

Lezione Fermi 18

Luciano Maiani, AA 14-15

I Raggi Cosmici. 1

Sommario

1. Radiazioni ionizzanti dal cielo
2. Raggi gamma o particelle ?
3. La misura dell'effetto Est-Ovest
4. Bruno Rossi negli Stati Uniti
5. Bruno Rossi e la nascita dell'astronomia X
6. Lo spettro dei Raggi Cosmici
7. Raggi cosmici galattici e extra-galattici

Molto del materiale che discuto qui proviene dagli articoli apparsi sugli Atti di questa Conferenza. Ringrazio:

- **Omar Tibolla** del MCTP (*MesoAmerican Centre for Theoretical Physics*), Chiapas, Mexico per le conversazioni sull'origine dei raggi cosmici e per avermi inviato gli Atti di questa Conferenza
- **Arnulfo Zepeda**, direttore MCTP, per utili informazioni sui dati raccolti all'Osservatorio Pierre Auger, Malargue, Argentina.

Cosmic Ray Origin - beyond the standard models

San Vito di Cadore (Dolomites, Italy)
16-22 March 2014

One hundred years after their discovery great progress has been made in understanding the origin of the cosmic rays, but many questions remain. There is now convincing evidence for the long-suspected role of supernova remnants, but it is also clear that not all remnants contribute equally or at the same level throughout their evolution (and indeed there are questions about their overall efficiency as accelerators). In addition to supernova remnants there are strong hints that other categories of sources, such as pulsar wind nebulae, OB associations, GRBs etc, may contribute. This conference is held to critically examine the contributions of various Galactic sources to the cosmic ray production.

Scientific Organizing Committee:
Elena Amato (INAF-Arcetri)
K.S. Cheng (University of Hong Kong)
Luke Drury (co-chair) (DIAS)
Jamie Holder (University of Delaware)
Marianne Lemoine-Goumard (CENBG Bordeaux Univ.)
Josep M. Paredes (Univ. de Barcelona)
Piergiorgio Picozza (Roma Tor Vergata Univ. & INFN-Roma)
Pat Slane (CfA)
Omar Tibolla (chair) (Curtin Univ. & ITPA, Würzburg Univ.)
Jacco Vink (University of Amsterdam)
Heinz Völk (MPIK)

Local Organizing Committee:
Pedro Abreu (IST and LIP Lisboa)
Alessandro de Angelis (Udine & LIP Lisboa)
Denis Bastieri (Padova Univ. & INFN)
Sara Buson (Padova Univ. & INFN)
Sandra Calore (Padova Univ. & INFN)
Sandra Dias (LIP Lisboa)
Sarah Kaufmann (LSW, Heidelberg Univ.)
Karl Mannheim (ITPA, Würzburg Univ.)
Massimo Persic (INAF & INFN Trieste)
Omar Tibolla (Curtin Univ. & ITPA, Würzburg Univ.)

Confirmed invited speakers:
Roger Blandford, Pasquale Blasi, Marco Tavani, Yoel Rephaeli, Etienne Parizot, Evgeny Berezhko, Vladimir Zirakashvili, Peter Meszaros

<http://www.crbsm.eu>

Logos: UNIVERSITÄT WÜRZBURG, Curtin University, HELMHOLTZ ASSOCIATION, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA, ARI ITPA LSW, Alto Cadore DOLOMITI.

1. Radiazioni ionizzanti dal cielo (1912)



FORAY Victor F. Hess, center, departing from Vienna about 1911, was awarded the Nobel Prize in Physics in 1936.

- I corpi elettrizzati si “scaricano” naturalmente
- ci deve essere una sorgente che ionizza gli atomi dell’aria, liberando cariche elettriche che vanno a neutralizzare le cariche localizzate sul corpo carico
- Ai primi del Novecento, era naturale identificare la sorgente di radiazione ionizzante nelle sostanze radioattive che si trovano diffuse nella crosta terrestre e, quindi, in tutti i corpi intorno a noi;
- e’ il fondo naturale ben noto agli esperti di radioprotezione.

- Ma ci sono delle anomalie
- T. Wulf (1909) mostro’ che la ionizzazione “aumenta” andando sulla Torre Eiffel, quindi allontanandosi dal suolo
- D. Pacini (1912), esegui’ esperimenti sistematici, nella baia di Livorno e nel lago di Bracciano, immergendo un elettroscopio racchiuso in una scatola stagna. I dati mostravano che la ionizzazione “diminuisce” con la profondita’, tanto da far concludere che: *esista nell’atmosfera una sensibile causa ionizzante con radiazioni penetranti indipendente dall’azione diretta delle sostanze radioattive del terreno* (vedi Letture Consigliate 2).
- la dimostrazione definitiva fu ottenuta da V. Hess (1912) che sali’ in una mongolfiera a idrogeno fino a 5000 metri, mostrando un aumento inequivocabile della ionizzazione con l’altezza. Per questo Hess ha ottenuto il Premio Nobel per la Fisica nel 1934 (due anni dopo la scomparsa di Pacini).

2. Raggi gamma o particelle ?

- R. A. Millikan (che aveva per primo misurato la carica elettrica dell'elettrone e a cui è dovuto il nome "raggi Cosmici") pensava che la radiazione cosmica fosse dovuta a raggi gamma dallo spazio
- tuttavia, questa radiazione è anche all'origine delle aurore boreali, che sono limitate alle zone polari, "come se" i raggi cosmici fossero particelle elettricamente cariche, schermate dal campo magnetico terrestre alle piccole latitudini (effetto latitudine)
- Bruno Rossi (1905-1993), assistente a Firenze e poi professore a Padova, diventa negli anni '30 un protagonista delle ricerche sulla radiazione cosmica
- nel 1930, ad Arcetri, Rossi inventa il circuito elettronico delle coincidenze:
 - un primo segnale aziona un circuito elettronico che apre un "gate" (un periodo temporale T durante il quale il circuito è disponibile)
 - se un secondo evento arriva durante il gate, il circuito complessivo dà un segnale in uscita
 - la presenza del segnale finale segnala la "coincidenza" dei due eventi entro il tempo T
 - Il circuito di coincidenza di Rossi avrà innumerevoli applicazioni e variazioni ma l'idea resta immutata fino ai nostri giorni.
- collegando i suoi rivelatori ad un circuito di coincidenza, Rossi mostra che la radiazione cosmica si presenta, al livello del mare, sotto forma di "sciame" di particelle che arrivano insieme (in coincidenza), con una componente "penetrante" (i mesotroni) e una componente "soffice" (fotoni e elettroni)
- Bruno Rossi si convince che la radiazione primaria deve essere dovuta a particelle elettricamente cariche, come proposto da Bothe e Kalhorst: forse elettroni?

La scuola di Arcetri



Bruno Rossi con i suoi allievi:
in senso orario

Giuseppe (Beppo) Occhialini, seduto in alto
Pier Giovanni Caponi (in piedi)

Daria Bocciarelli

Gilberto Bernardini

Bruno Rossi

Beppo Occhialini, in Europa e poi in Brasile durante la guerra, partecipa alla scoperta del positrone (con Anderson) e del mesone di Yukawa (con Powell e Lattes), entrambe riconosciute con il Premio Nobel. Fondatore della fisica spaziale in Italia, con il programma SAC. Fondatore della scuola di Milano, da lui prende il nome il satellite Beppo SAX con cui e' stata mostrata la natura cosmologica dei Gamma Burst

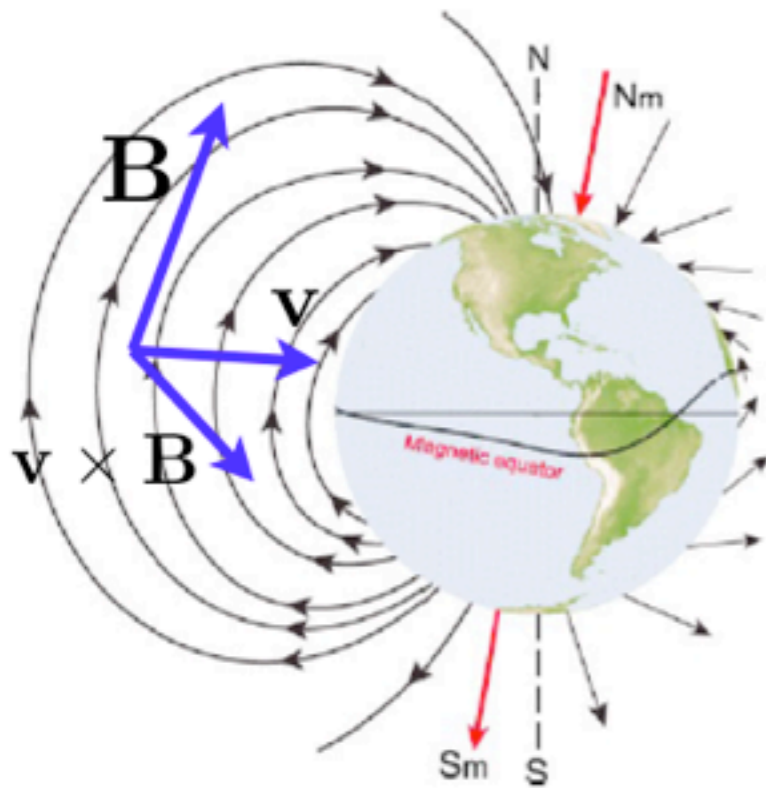
Daria Bocciarelli, a Roma, collabora con E. Amaldi e R. Querzoli ai test dell'elettrodinamica a partire dalle sezioni d'urto degli elettroni nei raggi cosmici soffici. Costruisce il microscopio elettronico dei Laboratori di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanita'. Alla fine degli anni '60 succede a Mario Ageno alla direzione del Laboratorio all'ISS.

Gilberto Bernardini, a Roma durante la guerra, inventa i magneti con cui Conversi, Pancini e Piccioni mostrano che il mesotrone non e' il mesone di Yukawa. Fisico internazionale, sara' il primo Presidente dell'INFN ed e' Direttore scientifico del CERN quando si realizzano i primi fasci di neutrini di alta energia

3. La misura dell' Effetto Est-Ovest

Sempre nel 1930 B. Rossi invia una lettera alla Physical Review in cui suggerisce che se i raggi cosmici primari sono **elettroni**, a causa del campo magnetico terrestre si deve osservare un **eccesso di radiazione proveniente da est** rispetto a ovest.

Nel 1934 (preceduto da Johnson e da Alvarez e Compton) pubblica i risultati sulla asimmetria Est-Ovest ottenuti in un viaggio in Eritrea ad Asmara (2,300 m).|



z	Direction	Total counts	Rate (min. ⁻¹)	W/E ratio
(a) counters unshielded, $d = 6.5 \text{ cm}^9$				
45°	W	4734	5.01 ± 0.052	
45°	E	4078	4.32 ± 0.049	1.161 ± 0.017
(b) counters shielded, 16 mm lead + 2 mm brass, $d = 12 \text{ cm}$				
45°	N	2516	1.39 ± 0.02	
45°	W	2669	1.47 ± 0.02	
45°	S	2446	1.35 ± 0.02	
45°	E	2246	1.24 ± 0.02	1.188 ± 0.022
30°	W	4290	2.08 ± 0.022	
30°	E	3710	1.80 ± 0.021	1.157 ± 0.018
15°	W	3962	2.48 ± 0.028	
15°	E	3570	2.23 ± 0.026	1.11 ± 0.018

error. We conclude therefore, in agreement with the results of Johnson and of Alvarez and Compton, that a portion at least of the cosmic radiation consists of **positively charged particles**.

$F = q \cdot (v \times B)$: se q e' positiva, la forza di Lorentz devia la particella da Ovest verso Est

Bruno Rossi and the Racial Laws of Fascist Italy

Luisa Bonolis*

.... with more cosmic rays going from east to west, or from west to east, depending upon the sign of their charge. He attempted, unsuccessfully, to detect this effect at Arcetri and then, in the summer of 1930, realizing that it would be more pronounced at low latitudes and high altitudes, he planned an expedition to Asmara, the capital of the Italian colony of Eritrea at a latitude of $11^{\circ}30'$ N and an altitude of 2,370 meters, but was delayed owing to logistical problems. Three years later, he and Sergio De Benedetti did lead an expedition there, but just before they left Arcetri two Letters to the Editor of the *Physical Review* appeared, one by Thomas H. Johnson,¹¹ the other by Luis Alvarez and Arthur H. Compton,¹² reporting their observations of an east-west effect in Mexico City. Since Rossi had predicted this effect three years earlier, he was particularly upset when both Johnson and Alvarez and Compton cited for that prediction a paper that Georges Lamaitre and Manuel S. Vallarta had published in January 1933,¹³ an “oversight” that Alvarez later acknowledged in a letter to him.¹⁴ In any case, Rossi and De Benedetti now observed that “chance coincidences” occurred when their Geiger-Müller counters were separated by large distances—which was the first observation of the extensive cosmic-ray showers that Pierre Auger and his collaborators studied in detail a few years later.

(*) La misura fu eseguita da Manuel S. Vallarta

Cacciata di Bruno Rossi (1938)

Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2002. 52:1–21
doi: 10.1146/annurev.nucl.52.050102.090730
Copyright © 2002 by Annual Reviews. All rights reserved

THE DISCREET CHARM OF THE NUCLEAR EMULSION ERA

Milla Baldo Ceolin

*Department of Physics, University of Padova and I.N.F.N., Sezione di Padova,
Via Marzolo 8, Padova 35131, Italy; e-mail: baldoceolin@pd.infn.it*

Having mentioned Bruno Rossi brings to mind that this man was a Professor of Physics at the University of Padova from 1932 to 1938, when, as he said himself (8), he received the unexpected notice that the University did not need him anymore. Because he was a Jew, he had been deprived not only of the right to teach and to have a salary, but also of the right to continue his research and even of his right to enter the Institute of Physics that he himself had founded. And we who arrived later in this Institute still feel his pain weighing on us, along with the responsibility of telling his story, hoping that such terrible pain will never again be inflicted, and that his impression of the faces around him suddenly turning into white masks, without eyes, expressionless, will never again be possible. This action left a deep sadness on Bruno Rossi's remaining life. I think he never forgave it.

He returned to Padova only in 1987 for the celebration of the fiftieth anniversary of his Institute.

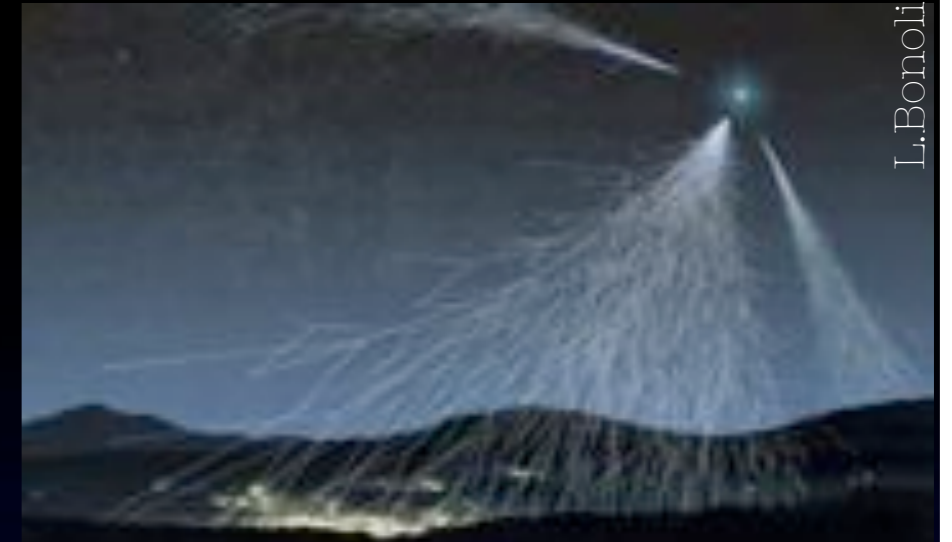
4. Bruno Rossi negli Stati Uniti

- osserva per primo la dilatazione relativistica del tempo misurando la vita media dei mesotroni in volo
- collabora con Fermi al Progetto Manhattan
- dopo la guerra torna ai Raggi Cosmici per lo studio delle “nuove particelle”
- all’ MIT, si interessa agli “sciame estesi” ed inizia lo studio dei Raggi Cosmici di altissima energia;
- un suo allievo, John Linsley, insieme al fisico italiano Livio Scarsi, realizza il primo osservatorio per i raggi cosmici di Ultra High Energy (a Volcano Ranch). Nel 1962 osservano uno sciame esteso creato da una particella primaria con energia superiore a 10^{20} eV
- inventa l’astronomia a raggi X dallo spazio, con i primi rivelatori su razzo. Nel 2002 un suo allievo, Riccardo Giacconi, prendera’ il Premio Nobel per la scoperta della prima sorgente X, Cygnus X1.

Fisica delle particelle nell' "età dell'innocenza" 1939-1943

Mesotrone, 1936-1937: particella di Yukawa?.....

Luisa Bonolis. Figure e storie della fisica del Novecento
A.I.F. Scuola di Storia della Fisica 2010
Aosta, 29 novembre - 4 dicembre



L. Bonolis 2010

1938: P.V. Auger, R. Maze, Roland Maze
e Thérèse Grivet-Meyer "riscoprono" gli sciami atmosferici (EAS)

Tardi anni '30: M. Schein mostra che i primari non sono elettroni



Rossi e il decadimento del mesotrone

- ◆ Prima prova sperimentale non ambigua del decadimento del mesotrone
- ◆ Dimostrazione della dilatazione relativistica dei tempi per il mesotrone in volo
- ◆ Prima misurazione precisa (sorprendentemente vicina a quella attuale) della vita media del mesotrone a riposo: $(2.3 \pm 0.2) \times 10^{-6}$ s.

"Era ancora un'epoca in cui risultati fondamentali per la fisica delle particelle elementari potevano essere ottenuti per mezzo di esperimenti straordinariamente semplici, che costavano poche migliaia di dollari e che richiedevano soltanto l'aiuto di uno o due giovani laureati..."

Bruno Rossi (Momenti nella vita di uno scienziato)

Ritorno alla fisica fondamentale: la scuola di Varenna (1954)

Luisa Bonolis. Figure e storie della fisica del Novecento

Varenna 1954

Bruno Rossi, Gilberto Bernardini, Enrico Fermi



E. Fermi, "Lectures on Pions and Nucleons"
B. Rossi, "Lectures on Fundamental Particles"
B. Rossi, "Lectures on the Origin of Cosmic rays"

martedì 28 dicembre 2010

Verso lo spazio esterno

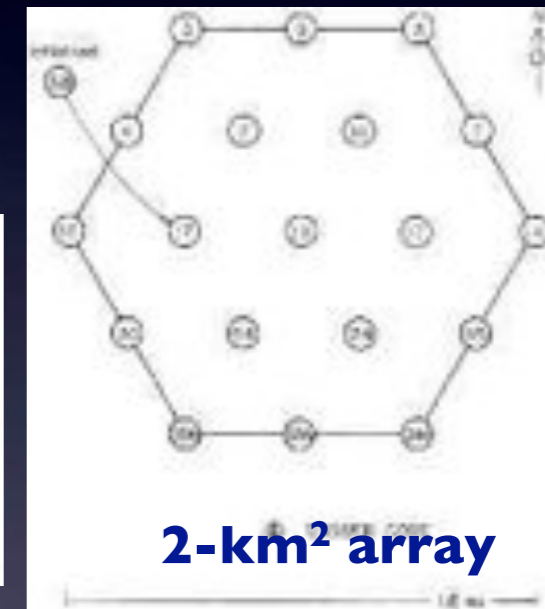
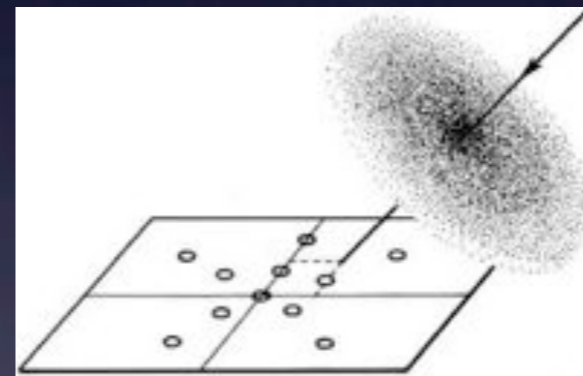
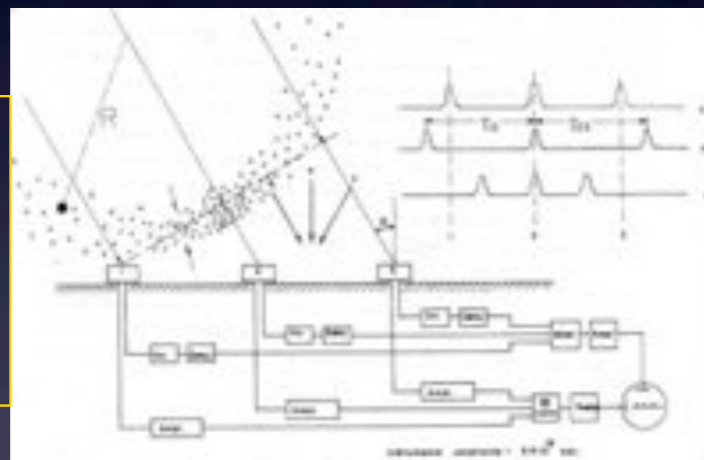
Gli sciami estesi dell'atmosfera



- ▶ 0,67 eV energia necessaria a un protone o neutrone per sfuggire all'attrazione terrestre
- ▶ 1000 – 15 000 eV energia tipica di un elettrone in un'aurora polare
- ▶ 200 000 eV energia dei raggi X di una radiografia dentaria
- ▶ 1 - 10 MeV energia delle particelle emesse dagli elementi radioattivi
- ▶ 1-100 000 000 000 GeV Dominio delle energie tipiche dei raggi cosmici

Verso gli aspetti
astrofisici del problema
dei raggi cosmici

Particelle primarie
con energia 10^{20} eV
(1959-1962, Volcano
Ranch)

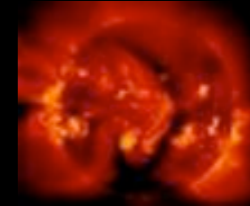


Extended Air Showers MIT Volcano Ranch Experiment

“Al MIT non mise mai le mani su un cacciavite o un saldatore... non ricordo che Bruno ‘ordinasse’ mai a qualcuno di fare qualcosa: le attività scaturivano sempre dal discutere sulle possibilità.”

Matthew Sands

5. Bruno Rossi e la nascita dell'Astronomia X



Una sfida scientifica Ovvero: il caso favorisce la mente predisposta

Nonostante le alte temperature degli strati esterni del sole (corona e brillamenti) l'intensità totale in raggi X in lunghezze d'onda inferiori a circa 10 \AA è estremamente ridotta. Così che i primi studi sul sole fornivano una descrizione di quella che gli scienziati assumevano essere una tipica emissione X da stelle analoghe alla nostra, funzionando da disincentivo per le ricerche dell'epoca.

“Devo ammettere che la mia motivazione principale era una profonda fiducia nelle illimitate risorse della natura, che così spesso sorpassa di gran lunga la più audace immaginazione umana.”

Bruno Rossi

Tuttavia, secondo l'opinione del gruppo di Rossi (R. Giacconi, F. Paolini), i vari processi in cui vengono prodotti raggi X in differenti quantità potevano indurre a pensare a grandi variazioni di flusso in stelle di tipo diverso.

In altre parole, l'astronomia X poteva essere di interesse ben più ampio dell'astronomia ottica e ci si poteva aspettare di vedere in molti casi oggetti diversi da quelli identificati attraverso la luce visibile. Nuovi meccanismi di produzione rendevano particolarmente interessante questo tipo di astronomia...

“Ma nessuno aveva ancora esplorato il cielo con rivelatori per i raggi X così sensibili come quelli che io speravo potessero essere sviluppati, e questa per me era una ragione sufficiente per intraprendere questa esplorazione; la mia lunga esperienza come fisico dei raggi cosmici mi aveva insegnato che quando si entra in un territorio inesplorato esiste sempre la possibilità di trovare qualcosa di imprevedibile.”

Bruno Rossi

Bruno Rossi e la nascita dell'astronomia X

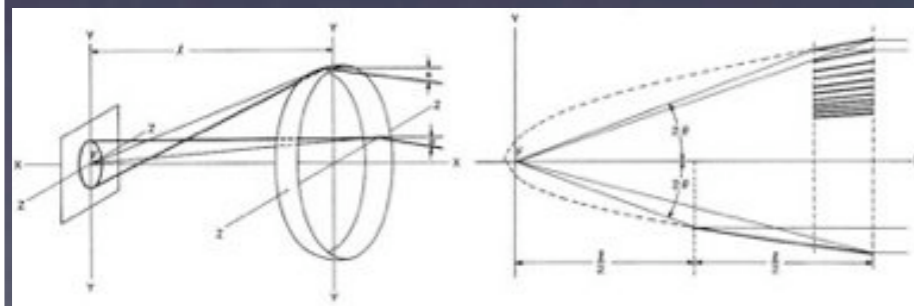
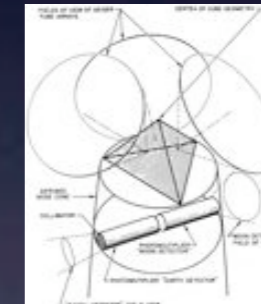
Una sfida scientifica

“Mentre il nostro esperimento era ufficialmente mirato alla luna, speravamo che avrebbe anche rappresentato un primo tentativo nella ricerca di altre più remote sorgenti di raggi X. Così, invece di usare un rivelatore con un ristretto campo ristretto di vista, che montato su un razzo in rotazione avrebbe ripetutamente esplorato una stretta striscia del cielo contenente la luna, decidemmo di lasciare il campo di vista del rivelatore completamente aperto, in modo da dargli modo di esplorare una larga sezione del cielo.”

Bruno Rossi



Il team dell' American Science & Engineering
Riccardo Giacconi, Frank Paolini, Herbert Gursky



**B. Rossi and R. Giacconi,
A 'Telescope' for Soft X-Ray Astronomy"
J. Geophys. Res. 1960**

Il sistema di rivelazione sviluppato da Frank Paolini consisteva in tre serie di Geiger a forma di pancake. Rappresentava un notevole miglioramento da un punto di vista della sensibilità (l'area di rivelazione era molte centinaia di volte più ampia), dei tempi per l'accumulo dei dati e del range in lunghezza d'onda. Il fondo cosmico venne ridotto con un sistema di anticoincidenze.

Alle frontiere della fisica

Ricordo che passammo mesi e mesi ad assicurarci che non ci fosse qualche errore nelle nostre determinazioni e per convincerci che la sorgente di raggi X non era effettivamente la luna...

Eravamo tutti scettici all'inizio e facemmo un gran lavoro per valutare tutte le possibili sorgenti di errore.

In autunno, essendo finalmente certi di aver correttamente interpretato le nostre osservazioni, ci sentimmo autorizzati ad informare la comunità scientifica della nostra scoperta: Riteniamo che i data possano essere spiegati nel modo migliore identificando l'insieme della radiazione come raggi X molli provenienti dall'esterno del sistema solare.

L'annuncio della scoperta di una sorgente di raggi X situata all'esterno del sistema solare fu accolta con molto interesse, ma inizialmente con considerevole scetticismo; tanto che la nostra "lettera" fu inizialmente respinta da Physical Review, e alla fine fu accettata per la pubblicazione soltanto dopo che io stesso dissi a Samuel Goudsmith, all'epoca editor della rivista, che mi assumevo personalmente la responsabilità del contenuto.

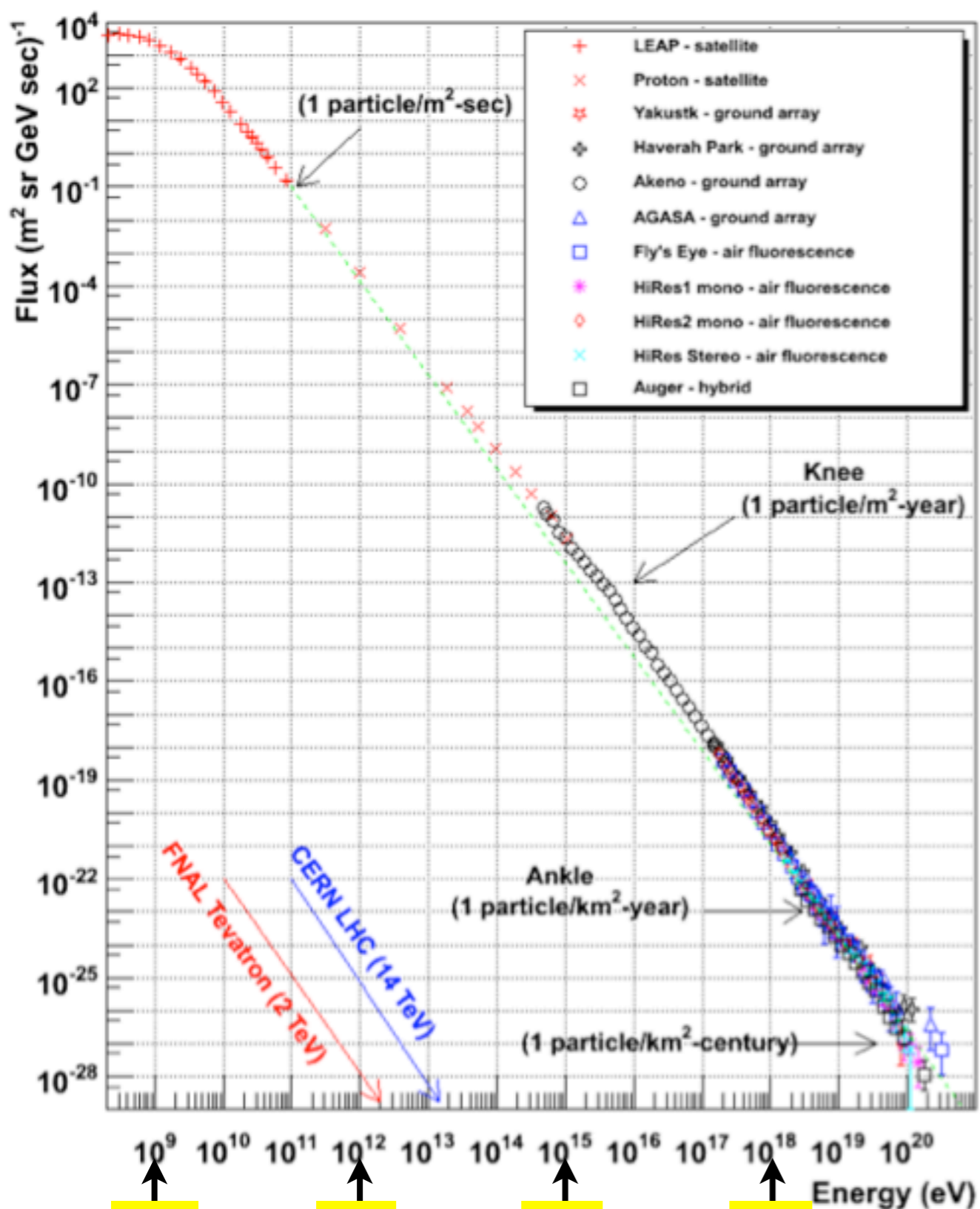
Lo scetticismo era giustificato. L'esistenza di una sorgente celeste, presumibilmente molto remota di raggi X di tale straordinaria intensità da essere osservabile con i nostri semplici strumenti appariva incompatibile con tutte le osservazioni astronomiche disponibili all'epoca e che riguardavano i corpi celesti noti.

Quello che il nostro esperimento rivelava non contraddiceva queste informazioni, ma aveva dimostrato l'esistenza di oggetti celesti in precedenza sconosciuti a cui tali informazioni non si applicavano..."

Bruno Rossi

6. Lo spettro dei Raggi Cosmici

Cosmic Ray Spectra of Various Experiments



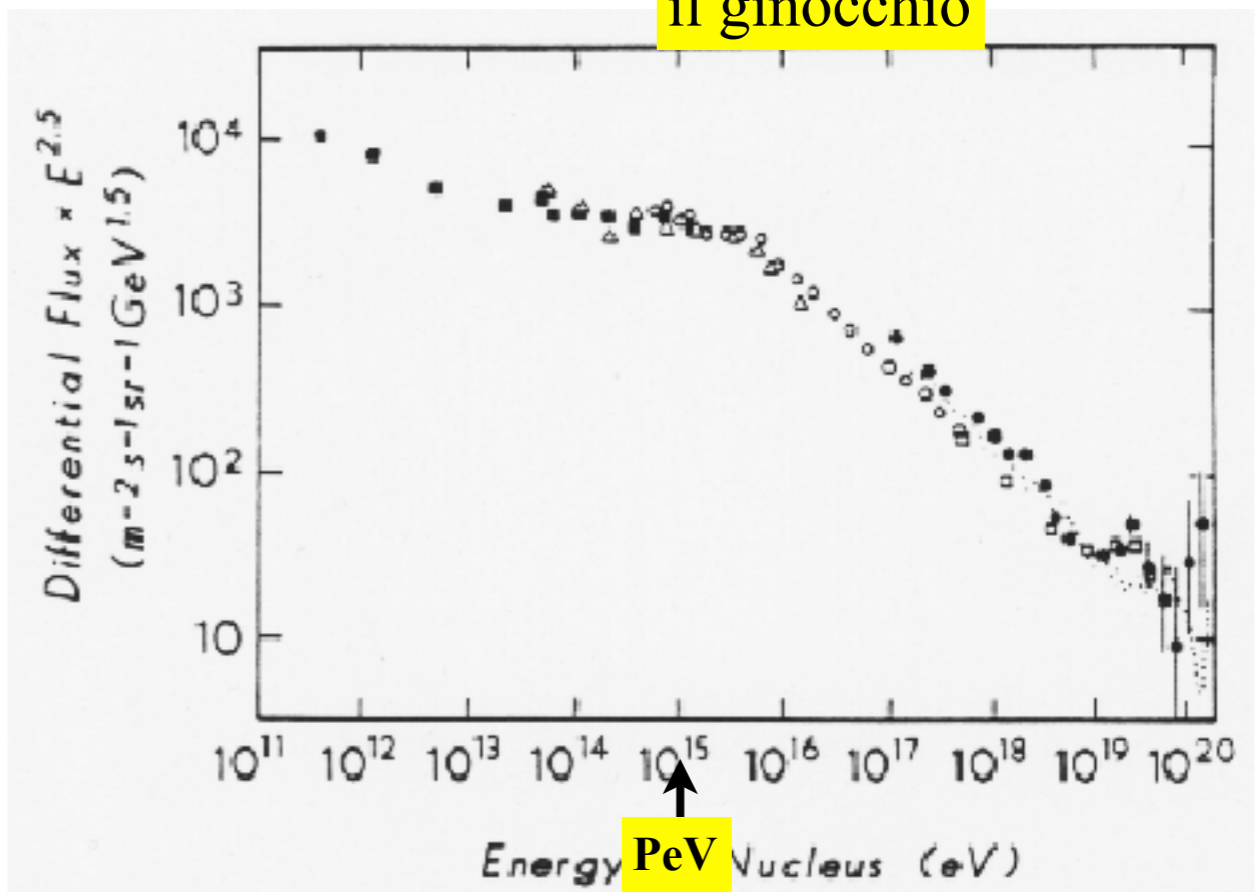
GeV

TeV

PeV

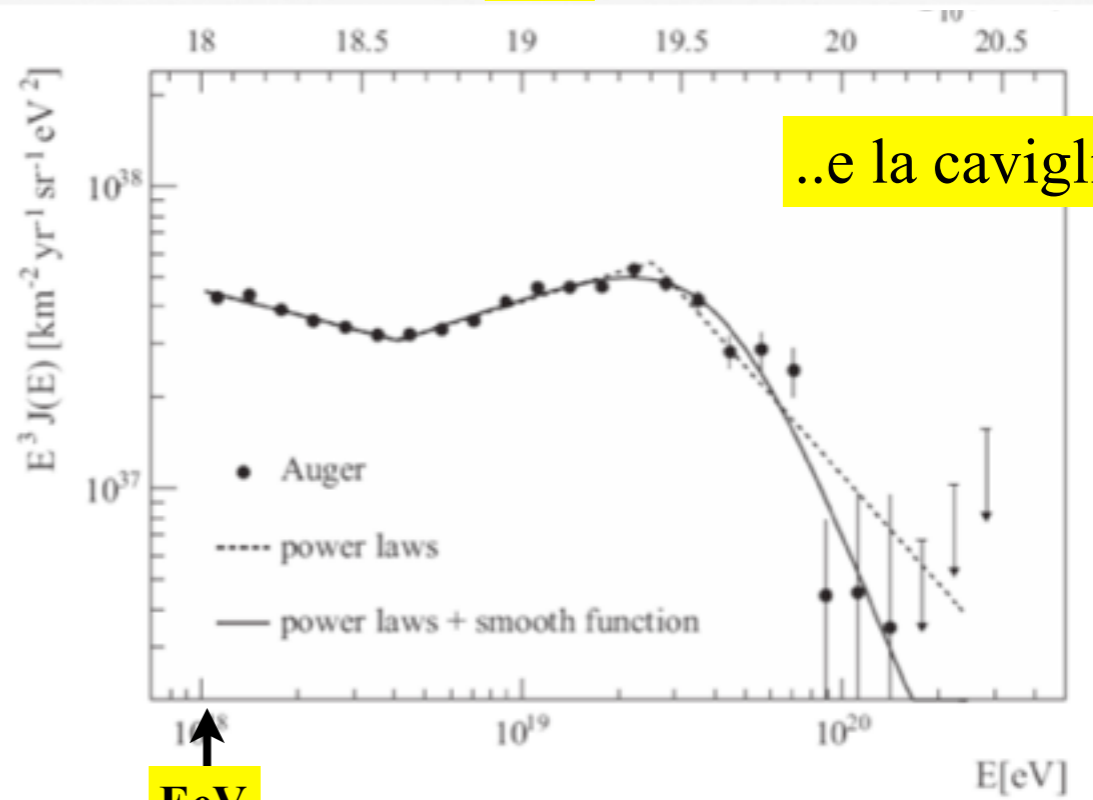
EeV

il ginocchio



PeV

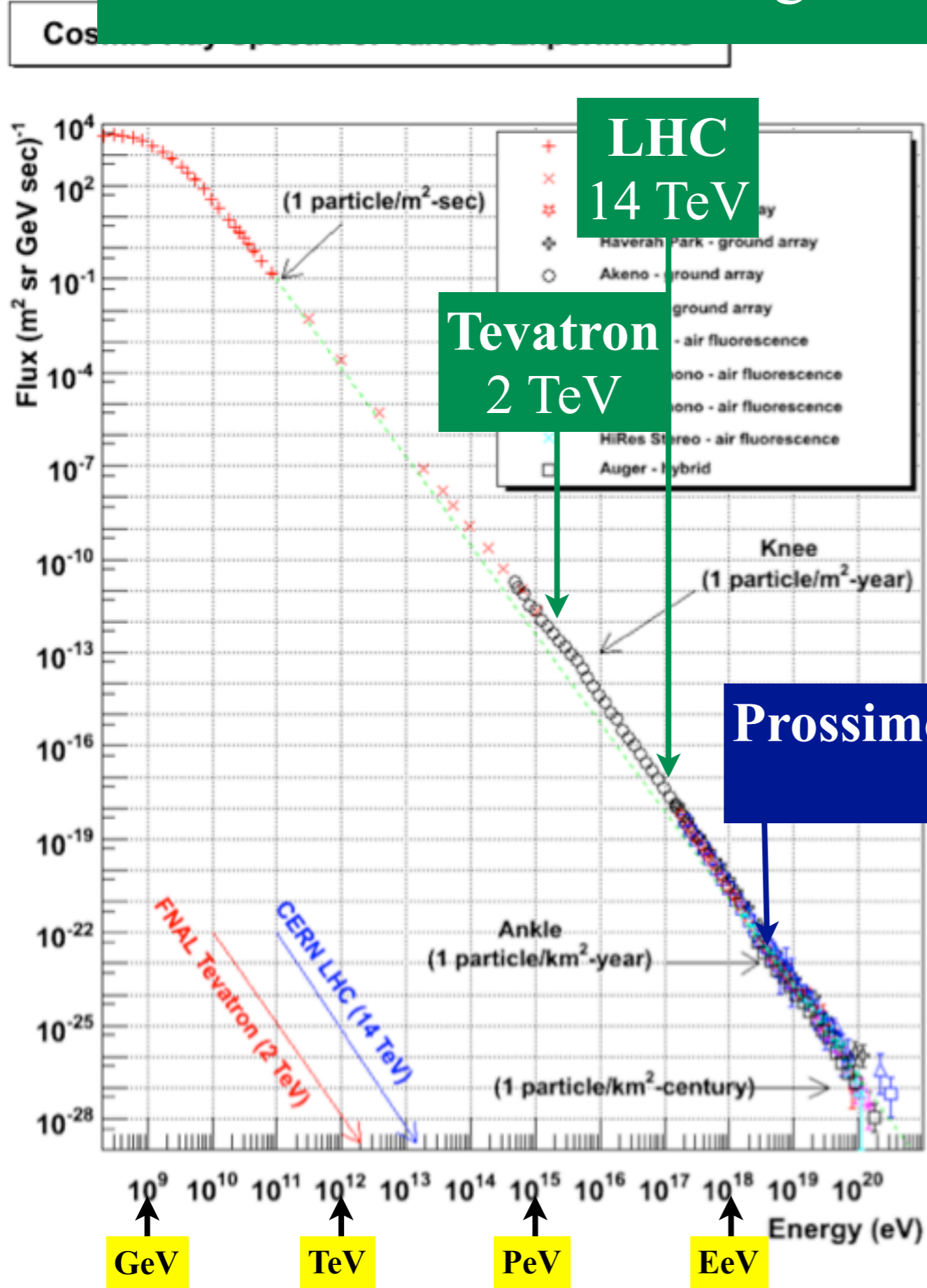
..e la caviglia



EeV

E[eV]

Confronto con le energie raggiungibili agli acceleratori



- l'efficacia di una collisione (ad.e. la massa di nuove particelle che si possono produrre) dipende dall'energia nel centro di massa, riferimento in cui le quantita' di moto sono opposte

– C.d.m.: $\mathbf{p}_{\text{proj}} + \mathbf{p}_{\text{bers}} = 0$

- collisori moderni: $E_{\text{cm}} = 2E_{\text{fascio}}$

- collisioni RC+atmosfera:

$$E_{\text{cm}} = \sqrt{2Em}$$

- l'interazione dei RC col gas interstellare non dovrebbe riservare grandi sorprese

Un esercizio: energia del centro di massa in Relativita'

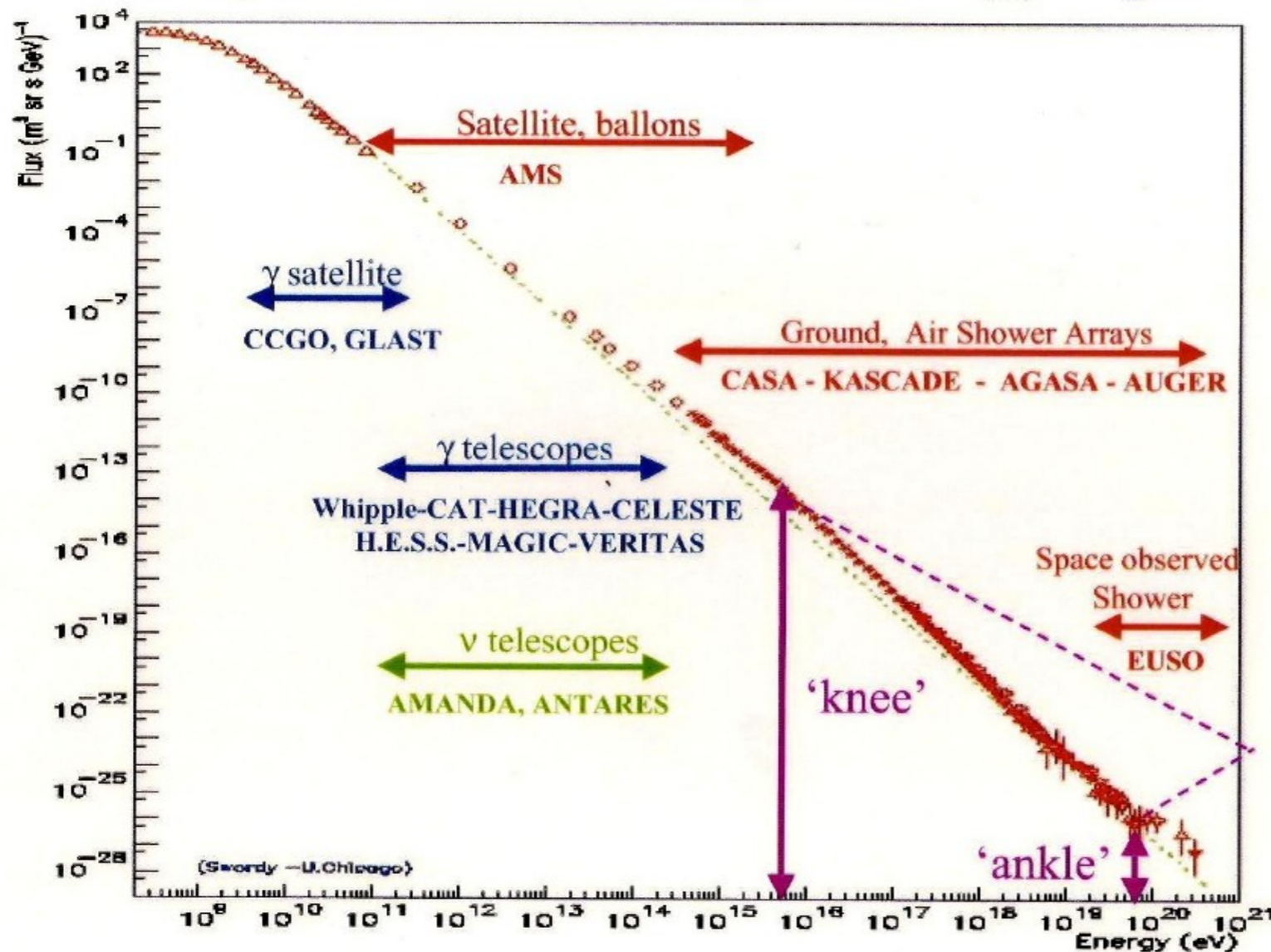
- Nella Teoria della Relativita', energia e quantita' di moto di una particella formano un 4-vettore, che si chiama il 4-momento: $p^\mu = (E, \mathbf{p}); \quad (c = 1)$
- il "quadrato" del 4vettore e' un invariante relativistico (prende lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento). Visto che nel sistema di quiete della particella $p=(m, 0)$, il quadrato di p da' il quadrato della massa della particella, sempre: $p^2 = E^2 - \mathbf{p} \cdot \mathbf{p} = m^2$
- Se ho due particelle, con 4 momenti p_1 e p_2 , la somma dei 4 vettori definisce l'energia e il momento totali. Nel sistema del centro di massa, ho $P= p_1 + p_2= (E_{cm}, \mathbf{0})$, quindi $E_{cm}^2=P^2$
- P^2 lo possiamo calcolare in qualunque sistema di riferimento, ad esempio nel sistema in cui il bersaglio e' in quiete e il raggio cosmico ha 4momento $p_1=(E, \mathbf{p})$.
- Per un urto protone-protone: $E_{cm}^2 = (p_1 + p_2)^2 = p_1^2 + p_2^2 + p_1 \cdot p_2 = 2m_p^2 + 2Em_p$
- per grandi valori di E_{cm} possiamo trascurare $2m_p^2$ e troviamo, come anticipato: $E_{cm} = \sqrt{2Em_p}$
- Un caso interessante e' quello di una particella di massa 0, ad es. il fotone. Il 4momento e': $q = (\omega, \mathbf{q})$, con : $|\mathbf{q}| = \omega$ in accordo con il fatto che deve essere: $q^2 = \omega^2 - |\mathbf{q}|^2 = m^2 = 0$
- in un urto frontale protone-fotone, l'energia del centro di massa e' data da:

$$E_{cm}^2 = (p + q)^2 = m_p^2 + 0 + 2p \cdot q = m_p^2 + 2(E\omega + P\omega) \approx m_p^2 + 4\omega E$$

ovvero : $E = \frac{E_{cm}^2 - m_p^2}{4\omega}$

Direct and indirect detection

Charged Cosmic Ray Energy Spectrum



HE $> 10^9$ eV

VHE $> 10^{12}$ eV

7. Raggi Cosmici galattici ed extra-galattici

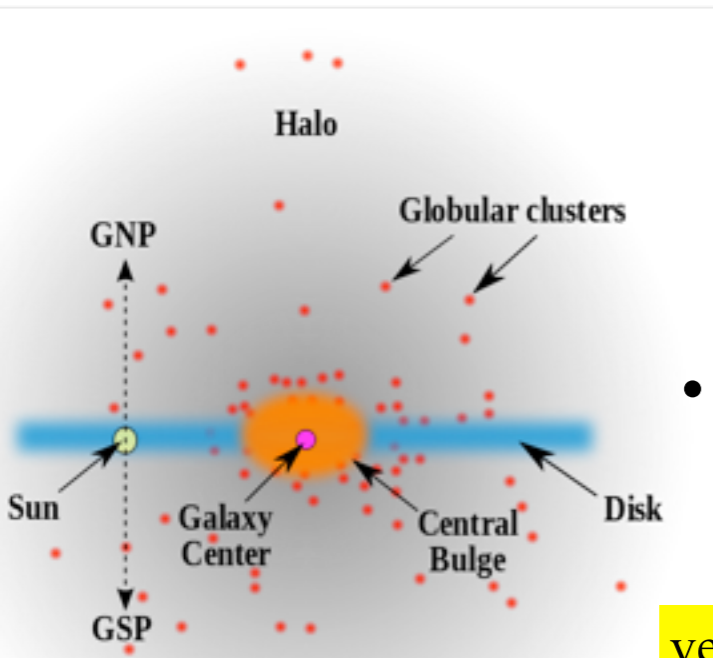
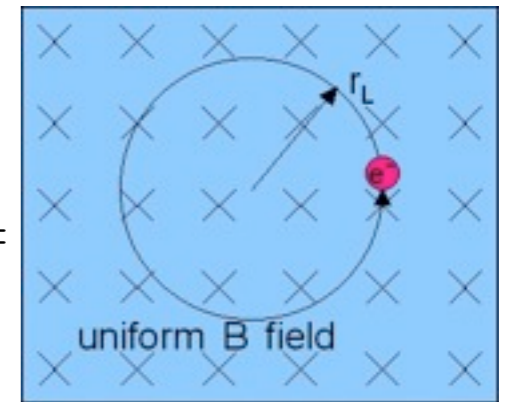
- Il ginocchio sembra segnare l'inizio del declino dei raggi cosmici che originano nella Galassia
- i protoni di alta energia si muovono su cerchi concentrici alle linee di forza del campo magnetico galattico, che corre lungo i bracci della Galassia, di raggio pari al raggio di Larmor

- per un protone:

$$R = \frac{q}{eB} = 3.3 \text{ km} \left(\frac{q}{1 \text{ TeV}} \right) \left(\frac{1 \text{ Tesla}}{B} \right) =$$

$$= 3.3 \cdot 10^3 \cdot 10^{10} \text{ km} \left(\frac{q}{1 \text{ PeV}} \right) \left(\frac{1 \mu\text{Gauss}}{B} \right) =$$

$$\approx 3 \text{ ly} \left(\frac{q}{1 \text{ PeV}} \right) \left(\frac{1 \mu\text{Gauss}}{B} \right)$$



- per $q \approx 10^2 \text{ PeV}$, il raggio di Larmor diventa confrontabile con il raggio dei bracci della spirale ($\approx 500 \text{ ly}$) e i protoni cominciano ad uscire dalla Galassia.

vedi e.g.: F. Giordano, L. Di Venere / Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 256–257 (2014) 78–88

- Le prime ipotesi sul meccanismo di accelerazione dei protoni all'interno della Galassia sono dovute a E. Fermi che lo collegò all'effetto di campi magnetici variabili
 - nelle collisioni stocastiche con i campi magnetici irregolari all'interno di nubi di gas che si muovono nel mezzo interstellare (1949), ma è considerato un meccanismo meno importante
 - nelle collisioni con i campi magnetici nelle onde di shock (1954): è considerato il meccanismo dominante, dovuto alle onde di shock generate dalle Supernovae da collasso del core.

composizione

- le abbondanze dei nuclei osservati nei raggi cosmici riflettono le abbondanze stellari : Idrogeno + He + metalli
- sono le abbondanze tipiche della composizione dei residui di Supernova

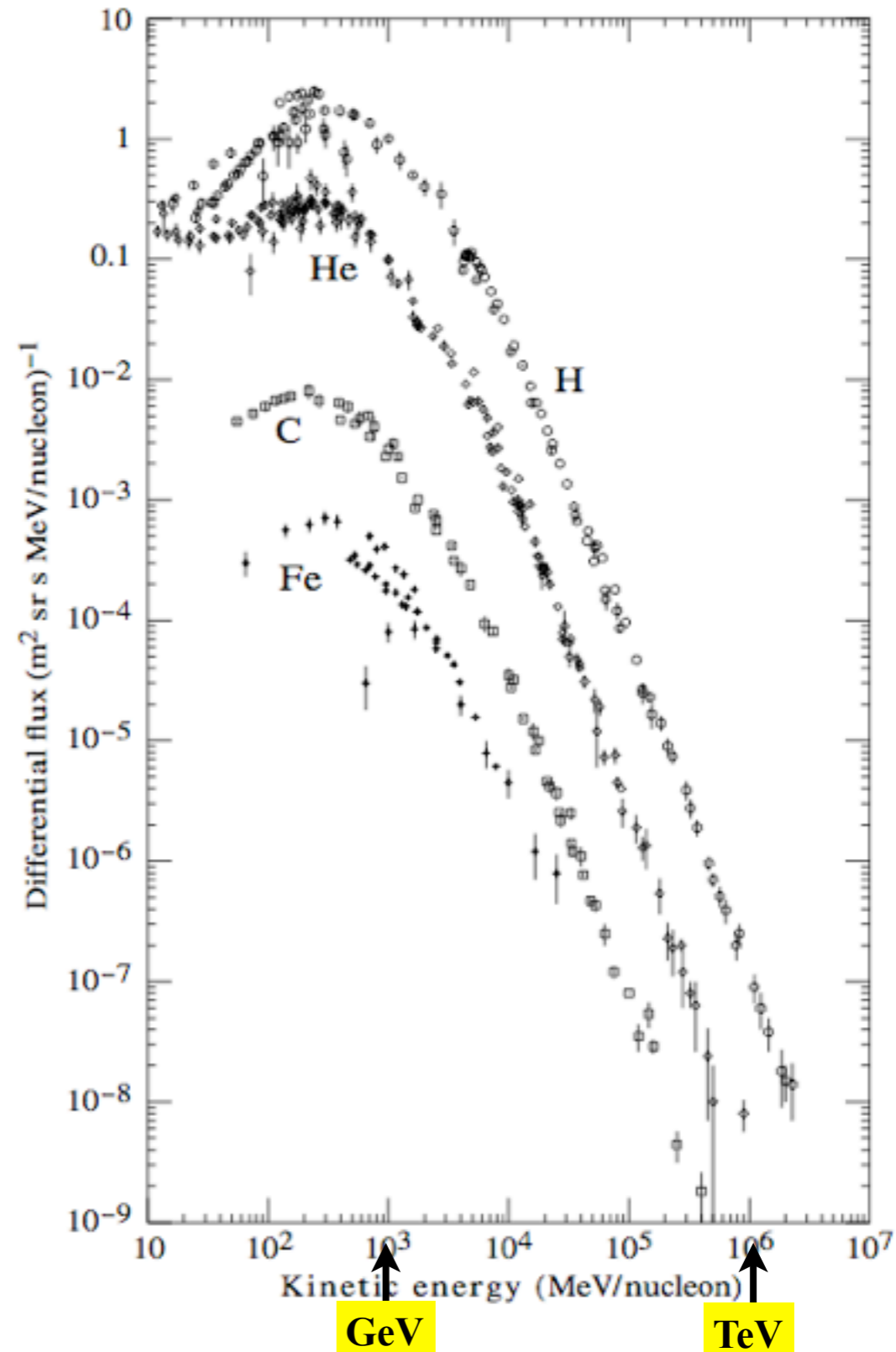


Figure 1: Major components of the primary cosmic rays (from Simpson).

energetica

- ma anche il bilancio delle energie e' compatibile con la produzione e accelerazione dei Raggi Cosmici fino al PeV (ginocchio), a partire dalle onde d'urto generate dall'esplosione di una Supernova a seguito del collasso del core
- alcuni fatti
 - densita' di energia immagazzinata nei RC: $\rho_{RC}=1 \text{ eV/cm}^3= 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ erg/cm}^3$;
 - volume della Galassia: $V_G= 1.6 \cdot 10^{66} \text{ cm}^3$ (un disco di raggio $R=50.000 \text{ ly}$, e spessore $w=1000 \text{ ly}$, fate la conversione),
 - $E_{RC} = \rho_{RC} V_G = 2.6 \cdot 10^{54} \text{ erg}$
 - tempo di permanenza dei raggi cosmici nella Galassia: $T_{RC} = 10 \text{ Milioni di anni}$
- Energia iniettata dalle supernovae nella Galassia (neutrini esclusi)
 - $R_{SN} = \text{Supernovae/anno} = 3/\text{secolo} = 3 \cdot 10^{-2} / \text{anno}$
 - energia visibile in una Supernova: $E_{SN} = 10^{51} \text{ erg}$
 - energia nel tempo T_{RC} , $E = T_{RC} R_{SN} E_{SN} = 3 \cdot 10^{56} \text{ erg} = 100 E_{RC}$
- basta un'efficienza di trasferimento dell' 1% dalle onde di shock alle particelle accelerate per spiegare tutta l'energetica dei RC con le Supernovae !
- un altro modo per arrivare allo stesso risultato:

Energia fornita ai RC dalle SN per anno : $E_{in} = \epsilon E_{SN} R_{SN}$
($\epsilon =$ coefficiente di trasferimento di energia ai RC)

Energia persa dai RC per anno : $E_{out} = \frac{E_{RC}}{T_{RC}}$

in condizioni stazionarie deve essere : $E_{out} = E_{in} \rightarrow \epsilon \approx 0.01$