



Payload e sensori per lo spazio

Lo spazio è un laboratorio privilegiato utilizzato da una vastissima utenza per :

- Telerilevamento (meteorologia, agricoltura, geologia, oceanografia, risorse idriche, monitoraggio ambientale e sicurezza)
- Scienza (fisica, astronomia, medicina, biologia)
- Navigazione (misura delle posizioni e dei tempi)
- Telecomunicazioni (civile, militare e commerciale)
- Difesa militare

I payload ed i sensori che vengono utilizzati nello spazio, a differenza degli altri, devono :

- a. soddisfare requisiti precisi in termini di ingombri, pesi, consumi e componenti
- b. essere progettati per superare una serie di test che ne garantiscano la sopravvivenza ed il funzionamento nello spazio ed in fase di lancio (vibrazioni, cicli termici, termovuoto, ecc.)

Queste condizioni in passato hanno limitato molto la gamma di oggetti utilizzabili per le misure in ambiente spaziale ma hanno anche dato agli sperimentatori ed ai tecnologi lo stimolo per studiare soluzioni alternative e sviluppare sensori e materiali di nuova generazione.

Materiali, componenti, sensori ed architetture, inizialmente dedicati allo spazio, hanno spesso avuto enormi ricadute sulle tecnologie di uso quotidiano.

Nel design di un payload bisogna tener conto di:

1. **Obiettivi:** caratteristiche dello spazio da osservare e risultati aspettati
2. **Concetti operativi:** copertura, piano di osservazione, registrazione e trasmissione dei dati acquisiti, durata della missione, numero di strumenti necessari
3. **Caratteristiche del design:** banda di frequenze, polarizzazione, ottiche e/o antenne, configurazione meccanica

- 
4. **Caratteristiche dello strumento:** altezza, campo di vista, risoluzione, copertura a terra, lunghezza focale, duty cycle, dimensioni dei rivelatori
 5. **Requisiti di supporto:** dimensioni, peso, potenza assorbita, precisione e stabilità di puntamento, limitazioni termiche e di posizione rispetto al Sole, duty cycle, data rate, data storage, data processing)
 6. **Considerazioni di costo**

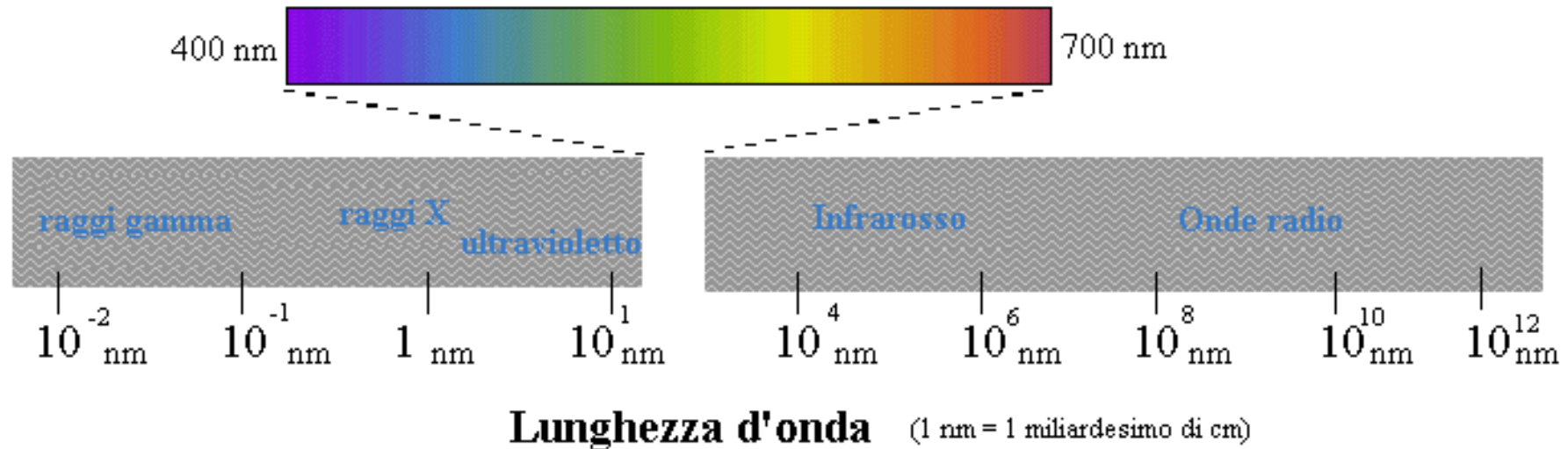
1. Progettazione di un payload (1/4)

Nella progettazione di un qualunque payload vanno considerati due fatti essenziali:

- a. Con gli strumenti si rivela radiazione elettromagnetica, la radiazione e.m. viaggia nel vuoto ad una velocità cost. su tutto lo spettro dalle frequenze gamma a quelle radio

$$c = \lambda \nu$$

a basse frequenze, cioè a basse energie, prevalgono gli effetti ondulatori e quindi la diffrazione e l'interferenza
ad alte frequenze, cioè ad alte energie, prevalgono gli effetti corpuscolari come l'effetto fotoelettrico e le reazioni a cascata



Lo spettro elettromagnetico di una radiazione è la distribuzione in energia (o in lunghezza d'onda o in frequenza) dell'intensità di quella radiazione elettromagnetica.

1. Progettazione di un payload (2/4)

- b. Tutta la materia a $T > 0$ K emette un'energia, nota come radiazione termica o radiazione di corpo nero, che per un corpo nero perfetto ha una distribuzione, in funzione della lunghezza d'onda, funzione della sola temperatura

$$E_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left\{ e^{\left[\frac{hc}{\lambda kT} \right]} - 1 \right\}}$$

>>> per ogni oggetto esiste un lunghezza d'onda ideale per le osservazioni

1. Progettazione di un payload (3/4)

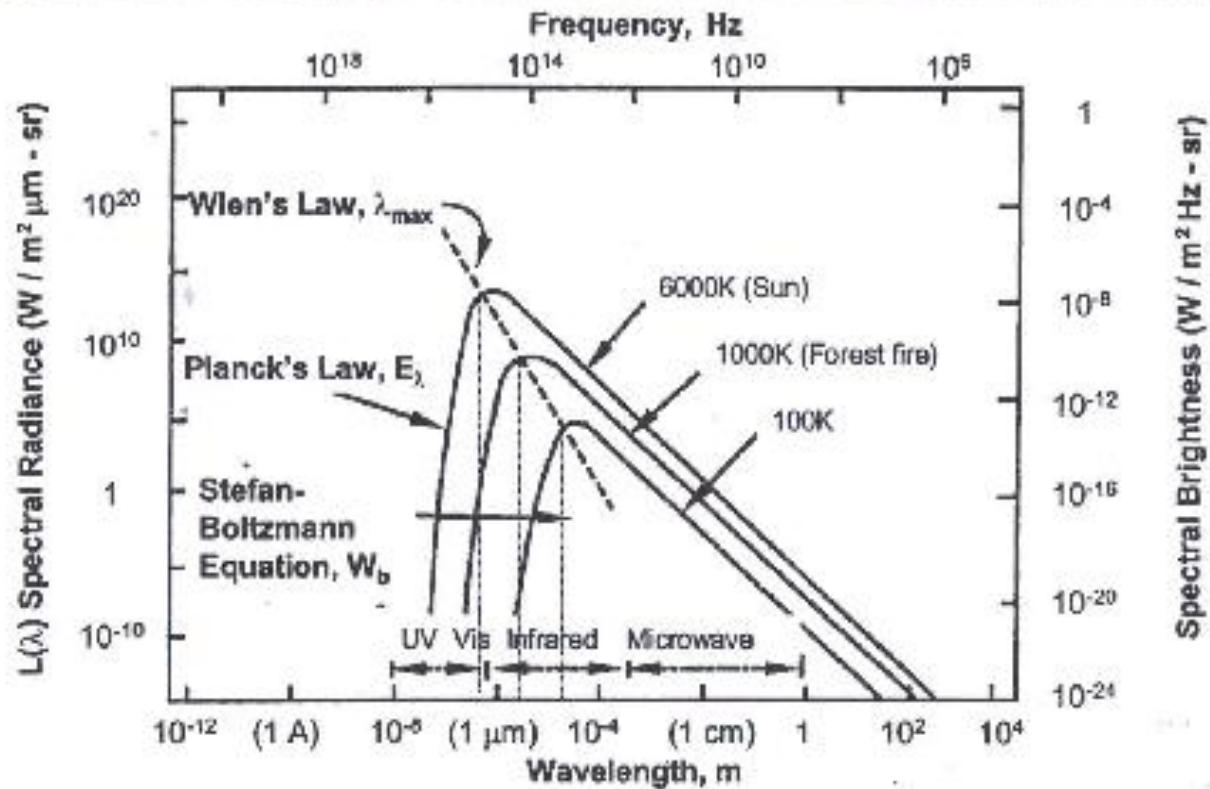
- L'eq. Di Stefan-Boltzmann definisce l'energia totale irradiata da un corpo nero:

$$W_b = \sigma T^4$$

- La legge di Wien identifica la lunghezza d'onda del picco di energia:

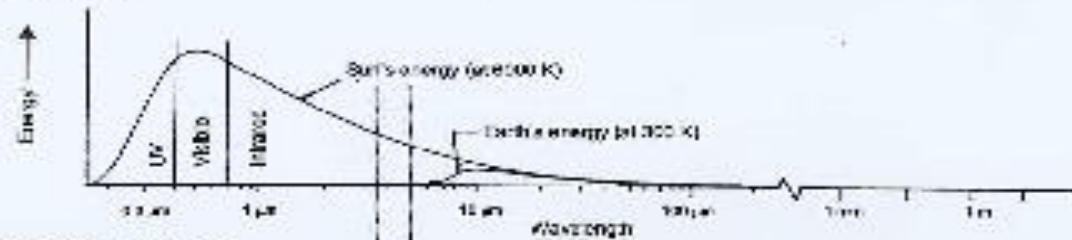
$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T}$$

Characteristic Black-Body Radiation Curves

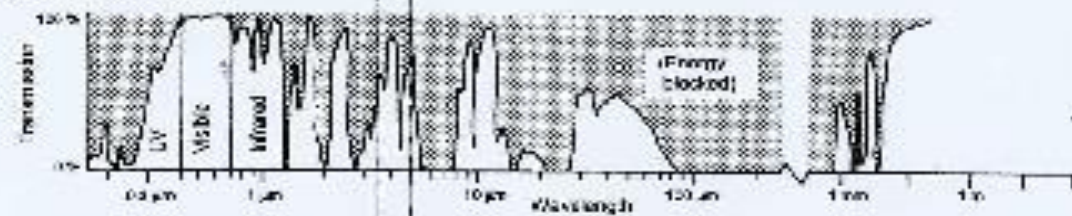


Atmospheric Windows

(a) Energy Sources



(b) Atmospheric Transmittance



(c) Common Remote Sensing Systems



1. Progettazione di un payload (4/4)

Partendo da queste due considerazioni si costruisce una gamma di strumenti che misurano:

- La posizione di un oggetto (imager, camere, sounder)
- Lo spettro (spettrometri)
- L'intensità della sua energia (polarimetri, radiometri, fotometri)

2. Caratteristiche di un payload per uso spaziale (1/3)

Tipicamente il design di uno strumento per utilizzo spaziale è guidato da due tipi di necessità:

1. necessità funzionali:

- le frequenze di acquisizione
- la risoluzione
- la precisione di puntamento
- la velocità di acquisizione
- la stabilità
- la sensibilità (rapporto S/N)

Caratteristiche di un payload per uso spaziale (2/3)

2. necessità operative

- la max quantità di dati acquisibile
- la capacità di compressione
- la velocità di trasferimento
- a terra dei dati stessi
- la visibilità

2. Caratteristiche di un payload per uso spaziale (2/3)

Sulla terra è relativamente semplice soddisfare i requisiti funzionali ed operativi di un esperimento ma in orbita si deve tener conto di ingombri, pesi, robustezza

- >>utilizzo, ove possibile, di strutture compatte (semiconduttori)
- utilizzo di materiali di nuova generazione (gonfiabili, fibre di carbonio)
- utilizzo di frequenze di trasmissione alte (banda S o C)
- compressione dei dati a bordo (fino a 1 Mbit)
- minimizzazione della gestione del payload da terra
- massimizzazione delle potenze a bordo (batterie, pannelli)

Esempio di progetti di nuova generazione per osservazioni astrofisiche (1/4)

Interferometri MEMS



MICROINTERFEROMETRO MEMS

Si basa sulla realizzazione di un unico chip ibrido che contiene sia gli interferometri (ciascun elemento interferometrico è ottimizzato su una finestra predefinita e il meccanismo lavora con un array) che i circuiti elettronici necessari al pilotaggio del dispositivo. In questo dispositivo le variazioni di cammino ottico vengono realizzate mediante variazioni dell'indice di rifrazione all'interno di ciascun interferometro mediante l'applicazione di un campo elettrico variabile.

Questa tecnica oltre a ridurre drasticamente gli ingombri (da metri a centimetri) ed i pesi (da chili a grammi), riduce quasi a zero il rumore di fondo (sia quello dovuto all'elettronica che quello dovuto alle vibrazioni della struttura) e la perdita di segnale dovuta alla trasmissione, e garantisce un perfetto allineamento ottico e quindi un'altissima qualità sulle immagini ottenute.

MICROINTERFEROMETRO MEMS

Poiché è integrato in ingresso ed in uscita con fibre ottiche (perdita nell'IR di circa 1db/m) è stato sviluppato anche un progetto innovativo sui cammini ottici per ottimizzare le guide d'onda.

E' uno strumento che in principio può lavorare a qualunque lunghezza d'onda ma che al momento è stato progettato per un range che va da 0.4 a 4.5 micron. Naturalmente è particolarmente strategico se accoppiato a sensori chimici ed a infrarosso.

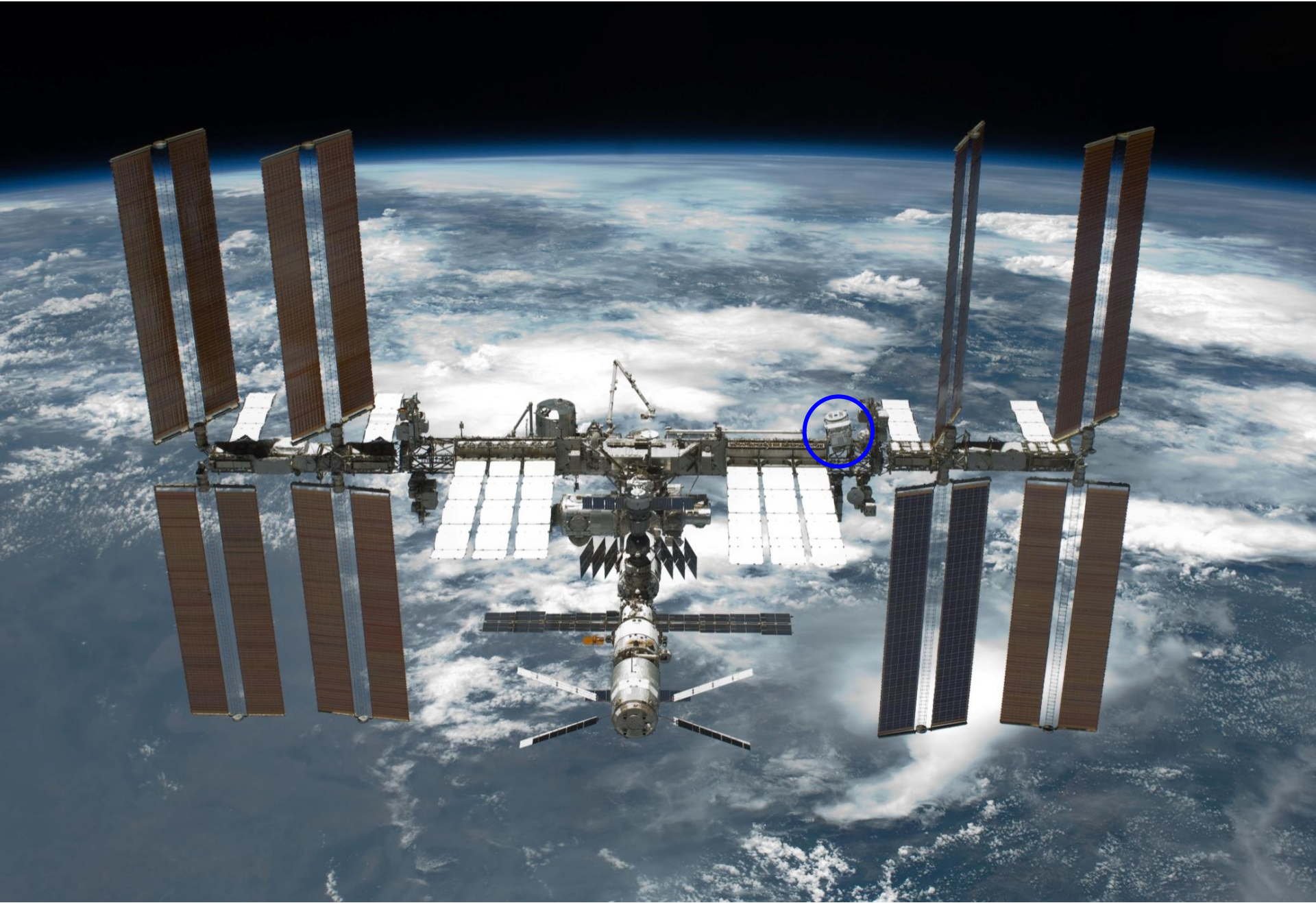
Una volta ultimato (2 mesi) peserà circa 200 gr e avrà le dimensioni di una scatola di 15x20x5 cm. Considerati i consumi energetici potrà essere alimentato da una semplice batteria a Litio.

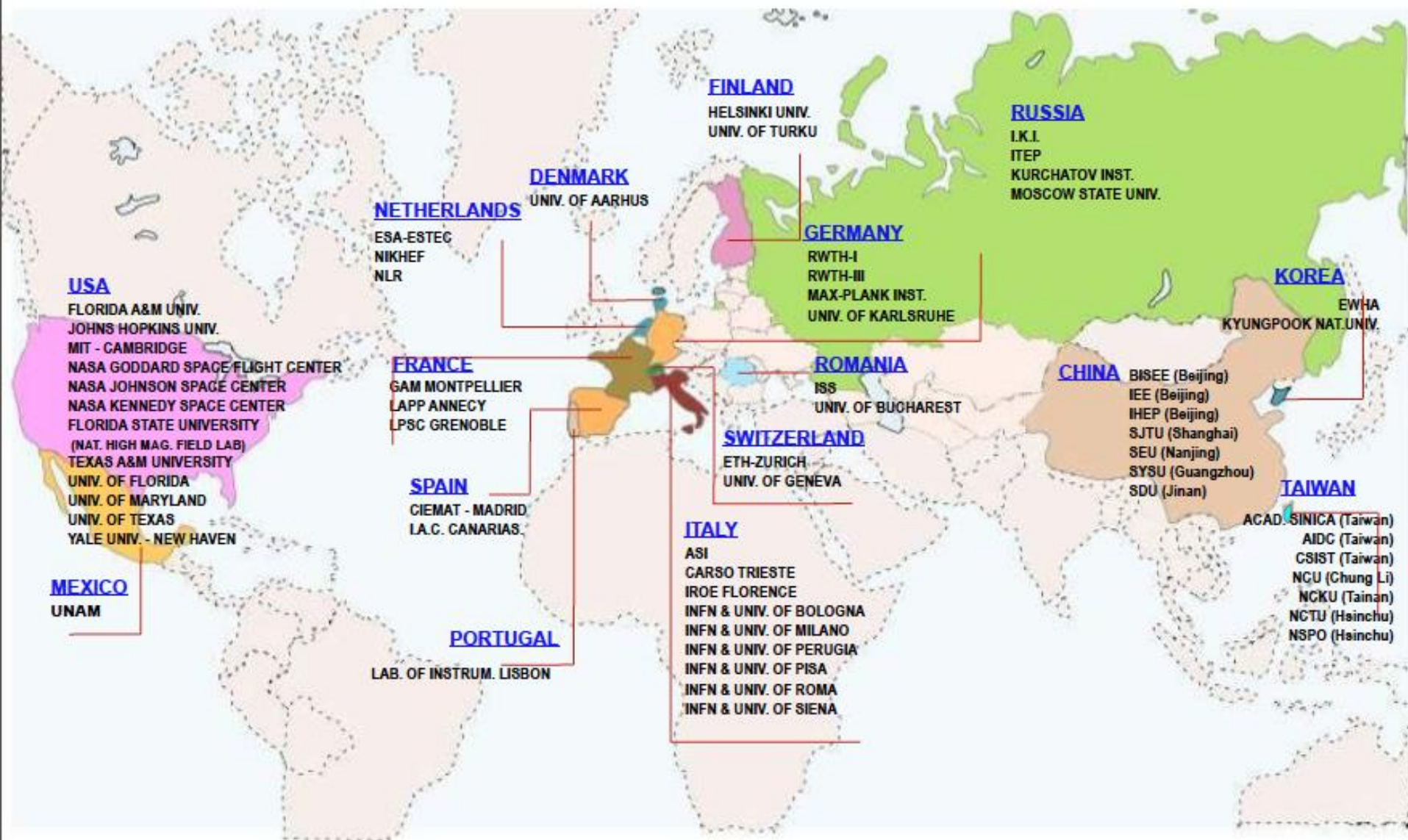
Può essere interamente realizzato in laboratorio nel giro di venti giorni con costi minimi .

Esempi di strumenti per osservazioni astrofisiche :

- AMS- rivelatori di raggi cosmici (dal 2011 su ISS)
- LARES- misuratore dell'effetto Lense-Thirring (in orbita da feb. 2012)
- LISA PF- dimostratore tecnologico per misurazione di onde gravitazionali (previsto nel 2014)

The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) Experiment





AMS: 16 Years, 16 Countries, 60 Institutes, 500 Physicists

AMS misura con altissima precisione il flusso dei diversi tipi di raggi cosmici nello spazio.

AMS-01
volo precursore di 10gg su
STS 91 (giugno 1998)

AMS-02 attualmente in
orbita su ISS

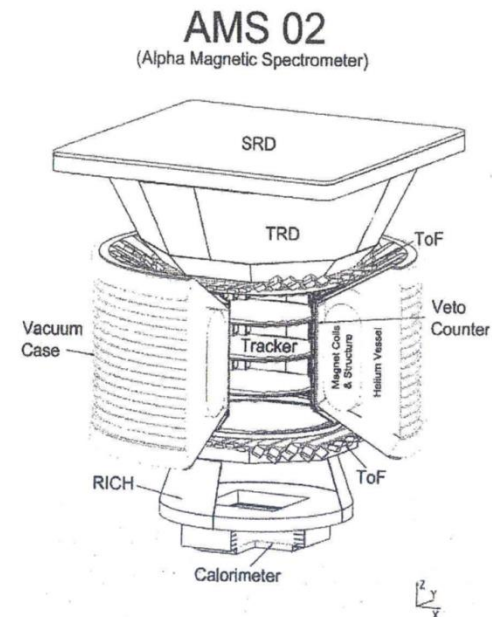
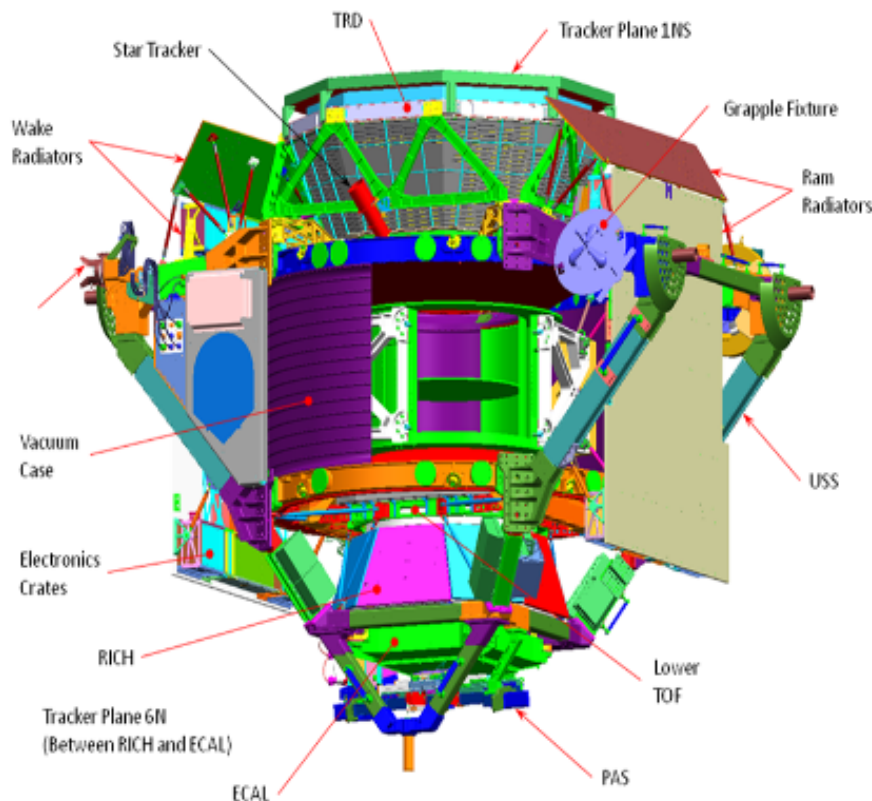


Figura 1. L'apparato AMS-02 per la Stazione Spaziale ISS.

Il contributo italiano

- 1- Il sistema del Tempo di Volo (Time of Flight)
- 2- Il Tracciatore al Silicio (Silicon Tracker)
- 3- Il Calorimetro elettromagnetico (Electromagnetic Calorimeter)
- 4- Il sistema di controllo per il gas del Sistema di Radiazione di Transizione
- 5- Il sistema di allineamento stellare
- 6- Il sistema di acquisizione ed immagazzinamento dati ACOP.



Il Magnete curva in direzioni opposte particelle e antiparticelle

Il Transition Radiation Detector (TRD) identifica la popolazione di elettroni e positroni presente nei raggi cosmici

Il Time-of-Flight System (ToF) avvisa i rivelatori dell'arrivo di un raggio cosmico

Il Silicon Tracker (Tracker) rileva il segno della carica della particella permettendo di separare la materia dall'antimateria

Il Ring-Imaging Cherenkov Detector (RICH) misura con alta precisione la velocità dei raggi cosmici

L'Electromagnetic Calorimeter (ECAL) misura l'energia di elettroni, positroni e raggi γ

L'Anti-Coincidence Counter (ACC) rigetta i raggi cosmici che attraversano le pareti del magnete

Il Tracker Alignment System (TAS) controlla la stabilità dell'allineamento del tracciante al silicio

Lo Star Tracker e il GPS stabiliscono l'ora, la posizione e l'orientamento dell'esperimento AMS-02

L'elettronica trasforma i segnali provenienti dai rivelatori di particelle in informazioni digitali pronte per essere trasmesse a terra e successivamente analizzate

La Collaborazione di AMS ha sviluppato due magneti:

- Un magnete permanente (Permanent Magnet, PM) che opera a temperatura ambiente. Il PM è composto da 6000 blocchi in lega di Neodimio accuratamente magnetizzati e poi incollati assieme. Questo magnete è stato già utilizzato nel prototipo di AMS, AMS-01, che ha volato nella missione Shuttle STS-91 nel 1998
- Un magnete superconduttore (Superconducting Magnet, SCM) in grado di operare a una temperatura di 4 gradi sopra lo zero assoluto (0 K).

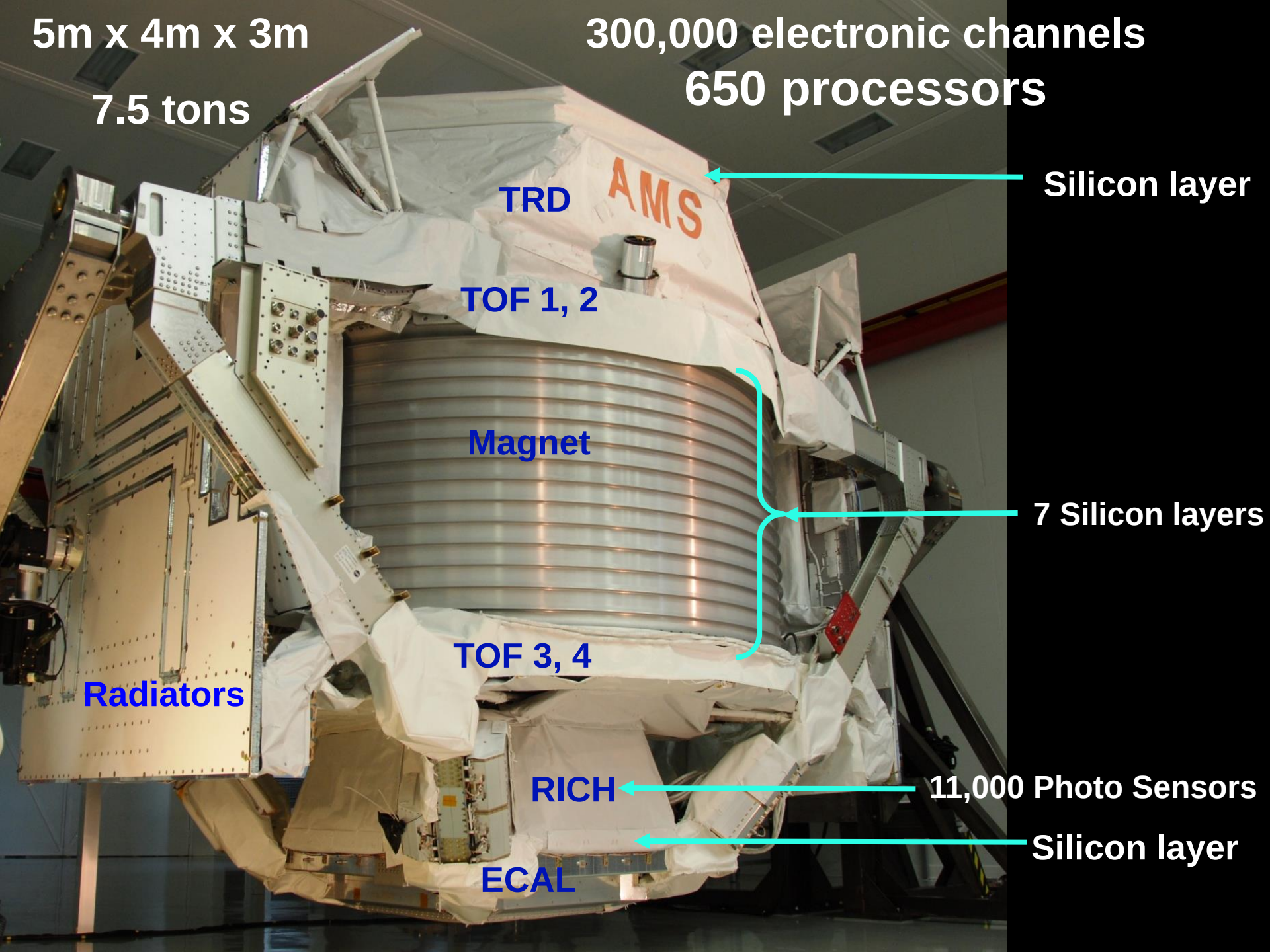
Entrambi i sistemi magnetici hanno la stessa configurazione del campo, il cosiddetto *anello magico*, che assicura al magnete un momento di dipolo netto trascurabile e impedisce che, una volta installati nello spazio, ci siano accoppiamenti con il campo magnetico terrestre, cosa che disturberebbe l'orbita della Stazione Spaziale

5m x 4m x 3m

7.5 tons

300,000 electronic channels

650 processors



TRD

AMS

Silicon layer

TOF 1, 2

Magnet

7 Silicon layers

TOF 3, 4

Radiators

RICH

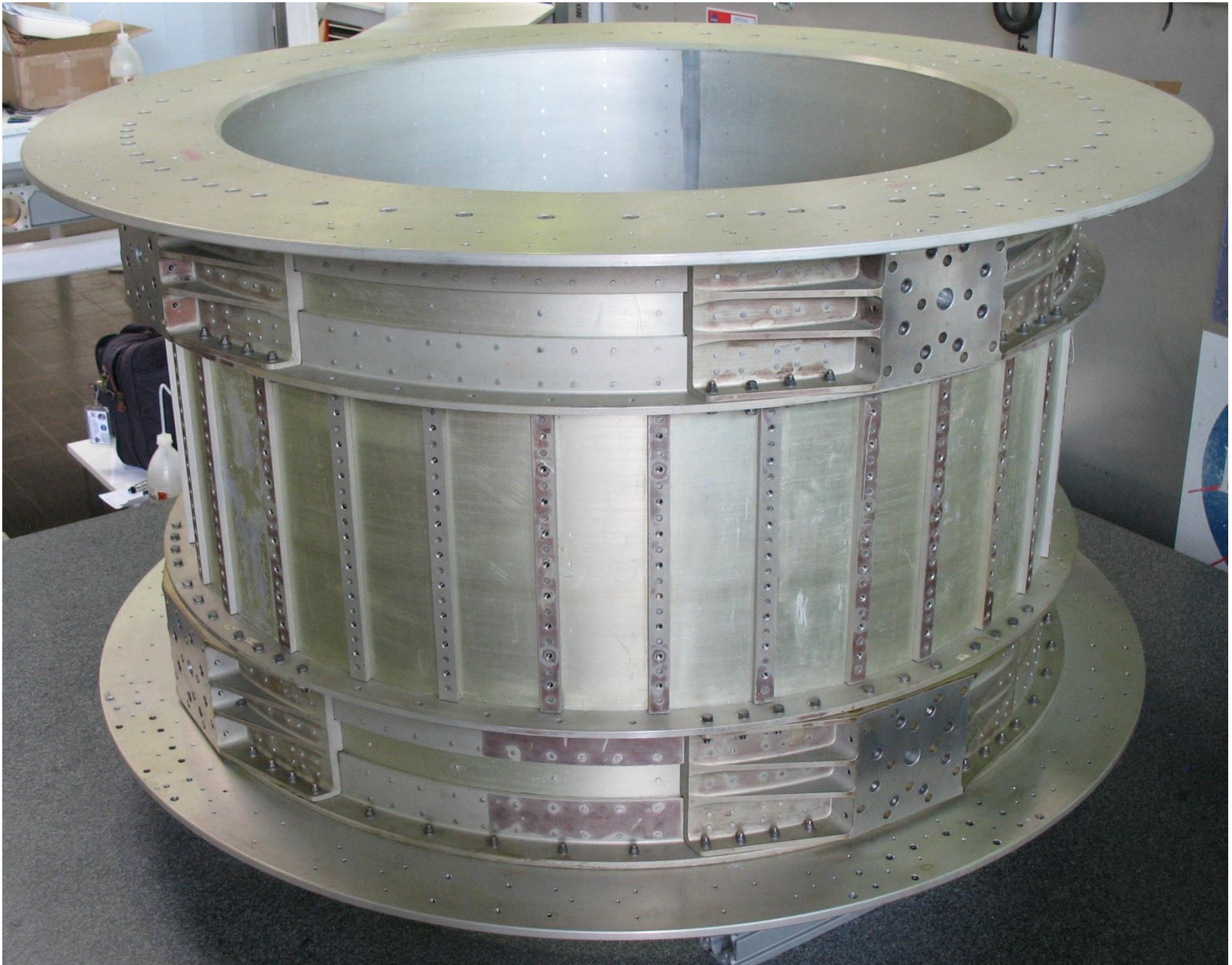
11,000 Photo Sensors

ECAL

Silicon layer

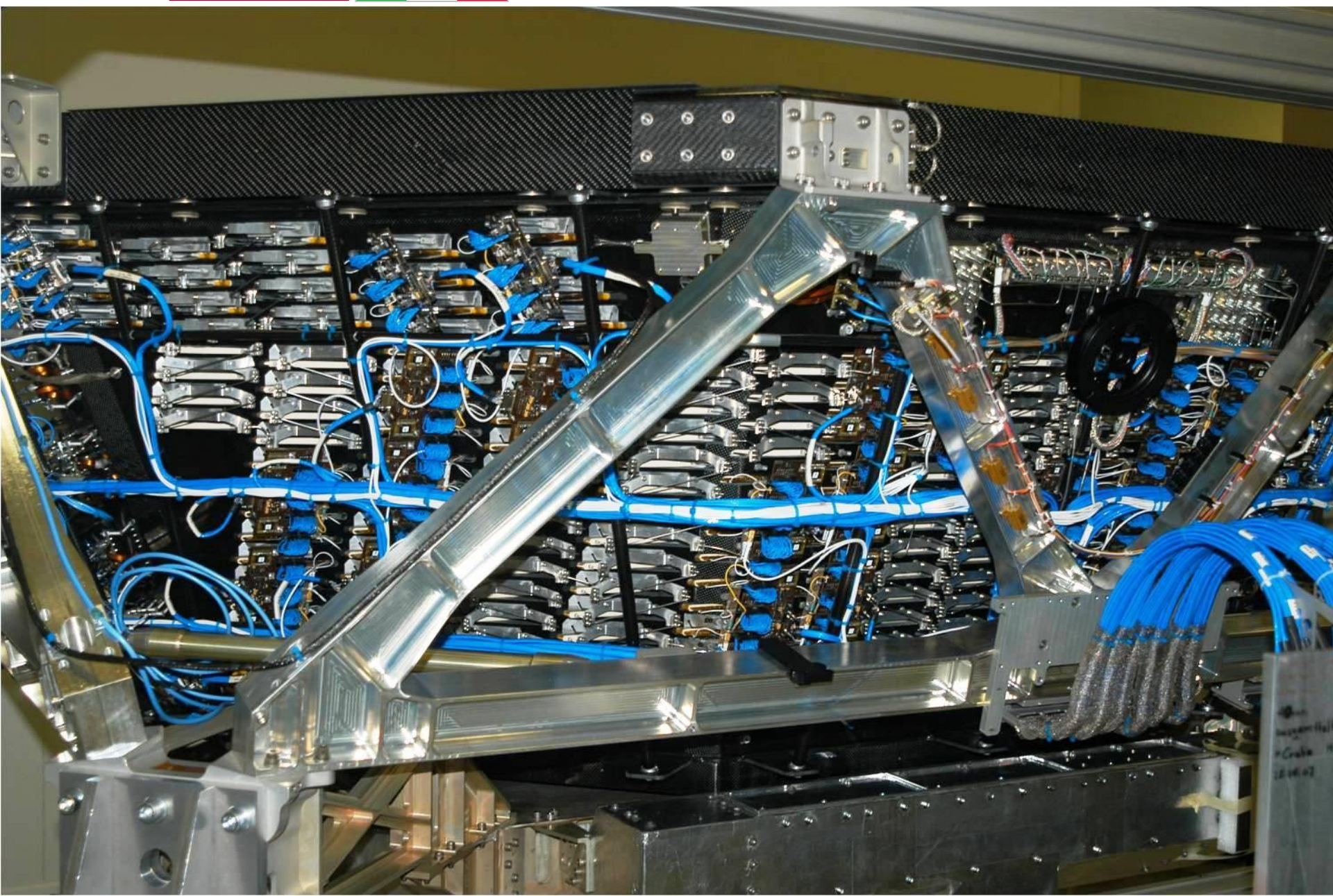


The Permanent Magnet: on the Shuttle - AMS-01 and on ISS – AMS-02

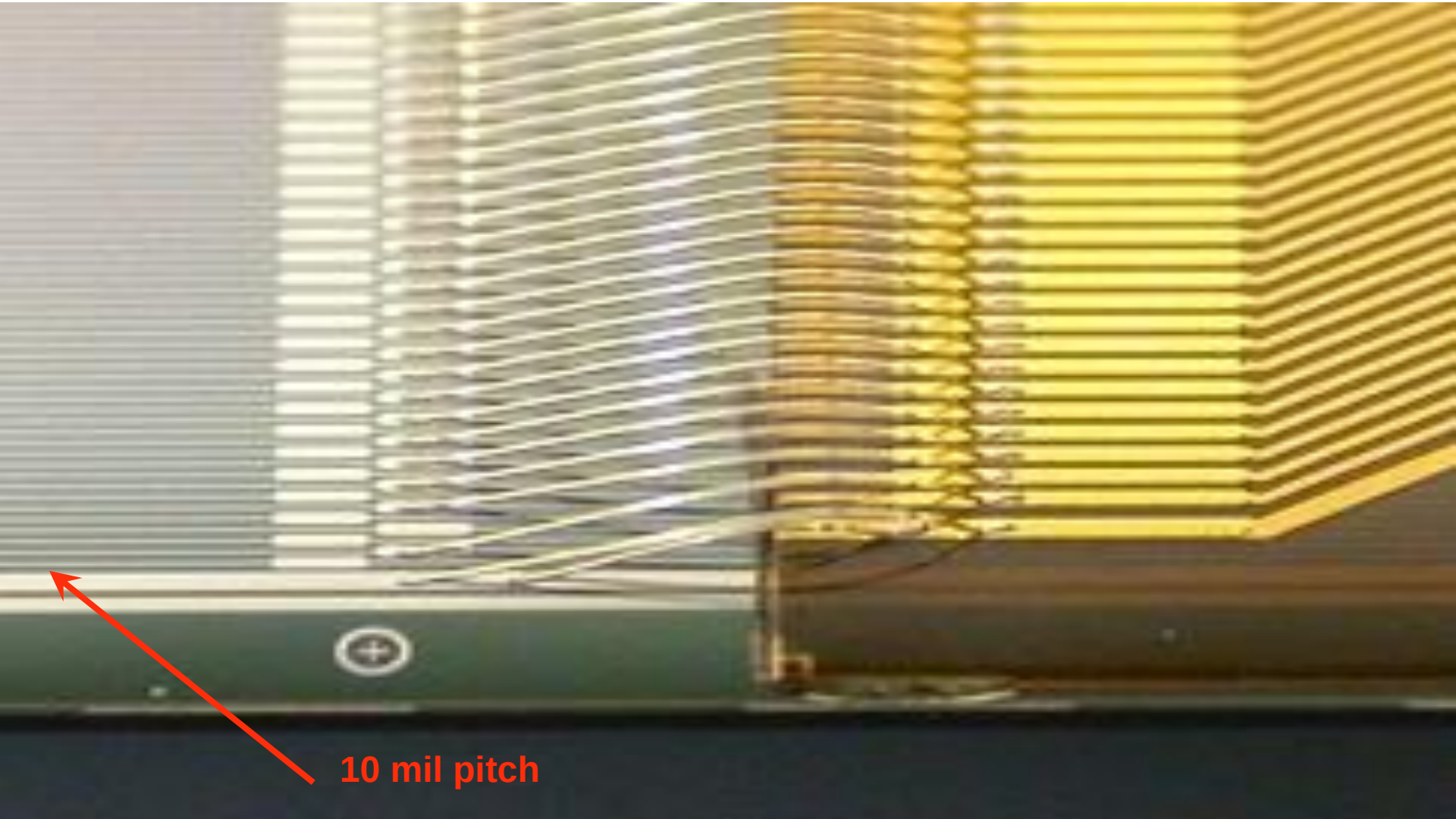
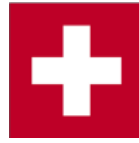




Transition Radiation Detector: TRD



Silicon Tracker

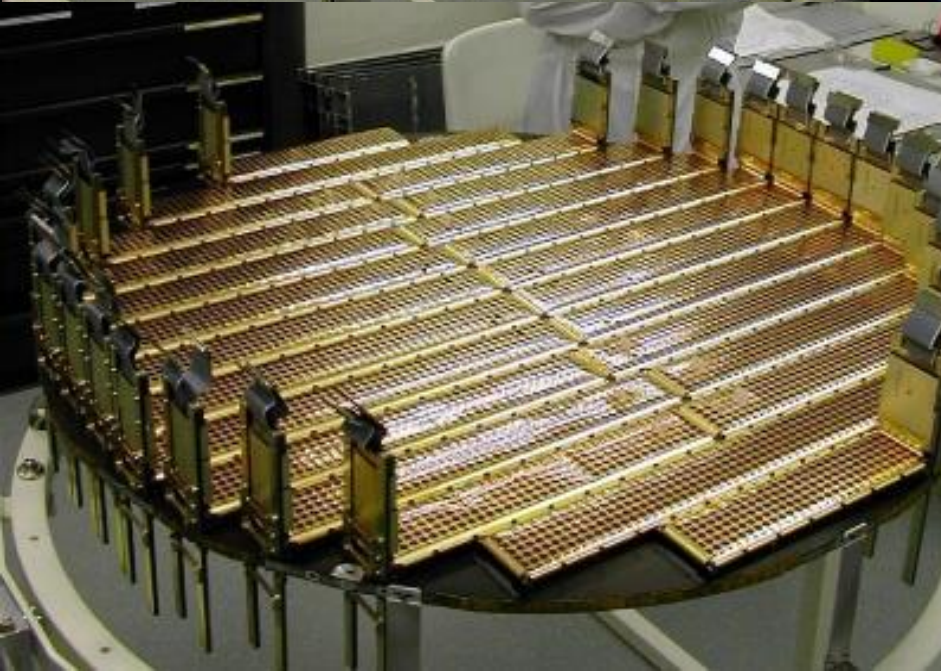
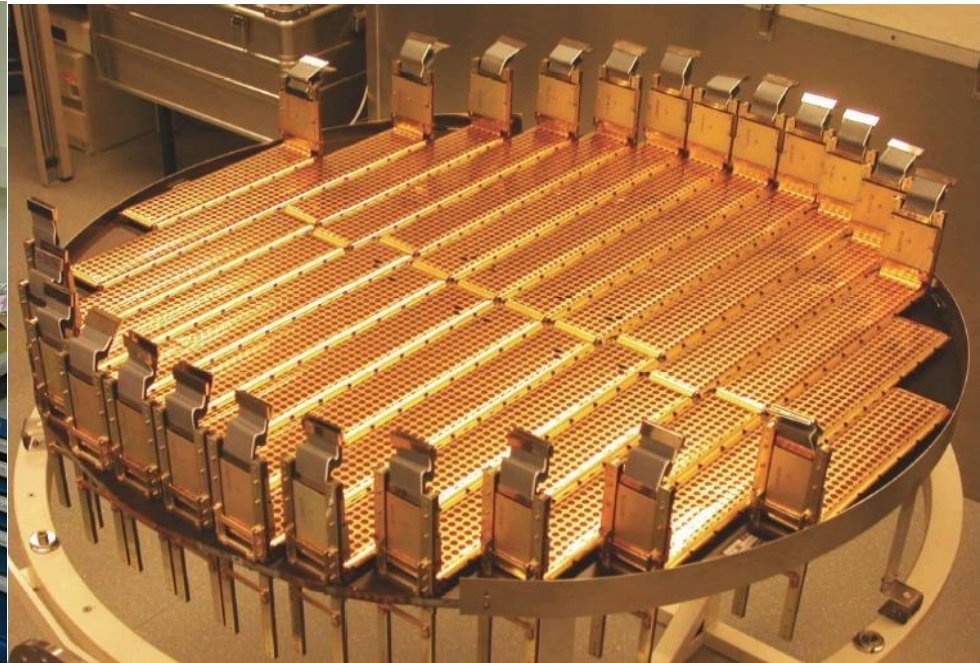
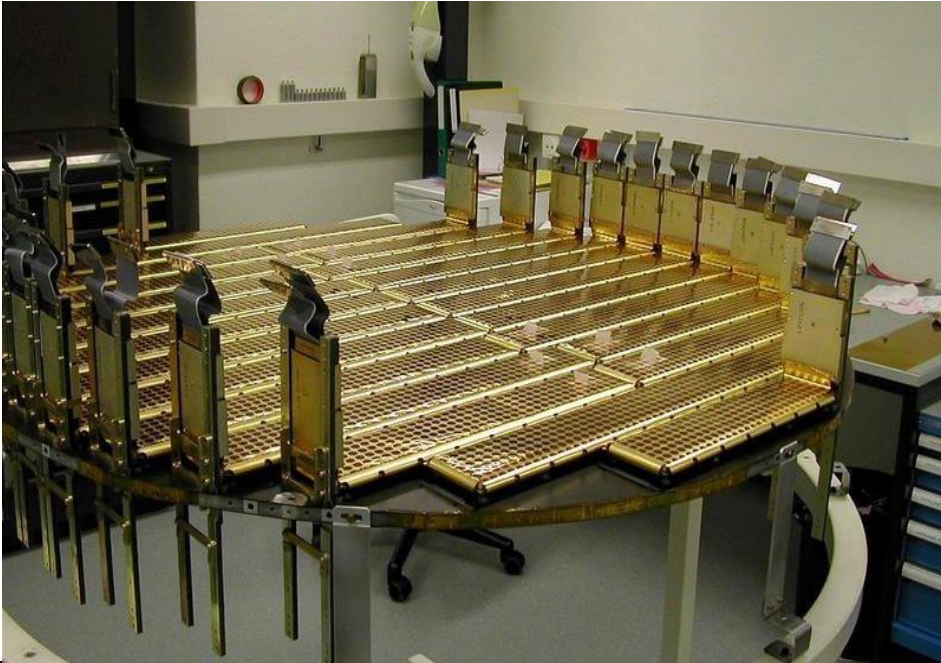


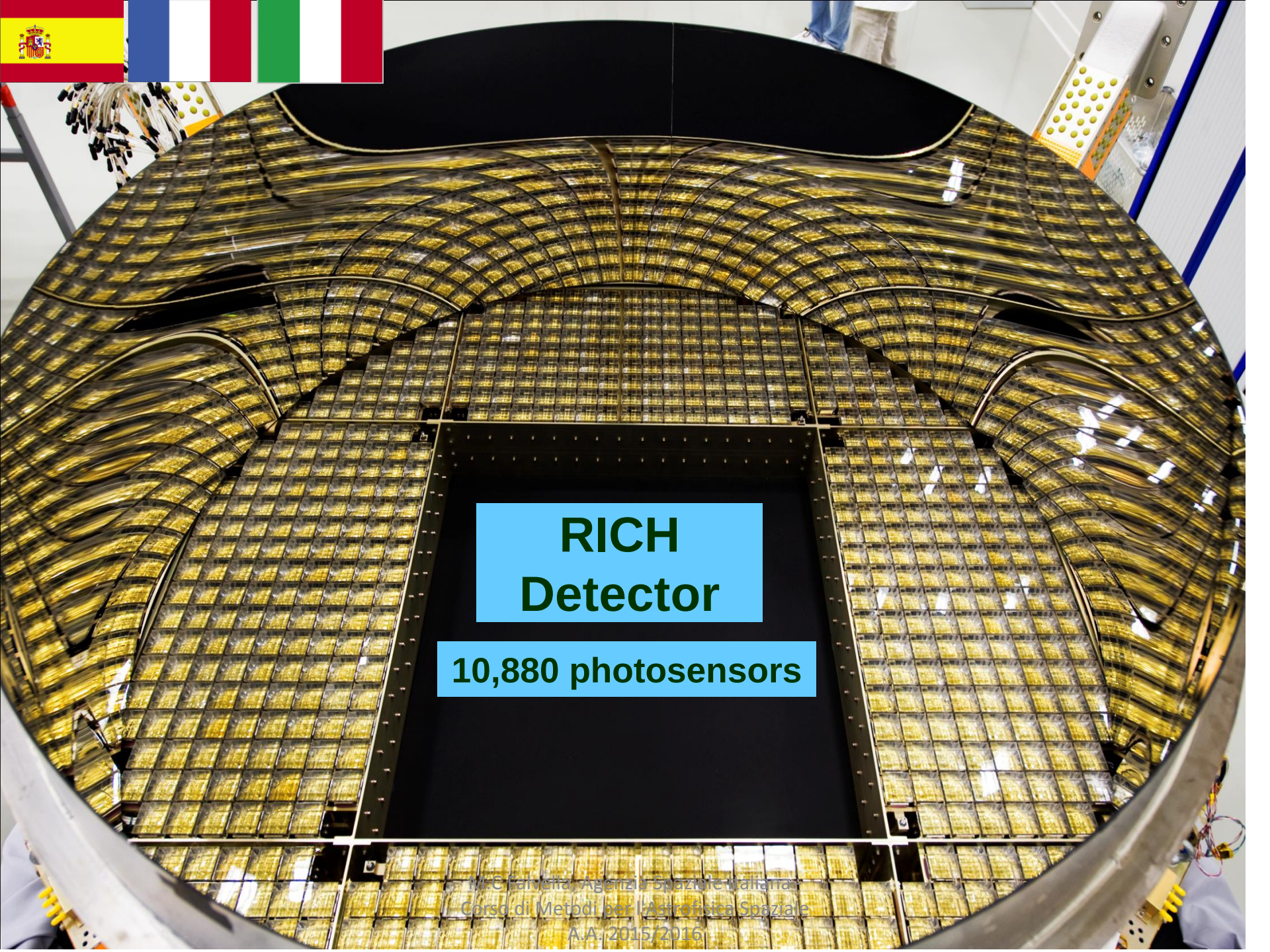
The coordinate resolution is 10 micron



It has taken 50 engineers to complete the detector

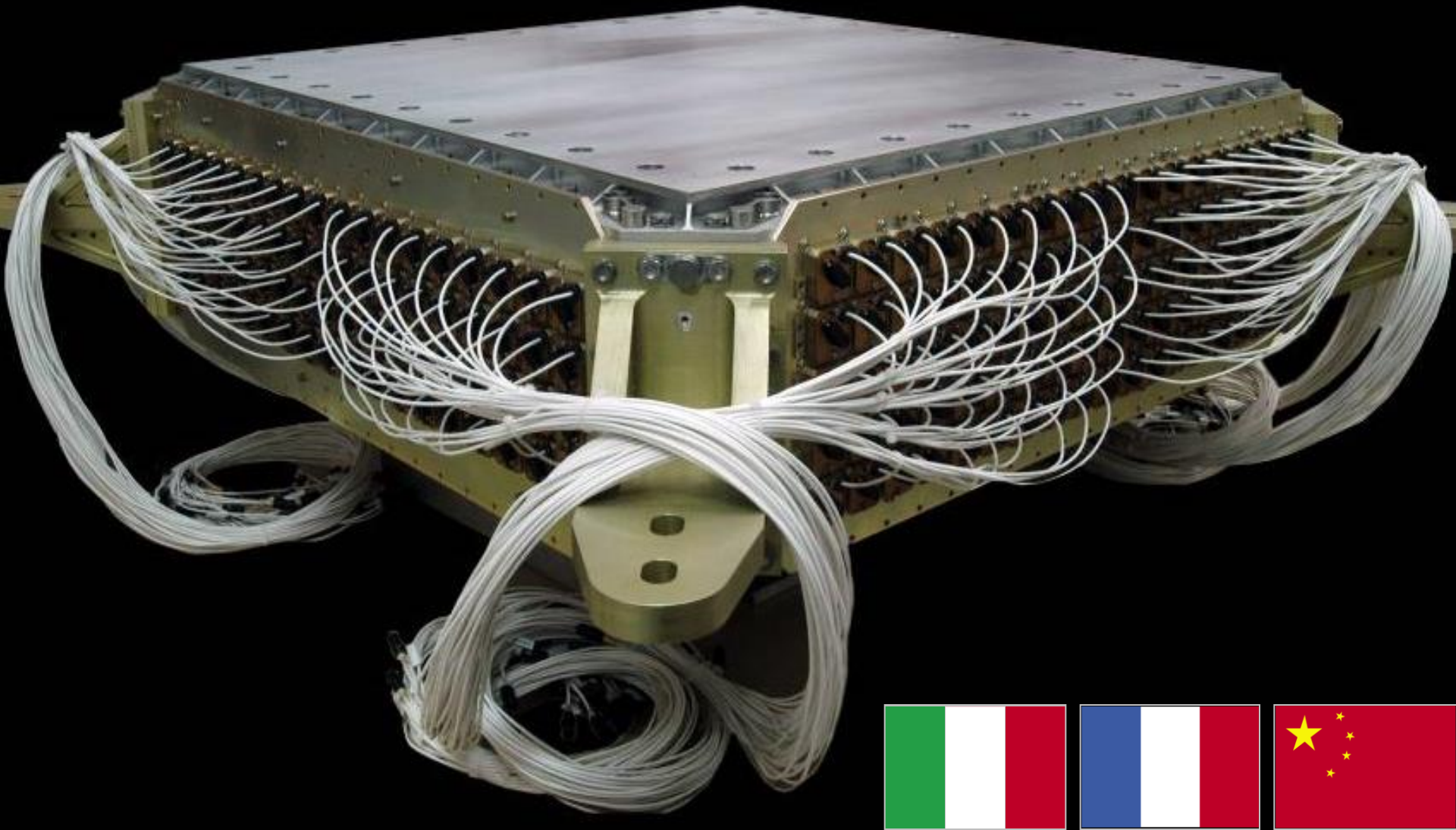
There are 9 planes with 200,000 channels aligned to 3 microns





RICH Detector

10,880 photosensors



**50,000 fibers, $\phi = 1\text{mm}$, distributed uniformly inside 1,200 lb of lead
which provides a precision, 3-dimensional, $17X_0$ measurement
of the directions and energies of light rays and electrons up to 1 TeV**

AMS IN CIFRE

Peso 8500 kg

Volume 64 metri cubi

Potenza 2500 Watt

Trasmissione dati 2 Mbps

Intensità del campo magnetico 0.125 Tesla o 1250 Gauss (all'incirca 4000 volte più intenso del campo magnetico terrestre)

Materiale magnetico lega di Neodimio ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), per un peso di 1200 kg

Sottosistemi 15 tra rivelatori di particelle e sottosistemi di supporto

Lancio 16 maggio 2011 alle 08:56 EDT

Durata della missione fino alla fine dell'attività della ISS, anno 2020 o oltre (non ritornerà sulla Terra)

Costruzione 1999-2010

Costo \$1.5 miliardi (stimati)

Cosmic Rays: protons, electrons, Helium ...
Collision of Cosmic Rays will produce e^+ ...

Search for the origin of Dark Matter:

Collisions of Dark Matter will produce additional e^+

**These characteristics of additional e^+ can be measured very accurately
by AMS**

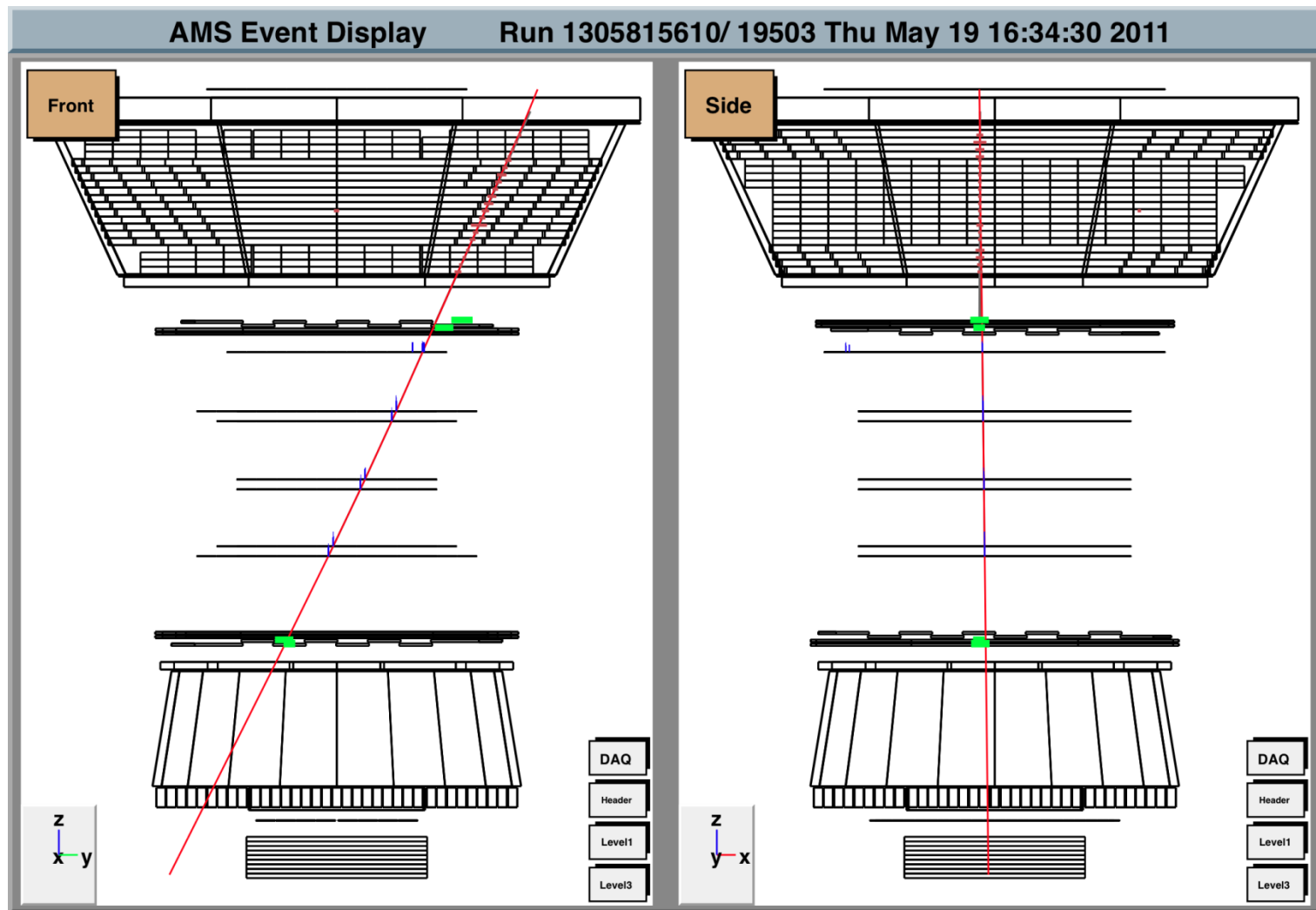


May 19: AMS installed on ISS 5:15 CDT, start taking data 9:35 CDT

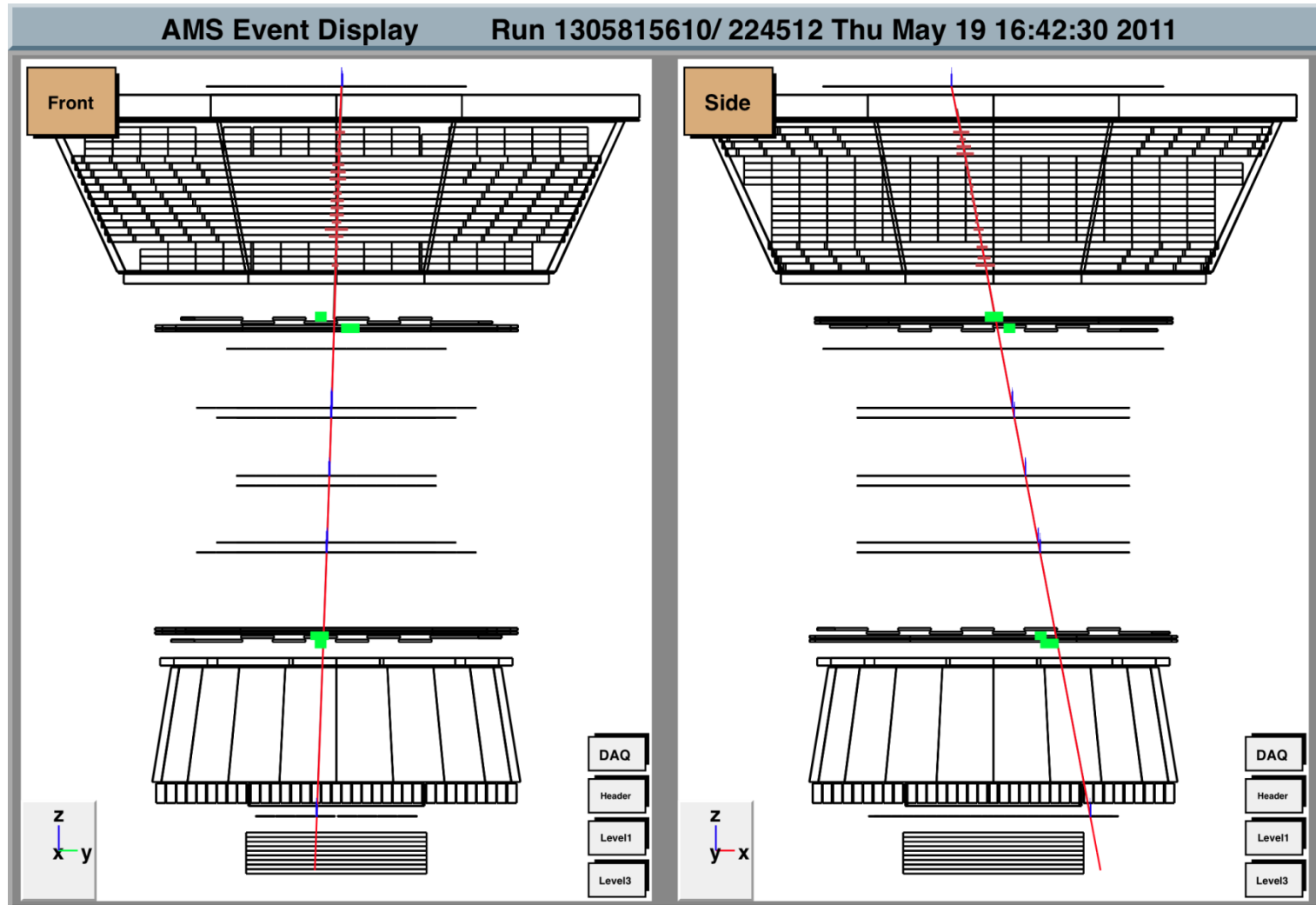
During the first week, we collected 100 million cosmic rays

First few minutes of AMS

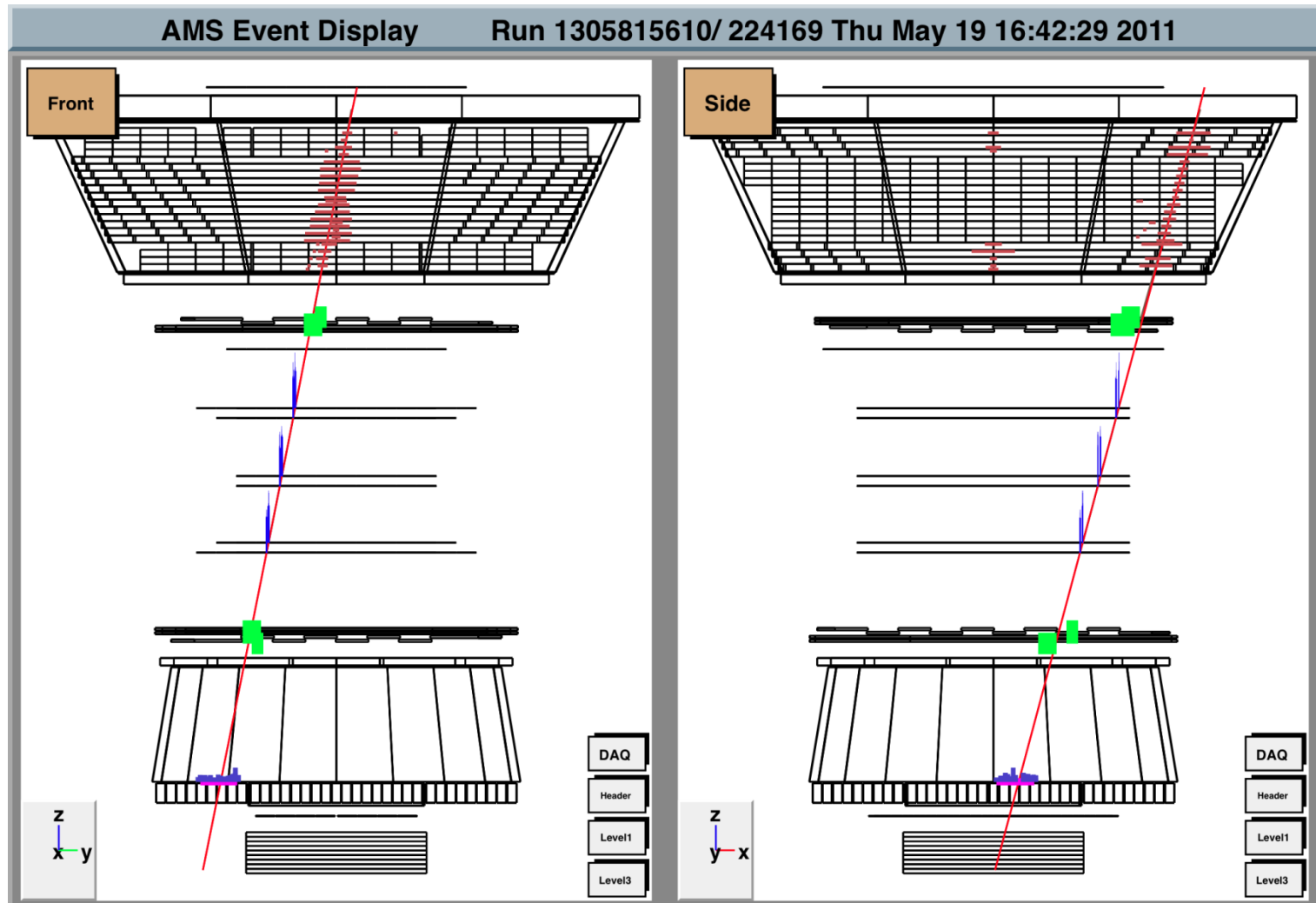
Proton



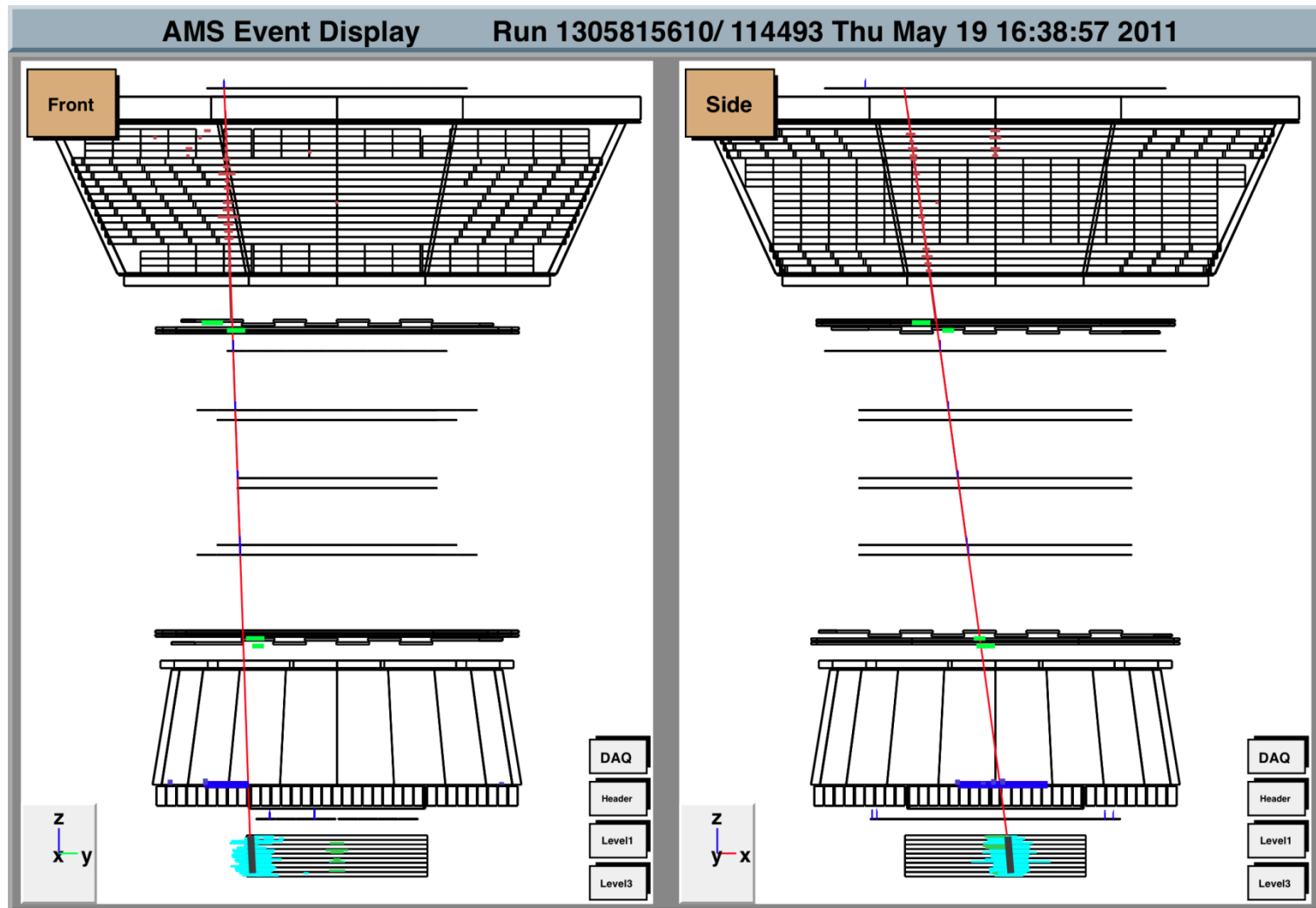
Helium



Carbon



Electron



Physics of AMS: Search for Antimatter Universe

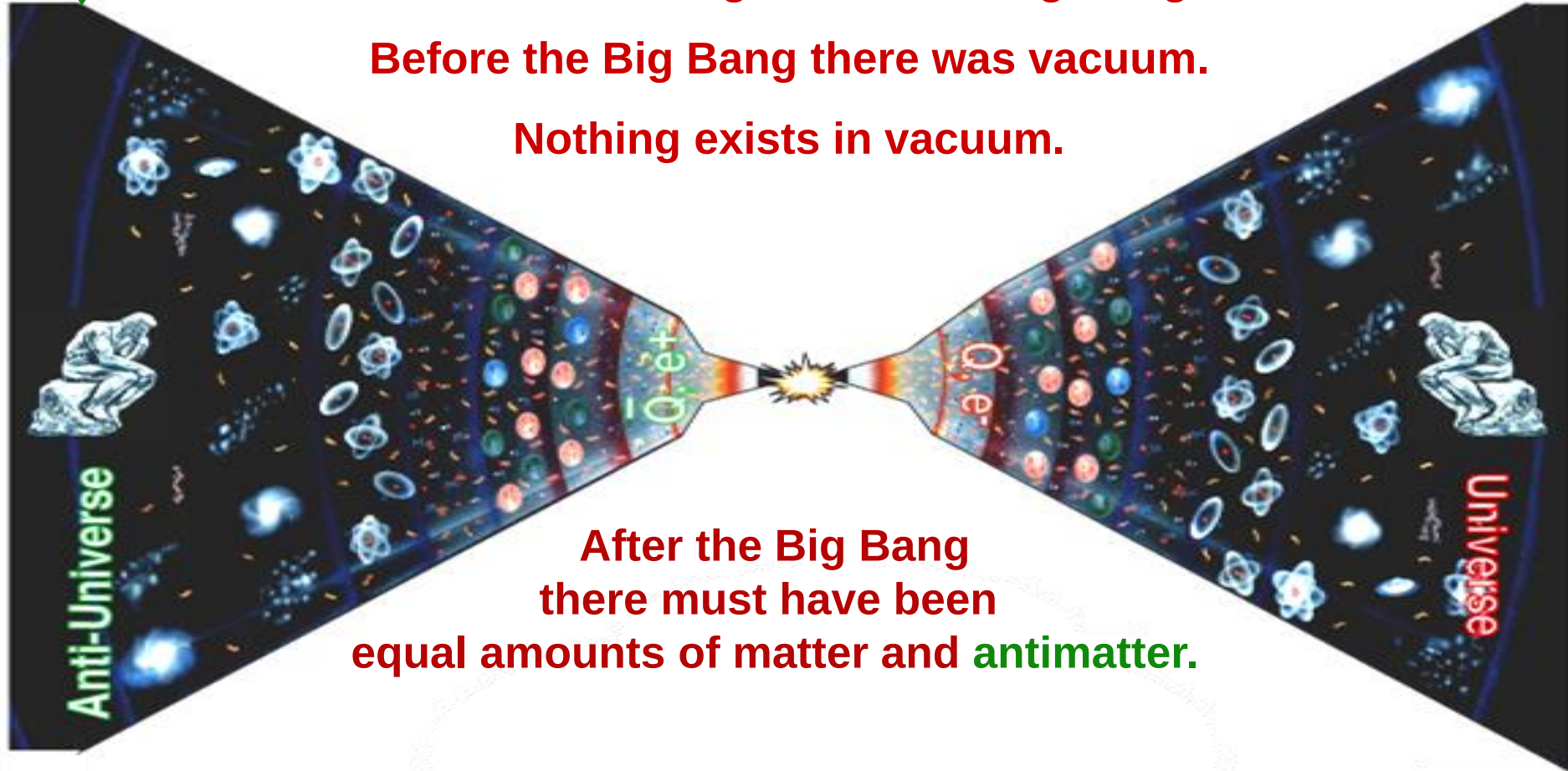
AMS on ISS



The Universe began with the Big Bang.

Before the Big Bang there was vacuum.

Nothing exists in vacuum.



After the Big Bang
there must have been
equal amounts of matter and **antimatter**.

AMS on the Space Station for 20 years will search
for the existence of **antimatter** to the edge of the universe

Question

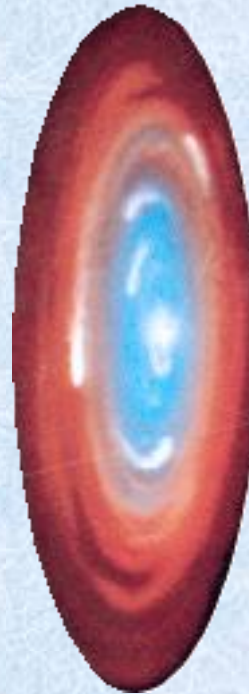
Universe

He
C



Anti universe ?

$\bar{\text{He}}$
 $\bar{\text{C}}$

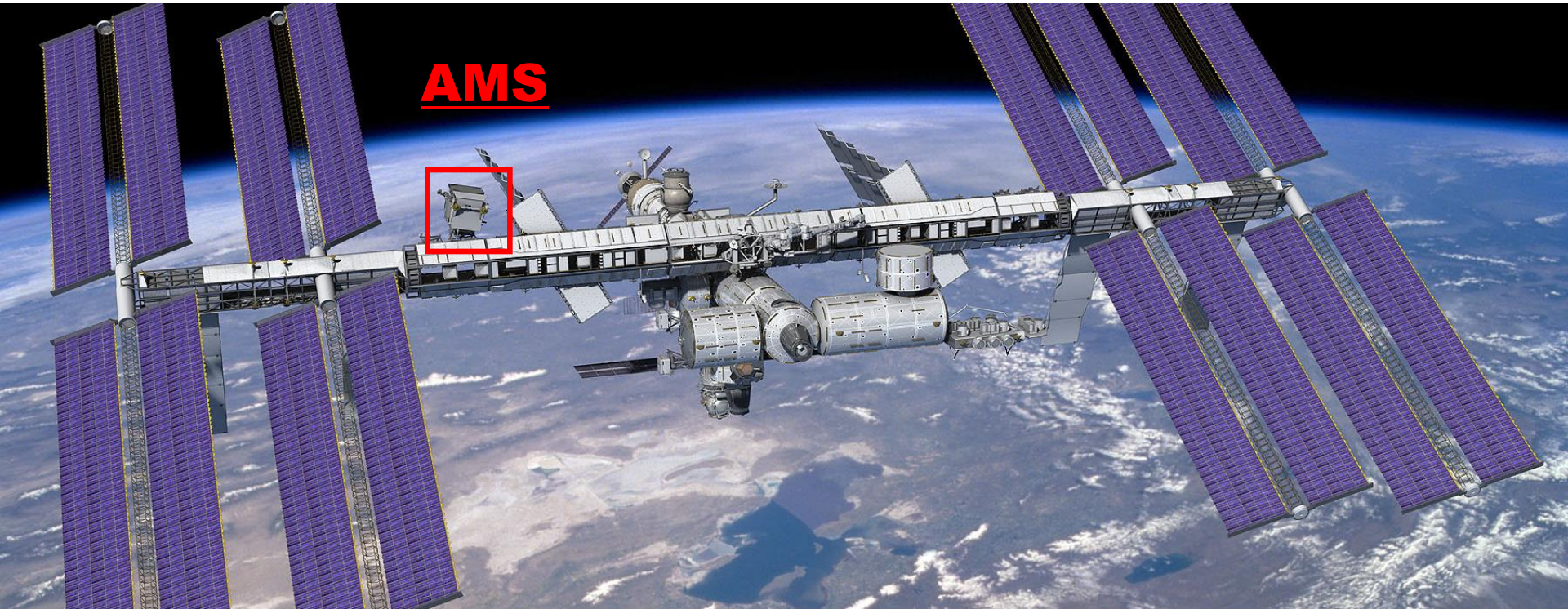


Cosmic antimatter cannot be detected on Earth because matter and antimatter will annihilate each other in the atmosphere

The Cosmos is the Ultimate Laboratory.

Cosmic rays can be observed at energies higher than any accelerator.

The issues of antimatter in the universe and the origin of Dark Matter probe the foundations of modern physics.



AMS

AMS is the only large scientific experiment to study these issues directly in space.

LARES (Laser Relativity Satellite) è un satellite artificiale dell'ASI realizzato dalla Compagnia Generale per lo Spazio e progettato dall'Università La Sapienza di Roma.

LARES è stato messo in orbita dal vettore Vega, ad una quota di 1450 km con un'inclinazione $69,5^\circ$ e una ridotta eccentricità, il 13 febbraio 2012 dalla base di lancio europea di Kourou (Guyana Francese) con il lancio di qualifica del nuovo vettore europeo Vega.



LARES è una evoluzione dei satelliti LAGEOS I e II, ha come obiettivo di raggiungere importanti obiettivi scientifici nel campo della fisica gravitazionale, fisica fondamentale e scienze della Terra.

Le diverse misure eseguite dalle postazioni a terra permetteranno di triangolare la posizione del satellite e la sua orbita per studiare l'effetto Lense-Thirring.

EFFETTO LENSE-THIRRING

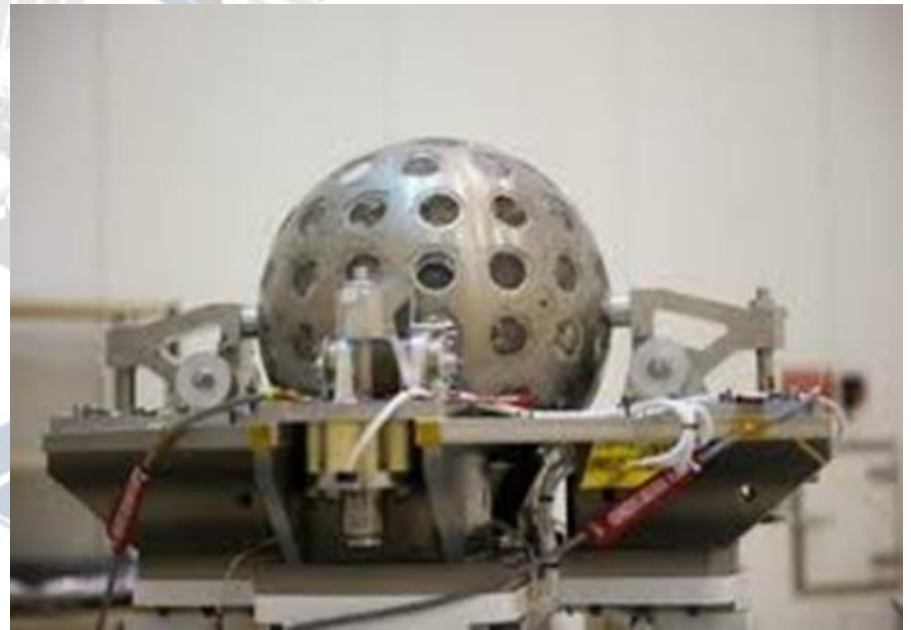
Questo effetto definisce come viene alterato lo spazio tempo dalla rotazione di un corpo dotato di massa (come la Terra)

Lense e Thirring avevano previsto che la rotazione di un oggetto dovrebbe portare a una modifica dello spazio e del tempo tale da trascinare un oggetto circostante al di fuori dalla posizione che sarebbe invece prevedibile in base alla fisica newtoniana classica.

Tentativi di misurare l'effetto Lense-Thirring sono stati condotti con i satelliti LAGEOS-1 e LAGEOS-2, ottenendo una misura con una incertezza del 10%. **Il satellite LARES, grazie anche alla perfetta immissione nell'orbita prevista, permette di effettuare una misura dell'effetto Lense-Thirring con una precisione di circa l'1% .**

Oltre a questo obiettivo primario LARES verrà utilizzato per altri test sulla relatività generale. Il satellite permetterà di effettuare anche misure nel campo della geodinamica e della geodesia spaziale

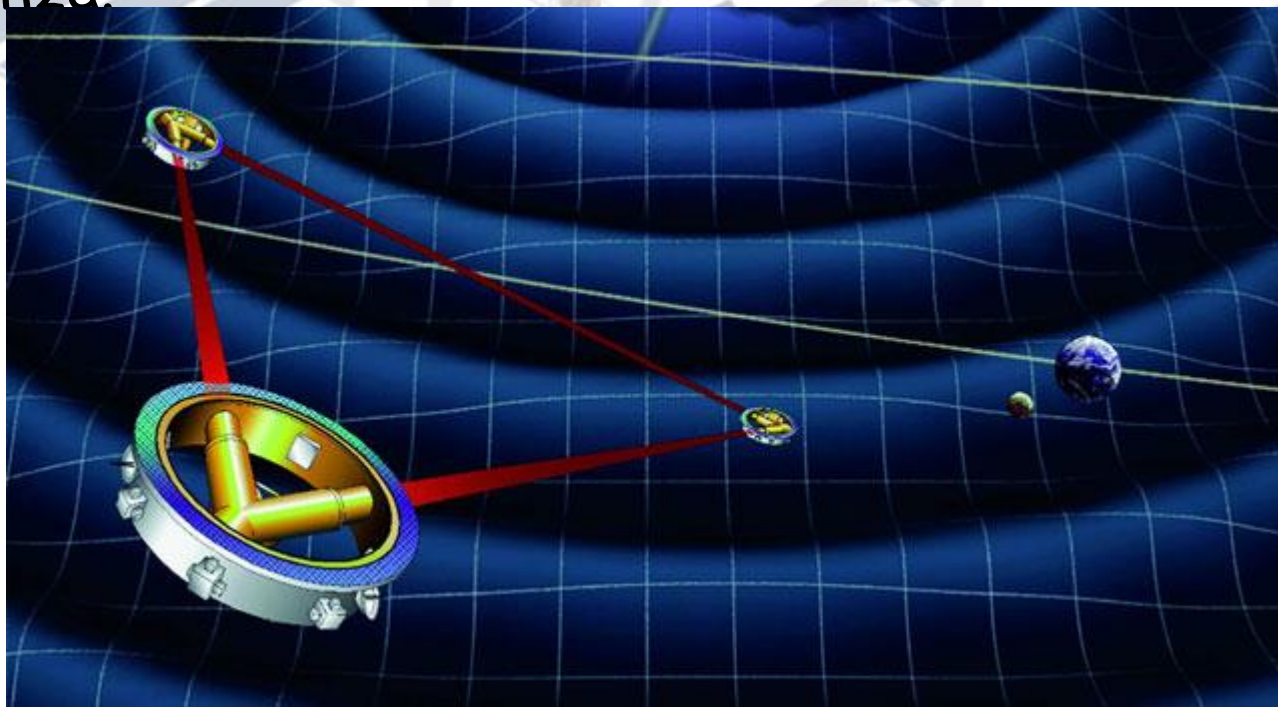
Il satellite, totalmente passivo, è formato da un corpo sferico in lega di tungsteno, ricoperto da 92 retroriflettori a spigolo di cubo (CCR), ed ha un diametro di 36 cm e pesa 386,8 kg.



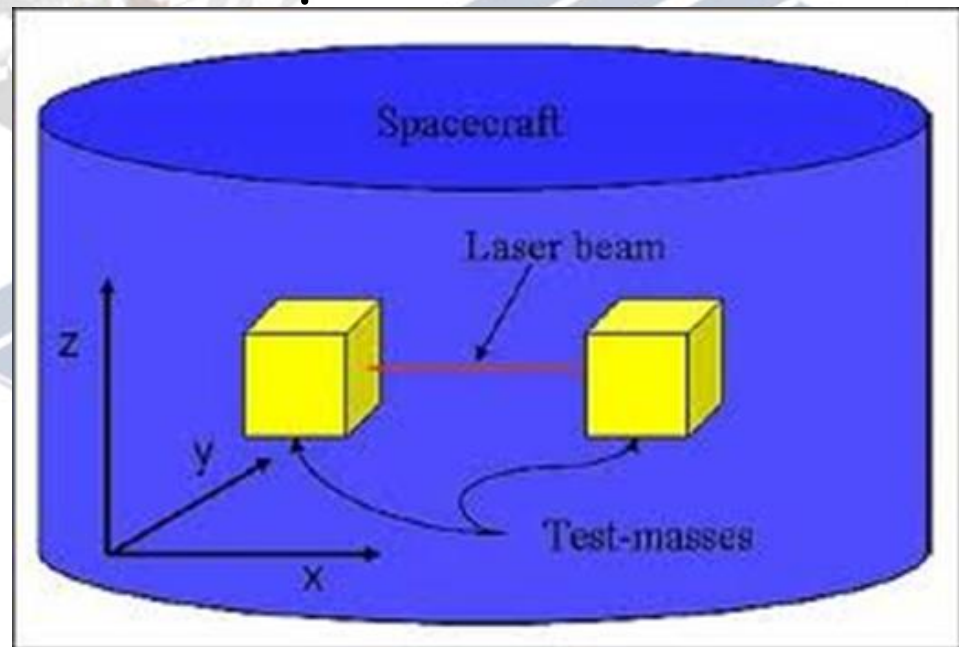
LA MISURA

Una serie di postazioni a terra (gestite dall'International Laser Ranging Service - ILRS) punteranno il satellite utilizzando dei laser ad impulsi e, misurando il tempo necessario al segnale laser stesso per tornare a terra, determineranno la distanza del satellite

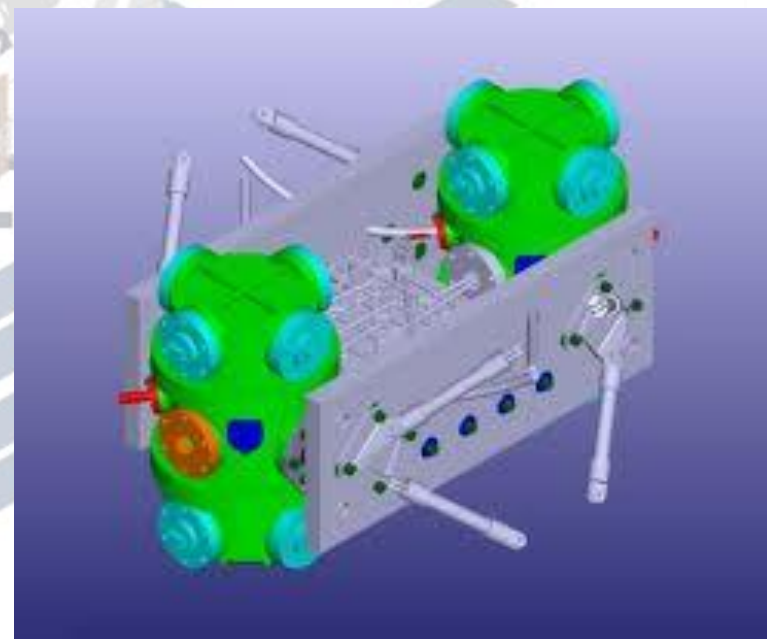
LISA-Pathfinder (LISA-PF) - lanciato il 3.12.2015!
progetto europeo nell'ambito della collaborazione ESA-
NASA per la realizzazione della cornerstone mission LISA
(Laser Interferometer Space Antenna), il primo
osservatorio spaziale per onde gravitazionali di bassa
frequenza.



A bordo del satellite è montato un sistema composto da due masse di prova e da un interferometro che, insieme all'elettronica e all'ottica associate, costituisce il LISA Technology Package (LTP), realizzato da un consorzio di enti di ricerca europei.



Lo scopo di LISA-PF è mettere alla prova il concetto stesso di rivelazione di onde gravitazionali dallo spazio, dimostrando che è possibile controllare e misurare con una precisione altissima il movimento di due masse in condizioni di caduta libera.



Contributo Italiano

L'Italia è stata responsabile per l'ESA della definizione dell'architettura complessiva dell'LTP. Attualmente ha il ruolo di Principal Investigator (PI) e sviluppa il sensore inerziale, secondo quanto previsto da un accordo multilaterale con l'ESA firmato dall'ASI.

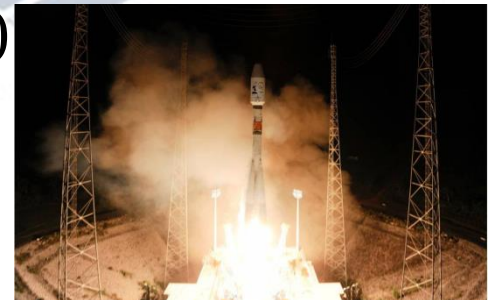
A livello nazionale ASI gestisce il progetto attraverso un accordo con l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, istituto del PI.

LA MISSIONE GAIA

Il Satellite Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) è stato sviluppato dall'Agenzia Spaziale Europea come continuazione della missione Hipparcos nell'ambito del programma scientifico Horizon 2000.

Il lancio è avvenuto il 19 dicembre del 2013 (9:12:18 UTC) e il satellite ora occupa un'orbita di Lissajous attorno ad L2(basso livello di radiazioni e una buona stabilità termica)

L'obiettivo principale della missione è l'effettuazione di misure astrometriche di altissima precisione



Gaia compilerà un catalogo di circa un miliardo di stelle fino alla magnitudine 20.

mappa tridimensionale molto precisa con la posizione ed i movimenti delle stelle, in modo da poter studiare l'evoluzione della Galassia.

Le misure fotometriche forniranno dettagliate informazioni fisiche sulla composizione e sulle caratteristiche delle stelle osservate:

- la luminosità
- la gravità, la temperatura
- la composizione chimica
- Misura di quasar, pianeti extrasolari ed altri oggetti del sistema solare

Dati fondamentali per risolvere problemi sull'origine, la struttura e la storia evolutiva della Galassia.

I dati acquisiti da GAIA saranno gestiti dal centro di elaborazione Osservatorio Astronomico di Torino (P.I. Mario Lattanzi) in collaborazione con ALTEC (finanziato da ASI) .

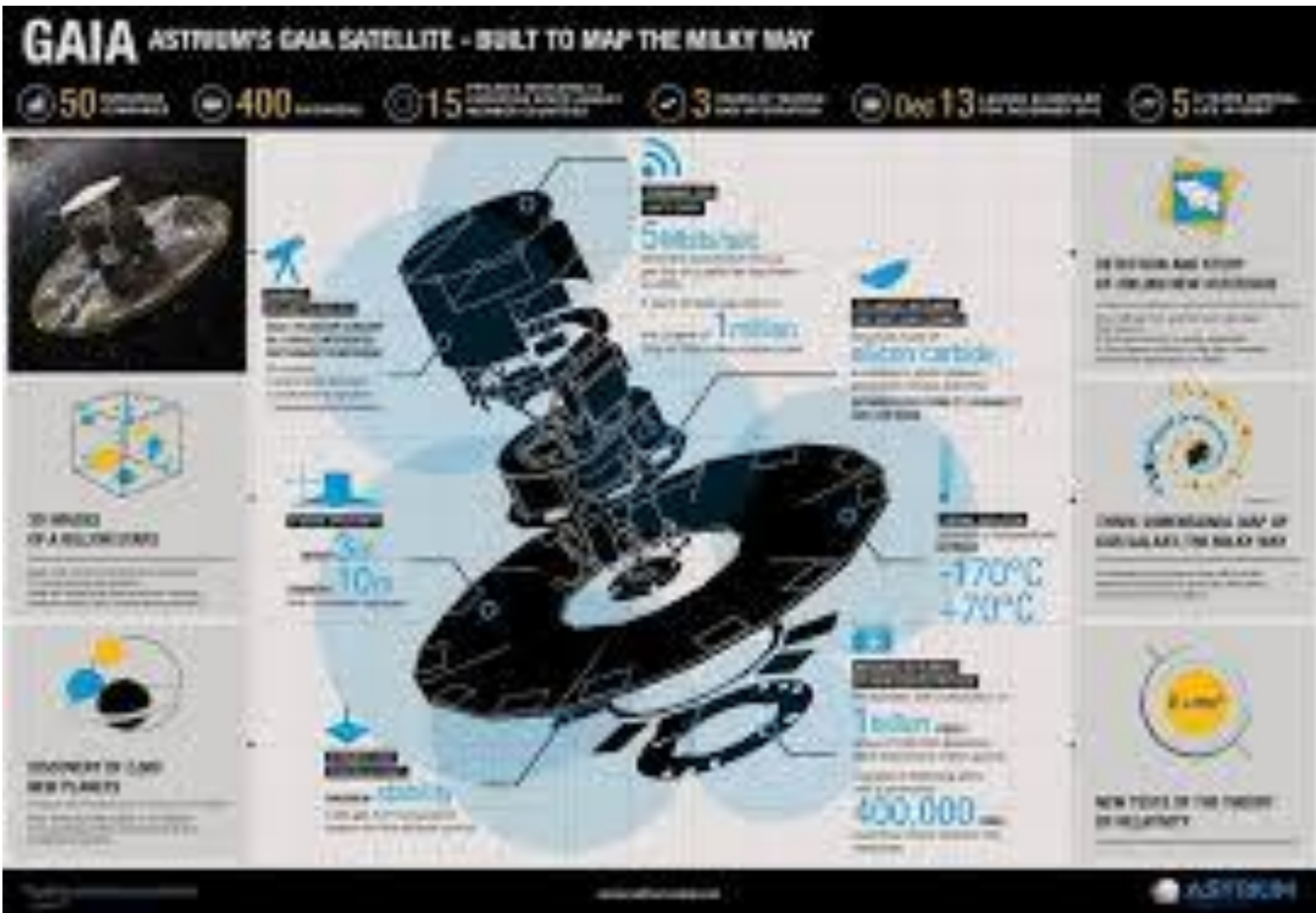


ALTEC ha il compito di fornire un'infrastruttura completa, hardware e software, e un database con i requisiti necessari per permettere l'esecuzione dei moduli software scientifici sviluppati dall'Osservatorio Astronomico di Torino . Il DPCT -Data Processing



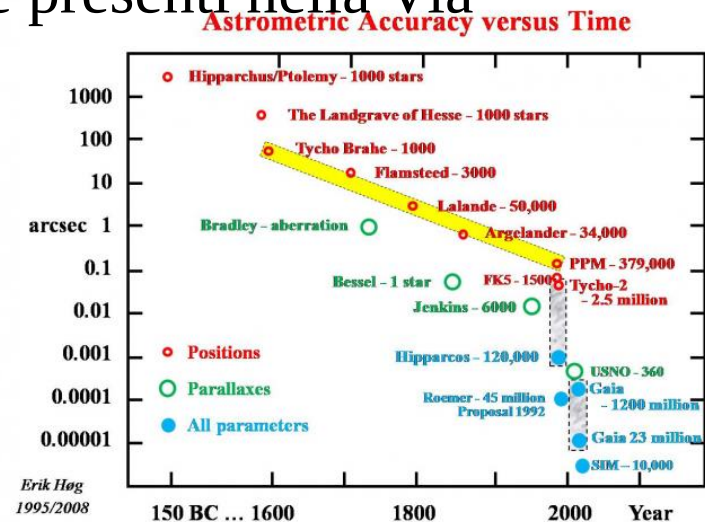
Center Torino realizzato a Torino presso ALTEC utilizzerà anche il supercalcolatore FERMI installato presso il CINECA di Bologna.





Oltre alla realizzazione della mappa 3D, Gaia avrà altri compiti: misurare la posizione, i colori e la velocità di oltre un miliardo e mezzo di stelle e determinare le loro luminosità e temperatura.

Gaia, che ha a bordo gli strumenti **Astro** (2 telescopi e imaging system), **BP/RP** (Blue and Red Photometers) e **RVS** (Radial Velocity Spectrometer), svolgerà in media 40 milioni di osservazioni al giorno su una popolazione stellare che ammonta a circa un centesimo delle stelle presenti nella Via Lattea.





Il satellite GAIA:

- il modulo di payload
- il modulo di servizio
- lo schermo solare (Deployable Sunshield Assembly, DSA)

Massa complessiva : circa 2 ton.

Il modulo di payload è costruito intorno a una struttura toroidale, che fornisce il supporto a un singolo strumento integrato, in grado di fornire tre diverse funzioni:

- **Astrometria** (posizioni, distanze e movimenti delle stelle)
- **Fotometria** (intensità della radiazione emessa dalle sorgenti)
- **Spettrometria** (caratteristiche della radiazione emessa dalle diverse sorgenti alle diverse lunghezze d'onda).



La partecipazione al DPAC di studiosi dell'Istituto nazionale di astrofisica (INAF) è seconda soltanto a quella francese, e coinvolge 74 tra scienziati e tecnologi, afferenti agli Osservatori di Bologna, Catania, Napoli, Padova, Roma Teramo e Torino, nonché agli atenei e politecnici delle stesse città e al Politecnico di Milano.

