



Discover Cosmic Particles

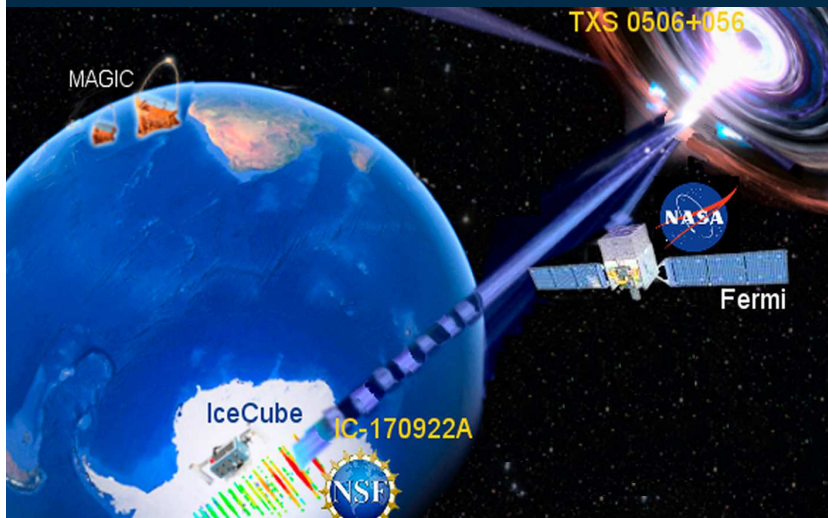
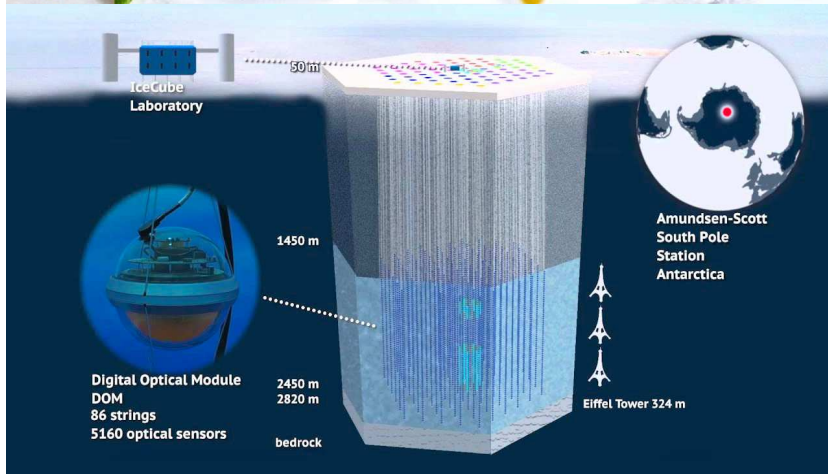
# INTERNATIONAL COSMIC DAY 2023

November 21 | 2023

## Raggi gamma e neutrini cosmici: segnali da diversi messaggeri

Stefano Ciprini

1. INFN Sezione di Roma Tor Vergata
2. ASI Space Science Data Center (SSDC), Roma



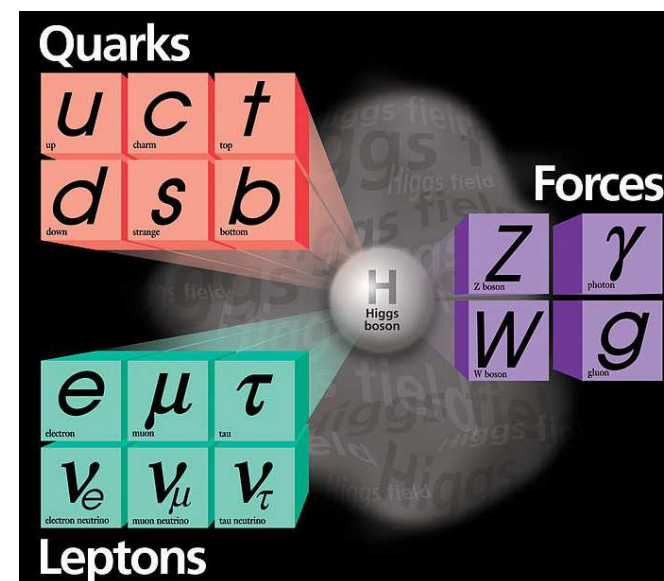
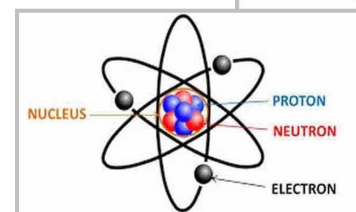
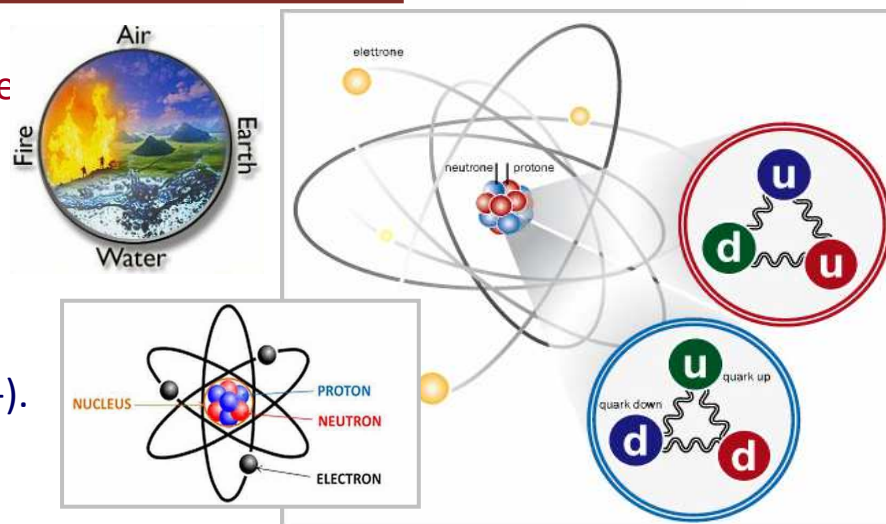
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
SEZIONE DI ROMA TOR VERGATA



International Cosmic ray Day (ICD) 2023  
Dip. di Fisica & INFN Roma Tor Vergata  
21 Novembre 2023

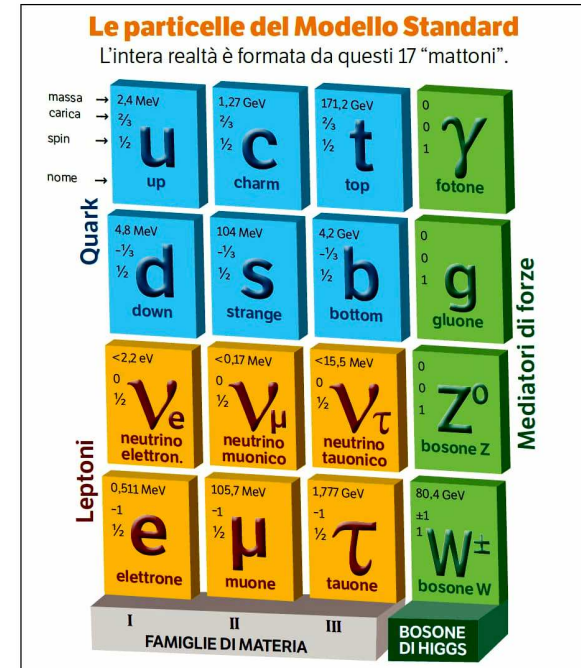
# Fisica delle particelle elementari

- ❑ Tempi antichi: elementi fondamentali terra, aria, fuoco e acqua. Ma esiste qualcosa di più fondamentale l'atomo.
- ❑ Atomi costituiti da elementi più semplici. Le diverse combinazioni che determinano le proprietà chimiche degli elementi (tavola periodica degli elementi).
- ❑ Esperimenti: gli atomi hanno un nucleo positivo piccolo ma denso e una nuvola di elettroni negativi (e-).
- ❑ Anche il nucleo si scoprì che non era una particella fondamentale: composto da protoni (p+), che hanno carica positiva, e neutroni (n), che non hanno carica.
- ❑ Protoni e neutroni non sono fondamentali.
- ❑ I fisici hanno scoperto che protoni e neutroni sono composti da particelle ancora più piccole chiamate quark. Per quanto ne sappiamo, i quark sono puntiformi e non sono costituiti da nient'altro.
- ❑ Le Particelle Fondamentali: i fisici hanno ora sviluppato il Modello Standard. Il modello classifica quark e leptoni come particelle fondamentali e sono tenuti insieme da interazioni (forze) fondamentali.
- ❑ Leptoni e quark sono collettivamente chiamati fermioni.



# Fisica delle particelle elementari

- La teoria che definisce le nostre attuali conoscenze di **fisica subnucleare** delle alte energie (delle **particelle elementari**) è chiamata **Modello Standard**.
- Ad esempio: scoperta e studio delle proprietà del **bosone di Higgs** → permette di capire profondamente un aspetto fondamentale della materia (il meccanismo con cui si genera la **massa** delle particelle).
- Un'**interazione**, o forza, **fondamentale** è un meccanismo mediante il quale le particelle interagiscono tra loro e che non può essere spiegato da un'altra interazione più fondamentale.



Quarks	
Flavor	Electric charge
<b>u</b> up	2/3
<b>d</b> down	-1/3
<b>c</b> charm	2/3
<b>s</b> strange	-1/3
<b>t</b> top	2/3
<b>b</b> bottom	-1/3

Leptons	
Flavor	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	0
<b>e</b> electron	-1
$\nu_\mu$ muon neutrino	0
<b><math>\mu</math></b> muon	-1
$\nu_\tau$ tau neutrino	0
<b><math>\tau</math></b> tau	-1

Force Carriers	
Name	Electric charge
<b><math>\gamma</math></b> photon	0
<b><math>W^-</math></b>	-1
<b><math>W^+</math></b>	+1
W bosons	
<b><math>Z^0</math></b> Z boson	0
<b>g</b> gluon	0

Interaction	Mediator (Boson)	Relative Magnitude	Range
Strong interaction	gluon	$10^{38}$	infinite
Electromagnetic interaction	photon	$10^{36}$	infinite
Weak interaction	W and Z bosons	$10^{25}$	$10^{-18}$ m
Gravity	graviton	$10^0$	infinite

# Fisica delle particelle elementari

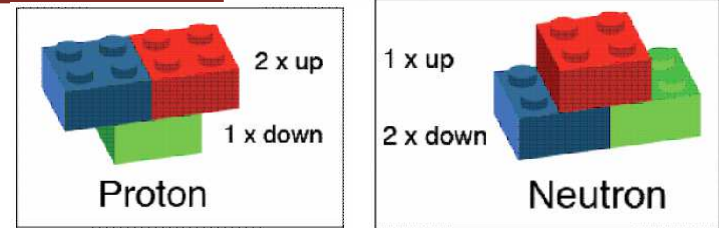
□ Esistono **sei leptoni**, tre dei quali hanno carica elettrica e tre no. Sembrano particelle puntiformi senza struttura interna. Il leptone più conosciuto è l'**elettrone** (e<sup>-</sup>). Gli altri due leptoni carichi sono il **muone** e il **tau**, carichi come gli elettroni ma con molta più massa.

□ Gli altri leptoni sono i **tre tipi di neutrini**. I **neutrini** non hanno carica elettrica ed hanno una massa molto molto piccola.

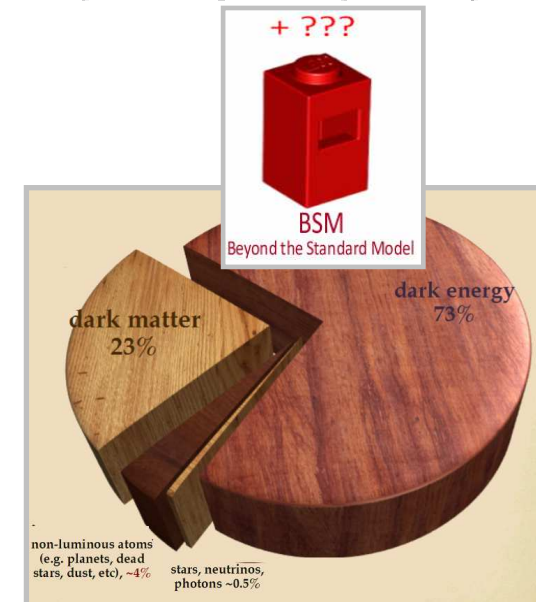
□ I **quark sono sei**. La maggior parte della **materia** che vediamo intorno a noi è composta da protoni e neutroni, **che sono composti da quark**. I fisici solitamente ne parlano in termini di tre coppie: **up/down, charme/strange, top/bottom**.

□ Per ciascuno di questi quark, esiste un antiquark corrispondente (**antimateria**). Hanno carica elettrica frazionaria, e trasportano anche un tipo di carica chiamata di colore. Il quark più sfuggente, il quark top (scoperto nel 1995 dopo che la sua esistenza era stata teorizzata per 20 anni). I quark **esistono solo in gruppi con altri quark** e non si trovano mai da soli.

□ Si punta anche alla scoperta di **fenomeni nuovi** di fisica ("oltre il Modello Standard"): possibili **particelle supersimmetriche** (candidate a costituire la **materia oscura** prevalente nell'Universo), o segnali di nuova fisica che spieghino l'**asimmetria tra materia e antimateria** nel nostro Universo, o la prova dell'esistenza di ulteriori dimensioni spazio-temporali.



Quarks			Antiquarks		
1	2	3	3	2	1
Up u	Charm c	Top t	Antitop t̄	Anticharm c̄	Antiup ū
Down d	Strange s	Bottom b	Antibottom b̄	Antistrange s̄	Antidown d̄



# Scoperta dei neutrini

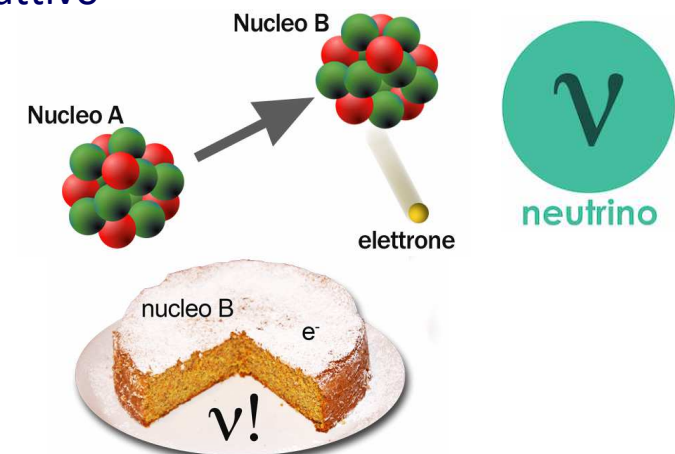
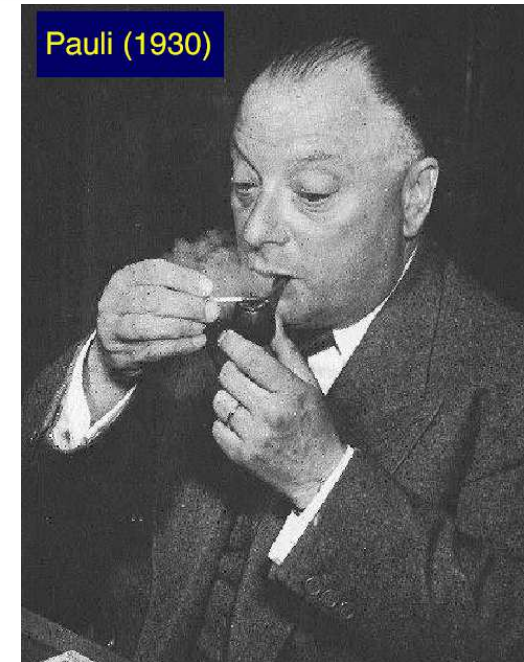
□ Il neutrino è associato a numeri **piccolissimi** (es.: **massa**, sezione d'urto, etc.) e **grandissimi** (es. **numero** neutrini dal Sole o esplosioni supernovae, **dimensioni dei rivelatori e laboratori** necessari per rivelarli, etc.) → questo è probabilmente già un indice della sua **speciale natura**.

□ I **neutrini** sono particelle elementari che si trovano all'**esterno** degli atomi e che **non** sono composte da ulteriori particelle più semplici; **non hanno carica elettrica** e hanno una **massa estremamente piccola** (più di 1 milione di volte più piccola di quella di un elettrone). Elettrone già ha massa circa 2.000 volte più piccola del protone e neutrone).

□ **Neutrini** scoperti **per caso** (fine anni '20). Decadimento radioattivo di tipo beta (nucleo atomico emette 1 elettrone e si trasforma in un nucleo di una nuova specie atomica) con parte dell'energia che scompariva:

→ **contraddizione** col principio di **conservazione massa-energia**

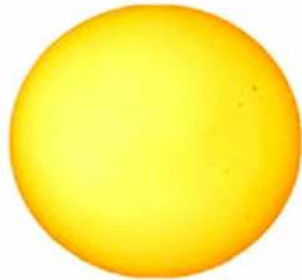
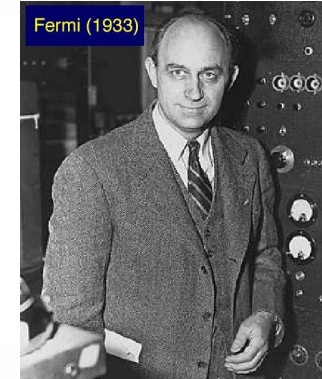
→ **Wolfgang Pauli** ipotizzò l'esistenza di una strana particella che compare quando il nucleo radioattivo emette l'elettrone (in tal modo sono sanate violazioni leggi conservazione massa-energia, quantità di moto, momento angolare).



# Da dove vengono i neutrini

- ❑ **Enrico Fermi** (nel 1934) usò per primo il termine "**neutrino**" per distinguerlo dal neutrone (molto più grande e scoperto da Chadwick).
- ❑ 1 neutrone si trasforma in 1 protone emettendo 1 elettrone e 1 neutrino;
- ❑ 1 protone si trasforma in 1 neutrone emettendo 1 positrone (anti-elettrone) e 1 neutrino.

I neutrini sono **molto abbondanti nel nostro Universo**, ma **non interagiscono** con la materia, possono viaggiare attraversando anche grossi spessori (addirittura interi pianeti) senza essere fermati.



Neutrini Solari



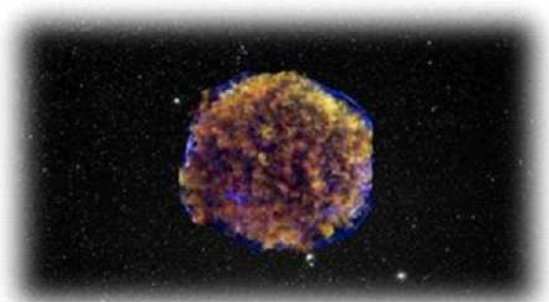
Neutrini Fossili dal Big Bang



Neutrini Artificiali da acceleratori



Neutrini da interazione di raggi cosmici in atmosfera



Neutrini da esplosioni di SuperNova



Neutrini Astrofisici (Active Galactic Nucleus, Gamma Ray Bursts, etc...)



Neutrini prodotti dal nostro pianeta

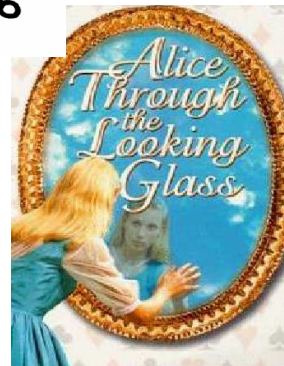
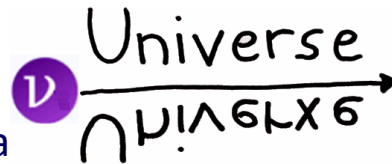
# Neutrino: particella misteriosa

## Caratteristiche del neutrino (ai tempi di Enrico Fermi).

- ❑ Particella di **massa quasi nulla** e **neutra** elettricamente.
- ❑ **Fermione** (dotata di **spin**) → una trottola fatta di nulla ?!
- ❑ **Piccolissima probabilità di interazione con la materia**, può percorrere decine di anni luce **dentro la materia** senza interagire !
- ❑ Per questo ci vollero 25 anni per “scoprirlo”.
- ❑ Per questo ci vogliono **grandissimi laboratori, sotterranei** (piccola probabilità interazione → grossi volumi necessari).
- ❑ Appena scoperto, il neutrino ci aiutò a risolvere un vecchio problema: è possibile **distinguere la destra dalla sinistra** ? Possiamo distinguere il **mondo nello specchio dal mondo reale** → i neutrini e la **violazione della parità**.

## MISTERI ATTUALI:

- ❑ Neutrino è una particella di **Dirac** o di **Majorana** (coincide con la sua antiparticella)?
- ❑ Supremazia **materia** su antimateria.
- ❑ **Mescolamento** e **oscillazioni** di neutrini.
- ❑ Valore della **velocità** ?
- ❑ Valore della **massa** ?



Una particella elementare... molto particolare!

### 3 FAMIGLIE DI NEUTRINI

	$\nu_e$ neutrino elettronico	$\nu_\mu$ neutrino muonico	$\nu_\tau$ neutrino tau
	$\bar{\nu}_e$ antineutrino elettronico	$\bar{\nu}_\mu$ antineutrino muonico	$\bar{\nu}_\tau$ antineutrino tau

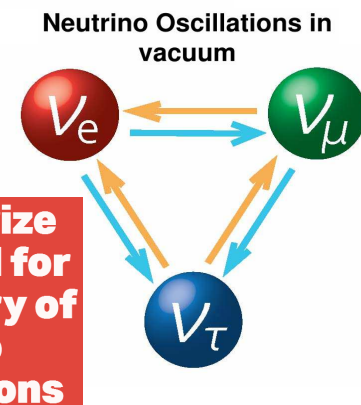
Carica elettrica	0
Momento angolare intrinseco (legato al suo moto di rotazione su se stesso)	1/2
Interazioni di cui risente	debole
Ha una massa nulla?	?
Concide con la sua antiparticella?	?

Una trottola fatta di niente!... Ma molto comune nel nostro Universo!

	?		?
particella di Dirac		particella di Majorana	
$\nu \neq \bar{\nu}$		$\nu = \bar{\nu}$	

# Esistono 3 tipi di neutrini

- ❑ Tre "famiglie" (specie) di neutrini: elettronico, muonico e tauonico; esse variano a seconda del leptone che accompagna il neutrino stesso ("doppietti").
- ❑ Oscillazione dei neutrini (va in famiglie diverse).
- ❑ Attraverso l'interazione (forza) debole (la sola che i neutrini subiscano), i neutrini possono trasformarsi nel rispettivo leptone partner.



MATERIA			QUARK
$u$ up	$c$ charm	$t$ top	
$d$ down	$s$ strange	$b$ beauty	
$\nu_e$ neutrino e	$\nu_\mu$ neutrino $\mu$	$\nu_\tau$ neutrino $\tau$	LEPTONI
$e$ elettrone	$\mu$ muone	$\tau$ tau	
1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	famiglia

- $m_{\nu_e} < 2.8 \text{ eV}$
- $m_{\nu_\mu} < 17 \text{ Kev}$
- $m_{\nu_\tau} < 18.2 \text{ MeV}$

La massa dei neutrini, anche se diversa da zero, è comunque piccolissima.



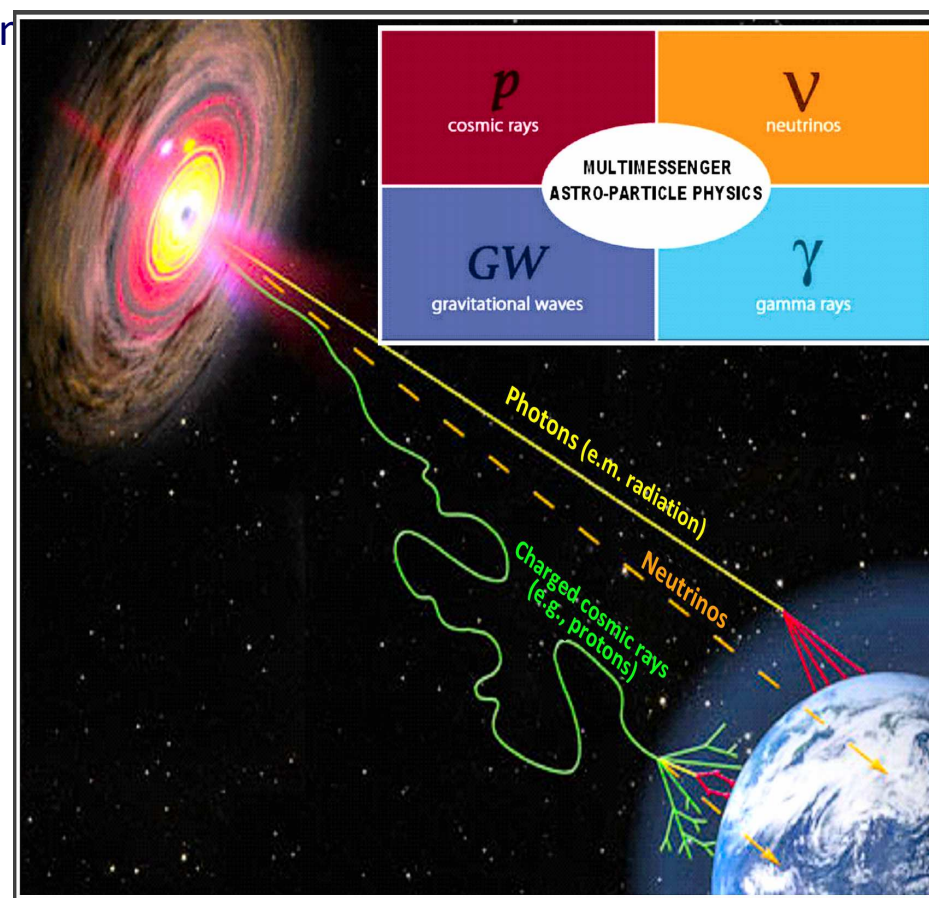


# Fisica delle astro-particelle multi-messaggero

❑ La fisica delle astroparticelle consiste nell'osservazione e nella misura sperimentale delle particelle provenienti dallo spazio: raggi cosmici, nuclei, antimateria (antinuclei e antiparticelle), neutrini, raggi gamma ad alta energia, altra radiazione (fotoni ad energie più basse), onde gravitazionali, processi fisici denor

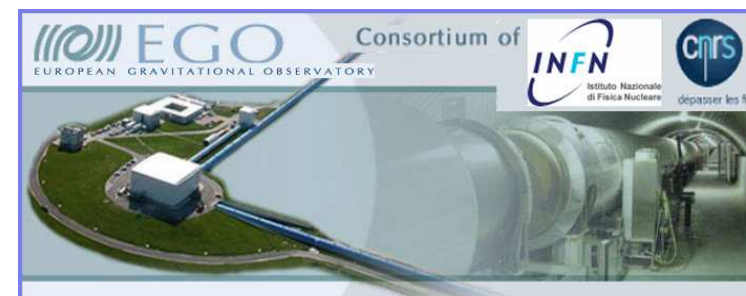
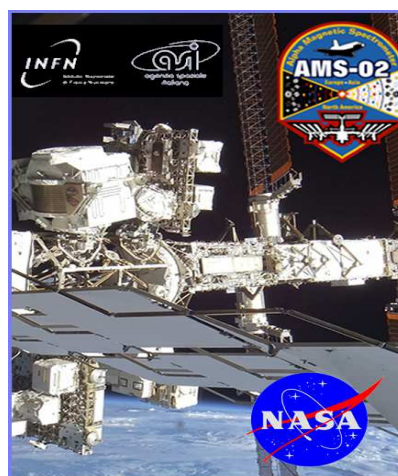
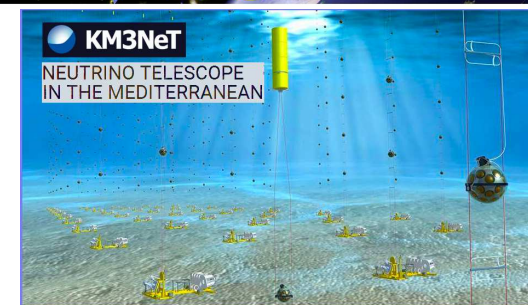
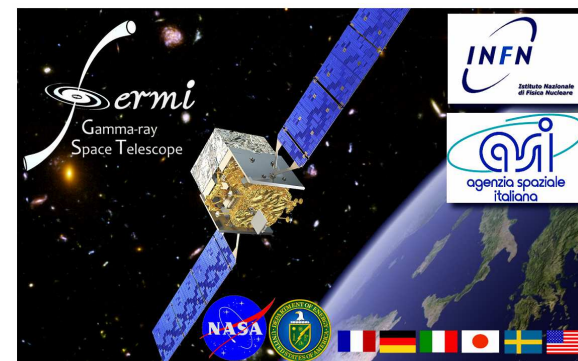
❑ Gli esperimenti di fisica delle astroparticelle studiano la radiazione e le particelle del cosmo con esperimenti che trovano naturale ambientazione in laboratori di superficie, sotterranei, sottomarini, d' alta quota o direttamente nello spazio (su satelliti, sonde, stazioni spaziali).

❑ Questo permette di studiare quella parte della fisica fondamentale che non possiamo indagare direttamente con gli acceleratori sfruttando invece e direttamente l'Universo visto come un sistema di tanti acceleratori naturali e come un enorme laboratorio di fisica.



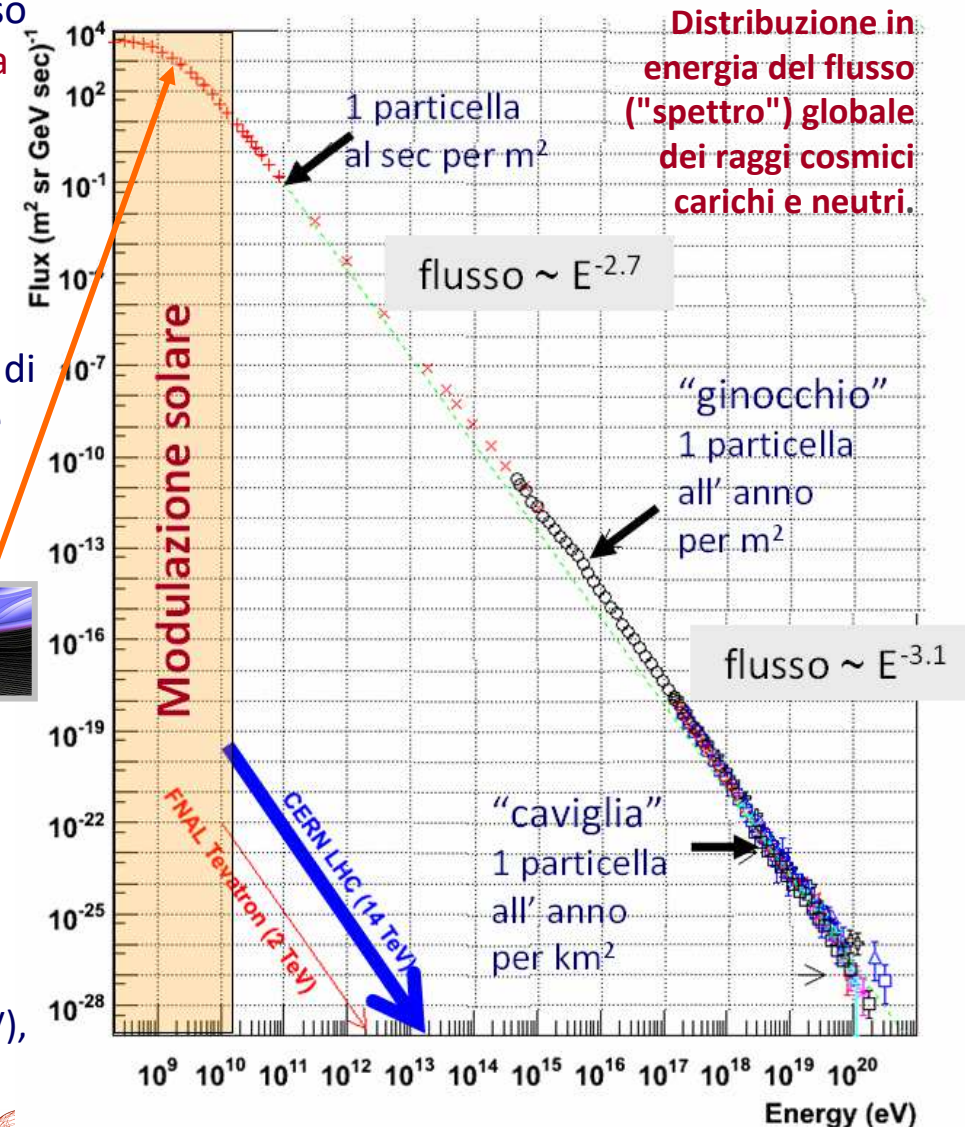
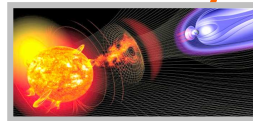
# Fisica delle astro-particelle multi-messaggero

- ❑ Esempio: nei **Laboratori Nazionali del Gran Sasso** dell'INFN (il più grande laboratorio sotterraneo al mondo) vi sono rivelatori per lo studio della **materia oscura**, **neutrini**, **fenomeni rari**, rivelabili solo nelle condizioni di "silenzio cosmico" garantite dalla protezione della roccia sovrastante. Li si svolgono anche ricerche di carattere astrofisico (es. **neutrini solari**, o da **supernova**).
- ❑ Nello spazio i **rivelatori posti su satelliti** hanno accesso diretto ai **raggi cosmici primari** (anche fotoni di alta energia, **raggi-gamma**) che sulla superficie terrestre sarebbero attenuati (o schermati del tutto) dall'atmosfera terrestre.
- ❑ Fisica astroparticellare spaziale dei **raggi gamma** di alta energia, i **laboratori sottomarini** (e sotto calotta Antartica) per la fisica con **neutrini** (atmosferici/solari/cosmici...), i grandi **rivelatori interferometrici** per le **onde gravitazionali**.



# Flusso ed energia dei raggi cosmici

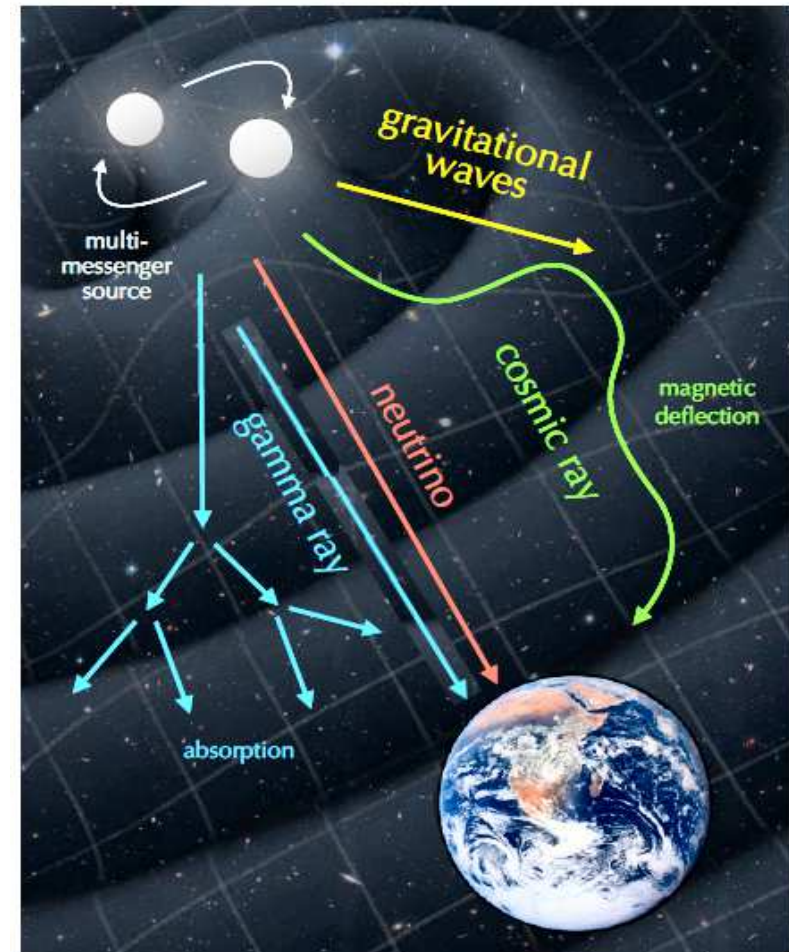
- ❑ Raggi cosmici → chiara evidenza che nell'Universo vi sono acceleratori naturali di particelle ad altissima energia.
- ❑ I raggi cosmici sono particelle subatomiche che arrivano sulla Terra: per lo più (~90%) protoni e nuclei di elio (~9%). Gli elettroni sono ~1%; ~0.1% sono raggi gamma
- ❑ Il flusso (quantità per unità di tempo e superficie) di raggi cosmici diminuisce rapidamente all'aumentare dell'energia.
- ❑ Origine dei raggi cosmici alle altissime energie ancora in discussione.
- ❑ Origine dell'andamento in funzione dell'energia ("ginocchio" e "caviglia") ancora in discussione.
- ❑ Composizione chimica, in funzione dell'energia, ancora largamente ignota.
- ❑ Fotoni e neutrini (neutri, non carichi) di alta energia puntano indietro direttamente alla sorgente (→ mappe del cielo e identificazione).
- ❑ Flusso di raggi cosmici a energie più basse ( $E < 10^{10}$  eV), è fortemente influenzato dalla "modulazione solare" (varia al variare dell'attività del nostro Sole)



# Fisica delle astro-particelle multi-messaggera coi neutrini cosmici molto (TeV/PeV) energetici

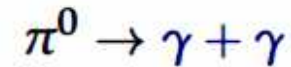
Accelerazione raggi cosmici (cosmic rays CR) può essere vista come conseguenza di eventi violenti e cataclismatici come ad esempio:

- ❑ i flare (lampi, esplosioni) nei getti dei blazar e nei microquasar che emettono raggi gamma;
  - ❑ le onde d'urto (shock) nei resti di supernovae;
  - ❑ i gamma-ray burst (GRBs);
  - ❑ l'ambiente esterno vicino ad una pulsar;
  - ❑ i burst di onde gravitazionali che seguono una fusione di 2 stelle di neutroni o di 1 buco nero e 1 stella neutroni;
  - ❑ l'ambiente interstellare particolare all'interno delle bolle gamma di Fermi (Fermi bubbles) della nostra galassia, o l'alone della nostra galassia, o l'emissione gamma diffusa del piano della nostra galassia.
- ❑ Neutrini cosmici ad altissime energie (TeV/PeV) possono anche essere prodotti da decadimenti di possibile materia oscura pesante (PeV scale decaying dark matter) con canali generici.



# Fisica delle astro-particelle multi-messaggera coi neutrini cosmici molto (TeV/PeV) energetici

Collisioni inelastiche con **radiazione** (fotoni) o **gas** (atomi, molecole del gas e polveri che si trovano nei vari ambienti dei diversi candidati astrofisici di acceleratori cosmici) **producono raggi gamma e neutrini**. Esempio:

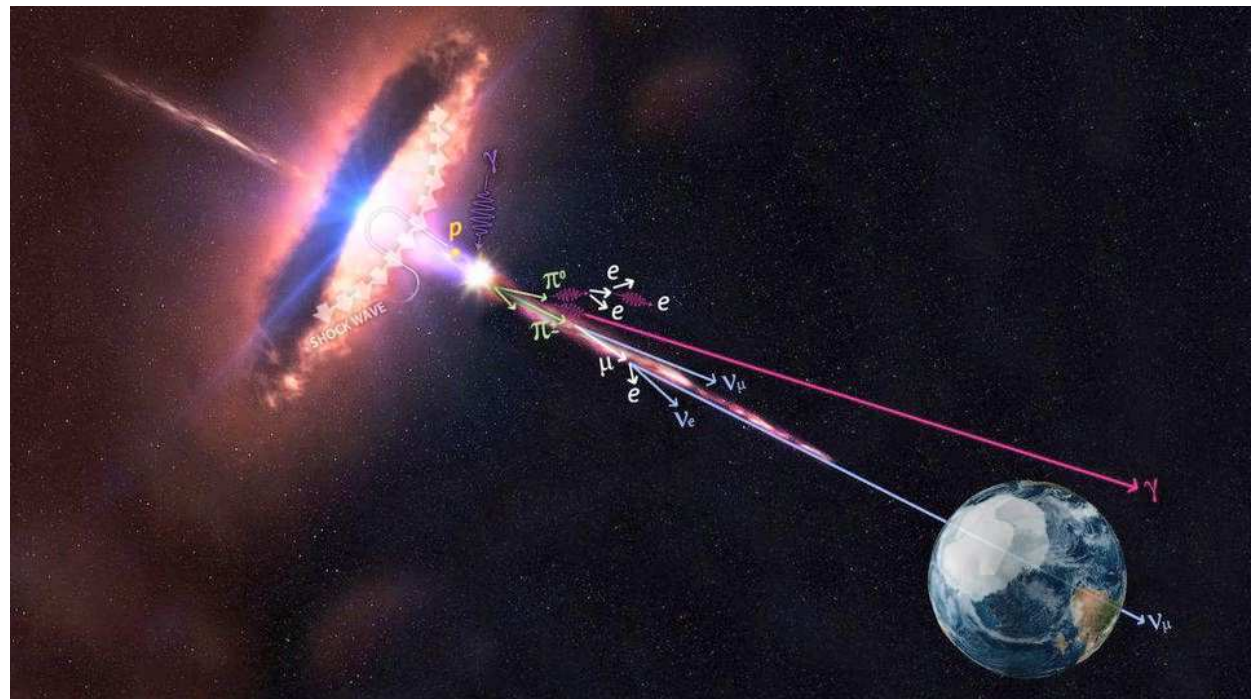
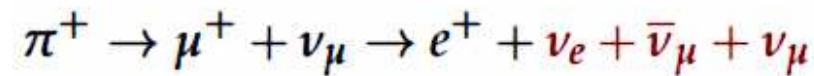


Aspetti unici del neutrino come particella messaggera cosmica:

→ **identifica una sorgente** (ed acceleratore) di **raggi cosmici**;

→ **qualifica** l'emissione di **raggi gamma**;

→ **fa luce** su una parte ancora oscura dell'astrofisica e fisica delle astroparticelle dell'**Universo alle energie molto alte** (very-high-energy, VHE Universe).



# Neutrini dall'interno del Sole e della Terra



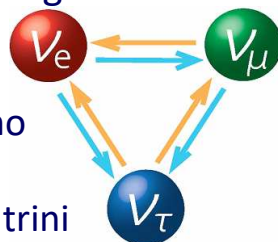
□ Grande quantità di neutrini prodotta all'interno delle stelle e in particolare del Sole.

□ Ogni  $\text{cm}^2$  nostro corpo attraversato da 60 miliardi di neutrini solari al sec.!

□ Neutrini emessi nel nucleo del Sole durante le reazioni di fusione termonucleare (partecipano a produzione energia poi fuoriescono, giungendo fino alla Terra.



□ Problema dei neutrini solari (metà anni '60 fino al 2002): discrepanza tra numero osservato di neutrini elettronici che arrivano sulla Terra e numero predetto da modelli.  
→ nuova comprensione della fisica dei neutrini con **modifica Modello Standard** delle particelle,  
→ **oscillazioni del neutrino**, neutrino anche se ha piccola massa **può cambiare sapore** (elettronico, muonico, tauonico) dal momento in cui è generato dentro il Sole



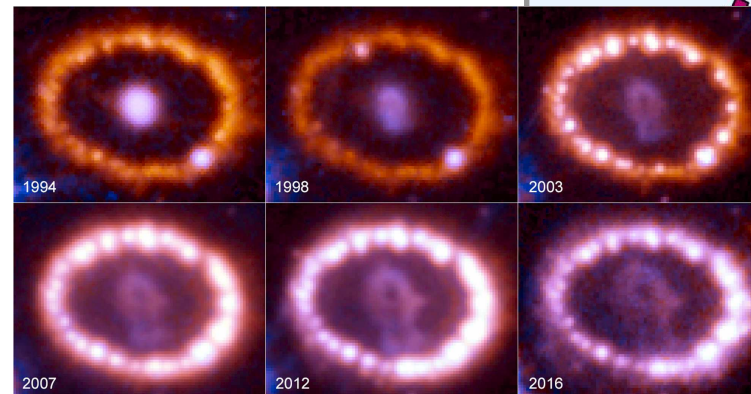
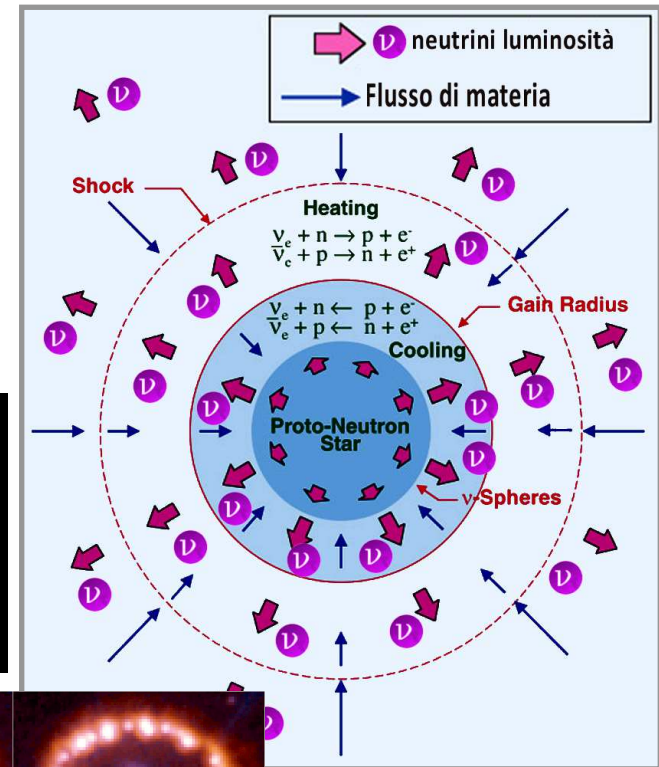
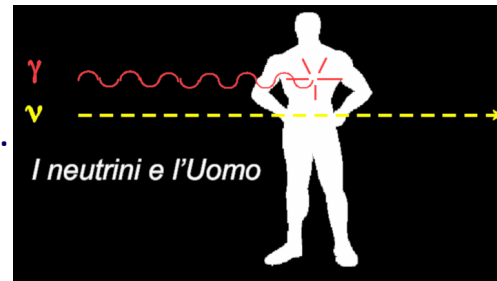
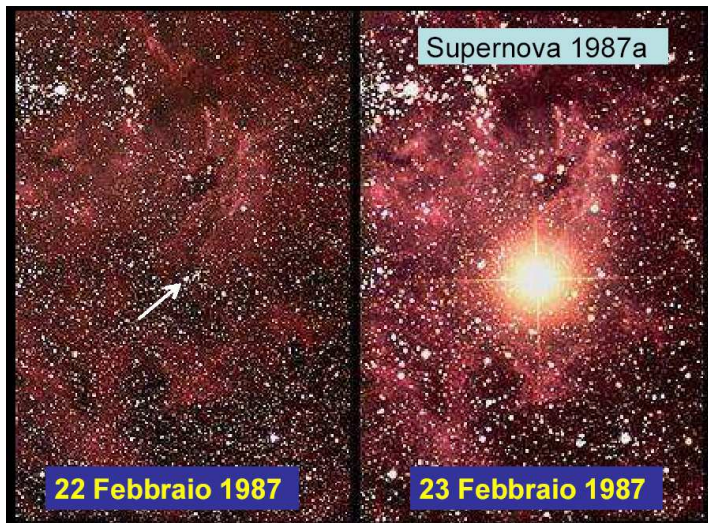
□ Sotto la crosta terrestre c'è un mare di uranio e torio. Lo sapevamo ma ora studiando i neutrini che si originano al centro della Terra, ne abbiamo certezza.

□ Nuclei di uranio e torio decadono emettendo antineutrini elettronici e energia in forma di calore.

□ L'energia prodotta corrisponde a circa 40.000 centrali elettriche da 1 GigaWatt ( $10^9$  Watt) e contribuisce a **mantenere incandescente sia il nucleo che il mantello terrestre.**

# Esplosione della Supernova 1987a

- Una **supernova** emette in 1 minuto l'energia emessa dal Sole in 200 anni.
- Per giorni, l'oggetto più splendente della notte.
- Solo lo 0.1% dell'**energia** dell'esplosione va in radiazione, il **99.9%** viene **emesso sotto forma di neutrini**.
- Il 23 Febbraio 1987 ciascun essere umano fu attraversato da 10000 miliardi di neutrini.
- Solo 1 milione di persone ebbero 1 di tali neutrini interagente nel loro corpo.
- Siamo **figli delle stelle**, e soprattutto delle **supernovae** (nucleosintesi nuclei atomici e quindi nuovi elementi chimici).



# Fabbriche di neutrini naturali (sole, supernovae, blazar...)

## NEUTRINO FACTORIES

Neutrinos are everywhere, generated by a variety of processes

Fusion of hydrogen nuclei to form helium in the Sun.



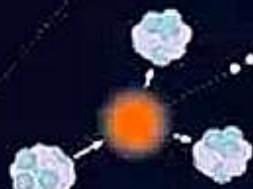
Sun

Supernovae and collisions between cosmic rays and air particles in Earth's atmosphere.



Supernovae

Particle accelerators smashing protons into a target and fission from the radioactive decay of elements inside nuclear reactors.



Nuclear fission



## WHERE THEY WILL BE DETECTED

**Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), United States**

Status: Planned

Cost: US\$1 billion

Will make highest-energy neutrinos of any experiment.

**Hyper-Kamiokande, Japan**

Status: Planned

Cost: About \$800 million

Will be the world's largest neutrino detector — it is 25 times bigger than its predecessor, Super-Kamiokande.

**Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO), China**

Status: Construction begun

Cost: \$330 million

Sits under 700 metres of rock.

**India-based Neutrino Observatory (INO), India**

Status: Funding approved

Cost: \$233 million

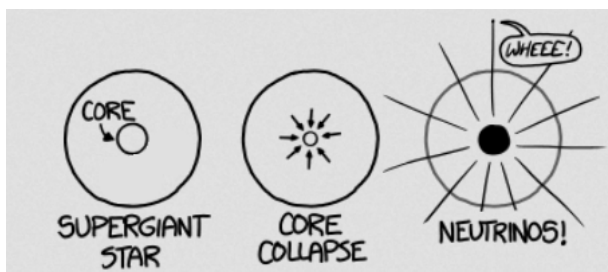
Will be largest experimental basic-science facility in India.

© nature



# Fabbriche di neutrini cosmici e come si rivelano

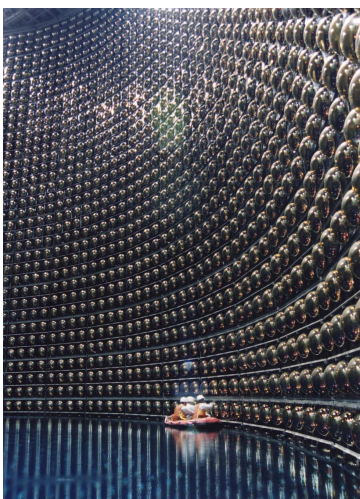
- ❑ Collisioni di **neutrini ad alta/altissima energia** con **nuclei** via interazione di corrente carica/neutra, **profondamente inelastica** (deep-inelastic charged and neutral current interactions).
- ❑ Particelle secondarie che sono il risultato di queste collisioni possono essere **rivelate grazie alla loro produzione di luce ottica blu per effetto Cherenkov** in materiali trasparenti alla luce (come acqua e ghiaccio).



*back-of-the-envelope* ( $E_\nu \sim 1\text{PeV} = 10^{15} \text{ eV}$ ):

- **flux of neutrinos** :  $\frac{d^2 N_\nu}{dt dA} \sim \frac{1}{\text{cm}^2 \times 10^5 \text{yr}}$
- **cross section** :  $\sigma_{\nu N} \sim 10^{-8} \sigma_{pp} \sim 10^{-33} \text{cm}^2$
- **targets**:  $N_N \sim N_A \times V / \text{cm}^3$
- **rate of events** :

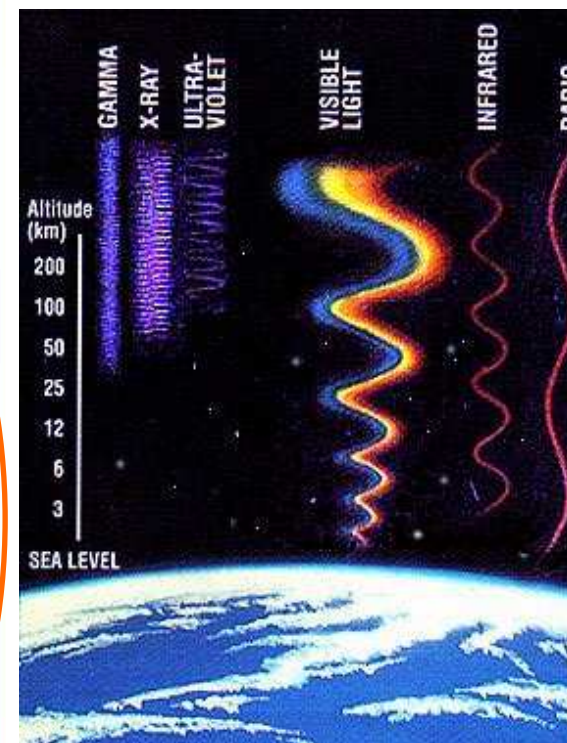
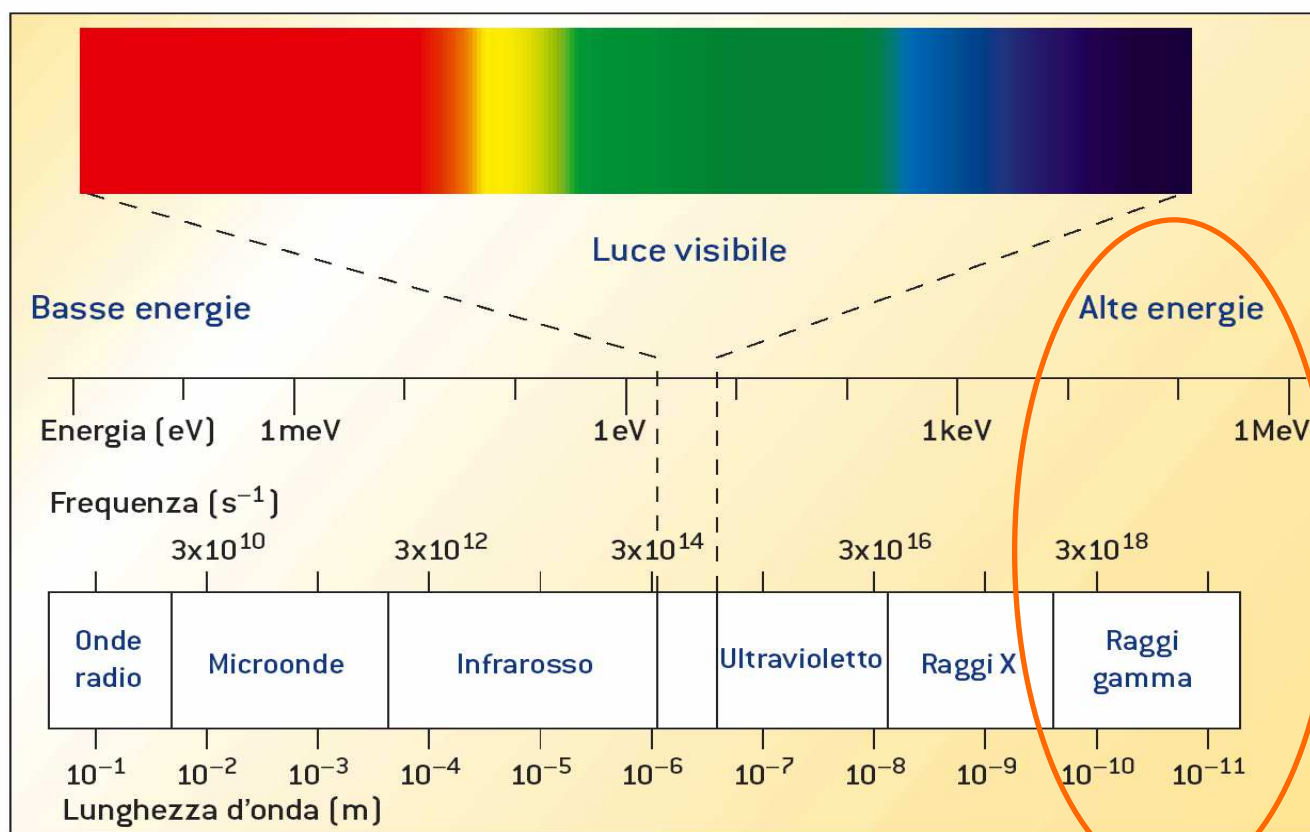
$$\dot{N}_\nu \sim N_N \times \sigma_{\nu N} \times \frac{d^2 N_\nu}{dt dA} \sim \frac{1}{\text{year}} \times \frac{V}{1\text{km}^3}$$



# Fotoni (radiazione elettromagnetica) dallo spazio

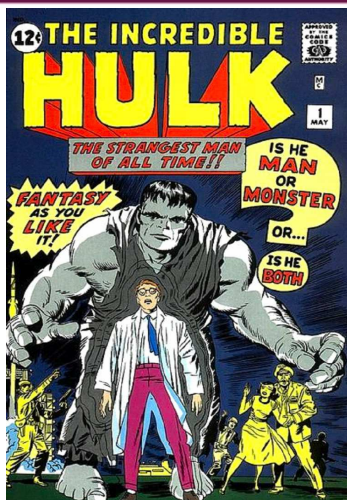
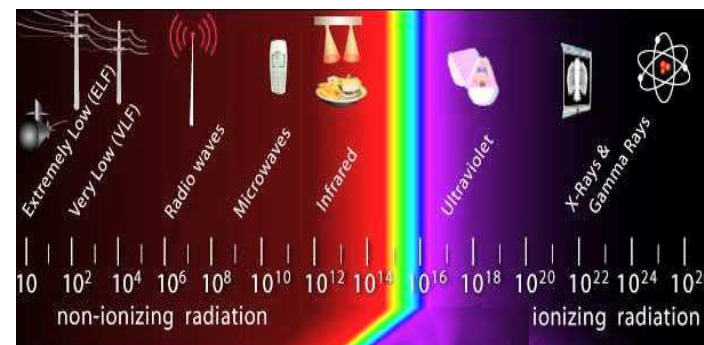
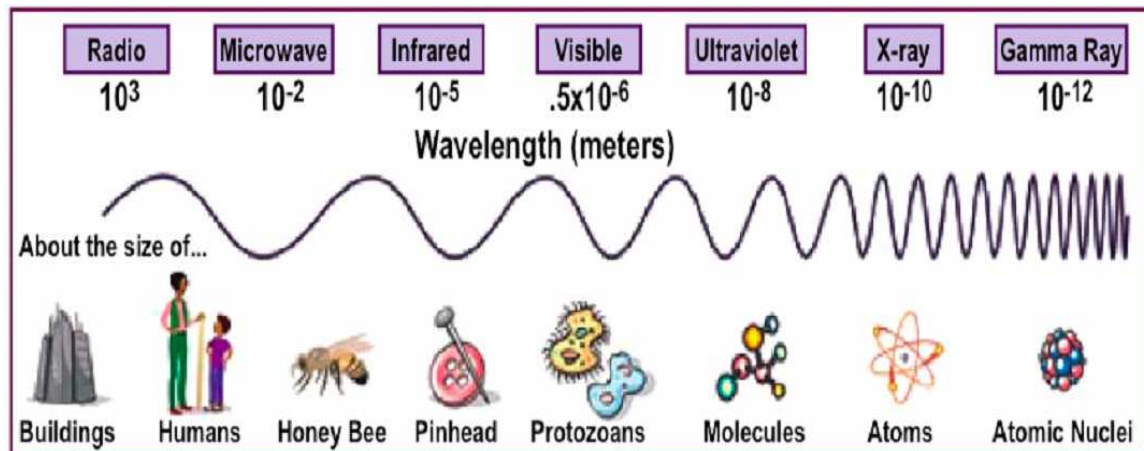
- ~0.1% dei raggi cosmici sono raggi gamma
- Il termine raggi-gamma (gamma-rays) è storico e non descrittivo. Si riferisce a una porzione dello spettro delle onde elettromagnetiche (non era noto nei primi anni del '900 quando fu inventato).

Einstein (1905) light quantum hypothesis: electromagnetic radiation is composed of discrete particles (later called PHOTONS) whose energy is  $E=hc/\lambda$ , where  $h$  is Planck's constant ( $4.1357 \times 10^{-15}$  eV s),  $\lambda$  is the wavelength, and  $c=3 \times 10^8$  m/s.



# I raggi gamma

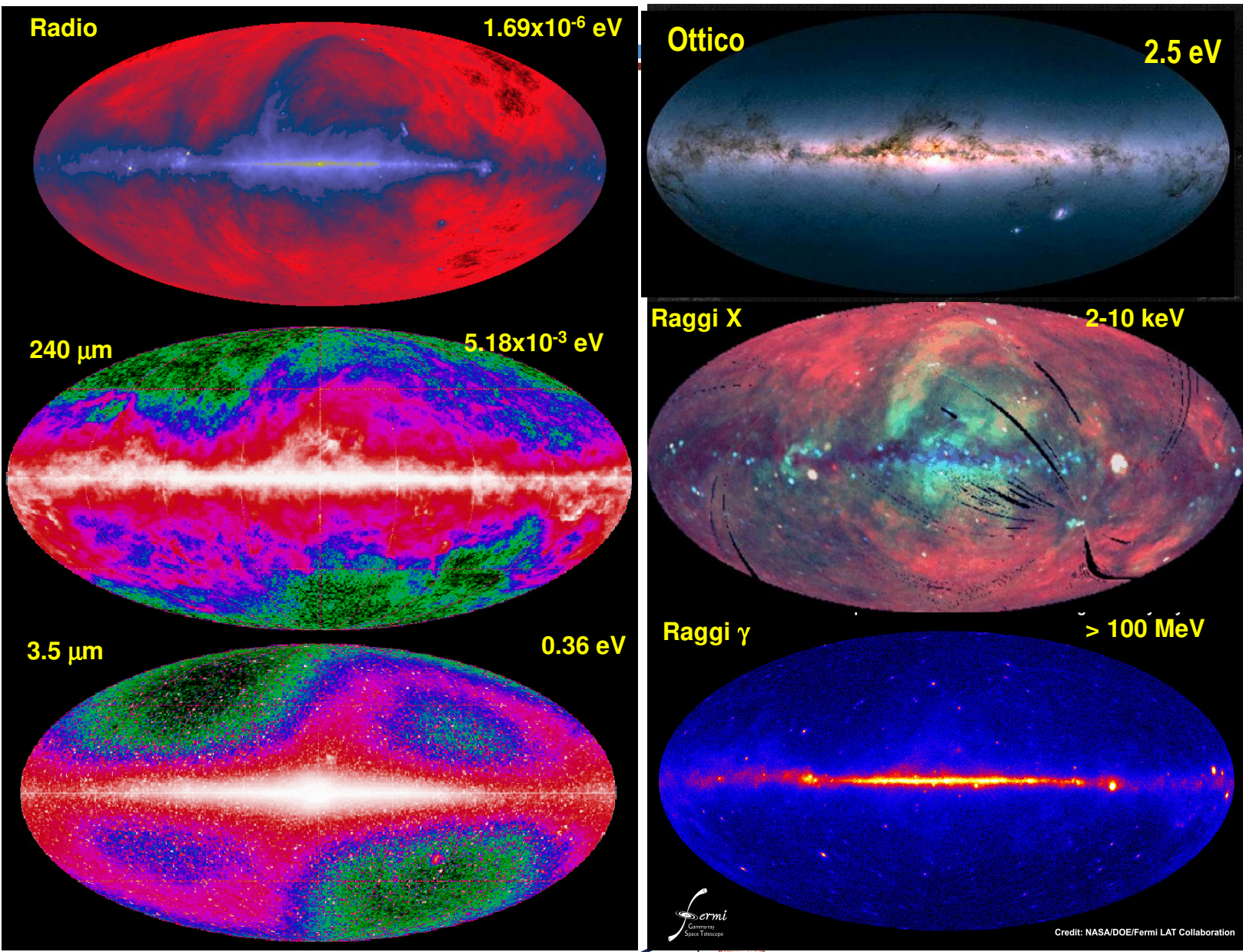
Cosa è un **raggio gamma** ? E' una delle molte forme della luce (**fotoni**). Ogni tipo di luce (fotone radio, infrarosso, ottico, UV, X, gamma) trasporta diverse informazioni. I **raggi gamma** sono il tipo di luce di più **alta energia** che esista. Ci danno informazioni sugli **oggetti** e **fenomeni** più energetici ed estremi del Cosmo.



Che cosa ha trasformato David Banner nell'incredibile Hulk dei fumetti? **I raggi Gamma!**

Perche i raggi gamma soni molto potenti (decadimenti, reazioni ed **esplosioni nucleari**, fenomeni molto energetici prodotti da **pulsar**, **buchi neri**, **shock**, **getti di plasma e gas**, **annichilazione materia-antimateria**, **diffusione Compton inversa**, possibili interazioni prodotte da **materia oscura**, etc.).

# Fotoni: mappe del cielo (astronomia) multi-frequenza



L'aspetto del cielo e quello che vi appare evidente cambiano a seconda della frequenza della radiazione elettromagnetica (e quindi del diverso strumento) con cui lo osserviamo.

# Fermi Gamma-ray Space Telescope

## General Spacecraft Information:

Lifetime	5-10 years
Height	2.9 m (9.2 feet)
Width	1.8 m (4.6 feet) across spacecraft bus
Mass	4,303 kg (9,487 lbs)
Download Link	40 megabits/second
Power	1,500 watts
Launch	June 11, 2008

Launch from Cape Canaveral  
Air Station

11-June-2008 at 12:05PM EDT  
Circular orbit, 565 km altitude (96  
min period), 25.6 deg inclination.



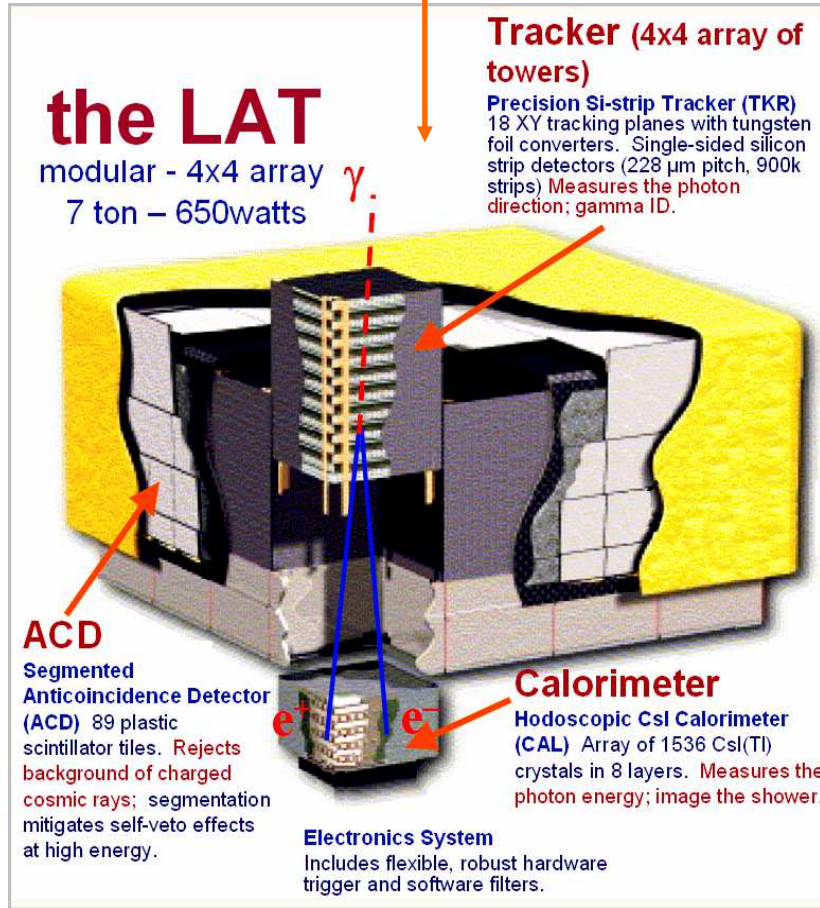
# Fermi Gamma-ray Space Telescope: due strumenti, il LAT ed il GBM

## The Large Area Telescope (LAT)

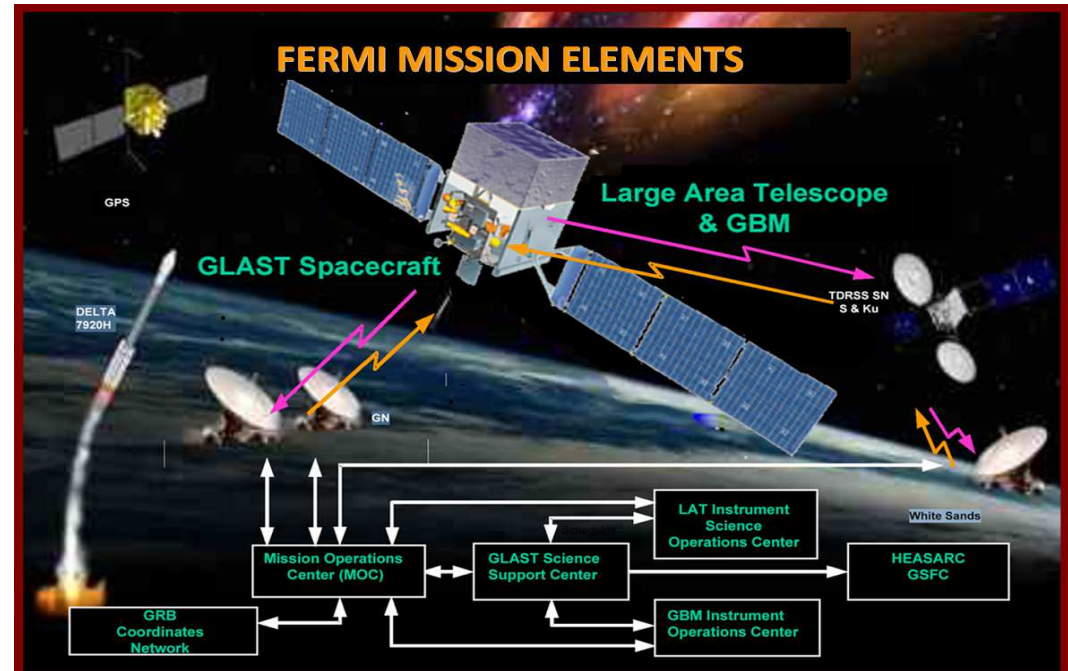
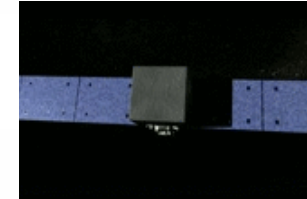
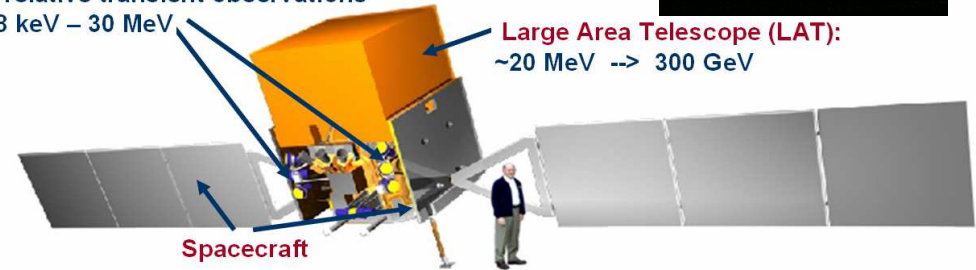
20 MeV - 300 GeV - >2.5 sr FoV

## The Burst Monitor (GBM)

8 keV - 40 MeV - 9.5 sr FoV



**Gamma Ray Burst Monitor (GBM):**  
correlative transient observations  
 $\sim 8 \text{ keV} - 30 \text{ MeV}$



# Fermi LAT: telescopio a produzione di coppie per alte energie tali che $E = mc^2$ diviene importante

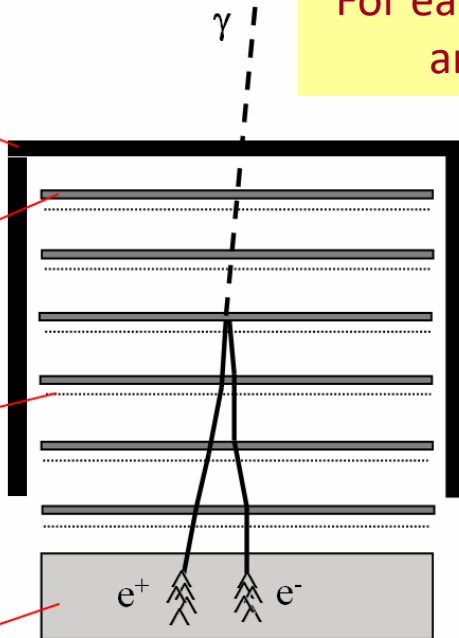
## Principle of Operation

Charged particle anticoincidence detector

Conversion foils

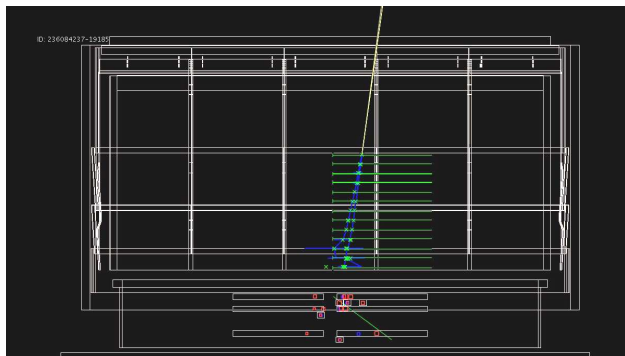
Particle tracking detectors

Calorimeter (energy measurement)



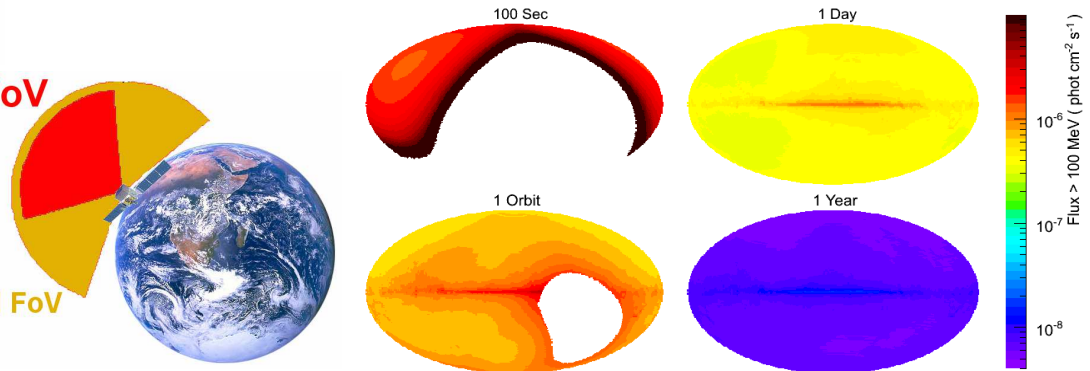
For each event, the LAT measures three quantities: arrival direction, energy, and arrival time.

- ❑ A key point - because gamma rays are detected one at a time like particles, the *Fermi* telescopes do not have high **angular resolution** like radio, optical or X-ray telescopes. **No pretty pictures of individual objects.**
- ❑ Instead, *Fermi* trades resolution for **field of view**. The LAT field of view is 2.4 steradians (about **20%** of the sky), and the GBM field of view is over 8 steradians.
- ❑ The *Fermi* satellite is usually operated in a **scanning mode**, always looking away from the Earth.
- ❑ The **combination of huge field of view and scanning** means that the LAT and GBM view the **entire sky every three hours!**

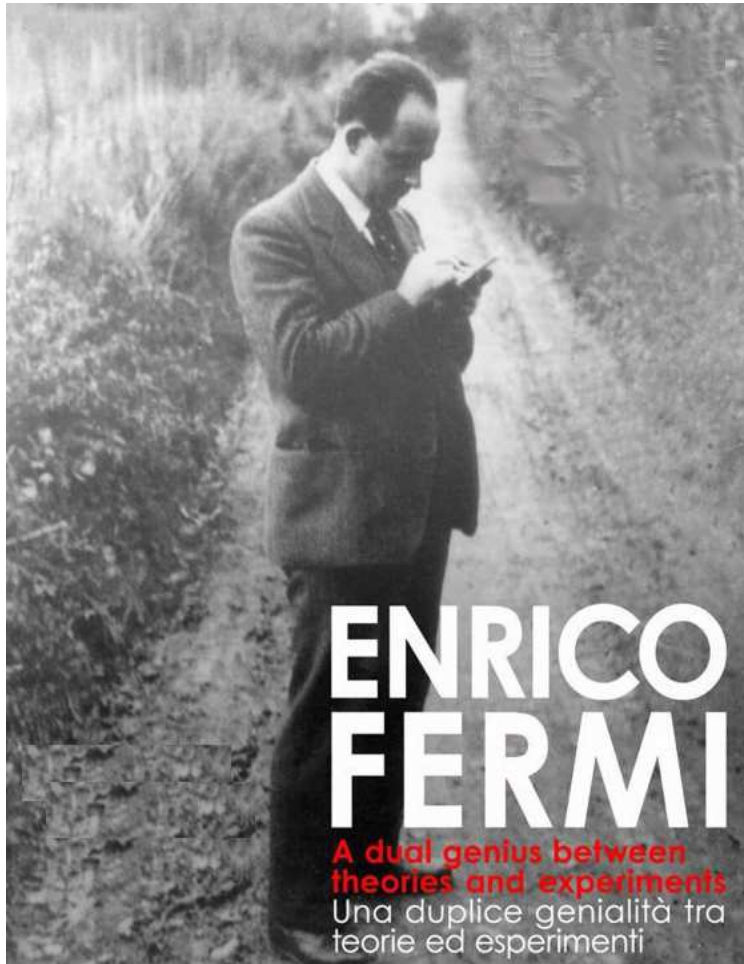


LAT FoV

GBM FoV



# Il nome: *Fermi* Gamma-ray Space Telescope



Enrico Fermi ed i “ragazzi di via Panisperna” a Roma



Il Terzo Fermi Symposium a Roma nel 2011



DoE–NASA partnership internazionale

GLAST rinominato *Fermi* dalla NASA il 26 Agosto 2008

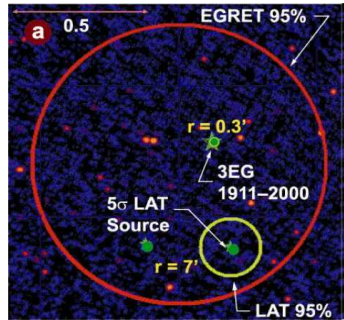
“ Enrico Fermi (1901-1954) ... was the first to suggest a viable mechanism for astrophysical particle acceleration. This work is the foundation for our understanding of many types of sources to be studied by the Fermi Gamma-ray Space Telescope, formerly known as GLAST. ”

“ Questo nuovo nome e' stato selezionato con un sondaggio pubblico realizzato dalla NASA e che ha ricevuto piu' di 12 mila risposte. Oltre ad avere un legame diretto con la scienza dei raggi-gamma della nostra nuova missione, **Fermi ha un significato speciale per il DoE, l'ASI e l'INFN, tre agenzie che hanno maggiormente contribuito alla missione**”

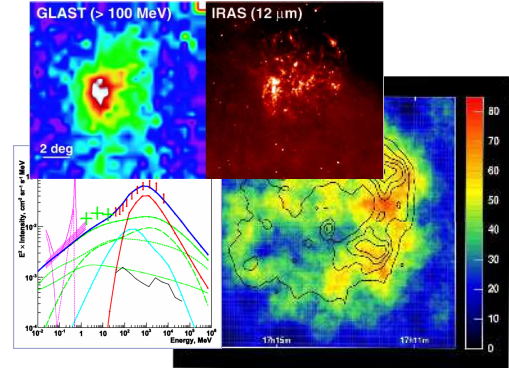
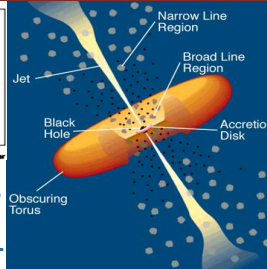
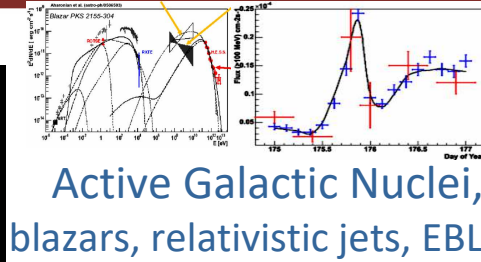
Jon Morse  
Director of Astrophysics Division, NASA HQ, Washington DC



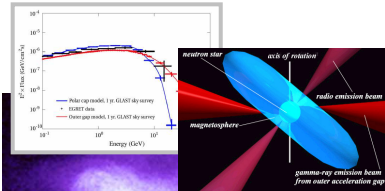
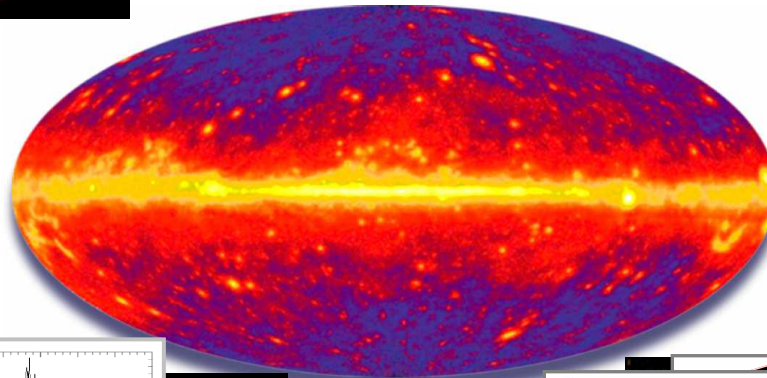
# Lo zoo dell'astronomia gamma sopra 100 MeV



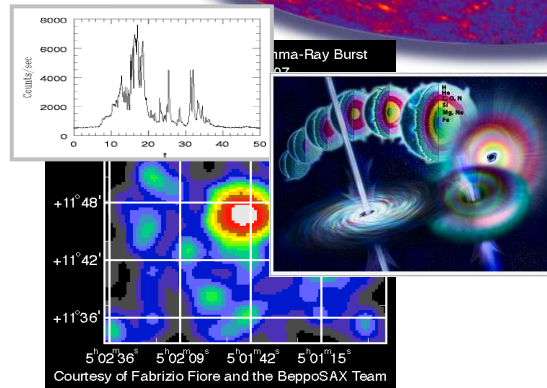
Unidentified sources



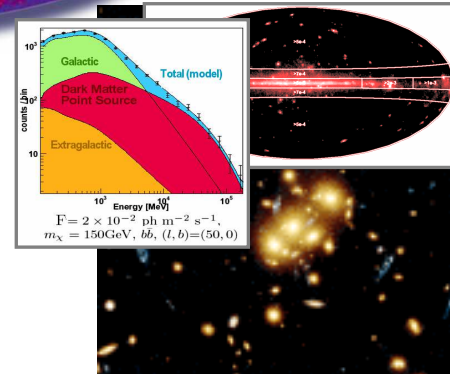
Diffuse, Molecular Clouds, SNR, Cosmic ray accelerat.



Pulsars



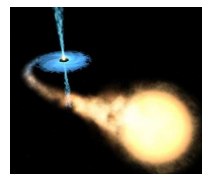
Gamma Ray Bursts



Dark matter, cosmology, particle physics



Solar flares



Microquasars

0.01 GeV

0.1 GeV

1 GeV

10 GeV

100 GeV

1 TeV

# Cosa ci dice il cielo nei raggi gamma

## Gamma rays as Signatures:

- Signatures of Extreme Systems: Energy Sources
- Signatures of Exotic Particles: Dark Matter Searches

## Gamma rays as Tracers:

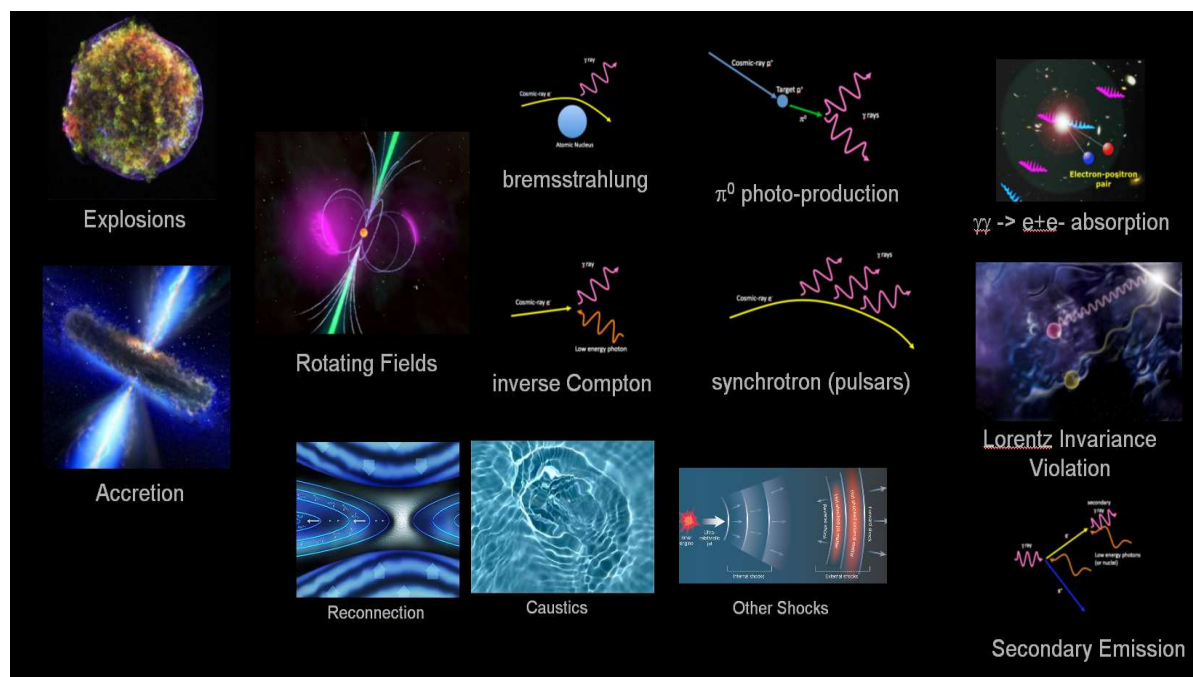
- Tracing Cosmic Rays & Targets: Emission Mechanisms

## Gamma ray Sources as Probes:

- Probing Extreme Systems: Acceleration Mechanisms
- Probing the Medium: Foreground / Propagation Effects

## SOME SCIENCE MENU:

- Active galactic nuclei (blazars, quasars, radiogalaxies, etc.)
- Gamma ray bursts
- Supernova remnants
- Pulsars
- X-ray binaries and microquasars
- Solar flares and solar system objects
- Normal galaxies, clusters of galaxies
- Unidentified sources/new populations
- Study of diffuse gamma-ray emission
- Cosmic-ray acceleration & propagation
- Study of Extra-galactic background light (EBL)
- Search for Particle Dark matter/ tests of new physics
- Test Quantum Gravity
- Serendipity (survey/monitor observing mode)

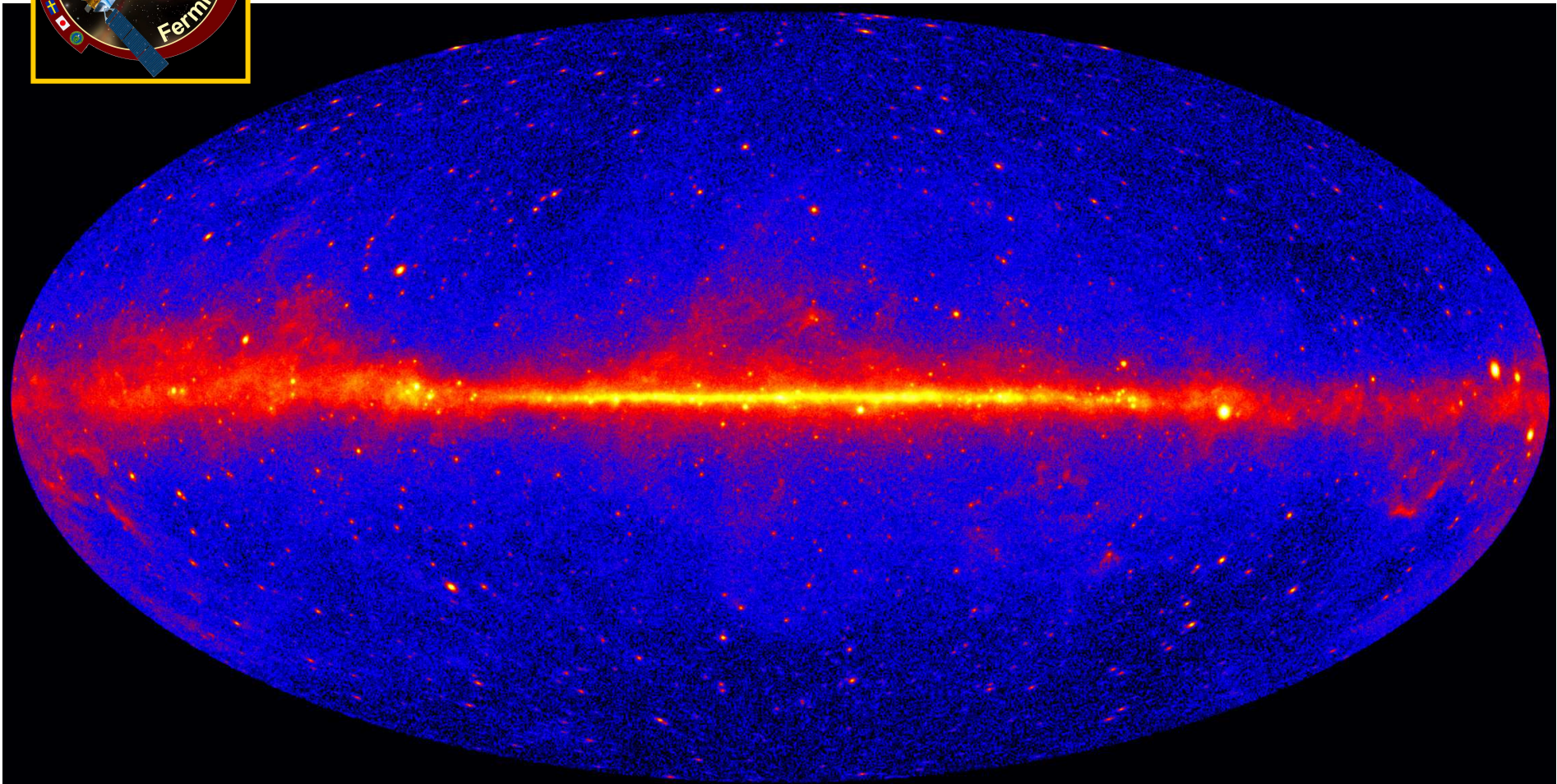


**L'osservazione del cielo nei raggi-gamma interessa entrambe le comunità della fisica delle particelle delle alte energie e dell'astrofisica delle alte energie.**

# Il cielo nei raggi gamma visto dall'esperimento *Fermi* LAT



Il cielo nei raggi gamma in coordinate galattiche (piano della nostra galassia Via Lattea è la fascia centrale) con scala colori arbitrari per l'intensità (luminosità). Mappa ottenuta accumulando i primi 15 anni di dati (fotoni raggi gamma) rivelati dal *Fermi* LAT.

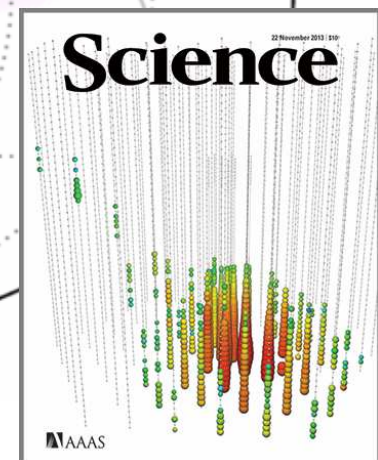
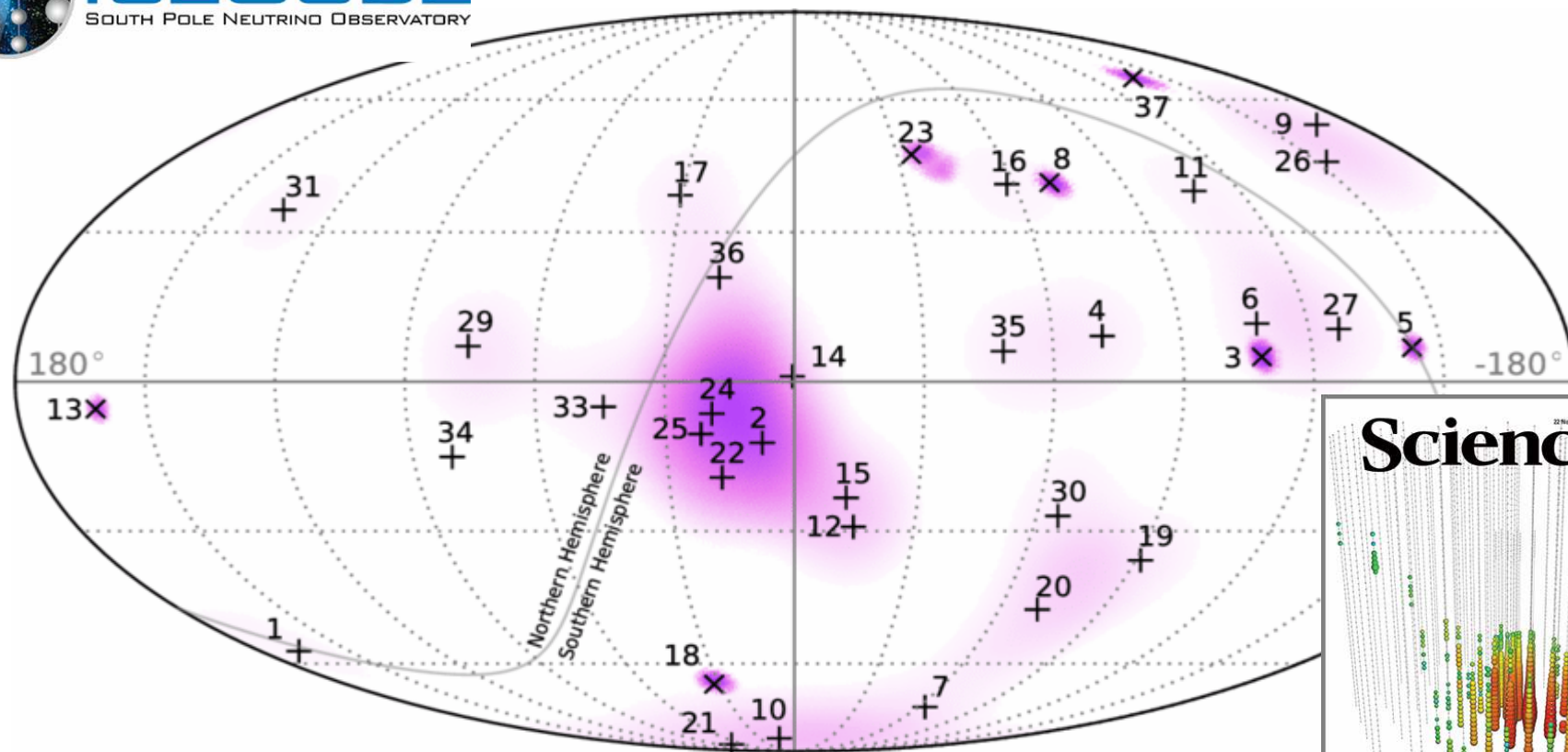


# Il cielo dei neutrini visto dall'esperimento IceCube

I primi 37 eventi di neutrini cosmici (provenienti dallo spazio ma non dal Sole) rivelati dall'esperimento IceCube dal 2010 al 2012 posizionati nel cielo con la loro incertezza di posizione (nuvola rosa) in questa mappa in coordinate galattiche (piano della nostra galassia Via Lattea è l'equatore centrale della mappa).

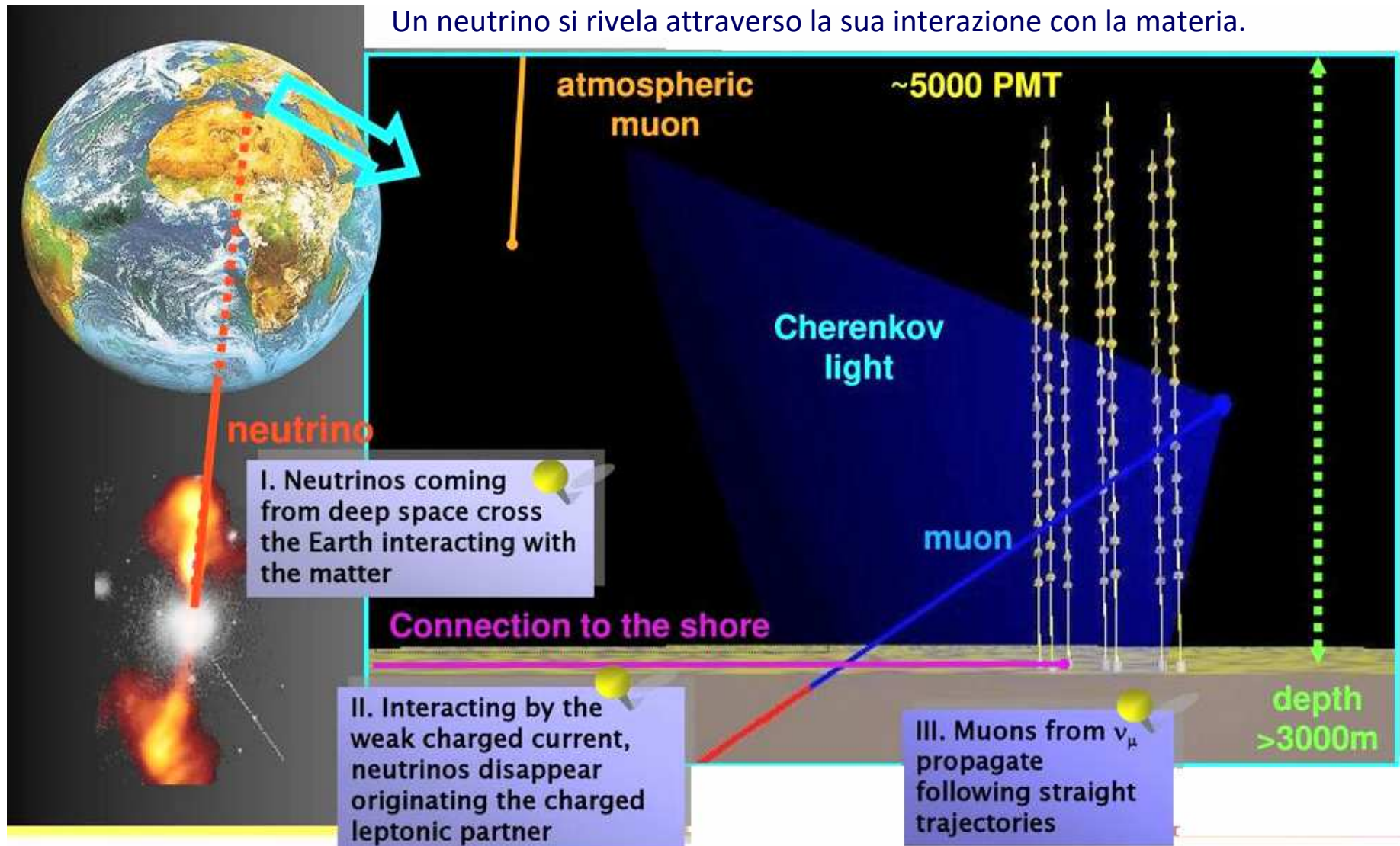


**ICECUBE**  
SOUTH POLE NEUTRINO OBSERVATORY



# Principio di rivelazione

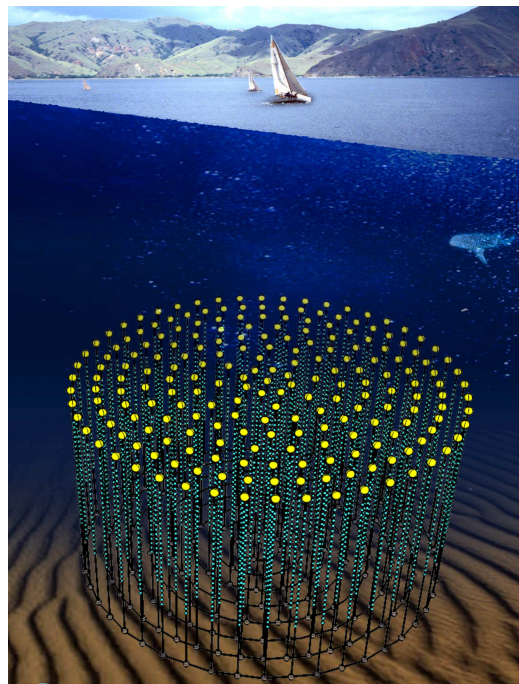
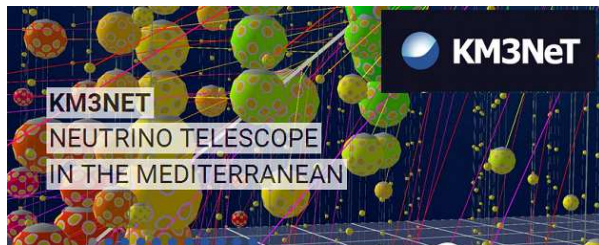
Un neutrino si rivela attraverso la sua interazione con la materia.



# L'esperimento KM3NeT nel Mar Mediterraneo

- ❑ **KM3NeT**: telescopio con migliaia di sensori ottici dedicato ai neutrini cosmici di prossima generazione ed ampio alcuni chilometri cubi, sotto il mar Mediterraneo (in punto profondo alcuni km, al largo di capo Passero, Sicilia).
- ❑ Studio dell'Universo e del cielo cercando i neutrini cosmici da sorgenti astrofisiche diverse dal Sole, come supernovae, gamma-ray bursts, blazar e AGN brillanti nei raggi gamma, etc. (strumento **ARCA**)
- ❑ Studio delle proprietà dei neutrini usando quelli molto numerosi che sono generati dall'atmosfera terrestre (strumento **ORCA**).

❑ La struttura ospiterà inoltre strumentazione per scienze della terra e del mare, e per monitoraggio a lungo termine degli ambienti di acque profonde e del fondale marino.



## Come il telescopio per neutrini spierà i capodogli

**IL PROGETTO KM3NET**  
Realizzato in partnership da Italia, Cipro, Francia, Germania, Grecia, Irlanda, Olanda, Regno Unito, Romania e Spagna

155 torri osserveranno i neutrini cosmici, particelle elementari ad altissima energia sulla cui origine e natura ci sono ancora molti interrogativi aperti

I neutrini di alta energia provenienti dal centro della nostra galassia possono essere la chiave per scoprire misteriose sorgenti di raggi cosmici nel cuore della Via Lattea

I neutrini studiati sono quelli che attraversano l'intero pianeta prima di raggiungere KM3Net. Lo spessore della Terra e la massa d'acqua sovrastante fungono da schermo, impedendo alle altre particelle meno penetranti di arrivare fino al telescopio

**L'APPARATO DI ASCOLTO**  
I sensori acustici sono "ospitati" su una torre ancorata a 3.500 m di profondità e che si alza dal fondale per 450 metri

14 sensori acustici situati sulla torre prototipo del progetto KM3NET permettono di ascoltare i rari cetacei

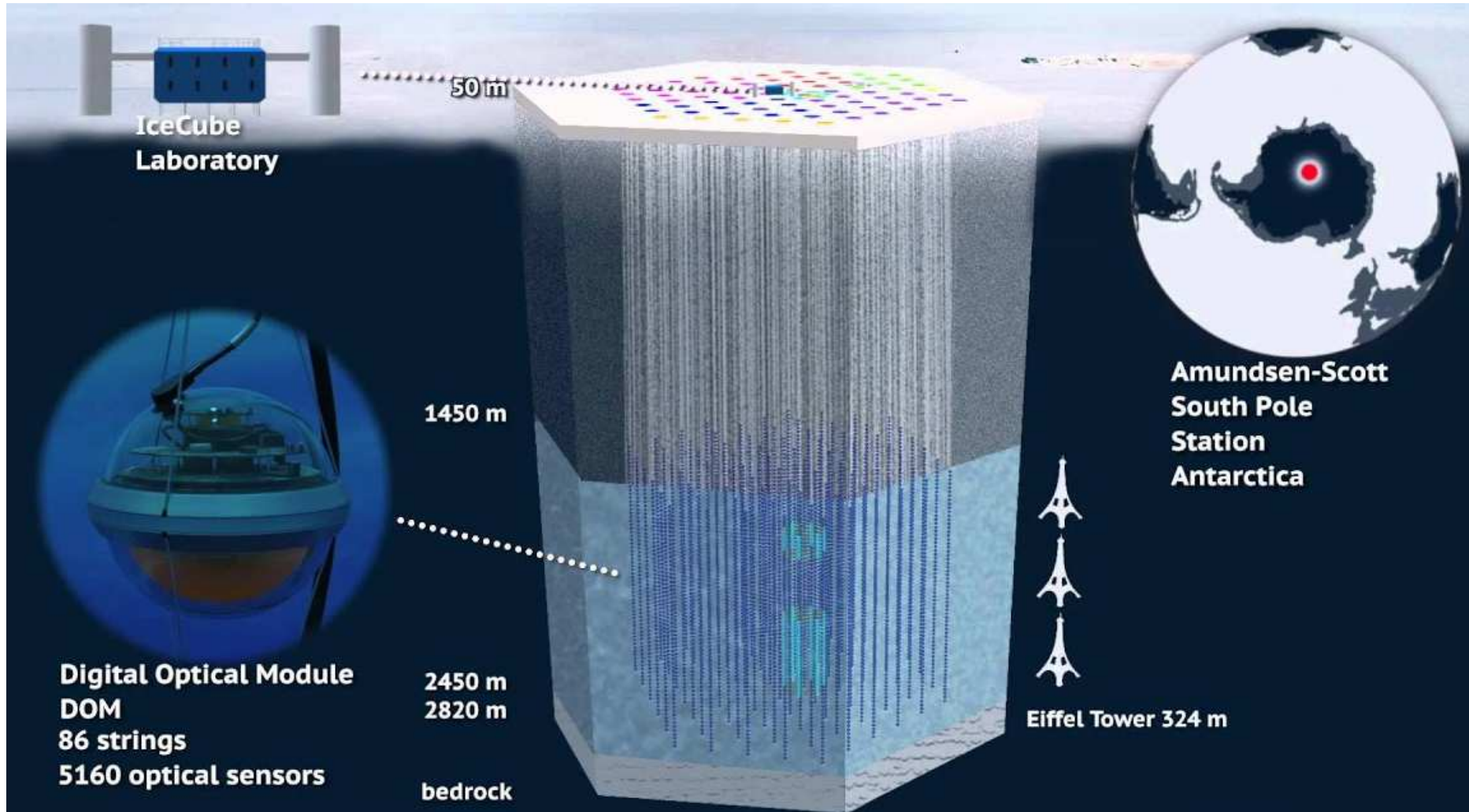
**DOVE SI TROVA KM3NET**  
80 km a sud di Capo Passero

**CAPODOGLI**  
Sono animali appartenenti all'ordine dei cetacei. È una specie ad alto rischio di estinzione, importantissima per l'equilibrio ecologico del Mediterraneo

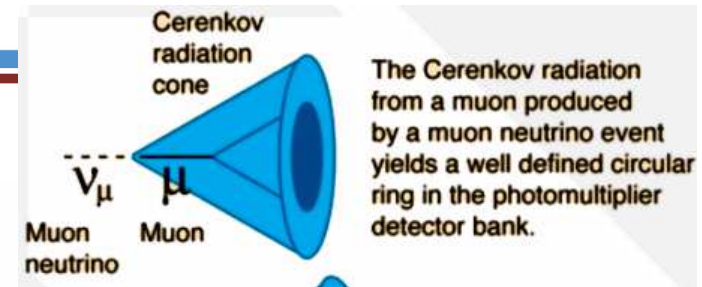
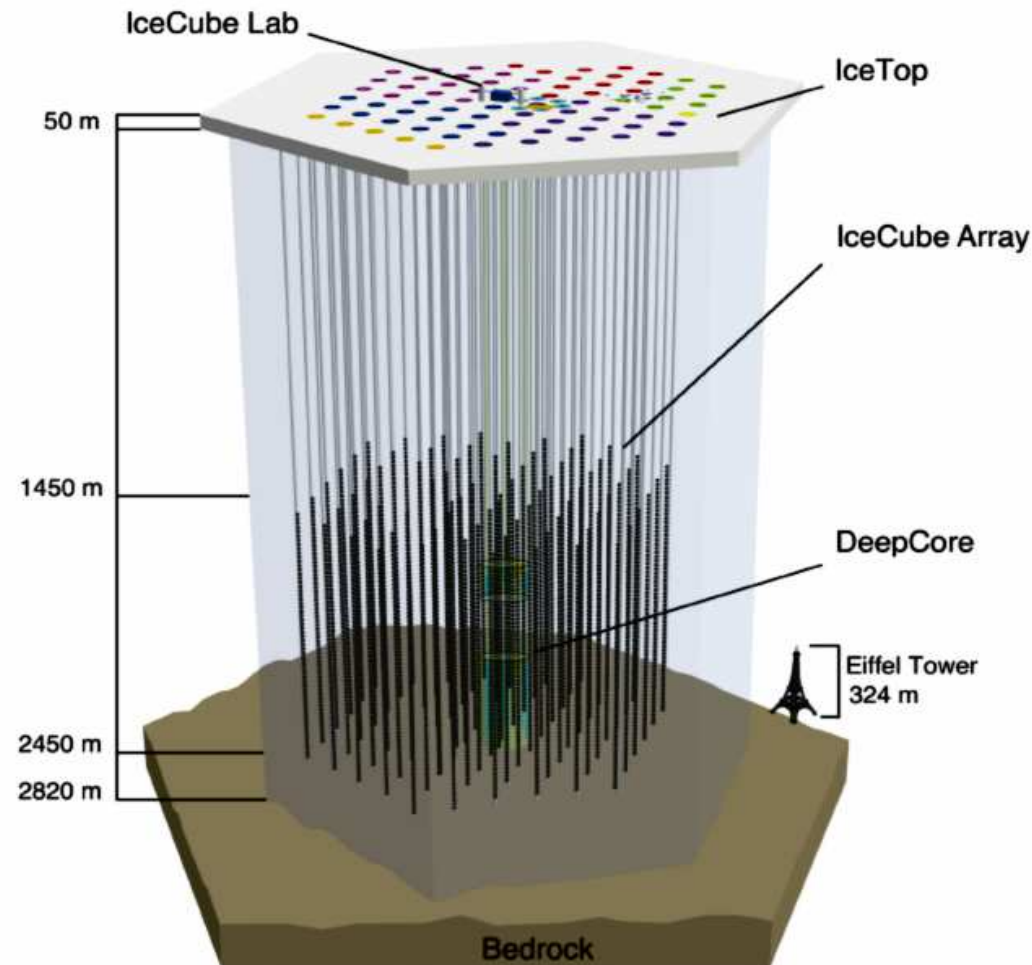
Le rilevazioni permetteranno di segnalare la presenza dei cetacei alle navi che rischiano di incrociare la loro rotta o che producono un inquinamento acustico pericoloso

**INFN**  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
Integrata a cura di «centimetri»

# L'esperimento IceCube in Antartide



# L'attuale esperimento IceCube in Antartide



- Giga-ton **Cherenkov telescope** at the South Pole
- 60 digital **optical modules** (DOMs) per string
- **78 IceCube strings**  
125 m apart on triangular grid
- **8 DeepCore strings**  
DOMs in particularly clear ice
- **81 IceTop stations**  
two tanks per station, two DOMs per tank
- 7 year construction phase (2004-2011)
- price tag: **€0.25 per ton**



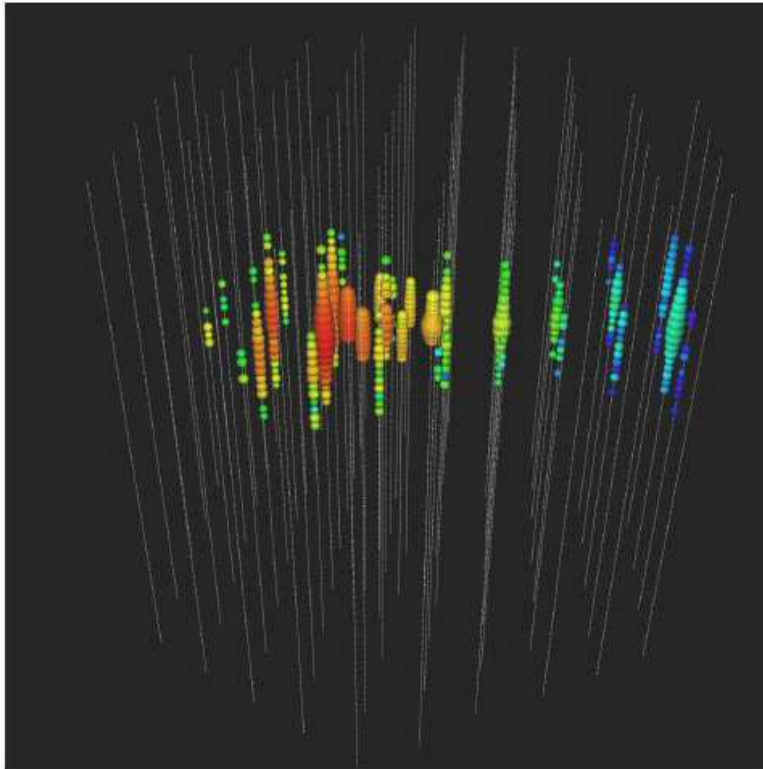
# Esperimento IceCube in Antartide



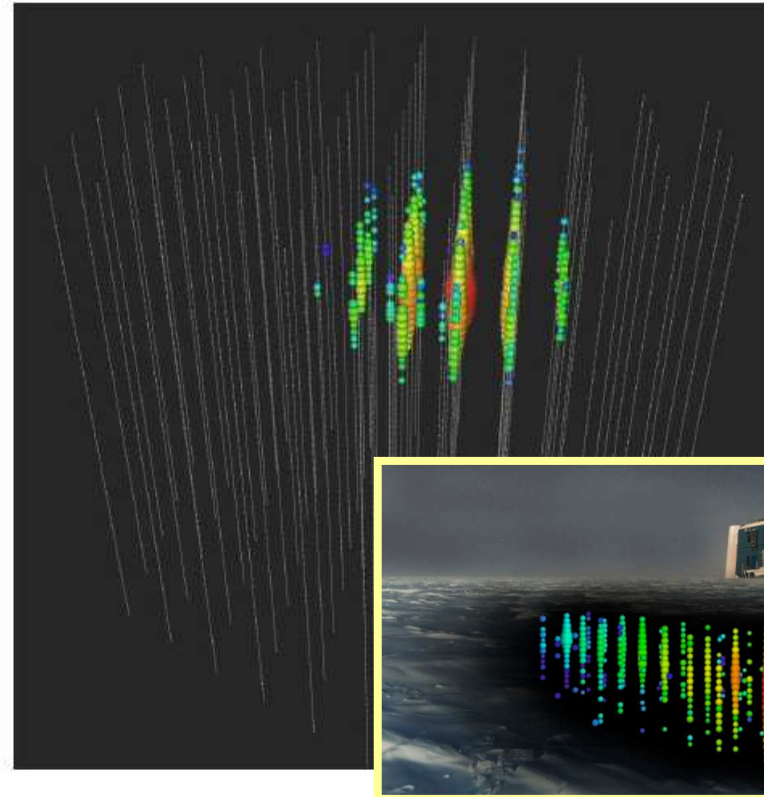
# 2013: prima storica rivelazione di un neutrino cosmico (non dal Sole) ad altissima energia

First observation of high-energy astrophysical neutrinos by IceCube!

“track event” (from  $\nu_\mu$  scattering)



“cascade event” (from all flavours)

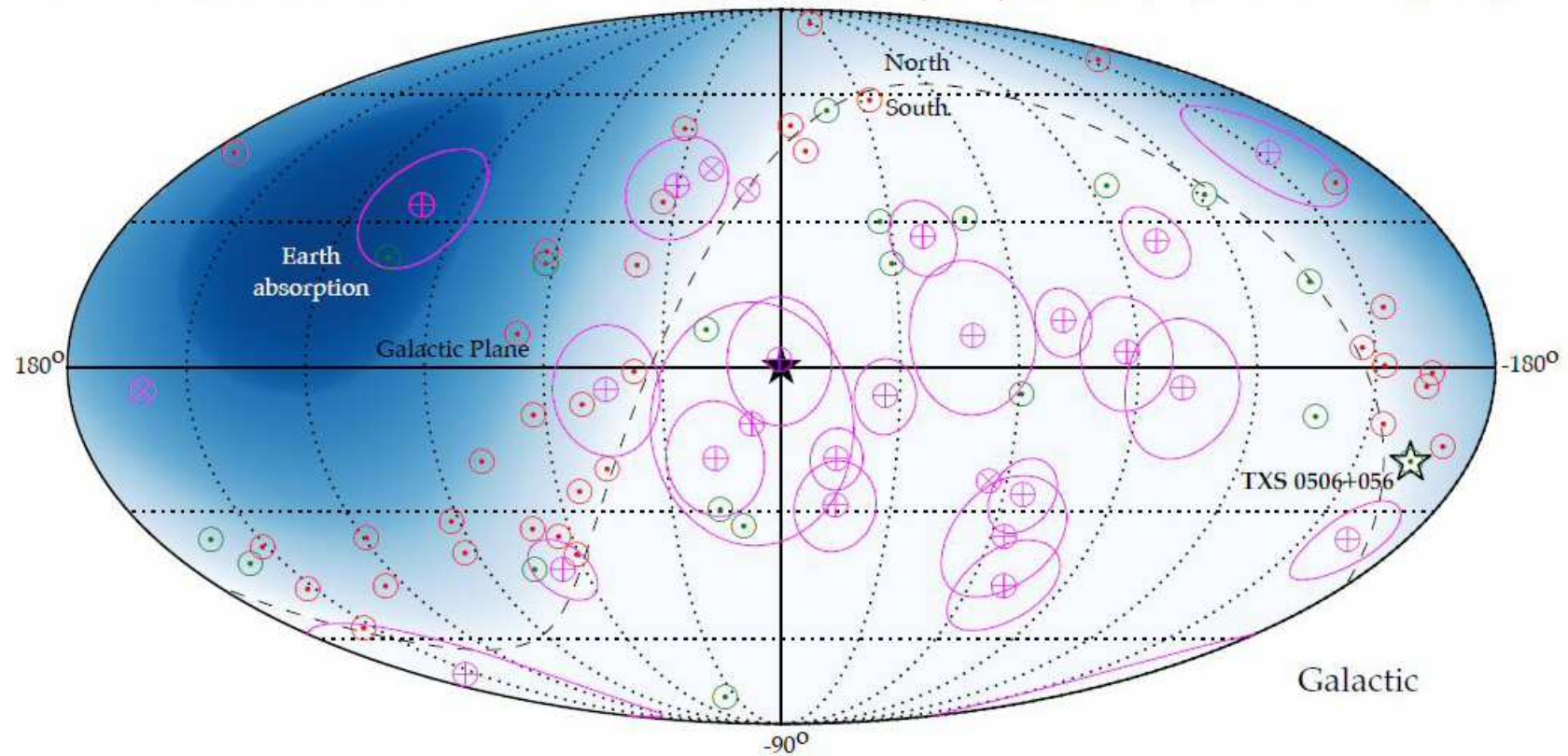


[“Breakthrough of the Year” (Physics World), Science 2013]  
(time-dependent neutrino signal: early to late light detection)

# Mappa del cielo dei neutrini rivelati da IceCube

## Arrival Directions of Cosmic Neutrinos

Most energetic neutrino events (HESE 6yr (magenta) &  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$  8yr (red) + public alerts (green))



No significant correlation of diffuse flux with known sources, except TXS 0506+056.

# Astronomia coi neutrini dall'Antartide

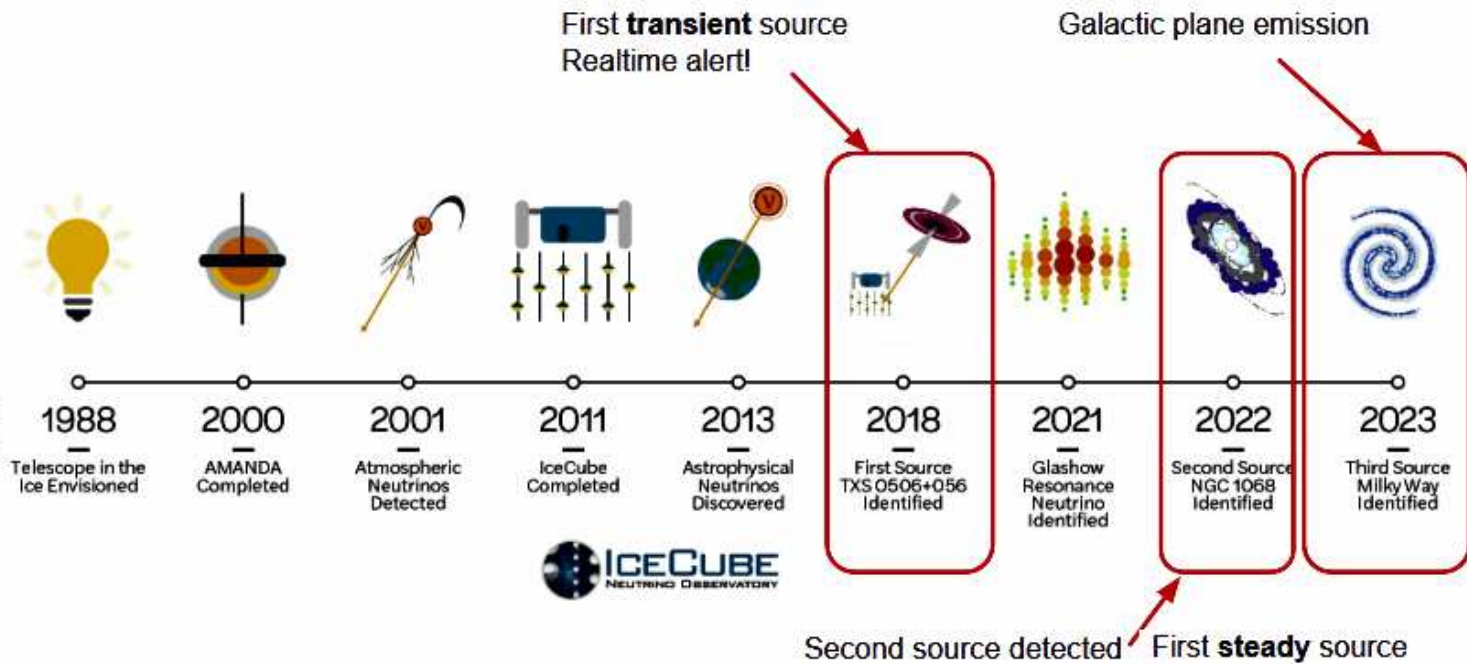
One of IceCube's major goal is finding the origins of high energy neutrinos

**Challenge:** background dominated analysis

For 1 astrophysical  $\nu$ :

- $\sim 10^9$  Atmospheric  $\mu$
- $\sim 10^3$  Atmospheric  $\nu$

## A History of Neutrino Astronomy in Antarctica



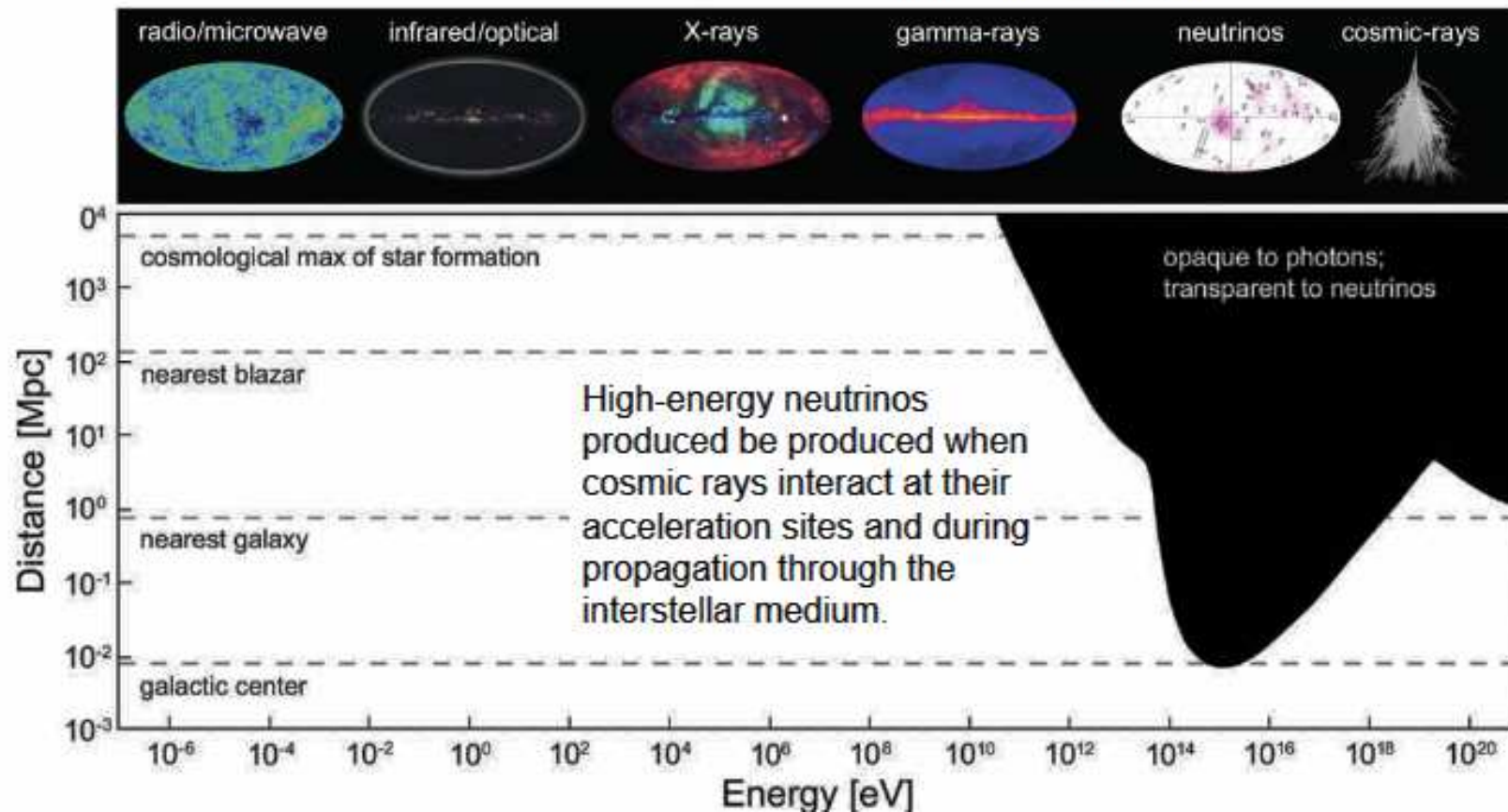
# Astronomia coi neutrini

## Neutrino astronomy

The necessary neutrino messenger

At the highest energy, **photons are absorbed** in interactions with the CMB photons.

Trajectory from **charged particles are deflected** by magnetic fields



# Neutrini cosmici, raggi cosmici e raggi gamma

Vari modelli di produzione di neutrini astrofisici (cosmici) ad altissime energie (Very/Extreme high-energy, VHE/EHE neutrinos):

□ Modelli di accelerazione dei raggi cosmici in sorgenti di raggi gamma e dotate di getti (come nuclei galattici attivi AGN in particolare i blazars, i gamma-ray bursts, le stelle binarie di alta massa e compatte, i microquasar etc.)

- neutrini sono prodotti dentro la sorgente che produce raggi cosmici;
- mesoni sono prodotti da interazioni di raggi cosmici con fotoni (radiazione elettromagnetica):

□ Modelli di serbatoi di raggi cosmici (galassie Starburst ricche di gas e polveri e con intensa formazione stellare, gruppi e ammassi di galassie, etc.)

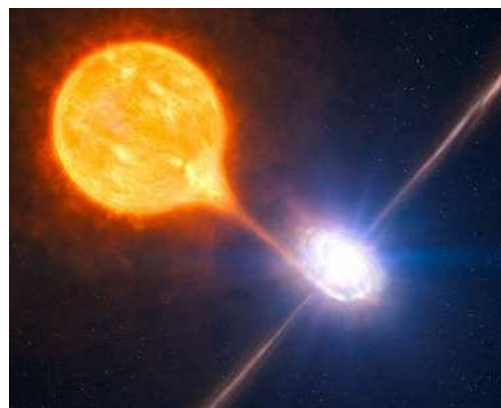
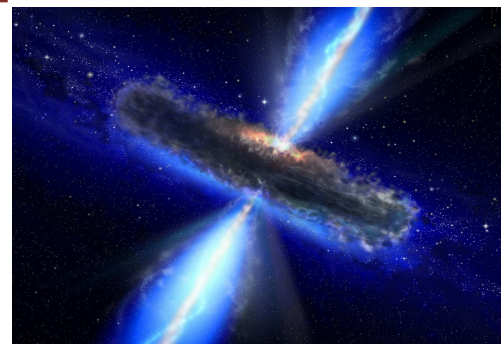
- neutrini prodotti mentre essi sono confinati dentro l'ambiente che circonda la sorgente di raggi cosmici;
- prodotti da collisioni inelastiche adro-nucleari

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu + \nu_\mu$$



$$pp \rightarrow \begin{cases} \pi^0 \rightarrow \gamma \gamma \\ \pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \rightarrow e^+ \nu_e \nu_\mu \bar{\nu}_\mu \\ \pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \bar{\nu}_\mu \nu_\mu \end{cases}$$



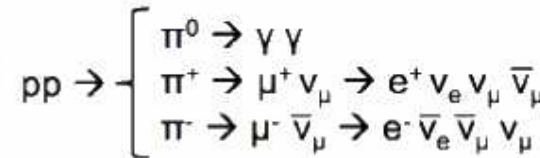
# Neutrini cosmici, raggi cosmici e raggi gamma

Neutrini very-high-energy da processi **adronucleare** e **fotoadronico**.

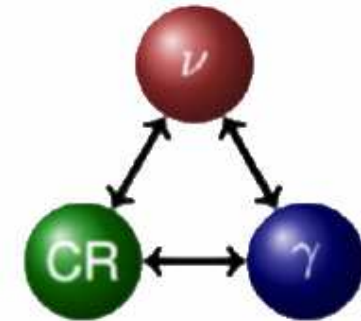
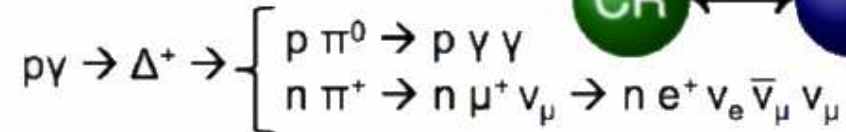
❑ NB: **relazione multi-messaggero (gamma-neutrino)** più complicata;

❑ NB: raggi gamma non solo da processi adronici.

▪ **Hadronuclear**



▪ **Photohadronic**



**Sorgenti astrofisiche candidate:**

- ❑ Buchi neri supermassicci attivi che accrescono ed emettono getti ( $M^{BH} \sim 10^{8-9} M_{sun}$ ) → AGNs, blazars
- ❑ Esplosioni più luminose ( $L \sim 10^{52}$  erg/s) → GRBs (SN, FRB?)
- ❑ I campi magnetici più intensi ( $B \sim 10^{15}$  G) → Magnetars (binarie X-ray, young stellar objects ?)
- ❑ I più grandi oggetti legati gravitazionalmente → ammassi e gruppi di galassie

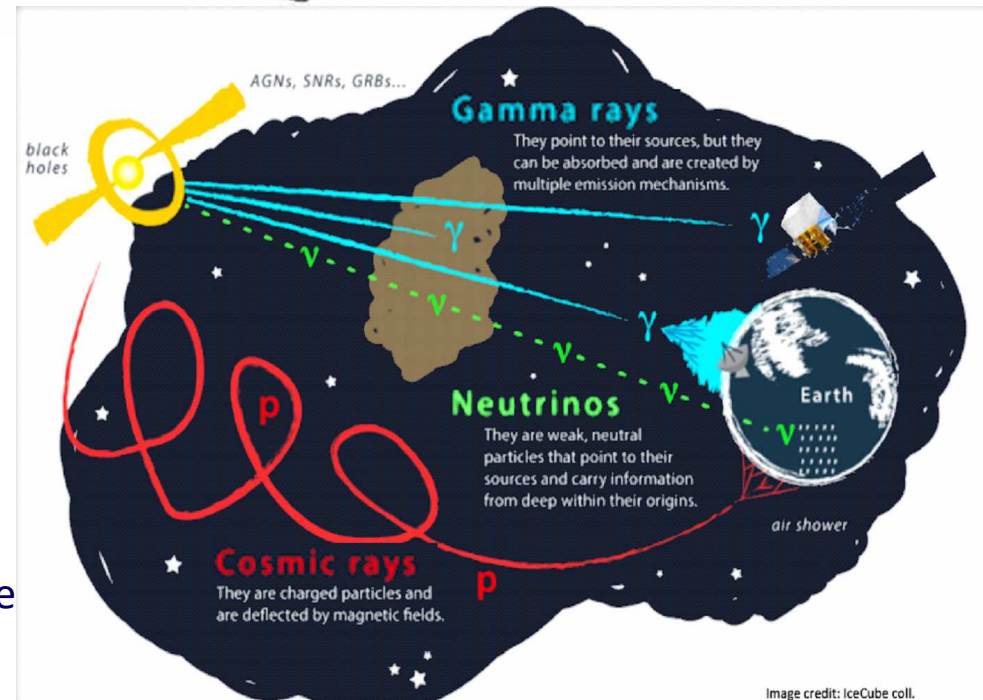
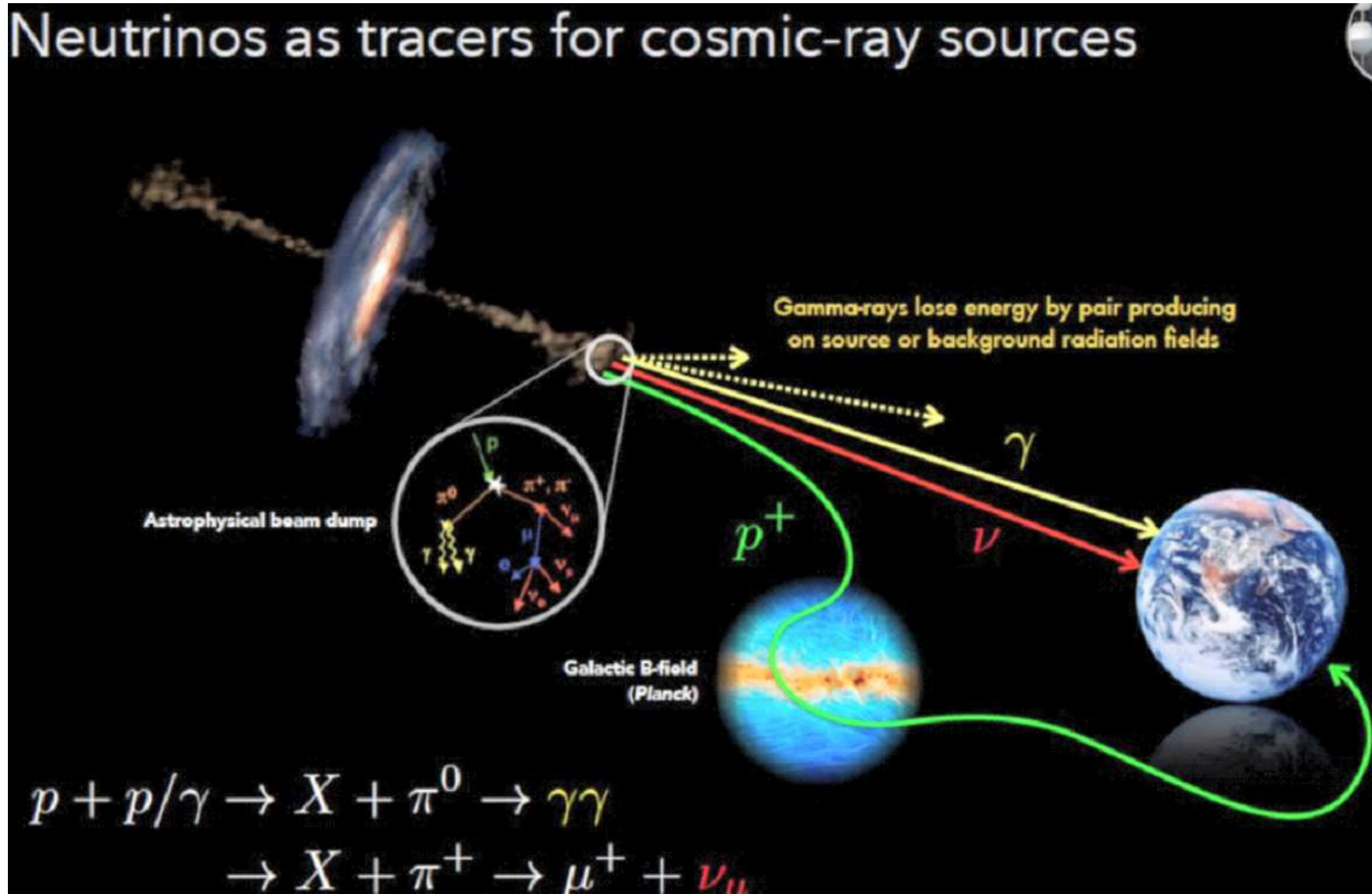


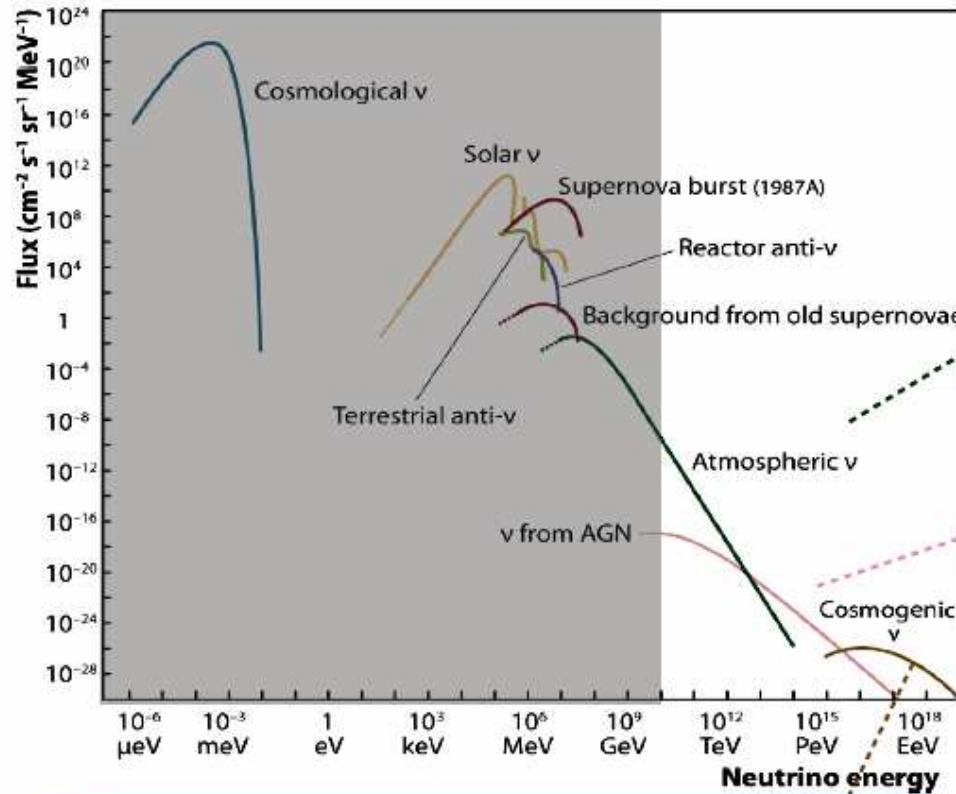
Image credit: IceCube coll.

# Neutrini cosmici, raggi cosmici e raggi gamma





# Spettro dei neutrini dallo spazio

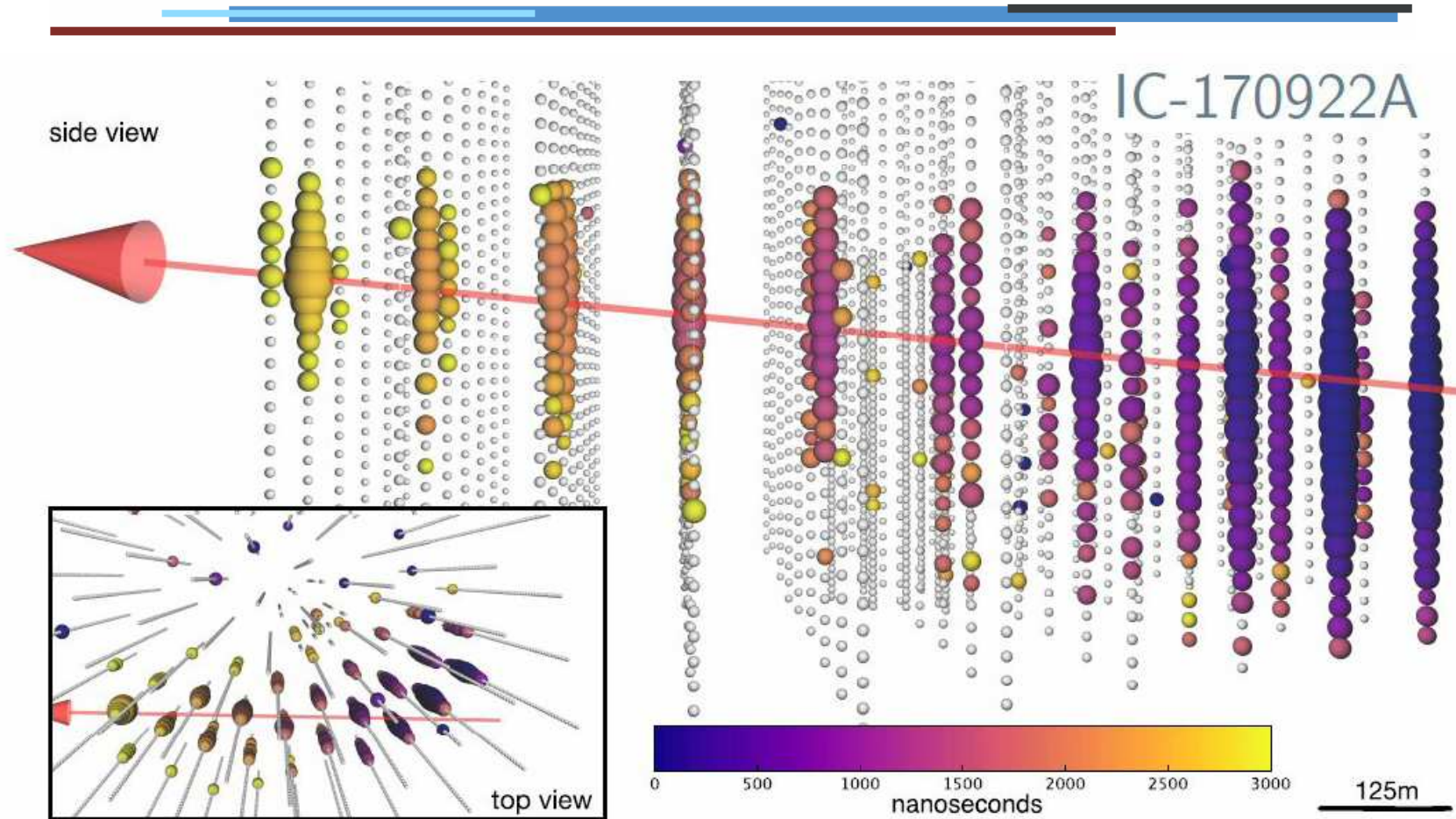


Cosmic rays interacting in the atmosphere producing charged and neutral mesons

Astrophysical beam dumps  
high-energy cosmic rays interacting with gas or radiation

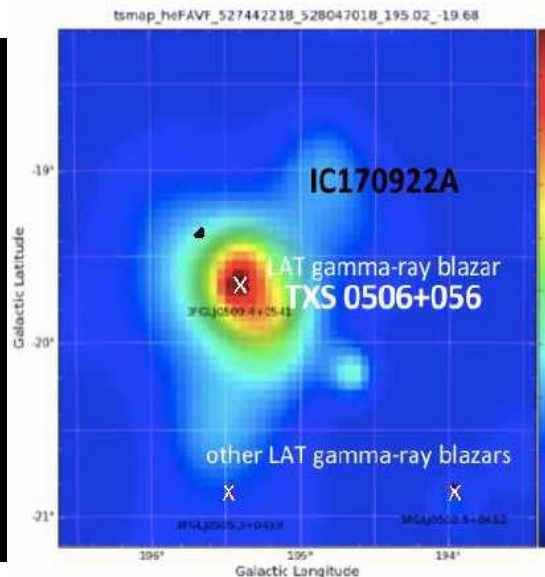
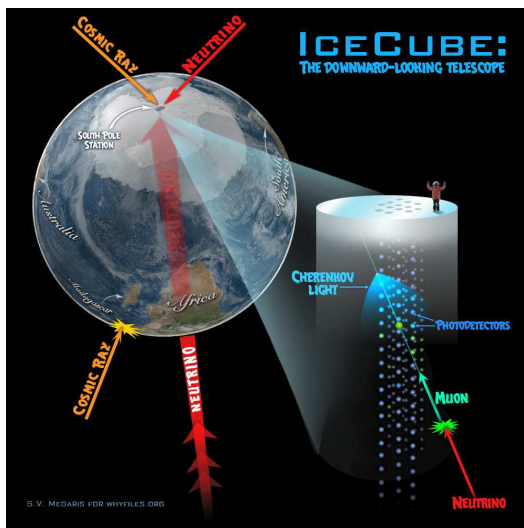
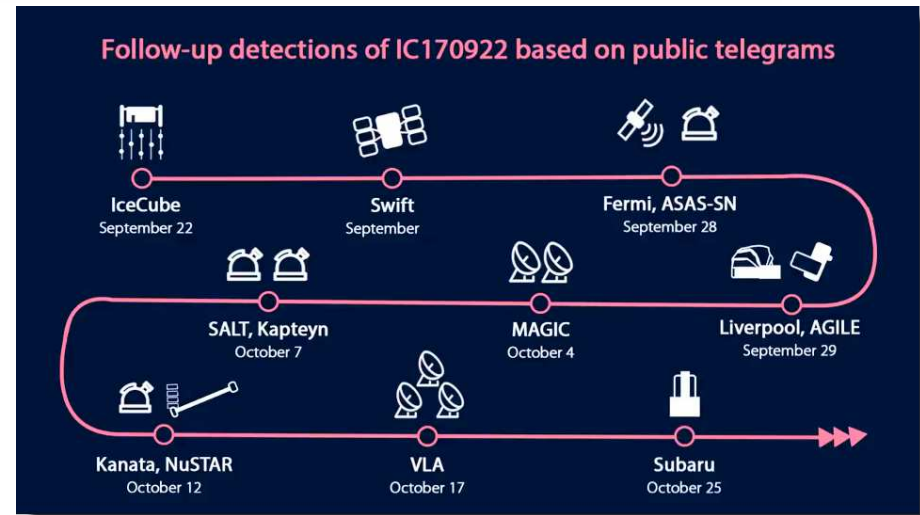
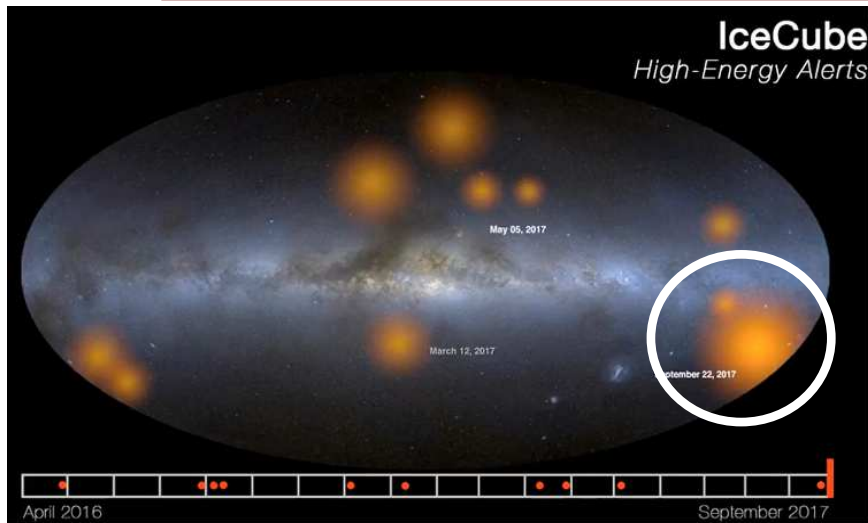
Ultra high-energy cosmic rays interacting with the Cosmic Microwave Background

# Un neutrino di IceCube molto importante: IC 170922A



Up-going muon track ( $5.7^\circ$  below horizon) observed on September 22, 2017.  
The best-fit neutrino energy for an  $E^{-2}$ -spectrum is 311 TeV.

# Il neutrino IC 170922A ed il blazar gamma TXS 0506+056



**Fermi-LAT detection of increased gamma-ray activity of TXS 0506+056, located inside the IceCube-170922A error region.**

**ATel #10791**

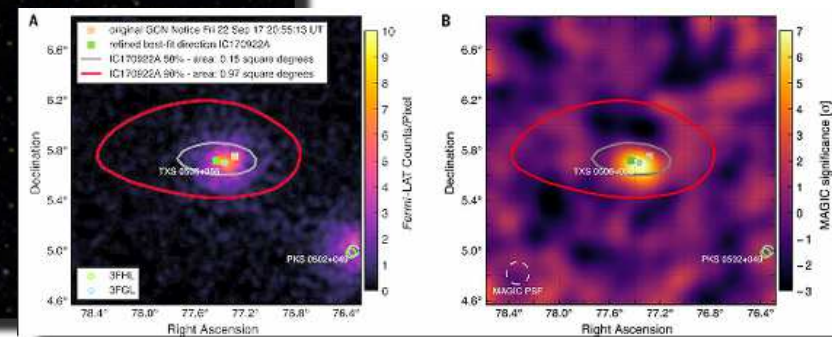
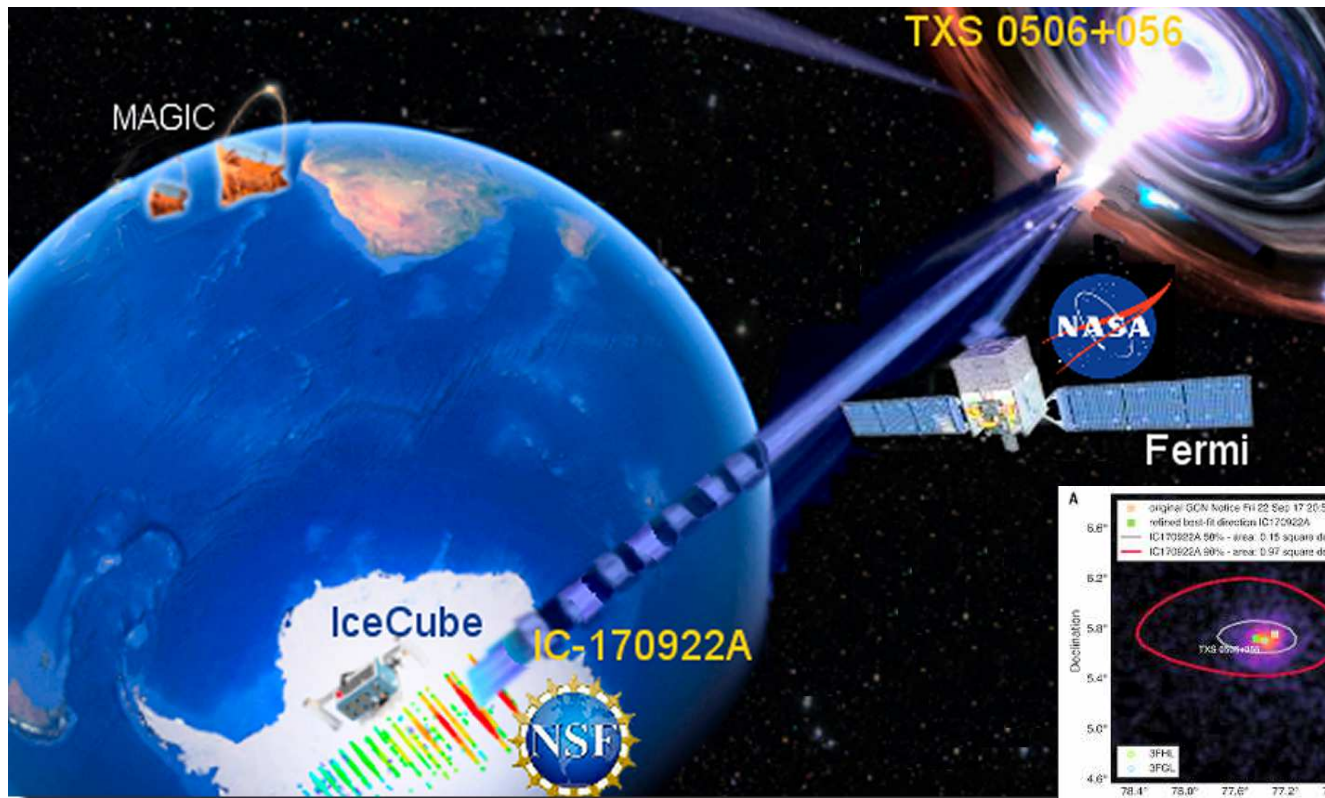
*Yasuyuki T. Tanaka (Hiroshima University),  
Sara Buson (NASA/GSFC),  
Daniel Kocevski (NASA/MSFC)  
on behalf of the Fermi-LAT collaboration  
on 28 Sep 2017; 10:10 UT*



# Blazar *Fermi* TXS 0506+056 e IceCube neutrino IC 170922A : copertina di science e conferenza stampa alla NSF

Gamma-ray blazar object **TXS 0506+056** ( $z=0.3365$ , a.k.a. RX J0509.3+054, ZS 0506+056) detected in high state by the **NASA Fermi gamma-ray space telescope** coincident with 290TeV neutrino IC170922A detected by the **IceCube experiment** at the **Amundsen-Scott South Pole Station**, announced on **July 12, 2018** with a **press conference at US National Science Foundation NSF** in Washington. Also cover in the Science journal.

□ Paper: Aartsen+ 2018, "Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A" *IceCube Collab., Fermi-LAT Collab., MAGIC, AGILE, ASAS-SN, HAWC, H.E.S.S., INTEGRAL, Kanata, Kiso, Kapteyn, Liverpool Tel., Subaru, Swift, NuSTAR, VERITAS, VLA/17B-403 teams. Science, 361, eaat1378*



# Blazar *Fermi* TXS 0506+056 e IceCube neutrino IC 170922A : copertina di science e conferenza stampa alla NSF

## First Multi-Messenger Blazar: TXS 0506+056



### Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A

The IceCube Collaboration, *Fermi*-LAT, MAGIC, *AGILE*, ASAS-SN, HAWC, H.E.S.S., *INTEGRAL*, Kanata, Kiso, Kapteyn, Liverpool Telescope, Subaru, *Swift*/*NuSTAR*, VERITAS, and VLA/17B-403 teams\*†

[[Science 361 \(2018\) no.6398, eaat1378](#)]

### Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert

IceCube Collaboration\*†

[[Science 361 \(2018\) no.6398, 147-151](#)]

# Coincidenza spaziale (mappe fotoni gamma) e temporale (curve di luce gamma) col neutrino IC 170922A

sky tg24

SCIENZE

12 luglio 2018

Un buco nero sorgente dei neutrini cosmici, "fantasmi" dell'Universo

Rai News

SCIENZA



BLAZAR (NASA/GODDARD SPACE FLIGHT CENTER CONCEPTUAL IMAGE LAB)

SLIDESHOW

FOTO 1 DI 5

Spazio: scoperta origine dei neutrini cosmici

Per la prima volta, gli scienziati sono riusciti a individuare la possibile sorgente dei messaggeri dell'universo

tuttoscienze  
e innovazione

LA STAMPA

IL CIELO

13/07/2018

Prima assoluta: identificata una sorgente di neutrini cosmici

la Repubblica.it Scienze

Home

Politica

Economia

Sport

Spettacoli

Tecnologia

Motori

Tutte le sezioni

D

Rep tv

f

5

t

in

e

Ecco dove nascono i raggi cosmici: ce lo indica un neutrino



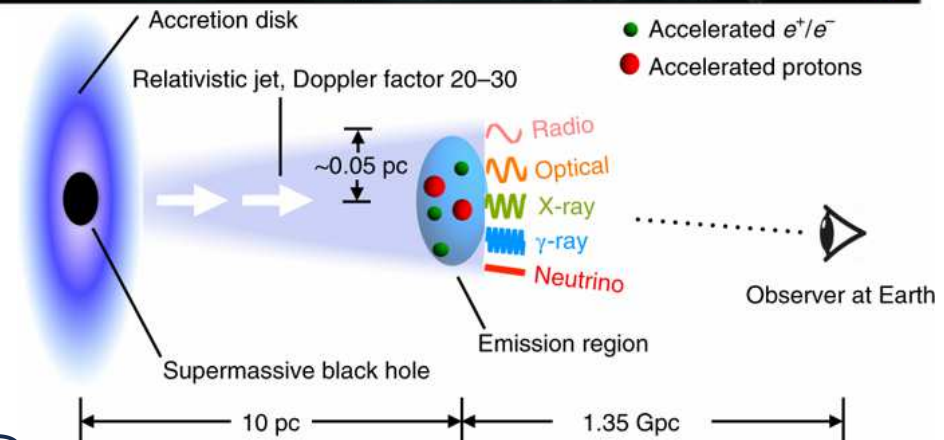
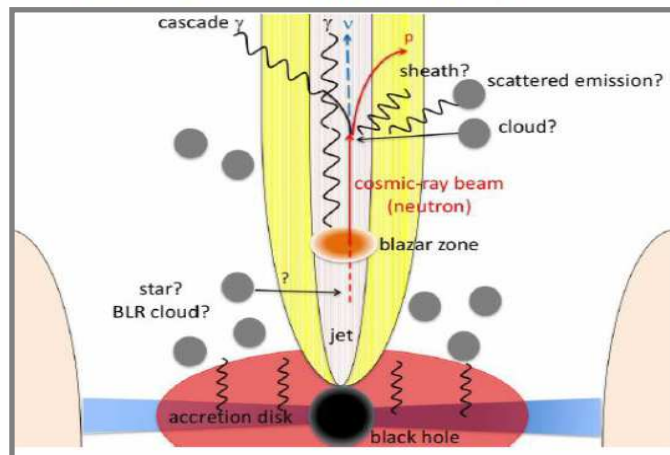
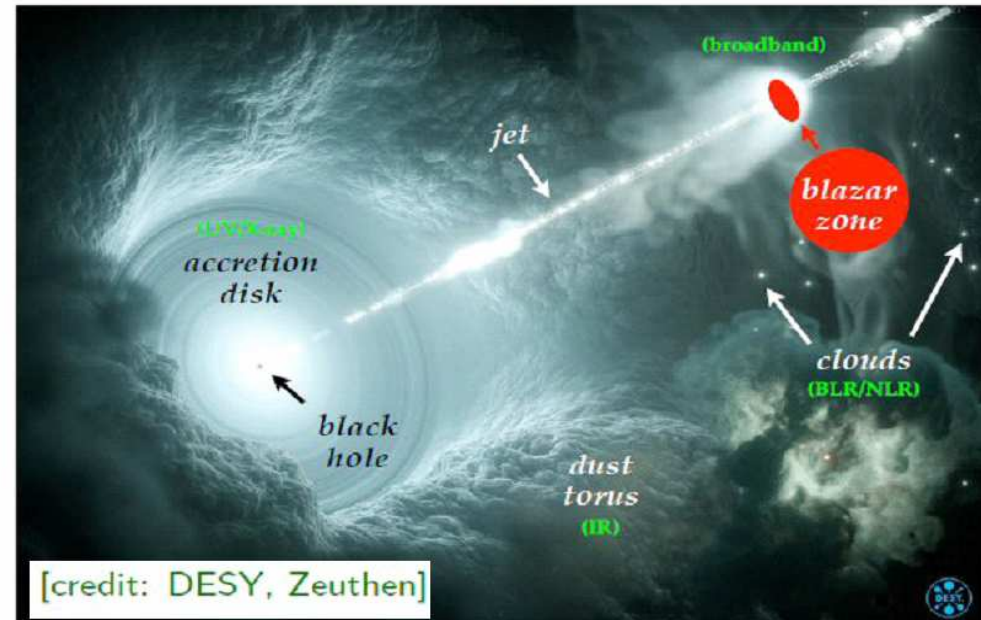
Spazio, svelata l'origine dei neutrini cosmici. In un buco nero la sorgente

La scoperta apre una nuova era della ricerca spaziale

# Il neutrino IC 170922A ed il blazar gamma di *Fermi* TXS 0506+056

- **Blazars:** active galaxies powered by accretion onto a supermassive black hole expel relativistic jets pointing into our line of sight.
- Cosmic ray acceleration and  $p\gamma$  interaction in blazar zone leads to neutrino beam. [Stecker et al.'91] [Mannheim'96; Halzen & Zas'97]
- **Non-power-law neutrino spectra due to diverse photon spectra.**
- Typically, deficit of sub-PeV and excess of EeV neutrinos.

## Blazars as Neutrino Factories



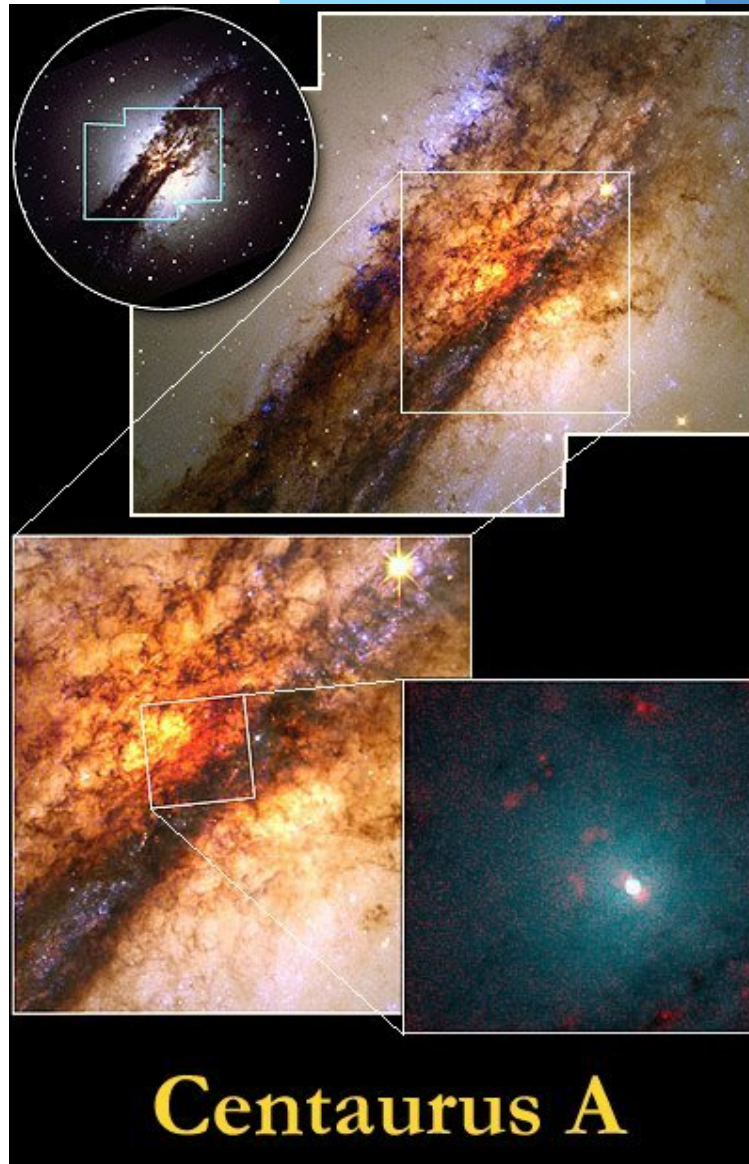
# Nuclei Galattici Attivi (AGN) e blazar

- ❑ Nei nuclei galattici attivi (AGN, di cui fanno parte quasars e blazars) l'enorme potenza energetica è prodotta dall'accrescimento di materia attorno ad un buco nero super-massiccio (super-massive black hole).
- ❑ Una parte di questa energia rifornisce un getto di particelle di alta energia che viaggia a velocità relativistiche cioè vicine a quelle della luce.

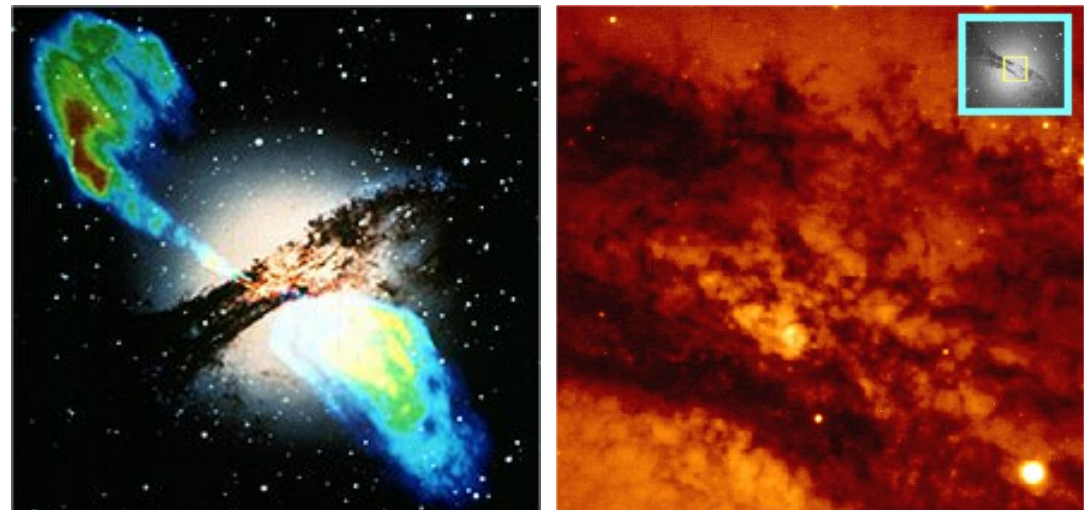
- ❑ I blazar sono particolari AGN in cui il getto è dominante e punta in direzione della nostra linea visuale (della Terra). Sono potenti sorgenti di raggi gamma e sono le più numerose sorgenti gamma di alta anergia nell'Universo finora osservate.



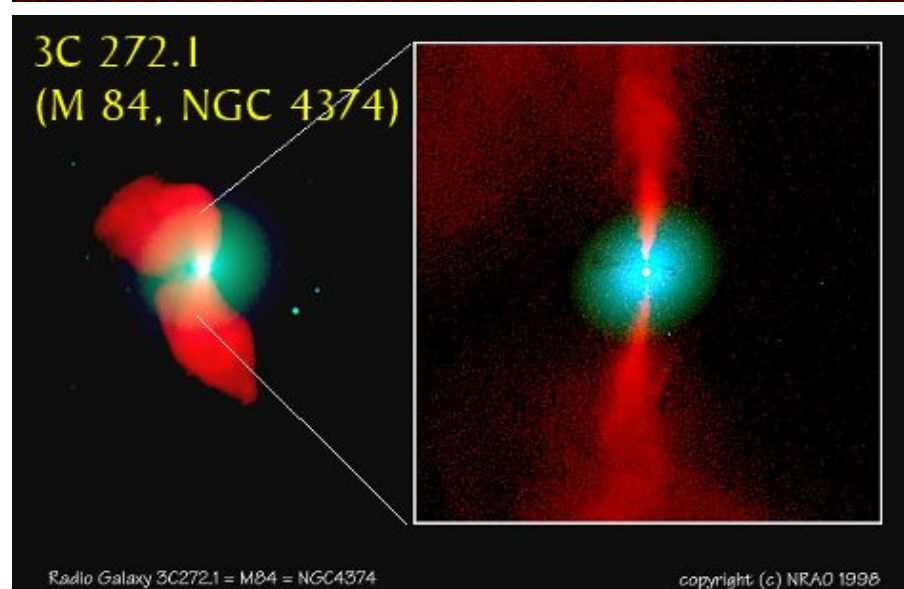
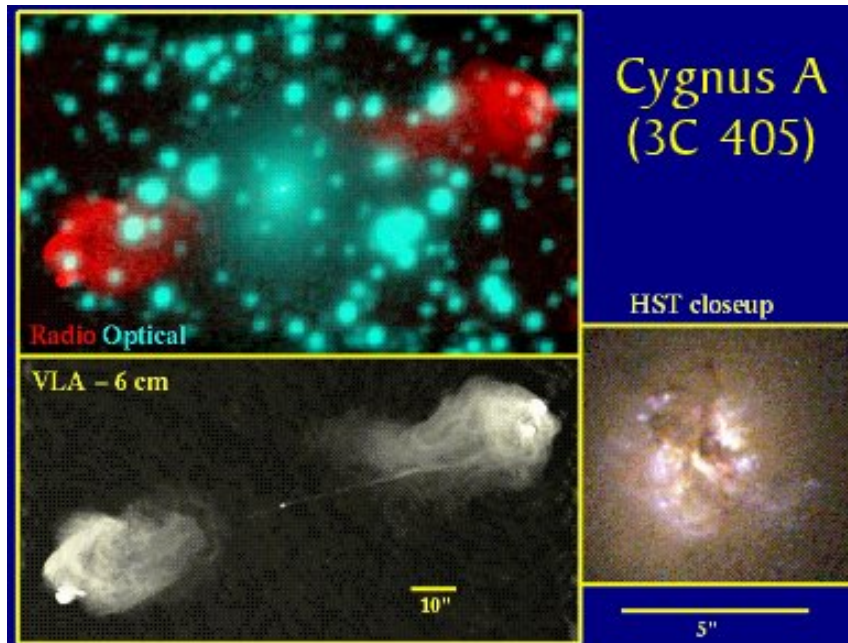
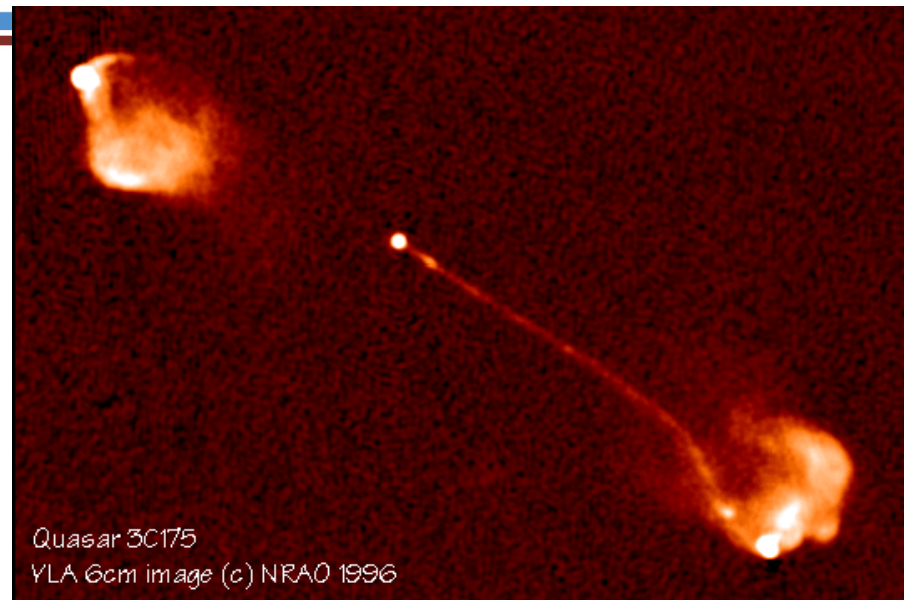
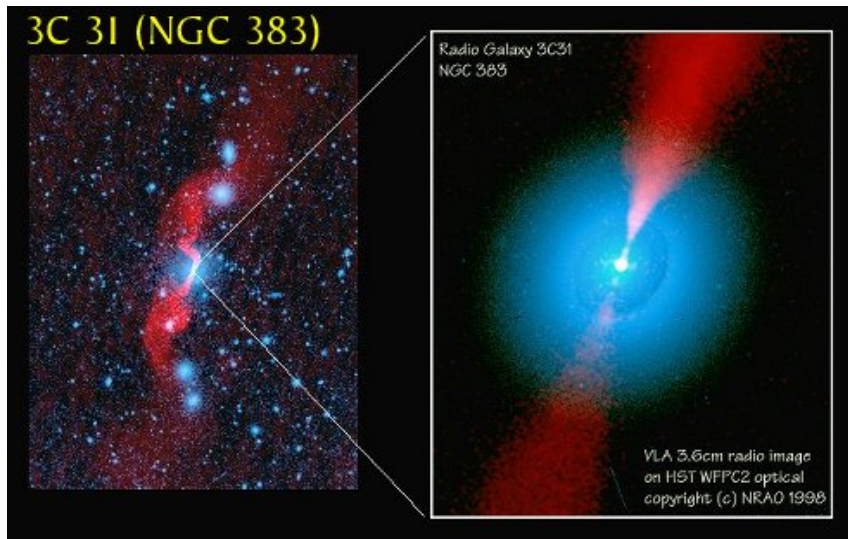
# Esempi di AGN: Centaurus A



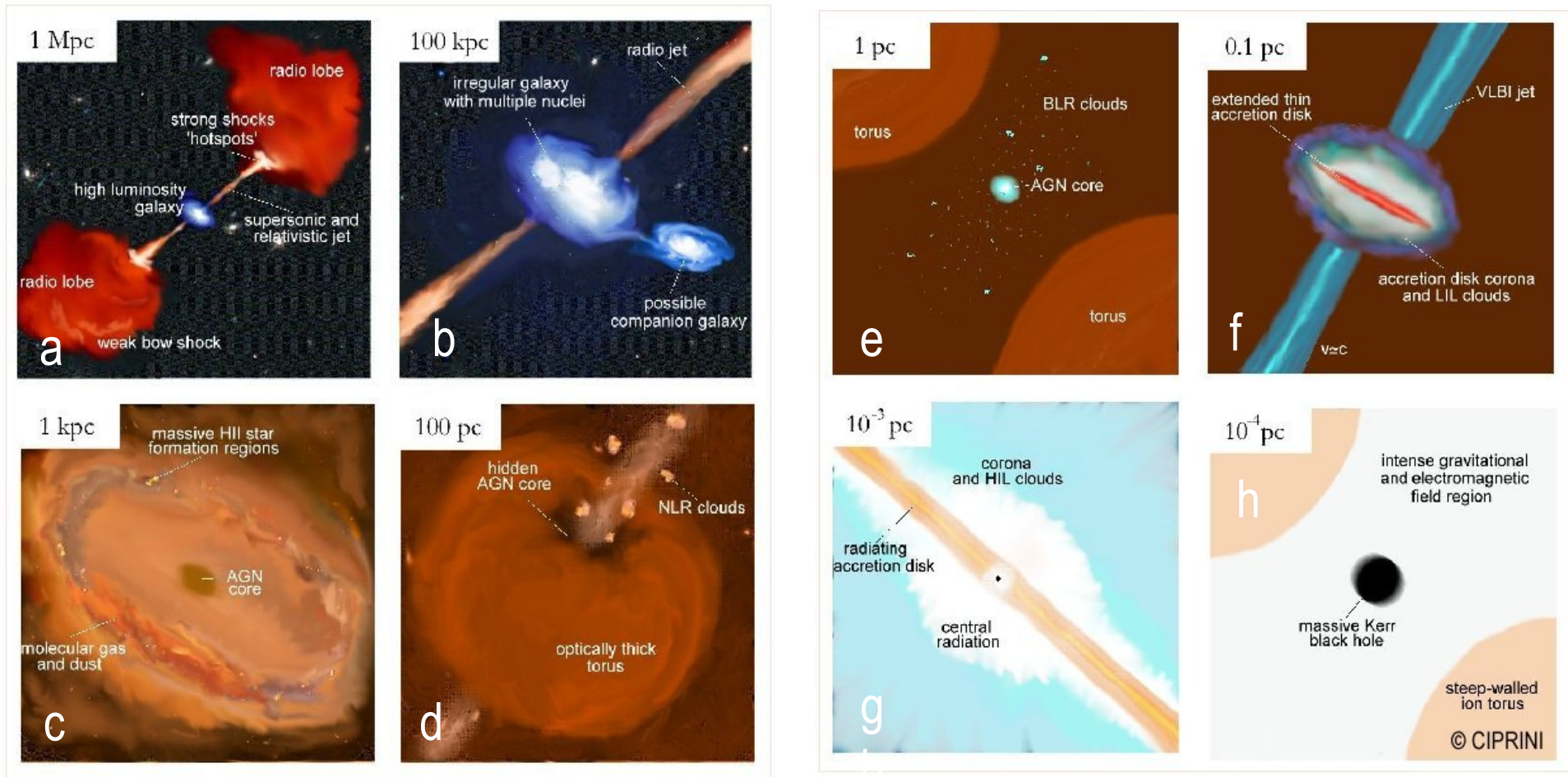
Centaurus-A (NGC 5128), la radiogalassia (ed AGN) più vicina posta a 10 milioni di a.l.. Lo spesso disco di polvere che taglia la galassia è il prodotto di una fusione tra una galassia a spirale e la gigante ellittica. Lo shock della collisione ha compresso il gas interstellare che ha innescato una intensa formazione stellare a dense nubi. HST ha rivelato un disco luminoso (la macchia al centro dell'ultima immagine in fondo) di 130 a.l. di diametro, che circonda un buco nero supermassiccio di  $10^9$  volte la massa del sole. Tale disco luminoso alimenta probabilmente un disco di accrescimento interno.



# Esempi di AGN: radiogalassie (blazar visti di taglio)

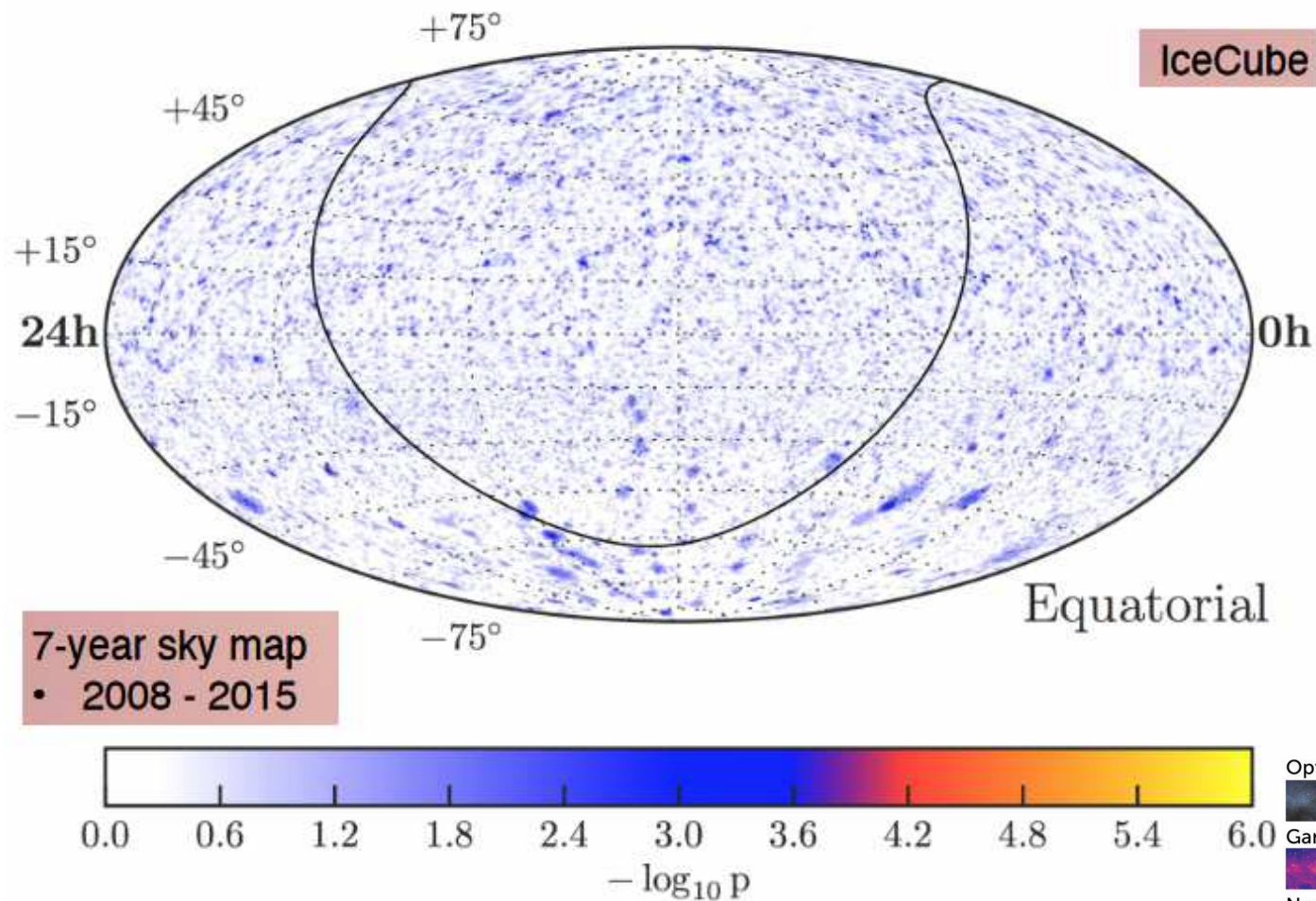


# Un cartoon del modello standard per gli AGN

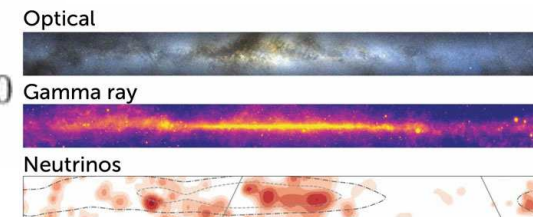


AGN e blazars: da 1 megaparsec ( $10^6$  parsec) a 0.0001 parsec (1 parsec = 3.26 anni luce)

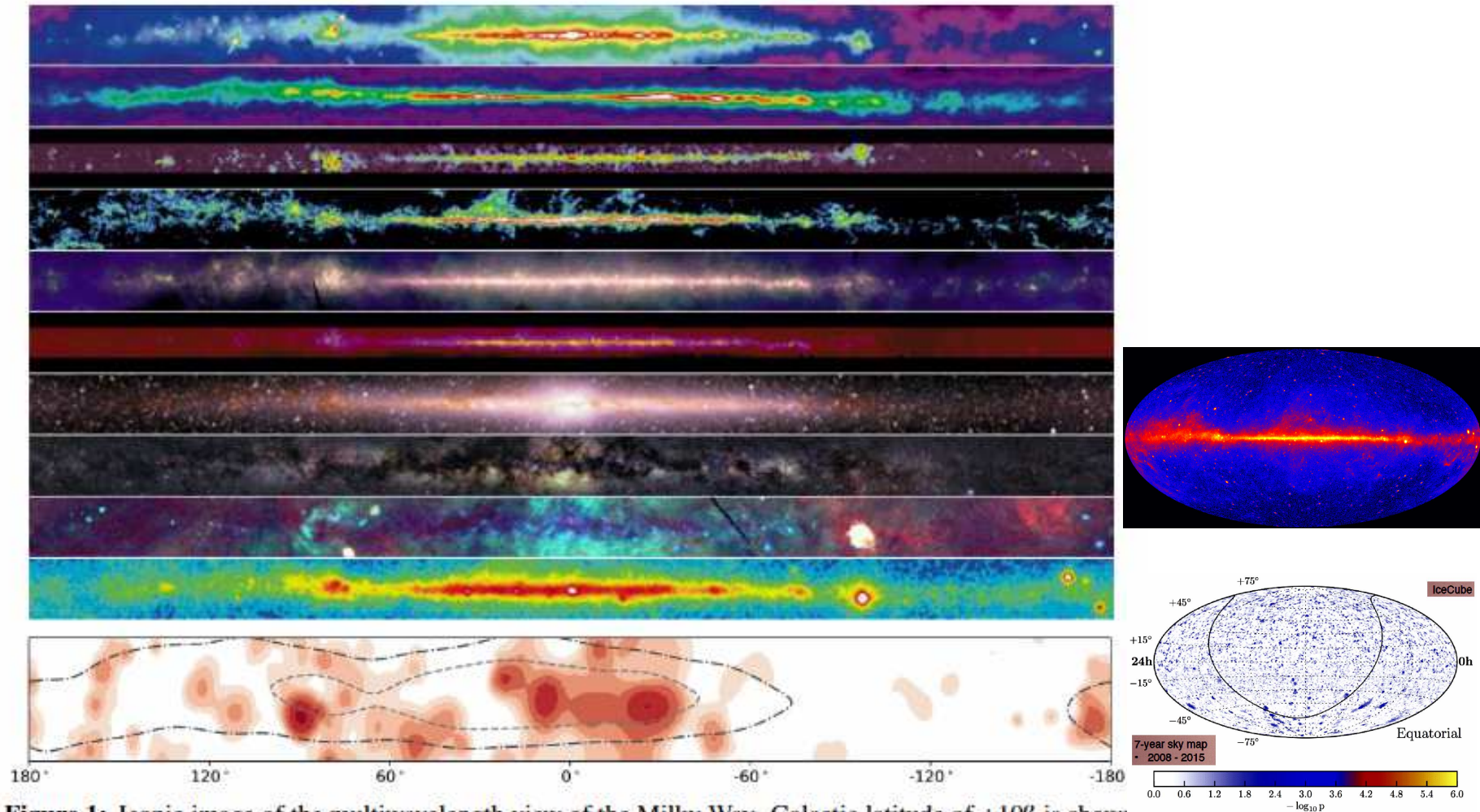
# Mappa del cielo dei neutrini rivelati da IceCube



Le candidate sorgenti extragalattiche (galassie normali/oscurate e blazars) che emettono raggi X e raggi gamma, che risultano più significative per essere l'origine di neutrini cosmici ad altissima energia sono: galassia **Messier 77 (NGC 1068**, significatività quasi 3 sigma) e blazars **PKS 1424+240**, **GB6 J1542+6129**, **TXS 0506+056**.



# La nostra Galassia: sorgente di fotoni e neutrini



**Figure 1:** Iconic image of the multiwavelength view of the Milky Way. Galactic latitude of  $\pm 10^\circ$  is shown from radio to gamma ray observations [4]. At the bottom is the "neutrino image" of the Galactic plane shown for latitudes of  $\pm 20^\circ$

# Neutrini dalla galassia M 77 (NGC 1068)

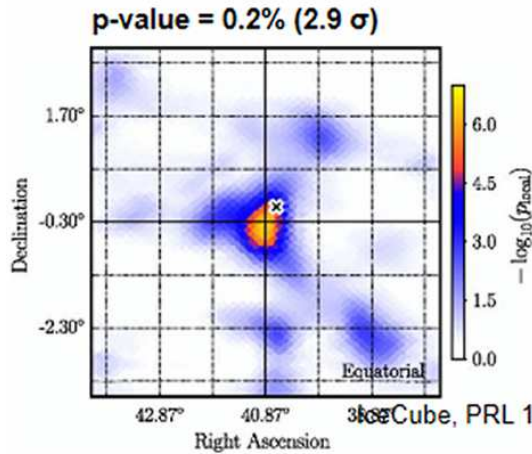
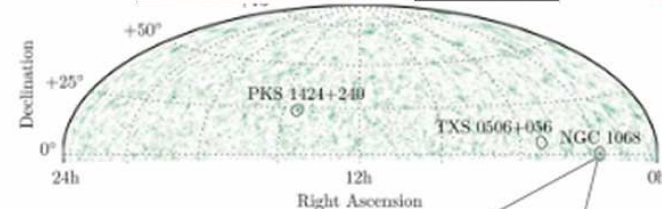
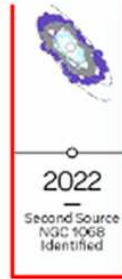
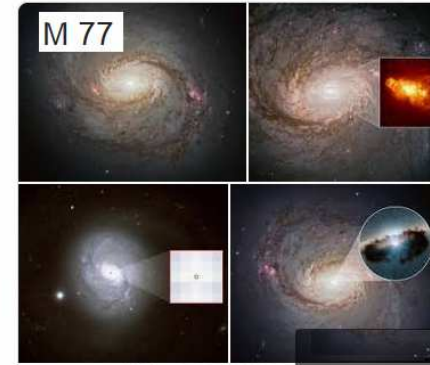
## Galassia Messier 77 (M77, NGC 1068)

First steady neutrino source

AGN promising neutrino sources candidates since the 1970s

IceCube identified neutrino emission from NGC 1068, a Type II Seyfert galaxy, at  $4.2 \sigma$  in 2022  $\Rightarrow$  very close,  $z=0.004$  (14 Mpc)

Soft best-fit spectrum power-law with spectral index  $\gamma = 3.2 \pm 0.2$



p-value = 0.2% ( $2.9 \sigma$ )



Analysis improvements:

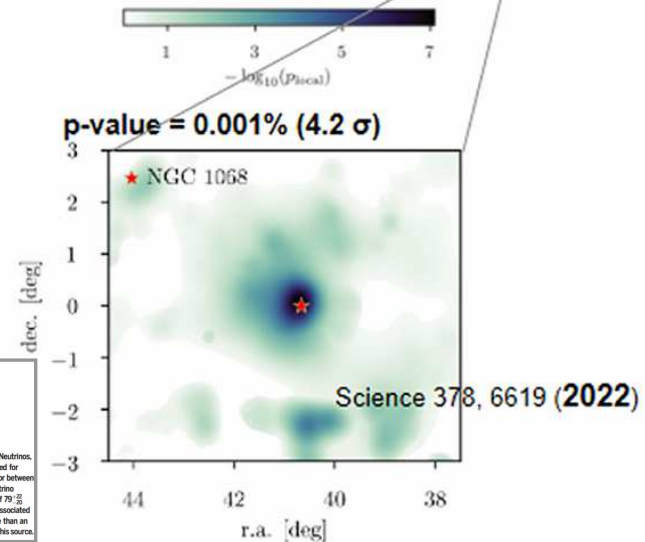
- Improved data processing
- Improved event reconstruction

IceCube, PRL 124, 051103 (2020)

NEUTRINO ASTROPHYSICS  
Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068

IceCube Collaboration\*




A supermassive black hole, obscured by cosmic dust, powers the nearby active galaxy NGC 1068. Neutrinos, which rarely interact with matter, could provide information on the galaxy's active core. We searched for neutrino emission from astrophysical objects using data recorded with the IceCube neutrino detector between 2011 and 2020. The positions of 120 known gamma-ray sources were individually searched for neutrino detectors above atmospheric and cosmic backgrounds. We found that NGC 1068 has an excess of  $79 \pm 22$  neutrinos at tera-electron volt energies, with a global significance of  $4.2\sigma$ , which we interpret as associated with the active galaxy. The flux of high-energy neutrinos that we measured from NGC 1068 is more than an order of magnitude higher than the upper limit on emissions of tera-electron volt gamma rays from this source.



p-value = 0.001% ( $4.2 \sigma$ )

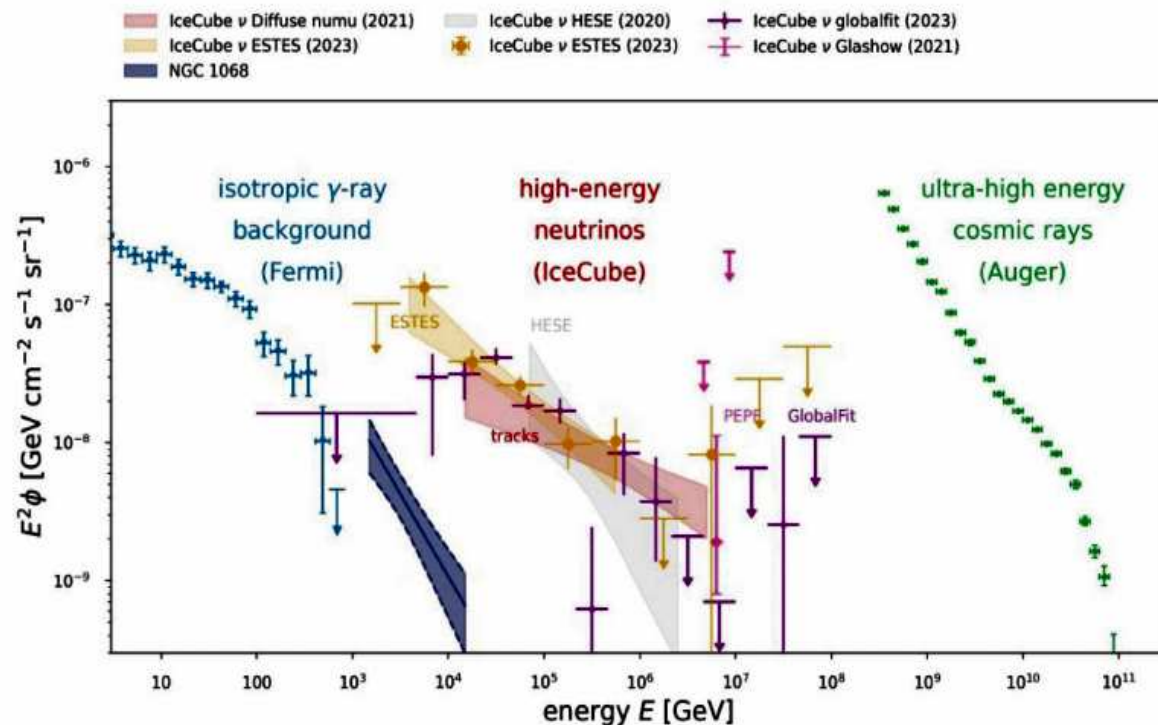
# Sorgenti astrofisiche identificate e componente diffusa di neutrini

IceCube ha ora identificato tre sorgenti di neutrini:

1. TXS blazar 
2. NGC 1068 AGN 
3. Galactic plane 

Tuttavia, la maggior parte del flusso astrofisico di neutrini proveniente dal cosmo, proviene da una componente diffusa su tutto il cielo, che resta da comprendere appieno (è differente a seconda del campione scelto, copertura del cielo, e range di energia).

Inoltre la componetne diffusa di neutrini è una legge di potenza unica o una broken power law?



# Torniamo all'inizio: raggi gamma, neutrini, raggi cosmici

□ **Infinitamente piccolo**  $\leftrightarrow$  **infinitamente grande**:

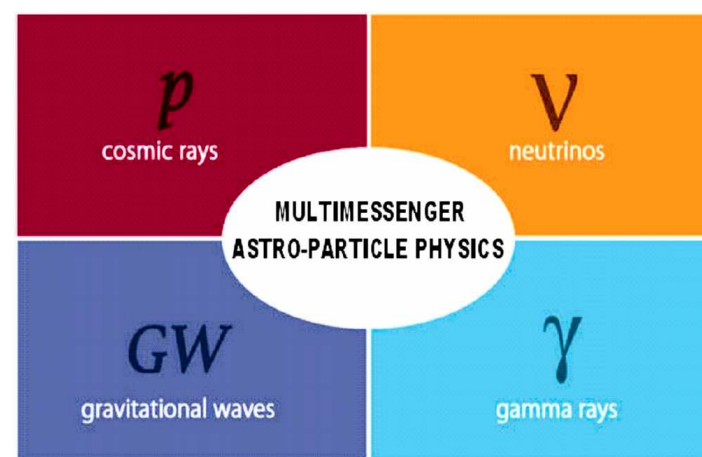
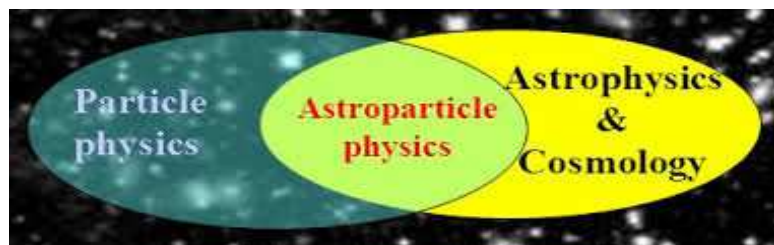
stretta connessione tra fisica delle particelle elementari e l'astrofisica e cosmologia.

□ Visione moderna di un **Universo variabile, transiente, piuttosto violento** ed anche piuttosto sconosciuto (materia **oscura**, energia **oscura**), pieno di interessanti sorgenti, fenomeni, particelle.

□ **Fisica delle astro-particelle** ed **astrofisica multi-messaggero**: astronomia, astrofisica e fisica fondamentale sviluppata rivelando le diverse particelle che trasportano informazione fino a noi sulla Terra, ed osservando le sorgenti presenti nell'Universo.

▪ Tecnologia e ricerca basata su **rivelatori posti nello spazio** su **satelliti** (es. Fermi Gamma-ray Large Area Telescope LAT, Laser Interferometer Space Antenna), **sonde** interplanetarie, **stazione spaziale** (es. Alpha Magnetic Spectrometer), **palloni** d'alta quota (ex. Boomerang), e in futuro sulla **Luna**.

▪ Tecnologia e ricerca basata anche su **laboratori di superficie** e laboratori **sotterranei** o **sottomarini** (es: strumenti, telescopi e laboratori come quelli del Gran Sasso, IceCube, Auger, KM3Net, Virgo LIGO e Einstein Telescope, Cherenkov Telescope Array).





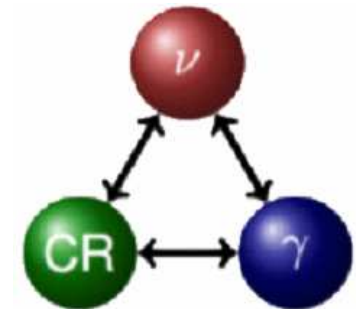
# Conclusioni

□ Abbiamo visto qui la connessione dei dati dell'esperimento *Fermi Large Area Telescope* (LAT) cioè dei **fotoni** alle alte energie dei **raggi gamma** con i **neutrini cosmici** di altissima energia di *IceCube* con la scoperta del primo esempio di:

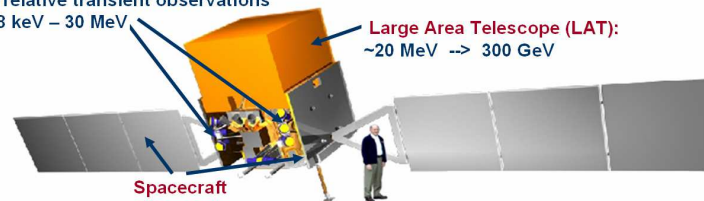
- **coincidenza spaziale** (mappe fotoni di energia MeV-GeV-TeV gamma e posizione sorgenti blazar gamma  $\leftrightarrow$  vicinanza alla direzione di provenienza nel cielo dei neutrini con energia TeV/PeV);
- **coincidenza temporale** (sorgente di raggi gamma in "flare", in stato di alto flusso  $\leftrightarrow$ , vicinanza in tempo alla data di rivelazione del neutrino cosmico).

□ [ **Fotoni (raggi) gamma**  $\leftrightarrow$  **neutrini cosmici** ]  $\rightarrow$  capire meglio i raggi cosmici.

□ Tutti i dati di *Fermi* LAT sono immediatamente pubblici ed usabili da tutta la comunità scientifica. *Fermi* è pertanto una **grande missione di astronomia e fisica gamma** della NASA con fondamentale contributo italiano (ASI e INFN principalmente). Uno degli esperimenti e missioni spaziali più produttivi.



**Gamma Ray Burst Monitor (GBM):**  
correlative transient observations  
~ 8 keV – 30 MeV



**Large Area Telescope (LAT):**  
~20 MeV  $\rightarrow$  300 GeV

