

Fisica ed Astrofisica dei Raggi Cosmici

Il parte 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

i. Generalità e prime osservazioni

ii. Misure dirette e “composizione chimica”

a. La nostra Galassia

b. Le Supernovae originano i RC

iii. Misure Indirette

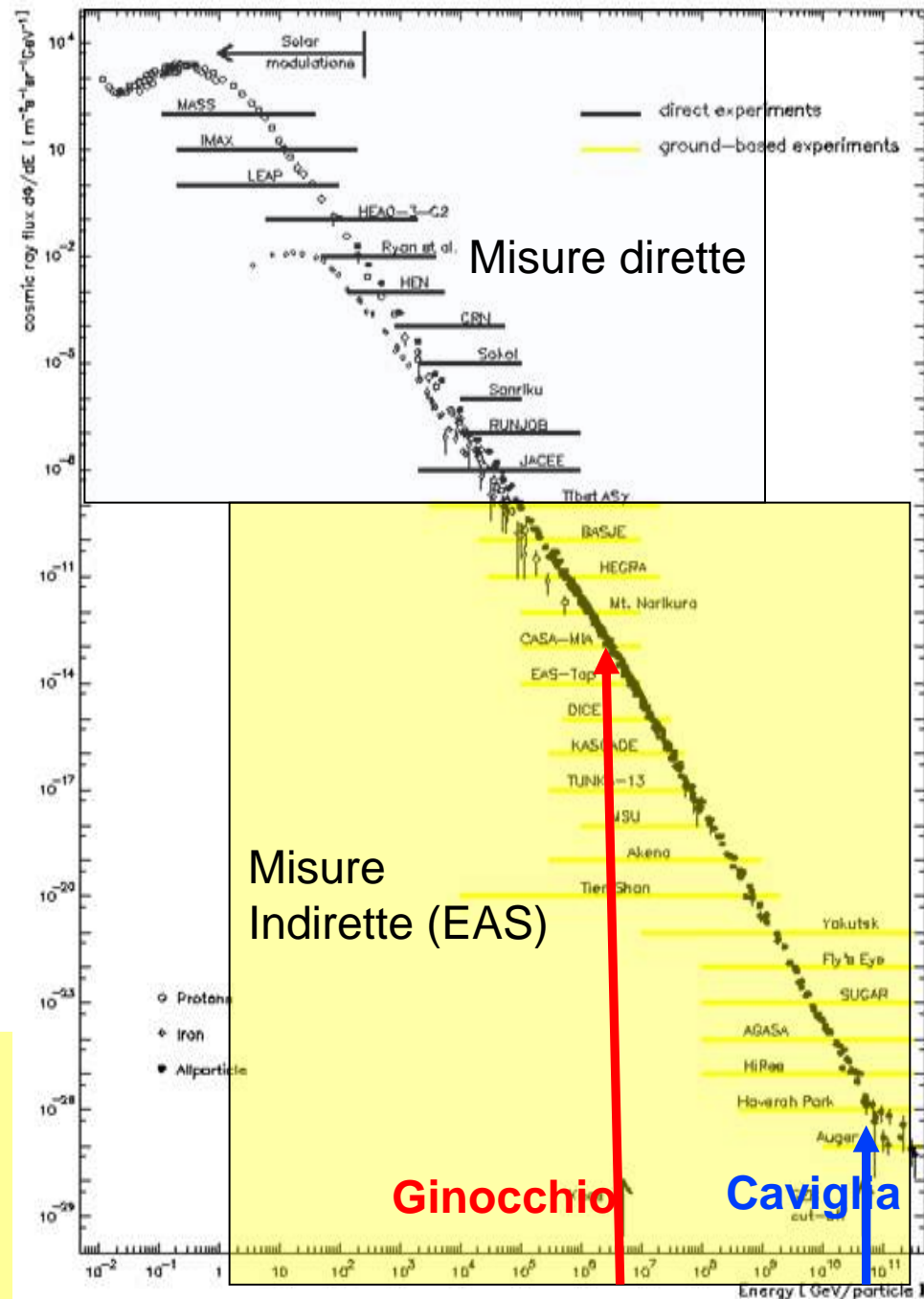
a. Possibili sorgenti extragalattiche

2. Alcuni effetti dei RC sulla vita quotidiana

Spettro Energetico dei raggi cosmici

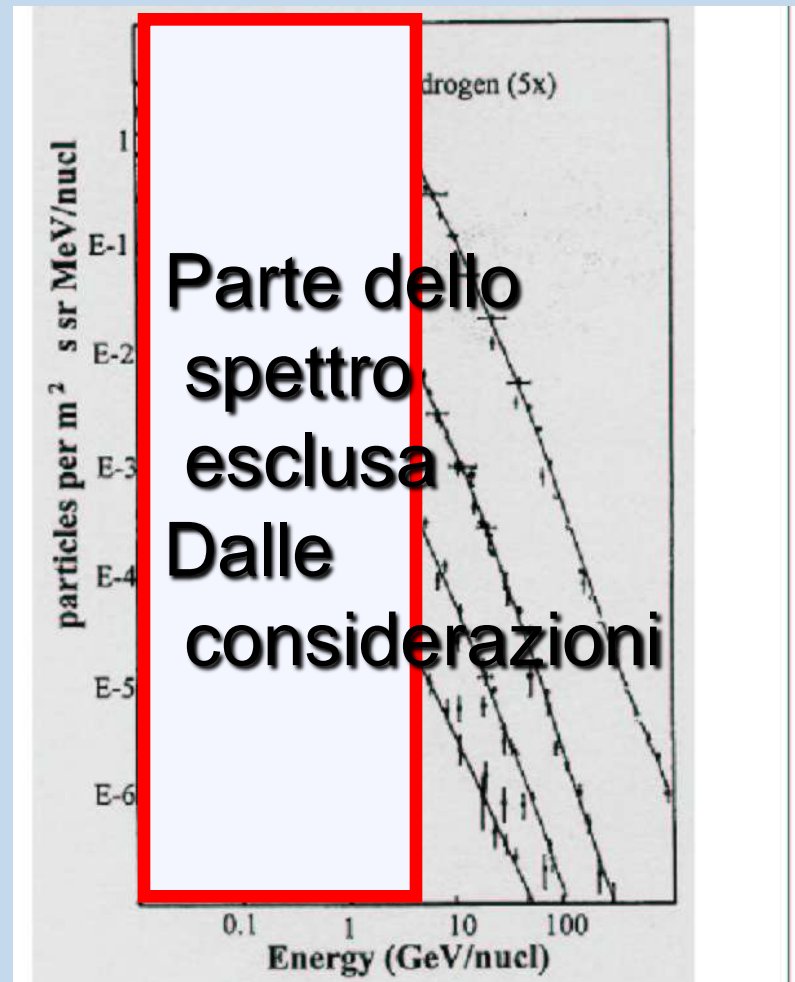
- $\Phi_{TOT} \sim 1000 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$
- Misure dirette: 90% p, 9% He, 1% nuclei pesanti
- Si estende per 11 ordini di grandezza in energia: da 1 GeV a 10^{11} GeV
- Legge di potenza su tutto lo spettro, con due cambi di pendenza

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 $1 \text{ GeV}/c^2$.



Modulazione dei RC di bassa energia dovuta al ciclo del Sole

- Le variazioni del ciclo solare hanno effetti per energie < 1 GeV
- RC con $E > 2$ GeV non affetti dal ciclo solare
- Flusso di RC di bassa energia (< 1 GeV): ~ 1000 p/(m²s sr).
- Pensateci prima di offrirvi volontari per una missione su Marte.



Misure delle abbondanze degli elementi nella Galassia

- Le abbondanze “primordiali” degli elementi sono fissati dalla **cosmologia**:
 - 24% (in massa) di 4He
 - 76% (in massa) di H
- La **nucleosintesi** nelle stelle provvede alla sintesi degli elementi più pesanti
- Le esplosioni stellari (per $M \gg M_{\odot}$) hanno una vita media \ll dell'età dell'Universo e provvedono a rifornire il mezzo IG

Elementi chimici: genesi

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 H | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 He | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 Li | 4 Be | | | | | | | | | | | 5 B | 6 C | 7 N | 8 O | 9 F | 10 Ne | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 Na | 12 Mg | | | | | | | | | | | 13 Al | 14 Si | 15 P | 16 S | 17 Cl | 18 Ar | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 K | 20 Ca | 21 Sc | 22 Ti | 23 V | 24 Cr | 25 Mn | 26 Fe | 27 Co | 28 Ni | 29 Cu | 30 Zn | 31 Ga | 32 Ge | 33 As | 34 Se | 35 Br | 36 Kr | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37 Rb | 38 Sr | 39 Y | 40 Zr | 41 Nb | 42 Mo | 43 Tc | 44 Ru | 45 Rh | 46 Pd | 47 Ag | 48 Cd | 49 In | 50 Sn | 51 Sb | 52 Te | 53 I | 54 Xe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 55 Cs | 56 Ba | 57 La | 72 Hf | 73 Ta | 74 W | 75 Re | 76 Os | 77 Ir | 78 Pt | 79 Au | 80 Hg | 81 Tl | 82 Pb | 83 Bi | 84 Po | 85 At | 86 Rn | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 87 Fr | 88 Ra | 89 Ac | 104 Rf | 105 Db | 106 Sg | 107 Bh | 108 Hs | 109 Mt | 110 -- | 111 -- | 112 -- | 114 -- | 116 -- | 118 -- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <tr> <td>58 Ce</td> <td>59 Pr</td> <td>60 Nd</td> <td>61 Pm</td> <td>62 Sm</td> <td>63 Eu</td> <td>64 Gd</td> <td>65 Tb</td> <td>66 Dy</td> <td>67 Ho</td> <td>68 Er</td> <td>69 Tm</td> <td>70 Yb</td> <td>71 Lu</td> </tr> <tr> <td>90 Th</td> <td>91 Pa</td> <td>92 U</td> <td>93 Np</td> <td>94 Pu</td> <td>95 Am</td> <td>96 Cm</td> <td>97 Bk</td> <td>98 Cf</td> <td>99 Es</td> <td>100 Fm</td> <td>101 Md</td> <td>102 No</td> <td>103 Lr</td> </tr> </table> | | | | | | | | | | | | | | | | | | 58 Ce | 59 Pr | 60 Nd | 61 Pm | 62 Sm | 63 Eu | 64 Gd | 65 Tb | 66 Dy | 67 Ho | 68 Er | 69 Tm | 70 Yb | 71 Lu | 90 Th | 91 Pa | 92 U | 93 Np | 94 Pu | 95 Am | 96 Cm | 97 Bk | 98 Cf | 99 Es | 100 Fm | 101 Md | 102 No | 103 Lr |
| 58 Ce | 59 Pr | 60 Nd | 61 Pm | 62 Sm | 63 Eu | 64 Gd | 65 Tb | 66 Dy | 67 Ho | 68 Er | 69 Tm | 70 Yb | 71 Lu | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 90 Th | 91 Pa | 92 U | 93 Np | 94 Pu | 95 Am | 96 Cm | 97 Bk | 98 Cf | 99 Es | 100 Fm | 101 Md | 102 No | 103 Lr | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

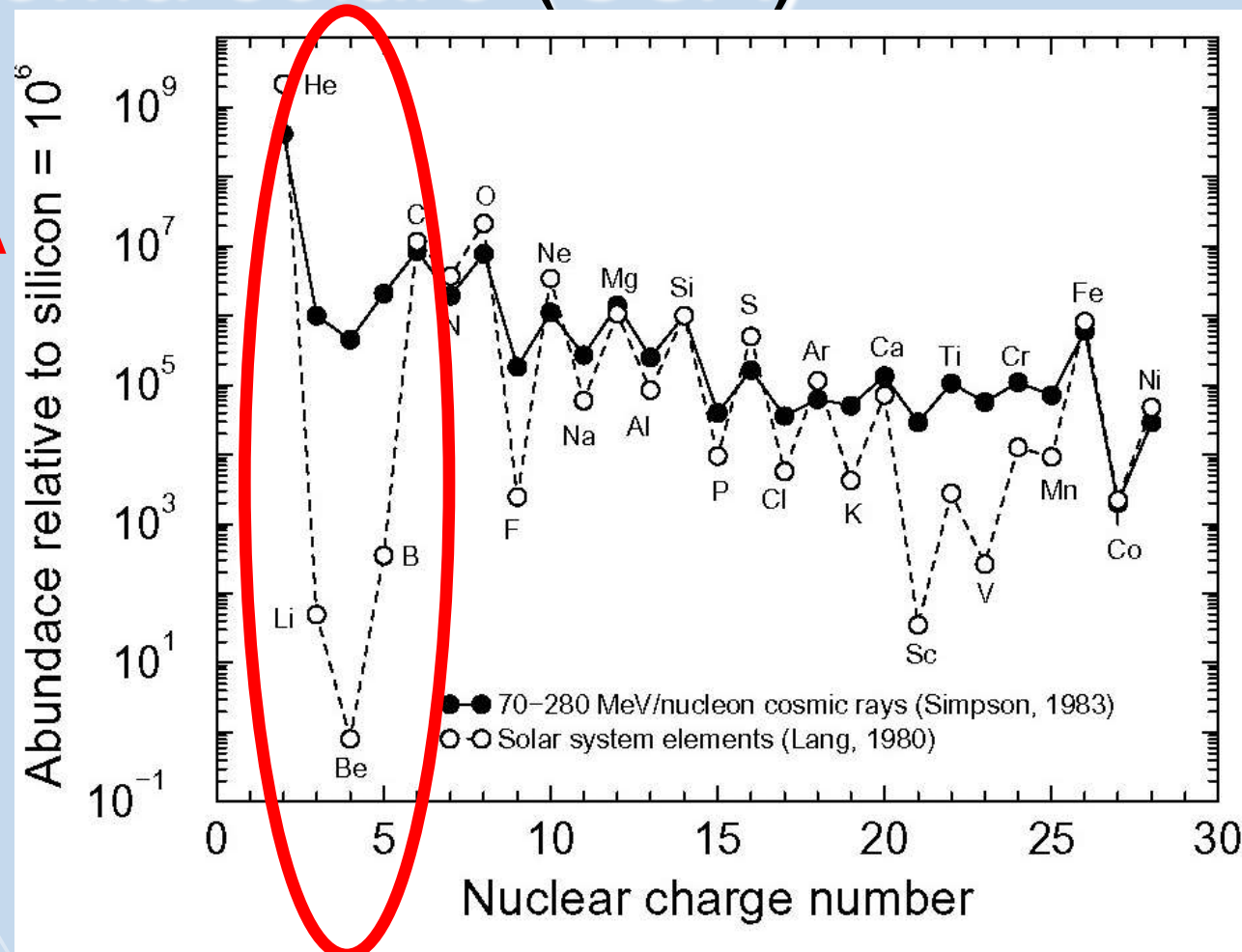
White - Big Bang
 Pink - Cosmic Rays
 Yellow - Small Stars
 Green - Large Stars
 Blue - Supernovae

3.5 Confronto tra le abbondanze dei vari nuclidi nei RC e nel mezzo IG

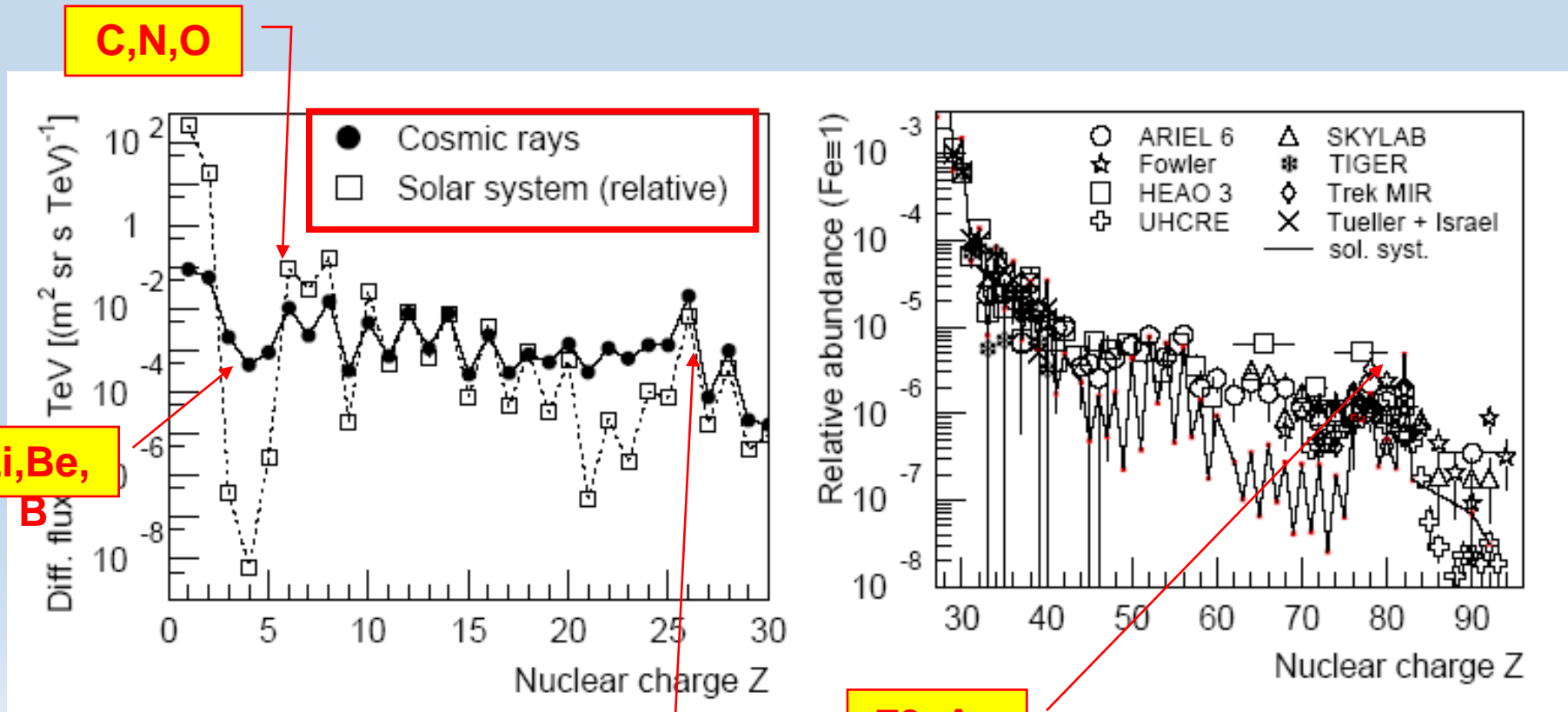
- Le abbondanze degli elementi nei RC si determinano tramite esperimenti di misura diretta dei RC
- Si notano alcune discrepanze rispetto al SSA, in particolare in corrispondenza al gruppo Li, Be, B e del gruppo prima del Fe
- Si nota anche un effetto *pari/dispari*, noto dalla fisica dei nuclei

Abbondanze relative dei RC e del sistema solare (SSA)

- **H e He** sono dominanti (98%), leggermente in difetto rispetto SSA
- Buon accordo tra CR e SSA per molti elementi, in particolare C, O, Mg, Fe.
- Elementi leggeri **Li, Be, B** e quelli prima del ferro **Sc, V** sono straordinariamente abbondanti nei RC rispetto SSA



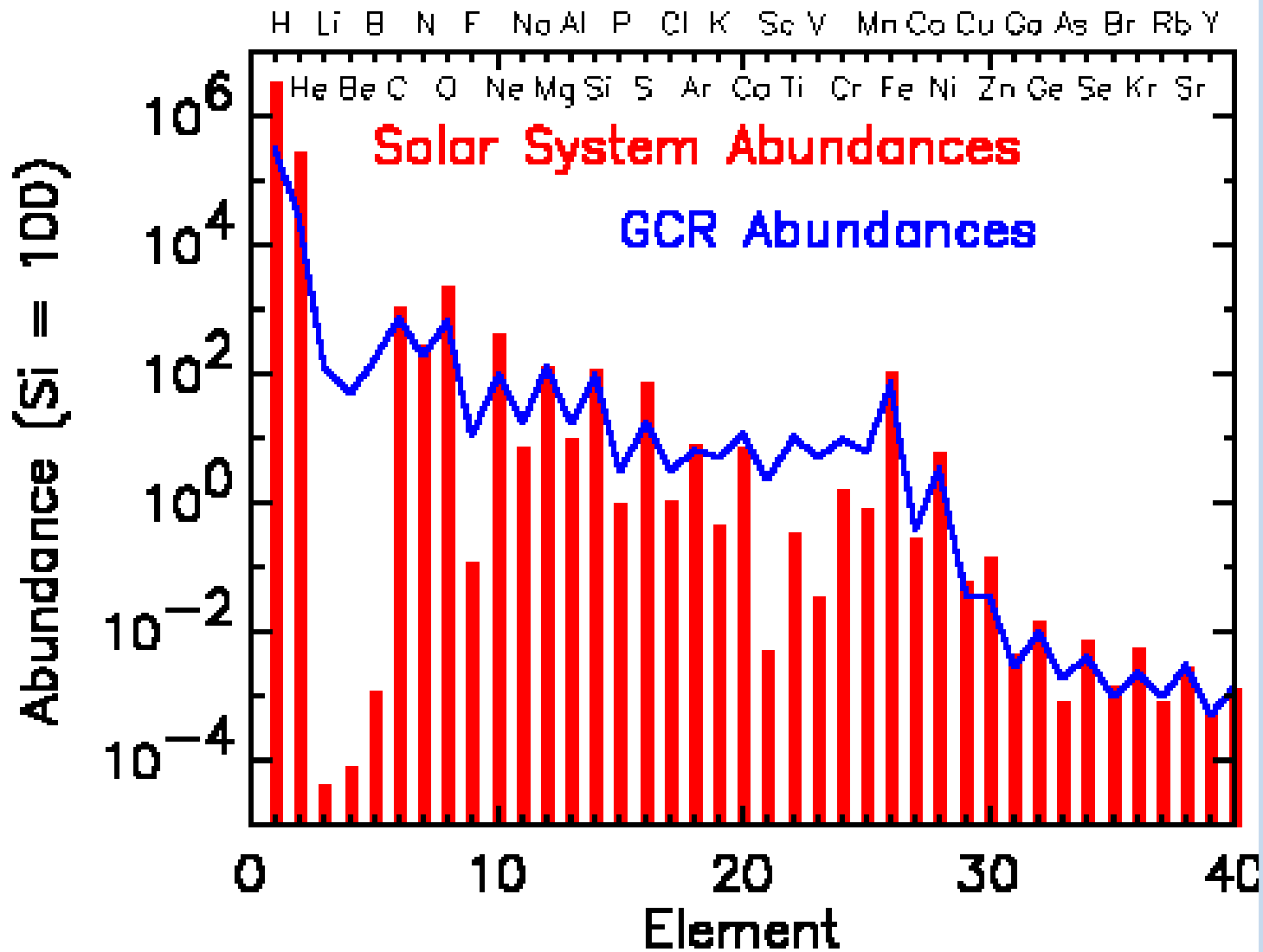
La composizione Chimica : confronto tra il elementi prima e dopo il Fe



Elementi formati nella Nucleosintesi stellare

Elementi formati nella esplosione (supernova)

La stessa figura...



CHEMICAL COMPOSITION of CR at LOW ENERGIES

Intensity ($E > 2.5$ GeV/particle($m^{-2} sr^{-1} sec^{-1}$))

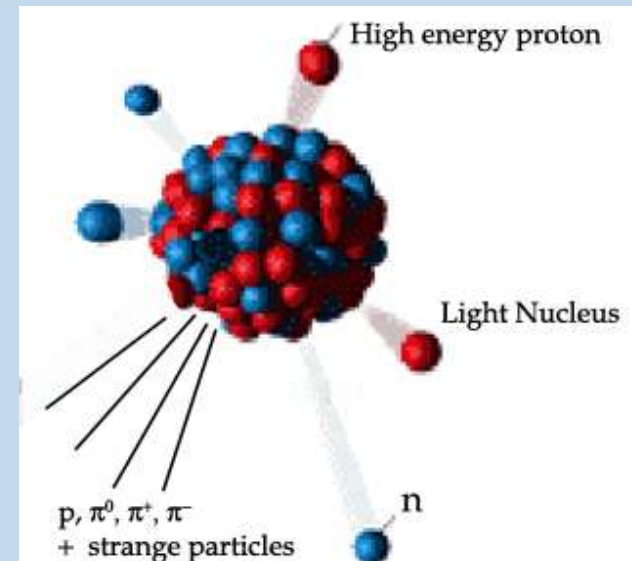
| Nuclear group | Particle charge, Z | Integral Intensity in CR ($m^{-2} s^{-1} sr^{-1}$) | Number of particles per 10^4 protons | |
|---------------|--------------------|--|--|--------------------|
| | | | CR | Universe |
| Protons | 1 | 1300 | 10^4 | 10^4 |
| Helium | 2 | 94 | 720 | 1.6×10^3 |
| L (=Li,Be,B) | 3-5 | 2 | 15 | 10^{-4} |
| M(=C,N,O) | 6-9 | 6.7 | 52 | 14 |
| Heavy | 10-19 | 2 | 15 | 6 |
| VeryHeavy | 20-30 | 0.5 | 4 | 0.06 |
| SuperHeavy | >30 | 10^{-4} | 10^{-3} | 7×10^{-5} |
| Electrons | -1 | 13 | 100 | 10^4 |
| Antiprotons | -1 | >0.1 | 5 | ? |

Produzione di Li, Be, B nei RC

- ${}^6\text{Li}$, Be , B sono catalizzatori delle reazioni di nucleosintesi. Ciò significa che NON sono rilasciati al termine della vita stellare. Il solo ${}^7\text{Li}$ ha una piccola percentuale di origine cosmologica.
- Li , Be , B sono prodotti temporaneamente durante la catena di fusione, ma vengono “consumati” durante le reazioni: le stelle consumano questi elementi durante la loro vita.
- Quale è l'origine di questi elementi rari?
- \Rightarrow Reeves, Fowler & Hoyle (1970) ipotizzarono la loro origine come dovuta all'interazione dei RC (spallazione e fusione di $\alpha + \alpha$) con il mezzo interstellare (ISM).

Meccanismo di propagazione

- Gli elementi del gruppo M(=C,N,O) sono gli elementi candidati a produrre L(=Li,Be,B) durante la propagazione.
- Il processo fisico con cui gli M producono gli L è la spallazione, urto con i protoni del GI.



- Nei RC, il rapporto misurato tra nuclei:

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

- Facciamo 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.

Misura sperimentale dello spessore di materiale per riprodurre R

- Nei RC il rapporto misurato tra i nuclei è:

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

- Possiamo immaginare un esperimento che riproduca il valore sperimentale del rapporto
- 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.

Tempo di Permanenza dei RC nella Galassia

- Si trova sperimentalmente lo spessore di rivelatore tale che il rapporto tra nuclei di C,N,O “fascio” e nuclei Li,Be,B “frammenti” sia 2.5.
- Questo corrisponde ad aver attraversato una “densità” di materiale $4,8 \text{ g/cm}^3$
- I RC si muovono nella Galassia, non nel rivelatore.
- 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

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

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**.

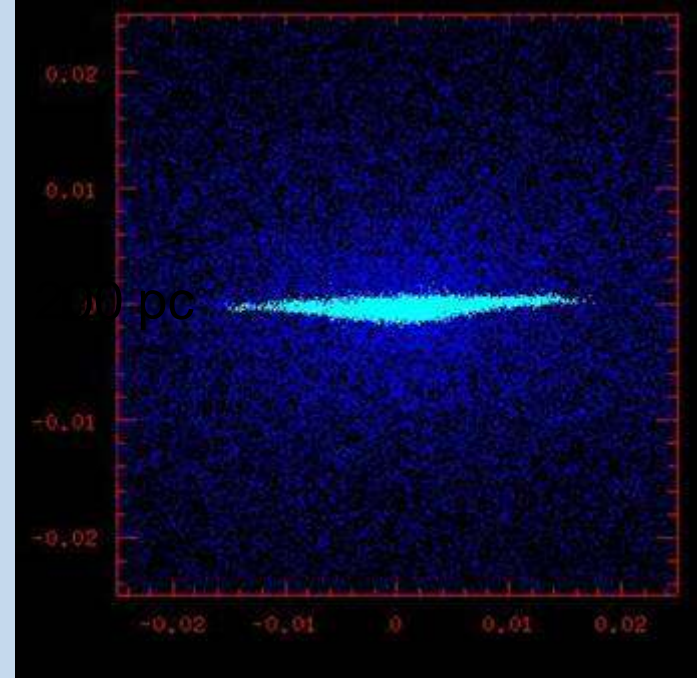
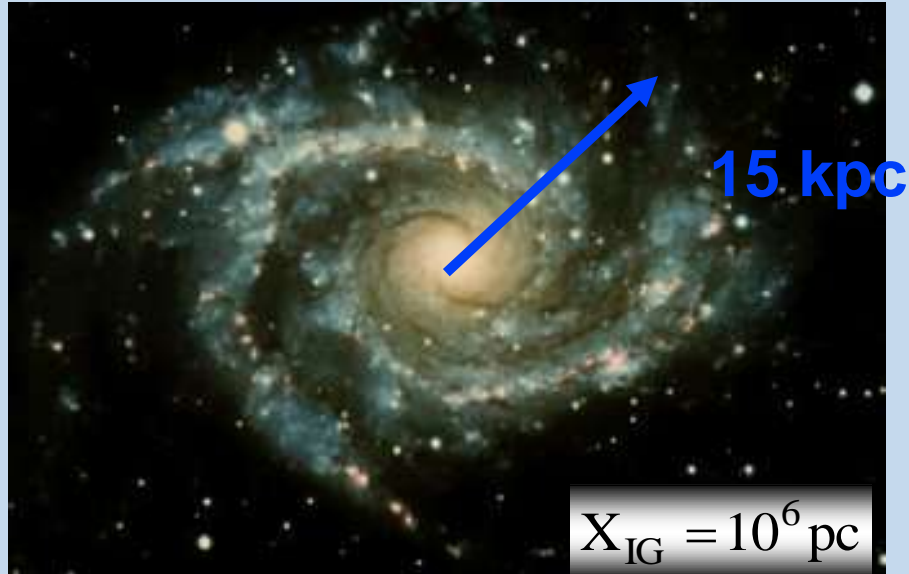
1 parsec = 3×10^{18} cm

- 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

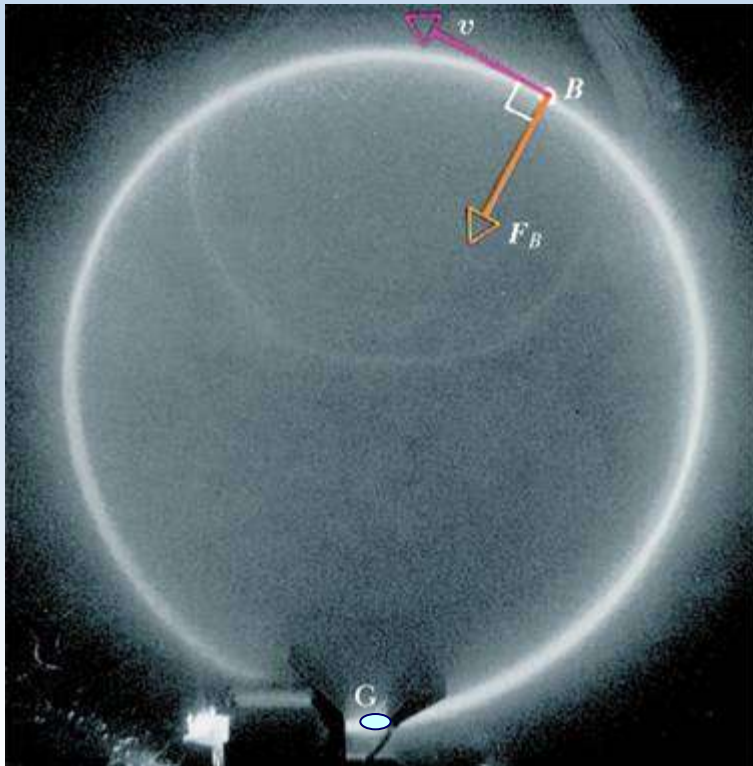
$$qvB = F_{\text{Lorentz}}$$

La forza agente, F , è perpendicolare a v e a B : è diretta verso il centro

Il moto è circolare uniforme

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

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



3.2 Il campo magnetico galattico

- Si misura tramite la polarizzazione della luce delle stelle
- Intensità media: $3 \mu\text{Gauss}$

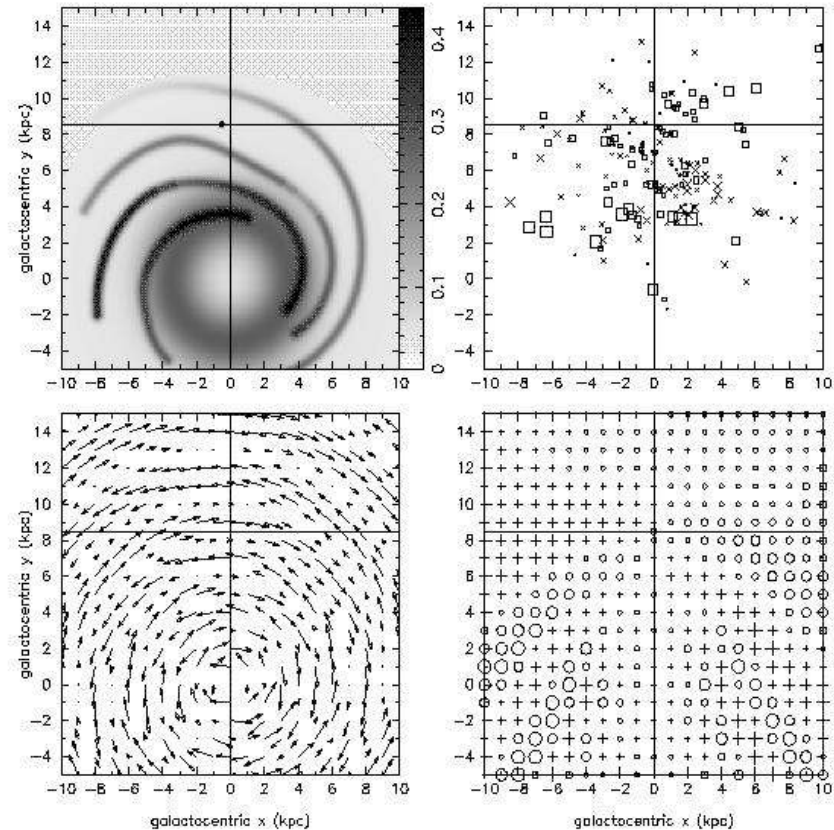
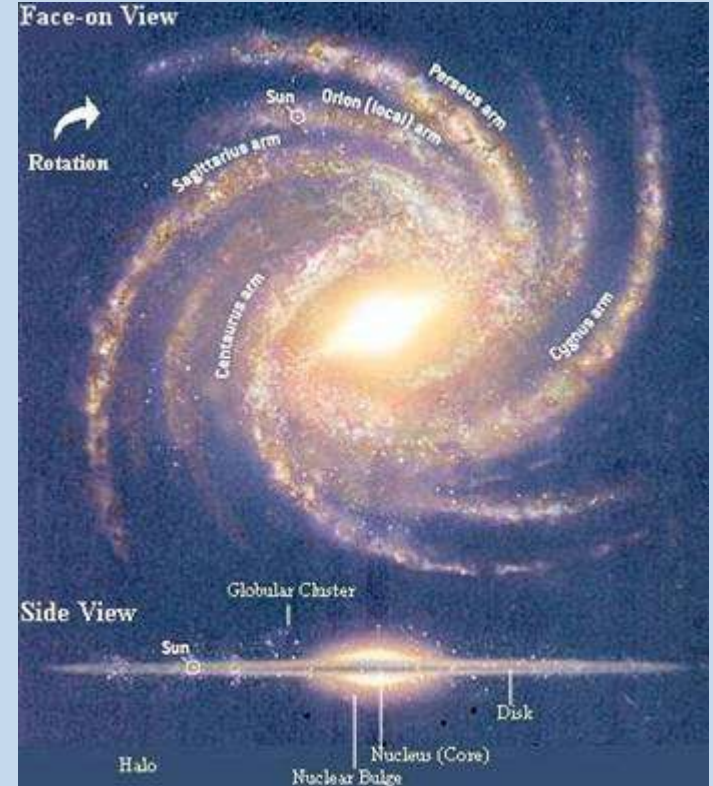
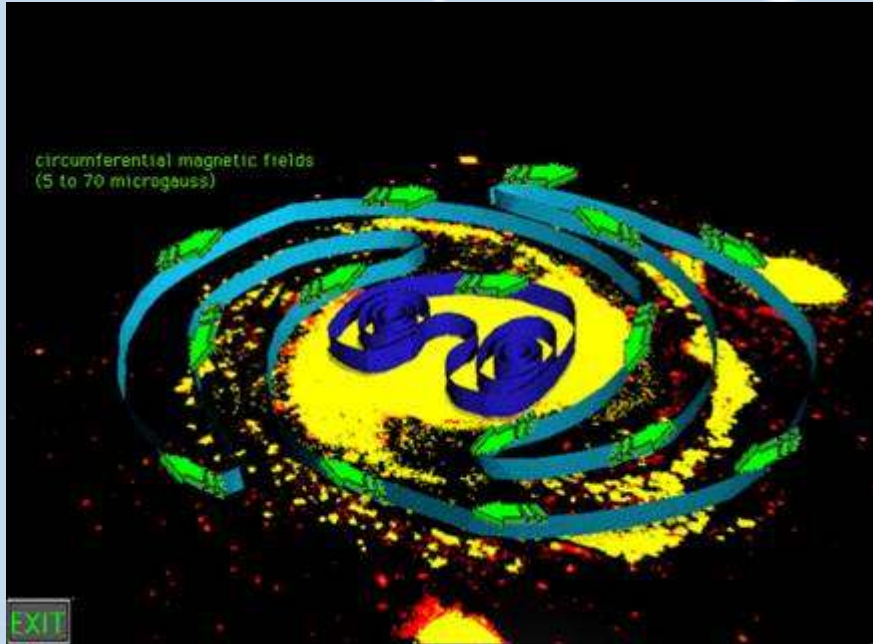


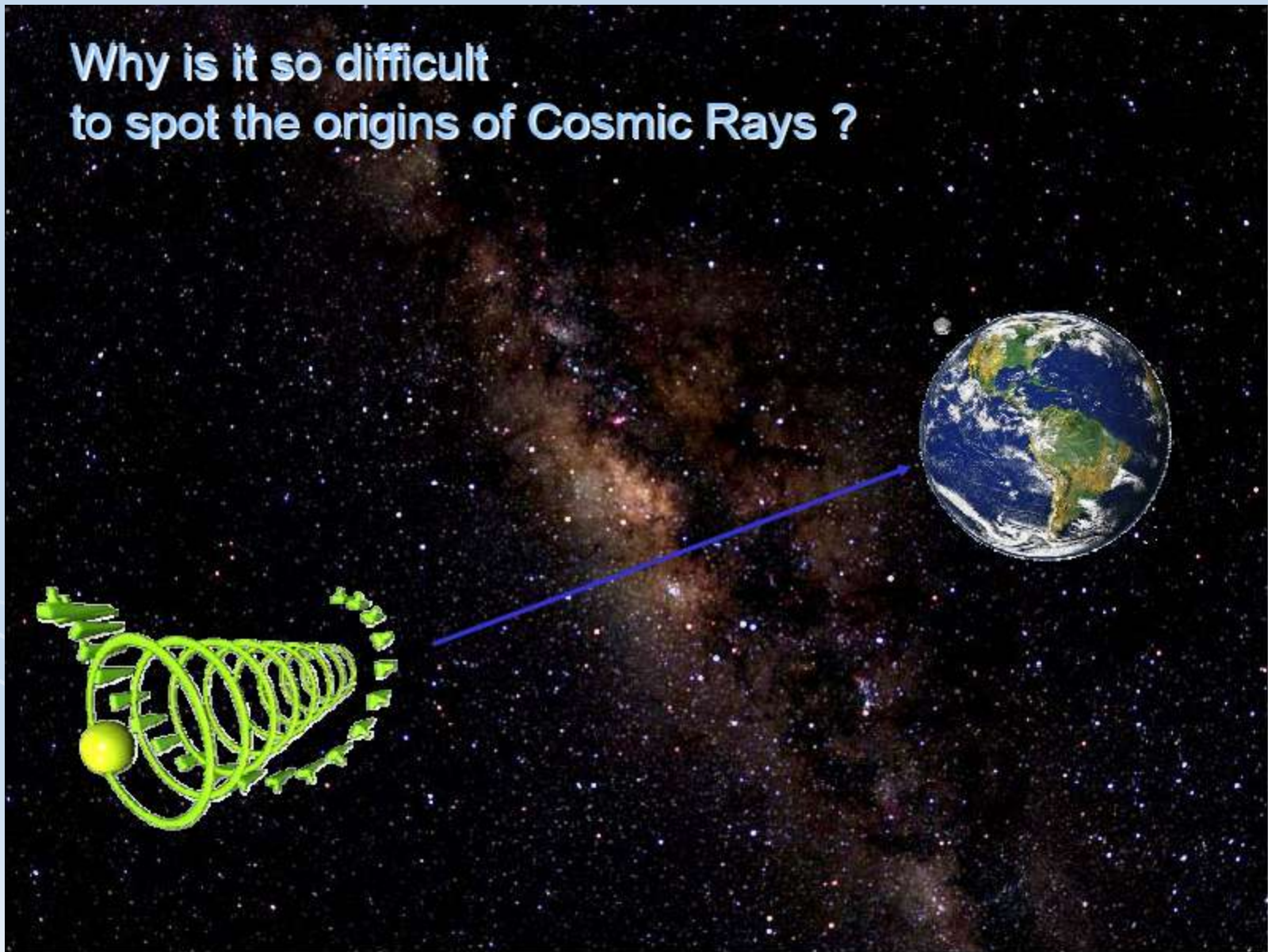
Figure 4. The large scale pattern of the magnetic field, using $p = -4.5^\circ$ and $R_o = 9.3$ kpc. The panels arrangement is the same as in figures 1 and 2.

Campo Magnetico Galattico

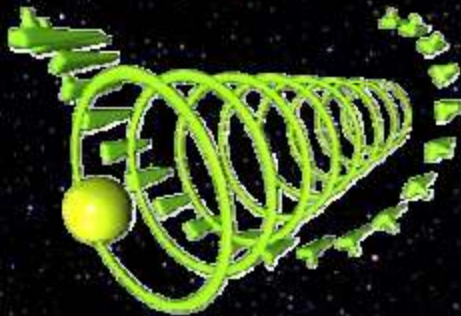


- La Galassia ha un Campo Magnetico pari a circa 3×10^{-6} Gauss = 3×10^{-10} T
- La direzione e verso del campo magnetico Galattico variano in continuazione (su scale di distanze dell'ordine di 10 pc).

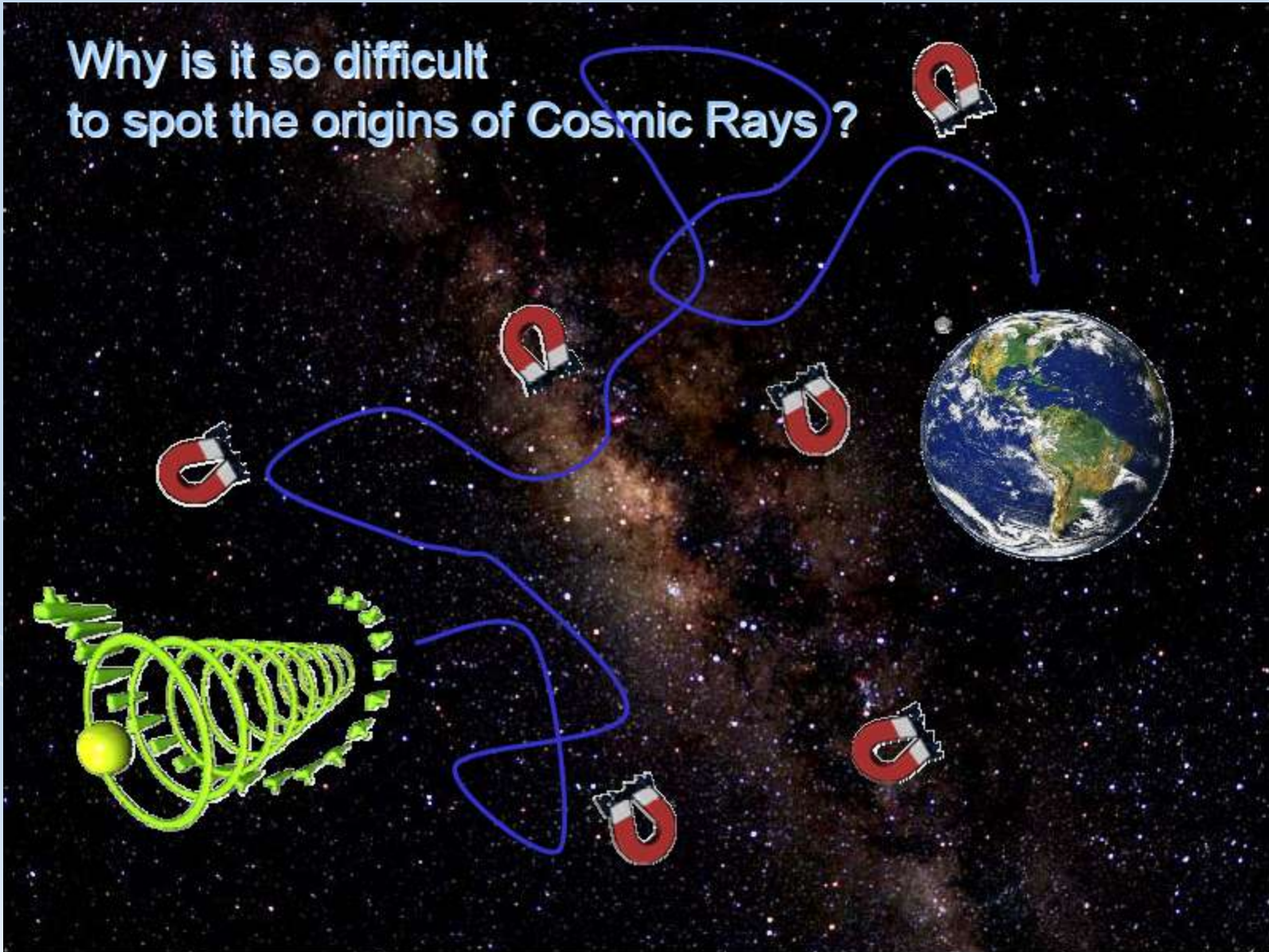
Why is it so difficult
to spot the origins of Cosmic Rays ?



Why is it so difficult
to spot the origins of Cosmic Rays ?



Why is it so difficult to spot the origins of Cosmic Rays?



Raggio di curvatura dei RC

- E' il **campo magnetico galattico** che confina ed “intrappola” i RC per un tempo molto lungo, sino a quando i RC raggiungono il bordo della Galassia e riescono a fuggire.
- Il raggio di curvatura di un nucleo relativistico (con $v=c$) di carica $q=Ze$ in campo magnetico B :

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

$$r = \frac{mc^2}{ZecB} = \frac{E}{ZecB}$$

Raggio di curvatura dei RC

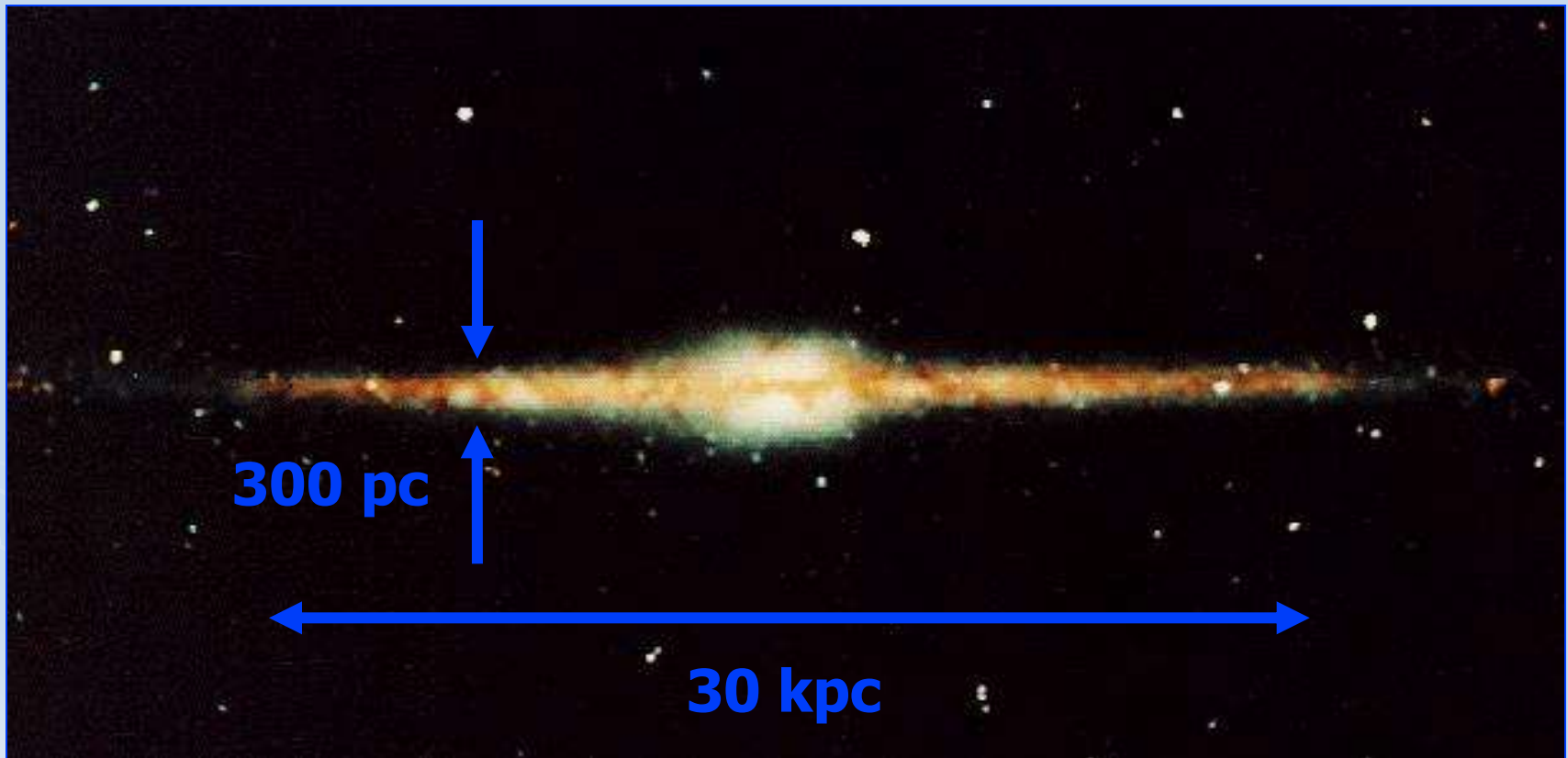
- Consideriamo un protone di $E \sim 10^6 \text{ GeV} = 1.6 \times 10^{-4} \text{ J}$

$$r = \frac{E}{ZecB} = \frac{1.6 \times 10^{-4}}{1.6 \times 10^{-19} (C) \cdot 3 \times 10^8 (m/s) \cdot 3 \times 10^{-10} (T)} =$$
$$\cong 10^{16} m = 3 pc$$

- Il valore del raggio di curvatura di questo protone è molto più piccolo dello spessore della Galassia

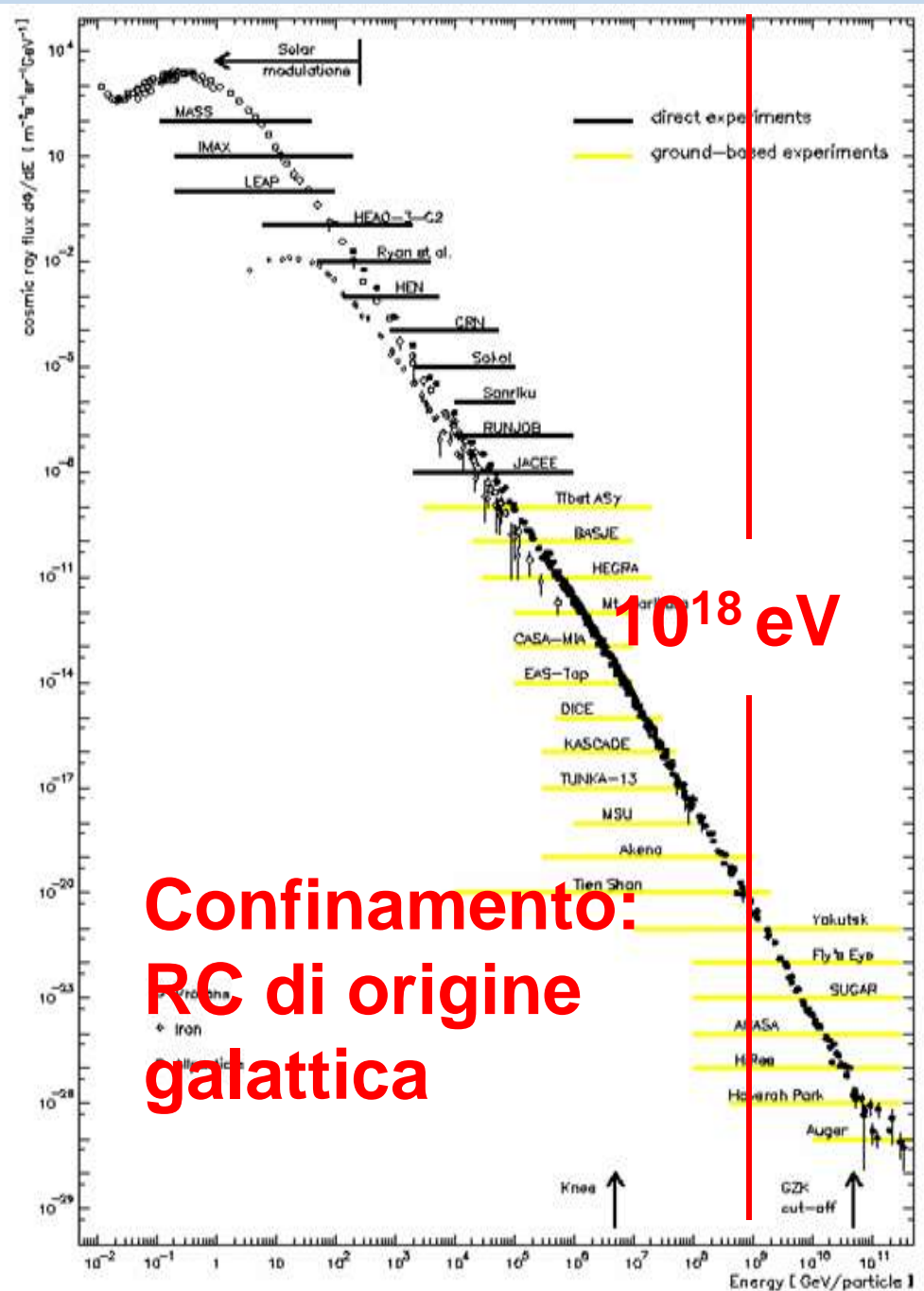
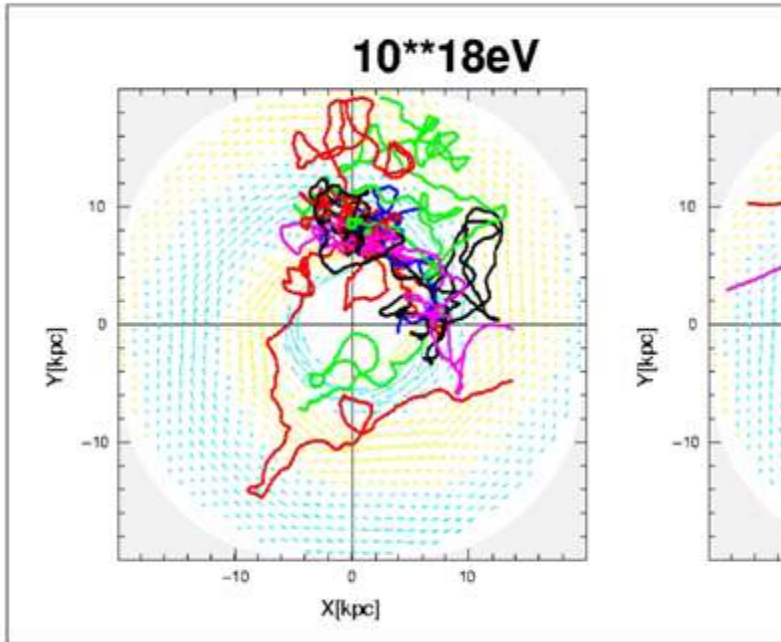
Raggio di curvatura dei RC

- Consideriamo un protone di $E \sim 10^6 \text{ GeV} = 1.6 \times 10^{-4} \text{ J}$



- Il valore del raggio di curvatura di questo protone è 3 pc, molto più piccolo dello spessore della Galassia

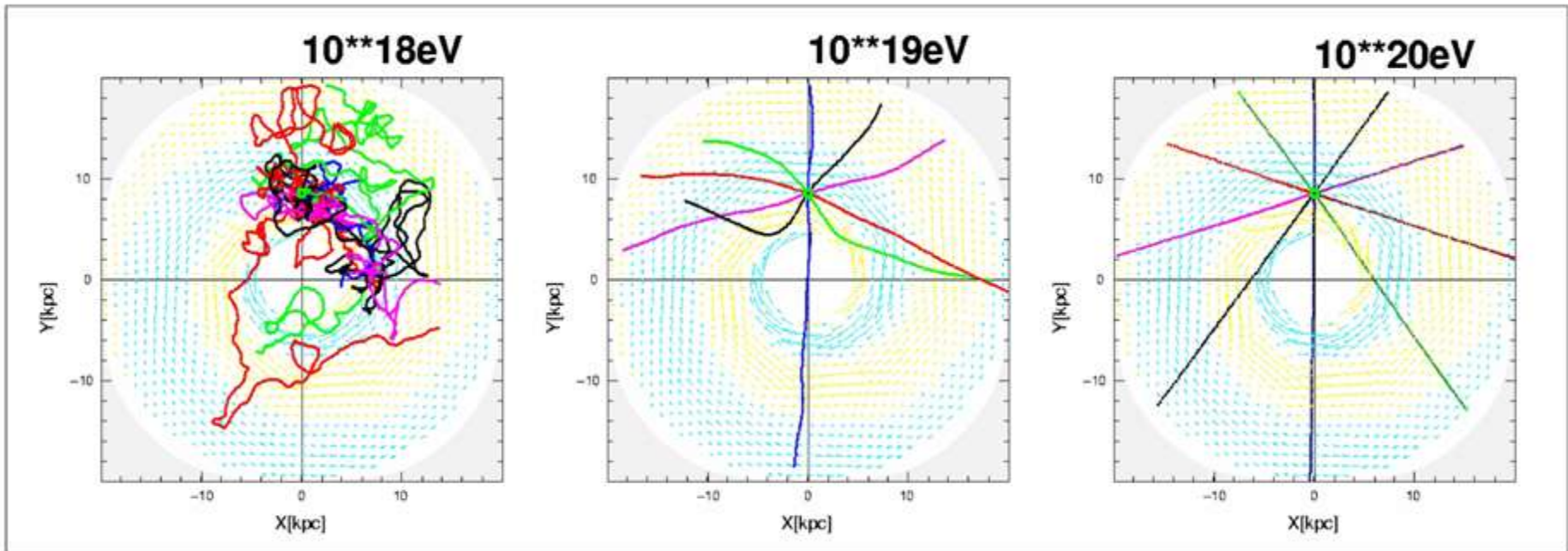
Effetto del Campo Galattico



**Confinamento:
RC di origine
galattica**

RC

Effetto del Campo Magnetico Galattico sui RC



- $< 10^{15} \text{ eV}$ (10^6 GeV) : intrappolati in piccole regioni della Galassia.
- $< 10^{18} \text{ eV}$ (10^9 GeV) : RC ben confinati nella galassia
- $\geq 10^{19} \text{ eV}$ (10^{10} GeV) : sorgenti extragalattiche
- $\sim 10^{20} \text{ eV}$ (10^{11} GeV) la deviazione nella Galassia $< 1^\circ$

Tempo di permanenza dei RC nella Galassia

- A causa della deflessione nel Campo magnetico, non è possibile “fare astronomia” coi RC (non puntano alla sorgente); le direzioni di provenienza sono “random”.
- I Raggi cosmici sono dunque intrappolati dal campo magnetico galattico all'interno della Galassia stessa.
- Sai calcolare il tempo di permanenza dei RC con i dati sinora in possesso? •(Risposta: $3 \cdot 10^6$ anni)

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

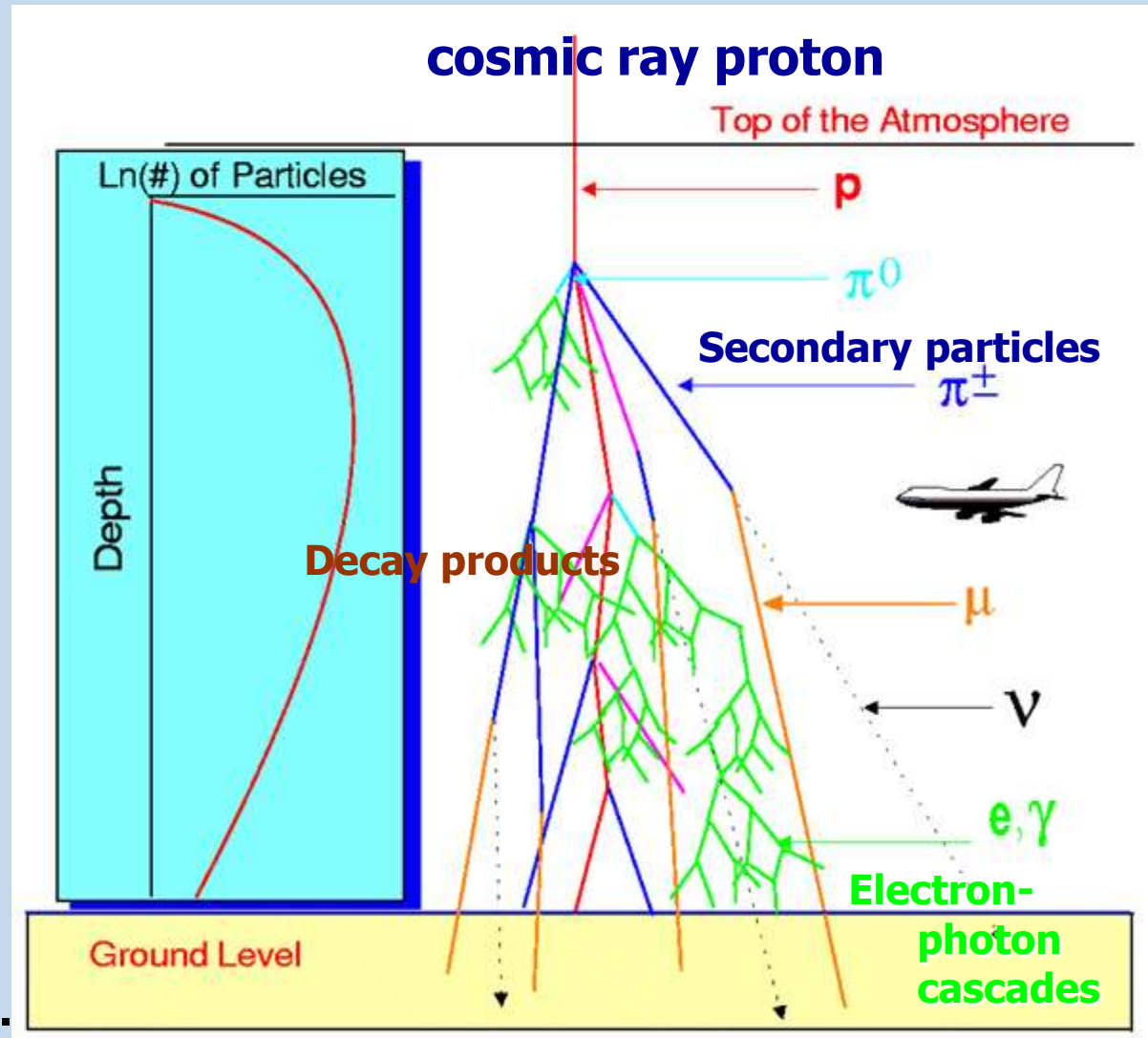
1.3 Misure Indirette

- **Possibili sorgenti extragalattiche**

2. Alcuni effetti dei RC sulla vita quotidiana

Raggi Cosmici Secondari (RCS)

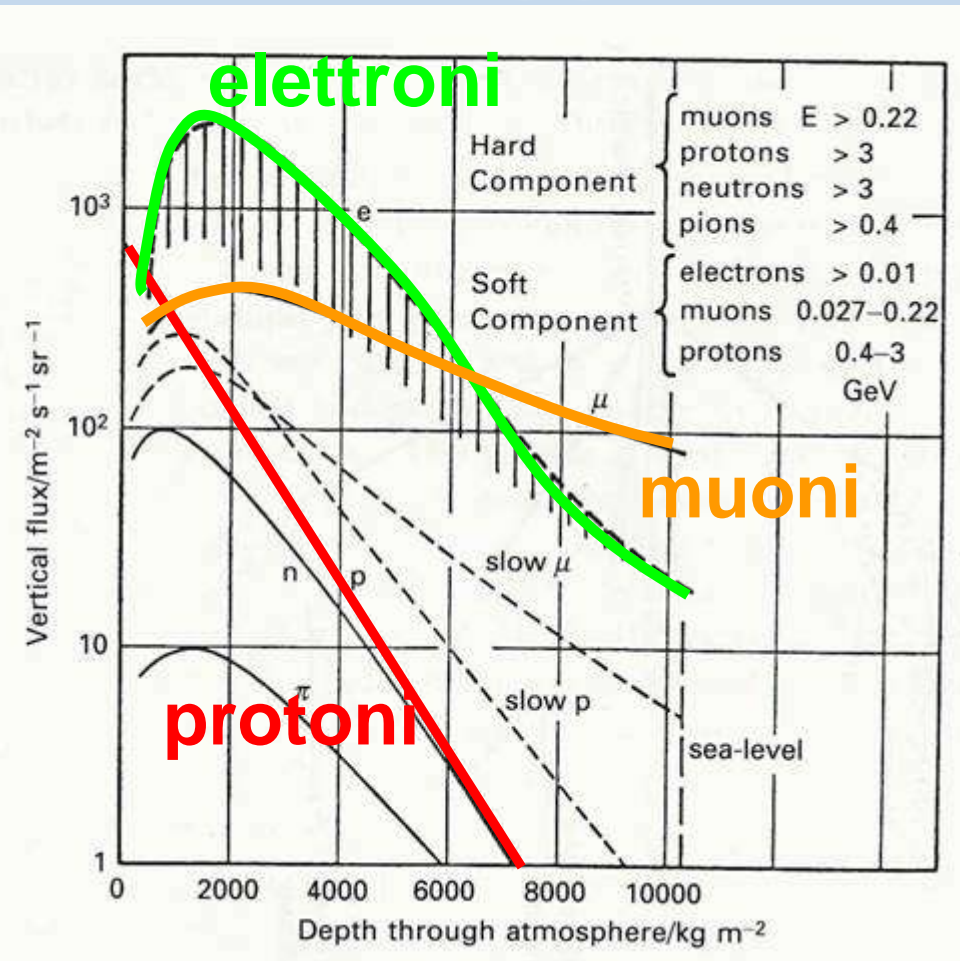
- I RC secondari sono prodotti dall'interazione dei primari nell'atmosfera.
- I RCS sono principalmente composti da elettroni, muoni ed adroni.
- Nei RCS sono presenti neutrini.



Misure sui RAGGI COSMICI tramite Sciami Estes.



Raggi cosmici Secondari



- L'uomo si è adattato alla presenza di RCS.
- Tuttavia, il loro flusso cresce all'aumentare della quota (Hess, 1912).
- Possibili problemi per la lunga permanenza dell'uomo nello spazio.
- I RC di energia estrema sono misurabili solo attraverso gli sciami prodotti nell'atmosfera.

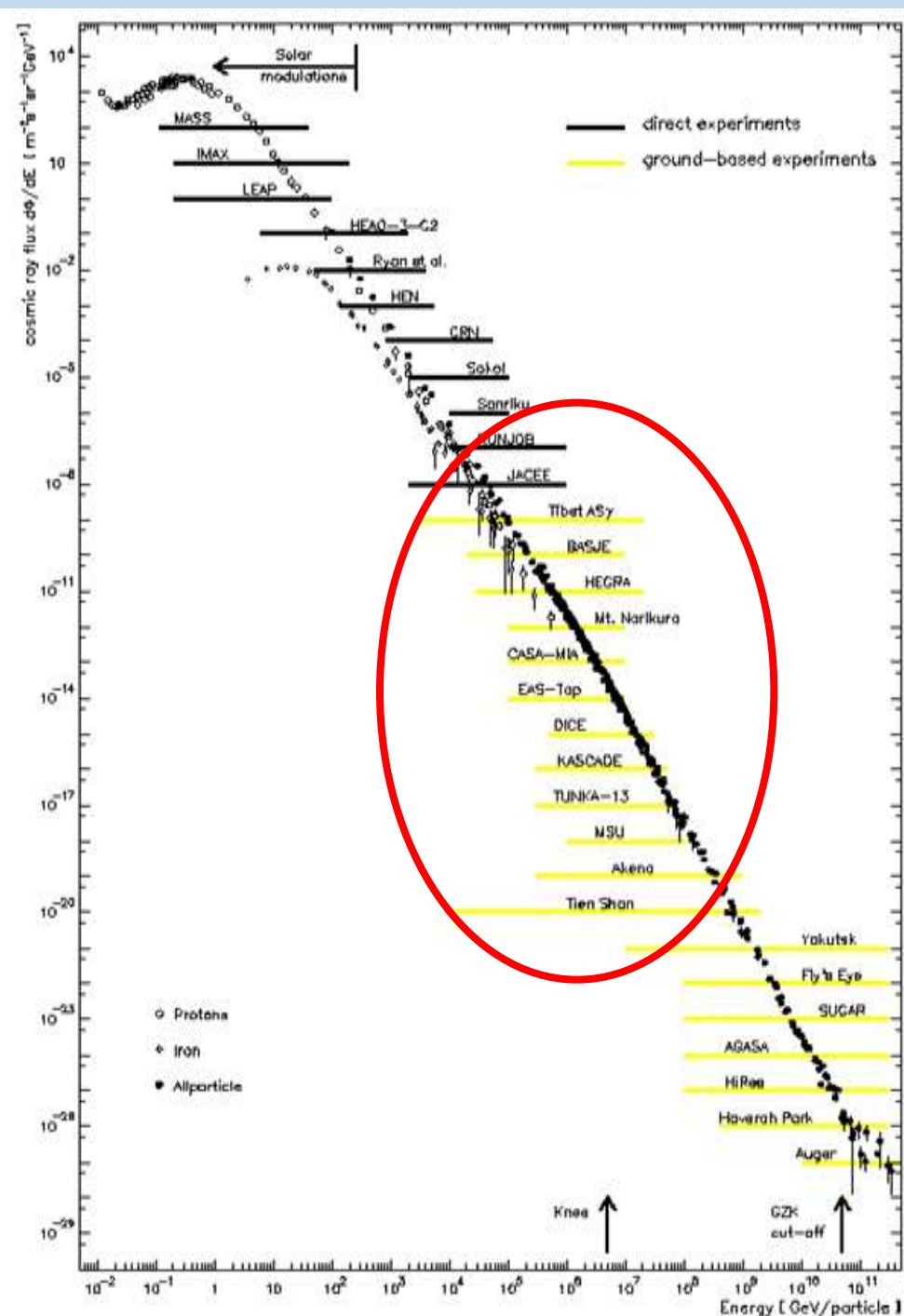
Flusso a diverse quote dei RCS. Il possibile danno biologico provocato dalle tre componenti è diverso.

RC secondari, Outline

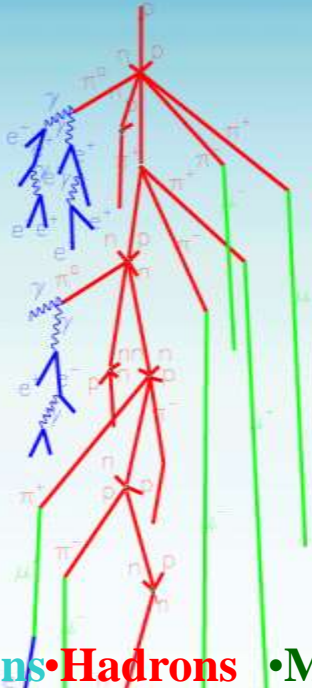
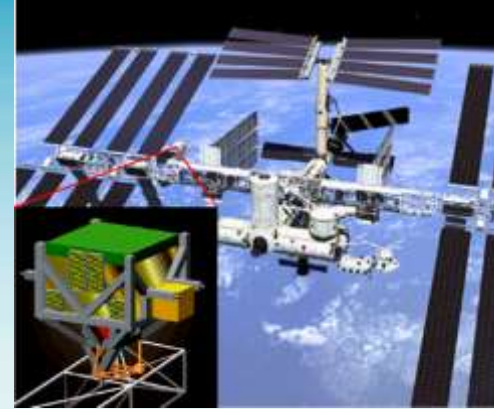
- Produzione di Sciami in Atmosfera
- Rivelatori di Sciami estesi attorno 10^{14} eV
- Le misure del flusso per 10^{14} eV $<E<10^{18}$ eV
- Tecniche di rivelazione e spettro Energetico dei RC alle energie estreme, $E>10^{18}$ eV
- Alcuni esperimenti per $E>10^{18}$ eV: Fly's Eye, HiRes, AGASA, AUGER
- Cutoff GZK: energia di soglia e orizzonte
- Possibili sorgenti extragalattiche candidate

Spettro dei raggi cosmici (richiamo)

- $\Phi_{TOT} \sim 1000 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-2}\text{sr}^{-1}$
- Misure dirette: 90% p, 9% He, 1% nuclei pesanti
- Si estende per 13 ordini di grandezza in energia
- Per 32 ordini di grandezza in flusso
- Legge di potenza su tutto lo spettro, con due cambi di pendenza



•Observation of cosmic rays



•Electrons •Hadrons •Muons



•Fluorescence light



•Cerenkov light
•(imaging & non-imaging)



•Neutrinos



•Muons