

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)

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

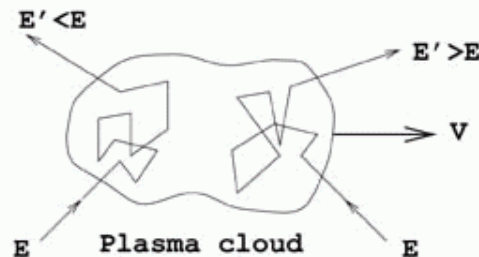
$$E = \gamma (E' + \beta P' \cos \theta')$$

Επιτάχυνση σε νέφη, μηχανισμός Fermi 2ης τάξης

Fermi Acceleration Mechanism

Stochastic energy gain in collisions with plasma clouds

2nd order :
randomly distributed magnetic mirrors



$$\frac{\Delta E}{E} \sim \beta^2 \quad \beta = \frac{V}{c} \lesssim 10^{-4}$$

[Slow and inefficient]

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

$$\text{Μετά από } n \text{ κρούσεις} \quad E_n = E_0 (1 + \xi)^n$$

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

Υπολογισμός για συνγραμμική κρούση

152

11.2. Shock acceleration

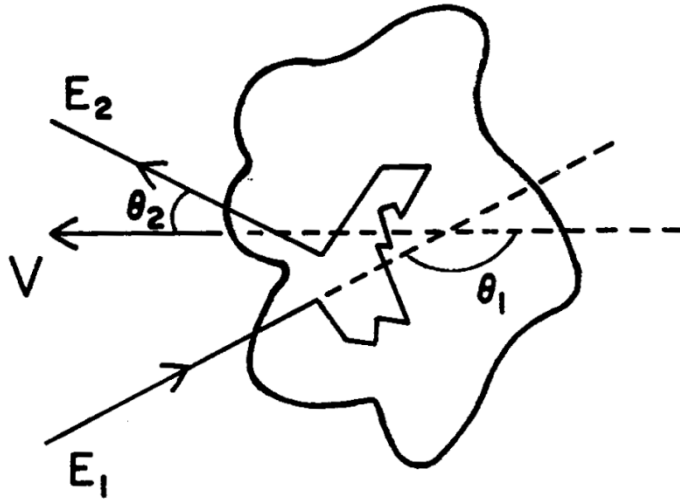


Figure 11.1: Acceleration by a moving, partially ionized gas cloud.

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":

$$E_2^* = E_1^*$$

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

Τελικά

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

Τελικά:

$$\frac{\Delta E}{E_1} \prec \beta_{cl}^2$$

Επαναλαμβάνουμε τον υπολογισμό, γωνία εισόδου θ_1 γωνία εξόδου θ_2' .

$$E^* = \gamma_{cl}(E_0 + \beta_{cl} p_0 \cos \theta_0)$$

$$E_1 = \gamma_{cl}(E_0^* + \beta_{cl} p_0^* \cos \theta_1')$$

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{1 - \beta \cos \theta_1 + \beta \cos \theta_2' - \beta^2 \cos \theta_1 \cos \theta_2'}{1 - \beta^2} - 1$$

Στο σύστημα κέντρου μάζας η κατανομή της γωνίας εξόδου είναι ισότροπη.

$$\frac{dn}{d \cos \theta_2'} = \text{constant} \quad -1 \leq \cos \theta_2' \leq 1$$

$$\rightarrow \langle \cos \theta_2' \rangle = 0$$

Υπολογίζουμε τη μέση τιμή του $\cos \theta_1$. Η πιθανότητα σύγκρουσης είναι ανάλογη της σχετικής ταχύτητας

$$\frac{dn}{d \cos \theta_1} = \frac{c - V \cos \theta_1}{c} \quad -1 \leq \cos \theta_2' \leq 1$$

$$\rightarrow \langle \cos \theta_1 \rangle_a = -\frac{V}{2c}$$

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

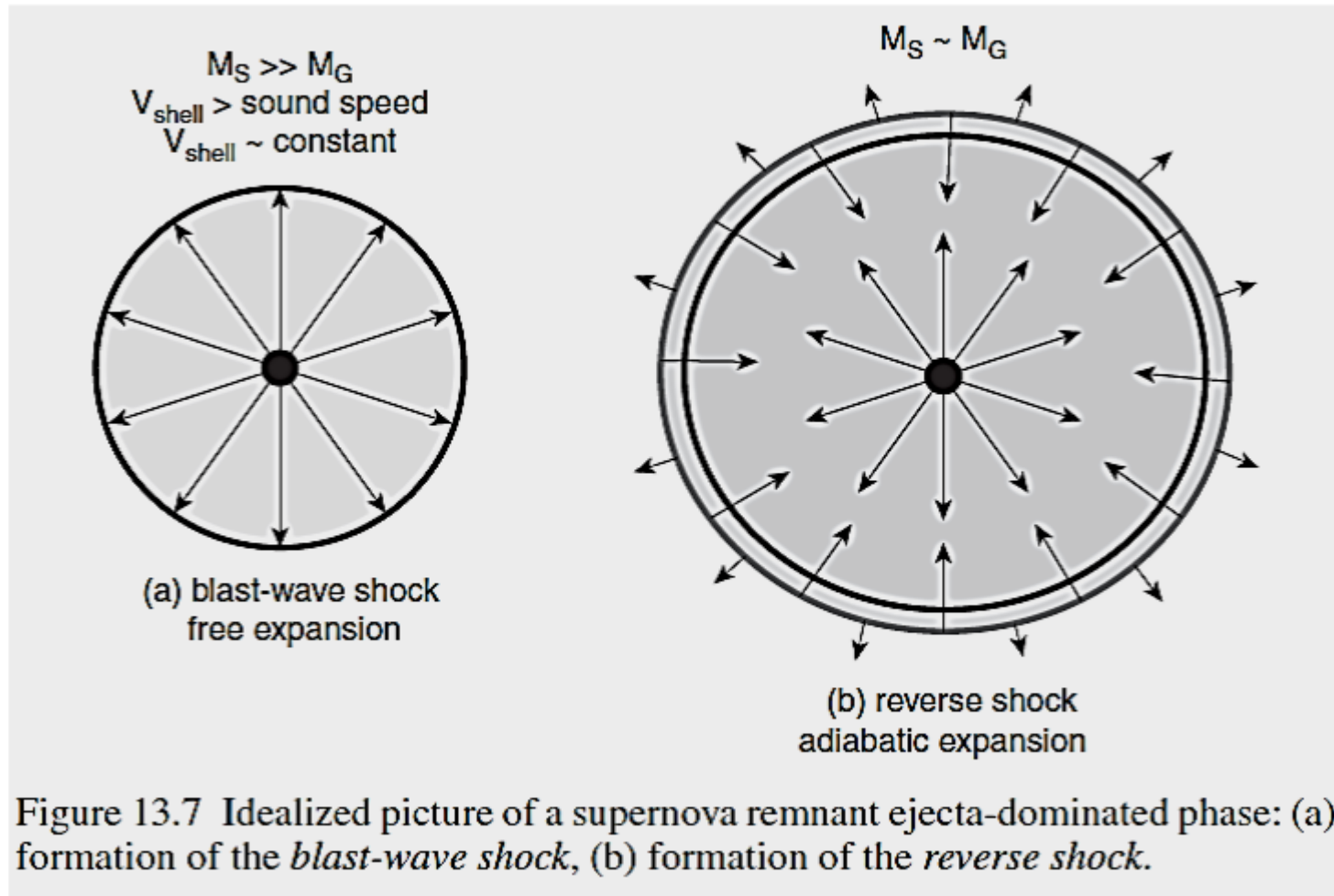
Τελικά:

$$\xi = \frac{1 + \frac{1}{3} \beta^2}{1 - \beta^2} - 1 \approx \frac{4}{3} \beta^2$$

Μηχανισμός Fermi 2ης τάξης

- Ένα σωματίδιο μπορεί να κερδίσει ενέργεια ή ακόμη να χάσει ενέργεια ανάλογα με την γωνία εξόδου. Στον μέσον όρο παρουσιάζεται κέρδος.
Καταλαβαίνετε την αιτία;
- Ο μηχανισμός αυτός χρειάζεται μεγάλο αριθμό νεφών που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα. Αρχικά ο Fermi υπέθεσε ότι ολόκληρος ο γαλαξίας λειτουργεί σαν χώρος επιτάχυνσης. Ο μηχανισμός αυτό είναι αργός λόγω του β^2 . Επίσης η τελική ενέργεια εξαρτάται από τον χρόνο ζωής της περιοχής επιτάχυνσης.
- Υπάρχουν ενδείξεις ότι ο μηχανισμός αυτός λειτουργεί σε περιοχές με πολλά νέφη, όπως στο εσωτερικό του κελύφους ορισμένων υπερκαινοφανών.

Στάδια δημιουργίας κύματος κρούσης



Επεξήγηση

Στάδιο ελεύθερης εξάπλωσης.

Το υλικό που εκτοξεύεται από τον Σ.Ν. δημιουργεί κρουστικό κύμα που διαδίδεται στο μέσο που περιβάλλει τον Σ.Ν. με ταχύτητα v_{sh} μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ήχου στο μέσο αυτό.

Για μάζα $10M_0$, πυκνότητα διαστρικής ύλης 1 g/cm^3 , το στάδιο αυτό διαρκεί περίπου 1000 χρόνια και η ταχύτητα εξάπλωσης $5 \times 10^6 \text{ m/s}$.

Στάδιο αδιαβατικής εξάπλωσης.

Το κρουστικό κύμα λειτουργεί σαν «φτυάρι» και συγκεντρώνει την διαστρική ύλη εμπρός από το μέτωπο. Όταν η μάζα της ύλης γίνει ίση με την μάζα του κρουστικού κύματος, επιβραδύνει την κύμα. Όταν η ταχύτητα του γίνει ίση με την ταχύτητα του μέσου, τότε το κύμα διαλύεται και διαχέεται στον διαστρικό χώρο. Η φάση αυτή μπορεί να διαρκέσει μέχρι 10000 χρόνια ανάλογα με την μάζα που εκτοξεύτηκε.

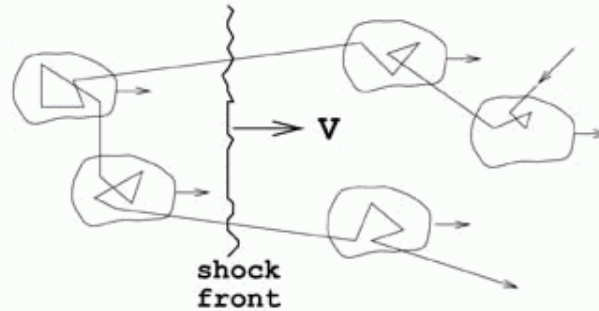
Επιτάχυνση στα Μαγνητικά Νέφη, Κύμα Κρούσης

- 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.

Μηχανισμός στοχαστικής επιτάχυνσης 1ης τάξης

Σκέδαση σε κύμα κρούσης

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



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

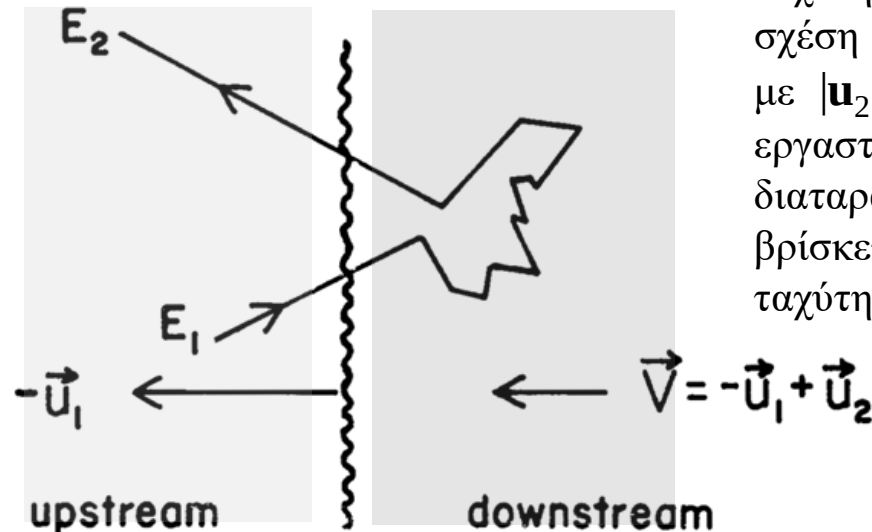
Μηχανισμός στοχαστικής επιτάχυνσης 1ης τάξης

- Ο μηχανισμός 1^{ης} τάξης προϋποθέτει την παρουσία τυρβώδους μαγνητικού πεδίου πριν και μετά το κρουστικό κύμα ώστε το σωματίδιο να συναντήσει ξανά το κύμα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου, λόγω της μεγάλης ακαμψία, το σωματίδιο δεν μπορεί να συγκρατηθεί στο κύμα κρούσης. Για μαγνητικό πεδίο 3 μG υπολογίζεται ακαμψία $5 \times 10^4 \text{ GV}$.
- Το μοντέλο εμπλουτίζεται με άλλους μηχανισμούς που προβλέπουν την παραγωγή πολύ υψηλότερης ενέργειας.

Μοντέλο κρουστικού κύματος

Το κρουστικό κύμα κινείται προς τα αριστερά με ταχύτητα $-\mathbf{u}_1$. Το αδιατάρακτο διαστρικό μέσο βρίσκεται αριστερά (upstream).

Acceleration



Μετά το πέρασμα του μετώπου, αλλάζει η ταχύτητα του μέσου, σε σχέση με το μέτωπο, σε $\mathbf{u}_2$ με $|\mathbf{u}_2| < |\mathbf{u}_1|$. Στο σύστημα εργαστηρίου το διαταραγμένο μέσο που βρίσκεται δεξιά, έχει ταχύτητα $\mathbf{V} = -\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2$.

Figure 11.2: Acceleration at a plane shock front.

Το φορτισμένο σωματίδιο παγιδεύεται στο μαγνητικό πεδίο και κινείται μαζί με το αέριο που βρίσκεται downstream. Στην ταχύτητα του προστίθεται η ταχύτητα $\mathbf{V}$ και αυξάνεται η ενέργεια του κατά ΔE . Το σωματίδιο διαγράφει μία τυχαία ελικοειδή τροχιά και κάποια στιγμή διασχίζει ξανά το κρουστικό κύμα. Σε κάθε πέρασμα κερδίζει ενέργεια ΔE .

Υπολογισμός για επίπεδο κύμα κρούσης

Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία του μηχανισμού Fermi. Στη θέση του νέφους χρησιμοποιούμε το πλάσμα στην περιοχή downstream που κινείται με $\beta=V/c$

$$\mathbf{V} = -\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2$$

$$|u_2| < |u_1| \quad E_1^* = \gamma_d(E_1 - \beta_d p_1 \cos \theta_1) \quad E_1^* = \gamma_d E_1 (1 - \beta_d \cos \theta_1)$$

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

Μετά από τη κρούση, το σωματίδιο κινείται μαζί με το νέφος. Μετά την έξοδο του, επιστρέφοντας στο σύστημα εργαστηρίου:

$$E_2 = \gamma_d(E_1^* + \beta_d p_1^* \cos \theta_2')$$

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

Υπολογισμός για επίπεδο κύμα κρούσης

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 ώστε: $\langle \cos\theta_1 \rangle_b = -\frac{2}{3}$

Αντικαθιστούμε με τις μέσες τιμές:

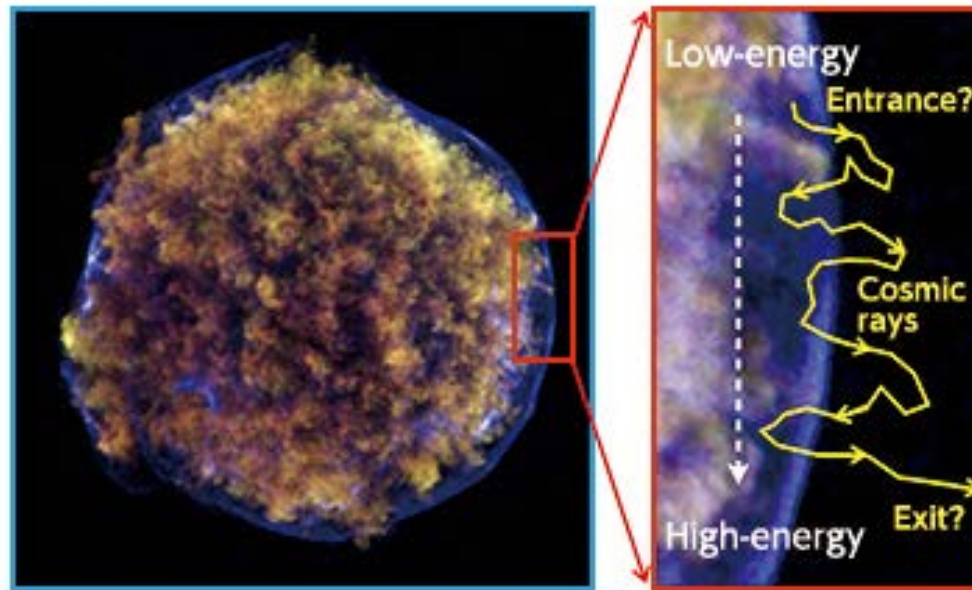
$$\rightarrow \xi = \frac{1 - \frac{4}{3}\beta + \frac{4}{9}\beta^2}{1 - \beta^2} - 1$$

Για μη σχετικιστικές ταχύτητες, το σωματίδιο κερδίζει ενέργεια με ρυθμό:

$$\xi \cong \frac{4}{3}\beta = \frac{4}{3} \frac{u_S - u_R}{c}$$

Το πλεονέκτημα σε σχέση με τον μηχανισμό 2^{ης} τάξης, είναι ότι σε κάθε πέρασμα από το μέτωπο, το σωματίδιο κερδίζει ενέργεια.

Αναπαράσταση επιτάχυνσης 1ης τάξης



Κύμα κρούσης σε Υ.Κ.

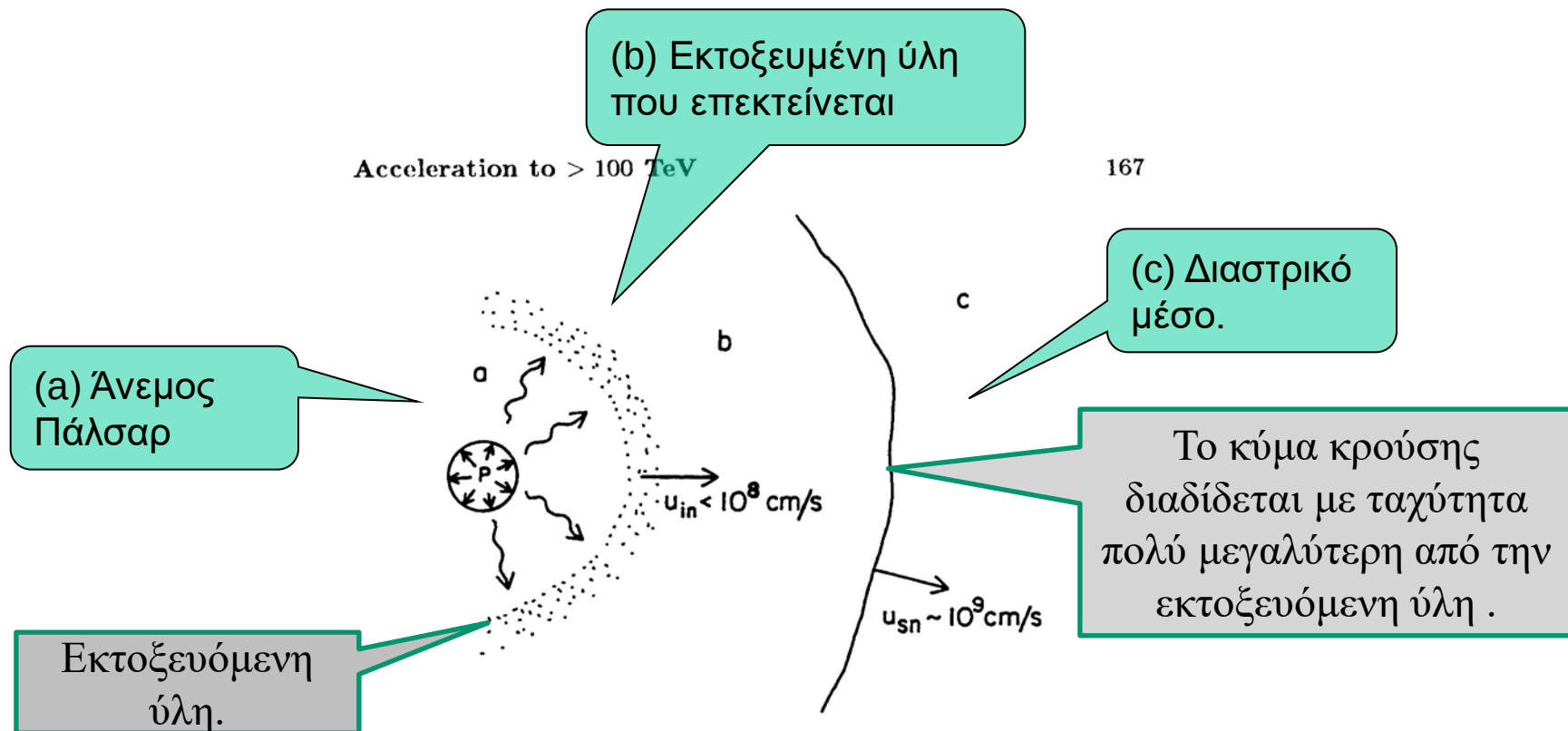


Figure 12.2: A very young supernova remnant: (a) shocked pulsar wind; (b) expanding ejecta; (c) interstellar medium (perhaps modified by wind of progenitor star). Straight and wavy arrows represent, respectively, unshocked and shocked pulsar wind. From Gaisser, Harding & Stanev, 1989.

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 πρέπει να παρουσιάζονται 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.