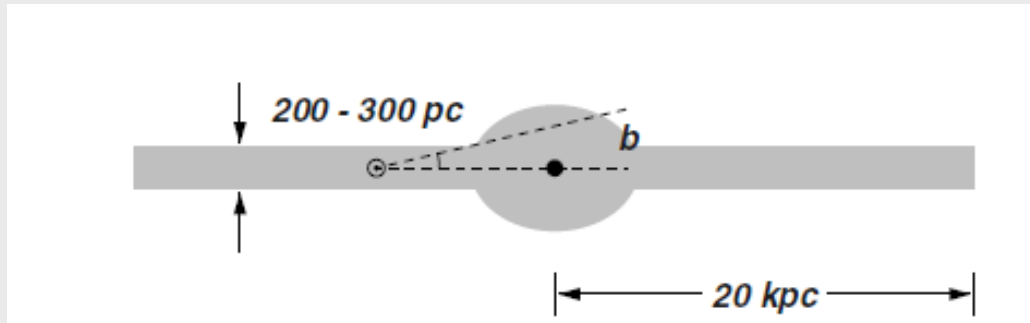


Πηγές, επιτάχυνση Κοσμικών Ακτίνων

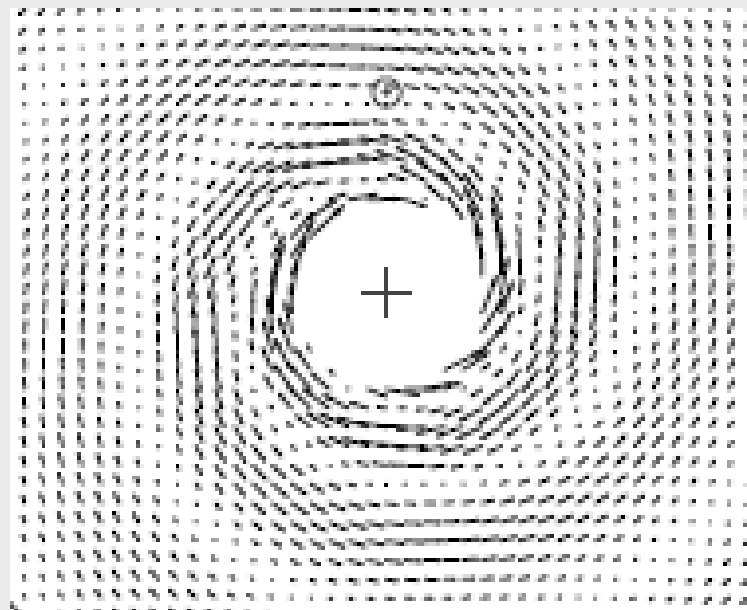
Πηγές

Διαστάσεις Γαλαξία



Διαστάσεις Γαλαξία:
Ακτίνα 15-20 kpc, ύψος
δίσκου 200-300 pc ($1 \text{ pc} = 3,1 \cdot 10^{16} \text{ m}$). Ο ήλιος
βρίσκεται σε απόσταση
8,5 kpc από το κέντρο του
γαλαξία.

Το Μαγνητικό πεδίο είναι
παγιδευμένο κατά μήκος των
σπειρών. Περίπου $3 \cdot 10^{-6}$
Gauss



Μαγνητικό πεδίο γαλαξία

Πυκνότητα ύλης

Πυκνότητα $H \approx 1H/cm^3$

50% ουδέτερο

Μοριακά νέφη $\cdot 10^3$

Άλως ≈ 700 pc πυκνότητα $\approx .031H/cm^3$

Τα βέλη δείχνουν τις πιθανές περιοχές επιτάχυνσης που είναι τα κατάλοιπα των υπερκαινοφανών (SNR), που επεκτείνονται μέσα στην διαστρική ύλη.

Propagation

119

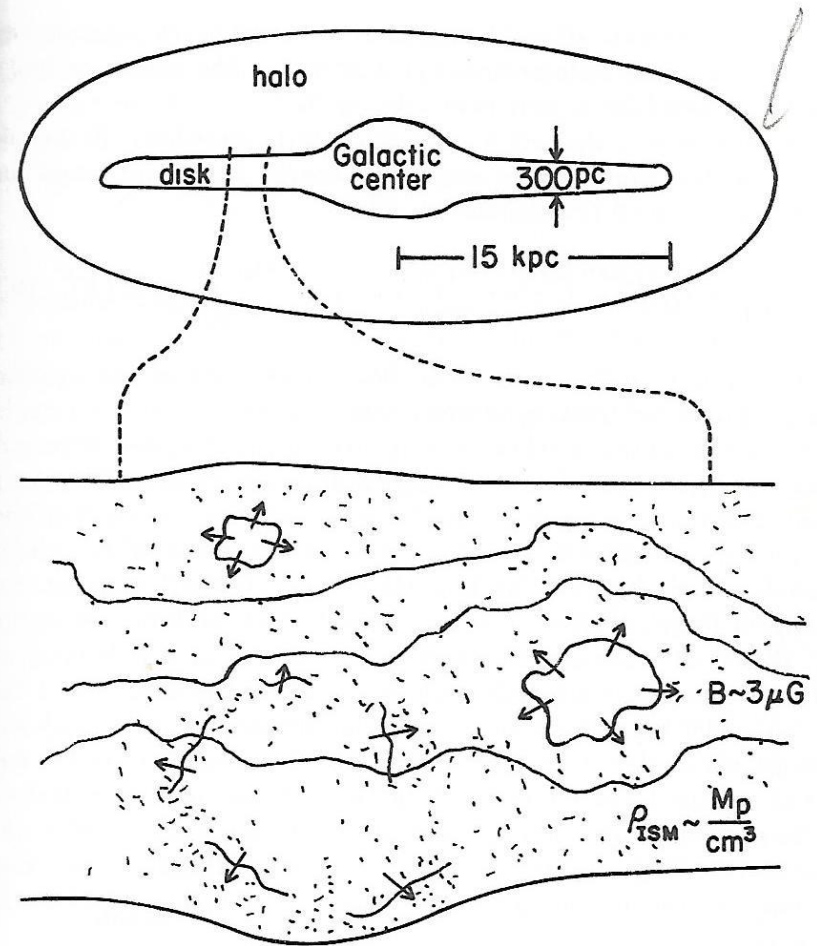


Figure 9.2: Schematic view of the galaxy seen edge on. In the exploded section of the disk, arrows indicate possible regions of cosmic ray acceleration as supernova remnants expand into the interstellar medium.

Μαγνητικό πεδίο Γαλαξία

Το μαγνητικό πεδίο παγιδεύεται στο πλάσμα το οποίο συμπεριφέρεται σαν μαγνητο-υδροδυναμικό υγρό. Παράδειγμα: Στις σπείρες του γαλαξία το μαγνητικό πεδίο είναι $3 \cdot 10^{-6}$ Gauss. Η πυκνότητα ενέργειας του μαγνητικού πεδίου είναι

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{B^2}{8\pi}$$

$$\frac{B^2}{8\pi} \approx 0,4 \times 10^{-12} \text{ erg / cm}^3$$

Η ενέργεια είναι συγκρίσιμη με την πυκνότητα ενέργειας των κοσμικών ακτίνων $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ erg/cm}^3$!

Μοντέλο διάδοσης (leaky box)

- Οι Κ.Α. παράγονται από τις πηγές (Πιθανότερες πηγές είναι οι υπερκαινοφανείς) .
- Στη διαδρομή αντιδρούν με την διαστρική ύλη . Μετά από κάποιο χρόνο διαφεύγουν από τον γαλαξία.
- Από τις δευτερογενείς αντιδράσεις παράγονται νέα σωματίδια μικρότερης ενέργειας.
- Το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία. Όσα σωματίδια παράγονται τόσα χάνονται.

Διαφυγή ακτίνων

Αν αγνοήσουμε τη δευτερογενή παραγωγή σωματιδίων ο αριθμός σωματιδίων N με ενέργεια E :

$$N(E, t) = N_0(E) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{esc}}\right)$$

όπου τ_{esc} ο μέσος χρόνος διαφυγής από το «κουτί».

Η μέση πυκνότητα που διασχίζει είναι $\lambda_{esc} = \rho \beta c \tau_{esc}$

όπου ρ η πυκνότητα της διαστρικής ύλης και βc η ταχύτητα του σωματιδίου

Από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει ότι το μήκος διαφυγής στις μικρές ενέργειες είναι σταθερό (10.8 g/cm^2) και ανεξάρτητο από το είδος του πυρήνα. (C, O, Fe, κ.α.)

Για $R > 4 \text{ GV}$

$$\lambda_{esc} = 10.8 \beta \times \left(\frac{4}{R}\right)^\delta \text{ g/cm}^2 \quad \delta = 0.6$$

Αντί για χρόνο διαφυγής χρησιμοποιούμε μήκος διαφυγής, για να είναι συγκρίσιμο με το μήκος αντίδρασης.

Ελάττωση αριθμού

$$N(E, x, t) = N \exp\left(-\left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{\gamma\tau_0}\right)\right)$$

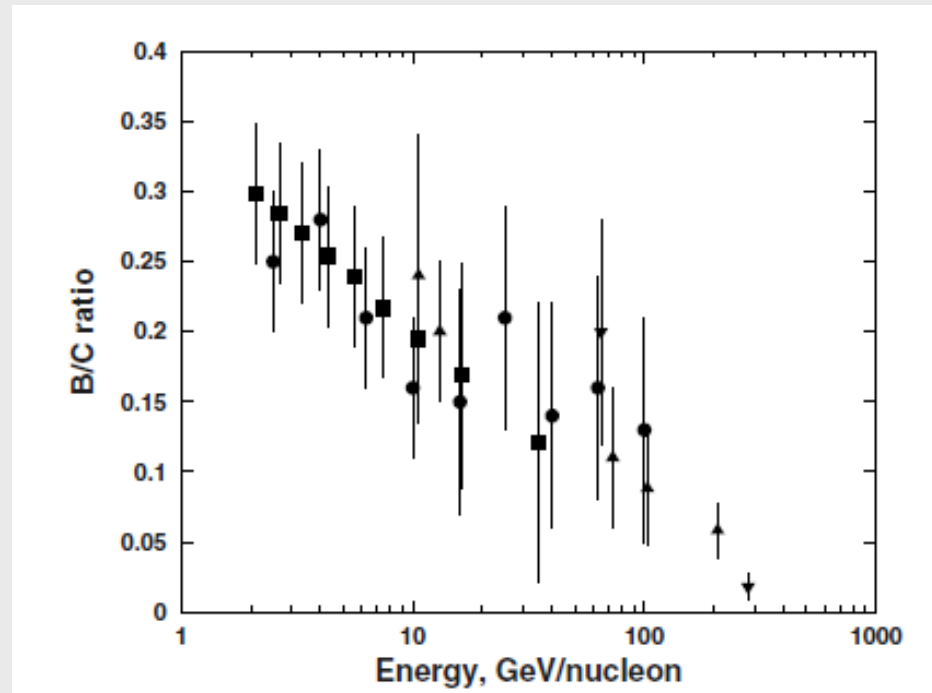
Αντίδραση

Διάσπαση

Για πρωτόνια, το μήκος αντίδρασης είναι 50,8 g/cm²,
ενώ δεν διασπώνται. Άρα ο σημαντικότερος παράγοντας
απώλειας για τα πρωτόνια είναι η διαφυγή.

Για πυρήνες άνθρακα το μήκος αντίδρασης είναι 6,4 g/cm² και
για πυρήνες σιδήρου 2,6 g/cm².

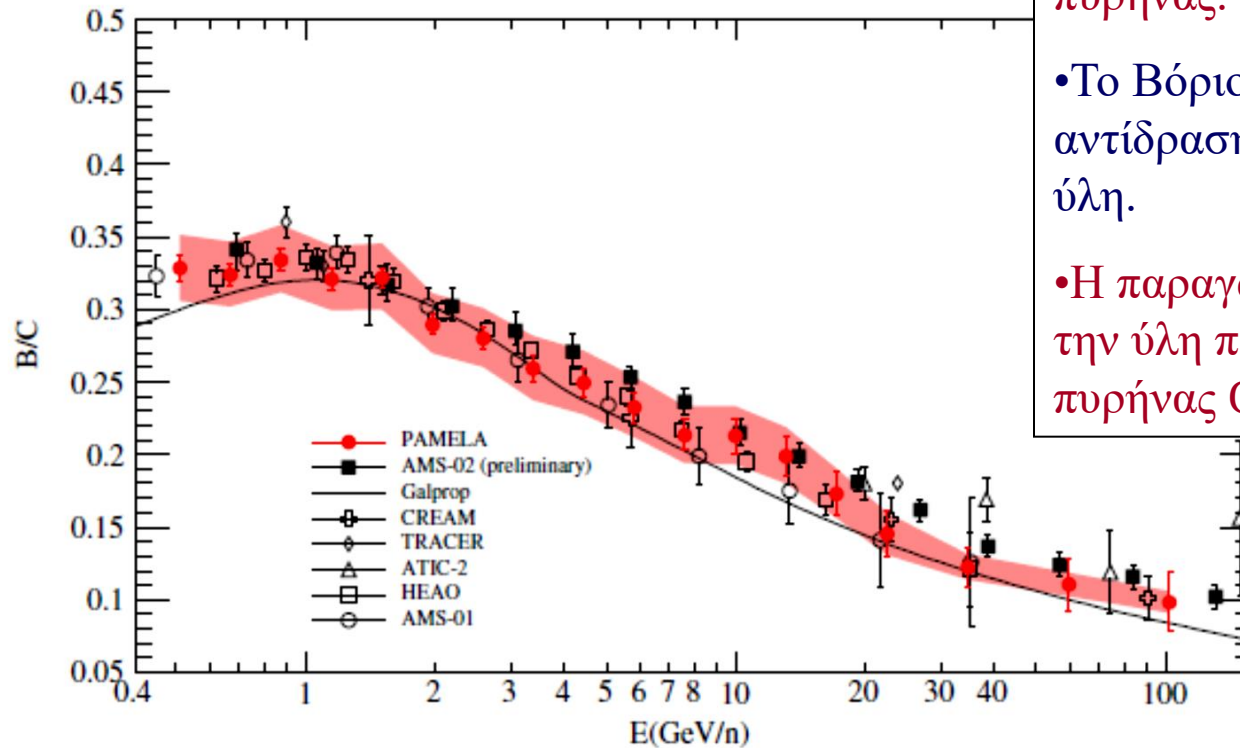
Λόγος αριθμού πυρήνων βορίου προς αριθμό πυρήνων άνθρακα, σαν συνάρτηση της ενέργειας.



Ο Άνθρακας θεωρείται πρωτογενές στοιχείο, ενώ το Βόριο δημιουργείται από το spallation του Άνθρακα.

Το ποσοστό του Βορίου εξαρτάται από το μήκος της διαδρομής του πυρήνα άνθρακα στον γαλαξία,
Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η διαδρομή είναι μικρότερη στις μεγάλες ενέργειες άρα και ο χρόνος παραμονής των πυρήνων.

Λόγος B/C από το πείραμα PAMELA



- Ο Άνθρακας πρωτογενής πυρήνας.
- Το Βόριο παράγεται από την αντίδραση του C με την γαλαξιακή ύλη.
- Η παραγωγή B εξαρτάται από την ύλη που θα συναντήσει ο πυρήνας C, σε όλη τη διαδρομή.

Λόγος πυρήνων Βορίου προς Άνθρακα όπως μετρήθηκε από το Πείραμα PAMELA. $\gamma_B = 3.01 \pm 0.13$ για το Βόριο $\gamma_C = 2.72 \pm 0.06$ για τον Άνθρακα.

Στις υψηλές ενέργειες παράγεται μικρότερο ποσοστό Βορίου άρα η διαδρομή είναι μικρότερη.

Απόσπασμα από τη δημοσίευση

primary production ratios as a function of energy.

The simplest interpretation of the energy dependence of the secondary to primary ratio is that the path length of the primary particles through the interstellar gas changes with energy.

Suppose the energy dependence of the path length for escape from the Galaxy is of the form $\xi_e(E) = \xi_0(E/E_0)^{-\alpha}$, so that, if α is positive, the path length decreases at high energies.

We therefore include a loss term of the form $-NL/\xi_e(E)$ on the right-hand side of (15.8) to represent the escape of particles from the system.

Let us study the steady state

solution $dNL/dt = 0$, meaning the abundances reach a steady value under the combination of spallation losses, escape from the system and injection from sources,

In the high energy limit, the escape path length is much less than the spallation path length

$$\lambda_{\text{esc}} \ll \lambda_{\text{int}}$$

Υπολογισμός χρόνου διαφυγής

Μετρώντας τον λόγο ενός ασταθούς ισοτόπου σε προς το σταθερό.

Το ^{10}Be είναι ασταθές με χρόνο ζωής $1,6 \cdot 10^6 \text{ y}$ και συγκρίνουμε το ποσοστό του σε σχέση με το σταθερά ^9Be και ^7Be .

Δορυφορικές μετρήσεις (IMP, Voyager) δίνουν χρόνους $8 - 30 \cdot 10^6 \text{ y}$

Άλλες μετρήσεις:	(Ulysses)	$^{26}\text{Al}/\text{Al}$	$16 \pm 3 \cdot 10^6 \text{ y}$
		$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$	$11 \pm 6 \cdot 10^6 \text{ y}$

Μέσος όρος;

$\tau_{\text{esc}} = 15 \pm 2 \cdot 10^6 \text{ y}$	$\rho_{\text{ISM}} = 0.39 \pm 0.05 \text{ cm}^{-3}$	$d_{\text{halo}} = 2.8 \pm 0.1 \text{ kpc}$
---	---	---

Υπολογισμός χρόνου παραμονής στον γαλαξία

Τα ποσοστά των ισοτόπων μας δίνουν την εκτίμηση της «ηλικίας» των ακτίνων δηλαδή τον χρόνο που παραμένουν στον γαλαξιακό χώρο.

Ειδικότερα ο λόγος Be^{10}/Be . Το Be^{10} έχει χρόνο ζωής $1,6 \cdot 10^6$ y παράγεται στο ίδιο ποσοστό με το σταθερό Be .

Ο χρόνος ζωής του ισοτόπου είναι μικρότερος από τον χρόνο παραμονής στον γαλαξία, άρα μετρούμε μικρότερο ποσοστό.

Από το μετρούμενο ποσοστό προκύπτει ότι ο χρόνος τ_{esc} είναι 8-30 εκατομμύρια χρόνια και $\lambda_{\text{esc}} = 10 \text{ g/cm}^2$.

Επίσης $\rho_{\text{ist}} = 0,2-0,3 \text{ gr/cm}^3$, μικρότερη από την πυκνότητα του γαλαξιακού δίσκου. Συμπεραίνουμε ότι χώρος που κινούνται τα σωματίδια είναι μεγαλύτερος από το πάχος του γαλαξία και επεκτείνεται στην περιοχή της άλω.

Το πάχος της άλω προκύπτει **2,8 parsec** σε σύγκριση με το πάχος του γαλαξιακού δίσκου **0,3 – 0,5 parsec**

Υπολογισμός χρόνου διαφυγής

Η υπολογιζόμενη πυκνότητα διαστρικής ύλης ($\rho_{\text{ISM}} = 0.39 \pm 0.05 \text{ cm}^{-3}$) είναι μικρότερη από την πυκνότητα της ύλης στον γαλαξία, άρα συμπεραίνουμε ότι τα σωματίδια ταξιδεύουν σε μεγάλη απόσταση από τον γαλαξιακό δίσκο, 500-700 psc.

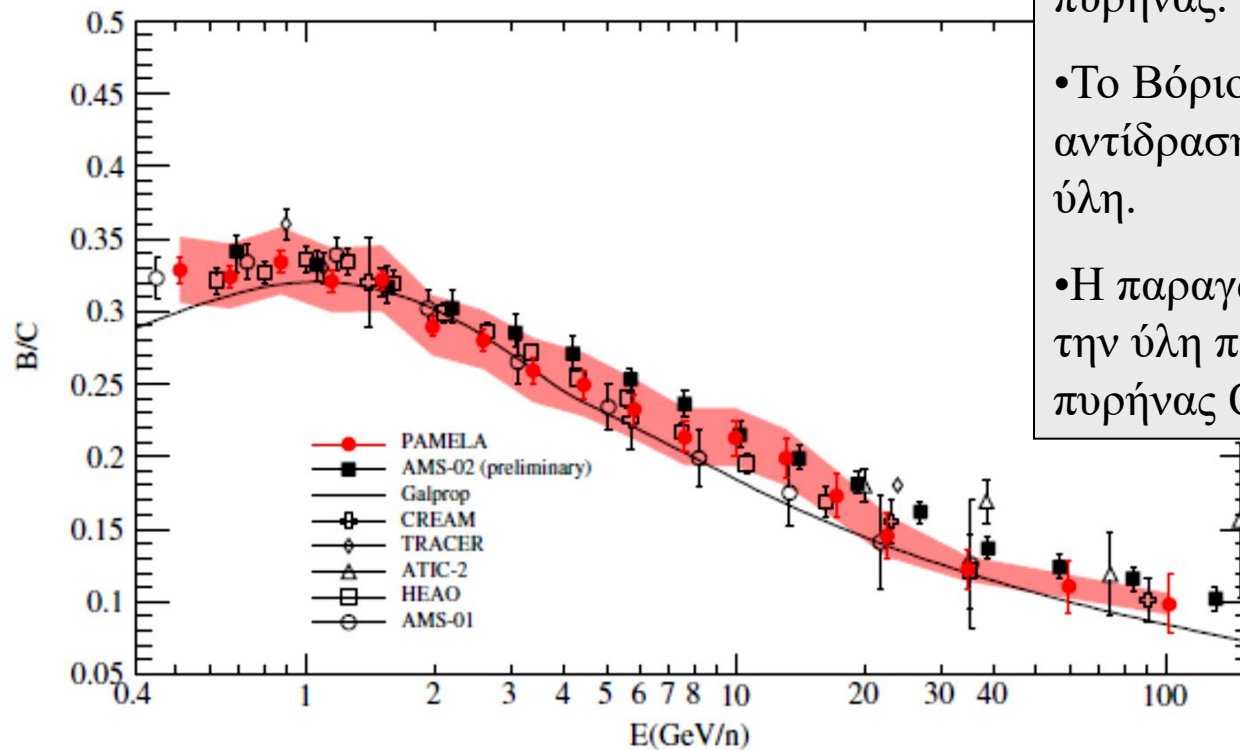
επίσης υπολογίζουμε το πάχος της halo που περιβάλλει τον γαλαξία ($d_{\text{halo}} = 2.8 \pm 0.1 \text{ kpc}$).

Χρόνος Παραμονής

Για ακαμψίες μικρότερες από 4 GV ο χρόνος παραμονής είναι ανεξάρτητος από την ενέργεια του σωματιδίου. Το μήκος διαφυγής είναι 10.8 g/cm^2

Ο τύπος δίνει για πρωτόνια με ακαμψία 10 GV έχει $=6,2 \text{ g/cm}^2$ ενώ ένας πυρήνας ηλίου ίδιας ακαμψίας $9,5 \text{ g/cm}^2$.

Λόγος B/C νέα αποτελέσματα.



- Ο Άνθρακας πρωτογενής πυρήνας.
- Το Βόριο παράγεται από την αντίδραση του C με την γαλαξιακή ύλη.
- Η παραγωγή B εξαρτάται από την ύλη που θα συναντήσει ο πυρήνας C, σε όλη τη διαδρομή.

Λόγος πυρήνων Βορίου προς Άνθρακα όπως μετρήθηκε από το Πείραμα Pamelas. $\gamma_B=3.01\pm0.13$ για το Βόριο $\gamma_C=2.72\pm0.06$ για τον Άθρακα.

Στις υψηλές ενέργειες παράγεται μικρότερο ποσοστό Βορίου άρα η διαδρομή είναι μικρότερη.

Επιτάχυνση στα Μαγνητικά Νέφη, Κύμα Κρούσης

Τα κελύφη των σουπερνόβα είναι οι πιο πιθανοί τόποι επιτάχυνσης επειδή επεκτείνονται με μεγάλη ταχύτητα, έχουν ισχυρό μαγνητικό πεδίο, και μεγάλο χρόνο ζωής.

Τα κοσμικά σωματίδια επιταχύνονται στο κρουστικό κύμα που δημιουργείται από την εκτινασσόμενη ύλη στους υπερκαινοφανείς. Ένα μικρό ποσοστό της ενέργειας του κρουστικού κύματος μεταφέρεται στις κοσμικές ακτίνες.

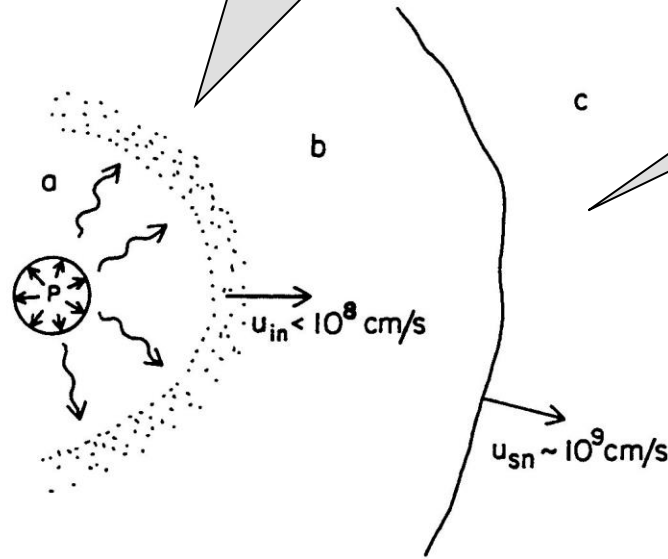
Κύμα κρούσης σε Υ.Κ.

Εκτοξευμένη ύλη που
επεκτείνεται

Acceleration to $> 100 \text{ TeV}$

167

Άνεμος
Πάλσαρ



Διαστρικό
μέσο.

Figure 12.2: A very young supernova remnant: (a) shocked pulsar wind; (b) expanding ejecta; (c) interstellar medium (perhaps modified by wind of progenitor star). Straight and wavy arrows represent, respectively, unshocked and shocked pulsar wind. From Gaisser, Harding & Stanev, 1989.

Υπολογισμός ισχύος που διαφεύγει από τον γαλαξία λόγω κοσμικών ακτίνων. (Ginzbourg)

Χρόνος παραμονής ακτίνων στον γαλαξία: $t_{GD} = 10^7$ γ

Πυκνότητα ενέργειας κοσμικών ακτίνων : $\rho_E = 0,5 \text{ eV/cm}^3$

Θεωρούμε το γαλαξία δίσκο ακτίνας 15 kpc και ύψους 500 pc

Όγκος Γαλαξία: $V_{GD} = 10^{67} \text{ cm}^3$

Οι ακτίνες διαφεύγουν από το Γαλαξία και η ισχύς που διαφεύγει από τον Γαλαξία είναι:

$$L_{CR} = (V_{GD} * \rho_E) / t_{GD} = 3 * 10^{40} \text{ erg/s}$$

Αρκούν **3 εκρήξεις σουπερνόβα με μάζα 10 ηλιακών**. Το κέλυφος τους απλώνεται με ταχύτητα $5 * 10^8 \text{ cm/century}$.

Ελευθερώνουν ενέργεια $Q = 3 * 10^{42} \text{ erg/s}$.

Περίπου 100 φορές την ενέργεια που διαφεύγει λόγω των κοσμικών ακτίνων. Αρκεί λοιπόν ένας μηχανισμός με απόδοση 1% για να παραχθούν οι παρατηρούμενες κοσμικές ακτίνες.

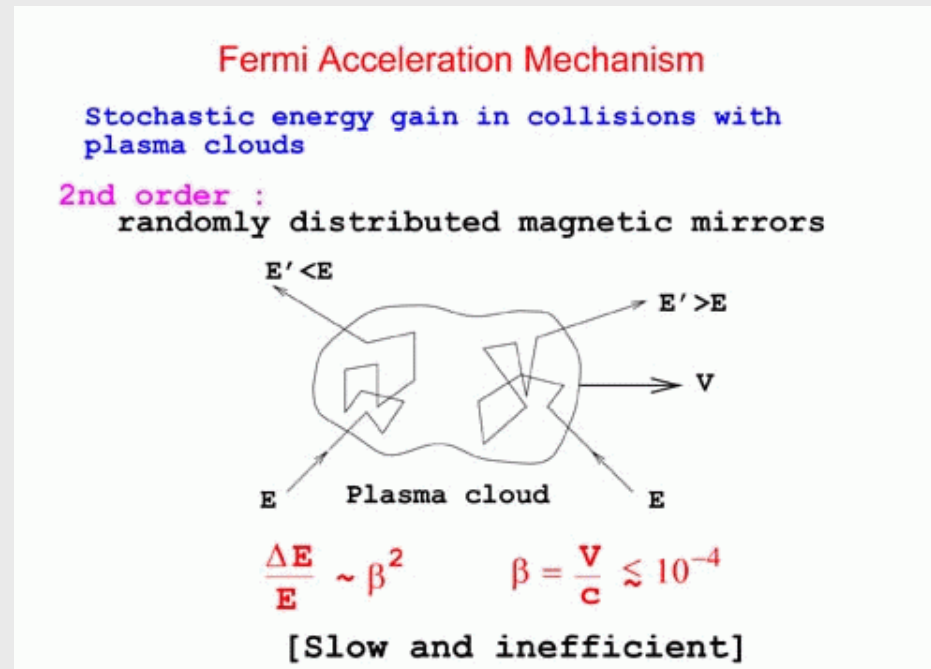
Επιτάχυνση Κοσμικών Ακτίνων, μηχανισμός Fermi.

- Η βασική ιδέα είναι ότι η επιτάχυνση προκαλείται από διαστρικά νέφη, στα οποία υπάρχουν τυχαία μαγνητικά πεδία.
- Ξεκινάμε με ένα φορτισμένο σωματίδιο που εισέρχεται σε ένα «ακίνητο» νέφος. Το σωματίδιο θα διαγράψει κάποια πολύπλοκη τροχιά και θα εξέλθει με μία τυχαία γωνία. Όμως επειδή οι δυνάμεις που ασκούνται είναι μαγνητικές, η ενέργεια του διατηρείται.
- Αν το νέφος κινείται στην αρχική ταχύτητα του σωματιδίου προστίθεται και η ταχύτητα του νέφους!
- Επειδή οι ταχύτητες είναι πολύ μεγάλες, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τους σχετικιστικούς τύπους!
- Υπενθυμίζουμε τους μετασχηματισμούς ενέργειας στη σχετικότητα: (θ η γωνία που σχηματίζει η ορμή του σωματιδίου με την ταχύτητα του νεφους στο σύστημα εργαστηρίου)

$$E' = \gamma(E - \beta P \cos \theta)$$

$$E = \gamma(E' + \beta P' \cos \theta')$$

Επιτάχυνση σε νέφη, μηχανισμός Fermi 2ης τάξης

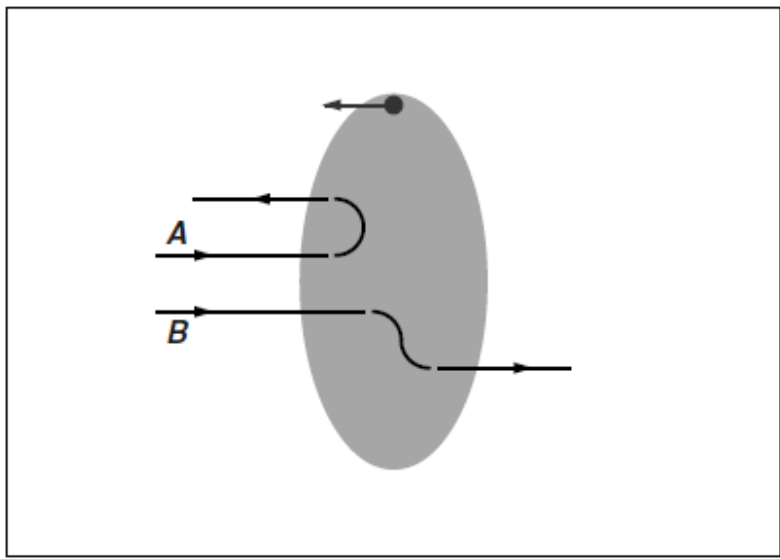


$$\xi \equiv \frac{\Delta E}{E} = \frac{E_1 - E_0}{E_0} = \gamma_{cl}^2 (1 + \beta_{cl}^2) - 1 \quad \text{Μέση τιμή} \quad \langle \xi \rangle = \frac{4}{3} \beta_{cl}^2$$

Μετά από n κρούσεις $E_n = E_0 (1 + \xi)^n$

Επειδή η μεταβολή της ενέργειας εξαρτάται από το τετράγωνο του β , ο μηχανισμός δεν είναι αποδοτικός

Υπολογισμός



Απλοποιημένο διάγραμμα της ιδέας του Fermi. Το νέφος κινείται με ταχύτητα u_{cl} , το σωματίδιο εισέρχεται με ενέργεια, ορμή (E_1, p_1) και βγαίνει με (E_2, p_2) στην αντίθετη φορά.

E_1 η ενέργεια εισόδου και E_2 η ενέργεια εξόδου

$$E_1 \approx p_1 c$$

u_{cl} ταχύτητα νέφους $\beta_{cl} = \frac{u_{cl}}{c}$

E_1^* Ενέργεια στο σύστημα νέφους

$$E_1^* = \gamma_{cl}(E_1 + u_{cl} p_1)$$

Αντικαθιστώντας από την (1)

$$\rightarrow E_1^* = \gamma_{cl}(E_1 + \beta_{cl} E_1) = \gamma_{cl} E_1 (1 + \beta_{cl})$$

μετά από ελαστική "κρούση":

$$E_2^* = E_1^*$$

$$\rightarrow E_2^* = \gamma_{cl}(E_1^* + \beta_{cl} p_1^*) = \gamma_{cl} E_1^* (1 + \beta_{cl})$$

Τελικά

$$E_2 = \gamma_{cl}^2 E_1 (1 + \beta_{cl}^2)^2$$

Τελικά :

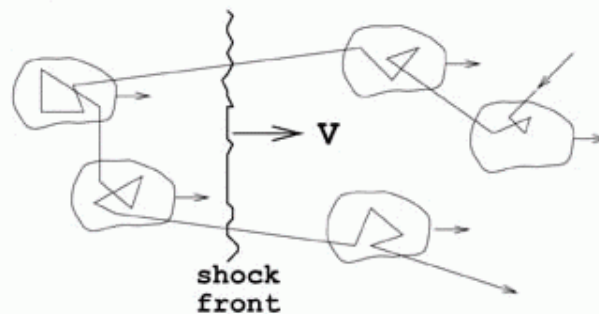
$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_2 - E_1}{E_1} = \gamma_{cl}^2 (1 + \beta_{cl}^2)^2 - 1$$

Τελικά :

Μηχανισμός στοχαστικής επιτάχυνσης 1ης τάξης

Σκέδαση σε κύμα κρούσης

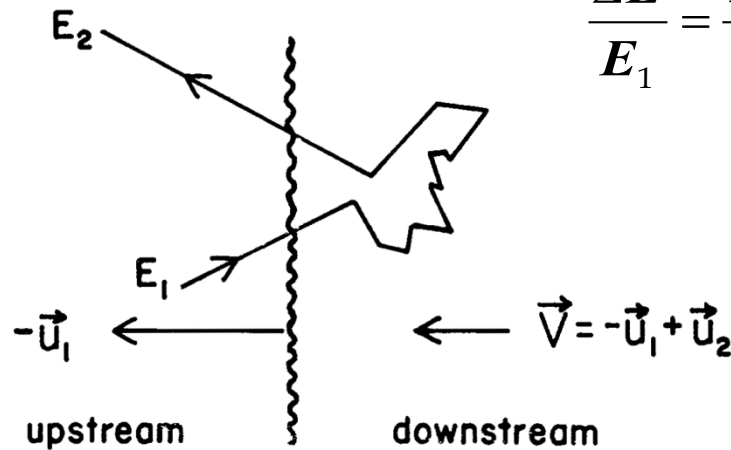
1st order :
acceleration in strong shock waves
(supernova ejecta, RG hot spots...)



$$\frac{\Delta E}{E} \sim \beta \quad \beta = \frac{v}{c} \lesssim 10^{-1}$$

Υπολογισμός για επίπεδο κύμα κρούσης

Acceleration



$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{1 - \beta \cos \theta_1 + \beta \cos \theta'_2 - \beta^2 \cos \theta_1 \cos \theta'_2}{1 - \beta^2} - 1$$

$$V = -u_1 + u_2$$

$$|u_2| < |u_1|$$

$$\beta = \frac{V}{c}$$

Figure 11.2: Acceleration at a plane shock front.

Μέση τιμή του $\cos \theta'$

$$\frac{dn}{d \cos \theta'_2} = 2 \cos \theta'_2 \quad 0 \leq \cos \theta'_2 \leq 1$$

$$\rightarrow \langle \cos \theta'_2 \rangle_b = \frac{2}{3}$$

Υπολογισμός για επίπεδο κύμα κρούσης

$$\frac{\langle \Delta E \rangle_2}{E_1} = \frac{1 - \beta \cos \theta_1 + \frac{2}{3} \beta - \frac{2}{3} \beta^2 \cos \theta_1}{1 - \beta^2} - 1$$

β) Για το κύμα η κατανομή του $\cos \theta_1$ είναι η προβολή μιας ισοτροπικής ροής σε ένα επίπεδο με $-1 \leq \cos \theta_1 \leq 0$ έτσι $\langle \cos \theta_1 \rangle_b = -\frac{2}{3}$

Τελικά το σωματίδιο κερδίζει ενέργεια με ρυθμό: $\xi \cong \frac{4}{3} \beta = \frac{u_S - u_R}{c}$

Συνοπτικά

Οι μηχανισμοί που περιγράψαμε αποτελούν βασικά μοντέλα για την επιτάχυνση κοσμικών σε νέφη και σε κύματα κρούσης που παράγονται μετά από τη έκρηξη SN.

Αντίστοιχα φαινόμενα εμφανίζονται στη περιοχή κοντά στον πάλσαρ (Pulsed Wind Nebulae), σε διαδικούς αστέρες πάλσαρ, ή στους πίδακες ενεργών γαλαξιών.

Στην πράξη δεν αρκούν για να περιγράψουν συνολικά τους μηχανισμούς και συμπληρώνονται με διάφορα μοντέλα.

Για τους μηχανισμούς παραγωγής ακτίνων γ πολύ υψηλών ενεργειών, θα μιλήσουμε στο αντίστοιχο κεφάλαιο.