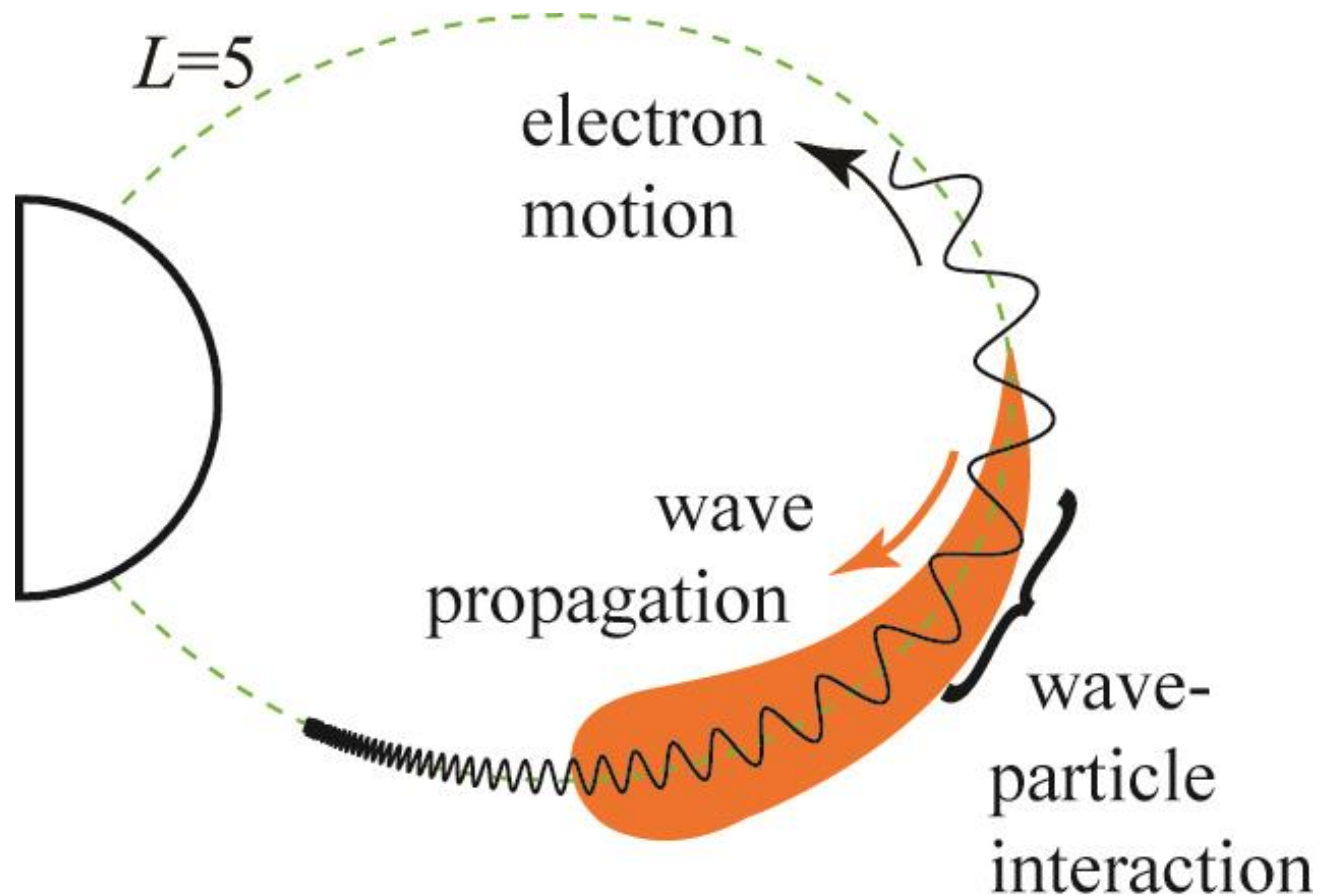


Space Physics Master's Course

Lecture 4



RECOMMENDED READING

Διαστημική Φυσική, Κεφάλαιο 3

(<https://repository.kallipos.gr/handle/11419/11507>)

Physics of Earth's Radiation Belts, Κεφάλαιο 2

(<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-030-82167-8.pdf>)

Συνθήκες διατήρησης ($dJ/dt=0$)

- Η μ διατηρείται όταν η χωρική μεταβολή του B σε διαστάσεις $\sim r_L$ είναι πολύ μικρή:

$$\left| \frac{\tilde{N}B}{B} \right| \ll \frac{1}{r_L}$$

- Όλες οι αδιαβατικές αναλλοίωτες διατηρούνται όταν η χρονική μεταβολή του B στη διάρκεια της περιόδου της κίνησης είναι πολύ μικρή:

$$\left| \frac{1}{B} \frac{\partial B}{\partial t} \right| \ll \frac{1}{\tau}$$

Περίοδοι κίνησης: $t_m \sim 10^{-6} - 10^{-3} s$

$$t_J \sim 1s$$

$$t_F \sim 1 - 60m$$

Η 1^η αδιαβατική αναλλοίωτη
(μαγνητική ροπή)
ισούται με το ολοκλήρωμα δράσης
της γενικευμένης ορμής του σωματιδίου
κάθετα στο μαγνητικό πεδίο $p = mv_{\perp}$
κατά μήκος της κλειστής κυκλοτρονικής
τροχιάς του σωματιδίου:

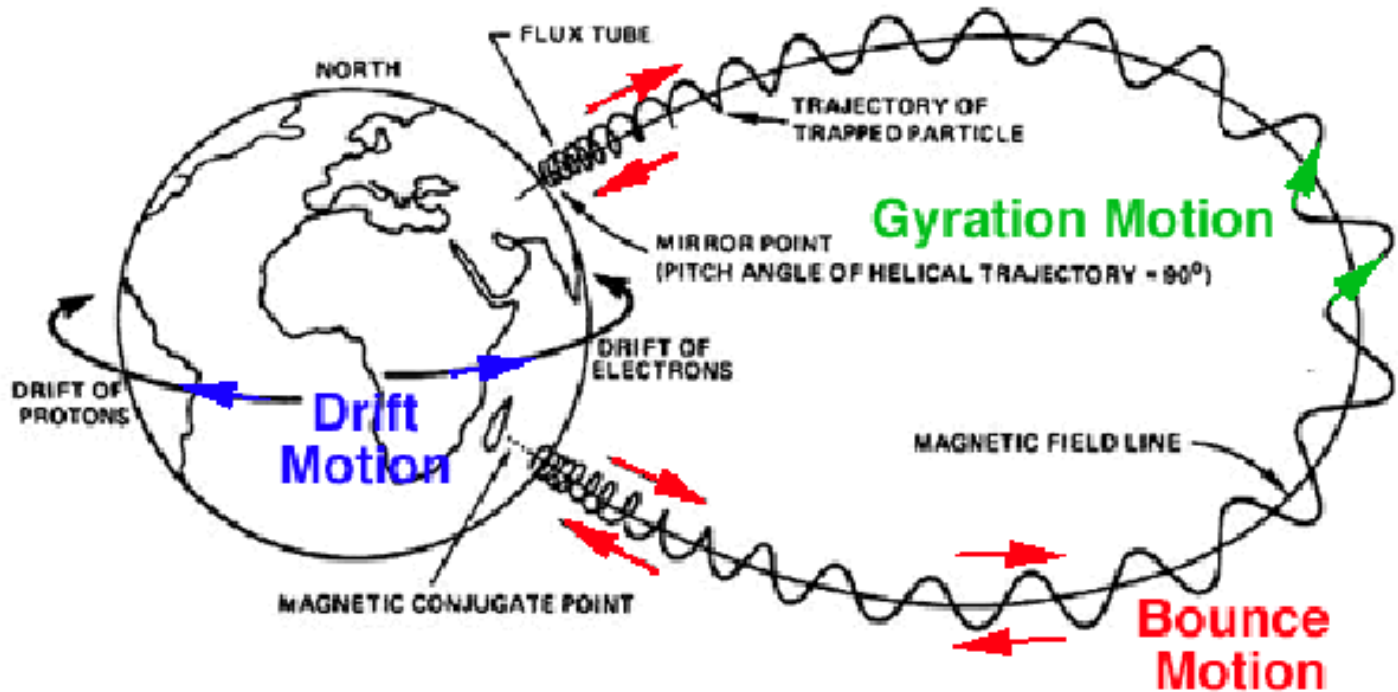
$$J_1 = \oint p_{\perp} ds \approx \mu = mv_{\perp}^2 / 2B$$

Η 2^η αδιαβατική αναλλοίωτη
(διαμήκης αναλλοίωτη)
ισούται με το ολοκλήρωμα δράσης
της γενικευμένης ορμής του οδηγού κέντρου
κατά την κίνησή του
παράλληλα στο μαγνητικό πεδίο $p = mu_{\parallel}$
και μεταξύ των σημείων ανάκλασης:
$$J_2 = \int p_{\parallel} ds$$

Η 3^η αδιαβατική αναλλοίωτη (μαγνητική ροή) ισούται με το ολοκλήρωμα δράσης της γενικευμένης ορμής του οδηγού κέντρου κατά μήκος του ίχνους ολίσθησης γύρω από το μαγνητικό δίπολο $p = mu_D$ (όπου u_D η ταχύτητα ολίσθησης)

και είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής που περικλείεται από την τροχιά του οδηγού κέντρου γύρω από το μαγνητικό δίπολο:

$$J_3 = \int p_d ds \propto \Phi$$



Gyration: $J_1 = \int p_{\perp} ds = p_{\perp}^2 / 2mB$ $T_g \sim 10^{-3} \text{ s}$, $f_g \sim 1 \text{ kHz}$

Bounce motion: $J_2 = \int p_{\parallel} ds$ $T_b \sim 10^0 \text{ s}$, $f_b \sim 1 \text{ Hz}$

Drift motion: $J_3 = \int p_d ds \propto \Phi$ $T_d \sim 10^3 \text{ s}$, $f_d \sim 1 \text{ mHz}$

Η σταθερότητα των αδιαβατικών αναλλοίωτων καταργείται όταν οι γεωμαγνητικές διαταραχές, που εμφανίζονται στη μαγνητόσφαιρα, έχουν **περιόδους συγκρίσιμες ή μικρότερες** από τις περιόδους των τριων αντίστοιχων στις αναλλοίωτες χαρακτηριστικών περιοδικών κινήσεων των σωματιδίων:

1. της γυροκίνησης γύρω από το B
2. της ανάκλασης κατά μήκος του B
3. της ολίσθησης γύρω από τη $\Gamma\eta$

Invariant	Velocity	Time scale	Validity
magnetic moment	gyro motion	gyro period	$\tau \gg \tau_L$
longitudinal invariant	longitudinal velocity of GC	bounce period	$\tau \gg \tau_b \gg \tau_L$ and μ const
flux invariant	perpendicular velocity of GC	drift period	$\tau \gg \tau_d \gg \tau_b \gg \tau_L$ and μ and J const

Specific energization mechanism for each invariant

μ : $W_{\perp}$ changed by changing the Larmor radius (i.e., $|B|$)

J : $W_{\parallel}$ changed by stretching or shortening the magnetic bottle

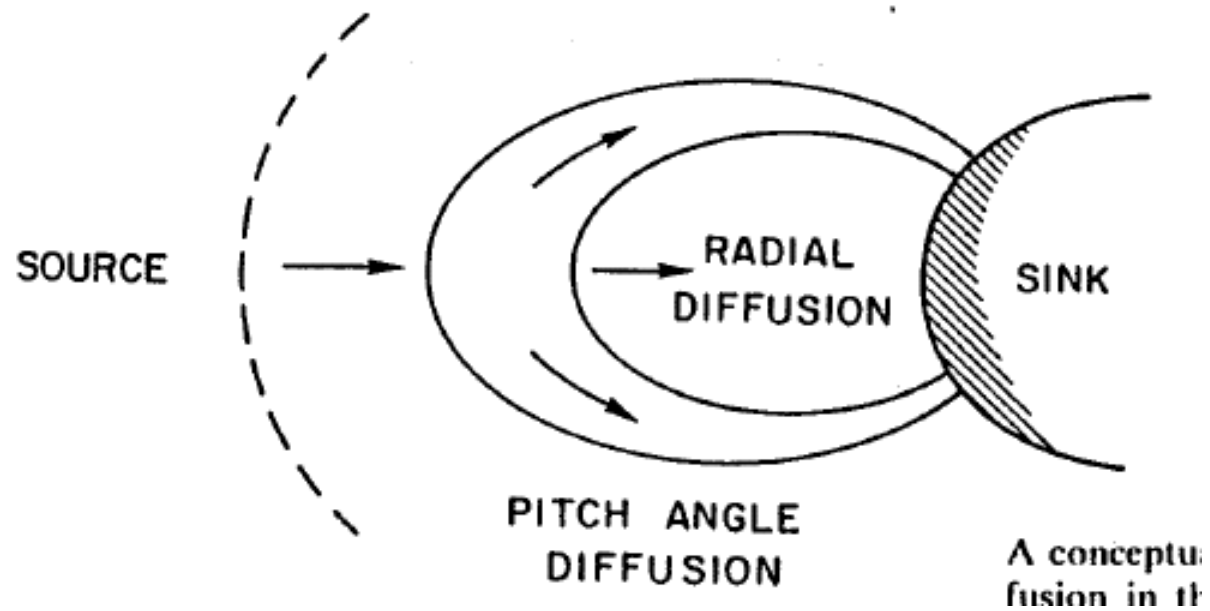
Φ : W changed by compressing or expanding the drift surface

Η σταθερότητα των αδιαβατικών αναλλοίωτων **καταργείται** όταν οι γεωμαγνητικές διαταραχές, που εμφανίζονται στη μαγνητόσφαιρα, έχουν **συχνότητες συγκρίσιμες ή μεγαλύτερες** από τις συχνότητες των τριων αντίστοιχων στις αναλλοίωτες χαρακτηριστικών περιοδικών κινήσεων των σωματιδίων:

1. της γυροκίνησης γύρω από το B
2. της ανάκλασης κατά μήκος του B
3. της ολίσθησης γύρω από τη Γη

Διαταραχές που καταργούν τη διατήρηση των αναλλοίωτων

- Μαγνητοσφαιρική συμπίεση (compression): Φ / ακτινική διάχυση (radial diffusion)
- Επιτάχυνση στη διεύθυνση ολίσθησης από ηλεκτρικά πεδία: Φ / ακτινική διάχυση
- Επιτάχυνση στη διεύθυνση ανάκλασης από μικροταλαντώσεις ή πτώσεις δυναμικού: J / ακτινική διάχυση και σκέδαση γωνίας κλίσης
- Κυκλοτρονική επιτάχυνση λόγω συντονισμού με κύματα: μ και J / σκέδαση γωνίας κλίσης
- Αλληλεπίδραση Coulomb με την ατμόσφαιρα: μ και J / σκέδαση γωνίας κλίσης

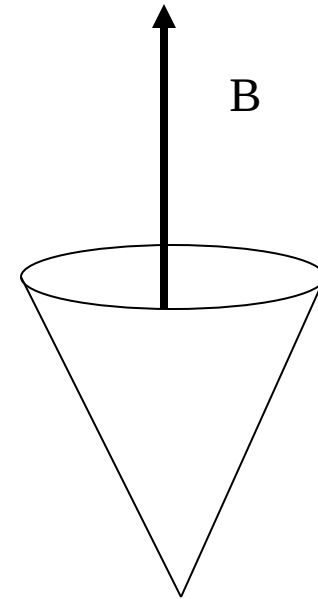


Συνέπειες του κώνου απώλειας

Κώνος απώλειας

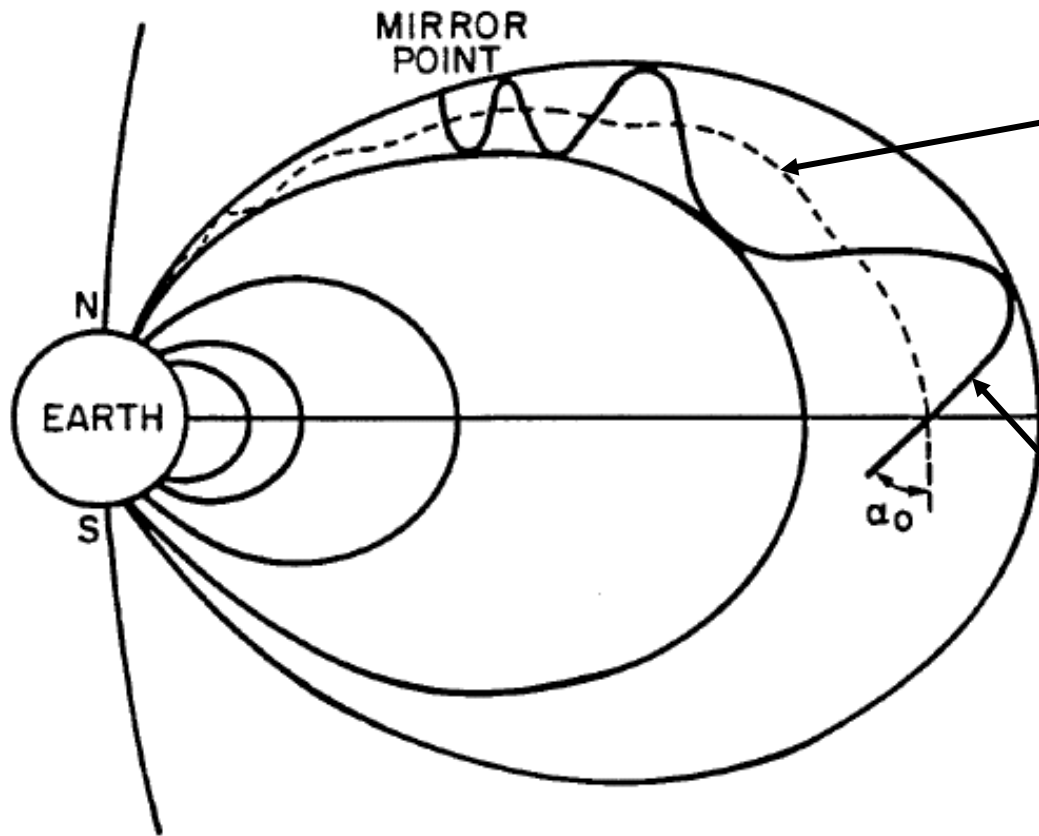
Αν ένα σωματίδιο συναντήσει την ατμόσφαιρα πριν από το σημείο ανάκλασης, θα χαθεί. Αυτό συμβαίνει όταν η γωνία κλίσης είναι πολύ μικρή και λόγω της διατήρησης της πρώτης αδιαβατικής αναλλοίωτης, χρειάζεται πολύ μεγάλο B_M για την ανάκλαση.

Τα σωματίδια **που στον ισημερινό έχουν γωνία κλίσης τόσο μικρή** ώστε να είναι «καταδικασμένα» να χαθούν στην ατμόσφαιρα, **ορίζουν τον κώνο απώλειας**



Loss cone

Κίνηση ανάκλασης σωματιδίου και κώνος διαφυγής



Γωνία κλίσης **εντός** του κώνου διαφυγής. Το σωματίδιο δεν ανακλάται, συνεχίζει την ελικοειδή κίνηση κατά μήκος του B και χάνεται στην ατμόσφαιρα

Γωνία κλίσης **εκτός** του κώνου διαφυγής

Κώνος διαφυγής (loss cone) και υετός (precipitation)

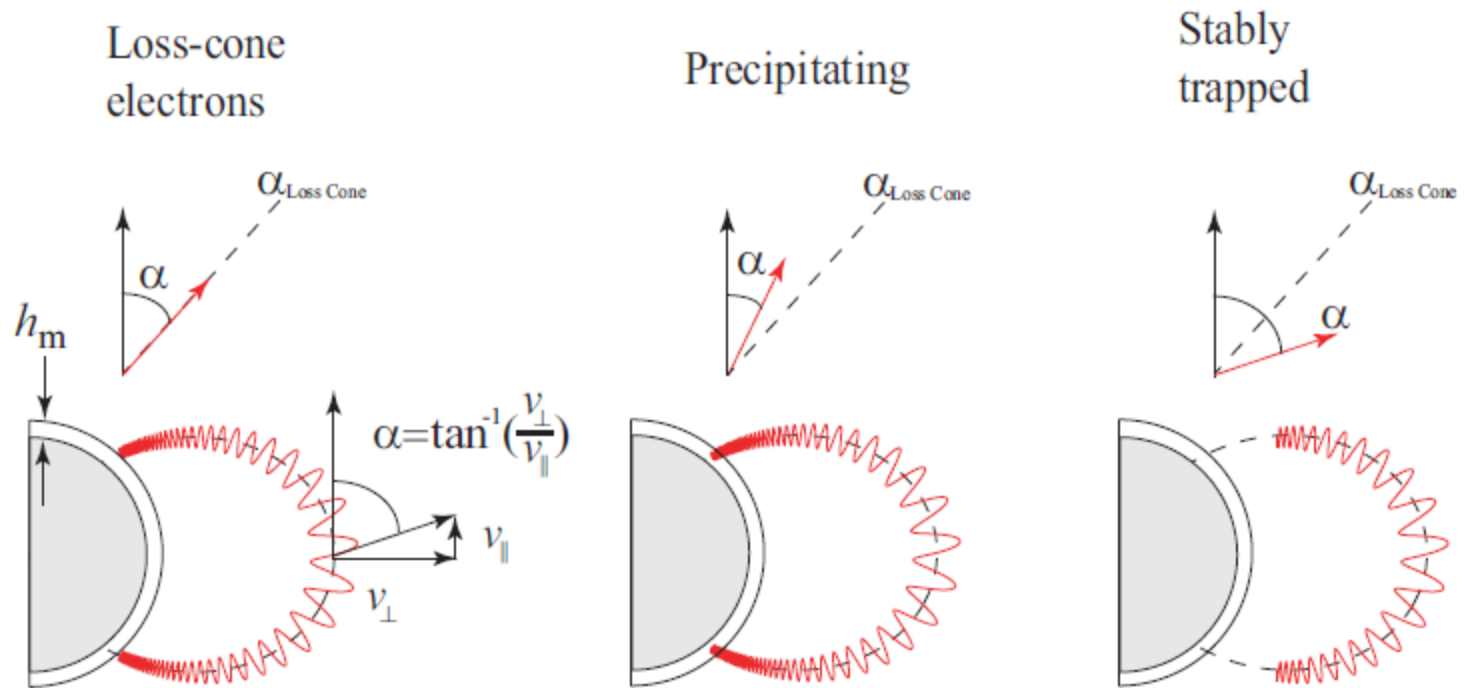
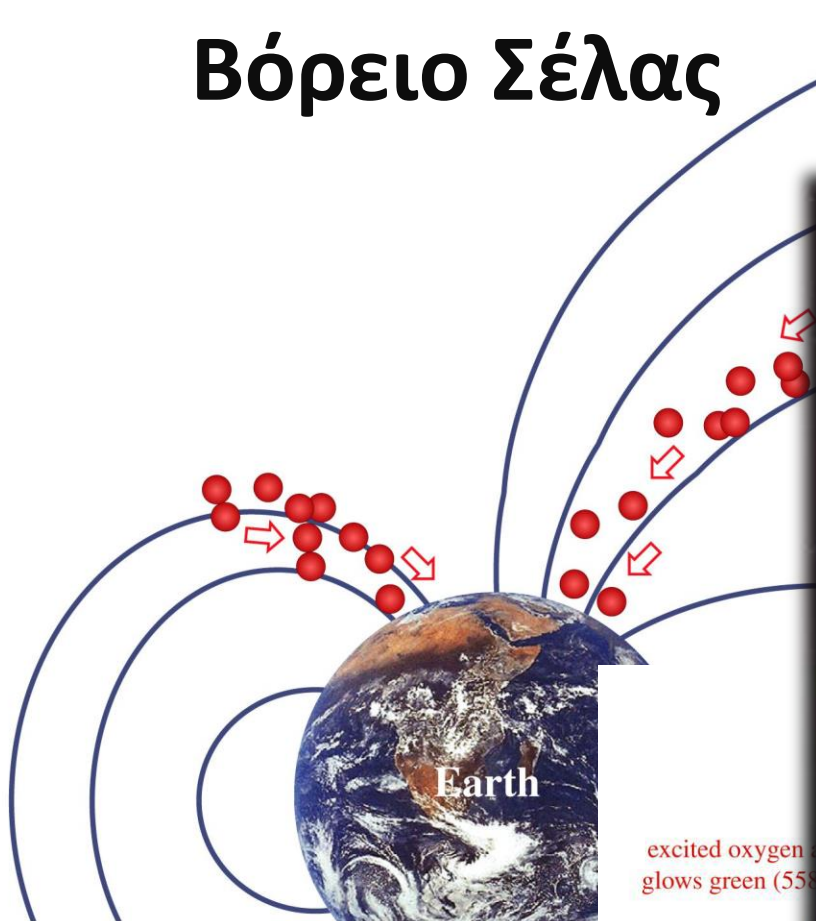


Figure 2.8: The relation of mirror height to equatorial pitch angle, and the concept of a loss-cone angle.

**Ένα λαμπρό
(κυριολεκτικά και μεταφορικά)
αποτέλεσμα
του υετού ηλεκτρονίων
(electron precipitation)**



Βόρειο Σέλας

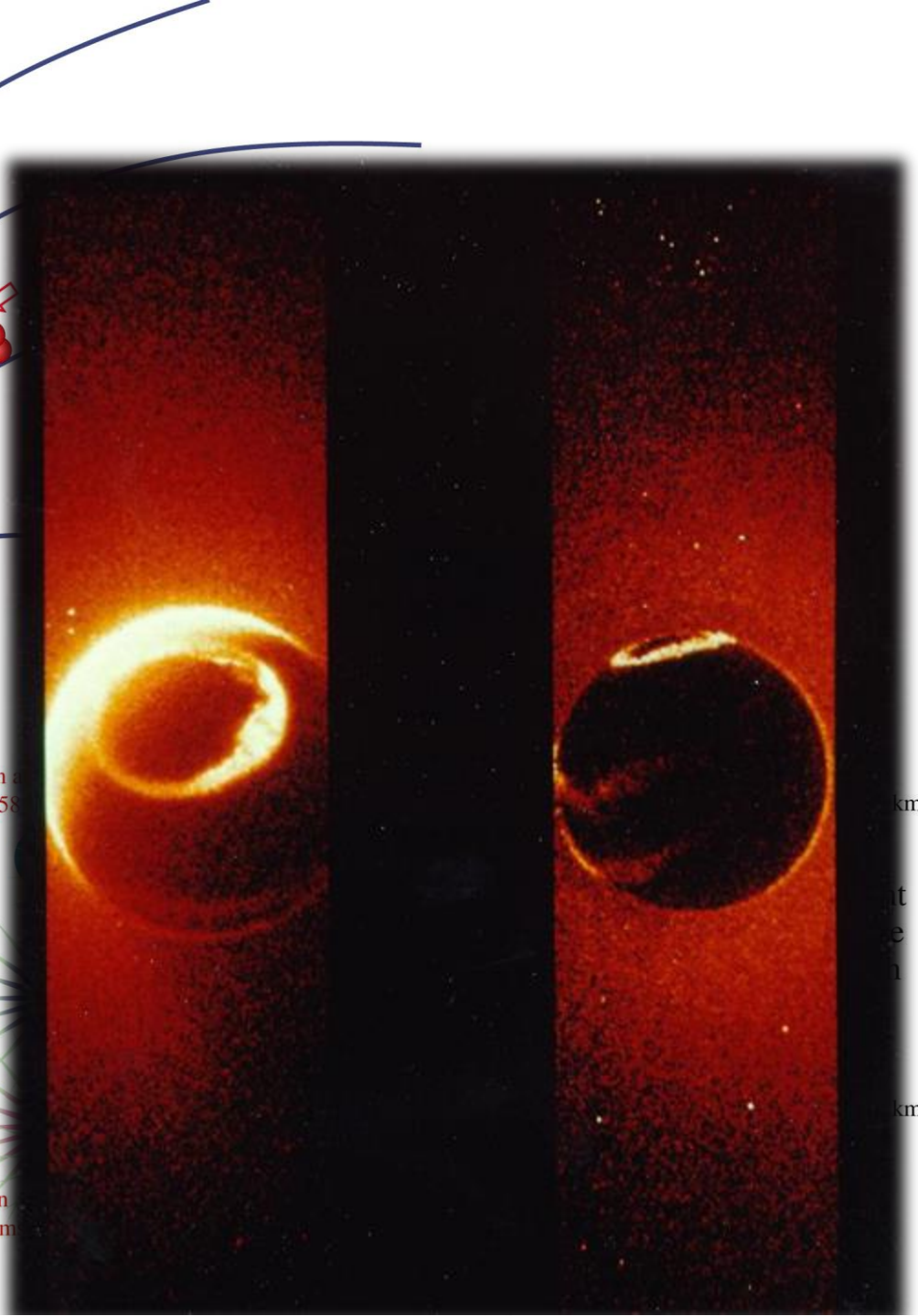


Earth

excited oxygen
glows green (558

nitrogen atom
glows blue

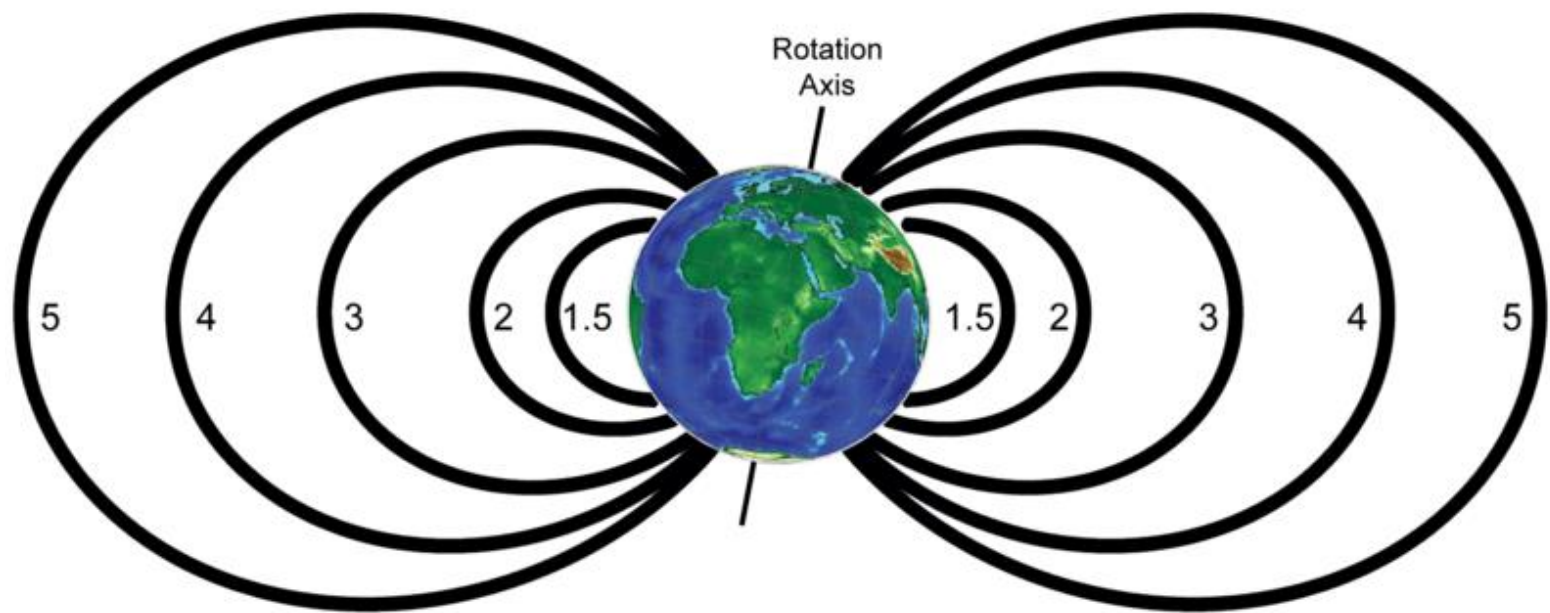
ionized nitrogen
molecules glow crim



Υετός (precipitation)

“Rain down on me from a great height”

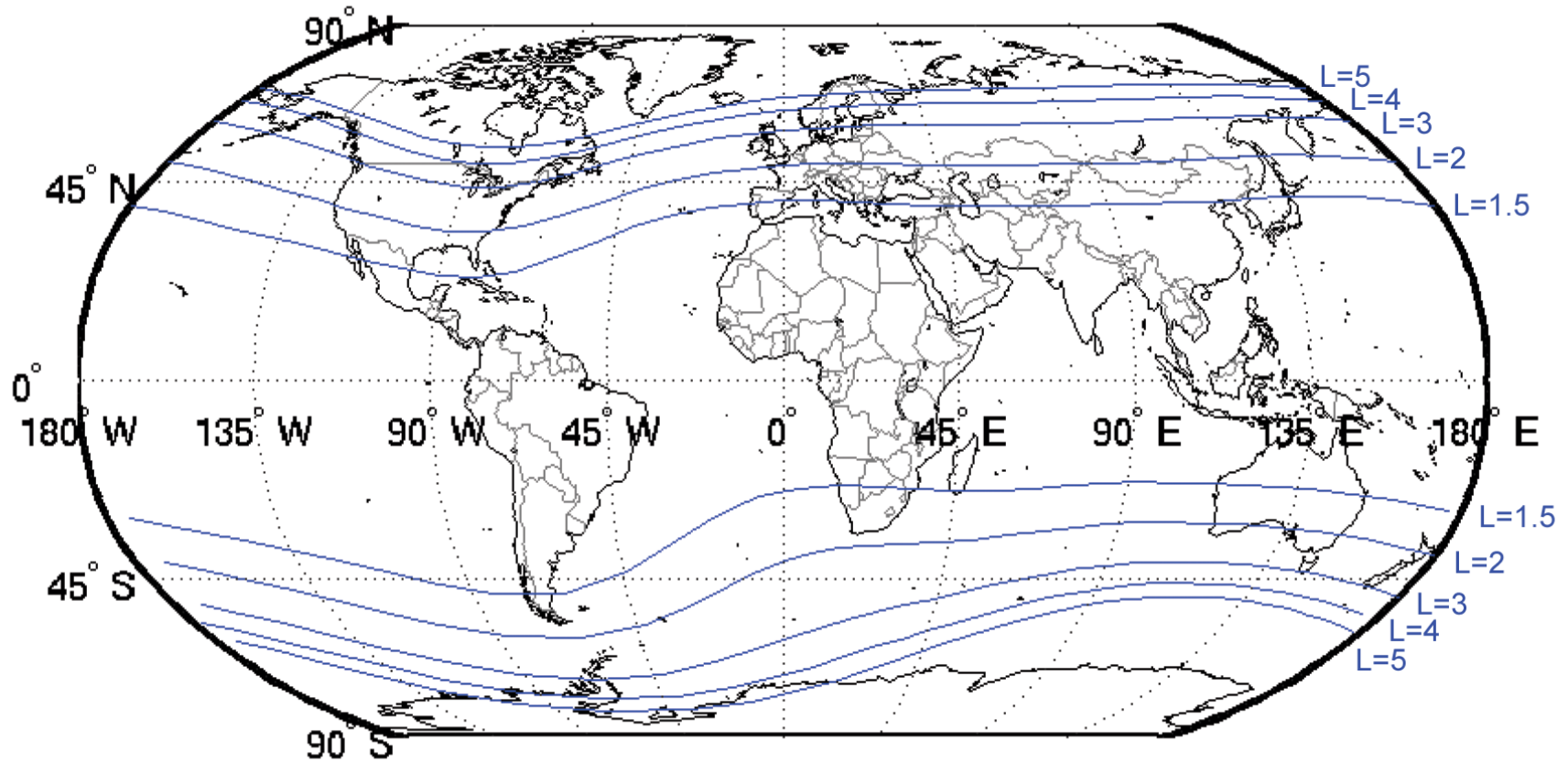




$$r = L \cos^2 \lambda$$

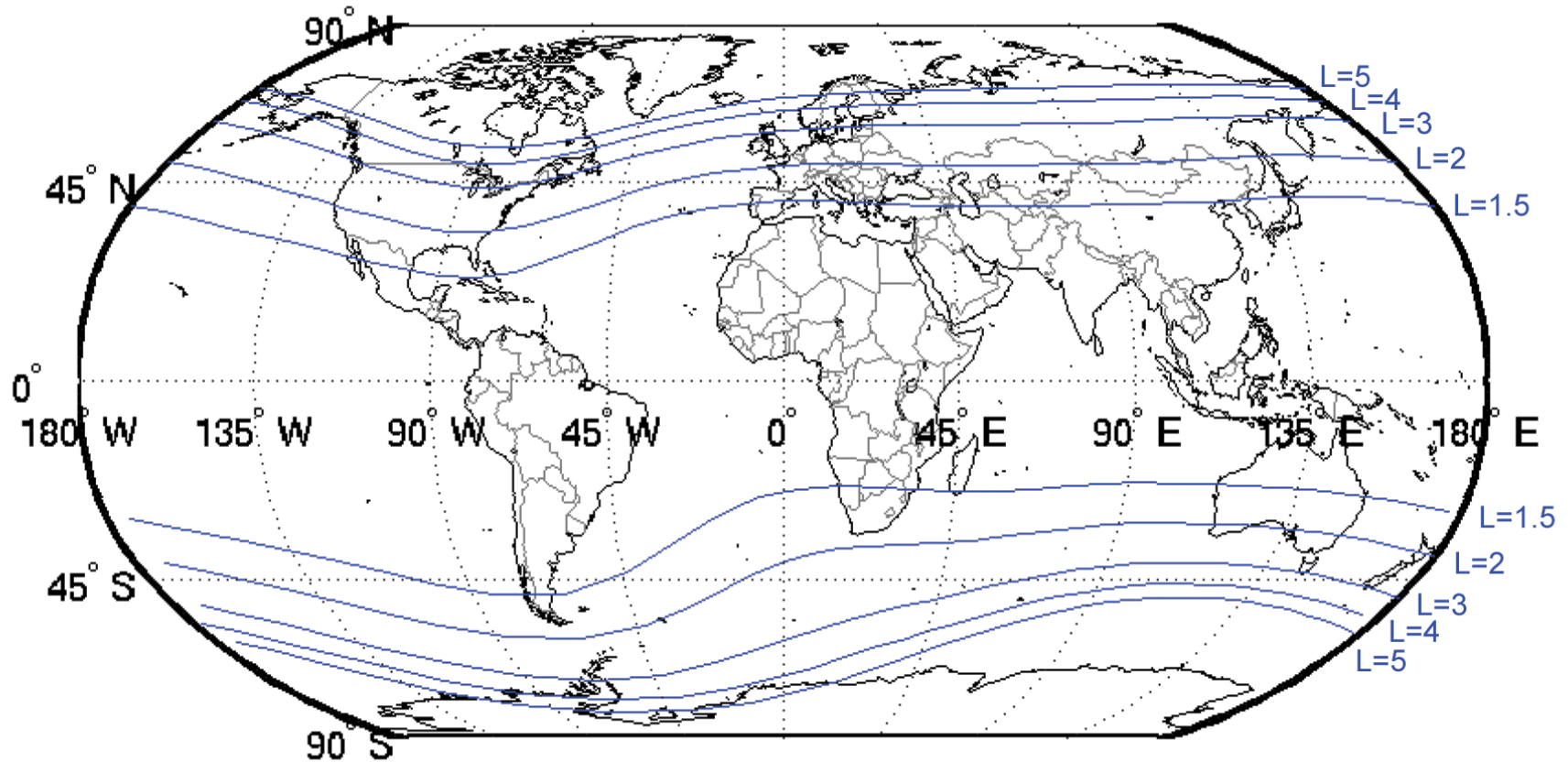
Μαγνητοκέλυφος L

Προβολή στην επιφάνεια της Γης



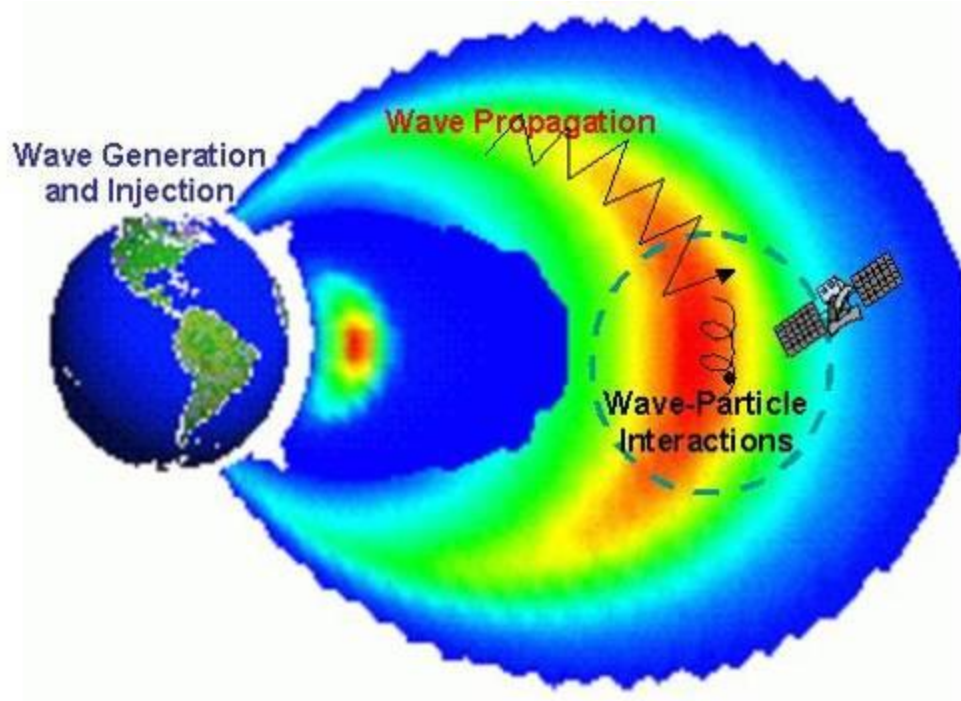
Μαγνητοκέλυφος L

Προβολή στην επιφάνεια της Γης



South Atlantic Anomaly

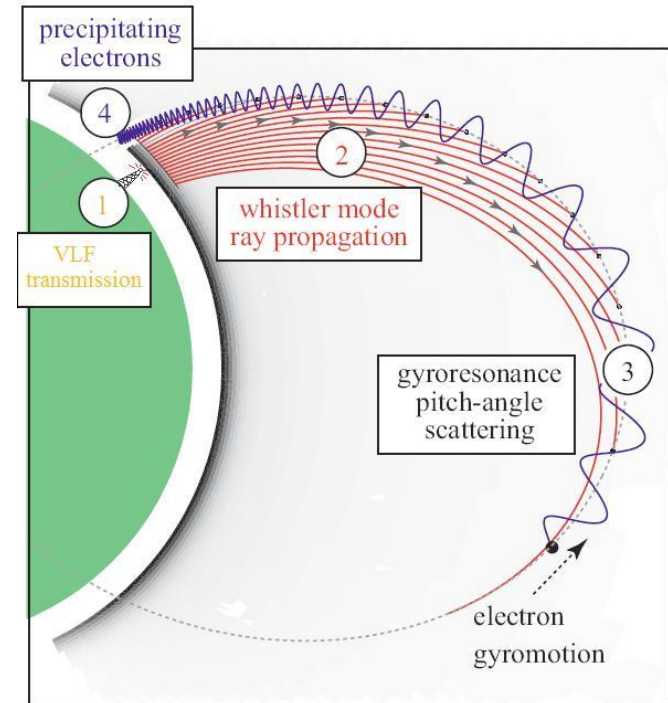
Η τέχνη της κατάρριψης ηλεκτρονίων *aka* How to shoot down nasty electrons



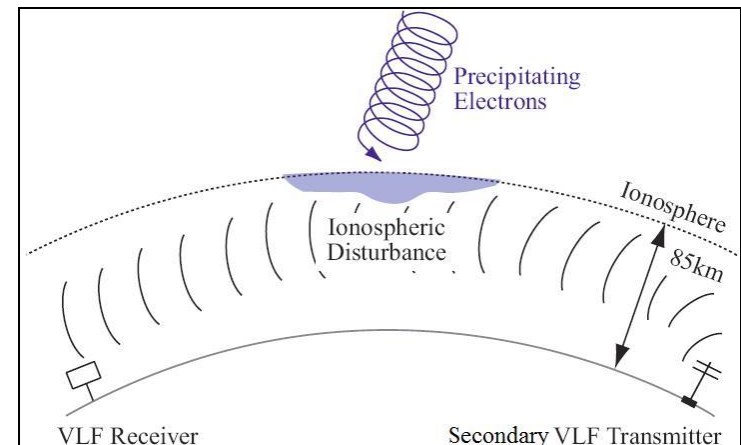


Shooting down electrons

VLF electromagnetic waves, created by lightning, transmitter, or otherwise, can induce precipitation of energetic electrons by altering the pitch angle of their motion.



The precipitation results in an ionospheric enhancement which perturbs subionospherically propagating VLF signals beneath the disturbed region



Controlling radiation belts: HAARP

The Greek connection: Dennis Papadopoulos

