



## Fisica delle astro-particelle con neutrini cosmici e sorgenti gamma

#### Stefano Ciprini

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







Terza edizione della MasterClass di Fermi Dip. di Fisca & INFN Roma Tor Vergata 5 Aprile 2019

#### Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (I.N.F.N.): ente nazionale pubblico di ricerca, istituito nel 1951 per sviluppare la tradizione scientifica iniziata da Enrico Fermi negli anni '30, dedicato allo studio dei costituenti fondamentali della materia e delle leggi fisiche che li governano;

- ☐ Svolge ricerca sperimentale e teorica pura, di base, nel campo della fisica nucleare, subnucleare, ed astro-particellare, favorendo anche l'innovazione ed il trasferimento tecnologico e di conoscenza al mondo produttivo.
- Opera in grandi collaborazioni internazionali ed è fortemente presente sul territorio nazionale: 20 Sezioni INFN; 6 Gruppi collegati presso le Università; 4 grandi Laboratori Nazionali INFN (Catania, Frascati, Legnaro, Gran Sasso), 3 tra consorzi e centri nazionali (EGO, CNAF, TIFPA). Collaborazione con varie regioni italiane (protocollo d'intesa, progetti a regia).
- ☐ Forte presenza nel Lazio: Lab. Naz. Frascati (LNF), Sez. Roma (1, c/o La Sapienza), Sez. Roma Tor Vergata, Sez. Roma Tre, Presidenza (Roma), Ammin. Centrale (Frascati).
- ☐ Attività in ambito di competizione internazionale e in collaborazione con il mondo universitario. Contributo ricercatori e tecnici INFN riconosciuto

internazionalmente nei laboratori europei e in centri di ricerca mondiali.















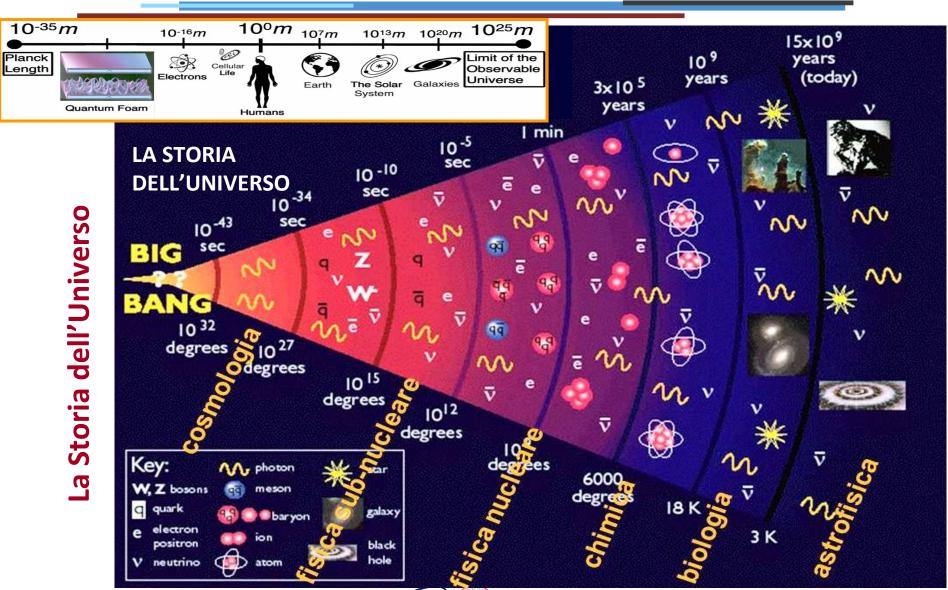








#### Infinitamente piccolo infinitamente grande



## Fisica delle particelle elementari

Studio delle interazioni dei costituenti fondamentali della materia

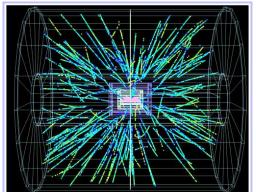
attraverso esperimenti con gli acceleratori di particelle.

☐ Gli esperimenti di fisica subnucleare esplorano 2 frontiere (diverse/ complementari) dei nostri limiti sperimentali: quella dell'energia e della luminosità.

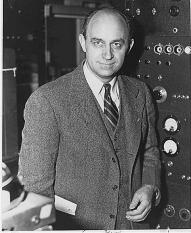
Acceleratori di particelle sempre più potenti per raggiungere un'energia delle collisioni sempre più elevate e consentire la formazione di nuove particelle (come nel Large Hadron Collider, LHC, al CERN).

☐ In alternativa (o nello stesso ad LHC) si prova a favorire il verificarsi dei processi fisici ed eventi più rari e affinare in modo estremo le misure di precisione di questi eventi.

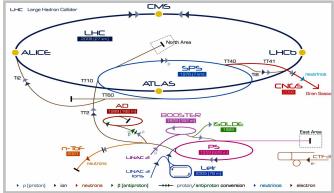










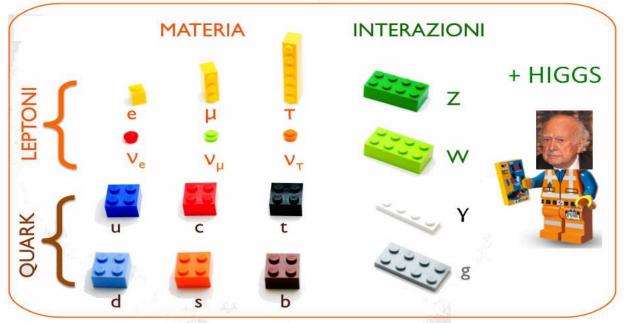


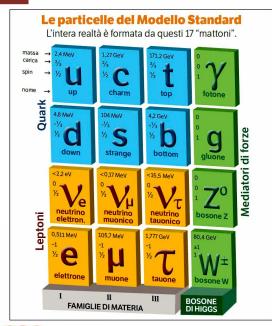


## Fisica delle particelle elementari

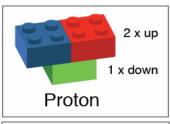
- ☐ La teoria che definisce le nostre attuali conoscenze di fisica subnucleare delle alte energie (delle particelle elementari) è chiamata Modello Standard.
- ☐ Ad esempio: scoperta e studio delle proprietà del bosone di Higgs → permette di capire profondamente un aspetto fondamentale della materia (il meccanismo con cui si genera la massa delle particelle).

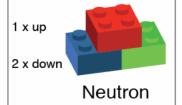
#### Modello standard delle particelle elementari















## Fisica delle particelle elementari

nuovi materiali

analisi dei materiali

luce di sincrotrone

iagnostica PET RMN

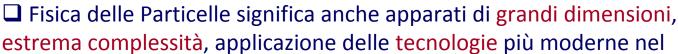
analisi beni culturali

fusione nucleare

lettronica più veloce

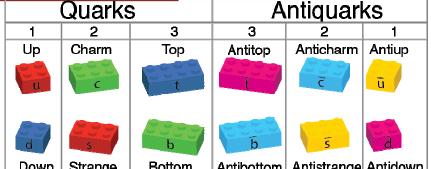
- ☐ Si punta anche alla scoperta di fenomeni nuovi di fisica ("oltre il Modello Standard"):
- → esempio: possibile rivelazione sperimentale di particelle supersimmetriche, alcune candidate a costituire la materia oscura (prevalente nell'Universo);
- → altro esempio sarebbe la scoperta di segnali

di nuova fisica che spieghino l'asimmetria tra materia e antimateria nel nostro Universo, o la prova dell'esistenza di ulteriori dimensioni spazio-temporali.



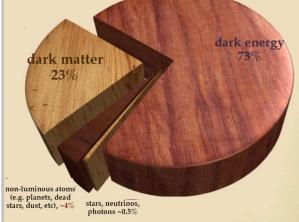
campo dei rivelatori, dell'elettronica, dei sistemi di acquisizione dati e di calcolo informatico.

- Ricadute tecnologiche dello sviluppo degli acceleratori di particelle
- RICERCA IN BIOLOGIA E CHIMICA
- ENERGIA E AMBIENTE
- **► MEDICINA**
- **► TEST NON DISTRUTTIVI**
- ► APPLICAZIONI INDUSTRIALI
  - **▶** PROSPETTIVE









BSM

Beyond the Standard Model

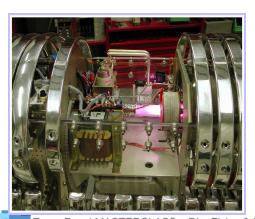
#### Fisica nucleare

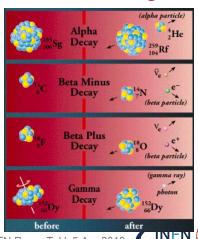
- ☐ Studio degli aggregati elementari della materia, dei nuclei, della struttura e dinamica della materia nucleare a partire dai quark.
- Esperimenti con collisioni tra particelle e anche nuclei (es. collisioni elettrone-nucleo, collisioni tra nuclei di piombo al CERN).
- ☐ Studio del plasma di quark e gluoni (stato Universo primordiale).
- ☐ Studio della formazione dei nuclei a energie simili a quelle che si trovano dentro una stella (più basse rispetto a quelle ottenute nei normali acceleratori di particelle). Produzione e studio delle caratteristiche dei

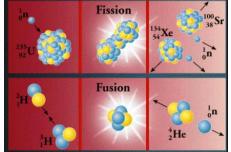
nuclei instabili. Studio della forza nucleare in presenza dei quark "strani"

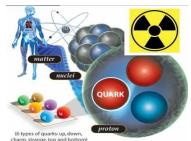
(utile per capire le stelle di neutroni).

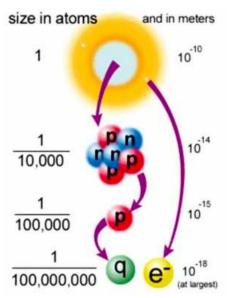
☐ Sviluppi per nuove applicazioni ad esempio nel campo della adroterapia medica oncologica.

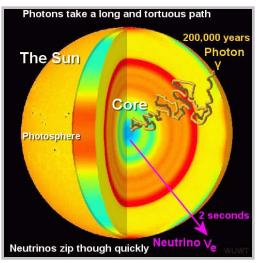












## Fisica delle astro-particelle

- □ **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).

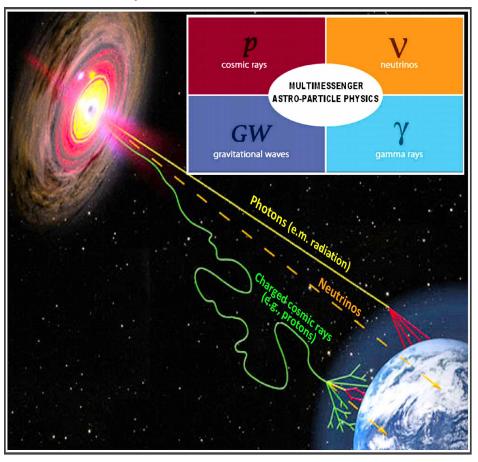


## Fisica delle astro-particelle

☐ 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 esergie più basse), onde gravitazionali, processi fisici denominati rari.

☐ 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

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).

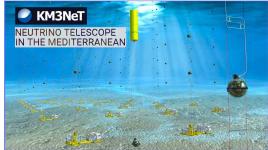
□ Nello spazio i rivelatori posti su satelliti hanno accesso diretto ai raggi cosmici primari (anche fotoni di alta energia, raggi-gamma) che sulla superficie terrestre sarebbero attenuati (o schermati del tutto) dall'atmosfera terrestre.

☐ 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.





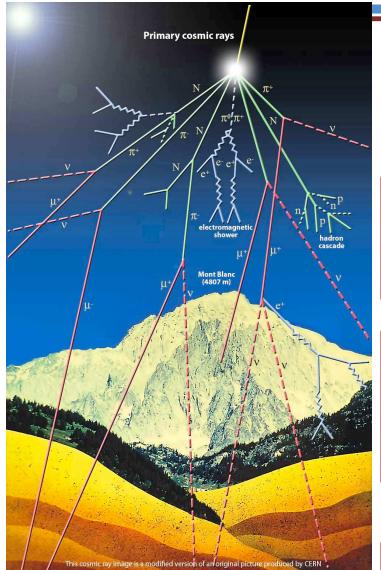








## Scoperta di particelle nei raggi cosmici

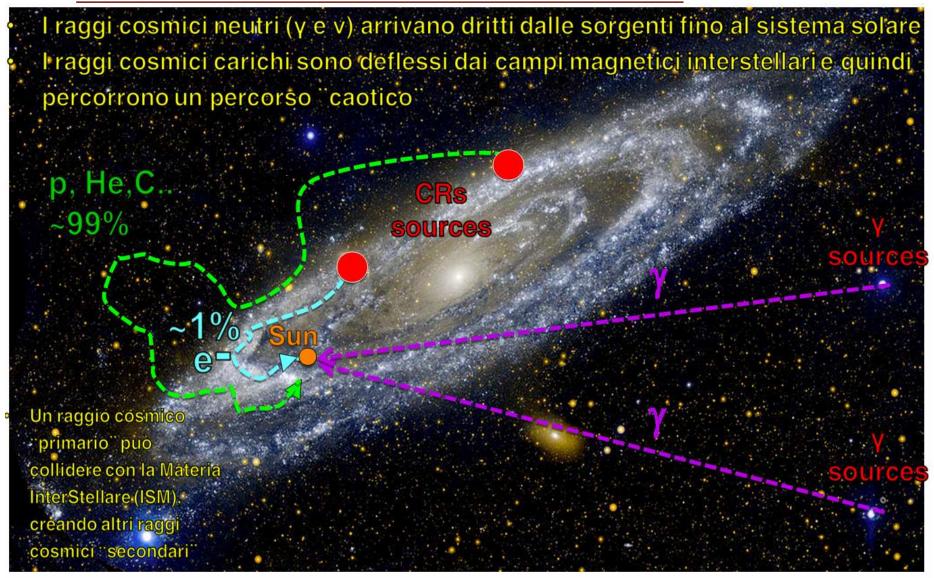


Particle	Year	Discoverer (Nobel Prize)	Method
e-	1897	Thomson (1906)	Discharges in gases
p	1919	Rutherford	Natural radioactivity
n	1932	Chadwik (1935)	Natural radioactivity
$e^+$	1933	Anderson (1936)	Cosmic Rays
$\mu^{\pm}$	1937	Neddermeyer, Anderson	Cosmic Rays
$\pi^{\pm}$	1947	Powell (1950), Occhialini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





## La propagazione dei raggi cosmici





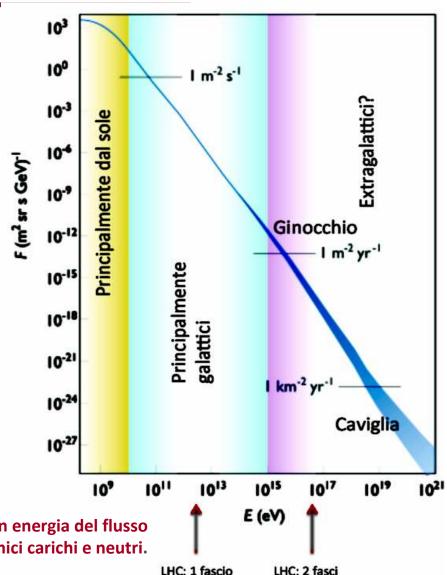
## Flusso ed energia dei raggi cosmici

I raggi cosmici sono particelle subatomiche che arrivano sulla Terra:

- Perlo più (~90%) protoni
- 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:

- 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 che riusciamo a produrre 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.

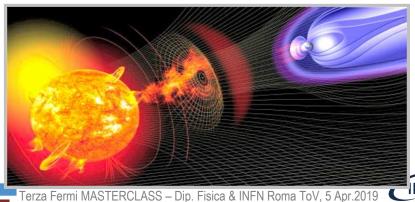
Composizione chimica, in funzione

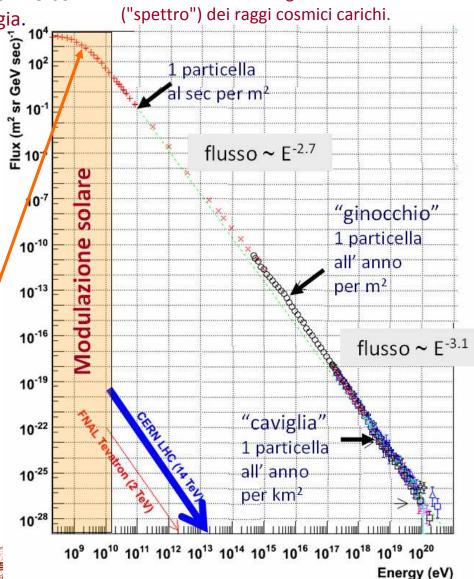
dell'opergia ancora largamente ignota.

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).

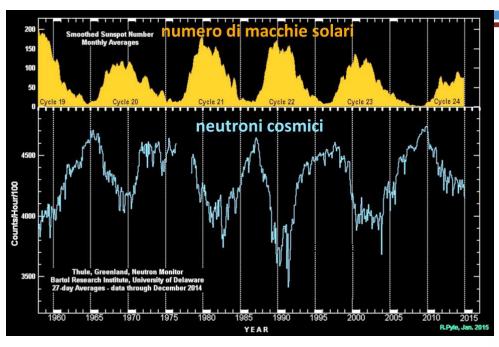
☐ Flusso di raggi cosmici alle energie più basse del diagramma (E<10<sup>10</sup> eV), è fortemente influenzato dalla "modulazione solare", ovvero varia al variare dell'attivita del nostro Sole.

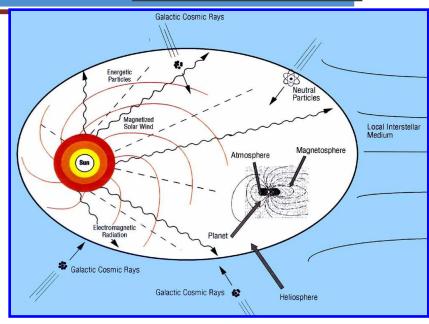




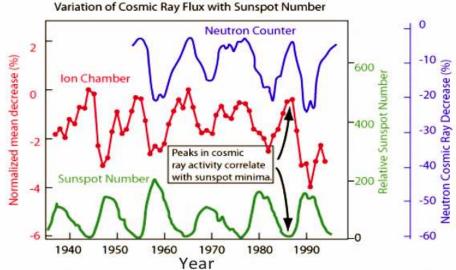
Distribuzione in energia del flusso

## Modulazione dei raggi cosmici





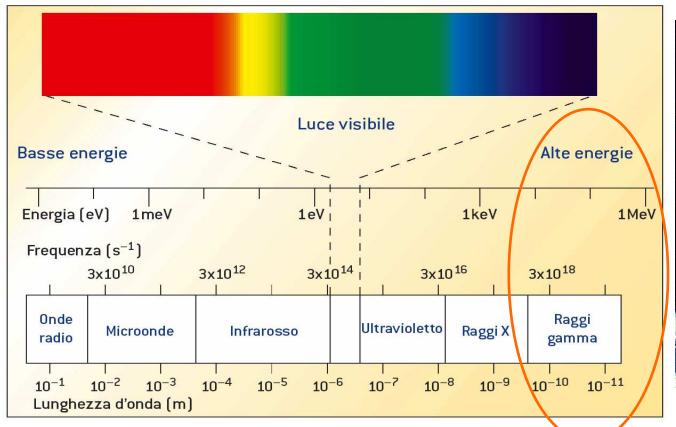
- ☐ I Raggi Cosmici Galattici che entrano nella eliosfera del nostro Sole sono modulati nel tempo da processi fisici legati alle variazioni della attività magnetica solare.
- □ Relazione tra variazione flusso (e altri parametri) dei raggi cosmici sulla terra e i parametri dell'eliosfera → discussione ancora molto aperta ed importante per ricostruire l'attività solare nel passato.

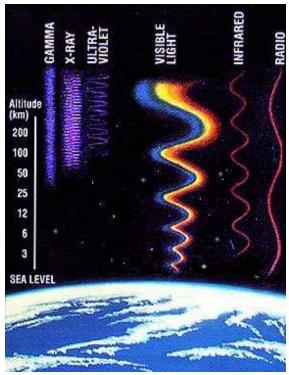


#### Fotoni dal cosmo (radiazione elettromagnetica)

□~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 (4.1357x10<sup>-15</sup> eV s),  $\lambda$  is the wavelength, and c=3x10<sup>8</sup> m/s.



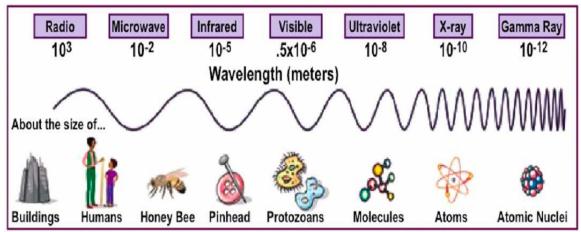






#### I raggi gamma

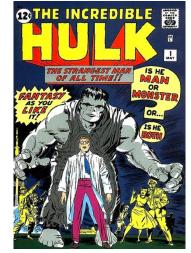
Cosa è un raggio gamma? E' una delle molte forme della luce (fotoni). Ogni tipo di luce (fotone radio, infrarosso, ottico, UV, X, gamma) trasporta diverse informazioni. I raggi gamma sono il tipo di luce di più alta energia che esista. Ci danno informazioni sugli oggetti e fenomeni più energetici ed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







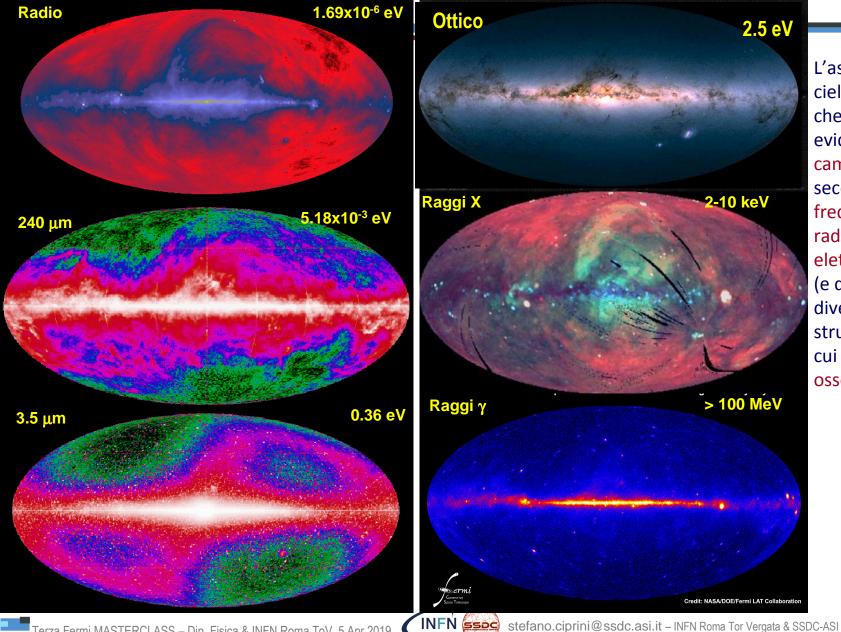
Perche i raggi gamma soni molto potenti (decadimenti, reazioni ed esplosioni nucleari, fenomeni molto energetici prodotti da pulsar, buchi neri, shock, getti di plasma e gas, annichilazione materia-antimateria, diffusione Compton inversa, possibili interazioni prodotte da materia oscura, etc.).







#### 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.

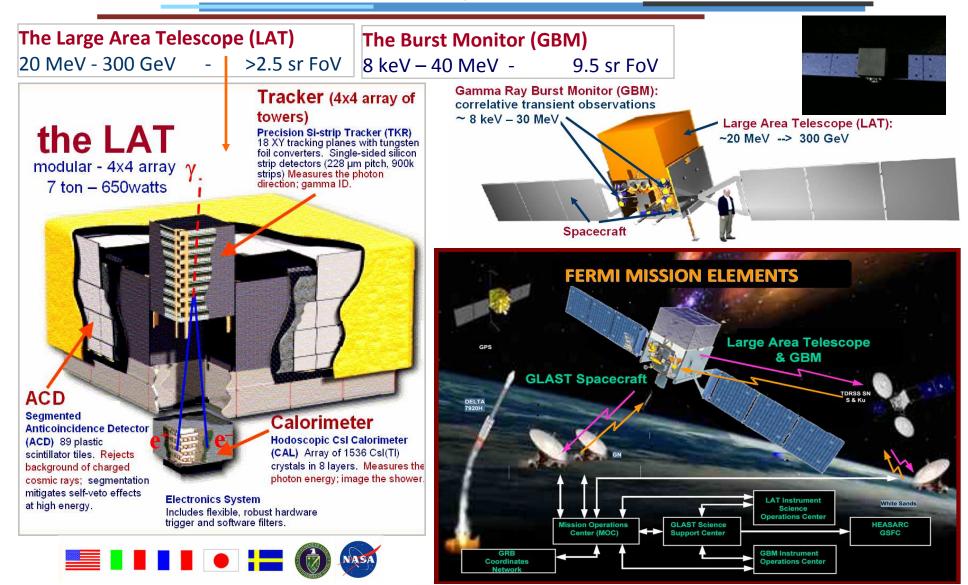








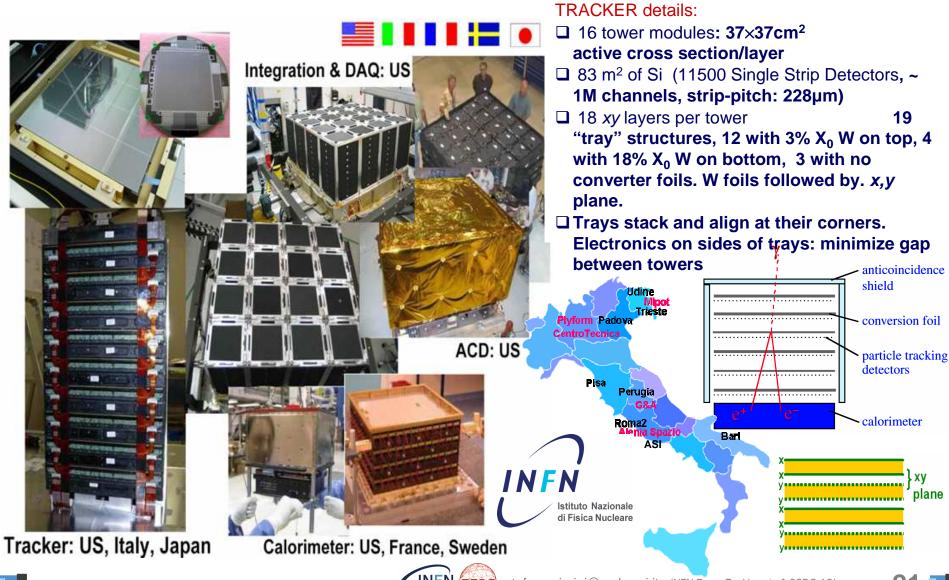
#### Fermi Gamma-ray Space Telescope: due strumenti, il LAT ed il GBM





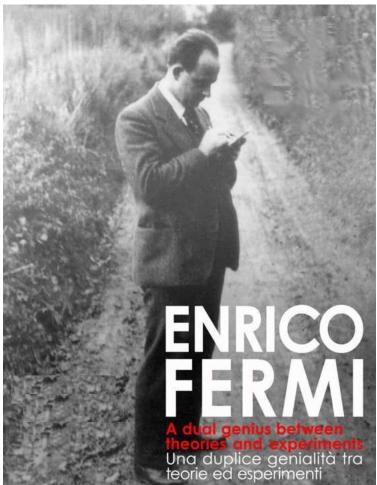


#### Strumento LAT di Fermi: uno sforzo INFN e internazionale





#### 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"

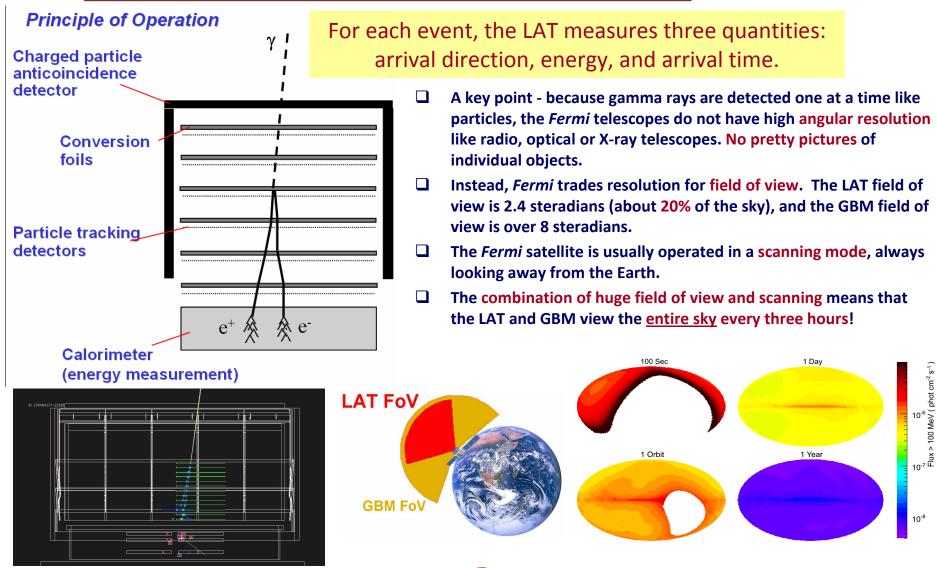
Jon Morse
Director of Astrophysics Division, NASA HQ, Washington DC







## Fermi LAT: telescopio a produzione di coppie per alte energie tali che E = mc² diviene importante

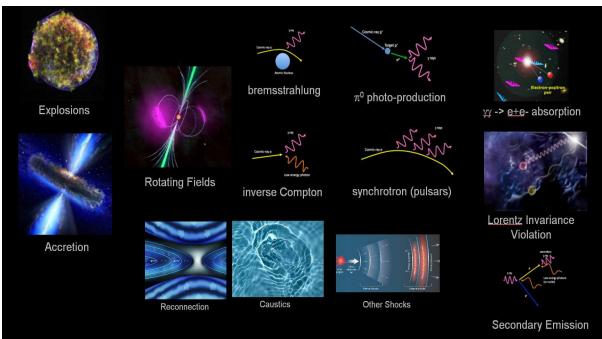




#### Cosa ci dice il cielo nei raggi gamma

#### 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 ad 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)

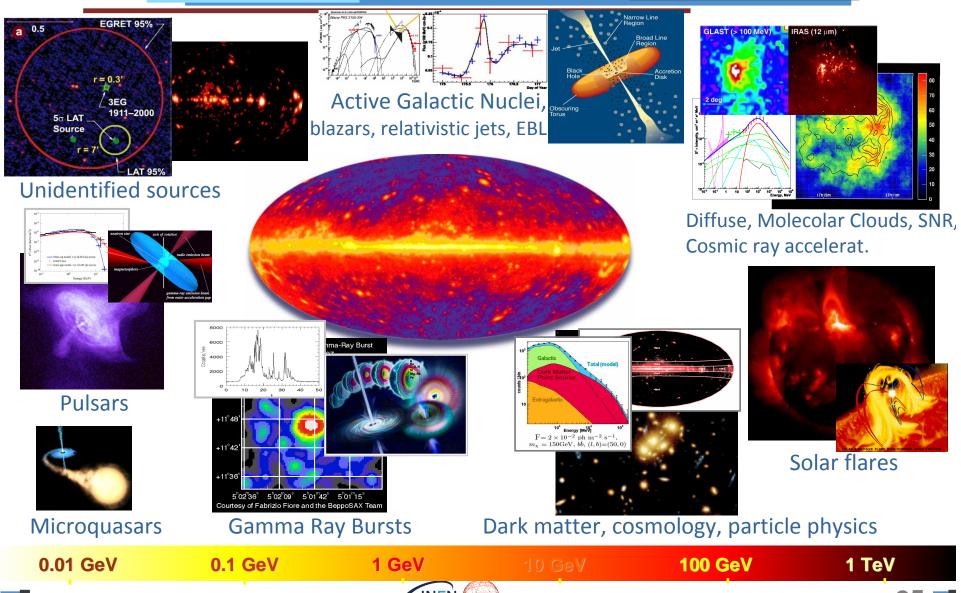
L'osservazione del cielo nei raggigamma interessa entrambe le comunità della fisica delle particelle delle alte energie e dell'astrofisica delle alte energie.



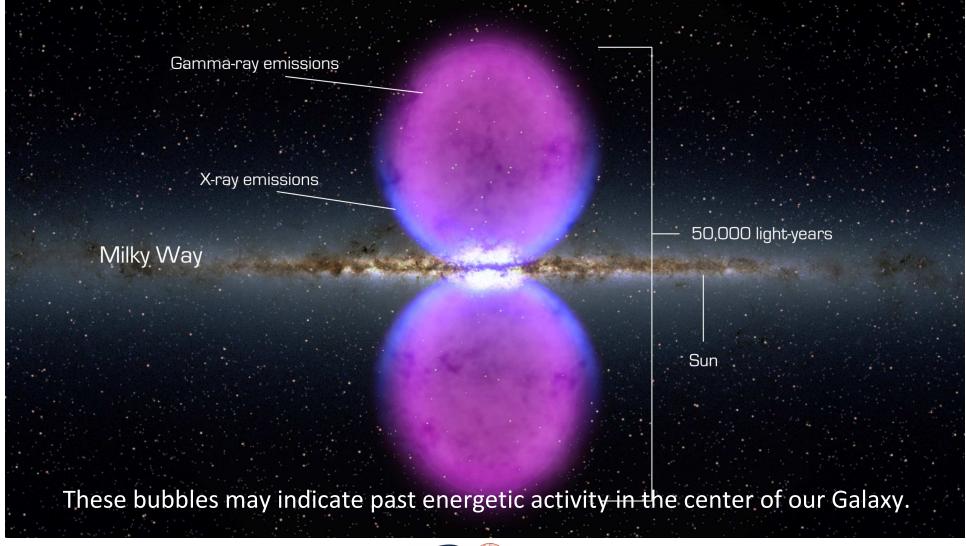




#### Lo zoo dell'astronomia gamma sopra 100 MeV



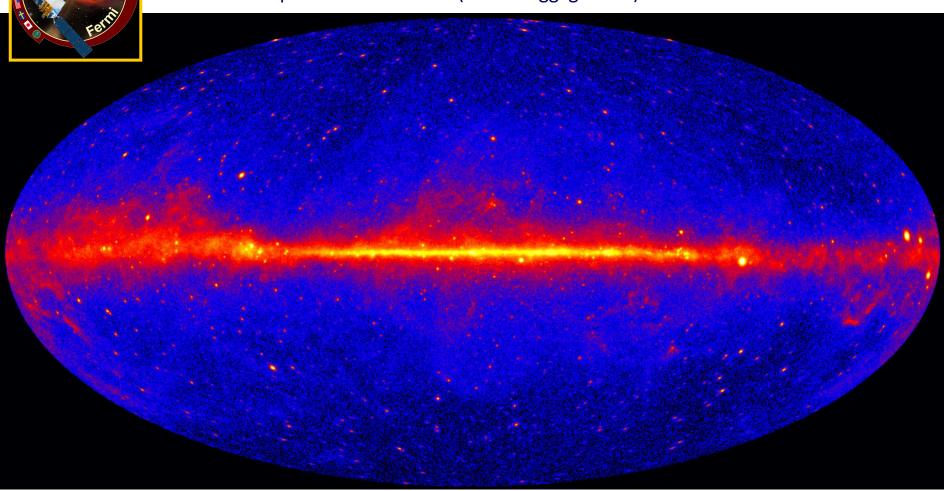
#### Le bolle gamma della nostra Galassia





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

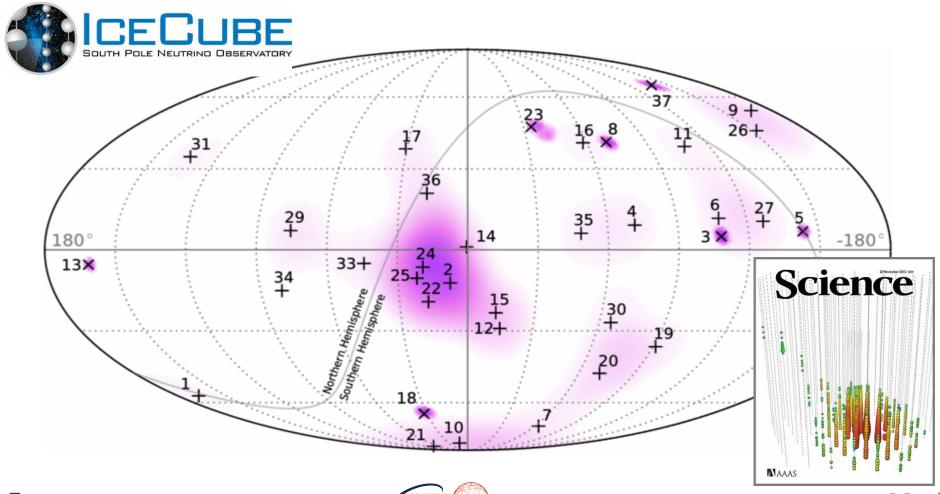
Il cielo nei raggi gamma in coordinate galattiche (piano della nostra galassia Via Lattea è la fascia centrale) con scala colori arbitrari per l'intensità (luminosità). Mappa ottenuta accumulando i primi 10 anni di dati (fotoni raggi gamma) rivelati dal *Fermi* LAT.





#### 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).

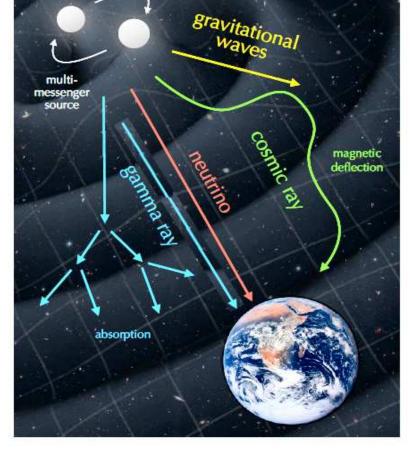




# Fisica delle astro-particelle multi-messaggera coi neutrini cosmici molto (TeV/PeV) energetici

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:  $\pi^0 \to \gamma + \gamma$ 

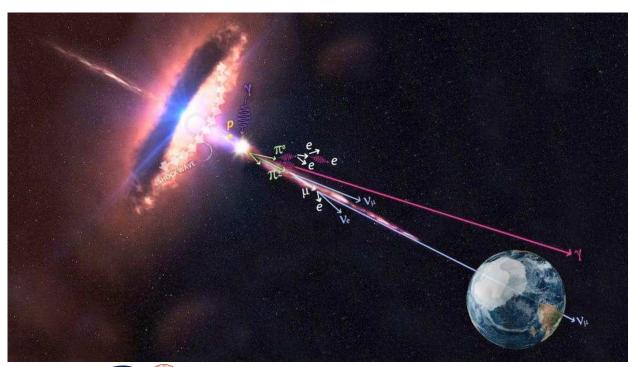
Aspetti unici del neutrino come particella messaggera cosmica:

→ 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).



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



#### Scoperta dei neutrini

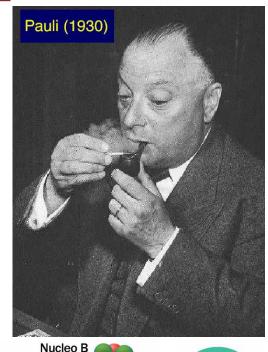
☐ Il neutrino è associato a numeri piccolissimi (es.: massa, sezione d'urto, etc.) e grandissimi (es. numero neutrini dal Sole o esplosioni supernovae, dimensioni dei rivelatori e laboratori necessari per rivelarli, etc.)  $\rightarrow$  questo è probabilmente già un indice della sua speciale natura.

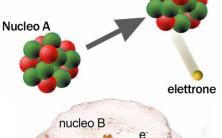
☐ I neutrini sono particelle elementari che si trovano all'esterno degli atomi e che non sono composte da ulteriori particelle più semplici; non hanno carica elettrica e hanno una massa estremamente piccola (più di 1 milione di volte più piccola di quella di un elettrone). Elettrone già ha massa circa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









stefano.ciprini@ssdc.asi.it - INFN Roma Tor Vergata & SSDC-ASI







#### 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

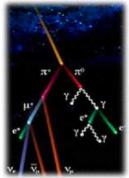


Neutrini da esplosioni di SuperNova



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





Neutrini da interazione di raggi cosmici in atmosfera



Neutrini prodotti dal nostro pianeta



#### Neutrino: particella misteriosa

Caratteristiche del neutrino (ai tempi di Enrico Fermi). ☐ Particella di massa quasi nulla e neutra elettricamente.  $\square$  Fermione (dotata di spin)  $\rightarrow$  una trottola fatta di nulla ?! Piccolissima probabilità di interazione con la materia, può percorrere decine di anni luce dentro la materia senza interagire! Per guesto 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

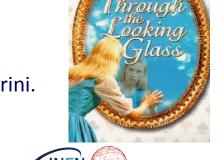
la sua antiparticella)?

☐ Supremazia materia su antimateria.

☐ Mescolamento e oscillazioni di neutrini.

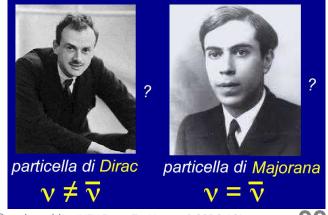
☐ Valore della velocità?

☐ Valore della massa?



Una particella elementare... molto particolare! **3** FAMIGLIE DI NEUTRINI neutrino neutrino elettronico muonico antineutrino antineutrino elettronico muonico Carica elettrica 0 Momento angolare intrinseco (legato al suo moto di rotazione su se stesso) 1/2 debole Interazioni di cui risente Ha una massa nulla? Concide con la sua antiparticella?

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

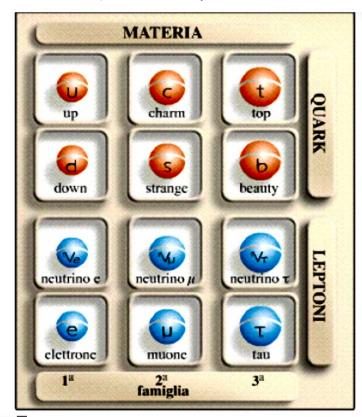


## Esistono 3 tipi di neutrini

☐ 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 patner.



< 2.8 eV

<17 Kev

<18.2 MeV

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

**Nobel Prize** awarded for discovery of neutrino oscillations







**Neutrino Oscillations in** vacuum





electron

neutrino

## Sorgenti di neutrini

#### Solar neutrinos

From the process of thermonuclear fusion inside a star. Also produced copiously by supernovae. Our sun produces about  $2x10^{38}$  per second total.

Neutrinos from nuclear reactors and accelerators

A standard nuclear power plant radiates about  $5 \times 10^{20}$  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

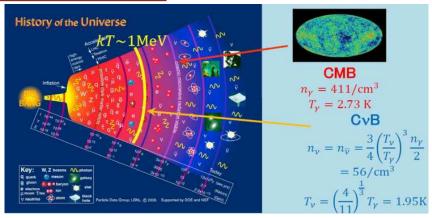
☐ Molti neutrini che pervadono l'universo sono stati prodotti circa 14 miliardi di anni fa dopo la nascita dell'Universo (Big Bang). Ora vi sono tanti neutrini quanti in accordo con la temperatura attuale della radiazione (fotoni) di fondo a microonde (cosmic microwave background, CMB) di 2.7° Kelvin.

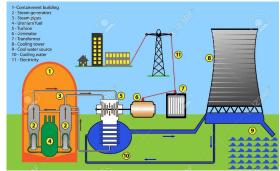
→ fondo cosmico di neutrini (CvB) uniforme è

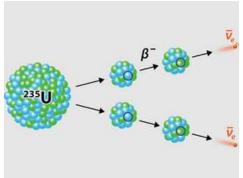
previsto esistere nell'Universo, nell'attuale epoca con densità di 330 neutrini per cm^3 a 1.9° Kelvin → energie piccolissime (10^-4 eV) nessun esperimento li ha rivelati.

#### 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 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. FASCIO DI NEUTRIN SVIZZERA ITALIA **CERN Neutrinos** to Gran Sasso facility CNGS 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 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.

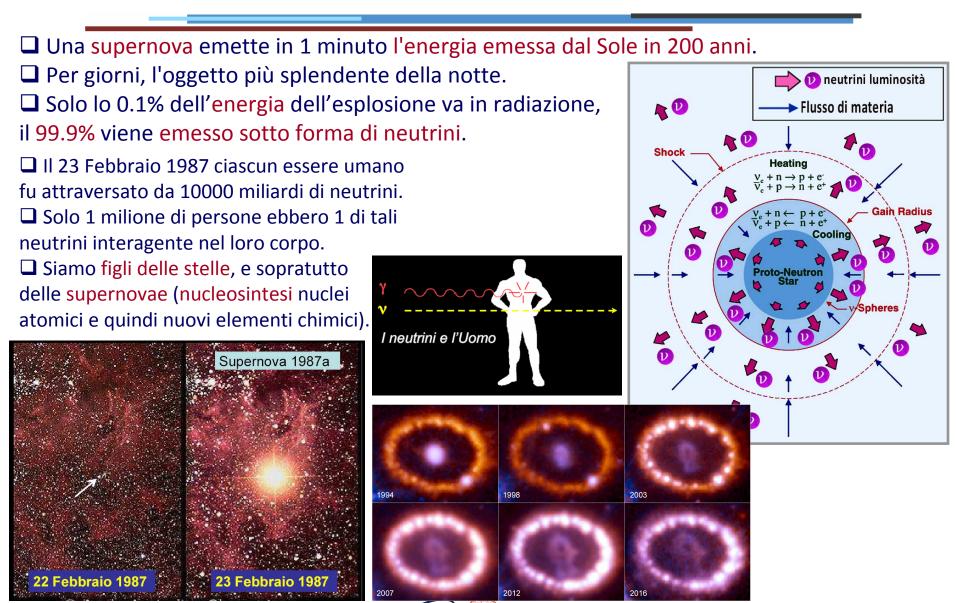


- Problema dei neutrini solari (metà anni '60 fino al 2002): discrepanza tra numero osservato di neutrini elettronici che arrivano sulla Terra e numero predetto da modelli.
- → nuova comprensione della fisica dei neutrini con modifica Modello Standard delle particelle,
- → oscillazioni del neutrino,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

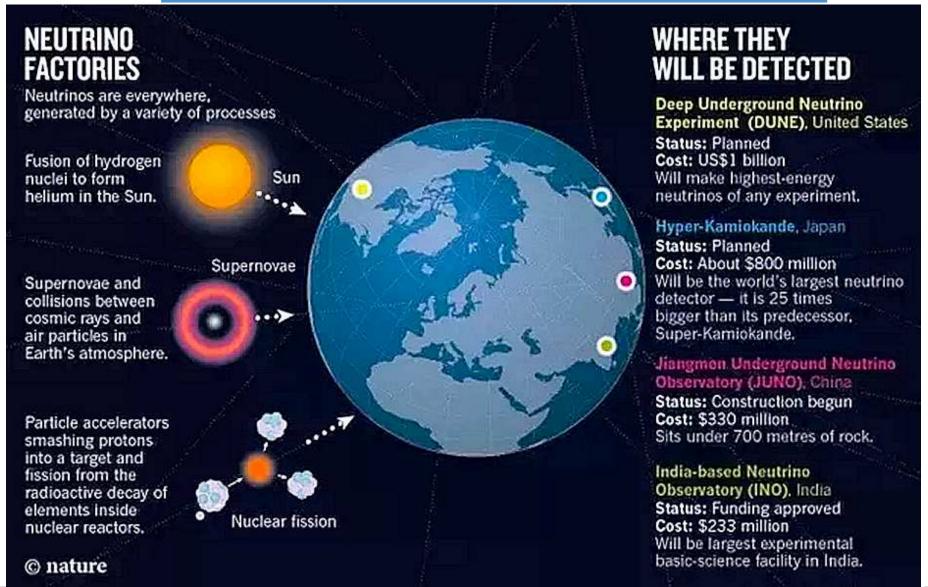
- Sotto la crosta terrestre c'è un mare di uranio e torio. Lo sapevamo ma ora studiando i neutrini che si originano al centro della Terra, ne abbiamo certezza.
- ☐ Nuclei di uranio e torio decadono emettendo antineutrini elettronici e energia in forma di calore.
- L'energia prodotta corrisponde a circa 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



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





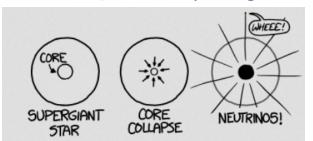
# Fabbriche di neutrini naturali dallo spazio

Neutrini cosmici = neutrini dallo spazio Non-Anthropogenic Neutrino Fluxes (per flavour)  $10^{6}$ che non provengono dal Sole  $solar/(4\pi)$ core-collapse SNe  $10^{4}$ (sorgente predominante), ne prodotti in SN 1987A/ $(4\pi)$ /(3s) $10^{2}$ atmosfera. avg. atmo.  $V_{\mu} + \bar{V}_{\mu}$  $E^2\phi_{v+\bar{v}}$  [GeV cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 100 avg. atmo.  $v_e + \bar{v}_e$ avg. Galactic diffuse  $10^{-2}$ IceCube HESE (4yr)  $10^{-4}$ IceCube  $v_{\mu} + \bar{v}_{\mu}$  (6yr) cosmogenic (proton) Supernova 1987A  $10^{-6}$ The sun  $10^{-8}$  $10^{-10}$  $10^{-2}$  $10^{-4}$  $10^{0}$  $10^{2}$  $10^{4}$ E [TeV] **Gamma Ray Bursts** 10-6 **Active Galactic Nuclei** isotropic γ-ray ultra-high energy  $E^2\phi \, [\text{GeV cm}^{-2} \, \text{s}^{-1} \, \text{sr}^{-1}]$ background cosmic rays proton (E-2 (Fermi) (Auger)  $10^{-7}$ HESE calorimetri **Dark Matter?** GZK v 10<sup>10</sup> 1011  $10^{3}$ 104 10<sup>5</sup> 106 108 109 107 10 100 energy E [GeV] Terza Fermi MASTERCLASS – Dip. Fisica & INFN Roma ToV, 5 Apr.2019

#### 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:

$$\frac{\mathrm{d}^2 N_{\nu}}{\mathrm{d}t \, \mathrm{d}A} \sim \frac{1}{\mathrm{cm}^2 \times 10^5 \mathrm{yr}}$$

cross section :

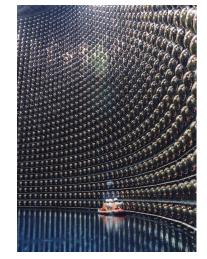
$$\sigma_{\nu N} \sim 10^{-8} \sigma_{pp} \sim 10^{-33} \text{cm}^2$$

targets:

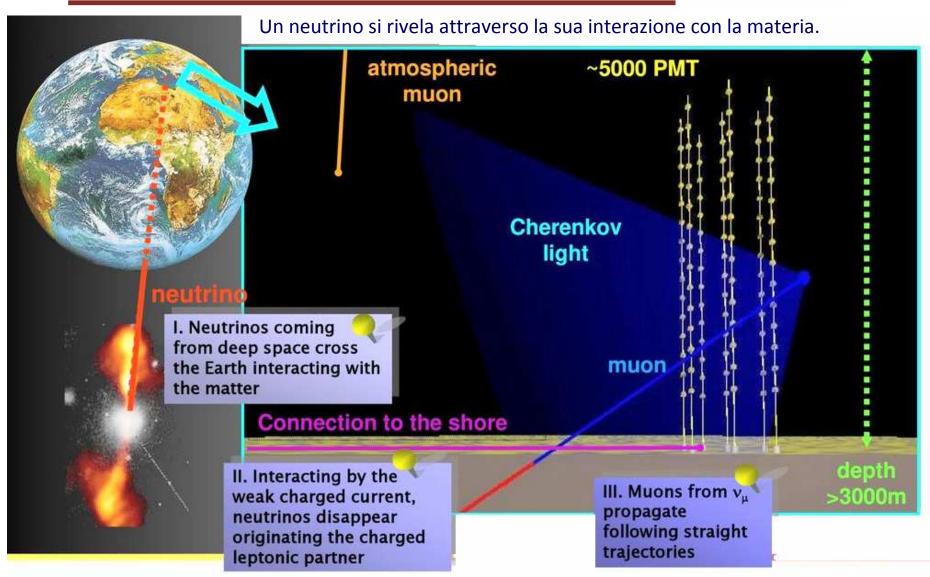
$$N_N \sim N_A \times V/\text{cm}^3$$

rate of events :

$$\dot{N}_{\nu} \sim N_N \times \sigma_{\nu N} \times \frac{\mathrm{d}^2 N_{\nu}}{\mathrm{d}t \, \mathrm{d}A} \sim \frac{1}{\mathrm{year}} \times \frac{V}{1 \mathrm{km}^3}$$



# Principio di rivelazione





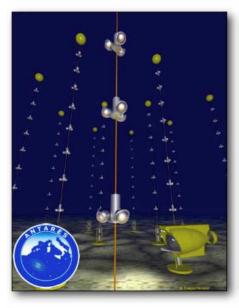
# Rivelatori di luce Cherenkov ottica per neutrini di altissima energia (telescopi per neutrini cosmici)

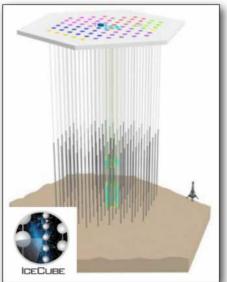
**Antares** 

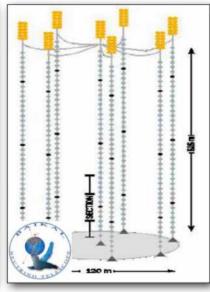
**IceCube** 

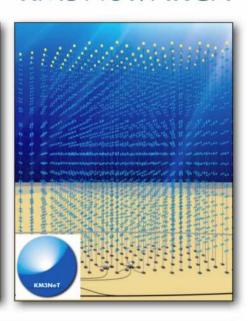
Baikal-GVD

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 km³	~1 km³	~0.4 km³ (Phase 1) ~1 km³	~0.1 km <sup>3</sup> (Phase 1) ~1 km <sup>3</sup>
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).

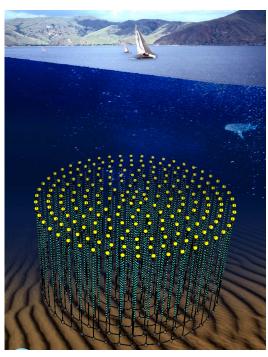
☐ Studio dell'Universo e del cielo cercando i neutrini cosmici da sorgenti astrofisiche diverse dal Sole, come supernovae, gamma-ray bursts, blazar e AGN brillanti nei raggi gamma, etc. (strumento ARCA)

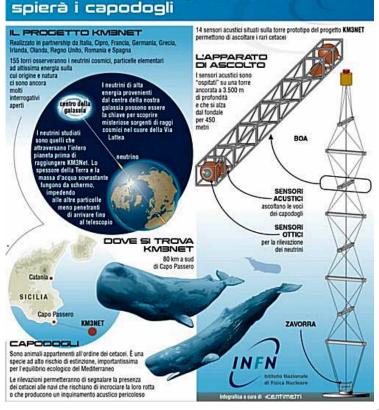
☐ Studio delle proprietà dei neutrini usando quelli molto numerosi che sono generati dall'atmosfera terrestre

(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.





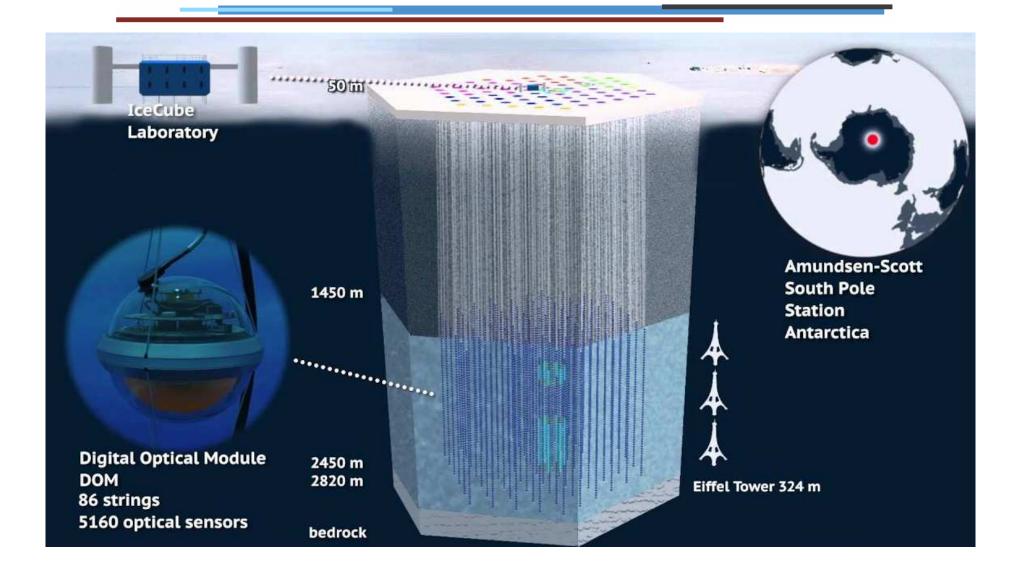


Come il telescopio per neutrini



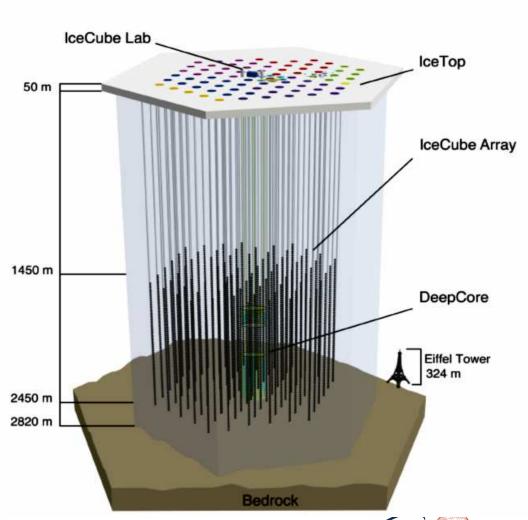


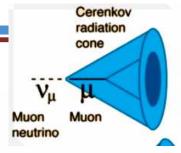
# L'attuale esperimento IceCube in Antartide





### L'attuale esperimento IceCube in Antartide



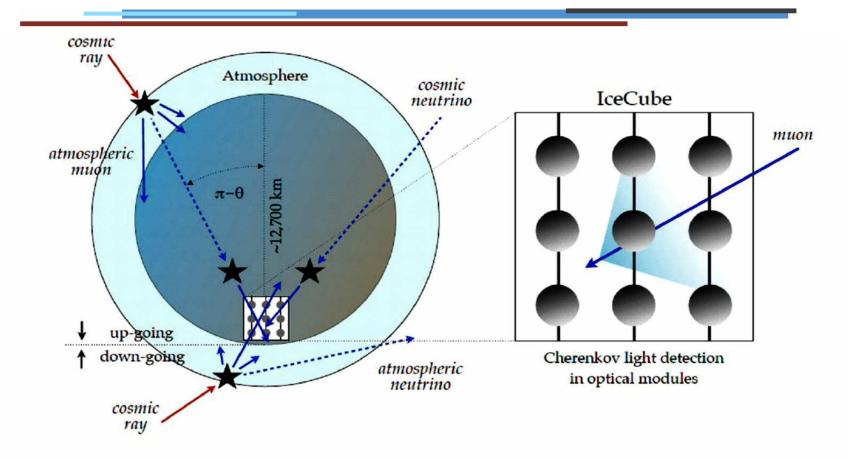


The Cerenkov radiation from a muon produced by a muon neutrino event yields a well defined circular ring in the photomultiplier detector bank.

- 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:

10,000,000,000

100,000

atmospheric muons (from above)

atmospheric neutrinos

cosmic neutrinos

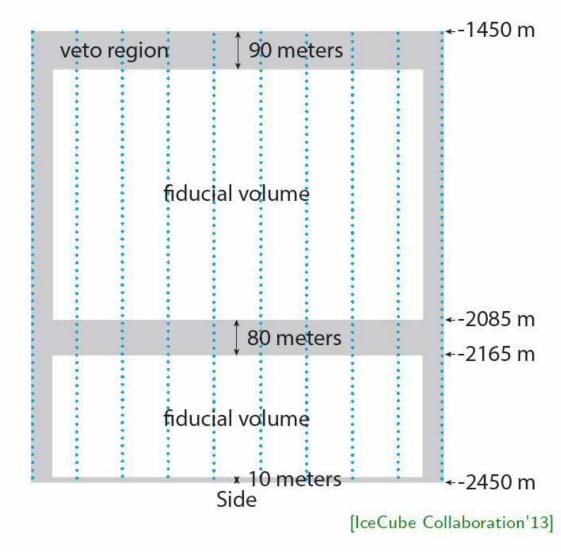






#### Rivelare neutrini cosmici con IceCube

- Outer layer of optical modules can be used as a veto region (gray area):
- X 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



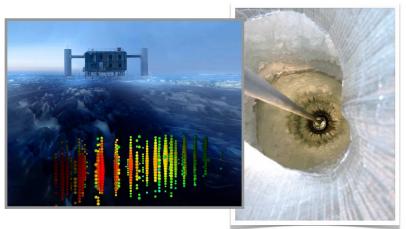
stefano.ciprini@ssdc.asi.it - INFN Roma Tor Vergata & SSDC-ASI





# **Esperimento IceCube in Antartide**













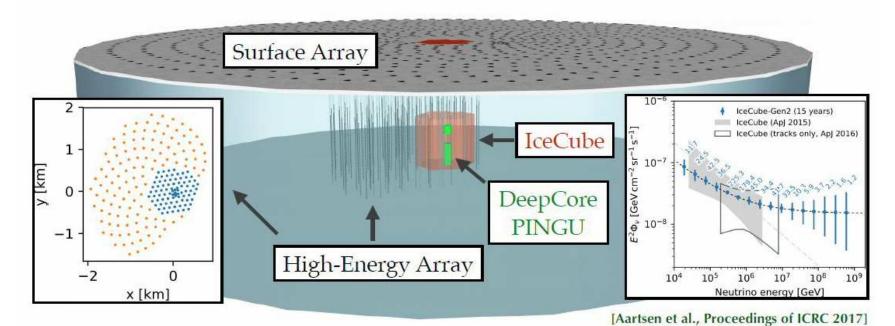




#### Il futuro: IceCube-Gen2

#### IceCube-Gen2

- · Multi-component facility (low- and high-energy & multi-messenger).
- In-ice high-energy Cherenkov array with 6-10 km<sup>3</sup> volume.
- Under investigation: Surface arrays for in-ice radio Askaryan and cosmic ray veto (air Cherenkov and/or scintillator panels).





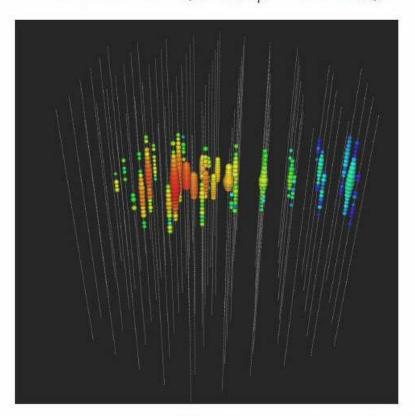


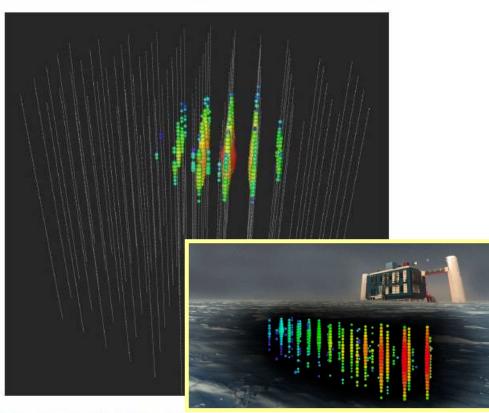
# 2013: prima storica rivelazione di un neutrino cosmico (non dal Sole) ad altissima energia

First observation of high-energy astrophysical neutrinos by IceCube!

"track event" (from  $\nu_{\mu}$  scattering)

"cascade event" (from all flavours)





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

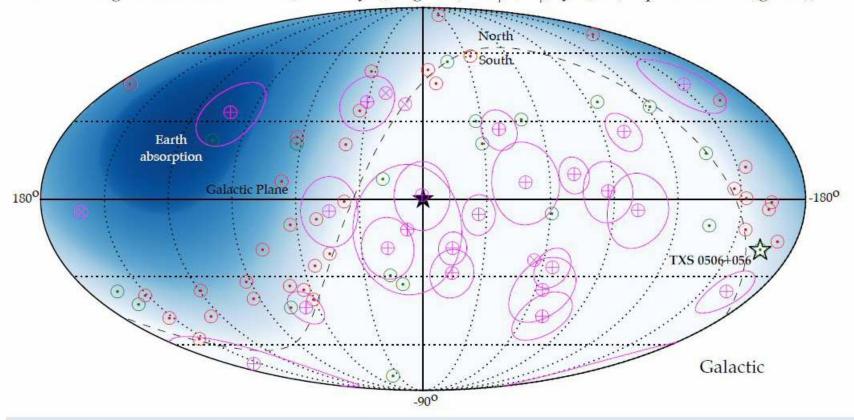




## Mappa del cielo dei neutrini rivelati da IceCube

#### Arrival Directions of Cosmic Neutrinos

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

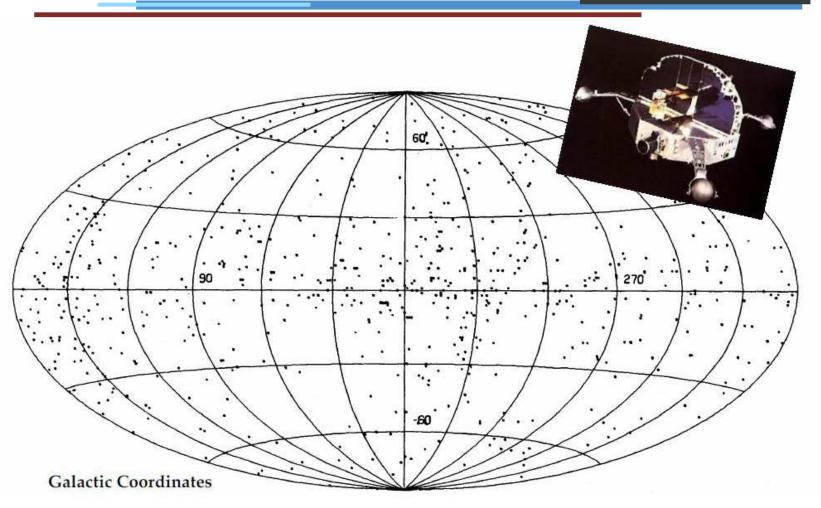


No significant correlation of diffuse flux with known sources, except TXS 0506+056.





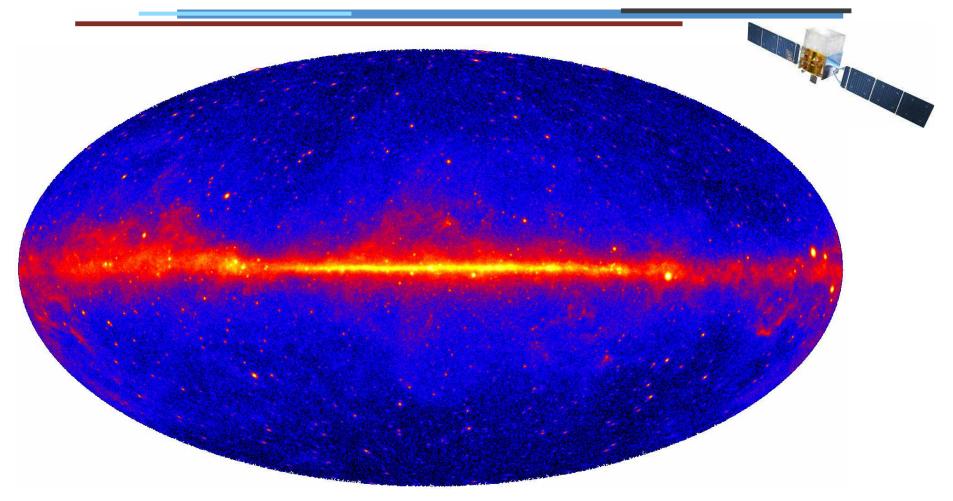
# Neutrini cosmici e raggi gamma: il cielo nei raggi gamma nel 1967



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)



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





# 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.)



→ mesoni sono prodotti da interazioni di raggi cosmici con fotoni (radiazione elettromagnetica):



→ neutrini prodotti mentre essi sono confinati dentro l'ambiente che circonda la sorgente di raggi cosmici;

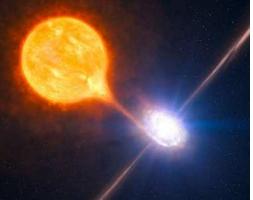
→ prodotti da collisioni inelastiche adro-nucleari

$$\pi^0 o \gamma + \gamma$$
  $\pi^+ o \mu^+ + 
u_\mu o e^+ + 
u_e + \overline{
u}_\mu + 
u_\mu$  neutrino

$$pp \rightarrow \begin{cases} \pi^{0} \rightarrow \gamma \gamma \\ \pi^{+} \rightarrow \mu^{+} V_{\mu} \rightarrow e^{+} V_{e} V_{\mu} \overline{V}_{\mu} \\ \pi^{-} \rightarrow \mu^{-} \overline{V}_{\mu} \rightarrow e^{-} \overline{V}_{e} \overline{V}_{\mu} V_{\mu} \end{cases} V$$











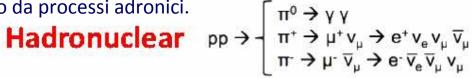


## Neutrini cosmici, raggi cosmici e raggi gamma

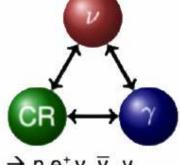
Neutrini very-high-energy da processi adronucleare e fotoadronico.

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

□NB: raggi gamma non solo da processi adronici.

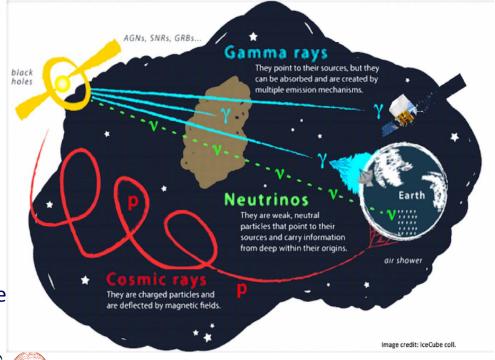


Photohadronic  $p\gamma \rightarrow \Delta^{+} \rightarrow \begin{cases} p \pi^{0} \rightarrow p \gamma \gamma \\ n \pi^{+} \rightarrow n \mu^{+} v_{\mu} \rightarrow n e^{+} v_{e} \overline{v}_{\mu} v_{\mu} \end{cases}$ 



#### Sorgenti astrofisiche candidate:

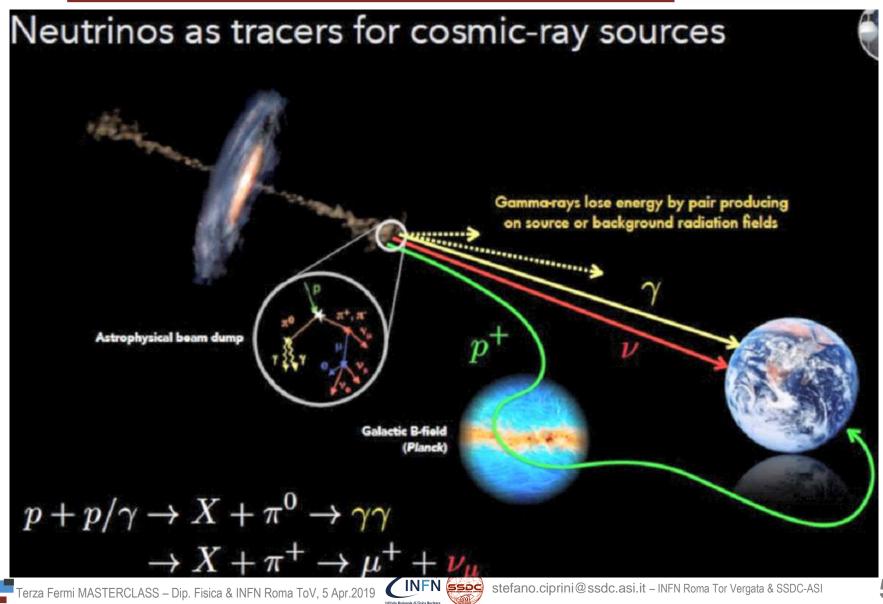
- ☐ Buchi neri supermassicci attivi che accrescono ed emettono getti (M^BH~ 10^8-9 Msun)  $\rightarrow$  AGNs, blazars
- ☐ Esplosioni più luminose (L ~ 10^52 erg/s)
- $\rightarrow$  GRBs (SN, FRB?)
- ☐ I campi magnetici più intensi (B ~ 10^15 G)
- → Magnetars (binarie X-ray, young stellar objects?)
-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



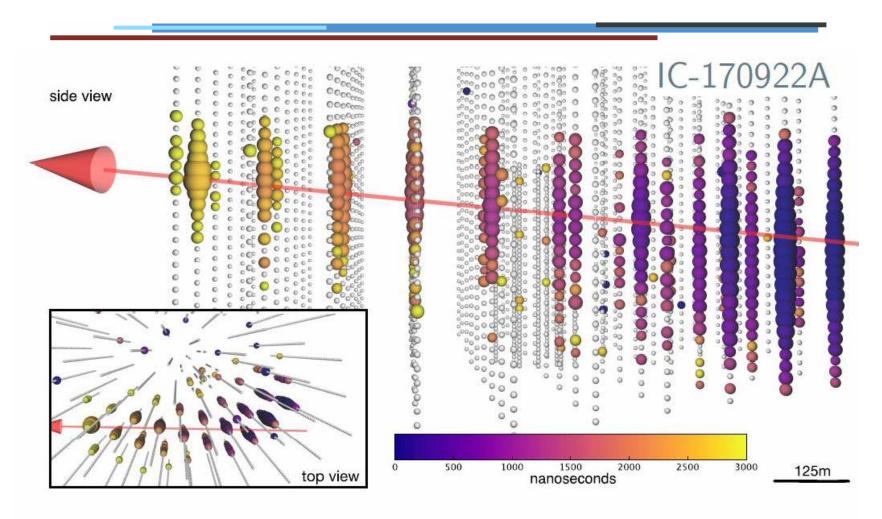




### Neutrini cosmici, raggi cosmici e raggi gamma



### Un neutrino di IceCube molto importante: IC 170922A

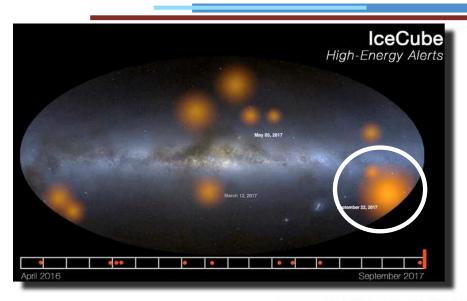


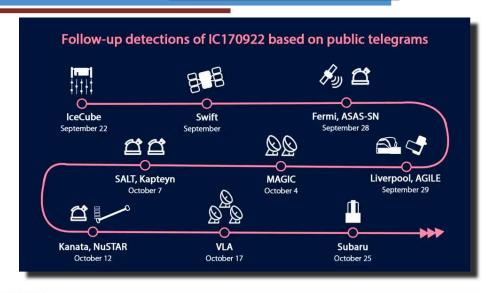
Up-going muon track (5.7° below horizon) observed on September 22, 2017. The best-fit neutrino energy for an  $E^{-2}$ -spectrum is 311 TeV.

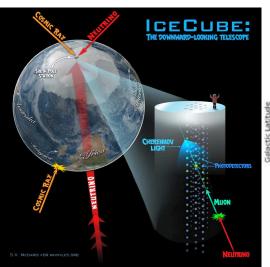


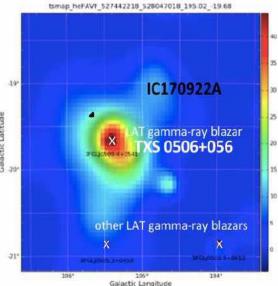


### Il neutrino IC 170922A ed il blazar gamma TXS 0506+056









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





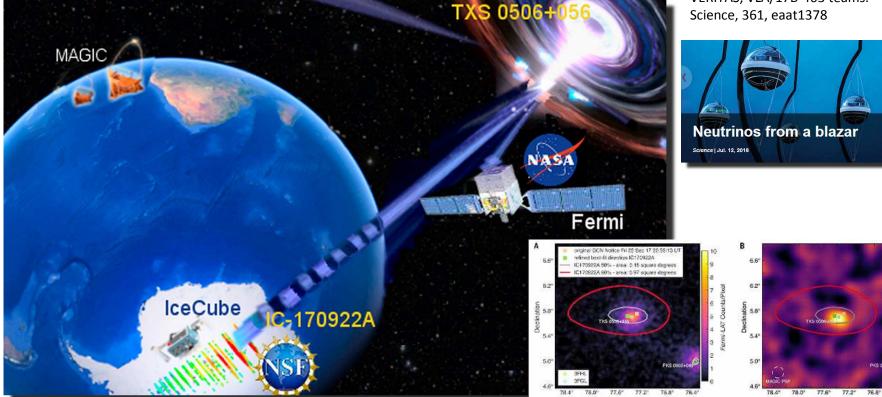
> ermi

Gamma-ray Space Telescope

# 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 Fondation 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.





# 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\*+

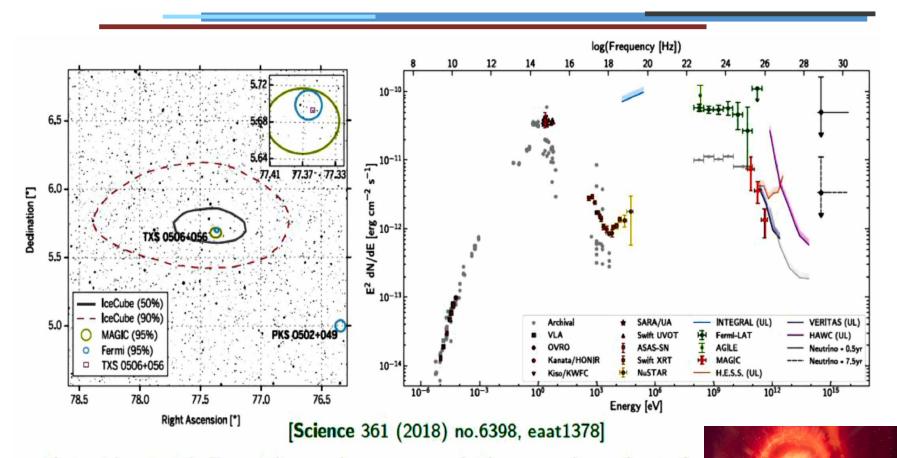
[Science 361 (2018) no.6398, 147-151]







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



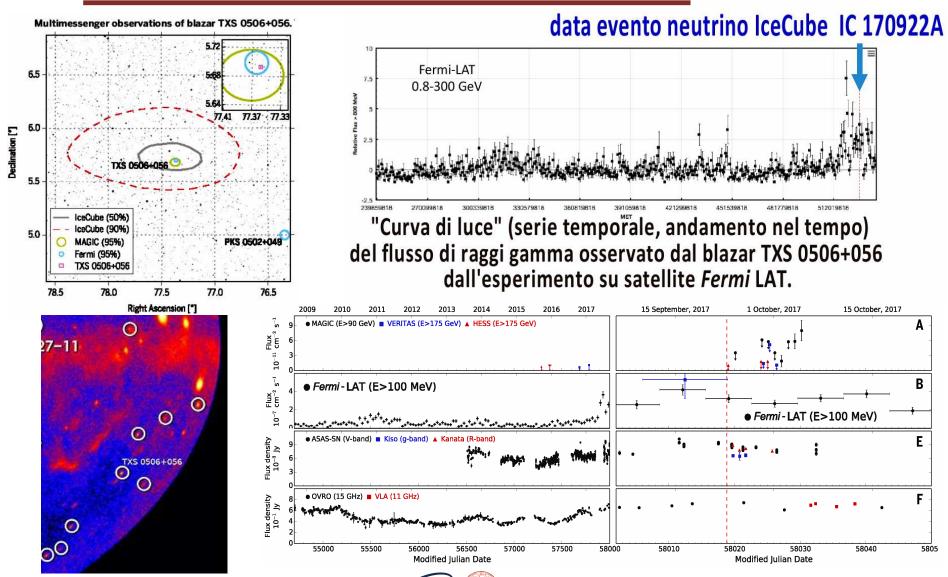
- Coincident with Fermi flare; chance correlation can be rejected at the  $3\sigma$ -level.
- TXS 0506+056 is among the 3% brightest Fermi-LAT blazars.
- One of the most luminous BL Lacs  $(2.8 \times 10^{46} \text{ erg/s})$ .







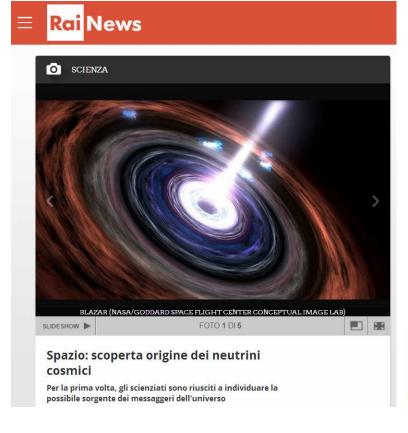
# Coincidenza spaziale (mappe fotoni gamma) e temporale (curve di luce gamma) col neutrino IC 170922A





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









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

La scoperta apre una nuova era della ricerca spaziale

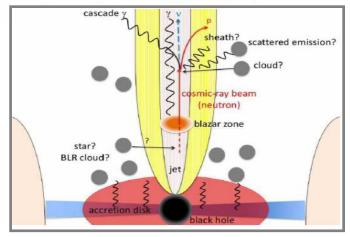


#### Il neutrino IC 170922A ed il blazar gamma di Fermi TXS 0506+056

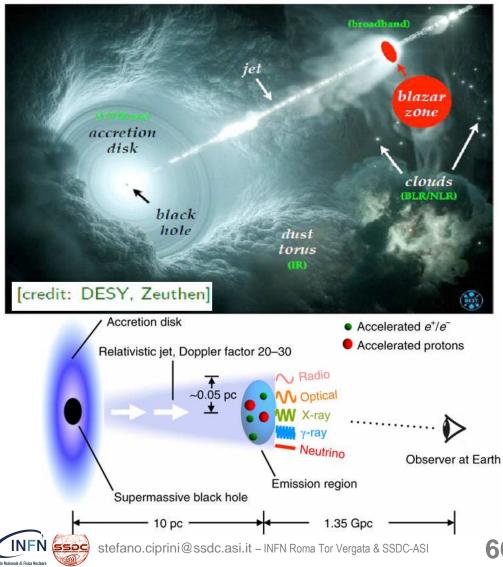
- Blazars: active galaxies powered by accretion onto a supermassive black hole expel relativistic jets pointing into our line of sight.
- Cosmic ray acceleration and pγ interaction in blazar zone leads to neutrino beam. [Stecker et al.'91]

[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





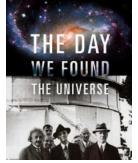
# Nuclei Galattici Attivi (AGN) e blazar

☐ 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 (supermassive 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









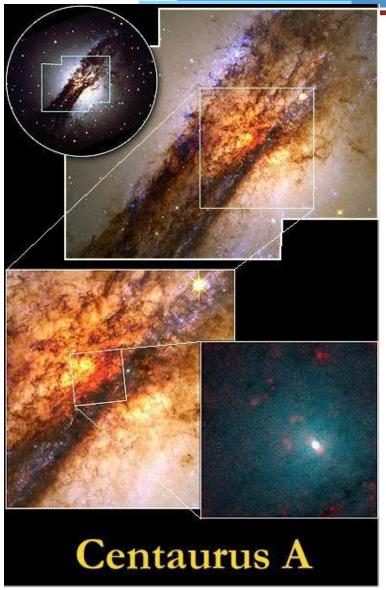


matter, etc.).



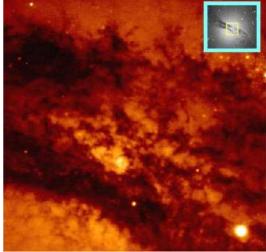


### **Esempi di AGN: Centaurus A**

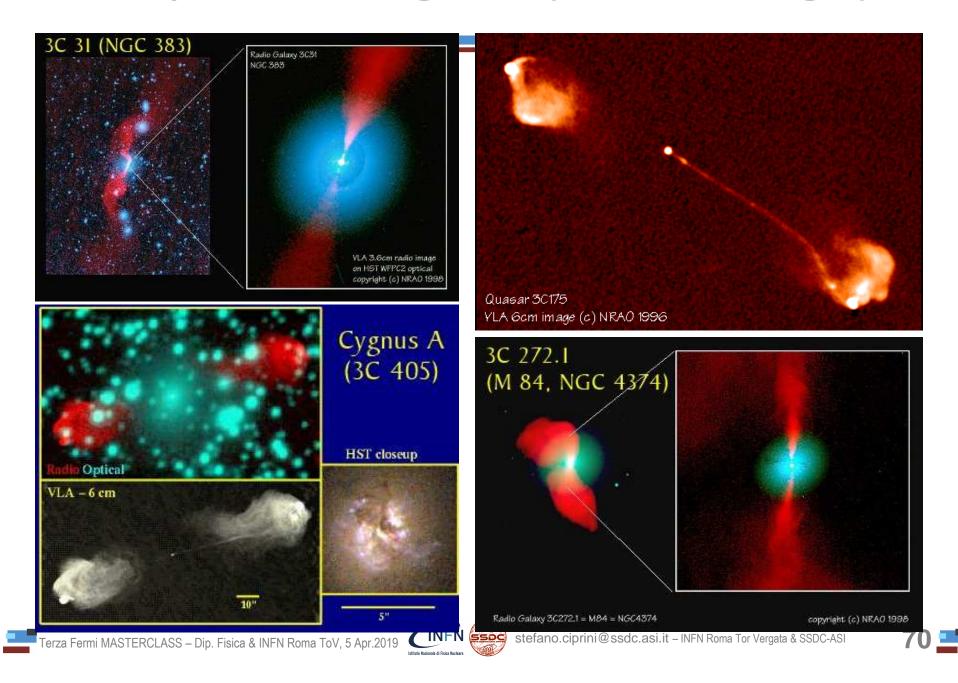


Centaurus-A (NGC 5128), la radiogalassia (ed AGN) più vicina posta a 10 milioni di a.l.. Lo spesso disco di polvere che taglia la galassia è il prodotto di una fusione tra una galassia a spirale e la gigante ellittica. Lo shock della collisione ha compresso il gas interstellare che ha innescato una intensa 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 109 volte la amssa del sole. Tale disco luminoso alimenta probailmente un disco di accrescimento interno.





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



# Un cartoon del modello stadard per gli AGN



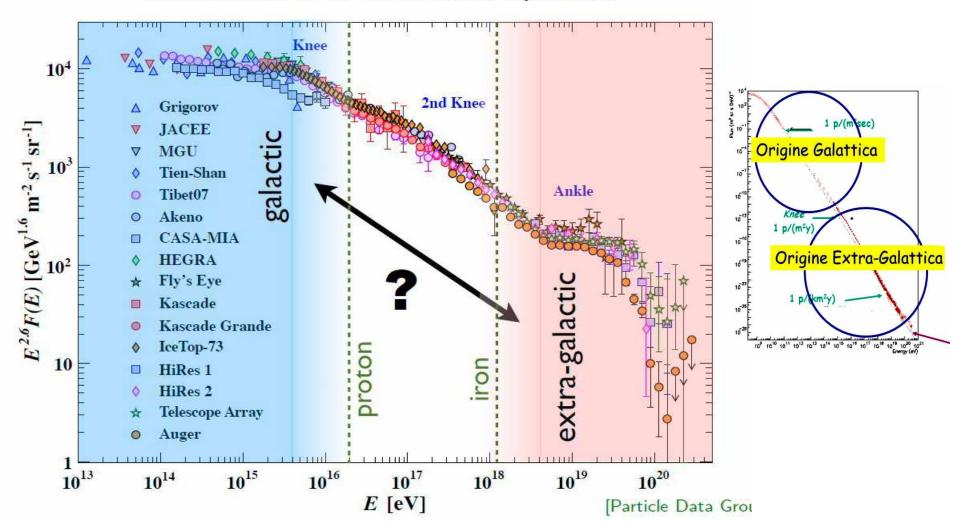
AGN e blazars: da 1 megaparsec (10<sup>6</sup> parsec) a 0.0001 parsec (1 parsec = 3.26 anni luce)





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

 $1 \, \text{PeV}$  neutrino  $\leftrightarrow 20\text{--}30 \, \text{PeV}$  cosmic ray nucleon



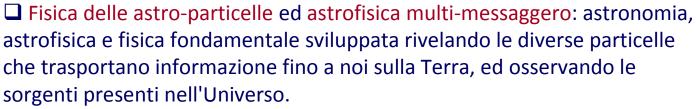


#### Torniamo all'inizio: raggi gamma, neutrini, raggi cosmici

 $\square$  Infinitamente piccolo  $\leftarrow \rightarrow$  infinitamente grande:

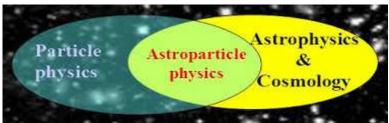
stretta connessione tra fisica delle particelle elementari e l'astrofisica e cosmologia.

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

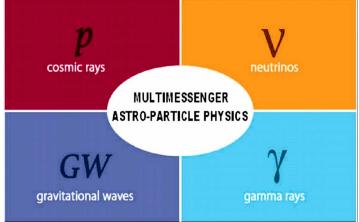


■ Tecnologia e ricerca basata su rivelatori posti nello spazio su satelliti (es. Fermi Gammaray Large Area Telescope LAT, Laser Interferometer Space Antenna), sonde interplanetarie, stazione spaziale (es. Alpha Magnetic Spectrometer), palloni d'alta quota (ex. Boomerang), e in futuro sulla Luna.

■ 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).





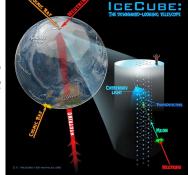


# **Conclusioni (1)**

- 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 ←→ 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 ← →,
     vicinanza in tempo alla data di rivelazione del neutrino cosmico).
- □ [Fotoni (raggi) gamma ← → neutrini cosmici] → 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.











# 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.

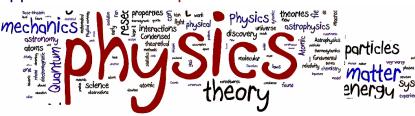
Fisica delle astroparticelle: il cosmo è un laboratorio contenente acceleratori naturali di particelle.

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.





conoscenza e progresso dell'umanità







# Conclusioni (3)

- ☐ Tutto questo perché siamo tutti curiosi, abbiamo sete di conoscenza.
- La CURIOSITA' sulla vita, sulla natura, sull'Universo, non è scontata, ma basta un punto di interesse nella vostra vita e studi: quel punto, è un punto di aggancio, una breccia che può (solo con molto impegno) tirare dentro tutto, se si segue fino in fondo. Potrete essere delle persone migliori solo se vorrete CONOSCERE e STUDIARE.

Basic Science
Curiosity-driven exploration
Applied Science

Understanding fundamentals needed to solve a problem

- ☐ INFN: ente di ricerca scientifico (anche culturale e tecnologico) tra i più prestigiosi nel mondo. Attività dell'ente riconosciuta a livello internazionale. Stretta collaborazione con le università.
- → Forte internazionalizzazione e coinvolgimento in grandi collaborazioni internazionali.
- ☐ Cultura scientifica, ricerca di base, fisica pura, ricerca guidata dalla curiosità
- → implicano crescita e progresso per economia e società. Economia della conoscenza.
- Partecipazione all'istruzione scientifica e diffusione della cultura scientifica significano una nazione meno fragile e meno esposta a regressioni culturali, sociali, economiche e territoriali



- Micro/macro-economia basate sulla "fiducia". La credibilità, la reputazione, il rispetto e stima internazionale dei singoli, di una comunità, di una nazione, anche della produzione scientifica, sono condizioni necessarie in economia per essere efficaci, attrarre investimenti e crescere.
- La ricerca di base ha spesso ricadute anche in sviluppo tecnologico. Non di rado la ricerca di base del passato e presente si trasforma in ricerca applicata e tecnologia nel futuro prossimo o lontano.
- ☐ PROBLEMI DELL'ITALIA: 1) Paese in fondo alle classifiche per investimenti pubblici e privati in ricerca e sviluppo, per numero di ricercatori sul totale della forza lavoro, per laureati in materie scient

(versi 118-120, canto XXVI dell'Inferno, Dante Alighieri)

Considerate la vostra origine:

non siete nati per vivere come bruti
(come animali),

ma per praticare la virtù
e apprendere la conoscenza.

Alighieri

ricercatori sul totale della forza lavoro, per laureati in materie scientifiche. Italia lontanissima da Corea del Sud, Cina, USA, Germania, Giappone, e anche paesi emergenti. 2) Classe politica e dirigente italiana senza lungimiranza e sovente impreparata sulle materie scientifiche. 3) Leviathano autoreferenziale della burocrazia italiana cresciuto in modo insopportabile, strangolando crescita economia, iniziativa e creatività in tutti i settori.



