



Εικόνα: Σε μια επιτραπέζια μπάλα πλάσματος, οι χρωματιστές γραμμές που βγαίνουν από τη σφαίρα αποδεικνύουν την ύπαρξη ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Με το νόμο του Gauss, δείχνουμε ότι το ηλεκτρικό πεδίο που περιβάλλει μια ομοιόμορφα φορτισμένη σφαίρα είναι όμοιο με αυτό γύρω από ένα σημειακό φορτίο.

Φυσική για Μηχανικούς

Ο νόμος του Gauss



Εικόνα: Σε μια επιτραπέζια μπάλα πλάσματος, οι χρωματιστές γραμμές που βγαίνουν από τη σφαίρα αποδεικνύουν την ύπαρξη ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Με το νόμο του Gauss, δείχνουμε ότι το ηλεκτρικό πεδίο που περιβάλλει μια ομοιόμορφα φορτισμένη σφαίρα είναι όμοιο με αυτό γύρω από ένα σημειακό φορτίο.

Φυσική για Μηχανικούς

Ο νόμος του Gauss

Ο νόμος του Gauss (επανάληψη...)

- Ηλεκτρική Ροή

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

- Η ηλεκτρική ροή διαμέσου οποιασδήποτε κλειστής επιφάνειας γύρω από ένα σημειακό φορτίο q είναι $\Phi_E = q/\epsilon_0$ και είναι ανεξάρτητη από το σχήμα της.
- Για πολλά (έστω M) σημειακά φορτία, έχουμε

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \oint \sum_{i=1}^M \vec{E}_i \cdot d\vec{A}$$

- Για κατανομή φορτίου (νόμος του Gauss)

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0}$$

Ο νόμος του Gauss (επανάληψη...)

- Ο νόμος του Gauss

- Συνθήκες Εφαρμογής

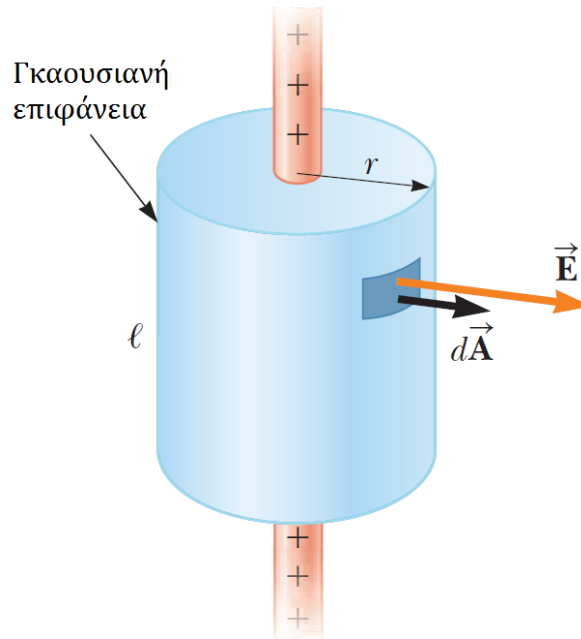
1. Η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να θεωρηθεί σταθερή λόγω συμμετρίας επάνω σε όλη την επιφάνεια
2. Το εσωτερικό γινόμενο του νόμου του Gauss μπορεί να εκφραστεί ως απλό αλγεβρικό γινόμενο $E dA$, δηλ. τα $\vec{E}$ και $d\vec{A}$ είναι παράλληλα
3. Το εσωτερικό γινόμενο είναι μηδέν γιατί τα παραπάνω διανύσματα είναι κάθετα
4. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδέν σε ένα τμήμα επιφάνειας

Ο νόμος του Gauss

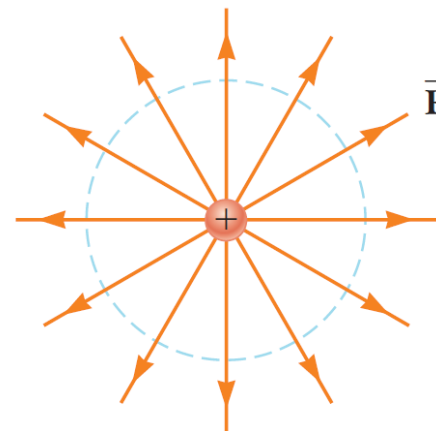
• Παράδειγμα:

- Βρείτε το ηλεκτρικό πεδίο σε απόσταση r από μια γραμμή θετικά φορτισμένη και απείρου μήκους. Η γραμμή έχει σταθερή γραμμική πυκνότητα φορτίου λ .

1. Η τιμή του ηλεκτρικού σταθερή σε όλη την επιφάνεια
2. Το εσωτερικό γινόμενο ως απλό αλγεβρικό γινόμενο $E dA$, δηλ. τα $\vec{E}$ και $d\vec{A}$ είναι παράλληλα
3. Το εσωτερικό γινόμενο είναι μηδέν
4. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι



a



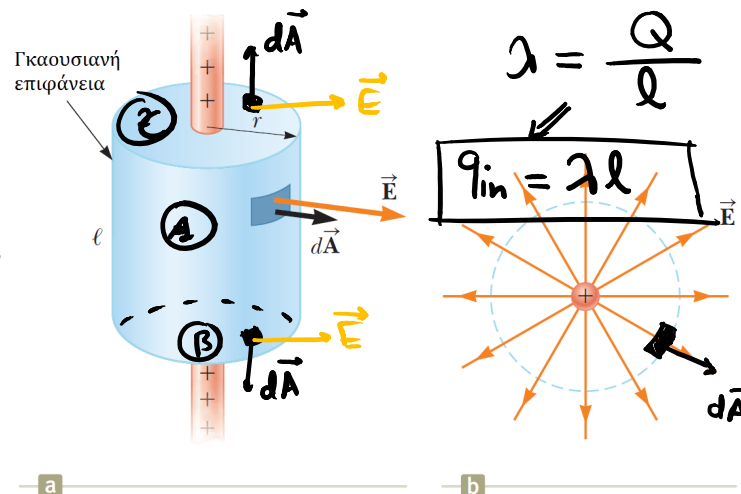
b

$$\ast \Rightarrow E = \frac{\lambda}{2\pi r \epsilon_0}$$

Ο νόμος του Gauss

• Παράδειγμα - Λύση:

- Βρείτε το ηλεκτρικό πεδίο σε απόσταση r από μια γραμμή θετικά φορτισμένη και απείρου μήκους. Η γραμμή έχει σταθερή γραμμική πυκνότητα φορτίου λ .



Επιλέξαμε γκαουσιανή επιφάνεια έναν κύλινδρο ακτίνας r και μήκους l . Επειδή το μήκος της ράβδου είναι άπειρο, το ηλεκτρικό πεδίο είναι σταθερό σε κάθε σημείο που απέχει απόσταση r από τη ράβδο. Λόγω αυτού, το ηλεκτρικό πεδίο είναι σταθερό σε κάθε σημείο της επιφάνειας (A). Ικανοποιείται η συνθήκη (1). Στις επιφάνειες (B), (C), ισχύει ότι $\vec{E} \perp d\vec{A}$. Άρα το $\vec{E} \cdot d\vec{A} = 0$. Ικανοποιείται η συνθήκη (3). Τέλος, στην επιφάνεια (A), ισχύει $\vec{E} \cdot d\vec{A} = E dA$, γιατί $\vec{E} \parallel d\vec{A}$. Ικανοποιείται η συνθήκη (2).

$$\begin{aligned} \text{Συναι: } \phi_E^A &= \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0} \Leftrightarrow \oint E dA = \frac{q_{in}}{\epsilon_0} \Leftrightarrow E \underbrace{\oint dA}_{2\pi r l} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow 2E\pi r l = q_{in}/\epsilon_0 \Leftrightarrow E = \frac{1}{2\pi r l} \frac{\lambda l}{\epsilon_0} \quad \ast \end{aligned}$$

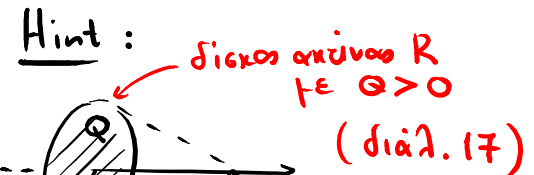
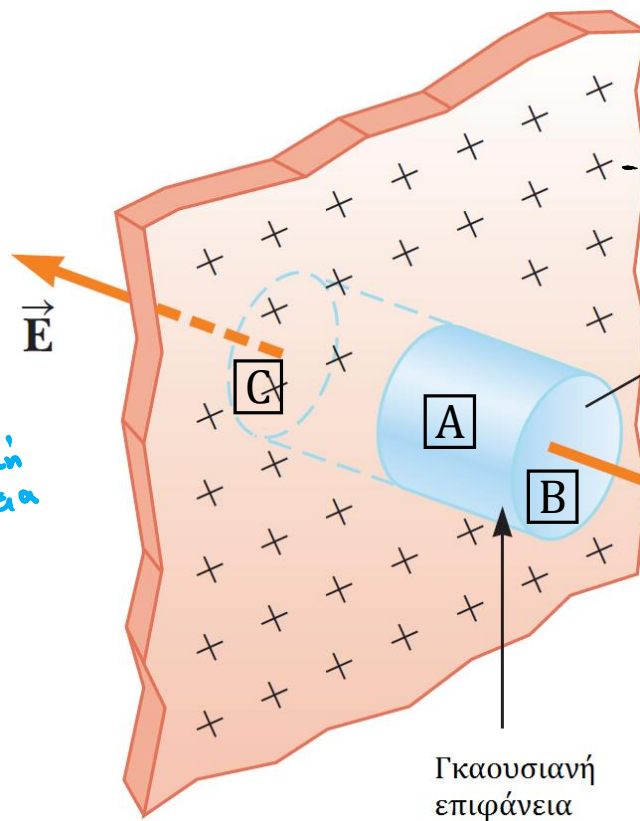
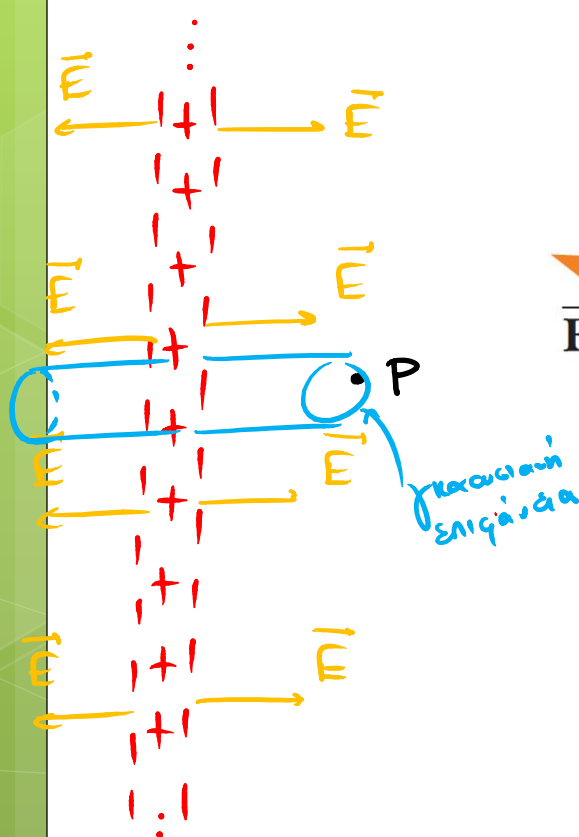
$$\sigma = \frac{Q}{A}$$

Ο νόμος του Gauss

• Παράδειγμα:

- Βρείτε το ηλεκτρικό πεδίο λόγω μιας άπειρης επιφάνειας θετικά φορτισμένης με ομοιόμορφη επιφανειακή κατανομή φορτίου σ .

1. Η τιμή του ηλεκτρικού σταθερή σε όλη την επιφάνεια
2. Το εσωτερικό γινόμενο ως απλό αλγεβρικό γινόμενο $E dA$, δηλ. τα $\vec{E}$ και $d\vec{A}$ είναι παράλληλα
3. Το εσωτερικό γινόμενο είναι μηδέν
4. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι



$$E_p = 2k_e n \sigma \left(1 - \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \right)$$

Αν $R \rightarrow \infty$, $\lim_{R \rightarrow \infty} E_p =$

$$= 2k_e n \sigma \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R^2}{x^2}}} \right)$$

$$\vec{E} = \frac{2n\sigma}{4\pi\epsilon_0} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0},$$

σταθερό.

(στη μια πλευρά του δίσκου)

$$\sigma = Q/A \Rightarrow q_{in} = \sigma A$$

Ο νόμος του Gauss

• Παράδειγμα - Λύση:

- Βρείτε το ηλεκτρικό πεδίο λόγω μιας άπειρης επιφάνειας θετικά φορτισμένης με ομοιόμορφη επιφανειακή κατανομή φορτίου σ .

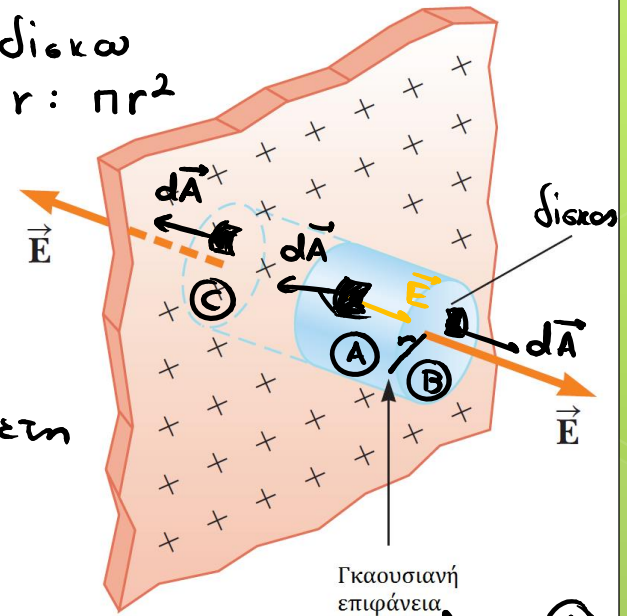
Επιλέξαμε κυλινδρική γκαουσιανή επιφάνεια κάθετη στο επίπεδο. Επειδή το επίπεδο έχει άπειρες διαστάσεις, το ηλ. πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο μακριά από το επίπεδο θα είναι σταθερό. Άρα ικανοποιείται η συνθήκη ①

Στις επιφάνειες ③, ④, $\vec{E} \parallel d\vec{A}$, άρα $\vec{E} \cdot d\vec{A}$ γίνεται αλγεβρικό: $E dA$. Ικανοποιείται η συνθήκη ②. Τέλος, στην επιφάνεια ①, έχουμε $\vec{E} \perp d\vec{A}$, άρα $\vec{E} \cdot d\vec{A} = 0$. Ικανοποιείται η συνθήκη ③. Οπότε τελικά:

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{in}}{\epsilon_0} \Leftrightarrow E \oint dA = \frac{q_{in}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma \pi r^2}{\epsilon_0} \Leftrightarrow E \cdot 2\pi r^2 = \frac{\sigma \pi r^2}{\epsilon_0}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}}, \text{ σταθερό σε κάθε σημείο της επιφάνειας.} \quad \left(\text{2 επιφάνειες} \rightarrow \text{2 επιφάνειες} \right) \quad \left(\text{1 διο αποτέλεσμα με πριν!} \right)$$

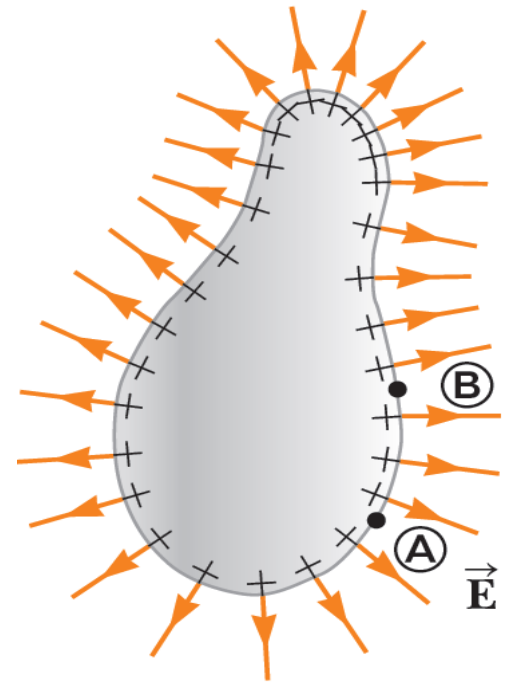
Εμβαδόν δίσκου
ακτίνας r : πr^2



Ο νόμος του Gauss

● Αγωγοί – Ηλεκτρικό Πεδίο

- Μπορεί κανείς να δείξει ότι ένας στέρεος αγωγός σε ηλεκτροστατική ισορροπία (τα φορτία δεν κινούνται) έχει τις ακόλουθες ιδιότητες
 - Το ηλεκτρικό πεδίο ακριβώς **έξω** από τον αγωγό είναι κάθετο στην επιφάνειά του και έχει μέτρο $E = \sigma / \epsilon_0$
 - Το ηλεκτρικό πεδίο **εντός** του αγωγού είναι μηδέν
 - ...είτε ο αγωγός είναι συμπαγής είτε «κούφιος»
 - Αν ο αγωγός είναι μονωμένος και φέρει φορτίο, το φορτίο βρίσκεται στην επιφάνειά του
 - Σε έναν αγωγό ακαθόριστου σχήματος, η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου είναι μεγαλύτερη εκεί που η κυρτότητά του είναι μεγαλύτερη





Εικόνα: Οι διαδικασίες που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας προκαλούν μεγάλες διαφορές ηλεκτρικού δυναμικού ανάμεσα στα σύννεφα και στο έδαφος. Το αποτέλεσμα αυτής της διαφοράς είναι μια ηλεκτρική εκφόρτιση που τη λέμε «κεραυνό», όπως στην εικόνα.

Φυσική για Μηχανικούς

Ηλεκτρικό Δυναμικό



Εικόνα: Οι διαδικασίες που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας προκαλούν μεγάλες διαφορές ηλεκτρικού δυναμικού ανάμεσα στα σύννεφα και στο έδαφος. Το αποτέλεσμα αυτής της διαφοράς είναι μια ηλεκτρική εκφόρτιση που τη λέμε «κεραυνό», όπως στην εικόνα.

Φυσική για Μηχανικούς

Ηλεκτρικό Δυναμικό

Ηλεκτρικό Δυναμικό

◉ Εισαγωγή

- ◉ Στη μελέτη του ηλεκτρισμού ως τώρα, τον σχετίσαμε με την έννοια της ηλεκτρικής δύναμης
- ◉ Τώρα, θα συσχετίσουμε τα ηλεκτρικά φαινόμενα με την έννοια της **ενέργειας**
- ◉ Θα ορίσουμε την έννοια του **ηλεκτρικού δυναμικού**
- ◉ Θα περιγράψουμε φαινόμενα με μεγαλύτερη ευκολία απ' ότι με χρήση πεδίων και δυνάμεων
 - ◉ Όπως περιγράψαμε πιο εύκολα τα φαινόμενα της Κινητικής με ενεργειακά θεωρήματα σε σχέση με την περιγραφή μέσω δυνάμεων και διανυσμάτων
- ◉ Το ηλεκτρικό δυναμικό έχει μεγάλη εφαρμογή στη λειτουργία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων και συσκευών

Ηλεκτρικό Δυναμικό

◉ Ηλεκτρικό Δυναμικό

- ◉ Έστω ένα φορτίο q τοποθετείται σε ηλεκτρικό πεδίο $\vec{E}$
- ◉ Έστω το φορτίο και το πεδίο ως ένα **σύστημα**
- ◉ Δύναμη $F_e = qE$ ασκείται στο φορτίο
 - ◉ Η δύναμη οφείλεται στο πεδίο
 - ◉ Το φορτίο κινείται λόγω της ηλεκτρικής δύναμης
 - ◉ Η δύναμη είναι **συντηρητική** και **εσωτερική** δύναμη του συστήματος
 - ◉ Άρα το έργο της είναι **εσωτερικό** στο σύστημα
- ◉ Άρα το **πεδίο παράγει εσωτερικό έργο στο σύστημα**
 - ◉ Όπως ακριβώς η βαρύτητα (βαρυτικό πεδίο) στο σύστημα Γης-βιβλίου, όταν το βιβλίο αφήνεται να πέσει από ύψος

Ηλεκτρικό Δυναμικό

• Ηλεκτρικό Δυναμικό

- Για μια απειροστά μικρή μετατόπιση $d\vec{s}$ ενός σημειακού φορτίου σε ένα ηλεκτρικό πεδίο...

- Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης είναι

$$dW_{int} = \vec{F}_e \cdot d\vec{s} = q\vec{E} \cdot d\vec{s}$$

- Θυμηθείτε: το έργο μιας εσωτερικής δύναμης σε ένα σύστημα ισούται με την αρνητική μεταβολή της δυναμικής του ενέργειας (εδώ: **ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας**)

$$dW_{int} = -dU_e$$

- Άρα

$$dU_e = -dW_{int} = -q\vec{E} \cdot d\vec{s}$$

- Για πεπερασμένη μετατόπιση από το σημείο (A) στο (B) είναι

$$\Delta U_e = -q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Η qE δεν εξαρτάται από το μονοπάτι (συντηρητική δύναμη)!

Ηλεκτρικό Δυναμικό

- **Ηλεκτρικό Δυναμικό**

- Για μια συγκεκριμένη θέση του φορτίου στο πεδίο, το σύστημα έχει μια δυναμική ενέργεια U_e , σε σχέση με μια θέση όπου έχει δυναμική ενέργεια $U_e = 0$
- Διαιρώντας τη U_e με το φορτίο, έχουμε:

$$V = \frac{U_e}{q}$$

το οποίο ονομάζεται **ηλεκτρικό δυναμικό** V

- Η **διαφορά δυναμικού** ορίζεται ως η **μεταβολή** στην ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του συστήματος όταν ένα φορτίο q μετακινείται μεταξύ δυο σημείων (A) και (B), δια το φορτίο αυτό:

$$\Delta V_{A \rightarrow B} = V_B - V_A = \frac{\Delta U_e}{q} = -\frac{1}{q} q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

- Το ηλεκτρικό δυναμικό μετρά δυναμική ενέργεια ανά μονάδα φορτίου: J/C = Volt (V)

Ηλεκτρικό Δυναμικό

- Ηλεκτρικό Δυναμικό

$$\Delta V = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

- Δεν εξαρτάται από το φορτίο q , παρά μόνο από το ηλεκτρικό πεδίο!
- Άρα το δυναμικό αποτελεί ένα **χαρακτηριστικό του πεδίου!**
- Παρατηρήστε ότι $\text{Volt} = \frac{Nm}{C}$
- Όπως και με τη δυναμική ενέργεια που έχουμε δει ως τώρα (βαρυτική, ελαστική), μόνο διαφορές δυναμικού έχουν νόημα
- Πολλές φορές ορίζουμε εμείς ένα σημείο/μια περιοχή του ηλεκτρικού πεδίου ως μηδενικού δυναμικού

Ηλεκτρικό Δυναμικό

- **Ηλεκτρικό Δυναμικό**

- **Προσοχή:** η διαφορά δυναμικού δεν είναι το ίδιο με τη διαφορά δυναμικής ενέργειας
 - Η διαφορά δυναμικού μεταξύ (A) και (B) υπάρχει αποκλειστικά λόγω **μιας πηγής φορτίου** και εξαρτάται από την κατανομή αυτής
 - Για να υπάρχει διαφορά δυναμικής ενέργειας, πρέπει να υπάρχει ένα σύστημα με τουλάχιστον **δυο** φορτία!
 - Η δυναμική ενέργεια ανήκει στο σύστημα και αλλάζει μόνον αν ένα φορτίο μετακινηθεί σε σχέση με τη θέση ηρεμίας του συστήματος!
- Σκεφτείτε το όμοια με το ηλεκτρικό πεδίο...
 - Το πεδίο υπάρχει λόγω μιας πηγής φορτίου
 - Η ηλ. δύναμη εγείρεται σε άλλο φορτίο στο χώρο του πεδίου
 - Απαιτούνται δηλαδή τουλάχιστον δυο φορτία για τη δύναμη!

Ηλεκτρικό Δυναμικό

- Ηλεκτρικό Δυναμικό

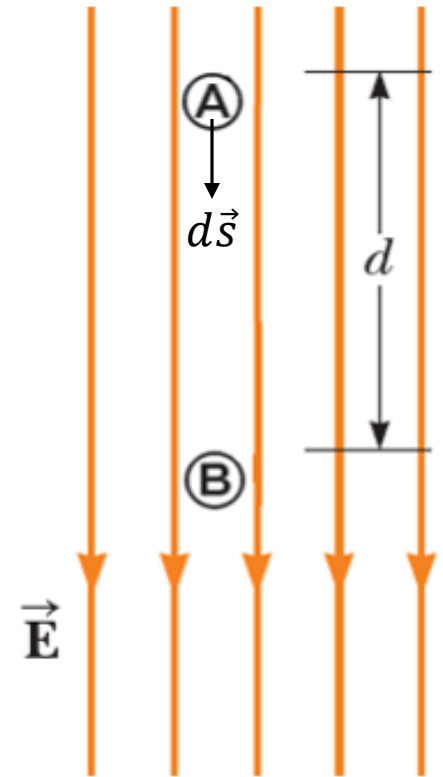
- Ας θεωρήσουμε τώρα την περίπτωση όπου κάποια **εξωτερική** δύναμη μετακινεί ένα φορτίο στο πεδίο
 - Από ένα σημείο (A) σε ένα (B)
 - Χωρίς να αλλάζει την κινητική του ενέργεια
 - Αλλάζει όμως η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια!
- Το έργο αυτής της δύναμης θα είναι:

$$W_{ext} = \Delta K + \Delta U_e = 0 + q\Delta V = q\Delta V$$

Ηλεκτρικό Δυναμικό

• Διαφορά Δυναμικού

- Ας απλοποιήσουμε τα πράγματα ☺
- Έστω ένα **ομογενές** ηλεκτρικό πεδίο
- Ας υπολογίσουμε τη ΔV ανάμεσα στα σημεία (A), (B), απόστασης d
- Η μετατόπιση $d\vec{s}$ από το (A) στο (B) είναι παράλληλη στις δυναμικές γραμμές



$$V_B - V_A = \Delta V_{A \rightarrow B} = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_A^B E ds = -E \int_A^B ds = -Ed$$

- Άρα

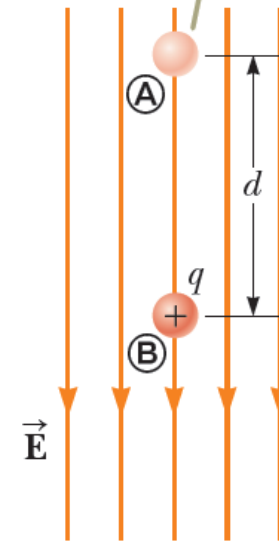
$$\Delta V_{A \rightarrow B} = -Ed$$

Ηλεκτρικό Δυναμικό

• Διαφορά Δυναμικού

- Ας θεωρήσουμε τώρα ένα φορτίο $+q$ που κινείται από το (A) στο (B)
- Τότε $\Delta U_e = q\Delta V_{A \rightarrow B} = -qEd$
- Βλέπουμε ότι $\Delta U_e < 0$
 - Αυτό σημαίνει ότι η δυναμική ενέργεια του συστήματος φθίνει όταν το θετικό φορτίο κατευθύνεται προς την κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών
 - Άρα, αν αφήσουμε στη θέση (A) ένα φορτίο $q > 0$, αυτό θα κινηθεί προς τα «κάτω» λόγω ηλεκτρ. δύναμης
 - Άρα επιταχύνεται $\rightarrow$ αποκτά κινητική ενέργεια
 - Όσο προχωρά προς τα κάτω, η δυναμική ενέργεια του συστήματος φορτίο-πεδίο μειώνεται εξίσου με την αύξηση της κιν. ενέργειας!
 - Σας εκπλήσσει αυτό; ☺ Γιατί συμβαίνει;

Όταν ένα θετικό φορτίο μετακινείται από το (A) στο (B), η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του συστήματος φορτίο-πεδίο μικραίνει.



Ηλεκτρικό Δυναμικό

◉ Διαφορά Δυναμικού

- ◉ Ας θεωρήσουμε – στην ίδια διάταξη – τώρα ένα φορτίο – q που κινείται από το (B) στο (A) (δε γίνεται να κινηθεί $A \rightarrow B$)
- ◉ Τότε $\Delta U_e = -q\Delta V_{B \rightarrow A} = -q(Ed) = -qEd$
 - ◉ ...αφού τώρα μετράμε $\Delta V_{B \rightarrow A}$ και όχι $\Delta V_{A \rightarrow B}$
- ◉ Βλέπουμε ότι πάλι $\Delta U_e < 0$!
 - ◉ Αυτό σημαίνει ότι η δυναμική ενέργεια του συστήματος φθίνει ξανά όταν το αρνητικό φορτίο κατευθύνεται προς αντίθετη κατεύθυνση από την κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών
 - ◉ Άρα, αν αφήσουμε στη θέση (B) ένα φορτίο $q < 0$, αυτό θα κινηθεί προς τα «πάνω» λόγω ηλεκτρ. δύναμης
 - ◉ Άρα επιταχύνεται $\rightarrow$ αποκτά κινητική ενέργεια
 - ◉ Όσο προχωρά προς τα πάνω, η δυναμική ενέργεια του συστήματος φορτίο-πεδίο μειώνεται εξίσου.

Ηλεκτρικό Δυναμικό

• Διαφορά Δυναμικού

- Ας γενικεύσουμε τώρα για μετατόπιση μη παράλληλη στις δυναμικές γραμμές

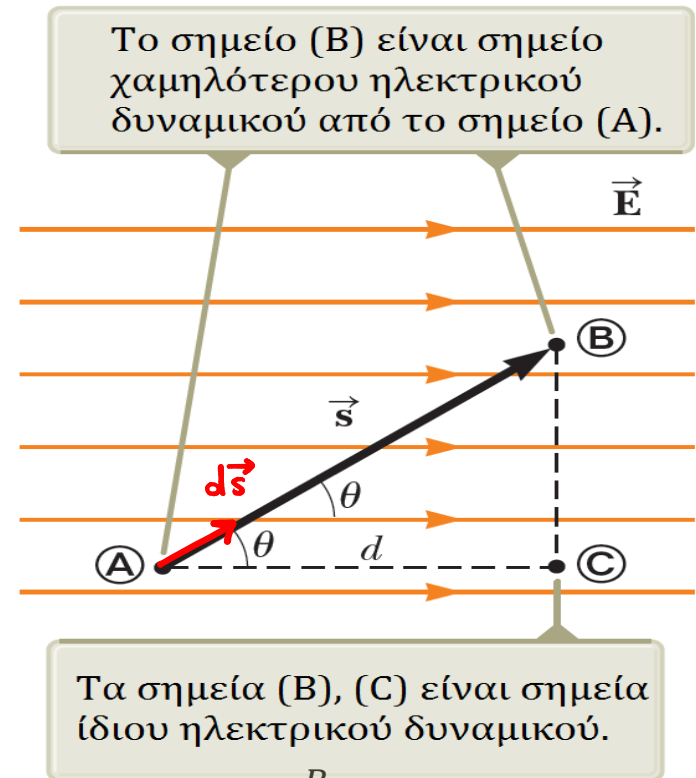
- Έστω ότι η μετατόπιση $\vec{s}$ από το (A) στο (B) ΔΕΝ είναι παράλληλη στις δυναμικές γραμμές

- Τότε για τη μετατόπιση $\vec{s}$

$$\begin{aligned}\Delta V_1 &= - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_A^B E ds \cos(\theta) = -E \cos(\theta) \int_A^B ds = -E \underbrace{s \cos(\theta)}_d \\ &= -Ed\end{aligned}$$

Άρα για το σύστημα πεδίο-φορτίο

$$\Delta U_e = -qEd$$



Ηλεκτρικό Δυναμικό

- Διαφορά Δυναμικού

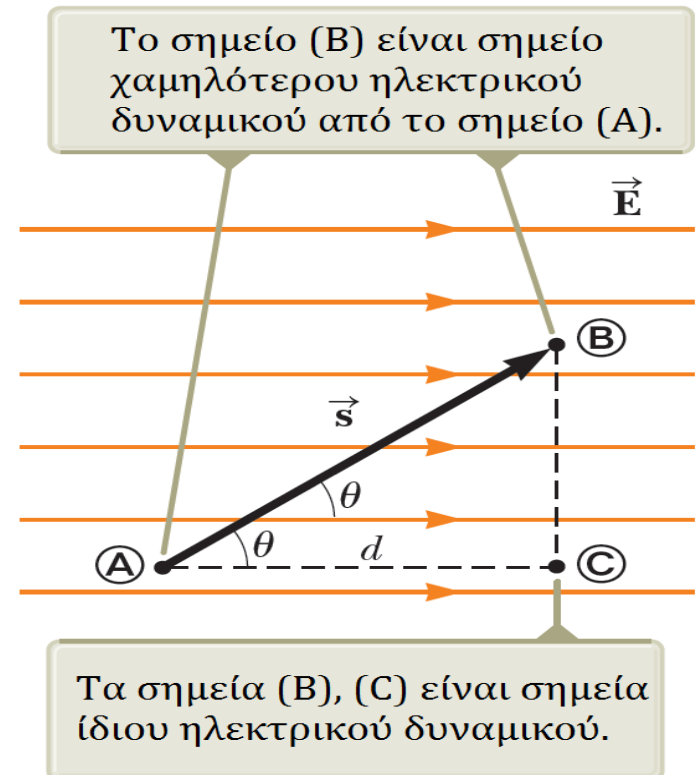
- Άρα για το σύστημα πεδίο-φορτίο

$$\Delta U = -q\vec{E} \cdot \vec{s} = -qEd$$

- Όμως είδαμε πριν ότι

$$\Delta V_2 = - \int_A^C \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\vec{E} \cdot \int_A^C d\vec{s} = -\vec{E} \cdot \vec{s} = -Ed$$

- Συμπέρασμα: όλα τα σημεία που βρίσκονται σε επίπεδο κάθετο στο πεδίο έχουν ίδιο δυναμικό (ισοδυναμική επιφάνεια)

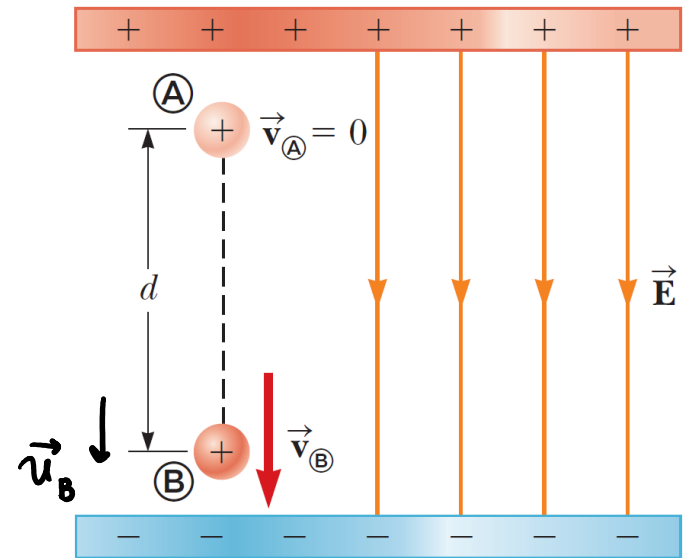


Ηλεκτρικό Δυναμικό

● Παράδειγμα:

- Ένα πρωτόνιο αφήνεται από το σημείο (A) σε ομογενές ηλ. πεδίο μέτρου $8 \times 10^4 \frac{V}{m}$.

Το πρωτόνιο υπόκειται σε μετατόπιση μέτρου $d = 0.5 \text{ m}$ στο σημείο (B) στην κατεύθυνση του $\vec{E}$. Βρείτε την ταχύτητα του πρωτονίου αμέσως μετά τη μετατόπισή του. Θεωρήστε ότι $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ και $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

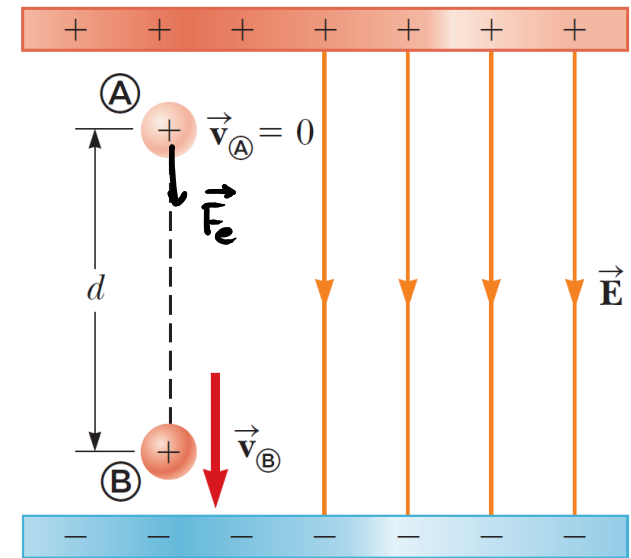


Ηλεκτρικό Δυναμικό

● Παράδειγμα - Λύση:

- Ένα πρωτόνιο αφήνεται από το σημείο (A) σε ομογενές ηλ. πεδίο μέτρου $8 \times 10^4 \frac{V}{m}$. Το πρωτόνιο υπόκειται σε μετατόπιση μέτρου $d = 0.5 \text{ m}$ στο σημείο (B) στην κατεύθυνση του $\vec{E}$. Βρείτε την ταχύτητα του πρωτονίου αμέσως μετά τη μετατόπισή του.

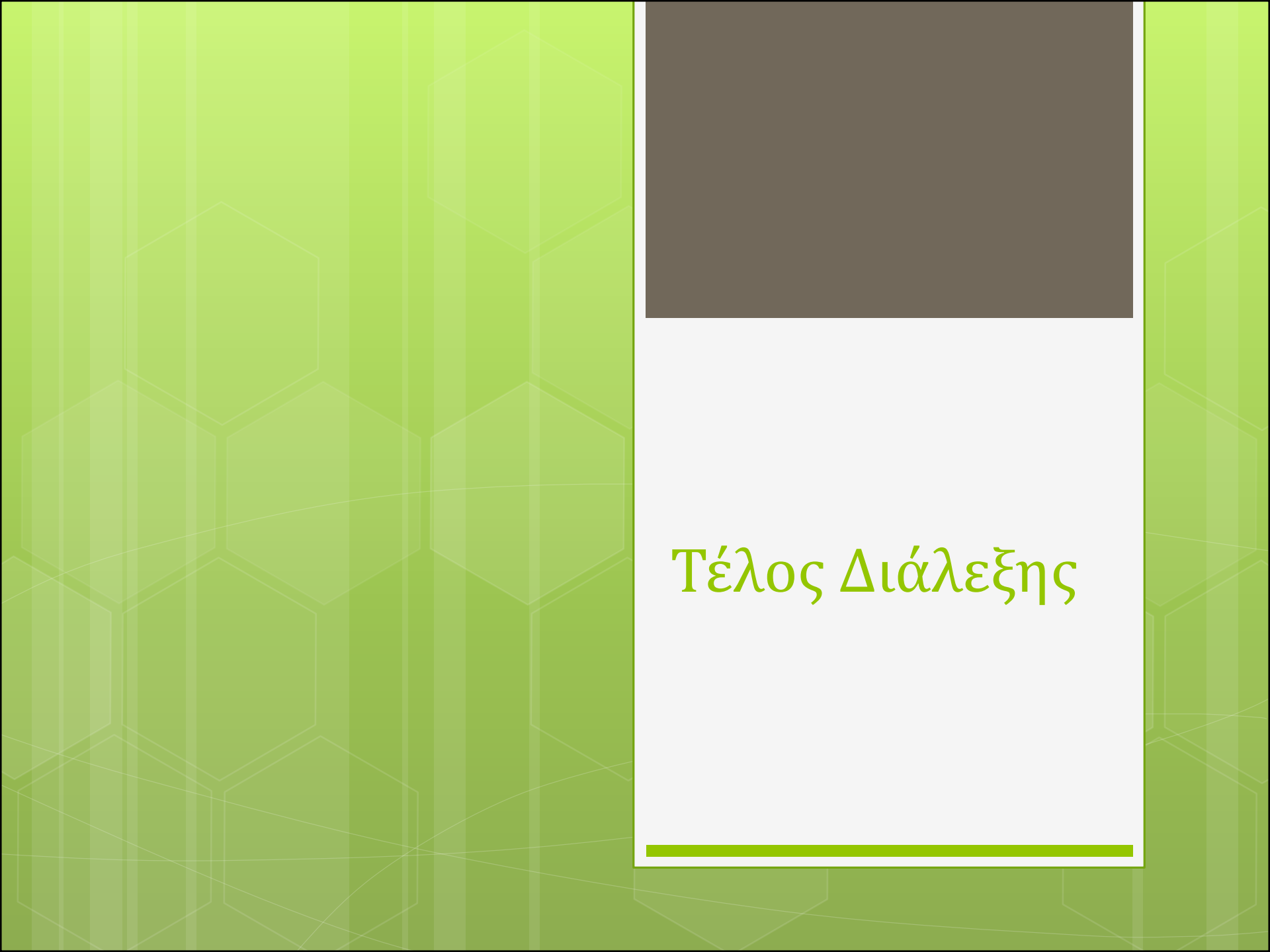
Θεωρήστε ότι $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ και $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.



Θεωράμε το σύστημα γροβίο + πεδίο. Το σύστημα είναι απομονωμένο και η μόνη δύναμη που ασκείται εντός του συστήματος είναι η ηλεκτρική δύναμη $\vec{F}_e$, η οποία είναι και συντηρητική. Ισχύει η Α.Δ.Μ.Ε_{A-B}: $K_A + U_{eA} = K_B + U_{eB} \Leftrightarrow \Delta K_{A-B} + \Delta U_{eA-B} = 0$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2} m_p u_B^2 - \underbrace{0}_{K_A} + \Delta U_{eA-B} = 0 \Leftrightarrow \frac{1}{2} m_p u_B^2 - q_p E d = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow u_B^2 = (2 q_p E d) / m_p \Rightarrow u_B = \sqrt{\frac{2 q_p E d}{m_p}} = 2.8 \cdot 10^6 \frac{m}{s}$$



Τέλος Διάλεξης