

Fisica ed Astrofisica dei Raggi Cosmici

11-18 febbraio 2010

prof. Mariagrazia Fabbri

mariagrazia.fabbri@libero.it

Sommario

1. I Raggi Cosmici

i. Generalità e prime osservazioni

ii. Misure dirette e “composizione chimica”

a. La nostra Galassia

b. Le Supernovae originano i RC

iii. Misure Indirette

a. Possibili sorgenti extragalattiche

2. Alcuni effetti dei RC sulla vita quotidiana

Sommario

1. I Raggi Cosmici

1.1 Generalità e prime osservazioni

1.2 Misure dirette e “composizione chimica”

- La nostra Galassia
- Le Supernovae originano i RC

1.3 Misure Indirette

- Possibili sorgenti extragalattiche

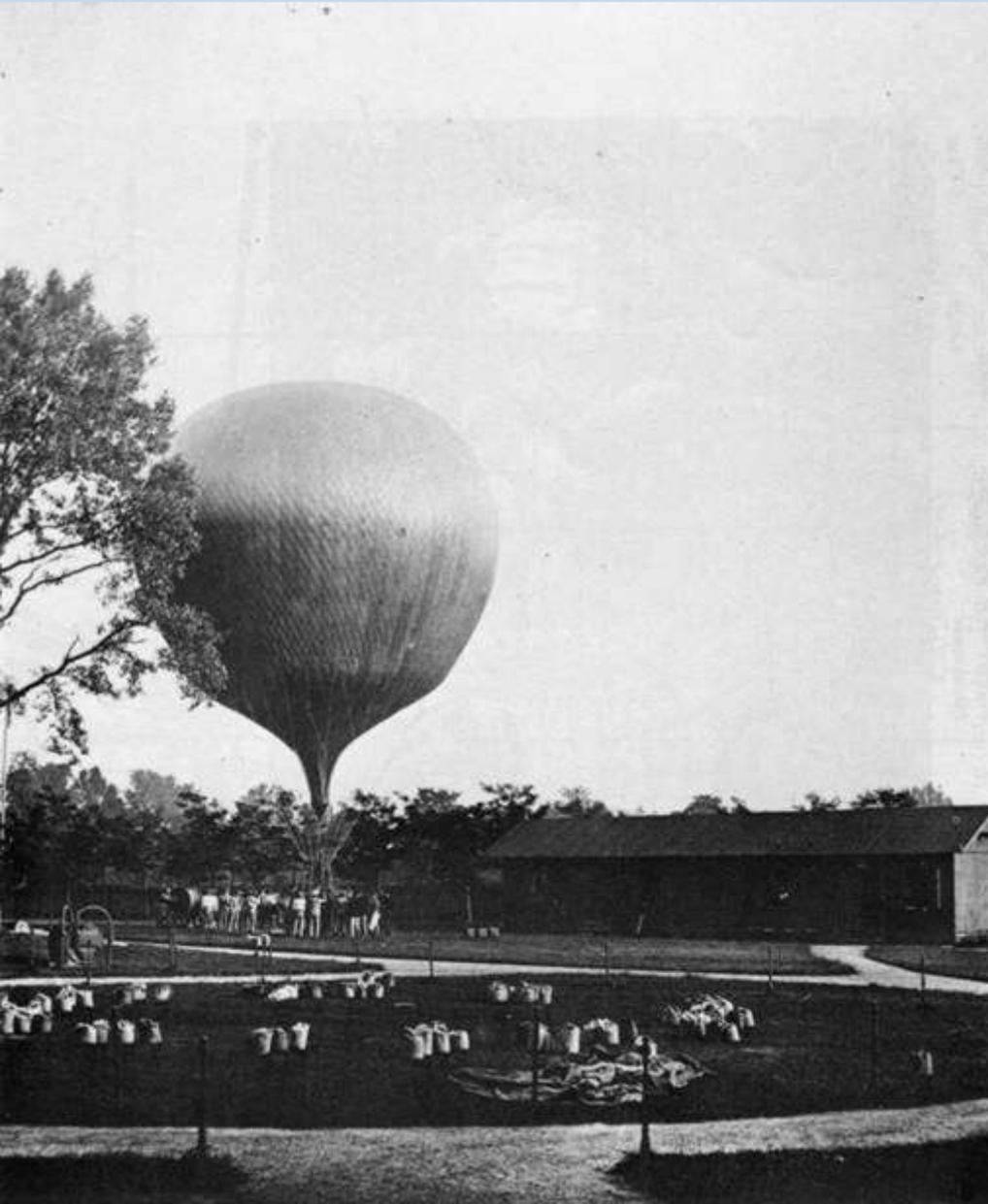
2. Alcuni effetti dei RC sulla vita quotidiana

La scoperta dei RC

- L'esistenza dei Raggi Cosmici fu scoperta da Victor Hess agli inizi del 1900. La radioattività era stata da poco scoperta.
- Il problema: sembrava che nell'ambiente ci fosse molta più radiazione di quella che poteva essere prodotta dalla radioattività naturale.
- Inoltre, allontanandosi dalla Terra (dove ci sono le rocce radioattive), la "radioattività" sembrava aumentare.



Il primo esperimento



- Nel 1912, Hess caricò su un pallone aerostatico un dispositivo per misurare le particelle cariche.
- Nel volo, si dimostrò come la radiazione aumentava con l'altitudine.
- Questo significava che la radiazione sconosciuta non aveva origine terrestre (come la radioattività naturale) ma proveniva dallo spazio esterno, da cui il nome di **Raggi Cosmici**

- Dopo Hess, fu [Millikan](#), nel 1925, ad interessarsi a questa radiazione, e a lui si deve il nome di **raggi cosmici**: egli riteneva che fossero composti principalmente da raggi gamma.
- [Compton](#) ipotizzò, al contrario, che fossero composti da particelle cariche: successive misurazioni dimostrarono la validità di questa seconda ipotesi. La distribuzione dei RC, infatti, variava con la latitudine magnetica, come ci si attende per le particelle cariche sotto l'influenza del campo geomagnetico terrestre.
- Nel 1930 il fisico italiano [Bruno Rossi](#) notò che, se la carica delle particelle era positiva, esse dovevano provenire, al Polo Nord, in maniera preferenziale da ovest. [Thomson](#) dimostrò sperimentalmente la correttezza dell'intuizione dell'italiano.

A partire dagli anni '30 sino alla nascita dei primi acceleratori di particelle,

la storia della fisica delle particelle coincide con quella dei Raggi Cosmici

Successivamente si pose la questione sull'origine e la provenienza dei raggi primari.

Nascita dell'astrofisica dei RC

la storia della fisica delle particelle coincide con
quella dei Raggi Cosmici

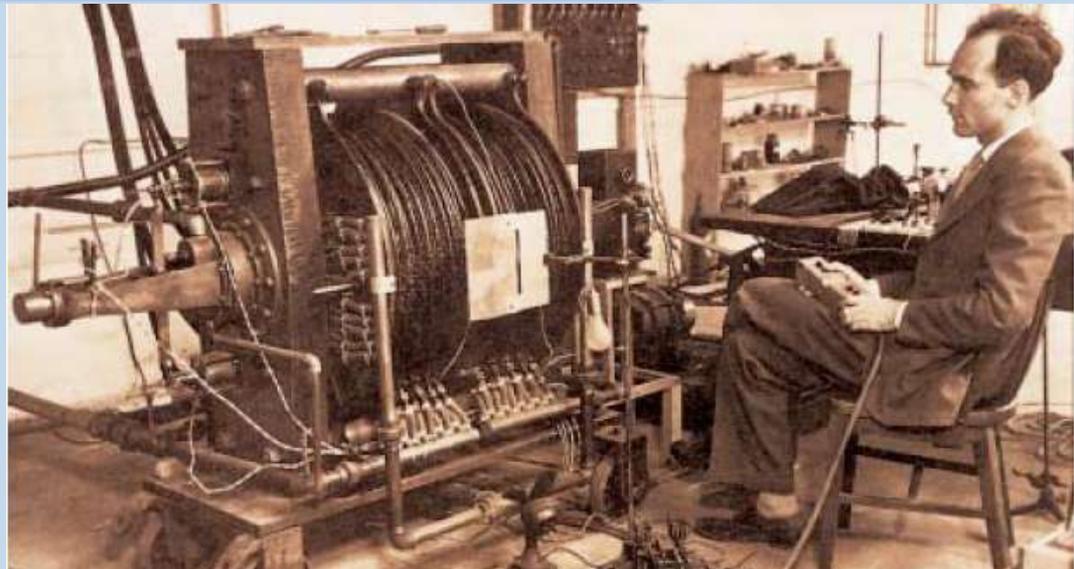
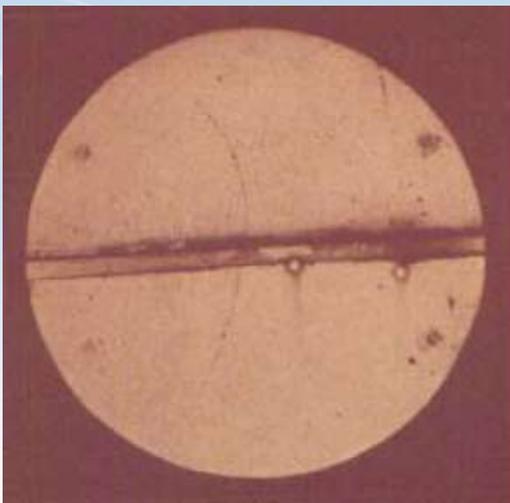


Particelle scoperte nei RC

- **Il positrone (1932).**

- Carl Anderson osservò delle particelle cariche positivamente, che lasciavano nella camera a nebbia la stessa traccia degli elettroni. I suoi risultati furono convalidati nel 1933 da P. Blackett e G. Occhialini che riconobbero in esse l'antielettrone o positrone proposto teoricamente da Dirac, osservando la conversione di fotoni di alta energia in coppie e^+e^- .
- Vedi:

<http://www.infn.it/notiziario/not12/Art1.pdf>



• Il muone (1937).

Ancora Anderson, notò delle particelle che deviavano in maniera diversa dagli elettroni e da altre particelle note quando queste passavano attraverso un campo magnetico. In particolare, queste nuove particelle venivano deflesse ad un angolo minore rispetto agli elettroni, ma più acuto di quello dei protoni. Si assunse che la loro carica fosse identica a quella dell'elettrone e, per rispondere alla differenza di deflessione, si ritenne che avesse una massa intermedia (un valore compreso tra la massa del protone e dell'elettrone).

- Si pensava che fosse la particella ipotizzata da Yukawa per spiegare le interazioni tra nucleoni per formare i nuclei
- Si scoprì che questa particella aveva delle caratteristiche peculiari da renderla il cugino pesante dell'elettrone (esperimento Pancini-Piccioni-Conversi). Leggere l'articolo di Salvini:

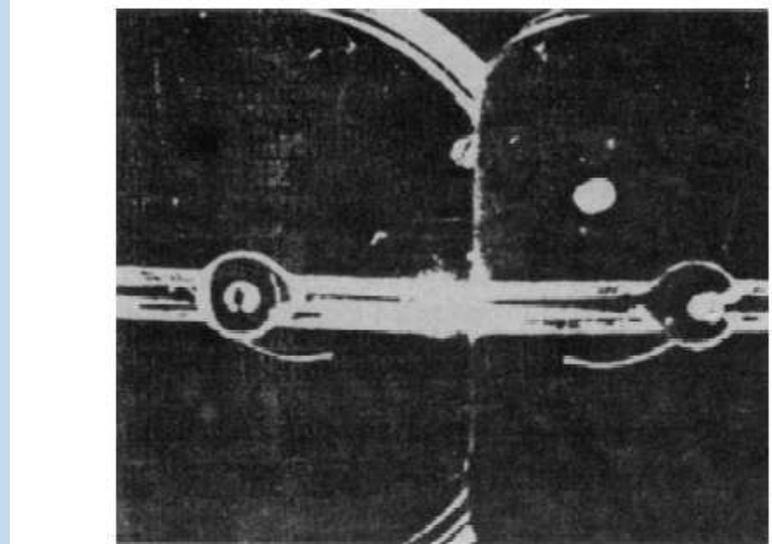
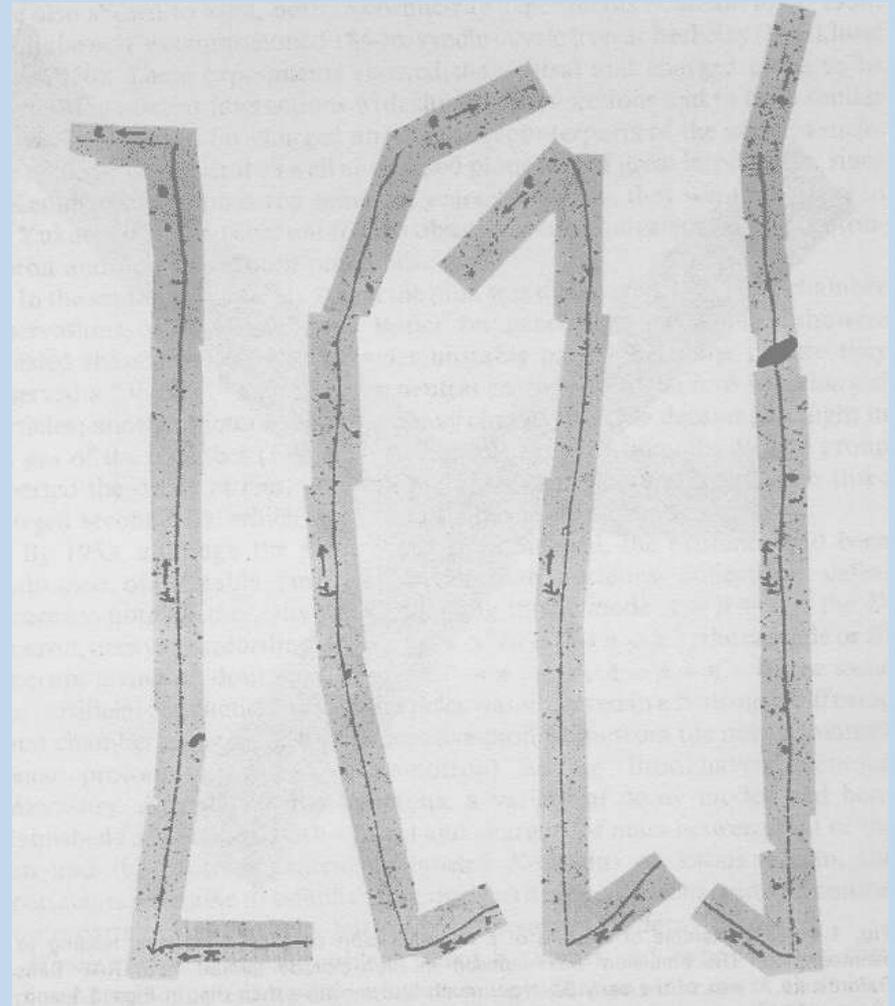


Fig. 1. – Evidenza in camera di Wilson di un muone positivo che attraversa un contatore di Geiger entro la camera [1]. La sensibilità della camera non poteva arrivare a rivelare l'elettrone di decadimento.

- **Il pione (1947).**

- Particella predetta nel 1936 da Hideki Yukawa, il pione si osservò sperimentalmente solo nel 1947 da parte di C.F. Pawel, G. Occhialini e C. Lattes, utilizzando speciali emulsioni fotografiche per registrare la produzione di pioni da parte dei raggi cosmici e il loro successivo decadimento in muoni, che a loro volta decadono in elettroni (o positroni) e in neutrini (invisibili).

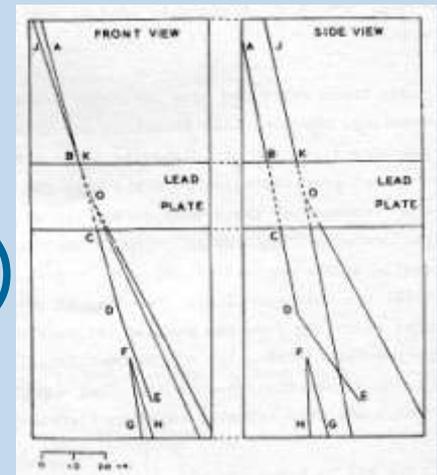
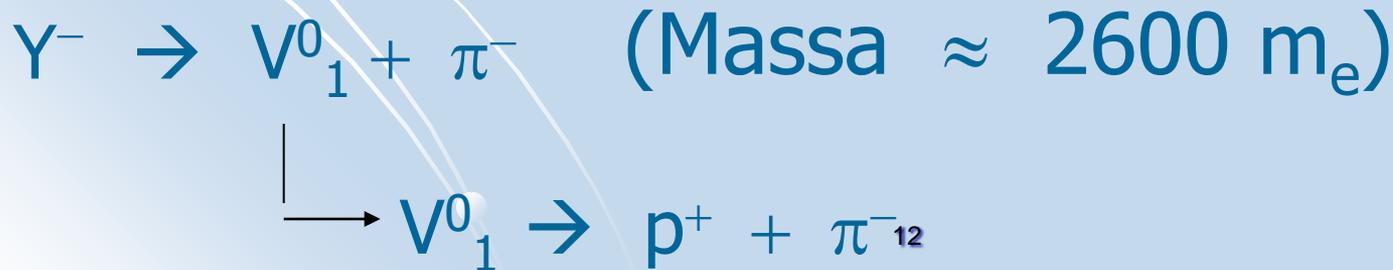
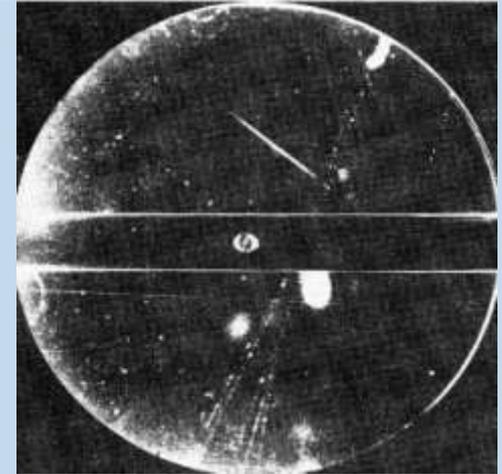
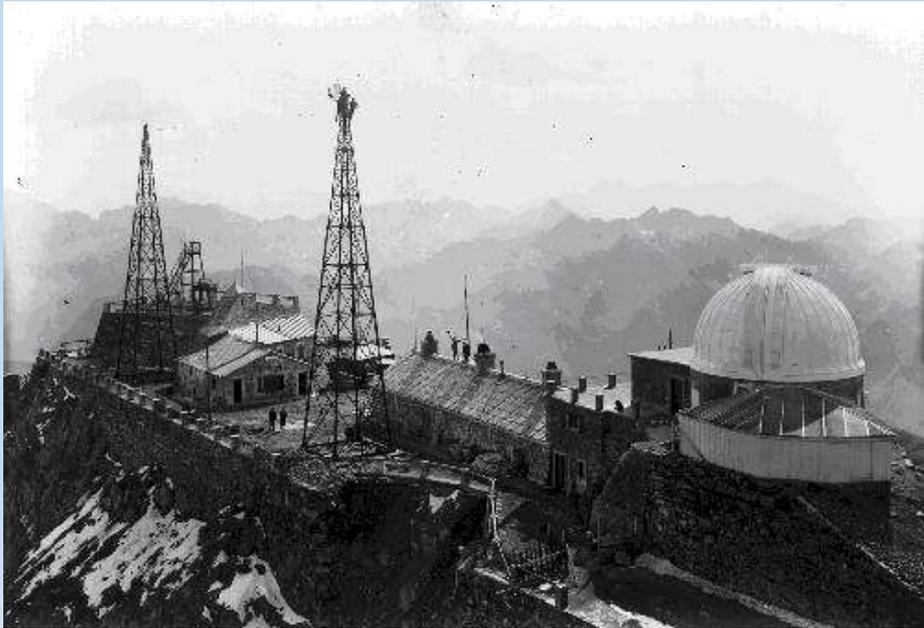


[Vedi i filmati](http://www.explora.rai.it/online/doc.asp?pun_id=1140)

http://www.explora.rai.it/online/doc.asp?pun_id=1140

- **Gli “Iperoni” (anni '50), ossia particelle composte da quarks.**

Esempio di iperone: un decadimento a cascata nell' osservatorio del Pic du Midi (2877m, Pirenei)



Le particelle K degli emulsionisti (circa 1953)

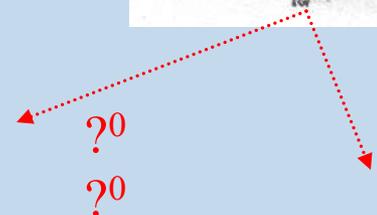
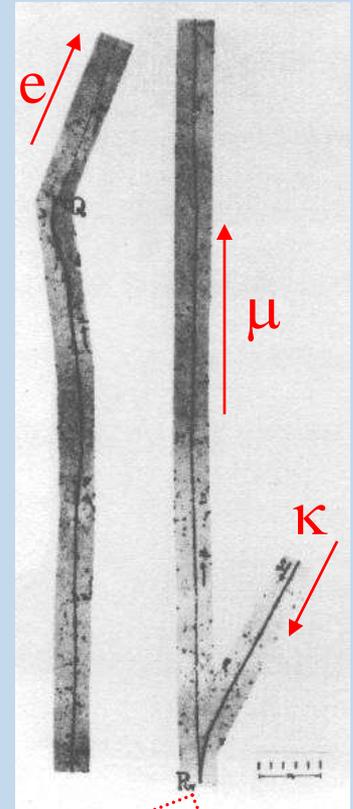
$$\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm + \pi^+ + \pi^- \quad m_\tau \approx 970 m_e$$

$$\kappa^\pm \rightarrow \mu^\pm + ?^0 + ?^0 \quad m_\kappa \approx 1125 m_e$$

$$\chi^\pm \rightarrow \pi^\pm + ?^0 \quad m_\chi \approx 900 - 1000 m_e$$



Jungfrau joch,
Svizzera tedesca,
3454 m



... poi

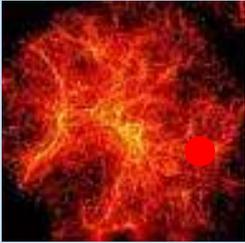
Fisica delle particelle =
Fisica agli acceleratori



Astrofisica=
Fisica dei Raggi Cosmici

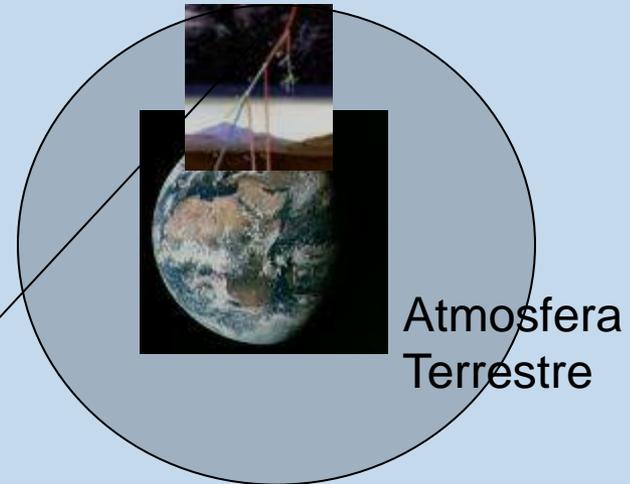
Ora: strettissimo legame tra Astrofisica e Fisica delle
particelle elementari

RC Primari e Secondari



Sorgente Astrofisica
(Resto di Supernova....)

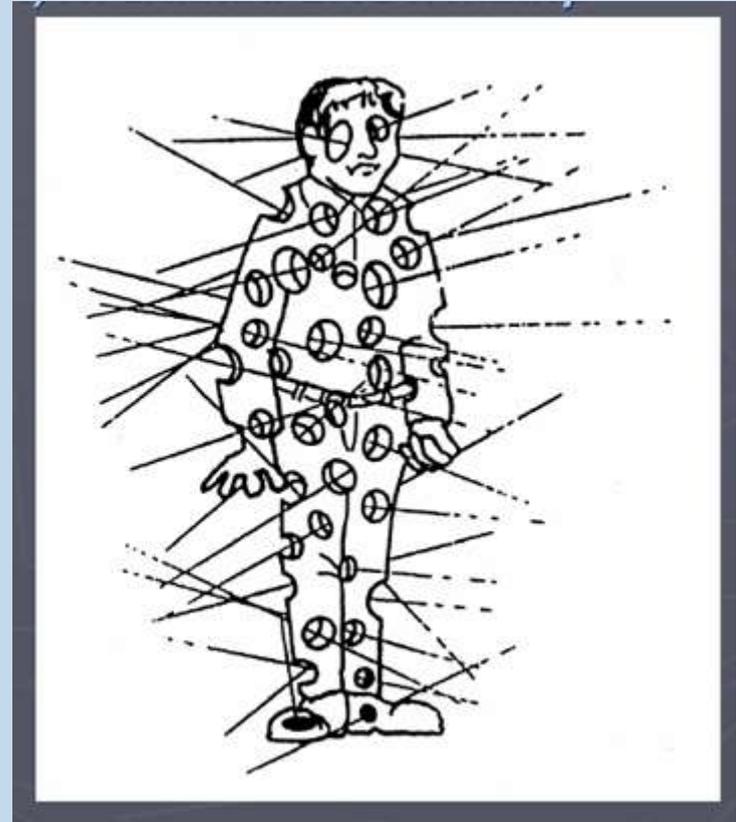
Raggio Cosmico Primario
(protone, nucleo)



Sciame di particelle
secondarie =
RC secondari

I Raggi Cosmici sulla Terra

- I RC bombardano continuamente la Terra: circa 100 000 particelle originate dai Raggi Cosmici ci attraversano ogni ora.
- Questo contribuisce alla dose di radioattività ambientale a cui siamo continuamente soggetti.

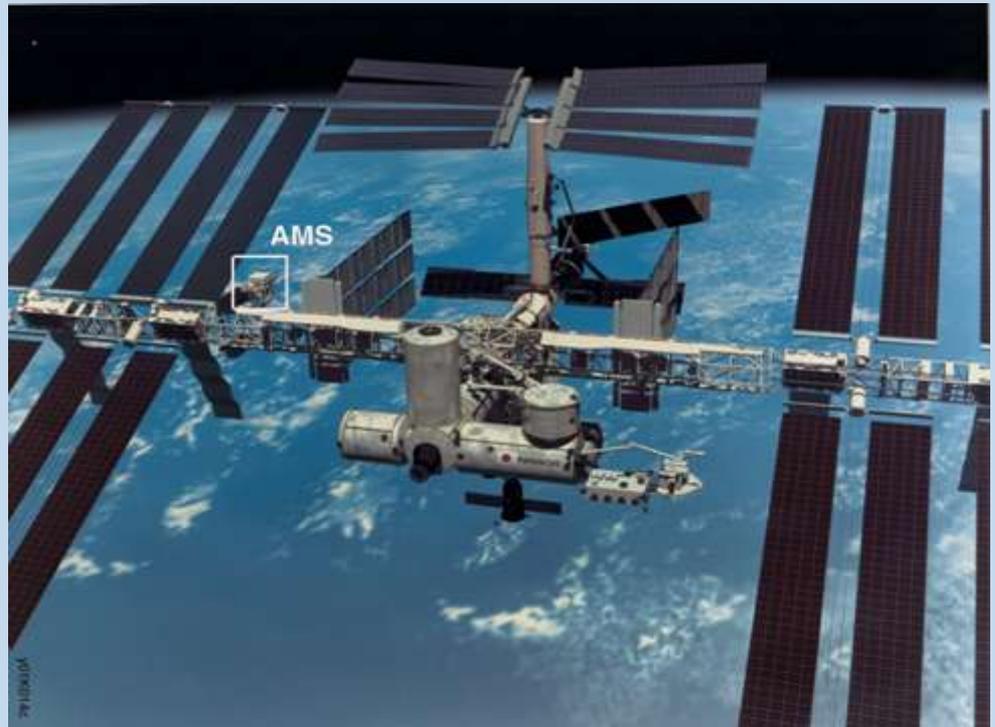


Misurare i RC Primari

- Occorre andare molto in alto, al limite dell'atmosfera, per intercettare il RC prima che interagisca coi nuclei dell'Atmosfera (con palloni, satelliti, base spaziale).



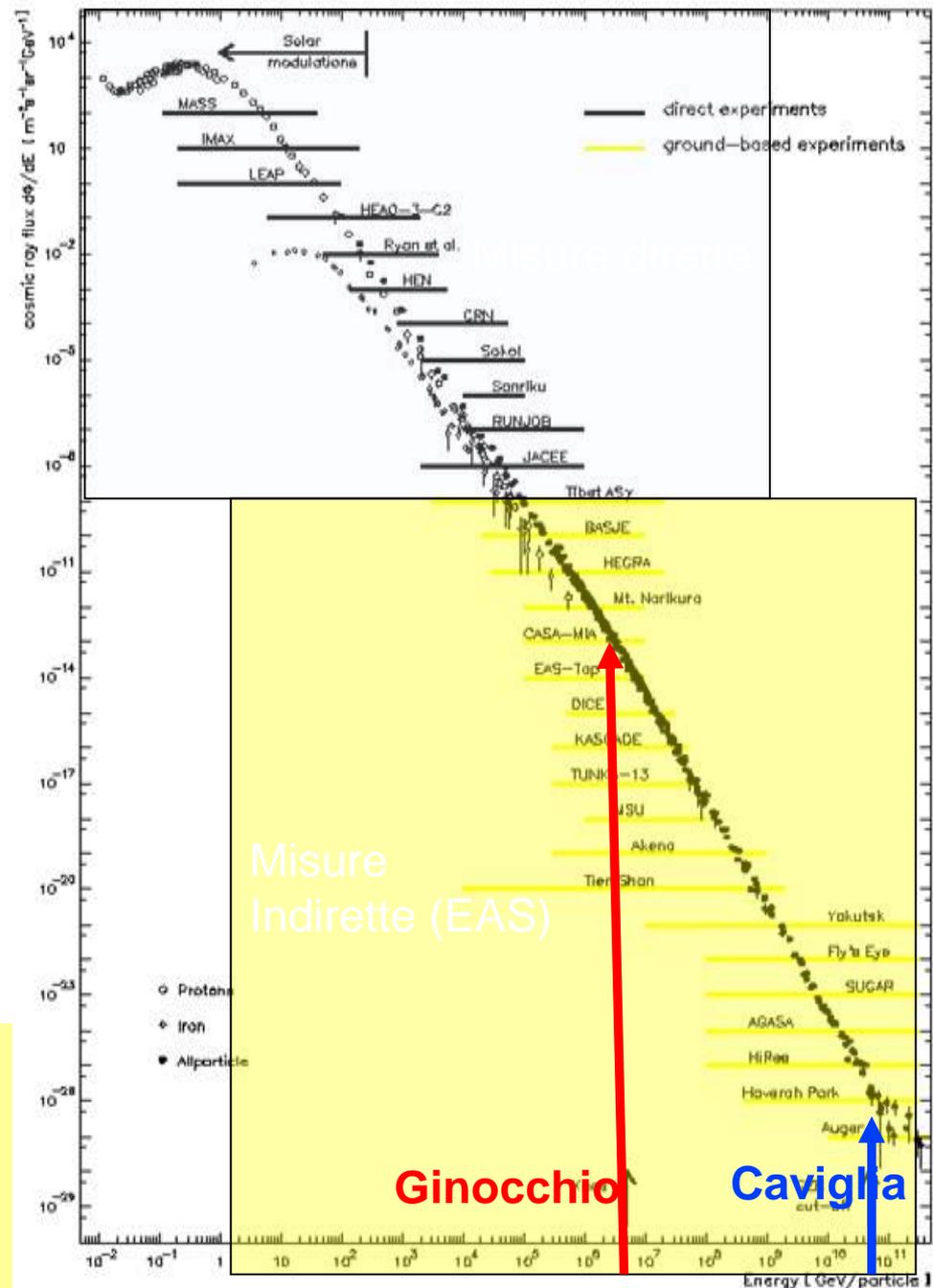
Un gruppo di Bologna collabora per la costruzione di un rivelatore di RC da installare sulla Stazione Spaziale Internazionale (esperimento AMS-2).



Spettro Energetico dei raggi cosmici

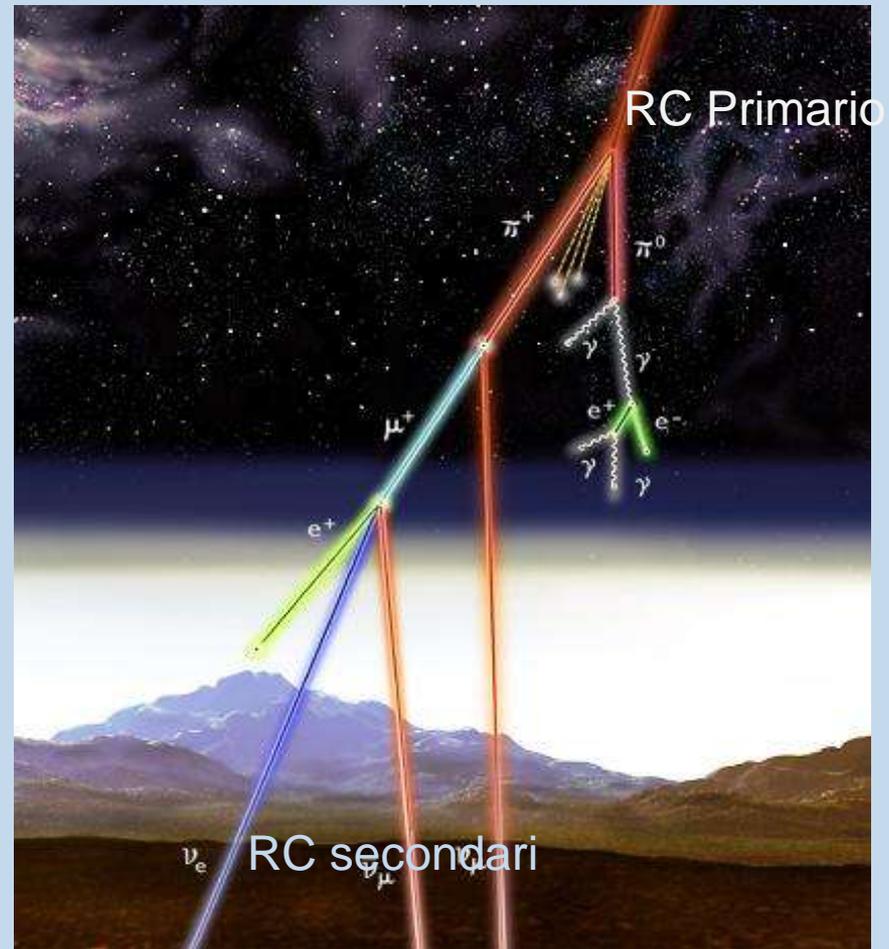
- $\Phi_{TOT} \sim 1000 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$
- Misure dirette: 90% p, 9% He, 1% nuclei pesanti
- Si estende per 11 ordini di grandezza in energia: da 1 GeV a 10^{11} GeV
- Legge di potenza su tutto lo spettro, con due cambi di pendenza

Nota: i Fisici misurano spesso le energie in GeV anziché in Joule.
 $1 \text{ GeV} = 1.6 \times 10^{-10} \text{ J}$.
 Poiché $E=mc^2$, la massa del protone corrisponde circa a $1 \text{ GeV}/c^2$.



Misurare i RC Secondari

- I RC Primari (90% protoni, 9% nuclei) in arrivo sulla sommità dell'atmosfera interagiscono producendo uno sciame di particelle.
- Tra queste, sopravvivono sino alla superficie della terra gli **elettroni** ed i **muoni**.



Sommario

1. I Raggi Cosmici

1.1 Generalità e prime osservazioni

1.2 Misure dirette e “composizione chimica”

- La nostra Galassia
- Le Supernovae originano i RC

1.3 Misure Indirette

- Possibili sorgenti extragalattiche

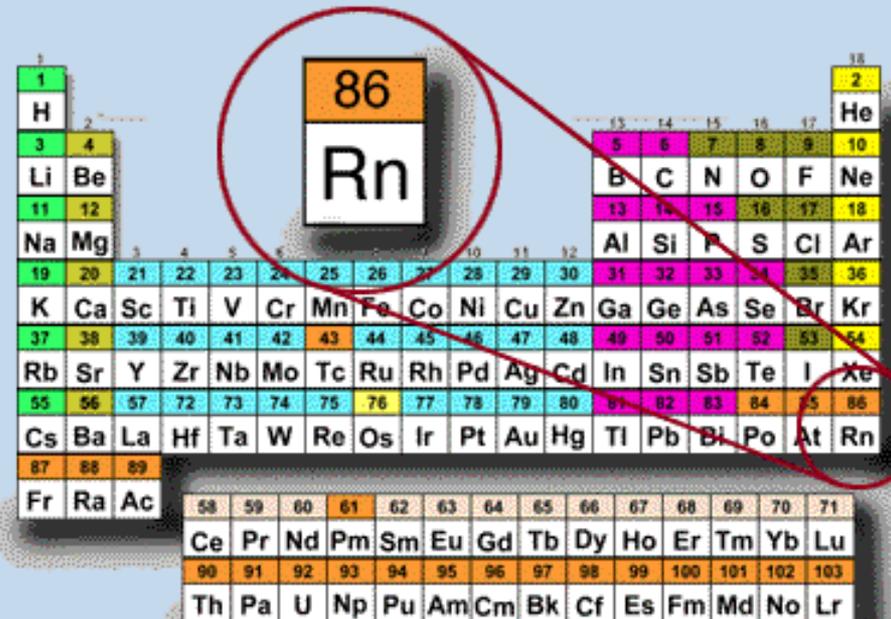
2. Alcuni effetti dei RC sulla vita quotidiana

La composizione Chimica dei RC

LA TABELLA PERIODICA DEGLI ELEMENTI:

Uno dei principali argomenti di ricerca dell'astrofisica è comprendere come si siano formati gli elementi chimici

- Noi conosciamo la composizione chimica del nostro Sistema Solare (SS).
- Questa, è conseguenza del processo di formazione del SS stesso.



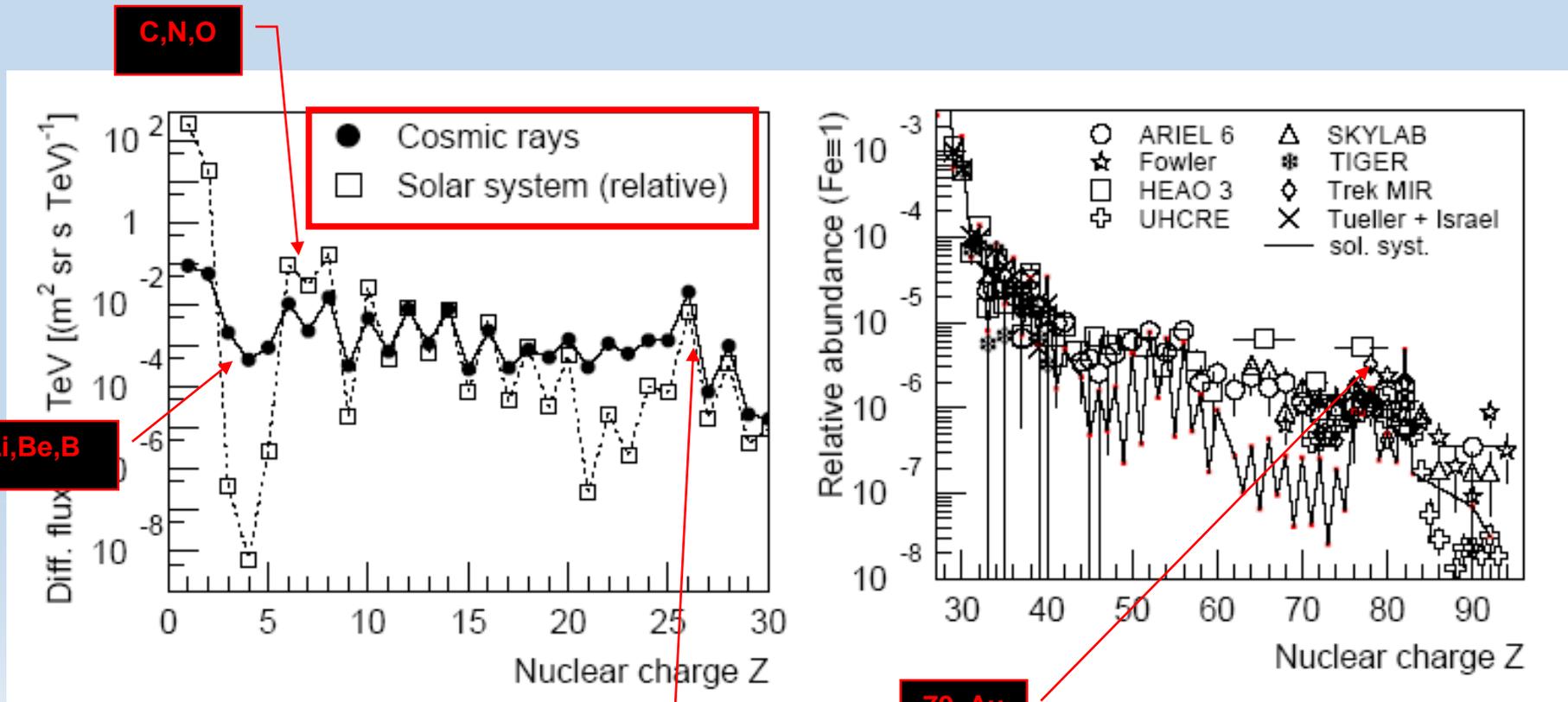
The image shows a standard periodic table of elements. The element Rn (Radon) is highlighted with a red circle. The table is color-coded by groups: Group 1 (H, Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) is light blue; Group 2 (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra) is light green; Groups 3-10 (Sc to Ni) are light blue; Groups 11-12 (Cu, Zn, Ag, Cd, Au, Hg, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn) are light green; Groups 13-18 (B to Ne, Al to Ar, Ga to Kr, In to Xe) are light blue. The lanthanide and actinide series are shown below the main table.

1																	18	
H																	He	
3	4											5	6	7	8	9	10	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
11	12											13	14	15	16	17	18	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
87	88	89																
Fr	Ra	Ac																
			58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
			90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

La composizione Chimica del SS

- Ad esempio, sulla Terra, l'Oro (Au) è circa 5×10^{-6} meno abbondante del Ferro (Fe);
- Questo deriva da un meccanismo universale: il Fe si forma all'interno delle stelle più massicce ($>8 M_{\odot}$), durante la loro vita normale.
- Quando nel nucleo della stella si è formato il Fe, essa cessa di funzionare, ed esplose (supernova).
- L'Au si forma quando le stelle più grandi esplodono.
- Il rapporto (Au/Fe) è circa costante in tutta la Galassia.

La composizione Chimica : confronto tra il Sistema Solare e i RC



Elementi formati nella Nucleosintesi stellare

Elementi formati nella esplosione (supernova)

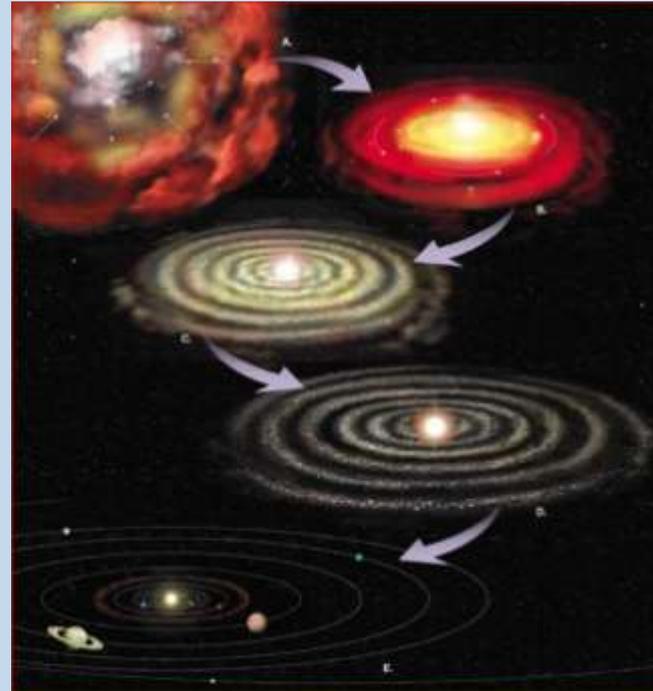
Osservazione 1

- I Raggi Cosmici hanno una somiglianza molto forte con composizione chimica del materiale presente attorno al **Sistema Solare!**
- Come vedremo, i RC NON provengono dal Sistema Solare, ma “navigano” nella Galassia per **milioni di anni**
- Quindi il meccanismo che **origina** i Raggi Cosmici è lo stesso meccanismo che ha originato il Sistema Solare.

Conosciamo la composizione chimica del Sistema Solare

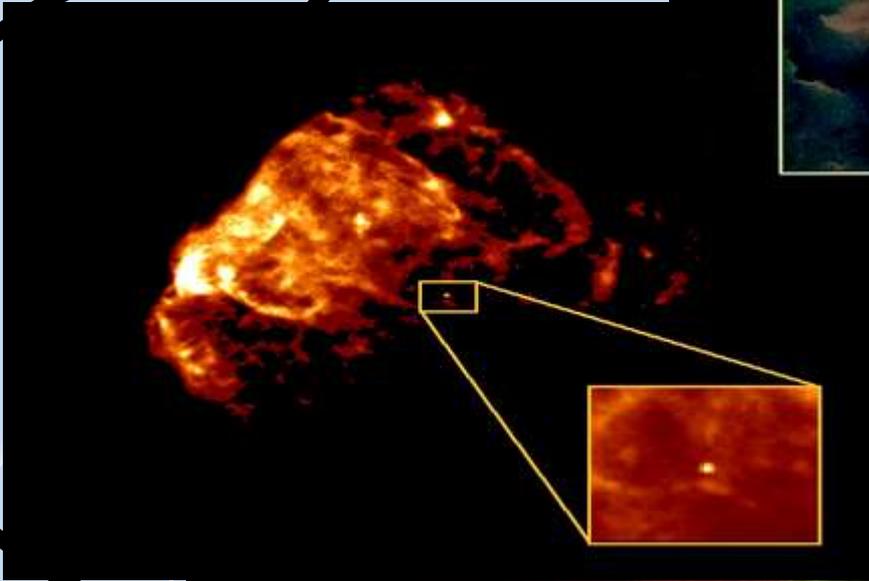


Qual è stata l'origine del Sistema Solare?



Big Bang
(13.7 Gy)

Galassie → Formazione di stelle



Stella



$M < 8 M_{\text{sole}}$

N

Il Sistema solare e i RC

- Dalla presenza di elementi pesanti (ed anche quelli superiori al Fe) deduciamo che il sistema Solare è stato generato (5Gy) da una esplosione di una stella più massiccia del Sole, che ha originato il Sole e tutti i pianeti.
- Ciò è deriva dal fatto che sulla Terra (come su tutti gli altri pianeti, e sul Sole) sono presenti tutti gli elementi chimici sino all' Uranio.
- I RC, avendo una composizione chimica analoga a quella del nostro Sistema Solare, **sono particelle provenienti ed accelerate da analoghe esplosioni all'interno della Galassia.**

Il Sistema solare e i RC

I RC devono:

- provenire **dall'esterno** del nostro Sistema Solare
- rimanere confinati per circa 10 milioni di anni all'interno della Galassia.

Come si possono dimostrare questi fatti?

Chi “confina” i RC all'interno della nostra Galassia?

Il confinamento dei RC



C,N,O

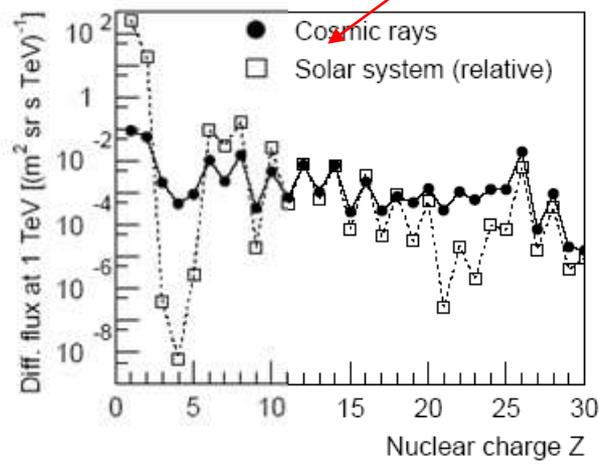
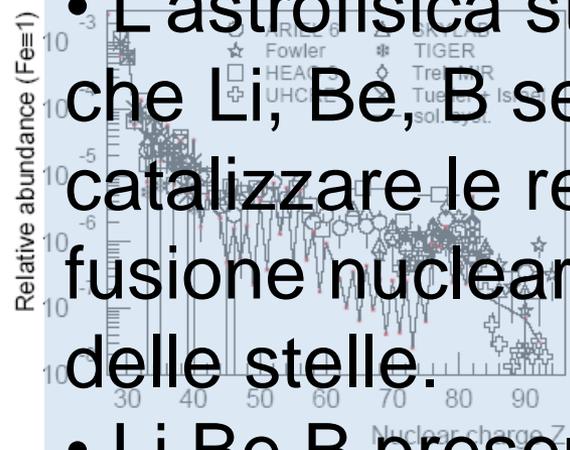


Fig. 4. *Left:* Abundance of elements ($Z \leq 28$) in abundance of CR elements ($Z > 28$) normalized to $\text{Fe} \equiv 1$. For references see^{36,6}. For comparison, abundances normalized to Si (*left*) and to Fe (*right*).

- L'astrofisica stellare ci dice che Li, Be, B servono per catalizzare le reazioni di fusione nucleare nel nucleo delle stelle.
- Li, Be, B presenti → la stella "arde".
- Li, Be, B assenti → la stella collassa (Supernova, SN).



Li, Be, B

Le composizioni chimiche dei Raggi Cosmici e del SS sono simili
 Notate ora la differenza!

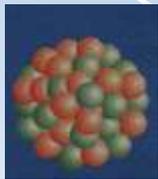
Produzione di Li, Be, B nella propagazione dei RC

- Nelle esplosioni delle SN **non** vengono emessi Li, Be, B.
- Nel nostro sistema solare, questi tre elementi sono molto scarsi (rari come l'oro).
- E' una ulteriore conferma che il Sistema Solare è stato generato da una SN
- Nei RC sono invece abbondanti, quasi come il C, N, O (elementi molto comuni).
- **Come si spiega questo fatto?**

- La presenza di Li, Be, B nei Raggi cosmici è un indizio molto importante.
- Nei RC, il rapporto misurato tra nuclei:

$$R = \frac{\text{numero di nuclei (Li+Be+B)}}{\text{numero di nuclei (C+N+O)}} = 0,25$$

- Possiamo fare la seguente supposizione: i nuclei C,N,O producono nuclei di Li,Be,B per **frammentazione** nell'urto col gas interstellare, durante la propagazione nella Galassia.



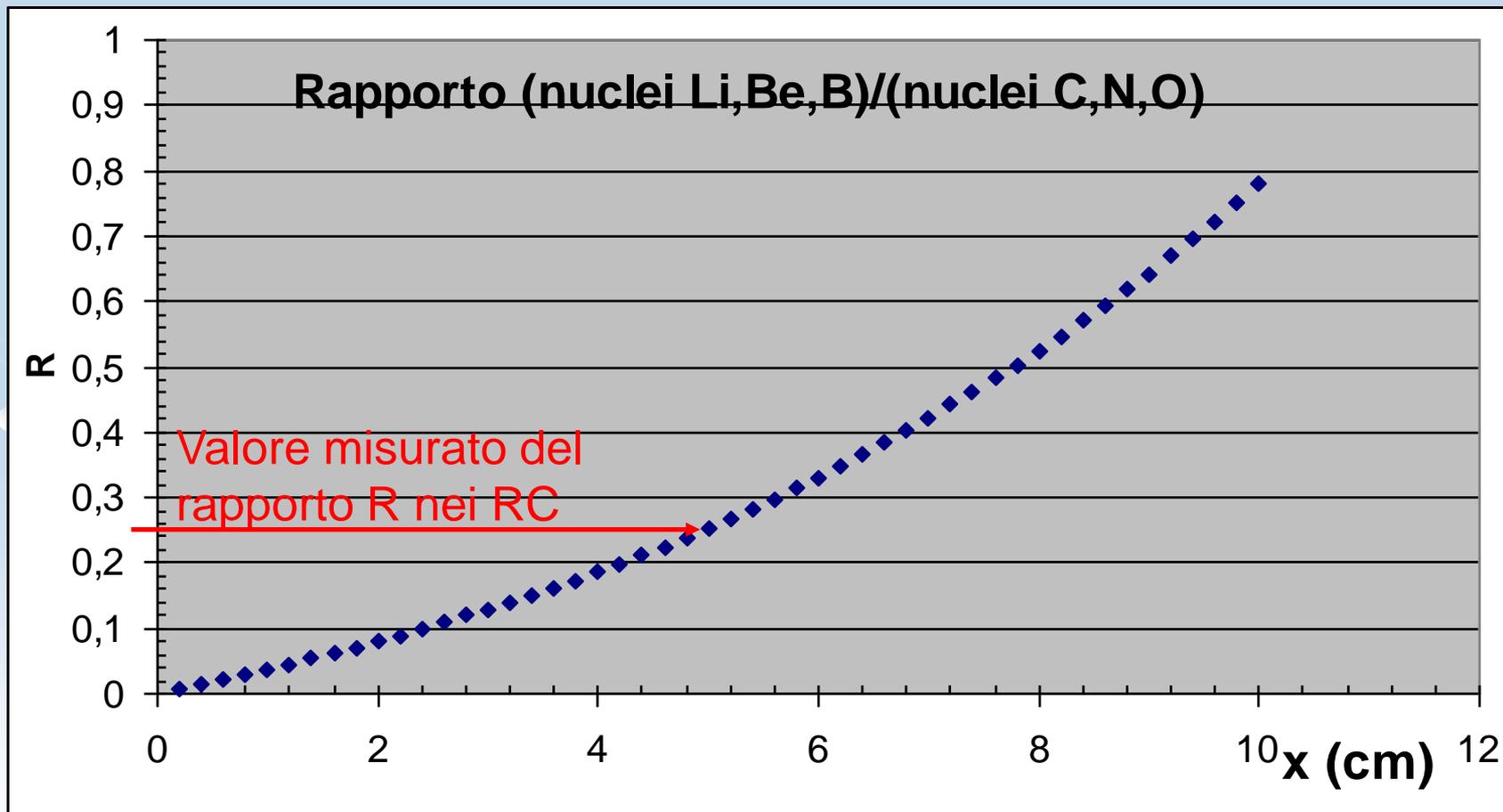
Frammentazione dei nuclei

Misura sperimentale dello spessore di materiale per riprodurre R

- Possiamo immaginare un esperimento che riproduca il valore sperimentale del rapporto **$R = \#(\text{Li} + \text{Be} + \text{B}) / \#(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 0,25$**
- In un acceleratore di particelle, inviamo un fascio di nuclei C,N,O contro un bersaglio di rivelatori nucleari a traccia.
- Nel passaggio nei rivelatori, alcuni nuclei C,N,O si frammentano per diventare Li,Be,B.
- **Domanda**: quale è lo spessore di bersaglio necessario perché $R=0,25$?

Produzione di Li, Be, B da frammentazione di nuclei di C, N, O:

- Esperimento simulato (attenuazione.xlm).



Tempo di Permanenza dei RC nella Galassia

- Si trova sperimentalmente lo spessore di rivelatore X tale che il rapporto tra nuclei di C,N,O “fascio” e nuclei Li,Be,B “frammenti” sia 2.5.
- Lo spessore misurato dipende dalla densità del mezzo attraversato

- I RC si muovono nella Galassia, non nel rivelatore.
- Il percorso nella galassia sarà estremamente più elevato, poiché gli astronomi ci dicono che la densità del mezzo interstellare nella Galassia è molto piccola $\rho_{IG} = 1 \text{ protone/cm}^3 = 1.6 \cdot 10^{-24} \text{ g/cm}^3$. (come confronto, la densità dell'acqua è 1 g/cm^3)

Tempo di Permanenza dei RC nella Galassia

Si trova che il percorso X_{IG} nella Galassia per avere

$$R = \frac{\text{numero di nucleoli(Li+Be+B)}}{\text{numero di nucleoli(C+N+O)}} = 0,25$$

è

$$X_{IG} = 3 \times 10^{24} \text{ cm}$$

Tempo di Permanenza dei RC nella Galassia

- Gli astronomi preferiscono misurare le distanze di oggetti astrofisici in **parsec**.

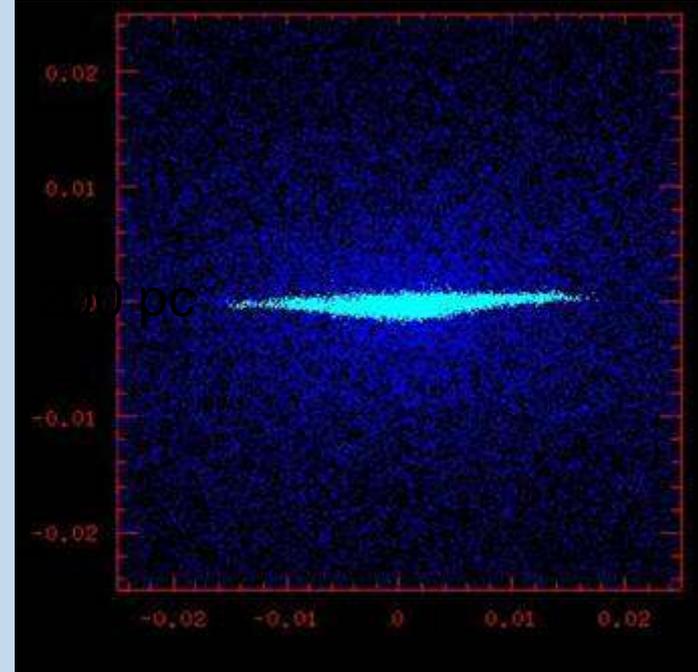
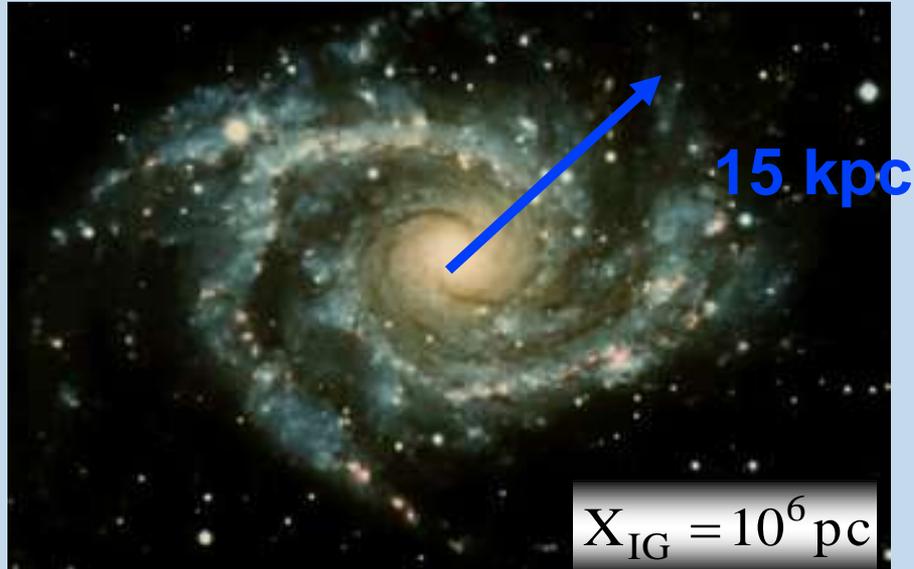
1 parsec = 3×10^{18} cm

- Dunque, il percorso dei raggi cosmici nella Galassia corrisponde a:

$$X_{IG} = 3 \times 10^{24} / 3 \times 10^{18} = 10^6 \text{ pc} = 1 \text{ Mpc}$$

Domanda: E' tanto o poco?

Dimensioni della Galassia



- I RC permangono nella Galassia, percorrendo circa 1 Mpc, percorso \gg del diametro della Galassia.

- ***Perché non sono fuggiti?***
- ***Quale meccanismo li intrappola ?***

Moto di una particella carica in campo magnetico

Una particella con carica q entra in un campo magnetico B uniforme. Il campo B è perpendicolare al piano, entrante.

Raggio

$$r = \frac{mv}{qB}$$

La velocità v è perpendicolare al campo magnetico B

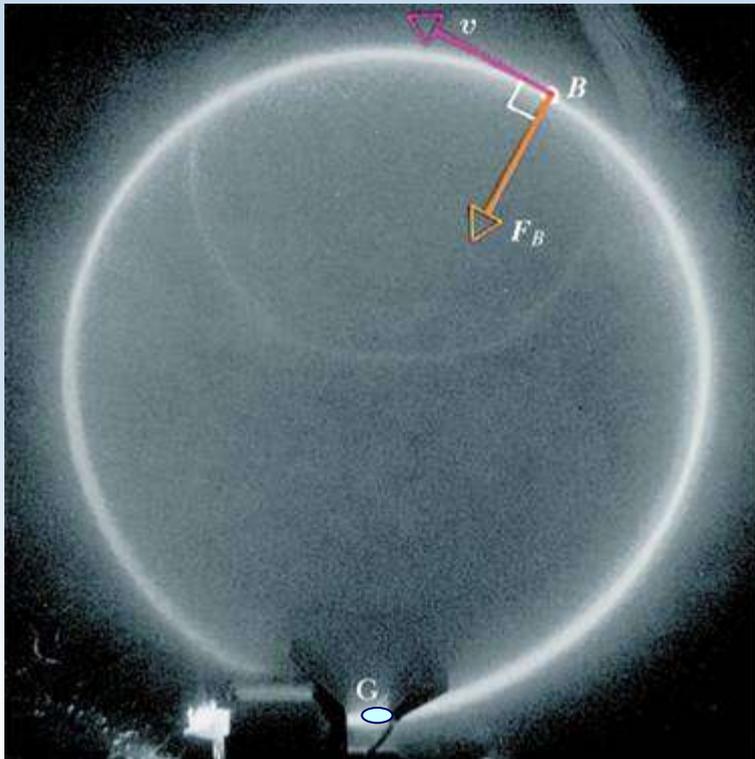
$$qvB = F_{\text{Lorentz}}$$

F è perpendicolare a v e B : è diretta verso il centro

Il moto è circolare uniforme

$$F = m \frac{v^2}{r}$$

$$qvB = m \frac{v^2}{r}$$



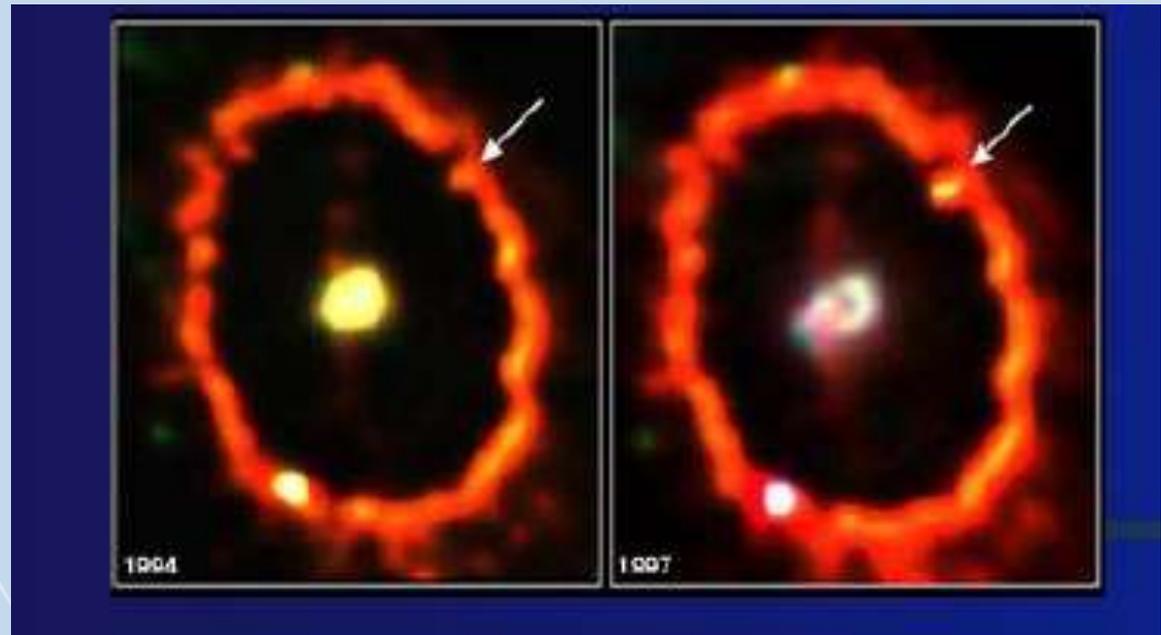
Fine



Complementi 2: Reazioni Nucleari nelle Stelle Supernovae



SN1987A

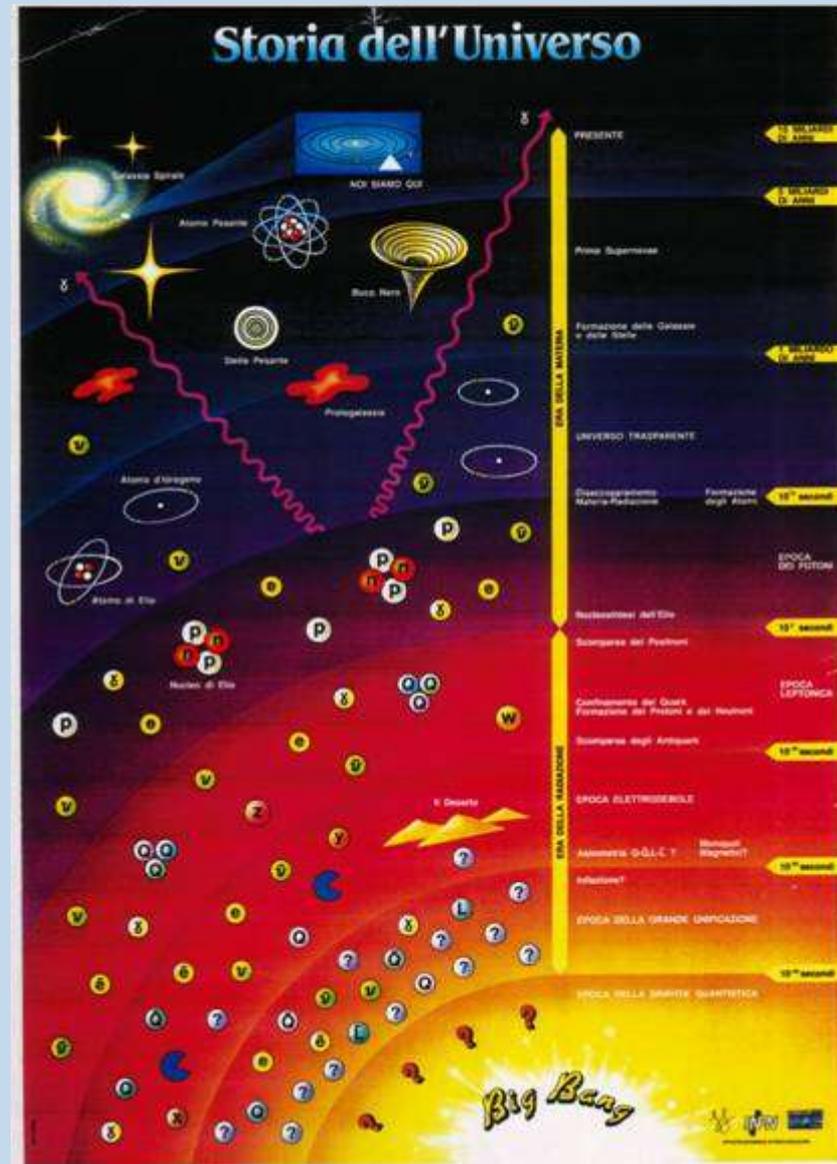


Come è nato il Sistema Solare?-1

- La teoria (Big Bang) e le osservazioni sull'evoluzione dell'Universo mostrano che la sua età ~14 miliardi di anni.
- L'Universo primordiale (a partire da 3 minuti, era composto solamente di nuclei di H e He.

Solo idrogeno ed elio !!!

- Come si sono potuti formare gli elementi più pesanti della Tabella periodica, necessari per la spiegare l'abbondanza degli elementi??



Come è nato il Sistema Solare?-2

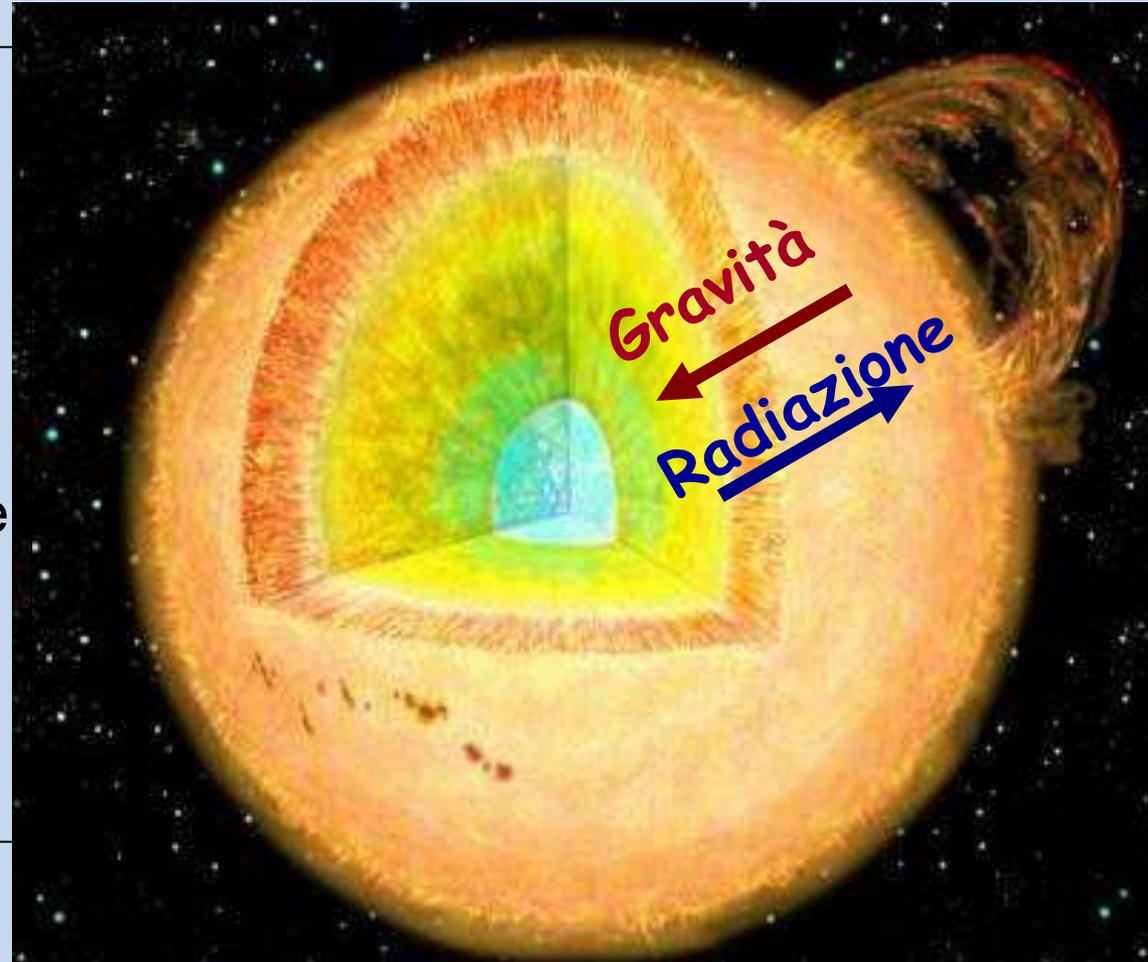


- La materia, a causa dell'attrazione gravitazionale, ha cominciato ad aggregarsi in gigantesche ammassi;
- Questi grandi ammassi di gas hanno iniziato a formare le Galassie;
- All'interno delle Galassie (1 Gy), sono cominciate a formarsi le **stelle**.
- Le stelle sono agglomerati di materia (H,He) che si formano a causa della **forza gravitazionale** (attrattiva).

• Gli elementi più pesanti di H ed He (sino al Fe), si sono formati (e si formano) nei processi di **fusione nucleare** all'interno delle stelle !

Come è nato il Sistema Solare?-3

- Nelle stelle, l'enorme pressione per la gravità avvicina i protoni a distanze tali da far innescare la cattura da parte delle forze nucleari.
- Si formano così, a partire da H ed He, nuclei più pesanti in un processo chiamato "fusione".
- La fusione libera energia.



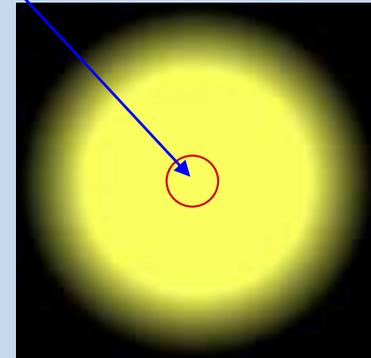
Questa energia (radiazione) è sufficiente a contrastare la pressione dovuta alla gravità e a mantenere in equilibrio le stelle per miliardi di anni.

Fusione Nucleare

Richiede: Un gas ad alta densità ed un temperatura interna estremamente elevata.

Queste condizioni sono soddisfatte nel “core” del Sole e delle Stelle.

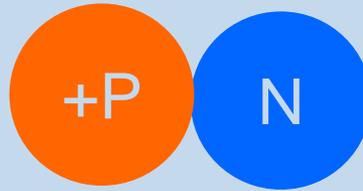
La materia è completamente ionizzata; I nuclei, a causa della pressione dovuta alla gravità, sono molto vicini e collidono con velocità molto elevate.





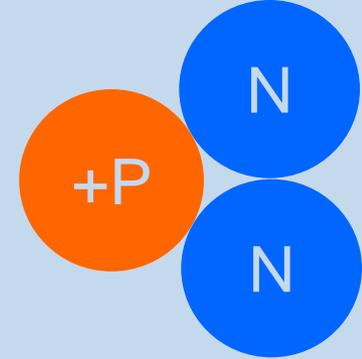
H^1

Protone → Nucleo di Idrogeno



H^2

Deuterio



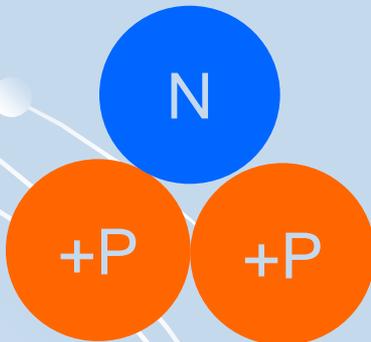
H^3

Tritium

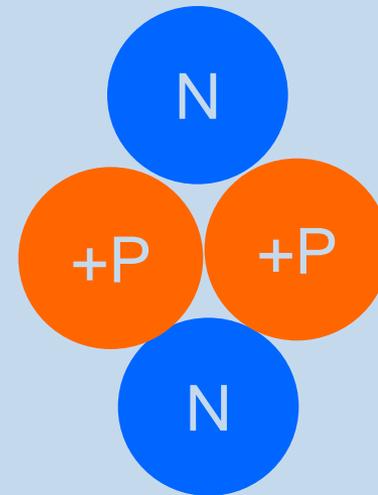
Nuclei di Idrogeno

I protagonisti:

Nuclei di Elio



He^3



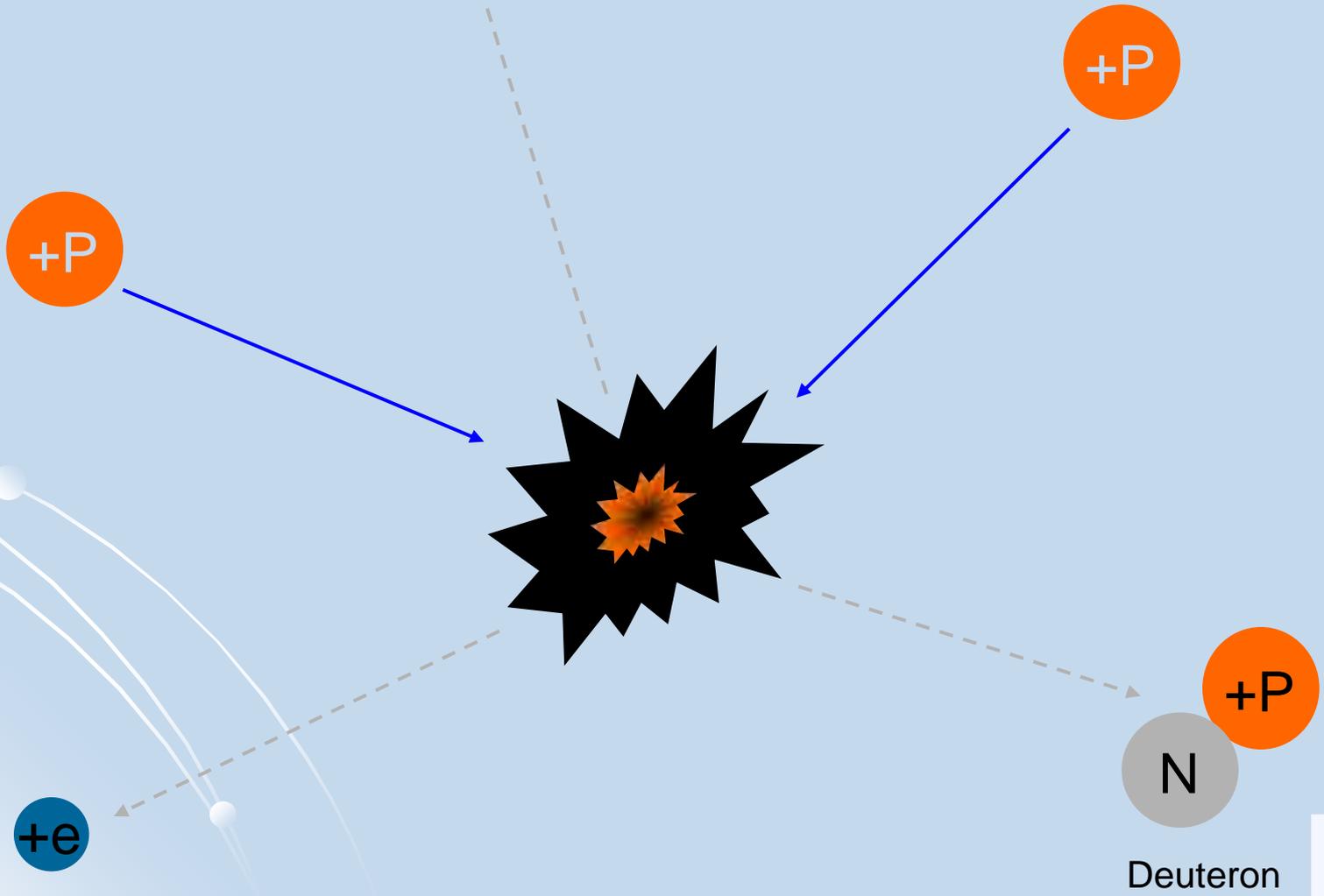
He^4

Forze Implicate nella Fusione

Elettriche: Cariche Positive si Respingono

Forze Nucleari Forti: I protoni. Se estremamente vicini, si attraggono (forze a short range)

Neutrino



Catena Protone-Protone

