

Un altro modo di guardare il cielo:

Astronomia con fotoni e raggi cosmici carichi con esperimenti a terra e nello spazio



Aldo Morselli

INFN e Università di Roma Tor Vergata

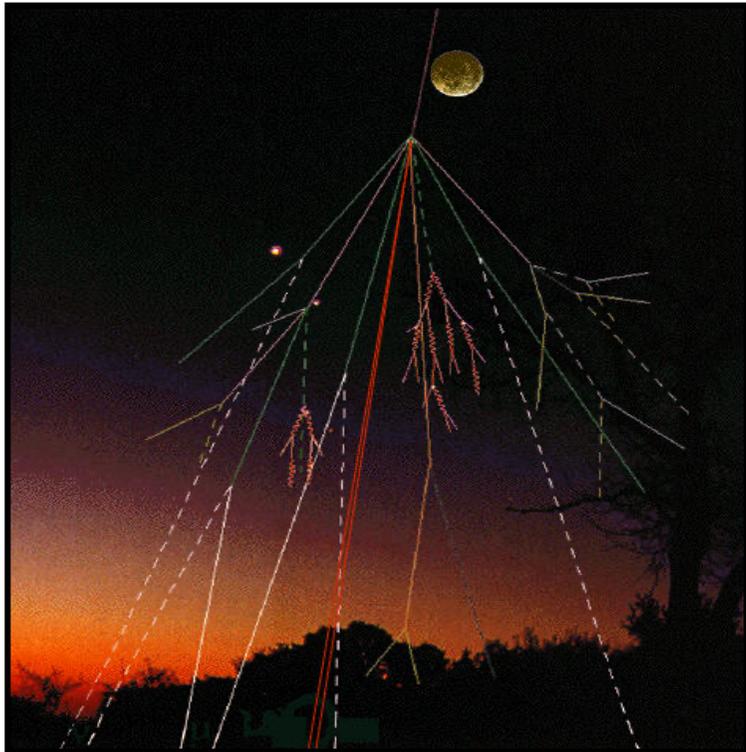
Cosa Riceviamo dal Cielo

- Radiazione Elettromagnetica
- Raggi Cosmici
- Neutrini
- Particelle Esotiche ?
- Onde Gravitazionali



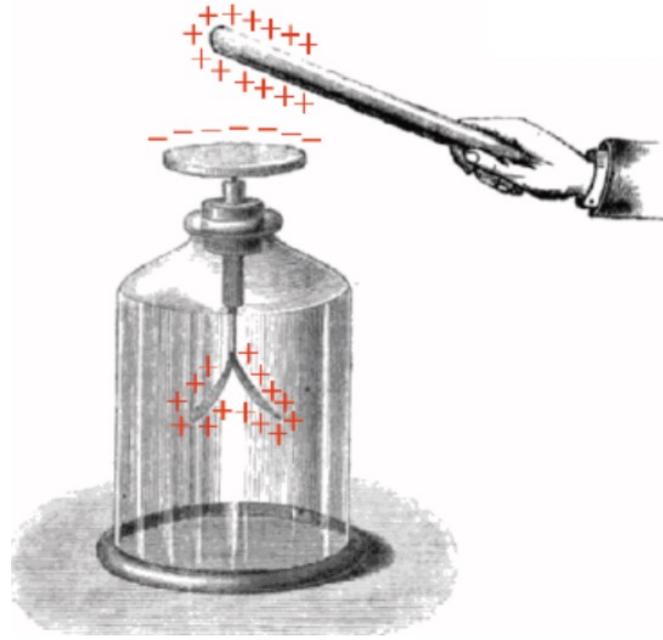
Apri la tua mano...

**Nel tempo impiegato
a leggere questa frase
circa 20 particelle
(per lo più "muoni")
la avranno attraversata!**



i "muoni" vengono create dai
"Raggi Cosmici", particelle di vario tipo
che dallo spazio esterno entrano nella
nostra atmosfera ed interagiscono con
l'atmosfera stessa

Prima osservazione: un elettroscopio si carica spontaneamente



Se non fosse per un isolamento imperfetto, sembrerebbe a prima vista che un elettroscopio debba mantenere per sempre la sua carica.

Nel 1785 **Coulomb** osservò un fatto apparentemente insignificante: **un corpo carico** (un elettroscopio) **perde spontaneamente la carica nonostante venisse ben isolato.**

→ primo esempio di conduzione elettrica nell'aria

Perchè ?

Si pensò che l'isolamento non fosse ottimale e le particelle di polvere trasportassero via la carica elettrica

Ma nel 1835 **Faraday** confermò il fenomeno con una strumentazione meglio isolata.

Nel 1879 **Crookes** osservò che la velocità di scarica diminuiva quando la pressione veniva ridotta. Si concluse quindi che la causa diretta della scarica dell'elettroscopio dovesse essere la ionizzazione dell'aria contenuta nell'elettroscopio stesso.

Ma quale era la causa prima ?

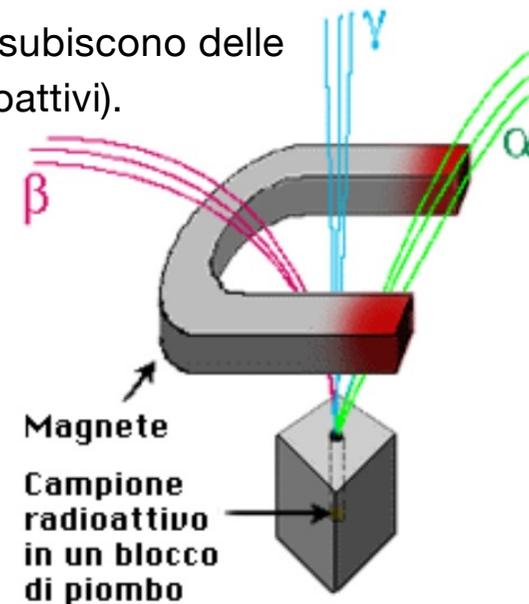


100 anni dopo: la radioattività

- Nel 1896 **Becquerel** scoprì la radioattività naturale.
- Nel 1898 **Marie e Pierre Curie** scoprirono che il Polonio ed il Radio subiscono delle trasmutazioni spontanee generando radioattività (decadimenti radioattivi).

La maggior parte dei nuclei non sono eterni ma hanno vita finita e si trasformano in altri nuclei emettendo particelle (α , β , γ).

Il decadimento radioattivo di un nucleo è un fenomeno puramente statistico, ossia non è possibile prevedere quali nuclei decadranno ma solo il ritmo (“rate”) di decadimento.



- In presenza di materiale radioattivo un elettroscopio carico si scarica più velocemente
- Alcuni elementi sono capaci di emettere particelle cariche che a loro volta possono causare la scarica degli elettroscopi.
- **Si può dunque concludere che la scarica spontanea degli elettroscopi possa essere dovuta a particelle cariche emesse nei decadimenti radioattivi.**
- La **velocità di scarica** di un elettroscopio può quindi essere usata per valutare il **livello di radioattività**

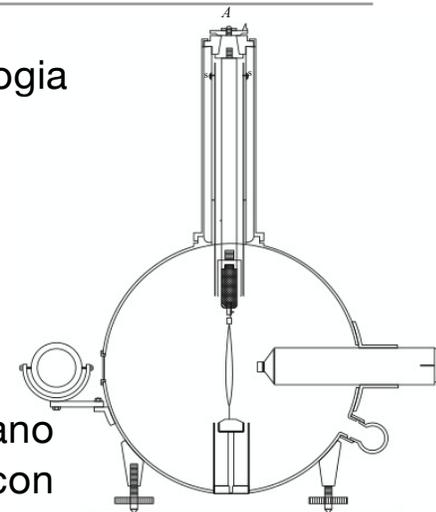
L'elettroscopio di Padre Wulf

Lo studio della velocità di scarica degli elettroscopi richiedeva una tecnologia sperimentale abbastanza sofisticata.

La ricerca dell'origine della radioattività naturale richiedeva che gli strumenti fossero trasportabili con facilità.



Padre Wulf costruì un elettroscopio dove le due foglie erano sostituite da due fili o lamelle di vetro metallizzato con silicio, con una molla di tensione di vetro posta nel mezzo.



Per mettere a punto lo strumento fece una serie di misure ottenendo risultati consistenti con l'ipotesi che la radiazione penetrante fosse causata da sostanze radioattive presenti negli strati superiori della crosta della Terra.

Wulf ebbe l'idea di **misurare la variazione di radioattività con l'altezza per capire la sua origine.**

L'idea era semplice: **se la radioattività veniva dalla Terra, essa sarebbe diminuita con l'altezza.**

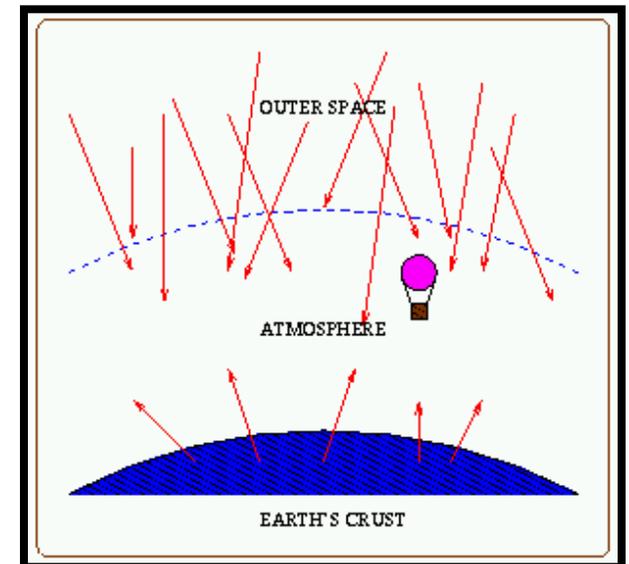


1912: Scoperta dei 'Raggi Cosmici'



- Victor Hess volò su pallone ad un altitudine di 5000 metri
- Misurò le radiazioni con un elettroscopio...
- ... e trovò che questa aumentava con l'ascesa del pallone

• **Ciò fu una grande sorpresa perchè si pensava che questa radiazione fosse generata da materiale radiattivo nella crosta terrestre**



- 1926 Millikan introdusse il nome di 'cosmic rays' (raggi cosmici)

Raggi Cosmici

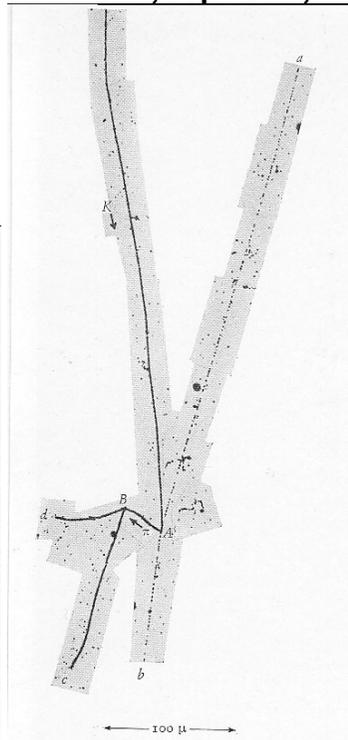
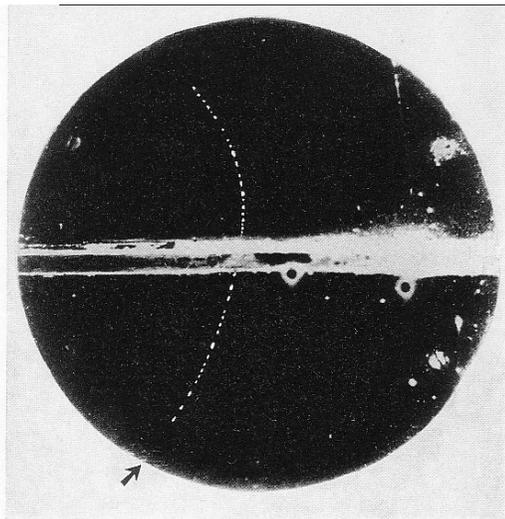
- Particelle cariche : protoni, antiprotoni, elettroni, positroni, nuclei , antinuclei (?), Altro (?)
- Risentono dei campi elettrici e magnetici
- Portano da distanze differenti un campione di materiale galattico ed extragalattico ed accelerato ad energie molto elevate.

C.R.: come vengono studiati e cosa ci dicono?

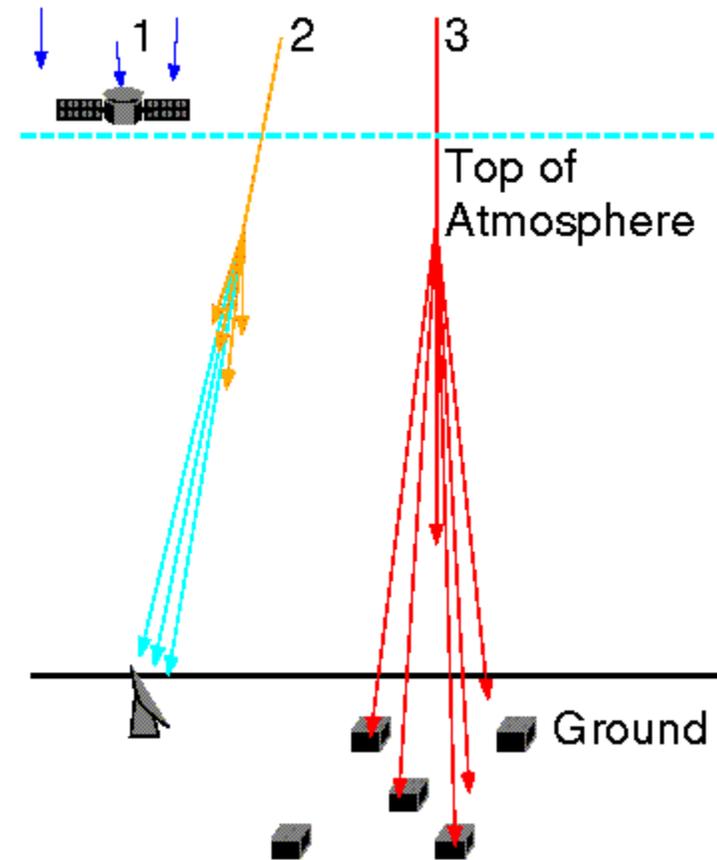
Anni 1930-1950:

Strumenti: camere a nebbia, emulsioni, contatori Geiger, etc.

I raggi cosmici permettono di scoprire l'antimateria (positroni), i muoni, i pioni, le particelle "strane"...



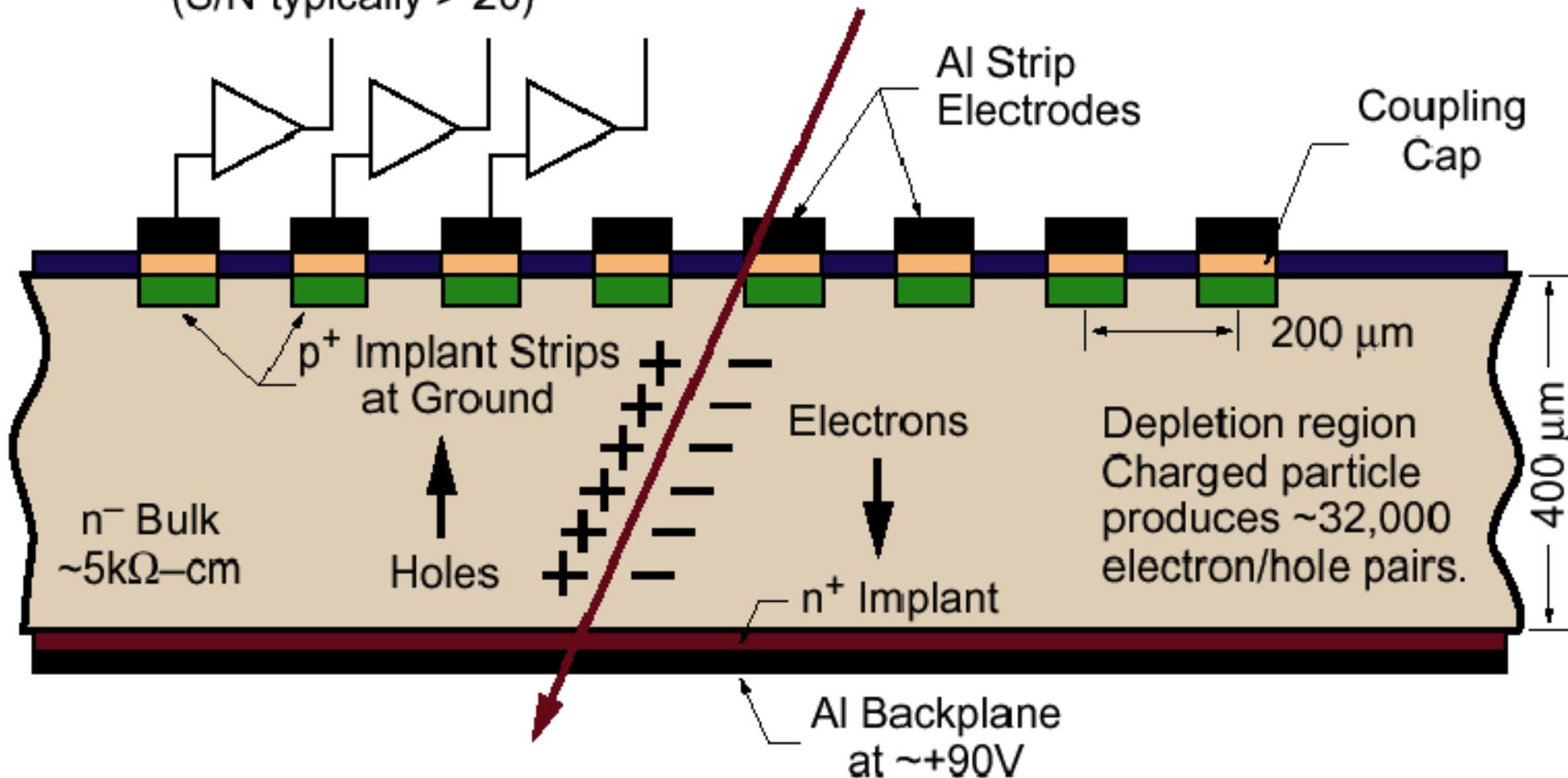
Attualmente: principalmente sonde per lo studio dell'astrofisica



Silicon Strip Detector Principle

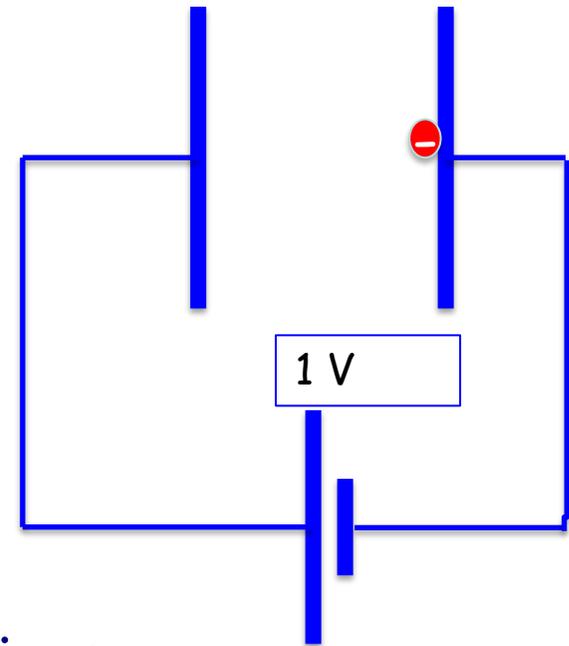
VLSI

Low-noise, Low-power
Amplifier/Discriminator
(S/N typically > 20)



Una utile unità di misura: elettronvolt (eV)

- L'energia delle particelle si misura in eV
 - Energia acquisita da un elettrone muovendosi in una differenza di potenziale di 1 Volt

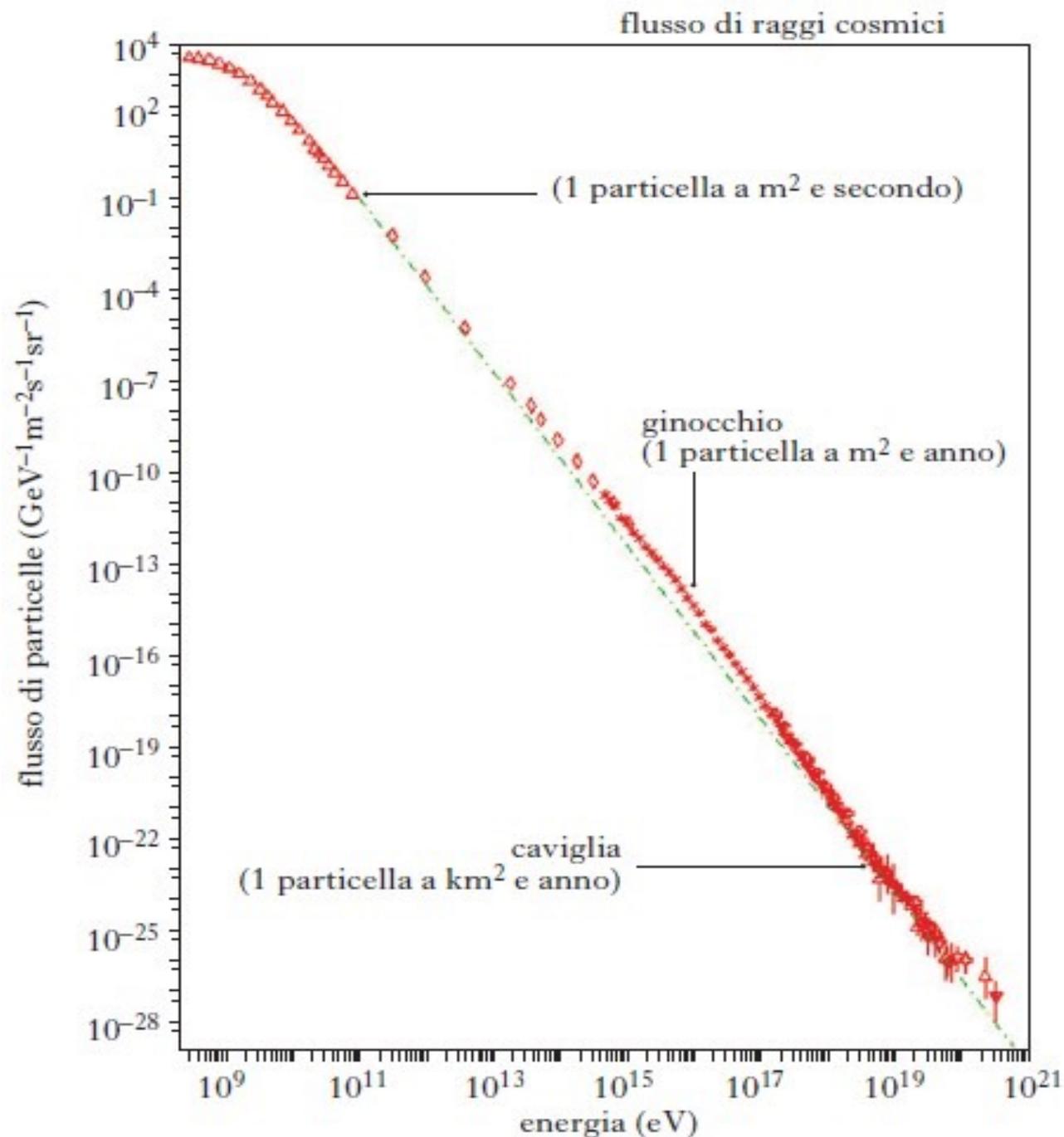


- La luce visibile ha un energia di 1,6 / 3,4 eV
- 1 MeV (1.602×10^{-13} J): 2 volte l'energia a riposo dell'elettrone
- 200 MeV: Energia media della fissione di un nucleo di U-235
- 125.1 ± 0.2 GeV: La massa del bosone di Higgs
- 1 TeV: Mille miliardi di eV, l'energia cinetica di una zanzara in volo

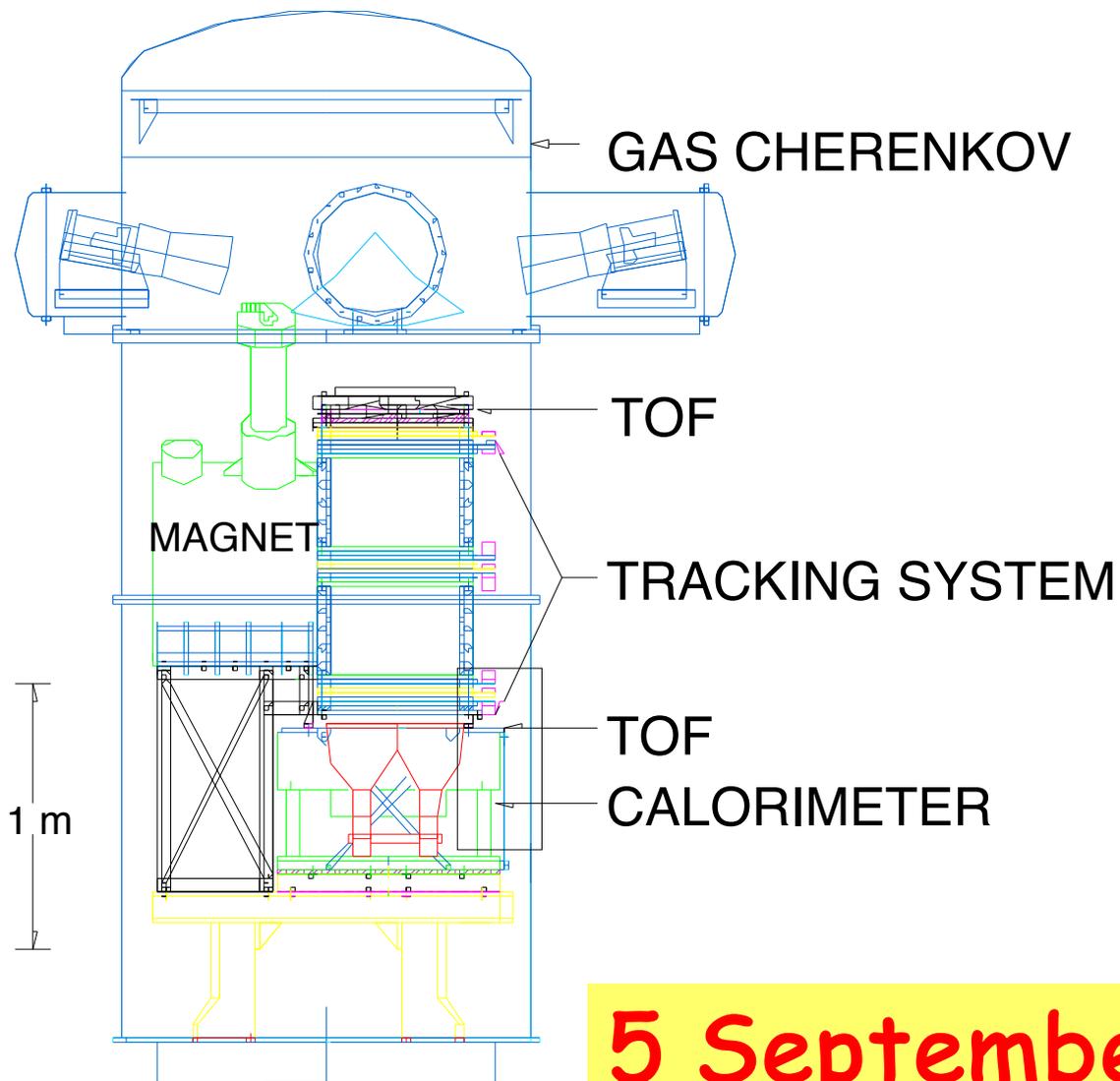
Nota: KeV = 10^3 eV MeV = 10^6 eV GeV = 10^9 eV TeV = 10^{12} eV

Lo spettro dei RAGGI COSMICI

I Raggi Cosmici
vengono dallo spazio
quindi potrei
misurarli nello
spazio.

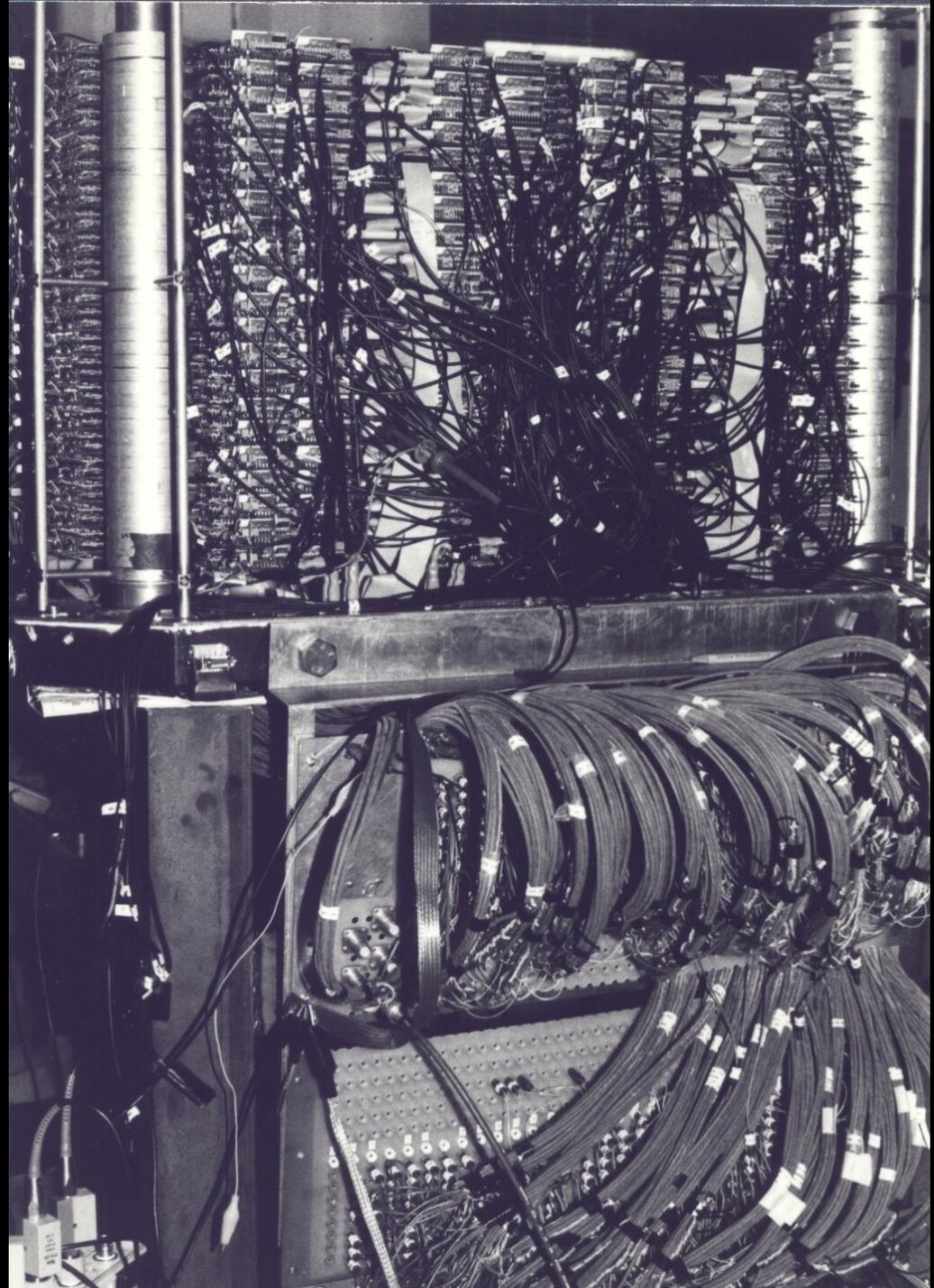


MASS Matter Antimatter Space Spectrometer



5 September 1989

il Calorimetro di MASS89



il Calorimetro di MASS89



da Las Cruces a Prince Albert



il laboratorio era un hangar !!





pausa di relax (in attesa del vento favorevole)



il giorno del lancio





MASS 89 :il recupero



MASS 89



MASS 89

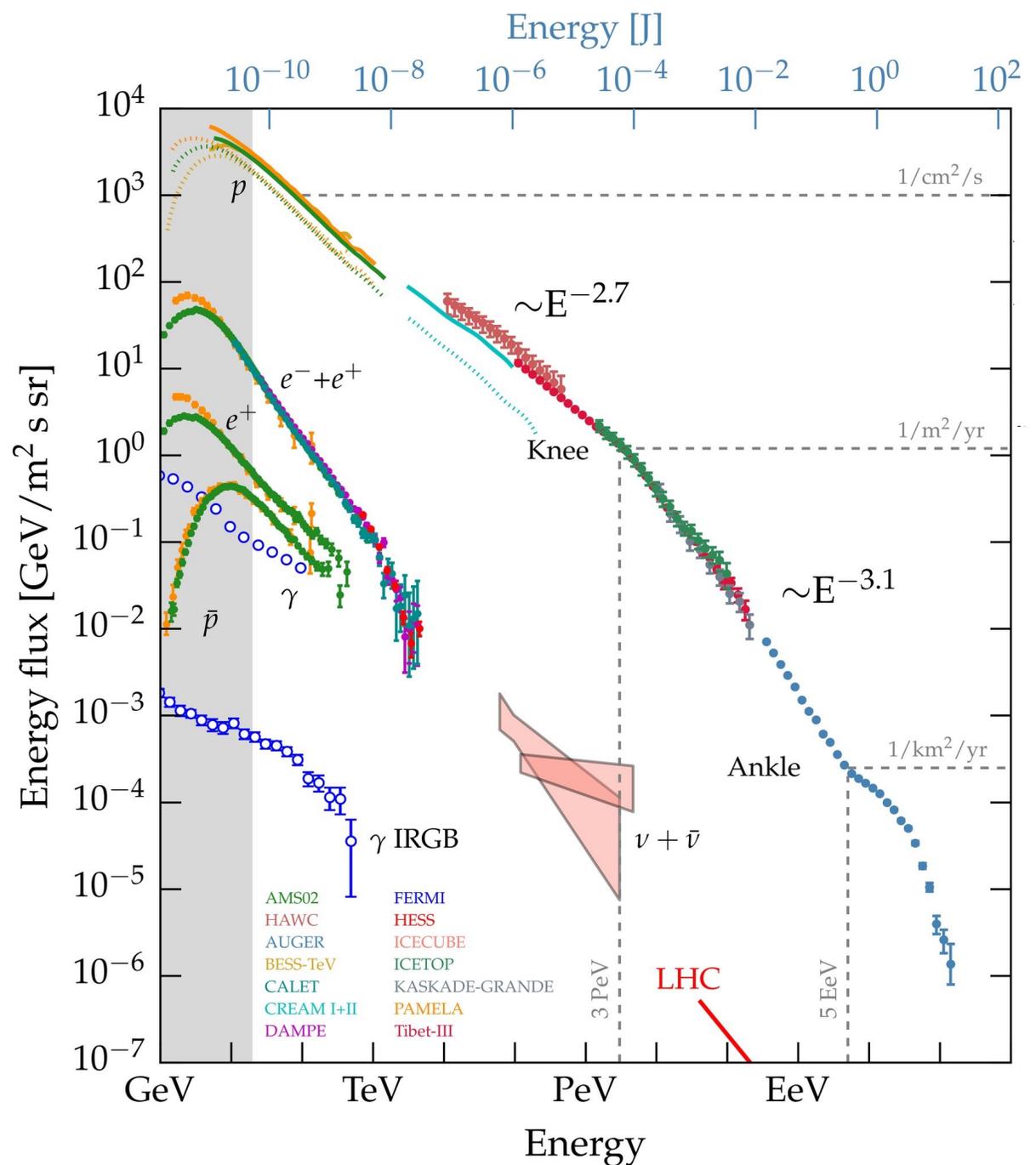
PAMELA

Payload for **A**ntimatter
Matter **E**xploration and
Light Nuclei **A**strophysics

In orbita dal Giugno 2006, a
bordo del satellite DK1
lanciato da un razzo Soyuz
dalla base di lancio di
Bajkonour



Lo spettro dei RAGGI COSMICI



Onde Radio, raggi di sole, fotoni Gamma

Lo spettro elettromagnetico

Le 2 relazioni fondamentali:

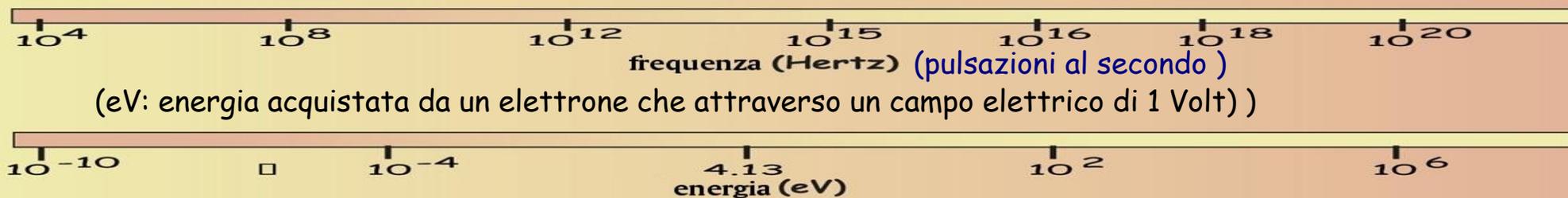
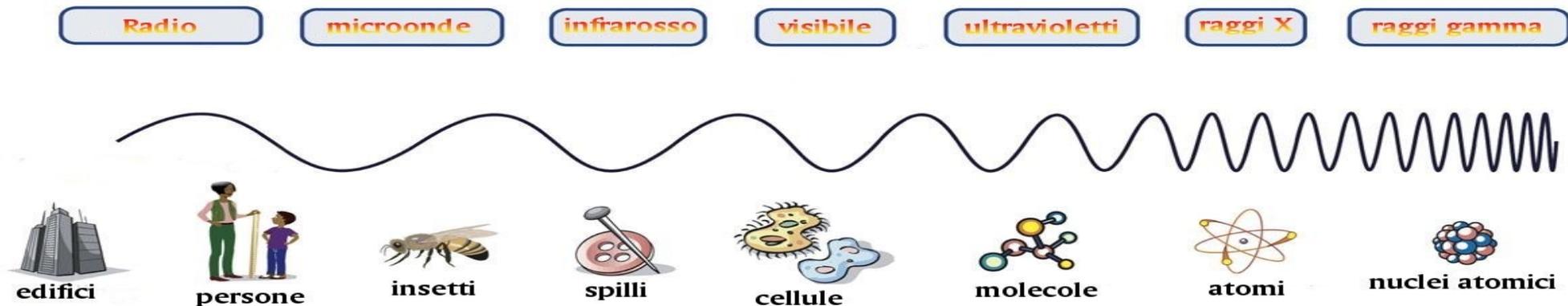
$$E = h \nu$$

E = energia
 ν = frequenza

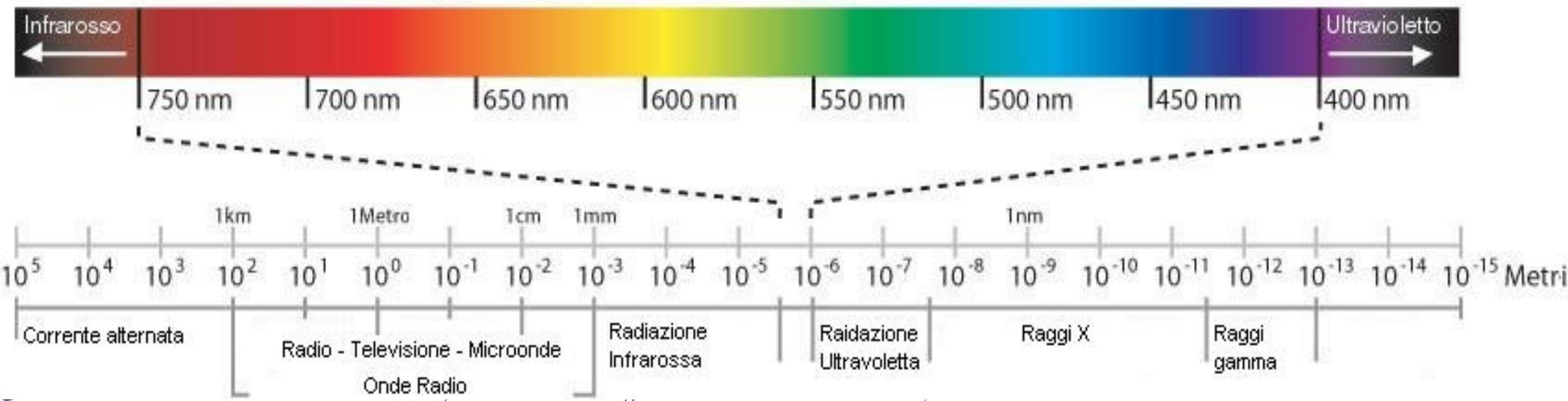
$$c = \lambda \nu$$

c = velocità della luce
 λ = lunghezza d'onda

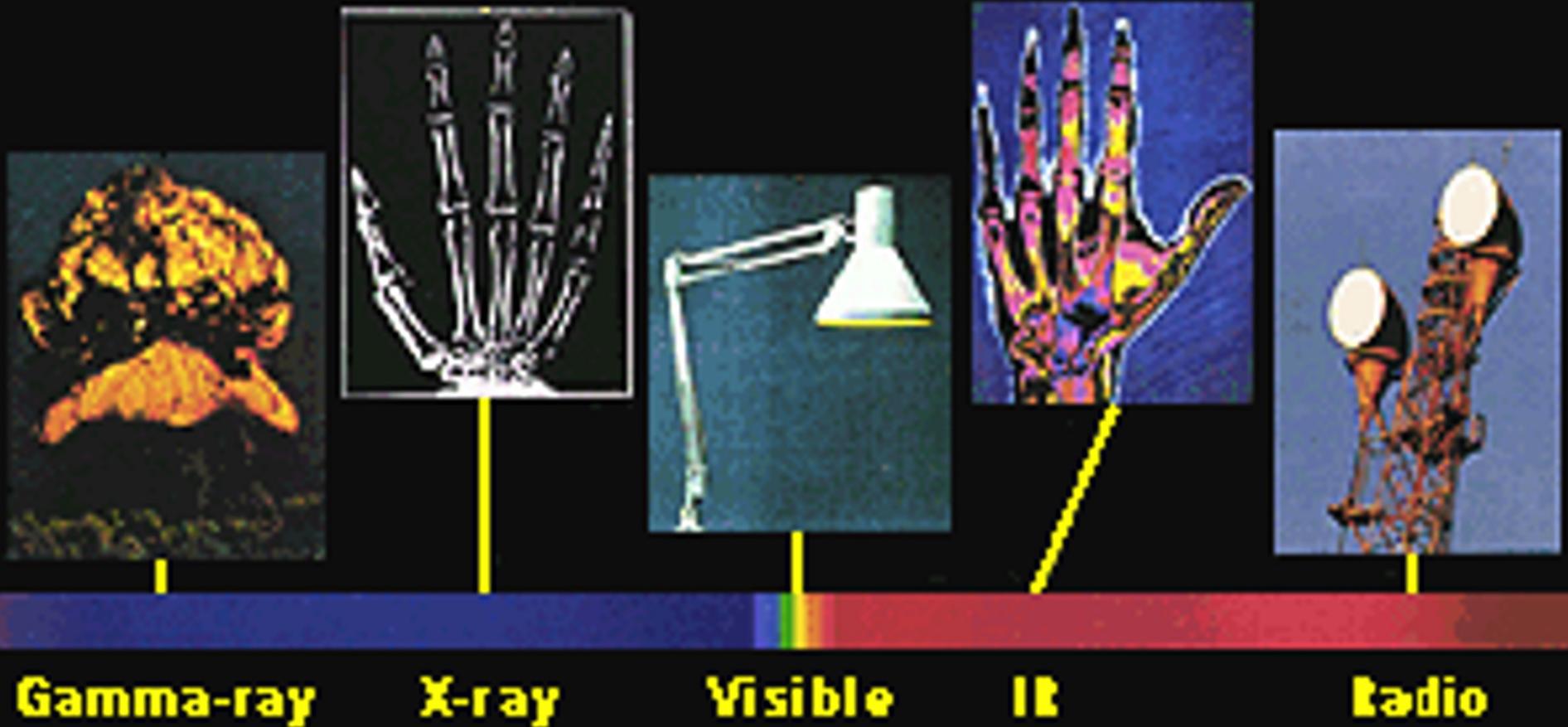
Radiazione elettromagnetica



Spettro di luce visibile all'occhio umano



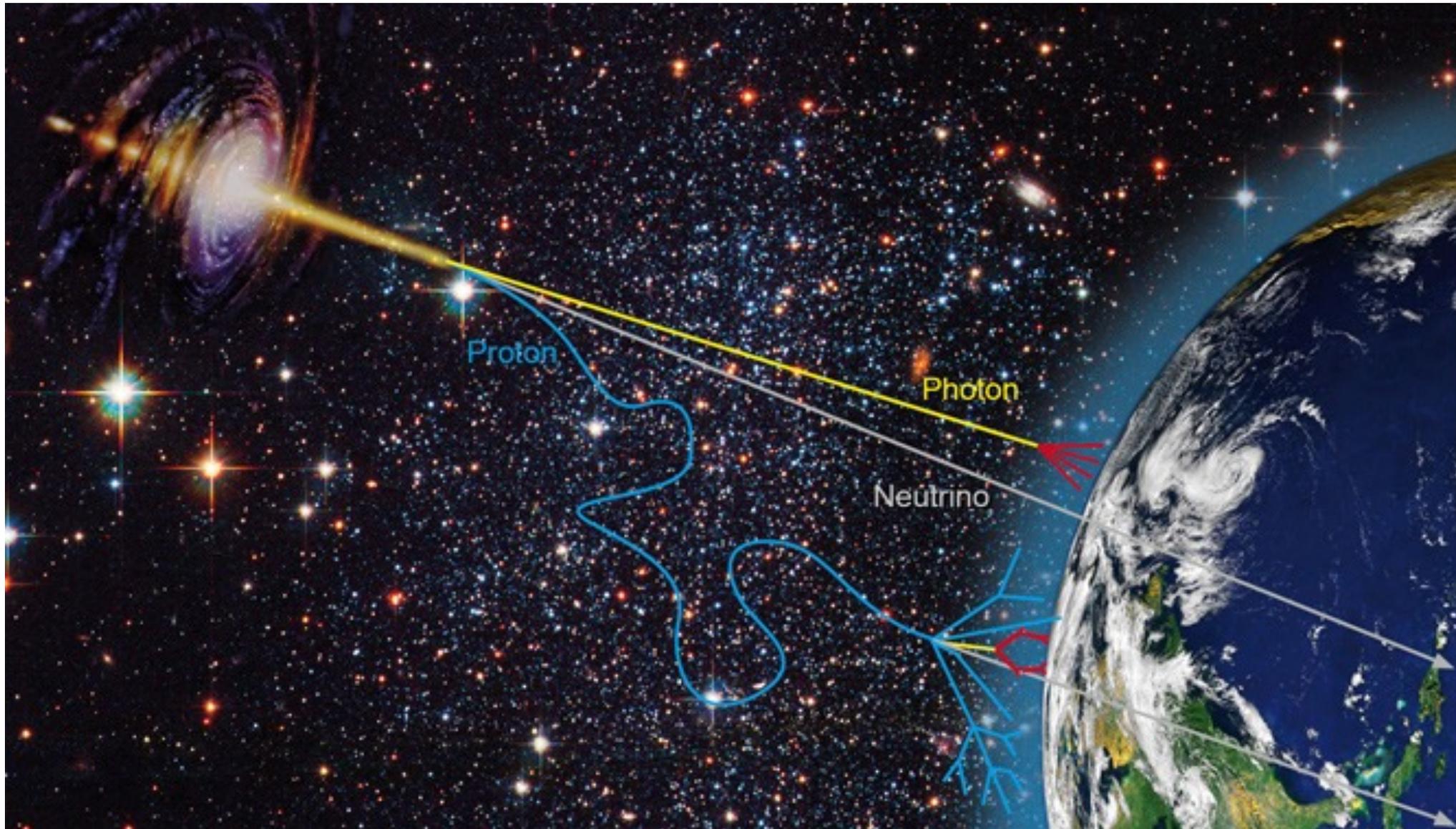
Onde Radio, raggi di sole, fotoni Gamma Lo spettro elettromagnetico



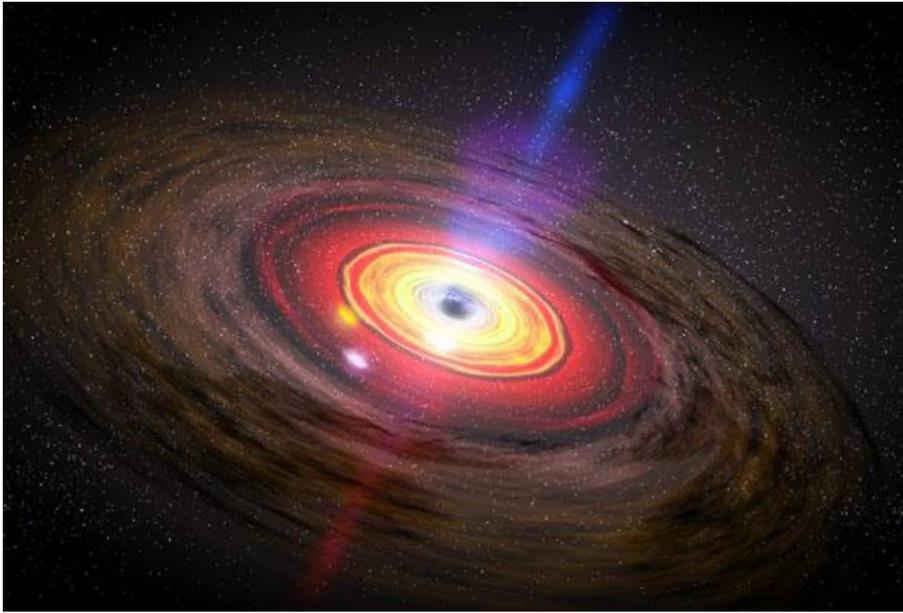
ma esistono raggi gamma che
vengono dallo spazio ?

e come vengono prodotti ?

I raggi gamma arrivano direttamente dalla sorgente, non sono deviati dai campi magnetici in quanto neutri



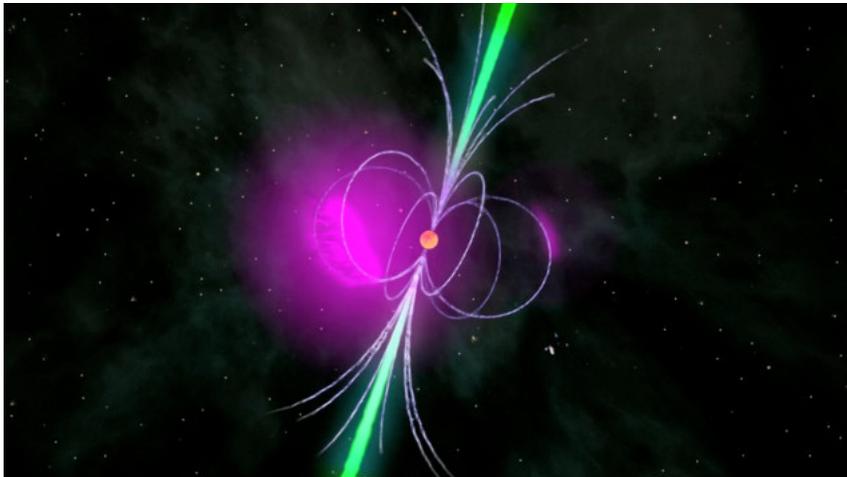
Chi emette raggi gamma?



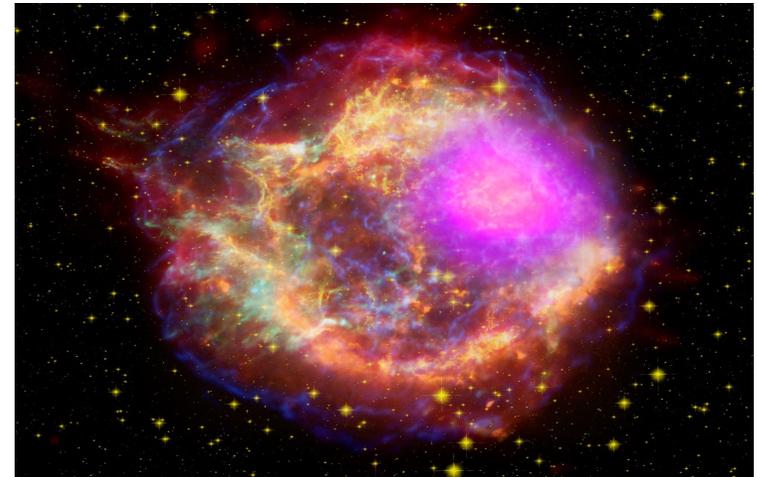
Nuclei Galattici Attivi (AGN)



Gamma Ray Burst (GRB)



Pulsar



Resti di supernova

Esplosione di supernova



Esplosione di SuperNova

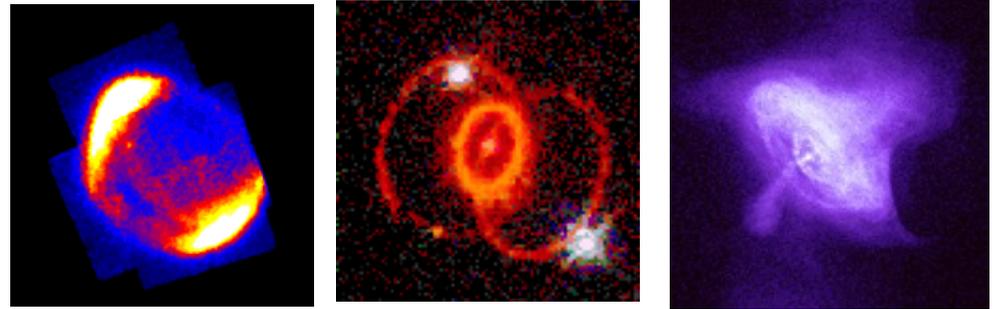
Una SuperNova indica la fine esplosiva della vita di una stella massiva (>10 masse solari); nella nostra galassia circa una SN ogni 50 anni



NEBULOSA DEL GRANCHIO

Astronomi cinesi ne registrarono l'esplosione nel 1054.

Particelle (protoni e nuclei fabbricati durante la vita della stella) vengono espulsi e poi accelerati nell'"onda d'urto" che si forma



Mentre i fotoni prodotti vanno dritti ed in circa 5000-50000 anni escono dalla galassia, le particelle cariche espulse rimangono intrappolate dai campi magnetici anche per 10 milioni di anni

Questo meccanismo puo' spiegare gran parte dello spettro di energia dei raggi cosmici (fino a circa 10^{16} eV)

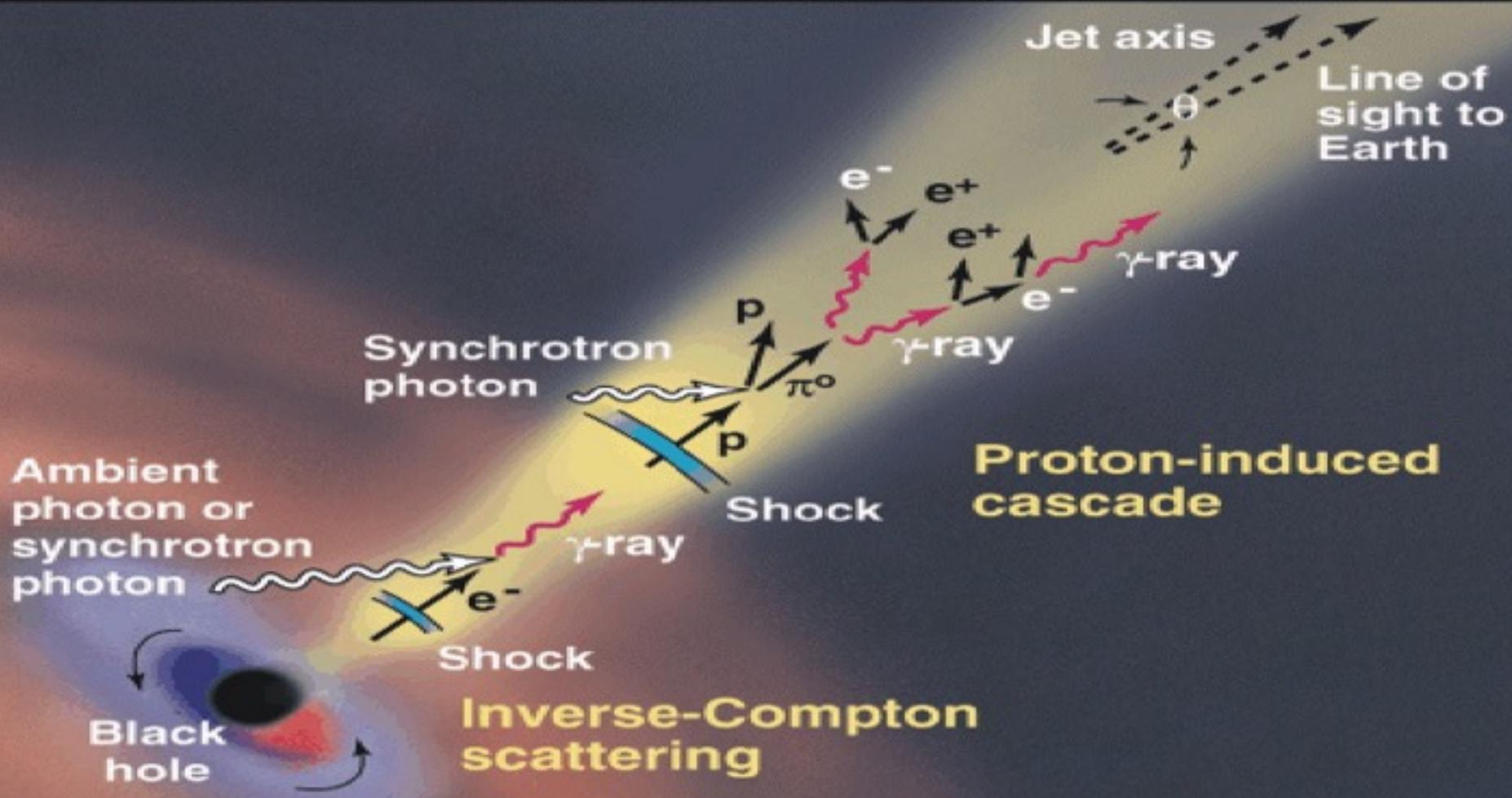


La CRAB Pulsar



un buco nero rotante in un disco di accrescimento





Modelli per l'emissione di alta energia da buchi neri al centro di galassie attive



Lampi di raggi Gamma



Fisica delle particelle => Astrofisica delle particelle

acceleratori terrestri

acceleratori cosmici

Diameter of collider



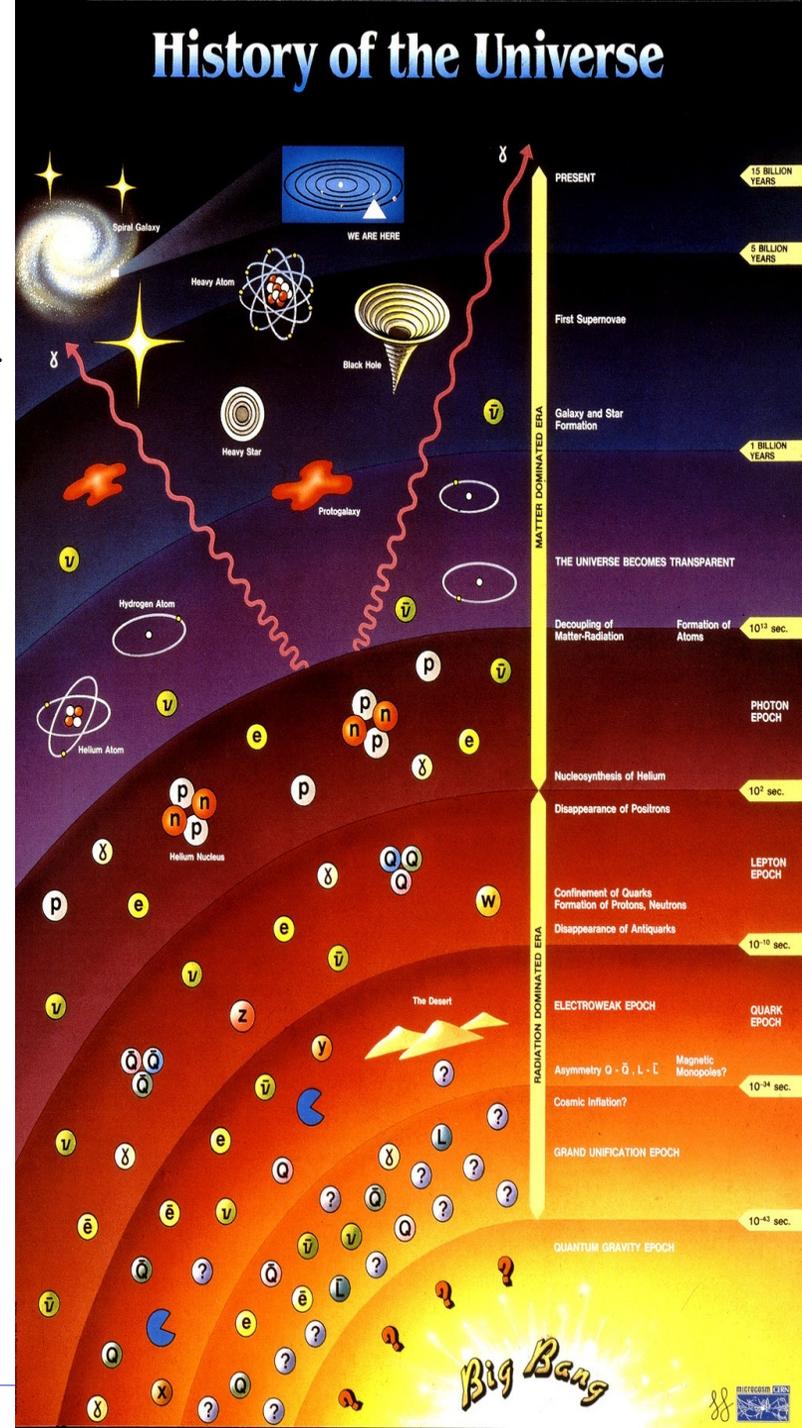
Energy of accelerated particles

La teoria del **big bang** descrive l'evoluzione dell'Universo da uno stato caldo e denso (10^{50} volte la densità attuale), **13,7 miliardi di anni fa**, ai giorni nostri.

La rivelazione di una **radiazione elettromagnetica** - relitto del big bang - ne dà un'importante conferma sperimentale.

Ma il 95 % della massa dell'universo resta di natura sconosciuta. Si tratta di una misteriosa **materia ed energia oscura**.

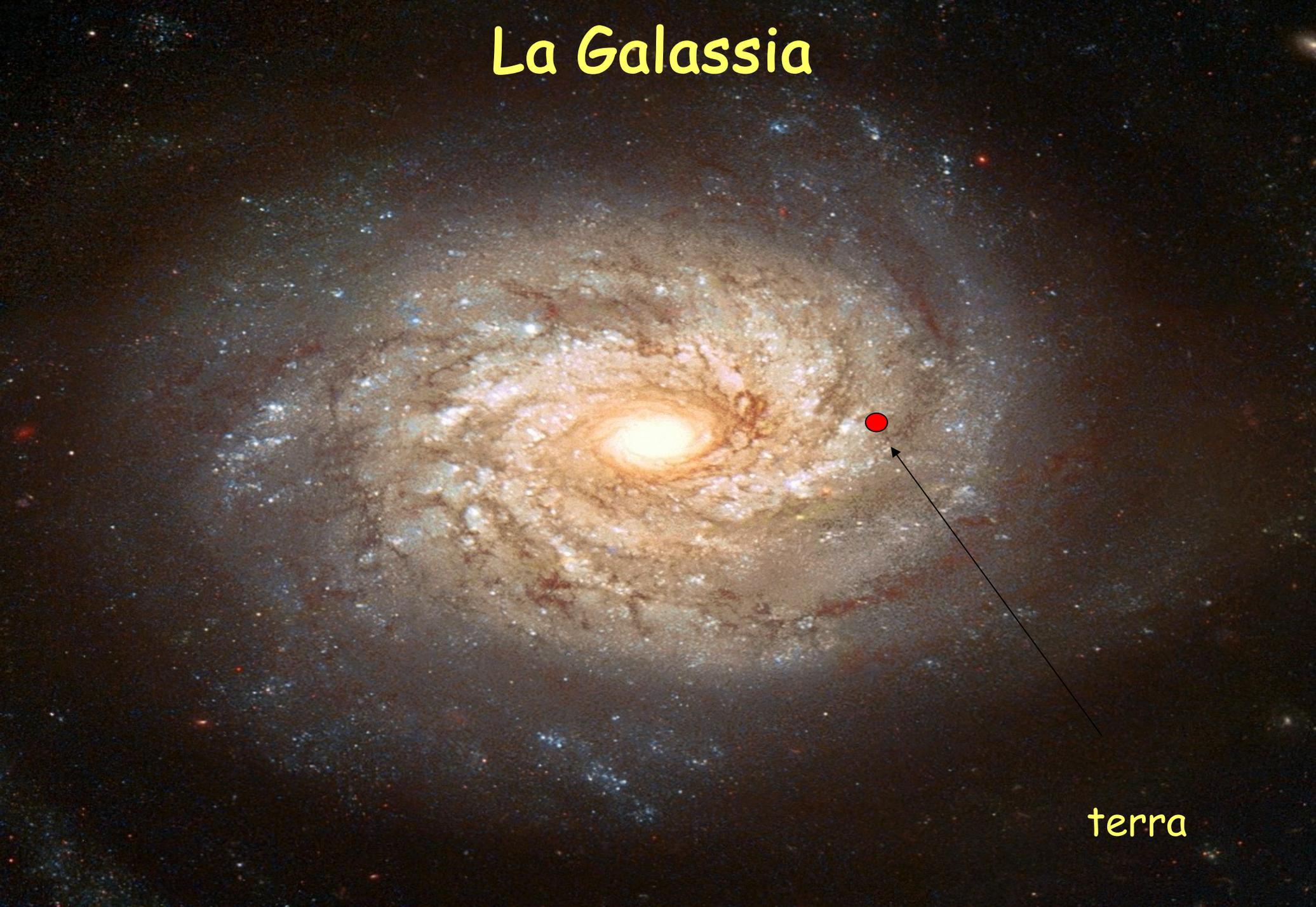
L'esistenza della materia oscura è dedotta da misure della velocità di rotazione delle galassie. Tali misure portano a ipotizzare la presenza di un alone sferico di materia invisibile (non luminosa) nel quale sarebbe immersa ogni galassia.



La materia predominante nell'Universo e' la stessa materia di cui siamo fatti noi ?



La Galassia

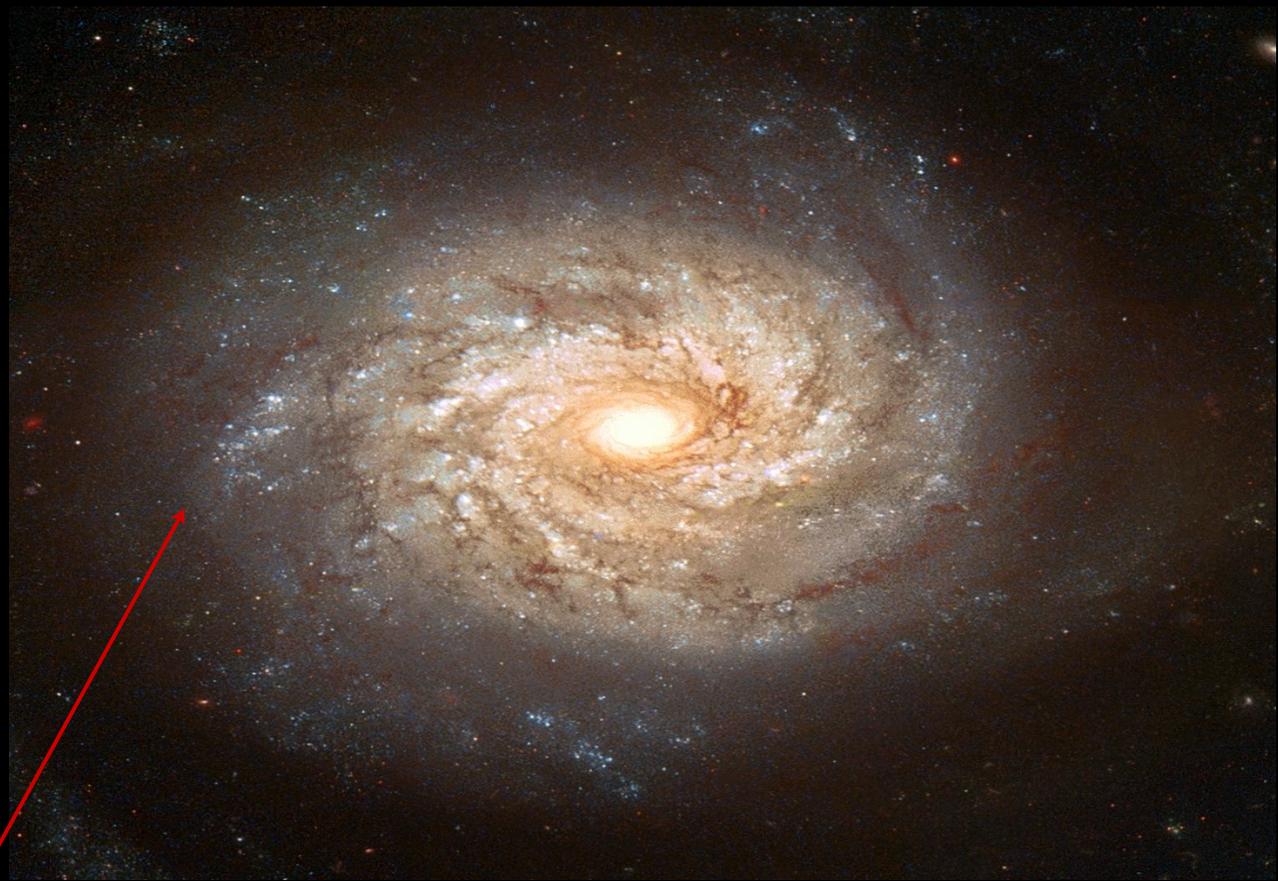


terra

Di cosa è fatto l'Universo?

Ora sappiamo che esiste della materia oscura, necessaria per spiegare la dinamica delle stelle nelle Galassie e delle galassie negli ammassi di Galassie.

Questa materia oscura non è composta della stessa materia di cui siamo fatti noi, ma non sappiamo ancora cos'è



- Le stelle periferiche delle galassie ruotano più velocemente della velocità di fuga e l'unica spiegazione è che ci sia più materia di quella che vediamo nella galassia. Questa è un'evidenza indiretta della presenza di materia oscura.

$z=11.9$

800 x 600 physical kpc



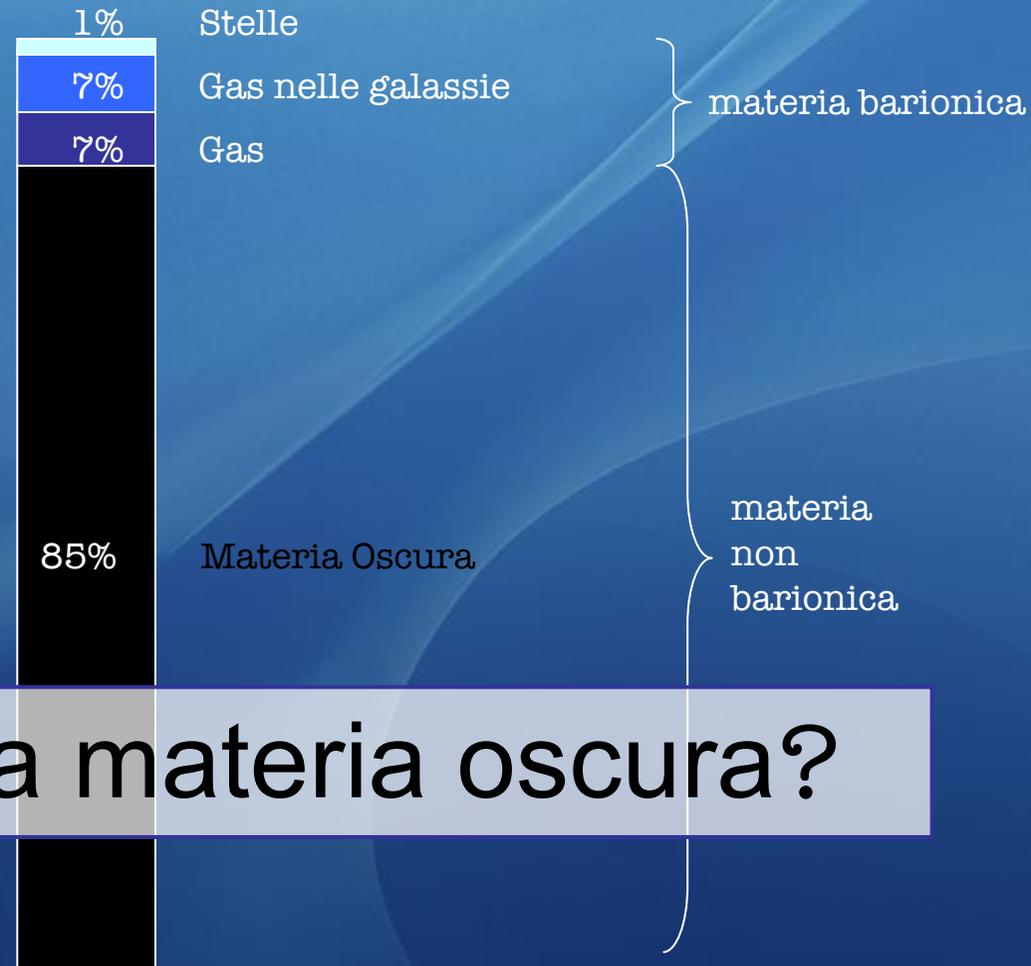
Diemand, Kuhlen, Madau 2006

Simulazione in funzione del tempo

Distribuzione della materia oscura secondo le simulazioni



Inventario della materia nell' Universo



Allora, cos'è la materia oscura?



Solo il 15% della materia dell'Universo è composta della stessa materia di cui siamo fatti noi . Una nuova rivoluzione Copernicana !



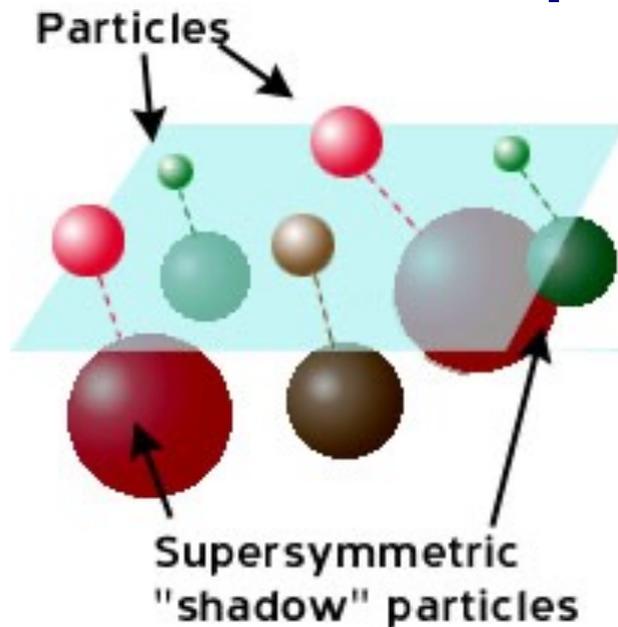
ma come si fa a scoprire di cosa è fatta la materia oscura ?

viale
dell'Astronomia

via
della Fisica

Supersimmetria

Particella \longleftrightarrow Partner
supersimmetrico



è possibile che la materia oscura sia formata dalla particella supersimmetrica più leggera, unico rimasta dopo il Big bang

E' anche possibile che il nostro universo a quattro dimensioni (spazio-tempo) non sia che la parte visibile di un mondo costituito in realtà da dimensioni supplementari.

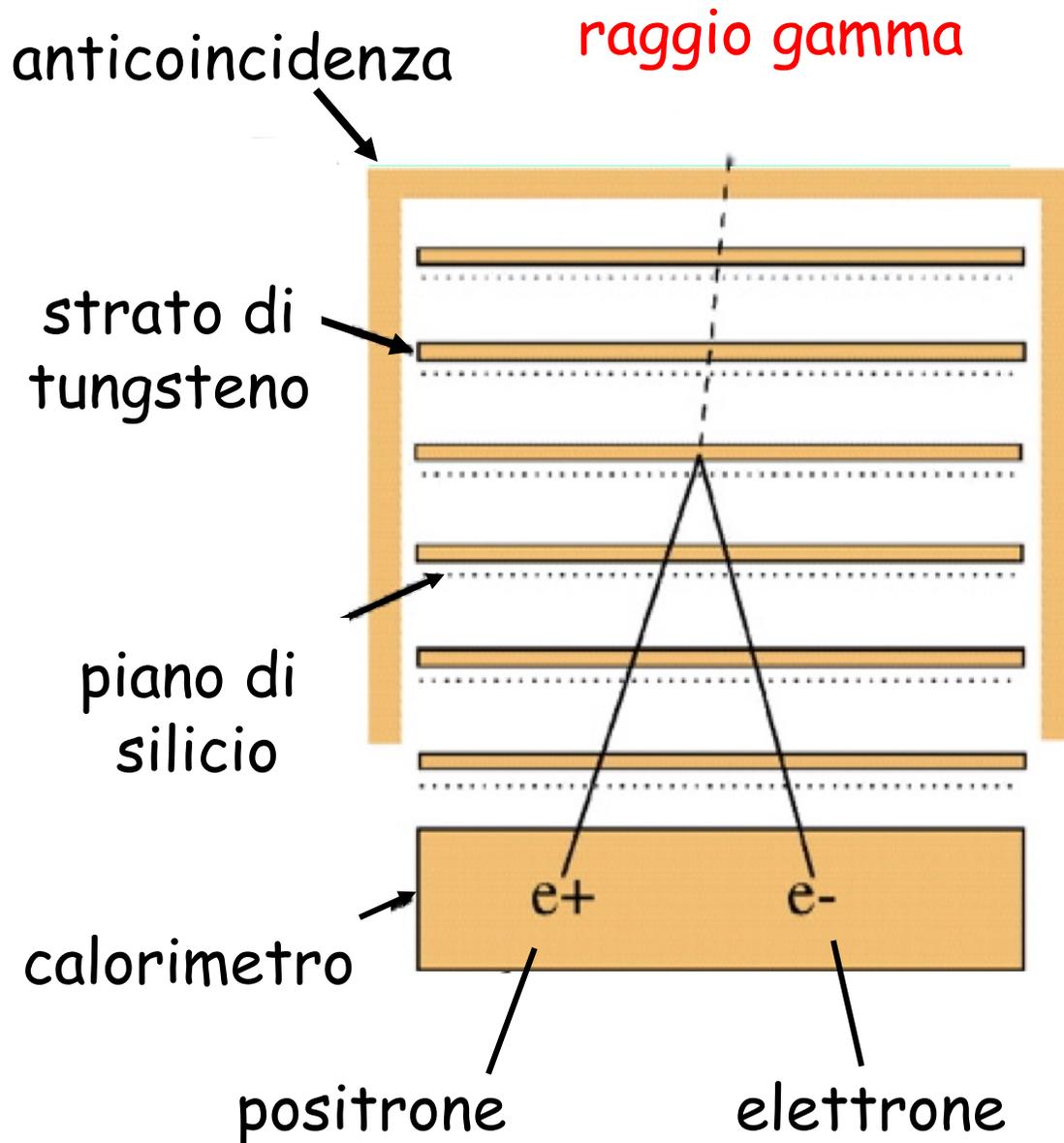
Se la teoria della supersimmetria fosse vera, la particella supesimmetrica più leggera potrebbe essere la principale componente della materia oscura.

Un modo per scoprirlo è quello di osservare il cielo nei raggi gamma per vedere se ci sono annichilazioni di particelle supersimmetriche che, secondo la legge $E=mc^2$, darebbero raggi gamma, antiprotoni e positroni

Onde Radio, raggi di sole, fotoni Gamma Come si rivelano?

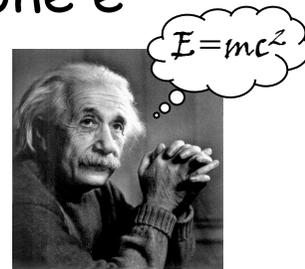


Rivelare i raggi gamma

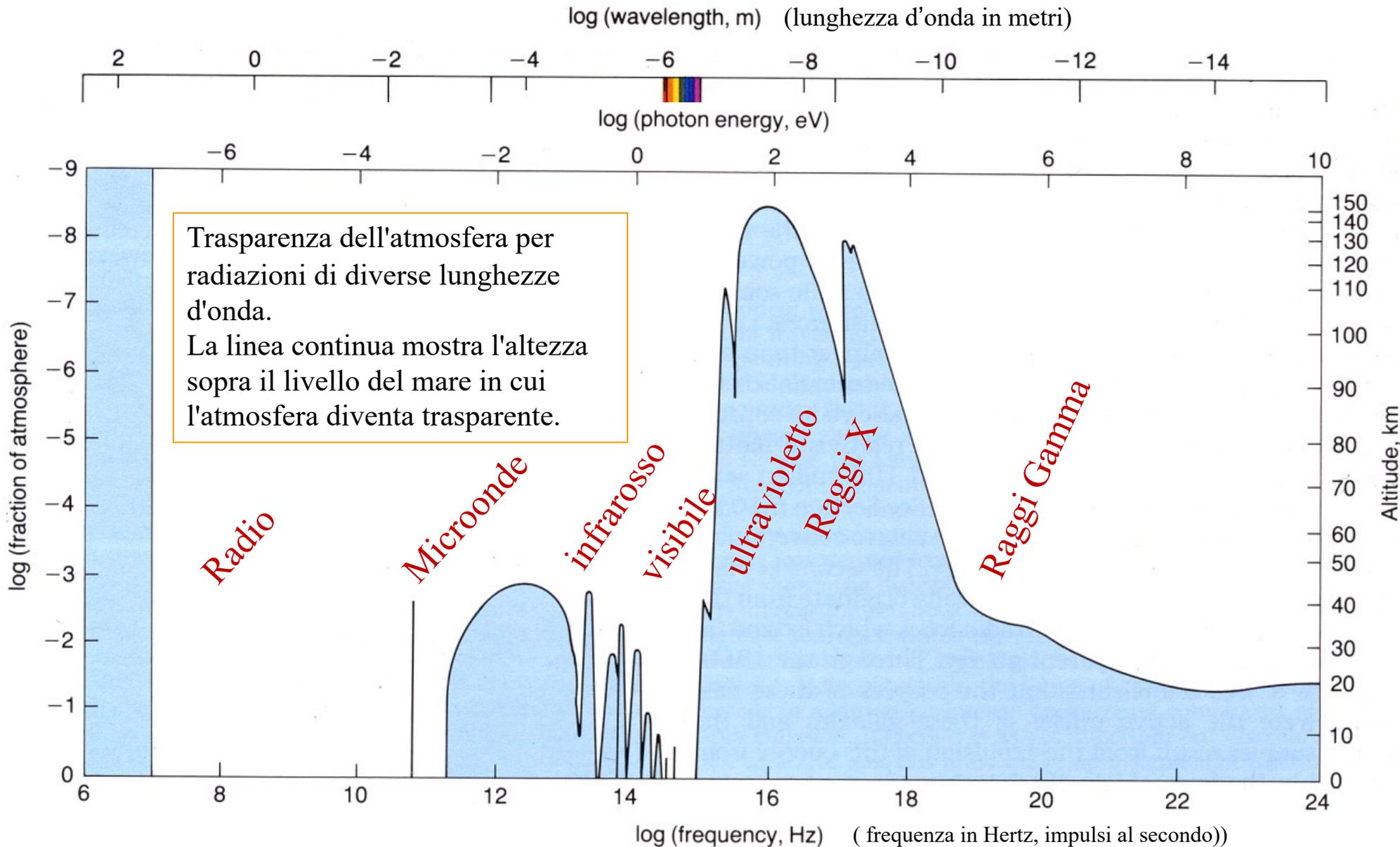


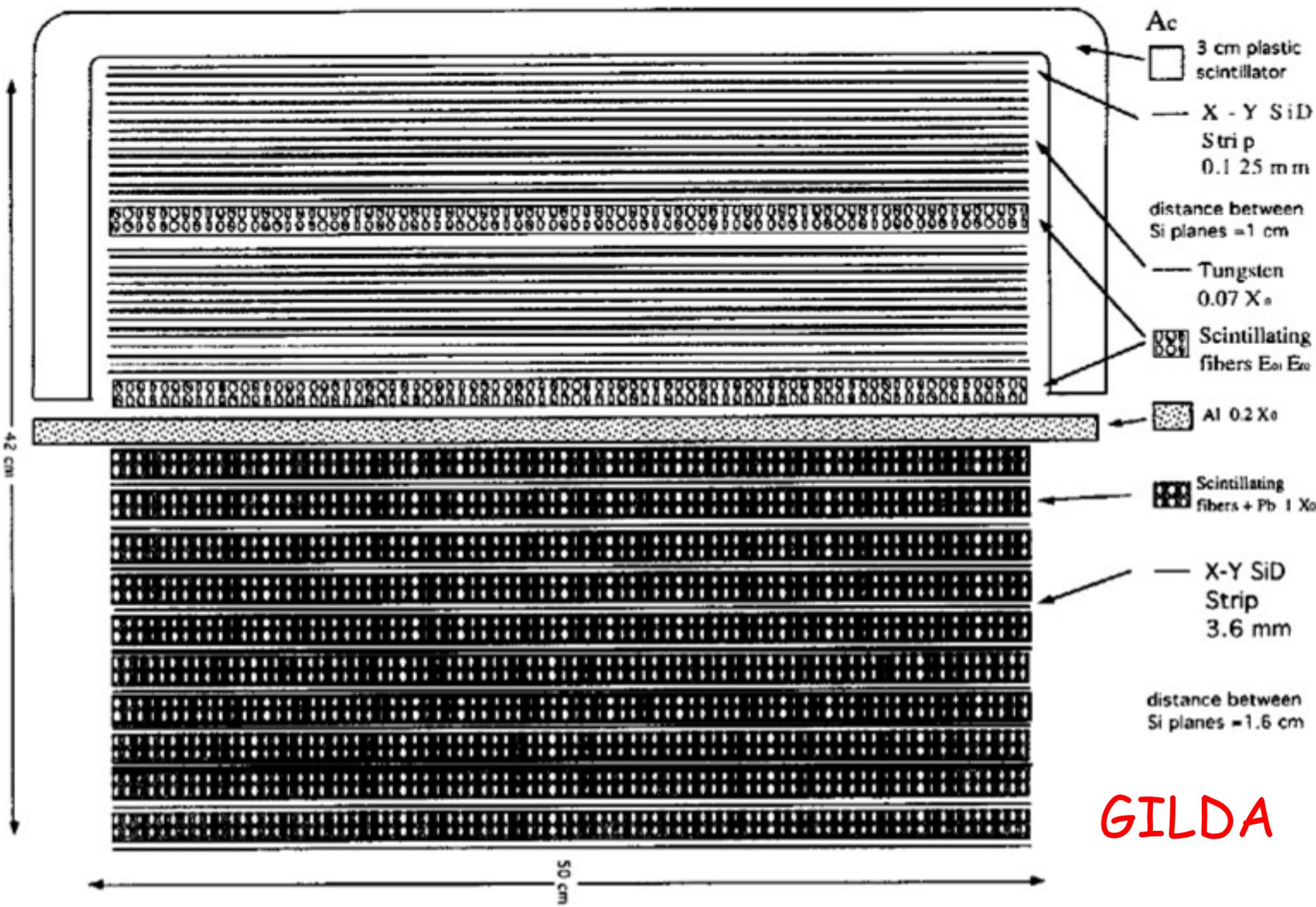
La produzione di coppia elettrone - positrone avviene attraverso la trasformazione dell'energia elettromagnetica associata al fotone (il raggio gamma) quando interagisce con il campo elettromagnetico del nucleo pesante (tungsteno, piombo). Questo è possibile grazie a:

- l'equivalenza energia-massa $E=mc^2$
- il meccanismo quantistico di interazione tra il fotone e il campo elettromagnetico



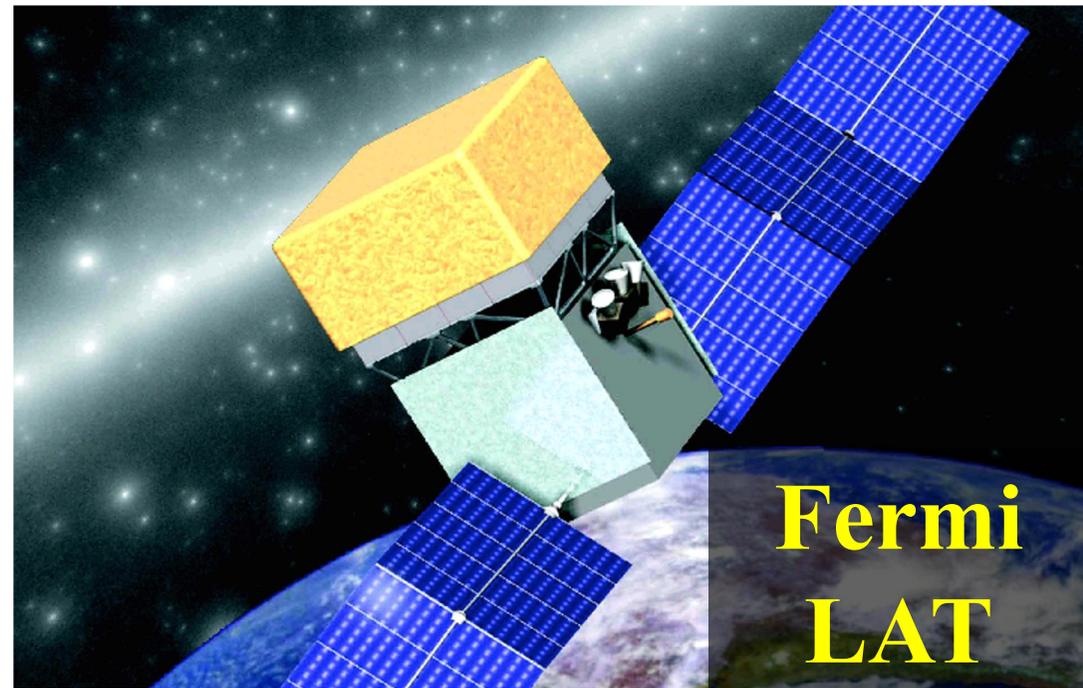
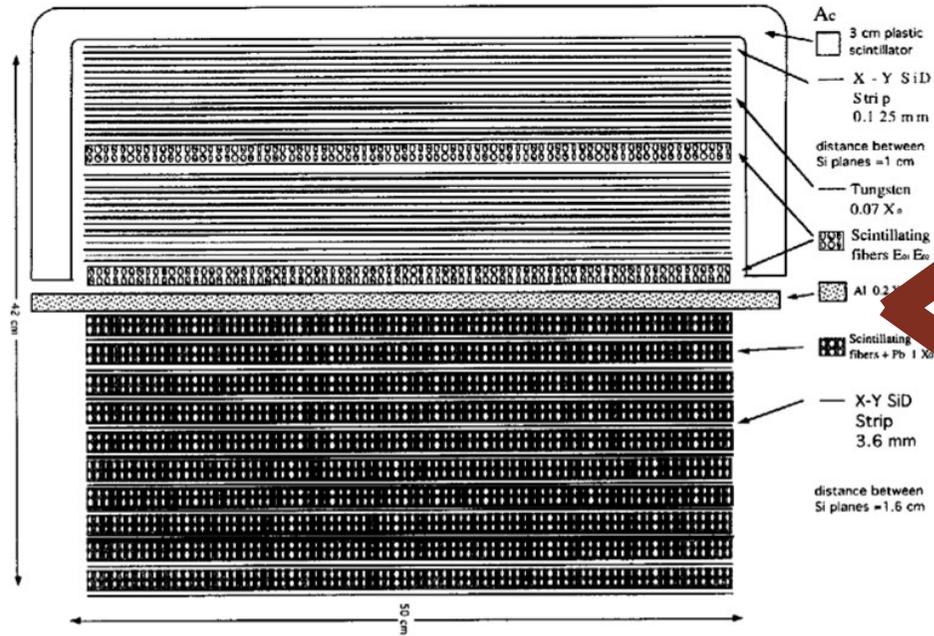
Trasparenza dell'atmosfera





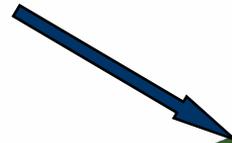
GILDA

GILDA

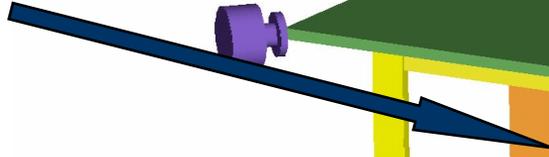


La tecnologia di AGILE

Anticoincidenza



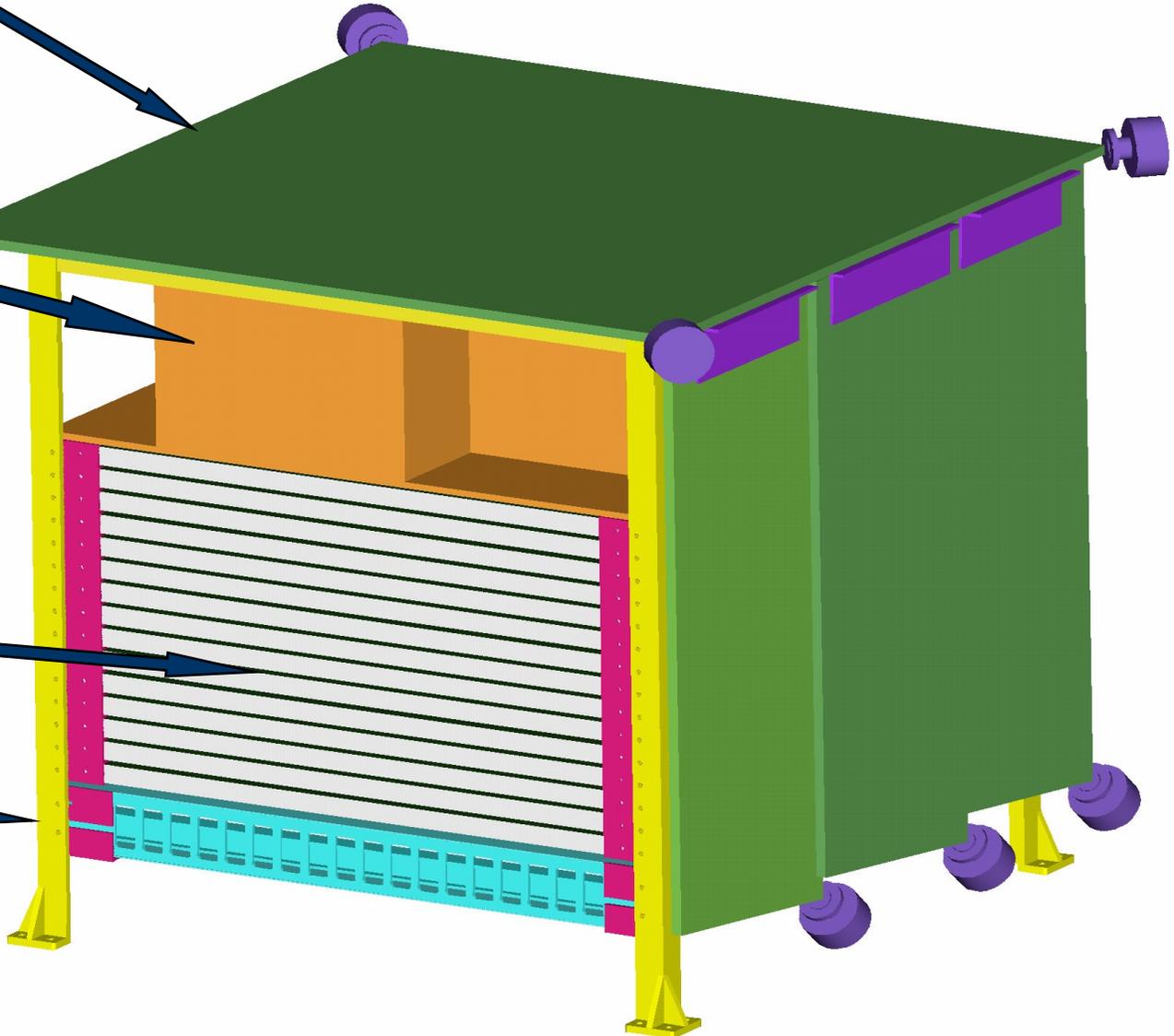
SuperAGILE



Tracciatore
al Silicio



Mini-Calorimetro



AGILE : Istituti e Industrie coinvolte



INAF



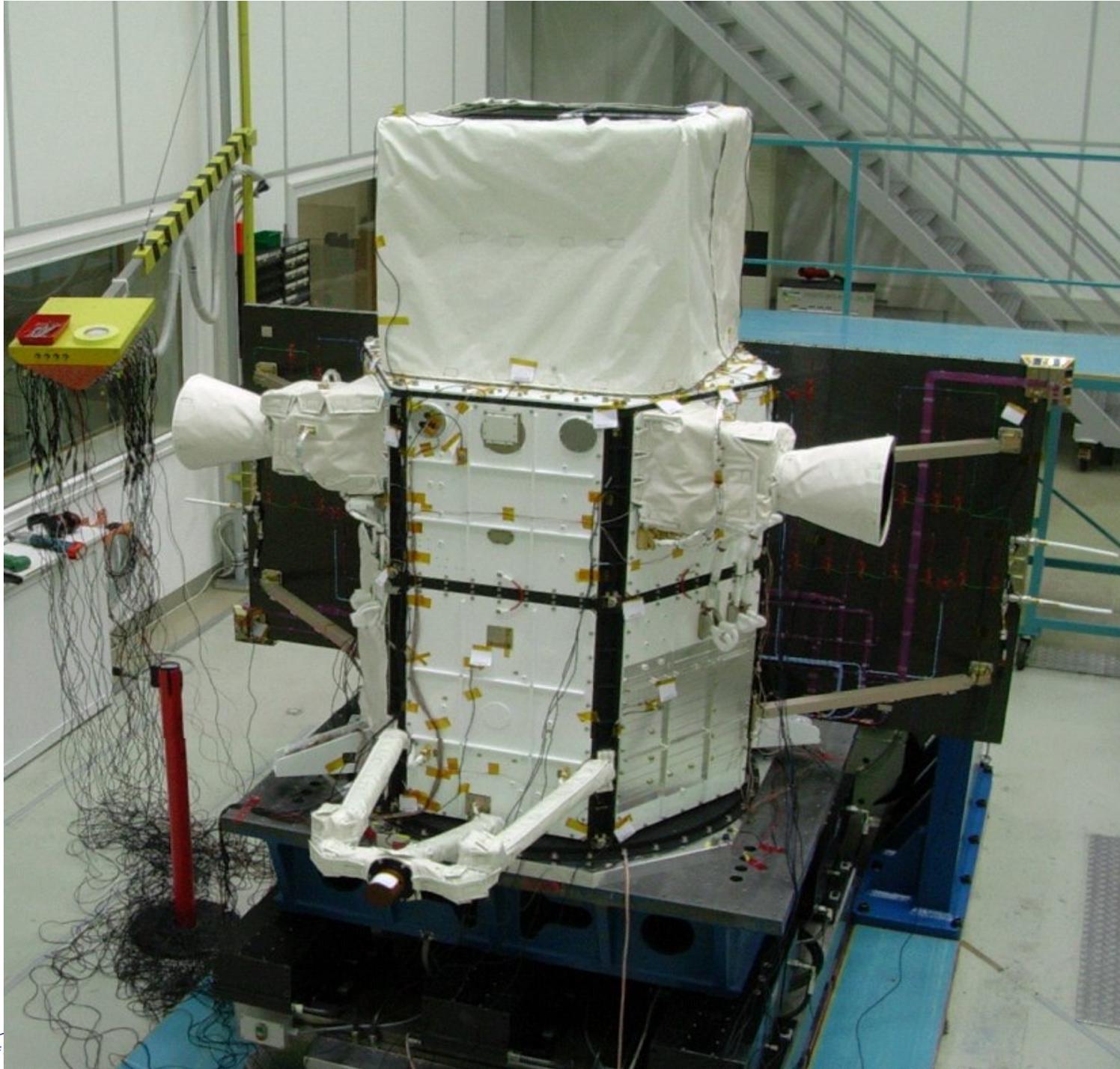
Carlo Gavazzi Space SpA



ENEA



**AGILE Satellite
(IABG, Munich
June 16, 2006)**



AGILE in Sriharikota, April 10, 2007



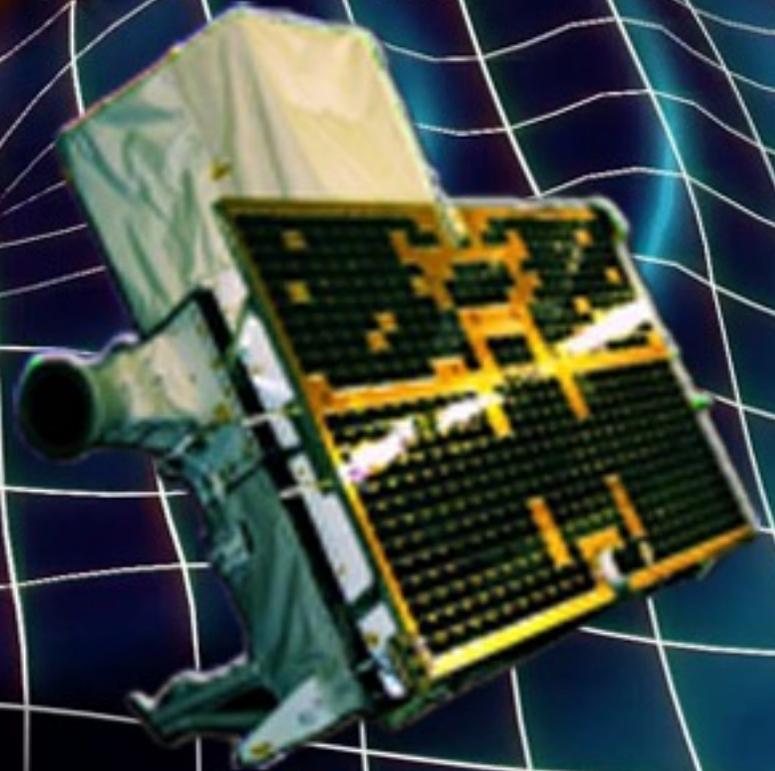
PSLV-C8 launch, 23 Apr. 2007



AGILE

23 April 2007

Happy 14th Birthday Agile !!



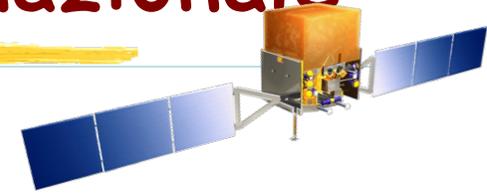
Puoi seguire AGILE
con la
AGILE Science
App.



Il Telescopio di raggi Gamma FERMI



Fermi : una collaborazione internazionale



American Institutions

SU-HEPL Stanford University, Hanson Experimental Physics Laboratory ,
 SU-SLAC Stanford Linear Accelerator Center, Particle Astrophysics group
 GSFC-NASA-LHEA Goddard Space Flight Center, Laboratory for High Energy Astrophysics
 NRL - U. S. Naval Research Laboratory, E. O. Hulburt Center for Space Research, X-ray and gamma-ray branches
 UCSC- SCIPP University of California at Santa Cruz, Santa Cruz Institute of Particle Physics
 SSU- California State University at Sonoma, Department of Physics & Astronomy , WUStL-Washington University, St. Louis
 UW- University of Washington , TAMUK- Texas A&M University-Kingsville, Ohio State University

Italian Institutions

INFN - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare and Univ. of Bari, Padova, Perugia, Pisa, Roma Tor Vergata, Trieste, Udine
 ASI - Italian Space Agency
 IASF- Milano, Roma

Japanese Institutions

University of Tokyo
 ICRR - Institute for Cosmic-Ray Research
 ISAS- Institute for Space and Astronautical Science
 Hiroshima University

French Institutions

CEA/DAPNIA Commissariat à l'Énergie Atomique, Département d'Astrophysique, de physique des Particules, de physique Nucléaire et de l'Instrumentation Associée, CEA, Saclay
 IN2P3 Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules, IN2P3
 IN2P3/LPNHE-X Laboratoire de Physique Nucléaire des Hautes Energies de l'École Polytechnique
 IN2P3/PCC Laboratoire de Physique Corpusculaire et Cosmologie, Collège de France
 IN2P3/CENBG Centre d'études nucléaires de Bordeaux Gradignan

Swedish Institutions

IN2P3/LPTA Laboratoire de Physique Theorique et Ast
 KTH Royal Institute of Technology
 Stockholms Universitet

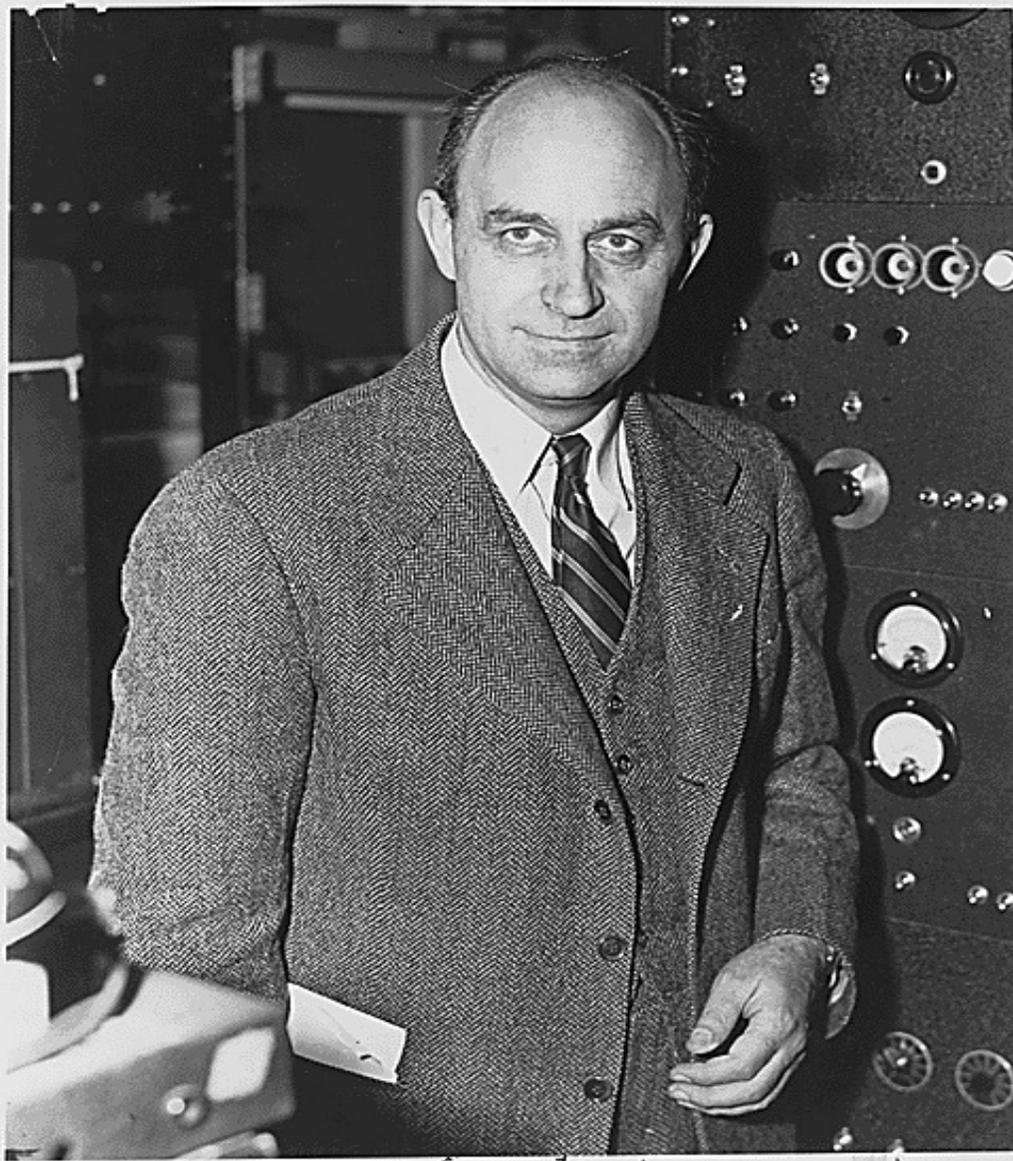
Collaboration members:	~390
Members:	121
Affiliated Scientists	~96
Postdocs:	68
Graduate Students	105

Il Satellite Fermi

- Fermi Gamma-Ray Space Telescope è una missione spaziale internazionale per lo studio della radiazione gamma di origine astrofisica
- Il satellite è composto da 2 strumenti:
 - Il Gamma-Ray Burst Monitor (GBM)
 - Effettua misure di GRB e eventi transienti ad energie tra 8 keV e 40 MeV
 - Il Large Area Telescope (LAT)
 - Effettua misure di raggi gamma ad energie tra 20 MeV e oltre 300 GeV

Fermi Gamma-ray Space Telescope

DoE – NASA – international partnership



GLAST renamed *Fermi* by NASA on August 26, 2008

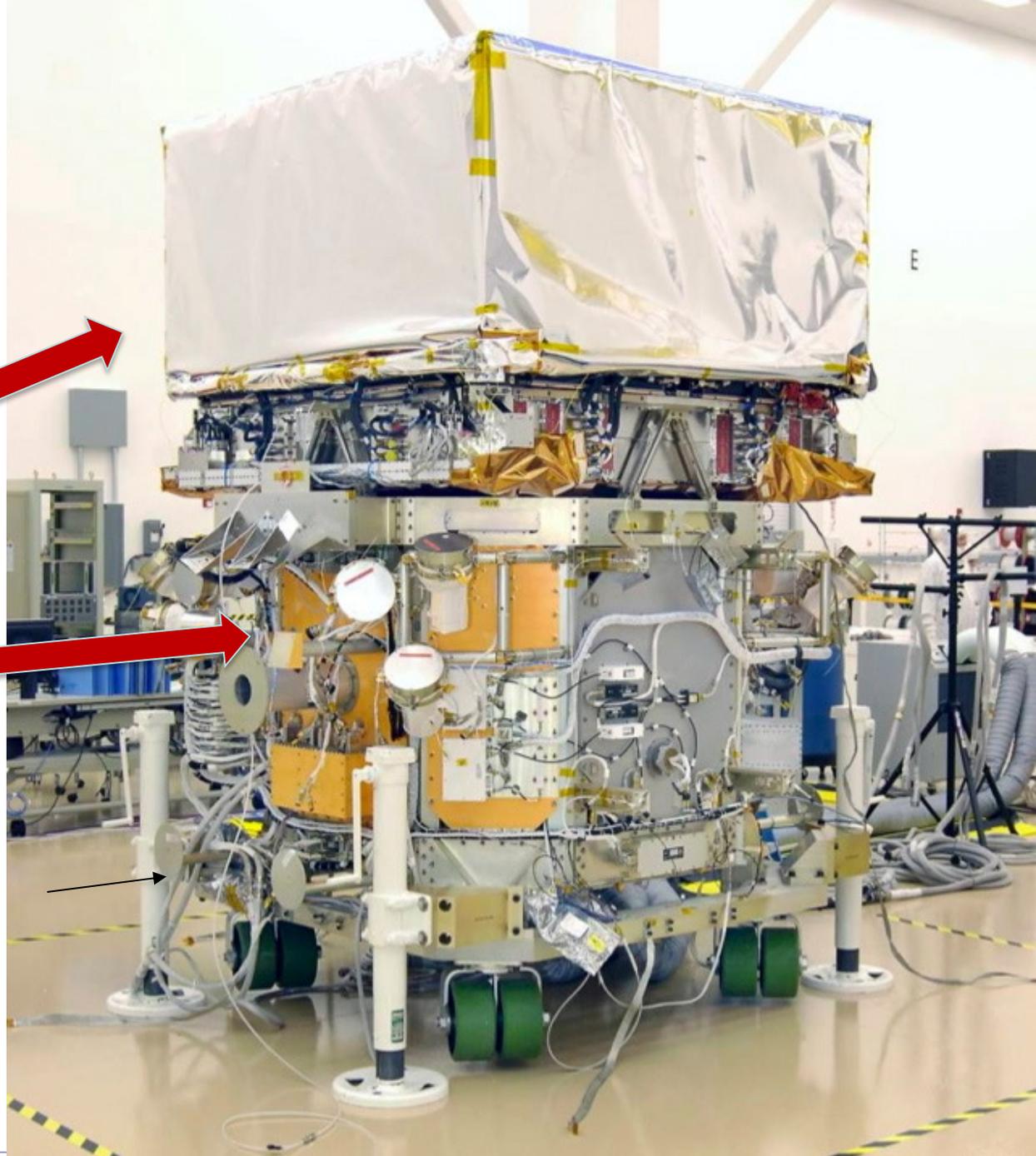
<http://fermi.gsfc.nasa.gov/>

“ Enrico Fermi (1901-1954) was an Italian physicist who immigrated to the United States. He was the first to suggest a viable way to produce high-energy particles in cosmic sources. Since gamma-rays are produced by interactions of such energetic particles, his work is the foundation for many of the studies being done with the **Fermi Gamma-ray Space Telescope**, formerly GLAST.

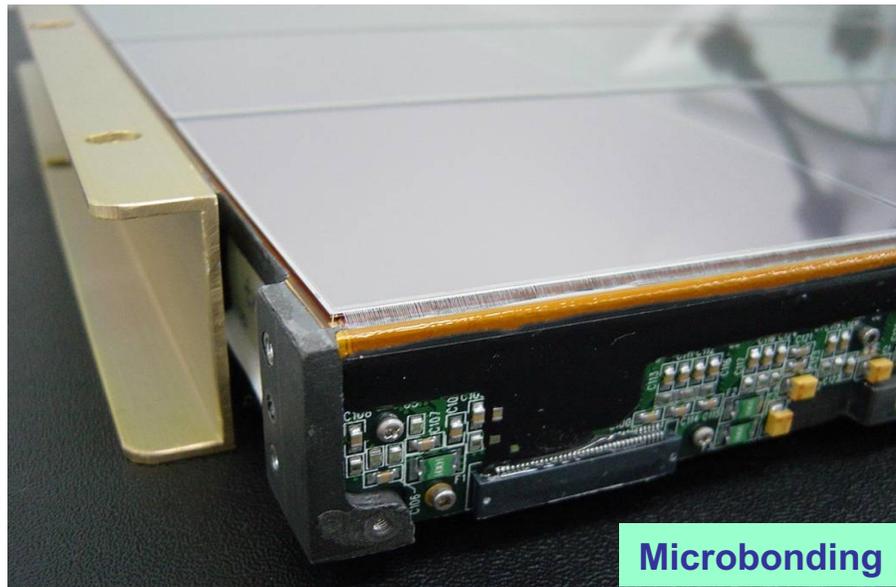
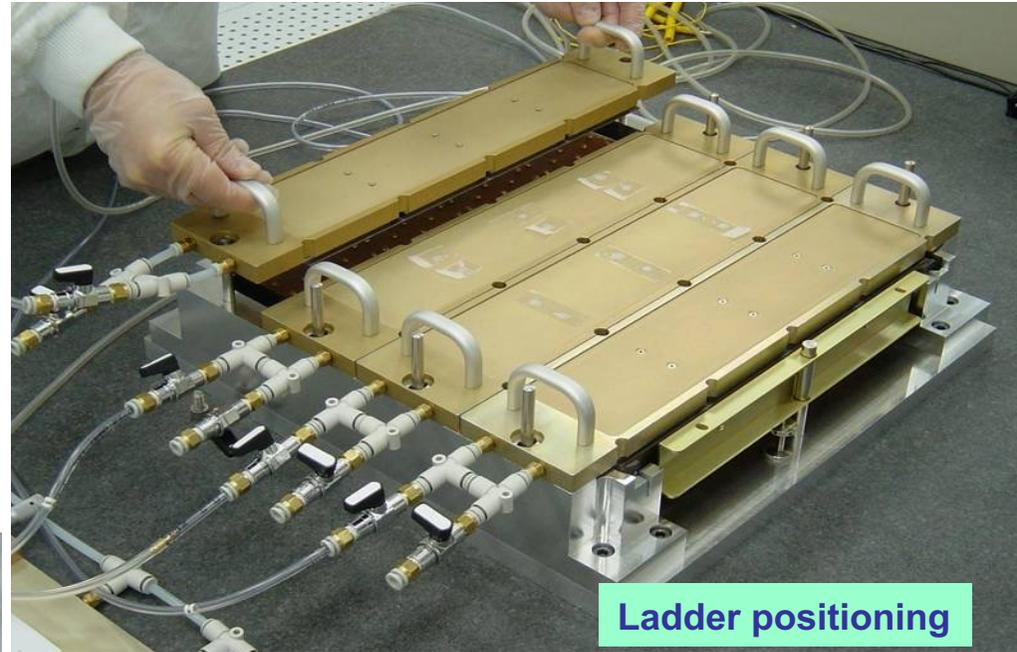
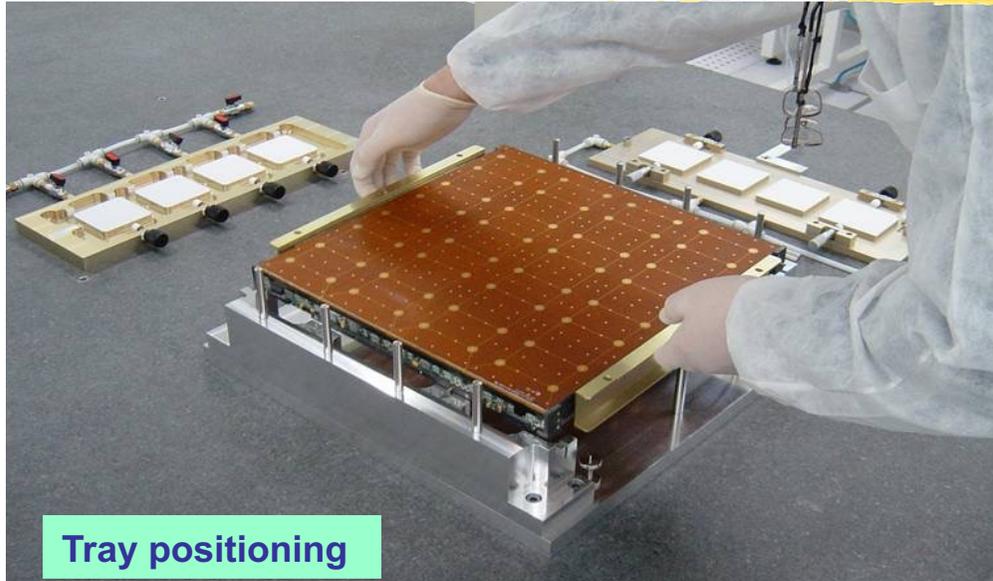
Il Telescopio di raggi gamma Fermi

Large Area Telescope

Gamma ray Burst Monitor



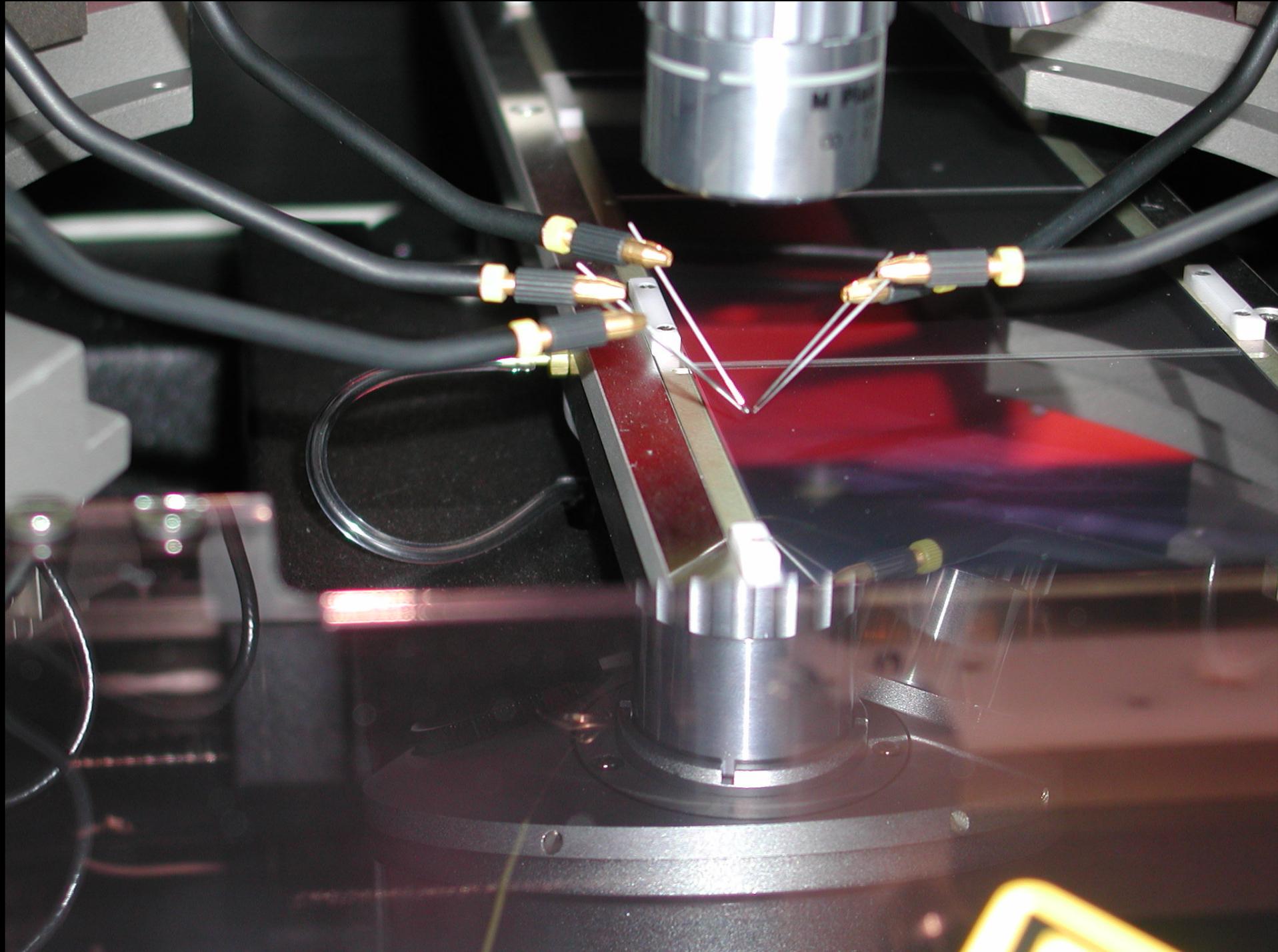
Assemblaggio presso la G&A ad Oricola

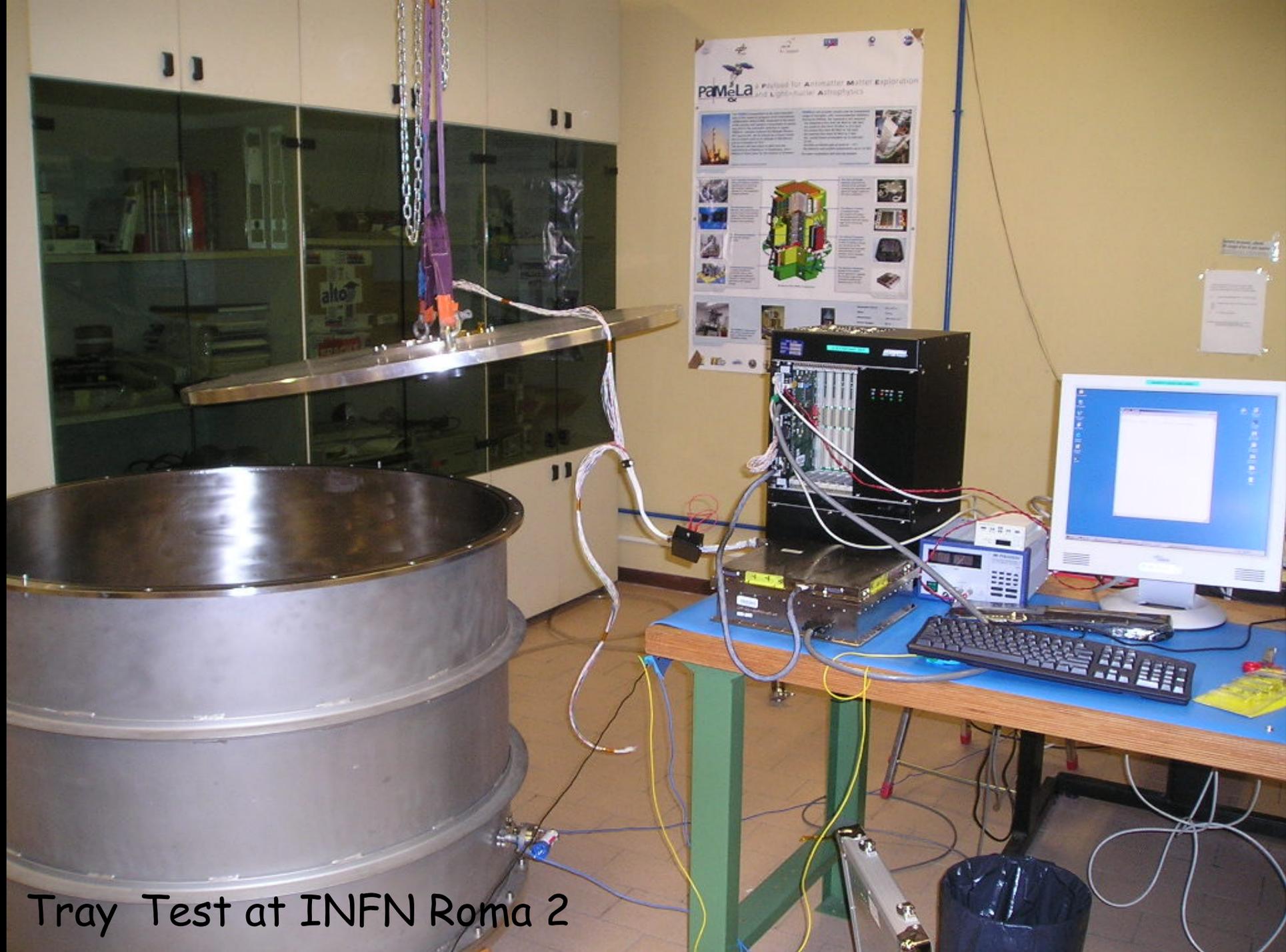












Tray Test at INFN Roma 2

LOAD ALIGN Out Core SET SET 2

0.25%

TOG INNER

2x 10x 20x 50x

SET SET 2 SET

Out

Align Chuck

Automatically move chuck to each point

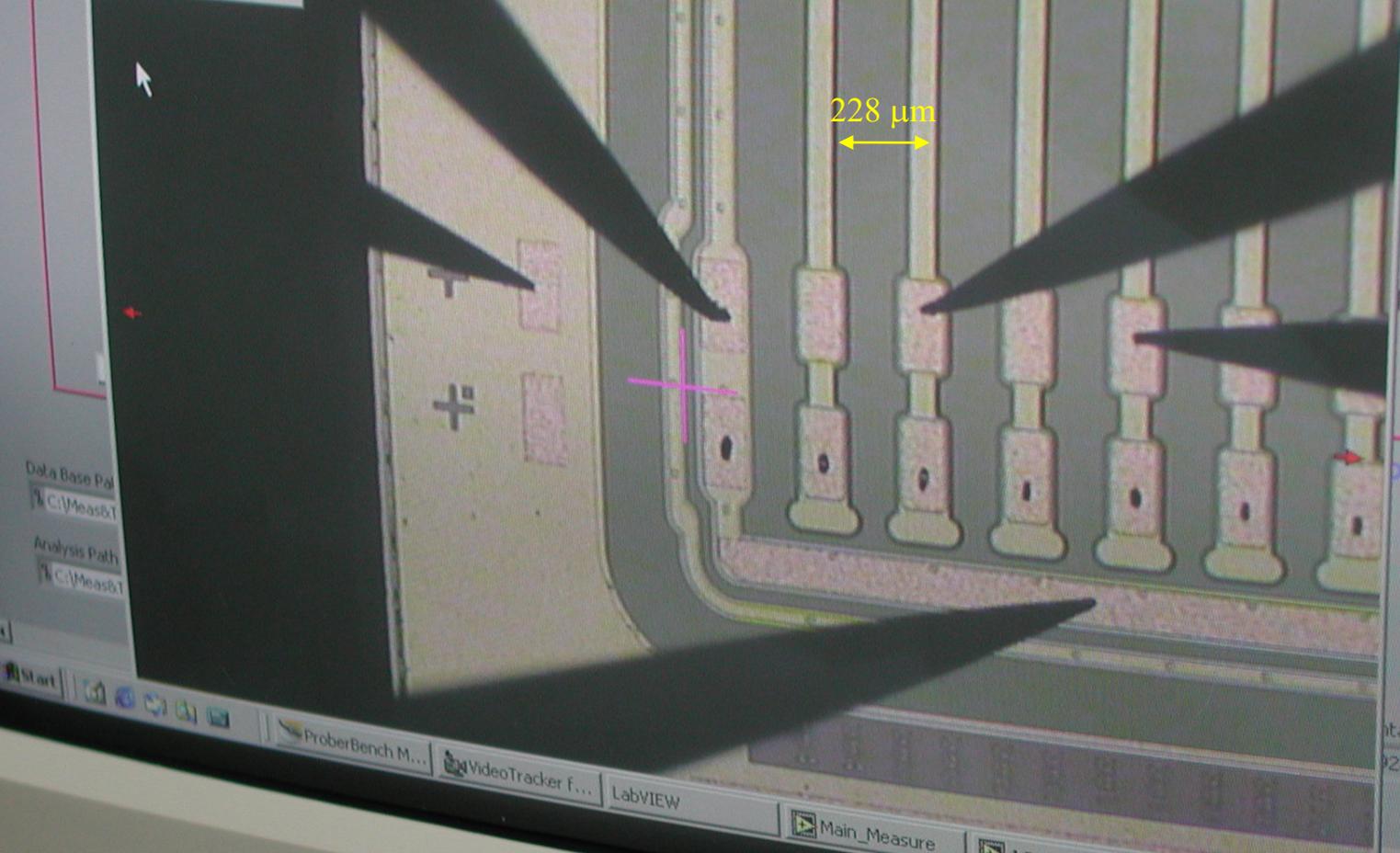
Automatically turn on chuck vacuum

The Alignment process takes two points along a street on a wafer. The chuck will move automatically to either side of the wafer as determined by the distances from center.

OK

Begin

Cancel



in

R 4S

ZSM

Bad strips

1

on

Data Base Pal

C:\Meas&T

Analysis Path

C:\Meas&T

tact

9207.500000

Hansol

Start

ProberBench M...

VideoTracker F...

LabVIEW

Main_Measure

AC_acq_fast_...

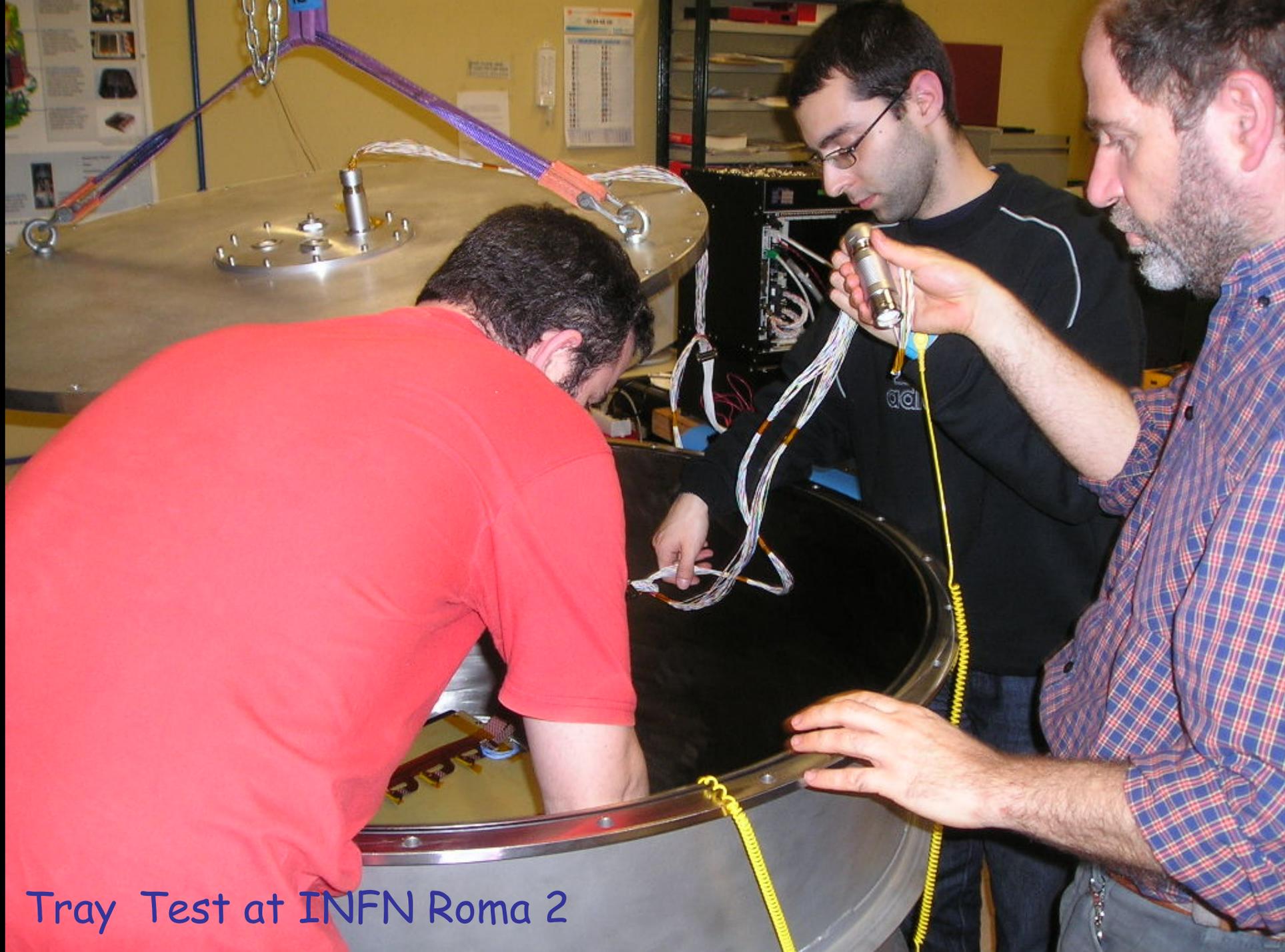
Navigator for...

IT

11.25







Tray Test at INFN Roma 2

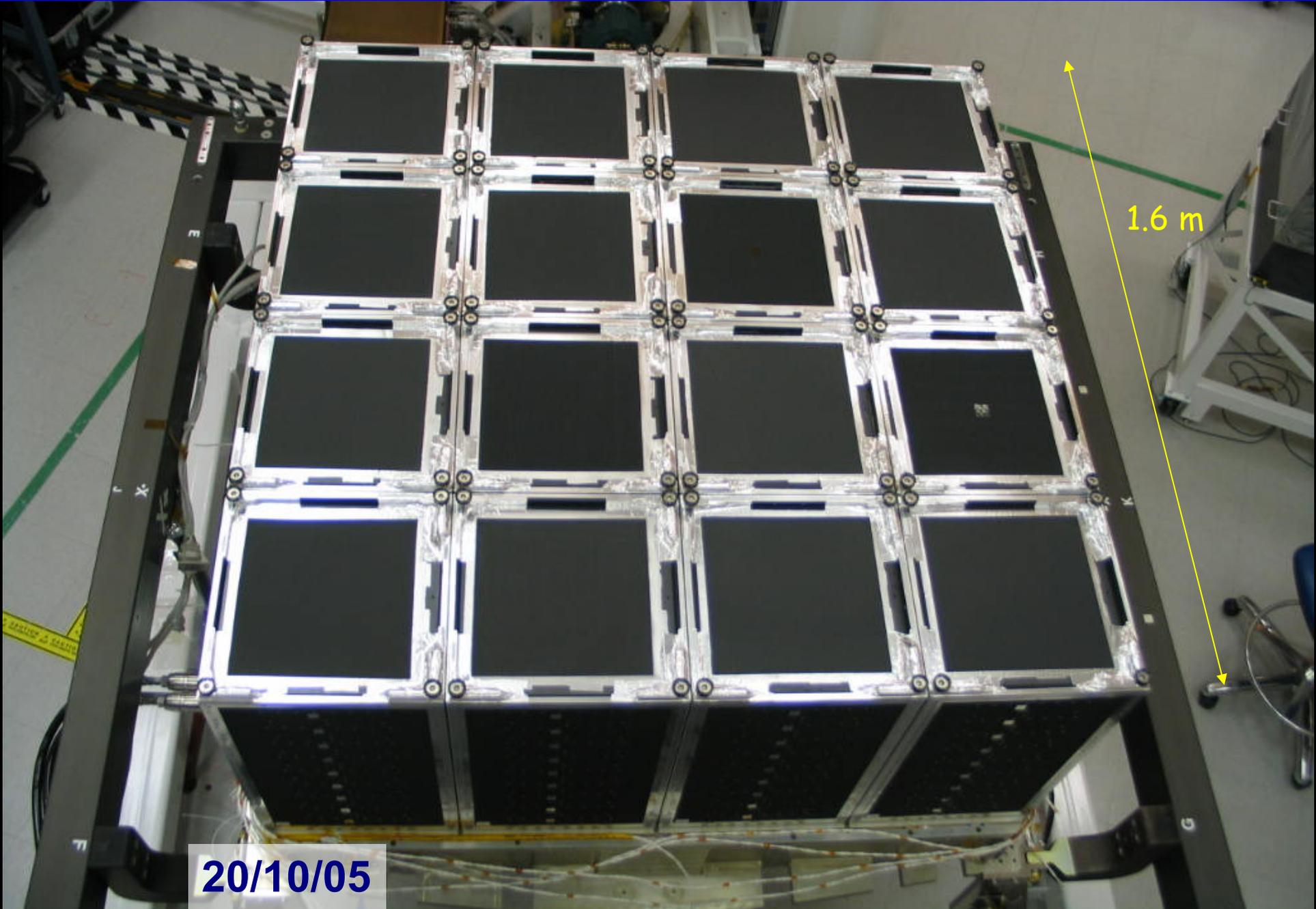


INFN Roma
Tor Vergata



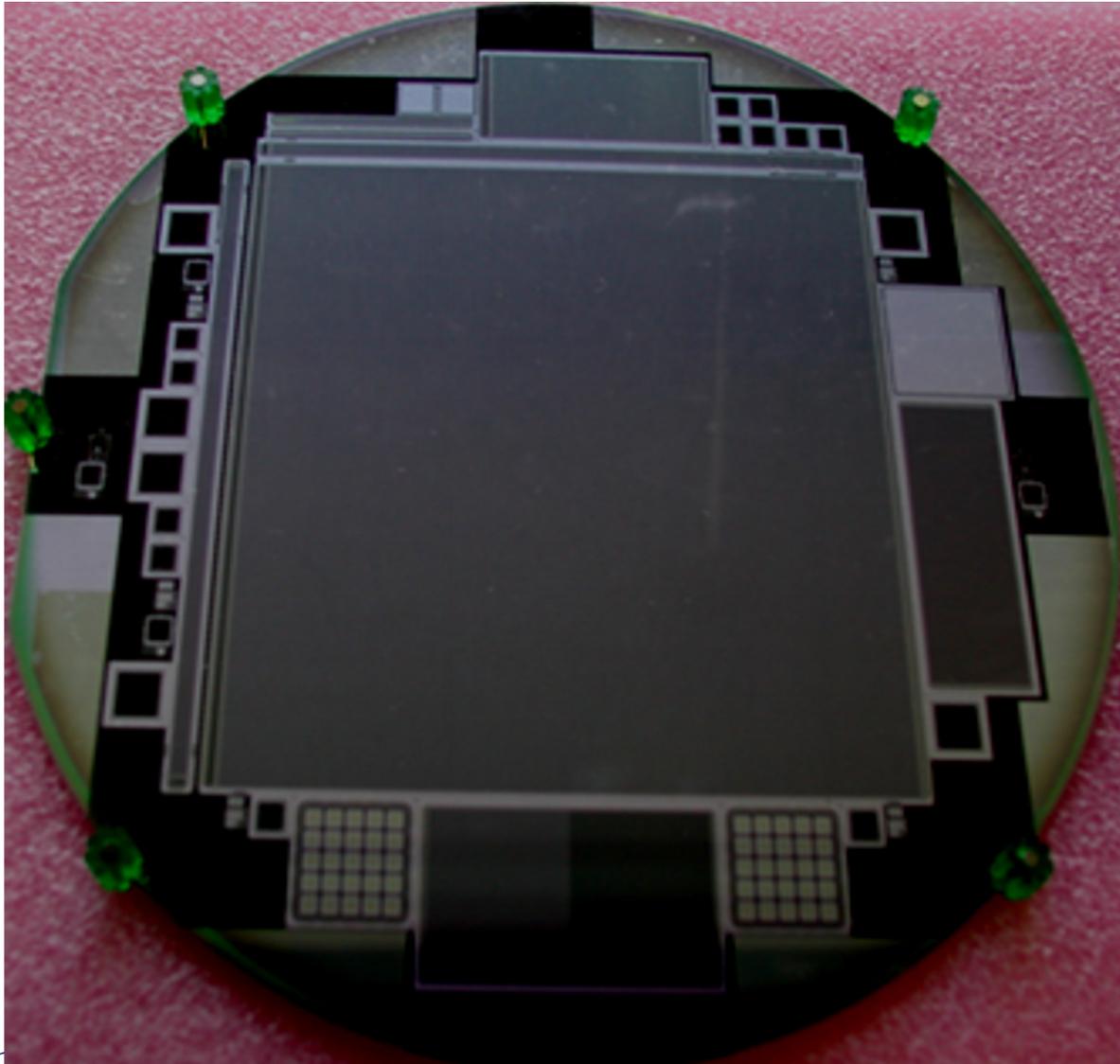
Test dei piani di silicio presso l' INFN di Roma Tor Vergata

Integrazione finale di GLAST a SLAC (Università di Stanford)



20/10/05

I numeri del tracciatore del telescopio spaziale di raggi gamma Fermi



**11.500 rivelatori
~ 1M canali di
elettronica**

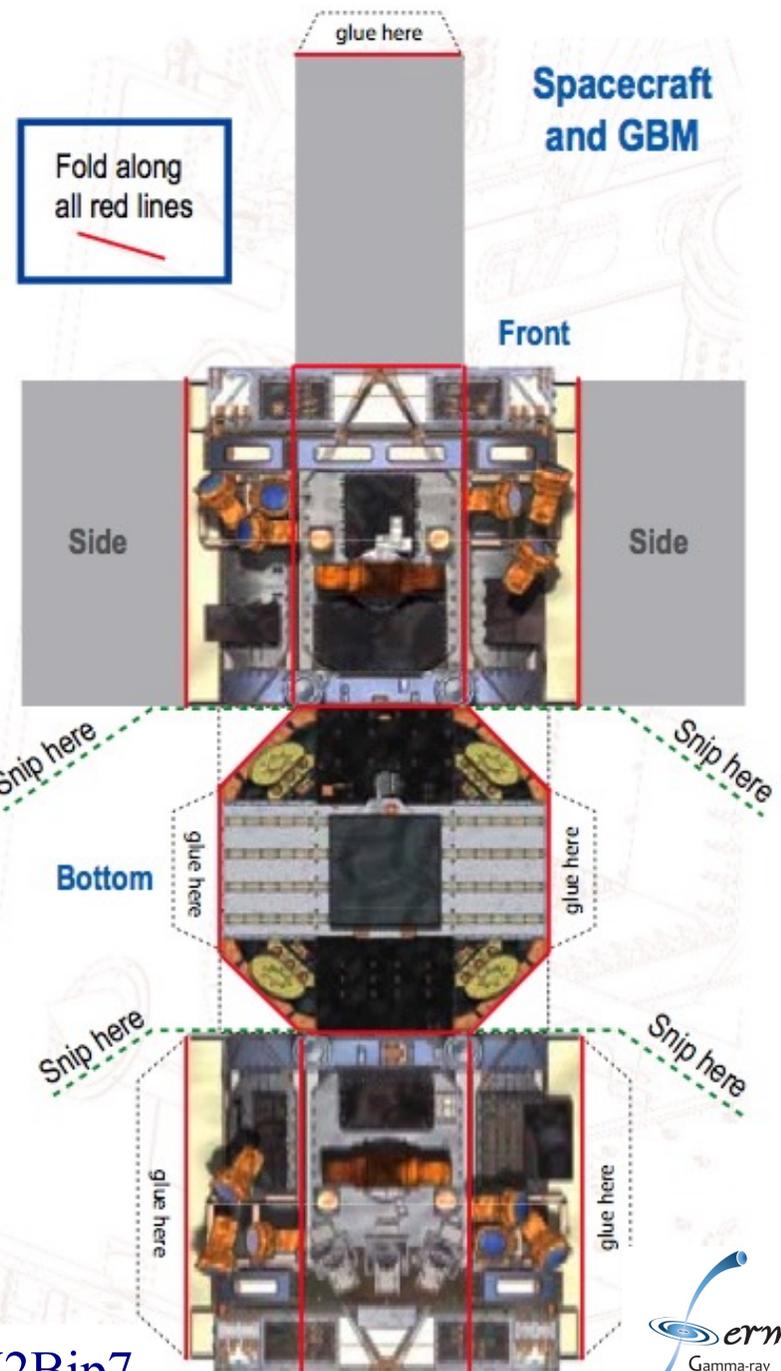
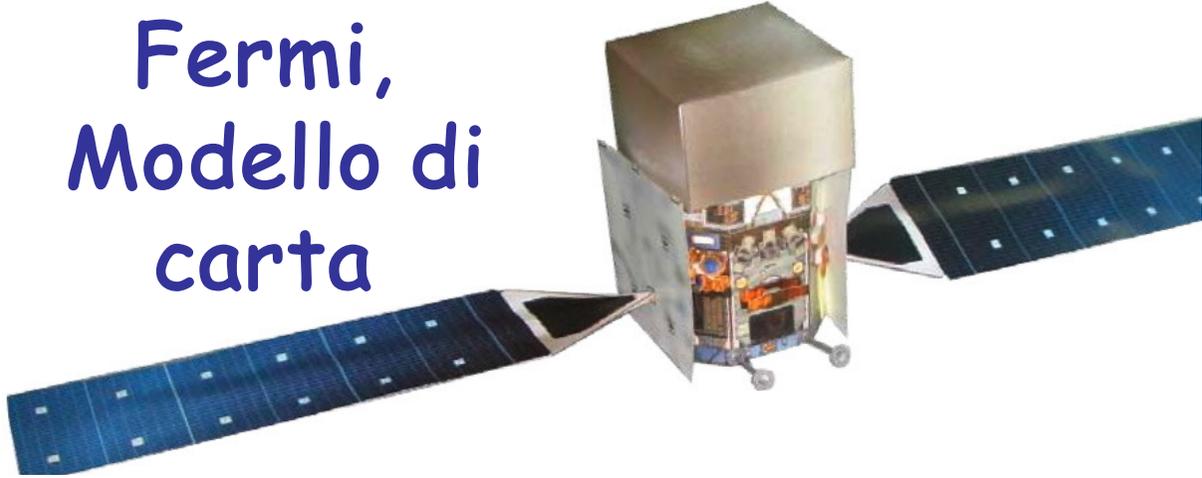
**83 m² superficie di
Silicio**

**> 240K functional test
recorded in DB
~ 30M di test sulle**

Fermi prima dell'installazione



Fermi, Modello di carta





Fermi
all'interno del Delta 2



11 June 2008



11 June 2008



11 June 2008



11 June 2008



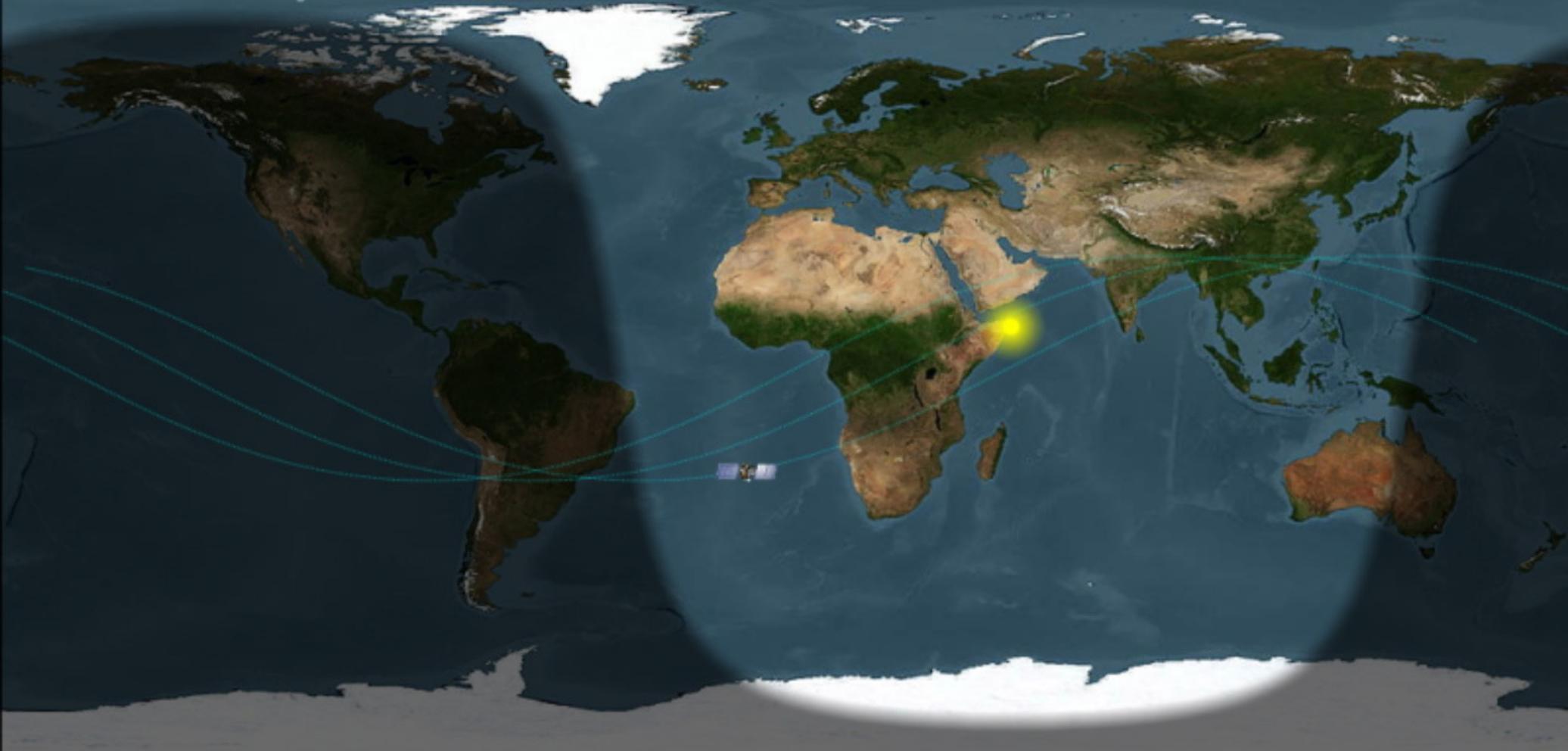
11 June 2008



11 June 2008

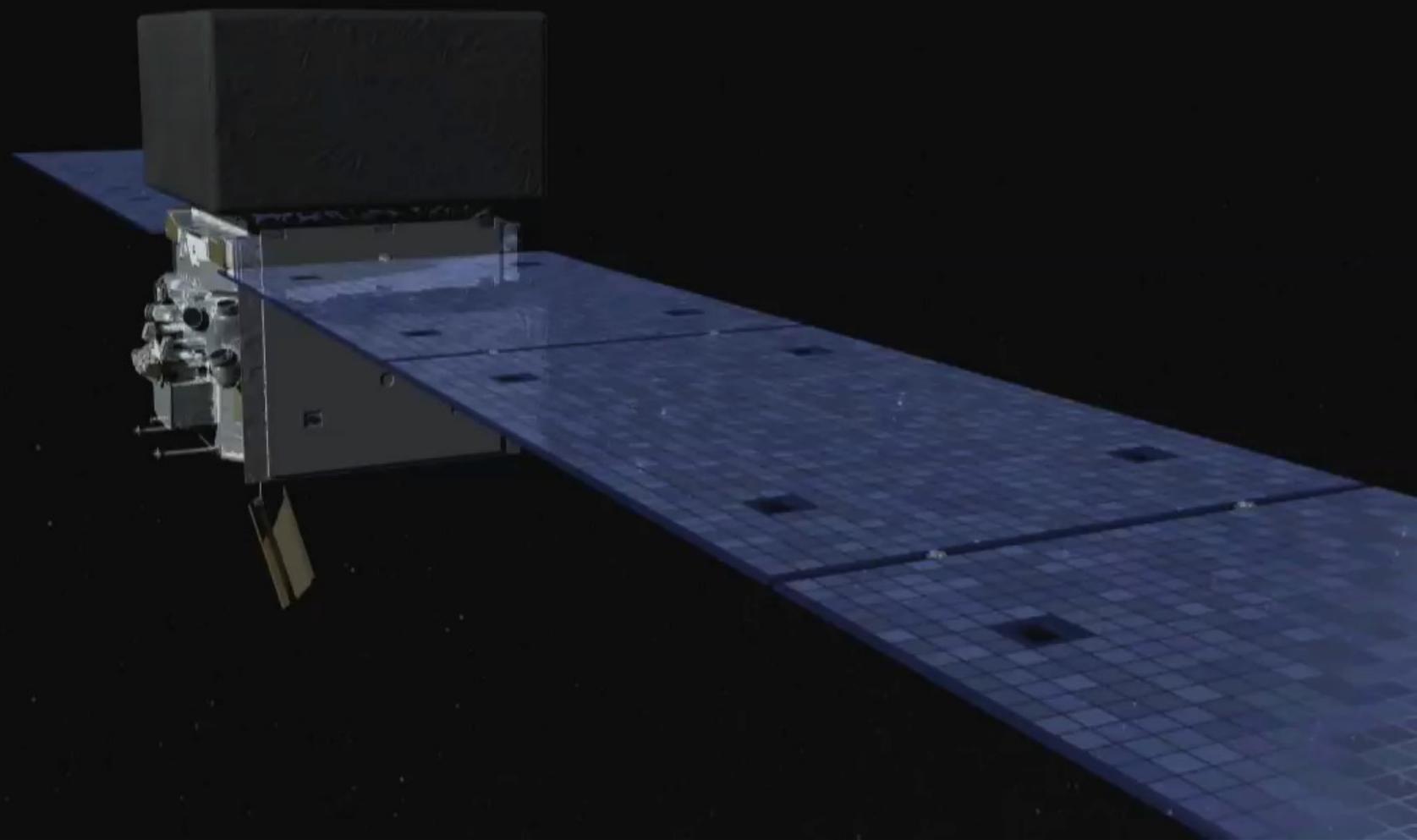
Fermi in orbita

GLAST Latitude = S 23 28 20.36 Longitude = W 09 05 30.98 Altitude = 555.92 km

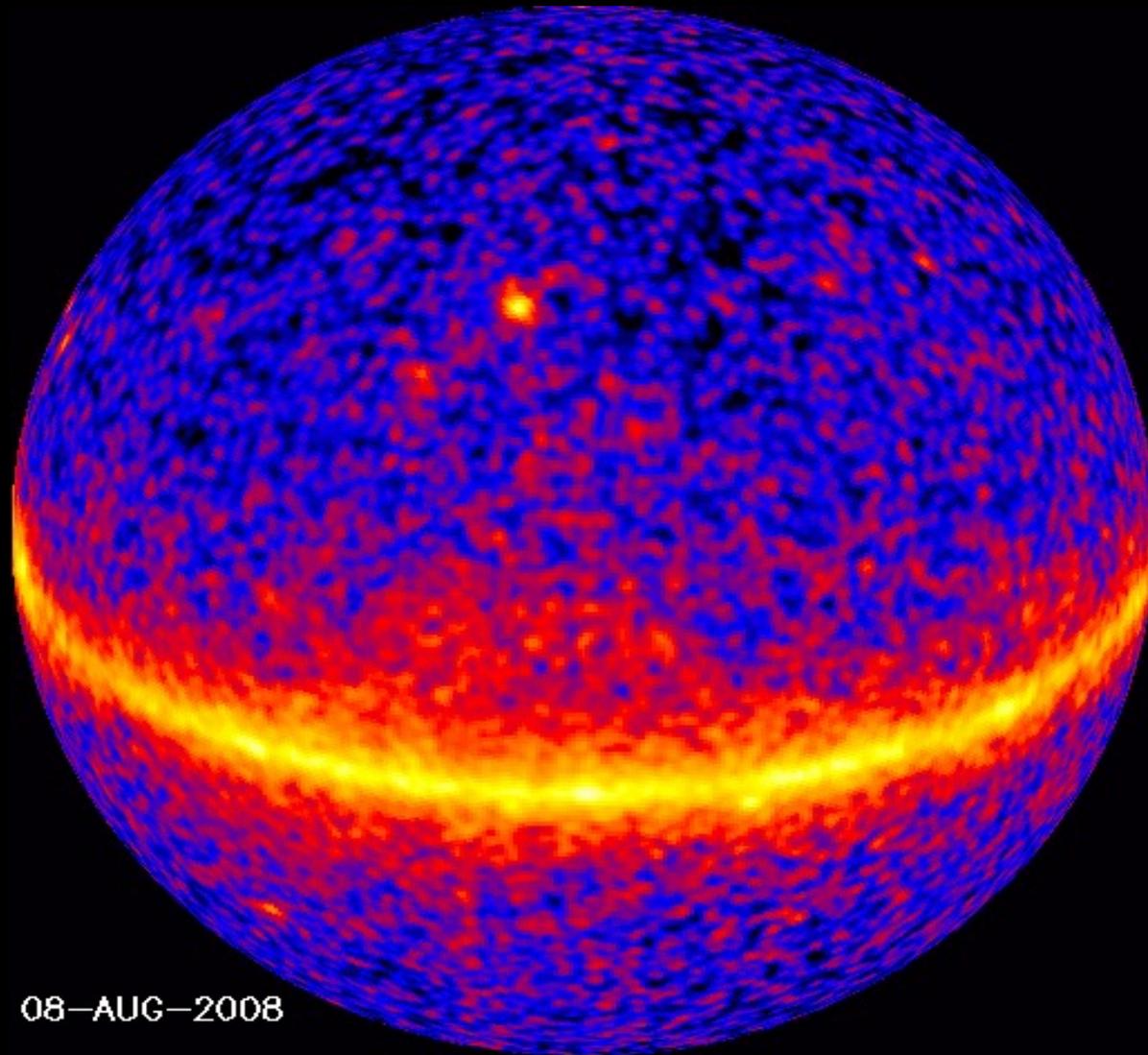


- Per rintracciare il satellite: <http://observatory.tamu.edu:8080/Trakker>
- Per vedere il satellite sopra la città :
http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/glast_online.html





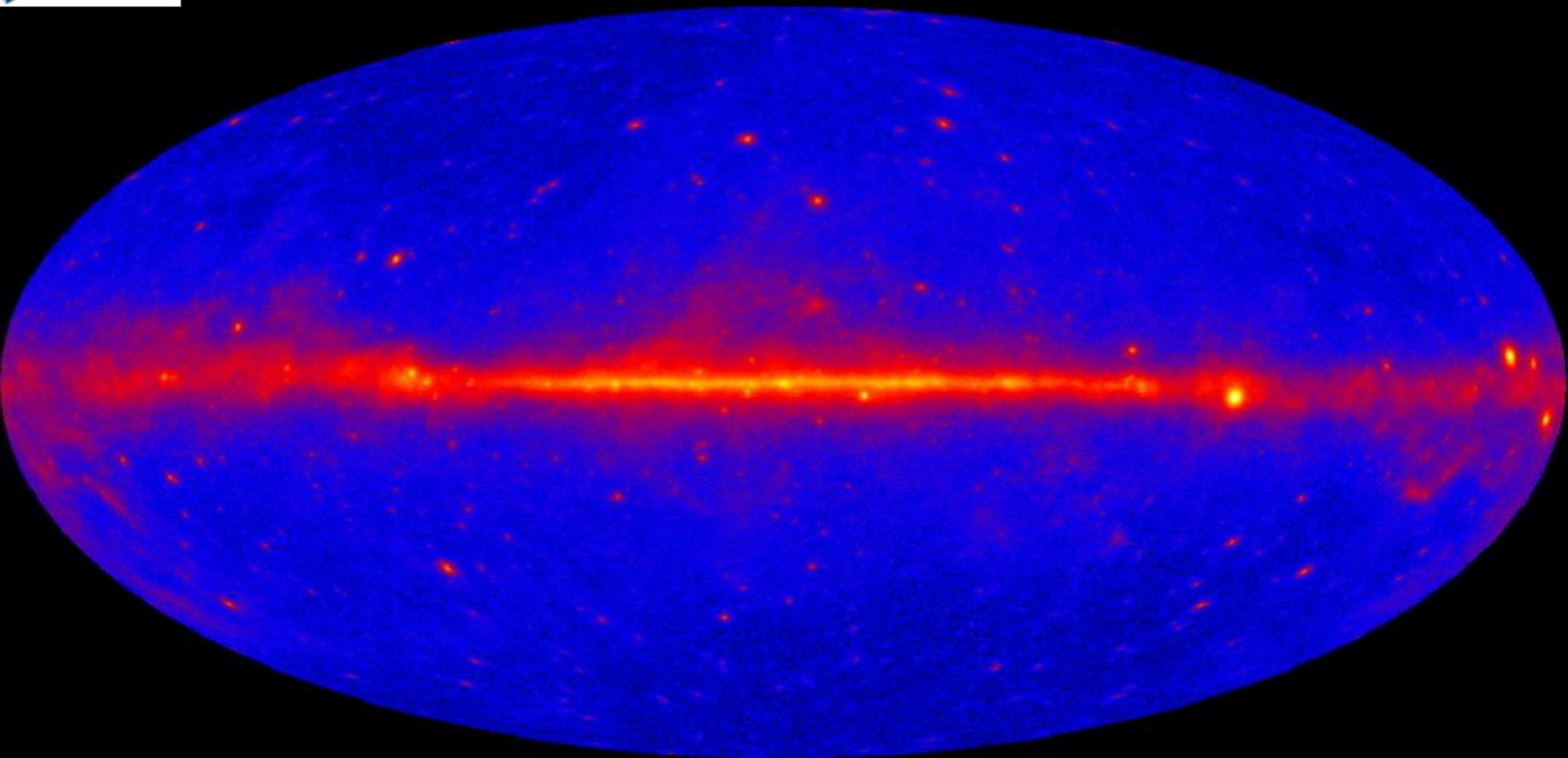
Daily Gamma-ray Sky



08-AUG-2008



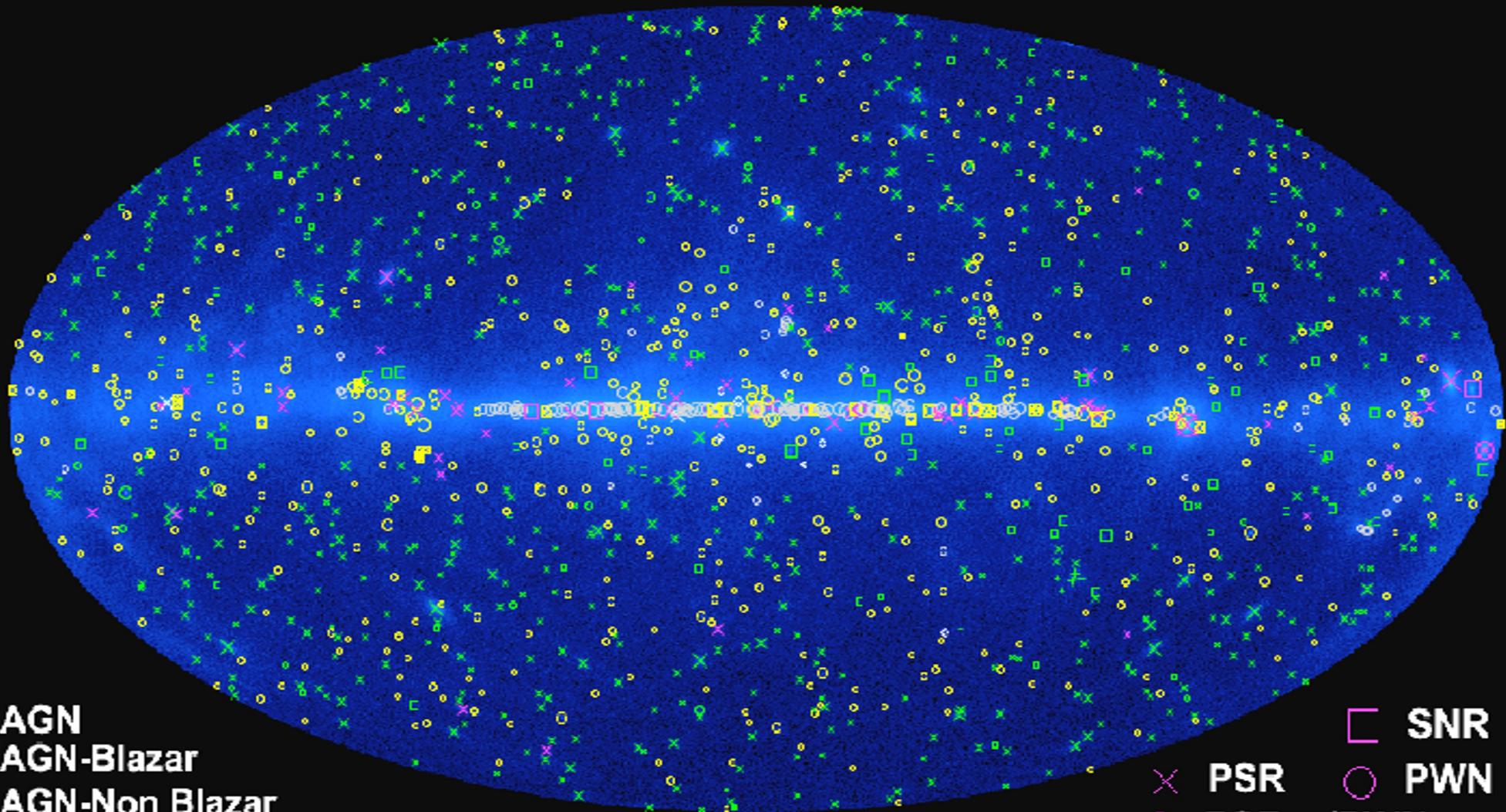
Primo Catalogo delle sorgenti viste dal telescopio Fermi (11 mesi, 1451 sorgenti)



http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/1yr_catalog/

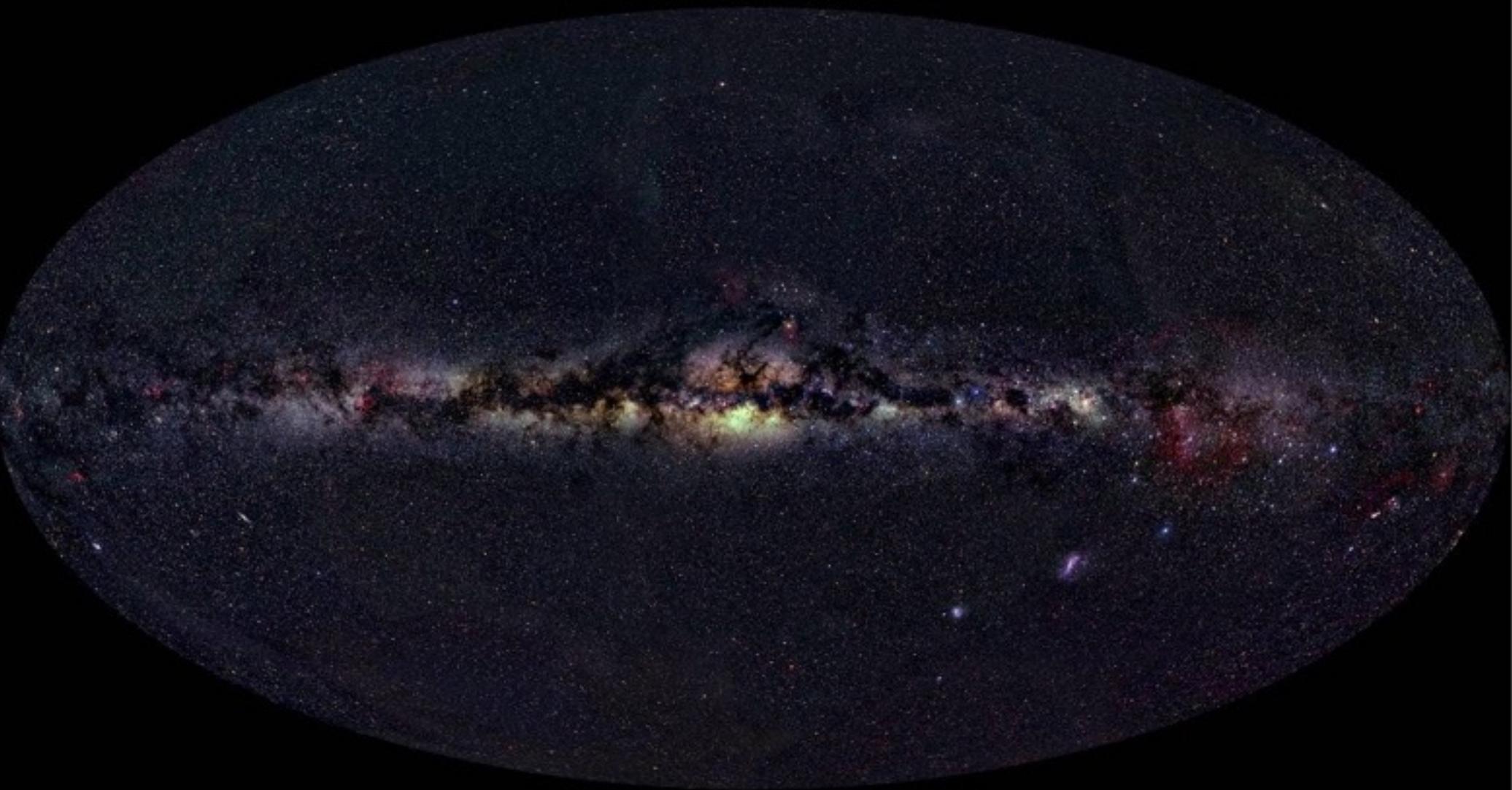
arXiv:1002.2280

Primo Catalogo delle sorgenti viste dal telescopio Fermi (11 mesi, 1451 sorgenti)

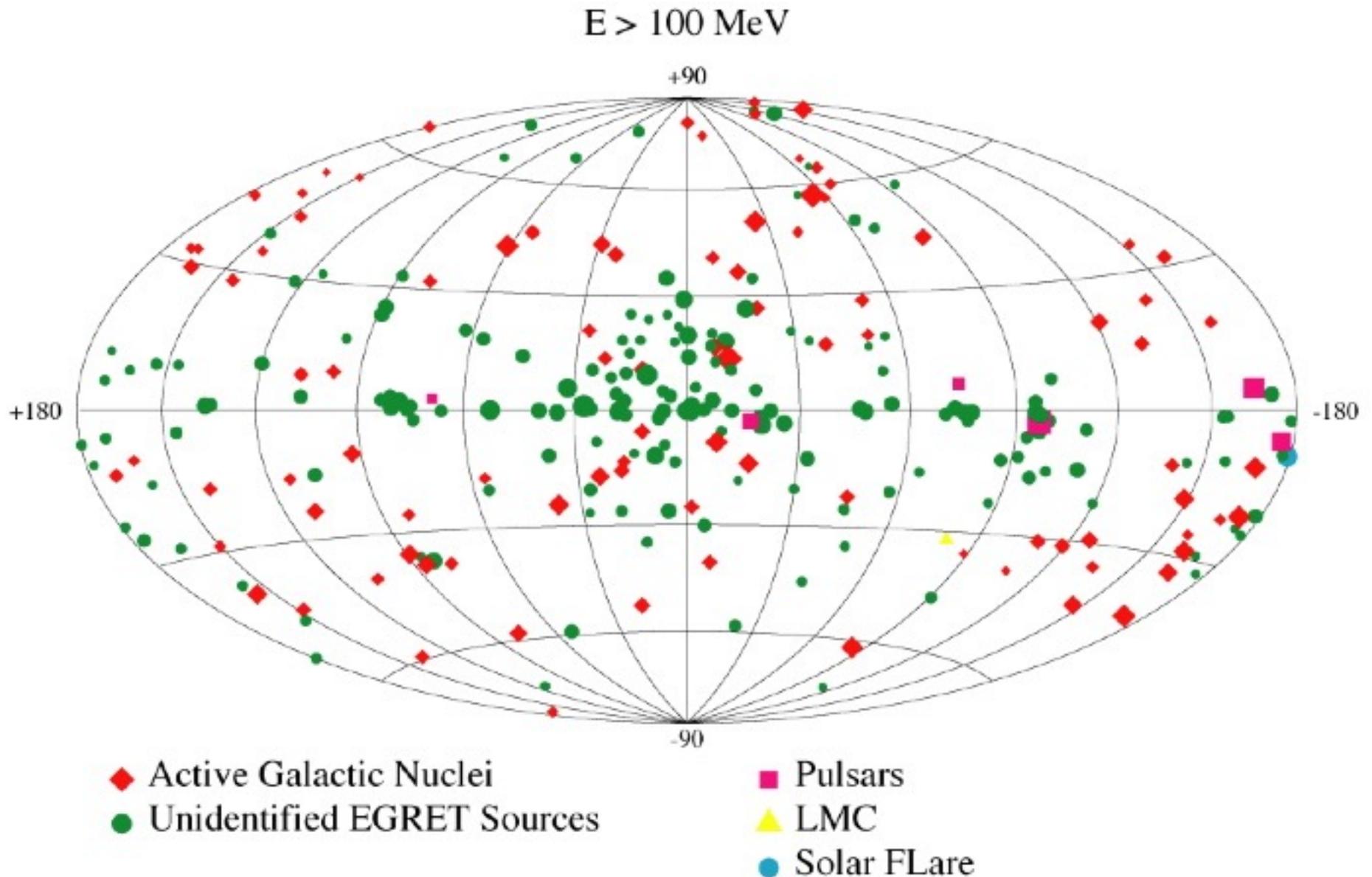


- AGN
- × AGN-Blazar
- AGN-Non Blazar
- No Association
- Possible Association with SNR and PWN
- Possible confusion with Galactic diffuse emission
- Starburst Galaxy
- Galaxy
- SNR
- × PSR
- PWN
- ⊗ PSR w/PWN
- ◇ Globular Cluster
- × HXB or MQO

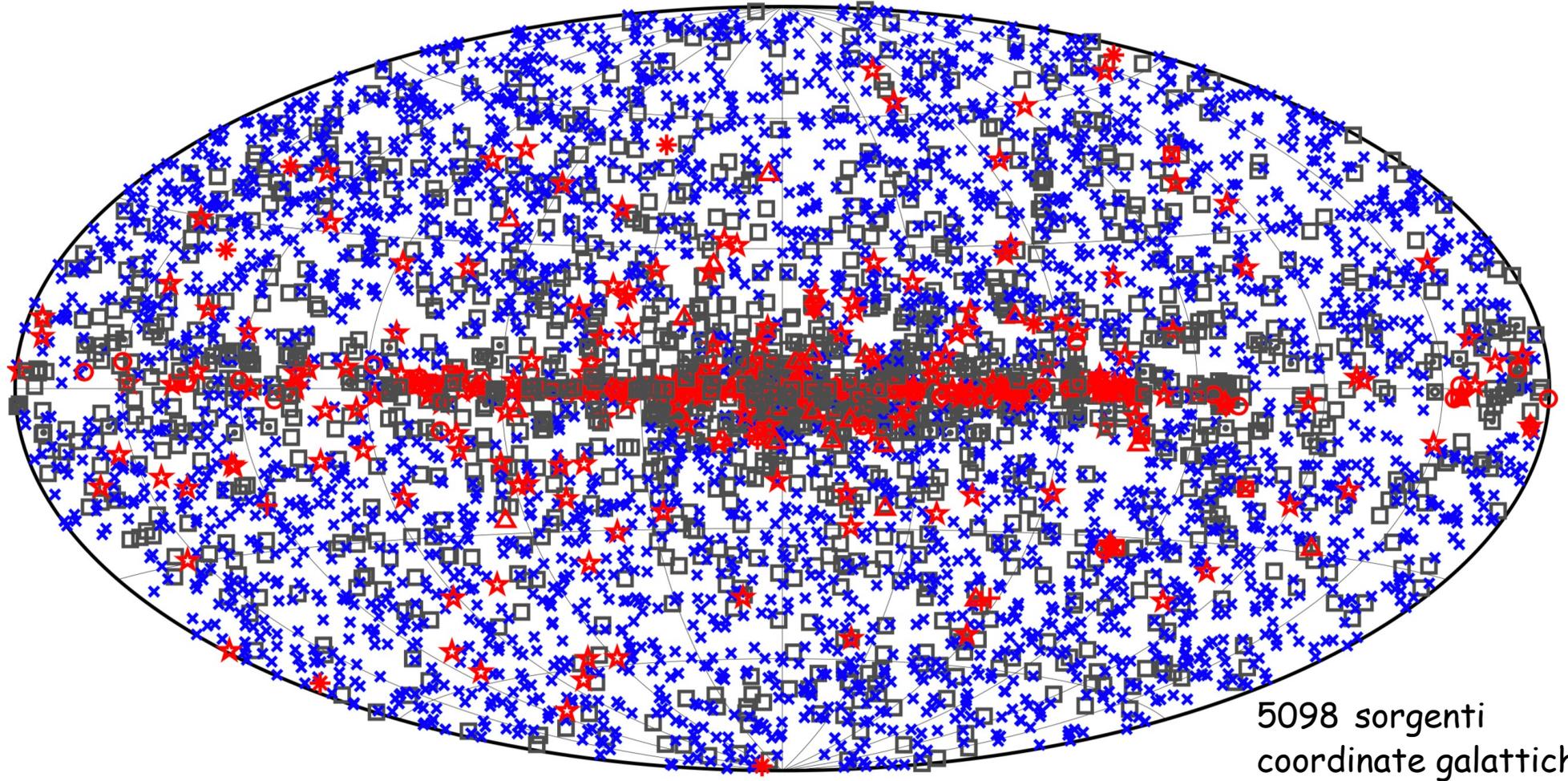
Il cielo nell'ottico



da confrontare con il precedente esperimento EGRET (298 sorgenti)

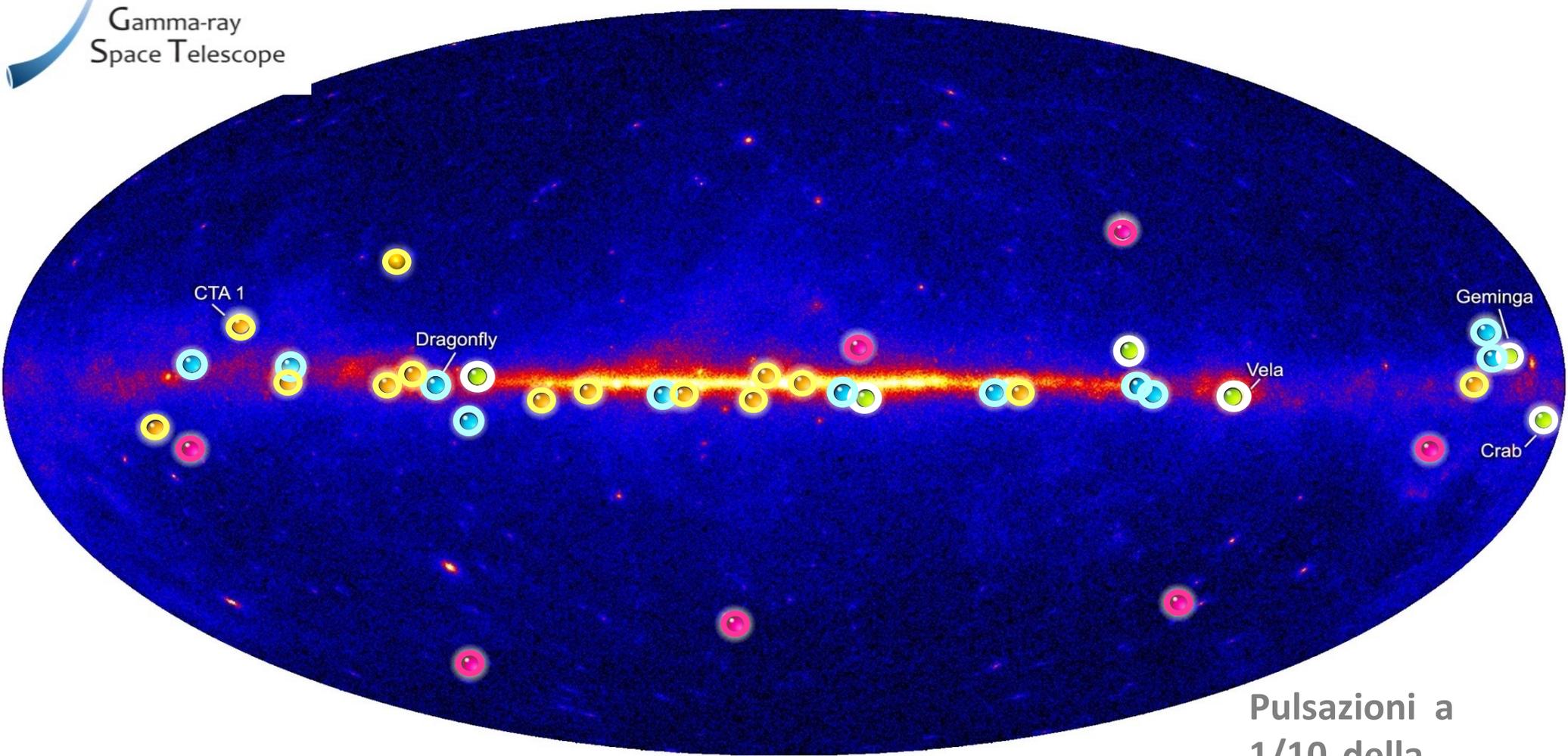
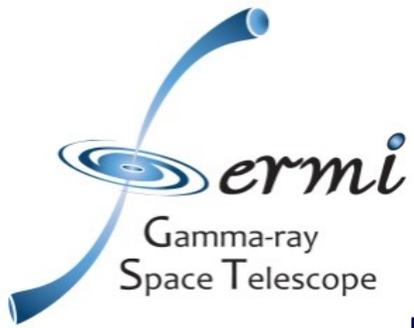


Quarto Catalogo delle sorgenti viste dal telescopio Fermi



□ No association	▣ Possible association with SNR or PWN	× AGN
★ Pulsar	△ Globular cluster	* Starburst Galaxy
▣ Binary	+ Galaxy	○ SNR
★ Star-forming region	▣ Unclassified source	◆ PWN
		⊛ Nova

M.Ackermann et al. [Fermi Coll.] 4FGL: Fermi-LAT Fourth Source arXiv:1902.10045



Il cielo pulsante nei raggi gamma

- New pulsars discovered in a blind search
- Millisecond radio pulsars
- Young radio pulsars
- Pulsars seen by Compton Observatory EGRET instrument

Pulsazioni a 1/10 della frequenza reale



Happy 15th Birthday Fermi !!

11 June 2008

GW170817

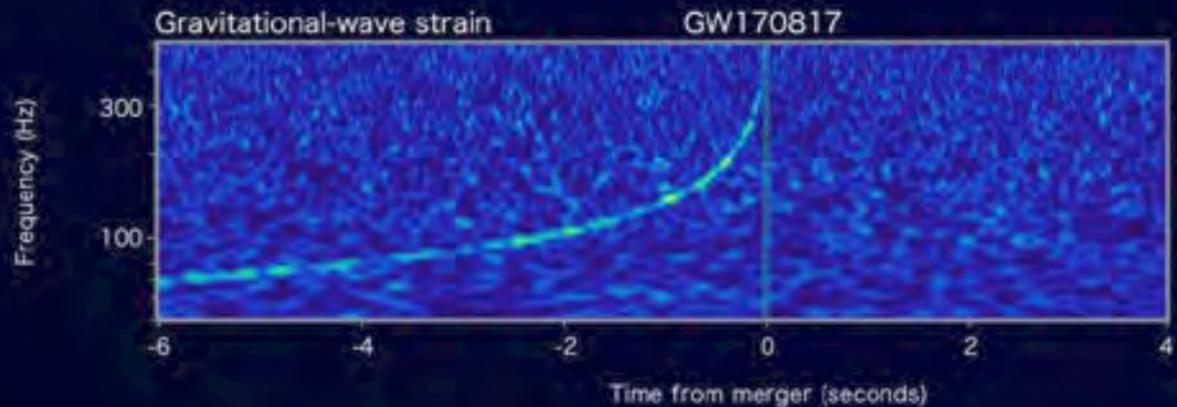
Fermi

Reported 16 seconds after detection



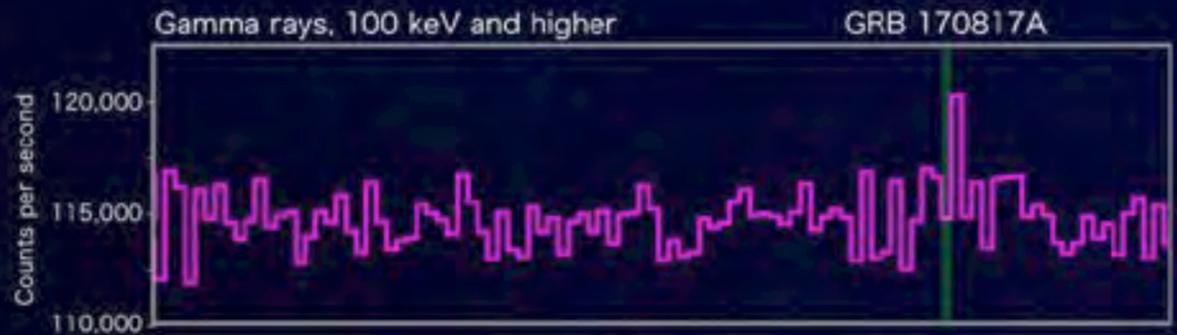
LIGO-Virgo

Reported 27 minutes after detection



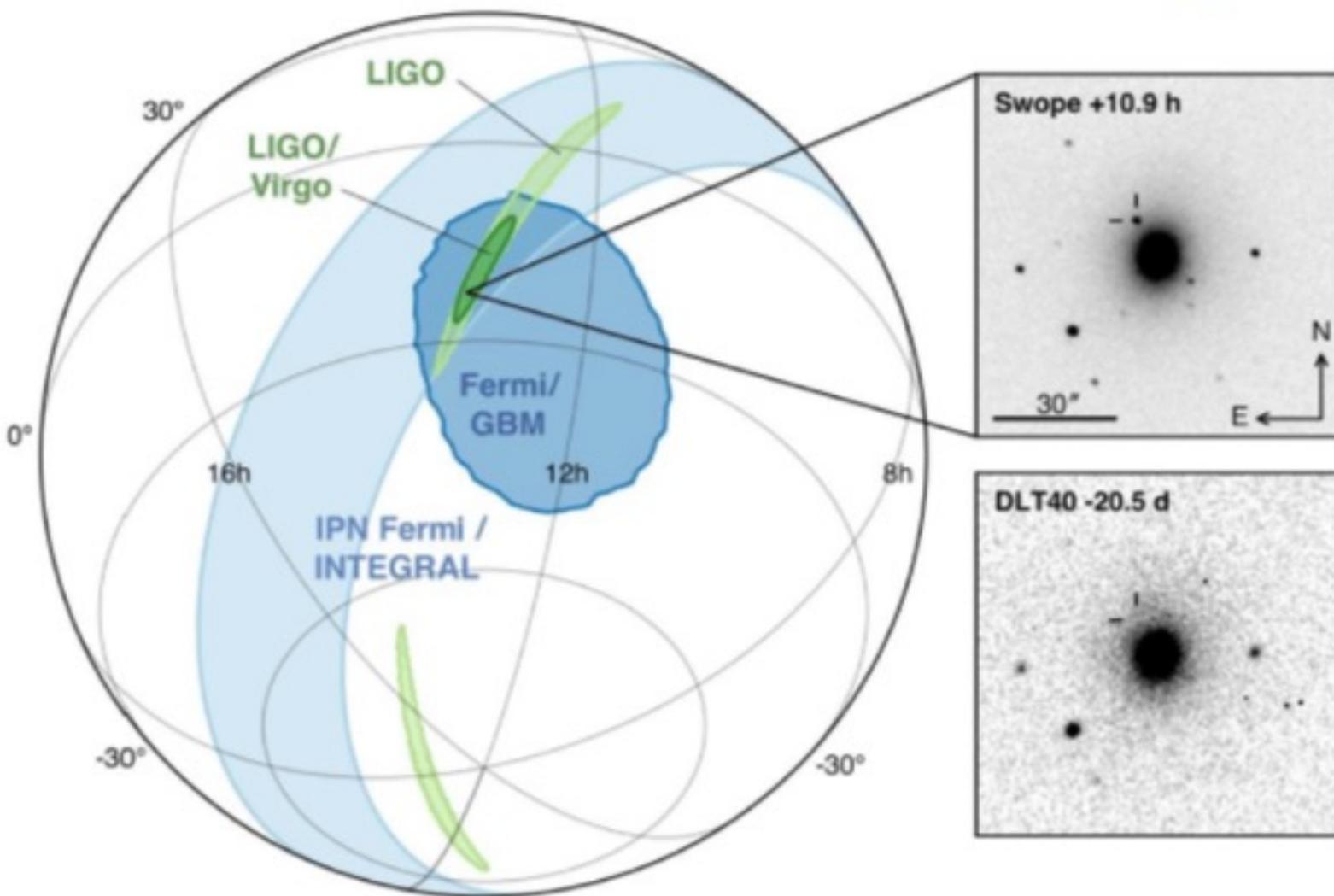
INTEGRAL

Reported 66 minutes after detection



Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger ApJL 848 L12 2017 [arXiv:1710.05833] 3656 authors !

GBM e Onde Gravitazionali: 17 08 2017

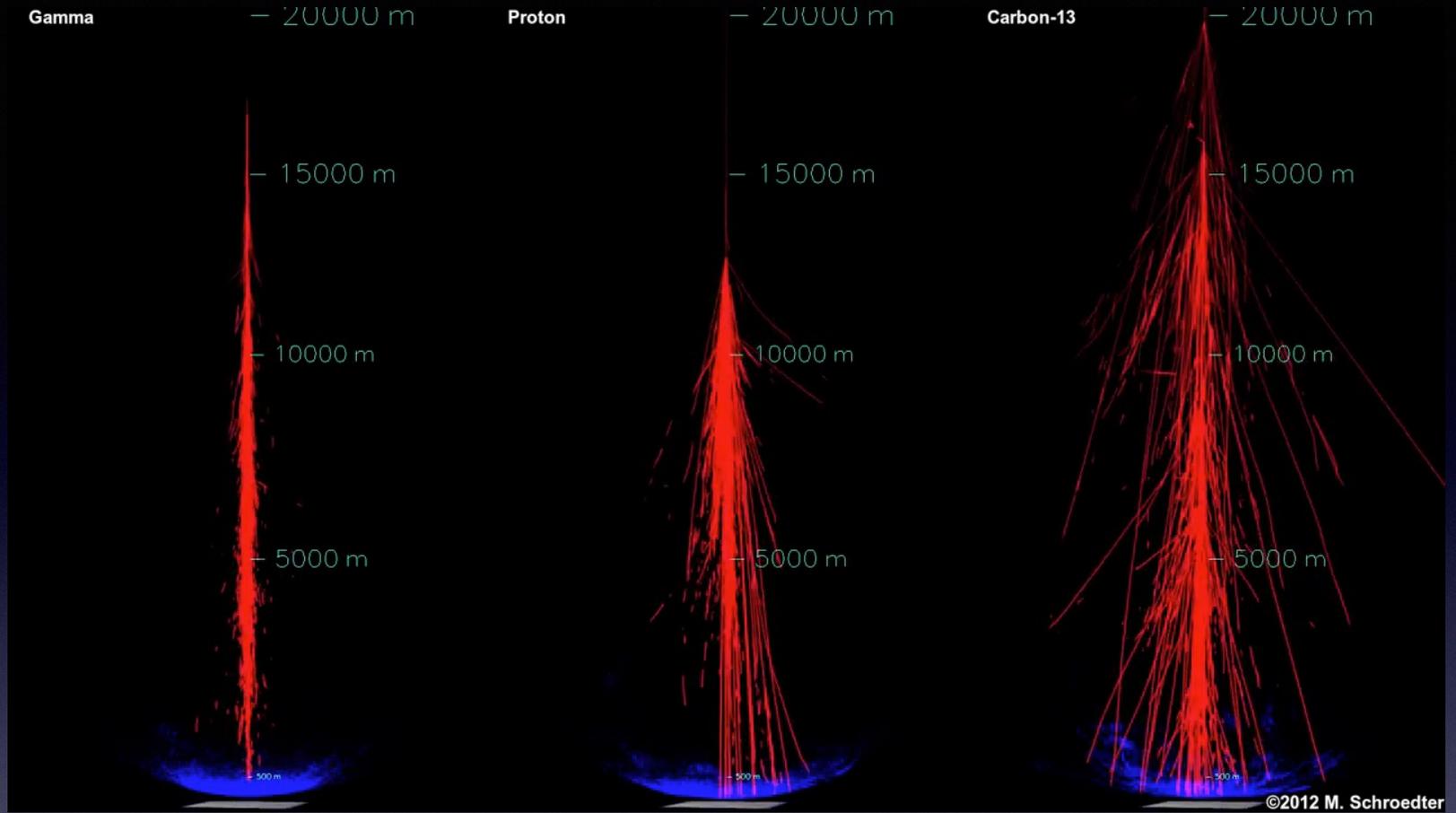


17 agosto 2017: coalescenza fra due Stelle di neutroni

E a energia piu' alta?

COSA SUCCEDE QUANDO UN FOTONE
O UNA PARTICELLA DI ALTA ENERGIA
COLPISCONO L'ATMOSFERA?





Intensità dell'immagine

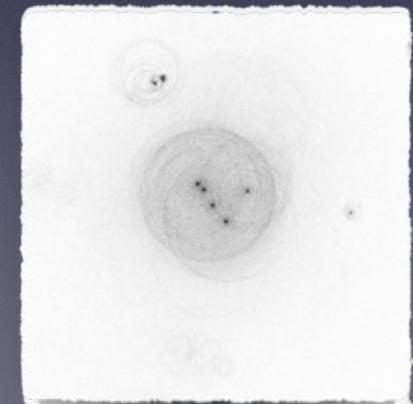
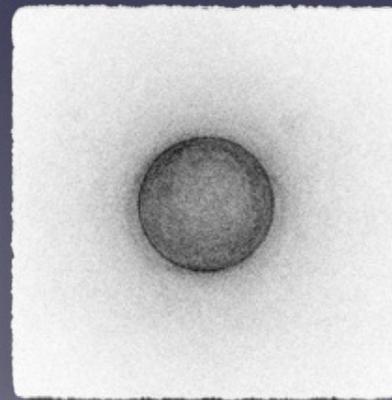
↳ energia

orientamento

↳ direzione

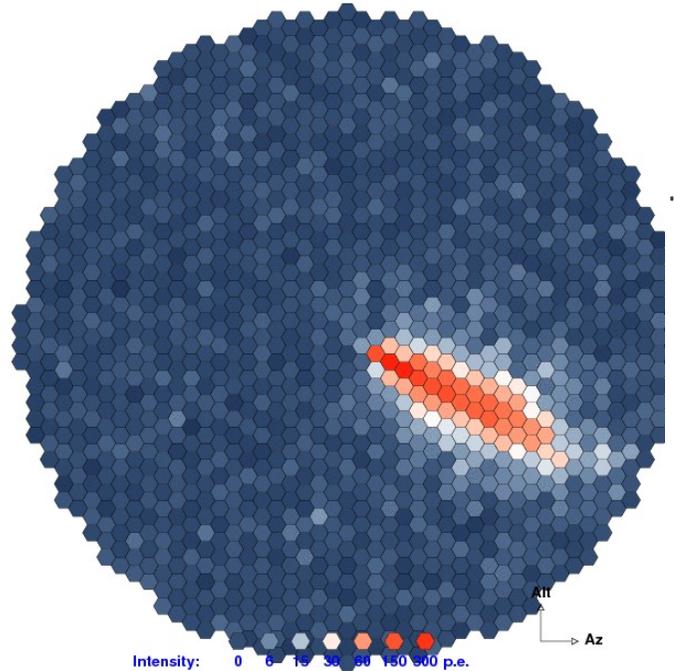
Forma dell'immagine

↳ tipo di particella

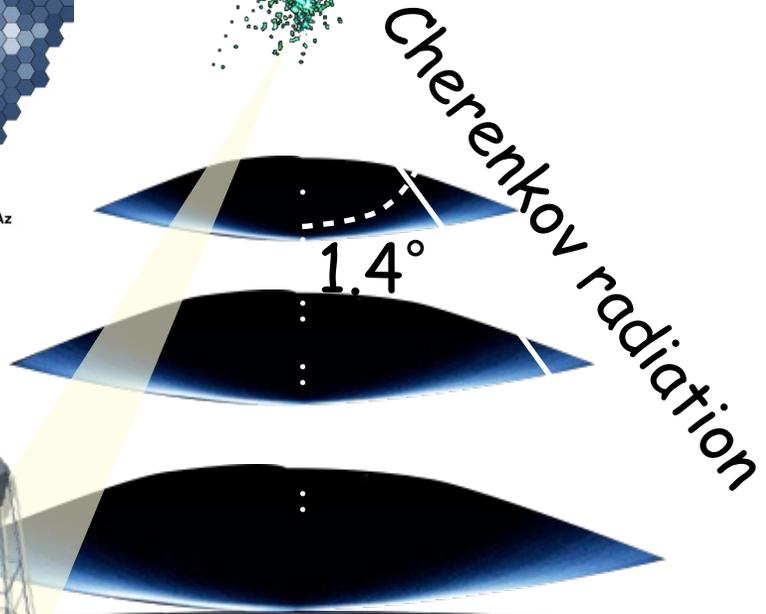
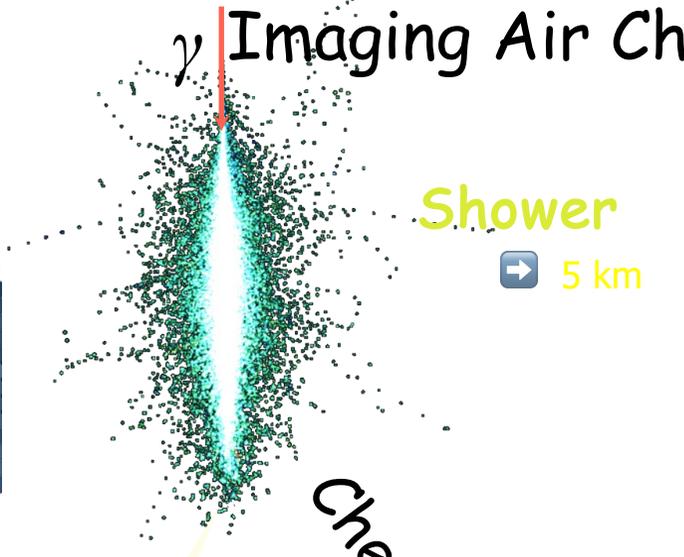


Time = 11.0 nanoseconds

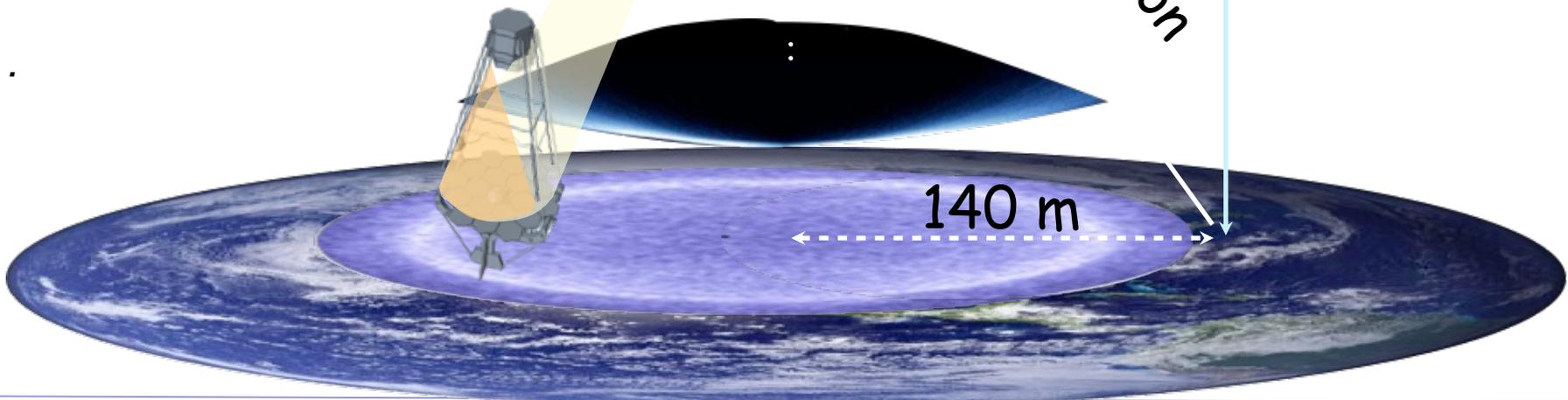
Imaging Air Cherenkov Technique



Primary: gamma of 50.000 TeV at 107 m distance

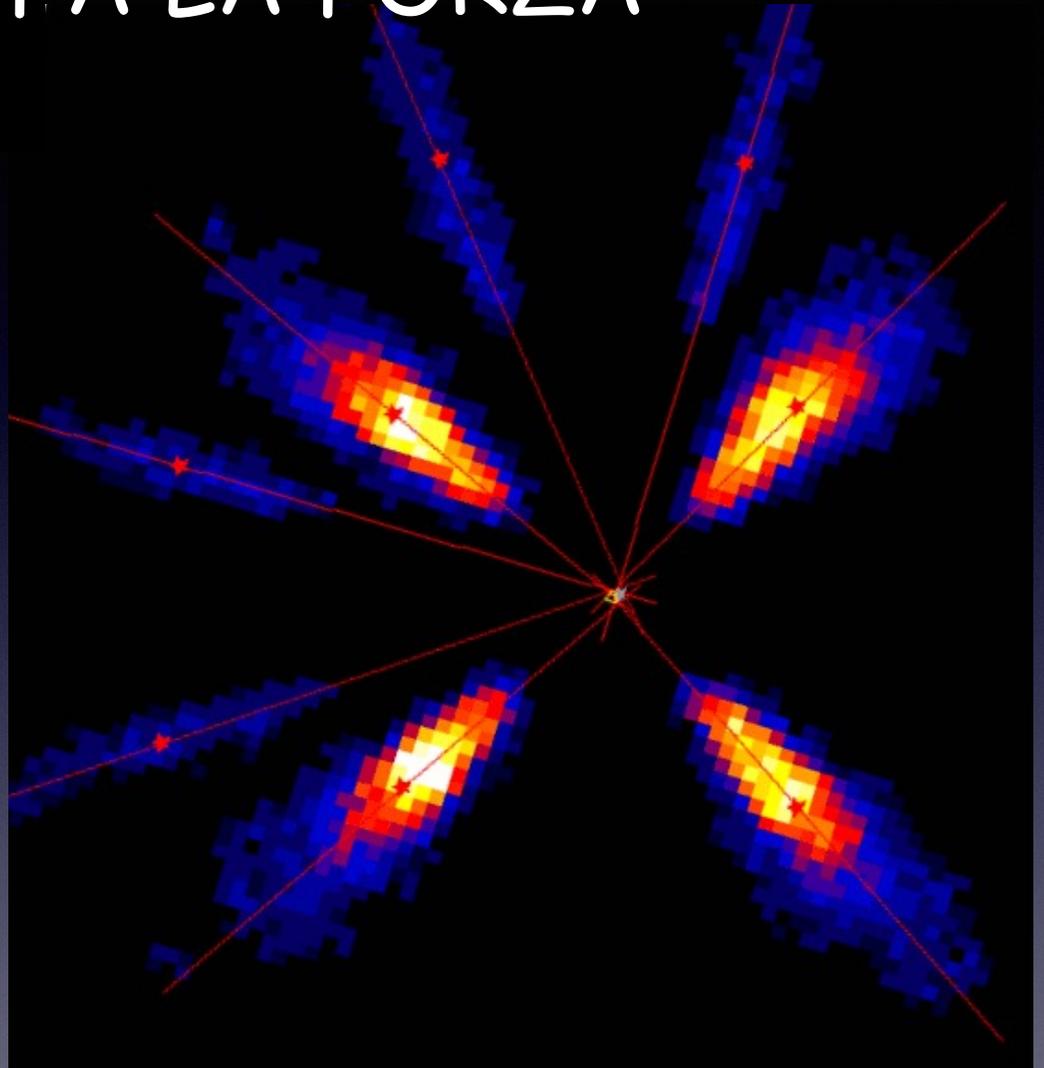


~10 km



L'UNIONE FA LA FORZA

INCROCIANDO LE
INFORMAZIONI
PRODOTTE DA
DIVERSI TELESCOPI
SI OTTENGONO
RISULTATI MIGLIORI



Simulation:
Superimposed images from
8 cameras

Una schiera di telescopi Cherenkov **COME ?**

- γ di bassa energia sono tanti ma producono segnale debole
→ ci vogliono telescopi molto grandi
- γ di alta energia sono pochi ma producono segnale forte
→ specchi piccoli sparsi su grande area

Pochi telescopi
grandi per le basse
energie

\sim km² schiera di
telescopi medi

7 km² schiera di
piccoli telescopi

Osservatori gamma operativi al suolo

MAGIC Canary Islands 2200 m asl
2 x 17m telescopes. Magic I in operation since
Oct 2003, Magic II first light shown at ICRC09

VERITAS Arizona, USA 1800 m asl
4 telescopes of 12m diameter
fully operational from fall 2007



MAGIC

HESS Namibia 1800 m asl
HESS I: 4 telescopes of 12m diameter
HESS II: 28 m diameter



VERITAS



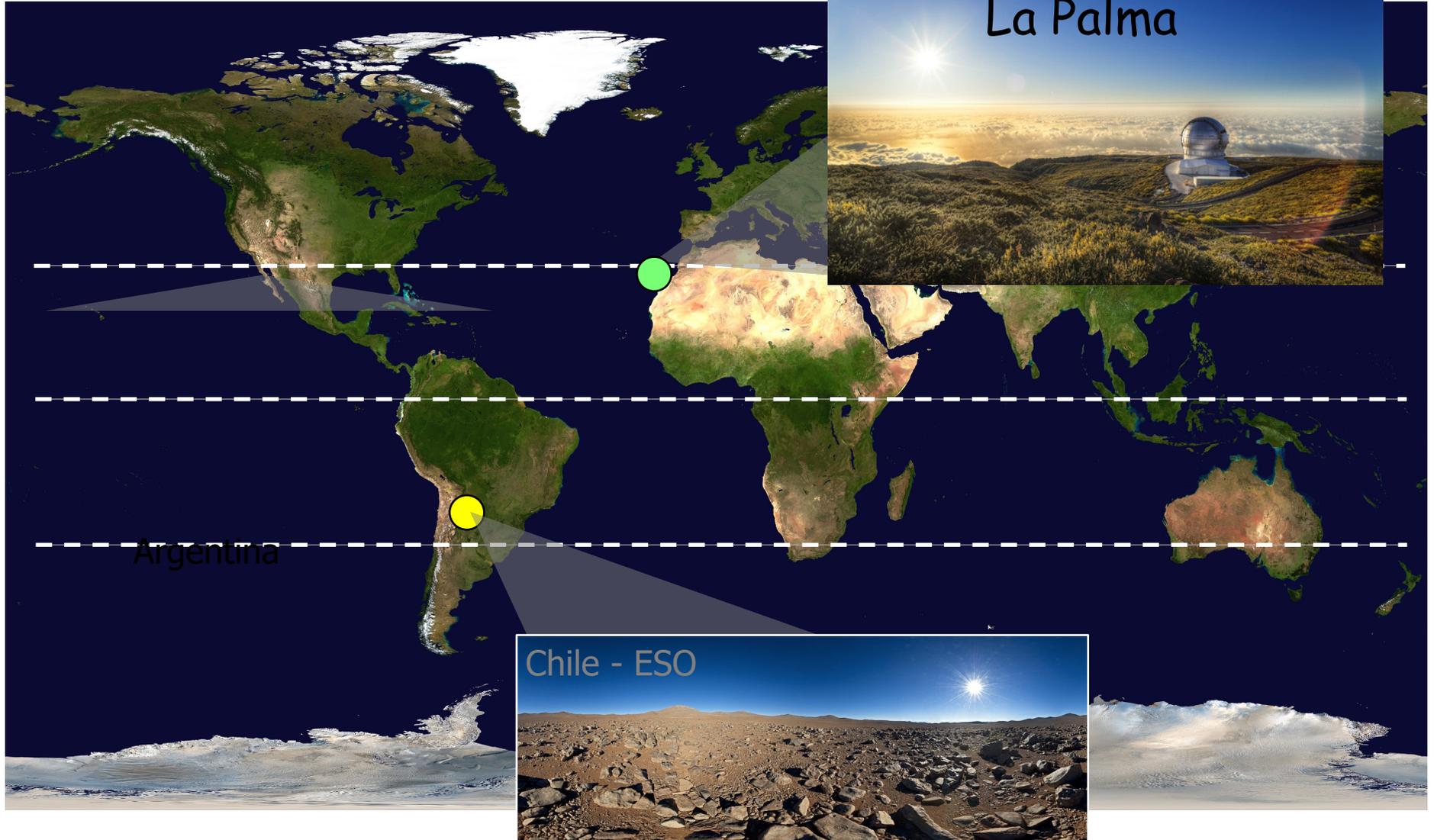
HESS

MAGIC

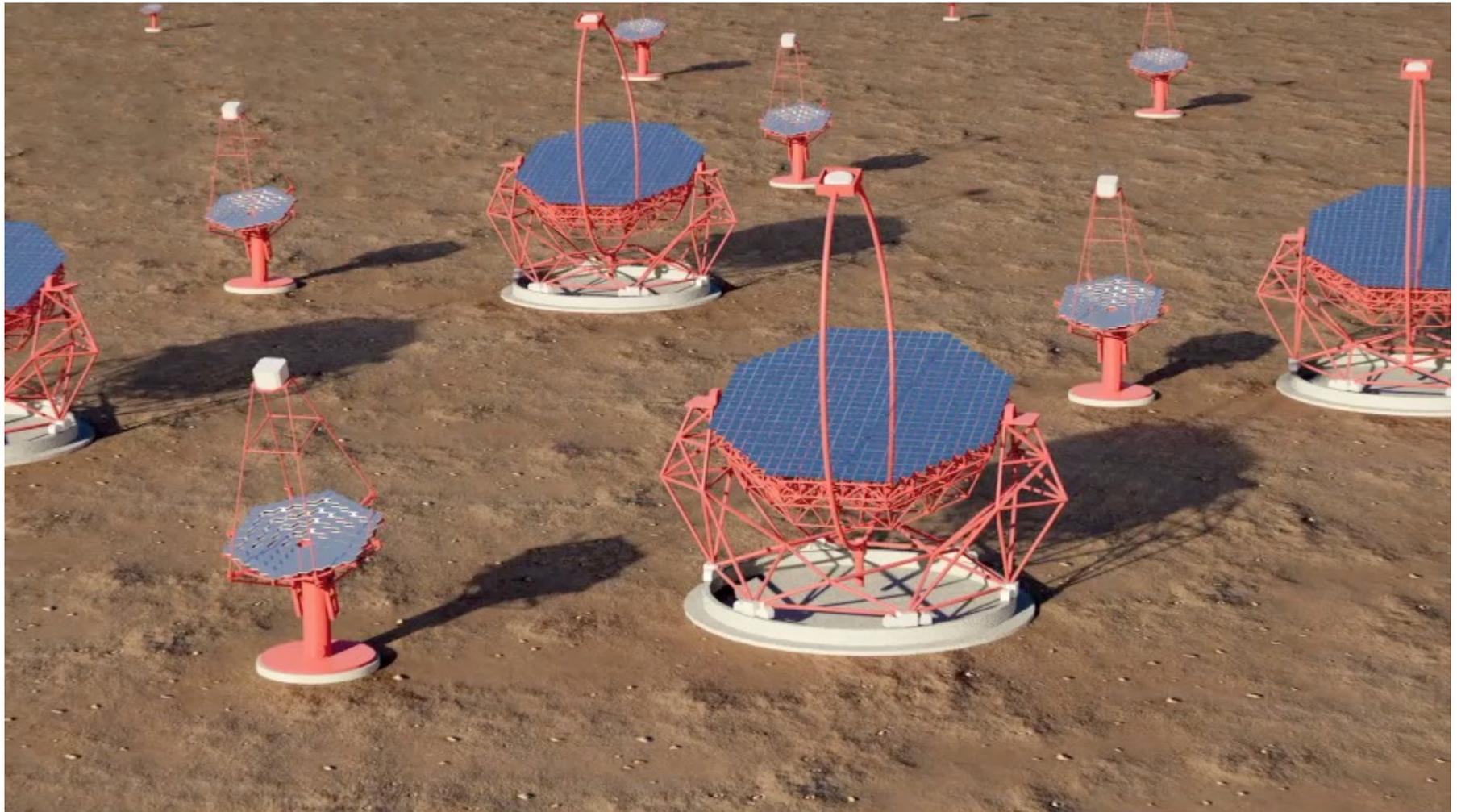
VERITAS

HESS

Dove?



Rendering della schiera di telescopi nel sito sud



Sorgente

Creazione e accelerazione

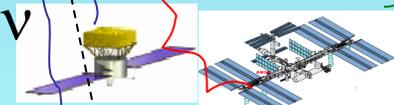
.. tanti diversi apparati , ma stesso scopo

Propagazione

Raggi cosmici

Modulazione

I raggi cosmici viaggiano per circa 10 milioni di anni nella nostra galassia prima di arrivare a noi



Esperimenti spaziali a circa 400 km di altezza

Rivelazione diretta

Atmosfera
40 km

Balloons ~ 40 km
~3 g/cm² residual atmosphere

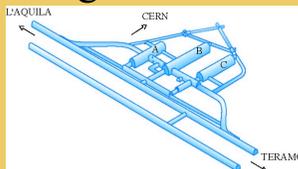
Rivelatori di sciami estesi

Esperimenti di Fisica delle Astroparticelle

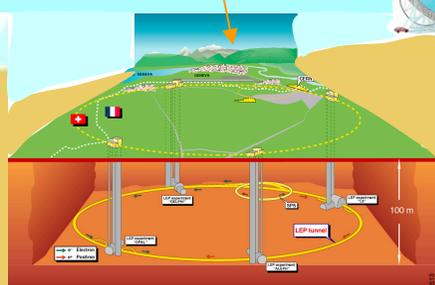
Rivelatori in alta montagna

Rivelatori Cherenkov

Acceleratori di particelle



Esperimenti sottoterra, sotto il ghiaccio, sotto l'acqua

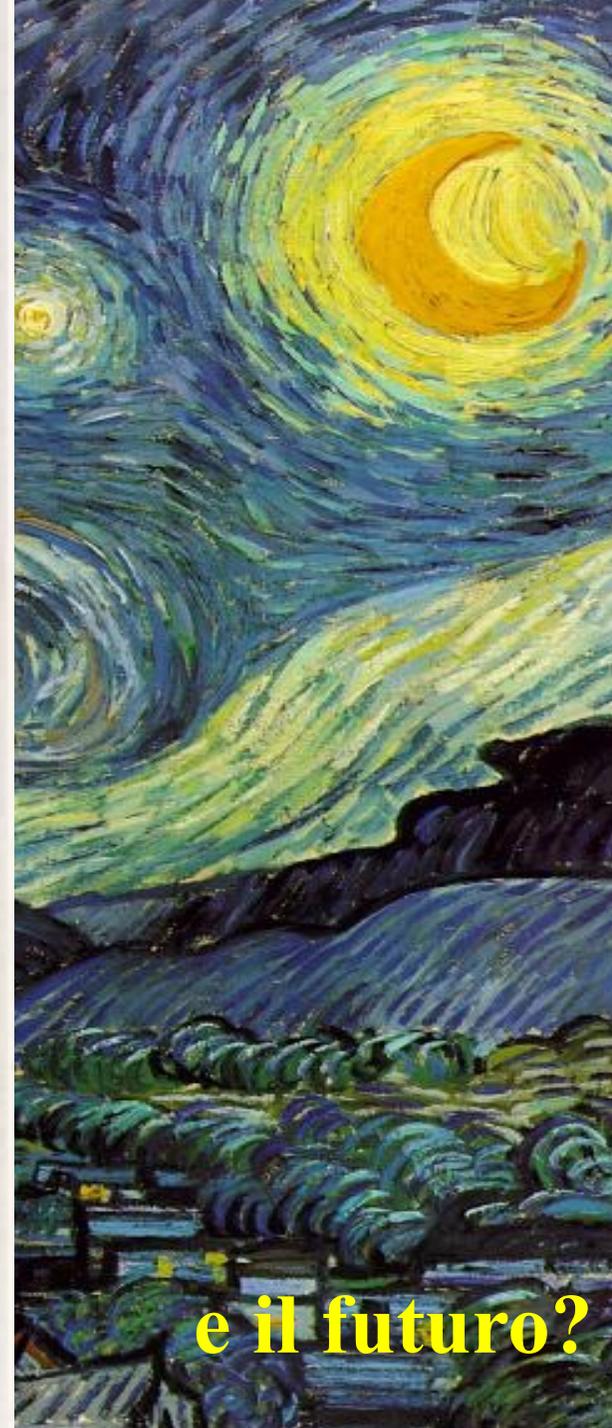
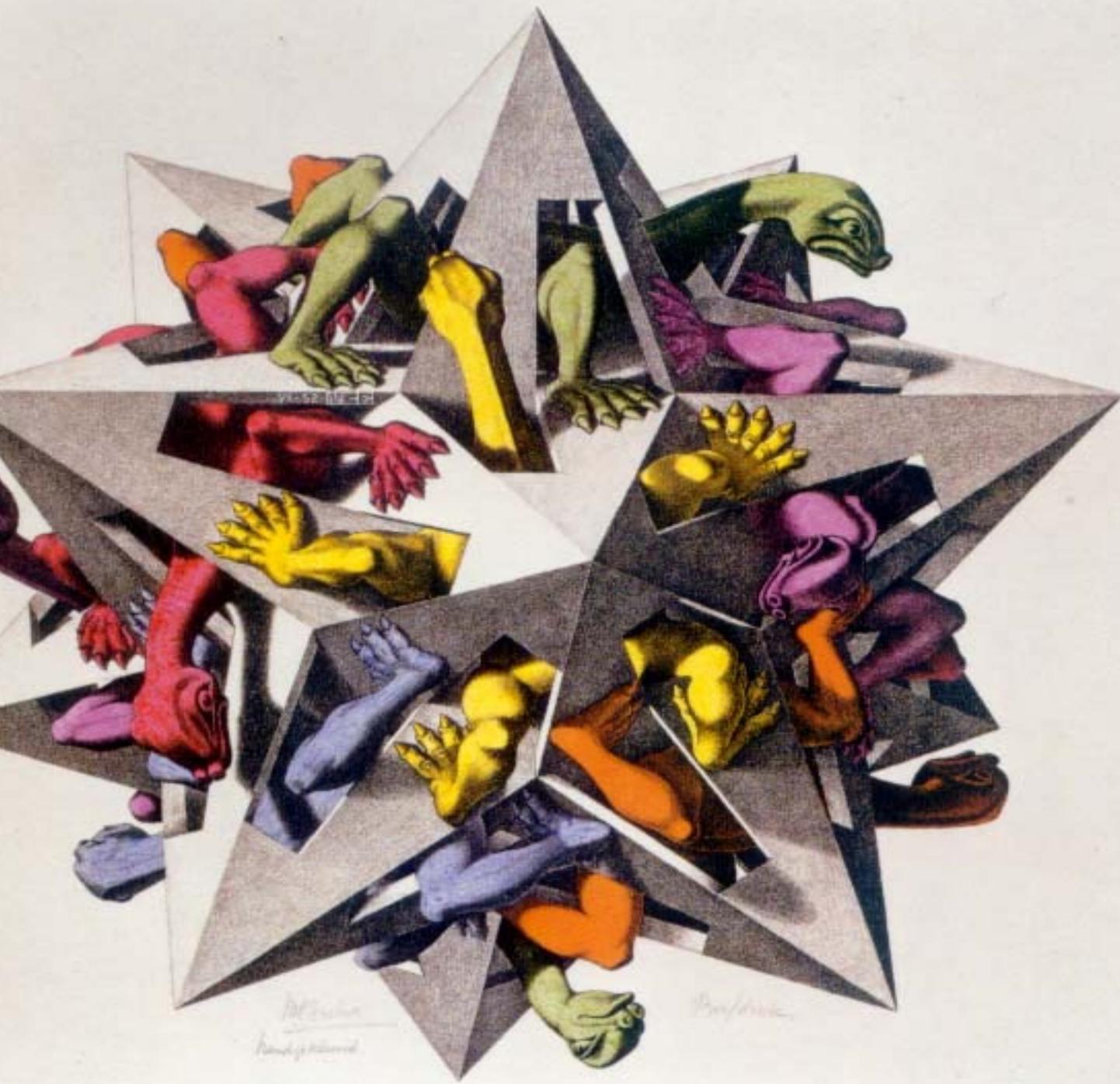




Nel corso della maggior parte della storia, il cosmo è stato visto come eternamente stabile



Durante il 20 esimo secolo la ricerca ci ha mostrato la vastità dell'Universo e ci ha rivelato violenti fenomeni cosmici e misteri



e il futuro?