ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Φυσική Διαστήματος

Ενότητα 1: Ηλιακός Άνεμος

Ξενοφών Δ. Μουσάς
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Φυσικής

Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

Φυσική Διαστήματος

Ηλιακός άνεμος
Η θεωρία Parker

Ξενοφών Δ. Μουσάς,
Καθηγητής Φυσικής Διαστήματος

ΑΘΗΝΑ 2014

Ευχαριστίες

Ιδιαίτερες Ευχαριστίες οφείλονται στη NASA, ESA,

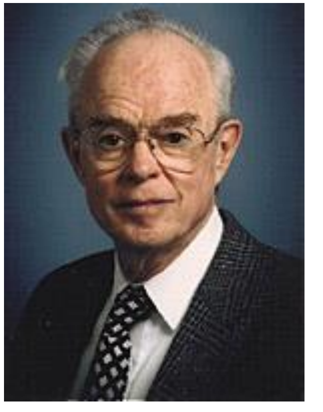
στους Ερευνητές και λοιπούς συντελεστές των επιγείων τηλεσκοπίων και διαστημικών πειραμάτων, στην κυρία Παν. Πρέκα Παπαδήμα, στον κύριο Πάνο Παπασπύρου για τις ενδιαφέρουσες συζητήσεις, σε όλους αυτούς που μας έδωσαν μετρήσεις, το NSSDC ή συμβουλές, στην Wikipedia για πολλές πολύτιμες εικόνες που προσφέρονται χωρίς δικαιώματα χρήσης και συνεπώς είναι πολύτιμες σε κάθε δάσκαλο.

ΘΕΩΡΙΑ E N PARKER

ΙΣΟΘΕΡΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΝΕΜΟΥ:

Βασικές εξισώσεις:
Διατήρηση ορμής:

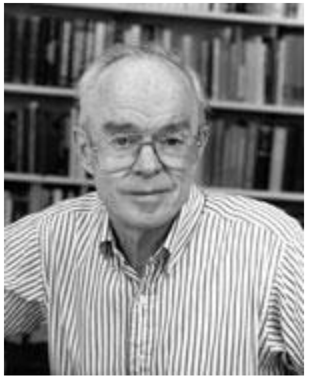
$$\rho u \frac{du}{dr} = - \frac{dP}{dr} - \rho \frac{GMs}{r^2}$$



όπου r είναι η ηλιοκεντρική απόσταση
M_s είναι η μάζα του Ήλιου
u είναι η ταχύτητα της ροής του ρευστού
ρ η πυκνότητα
G η παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας
P η πίεση
t ο χρόνος

- Διατήρηση μάζας:

$$r^2 \rho u = \sigma \tau \alpha \theta$$



Πολυτροπική σχέση: (τοπική θερμοδυναμική ισορροπία)

$$\frac{P}{P_o} = \left(\frac{\rho}{\rho_o}\right)^{\mu} \qquad 1 \leq \mu < \gamma$$

$$P_1 V_1^{\ \mu} = P_2 V_2^{\ \mu} = \sigma\tau\alpha\theta\varepsilon\rho\acute{\alpha}$$

όπου P είναι η πίεση
ρ η πυκνότητα και
V ο όγκος του αερίου
ενώ οι δείκτες 1,2 αναφέρονται σε διαφορετικές καταστάσεις.

πολυτροπική σχέση: διατήρηση της ενέργειας με πηγή θερμότητας
Στον ηλιακό άνεμο δεν έχει λυθεί (θέρμανσης στέμματος με κύματα)

καταστατική εξίσωση των τελείων αερίων έχουμε

$$P = \frac{n_{mol}}{V} RT$$

=

$$\mathrm{P} = \mathrm{n_e k T_e} + \mathrm{n_p k T_p} + \mathrm{n_\alpha k T_\alpha} = \sum n_{\iota o \nu \tau \omega \nu} k T_{\iota o \nu \tau \omega \nu}$$

Στην περίπτωση του ηλιακού ανέμου ισχύει:

$$\mathrm{P} = n_e k T_e + n_p k T_p + n_a k T_a =$$

οι δείκτες e, p αναφέρονται σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια αντίστοιχα, και ο δείκτης α αναφέρεται σε σωμάτια άλφα (πυρήνες ηλίου).

Τα σωμάτια άλφα αποτελούν περίπου το 4% του ηλιακού ανέμου. Σε πρώτη προσέγγιση θεωρούμε ότι $T=T_e=T_p$

ή τη μέση τιμή $T= ½\ (T_e+T_p)$

Δηλαδή υποθέτουμε ότι πρακτικά οι δύο αριθμητικές πυκνότητες είναι ίσες $n_e=n_p=n$.

$\rho = n(m_p + m_e)$ και επειδή $m_p >> m_e$ ισχύει ότι $\rho = n m_p$

Αν το ποσοστό σωματιδίων άλφα ~5%, τότε αυτά συνεισφέρουν κατά 20% ($m_\alpha = 4m_p$) στη συνολική μάζα:

$$\rho = 1{,}2 n_p m_p = n' m_p$$

και $P = 2n'kT$

Από την αρχή διατήρησης της ορμής:

$$\rho u \frac{du}{dr} = - \frac{dP}{dr} - \rho \frac{GM_s}{r^2}$$

την πυκνότητα: $\rho = nm_p$

την καταστατική εξίσωση: $P = 2nkT$

$$\frac{1}{u}\frac{du}{dr}\left(u^2 - \frac{2kT}{m_p}\right) = \frac{nkT}{m_p r} - \frac{GM_s}{r} = \frac{4kT}{m_p}\frac{1}{r^2}\left(r - r_c\right)$$

$$\frac{1}{u}\frac{du}{dr}\left(u^2-\frac{2kT}{m_p}\right)=\frac{nkT}{m_p r}-\frac{GM_s}{r}=\frac{4kT}{m_p}\frac{1}{r^2}(r-r_c)$$

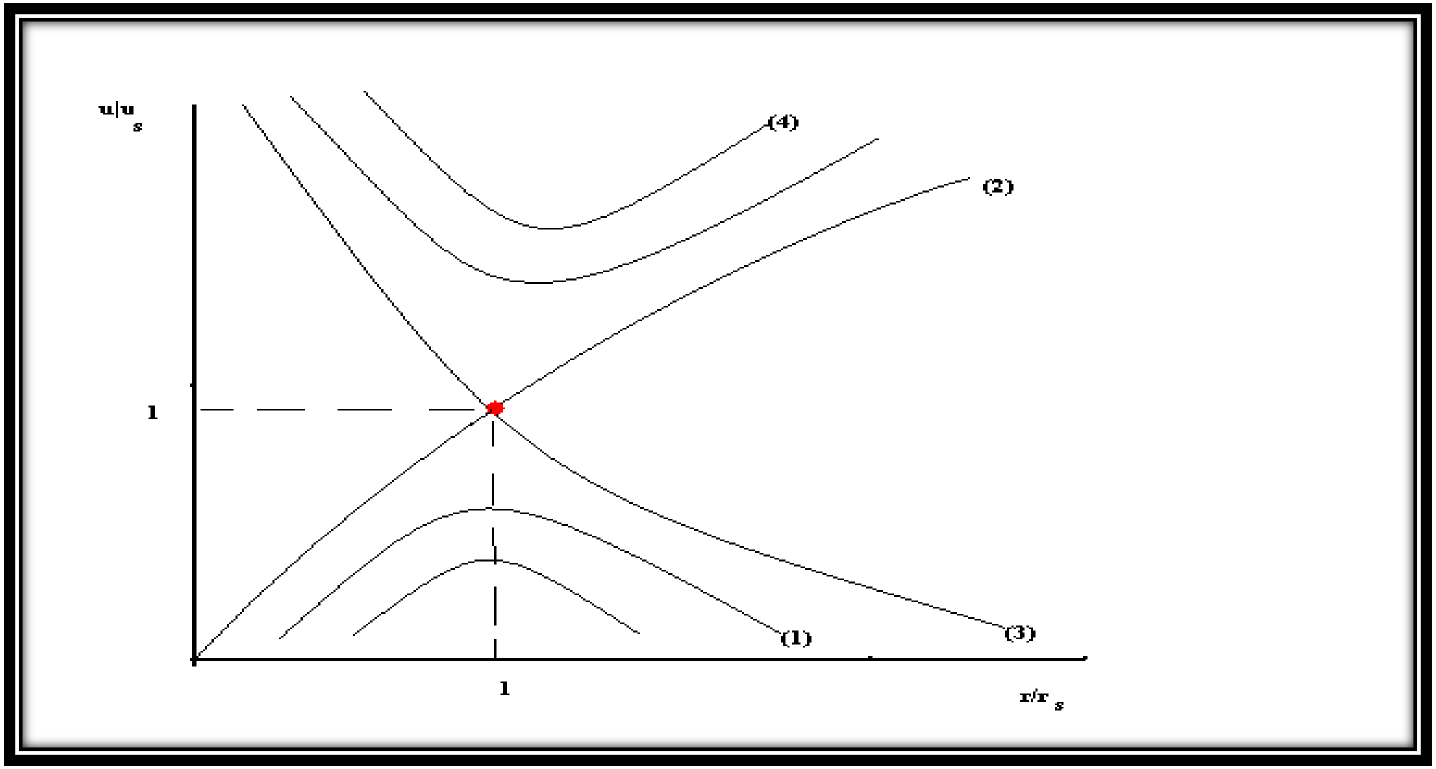
η κρίσιμη απόσταση στην οποία η κινητική ενέργεια ενός στοιχειώδους όγκου του ηλιακού ανέμου είναι ίση με την θερμική του ενέργεια

$$r_c=\frac{GM_s m_p}{4kT}$$

η κρίσιμη ταχύτητα η οποία είναι ίση με την πιθανότερη θερμική ταχύτητα των σωματίων του αερίου

$$u_c=\sqrt{\frac{2kT}{m_p}}$$

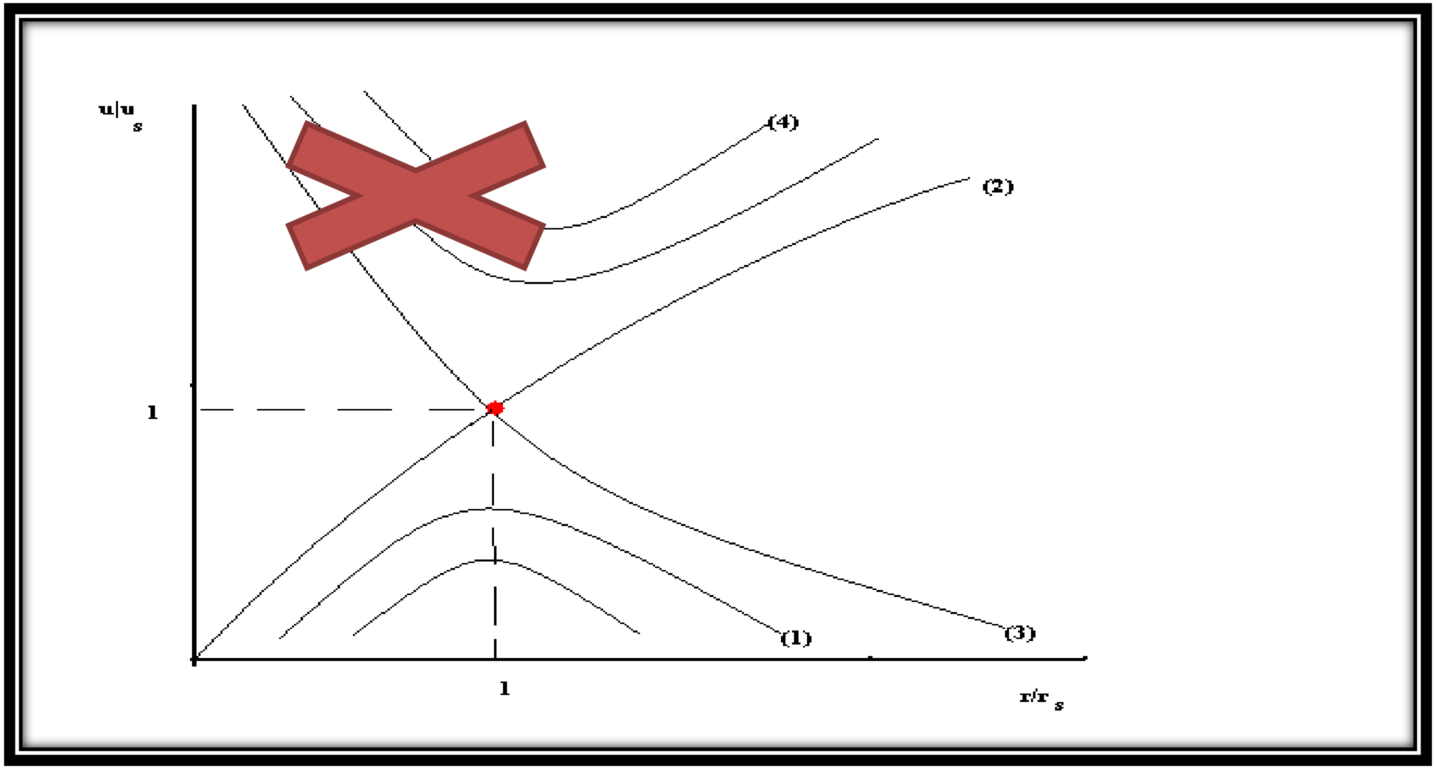
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ:



Υπάρχουν δύο οικογένειες λύσεων για τις οποίες στην απόσταση $r=r_c$ και η ταχύτητα στην κρίσιμη απόσταση παρουσιάζει μέγιστο ή ελάχιστο

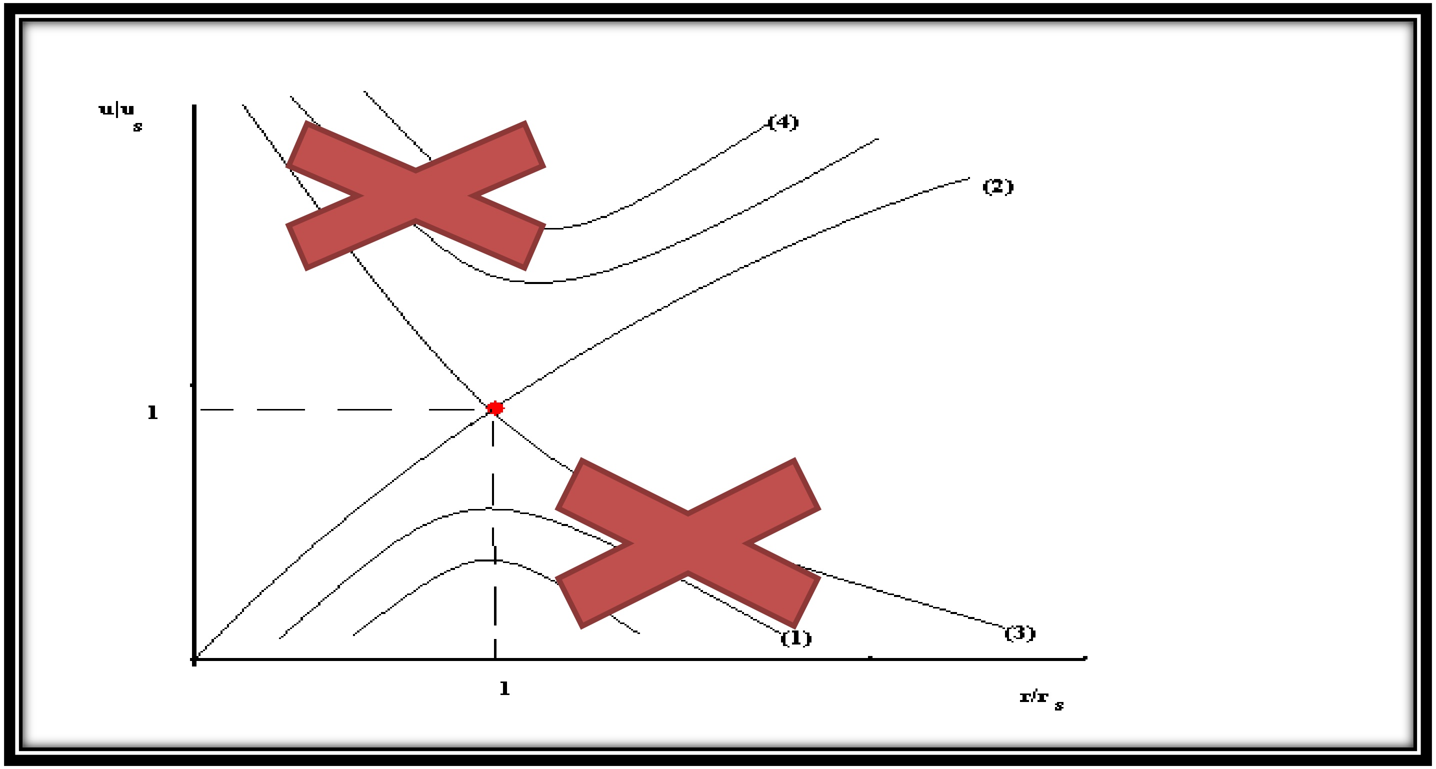
$$\frac{du}{dr}=0$$

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ:



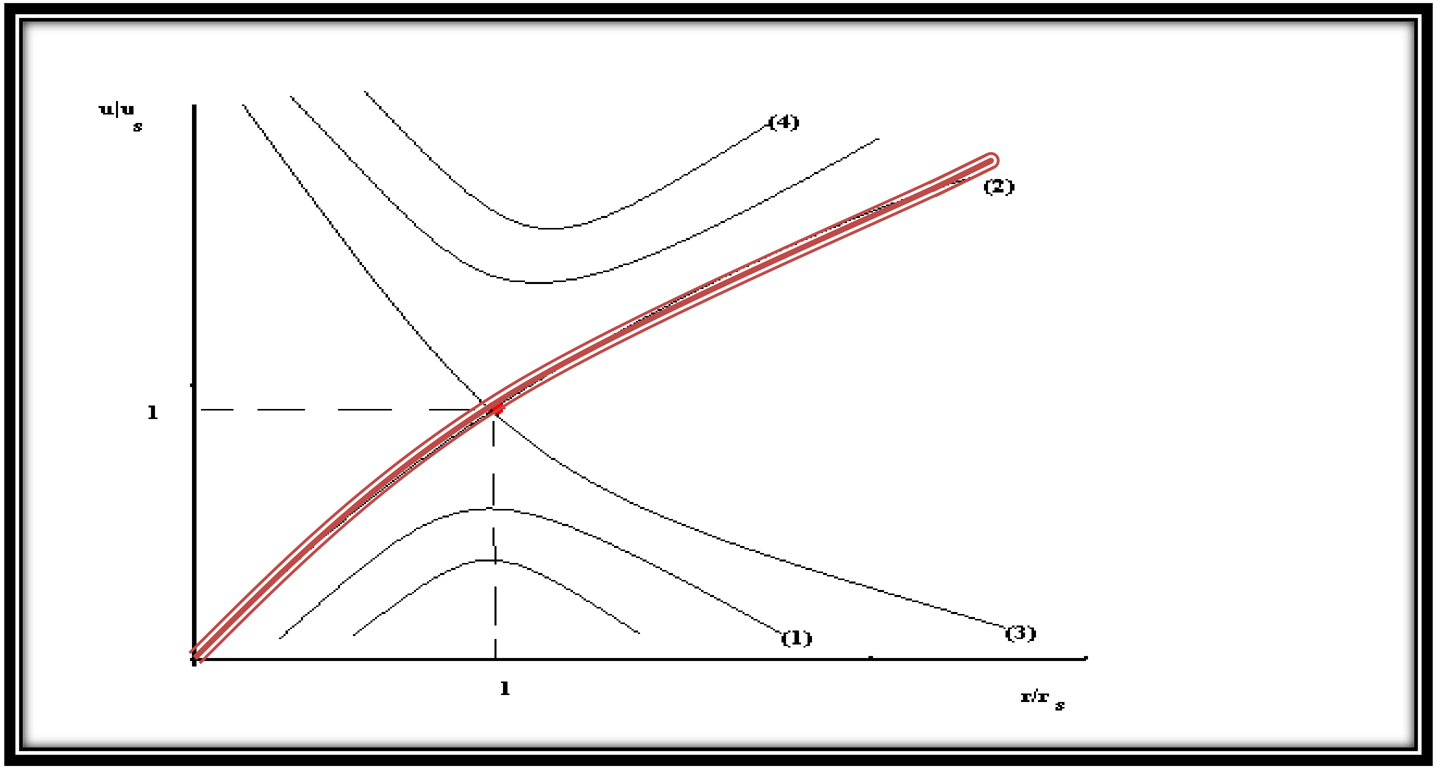
Οι οικογένειες λύσεων (3 και 4) αποκλείονται διότι δεν έχουν παρατηρηθεί μεγάλες ταχύτητες κοντά στον Ήλιο

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ:



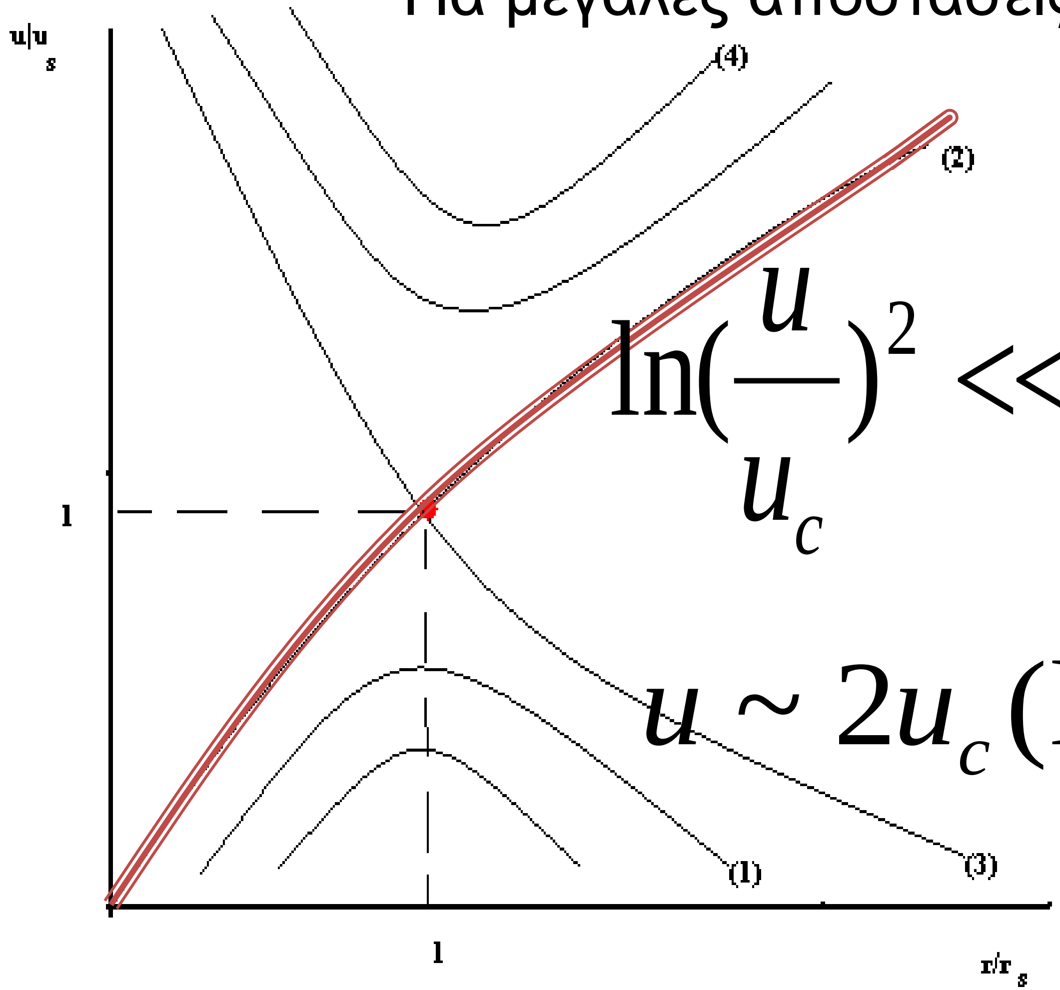
Οι λύσεις (1 και 3) αποκλείονται διότι θα συσσώρευαν κέλυφος υλικού σε κάποια απόσταση γύρω από τον Ήλιο

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ:



Μας μένει η λύση (2) που περιγράφει την πραγματικότητα, όπως επαληθεύτηκε από τις επιτόπιες μετρήσεις

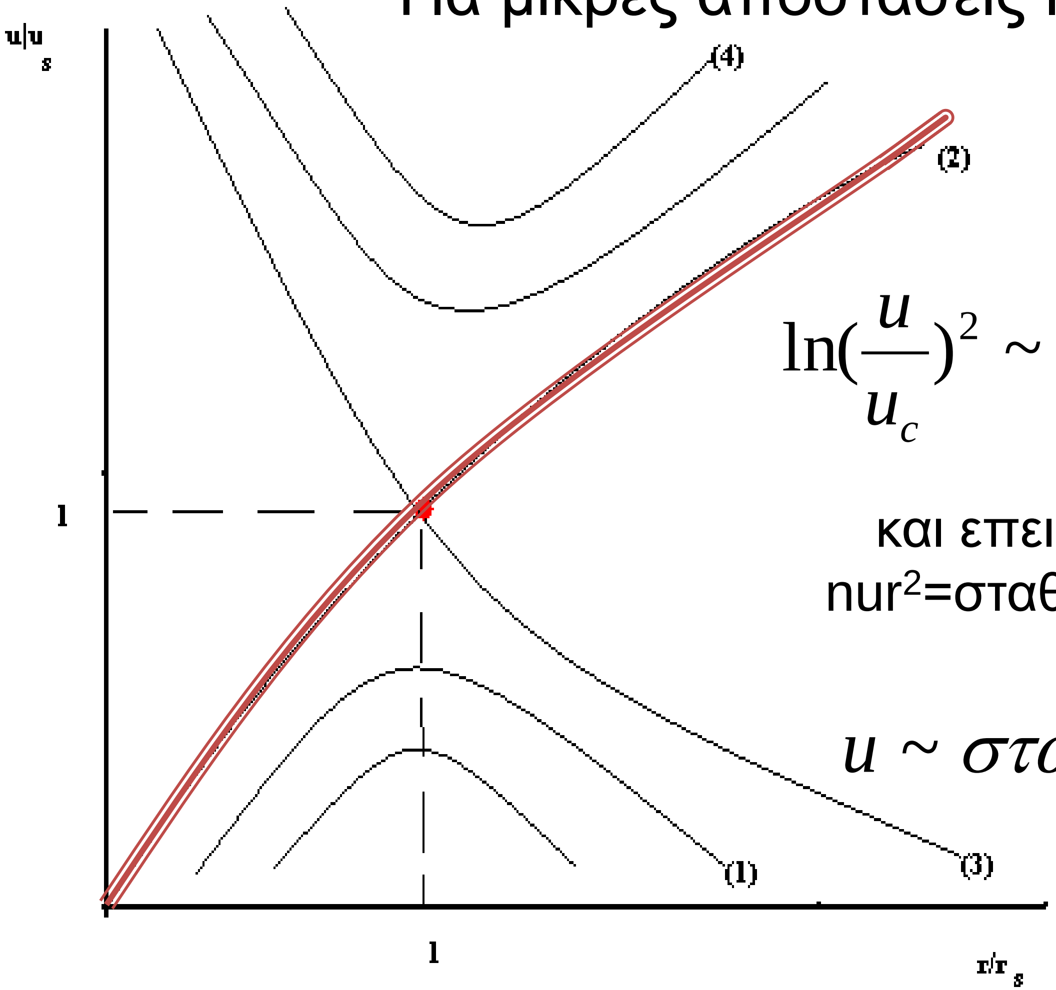
Για μεγάλες αποστάσεις ισχύει:



$$\ln\left(\frac{u}{u_c}\right)^2 << \left(\frac{u}{u_c}\right)^2$$

$$u \sim 2u_c(\ln r)^{1/2}$$

Για μικρές αποστάσεις ισχύει:



$$\ln\left(\frac{u}{u_c}\right)^2 \sim -2\ln 2$$

και επειδή
nur^2=σταθερό.

$$u \sim \sigma\tau\alpha\theta\,\frac{1}{r^2}$$

ΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου του ηλιακού ανέμου συμπίπτουν με τις γραμμές ροής του ηλιακού ανέμου επειδή το μαγνητικό πεδίο είναι παγωμένο, μέσα στο πλάσμα εξαιτίας της μεγάλης ηλεκτρικής αγωγιμότητάς του.

Χρησιμοποιούμε ένα σύστημα συντεταγμένων που περιστρέφεται μαζί με τον Ήλιο με γωνιακή ταχύτητα

$$\omega = \frac{2\pi}{25} = 2{,}9 \cdot 10^{-6} \frac{rad}{\sec}$$

ο Ήλιος περιστρέφεται

οι γραμμές ροής του ηλιακού ανέμου και οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου έχουν τη μορφή των ελίκων του Αρχιμήδη.

Η γραμμή ροής του ηλιακού ανέμου στο επίπεδο του ισημερινού του Ήλιου δίνεται από τις παραμετρικές εξισώσεις:

$$r = r_o + ut$$

$$\theta = \theta_o$$

$$\phi = \phi_o - \omega t$$

σημείο αναφοράς παίρνουμε τη βάση του στέμματος (r_o ,θ_o).

Οι συνιστώσες της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου
σε ένα μη αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων
που περιστρέφεται μαζί με τον ήλιο με γωνιακή ταχύτητα ω είναι:

$$V_r(r,\phi,\theta) = u$$

$$V_\phi(r,\phi.\theta) = -\omega(r - r_o)\sin\theta$$

$$V_\theta(r,\phi,\theta) = 0$$

Η γραμμή ροής δίνεται από τη σχέση: $$\frac{1}{r}\frac{dr}{d\phi} = \frac{V_r}{V_\phi} = \frac{u}{-\omega r\sin\theta}$$

ή η γραμμή ροής δίνεται από τη σχέση: $$\Rightarrow r - r_o = -\frac{u}{\omega r\sin\theta}(\phi - \phi_o)$$

Το διάνυσμα της ταχύτητας είναι η εφαπτομένη στις γραμμές ροής.

Σε σφαιρικές συντεταγμένες έχουμε:

$$V_r = u$$
$$V_\phi = -\omega(r - r_o)\sin\theta$$
$$V_\theta = 0$$

παγωμένο μέσα στον ηλιακό άνεμο, άρα αναμένεται:

$$\overline{\mathrm{B}} = \alpha \overline{V}$$

$$B_r = \alpha(r,\phi,\theta)u$$
$$B_\phi = -\alpha(r,\phi,\theta)\omega(r - r_o)\sin\theta$$
$$B_\theta = 0$$

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ α(r,φ,θ) για Ω//Μ

ισχύει $$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\frac{1}{r^2}\frac{d(r^2 au)}{dr} + \frac{1}{r\sin\theta}\frac{d(\sin\theta.0)}{d\theta} + \frac{1}{r\sin\theta}\frac{d(-\omega(r-r_o)a\sin\theta)}{d\phi} = 0$$

$B_\theta = 0$

ή $$\frac{1}{r^2}\frac{d(r^2 au)}{dr} + \omega\frac{r\sin\theta}{\sin\theta}\frac{d(-a)}{d\phi} = 0$$

Θεωρούμε ότι υπάρχει αξονική συμμετρία γύρω από τον άξονα περιστροφής του Ήλιου και συνεπώς το α δεν εξαρτάται από την αζιμουθιακή γωνία φ. Άρα:

$$\frac{d(r^2 a u)}{dr} = 0 \quad \Longrightarrow \quad a = \frac{c}{r^2 u}$$

α είναι ανεξάρτητο του φ και

u=u(r),

το c(θ)=σταθερό =>

$$B_r(r,\phi,\theta) = \frac{c(\theta)}{r^2}$$

$$B_\phi(r,\phi,\theta) = -\frac{c(\theta)\omega\sin\theta}{ru}$$

$$B_\theta(r,\phi,\theta) = 0$$

$$B^2(r_o,\phi_o,\theta_o) = B_r^2(r_{o,}\phi_{o,}\theta_o) + B_\phi^2(r_{o,}\phi_{o,}\theta_o) + B_\theta^2(r_o,\phi_o,\theta_o)$$

$$= \frac{c^2}{{r_o}^2}\left(\frac{1}{{r_o}^2} + \omega^2\,\frac{\sin^2\theta}{u_o^2}\right)$$

$$= \frac{c^2}{r_o^2}\left(\frac{u_o^2 + (\omega r_o\sin\theta)^2}{r_o^2 u_o^2}\right) = \frac{c^2}{r_o^4}\left(\frac{\upsilon_o^2}{u_o^2}\right)$$

$$\upsilon_o^2 = (\omega r_o\sin\theta)^2 + u_o^2$$

$$B(r_o,\phi_o,\theta\;) = \left|c(\theta)\right|\frac{\upsilon}{u}$$ και $$\left|c(\theta)\right| = \frac{u_o r_o^2}{\upsilon_0}B(r_o,\phi_o,\theta)$$

Οι τρεις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου του ηλιακού ανέμου μεταβάλλονται με την ηλιοκεντρική απόσταση:

$$B_r = \pm B(r_o, \phi_o, \theta_o)\frac{u_o}{\upsilon_o}\left(\frac{r_o}{r}\right)^2$$

$$B_\phi = \pm B(r_o, \phi_o, \theta_o)\left(\frac{u_o r_o^2}{r_o r u}\omega \sin\theta\right)$$

$$B_\theta = 0$$

Οι τρεις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου του ηλιακού ανέμου μεταβάλλονται με την ηλιοκεντρική απόσταση:

$$B_r = \pm B(r_o, \phi_o, \theta_o)\frac{u_o}{\upsilon_o}(\frac{r_o}{r})^2$$

$$B_\phi = \pm B(r_o, \phi_o, \theta_o)(\frac{u_o r_o^2}{r_o r u}\omega \sin\theta)$$

$$B_\theta(r, \phi, \theta) = B_\theta(r_o, \phi, \theta)\frac{r_o}{r}$$

Το μέτρο του μαγνητικού πεδίου του ηλιακού ανέμου μεταβάλλεται με την ηλιοκεντρική απόσταση:

$$B = \sqrt{B_{R_o}^2 \left(\frac{R_o}{R}\right)^4 + B_{\varphi_o}^2 \left(\frac{R_o}{R}\right)^2 + B_{\theta_o}^2 \left(\frac{R_o}{R}\right)^2}$$

Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΕΣΠΑ 2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.0.

Σημείωμα Αναφοράς

Σημείωμα Αδειοδότησης

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.