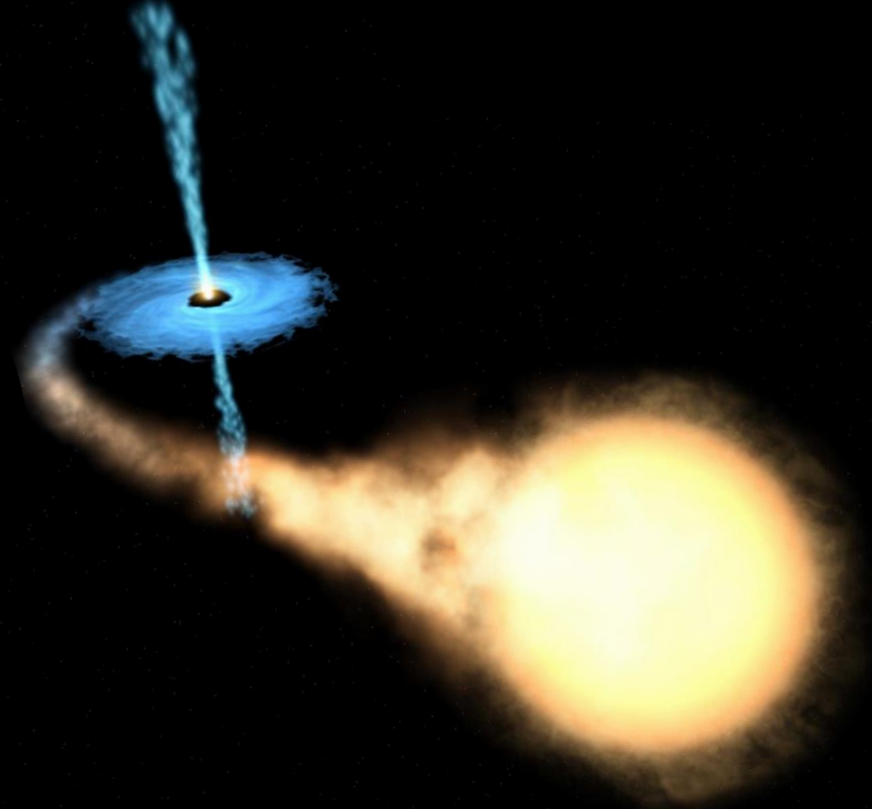
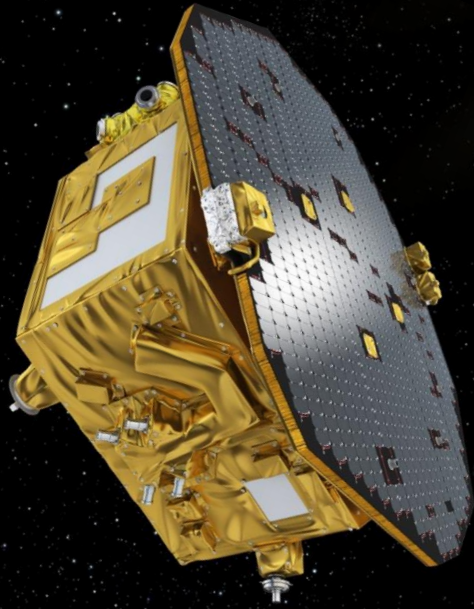
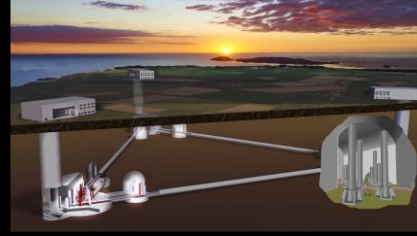


Buchi Neri e Onde Gravitazionali



Roberto Silvotti

INAF - Osservatorio Astrofisico di Torino

Corso di Astronomia e Astrofisica OATo, Lezione #11, 13 Maggio 2021



Schema

1) Cenni all'evoluzione delle stelle

2) Fasi finali dell'evoluzione stellare

nane bianche, stelle di neutroni, buchi neri

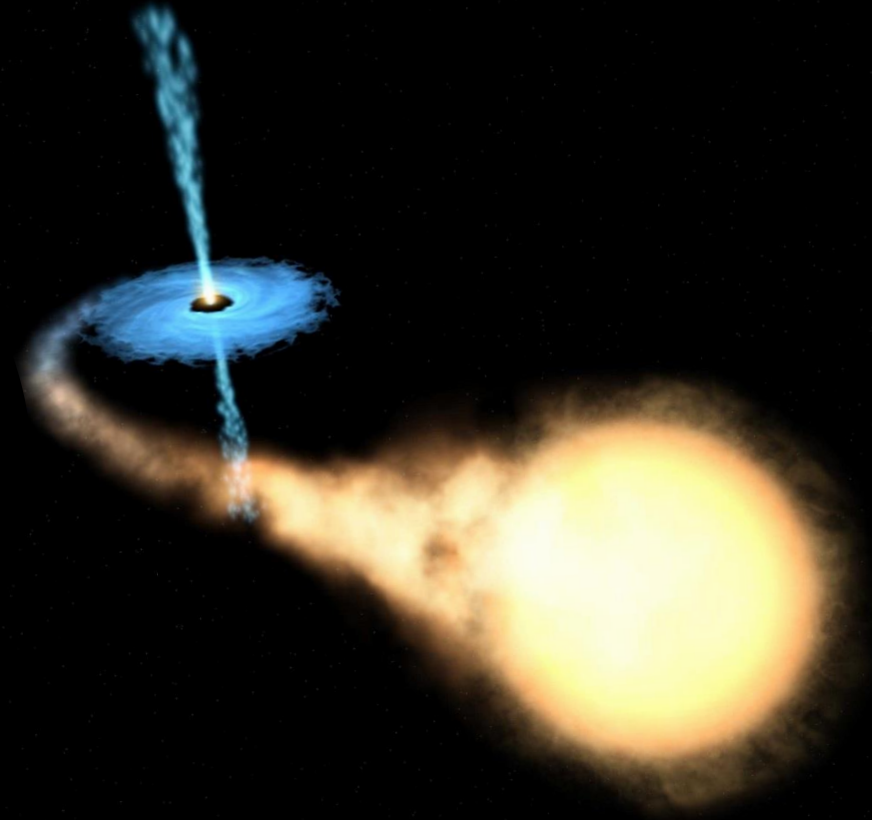
3) Buchi Neri

- Orizzonte degli eventi: quando la velocità di fuga supera la velocità della luce
- buchi neri di massa stellare
- buchi neri supermassicci al centro delle galassie: la prima immagine di un BH al centro di M87
- Sagittarius A: un BN di $4.300.000 M_{\text{sun}}$ al centro della nostra galassia

4) Alcuni «strani» effetti relativistici

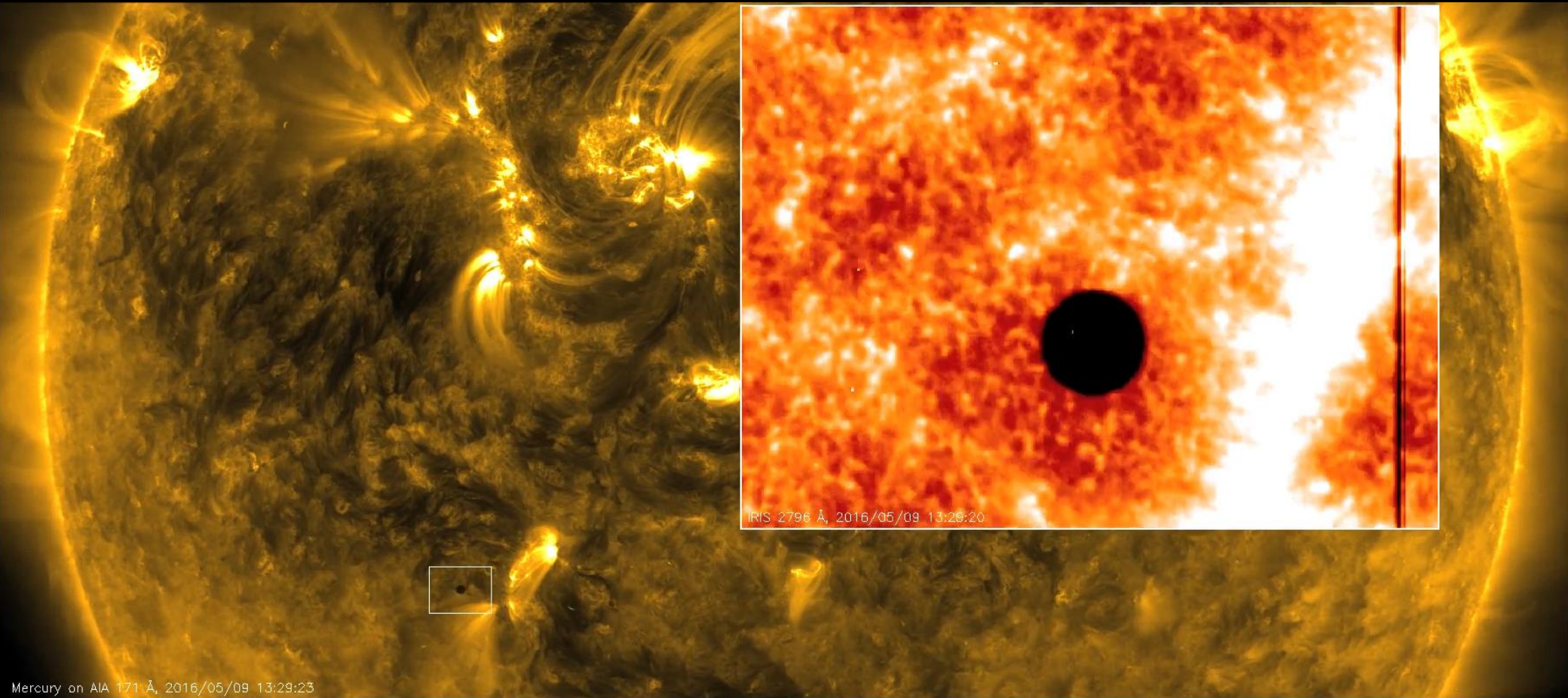
5) Onde gravitazionali

- cos'è un'onda gravitazionale ? Come la si osserva ?
- dalle prime previsioni teoriche (1915) alla prima detezione (2015)
- coalescenza di coppie di BH, BH stellari di grande massa, 1^a fusione di 2 NS (GW170817), 1^o merger di un BH con una NS (GW190814) ?
- da LIGO/Virgo a LISA fino a ET (Einstein Telescope)



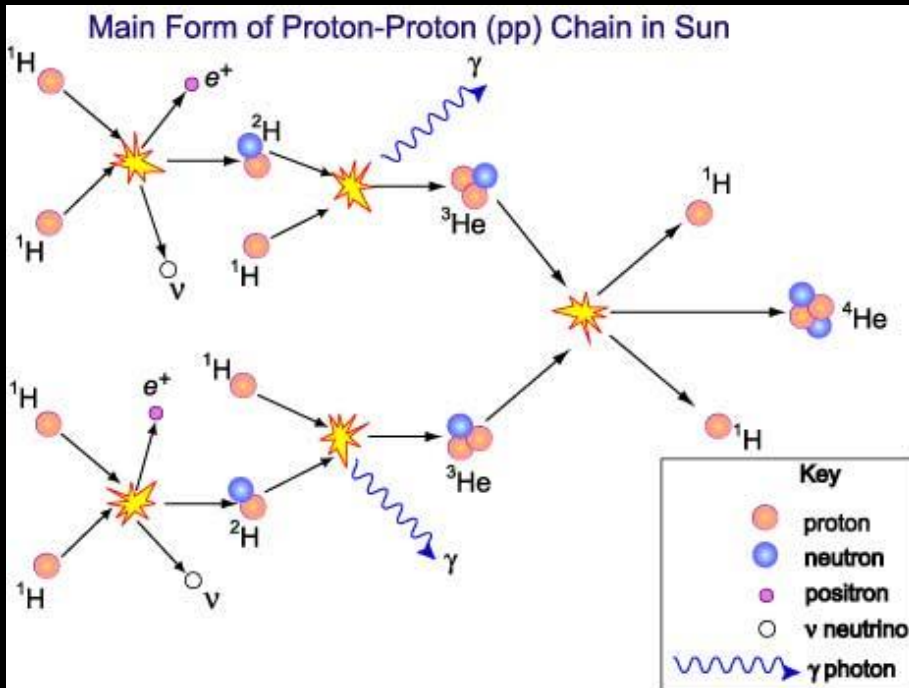
Il Sole: fotosfera, cromosfera e corona

fotografate da SDO/IRIS durante
il transito di Mercurio del 9 Maggio 2016

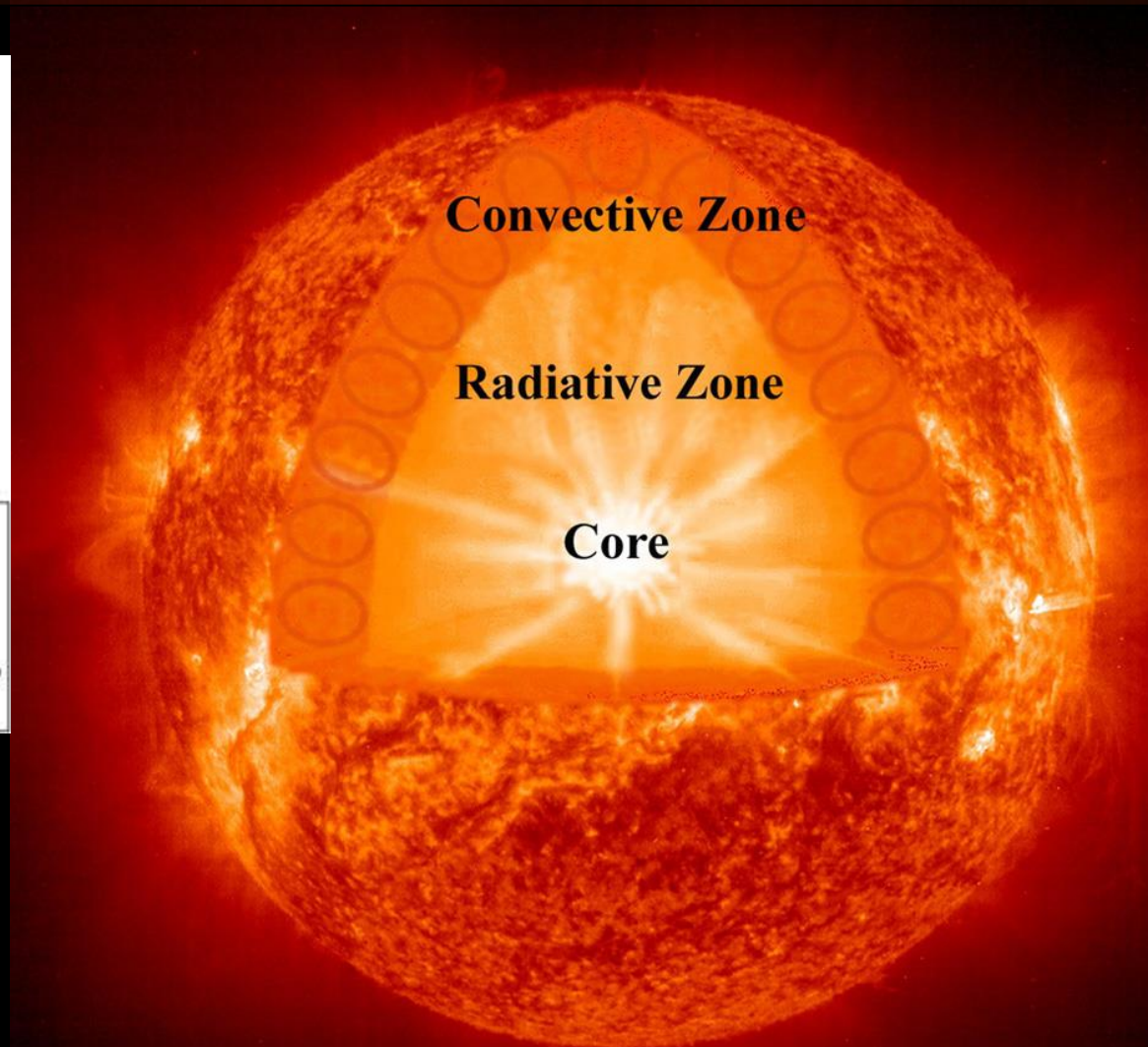


La catena protone-protone nel Sole e nelle stelle di MS

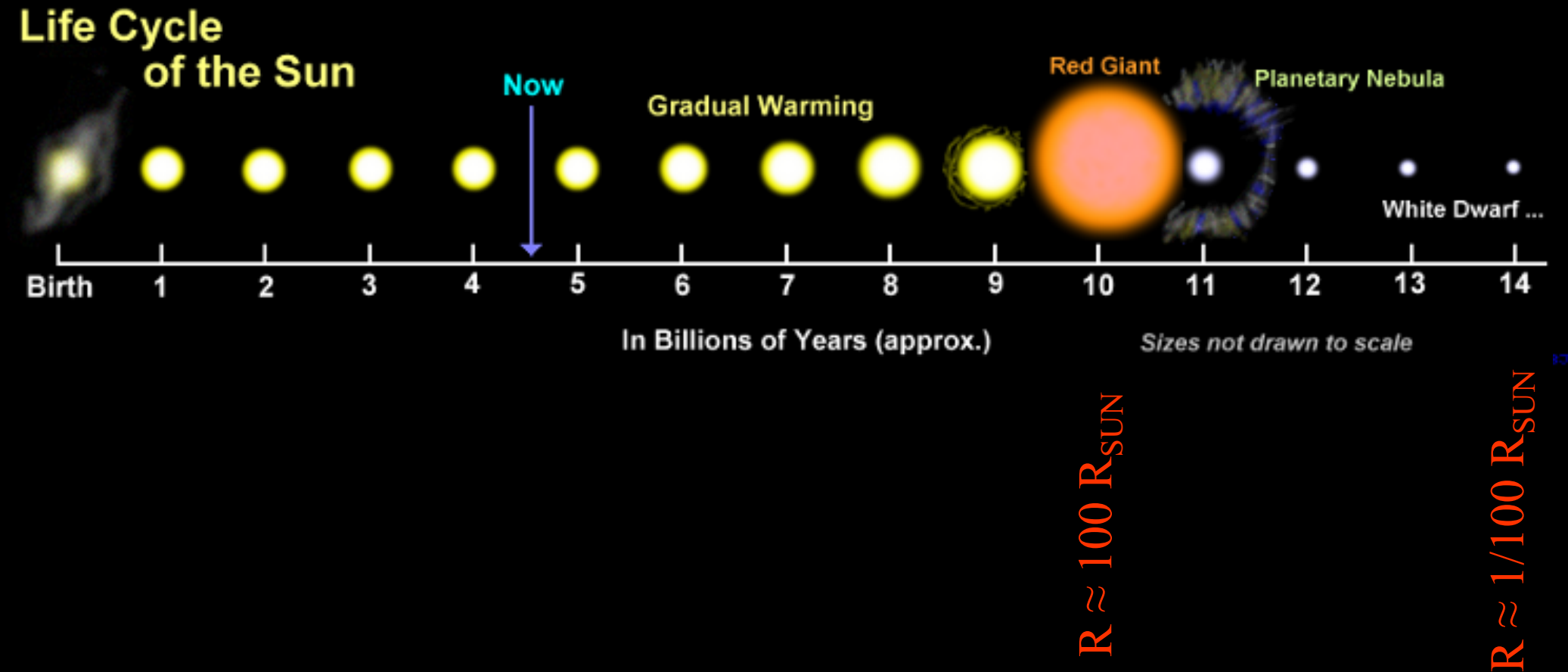
Nel centro del Sole (core), a una temperatura di circa 20 MK con densità di circa 150 g/cm^3 , la catena protone-protone trasforma l'idrogeno in elio e produce energia in fotoni e neutrini (mentre i positroni si combinano velocemente con un elettrone per formare un fotone gamma).

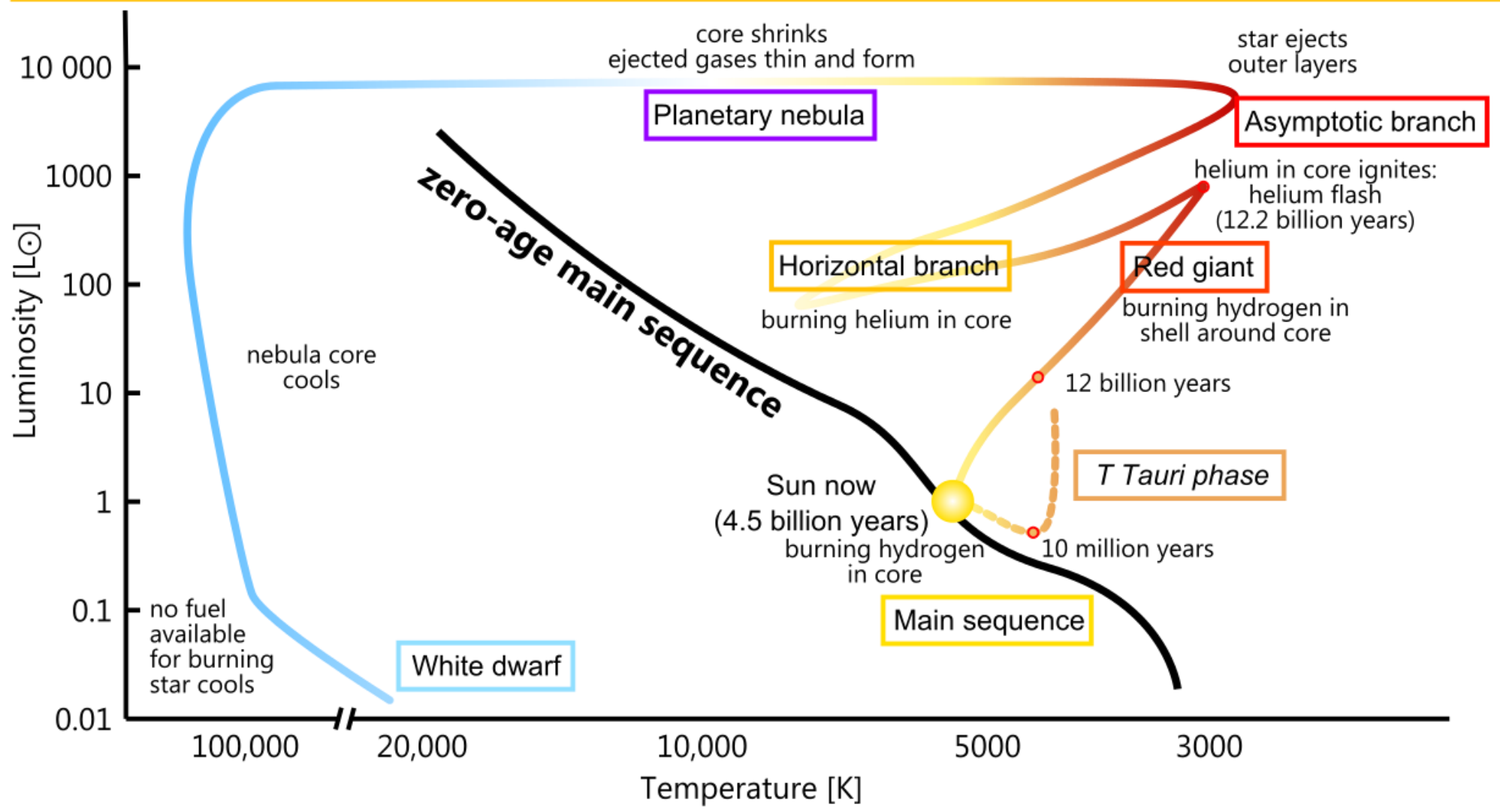
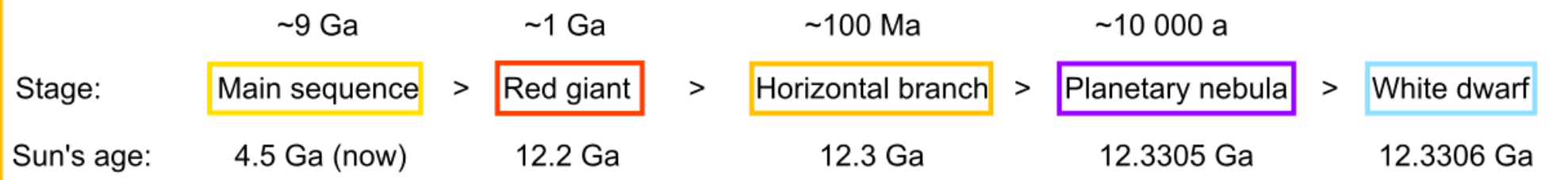


La catena p-p produce ben oltre il 90% dell'energia solare, mentre la frazione rimanente viene prodotta dalla catena CNO, che è preponderante nelle stelle di grande massa (vedi recenti risultati da Borexino)

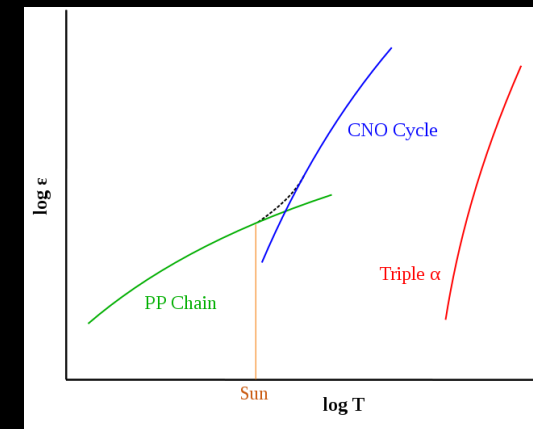
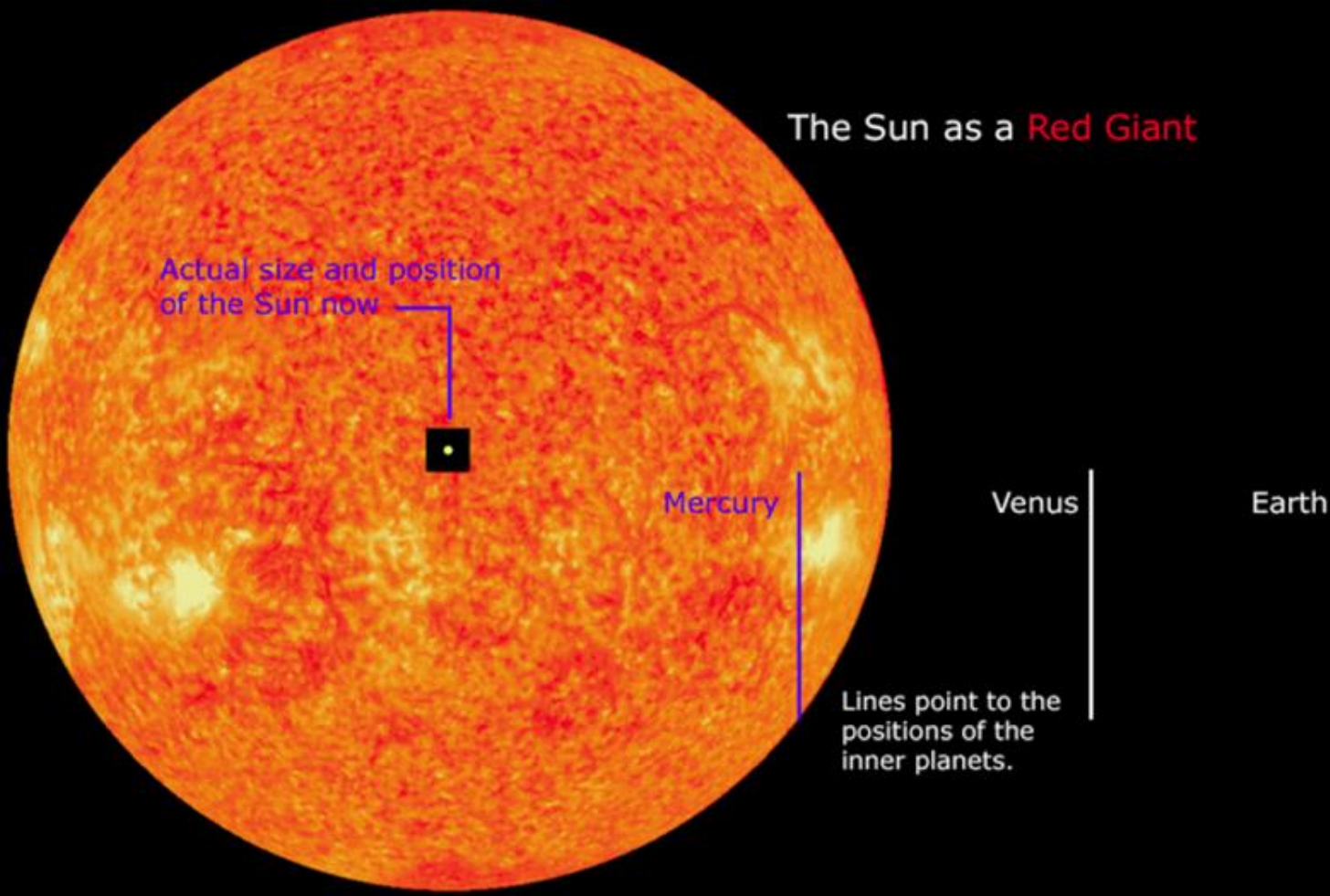
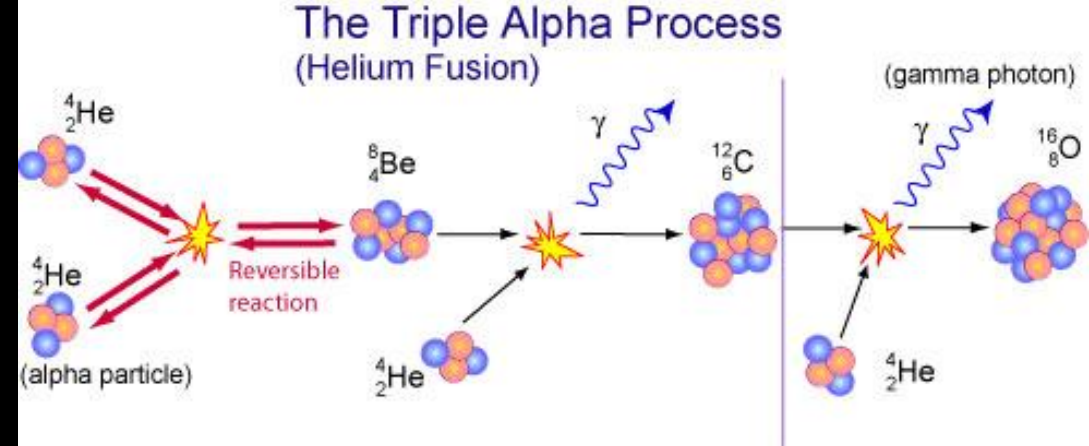


Evoluzione di una stella di MS tipo Sole

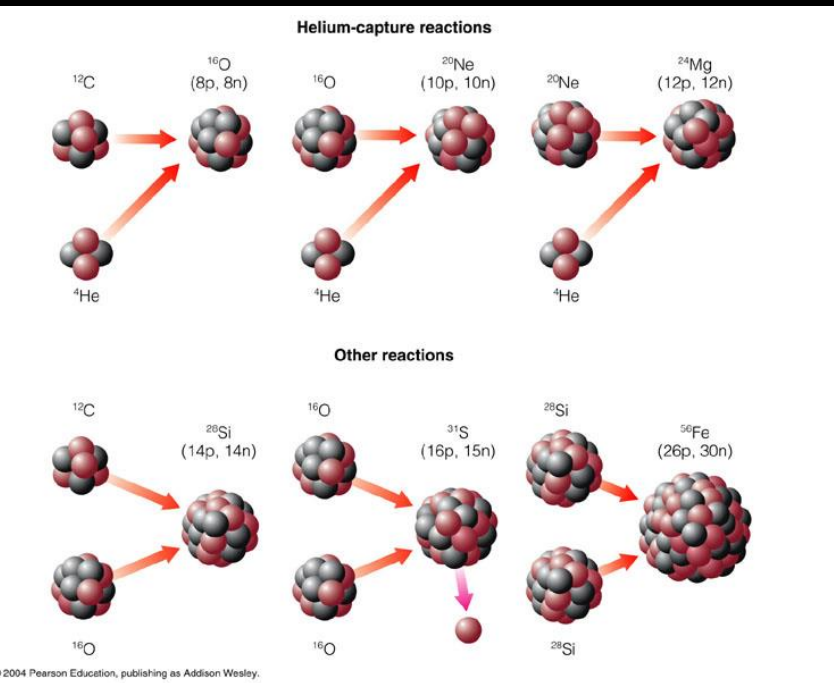




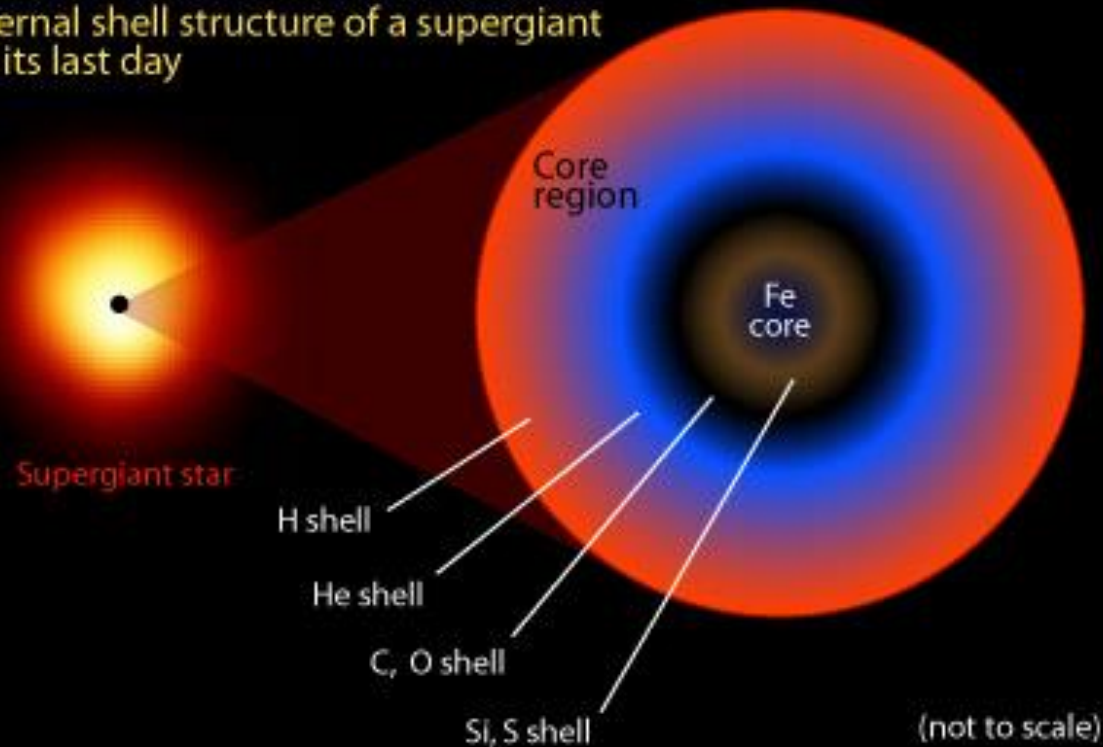
Il ciclo 3α nelle stelle che hanno superato la fase di gigante rossa



La formazione di elementi pesanti nelle fasi evolutive finali di stelle con massa $\gtrsim 8 M_{\text{SUN}}$

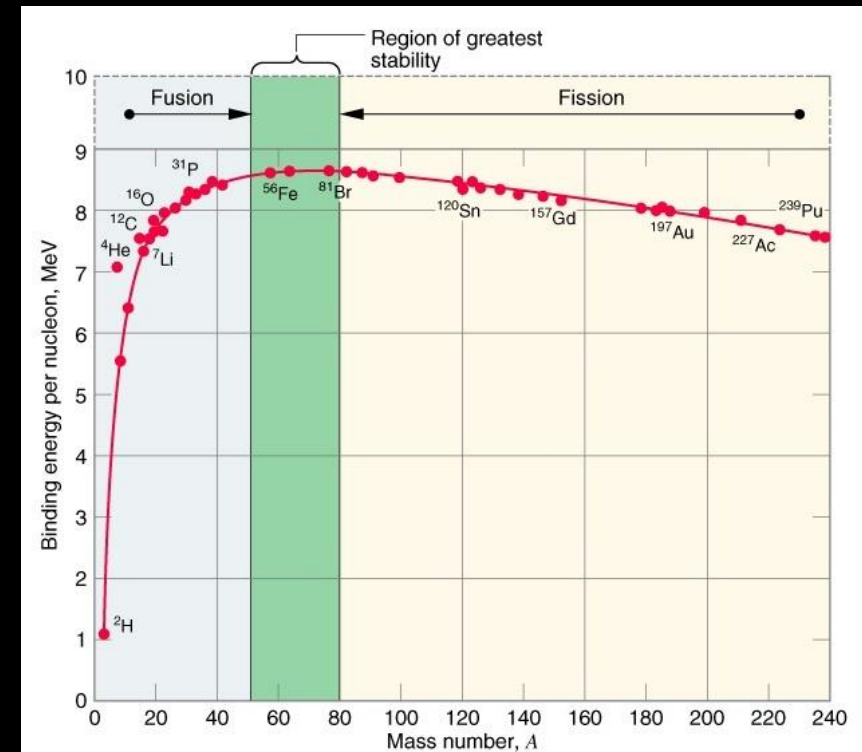
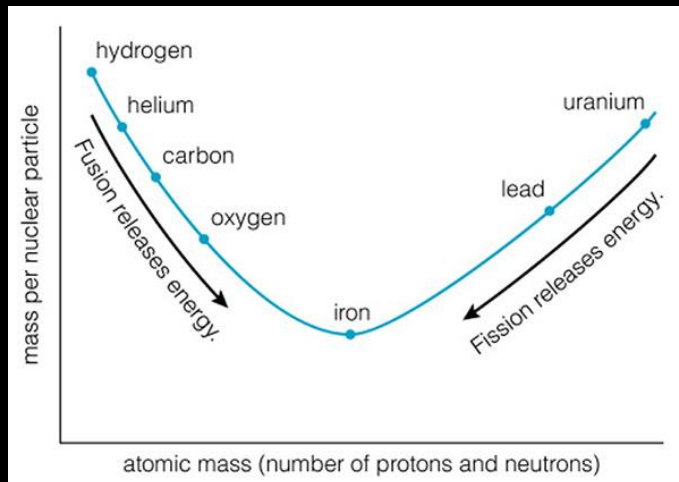


Internal shell structure of a supergiant
on its last day



Stadi evolutivi finali per stelle con massa $>8-10 M_{\text{SUN}}$

- 1) Se la stella è abbastanza massiccia, la fusione di ^{12}C e ^{16}O forma ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si .
 - 2) Poi la fusione del Si produce vari elementi vicini al picco di stabilità come ^{54}Fe , ^{56}Fe , ^{56}Ni .
 - 3) Oltre al Fe, le reazioni di fusione nucleare diventano **endotermiche**, cioè assorbono energia andando a raffreddare e diminuire la pressione nel nucleo, che inizia a collassare.
 - 3a) I fotoni ad altissima energia che vengono prodotti disintegrano i nuclei pesanti formando neutroni e protoni, i quali si combinano con gli elettroni liberi (che bilanciavano la gravità tramite la pressione di degenerazione) per formare neutroni e neutrini, i quali portano fuori dal nucleo un'enorme quantità di energia.
- **COLLASSO** del nucleo fino a quando la pressione dei neutroni degeneri ferma il collasso, creando un'onda d'urto di rimbalzo che si propaga verso l'esterno: **SuperNova**



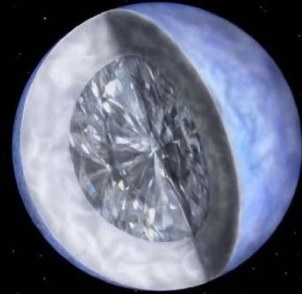
Equilibrio idrostatico e stadi evolutivi finali

In una stella non degenere la forza di gravità è bilanciata dalla pressione del gas (perfetto):

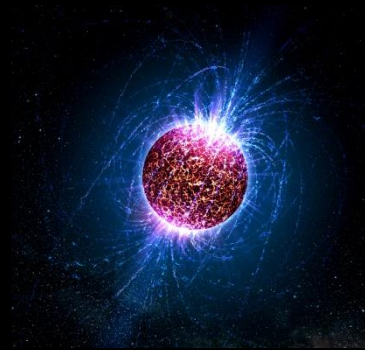
$$P = (K/\mu H) \rho T \quad [PV = nRT = n N_A K T \Rightarrow P = (K/\mu H) (n N_A \mu H/V) T = (K/\mu H) (M/V) T]$$

- Se $M_i < 8-10 M_{\text{SUN}}$: **White Dwarf** ($M_{\text{WD}} \lesssim 1.4 M_{\text{SUN}}$, $\langle \rho \rangle \approx 10^6 \text{ g/cm}^3$).
La gravità è bilanciata dalla pressione degli elettroni degeneri: $P \propto \rho^{5/3}$
(o $P \propto \rho^{4/3}$ nel caso relativistico). Il che implica che $R \propto M^{-1/3}$
- Se $8-10 \lesssim M_i / M_{\text{SUN}} \lesssim 25$: **Neutron Star** ($1.4 \lesssim M_{\text{NS}} / M_{\text{SUN}} \lesssim 2.2-2.9$, $\langle \rho \rangle \approx 10^{14}-10^{15} \text{ g/cm}^3$). Gravità bilanciata dalla press. dei neutroni degeneri.
- Se $M_i / M_{\text{SUN}} \gtrsim 25$: **Black Hole** ($M_{\text{BH}} / M_{\text{SUN}} \gtrsim 2.5$)
Non c'è alcuna forza fisica conosciuta che possa bilanciare la gravità !

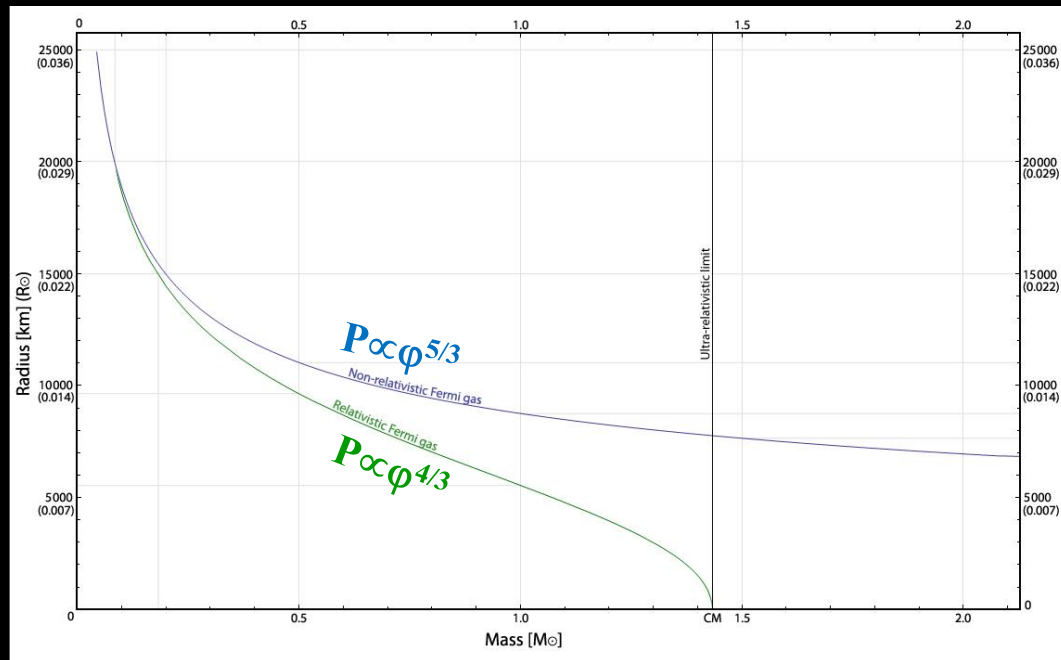
limite di Chandrasekhar



limite di Tolman-Oppenheimer-Volkoff

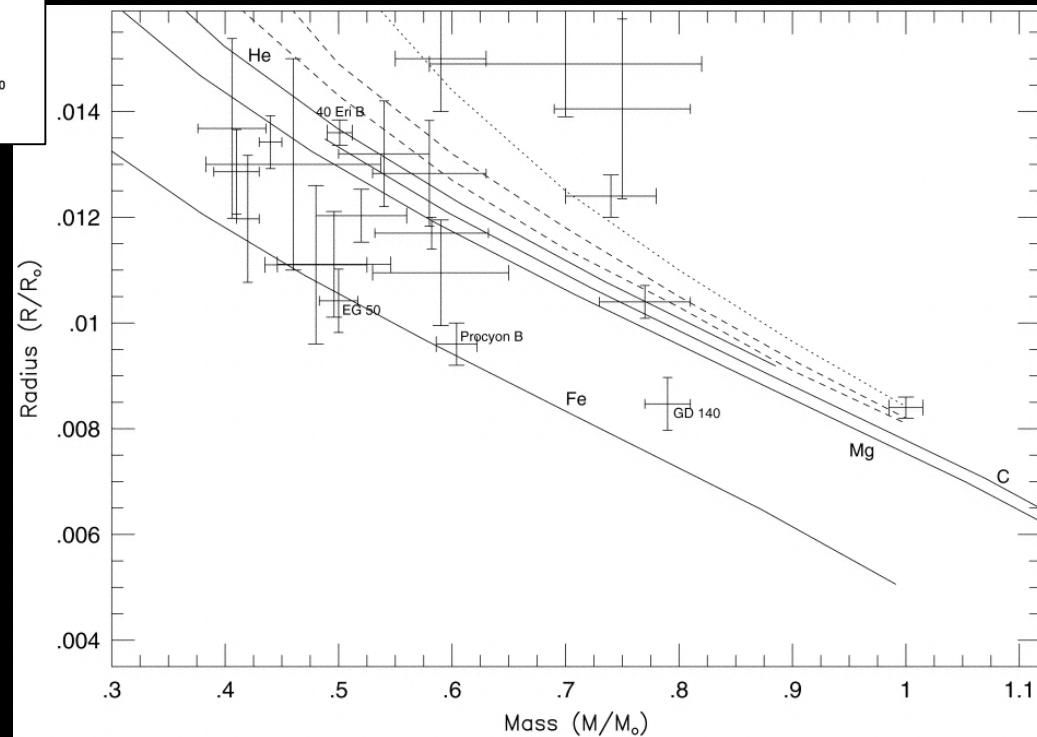


La relazione massa-raggio per le Nane Bianche

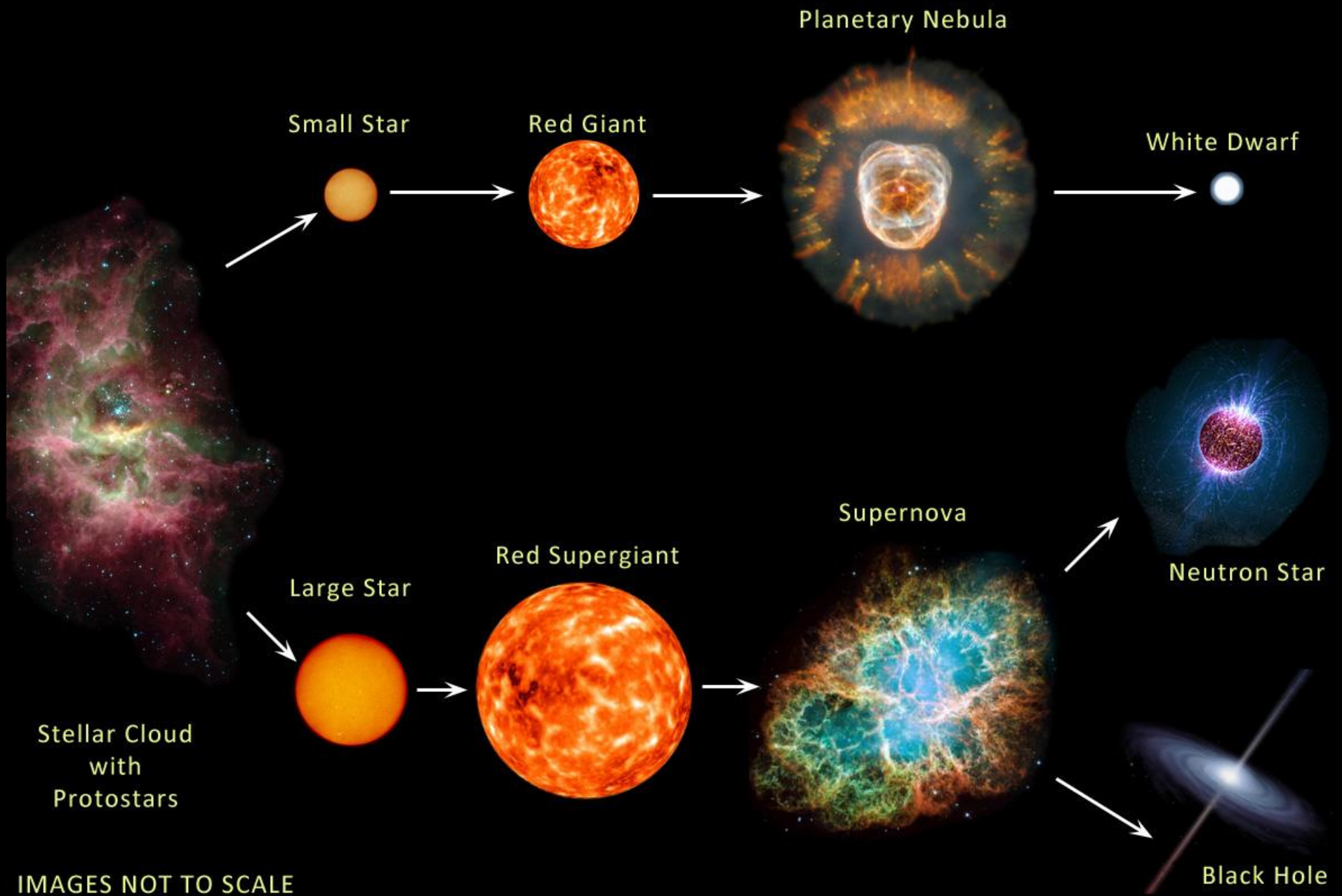


limite di Chandrasekhar

Provencal & Shipman 1997



EVOLUTION OF STARS



Crab Nebula

as seen by HST
(24 individual images assembled)

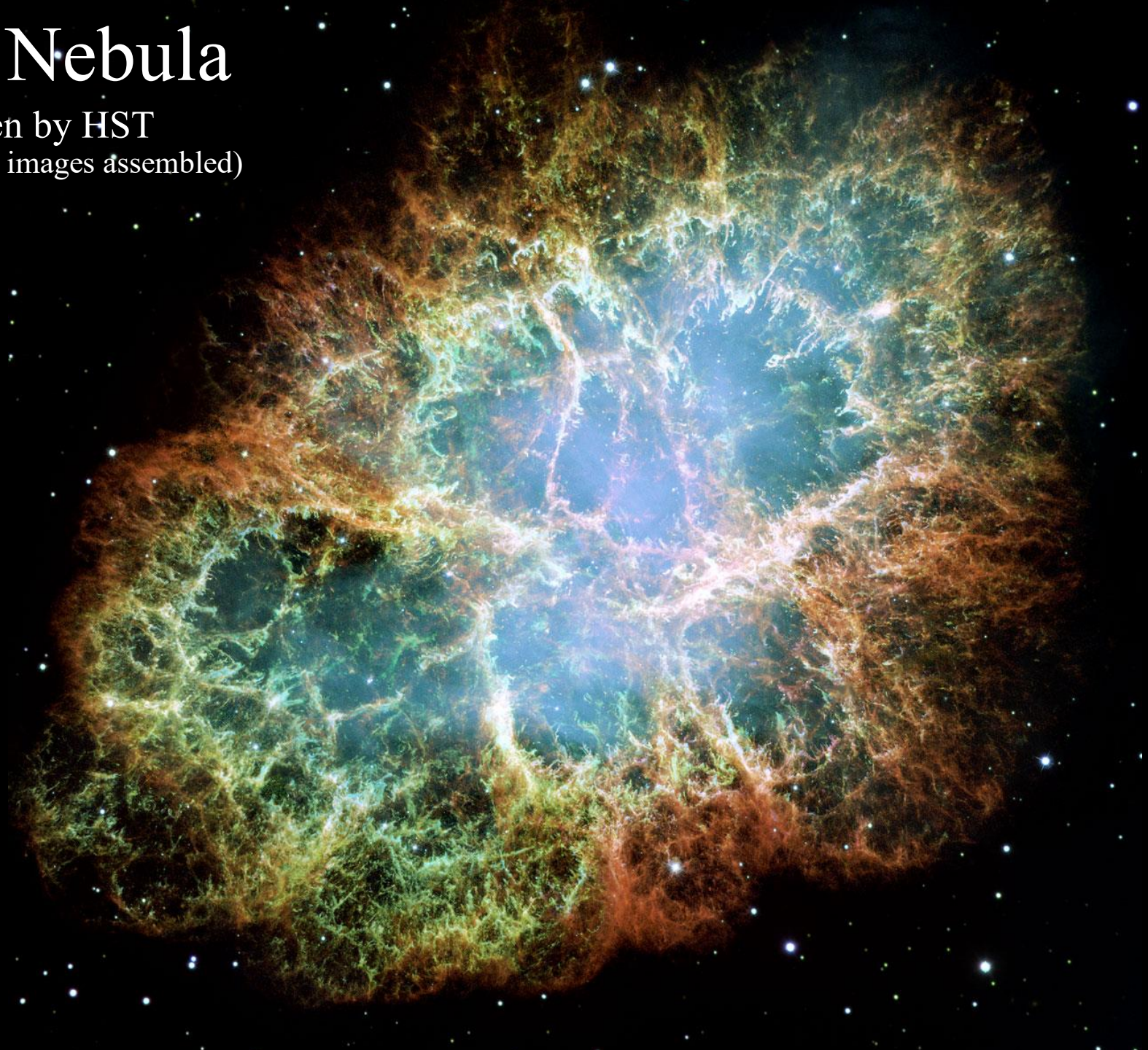
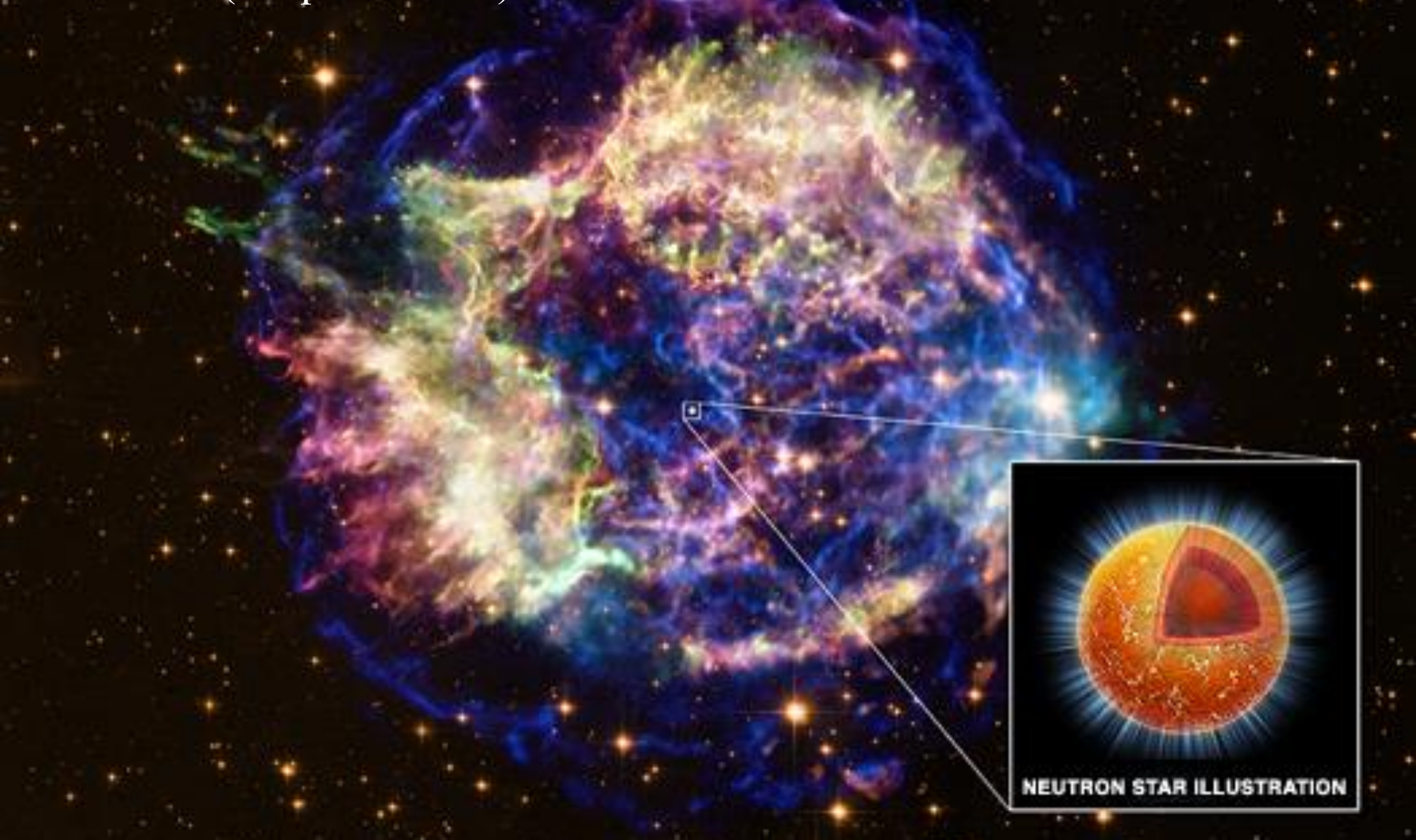
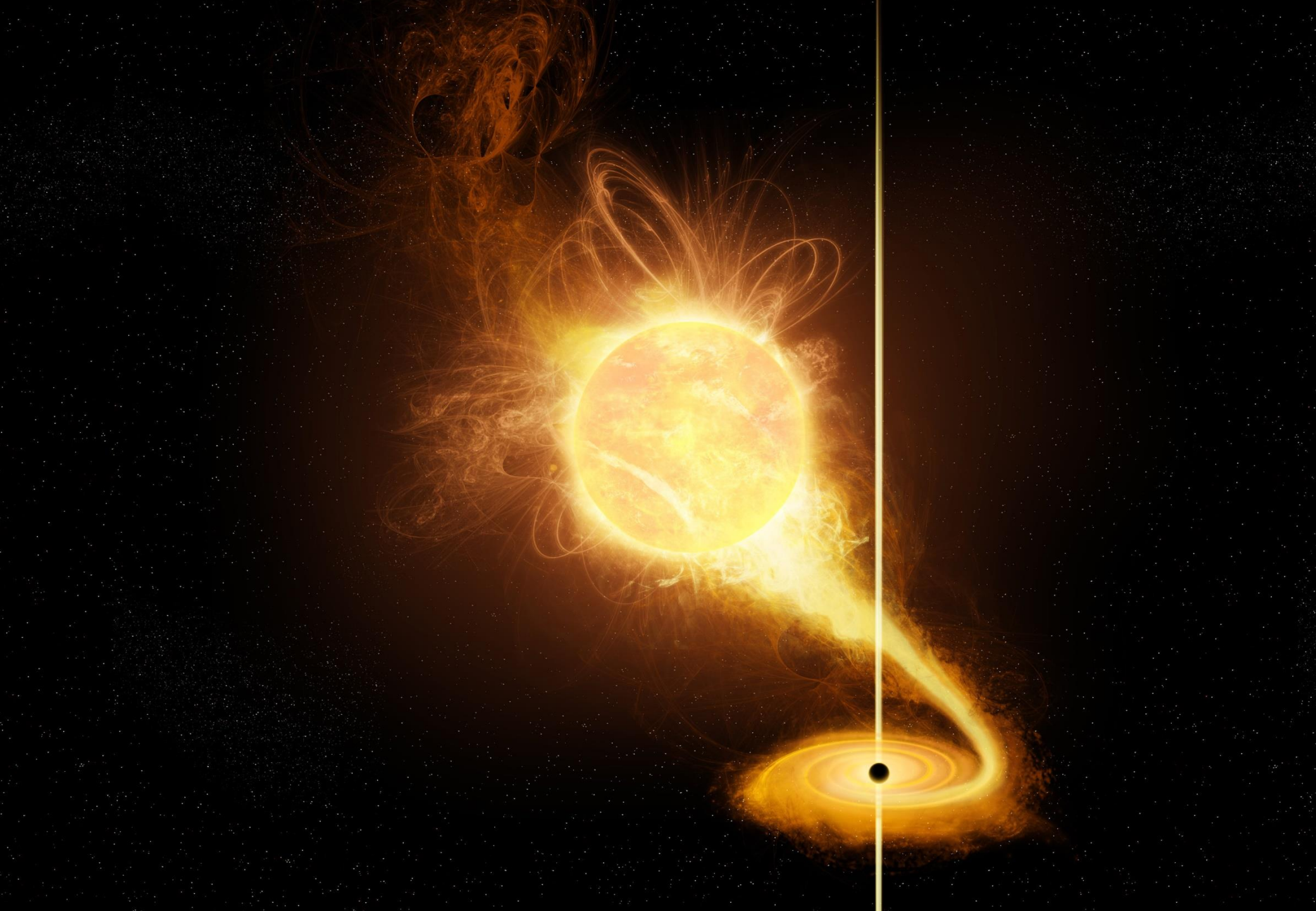
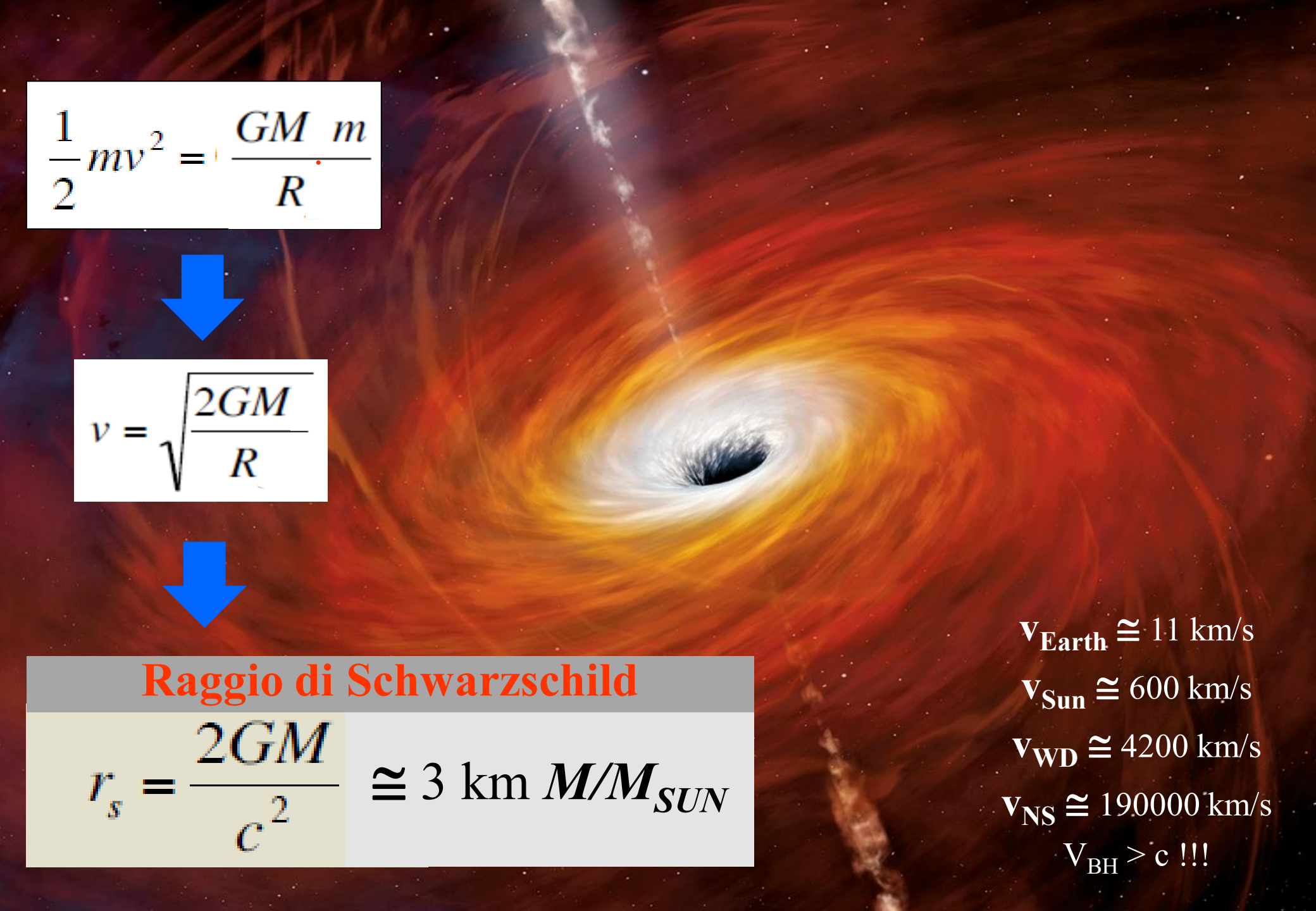


Immagine ottica (HST, oro) + X (Chandra, rosso, verde e blu) di Cassiopea A, un resto di SN a circa 11.000 al da noi nella ns Galassia. La SN è esplosa circa 330 anni fa (tempo terrestre) creando una stella di neutroni al centro della nube.






$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{R}$$



$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$



Raggio di Schwarzschild

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \cong 3 \text{ km } M/M_{SUN}$$

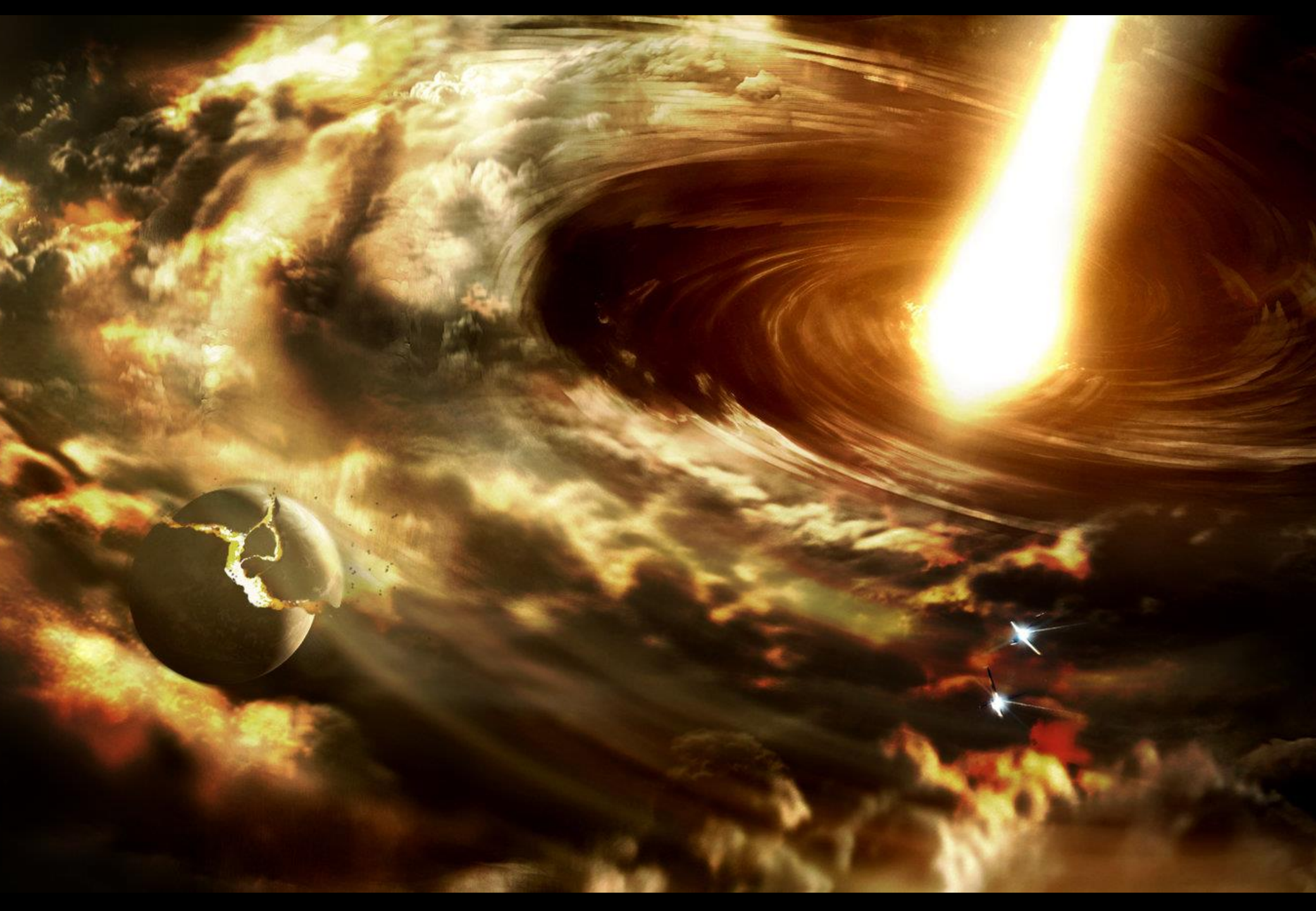
$$v_{\text{Earth}} \cong 11 \text{ km/s}$$

$$v_{\text{Sun}} \cong 600 \text{ km/s}$$

$$v_{\text{WD}} \cong 4200 \text{ km/s}$$

$$v_{\text{NS}} \cong 190000 \text{ km/s}$$

$$v_{\text{BH}} > c !!!$$



Oltre ai BN stellari, formati dal collasso di una stella di grande massa, esiste anche un'altra classe di BN supermassicci al centro di molte galassie



I BN supermassicci al centro delle galassie sono BN a 'bassa densità' !

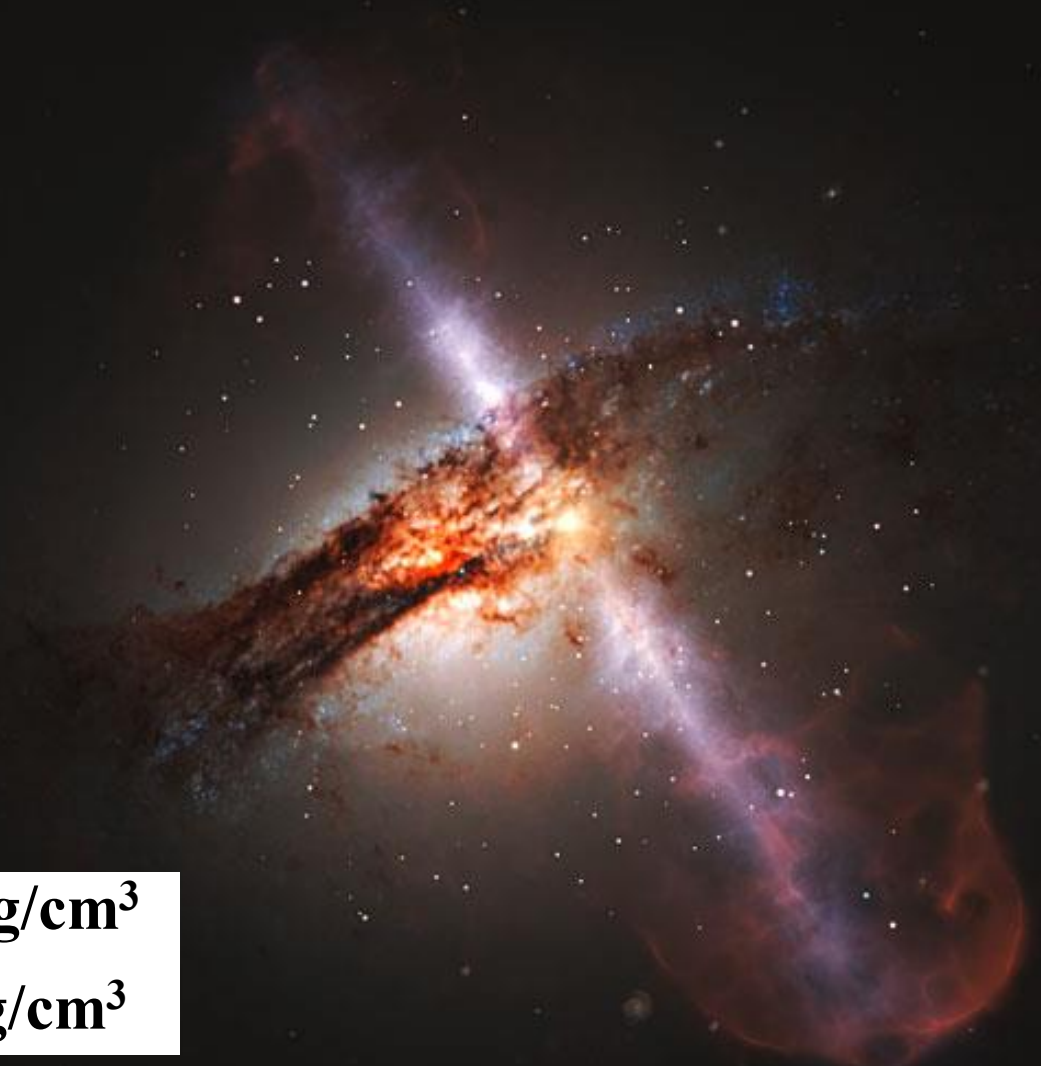
$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$



$$\begin{aligned}\varphi_s &= M/V_s = M/(4/3 \pi r_s^3) \\ &= [3c^6/(32\pi G^3)] M^{-2} \\ \text{ovvero } \varphi_s &\propto M^{-2}\end{aligned}$$

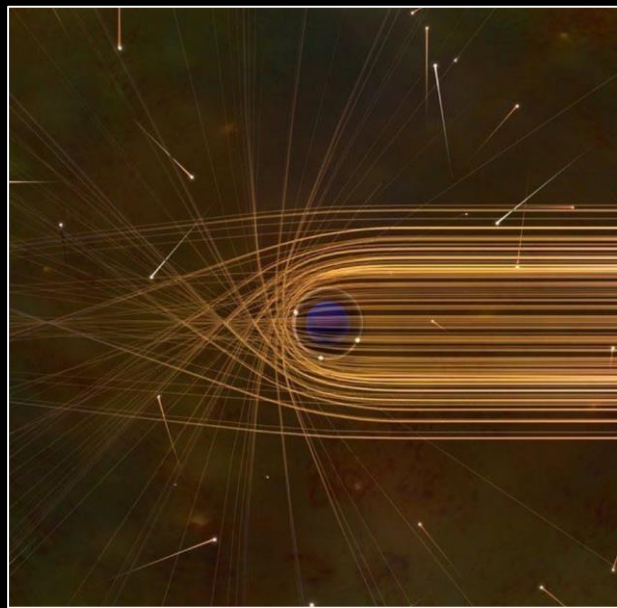
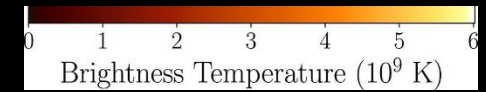
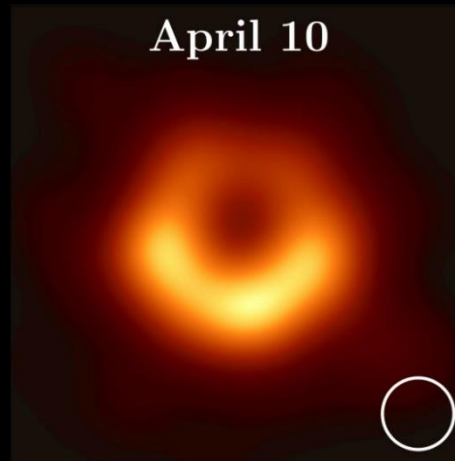
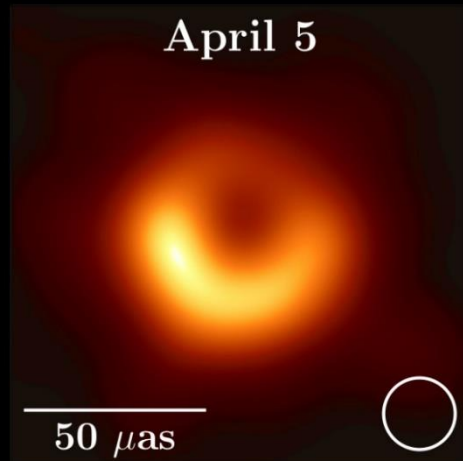


$$\begin{aligned}\text{per } M_{\text{BH}} &= 1 M_{\text{SUN}}: & \varphi_s &= 2 \times 10^{16} \text{ g/cm}^3 \\ \text{per } M_{\text{BH}} &= 3 \times 10^9 M_{\text{SUN}}: & \varphi_s &= 2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3\end{aligned}$$



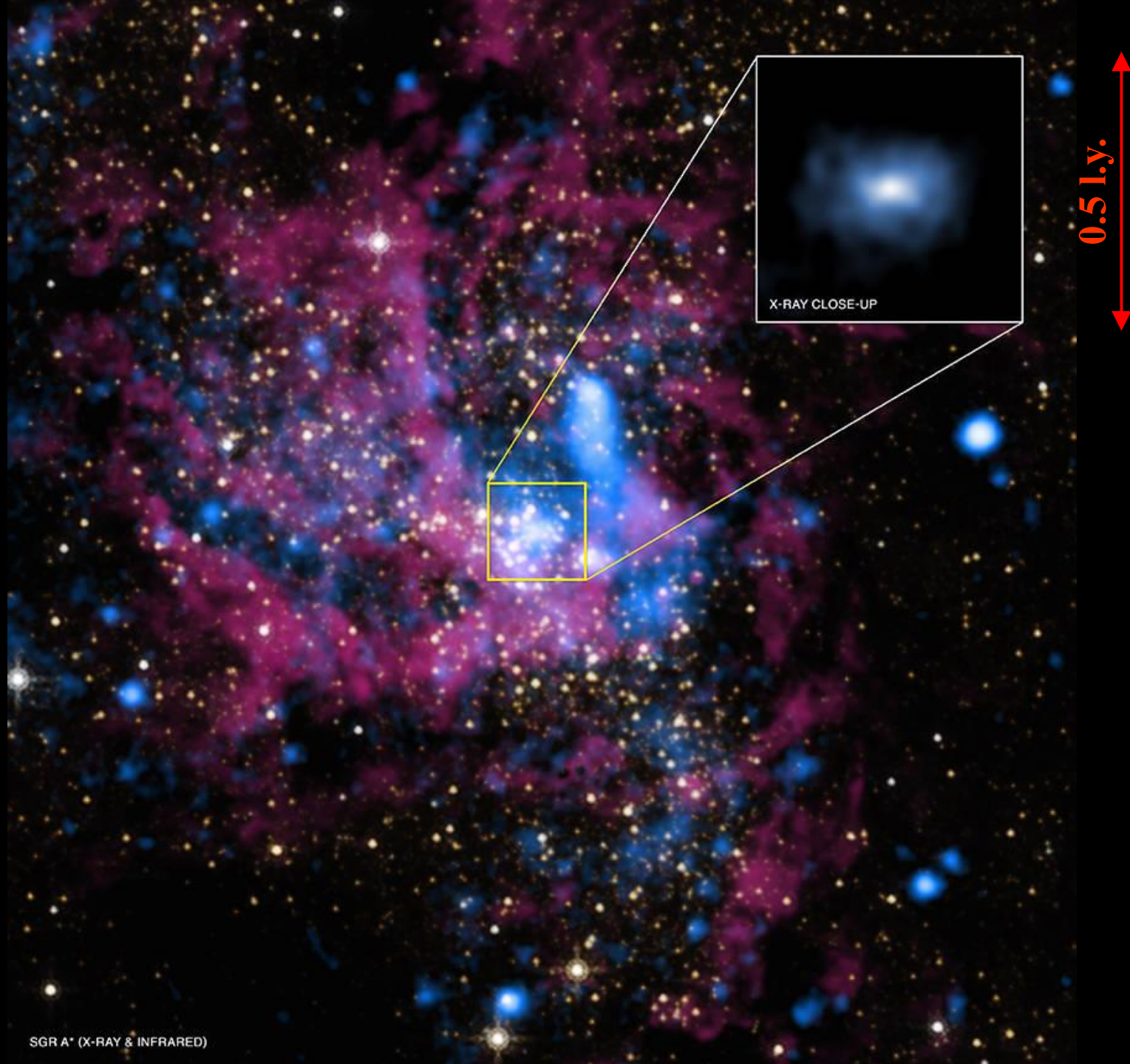
BH della galassia ellittica M87

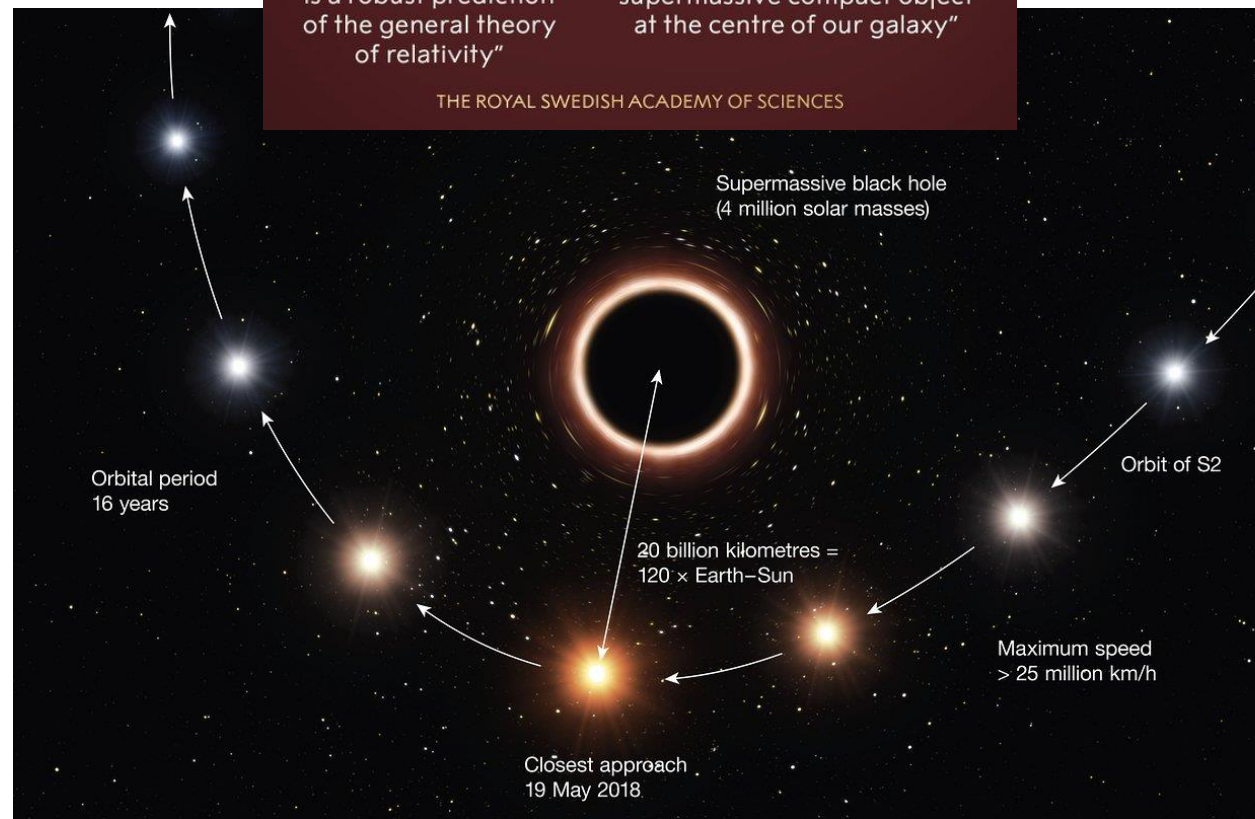
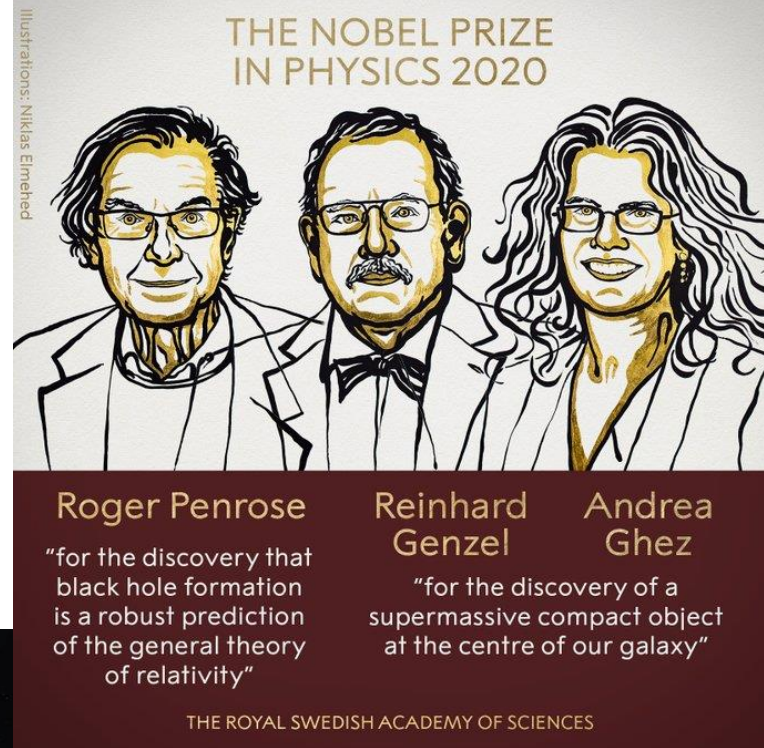
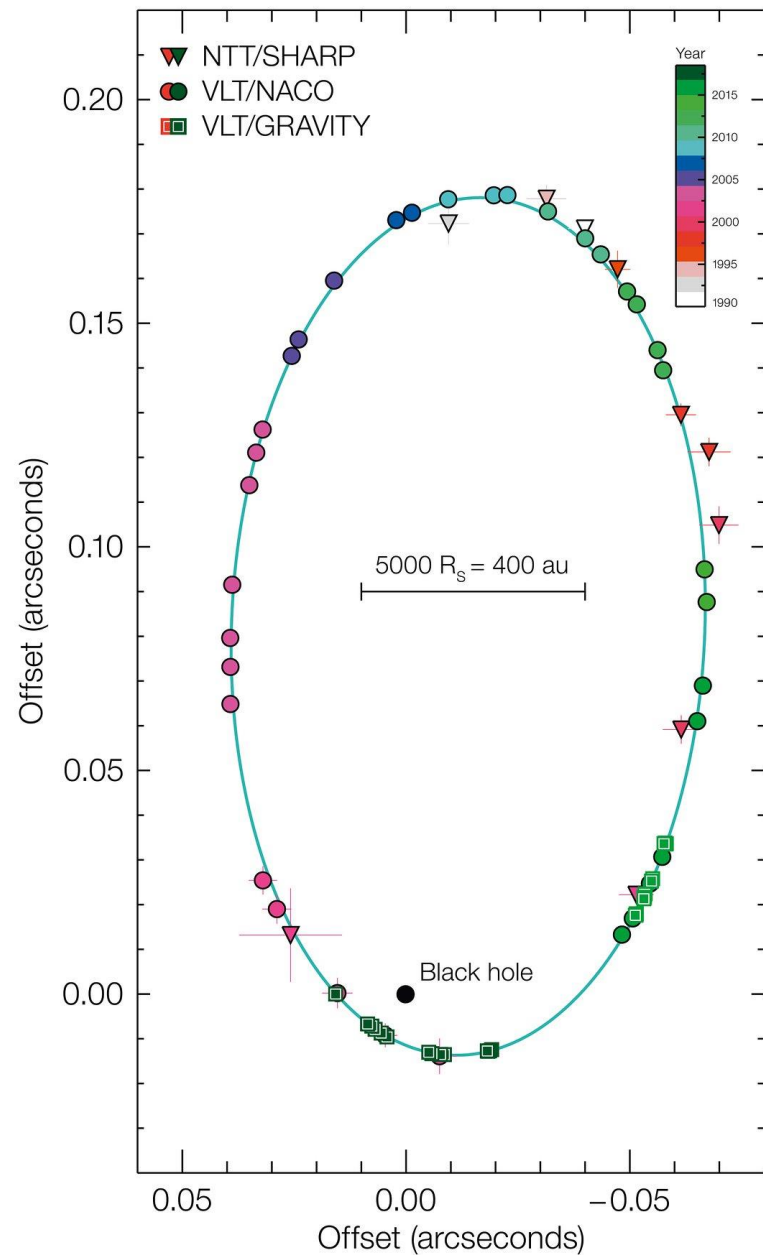
$M = (6.5 \pm 0.7) \times 10^9 M_{\text{SUN}}$, $D_{\text{EH}} \cong 16 \mu\text{as} \cong 270 \text{ AU} \cong 1.5 \text{ ld}$

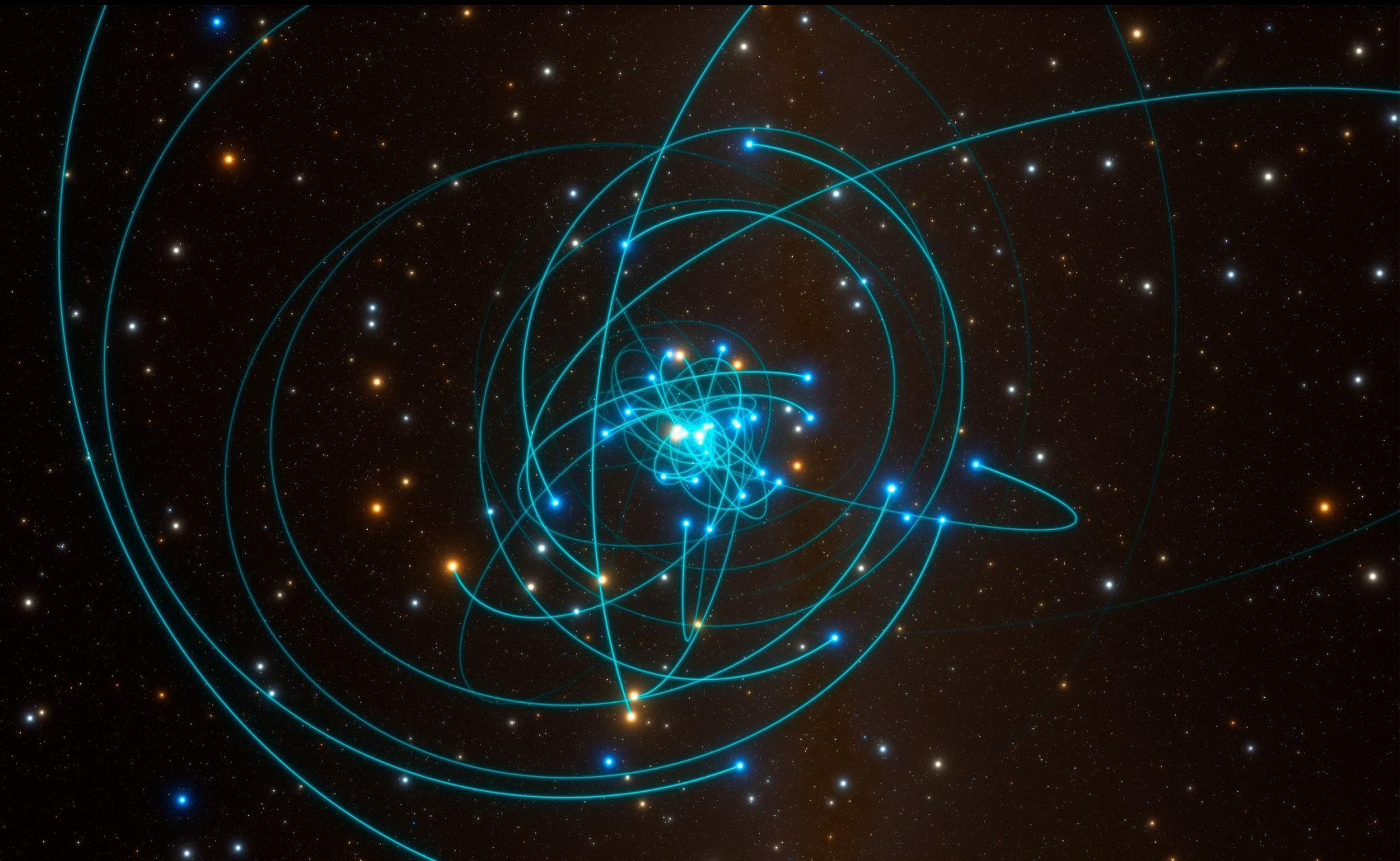


Sgr A

As seen by HST (IR, red and yellow) and Chandra (X-ray, blue). The relatively low X-ray emission from Sgr A* suggests that only $\sim 1\%$ of the material within the BH grav. influence reaches the event horizon, while most of it is ejected.

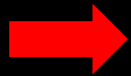






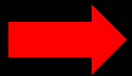
Cosa succede se cado in un BN ?

1) Se si tratta di un BN stellare, devo fare i conti con le forze mareali.



Meglio scegliere un BN super massiccio a bassa densità !

2) Per un osservatore che mi guarda da abbastanza lontano + mi avvicino all'orizz. degli eventi e + il mio tempo rallenta:

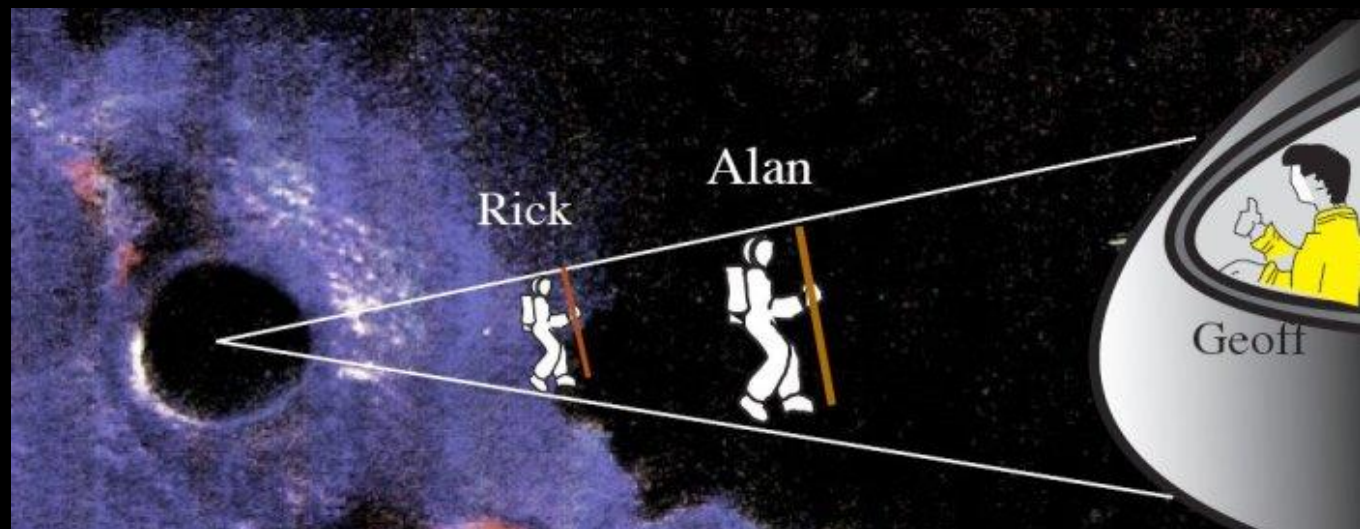


per lui o per lei la mia caduta non ha fine !

Mentre per me che cado la caduta avviene in un tempo finito !

3) Infine, per il principio di equivalenza che sancisce l'indistinguibilità tra un sistema di rif. accelerato ed uno fermo e sottoposto a forza di gravità, anche le lunghezze cambiano.

Spaghettification is the theoretical process of an object getting stretched by the gravity of a black hole.

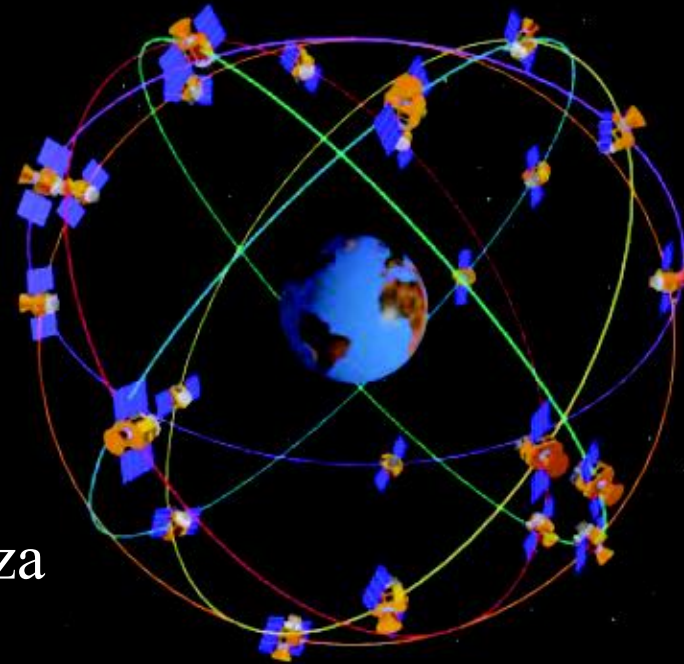


La dilatazione/contrazione relativistica del tempo può avere effetti molto concreti !

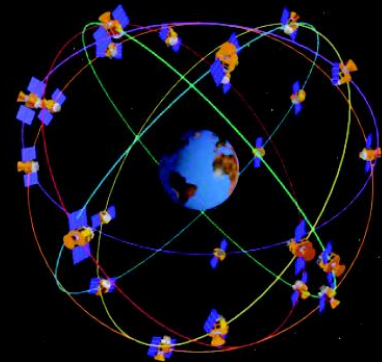
Esempio: GPS

(Global Positioning System)

- 24 (+5) satelliti in orbita a circa 20000 km d'altezza
- 6 orbite inclinate di 55° sull'equatore
- almeno 4 sempre visibili ovunque
- ogni satellite ha un orologio atomico al cesio con precisione di 1 su 10^{14}
 - $\Rightarrow$ errore in 1 giorno ($=24 \times 60 \times 60 = 86400\text{s}$): $86400\text{ s}/10^{14} = 8.6 \times 10^{-10}\text{ s} = 0.86\text{ ns}$
 - $\Rightarrow$ precisione nominale sulla posizione: circa 26 cm ($0.86\text{ ns} \times 300000\text{ km/s}$)



Esempio: GPS (Global Positioning System)



Relatività ristretta

Il moto dei satelliti rispetto al ricevitore fa sì che il loro tempo scorra più lentamente rispetto al tempo del ricevitore.

Velocità dei satelliti: 3.8 km/s $\Rightarrow$ $dt = 7.1 \mu\text{s}$ al giorno, $ds = 7.1 \mu\text{s} \cdot c = \mathbf{2.2 \text{ km} !}$

Relatività generale

Il campo gravitazionale terrestre fa sì che il tempo dei satelliti scorra più velocemente rispetto al tempo del ricevitore.

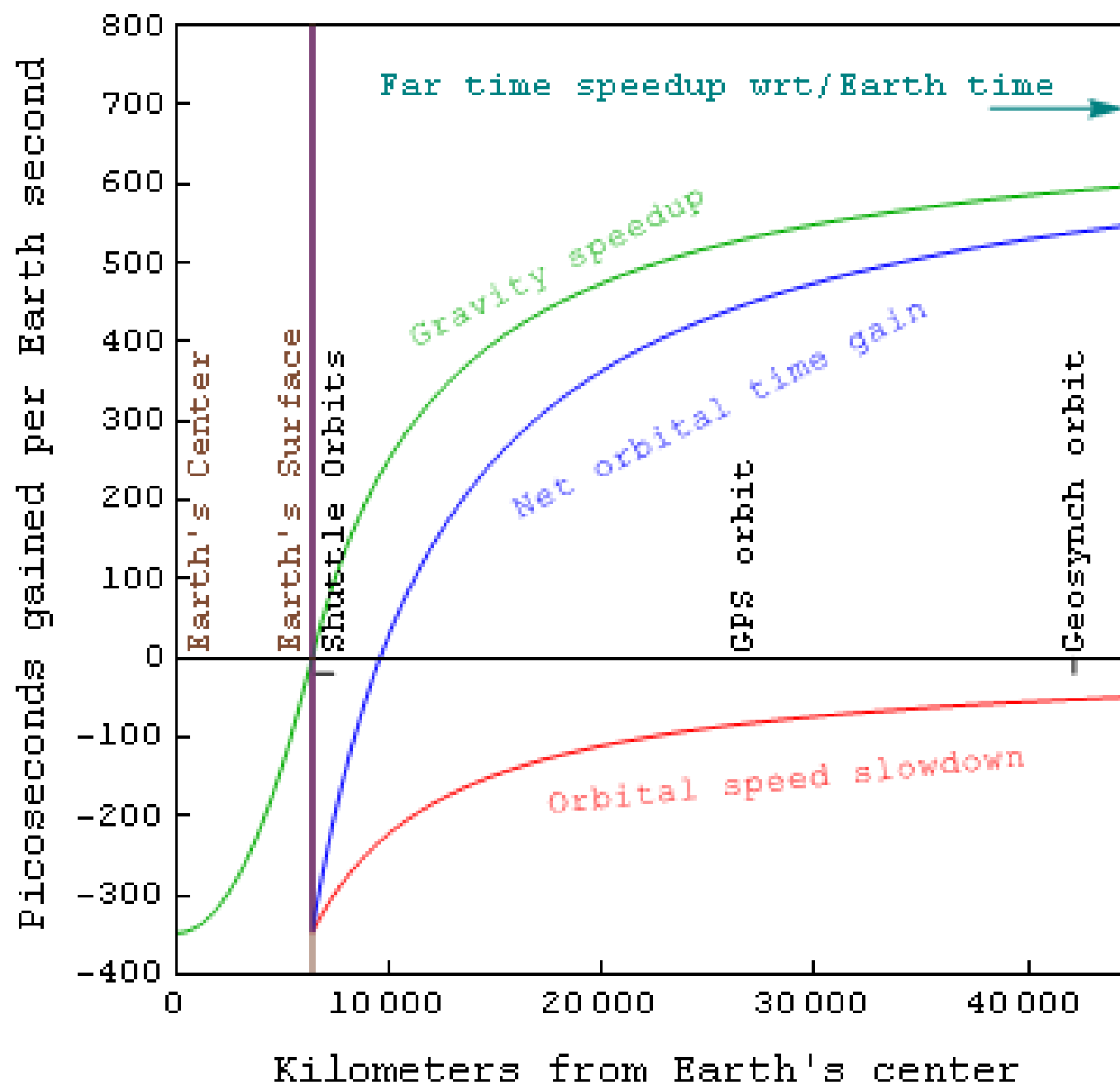
Altezza dei satelliti: 20000 km $\Rightarrow$ $dt = 45.7 \mu\text{s}$ al giorno, $ds = 45.7 \mu\text{s} \cdot c = \mathbf{15 \text{ km} !}$

Notare che la differenza temporale dovuta alla relatività generale è di segno opposto a quella dovuta alla rel. ristretta !

Come se ne esce ?

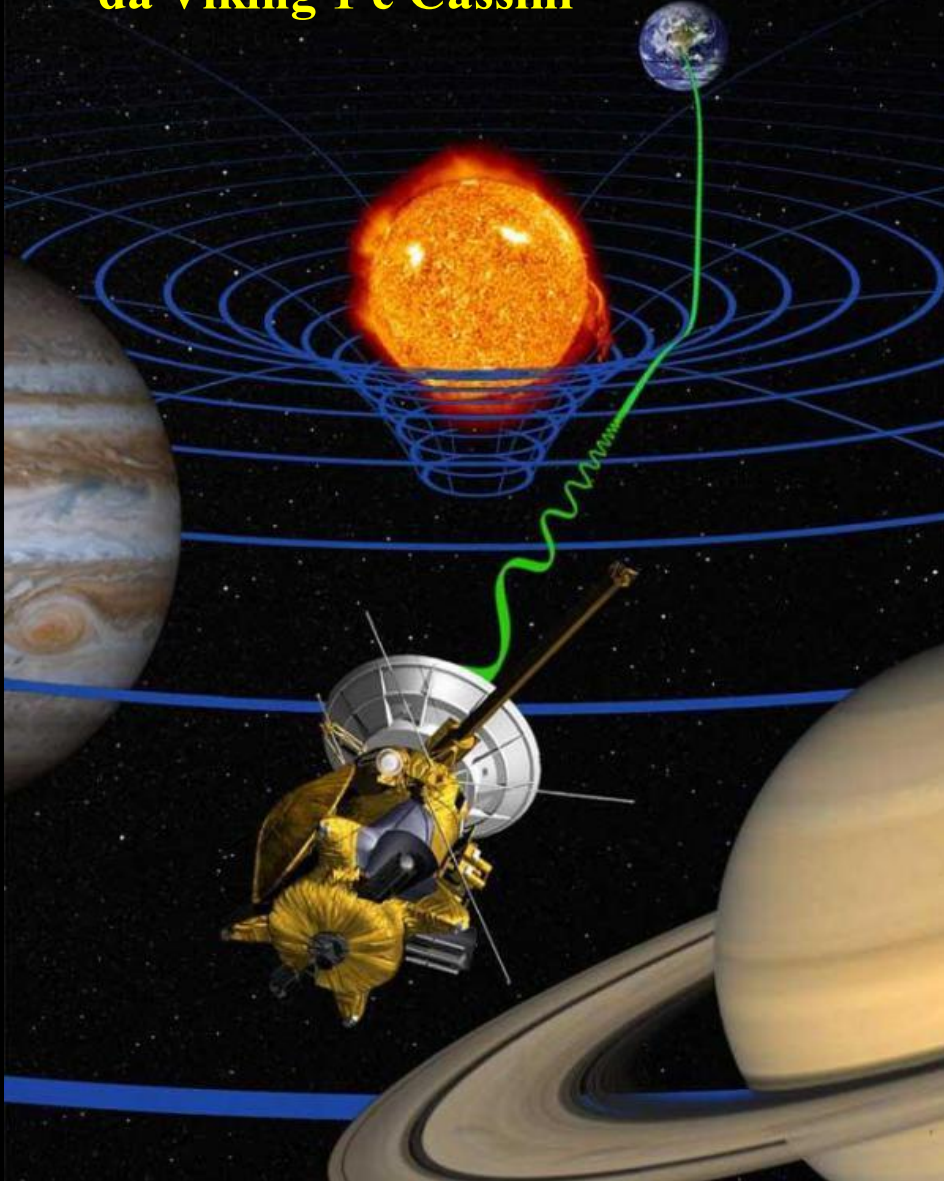
Semplicemente gli orologi dei satelliti vanno volutamente ad una velocità diversa da quelli a Terra e in questo modo compensano il diverso scorrimento del tempo !

Time Dilation Effects on Earth

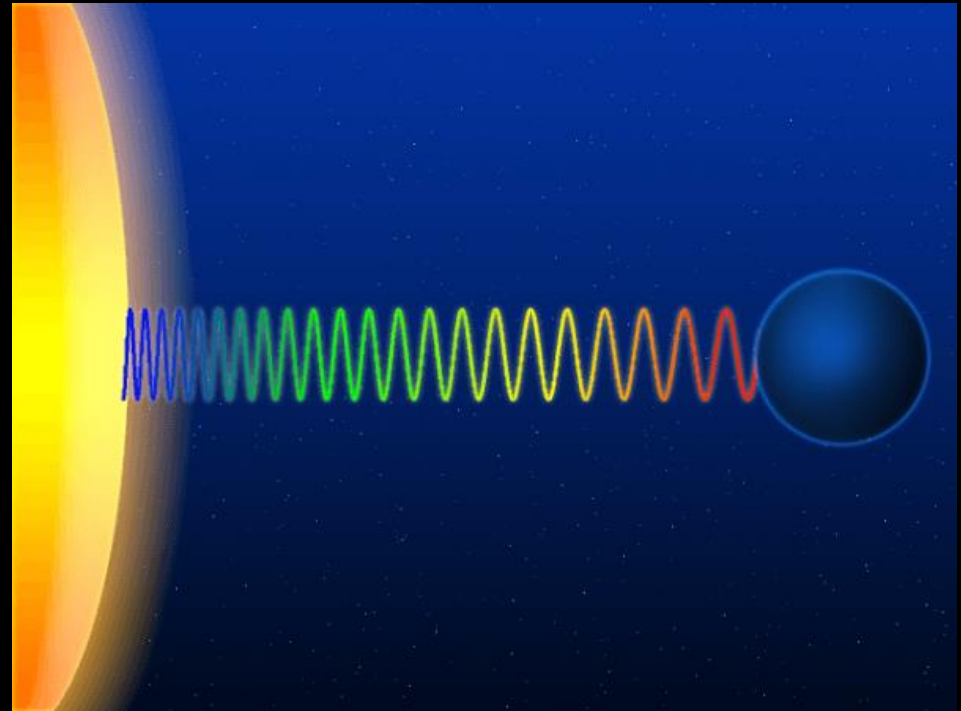


Altri effetti della relatività generale e della curvatura dello spazio-tempo:

**il ritardo delle onde radio provenienti
da Viking 1 e Cassini**

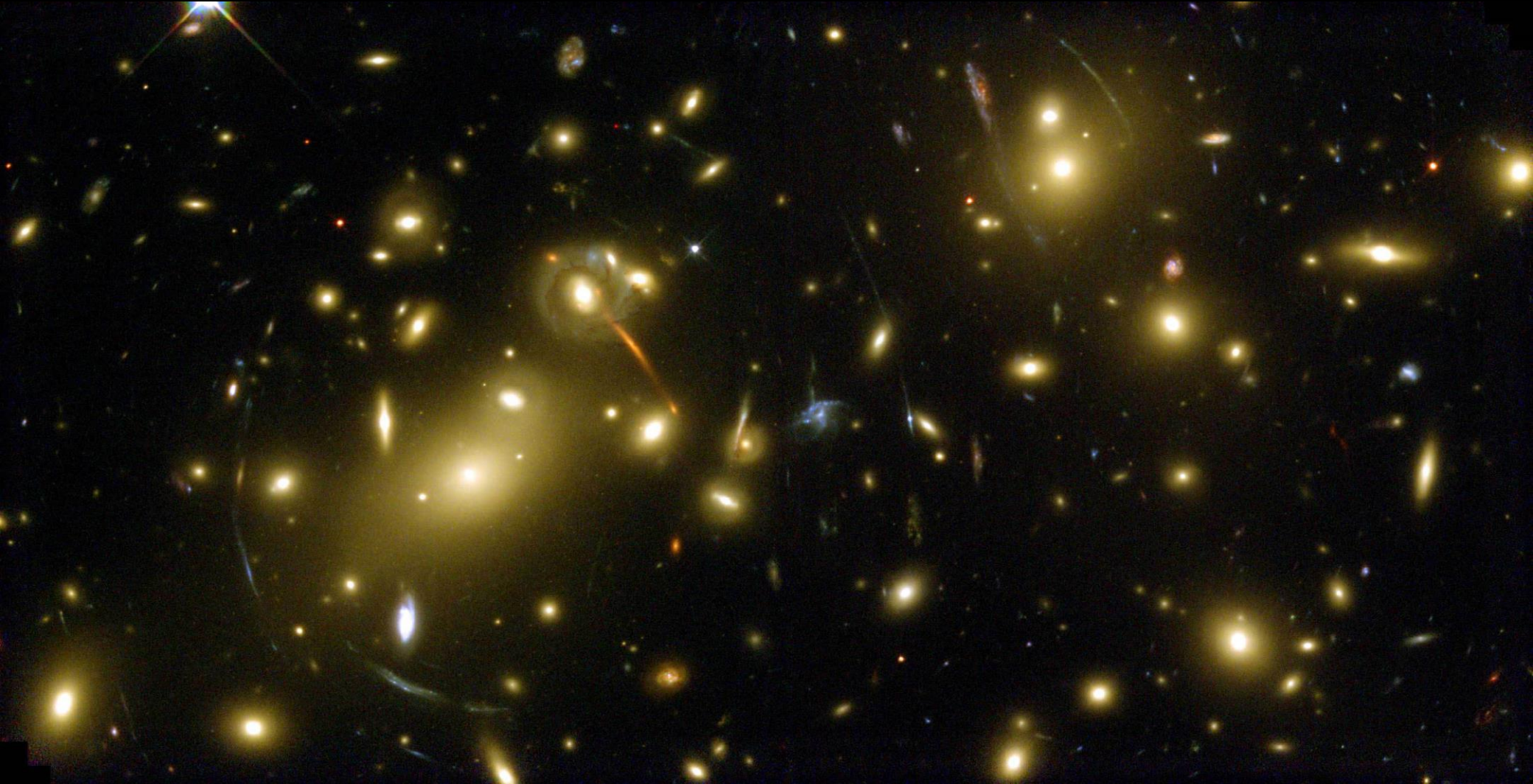


e il redshift gravitazionale



Altri effetti della relatività generale e della curvatura dello spazio-tempo:

Lenti Gravitazionali (1)

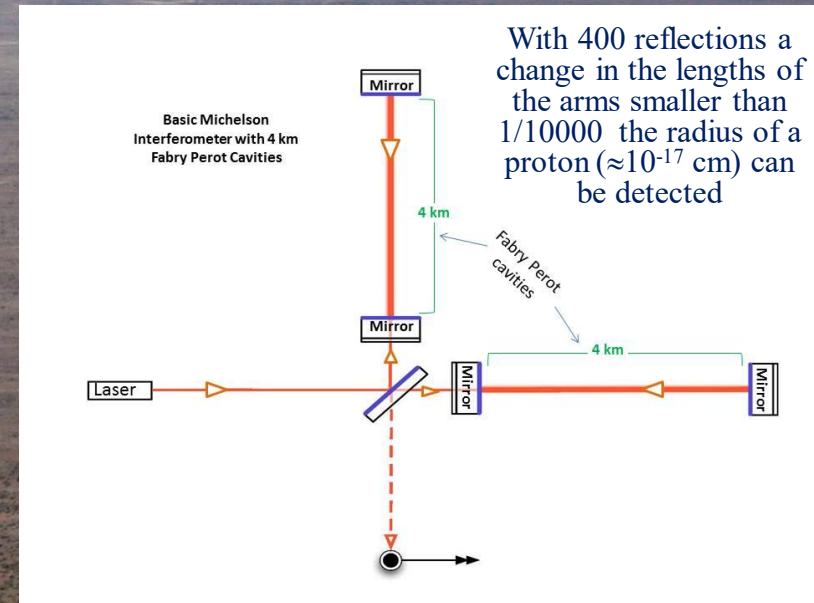
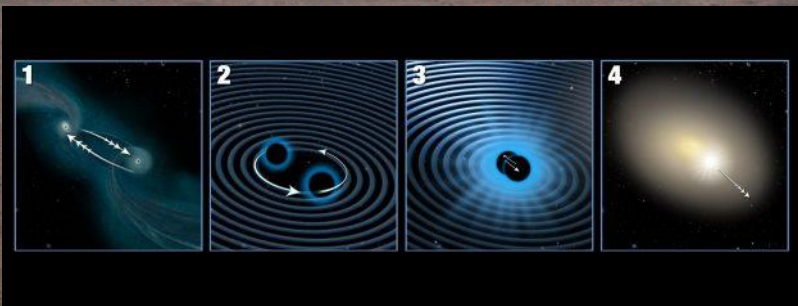
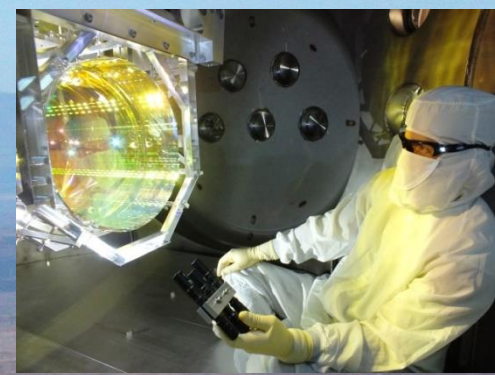


11 Febbraio 2016:

1a detezione delle Onde Gravitazionali

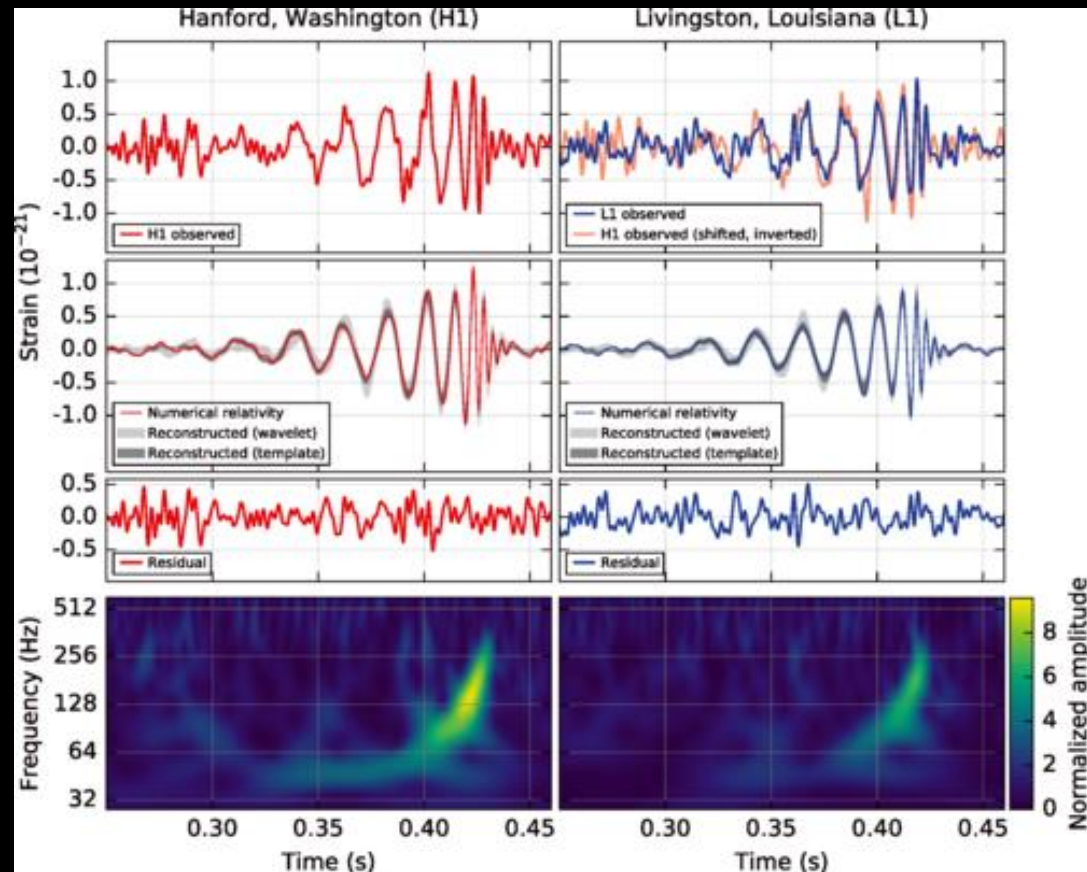
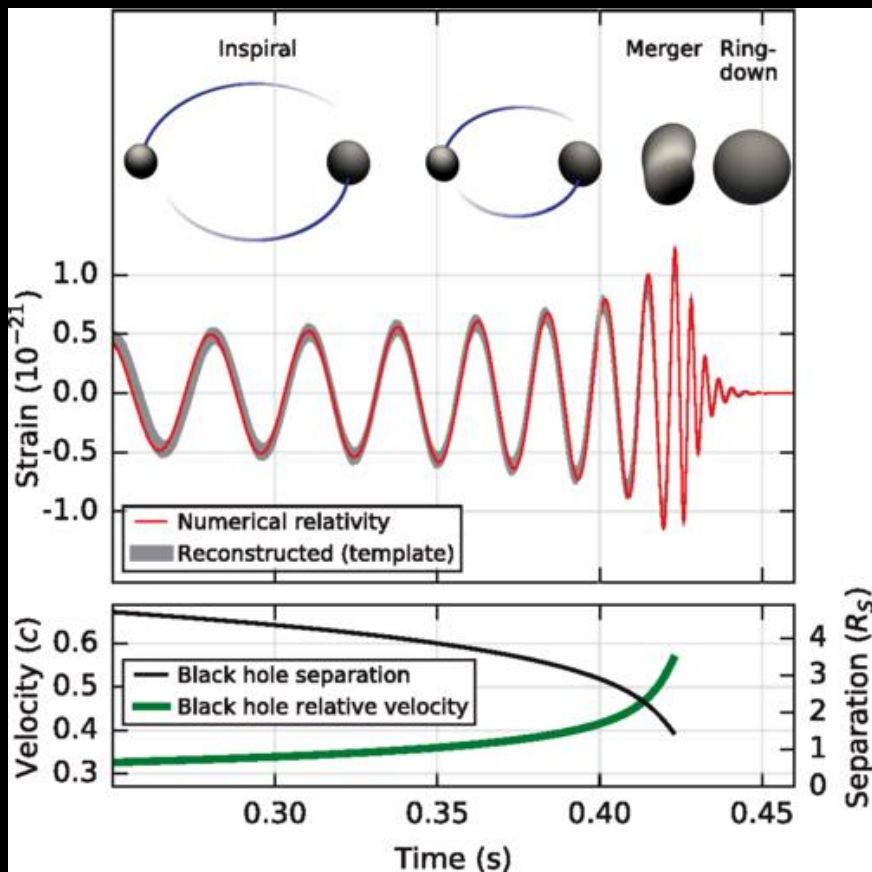
(previste dal 1915) con le 2 antenne LIGO

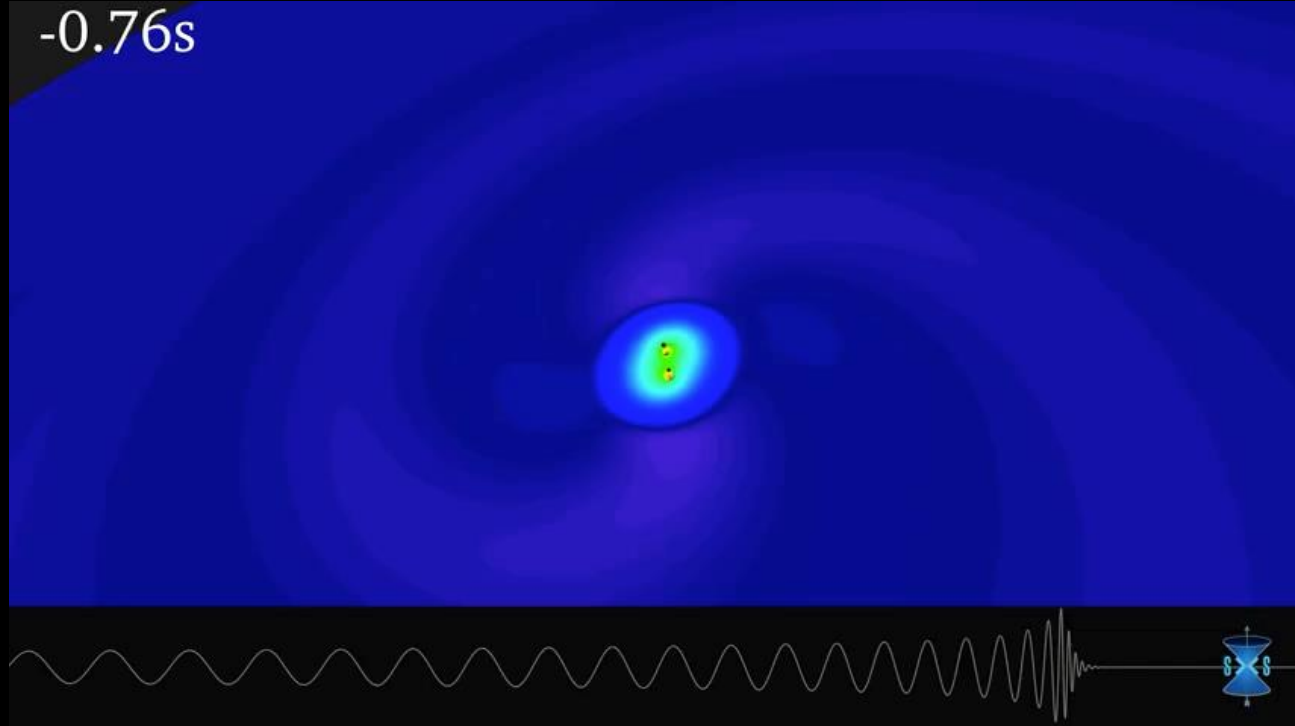
(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)
a Livingston (Louisiana) e Hanford (Washington)





La distorsione delle lunghezze misurata, con un'ampiezza relativa di 10^{-21} e un'emissione di energia al picco pari a circa 50 volte l'emissione luminosa dell'intero universo visibile, si spiega con la coalescenza di 2 buchi neri con masse di 29 e 36 M_{sun} per formare un BN di circa 62 M_{sun} . (3 M_{sun} sono dissipate in onde grav). L'evento, registrato il 14/09/2015, si è verificato circa 1.3 miliardi di anni fa nell'emisfero australe ($dt=7$ ms).

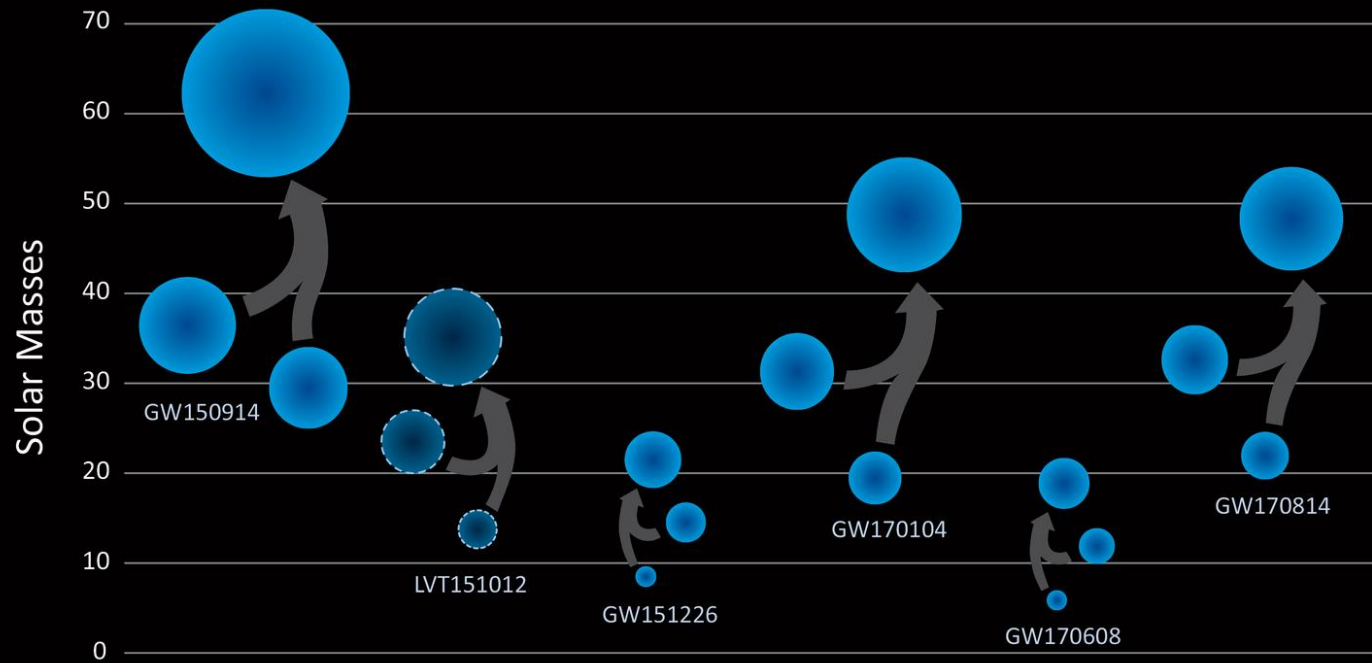
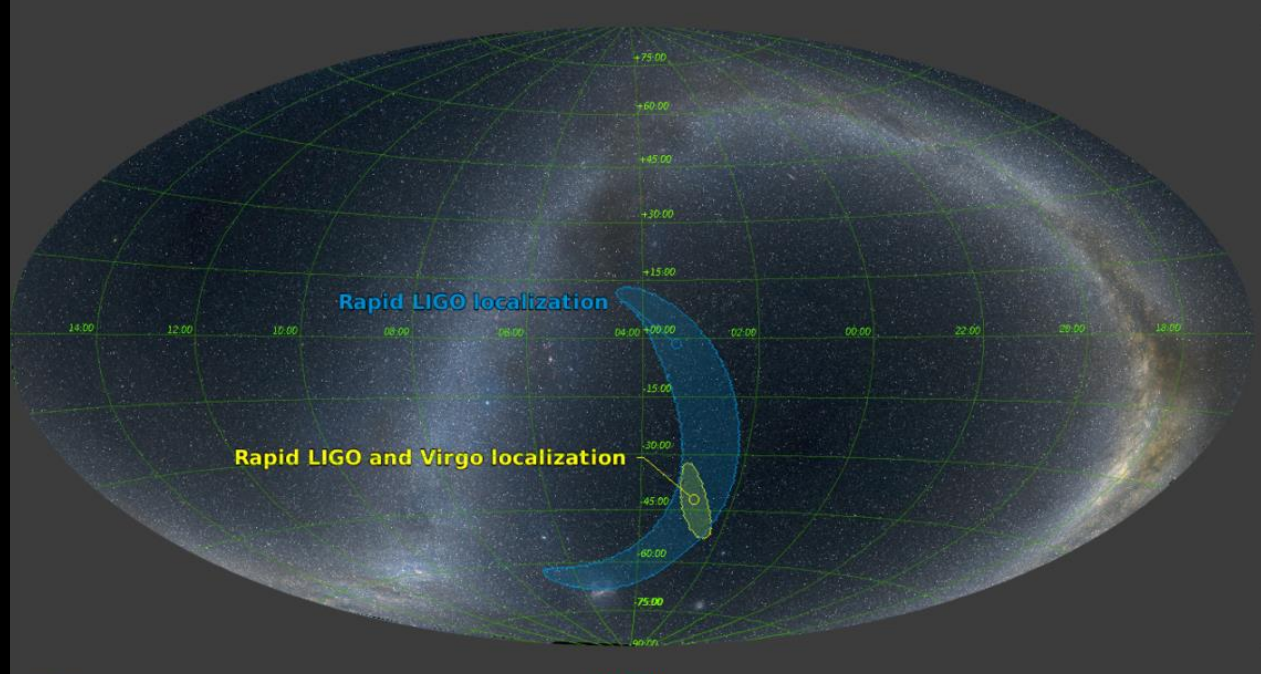




How do we know these were black holes?

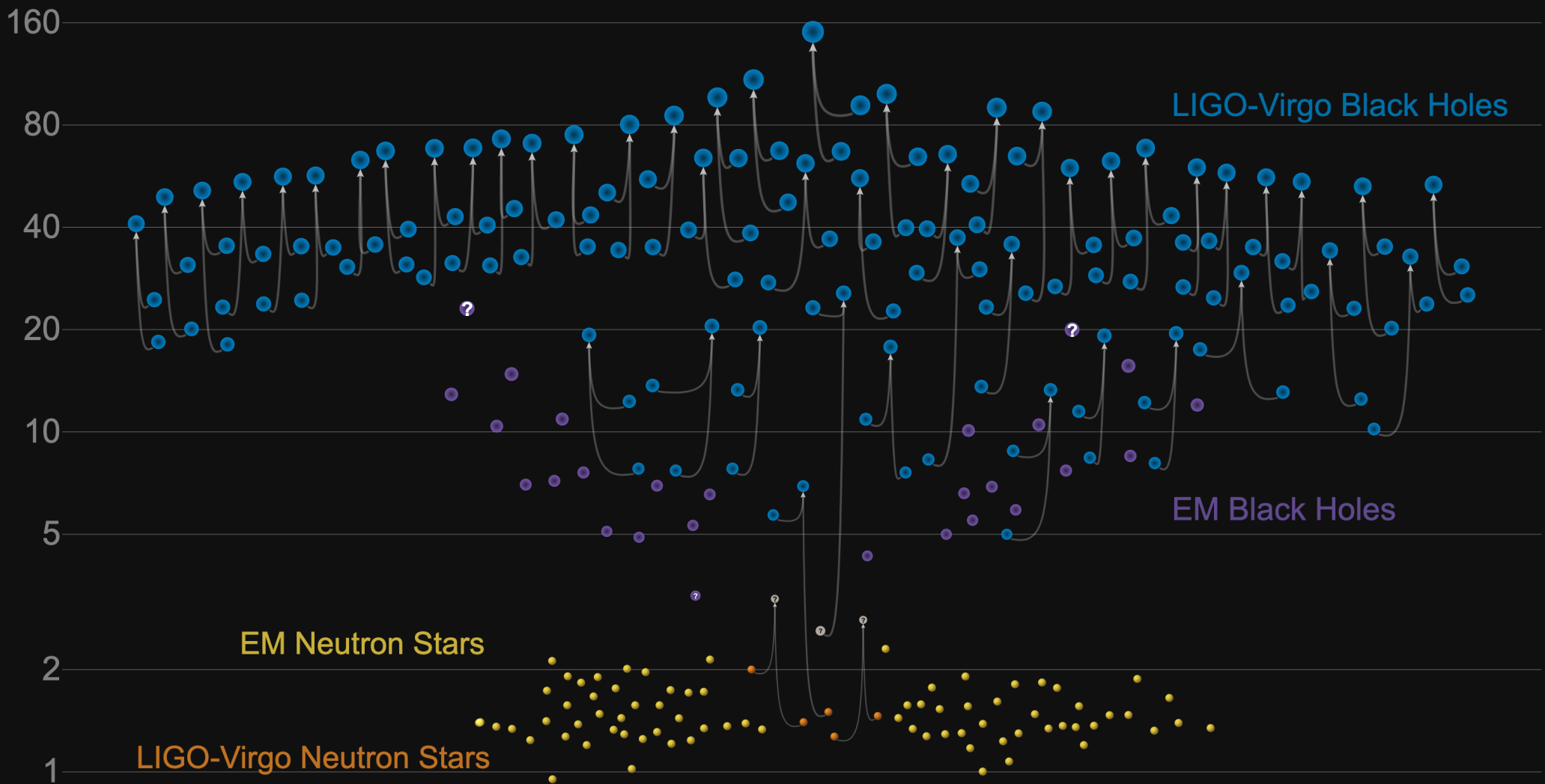
The two components of GW150914 were only a few hundred kilometers apart just before they merged, and **black holes are the only known objects compact enough to get this close together without merging**. Also, based on the estimated total mass for the two components, a pair of neutron stars would not be massive enough, and a black hole-neutron star pair would have already merged at a lower frequency than the value observed by LIGO.

Dopo la prima rivelazione di GW del 04/09/2015, molti altri eventi simili prodotti dalla coalescenza di 2 BN sono stati registrati anche da VIRGO, (ad esempio GW170814), permettendo una localizzazione in cielo molto più precisa



Masses in the Stellar Graveyard

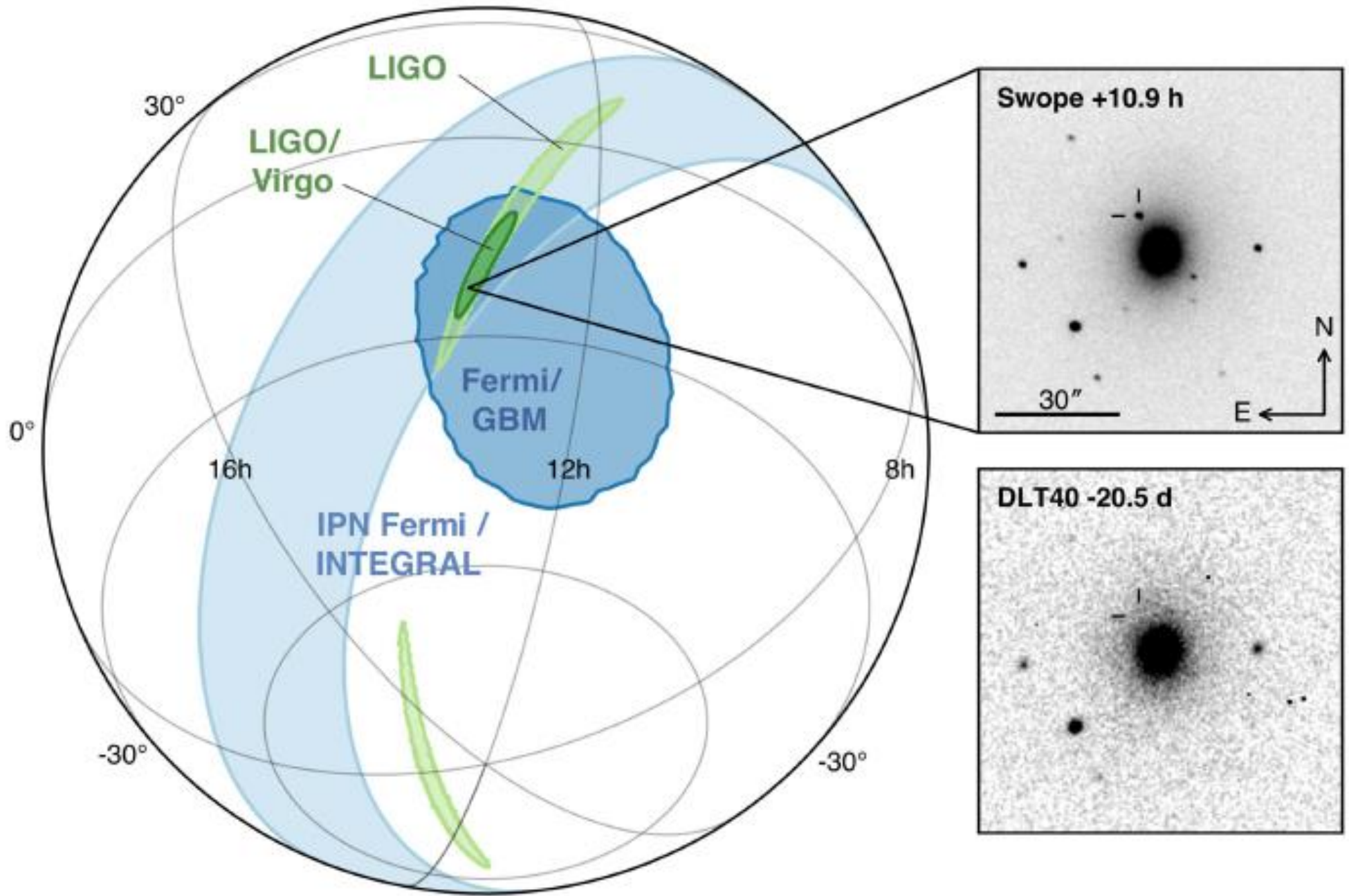
in Solar Masses



GWTC-2 plot v1.0

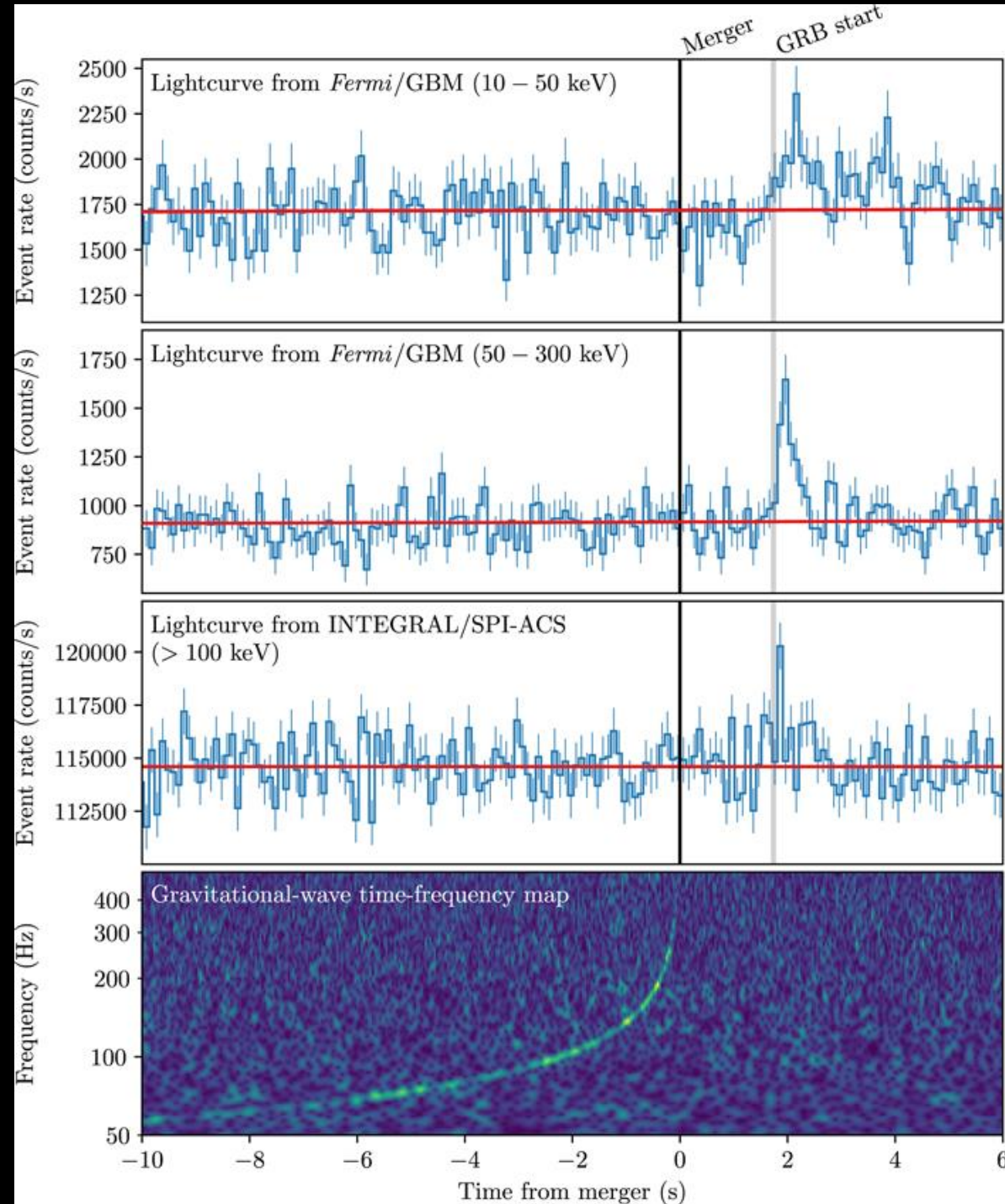
LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

GW170817: primo merger di una coppia di stelle di neutroni



GW170817

**primo merger di una
coppia di stelle di neutroni e
primo caso di osservazioni
multi-messenger: sia onde
grav. che onde
elettromagnetiche**



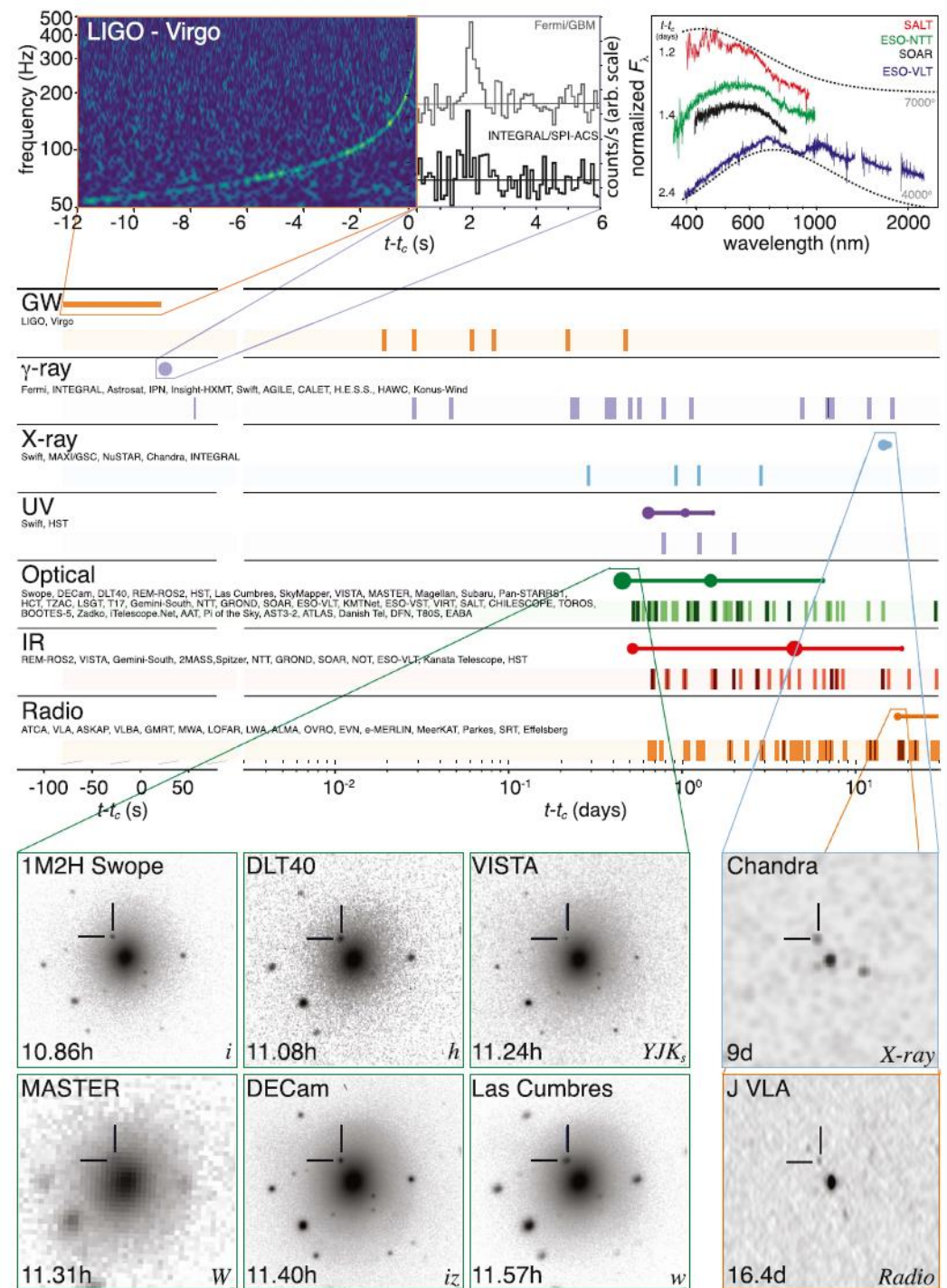
GW170817

Le osservaz. multibanda (dal gamma all'X, UV, ottico, IR fino al radio) hanno permesso di capire che:

1) Almeno parte dei GRB brevi sono associati al merger di 2 NS (burst γ)

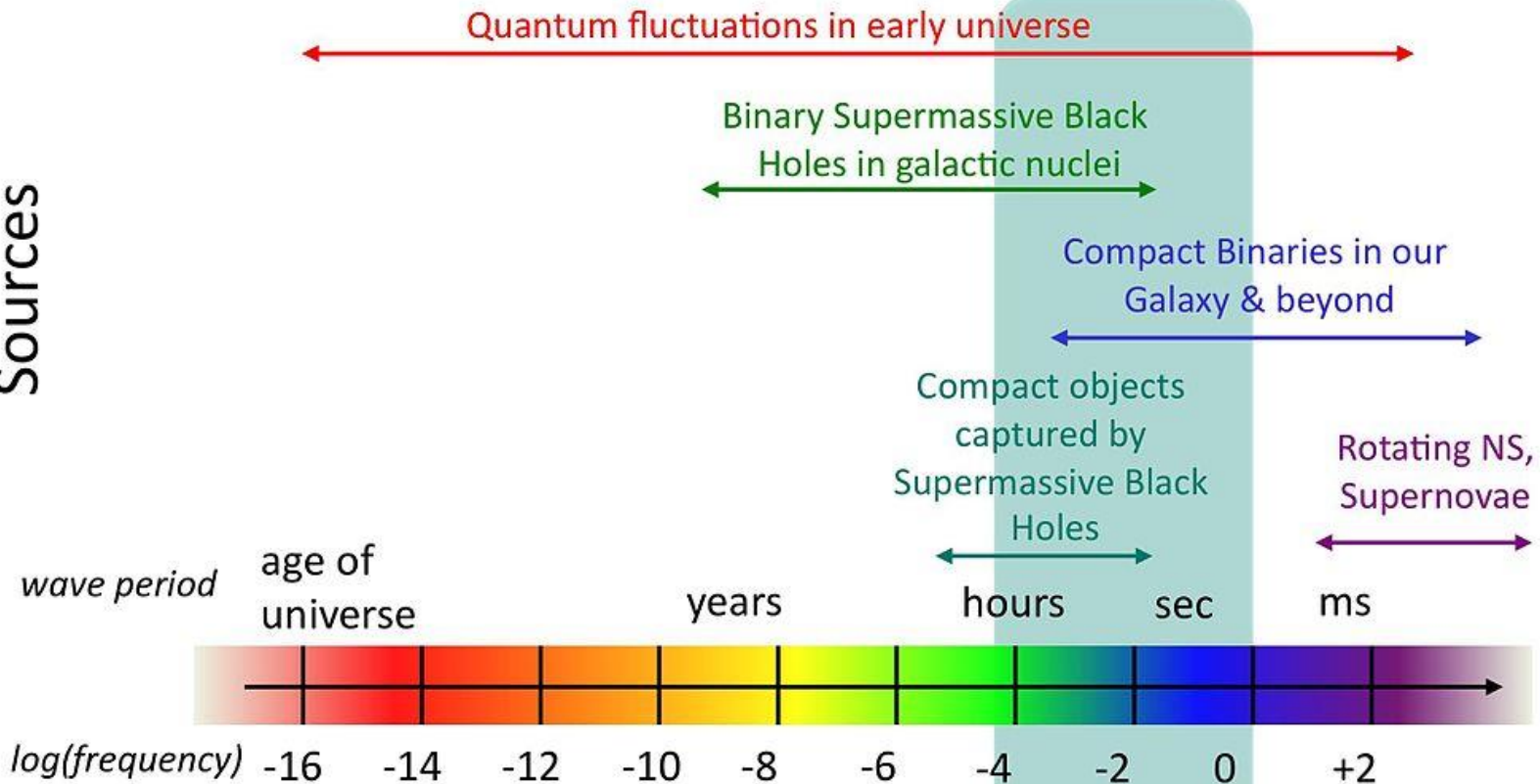
2) Il materiale emesso ($\approx 0.04 M_{\text{SUN}}$) a velocità di $0.2c$ mostra progressivamente le righe di assorbimento di metalli pesanti incluso oro e platino, suggerendo che oltre il 50% di questi metalli pesanti si forma in questi merger mentre una percentuale minore si forma nelle SN (emissione UV, ottica e IR).

3) La successiva emissione X e radio (ben 9 e 13 giorni dopo il merger rispettivamente) è probabilmente un fenomeno indipendente legato all'interazione con il mezzo interstellare (emissione di sincrotrone).

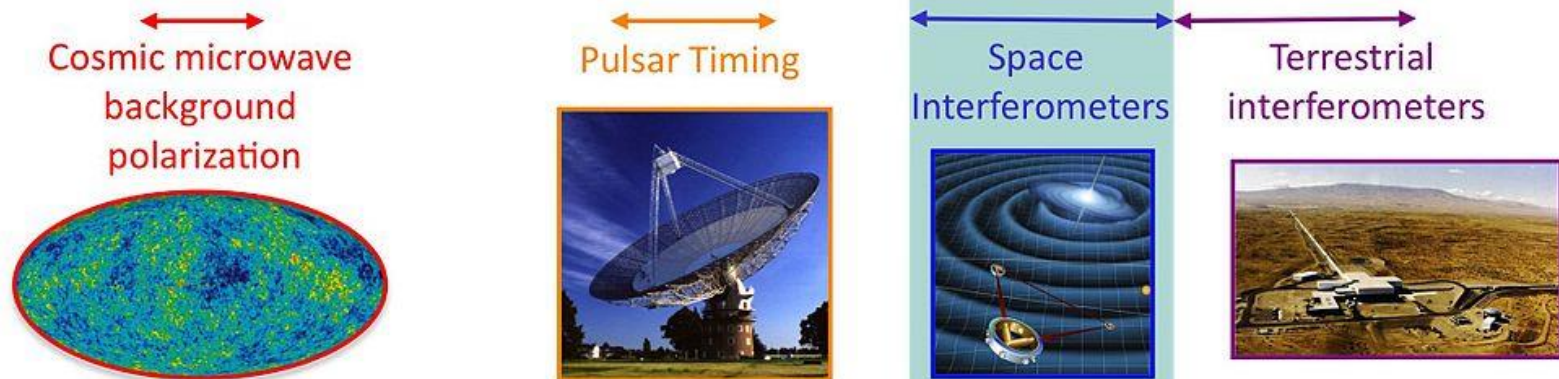


The Gravitational Wave Spectrum

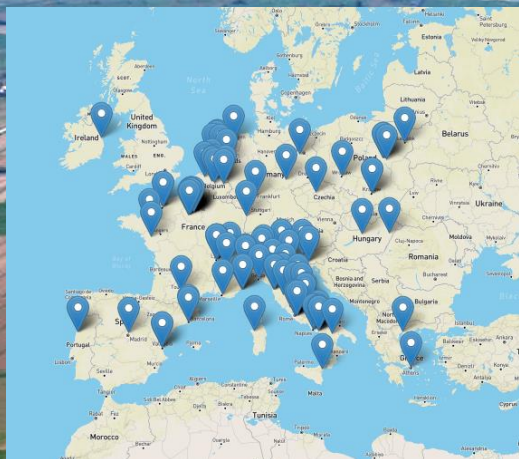
Sources

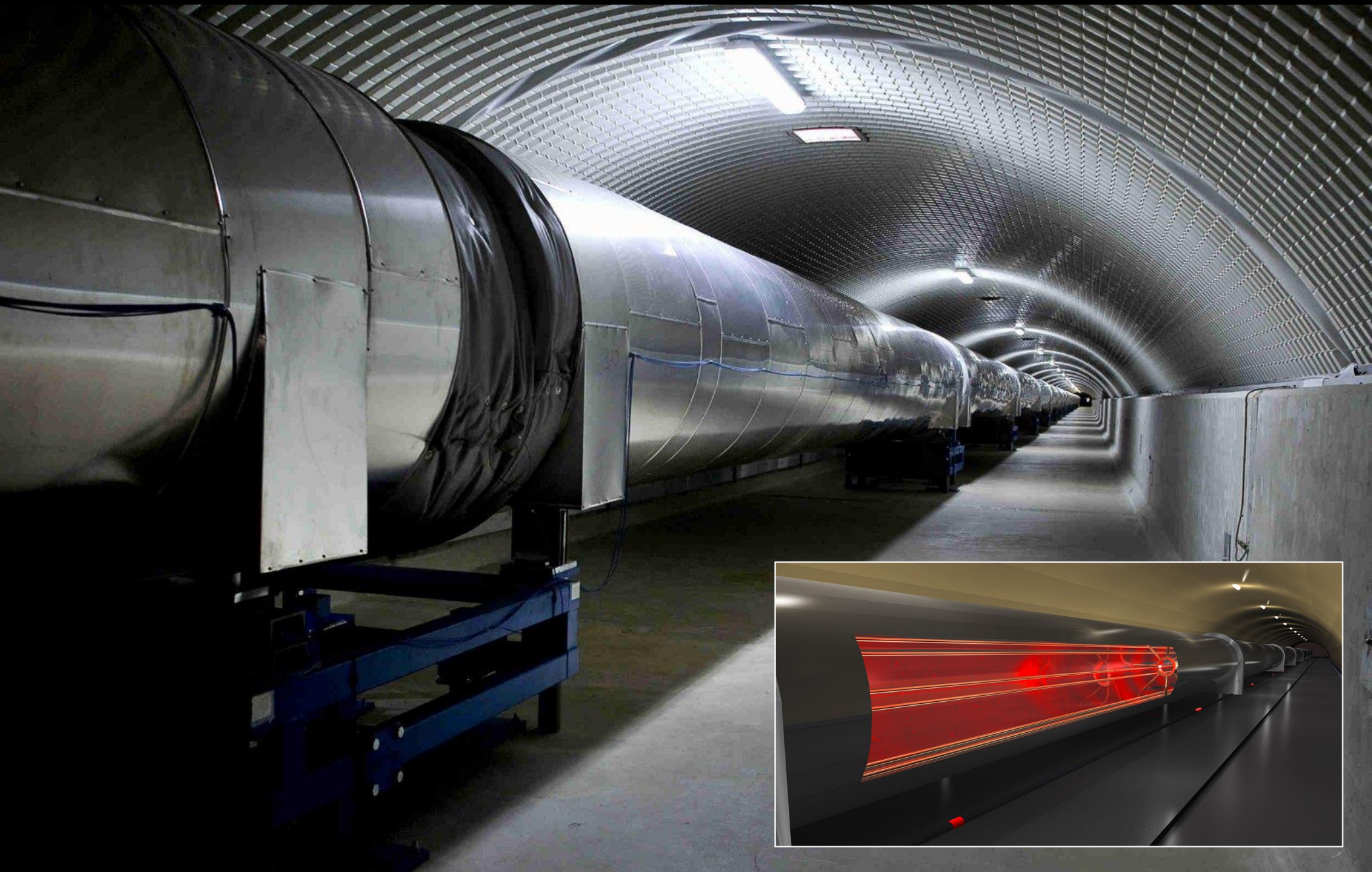


Detectors



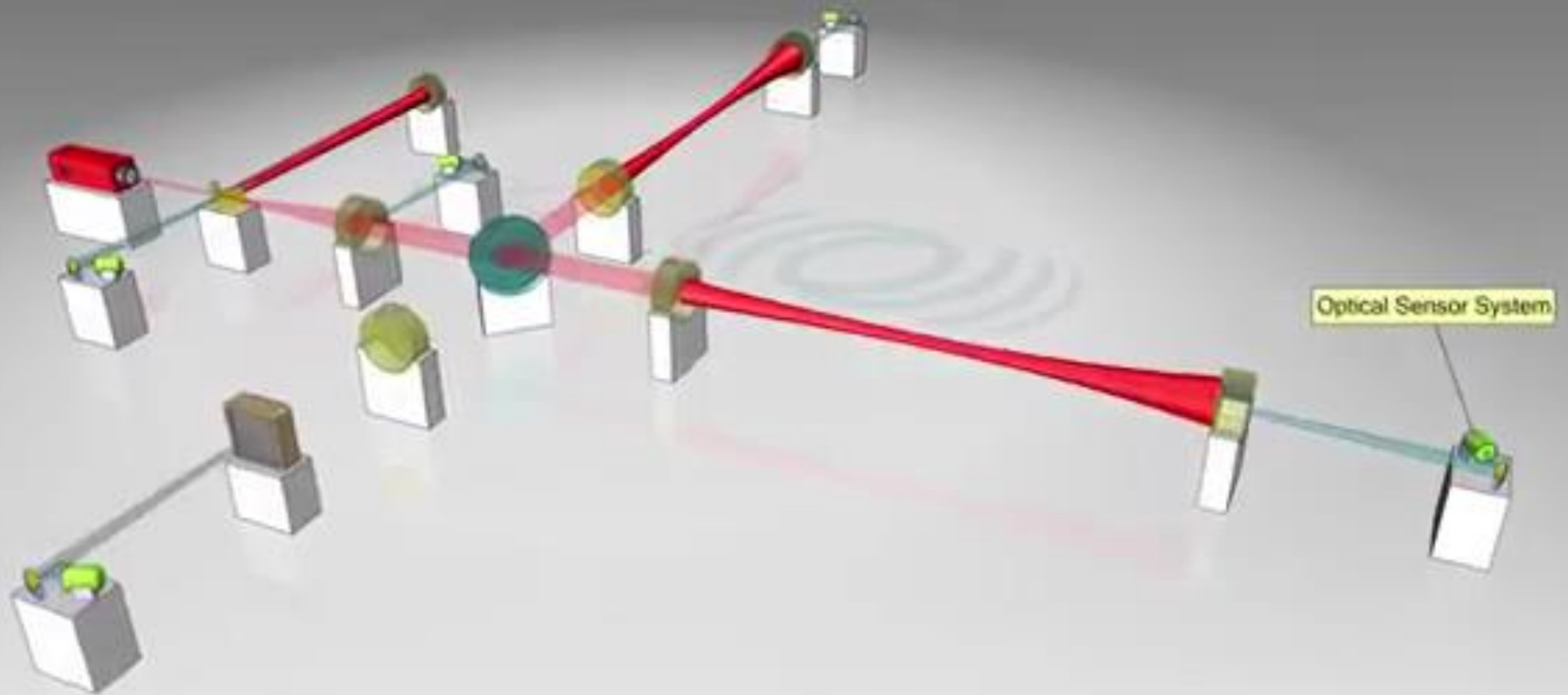
 VIRGO



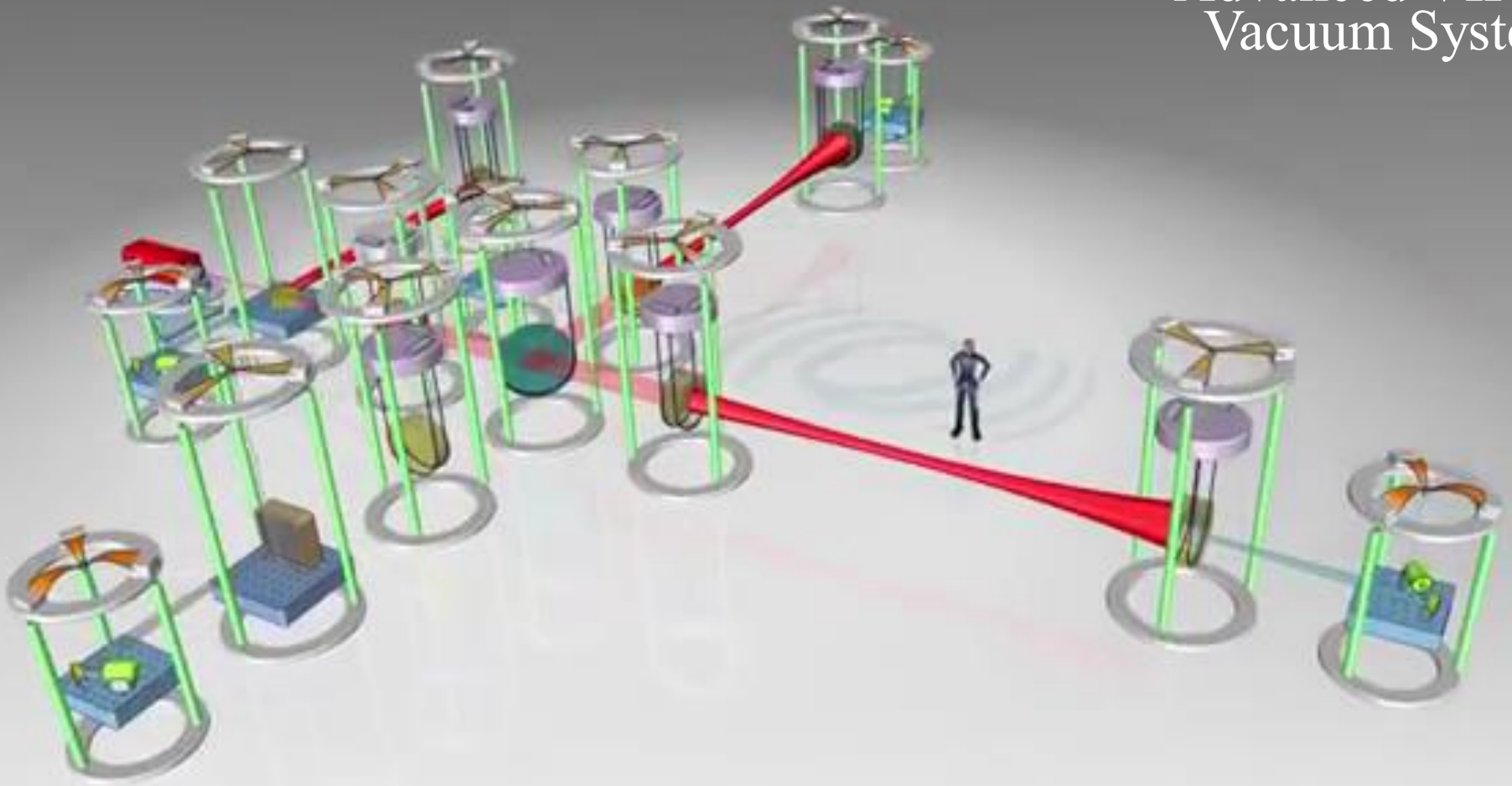




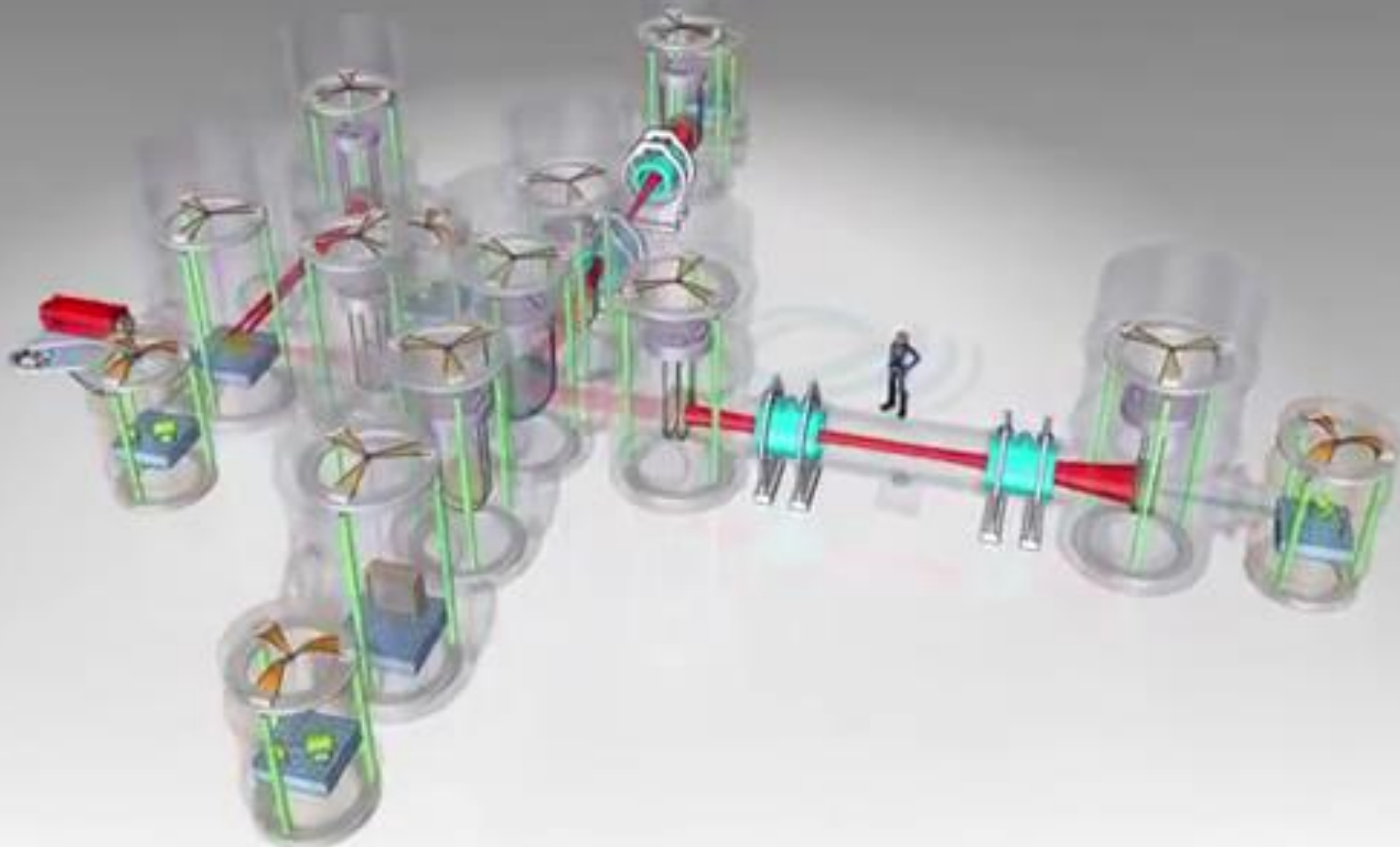
Advanced VIRGO Super Attenuators

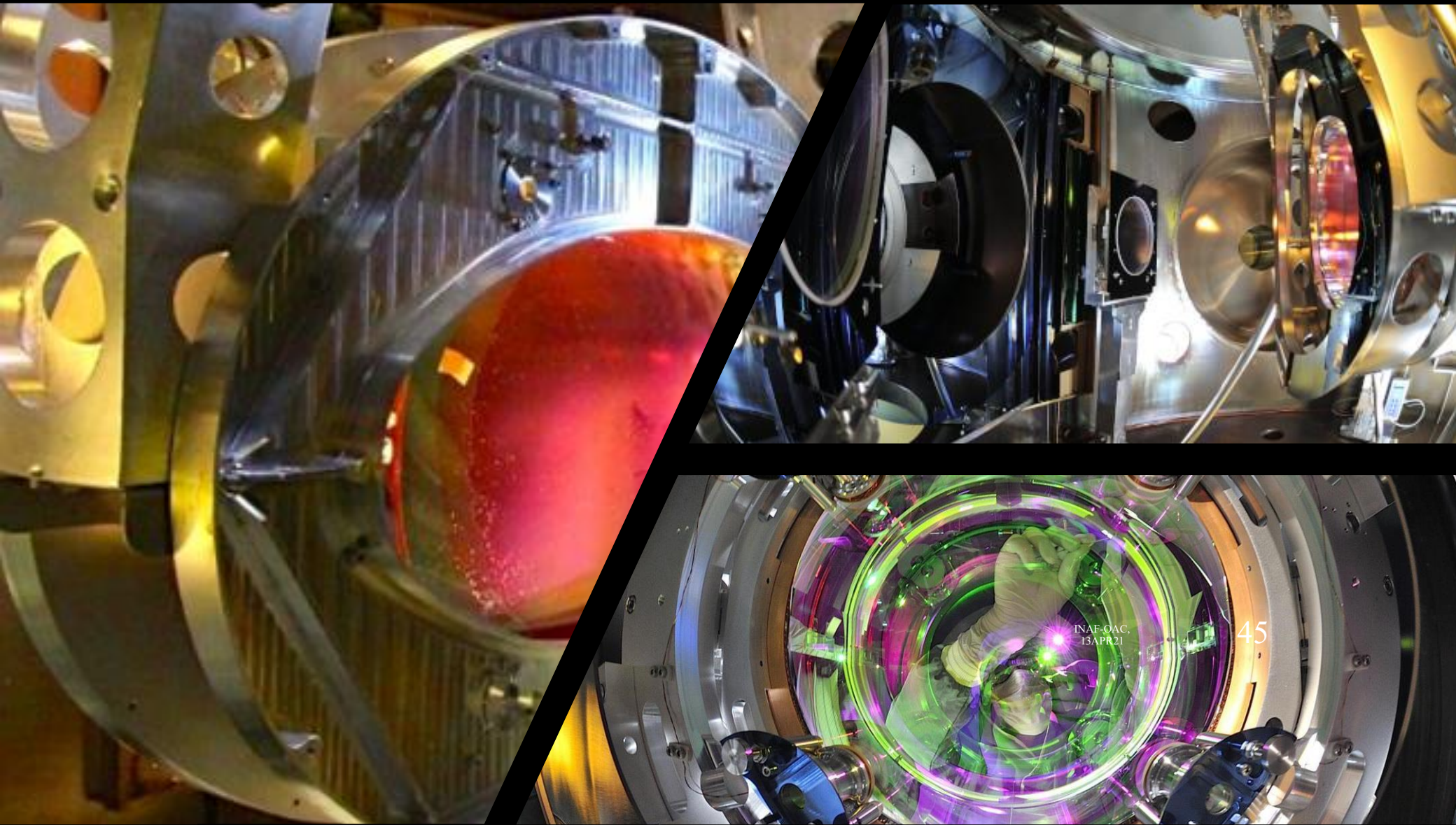


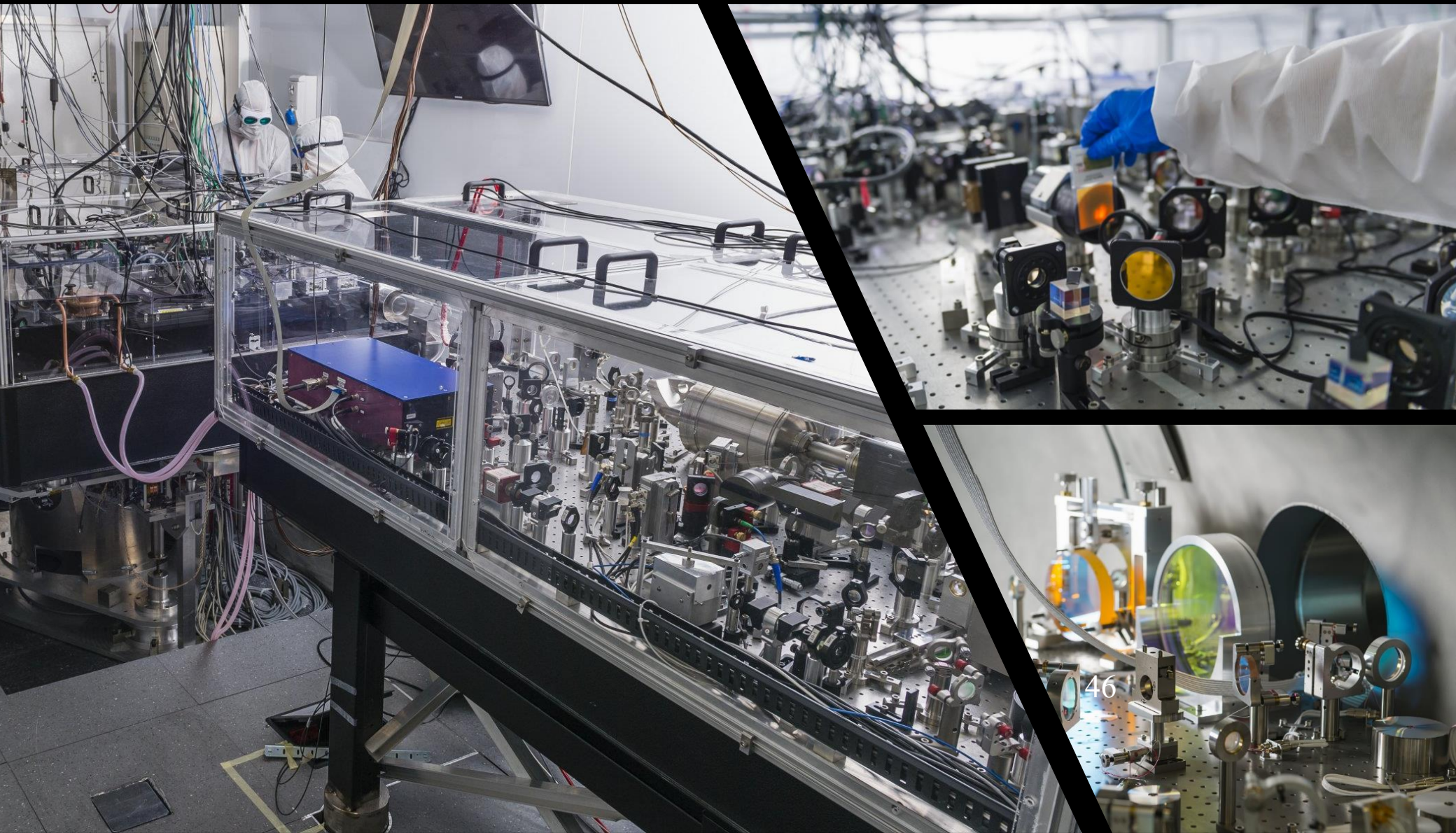
Advanced VIRGO Vacuum System



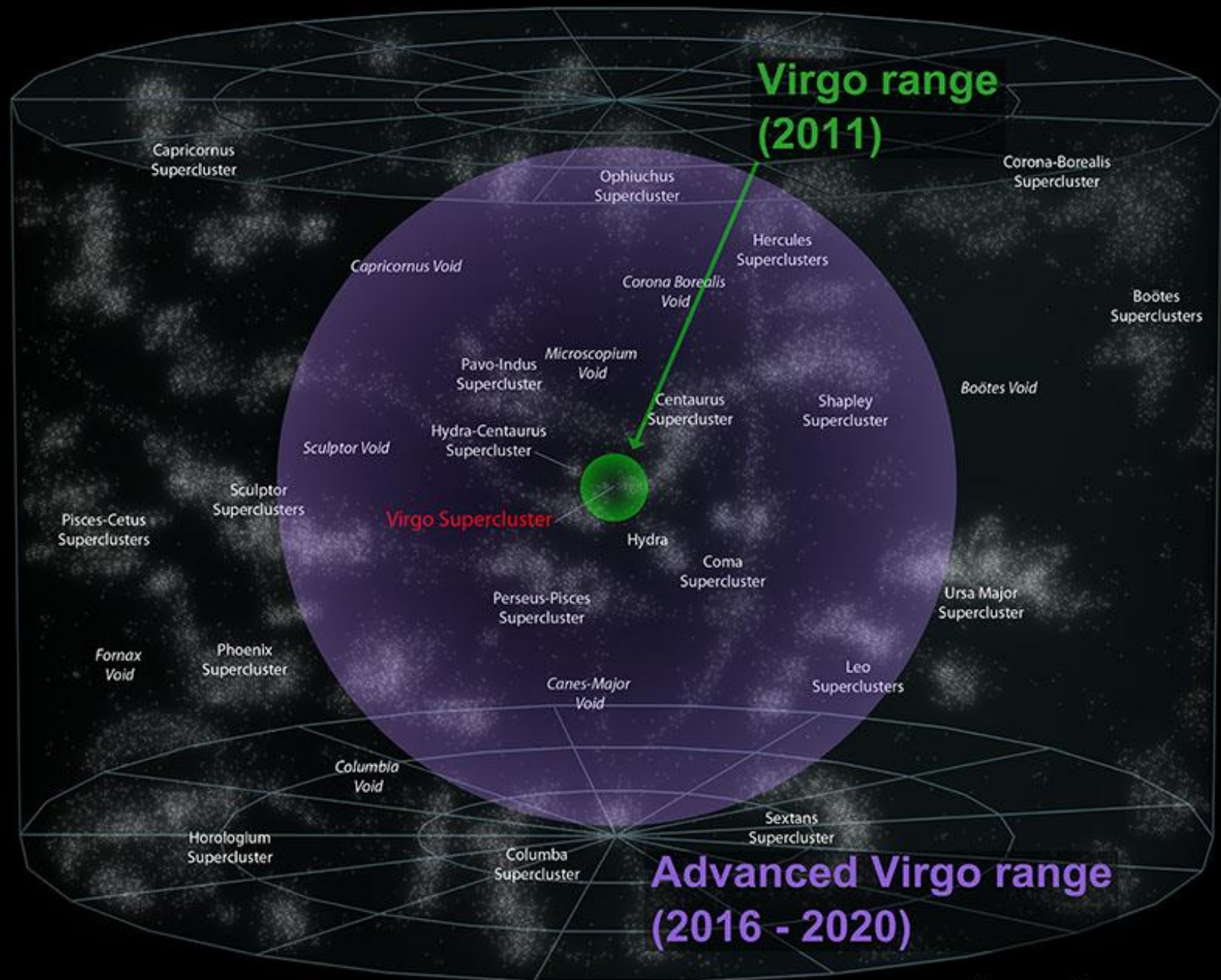
Vacuum inside the 3 km arms: 10^{-9} mbar



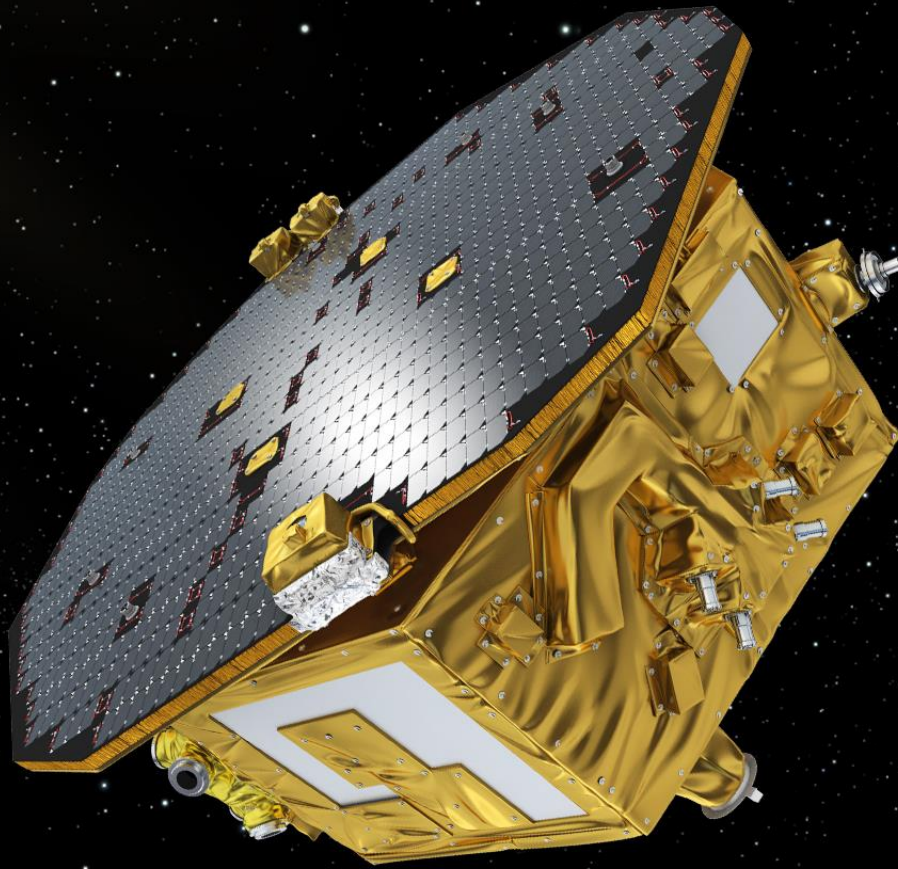




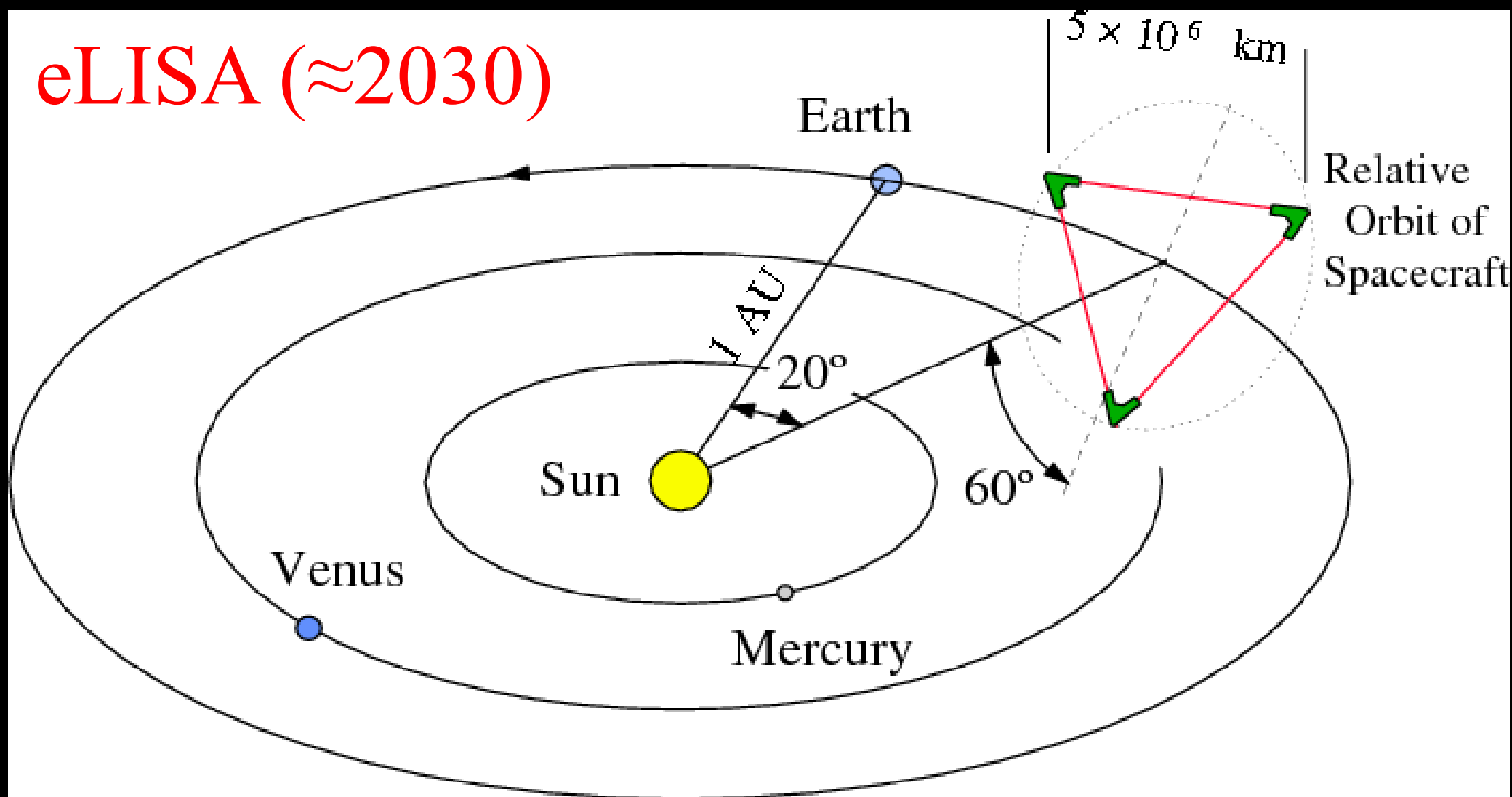


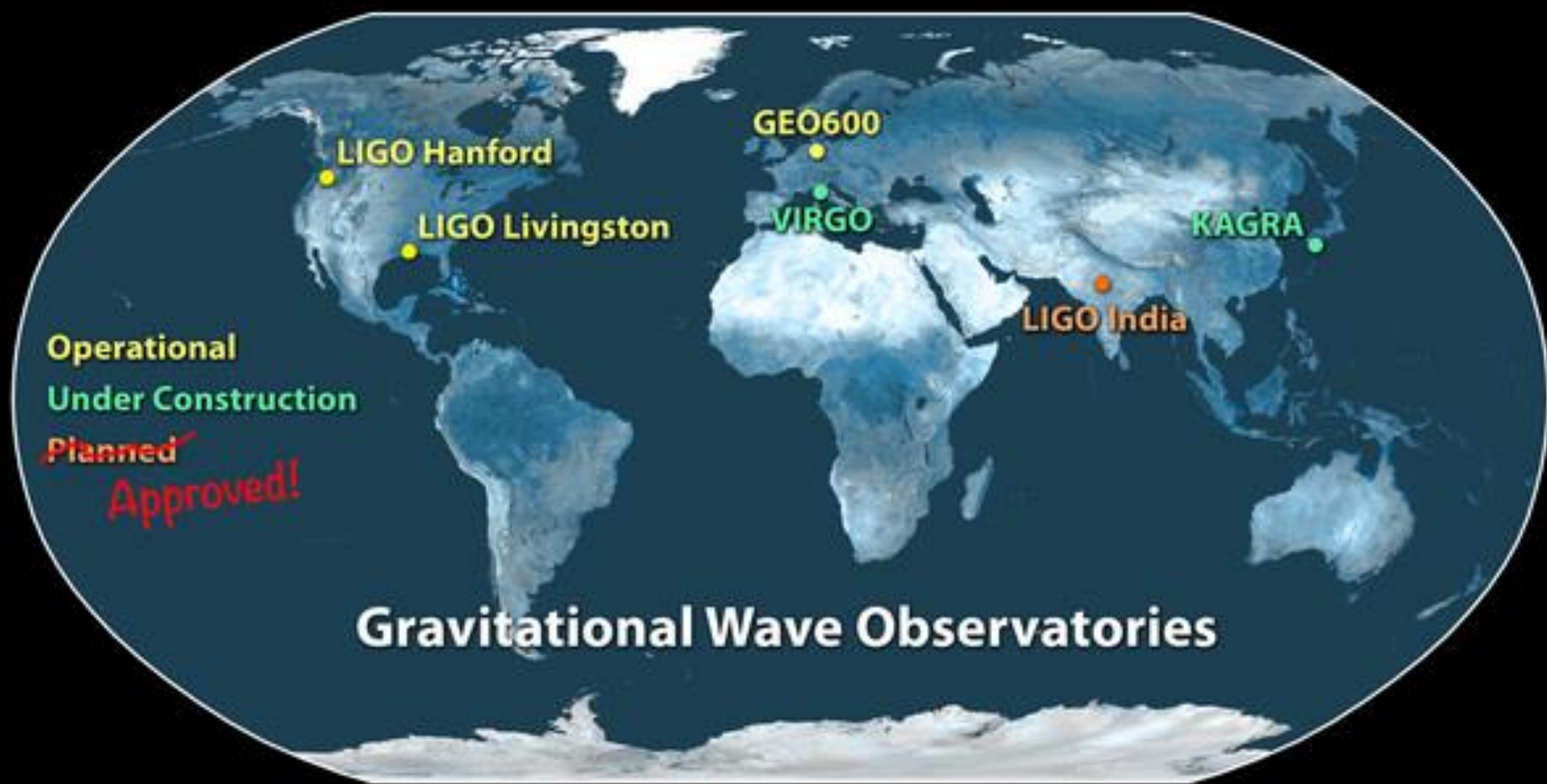


LISA Pathfinder (2016-2017)



eLISA (≈ 2030)

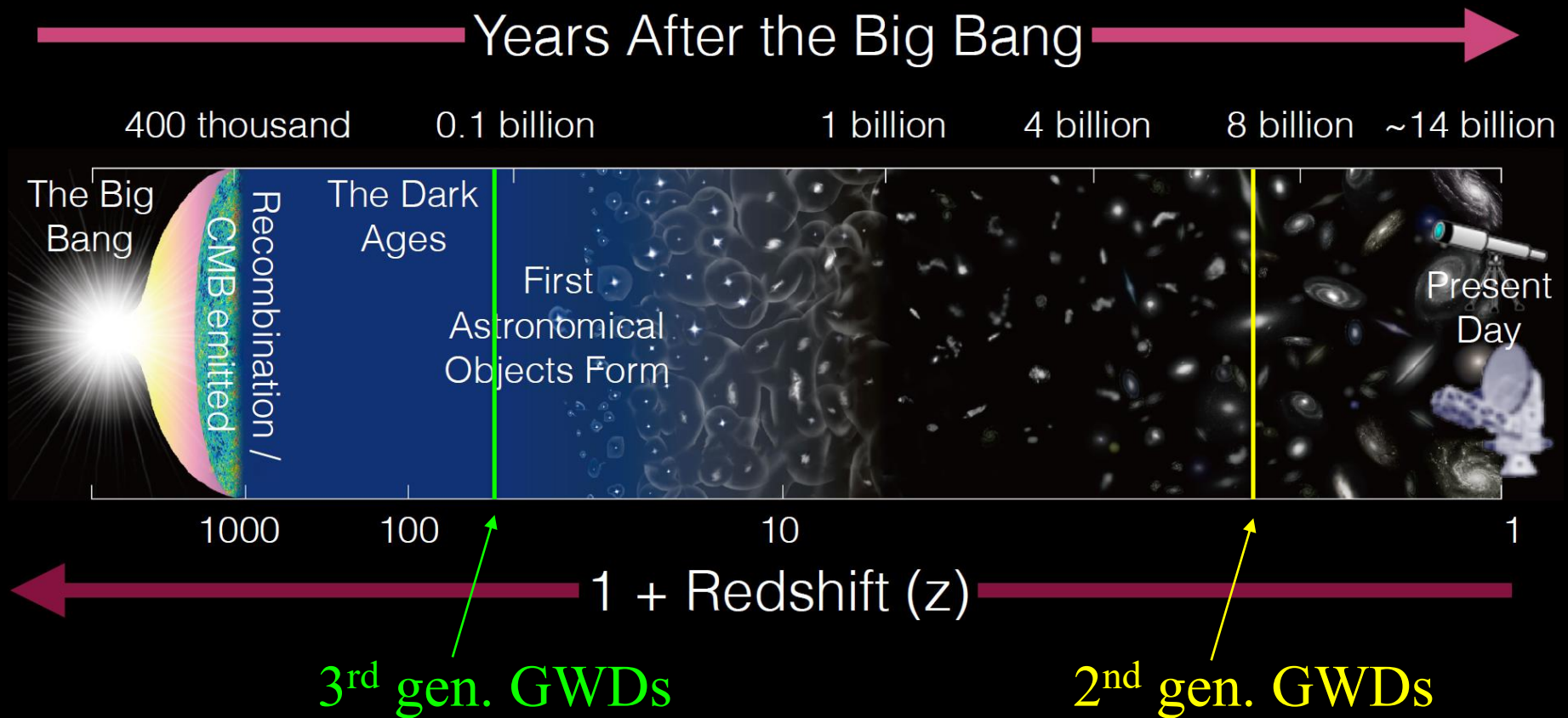




Kagra (2024)



Detection distance of GW detectors



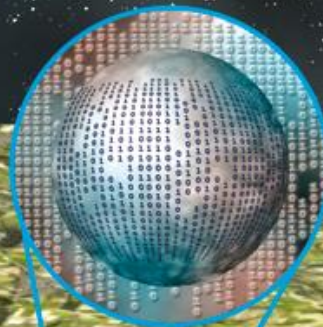
EINSTEIN TELESCOPE

gravitational wave observatory

CENTRAL FACILITY



COMPUTING CENTRE



DETECTOR STATION



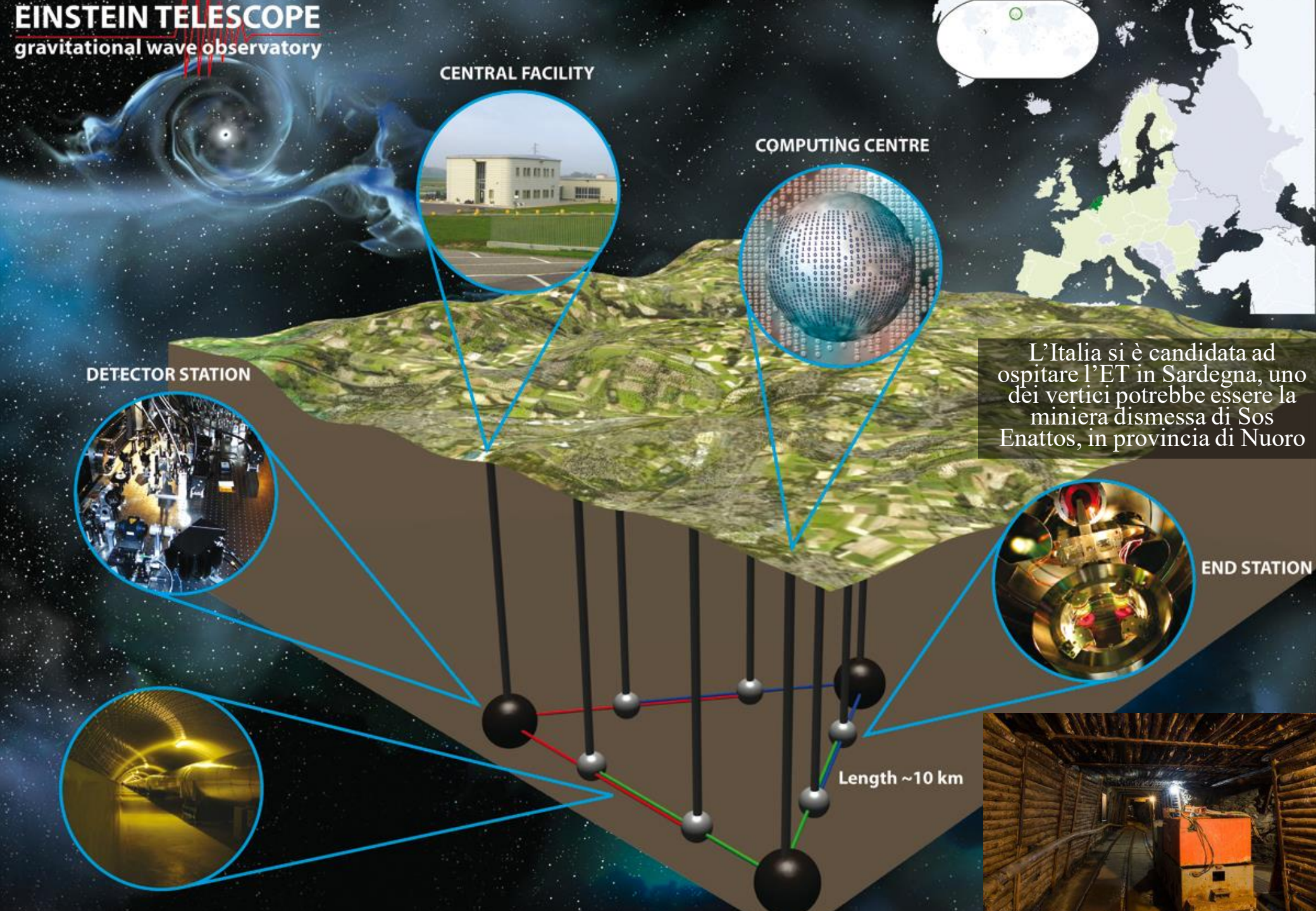
END STATION



Length ~10 km



L'Italia si è candidata ad ospitare l'ET in Sardegna, uno dei vertici potrebbe essere la miniera dismessa di Sos Enattos, in provincia di Nuoro



ET and the 3rd generation GWDs



- The Einstein Telescope (ET) will be a new 3rd generation (3G) GW observatory
- 3G means a factor ~ 10 better than advanced (2G) GW detectors, **and ~ 1000 more universe to explore**
- A completely **new infrastructure is needed**, as the current ones will limit the sensitivity improvement of future upgrades (see later)
- **Key requirements**
 - Wide frequency sensitivity, with special attention to low frequency (few Hz)
 - Capable to work in a standalone mode
 - Sensitive to GW polarization
 - (some) Localization capability
 - High duty-cycle
 - Upgradable
 - 50-years lifetime of the infrastructure
- **ET will extend the science capabilities of 2G/2G+ GW observatories and will introduce new science targets**

A triangular shape

Why ?

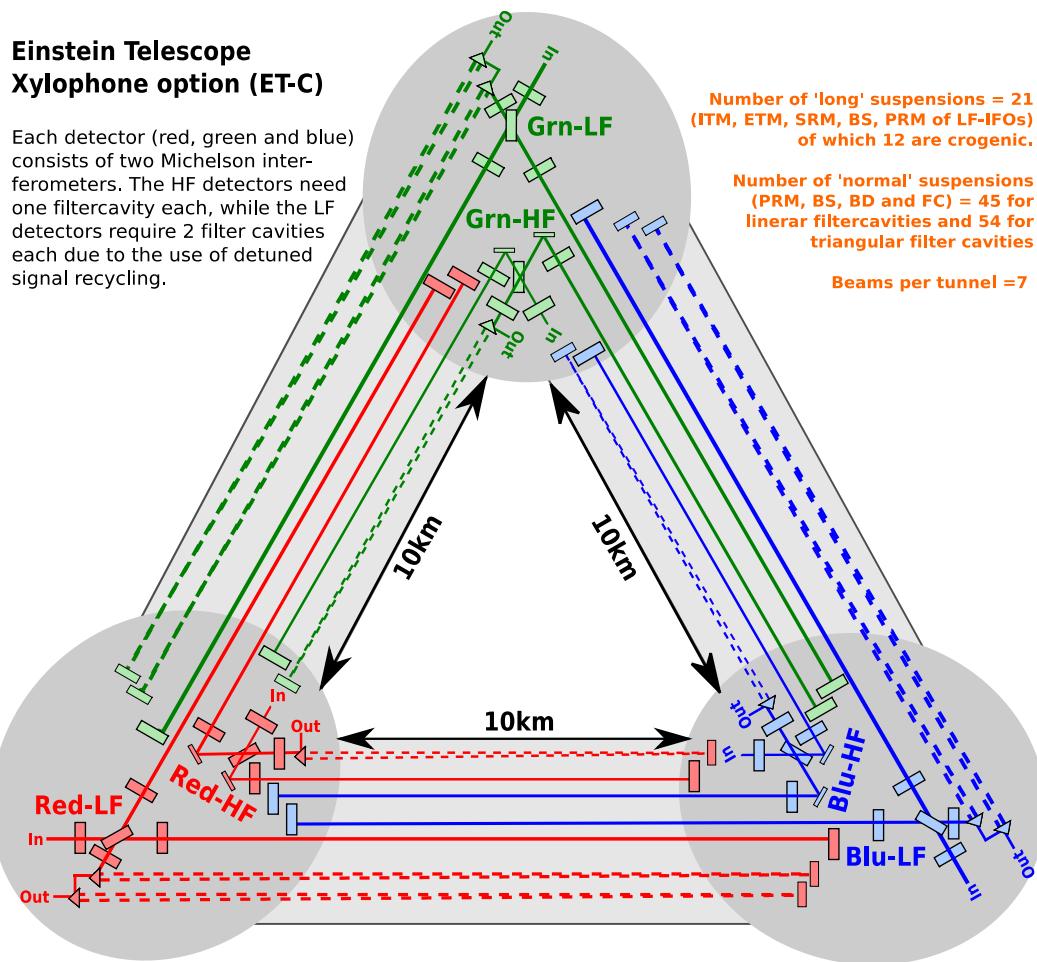
Einstein Telescope Xylophone option (ET-C)

Each detector (red, green and blue) consists of two Michelson interferometers. The HF detectors need one filtercavity each, while the LF detectors require 2 filter cavities each due to the use of detuned signal recycling.

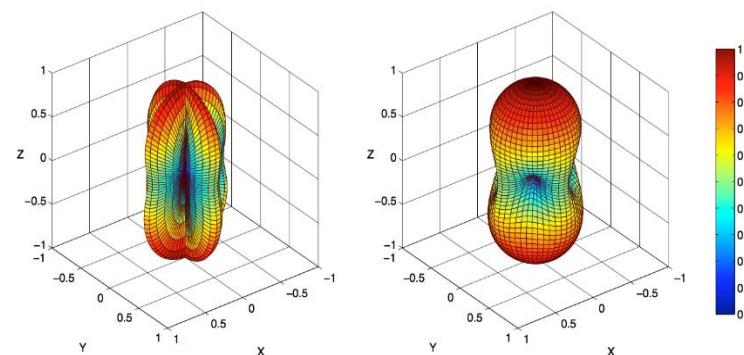
Number of 'long' suspensions = 21
(ITM, ETM, SRM, BS, PRM of LF-IFOs)
of which 12 are crogenic.

Number of 'normal' suspensions
(PRM, BS, BD and FC) = 45 for
linear filtercavities and 54 for
triangular filter cavities

Beams per tunnel = 7



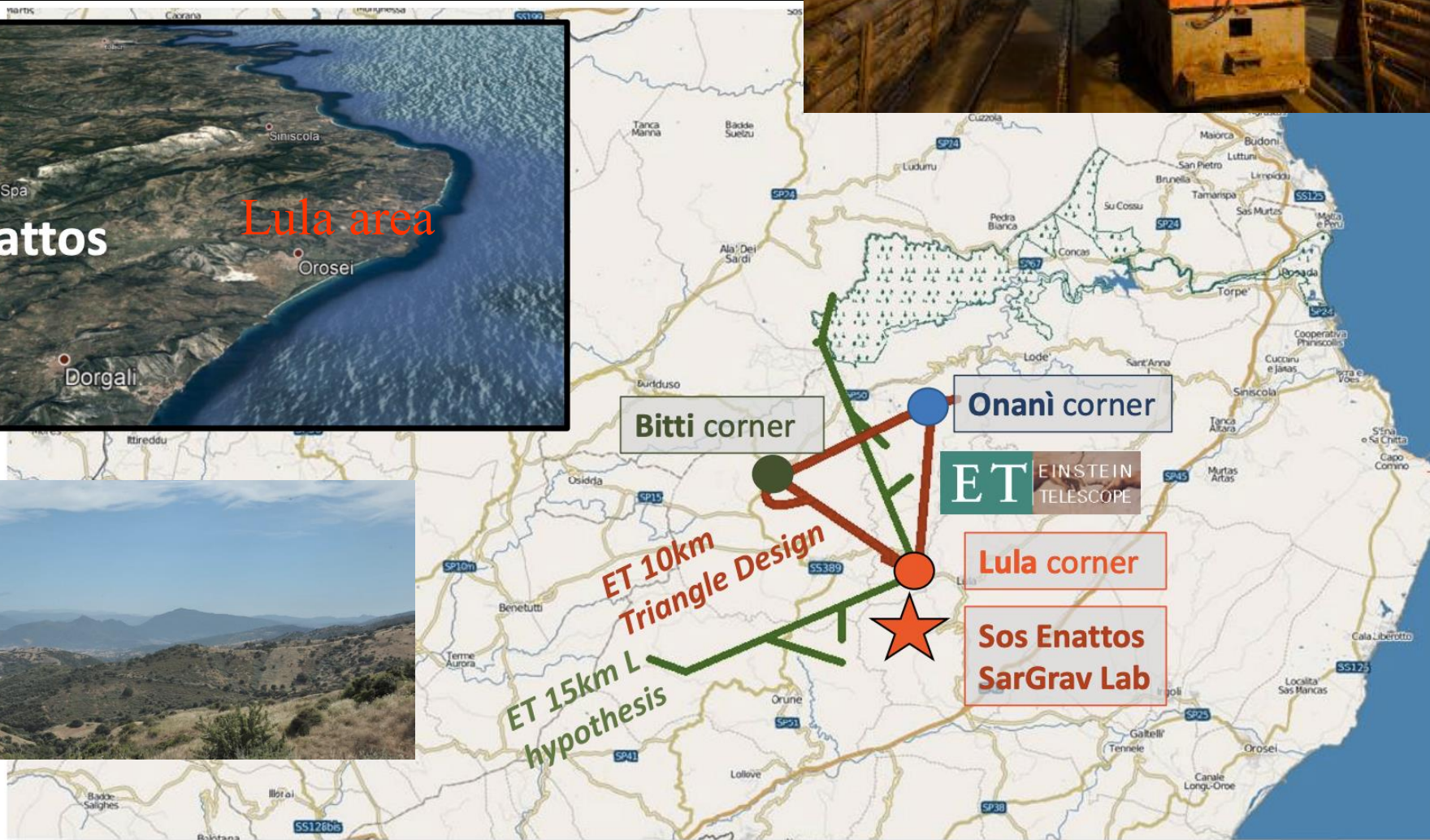
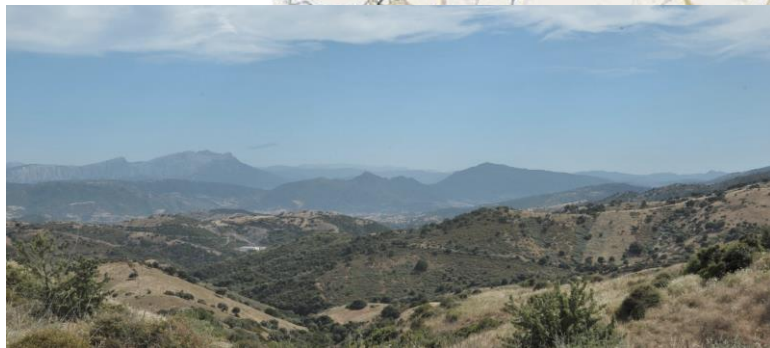
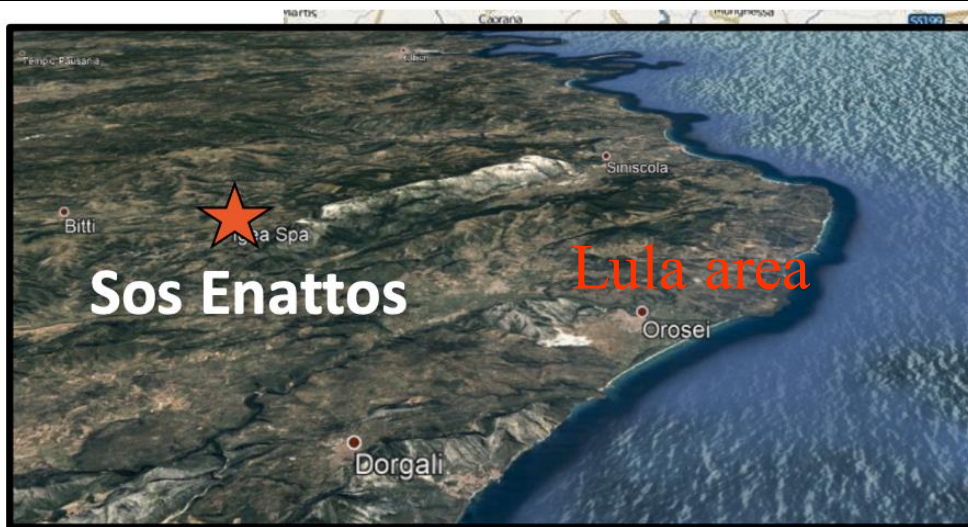
- 1) Three instruments arranged in a compact configuration.
- 2) A second instrument allows to fully resolve all GW polarizations.



Antenna patterns for a polarized GW for a standard "L" (left) and a "triangular" (right) instrument design

- 3) A third instrument adds redundancy to the system, and allows to continuously check the "zero" of the instrument

L'Italia si è candidata ad ospitare l'ET in Sardegna, uno dei vertici potrebbe essere la miniera dismessa di Sos Enattos, in provincia di Nuoro



Siti web di interesse

LIGO Scientific Collaboration

LIGO LAB

VIRGO

GW LIGO-VIRGO event list





Grazie dell'attenzione !

Per domande/commenti: roberto.silvotti@inaf.it