

Astrofisica Nucleare e Subnucleare
Cosmic Ray Astrophysics

Exercise #5

- Find the information about the latest results by PAMELA
- Check the actual status of AMS-02 CR detector in space

PAMELA



a Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics

[Home](#)[Heritage](#)[Instrument](#)[Main results](#)[PAMELA publications](#)[Team](#)

PAMELA publications

7500 SOLAR PHYSICS anisotropy Antimatter astroparticle physics ASTROPHYSICS Astrophysics - Earth and Planetary Astrophysics Astrophysical Phenomena Astrophysics - Instrumentation and Methods for Astrophysics Astrophysics - Solar and Stellar Astrophysics Composition energy spectra and interactions Cosmic ray cosmic ray detectors Cosmic rays Cosmic-rays Dark matter Geomagnetic cutoff helium High Energy Physics - Experiment Neutrino muon pion and other elementary particle detectors PAMELA Physics - Space Physics positron protons SEPs Solar modulation space vehicles Sun: coronal mass ejections: CMEs Sun: flares Sun: heliosphere Sun: particle emission

All years ▾ All types ▾ All authors ▾ All users ▾

228 entries « ‹ 1 of 5 › »

2022

Marcelli, N.; Boezio, M.; Lenni, A.; Menn, W.; Munini, R.; Aslam, O. P. M.; Blisschoff, D.; Ngoben, M. D.; Potgieter, M. S.; Adriani, O.; Barbarino, G. C.; Bazilevskaya, G. A.; Bellotti, R.; Bogomolov, E. A.; Bongli, M.; Bonvicini, V.; Bruno, A.; Cafagna, F.; Campana, D.; Carlson, P.; Casolino, M.; Castellini, G.; Santis, C. De; Galper, A. M.; Koldashov, S. V.; Koldobskiy, S.; Kvashnin, A. N.; Leonov, A. A.; Malakhov, V. V.; Marcelli, L.; Martucci, M.; Mayorov, A. G.; Merge, M.; Mocchliutti, E.; Monaco, A.; Mori, N.; Mikhailov, V. V.; Osteria, G.; Panico, B.; Papini, P.; Pearce, M.; Picozza, P.; Ricci, M.; Ricciarini, S. B.; Simon, M.; Sotgiu, A.; Sparvoli, R.; Spillantini, P.; Stozhkov, Y. I.; Vacchi, A.; Vannuccini, E.; Vasilyev, G. I.; Voronov, S. A.; Yurkin, Y. T.; Zampa, G.; Zampa, N.

Helium fluxes measured by the PAMELA experiment from the minimum to the maximum solar activity for solar cycle 24 [Journal Article](#)

In: arXiv e-prints, pp. arXiv:2201.01045, 2022.

[BibTeX](#) | Tags: [Astrophysics - High Energy Astrophysical Phenomena](#), [Astrophysics - Solar and Stellar Astrophysics](#)

2021

Bruno, A.; Martucci, M.; Cafagna, F. S.; Sparvoli, R.; Adriani, O.; Barbarino, G. C.; Bazilevskaya, G. A.; Bellotti, R.; Boezio, M.; Bogomolov, E. A.; Bongli, M.; Bonvicini, V.; Campana, D.; Carlson, P.; Casolino, M.; Castellini, G.; Santis, C. De; Galper, A. M.; Koldashov, S. V.; Koldobskiy, S.; Kvashnin, A. N.; Lenni, A.; Leonov, A. A.; Malakhov, V. V.; Marcelli, L.; Marcelli, N.; Mayorov, A. G.; Menn, W.; Merge, M.; Mocchliutti, E.; Monaco, A.; Mori, N.; Mikhailov, V. V.; Munini, R.; Osteria, G.; Panico, B.; Papini, P.; Pearce, M.; Picozza, P.; Ricci, M.; Ricciarini, S. B.; Simon, M.; Sotgiu, A.; Spillantini, P.; Stozhkov, Y. I.; Vacchi, A.; Vannuccini, E.; Vasilyev, G. I.; Voronov, S. A.; Yurkin, Y. T.; Zampa, G.; Zampa, N.

East-West Proton Flux Anisotropy Observed with the PAMELA Mission [Journal Article](#)

In: Astrophysical Journal, 919 (2), pp. 114, 2021.

[Links](#) | [BibTeX](#) | Tags: [Cosmic rays](#), [Van Allen radiation belts](#)

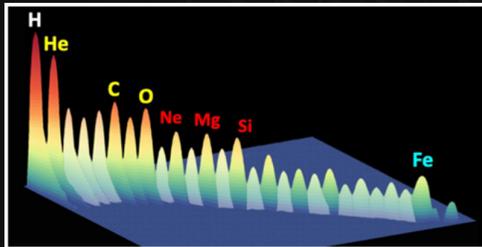
<https://pamela-web.web.roma2.infn.it/>

AMS02



Latest Physics Topic

Ironing Out Cosmic Rays



PHYSICS

- › Ironing Out Cosmic Rays
- › Primary Neon, Magnesium, and Silicon Fluxes
- › Properties of Helium Isotopes
- › Origin of Cosmic-Ray Positrons
- › Origin of Cosmic-Ray Electrons
- › Boron to Carbon Flux Ratio
- › Identical Rigidity Dependence of He, C and O
- › New Properties of Secondary Cosmic Rays Li, Be and B
- › Nitrogen and its Primary and Secondary Components
- › Fine Time Structures in the Cosmic Proton and Helium
- › Complex Time Structures in Cosmic-Ray Electron and Positron Fluxes

PUBLICATIONS

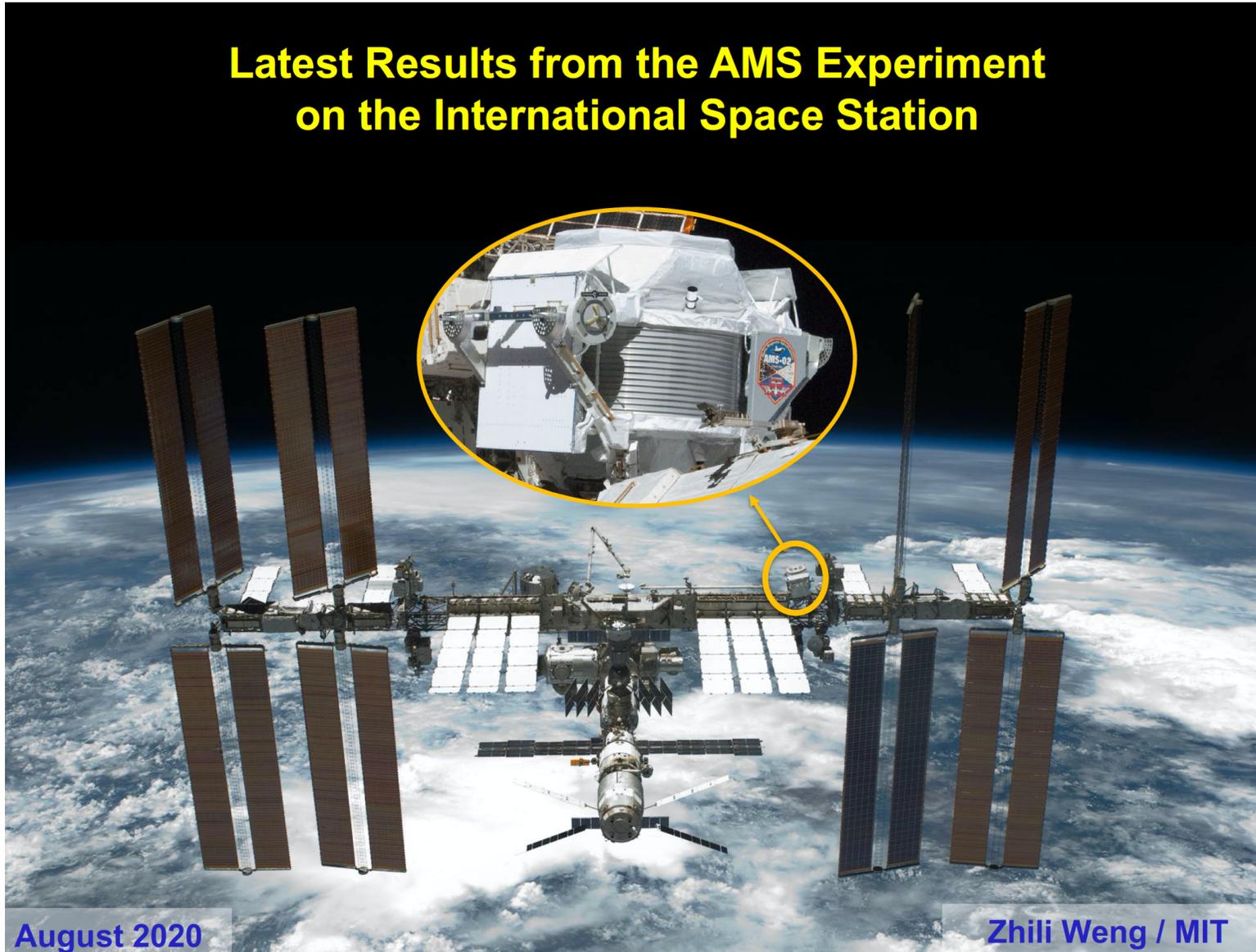
- › AMS Publications

ADVANCES IN THE DATA ANALYSIS

- › Tracker: Charge Sign Identification
- › Tracker: Coordinate Measurement
- › Tracker: Absolute Rigidity Scale and Alignment
- › Tracker: Track Finding Efficiency
- › Tracker: Rigidity Resolution at Low Rigidities
- › Tracker: Charge Resolution
- › ECAL: New Reconstruction Method
- › ECAL: Energy Reconstruction
- › ECAL: Proton Rejection
- › Measurements of Nuclei Cross Sections with cosmic rays

AMS

Latest Results from the AMS Experiment on the International Space Station



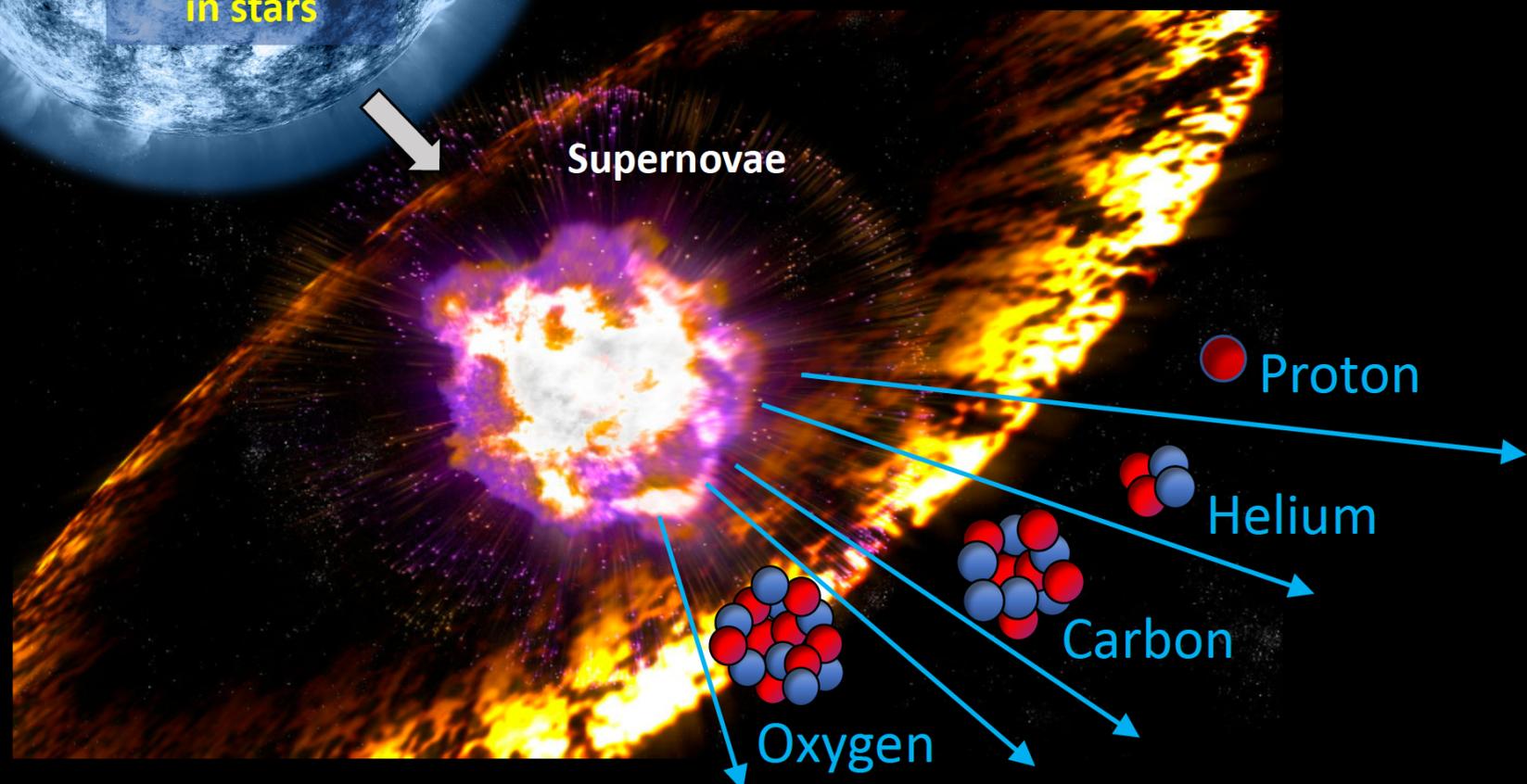
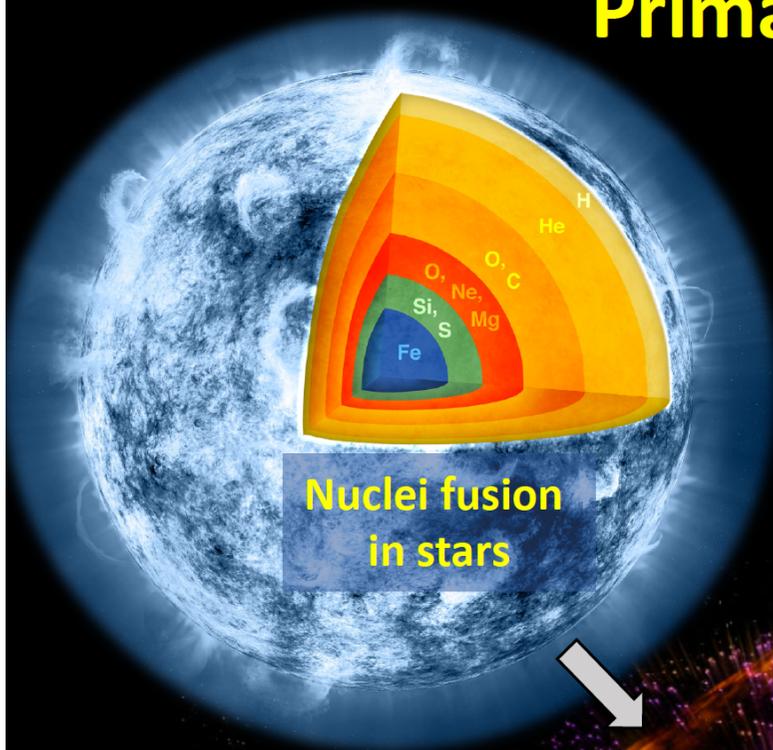
August 2020

Zhili Weng / MIT

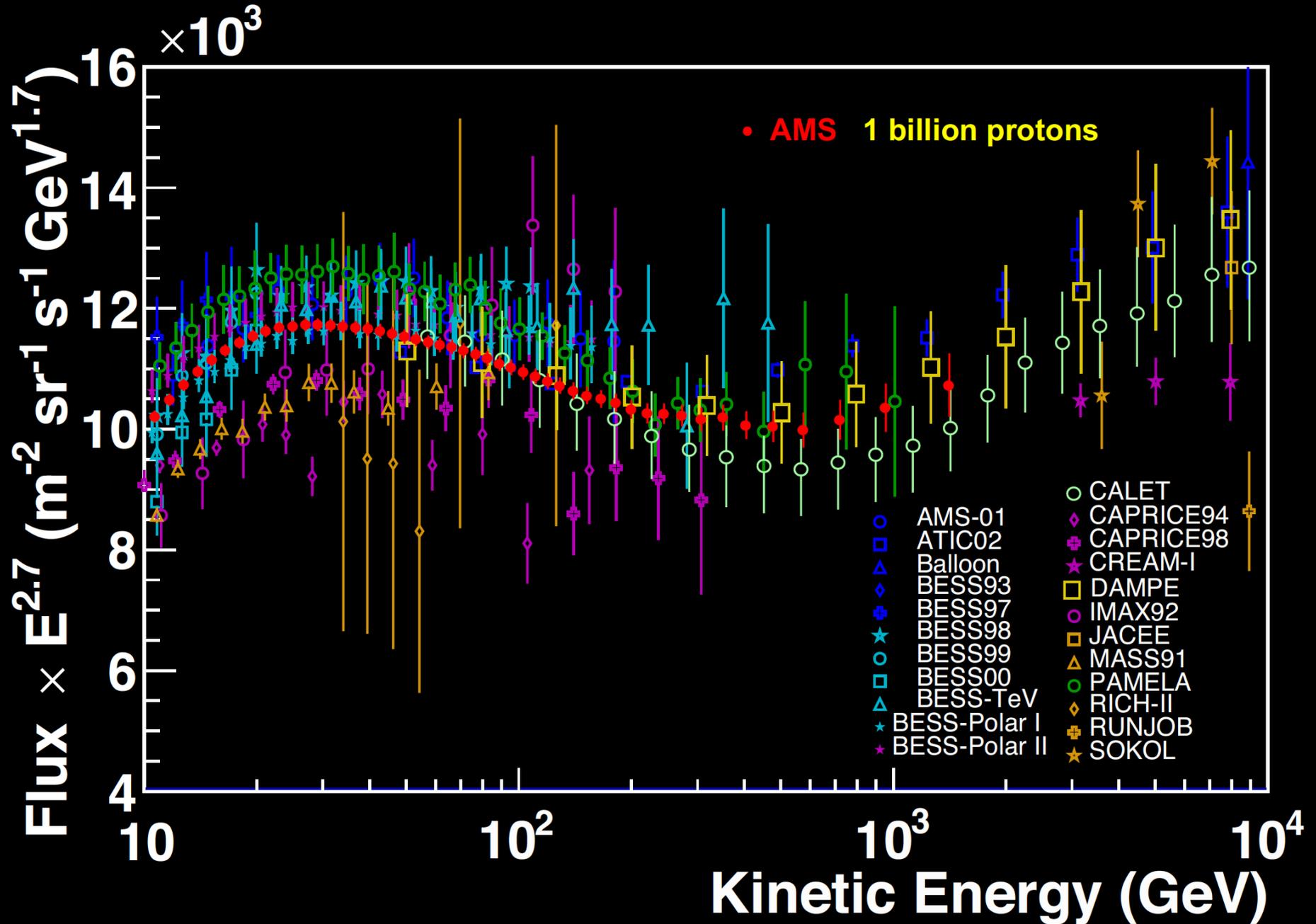
Primary Cosmic Rays

Primary elements (H, He, C, ..., Fe) are produced during the lifetime of stars.

They are accelerated by the explosion of stars (supernovae).

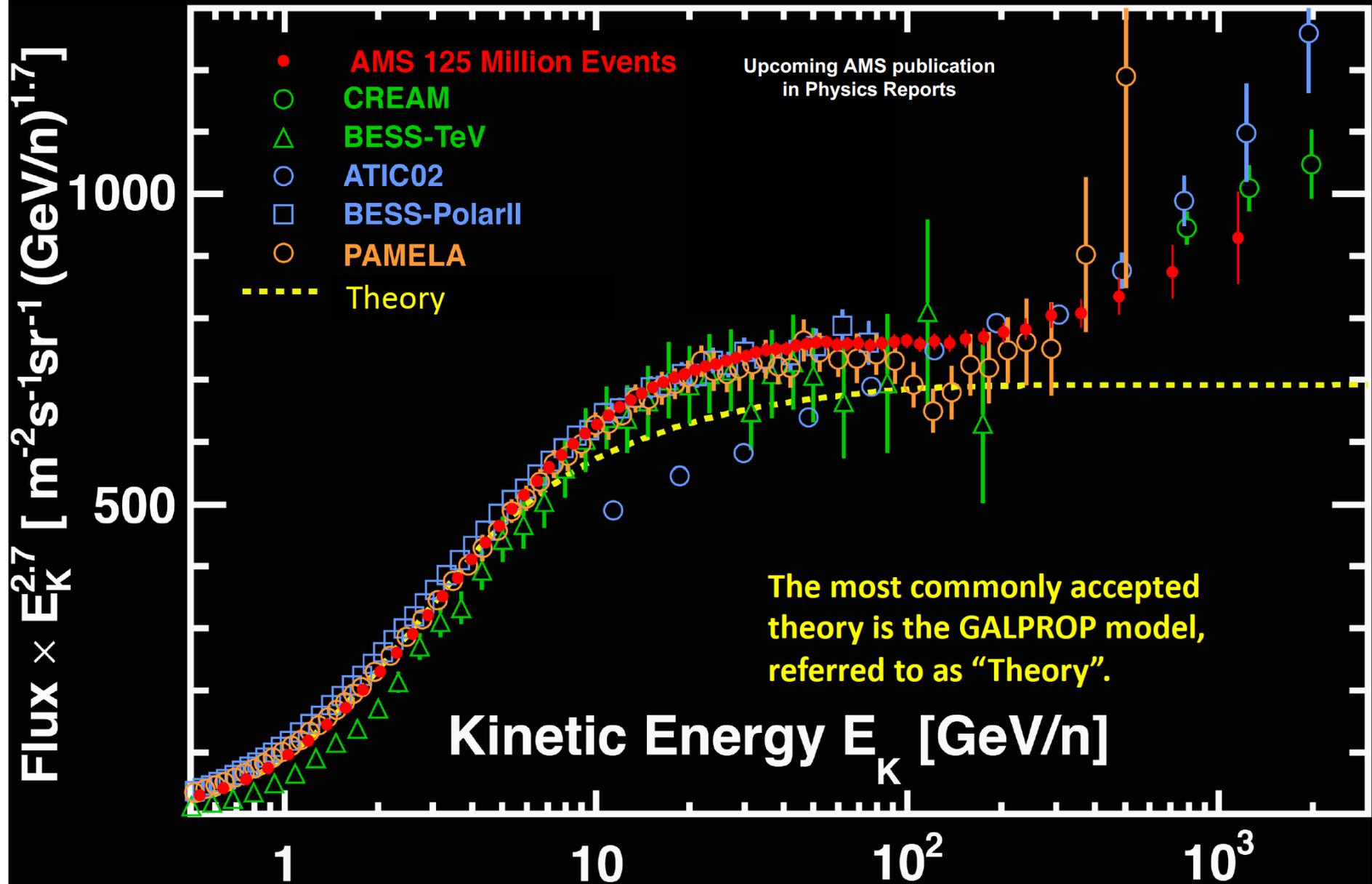


Protons (Z = +1) are the most abundant cosmic ray

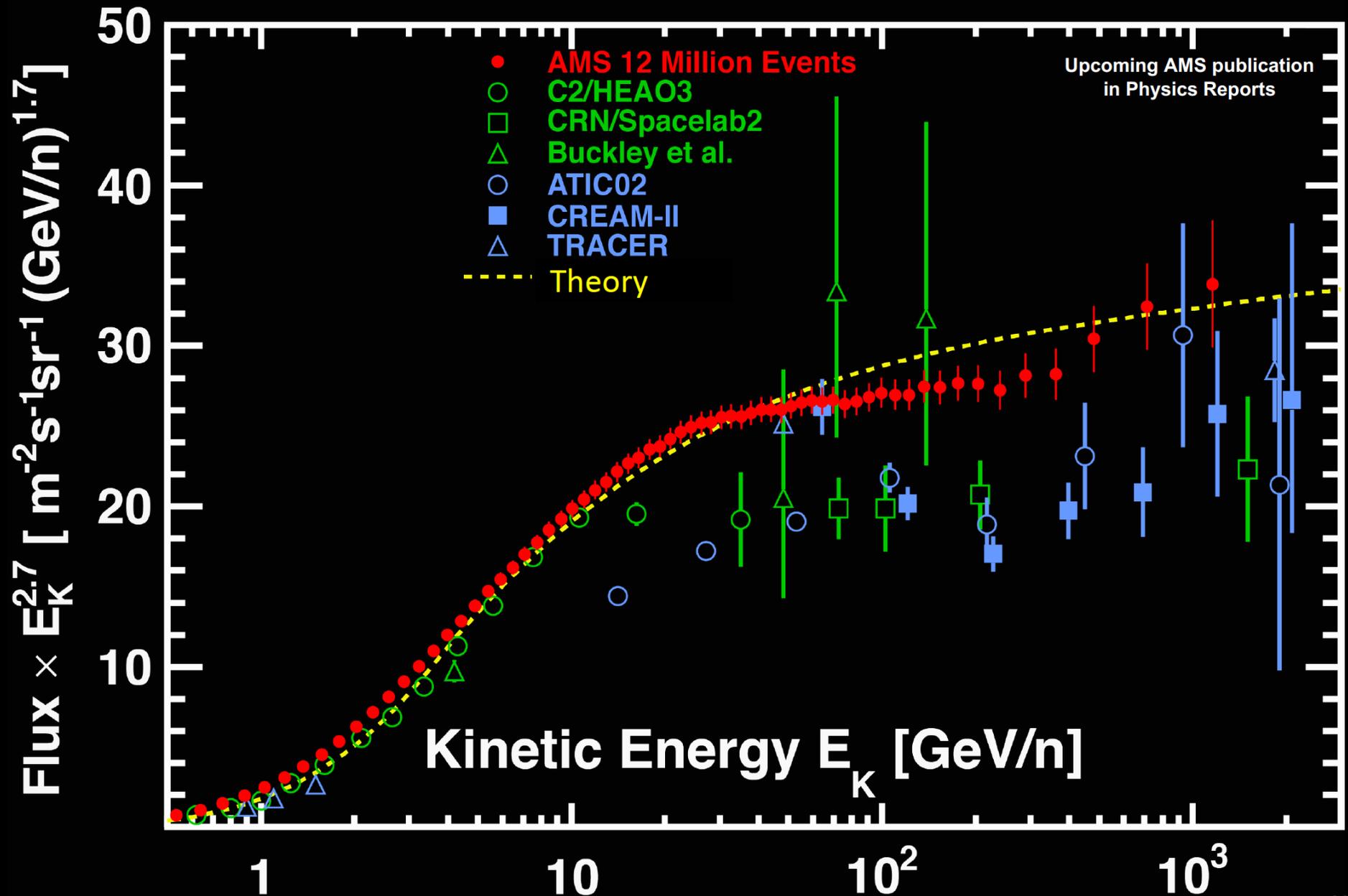


AMS Primary Cosmic Ray Helium ($Z = +2$)

(${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$)

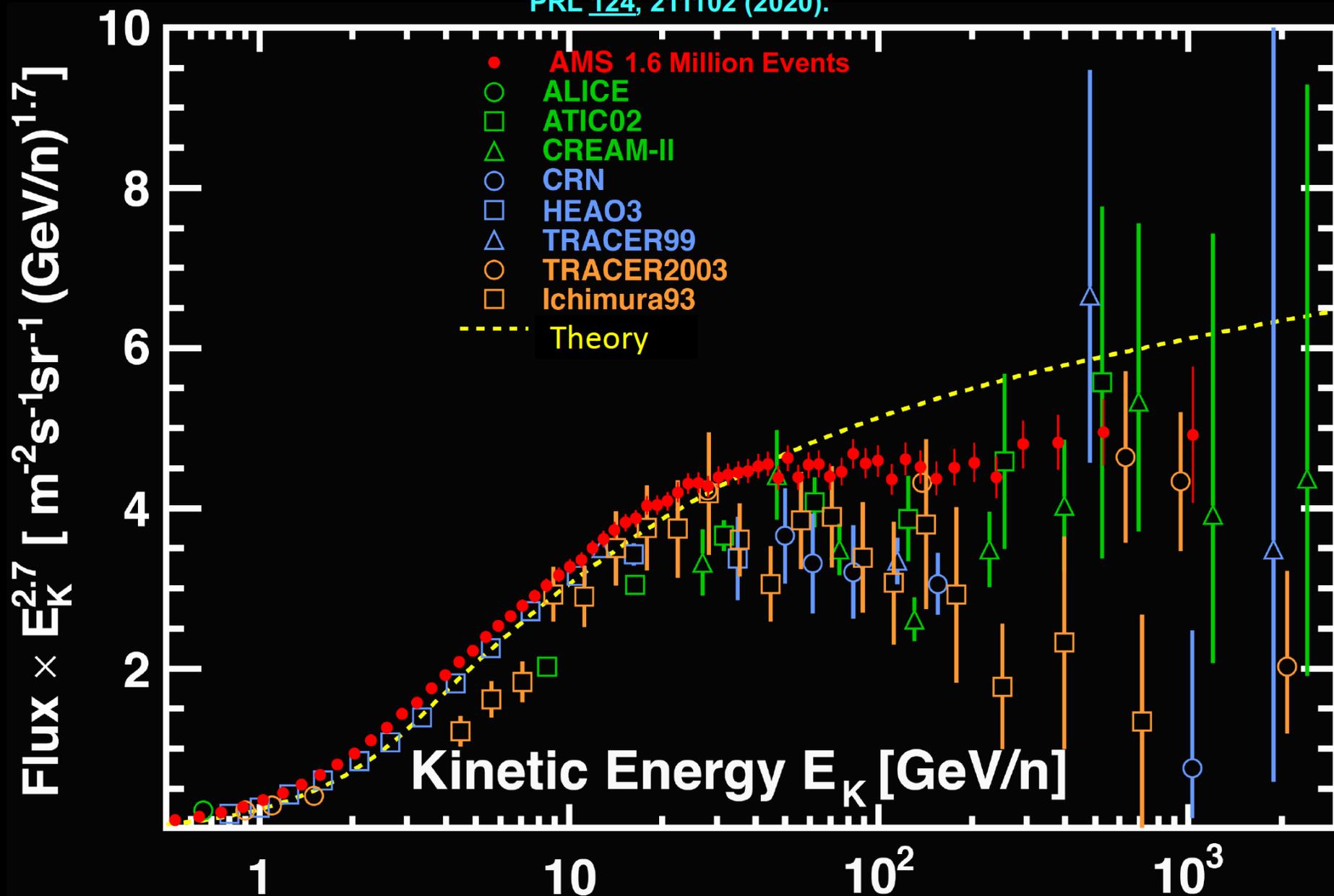


AMS Primary Cosmic Ray Oxygen ($Z = +8$)



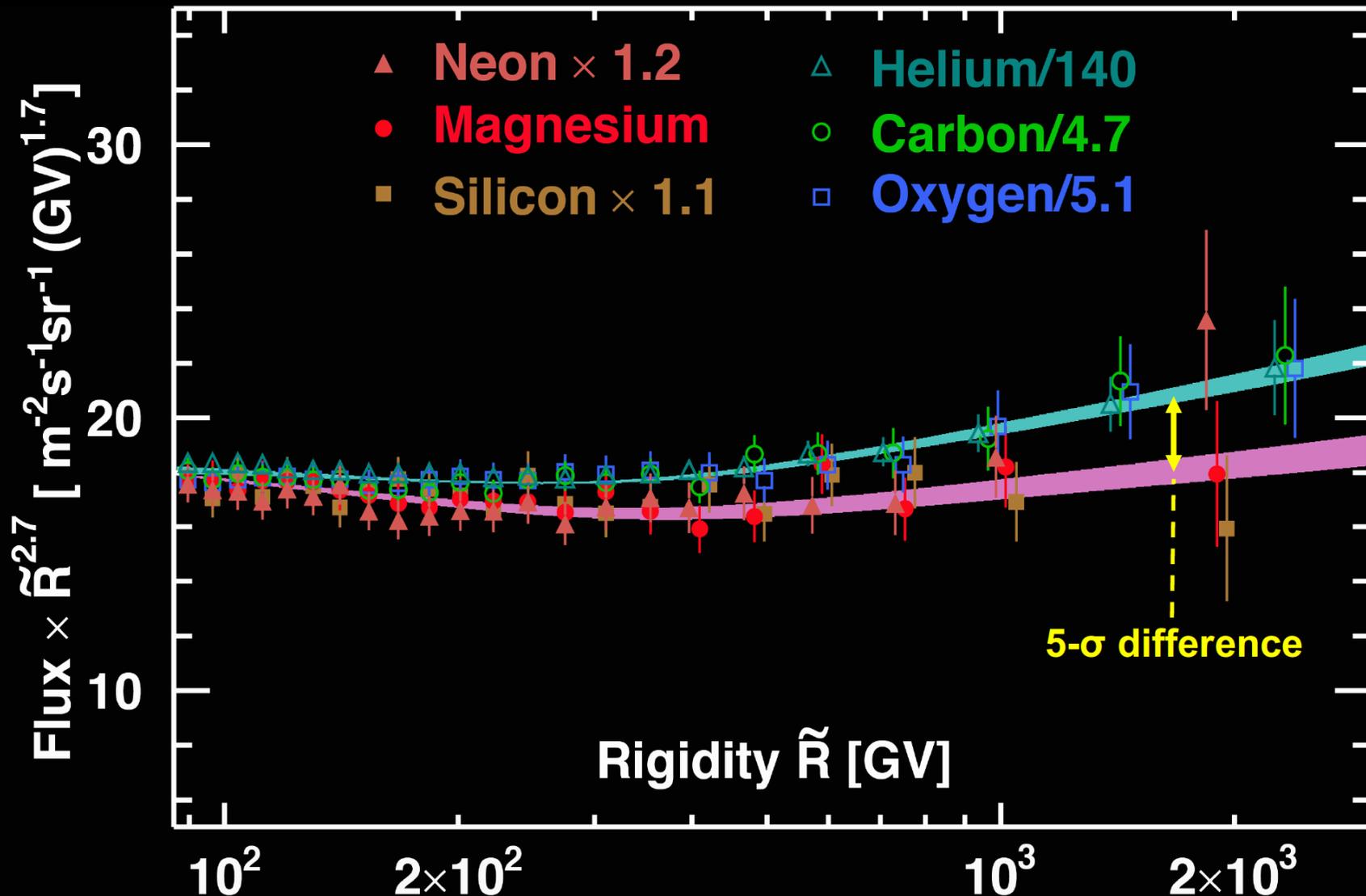
AMS Primary Cosmic Ray Silicon ($Z = +14$)

PRL 124, 211102 (2020).

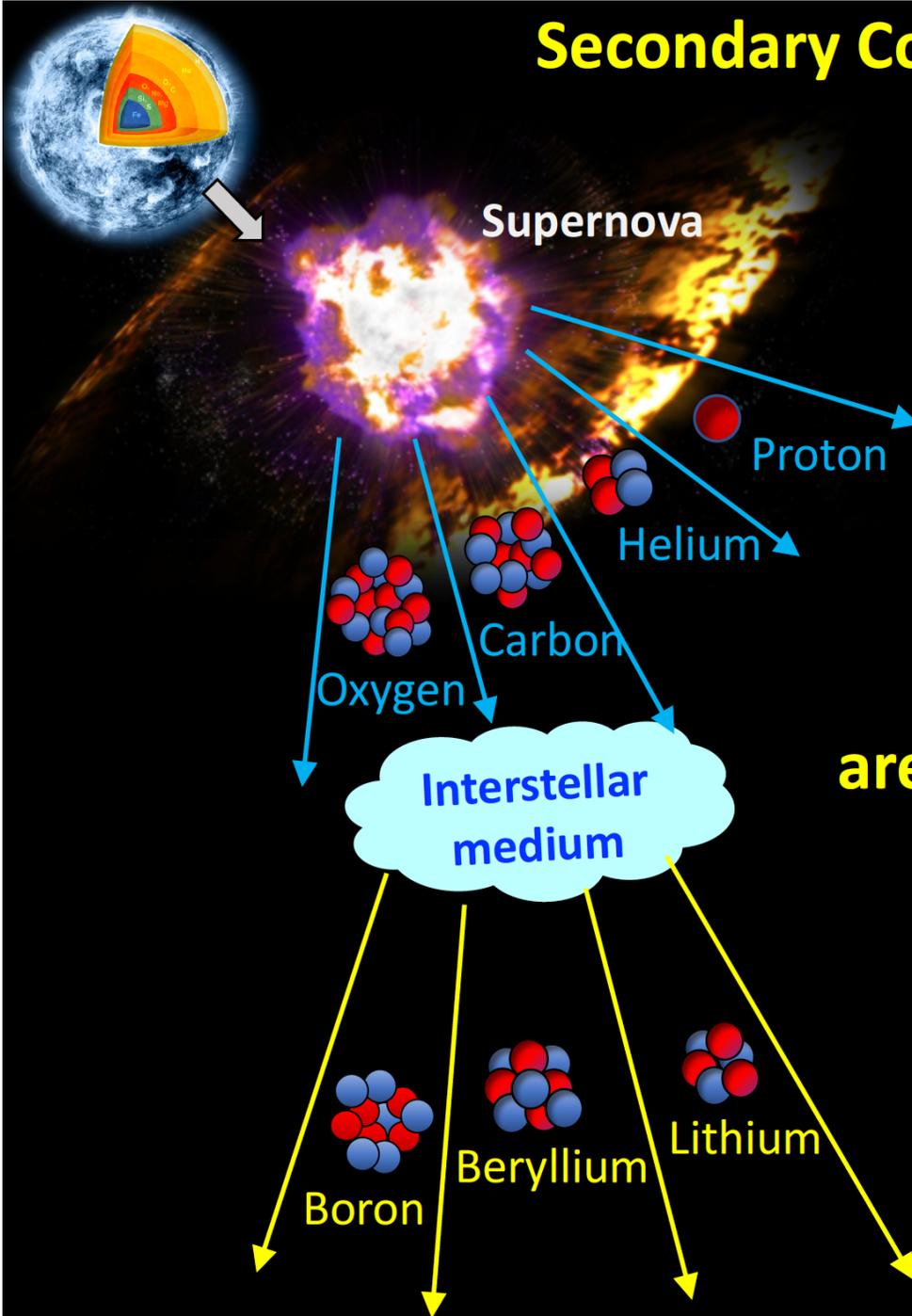


Unexpected result on heavier primary cosmic rays Ne, Mg, Si:
They have their own identical rigidity behavior, different from He, C, O.
At the 5- σ level, primary cosmic rays have at least two classes.

PRL [124](#), 211102 (2020).

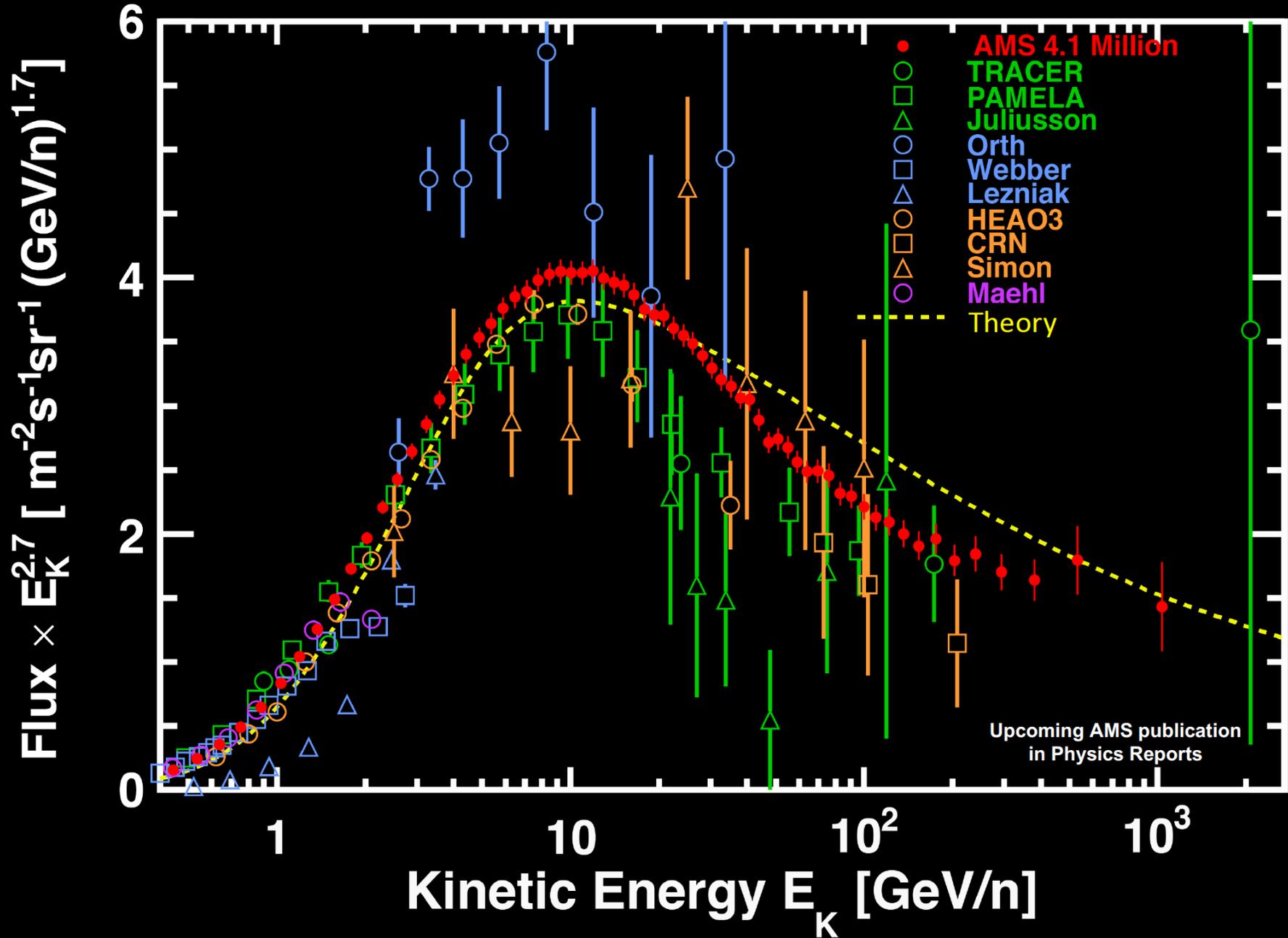


Secondary Cosmic Rays

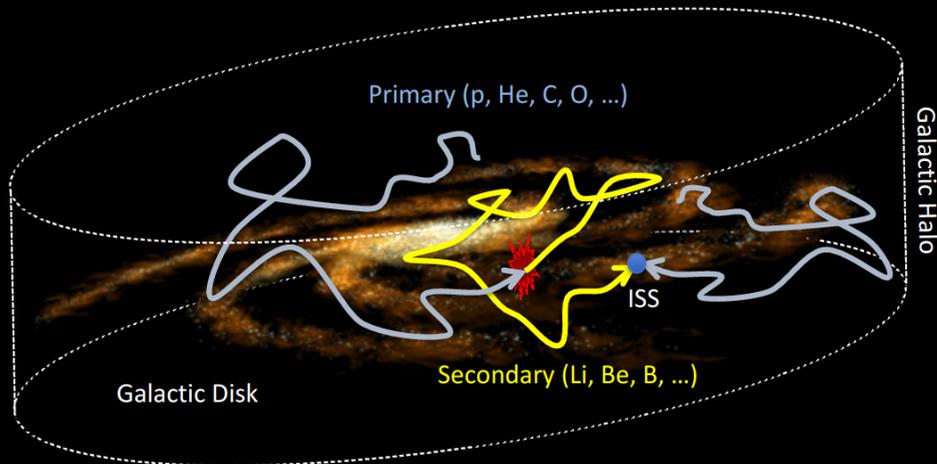


**Secondary cosmic nuclei
(Li, Be, B, ...)
are produced by the collision of
primary cosmic rays and
interstellar medium**

AMS Secondary Cosmic Ray Boron ($Z = +5$)



Secondary/Primary Flux ratios



Cosmic rays are commonly modeled as a relativistic gas diffusing into a magnetized plasma.

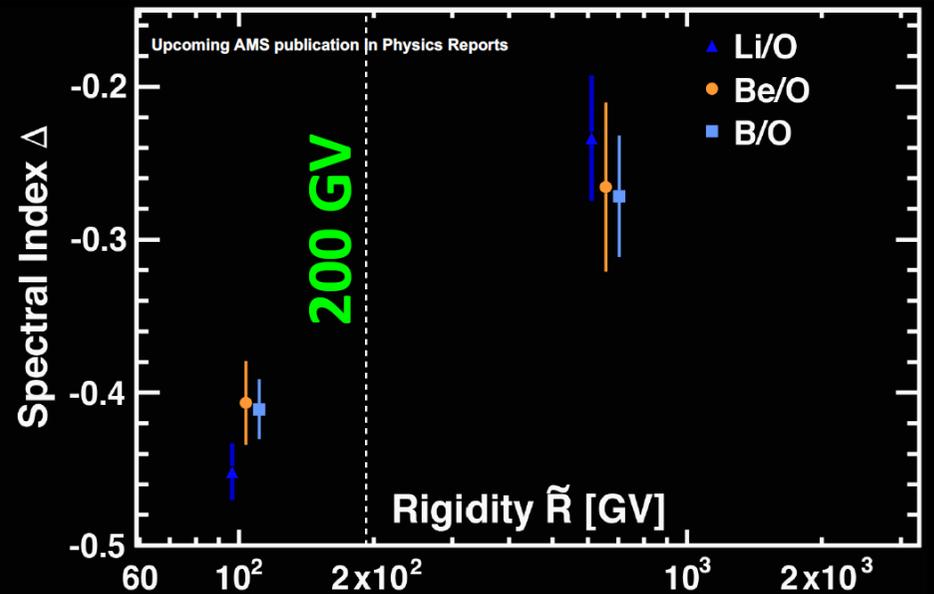
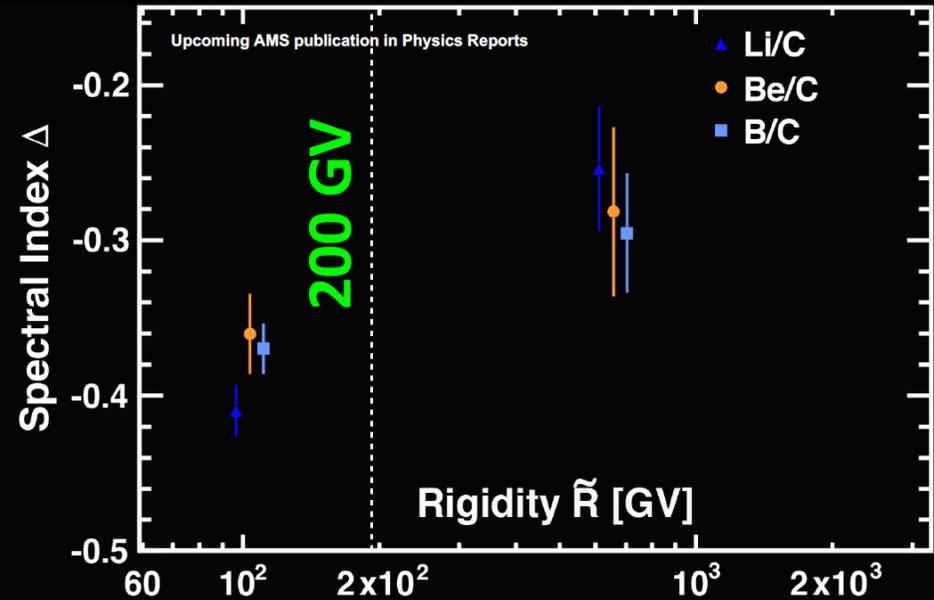
Diffusion models based on different assumptions predict a **Secondary/Primary** ratio asymptotically proportional to R^δ .

AMS Physics Results:

The Secondary/Primary Ratios $\neq kR^\Delta$

Δ is not a constant at $5\text{-}\sigma$

$$\Delta[192\text{-}3300\text{GV}] - \Delta[60\text{-}192\text{GV}] = 0.140 \pm 0.025$$



This AMS data provides new and unexpected information on the interstellar medium

The Origins of Cosmic Positrons and Electrons

Dark Matter Electrons

Dark Matter

Interstellar Medium

Protons, Helium, e[±]...

Supernovae

e[±]
from Collisions

e[±]
from Dark Matter

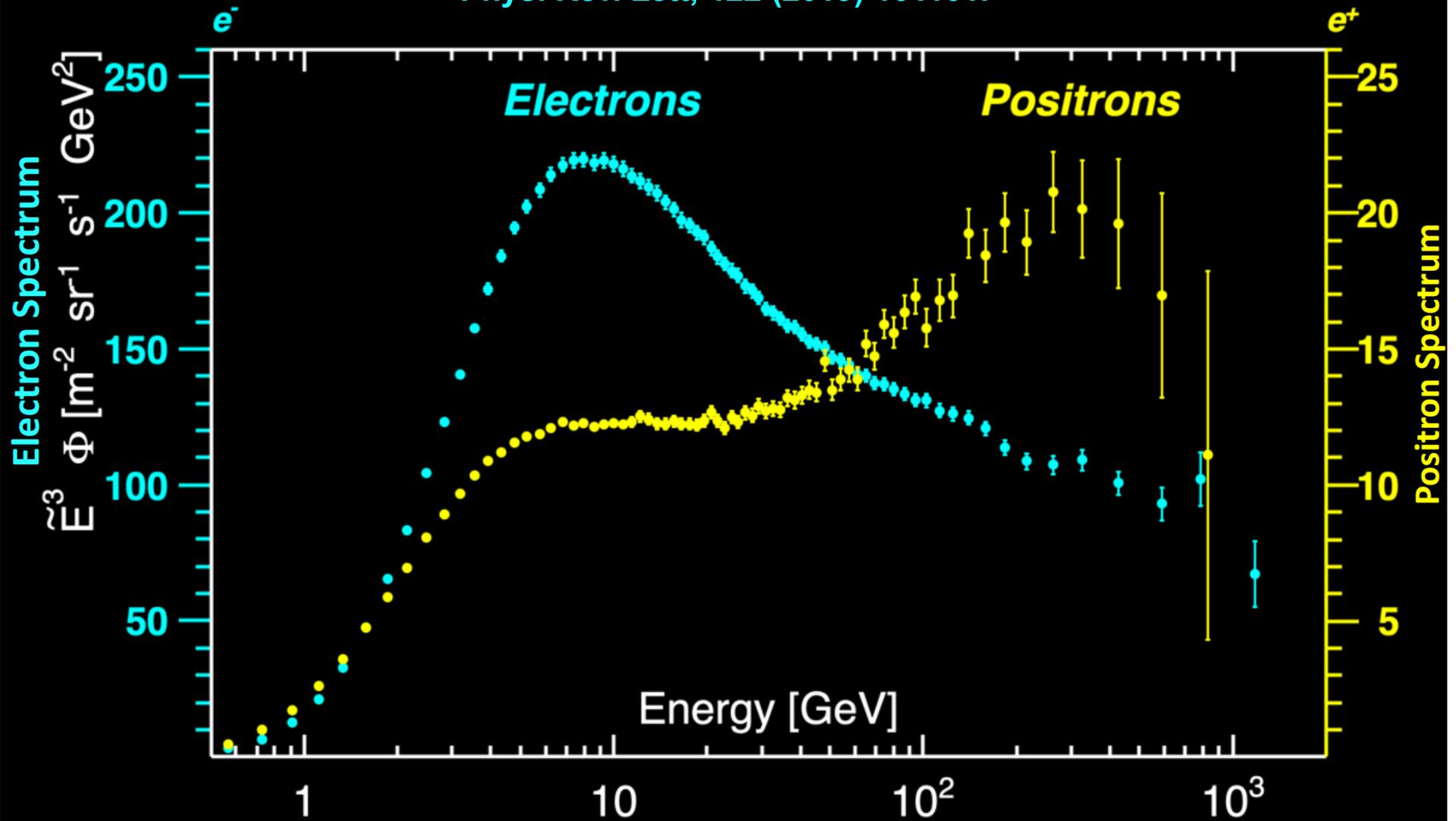
e[±]
from Pulsars

New Astrophysical Sources
(Pulsars, ...)

Cosmic Ray **Positron** and Electron spectra measured by AMS

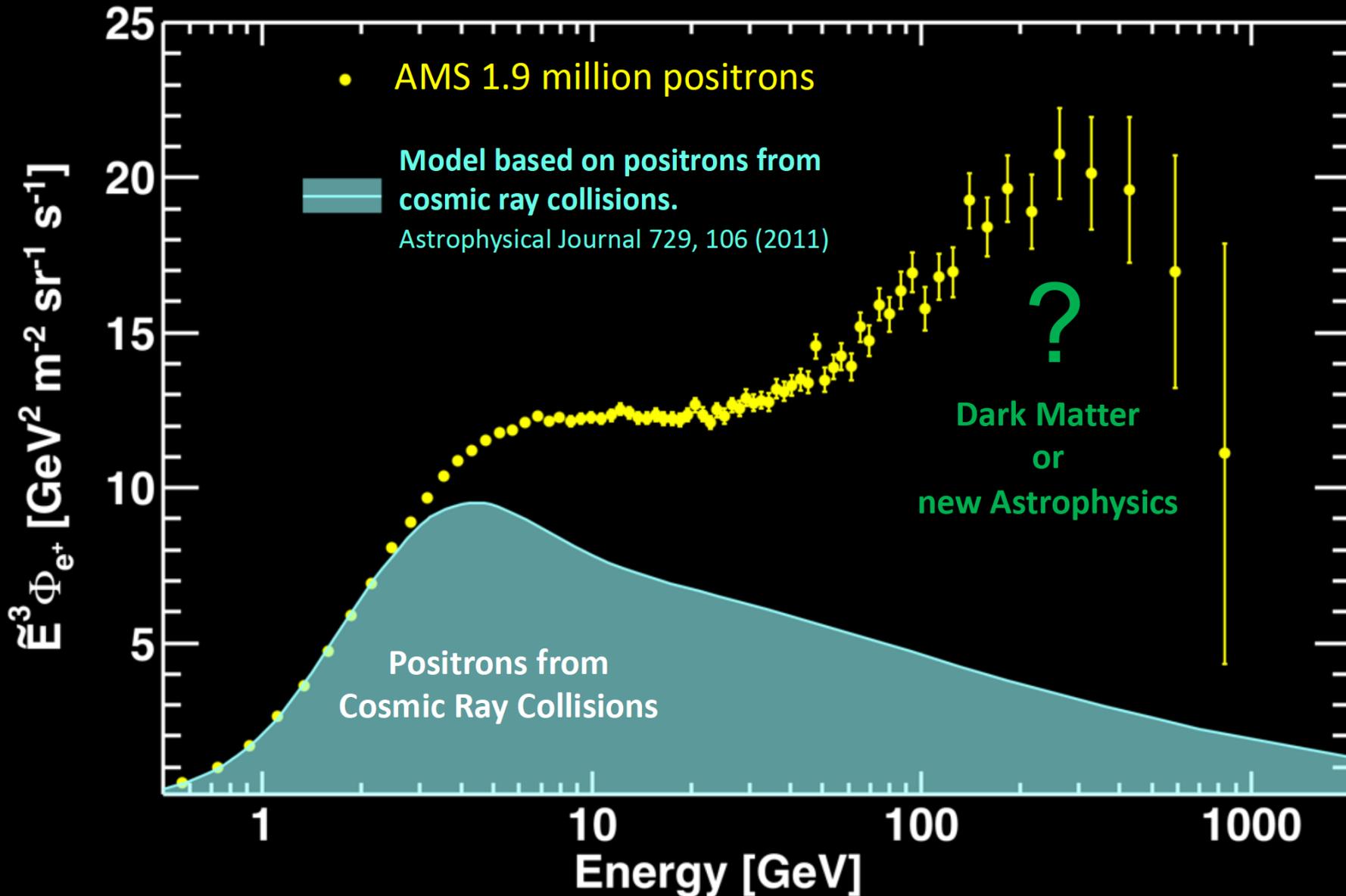
Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 041102.

Phys. Rev. Lett, 122 (2019) 101101.



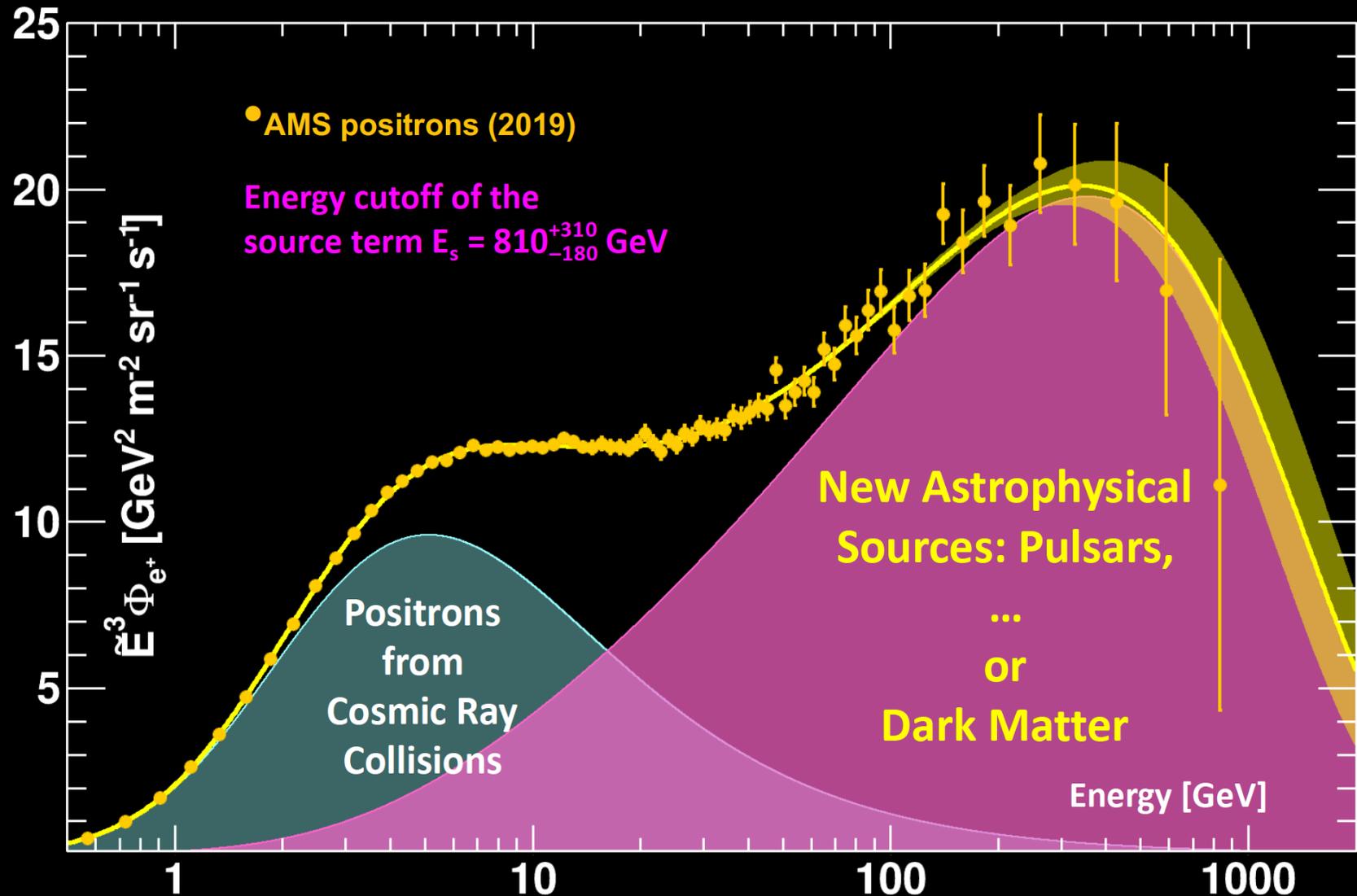
AMS Physics Results: The Origin of Cosmic Positrons

Low energy positrons mostly come from cosmic ray collisions



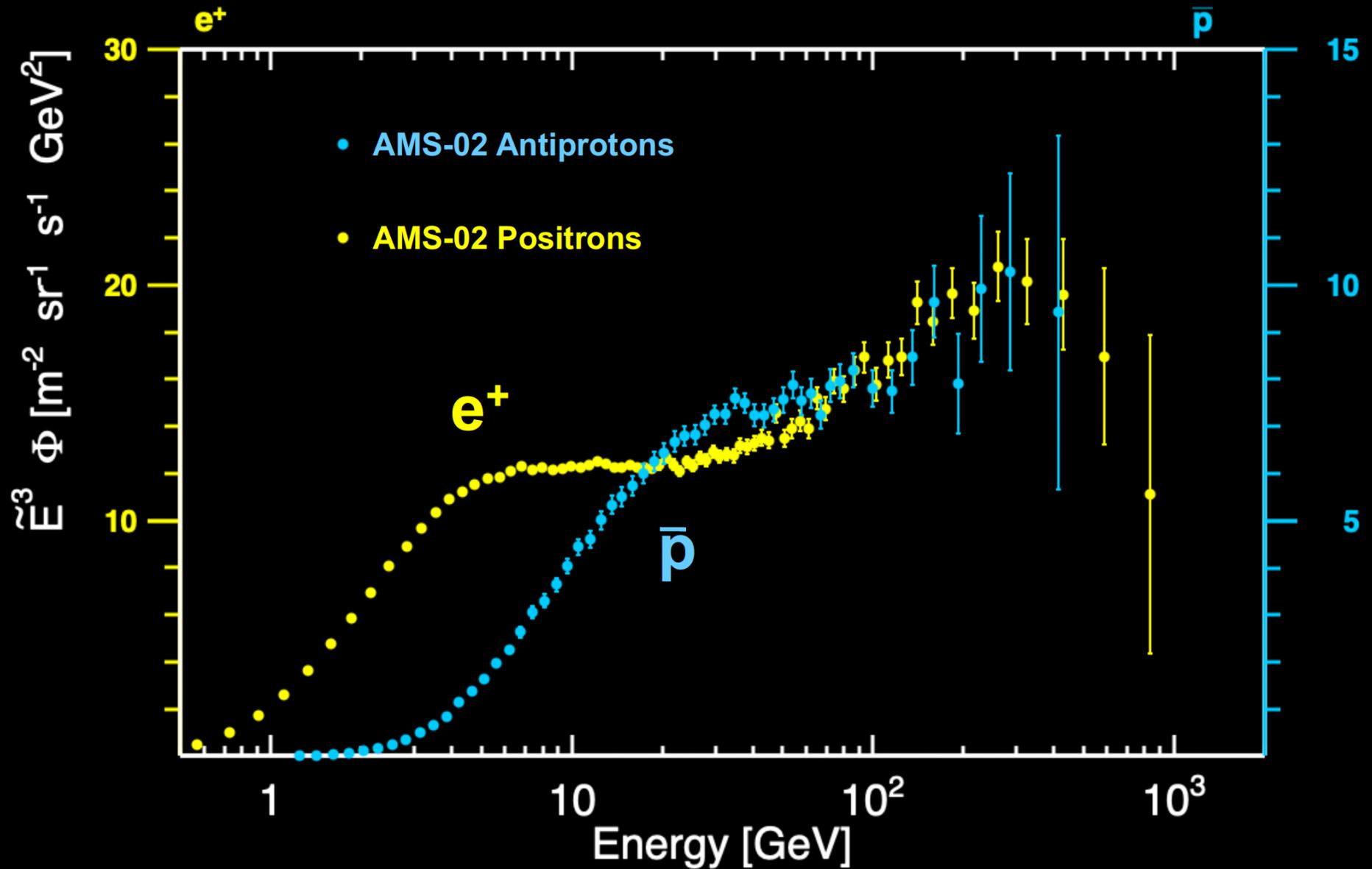
The positron flux is the sum of low-energy part from cosmic ray collisions plus a high-energy part from pulsars or dark matter.

$$\Phi_{e^+}(E) = \frac{E^2}{\hat{E}^2} \left[C_d (\hat{E}/E_1)^{\gamma_d} + C_s (\hat{E}/E_2)^{\gamma_s} \exp(-\hat{E}/E_s) \right]$$



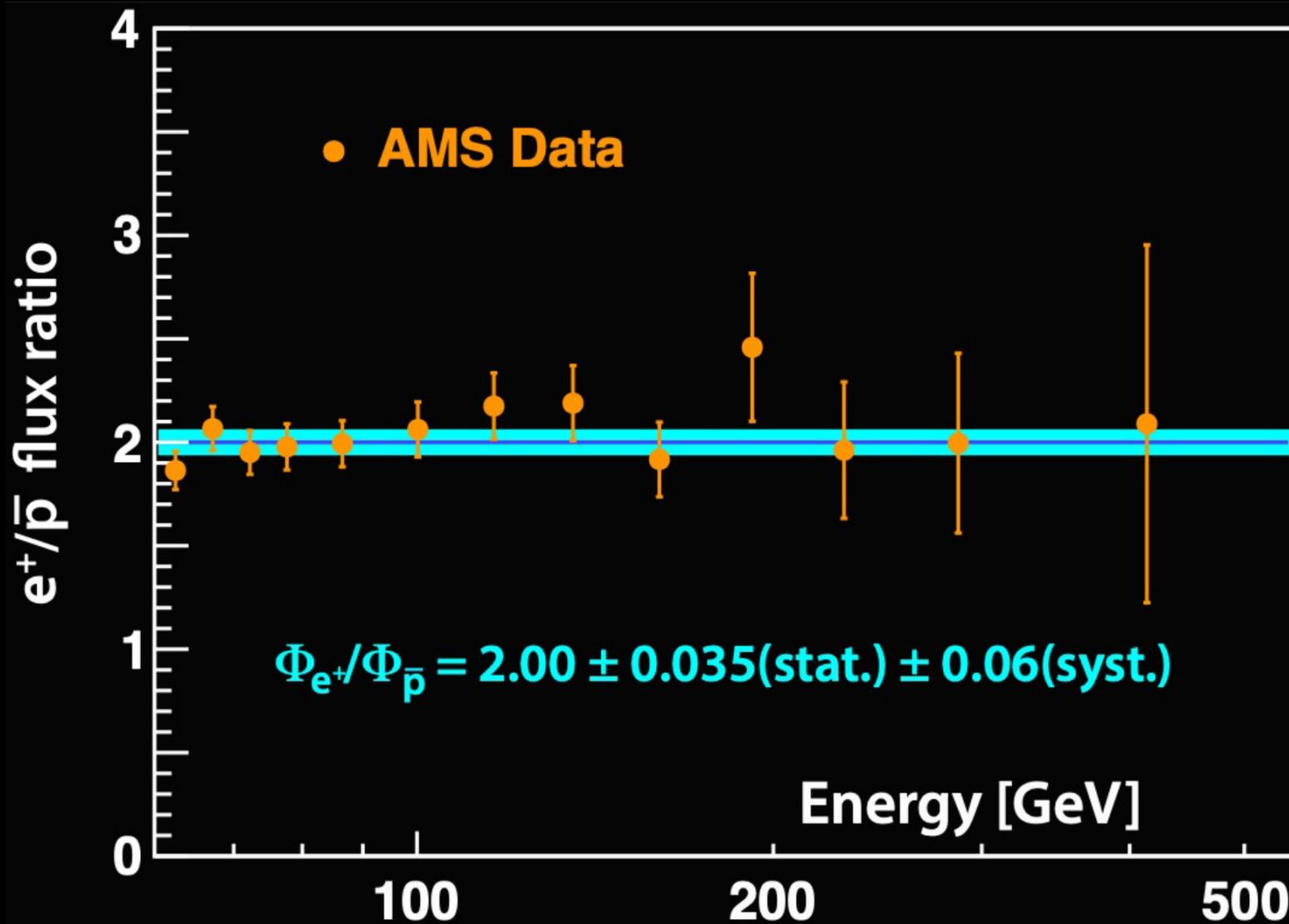
AMS Physics Results:

Antiproton data show a similar trend as **positrons**.

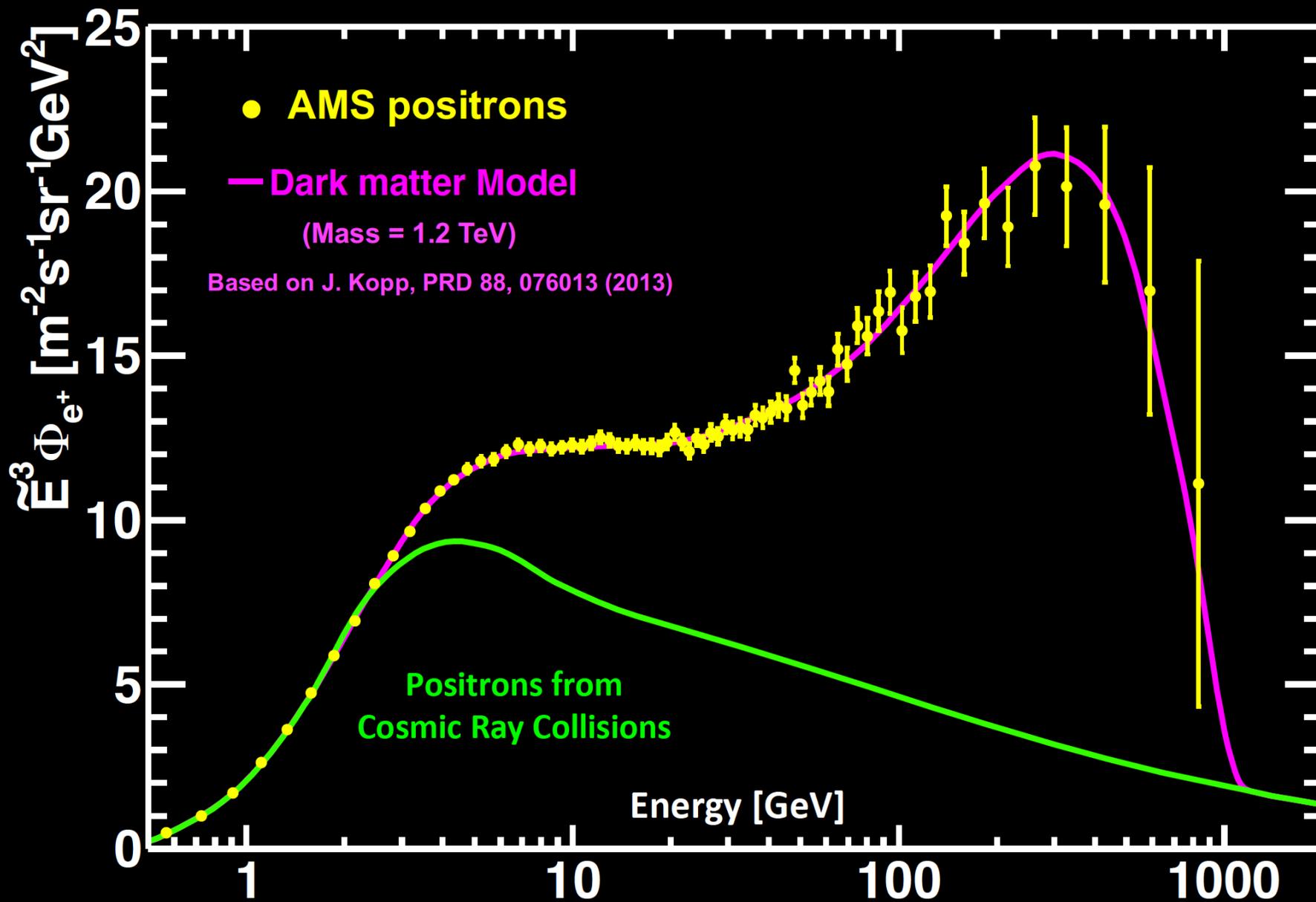


AMS Physics Results:

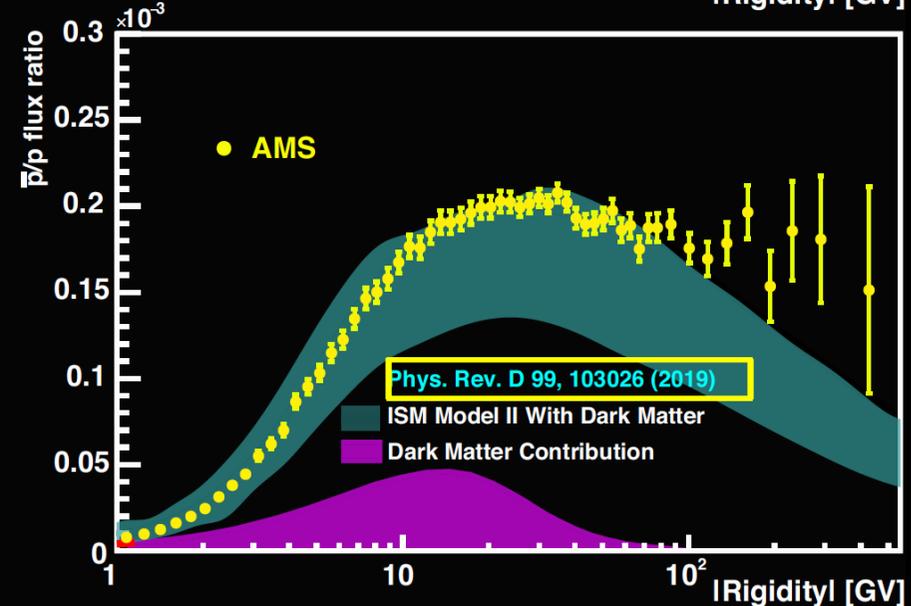
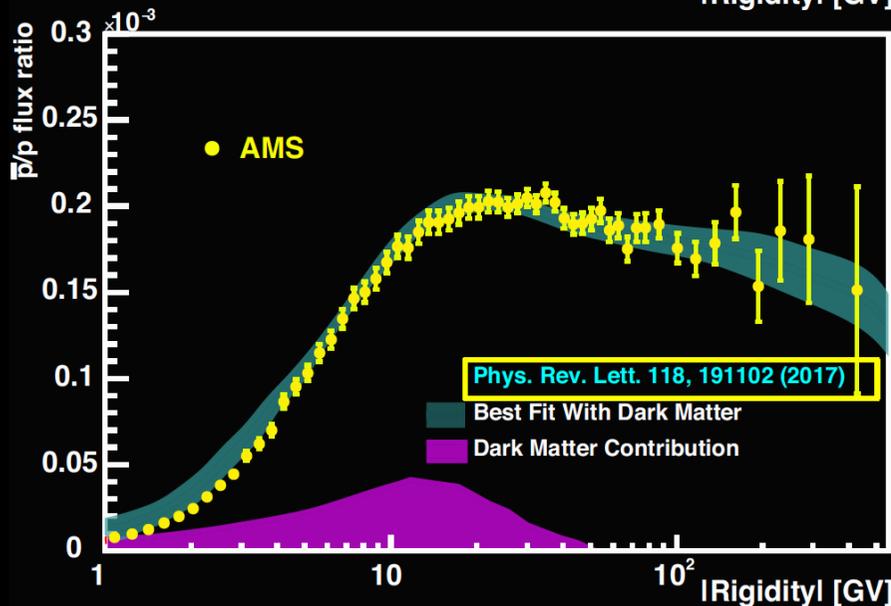
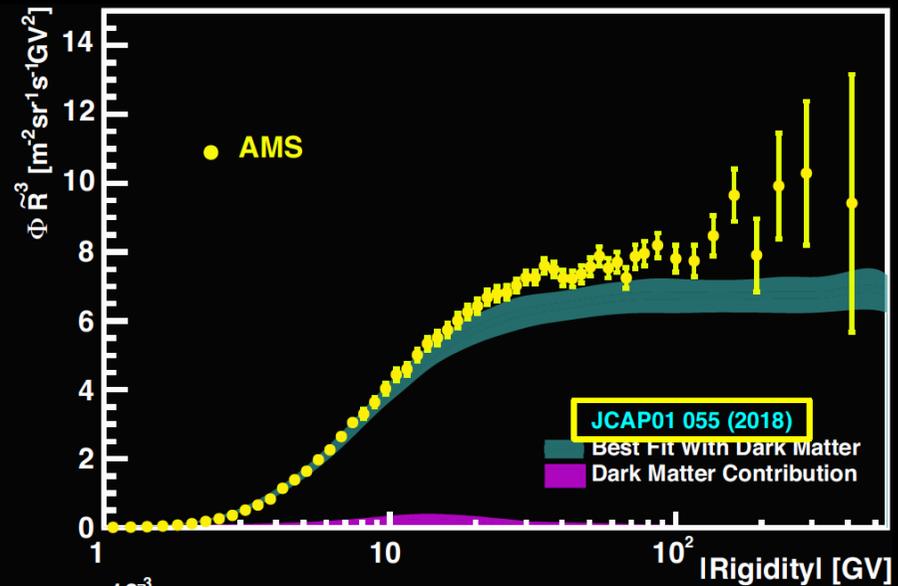
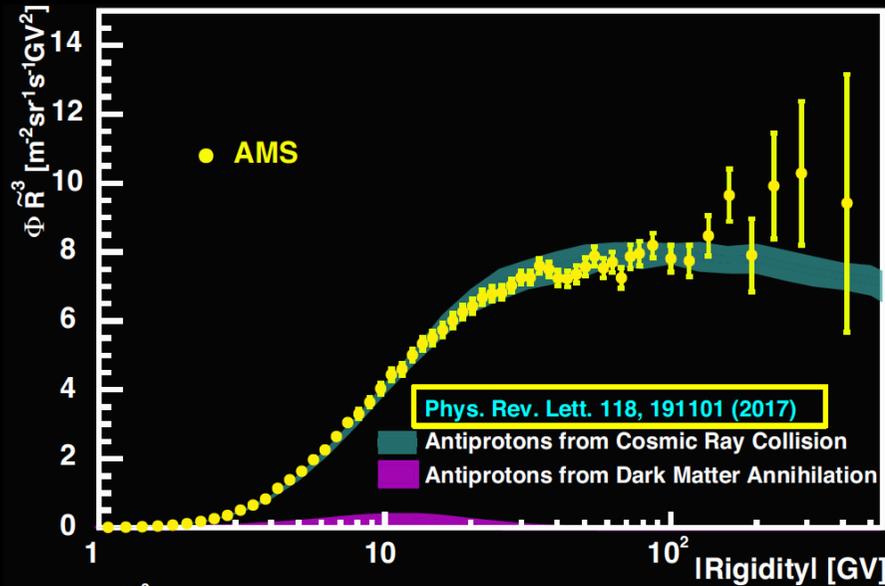
The positron-to-antiproton flux ratio is independent of energy.
Antiprotons cannot come from pulsars.



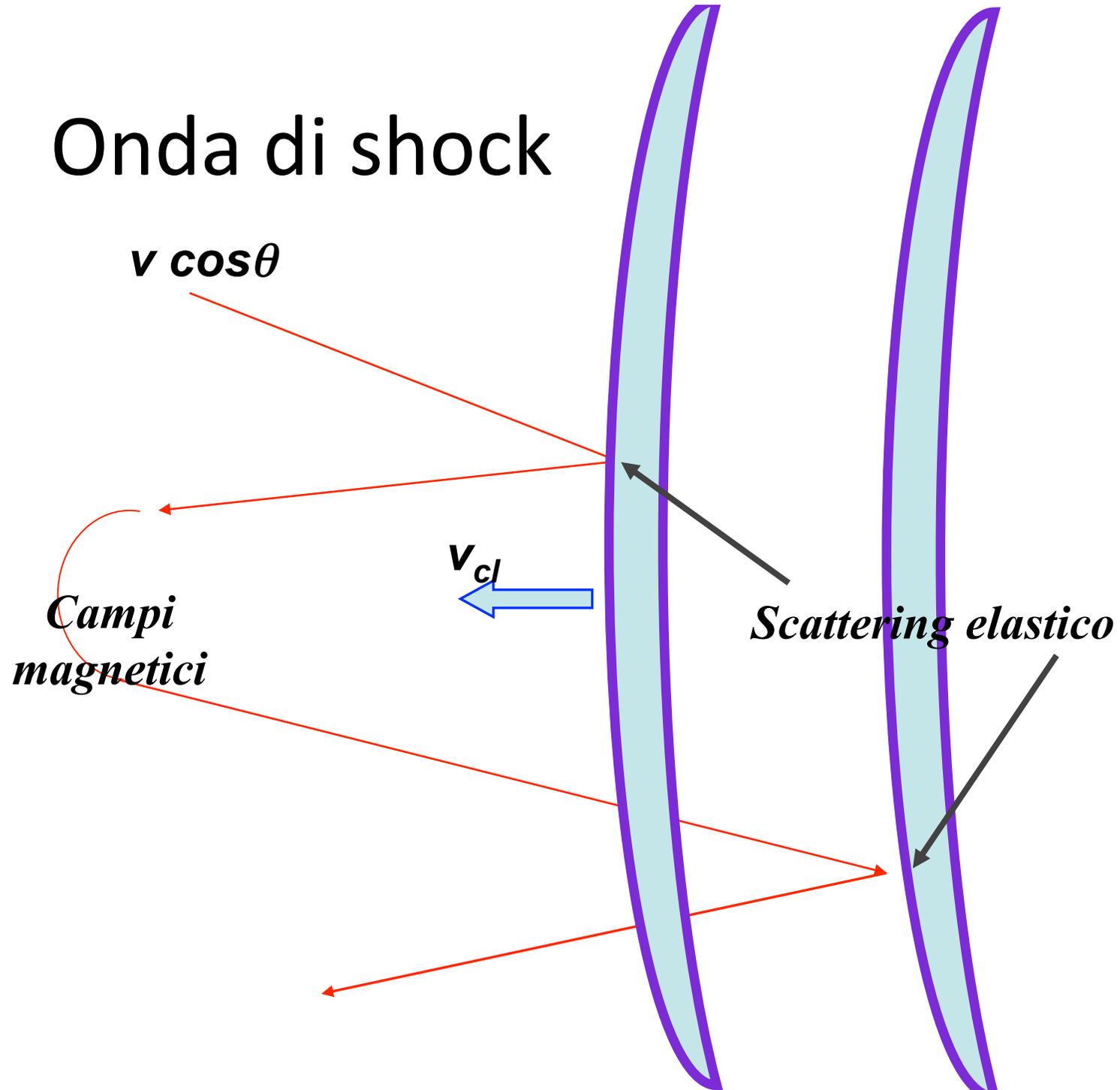
AMS Positron spectrum and a Dark Matter Model



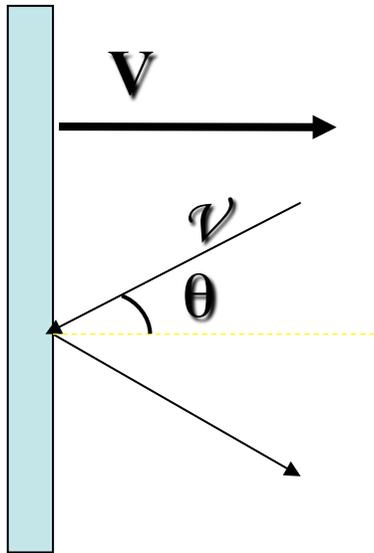
There is a large class of dark matter models that require an excess of antiprotons. The current cosmic ray models deviate from the high energy antiproton spectrum. The models also limit comparison of low energy dark matter.



Onda di shock



Incremento di energia in urto con onda di shock



- *Onda di shock* = perturbazione che si propaga con velocità $V >$ velocità del suono nel mezzo.
 - Assumeremo l'approssimazione di onda piana e con massa $M \gg$ massa particella
 - L'urto è elastico nel SR di quiete di un osservatore sull'onda di shock (S').
-
- **Considereremo il processo nei due SR:**
 - S = Sistema di riferimento dell'osservatore
 - S' = Sistema di riferimento dell'onda di shock

SR osservatore

SR onda shock

- Quadrimpulso particella

$$(E, p_x)$$

$$(E', p'_x)$$

$$E' = \gamma(E + Vp_x)$$

$$p'_x = \gamma\left(p_x + \frac{V}{c^2}E\right)$$

- Urto elastico:

$$E' \xrightarrow{\text{urto}} E'$$

$$p'_x \xrightarrow{\text{urto}} -p'_x$$

- Conseguenze dell'urto:

$$E = \gamma(E' - Vp'_x) \xrightarrow{\text{urto}} \gamma(E' - V(-p'_x)) \equiv E^*$$

- dove E^* = energia della particella dopo l'urto:

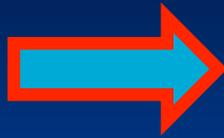
$$E^* \equiv \gamma(E' - V(-p'_x))$$

$$E^* = \gamma \left[\gamma(E + Vp_x) + V\gamma\left(p_x + \frac{V}{c^2}E\right) \right]$$

- Ricordando che:

$$p_x = mv\gamma \cos\theta$$

$$E = mc^2\gamma$$



$$\frac{p_x}{E} = \frac{mv\gamma \cos\theta}{mc^2\gamma} = \frac{v}{c^2} \cos\theta$$

$$E^* = \gamma \left[\gamma(E + Vp_x) + V\gamma \left(p_x + \frac{V}{c^2} E \right) \right] = \gamma^2 \left[(E + 2Vp_x + \frac{V^2}{c^2} E) \right] =$$

$$= \gamma^2 E \left[1 + 2V \frac{p_x}{E} + \frac{V^2}{c^2} \right] = \gamma^2 E \left[1 + 2V \frac{v \cos\theta}{c^2} + \frac{V^2}{c^2} \right] \stackrel{\text{Taylor}}{\cong}$$

$$= \left(1 + \frac{V^2}{c^2} \right) E \left[1 + 2V \frac{v \cos\theta}{c^2} + \frac{V^2}{c^2} \right] \stackrel{\text{Taylor}}{\cong}$$

$$\stackrel{\text{2ordine}}{=} E \left[1 + 2 \frac{Vv \cos\theta}{c^2} + 2 \frac{V^2}{c^2} \right]$$

- L'energia guadagnata dalla particella nell'urto con l'onda di shock nel sistema S (Galassia):

$$\Delta E = E^* - E = \left[2 \frac{Vv \cos \theta}{c^2} + 2 \frac{V^2}{c^2} \right] \cdot E$$

$$\underset{v \approx c}{\cong} \left(2 \frac{V \cos \theta}{c} \right) \cdot E$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{E^* - E}{E} = \left(2 \frac{V \cos \theta}{c} \right)$$

- In altri termini, il rapporto tra energia finale e iniziale è >1 nel caso in cui la particella si diriga contro l'onda ($\cos \theta > 0$):

$$\frac{E^*}{E} = \left(1 + 2 \frac{V \cos \theta}{c} \right)$$

- Mediando (ossi, integrando) su tutti gli angoli per cui $\cos \theta > 0$:

$$\langle \cos \theta \rangle = \frac{\int_0^1 \cos \theta \cdot \cos \theta d\theta}{\int_0^1 \cos \theta d\theta} = \frac{2}{3}$$

$$\left\langle \frac{E^*}{E} \right\rangle = \left(1 + \frac{4}{3} \frac{V}{c} \right) = \mathbf{B}$$

$$\langle E^* \rangle = \mathbf{B} \langle E \rangle$$

eq. 4.1

Accelerazione ricorsiva

- Dalla eq. 4.1 abbiamo ottenuto che in ogni urto frontale, la particella guadagna energia:
- La particella inoltre rimane nella zona di accelerazione con una certa probabilità P
- Dopo k collisioni:

$$E^f = \mathbf{B} \cdot E_o$$

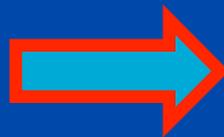
$$P$$

- Energia in possesso della particella
- Numero di particelle con energia E

$$E = E_o \mathbf{B}^k$$

$$N = N_o P^k$$

$$\begin{aligned} \ln(E / E_o) &= k \ln B \\ \ln(N / N_o) &= k \ln P \end{aligned}$$



$$\frac{\ln(N / N_o)}{\ln(E / E_o)} = \frac{\ln P}{\ln B} \equiv \alpha$$

eq. 4.2

$$\frac{N}{N_o} = \left(\frac{E}{E_o} \right)^\alpha$$

eq. 4.3

- La formula trovata si riferisce al numero N di particelle con energia $>E$, ossia $N=N(>E)$ è la funzione integrale di:

$$\frac{dN(E)}{dE} \propto E^{\alpha-1}$$

eq. 4.4

- La 4.4 rappresenta la distribuzione differenziale del numero di particelle in un certo intervallo di energia.
- La 4.4 ha la forma di uno spettro di potenza, con $\gamma=\alpha-1$.
- Questo è quanto cercavamo per lo spettro (osservato) dei RC. Il problema è ora determinare il valore di γ . Dalla 4.2:

$$\gamma = \alpha - 1 = \frac{\ln P}{\ln B} - 1$$

eq. 4.5

- Quindi, occorre determinare il valore del rapporto tra $\ln P/\ln B$

Stima del coefficiente $\alpha = \ln P / \ln B$

- Flusso di particelle relativistiche VERSO il fronte d'onda:

$$F[s^{-1}] = \rho[cm^{-3}] \cdot c[cm/s] \cdot A[cm^2]$$

- Le particelle nella regione *downstream* non vengono di nuovo accelerate. Il flusso di queste particelle verso sinistra è:

$$F' = \rho \cdot v_s \cdot A$$

- La probabilità che il RC oltrepassi il fronte d'onda e venga persa (ossia NON venga riaccelerato):

$$\bar{P} = \frac{F'}{F} = \frac{\rho \cdot v_s \cdot A}{\rho \cdot c \cdot A} = \frac{v_s}{c}$$

- La probabilità che il RC rimanga nella regione di accelerazione:

$$P = 1 - \bar{P} = 1 - \frac{v_s}{c}$$

eq. 4.6

Il valore stimato di α

- $\gamma(\alpha)$ definito dalla eq. 4.5:

$$\gamma = \alpha - 1 = \frac{\ln P}{\ln B} - 1$$

- L'equazione 4.6

$$P = 1 - \bar{P} = 1 - \frac{v_s}{c}$$

- B dalla eq. 4.1, con $V = 3/4 v_s$

$$\left\langle \frac{E^*}{E} \right\rangle = \left(1 + \frac{4V}{3c} \right) = \left(1 + \frac{4(3/4)v_s}{3c} \right) \mathbf{B}$$

- Quindi, se $(V/c) \ll 1$:

$$\alpha = \frac{\ln P}{\ln B} = \frac{\ln\left(1 - \frac{v_s}{c}\right)}{\ln\left(1 + \frac{v_s}{c}\right)} \stackrel{Taylor}{\cong} \frac{-\frac{v_s}{c}}{\frac{v_s}{c}} = -1.0$$

e quindi

$$\gamma = \alpha - 1 = -2$$

eq. 4.7

Spettro energetico alle sorgenti

- Il modello di Fermi **predice** quindi uno spettro energetico delle particelle in prossimità delle sorgenti (eq. 4.4) del tipo:

$$\frac{dN(E)}{dE} \propto E^{\alpha-1} = E^{-2}$$

- Si tratta di una predizione che si accorda coi dati sperimentali. La pagina seguente riporta una slide già vista:
- Occorre ora mostrare che:
 - L'energetica delle SN riesce a spiegare tutta l'energia associata ai RC
 - La velocità dell'onda di shock NON è relativistica
 - Come le particelle vengono fatte "rimbalzare" verso l'onda di shock
 - La massima energia cui si può giungere con questo modello

Spettro dei RC alle sorgenti

- Il risultato appena ottenuto è estremamente importante, perché permette di avere informazioni sullo spettro energetico dei RC alle sorgenti.
- Poiché il flusso dei RC sulla Terra è stazionario, vi deve essere equilibrio tra:
 - Spettro energetico misurato: $\Phi(E) \propto E^{-2.7} (\text{erg} / \text{cm}^3 \cdot \text{GeV})$
 - Spettro energetico alle Sorgenti: $Q(E) \propto E^{-?} (\text{erg} / \text{s} \cdot \text{GeV})$
 - Probabilità di diffusione: $\tau(E) \propto E^{-0.6} (\text{s})$

Parametri caratteristici di un'onda di shock da Supernova

- Osservazioni di Supernovae (da altre Galassie):
 $1/\tau = 1 \text{ SN} / 30 \text{ anni}$
- Energia emessa sotto forma di energia cinetica:
 $K = 10^{51} \text{ erg}$
- Massa caratteristica delle Supernovae:
 $M = 10 M_{\odot} (= 10 \times 2 \times 10^{33} \text{ g})$
- “Potenza” alimentata dalle esplosioni di SN:
 $W = K/\tau = 10^{51} / 30(3 \times 10^7 \text{ s}) = 10^{42} \text{ erg/s}$
- Velocità di propagazione dell'onda di shock:

$$V = \sqrt{\frac{2K}{M}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{51} \text{ erg}}{10 \cdot (2 \cdot 10^{33} \text{ g})}} = 3 \cdot 10^8 \text{ cm/s}$$



$$\frac{V}{c} = 10^{-2}$$

eq. 4.8

Massima energia per i RC da SN

- Incremento di energia in un singolo urto (eq.4.1):

$$\langle E \rangle = \mathbf{B} \langle E_o \rangle = \left(1 + \frac{4V}{3c} \right) \langle E_o \rangle$$

$$\Delta E = \langle E \rangle - \langle E_o \rangle = \frac{4V}{3c} \langle E_o \rangle = \eta \langle E_o \rangle; \quad \eta \approx 10^{-2}$$

- Tempo che intercorre tra due urti successivi: T_{ciclo} ;
- Numero massimo di urti possibili: $N_{cicli} = T_{OS} / T_{ciclo}$;
- La massima energia raggiungibile è dunque:

$$E_{max} = N_{cicli} \Delta E = \frac{\eta E_o \cdot T_{OS}}{T_{ciclo}}$$

eq. 4.11

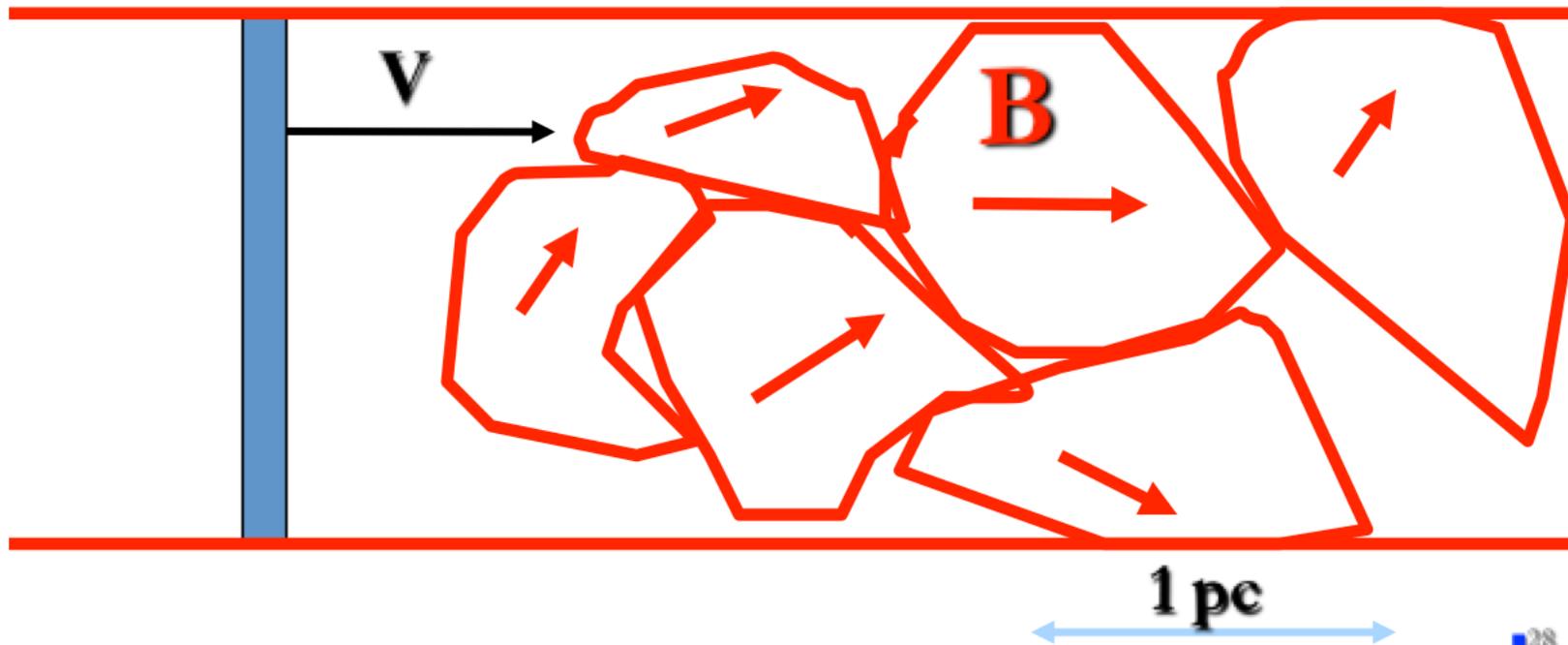
- Occorre dunque stimare il parametro T_{ciclo} ;

Stima di T_{ciclo}

$$T_{\text{ciclo}} = \frac{\lambda_c}{V}$$

λ_c = Lunghezza caratteristica della particella
confinata = raggio di Larmor nel
campo magnetico Galattico

$$\lambda_c \approx r_L = \frac{E}{ZeB}$$



- Se assumiamo: $\lambda_c \approx r_L = \frac{E}{ZeB}$

- Allora: $T_{ciclo} = \frac{\lambda_c}{V} = \frac{E}{ZeBV}$

- Possiamo determinare la massima energia (eq. 4.11):

$$E_{\max} = N_{cicli} \Delta E = \frac{\eta E \cdot T_{OS}}{T_{ciclo}} \longrightarrow E_{\max} = \frac{\eta E \cdot T_{OS}}{T_{ciclo}} = \eta E \left(\frac{ZeBV}{E} \right) \cdot T_{OS}$$

$$\eta = \frac{4V}{3c} \longrightarrow E_{\max} = \frac{4ZeB}{3c} V^2 \cdot T_{OS}$$

$$B = 3 \times 10^{-6} G$$

$$V = 5 \times 10^8 cm/s$$

$$T_{OS} = 10^3 y = 3 \times 10^{10} s$$

$$E_{\max} = \frac{4ZeB}{3c} V^2 \cdot T_{OS} = 480 \cdot Z \quad erg = 3 \times 10^{14} Z \quad eV$$

$$E_{\max} = 300 \times Z \quad TeV$$

eq. 4.12

Conclusioni circa il modello

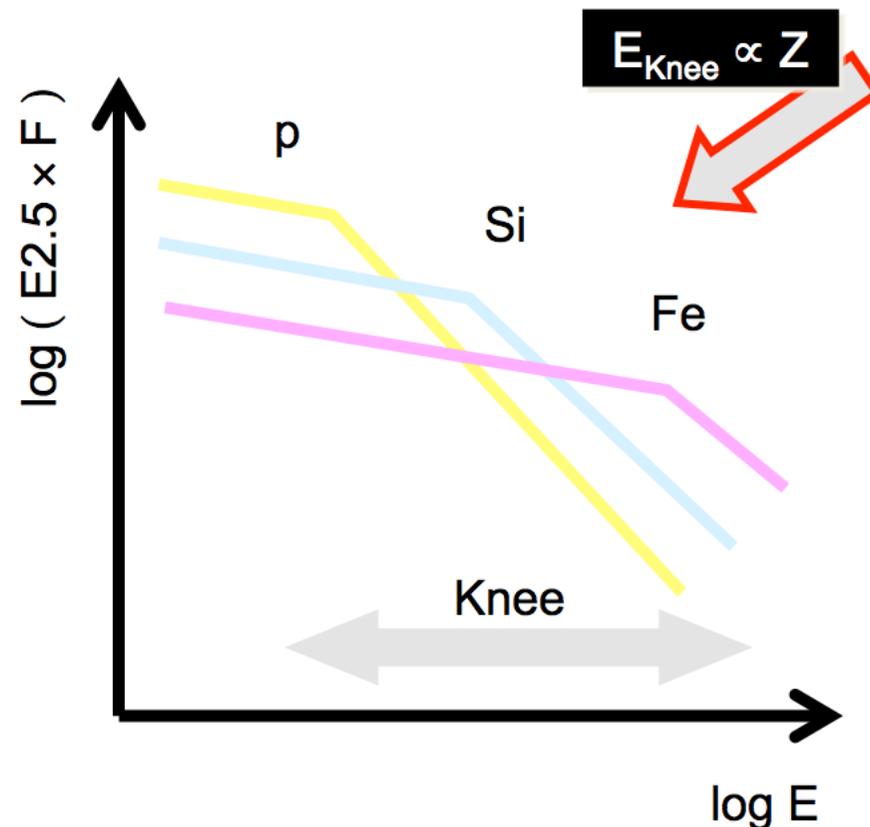
- Il modello di accelerazione dei RC da parte di SN fonda la sua giustificazione sulla concordanza tra energia cinetica emessa (10^{42} erg/s) e la “potenza” sotto forma di RC nella Galassia:
 $W_{\text{CR}} = 5 \times 10^{40}$ erg/s
- Un meccanismo che trasferisca il $\sim 5\%$ di energia verso particelle relativistiche (RC) è sufficiente per spiegare i RC galattici sino ad energie $\sim 10^{15}$ eV.
- Il meccanismo di Fermi ha proprio una efficienza $\eta = \frac{V}{c} \cong 5 \times 10^{-2}$
- Nella regione di accelerazione, lo spettro energetico dei RC è descritto da una legge di potenza:

$$\frac{dN(E)}{dE} \propto E^{\alpha-1} = E^{-2}$$

- La legge di potenza alla sorgente del tipo E^{-2} si confronta con l'osservazione sperimentale di uno spettro del tipo $E^{-2.7}$ sulla Terra, tenendo conto della probabilità di fuga dalla Galassia vs. E
- L'energia *massima* che i RC possono acquisire in queste regione di accelerazione è

$$E_{\max} = 300 \times Z \quad TeV$$

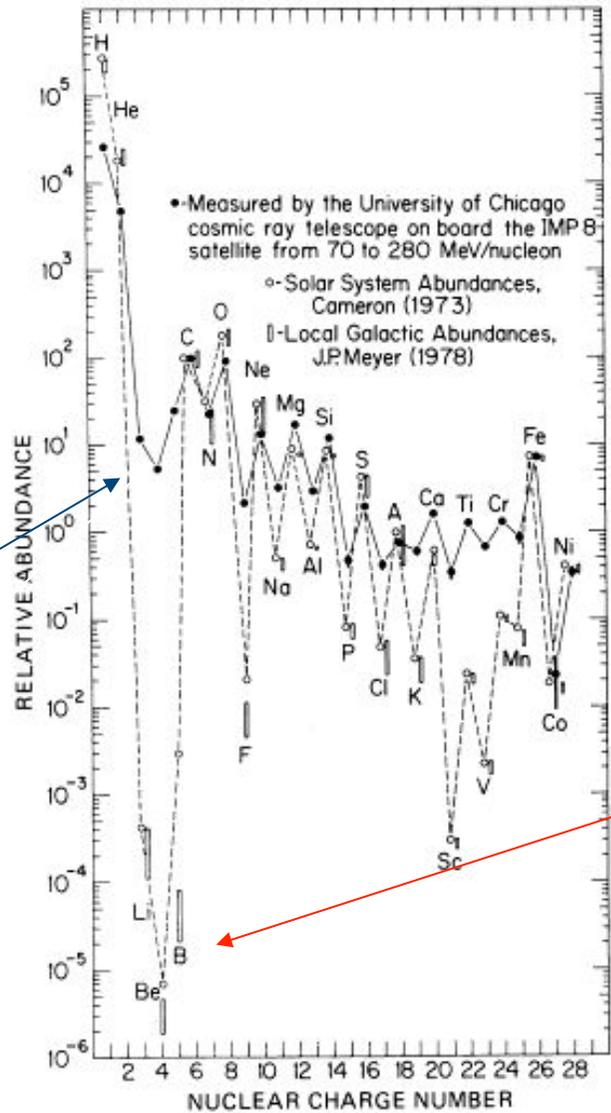
- In corrispondenza di questa energia, si trova una struttura nello spettro osservato (ginocchio). La previsione del modello è che il ginocchio dipende dalla rigidità (ossia, da Z) della particella



Astrofisica Nucleare e Subnucleare

Propagazione di Raggi Cosmici

CR observations

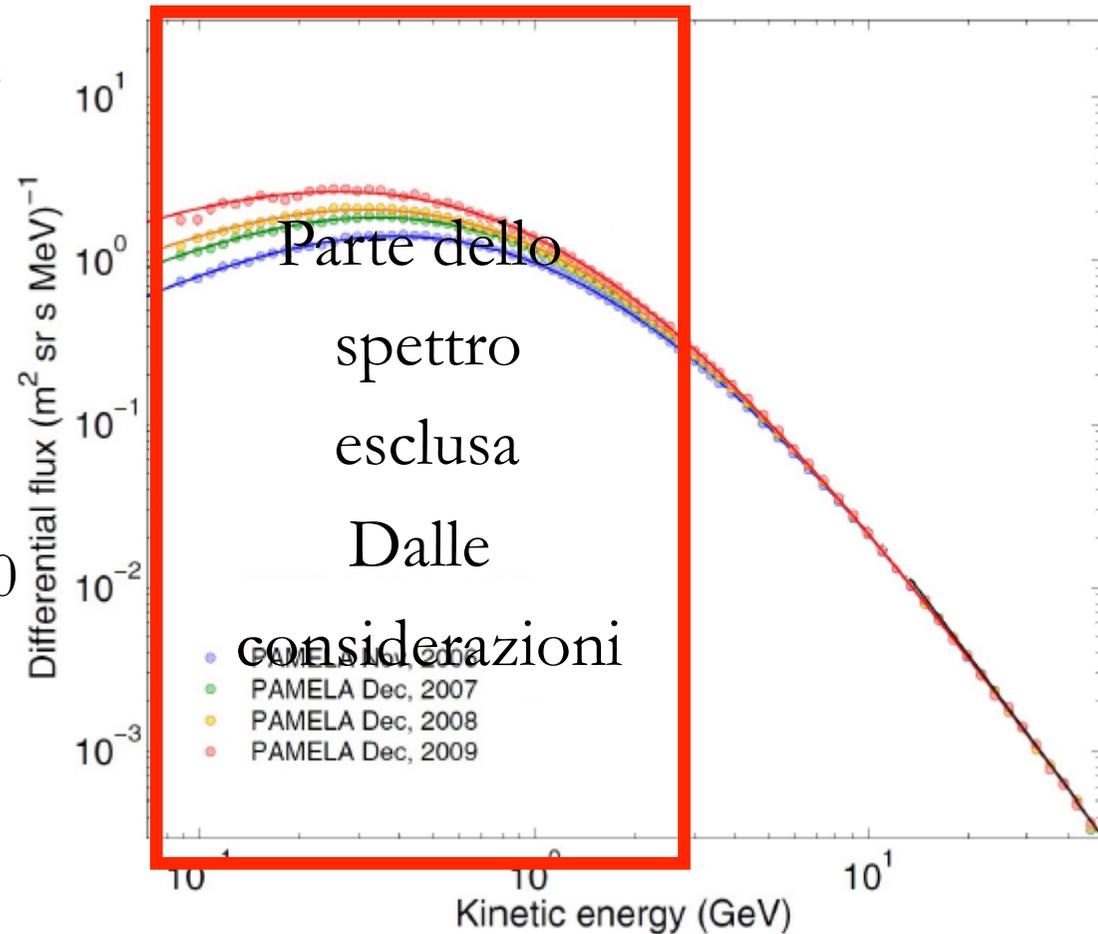


CR component

Solar system

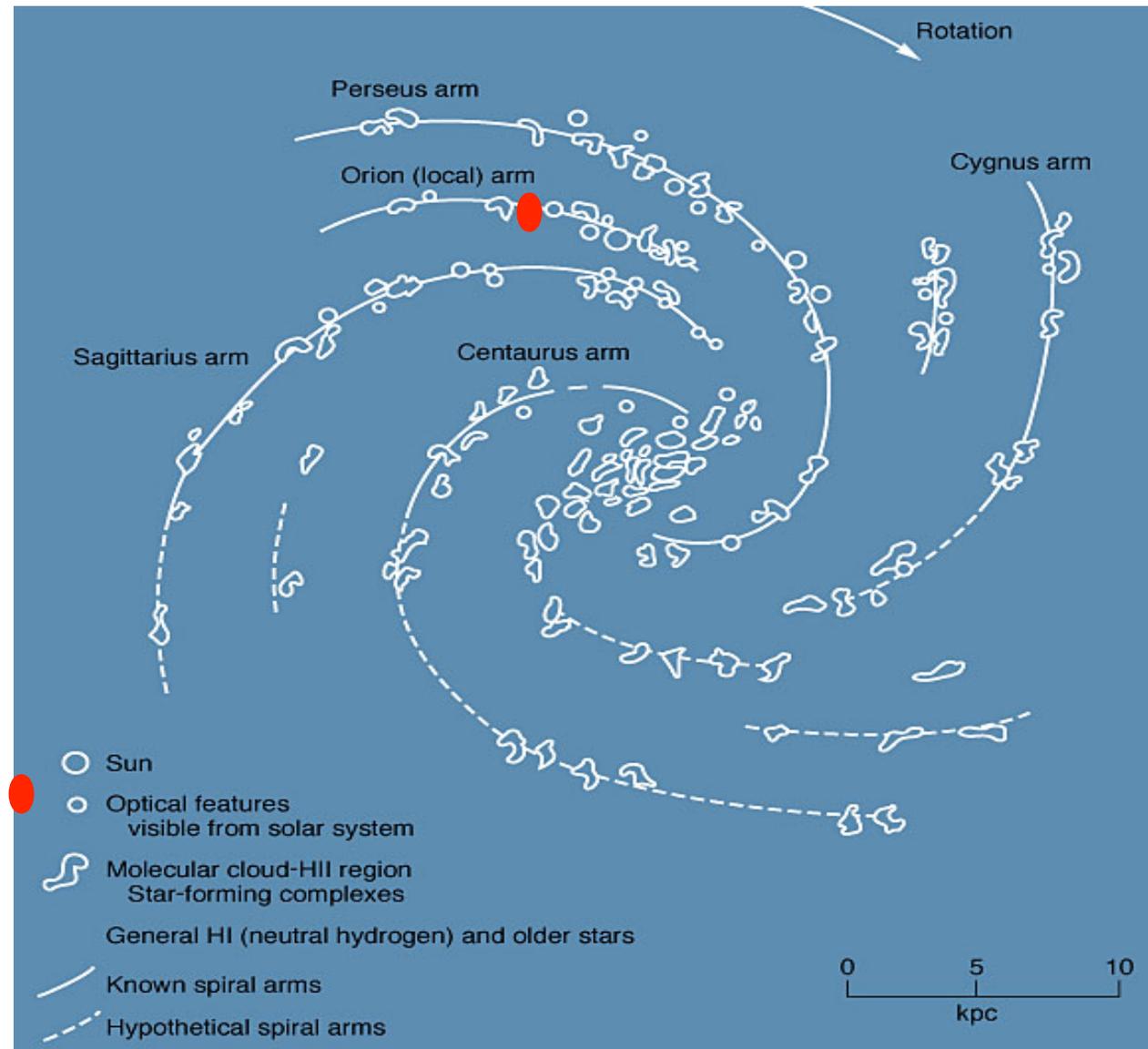
Modulazione dei RC di bassa energia dovuta al ciclo del Sole

- 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): ~ 1000 p/(m²s sr).

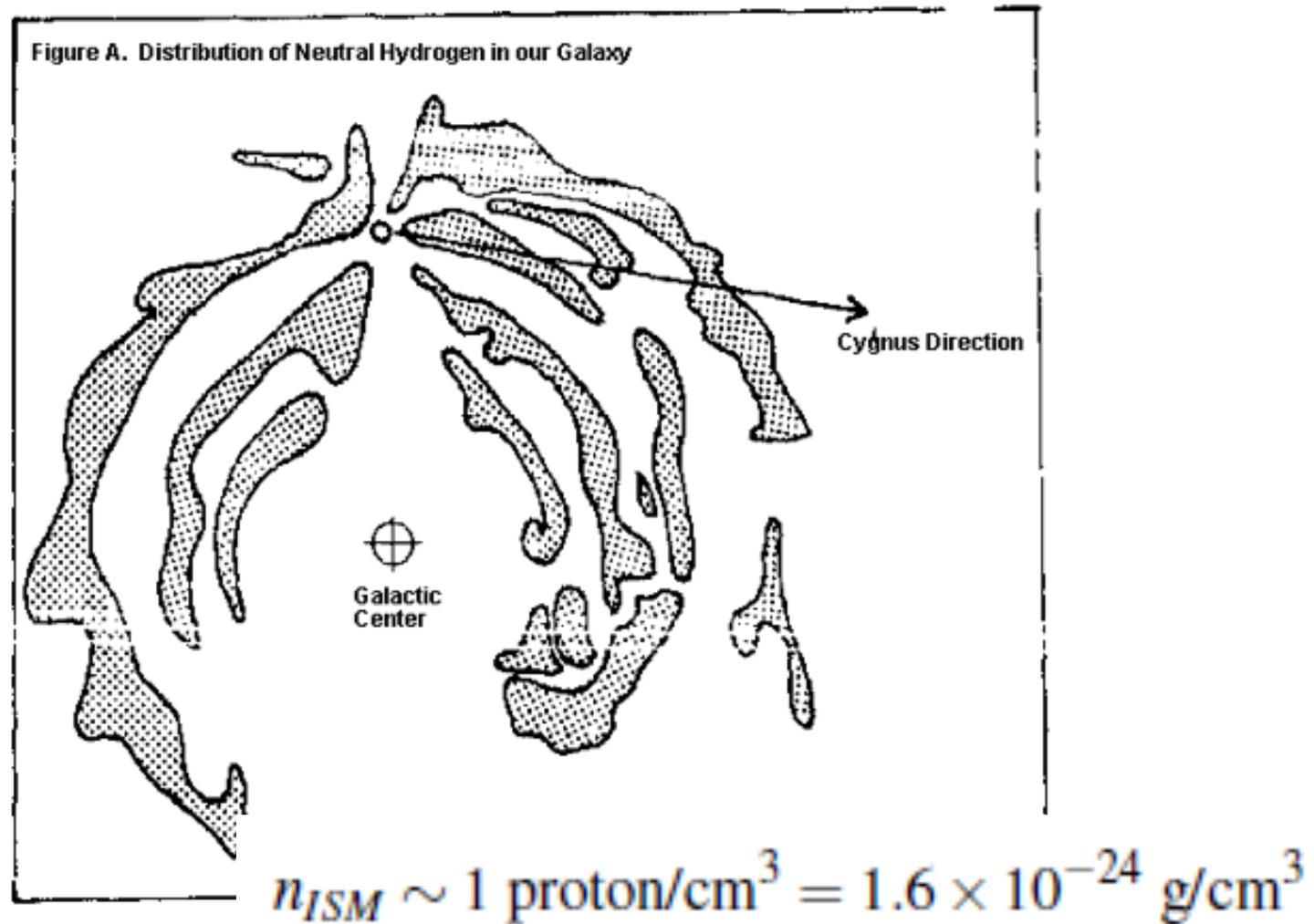


La Galassia

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



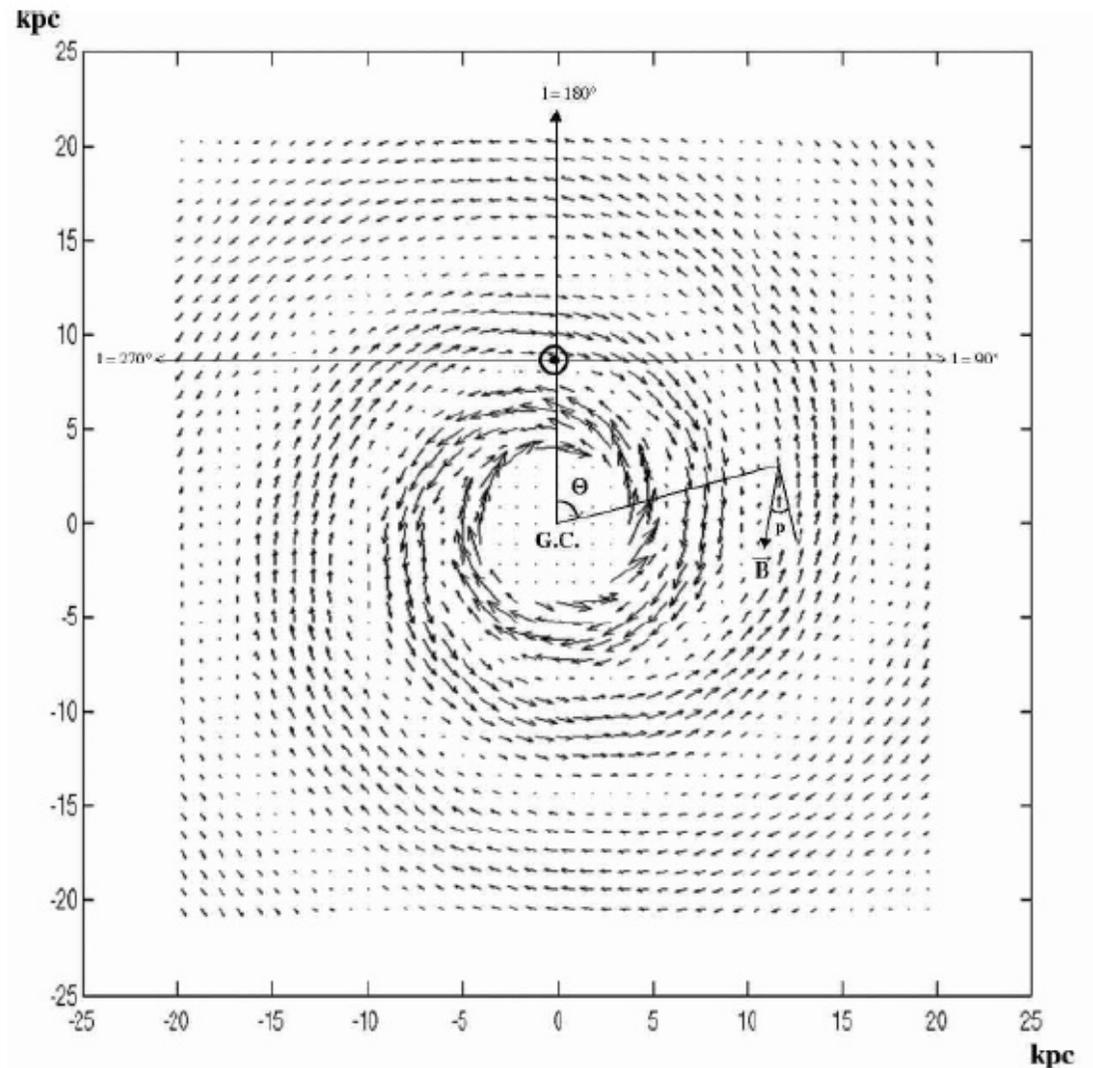
Distribuzione di idrogeno neutro nella Galassia



Copyright (c) 1997 by Michael

Il campo magnetico galattico

- Si misura tramite la polarizzazione della luce delle stelle
- Intensità media:
3-4 μGauss
- 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

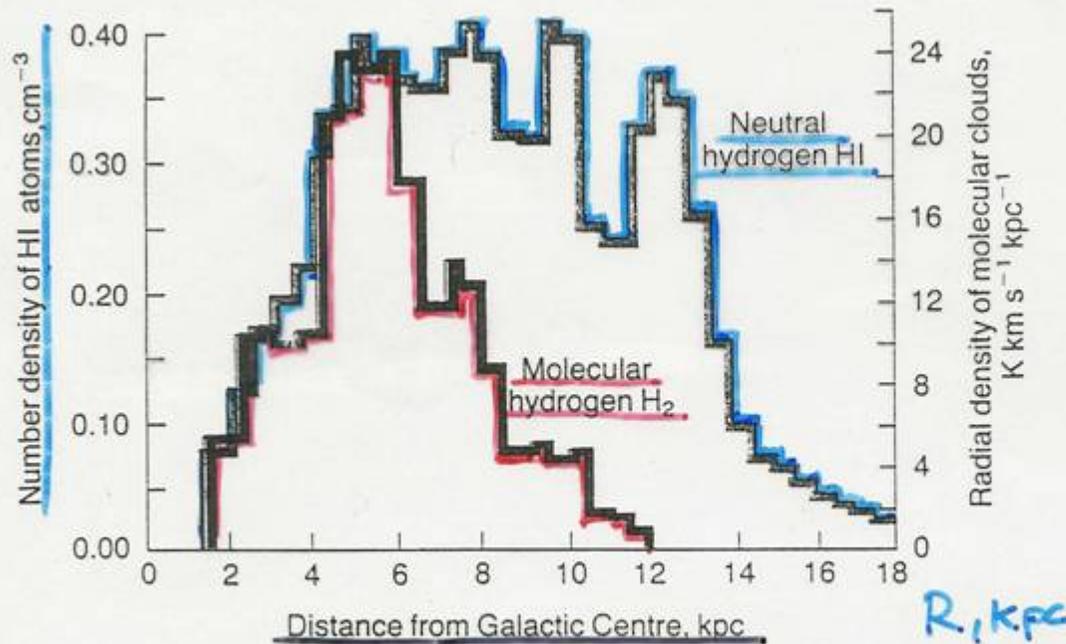


Figure 17.2. The radial distribution of atomic and molecular hydrogen as deduced from radio surveys of the Galaxy in the 21-cm line of atomic hydrogen and from millimetre surveys of the molecular emission lines of carbon monoxide, CO. (After D. Michalis and J. Binney (1981). *Galactic astronomy: structure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

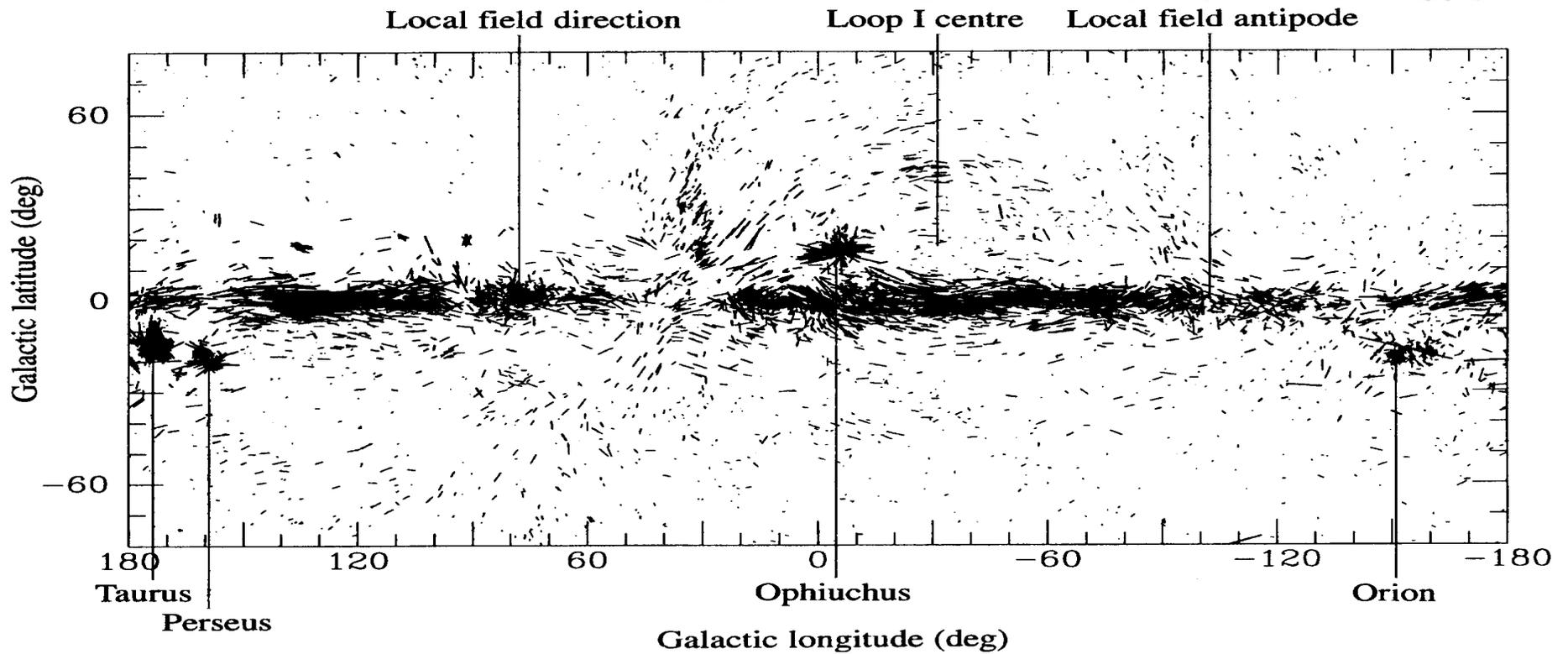
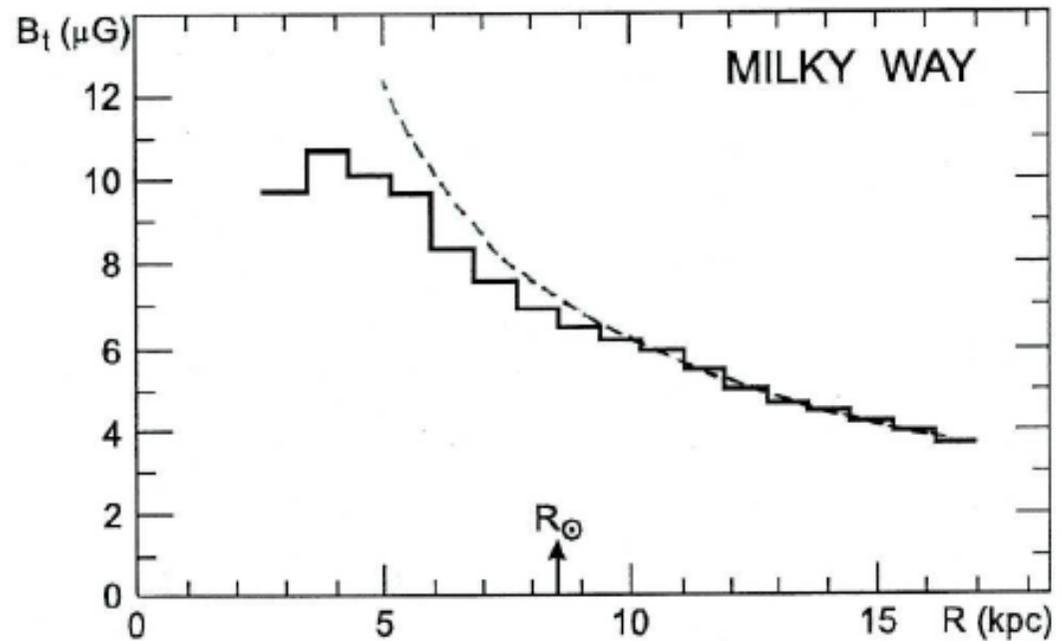
- Figura 17.2 libro

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

NOME	IL MEZZO INTERSTELLARE		T (K)
	Costituenti	Rivelati da...	
MOLECOLARI NUBI	H ₂ , 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 ⁺ , e ⁻ (ionizz. 40%)	21 cm + assorbim. Linee H	40% 20% 0.1-1 ~10 ⁴
CORONE stellari	H ⁺ , e ⁻ ... O ⁵⁺	soft X (0.1-2 keV)	~50% 0.1% 1000 10 ⁶

Intensità di B

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

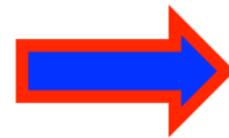


Richiamo: moto di un RC nel campo magnetico Galattico

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

$$r = pc / ZeB$$

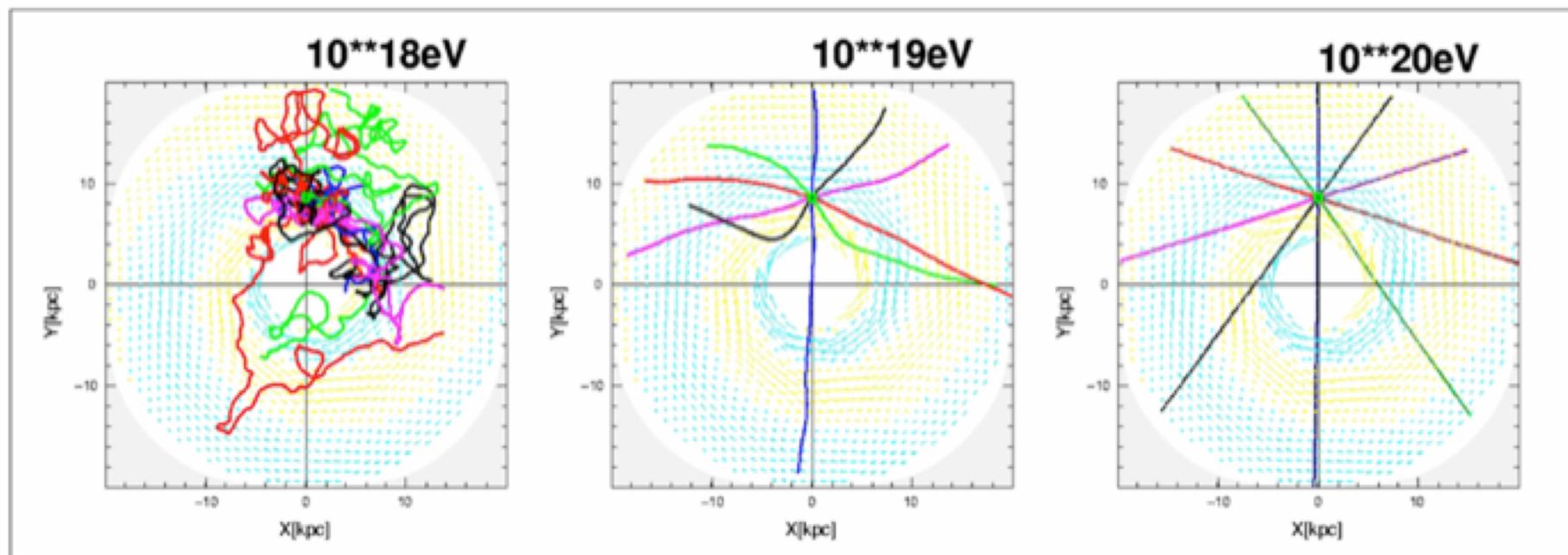
$$r(\text{cm}) = \frac{1}{300} \frac{E(\text{eV})}{ZB(\text{G})}$$



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

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

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



Abbondanze dei nuclei nel Sistema Solare

- Sono rappresentative delle abbondanze degli elementi nel mezzo interstellare

Ref: Mashnik, astro/ph:
0008382

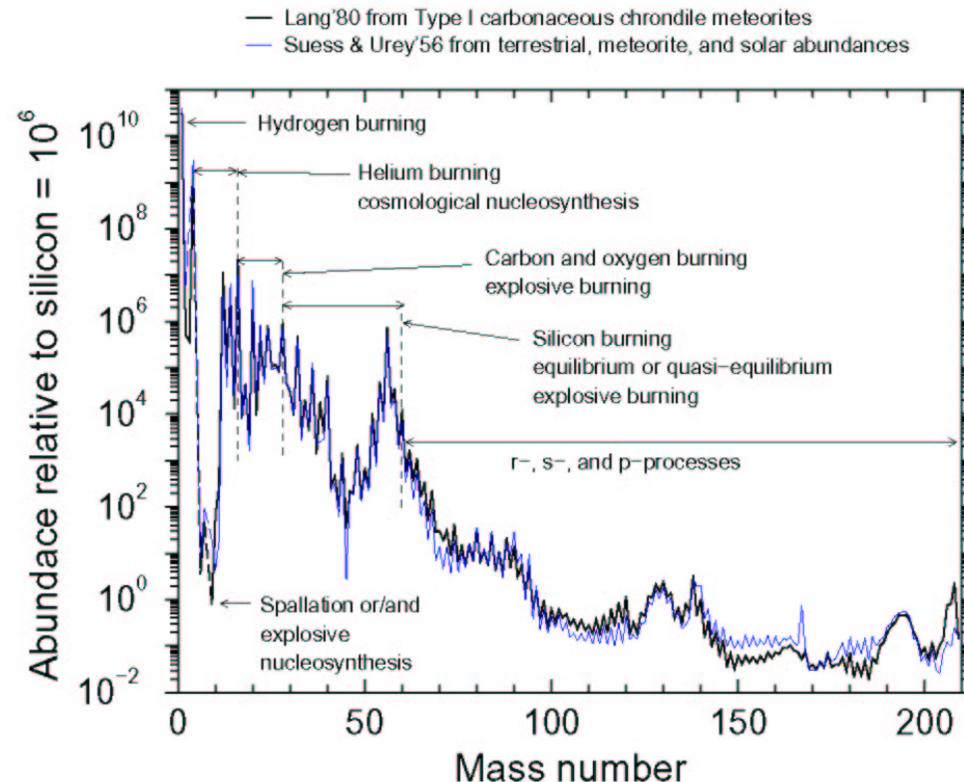


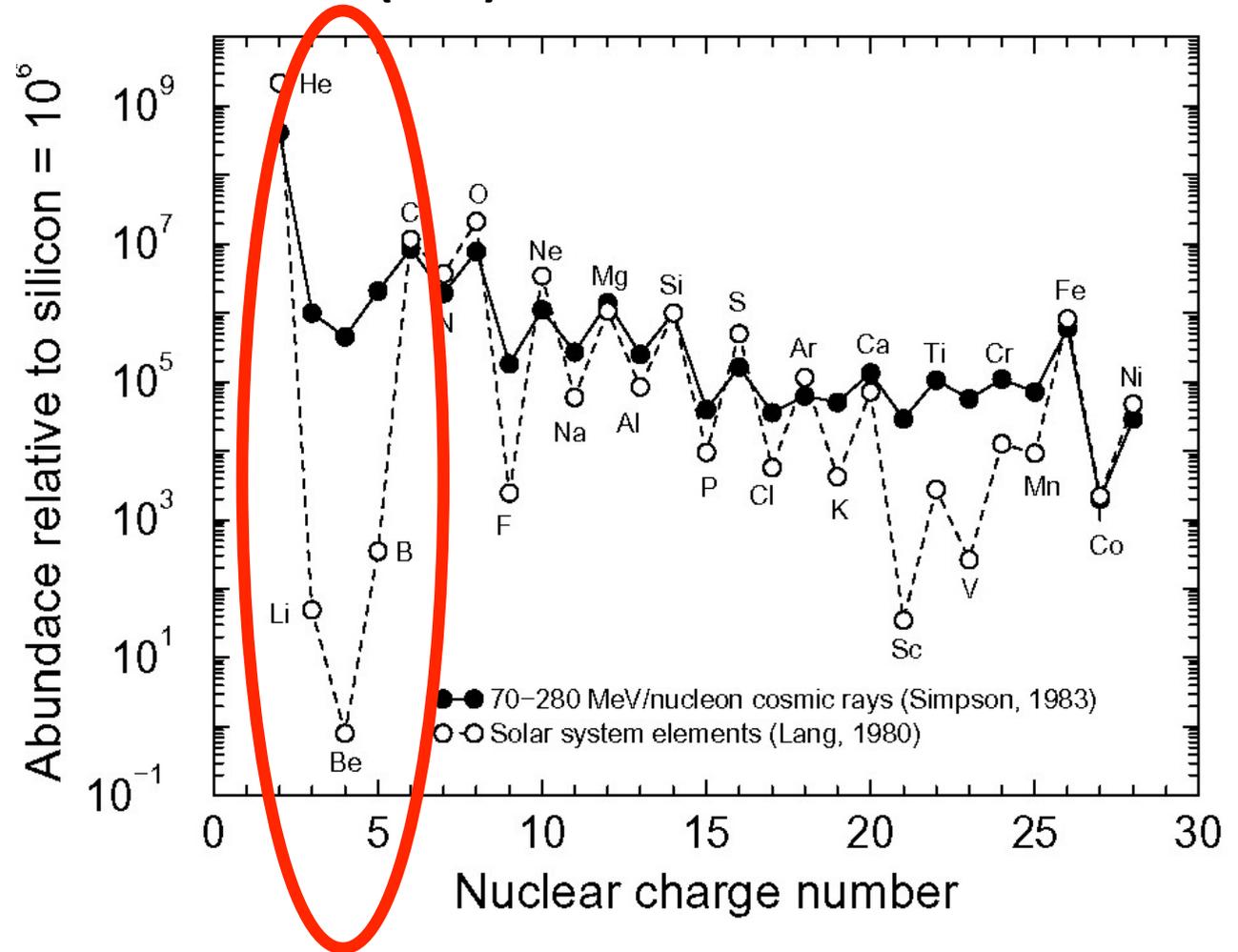
Fig. 1.— Abundances of solar system nuclides plotted as a function of mass number. The thin blue curves shows old data compiled in Table III by Suess and Urey (1956) which are based on measurements of terrestrial, meteoric, and solar abundances. These data were used by Burbidge, Burbidge, Fowler, and Hoyle (1957) in postulating the basic nucleosynthetic processes in stars in their seminal work which become widely known as “B²FH,” 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

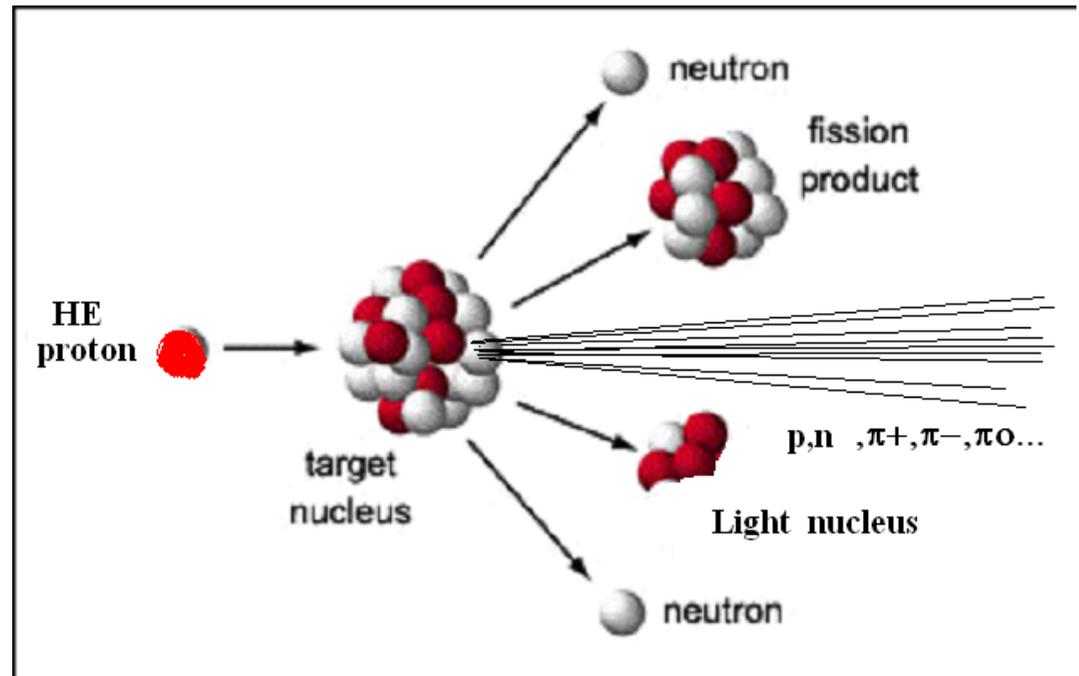


Produzione di Li, Be, B nei RC

- ${}^6\text{Li}$, 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, α) possono evaporare. La parte rimanente viene chiamata frammento nucleare, o nucleo di spallazione.

Meccanismo di propagazione

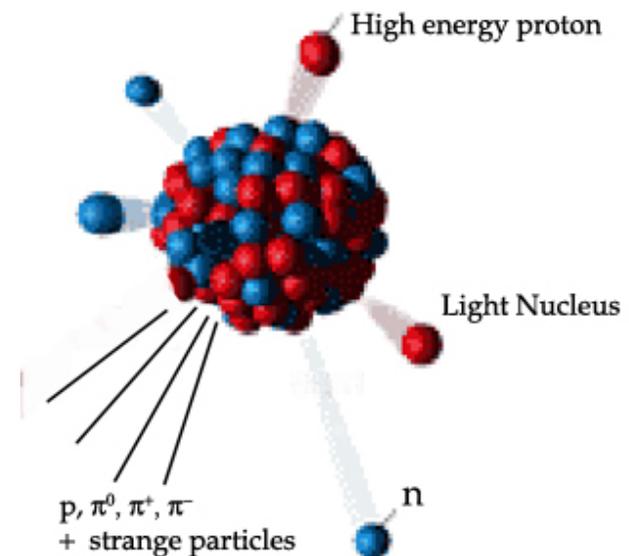
- Gli elementi del gruppo M(=C,N,O) sono gli elementi candidati a produrre L(=Li,Be,B) durante la propagazione.
- Il processo fisico con cui gli M producono gli L è la spallazione, urto con i protoni del GI.

- 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.



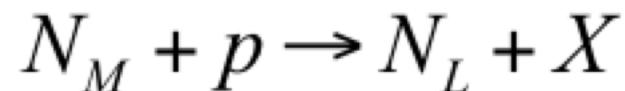
- Costruiamo un “modellino giocattolo” di propagazione dei RC, in cui le ipotesi di partenza sono:

- **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^{ξ/λ_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:

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

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

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

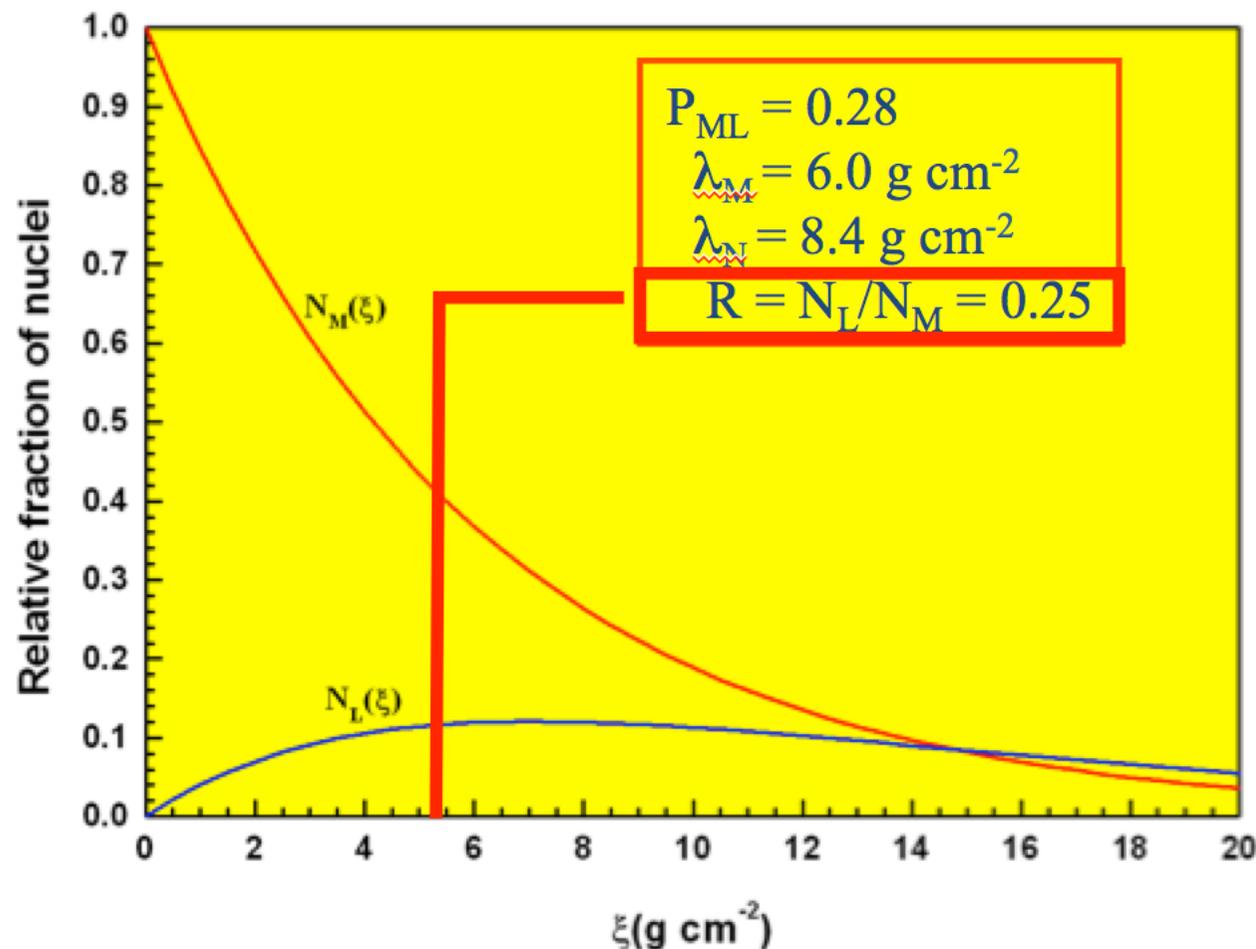
$$c \cdot \left(\frac{1}{\lambda_M} - \frac{1}{\lambda_L} \right) = B$$

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

- 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 ξ_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 τ sarebbe:

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

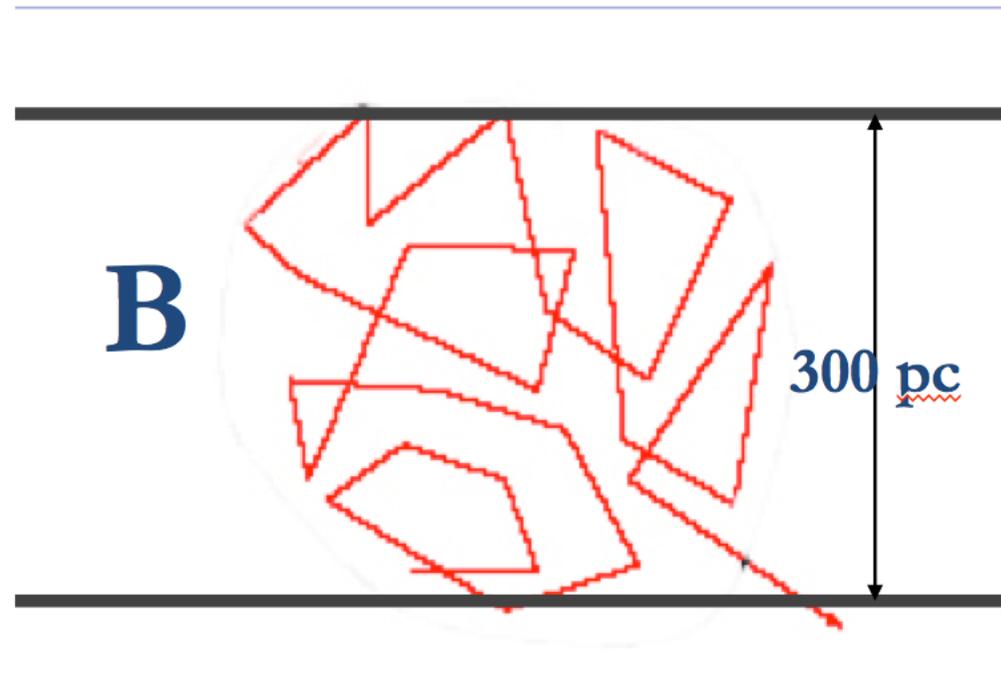
valore molto maggiore delle dimensioni della Galassia.

- τ 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 τ (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 τ dei RC nella Galassia; all'aumentare di τ , 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 $\tau(E)$.

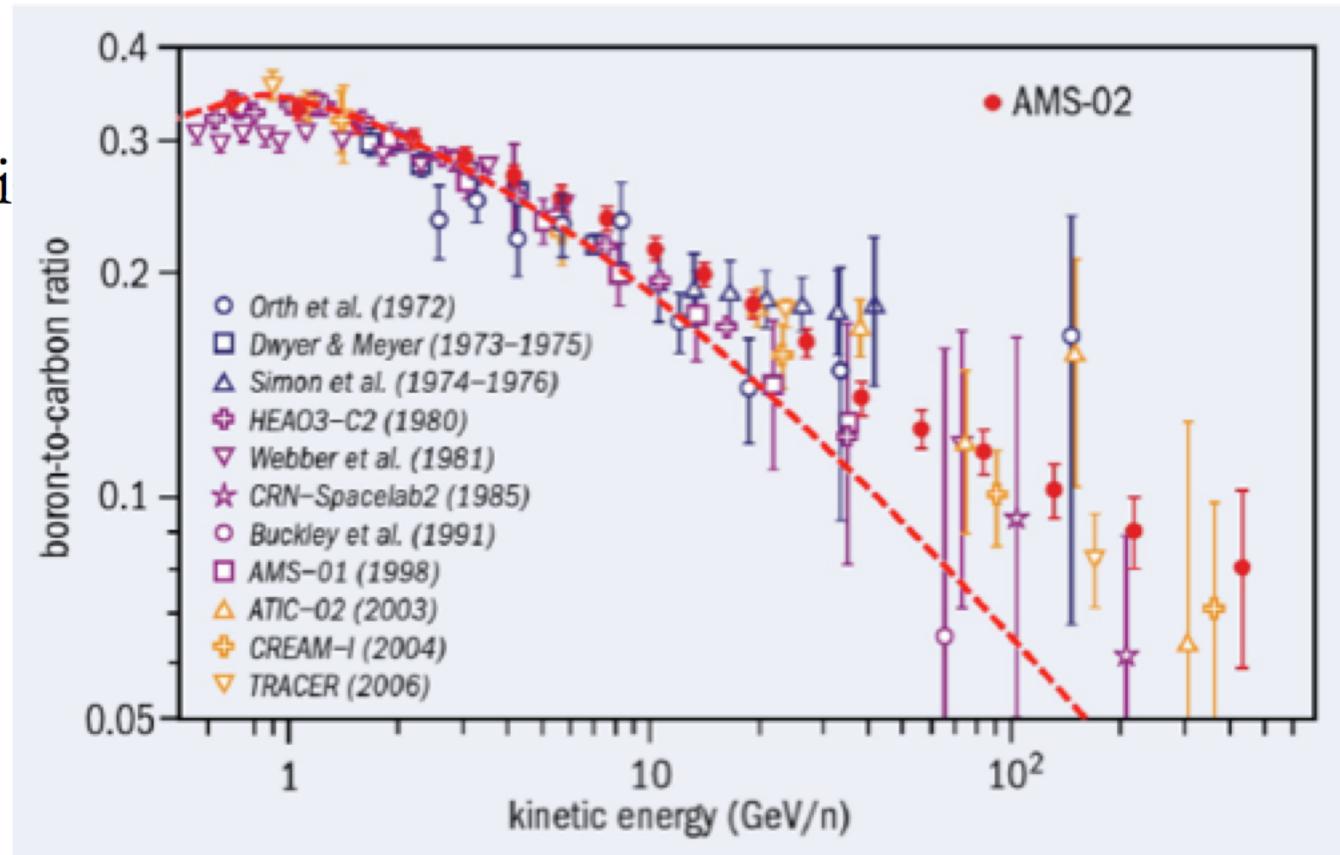
Dipendenza del rapporto B/C vs. E

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

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

- Poiché $\tau \sim \xi$

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



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

3.10 L'orologio dei Raggi Cosmici

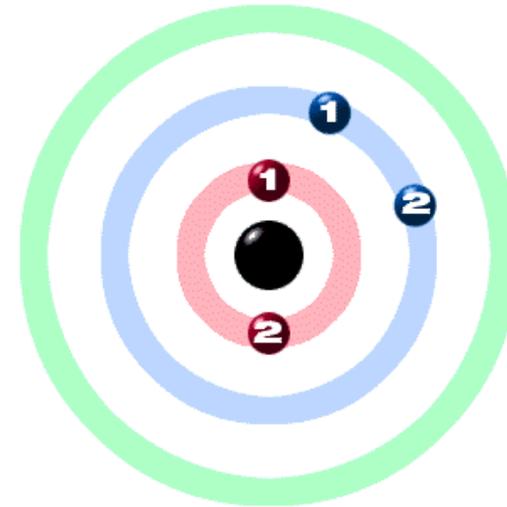
- Nel 1958, Hayakawa et al., stabilirono che le abbondanze dei secondari radioattivi potevano essere impiegati come “orologi” dei RC misurando il flusso (relativo) degli isotopi radioattivi e confrontandolo con quello aspettato se nessun decadimento fosse avvenuto.
- Per poter misurare il tempo di permanenza 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
${}^{10}\text{Be}$	$1.6 \cdot 10^6 \text{ y}$	β^-



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 :

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

* 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 τ_F

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

■ σ^{10} e σ^7 (= probabilità di produzione di Be¹⁰ e Be⁷ 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:

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

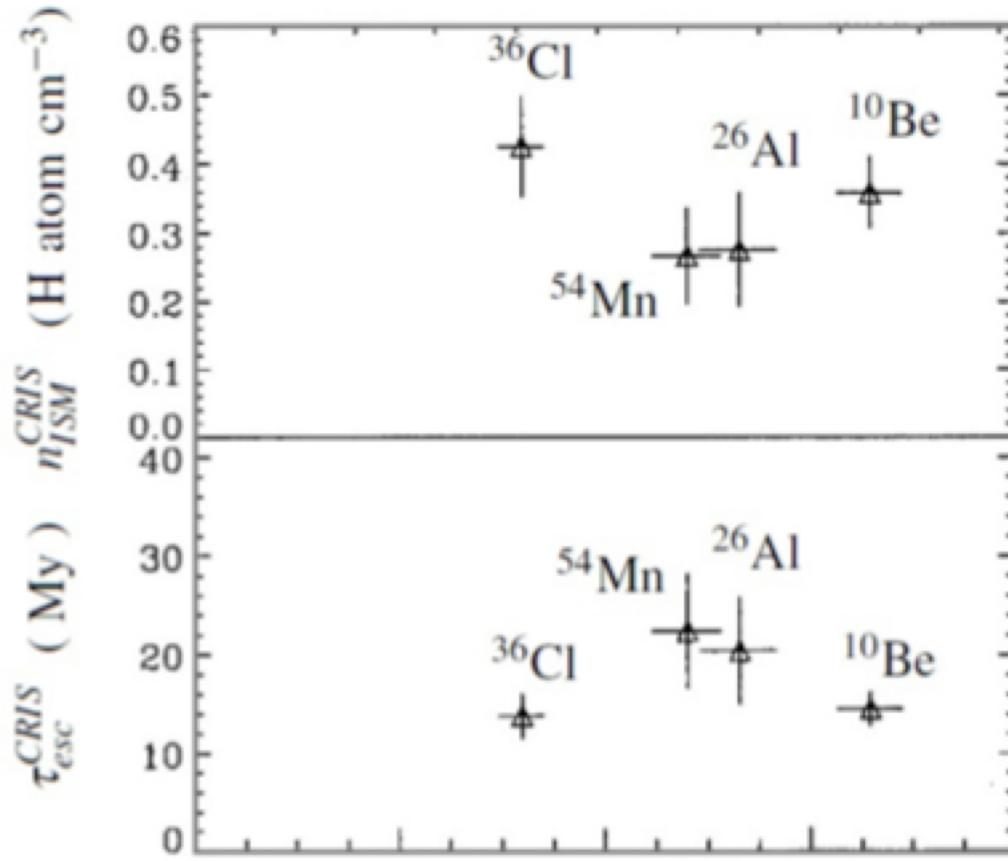
$$\tau_F \equiv t^* = 2.2 \times \tau_{10} = 8 \times 10^6 \text{ y}$$

Interpretazione delle misure del tempo di fuga in termini di modello

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

↓

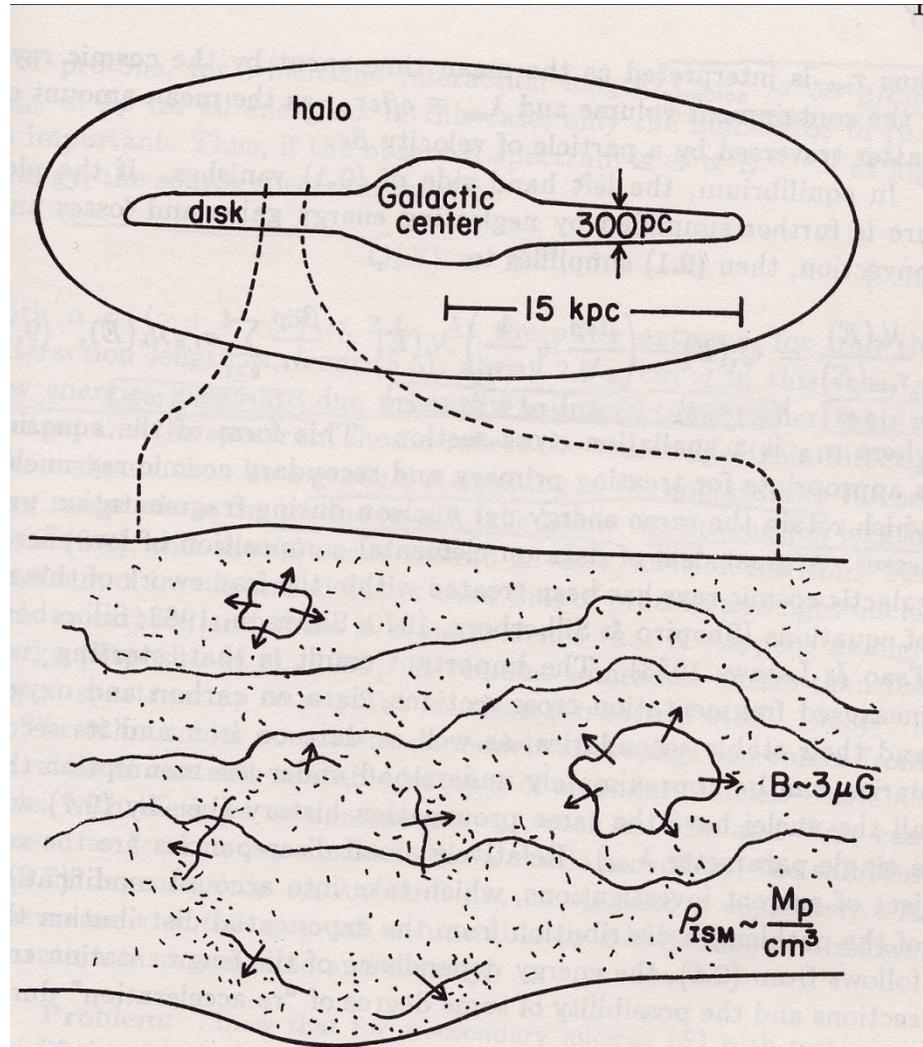
$$\rho_{ISM} = \frac{\lambda_f}{c \cdot \tau_f}$$



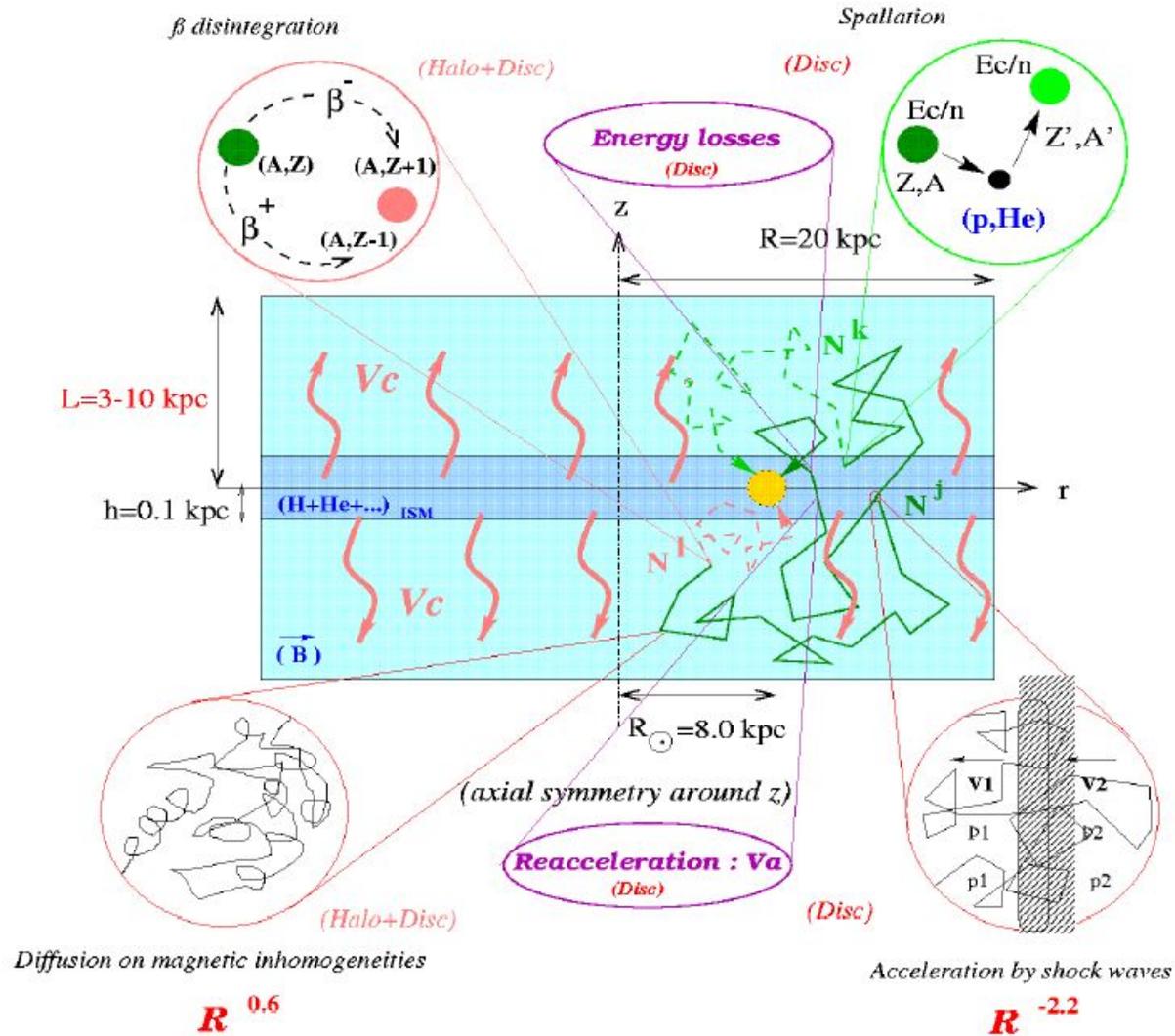
Le misure dei tempi di permanenza dei RC favoriscono scenari di propagazione nel volume con densità tipiche minori della densità media del disco galattico ($1\text{p}/\text{cm}^3$): altra evidenza *dell'alone galattico*

- 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

The diagram illustrates the cosmic ray propagation equation, with various terms labeled as follows:

- 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 $-\nabla \cdot \mathbf{u} N_i(E)$.
- Cascade**: Points to the integral term $+\frac{v\rho}{m} \sum_{k \geq i} \int \frac{d\sigma_{i,k}(E, E')}{dE} N_k(E') dE'$.
- Losses**: Points to the term $-p_i N_i$.
- Source**: Points to the term $+Q_i(E, t)$.

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

Cosmic Rays Propagation



galprop.stanford.edu
studies of cosmic rays and galactic diffuse gamma-ray emission

CODE	WEBRUN	FORUM	RESOURCES	PUBLICATIONS	CONTACTS	BUGS?
------	--------	-------	-----------	--------------	----------	-------

Search GALPROP web site

[Register](#) [Login](#)

The GALPROP code for cosmic-ray transport and diffuse emission production

GALPROP is a numerical code for calculating the propagation of relativistic charged particles and the diffuse emissions produced during their propagation. The GALPROP code incorporates as much realistic astrophysical input as possible together with latest theoretical developments. The code calculates the propagation of cosmic-ray nuclei, antiprotons, electrons and positrons, and computes diffuse γ -rays and synchrotron emission in the same framework. Each run of the code is governed by a configuration file allowing the user to specify and control many details of the calculation. Thus, each run of the code corresponds to a potentially different "model". The code itself continues to be developed and is available to the scientific community via this website.

MOTIVATION AND ACKNOWLEDGEMENTS

Discoveries and studies in cosmic-ray physics and, generally, in high-energy astrophysics are closely related to research in many areas of particle physics and cosmology: the search for dark matter, antimatter, new particles, and exotic physics; nucleosynthesis studies; the origin of the Galactic and extragalactic γ -ray diffuse emission; the formation of the large scale structure of the Universe; heliospheric modulation, and so forth. In turn, the astrophysics of cosmic rays, γ -rays, and other diffuse emissions, depends very much on the quality of the data and their proper interpretation. The quality of data from cosmic-ray experiments such as Ulysses, the Advanced Composition Explorer (ACE), the Voyagers, TIGER, the Fermi LAT (formerly GLAST), PAMELA, CREAM, BESS-Polar, AMS, and possibly ACCESS, far exceeds the accuracy of analytical propagation models, such as the "leaky-box" model that has remained one of the main research tools for the last 50 years. These missions are specifically designed to search for dark matter signals in cosmic rays and diffuse γ -rays, searches for antimatter, and to study the diffuse Galactic and extragalactic diffuse emission, over a wide energy range. Meanwhile, developments in astrophysics, such as detailed 3-dimensional maps of the Galactic gas distribution, detailed studies of composition of interstellar dust, grains, the Local Bubble, interstellar radiation and magnetic fields, and new classes of cosmic-ray sources, all have implications for the interpretation of data obtained from balloon-borne and space-based experiments. The same can be said for more accurate measurements of nuclear isotopic production cross sections and new particle data that become increasingly available. Having the latest results and theoretical knowledge distilled and easily accessible in a unified framework is advantageous for the scientific community, as well as for planning and setting the goals for new missions.

The first version of the GALPROP code was written in FORTRAN-90/77 in the mid-1990s by *Andrew W. Strong* and *Igor V. Moskalenko* and then rewritten in C++ (with the well-tested FORTRAN-77 routines remaining). *Seth W. Digel* and *Troy A. Porter* joined the project in the early 2000s with *Gulli Johannesson*, *Elena Orlando*, and *Andrey Vladimirov* as more recent additions to the team. Other people have contributed by providing libraries, expertise, and data sets over the years: *Stepan G. Mashnik*, *Olaf Reimer*, *V. S. Barashenkov*, *A. Polanski*, *R. Silberberg*, *C. H. Tsao*, and *W. R. Webber*. We remember our late colleague *Patrick Nolan* who has shared a great deal of his knowledge, time and humor with the GALPROP team.

We are grateful to *Jeff Wade* who provides valuable assistance with the system administration for the GALPROP web servers and computing cluster. We also thank *Irina V. Malkova* for her help in designing and supporting the first version of this website.

The GALPROP development team acknowledges the use of HEALPix <https://healpix.jpl.nasa.gov/> described in: K.M. Gorski et al., 2005, Ap.J., 622, p.759

This website is supported by NASA through an APRA "Laboratory Astrophysics" grant, by Stanford University, and by the GALPROP project. This is a free service to the scientific community. GALPROP source code and data sets can be freely copied, however, it is requested that in any subsequent use of the code and associated data sets be given appropriate acknowledgment.

GALPROP NEWS:

<< < 1 - 3 > >>

June 8, 2020: *The galprop cluster is up and running! It was shut down due to the UPS failure on May 8, 2020. The power is now restored.*

November 2017: We are happy to inform the community of the new version 56 of the GALPROP code and the support library GALTOOLSLIB v.1. The new version is readily available for downloads. The WebRun version will also be available soon.

August 2016: We are pleased to inform the community of the launch of a new service [HelMod](#), which can be used to seamlessly calculate the effects of the heliospheric modulation for GALPROP output files. HelMod is a complete package that calculates propagation of Galactic cosmic rays from the Termination Shock down to the Earth for an arbitrary epoch. We congratulate our colleagues with this significant step forward, and anticipate that their excellent web-site will be widely used!



<https://galprop.stanford.edu/>

Cosmic Rays Propagation



DRAGON

Diffusion Reacceleration and Advection of Galactic cosmic rays: an Open New code

<https://github.com/cosmicrays/> [✉ daniele.gaggero@uam.es](mailto:daniele.gaggero@uam.es)

[Overview](#) [Repositories 4](#) [Projects](#) [Packages](#) [People 6](#)

Popular repositories

hermes Public

HERMES is a publicly available computational framework for the line of sight integration over galactic radiative processes which creates sky maps in the HEALPix-compatible format.

● C++ ☆ 15 🍴 7

DRAGON Public

First version of the code - last update Dec 2015

● C++ ☆ 12 🍴 9

DRAGON2-Beta_version Public

Preliminary DRAGON2 with the various cross section options

● C++ ☆ 9 🍴 3

hermes-examples Public

Examples for HERMES

● Jupyter Notebook ☆ 5 🍴 1

People



Top languages

● C++ ● Jupyter Notebook

Most used topics

cosmic-rays gamma-ray-astronomy
neutrino-astronomy

Repositories

Find a repository... Type ▾ Language ▾ Sort ▾

hermes Public

HERMES is a publicly available computational framework for the line of sight integration over galactic radiative processes which creates sky maps in the HEALPix-compatible format.

● C++ ☆ 15 📄 GPL-3.0 🍴 7 🕒 6 (1 issue needs help) 🐞 0 Updated 2 days ago

DRAGON2-Beta_version Public

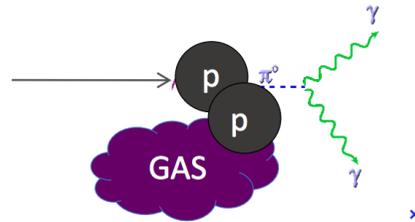
Preliminary DRAGON2 with the various cross section options

● C++ ☆ 9 📄 GPL-2.0 🍴 3 🕒 4 🐞 0 Updated on Sep 30, 2021

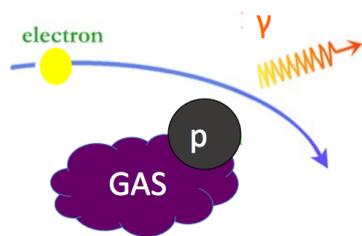
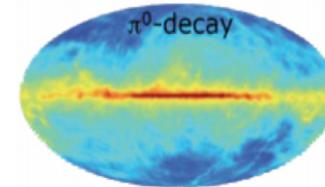
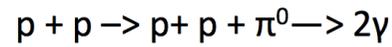
<https://github.com/cosmicrays>

Cosmic Rays Propagation

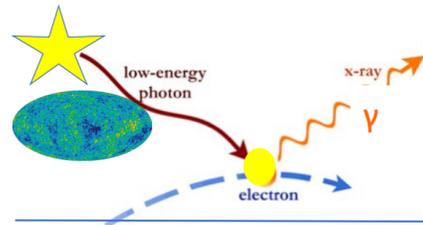
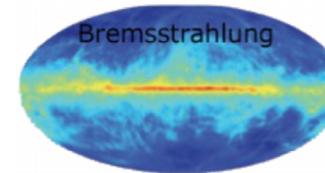
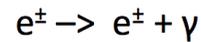
Interstellar Emission Mechanisms



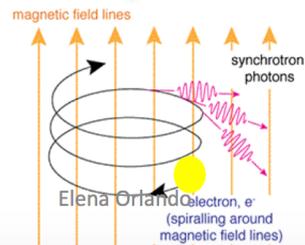
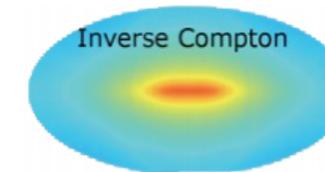
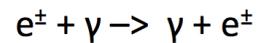
Pion decay



Bremsstrahlung



Inverse Compton



Synchrotron

