

INTERAZIONE DELLE PARTICELLE CARICHE CON LA MATERIA

$\langle \frac{dE}{dx} \rangle$ PER PARTICELLE LEGGERE O PESANTI

- DATO CHE $S_{\text{coll}} \propto \rho$, CONVIENE DARE S_{coll}/ρ (CI SI SCORPORÀ DALLA DIPENDENZA PIÙ IMPORTANTE DAL MATERIALE)

$$\frac{S_{\text{coll}}}{\rho} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{N_A e^4}{m c^2} \frac{Z}{A} \frac{Z^2}{v^2} c^2 \log \left[\frac{2m v^2}{I \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \sqrt{\rho} \right]$$

\uparrow PERDITA DI ENERGIA TOTALE MASSICA $\left[\frac{\text{MeV}}{\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}} \right]$

\uparrow TERMINI NUMERICI CON LE STESSÉ DIMENSIONI DI S_{coll}/ρ (A MENO DEI g_A) (0.306 MeV · cm²)

\uparrow SI MISURA IN g!

■ PROPRIETÀ MATERIALE
 ■ PROPRIETÀ PROIETTIVE
 ELEMENTI ELEMENTI PESANTI

(FORMULA DI BETHE E BLOCH APPROSSIMATA)

- FORMULE PIÙ PRECISE.

ANZITUTTO RISCRIVIAMO S_{wee}/ρ INTRODUCENDO

$$r_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mc^2} \quad \text{RAGGIO CLASSICO} \rightarrow 2.8 \times 10^{-13} \text{ cm}$$

DELL'ELETTRONE.

FATTORE PRE-LOGARITMICO NUMERICO:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0^2} \cdot \frac{e^4}{mc^2} N_A = \underbrace{r_e^2 \frac{(4\pi)^2 \epsilon_0^2 \cdot (mc^2)^2}{e^4}}_{=1} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0^2} \frac{e^4}{mc^2} \cdot N_A =$$

$$= 4\pi r_e^2 mc^2 N_A$$

QUINDI:

$$\frac{S_{\text{wee}}}{\rho} = \underbrace{4\pi r_e^2 mc^2 N_A}_{\rightarrow 0.306 \text{ MeV cm}^2} \frac{Z}{A} \frac{Z^2}{\beta^2} \log \left[\frac{2mc^2\beta^2}{I\sqrt{1-\beta^2}} \cdot \sqrt{f} \right]$$

VALE
PER
PARTICELLE
CON
 $M \gg m$

CALCOLO ESATTO (FORMULA DI BETHE E BLOCH)

$$\frac{S_{\text{wee}}}{\rho} = 4\pi r_e^2 mc^2 N_A \frac{Z}{A} \frac{Z^2}{\beta^2} \left\{ \log \left[\frac{2mc^2\beta^2}{I(1-\beta^2)} \right] - \beta^2 \right\}$$

OSSERVAZIONI :

- BLANDA DIPENDENZA DAL MATERIALE

- DIPENDENZA DA $(CARICA)^2$

- DIPENDENZA DA $1/\beta^2$ A BASSI β

- PRESENZA DI UN MINIMO ($\beta\gamma \approx 4 \rightarrow$ PARTICELLE RELATIVISTICHE)

$\sim 2 \frac{\text{MeV}}{\text{g cm}^{-2}} \rightarrow$ MINIMO DI IONIZZAZIONE
(MIP \rightarrow MINIMUM IONIZING PARTICLE)

- PRESENTA UNA RISALITA PER $\beta\gamma > 4$
(RISALITA RELATIVISTICA)

ELEMENTI LEGGERI
ELEMENTI PESANTI
 $0.5 < Z/A < 0.38$
NEL TERMINE \log

NON BASSISSIMI!

↳ MA: SOTTOSTIMA LA PERDITA DI ENERGIA
PER PARTICELLE ULTRARELATIVISTICHE

MOTIVO: γ ELEVATI \rightarrow ELEVATI $E_L \rightarrow$ FORTE
POLARIZZAZIONE DEL MEZZO AD ALTI PARAMETRI
DI IMPATTO (MOLTI ATOMI INTERPOSTI)
 \rightarrow SCHERMAGGIO DI $E_L \rightarrow$ PERDITA PIÙ
RIDOTTA

↳ EFFETTO DENSITÀ
PER I MATERIALI DENS

SI INTRODUCE $-\frac{\delta}{2}$ NEL TERMINE TRA $\{ \}$

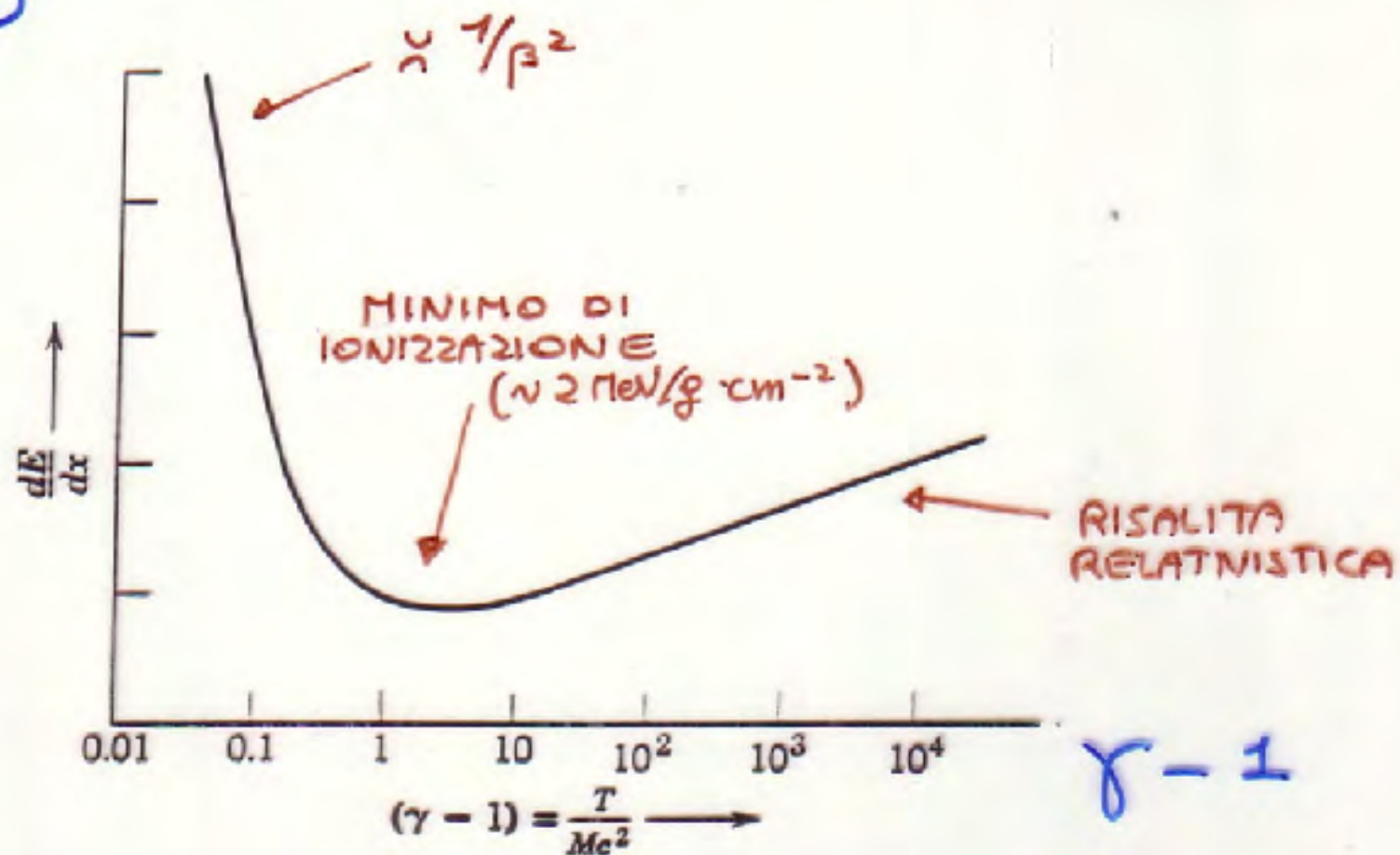
$\delta \rightarrow 2 \log \gamma + \text{cost.}$ AD ALTE ENERGIE

CRESCITA ASINTOTICA RIDOTTA: $\sim \log \gamma$ INVECE DI $\sim 2 \log \gamma$

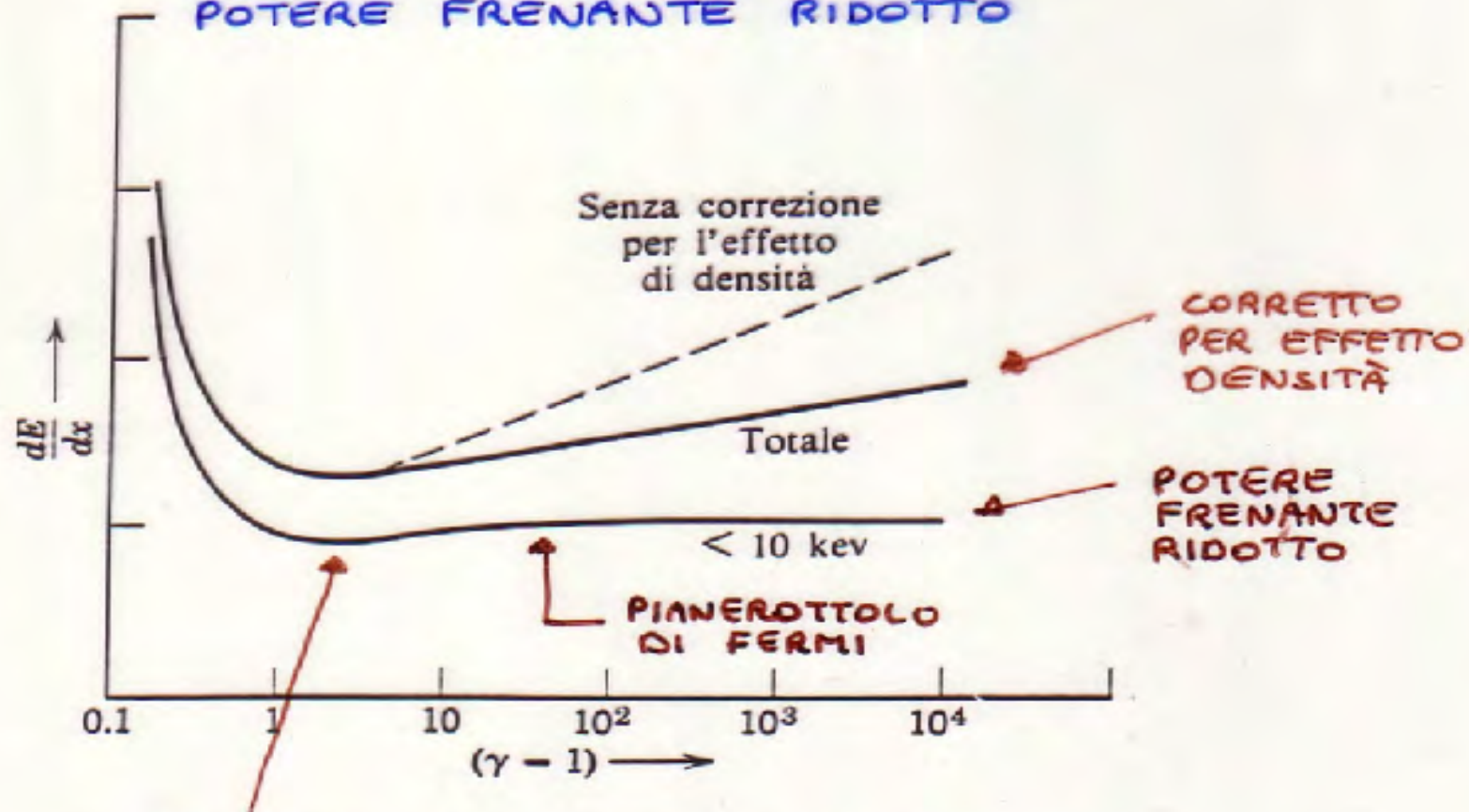
- ALTRI MODELLI: DISTINGUONO GLI ELETTRONI PIÙ INTERNI
DAGLI ALTRI

GRAFICI DI S

S



EFFETTO DENSITÀ E POTERE FRENANTE RIDOTTO

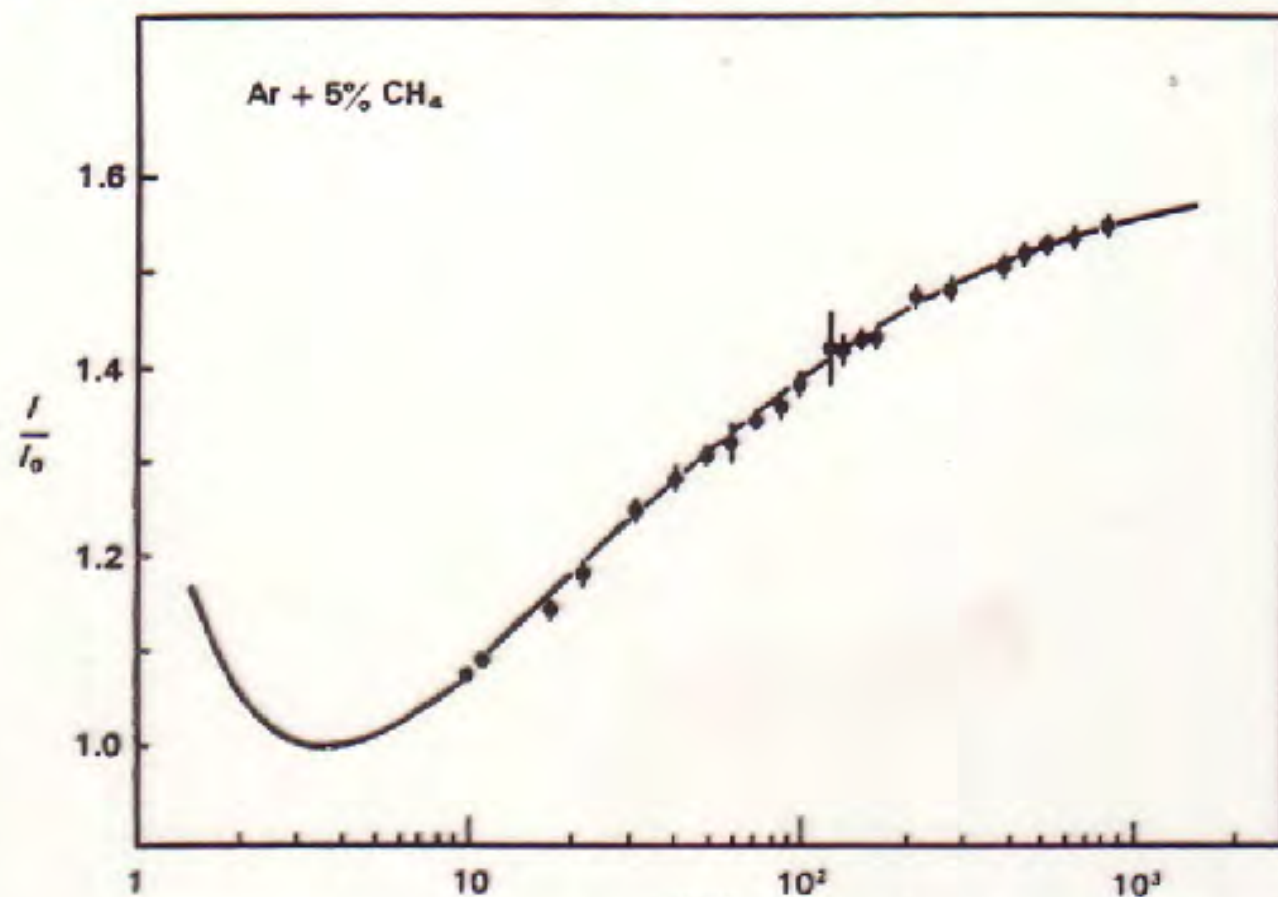


CONSIDERANDO SOLO CESSIONI DI
ENERGIA INFERIORI A 10 keV
PER SINGOLO EVENTO

RISALITA RELATIVISTICA E EFFETTO DENSITÀ

S/S_{\min}

NEI GAS:



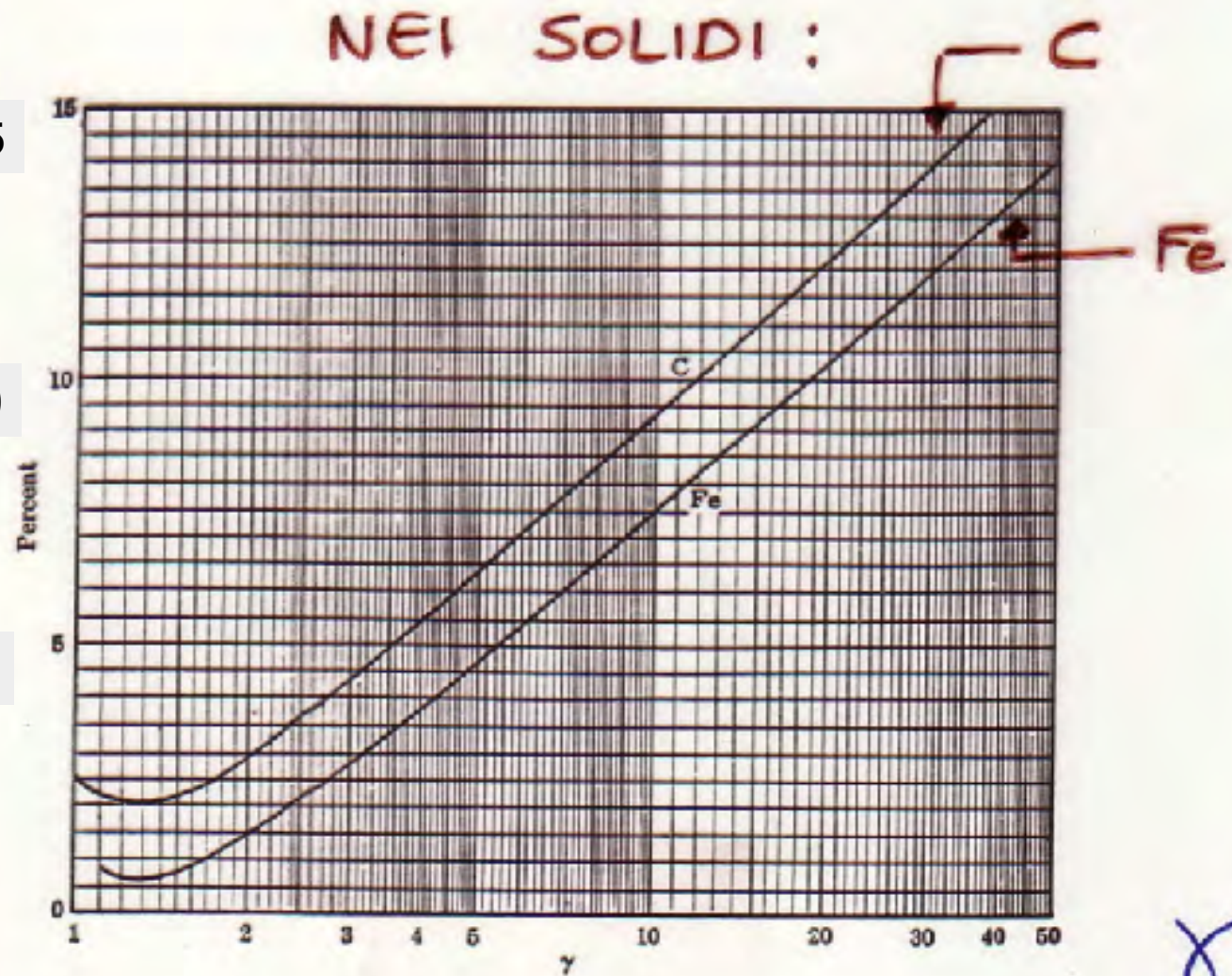
γ

$$\frac{S - S_{\min}}{S_{\min}} \quad (15)$$

(%)

10

5



LA RISALITA NEI SOLIDI È PIÙ RIDOTTA
PERCHÈ L'EFFETTO DENSITÀ È MAGGIORE

- COMPORTAMENTO A BASSA ENERGIA DI S_{coll}/S

$S_{coll} \propto \frac{1}{\beta^2}$ NON PUÒ VALERE NEL LIMITE $\beta \rightarrow 0$

→ CHE COSA SUCCEDDE A BASSA ENERGIA?

↳ LA PARTICELLA CARICA INCIDENTE COMINCIA A CATTURARE ELETTRONI DEL MEZZO



LA SUA CARICA SI SCHERMA



LA PERDITA DI ENERGIA SI RIDUCE

(MASSIMO A $\beta \sim 10^{-2}$; A $\beta \sim 10^{-4}$ VALORE SIMILE A MINIMO IONIZZAZIONE)

- MODELLI TEORICI MOLTO COMPLICATI

LA PROBABILITÀ DI CATTURARE UN ELETTRONE AUMENTA QUANDO v DIVENTA SIMILE ALLA VELOCITÀ ORBITALE DEGLI ELETTRONI ATOMICI

↳ modello di Bohr: $J_{orb} \propto Z$

↳ DIFFERENZA TRA MEZZI AD ALTO Z (E ATOMICI VELOCI) E BASSO Z

- MODELLO TEORICO MOLTO SEMPLICE DI **Fermi e Teller**
VALIDO A ENERGIE MOLTO BASSE.

$$S_{be} = \frac{4}{3\pi} E_{ry} \frac{m\bar{v}}{\hbar} \log \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar \bar{v}_m}{e^2}$$

VALE PER
 $\bar{v} \ll \bar{v}_m$

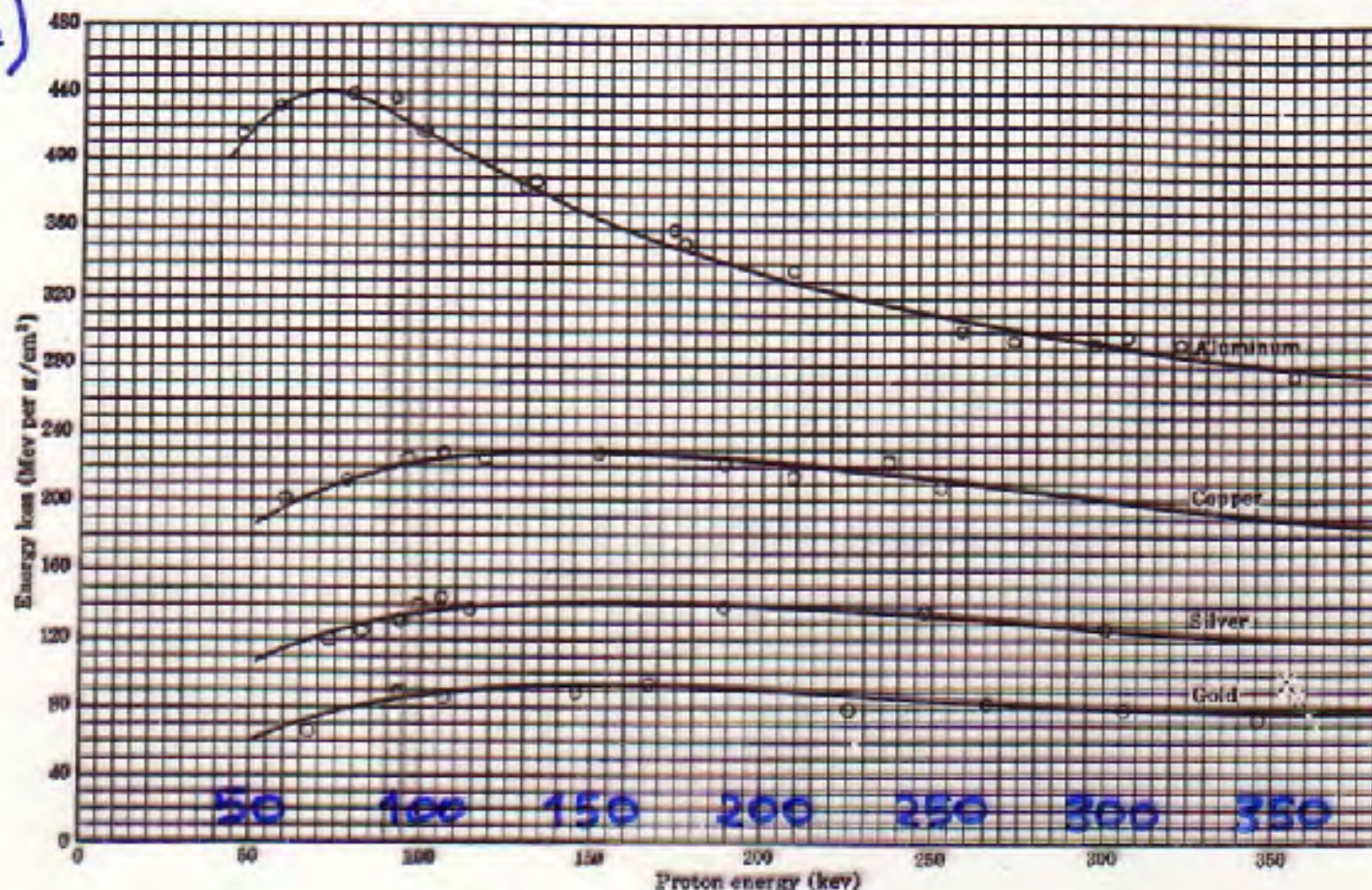
MASSIMA VELOCITÀ
IN UN GAS DI FERMİ
(SI PUÒ CALCOLARE DA DENSITÀ
DEGLI ELETTRONI E STAT. DI FERMİ)

GLI ELETTRONI DEL MEZZO SONO APPROSSIMATI AD
UN GAS DI FERMİ. TRASCURATI TUTTI GLI EFFETTI ATOMICI
→ OTTIMI ACCORDI CON L'ESPERIENZA

S A BASSA ENERGIA

DATI SPERIMENTALI PER P (PROTONI)

$$\frac{S}{\rho} \left(\frac{\text{MeV}}{\text{g} \cdot \text{cm}^2} \right)$$



E_p (keV)

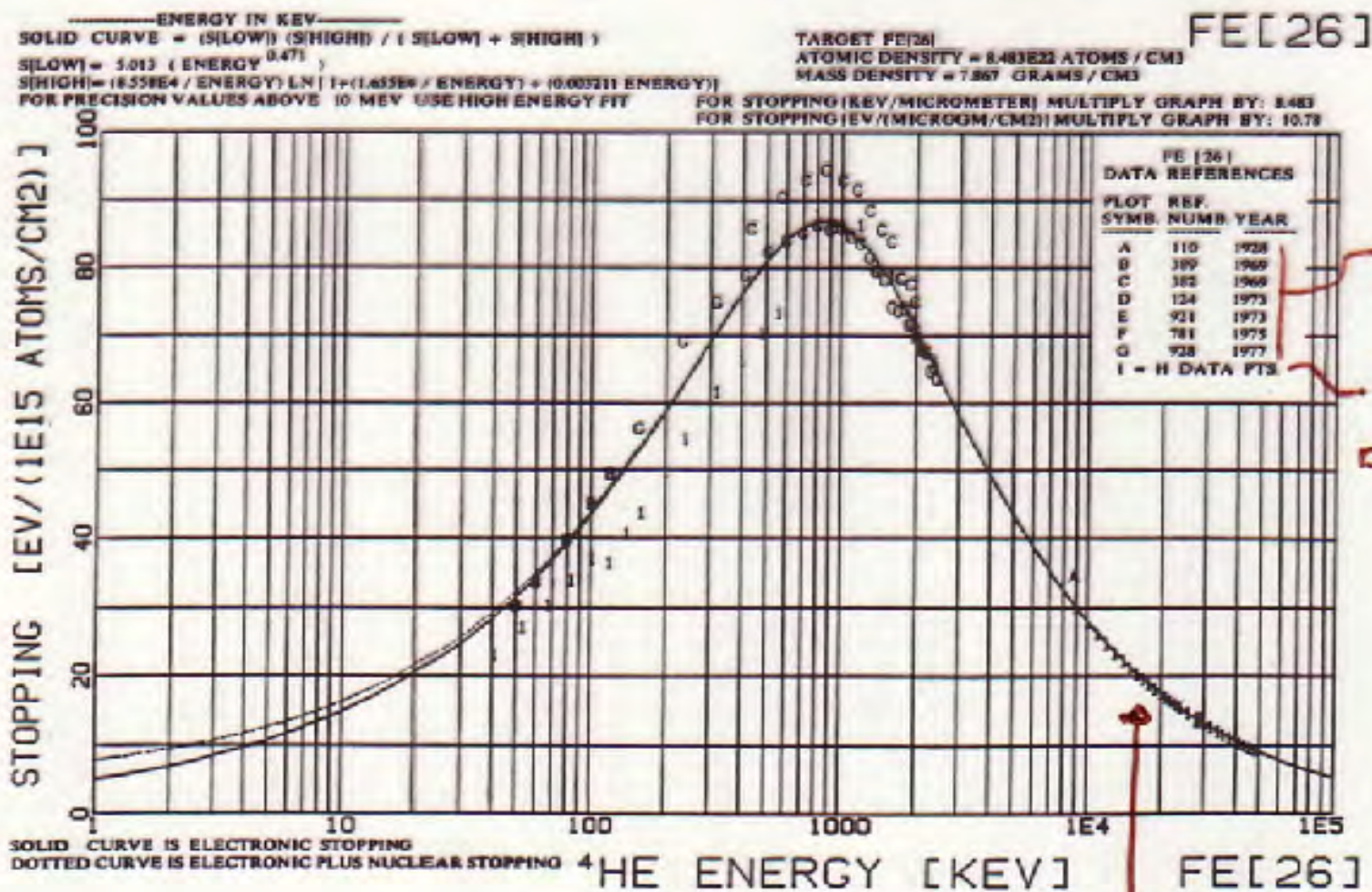
Al

Cu

Ag

Au

DATI SPERIMENTALI E MODELLO PARTICELLE α IN Fe



LETTERE:
VARIE
MISURE

NUM.
1:
DATI PER
P

E_{α} (keV)

REGIONE DI
VALIDITÀ DELLA FORMULA
DI BETHE E BLOCH

S PER IONI PESANTI (FRAMMENTI DI FISSIONE)

- COMPORTAMENTO SIMILE A PARTICELLE α

A BASSA ENERGIA, CATTURA DI ELETTRONI ATOMICI

→ SCHERMAGGIO DELLA CARICA: $Z \rightarrow Z_{eff} < Z$

- L'EFFETTO COMINCIA A β PIÙ ALTE CHE PER LE α

GRANDE CARICA (FINO A $20e$)

→ MAGGIORE PROBABILITÀ DI CATTURA

→ IL MASSIMO DI S SI SPOSTA VERSO β MAGGIORI AL CRESCERE DI Z

- SE Z È GRANDE (FRAMMENTI DI FISSIONE)
($Z \sim 20e$)

DIVENTA IMPORTANTE LA PERDITA DI ENERGIA PER COLLISIONE CON I NUCLEI.

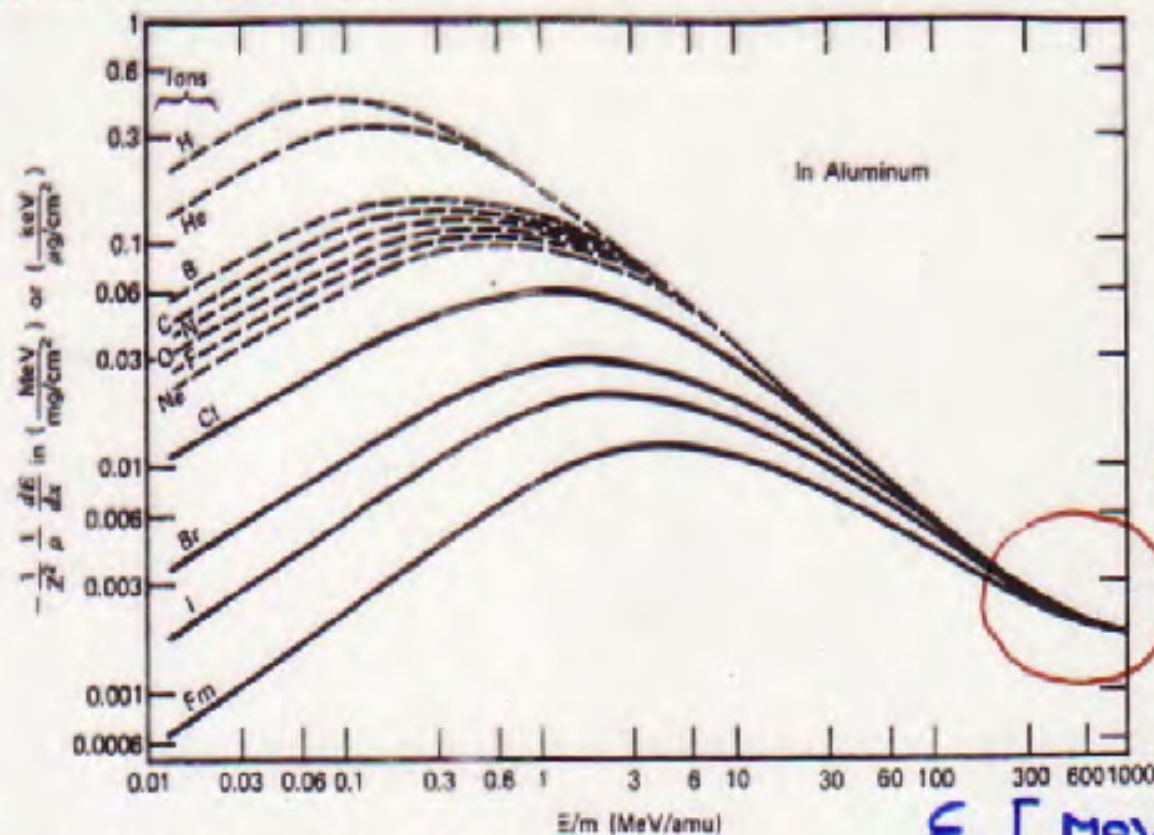
$$\begin{cases} S_{ee} \propto \frac{Z_{eff}^2 Z}{m_e} \\ S_{NUCLEI} \propto \frac{Z^2 Z}{M_N} \end{cases}$$

→ POCCHI URTI:
FORTE FLUTTUAZIONE
IN dE/dx E PERCORSO

$M_N \gg m_e$ È
BILANCIATO DA
 $Z^2 \gg Z_{eff}^2$

URTO RAVVICINATO:
PENETRAZIONE NELLA
NUVOLE ELETTRONICA

$$\frac{1}{Z^2} \frac{S}{\rho}$$



REGIONE DI
VALIDITÀ
DI
BETHE BLOCH

$$T = \frac{1}{2} m v^2$$

$$E \cdot A [\text{MeV}] \approx \frac{1}{2} A [\text{GeV}] \beta^2$$

$$\rightarrow \beta = \sqrt{\frac{2E}{1000}}$$

$$E [\text{MeV/Amu}]$$

$$= 500 \cdot \beta^2$$

- CURVE DI BRAGG

↳ DISTRIBUZIONE DELLA
DENSITÀ LINEARE DI IONIZZAZIONE
(N° COPPIE IONI / L)
LUNGO IL PERCORSO DI UNA
PARTICELLA CARICA PESANTE

IONIZZAZIONE TOTALE =

IONIZZAZIONE
PRIMARIA
($\times \frac{1}{3}$)

+

IONIZZAZIONE ($\times \frac{2}{3}$)
SECONDAIA
(ELETTRONI VELOCI
CHE IONIZZANO A
LORO VOLTA)

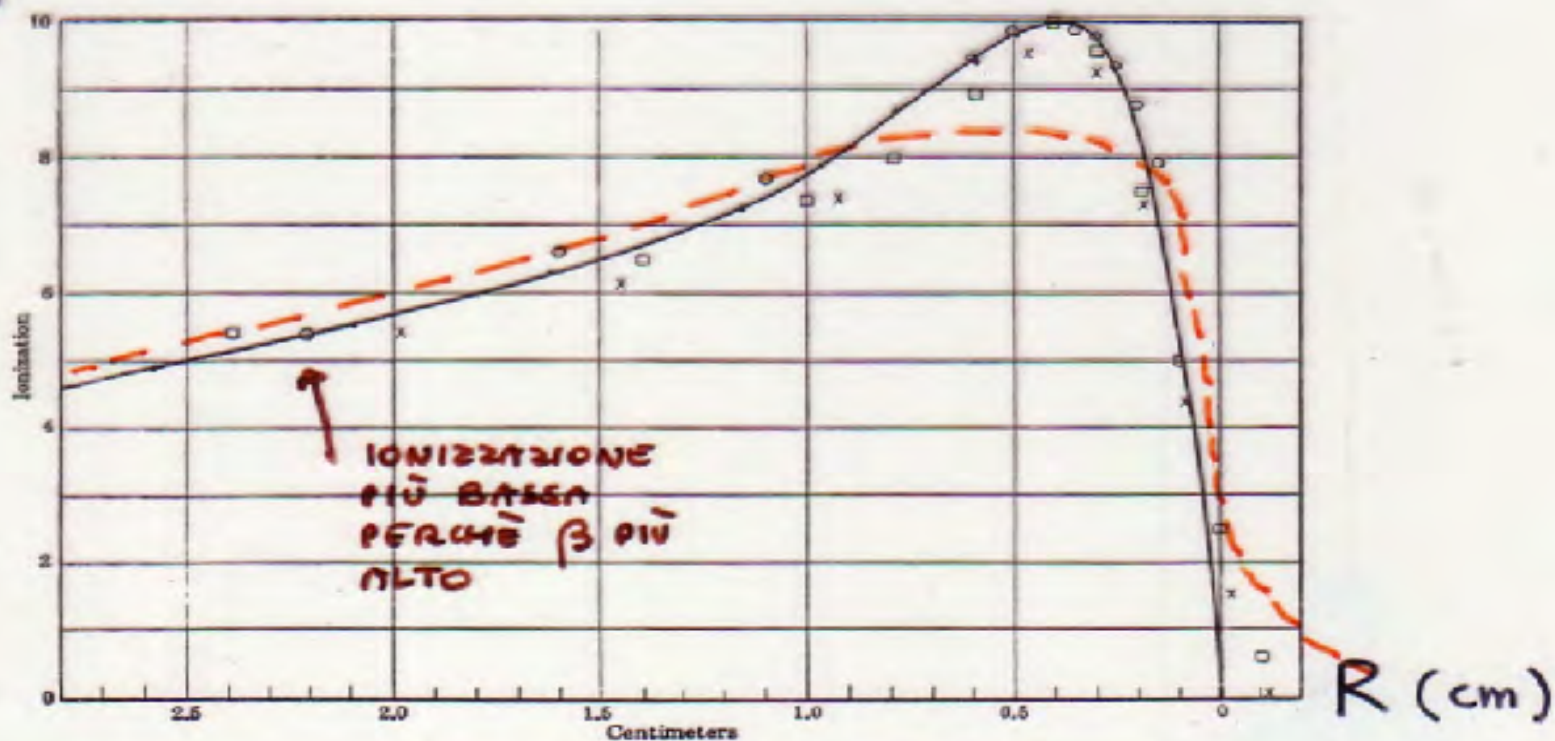
- DISTRIBUZIONE DELLA IONIZZAZIONE LUNGO IL
PERCORSO .

v GRANDE (INIZIO PERCORSO) \Rightarrow S PICCOLA \Rightarrow BASSA
IONIZZAZIONE
 v PICCOLA (FINE PERCORSO) \Rightarrow S GRANDE \Rightarrow ALTA
IONIZZAZIONE

↳ CURVE DI BRAGG

COPPIE IONI
(mm⁻¹)

MAX: CIRCA 6'000 $\frac{\text{ioni}}{\text{mm}}$



PARTICELLA α DI 5.4 MeV IN ARIA
(SINGOLA)

----- FASCIO DI PARTICELLE
FORMA PIÙ ARROTONDATA + CODA
(FENOMENI DI DISPERSIONE)