

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

---

**Αναστάσιος Αναστασιάδης**

**Ινστιτούτο Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης  
Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών**

**NTUA-EURATOM GROUP**

**anastasi@space.noa.gr  
<http://www.space.noa.gr/~anastasi>**



**9<sup>ο</sup> Σχολείο Φυσικής και Τεχνολογίας Σύντηξης  
Βόλος, 19 – 23 Απριλίου 2010  
Hellenic Republic – EURATOM Association**



# Περιεχόμενα (μέρος Α)

---

- Ιστορική αναδρομή
- Στοιχεία ατομικής φυσικής
- Πώς δημιουργείται το πλάσμα
- Τι είναι το πλάσμα
- Δυνάμεις μεγάλης και μικρής εμβέλειας
- Ιονισμένο αέριο και πλάσμα
- Παραδείγματα  
(πλάσμα στην φύση και στο εργαστήριο)

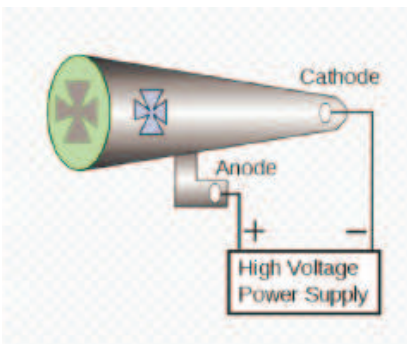
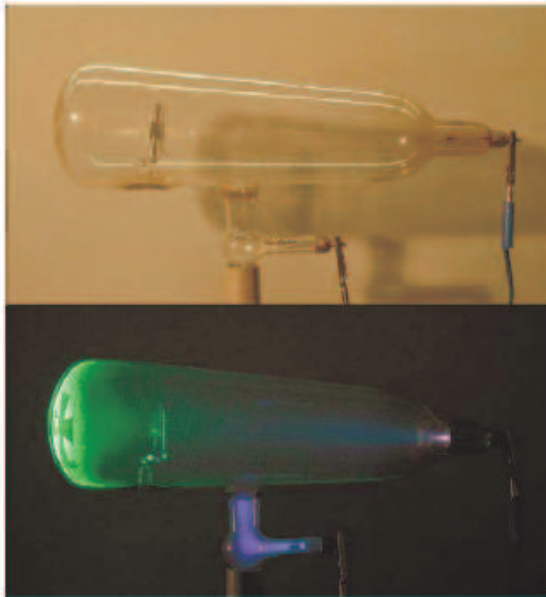


# Ιστορική Αναδρομή

---

1857 (H. Geissler): Εφεύρει τις πρώτες λυχνίες.

1879 (W. Crookes): Χρησιμοποιεί για πρώτη φορά τον όρο “4η μορφή της ύλης” για να περιγράψει το ιονισμένο αέριο σε μια ηλεκτρική εκκένωση (radiant matter).



# Ιστορική Αναδρομή

---

**1897 (J.J. Thomson):** Αναγνωρίζει την ύπαρξη αρνητικά φορτισμένων σωματιδίων μέσα στις λυχνίες Crookes



**1906 (Lord Rayleigh):** Περιέγραψε για πρώτη φορά τη συλλογική συμπεριφορά φορτισμένων σωματιδίων λόγω τις μεγάλης εμβέλειας των δυνάμεων Coulomb.



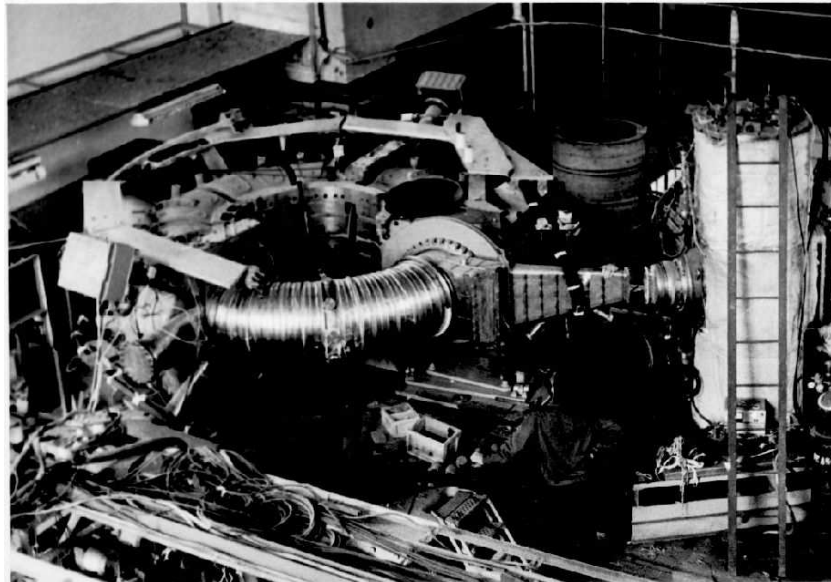
**1929 (Langmuir and Tonks):** Χρησιμοποίησαν για πρώτη φορά τον όρο “πλάσμα” για να περιγράψουν ένα σύνολο από φορτισμένα σωματίδια.



# Ιστορική Αναδρομή

---

1942 (H. Alfvén): (magneto) hydrodynamic waves  
(Alfvén waves)



1955 (L. Artsimovich): κατασκευή του πρώτου  
Tokamak, Institute of Nuclear Fusion, Kurchatov  
Institute, Moscow, Russia

και η ιστορία συνεχίζεται ....



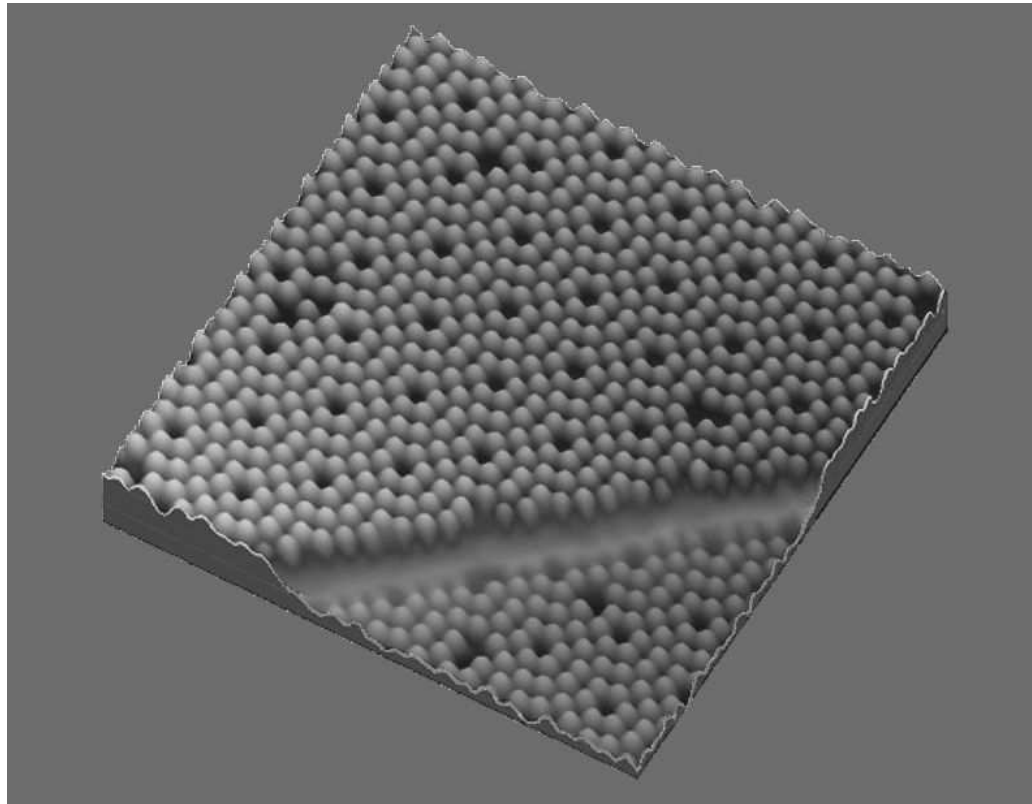
9<sup>ο</sup> Σχολείο Φυσικής και Τεχνολογίας Σύντηξης  
Βόλος, 19 – 23 Απριλίου 2010  
Hellenic Republic – EURATOM Association



# Μερικά στοιχεία Ατομικής Φυσικής

---

- Πώς είναι στην πραγματικότητα τα άτομα;



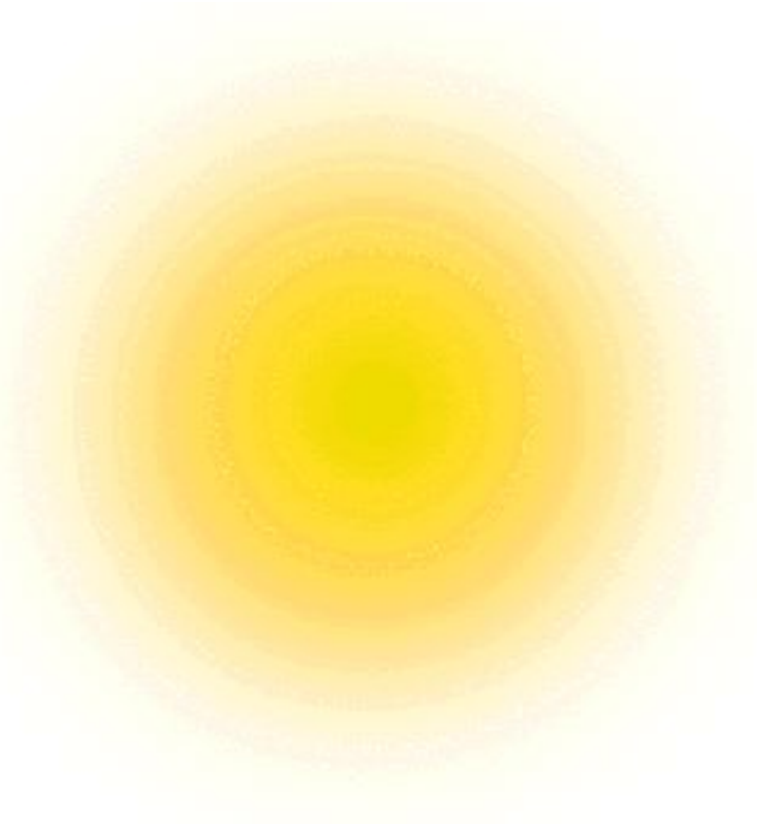
Άτομα σε κρύσταλλο Si



# Μερικά στοιχεία Ατομικής Φυσικής

---

- Κοιτάζοντας ένα άτομο



«Νέφος» Ηλεκτρονίων

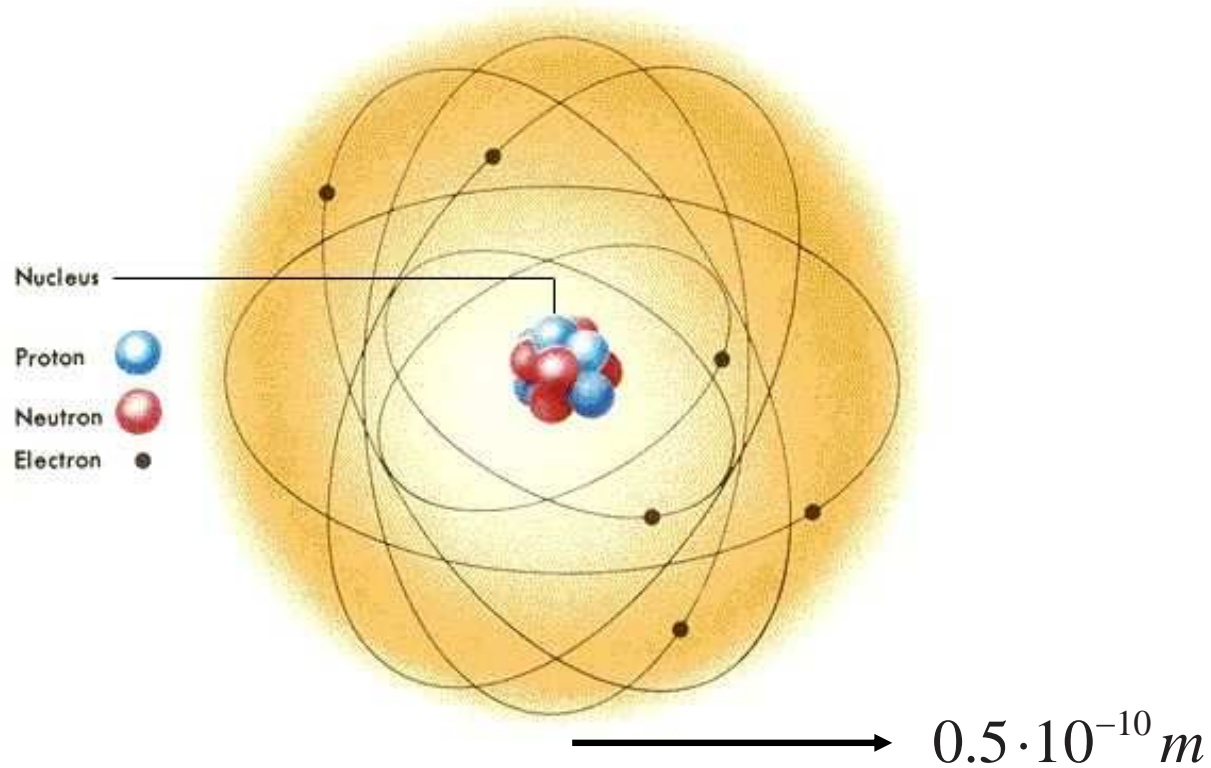


9<sup>ο</sup> Σχολείο Φυσικής και Τεχνολογίας Σύντηξης  
Βόλος, 19 – 23 Απριλίου 2010  
Hellenic Republic – EURATOM Association



# Μερικά στοιχεία Ατομικής Φυσικής

- Κοιτάζοντας στο εσωτερικό ενός ατόμου  
(στο εσωτερικό του «Νέφους» Ηλεκτρονίων)

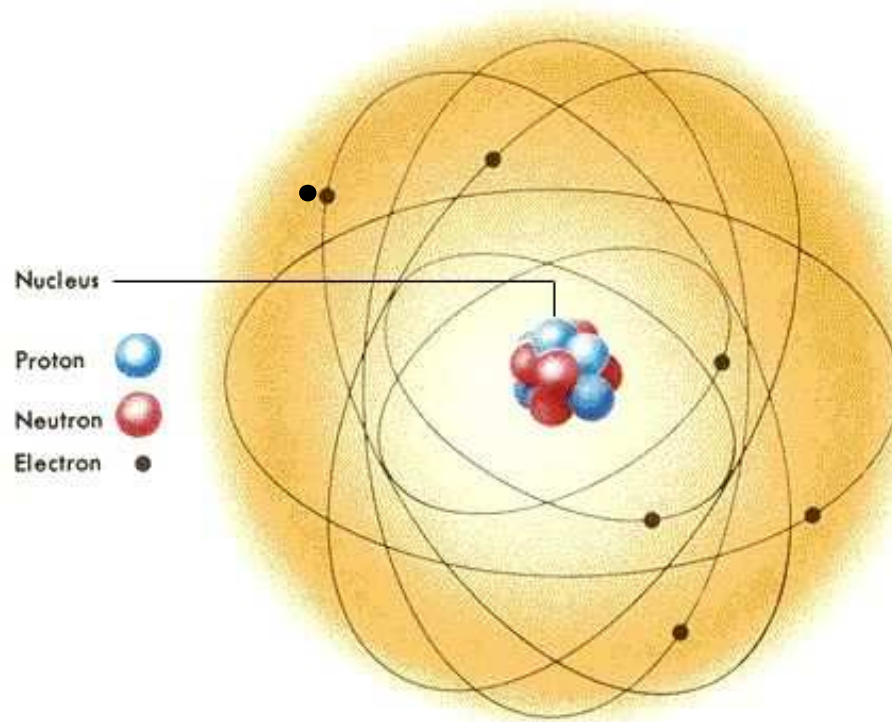




# Μερικά στοιχεία Ατομικής Φυσικής

---

- Διαδικασία Ιονισμού



Ενεργειακά ηλεκτρόνια προκαλούν ιονισμό

---



9<sup>ο</sup> Σχολείο Φυσικής και Τεχνολογίας Σύντηξης  
Βόλος, 19 – 23 Απριλίου 2010  
Hellenic Republic – EURATOM Association



# Μερικά στοιχεία Ατομικής Φυσικής

---

- Ατομική δομή



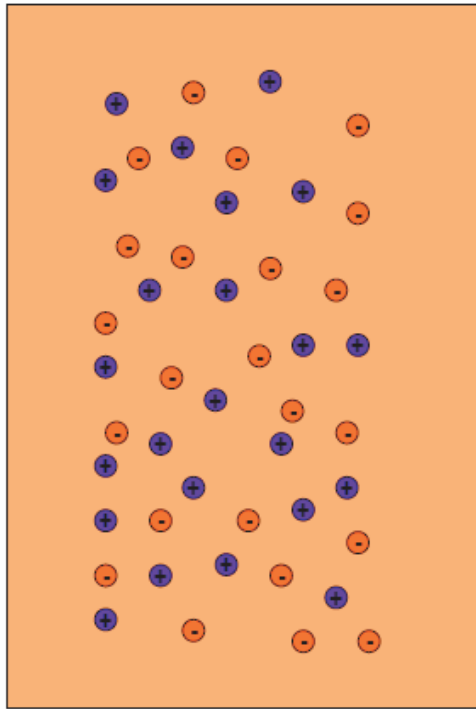
Οι πραγματικές αναλογίες στο εσωτερικό ενός ατόμου



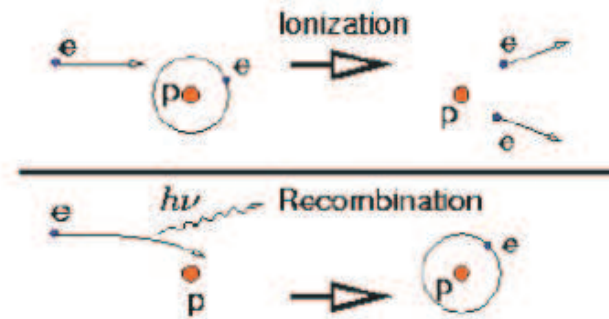
9<sup>ο</sup> Σχολείο Φυσικής και Τεχνολογίας Σύντηξης  
Βόλος, 19 – 23 Απριλίου 2010  
Hellenic Republic – EURATOM Association



# Πώς δημιουργείται το Πλάσμα



- Καθώς **θερμαίνεται** ένα υλικό μεταβαίνει από τα στάδια του στερεού, υγρού και αερίου.
- Από μια θερμοκρασία και επάνω τα άτομα στο αέριο αρχίζουν να **ιονίζονται**.
- Καθώς αυξάνει η θερμοκρασία το **ποσοστό ιονισμού** στο αέριο αυξάνεται.

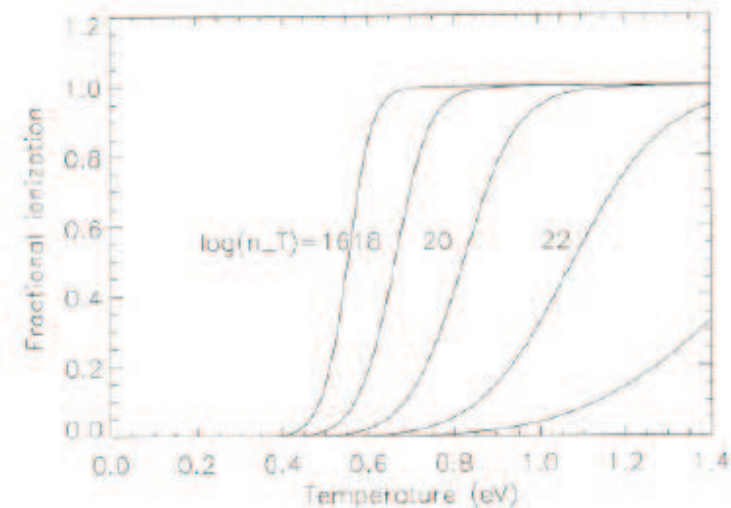


# Πώς δημιουργείται το Πλάσμα

- Ιονισμένο Αέριο
  - Ένα **ιονισμένο αέριο** χαρακτηρίζεται γενικά από ένα μίγμα ουδετέρων φορτίων, ιόντων και ηλεκτρονίων.
  - Για ένα αέριο σε θερμοδυναμική ισορροπία η **εξίσωση του Saha** δίνει το αναμενόμενο **ποσοστό ιονισμού**.

$$\alpha = n_i / (n_i + n_n)$$

$$\frac{n_i}{n_n} = 2.41 \cdot 10^{21} \frac{T^{3/2}}{n_i} \exp(-E_i / k_B T)$$



# Τι είναι τελικά το Πλάσμα;

---

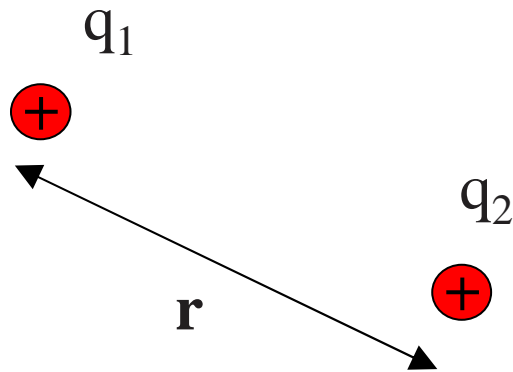
Πλάσμα είναι ένα μερικώς ή ολικώς ιονισμένο αέριο που παρουσιάζει συλλογική συμπεριφορά και ιονεί ουδετερότητα



# Δυνάμεις (μεγάλης και μικρής εμβέλειας)

- Μεγάλης εμβέλειας

Η δύναμη μεταξύ δύο φορτισμένων σωματιδίων  $q_1$  και  $q_2$  που βρίσκονται σε απόσταση  $r$



$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Δύναμη Coulomb



# Δυνάμεις (μεγάλης και μικρής εμβέλειας)

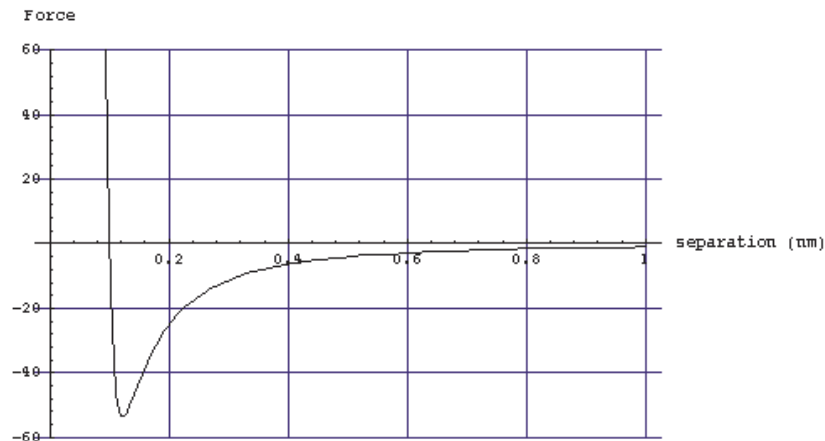
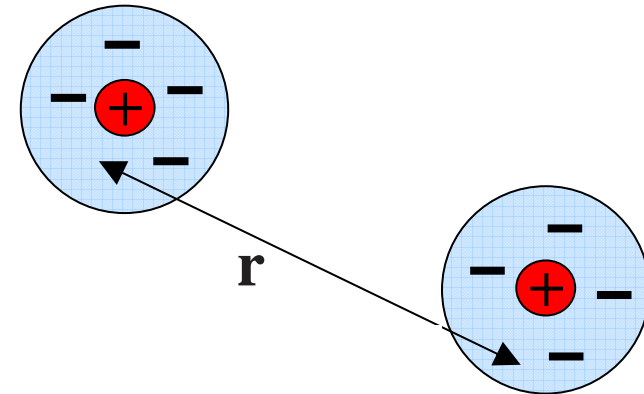
- Μικρής εμβέλειας

Η δύναμη μεταξύ δύο ουδετέρων ατόμων

$$U = 4\varepsilon \left[ \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$

$$\mathbf{F} = -\nabla U$$

$$\mathbf{F} = 4\varepsilon \left[ 12 \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12} - 6 \left( \frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \frac{\hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$



# Προσοχή!!!

---

- Ένα Ιονισμένο Αέριο

Δεν είναι απαραίτητα πλάσμα.

Μπορεί να εμφανίζει «**συλλογική συμπεριφορά**», όταν κατά την αλληλεπίδραση των φορτισμένων σωματιδίων οι δυνάμεις μεγάλης εμβέλειας υπερισχύουν των δυνάμεων μικρής εμβέλειας.

Μπορεί να εμφανίζει «**οιονεί ουδετερότητα**», όταν οι μεταβολές της πυκνότητας φορτίου περιορίζονται σε πολύ μικρό χώρο.

- Το Πλάσμα

Είναι ένα **ιονισμένο αέριο** που εμφανίζει «**συλλογική συμπεριφορά**» και «**οιονεί ουδετερότητα**».

Χαρακτηρισμός ως **Τέταρτη Κατάσταση της Ύλης**





# Πλάσμα: Η τέταρτη κατάσταση της ύλης

---

Η ύλη σε 'κανονικές συνθήκες' εμφανίζεται σε 3 διαφορετικές καταστάσεις: Στερεό, Υγρό και Αέριο.

Αυξάνοντας σταδιακά τη **θερμοκρασία** (=τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων) παρατηρούμε διαδοχικά αλλαγή φάσης από το στερεό, στο υγρό, στο αέριο.




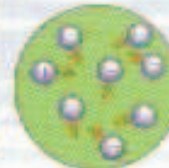
Μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της **συχνότητας συγκρούσεων** και του **βαθμού ιονισμού** του αερίου.

Το ιονισμένο αέριο μπορεί να γίνει **Πλάσμα** αν υπάρχουν κατάλληλες συνθήκες που αφορούν την Πυκνότητά του, την Θερμοκρασία του και το Χαρακτηριστικό Μήκος (ιονειί ουδετερότητα και συλλογική συμπεριφορά).

Το πλάσμα δεν εμφανίζει καμία άλλη αλλαγή φάσης, αλλά συμπεριφέρεται διαφορετικά όταν εφαρμόσουμε **Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία**..



# Πλάσμα: Η τέταρτη κατάσταση της ύλης

<b>Solid</b>	<b>Liquid</b>	<b>Gas</b>	<b>Plasma</b>
Example <b>Ice</b> $H_2O$	Example <b>Water</b> $H_2O$	Example <b>Steam</b> $H_2O$	Example <b>Ionized Gas</b> $H_2 \rightarrow H^+ + H^+ + 2e^-$
<b>Cold</b> $T < 0^\circ C$	<b>Warm</b> $0 < T < 100^\circ C$	<b>Hot</b> $T > 100^\circ C$	<b>Hotter</b> $T > 100,000^\circ C$ ( $> 10$ electron Volts)
			
<b>Molecules Fixed in Lattice</b>	<b>Molecules Free to Move</b>	<b>Molecules Free to Move, Large Spacing</b>	<b>Ions and Electrons Move Independently, Large Spacing</b>

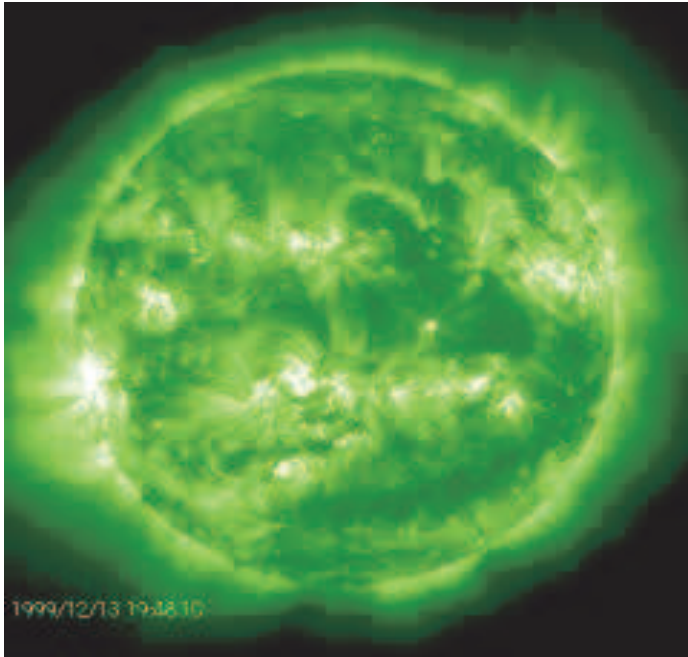


# Πλάσμα στην Φύση

---

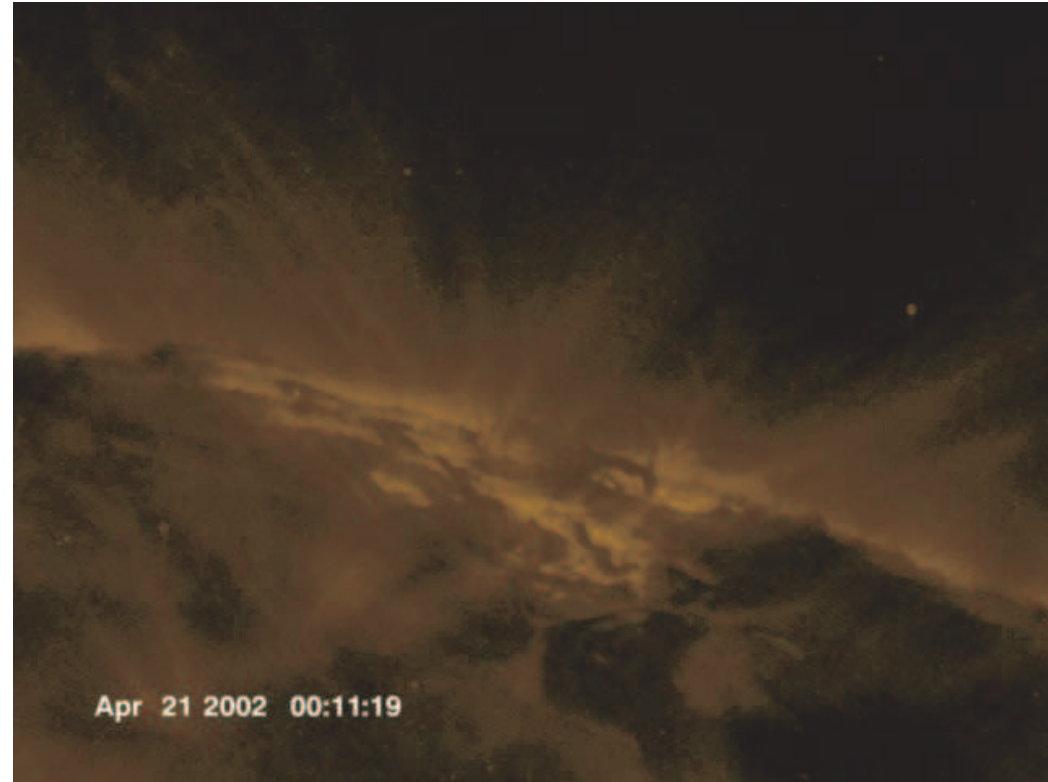
Το 99 % της ύλης στο Σύμπαν είναι σε μορφή πλάσματος

Αστέρες



Πυκνότητα  $n \sim 10^{30} \text{ m}^{-3}$

Θερμοκρασία  $T \sim 10^7 \text{ K}$



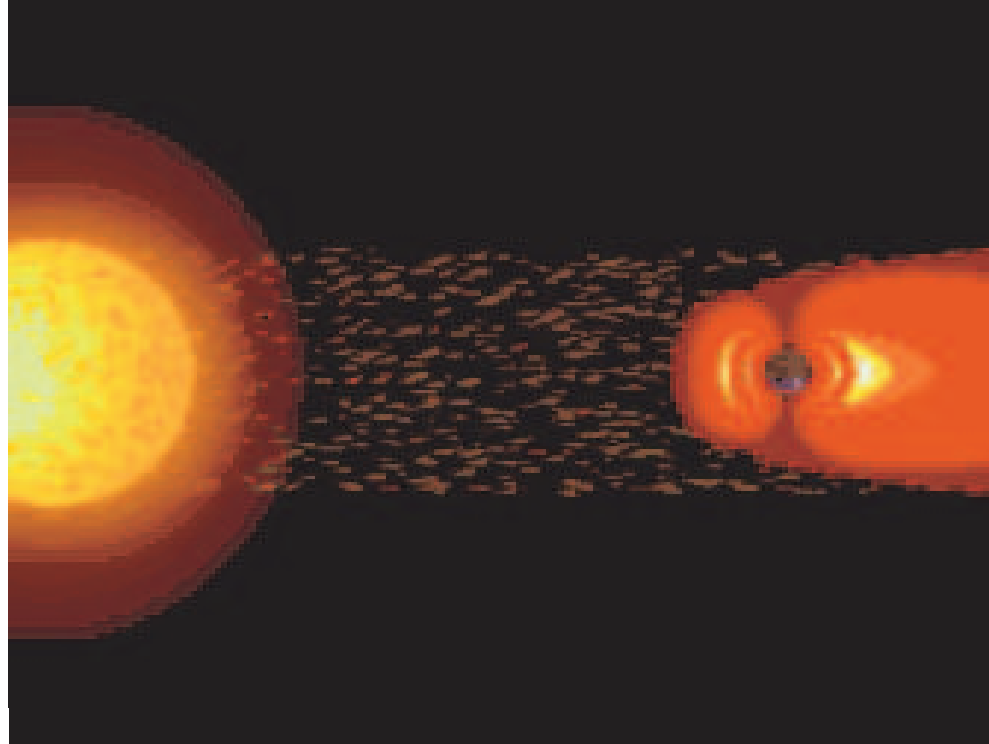
9<sup>ο</sup> Σχολείο Φυσικής και Τεχνολογίας Σύντηξης  
Βόλος, 19 – 23 Απριλίου 2010  
Hellenic Republic – EURATOM Association



# Πλάσμα στην Φύση

---

Το 99 % της ύλης στο Σύμπαν είναι σε μορφή πλάσματος



Ηλιακός άνεμος  $n_e \sim 10^6 \text{ m}^{-3}$ ,  $T_e \sim 500.000\text{K}$

Μεσοαστρική ύλη  $n_e \sim 10^4 - 10^6 \text{ m}^{-3}$ ,  $T_e \sim 100\text{K}$

Ηλιακό στέμμα  $n_e \sim 10^{15} \text{ m}^{-3}$ ,  $T_e \sim 10.000.000\text{K}$

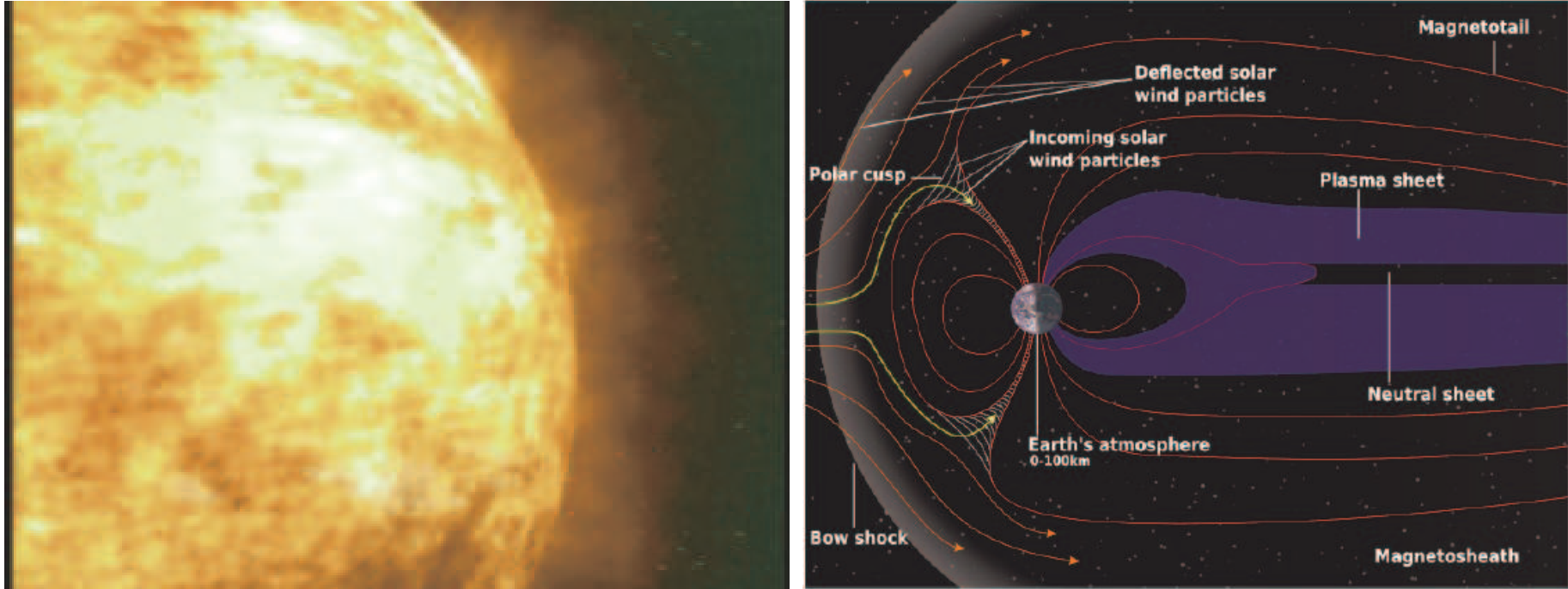


9<sup>ο</sup> Σχολείο Φυσικής και Τεχνολογίας Σύντηξης  
Βόλος, 19 – 23 Απριλίου 2010  
Hellenic Republic – EURATOM Association



# Πλάσμα στην Φύση

Το 99 % της ύλης στο Σύμπαν είναι σε μορφή πλάσματος



Μαγνητόσφαιρα Γης ( $15-200R_E$ )  $n_e \sim 10^{11} \text{ m}^{-3}$ ,  $T_e \sim 1000\text{K}$

Ιονόσφαιρα Γης ( $70-500\text{km}$ )  $n_e \sim 10^{10} - 10^{12} \text{ m}^{-3}$ ,  $T_e \sim 1000\text{K}$



9<sup>ο</sup> Σχολείο Φυσικής και Τεχνολογίας Σύντηξης  
Βόλος, 19 – 23 Απριλίου 2010  
Hellenic Republic – EURATOM Association



# Πλάσμα στην Φύση

---

Το 99 % της ύλης στο Σύμπαν είναι σε μορφή πλάσματος

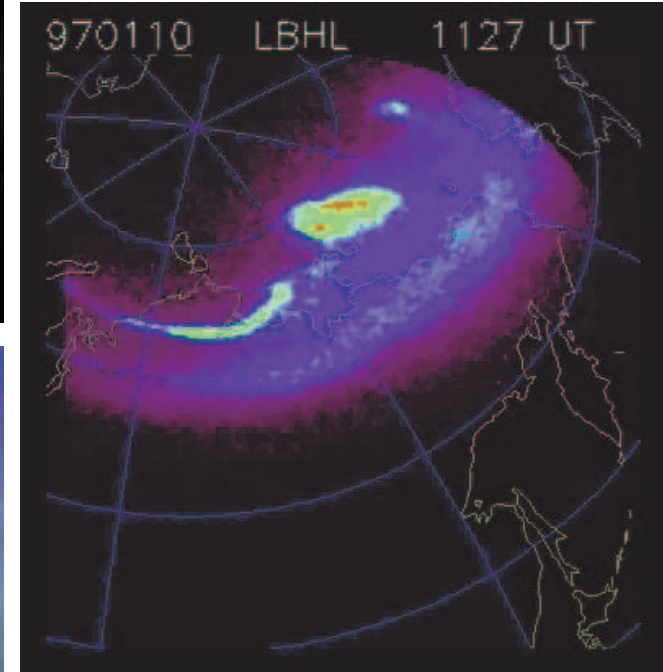
Αστρικά Νέφη...



9<sup>ο</sup> Σχολείο Φυσικής και Τεχνολογίας Σύντηξης  
Βόλος, 19 – 23 Απριλίου 2010  
Hellenic Republic – EURATOM Association



# Πλάσμα στη Γη



9<sup>ο</sup> Σχολείο Φυσικής και Τεχνολογίας Σύντηξης  
Βόλος, 19 – 23 Απριλίου 2010  
Hellenic Republic – EURATOM Association



# Πλάσμα στη φύση

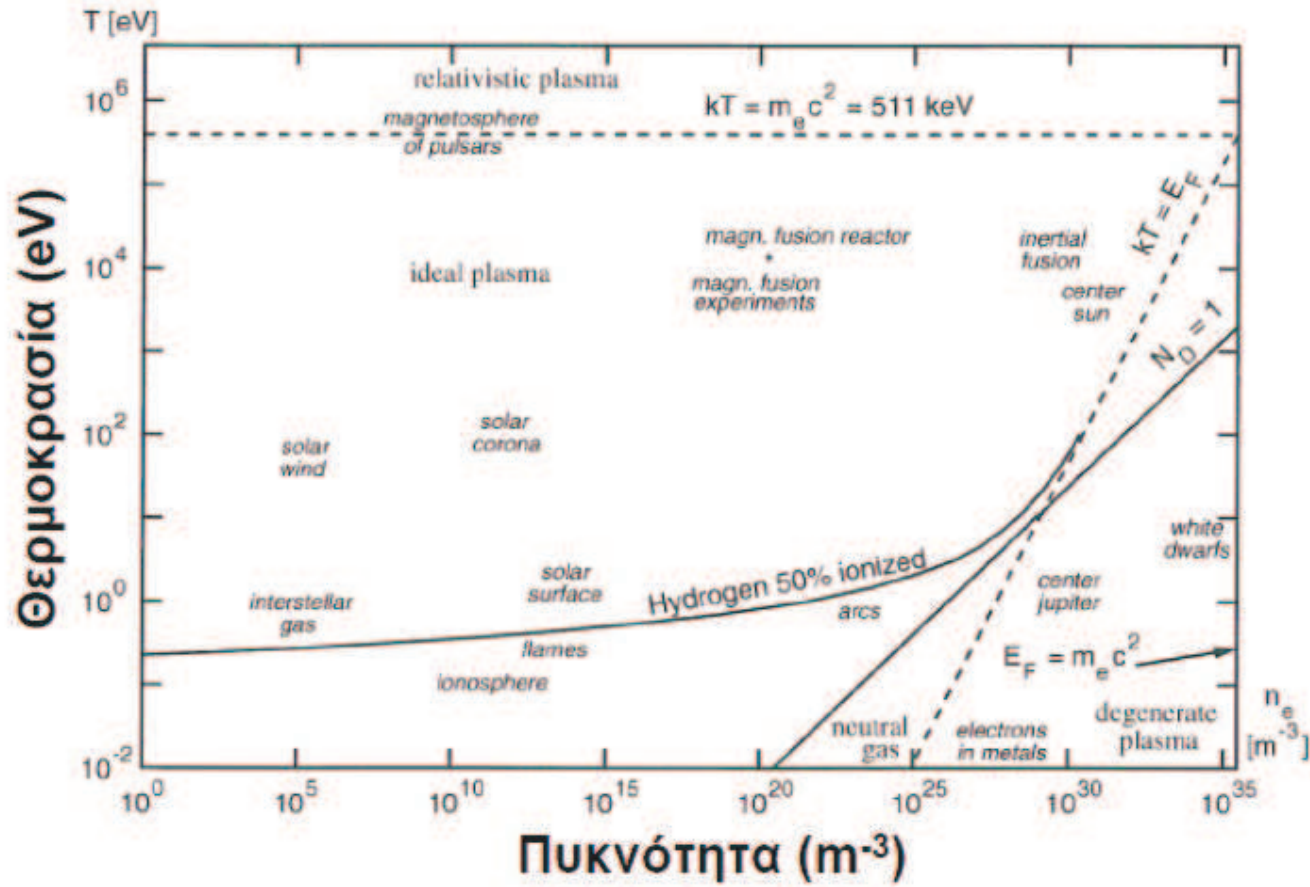
1eV ~ 11600 K

Είδος πλάσματος	Πυκνότητα $n$ [ $m^{-3}$ ]	Θερμοκρασία $T$ [K]
Ιονόσφαιρα Γης (70-500km)	$10^{12}$	1000
Ηλιακός άνεμος	$10^6$	$T_e \sim 500.000, T_i \sim 100.000$
Ηλιακό στέμμα	$10^{15}$	1-3.000.000
Τοκαμακ Πλάσμα	$10^{21}$	100.000.000
Λευκοί νάνοι	$10^{36}$	20.000
Βόμβα υδρογόνου	$10^{36}$	100.000.000.000
Μεσοαστρική ύλη	$10^4 - 10^6$	100





# Πλάσμα στη φύση



9<sup>ο</sup> Σχολείο Φυσικής και Τεχνολογίας Σύντηξης  
 Βόλος, 19 – 23 Απριλίου 2010  
 Hellenic Republic – EURATOM Association



# Περιεχόμενα (μέρος Β)

---

- Περιγραφή του πλάσματος
- Οιονεί ουδετερότητα
- Συχνότητα πλάσματος
- Χωρικές και Χρονικές κλίμακες
- Μήκος Debye
- Κριτήρια ύπαρξης πλάσματος
- Συγκρούσεις Coulomb – Συχνότητα συγκρούσεων
- Μαγνητισμένο πλάσμα
- Σύνοψη



# Περιγραφή του πλάσματος

Για να περιγράψουμε **πλήρως ένα πλάσμα**, θα πρέπει να καταγράψουμε τις θέσεις και τις ταχύτητες όλων των σωματιδίων που το συνθέτουν, και να **λύσουμε τις εξισώσεις της κίνησης για κάθε σωματίδιο**, παίρνοντας υπ' όψιν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που βλέπει κάθε σωματίδιο **ανά πάσα χρονική στιγμή**.

## Εξισώσεις Maxwell

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) +$$
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon_0 \quad (\text{νόμος Coulomb-Gauss})$$
$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{νόμος Faraday})$$
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$
$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (\text{νόμος Ampere-Maxwell})$$



# Περιγραφή του πλάσματος

---

- α) Μελέτη της **κίνησης μεμονωμένων** σωματιδίων μέσα σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία.
- β) **Κινητική Θεωρία** => Συνάρτηση κατανομής ταχυτήτων  $f(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)$   
=> Στατιστική περιγραφή
- γ) **Προσέγγιση ρευστού** => Κατανομή ταχυτήτων Maxwell – Boltzmann  
=> Μακροσκοπικές ποσότητες ( $n, T, P$  κλπ.)  
=> Συνδυασμός εξισώσεων Maxwell και Navier-Stokes

Μεμονωμένο Σωματίδιο => Τροχιές  
Κινητική Θεωρία => Συντελεστές Μεταφοράς (διάχυσης)  
Προσέγγιση ρευστού => Μακροσκοπική Περιγραφή



# Οιονεί ουδετερότητα

---

Έστω  $n_e$  είναι η πυκνότητα των ηλεκτρονίων και  $n_i$  η πυκνότητα των ιόντων το πλάσμα.

Τότε η πυκνότητα φορτίου είναι:  $\rho = e(n_i - n_e)$

Από τον νόμο των Coulomb-Gauss προκύπτει ένα ηλεκτρικό πεδίο:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} = \frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e)$$

Αυτό το ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί μία δύναμη που τείνει να απομακρύνει το περιττό φορτίο έτσι ώστε:

$$n_e \approx \sum_i n_i Z_i$$

Αυτό δεν σημαίνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο  $\mathbf{E} = 0$ , διότι πολύ μικρές αποκλίσεις από ουδετερότητα προκαλούν σημαντικά πεδία.

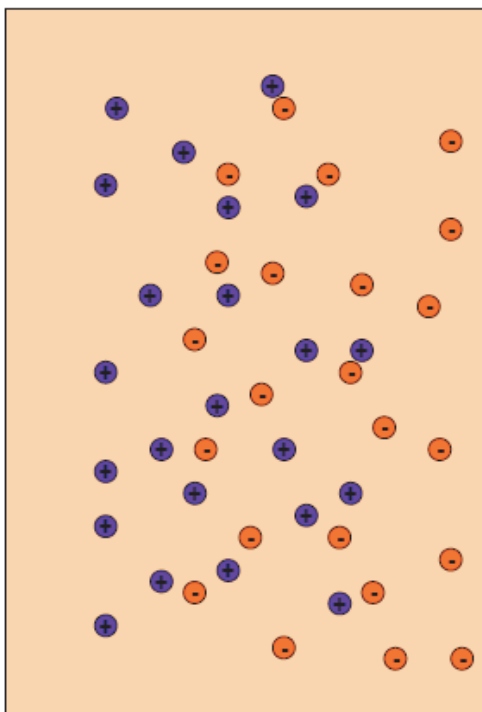
Η οιονεί-ουδετερότητα ισχύει μόνο για αρκετά μεγάλες χρονικές και χωρικές κλίμακες

---



# Συχνότητα Πλάσματος

---

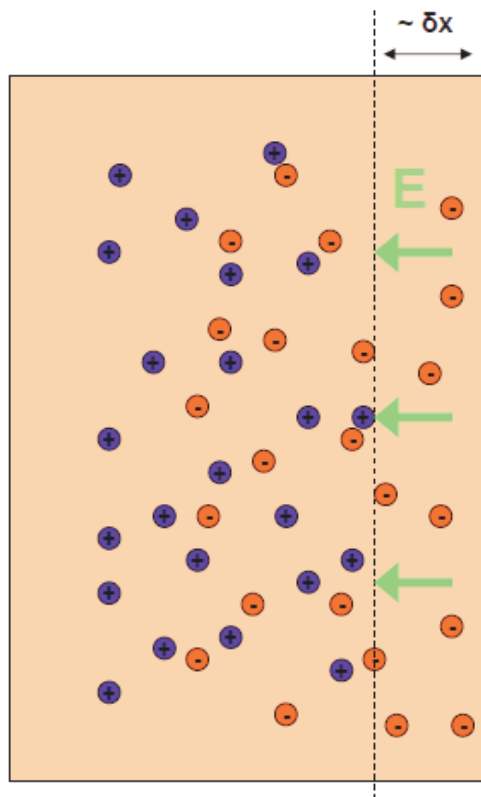


Η πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου των ιόντων και των ηλεκτρονίων είναι τέτοια ώστε οποιαδήποτε απόκλιση από ουδετερότητα δημιουργεί ένα δυνατό ηλεκτρικό πεδίο που τείνει να την αποκαταστήσει:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = -\frac{en_0}{\epsilon_0}$$



# Συχνότητα Πλάσματος



Η εξίσωση κίνησης των ηλεκτρονίων είναι:

$$m_e \frac{d^2 \delta x}{dt^2} = -eE = -\frac{n_0 e^2 \delta x}{\epsilon_0}$$

Τα ηλεκτρόνια εκτελούν αρμονική ταλάντωση γύρω από την θέση ισορροπίας με συχνότητα :

$$\omega_p = \left( \frac{n_0 e^2}{m \epsilon_0} \right)^{1/2}$$

Αν θεωρήσουμε και την κίνηση των ιόντων τότε

$$\omega_p = \left( \frac{n_0 e^2}{m_e \epsilon_0} + \frac{n_0 e^2}{m_i \epsilon_0} \right)^{1/2}$$

η συχνότητα πλάσματος είναι :



# Χρονική και Χωρική κλίμακα στο πλάσμα

---

- Η χαρακτηριστική χρονική κλίμακα του πλάσματος είναι:

$$\tau_p \sim 1/\omega_p$$

- Η χαρακτηριστική χωρική κλίμακα του πλάσματος είναι:

$$\lambda_D \sim v_{th} \tau_p \sim \sqrt{T / m_e} \omega_p^{-1} \sim \sqrt{\frac{\epsilon_0 T}{ne^2}}$$

- Για ένα ιδανικό πλάσμα θα πρέπει να ισχύει :

$$\frac{\lambda_D}{L} \ll 1$$
$$\frac{\tau_p}{\tau} \ll 1$$



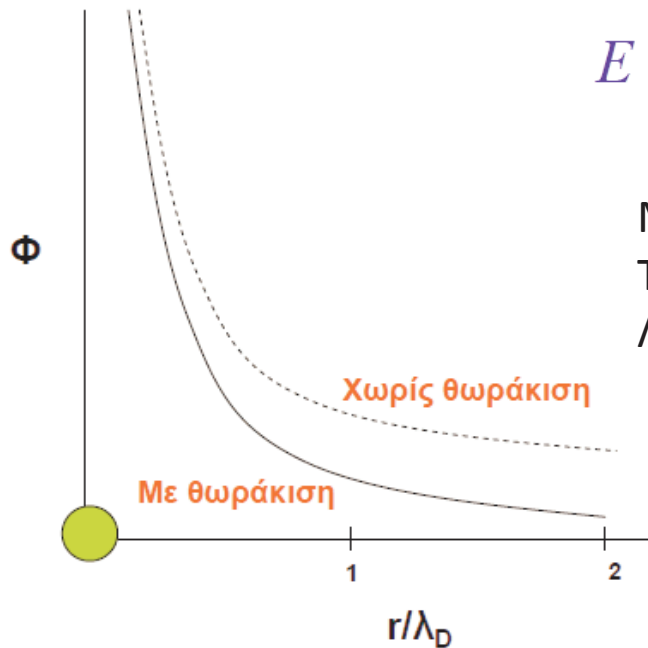


# Το μήκος Debye

Για ένα ιόν στο κενό, το ηλεκτρικό πεδίο γύρω του είναι :

$$E = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Μέσα στο πλάσμα, τα γειτονικά σωματίδια προσαρμόζουν τις τροχιές τους σ' αυτό το ηλεκτρικό πεδίο. Λόγω αυτής της κίνησης, το φορτίο του ιόντος θωρακίζεται.



Η εξίσωση Poisson δίνει:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} r^2 \frac{d\varphi}{dr} = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e) = -\frac{n_0 e}{\epsilon_0} (e^{-e\varphi/T} - e^{e\varphi/T})$$

Λύση :  $\varphi = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r} e^{-\sqrt{2}r/\lambda_D}$  με  $\lambda_D = \left( \frac{\epsilon_0 T}{e^2 n_0} \right)^{1/2}$  Το μήκος Debye



# Παράμετρος πλάσματος – Κριτήρια ύπαρξης πλάσματος

Ουσιαστικά, στο πλάσμα κάθε φορτίο θωρακίζεται από άλλα, έτσι ώστε να μειώνει το δυναμικό του. **Θωράκιση Debye.**

Η θωράκιση Debye γίνεται πιο ισχυρή, όσο περισσότερα φορτία υπάρχουν στο εσωτερικό μιας **σφαίρας με ακτίνα ίση με το μήκος Debye.**

Για **ιδανικό πλάσμα** επομένως ο **αριθμός των φορτίων** που υπάρχει στην σφαίρα Debye θα πρέπει να είναι :

$$\Lambda = 4\pi n \lambda_D^3 \gg 1$$

$$n_e \approx \sum_j n_j Z_j$$

Κριτήρια Ύπαρξης Πλάσματος  $\lambda_D \ll L$

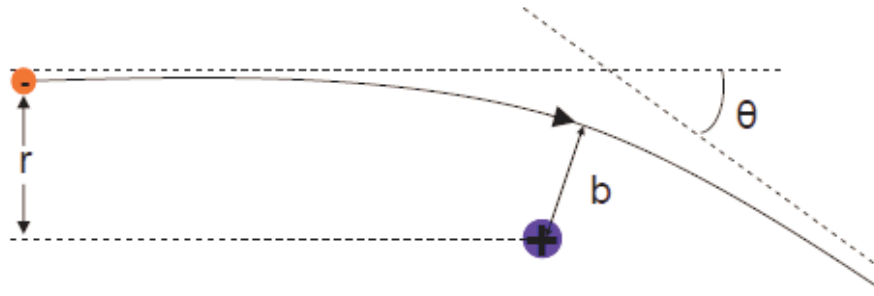
$$\Lambda \gg 1$$



# Συγκρούσεις Coulomb – Συχνότητα Συγκρούσεων

Αν θεωρήσουμε την απλή περίπτωση των δύο φορτίων, η μεταξύ τους δύναμη είναι :

$$F \sim 1/r^2$$



Από την κλασική θεωρία του Rutherford προκύπτει ότι :

$$\cot(\theta / 2) = \frac{4\pi\epsilon_0 m_e v^2 r}{e^2} \Rightarrow r_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e v^2}$$

για  $\theta=90^\circ$



# Συγκρούσεις Coulomb – Συχνότητα Συγκρούσεων

---

Όταν  $\lambda_{mfp} \ll L$ , οι συγκρούσεις κυριαρχούν και τα σωματίδια στο πλάσμα τείνουν προς **θερμοδυναμική ισορροπία**.

Μεταβίβαση ενέργειας μεταξύ σωματιδίων => **Κατανομή Maxwell – Boltzmann**.

Όταν  $\lambda_{mfp} \gg L$ , το πλάσμα είναι “collisionless”. Η κίνηση των σωματιδίων επηρεάζεται κυρίως από υπάρχοντα **μαγνητικά πεδία**.

Η **συχνότητα συγκρούσεων** στο πλάσμα είναι:

$$\nu \sim \frac{e^4 \ln \Lambda}{4\pi\epsilon_0^2 m^{1/2}} \frac{n}{T^{3/2}}$$



# Μαγνητισμένο Πλάσμα

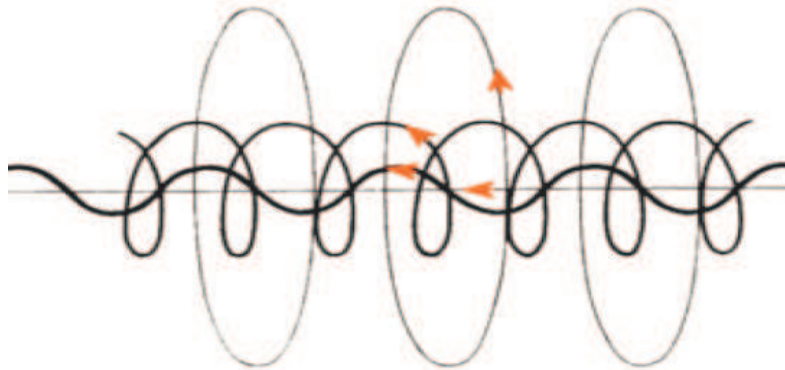
Στην περίπτωση που ένα μαγνητικό πεδίο  $B$  διαπερνάει το πλάσμα, τότε αν είναι αρκετά ισχυρό, μπορεί να επηρεάσει τις τροχιές των σωματιδίων.

Ορίζουμε την παράμετρο μαγνητισμού:  $\delta = \rho_{i/e} / \lambda_{mf}$

όπου

$$\rho_{i/e} = \frac{m_{i/e} v_{\perp}}{qB}$$

η ακτίνα Larmor



Στην περίπτωση που  $\delta \ll 1$ , το μαγνητικό πεδίο επηρεάζει σημαντικά την κίνηση των σωματιδίων, άρα και τις ιδιότητες του πλάσματος.



# Σύνοψη

---

Πλάσμα είναι ένα μερικώς ή ολικώς ιονισμένο αέριο που παρουσιάζει συλλογική συμπεριφορά και οιονεί ουδετερότητα

Η συλλογική αυτή συμπεριφορά καθορίζεται από μεγάλης εμβέλειας ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις

**99%** της ύλης στο σύμπαν βρίσκεται υπό τη μορφή πλάσματος

