

A purple alien character with a pink body and a gold spiral on its chest, holding a telescope against a starry background. The character has large green eyes and a small mouth with teeth. It is standing on a green surface.

# 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.  $\pi R^2$  di una pallottola)

	intensità relativa	raggio d'azione	mediatore della forza	azioni principali
forza forte	1	$10^{-15}\text{m}$	 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 indicarla «superficie di interazione» (es.  $\pi R^2$  di una pallottola)

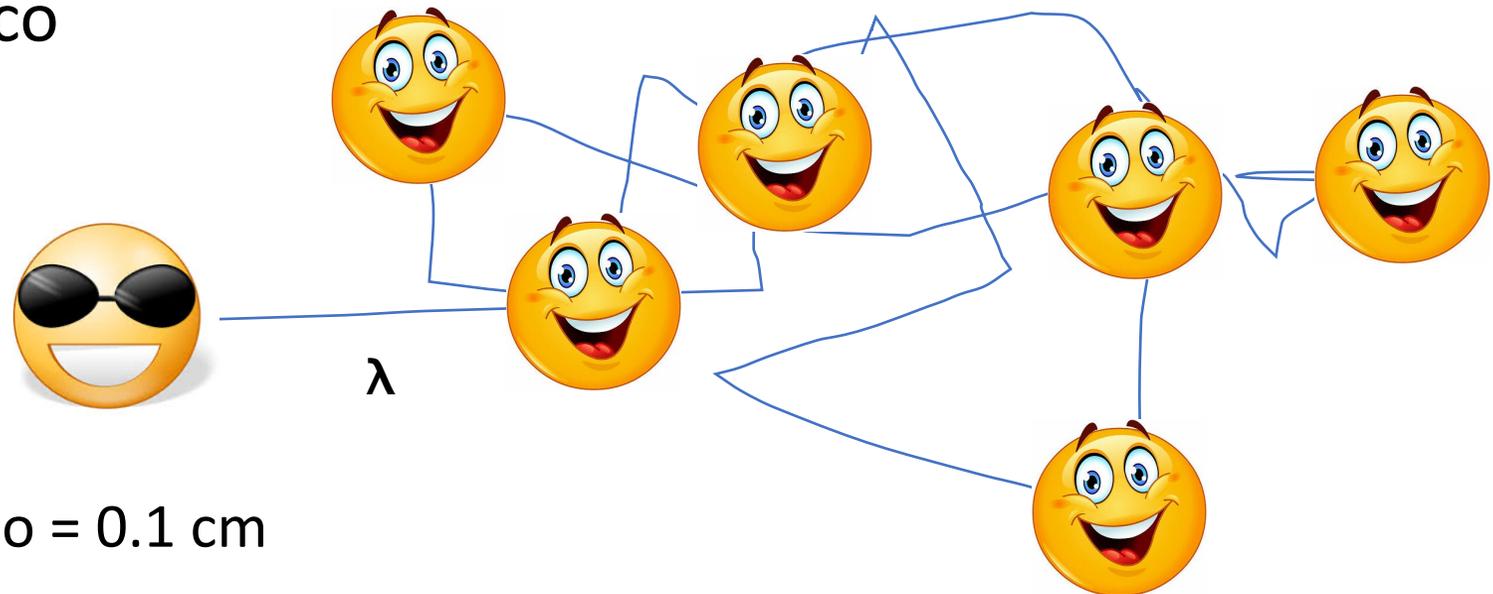
Dipende dalla natura della forza  
 gioco

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

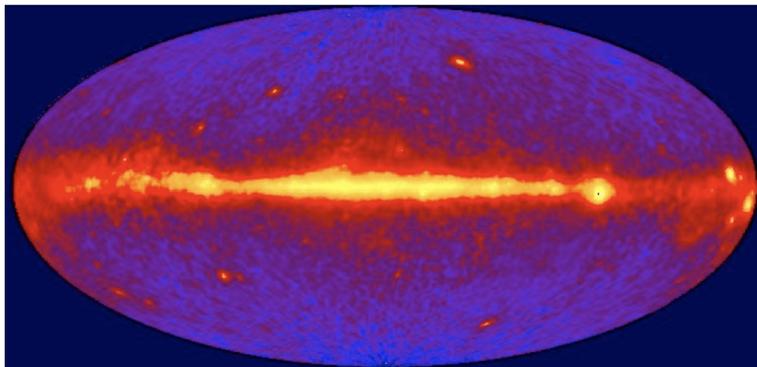
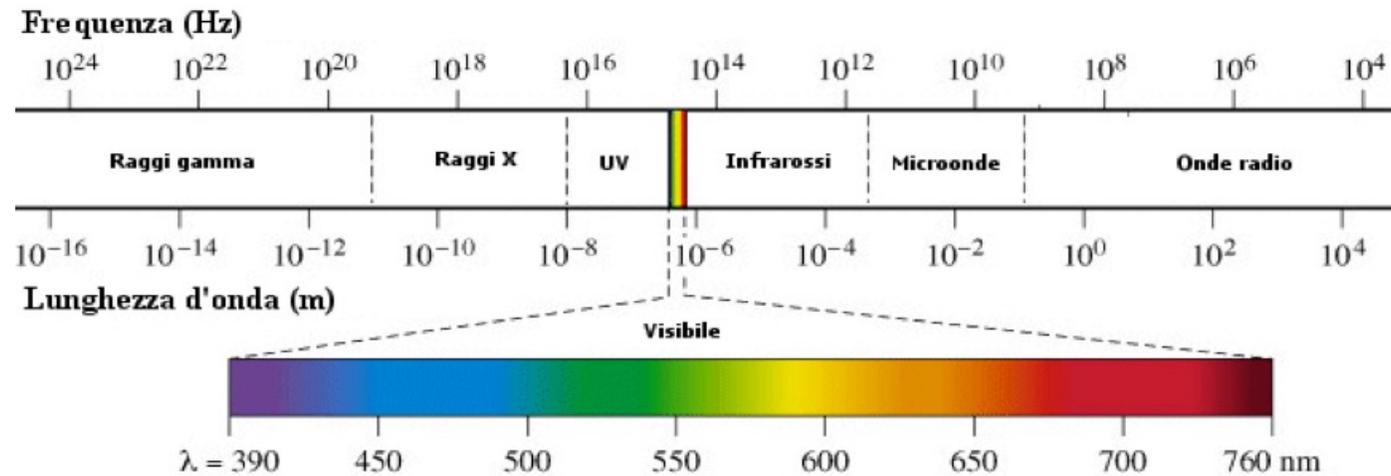


- ❖ Particella elementare
- ❖ Priva di massa
- ❖ Elettricamente neutra ma elemento costituente di ogni campo elettromagnetico
- ❖ Vita da Star



Libero cammino medio = 0.1 cm

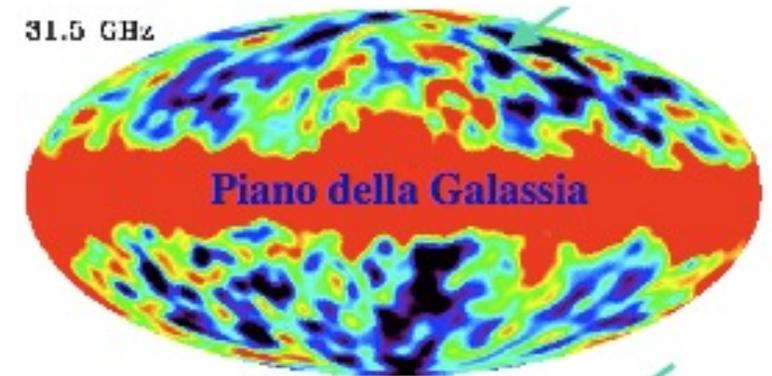
# Tanti modi di osservare e tante diverse informazioni



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



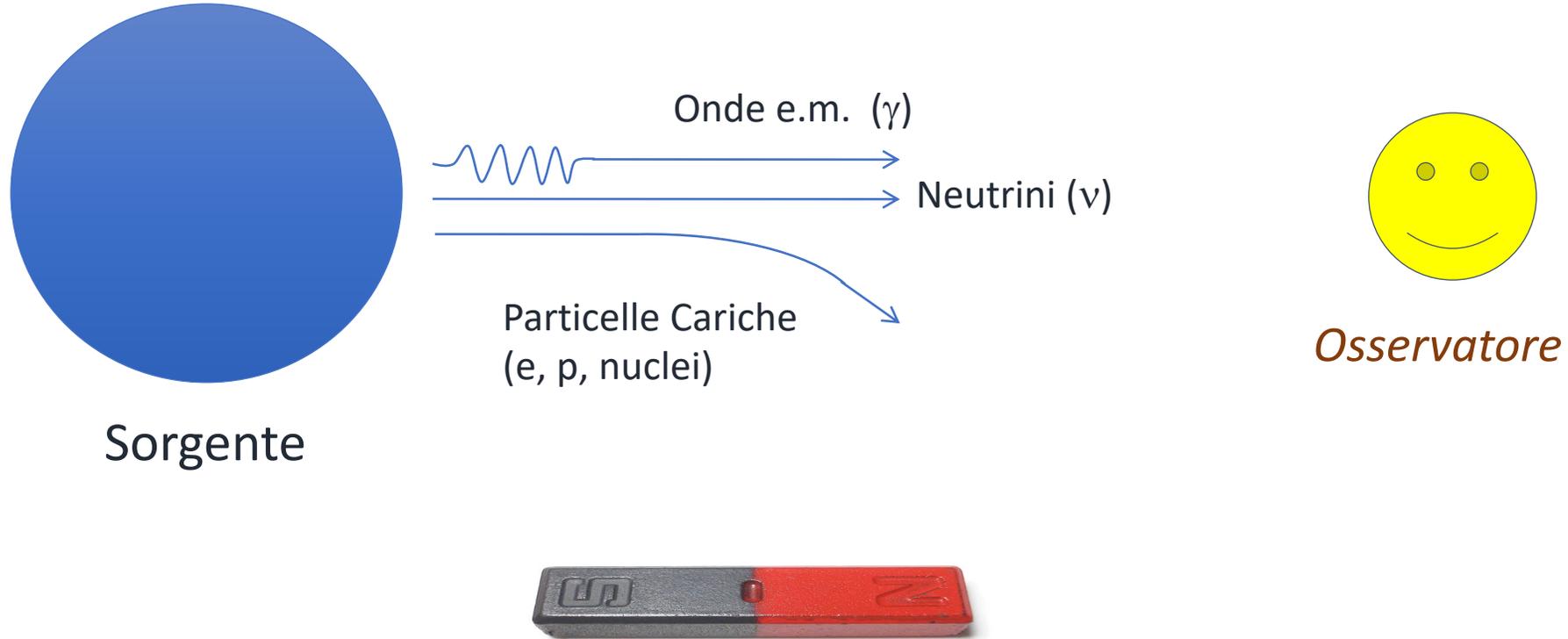
- ❖ Particella elementare
- ❖ Dotato di massa estremamente piccola
- ❖ Elettricamente neutra
- ❖ Trasformista
- ❖ Vita da Solitario



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

# Perché i neutrini?

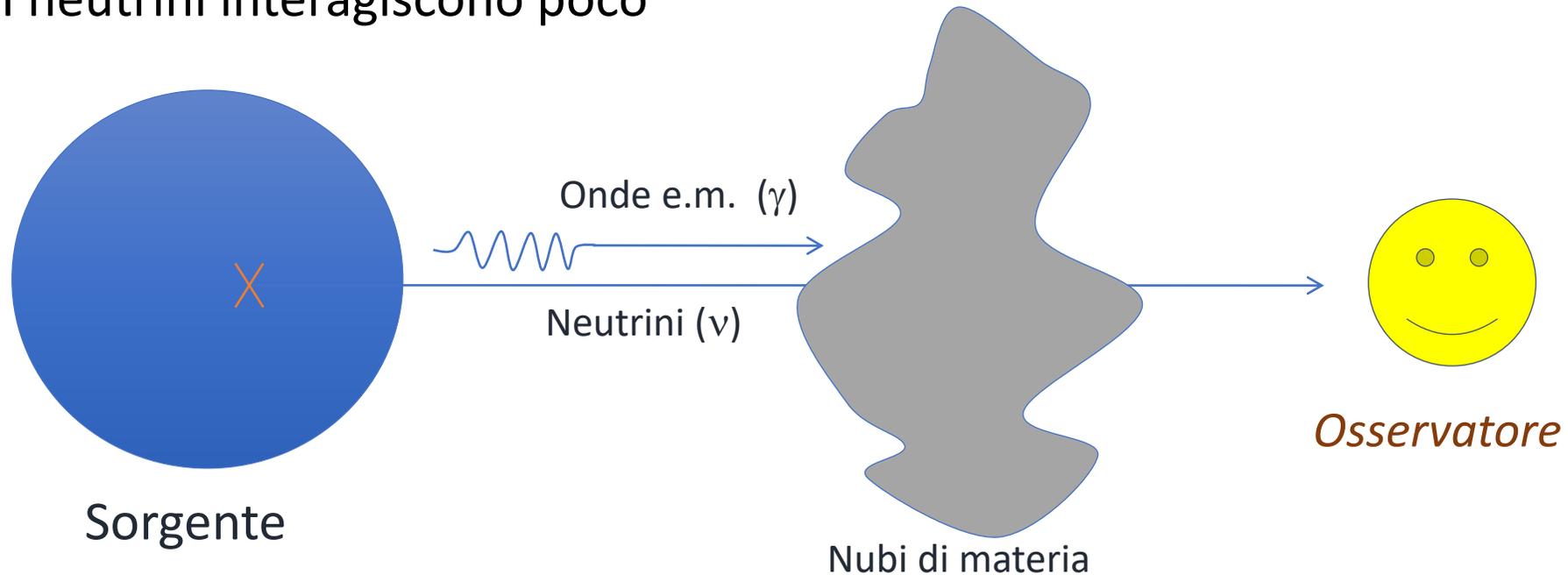
I neutrini sono neutri → non vengono deviati dai campi magnetici → puntano alla sorgente



# 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

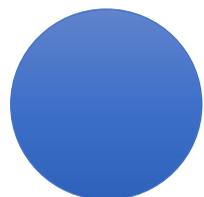
Il primo telescopio di neutrini

- KAMIOKANDE E SUPER-KAMIOKANDE (Japan)

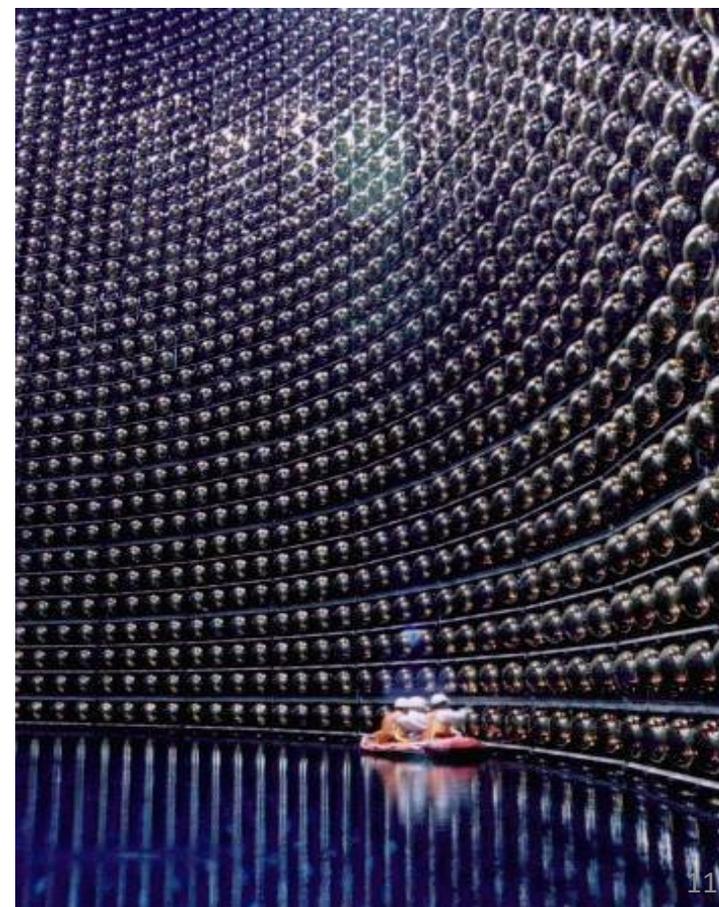
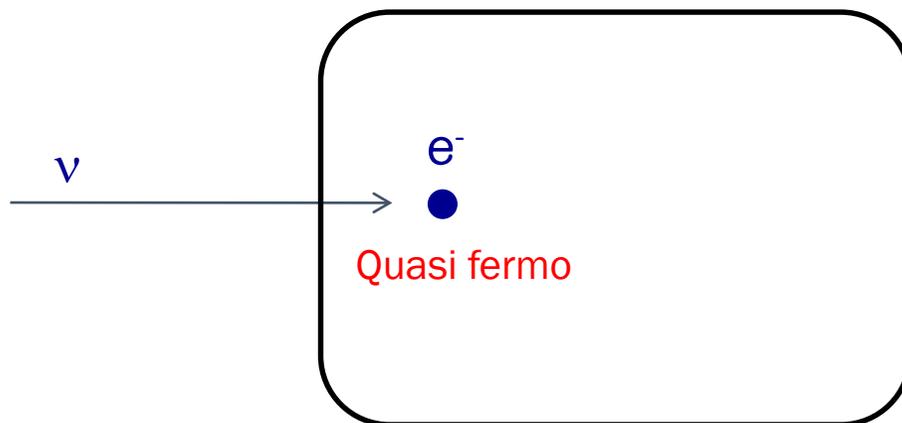
SK - 22.5 Kton di H<sub>2</sub>O



SK



Sole



# PER FARE ASTRONOMIA DOBBIAMO CATTURARLI

Il primo telescopio di neutrini

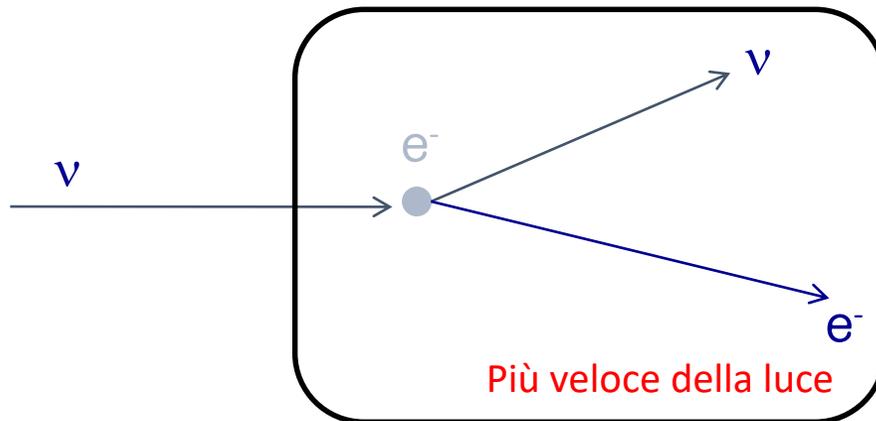
- KAMIOKANDE E SUPER-KAMIOKANDE (Japan)

SK – 22.5 Kton di H<sub>2</sub>O

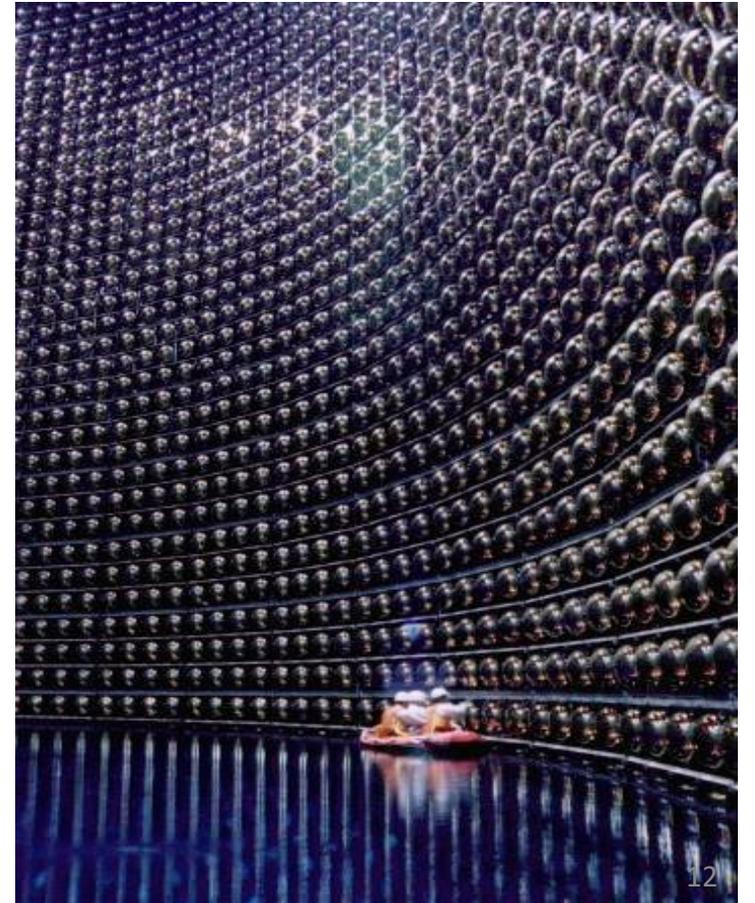
$$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$$



Sole



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

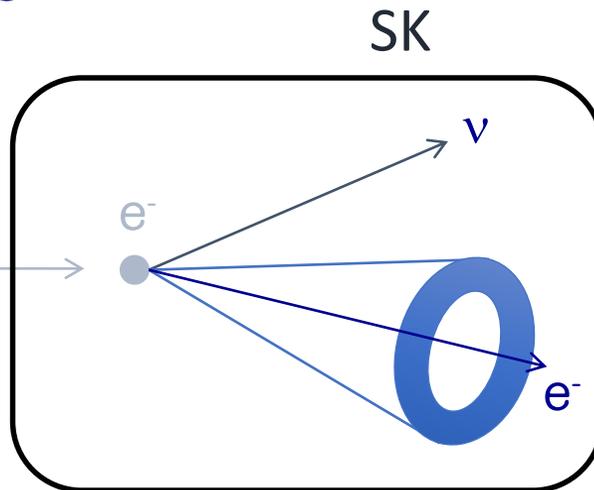


# PER FARE ASTRONOMIA DOBBIAMO CATTURARLI

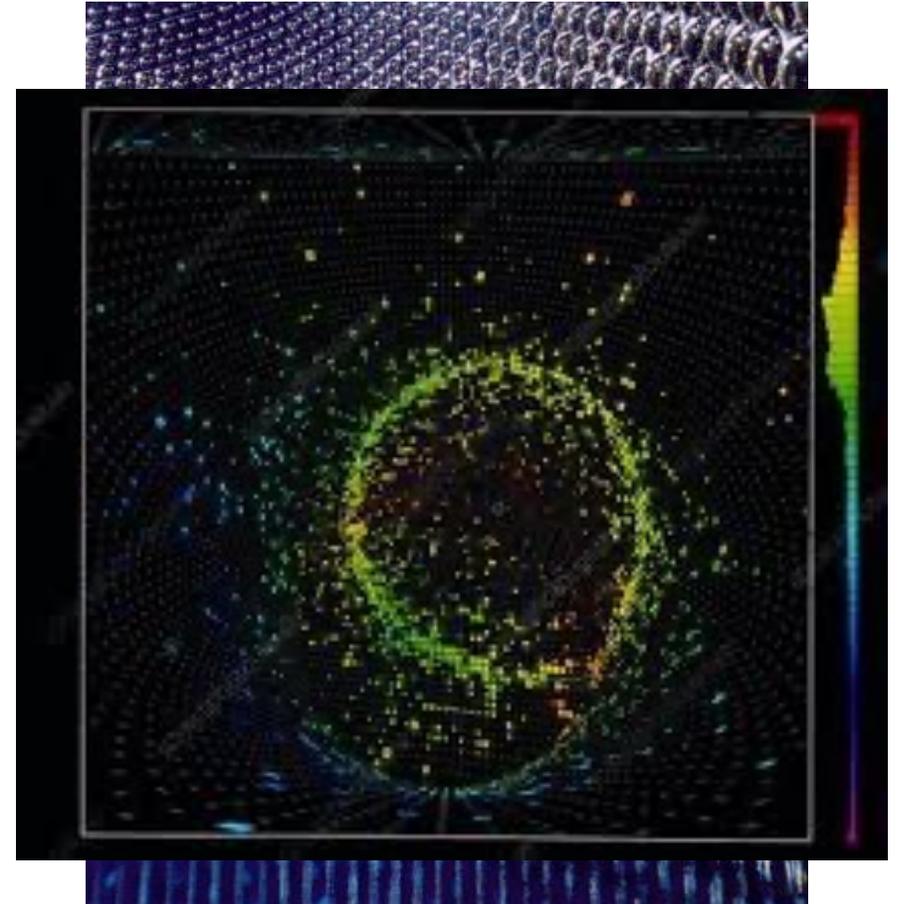
Il primo telescopio di neutrini

- KAMIOKANDE E SUPER-KAMIOKANDE (Japan)

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

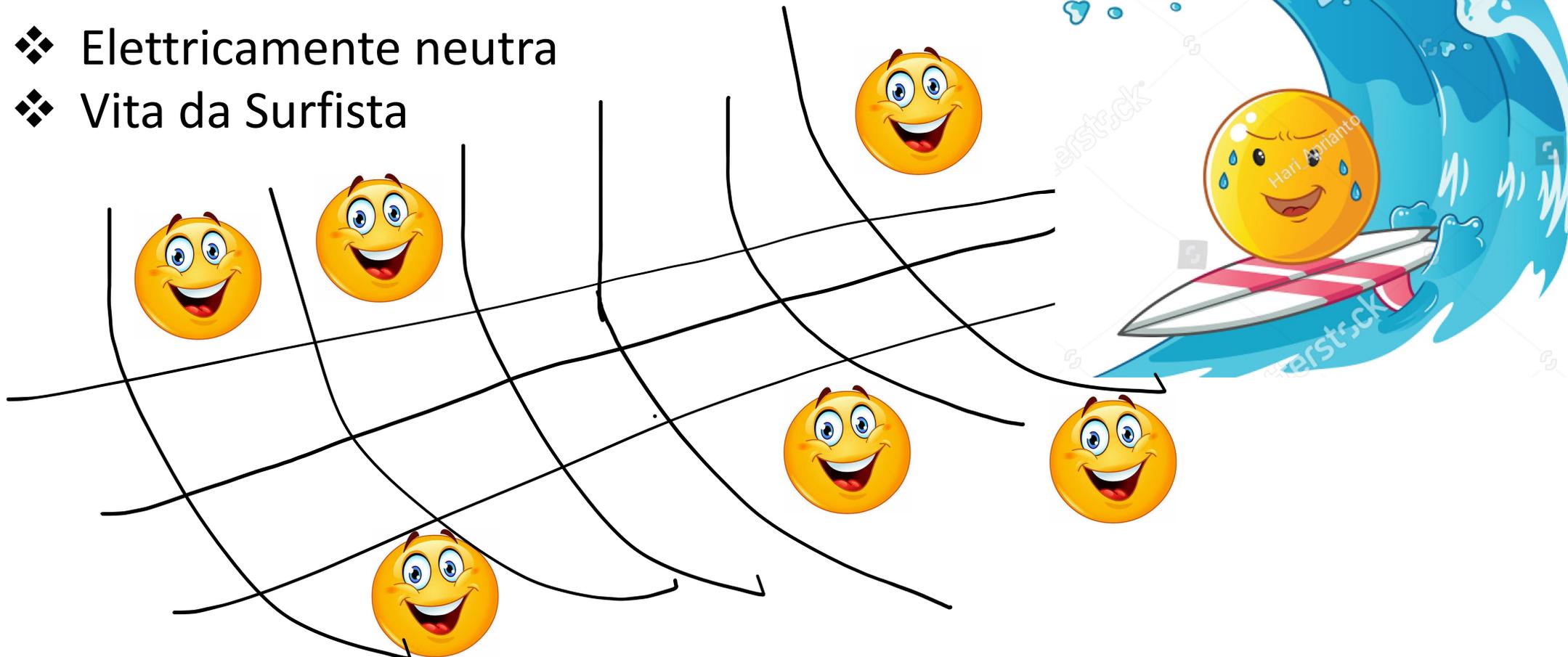


CONO DI LUCE CHERENCOV

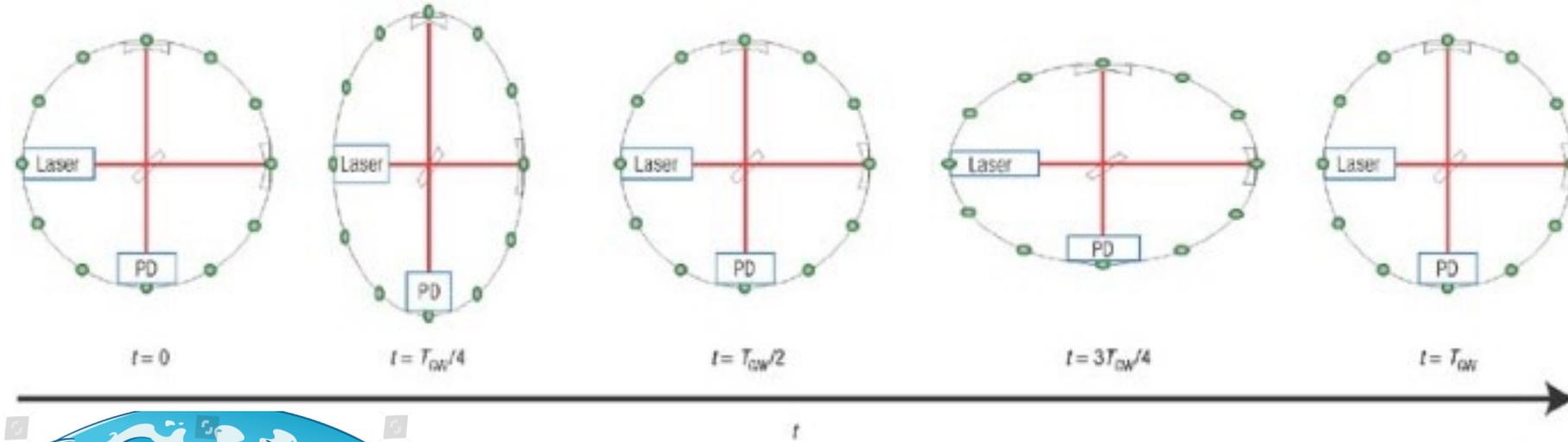


# CARTA DI IDENTITA' DELL'ONDA GRAVITAZIONALE

- ❖ 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?

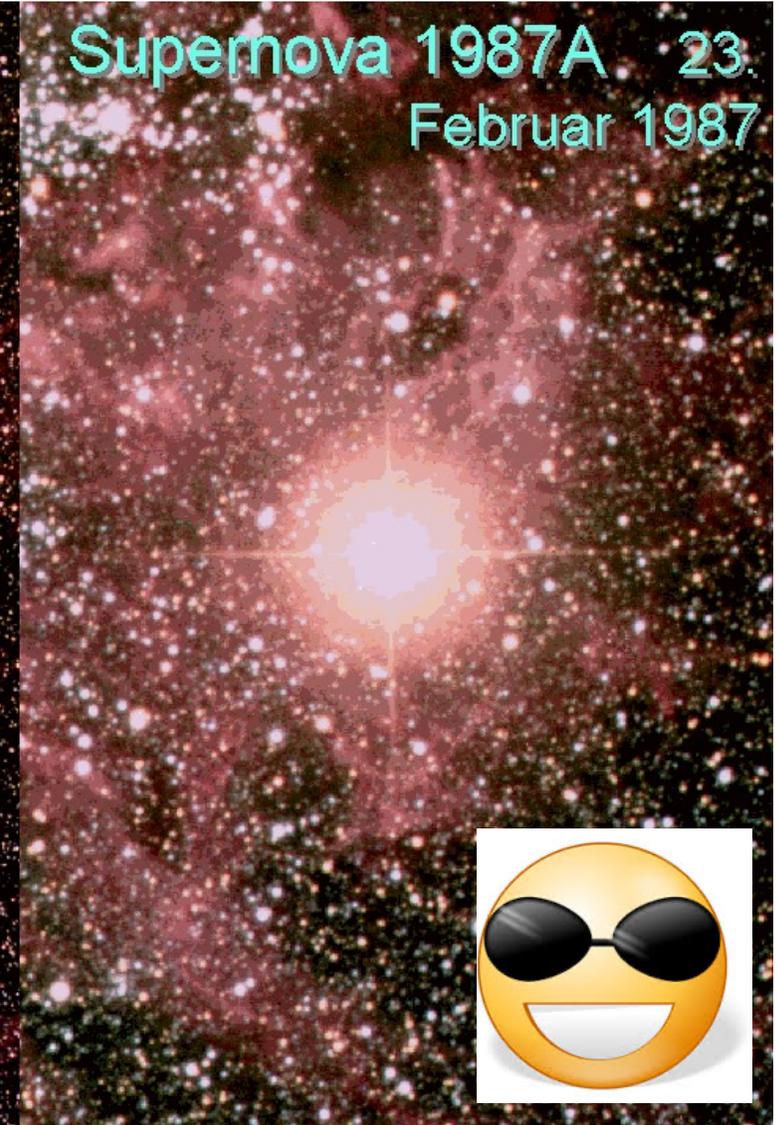
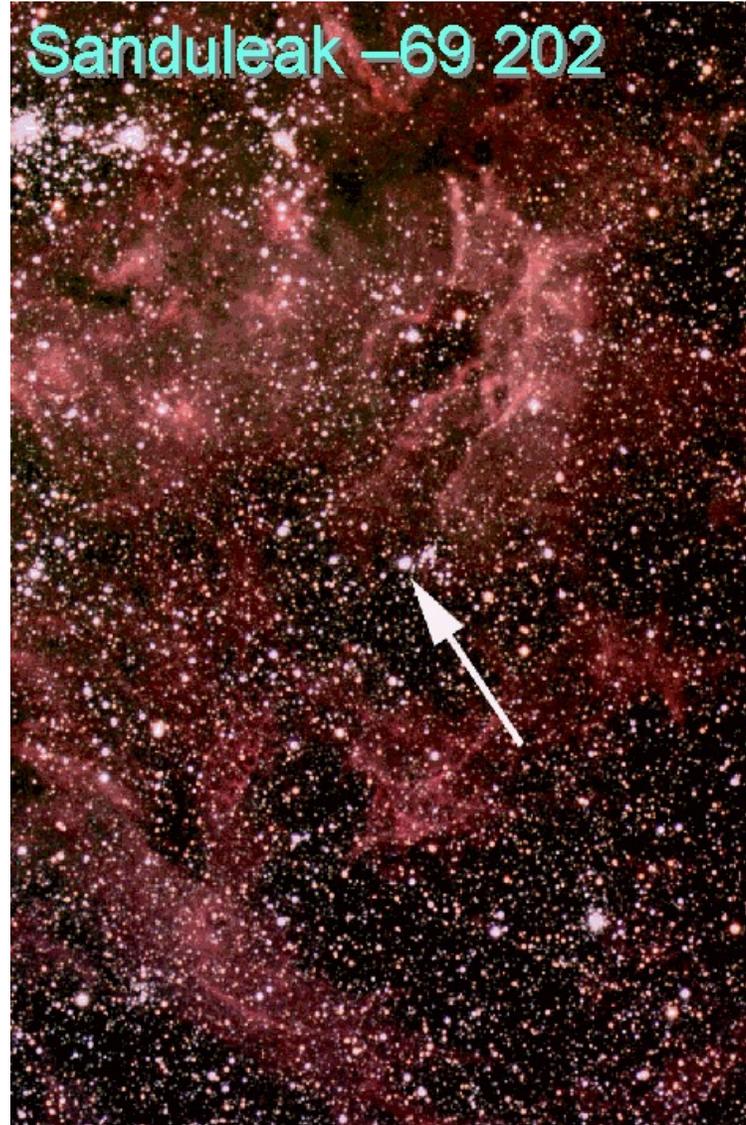
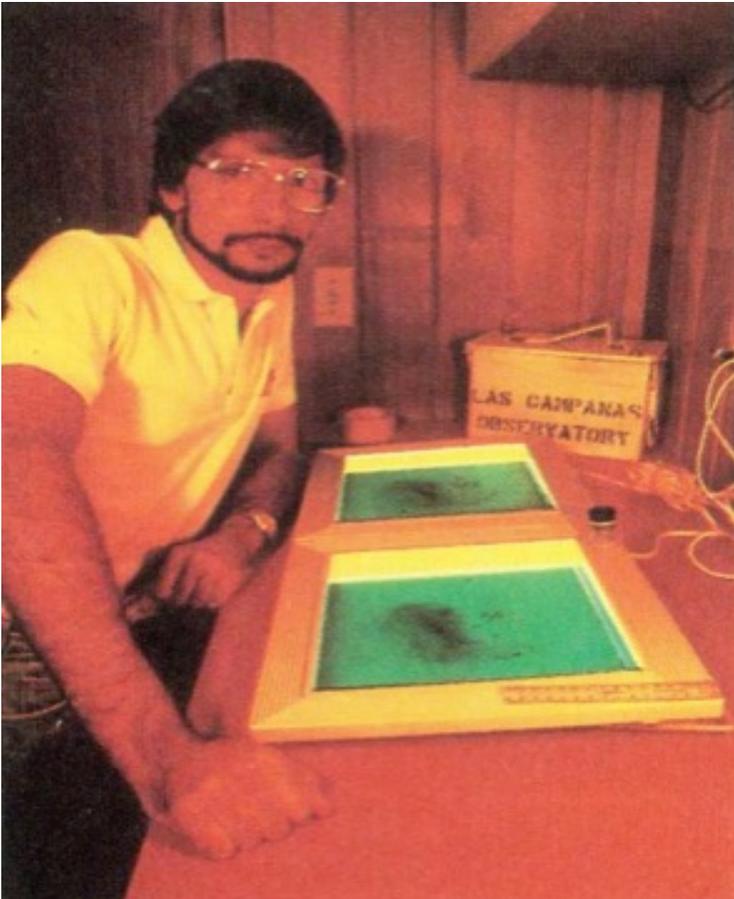
- Cosa possiamo combinare? I tempi, le direzioni, le caratteristiche specifiche
- Perché è meglio lavorare come una rete di rivelatori? Falso Alarm Rate (FAR)
- Perché è importante avere delle aspettative?

**50**

**IL DATO  
CONTESTUALIZZATO  
DIVENTA  
INFORMAZIONE**

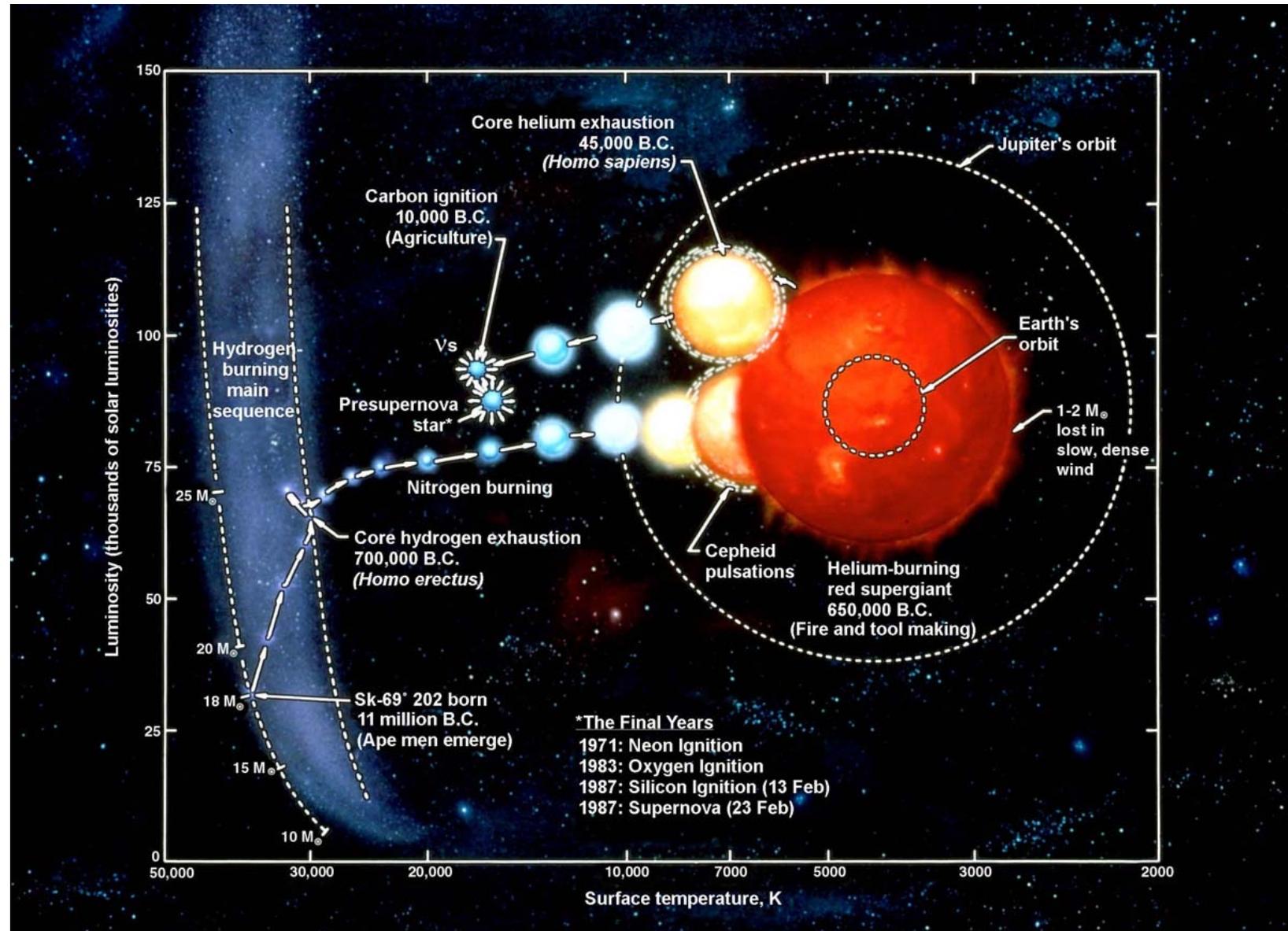
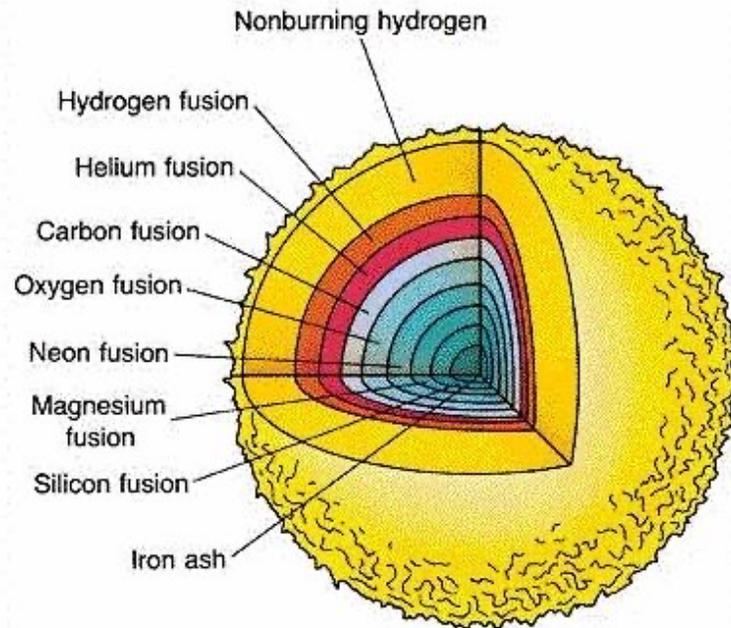


# La SN1987A



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

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

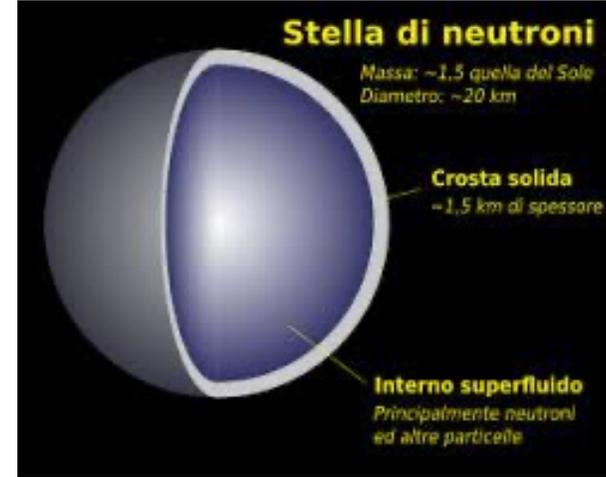
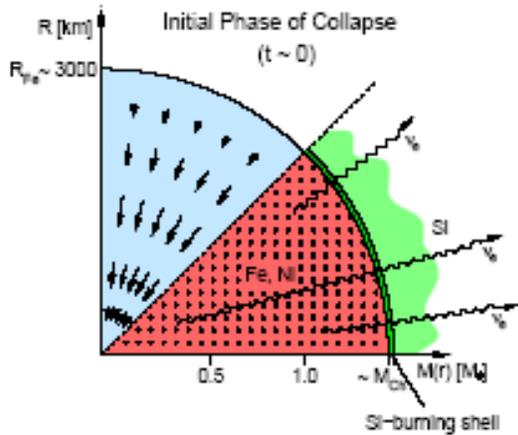
$$R_{Star} \sim 200R_{\odot}$$

STATO FINALE

Stella di Neutroni

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

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



Energia Emessa = STATO INIZIALE-STATO FINALE

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

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

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

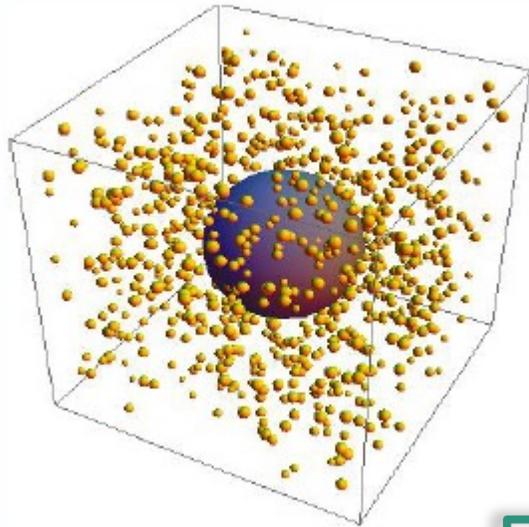
$$\epsilon_{\nu} = (1-5) \cdot 10^{53} \text{ erg}$$

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

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

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

# Neutrini



**ENERGIA**

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

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

**FLUENZA**

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

**DURATA**

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

# Prima osservazione di neutrini extragalattici

Nei dati registrati il 23 Febbraio alle 7:35 UT

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

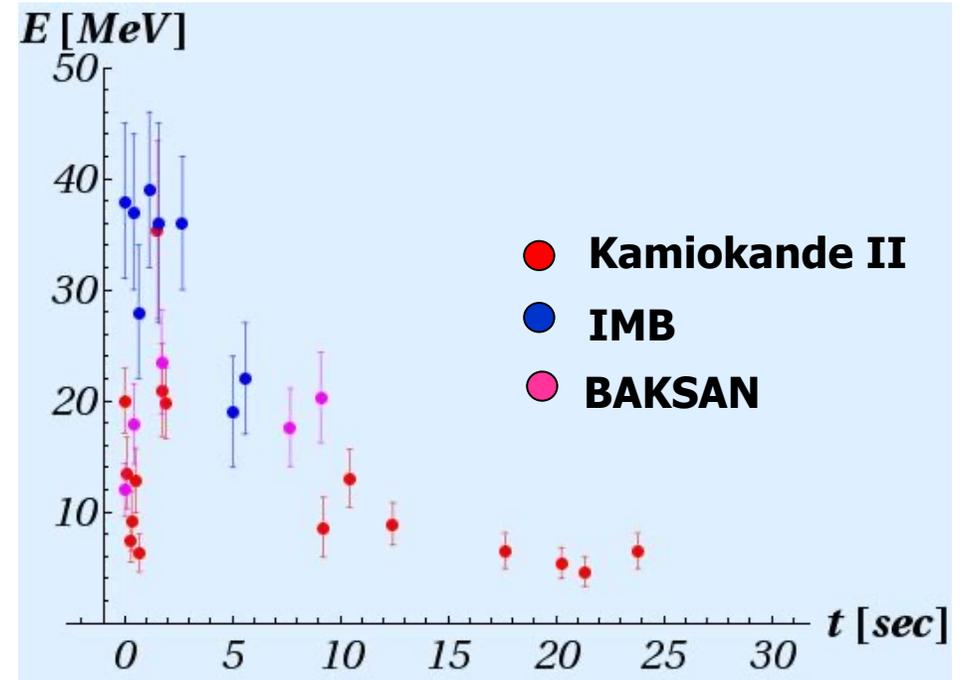
**Kamiokande II**



**IMB**

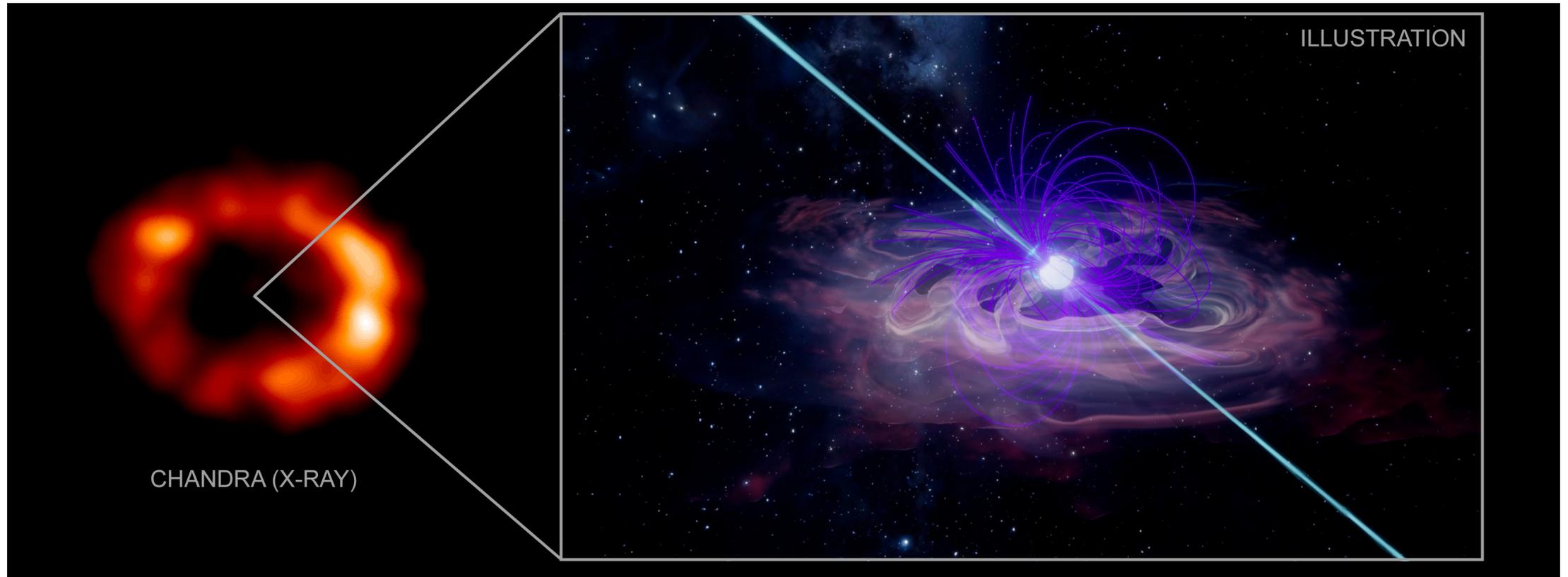


**BAKSAN**



# SN1987A Oggi

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



# La Supernova di Domani SN2025

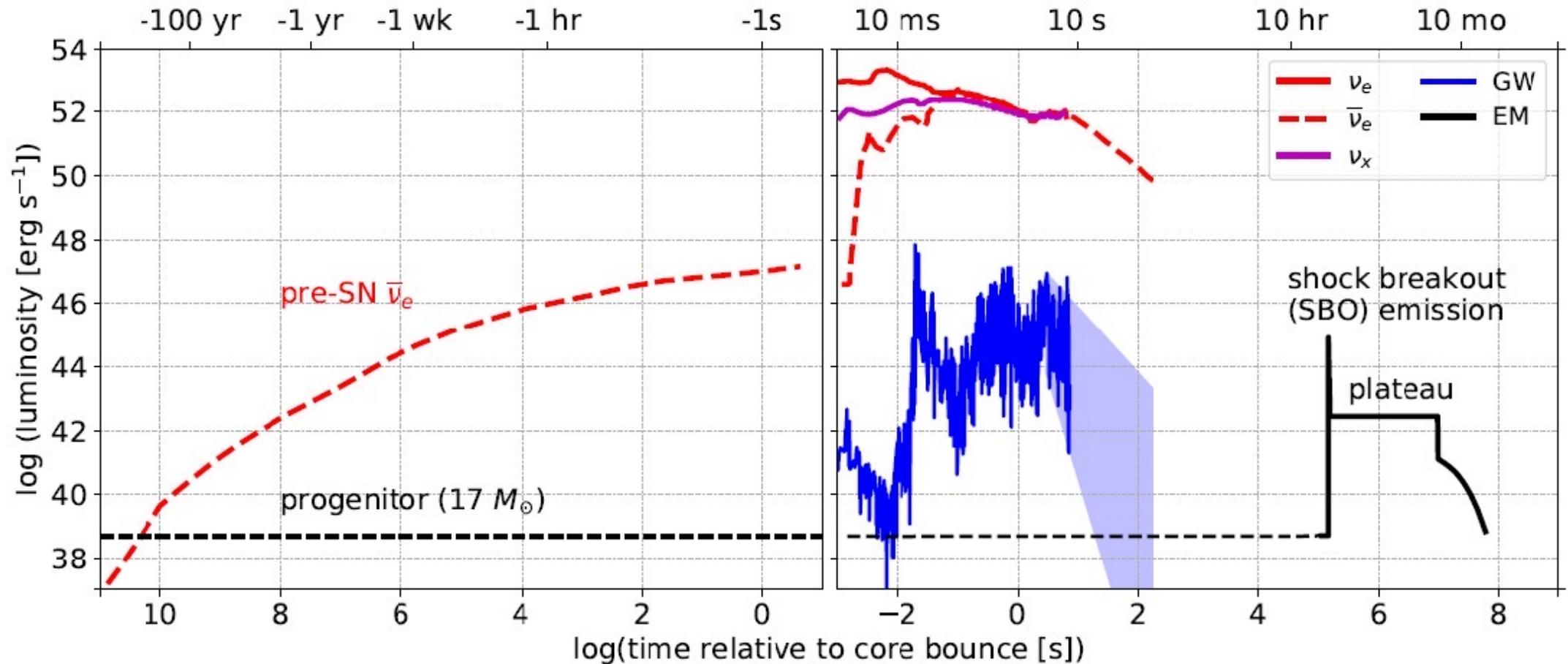


Figure from Nakamura *et al*, MNRAS 161, 3296 (2016)

# La Supernova di Domani SN2025

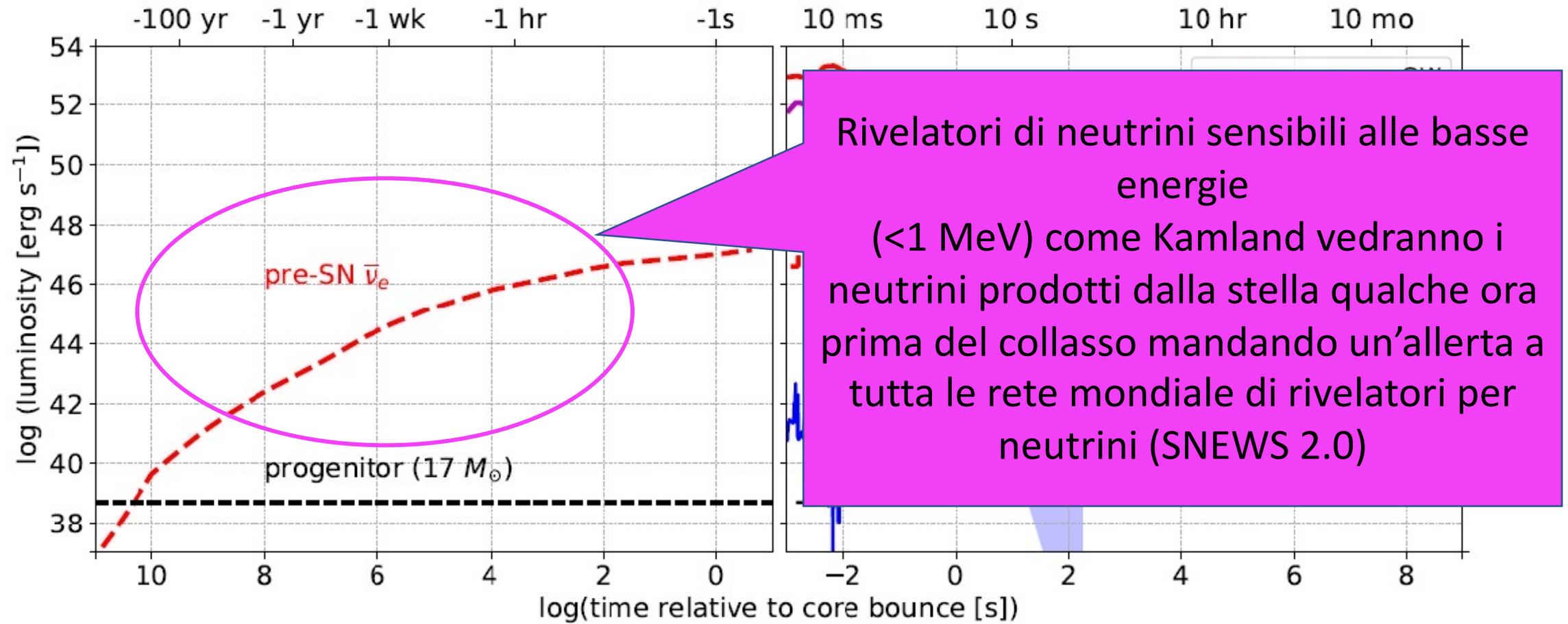


Figure from Nakamura *et al*, MNRAS 161, 3296 (2016)

# 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

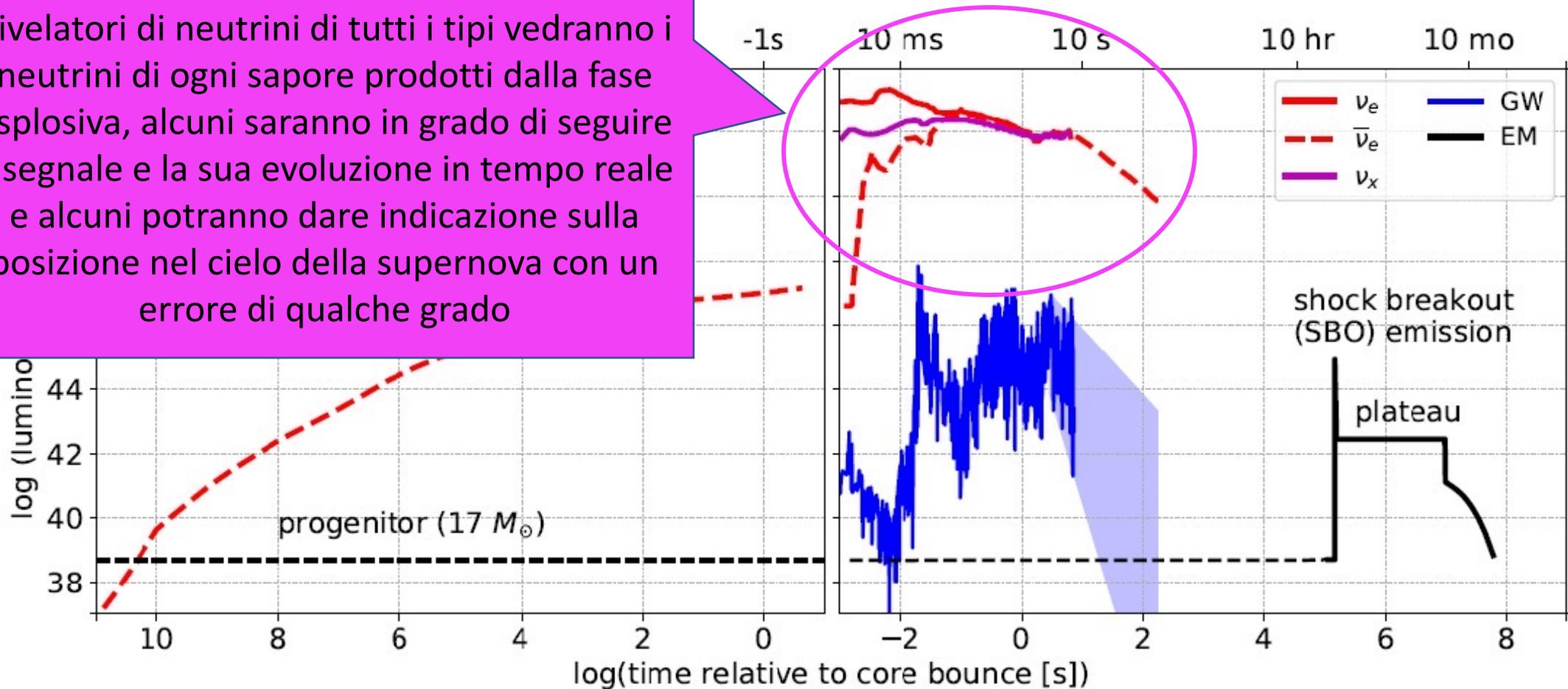
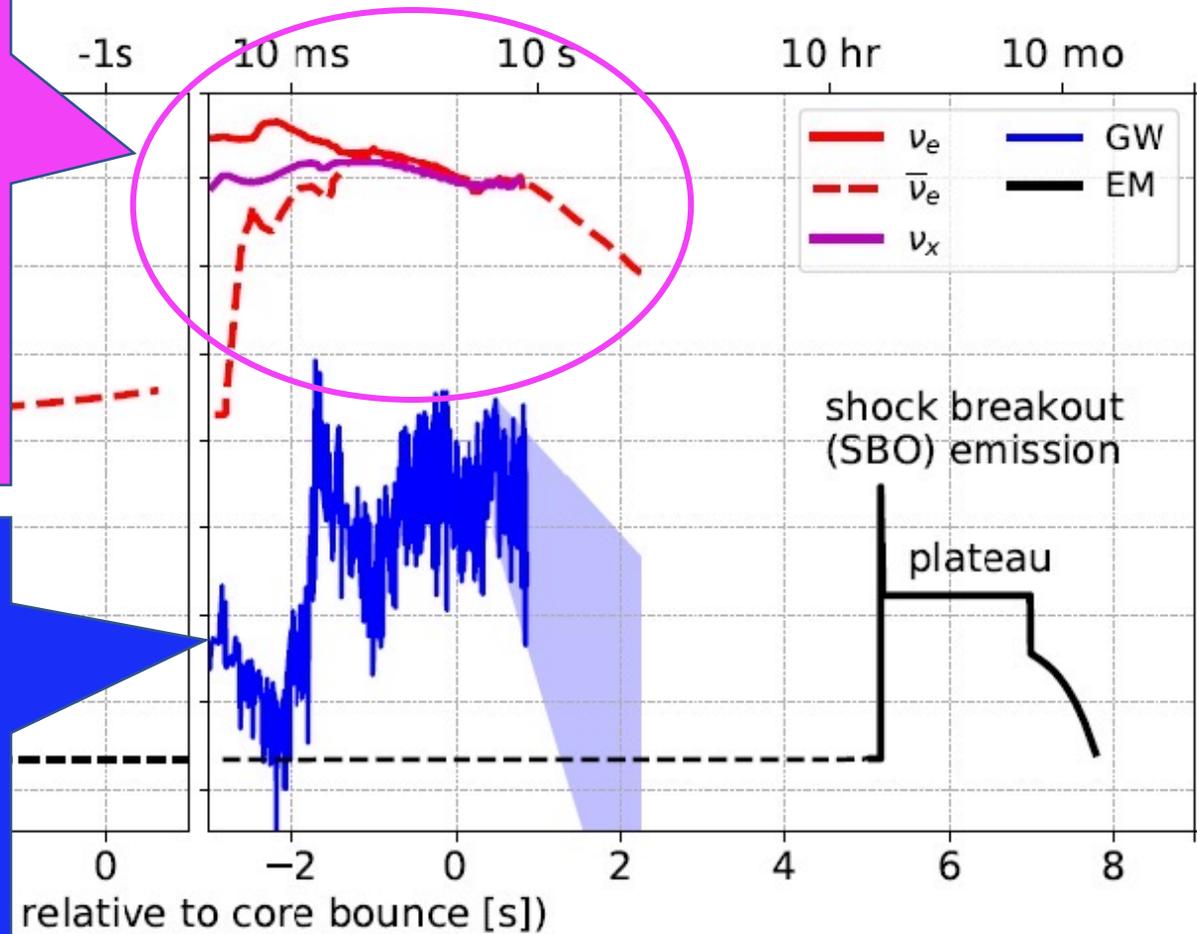


Figure from Nakamura *et al*, MNRAS 161, 3296 (2016)

# 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

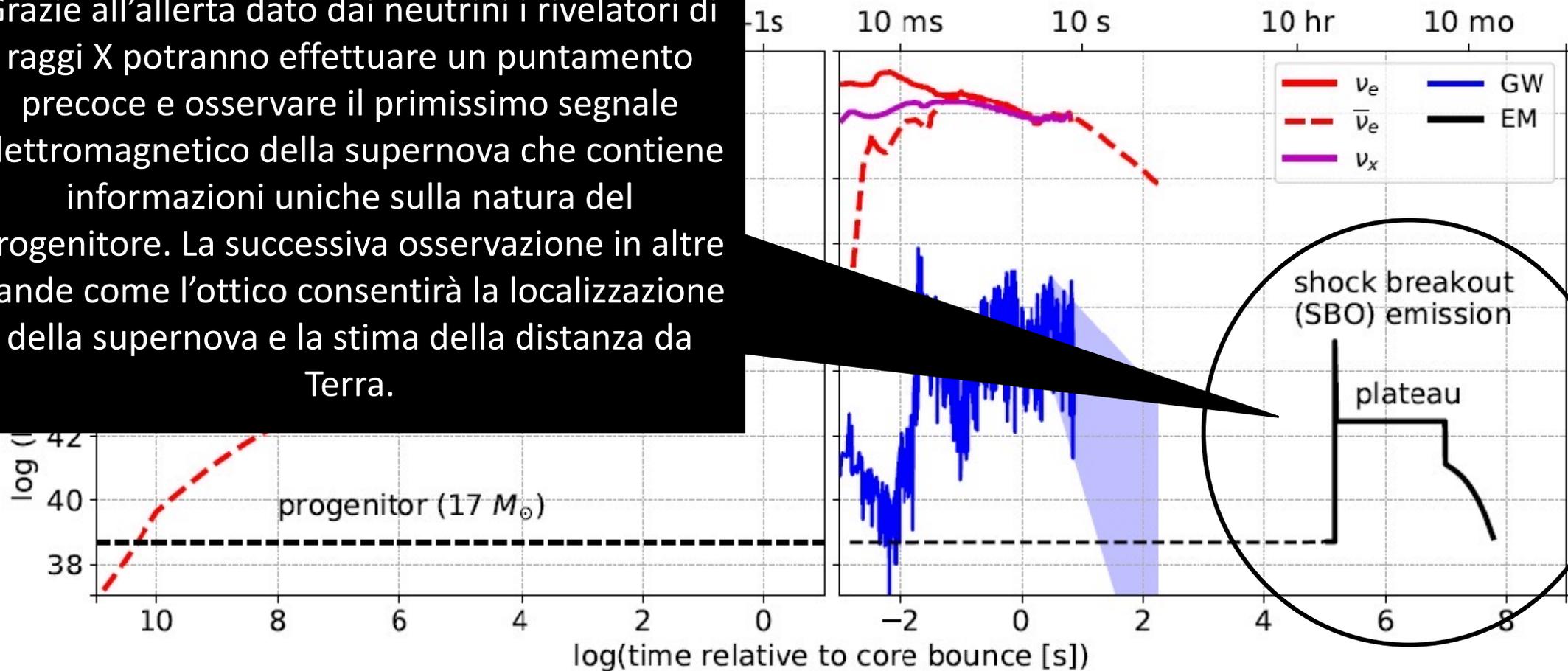
Gli interferometri gravitazionali aiutati anche dalle informazioni dei rivelatori neutrini osserveranno il segnale prodotto dalla stella durante la fase esplosiva e saranno fondamentali per determinare il meccanismo dinamico che porta alla esplosione



, 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.

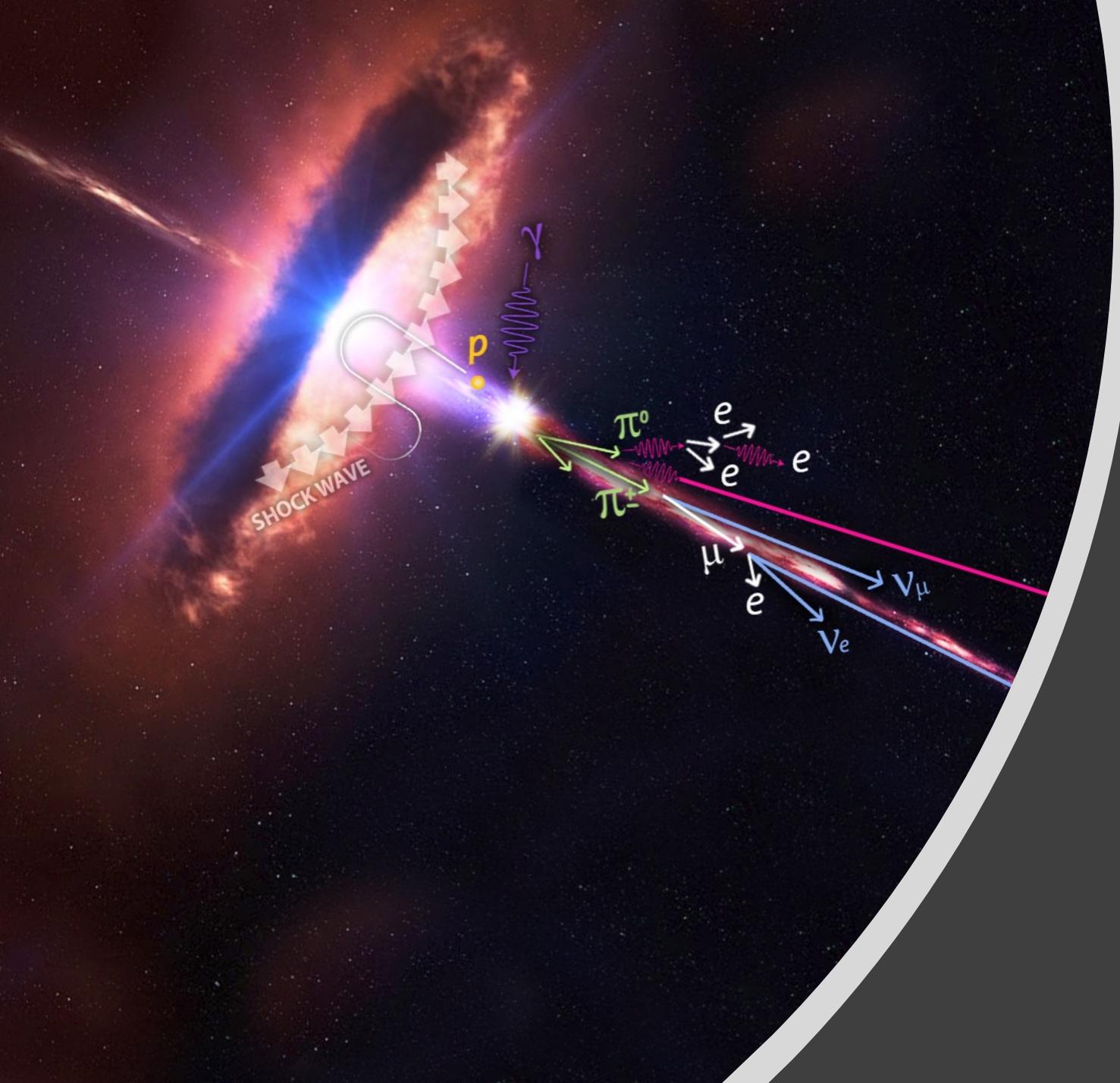




# Cosa Abbiamo imparato da SN1987A

---

- 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



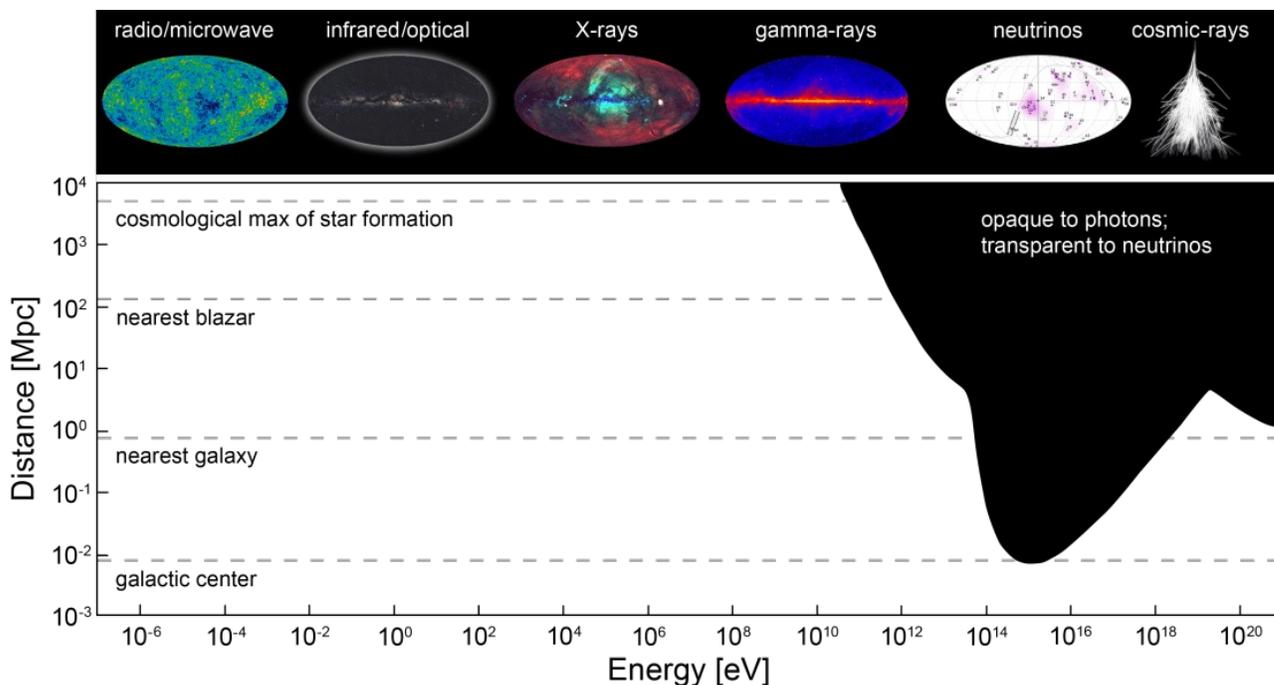
# IC-170922 & TXS 0506+056

La storia di un buco nero ancora tutto  
da capire

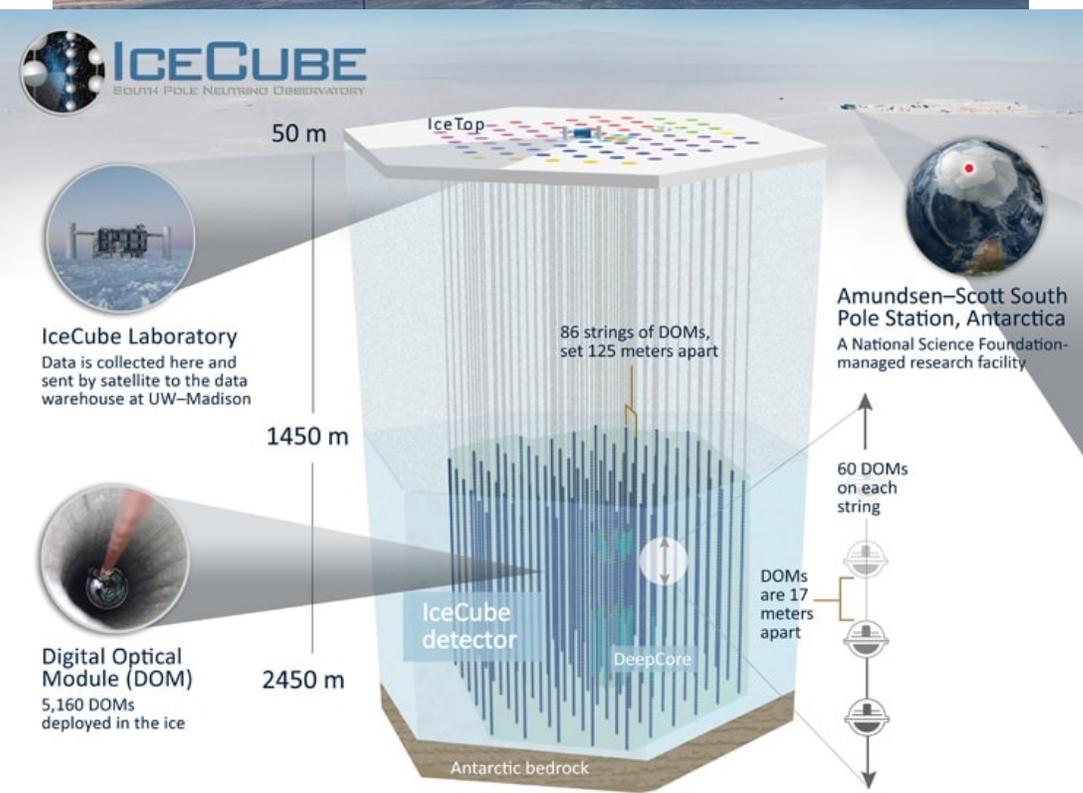
22 settembre 2017

# ICE CUBE E I NEUTRINI COSMICI

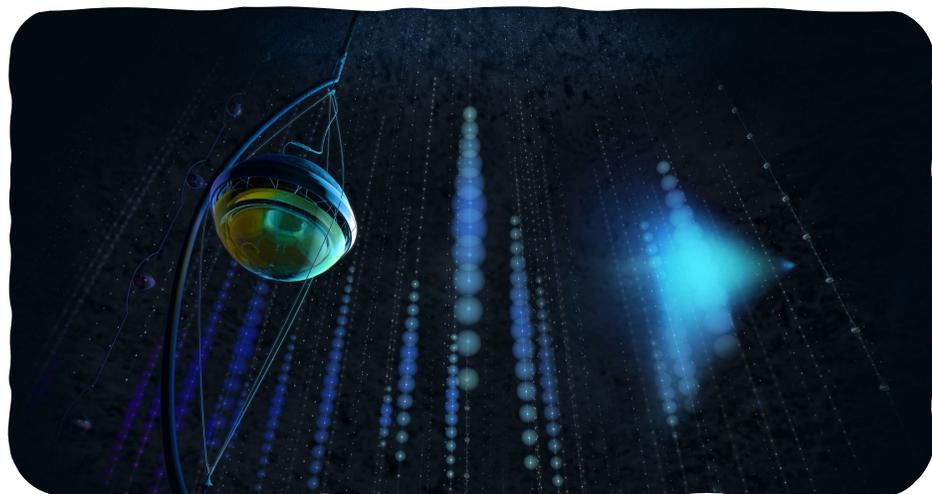
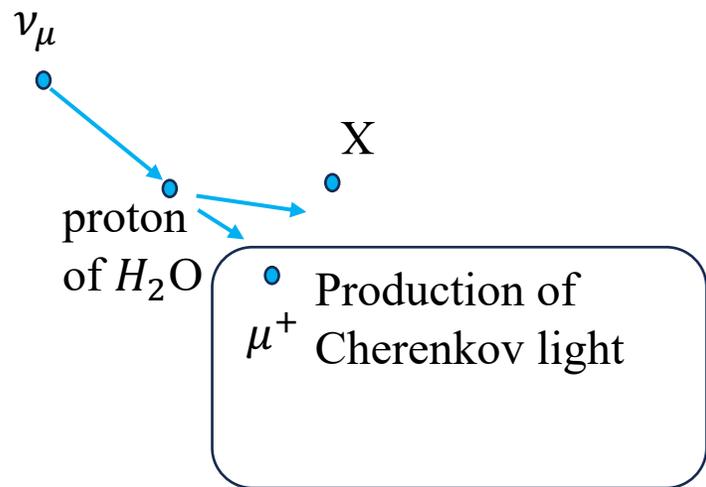
<https://icecube.wisc.edu>



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



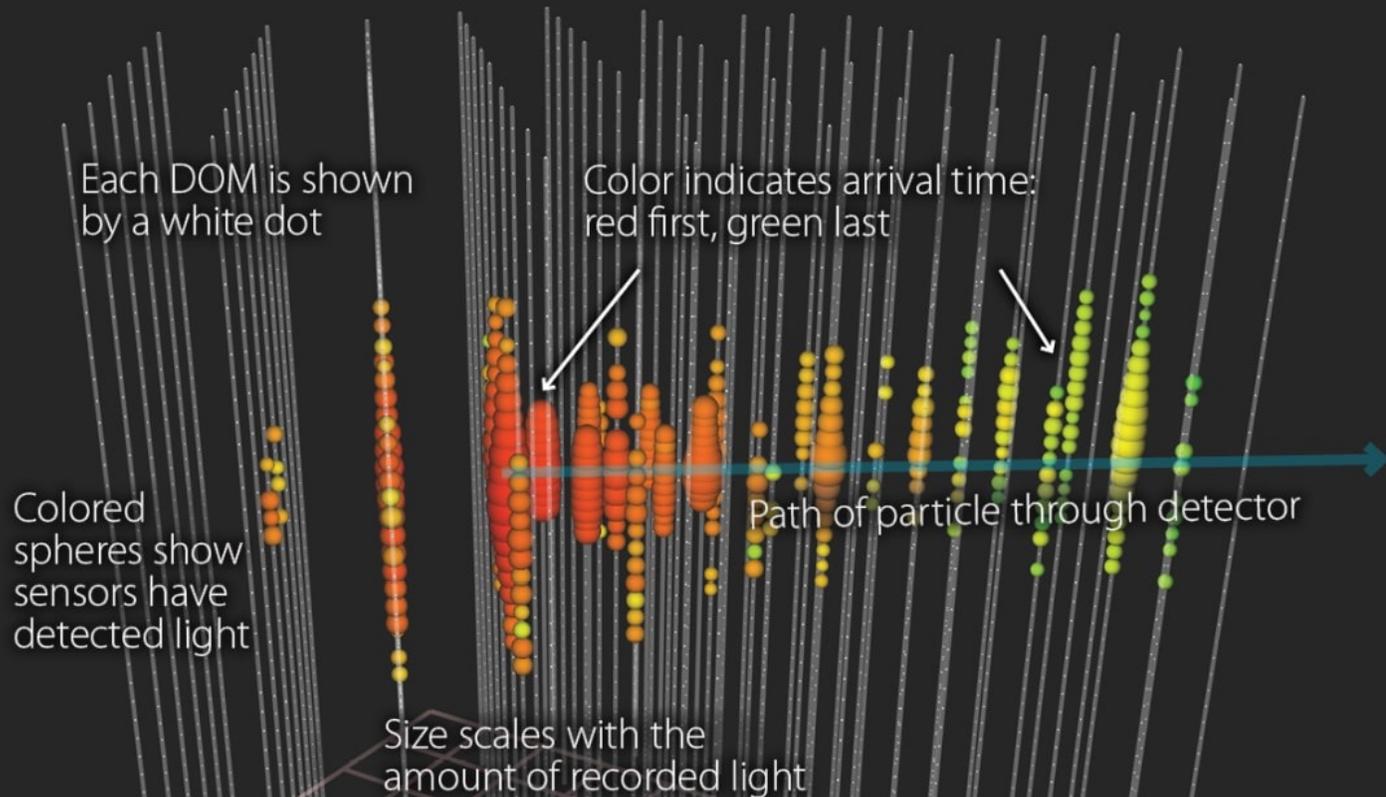
# Come sono rivelati i neutrini di alta energia



giulia.pagliaroli@lngs.infn.it

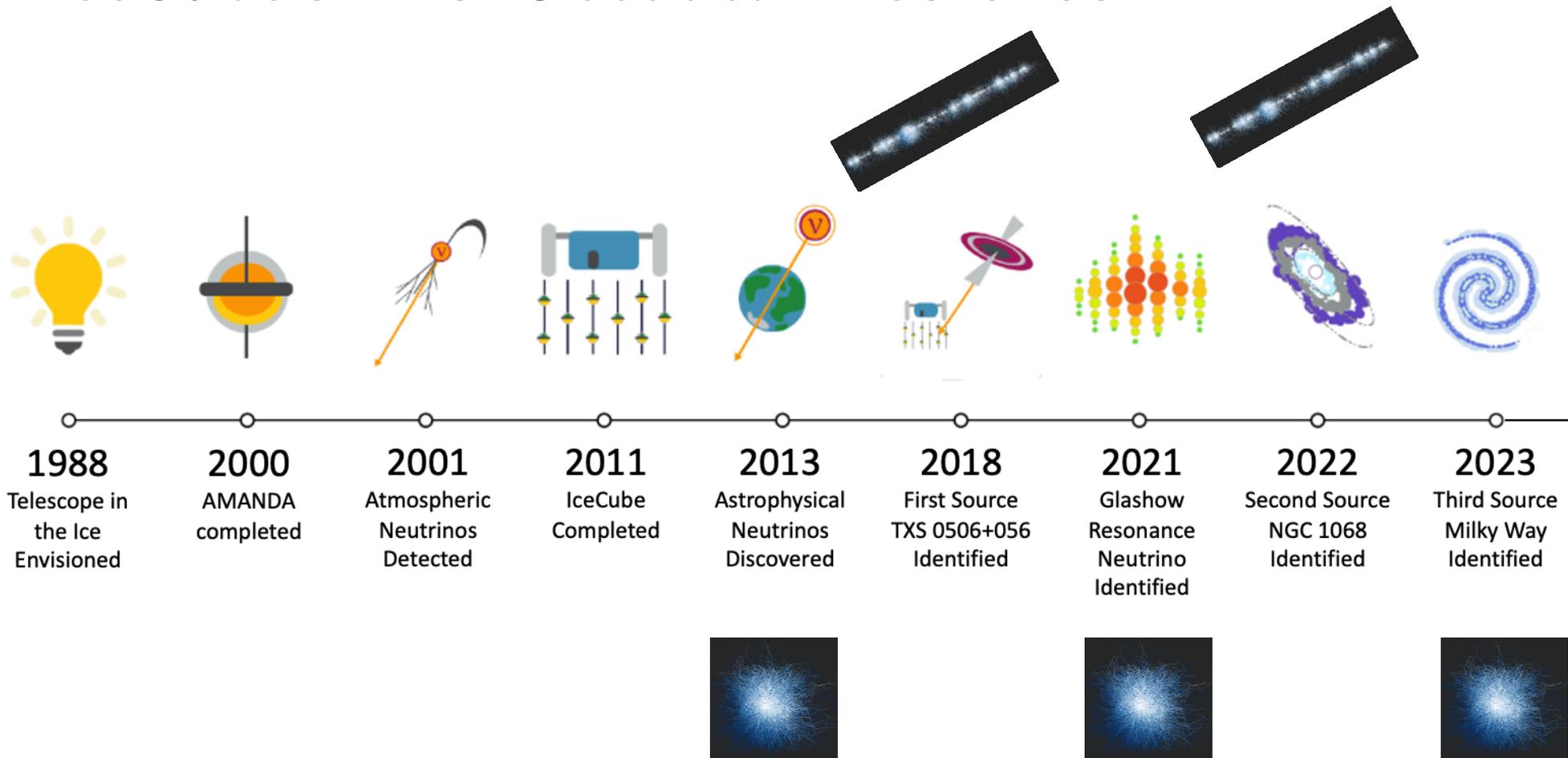
## How does IceCube work?

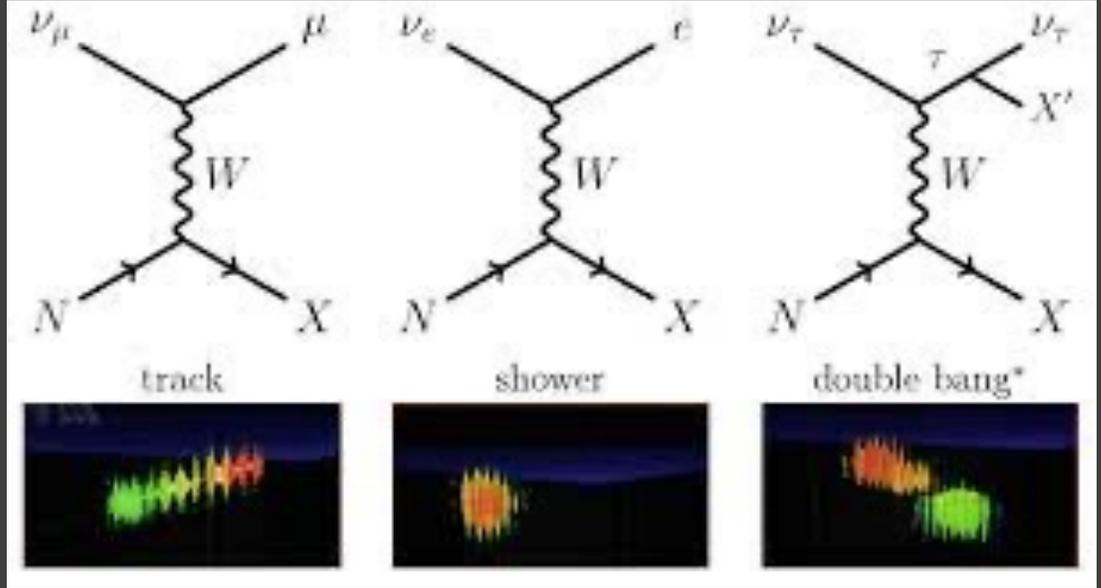
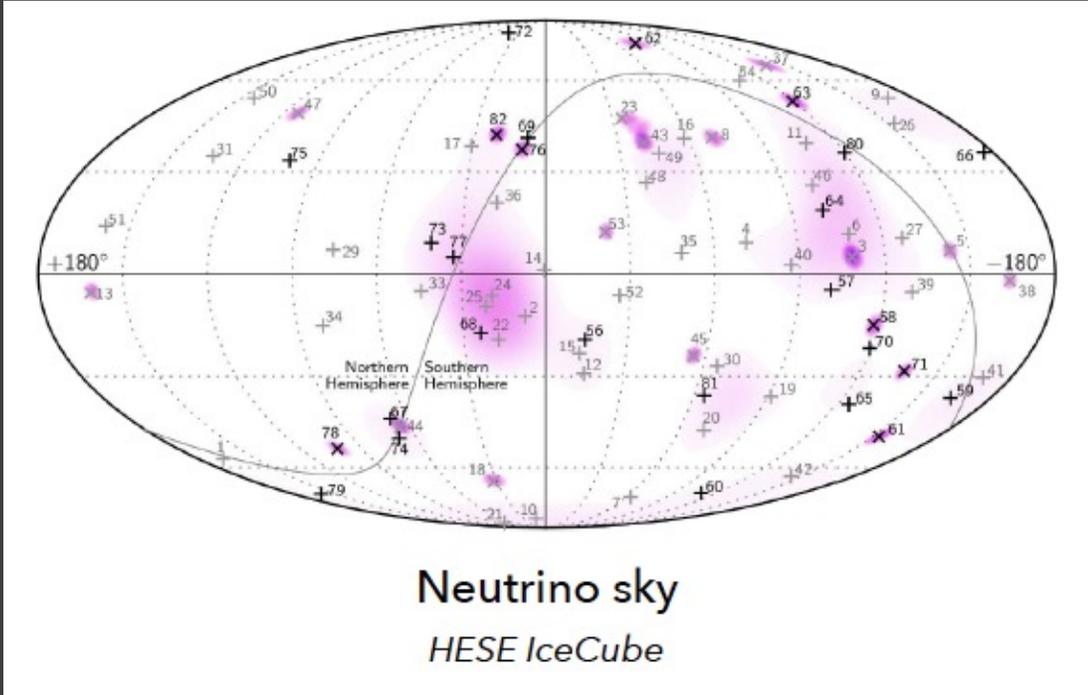
When a neutrino interacts with the Antarctic ice, it creates other particles. In this event graphic, a muon was created that traveled through the detector almost at the speed of light. The pattern and the amount of light recorded by the IceCube sensors indicate the particle's direction and energy.



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

# IceCube's First Decade: milestones



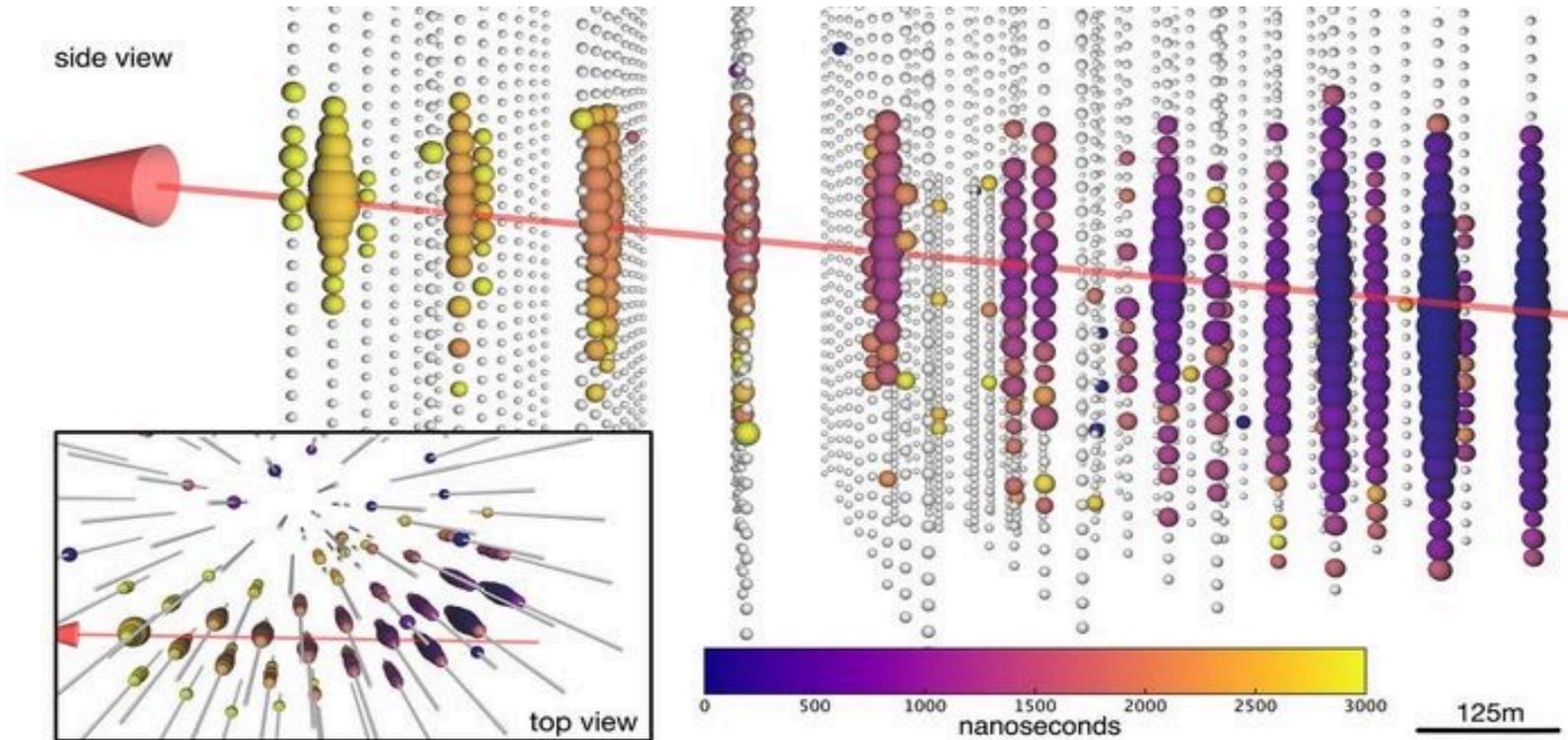


<https://youtu.be/2DDQYHibL3Q>

Il cielo  
extragalattico in  
neutrini

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

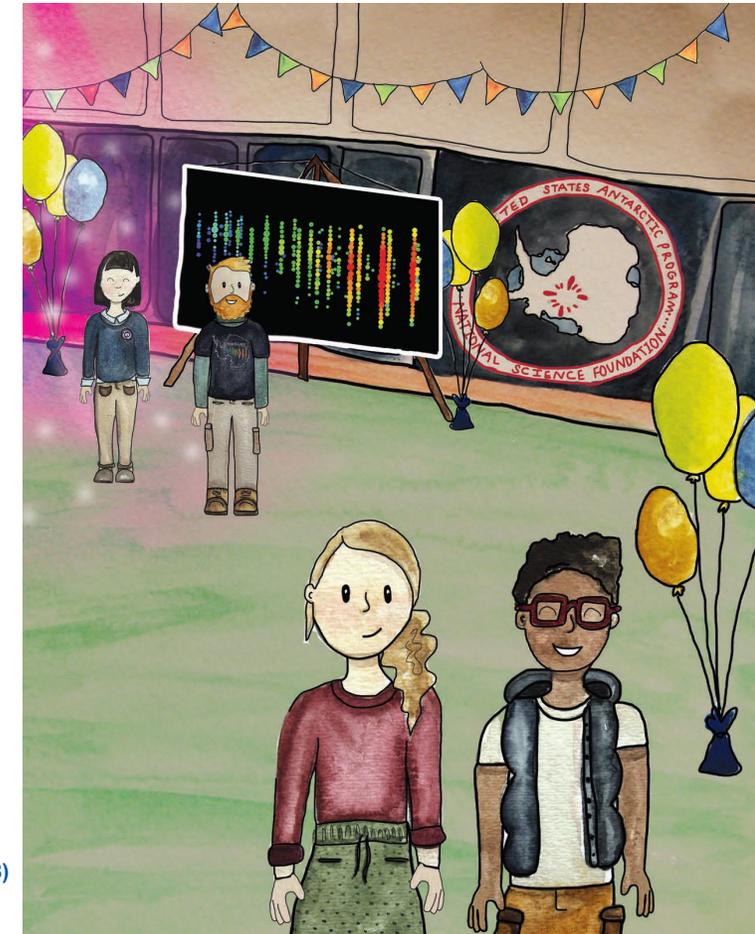
# IC-170922



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.

## Adventures with Rosie & Gibbs: the lost penguins



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

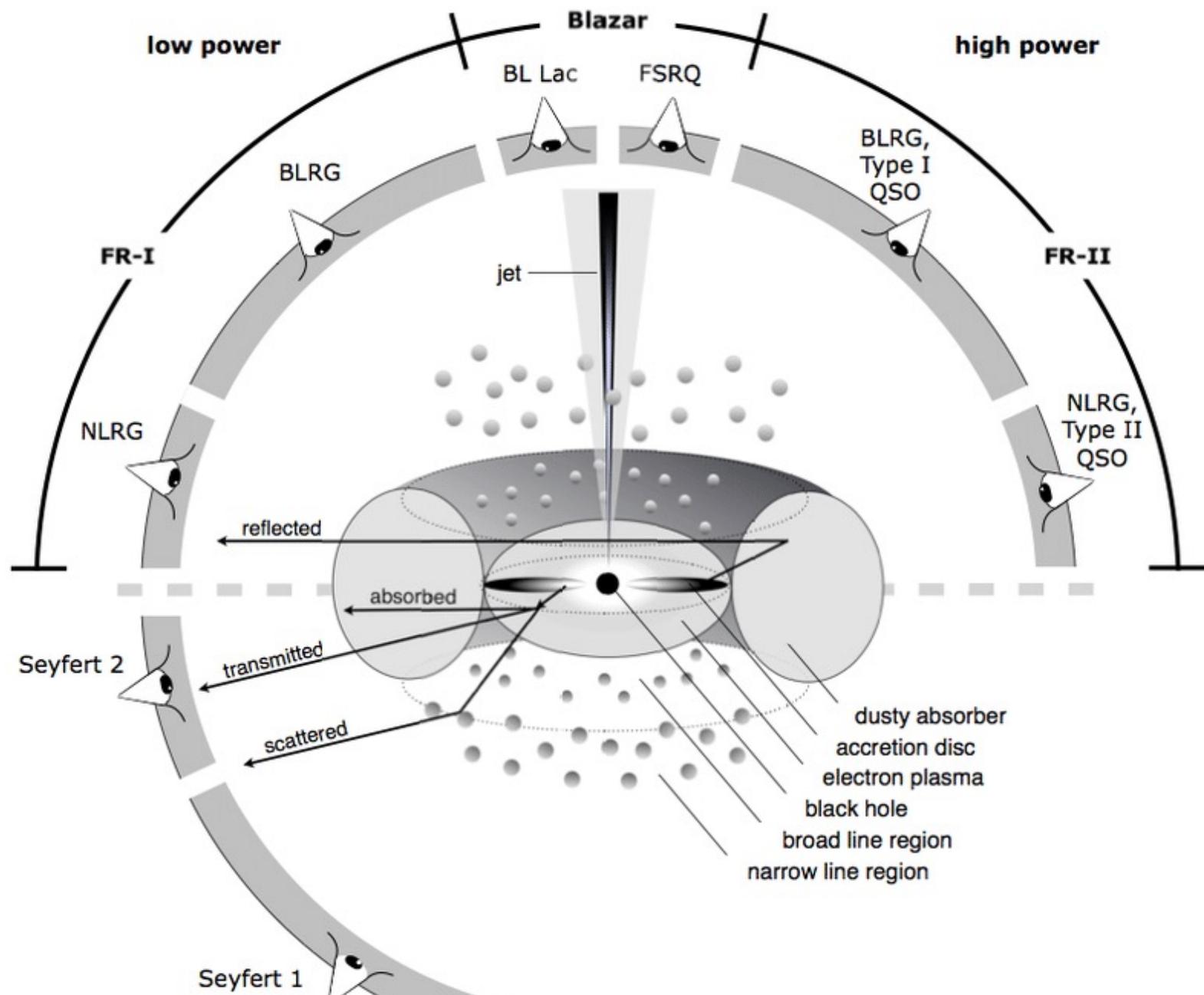
# Il sistema di allerta in funzione



*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*

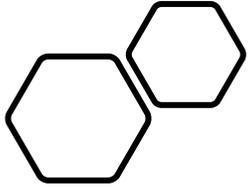
radio-loud (RL) AGN

radio-quiet (RQ) AGN



# I Nuclei Galattici Attivi

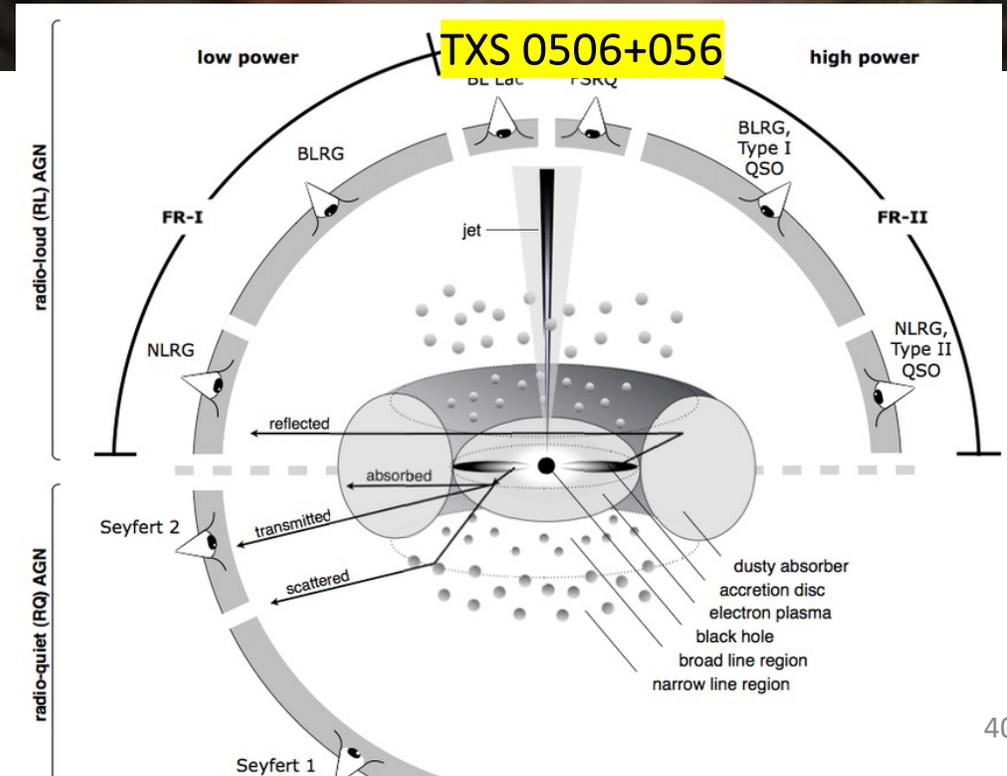
- **Gaslsie Attive:** Classe di galassie il cui nucleo, di aspetto stellare molto luminoso, emette una grandissima potenza radiativa (anche centinaia di volte superiore a quella dei nuclei galattici ordinari) con spettro continuo (dalle onde radio ai raggi X duri), non termico e con una variabilità temporale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



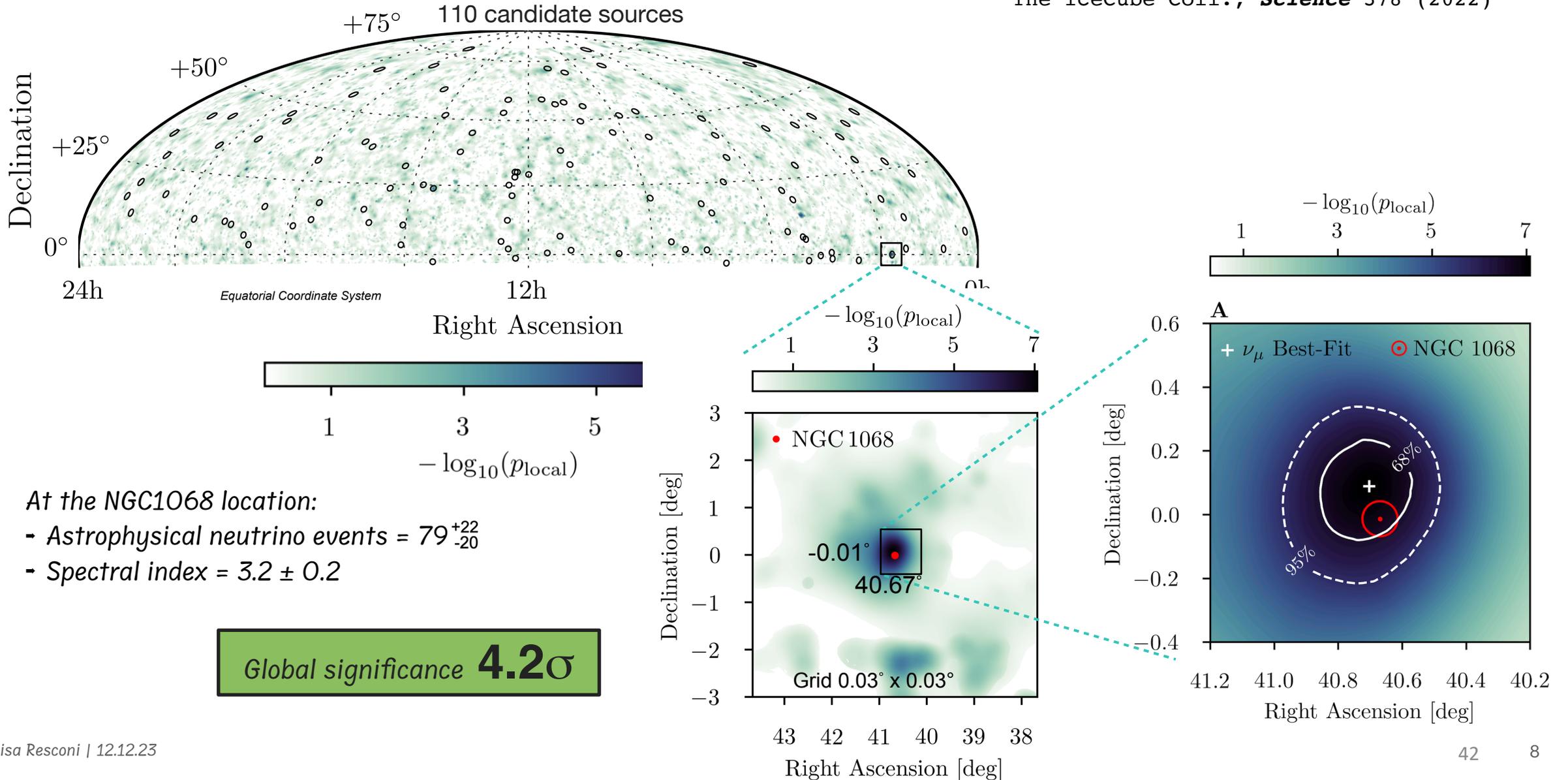


NGC 1068

Eccone un altro! Anno 2022

# Evidence of Neutrino Emission from NGC 1068

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

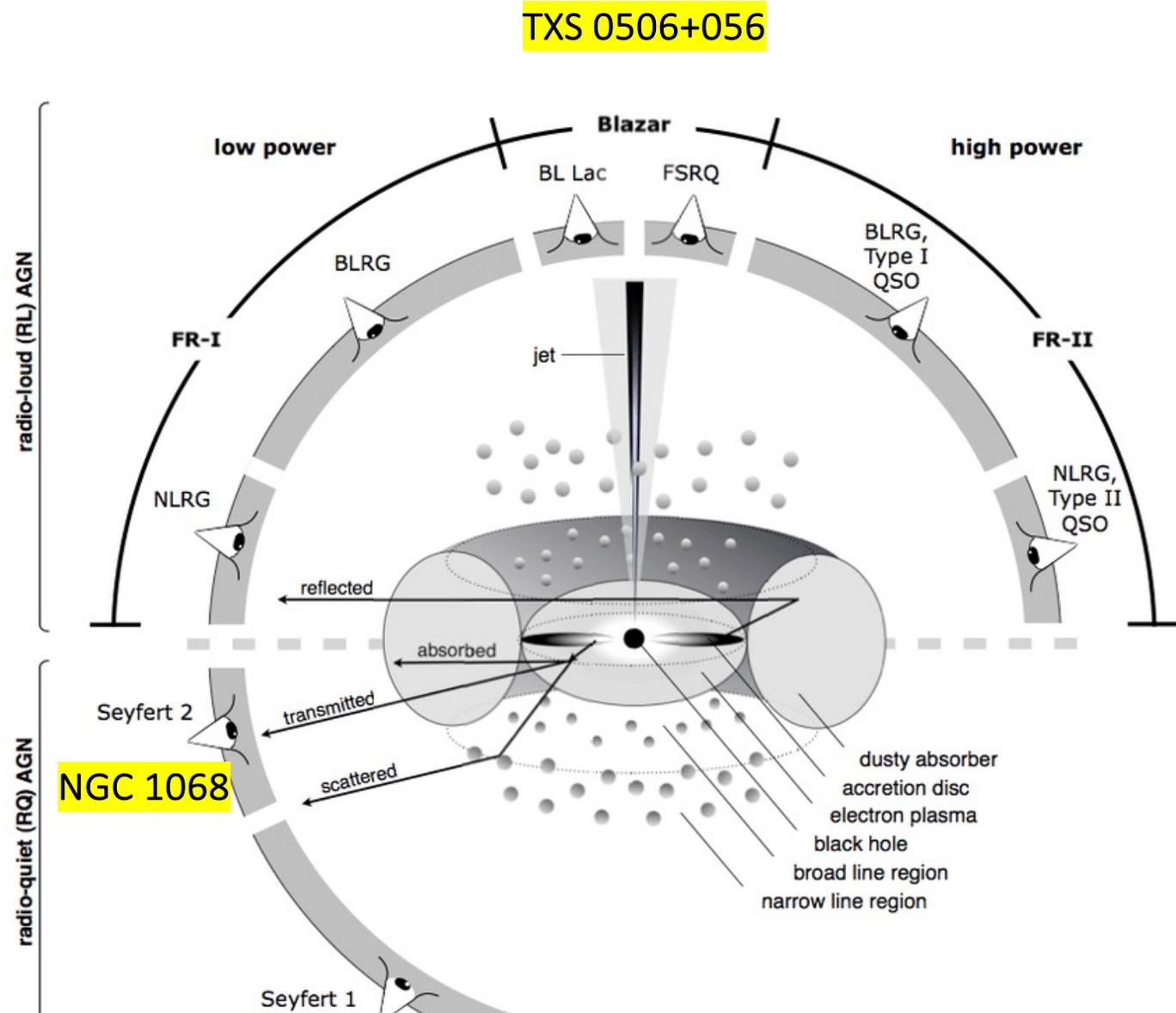


# NGC 1068

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

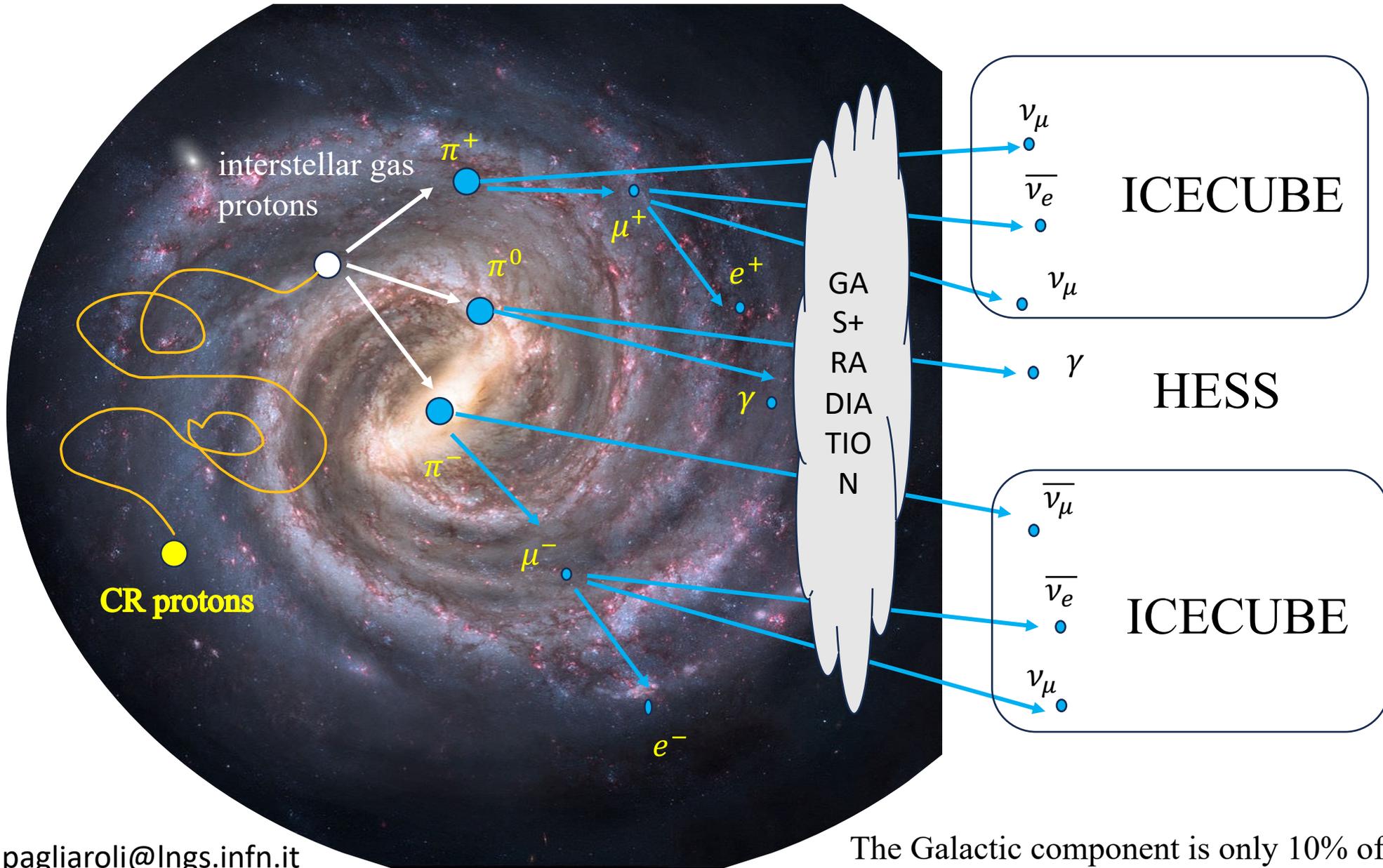


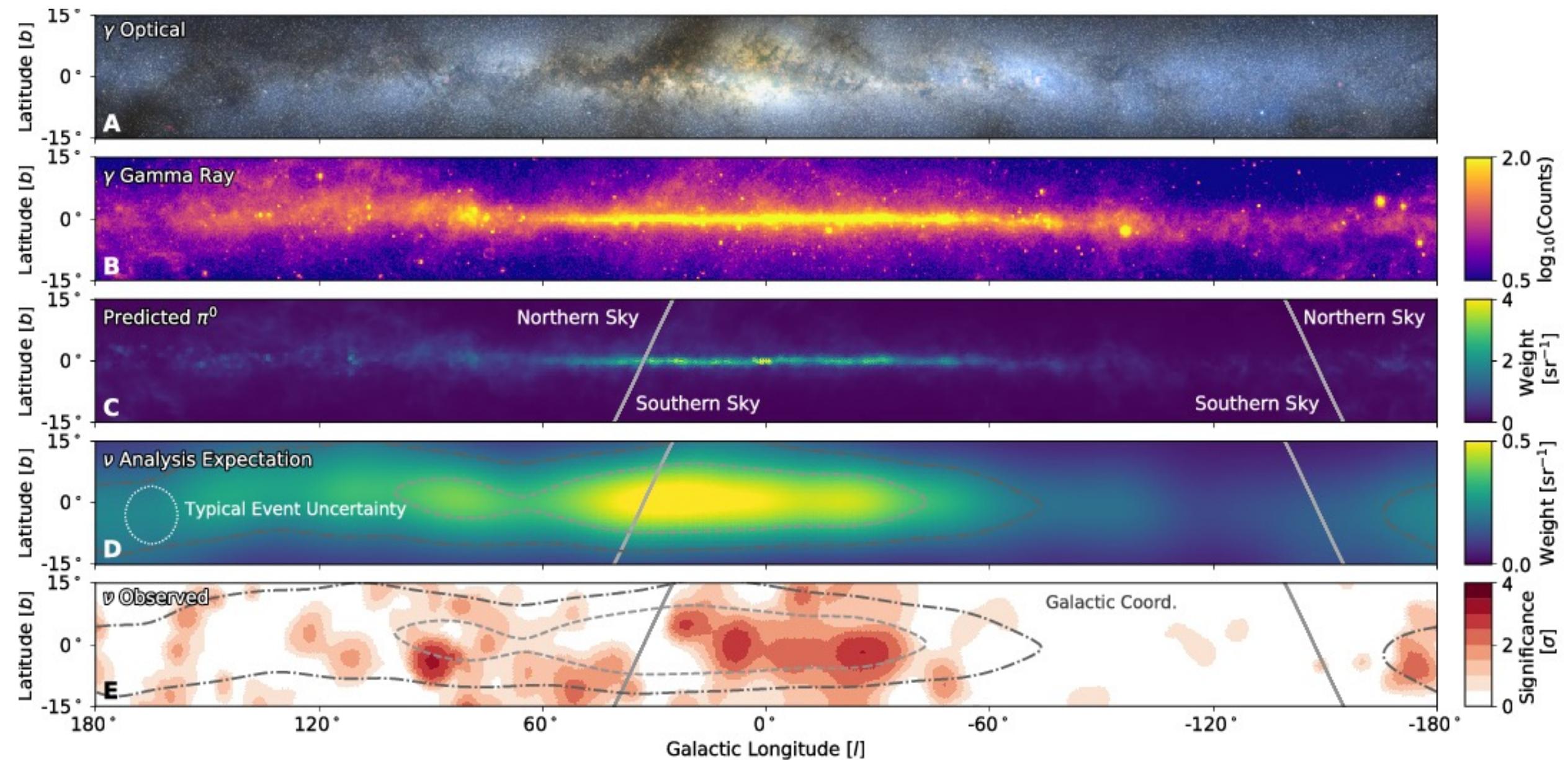
# June 30, 2023: High-energy neutrinos from the Galactic plane



<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

