

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



Apri la tua mano...

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



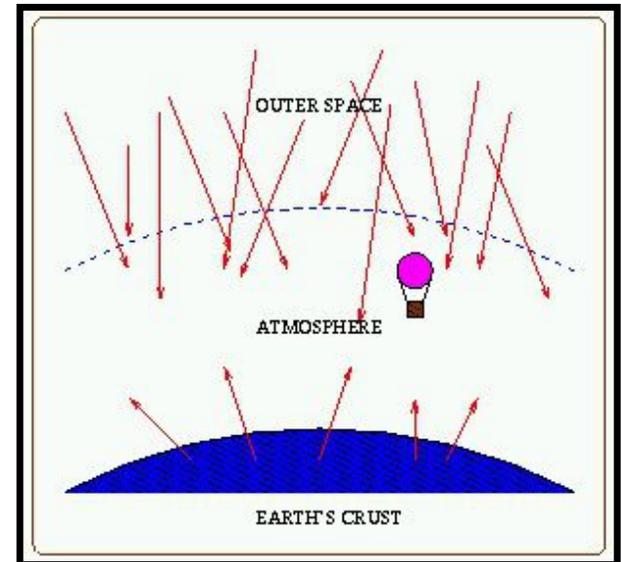
i "muoni" vengono create dai
"Raggi Cosmici", particelle di vario tipo
che dallo spazio esterno entrano nella
nostra atmosfera ed interagiscono con
l'atmosfera stessa

1912: Scoperta dei 'Raggi Cosmici'



- Victor Hess volò su pallone ad un'altitudine di 5000 metri
- Misurò la radiazione 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**



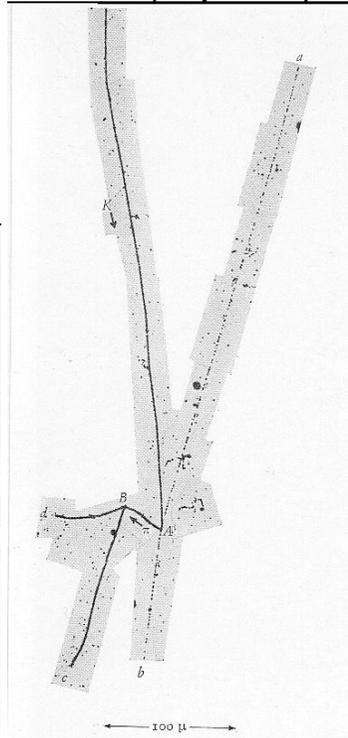
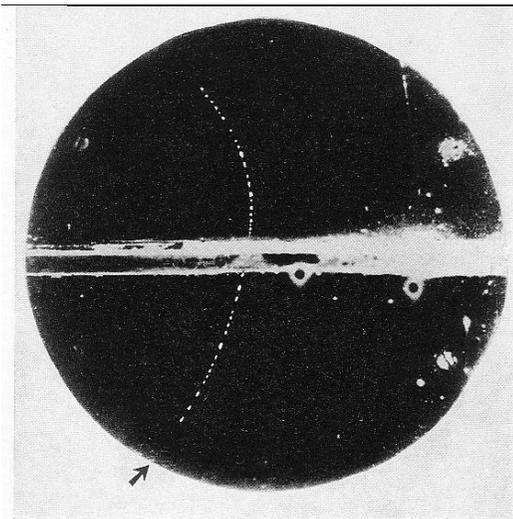
- 1926 Millikan introdusse il nome di 'cosmic rays' (raggi cosmici)

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

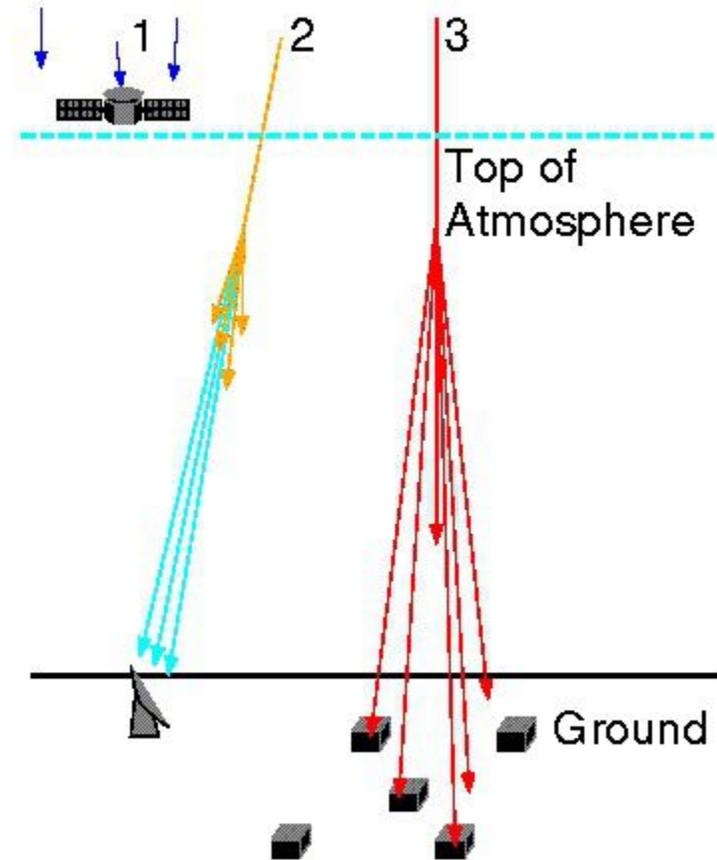
Anni 1930-1950:

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

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

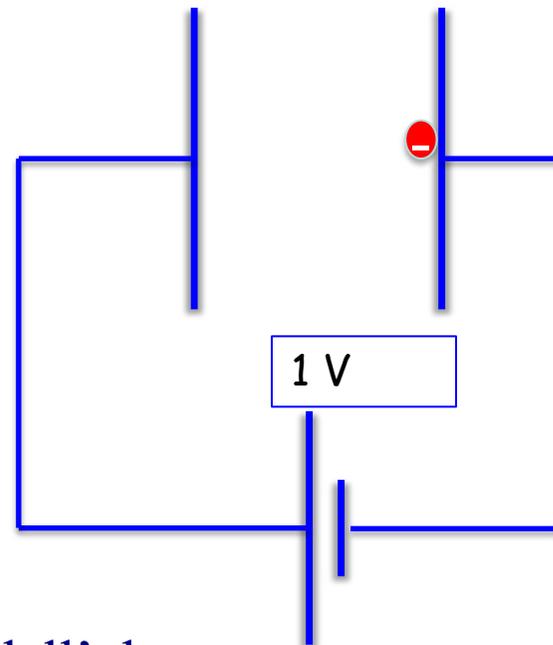


Attualmente: principalmente sonde per lo studio dell'astrofisica



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



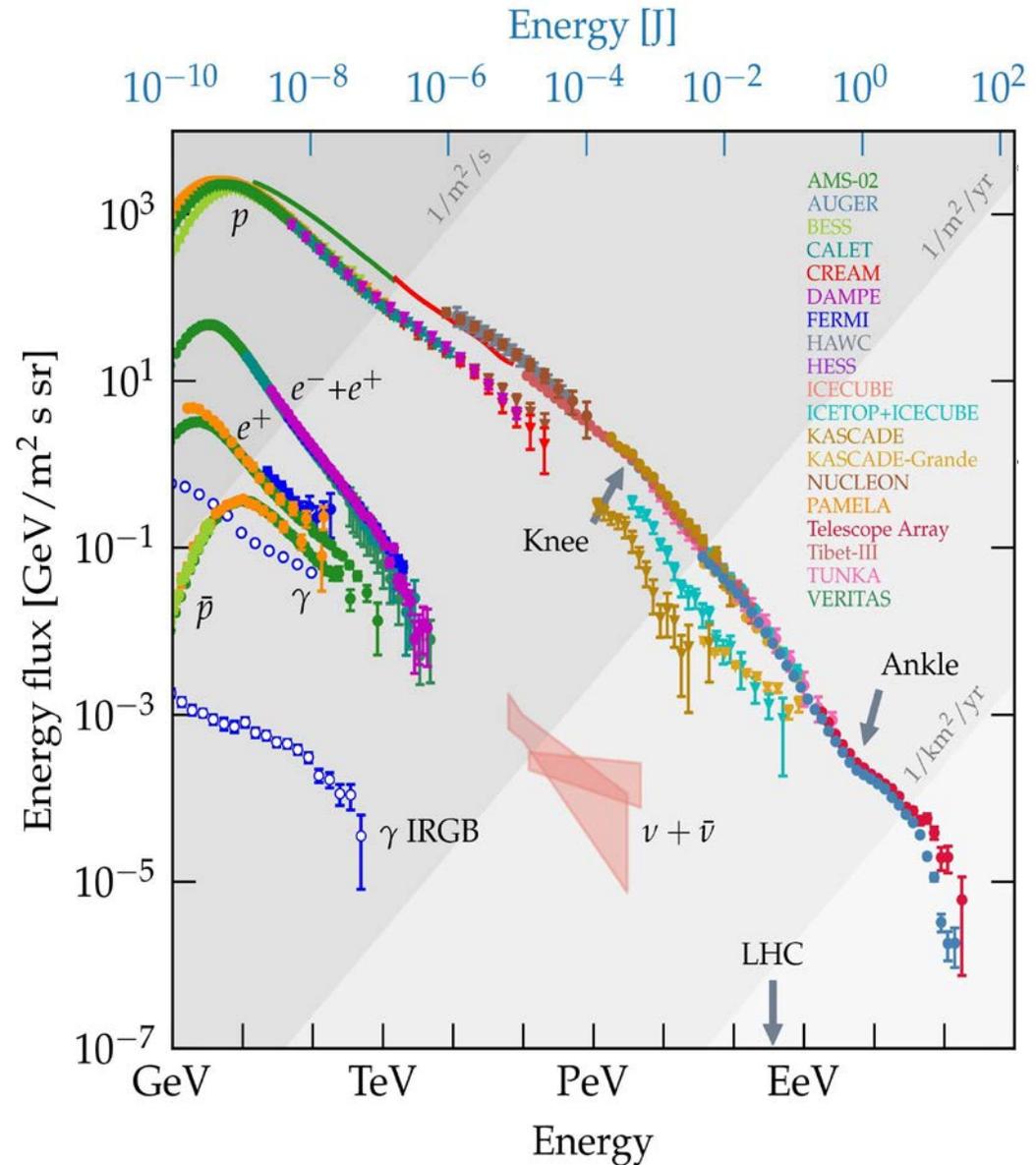
- La luce visibile ha un energia di 1,6 / 3,4 eV
- 1 MeV (1.602×10^{-13} J): 2 volte l'energia a riposo dell'elettrone
- 200 MeV: Energia media della fissione di un nucleo di U-235
- 125.1 ± 0.2 GeV: La massa del bosone di Higgs
- 1 TeV: Mille miliardi di eV, l'energia cinetica di una zanzara in volo

Nota:

KeV = 10^3 eV MeV = 10^6 eV GeV = 10^9 eV TeV = 10^{12} eV PeV = 10^{15} eV EeV = 10^{18} eV

Cosa sono i raggi cosmici

I raggi cosmici nello spazio sono particelle elettricamente cariche costituite principalmente da protoni (circa per il 90%), nuclei di elio (circa 9%) e il rimanente 1% da tutti gli altri nuclei atomici della tavola periodica, elettroni e le rispettive anti-particelle. Le sorgenti dei raggi cosmici possono essere sia galattiche sia extra-galattiche. Poi ci sono anche i fotoni



Onde Radio, raggi di sole, fotoni Gamma

Lo spettro elettromagnetico

Le 2 relazioni fondamentali:

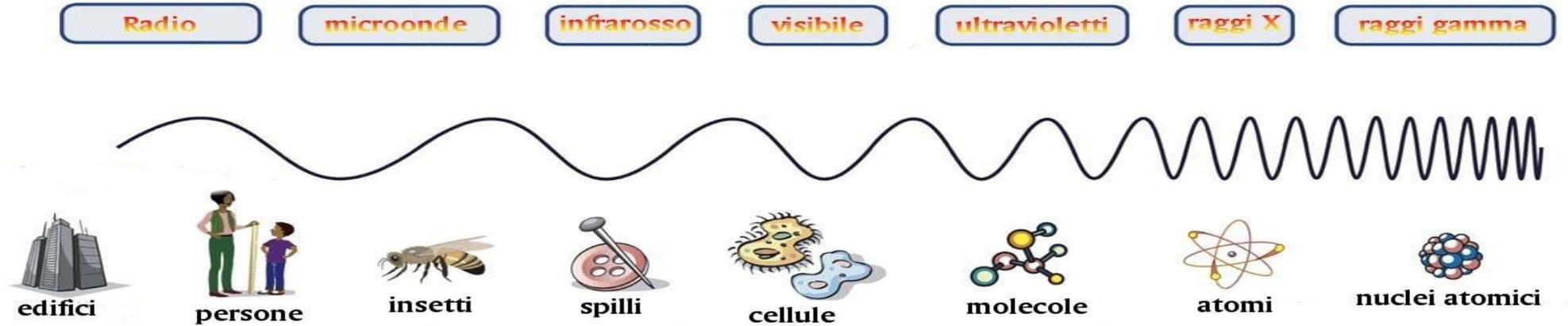
$$E = h \nu$$

E = energia
 ν = frequenza

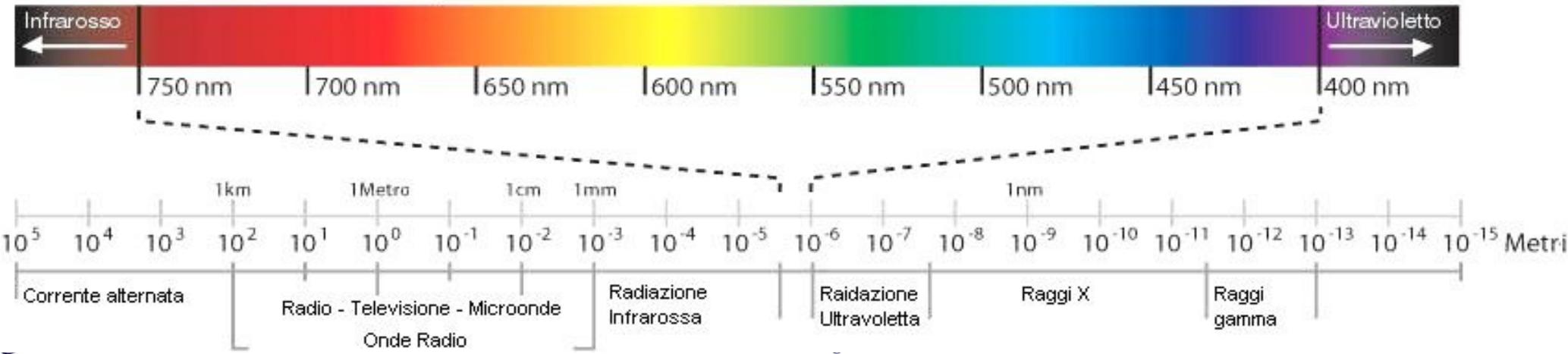
$$c = \lambda \nu$$

c = velocità della luce
 λ = lunghezza d'onda

Radiazione elettromagnetica



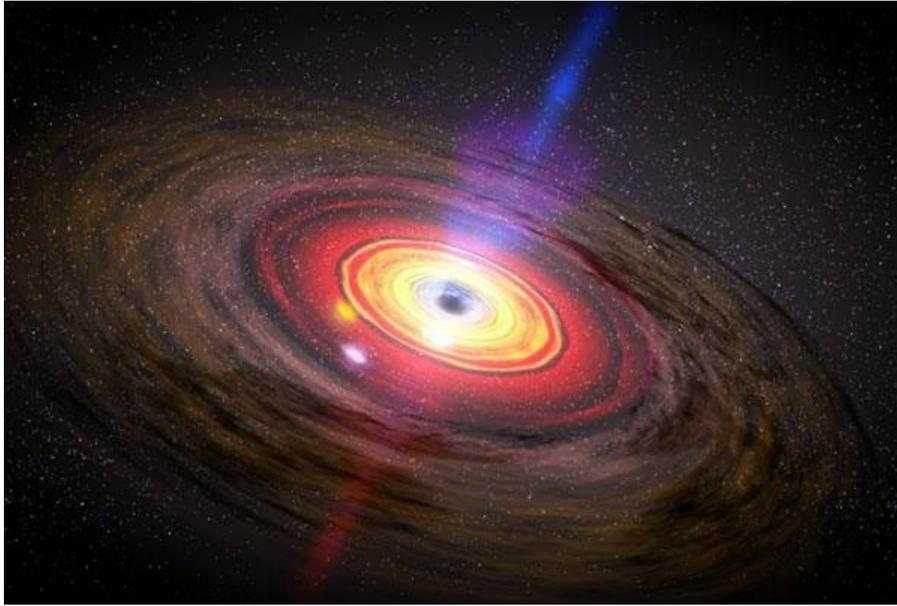
Spettro di luce visibile all'occhio umano



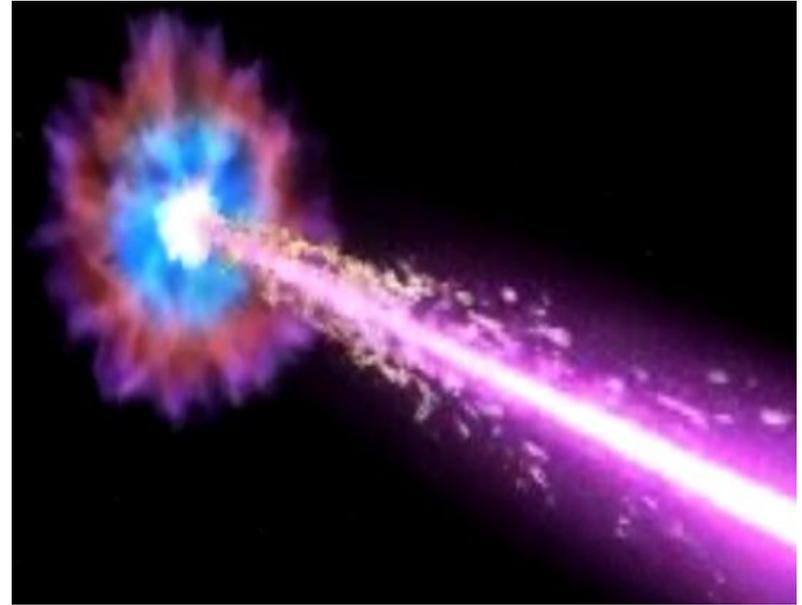
ma esistono i raggi gamma ?

- e come vengono prodotti ?

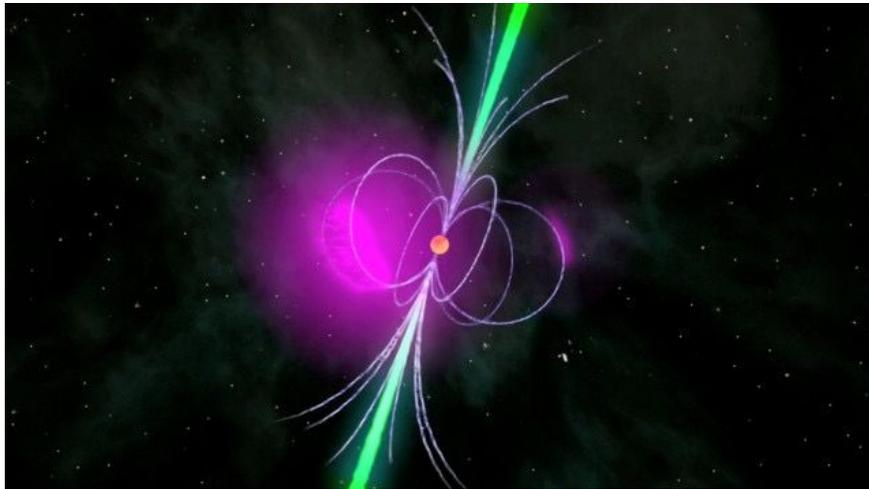
Chi emette raggi gamma?



Nuclei Galattici Attivi (AGN)



Gamma Ray Burst (GRB)



Pulsar



Resti di supernova

Esplosione di supernova





un buco nero rotante in un disco di accrescimento



Fisica delle particelle => Astrofisica delle particelle

acceleratori terrestri

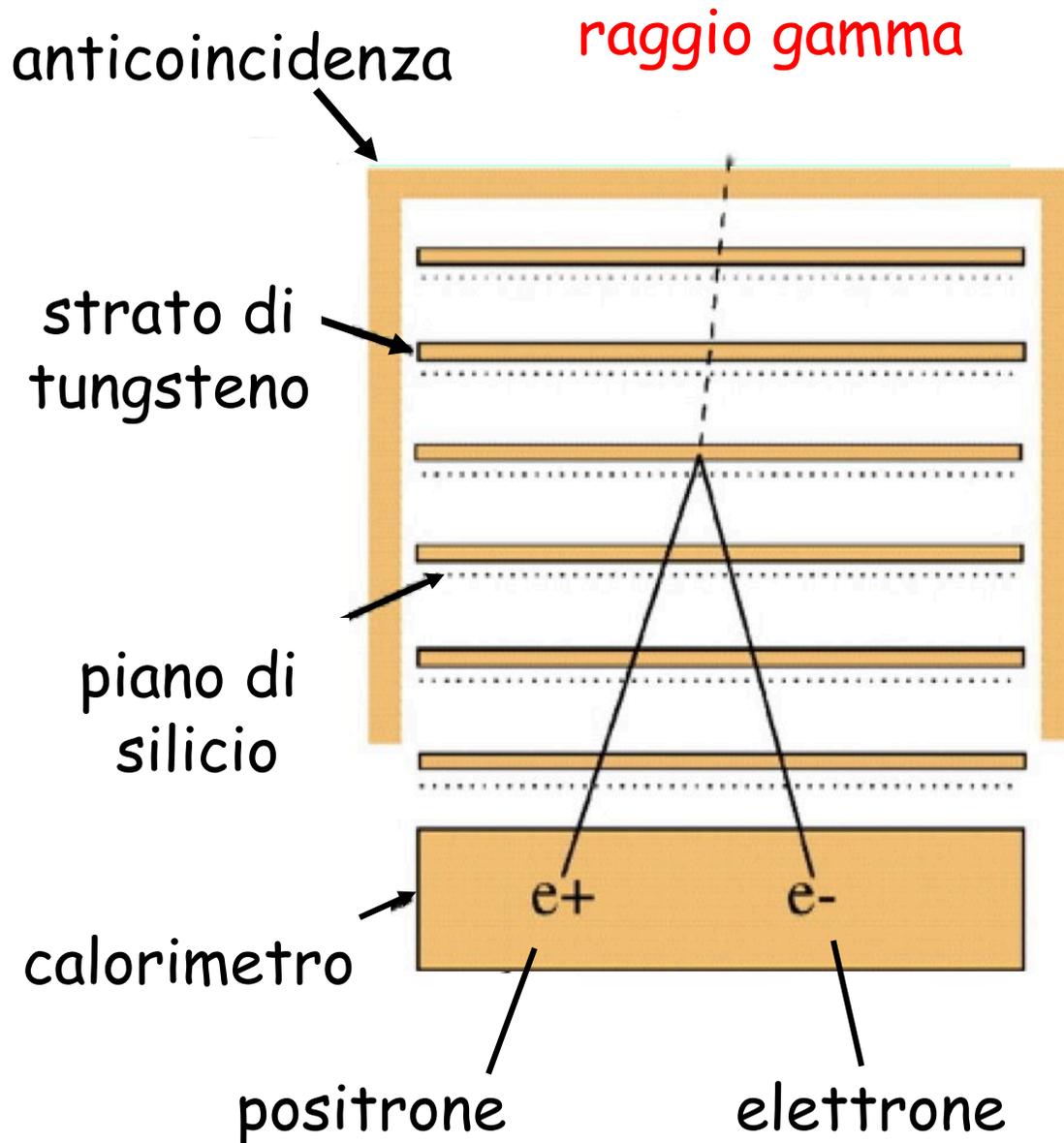
acceleratori cosmici

Diameter of collider



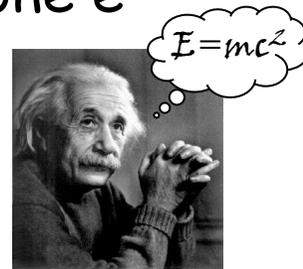
Energy of accelerated particles

Rivelare i raggi gamma

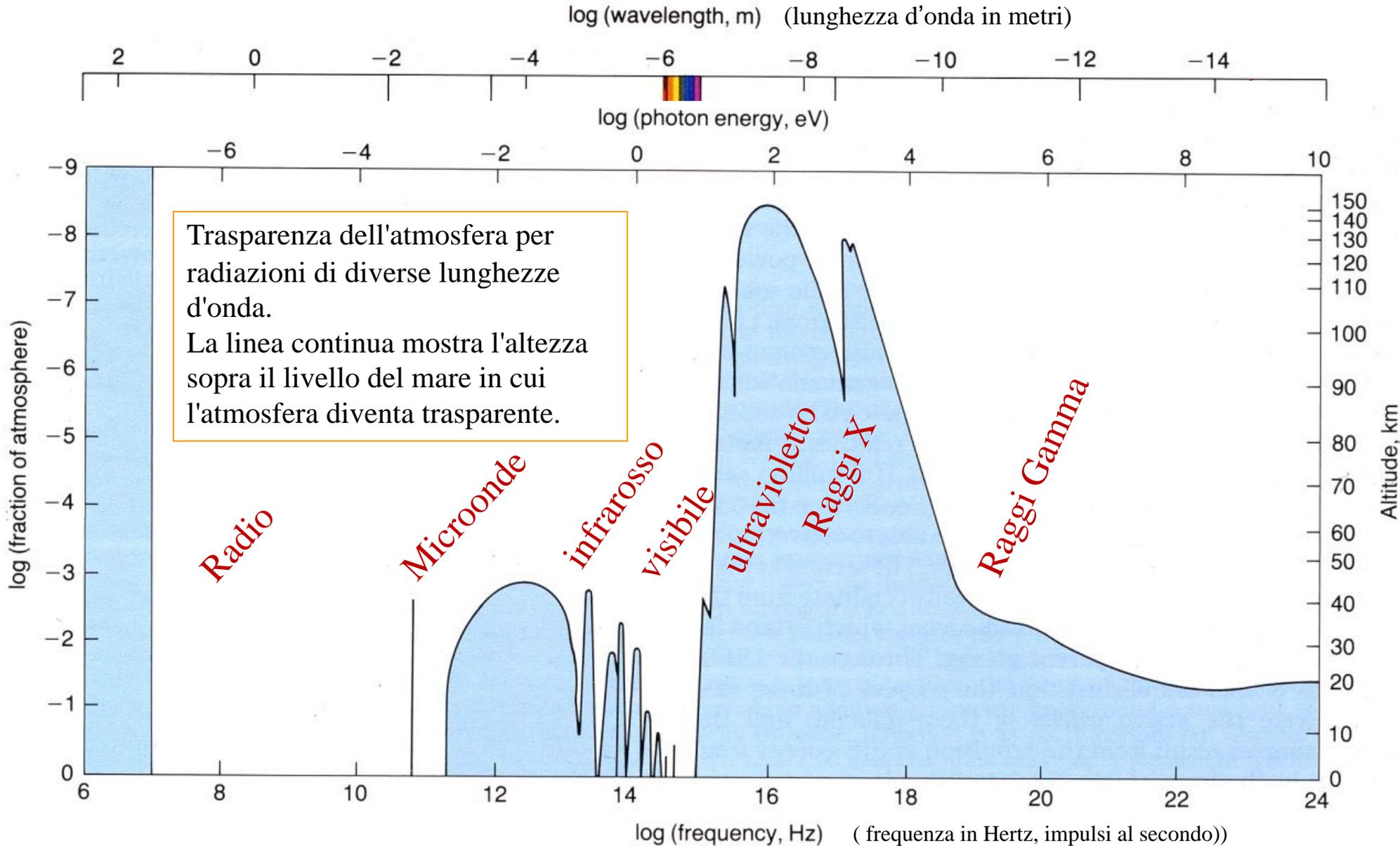


La produzione di coppia elettrone - positrone avviene attraverso la trasformazione dell'energia elettromagnetica associata al fotone (il raggio gamma) quando interagisce con il campo elettromagnetico del nucleo pesante (tungsteno, piombo). Questo è possibile grazie a:

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



Trasparenza dell'atmosfera



AGILE : Istituti e Industrie coinvolte



INAF



CARLO GAVAZZI

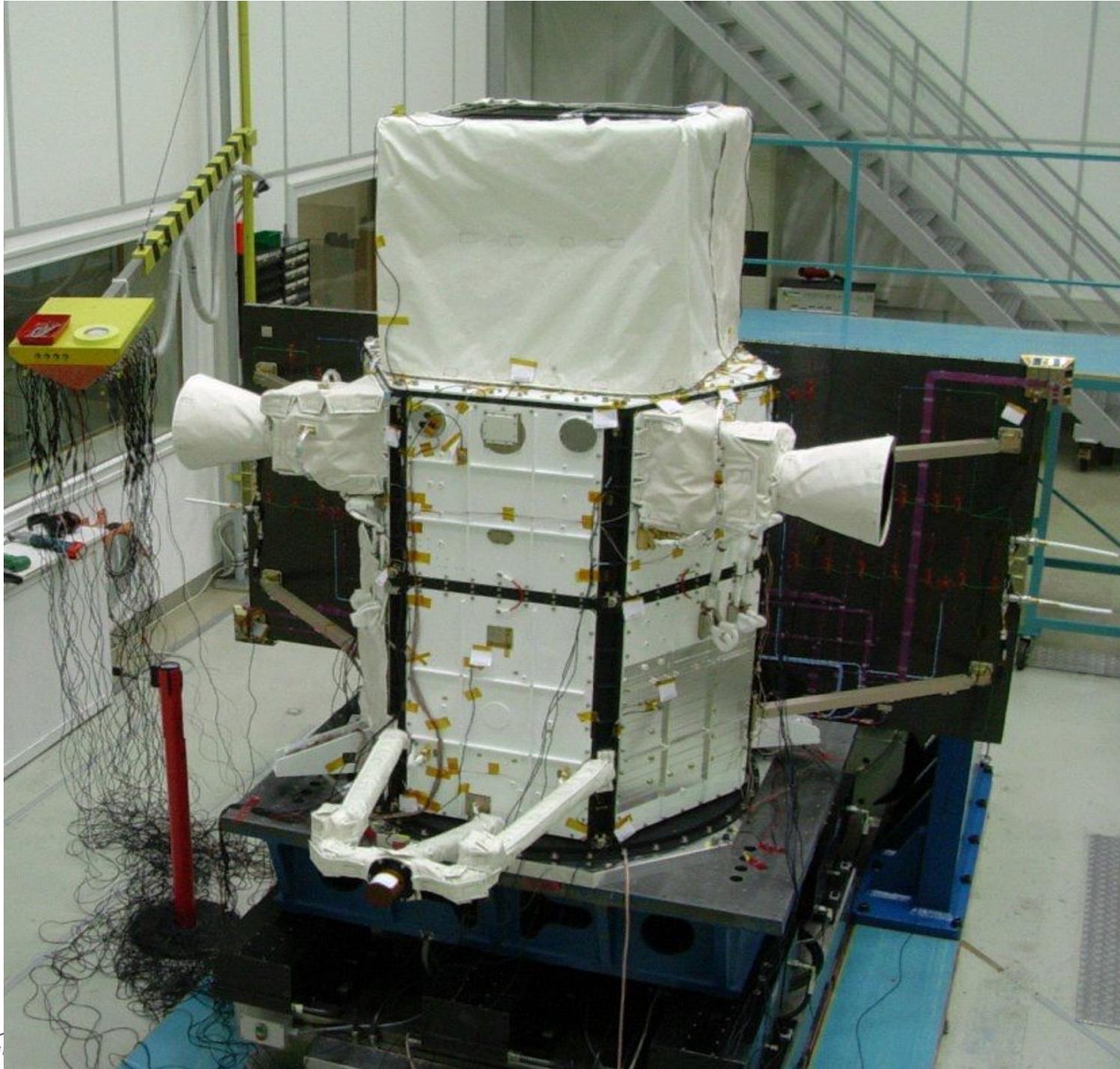
Carlo Gavazzi Space SpA



ENEA



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



AGILE in Sriharikota, April 10, 2007



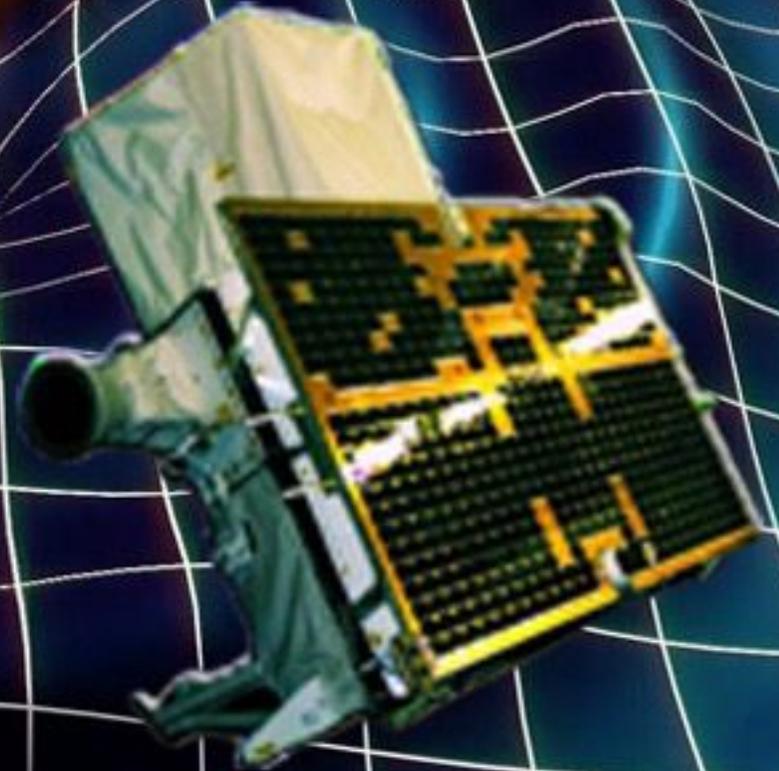
PSLV-C8 launch, 23 Apr. 2007



AGILE

23 April 2007

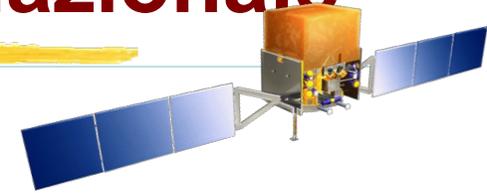
Happy 12th Birthday Agile !!



Il Telescopio di raggi Gamma FERMI



Fermi : una collaborazione internazionale

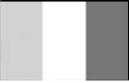


American Institutions

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

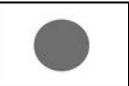
Italian Institutions

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



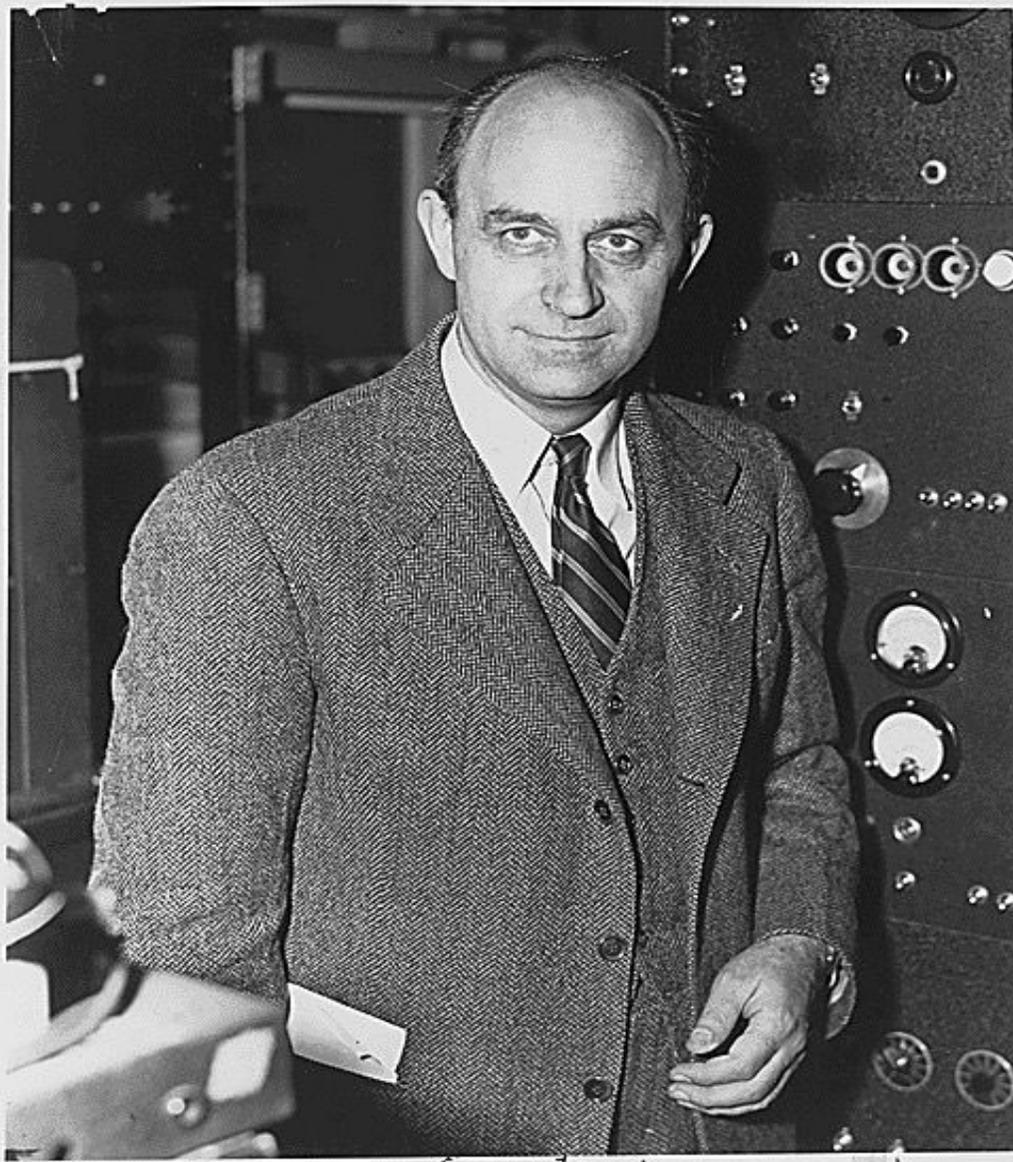
Collaboration members:	~390
Members:	121
Affiliated Scientists	~96
Postdocs:	68
Graduate Students	105

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.

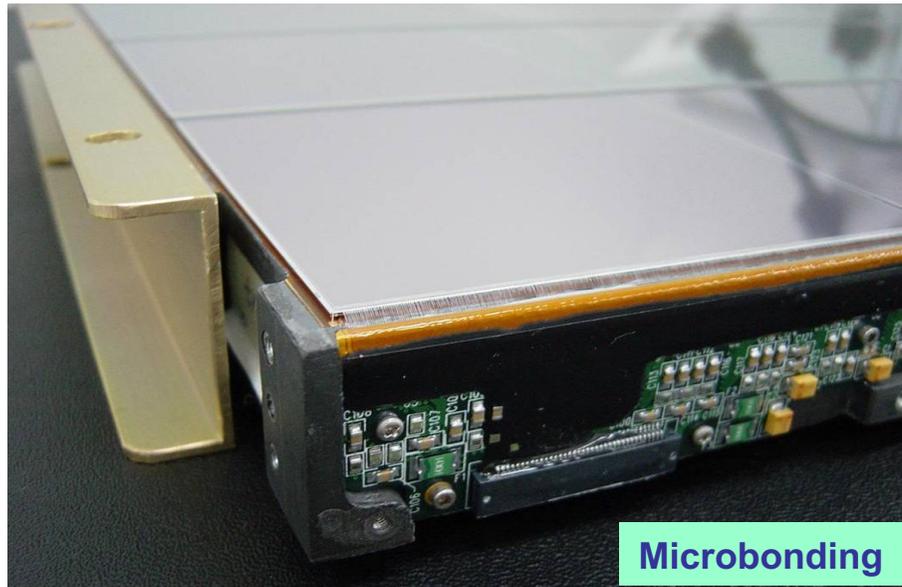
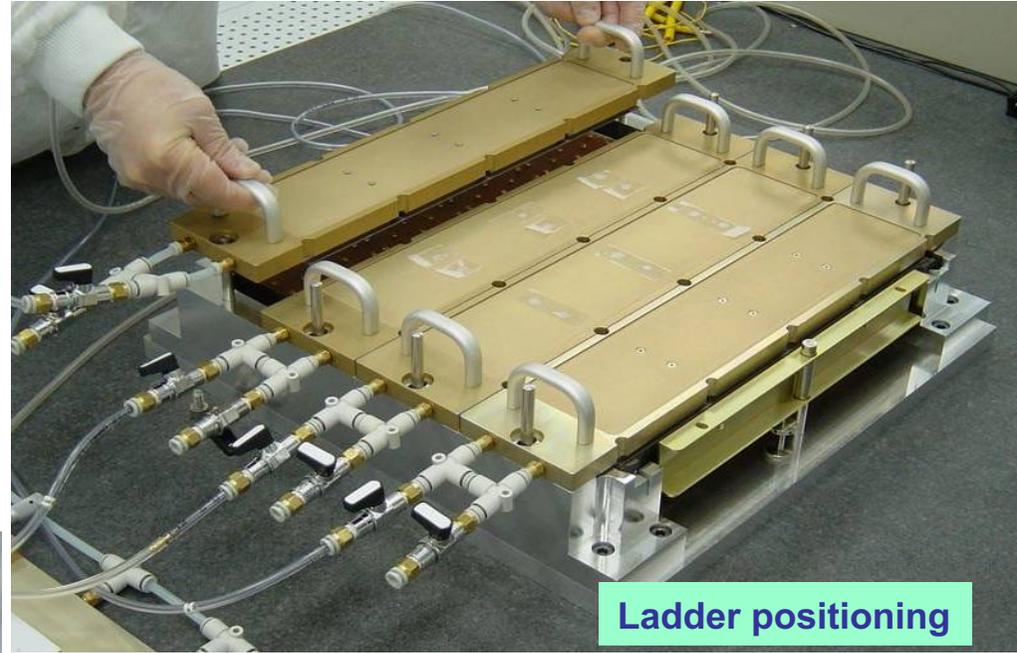
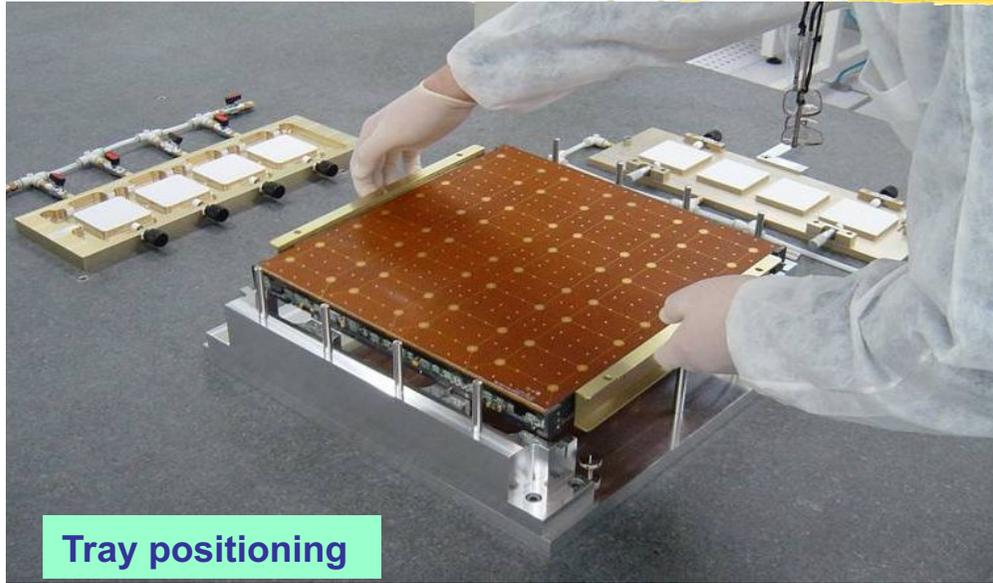
Il Telescopio di raggi gamma Fermi

Large Area Telescope

Gamma ray Burst Monitor



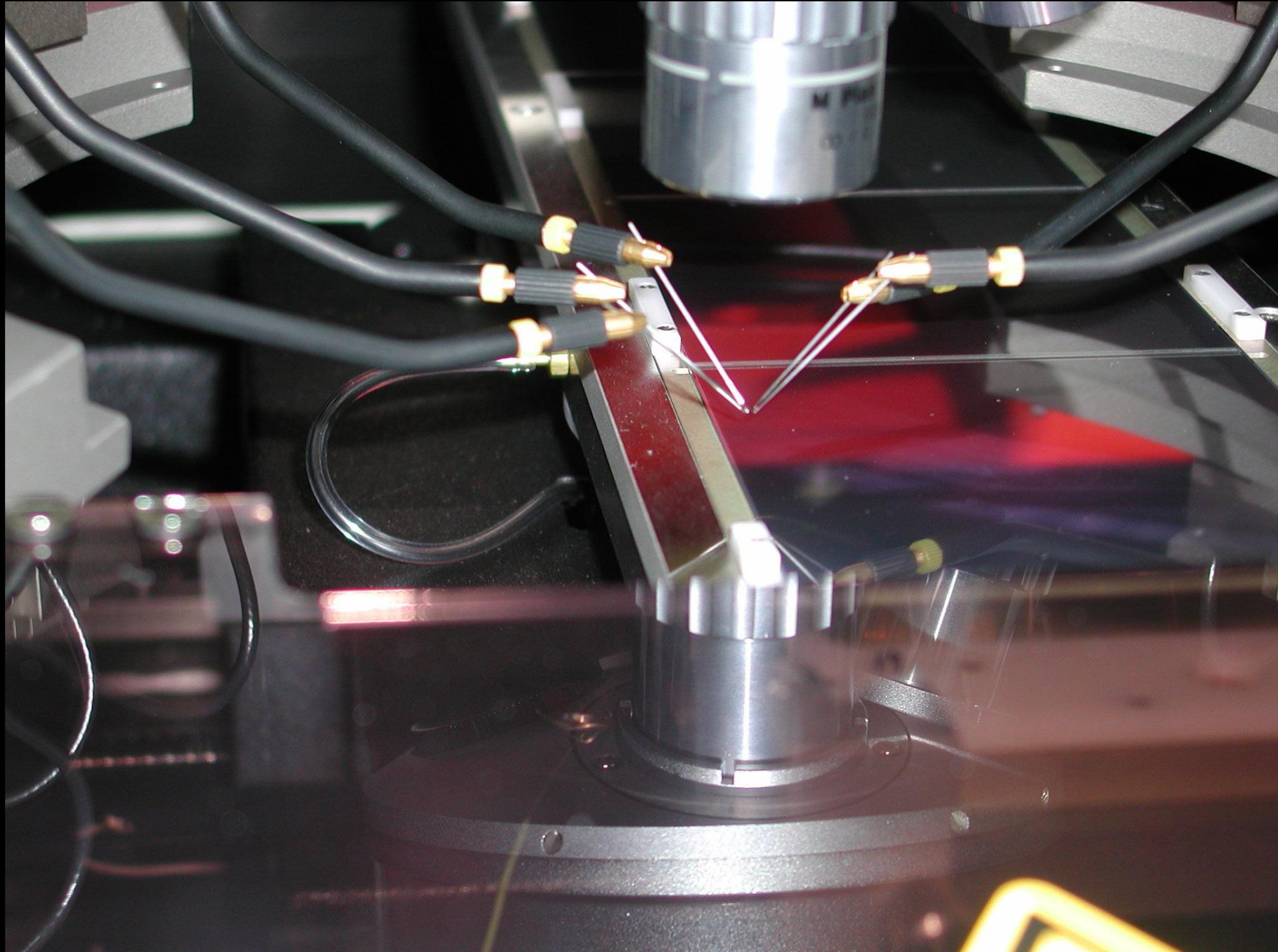
Assemblaggio presso la G&A ad Oricola













Tray Test at INFN Roma 2

LOAD ALIGN OUT SET SET 2 STOP

CENTER

0.25%

SET SET 2 SET

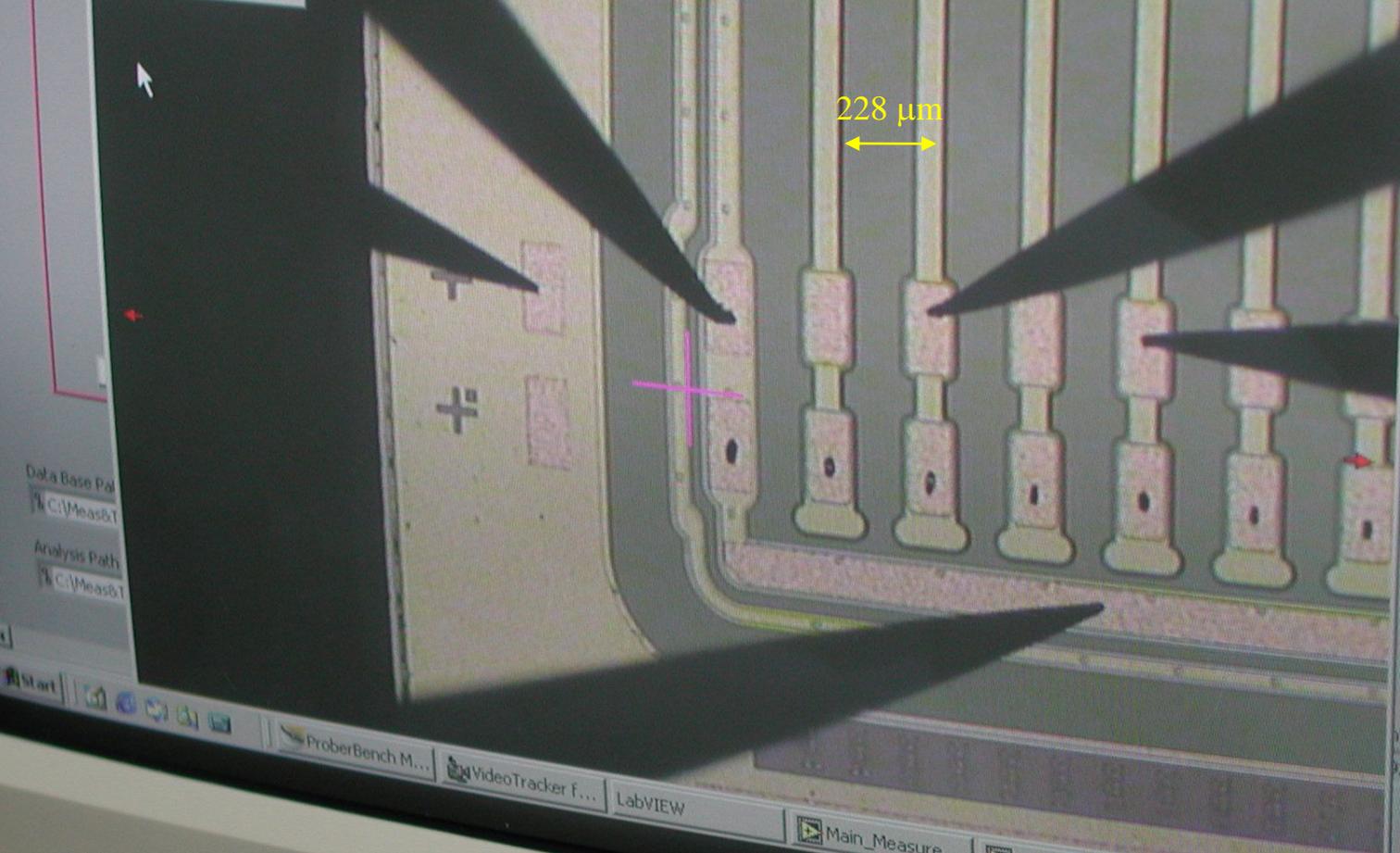
2x 10x 20x 50x

Automatically move chuck to each point
 Automatically turn on chuck vacuum

Align Chuck

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



R 4S

 Bad strips

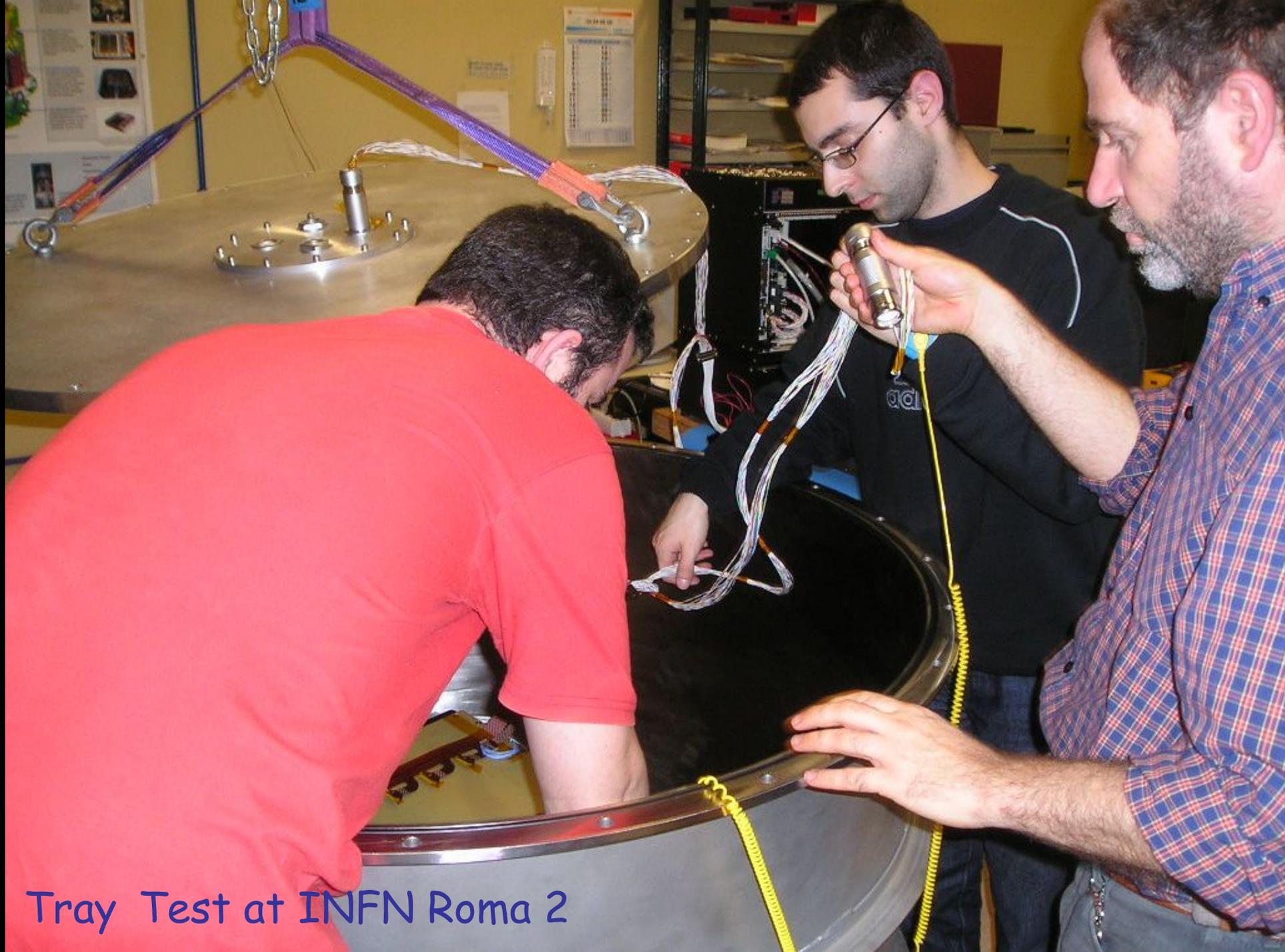
 tact
 207.500000

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

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

IT 11.25

Hansol

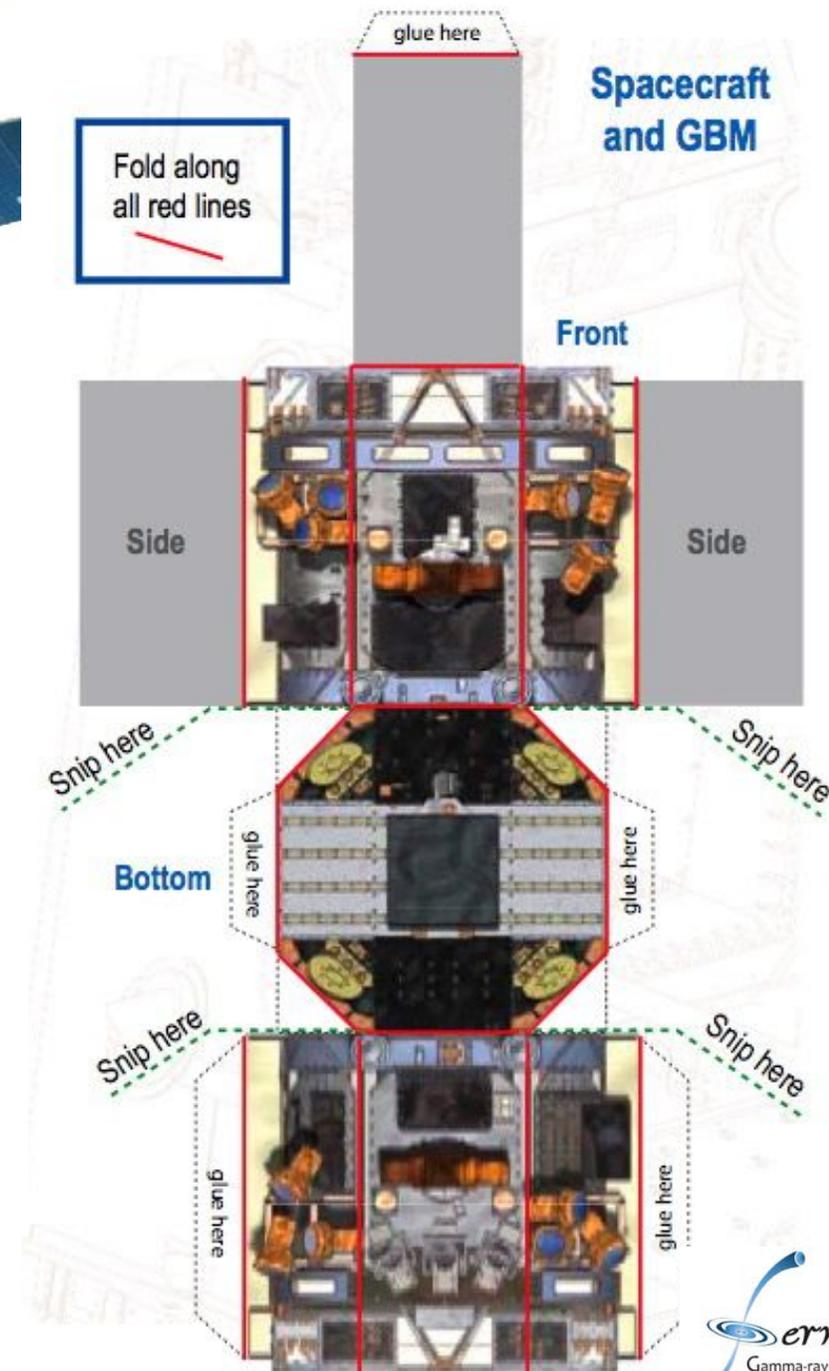
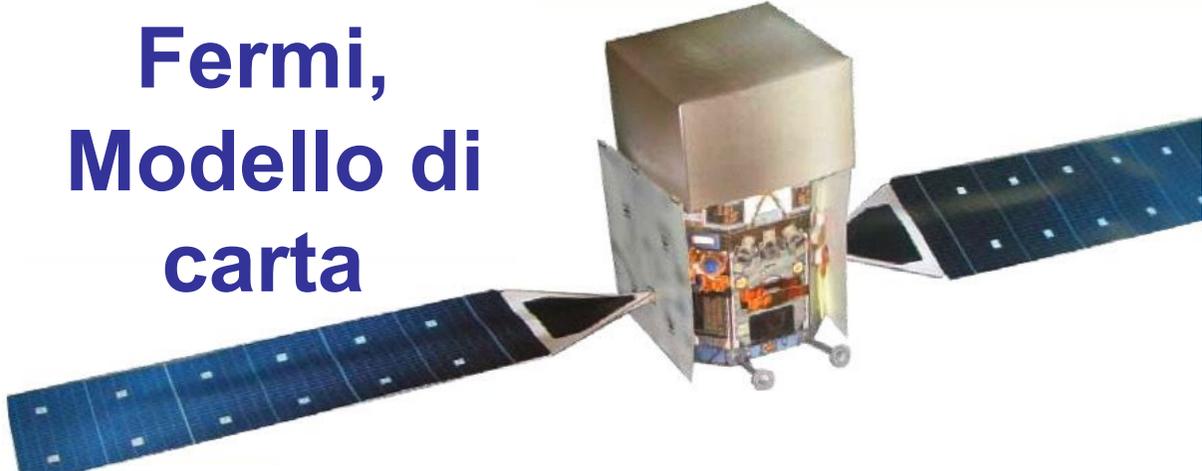


Tray Test at INFN Roma 2

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

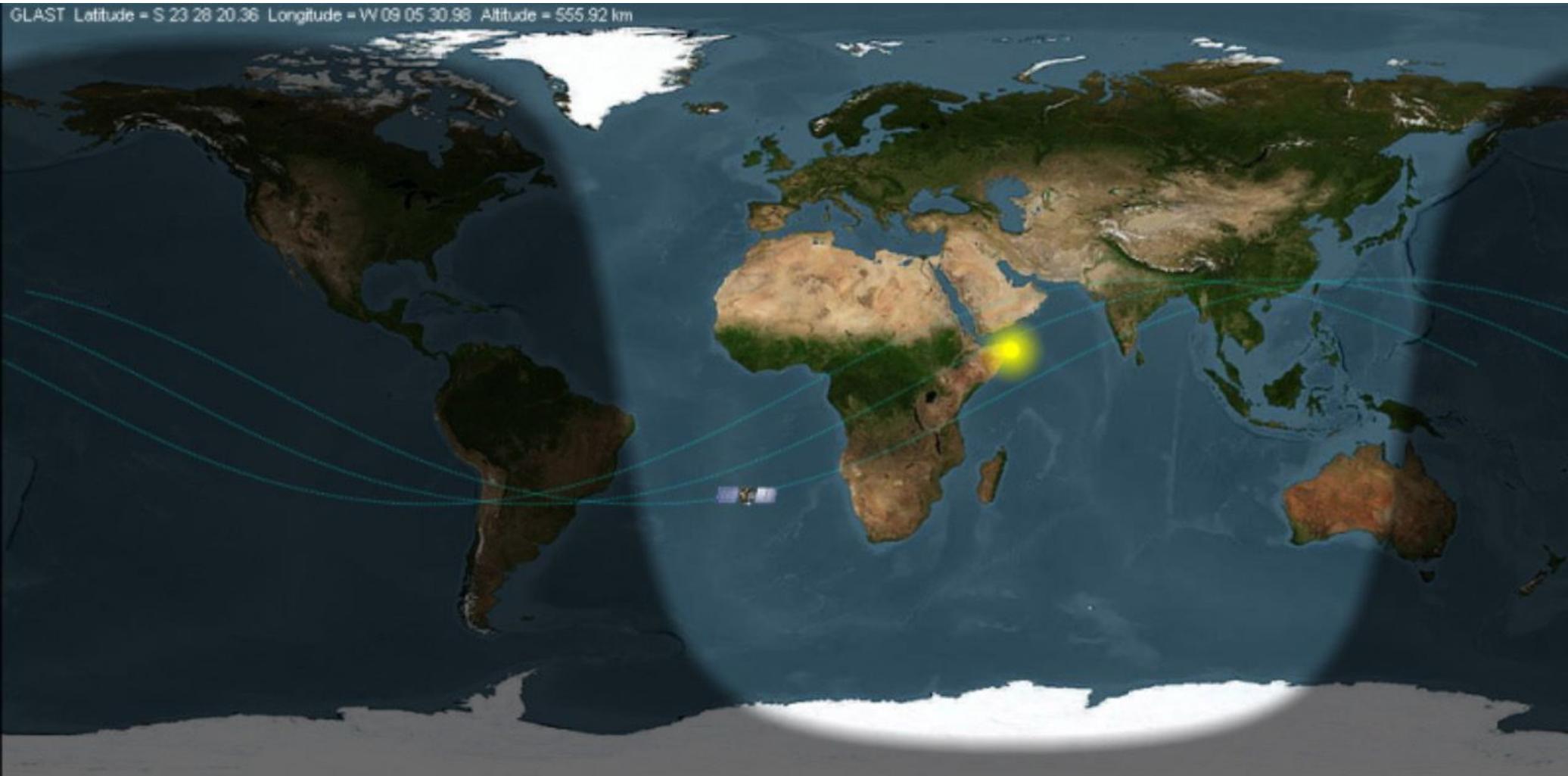


11 June 2008



11 June 2008

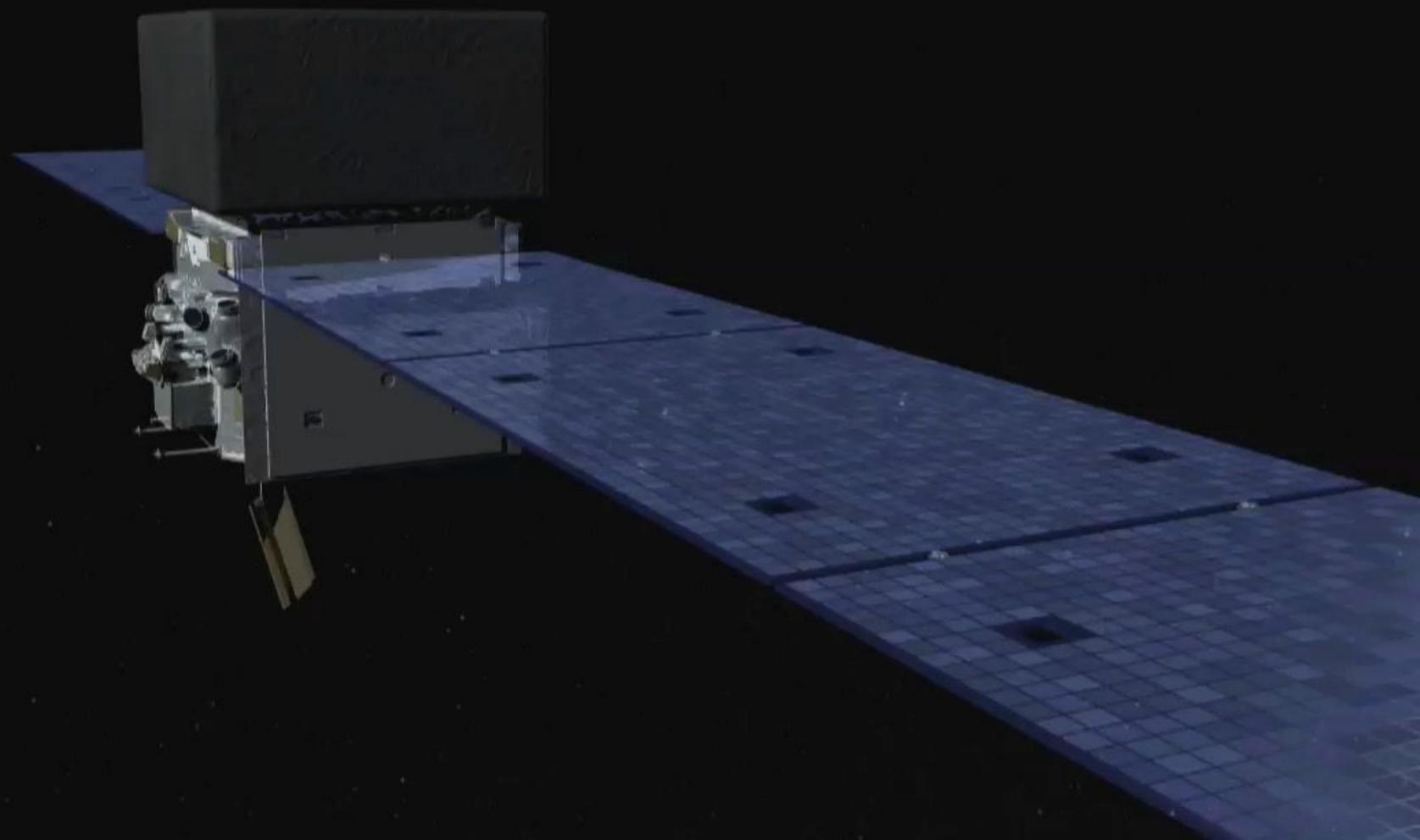
Fermi in orbita

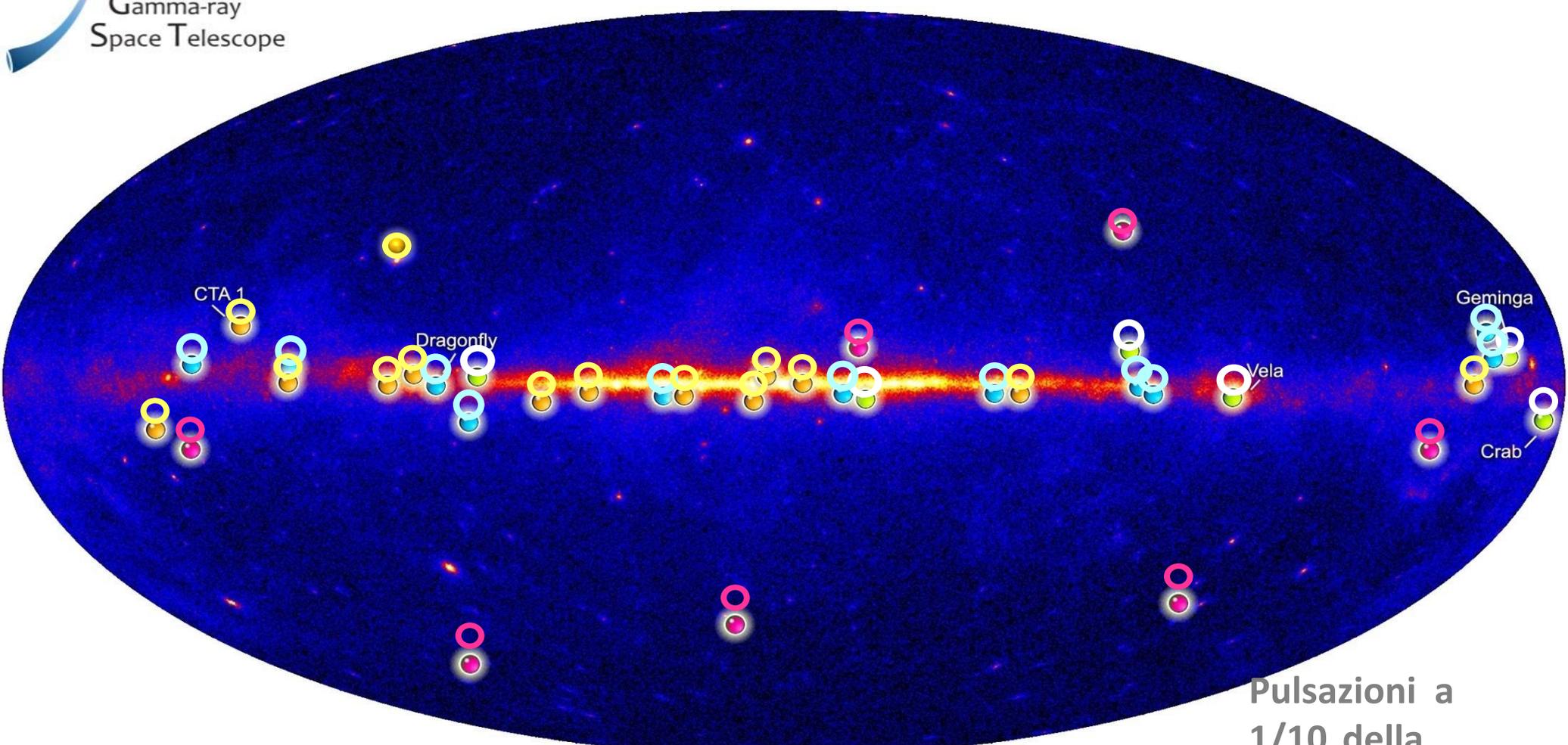


- Per rintracciare il satellite: <http://observatory.tamu.edu:8080/Trakker>
- Per vedere il satellite sopra la città :

http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/glast_online.html







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

Telescopio Fermi : principali risultati scientifici

- La mappa piu' completa del cielo nei raggi gamma
- Origine dei raggi cosmici e meccanismi di accelerazione
 - evidenza di accelerazione di protoni nelle supernove e di una popolazione di elettroni galattici ad alta energia
- Fermi Bubble: una struttura a bolla che parte dal centro galattico
- Nascita dell'astronomia multimessaggera
 - con le Onde Gravitazionali: prima rivelazione di emissione elettromagnetica dopo la fusione un sistema binario di stelle a neutroni
 - con i neutrini: prima associazione tra la rivelazione di neutrini da una galassia durante una emissione impulsiva di raggi gamma
- Materia oscura
 - Limiti piu' stringenti su candidati di materia oscura
 - Indizi di segnale dal centro galattico



Happy 13th Birthday Fermi !!

11 June 2008



Pisa 15 March 2018



COSMIC RAYS
(p, He, e⁻,...)



NEUTRINOS

**GRAVITATIONAL
WAVES**

**MULTIMESSENGER
ASTRONOMY**

PHOTONS



www.particlezoo.net

GW170817

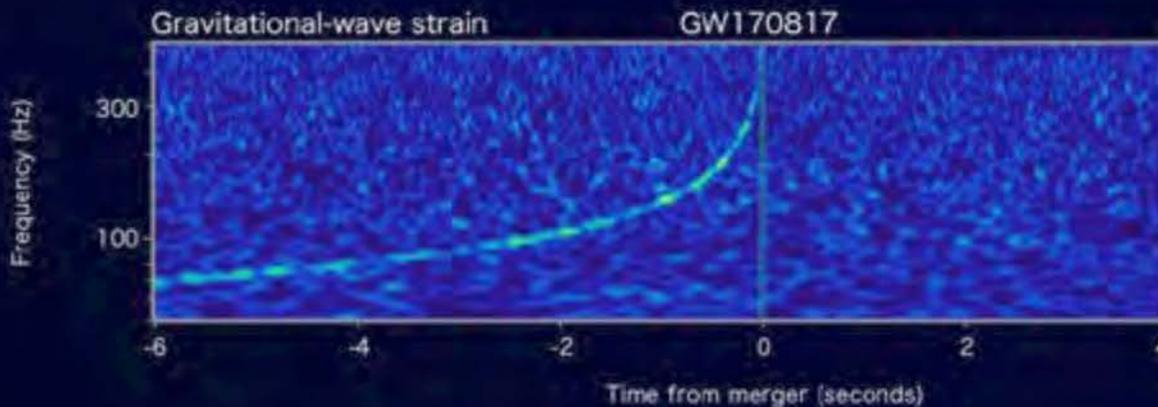
Fermi

Reported 16 seconds after detection



LIGO-Virgo

Reported 27 minutes after detection



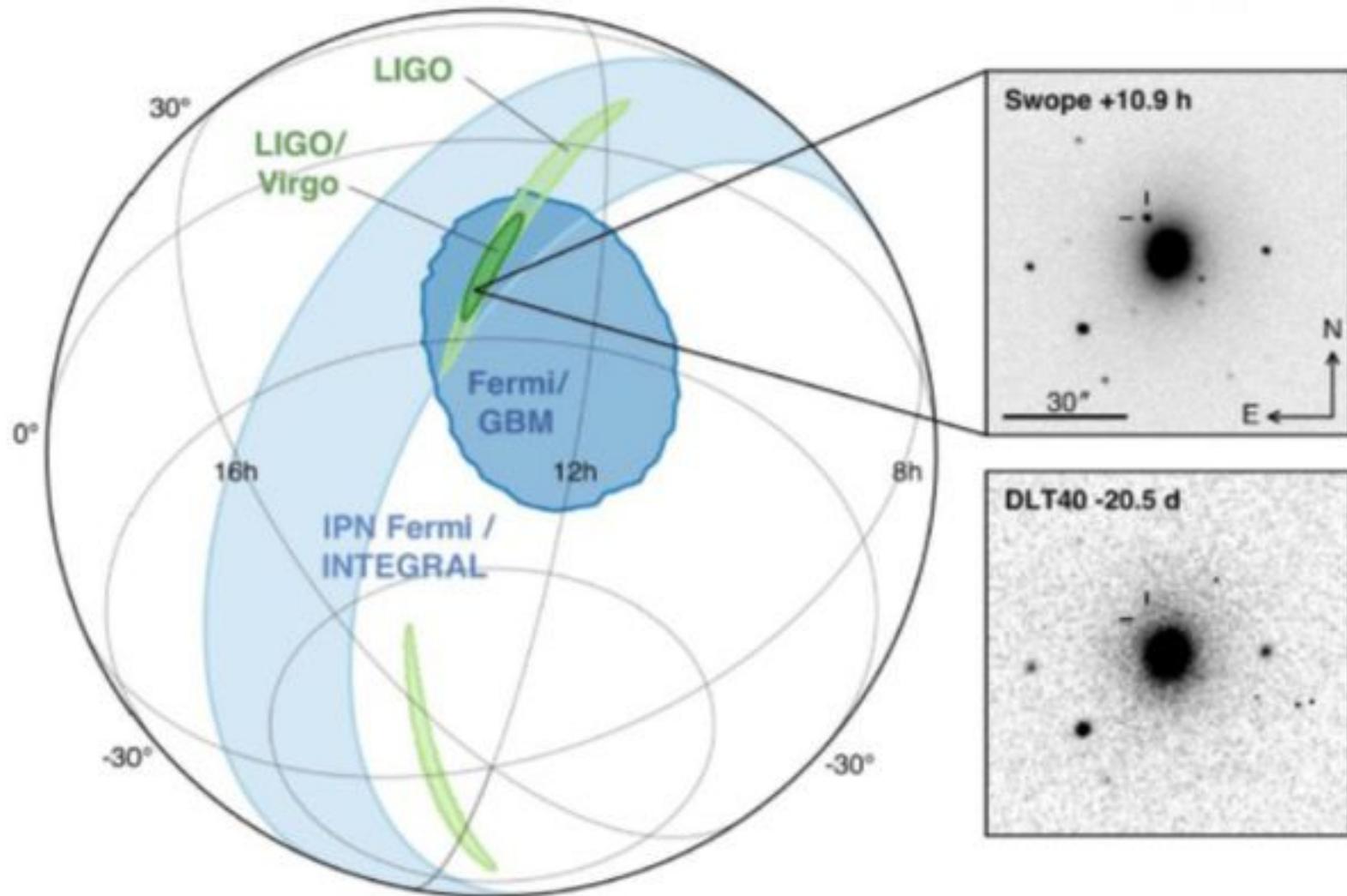
INTEGRAL

Reported 66 minutes after detection



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

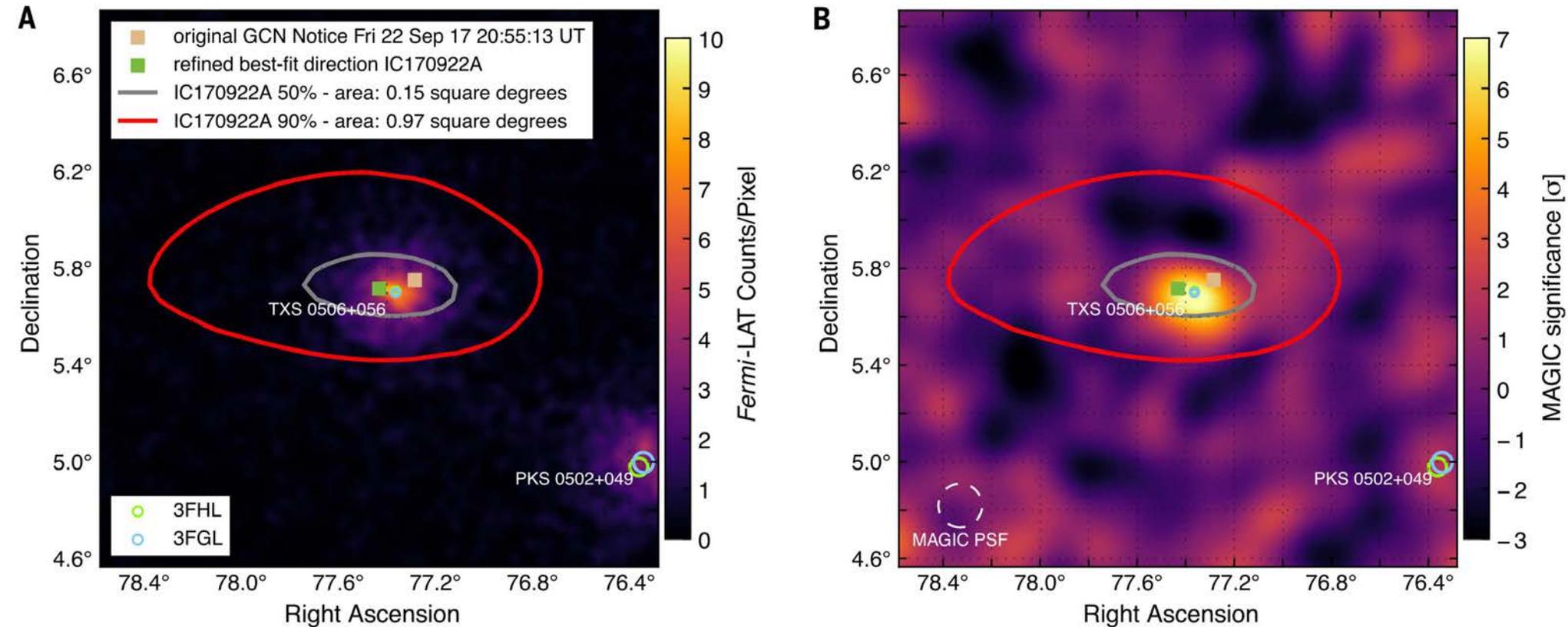
GBM e Onde Gravitazionali: 17 08 2017



→ intervento Prof. Ricci

Astronomia multimessaggero: neutrini

- I buchi neri delle galassie attive sono le sorgenti dei neutrini e quindi dei raggi cosmici di altissima energia (UHECR) ?
- Il caso di EHE 170922 (TXS 0506 +056)



Fermi-LAT and MAGIC observations of IceCube-170922A's location.

Distribuzione della materia oscura secondo le simulazioni



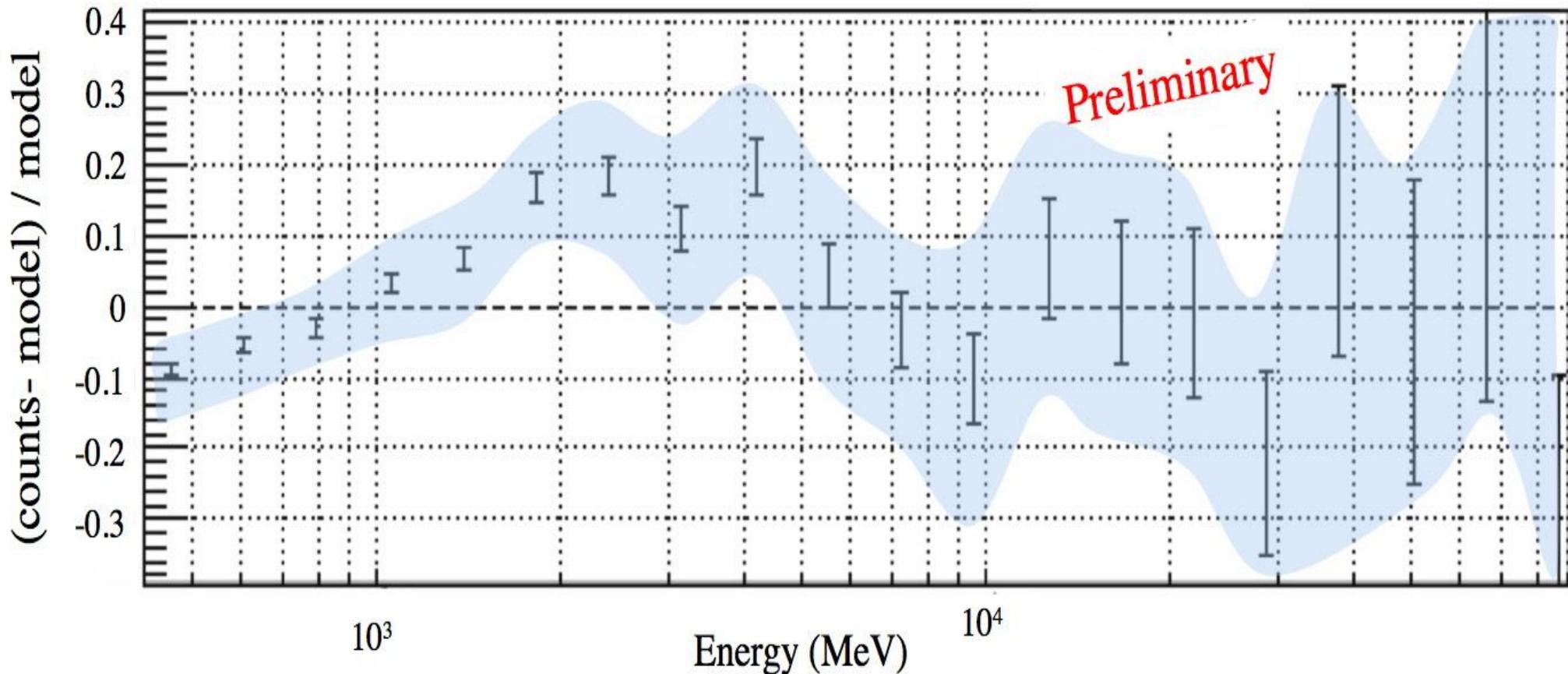
- con il telescopio Fermi si spera di rivelare i gamma provenienti dall'annichilazione di materia oscura nelle sotto-strutture

Residui dei fotoni dal centro galattico

(dati - modello)

regione di $7^\circ \times 7^\circ$ centrata nel Centro Galattico, 11 mesi di dati, $E > 400$ MeV)

- Incertezza sistemática $\sim 10\%$ at 100 MeV e 20% at 10 GeV



potrebbe essere un segnale dalla
materia oscura ?

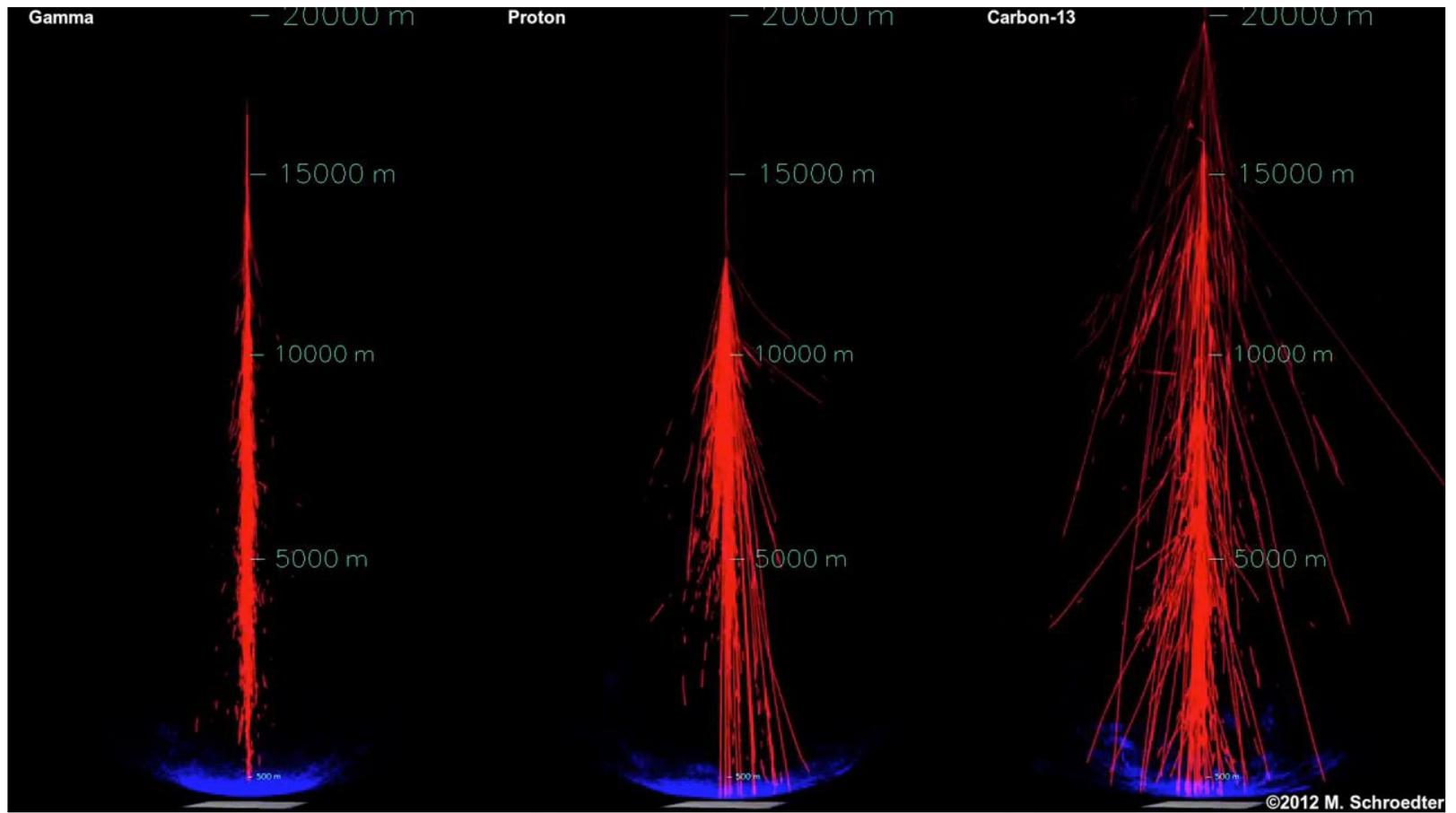
forse.

bisognerà escludere tutte le altre
ipotesi,
rendere più precisi i modelli,
c'e' ancora molto lavoro da fare
ma e' un bel lavoro!

E a energia piu' alta?

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





Intensità dell'immagine

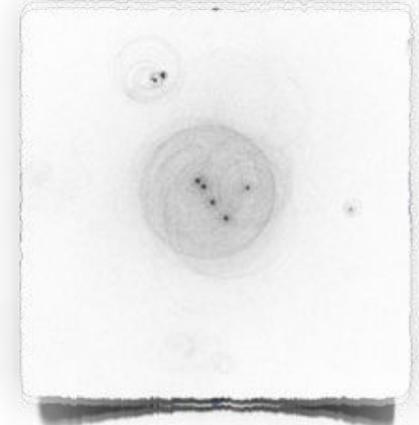
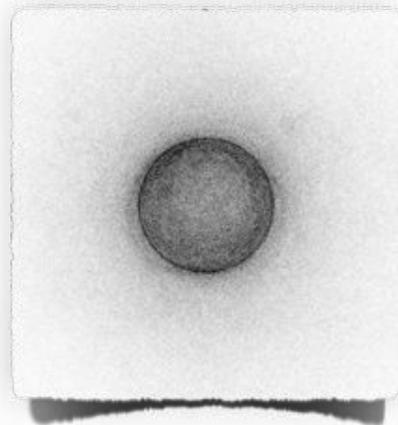
↳ *energia*

orientamento

↳ *direzione*

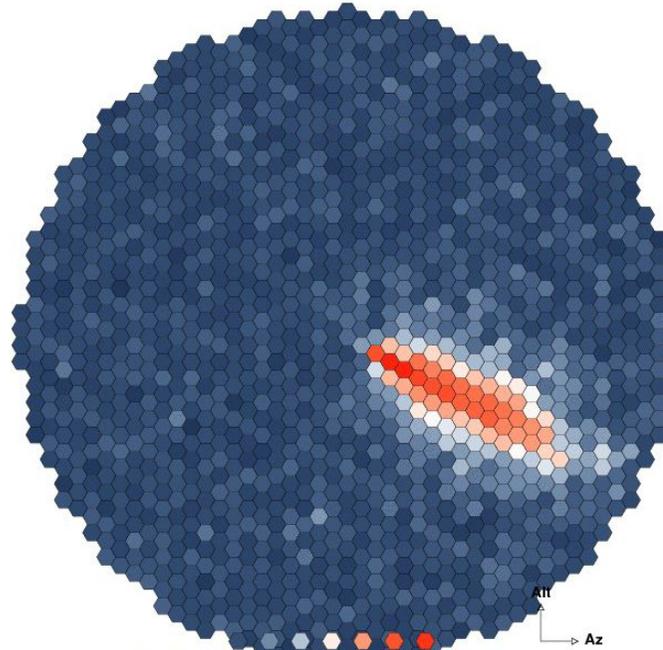
Forma dell'immagine

↳ *tipo di particella*



Time = 11.0 nanoseconds

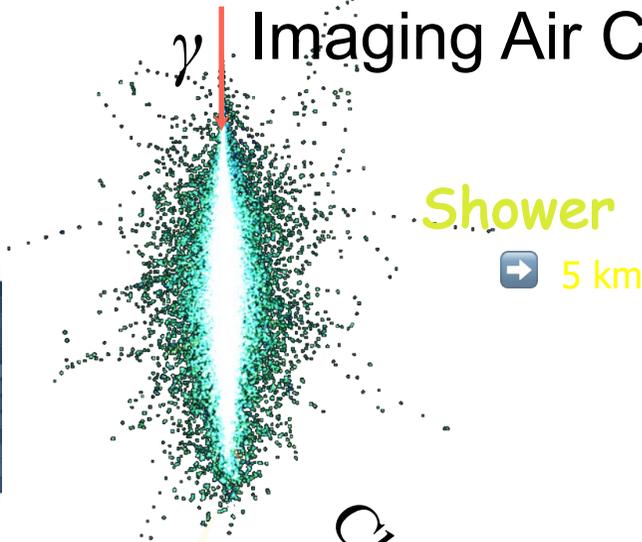
Imaging Air Cherenkov Technique



Intensity: 0 6 16 36 66 180 900 p.e.

Primary: gamma of 50.000 TeV at 107 m distance

Az



Shower

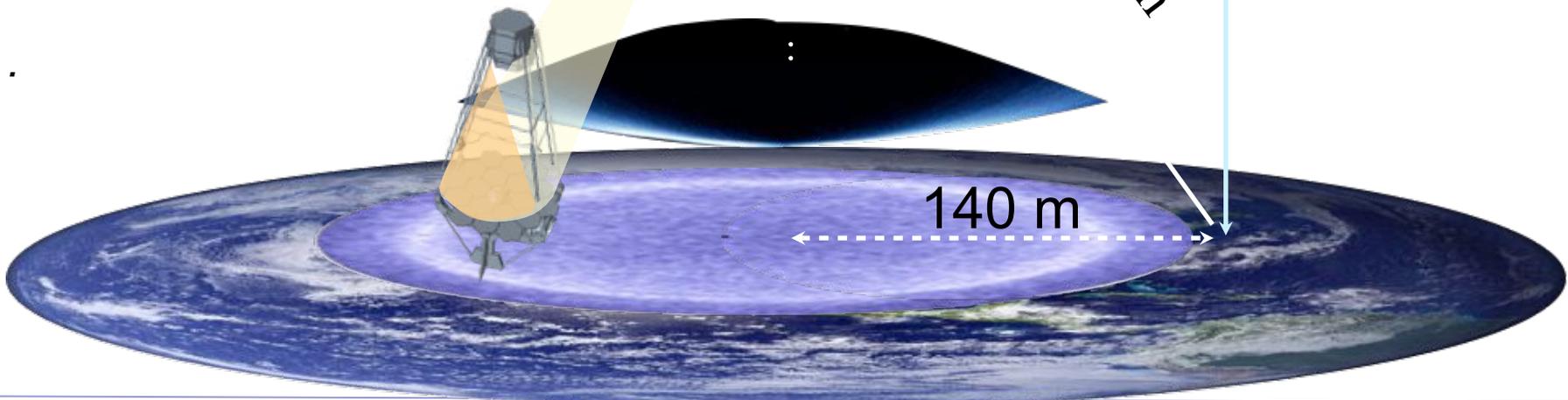
5 km

Cherenkov radiation

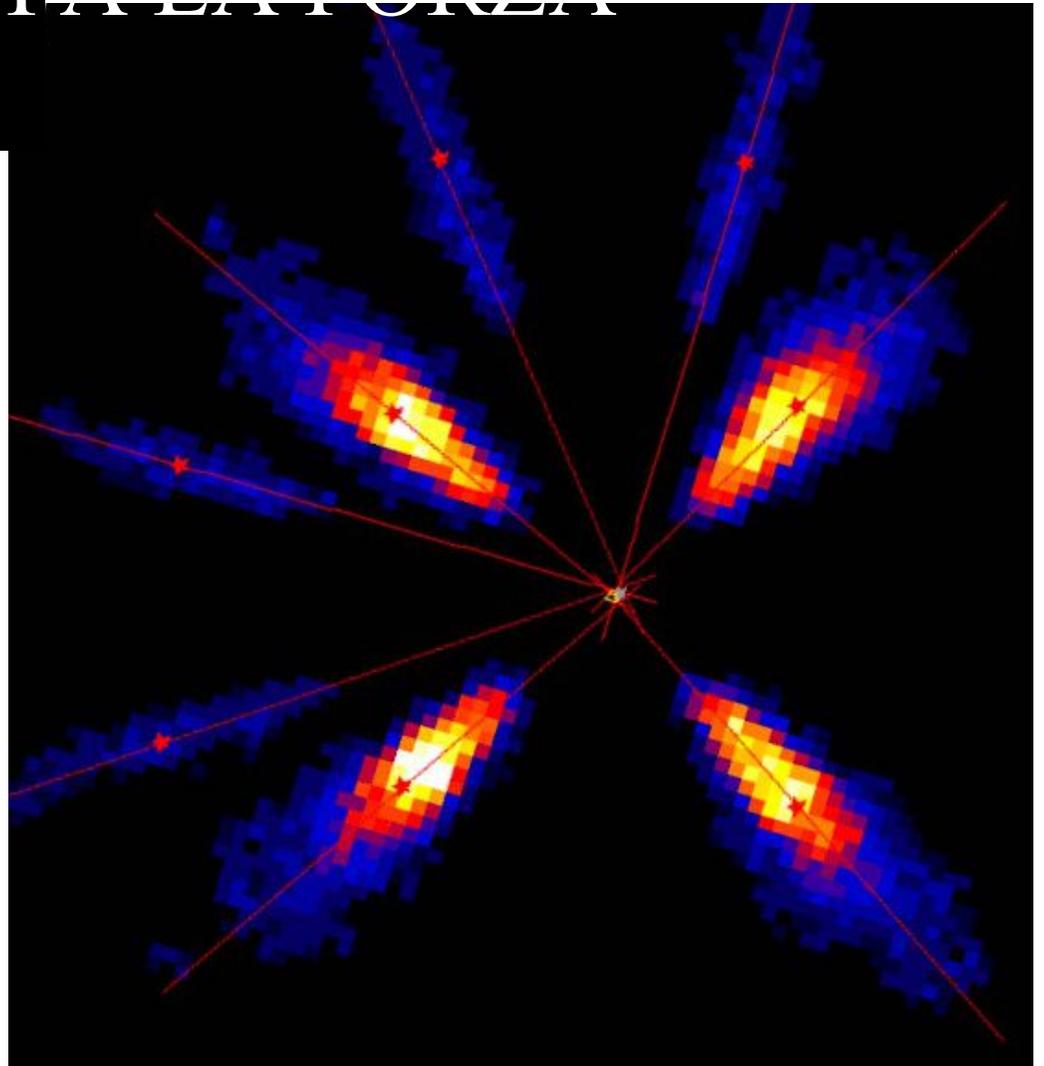
1.4°

~10 km

140 m



INCROCIANDO LE
INFORMAZIONI
PRODOTTE DA
DIVERSI TELESCOPI
SI OTTENGONO
RISULTATI MIGLIORI



Simulation:
Superimposed images from
8 cameras



Osservatori gamma operativi al suolo

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

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



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



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

4 LSTs

$\sim 1 \text{ km}^2$ schiera di telescopi medi

~ 25 MSTs plus
 ~ 24 SCTs extension

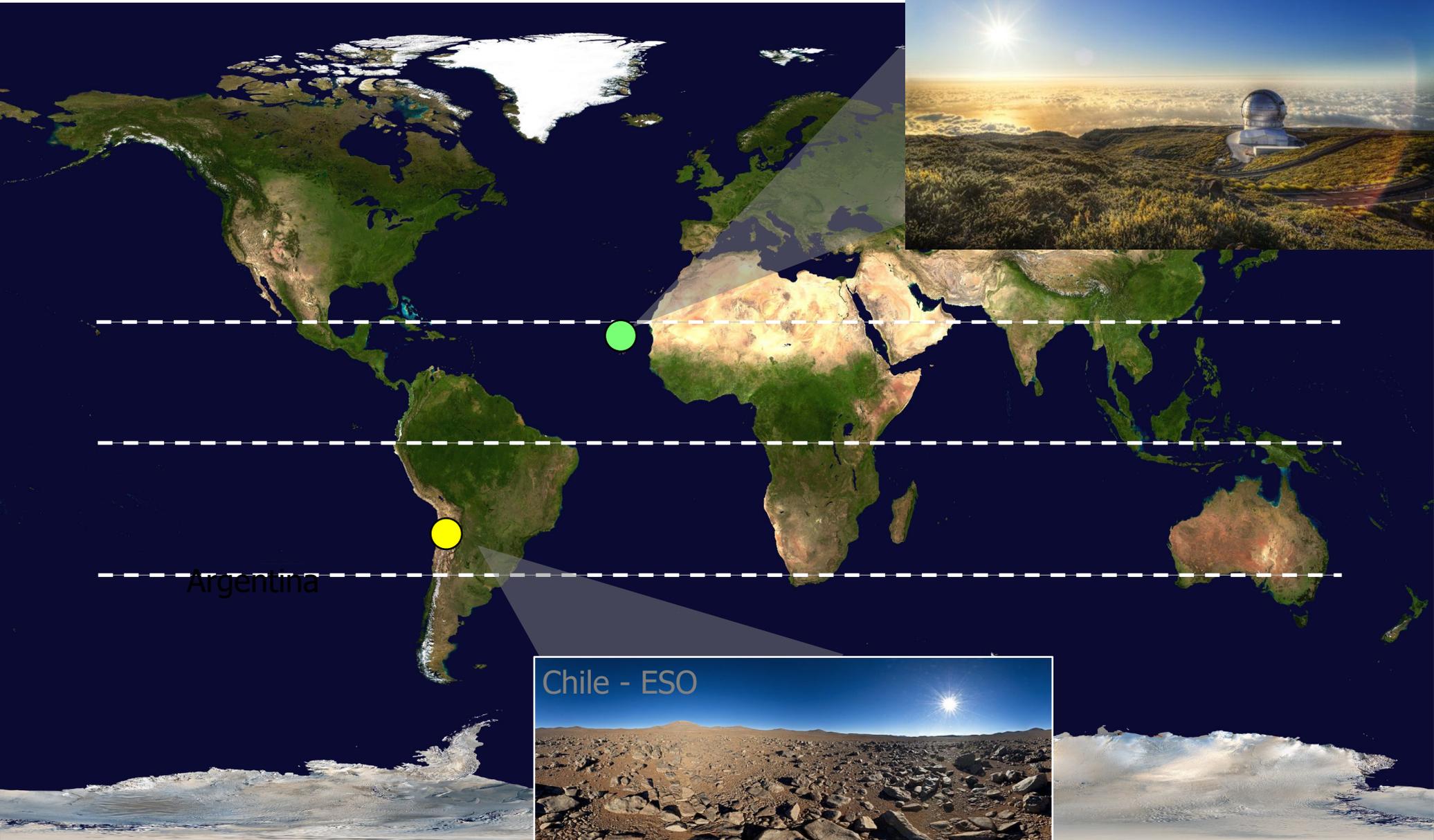
7 km^2 schiera di piccoli telescopi

~ 70 SSTs



Dove?

La Palma



Argentina

Chile - ESO

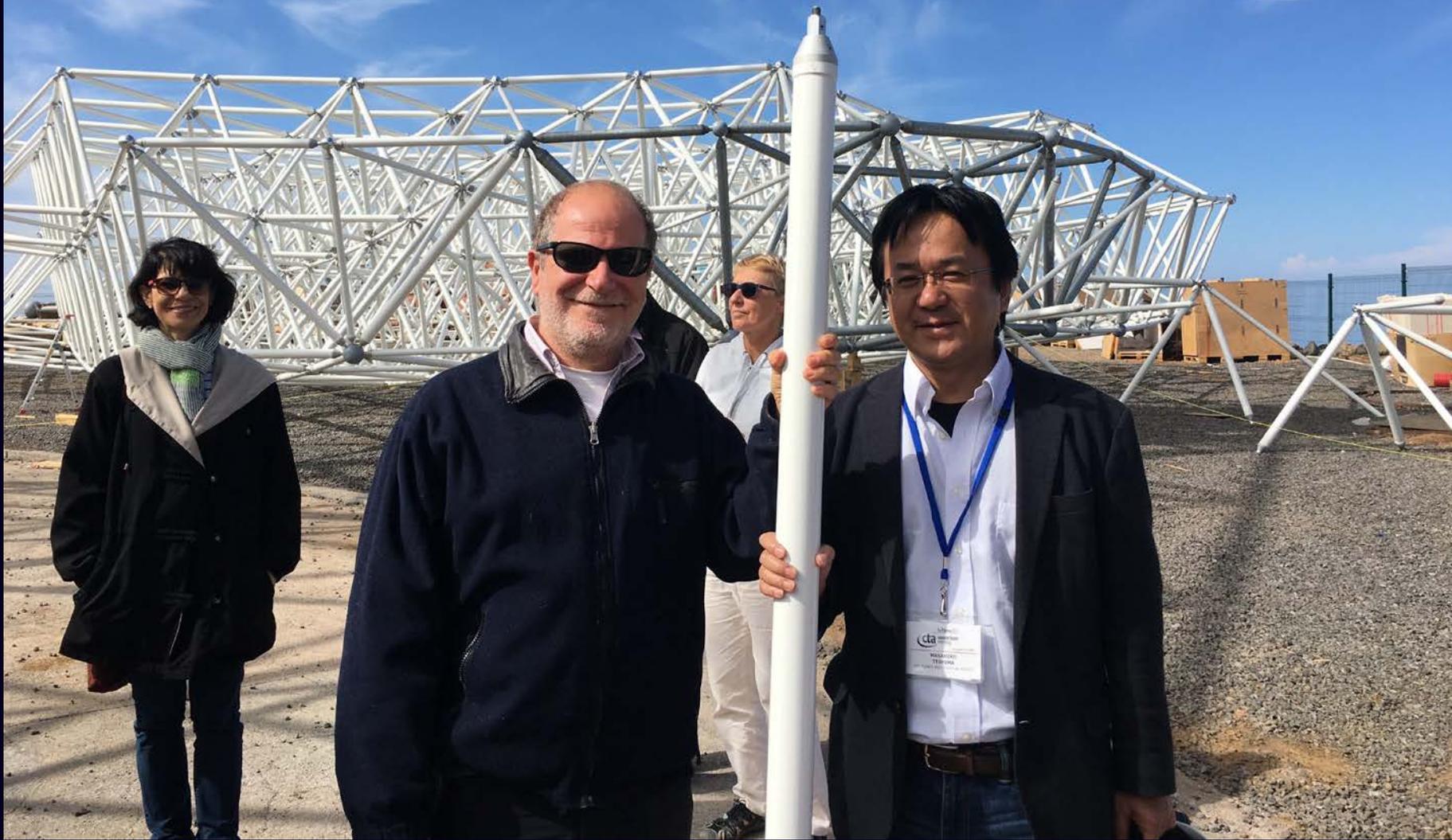


CTA 1st LST construction

Camera Support Structure Installed
21 June



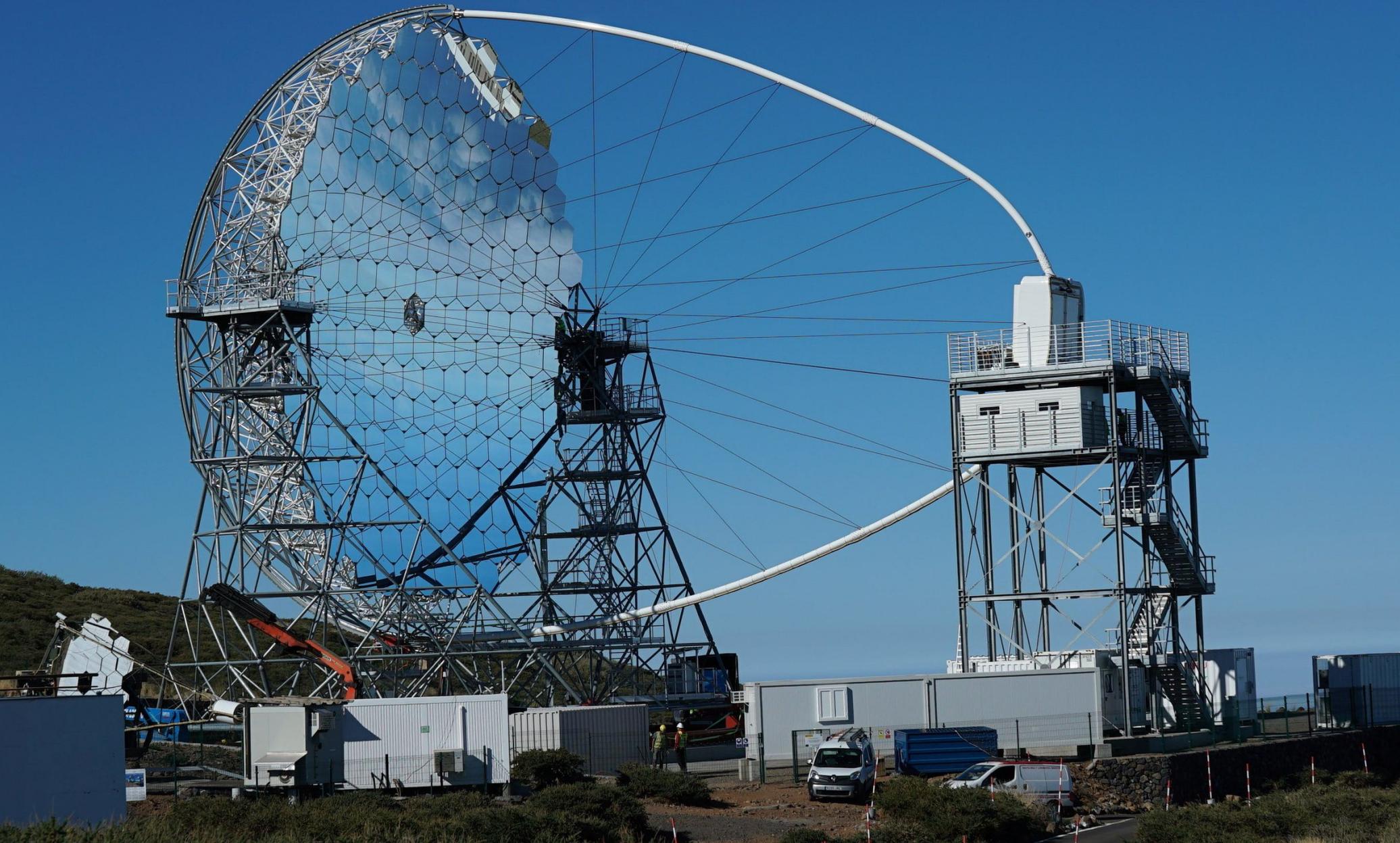
CTA 1st LST construction





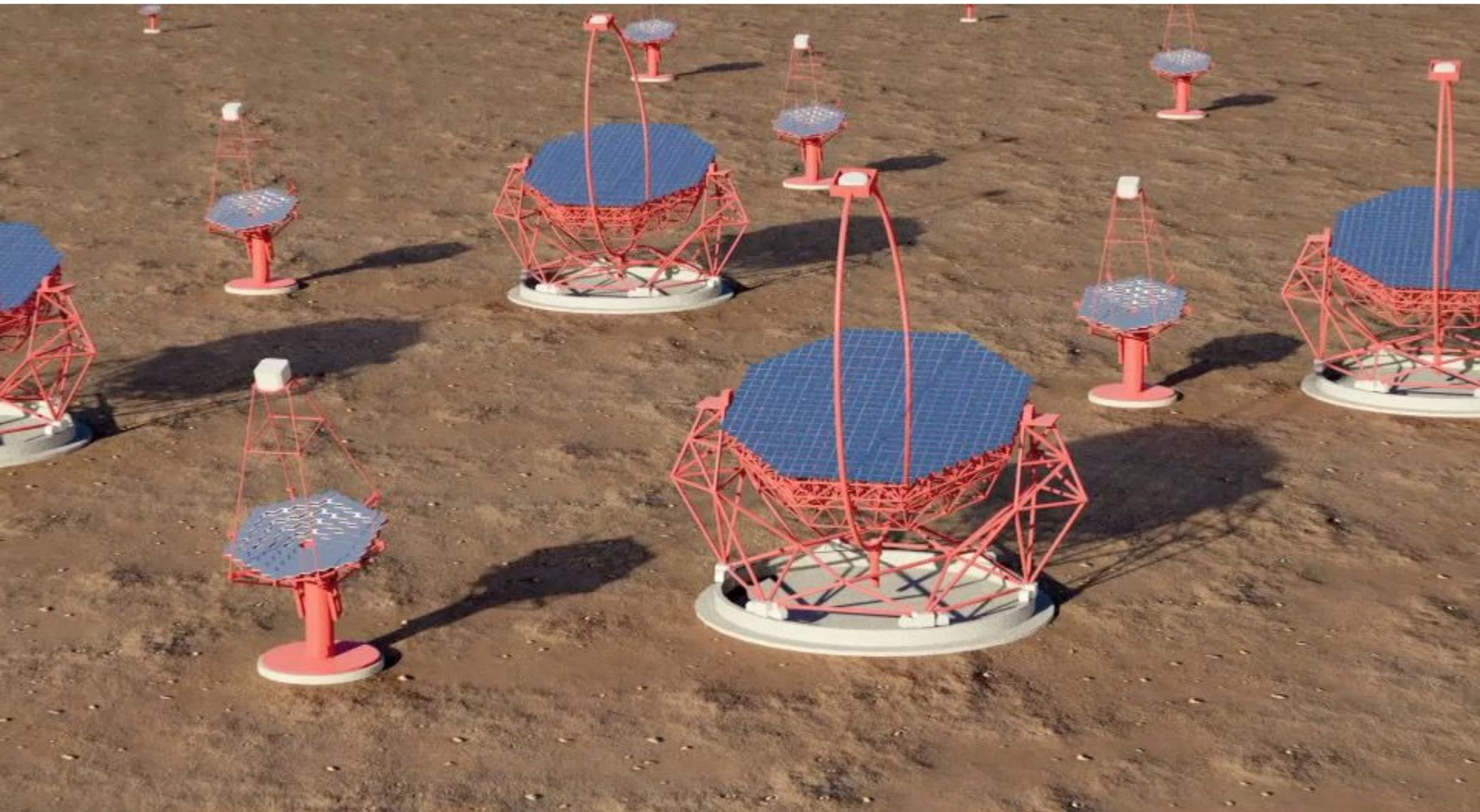
CTA Consortium Meeting, La Palma Nov.2017

CTA 1st LST construction



Inauguration 10 October 2018

Rendering della schiera di telescopi nel sito sud



Obiettivi scientifici di CTA

Accelerazione delle particelle

Materia Oscura

Cosmologia

Raggi Cosmici

**Resti di
Supernova**

Pulsars

Annichilazione

Space Time

**Extragalactic
Background Light**

**Nuclei galattici
attivi**

**Buchi neri
primordiali**

Gamma-ray Bursts

Axion-like Particles

... ?

Possibilita' di nuove scoperte grazie a importanti miglioramenti in sensibilità, campo di vista e intervallo di energia

Esperimenti di Fisica delle Astroparticelle



Creazione e accelerazione

Propagazione

Modulazione

Esperimenti spaziali a circa 400 km di altezza

Rivelazione diretta

Rivelatori di sciami estesi

Esperimenti sottoterra, sotto il ghiaccio, sotto l'acqua

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

Raggi cosmici

Sorgente

γ

v

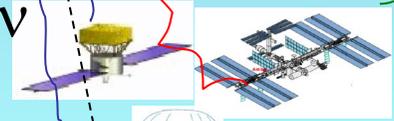
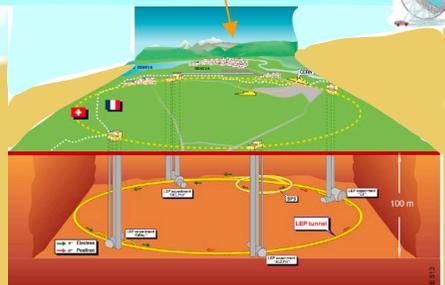
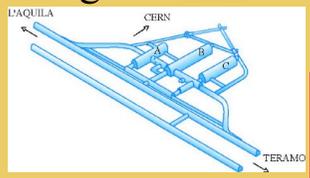
Atmosfera
40 km

Palloni ~ 40 km
~3 g/cm² atmosfera residua (0.3%)

Rivelatori in alta montagna

Rivelatori Cherenkov

Acceleratori di particelle



Esperimenti di Fisica delle Astroparticelle



Creazione e accelerazione

- Fermi
- PAMELA
- AGILE
- AMS
- DAMPE
- CALET
- Jem-EUSO
- HERD

.. tanti diversi apparati, ma stesso scopo

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

- MAGIC
- H.E.S.S.
- VERITAS
- CTA

Raggi cosmici
Propagazione

- KASCADE Grande
- DECOR
- AUGER
- LOFAR
- CODALEMA

- ARGO-JBJ
- Milagro
- HAWC
- LHAASO
- SWGO

Modulazione

- NEMO
- ANTARES
- IceCube
- KM3NeT
- Baikal-GVD

Space experiments ~ 400 km

Atmosphere

40 km
23 X₀

Rivelazione diretta

Palloni ~ 40 km
~3 g/cm² atmosfera residua (0.3%)

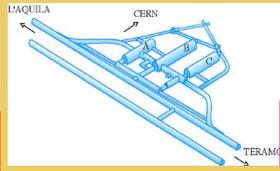
Rivelatori di sciame estesi

- DAMA/LIBRA
- CoGeNT
- CRESST-II
- CDMS
- Xenon1T
- LUX
- PandaX
- DarkSide

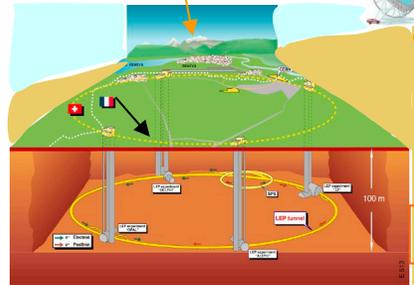
Rivelatori in alta montagna

Rivelatori Cherenkov

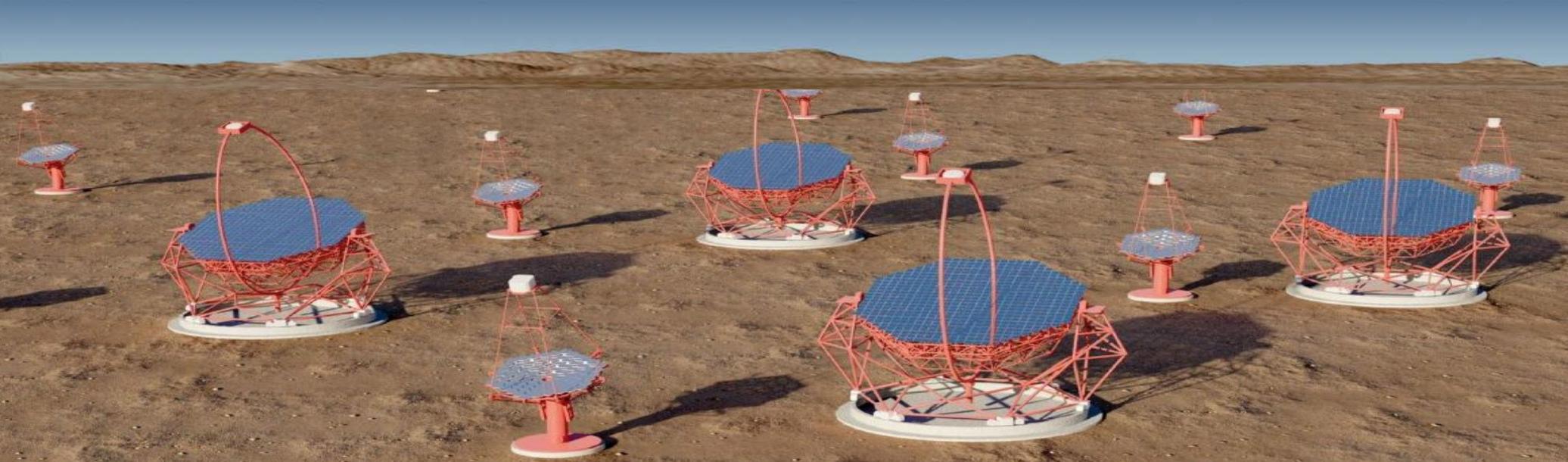
Acceleratori di particelle



Esperimenti sottoterra, sotto il ghiaccio, sotto l'acqua



tanti modi di guardare il cielo

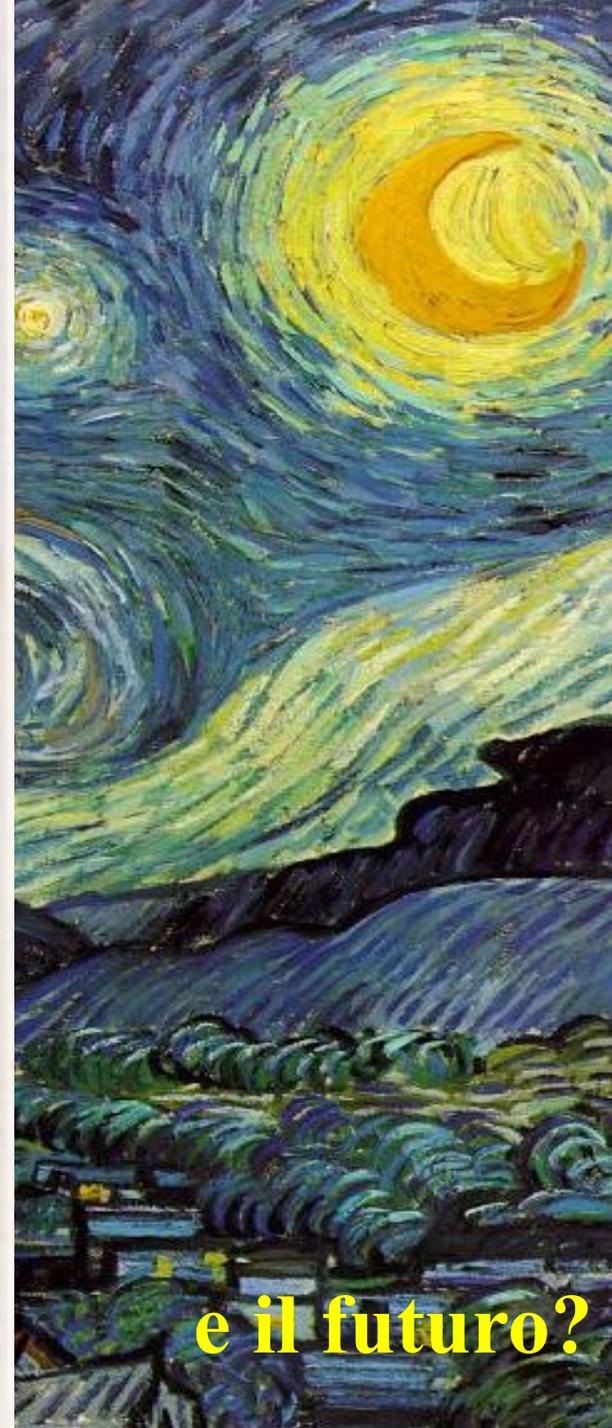
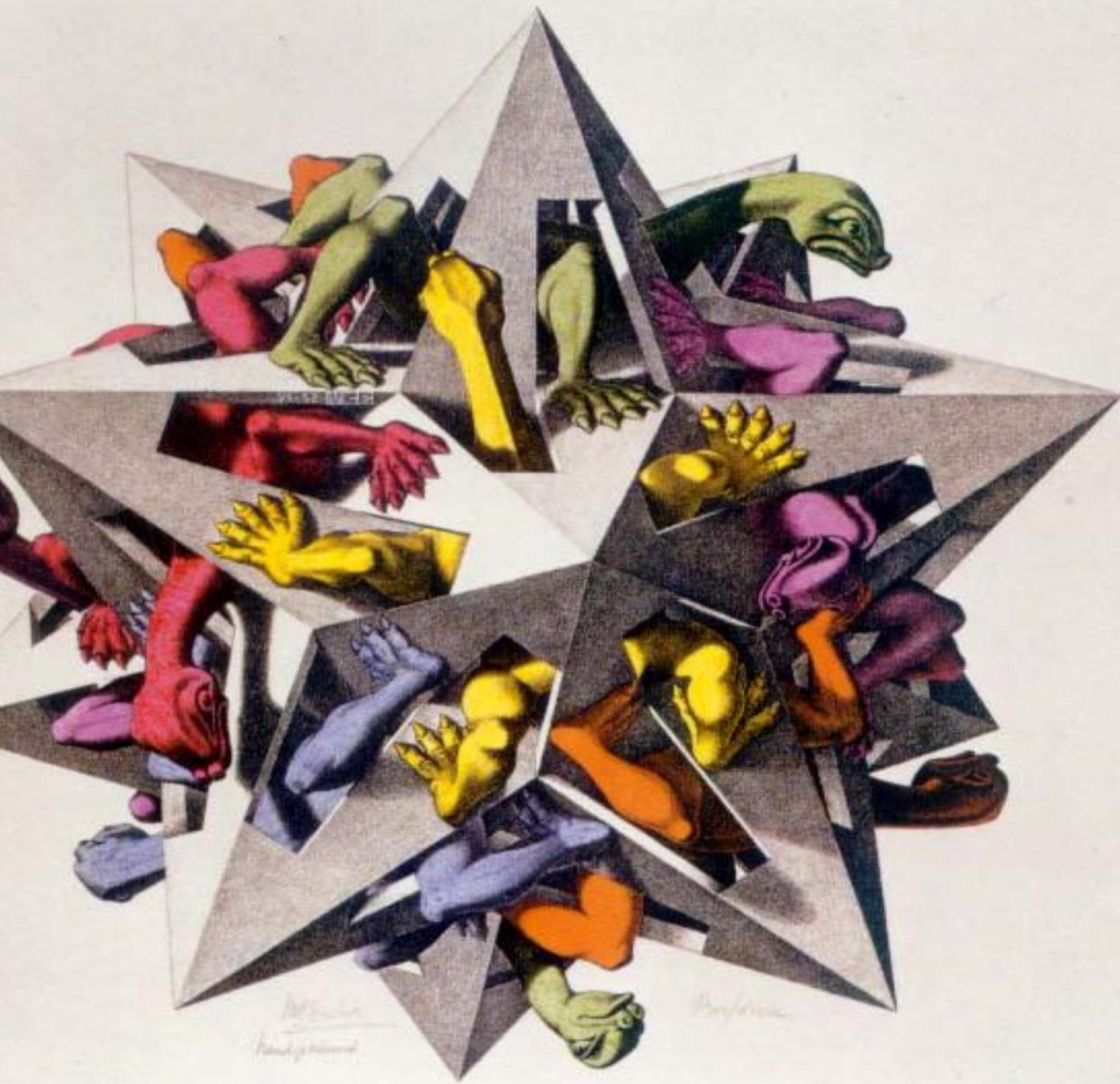




Per la maggior parte del tempo, il cosmo è stato visto come tranquillo e statico



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?