BIBLIOGRAFIA

FENOMENOLOGIA RAGGI COSMICI

- M. W. Friedlander, A thin cosmic rain, (Collocazione C 4 294)

- S: Longair , High Energy Astrophysics , Cambridge University Press, capitolo 9

RIVELATORI DI PARTICELLE

(APPROFONDIMENTI)

- W.R.Leo, Tecniques for Nuclear and Paricle Physics Experiments, Springer Verlang, 1994
- Claus Grupen , ‘Particles Detectors’ , Cambridge University Press,1996

ALCUNI COMMENTI PRELIMINARI

Energia delle particelle – unità di misura: **eV = 1.6 10^{-19} J = 1.6 10^{-12} erg**

KeV = 10^3 eV ; MeV = 10^6 eV ; GeV = 10^9 eV ….

Impulso p : si misura in eV/c (e suoi multipli)
massa a riposo m_o: si misura in eV/c^2

MA SPESSO SI USA : $\hbar = c = 1$

Unita' di massa (m) e di impulso (p)= eV

$$E^2 - p^2 = m^2$$

massa a riposo protone ~ 1 GeV , massa elettrone = 511 KeV

$\beta = v/c$ $\qquad \gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \dfrac{E}{m}$

Tecnologie Spaziali

- **I raggi cosmici interagiscono con gli apparati spaziali rilasciando energia al loro interno**

- **I raggi cosmici sono un laboratorio naturale dove studiare astrofisica e fisica delle particelle.**

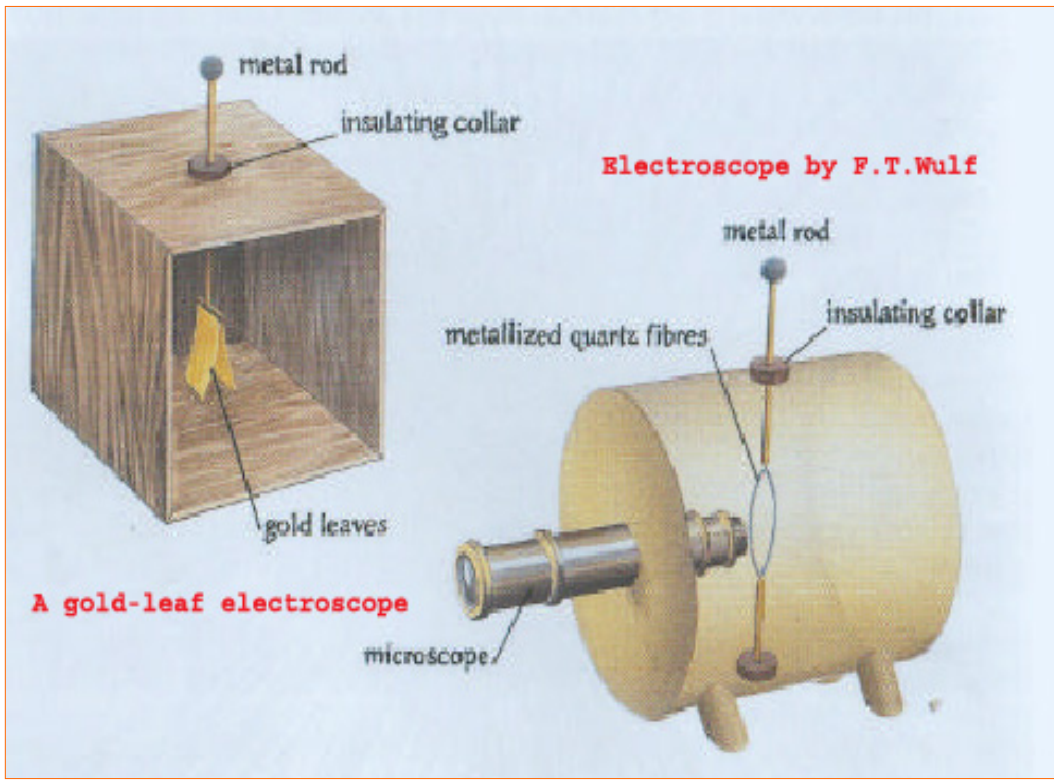
1. **Fenomenologia dei raggi cosmici**
2. **Fisica dei (con) raggi cosmici : alcuni esempi**
3. **La rivelazione dei raggi cosmici : interazione e rivelazione di particelle. Apparati per la rivelazione di particelle**
4. **Esempi di missione spaziale per la fisica dei raggi cosmici: PAMELA - AIRWATCH**

LA SCOPERTA DEI RAGGI COSMICI

LO SCOPRITORE UFFICIALE :
Victor Hess (Nobel 1936) nel 1912 con misure di ionizzazione dell'aria a varie altezze (voli in pallone)

1900 - Wilson (ed altri) scoprono che l'aria, anche in un contenitore chiuso, possiede conducibilità elettrica. La spiegazione fu la possibile presenza di sostanze radioattive capaci di ionizzare l'aria. Wilson formulò anche l'ipotesi (giusta) di radiazione ionizzante e penetrante di origine extraterrestre, ma lui stesso l'abbandonò subito in favore della spiegazione (sbagliata) della contaminazione radioattiva di origine terrestre

1911-1913 Hess compie 10 voli su pallone (5000 km raggiunti nel 1912) dimostrando inequivocabilmente che la radiazione ionizzante amentava con l'altitudine : 15 ioni/cm^3 a livello del mare , 34 ioni/cm^3 a 5000 km ! Compatibile con radiazione extraterrestre che penetra nell'atmosfera riducendosi progressivamente (ipotesi di Hess)



A gold-leaf electroscope

LA SCOPERTA DEI RAGGI COSMICI

1912 -1925 **La comunità scientifica dubitava fortemente delle conclusioni di Hess. Kolhorster, convinto che la ionizzazione fosse dipendente dalla temperatura, effettuo' altre misure da pallone che confermarono però la dipendenza dall'altitudine. Millikan pensava che la ionizzazione fose dovuta alla presenza di elementi radioattivi nell'alta atmosfera. In ogni caso la radiazione conosciuta non era abbastanza penetrante da giustificare l'ipotesi di Hess.**

1927-1932 **Si scopre che la radiazione e' influenzata dal campo geomagnetico e contiene particelle cariche. Compton prova definitivamente la dipendenza dalla latitudine. L'ipotesi di Hess si afferma, i 'raggi cosmici' diventano oggetto di molte ricerche.**

1936 **Premio Nobel a Victor Hess**

Victor Hess after his 1912 balloon flight, during which he discovered cosmic rays from space. © National Geographic.

… le particelle elementari …

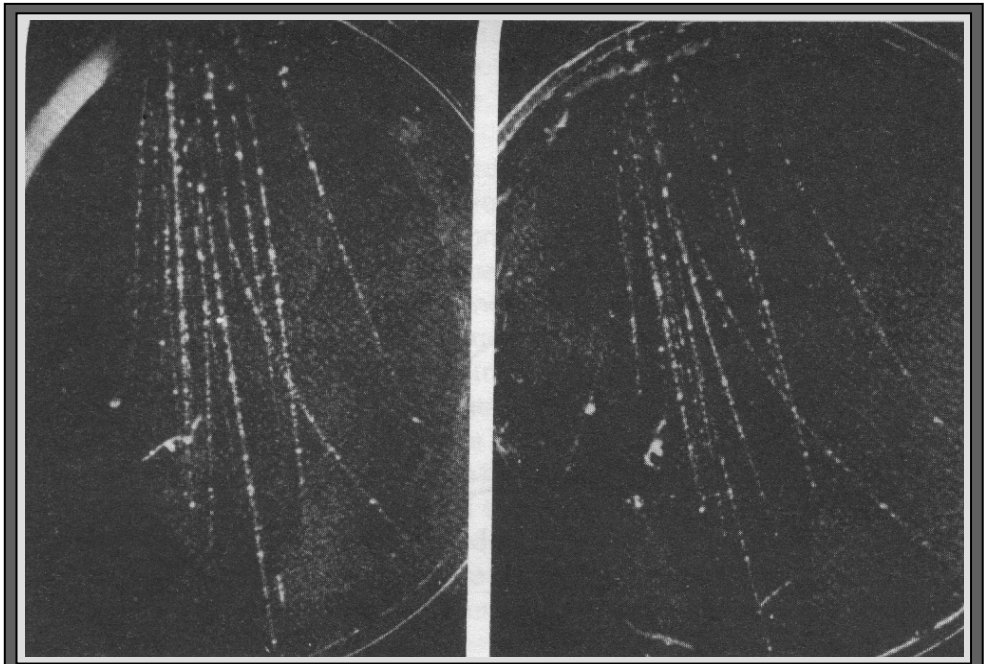
… continuano le osservazioni in laboratorio (camera a nebbia) e …

1927 **Dimitry Skobelzyn** fotografa le prime **tracce** da particelle di raggi cosmici

1932 **Carl Anderson** scopre il **positrone**

1933 **Patrick Blackett e Giuseppe Occhialini** fotografano la coppia positrone-elettrone

1937 **Seth Neddermeyer** e **Carl Anderson** scoprono il **muone**



Fotografia stereoscopica di uno sciame (P. Blackett & G. Occhialini, 1933)

… prende vita la scienza della fisica delle particelle elementari …

RC ⟷ Fisica delle particelle

Dal 1930 fino al 1950 i RC sono stati il principale (unico?) acceleratore a disposizione per la Fisica delle Particelle!!!

1927: scoperta degli sciami prodotti dai RC
1932: $\mathbf{e^+}$
1937: $\mu^{+/-}$
1947: $\pi^{+/-}$
1947/1953: Inizio della proliferazione degli adroni: $\mathbf{K^+, K^0, \Lambda^0, \Xi^-, \Sigma^+}$

A partire dagli anni 50 gli acceleratori hanno 'preso il sopravvento' (anche a Firenze!):

- Intensita' (Luminosita')
- Direzionalita'
- Energia fissata
- Riproducibilita'

Solo per la Fisica delle particelle, non per l'Astrofisica!!!!

Ma….

1900-1950 RAGGI COSMICI E FISICA DELLE PARTICELLE

Table 1. Discovery of elementary particles

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

Anni 90: ritorno ai RC

1. Energie in gioco maggiori che in acceleratori

2. Collegamenti interdiscplinari
   - Fisica Nucleare
   - Fisica delle particelle
   - Astrofisica

3. Nuovi mezzi tecnici
   - Grandi rivelatori
   - **Palloni stratosferici**
   - **Satelliti**

Tecnologie spaziali!!!!

La fisica dei RC è uno dei campi di esplorazione scientifica che più si è giovato della possibilità di andare nello spazio!!!!

FENOMENOLOGIA DEI RAGGI COSMICI

1. **OSSERVAZIONI PRELIMINARI**

2. **L'ENERGIA DEI RAGGI COSMICI (SPETTRO) E COMPOSIZIONE DEI RAGGI COSMICI**

3. **ORIGINE**

4. **QUESTIONI INSOLUTE E OPPORTUNITA DI SCOPERTA DI NUOVA FISICA**

RAGGI COSMICI

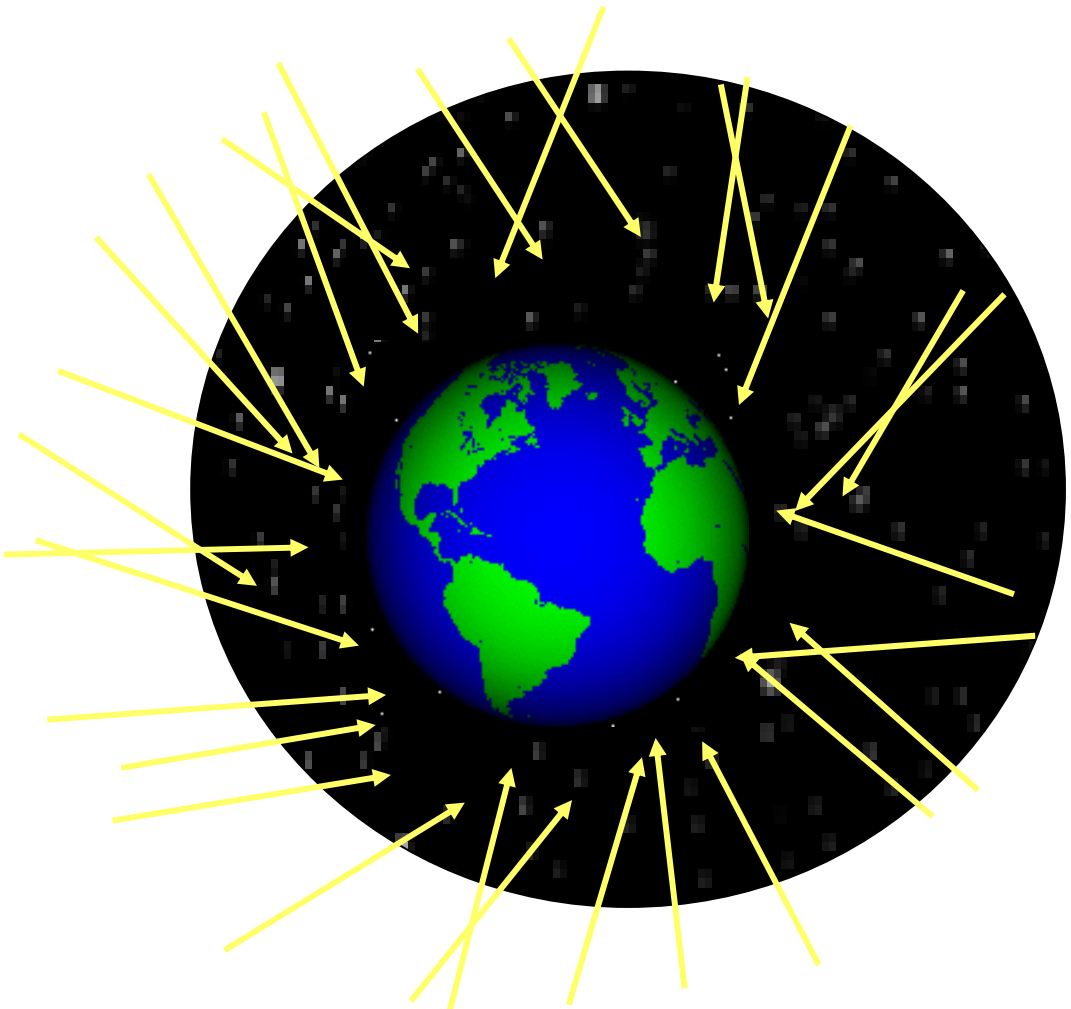
OSSERVAZIONI PRELIMINARI

RAGGI COSMICI

I **raggi cosmici** sono particelle subatomiche cariche molto energetiche che bombardano continuamente la Terra.

Protoni 90%, nuclei di elio (particelle alfa) 9%, nuclei pesanti,elettroni,.....

Lo **spettro energetico** inizia da circa 10^9 eV e sembra non avere un limite superiore.



L'atmosfera terrestre assorbe la maggior parte dei raggi cosmici.

LA COMPOSIZIONE DEI RAGGI COSMICI:

protoni e nuclei 99% → **componente principale**

antiprotoni

gamma (fotoni molto energetici)

elettroni

positroni

neutrini

LO STUDIO DI OGNUNA DI QUESTE COMPONENTI APRE UNO SCENARIO ATTIVO DI RICERCA

RAGGI COSMICI : LE OSSERVABILI

1. **FLUSSO** : Numero di particelle per unita' di superficie, per unita' di tempo, per unita' di angolo solido.
   Flusso = ϕ (cm^{-2}, s^{-1}, sr^{-1}) oppure (m^{-2}, s^{-1}, sr^{-1}), ($km^{-2}, anni^{-1}, sr^{-1}$), ...
   Flusso differenziale = dN/dE ($cm^{-2}, s^{-1}, sr^{-1}, eV^{-1}$)
   Spettro = dN/dE (E)

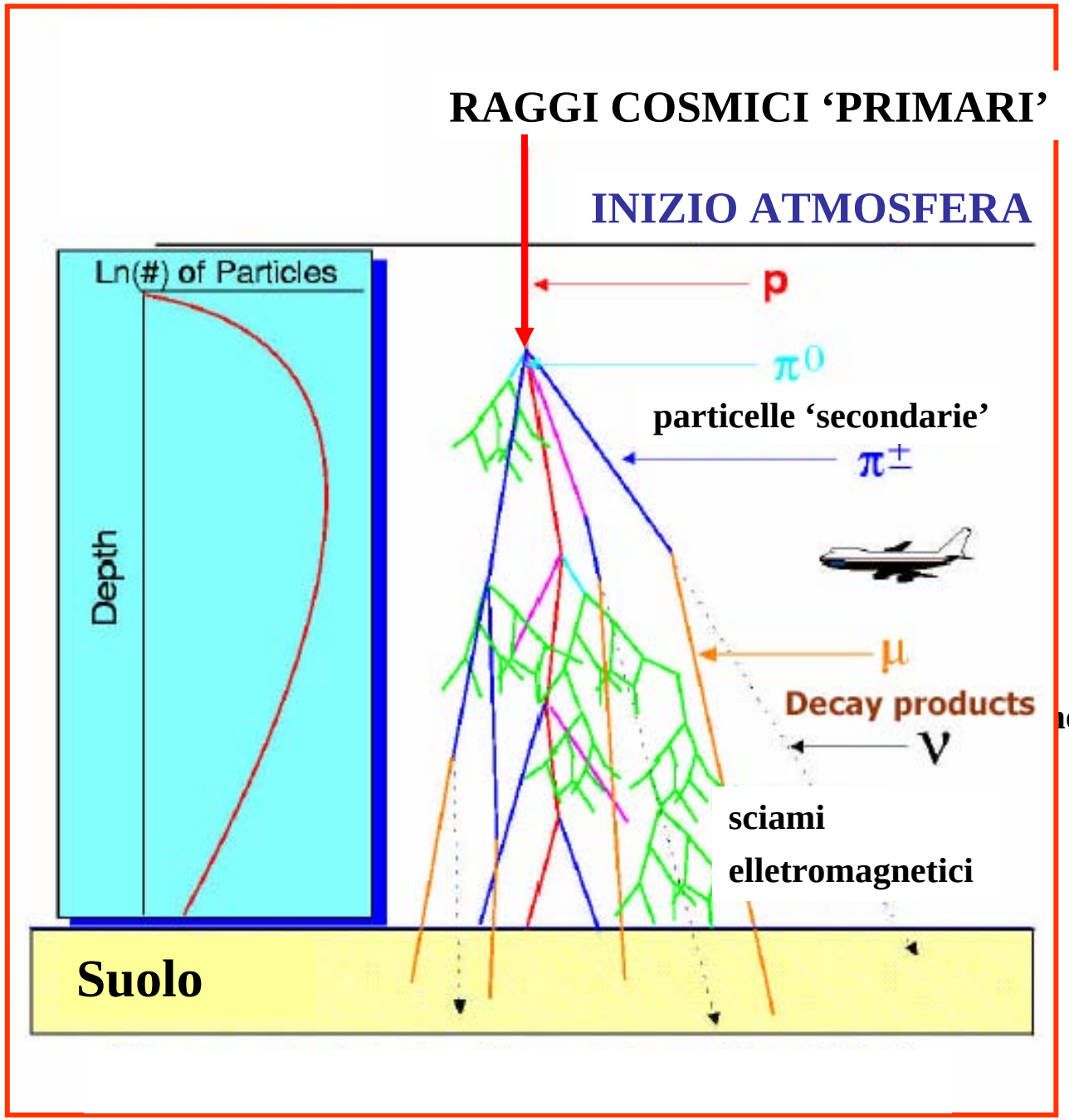
2. **ENERGIA :** energia della particella, energia del nucleo, energia del nucleone

3. **IMPULSO (p) :** se si conosce il tipo di particella e quindi la massa e' correlato all'energia ($E^2=m^2+p^2$). Se $E>>m$ allora $p \sim E$

4. **MASSA**

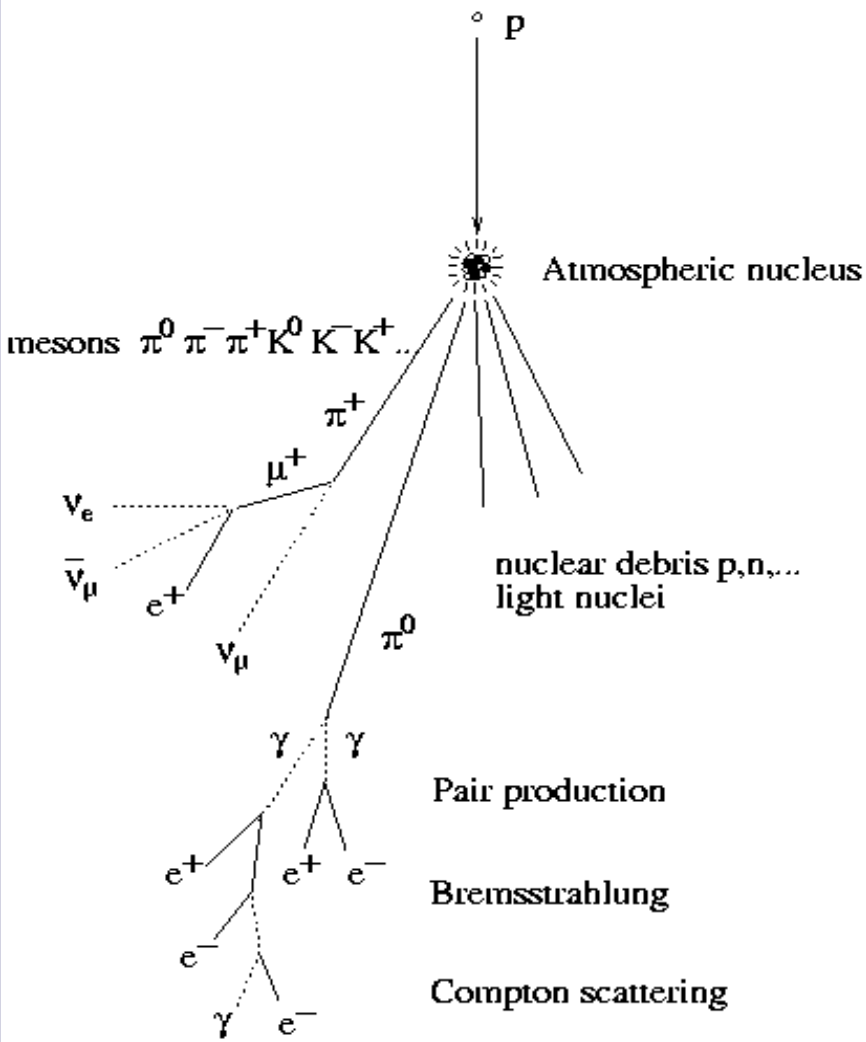
5. **CARICA :** insieme alla massa identifica la particella

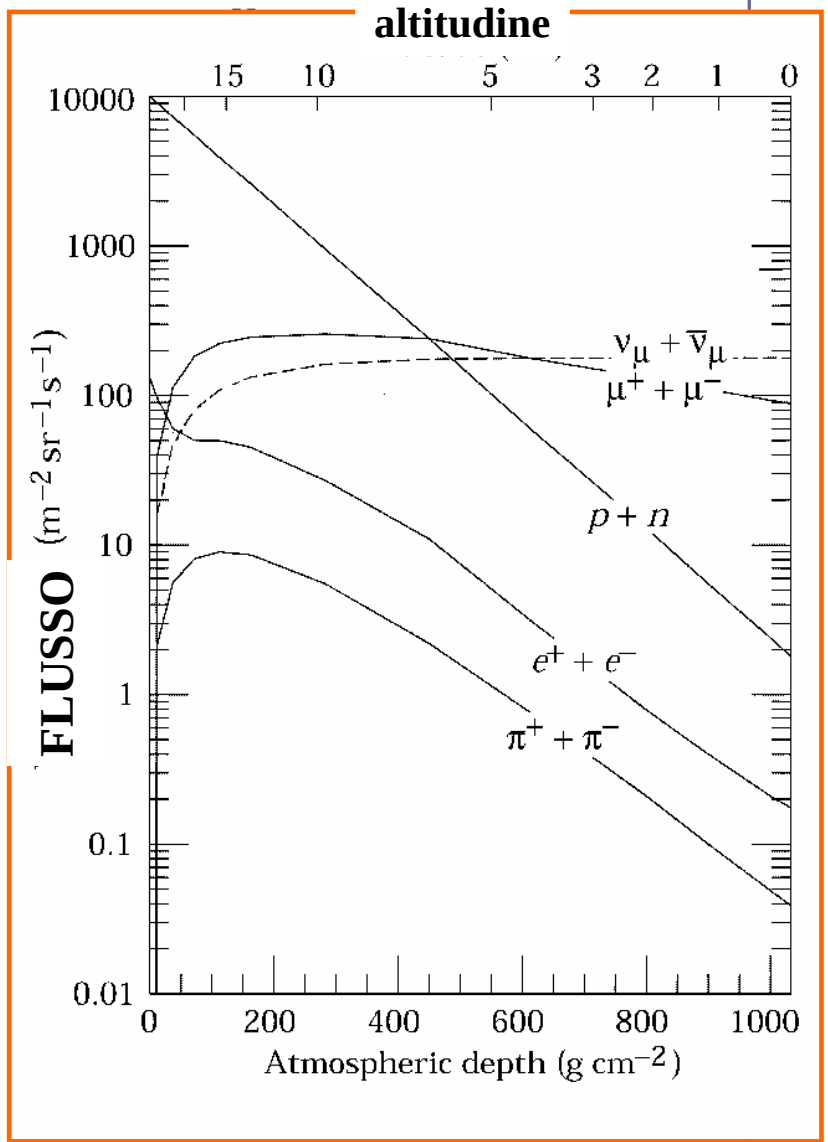
6. **DIREZIONE :** si puo' associare ad un oggetto astrofisico noto ?


RAGGI COSMICI 'PRIMARI'
INIZIO ATMOSFERA
Ln(#) of Particles
Depth
p
π^0
particelle 'secondarie'
$\pi^{\pm}$
μ
Decay products
ν
sciami
elletromagnetici
Suolo

nento

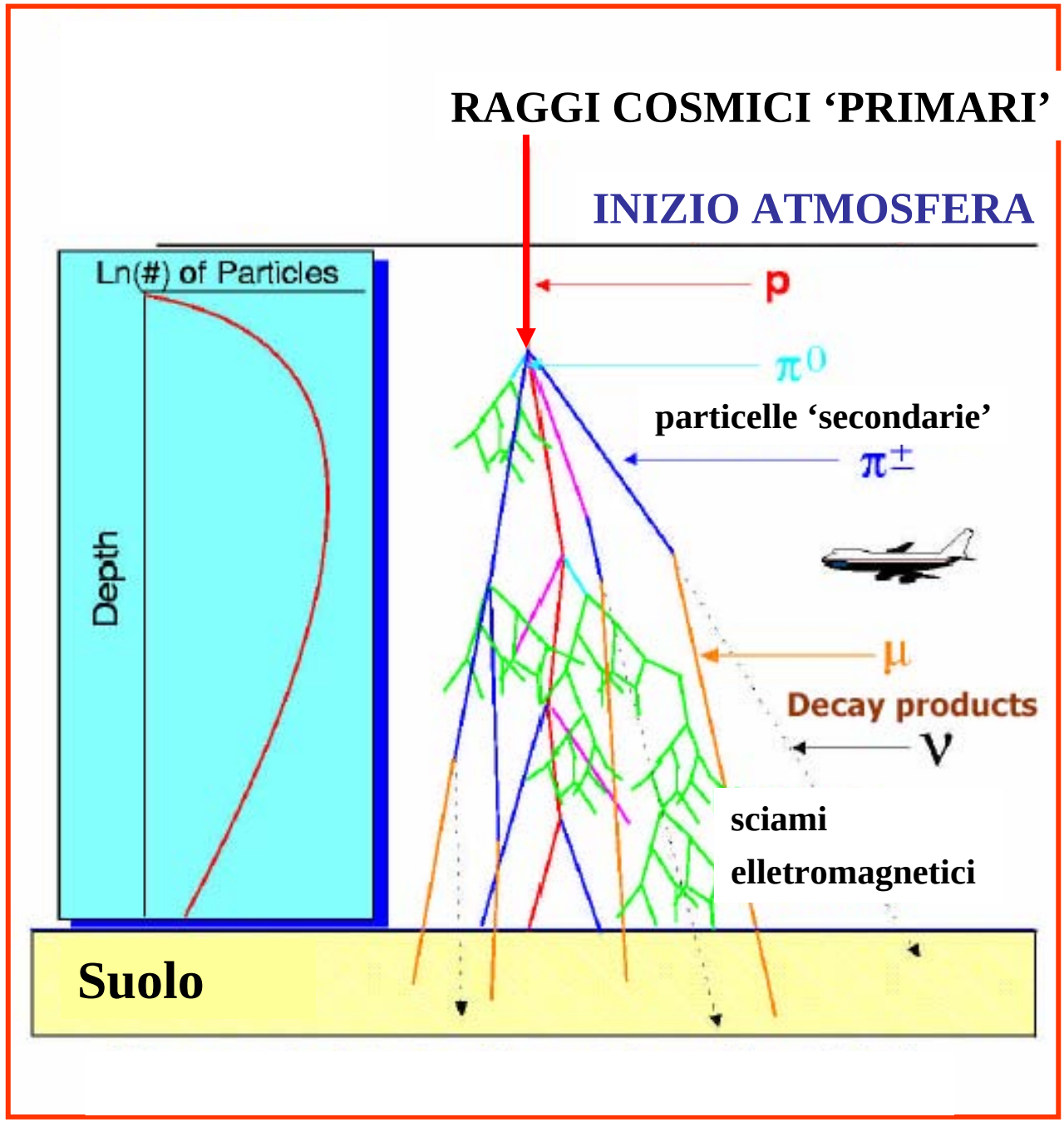
Particelle in atmosfera





Perché operare nello spazio è interessante per i raggi cosmici?

Rivelare i Raggi Cosmici prima della loro interazione con l'atmosfera, fornisce il massimo della informazione su di essi



Cosa possiamo imparare dai RC?

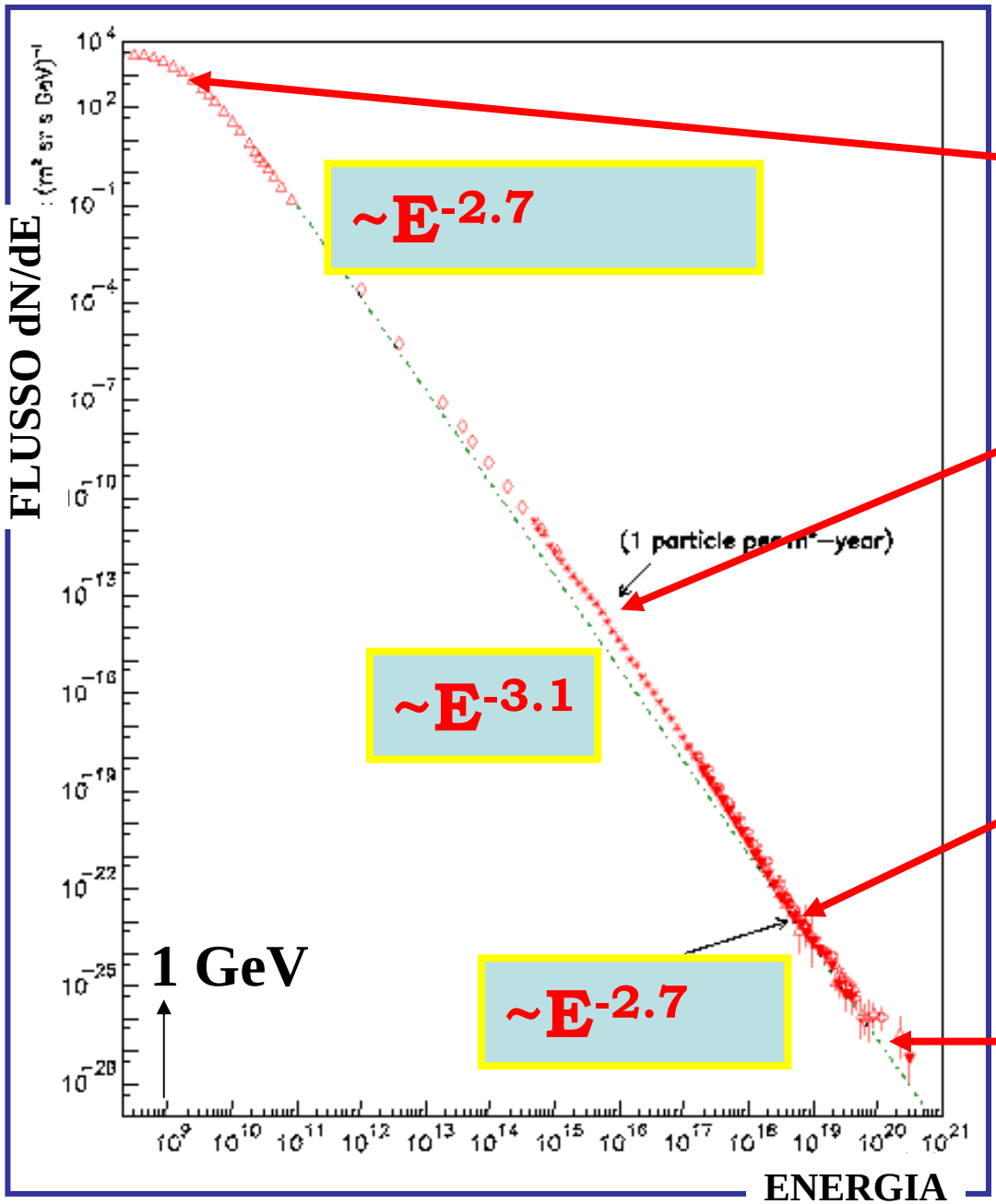
Misure/Effetti sperimentali	Informazioni Fisiche
Composizione: p ≅ 85% He ≅ 12% C,N,O ≅ 10^{-2} Fe ≅ 10^{-4} e^- ≅ 2% e^+ ≅ 10^{-4} $\bar{p} \cong 10^{-4}$ Spettri energetici Composizione isotopica Ricerche di antinuclei Ricerche di nuove particelle Modulazione solare Taglio geomagnetico Fasce di radiazione Atmosfera (23 X_0, 11 λ_I)	Sorgenti Meccanismi di accelerazione Meccanismi di propagazione Mezzo interstellare Tempo di confinamento Nucleosintesi Campi magnetici Fisica del sole Geofisica
	Simmetria materia/antimateria??? Nuove particelle??? Materia oscura??? Nuove interazioni??? Cosmologia???

RAGGI COSMICI

ENERGIA E COMPOSIZIONE

ENERGIA : LO SPETTRO dN/dE

legge di potenza : $dN/dE=kE^{-\gamma}$
su 12 ordini di grandezza !!!



~$10^2/m^2$/secondo

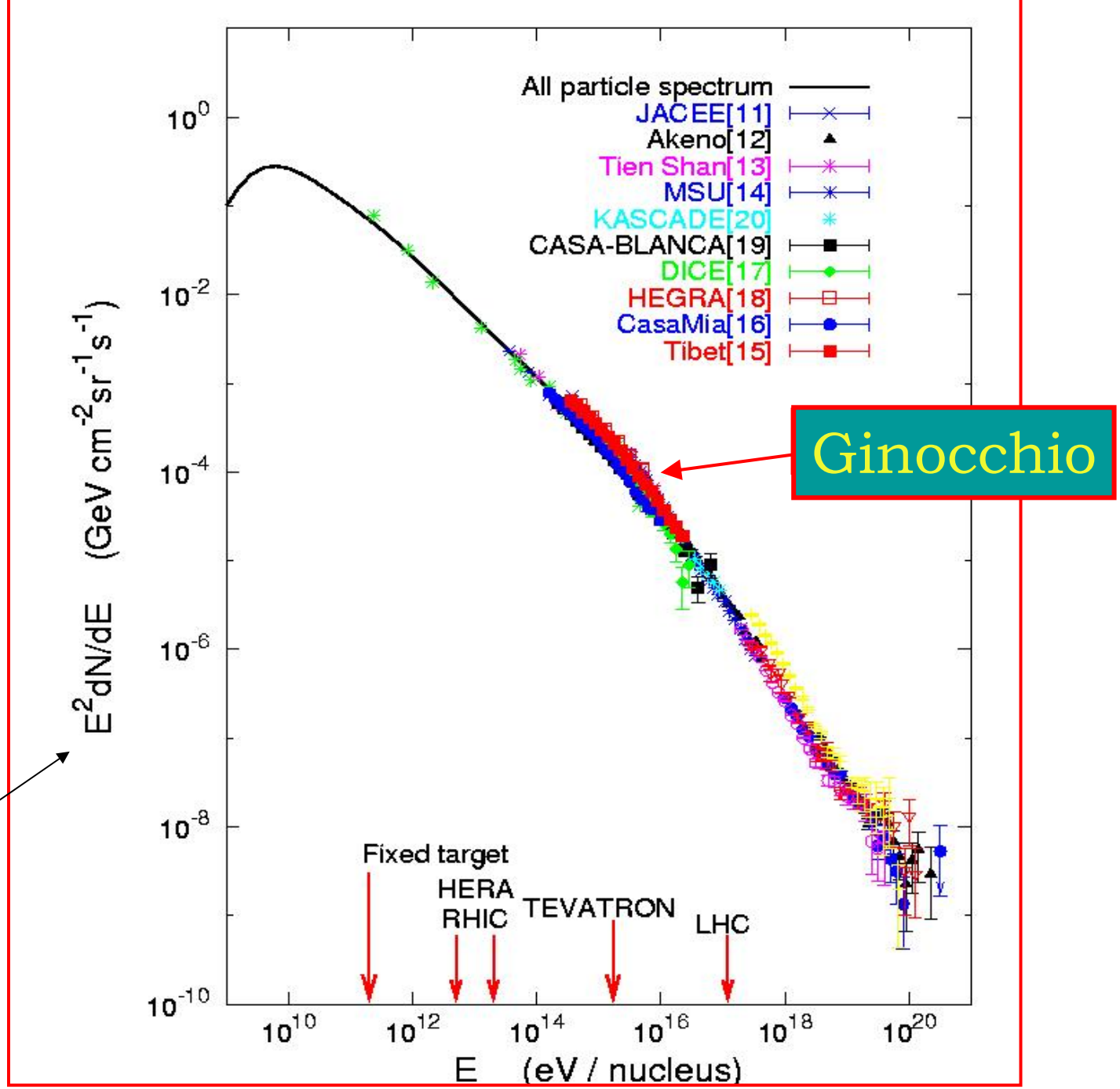
Ginocchio
10^{15} eV

~$1/m^2$/anno

Caviglia
10^{19}eV

~$1/km^2$/anno

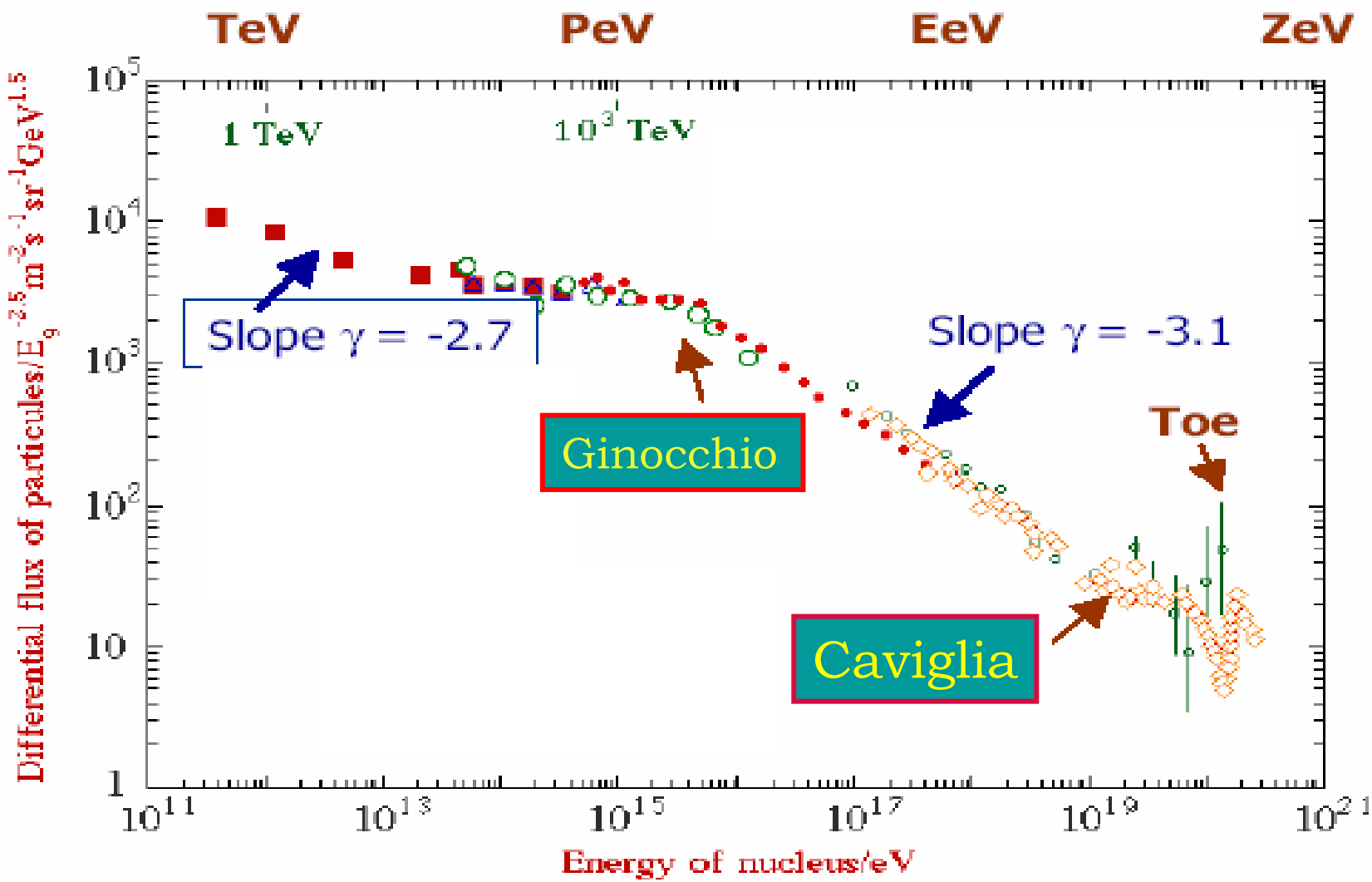
~$1/km^2$/secolo


All particle spectrum
JACEE[11]
Akeno[12]
Tien Shan[13]
MSU[14]
KASCADE[20]
CASA-BLANCA[19]
DICE[17]
HEGRA[18]
CasaMia[16]
Tibet[15]
Ginocchio
Fixed target
HERA
RHIC
TEVATRON
LHC
E^2dN/dE (GeV cm^{-2}sr^{-1}s^{-1})
E (eV / nucleus)
10^0
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
10^{-10}
10^{10}
10^{12}
10^{14}
10^{16}
10^{18}
10^{20}

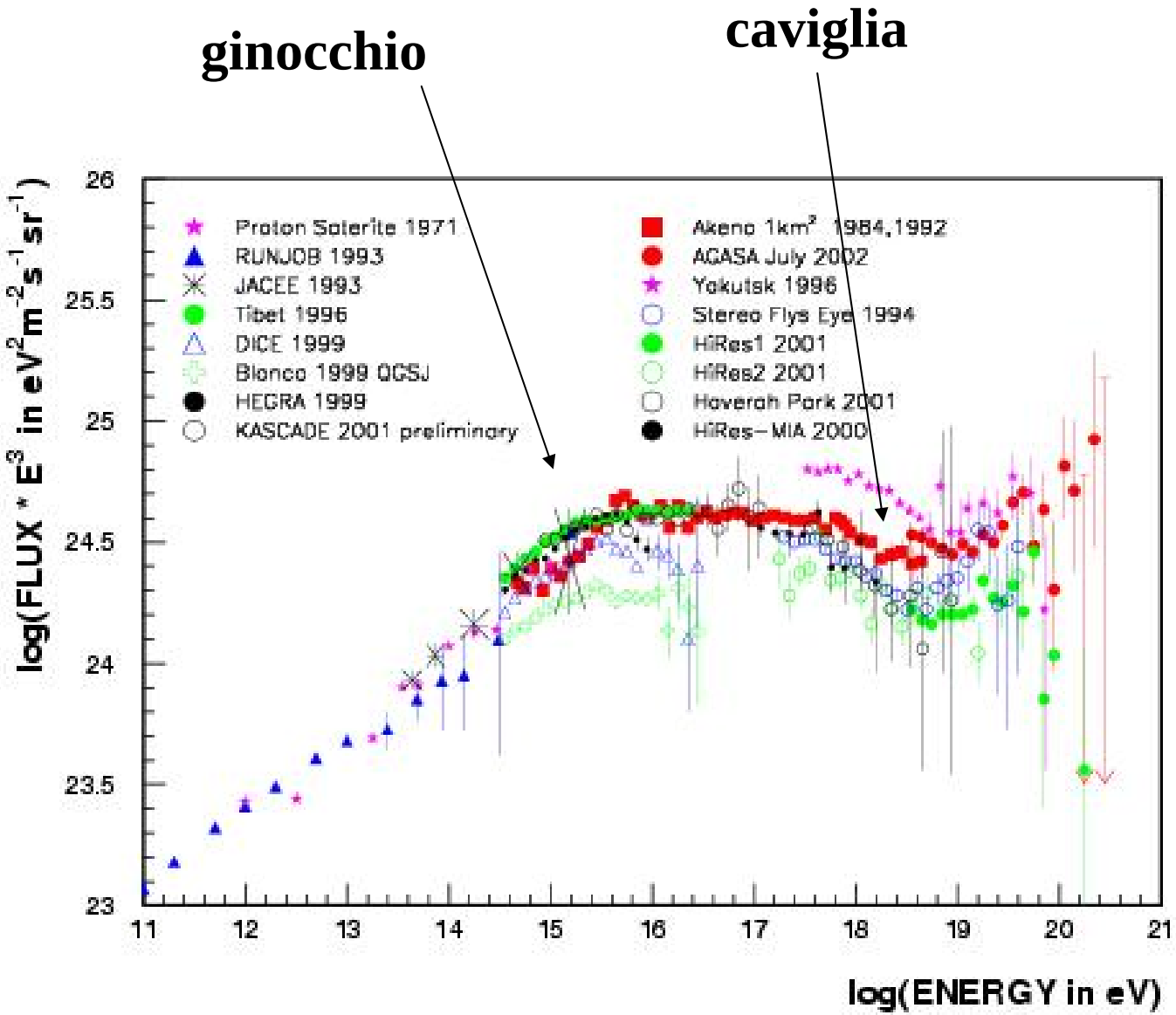
E^2dN/dE

ANCORA SULLO SPETTRO

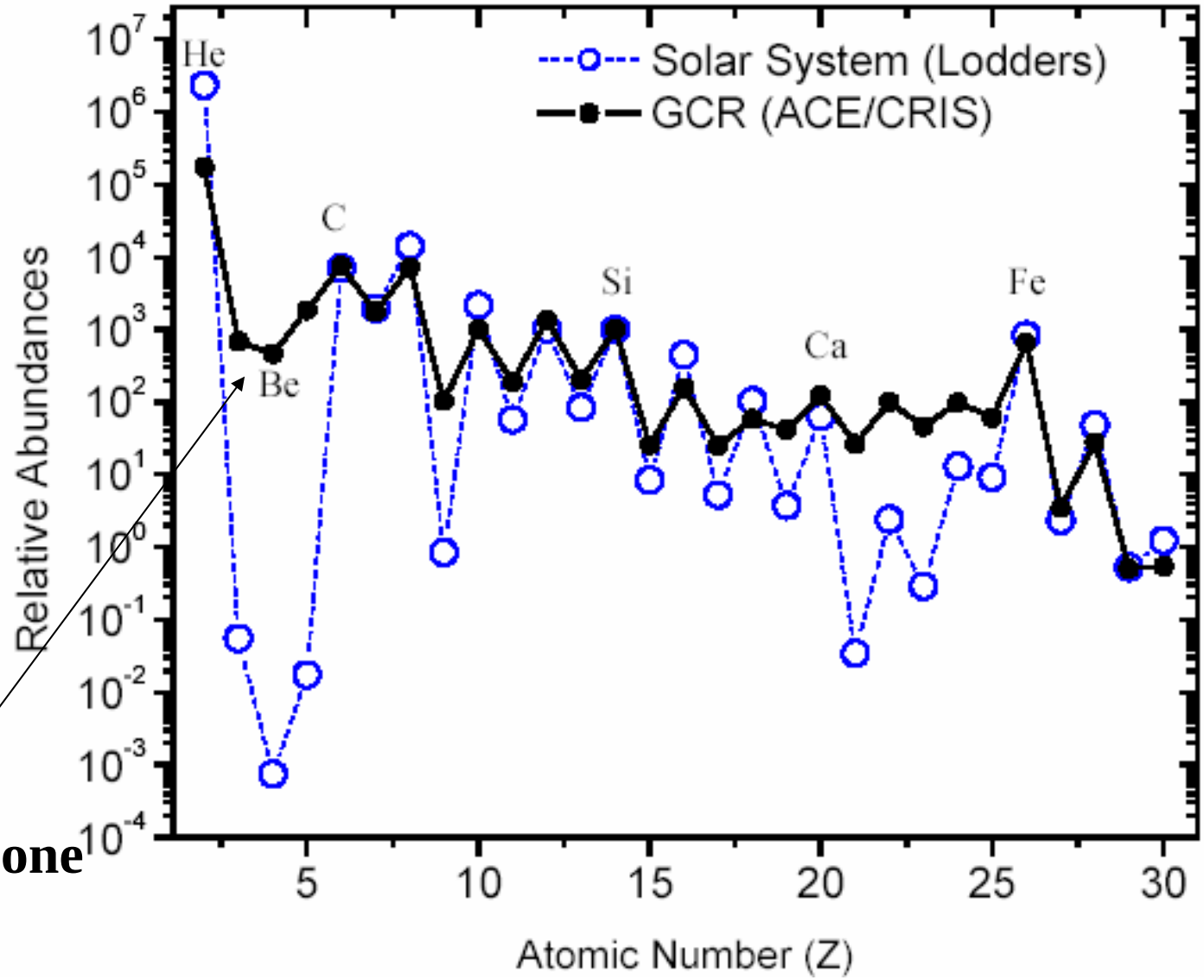
$E^{2,5}$ dN/dE



E^3 dN/dE

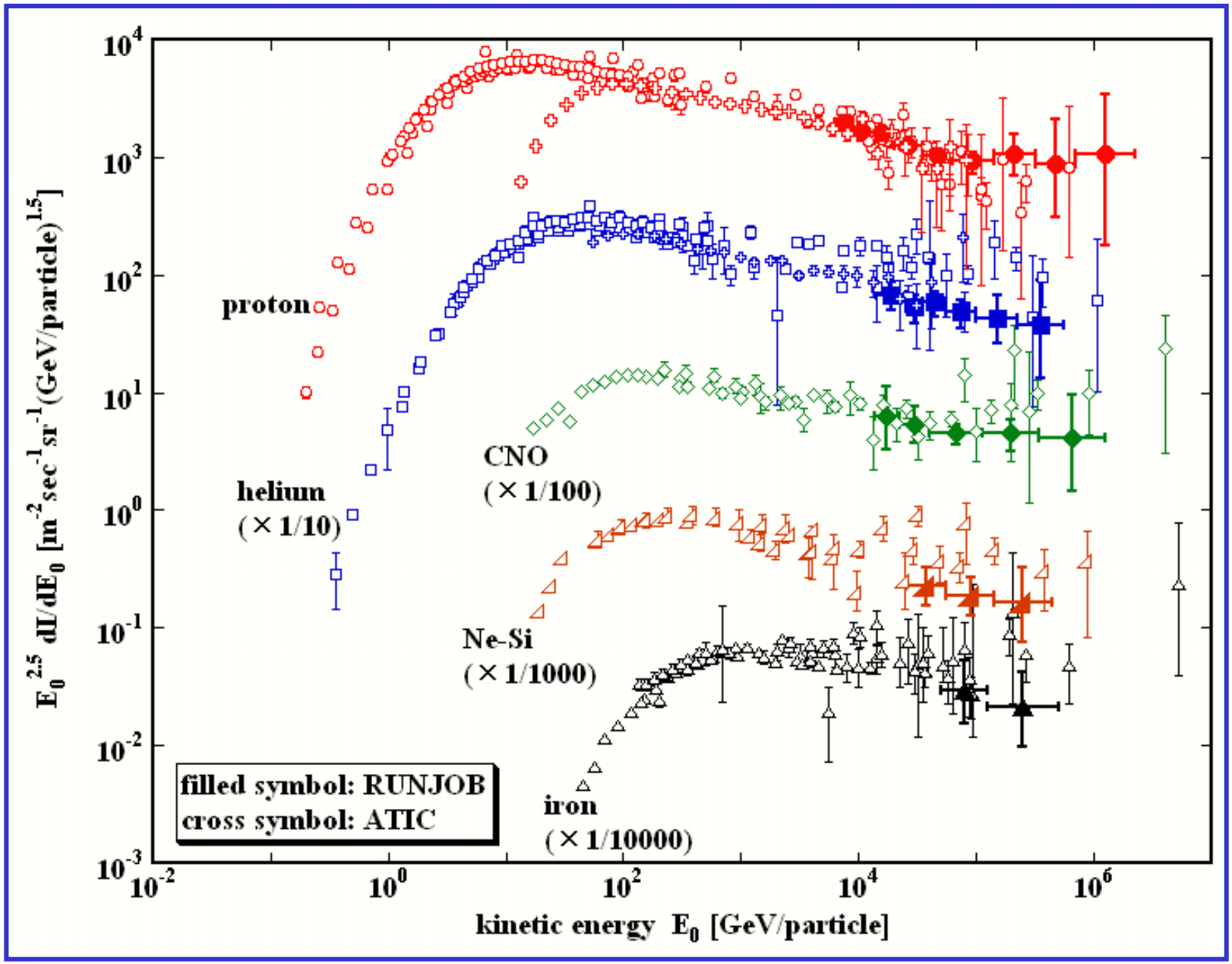

ginocchio
caviglia
Proton Satellite 1971
RUNJOB 1993
JACEE 1993
Tibet 1996
DICE 1999
Blanco 1999 QGSJ
HEGRA 1999
KASCADE 2001 preliminary
Akeno 1km² 1984,1992
AGASA July 2002
Yakutsk 1996
Stereo Flys Eye 1994
HiRes1 2001
HiRes2 2001
Haverah Park 2001
HiRes–MIA 2000
log(FLUX * E³ in eV²m⁻²s⁻¹sr⁻¹)
log(ENERGY in eV)
26
25.5
25
24.5
24
23.5
23
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21

LA COMPOSIZIONE DEI RAGGI COSMICI: protoni e nuclei (PRIMA DEL GINOCCHIO)



Spallazione

LA COMPOSIZIONE DEI RAGGI COSMICI: protoni e nuclei



LA COMPOSIZIONE DEI RAGGI COSMICI: protoni e nuclei

- *Componente primaria*
  - Specie accelerate nelle sorgenti : p^+,He,C,N,O.....
- *Componente secondaria*
  - Specie prodotte nelle interazioni

  dei primari con il mezzo interstellare (Li,Be,B) .....

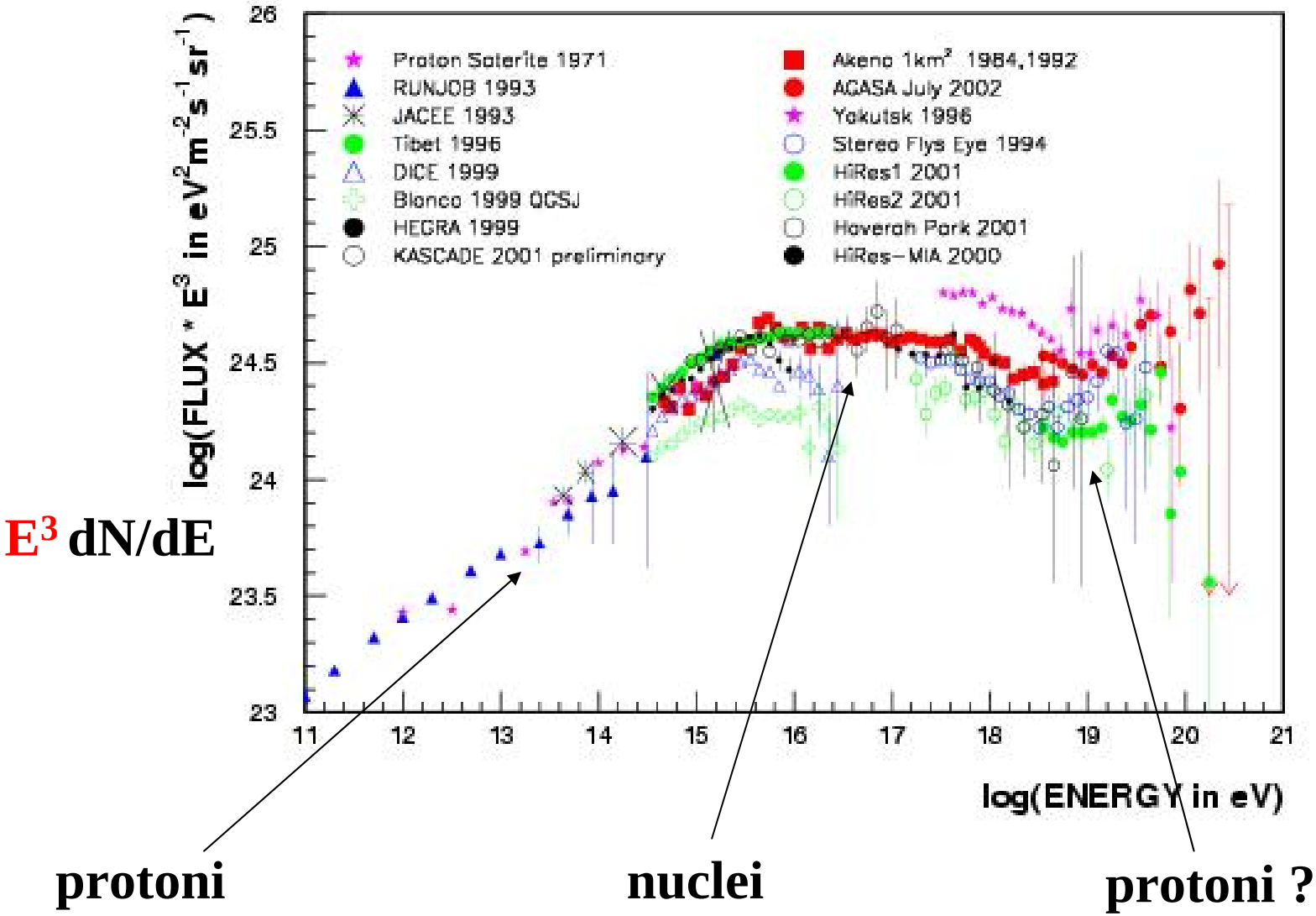
  ma anche antiprotoni p^-

Componenti speciali:

Nuclei instabili - il loro flusso e' legato al tempo trascorso tra l'accelerazione e la rivelazione (^{10}Be $t_{1/2}$=1.5 10^6 anni) $\longrightarrow$ 10^7 anni

Antiprotoni – la loro presenza e' certa nella 'componente secondaria'. Un eventuale eccesso e' previsto in modelli con nuova fisica : simmetria materia-antimateria materia oscura

COMPOSIZIONE
oltre il 'ginocchio' molte incertezze



RAGGI COSMICI

ORIGINE

RAGGI COSMICI : ORIGINE e PROPAGAZIONE

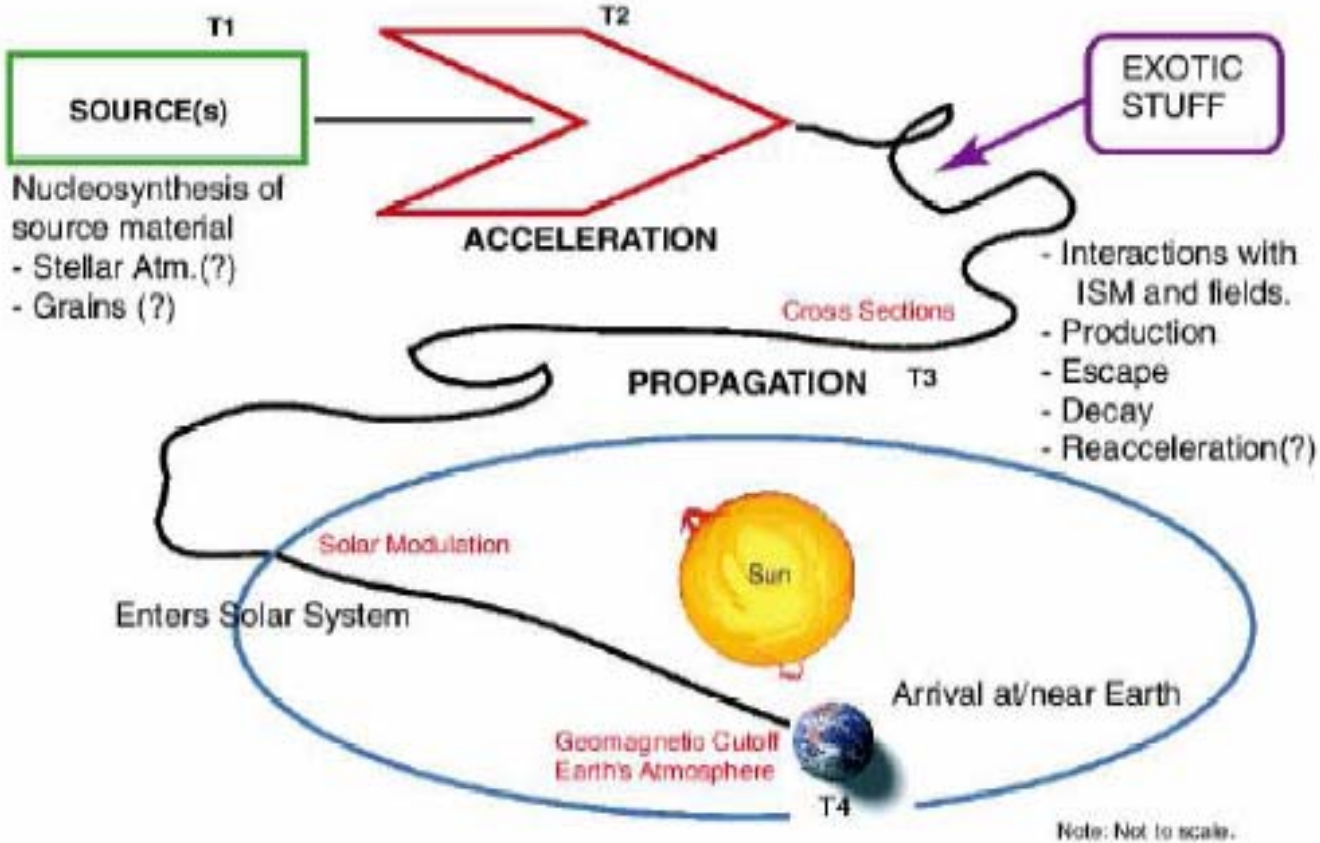


Figura 1.1: Viaggio dei raggi cosmici dalle sorgenti fino alla Terra [2].

<u>RAGGI COSMICI</u> : ORIGINE PROPAGAZIONE

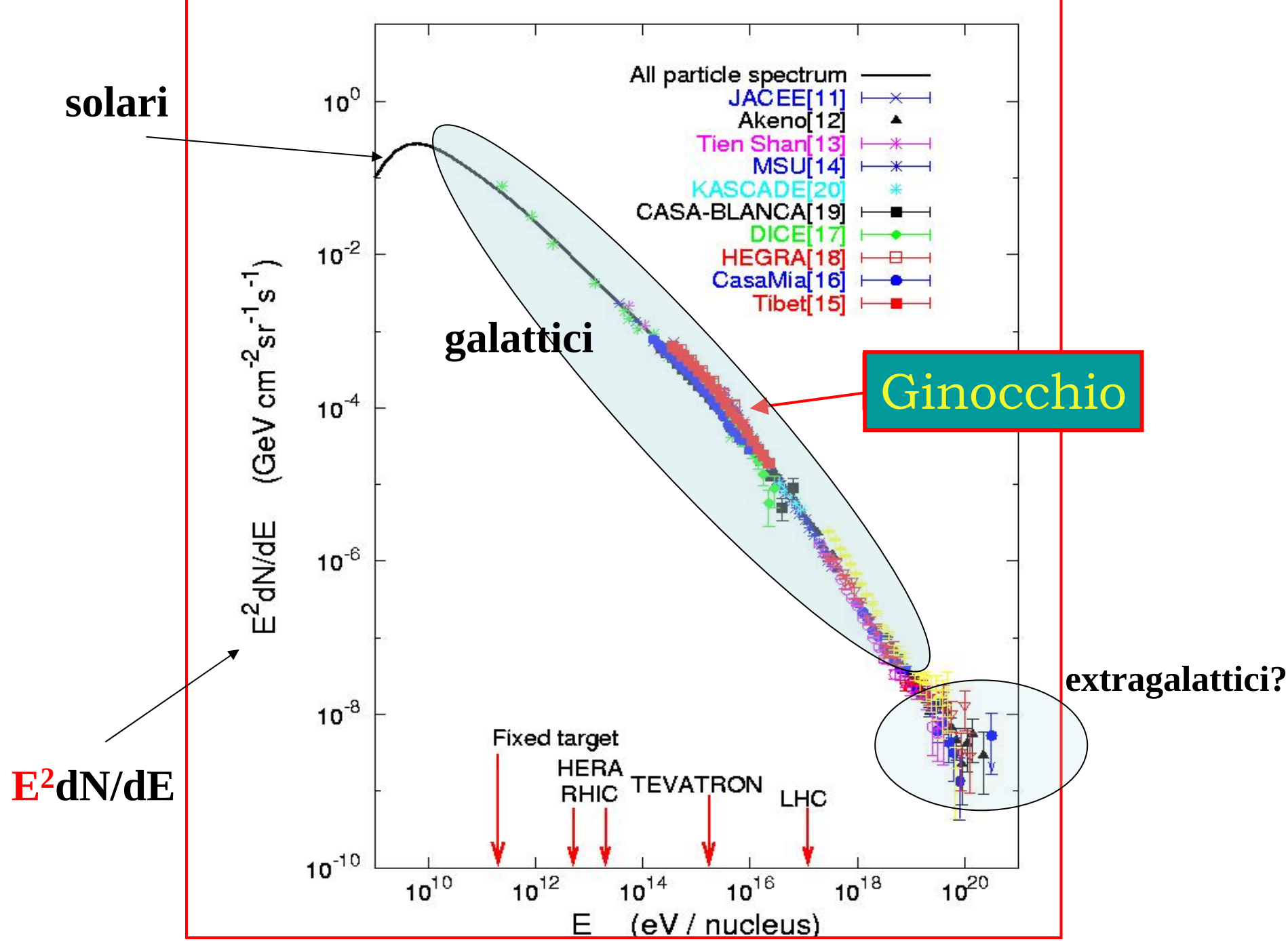
I raggi cosmici carichi non puntano alla sorgente in quanto istropizzati dalla interazione con i campi magnetici.

VENGONO DA LONTANO O DA VICINO ?

E<GeV(10^9eV) - origine solare (evidenza diretta)

< 10^{18}-10^{19} eV – origine extra solare ma galattica

E> 10^{19} eV origine extragalattica ??


solari
galattici
Ginocchio
extragalattici?
E²dN/dE
All particle spectrum
JACEE[11]
Akeno[12]
Tien Shan[13]
MSU[14]
KASCADE[20]
CASA-BLANCA[19]
DICE[17]
HEGRA[18]
CasaMia[16]
Tibet[15]
Fixed target
HERA
RHIC
TEVATRON
LHC
E (eV / nucleus)
E²dN/dE (GeV cm⁻²sr⁻¹s⁻¹)

RAGGI COSMICI : ORIGINE PROPAGAZIONE

I raggi cosmici carichi non puntano alla sorgente in quanto isotropizzati dalla interazione con i campi magnetici.

VENGONO DA LONTANO O DA VICINO ?

1 GeV = 10^9 eV < E< ~10^{19} eV – origine galattica

I PRINCIPALI ARGOMENTI A FAVORE DI UNA ORIGINE GALATTICA SONO :

1. **^{10}Be tempo di propagazione ~ 10^7 anni , confinamento magnetico (raggio di Larmor R < Rgalassia) , spallazione, sono in accordo con modello di diffusione nella galassia**

2. **Evidenza di anisotropia verso il centro galattico ad E~ 10^{18}eV**

3. **Argomento energetico**

I RAGGI COSMICI CON E<10^{19} eV SONO DI ORIGINE GALATTICA :

argomento energetico

Dal flusso di CR si puo' stimare la densita' di energia :

ρ_{CR}= 10^{-12} erg/cm^3

τ_{esc} ~ 10^7 anni ~ 10^{14} secondi

V galassia ~ 10^{67} cm^3

POTENZA CONSUMATA = $$\frac{\rho_{cr} \cdot Vgalassia}{\tau_{esc}} \approx 10^{41} erg/\sec ondi$$

1 SUPERNOVA OGNI 30 ANNI FORNISCE UNA POTENZA MEDIA

$$\frac{10^{51} erg}{30 \cdot 3 \cdot 10^{7} \sec ondi} = 10^{42} erg/\sec ondi$$

RAGGI COSMICI : ORIGINE PROPAGAZIONE

I raggi cosmici carichi non puntano alla sorgente in quanto isotropizzati dalla interazione con i campi magnetici.

10^9eV < E< 10^{18} eV – origine galattica

DOVE E COME SONO ACCELERATI ?

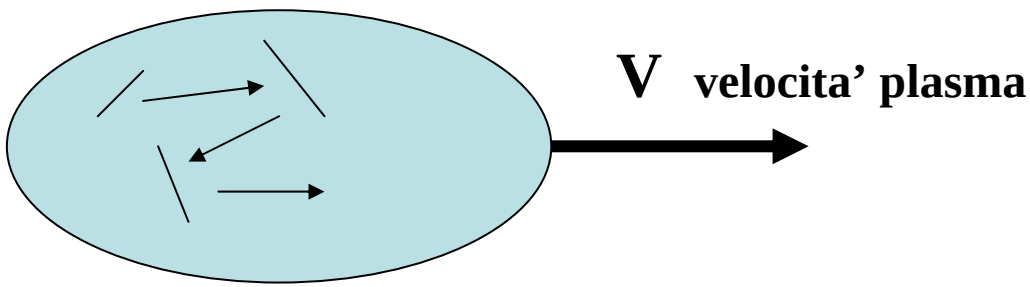
1949 Fermi scopre un possibile meccanismo di accelerazione (meccanismo di Fermi). Necessita di plasmi magnetizzati accelerati ad alta velocita'.

Le supernove sono un possibile oggetto galattico capace di mettere in pratica il mecanismo di Fermi (alle energie piu alte la cosa e' dubbia). Onda d'urto seguente all'esplosione fornisce l'ambiente necessario

ACCELERAZIONE DI RAGGI COSMICI :
Il meccanismo di Fermi

Nel 1949 E. Fermi propose un meccanismo di accelerazione naturale delle particelle nel cosmo che ancora oggi e' considerato il meccanismo piu' accreditato di accelerazione.

In un plasma magnetizzato le 'irregolarita' del campo magnetico possono fungere da 'specchi magnetici' per le particelle (vedi bottiglia magnetica e fasce di Van Allen). Le particelle devono rimanere confinate dai campi magnetici

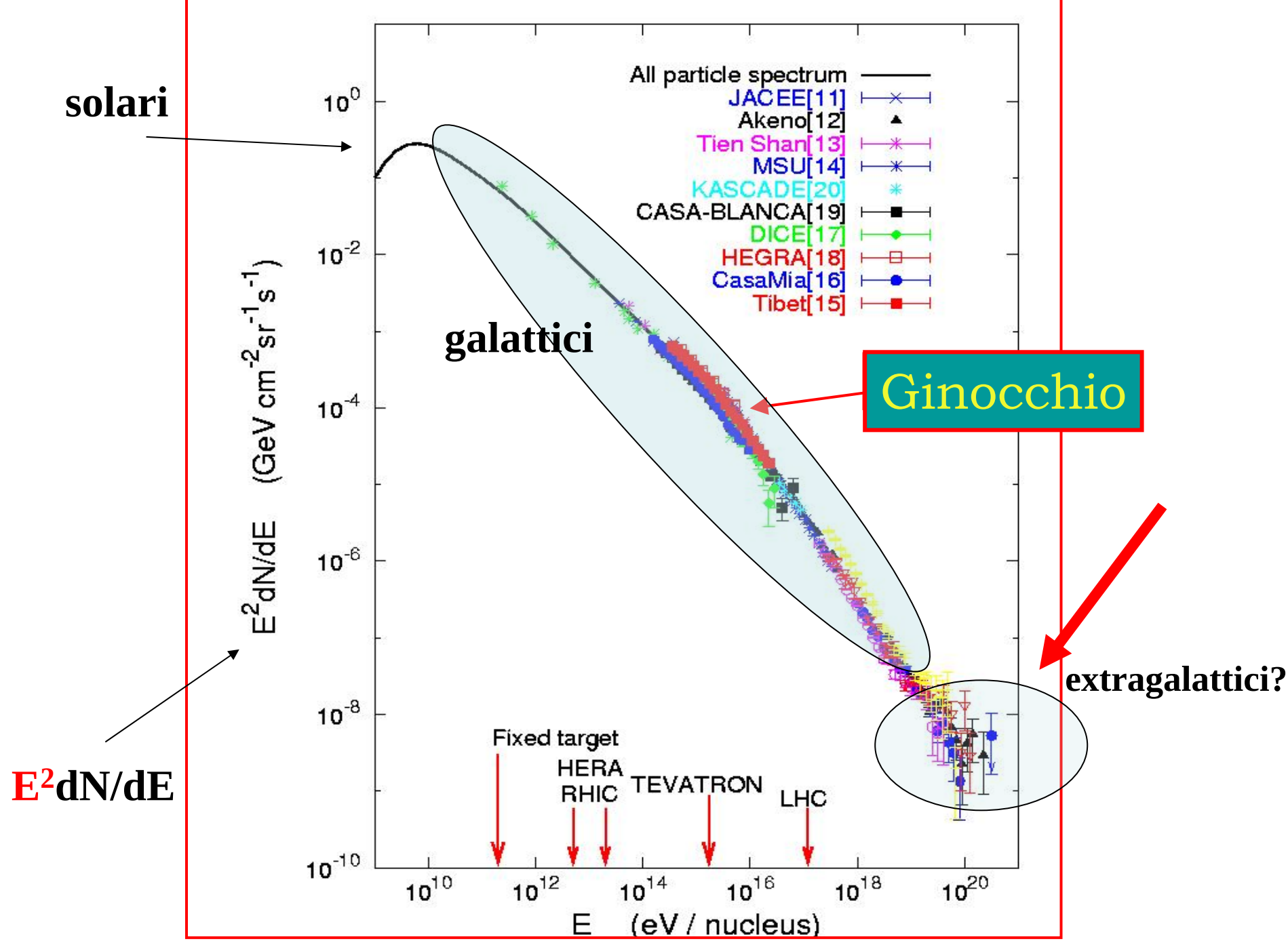


Lo 'specchio' ha massa molto grande rispetto alla particella ed in ogni urto essa trasferisce una quantita' di energia proporzionale all'energia della particella stessa e alla velocita' del plasma $\Delta E \propto E \cdot V$

produce spettri di potenza $dN/dE \propto E^{-\gamma}$ **(supernovae ?)**

Raggi cosmici galattici $E<10^{19}eV$

- Origine galattica
  - RC prodotti e accelerati durante le esplosioni di SN
- Diffusione all'interno della Galassia
  - Interazioni con il mezzo interstellare
  - Perdite di energia
  - Produzione di secondari
  - Spallazione
  - Decadimenti radioattivi
  - Fuga dal volume di confinamento


solari
galattici
Ginocchio
extragalattici?
E²dN/dE
All particle spectrum
JACEE[11]
Akeno[12]
Tien Shan[13]
MSU[14]
KASCADE[20]
CASA-BLANCA[19]
DICE[17]
HEGRA[18]
CasaMia[16]
Tibet[15]
Fixed target
HERA
RHIC
TEVATRON
LHC
E (eV / nucleus)
E²dN/dE (GeV cm⁻²sr⁻¹s⁻¹)

RAGGI COSMICI : ORIGINE PROPAGAZIONE

$E > 10^{19}$ eV – origine extragalattica

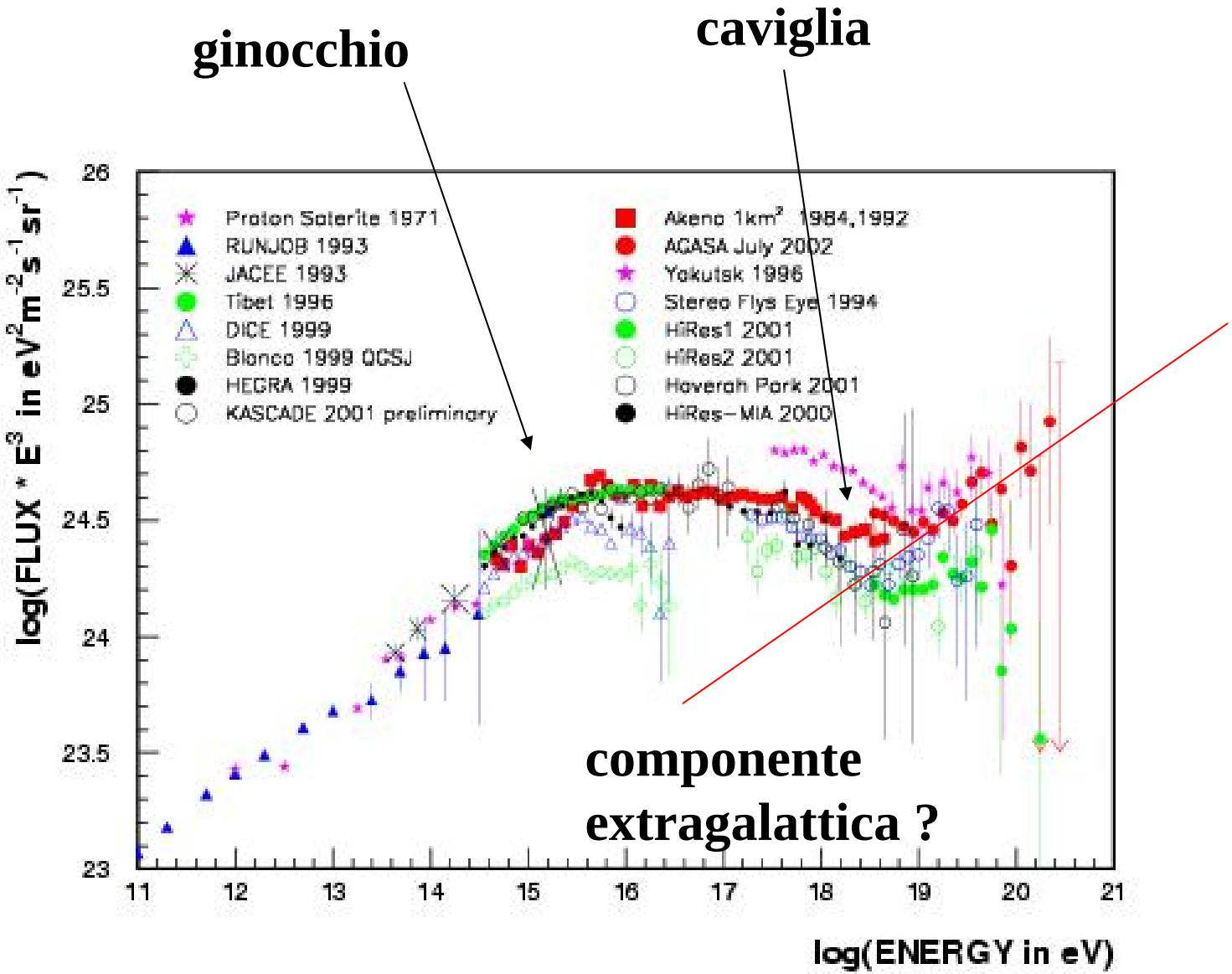
I PRINCIPALI ARGOMENTI A FAVORE DI UNA ORIGINE EXTRAGALATTICA SONO :

1. **Forma dello spettro (caviglia) , oltre la composizione cambia (+ protoni ?)**

2. **Confinamento magnetico : $R_{Larmor} > R_{galassia}$ campi magnetici galattici non sono piu' efficaci a confinare ed isotropizzare i CR, ma essi appaiono isotropi**

3. **Possibili siti acceleratori per tali energie sono piu' probabilmente oggetti extragalattici : AGN ?**

Dalle Supernove agli AGN ?


ginocchio
caviglia
Proton Satellite 1971
RUNJOB 1993
JACEE 1993
Tibet 1996
DICE 1999
Blanco 1999 QGSJ
HEGRA 1999
KASCADE 2001 preliminary
Akeno 1km² 1984,1992
AGASA July 2002
Yakutsk 1996
Stereo Flys Eye 1994
HiRes1 2001
HiRes2 2001
Haverah Park 2001
HiRes-MIA 2000
componente extragalattica ?
log(FLUX * E³ in eV²m⁻²s⁻¹sr⁻¹)
log(ENERGY in eV)
26
25.5
25
24.5
24
23.5
23
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21

RAGGI COSMICI

pricipali questioni insolute e opportunità di scoperta di nuova fisica

BIBLIOGRAFIA

FENOMENOLOGIA RAGGI COSMICI

- M. W. Friedlander, A thin cosmic rain, Collocazione C 4 294

- S: Longair , High Energy Astrophysics , Cambridge University Press, capitolo 9

RIVELATORI DI PARTICELLE

(APPROFONDIMENTI)

- W.R.Leo, Tecniques for Nuclear and Paricle Physics Experiments, Springer Verlang, 1994
- Claus Grupen , 'Particles Detectors' , Cambridge University Press,1996

I RAGGI COSMICI : pricipali questioni insolute e opportunità di scoperta di nuova fisica

- **Spiegazione del 'ginocchio' nello spettro**

- **Limite superiore in energia ? (effetto GZK ?)**

- **Origine e accelerazione E > 10^{17} eV (le particelle non sono confinate nella supernova ad E>10^{16}eV quindi non possono piu' essere accelerate)**

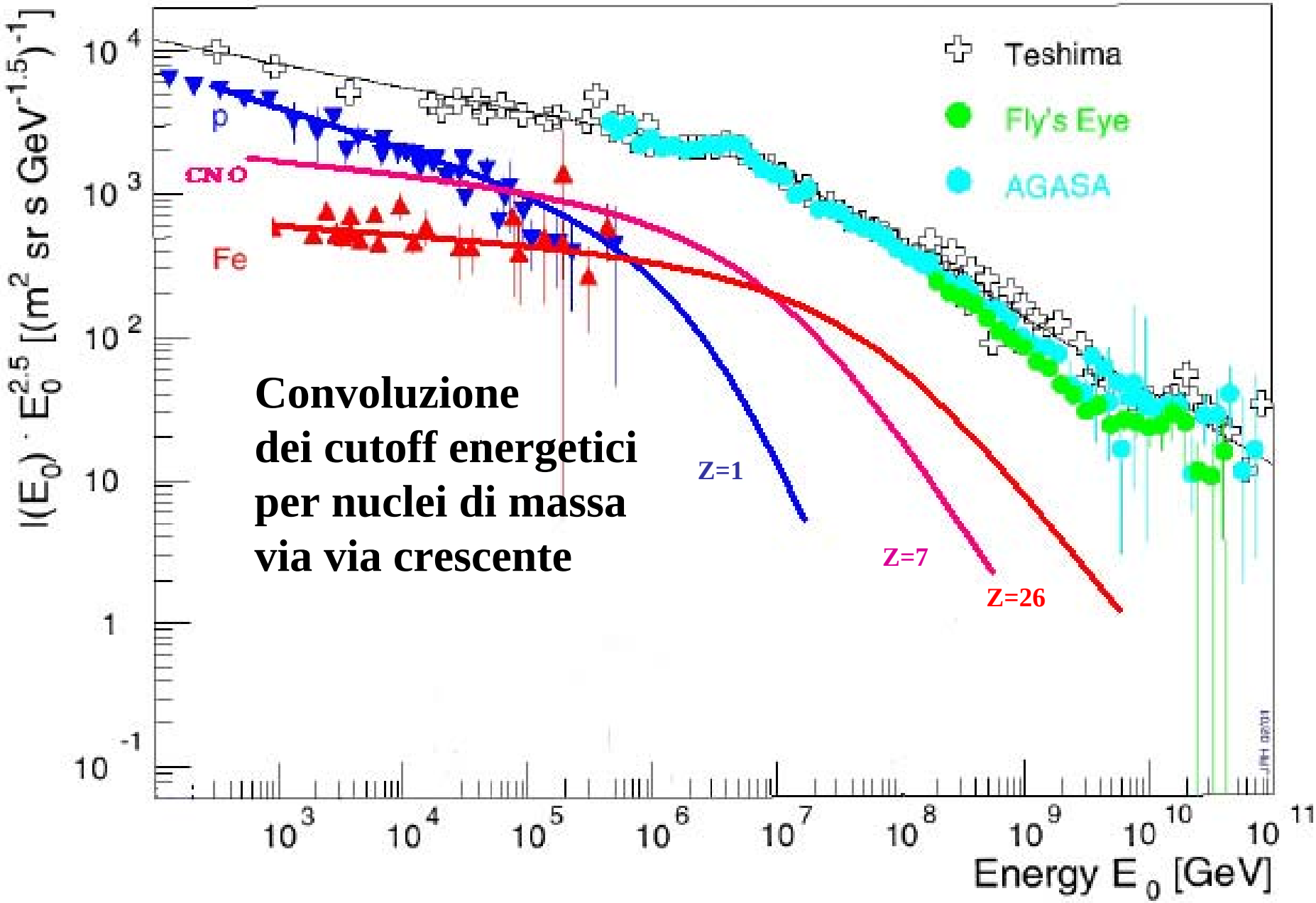
<u>nuova fisica</u>

- **Antimateria nei CR ? simmetria materia antimateria**

- **Evidenza di nuova particella causa di 'materia oscura' ?**

- **Anomalie alle energie estreme E>10^{20}eV ? – nuova fisica a tale scala di energia ?**

SPIEGAZIONE GINOCCHIO ??



Antimateria nei RC

Problema cosmologico: simmetria/asimmetria materia/antimateria?

Studio dei raggi γ del decadimento dei π^0 dall'annichilazione materia/antimateria

Volume $\cong 10^{-8}$ volume universo

L'universo 'vicino' (supercluster di galassie) e' fatto solo di materia

2 ipotesi cosmologiche:

1. L'universo e' simmetrico: materia e antimateria occupano dominii differenti
2. L'universo e' fatto solo di materia;

Condizioni di Sakharov:

1. Violazione numero barionico
2. Violazione CP
3. Non equilibrio termodinamico

Investigazione diretta della antimateria nell'Universo: Ricerca diretta di antiparticelle nei RC!!!!

$$\overline{p}, e^{+}, \overline{N}$$

- Antiprotoni: produzione secondaria in interazioni p-p
  produzione diretta con vari meccanismi
- Positroni: decadimento dei π^{+} secondari
  produzione diretta con vari meccanismi
- Antinuclei: evidenza diretta di antigalassie (antinucleosintesi)!!!

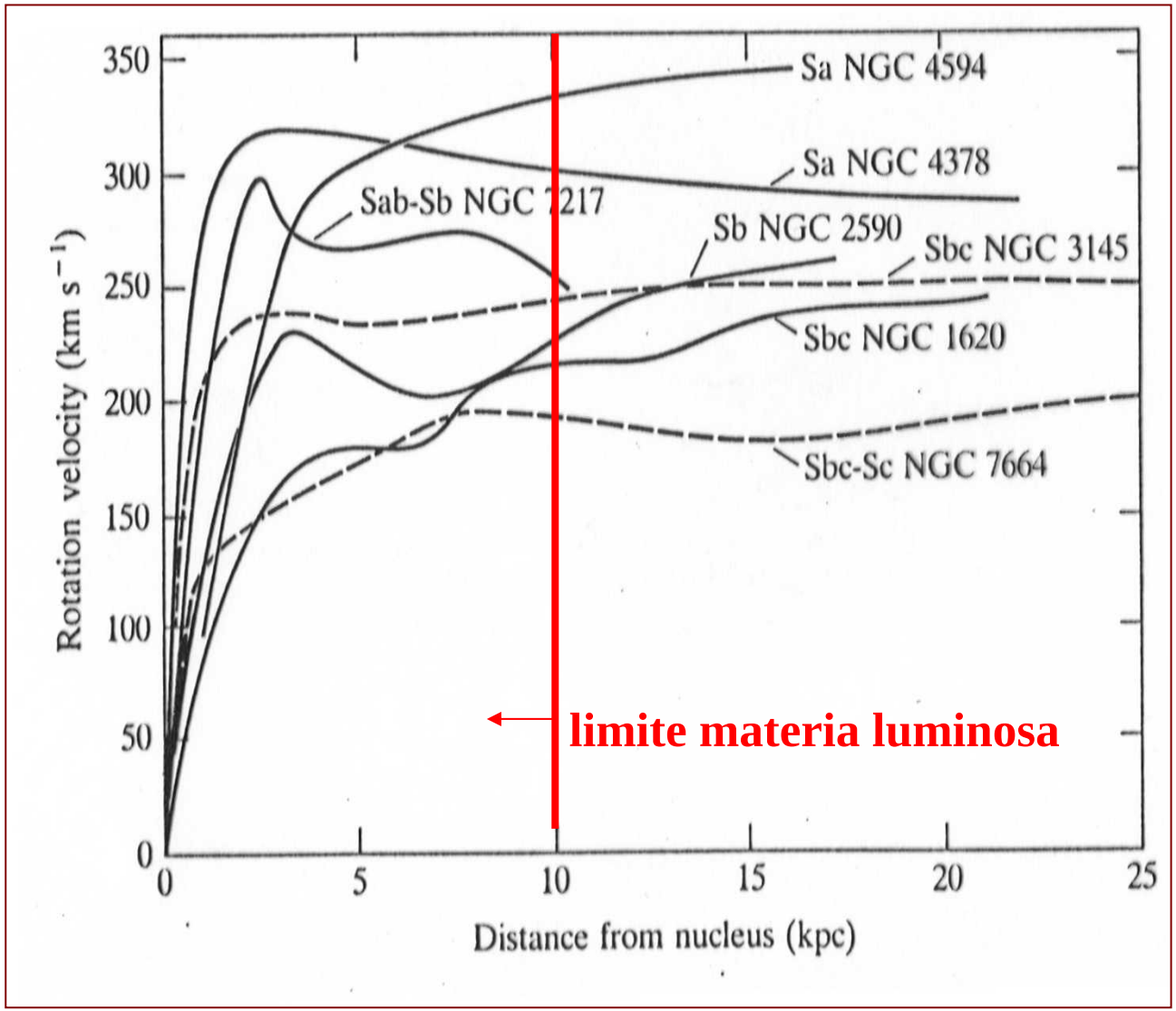
Esperimento PAMELA

MATERIA OSCURA : La curva di rotazione delle galassie indica che la materia luminosa e' solo una piccola frazione della materia totale della galassia.

$$\frac{GM(r)}{r^2} = \frac{v_{rot}^2}{r}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

M(r)≠0 OLTRE IL LIMITE DELLA MATERIA LUMINOSA

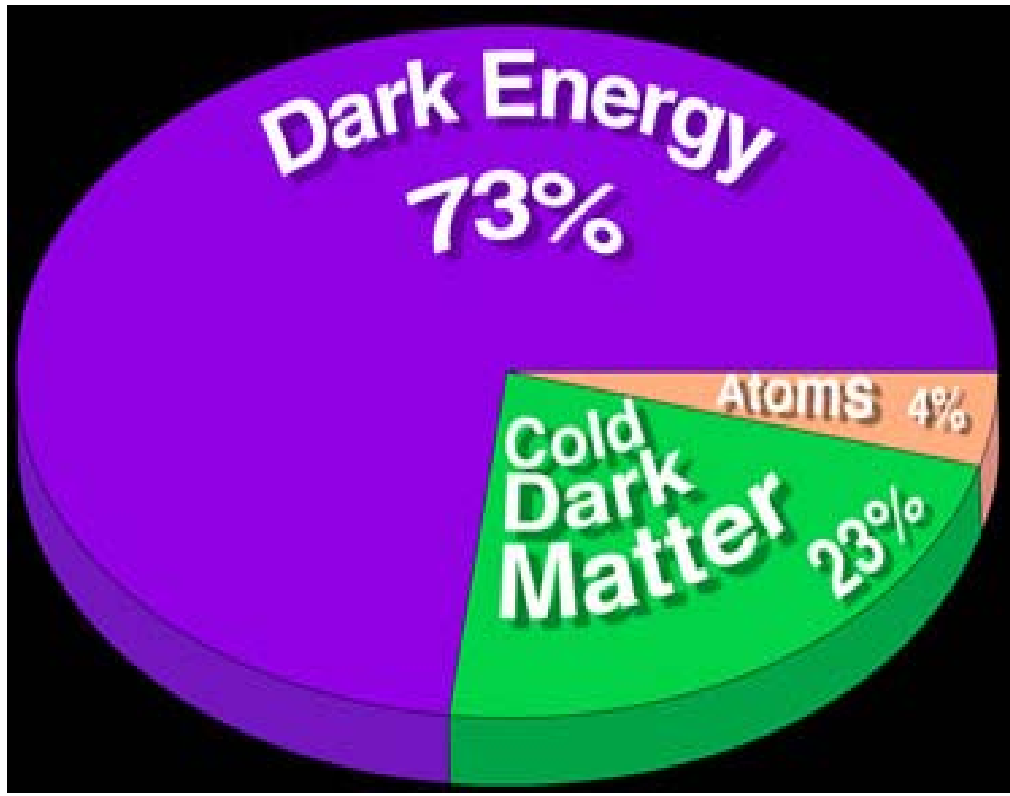


DA COSA E' FATTO L'UNIVERSO ?
(visione attuale)

L'espansione dell'universo stà accelerando

↓

energia oscura (nessuno sa cosa sia)



La materia che osserviamo gravitazionalmente e' formata all'85% da materia oscura

↓

Nessuno sa cosa sia → **Ipotesi più accreditata : particelle pesanti – debolmente interagenti (WIMP)**

MATERIA OSCURA : l'ipotesi WIMP

Una particella di grande massa (100 GeV- 1000GeV) e debolmente interagente con le altre particelle si sarebbe formata all'inizio dell'universo (come tutte le altre particelle) e sarebbe presente ad oggi in grande quantità (come fotoni e neutrini)- formando la cosiddetta materia oscura.

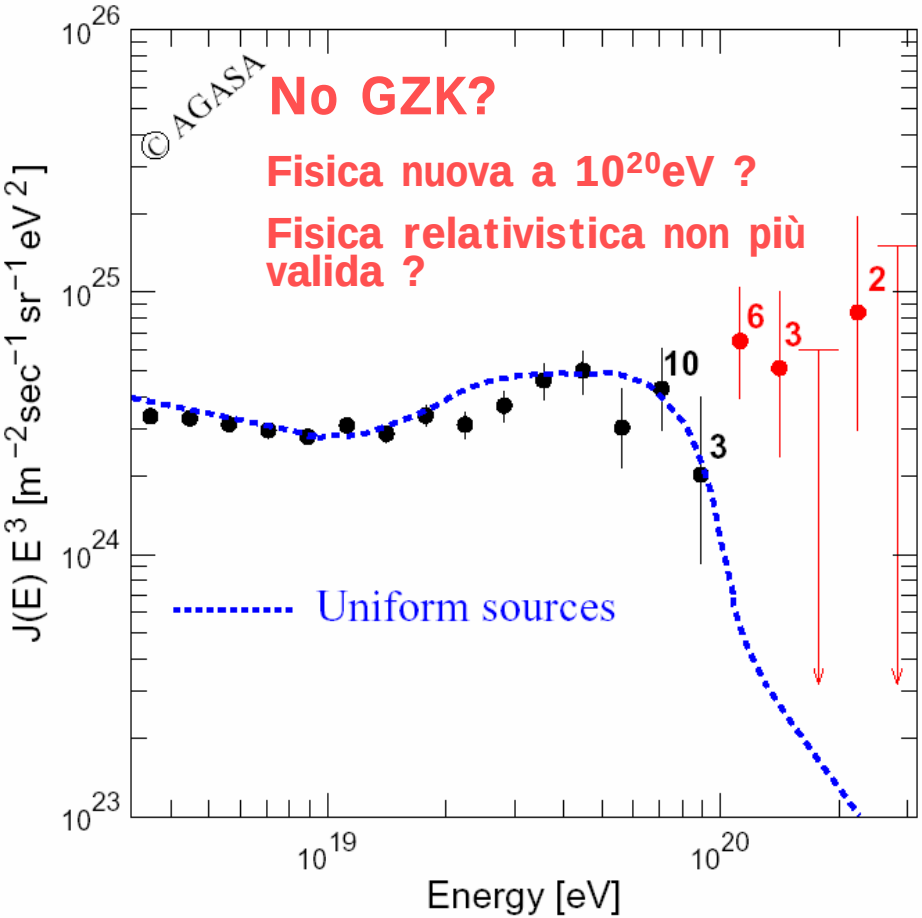
Essa non sarebbe stata osservata direttamente a causa della debole interazione con le altre particelle.

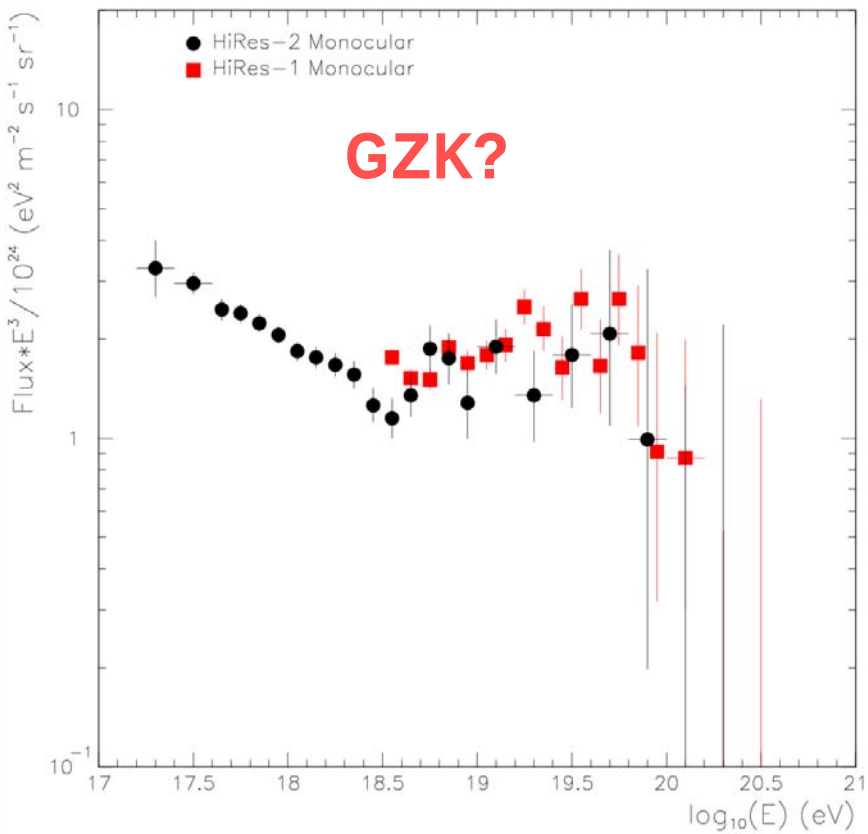
Tale particella non può essere nessuna di quelle conosciute e si deve ipotizzare quindi l'esistenza di una nuova particella. Il 'NEUTRALINO' , particella della teoria 'supersimmetrica' delle particelle elementari e' un candidato 'WIMP'. Si dovrebbe poterla vedere negli esperimenti ad LHC.

Gli WIMP interagiscono tra loro nella galassia producendo antiprotoni di alta energia che si sommano a quelli prodotti naturalmente da interazioni dei CR con i gas interstellari. Questa componente aggiuntiva può essere rivelata

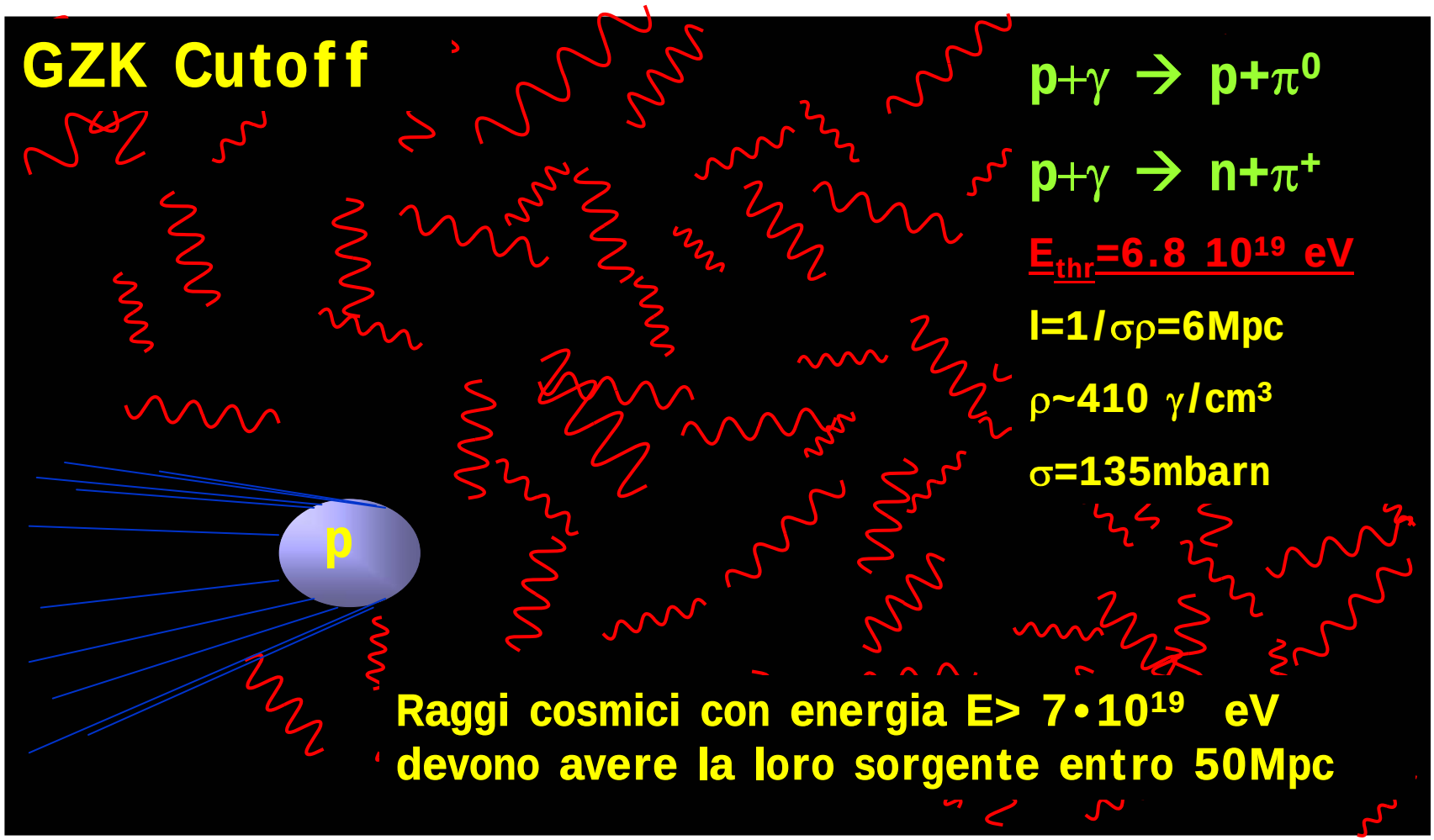
LE ENERGIE ESTREME

1. **Quale meccanismo possa accelerare fino ad oltre 10^{20}eV è un mistero**
2. **A causa della presenza della radiazione cosmica di fondo i CR non dovrebbero propagarsi ad energie oltre 10^{20}eV (effetto GZK). E' osservato ?**

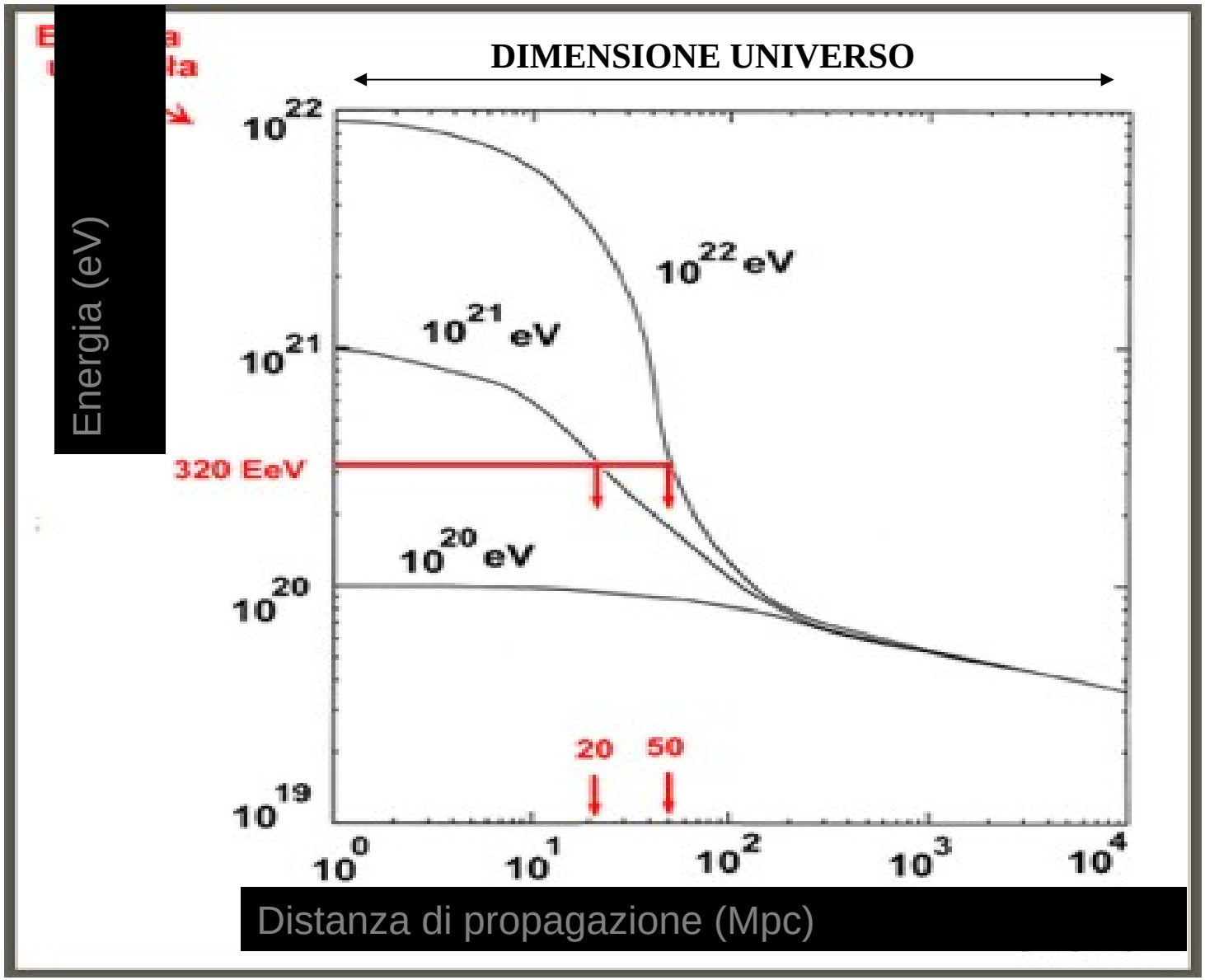




la radiazione cosmica di fondo a 3 ^{0}K rende l'Universo opaco ai raggi cosmici di energia molto elevata
K. Greisen - G.T.Zatsepin & V.A.Kuz'min (1966)

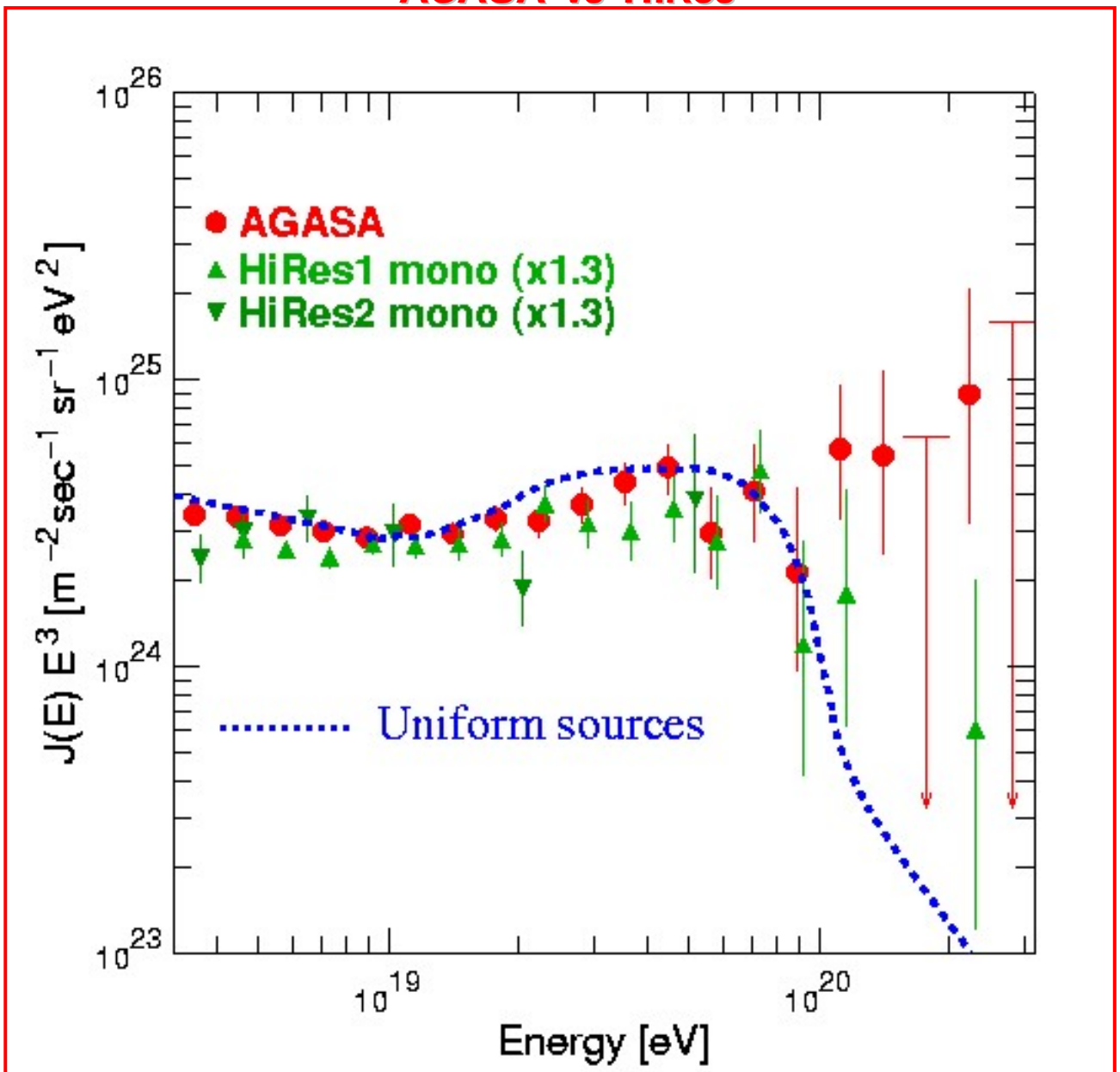


EFFETTO GZK


DIMENSIONE UNIVERSO
Energia (eV)
10^{22}
10^{21}
10^{20}
10^{19}
10^{22} eV
10^{21} eV
10^{20} eV
320 EeV
20
50
10^{0}
10^{1}
10^{2}
10^{3}
10^{4}
Distanza di propagazione (Mpc)

ESISTE IL CUT OFF 'GZK' ?

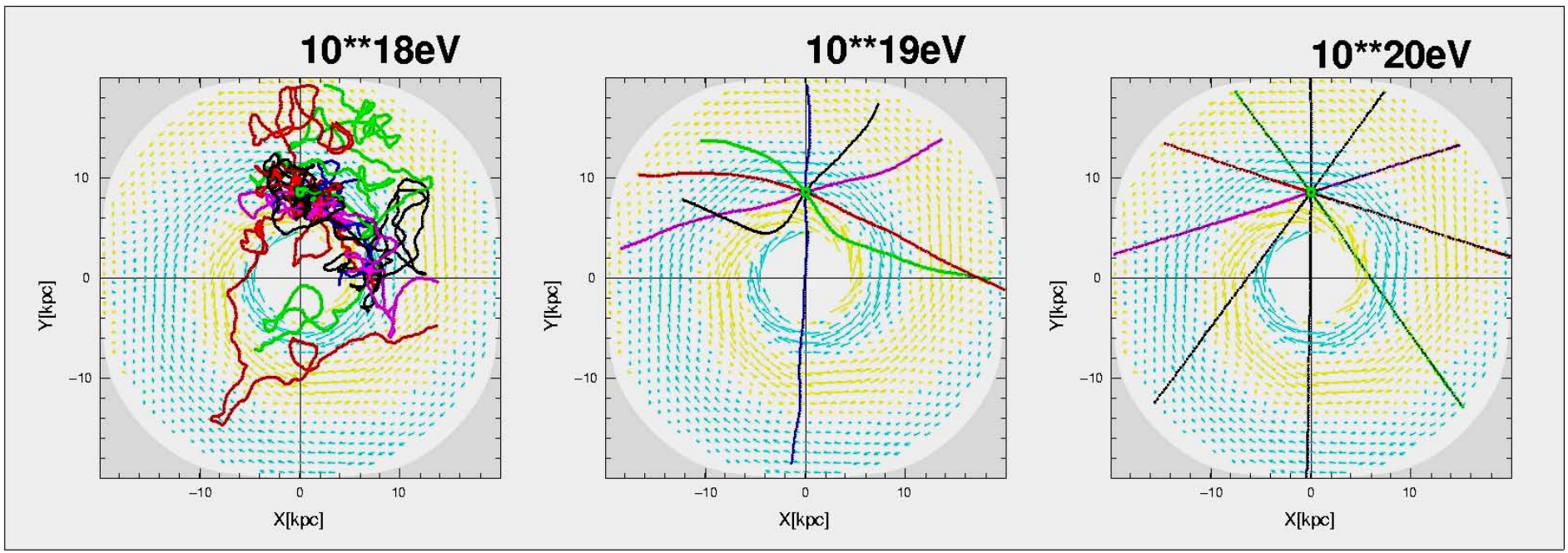
AGASA vs HiRes



LE ENERGIE ESTREME

si apre la possibilita' di osservare direttamente le sorgenti ?

- angolo di deflessione < 1 grado a 10^{20}eV



COSA DEVONO MISURARE I NUOVI ESPERIMENTI ?

Misurare il flusso di antiprotoni e antinuclei nei CR ad energie E~1-1000 GeV (antigalassie ?-materia oscura?)

Misurare la composizione nella regione del ginocchio E= 10^{15}-10^{16} eV (la composizione dettagliata puo' rivelare molto sull'origine della struttura 'ginocchio')

Misurare il flusso e la composizione ad E>10^{20}eV (nuova fisica a 10^{20}eV ? quali acceleratori cosmici ?)

TUTTE QUESTE MISURE DEVONO ESSERE FATTE NELLO SPAZIO PER POTER FORNIRE MISURE DI QUALITA' SUPERIORE A QUELLA ATTUALE

LA RIVELAZIONE DI RAGGI COSMICI

RIVELAZIONE DI RAGGI COSMICI

1) rivelazione 'diretta' : utilizzo di rivelatori di particelle posizionato al di sopra dell'atmosfera terrestre. E' una misura di buona precisione.

MA

- **Il flusso di particelle ad 1 GeV : ~ 100 particelle / m^2 /secondo**

flusso elevato : la rivelazione diretta e' possibile
(Area dei rivelatori < m^2)

- **Il flusso di particelle a 10^{19}eV : ~ 1 particella /km^2/100 anni !**

flusso debole : la rivelazione diretta e' impossibile

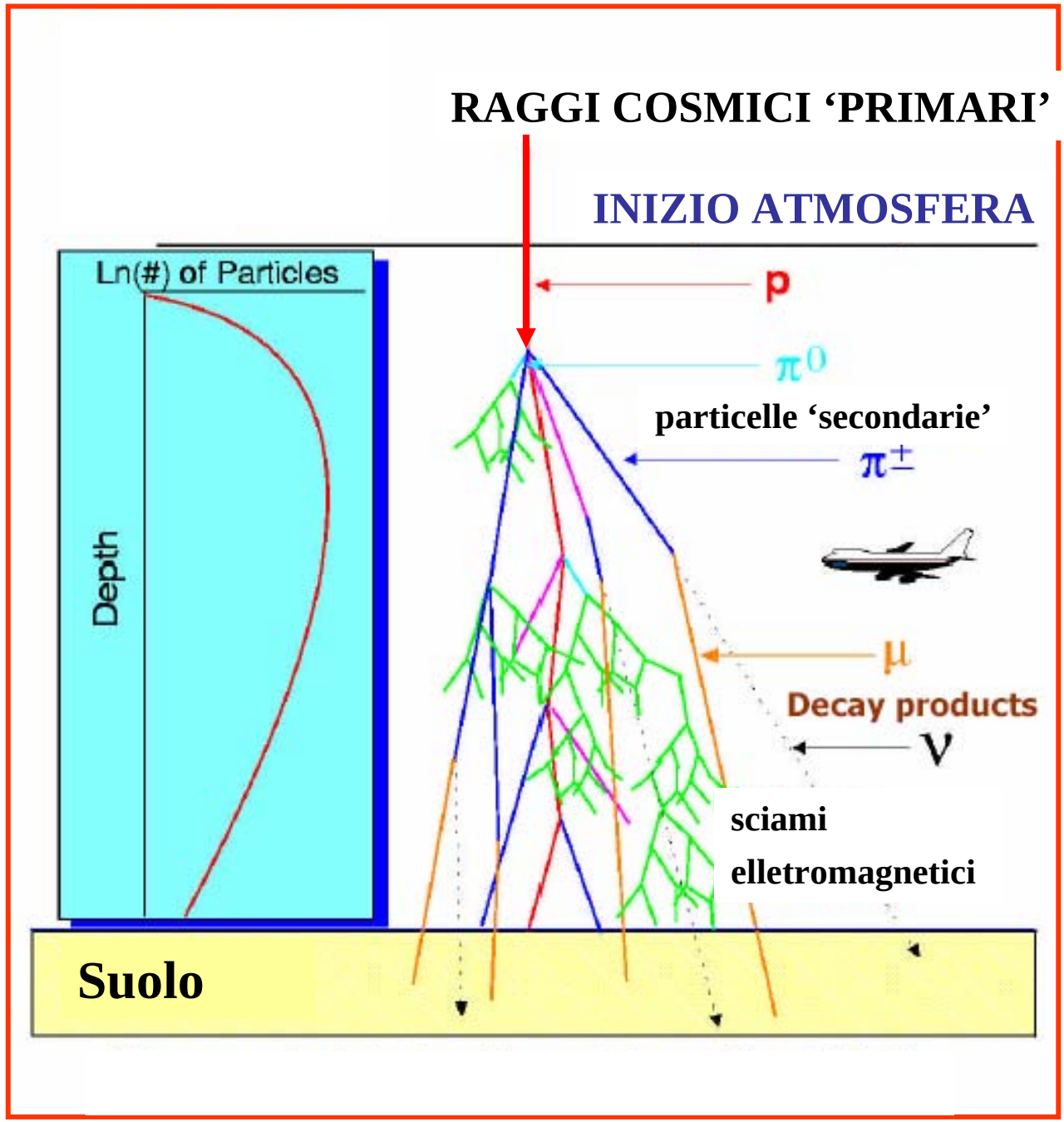
↓

La rivelazione diretta e' possibile solo al di sotto di E ~ 10^{15}eV (energia del ginocchio), al di sopra si usa misura 'indiretta'

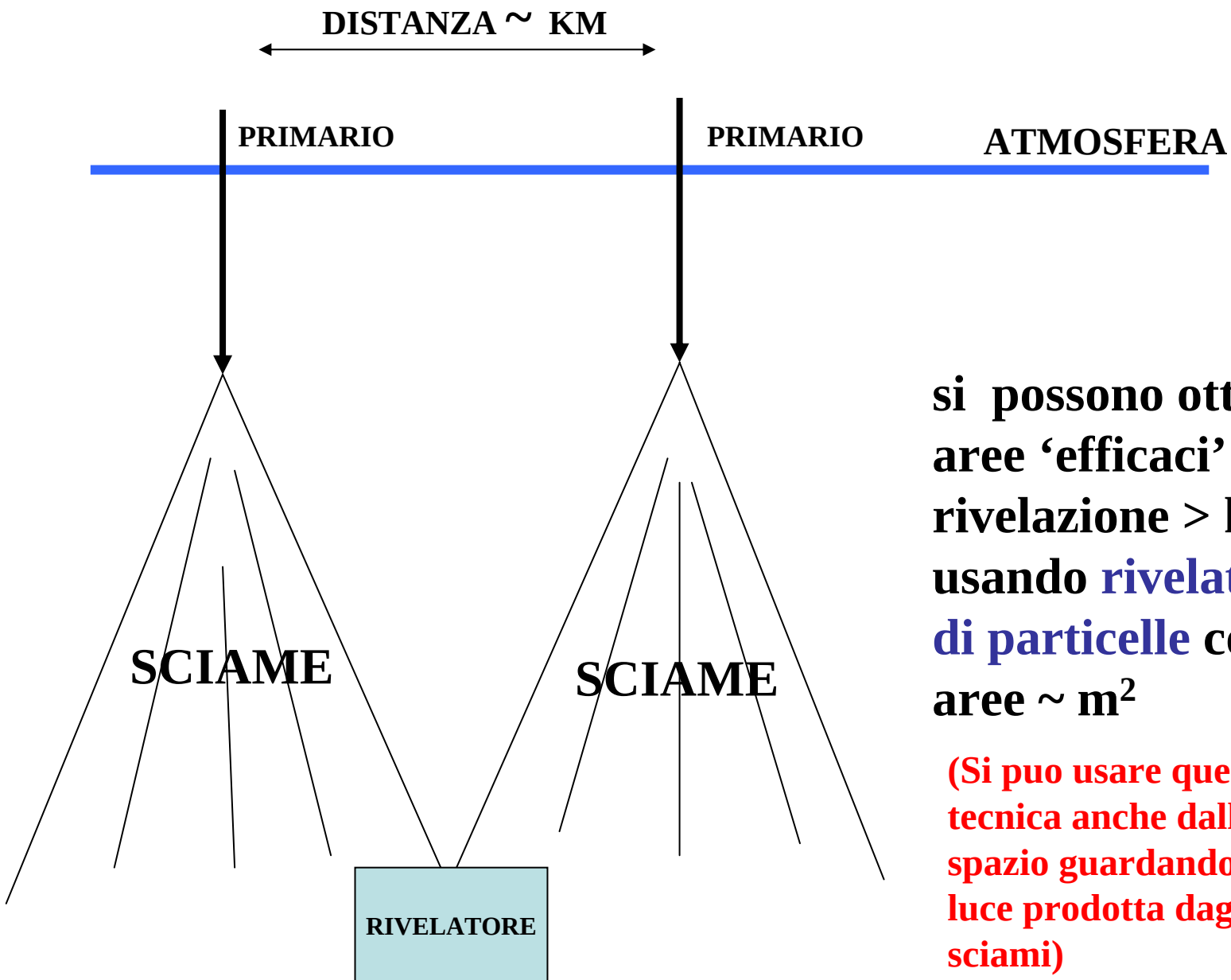
MISURE ‘INDIRETTE’

Si osserva e misura lo sciame di particelle prodotto dal primario in atmosfera

Lo sciame associato ad un primario e’ largo a terra ~ km !

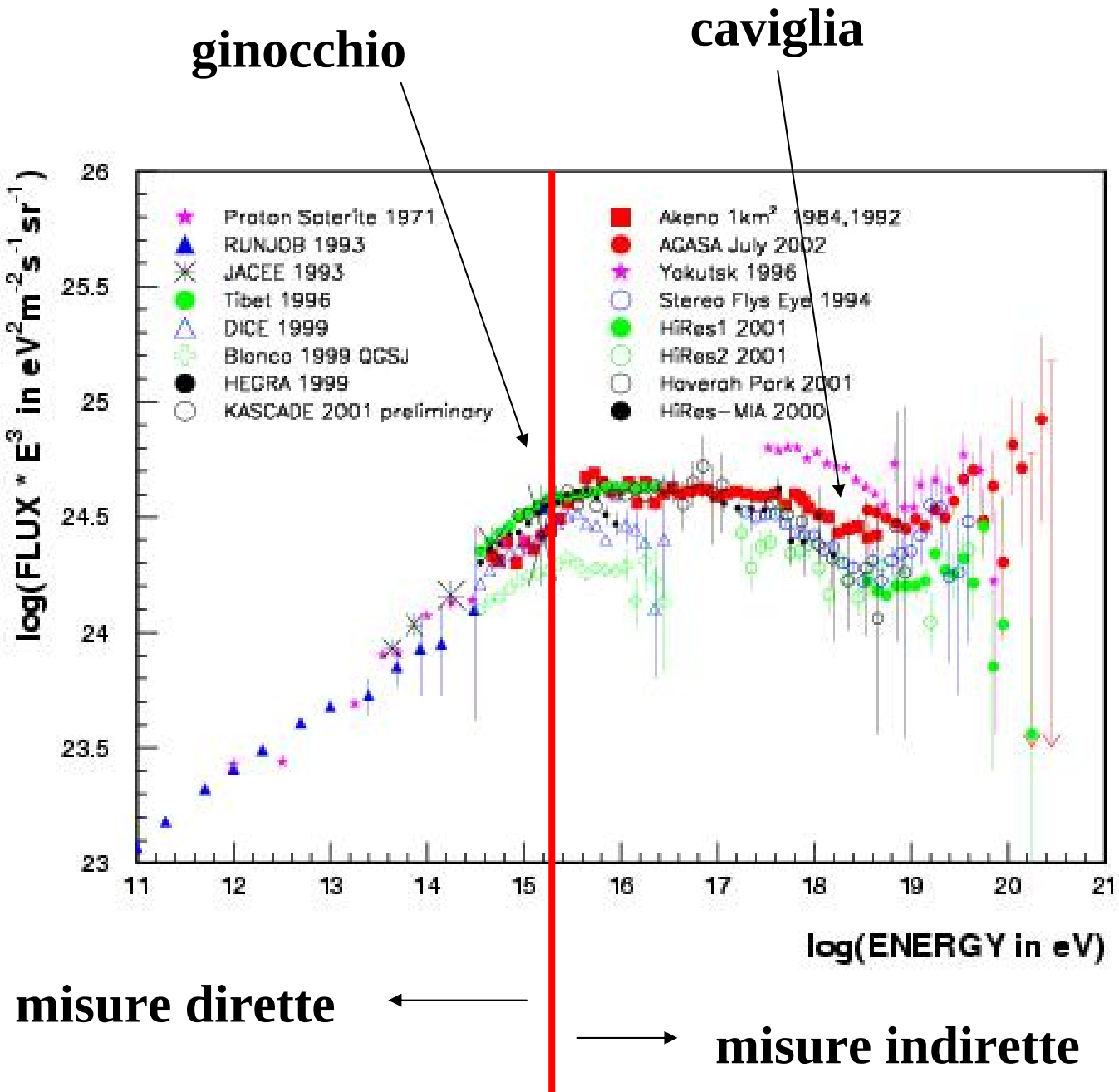


MISURE ‘INDIRETTE’



si possono ottenere aree ‘efficaci’ di rivelazione > km^2 usando rivelatori di particelle con aree ~ m^2

(Si puo usare questa tecnica anche dallo spazio guardando la luce prodotta dagli sciami)


ginocchio
caviglia
Proton Satellite 1971
RUNJOB 1993
JACEE 1993
Tibet 1996
DICE 1999
Blanco 1999 QGSJ
HEGRA 1999
KASCADE 2001 preliminary
Akeno 1km² 1984,1992
AGASA July 2002
Yakutsk 1996
Stereo Flys Eye 1994
HiRes1 2001
HiRes2 2001
Haverah Park 2001
HiRes-MIA 2000
log(FLUX * E³ in eV²m⁻²s⁻¹sr⁻¹)
log(ENERGY in eV)
misure dirette
misure indirette

PER RIVELARE RAGGI COSMICI SI USANO I RIVELATORI DI PARTICELLE

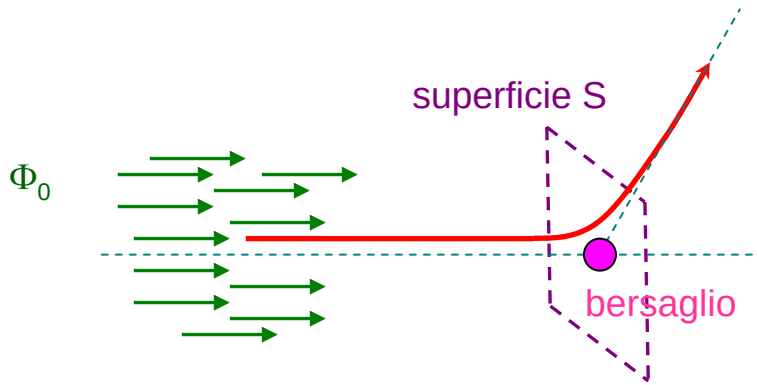
I RIVELATORI DI PARTICELLE

brevi cenni !

- **interazione particelle – materia**
- **processi fisici utilizzati nella rivelazione**
- **esempi di rivelatori**
- **misure di impulso ed energia**

INTERAZIONE PARTICELLE - MATERIA

Sezione d'urto → misura della probabilità che si verifichi un certo processo d'interazione



Flusso = numero di particelle incidenti per unita' di superficie e unità di tempo $\dfrac{dN}{dSdt}$

Dato un processo di interazione ad ogni particella bersaglio si associa un area σ , detta sezione d'urto del processo
Essa è proporzionale alla probabilità che il proceso di interazione avvenga :

Numero di interazioni per unita' di tempo =
= FLUSSO x SEZIONE D'URTO x NUMERO DI PARTICELLE BERSAGLIO = $\dfrac{dN}{dSdt} \cdot \sigma \cdot N^{o}_{bersagli}$

σ si misura in <u>cm²</u> oppure in <u>barn</u> = 10^{-24} cm²

INTERAZIONE PARTICELLE MATERIA

NON UGUALI PER TUTTE LE PARTICELE :

Cariche

particelle pesanti

protoni (p), muoni (μ), pioni (π), …

⇔

Neutre

neutroni (n)

elettroni

⇔

fotoni

raggi X, raggi γ

INTERAZIONE PARTICELLE MATERIA

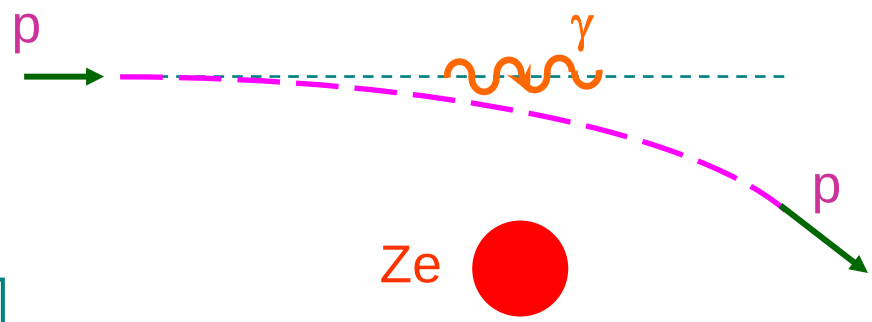
Particelle Cariche

1. **URTO CON ELETTRONI ATOMICI**

   EFFETTO : ECCITAZIONE-IONIZZAZIONE DEGLI ATOMI

2. **INTERAZIONE CON IL CAMPO ELETTRICO DEI NUCLEI**

   EFFETTO : IRRAGGIAMENTO DI FOTONI (Bremmstrahlung nel campo coulombiano del nucleo)



$$\sigma_B \propto \frac{m_e^2}{M^2}$$

Bremmstrahlung e' trascurabile per protoni e nuclei ma importante per elettroni

PER PARTICELLE CARICHE PESANTI (PROTONE..) IL CONTRIBUTO MAGGIORE ALLA PERDITA DI ENERGIA E' LA IONIZZAZIONE

Perdita di energia per ionizzazione

Osserviamo che ***dE/dx (FORMULA DI BETHE BLOCH):***

$$-\frac{dE}{dx} = \rho 4\pi N_0 r_e^2 mc^2 \frac{Z}{A} z^2 \frac{1}{\beta^2}\left[\frac{1}{2}\ln\frac{2mc^2\beta^2\gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2\right]$$

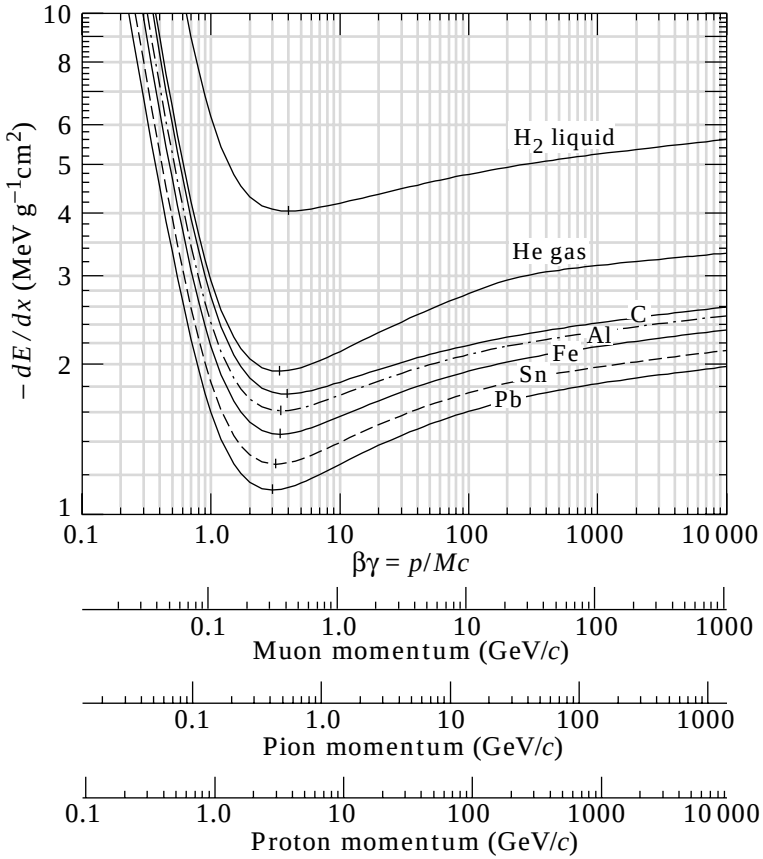
i. Dipende dalla carica della particella incidente (z^2). (interazione Coulombiana).

ii. Per β crescente decresce come $1/\beta^2$ raggiungendo un minimo per $\beta\gamma \sim 3 \div 4$ e poi risale in quanto $\log(\beta^2\gamma^2)$ domina. (risalita relativistica).

iii. Dipende dal potenziale di ionizzazione medio del materiale.

Perdita di energia per ionizzazione

Per Z/A = 0.5
Al minimo di ionizzazione :
~2MeV (g/cm^2)$^{-1}$
(da moltiplicare
per la densita')



Energia a cui si raggiunge il minimo di ionizzazione:
Protoni E ~2GeV
Elettroni E ~1 MeV

$$-\frac{dE}{dx} = \rho 4\pi N_0 r_e^2 mc^2 \frac{Z}{A} z^2 \frac{1}{\beta^2}\left[\frac{1}{2}\ln\frac{2mc^2\beta^2\gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2\right]$$

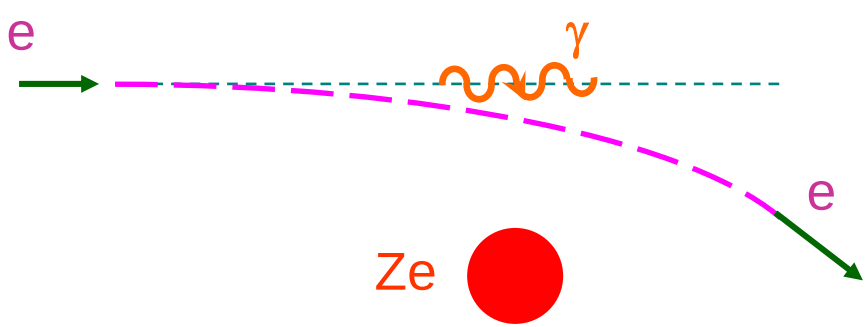
Elettroni & Positroni

Gli $e^{\pm}$ perdono energia per ionizzazione e bremmstralung:

- **Ionizzazione (Bethe Block).**
  la formula va leggermente modificata in quanto gli $e^{\pm}$ sia hanno piccola massa

o salita relativistica leggermente minore per $e^{\pm}$.

- **Bremmstrahlung nel campo coulombiano del nucleo**



Elettroni & Positroni

La perdita di energia per **Bremmstrahlung aumenta con l'energia dell'elettrone fino a divenire il processo dominante**

Energia critica E_c

energia particella incidente per la quale risulta

$$-\frac{dE}{dx}\bigg|_{Coll.} = -\frac{dE}{dx}\bigg|_{B}$$

$E > E_c \rightarrow$ domina Bremmstrahlung

$$E_c \sim \frac{800}{Z} \quad \text{MeV}$$

Interazioni dei γ

Per poter essere rivelati i γ devono prima creare una particella carica e/o trasferire energia alle particelle cariche.

Le principali interazioni dei fotoni con la materia sono:

- Effetto fotoelettrico **assorbimento γ con produzione elettrone**
- Effetto Compton **urto elastico con elettrone**
- Produzione di coppie **annichilazione con produzione di coppia elettrone-positrone**

Tutte queste interazioni sono di tipo elettromagnetico.

INTERAZIONE PARTICELLE MATERIA

Oltre ai processi dominanti di interazione e perdita di energia vi sono altri processi non importanti per la perdita di energia ma molto utili per rivelare la presenza delle particelle come :

- **Interazioni nucleari FORTI con nuclei (danno luogo a sciami –adronici)**
- **emissione di luce cherenkov**
- **emissione di luce di fluorescenza**
- **.....**

RIVELATORI DI PARTICELLE

RIVELATORI DI PARTICELLE (scopo)

In genere si usa un sistema di uno o piu' rivelatori

Lo scopo di un sistema di rivelatori di particelle e' :

1. **Registrare il passaggio di un particella attraverso di esso**
2. **Misurare l'energia persa dalla particella (E)**
3. **Misurare l'impulso della particella (p)**
4. **Misurare la carica della particella (Z)**
5. **Misurare la direzione di arrivo della particella**
6. **Misurare la velocità della particella (β)**
7. **Misurare il tempo di arrivo di una particella (t)**

La risoluzione e' un parametro di qualita' del rivelatore che indica la precisione con cui e' misurata una quantita'. Alta risoluzione indica un piccolo errore di misura

RIVELATORI DI PARTICELLE
(processi utilizzati)

- **I RIVELATORI DI PARTICELLE RIVELANO DIRETTAMENTE PARTICELLE CARICHE ATTRAVERSO LE LORO INTERAZIONI ELETTROMAGNETICHE CON L'APPARATO**
- **PER RIVELARE PARTICELLE NEUTRE SI DEVE CONVERTIRE PARTE DELL'ENERGIA PER PRODURRE PARTICELLE CARICHE**

I **fotoni** vengono rivelati indirettamente attraverso gli elettroni che essi producono per **effetto fotoelettrico**, **diffusione Compton** o **produzione di coppie**

I **neutroni** subiscono interazioni forti con i nuclei dei materiali producendo **particelle secondarie cariche**

Le particelle piu` difficili da rivelare sono i **neutrini** che possono avere solo interazioni deboli con i nuclei o gli elettroni. In questi processi si ha l'emissione di **elettroni o muoni**

RIVELATORI DI PARTICELLE
(funzionamento tipico di un apparato moderno con digitizzazione finale dei dati)

Risposta dell'apparato.

•In generale una particella viene rivelata misurando la carica Q liberata al passaggio della particella (t=0). Questa carica viene guidata verso un elettrodo di raccolta da un campo elettrico. Il tempo t_c di raccolta può variare dai ns (fotomoltiplicatori) ai ms (camere ad ionizzazione).

•Si avrà un segnale di corrente dal tempo t=0 fino al tempo $t=t_c$ e l'integrale di questa corrente sarà la carica Q.

•Il segnale in corrente viene adeguatamente amplificato e registrato in forma digitale dall'elettronica di lettura

Caratteristiche degli apparati

Qualunque sia la misura che si vuole effettuare con un apparato proprietà fondamentali sono:

i. **Sensibilità**
ii. **Risoluzione**
iii. **Efficienza**
iv. **Tempo di risposta**

RIVELATORI DI PARTICELLE
(processi utilizzati e principali tipologie)

RACCOLTA DELLA CARICA LIBERATA AL PASSAGGIO DELLA PARTICELLA CARICA

- **RIVELATORI DI IONIZZAZIONE A GAS** **(POSSIBILITA' DI GRANDI VOLUMI)**
- **RIVELATORI A SEMICONDUTTORE** **(ALTA RISOLUZIONE SPAZIALE)**

RACCOLTA DELLA LUCE EMESSA AL PASSARE DELLA PARTICELLA E TRADUZIONE DELLA LUCE IN SEGNALE ELETTRICO

- **RIVELATORI A SCINTILLAZIONE – FLUORESCENZA** **(ALTA RISOLUZIONE TEMPORALE)**
- **RIVELATORI A LUCE CHERENKOV (possibilita' grandi volumi – versatilità)**

RIVELATORI CHE FORMANO UNA IMMAGINE STABILE DELLA TRACCIA AL PASSAGGIO DELLA PARTICELLA **OBSOLETI !**

- Emulsioni fotografiche → l'ionizzazione induce processi chimici che permettono di formare un' immagine.
- Camere a bolle – Camere a nebbia -> il rilascio di energia favorisce transizioni di fase locali

Rivelatori di ionizzazione a gas

Si applica una differenza di potenziale

alimentatore

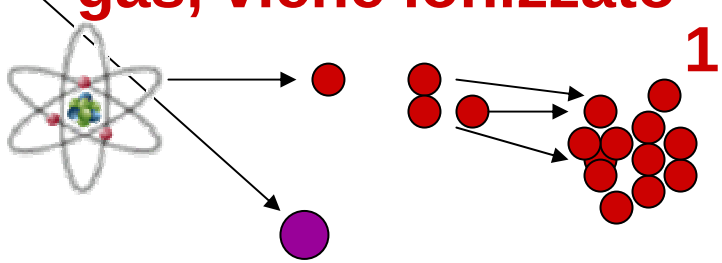
-

+

recipiente contenente gas

particella carica
e^+, e^-, μ^+, p etc

uno degli atomi del gas, viene ionizzato



$10^{7\div8}$

L'elettrone, libero, sente il campo elettrico, e viene accelerato; colpendo gli altri atomi del gas produce una valanga di elettroni

forte campo elettrico

E

segnale elettrico

0/1

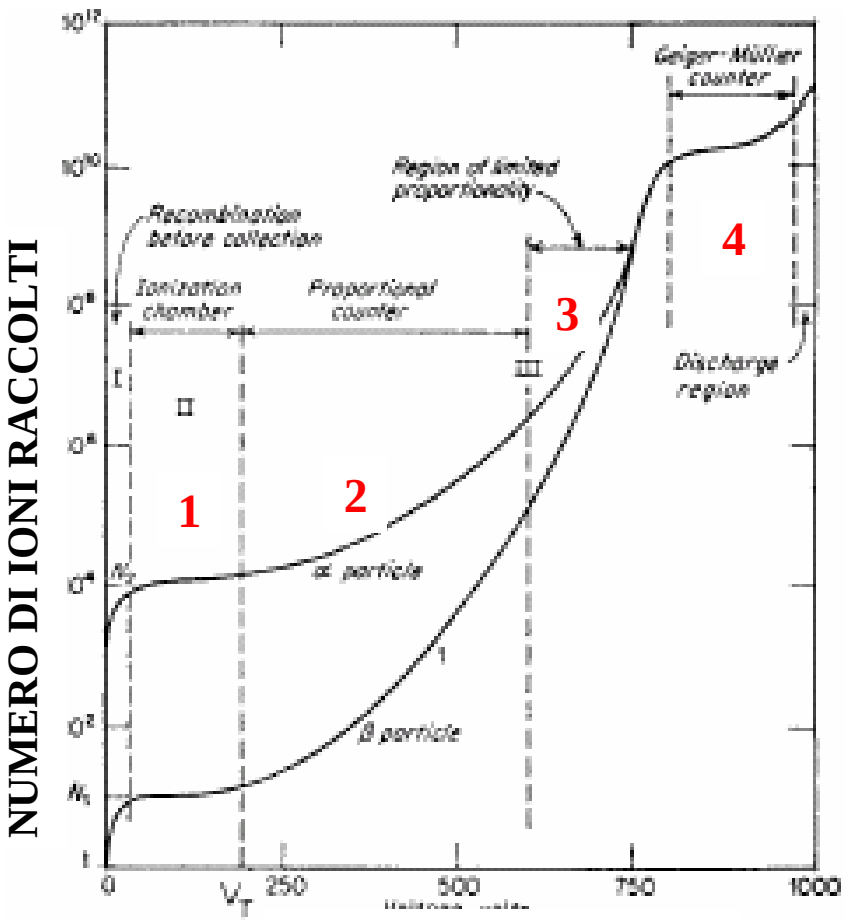
ADC

analisi e archivio

Rivelatori di ionizzazione a gas

tipologie

1. ionizzazione: si raccoglie tutta la carica nessuna moltiplicazione delle coppie ione-elettrone.
2. proporzionale: presente una moltiplicazione a valanga. Il segnale dell'apparato è proporzionale alla ionizzazione ➔ misura di DE e guadagno 10^4-10^6
3. proporzionale limitato → saturazione → streamer. Forte emissione di fotoni, moltiplicazioni a valanga secondarie, alti guadagni (10^{10}) → elettronica semplice.
4. geiger: grossa fotoemissione, il filo anodico è tutto coinvolto, regime di scarica eliminata abbassando HV. Necessari forti moderatori.



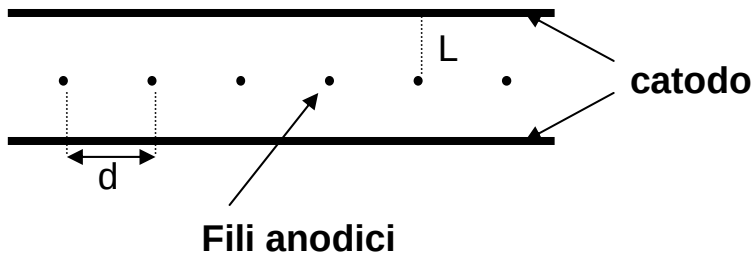
Voltaggio Volts

2 e 3 sono oggi i piu utilizzati

Rivelatori di ionizzazione a gas

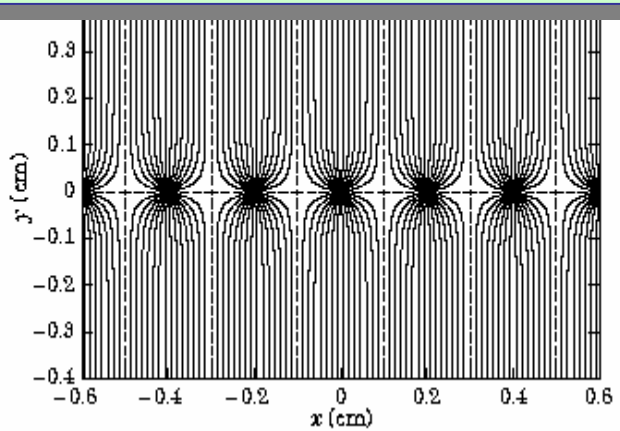
CAMERE A FILI **(fondamentali nello sviluppo della fisica delle particelle)**

G. Charpack et al. 1968. Premio Nobel 1992



Le migliori risoluzioni spaziali ottenute sono ~ 100 μm

Distribuzione delle linee di campo in una MWPC
la spaziatura fra gli anodi e` di 2 mm



linee di campo elettrico
(vicino al filo si ha la moltiplicazione ed il regime proporzionale)

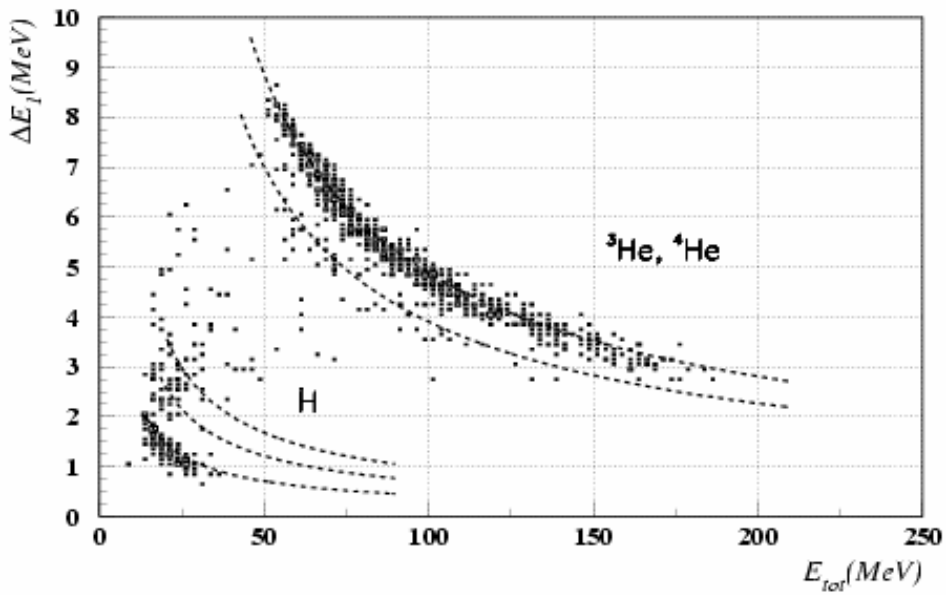
Rivelatori di ionizzazione a gas

POSSONO MISURARE :

- **la quantità di ionizzazione prodotta, quindi l'energia persa dalla particella nel gas**

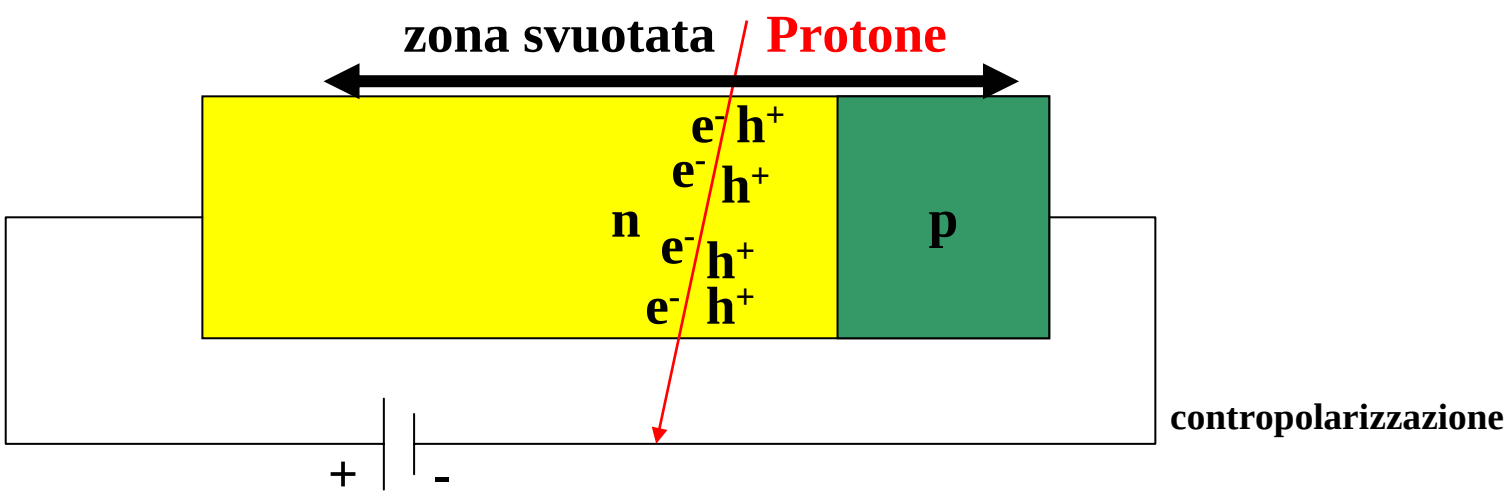
- **la posizione-traiettoria della particella**

dalla quantita' di ionizzazione prodotta si può risalire alla carica della particella (Bethe Block)



Rivelatori a semiconduttore

- Polarizzando inversamente un diodo (cioè applicando una V_B~100V dello stesso segno di V_d) → la sottile zona di carica spaziale si estende su tutto il diodo → diodo completamente svuotato.
- Il deposito di energia nella zona completamente svuotata, dovuto al passaggio della particella carica, crea delle coppie libere e-lacuna.
- Sotto l'influenza del campo elettrico, gli elettroni derivano verso il lato n, le lacune verso il lato p → si ha una corrente rivelabile

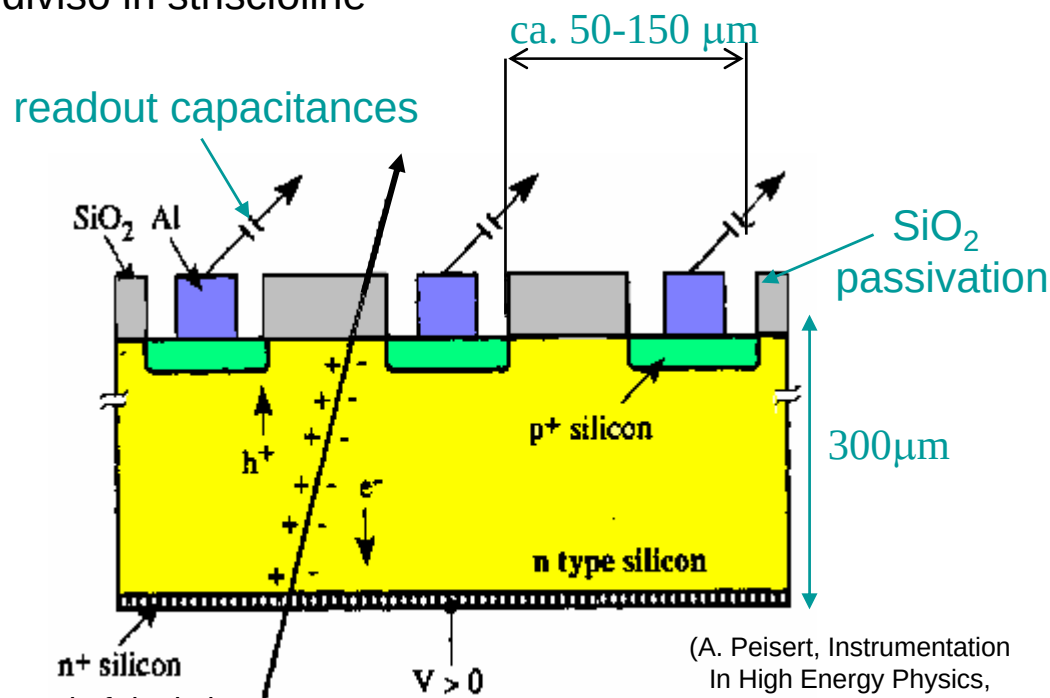


Rivelatori a semiconduttore
Rivelatori a strisce (strip)

Rivelatori

i. Silicio tipo n completamente svuotato

ii. Sottile strato di p^+ diviso in striscioline



defines end of depletion zone
+ good ohmic contact

(A. Peisert, Instrumentation In High Energy Physics, World Scientific)

il silicio e' il semiconduttore piu' usato

Rivelatori a semiconduttore

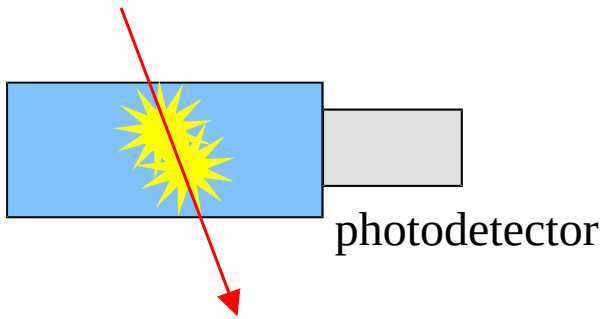
POSSONO MISURARE :

- **la posizione-traiettoria della particella con risoluzione ~1 μm (1 μm = 10^{-6}m = 10^{-3} mm). E' la migliore risoluzione spaziale raggiungibile con gli attuali rivelatori di particelle.**

- **l'Energia rilasciata dalla particella nel semiconduttore (piu' precisi rispetto ai gas perche' l'energia richiesta per produrre 1 coppia e' minore (3 eV contro 30 eV) e si producono piu' coppie nei semiconduttori)**

I rivelatori a semiconduttore hanno piccola estensione (max ~ m^2) ma grande risoluzione ! ottimi per applicazioni spaziali (grandi estensioni non richieste, ottima robustezza e stabilita'). Necessitano pero' di buona amplificazione

Scintillatori



Definiamo scintillatore qualunque materiale che emette un impulso di luce poco dopo il passaggio di una particella carica.

La funzione di uno scintillatore è duplice:

- Emettere luce (luminescenza)
- Trasmetterla al rivelatore di fotoni (e.g. fotomoltiplicatore)

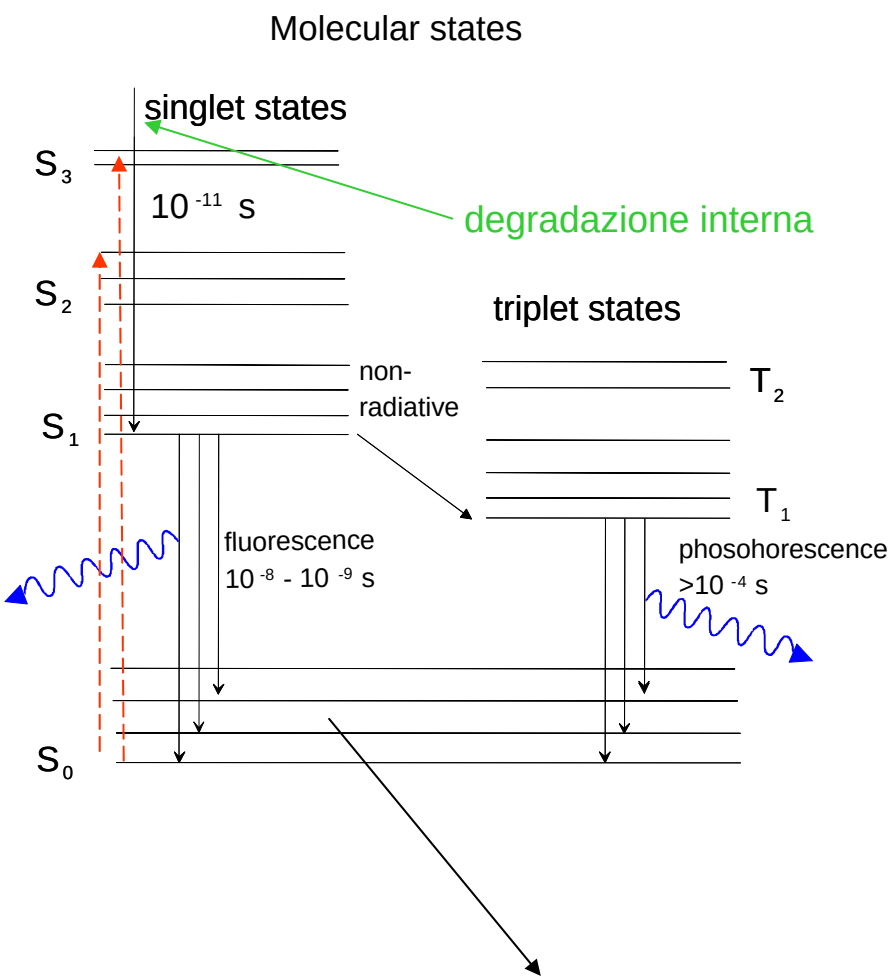
Scintillatori e fotorivelatori

Proprietà generali di uno scintillatore

Uno scintillatore consiste generalmente in un materiale scintillante accoppiato otticamente ad un fotomoltiplicatore (PM) o direttamente o tramite una guida di luce. Quando la particella passa attraverso lo scintillatore eccita gli atomi e le molecole dello scintillatore ➔ si emette luce.

la luce viene trasmessa al PM e viene convertita in una debole corrente di fotoelettroni, amplificata dai dinodi (altri elettrodi) del PM. ➔ abbiamo un segnale in corrente facilmente rivelabile dall'elettronica

Scintillatori



L'energia rilasciata dalla particella eccita sia i livelli elettronici che vibrazionali. (Linee rosse tratteggiate)

Le eccitazioni dello stato di singoletto decadono in ≤10 ps senza emettere radiazione (degradazione interna).

dallo stato S_1 è facile decadere nello stato fondamentale S_0 con emissione di luce di fluorescenza in 1÷ 10 ns.

Analogamente dallo stato di tripletto si arriva tramite degradazione interna allo stato T_1 e poi si scende a T_0 in maniera complessa con emissione di luce di fosforescenza (lenta > 10^{-4} s)

struttura fine dei livelli – permette di non riassorbire i fotoni

Scintillatori

Esistono 2 tipi di materiale scintillante:

- ❖ Scintillatori organici (poca luce, ma veloci)
- ❖ Scintillatori inorganici (molta luce, ma generalmente lenti)

- **Gli scintillatori forniscono un buona misura dell'energia persa nello scintillatore dalla particella (proporzionale alla quantità di luce emessa)**

- **Forniscono una risposta molto veloce (ns)**

Scintillatori organici

Gli scintillatori organici possono essere:

- Cristalli organici : i più comuni sono antracene e naftalene. L'antracene è relativamente lento (30 ns), ma dà abbastanza luce. Il naftalene è rapido, ma dà poca luce.
- Scintillatori liquidi e plastici: sono quelli più usati.
  - Liquidi: sono soluzioni di 1 o più scintillatori organici disciolti in un solvente organico. L'energia rilasciata dalla particella è, in generale, assorbita dal solvente e poi rilasciata al soluto (trasferimento rapido ed efficiente). Il soluto (o i soluti) funzionano da wawe length shifter ovvero assorbono e.g. nell'ultravioletto ed emettono nel visibile.
  - Plastici: sono del tutto analoghi ai liquidi per il funzionamento e la composizione (solvente e soluto/i), ma sono solidi.

Scintillatori inorganici

La luce emessa è difficile da rivelare in quanto è tendenzialmente emessa nell'ultravioletto:

- Ar 130 nm
- Kr 150 nm
- Xe 175 nm

Anche i gas nobili (ad alta pressione) possono scintillare.

Anche nel caso di gas nobili liquidi si hanno 2 costanti di tempo:

- rapida (pochi ns)
- lenta (100÷1000 ns)

ma con la medesima lunghezza d'onda.

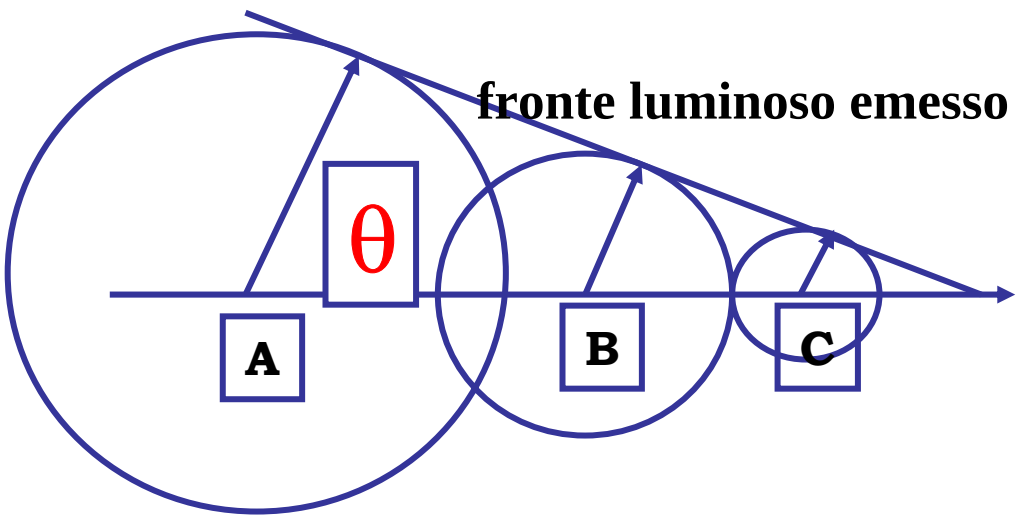
ALTRI RIVELATORI CON EMISSIONE DI LUCE

EFFETTO CHERENKOV

Se una particella carica viaggia ad una velocita' superiore a quella della luce nel mezzo si ha emissione di luce cherenkov

$$v > c/n$$

$$v_{luce} = c/n$$



fronte luminoso emesso ad angolo

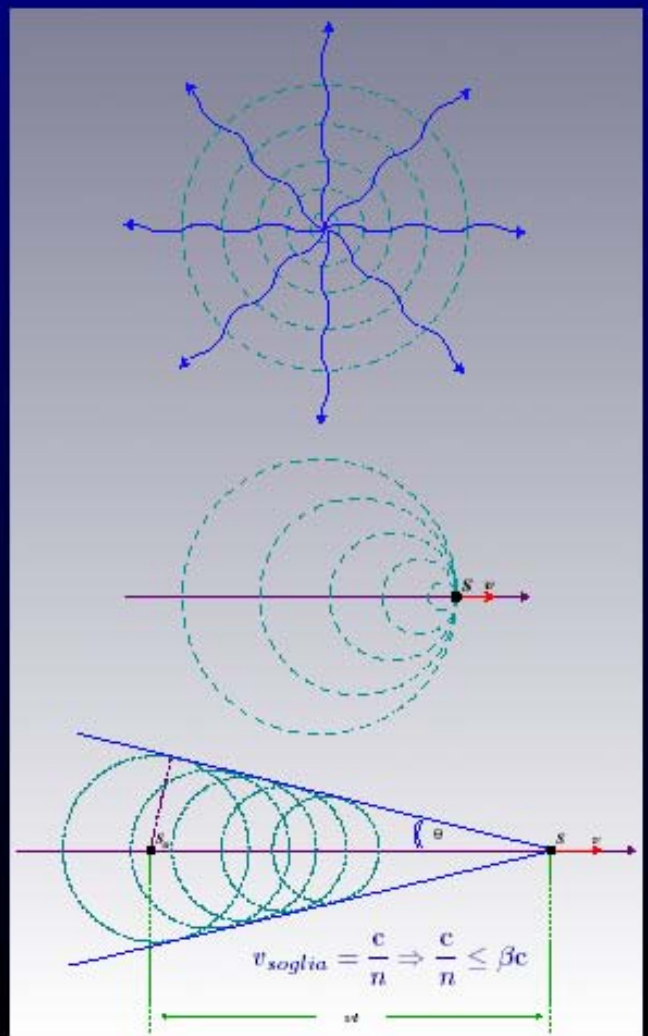
$$\cos\vartheta = \frac{1}{\beta n}$$

$$v = \beta c$$

Se si misura θ si conosce la velocità β

Luce Čerenkov

Fronti d'onda



Fronte d'onda per una sorgente ferma

Fronte d'onda per una sorgente in moto a velocità *v*

Fronte d'onda per una sorgente in moto a velocità > v_c

Effetto Cerenkov

1) Esiste una soglia per emissione di luce Cerenkov $\beta > 1/n$
2) La luce e' emessa ad un angolo particolare

→ Facile utilizzare l'effetto Cerenkov per identificare le particelle.

Con 1) posso sfruttare la soglia → Cerenkov a soglia.

Con 2) misurare l'angolo → DISC, RICH etc.

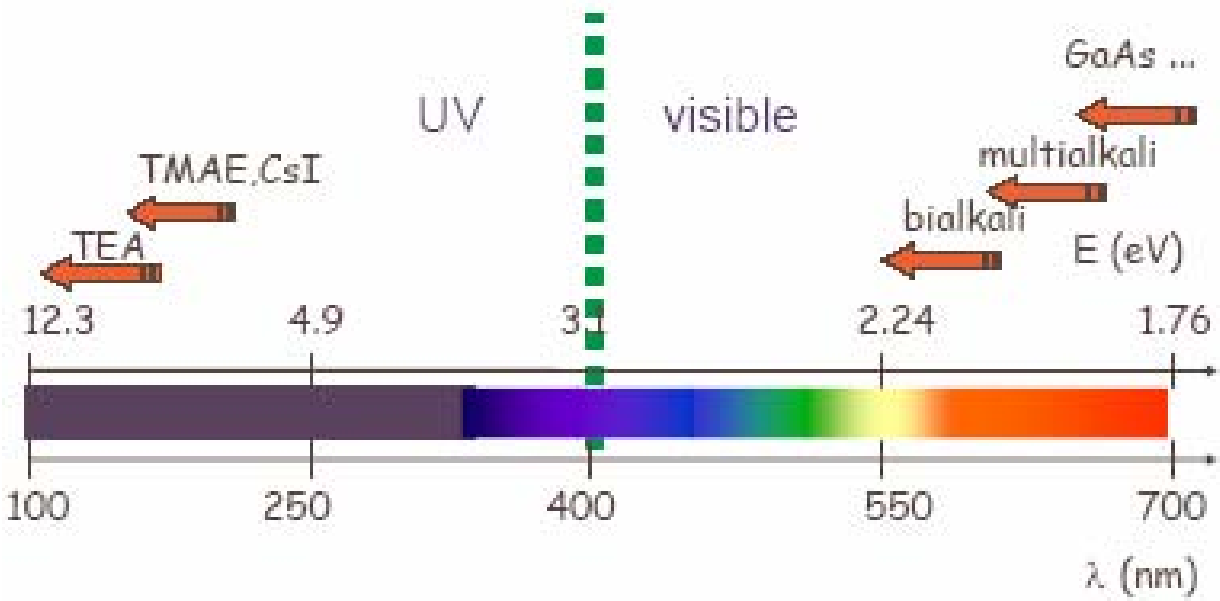
- **GRANDI VOLUMI – RADIATORI NATURALI (mare – atmosfera)**
- **MARE – RIVELATORI SOTTOMARINI DI NEUTRINI**
- **ATMOSFERA – RIVELATORIDI SCIAMI ATMOSFERICI INDOTTI DA RAGGI COSMICI**

.

Fotorivelatori

Fotorivelatori

Scopo dei vari fotorivelatori è quello di convertire la luce in segnali elettrici rivelabili. Lo spettro che ci interessa va normalmente dall'ultravioletto al visibile.



Fotorivelatori

Il Fotomoltiplicatore

(Philips Photonic)

Fotorivelatori

il fotomoltiplicatore

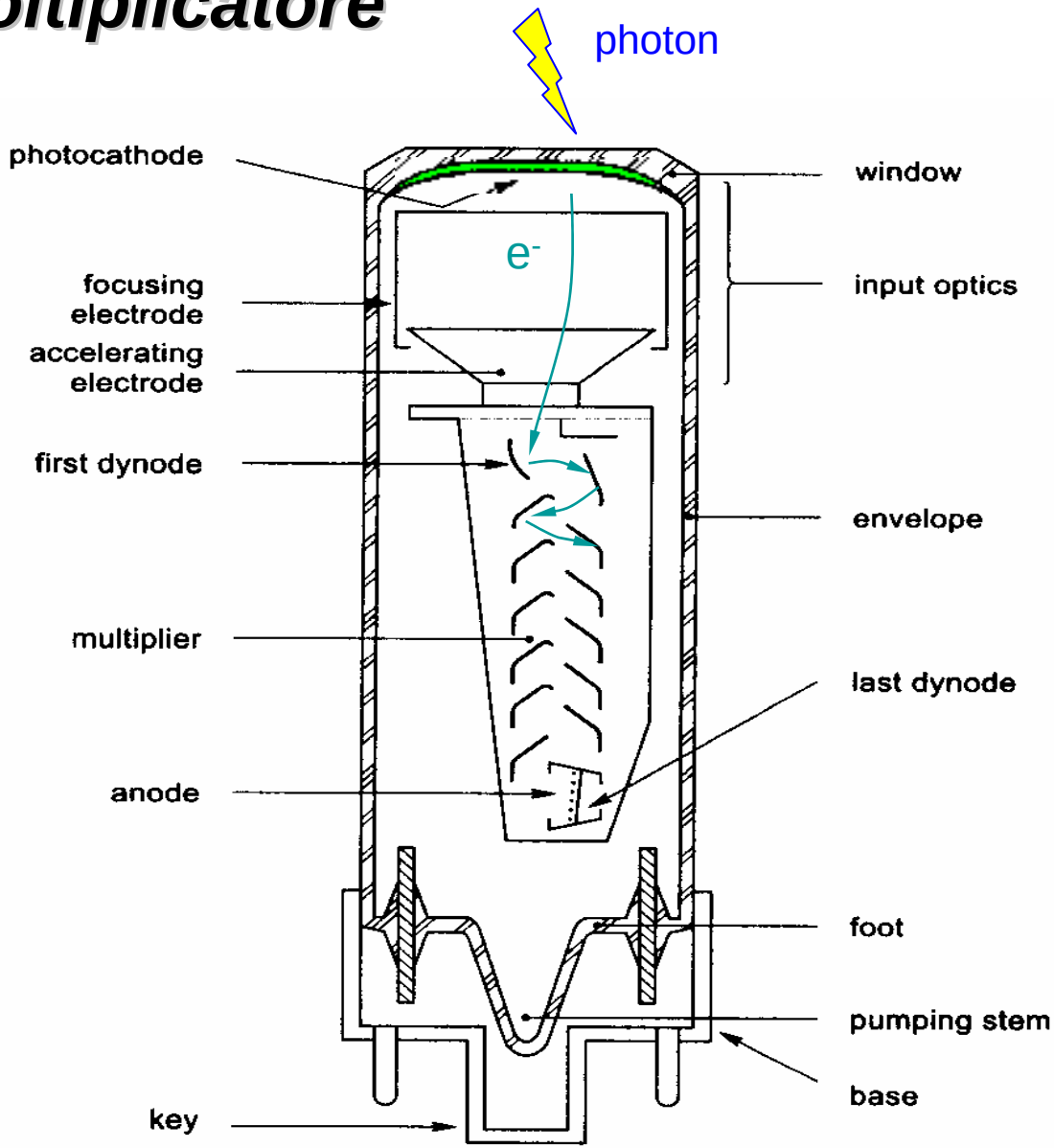
Il fotomoltiplicatore (PM) consiste in un catodo di materiale fotosensibile seguito da un sistema di raccolt degli elettroni, una sezione di moltiplicazione degli elettroni (dinodi) ed infine da un anodo dal quale si preleva il segnale elettrico. Tutto il sistema sta in un tub di vetro sotto vuoto.

Quando è in funzione si alimenta con una tensione negativa il catodo (a massa l'anodo) ed i dinodi ad una tensione degradante dal valore catodico a quello dell'anodo, come si può ottenere da un partitore di tensione.

Quando un fotone urta il fotocatodo viene emesso un elettrone per effetto fotoelettrico. A causa della d.d.p. applicata viene focalizzato ed accelerato sul primo dinodo e, colpendolo, si ha emissione secondaria di elettroni.

I nuovi elettroni vengono accelerati dal campo elettrico sul secondo, terzo … dinodo, producendo un fascio di elettroni diretti verso l'anodo.

All'anodo questo sciame di elettroni viene raccolto e fornisce un segnale di corrente che può essere ulteriormente amplificato e analizzato.



RIVELATORI :

come usare uno o più rivelatori per una specifica misura

- **Misure di energia (E)**
- **Misure di impulso (p)**
- **Misure di tempi di volo**
- **.....**

MISURARE L'ENERGIA

- cio' che si misura direttamente e' la perdita di energia

- per misurare l'energia bisogna che la particella dissipi tutta la sua energia nel rivelatore : $\Delta E = E$

- ad alte energie gli elettroni e piu' raramente i protoni ed i nuclei danno luogo a 'sciami', processi che dissipano velocemente l'energia rendendo possibile la misura anche ad alta energia. Gli sciami di particelle sono di due tipi :

  sciami elettromagnetici – indotti da elettroni egamma

  sciami adronici – indotti da nuclei e nucleoni attraverso le interazioni nucleari forti

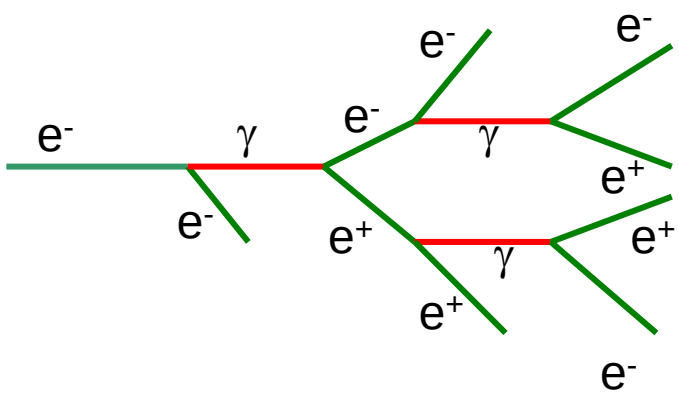
SCIAMI DI PARTICELLE

sciami elettromagnetici

Quando un elettrone e^- (di energia > Ec) interagisce per bremstrahlung produce un fotone γ

Il fotone γ interagisce successivamente e si annichila producendo una coppia e^+e^- elettrone positrone.

In N iterazioni si ha una moltiplicazione di particelle per un fattore > 2^N , con energia $Ei=E/2^N$. L'energia per particella diviene sempre piu' piccola fino che lo sciame si arresta



La lunghezza di uno sciame cresce logaritmicamente con l'energia iniziale !

LUNGHEZZA DI RADIAZIONE X_0 : $E = E_i e^{-\frac{x}{x_0}}$

$$X_0 \text{ (cm)} \sim 180\, A\, Z^{-2} \rho^{-1}$$

L'energia dello sciame si esaurisce dopo ~ 10-20 X_0

X_0 = 36 cm in acqua

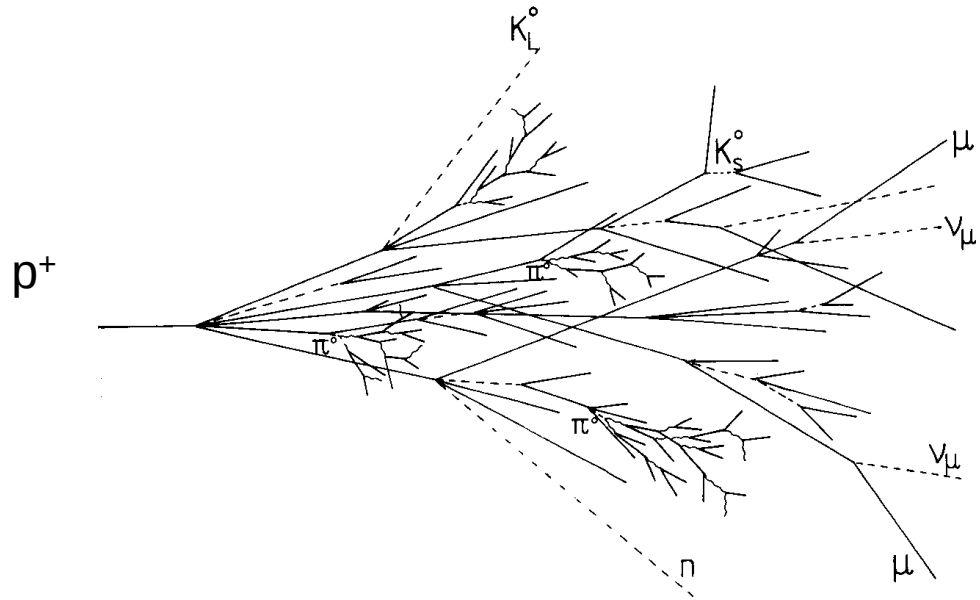
$$massimo \propto \frac{\ln E_0 / E_c}{\ln 2} X_0 \qquad N_{totale} \approx 2 \frac{E_0}{E_c}$$

SCIAMI DI PARTICELLE

sciami adronici

Molti processi coinvolti → molto più complicate che gli sciami e.m.

P_T ~ 350 MeV → sciami adronici molto più larghi di quelli e.m. (95% in un cilindro di raggio λ_I)

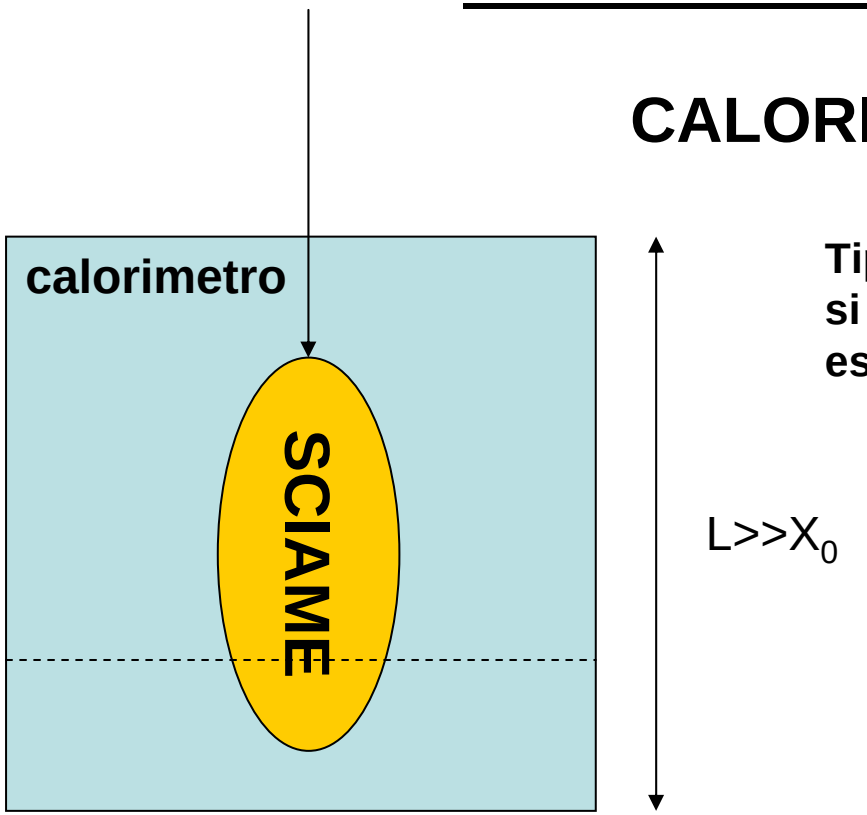


Gli sciami adronici sono molto più lunghi e più larghi e piu' irregolari di quelli elettromagnetici

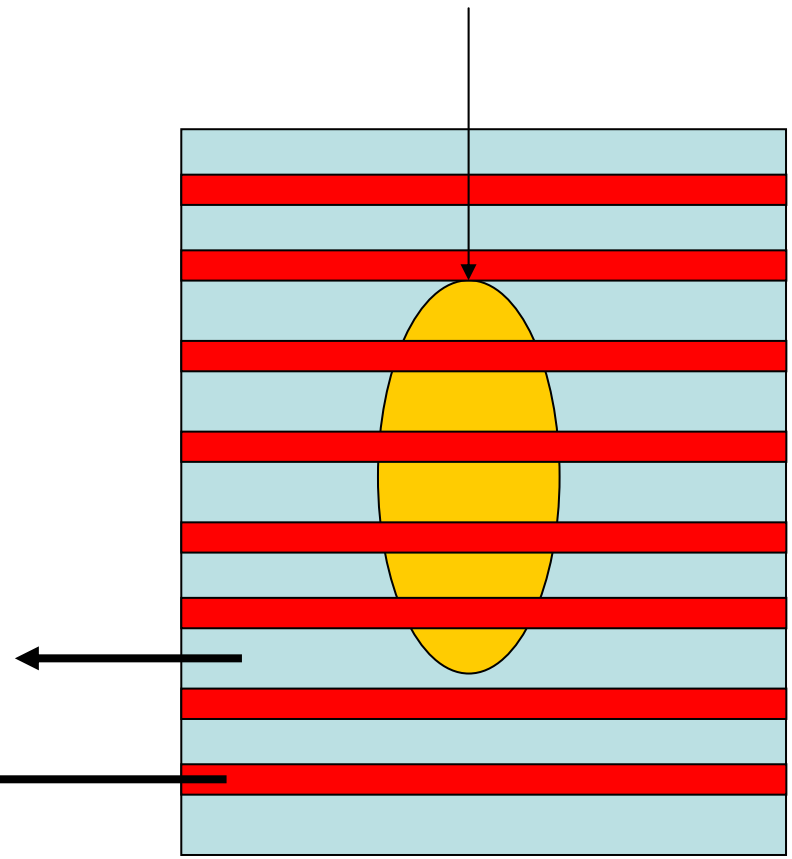
Mentre calorimetri e.m. possono raggiungere risoluzioni relative in energia ~1÷2%, quelli adronici non hanno una risoluzione migliore del ~35 % (per E=1GeV).

MISURARE L'ENERGIA

CALORIMETRI



Tipicamente si fanno calorimetri a 'sampling', si misura anche la 'forma' dello sciame e si estrapola l'energia totale rilasciata.



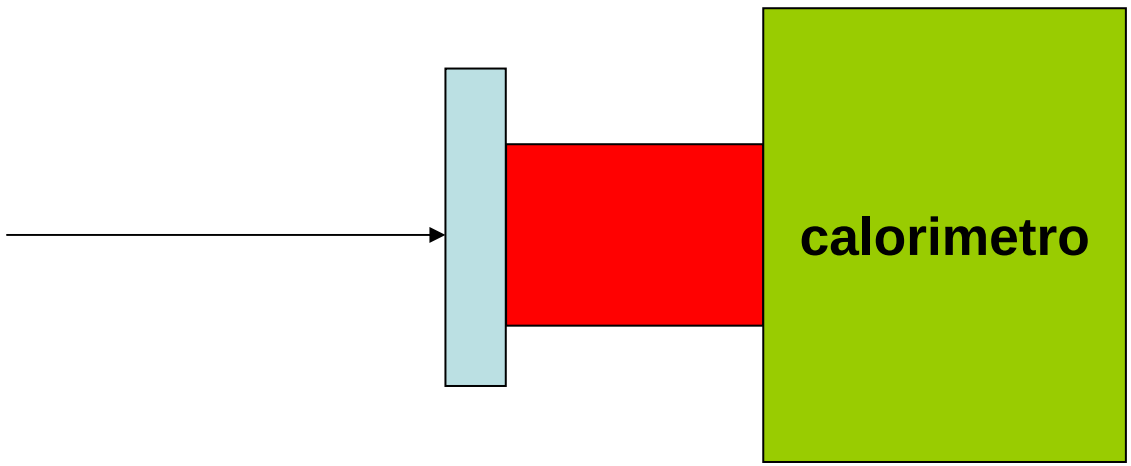
ASSORBITORE – ALTO Z , sciame corto

Rivelatore 'ATTIVO'
(semiconduttore ....)

MISURARE L'ENERGIA

CALORIMETRI

Misurare l'energia di una particella tramite un calorimetro è un metodo distruttivo, poiché la particella viene assorbita dal calorimetro ➔ sta alla fine (quasi) degli apparati sperimentali.



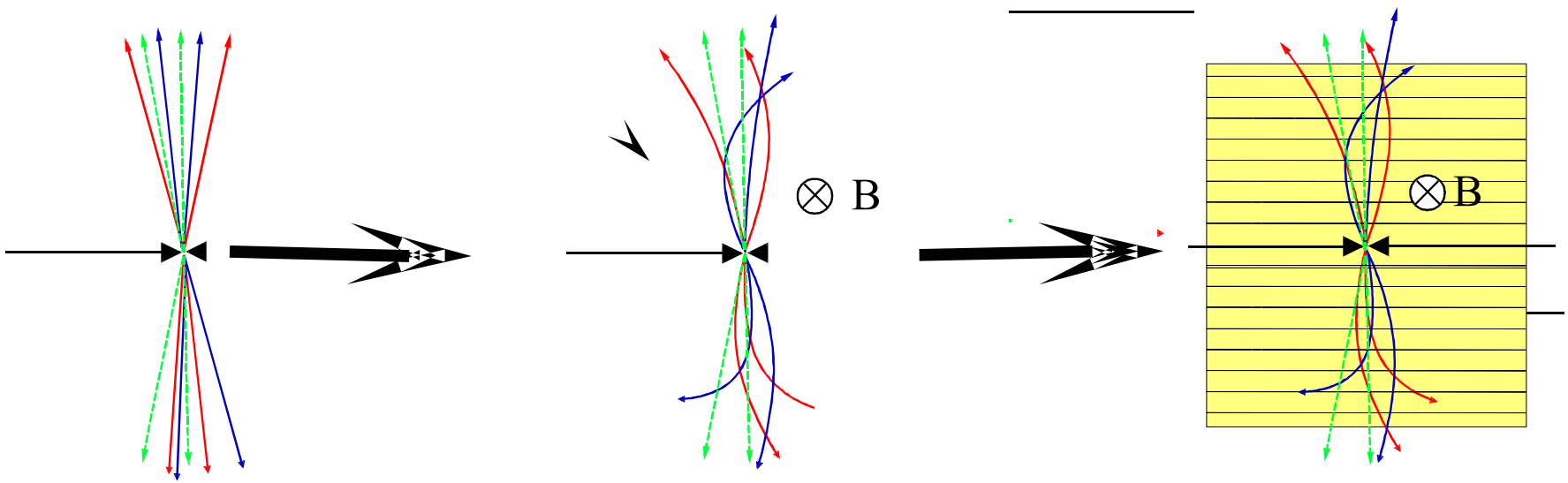
calorimetri ad immagine

Un calorimetro a sampling fornisce la 'forma' dello sciame e puo' permettere di distinguere tra sciami elettromagnetici e sciami adronici. Quindi fornisce infrmazioni per distingure tra elettroni (gamma) e protoni (adroni)

Misure d'impulso

- Una particella posta in un campo magnetico ha una traiettoria curva
- sappiamo che $$R_{Larmor} = m\frac{v}{qB} = \frac{p}{qB}$$
- Misurando la curvatura in un campo magnetico si misura l'impulso.

In realtà si misura : rigidità magnetica R = p/q

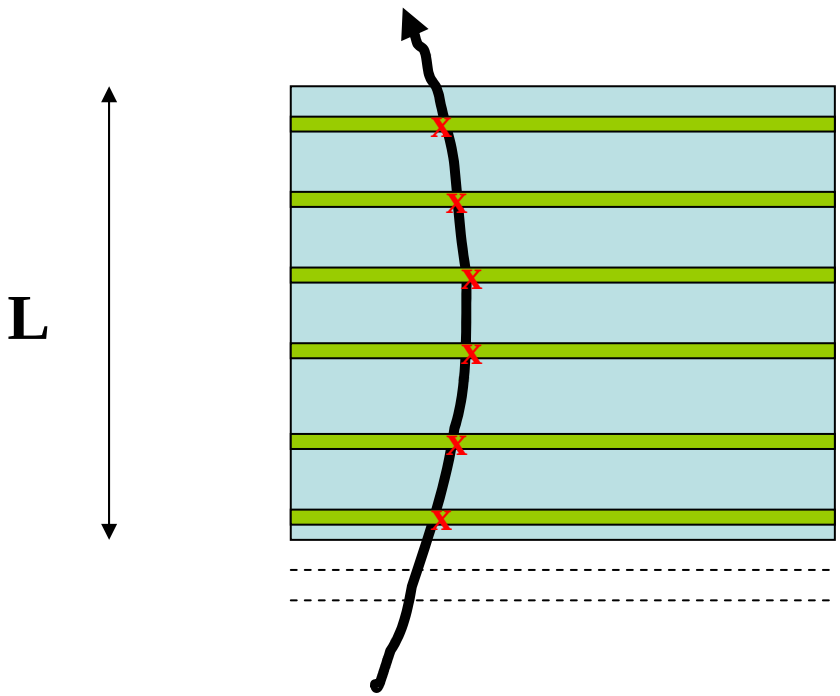


Il segno della carica e' importante per riconoscere materia - antimateria

Misure d'impulso

LO SPETTROMETRO MAGNETICO

Si deve produrre un campo magnetico → **Bobine**
Bobine supeconduttrici
Magneti permanenti



○ $\overline{B}$ **(uscente)**

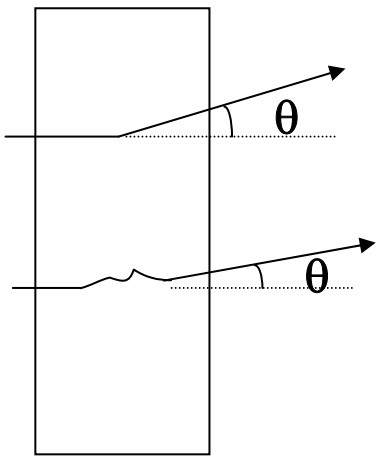
→ **N rivelatori di posizione**
(camere a fili , rivelatori a semiconduttore....) con risoluzione σ (x)

$$\left.\frac{\sigma(p)}{p}\right|^{tr} = \frac{\sigma(x)}{0.3BL^2}\sqrt{\frac{720}{N+4}}\cdot p$$

Misure d'impulso

scattering multiplo

Nell'attraversare del materiale una particella e' sottoposta a tanti piccoli urti (scattering)



Una particella può subire un solo scattering, ma può anche fare molti scattering coulombiani (la sezione d'urto cresce rapidamente quando gli angoli di scattering diminuiscono).
La particella può lasciare il blocco di materiale dopo aver fatto molte collisioni a piccolo angolo

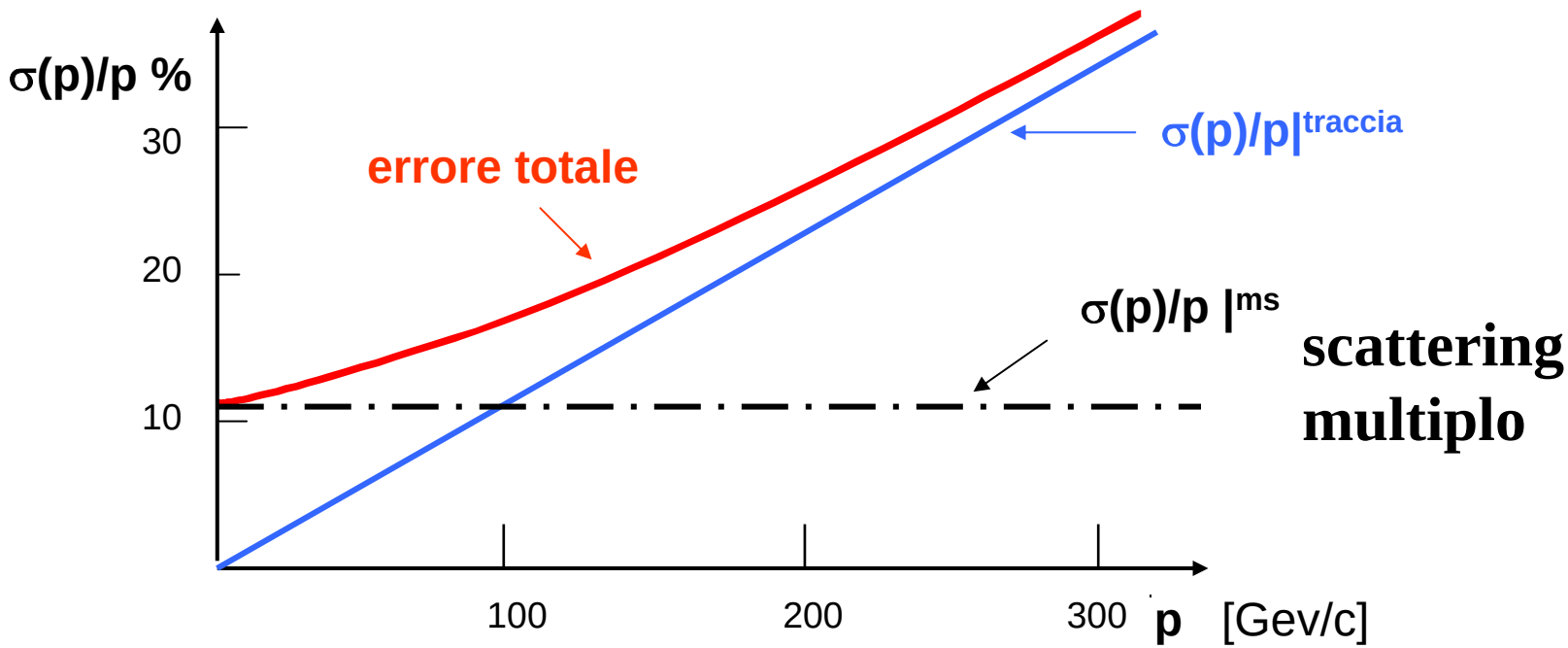
➔ scattering multiplo.

LA TRAIETTORIA NON E' RETTILINEA ANCHE IN ASSENZA DI CAMPO MAGNETICO

↓

lo scattering multiplo produce deviazioni impredicibili e produce incertezza nella misura del raggio di curvatura

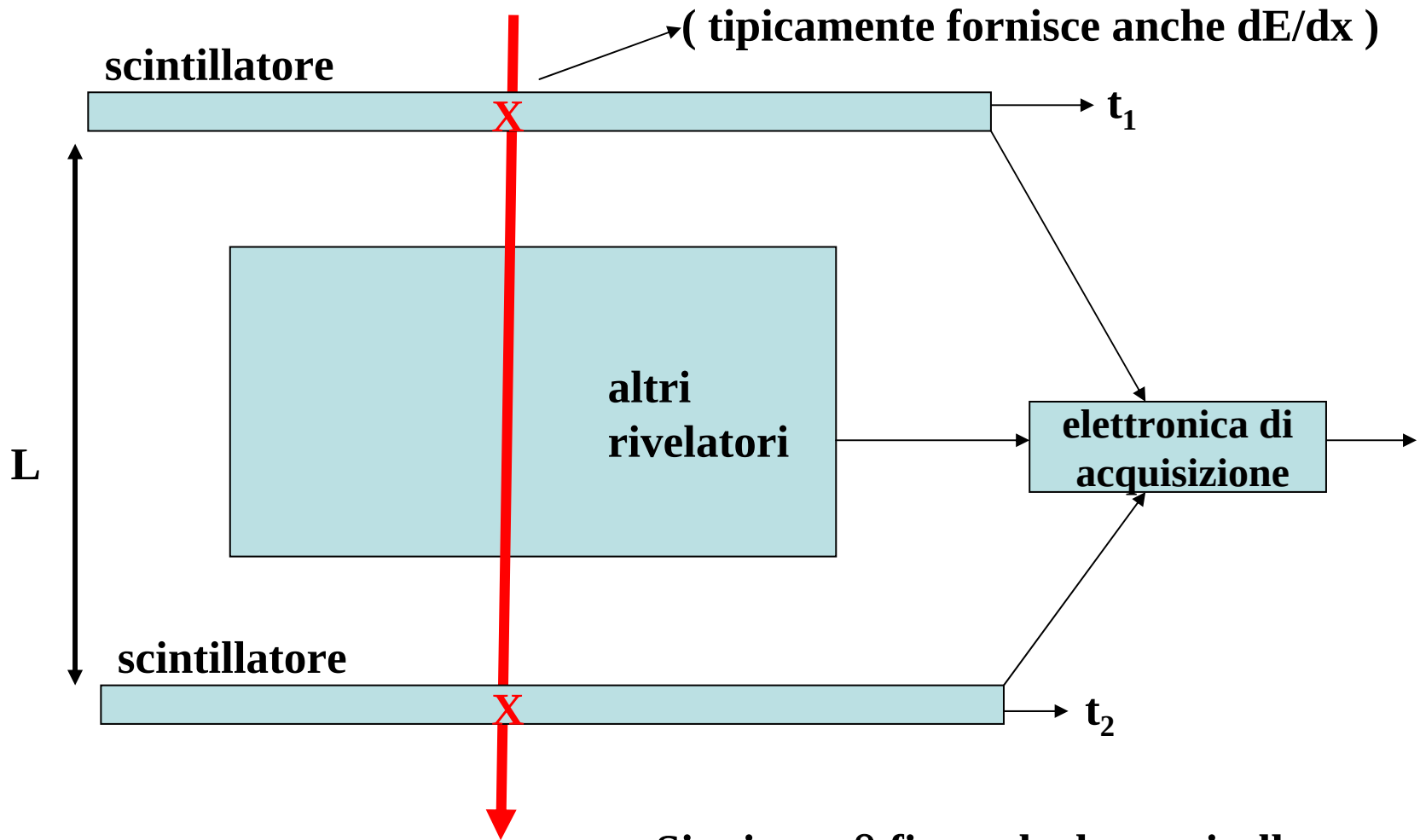
Misure d'impulso
risoluzione



TEMPI DI VOLO e 'TRIGGER'

la coincidenza di segnali tra due rivelatori veloci da il via all'acquisizione (trigger)

scintillatore (veloce, alta efficienza, senza spazi morti)



$\Delta t = t_1 - t_2 = L / \beta c$ → Si misura β finoa che la particella non e' relativistica $\beta \sim 1$, Δt = cost (tipicamente pochi nanosecondi)

La missione spaziale PAMELA

PAMELA

OBIETTIVI SCIENTIFICI :

- **Ricerca di antimateria nei raggi cosmici nel range di energia : 1 -300 GeV (antiprotoni, positroni, antinuclei)**

- **misura di flusso di protoni – nuclei .....**

- **raggi cosmici solari .....**

PAMELA ANTIPROTONI

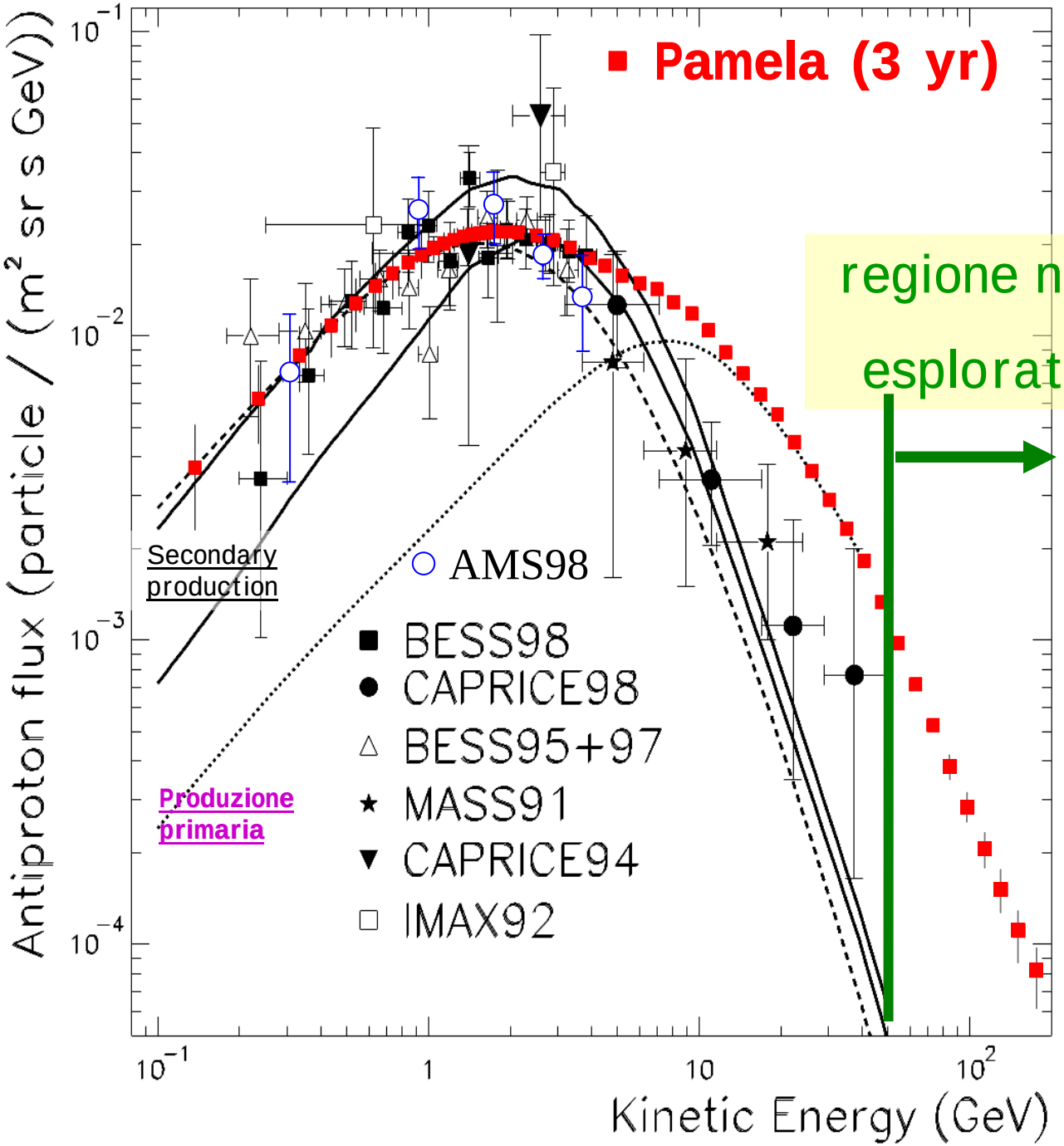
$\bar{p}$

Produzione secondaria:

Raggi Cosmici + materia interstellare

produzione primaria:

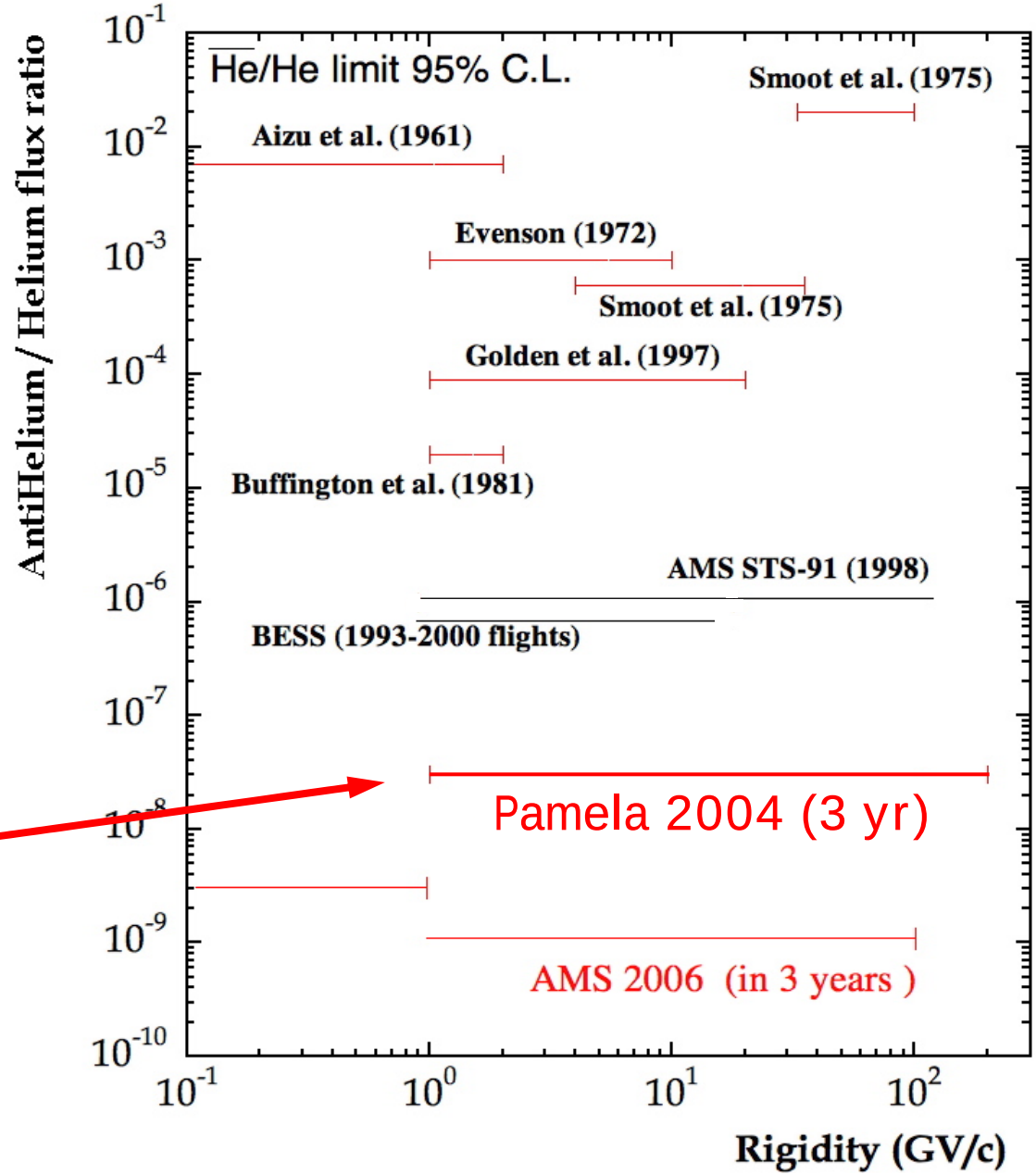
da annichilazione di materia oscura



Pamela ricerca antielio

Mai osservato antielio nei CR fino ad oggi

- Sensibilità migliore di 10^{-7} nel rapporto $\overline{He}$ / He



PAMELA

misura di antimateria nei raggi cosmici nel range di energia : 1-300 GeV

↓

- **Misurare fuori dall'atmosfera**
- **Riconocere Antiprotoni – Antinuclei dal resto dei RC (1 $\bar{p}$ su 10.000 p)**
- **Misurare l'energia (impulso) degli antiprotoni -antinuclei**

↓ **soluzione**

MOLTI RIVELATORI – MISURE RIDONDANTI

Misurare impulso, carica, perdita di energia, tempi di volo, riconoscimento sciami adronici - elettromagnetici

Expected Fluxes in 3 Years

Particle	Number (3 yrs)	Energy Range
Protons	3.10^8	80 MeV – 700 GeV
Antiprotons	$>3.10^4$	80 MeV – 190 GeV
Electrons	6.10^6	50 MeV – 2 TeV
Positrons	$>3.10^5$	50 MeV – 270 GeV
He	4.10^7	80 MeV/n – 700 GeV/n
Be	4.10^4	80 MeV/n – 700 GeV/n
C	4.10^5	80 MeV/n – 700 GeV/n
Antihelium Limit	7.10^{-8}	80 MeV/n – 30 GeV/n

- 'Semi-Polar' orbit (70^0) $\Rightarrow$ Low energy particles
- Wide energy range + 3 years mission $\Rightarrow$ Reliable measurements

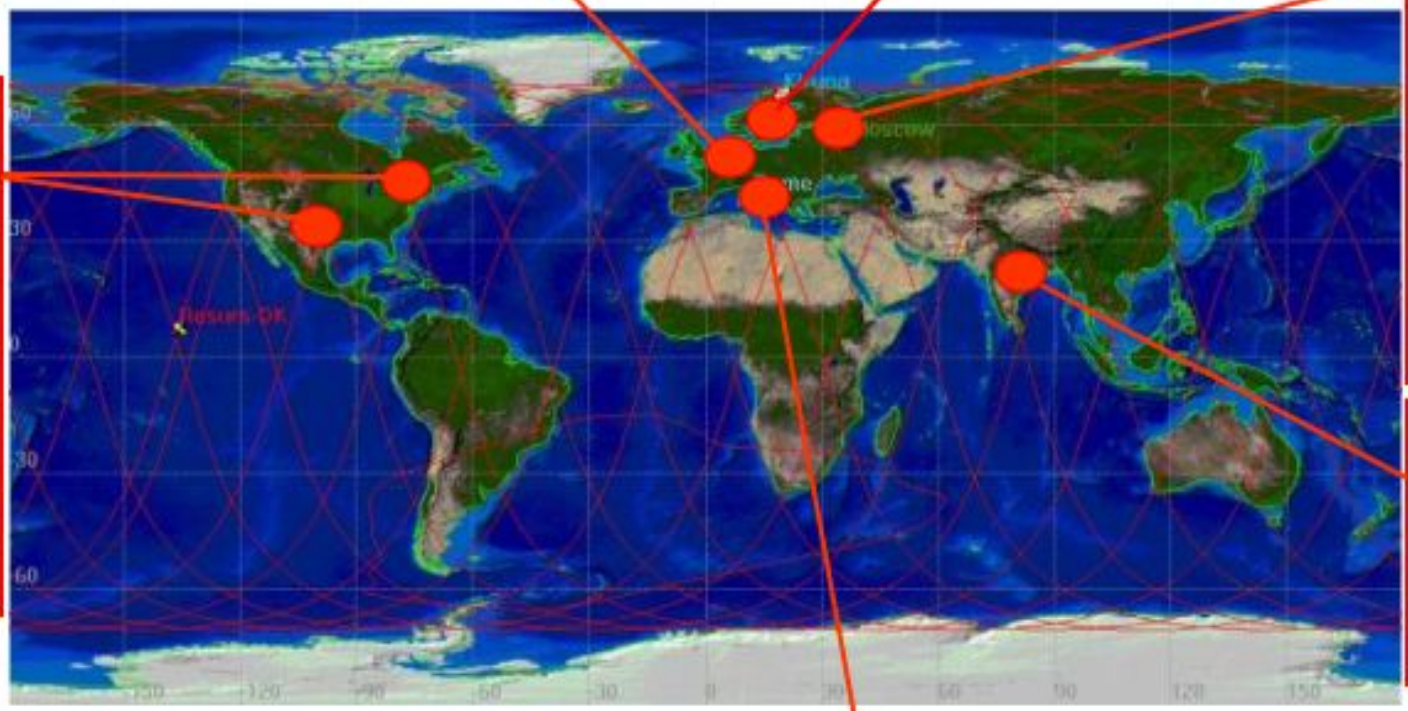
PRIMO PASSO : LA COLLABORAZIONE

Germany: Universität Gesamthochschule Siegen — Siegen

Sweden: Kungl Tekniska Högskolan — KTH, Stockholm

Russia:
Физический Институт
Ioffe Physico-Technical Institute
МИФИ
Moscow
St. Petersburg

USA:
NASA — GSFC
New Mexico State University — NMSU

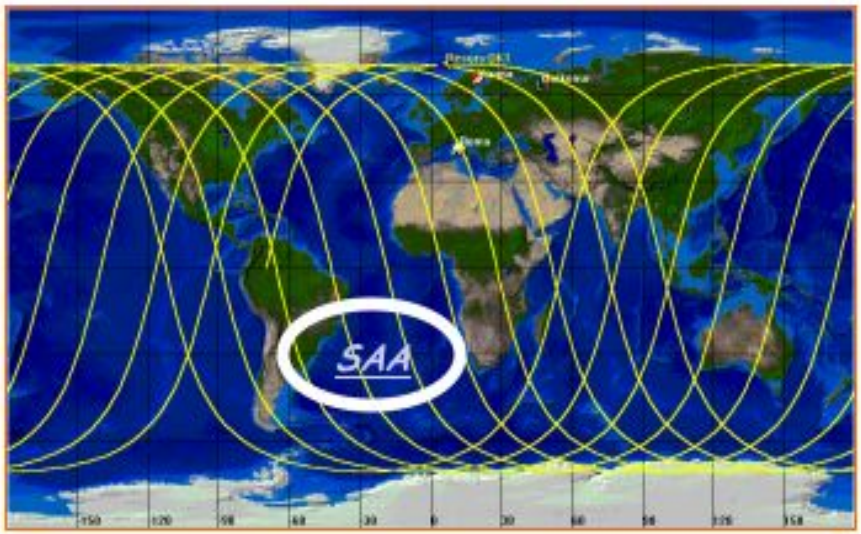


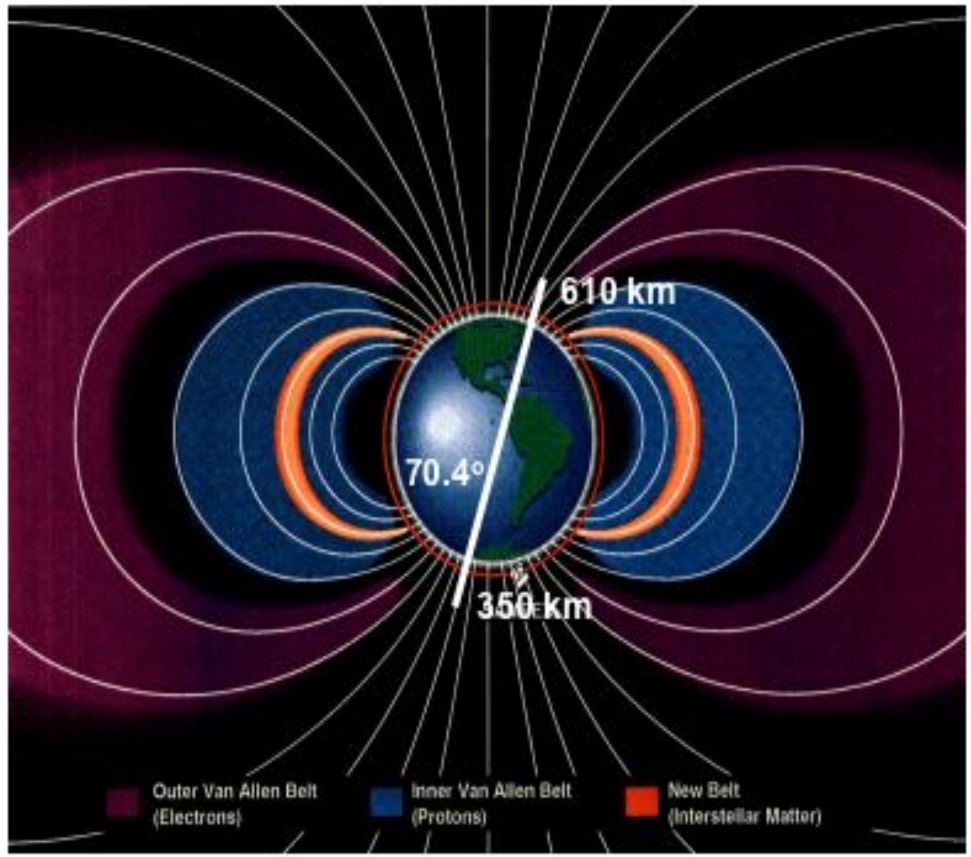
India: TIFR — Bombay

Italy: Bari, Florence, Frascati (LNF), Naples, Rome (Tor Vergata), Trieste, CNR, Florence (IFAC)

IL PASSAGGIO PER LO SPAZIO

SATELLITE RUSSO : REsurs DK1





- Low-earth elliptical orbit
- 350 – 610 km
- Quasi-polar (70.4° inclination)
- Lifetime >3 years (assisted)
- Electronics receive ~3 krad (qualify commercial parts)

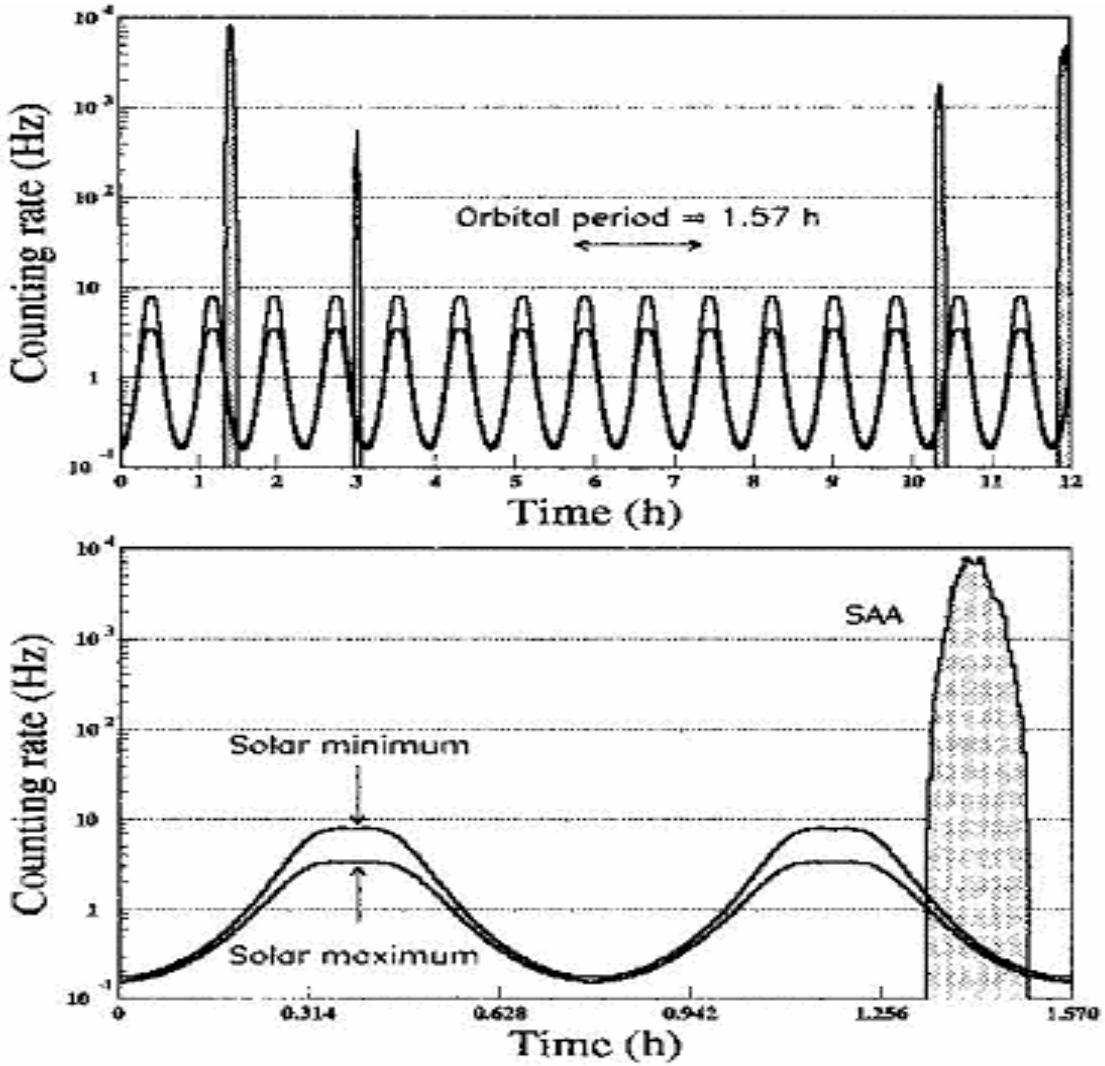
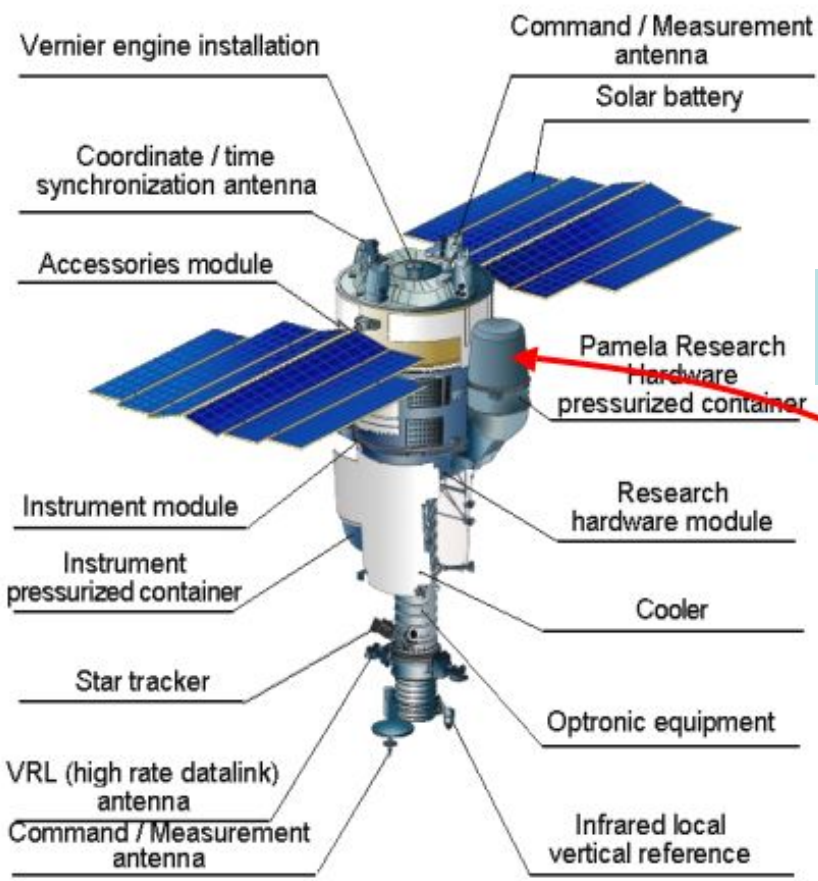


Fig. 2. *The expected trigger rate of the experiment during a 12 hour period* (above) *and during an orbit* (below). *The passage in the South Atlantic Anomaly, where the flux of particles is several orders of magnitude larger, and the anticorrelation of the cosmic particles flux with the solar activity cycle are clearly visible.*

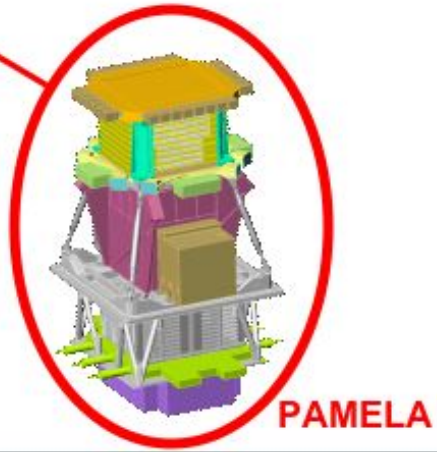
PAMELA

IL PASSAGGIO PER LO SPAZIO

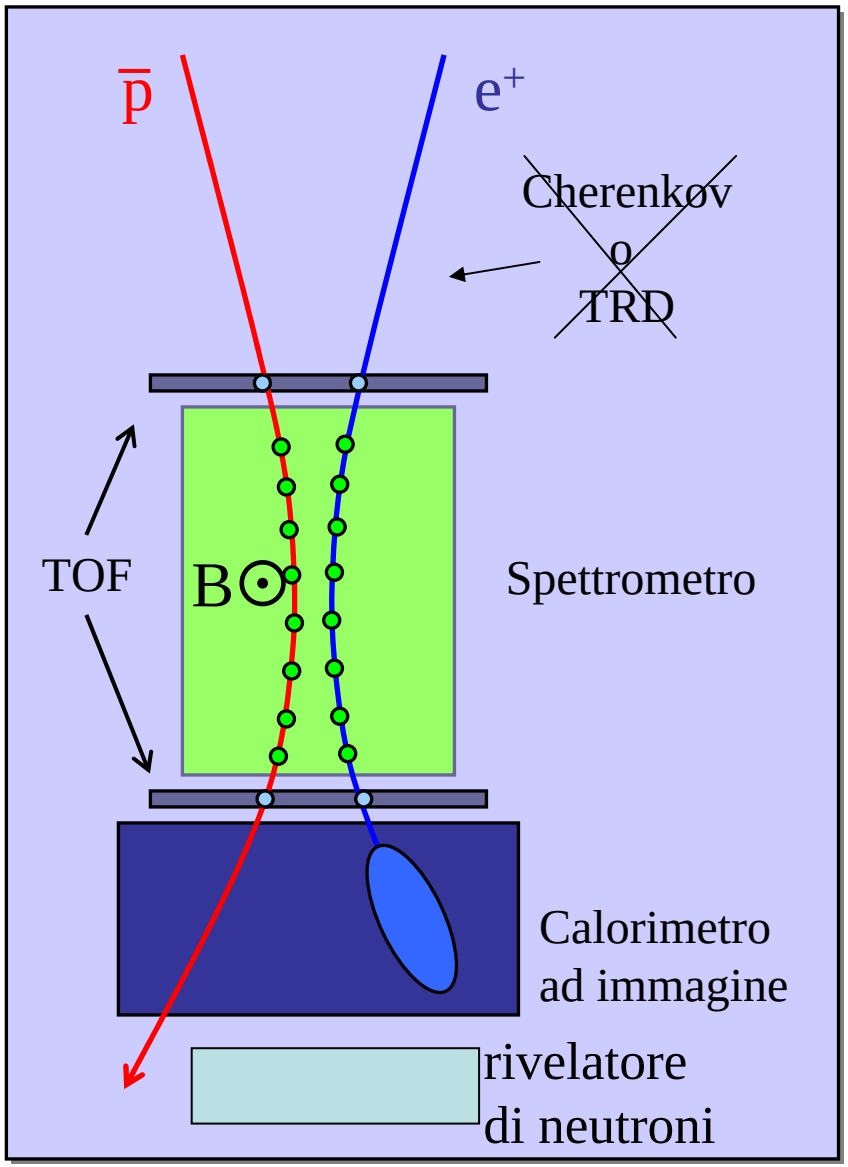
The Satellite: Resurs DK1



- Total mass = 400kg / 350W power budget
- Dedicated telemetry down-link (4/10 Gbyte per day)

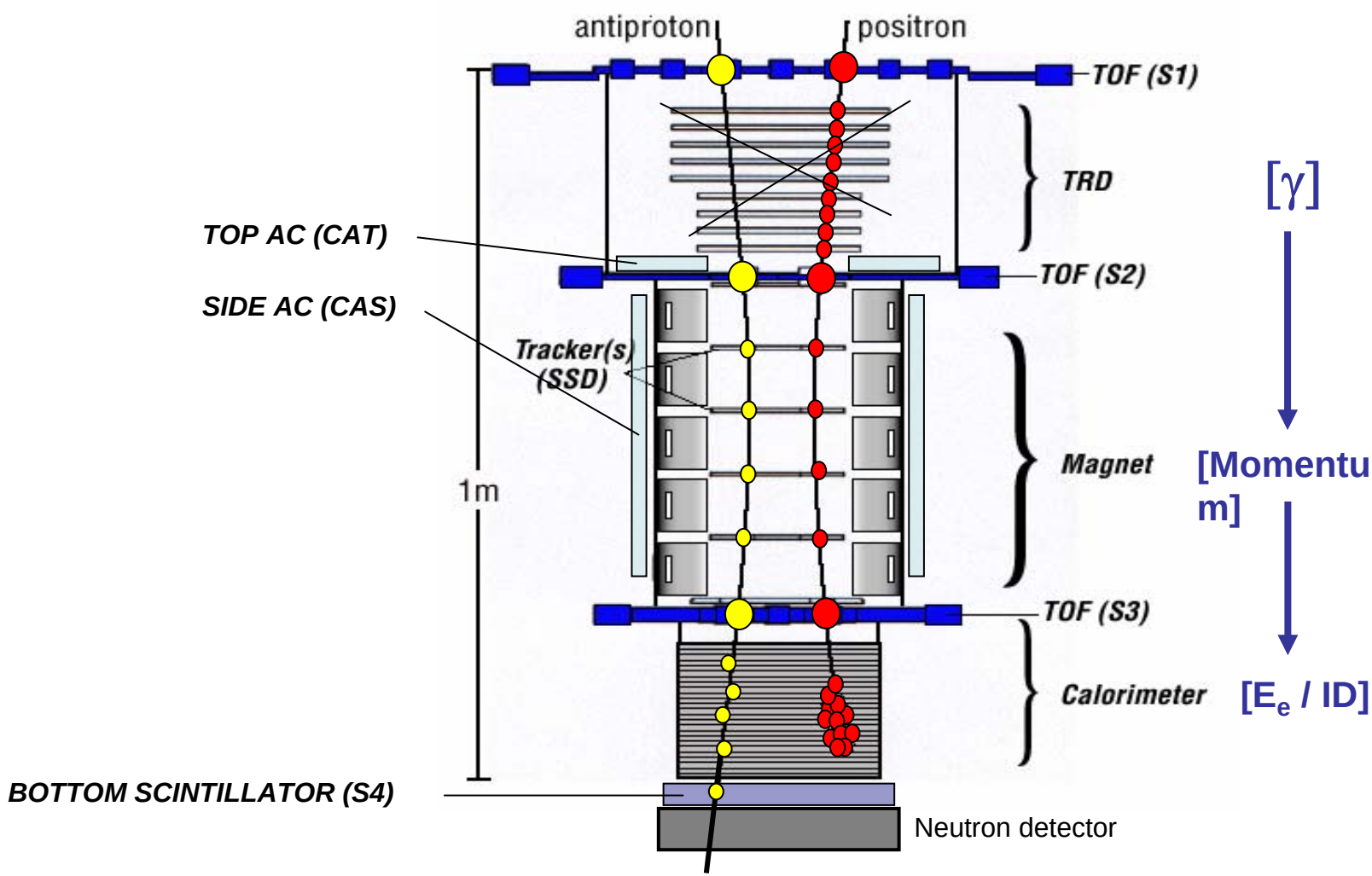


PAMELA :Metodo di misura

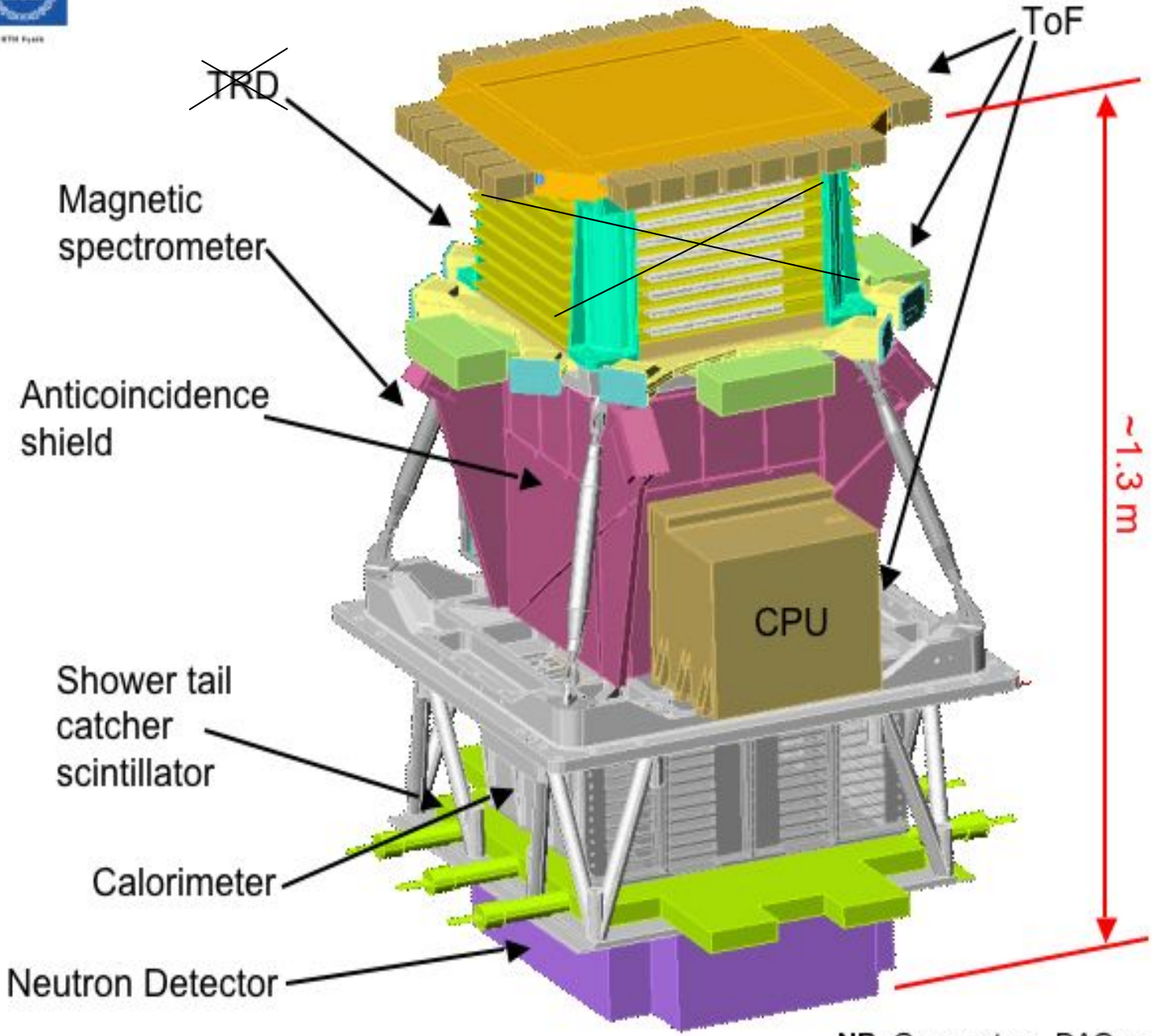


- Spettrometro magnetico
  - Segno della carica (e^+/e^-, $\bar{p}/p$) (materia – antimateria)
  - Rigidità magnetica R=p/Ze
- Apparati per l'identificazione
  - TOF (β)
    - Selezione di carica (dE/dx)
    - Identificazione (β vs R)
    - Reiezione albedo
  - ~~Cherenkov o TRD~~
    - ~~Identificazione (β vs R)~~
  - Calorimetro elettromagnetico a immagine
    - Identificazione (topologia interazione) Riconoscimento e^- $\bar{p}^-$!!!!!!!

PAMELA


antiproton
positron
TOF (S1)
TRD
TOP AC (CAT)
TOF (S2)
SIDE AC (CAS)
Tracker(s)
(SSD)
Magnet
1m
TOF (S3)
Calorimeter
BOTTOM SCINTILLATOR (S4)
Neutron detector
[γ]
[Momentum]
[E_e / ID]

PAMELA



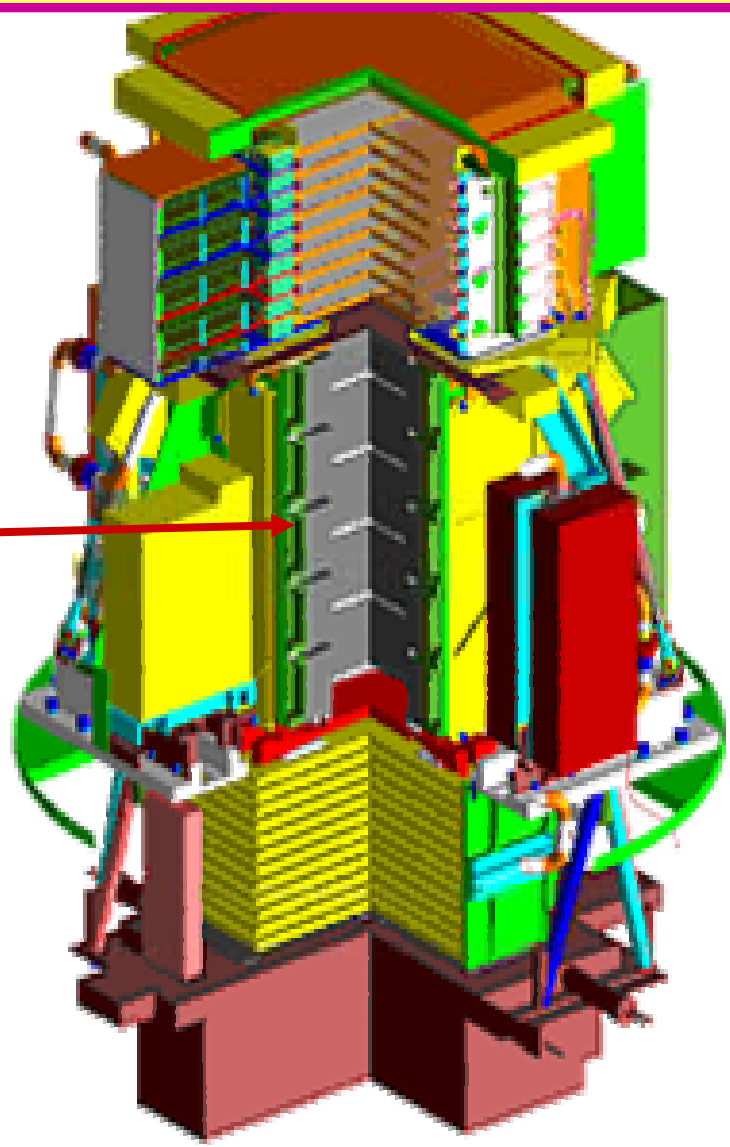
450 kg

360 W

NB: Gas system, DAQ, power supplies, ... not shown!

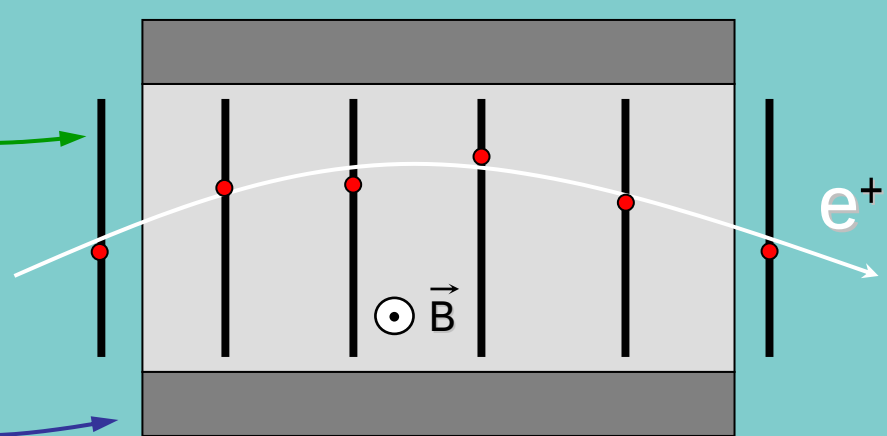
I sottorivelatori di PAMELA

LO SPETTROMETRO MAGNETICO



LO SPETTROMETRO MAGNETICO
6 piani di rivelatore di posizione a semiconduttore

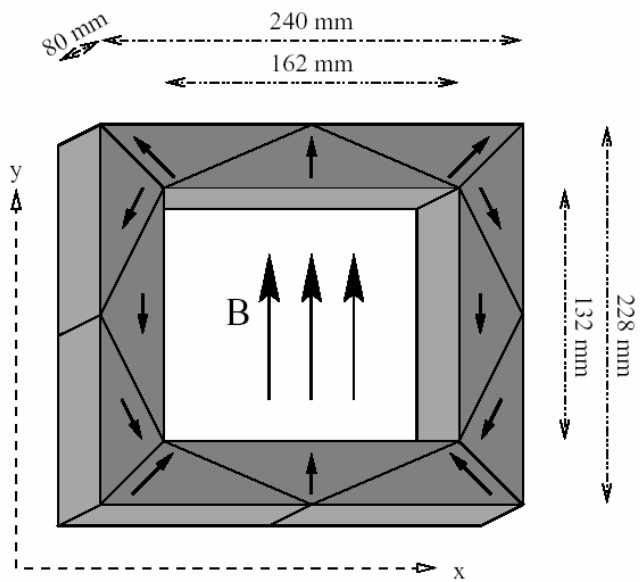
- **Magnetic System**
  - **It produces an intense magnetic field region where charged particles follow curved trajectories**
- **Tracking System**
  - **It allows to determine six points in the high field region to reconstruct the particle trajectory and so its <u>momentum</u> and <u>charge sign</u>**

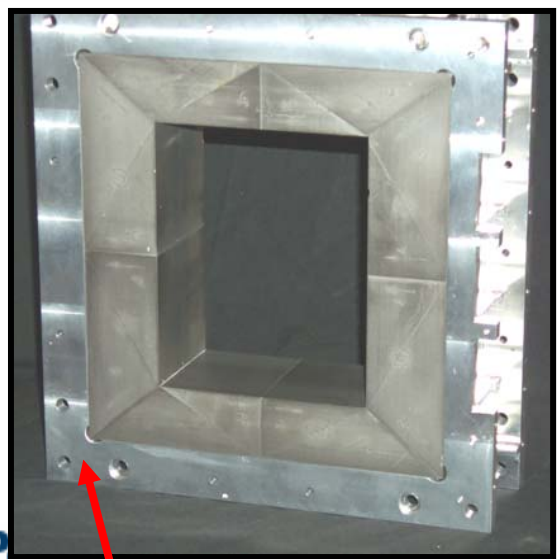


- Momentum $\mathbf{p} = m\gamma\mathbf{v}$
- Charge sign (e^+/e^-) ($\bar{p}/p$)
  - If **B** uniform and perpendicular to **p**, then

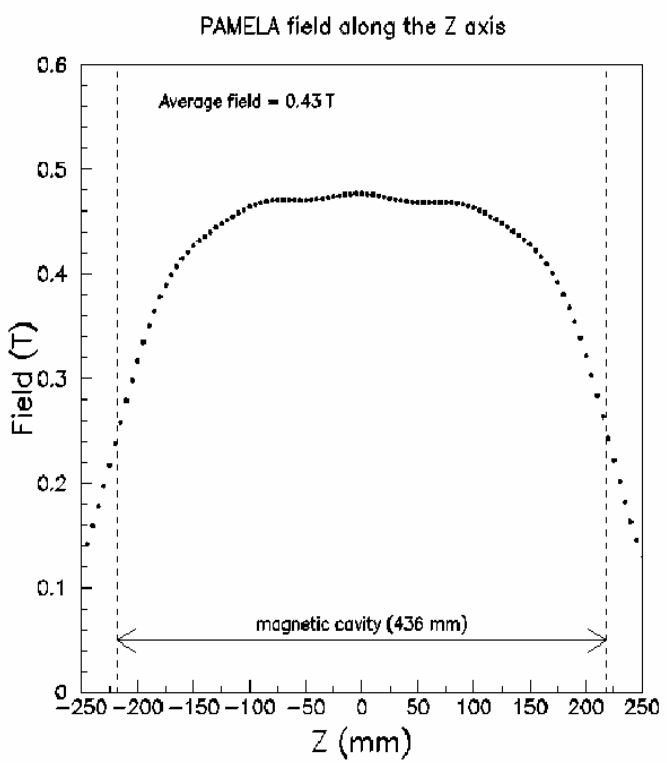
$$p = qBr$$

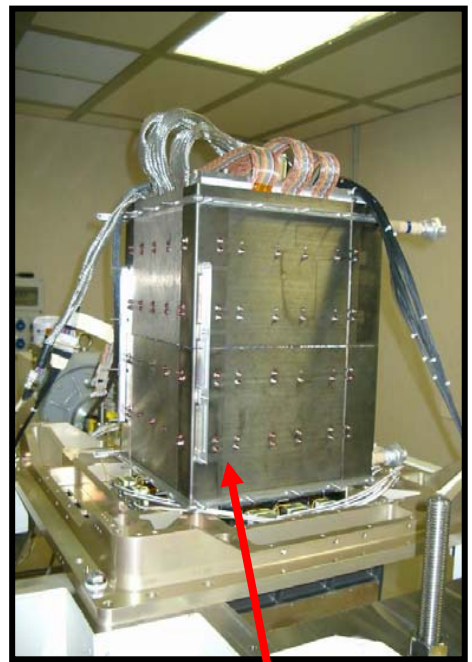
Lo Spettrometro: Il magnete





Support canister





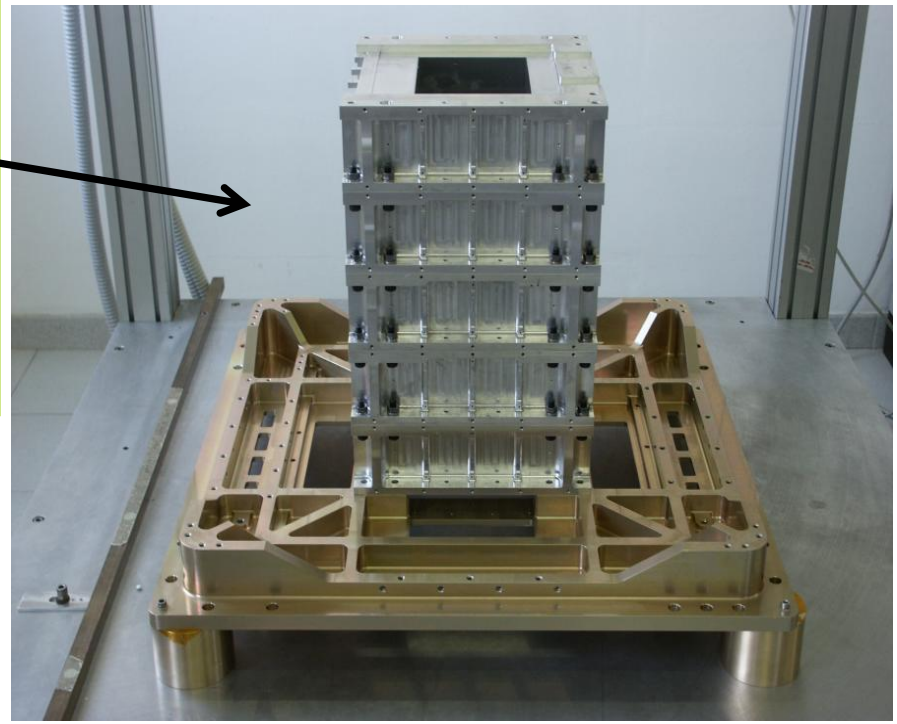
Ferromagnetic shielding

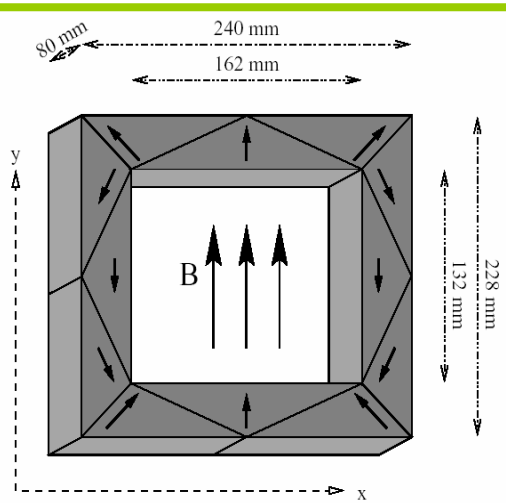
Lo Spettrometro: Il magnete

Permanent magnet:

- Made of 5 Blocks of Nd-B-Fe Alloy
- 0.48 T in internal cavity
- Height x A = 44.5cm x 13x16cm^2

  → Geometric factor: 20.5 cm^2 sr



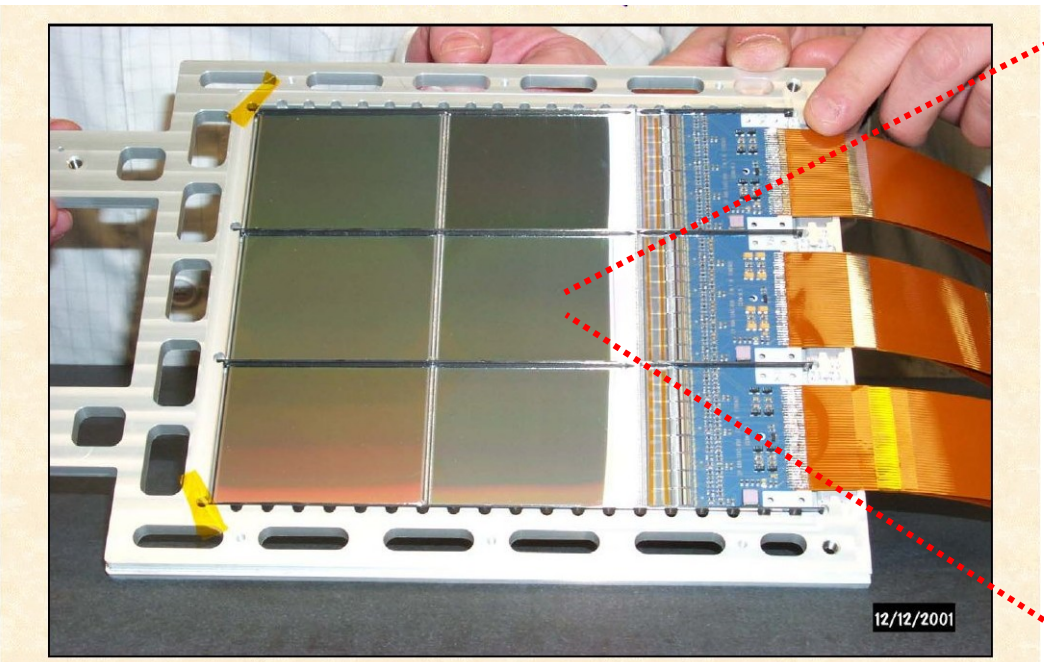


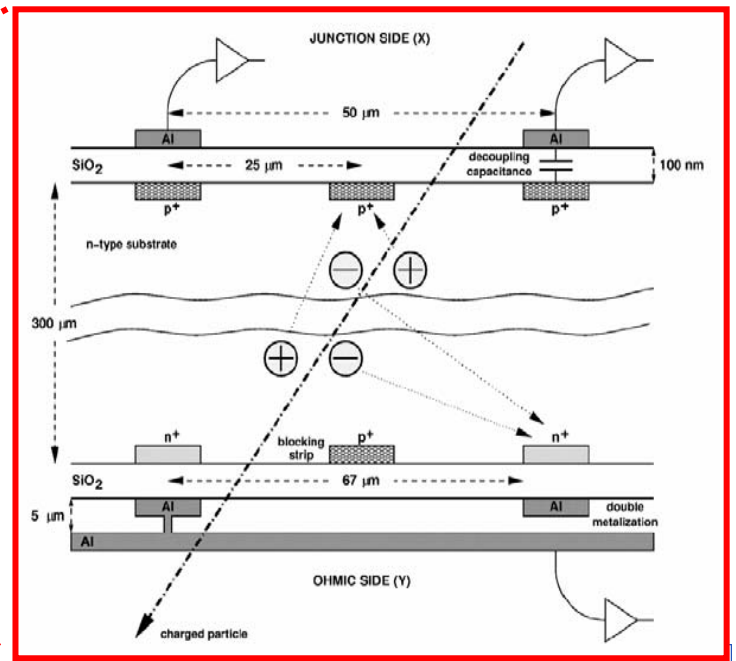
I piani di silicio

Double-sided silicon microstrips (300 μm thick):

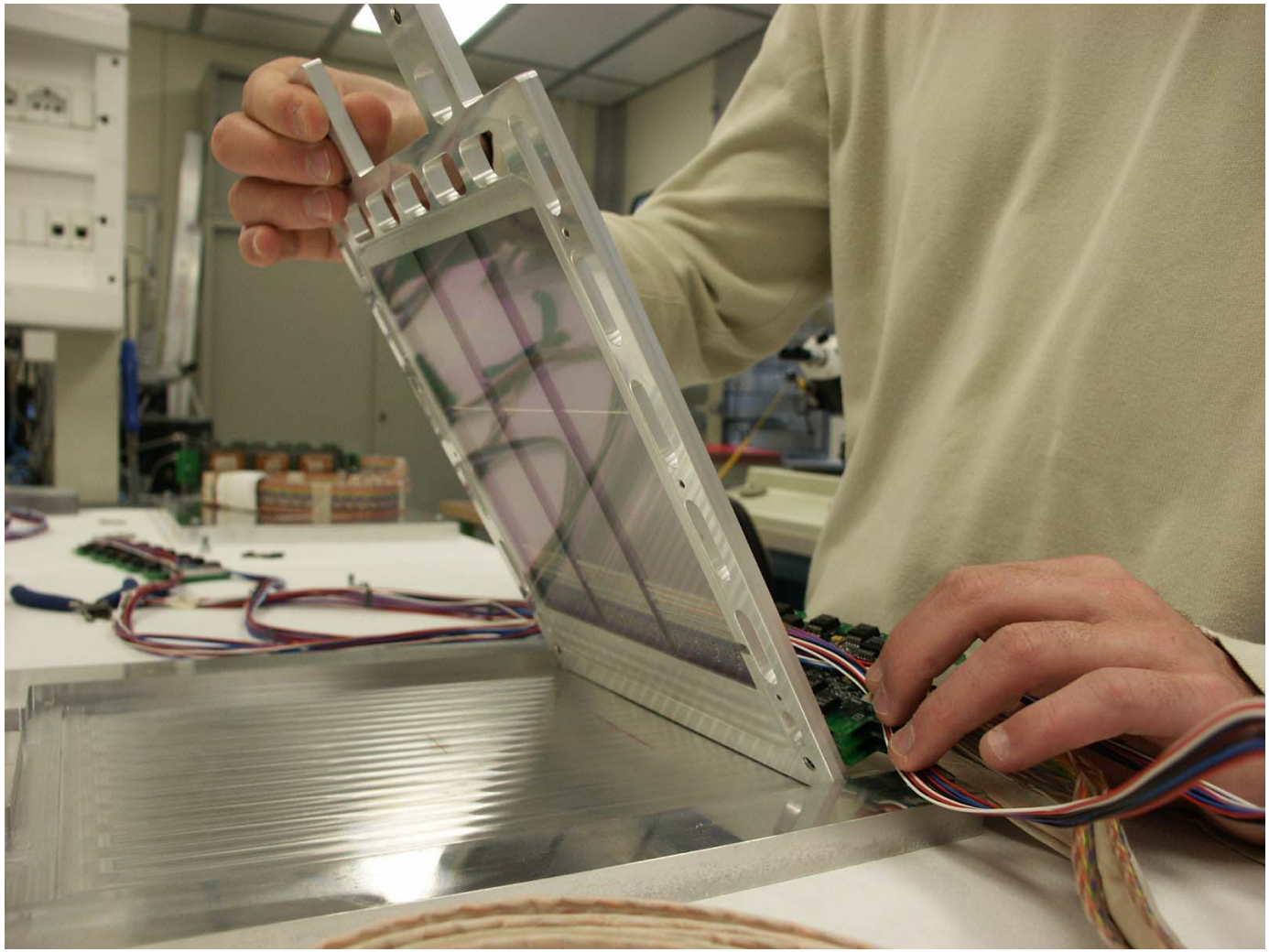
- 25 μm implantation pitch (junction side) / 67 μm (ohmic side)
- Strips mutually orthogonal on opposite sides
- Readout pitch 50 μm

[Bending]

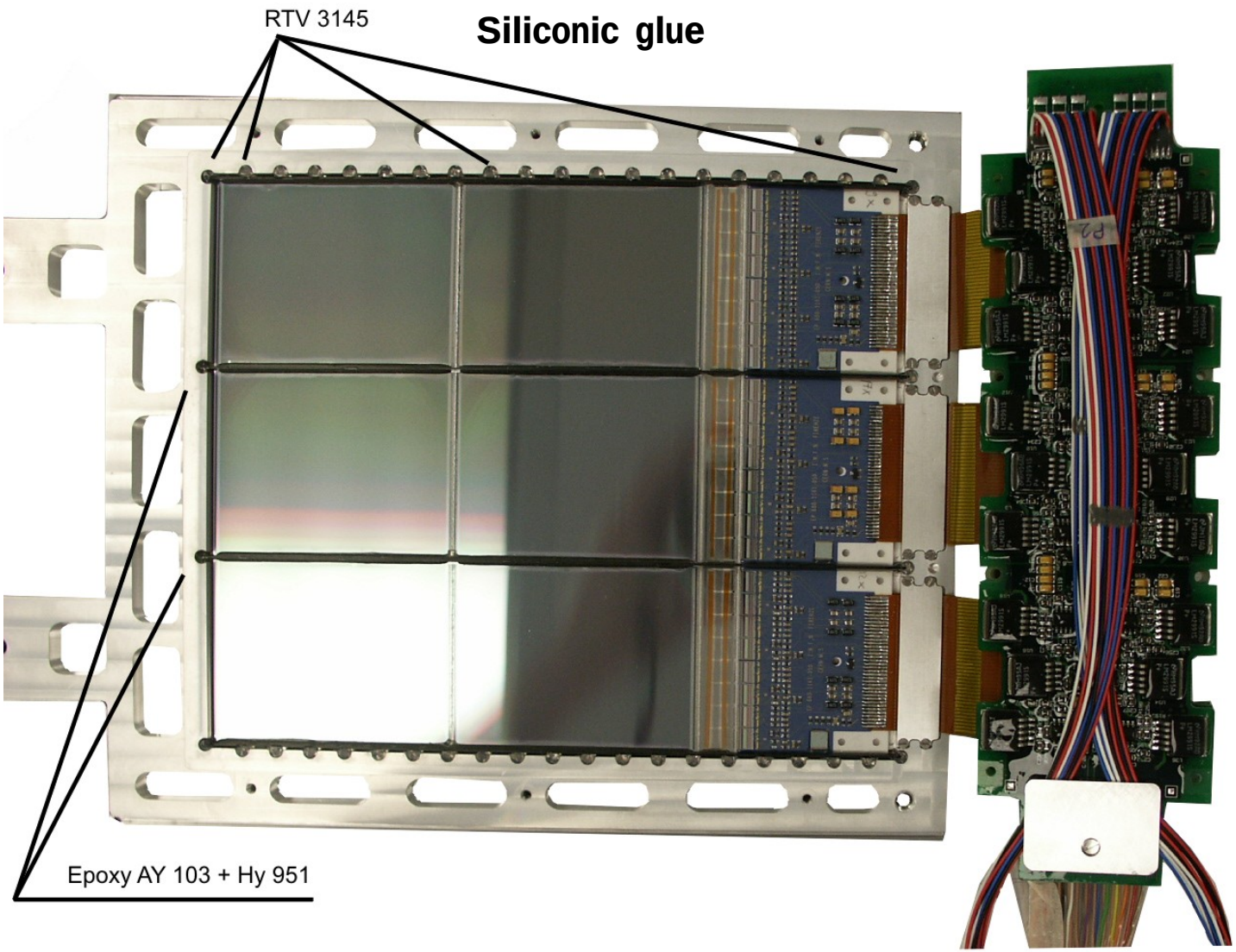




[Non-bending]



Siliconic glue



LO SPETTROMETRO : il tracciatore a silicio

- 6 Floors of Double Sided Si-MicroStripDet.
- R/O pitch 50 μm in X/Y, d=300 μm.
- X-Strip: 25 μm implantation pitch / junction
- Y-Strip: 67 μm pitch / ohmic side

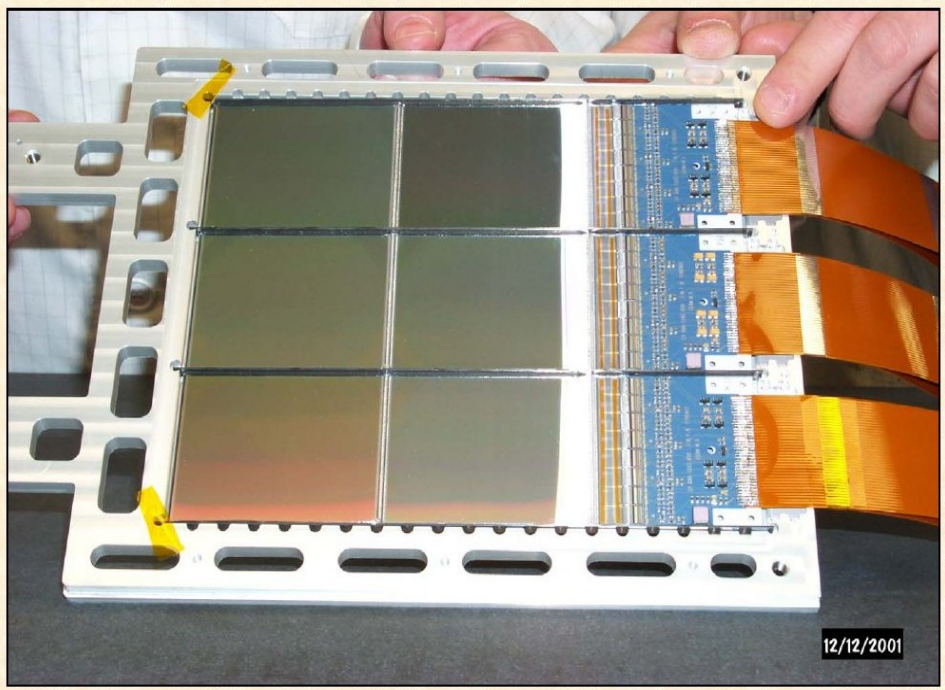
- 36864 R/O Channels
- VLSI-VA1 Chip
- 55 W total

Resolution :

- 3 μm in bending view X
- 10 μm in Y

→ Max.Ridigity ~740 GV

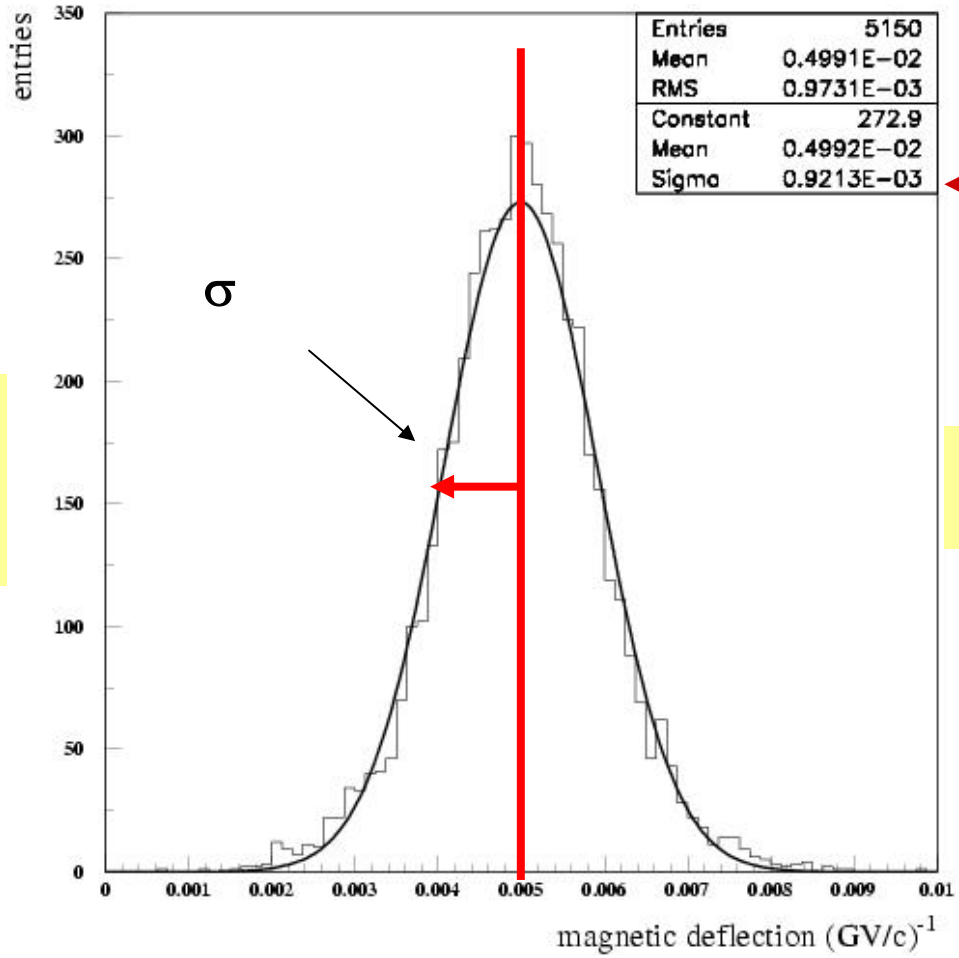
→ $\bar{p}$ separation up to 190 GeV (p-spillover)



The test plane electronics lodging on the magnetic system

Risoluzione dello spettrometro: test

SPS Test Beam Data:
p 200 GeV/c



MDR ≅ 1080 GV

x (bending) resolution = 2.7μm
y (bending) resolution = 12μm

SPETTROMETRO : PRESTAZIONI

RISOLUZIONE IN IMPULSO (ENERGIA) PER PROTONI :

$\Delta p/p$ ~ 5 % per p=10 GeV

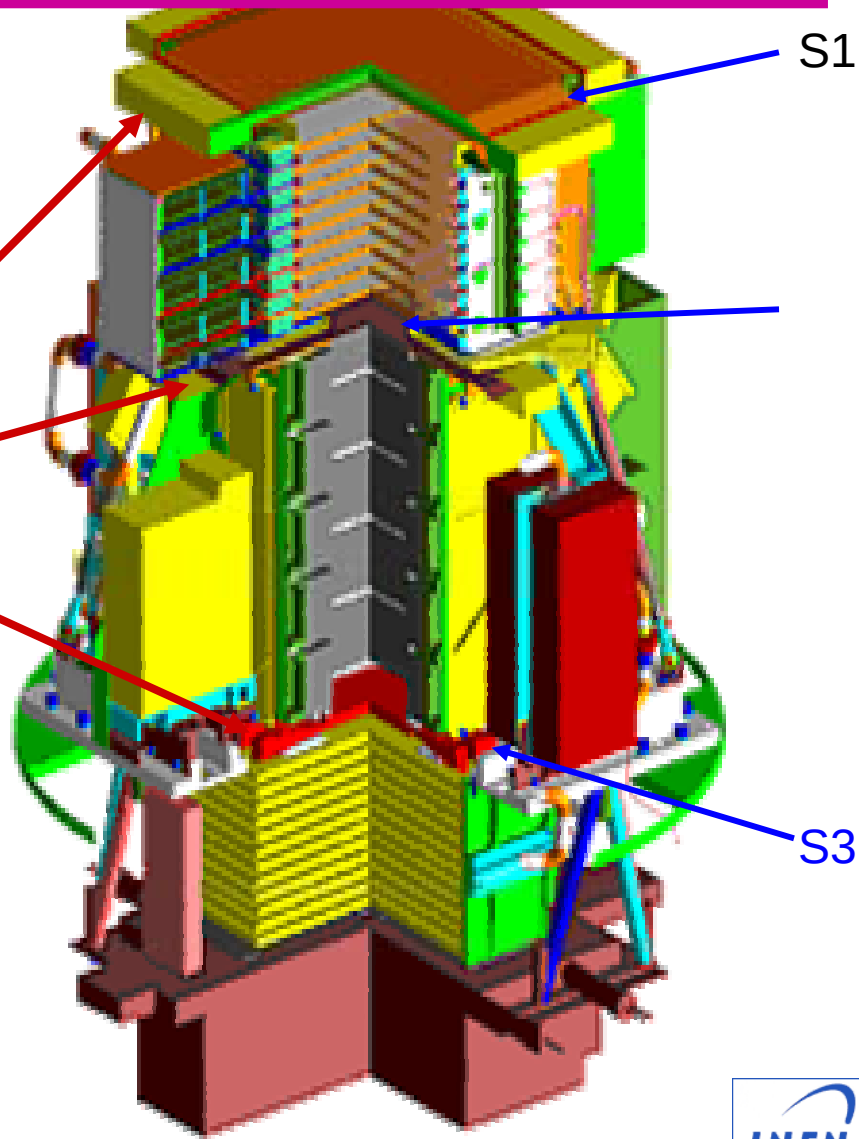
$\Delta p/p$ ~ 15 % per p=100 GeV

$\Delta p/p$ ~ 30 % per p=200 GeV

Cio' che limita le prestazioni e' il riconocimento del segno della carica. Per E>300 GeV il riconoscimento del segno della carica non e' piu' affidabile (1 antiprotone su 10000 protoni). La probabilità che un protone sia ricostrutito erroneamente dal sistema come se fosse un protone e' troppo alta sopra questa energia.

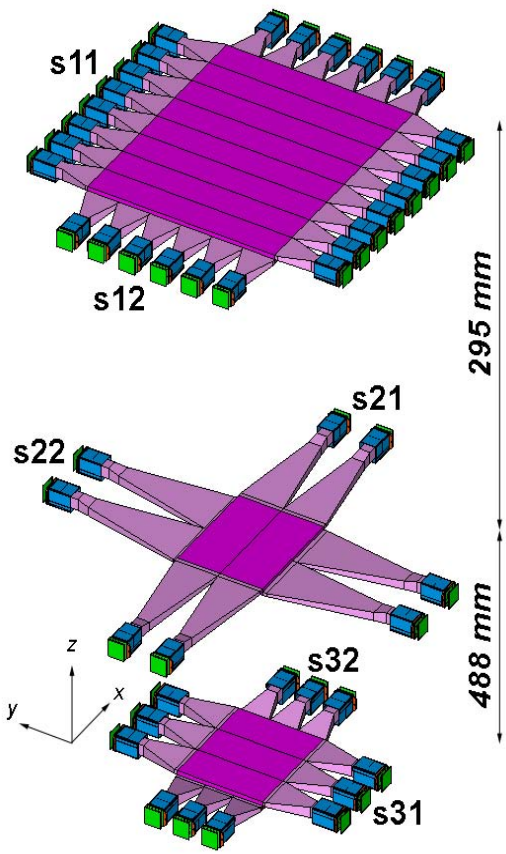
I sottorivelatori di PAMELA

IL SISTEMA
PER I TEMPI DI VOLO
(TOF)



IL TOF (tempi di volo)

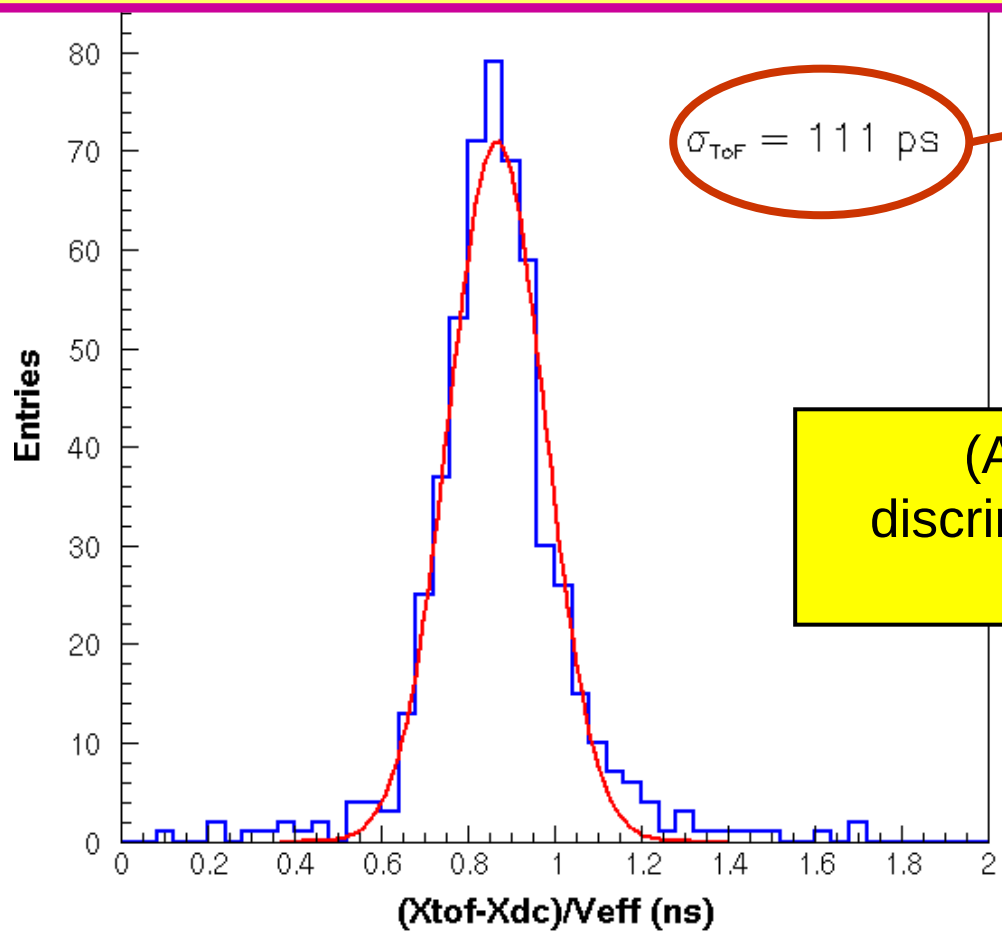
- 3 Planes of Plastic Scintillators S1, S2, S3
  Each Hodoscope Plane with 2 crossed Layers, segmented in X-/ Y-Strips
- Total: 48 Channels - Ham. PMT R5900
- $\sigma_{TOF} \sim 110$ps



Used for :

- **TRIGGER**: crossing particles
- **TOF**: ParticleID and for Albedo rejection (upward)
- **dE/dx** measurements

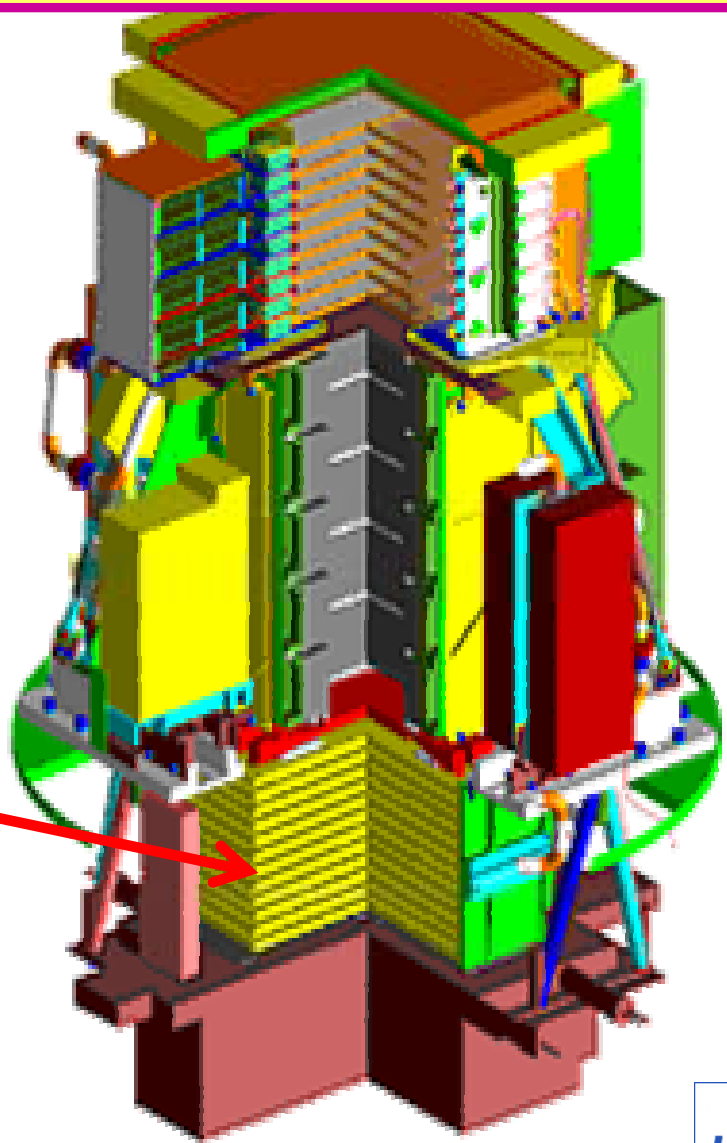
ToF Performance



(Anti)proton/electron discrimination possible up to ~ 1.5 GeV/*c*

I sottorivelatori di PAMELA

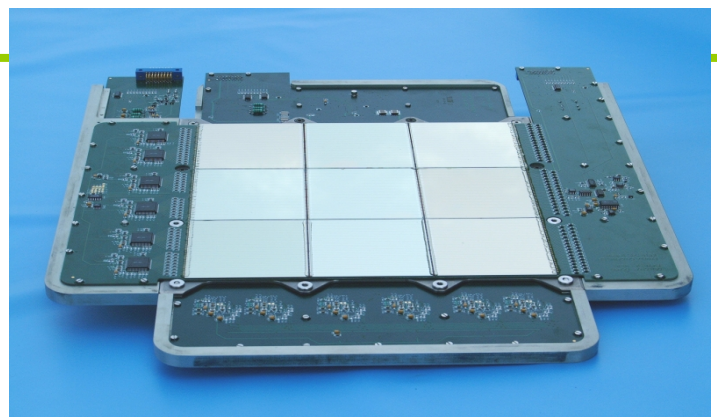
IL CALORIMETRO AD IMMAGINE

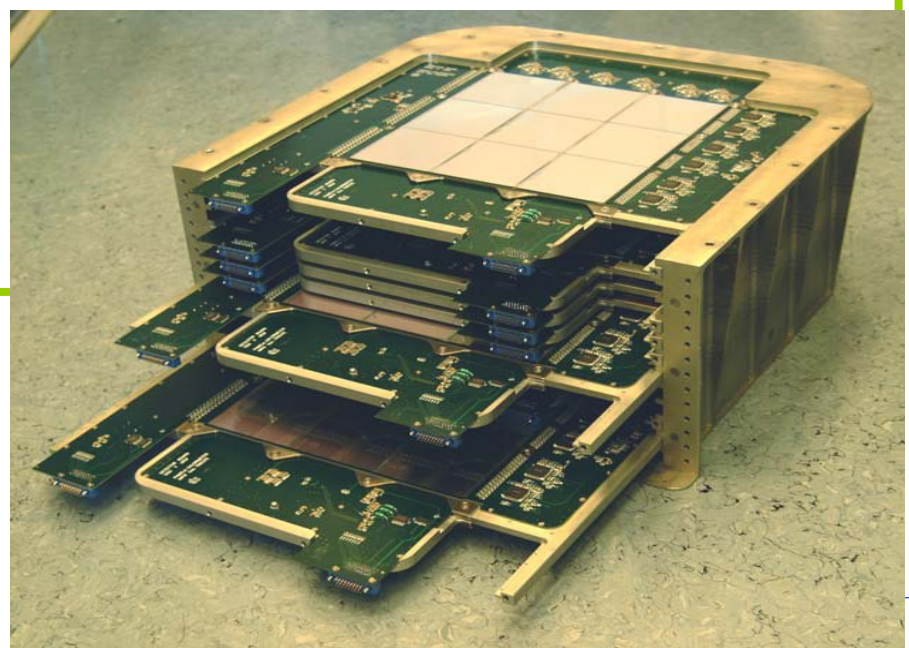


Il calorimetro ad immagine

- **22 planes of Tungsten (2.6mm) + Si-X/Si-Y MacroStripDet:**
  2.4mm pitch on 24cm long strips, A_{plane} = 24x24 cm^2
- **16.3 Rad.Length, 0.6 IntLength**
- Total: 4224 channels,

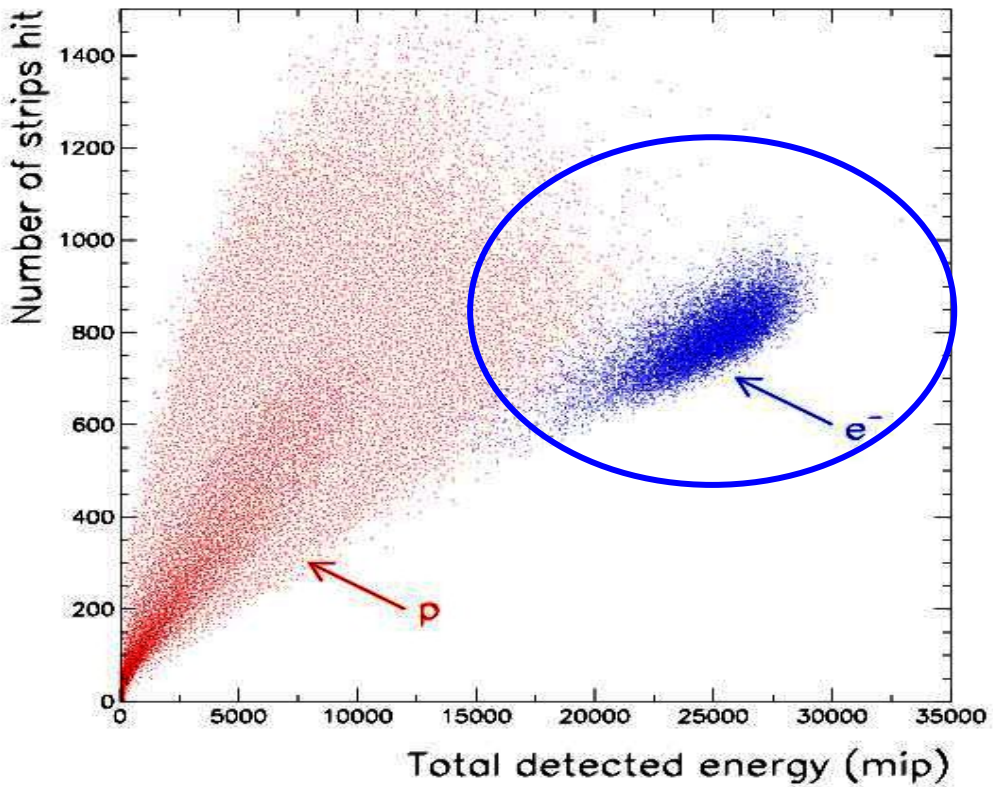
Contenimento sciami e^- 16 x_0





IL CALORIMETRO : SEPARAZIONE ELETTRONI PROTONI

SPS Test Beam Data:
p & e^-
200 GeV/c



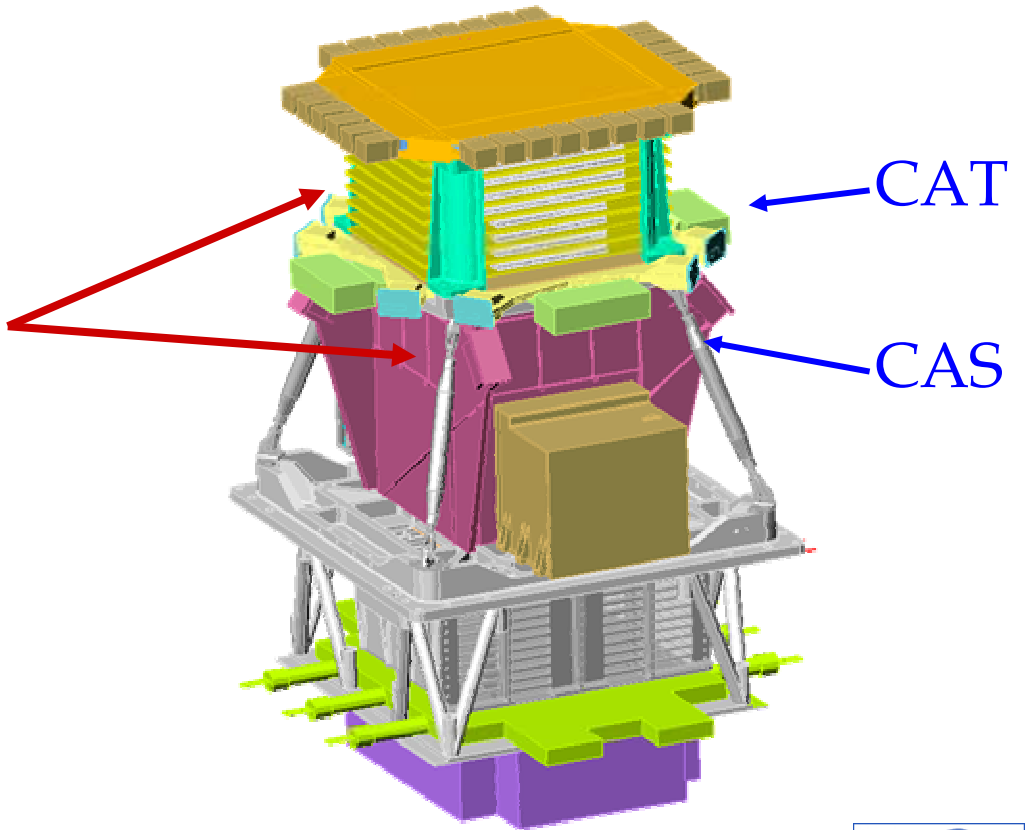
Proton rejection factor ≅ $3 \cdot 10^4$

Electron selection efficiency ≅ 95%

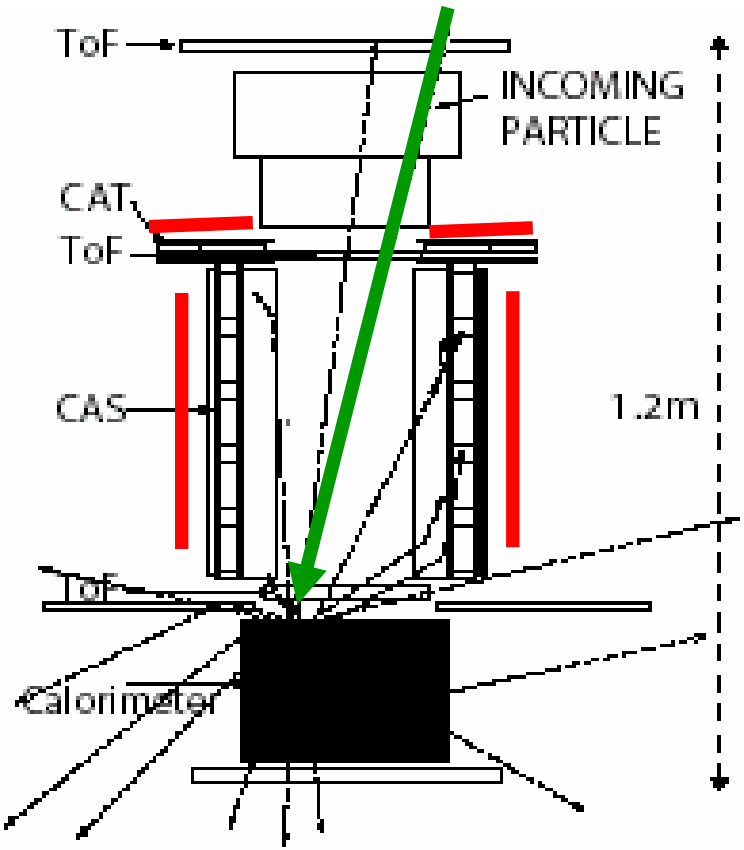
risoluzione in energia per elettroni 5% a 200 GeV

I sottorivelatori di PAMELA

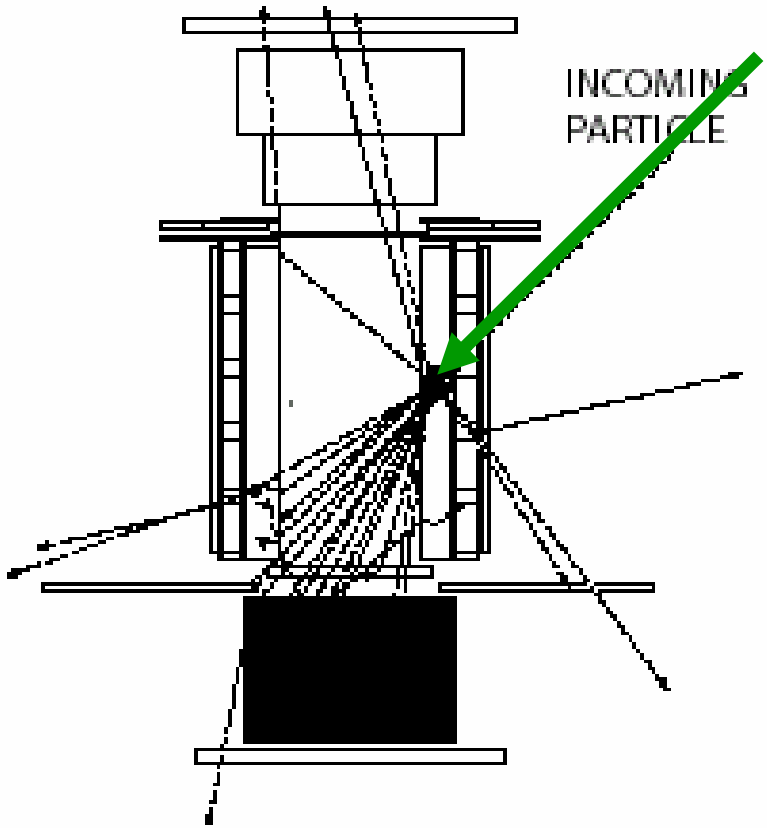
Il sistema di anticoincidenze



SISTEMA DI ANTICOINCIDENZE

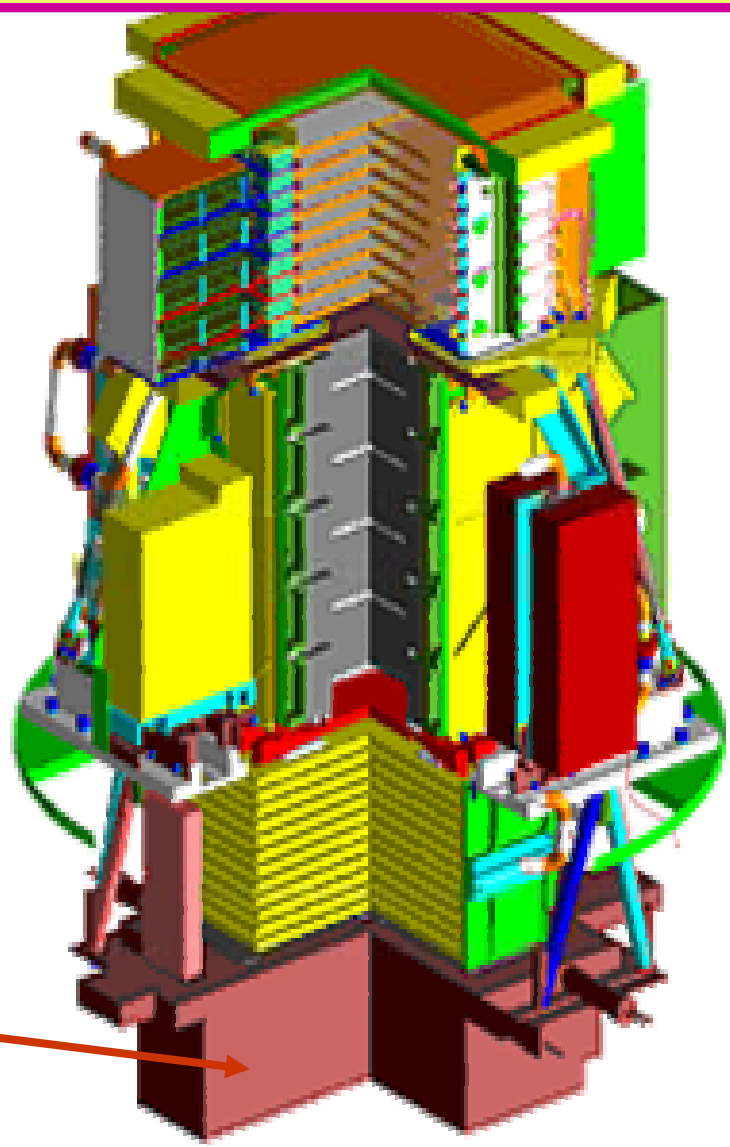


GOOD EVENT



BG Event – rejected

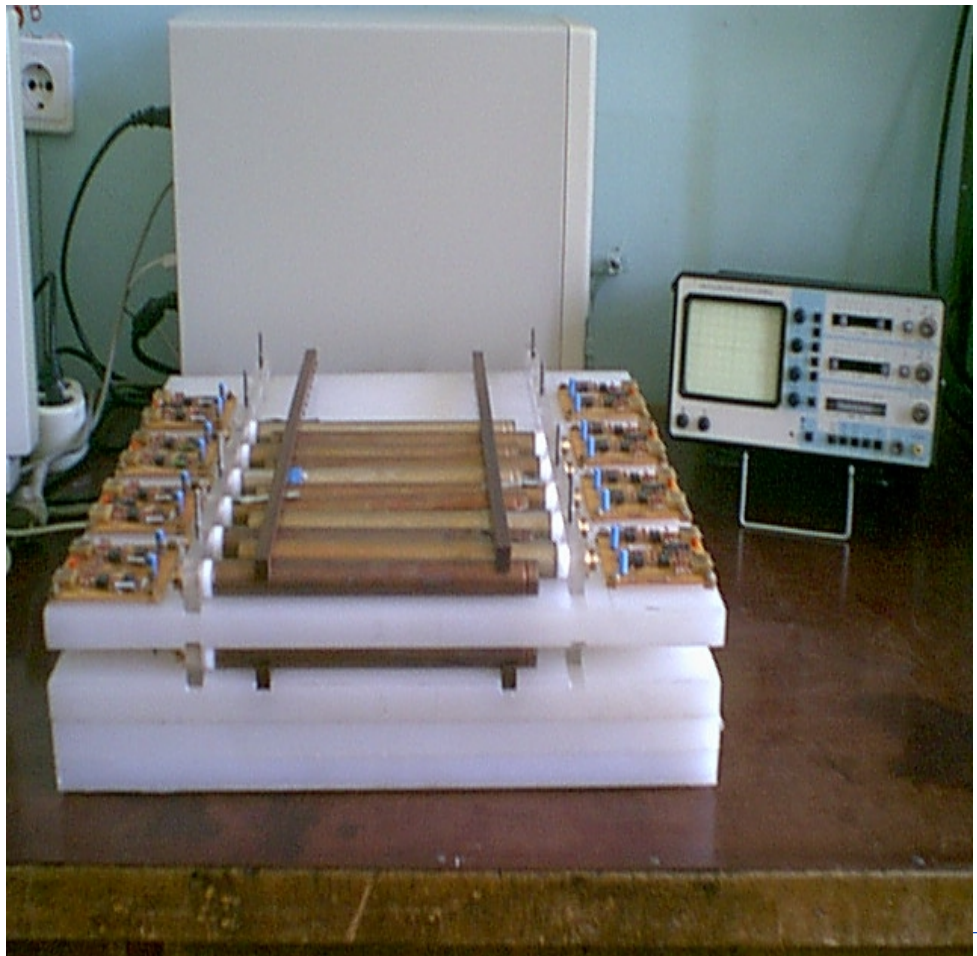
I sottorivelatori di PAMELA



IL RIVELATORE DI NEUTRONI

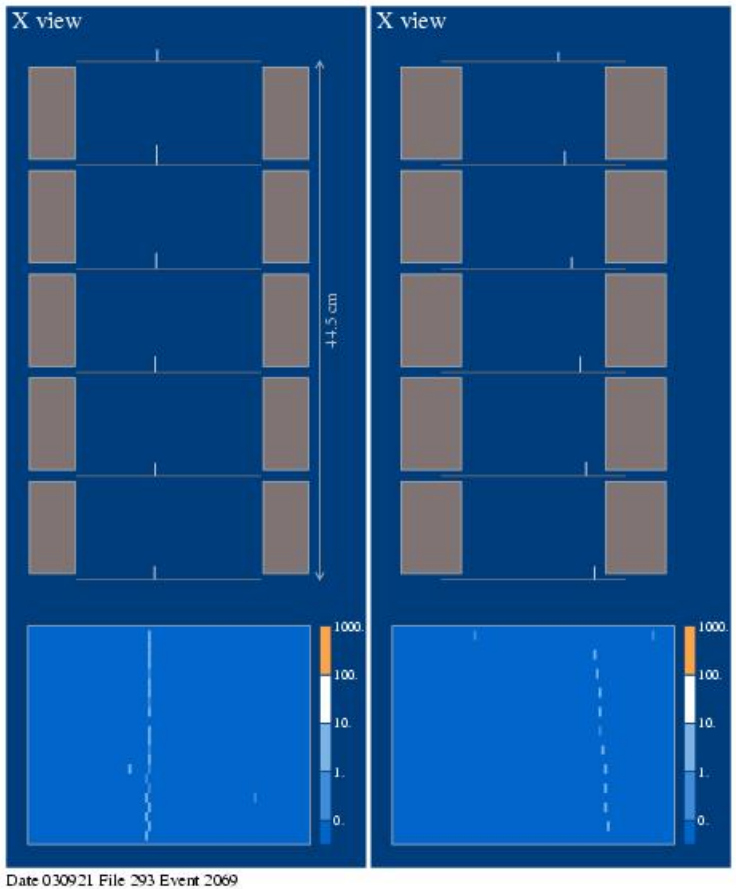
Il rivelatore di neutroni

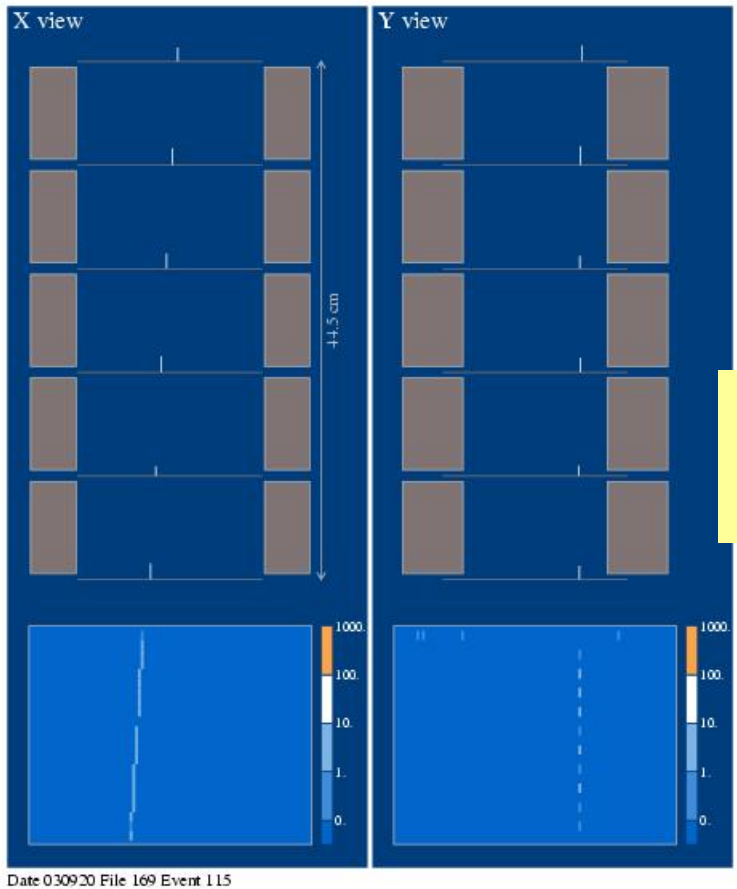
- 36 proportional counters filled with ^3He
- The counters are stacked in two planes of 18 counters each, oriented along the y-axis of the instrument.
- Size 600×550×150 mm^3



Spettrometro + Calorimetro

SPS Test Beam Data: p 50 GeV/c

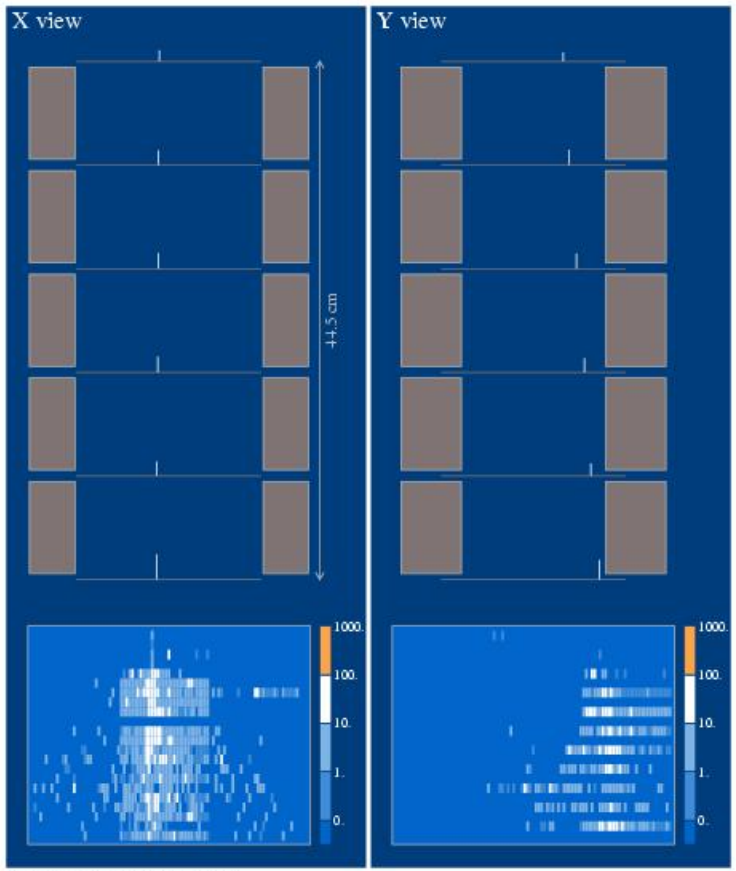


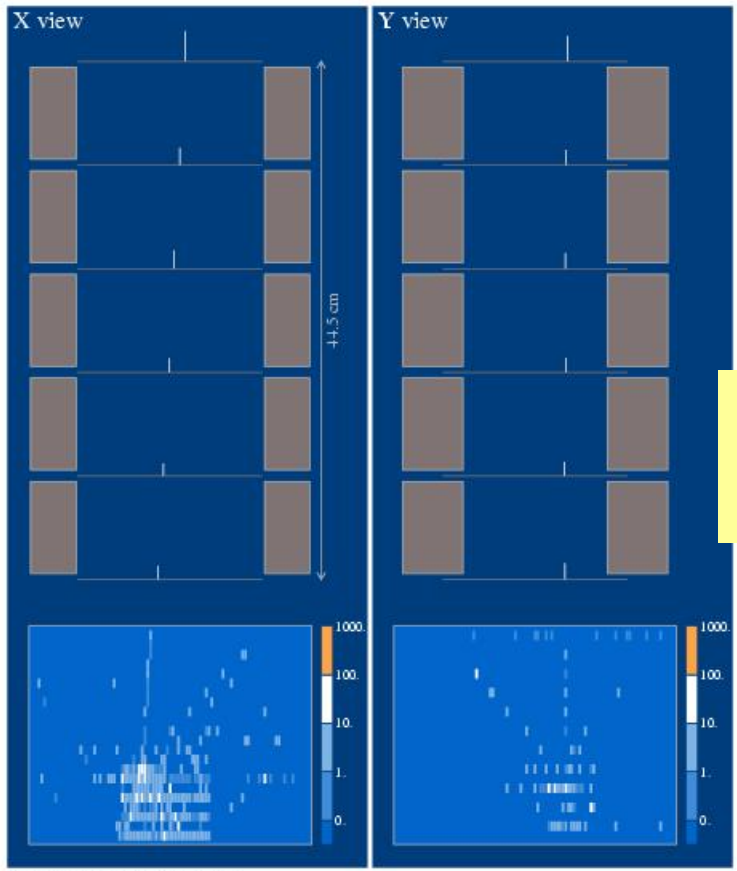


SPS Test Beam Data: p 100 GeV/c

Spettrometro + Calorimetro

SPS Test Beam Data: p 50 GeV/c

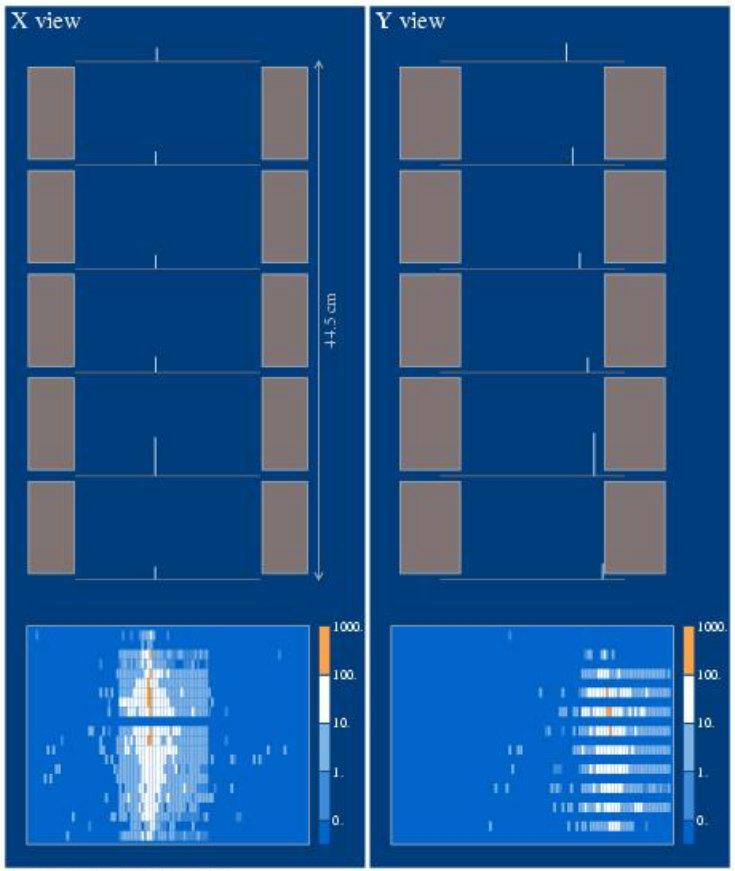


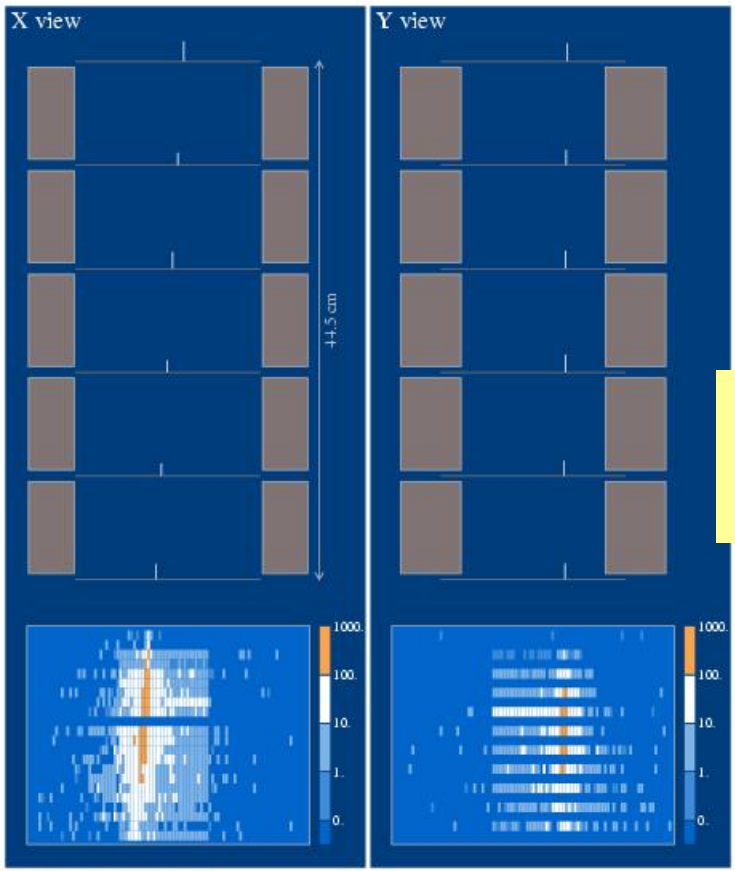


SPS Test Beam Data: p 100 GeV/c

Spettrometro + Calorimetro

SPS Test Beam Data: e^- 50 GeV/c





SPS Test Beam Data: e^- 100 GeV/c

“ 3 modelli di Pamela ”

PAMELA observed the ‘strict’ Russian procedure for satellite manufacturing:

Production goes in 3 steps with 3 “models” for every satellite/payload

(1) MASS & THERMAL MODEL → mechanical, thermal, dynamical qualification tests

Geometrical copy of final detector,
reproducing also power consumption

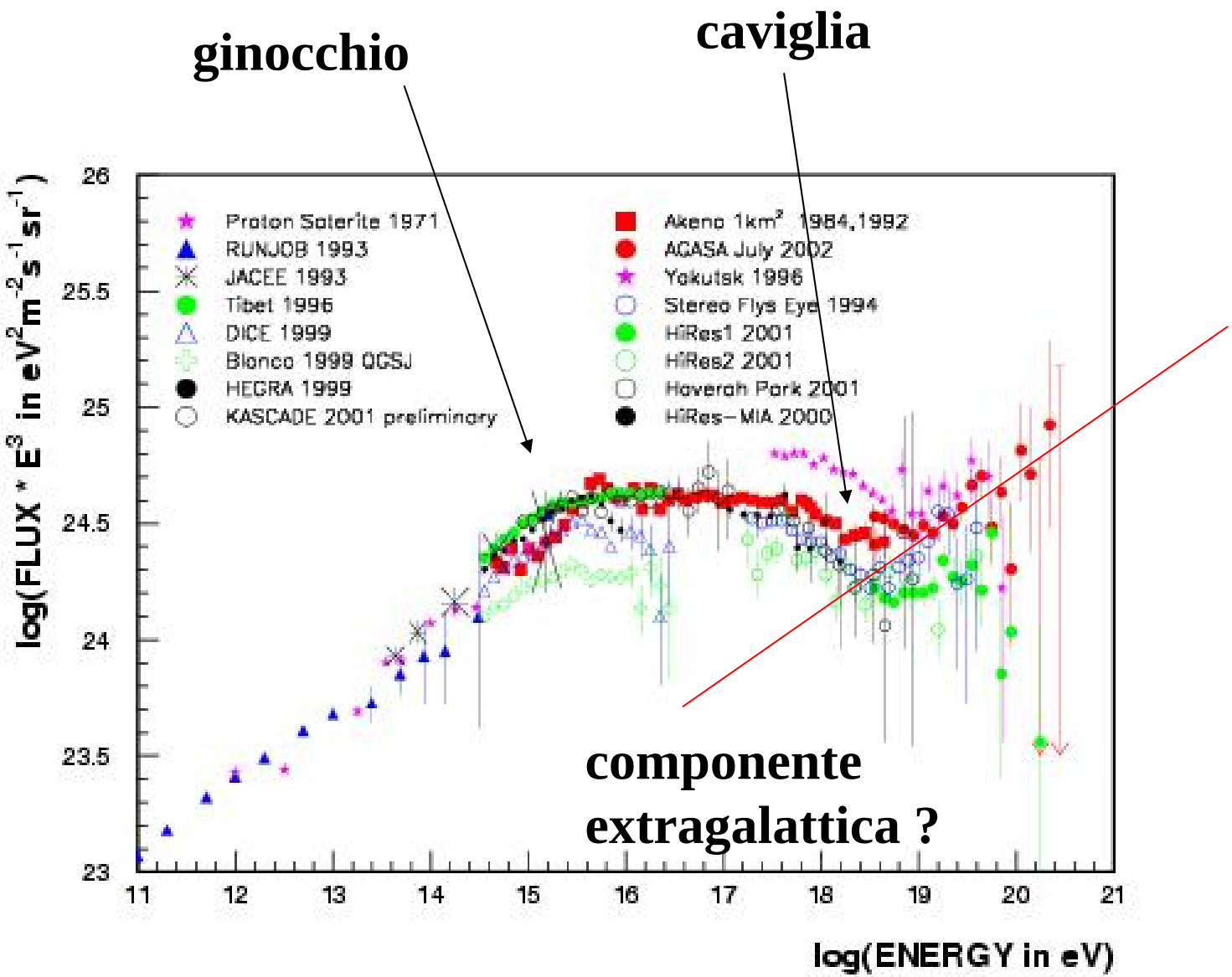
(2) TECHNOLOGICAL MODEL → verify functions & satellite interfaces

Full “1:1 copy” electrical, electronic, telemetry and mechanical copy of final detector with all active components but the detectors

(3) FLIGHT MODEL → verify & fly

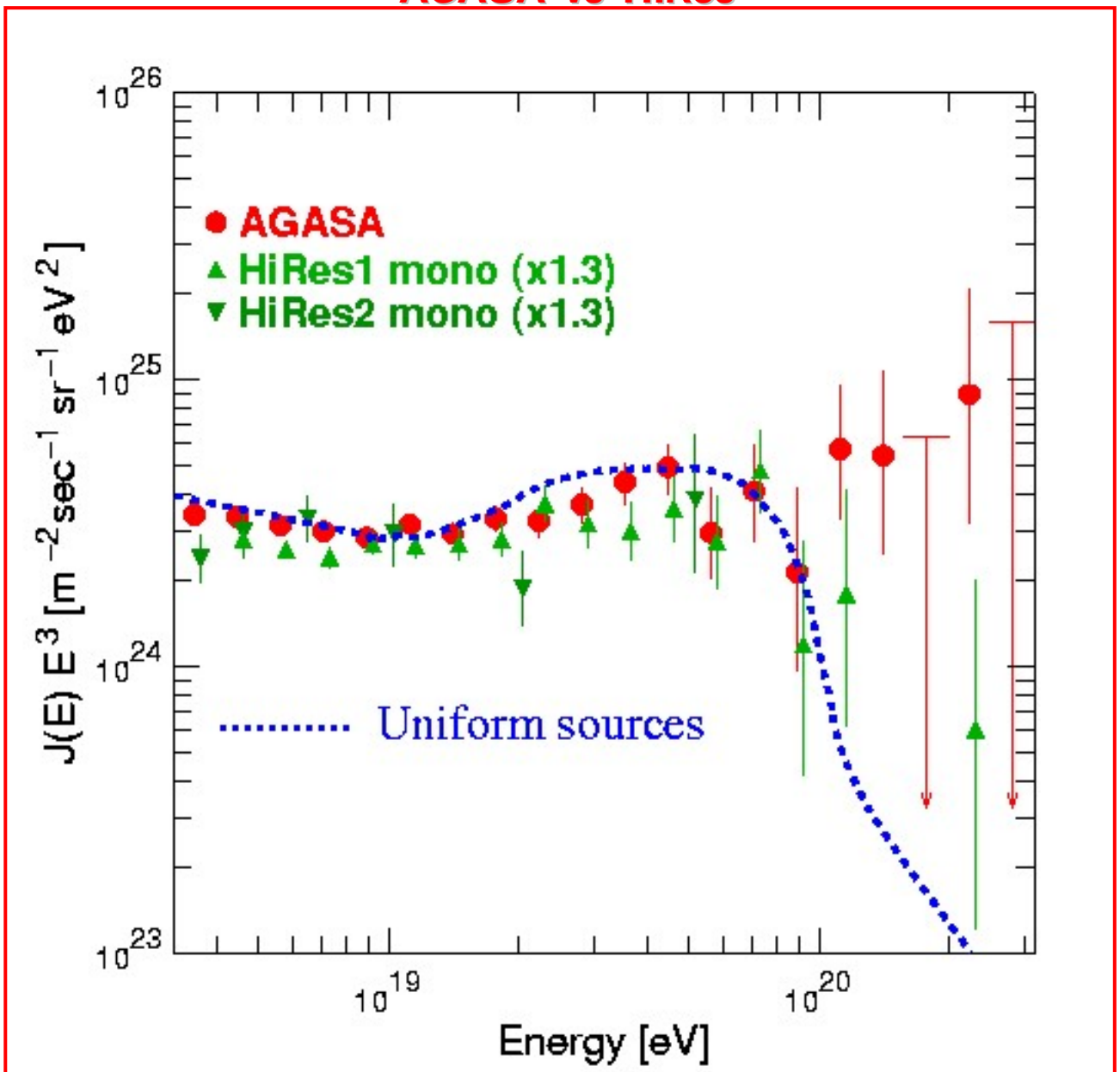
All “lessons” from Mass and Technological Model,
space-qualified components

LE ENERGIE ESTREME



LE ENERGIE ESTREME ESISTE IL CUT OFF 'GZK' ?

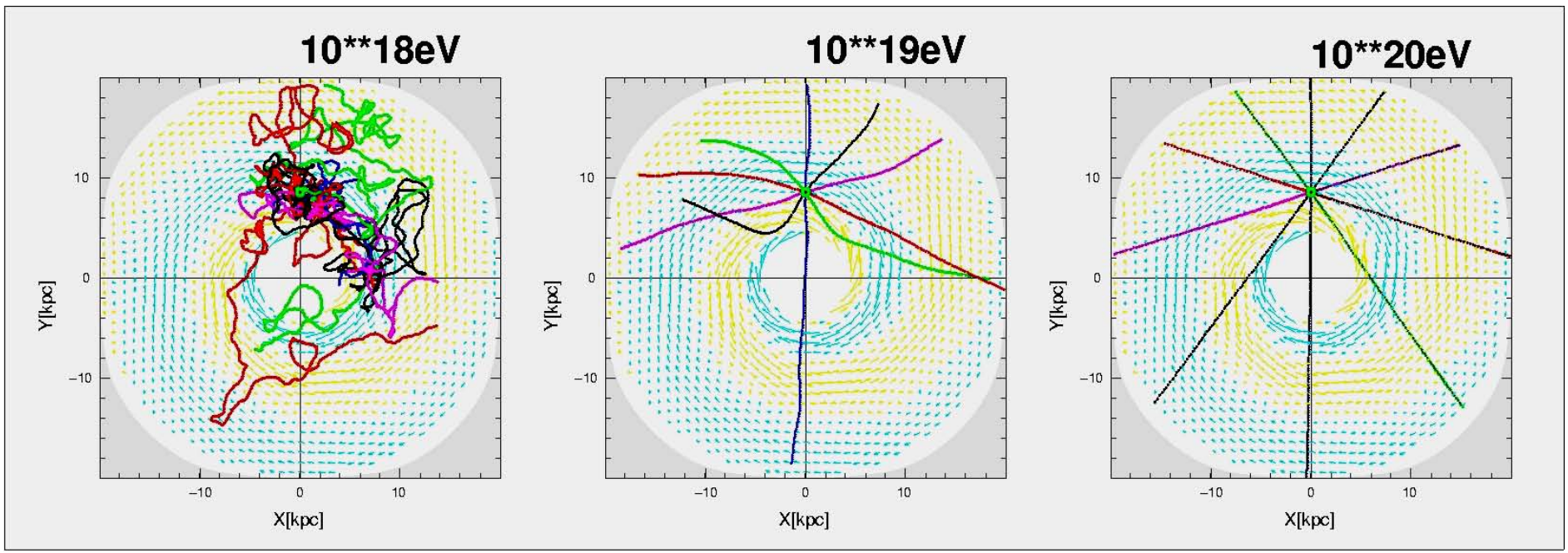
AGASA vs HiRes



LE ENERGIE ESTREME

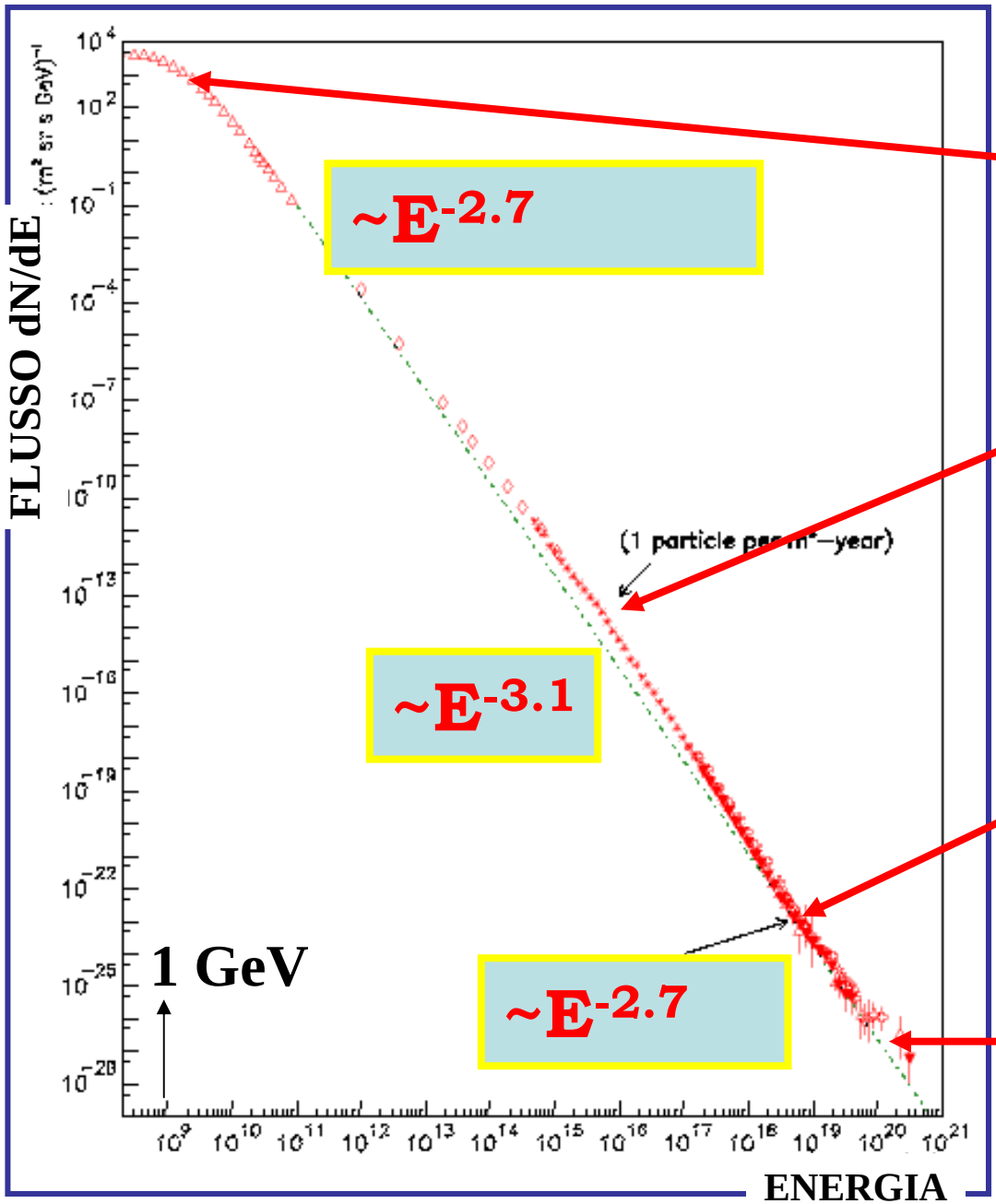
si apre la possibilita' di osservare direttamente le sorgenti ?

- angolo di deflessione < 1 grado a 10^{20}eV



ENERGIA : LO SPETTRO dN/dE

legge di potenza : $dN/dE=kE^{-\gamma}$
su 12 ordini di grandezza !!!



~$10^2/m^2$/secondo

Ginocchio
10^{15} eV

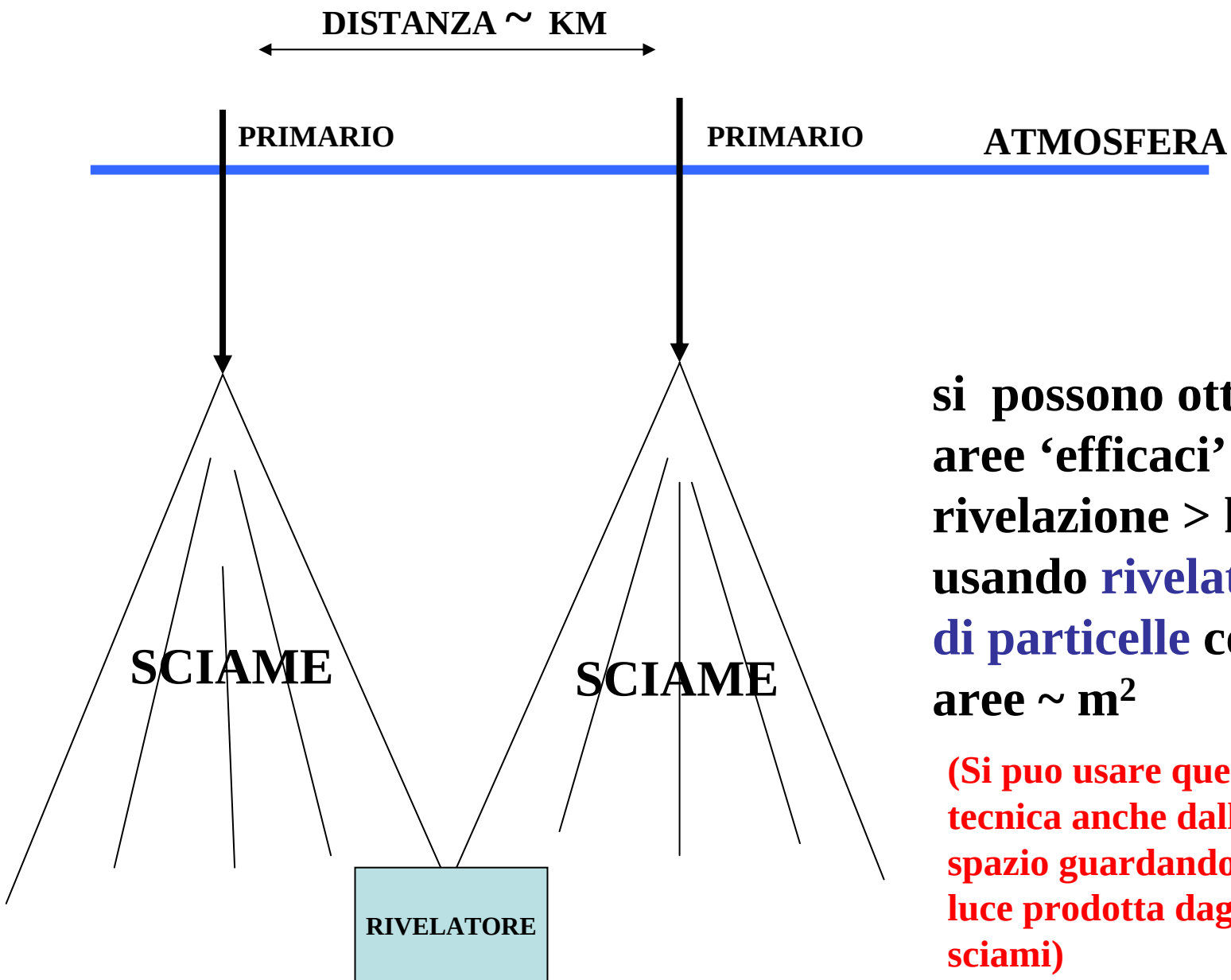
~$1/m^2$/anno

Caviglia
10^{19}eV

~$1/km^2$/anno

~$1/km^2$/secolo

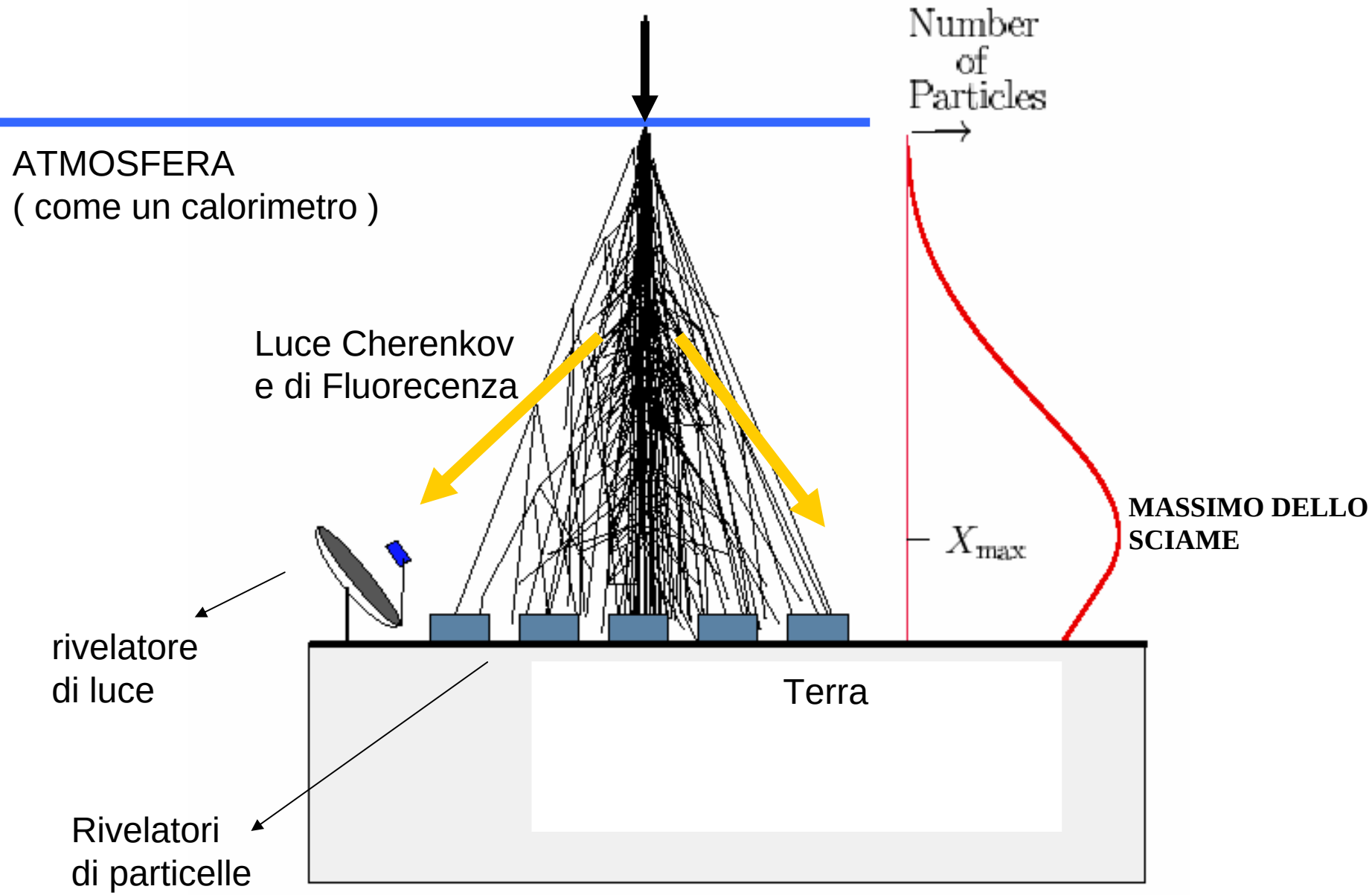
MISURE ‘INDIRETTE’



si possono ottenere aree ‘efficaci’ di rivelazione > km^2 usando rivelatori di particelle con aree ~ m^2

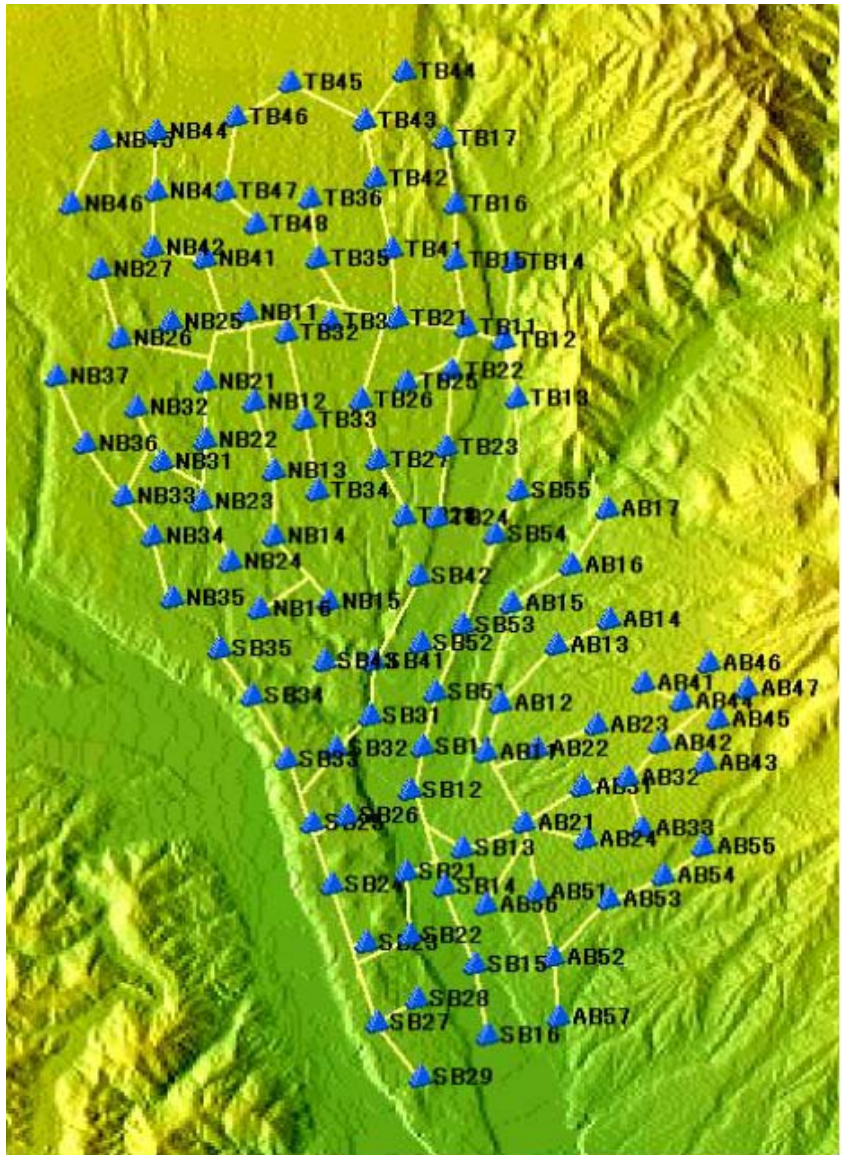
(Si puo usare questa tecnica anche dallo spazio guardando la luce prodotta dagli sciami)

MISURE 'INDIRETTE'



KASCADE collaboration

AGASA: Akeno Giant Air Shower Array



- 100 km^2 scintillators + muon detectors

The Fly's Eye/HiRes Detectors (Utah)

Air- fluorescence experiments
Fly's Eye is the precursor

- HiRes1: Five Mile Hill - Utah
- 21 mirrors, 1 ring (3<altitude<17 degrees).
- Data taking began in 1997

- HiRes2: Camel's Back Ridge
- 12.6 km SW of HiRes1.
- 42 mirrors, 2 rings (3<altitude<31 degrees).
- Data taking began in 2000

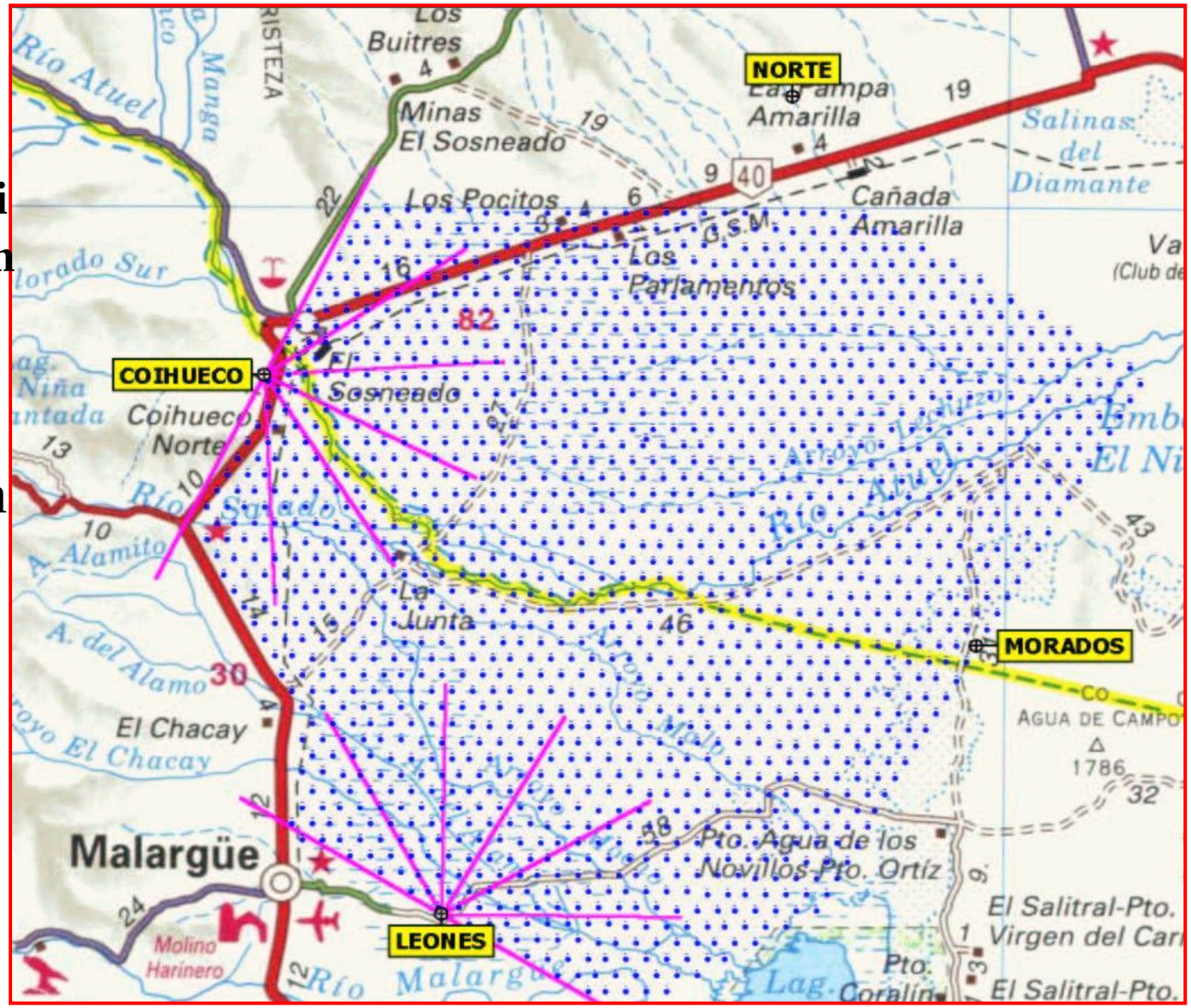
- Monocular: wider energy range ($10^{17.4} < E < 10^{20.5}$ eV), best statistics.
- Binocular: best 3d reconstruction, covers $10^{18.0} < E < 10^{20.5}$ eV

L'osservatorio Auger

Area ≈ 3000 km²

- **SD** **1600 rivelatori di particelle ad 1.5 km di distanza**

- **FD** **24 telescopi per** luce di fluorescenza



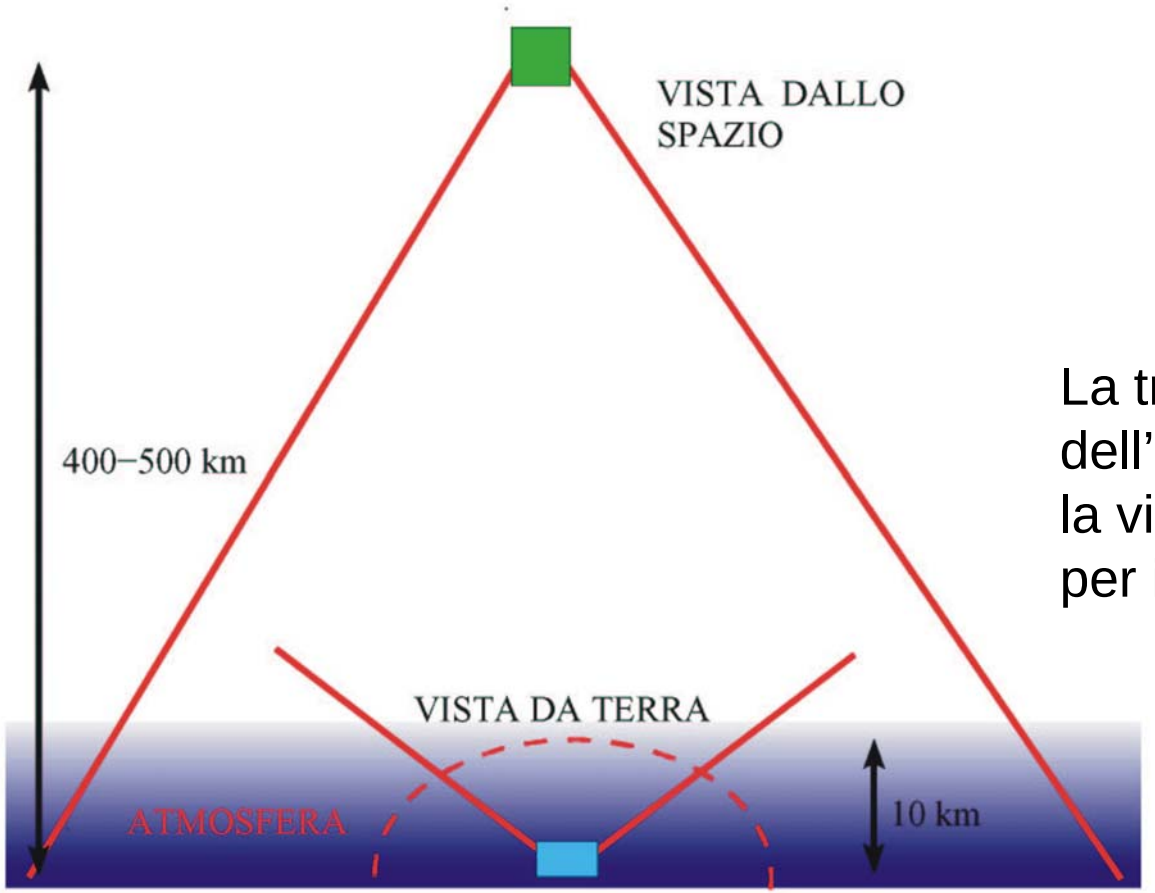
La rivelazione dallo spazio della luce di fluorescenza

Vantaggi :

1. Grande massa di atmosfera (10^{12} ton)
2. Copertura totale del cielo

Svantaggi :

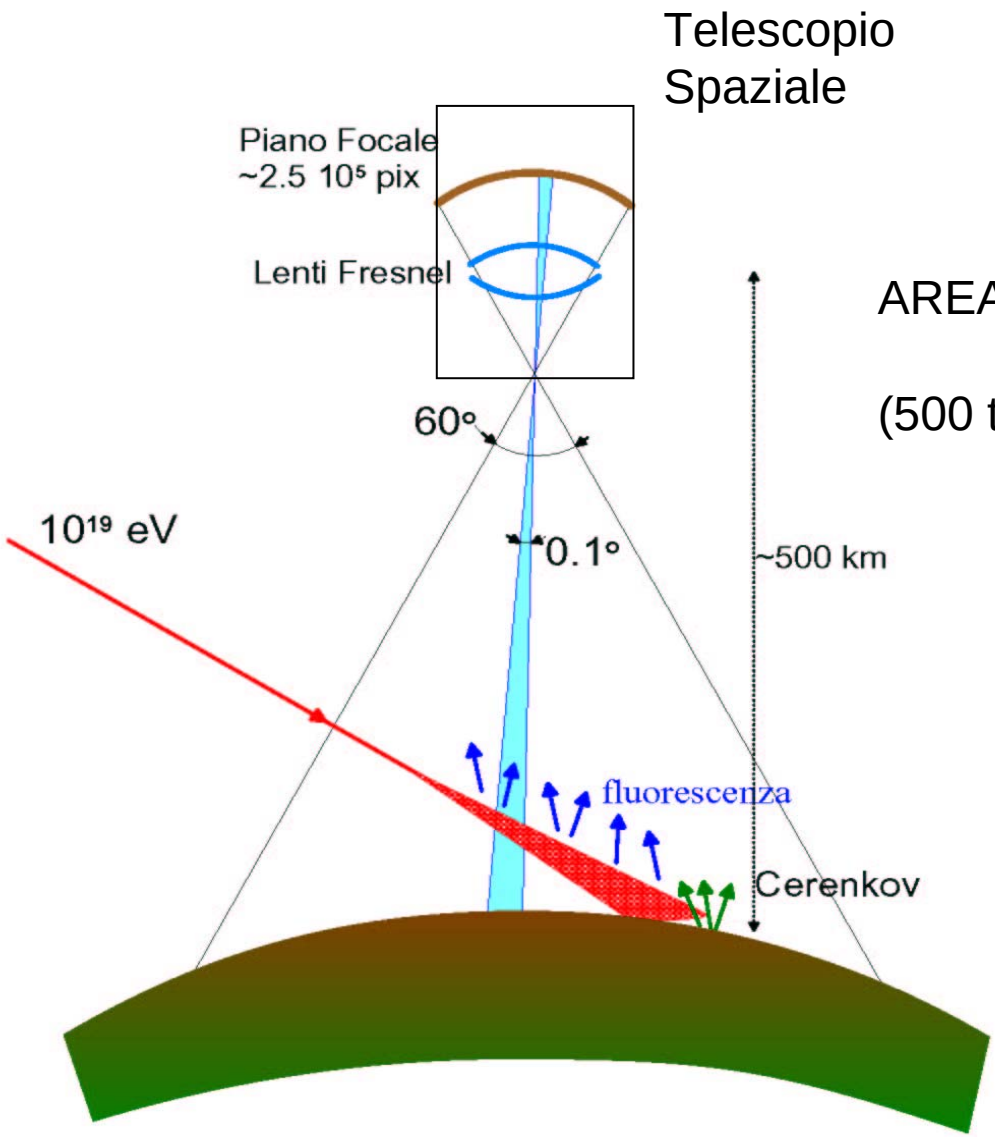
1. Duty cycle 10% (day/night/moon/clouds)
2. Costi/Complessità (1500 kg)
3. Soglia in energia elevata (5.10^{19} eV)



La trasparenza dell'atmosfera limita la visibilità laterale per i rivelatori a terra !

‘AIRWATCH’

‘Filmare gli sciami dallo spazio’



AREA OSSERVATA :

$(500 \tan(30))^2 \pi = 260.000 \mathrm{km}^2$

‘AIRWATCH’

La missione EUSO

Proposta da una collaborazione Europea-Americana-Giapponese all’ESA nel 2000

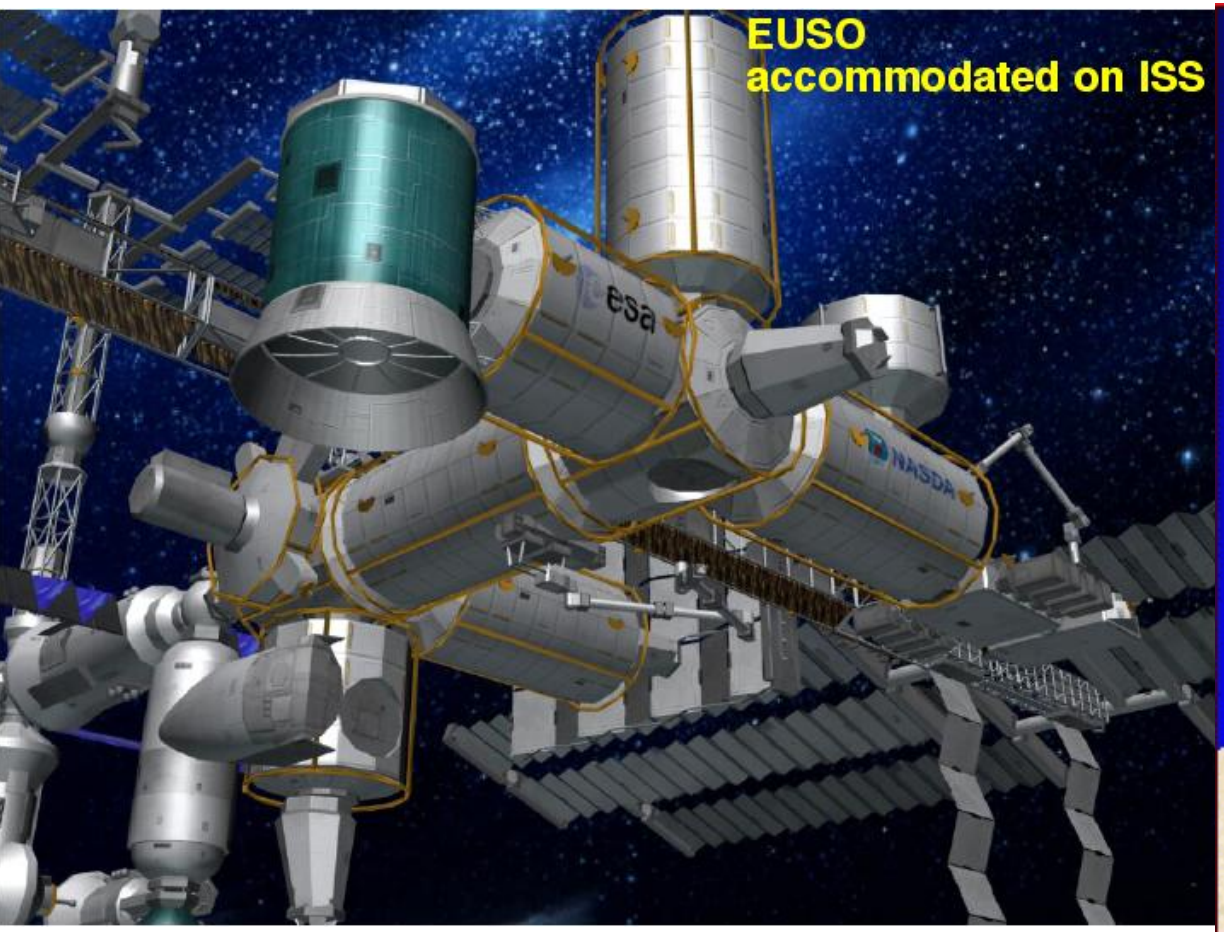
Proposta come missione su satellite è stata accettata da ESA con la raccomandazione di andare sulla stazione spaziale

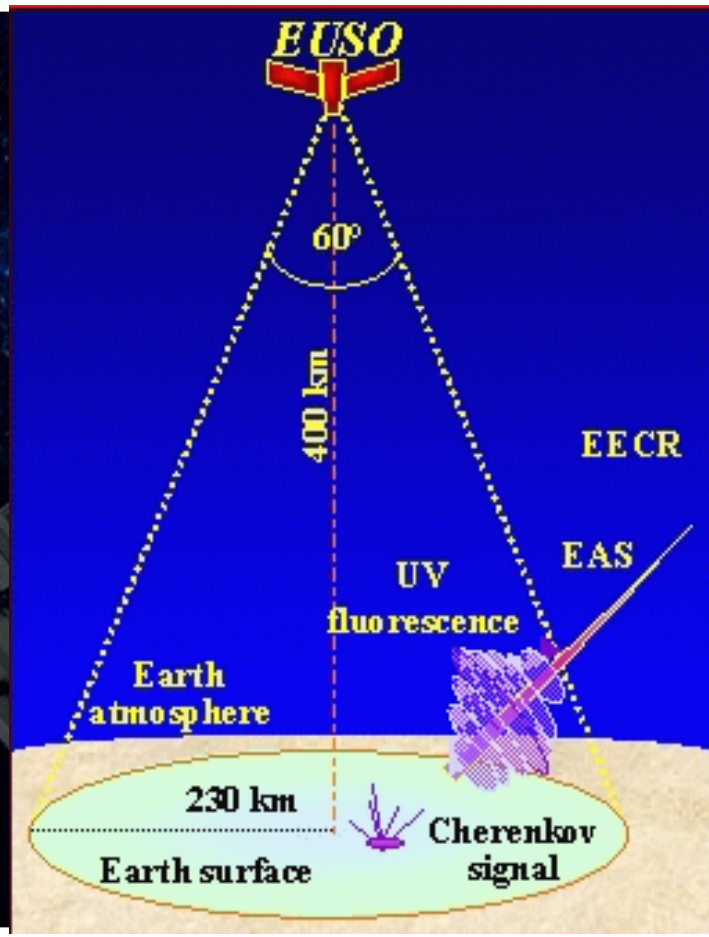
ESA (NASA) e le fasi di preparazione di una missione :

- **pre Fase A – linee guida del progetto**
- **Fase A - ‘studio di fattibilita’**
- **Fase B - ‘progetto’**
- **Fase C** | **progetto definitivo**
- **FAse D** | **realizzazione**
- **Fase E - volo**

La missione EUSO è stata fermata al termine della fase A per motivi finanziari e programmatici (stazione spaziale)

EUSO
Extreme Universe Space Observatory for EHECR Observations

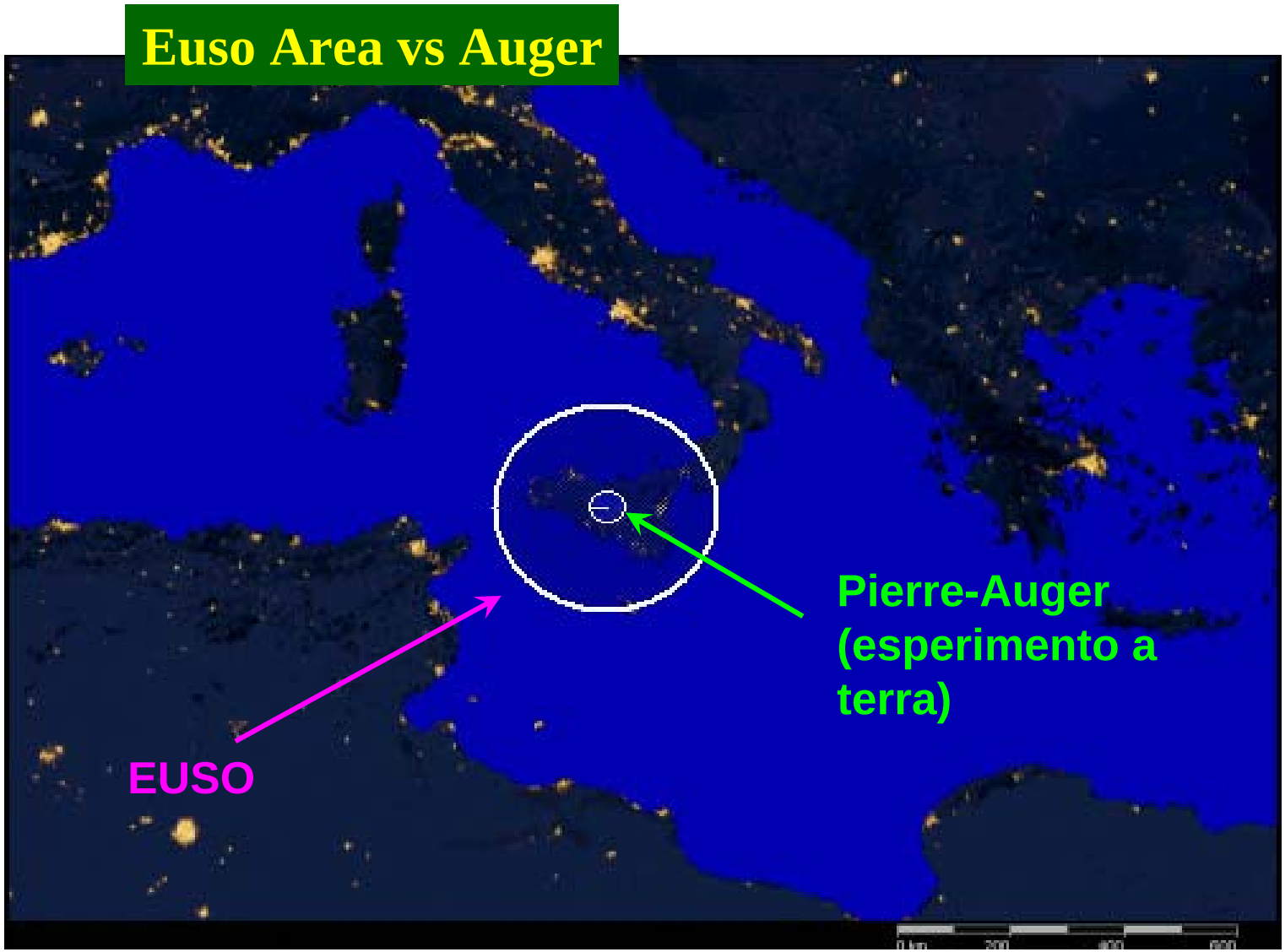




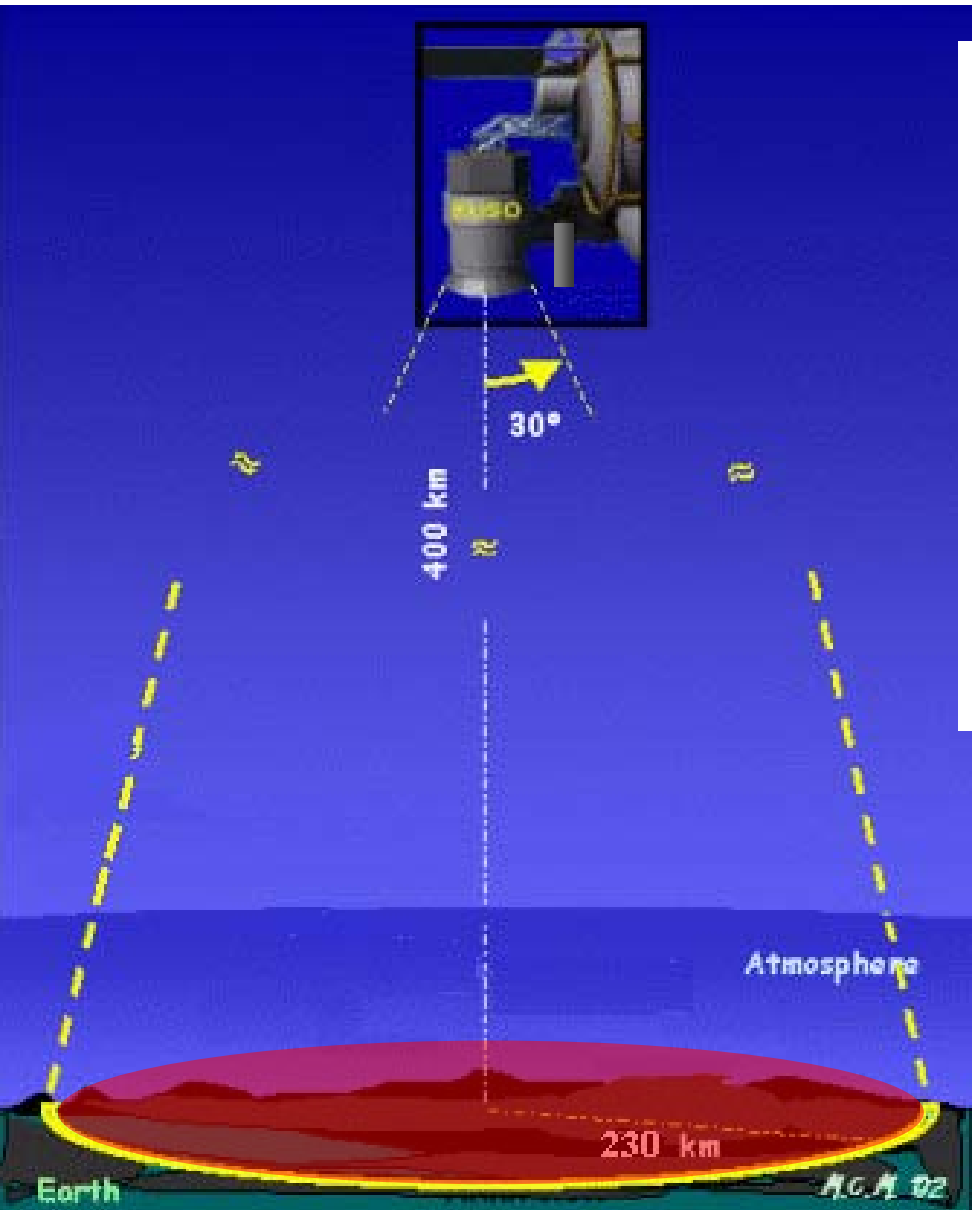
LA STAZIONE SPAZIALE (LIMITAZIONI SIMILI A SATELLITE + shuttle)

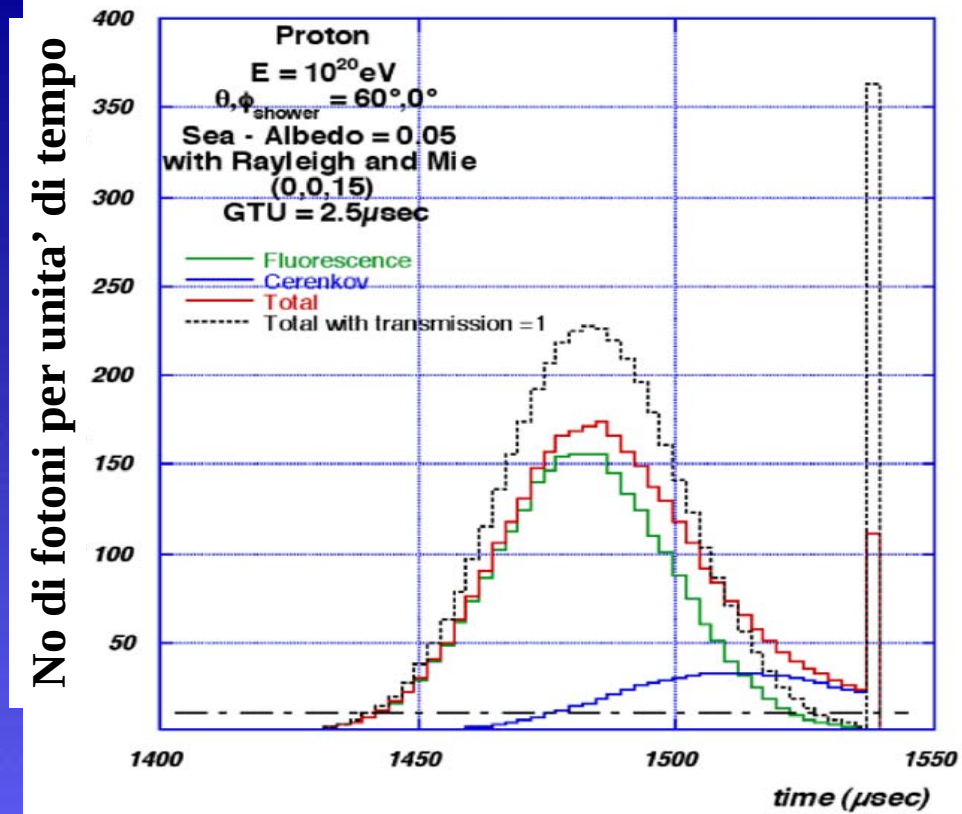
EUSO – VISTA DALLO SPAZIO

Confronto visivo tra le aree



COSA DEVE VEDERE ?



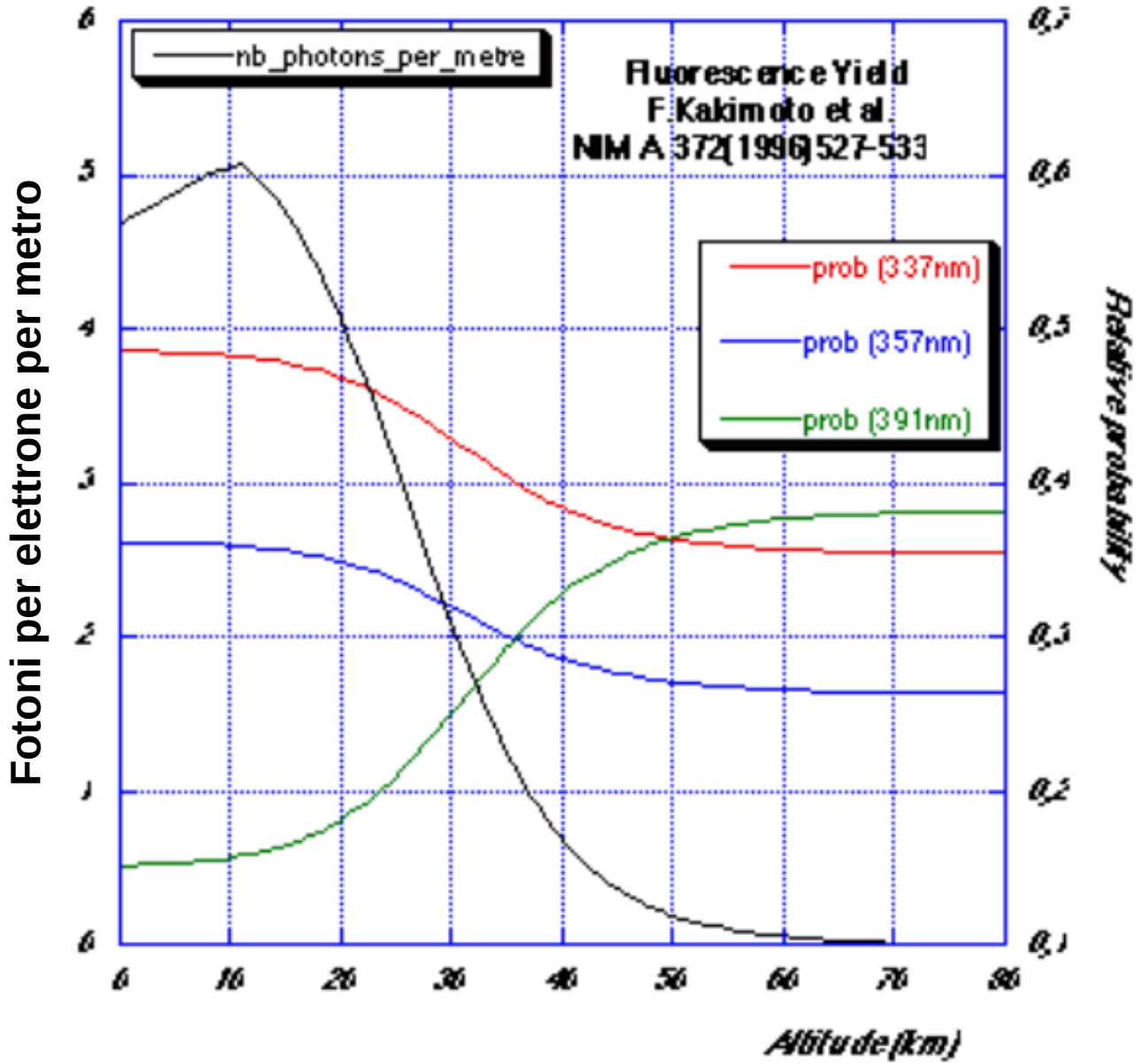


Numero di fotoni per unita' di tempo
(1 μs – 300 metri di sviluppo)

Direzionedi arrivo dei fotoni (0.1º di risoluzione corrisponde ad 1 km a terra)

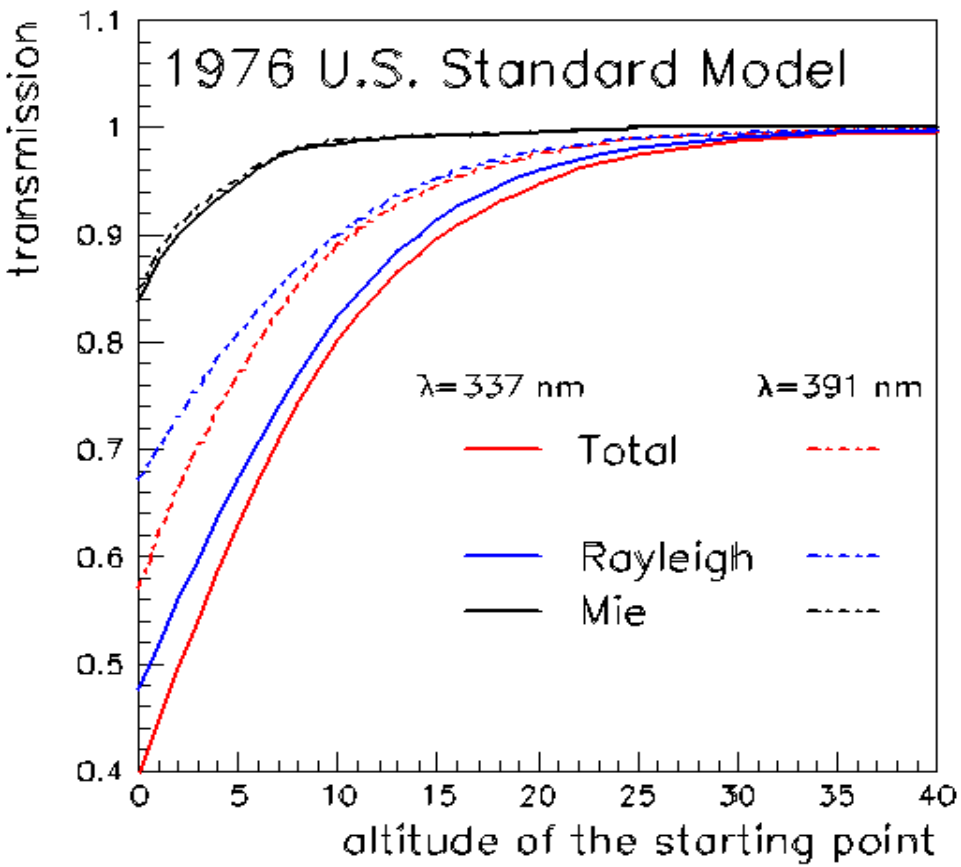
EMISSIONE DI LUCE DI FLUORESCENZA :

- **ISOTROPA**
- **POCO DIPENDENTE DALL'ALTEZZA (cioe' dalla densità)**



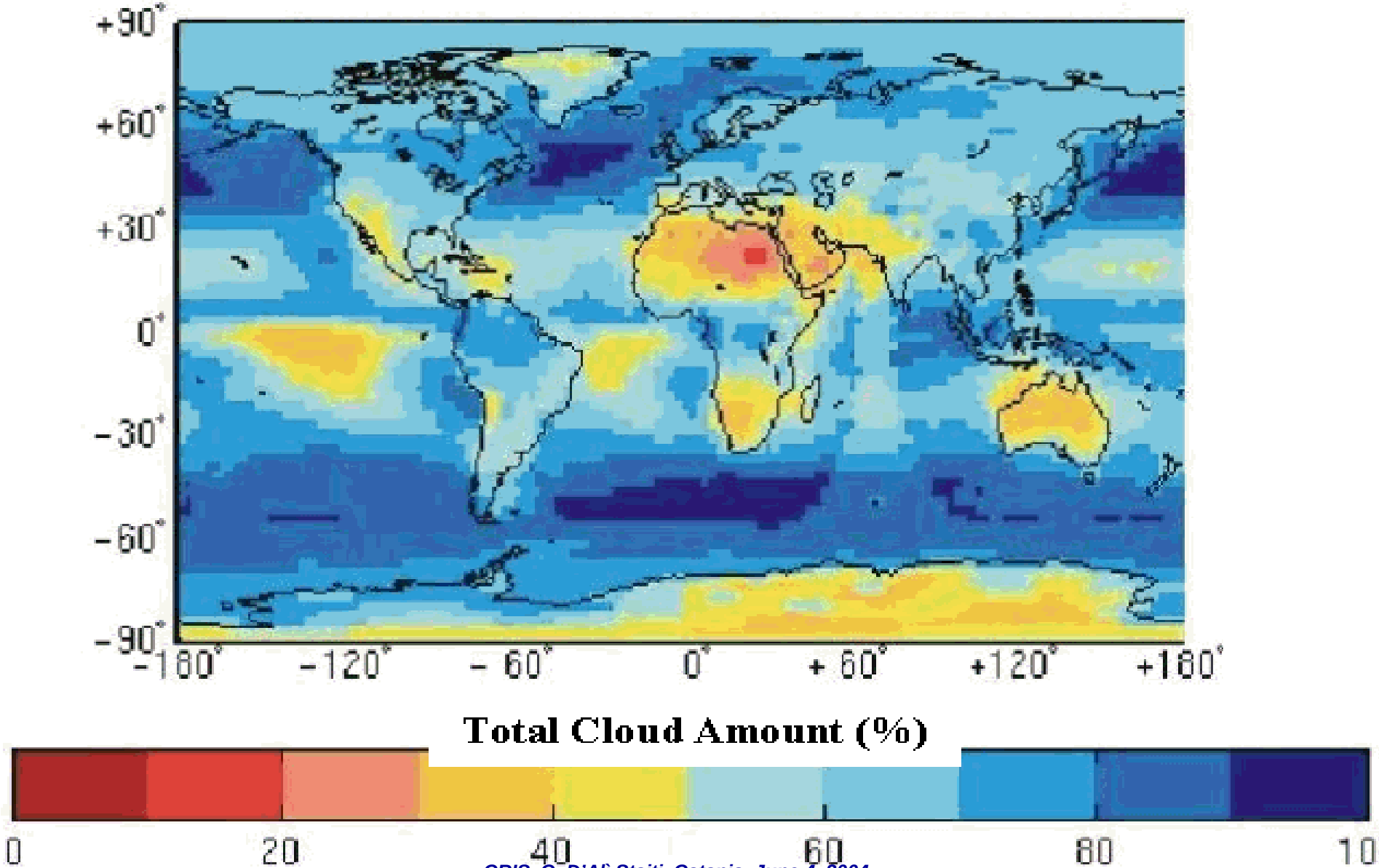
TRASMISSIONE DELLA LUCE

GLI SCIAMI HANNO IL MASSIMO DI PRODUZINE DELLA LUCE MEDIAMENTE A 5 km DA TERRA – TRASMISSIONE LUCE ~ 50%

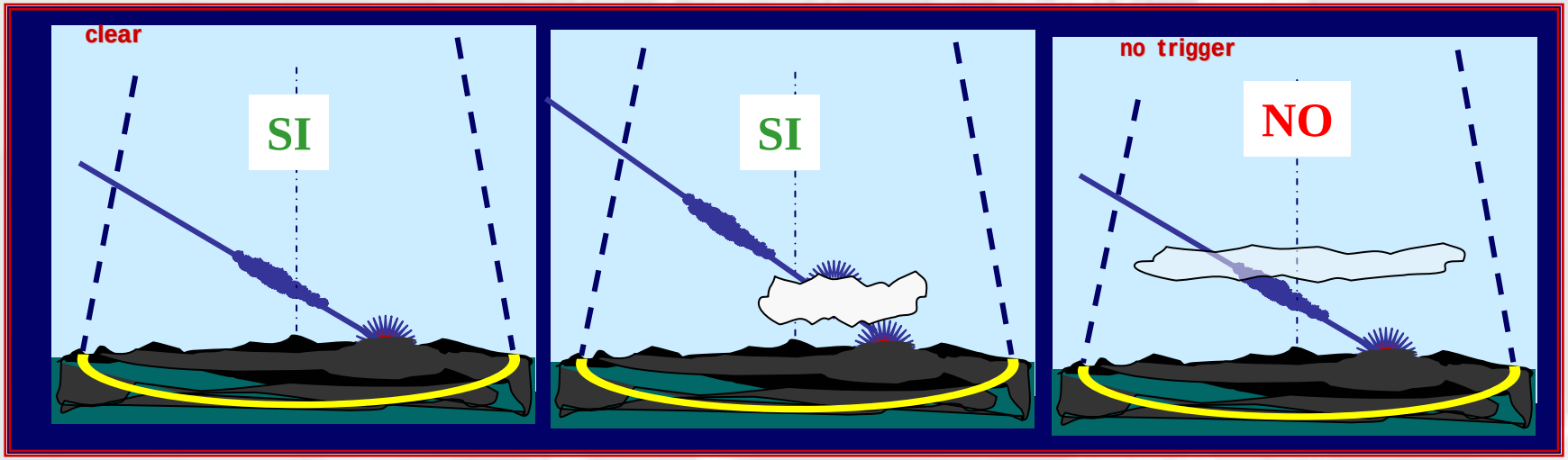


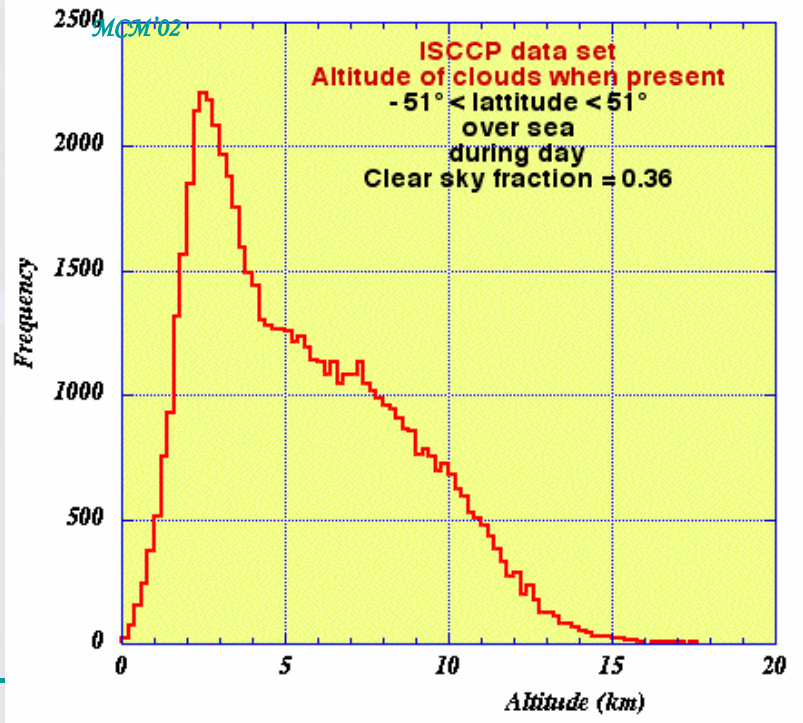
LE NUVOLE !

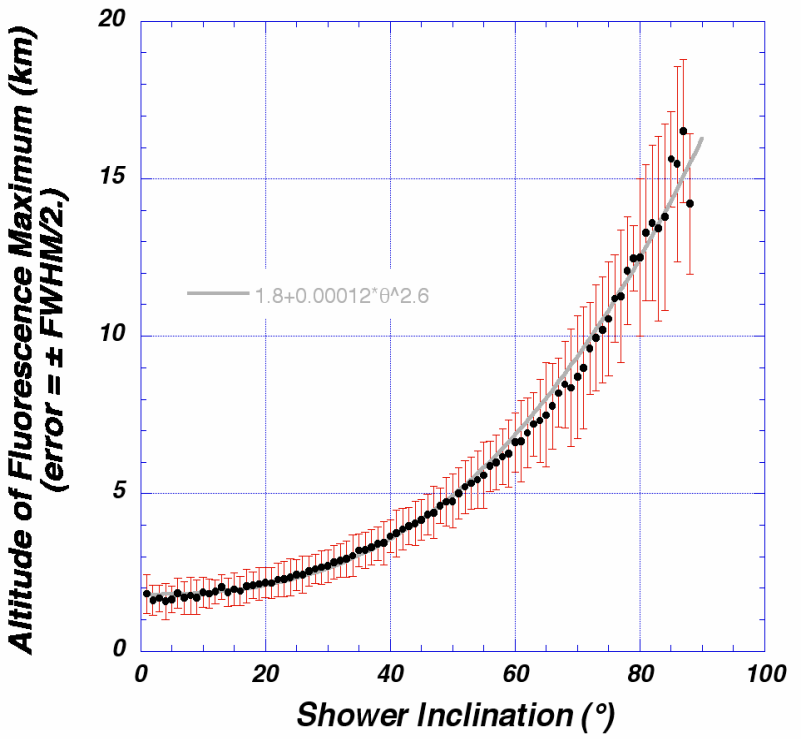
ISCCP-D2: 1983-2001 Mean Annual



LE NUVOLE

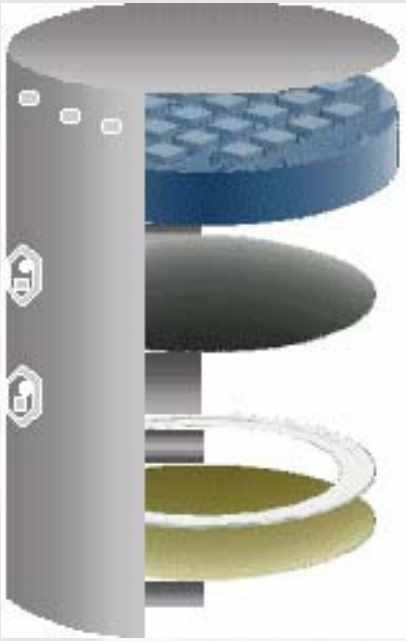

clear
SI
SI
no trigger
NO

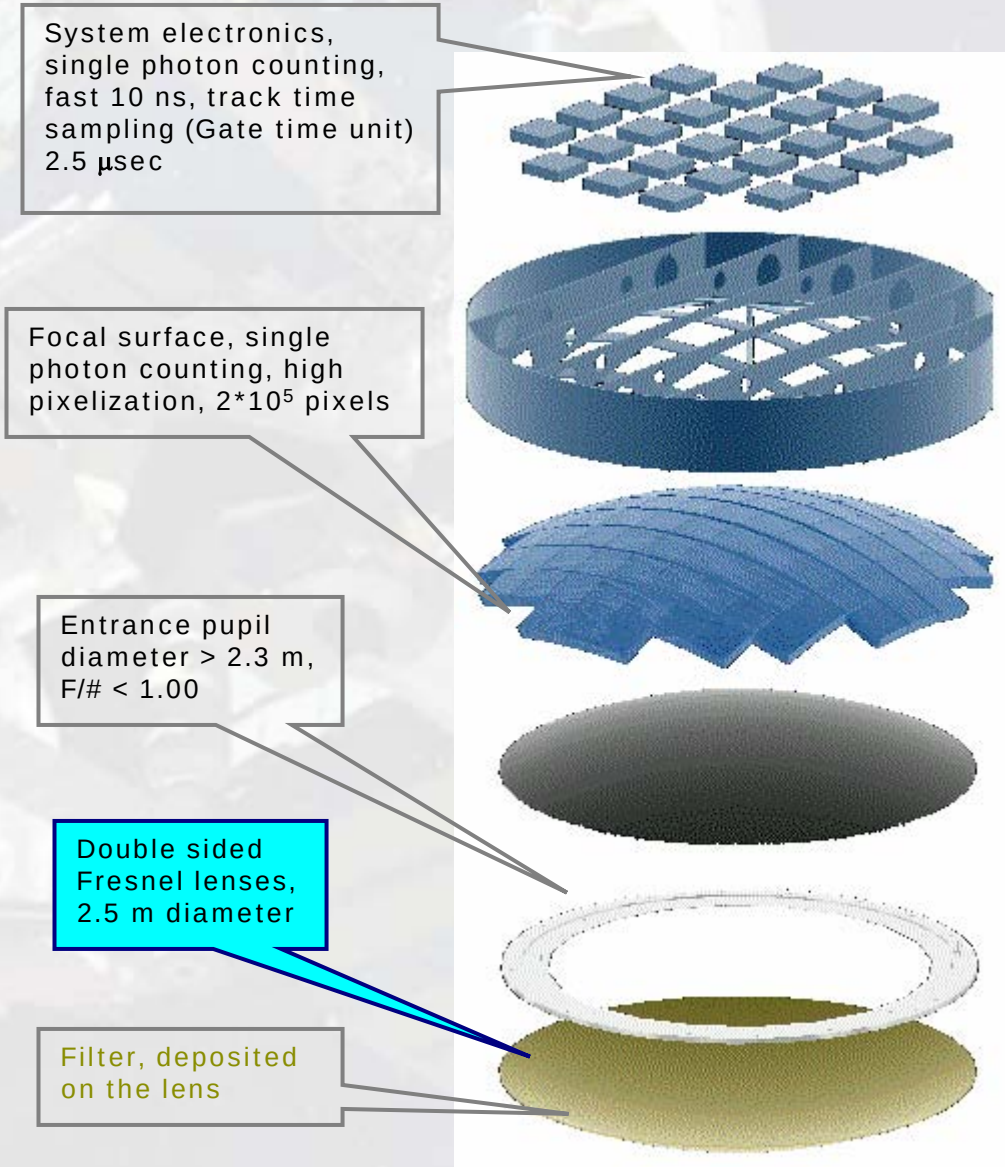

MCM'02
ISCCP data set
Altitude of clouds when present
- 51° < lattitude < 51°
over sea
during day
Clear sky fraction = 0.36
Frequency
Altitude (km)
0
500
1000
1500
2000
2500
0
5
10
15
20


Altitude of Fluorescence Maximum (km)
(error = ± FWHM/2.)
1.8+0.00012*θ^2.6
Shower Inclination (°)
0
5
10
15
20
0
20
40
60
80
100

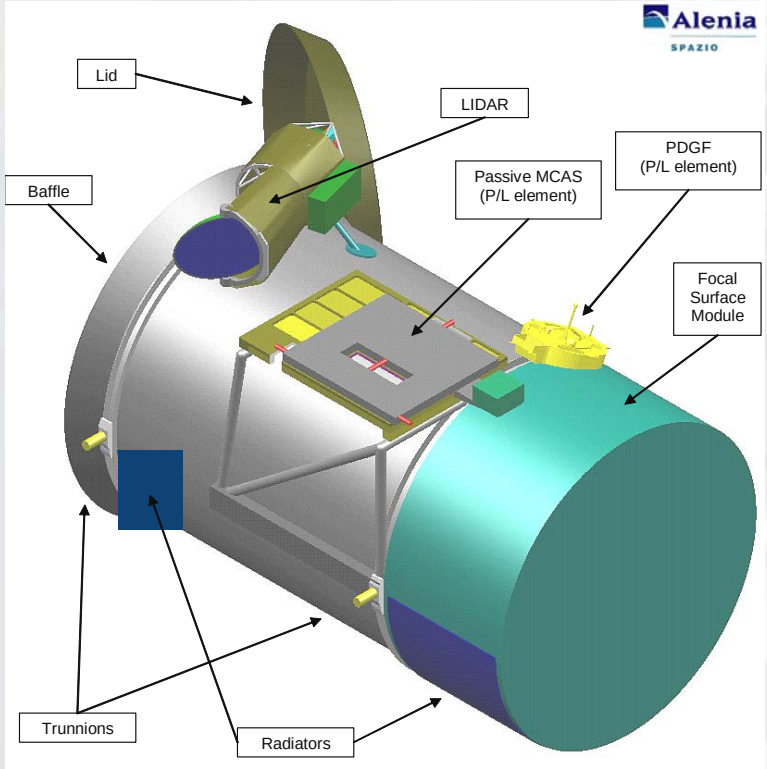
EUSO – LO STRUMENTO

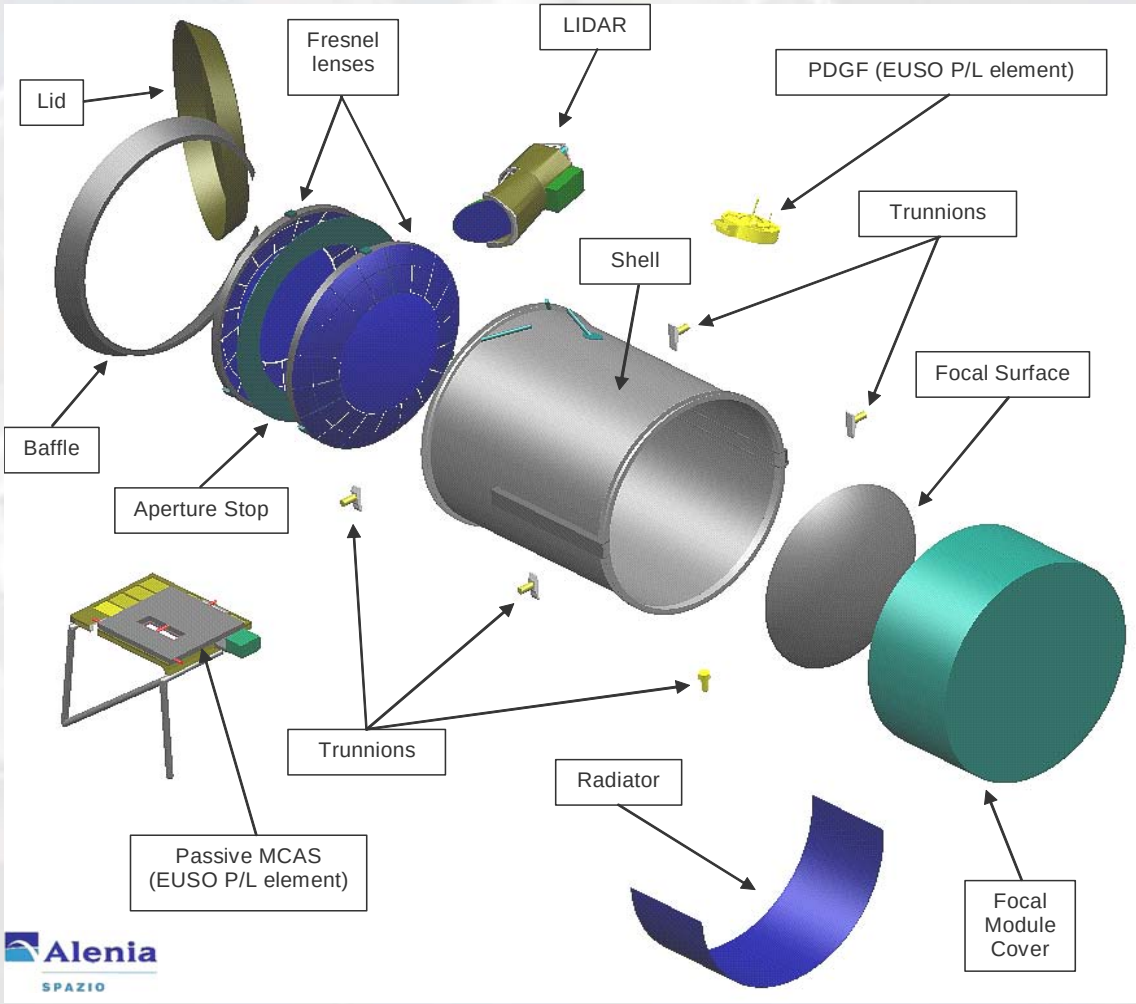
La luce UV (300-400 nm) viene raccolta e focalizzata da un sistema ottico a lenti di Fresnel. Essa e' registrata da un sistema di rivelatori a pixel posto nel piano focale



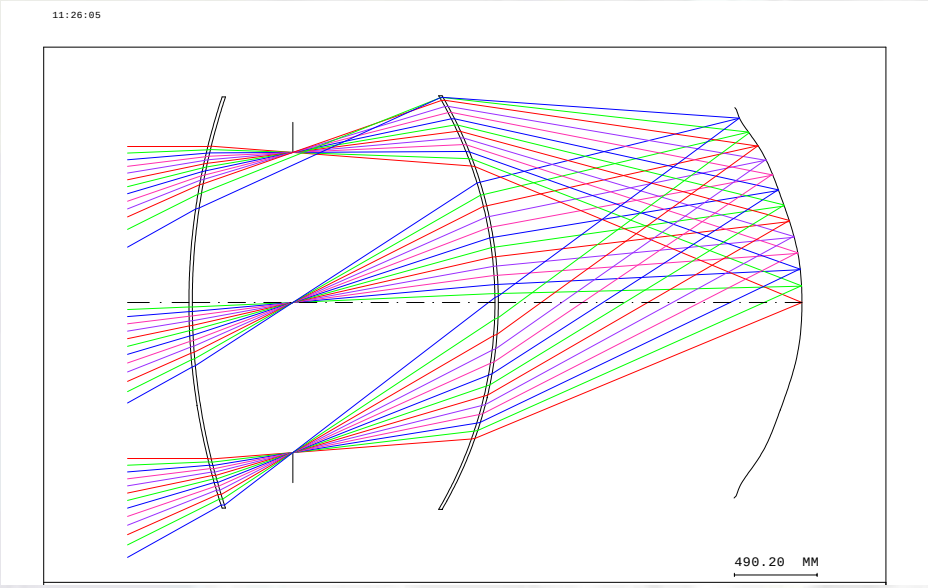


EUSO – LO STRUMENTO





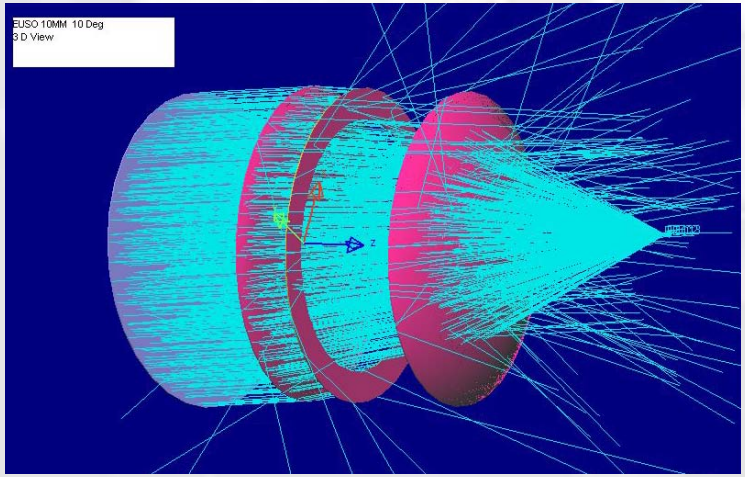
EUSO –IL SISTEMA OTTICO



Requisiti dell'ottica

- Campo di vista (FOV) ± 30°
- Diametro pupilla ≥ 2 m
- F/# ≤ 1.15
- Risoluzione ~ 0.1°
- Finesta spettrale 300-400 nm
- Massa limitata !!

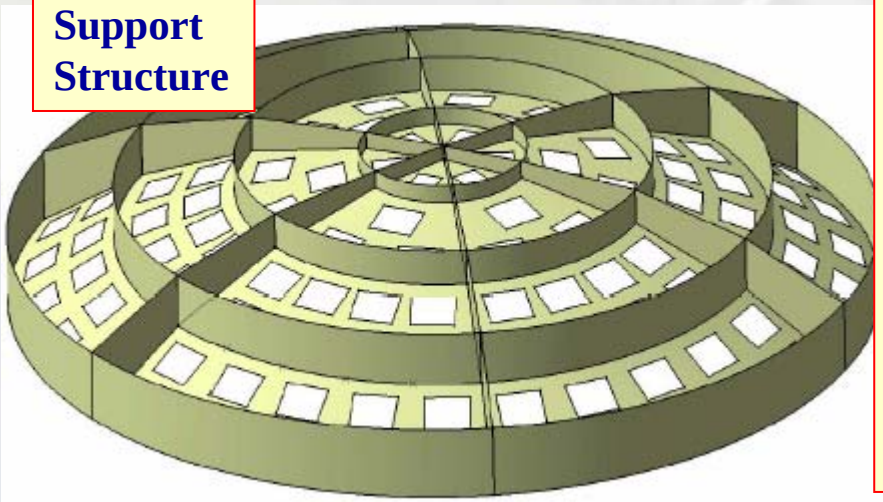
MOLTO DIFFICILE !!



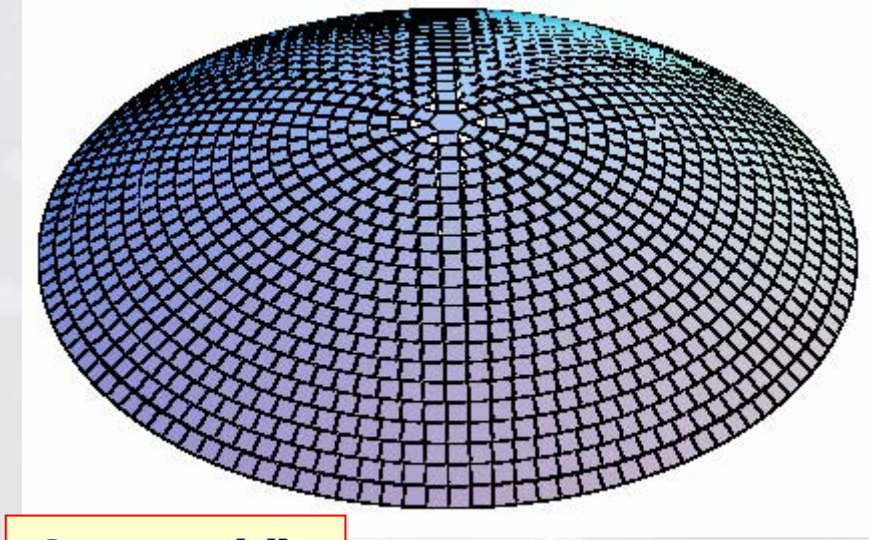
2 Lenti di Fresnel a doppia faccia !
Diametro della pupilla = 2.3m

EUSO – LA SUPERFICIE FOCALE

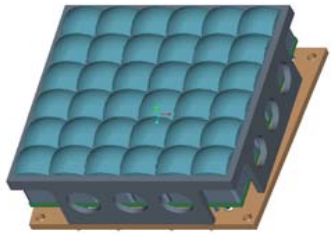
Support Structure



La superficie focale e' equpaggiata da una griglia fi fotomoltiplicatori multianodo. Ogni fotomoltiplicatore possiede 36 pixels che individuano la posizione dove e' stato rivelato il fotone. La dimensione del pixel e' circa 4mm.
5000 fotomoltiplicatori sono necessari per coprire tutta la superficie focale.
Ogni fotomltiplicatore ha una lentina per una maggiore efficienza di collezione



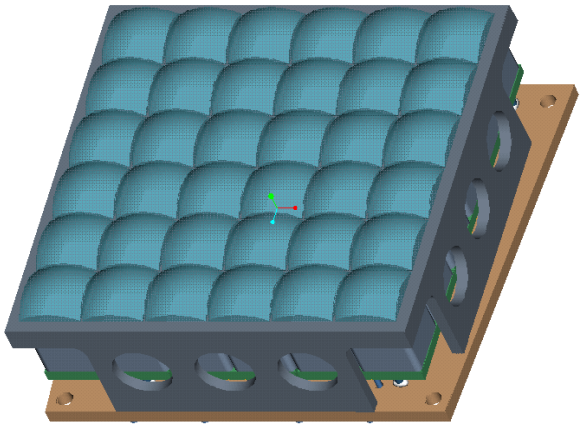
Struttura della superficie focale

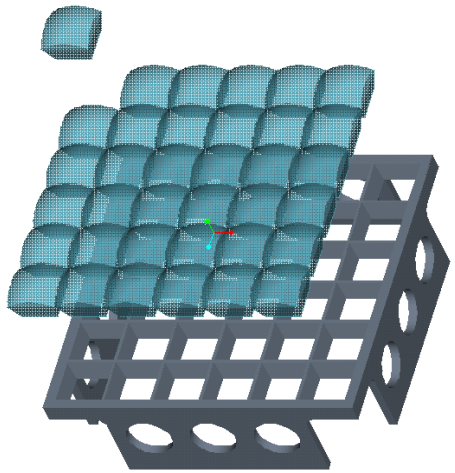


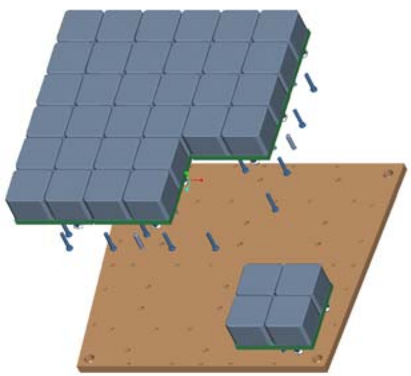
R8900 – M36

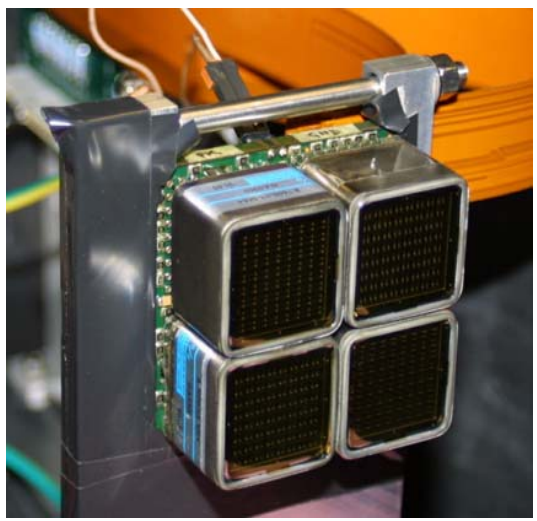
Elemento base: 4 fotomoltiplicatori multianodo

Macrocell









Microcell

EUSO – ELETTRONICA (conteggio dei fotoni)

PIX_TRIG
$N>N_{thr}$, minimum # of p.e./GTU

MC_TRIG
$M>M_{thr}$, minimum # of GTUs with PIX_TRIG

CONTROL ELECTRONICS & SYSTEM TRIGGER

PIXEL

Photon UV

ASIC FRONT_END ANALOGIC/DIGITAL

Pulses from i^{th} pixels

DIGITAL ELECTRONICS AT MACROCELL LEVEL

MC_TRIG

SAVE_FRAME

PMT

K

A

ASIC

Analog Thr

N=N+1

Enable

Compare

Pixel-level Digital Thr

N_thr

M=M+1

Compare

MC-level Digital Thrsh

M_thr

Y

X

X & Y + PH_CNT RING MEMORIES

MC

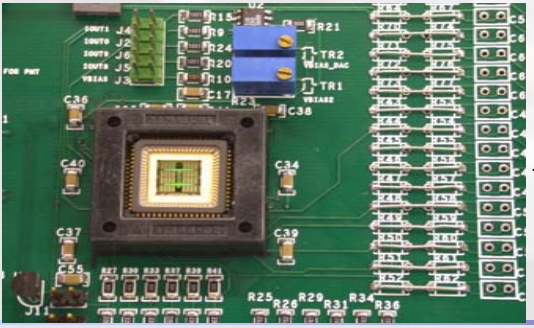
SYSTEM TRIGGER

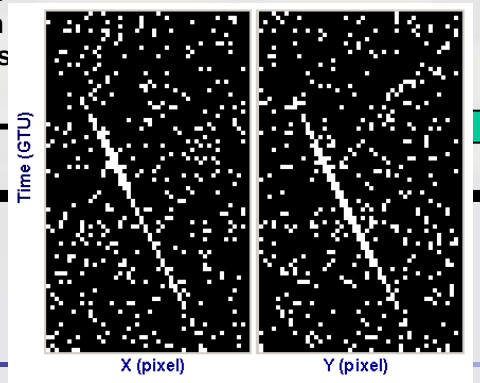
StopAcquisition

X & Y from pixels

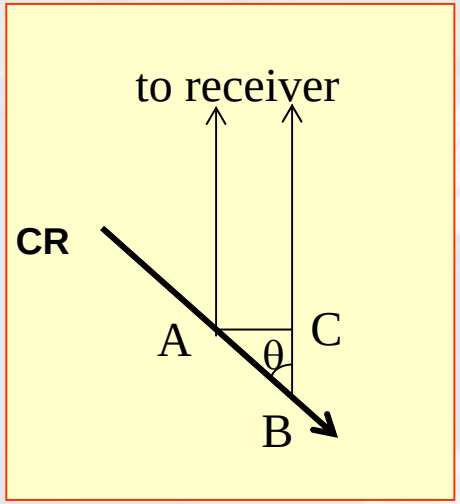
Dalle altre MCs

To Mem TCU





LA RICOSTRUZIONE DELLA TRACCIA



L'immagine della traccia nel piano focale fornisce una immagine 2D

Il tempo di arrivo della luce fornisce la terza dimensione per una ricostruzione 3D

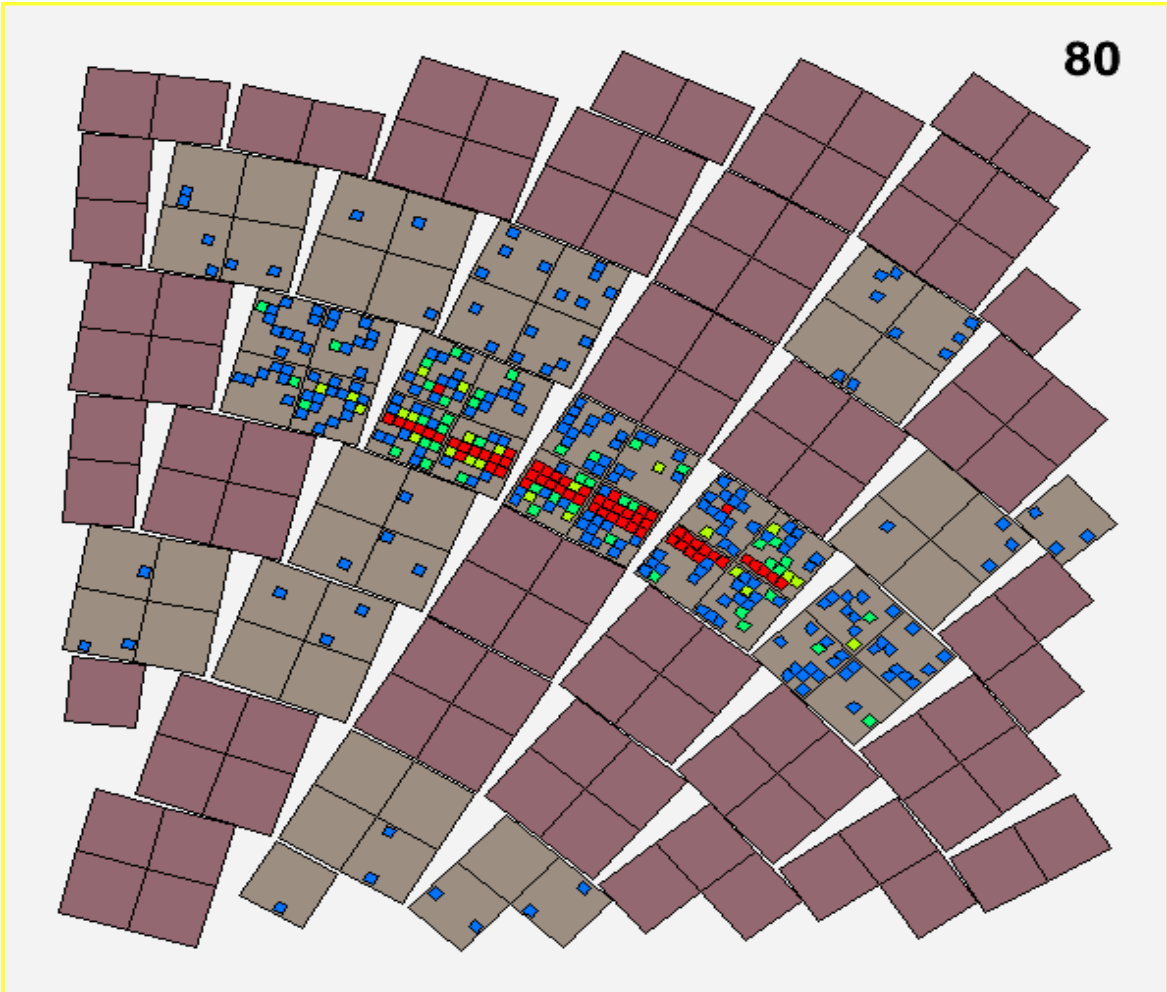
per sciami circa orizzontali

$$\varphi \sim \tan^{-1} \Delta Y/\Delta X$$

$$\theta \sim 2 \bullet \tan^{-1} \frac{(\Delta Y^2 + \Delta X^2)^{1/2}}{c \bullet \Delta t}$$

LA SIMULAZIONE

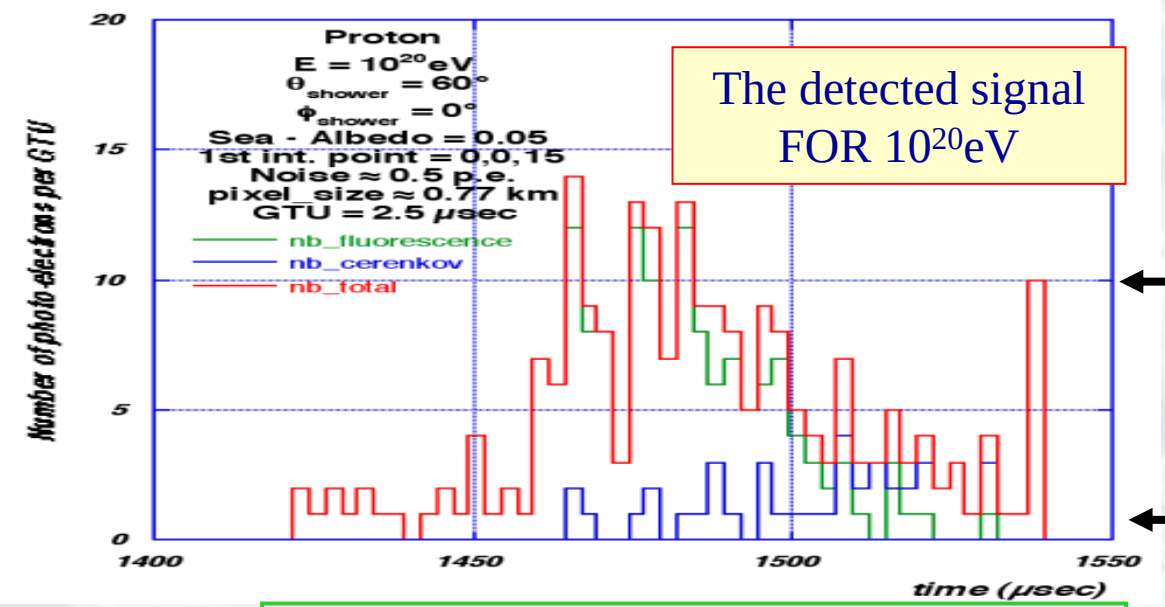
strumento fondamentale per il progetto (FASE A-B) e l'analisi dei dati



Evento simulato

come visto dal piano focale

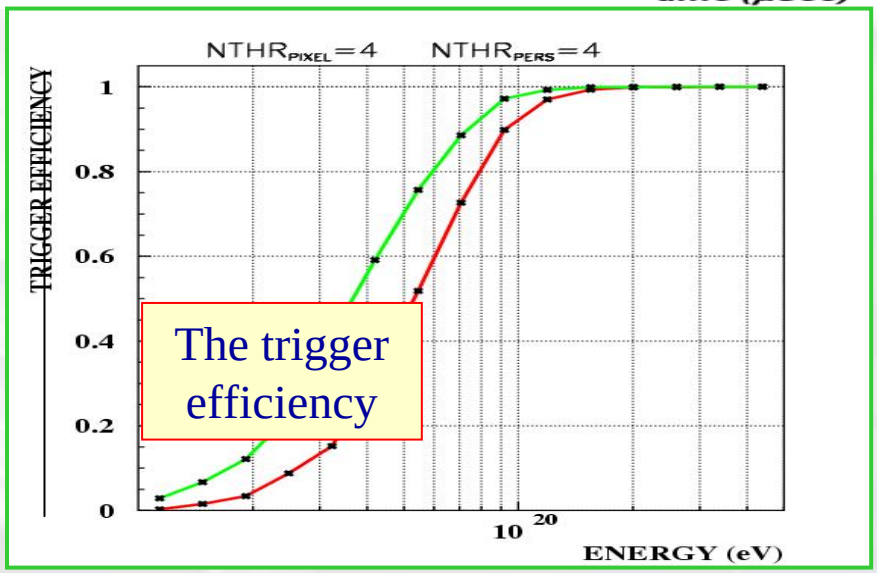
SIMULAZIONE : STUDIO DELLE PRESTAZIONI



The detected signal FOR 10^{20}eV

Signal ~10

Random Noise ~1

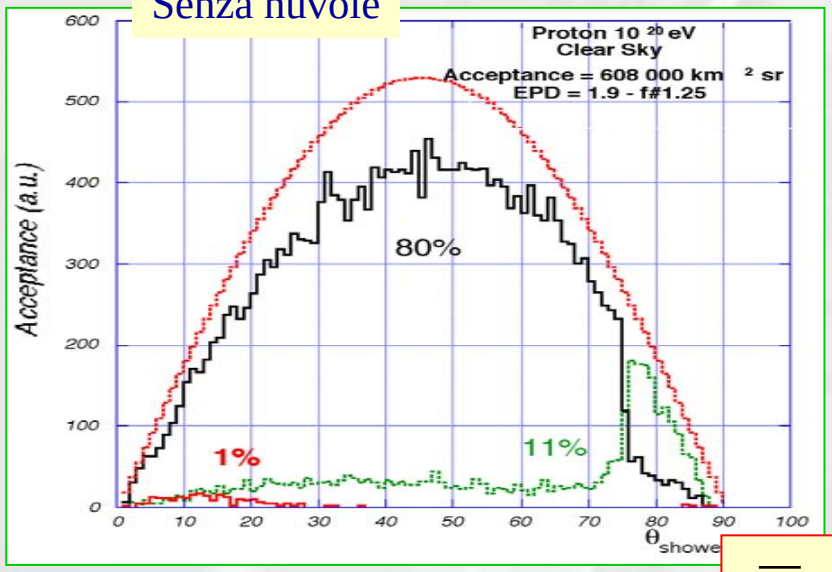


The trigger efficiency

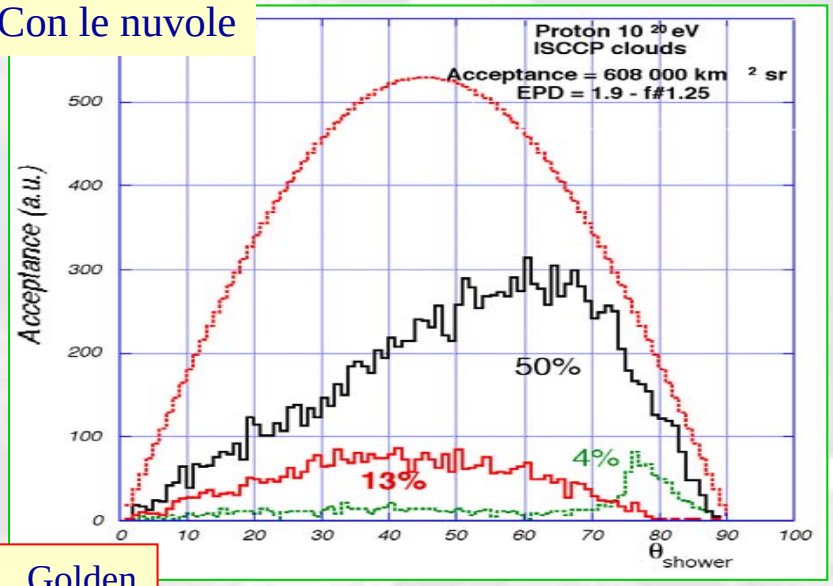
Threshold reach ~$5*10^{19}$eV ?

SIMULAZIONE : LE NUVOLE

Senza nuvole



Con le nuvole



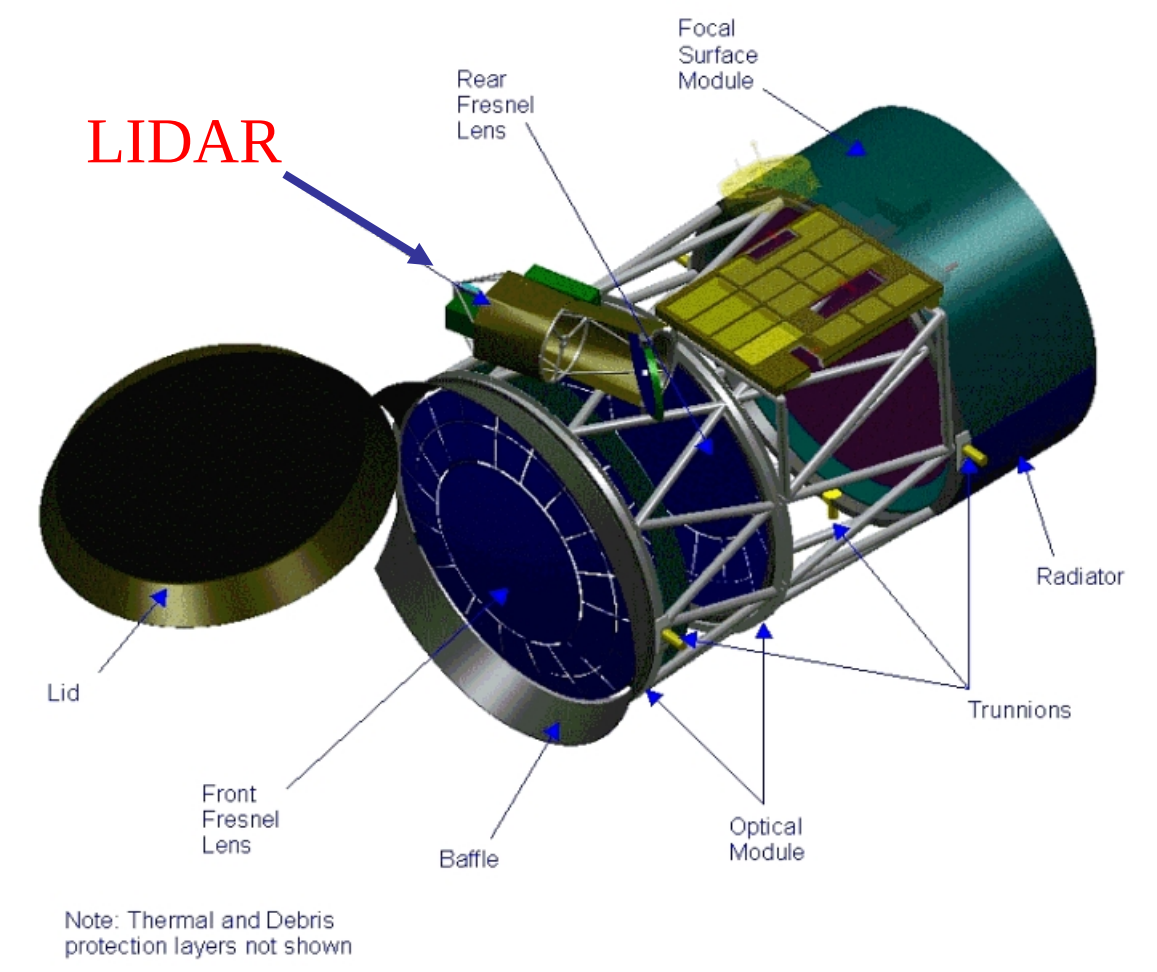
— Golden
— Cerenkov only
..... F_{max} only

LA PRESENZA DELLE NUVOLE 'UCCIDE' ~40% DEGLI SCIAMI

The EUSO statistics E>10^{20}eV

~1000 events/year in SuperGZK mode
>70 events/year in GZK-suppressed mode

IL MONITORAGGIO DELL'ATMOSFERA



LIDAR

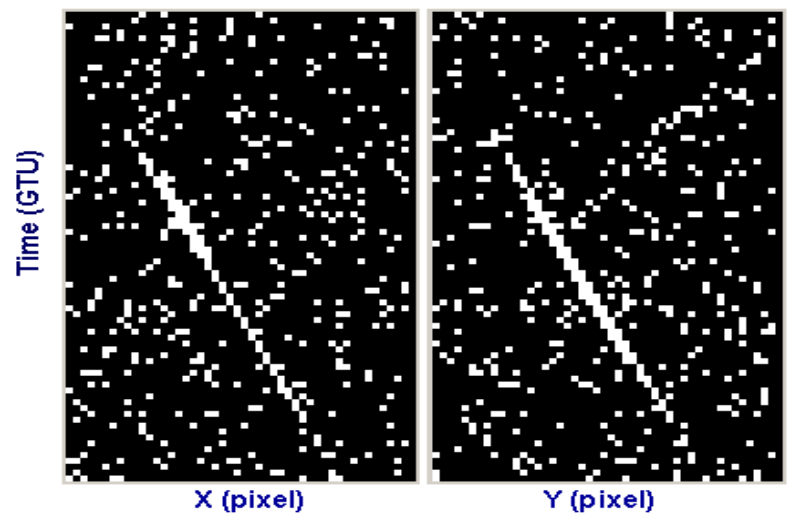
\+

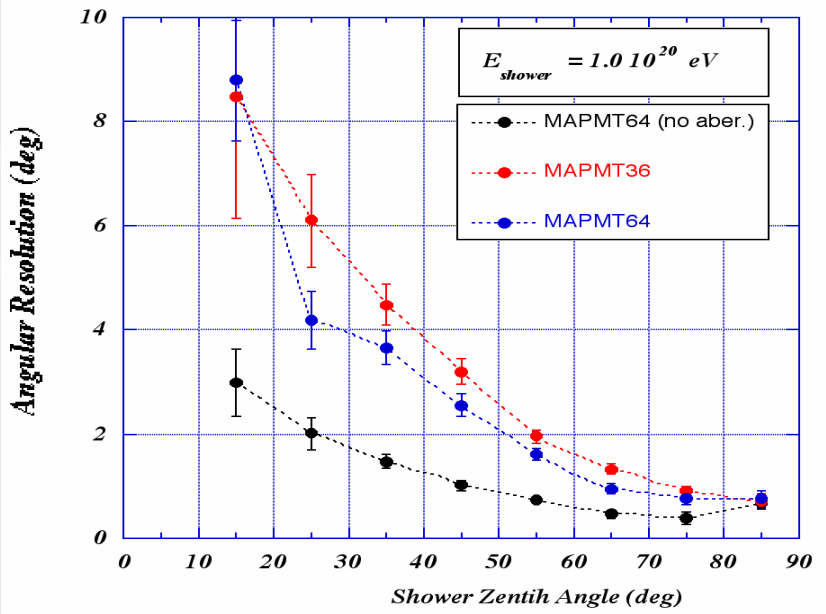
IR camera

→

- ✓ **Cloud topology survey**
- ✓ **Atmospheric transmission calibration**

SIMULAZIONE : La risoluzione dello strumento



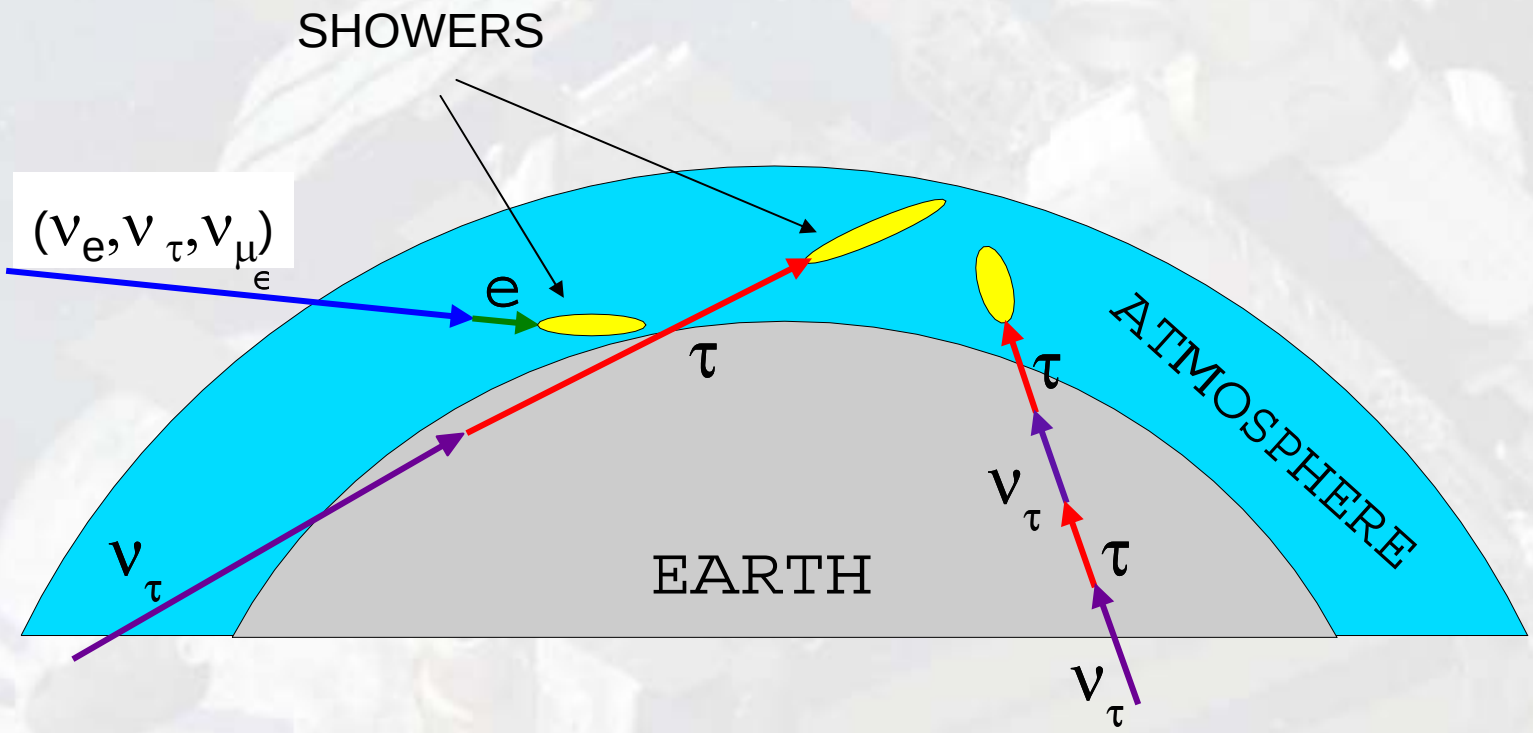


Angular res = 1º – 4º

Energy res = 20% (RMS)+..
(with Lidar info)

Xmax res = 50 g/cm^2
(with Lidar info)

L' astronomia a neutrini con EUSO



L'ASTRONOMIA A NEUTRINI E' UNO DEGLI ARGOMENTI CALDI AL CONFINE TRA FISICA DELLE PARTICELLE E ASTROFISICA