

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



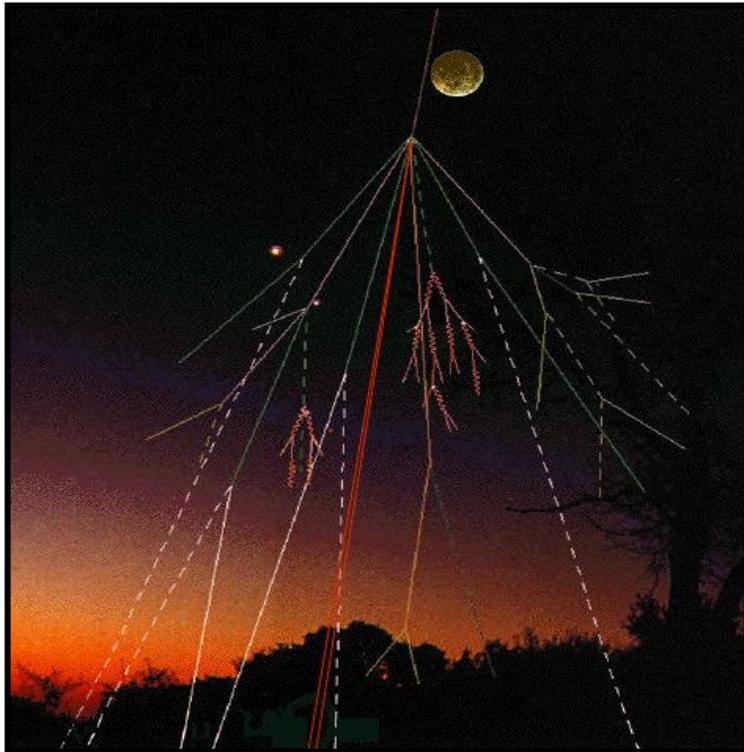
Cosa Riceviamo dal Cielo

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



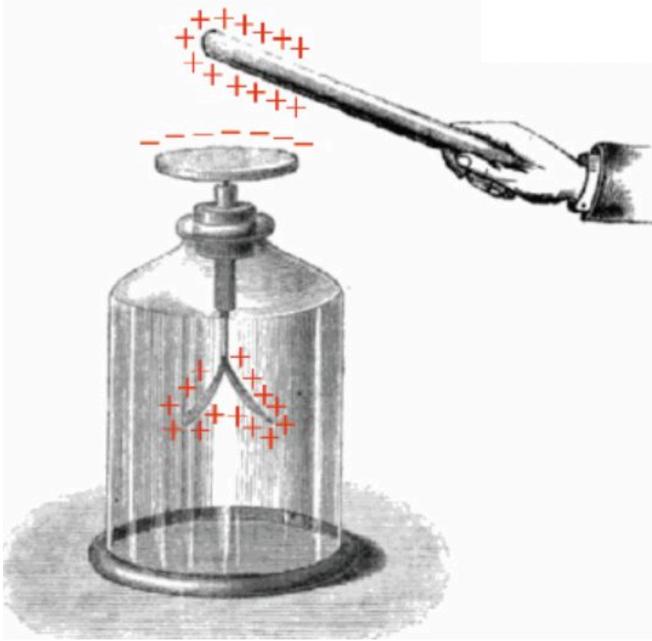
Apri la tua mano...

**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 ?

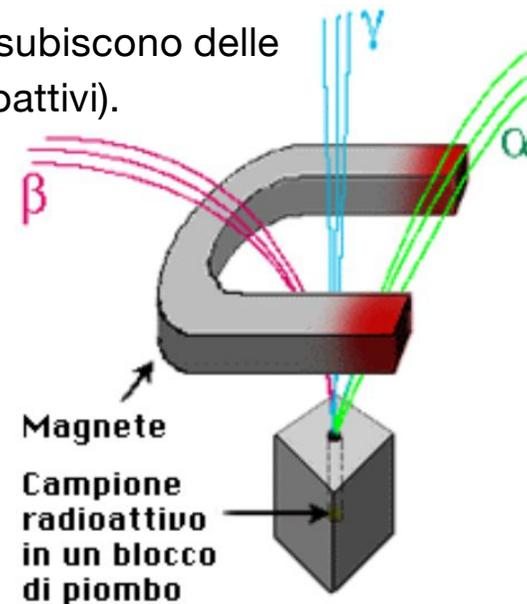


100 anni dopo: la radioattività

- 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**

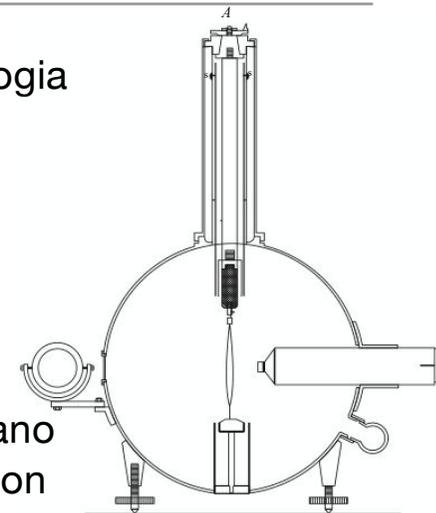
L'elettroscopio di Padre Wulf

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.**

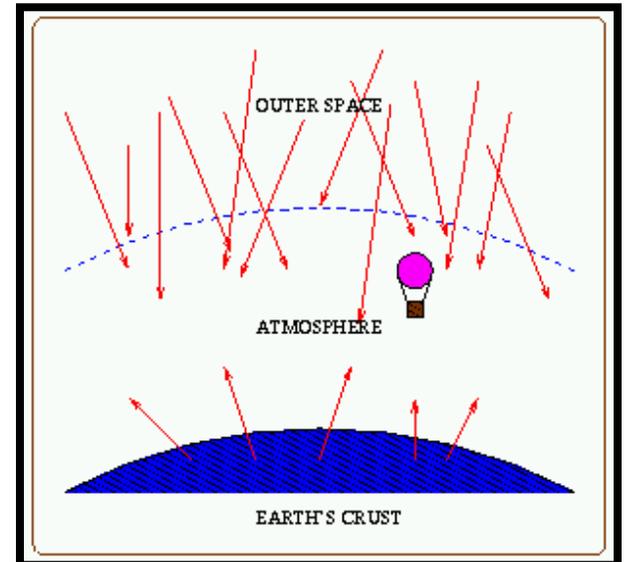


1912: Scoperta dei 'Raggi Cosmici'



- 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 perché 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

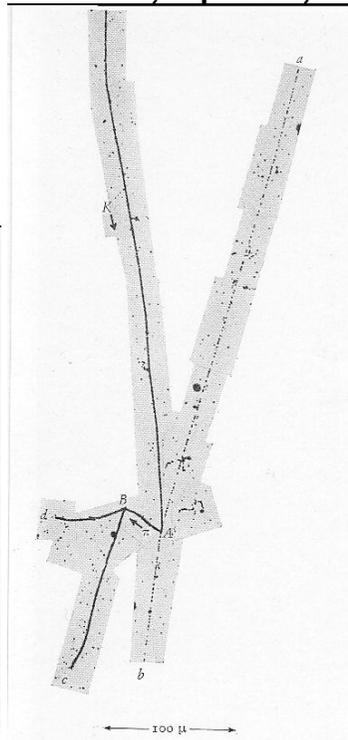
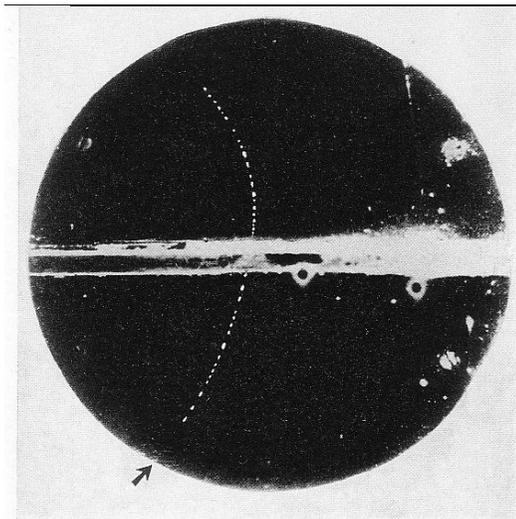
- Particelle cariche : protoni, antiprotoni, elettroni, positroni, nuclei , antinuclei (?), Altro (?)
- Risentono dei campi elettrici e magnetici
- Portano da distanze differenti un campione di materiale galattico ed extragalattico ed accelerato ad energie molto elevate.

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

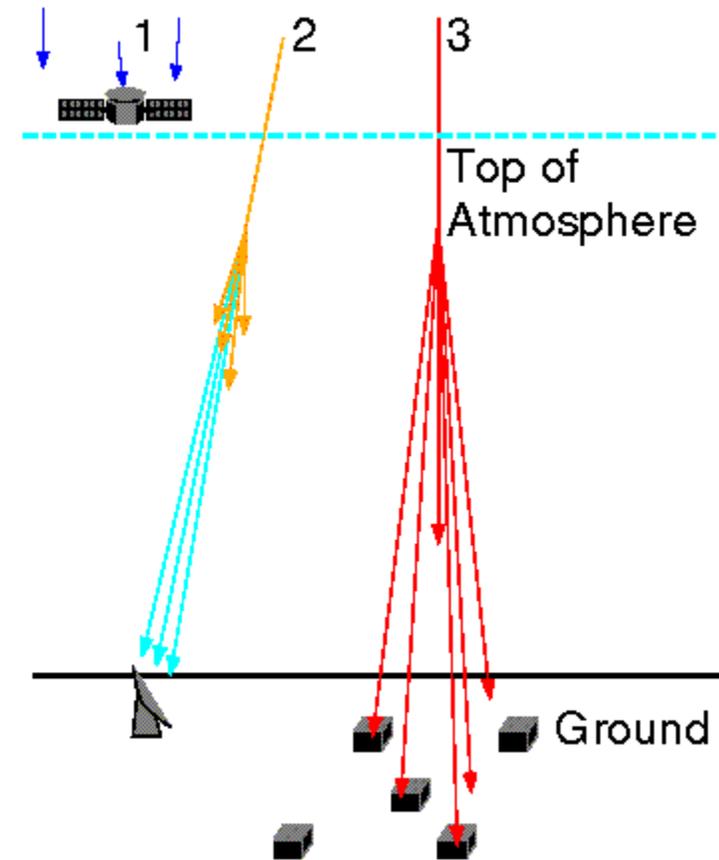
Anni 1930-1950:

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

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

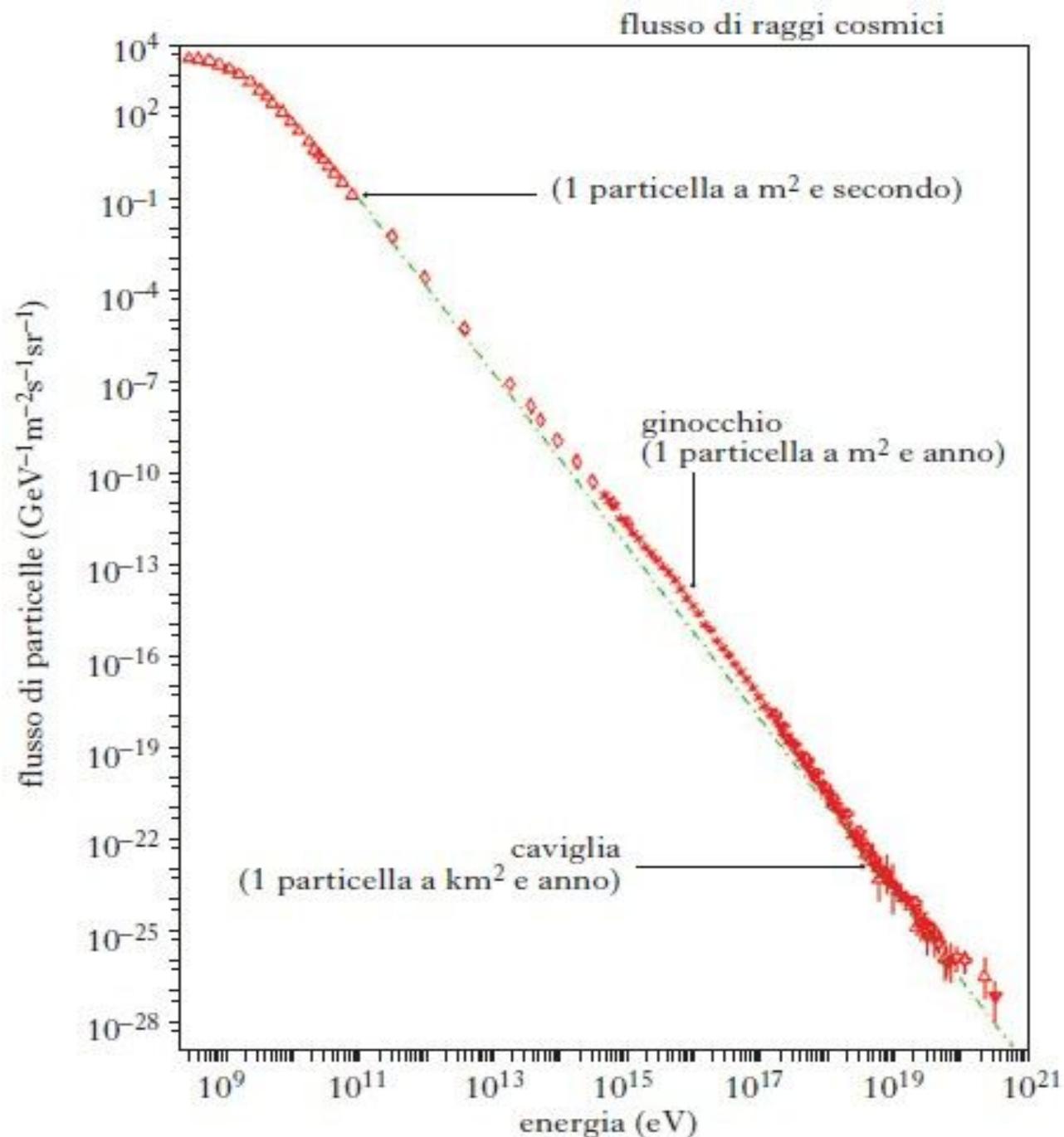


Attualmente: principalmente sonde per lo studio dell'astrofisica

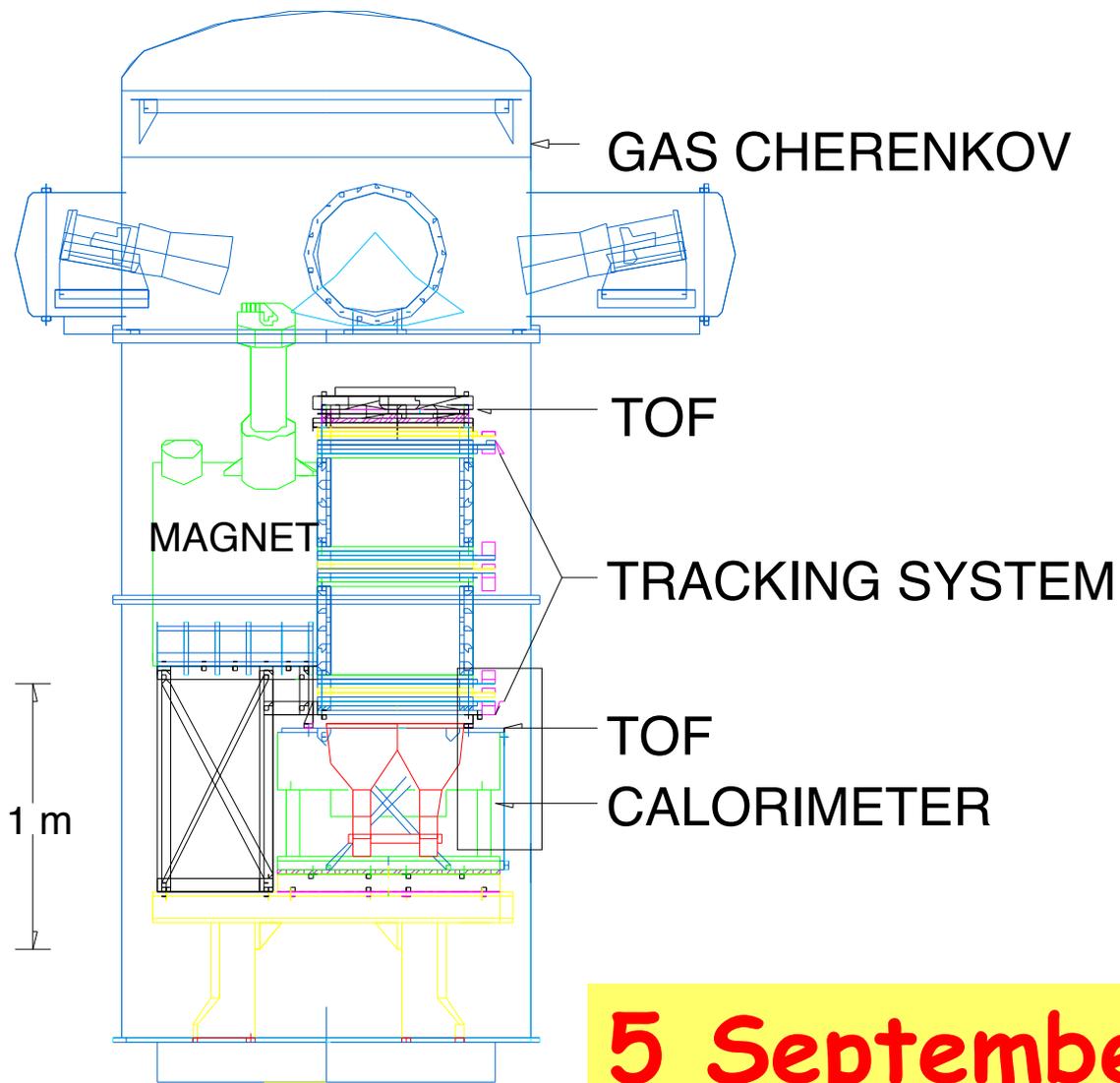


Lo spettro dei RAGGI COSMICI

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

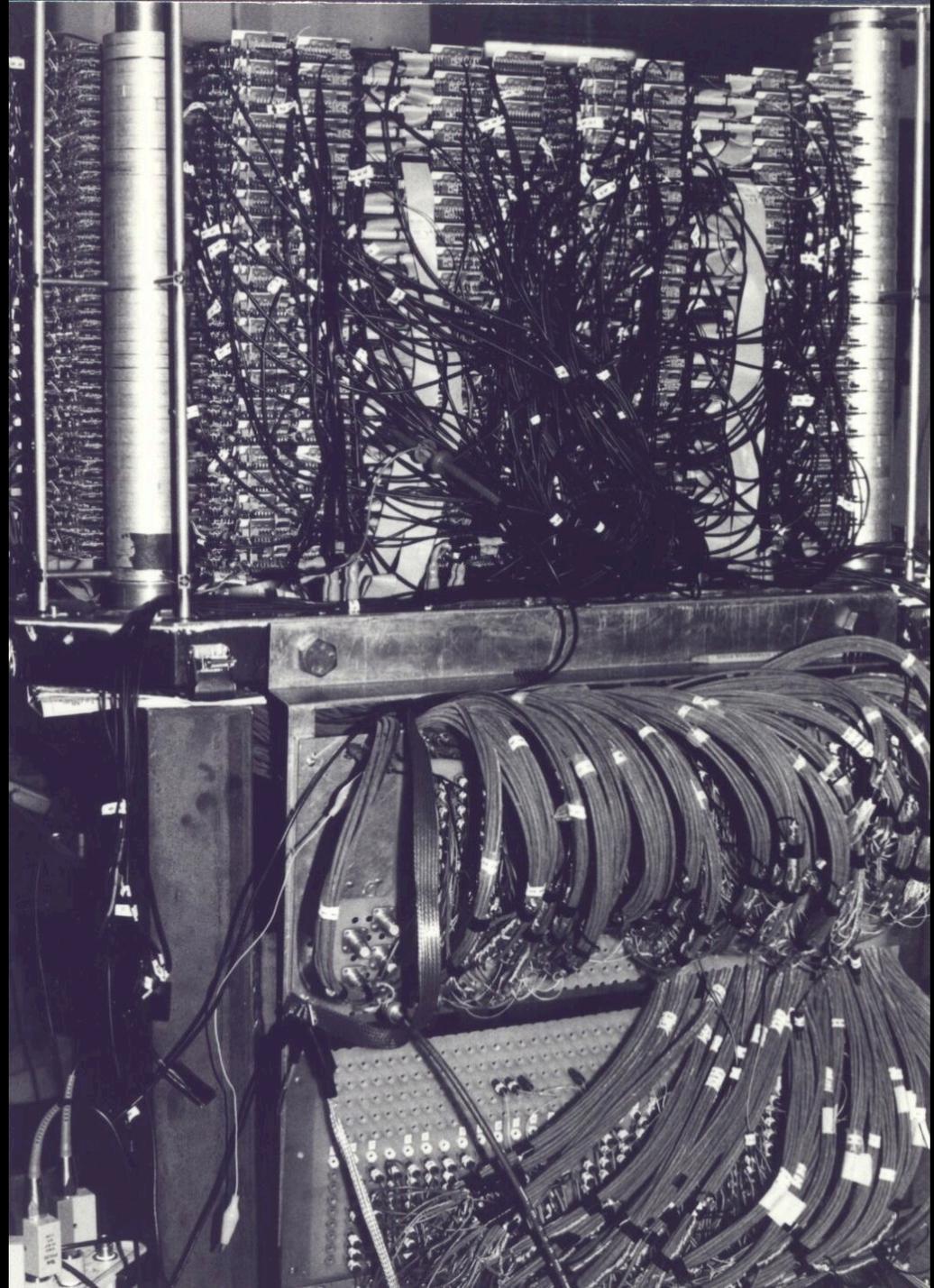


MASS Matter Antimatter Space Spectrometer



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

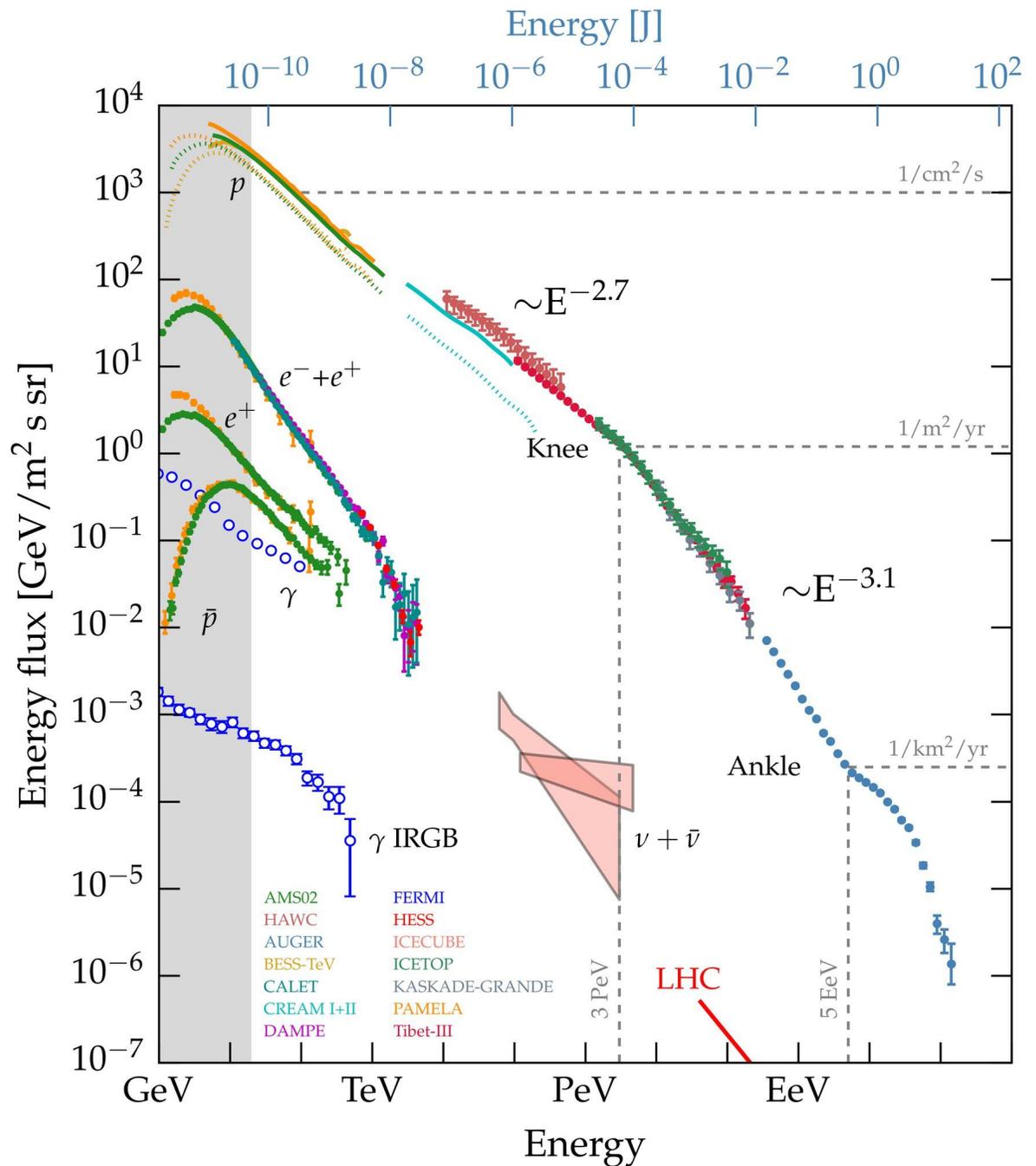
PAMELA

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:

$$E = h \nu$$

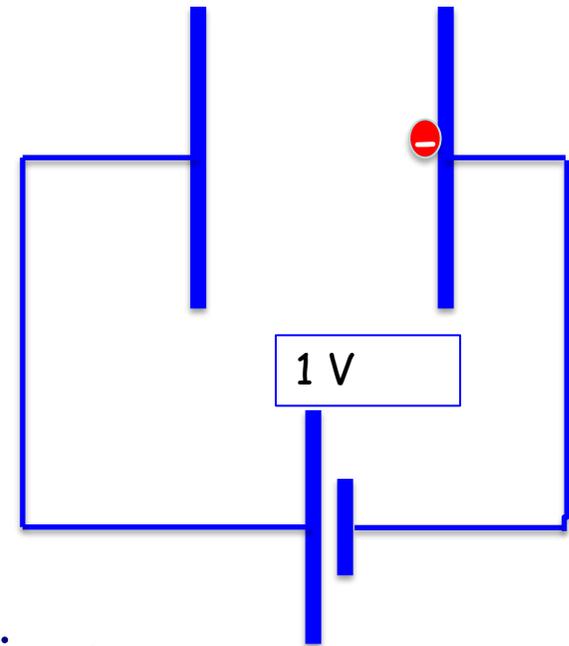
E = energia
 ν = frequenza

$$c = \lambda \nu$$

c = velocità della luce
 λ = lunghezza d'onda

Una utile unità di misura: elettronvolt (eV)

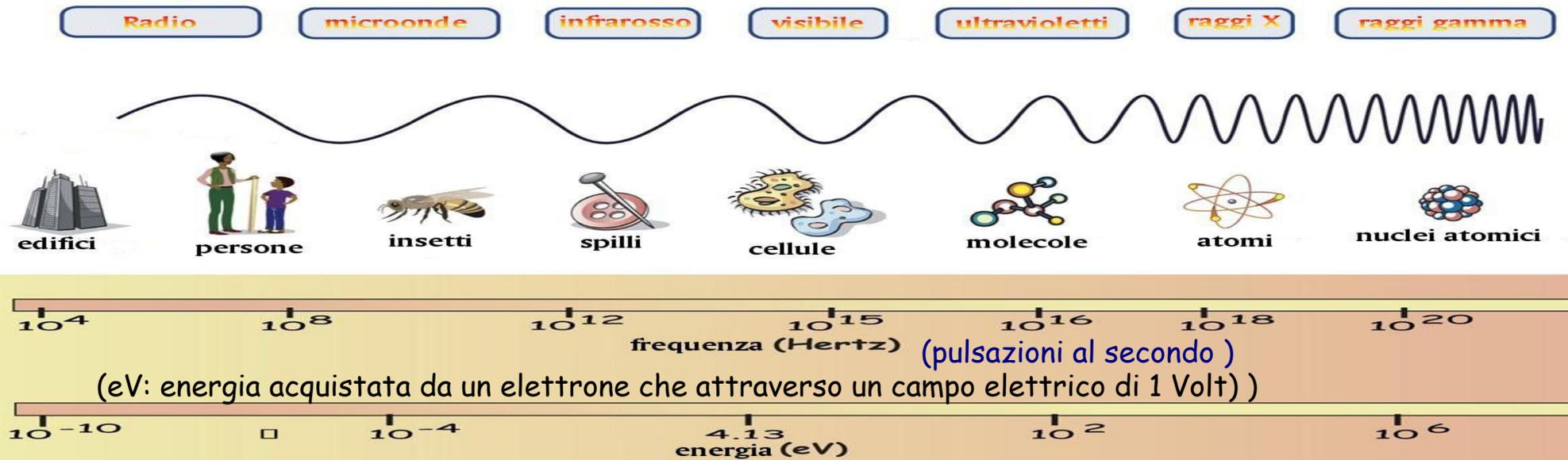
- L'energia delle particelle si misura in eV
 - Energia acquisita da un elettrone muovendosi in una differenza di potenziale di 1 Volt



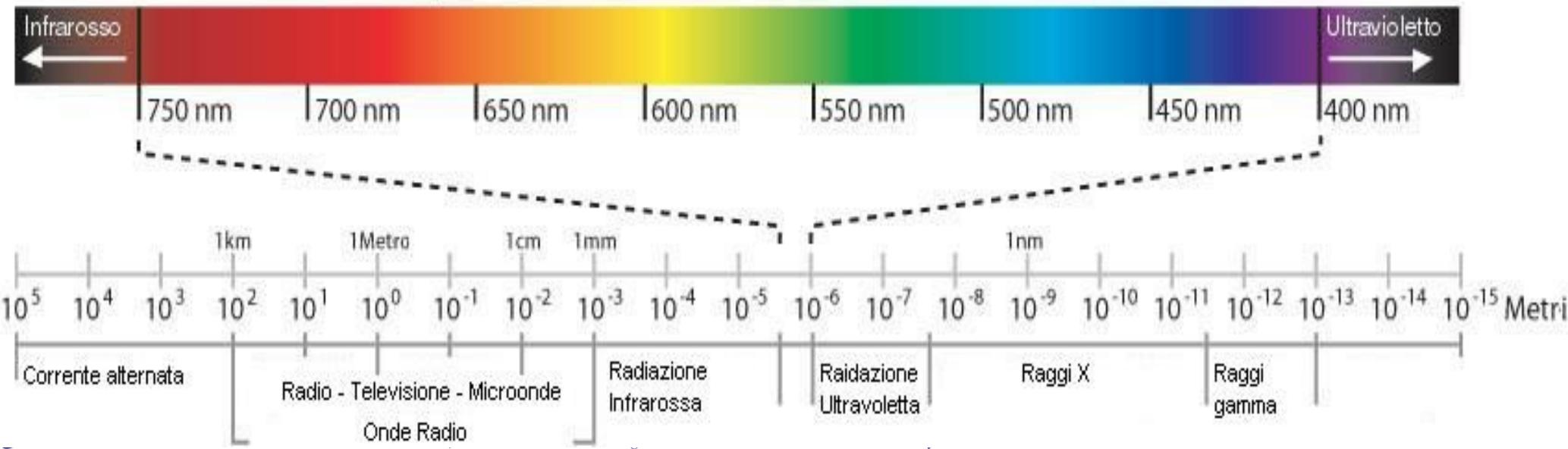
- La luce visibile ha un energia di 1,6 / 3,4 eV
- 1 MeV (1.602×10^{-13} J): 2 volte l'energia a riposo dell'elettrone
- 200 MeV: Energia media della fissione di un nucleo di U-235
- 125.1 ± 0.2 GeV: La massa del bosone di Higgs
- 1 TeV: Mille miliardi di eV, l'energia cinetica di una zanzara in volo

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

Radiazione elettromagnetica



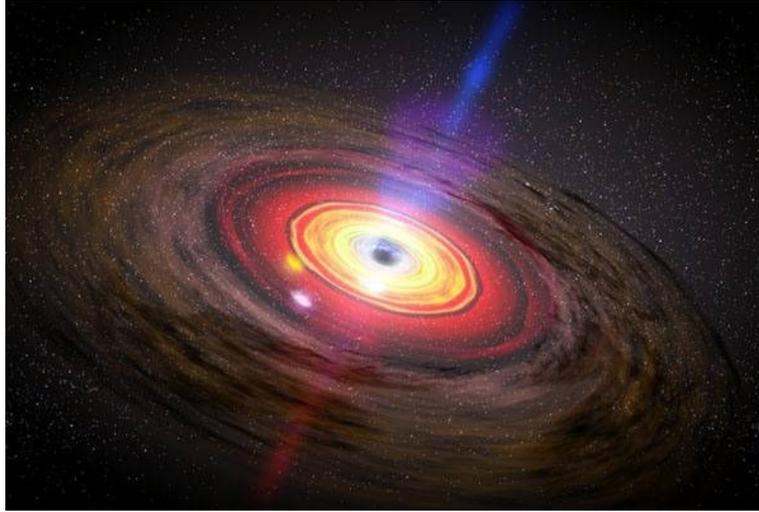
Spettro di luce visibile all'occhio umano



ma esistono i raggi gamma ?

e come vengono prodotti ?

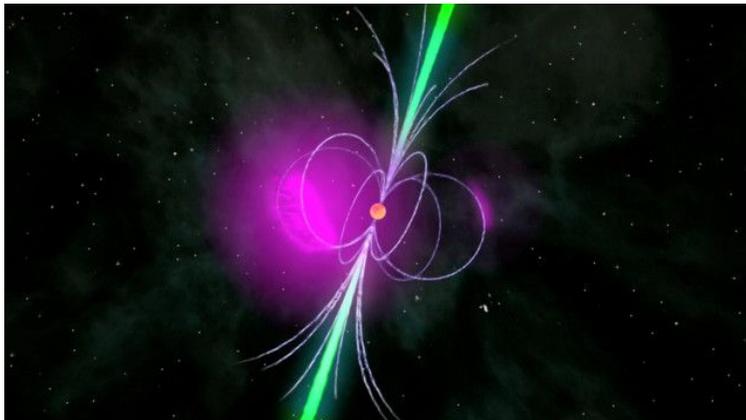
Chi emette raggi gamma?



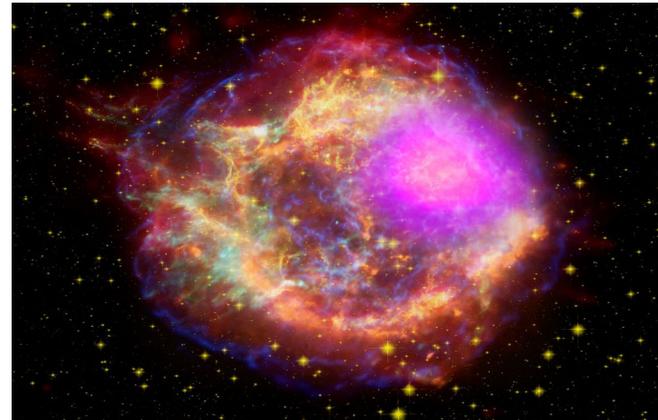
Nuclei Galattici Attivi (AGN)



Gamma Ray Burst (GRB)



Pulsar



Resti di supernova

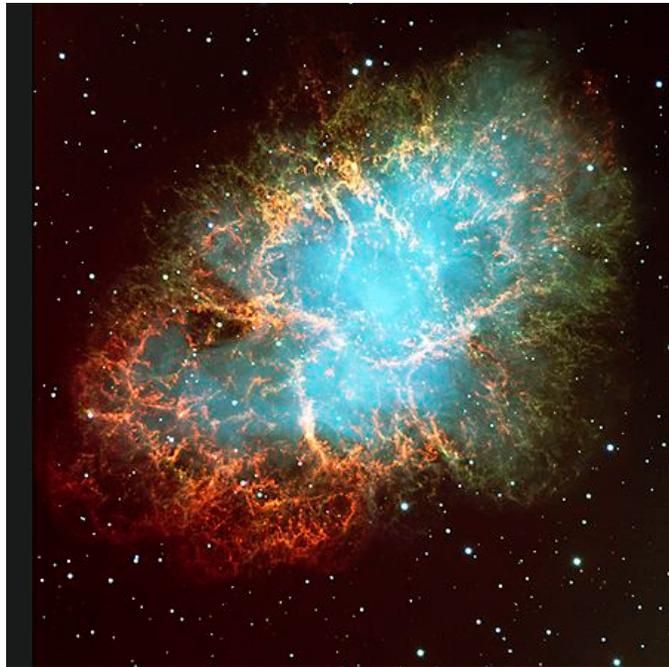
Esplosione di supernova



Esplosione di SuperNova

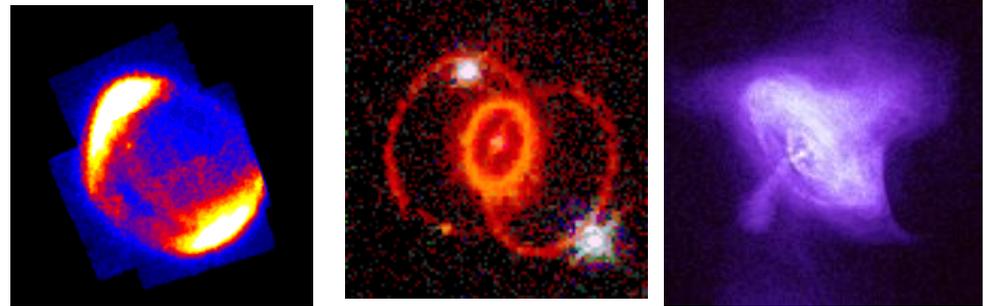
Una SuperNova indica la fine esplosiva della vita di una stella massiva (>10 masse solari); nella nostra galassia circa una SN ogni 50 anni

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



NEBULOSA DEL GRANCHIO

Astronomi cinesi ne registrarono l'esplosione nel 1054.



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)

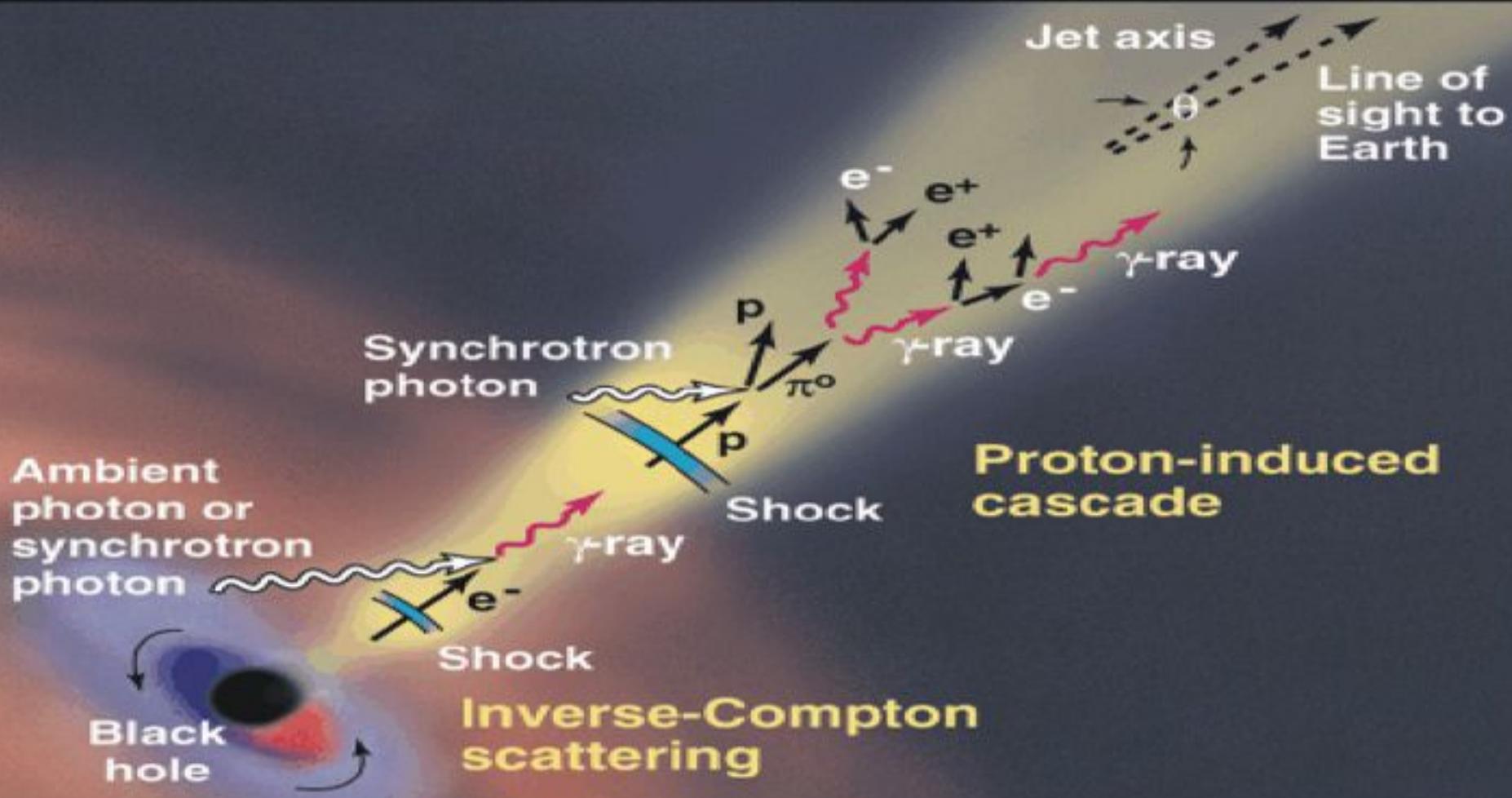


La CRAB Pulsar



un buco nero rotante in un disco di accrescimento





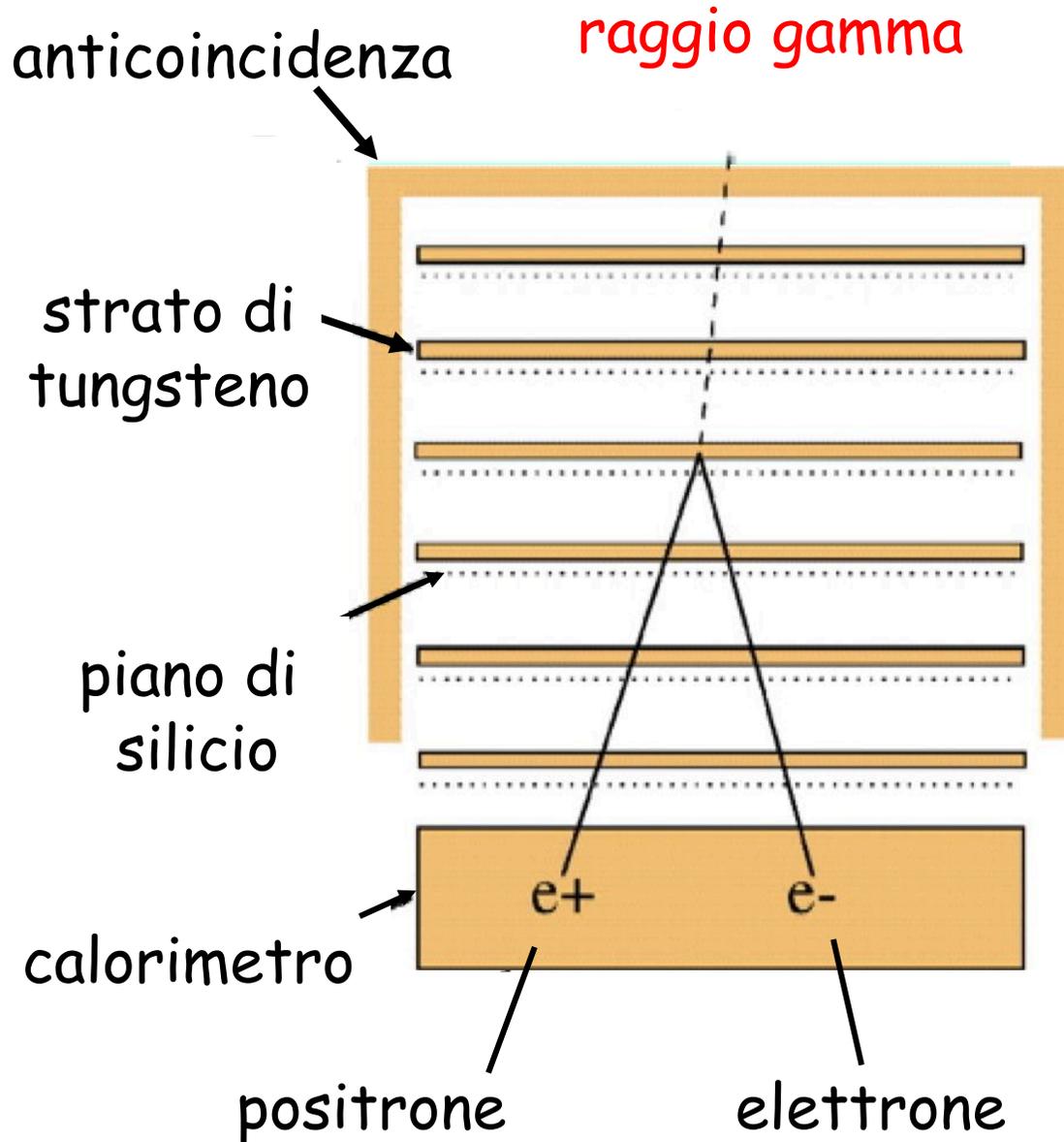
Modelli per l'emissione di alta energia da buchi neri al centro di galassie attive



Lampi di raggi Gamma

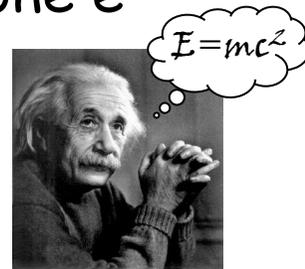


Rivelare i raggi gamma

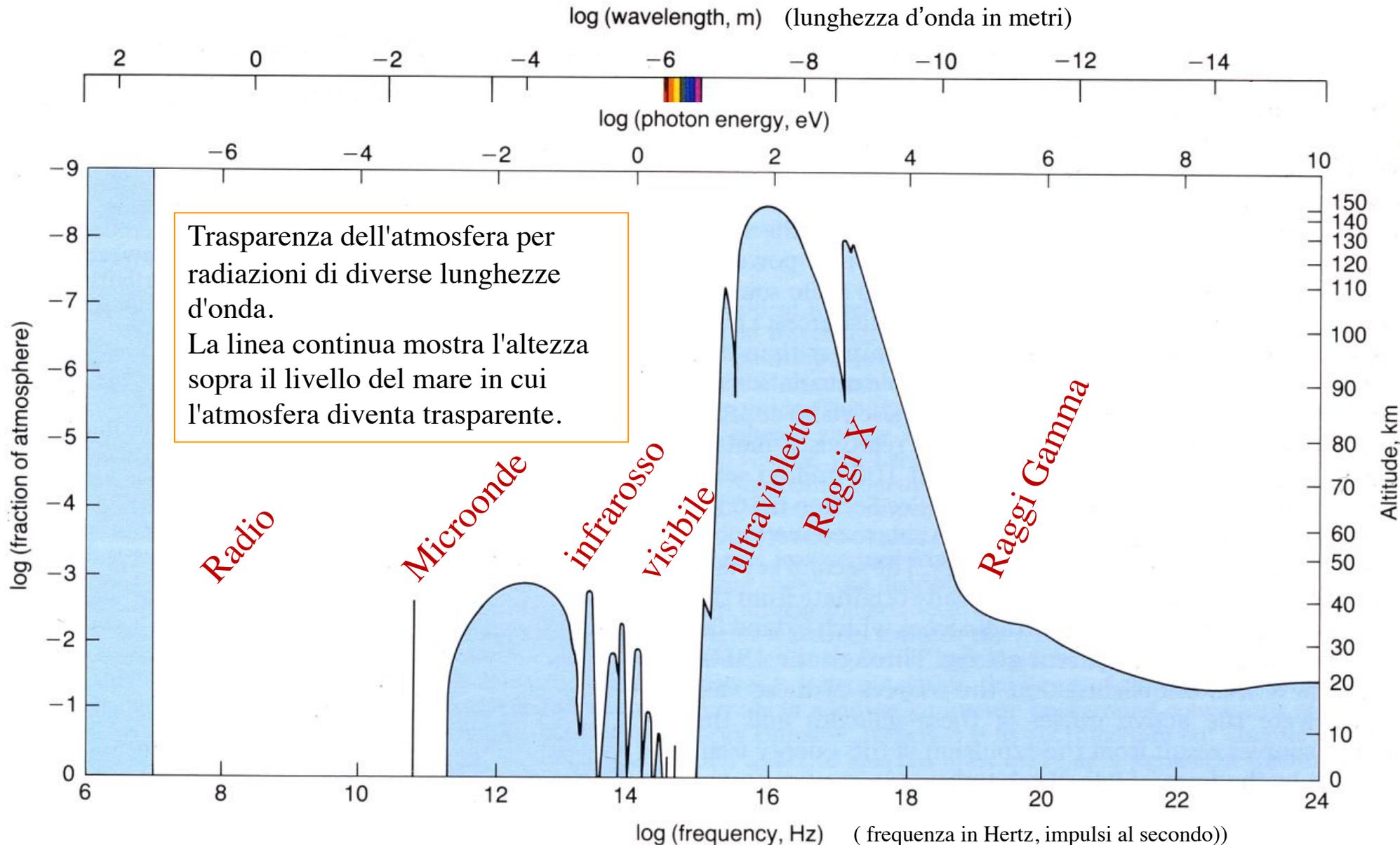


La produzione di coppia elettrone - positrone avviene attraverso la trasformazione dell'energia elettromagnetica associata al fotone (il raggio gamma) quando interagisce con il campo elettromagnetico del nucleo pesante (tungsteno, piombo). Questo è possibile grazie a:

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

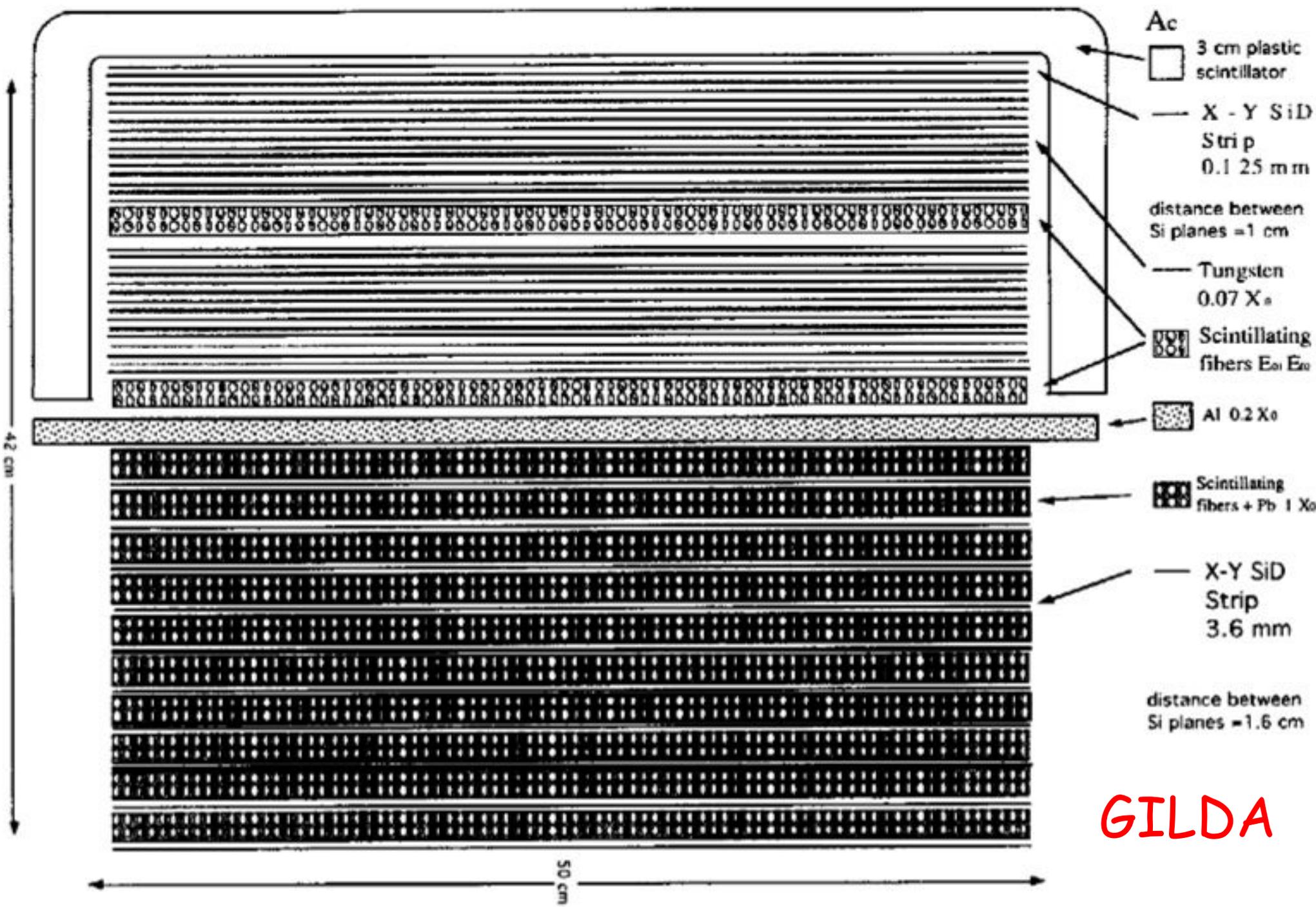


Trasparenza dell'atmosfera



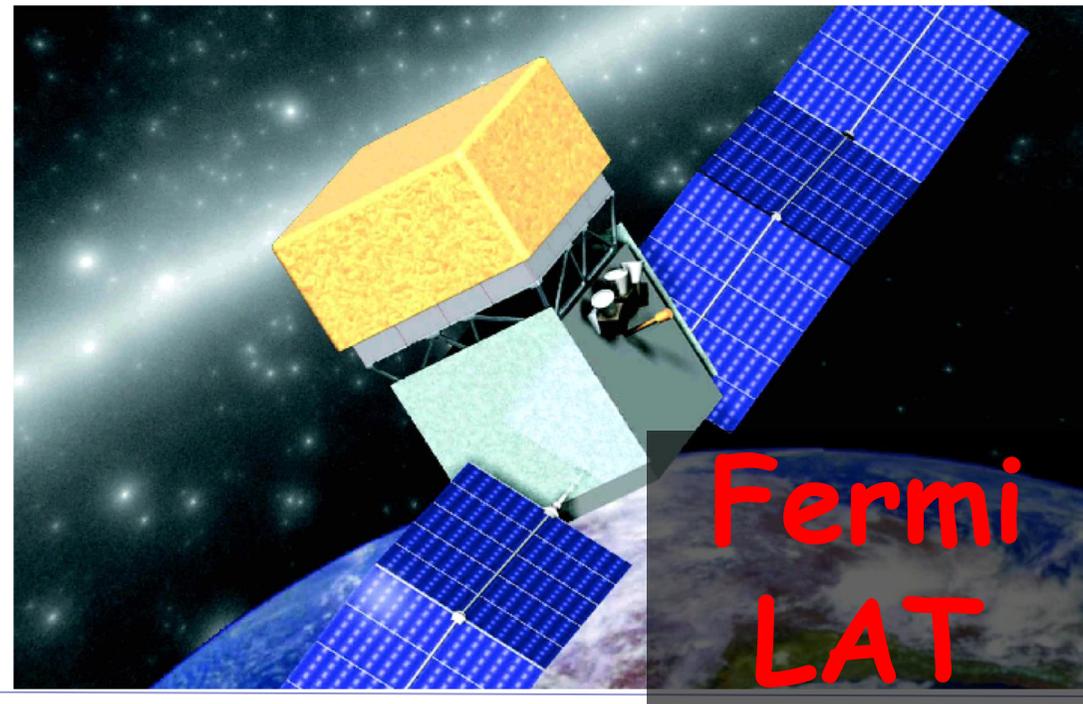
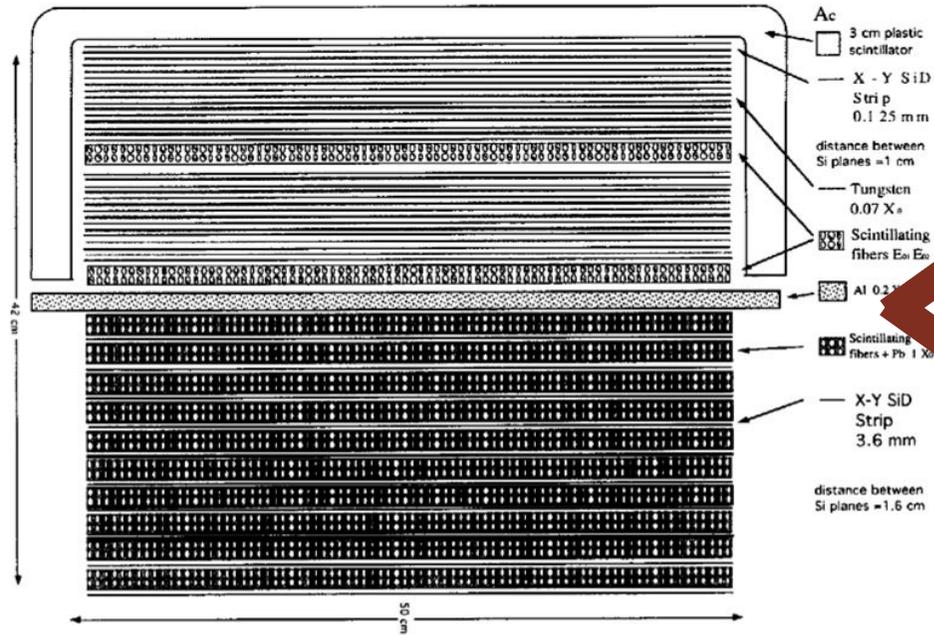
Onde Radio, raggi di sole, fotoni Gamma Come si rivelano?



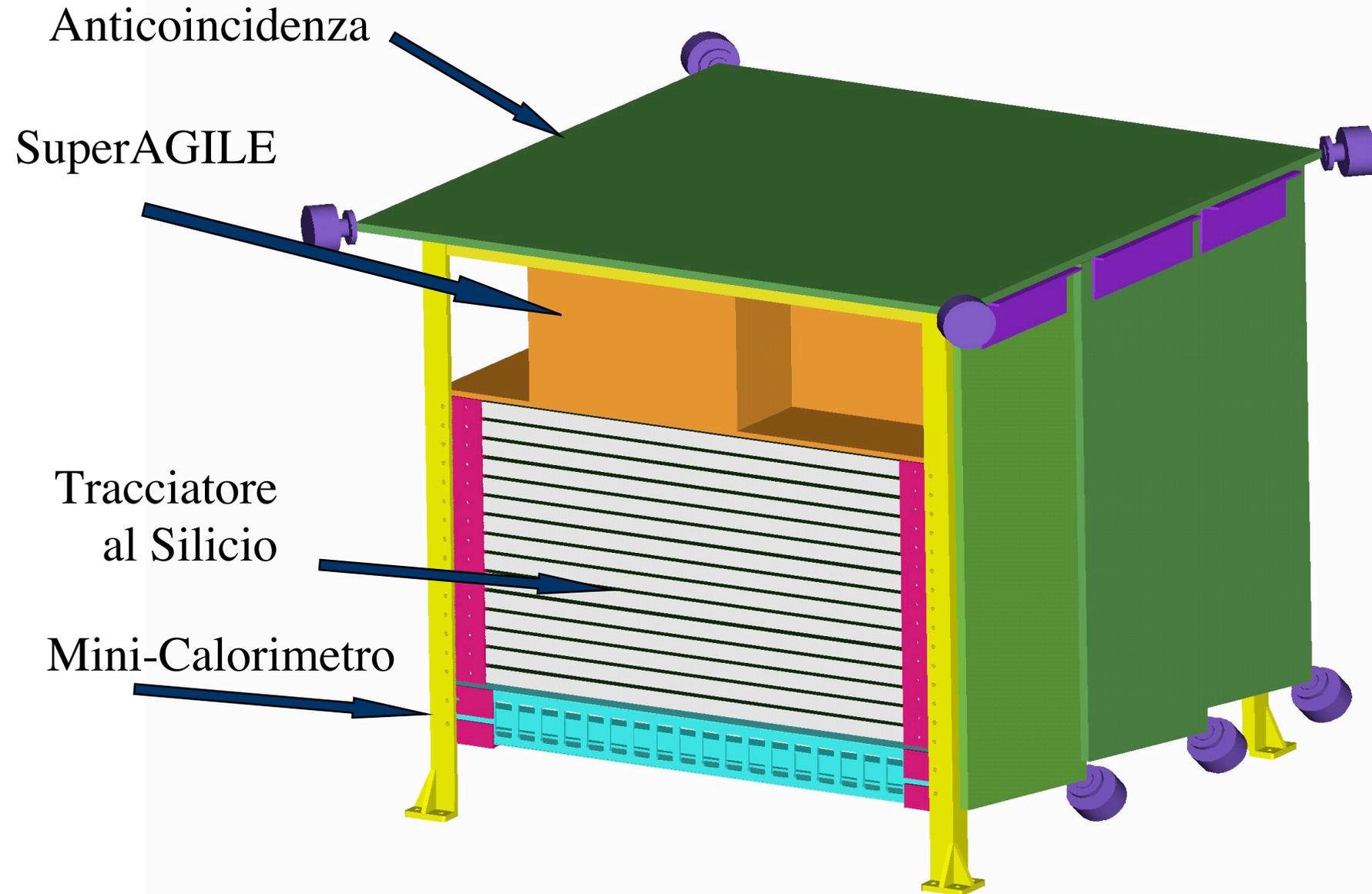


GILDA

GILDA



La tecnologia di AGILE



AGILE : Istituti e Industrie coinvolte



INAF



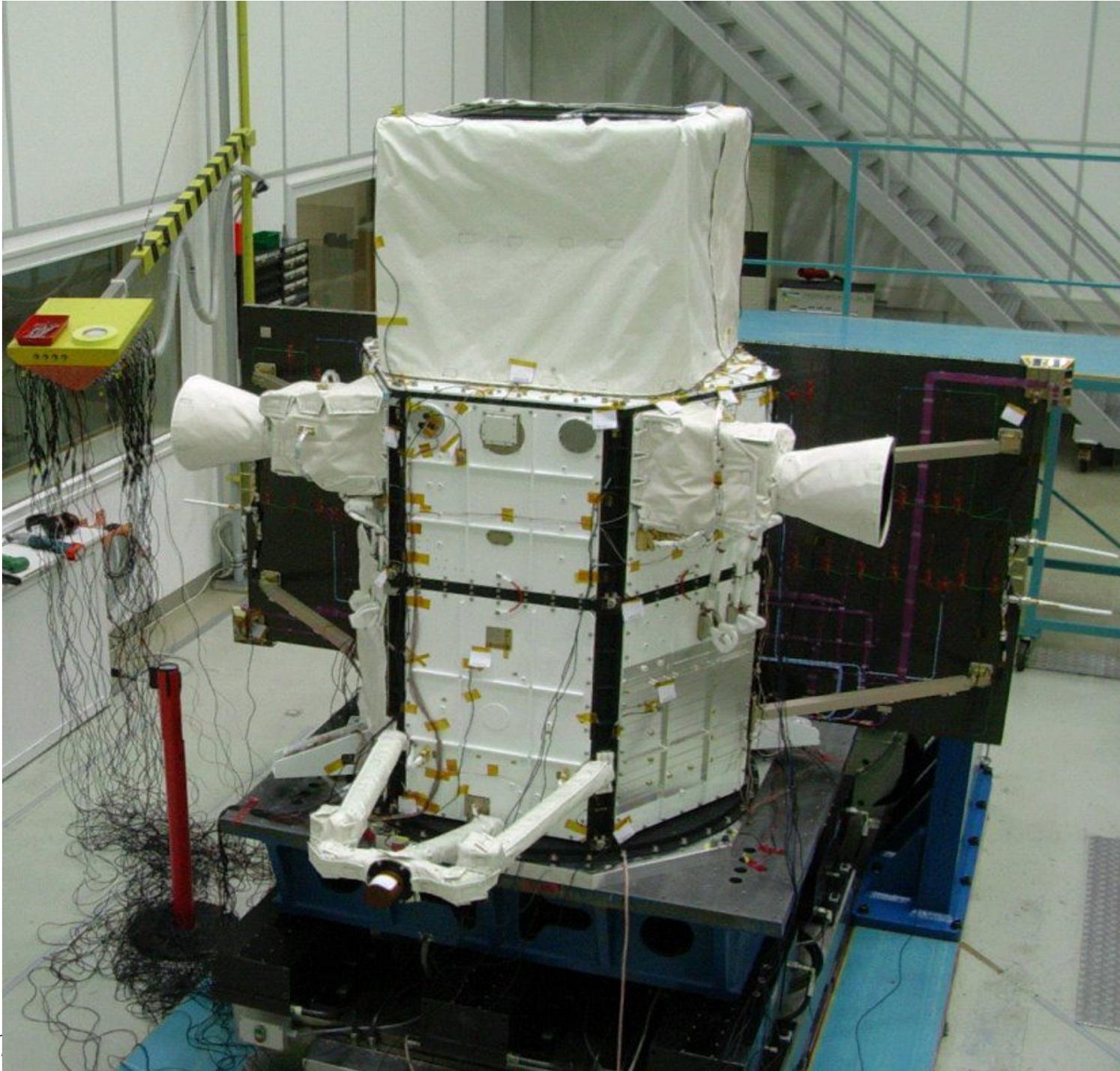
Carlo Gavazzi Space SpA



ENEA



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



AGILE in Sriharikota, April 10, 2007



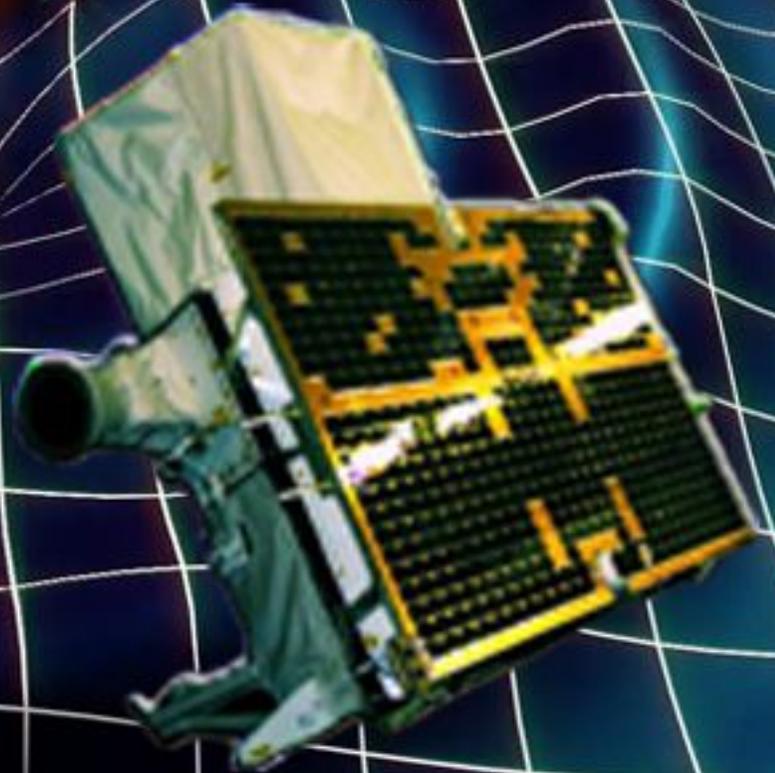
PSLV-C8 launch, 23 Apr. 2007



AGILE

23 April 2007

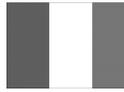
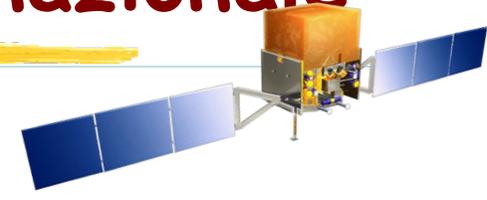
Happy 12th Birthday Agile !!



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'Energie 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
 IN2P3/LPTA Laboratoire de Physique Theorique et Astroparticules, Montpellier

Swedish Institutions

KTH Royal Institute of Technology
 Stockholms Universitet

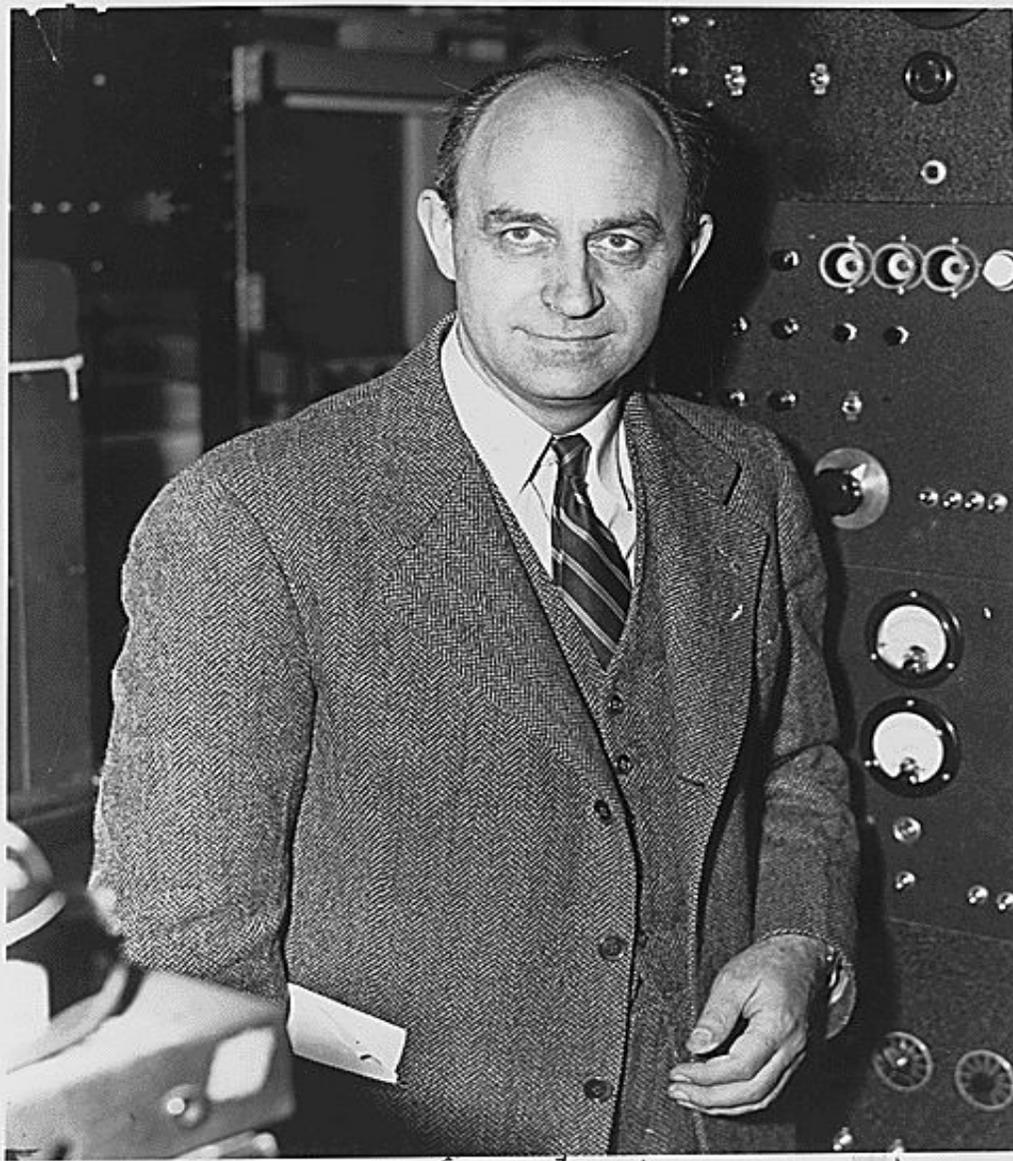
Collaboration members:	~390
Members:	121
Affiliated Scientists	~96
Postdocs:	68
Graduate Students	105

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.

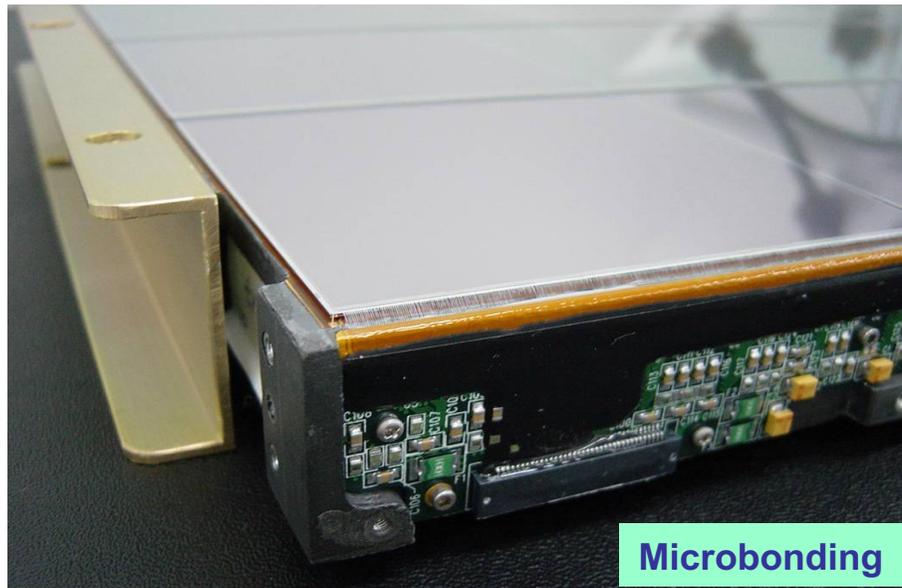
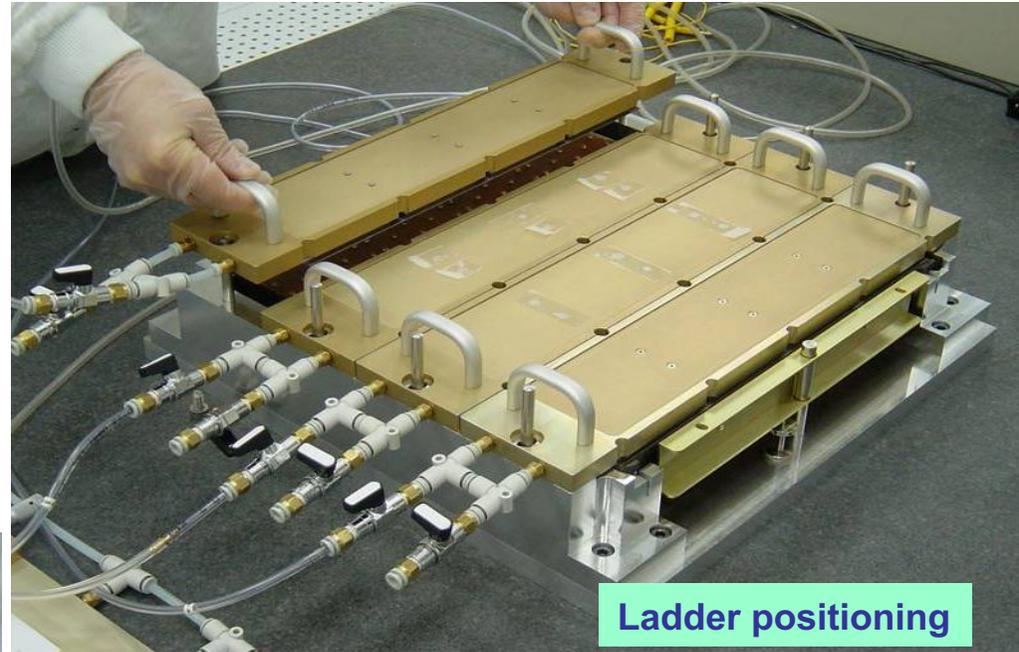
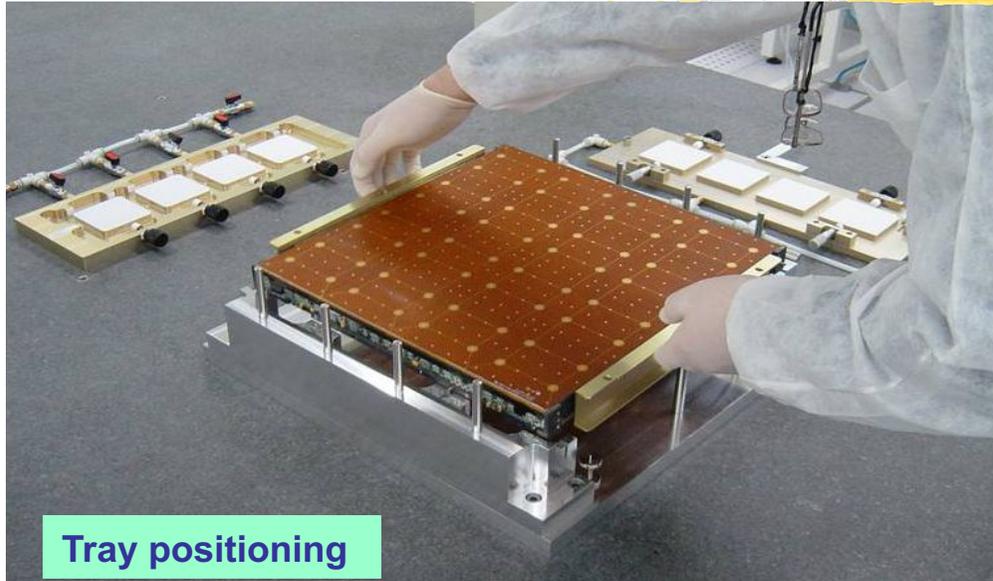
Il Telescopio di raggi gamma Fermi

Large Area
Telescope

Gamma ray
Burst
Monitor



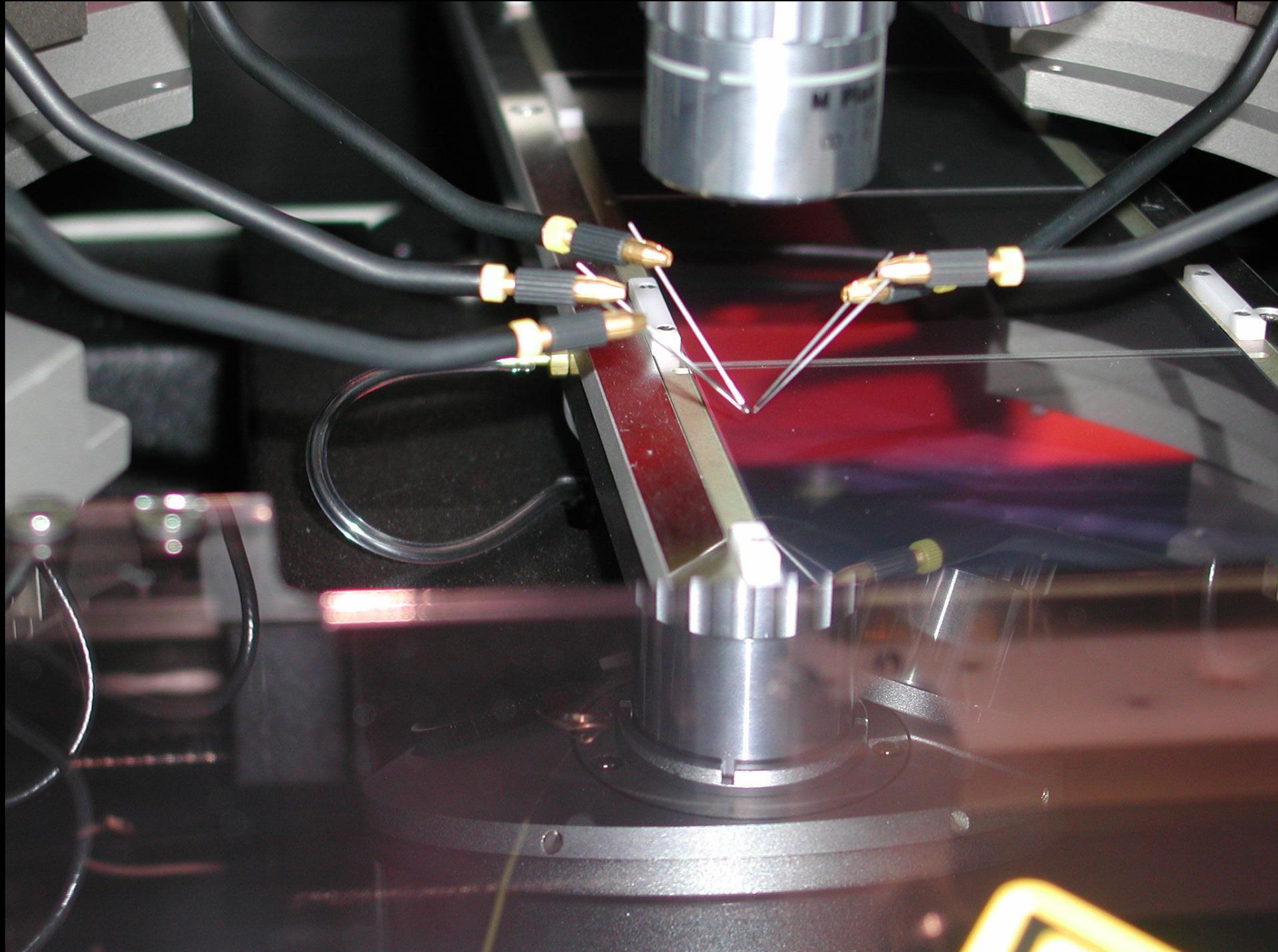
Assemblaggio presso la G&A ad Oricola











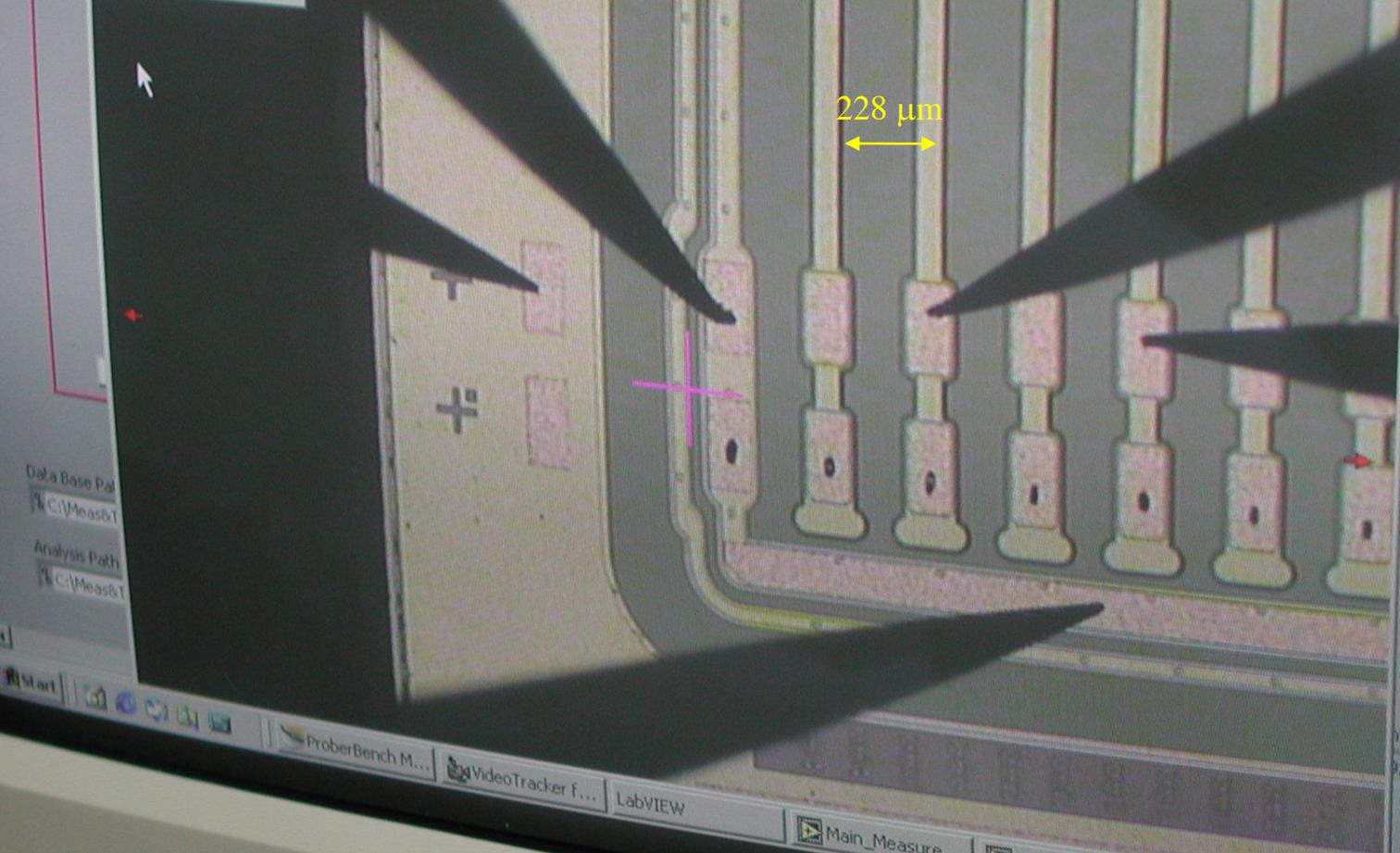


Tray Test at INFN Roma 2

LOAD ALIGN OK STOP
0.25%

2x 10x
20x 50x
SET SET 2

Align Chuck
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
tact
207.50000

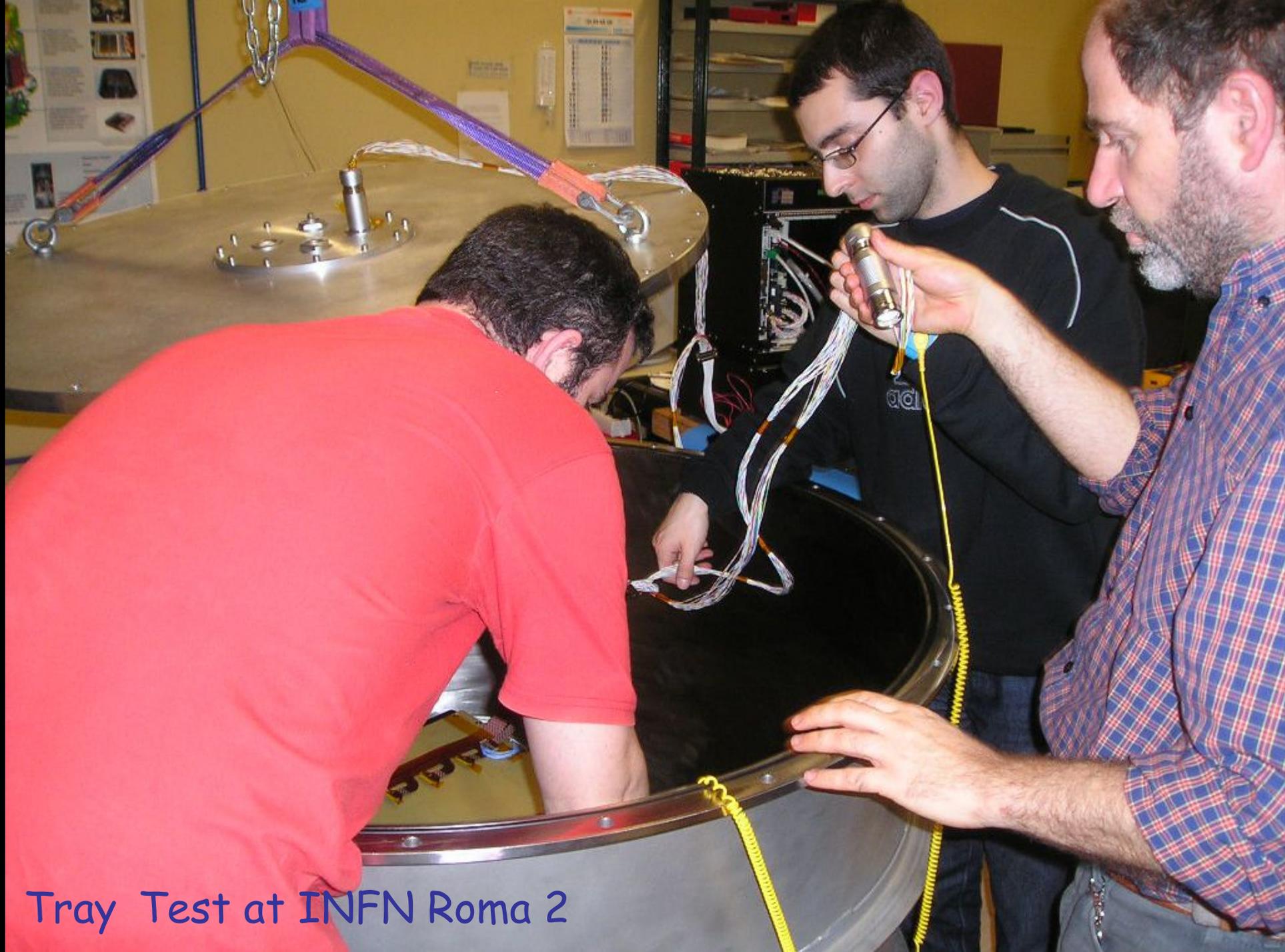
Data Base Pa
C:\Meas&I
Analysis Path
C:\Meas&I

Start
ProberBench M...
VideoTracker F...
LabVIEW
Main_Measure
AC_acq_fast_...
Navigator for...
11.25

Hansol







Tray Test at INFN Roma 2

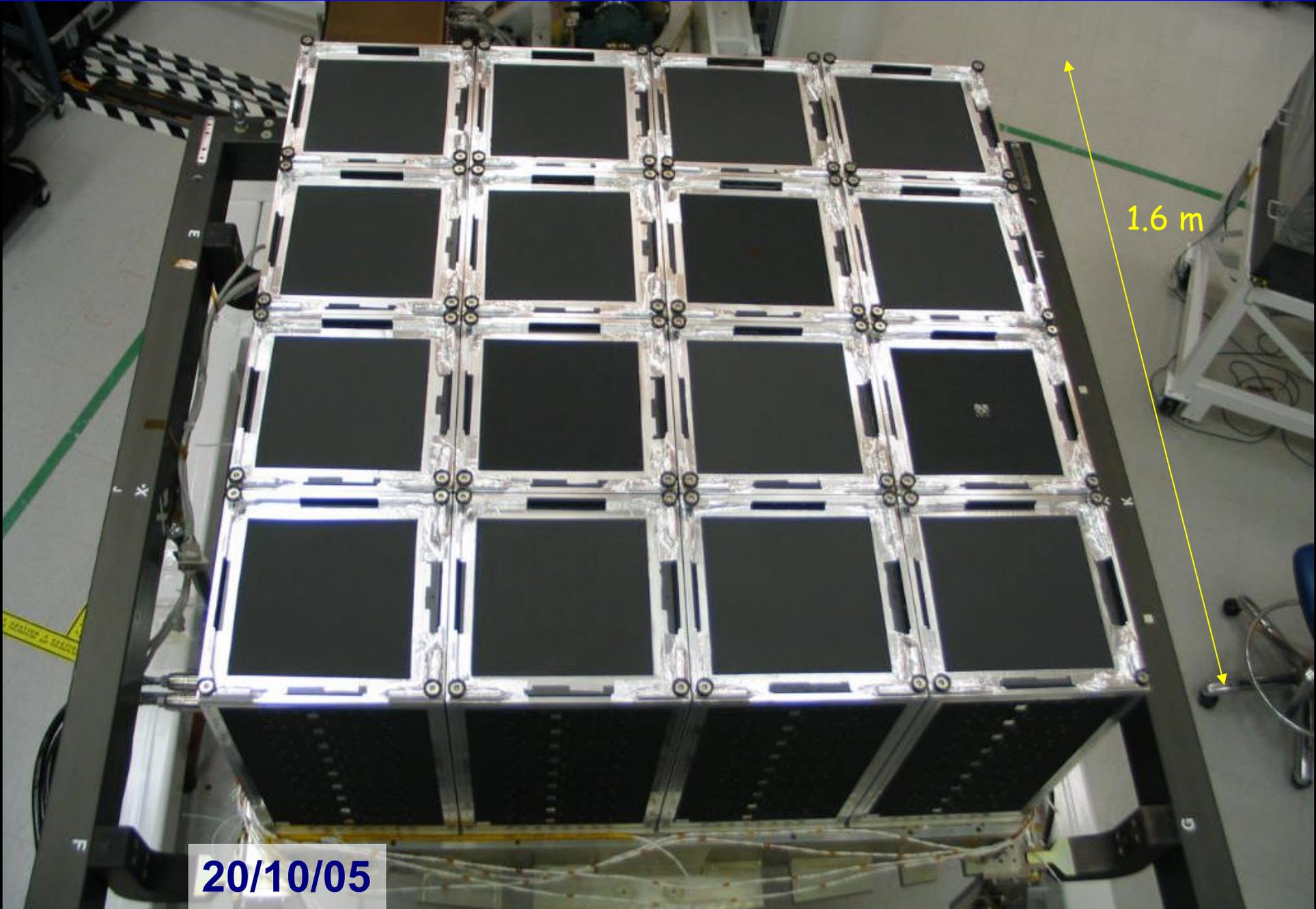


INFN Roma
Tor Vergata



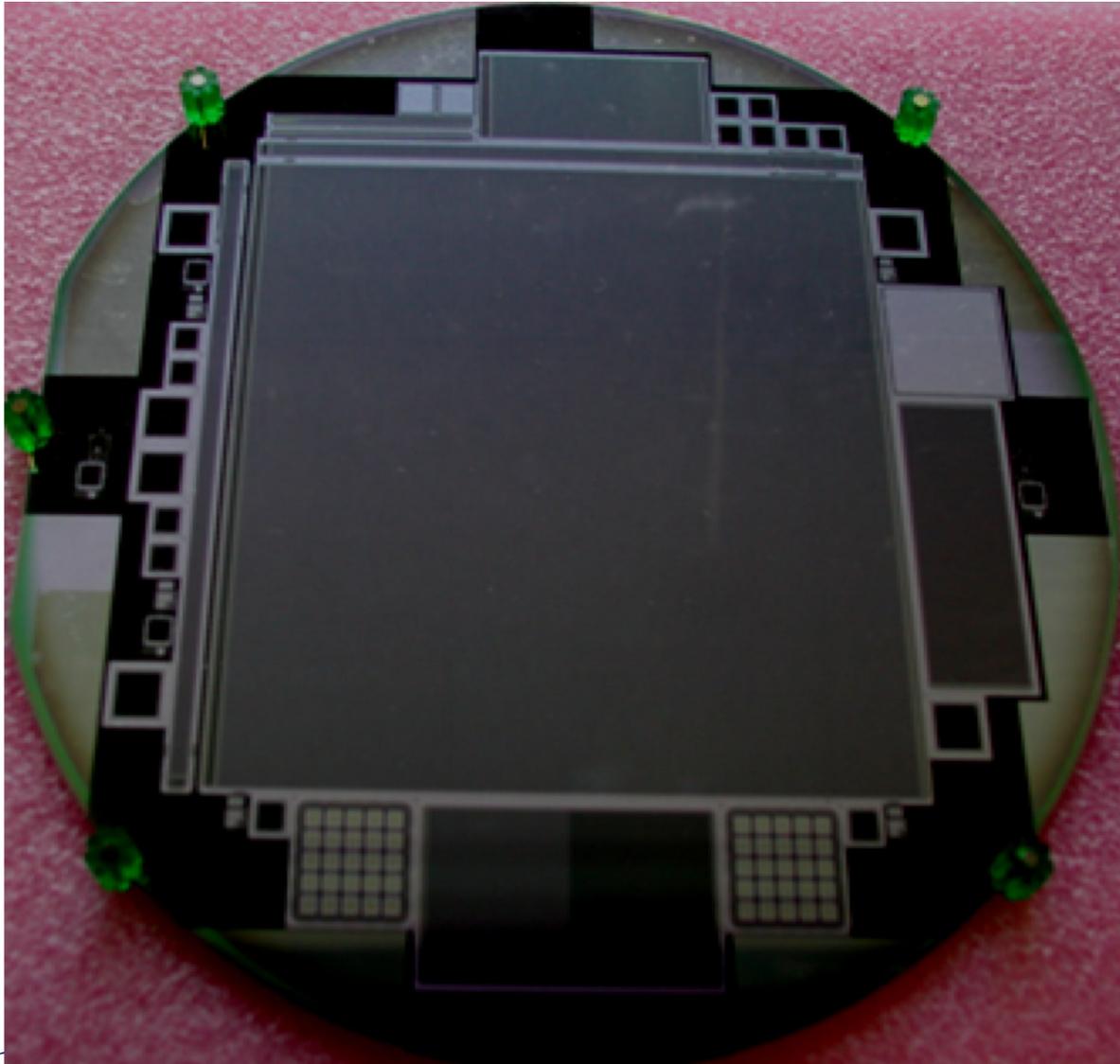
Test dei piani di silicio presso l' INFN di Roma Tor Vergata

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**

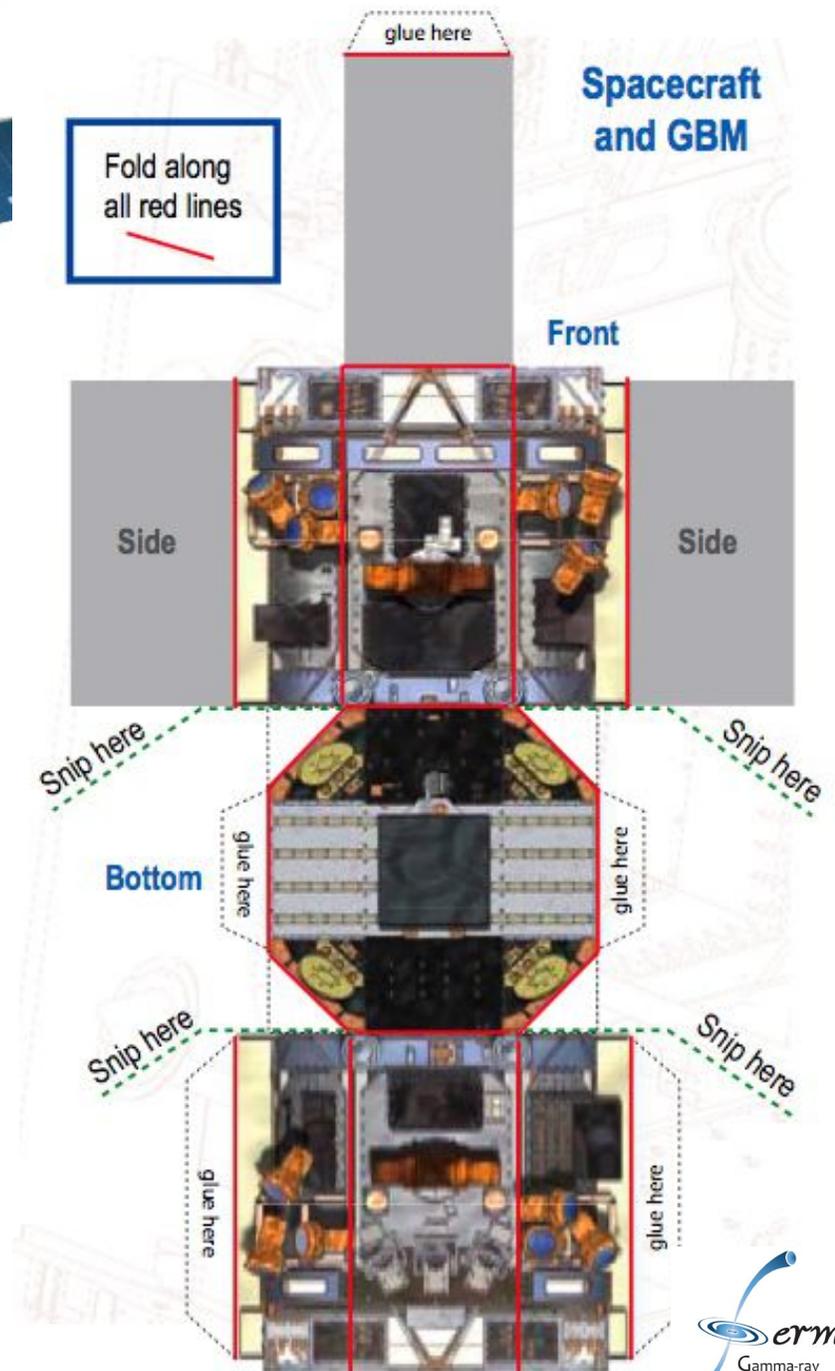
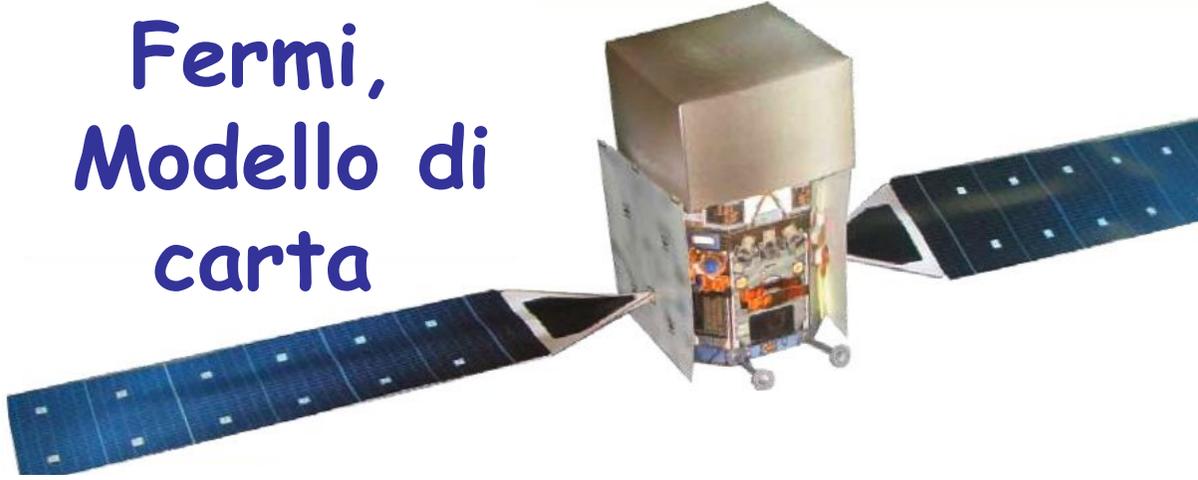
**83 m² superficie di
Silicio**

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

Fermi prima dell'installazione



Fermi, Modello di carta



<http://people.roma2.infn.it/~aldo/GLASTpaperModel.pdf>



**Fermi
all'interno del Delta 2**



11 June 2008



11 June 2008



11 June 2008



11 June 2008



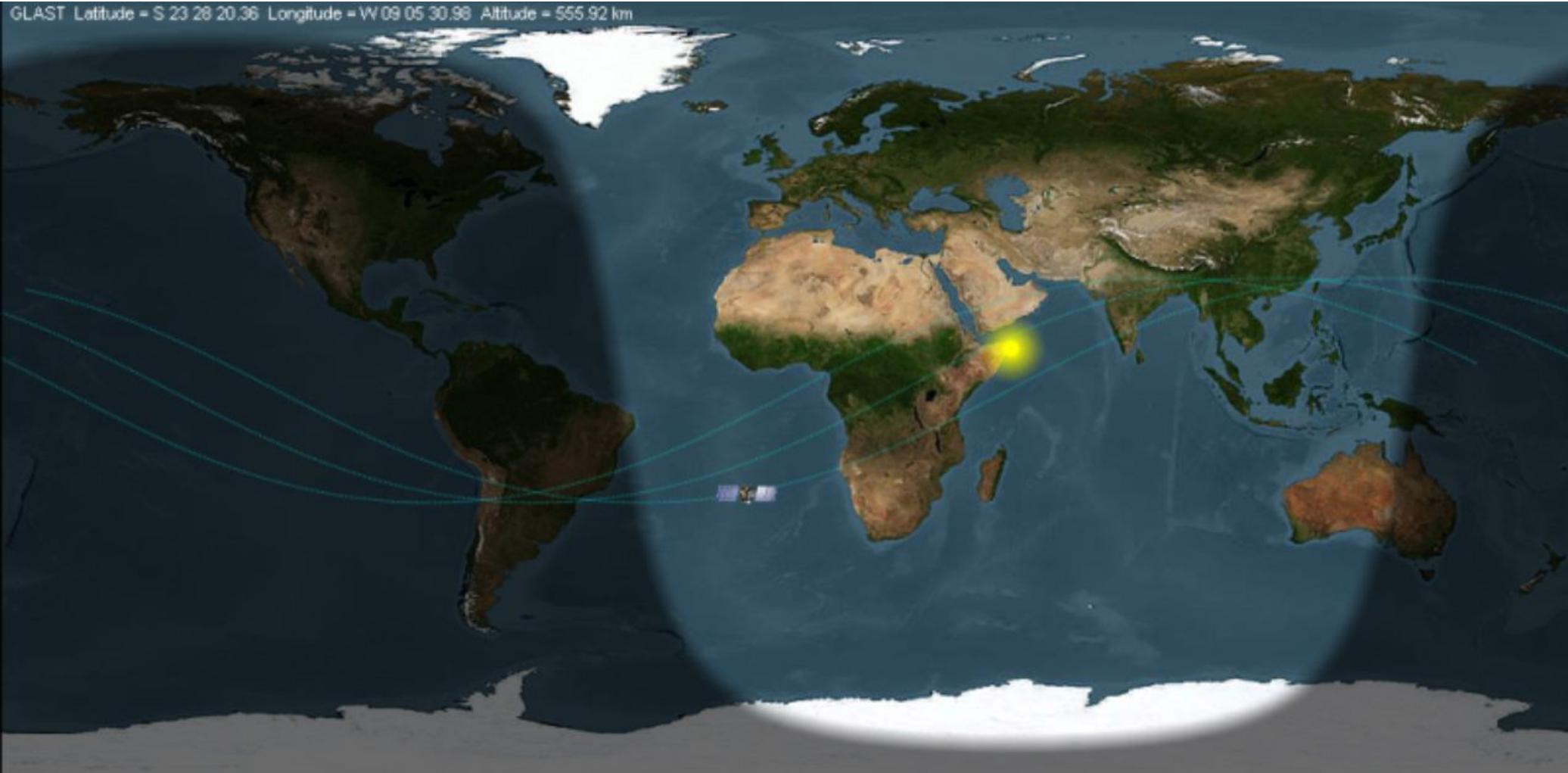
11 June 2008



11 June 2008

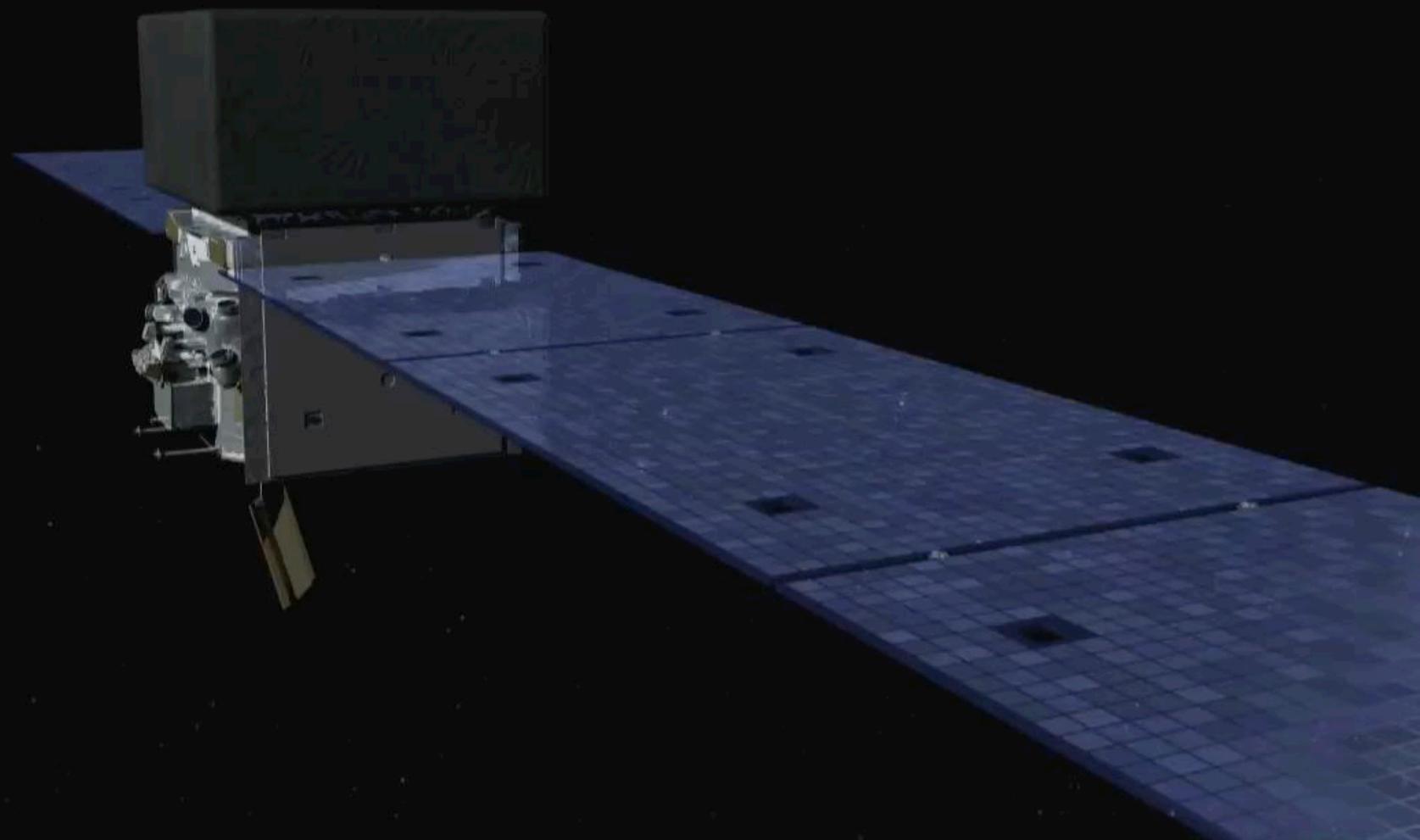
Fermi in orbita

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

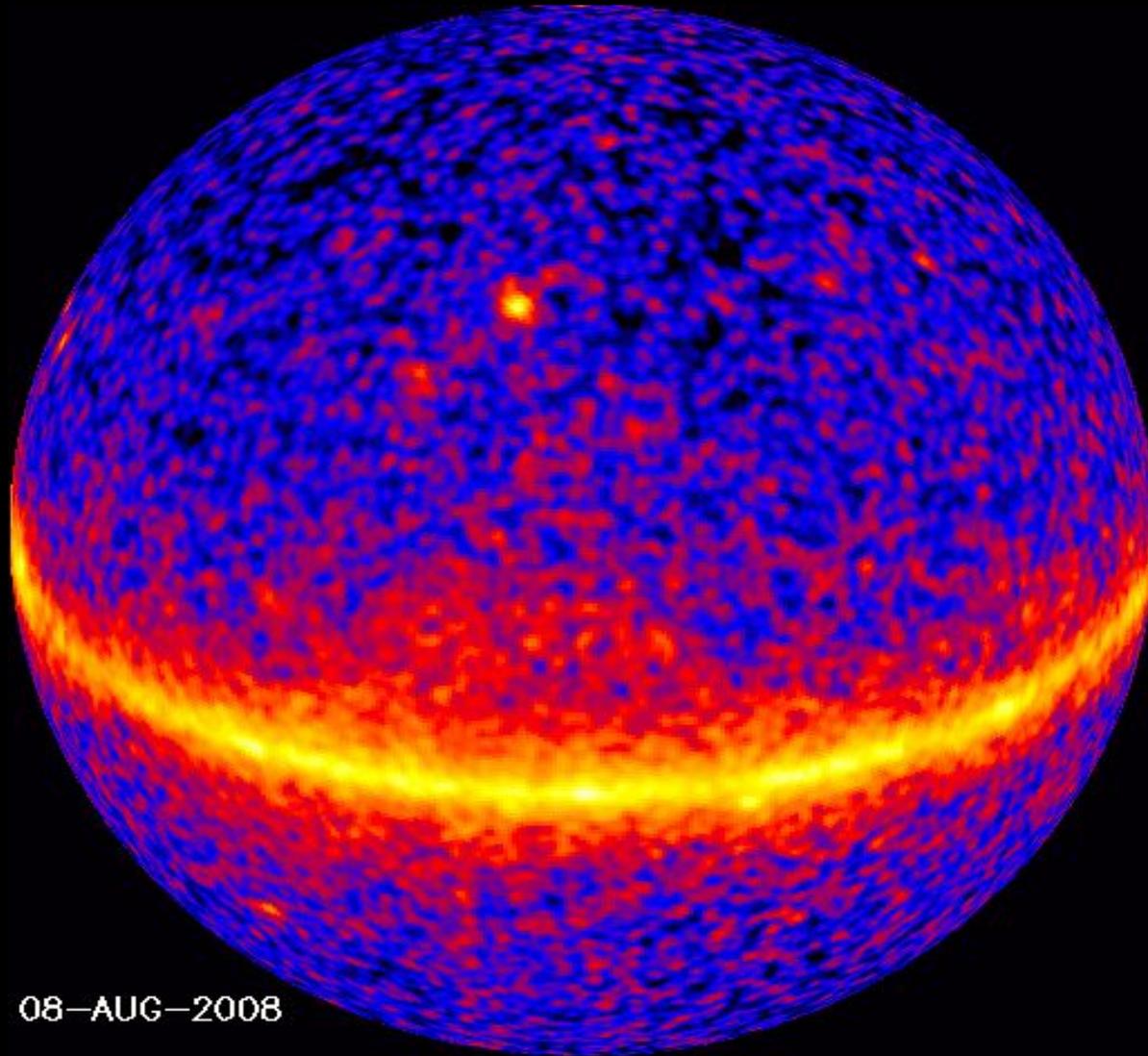


- Per rintracciare il satellite: <http://observatory.tamu.edu:8080/Trakker>
- Per vedere il satellite sopra la città :
http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/glast_online.html





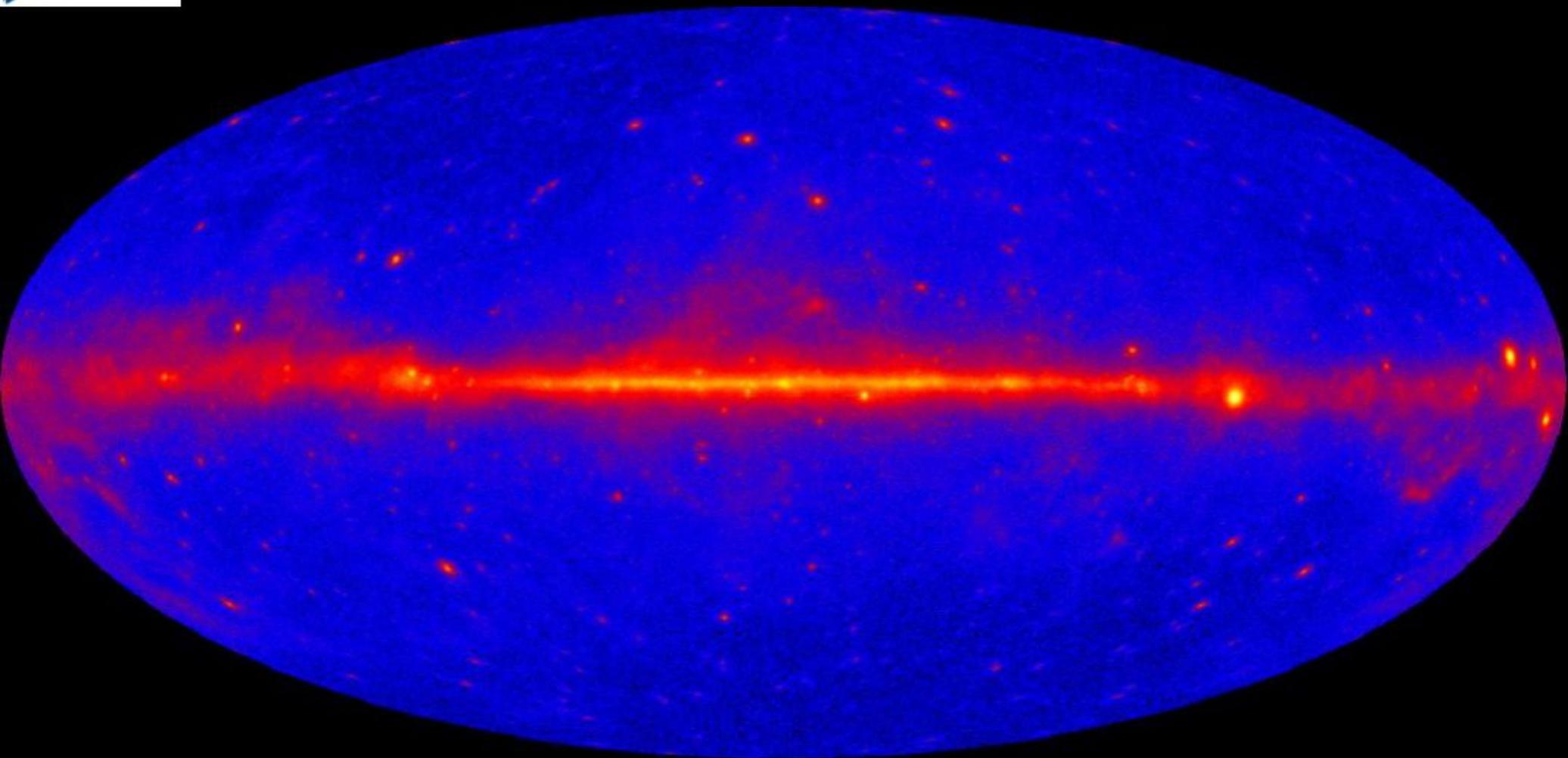
Daily Gamma-ray Sky



08-AUG-2008



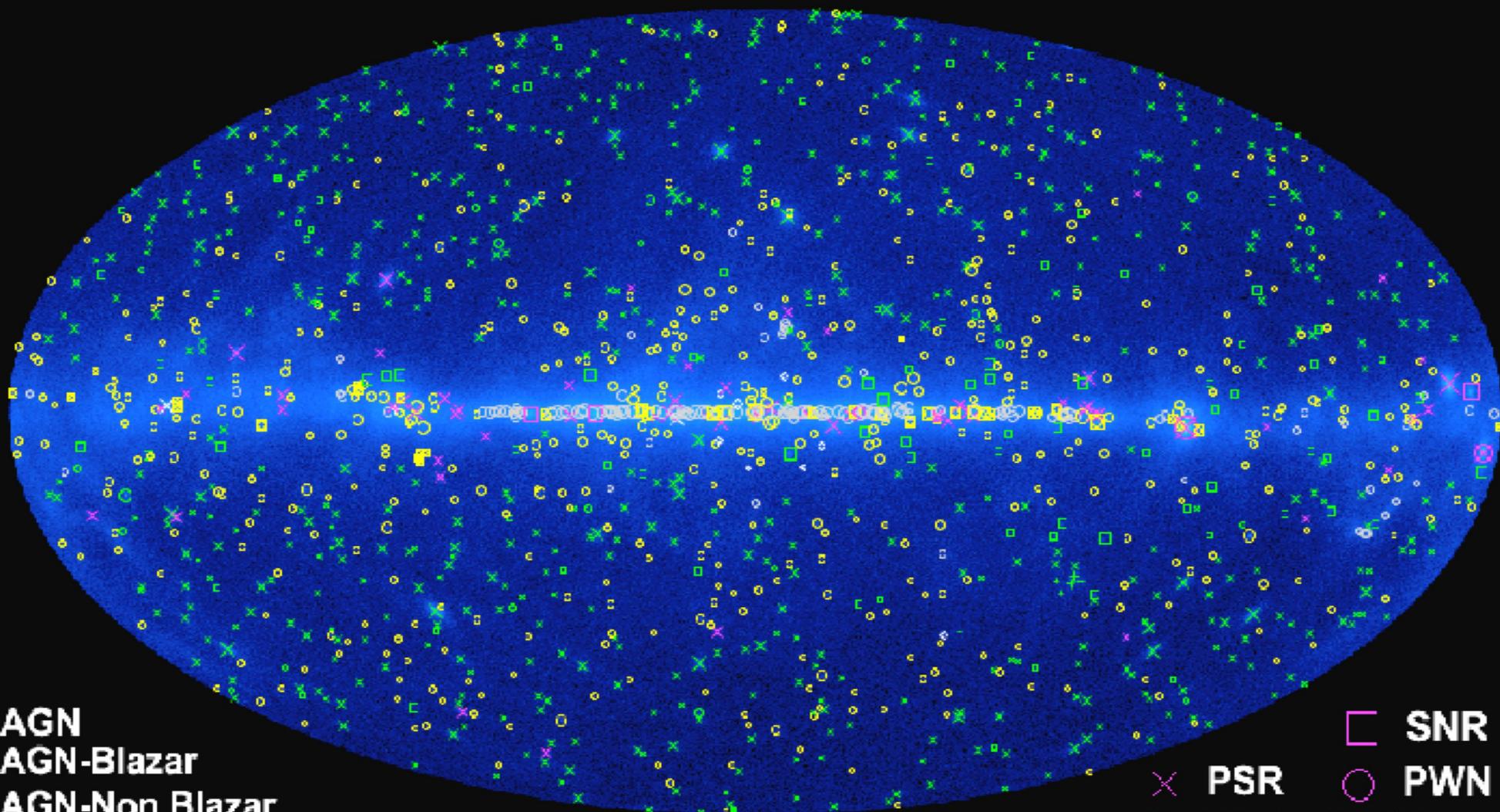
Primo Catalogo delle sorgenti viste dal telescopio Fermi (11 mesi, 1451 sorgenti)



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)

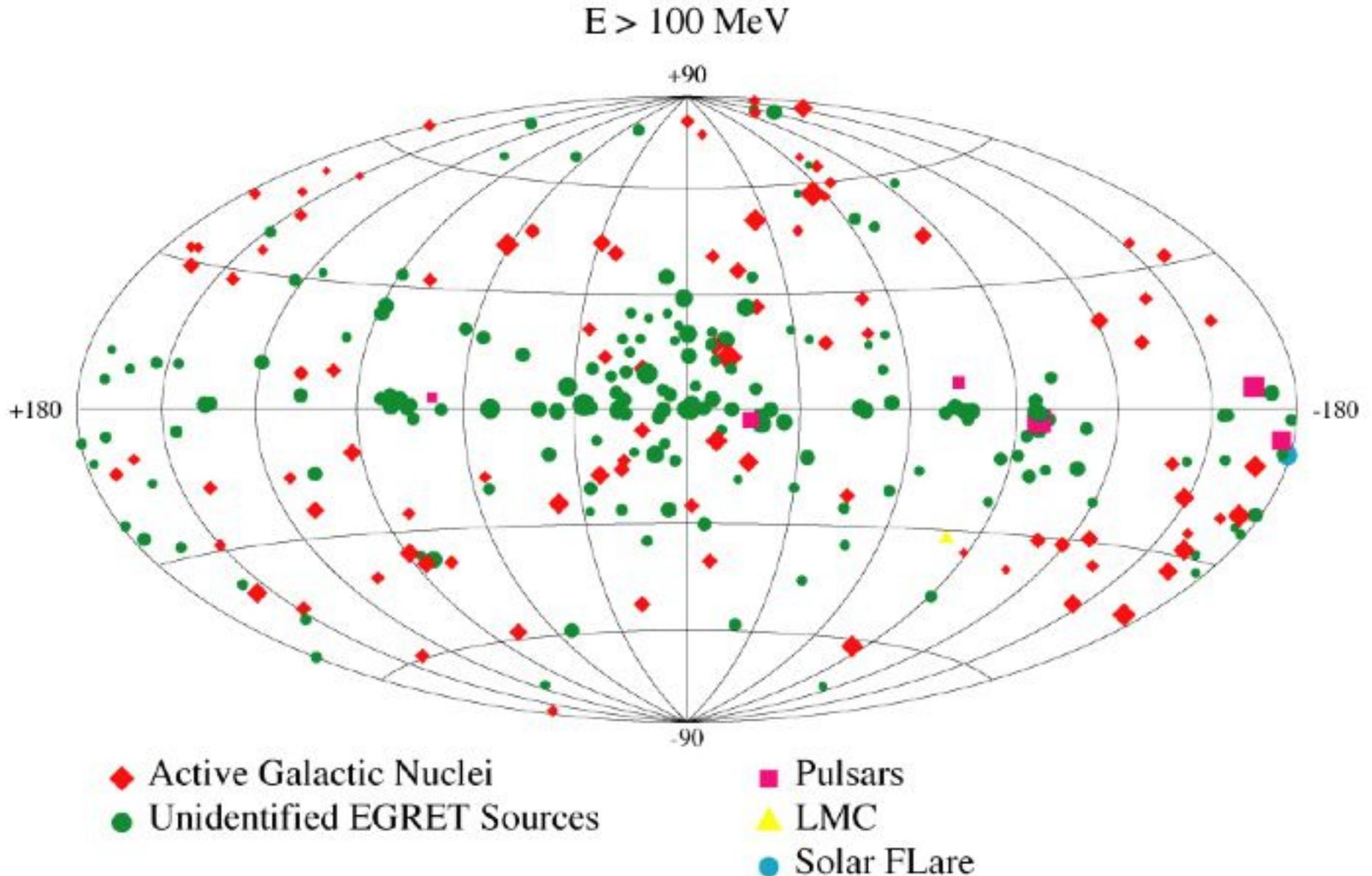


- | | |
|---|--------------------|
| ○ AGN | □ SNR |
| × AGN-Blazar | × PSR |
| □ AGN-Non Blazar | ○ PWN |
| ○ No Association | ⊗ PSR w/PWN |
| □ Possible Association with SNR and PWN | ◇ Globular Cluster |
| ○ Possible confusion with Galactic diffuse emission | × HXB or MQO |
| □ Starburst Galaxy |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

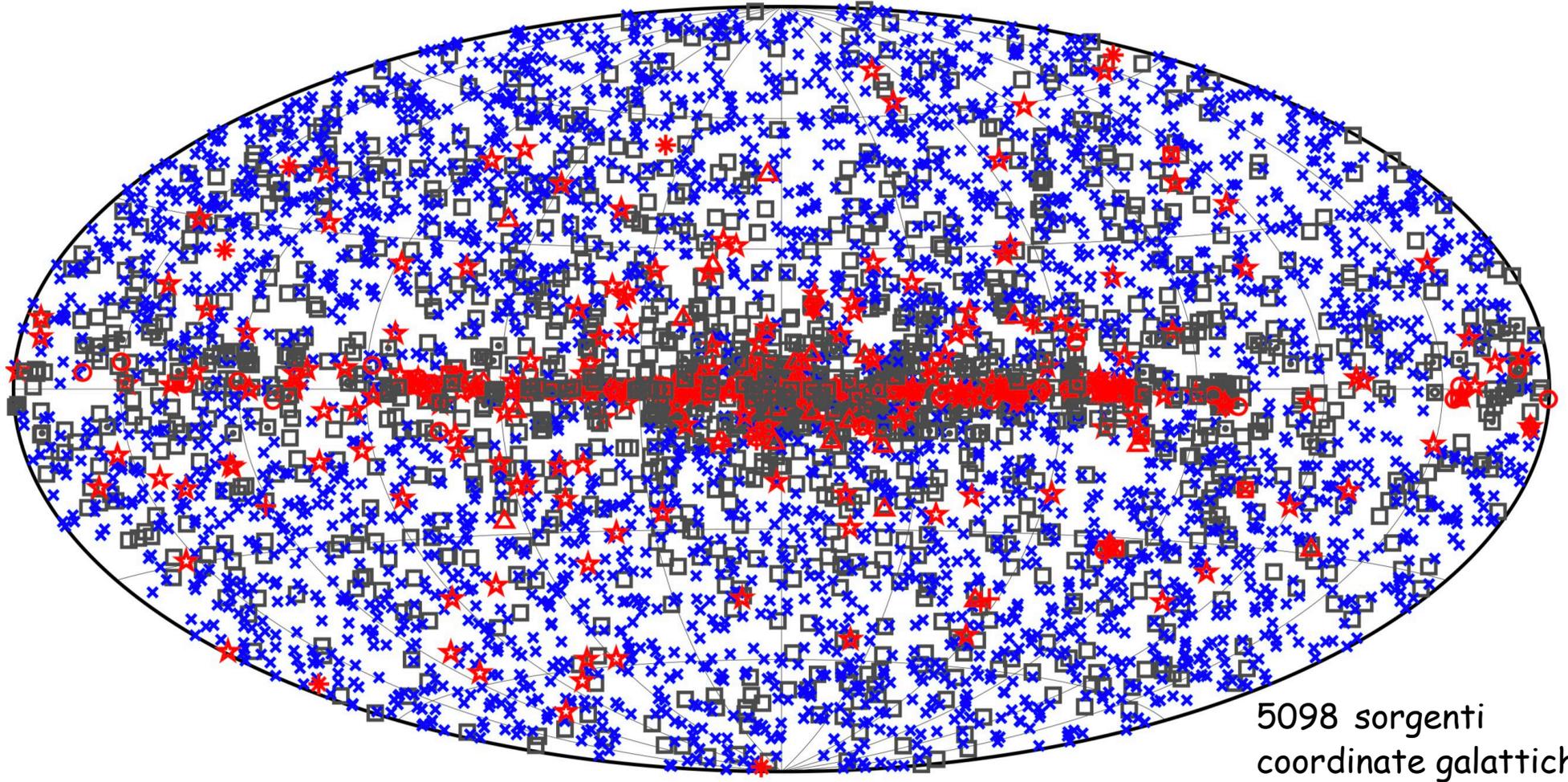
Il cielo nell'ottico



da confrontare con il precedente esperimento EGRET (298 sorgenti)

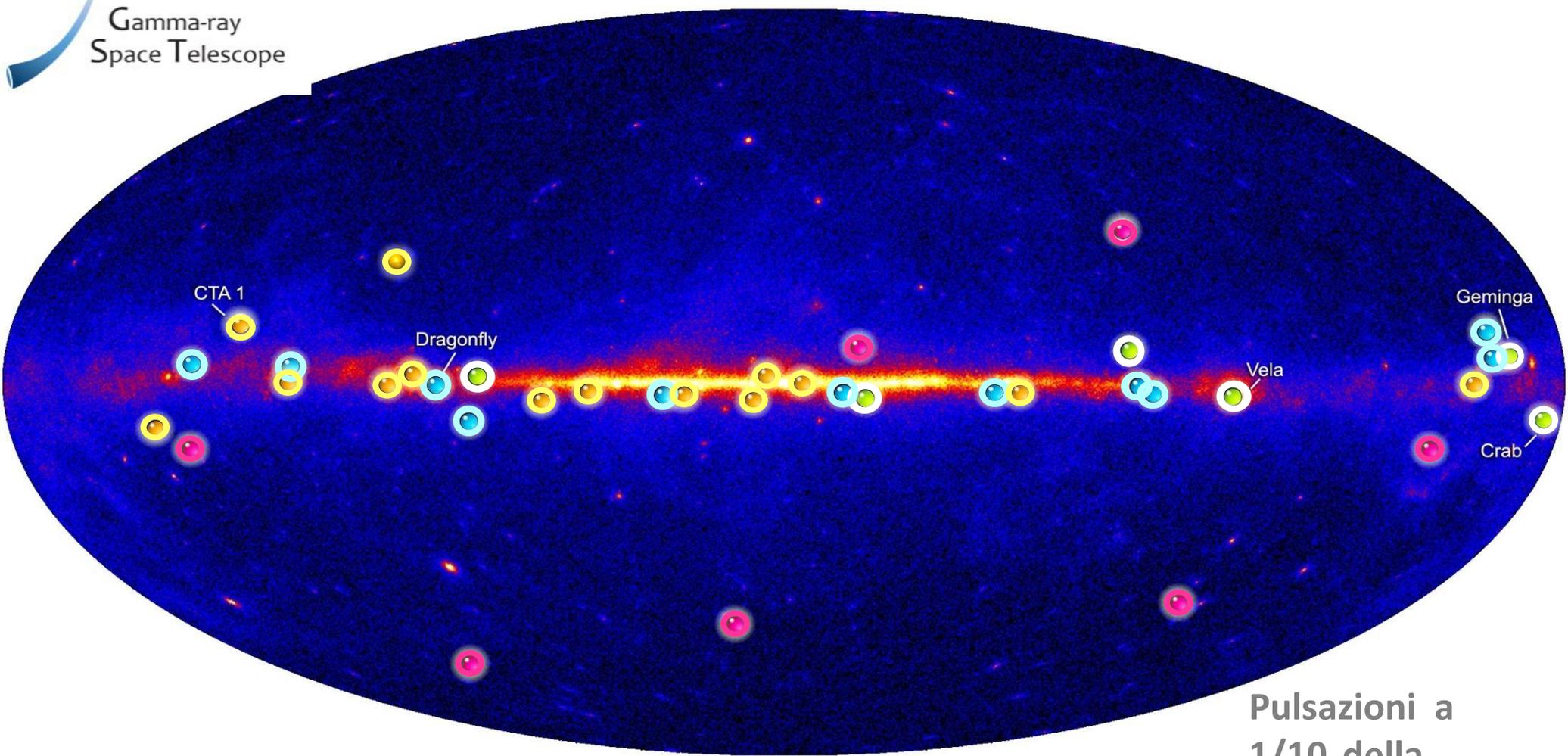
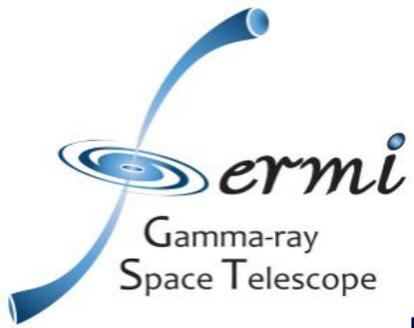


Quarto Catalogo delle sorgenti viste dal telescopio Fermi



□ 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 11th Birthday Fermi !!

11 June 2008

GW170817

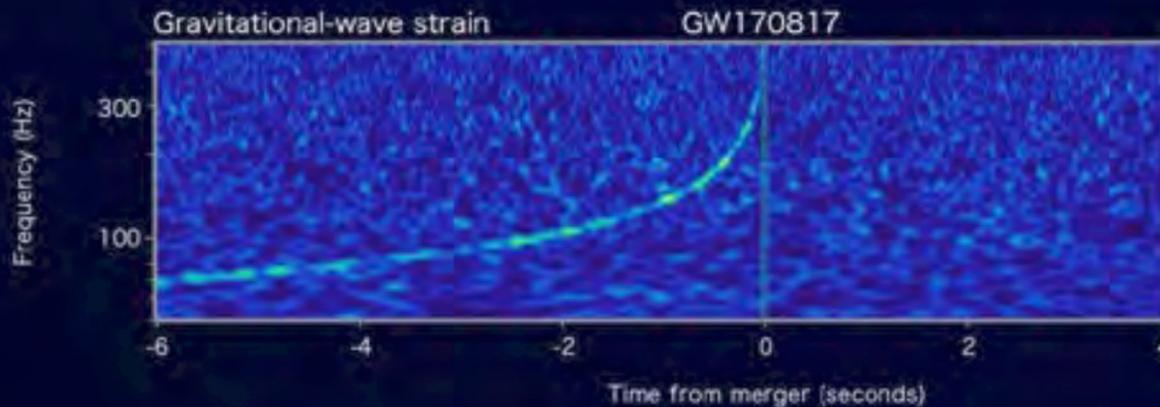
Fermi

Reported 16 seconds after detection



LIGO-Virgo

Reported 27 minutes after detection



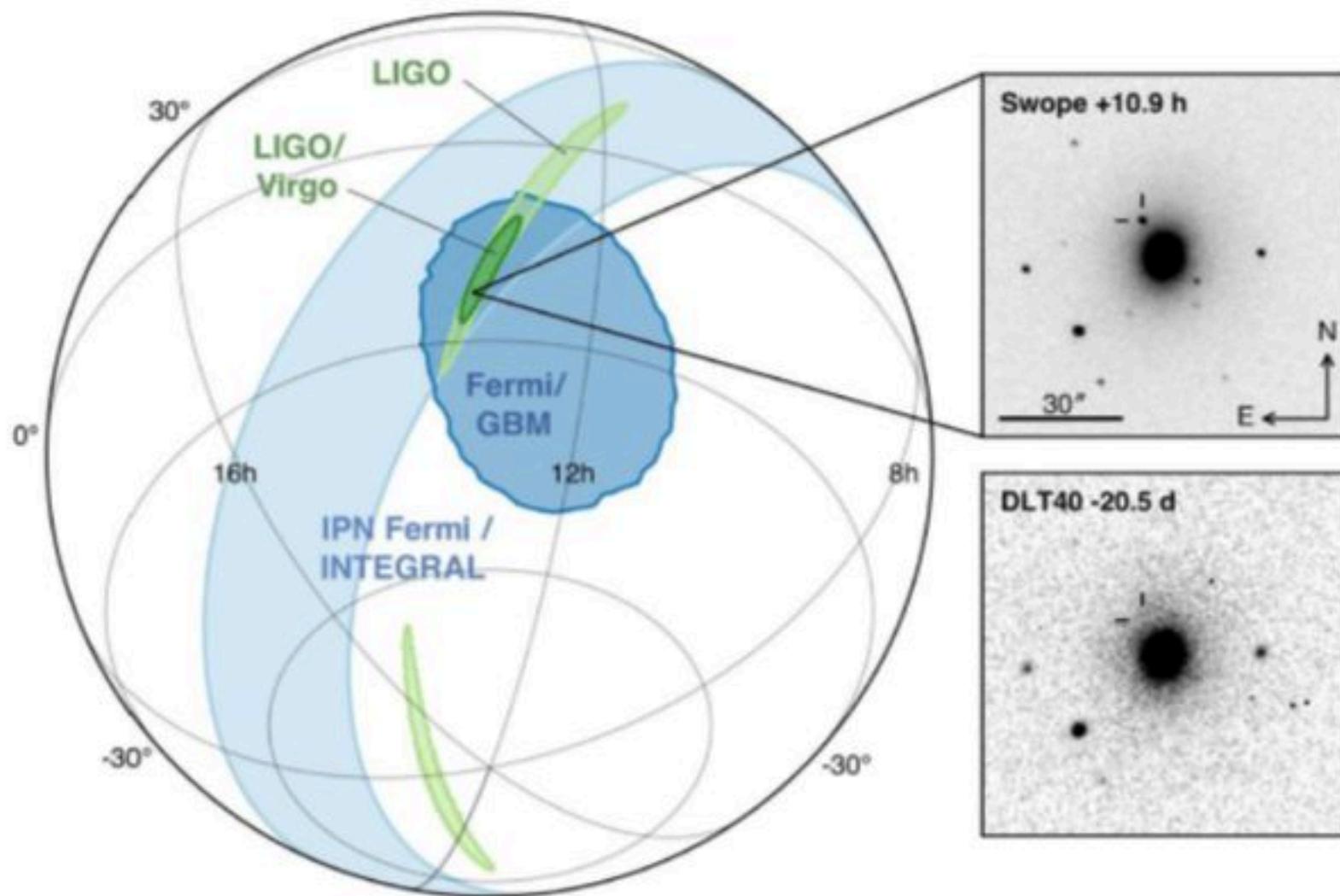
INTEGRAL

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

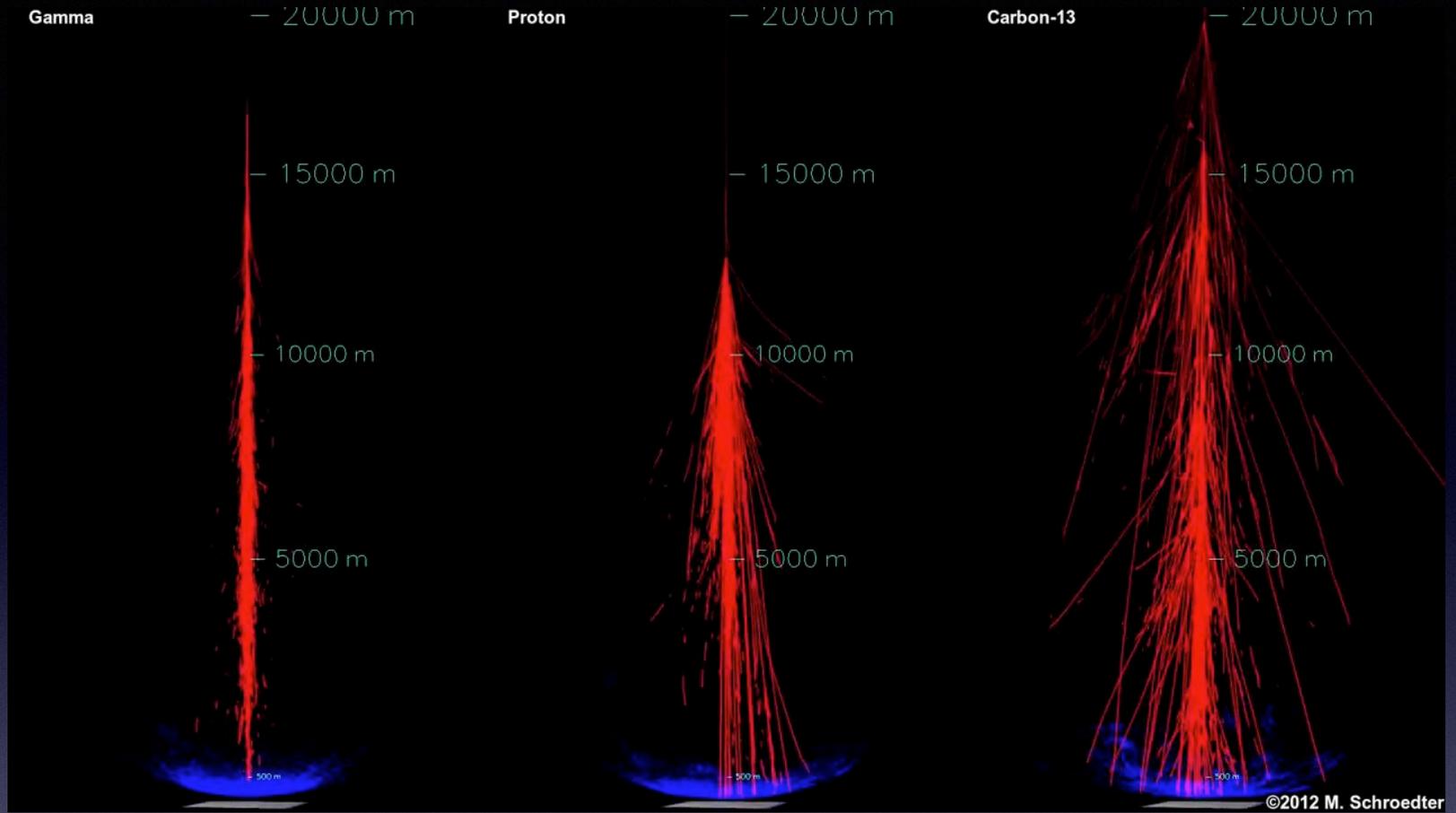


17 agosto 2017: coalescenza fra due Stelle di neutroni

E a energia piu' alta?

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





Intensità dell'immagine

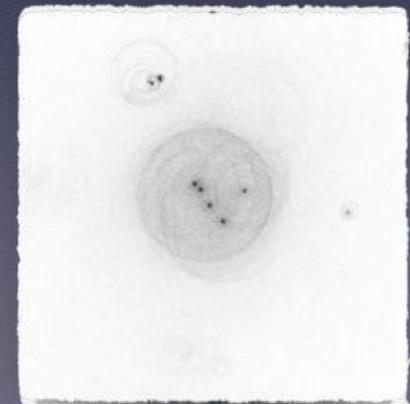
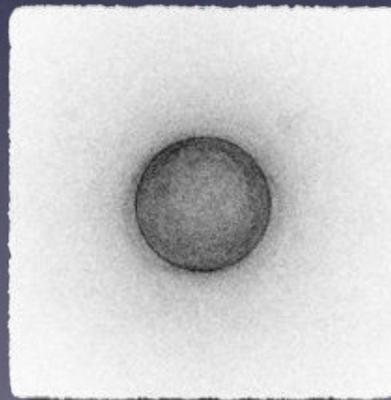
↳ energia

orientamento

↳ direzione

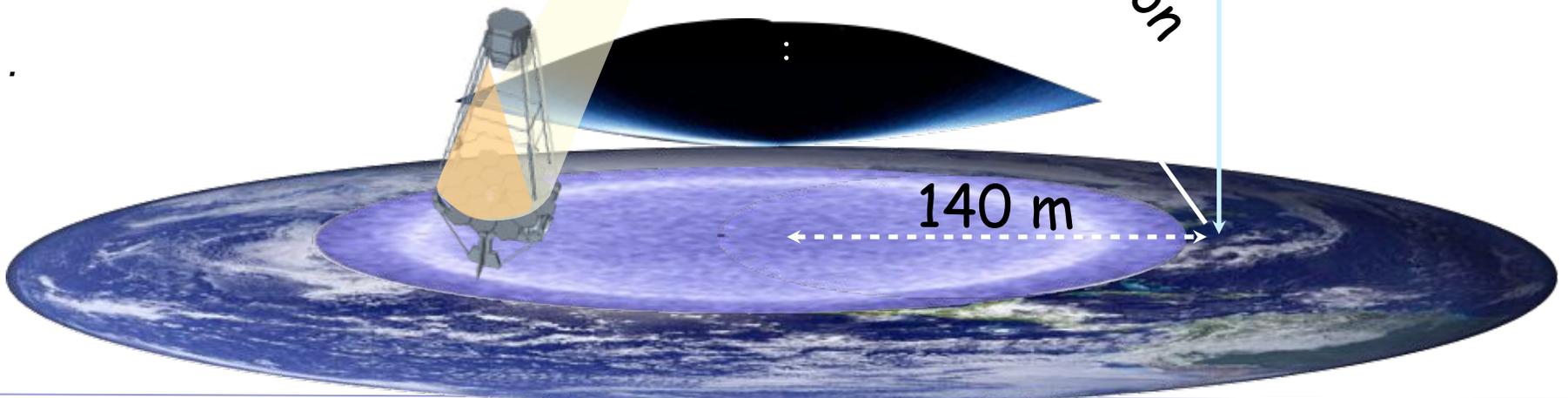
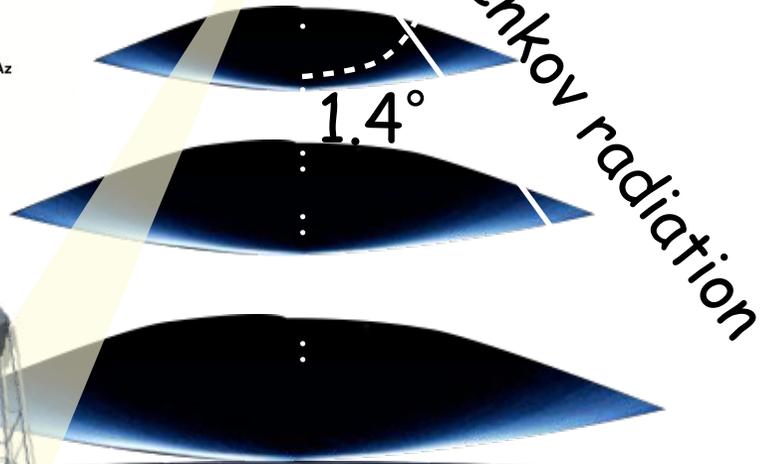
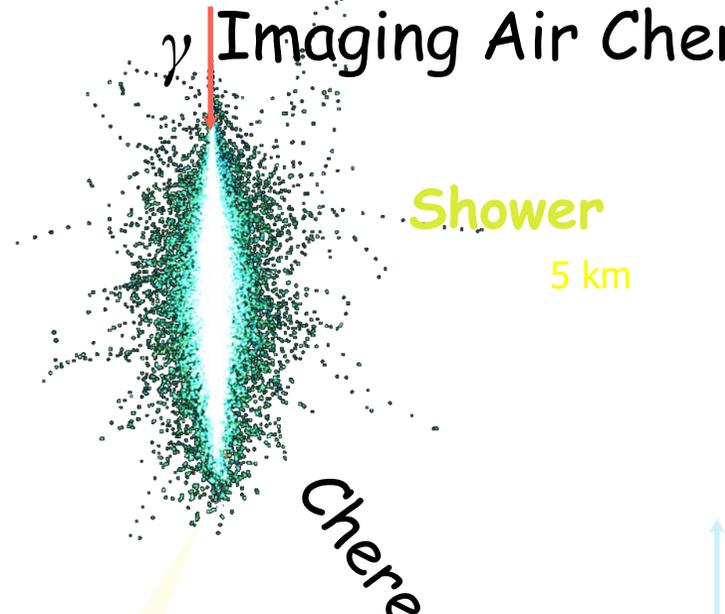
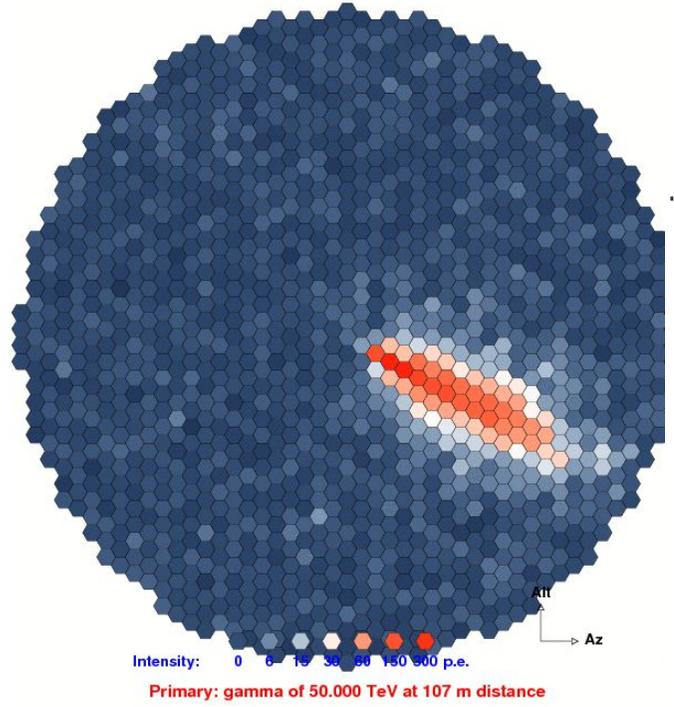
Forma dell'immagine

↳ tipo di particella



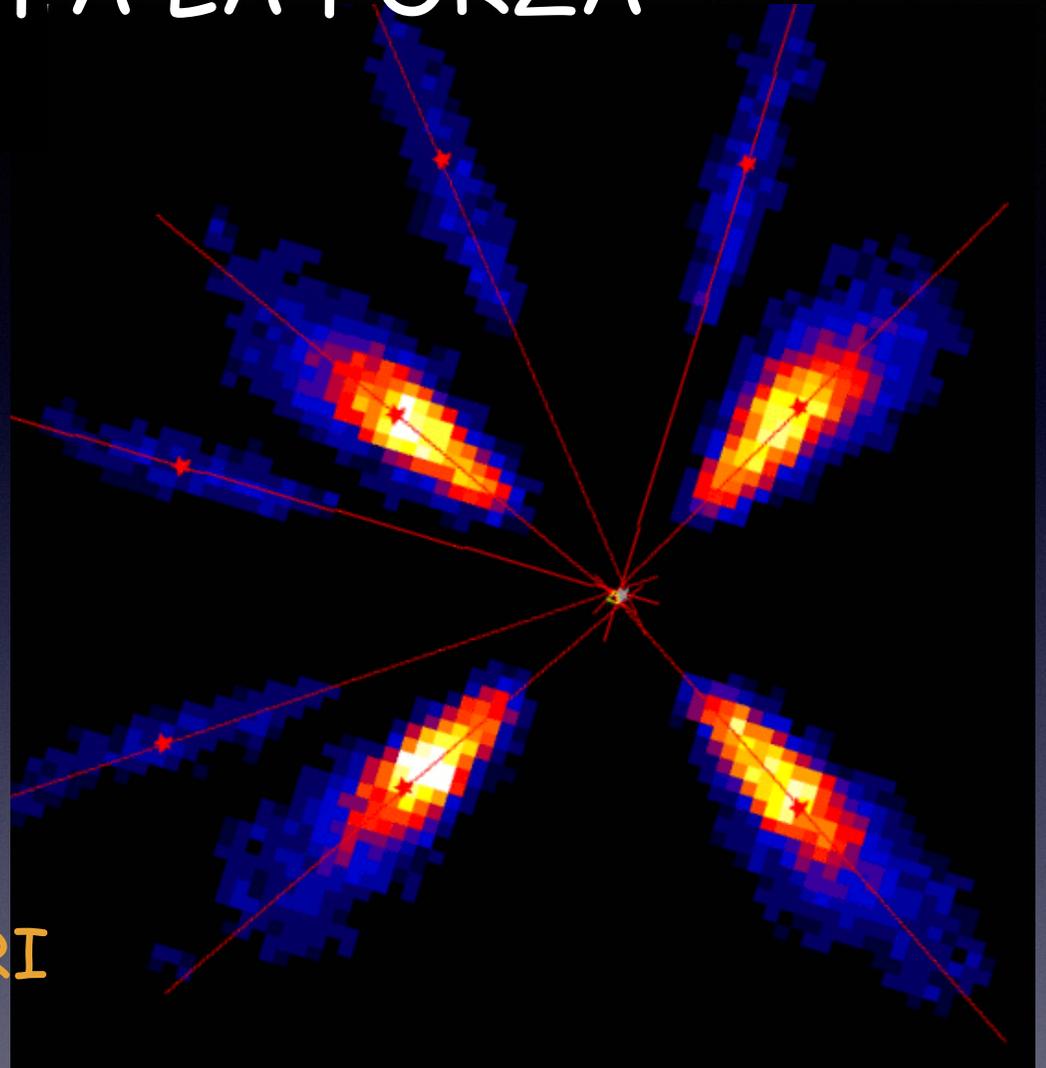
Time = 11.0 nanoseconds

Imaging Air Cherenkov Technique



L'UNIONE FA LA FORZA

INCROCIANDO LE
INFORMAZIONI
PRODOTTE DA
DIVERSI TELESCOPI
SI OTTENGONO
RISULTATI MIGLIORI



Simulation:
Superimposed images from
8 cameras

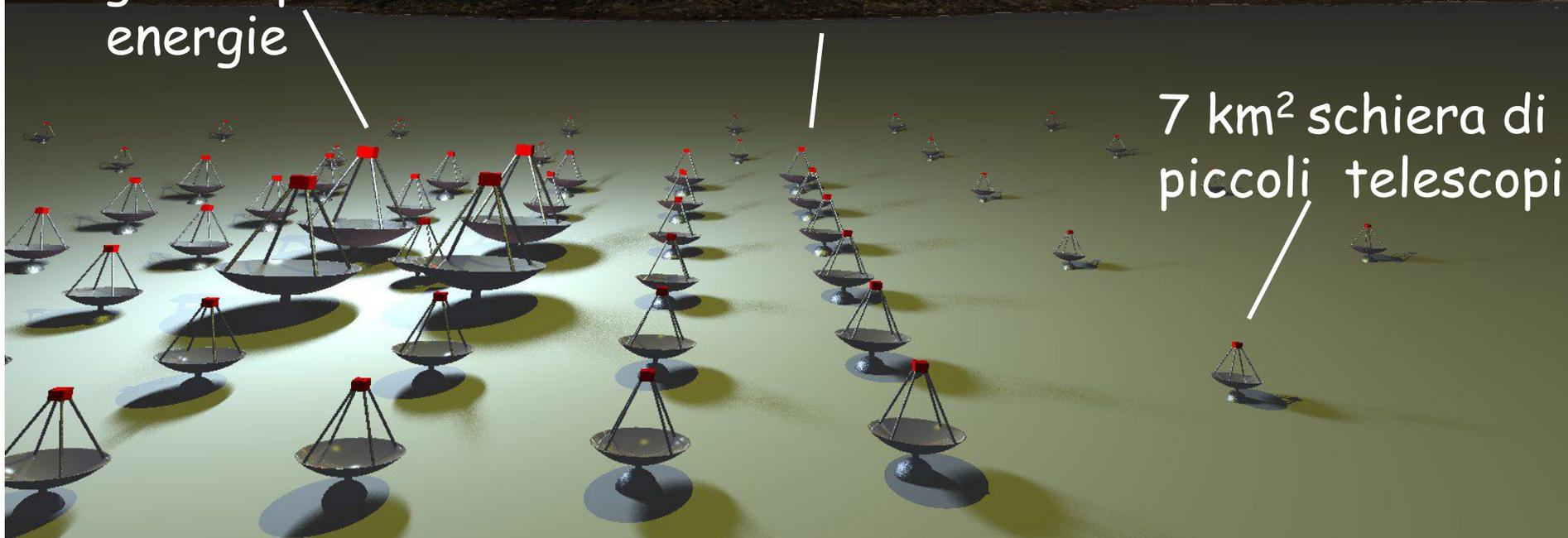
Una schiera di telescopi Cherenkov **COME ?**

- 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



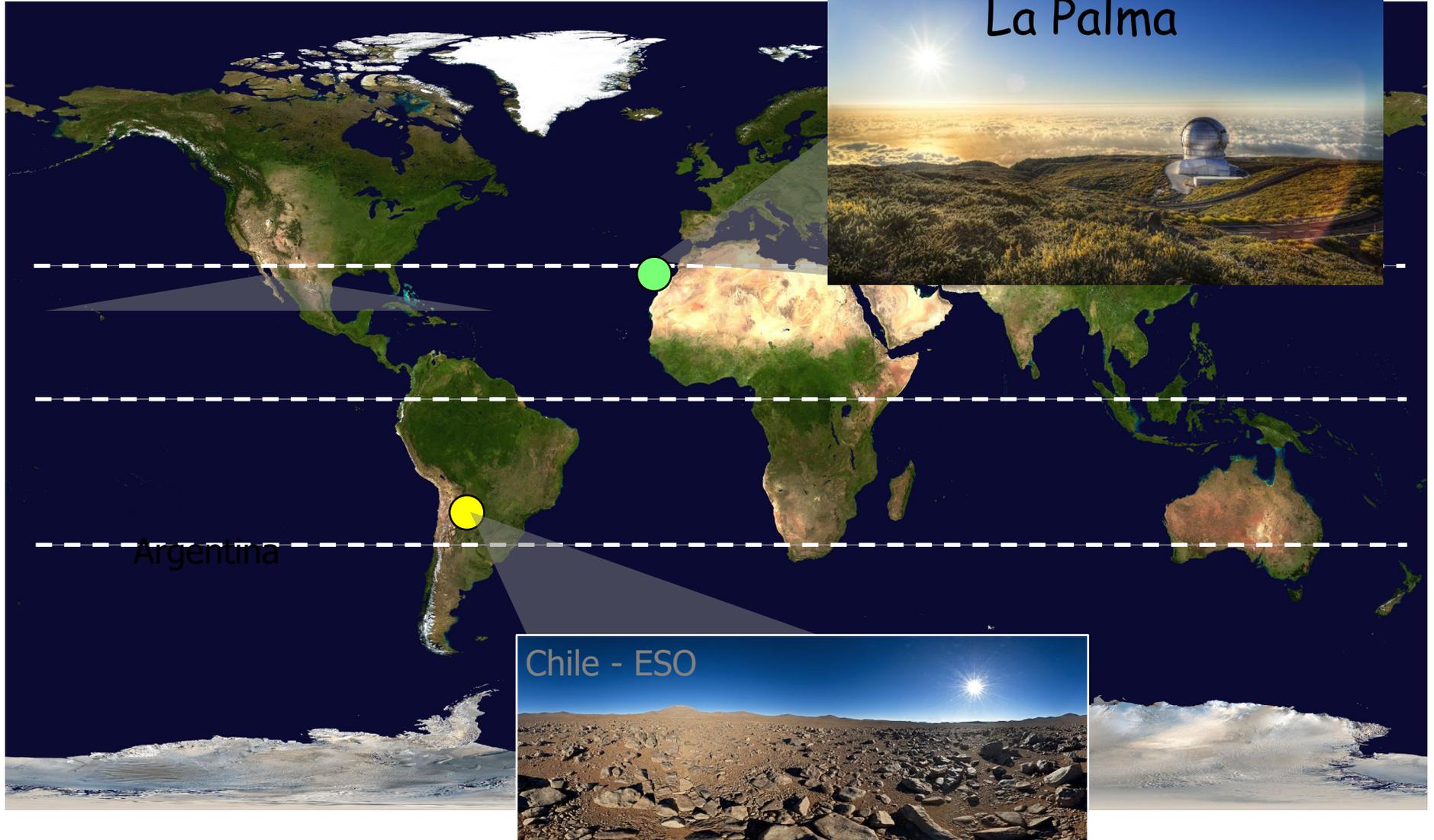
HESS

MAGIC

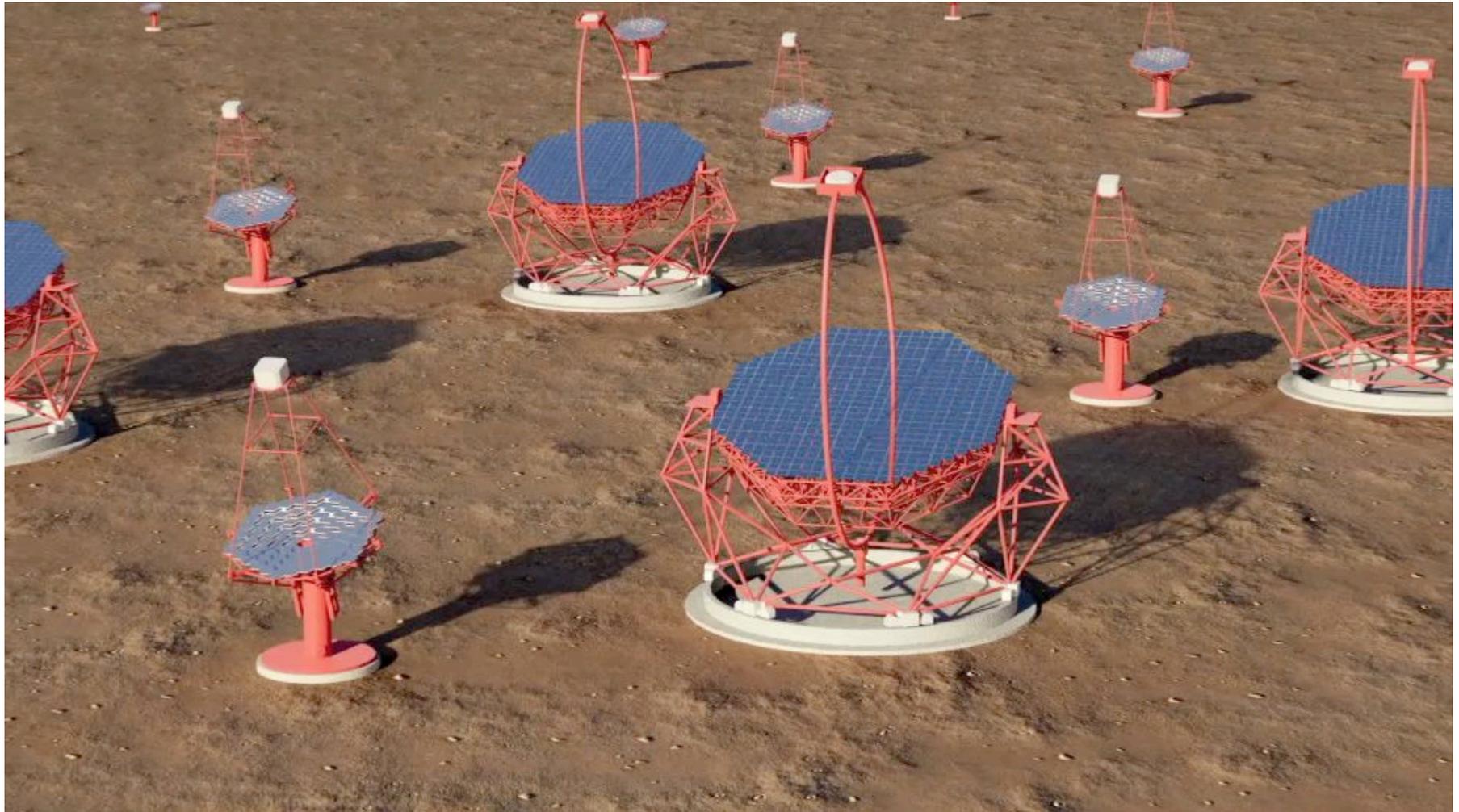
VERITAS

HESS

Dove?



Rendering della schiera di telescopi nel sito sud



.. tanti diversi
apparati , ma
stesso scopo



Sorgente

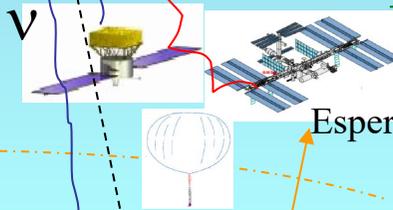
Creazione e
accelerazione

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

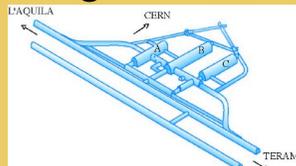
Rivelatori di sciami
estesi

Esperimenti di
Fisica delle
Astroparticelle

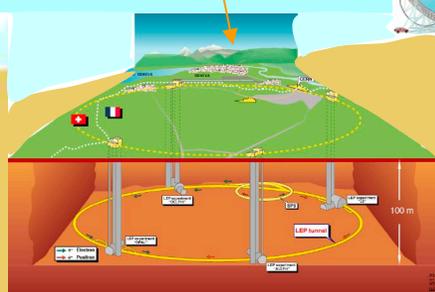
Rivelatori in alta montagna

Rivelatori Cherenkov

Acceleratori di
particelle



Esperimenti sottoterra, sotto il ghiaccio,
sotto l'acqua

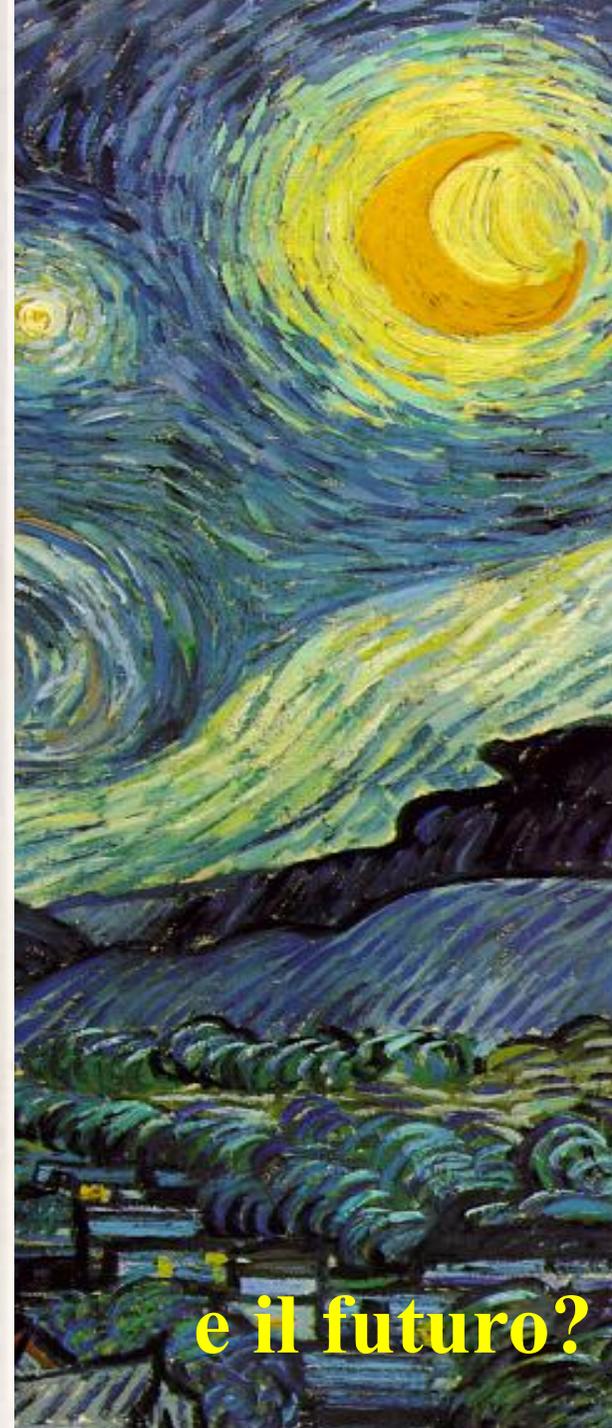
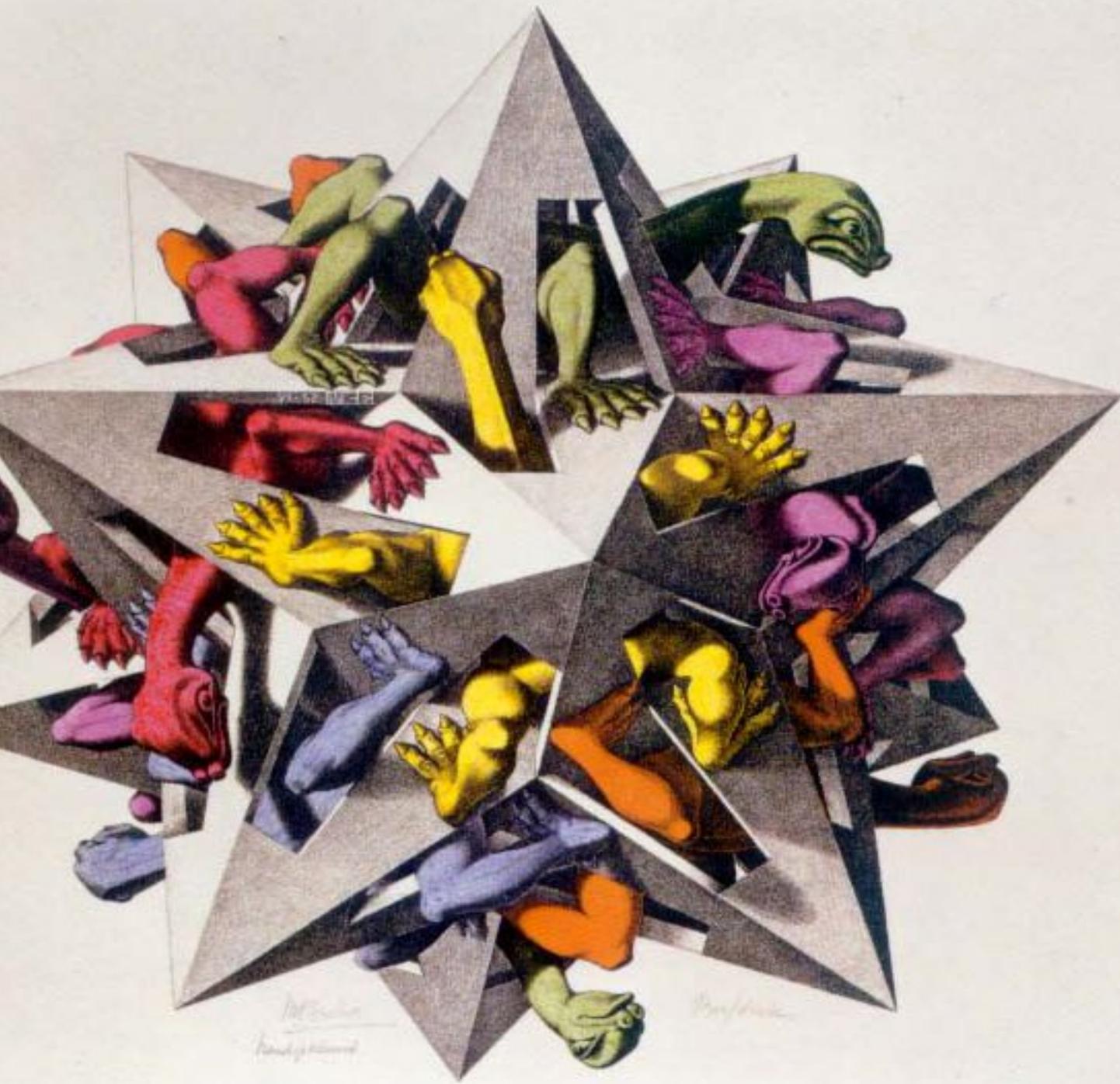




Nel corso della maggior parte della storia, il cosmo è stato visto come eternamente stabile



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?

Programma stage OCRA 2019

19-22 Aprile 2020 presso i Laboratori Nazionali di

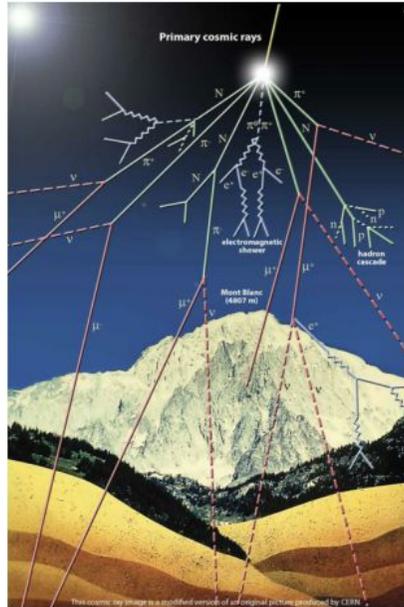
Frascati

- **Domenica 19:** arrivo nel pomeriggio presso l'hotel a Frascati
- **Lunedì 20:**
 - **Mattina:** Presentazione dello stage e seminario sui raggi cosmici e sulla loro rivelazione
 - **Pomeriggio:** Misura del flusso dei raggi cosmici a terra e preparazione strumentazione per il lancio
- **Martedì**
 - Lancio di un pallone stratosferico equipaggiato per la misura dei raggi cosmici in quota
 - Visita ai Laboratori Nazionali di Frascati in attesa del recupero della sonda
 - Analisi dei dati raccolti dalla sonda
- **Mercoledì :** Evento conclusivo dello stage e partenza nel primo pomeriggio

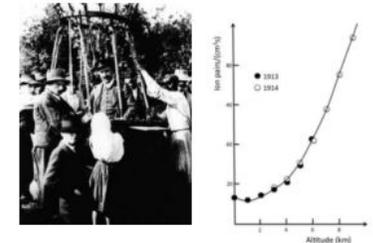
gli studenti (2 per sede, che parteciperanno allo stage saranno selezionati in base ad una relazione di massimo 3 pagine in cui riassumono l'esperienza dell'International Cosmic Day.

Tutte le informazioni saranno inserite sul sito

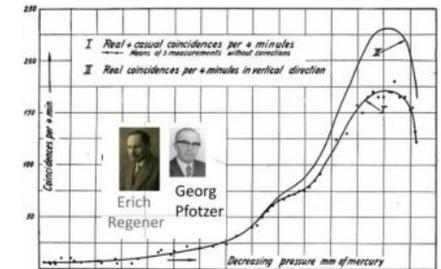
I raggi cosmici primari sono principalmente costituiti da protoni (adroni), che incidendo sull'atmosfera terrestre danno origine a cascate di particelle. Tra il 1913-1914, Victor Hesse (Nobel 1937), con delle ascensioni in pallone fino alla quota di 5300 metri, scoprì che la radiazione ionizzante aumentava con l'altitudine. Nel 1935, tramite l'uso dei palloni aerostatici, Regener e il suo studente Pfozter scoprirono che tale radiazione aumentava fino alla quota di 17000-20000 metri per poi diminuire, scoprendo quello che viene chiamato massimo di Regener-Pfozter. Nel 2018 e nel 2019, l'INFN, grazie alla collaborazione con le scuole di Nicotera e Cariati, ha portato due rivelatori di particelle del tipo ArduSiPM, con delle ascensioni su pallone, fino a quota di 27000 metri (EOS Project) e 34111 metri (MoCRiS project).



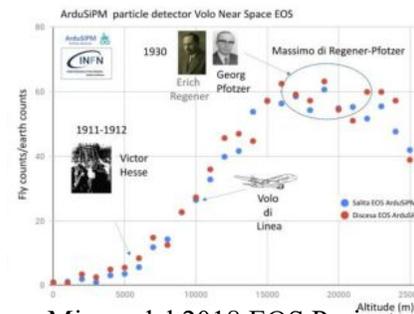
Misure del 1913-1914



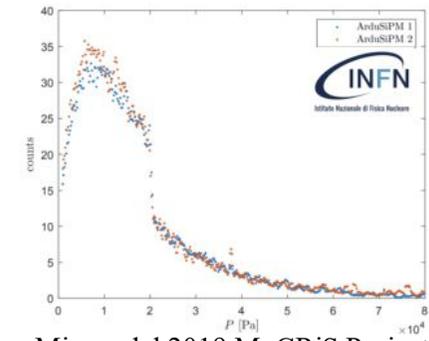
Misura del 1935



Durante lo stage OCRA del 2020, presso i Laboratori Nazionali di Frascati, sarà effettuato un nuovo lancio con pallone aerostatico, relativo recupero dei rivelatori e analisi dei dati raccolti.



Misura del 2018 EOS Project



Misura del 2019 MoCRiS Project