

## Εμβέλεια R

- Απόσταση που διανύει ένα σωματίδιο μέσα στην ύλη εφόσον έχει συνεχή απώλεια ενέργειας.

Εμβέλεια = f(τύπος υλικού, τύπος, ενέργεια σωματιδίου)

$$R \propto \int dx = \int_E^0 \frac{dE}{\frac{dE}{dx}} \propto E^{1+k}$$

$$\frac{dE}{dx} \propto \rho \quad \Rightarrow \quad R \propto \frac{1}{\rho}$$

- συχνά αναφερόμαστε σε εμβέλεια με μονάδα μέτρησης μάζα/επιφάνεια

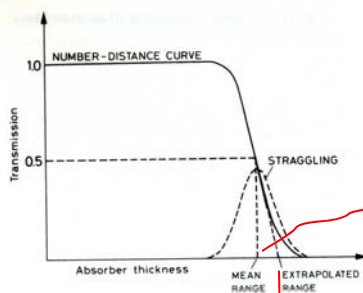
$$R' = \rho R \quad [\text{g/cm}^2]$$

Γ. Τσιπολίτης

## Εμβέλεια R

Η απώλεια ενέργειας ΔΕΝ είναι συνεχής, αλλά ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ φύσης

- Straggling (Στραγγαλισμός): ΙΔΙΑ σωματίδια με ΙΔΙΑ ενέργεια έχουν στατιστική κατανομή εμβέλειας γύρω από μια μέση τιμή (mean range).



Το πάχος όπου τα  $N_0/2$  σωματίδια σταματούν

$$\text{Mean range} = R(E_0) = \int_{E_0}^0 \left( \frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

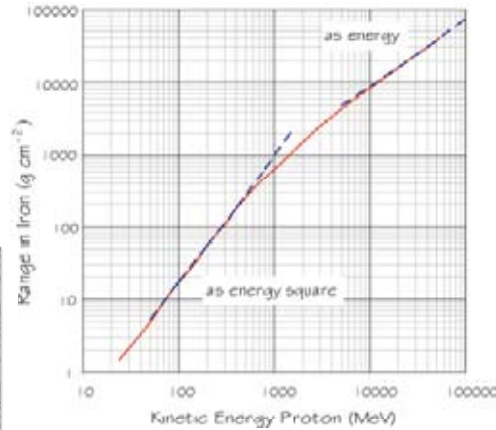
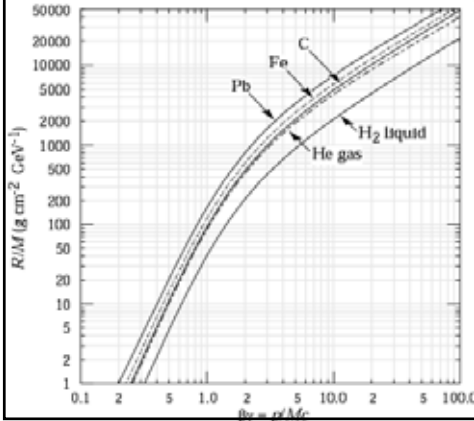
Extrapolated / Practical Range ΌΛΑ τα σωματίδια σταματούν

Γ. Τσιπολίτης

## Εμβέλεια R

$$R(E_0) = R(E_{\min}) + \int_{E_{\min}}^{E_0} \left( \frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

$$\text{Range} = R \approx \frac{\text{Const.}}{Z_1^2 m_1^2} E_{\text{Kinetic}}^2$$



Εμβέλεια  $\sim E_{\text{KIV}}^2$  στις μικρές ενέργειες (για την ακρίβεια  $\sim E_{\text{KIV}}^{1.75}$ ) και  $\sim E_{\text{KIV}}$  στις μεγάλες ενέργειες που το  $dE/dx \sim$  σταθερό

Χρήσιμο για τον υπολογισμό πάχους ανιχνευτών

## Εμβέλεια R

Βαθμωτό χαρακτηριστικό Εμβέλειας: διαφορετικά σωματίδια στο ίδιο μέσο

$$R_2(E_2) = \frac{M_2}{M_1} \frac{Z_1^2}{Z_2^2} R_1 \left( E_2 \frac{M_1}{M_2} \right)$$

Εξάρτηση από είδος σωματιδίου

$$\frac{dE}{dx} = S \propto z^2 f(v)$$

$$\text{K.E.} : E = \frac{1}{2} M v^2 \Rightarrow dE = M v dv$$

$$R = \int \frac{dE}{S} \propto \frac{M f(v)}{z^2}$$

Επομένως για μια ταχύτητα  $v$

$$S \propto z^2 \text{ και } R \propto \frac{M}{z^2}$$

Πχ. 1 MeV  $p$  και 4 MeV σωματίδιο -  $\alpha$  (ίδια ταχύτητα)

$$S(\alpha) = 4S(p),$$

$$R(p) = R(\alpha)$$

## Εμβέλεια R

Εξάρτηση από το υλικό: 
$$\frac{S}{\rho} \propto \frac{Z}{A} \ln \left( \frac{2m\nu^2}{I} \right)$$

Κανόνας Bragg-Kleeman: **ΙΔΙΟ** σωματίδιο διαφορετικά υλικά:

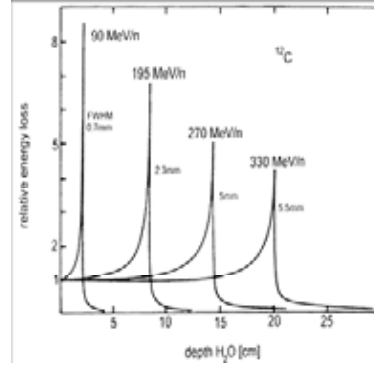
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{\sqrt{A_1}}{\sqrt{A_2}}$$

Αρχικά η ταχύτητα  $\nu$  είναι μέγιστη.

Στη συνέχεια ελαττώνεται καθώς το  $d$  αυξάνει, διότι χάνει ενέργεια.

Το  $S$  αυξάνεται, διότι  $S \propto \frac{1}{\beta^2}$

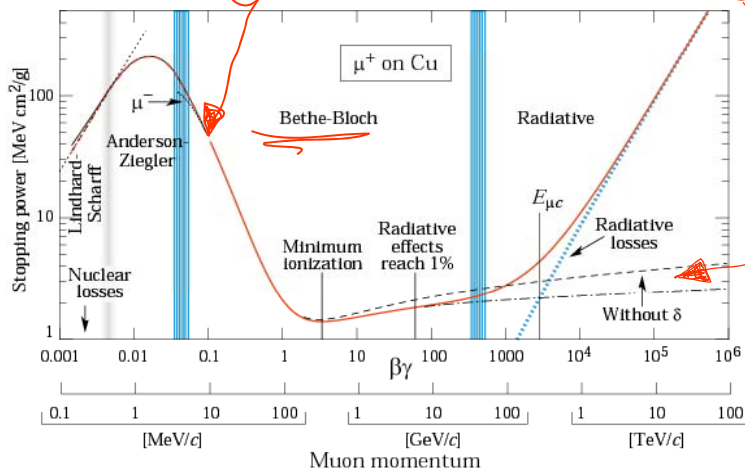
Προς το τέλος αφήνει τη μεγαλύτερη ενέργεια



Γ. Τσιπολίτης

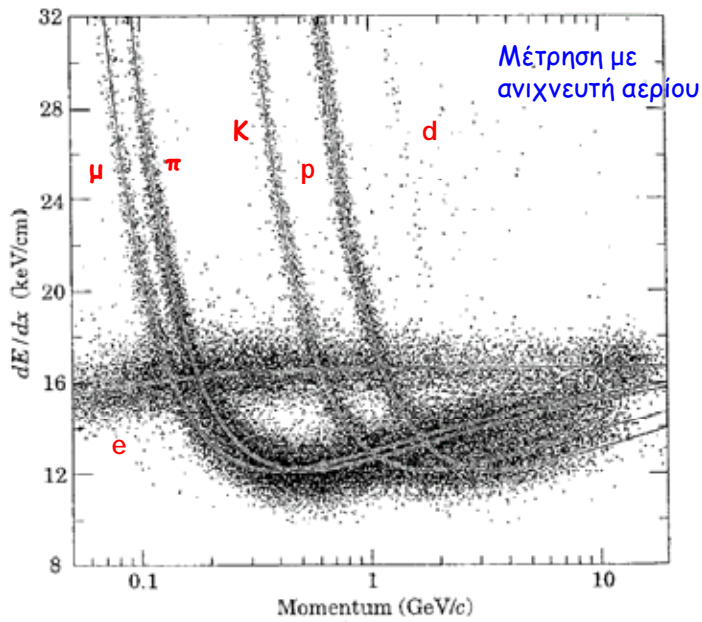
## dE/dx - Bethe - Bloch

$$\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 \frac{\delta}{2} \right]$$



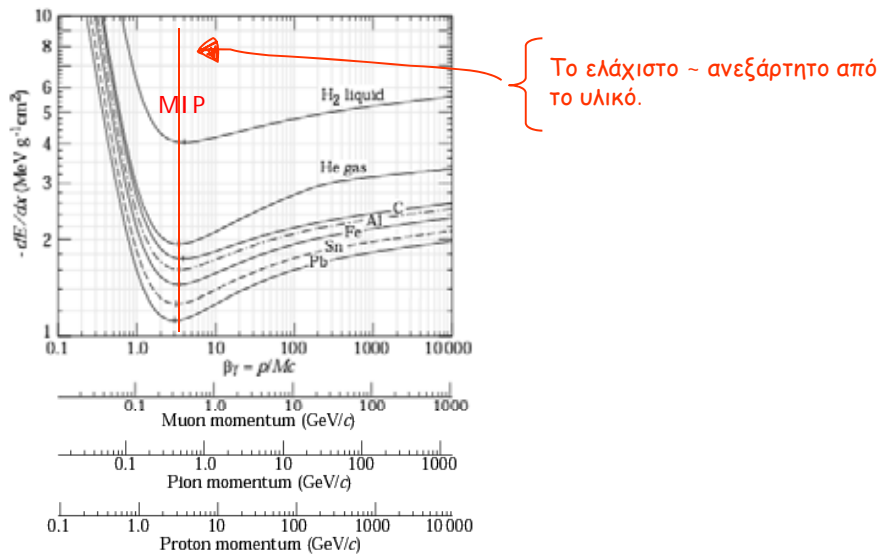
Γ. Τσιπολίτης

### dE/dx - Bethe - Bloch



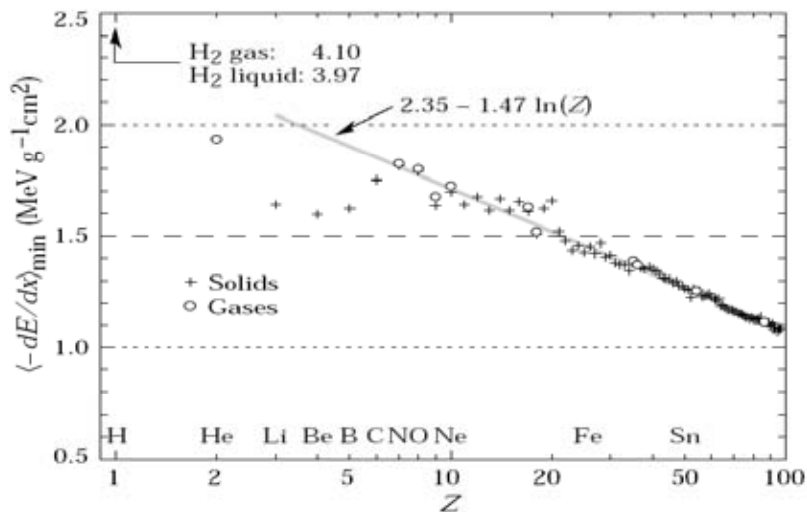
Γ. Τσιπολίτης

### Απώλεια Ενέργειας - Διαφορετικά Υλικά



Γ. Τσιπολίτης

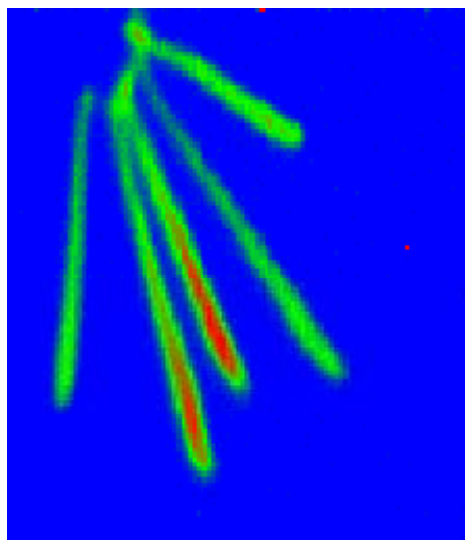
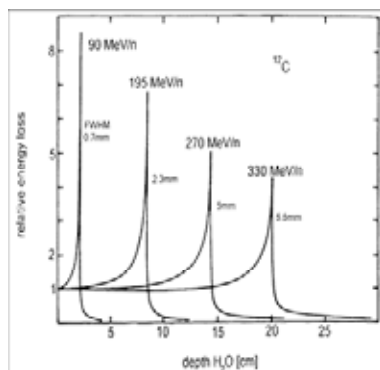
## Απώλεια Ενέργειας - Διαφορετικά Υλικά



Δεν παρατηρείται μια απλή μορφή στην εξάρτηση της απώλειας ενέργειας από  $Z$  του υλικού  $\rightarrow dE/dx$  εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους.

Γ. Τσιπολίτης

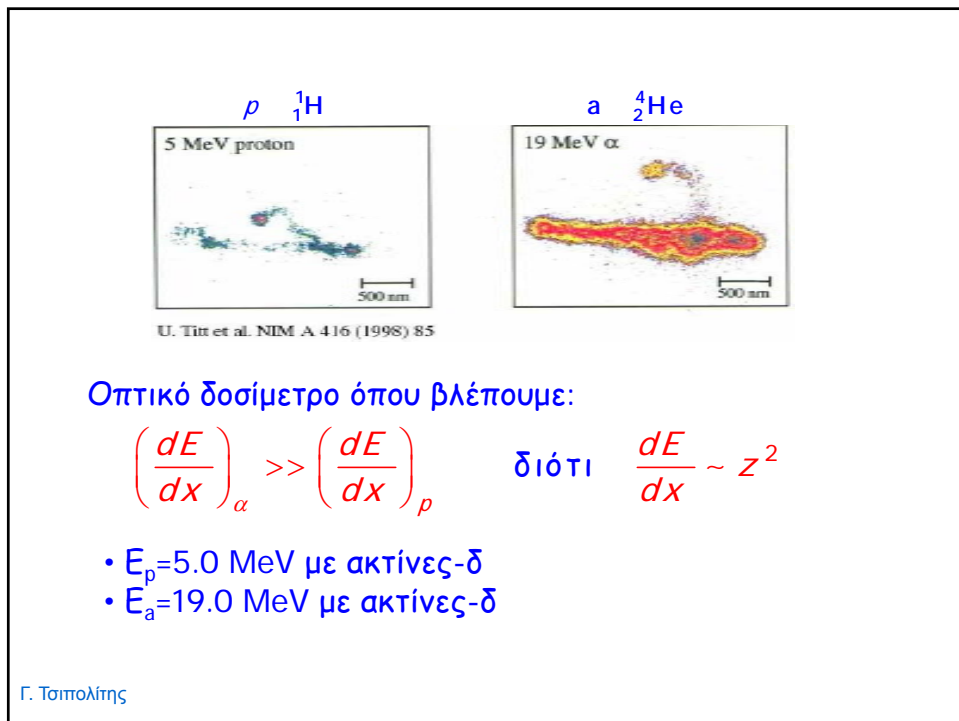
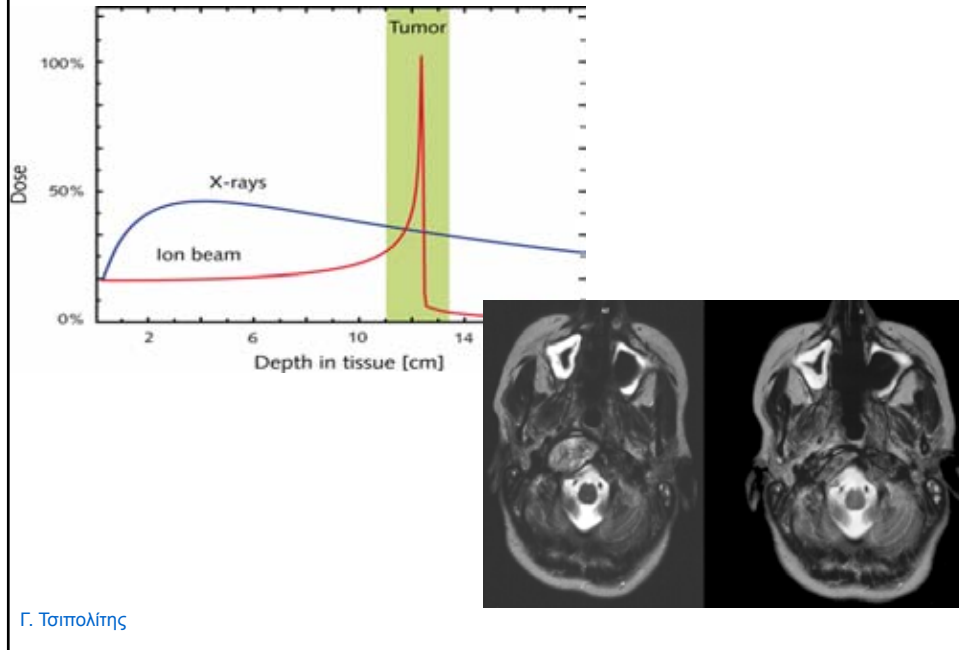
## Καμπύλες Βραγγ

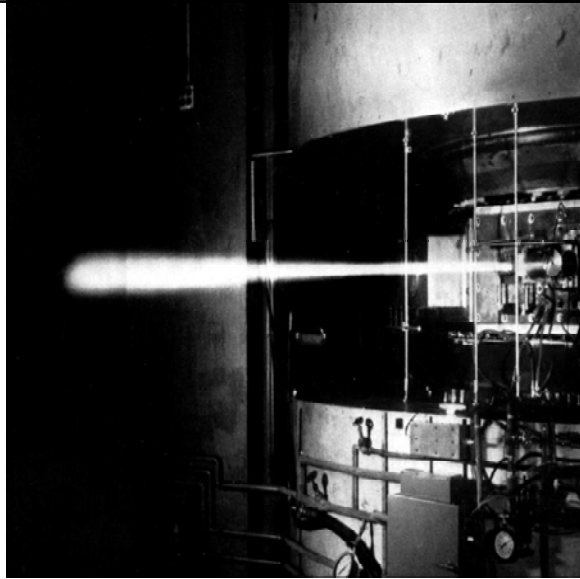


Τροχιές από σωματίδια  $\alpha$  σε ανιχνευτή micro-strip αερίου  $\text{CF}_4$  όπου καταγράφονται με τη βοήθεια φθορισμού (scintillation)

Γ. Τσιπολίτης

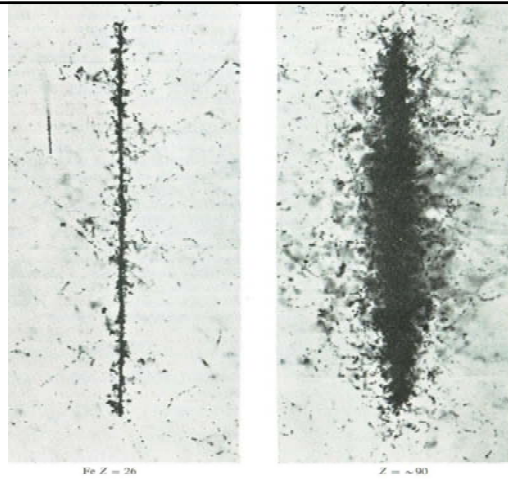
## Θεραπεία Καρκίνου





δέσμη δευτερίου (d) όπου ιονίζουν μόρια του αέρα και δημιουργούν φθορισμό.

Γ. Τσιπολίτης



Τροχιές σχετικιστικών βαρέων ιόντων σε ανιχνευτή nuclear emulsion. Βλέπουμε την εξάρτηση της πυκνότητας ιονισμού από το  $z^2$ :

$$-\frac{dE}{dx} = z^2 \frac{Z}{A} f(\beta, I)$$

Γ. Τσιπολίτης

