

*Επίδραση μαγνητικού πεδίου της Γης
(συννοδεύει τις διαφάνειες)*

Επίδραση μαγνητικού πεδίου της Γης.

Ένα σωματίδιο με ατομικό αριθμό Z , που κινείται σε μαγνητικό πεδίο $\mathbf{B}$ με ταχύτητα $\mathbf{v}$.

Η κεντρομόλος δύναμη ισούται με τη δύναμη Laplace

$$\left| Z e \vec{v} \times \vec{B} \right| = \frac{m v^2}{r_g}$$

Αν η ταχύτητα $\mathbf{v}$ είναι κάθετη στο $\mathbf{B}$, η ακτίνα καμπυλότητας δίνεται από

$$r_g = \left(\frac{pc}{Ze} \right) \frac{1}{Bc}$$

Ονομάζουμε **Ακαμψία** ή **Rigidity**: $R = pc/Ze$:

Μονάδες: $1 \text{ GeV} / 1 \text{ electron charge} = 1 \text{ GV}$

Για να προσδιορίσουμε τη συμπεριφορά των πυρήνων σε μαγνητικό πεδίο, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιήσουμε την **ακαμψία**.

Για ένα πρωτόνιο η ακαμψία είναι αριθμητικά ίση με την ορμή του.

Πυρήνας	Z	Ορμή πυρήνα	Ακαμψία	Ακτίνα σχετική
1p	1	1 GeV/c	1 GV	1
1D	1	1 GeV/c	1 GV	1
1He	2	1 GeV/c	0,5 GV	0,5
1 He	2	2 GeV/c	1 GV	1

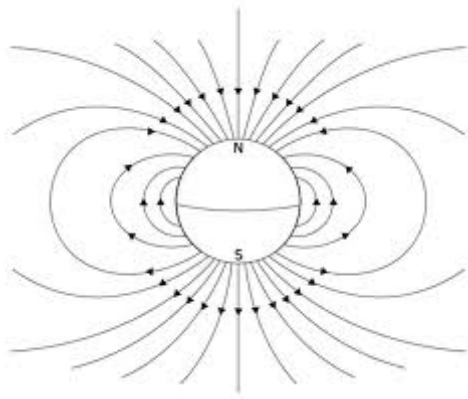
Η ροή των σωματιδίων κάτω από 10 GeV παρουσιάζει ασυμμετρία ως προς τη διεύθυνση. Τα φαινόμενα οφείλονται στο μαγνητικό πεδίο της γης που αλλάζει τη διεύθυνση των φορτισμένων σωματιδίων. Οι πόλοι και ο ισημερινός μαγνητικού πεδίου της γης δεν συμπίπτουν με τους γεωγραφικούς.

Ο Βόρειος μαγνητικός πόλος μετατοπίζεται και η σημερινή θέση του είναι [85.9°N 147.0°W](#).

Συνήθως το προσεγγίζουμε με το μαγνητικό πεδίο ενός μετατοπισμένου μαγνητικού δίπολου, δηλ ο άξονας του διπόλου δεν περνά από το κέντρο της γης. Από τις μετρήσεις προκύπτει ότι τα πεδία έχει και τετραπολική συνιστώσα.

Στα μεγάλα ύψη το πεδίο επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο του ηλιακού ανέμου

Στην πράξη όταν χρειάζεται να υπολογίσουμε με ακρίβεια τις τροχιές και τη ροή των σωματιδίων, χρησιμοποιούμε αριθμητικό υπολογισμό.



Εικόνα 1 μαγνητικό δίπολο γης..

Η εξίσωση κίνησης φορτισμένου σωματιδίου, μέσα στο μαγνητικό πεδίο διπόλου, είναι ένα δύσκολο μαθηματικό πρόβλημα, το οποίο έλυσε ο Νορβηγός μαθηματικός Størmer. Παρακάτω χρησιμοποιούμε έτοιμους τύπους από τη βιβλιογραφία.

Απλός υπολογισμός: Ένα σωματίδιο που κινείται σε ισημερινή τροχιά σε πεδίο μαγνητικού διπόλου: Η κεντρομόλος ισούται με τη δύναμη Laplace.

$$z|e|\mathbf{B} \times \mathbf{v} = \frac{mv^2}{r}$$

ze το φορτίο του σωματιδίου,

Το μαγνητικό πεδίο στο ισημερινό επίπεδο του διπόλου:

$$B = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) \frac{M}{r^3}$$

Η τροχιά που προκύπτει :

$$r_S = \left[\left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) \frac{Mz|e|}{p} \right]^{1/2}$$

Ονομάζεται μονάδα Størmer και απλοποιεί τους τύπους.

Η ελάχιστη ενέργεια για ένα σωματίδιο για να γίνει η ακτίνα Størmer ίση με την ακτίνα της γης, είναι :

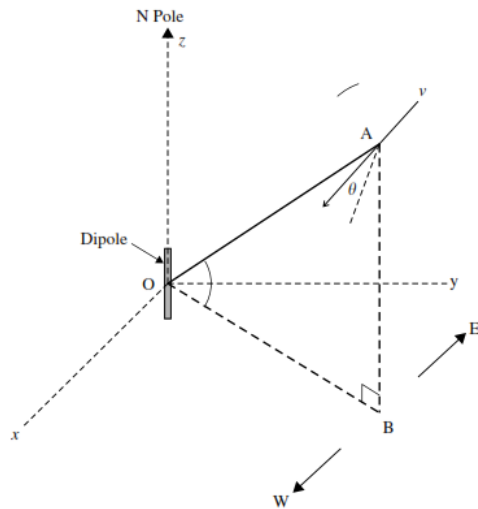
$$\frac{pc}{z} = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) \frac{Mc|e|}{r_E^2} = 59.6 \text{ GeV}$$

Η ενέργεια είναι ανά φορτίο. Αν διαιρέσουμε με το e, γίνεται ενέργεια ανά μονάδα φορτίου δηλαδή ακαμψία, με μονάδες GV.

Αυτή είναι η ελάχιστη ενέργεια για ένα πρωτόνιο που έρχεται από ανατολικά, και κινείται στο επίπεδο του μαγνητικού ισημερινού σε γωνία 0 μοίρες από τον ορίζοντα.

Όταν το γεωγραφικό πλάτος είναι λ και η γωνία της ταχύτητας με την προβολή της στο μεσημβρινό επίπεδο είναι θ (σε συντεταγμένες του διπόλου) το b είναι παράμετρος κρούσης. Το r μετριέται σε μονάδες Størmer.

$$b = r \sin \theta \cos \lambda + \frac{\cos^2 \lambda}{r}$$



Για ροή σωματιδίων στην κατακόρυφο διεύθυνση :

$$(pc)_{\min} (\theta = 0) = 14.9z \cos^4 \lambda \text{ GeV}$$

όπου λ το γεωγραφικό πλάτος Z ο ατομικός αριθμός.

Στον μαγνητικό ισημερινό ελάχιστη ορμή για ένα πρωτόνιο, $z=1$, είναι 14.9 GeV/c ένας πυρήνας Ηλίου, $z=2$, περίπου 7.5 GeV/c.

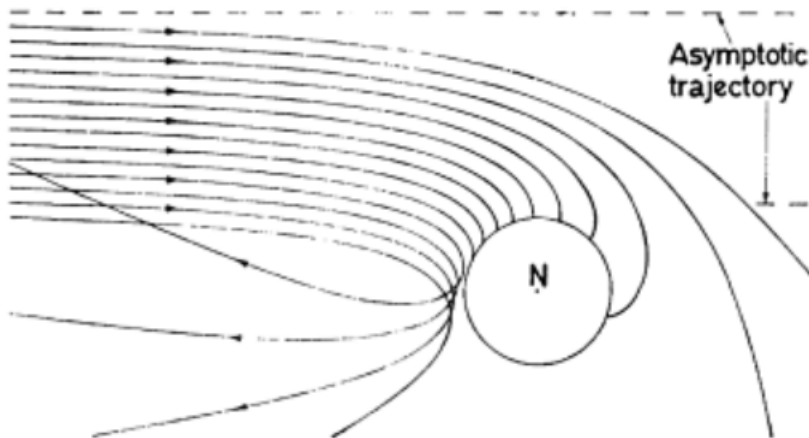
Η Ακαμψία 14.9 GV περιγράφει και τις δύο περιπτώσεις.

Στη βόρεια Ευρώπη, $\lambda=50^\circ$ $pc/z = 1,1 \text{ GeV}$. Για πρωτόνιο $E=1.41 \text{ GeV}$ και για ήλιο $1,1 \text{ GeV/nucleon}$. (Η ορμή είναι χαμηλή και στην ολική ενέργεια προσθέτουμε τη μάζα.

Η σχέση για σωματίδια που προσπίπτουν υπό γωνία θ ο τύπος είναι αρκετά πολύπλοκη. Αν την εφαρμόσουμε στον ισημερινό για σωματίδιο που έρχεται από τον ανατολικό ορίζοντα $\sin \theta = 1$, ελάχιστη ορμή 59,6 GeV/c και για σωματίδιο που έρχεται από τον δυτικό $\cos \theta = -1$ και ελάχιστη ορμή 10,2 GeV/c.

Λόγω της σχέσης αυτής η ροή σωματιδίων από τα ανατολικά είναι μικρότερη από εκείνη της δύσης. Το φαινόμενο ονομάζεται ανατολική-δυτική ασυμμετρία, και είναι πιο έντονο στο ισημερινό και λιγότερο έντονο στα μεγάλα πλάτη.

Ο τύπος του Stoermer περιγράφει το φαινόμενο αλλά όπως βλέπουμε στο χάρτη το μαγνητικό πεδίο έχει πολύπλοκη μορφή και απέχει πολύ από το ιδανικό μαγνητικό δίπολο. Στην πράξη όταν χρειάζεται ακριβής υπολογισμός γίνεται αριθμητικά υπολογισμός κατά βήματα.



Trajectories of 20 GV positively charged particles in the equatorial plane.

Σε γεωγραφικό πλάτος 50° η κατακόρυφη ορμή αποκοπής για ένα πρωτόνιο είναι 1,1 GeV.

Στον ισημερινό η κατακόρυφη ορμή αποκοπής, είναι 14,9 GeV/c. Για σωματίδιο που έρχεται από ανατολικά ($\sin\theta=+1$) γίνεται 59,6 GeV/c ενώ για σωματίδιο που έρχεται από δυσμάς μόνον 10,2 GeV/c .

Αυτή είναι η αιτία της ασυμμετρίας Ανατολής Δύσης στη ροή των κοσμικών δηλαδή περισσότερα σωματίδια φέρει πόλο, τα σωματίδια που είναι φορτισμένα θετικά λόγω του μαγνητικού πεδίου, διεγράφουν σπειροειδή τροχιά κατά τη φορά των δεικτών του ωρολογίου.

M.S. Longair “High Energy Astrophysics”, v1, Cambridge , 2002.

D. Perkins, “Astroparticle Physics”, Oxford, 2009

Παράδειγμα:

*Η ακτίνα καμπυλότητας για p με ενέργεια 1 TeV
(Gyroradius)*

$$r_g = 3 \cdot 10^9 \gamma (B/10^{-9} T) m$$

Για $B=10^{-9} T$ και $\gamma=10^3$, $r_g = 3 \cdot 10^{12} m$ ή 20AU, Αρα δεν επηρεάζονται από το μαγν πεδίο της γης ή του ήλιου.

Υπολογίστε τη ακτίνα καμπυλότητας για ένα πρωτόνιο ενέργειας $10^{20} eV$ υποθέτοντας ένα ομογενές γαλαξιακό μαγνητικό πεδίο 3 μG / Συγκρίνατε με την το πάχος ενός σπειροειδούς γαλαξία πάχους $d=0,3 kpc$

Η ακτίνα καμπυλότητας για ένα σωματίδιο με ένα στοιχειώδες φορτίο, ορμής p σε GeV, σε μαγνητικό πεδίο B . είναι ίση με $\rho = pc/(0.3B)$

αν

$$p=10^{11} GeV$$

και $B=3 \times 10^{-10} T$: Γαλαξιακό μαγνητικό πεδίο.

Μετά από αντικατάσταση προκύπτει ότι $\rho = 10^{21} m$ ή $3 \times 10^4 psc$ και απόκλιση $d/\rho = 0.5^\circ$.

$$1 psc = 3.1 \times 10^{16} m .$$

Επίδραση Ηλιακού ανέμου.

Τα φορτισμένα σωματίδια των κοσμικών ακτίνων πρέπει να ξεπεράσουν το μαγνητικό πεδίο το οποίο παράγεται από τον ηλιακό άνεμο. Προφανώς επηρεάζονται περισσότερο τα σωματίδια με μικρή ακαμψία. Για ακαμψίες πάνω από 20 GV η επίδραση είναι αμελητέα.

Ο ηλιακός άνεμος αποτελείται από φορτισμένα σωματίδια που εκτοξεύονται από τις ηλιακές εκλάμψεις. Το μαγνητικό πεδίο «παγώνει» (εγκλωβίζεται) μέσα στο ιονισμένο μέσο, και απομακρίνεται από τον ήλιο. Επειδή ο ήλιος περιστρέφεται σχηματίζεται μία έλικα.

$$B_r = B_{\odot} R_{\odot}^2 \frac{1}{r^2} \quad B_{\phi} = B_{\odot} R_{\odot} \frac{\sin \theta}{r}$$

Σε μεγάλη απόσταση από τον ήλιο μηδενίζεται η ακτινική και παραμένει μόνο η εφαπτομενική συνιστώσα.

Κοντά στην γη η ταχύτητα των σωματιδίων 300 – 600 km/s αντιστοιχεί σε ενέργεια 500 eV. Η ροή είναι περίπου $1.2 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ και πυκνότητα ενέργειας 2,5 KeV cm^{-3} . Το μαγνητικό πεδίο περίπου $5 \times 10^{-9} \text{ T}$.

Η ροή των κοσμικών σε χαμηλές ενέργειες, είναι ελάχιστη στα μέγιστα του ηλιακού κύκλου. Η μεταβολές αυτές είναι ακανόνιστες.

Τα πειράματα που κάνουν μετρήσεις στις ενέργειες αυτές, έχουν αναπτύξει μεθόδους διόρθωσης.