

Discover Cosmic Rays

INTERNATIONAL COSMIC DAY

November 6 | 2019

INFN Sezione di Roma Tor Vergata
e Dipartimento di Fisica di Roma Tor Vergata

Scientists worldwide are committed to school projects in order to give students insights into their research and answer questions like:

Local Organizing Committee

- Aldo Morselli
- Silvia Miozzi
- Giuseppe Di Sciacio
- Valerio Verzi
- Dario Gasparrini
- Stefano Ciprini
- Vincenzo Vitale

What are cosmic particles?
Where do they come from?
How can they be measured?

Become a Scientist for a Day
Discover the world of cosmic rays like an astroparticle physicist.

Poster by Stefano Ciprini
Image Credit: DESY, Science Communication Lab

Neutrini e fotoni (raggi) gamma

Stefano Ciprini

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



Organizers
INFN Sezione di Roma Tor Vergata
Dipartimento di Fisica,
Università di Roma Tor Vergata

More Information and Registration
<https://icd.desy.de>
<https://agenda.infn.it/event/20493/>

INFN
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
SEZIONE DI ROMA TOR VERGATA

TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA
DIPARTIMENTO DI FISICA

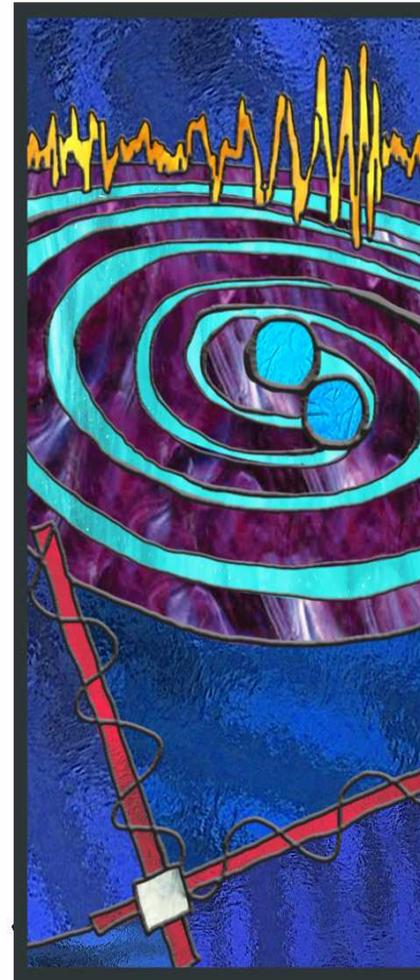
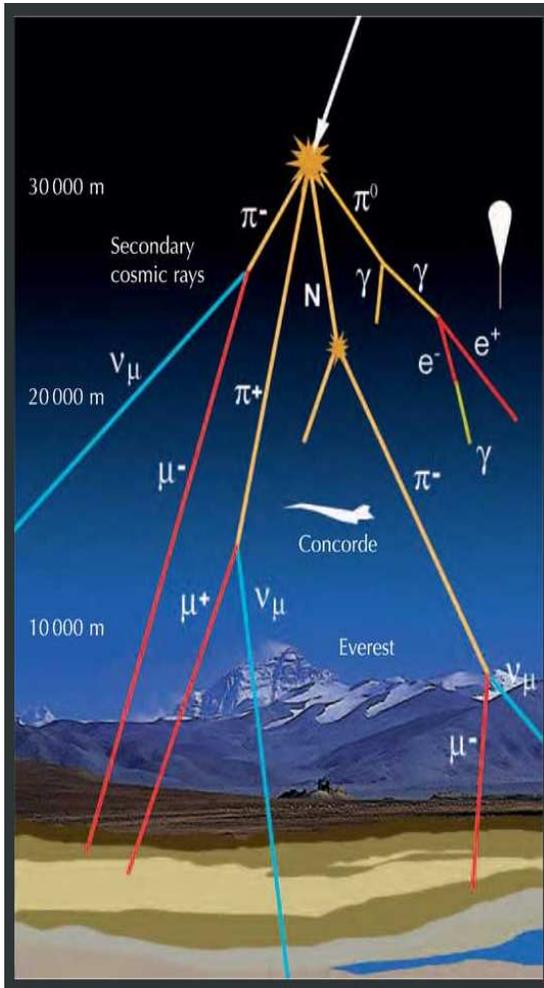
INFN OCRA

International Cosmic Day 2019
Dip. di Fisica & INFN Roma Tor Vergata
6 Novembre 2019

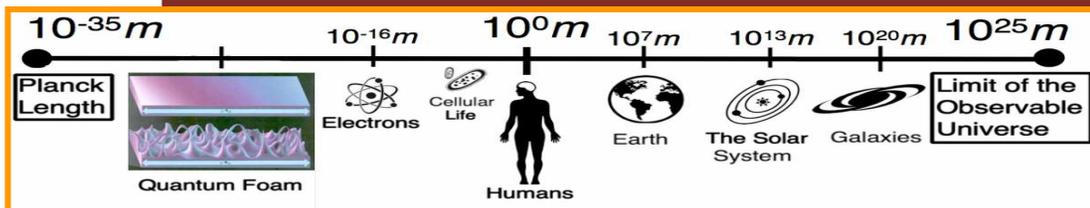
Outreach Cosmic Ray Activities



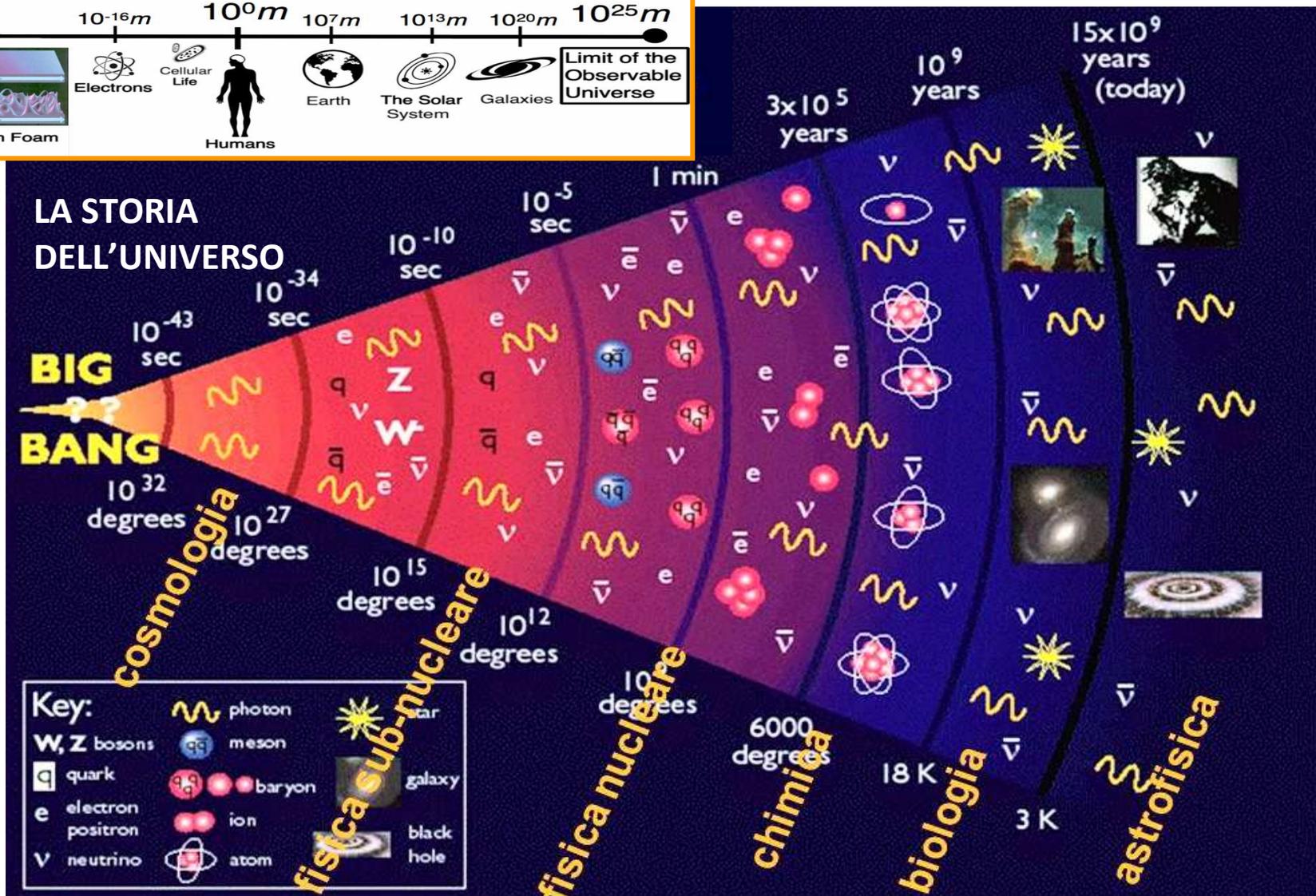
INTRO – RAGGI COSMICI E MESSAGGERI COSMICI



Infinitamente piccolo infinitamente grande

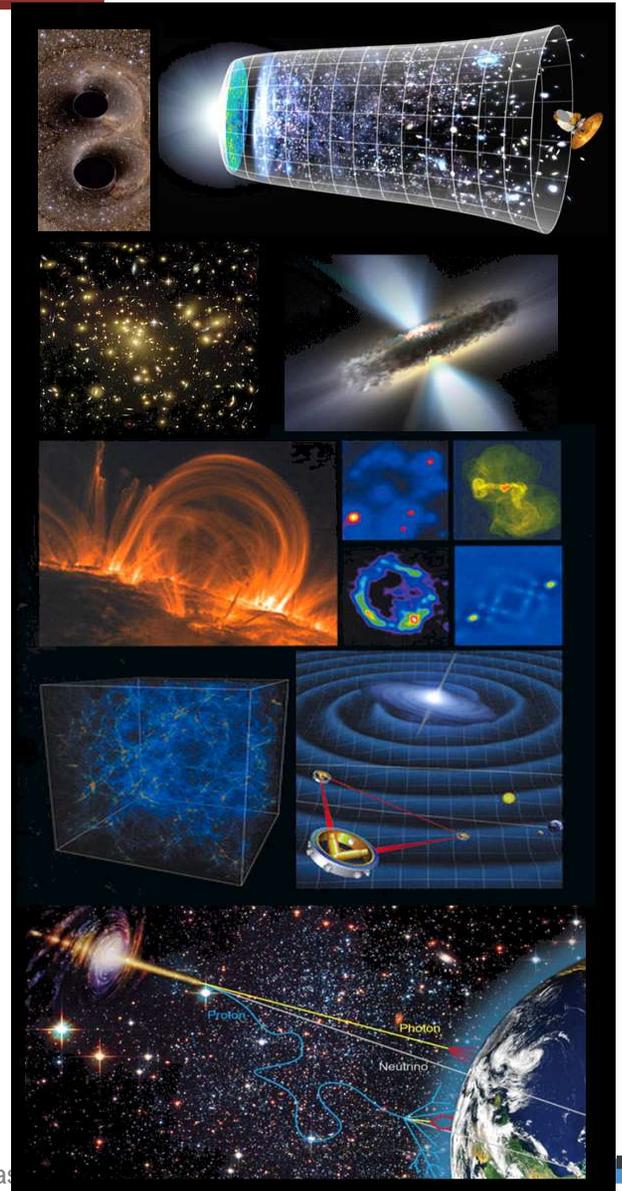


La Storia dell'Universo



Fisica delle astro-particelle

- ❑ **Astronomia:** (stella-legge) osservazione e spiegazione dei corpi celesti (stelle, galassie etc.) ed eventi dell'universo; studio origini ed evoluzione fisica/chimica degli oggetti e dell'intero universo (**cosmologia**).
- ❑ **Astrofisica:** studio delle **proprietà fisiche** e dei **fenomeni fisici** riguardanti la materia con cui sono formati gli oggetti del cosmo. Studio basato anche sulla fisica da esperimenti di laboratorio.
→ **Astrofisica multi-frequenza** (studio della **radiazione elettromagnetica** cioè **fotoni**, osservati nelle onde radio, microonde, infrarosso, luce ottica, ultravioletto, raggi-X, raggi gamma).
- ❑ **Fisica delle astroparticelle:** è la **fisica fondamentale** nello **spazio** (rivelatori di particelle posti su **satelliti**, **sonde spaziali**, **stazioni spaziali**, **palloni d'alta quota**) cioè la **fisica delle particelle elementari** che usa l' **Universo come laboratorio**) ma anche la fisica in **laboratori di superficie**, **laboratori sotterranei** (es. i Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN), **laboratori sottomarini**, e **d'alta quota**.
→ **Fisica delle astroparticelle multi-messaggero** (raggi cosmici, fotoni e soprattutto fotoni ad alta energia chiamati raggi-gamma, neutrini, onde gravitazionali, processi fisici rari).

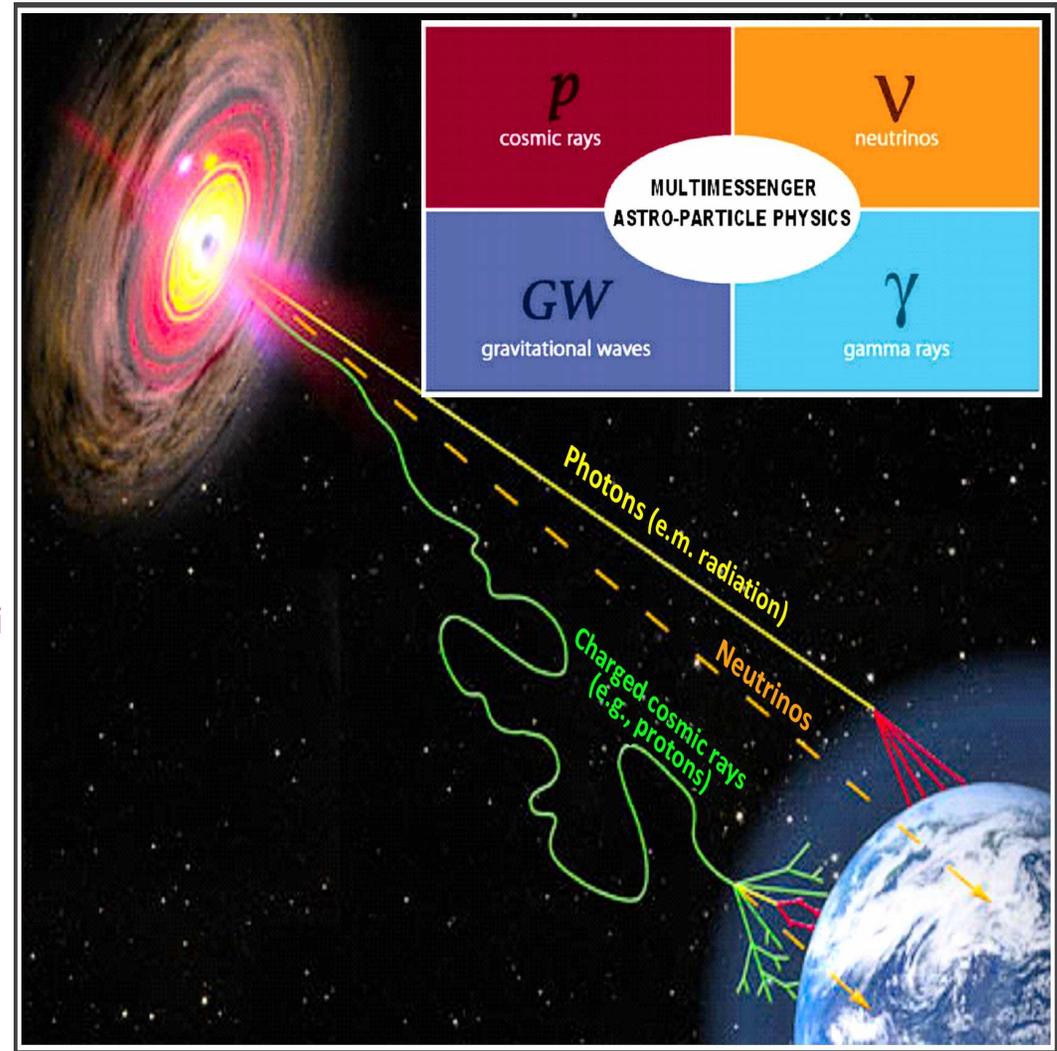


Fisica delle astro-particelle

□ La fisica delle astroparticelle consiste nell'osservazione e nella misura sperimentale delle particelle provenienti dallo spazio: raggi cosmici, neutrini, raggi gamma ad alta energia, altra radiazione (fotoni ad energie più basse), onde gravitazionali, processi fisici denominati rari.

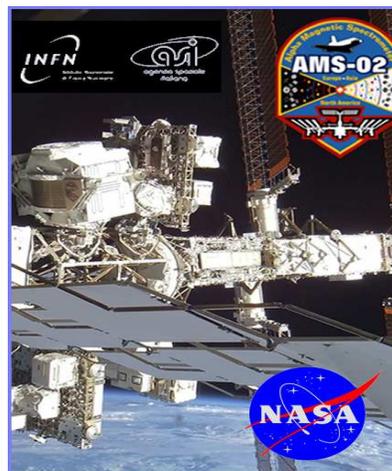
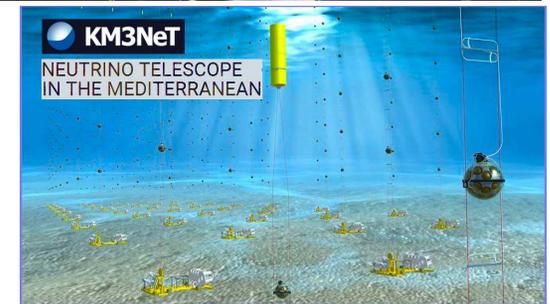
□ Esperimenti di fisica delle astroparticelle → studiano la radiazione e le particelle del cosmo con esperimenti che trovano naturale ambientazione in laboratori di superficie, sotterranei, sottomarini, d'alta quota o direttamente nello spazio (su satelliti, sonde, stazioni spaziali).

□ 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

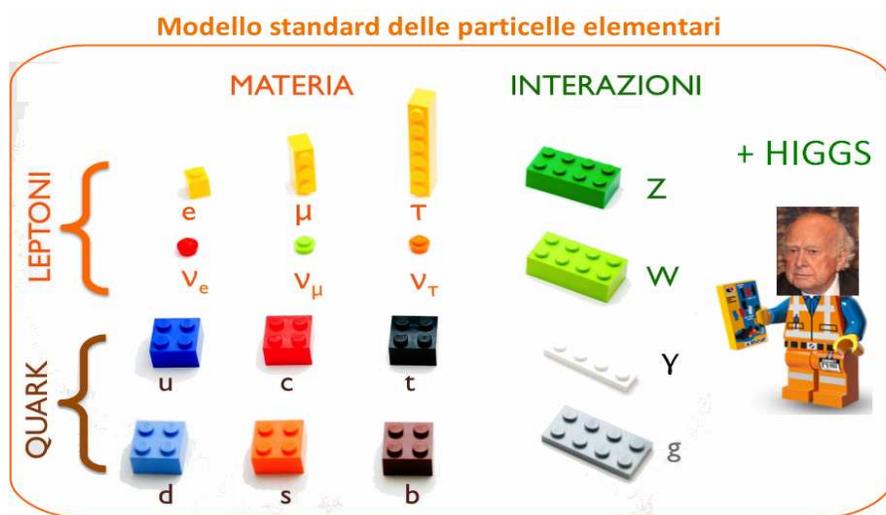
- ❑ Esempio: nei **Laboratori Nazionali del Gran Sasso** dell'INFN (il più grande laboratorio sotterraneo al mondo) vi sono rivelatori per lo studio della **materia oscura**, **neutrini**, **fenomeni rari**, rivelabili solo nelle condizioni di "silenzio cosmico" garantite dalla protezione della roccia 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**.



Particelle elementari

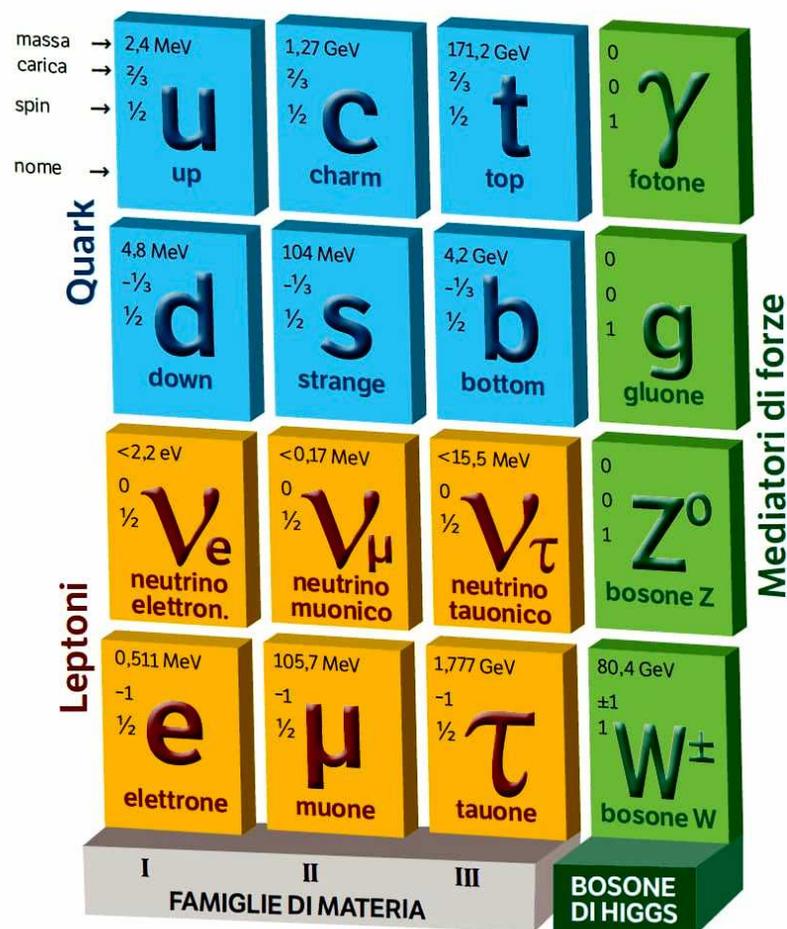
□ La teoria che definisce le nostre attuali conoscenze di **fisica subnucleare** delle alte energie (delle **particelle elementari**) è chiamata **Modello Standard**.

□ 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).



Le particelle del Modello Standard

L'intera realtà è formata da questi 17 "mattoni".



Particelle elementari

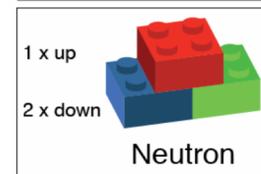
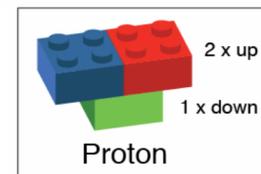
☐ Si punta anche alla scoperta di **fenomeni nuovi** di fisica (“oltre il Modello Standard”):

→ esempio: possibile rivelazione sperimentale di **particelle supersimmetriche**, alcune candidate a costituire la **materia oscura** (prevalente nell’Universo);

→ altro esempio sarebbe la scoperta di 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.

☐ Fisica delle Particelle significa anche apparati di **grandi dimensioni**, **estrema complessità**, applicazione delle **tecnologie più moderne** nel campo dei **rivelatori**, dell'**elettronica**, dei sistemi di **acquisizione dati** e di **calcolo informatico**.

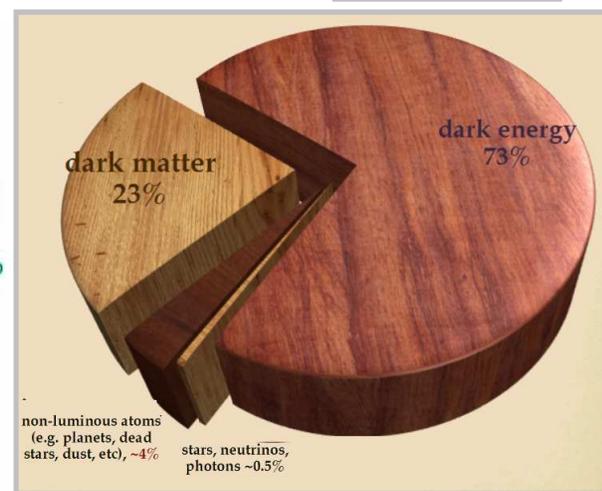
Quarks			Antiquarks		
1	2	3	3	2	1
Up u	Charm c	Top t	Antitop t̄	Anticharm c̄	Antiup ū
Down d	Strange s	Bottom b	Antibottom b̄	Antistrange s̄	Antidown d̄



Ricadute tecnologiche dello sviluppo degli acceleratori di particelle

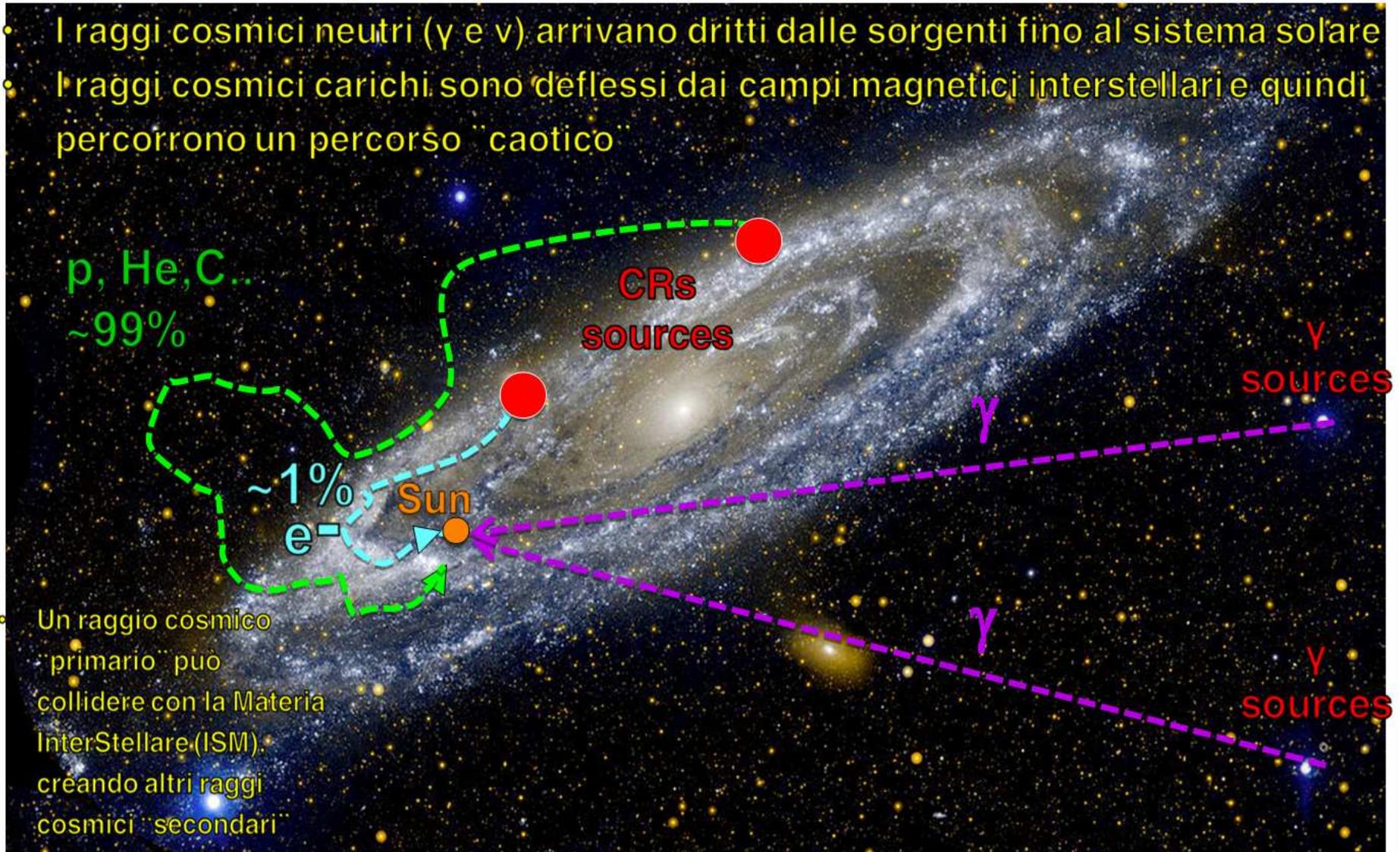
- ▶ RICERCA IN BIOLOGIA E CHIMICA
- ▶ ENERGIA E AMBIENTE
- ▶ MEDICINA
- ▶ TEST NON DISTRUTTIVI
- ▶ APPLICAZIONI INDUSTRIALI
- ▶ PROSPETTIVE

- nuovi materiali
- analisi dei materiali
- struttura delle proteine
- luce di sincrotrone
- controllo emissione di gas
- controllo polveri nell'aria
- adroterapia contro il cancro
- diagnostica PET RMN
- analisi beni culturali
- elettronica più veloce
- riduzione consumi auto
- fusione nucleare
- sicurezza per le scorie



La propagazione dei raggi cosmici

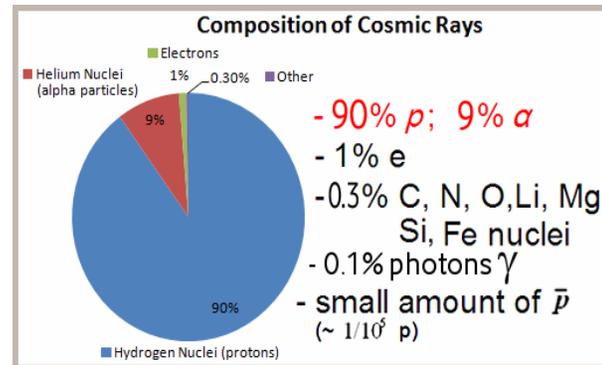
- I raggi cosmici neutri (γ e ν) arrivano dritti dalle sorgenti fino al sistema solare
- I raggi cosmici carichi sono deflessi dai campi magnetici interstellari e quindi percorrono un percorso caotico



Composizione, flusso, energia dei raggi cosmici

I raggi cosmici sono particelle subatomiche che arrivano sulla Terra:

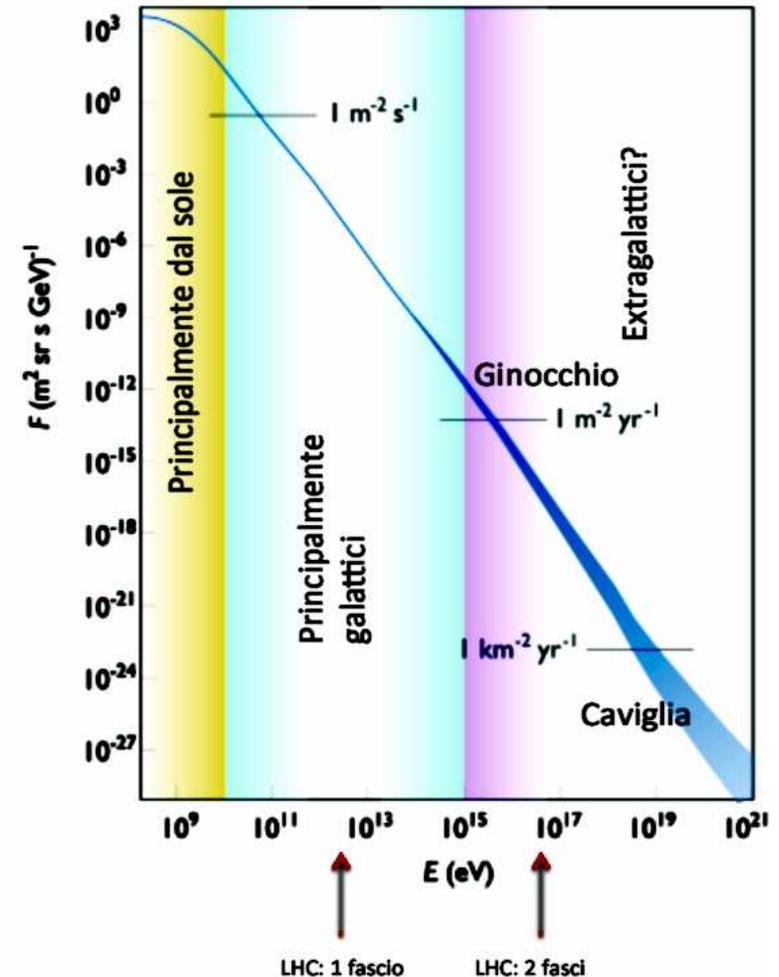
- Perlo più (~90%) sono protoni
- Nuclei di elio (~9%);
- Elettroni sono ~1%;
- ~0.1% sono raggi gamma



Il flusso (quantità per unità di tempo e superficie) di raggi cosmici diminuisce rapidamente all'aumentare dell'energia:

- una volta al secondo arriva sulla Terra una particella con l'energia di 1 pallina da tennis
- le più alte energie in astrofisica, oltre 100 milioni di volte più grandi delle energie prodotte sulla Terra (CERN LHC).

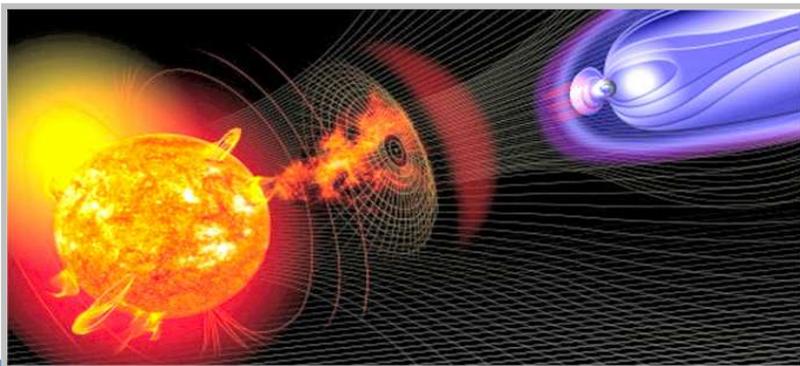
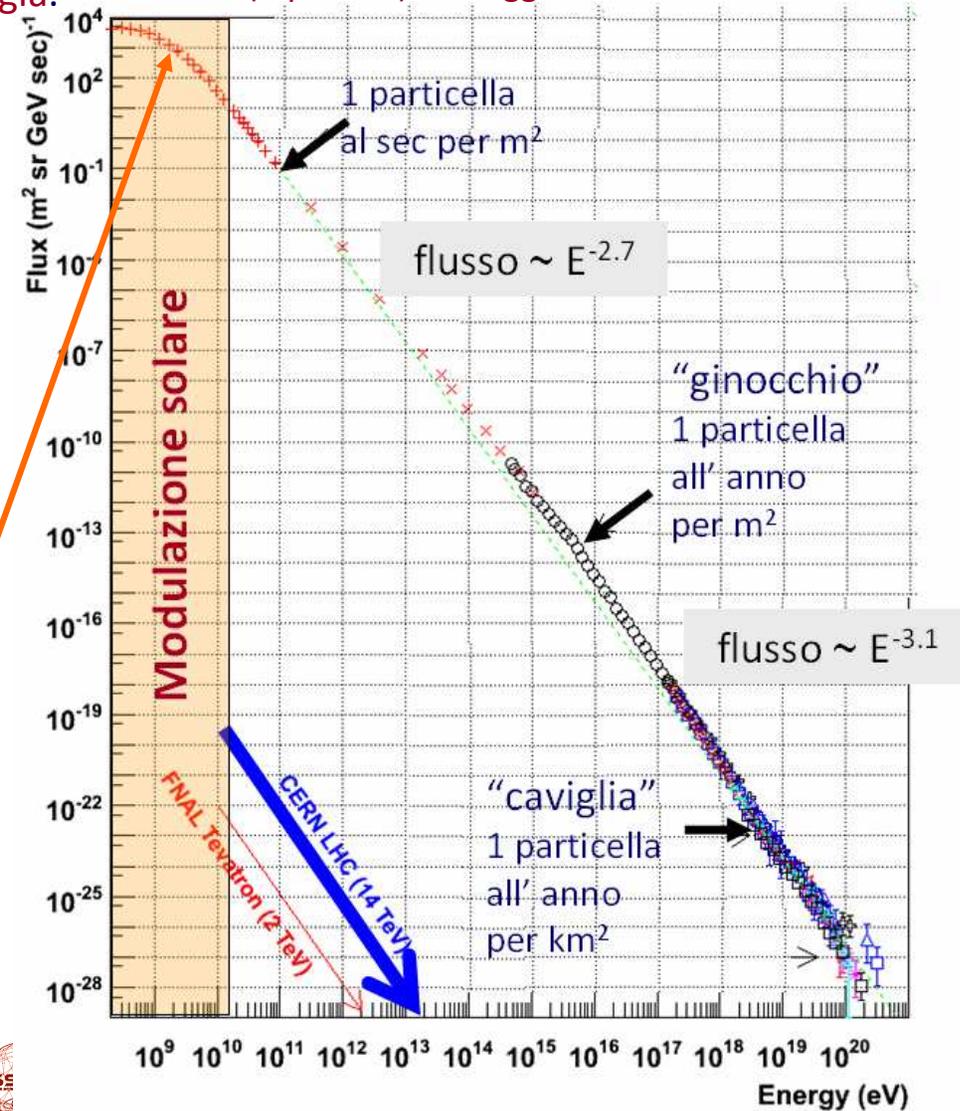
Distribuzione in energia del flusso ("spettro") globale dei raggi cosmici (carichi e neutri).



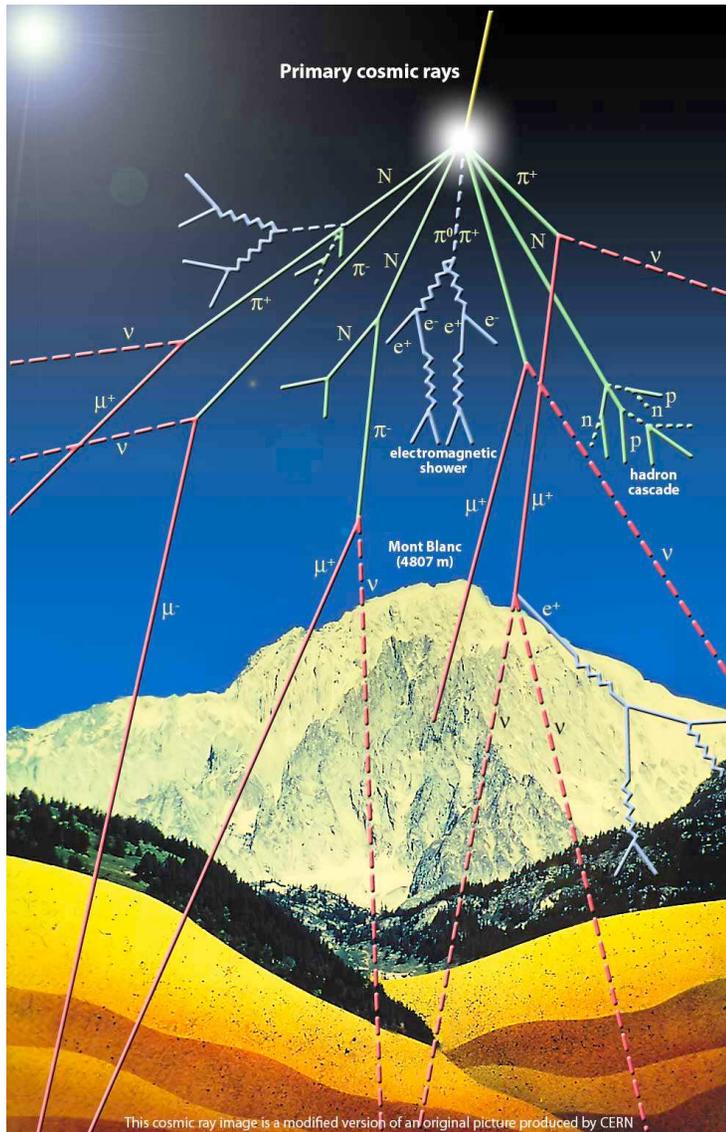
Flusso ed energia dei raggi cosmici

- ❑ I raggi cosmici sono una chiara evidenza che nell'Universo sono all'opera acceleratori naturali di altissima 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 (che sono neutri, non carichi) di alta energia puntano indietro direttamente alla sorgente (→ mappe del cielo e identificazione).
- ❑ Flusso di raggi cosmici alle energie più basse del diagramma ($E < 10^{10}$ eV), è fortemente influenzato dalla "modulazione solare", ovvero varia al variare dell'attività del nostro Sole.

Distribuzione in energia del flusso ("spettro") dei raggi cosmici carichi.

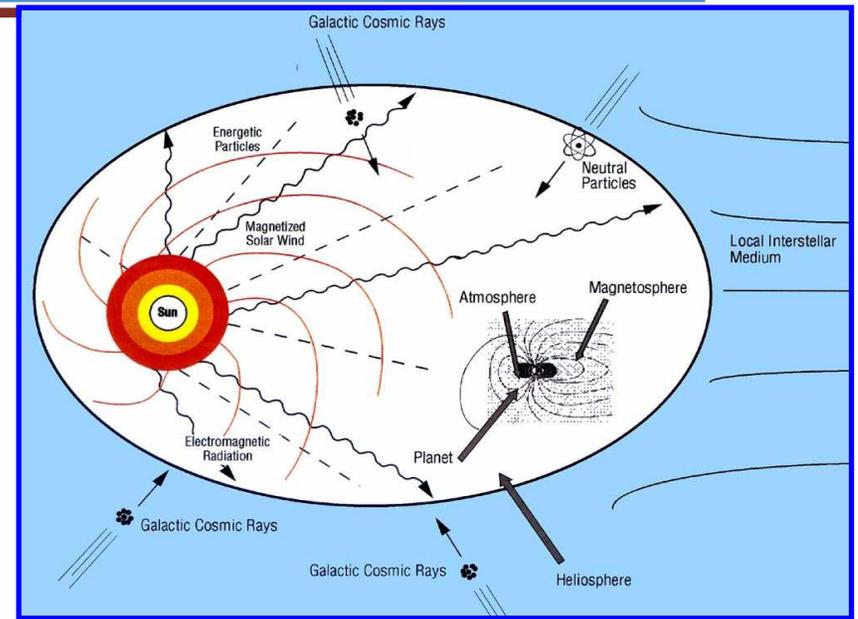
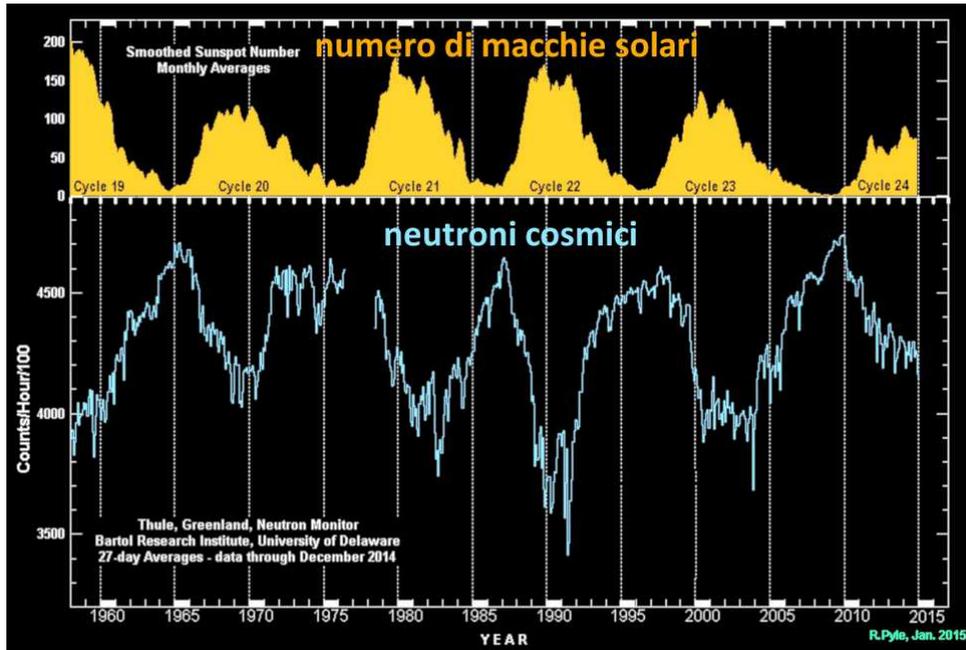


Scoperta di particelle nei raggi cosmici



Particle	Year	Discoverer (Nobel Prize)	Method
e^-	1897	Thomson (1906)	Discharges in gases
p	1919	Rutherford	Natural radioactivity
n	1932	Chadwick (1935)	Natural radioactivity
e^+	1933	Anderson (1936)	Cosmic Rays
μ^\pm	1937	Neddermeyer, Anderson	Cosmic Rays
π^\pm	1947	Powell (1950) , Occhialini	Cosmic Rays
K^\pm	1949	Powell (1950)	Cosmic Rays
π^0	1949	Bjorklund	Accelerator
K^0	1951	Armenteros	Cosmic Rays
Λ^0	1951	Armenteros	Cosmic Rays
Δ	1932	Anderson	Cosmic Rays
Ξ^-	1932	Armenteros	Cosmic Rays
Σ^\pm	1953	Bonetti	Cosmic Rays
p^-	1955	Chamberlain, Segre' (1959)	Accelerators
anything else	1955 \implies today	various groups	Accelerators
$m_\nu \neq 0$	2000	KAMIOKANDE	Cosmic rays

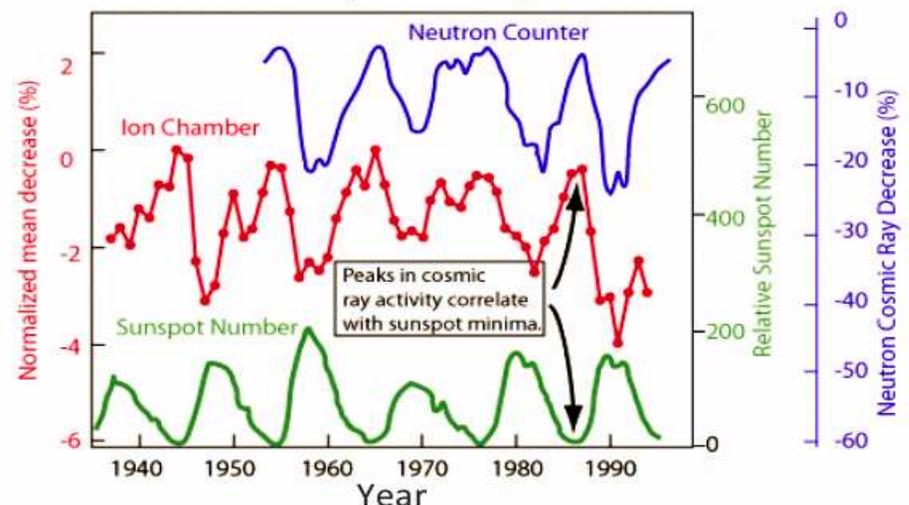
Modulazione dei raggi cosmici



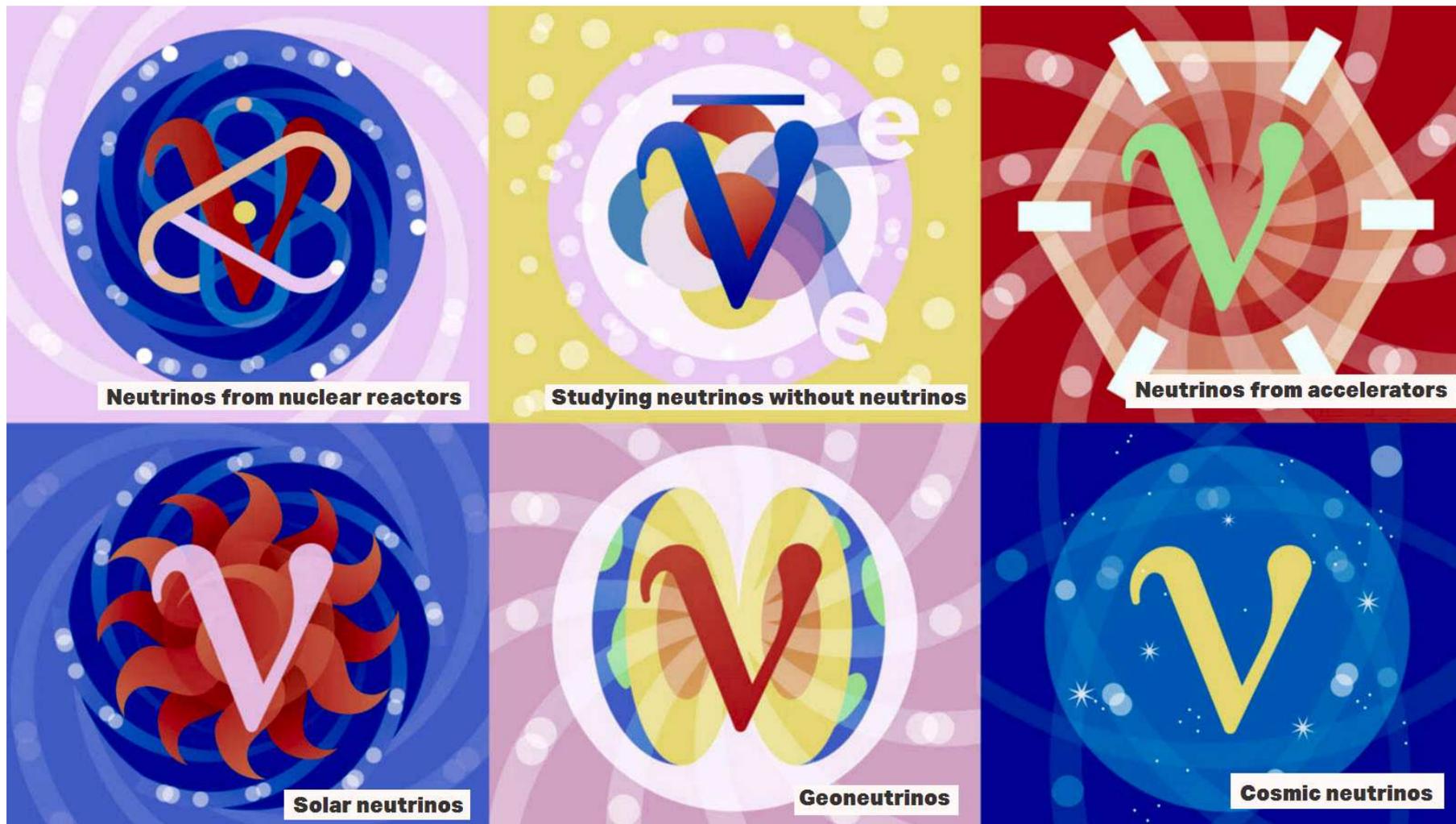
☐ I Raggi Cosmici Galattici che entrano nella eliosfera del nostro Sole sono modulati nel tempo da processi fisici legati alle variazioni della attività magnetica solare.

☐ Relazione tra variazione flusso (e altri parametri) dei raggi cosmici sulla terra e i parametri dell'eliosfera → discussione ancora molto aperta ed importante per ricostruire l'attività solare nel passato.

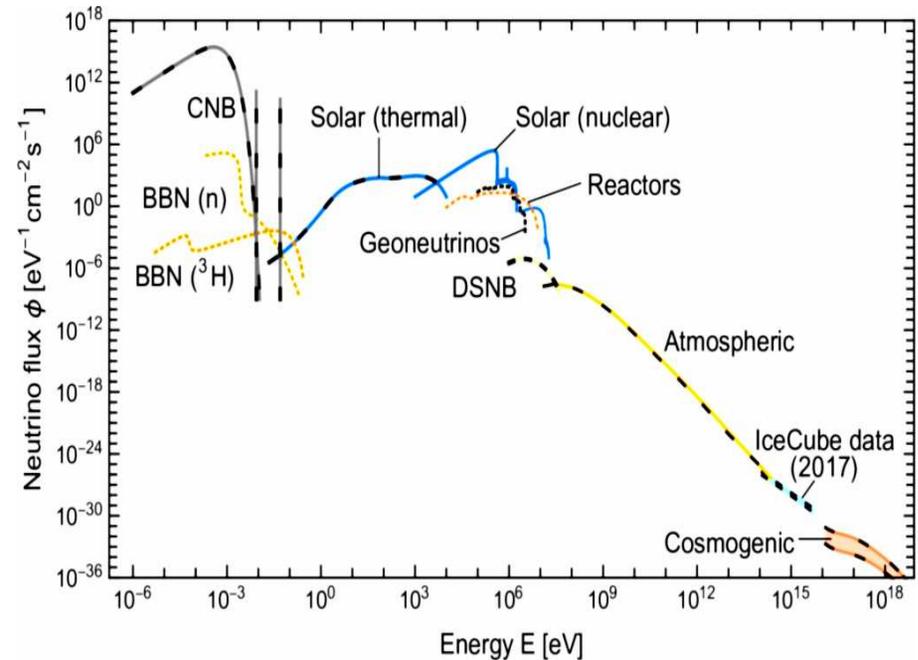
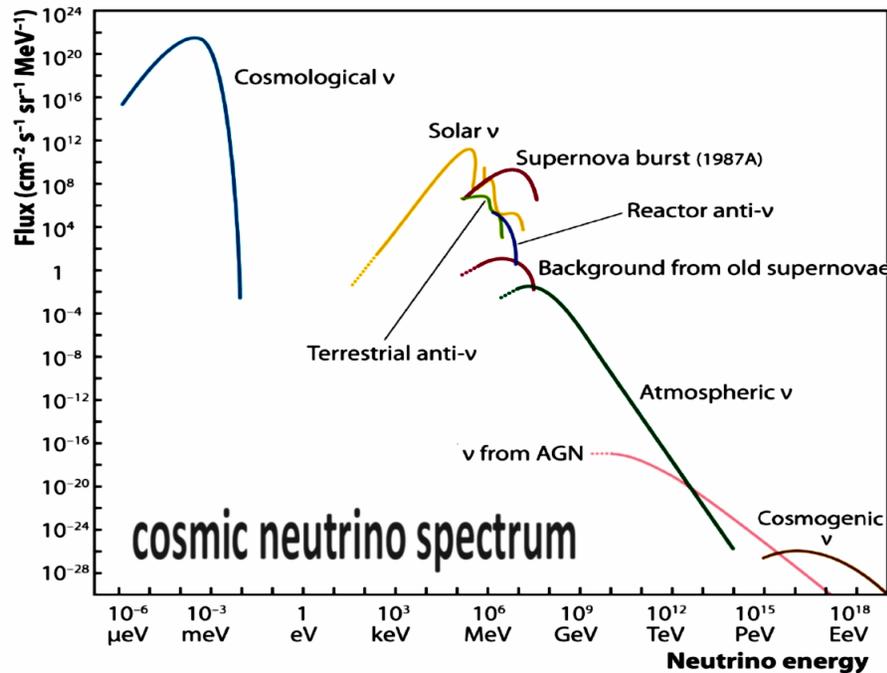
Variation of Cosmic Ray Flux with Sunspot Number



PARTE 1 – I NEUTRINI



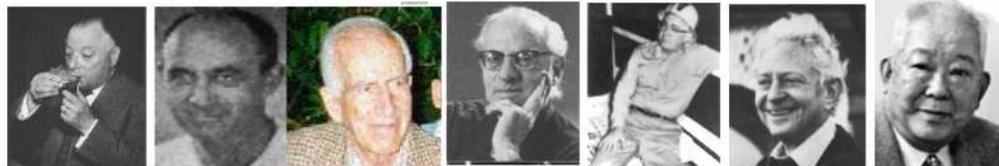
Neutrini cosmici



- Lo spettro dei soli neutrini cosmici si ritiene formato da un fondo a bassa energia rimasto dal Big Bang che permea l'Universo.
- Neutrini cosmici sono stati rilevati dalla vicina supernova SN 1987A.
- I neutrini atmosferici sono prodotti dalle cascate adroniche dei raggi cosmici impattanti l'alta atmosfera.
- Neutrini cosmici da fuori la nostra galassia (e forse dalla nostra galassia) osservati da IceCube (attesi teoricamente da GRB, blazars, star-forming galaxies, galaxy clusters, e da pulsar, SNR, dark matter...).
- I neutrini più energetici sono attesi dal decadimento dei pioni creati nelle collisioni tra fotoni del fondo cosmico a microonde e protoni cosmici (da raggi cosmici) con energie superiori a 4×10^{19} eV (soglia di Greisen-Zatsepin-Kuz'min GZK).

Breve storia del neutrino

- ❑ 1898 Scoperta della radioattività
- ❑ 1926 Problema con la radioattività beta
- ❑ 1930 Pauli inventa la particella neutrino
- ❑ 1932 Fermi battezza il neutrino e costruisce la teoria dell'interazione debole.
- ❑ 1946 Pontecorvo programma esperimenti per la rilevazione dei neutrini.
- ❑ 1956 Prima osservazione (Cowan e Reines premio nobel nel 1995) del neutrino da parte di un esperimento usando un reattore nucleare
- ❑ 1957 Pontecorvo: ipotesi di oscillazioni di neutrino.
- ❑ 1962 Scoperta di un secondo tipo di neutrino (muonico) da parte di Lederman, Schwarz e Steinberger ai laboratori di Brookhaven, e premio Nobel.
- ❑ 1967 Pontecorvo identifica esperimenti di neutrino e il problema della conservazione del numero leptonico, oltre che parlare di
 - ❑ violazione di CP e momento magnetico del neutrino, temi molto attuali oggi.
- ❑ 1970 L'esperimento di Davis in miniera del South Dakota apre il problema e puzzle dei neutrini solare.
- ❑ 1974 Scoperta di correnti neutre grazie ai neutrini.
- ❑ 1987 Neutrini rivelati dalla supernova SN 1987A nella Grande Nube di Magellano dall'esperimento KAMIOKANDE.
- ❑ 1991 Gli esperimenti CERN LEP mostrano che ci sono solo tre tipi di neutrini leggeri.
- ❑ 1992 Neutrini solari mancanti confermati dall'esperimento GALLEX.
- ❑ 1995 Premio Nobel 1995 per il primo esperimento del 1956 e successivi studi sul neutrino a Reines.
- ❑ 1998 Esperimento Super-Kamiokande osserva anche in ambito astrofisico l'oscillazione dei neutrini.
- ❑ 2001 Esperimento Sudbury Neutrino Observatory risolve il puzzle dei neutrini solari: nuova evidenza per neutrini solari che possono cambiare "sapore" e trasformarsi e che conferma sia che le nostre teorie sulla fisica del Sole sono corrette, che il neutrino ha massa diversa da zero.
- ❑ 2002 Kamland osserva la trasmutazione dei neutrini artificiali (creati nei reattori nucleari).
- ❑ 2009 Borexino al Gran Sasso rileva i geo-neutrini (neutrini dalla Terra).
- ❑ 2010 OPERA al Gran Sasso rileva la trasformazione da neutrino muonico a neutrino tauonico.
- ❑ 2015 Premio Nobel 2015 per le oscillazioni del neutrino a Kajita e McDonald.
- ❑ 2019 Esperimento Katrin (Karlsruhe Tritium Neutrino) ha svelato il nuovo limite superiore alla massa del neutrino dimezzandolo: non può pesare più di 1 elettronvolt (eV).



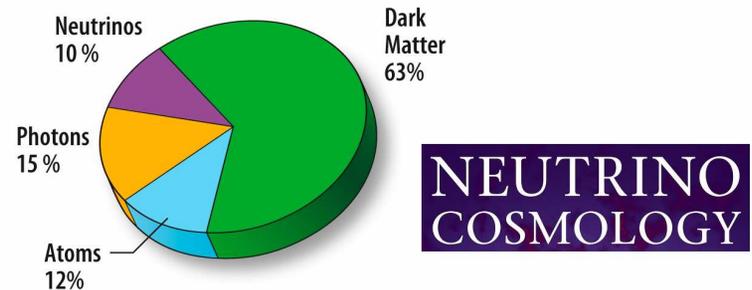
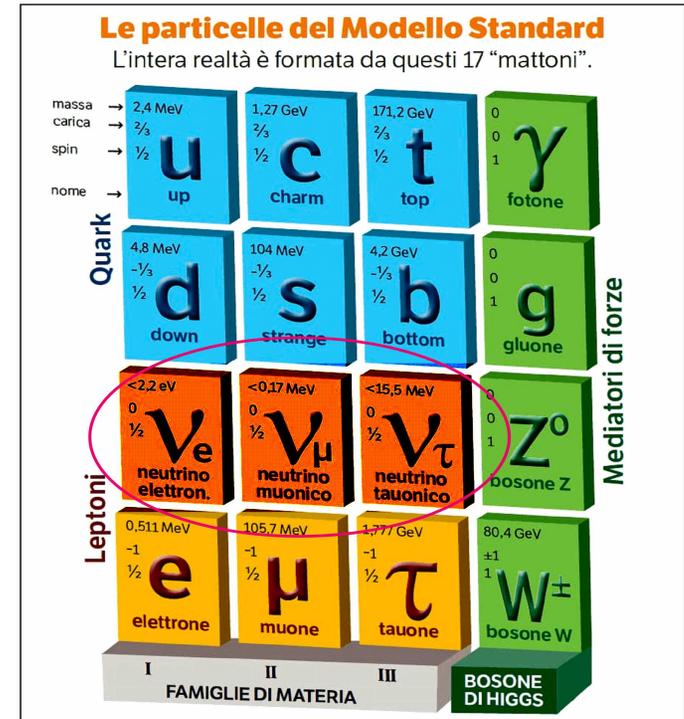
Neutrino: particella misteriosa ancora oggi

□ Dalla previsione di **Wolfgang Pauli** che affermò di aver inventato una particella, il **neutrino**, che “non potrà mai essere osservato” a **giganteschi esperimenti e rivelatori** che misurano neutrini altamente energetici provenienti dal cosmo, per passare dalla scoperta della **natura massiccia e camaleontica** di questa particella e **un gran numero di premi Nobel grazie al neutrino** sono stati fatti molti progressi.

□ Eppure il **neutrino ha ancora molti segreti da svelare** e potrebbe davvero essere il **messaggero della tanto attesa nuova fisica oltre il "Modello Standard"** della fisica delle particelle e sicuramente sarà prezioso per dare uno sguardo ai **primi istanti della vita dell'Universo**.

Domande ancora aperte dopo 90 anni dalla sua scoperta

- Quanto è la **massa del neutrino**?
- Come sono **ordinati in massa i tre neutrini**?
- Il neutrino è una **particella di Dirac o di Majorana**?
- Esistono altri tipi di neutrini (detti sterili)?
- I neutrini violano **CP**?
- I neutrini come uno dei **messaggeri dell'Universo violento**?
- Possiamo misurare i neutrini del fondo cosmico e fare una foto dell'Universo **1 secondo dopo il Big Bang**?



13.7 BILLION YEARS AGO
(Universe 380,000 years old)

Scoperta dei neutrini

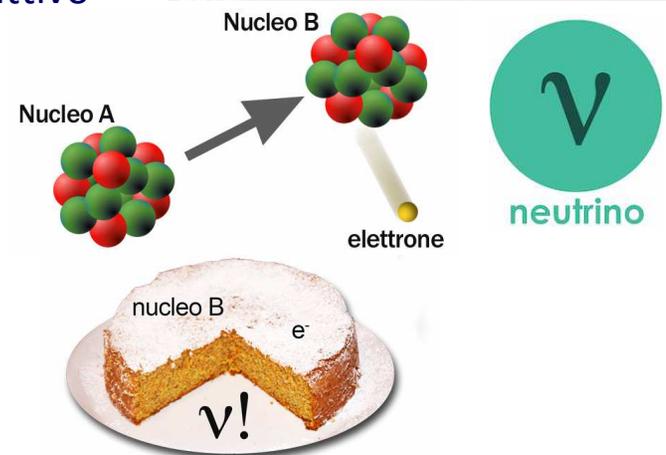
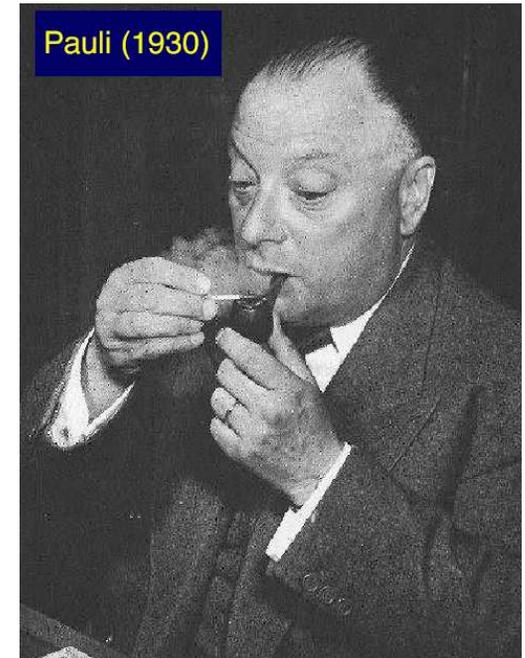
□ Il neutrino è associato a numeri **piccolissimi** (es.: **massa**, sezione d'urto, etc.) e **grandissimi** (es. **numero** neutrini dal Sole o esplosioni supernovae, **dimensioni dei rivelatori e laboratori** necessari per rivelarli, etc.) → questo è probabilmente già un indice della sua **speciale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

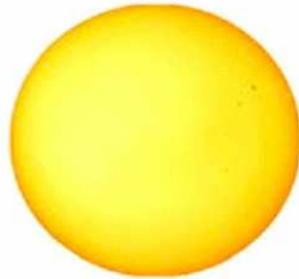
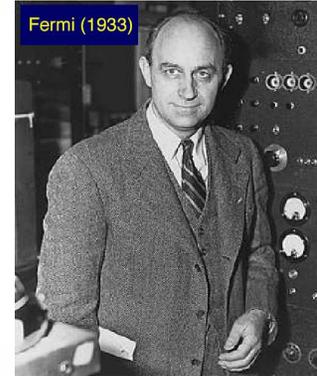
→ **Wolfgang Pauli** ipotizzò l'esistenza di una strana particella che compare quando il nucleo radioattivo emette l'elettrone (in tal modo sono sanate violazioni leggi conservazione massa-energia, quantità di moto, momento angolare).



Scoperta dei 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.



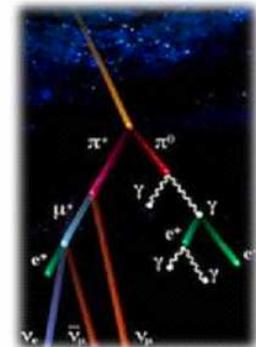
Neutrini Solari



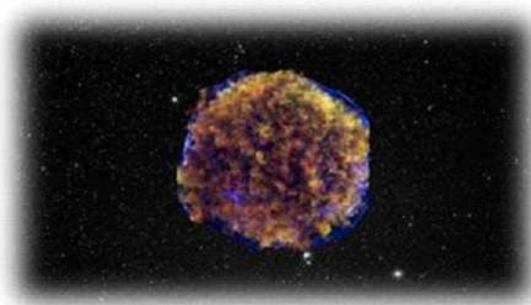
Neutrini Fossili dal Big Bang



Neutrini Artificiali da acceleratori



Neutrini da interazione di raggi cosmici in atmosfera



Neutrini da esplosioni di SuperNova



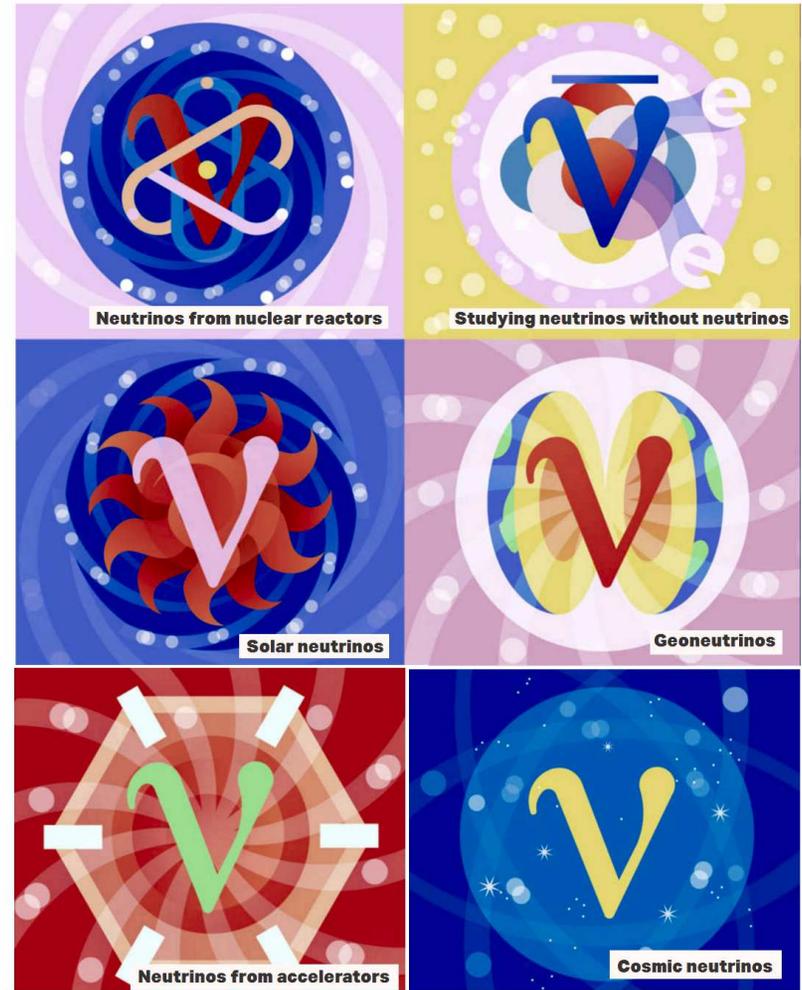
Neutrini Astrofisici (Active Galactic Nucleus, Gamma Ray Bursts, etc...)



Neutrini prodotti dal nostro pianeta

Neutrino: la sua carta d'identità

- ❑ Particella associata a un tipo di radiazione
- ❑ Nascita (del concetto di neutrino): 1930
- ❑ Maternità / Paternità: **Wolfgang Pauli ed Enrico Fermi**
- ❑ Famiglia: **Amaldi, Majorana, Pontecorvo**
- ❑ Residenza: quasi ovunque
- ❑ Origine: interno della Terra, interno del Sole e stelle, reattori centrali nucleari, acceleratori di particelle, galassie attive con buchi neri giganti ed altri oggetti cosmici (pulsar, GRBs, ?), materia oscura(?), ...
- ❑ Caratteristiche distintive: estremamente **sfuggente (penetrante)**
- ❑ Massa: "**molto piccola**" rispetto a quella di altre particelle
- ❑ Stato familiare: la famiglia comprende **3 tipi (generazioni)**



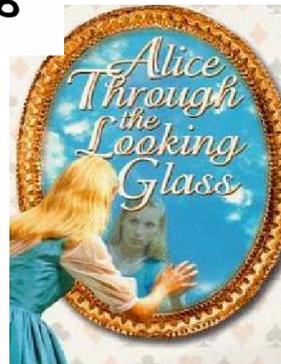
Neutrino: la sua carta d'identità

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

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?	?

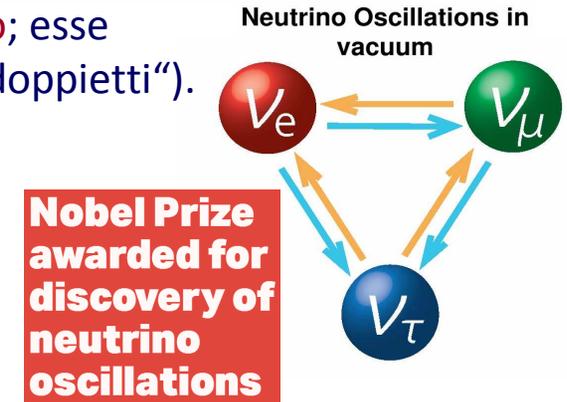
Una trottola fatta di niente!... Ma molto comune nel nostro Universo!

particella di **Dirac**
 $\nu \neq \bar{\nu}$

particella di **Majorana**
 $\nu = \bar{\nu}$

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 subiscono), i neutrini possono trasformarsi nel rispettivo leptone partner.



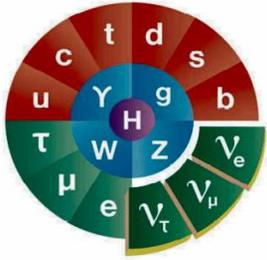
MATERIA			QUARK
u up	c charm	t top	
d down	s strange	b beauty	
ν_e neutrino e	ν_μ neutrino μ	ν_τ neutrino τ	LEPTONI
e elettrone	μ muone	τ tau	
1 ^a	2 ^a famiglia	3 ^a	

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

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



Ancora sulle proprietà dei neutrini



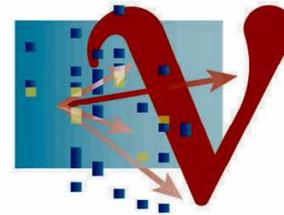
FUNDAMENTAL

Neutrinos are fundamental particles, which means that—like quarks and photons and electrons—they cannot be broken down into any smaller bits.



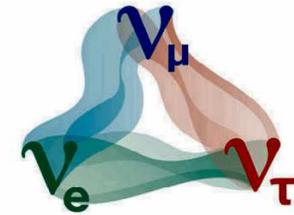
ABUNDANT

Of all particles with mass, neutrinos are the most abundant in nature. They're also some of the least interactive. Roughly a thousand trillion of them pass harmlessly through your body every second.



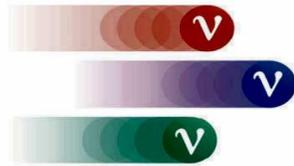
ELUSIVE

Neutrinos are difficult but not impossible to catch. Scientists have developed many different types of particle detectors to study them.



OSCILLATING

Neutrinos come in three types, called flavors. There are electron neutrinos, muon neutrinos and tau neutrinos. One of the strangest aspects of neutrinos is that they don't pick just one flavor and stick to it. They oscillate between all three.



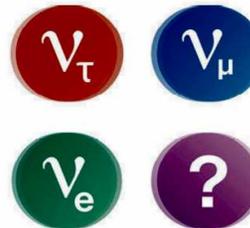
LIGHTWEIGHT

Neutrinos weigh almost nothing, and they travel close to the speed of light. Neutrino masses are so small that so far no experiment has succeeded in measuring them. The masses of other fundamental particles come from the Higgs field, but neutrinos might get their masses another way.



DIVERSE

Neutrinos are created in many processes in nature. They are produced in the nuclear reactions in the sun, particle decays in the Earth, and the explosions of stars. They are also produced by particle accelerators and in nuclear power plants.



MYSTERIOUS

Neutrinos are mysterious. Experiments seem to hint at the possible existence of a fourth type of neutrino: a sterile neutrino, which would interact even more rarely than the others.



VERY MYSTERIOUS

Scientists also wonder if neutrinos are their own antiparticles. If they are, they could have played a role in the early universe, right after the big bang, when matter came to outnumber antimatter just enough to allow us to exist.

Sorgenti di neutrini

Solar neutrinos

From the process of thermonuclear fusion inside a star. Also produced copiously by supernovae. Our sun produces about 2×10^{38} per second total.

Neutrinos from nuclear reactors and accelerators

A standard nuclear power plant radiates about 5×10^{20} neutrinos per second) and their energy is around 4 MeV.

Neutrinos from natural radioactivity on the earth

The power coming from this natural radioactivity is estimated at about 20,000 Giga Watts (about 20,000 nuclear plants!) and the neutrinos coming from this radioactivity are numerous: about 6 millions per second and per cm².

Neutrinos from cosmic rays

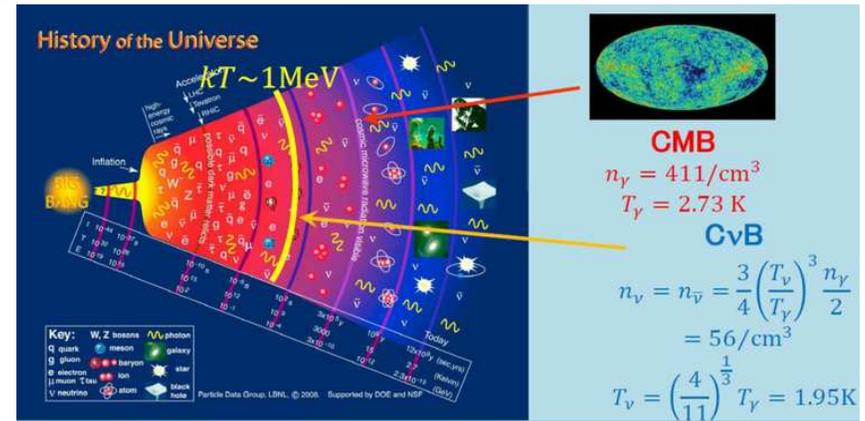
When a cosmic ray (proton coming from somewhere in space) penetrates the atmosphere, it interacts with an atomic nucleus and this generates a particles shower. They are called "atmospheric neutrinos".

Neutrinos from the Big-Bang

The "standard" model of the Big-Bang predicts, like for the photons, a cosmic background of neutrinos. There are about 330 neutrinos per cm³. But their energy is theoretically so little (about 0.0004 eV), that no experiment, even very huge, has been able to detect them.

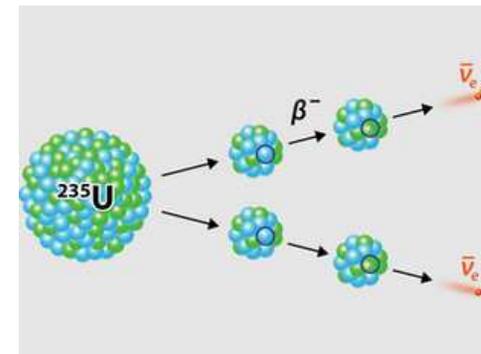
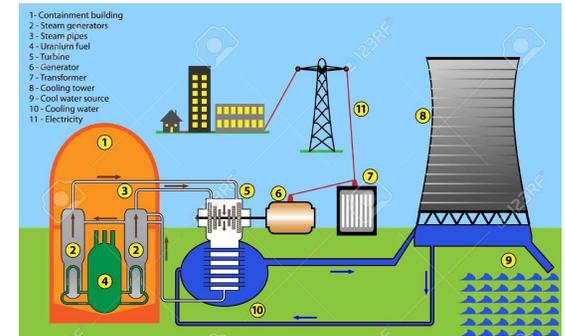
Neutrini creati dall'uomo (artificiali) e naturali

- ❑ Molti neutrini che pervadono l'universo sono stati prodotti circa 14 miliardi di anni fa dopo la nascita dell'Universo (Big Bang). Ora vi sono tanti neutrini quanti in accordo con la temperatura attuale della radiazione (fotoni) di fondo a microonde (cosmic microwave background, CMB) di 2.7° Kelvin.
- fondo cosmico di neutrini (CvB) uniforme è previsto esistere nell'Universo, nell'attuale epoca con densità di 330 neutrini per cm^3 a 1.9° Kelvin → energie piccolissime (10^{-4} eV) nessun esperimento li ha rivelati.



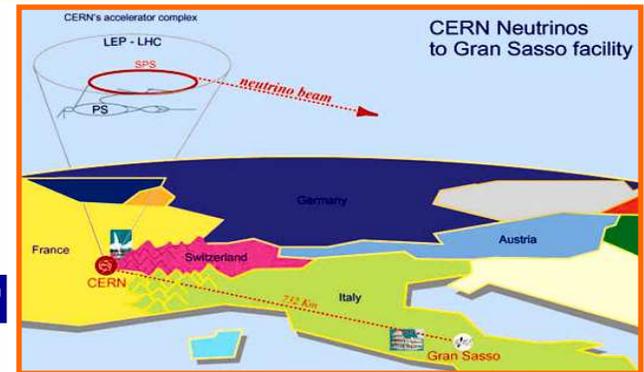
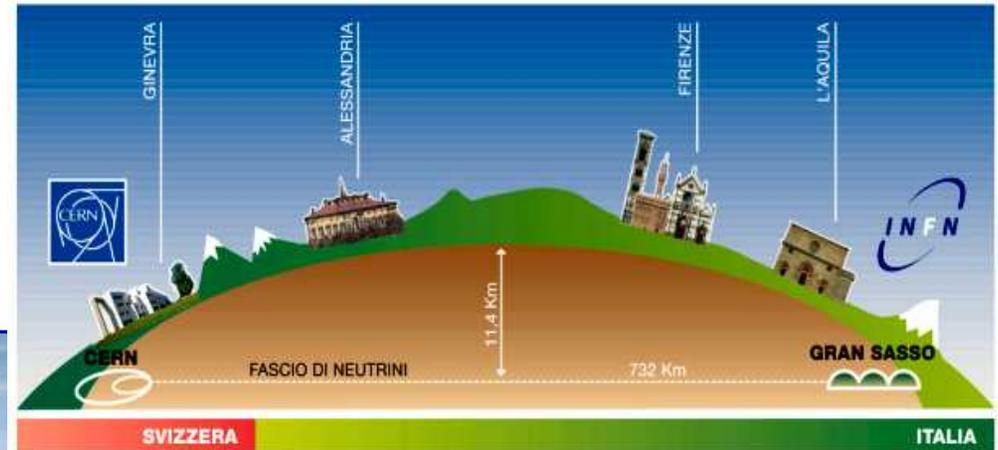
Neutrini prodotti dall'uomo

- ❑ Neutrini prodotti dai reattori a fissione delle centrali nucleari: reattori nucleari producono, oltre a neutroni e altri prodotti di fissione, anche antineutrini elettronici (energia circa 4 MeV). Un reattore a fissione di media potenza produce 100 miliardi di miliardi di neutrini al secondo.
- ❑ Esplosioni di bombe atomiche → neutrini.
- ❑ Fenomeni fisici generali nella atmosfera terrestre → neutrini
- ❑ Fasci di neutrini creati e sparati dal CERN di Ginevra ai Laboratori INFN del Gran Sasso a 730 km di distanza, per scopi di ricerca.



CERN di Ginevra e laboratori INFN Gran Sasso legati dai neutrini

Dal CERN al Gran Sasso: l'esperimento *Opera*, dal 2008 al 2012 ha studiato fasci di neutrini creati e sparati dal CERN di Ginevra ai Laboratori INFN del Gran Sasso dopo aver percorso 730 km nella la crosta terrestre, in 2.4ms.
 → per la prima volta osservato il fenomeno dell'oscillazione di un neutrino muonico in uno tauonico.



Il laboratorio sotterraneo del Gran Sasso dell'INFN

Neutrini dall'interno del Sole e della Terra



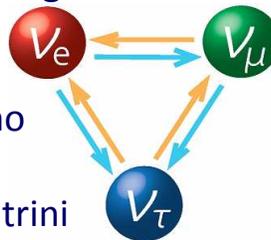
□ Grande quantità di neutrini prodotta all'interno delle stelle e in particolare del Sole.

□ Ogni cm² 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



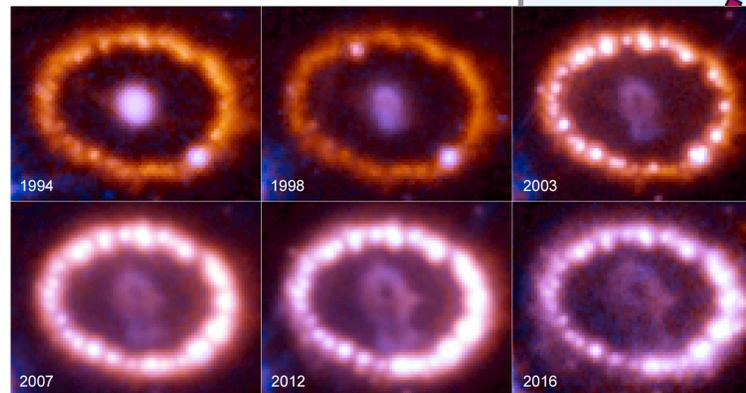
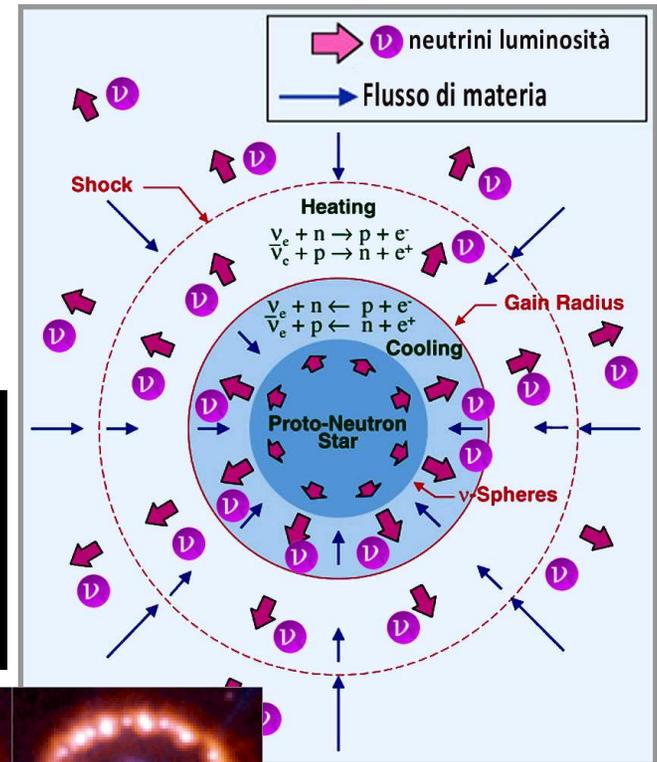
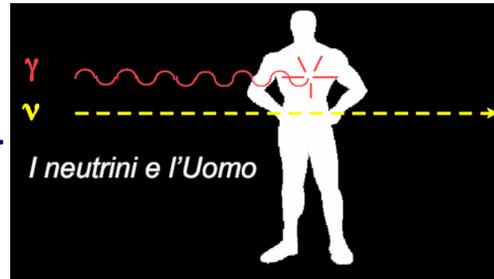
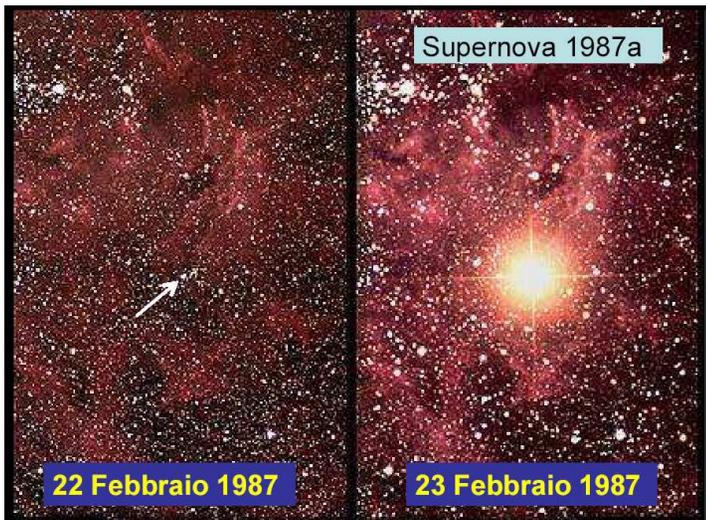
□ Sotto la crosta terrestre c'è un mare di uranio e torio. Lo sapevamo ma ora studiando i neutrini che si originano al centro della Terra, ne abbiamo certezza.

□ 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 (10⁹ 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.

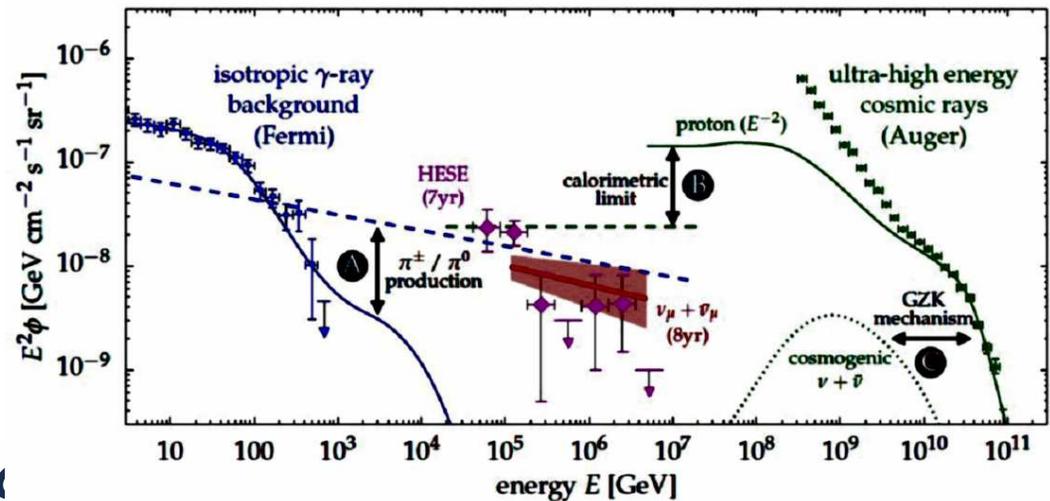
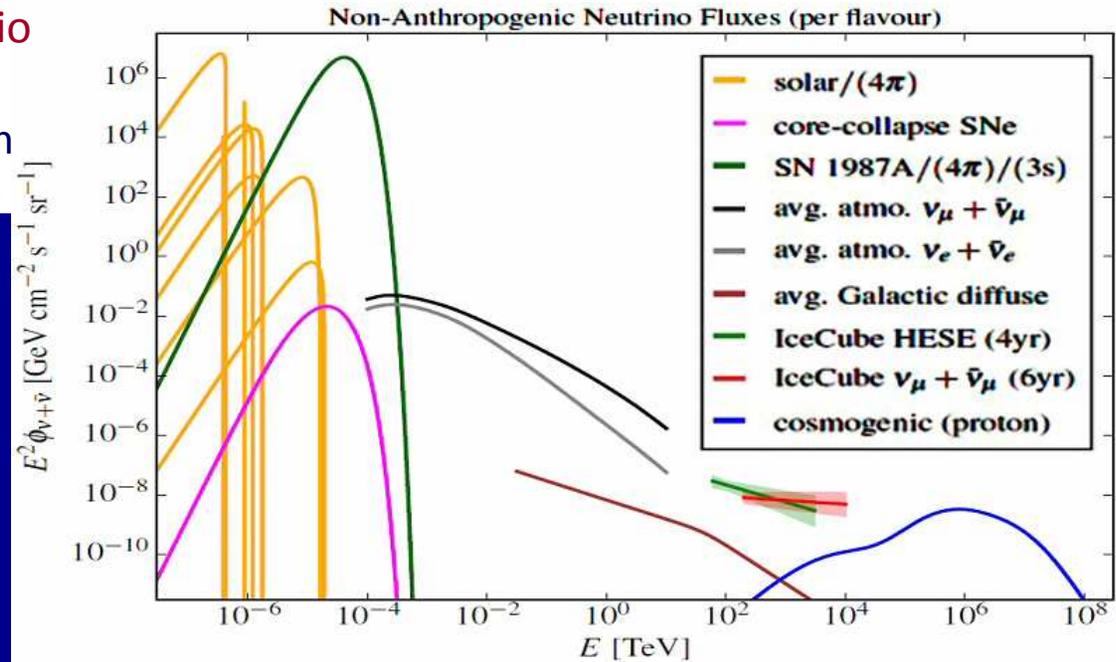
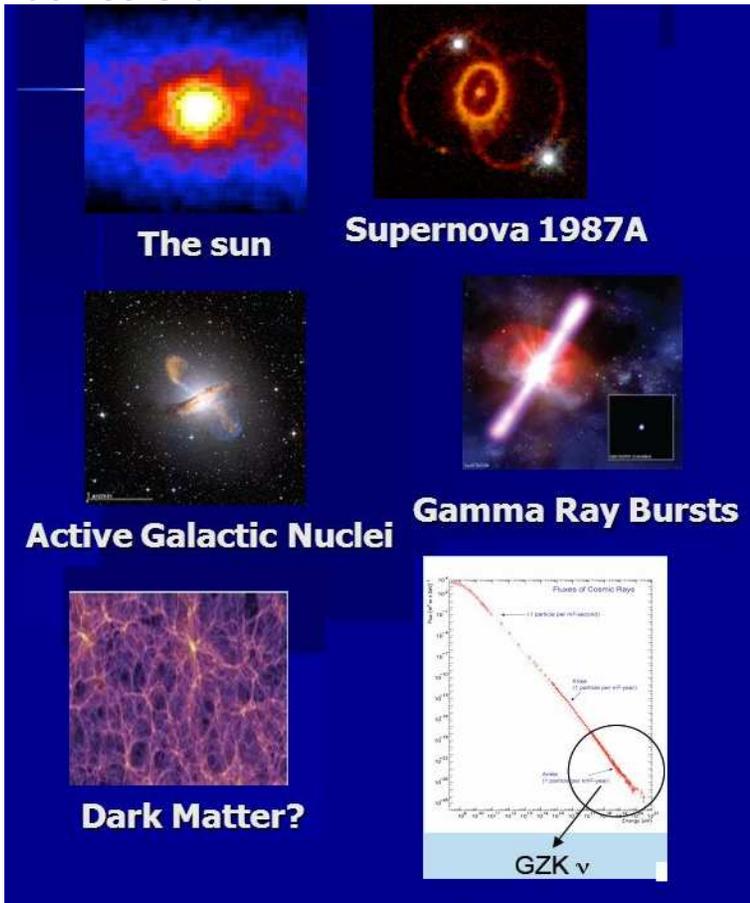
Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO), China
Status: Construction begun
Cost: \$330 million
Sits under 700 metres of rock.

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 naturali dallo spazio

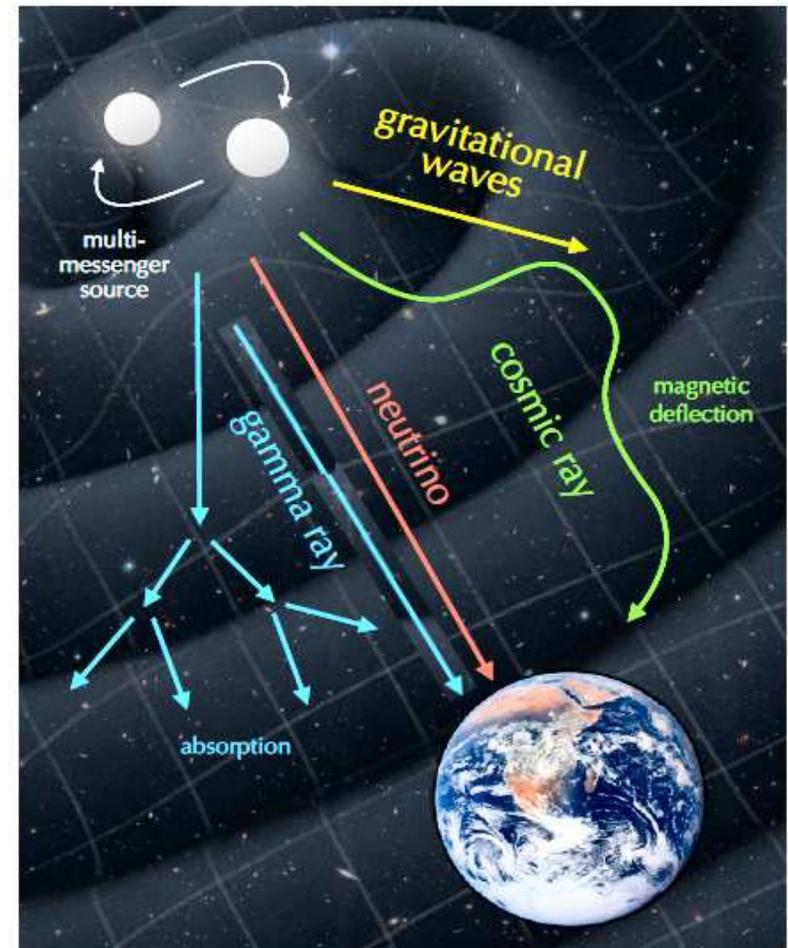
Neutrini cosmici = neutrini dallo spazio che non provengono dal Sole (sorgente predominante), ne prodotti in atmosfera.



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.

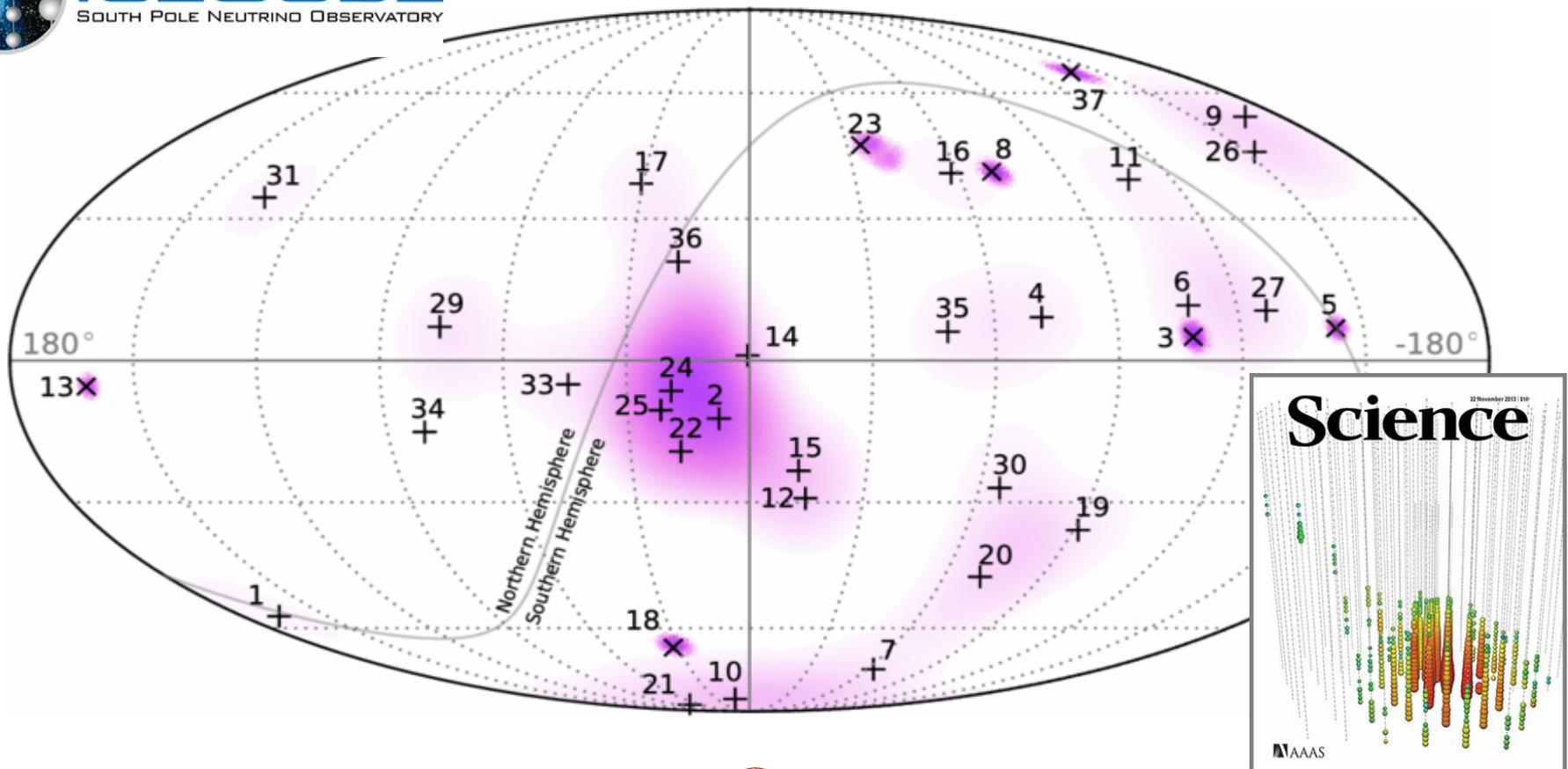


Il cielo dei neutrini visto dall'esperimento IceCube

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).

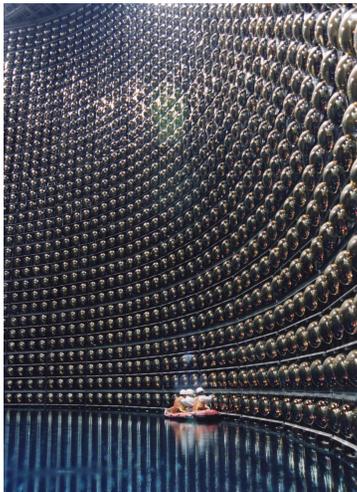
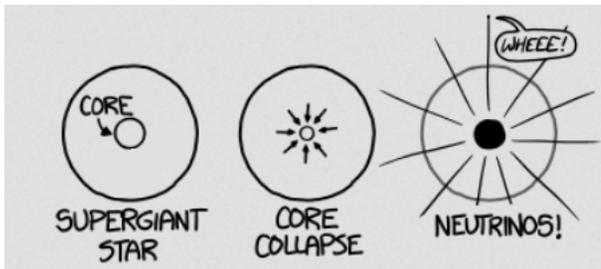


ICECUBE
SOUTH POLE NEUTRINO OBSERVATORY



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).



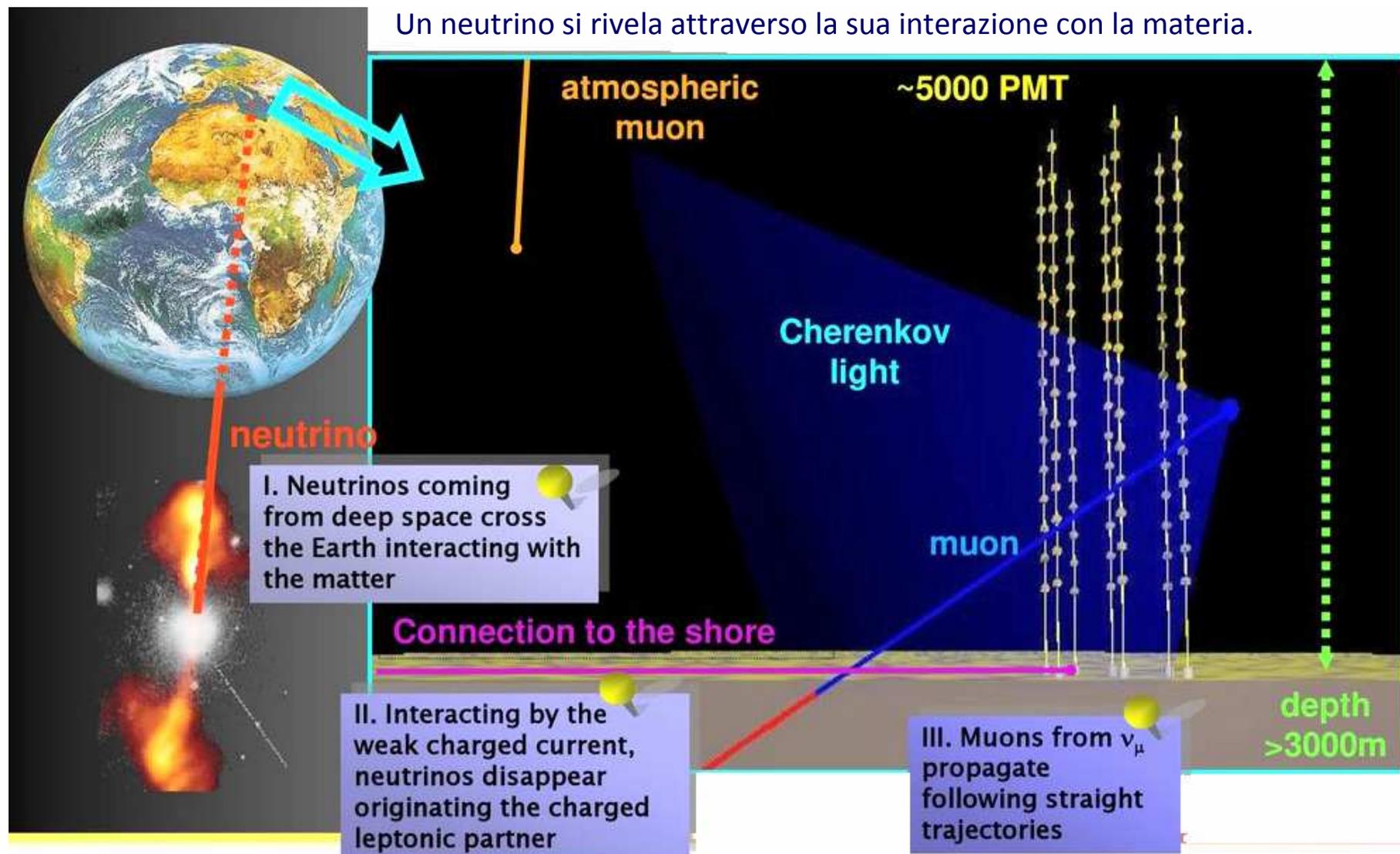
back-of-the-envelope ($E_\nu \sim 1\text{PeV} = 10^{15} \text{ eV}$):

- **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** :

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

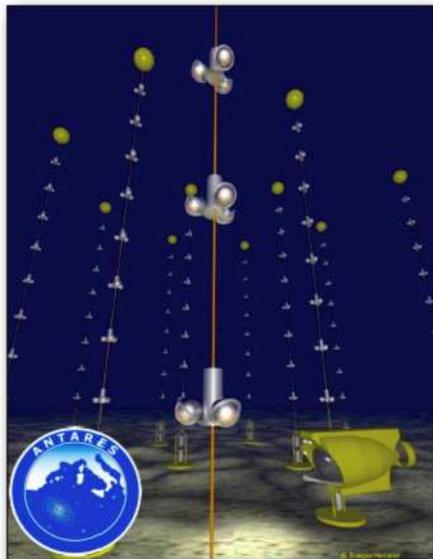
Principio di rivelazione

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

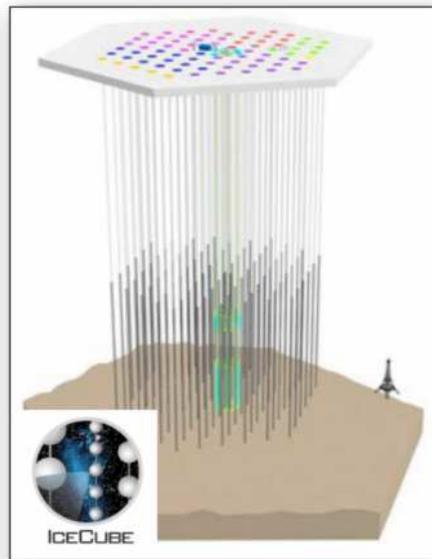


Rivelatori di luce Cherenkov ottica per neutrini di altissima energia (telescopi per neutrini cosmici)

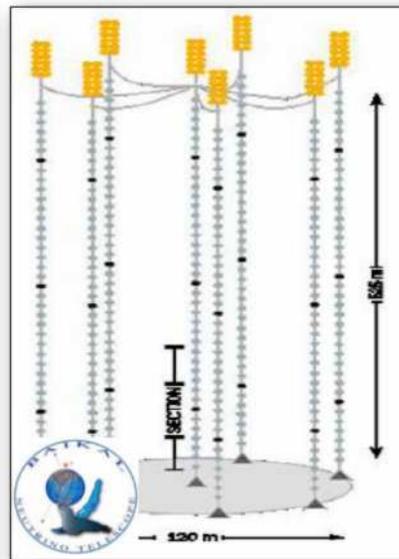
Antares



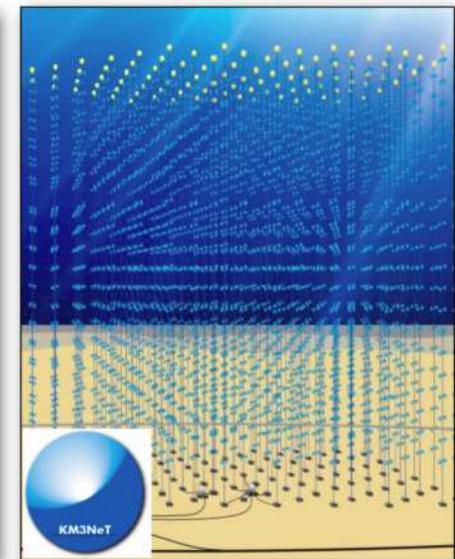
IceCube



Baikal-GVD



KM3NeT/ARCA

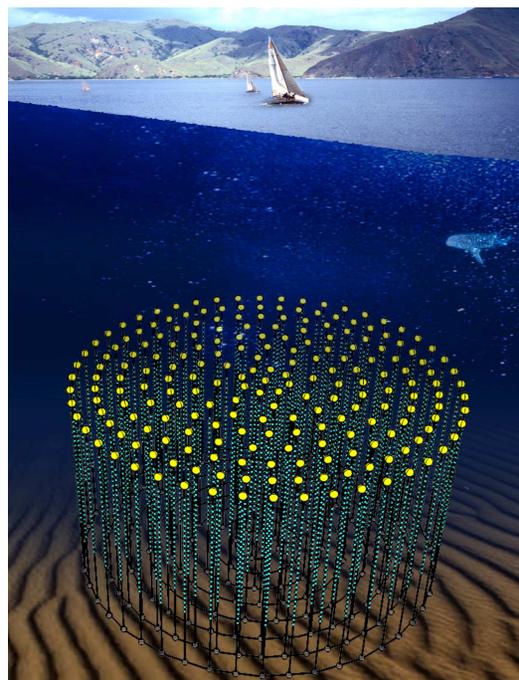


Antares	IceCube	Baikal-GVD	KM3NeT/ARCA
Mediterranean	South Pole	Lake Baikal	Mediterranean
2008–2019	fully instrumented since 2011	under construction (3 out of 8 clusters)	under construction (3 out of 230 DUs)
~0.01 km ³	~1 km ³	~0.4 km ³ (Phase 1) ~1 km ³	~0.1 km ³ (Phase 1) ~1 km ³
885 OMs (10'')	5160 OMs (10'')	2304 OMs (10'')	4140 OMs (31x3'')

Esempio: il prossimo esperimento KM3NeT

- ❑ **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

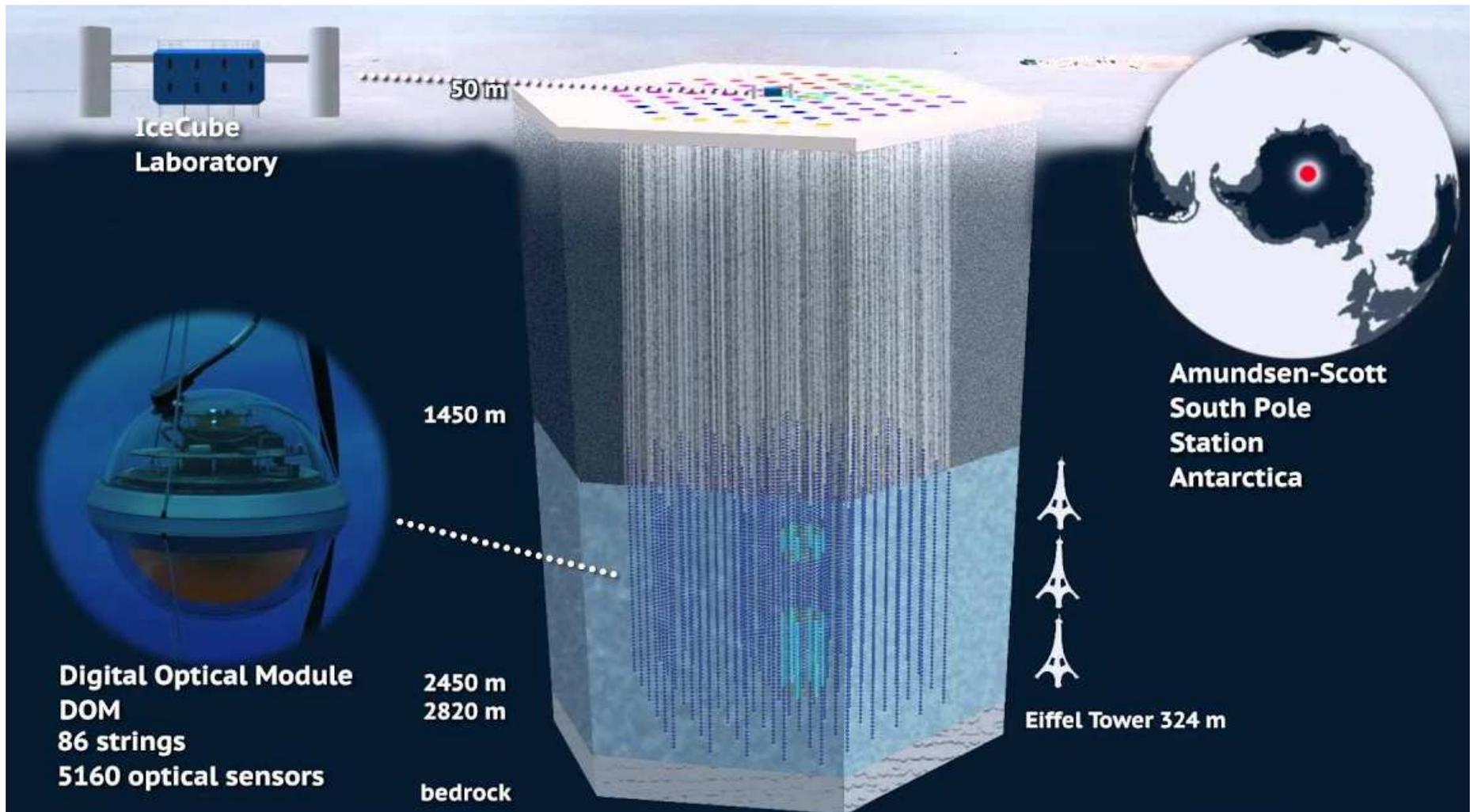
DOVE SI TROVA KM3NET
80 km a sud di Capo Passero

CAPODOLLI
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

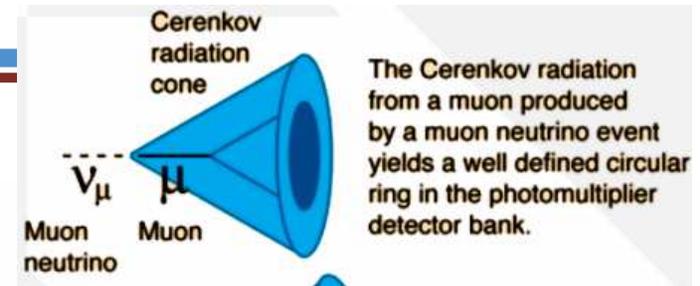
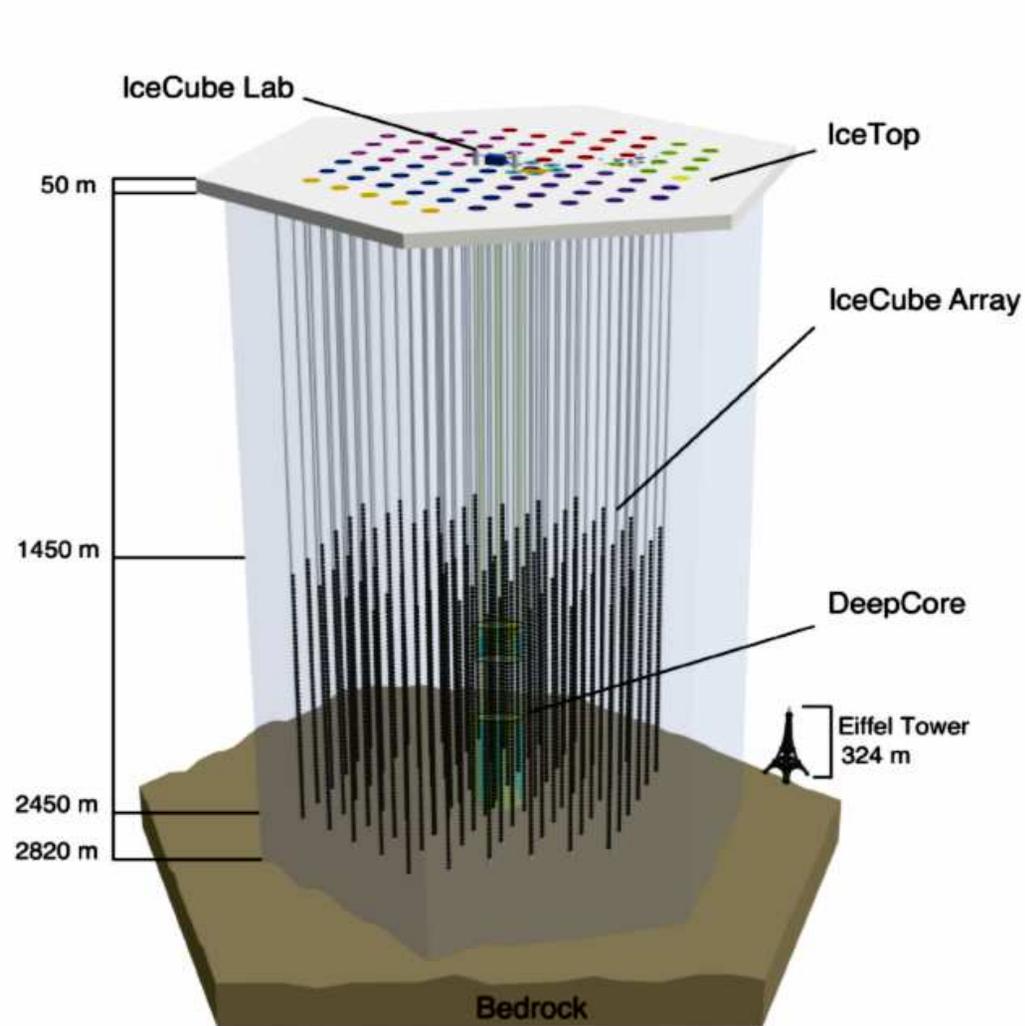
BOA
SENSORI ACUSTICI ascoltano le voci dei capodogli
SENSORI OTTICI per la rilevazione dei neutrini
ZAVORRA

INFN
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Inferografica a cura di -centimetri

L'attuale esperimento IceCube in Antartide

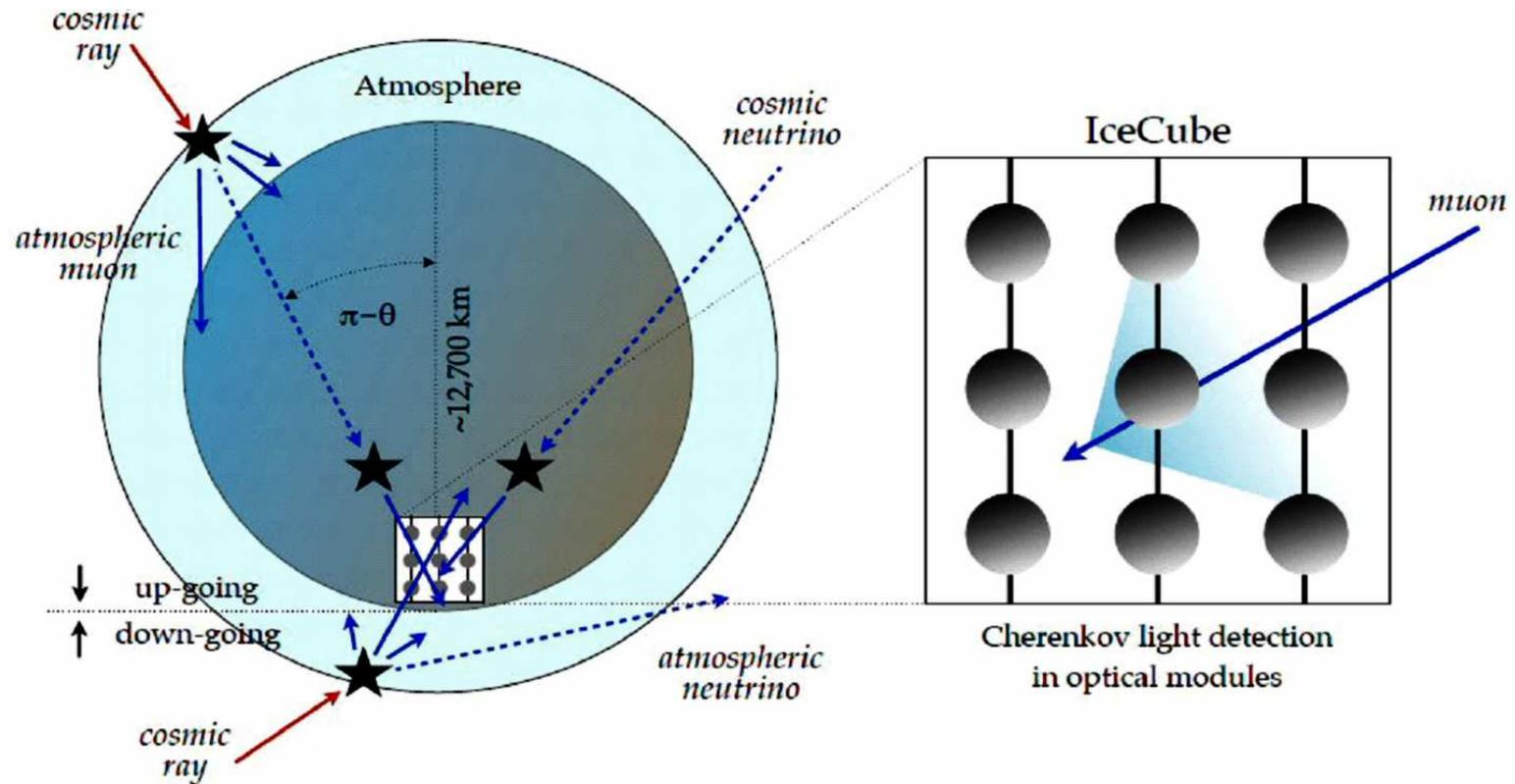


L'attuale esperimento IceCube in Antartide



- 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**

Rivelare neutrini cosmici con IceCube

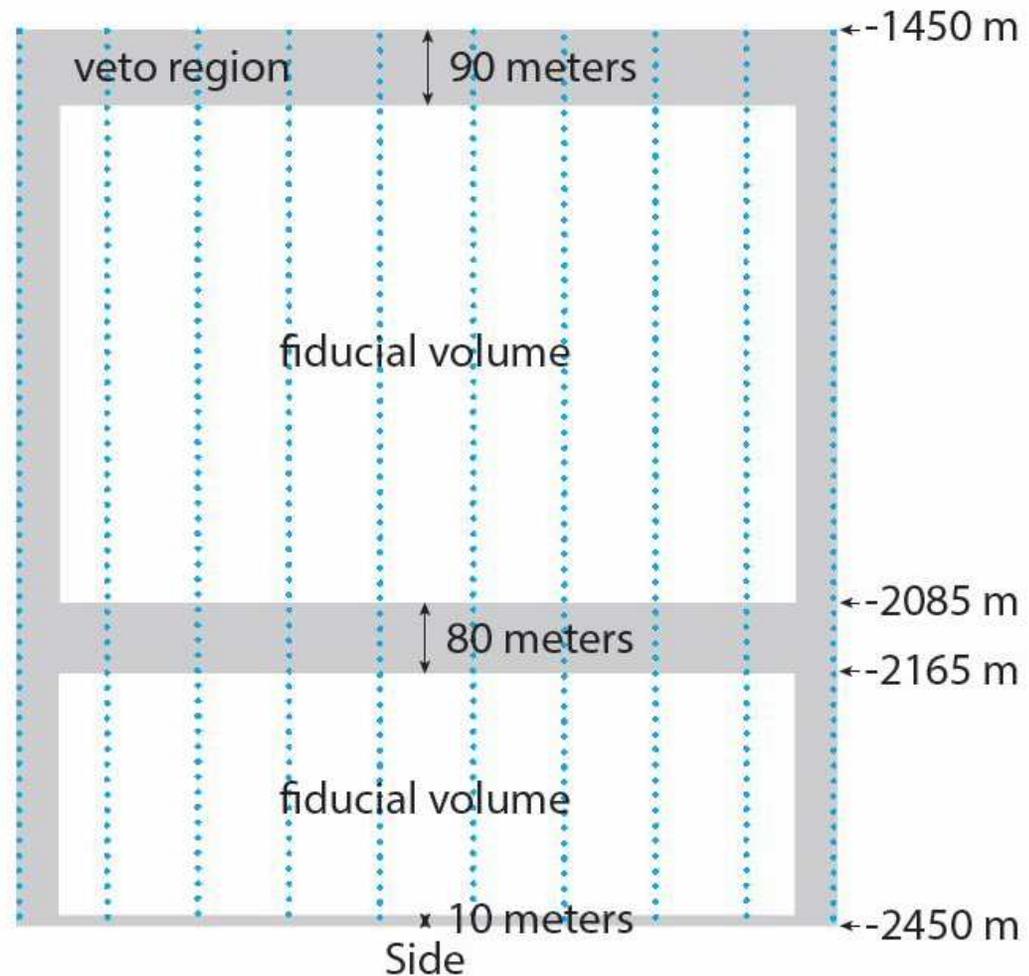


→ Selecting **up-going muon tracks** reduces atmospheric muon background:

$\underbrace{10,000,000,000}_{\text{atmospheric muons (from above)}} : \underbrace{100,000}_{\text{atmospheric neutrinos}} : \underbrace{10}_{\text{cosmic neutrinos}}$

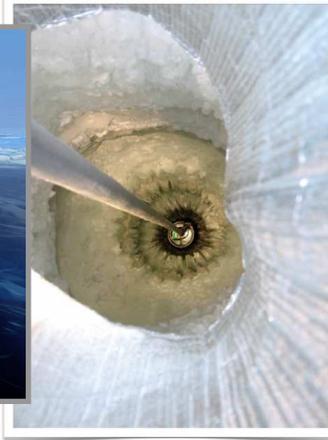
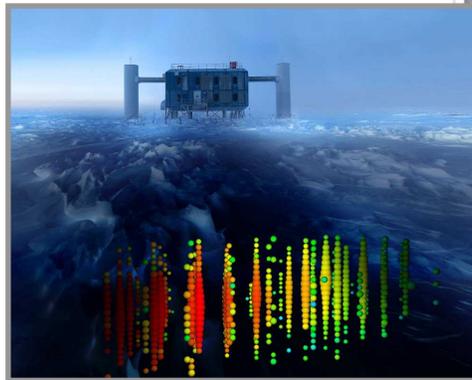
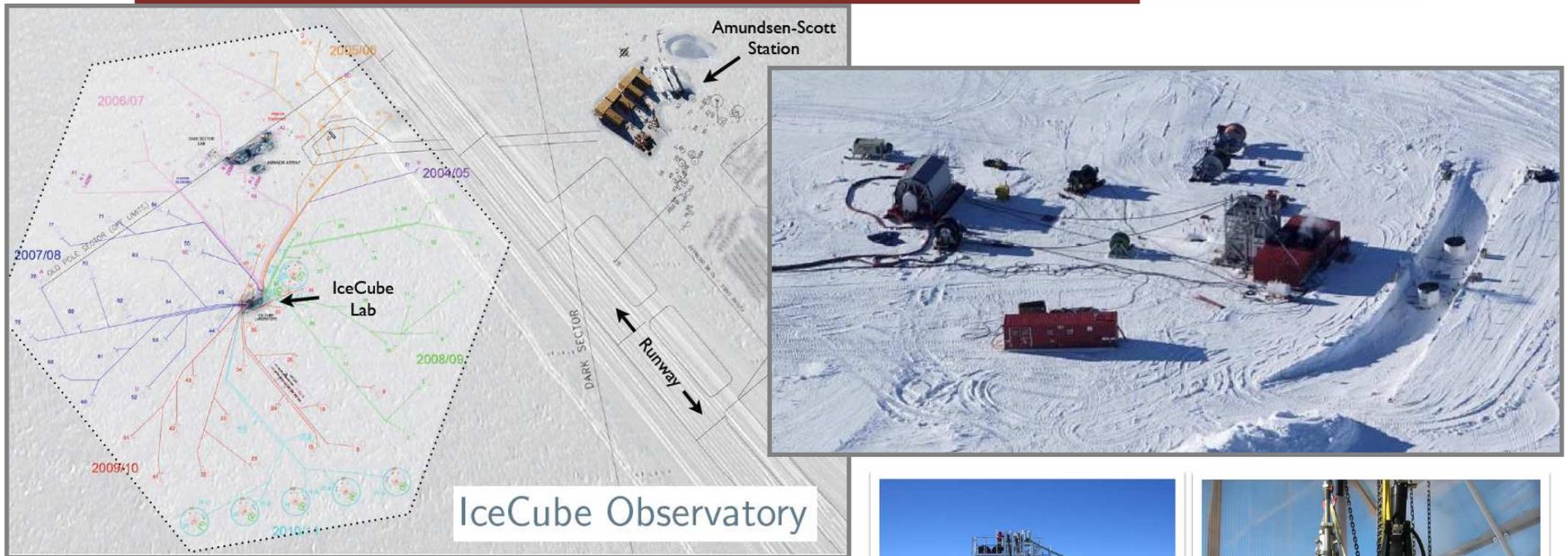
Rivelare neutrini cosmici con IceCube

- Outer layer of optical modules can be used as a **veto region** (gray area):
- ✗ **Atmospheric muons** pass through veto from above.
- ✗ **Atmospheric neutrinos** are produced in coincidence with atmospheric muons.
- ✓ **Cosmic neutrino** events can **start inside the fiducial volume**.
- **High-Energy Starting Event (HESE)** analysis



[IceCube Collaboration'13]

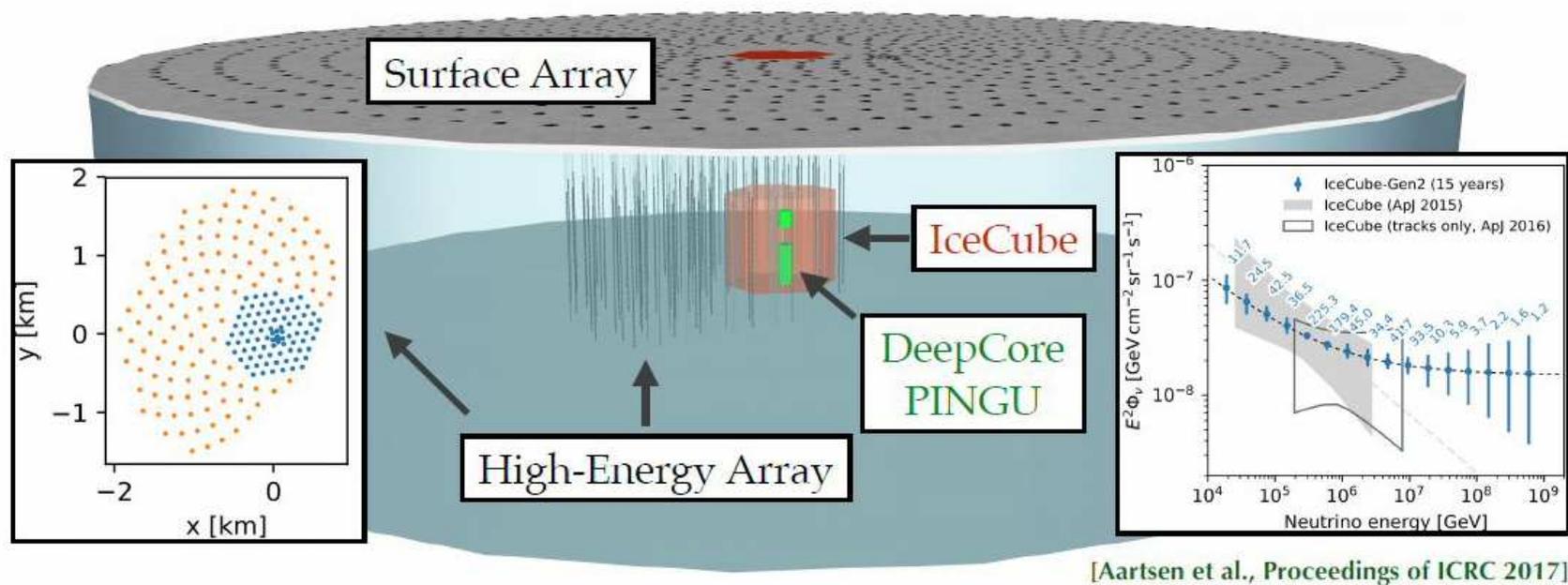
Esperimento IceCube in Antartide



Il futuro: IceCube-Gen2

IceCube-Gen2

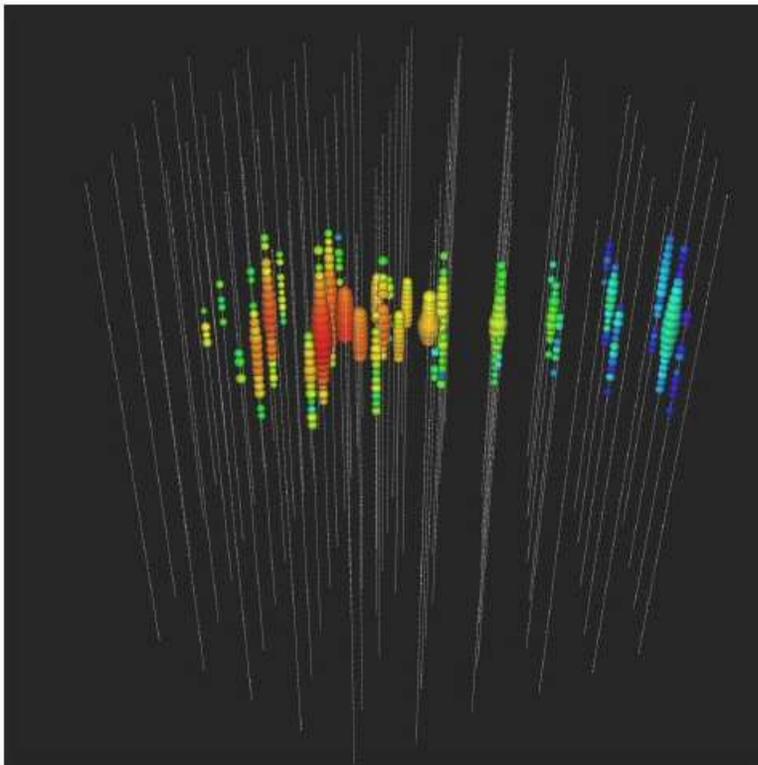
- **Multi-component facility** (low- and high-energy & multi-messenger).
- In-ice **high-energy Cherenkov array** with 6-10 km³ volume.
- **Under investigation:** Surface arrays for in-ice radio Askaryan and cosmic ray veto (air Cherenkov and/or scintillator panels).



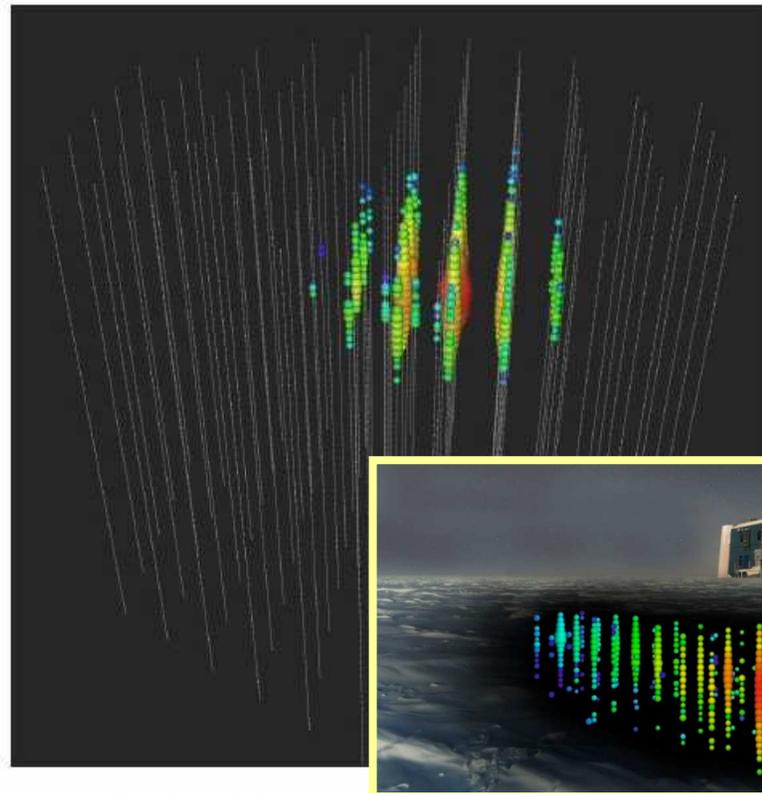
2013: prima storica rivelazione di un neutrino cosmico (non dal Sole) ad altissima energia

First observation of high-energy astrophysical neutrinos by IceCube!

“track event” (from ν_μ scattering)



“cascade event” (from all flavours)

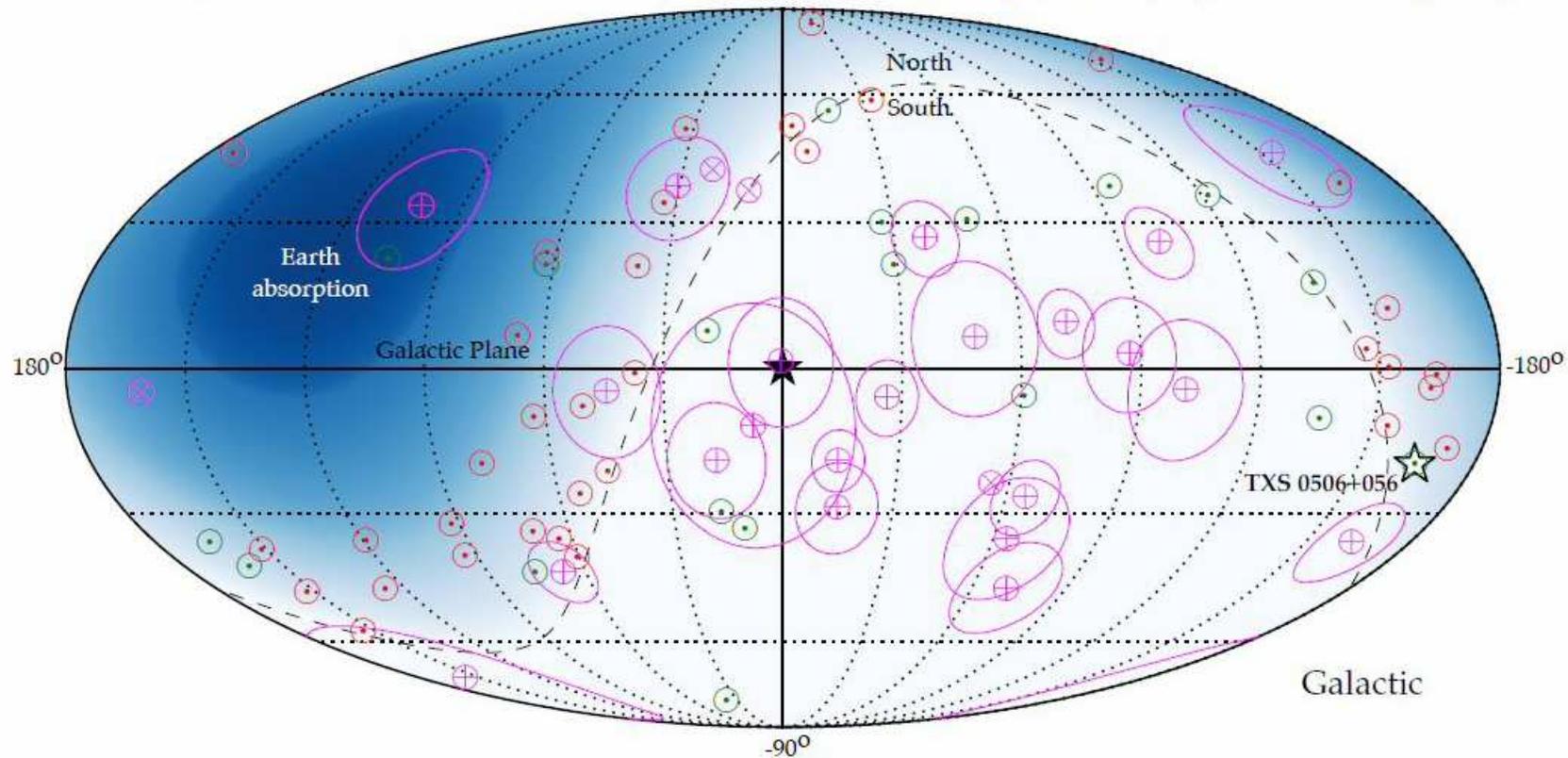


[“Breakthrough of the Year” (Physics World), Science 2013]
(time-dependent neutrino signal: early to late light detection)

Mappa del cielo dei neutrini rivelati da IceCube

Arrival Directions of Cosmic Neutrinos

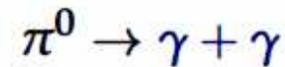
Most energetic neutrino events (HESE 6yr (magenta) & $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ 8yr (red) + public alerts (green))



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

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:

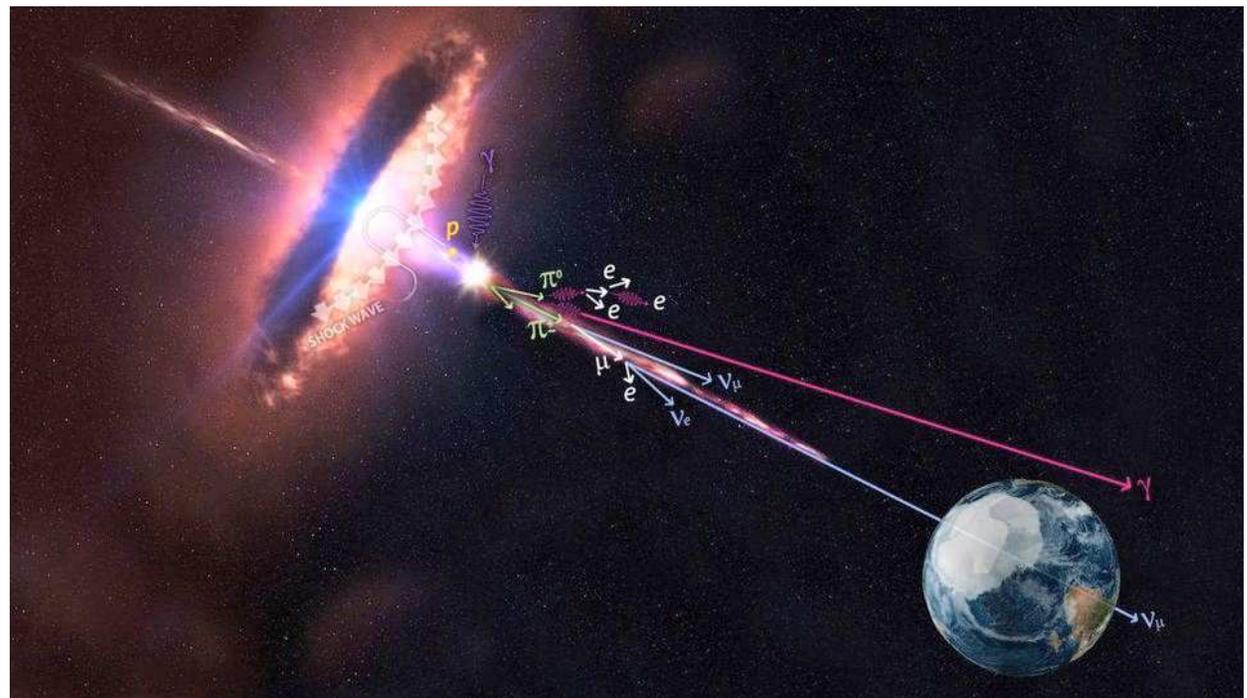
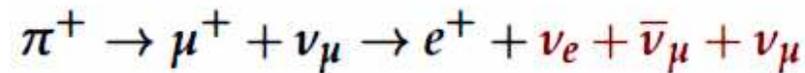


Aspetti unici del neutrino come particella messaggera cosmica:

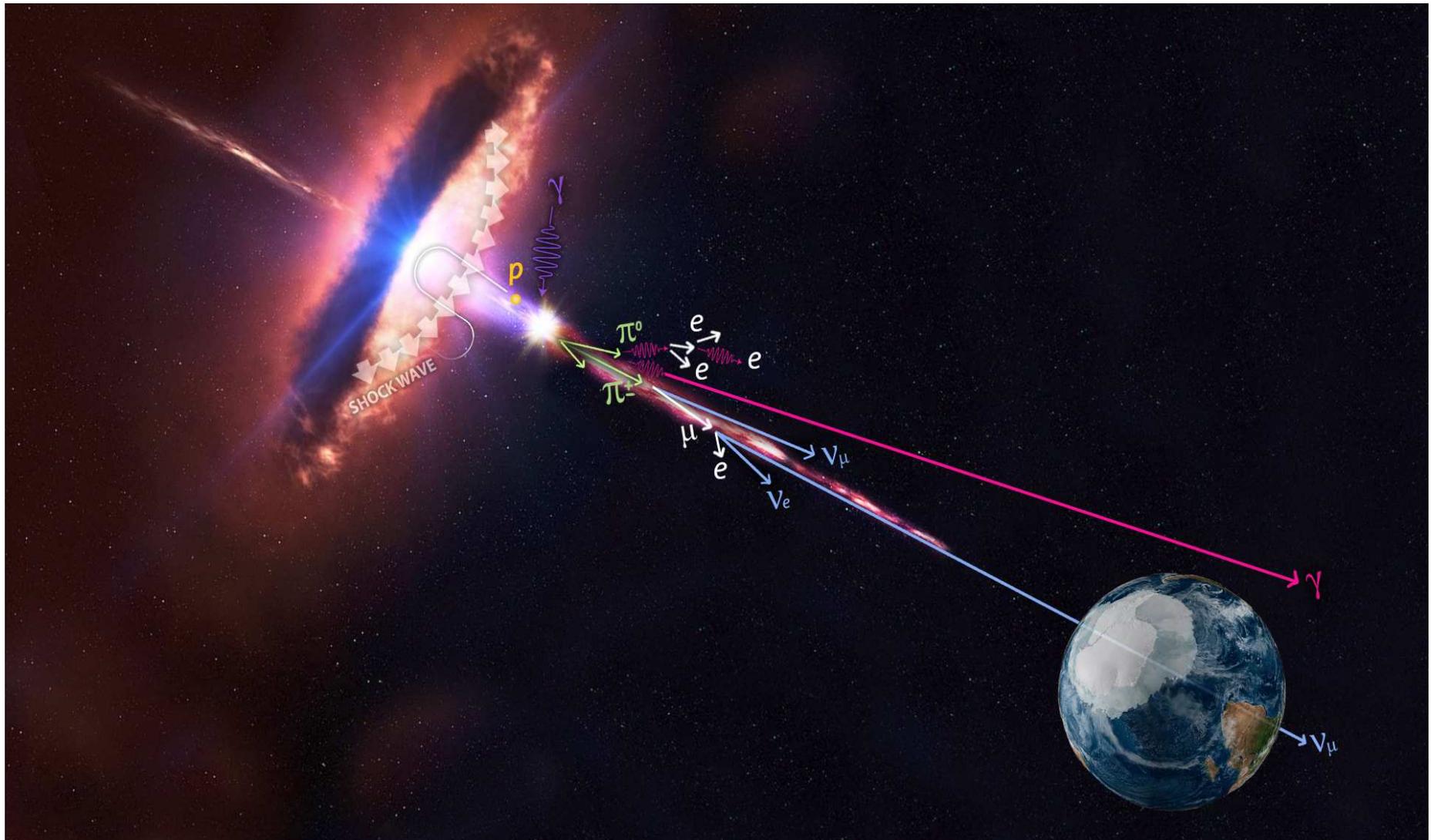
→ **identifica una sorgente** (ed acceleratore) di **raggi cosmici**;

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

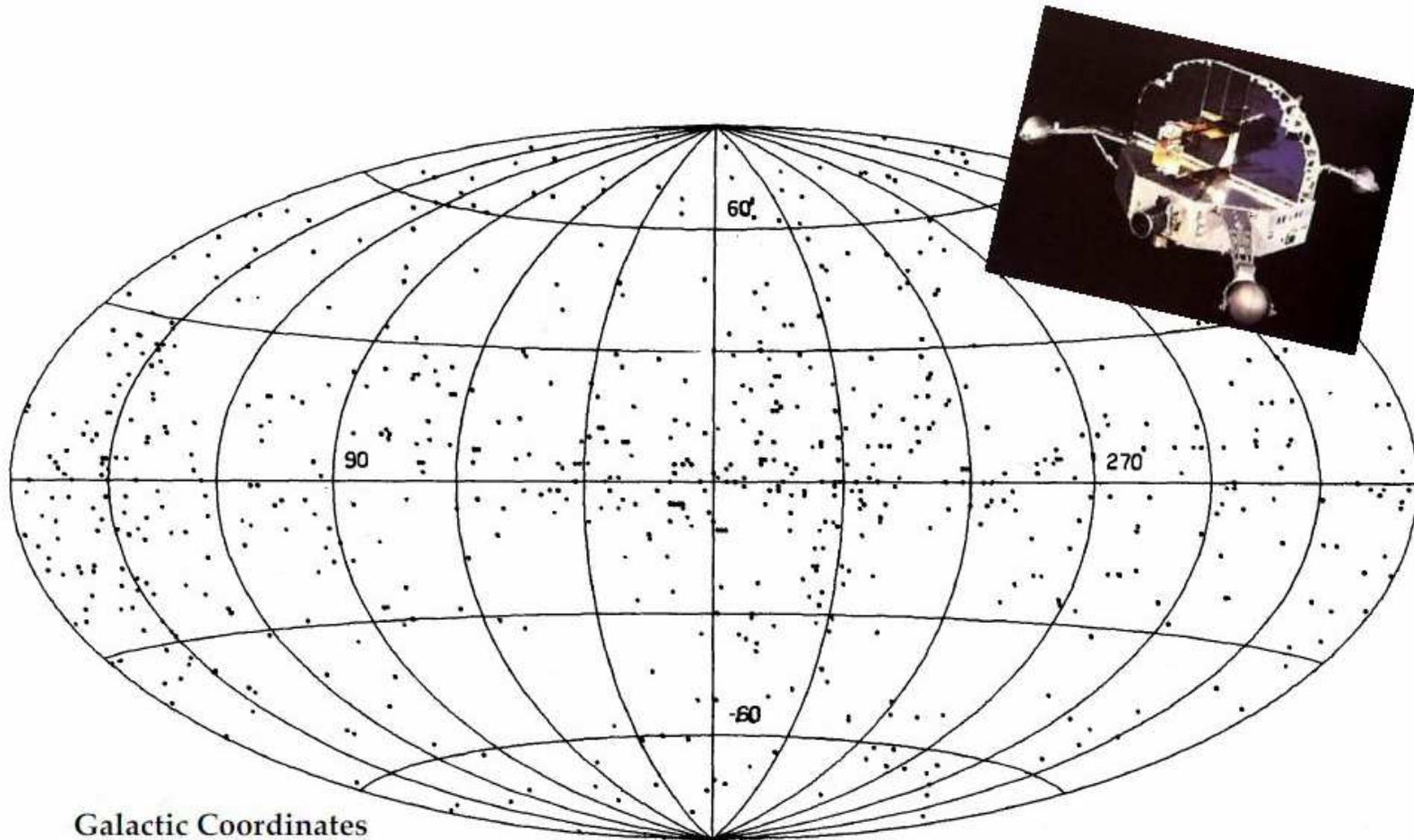
→ **fa luce su una parte ancora oscura dell'astrofisica e fisica delle astroparticelle dell'Universo alle energie molto alte** (very-high-energy, VHE Universe).



PARTE 2 – I FOTONI (RAGGI) GAMMA

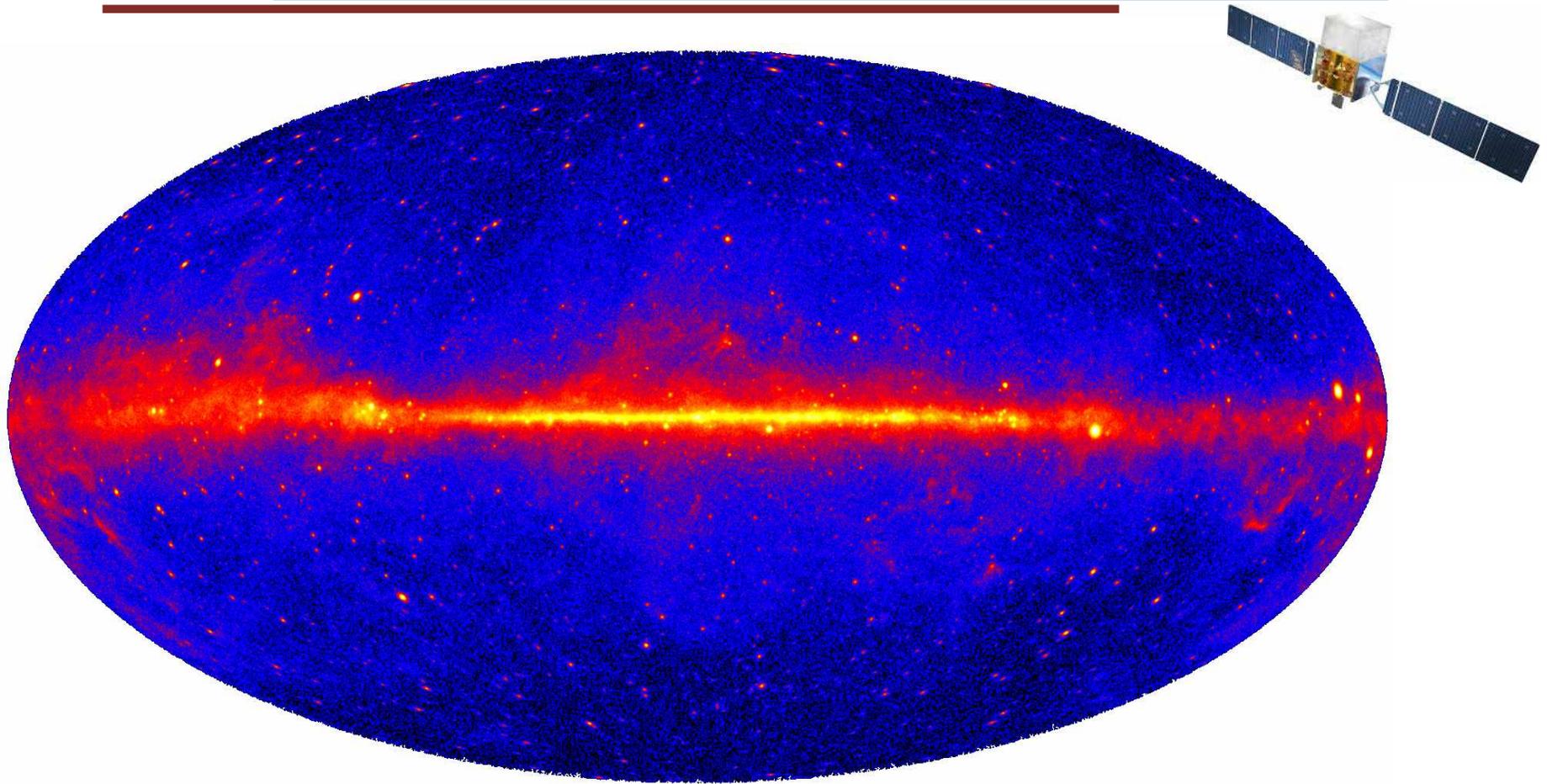


Neutrini cosmici e raggi gamma: il cielo nei raggi gamma nel 1967



Prima mappa del cielo nei raggi gamma con il satellite
Orbiting Solar Observatory (OSO-3), anno 1967.

Il cielo nei raggi gamma nel 2019 (Fermi LAT)

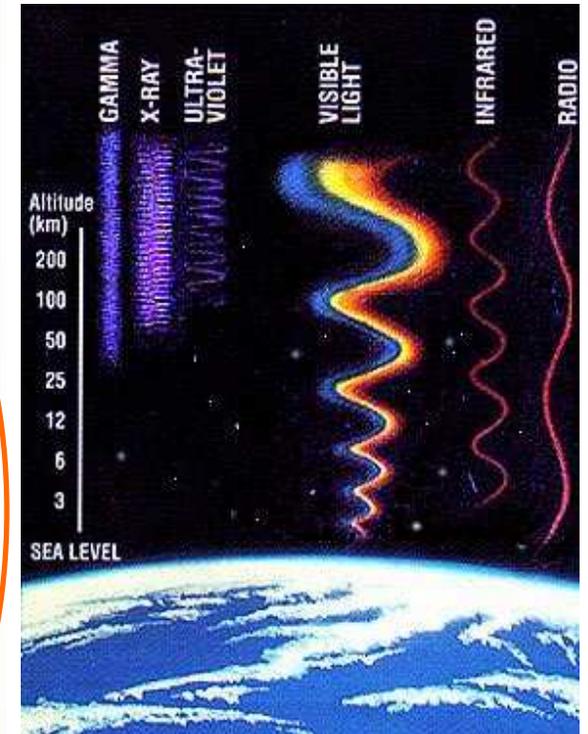
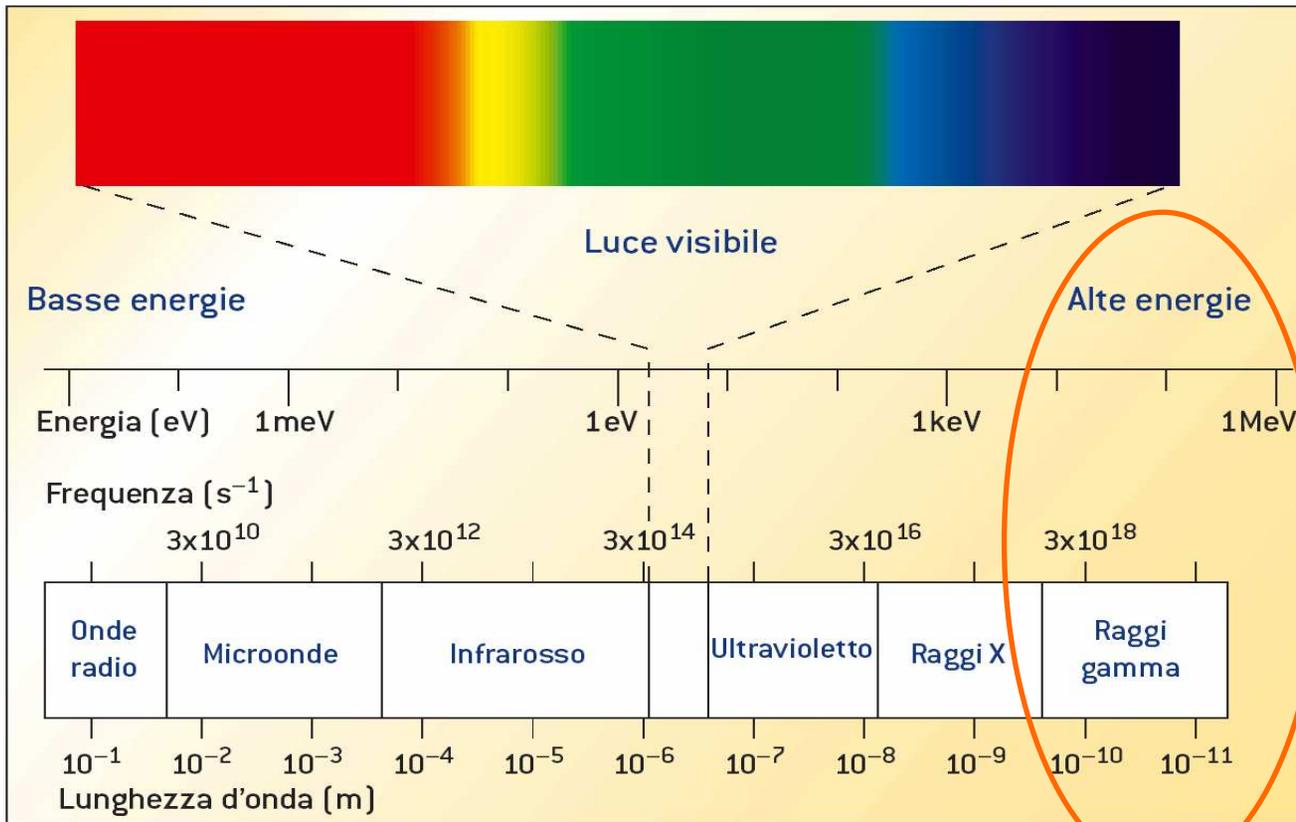


Mapa del cielo recente nei raggi gamma con il satellite
Fermi Large Area Telescope (LAT)

Fotoni dal cosmo (radiazione elettromagnetica)

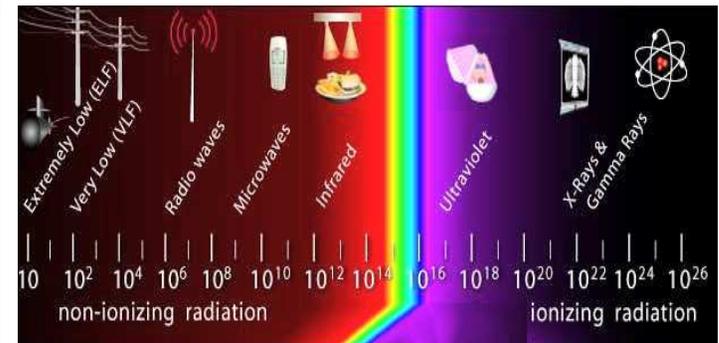
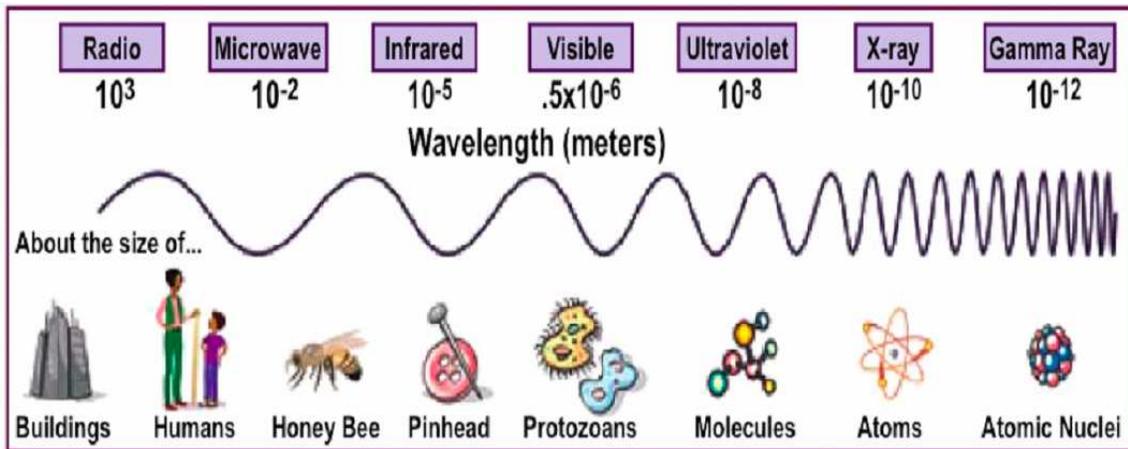
- ~0.1% dei raggi cosmici sono raggi gamma
- Il termine raggi-gamma (gamma-rays) è storico e non descrittivo. Si riferisce a una porzione dello spettro delle onde elettromagnetiche (non era noto nei primi anni del '900 quando fu inventato).

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 (4.1357×10^{-15} eV s), λ is the wavelength, and $c=3 \times 10^8$ m/s.



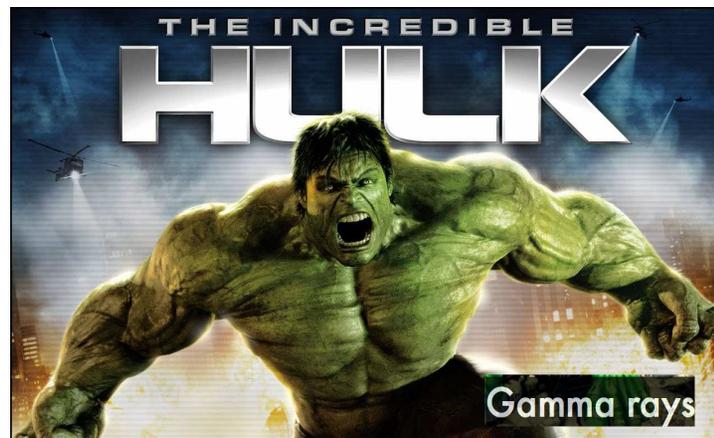
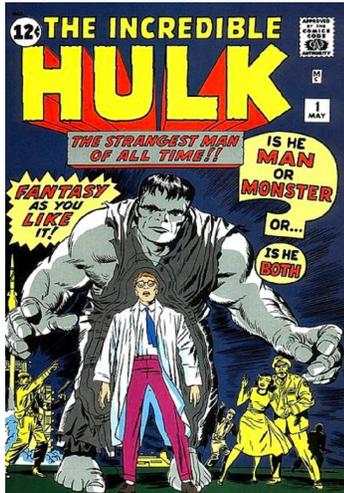
I raggi gamma

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**.

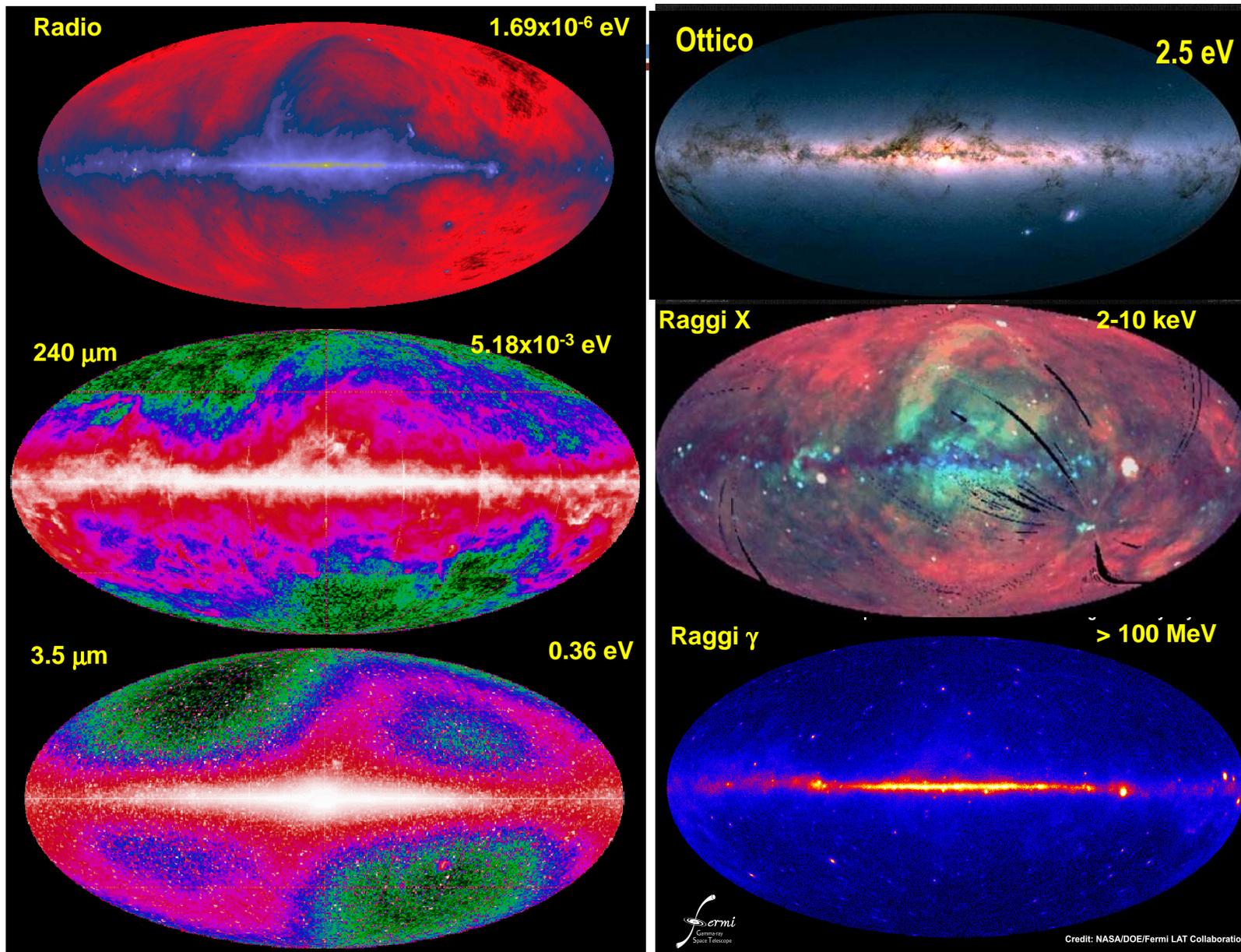


Che cosa ha trasformato David Banner nell'incredibile Hulk dei fumetti? **I raggi Gamma!**

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.

Lancio del 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

the LAT

modular - 4x4 array
7 ton - 650watts

Tracker (4x4 array of towers)

Precision Si-strip Tracker (TKR)
18 XY tracking planes with tungsten foil converters. Single-sided silicon strip detectors (228 μm pitch, 900k strips) Measures the photon direction; gamma ID.

ACD

Segmented Anticoincidence Detector (ACD) 89 plastic scintillator tiles. Rejects background of charged cosmic rays; segmentation mitigates self-veto effects at high energy.

Calorimeter

Hodoscopic CsI Calorimeter (CAL) Array of 1536 CsI(Tl) crystals in 8 layers. Measures the photon energy; image the shower.

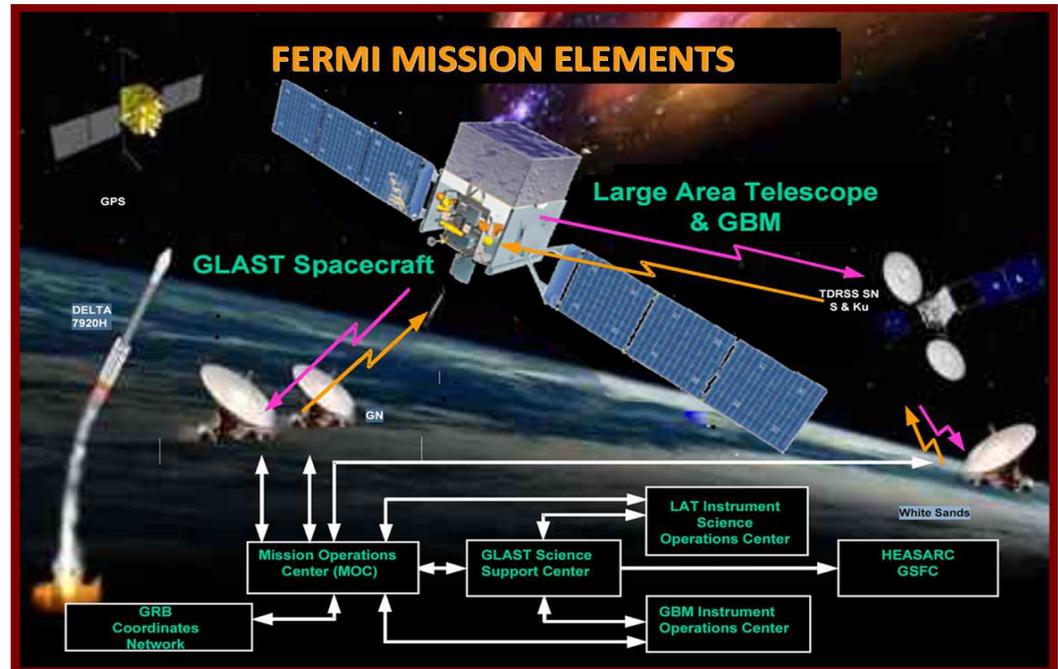
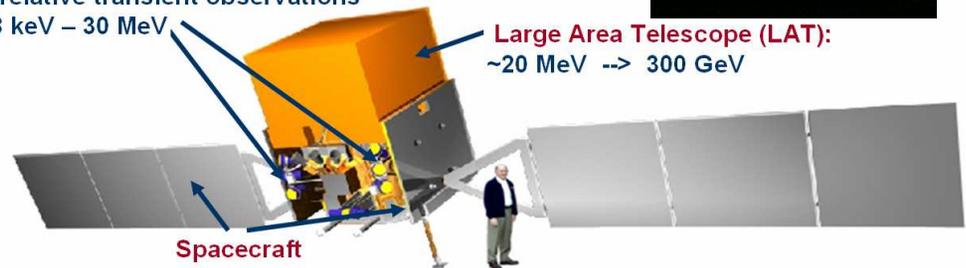
Electronics System

Includes flexible, robust hardware trigger and software filters.

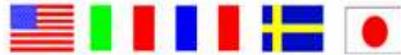
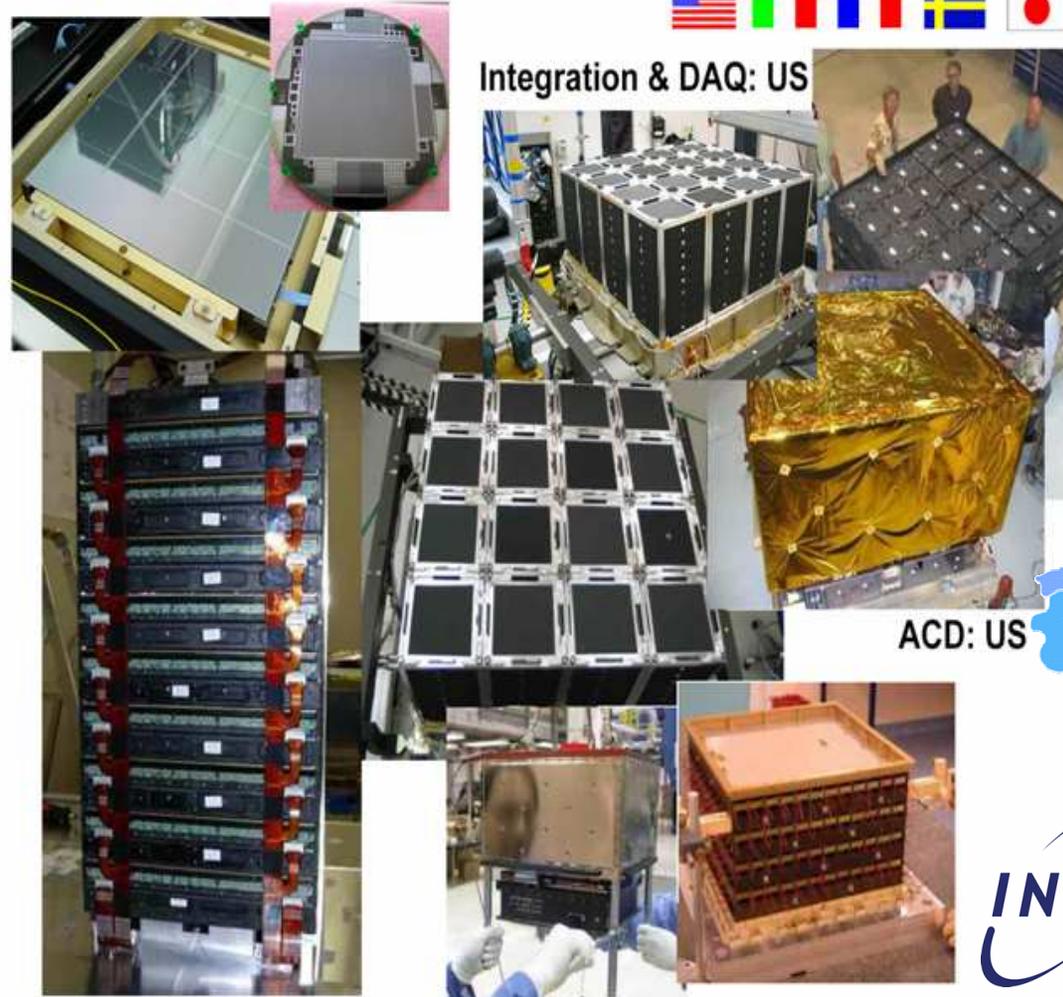
Gamma Ray Burst Monitor (GBM): correlative transient observations

$\sim 8 \text{ keV} - 30 \text{ MeV}$

Large Area Telescope (LAT):
 $\sim 20 \text{ MeV} \rightarrow 300 \text{ GeV}$



Strumento LAT di Fermi: uno sforzo INFN e internazionale



Integration & DAQ: US

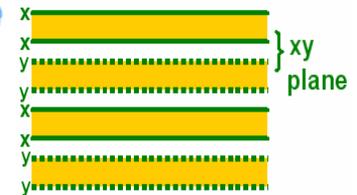
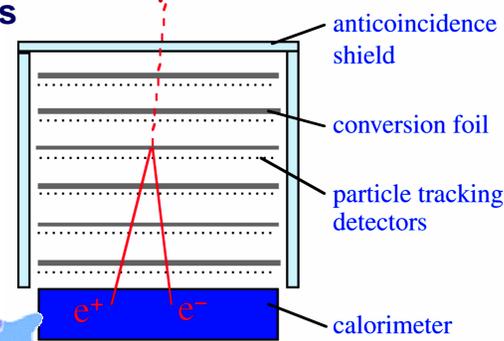
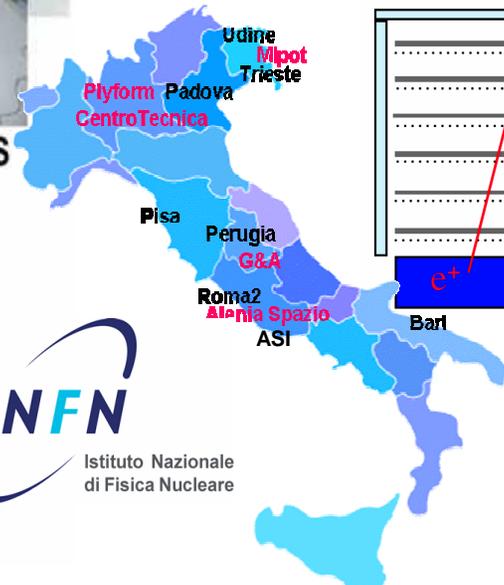
ACD: US

TRACKER details:

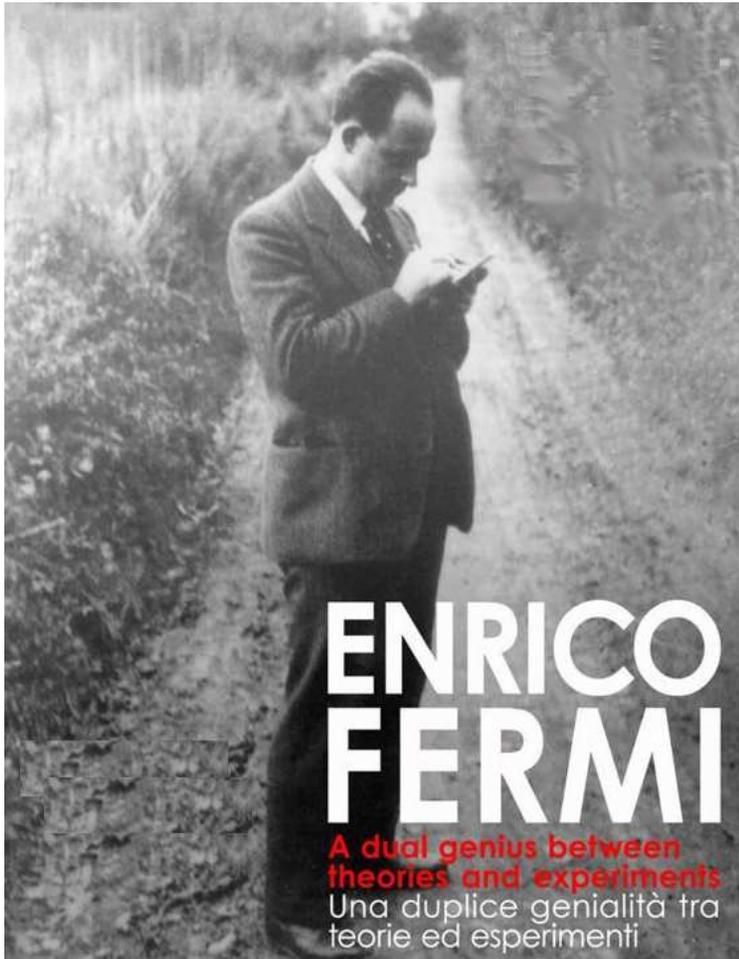
- ❑ 16 tower modules: $37 \times 37 \text{ cm}^2$ active cross section/layer
- ❑ 83 m^2 of Si (11500 Single Strip Detectors, $\sim 1\text{M}$ channels, strip-pitch: $228 \mu\text{m}$)
- ❑ 18 xy layers per tower 19
 “tray” structures, 12 with 3% X_0 W on top, 4 with 18% X_0 W on bottom, 3 with no converter foils. W foils followed by x, y plane.
- ❑ Trays stack and align at their corners. Electronics on sides of trays: minimize gap between towers

Tracker: US, Italy, Japan

Calorimeter: US, France, Sweden



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

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

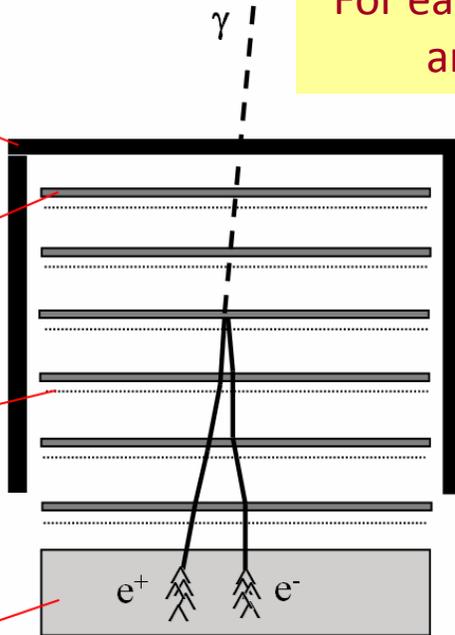
Principle of Operation

Charged particle anticoincidence detector

Conversion foils

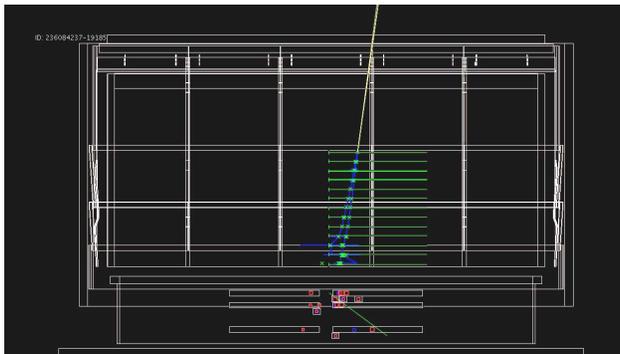
Particle tracking detectors

Calorimeter (energy measurement)



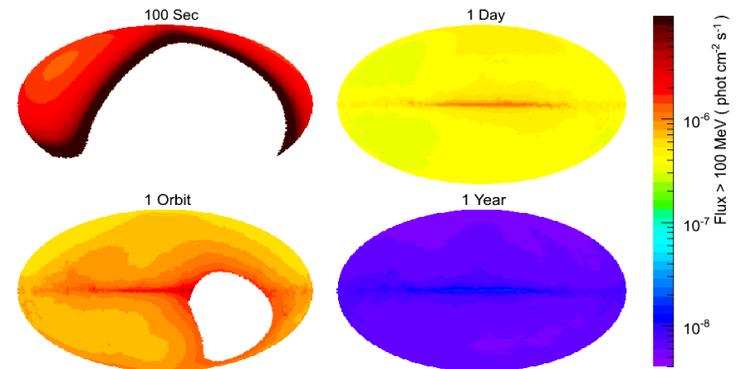
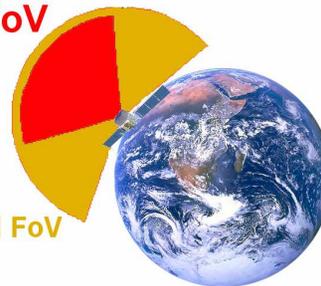
For each event, the LAT measures three quantities: arrival direction, energy, and arrival time.

- ❑ 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



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:

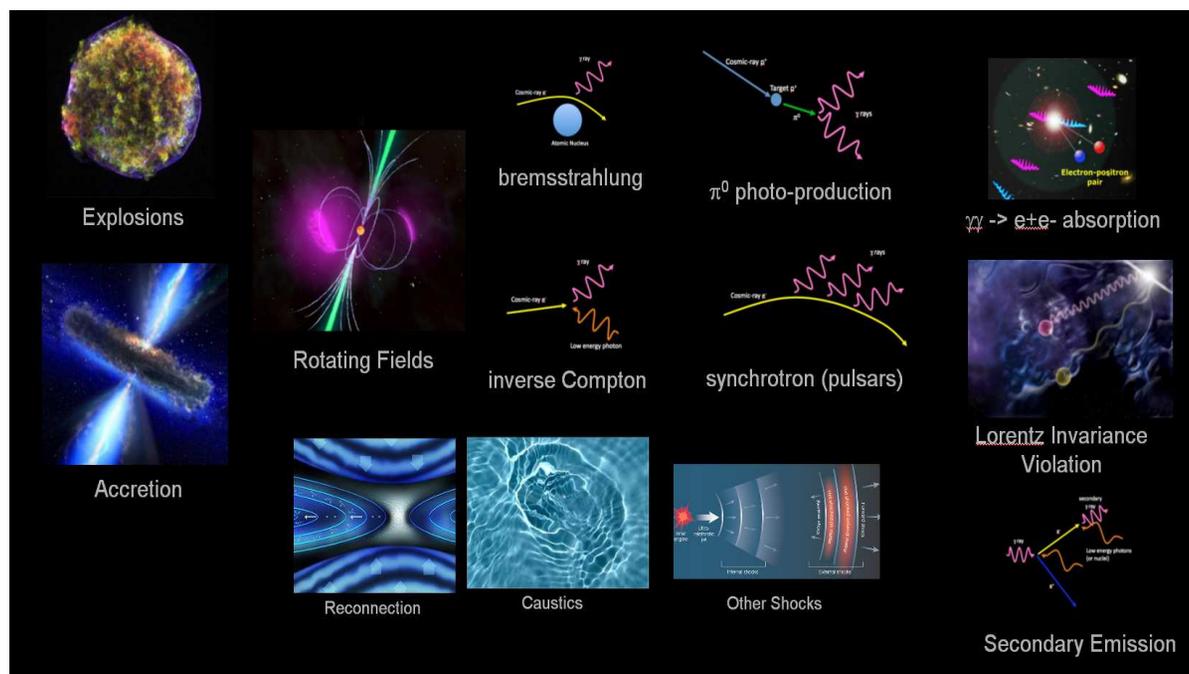
- Tracing Cosmic Rays & Targets: Emission Mechanisms

Gamma ray Sources as Probes:

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

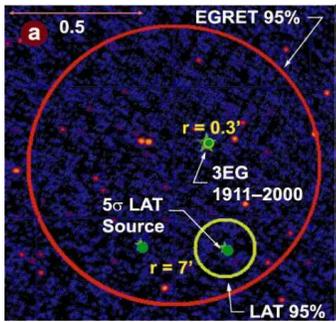
SOME SCIENCE MENU:

- 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)

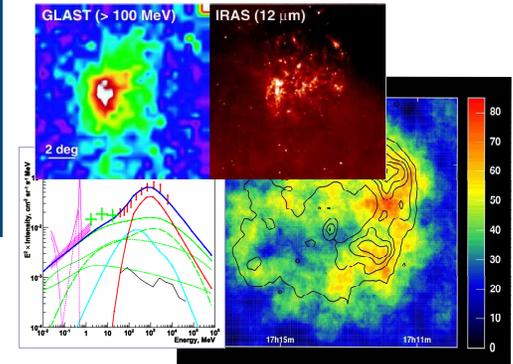
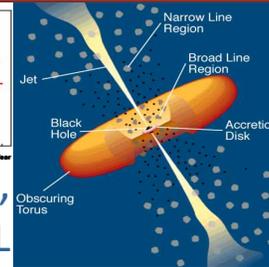
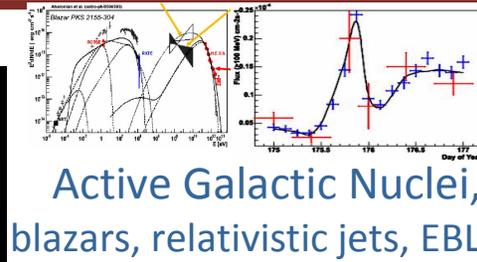


L'osservazione del cielo nei raggi gamma interessa entrambe le comunità della fisica delle particelle delle alte energie e dell'astrofisica delle alte energie.

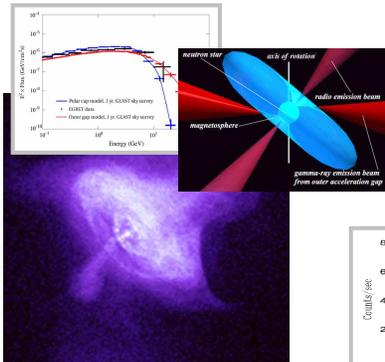
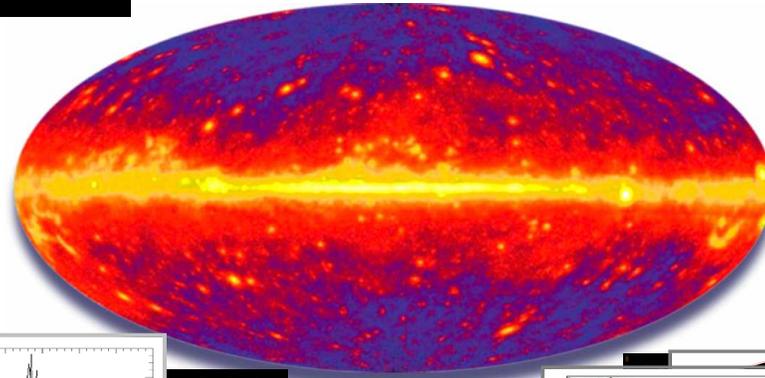
Lo zoo dell'astronomia gamma sopra 100 MeV



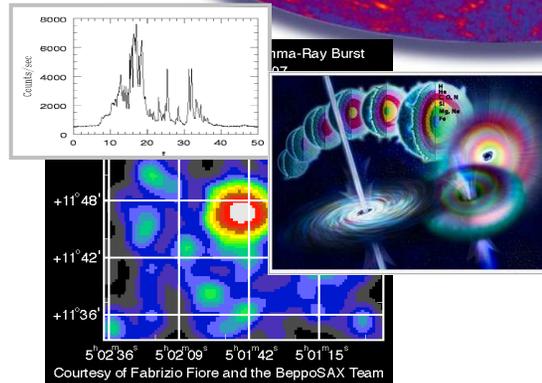
Unidentified sources



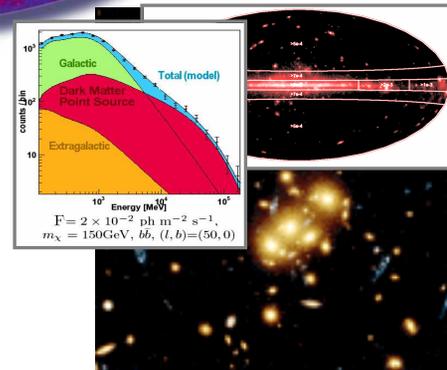
Diffuse, Molecular Clouds, SNR, Cosmic ray accelerat.



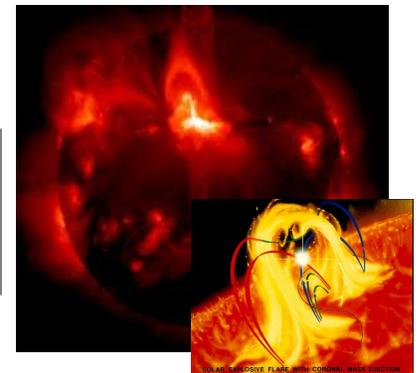
Pulsars



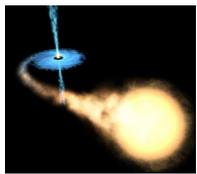
Gamma Ray Bursts



Dark matter, cosmology, particle physics



Solar flares



Microquasars

0.01 GeV

0.1 GeV

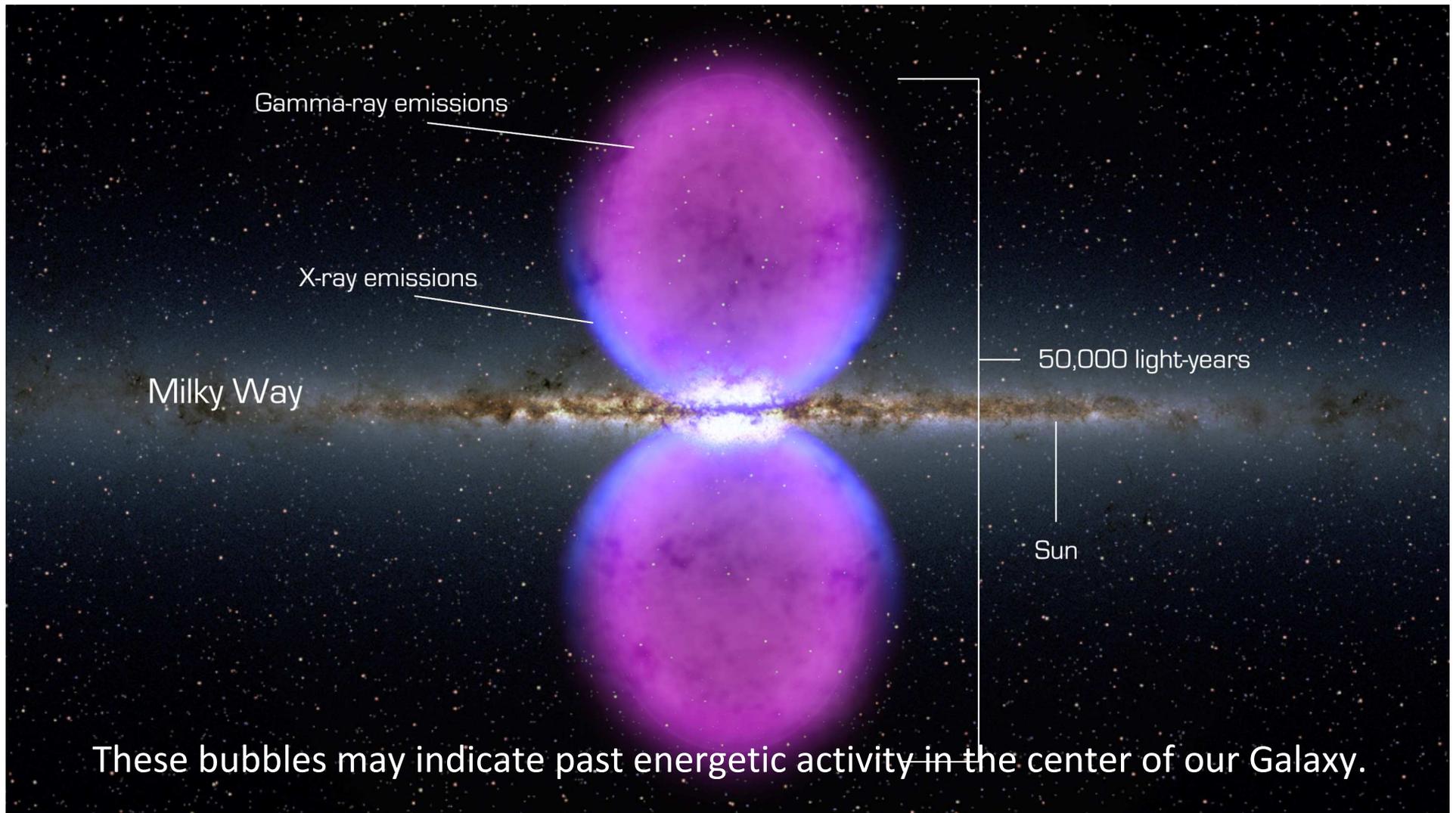
1 GeV

10 GeV

100 GeV

1 TeV

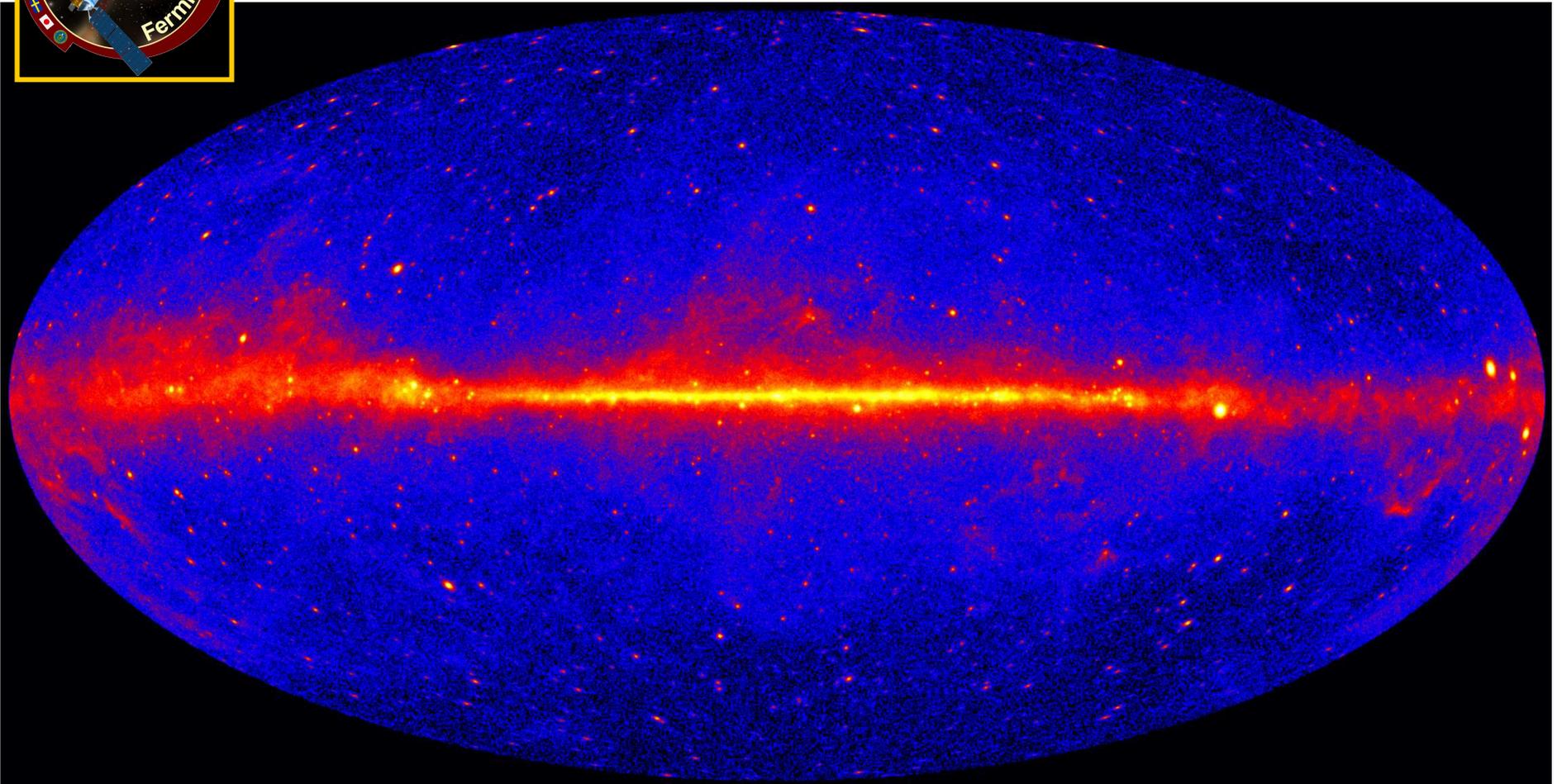
Le bolle gamma della nostra Galassia



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

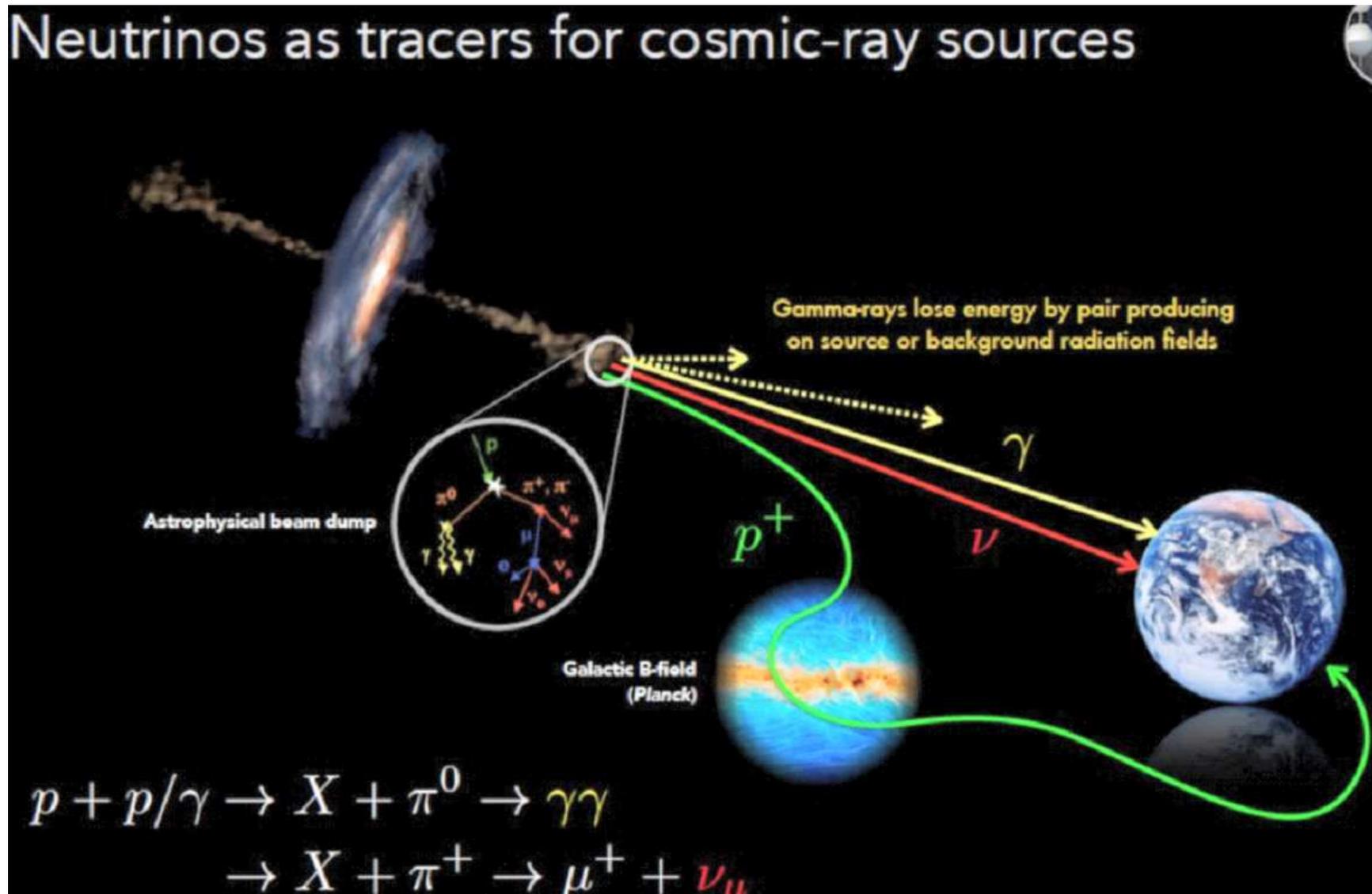


Il cielo nei raggi gamma in coordinate galattiche (piano della nostra galassia Via Lattea è la fascia centrale) con scala colori arbitrari per l'intensità (luminosità). Mappa ottenuta accumulando i primi 10 anni di dati (fotoni raggi gamma) rivelati dal *Fermi* LAT.



Neutrini cosmici, raggi cosmici e raggi gamma

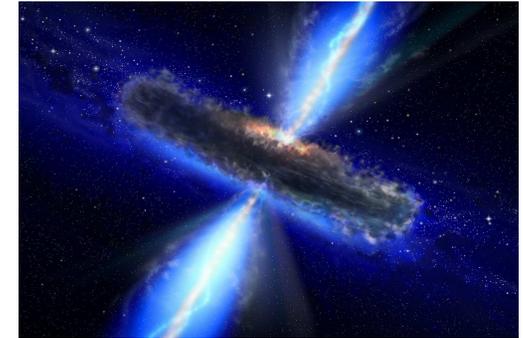
Neutrinos as tracers for cosmic-ray sources



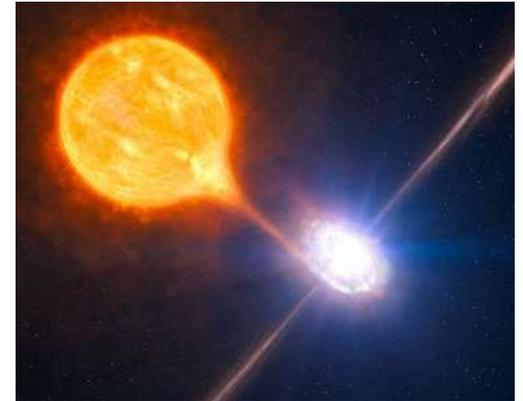
Neutrini cosmici, raggi cosmici e raggi gamma

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.)

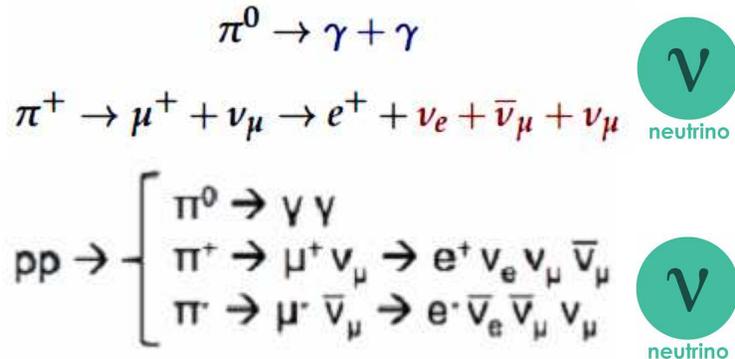


→ neutrini sono prodotti dentro la sorgente che produce raggi cosmici;
 → mesoni sono prodotti da interazioni di raggi cosmici con fotoni (radiazione elettromagnetica):



□ 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;



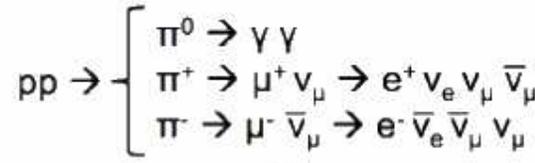
Neutrini cosmici, raggi cosmici e raggi gamma

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

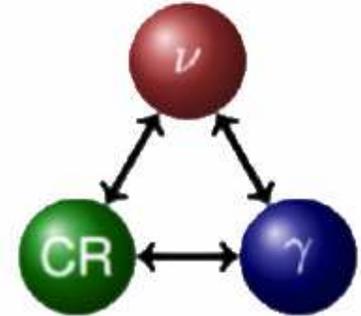
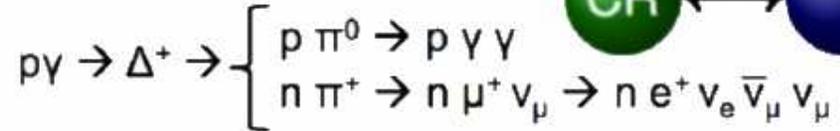
❑ NB: **relazione multi-messaggero (gamma-neutrino)** più complicata;

❑ 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

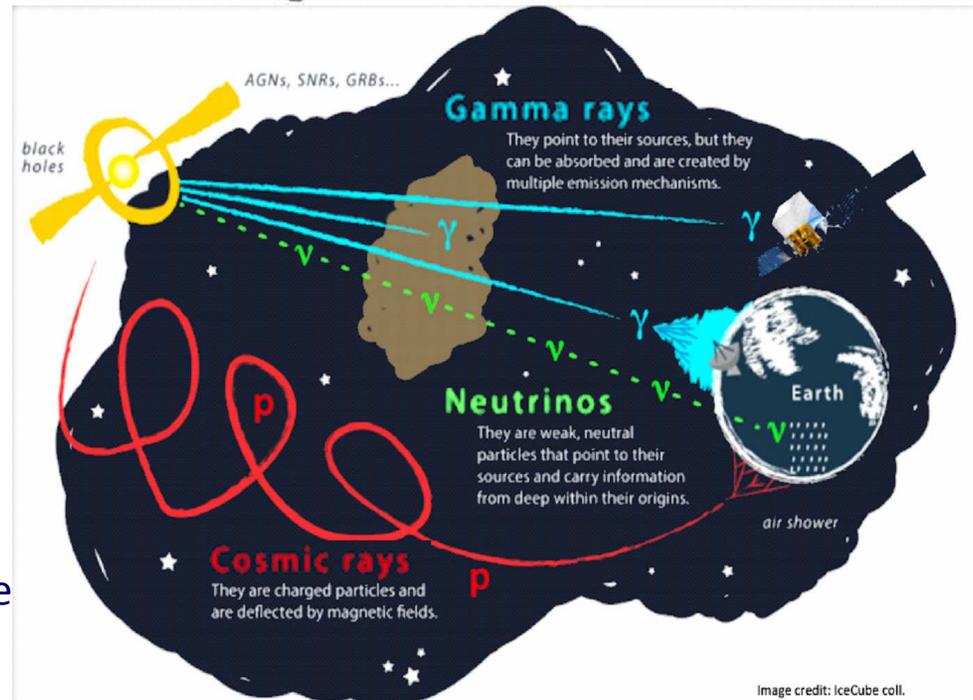
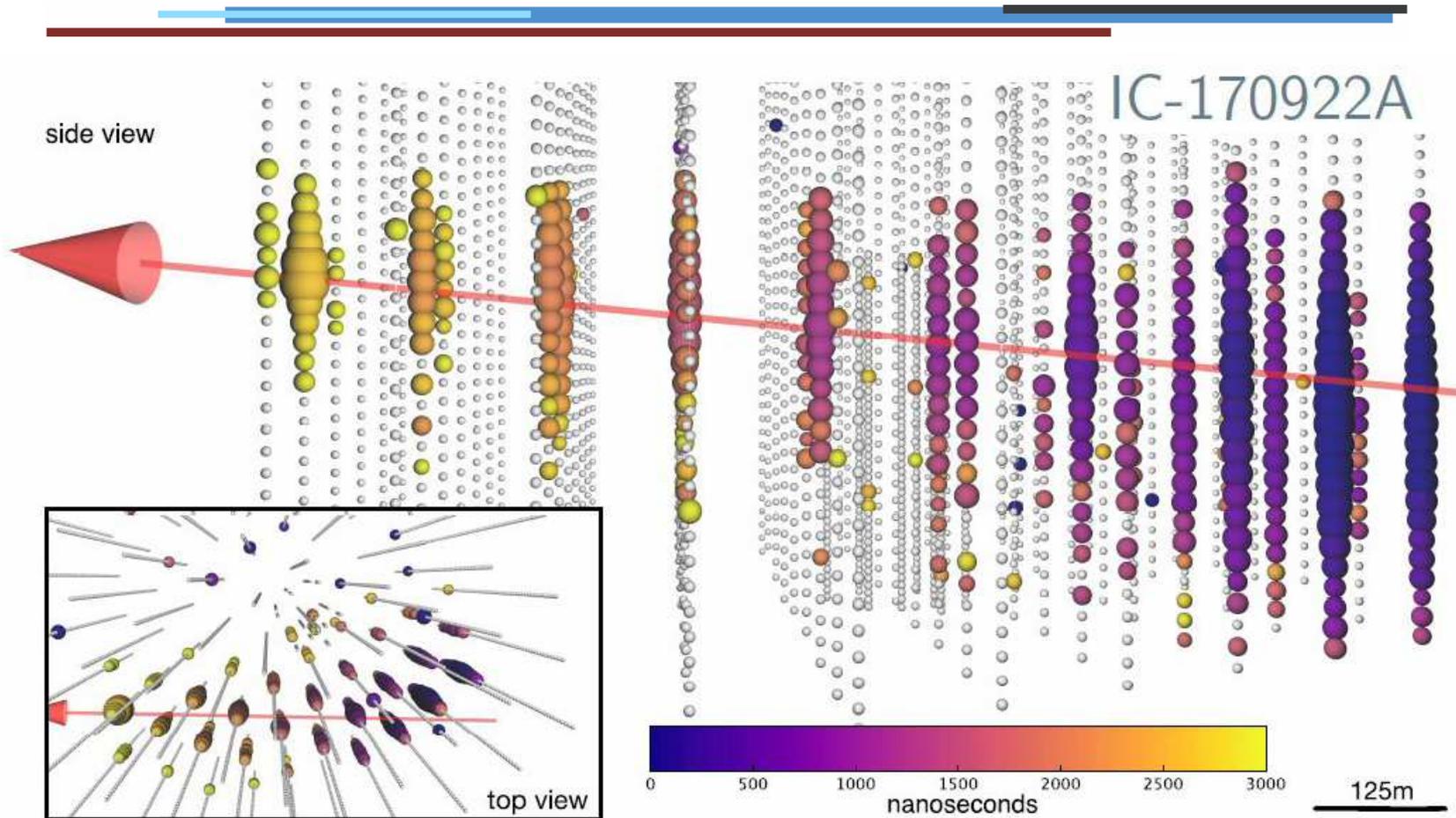


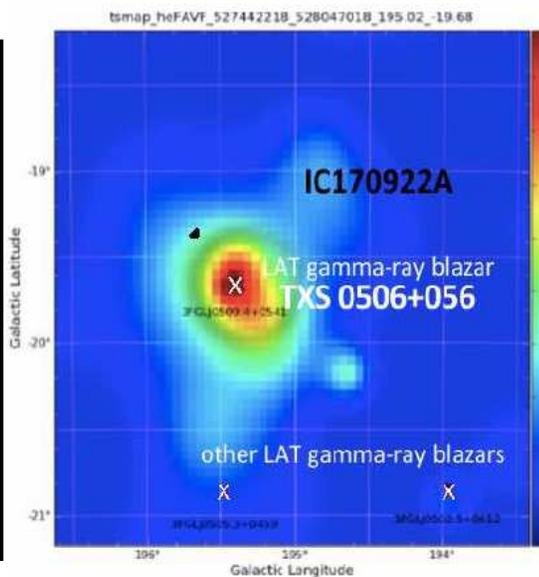
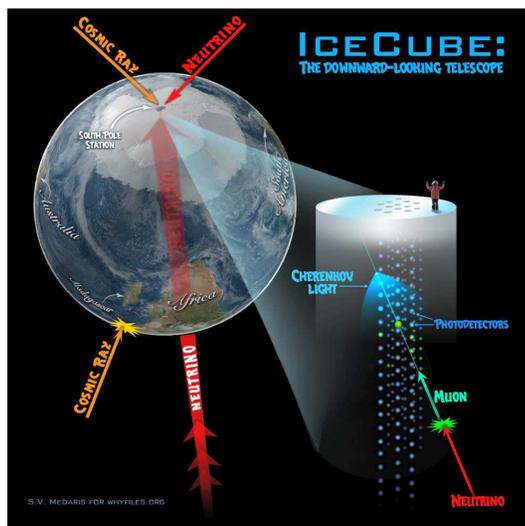
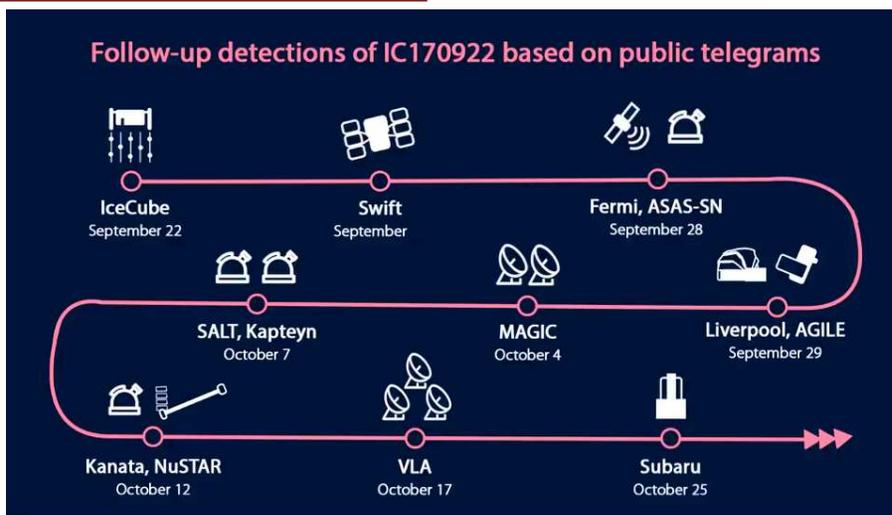
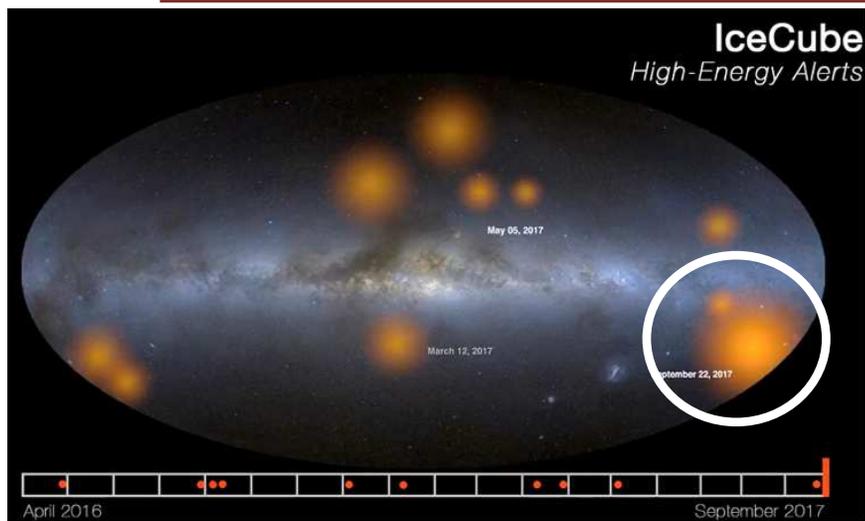
Image credit: IceCube coll.

Un neutrino di IceCube molto importante: IC 170922A



Up-going muon track (5.7° 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*

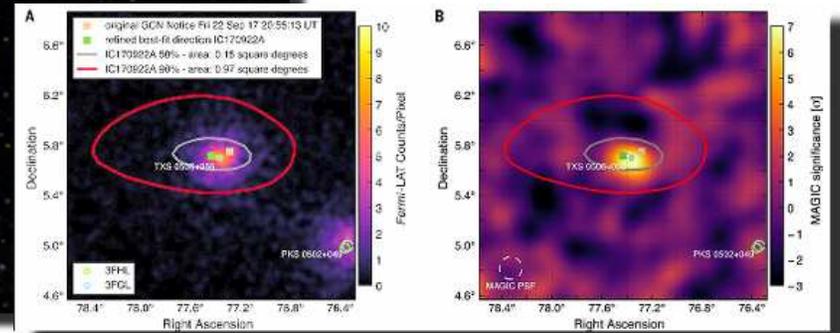
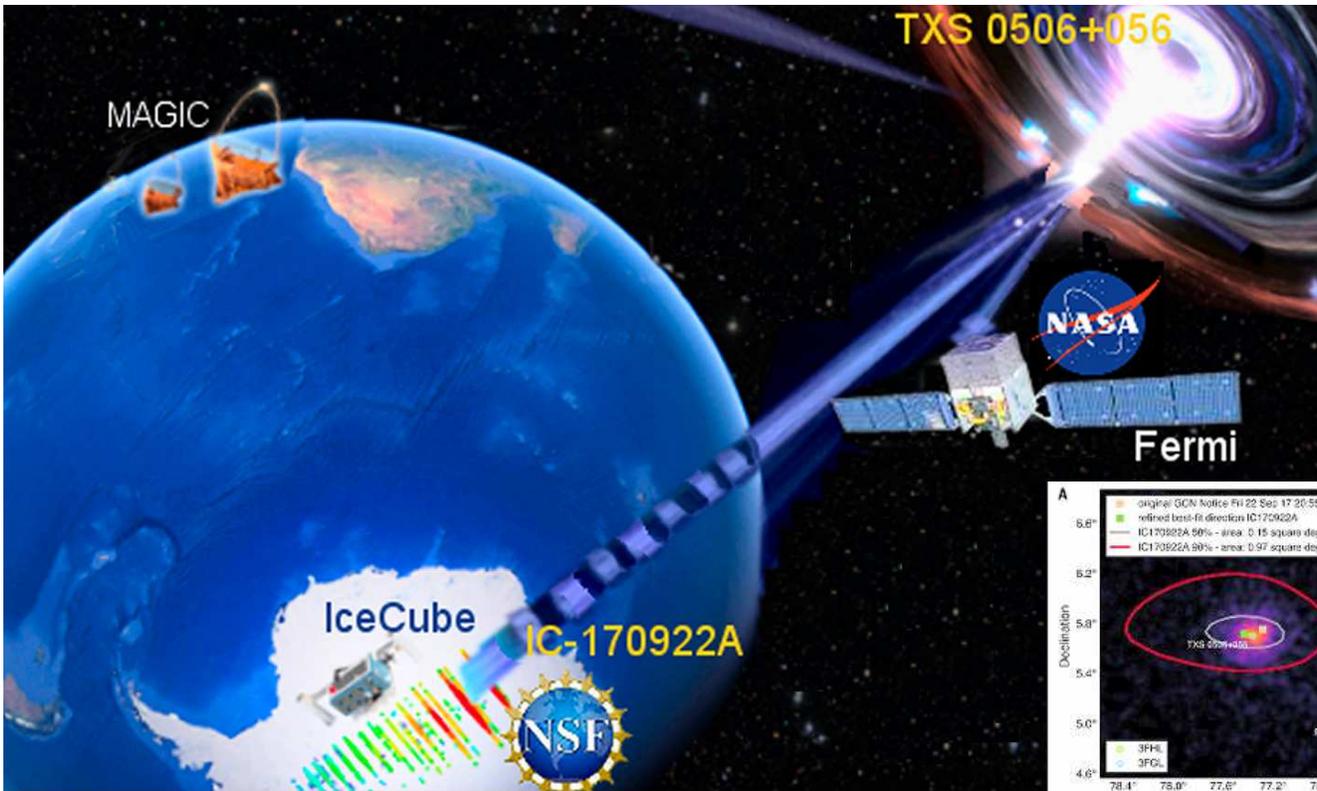
on 28 Sep 2017; 10:10 UT



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*†

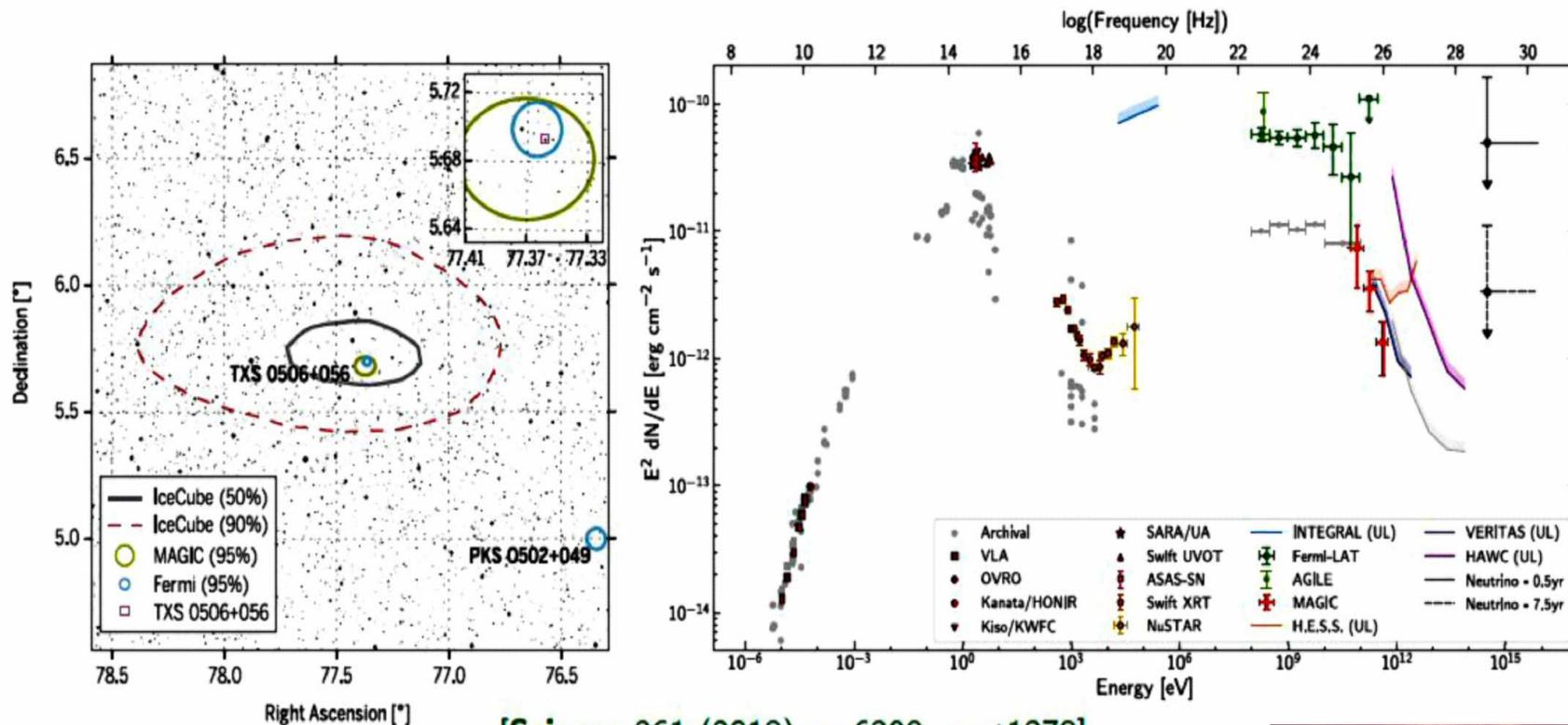
[[Science 361 \(2018\) no.6398, eaat1378](#)]

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](#)]

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



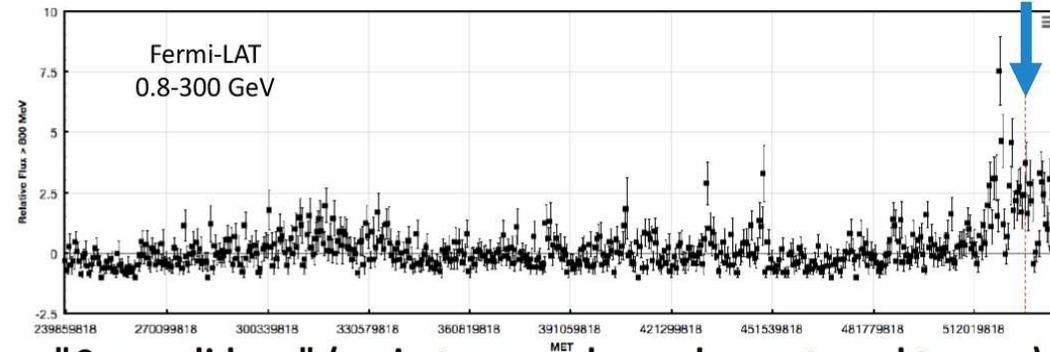
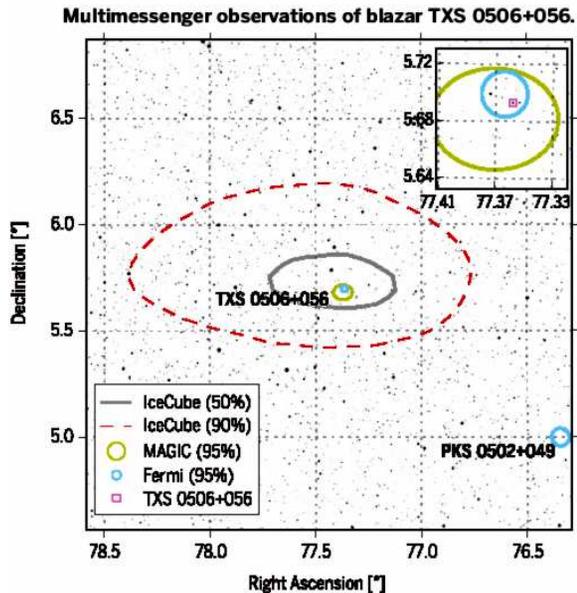
[Science 361 (2018) no.6398, eeat1378]

- Coincident with Fermi flare; **chance correlation can be rejected at the 3σ -level.**
- TXS 0506+056 is among the 3% brightest Fermi-LAT blazars.
- One of the most luminous BL Lacs (2.8×10^{46} erg/s).

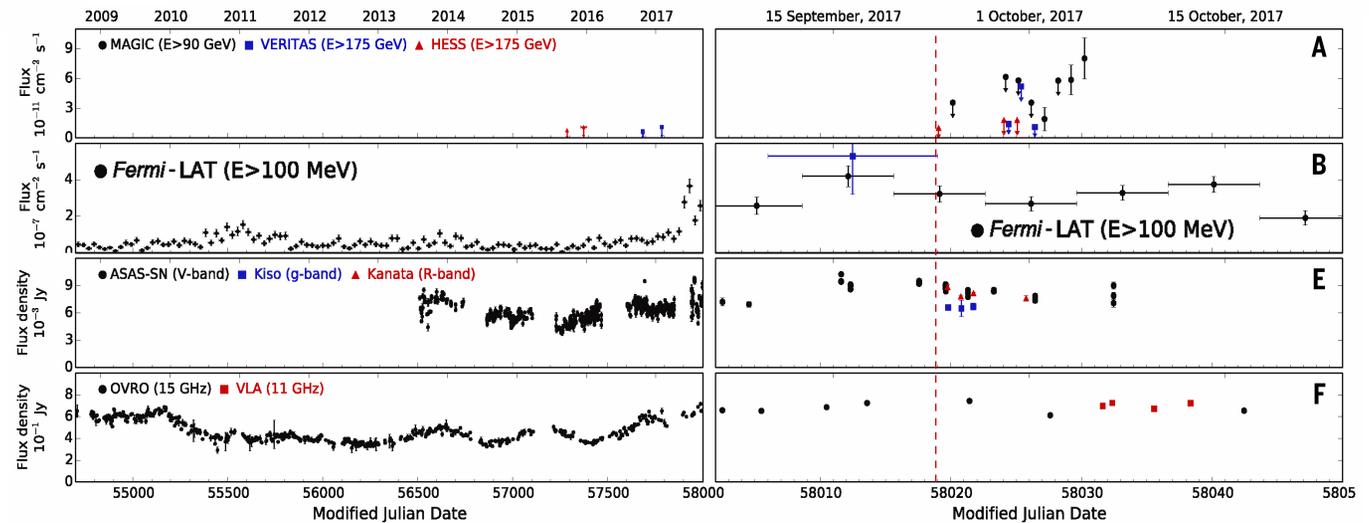
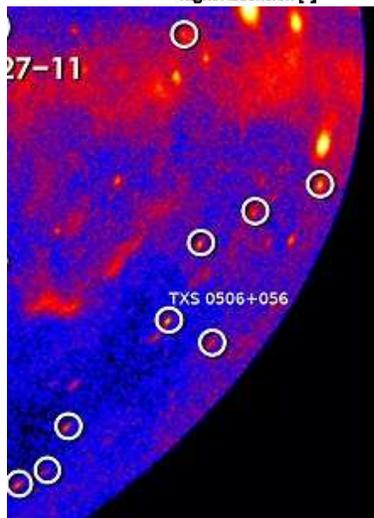


Coincidenza spaziale (mappe fotoni gamma) e temporale (curve di luce gamma) col neutrino IC 170922A

data evento neutrino IceCube IC 170922A



"Curva di luce" (serie temporale, andamento nel tempo) del flusso di raggi gamma osservato dal blazar TXS 0506+056 dall'esperimento su satellite *Fermi* LAT.



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

tuttoscienze
e innovazione

LA STAMPA

IL CIELO

13/07/2018

Prima assoluta: identificata una sorgente di neutrini cosmici

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

la Repubblica.it Scienze

Home

Politica

Economia

Sport

Spettacoli

Tecnologia

Motori

Tutte le sezioni

D

Rcp tv

f 5 t in

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



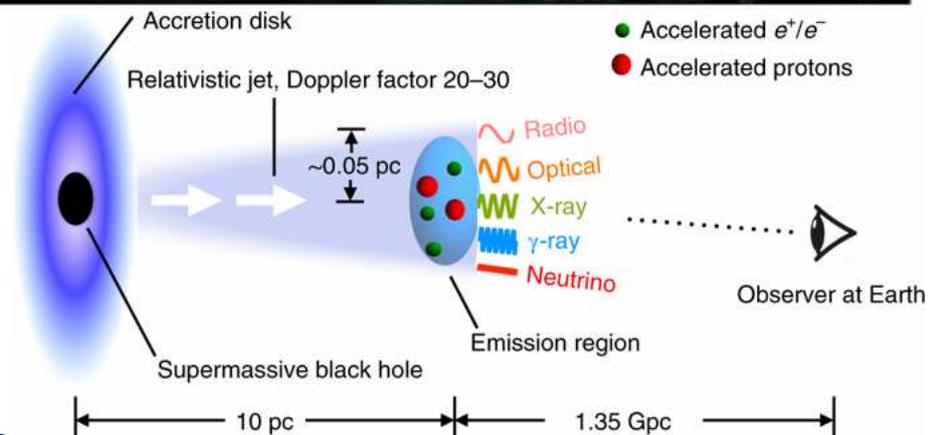
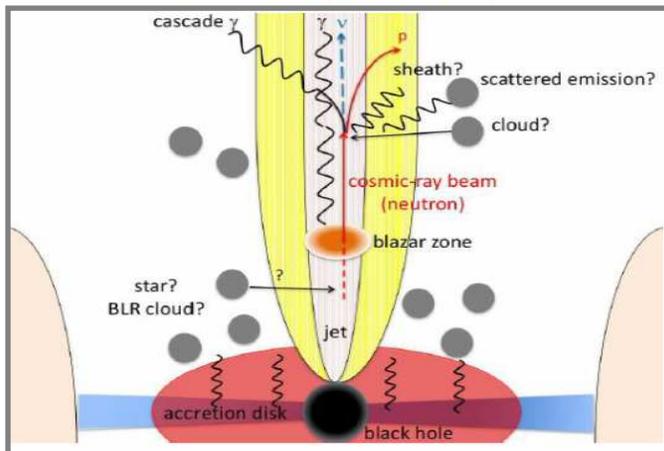
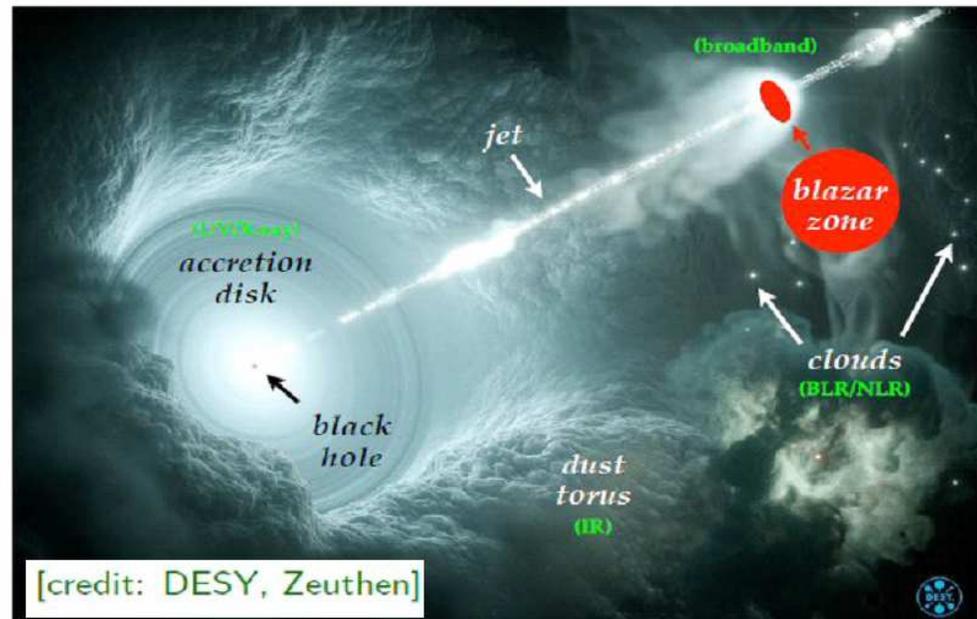
Spazio, svelata l'origine dei neutrini cosmici. In un buco nero la sorgente

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

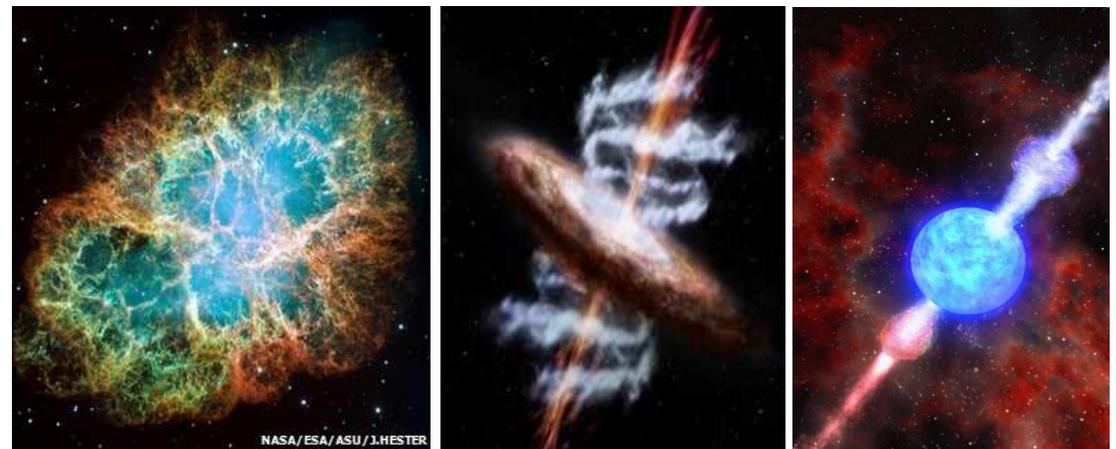
- ❑ Nei nuclei galattici attivi (AGN, di cui fanno parte quasars e blazars) l'enorme potenza energetica è prodotta dall'accrescimento di materia attorno ad un buco nero super-massiccio (super-massive black hole).
- ❑ Una parte di questa energia rifornisce un getto di particelle di alta energia che viaggia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

Dalla concezione dell'universo placido a quella dell'universo violento ed estremo

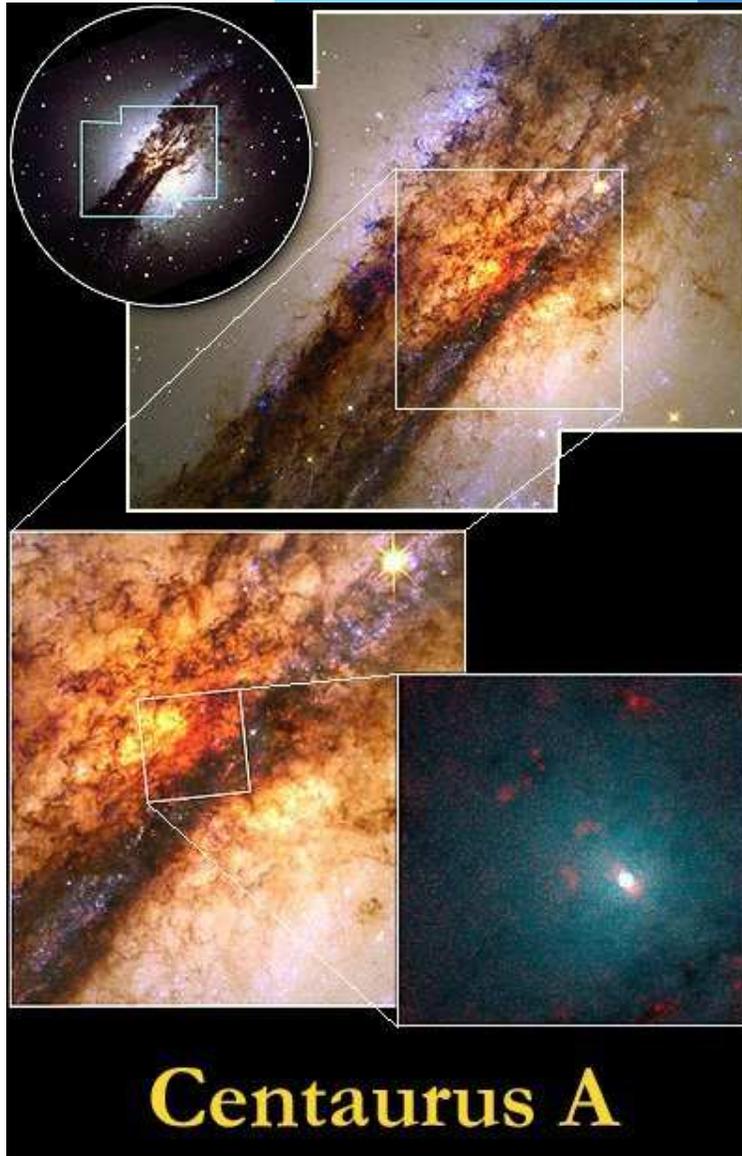
Fino agli anni '50 l'universo appariva **quieto e tranquillo**. Basti pensare alla bellezza delle galassie a spirali al centro del il "Grande Dibattito" di Shapley e Curtis degli anni '20 in merito alla reale natura delle galassie e le dimensioni dell'Universo osservabile.



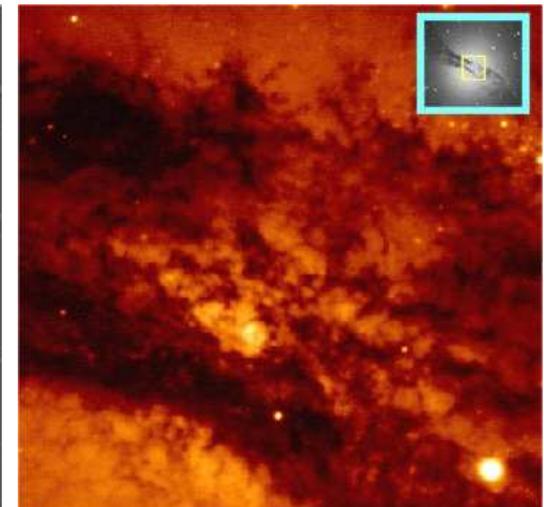
Con l'avvento della **radioastronomia** negli anni '50-'60 e poi dell'**astronomia raggi-X** e **astronomia dei raggi-gamma** dallo spazio negli anni '70-'90 l'universo ha rivelato la sua vera natura: **dinamico, variabile, transiente, estremamente energetico, ...violento** (es.: supernovae, quasars, blazars, getti, lobi, particelle energetiche, pulsars, flares, shock nel plasma, dischi di accrescimento, buchi neri, blazars, gamma-ray burst, microquasar, novae, binarie esplosive, annichilazione dark matter, etc.).



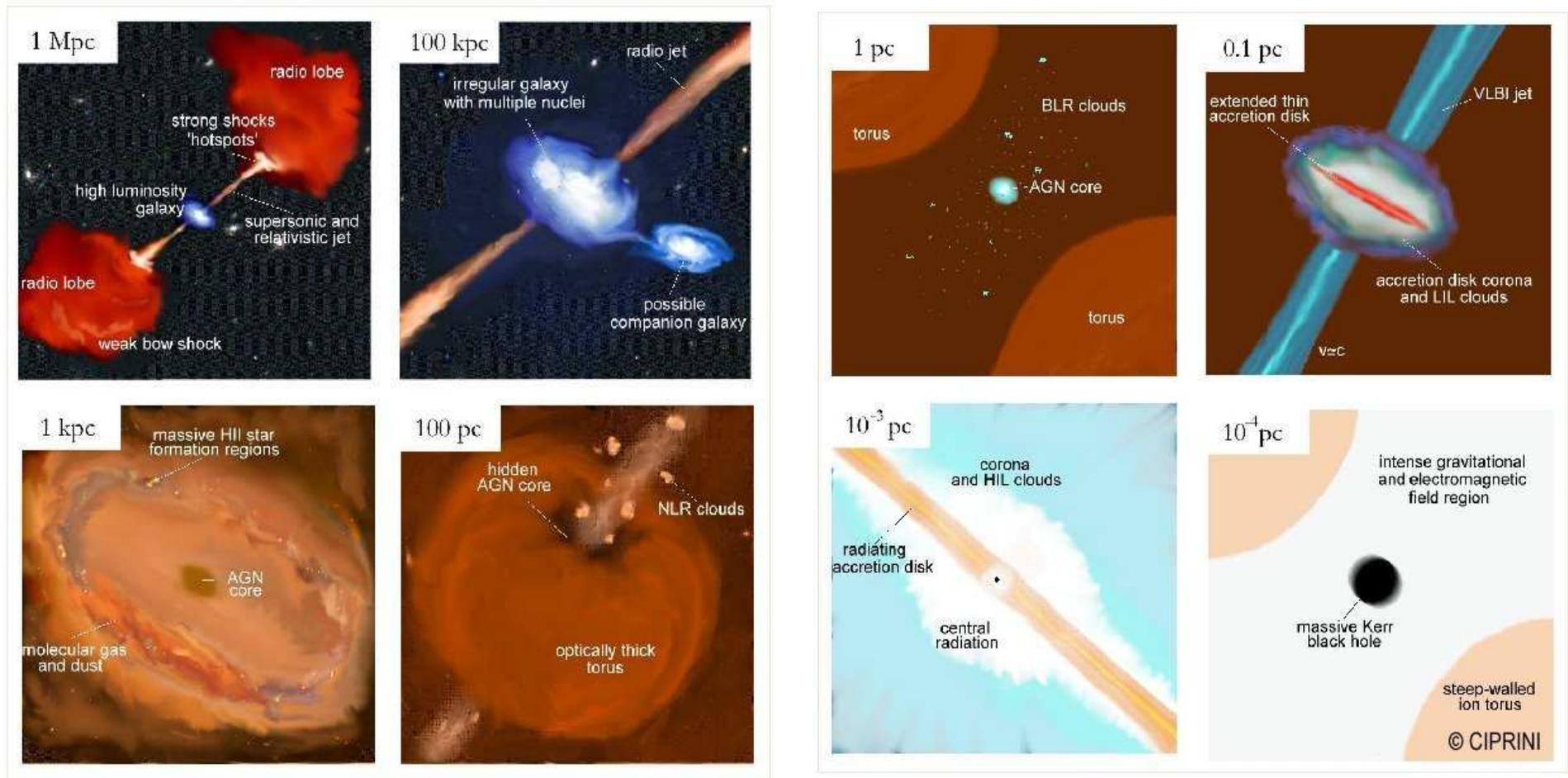
Esempi di AGN: Centaurus A



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.



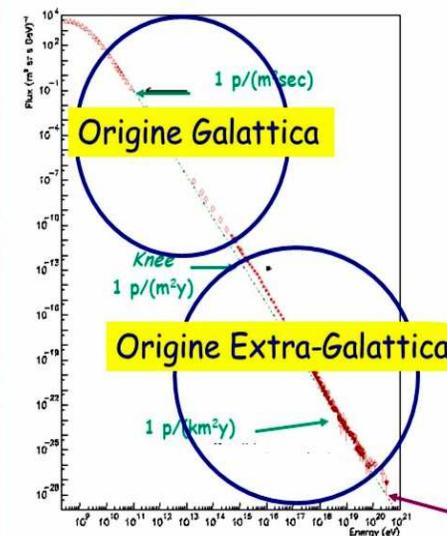
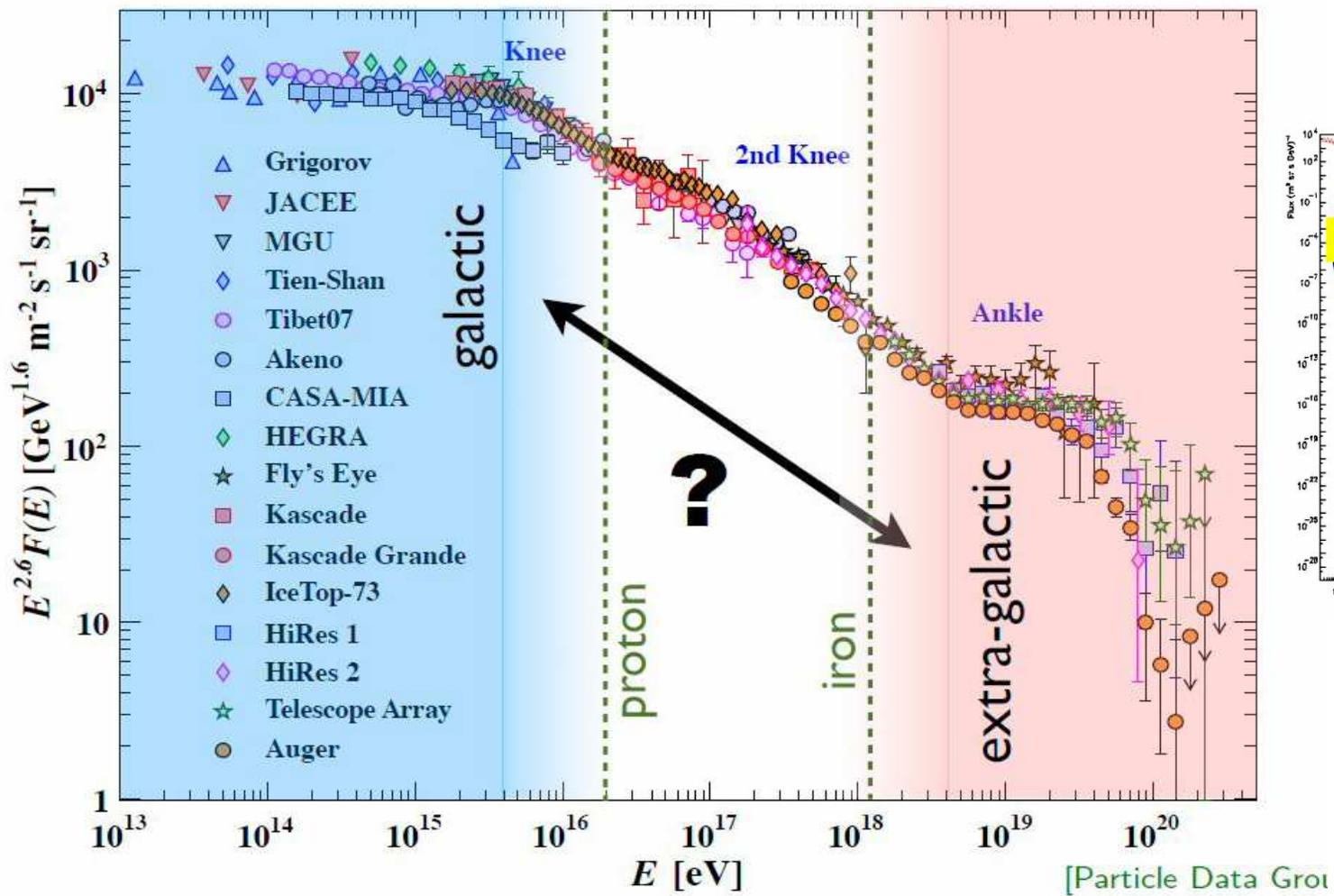
Un cartoon del modello standard per gli AGN



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

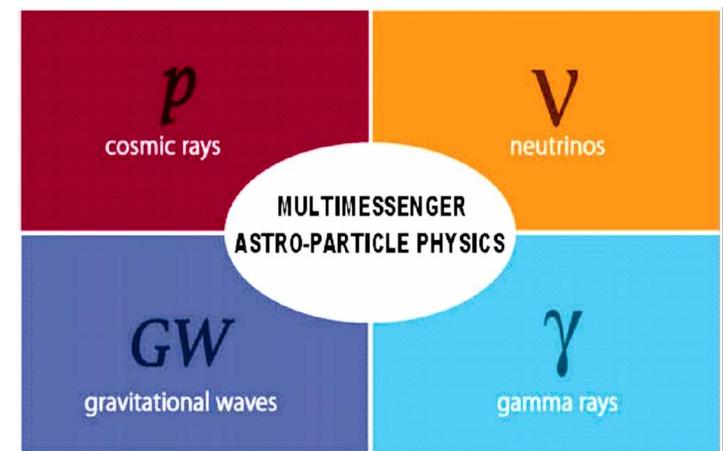
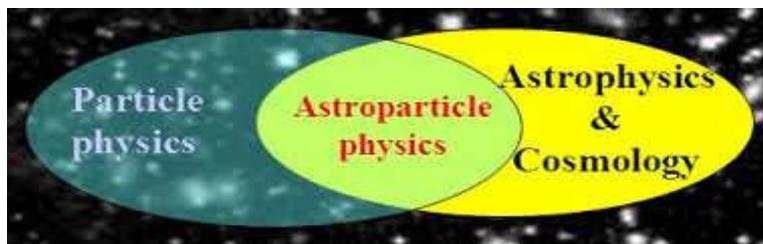
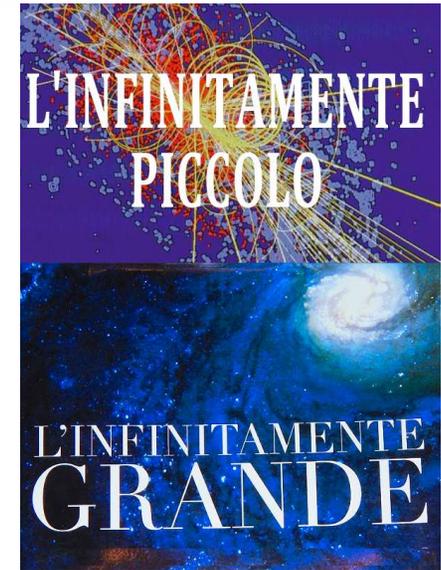
Blazar sorgenti di raggi gamma e neutrini: spettro dei raggi cosmici

1 PeV neutrino \leftrightarrow 20-30 PeV cosmic ray nucleon



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).



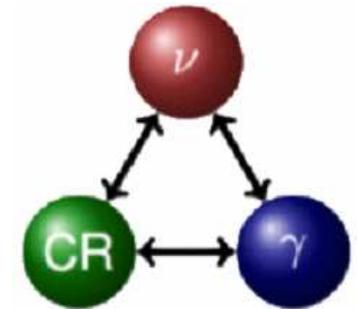
Conclusioni (1)

□ 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:

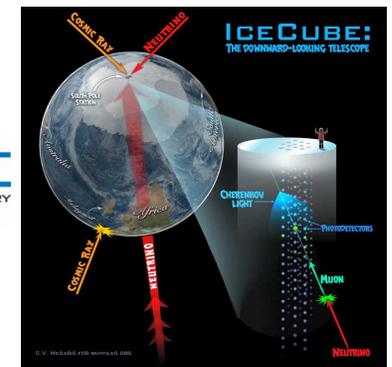
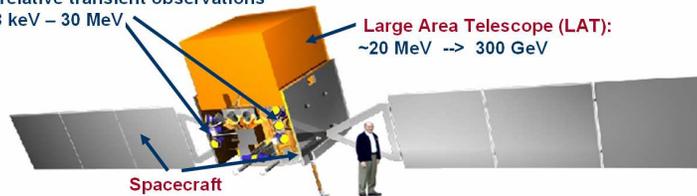
- **coincidenza spaziale** (mappe fotoni di energia MeV-GeV-TeV gamma e posizione sorgenti blazar gamma \leftrightarrow vicinanza alla direzione di provenienza nel cielo dei neutrini con energia TeV/PeV);
- **coincidenza temporale** (sorgente di raggi gamma in "flare", in stato di alto flusso \leftrightarrow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



Conclusioni (2)

Il satellite ed esperimento *Fermi* LAT sta continuando ad effettuare una survey ed un monitor continuo del cielo nei raggi-gamma. Osservare e studiare le sorgenti gamma galattiche ed extragalattiche ed i fenomeni fisici più estremi, variabili ed energetici del cosmo. Miglioramenti continui sia come profondità di esposizione sia come intervallo di energia.

La flessibilità e versatilità dell'esperimento *Fermi* stanno producendo una grande quantità di risultati nell'astronomia del dominio temporale, nell'astrofisica multifrequenza e fisica delle astro-particelle multimessaggero.

Fisica delle astroparticelle: il cosmo è un laboratorio contenente acceleratori naturali di particelle. Visione moderna: universo variabile, transiente, violento.

Voi vi “accorgete” delle cose non le subite solamente, siete esseri umani senzienti e siete pure attratti dagli oggetti ed eventi della natura, dalle arti e scienze, dai misteri e dalla cultura.

L'astrofisico, il fisico delle particelle/astro-particelle, costruiscono strumenti che osservano e rivelano le cose. Strumenti per “vedere” cose infinitamente grandi nello spazio oppure infinitamente piccole a livello sub-atomico.

