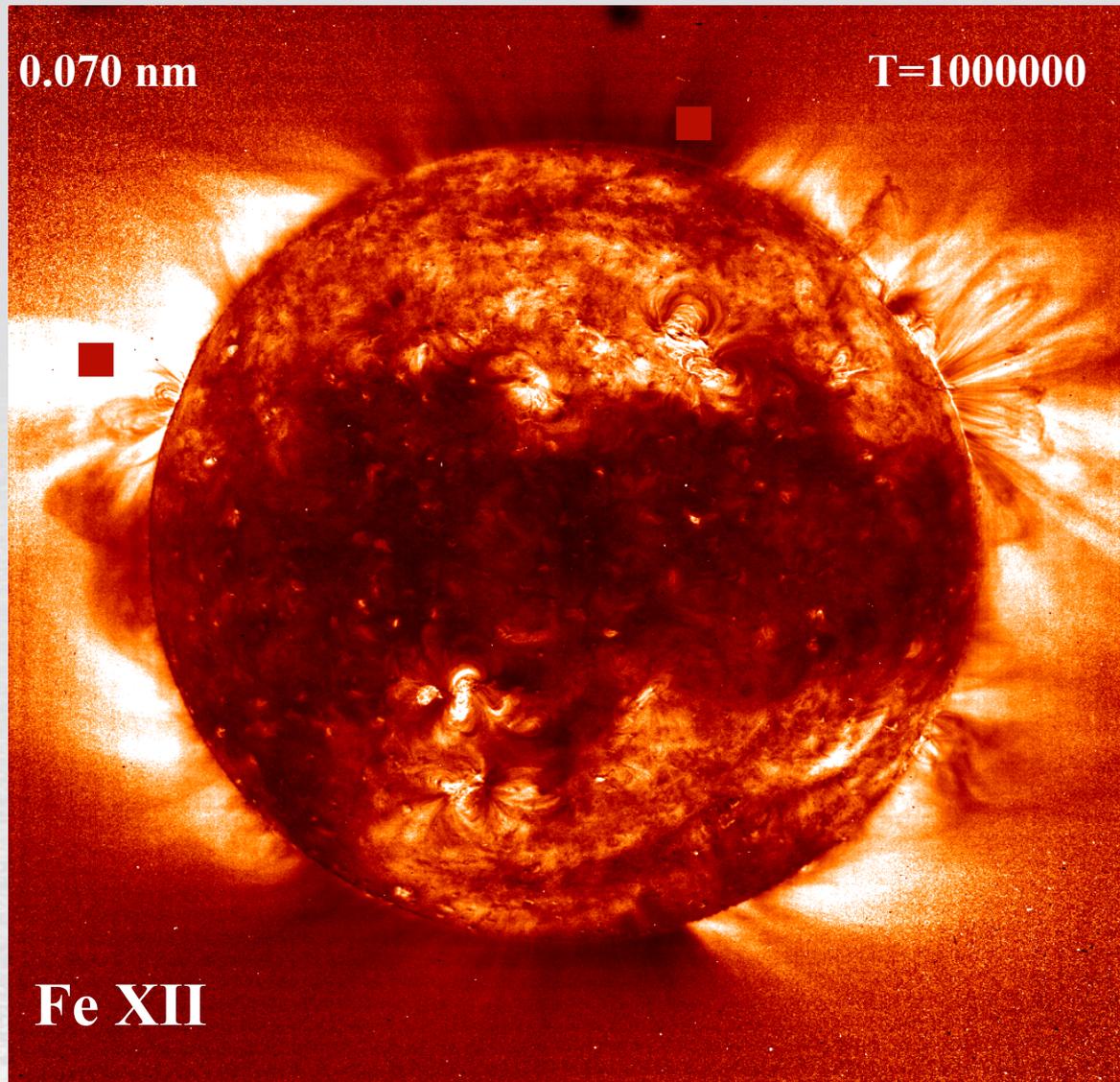
Migliore evidenza delle
strutture

Atmosfera non trasparente
SATELLITI!



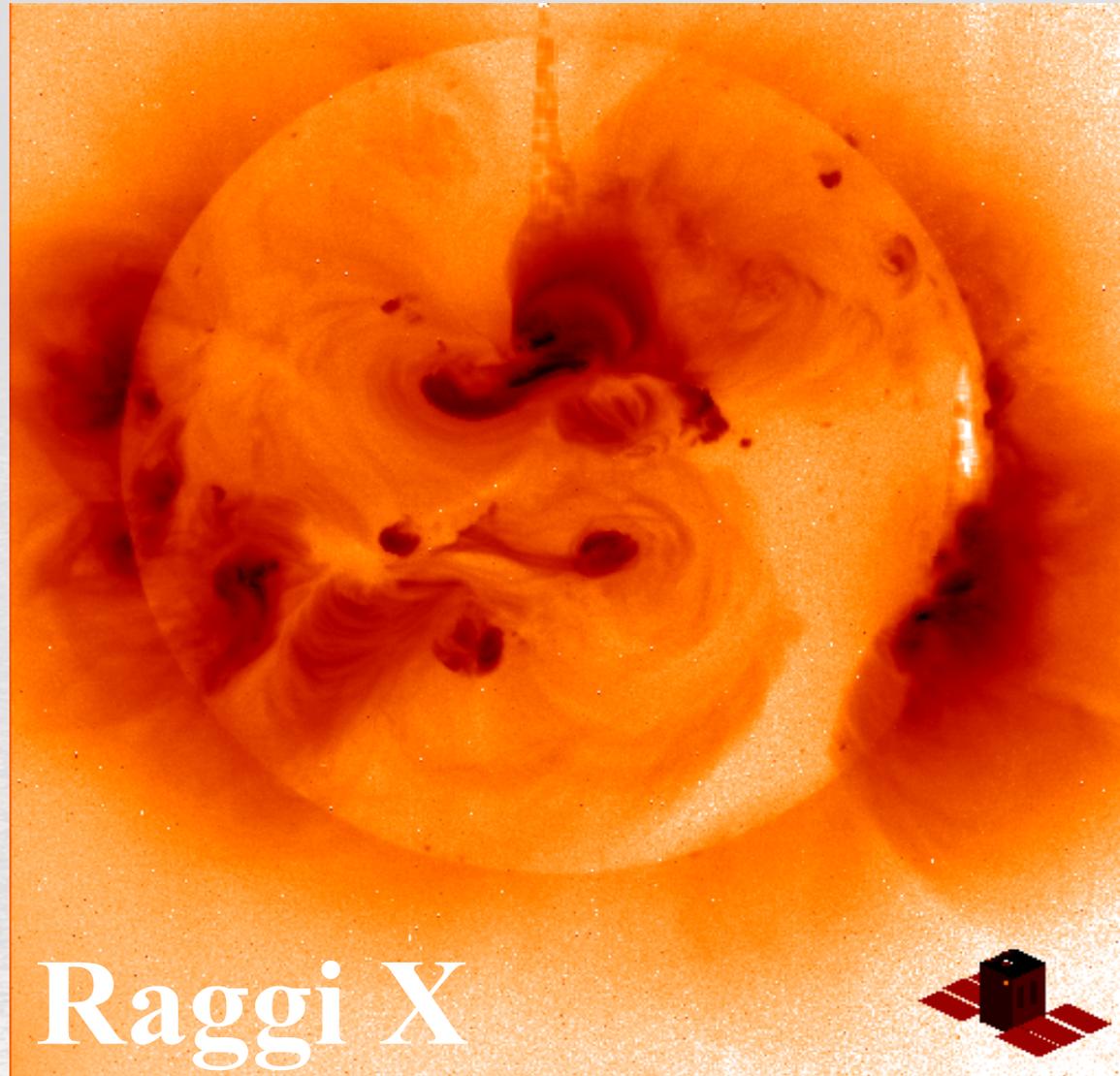






Nota bene:
le stelle normali
come il Sole
hanno emissione
X debolissima

Emissione nelle
regioni dove
il plasma è molto
caldo



Raggi X



- Ascoltare segnali radio da cielo
 - \sim molti GHz
 - Cellulari, wireless: 1-2 GHz
- Ingredienti
 - Un riflettore (parabolico)
 - Feed-horn
 - Amplificatore a basso rumore
 - Filtro
 - Modulatore
 - Amplificatore
 - Spettrometro





**Molti radiotelescopi “sincroni”
forniscono una “pupilla” effettiva di
migliaia di Km**

**I radiotelescopi hanno la migliore
risoluzione angolare**

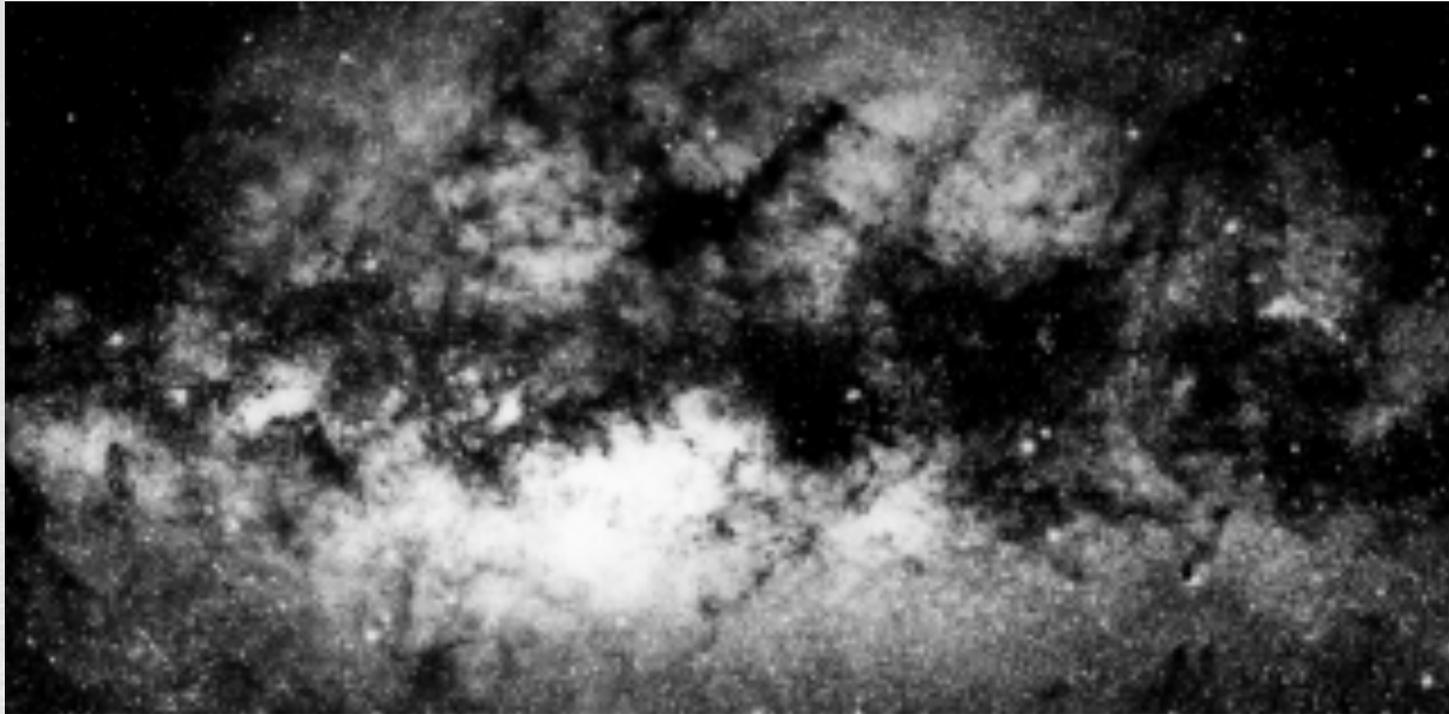


- Un capitolo a sé stante è quello dell'astronomia X
- Concettualmente simile, ma tecnicamente molto diversa perché:
 - I fotoni X non sono deflessi da lenti e non sono riflessi da specchi, a meno che l'angolo di incidenza non sia molto piccolo
 - E' necessario usare foto-rivelatori opportuni, per misurare il flusso e l'energia dei raggi X incidenti
 - L'atmosfera non è trasparente ai fotoni X per cui è indispensabile andare nello spazio
- E' uno dei capitoli fondamentali dell'astronomia degli ultimi 40 anni
 - Premio Nobel a Giacconi, allievo di Bruno Rossi

- Diverse lunghezze d'onda portano informazioni complementari
- Come esempio vediamo come si arriva ad avere una ragionevole certezza che al centro della Galassia c'è un buco nero di massa enorme
 - Almeno 1 milione di stelle come il Sole
- Idea attuale: tutte le Galassie hanno un grande buco nero al centro
 - I nuclei galattici attivi (quasars, radio-galassie, galassie Seyfert, etc) sono galassie in cui il buco nero centrale è ancora molto attivo
 - La Galassie normali (come la nostra) hanno un buco nero relativamente tranquillo

- Luce visibile, da Terra, senza filtri
- La polvere impedisce di vedere il centro
- Poche informazioni

500 pc



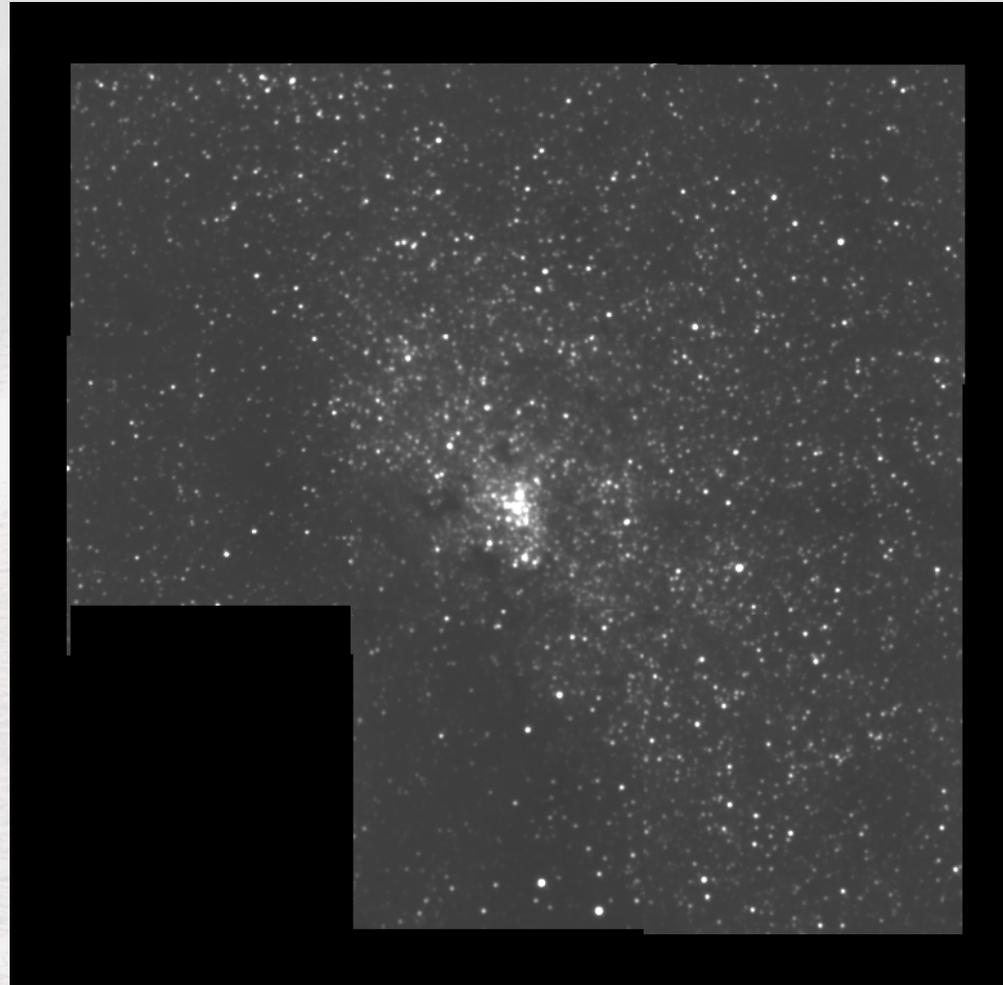
- All'infrarosso la polvere è quasi trasparente
 - Immagini molto più chiare e comprensibili

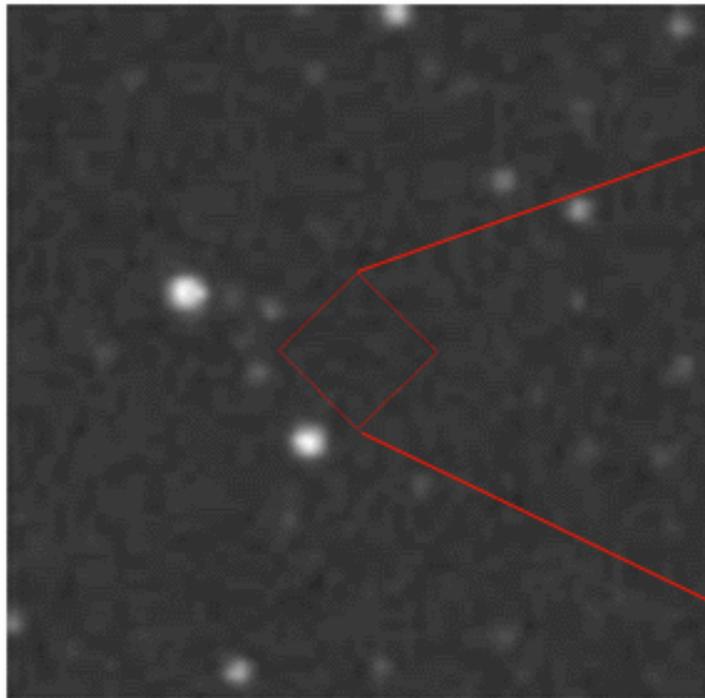
500 pc



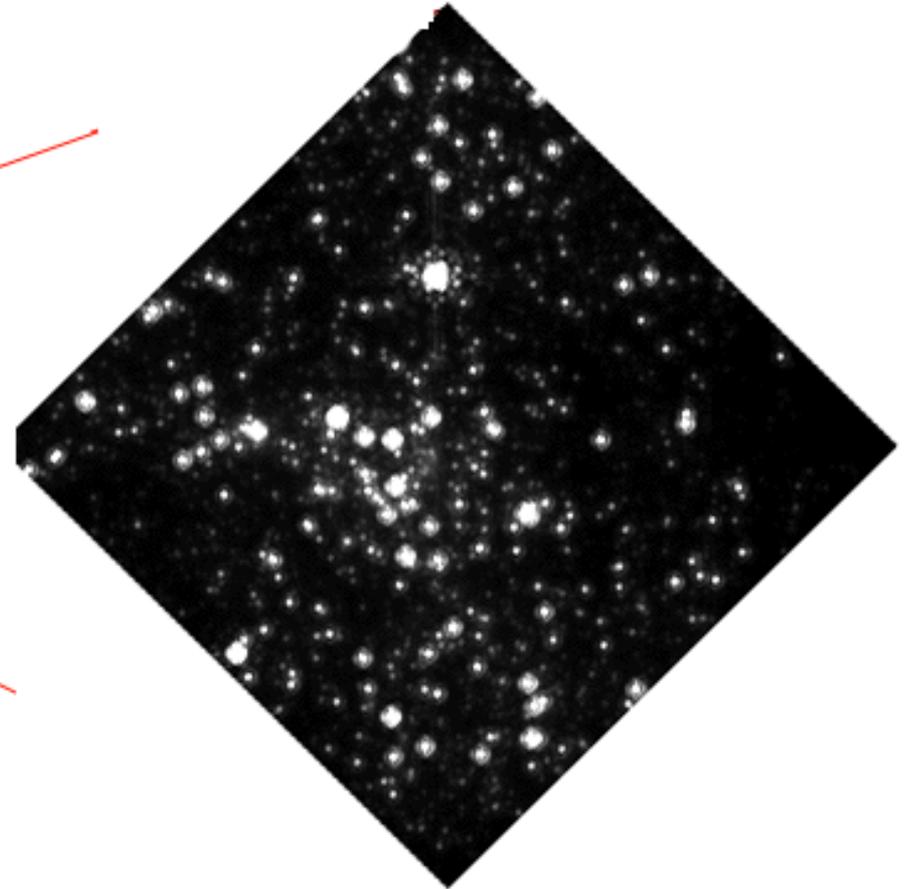


- Zoom Immagine
 - Diametro pochi pc
- Il centro è chiaramente visibile e quindi studiabile
- IR da Terra



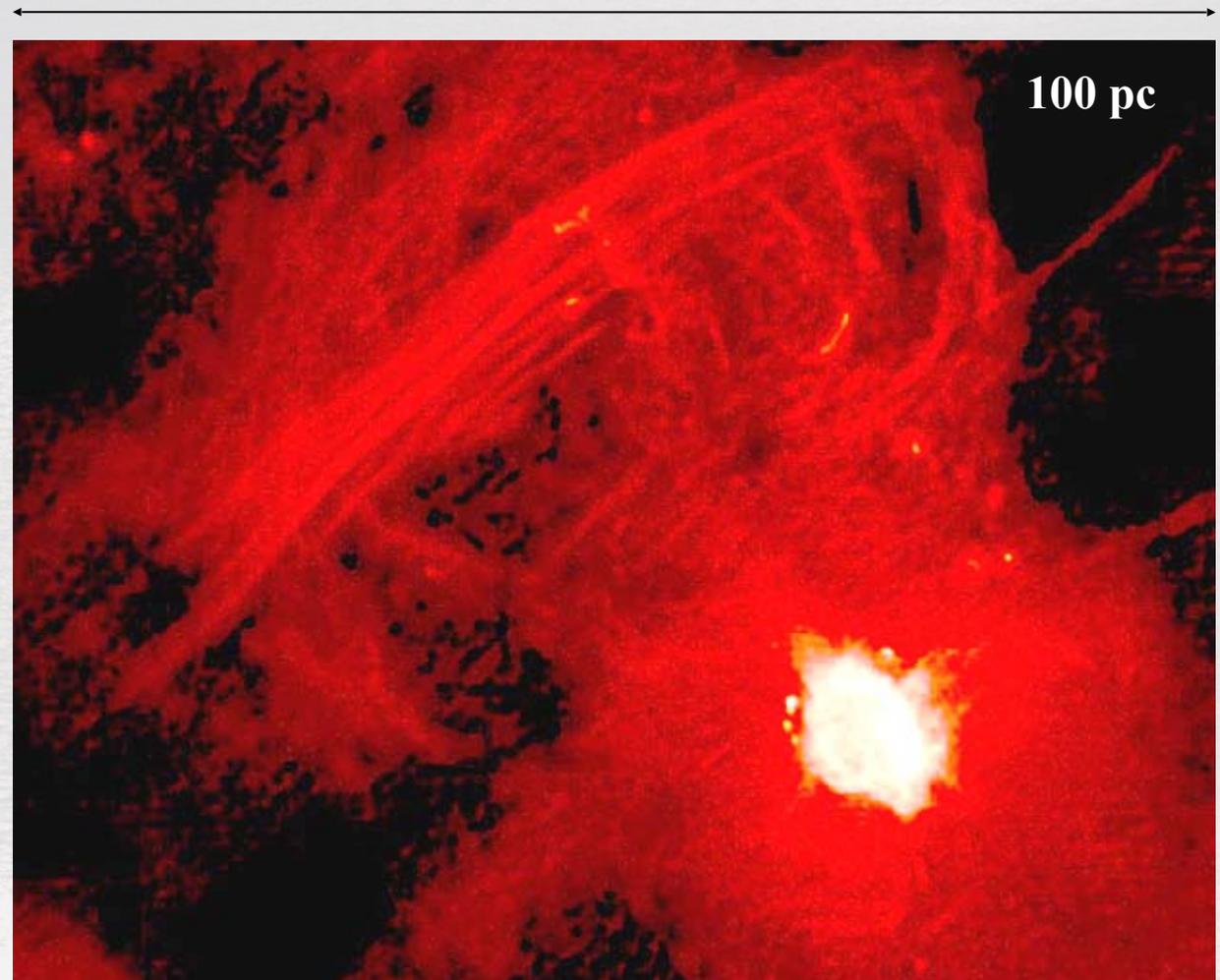
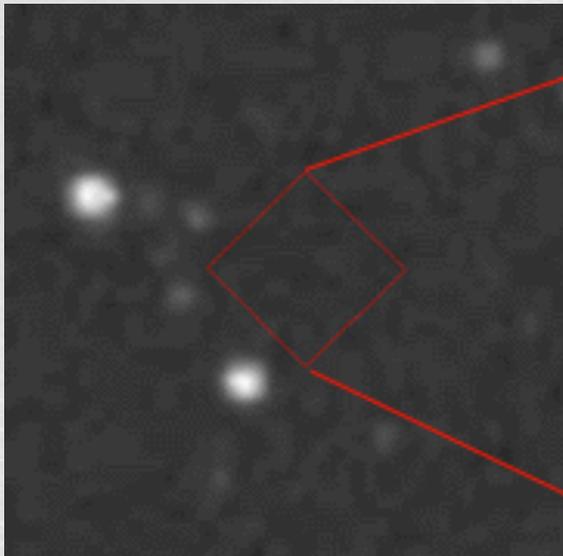


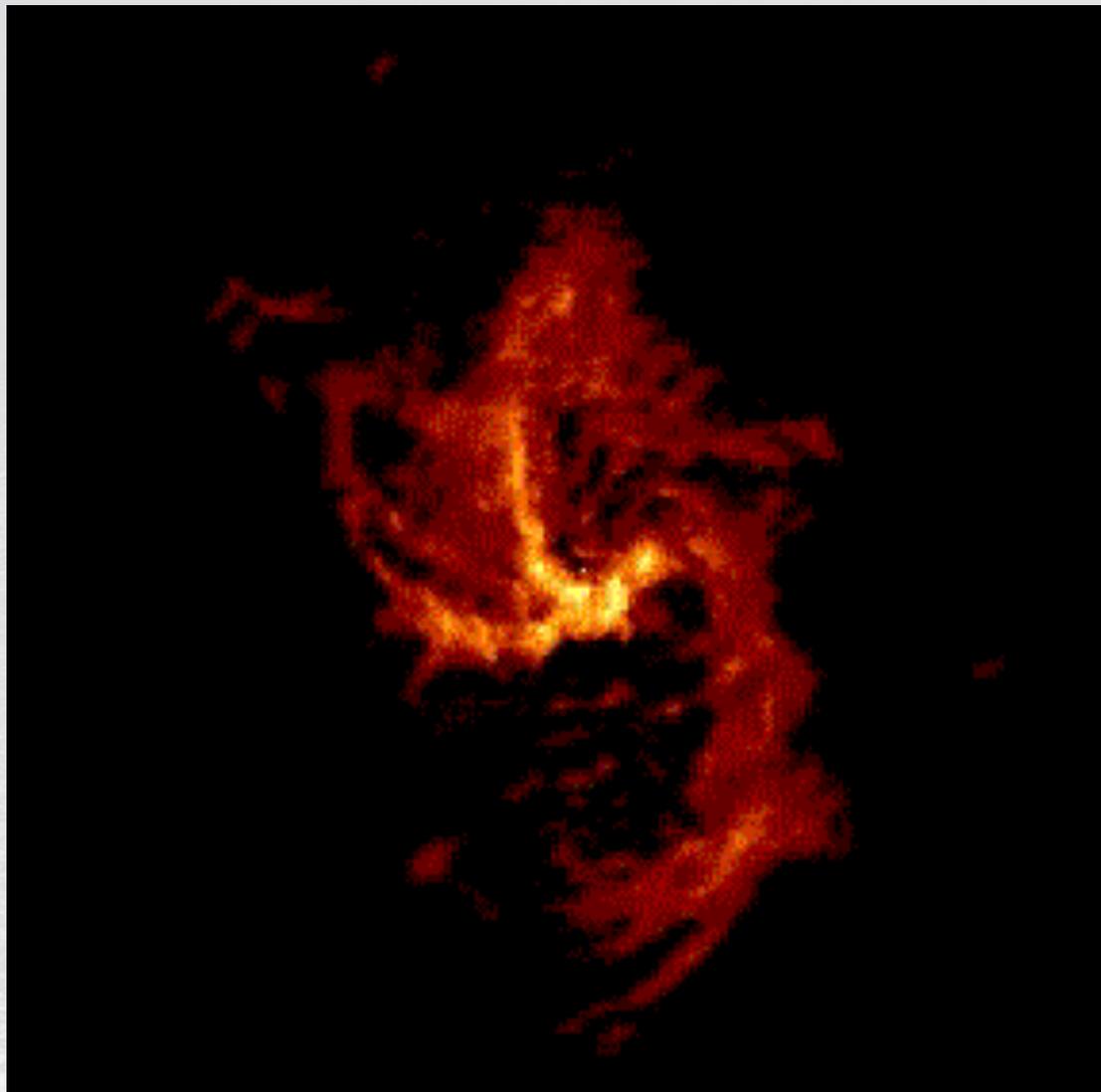
Visible Light



Infrared Light

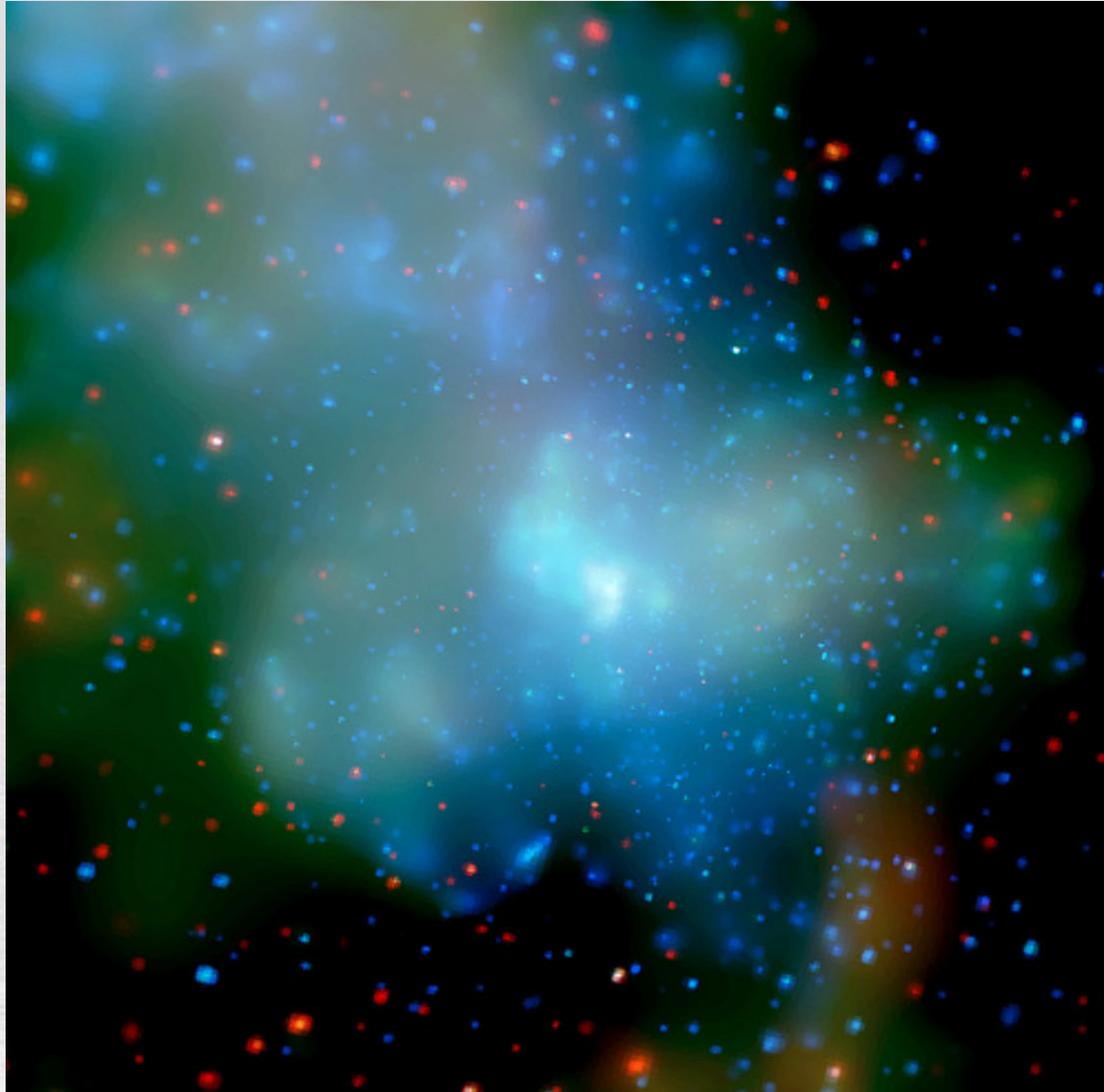
- **Onde radio** emesse dal materiale che accelera attorno al buco nero
- Dalla stessa zona dove in **ottico non si vede nulla**



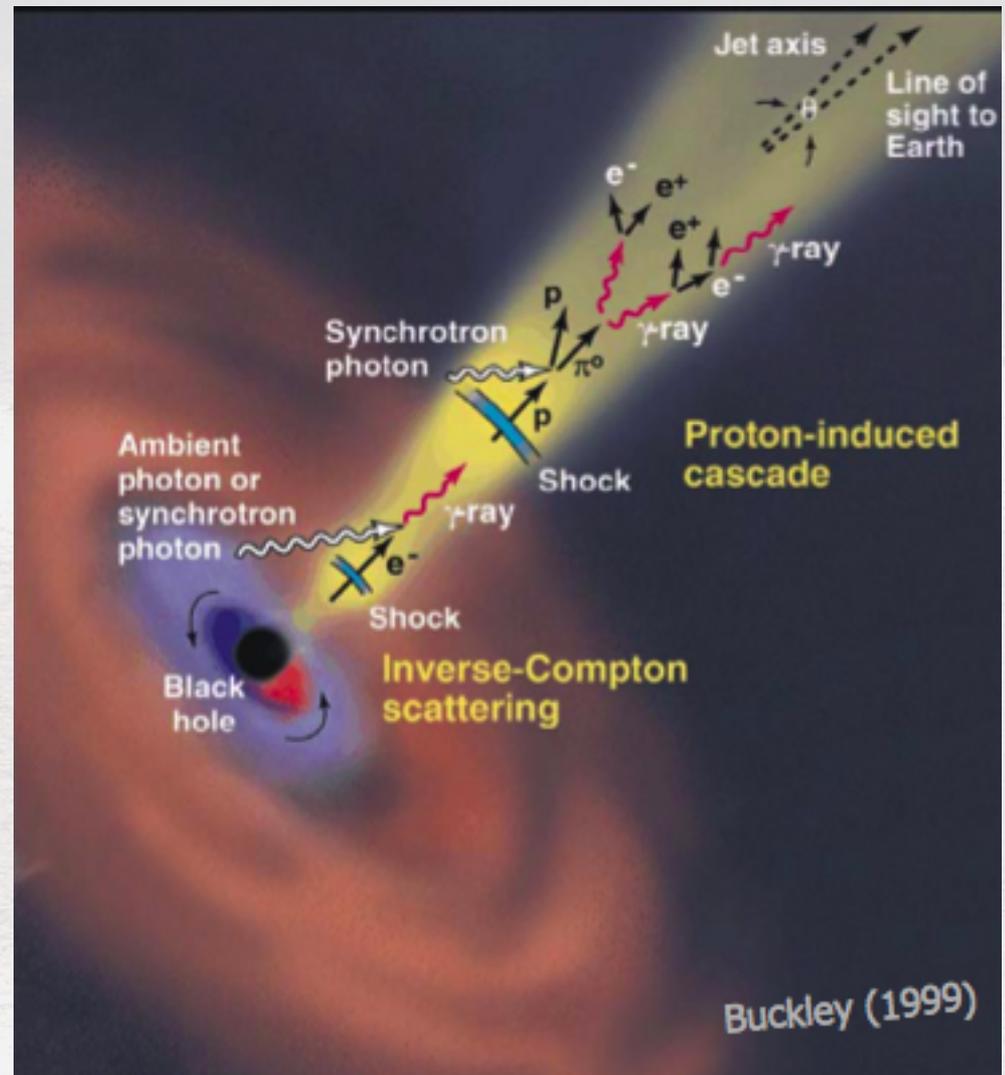


- **Ulteriore evidenza:** emissione in raggi X (**Chandra**)

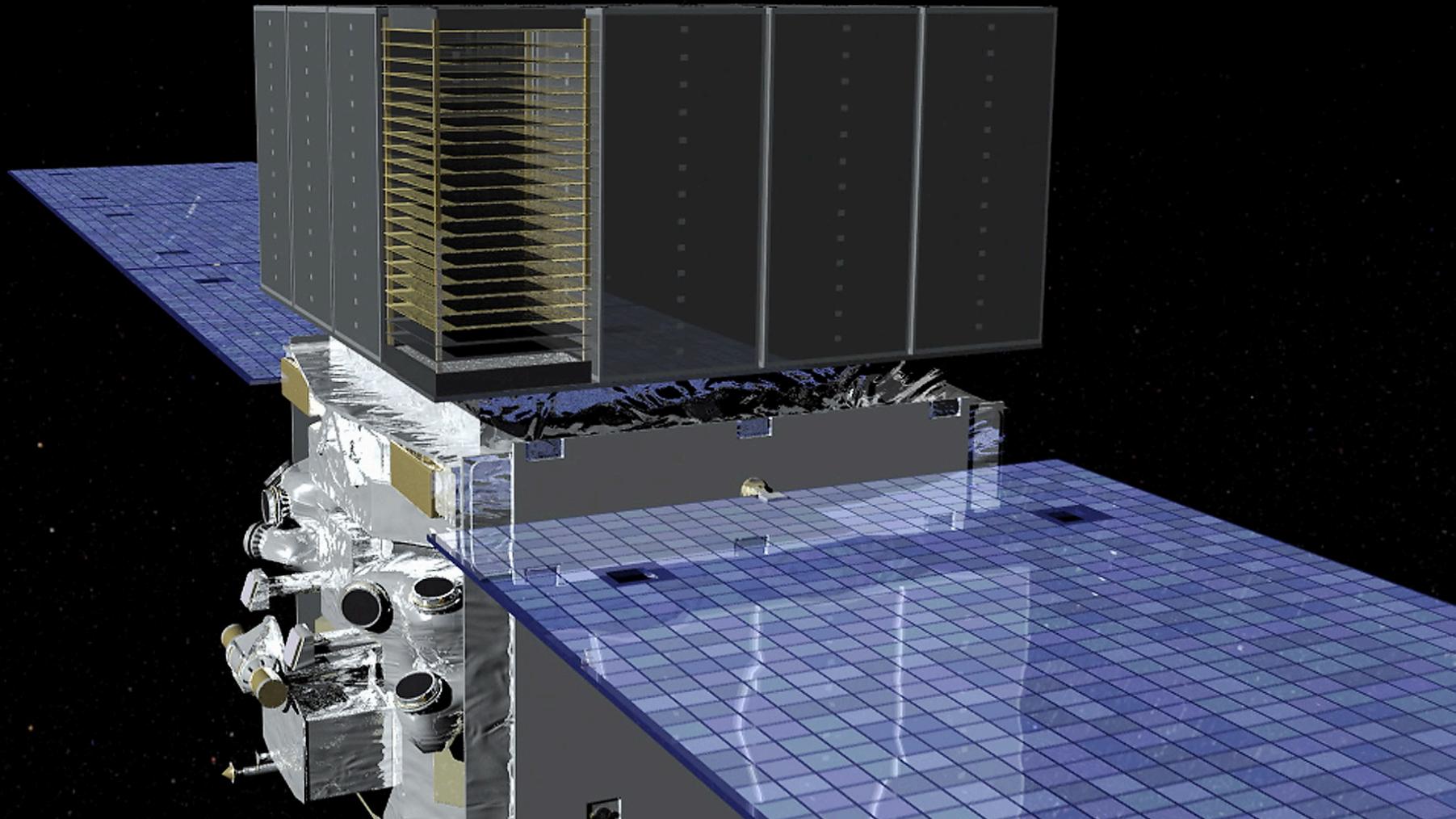


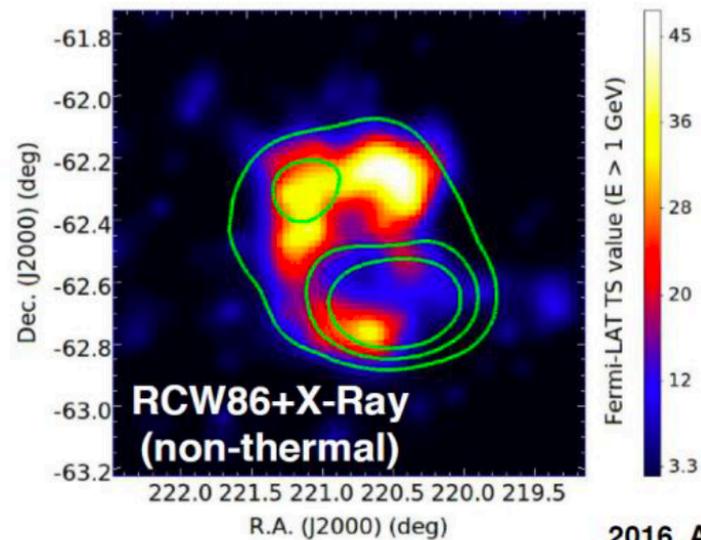
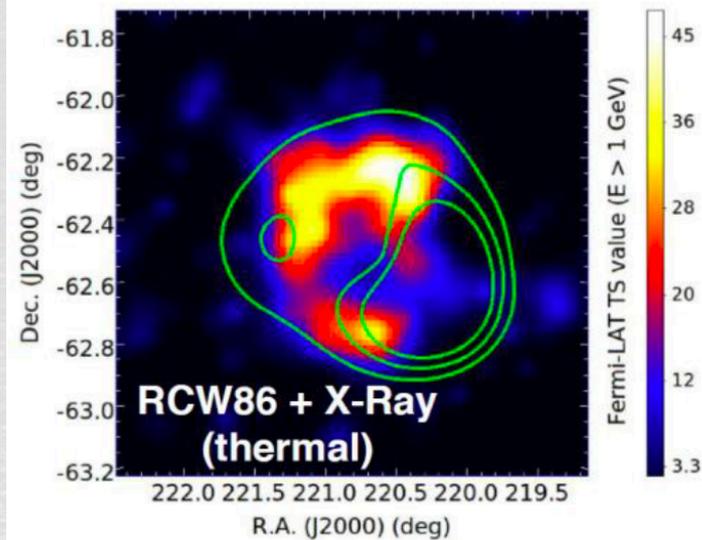
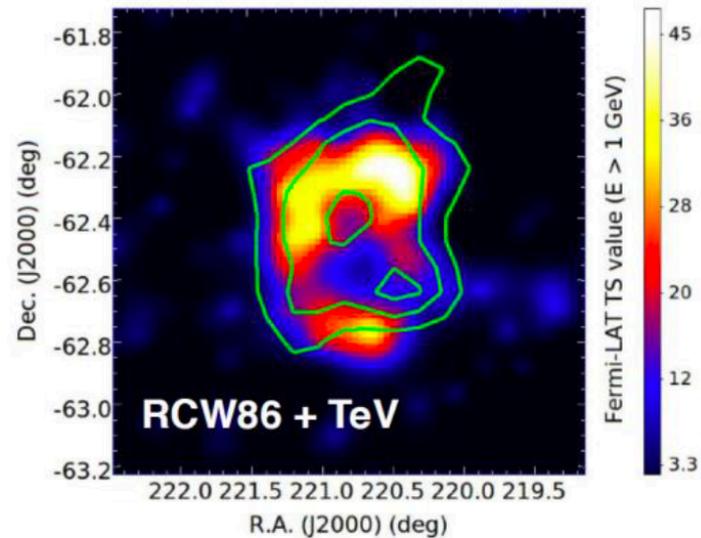
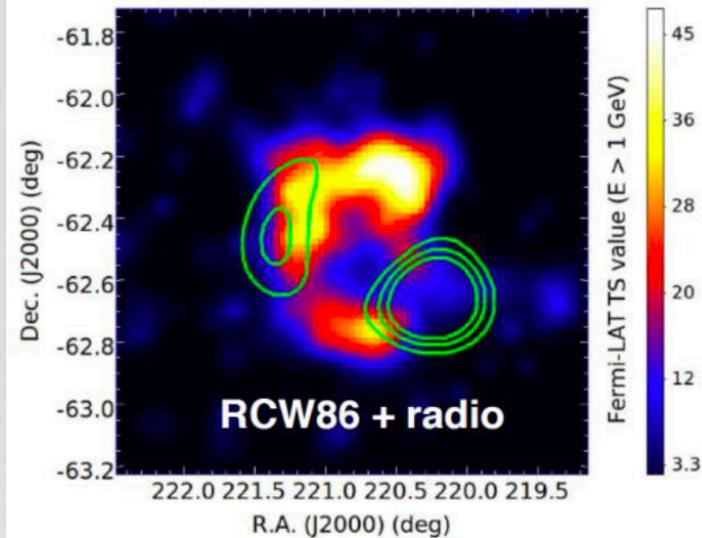


- I fotoni di massima energia sono i raggi gamma
- Sono emessi da fenomeni nucleari, oppure da particelle cariche a velocità relativistiche
- Consentono di studiare i fenomeni estremi dell'Universo
- Sia da Terra sia da telescopi in orbita



Tecnologia Italiana (INFN)





(Ajello et al. ApJ 2016)

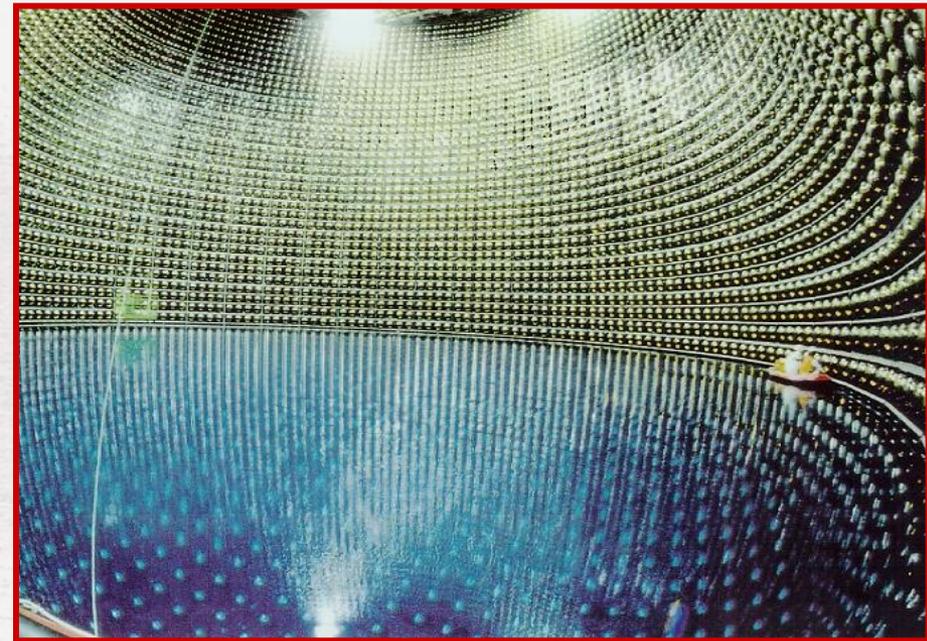
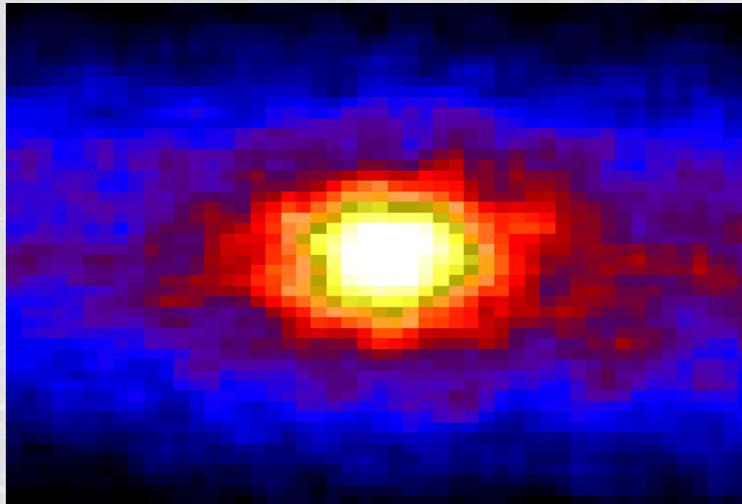
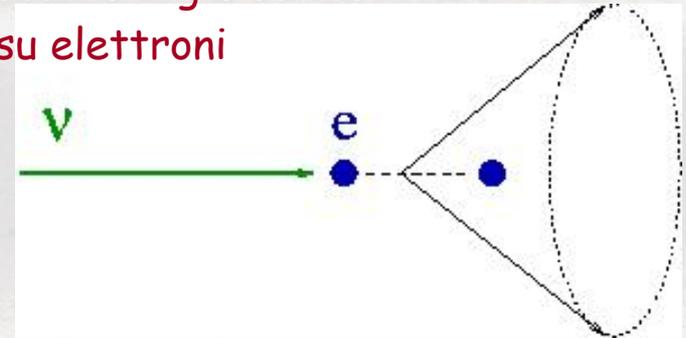
2016 A

- Si può vedere il funzionamento interno delle stelle, grazie ai neutrini
 - Particelle leggere, neutre, che possono attraversare senza problemi anni luce di materiale!
 - Sono prodotti dalle reazioni nucleari solari, e giungono a Terra
- Si sono osservati sia i neutrini solari, sia quelli prodotti da SN1987A
- L'osservazione dei neutrini si fa sotto-terra!
 - Grandi laboratori sotterranei per proteggersi dai raggi cosmici
 - Il più importante al mondo è in Italia, i Laboratori Nazionali del Gran Sasso

- In acqua:

- L'elettrone diffuso emette un **cono di luce Cerenkov** che può essere rivelata con dei **tubi fotomoltiplicatori**
- Si misura in tempo reale la **direzione del ν incidente**, consentendo lo studio delle distribuzioni angolari

scattering elastico
su elettroni



- Borexino al Gran Sasso ha studiato tutti i neutrini prodotti dal Sole nel ciclo protone-protone, verificando per la prima volta in dettaglio la teoria fondamentale sul Sole sviluppata negli anni '50

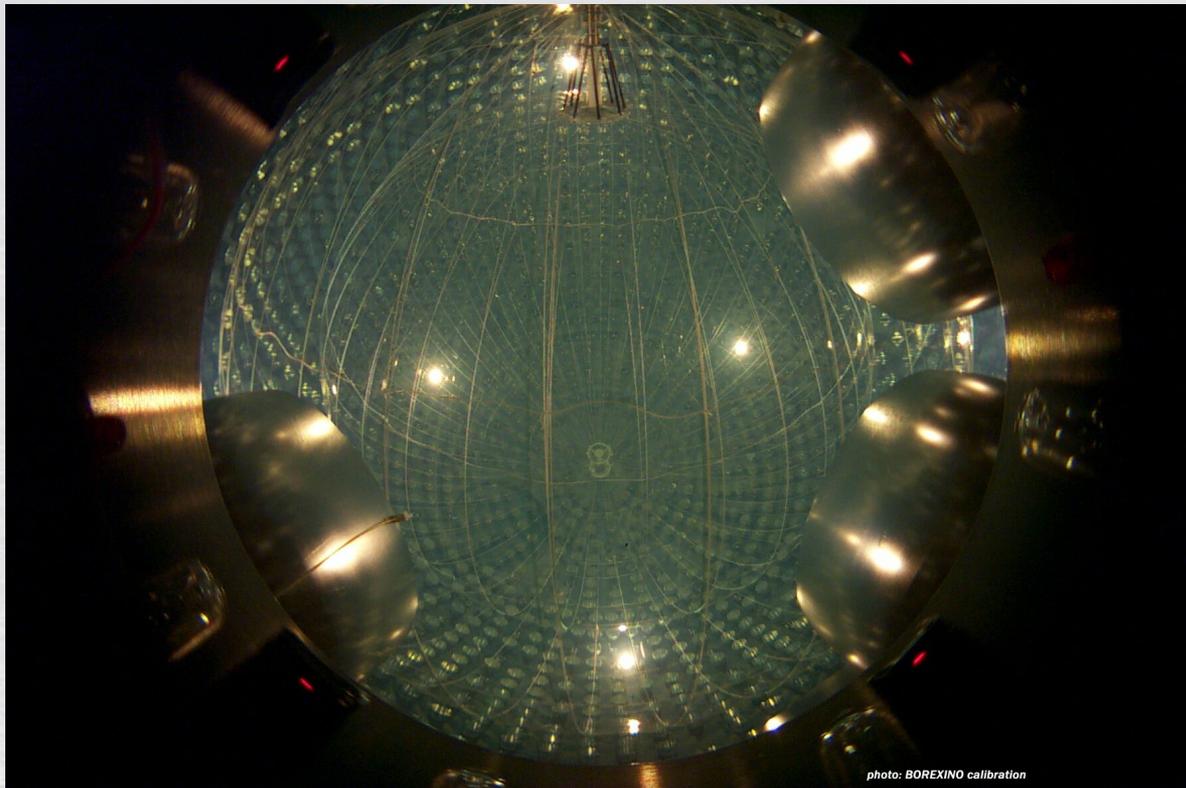
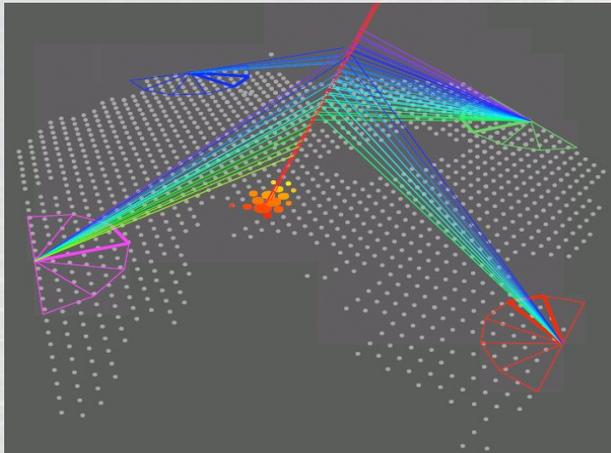
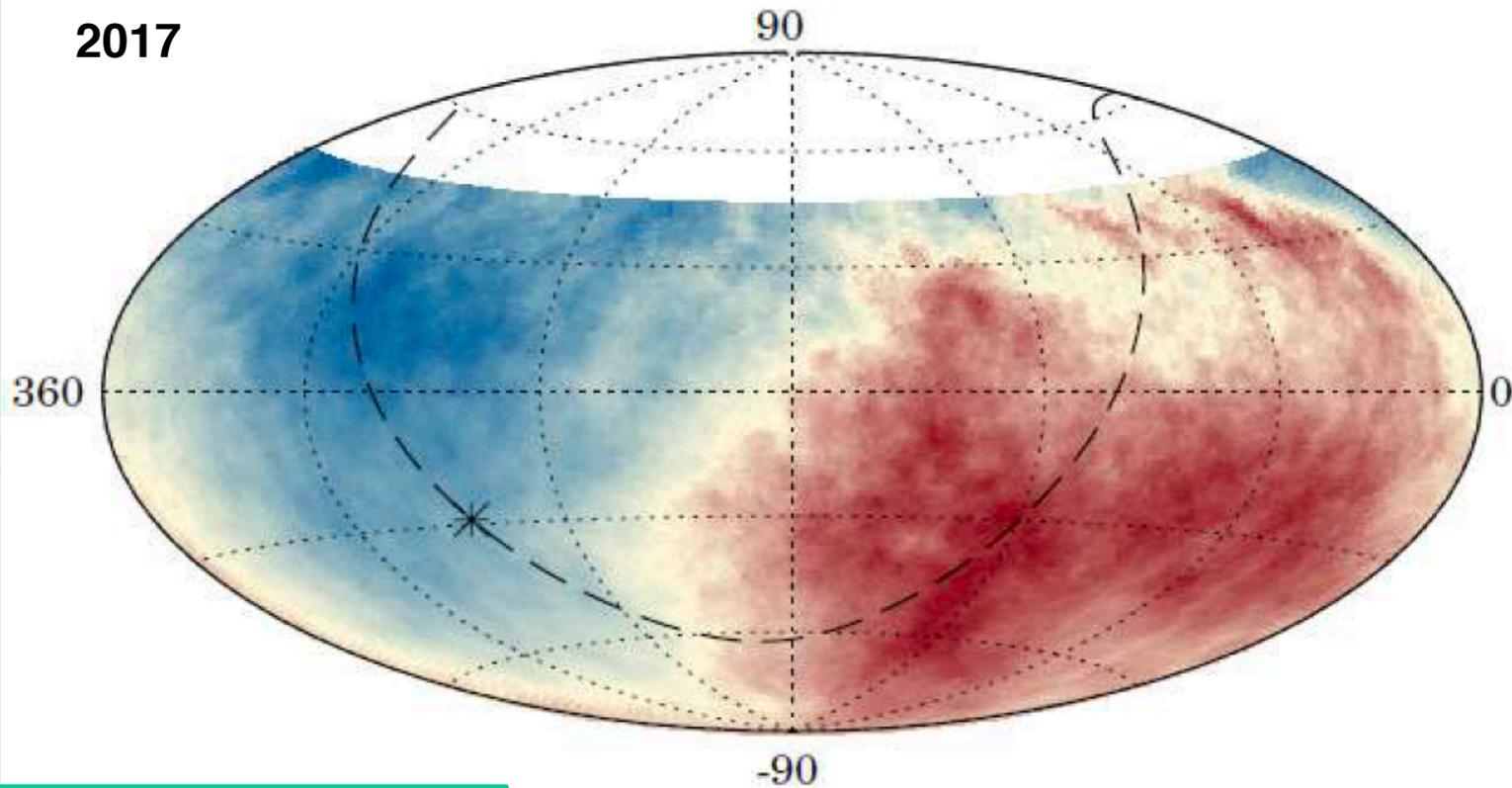


photo: BOREXINO calibration

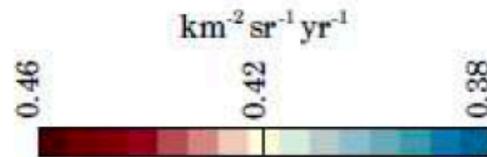
- Circa 3000 rivelatori distribuiti nella pampa argentina osservano raggi cosmici di altissima energia
- Prima evidenza che questi provengono da direzioni extra-galattiche (2017)



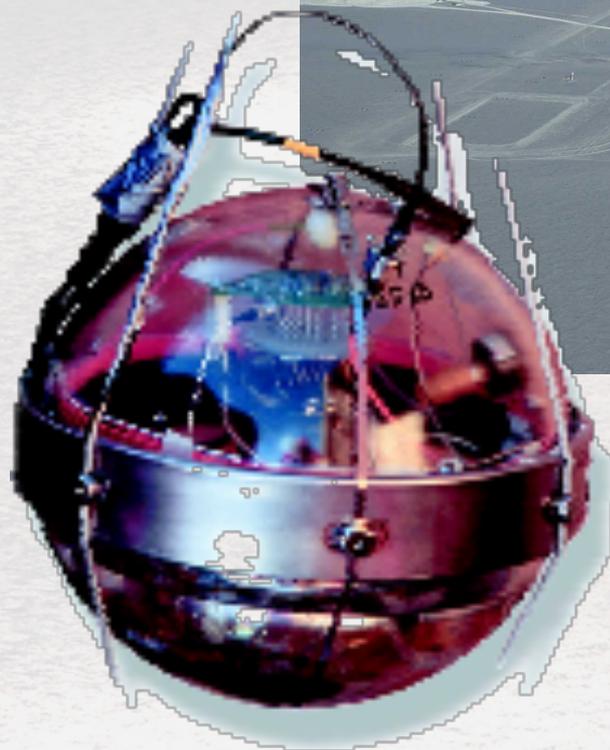
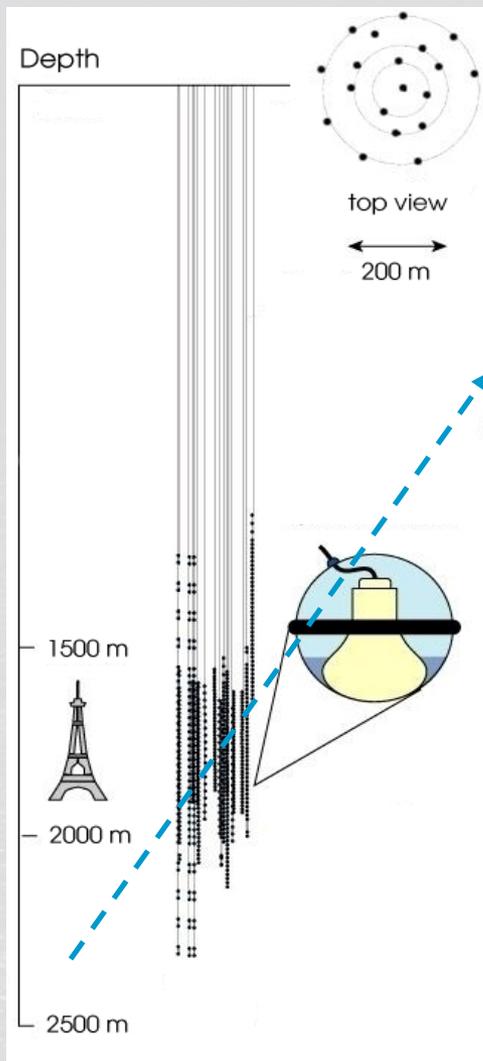
2017

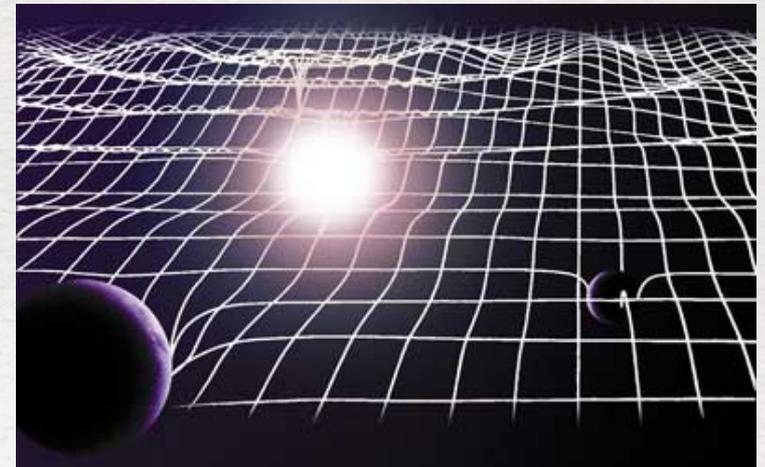
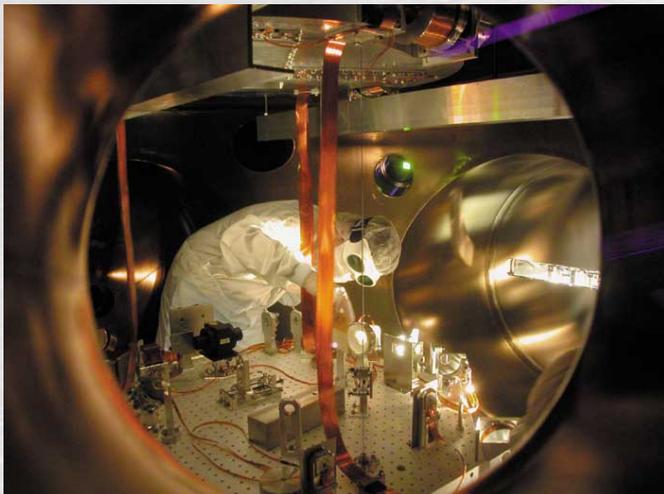
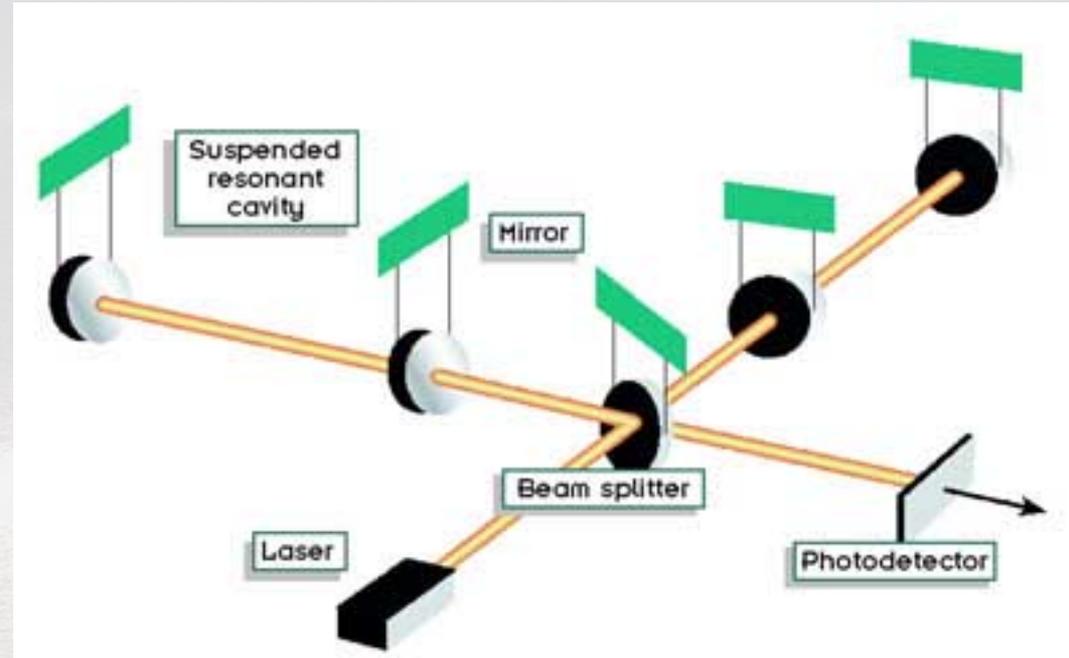


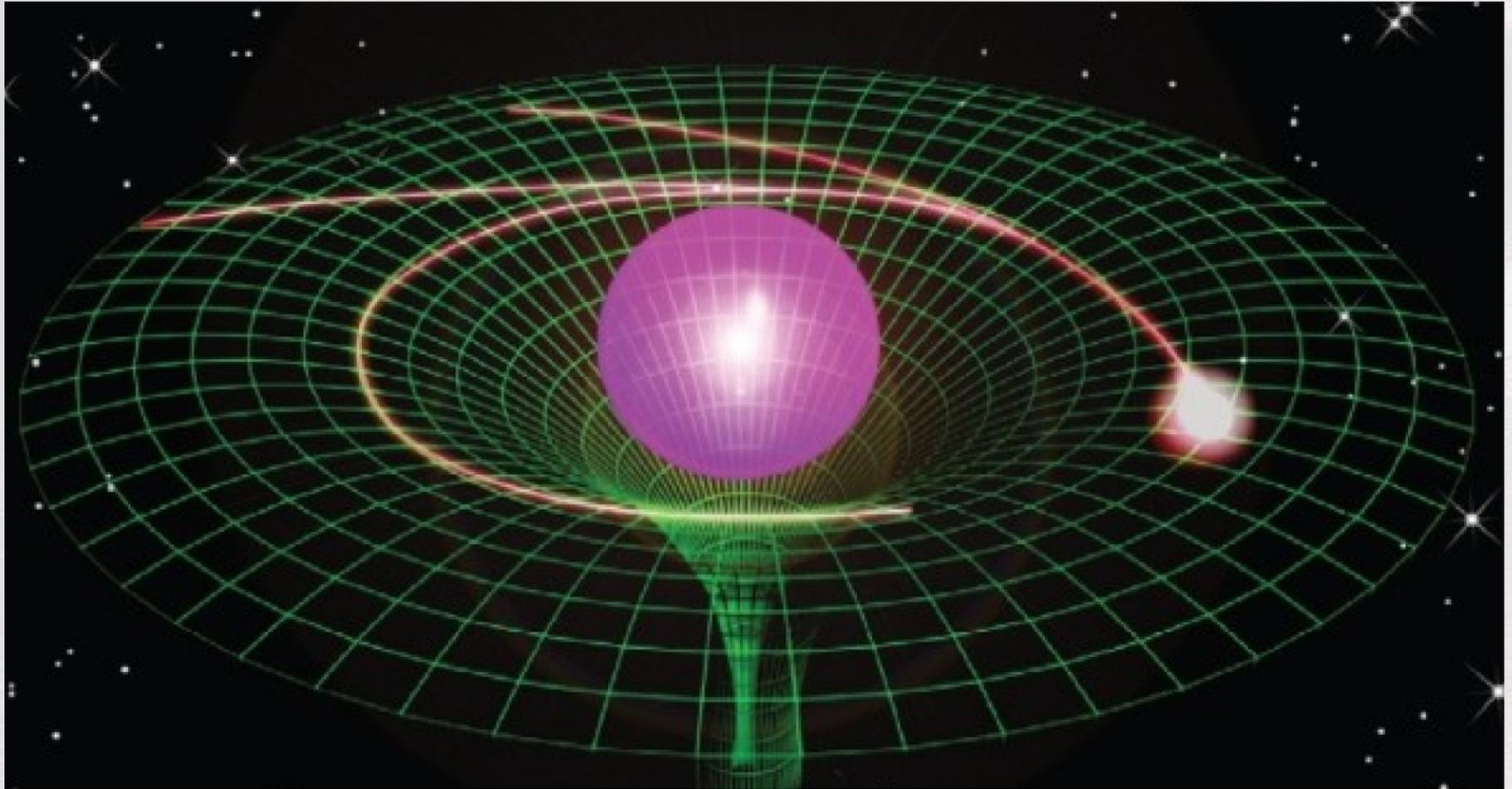
La prova che a altissima energia l'origine è extra-galattica



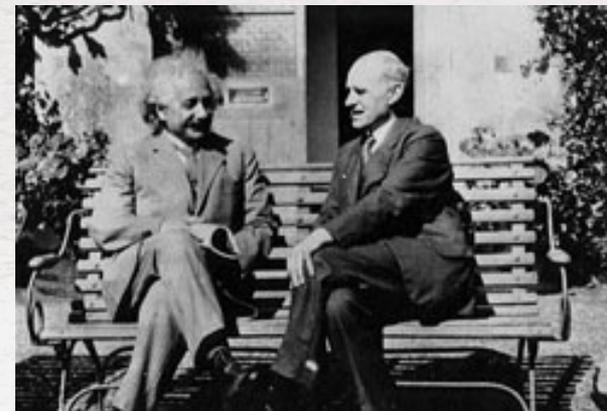
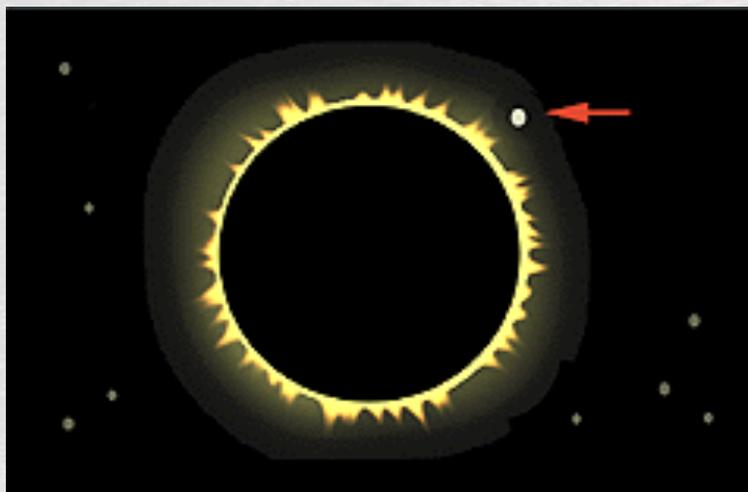
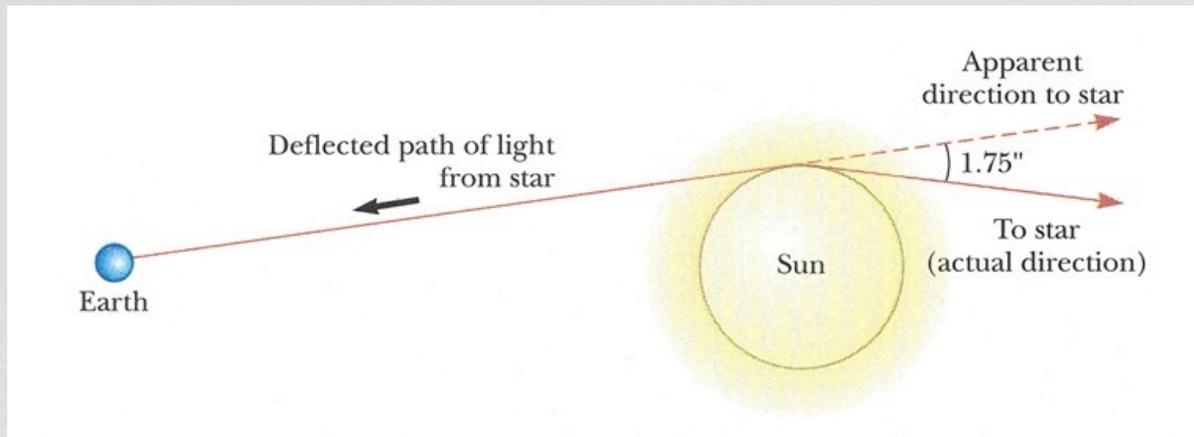
- Ricerca di neutrini astrofisici di alta energia in acqua e ghiaccio
 - I neutrini possono portare informazioni anche da grandissima distanza senza attenuazione
 - Anche la materia più densa è trasparente ai neutrini
 - Sono un messaggero unico per studiare fenomeni estremi (AGN, supernovae, ...)
- Perché acqua e/o ghiaccio ?
 - Perché servono enormi masse ($>10^9$ t)
 - L'acqua e il ghiaccio sono trasparenti alla luce Cerenkov.
 - Sono dei magnifici rivelatori naturali, come lo è l'atmosfera

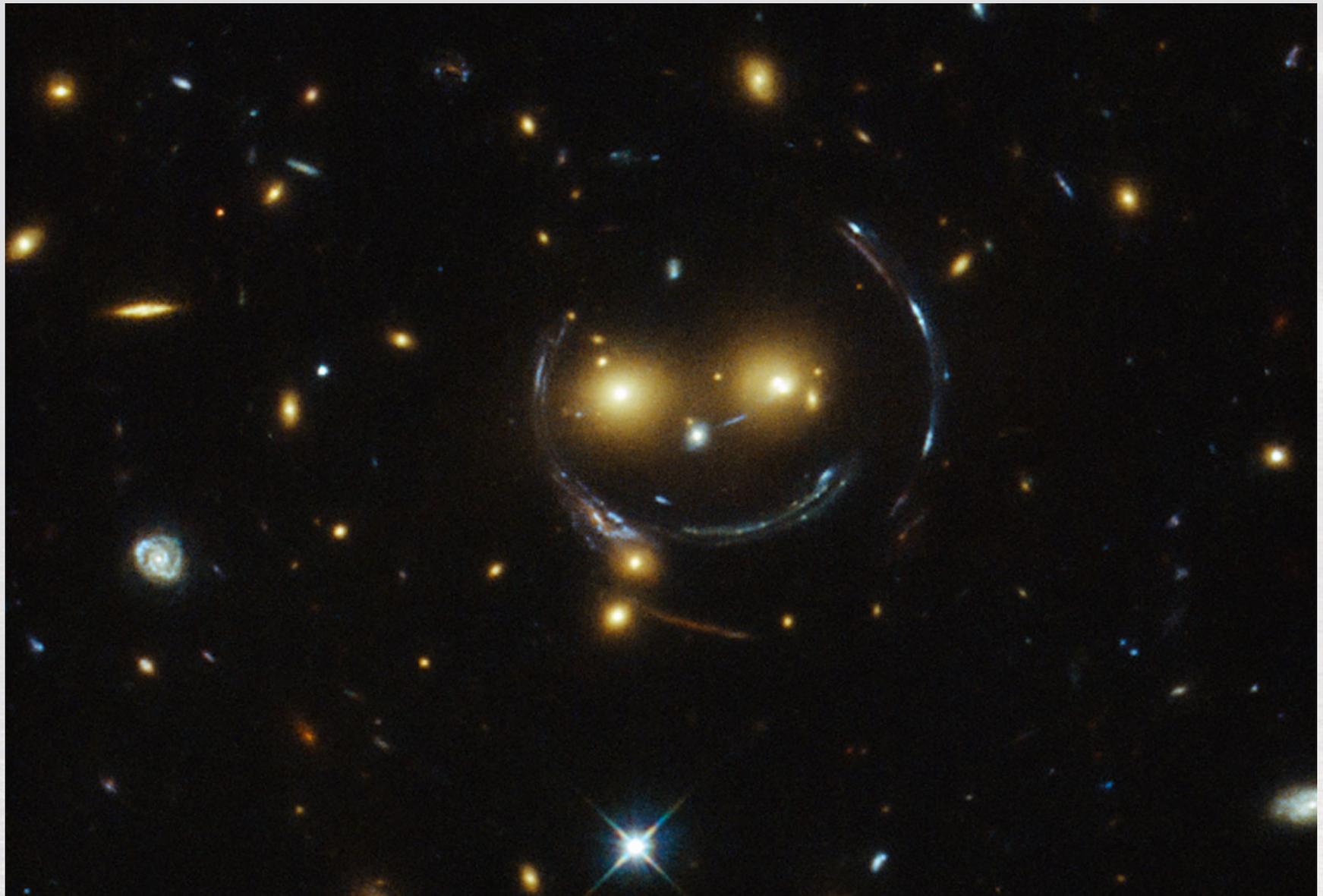




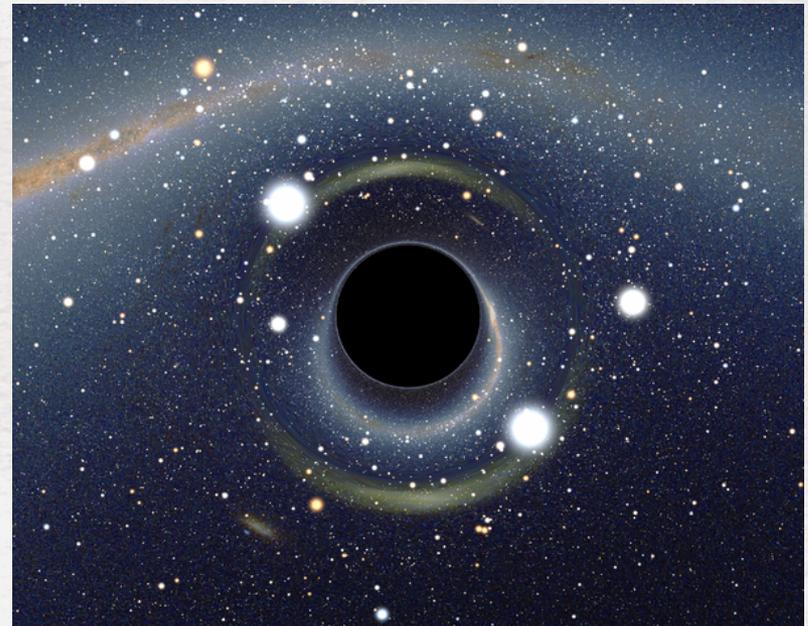
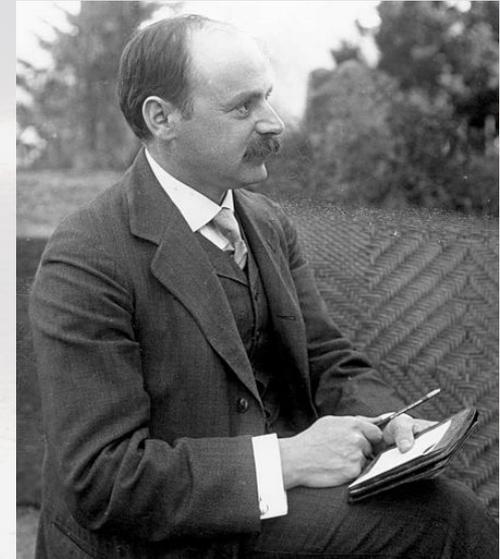


- Lo spazio curvo deflette anche la luce!
 - Se andiamo “dritti” in uno spazio curvo disegniamo una curva!





- La teoria di Einstein prevede che la luce in un campo gravitazionale si comporti come ogni altra particella
 - Può essere deflessa
 - Può anche essere catturata in un'orbita chiusa, come un pianeta
- Nel 1916, Karl Schwarzschild si accorge che se un corpo è abbastanza massivo e denso, la sua superficie separa l'Universo in due parti
 - Si può entrare
 - Nulla può uscire, neppure la luce
- E' il buco nero



- Il raggio del buco nero è dato dalla semplice formula:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

- Per la Terra, $M_T = 5.9 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ $R_s = 8 \text{ mm}$
- Per una massa come il Sole, $R_s = 3 \text{ km}$ circa (il Sole ha raggio 690000 km)
- Quindi per corpi “normali”, il problema non si pone
 - Il raggio di Schwarzschild è dentro il corpo, non conta
- Per avere un buco nero, devo compattare la massa di una stella al di sotto di pochi km
 - E' possibile ? Succede in Natura ?

- Una sorgente di raggi X intensa in un sistema binario con una stella di grande massa
 - La stella ruota attorno ad un punto che dista 0.2 A.U. con periodo di 5.5 giorni
 - La massa del candidato buco nero è di circa 15 masse solari
 - E' una delle sorgenti di raggi X più intense

Raggi X - Chandra

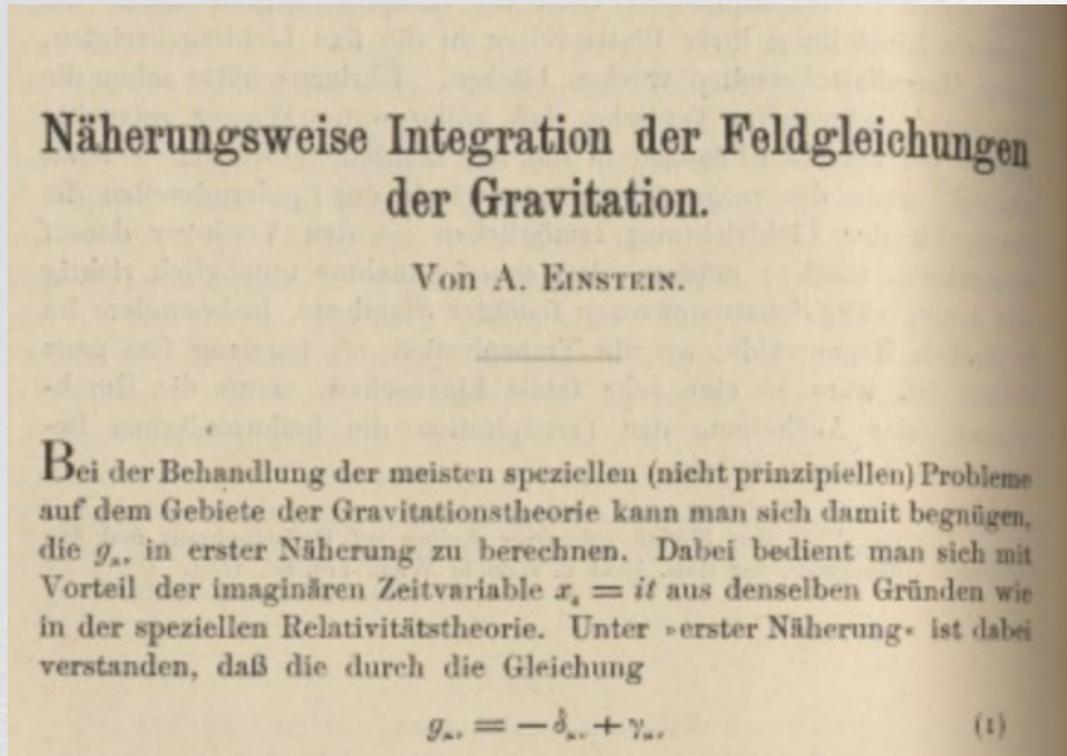
Ottico - Hubble

Illustrazione

OPTICAL

ILLUSTRATION

1916



- Soluzione approssimata delle equazioni di campo della gravità

2016

PRL 116, 061102 (2016)

Selected for a Viewpoint in *Physics*
 PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
 12 FEBRUARY 2016



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

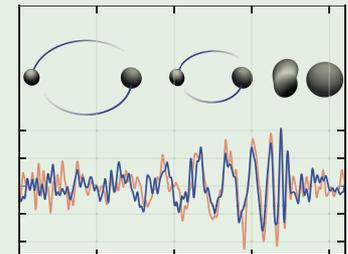
On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410_{-180}^{+160} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36_{-4}^{+5} M_{\odot}$ and $29_{-4}^{+4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62_{-4}^{+4} M_{\odot}$, with $3.0_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

PHYSICAL
 REVIEW
 LETTERS™

Member Subscription Copy
 Library or Other Institutional Use Prohibited (Last 2017)

Articles published week ending 12 FEBRUARY 2016



Published by
 American Physical Society™

APS
 physics

Volume 116, Number 6

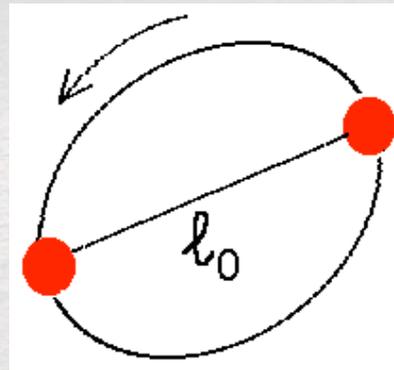
- Osservazione di onde gravitazionali dalla fusione di due buchi neri

- Nel 1916 Einstein si accorge che se lo spazio si deforma in presenza di una massa “statica”, automaticamente vibra quando una massa vibra
 - E' simile ad un'antenna: due cariche accelerate emettono onde e.m., due masse accelerate emettono onde gravitazionali
 - L'emissione è di solito piccolissima
 - Solo in presenza di masse enormi accelerate a velocità prossime a quelle della luce l'effetto è “grande” e misurabile con strumenti adeguati

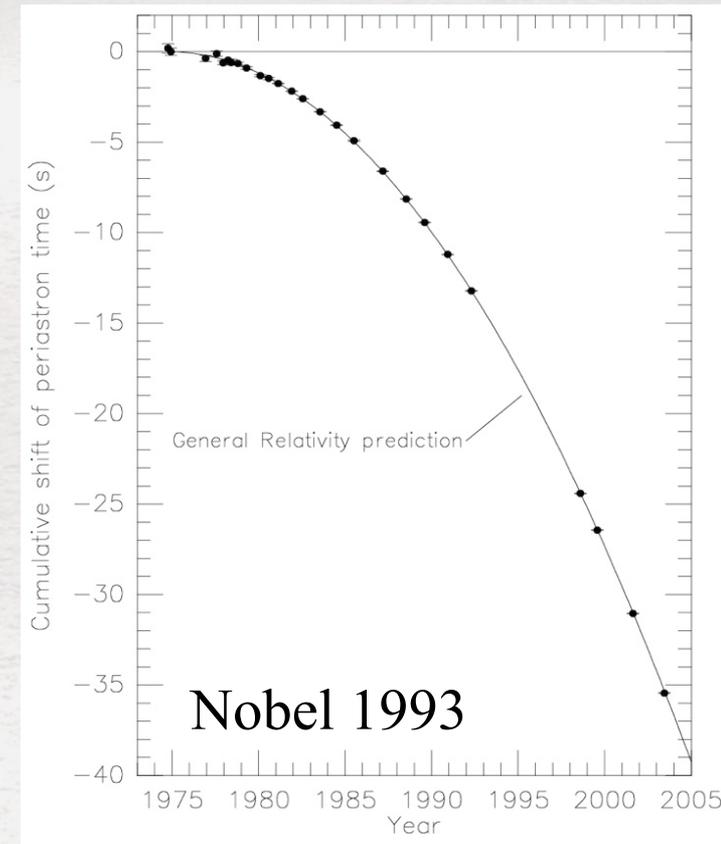
- Nel 1975 R.A. Hulse e J.H. Taylor hanno pubblicato i risultati dell'osservazione di PSR 1913+16, una pulsar binaria (1 pulsar e 1 stella di neutroni in orbita stretta)

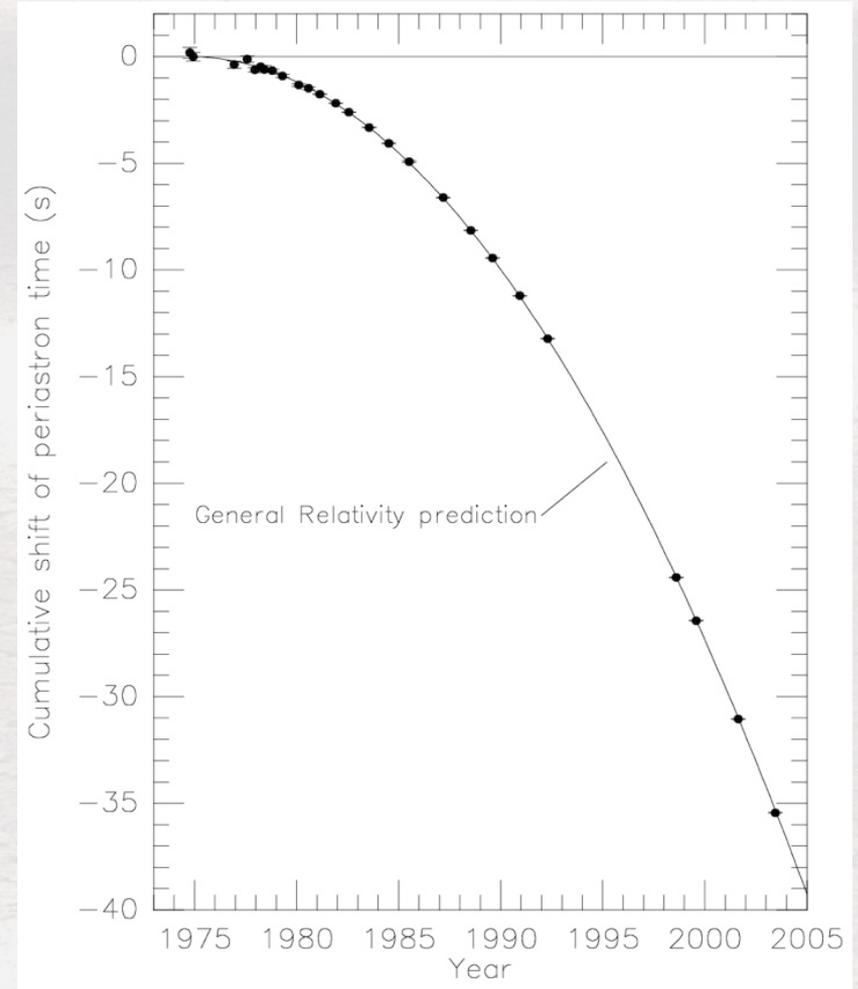
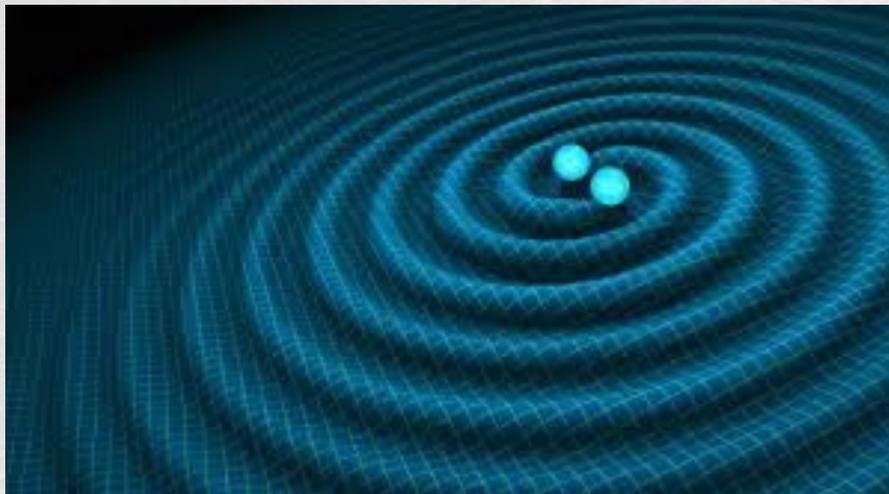
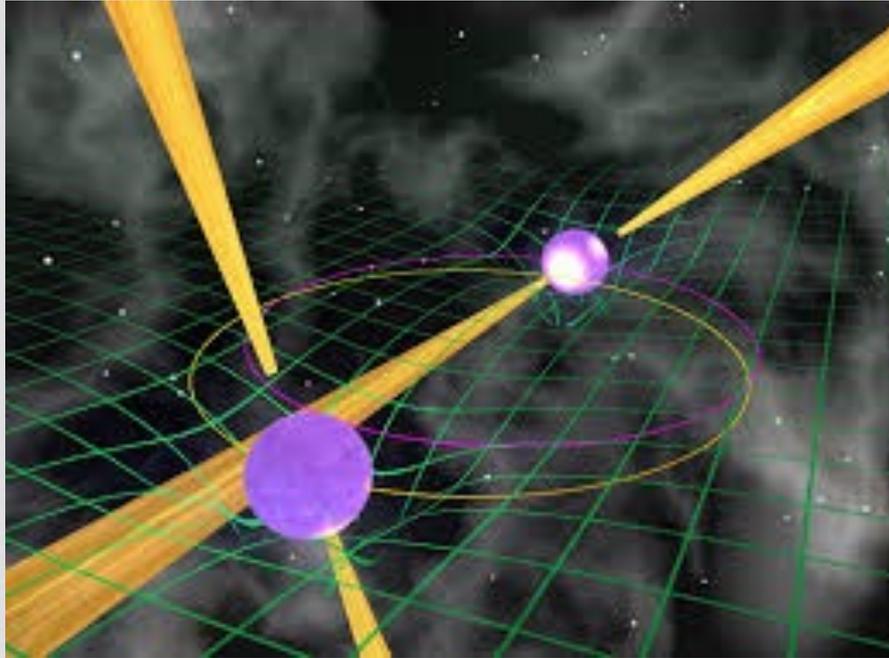


- $M_1 = M_2 = 1.4 M_s$
- $l_0 = 2 R_s$
- distanza: 5000 pc
- Periodo $P = 8$ h



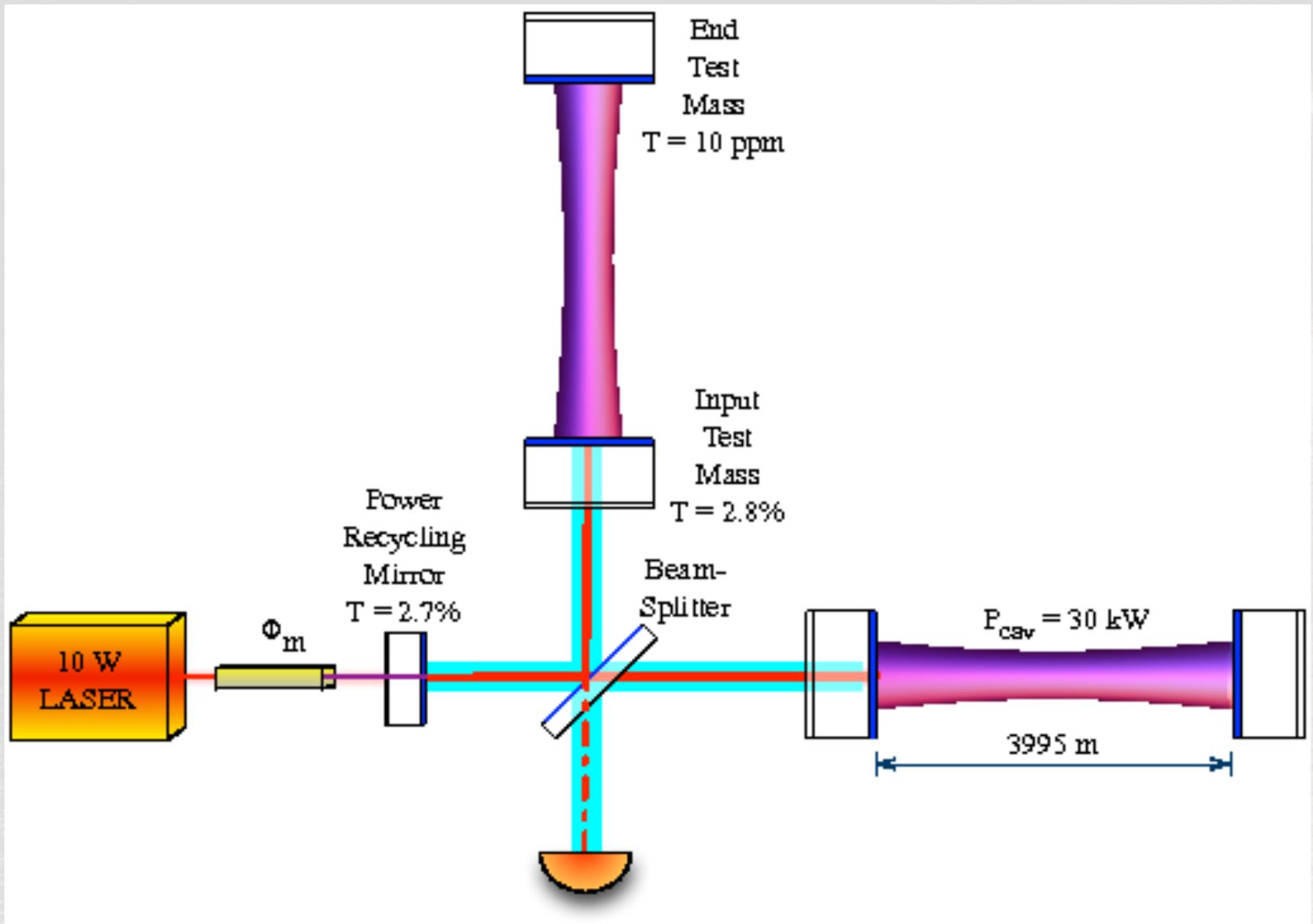
- Accelerazione: 3 g !
- Il periodo orbitale cambia di 0.0765 ms/y e il semiasse maggiore dell'orbita diminuisce di 3.5 m/y

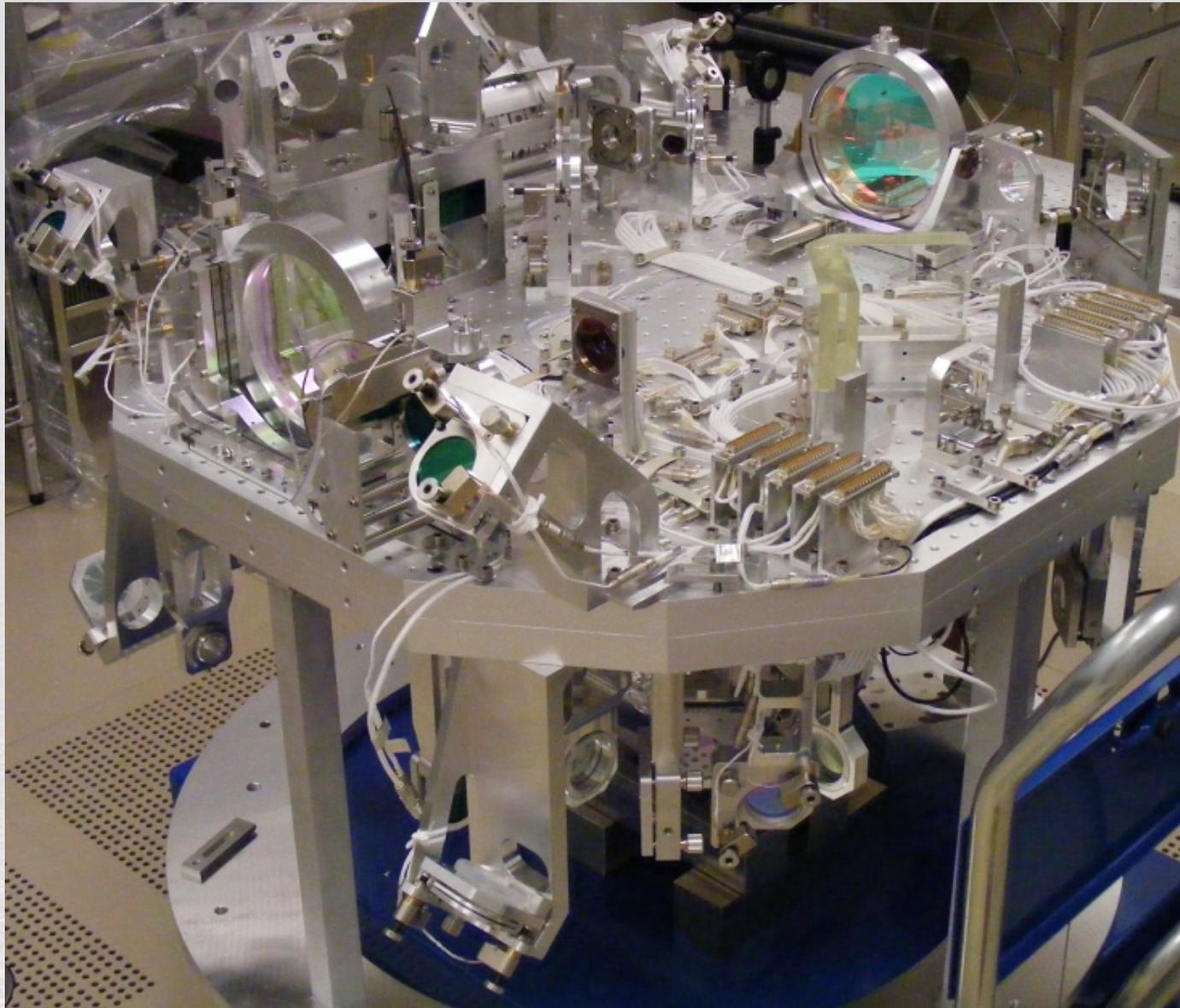


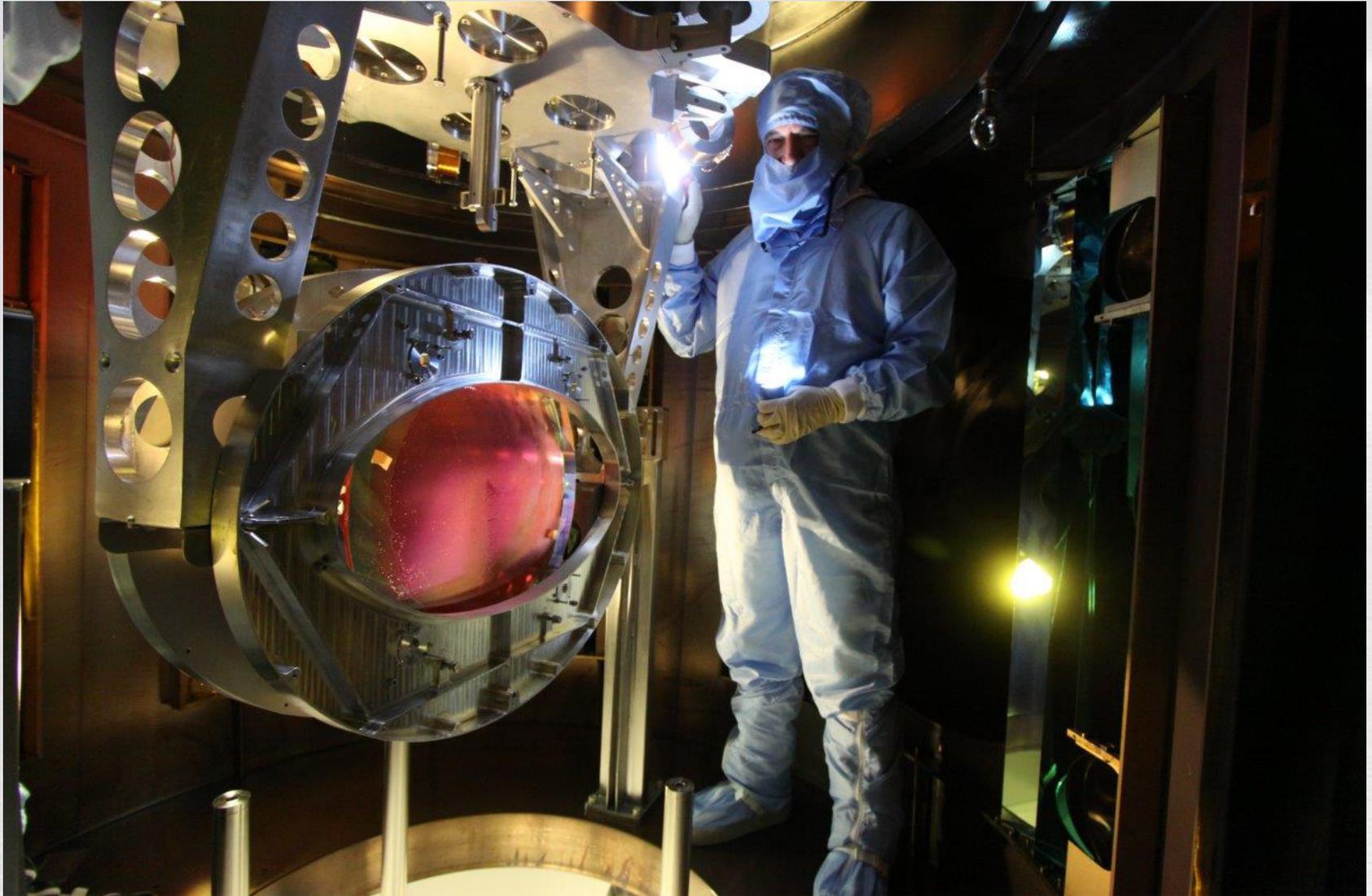


- Le onde gravitazionali non sono onde **NELLO** spazio, sono onde **DELLO** spazio
 - Tutto quello che esiste è “scosso” dal passaggio dell’onda
- Mi posso accorgere del passaggio dell’onda se misuro con grande (in realtà, grandissima, straordinaria...) precisione la distanza fra due oggetti
 - Quando passa l’onda per qualche istante questa distanza cambia con movimento periodico uguale alla frequenza dell’onda





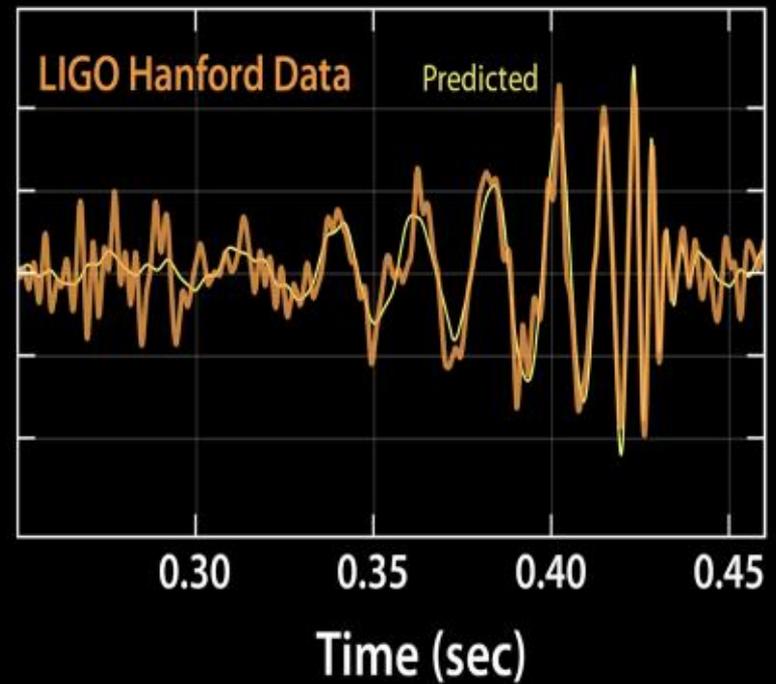
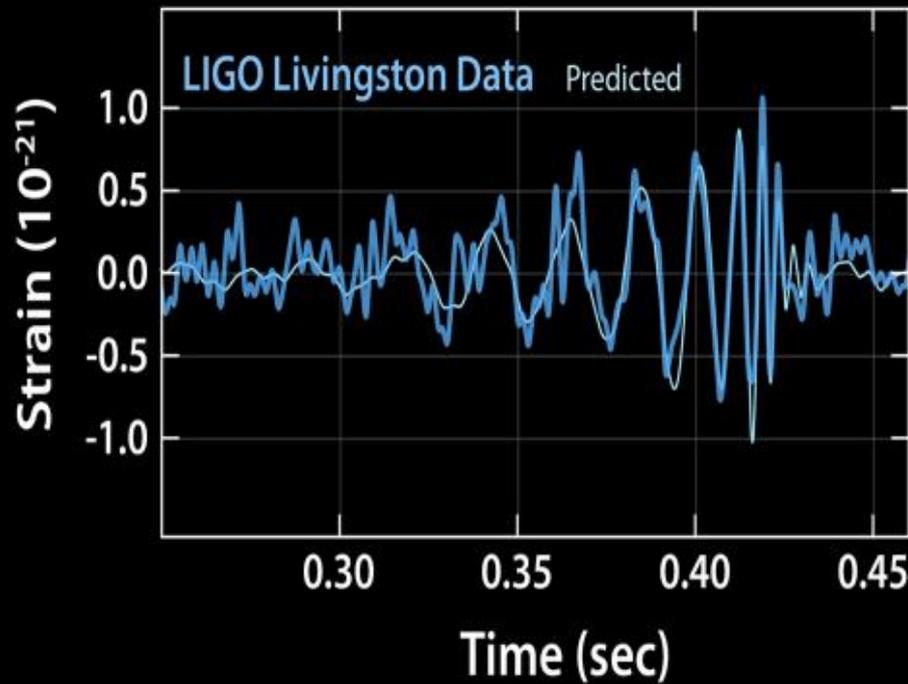


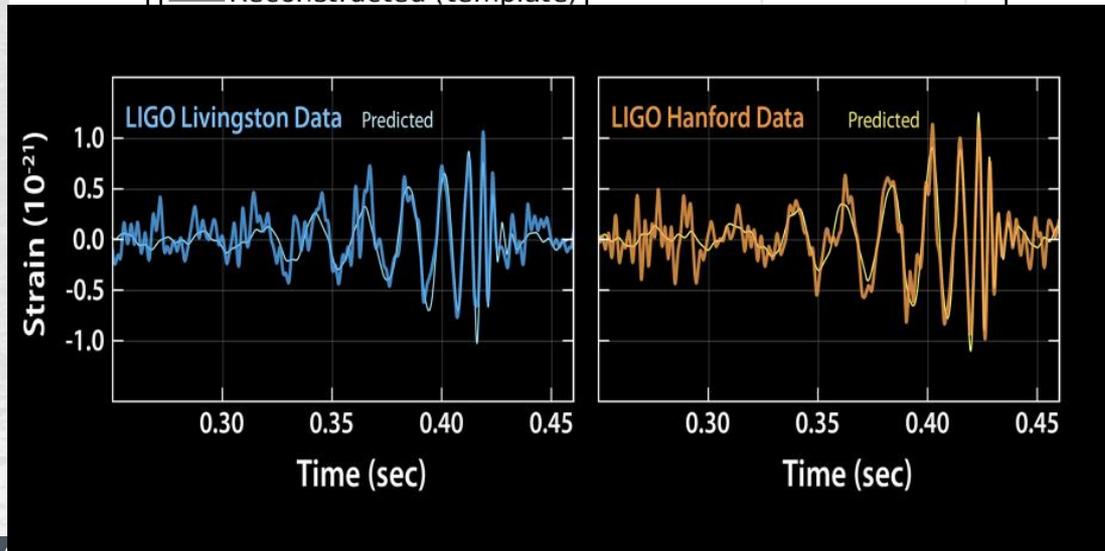
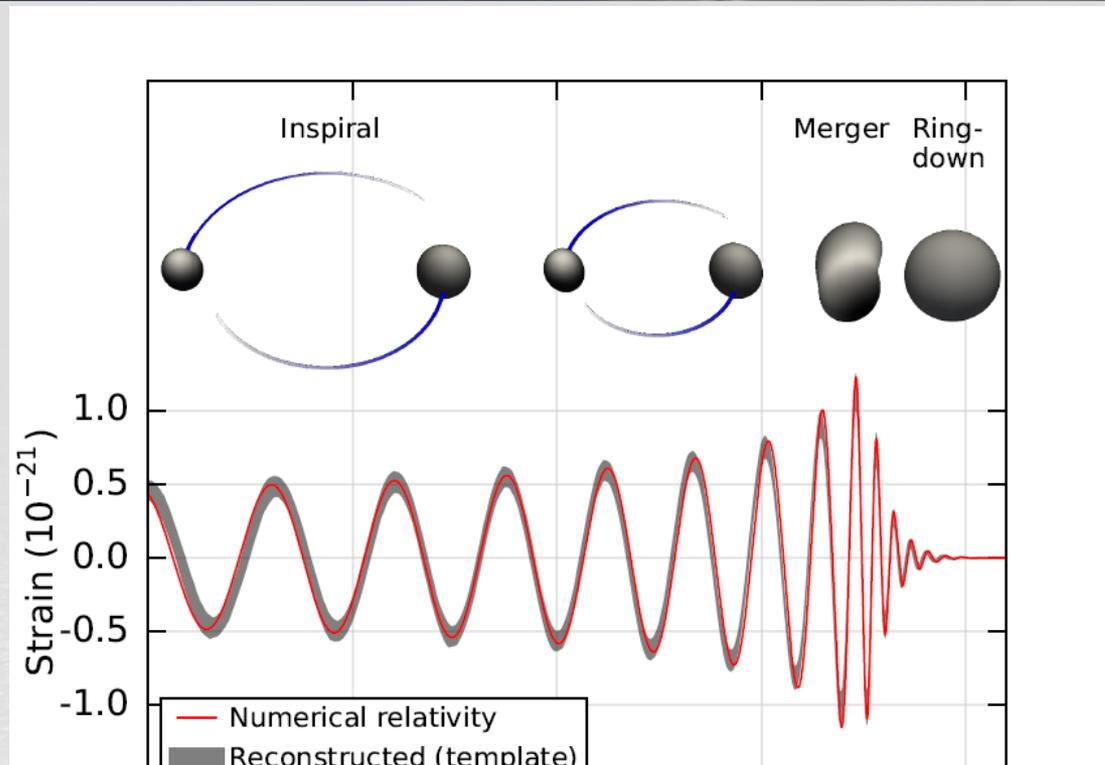




SUPERATTENUATORS









CONFIDENTIAL

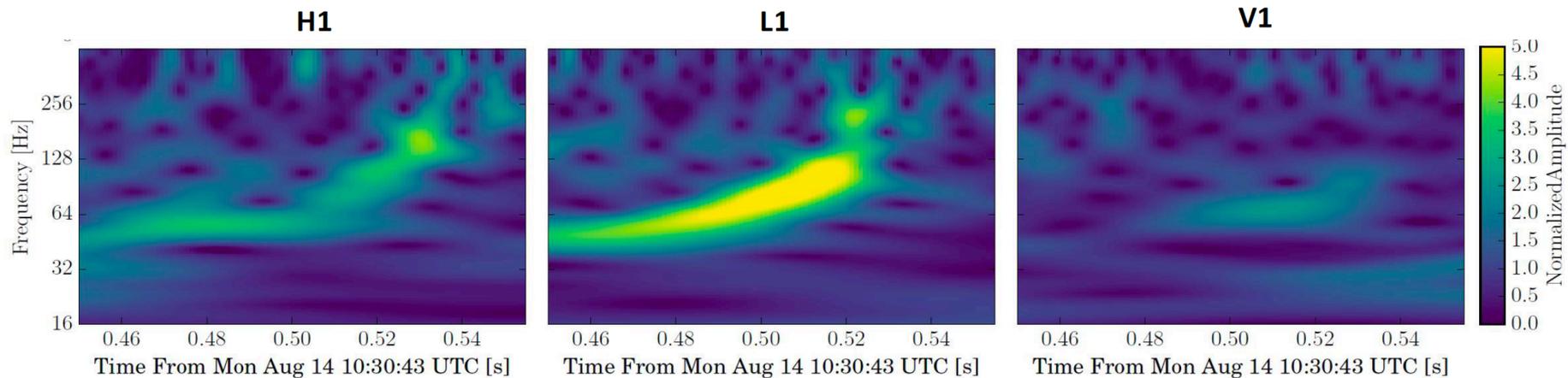
GW170814

First clear detection with VIRGO

On August 14, 2017, GWs from the coalescence of two black holes at a luminosity distance of 540 Mpc, with masses of 30.5 Msun and 25.2 Msun were observed in all three detectors

This event is consistent with the population of BBHs, physical parameters and merger rate measured with previous BBH events

This event is the first triple-coincident detection of GWs in the Advanced LIGO-Virgo network



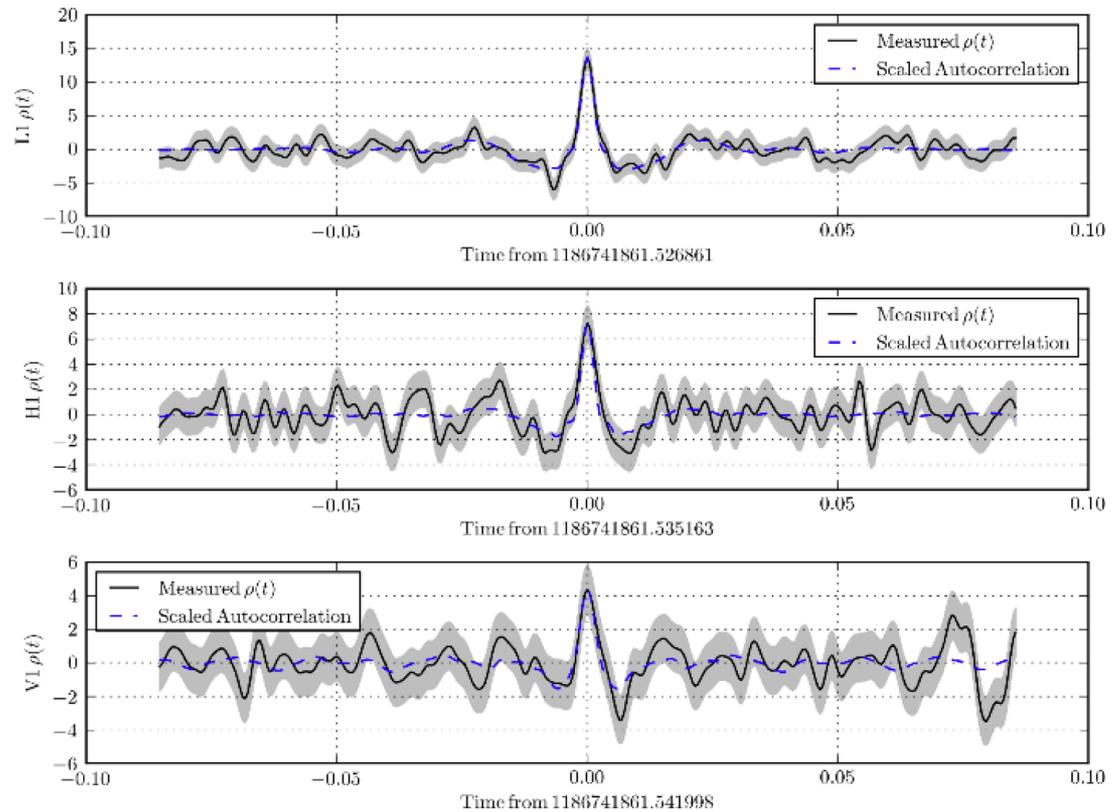
First clear detection with VIRGO

A model with an observed BBH signal in all three detectors is preferred by a Bayesian 363 odds of 1657 : 1 wrt a model assuming pure Gaussian noise in Virgo and a BBH signal only in the LIGO detectors

The search for un-modelled GW transients, demonstrates that Advanced Virgo raises the detection significance from approximately 1 in 300 years with just the two LIGO detectors, to less than 1 in 4900 years with all three detectors

False Alarm Rate ~ 1/27000 yrs
 Network SNR 18.3
 V1 SNR 4.2 (14 in L1 - 7 in H1)

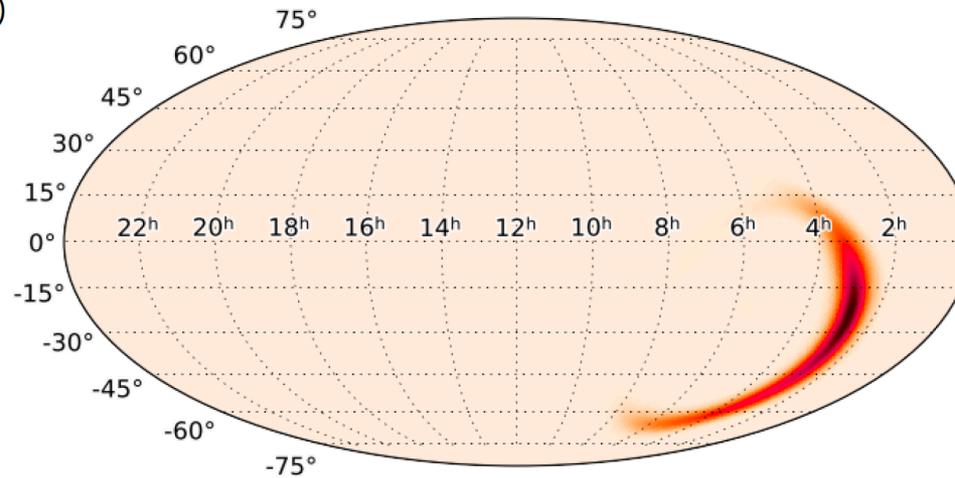
CSN2, Catania, 19/09/2017



Gianluca Gemme

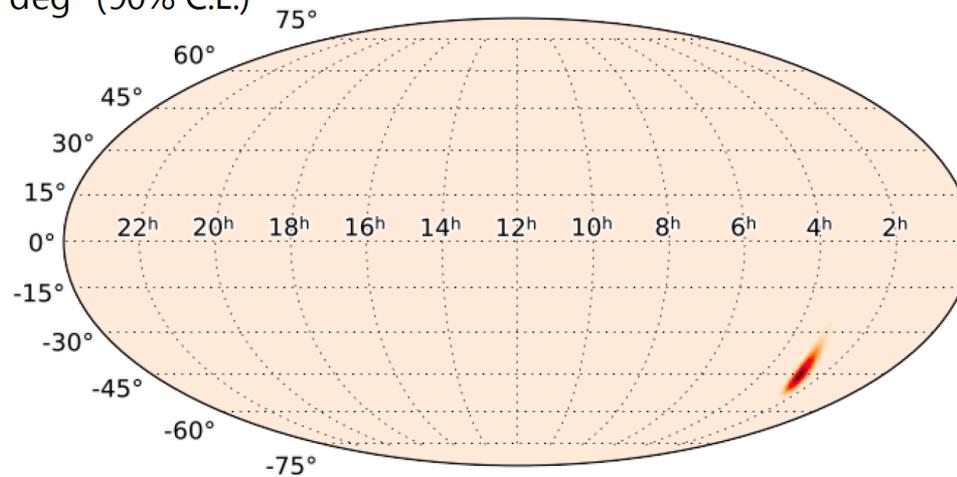
12

L'area del cielo localizzata dai soli interferometri di LIGO è pari a 1160 deg² (90% C.L.)



The era of gravitational astronomy has arrived

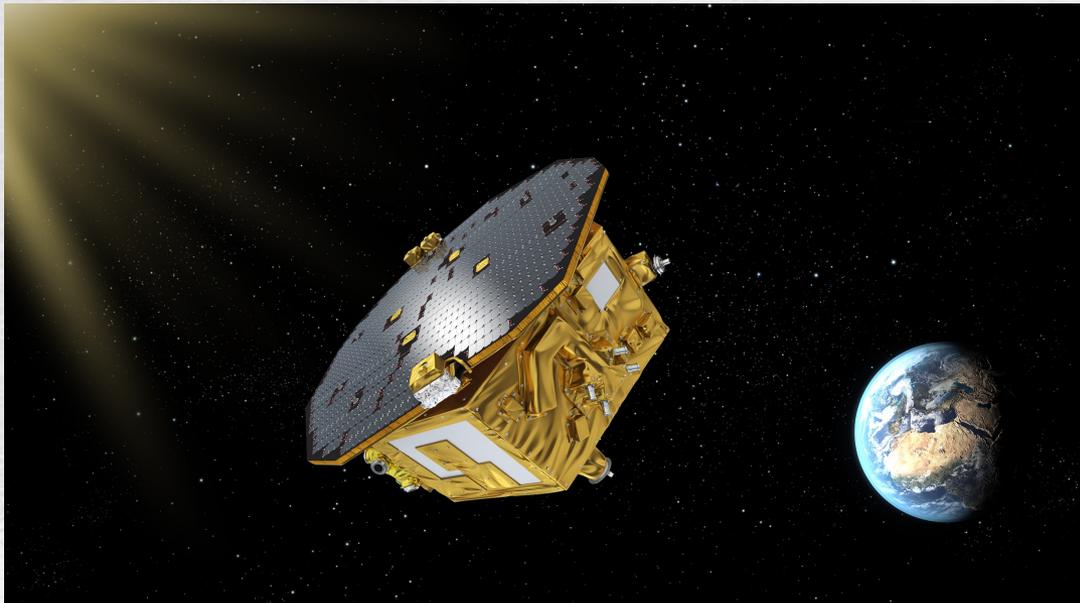
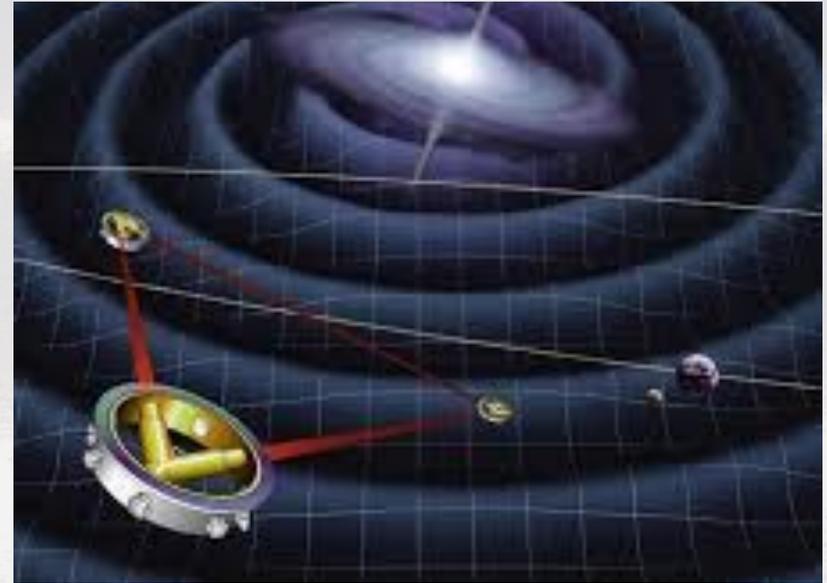
La localizzazione della sorgente, includendo i dati di Virgo, copre una regione di 100 deg^2 (90% C.L.)



The data favor purely tensor polarizations over purely scalar or purely vector with Bayesian odds of 95:1 and 23:1, respectively. Similar tests were inconclusive for previous events because the two LIGO detectors are very approximately coaligned, and record the same combination of polarizations

Thanks to the coincident observation of GW170814 in LIGO and Virgo, we are able to report the first positive detection of the tensor polarization of gravitational radiation. GW170814 is consistent with GR.







Grazie