

A purple alien character with a pink body and a gold spiral on its chest, holding a telescope against a starry background.

I messaggeri del cosmo

Giulia Pagliaroli

INFN-Laboratori Nazionali del Gran
Sasso

Outline

I messaggeri

SN1987A: La storia di una supernova

Due vite diverse di un buco nero

La Via Lattea emette neutrini

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)

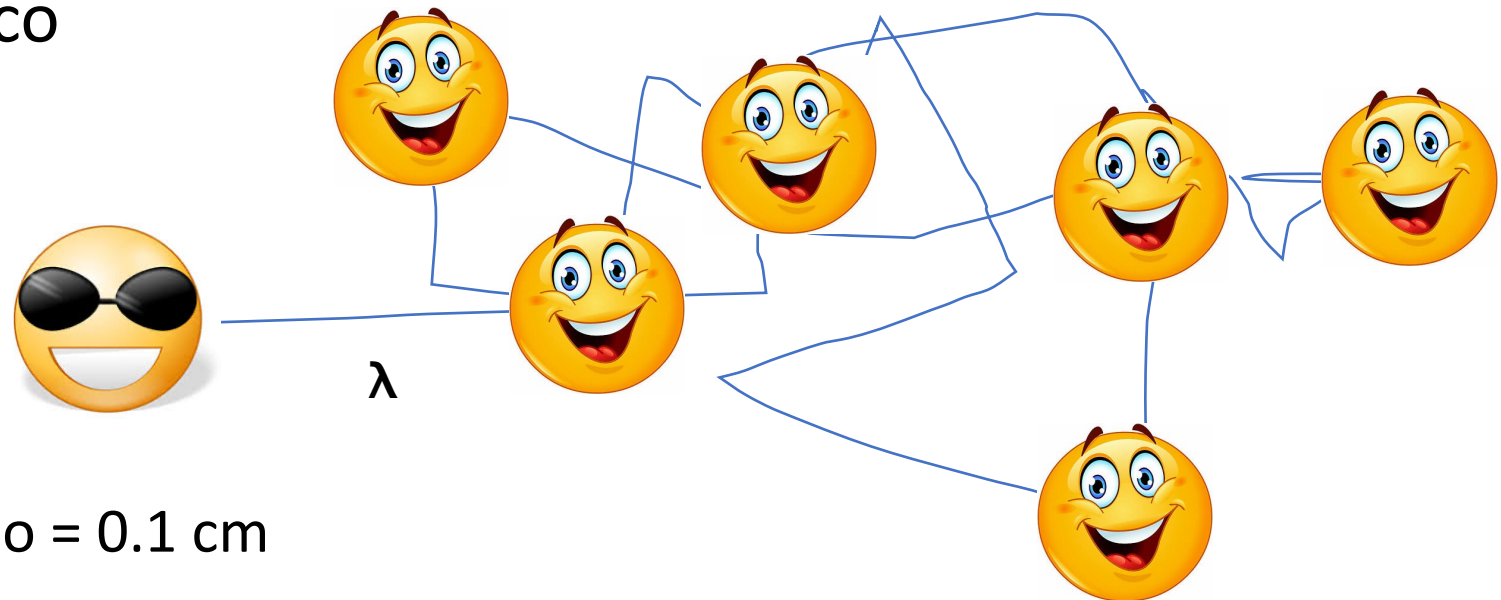
Dipende dalla natura della forza
gioco

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

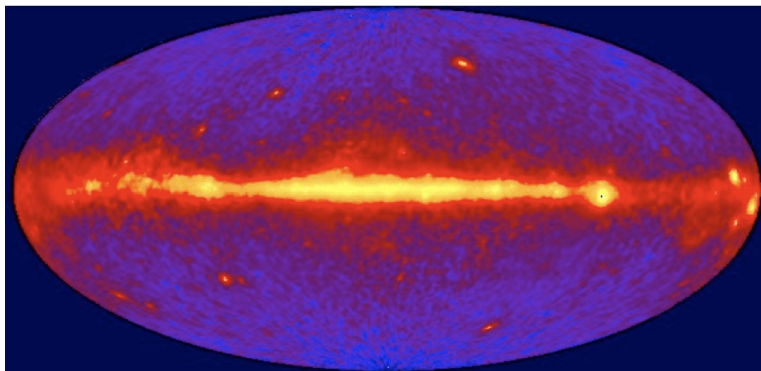
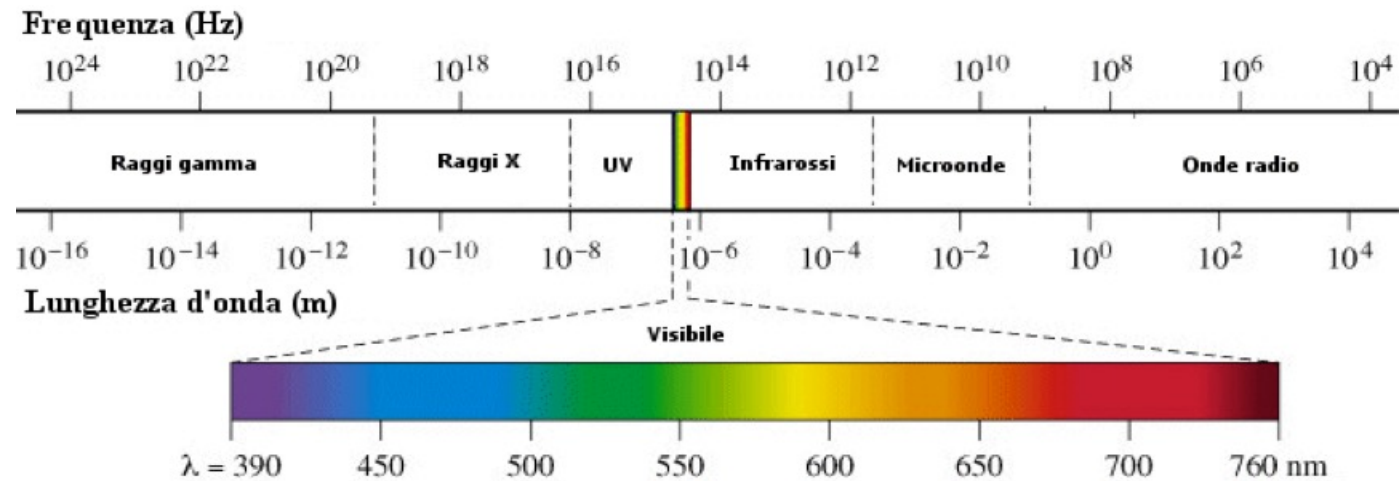


- ❖ Particella elementare
- ❖ Priva di massa
- ❖ Elettricamente neutra ma elemento costituente di ogni campo elettromagnetico
- ❖ Vita da Star



Libero cammino medio = 0.1 cm

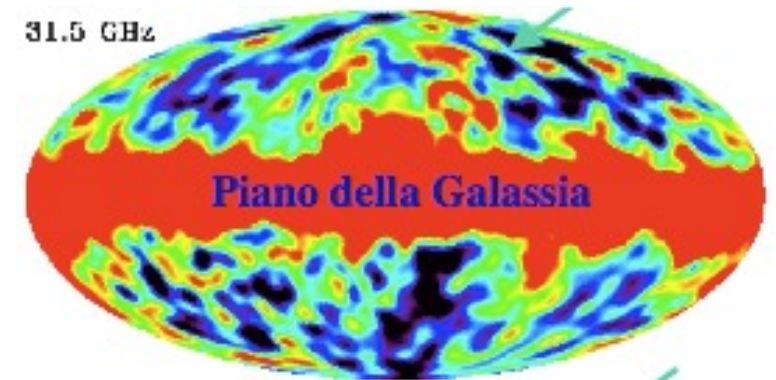
Tanti modi di osservare e tante diverse informazioni



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

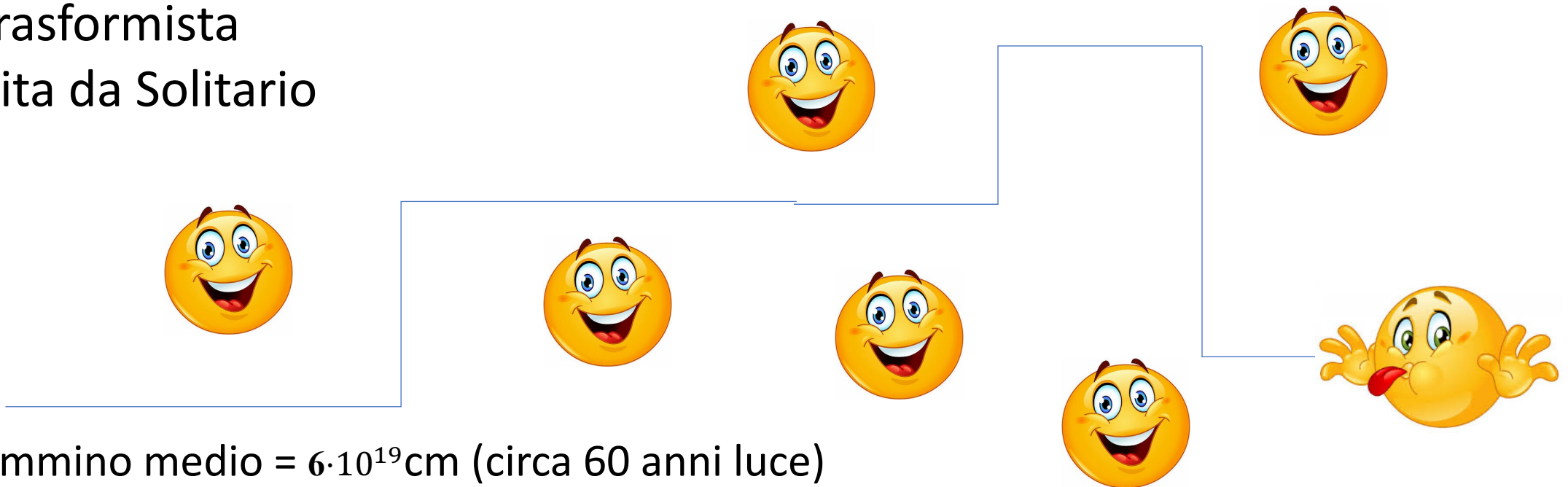


Microonde: la prima luce emessa dall'Universo appena nato

CARTA DI IDENTITA' DEL NEUTRINO



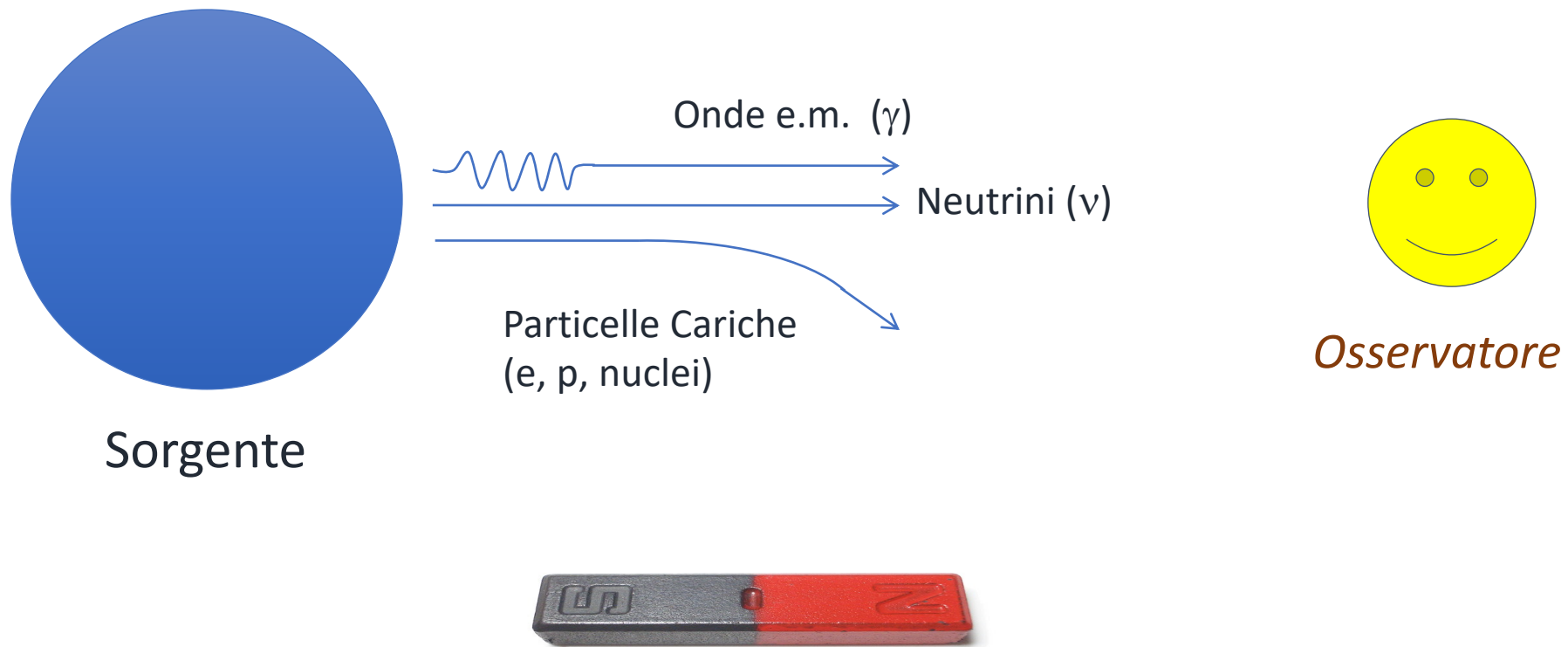
- ❖ Particella elementare
- ❖ Dotato di massa estremamente piccola
- ❖ Elettricamente neutra
- ❖ Trasformista
- ❖ Vita da Solitario



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

Perché i neutrini?

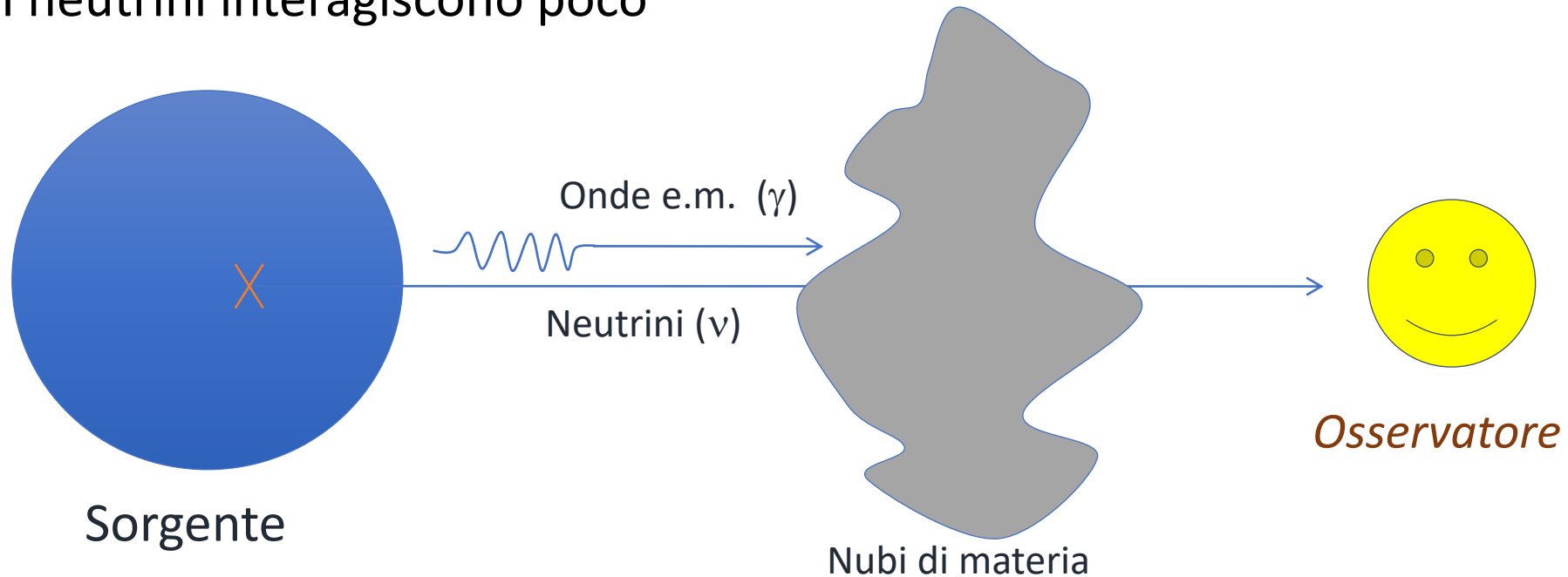
I neutrini sono neutri → non vengono deviati dai campi magnetici → puntano alla sorgente



Perché i neutrini?

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

I neutrini interagiscono poco



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

PER FARE ASTRONOMIA DOBBIAMO CATTURARLI

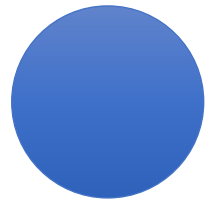
Il primo telescopio di neutrini

- KAMIOKANDE E SUPER-KAMIOKANDE (Japan)

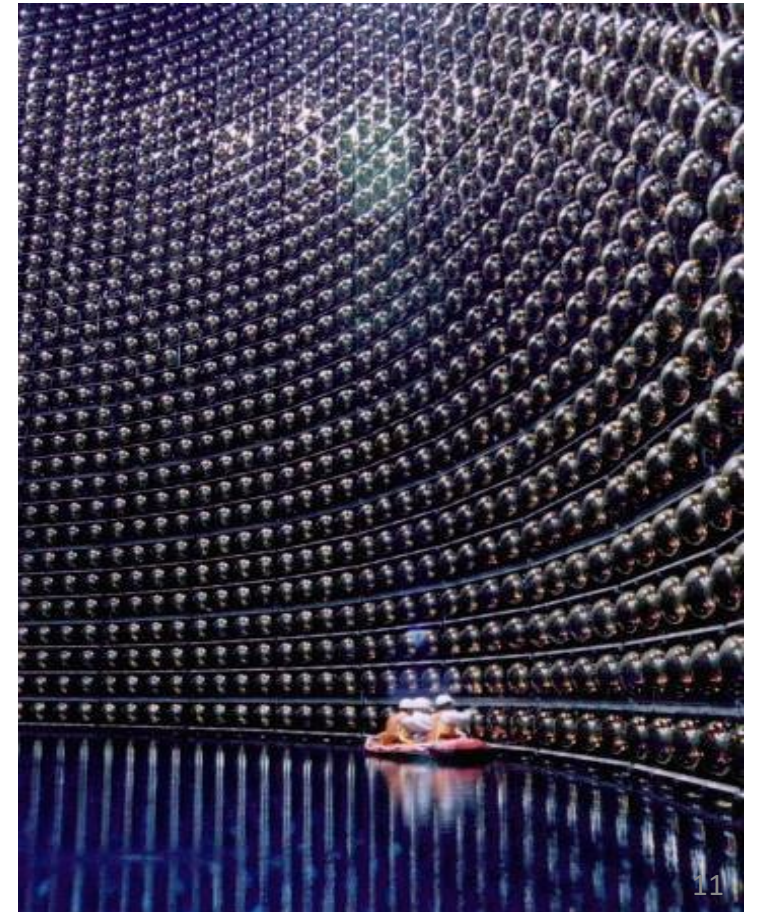
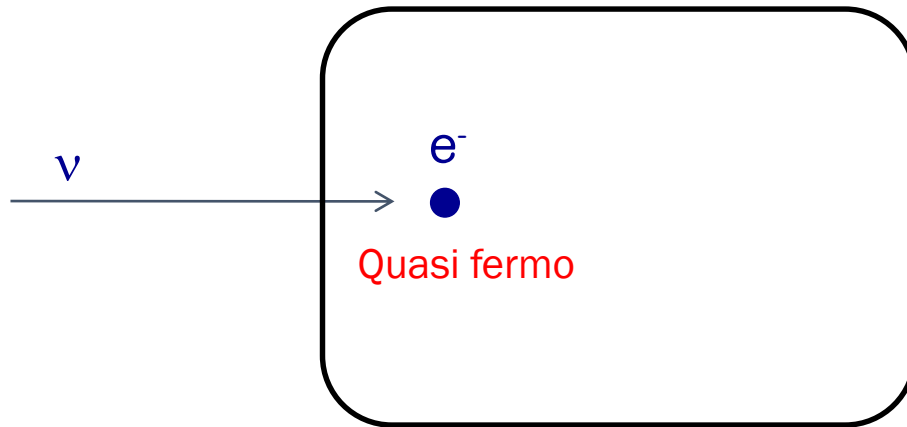
SK - 22.5 Kton di H₂O

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

SK



Sole



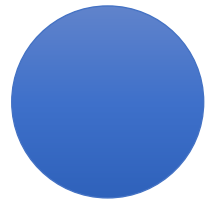
PER FARE ASTRONOMIA DOBBIAMO CATTURARLI

Il primo telescopio di neutrini

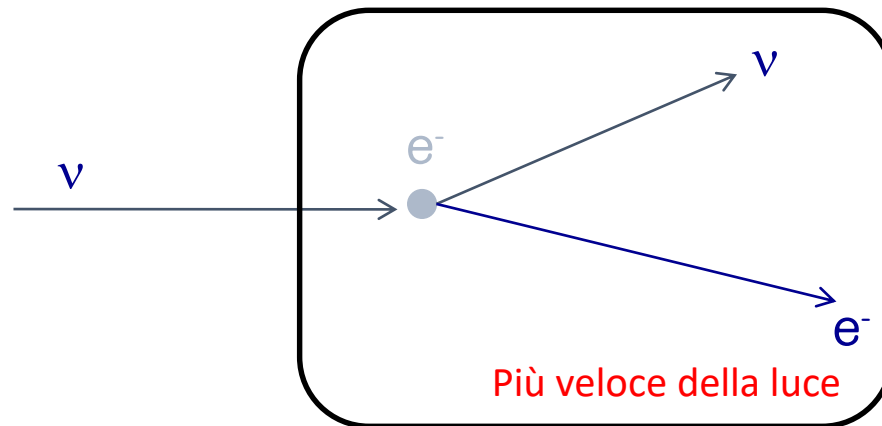
- KAMIOKANDE E SUPER-KAMIOKANDE (Japan)

SK – 22.5 Kton di H₂O

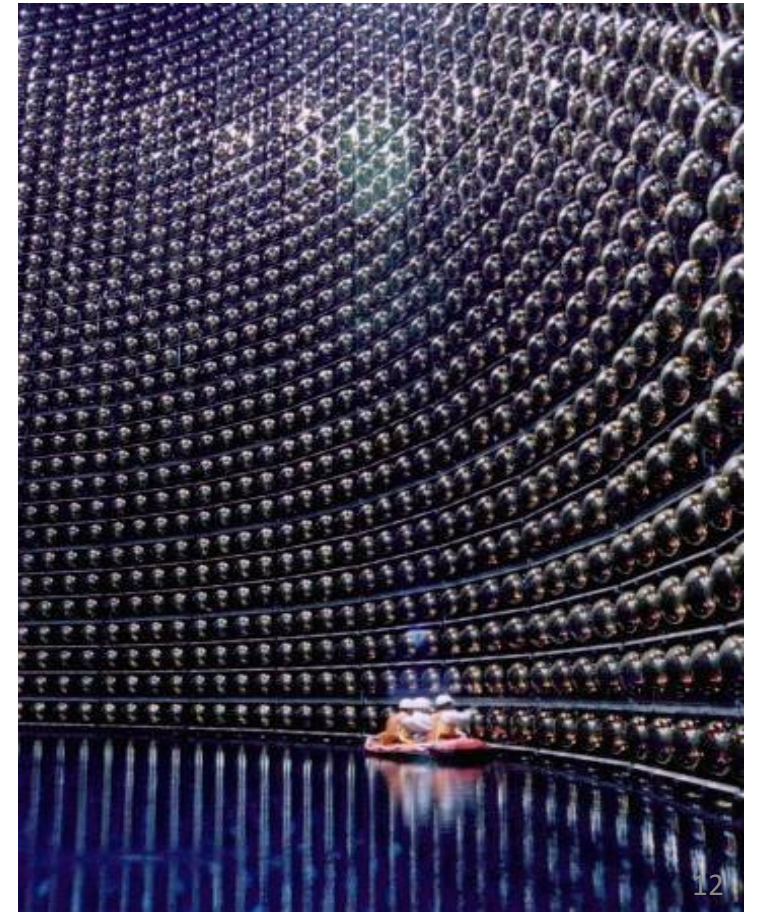
$$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$$



Sole



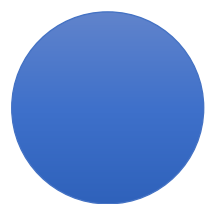
N.B. – La velocità della luce in acqua è minore della velocità della luce nel vuoto



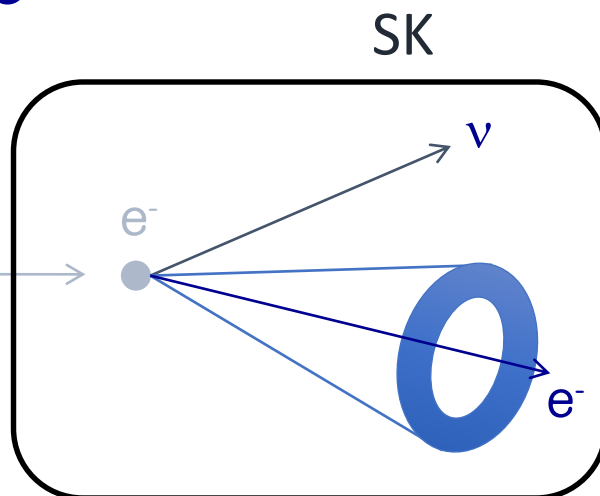
PER FARE ASTRONOMIA DOBBIAMO CATTURARLI

Il primo telescopio di neutrini

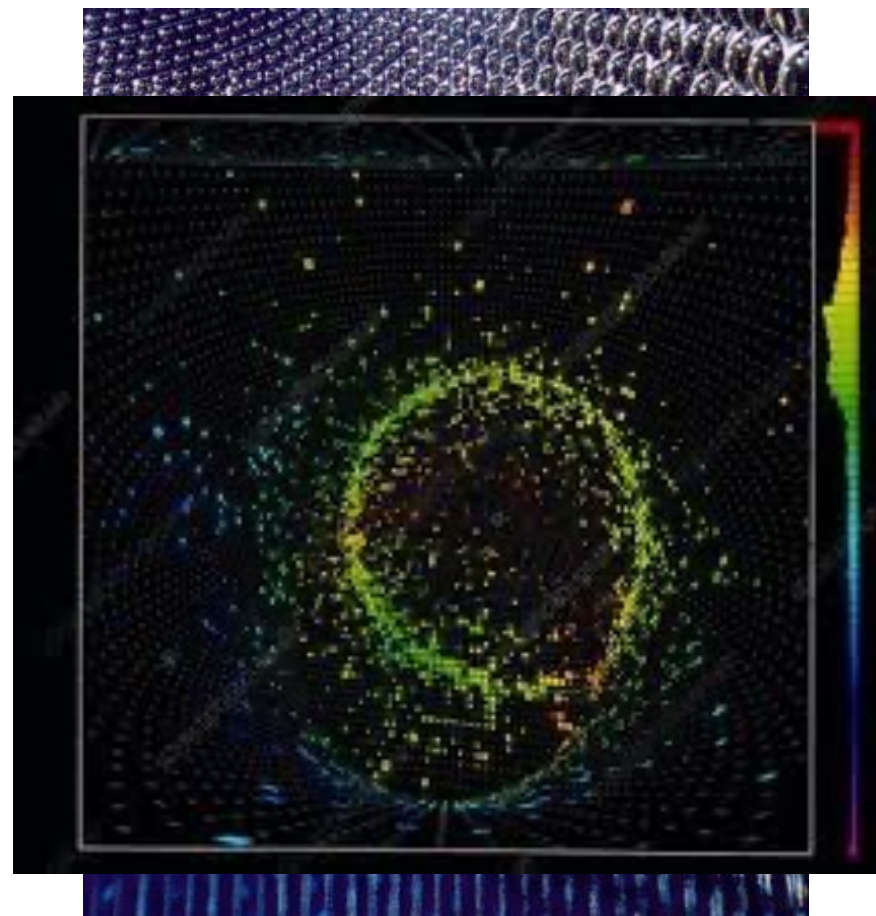
- KAMIOKANDE E SUPER-KAMIOKANDE (Japan)



Sole

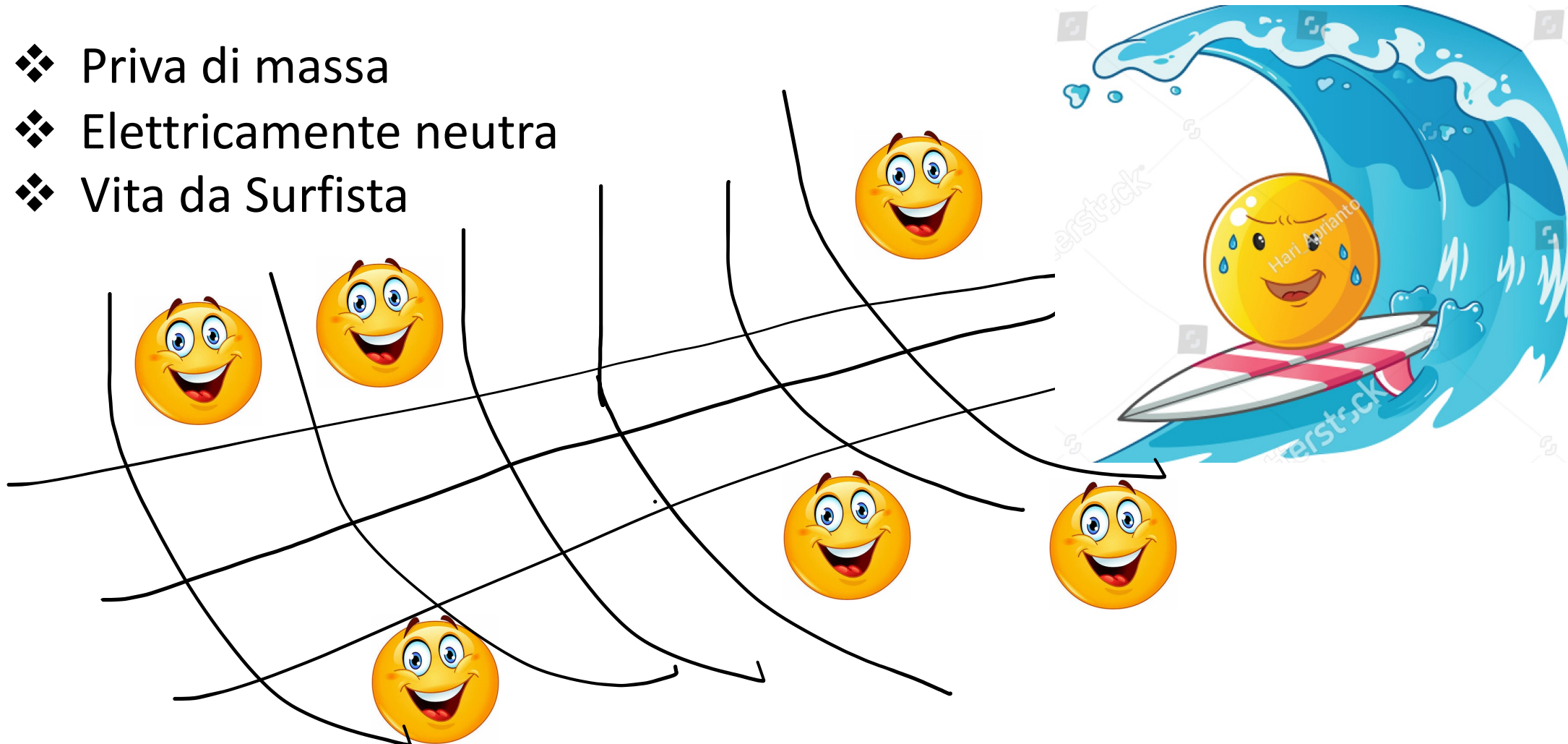


CONO DI LUCE CHERENCOV

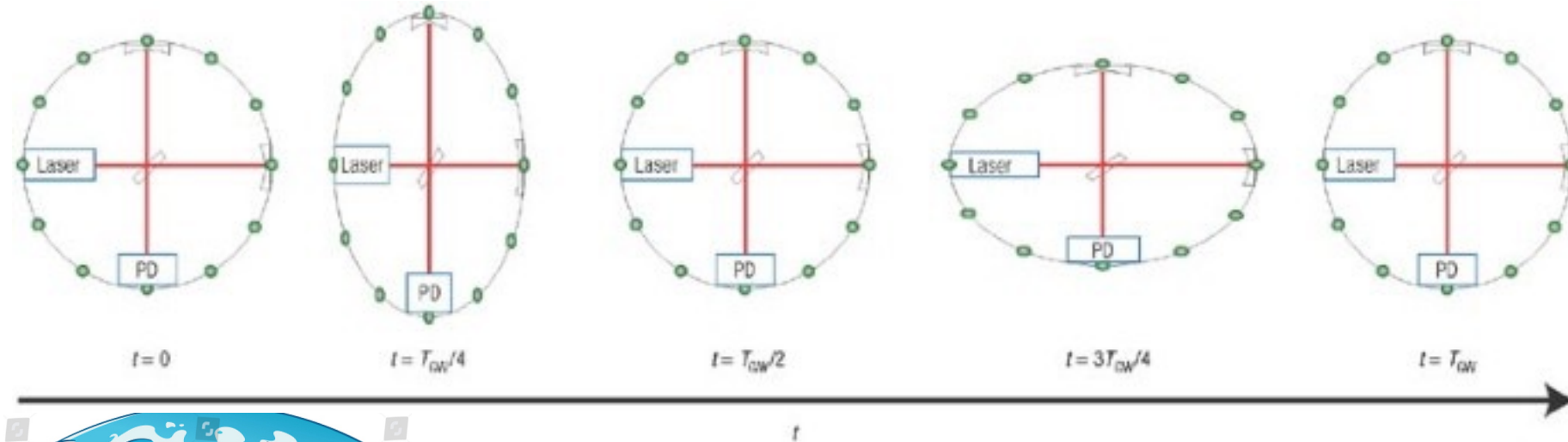


CARTA DI IDENTITA' DELL'ONDA GRAVITAZIONALE

- ❖ 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

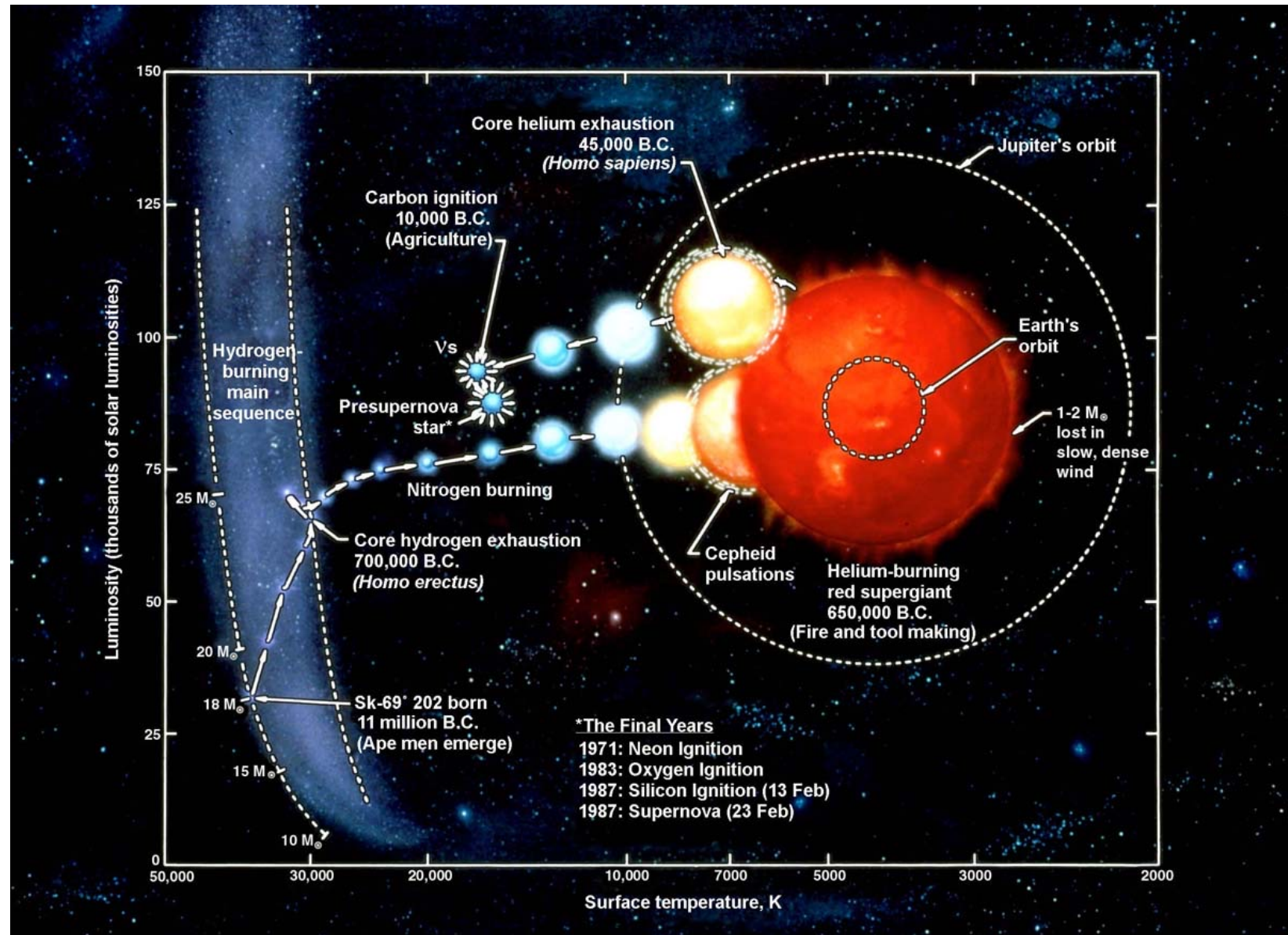
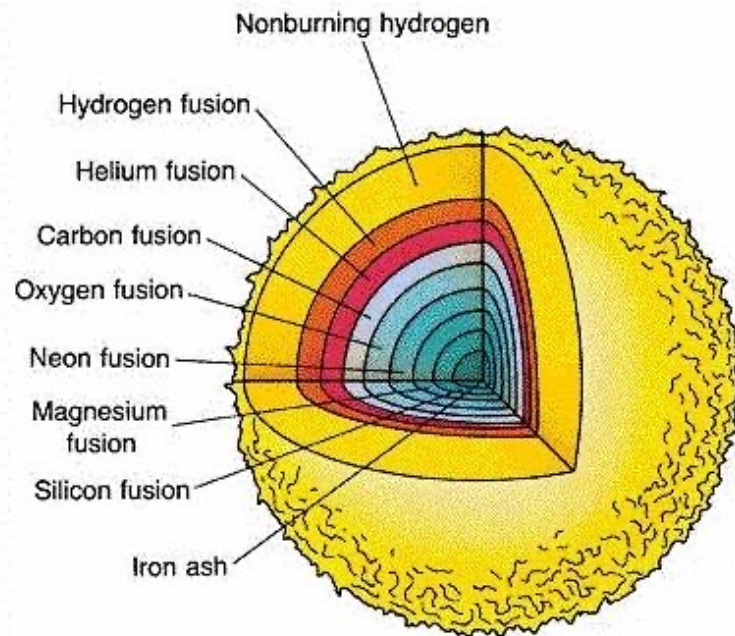


Supernova 1987A 23.
Februar 1987



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

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

STATO INIZIALE

Stella Progenitrice

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

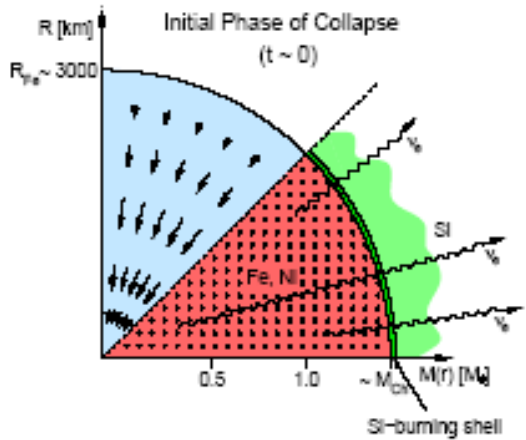
$$R_{Star} \sim 200R_{\odot}$$

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 $\longrightarrow \epsilon_{GW} \leq 0.0001\% \cdot \epsilon^b$

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

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

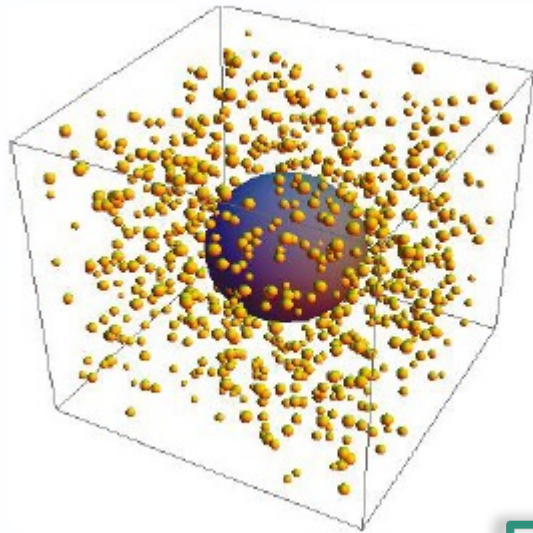
$$\epsilon_{\nu} = (1-5) \cdot 10^{53} \text{ erg}$$

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

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

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

Neutrini



ENERGIA

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

$$\varepsilon_\nu = 99\% \cdot \varepsilon_B$$

FLUENZA

$$F_{\nu_x} \cong \frac{\varepsilon_B}{6 \langle E_{\nu_x} \rangle} \frac{1}{4\pi D^2} \approx 5 \cdot 10^{10} \left(\frac{20 \text{ kpc}}{D} \right)^2 \frac{10 \text{ MeV}}{\langle E_{\nu_x} \rangle} \frac{v_x}{\text{cm}^2}$$

DURATA

$$\Delta t = 10 \text{ sec}$$

Prima osservazione di neutrini extragalattici

Nei dati registrati il 23 Febbraio alle 7:35 UT

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

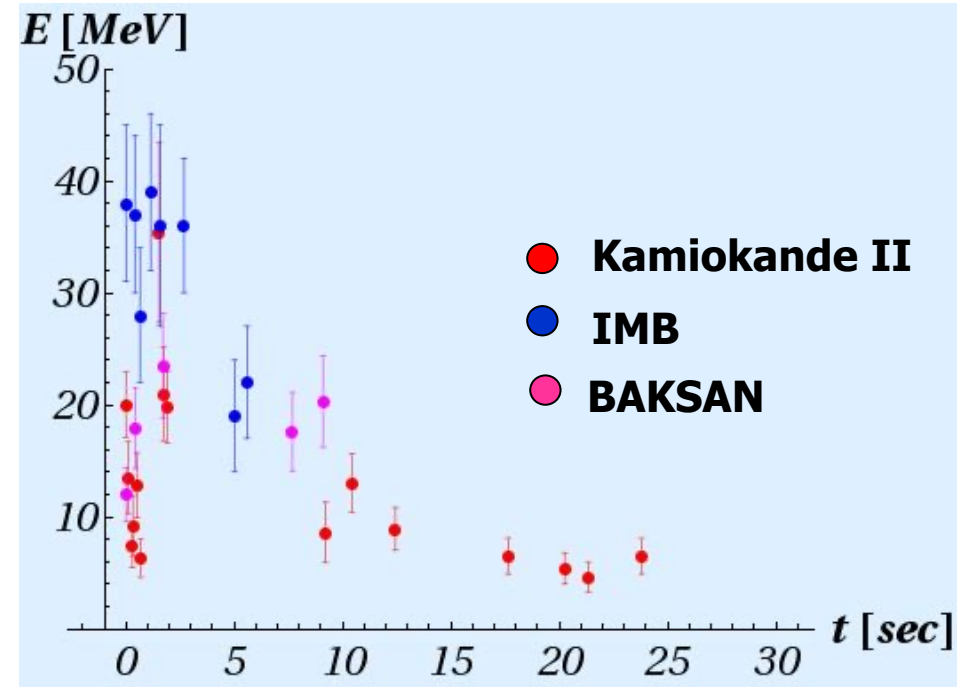
Kamiokande II



IMB

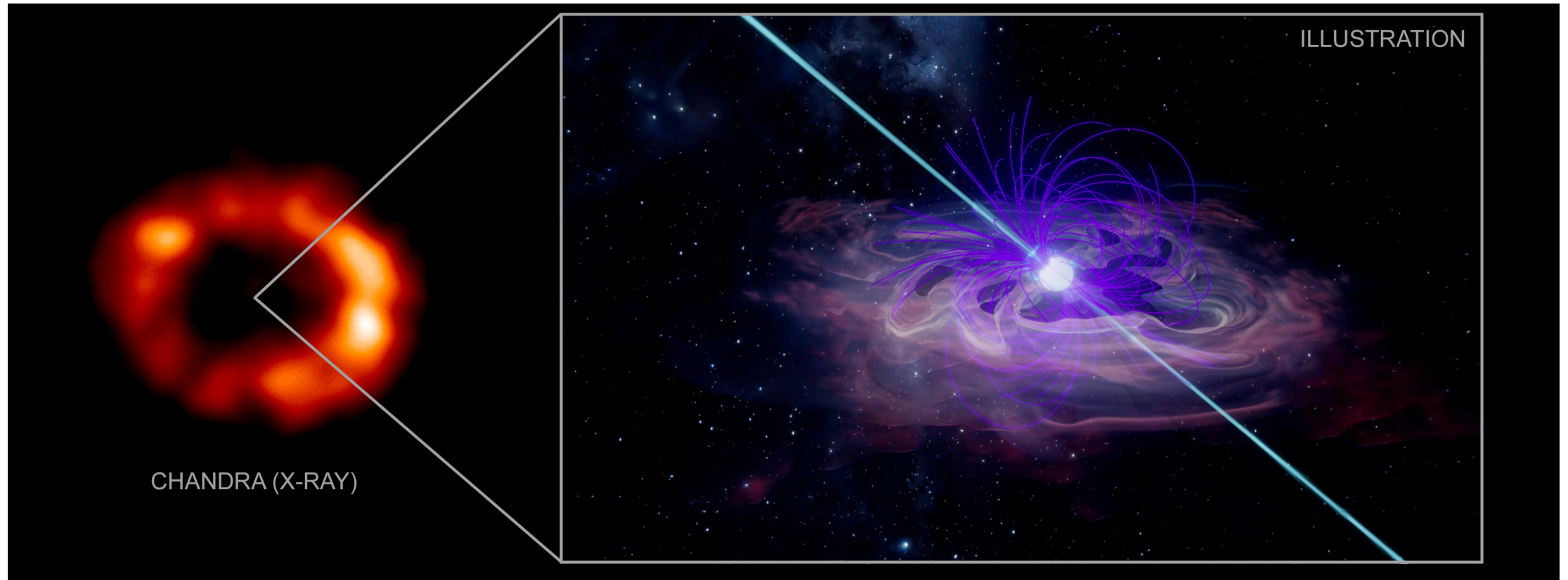


BAKSAN



SN1987A Oggi

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



La Supernova di Domani SN2025

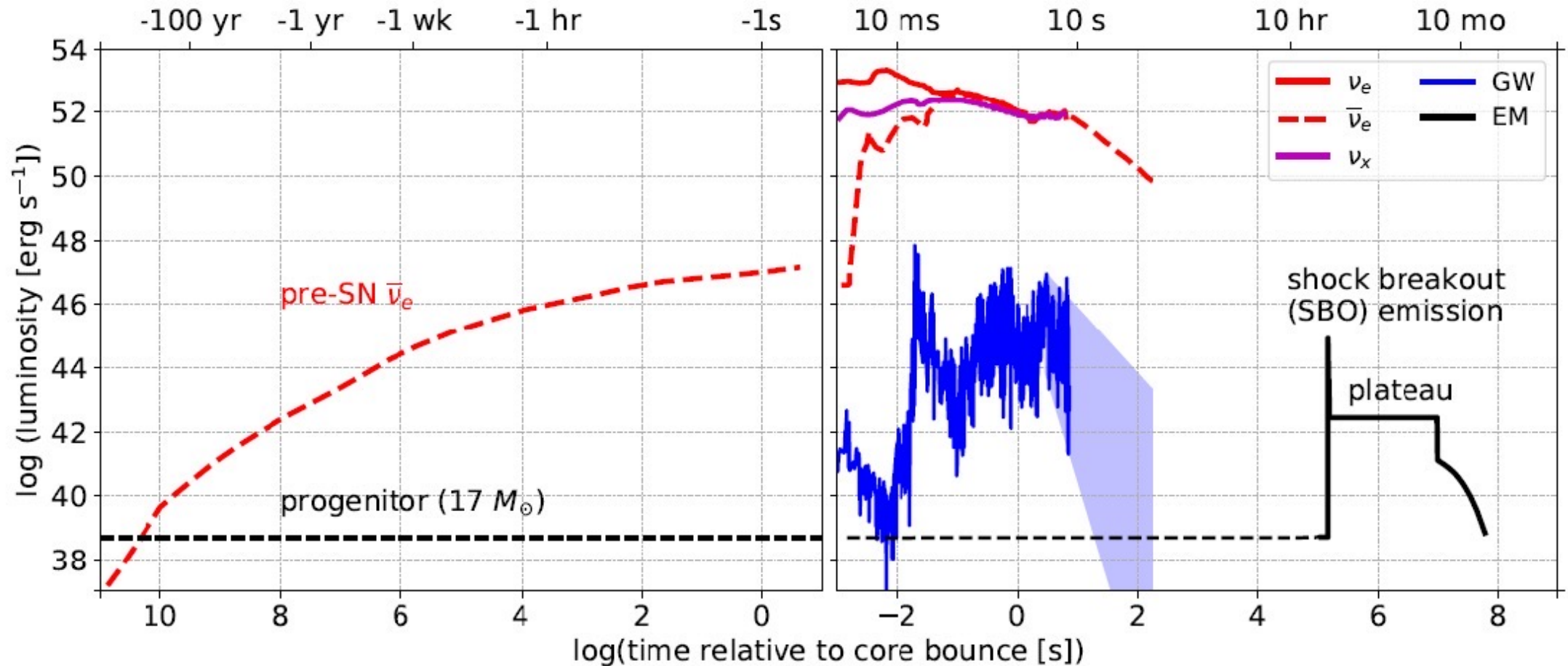


Figure from Nakamura *et al*, MNRAS 161, 3296 (2016)

La Supernova di Domani SN2025

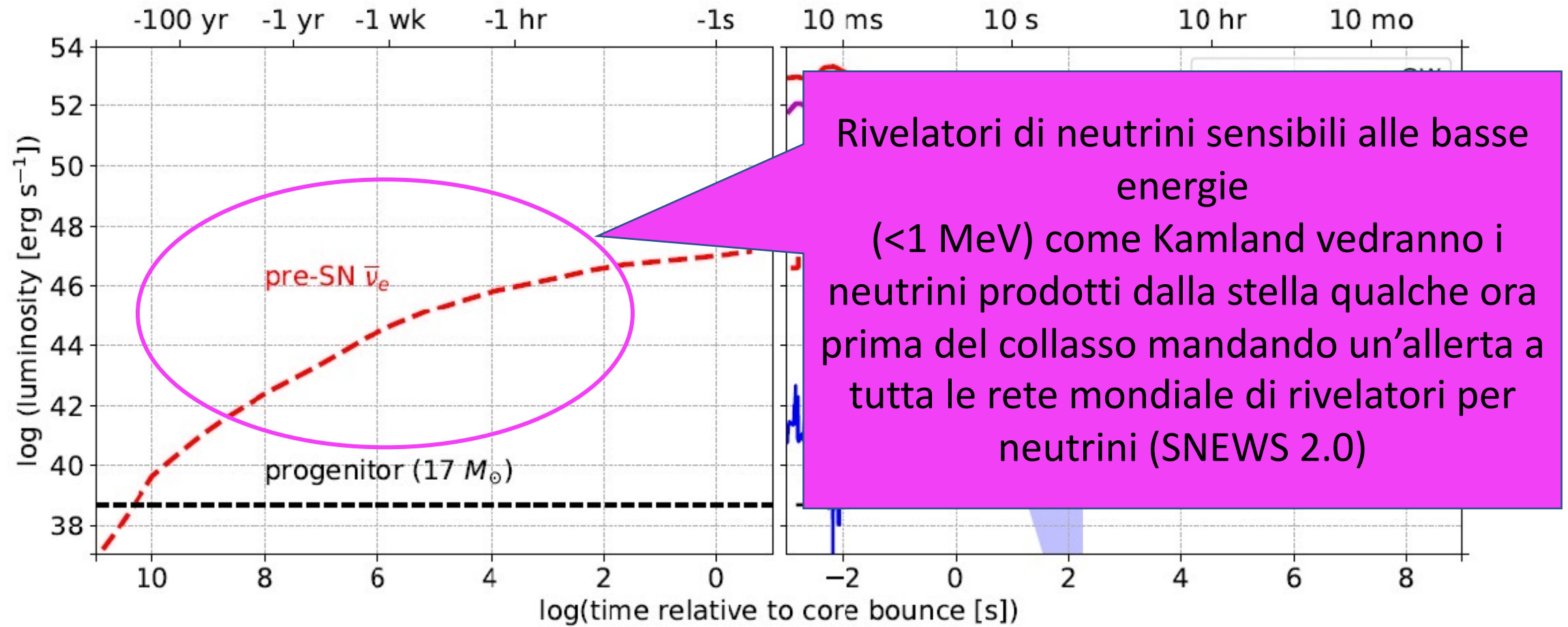


Figure from Nakamura *et al*, MNRAS 161, 3296 (2016)

La Supernova di Domani SN2025

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

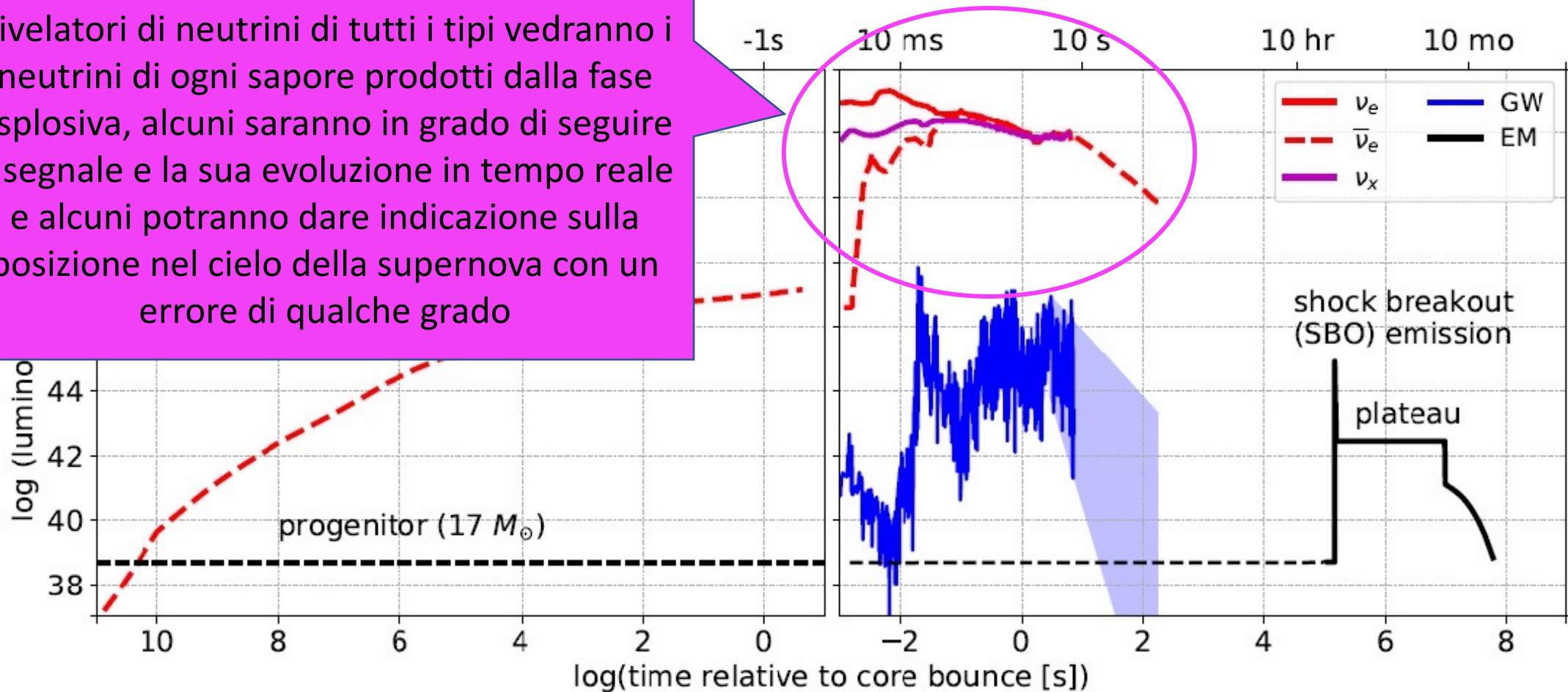
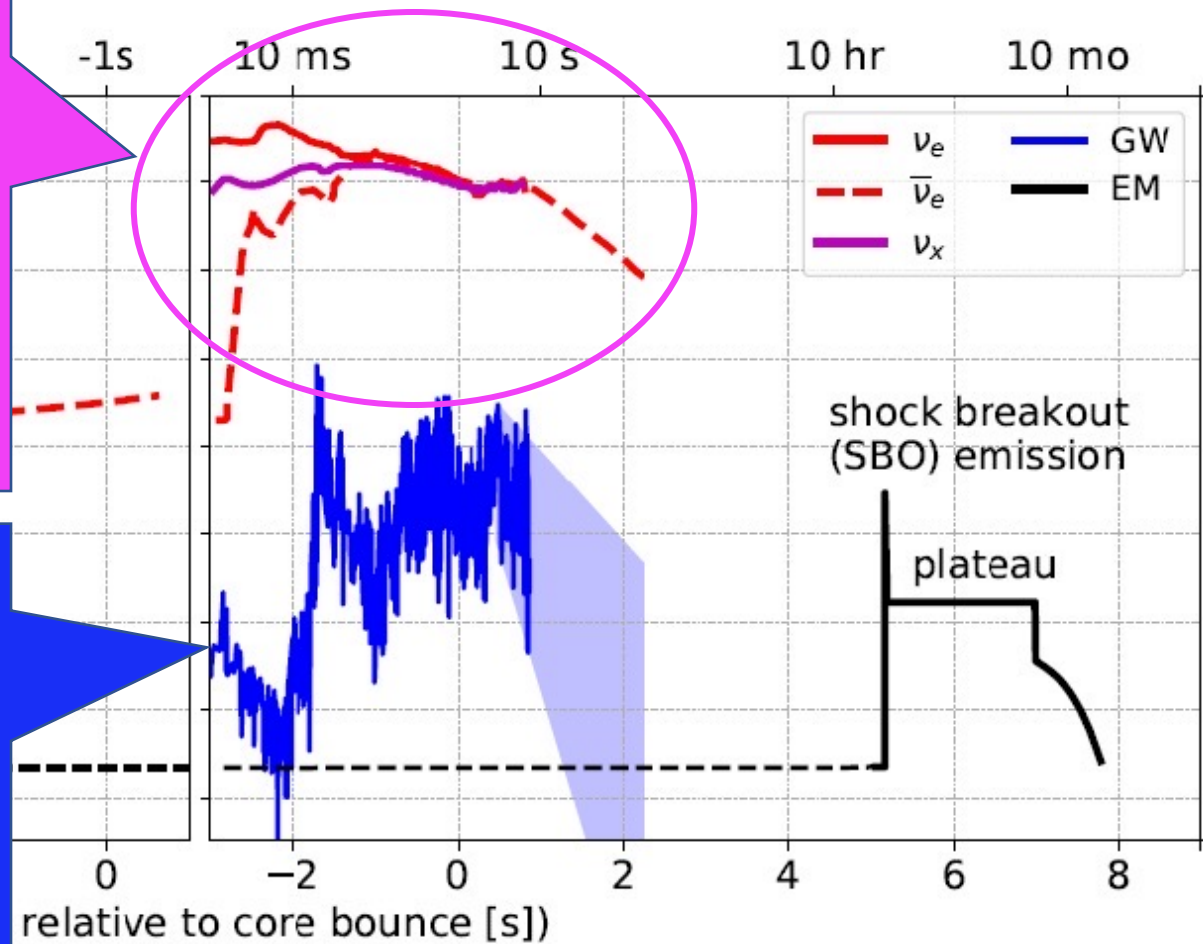


Figure from Nakamura *et al*, MNRAS 161, 3296 (2016)

La Supernova di Domani SN2025

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

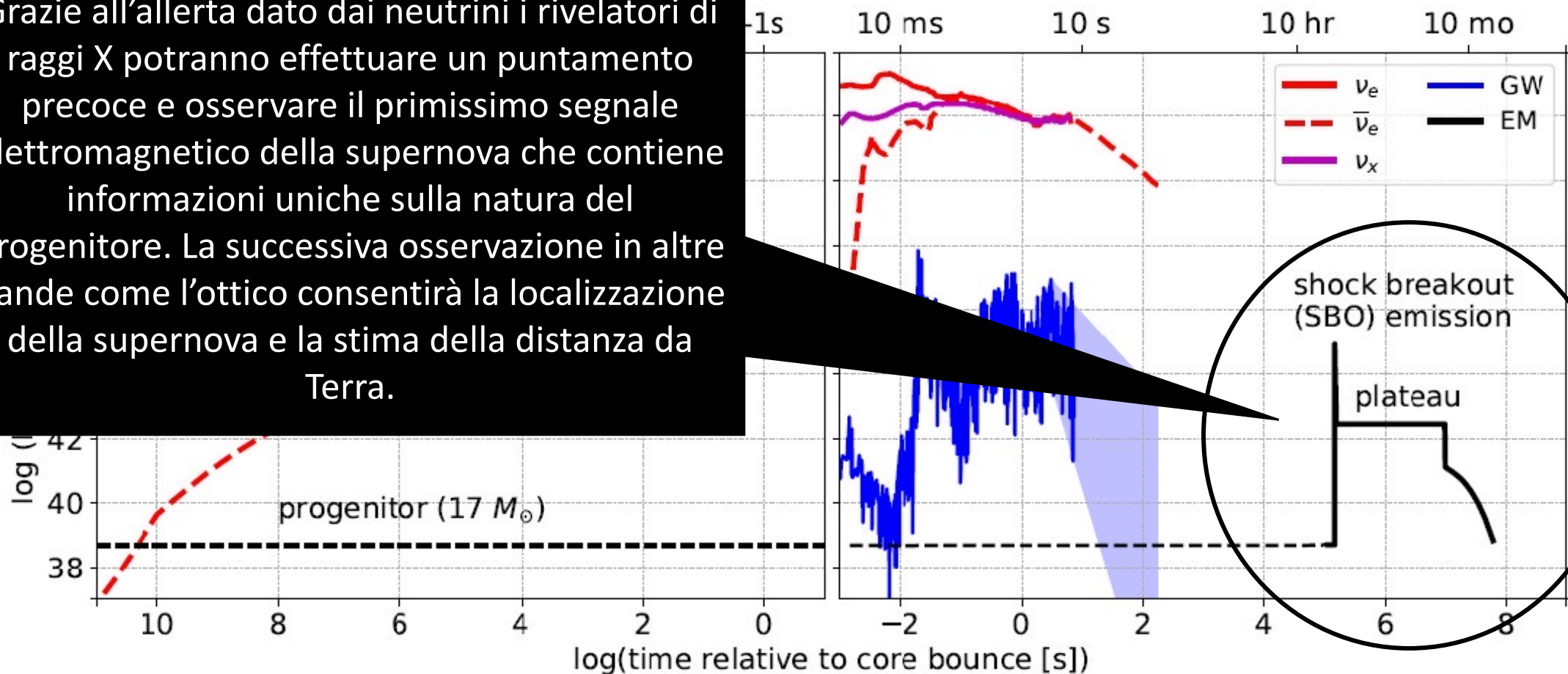
Gli interferometri gravitazionali aiutati anche dalle informazioni dei rivelatori neutrini osserveranno il segnale prodotto dalla stella durante la fase esplosiva e saranno fondamentali per determinare il meccanismo dinamico che porta alla esplosione



, 3296 (2016)

La Supernova di Domani SN2025

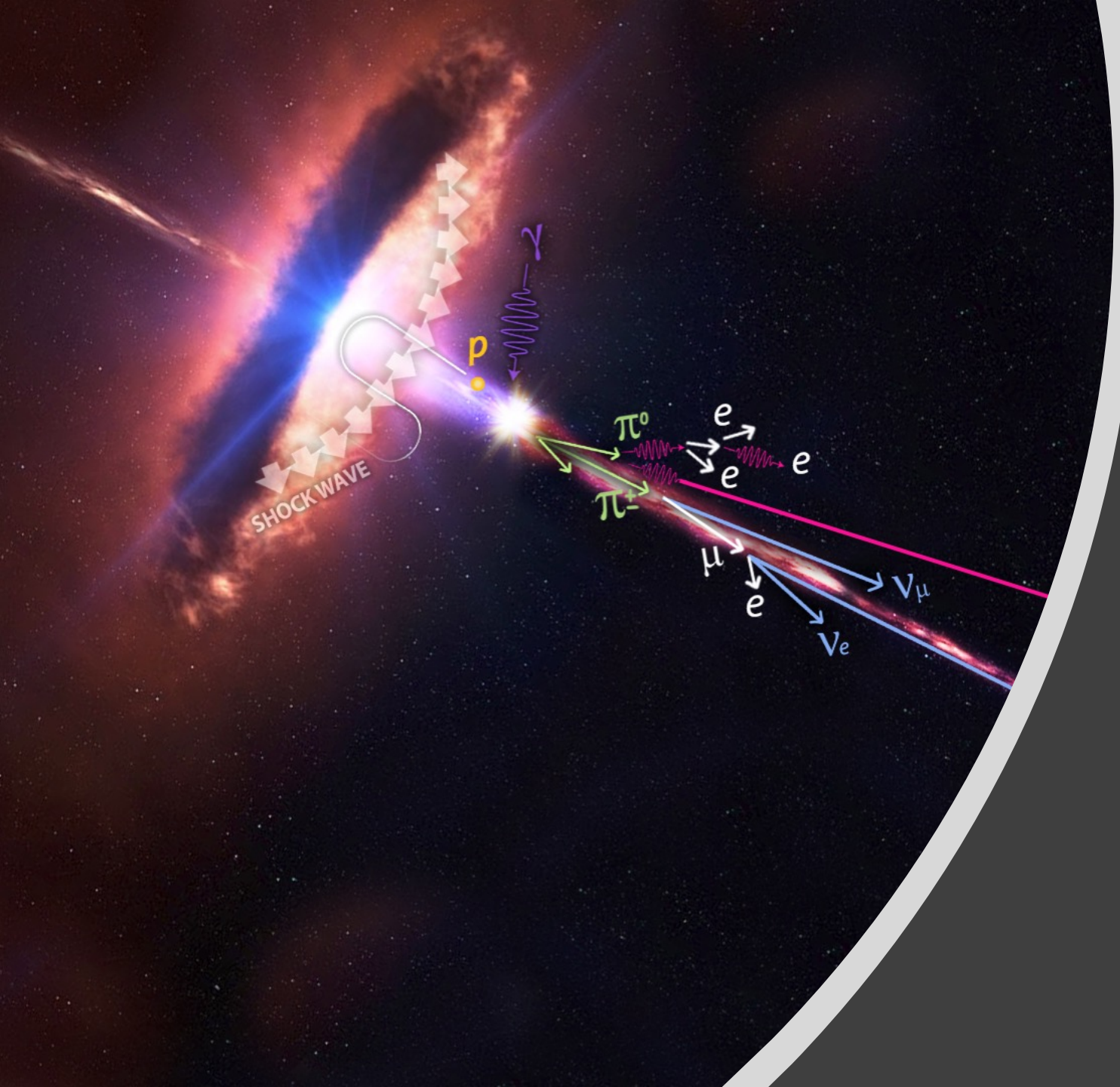
Grazie all'allerta dato dai neutrini i rivelatori di raggi X potranno effettuare un puntamento precoce e osservare il primissimo segnale elettromagnetico della supernova che contiene informazioni uniche sulla natura del progenitore. La successiva osservazione in altre bande come l'ottico consentirà la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





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



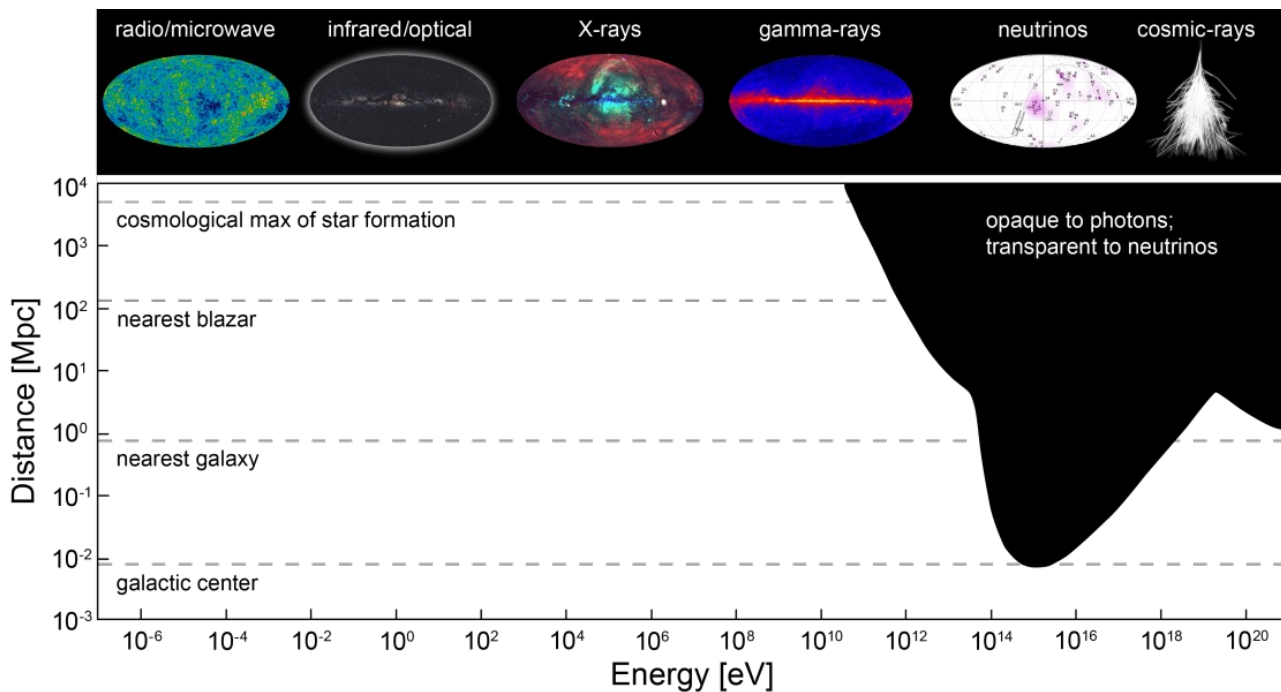
IC-170922 & TXS 0506+056

La storia di un buco nero ancora tutto
da capire

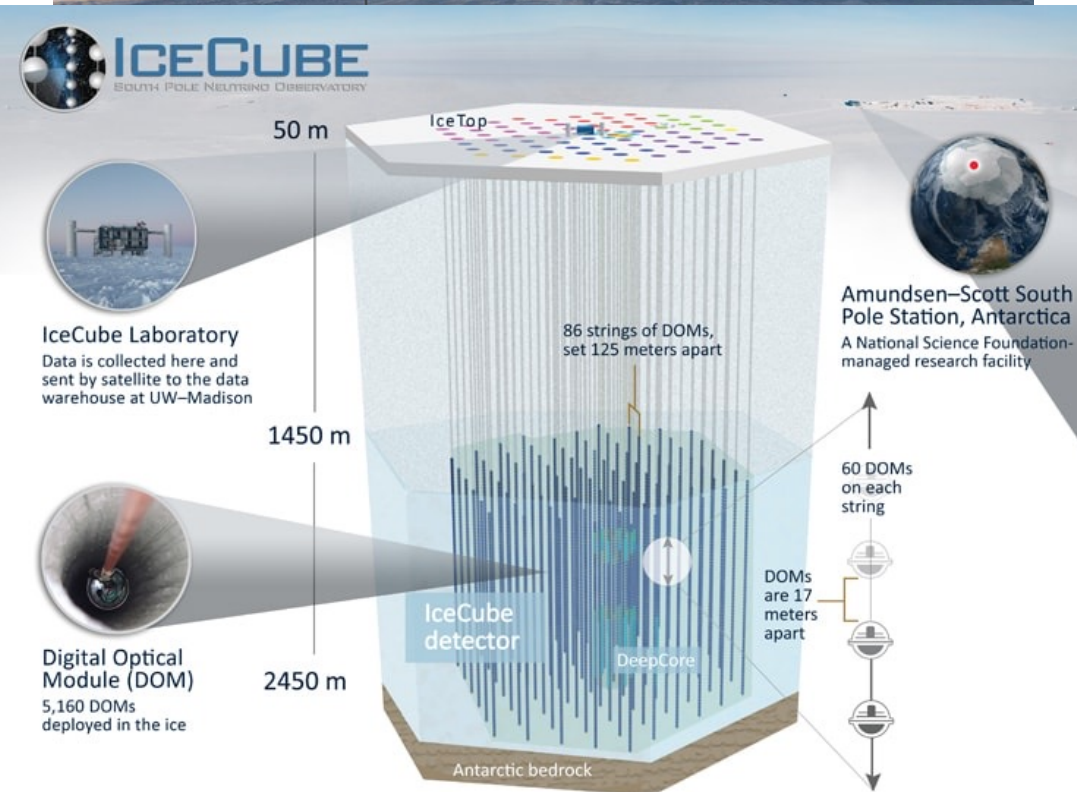
22 settembre 2017

ICE CUBE E I NEUTRINI COSMICI

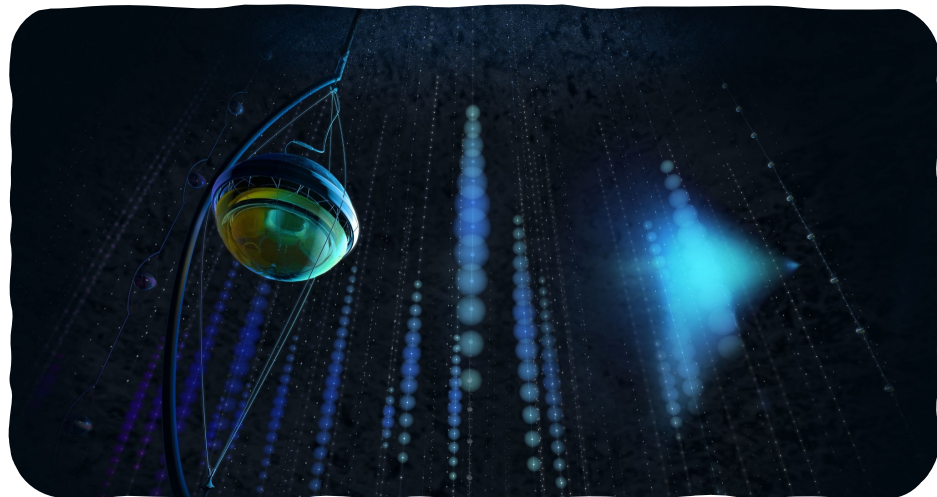
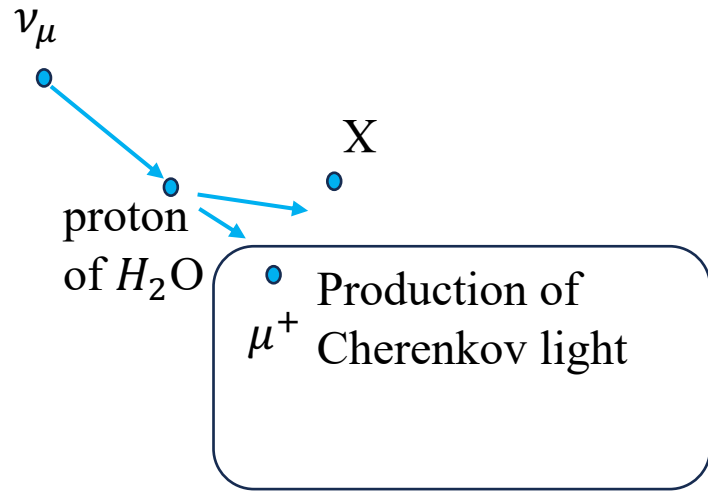
<https://icecube.wisc.edu>



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



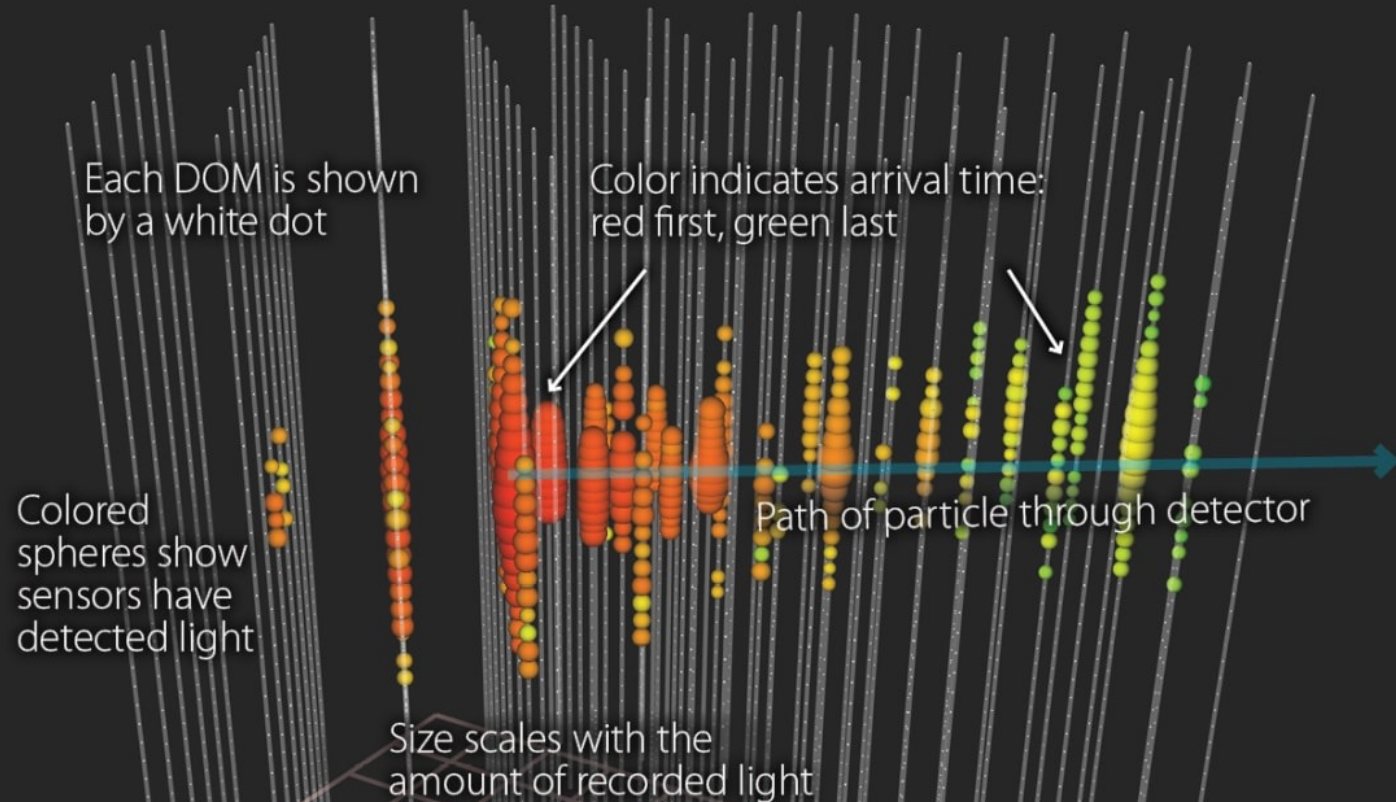
Come sono rivelati i neutrini di alta energia



giulia.pagliaroli@lngs.infn.it

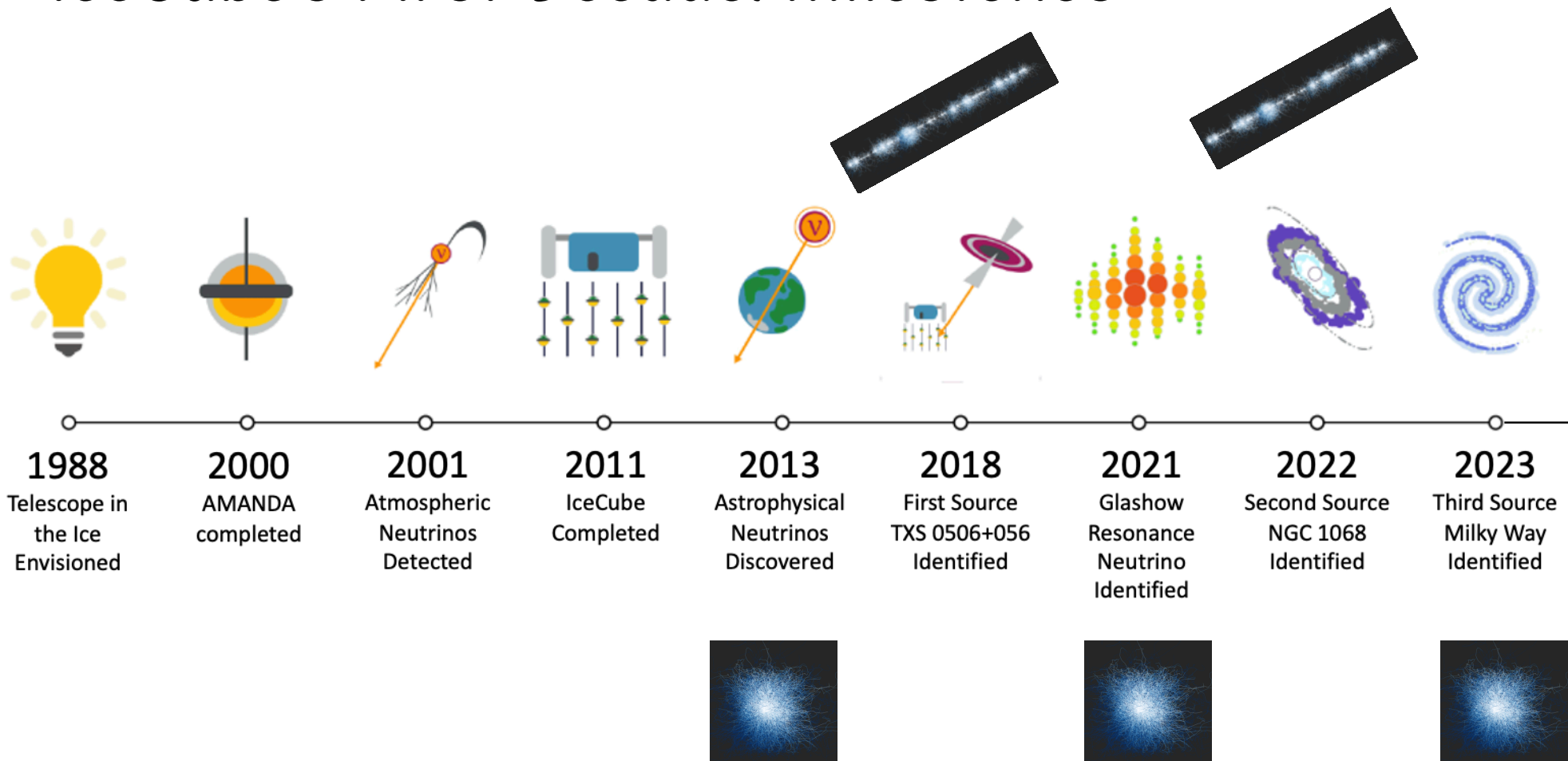
How does IceCube work?

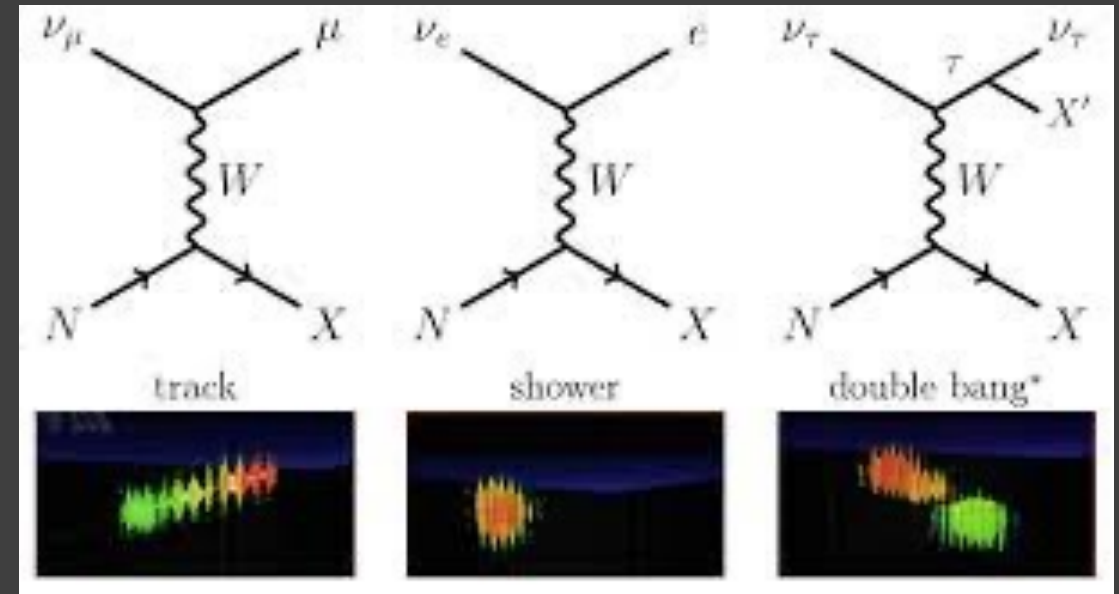
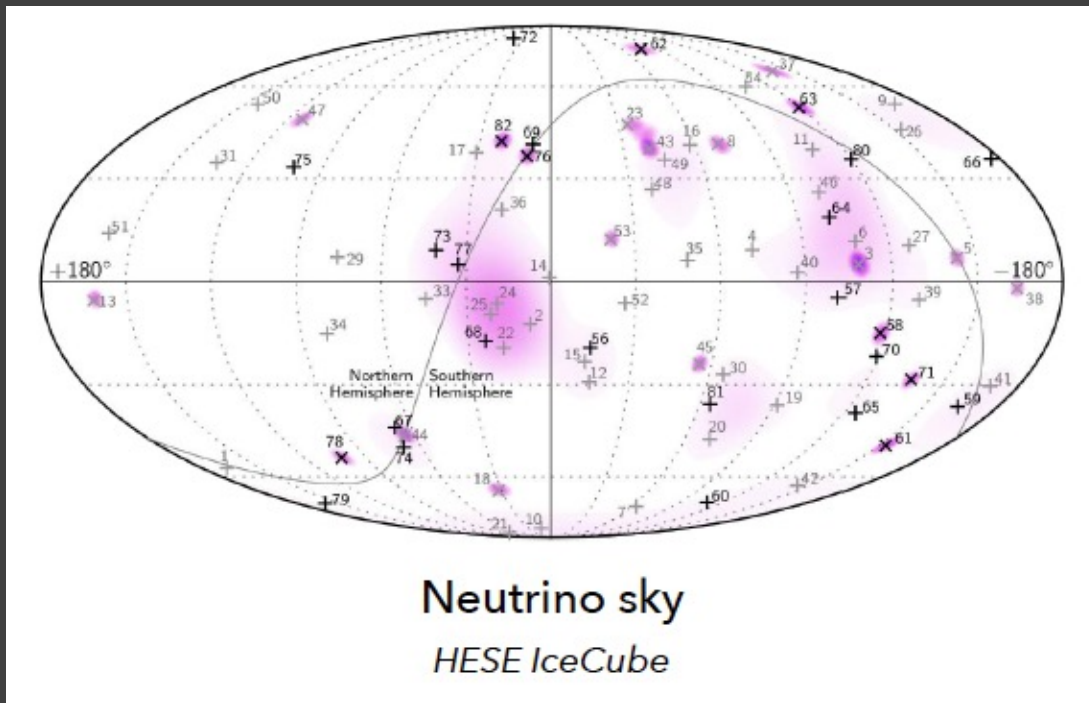
When a neutrino interacts with the Antarctic ice, it creates other particles. In this event graphic, a muon was created that traveled through the detector almost at the speed of light. The pattern and the amount of light recorded by the IceCube sensors indicate the particle's direction and energy.



date: November 12, 2010 duration: 3,800 nanoseconds energy: 71.4 TeV
declination: -0.4° right ascension: 110° nickname: Dr. Strangepork

IceCube's First Decade: milestones



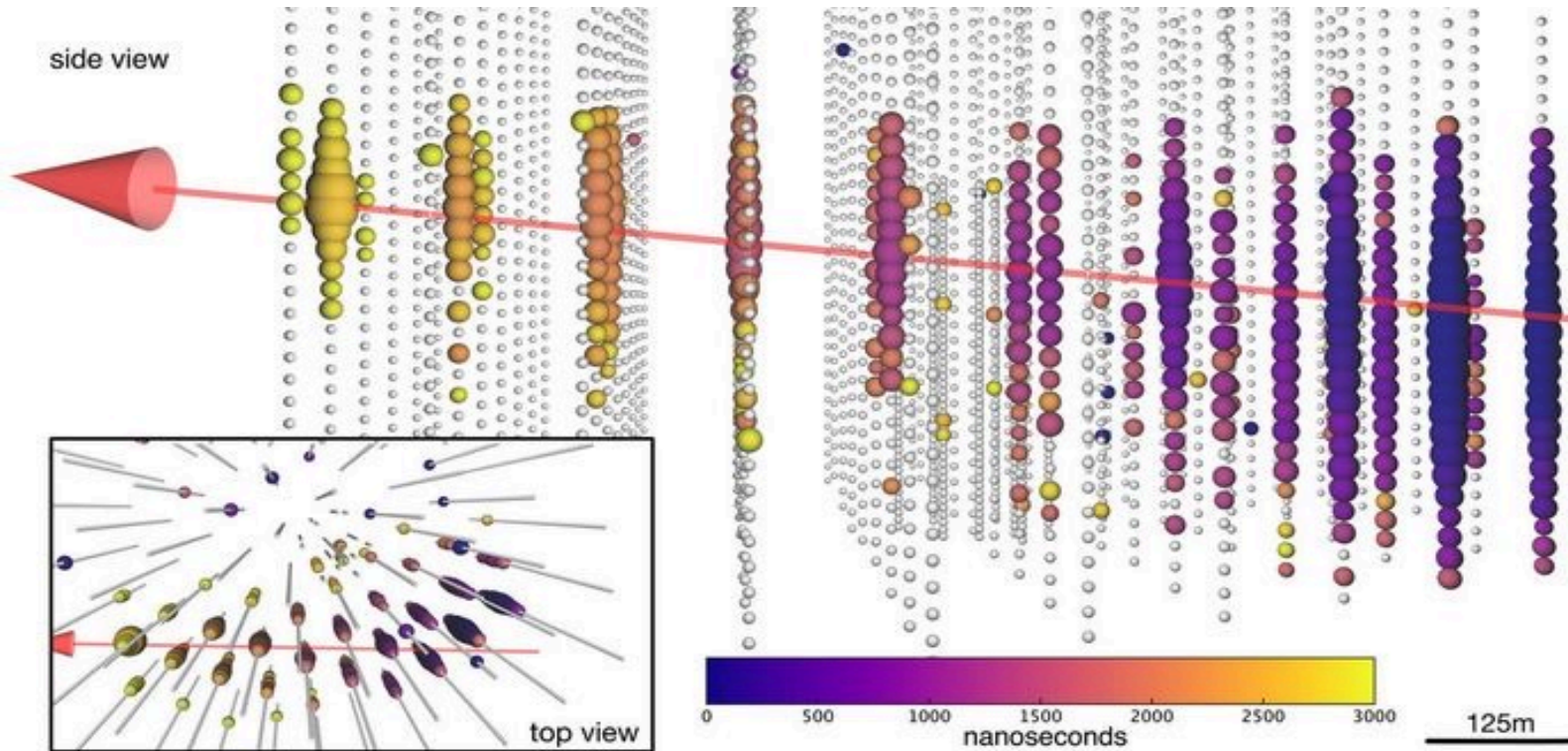


<https://youtu.be/2DDQYHibL3Q>

Il cielo
extragalattico in
neutrini

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

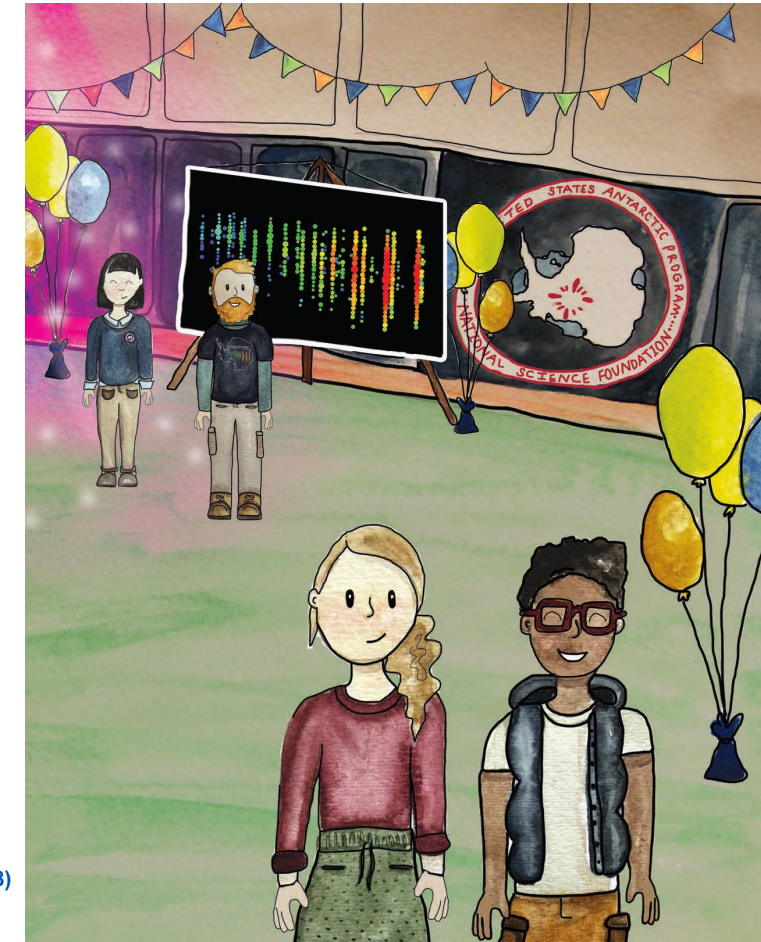
IC-170922



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.

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



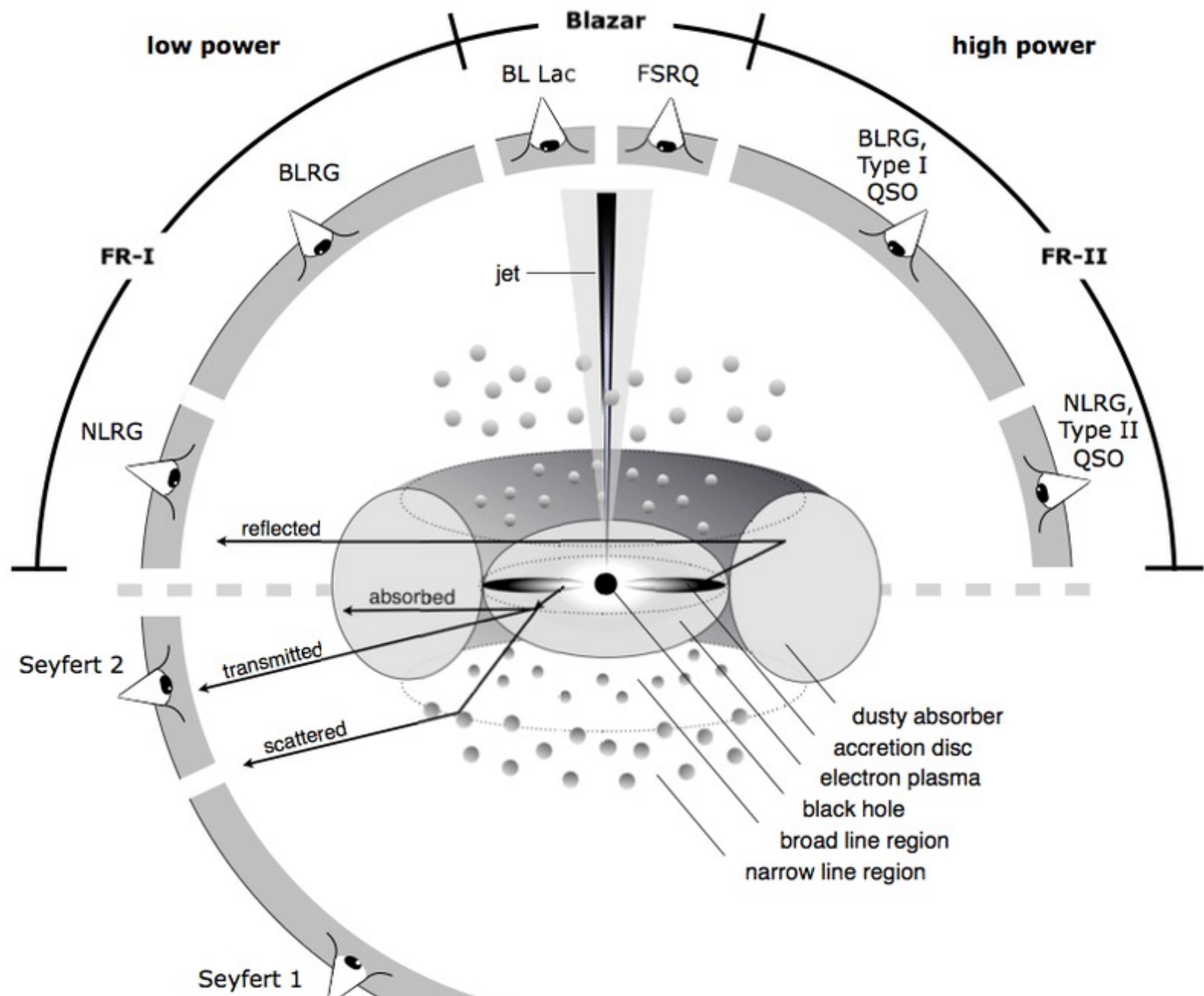
Il sistema di allerta in funzione



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

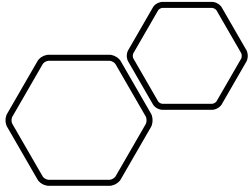
radio-loud (RL) AGN

radio-quiet (RQ) AGN



I Nuclei Galattici Attivi

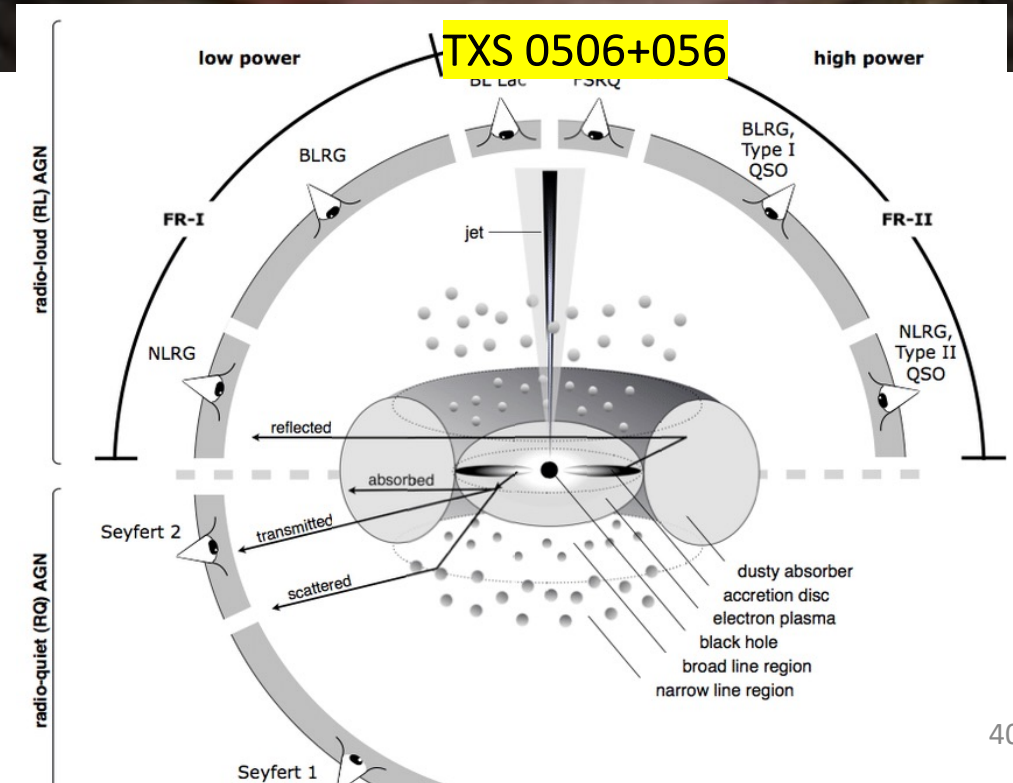
- **Gaslsie Attive:** Classe di galassie il cui nucleo, di aspetto stellare molto luminoso, emette una grandissima potenza radiativa (anche centinaia di volte superiore a quella dei nuclei galattici ordinari) con spettro continuo (dalle onde radio ai raggi X duri), non termico e con una variabilità temporale su scale di tempo assai brevi (anche solo di qualche giorno o meno). (Treccani)



TXS 0506+056

un BLAZAR, 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>
- Sorgente impulsiva di neutrini



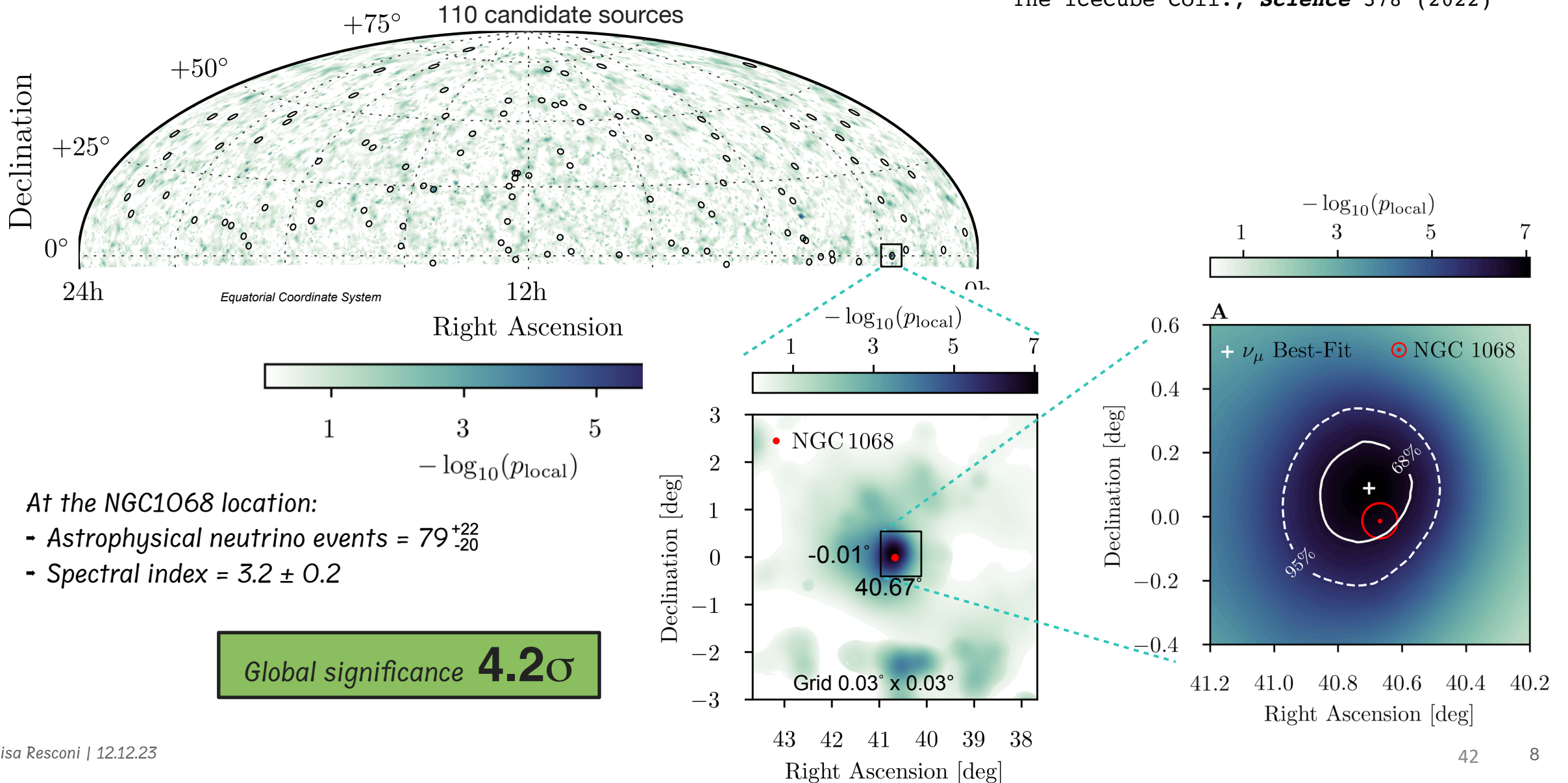


NGC 1068

Eccone un altro! Anno 2022

Evidence of Neutrino Emission from NGC 1068

The IceCube Coll., *Science* 378 (2022)

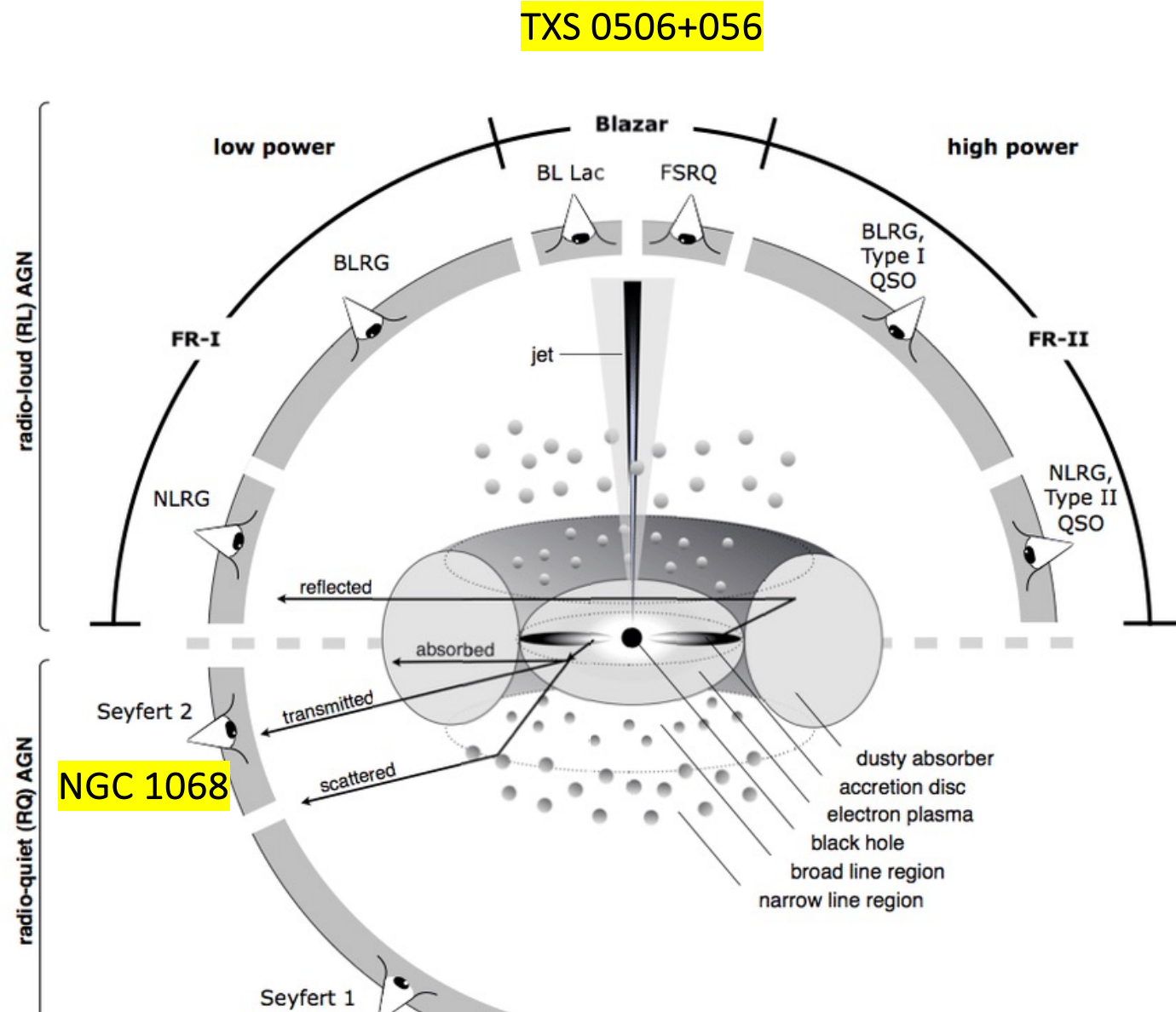


NGC 1068

un radio-quiet AGN, cioè un buco nero supermassiccio al centro di una galassia che espelle un getto di materia relativistica ma noi non lo vediamo dal basso

- Distanza: 47 milioni di anni luce
- SMBH = 10^7 masse solari

Sorgente di neutrini continua

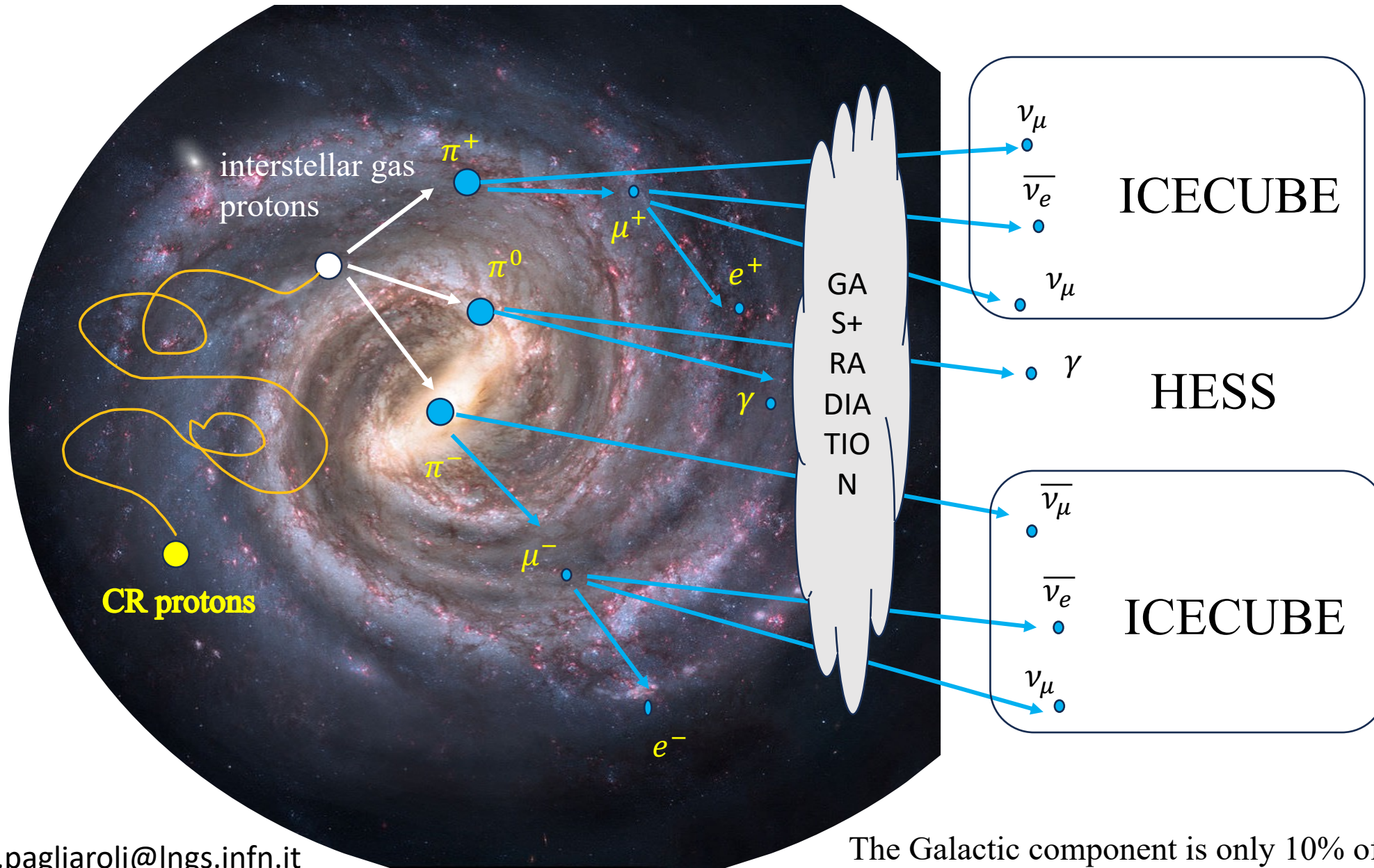


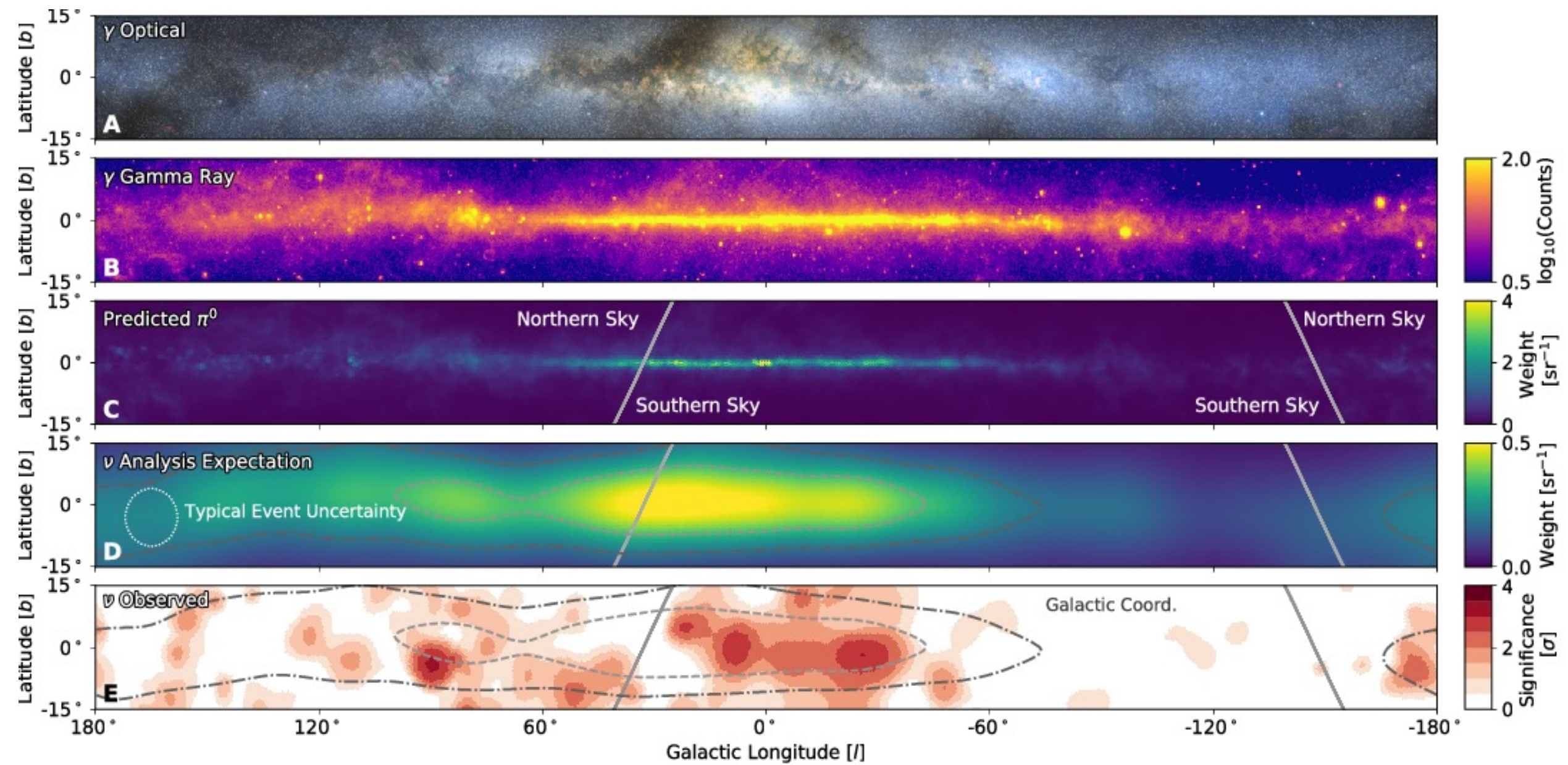
June 30, 2023: High-energy neutrinos from the Galactic plane



<https://icecube.wisc.edu/gallery/high-energy-neutrinos-from-the-galactic-plane/#modulagallery-10913-11983>

THE PROTON-PROTON PRODUCTION PROCESS OF DIFFUSE EMISSION







Conclusioni



L' Astronomia multi-messaggera è iniziata



Stiamo imparando molto
ma i quesiti sono ancora
tanti



Grazie per l'attenzione

