



I messaggeri del cosmo

Giulia Pagliaroli (INFN-LNGS)

Outline

I messaggeri

SN1987A: La storia di una supernova

GW170817: La storia di due stelle di neutroni

IC-170922A: La storia di un buco nero

Conclusioni

Tempo



CARTA DI IDENTITA' DEL FOTONE



- ❖ Particella elementare
- ❖ Priva di massa
- ❖ Elettricamente neutra ma elemento costituente di ogni campo elettromagnetico

Dipende dalla natura della forza in gioco

Per le particelle elementari si parla di «Sezione d'urto», $\sigma(E)$,
Per indicare la «superficie di interazione» (es. πR^2 di una pallottola)

	intensità relativa	raggio d'azione	mediatore della forza	azioni principali
forza forte	1	10^{-15}m	 gluone	tenere assieme il nucleo
forza elettromagnetica	10^{-2}	infinito	 fotone	tenere assieme atomi e molecole
forza debole	10^{-5}	$<10^{-17}\text{m}$	 bosone W o Z	far avvenire processi di trasformazione
forza gravitazionale	10^{-38}	infinito	 gravitone	tenere assieme corpi come sistemi planetari e stellari, galassie, ecc.



Per le particelle elementari si parla di «Sezione d'urto», $\sigma(E)$,
 Per indicare la «superficie di interazione» (es. πR^2 di una pallottola)

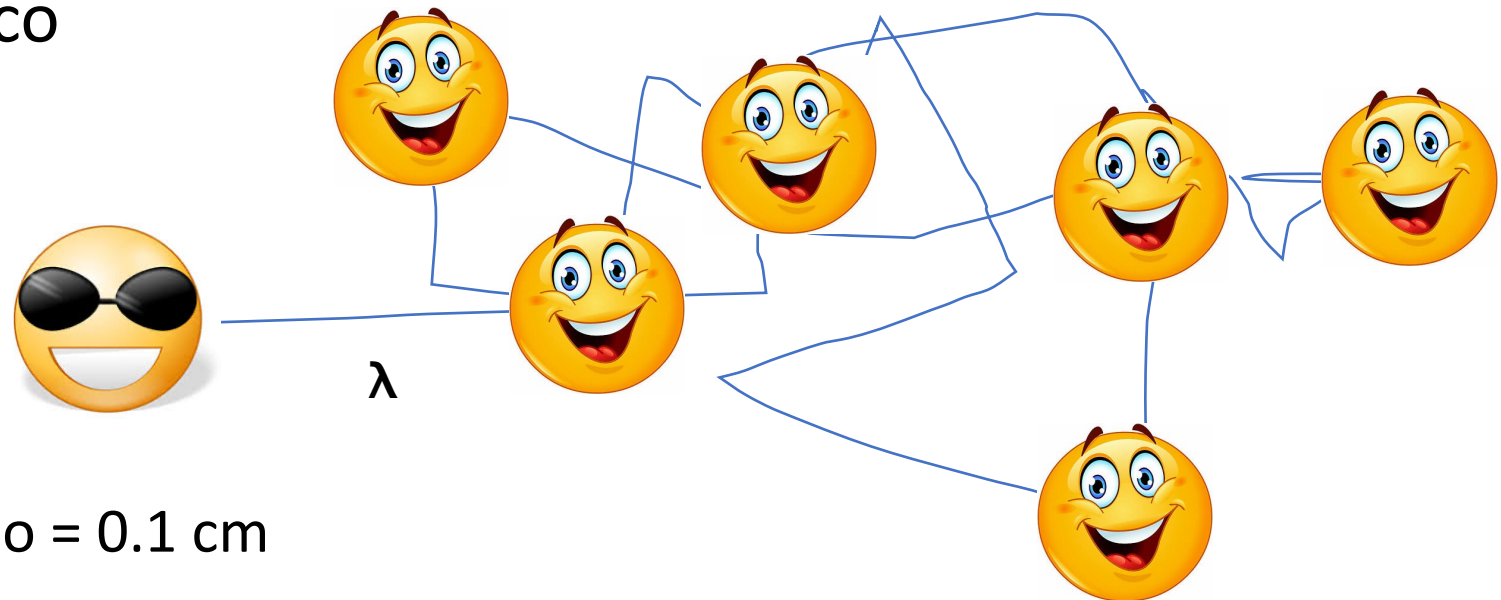
Dipende dalla natura della forza
gioco

Possiamo definire il libero cammino medio come la distanza media che intercorre tra due interazioni $\lambda = \frac{1}{n\sigma(E)}$

CARTA DI IDENTITA' DEL FOTONE

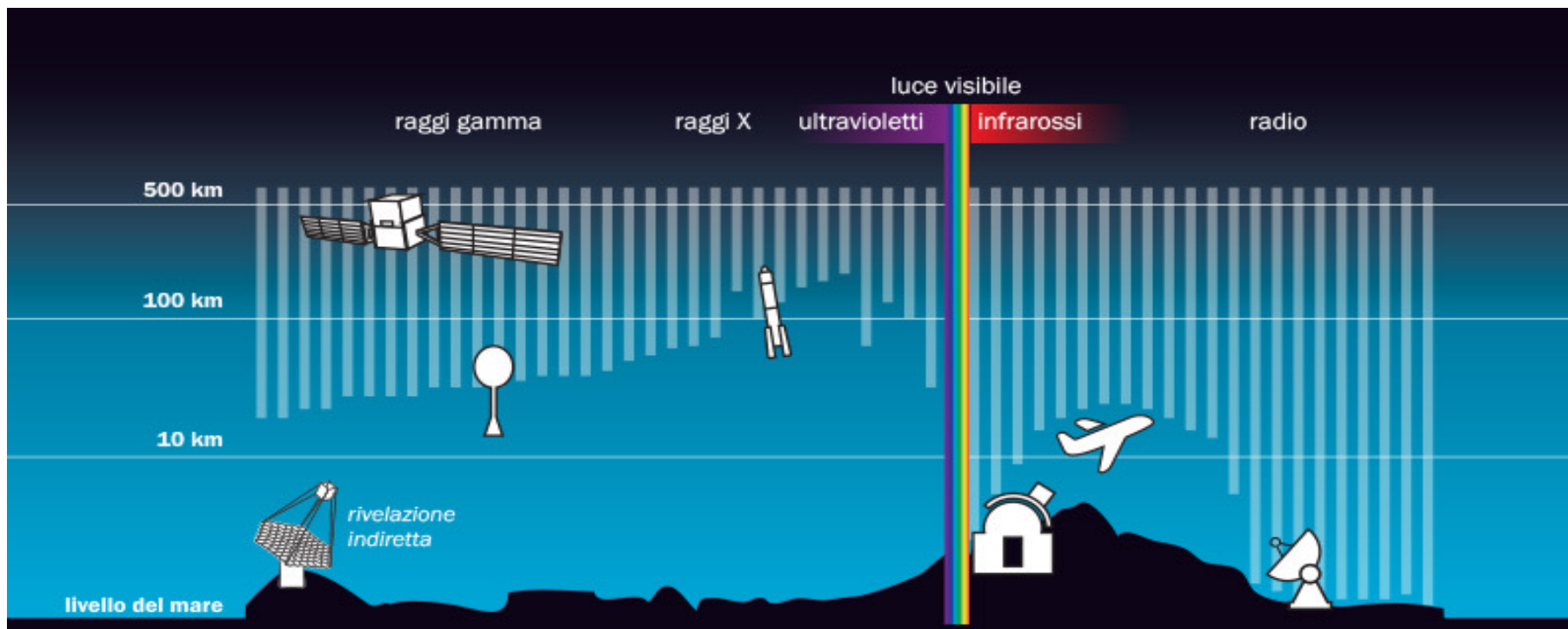
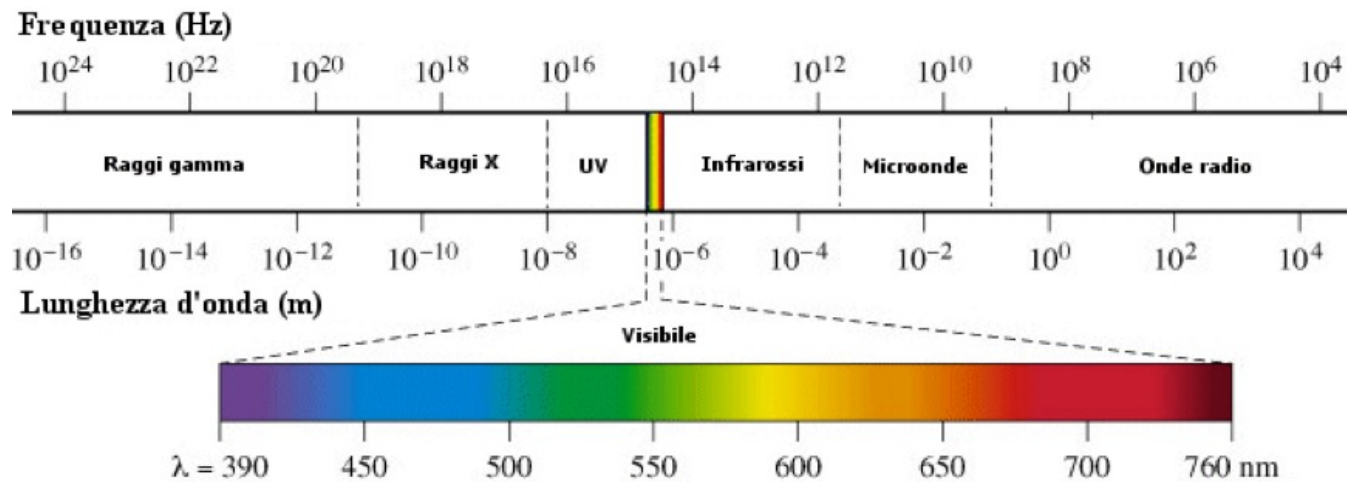


- ❖ Particella elementare
- ❖ Priva di massa
- ❖ Elettricamente neutra ma elemento costituente di ogni campo elettromagnetico
- ❖ Vita da Star

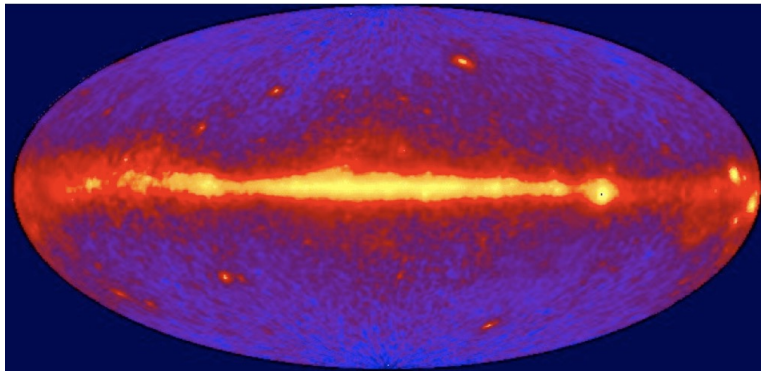
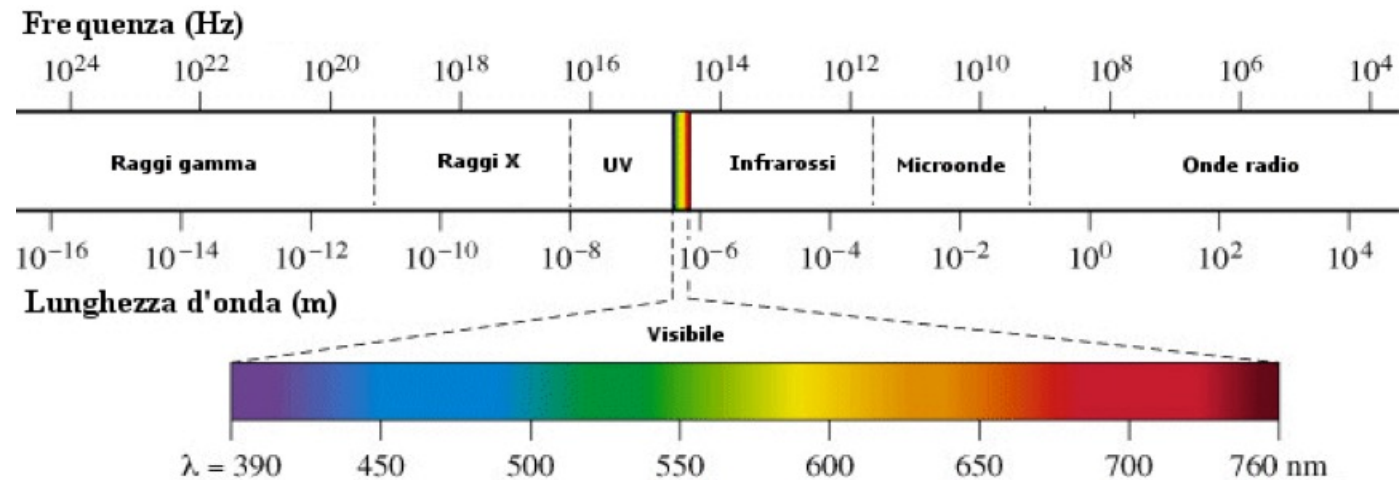


Libero cammino medio = 0.1 cm

Tanti modi di osservare e tanti diversi strumenti per farlo



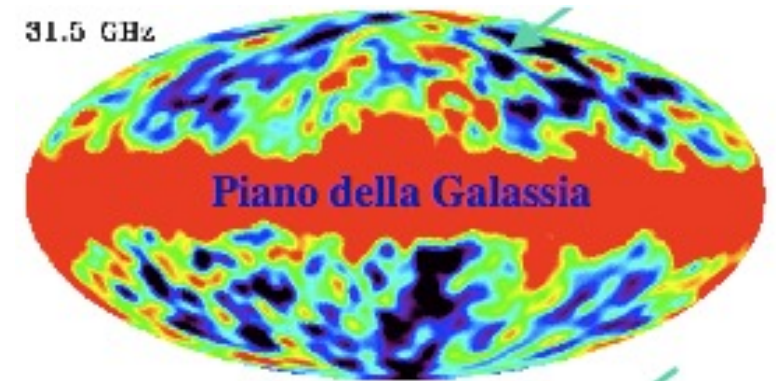
Tanti modi di osservare e tante diverse informazioni



Raggi gamma: lampi di raggi gamma che durano pochi secondi ogni $\frac{1}{2}$ giorni



Luce visibile: gas e polveri occultano le regioni più interne

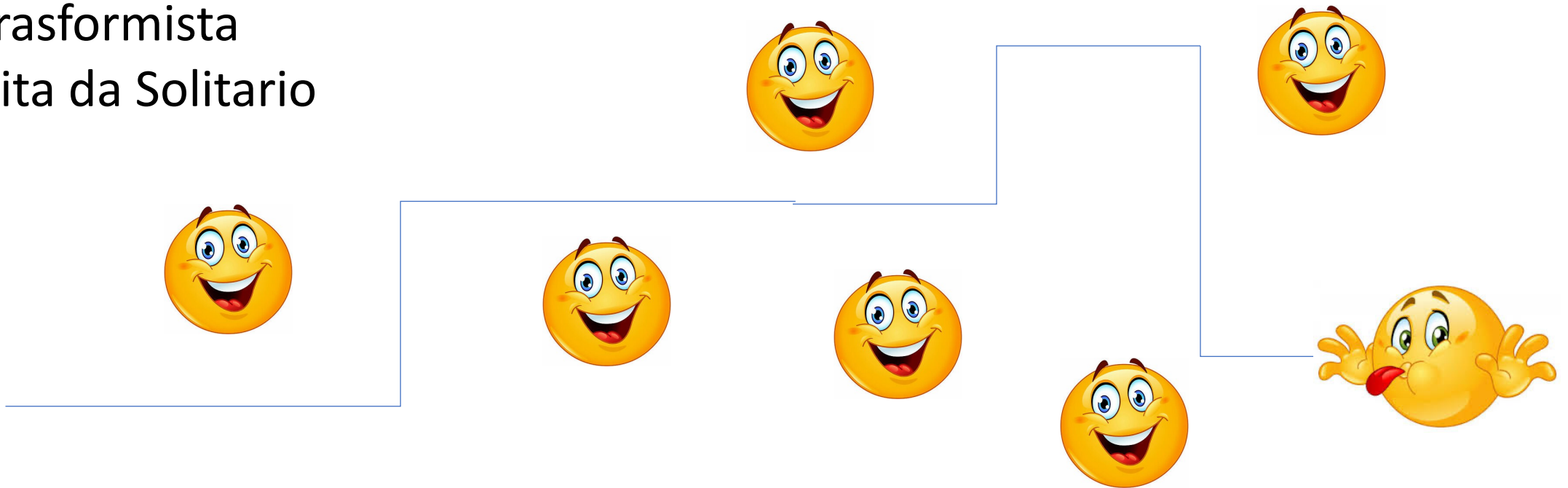


Microonde: la prima luce emessa dall'Universo appena nato

CARTA DI IDENTITA' DEL NEUTRINO

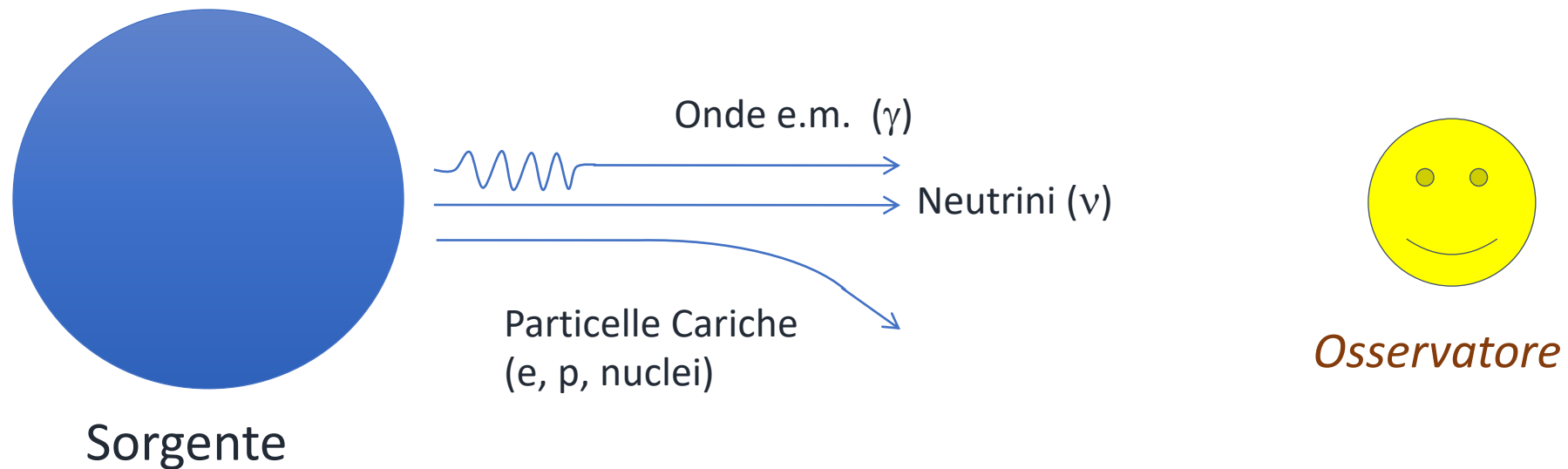


- ❖ Particella elementare
- ❖ Dotato di massa estremamente piccola
- ❖ Elettricamente neutra
- ❖ Trasformista
- ❖ Vita da Solitario



Perché i neutrini?

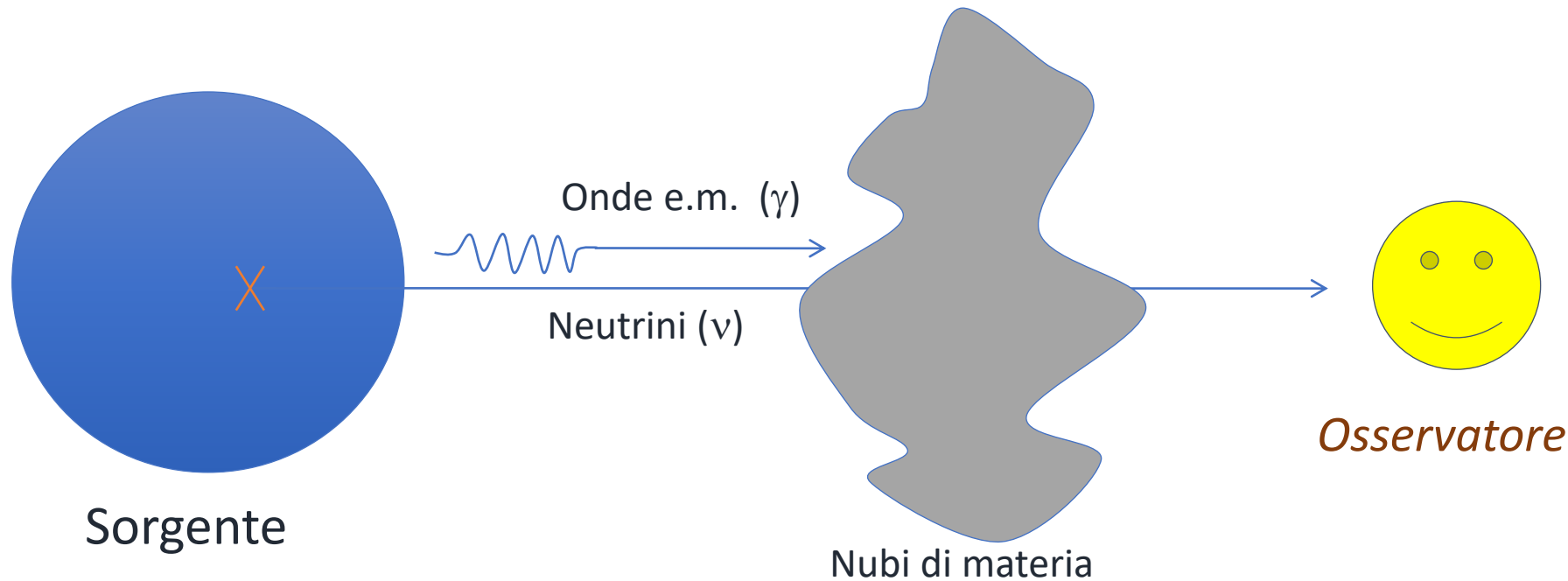
I neutrini sono neutri → non vengono deviati dai campi magnetici → puntano alla sorgente



Perché i neutrini?

I neutrini interagiscono poco

Consentono di osservare le zone interne degli oggetti.
Attraversano nubi di materia e polveri.



Libero cammino medio = $6 \cdot 10^{19}$ cm (circa 60 anni luce)

N.B. La stella più vicina a noi (dopo il Sole) dista 4 anni luce. Il centro della galassia circa 25.000 anni luce.

PER FARE ASTRONOMIA DOBBIAMO CATTURARLI

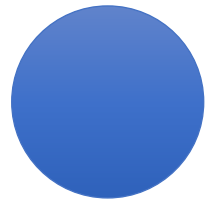
Il primo telescopio di neutrini

- KAMIOKANDE E SUPER-KAMIOKANDE (Japan)

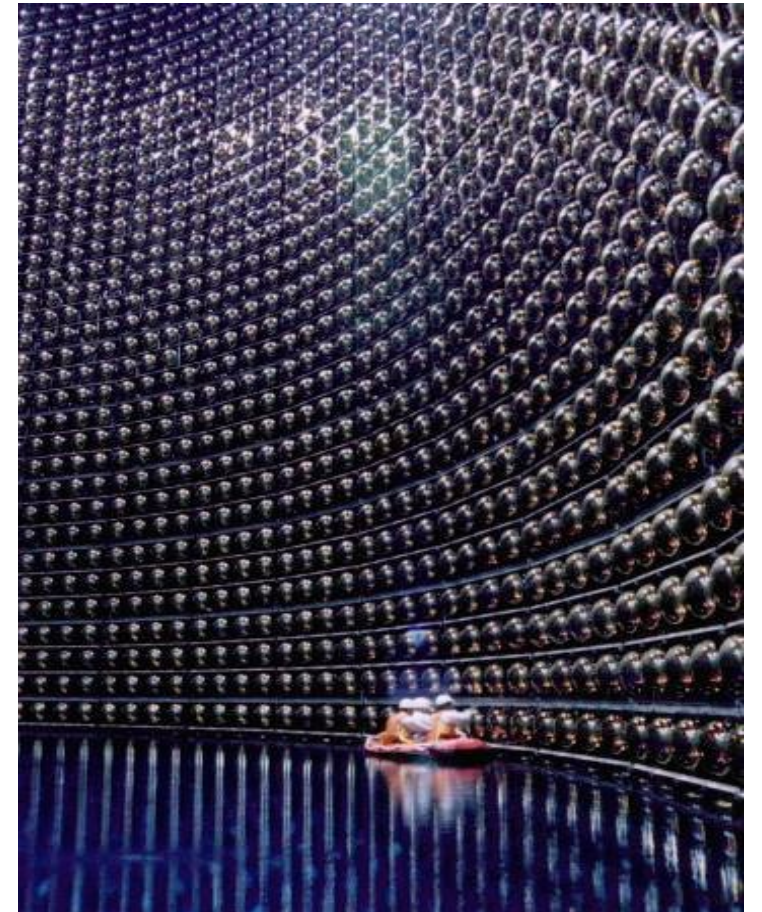
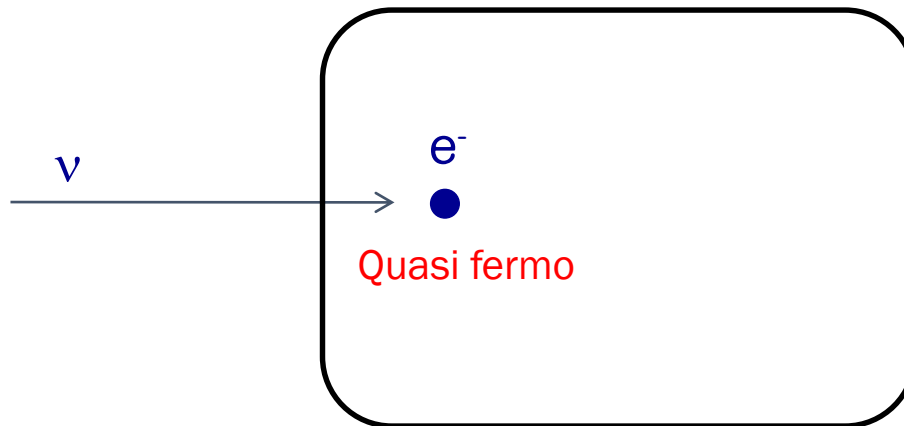
SK - 22.5 Kton di H₂O



SK



Sole



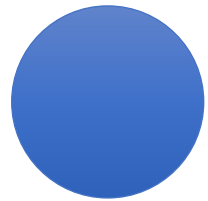
PER FARE ASTRONOMIA DOBBIAMO CATTURARLI

Il primo telescopio di neutrini

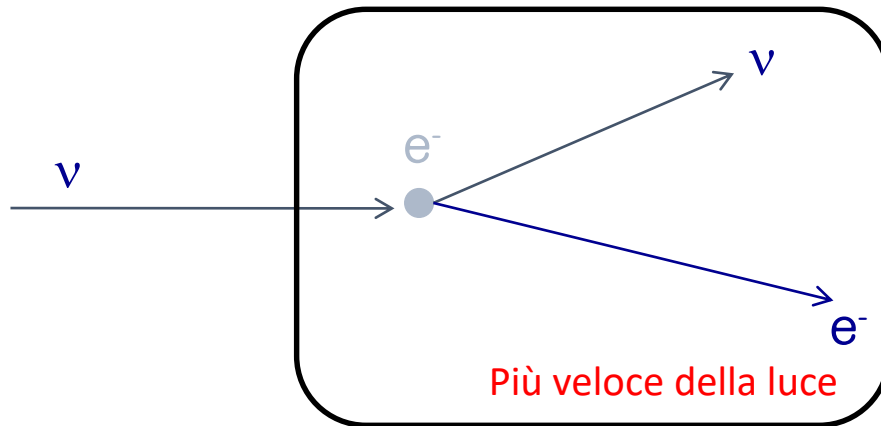
- KAMIOKANDE E SUPER-KAMIOKANDE (Japan)

SK – 22.5 Kton di H₂O

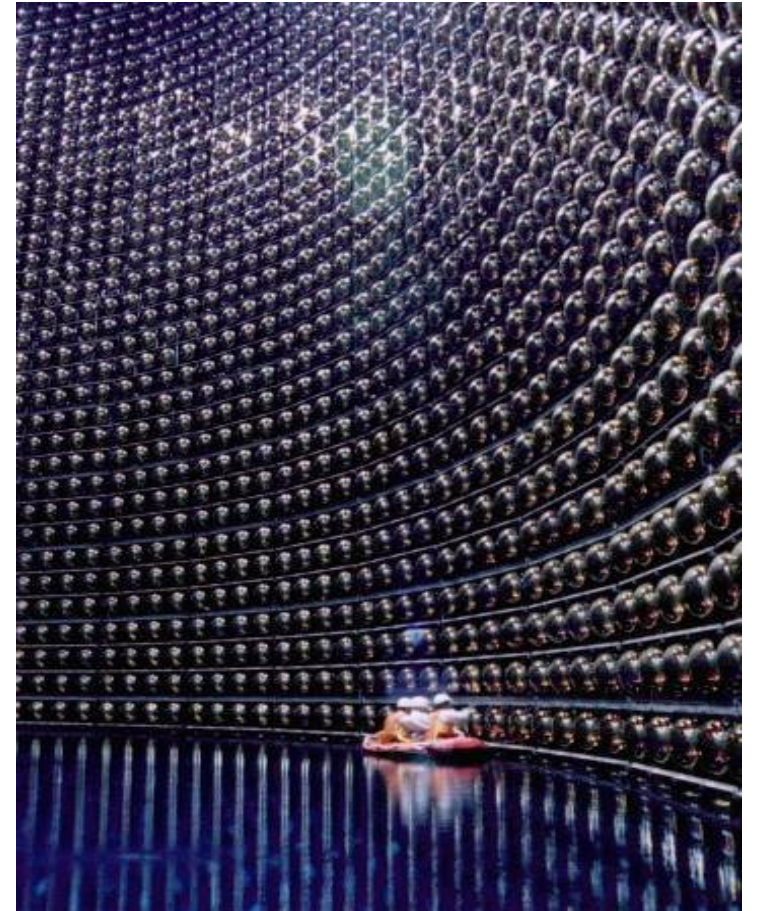
$$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$$



Sole



N.B. – La velocità della luce in acqua e' minore della velocità della luce nel vuoto

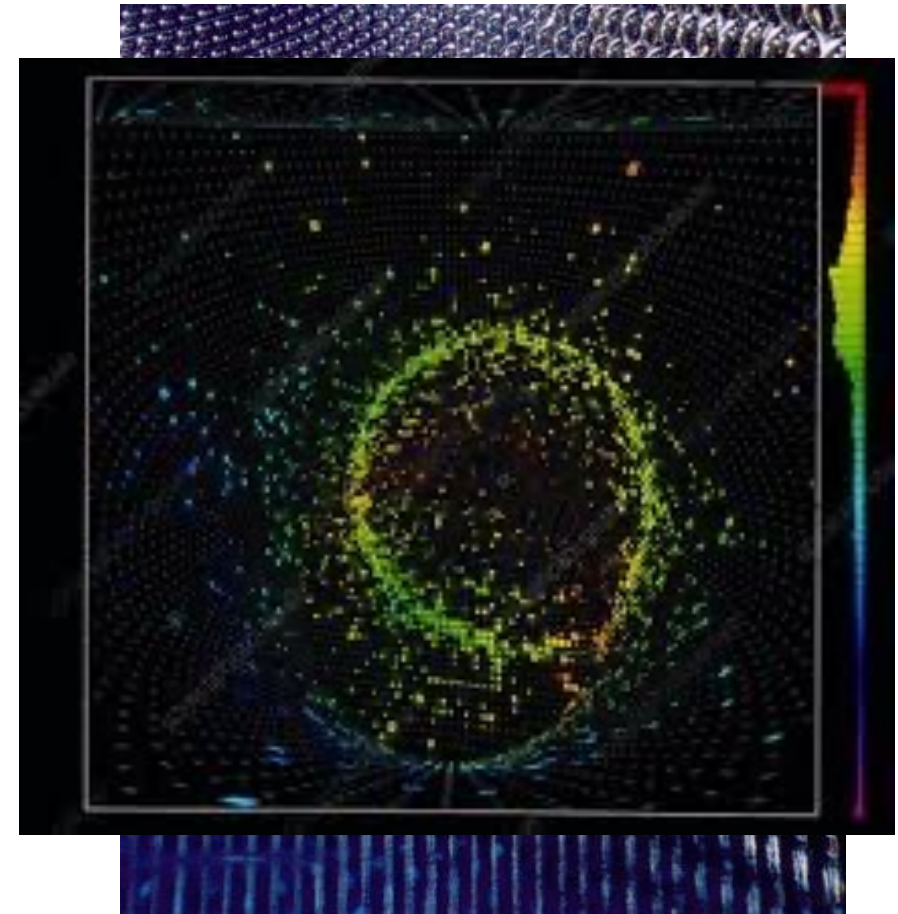
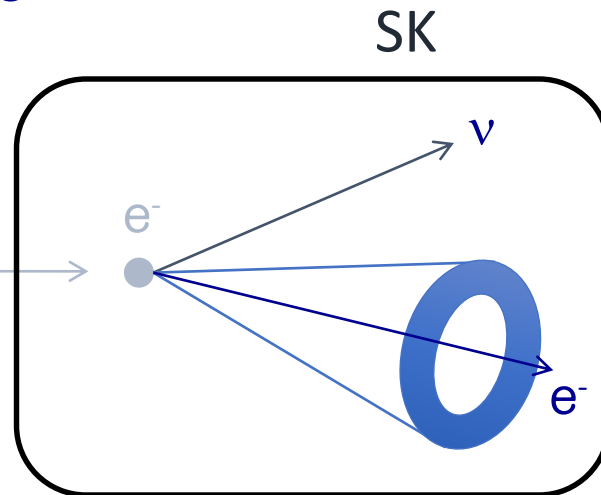


PER FARE ASTRONOMIA DOBBIAMO CATTURARLI

Il primo telescopio di neutrini

- KAMIOKANDE E SUPER-KAMIOKANDE (Japan)

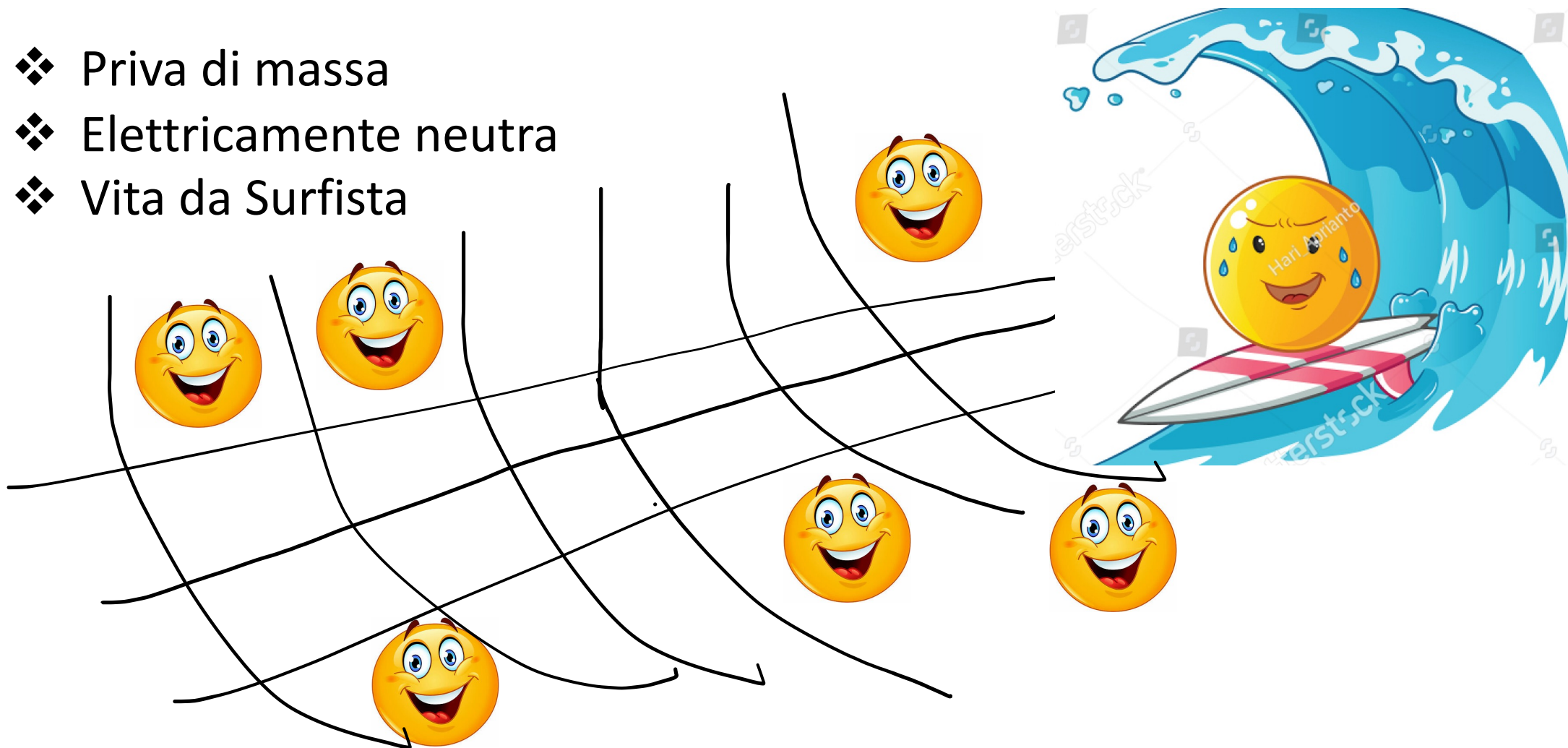
$$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$$



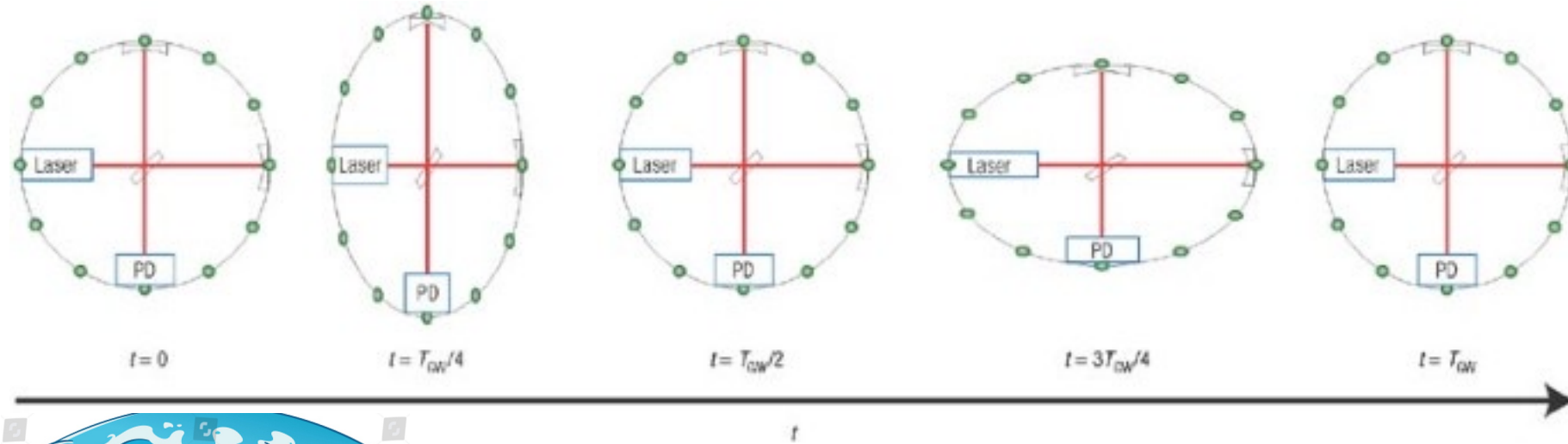
CONO DI LUCE CHERENCOV

CARTA DI IDENTITA' DELL'ONDA GRAVITAZIONALE

- ❖ Priva di massa
- ❖ Elettricamente neutra
- ❖ Vita da Surfista



Cosa succede quando passano?



Cosa le genera? → Cosa impariamo da loro?

Masse in
accelerazione che
cambiano
rapidamente la loro
forma e orientazione
generano ONDE
GRAVITAZIONALI



Rivelandole capiamo
la dinamica
dell'oggetto che le
ha generate

Perché fare astronomia multimessaggera?

- Cosa possiamo combinare? I tempi, le direzioni, le caratteristiche specifiche
- Perché è meglio lavorare come una rete di rivelatori? Falso Alarm Rate (FAR)
- Perché è importante avere delle aspettative?

50

**IL DATO
CONTESTUALIZZATO
DIVENTA
INFORMAZIONE**



La SN1987A



Sanduleak -69 202

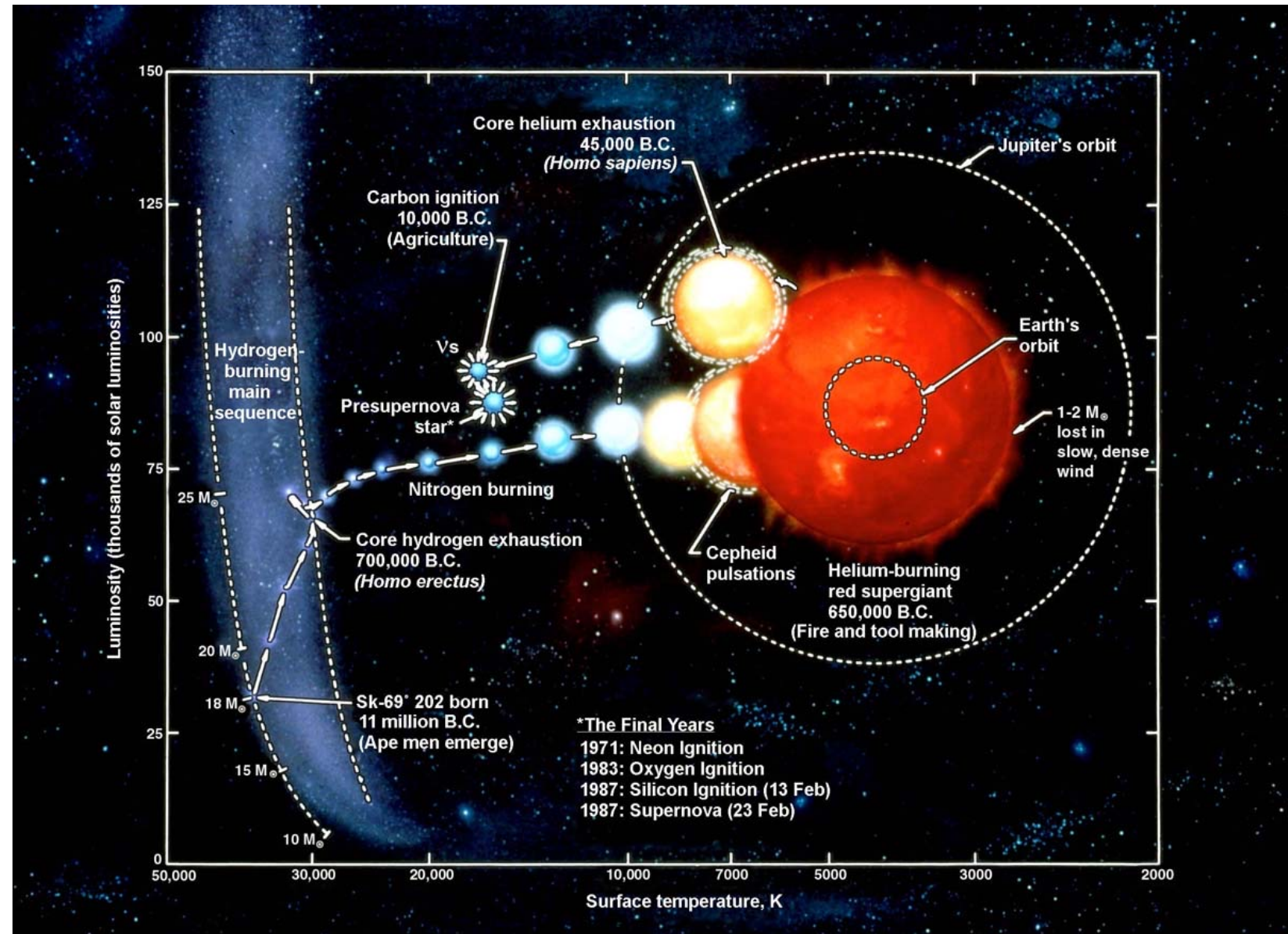
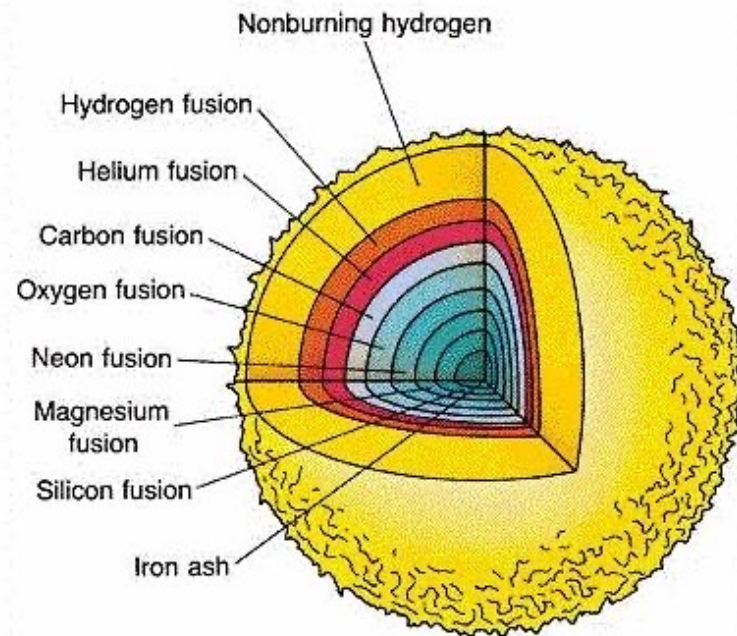


Supernova 1987A 23.
Februar 1987



Il 24 Febbraio 1987 Ian Shelton and Oscar Duhalde nell'osservatorio
astronomico di Las Campanas in Chile

Facciamo
un bel passo
indietro



Sanduleak: supergigante blu di circa 18 masse solari nelle Grandi Nubi di Magellano

Standard Core-Collapse SN

1. Collapse

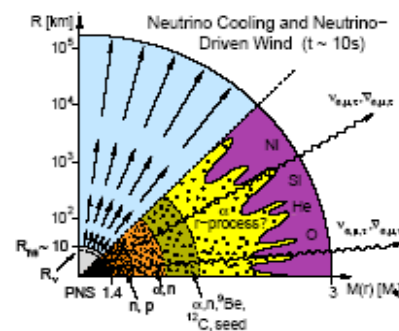
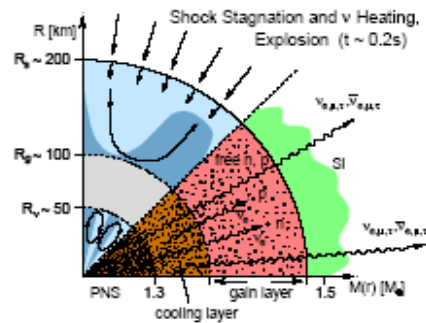
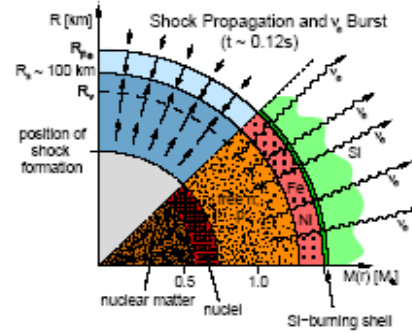
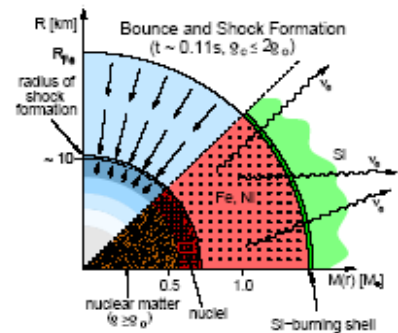
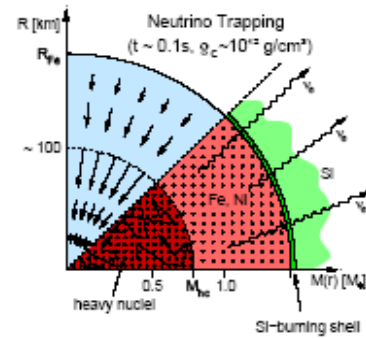
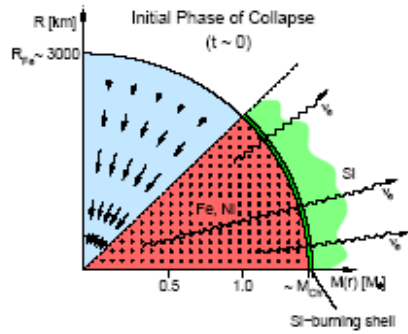
2. Bounce

3. Shock Propagation

4. Shock Stagnation

5. Accretion

6. Cooling PNS



Zero Time of the Collapse

Core of Fe⁵⁶

$$T_c \simeq 10^9 \text{K}$$

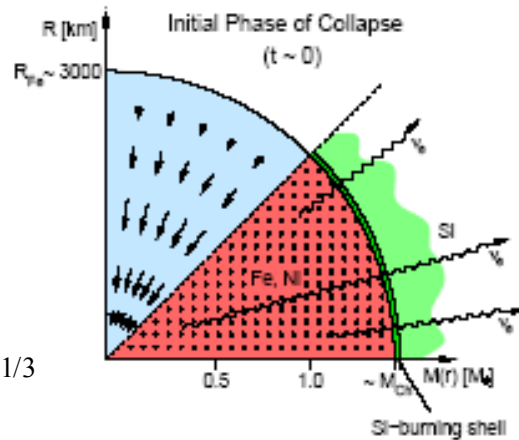
$$\rho_c \simeq 10^9 \text{g cm}^{-3}$$

$$k_B T_c \approx 1.7 m_e c^2 \sim 0.87 \text{MeV}$$

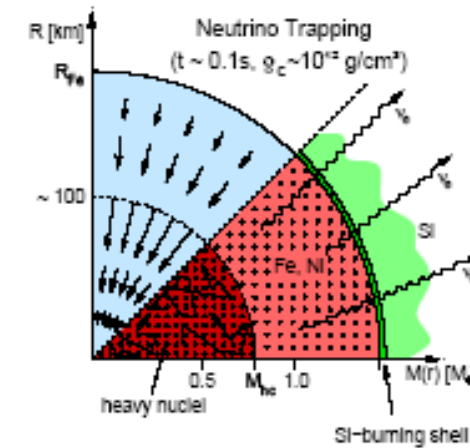
$$\chi_e = E_F \sim 11 \text{MeV} \left(\frac{\rho_c Y_e}{10^{10} \text{g cm}^{-3}} \right)^{1/3}$$

The structure is supported by the pressure of relativistic degenerate electrons

$$P_e = \left(\frac{3}{\pi} \right)^{1/3} \frac{hc}{8} \left(\frac{Y_e \rho}{m_u} \right)^{4/3}$$

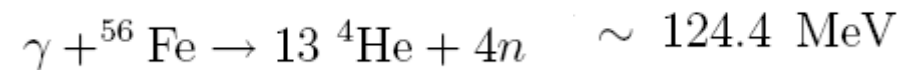


$$M_{CH} = 5.836 \cdot Y_e^2 M_\odot$$

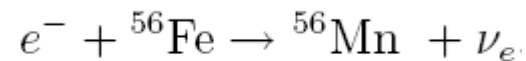


$$M_{hc} \sim 0.5 - 0.8 M_\odot$$

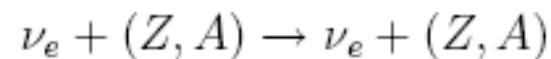
Photodisintegration



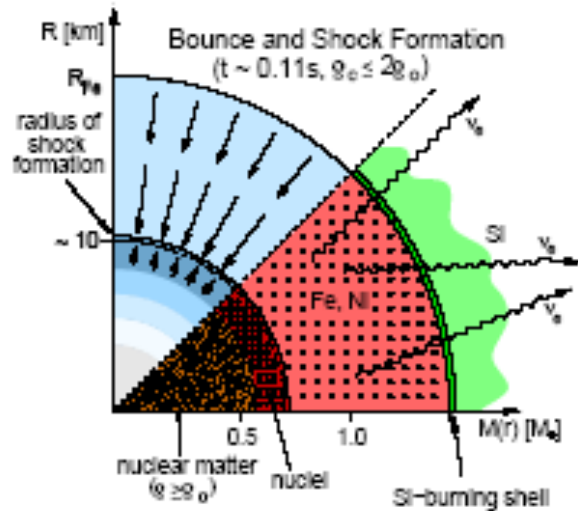
Electron capture



Elastic Scattering on Nuclei



Time of the “Bounce”



$$\rho > \rho_0 = 10^{14} \text{ g cm}^{-3} \quad \text{Nuclear Density}$$

Equation of state of compressed matter changes.
The outer part of the iron core bounces on the inner part giving rise to a shock wave

$$E_0^{sw} \approx 10^{52} \text{ erg}$$

The energy cost of nuclei dissociation is
 8.8 MeV/nucleon

$$\Delta M = 0.1 M_\odot \Rightarrow \Delta E^{sw} \approx 1.7 \cdot 10^{51} \text{ erg}$$

$$M_{outer} = M_{CH}^0 - M_{hc} \sim (0.9 - 0.6) M_\odot$$



$$E_{outer} = (6 - 9) \cdot 1.7 \cdot 10^{51} \text{ erg} > E_0^{sw}$$



The shock wave stagnates
Inside the iron core:
NO PROMPT EXPLOSION!!!

Energia di una Supernova a Collasso del Nucleo (Core-Collapse Supernova)

STATO INIZIALE

Stella Progenitrice

$$M_{star} > 8M_{\odot}$$

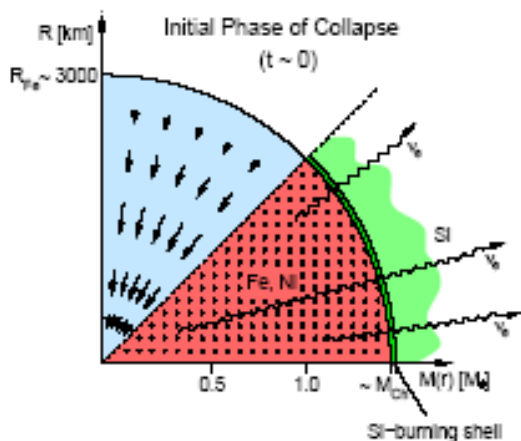
$$R_{Star} \sim 200R_{\odot}$$

STATO FINALE

Stella di Neutroni

$$M_{NS} \sim 1.4M_{\odot}$$

$$R_{NS} \sim 15km$$



Energia Emessa = STATO INIZIALE-STATO FINALE

- Neutrini $\longrightarrow \epsilon_{\nu} \approx 99\% \cdot \epsilon^b$
- Energia cinetica del gas $\longrightarrow \epsilon_{kin} \approx 1\% \cdot \epsilon^b$
- Fotoni $\longrightarrow \epsilon_{\gamma} \sim 0.01\% \cdot \epsilon^b$
- Onde Gravitazionali $\longrightarrow \epsilon_{GW} \leq 0.0001\% \cdot \epsilon^b$

$$\epsilon_{NS}^b \cong \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} = (1-5) \cdot 10^{53} \text{ erg}$$

$$\epsilon_{GW} = (10^{44} - 10^{48}) \text{ erg}$$

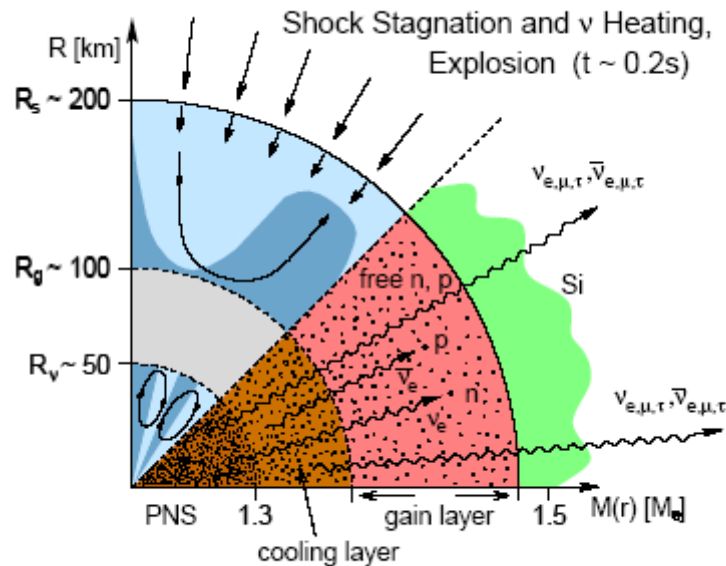
$$\epsilon_{\nu} = (1-5) \cdot 10^{53} \text{ erg}$$

$$M_{\odot} \cong 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

$$R_{\odot} = 6.955 \cdot 10^6 \text{ km}$$

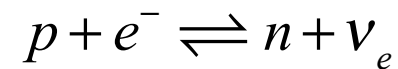
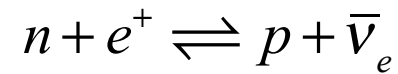
Accretion phase and Neutrinos



The shock wave stagnates and transform into a Standing accretion front around:

$$R_s \sim 200 \text{ km}$$

The thermal evolution of the region below the shock is determined by the following reactions:



BETHE-WILSON SCENARIO

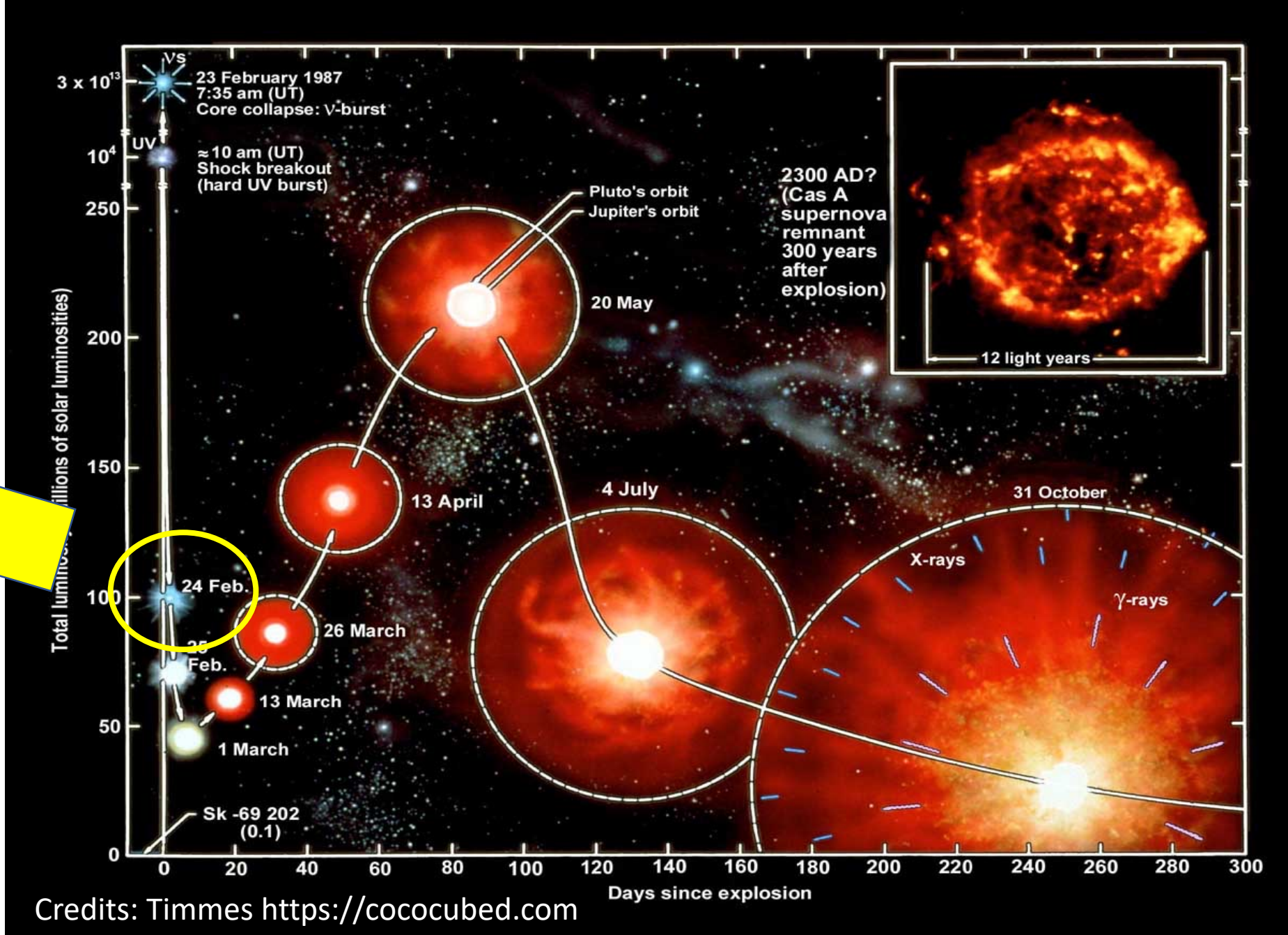
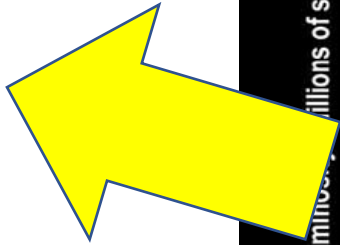
10-20% of the neutrinos energy is deposited below the shock wave + MHD instabilities



STAR EXPLOSION

$$\Delta t_b \approx 500 \text{ ms}$$

Dall'esplosio
ne in poi



Credits: Timmes <https://cococubed.com>

Prima osservazione di neutrini extragalattici

Nei dati registrati il 23 Febbraio alle 7:35 UT

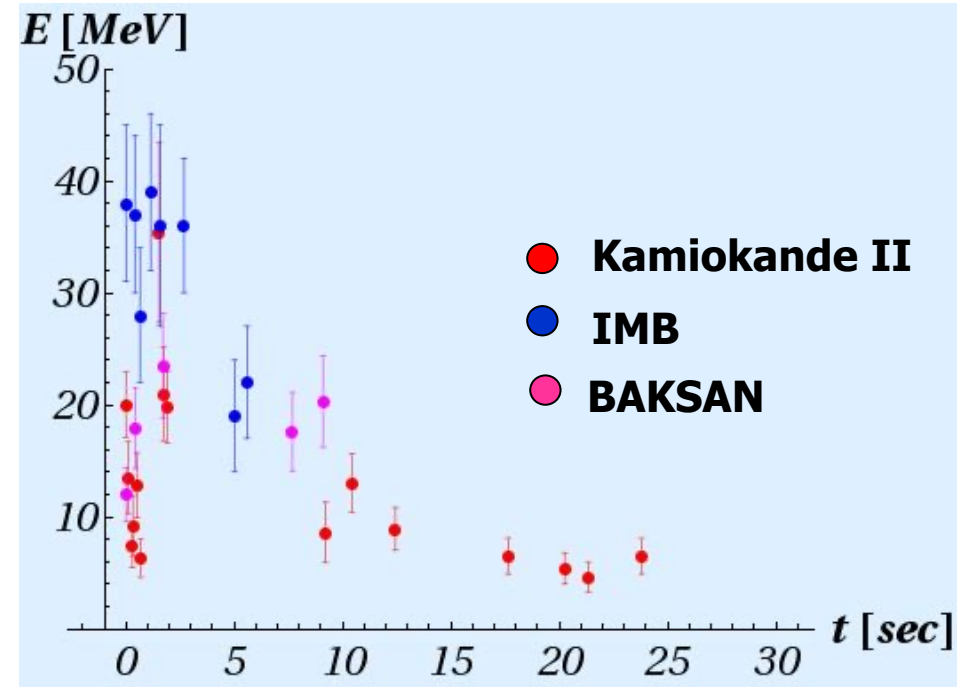
Kamiokande II



IMB



BAKSAN

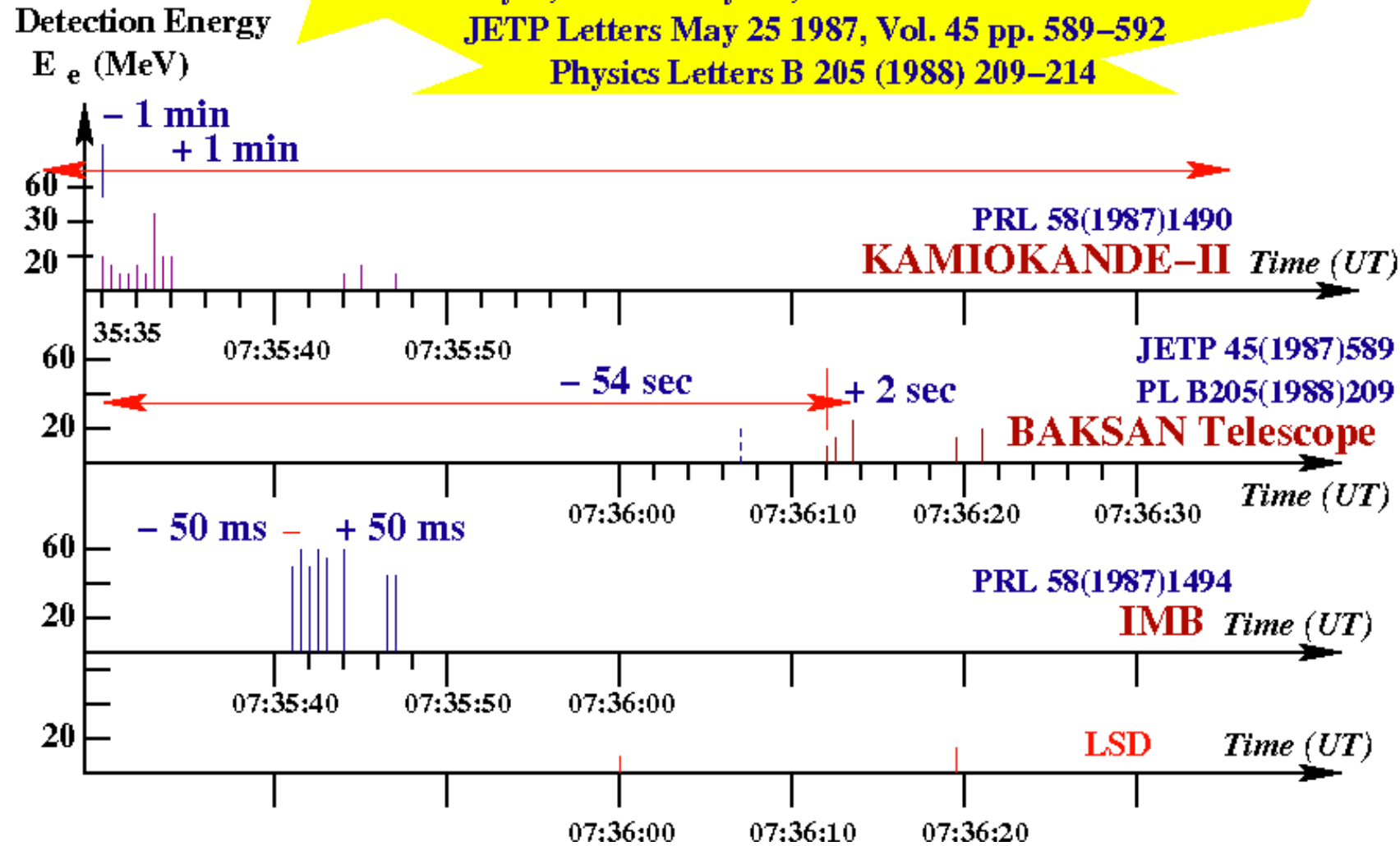


$$N_{\nu} = \frac{99\% \cdot \varepsilon_b^{NS}}{\langle E_{\nu} \rangle} \approx \frac{3 \cdot 10^{53} \text{ erg}}{12 \text{ MeV}} \approx 10^{58}$$

The time sequences of events detected by
KAMIOKANDE-II, Baksan telescope, IMB and LSD detectors
at 07:35 UT on February 23, 1987.

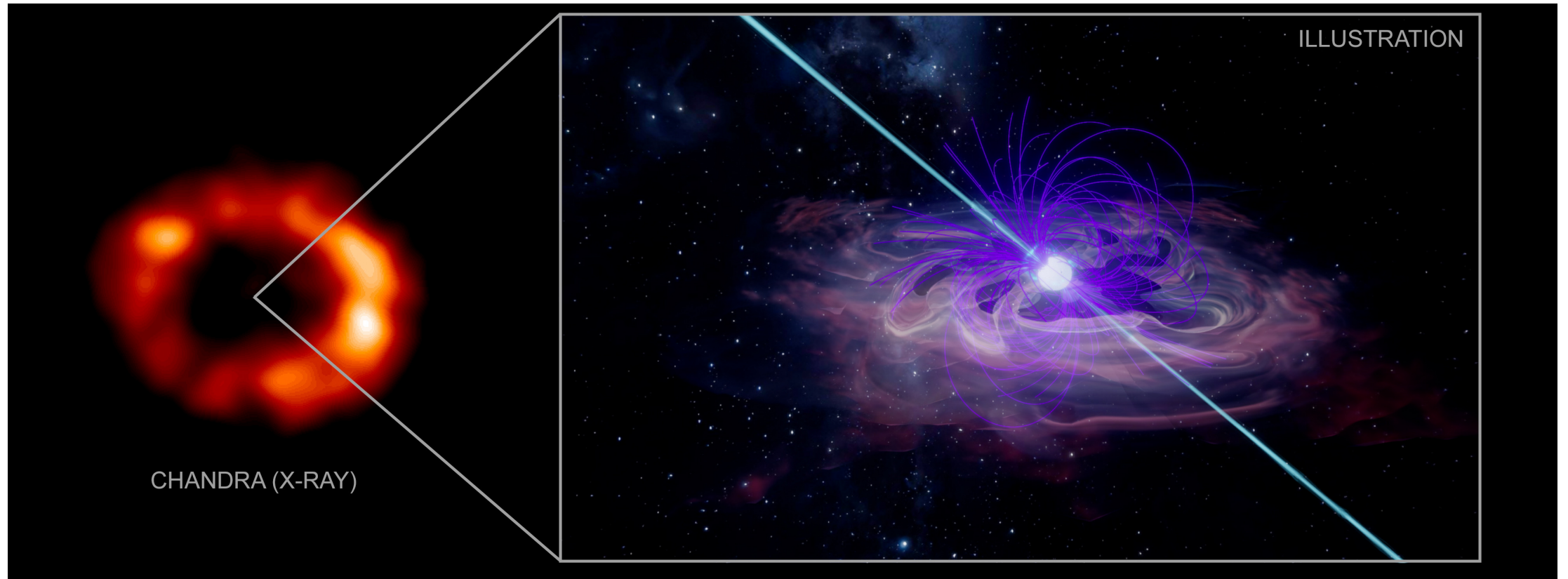
E.N. Alexeyev, L.N. Alexeyeva, I.V. Krivosheina and V.I. Volchenko
JETP Letters May 25 1987, Vol. 45 pp. 589-592
Physics Letters B 205 (1988) 209-214

OROLOGI non
sincronizzati



SN1987A Oggi

Nel 2020 viene rivelata un'emissione nei raggi X compatibile con una Stella di Neutroni



La Supernova di Domani SN2022

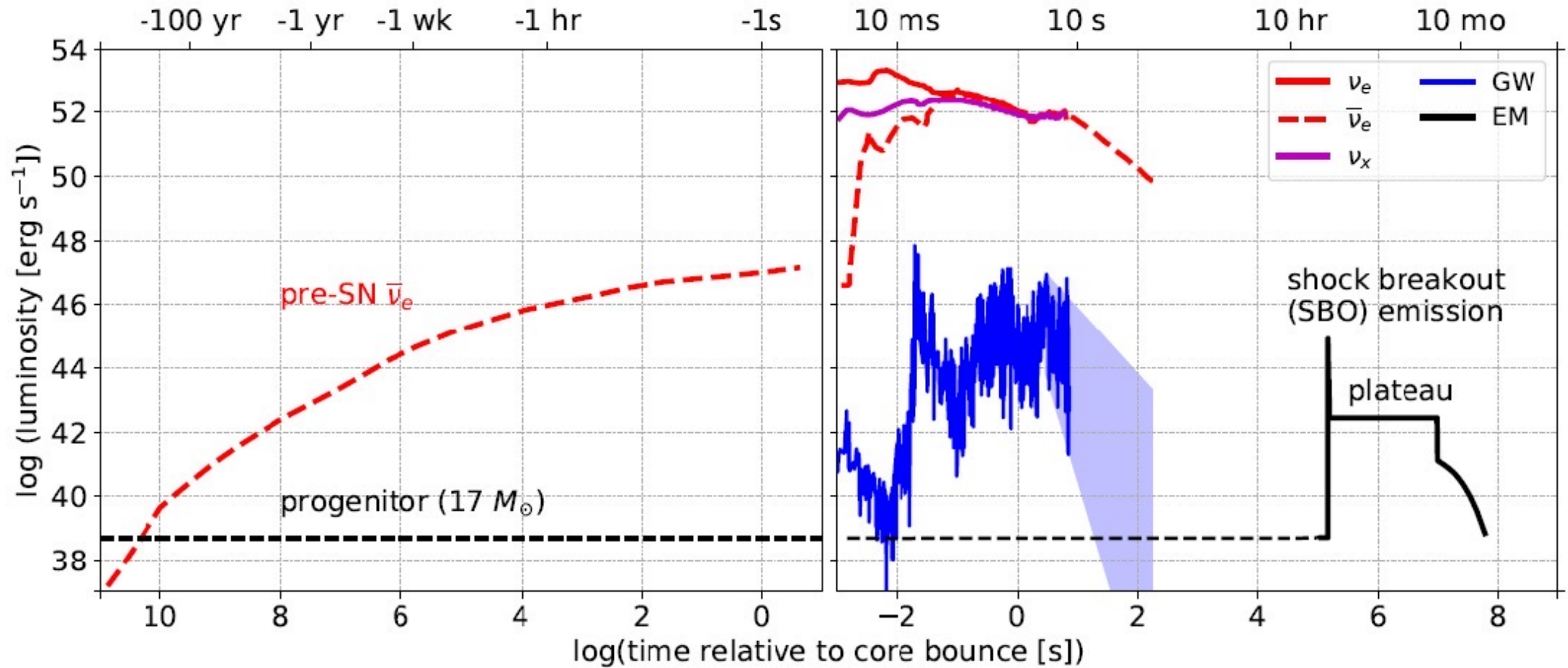


Figure from Nakamura *et al*, MNRAS 161, 3296 (2016)

“BOUNCE” and Gravitational Waves

$$h_{ij}^{TT}(t, \mathbf{x}) = \frac{2G}{c^4 r} \ddot{I}_{ij}^{TT} \left(t - \frac{r}{c} \right)$$

$$I_{ij}^{TT} = \int dx^3 \rho \left(x_i x_j - \frac{1}{3} \delta_{ij} r^2 \right)$$

Reduced Quadrupolar Momentum

$$h = \frac{2G}{c^4 D} \ddot{I}_{ij} \sim \frac{2G}{c^4 D} \frac{MR^2}{T_{dyn}^2} \epsilon$$

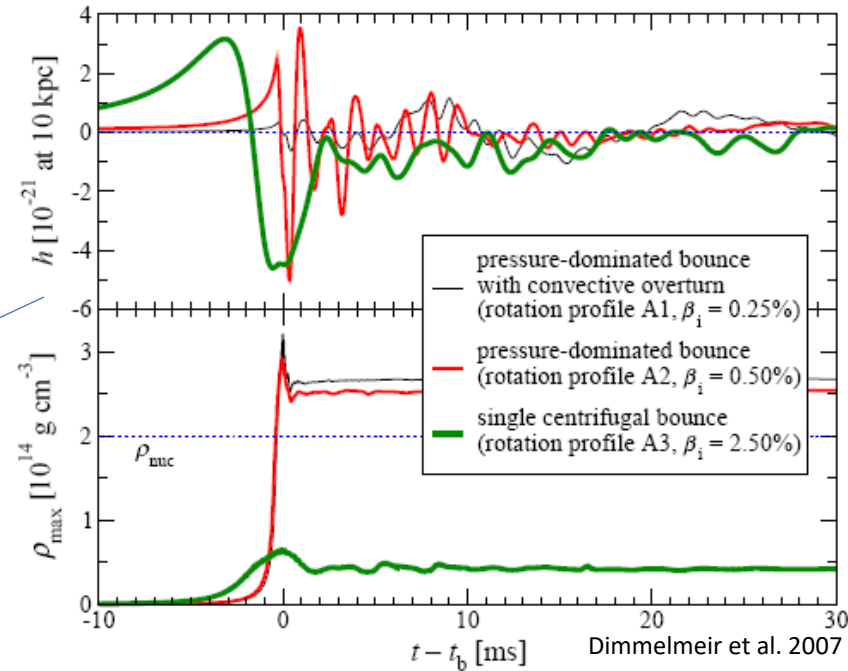
$$D = 10 \text{ kpc} = 30.8 \cdot 10^{12} \cdot 10^3 \text{ km}$$

$$M_{hc} = 0.7 M_{\odot}$$

$$R_{hc} = 10 \text{ km}$$

$$T_{dyn} = 1 \text{ ms}$$

$$h \cong \frac{2.3}{3.08 \cdot 10^{20}} \epsilon \approx 0.75 \cdot 10^{-20} \epsilon$$



$$\beta = \frac{K}{|W|_{in}}$$

Parameter taking into account of the structure
Compactness and shape

$$\epsilon \approx 10\% \implies h \cong 0.75 \cdot 10^{-21}$$

$$v_{GW} \cong \frac{1}{T_{dyn}} \cong 1 \text{ kHz}$$

$$\Delta t_{GW} \approx 20 \text{ ms}$$

La Supernova di Domani SN2022

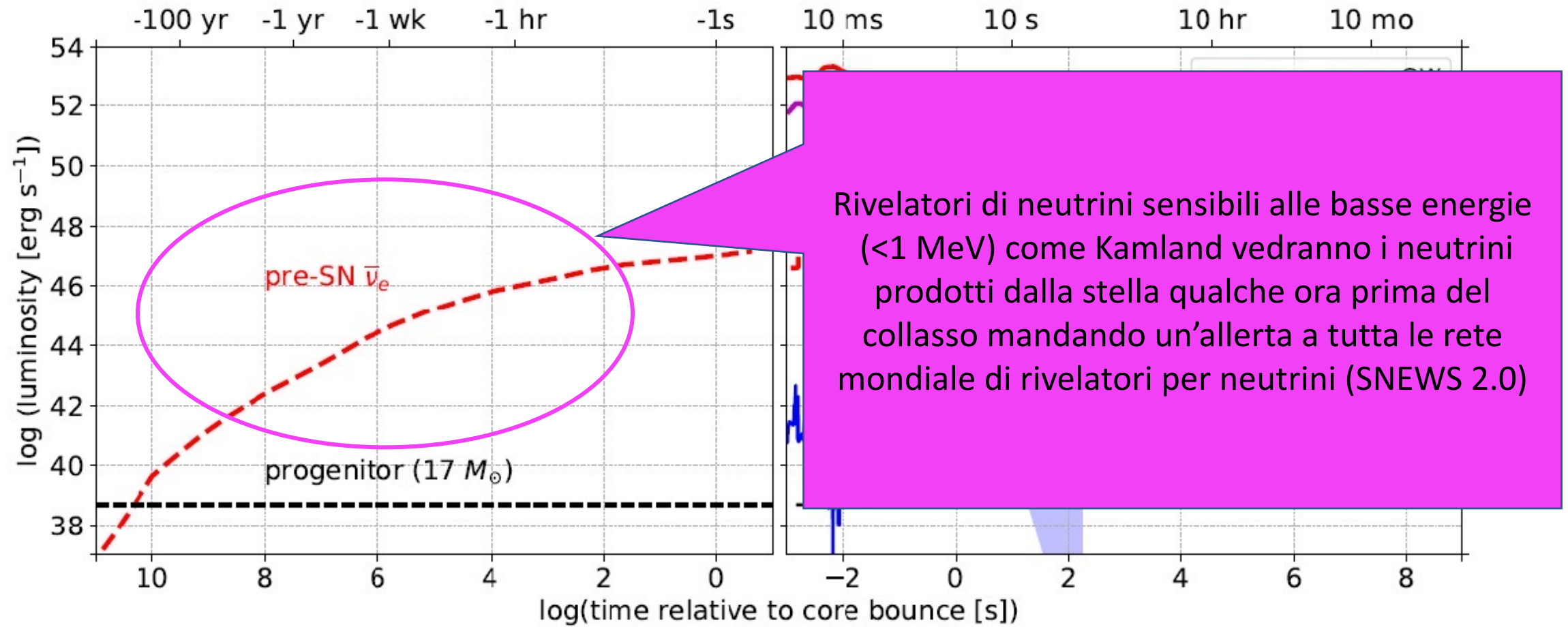


Figure from Nakamura *et al*, MNRAS 161, 3296 (2016)

La Supernova di Domani SN2022

Rivelatori di neutrini di tutti i tipi vedranno i neutrini di ogni sapore prodotti dalla fase esplosiva, alcuni saranno in grado di seguire il segnale e la sua evoluzione in tempo reale e alcuni potranno dare indicazione sulla posizione nel cielo della supernova con un errore di qualche grado

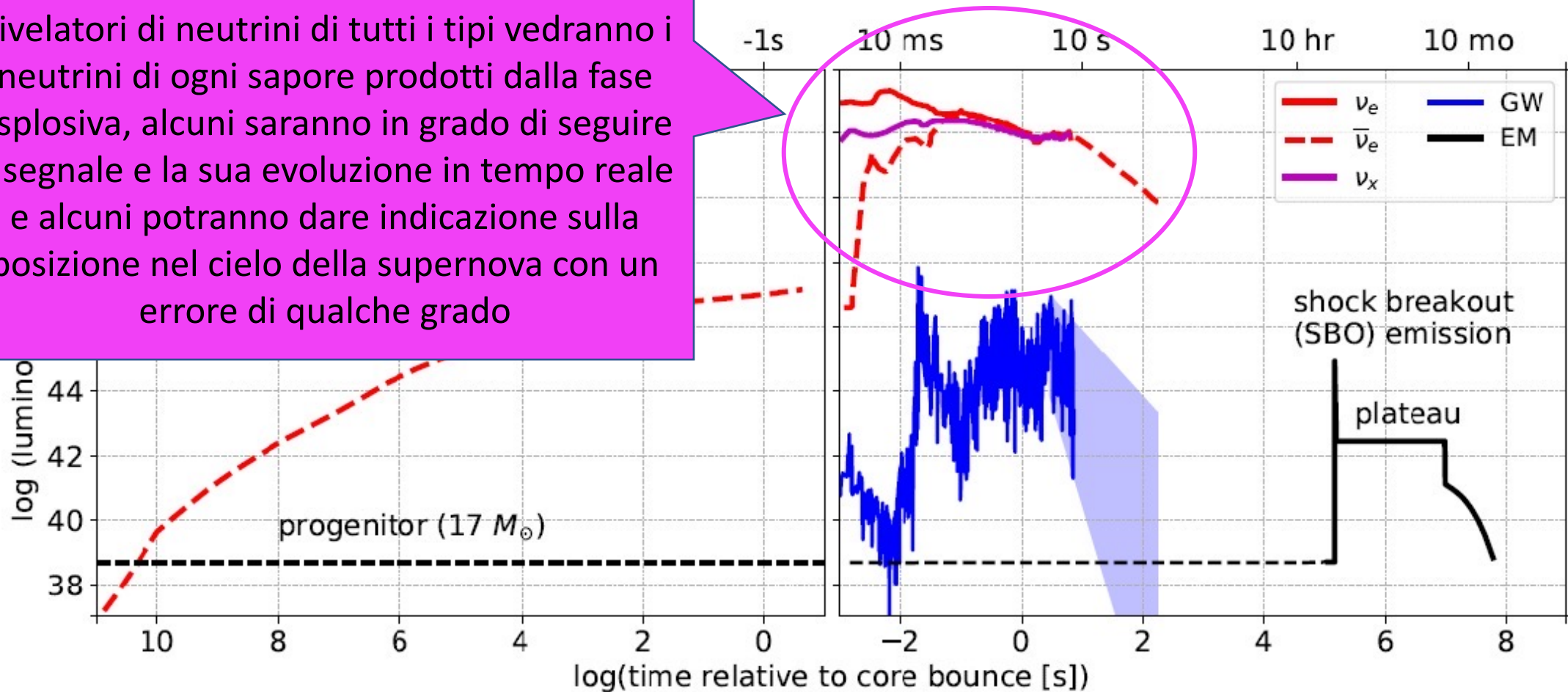
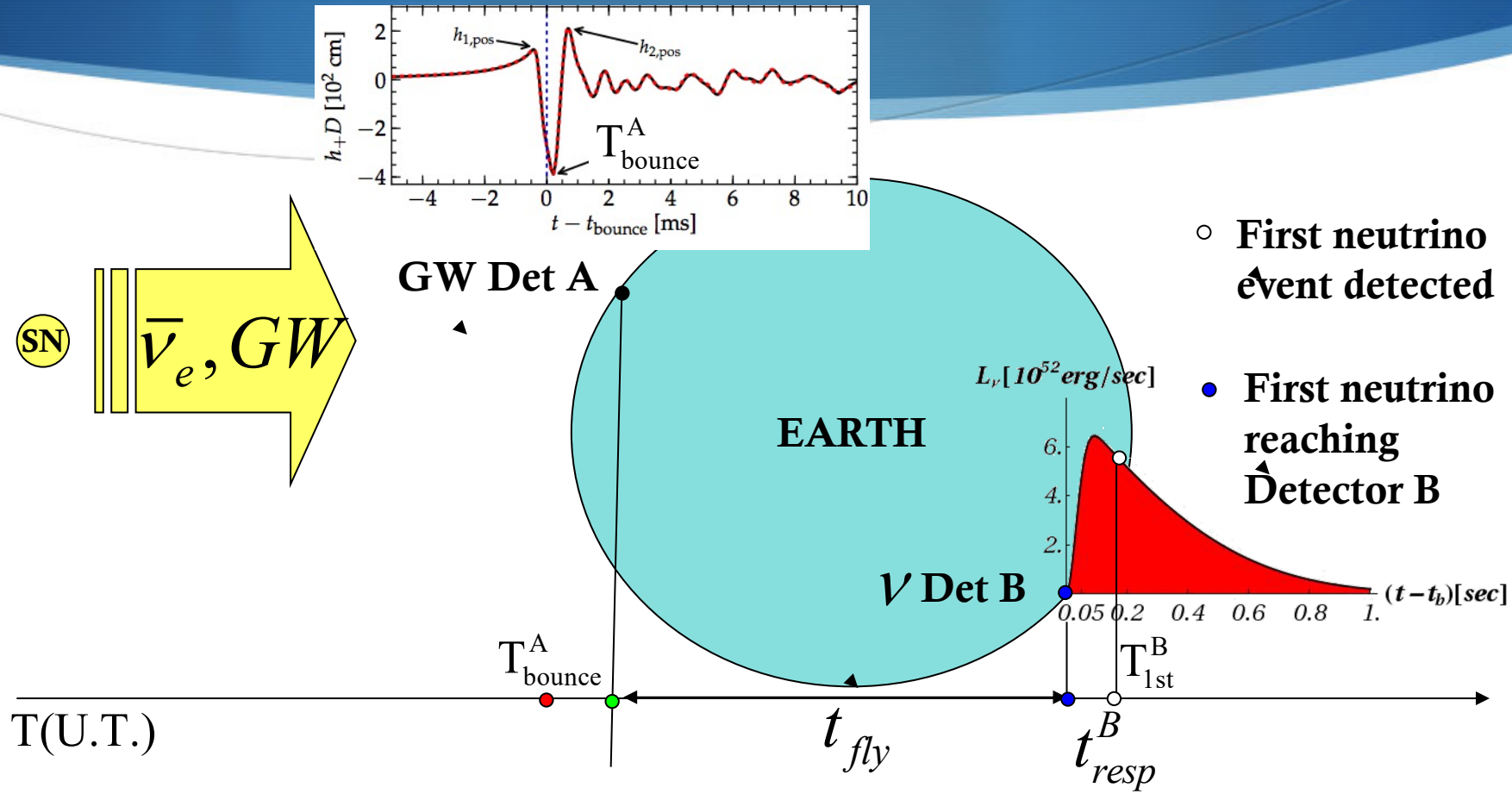


Figure from Nakamura *et al*, MNRAS 161, 3296 (2016)

THE IDEA



$$T_{\text{bounce}}^A = T_{\text{1st}}^B - (t_{\text{resp}} \pm t_{\text{fly}} + t_{\text{mass}} + t_{\text{GW}})$$

MASTER EQUATION

$$T_{\text{bounce}}^A = T_{\text{1st}}^B - (t_{\text{resp}} \pm t_{\text{fly}} + t_{\text{mass}} + t_{\text{GW}})$$

$$\delta T_{\text{bounce}} = \sqrt{\sum_i (\delta t_i)^2} \quad \text{GOAL} \longrightarrow \delta T_{\text{bounce}} \approx 10\text{ms}$$

$$t_{\text{GW}} = (1.5 - 4.5)\text{ms} \longrightarrow \delta t_{\text{GW}} \sim 1.5\text{ms}$$

$$t_{\text{mass}} \approx 0.27 \left(\frac{m_\nu}{0.23} \right)^2 \left(\frac{10\text{MeV}}{E_\nu} \right)^2 \left(\frac{D}{10\text{kpc}} \right) \text{ms} \longrightarrow \delta t_{\text{mass}} \text{ negligible}$$

Time of fly and response time are dominant



Both can be determined using Neutrinos Data

TIME OF FLY

	LIGO I	LIGO II	VIRGO	LVD	SK	IceCUBE
Φ	30° 30' N	46° 27' N	43° 41' N	42° 28' N	36° 14' N	90° S
λ	90° 45' W	119° 25' W	10° 33' E	13° 33' E	137° 11' E	139° 16' W
d^{SK}	32.1 ms	24.9 ms	28.8 ms	28.7 ms	-	19.0 ms
d^{LVD}	26.8 ms	27.5 ms	0.9 ms	-	28.7 ms	16.9 ms
d^{IceCUBE}	20.8 ms	15.6 ms	16.5 ms	16.9 ms	19.0 ms	-

$$t_{\text{fly}} \approx 30 \text{ms}$$

δt_{fly} 

negligible for an astronomically identified SN and in the lucky configuration between LVD and VIRGO

To reach $\delta t_{\text{fly}} \leq 5 \text{ms}$ it is enough to determine the SN position with a precision of 20°

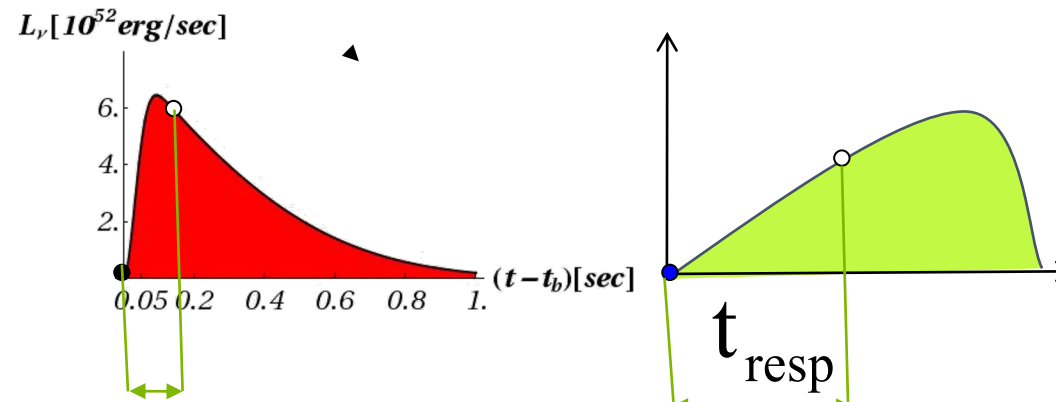
RESPONSE TIME

- The first neutrino that reaches the detector
- The first neutrino detected

$$t_{\text{resp}} = \text{●} \longleftrightarrow \text{○}$$

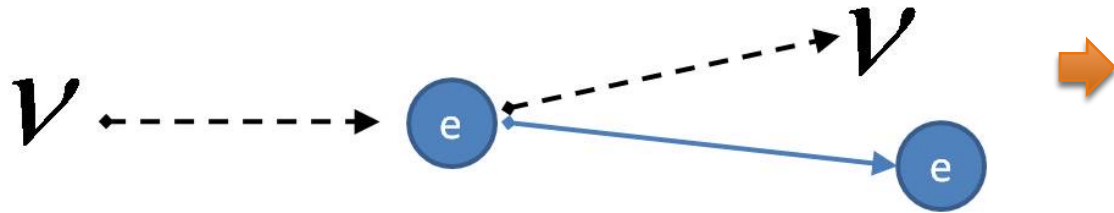
Ideal detector → It sees **All** neutrinos → $t_{\text{resp}} \equiv 0$

Real detector → It loses a part of the signal → $t_{\text{resp}} > 0$

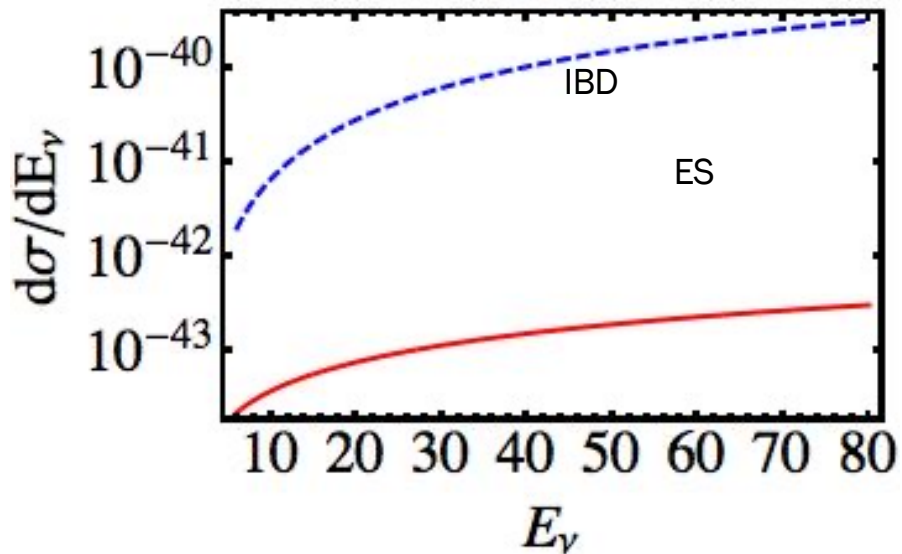


DEPENDS ON THE SIGNAL BEHAVIOUR !!

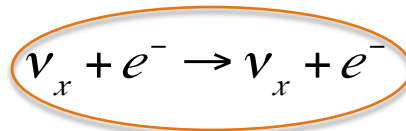
POINTING WITH NEUTRINO ELASTIC SCATTERING (ES)



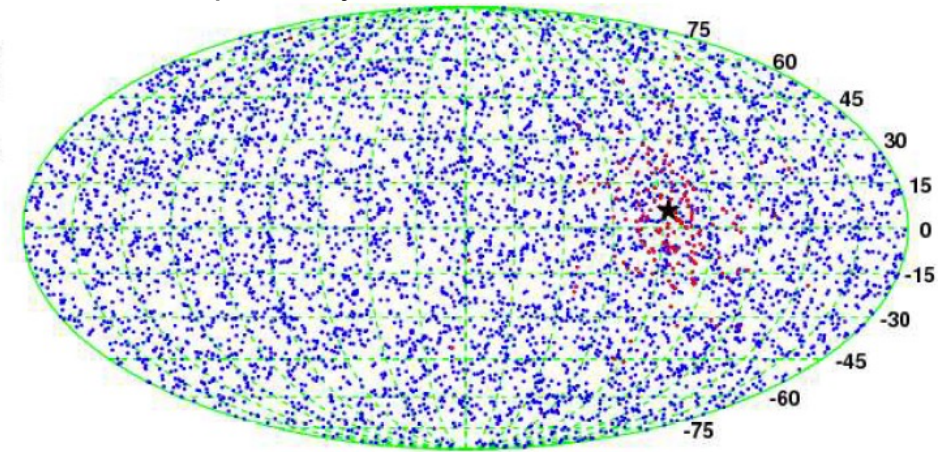
ES vs IBD



Refs: Tomas et al. PRD 68 (2003) 093013
Beacom & Vagins PRL 93 (2004) 171101



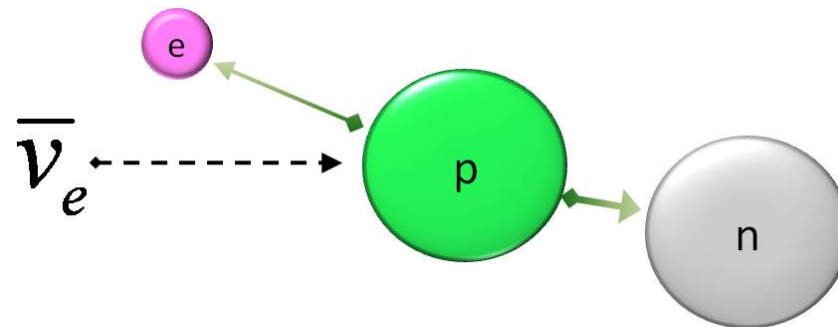
Declination (deg.)



Right ascension (deg.)

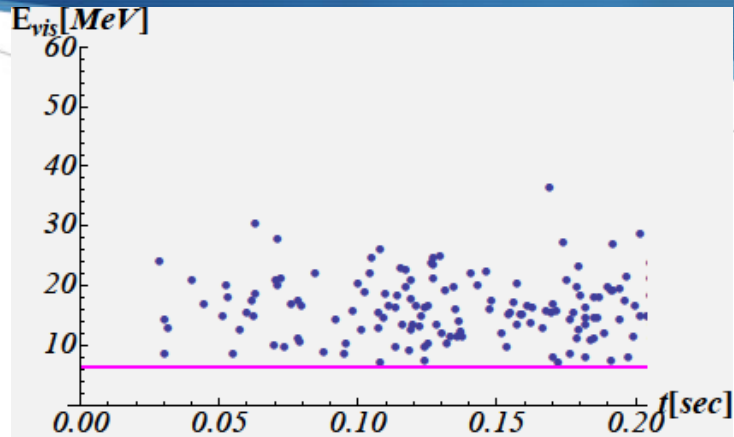
SuperKamiokande detector and D=10kpc
Pointing accuracy of $\sim 8^\circ$ at 95% C.L. \Rightarrow Improve to $\sim 3^\circ$ adding Gd

Inverse Beta Decay (IBD)



5000 IBD events expected in SK=32 kton for a SN in the GC

Results for SK and a SN distance of 20 kpc



**AVERAGE
RESPONSE TIME
UNCERTAINTY** $\langle \delta t_{\text{resp}}^{\text{Fit}} \rangle = 5.1 \text{ ms}$

Using neutrino signal detected by SK for a SN event at 20 kpc, we can determine the Universal Time of the bounce with an average error of

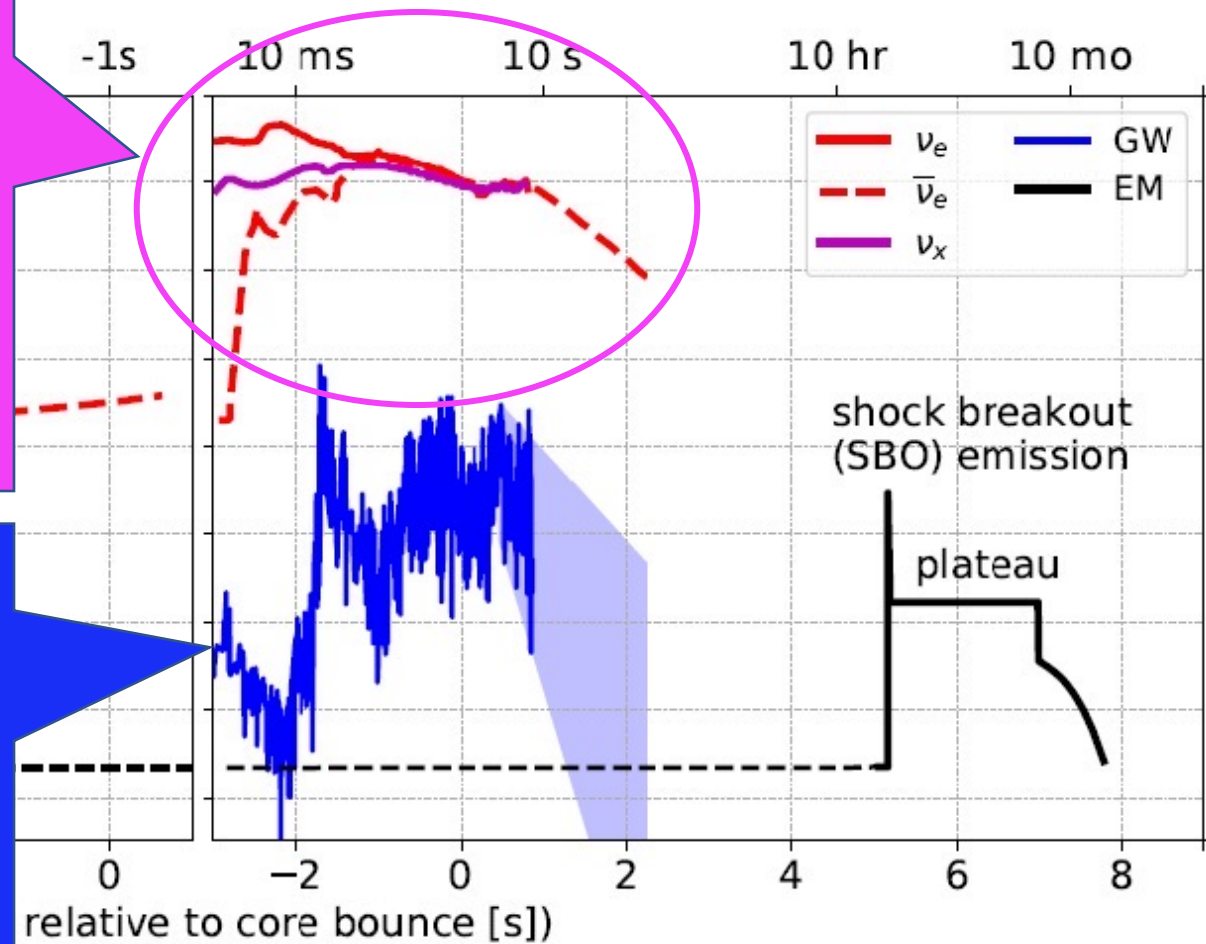
$$\delta T_{\text{bounce}} = \sqrt{\delta T_{\text{1st}}^2 + \delta t_{\text{GW}}^2 + \delta t_{\text{mass}}^2 + \delta t_{\text{fly}}^2 + \delta t_{\text{resp}}^2} \cong 7.2 \text{ ms}$$

IceCube $\pm 3.5 \text{ ms}$ at 95% CL (SN at 10 kpc)

La Supernova di Domani SN2022

Rivelatori di neutrini di tutti i tipi vedranno i neutrini di ogni sapore prodotti dalla fase esplosiva, alcuni saranno in grado di seguire il segnale e la sua evoluzione in tempo reale e alcuni potranno dare indicazione sulla posizione nel cielo della supernova con un errore di qualche grado

Le antenne gravitazionali aiutata anche dalle informazioni dei rivelatori neutrini osserveranno il segnale prodotto dalla stella durante la fase esplosiva e saranno fondamentali per determinare il meccanismo dinamico che porta alla esplosione



, 3296 (2016)

La Supernova di Domani SN2022

Grazie all'allerta dato dai neutrini i rivelatori di raggi X potranno effettuare un puntamento precoce e osservare il primissimo segnale elettromagnetico della supernova che contiene informazioni uniche sulla natura del progenitore. La successiva osservazione in altre bande come l'ottico consentirà la localizzazione della supernova e la stima della distanza da Terra.

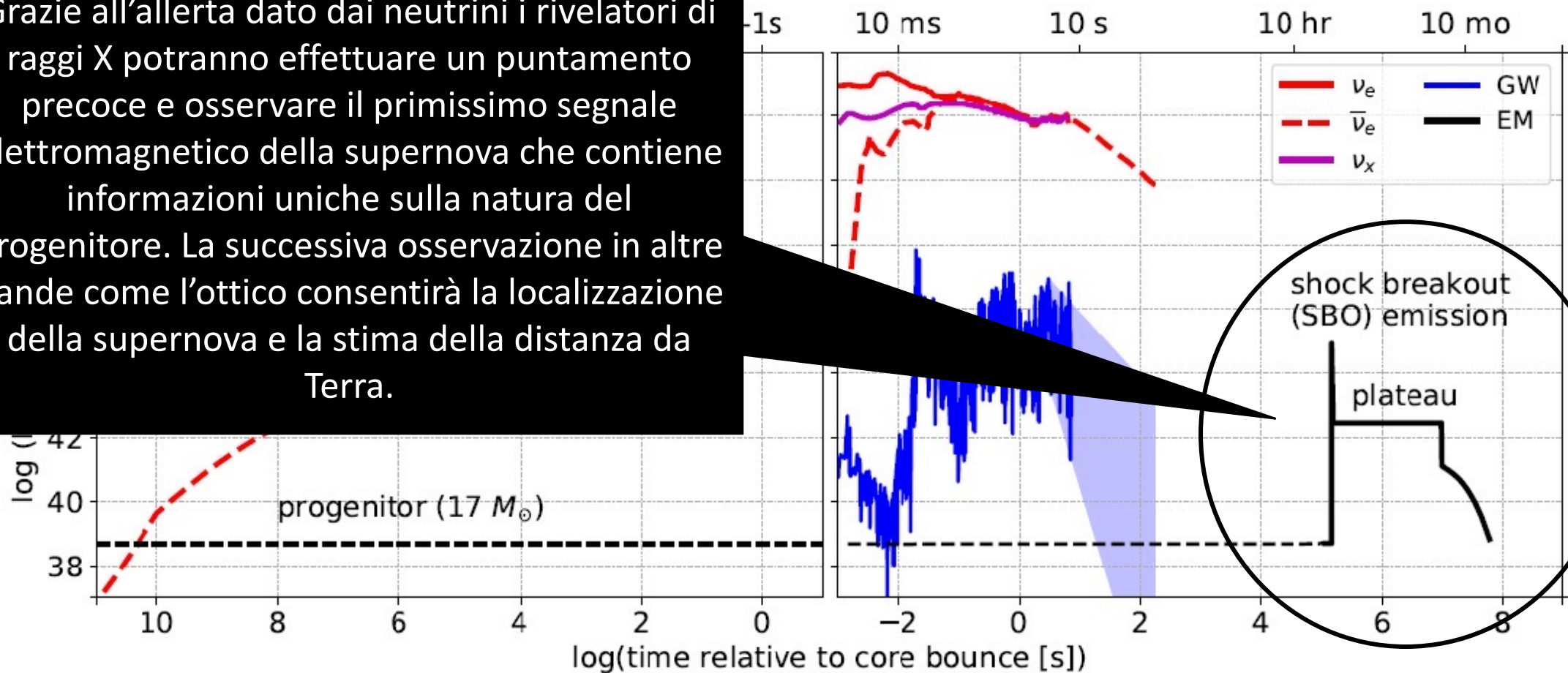
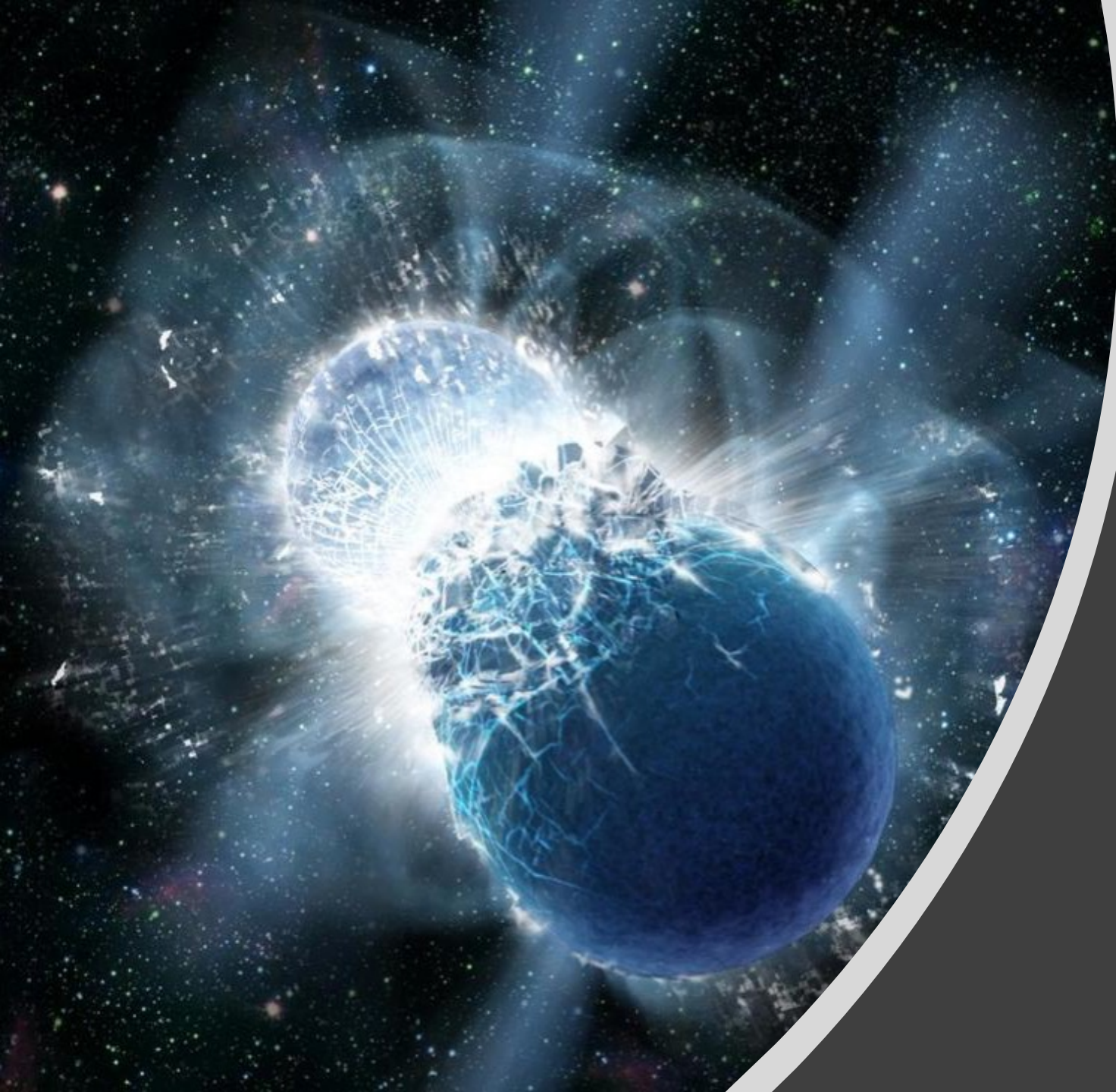


Figure from Nakamura *et al*, MNRAS 161, 3296 (2016)



Cosa Abbiamo imparato da SN1987A

- Possiamo usare i neutrini per fare astronomia
- Lo studio di quei pochi dati ci ha fornito informazioni sulla evoluzione temporale dell'esplosione di Supernova
- Possiamo usare i segnali di neutrini per aiutare la ricerca dei segnali in onde gravitazionali e in fotoni
- Il ritardo temporale tra i diversi segnali può essere usato per stimarne la velocità relativa/la massa delle particelle
- Possiamo lavorare con reti di rivelatori di diversa natura mandando segnali di allerta in tempo reale



GW170817

La storia di due stelle di neutroni

17 agosto 2017

GW170817

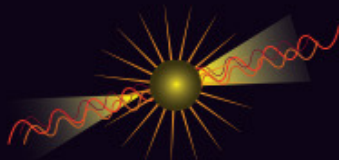
Coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni

Rivelazione di un'onda gravitazionale da parte di Ligo e Virgo, con associati eventi elettromagnetici rivelati da oltre 70 osservatori



12:41:04 UCT

Il 17 agosto 2017 viene rivelata un'onda gravitazionale dalla coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni avvenuto a 130 mln di anni luce, in un'area di 28 gradi quadrati nel cielo australe.



+2 secondi

Osservazione di un lampo di raggi gamma.

Un lampo gamma (gamma ray burst) è un'intensa emissione di radiazione gamma prodotto immediatamente dopo la coalescenza.



+10 ore e 52 minuti

Una nuova e brillante sorgente di luce visibile viene osservata sempre nell'emisfero australe, in una galassia nota come NGC 4993 nella costellazione dell'Idra.

Il decadimento di materia ricca di neutroni genera un'emissione elettromagnetica di grande luminosità (detta kilonova) producendo metalli pesanti come oro e platino.



Osservare contemporaneamente onde gravitazionali ed elettromagnetiche generate dallo stesso evento è una prova molto convincente che le onde gravitazionali viaggiano alla velocità della luce.

+11 ore e 36 minuti

Osservazione di radiazione infrarossa.

+15 ore

Osservazione di intensa radiazione ultravioletta.

+9 giorni

Osservazione di raggi X.

+16 giorni

Osservazione di onde radio.

Allontanandosi dalla coalescenza, i residui producono un'onda d'urto nel mezzo interstellare, cioè la materia rarefatta tra le stelle. Questo produce emissioni che possono durare per anni.



<https://www.ligo.org/detections/GW170817.php>

GW170817



GW170817

Coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni

Rivelazione di un'onda gravitazionale da parte di Ligo e Virgo, con associati eventi elettromagnetici rivelati da oltre 70 osservatori

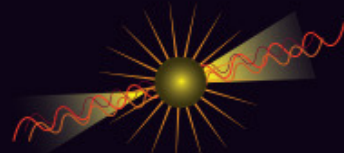


12:41:04 UCT

Il 17 agosto 2017 viene rivelata un'onda gravitazionale dalla coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni avvenuto a 130 mln di anni luce, in un'area di 28 gradi quadrati nel cielo australe.

+2 secondi

Osservazione di un lampo di raggi gamma.
Un lampo gamma (gamma ray burst) è un'intensa emissione di radiazione gamma prodotto immediatamente dopo la coalescenza.



+10 ore e 52 minuti

Una nuova e brillante sorgente di luce visibile viene osservata sempre nell'emisfero australe, in una galassia nota come NGC 4993 nella costellazione dell'Idra. Il decadimento di materia ricca di neutroni genera un'emissione elettromagnetica di grande luminosità (detta kilonova) producendo metalli pesanti come oro e platino.



Osservare contemporaneamente onde gravitazionali ed elettromagnetiche generate dallo stesso evento è una prova molto convincente che le onde gravitazionali viaggiano alla velocità della luce.

+11 ore e 36 minuti

Osservazione di radiazione infrarossa.

+15 ore

Osservazione di intensa radiazione ultravioletta.

+9 giorni

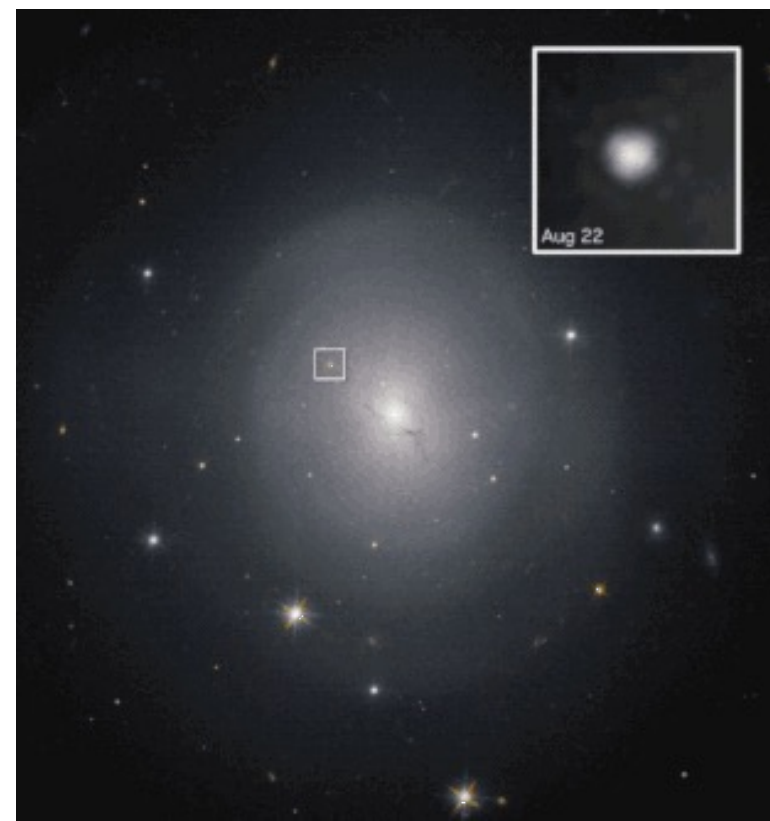
Osservazione di raggi X.

+16 giorni

Osservazione di onde radio.
Allontanandosi dalla coalescenza, i residui producono un'onda d'urto nel mezzo interstellare, cioè la materia rarefatta tra le stelle. Questo produce emissioni che possono durare per anni.

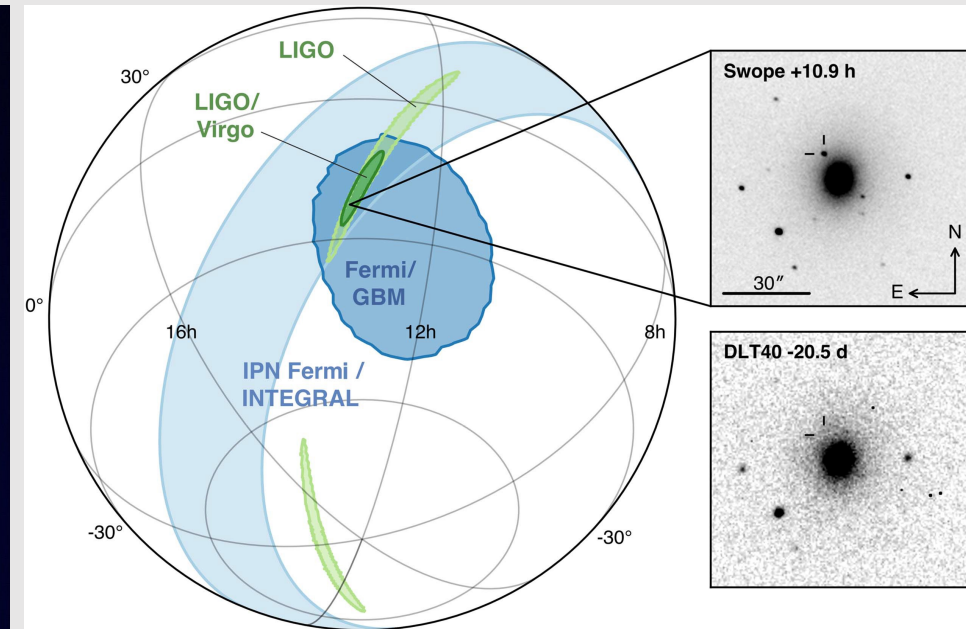
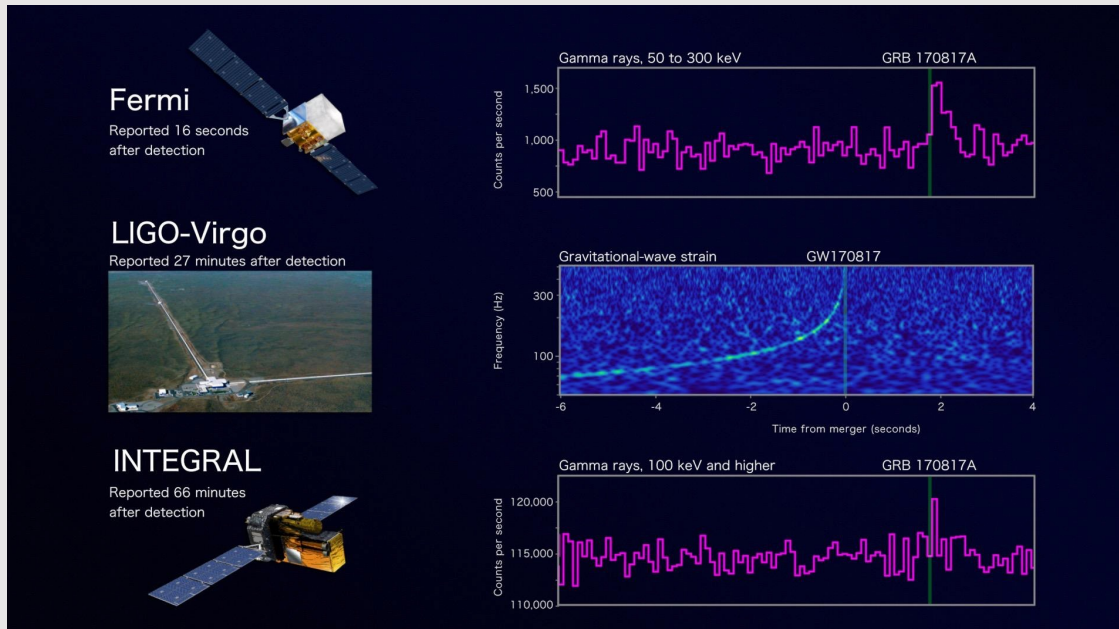


GW170817 + 2 secondi



Emissione gamma correlata:
Prima evidenza diretta che i GRB corti sono dovuti a fusioni di sistemi binari di stelle di neutroni.
Distanza: 130 milioni di anni luce

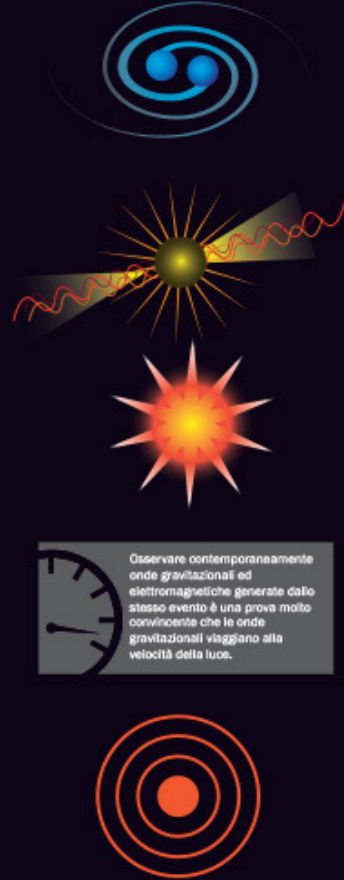
GW170817 + 10 ore (Emissione nel visibile)



GW170817

Coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni

Rivelazione di un'onda gravitazionale da parte di Ligo e Virgo, con associati eventi elettromagnetici rivelati da oltre 70 osservatori



Osservare contemporaneamente onde gravitazionali ed elettromagnetiche generate dallo stesso evento è una prova molto convincente che le onde gravitazionali viaggiano alla velocità della luce.

12:41:04 UCT

Il 17 agosto 2017 viene rivelata un'onda gravitazionale dalla coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni avvenuto a 130 mln di anni luce, in un'area di 28 gradi quadrati nel cielo australe.

+2 secondi

Osservazione di un lampo di raggi gamma.
Un lampo gamma (gamma ray burst) è un'intensa emissione di radiazione gamma prodotto immediatamente dopo la coalescenza.

+10 ore e 52 minuti

Una nuova e brillante sorgente di luce visibile viene osservata sempre nell'emisfero australe, in una galassia nota come NGC 4993 nella costellazione dell'Idra.
Il decadimento di materia ricca di neutroni genera un'emissione elettromagnetica di grande luminosità (detta kilonova) producendo metalli pesanti come oro e platino.

+11 ore e 36 minuti

Osservazione di radiazione infrarossa.

+15 ore

Osservazione di intensa radiazione ultravioletta.

+9 giorni

Osservazione di raggi X.

+16 giorni

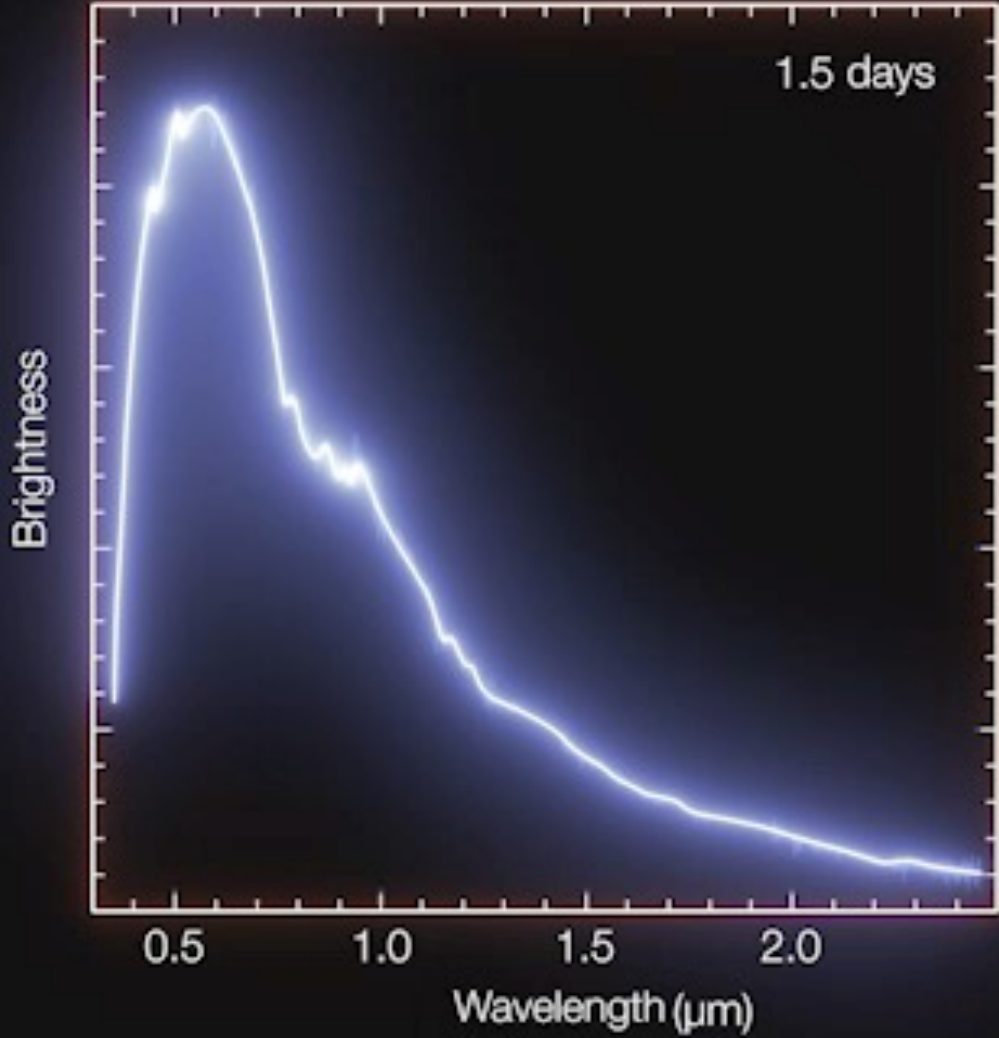
Osservazione di onde radio.
Allontanandosi dalla coalescenza, i residui producono un'onda d'urto nel mezzo interstellare, cioè la materia rarefatta tra le stelle. Questo produce emissioni che possono durare per anni.

GW170817 + 9 giorni

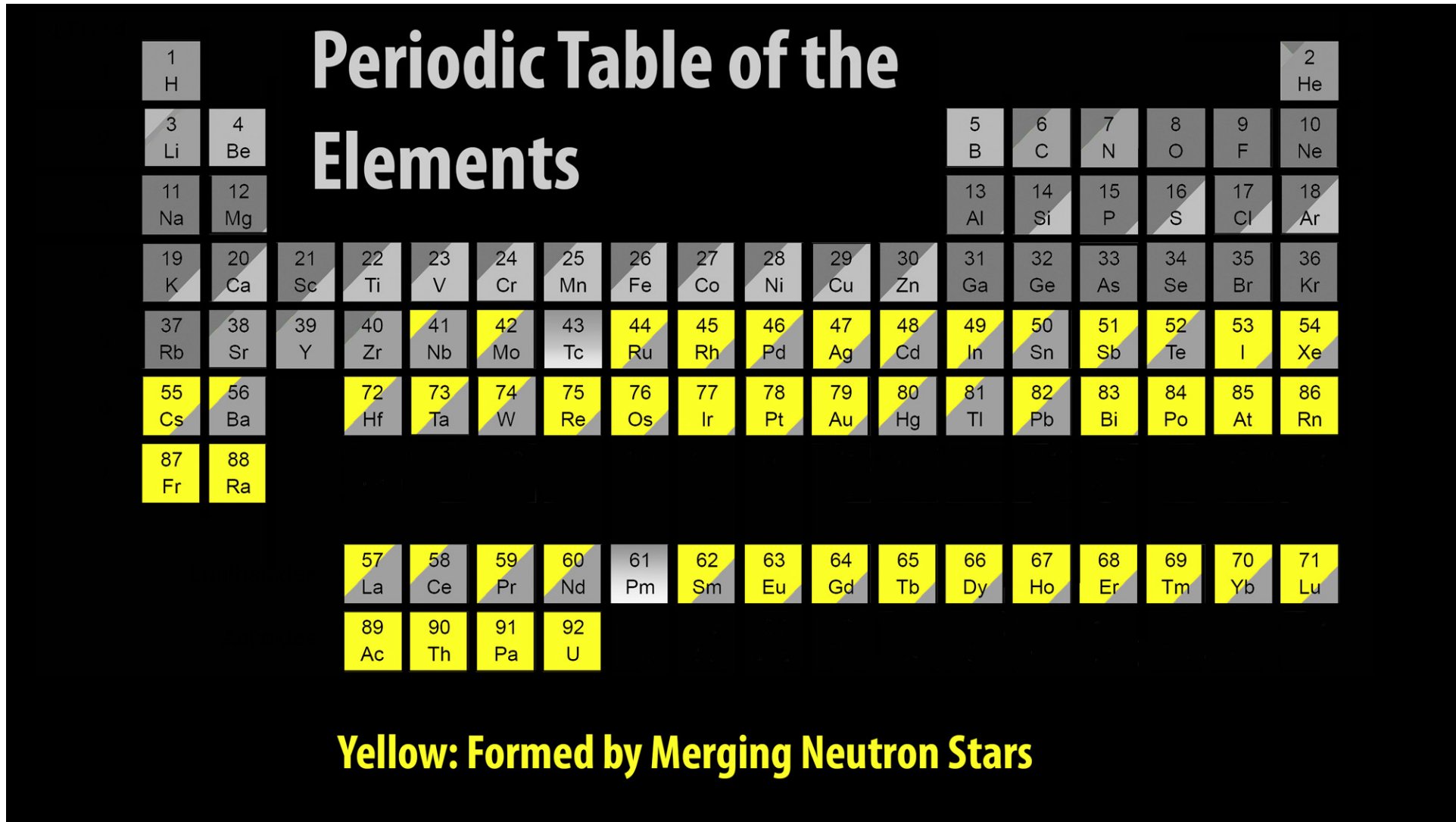


https://chandra.harvard.edu/resources/podcasts/media/pod310518_Bullets.m4v

ESO-VLT/X-Shooter
UV+ Visible +IR



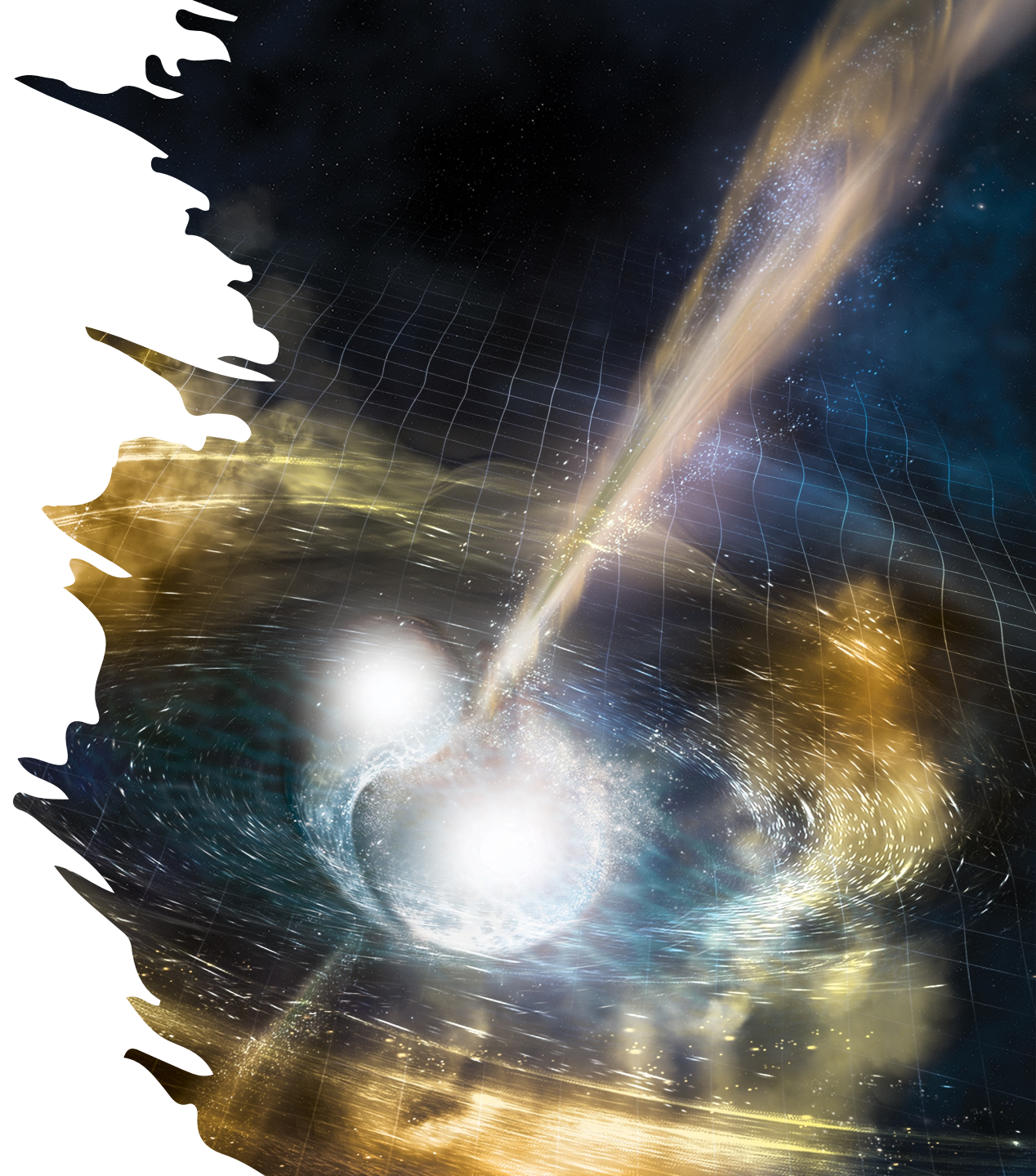
NUCLEOSINTESI

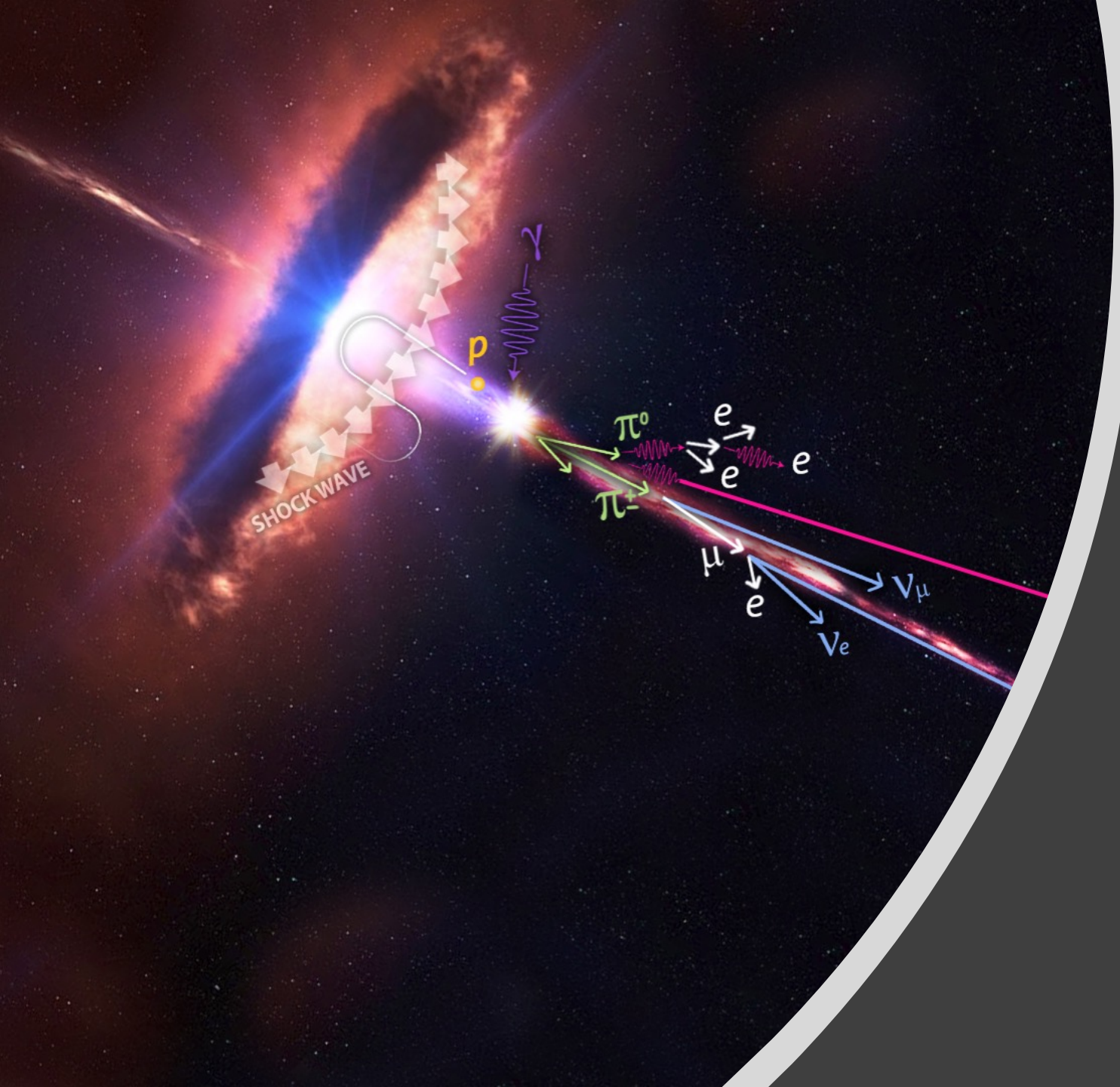


NELLA COALESCENZA DI DUE STELLE DI NEUTRONI E' STATA PRODOTTA UNA MASSA DI ORO PARI A $\sim 10 - 100 M_{\text{terra}}$

Cosa abbiamo imparato da GW170817

- Il sistema di allerta tra rivelatori di tipo diverso funziona!
- Dalla differenza in tempo di arrivo tra i segnali GW e in fotoni abbiamo la prova che la velocità delle GW è praticamente quella della luce
- Abbiamo la certezza che i GRB corti sono generati dalla coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni
- Abbiamo la certezza che la nucleosintesi stellare produce efficacemente quasi tutti gli elementi pesanti che conosciamo





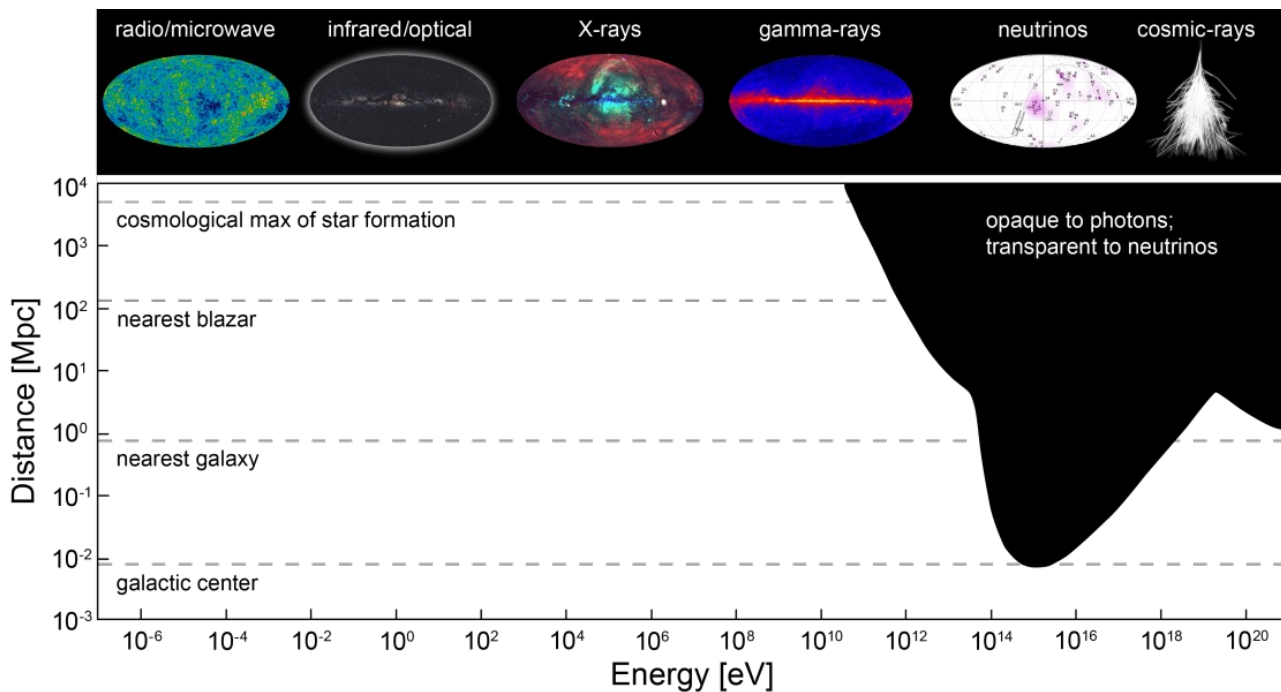
IC-170922 & TXS 0506+056

La storia di un buco nero ancora tutto
da capire

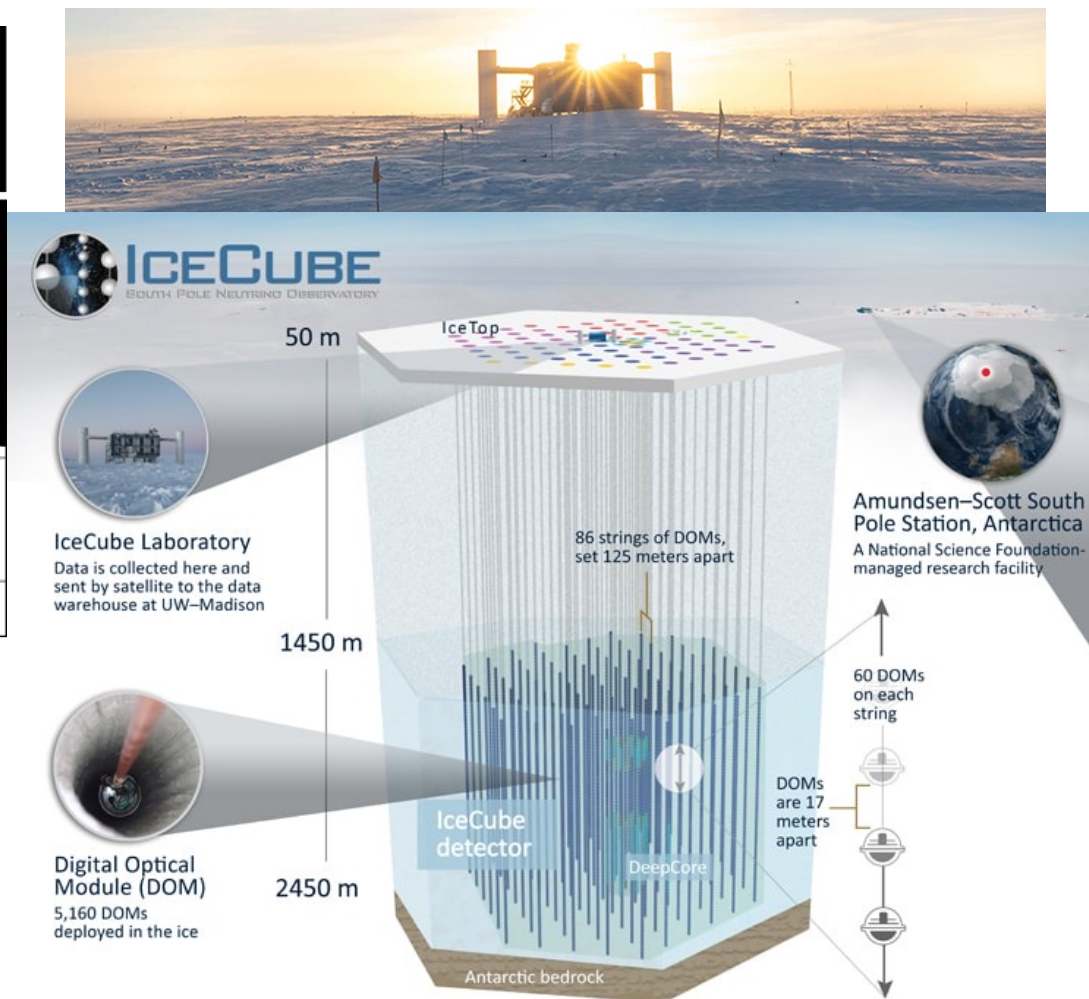
22 settembre 2017

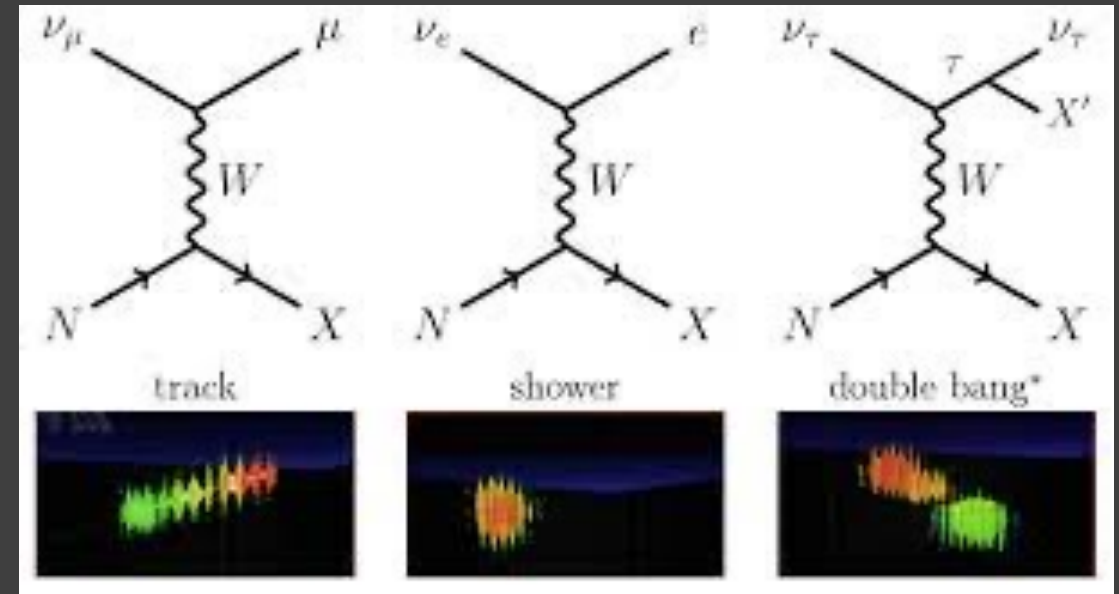
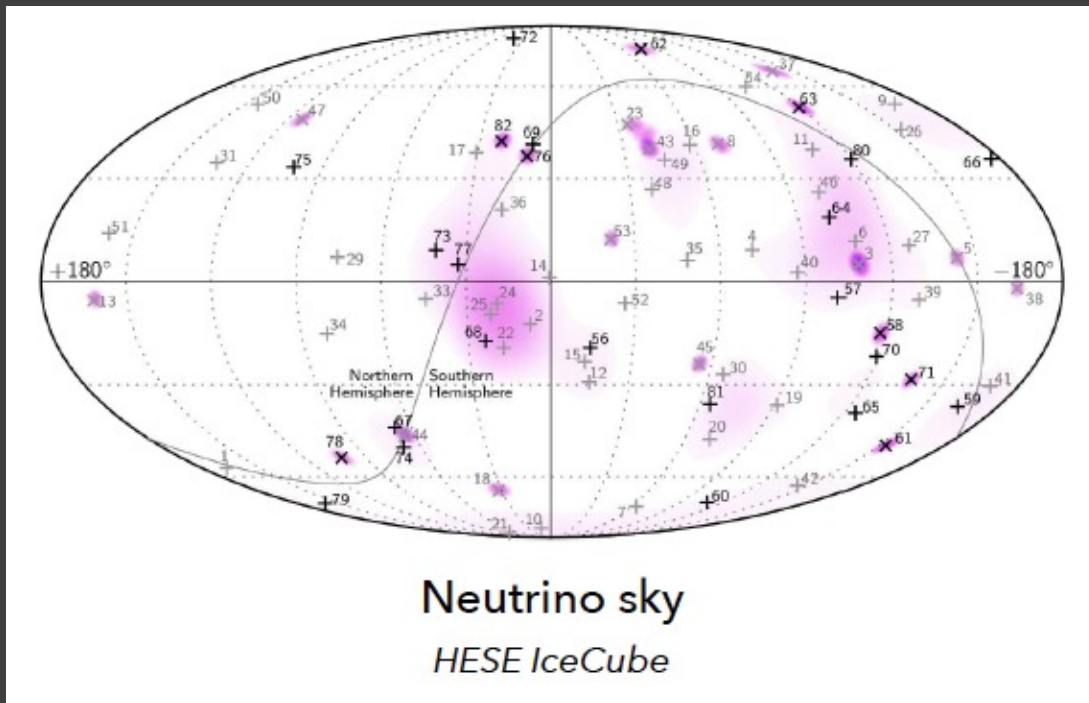
ICE CUBE E I NEUTRINI COSMICI

<https://icecube.wisc.edu>



Una gran fetta dell'Universo di alta energia è opaco ai fotoni ma trasparente ai neutrini



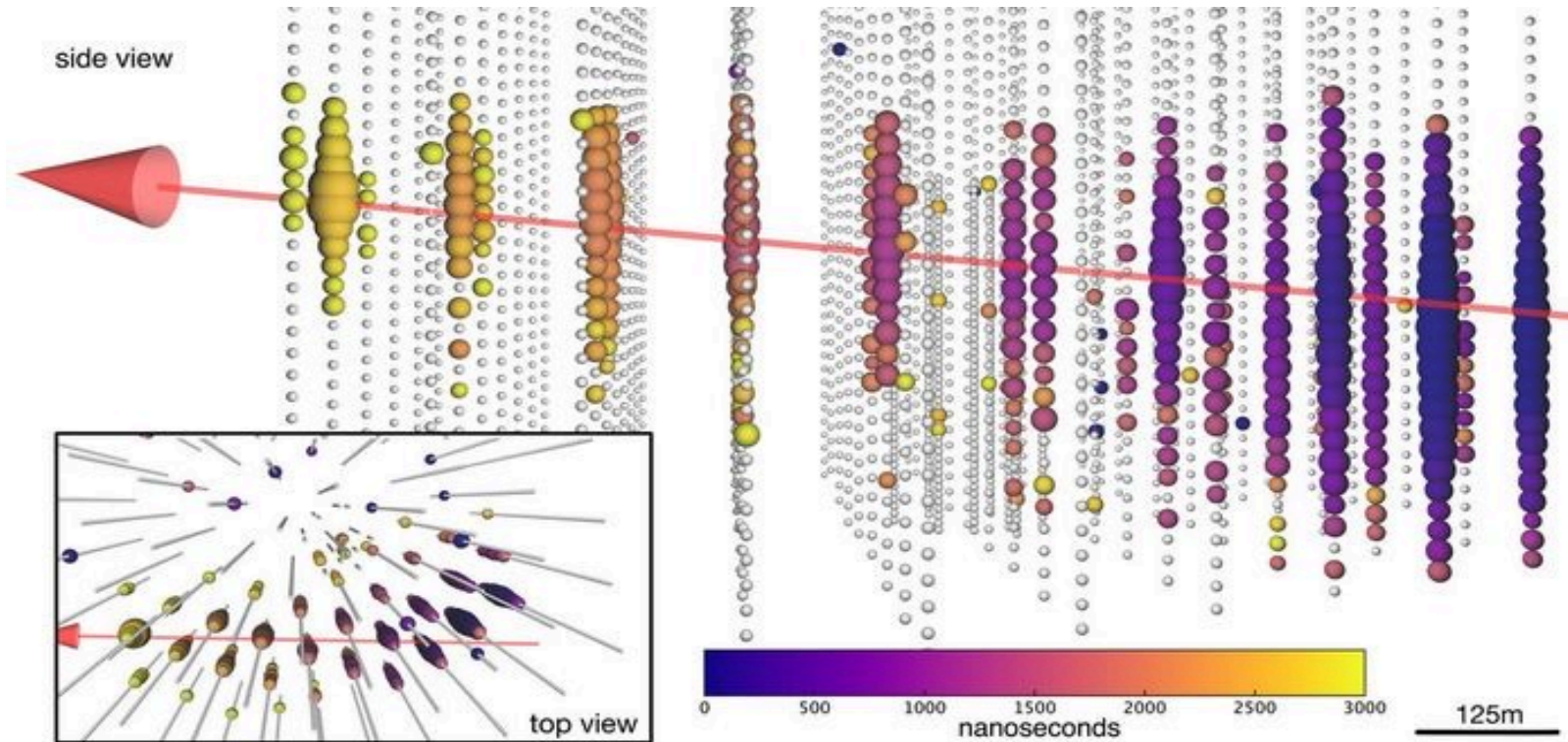


<https://youtu.be/2DDQYHibL3Q>

Il cielo
extragalattico in
neutrini

- IceCUBE ha osservato ad oggi più di 100 eventi di neutrini di origine astrofisica ancora sconosciuta

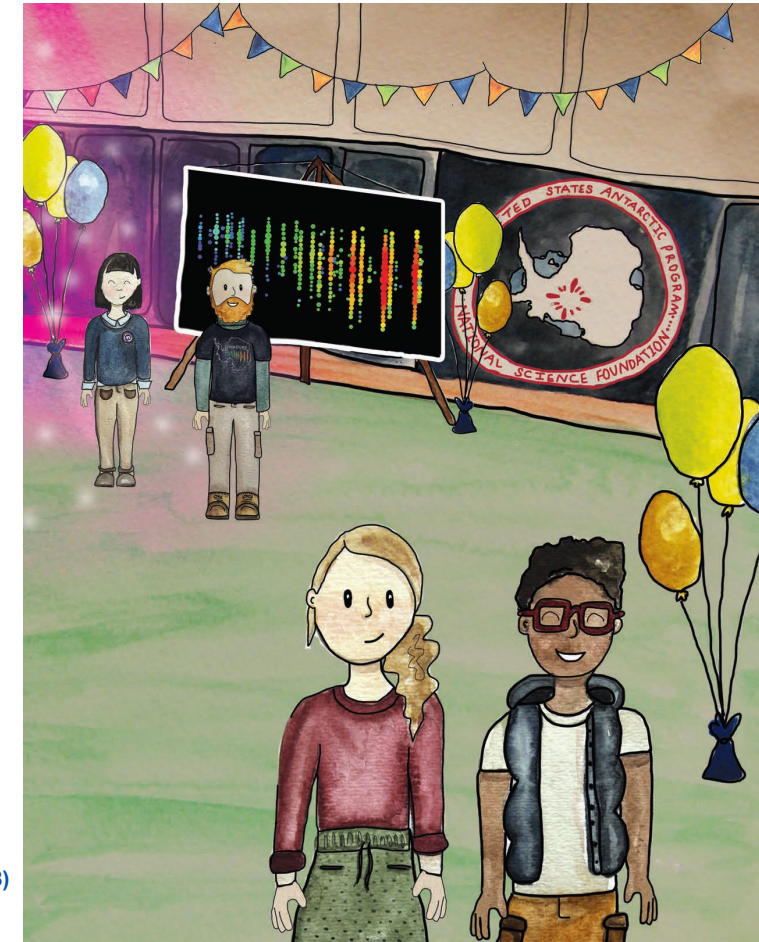
IC-170922



Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A, Volume: 361, Issue: 6398, DOI: (10.1126/science.aat1378)

IC-170922A con una energia impressionante, pare a 290 teraelettronvolt (TeV), cioè mille miliardi di elettronvolt. Una energia altissima se confrontata con quella prodotta dai protoni nell'acceleratore Large Hadron Collider del CERN di Ginevra, che rimane dell'ordine di 6,5 TeV.

Adventures with Rosie & Gibbs: the lost penguins

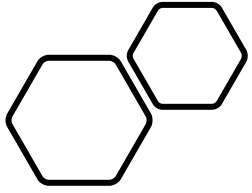


<https://icecube.wisc.edu/outreach/activities/rosie-gibbs/>

Il sistema di allerta in funzione

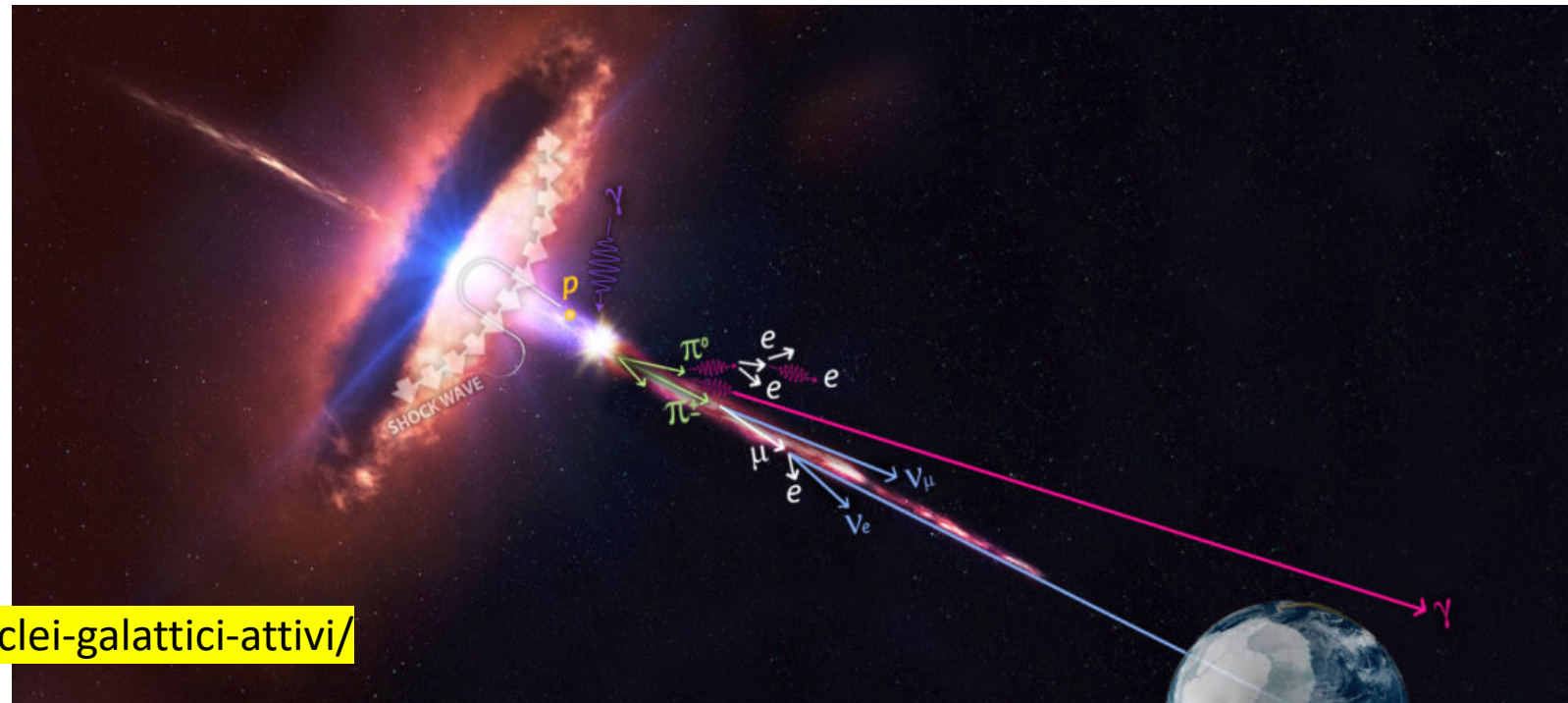


20 osservatori a terra e nello spazio cercano segnali correlati con l'evento di IceCUBE, questo ha permesso di identificare la sorgente più energetica di tutto l'universo conosciuto, il nucleo galattico attivo TXS-0506+056



I Nuclei Galattici Attivi

- TXS 0506+056: un nucleo galattico attivo, cioè un buco nero supermassiccio al centro di una galassia che espelle un getto di materia relativistica, flussi di particelle e radiazioni energetiche a velocità vicine a quella della luce
- Distanza: 4,5 miliardi di anni luce
- <http://tevcat.uchicago.edu/?mode=1;id=309>



Conclusioni



L' Astronomia multi-messaggera è iniziata



Stiamo imparando molto
ma i quesiti sono ancora
tanti



Grazie per l'attenzione

