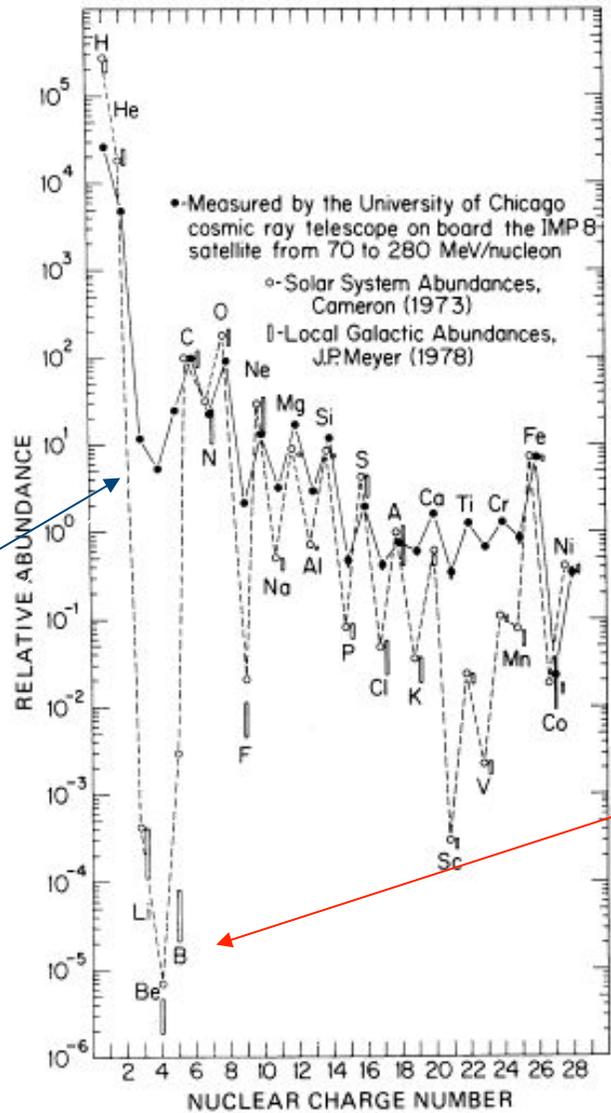


Astrofisica Nucleare e Subnucleare  
Cosmic Ray Astrophysics - III

# Astrofisica Nucleare e Subnucleare

## Propagazione di Raggi Cosmici

# CR observations

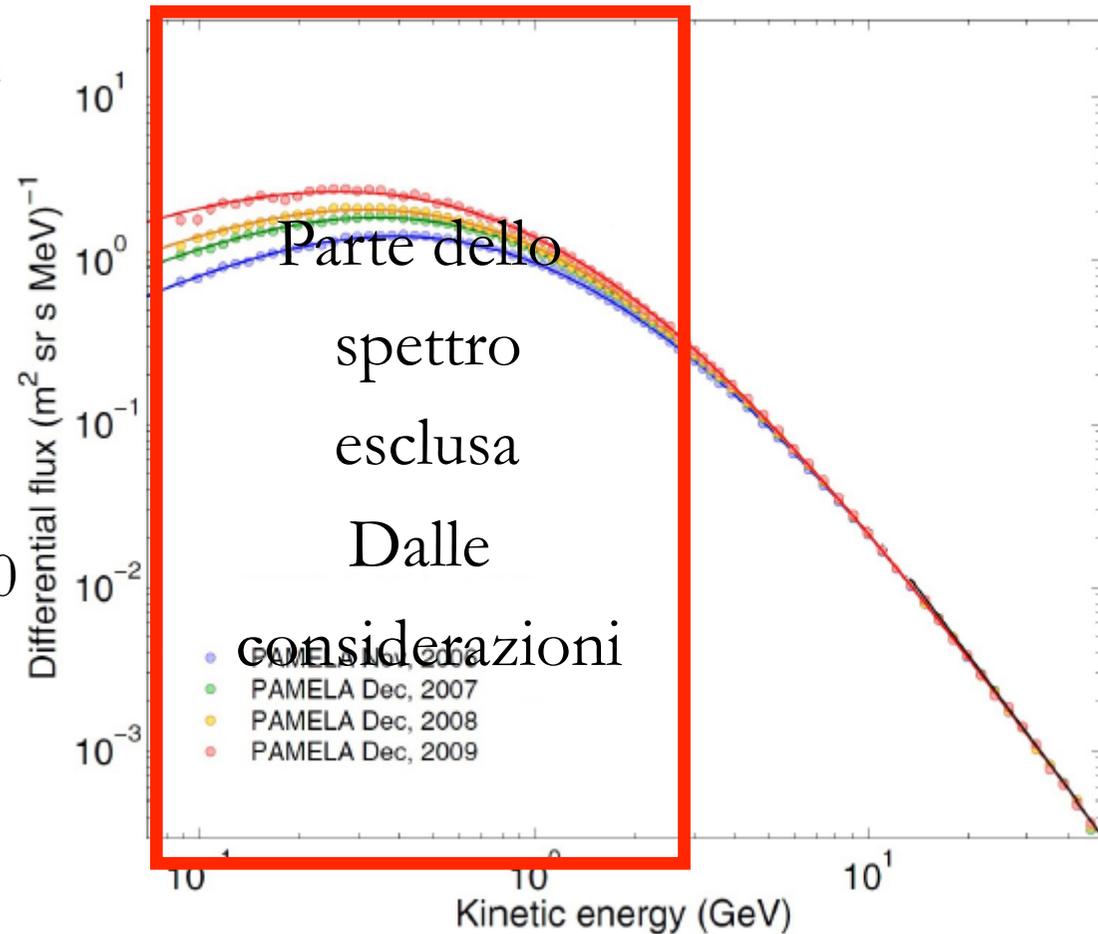


CR component

Solar system

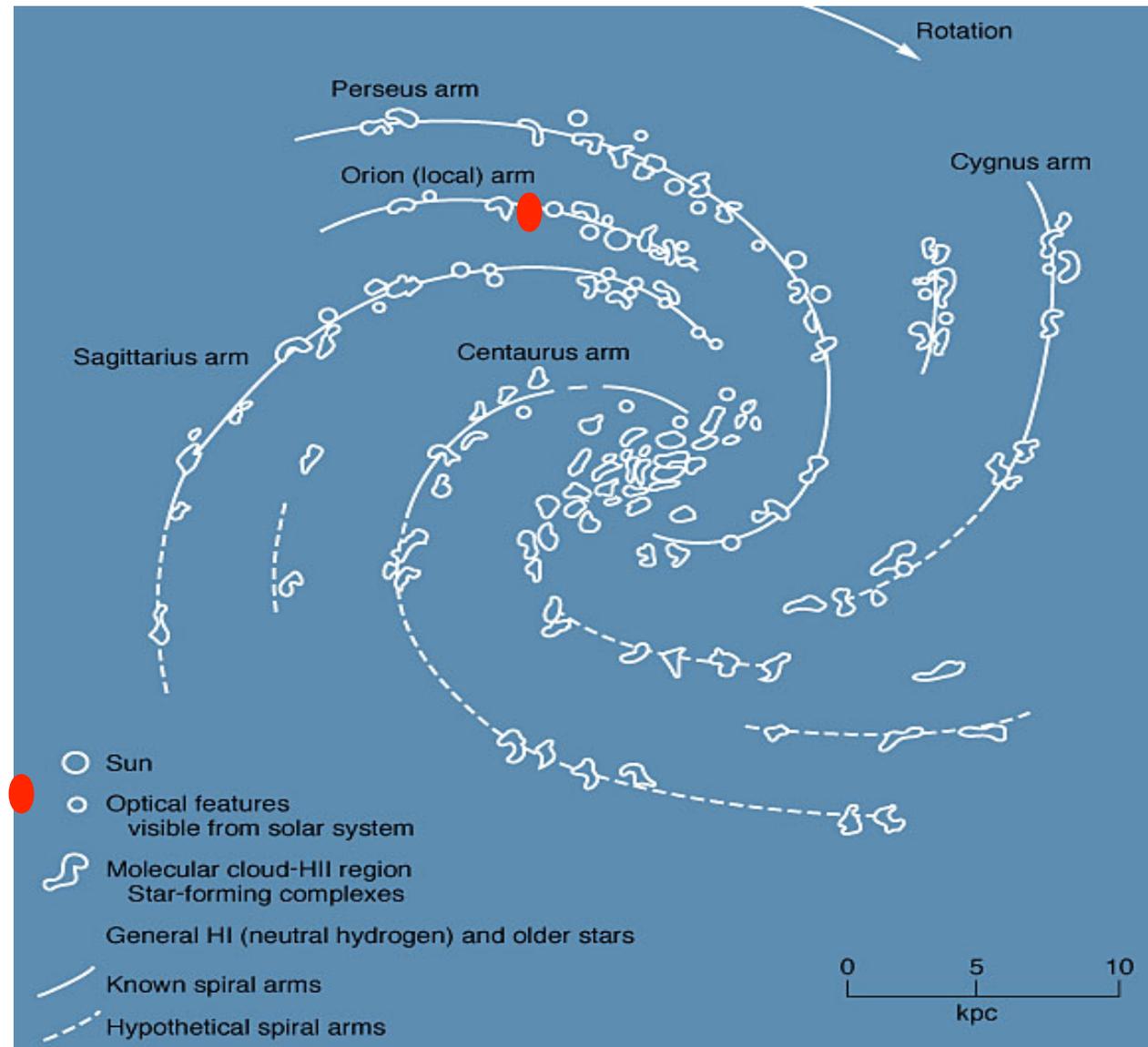
# Modulazione dei RC di bassa energia dovuta al ciclo del Sole

- Variazioni del ciclo solare per energie  $< \sim 3$  GeV
- Cfr dati di PAMELA
- RC con  $E > 3$  GeV non affetti dal ciclo solare
- Flusso di RC di bassa energia ( $>1$  GeV):  $\sim 1000$  p/(m<sup>2</sup>s sr).

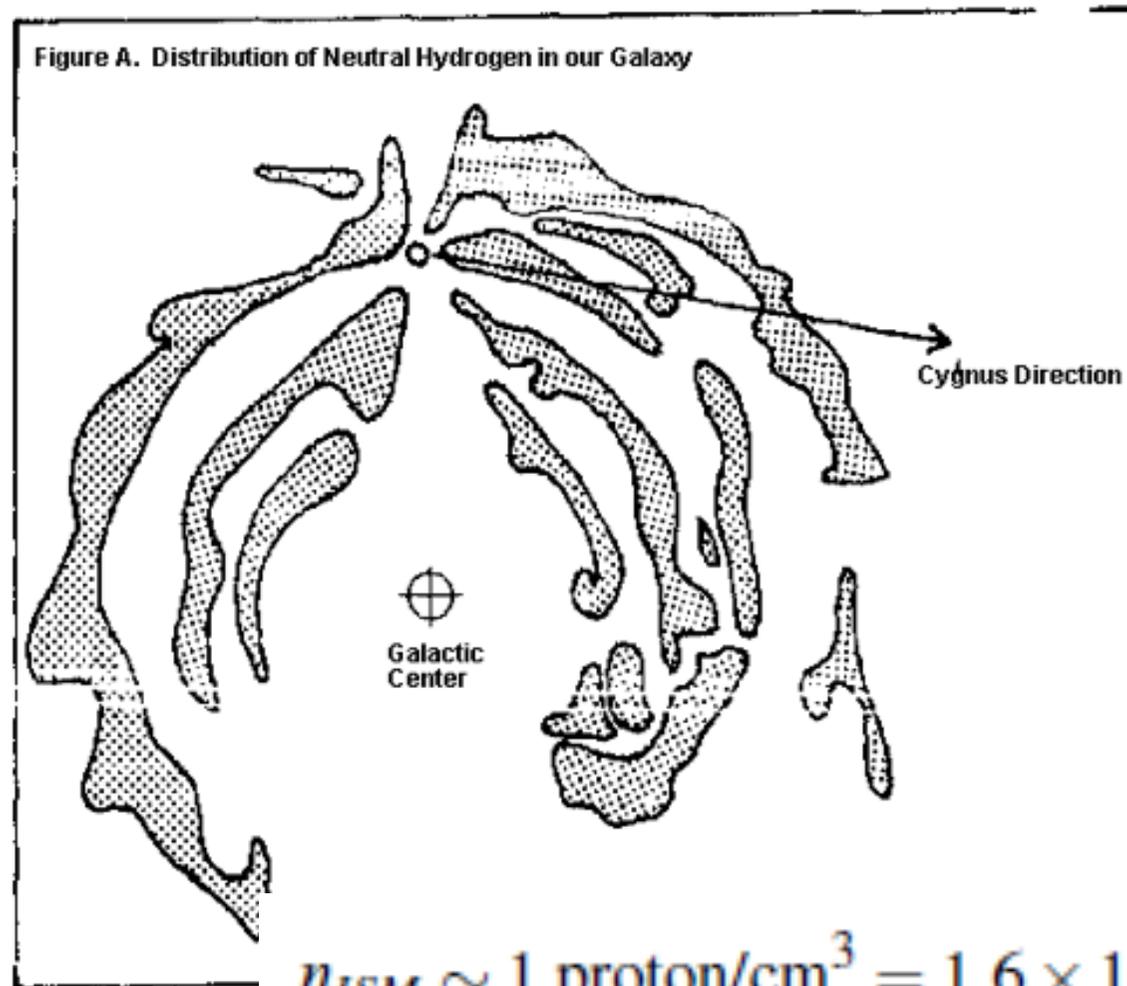


# La Galassia

- Il gas interstellare o intragalattico (GI) è il mezzo in cui si formano le stelle.
- Contribuisce per il 5% alla massa della Galassia



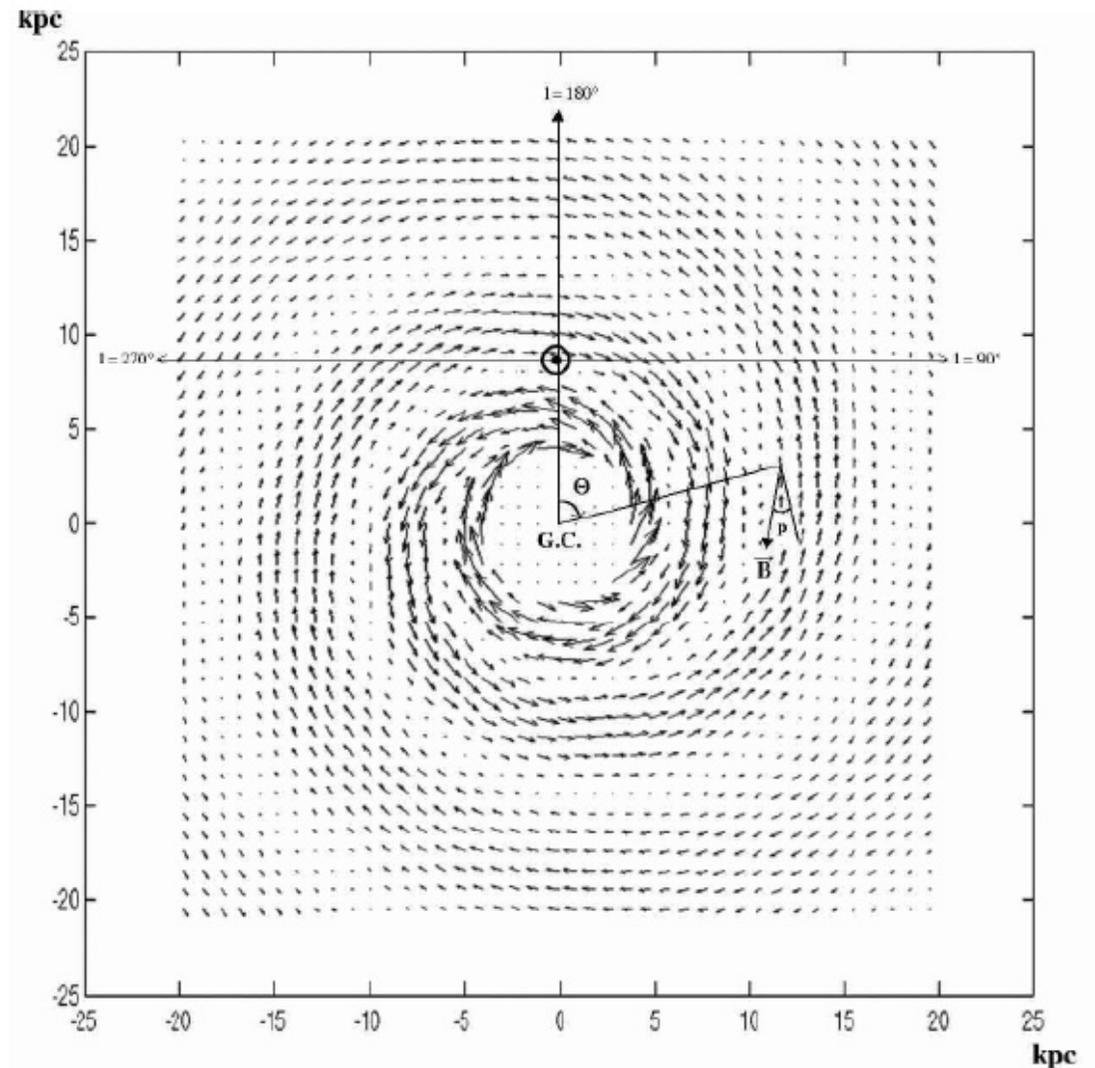
# Distribuzione di idrogeno neutro nella Galassia



Copyright (c) 1997 by Michael

# Il campo magnetico galattico

- Si misura tramite la polarizzazione della luce delle stelle
- Intensità media:  
3-4  $\mu\text{Gauss}$
- Coerenti su scale di  
1-10 pc



# Nubi Gassose

- Scoperte con astronomia radio
- Il gas viene riscaldato da vari meccanismi:
  - Esplosioni di SN
  - Radiazione U.V. da stelle giganti
  - Eccitazione/ionizzazione da RC
- Si raffredda con altri meccanismi:
  - Bremsstrahlung (gas caldi,  $K > 10^7$  K)
  - Diseccitazione  $10^4$  K  $< T < 10^7$  K
  - Emissione termica

# Densità media del mezzo Interstellare

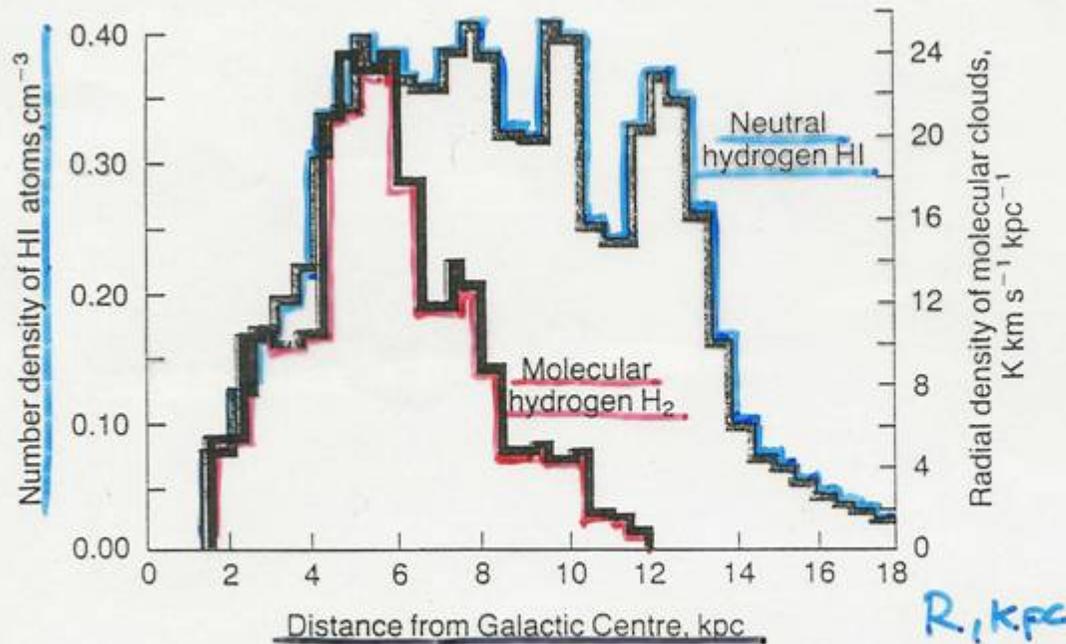


Figure 17.2. The radial distribution of atomic and molecular hydrogen as deduced from radio surveys of the Galaxy in the 21-cm line of atomic hydrogen and from millimetre surveys of the molecular emission lines of carbon monoxide, CO. (After D. Michalis and J. Binney (1981). *Galactic astronomy: structure and kinematics*, pp. 535, 554. San Francisco: W.H. Freeman and Co.)

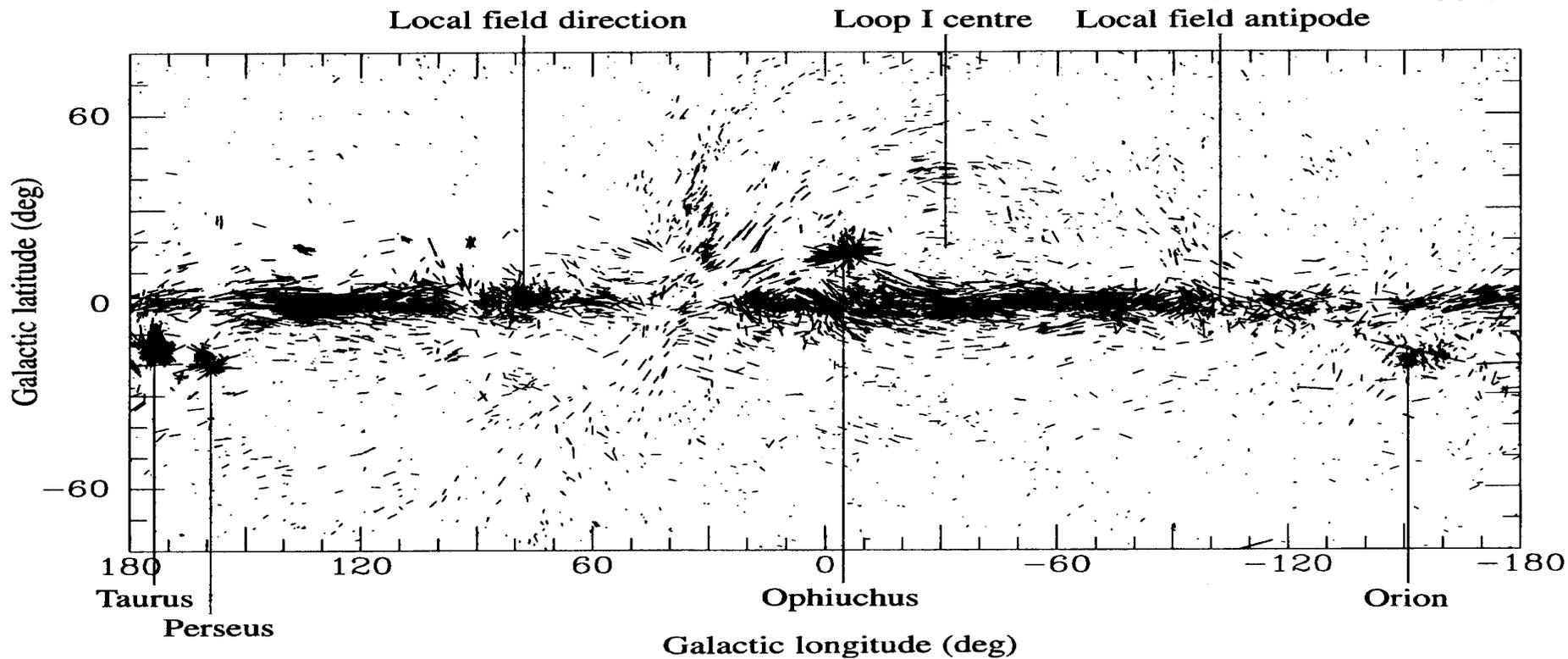
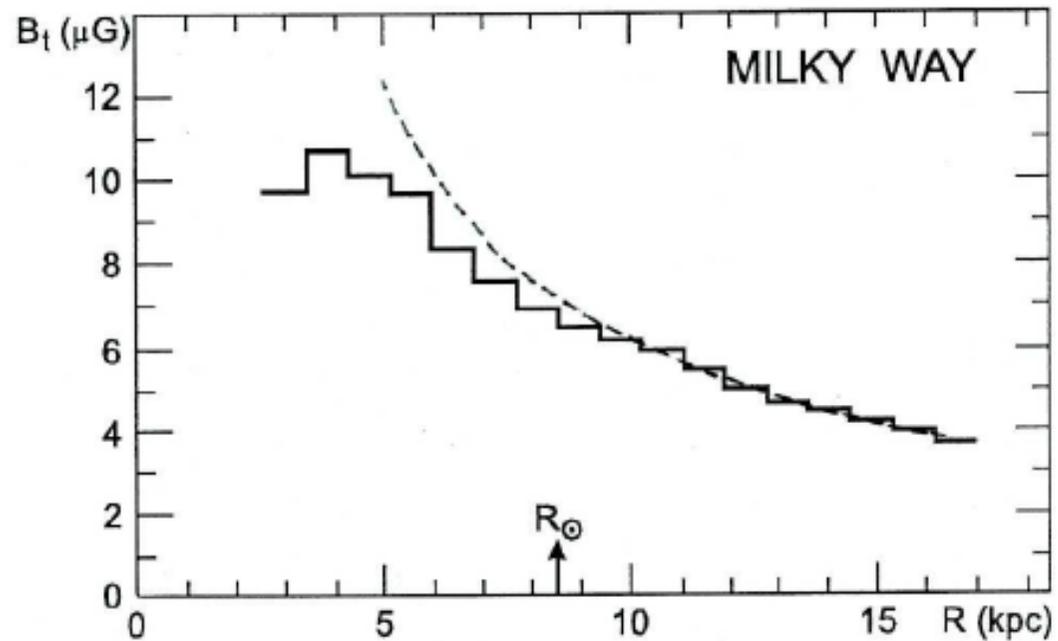
- Figura 17.2 libro

$$\rho_{\text{ISM}} = 1 \text{ p/cm}^3 = 1.6 \times 10^{-24} \text{ g/cm}^3$$

NOME	IL MEZZO INTERSTELLARE		T (K)
	COSTITUENTI	Rivelati da...	
MOLECOLARI NUBI	H <sub>2</sub> , CO CS etc	Linee molecolari Emiss. Polveri	~0.5% 40% 1000
NUBI DI H NUBI DIFFUSE	H, C, O neutri	linee di 21 cm Linee Assorbim.	5% 40% 1-100
INTERNEBULE	H, H <sup>+</sup> , e <sup>-</sup> (ionizz. 40%)	21 cm + assorbim. Linee H	40% 20% 0.1-1
CORONE stellari	H <sup>+</sup> , e <sup>-</sup> ... O <sup>5+</sup>	soft X (0.1-2 keV)	~50% 0.1% 1000

# Intensità di B

Zweibel & Heiles 1997, Nature 385,131  
Berdyugin & Teerikorpi 2001, A&A 368,635

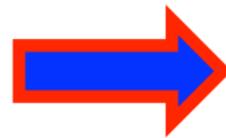


# Richiamo: moto di un RC nel campo magnetico Galattico

$$mv^2 / r = pv / r = ZevB / c$$

$$r = pc / ZeB$$

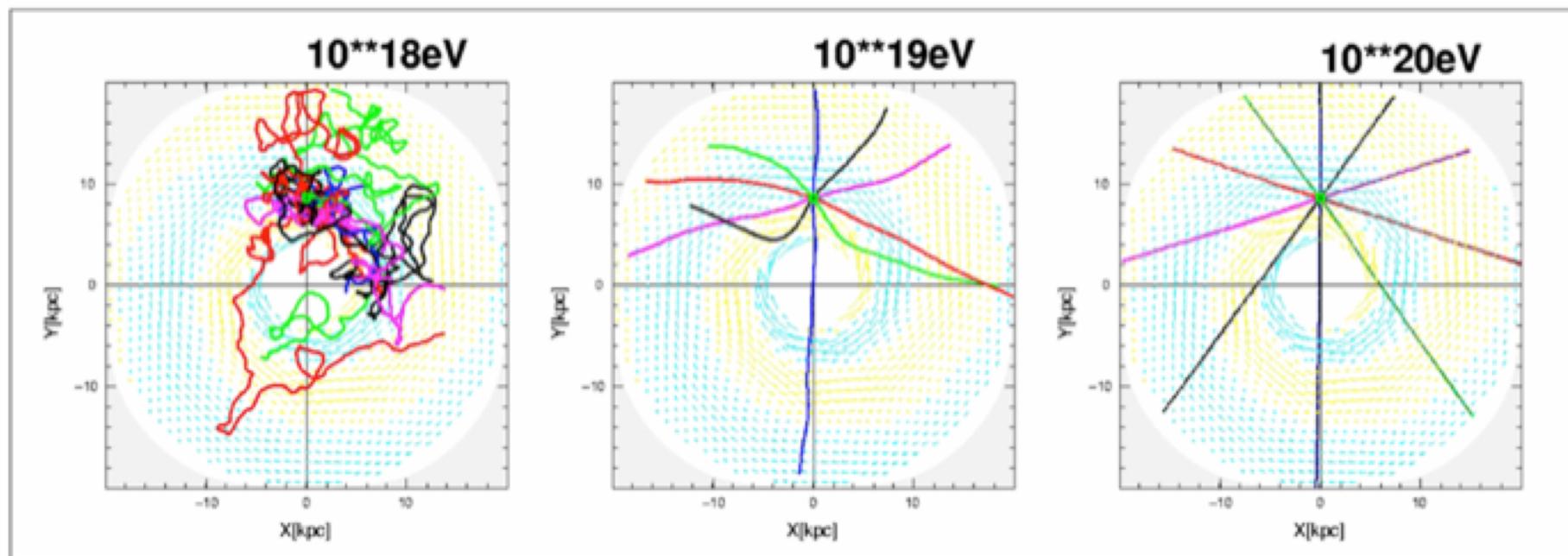
$$r(\text{cm}) = \frac{1}{300} \frac{E(\text{eV})}{ZB(\text{G})}$$



$$(10^{12} \text{ eV}) = 10^{15} \text{ cm} = 3 \times 10^{-4} \text{ pc}$$

$$r = (10^{15} \text{ eV}) = 10^{18} \text{ cm} = 3 \times 10^{-1} \text{ pc}$$

$$(10^{18} \text{ eV}) = 10^{21} \text{ cm} = 300 \text{ pc}$$



# Abbondanze dei nuclei nel Sistema Solare

- Sono rappresentative delle abbondanze degli elementi nel mezzo interstellare

Ref: Mashnik, astro/ph:  
0008382

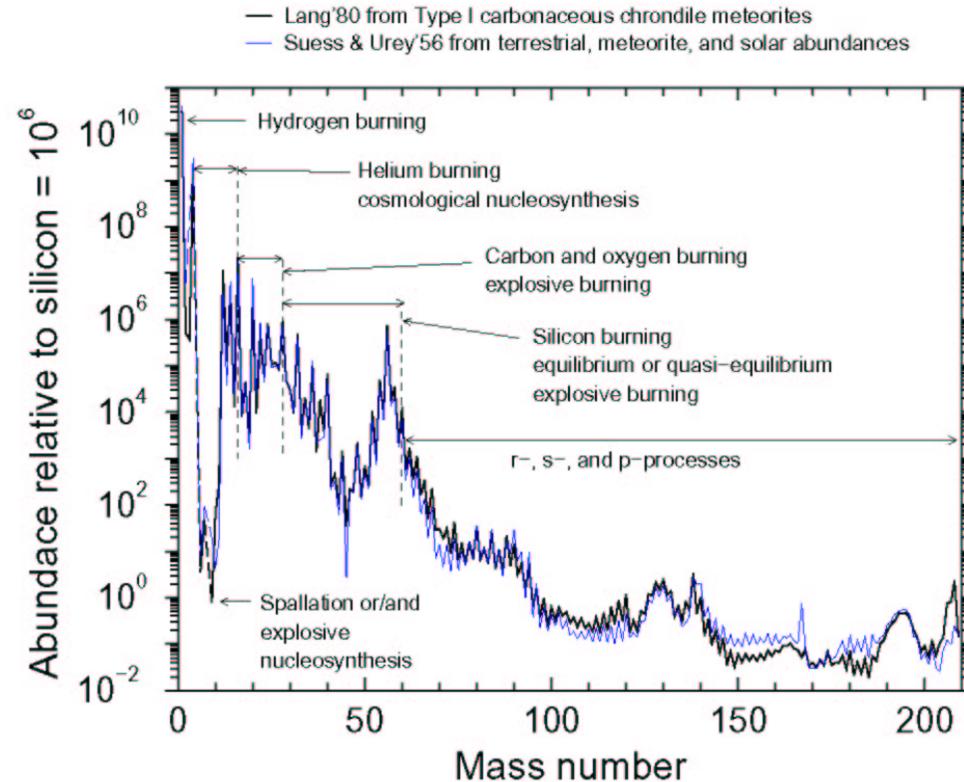


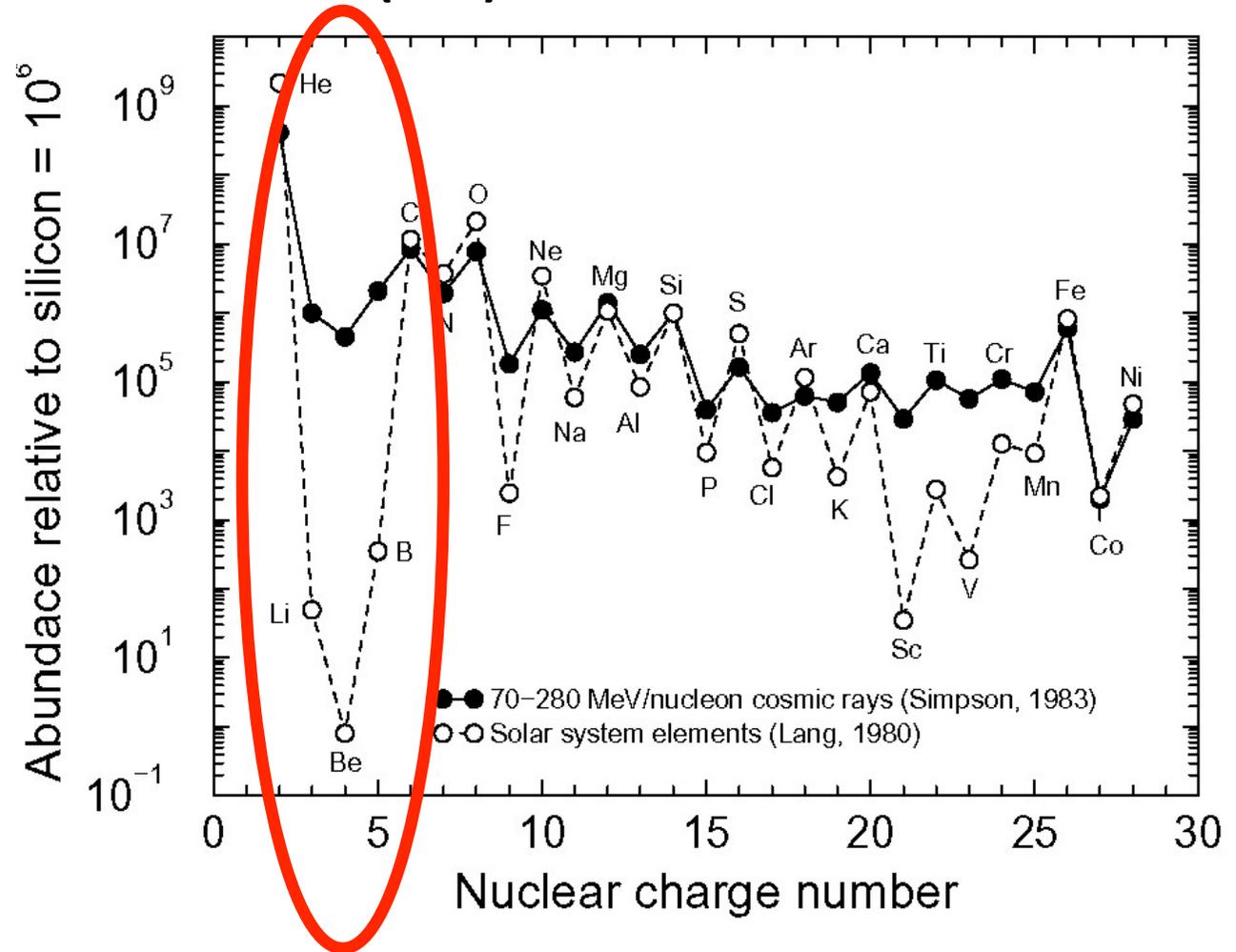
Fig. 1.— Abundances of solar system nuclides plotted as a function of mass number. The thin blue curves shows old data compiled in Table III by Suess and Urey (1956) which are based on measurements of terrestrial, meteoric, and solar abundances. These data were used by Burbidge, Burbidge, Fowler, and Hoyle (1957) in postulating the basic nucleosynthetic processes in stars in their seminal work which become widely known as “B<sup>2</sup>FH,” the “bible” of nuclear astrophysics. The thick black curve shows newer data from the compilation published in Table 38 by Lang (1980) which are based upon measurement of Type I carbonaceous chondrite meteorites, and are thought to be a better representation than Suess and Urey’s curve. The nuclear processes which are thought to be the main stellar mechanisms of nuclide production are shown as well in the figure.

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

- I RC hanno una composizione chimica analoga a quella del Sistema Solare (Solar System Abundance, SSA)?
- Se sì, questo indica una origine simile a quella del SS.
- 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

# Abbondanze relative dei RC e del sistema solare (SS)

- H e He sono dominanti (98%), leggermente in difetto rispetto SS
- Buon accordo tra CR e SS 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

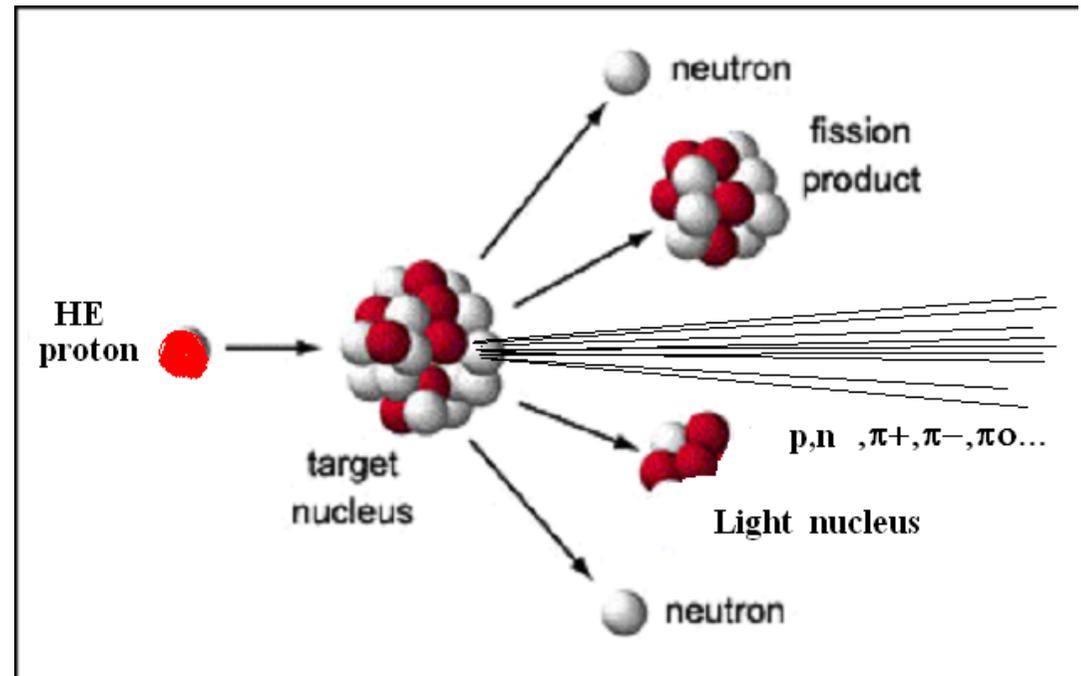


# Produzione di Li, Be, B nei RC

- ${}^6\text{Li}$ , 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, mentre  ${}^6\text{Li}$ , Be, B non sono stati prodotti dal big bang.
- Li, Be, B sono prodotti temporaneamente durante la catena di fusione, ma vengono “consumati” durante le reazioni (vedere cap. 8): 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).

# Interazioni di alta energia di p con nuclei

- Il p interagisce con un solo nucleone nel nucleo
- Nell'interazione p-nucleone vengono prodotte molte particelle (pioni principalmente)



- Nel Sistema di riferimento del laboratorio, le particelle sono emesse in avanti.
- In genere, pochi (1 o 2) nucleoni partecipano all'interazione, e vengono rimossi dal nucleo originario. La parte rimanente è in uno stato eccitato, e alcuni frammenti ( $n, \alpha$ ) possono evaporare. La parte rimanente viene chiamata frammento nucleare, o nucleo di spallazione.

# Meccanismo di propagazione

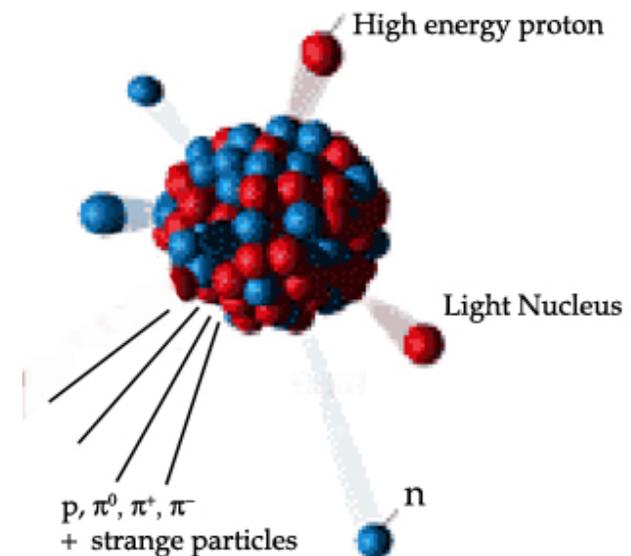
- Gli elementi del gruppo M(=C,N,O) sono gli elementi candidati a produrre L(=Li,Be,B) durante la propagazione.
- Il processo fisico con cui gli M producono gli L è la spallazione, urto con i protoni del GI.

- Quale quantità di materiale:

$$\xi = \rho L \text{ (gcm}^{-2}\text{)}$$

i nuclei M devono attraversare per produrre, nel rapporto osservato, gli elementi L.

- Il problema può essere impostato con un sistema di equazioni differenziali.



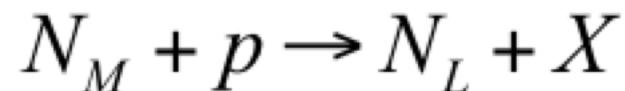
- Costruiamo un “modellino giocattolo” di propagazione dei RC, in cui le ipotesi di partenza sono:

- **Nessuna presenza di nuclei Leggeri ( $N_L$ ) alle sorgenti dei RC**
- **Una certa quantità di nuclei Medi ( $N_M$ ), che durante la propagazione diminuisce a causa della spallazione**

$$N_L(0) = 0$$

$$N_M(0) = N_M^0$$

- **Il processo di spallazione  $P_{ML}$  :**



**avviene con una probabilità  $0 \leq P_{ML} \leq 1$ .**  $P_{ML} = \frac{\sigma_{spall.}}{\sigma_{tot.}}$

- Sperimentalmente,  $P_{ML} = 28\%$ .



$$\frac{d}{d\xi} N_M(\xi) = -\frac{N_M(\xi)}{\lambda_M} \quad (1)$$

$$\frac{d}{d\xi} N_L(\xi) = -\frac{N_L(\xi)}{\lambda_L} + \frac{P_{ML}}{\lambda_M} N_M(\xi) \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{N_0 \cdot \sigma_i}$$

$$\sigma_i \propto \sigma_0 \cdot A_{\text{mdo}}^{2/3}$$

$$\sigma_M = (45 \text{ mb}) \cdot A_M^{2/3} = 280 \text{ mb}$$

$$\sigma_L = (45 \text{ mb}) \cdot A_L^{2/3} = 200 \text{ mb}$$

$$\lambda_M = \frac{1}{(6 \times 10^{23} \cdot 280 \text{ mb})} = 6.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$$

$$\lambda_L = \frac{1}{(6 \times 10^{23} \cdot 200 \text{ mb})} = 8.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$$

- lunghezza di interazione nucleare

- Valori dei parametri in (1) e (2)

- La soluzione dell'eq. 1 è:

$$N_M(\xi) = N_M^0 \cdot e^{-\xi/\lambda_M} \quad (3)$$

- Moltiplicando ambo i membri della (2) per  $e^{\xi/\lambda_L}$

$$\frac{d}{d\xi} N_L(\xi) \cdot e^{\xi/\lambda_L} = -\frac{N_L(\xi)}{\lambda_L} \cdot e^{\xi/\lambda_L} + \frac{P_{ML}}{\lambda_M} N_M(\xi) \cdot e^{\xi/\lambda_L}$$



$$\frac{d}{d\xi} (N_L(\xi) \cdot e^{\xi/\lambda_L}) = \frac{P_{ML}}{\lambda_M} N_M^0 \cdot e^{(\xi/\lambda_L - \xi/\lambda_M)}$$

- Questa, è una equazione del tipo:

$$\frac{d}{dx} (y(x) \cdot e^{x/\lambda_L}) = B \cdot e^{(x/\lambda_L - x/\lambda_M)} \quad (4)$$

$$\text{dove } B = \frac{P_{ML}}{\lambda_M} N_M^0$$

$$\frac{d}{dx} \left( y(x) \cdot e^{x/\lambda_L} \right) = B \cdot e^{(x/\lambda_L - x/\lambda_M)} \quad (4)$$

■ Proviamo con una soluzione del tipo:

$$y(x) = N_L(\xi) = c \cdot \left( e^{-x/\lambda_L} - e^{-x/\lambda_M} \right) \quad (5)$$

■ Con le condizioni al contorno:

$$y(x) = 0 = N_L(0) = 0$$

$$\frac{d}{dx} \left[ c \cdot \left( e^{-x/\lambda_L} - e^{-x/\lambda_M} \right) \cdot e^{x/\lambda_L} \right] = B \cdot e^{(x/\lambda_L - x/\lambda_M)}$$

$$\frac{d}{dx} \left[ c \cdot \left( 1 - e^{-x/\lambda_M + x/\lambda_L} \right) \right] = B \cdot e^{(x/\lambda_L - x/\lambda_M)}$$

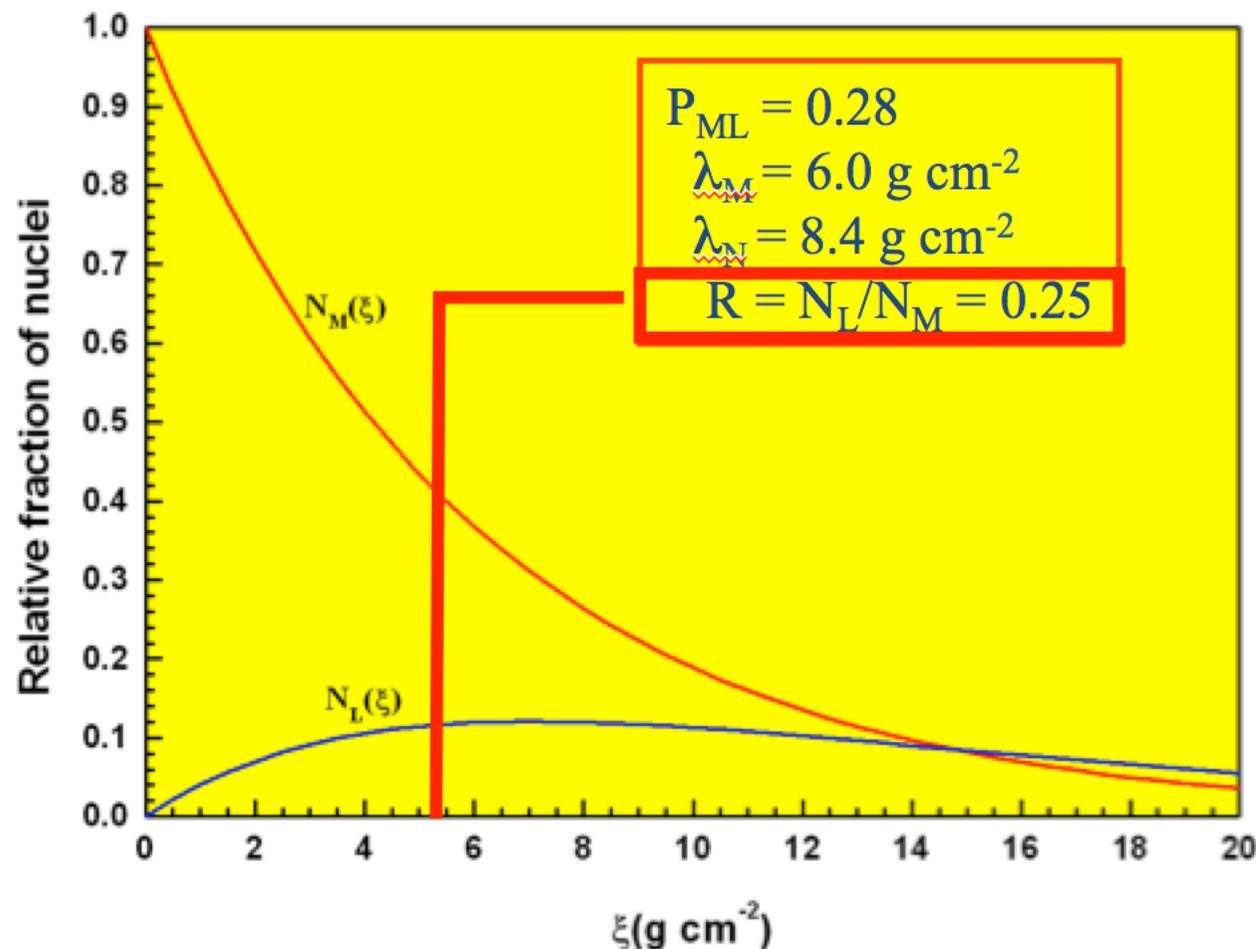
$$c \cdot \left( \frac{1}{\lambda_M} - \frac{1}{\lambda_L} \right) = B$$

$$c = B \cdot \frac{\lambda_M \lambda_L}{\lambda_L - \lambda_M}$$

- Inserendo il valore di “c” nella (5) otteniamo finalmente:

$$N_L(\xi) = \left( \frac{P_{ML}}{\lambda_M} N_M^0 \right) \cdot \left( \frac{\lambda_M \lambda_L}{\lambda_L - \lambda_M} \right) \cdot \left( e^{-\xi/\lambda_L} - e^{-\xi/\lambda_M} \right) \quad (6)$$

$$N_M(\xi) = N_M^0 \cdot e^{-\xi/\lambda_M} \quad (3)$$



- **Quindi:** perché i RC, presentino R osservato, devono avere attraversato nella Galassia uno spessore di “materiale equivalente” pari a  $\xi_T = 4.8 \text{ g cm}^{-2}$ .
- La Terra non ha una posizione privilegiata nella Galassia; un qualsiasi altro osservatore misura lo **stesso** numero.

## 3.7 Stima del tempo di confinamento da $\xi_T$ : Galassia senza alone.

- ❑ Il modello semplificato conferma la produzione di Li, Be, B da parte degli elementi del gruppo C,N,O con le abbondanze relative come sperimentalmente misurate;
- ❑ Il modello, senza ulteriori correzioni, non funziona altrettanto bene per riprodurre le abbondanze di Mn, Cr, V da parte del Ferro (potete immaginare perché ?)
- ❑ Dal valore ottenuto di  $\xi_T=4.8 \text{ g cm}^{-2}$  è possibile ottenere una stima del tempo di confinamento dei RC nella galassia. Infatti:

$$\xi_T = \rho_{CR} \cdot c \cdot \tau$$

$$\rho_{CR} = 1p/cm^3 = 1.6 \times 10^{-24} \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\tau = \frac{4.8 (\text{g.cm}^{-2})}{3 \times 10^{10} (\text{cm/s}) \cdot 1.6 \times 10^{-24} (\text{g.cm}^{-3})} = 10^{14} \text{ s} = 3 \times 10^6 \text{ y}$$

# Stima del tempo di confinamento nella Galassia con alone

- Nel caso si consideri la densità della Galassia con alone di DM:

$$\rho_{CR} = 0.3 p/cm^3$$

$$\tau_{Alone} = \frac{4.8 (g \cdot cm^{-2})}{0.3 \times 3 \times 10^{10} (cm/s) \cdot 1.6 \times 10^{-24} (g \cdot cm^{-3})} = 10^7 y$$

- Si noti che in ogni caso, se i RC si movessero di moto rettilineo, la distanza percorsa nel tempo  $\tau$  sarebbe:

$$L = c \cdot \tau = 3 \times 10^{10} \times 10^{14} = 3 \times 10^{24} cm = 10^6 pc$$

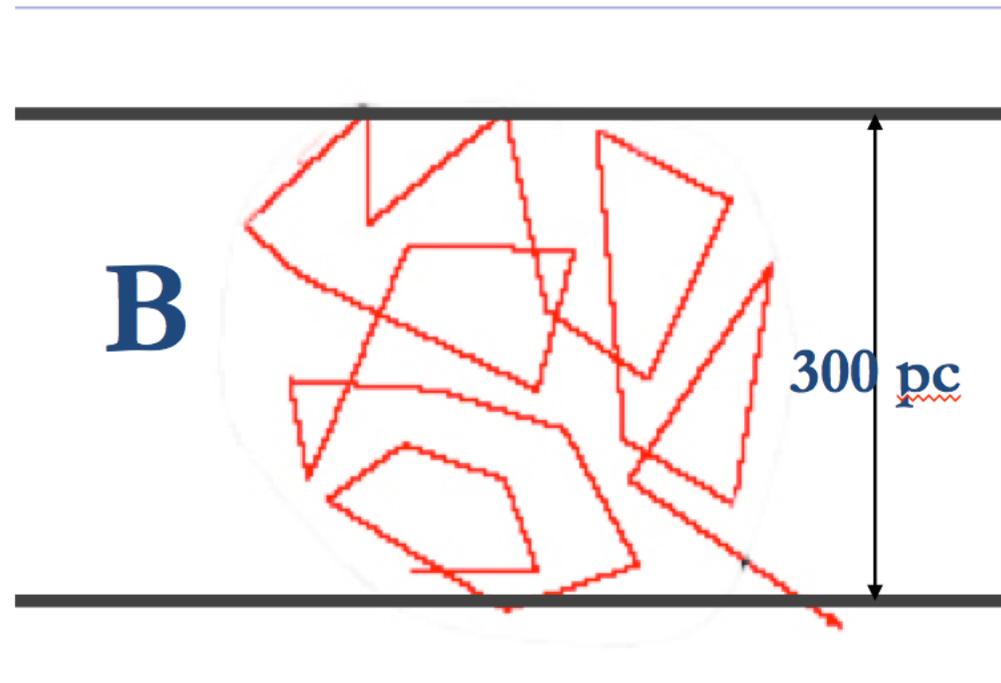
valore molto maggiore delle dimensioni della Galassia.

- $\tau$  rappresenta il tempo di diffusione dei RC dalla Galassia.
- In seguito, occorre raffinare il modello per determinare  $\tau = \tau(E)$

Se il moto dei RC fosse rettilineo:

$$L_{\min} = \tau_D c = 3 \cdot 10^{10} \cdot 10^{14} \text{ cm/s s} = 10^6 \text{ pc} \gg 15 \text{ kpc} = r_{\text{galax}}$$

Ciò conferma che i RC hanno una direzione continuamente modificata durante  $\tau$  (dal Campo Magnetico Galattico)



## 3.8 Variazione del tempo di confinamento con l'energia

- Il modello illustrato (confinamento dei RC nella Galassia come scatola parzialmente trasparente) è chiamato “leaky box”;
- Il rapporto  $r = (\#L/\#M)$  dipende dal tempo di confinamento  $\tau$  dei RC nella Galassia; all'aumentare di  $\tau$ , cresce  $r$ .
- Se il confinamento è dovuto al campo B Galattico, ci si aspetta che i RC più energetici abbiano un tempo di confinamento inferiore (ossia, aumenta la probabilità di fuggire dal piano Galattico);
- In tal caso, all'aumentare dell'energia ci si aspetta un valore di  $r$  che *decrece* con l'energia;
- L'equazione differenziale deve essere modificata per tener conto di  $\tau(E)$ .

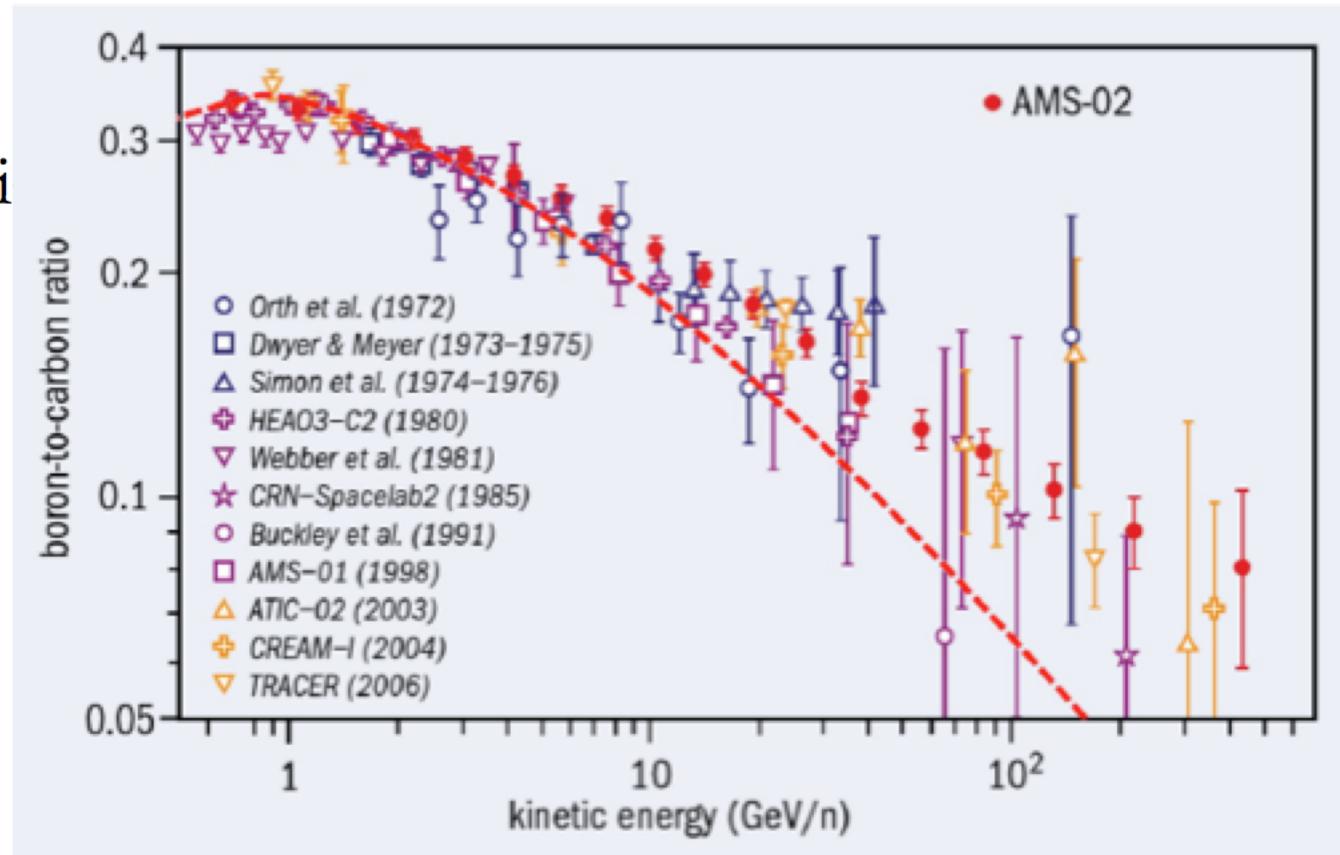
# Dipendenza del rapporto B/C vs. E

- La probabilità di fuga dalla Galassia dipende dall'energia dei RC come:

$$\tau = \tau_0 / E^{0.6}$$

- Poiché  $\tau \sim \xi$

$$\xi = \xi_0 E^{-0.6}$$



- Nota: non è possibile ricavare questo in modo semplice per via analitica.

## 3.10 L'orologio dei Raggi Cosmici

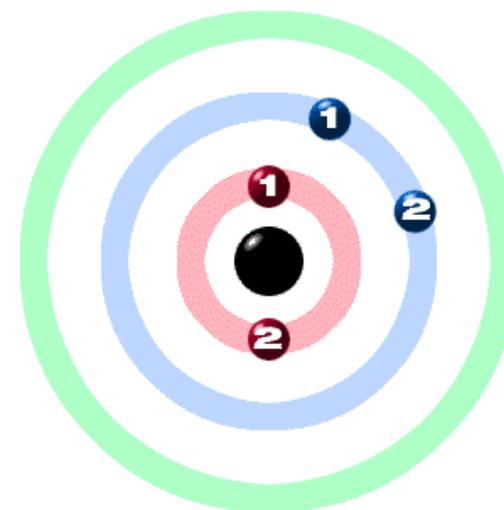
- Nel 1958, Hayakawa et al., stabilirono che le abbondanze dei secondari radioattivi potevano essere impiegati come “orologi” dei RC misurando il flusso (relativo) degli isotopi radioattivi e confrontandolo con quello aspettato se nessun decadimento fosse avvenuto.
- Per poter misurare il tempo di permanenza dei RC, un isotopo deve avere i seguenti requisiti:

1. La vita media dell'isotopo radioattivo deve essere paragonabile all'età stimata dei RC.
2. L'isotopo deve essere un “puro secondario”, cioè non deve essere presente alle sorgenti.
3. Deve essere possibile calcolarne il “rate” di produzione durante la propagazione nel mezzo intergalattico.



# Quali isotopi si usano: il Berillio

Nuclide	$t_{1/2}$	Tipo di Decadimento
${}^7\text{Be}^*$	-----	Stabile.
${}^9\text{Be}$	_____	Stabile
${}^{10}\text{Be}$	$1.6 \cdot 10^6 \text{ y}$	$\beta^-$



Il Be è stato il primo elemento ad essere usato per calcolare l'età dei RC. Risulta quindi il più studiato. Ma anche altri isotopi possono essere usati :

${}^{26}\text{Al}$	$7.1 \cdot 10^5 \text{ y}$	$\beta^-$
${}^{36}\text{Cl}$	$3.0 \cdot 10^5 \text{ y}$	$\beta^-$
${}^{54}\text{Mn}$	$\sim 6.3 \cdot 10^5 \text{ y}$	$\beta^-, \beta^+$

\* Il  ${}^7\text{Be}$  viene considerato stabile. In effetti può catturare elettroni, ma perché il libero cammino medio per il pickup di elettroni è molto più grande dello spessore attraversato, questa trasmutazione è trascurata

# Derivazione numerica di $\tau_F$

- In questo caso, due processi sono in competizione: la fuga dei nuclidi di Be dalla Galassia, con un tempo  $\tau_f$ ; la produzione di Be da parte della spallazione di nuclidi C,N,O con un tempo caratteristico  $\tau_{spall}$
- Supponendo (in prima approssimazione) che  $\tau_{spall} \gg \tau_f$ , e che  $\tau_{spall}$  sia lo stesso per i due Be (ciò è lecito perché  $\lambda_{spall}$  è debolmente dipendente dal numero atomico) e considerando che:

■  $\sigma^{10}$  e  $\sigma^7$  (= probabilità di produzione di Be<sup>10</sup> e Be<sup>7</sup> rispettivamente) si ricavano dalle tabelle di frammentazione

$$\sigma_7 = \sum_{J>7} P_{j7} \sigma_j = 9.7 mb$$

$$\sigma_{10} = \sum_{J>7} P_{j10} \sigma_j = 2.3 mb$$

- Il numero di Be 10 in funzione di t :

$$N_{10}(t) = N_{10}^0 e^{-t/\tau_{10}} \quad \text{con} \quad \tau_{10} = 3.9 \times 10^6 \text{ y}$$

- Il berillio 7 è invece stabile:

$$N_7(t) = N_7^0$$

- Sperimentalmente, il valore misurato del rapporto tra i due isotopi (al tempo  $t=t^*$ ) ha il valore

$$R(t^*) = \frac{N_{10}}{N_7} = 0.028$$

da cui possiamo ottenere:

$$R(t^*) = \frac{N_{10}^0}{N_7^0} e^{-t^*/\tau_{10}} \Rightarrow \frac{t^*}{\tau_{10}} = -\ln\left(\frac{N_7^0}{N_{10}^0} \cdot R(t^*)\right) = -\ln(0.118) = 2.2$$

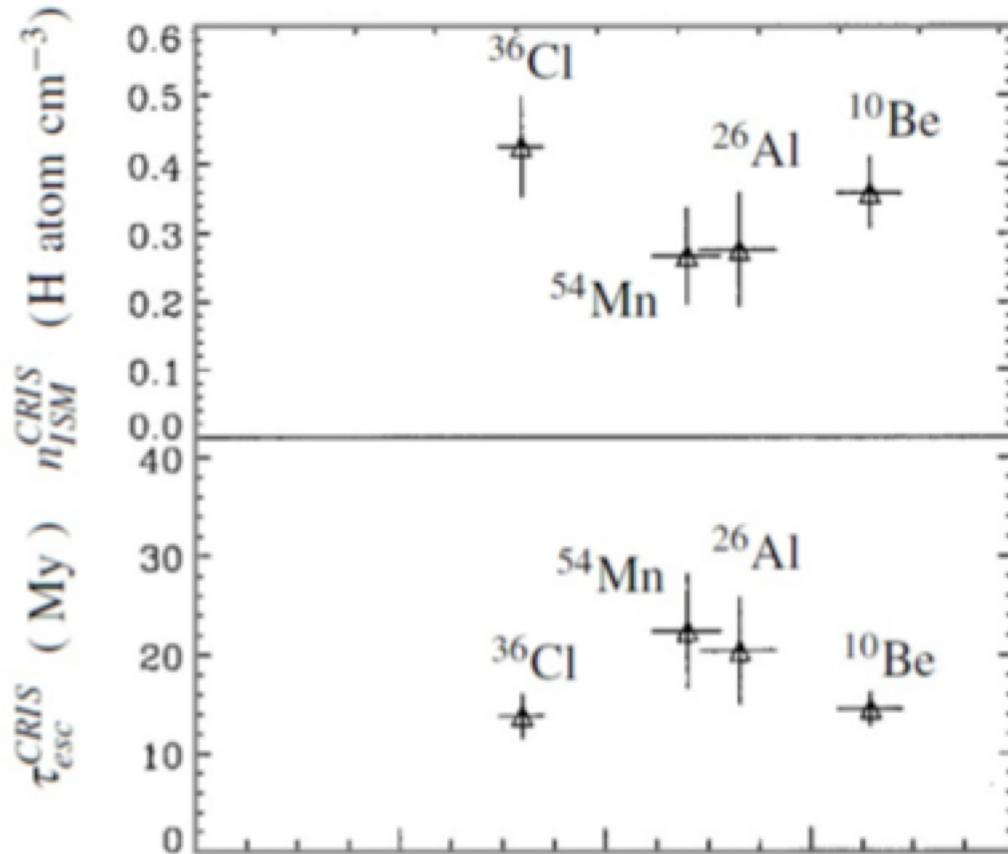
$$\tau_F \equiv t^* = 2.2 \times \tau_{10} = 8 \times 10^6 \text{ y}$$

# Interpretazione delle misure del tempo di fuga in termini di modello

$$\lambda_f \equiv 1/\tau_F = \rho_{ISM} \cdot c \cdot \tau_f$$

↓

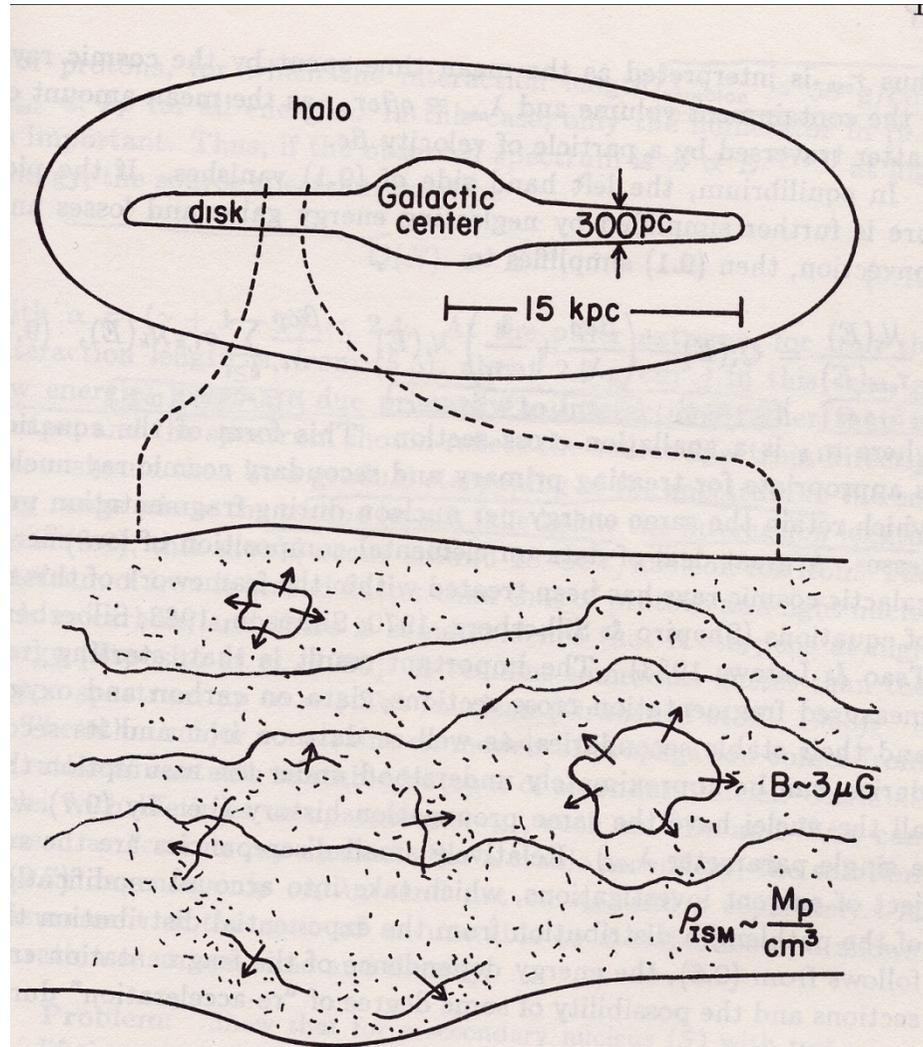
$$\rho_{ISM} = \frac{\lambda_f}{c \cdot \tau_f}$$



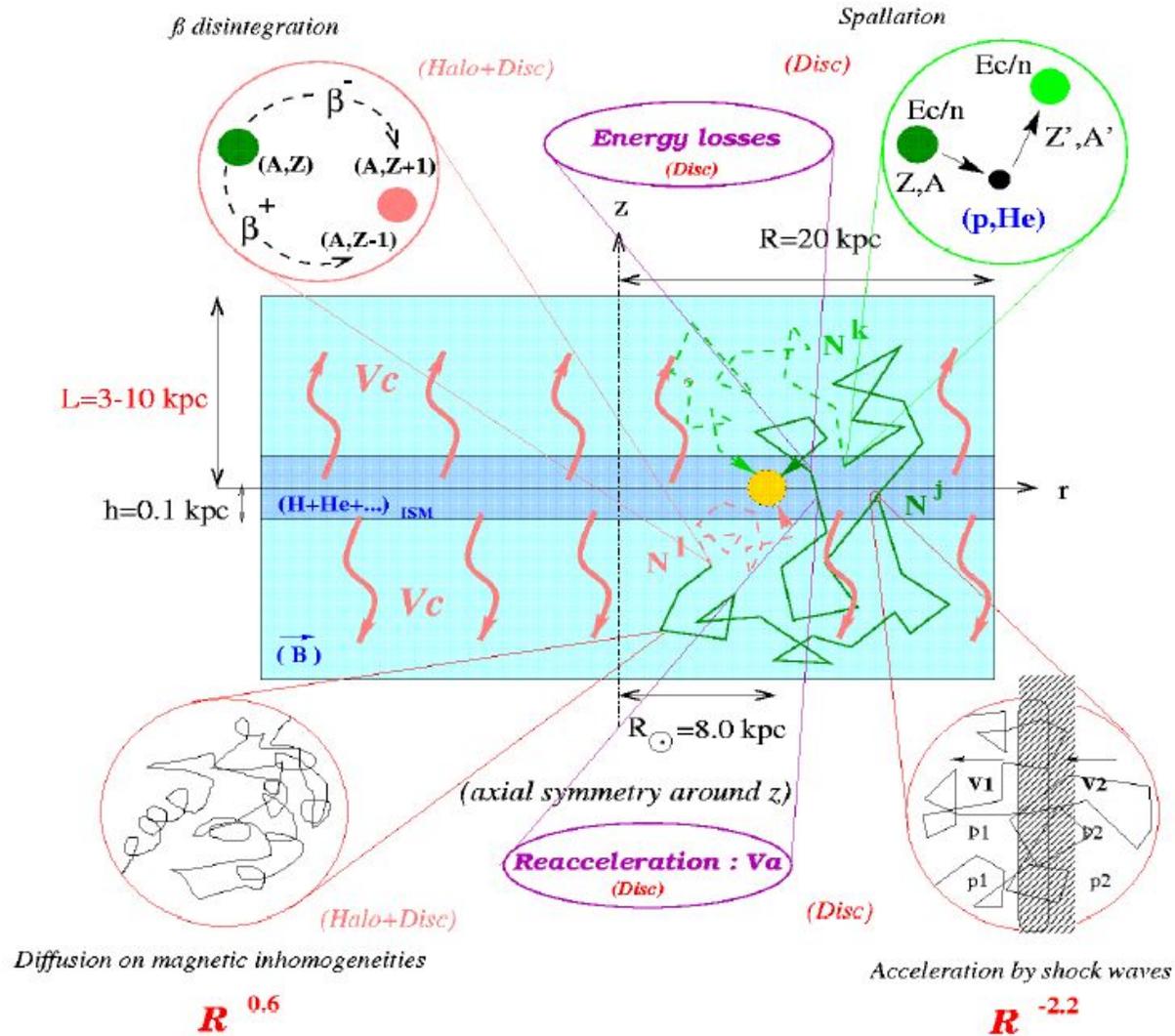
Le misure dei tempi di permanenza dei RC favoriscono scenari di propagazione nel volume con densità tipiche minori della densità media del disco galattico ( $1\text{p}/\text{cm}^3$ ): altra evidenza *dell'alone galattico*

- Gli isotopi radioattivi si sono rivelati ottimi strumenti per conoscere i tempi medi di permanenza dei RC nella Galassia e quindi utili anche per testare la densità media del ISM e i modelli di propagazione attraverso di esso.
- La possibilità di sfruttare diversi isotopi con differenti tempi di decadimento, ci permette di testare la densità del ISM intorno al sistema solare entro volumi di raggio variabile. Non sono state trovate differenze consistenti tra i tempi misurati con il Be ed i tempi misurati con isotopi diversi.
- Le ultime misure eseguite stimano una permanenza di 15 Myr e confermano modelli diffusivi attraverso un ISM di densità  $< 1 \text{ p/cm}^3$  (ossia, Galassia Disco+Alone)

# The Galaxy



# Cosmic Rays Propagation



# Cosmic Rays Propagation

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial N_i}{\partial t} = & \nabla \cdot (D_i \nabla N_i) - \frac{\partial}{\partial E} [b_i(E) N_i(E)] - \nabla \cdot \mathbf{u} N_i(E) \\
 & + Q_i(E, t) - p_i N_i + \frac{v\rho}{m} \sum_{k \geq i} \int \frac{d\sigma_{i,k}(E, E')}{dE} N_k(E') dE'
 \end{aligned}$$

The equation is annotated with the following terms:
 

- Diffusion**: points to the term  $\nabla \cdot (D_i \nabla N_i)$ .
- E loss or gain**: points to the term  $-\frac{\partial}{\partial E} [b_i(E) N_i(E)]$ .
- Convection**: points to the term  $-\nabla \cdot \mathbf{u} N_i(E)$ .
- Source**: points to the term  $+ Q_i(E, t)$ .
- Losses**: points to the term  $- p_i N_i$ .
- Cascade**: points to the integral term  $\frac{v\rho}{m} \sum_{k \geq i} \int \frac{d\sigma_{i,k}(E, E')}{dE} N_k(E') dE'$ .