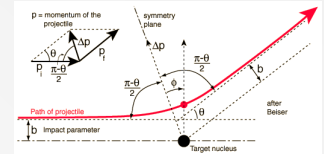


# Oddziaływanie Promieniowania Jonizującego z Materią

**Tomasz Szumlak, A.Obłąkowska-Mucha**

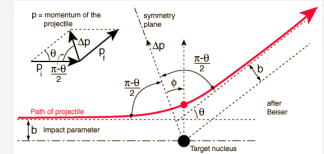
WFiIS AGH-UST Kraków

# Intro (I)



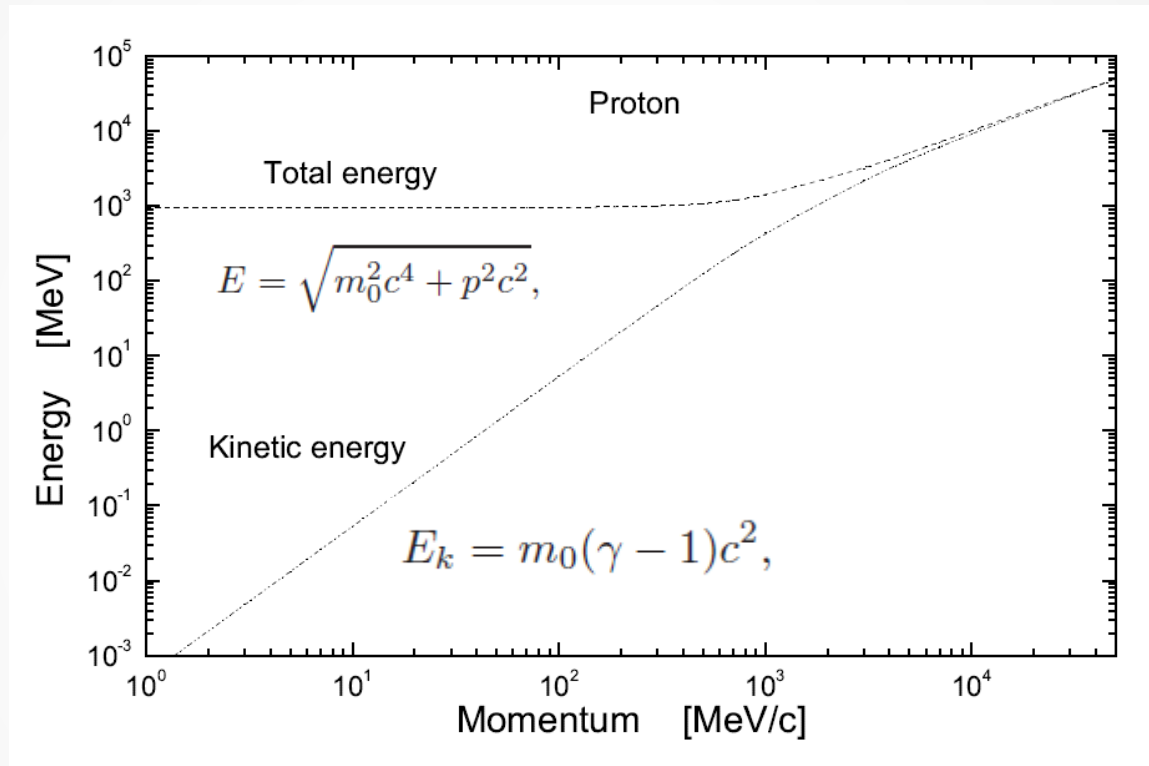
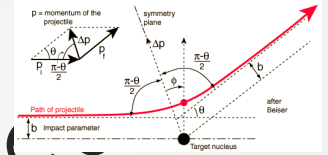
- ❑ **Detekcja** dowolnego typu **promieniowania** opiera się na fakcie, że promieniowanie to **deponuje** (traci) **energię** w materiale czynnym detektora.
- ❑ Energia zdeponowana w obszarze aktywnym może prowadzić do produkcji **nośników ładunku** (np. par elektron-jon lub elektron-dziura).
- ❑ Nośniki ładunku są źródłem sygnału w elektronice odczytu.
- ❑ **Działanie** dowolnego **układu detekcyjnego** opiera się więc na tym w jaki sposób promieniowanie **oddziałuje** z jego częścią **aktywną** (np. sensory krzemowe w detektorach śladowych).
- ❑ Inaczej - zrozumienie odpowiedzi danego typu detektora związane jest z **fundamentalnymi mechanizmami oddziaływania cząstek promieniowania z materią**.
- ❑ Pamiętajmy – bez względu na naturę oddziaływania, które prowadzi do strat energii cząstek promieniowania nasza wiedza o tym co zaszło oparta jest o **sygnały elektryczne** mierzone przez elektronikę odczytu!

## Intro (II)



- ❑ Mechanizm oddziaływania **promieniowania** z materią zależy w pierwszym rzędzie od **jego typu**, możemy wprowadzić poniższy ogólny podział:
  
- ❑ Strumienie cząstek **naładowanych (jakie źródła?)**
  - Ciężkie cząstki naładowane
  - Szybkie elektrony
  
- ❑ Strumienie cząstek **obojętnych (źródła?)**
  - Neutrony
  - Fotony – promieniowanie X i  $\gamma$

## Intro (IIb) Relatywistyczne:

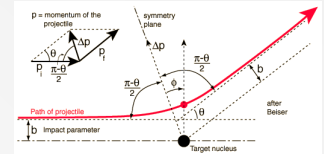


$$\vec{p} = \vec{\beta} \gamma m_0 c$$

$$p = \frac{\sqrt{E_k (E_k + 2m_0 c^2)}}{c}$$

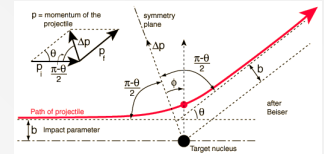
zadanie!

# Intro (III)



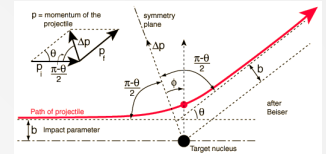
- ❑ W przypadku **cząstek naładowanych** - mogą one oddziaływać elektromagnetycznie (**E.M.**):
  - ❑ z **elektronami atomów** materiału czynnego aparatury detekcyjnej (oddziaływania z jądrami można zaniedbać) – **strata energii głównie na jonizację**
  - ❑ z **jądrami atomowymi** – straty energii pomijalnie małe, ale duży wpływ **na zmianę kierunku, w przypadku elektronów znaczna strata energii na prom. hamowania** (bo zmienia kierunek)
- ❑ **Cząstki obojętne** muszą najpierw ulec **pewnemu procesowi**, na skutek którego nastąpi **częściowe lub całkowite** przekazanie ich energii elektronom, jądrom atomowym lub fragmentom jąder.
  - ❑ Inaczej powiemy, że **detekcja cząstek obojętnych** opiera się o ich zdolność do produkcji **naładowanych cząstek wtórnych**!

# Cząstki naładowane (II)

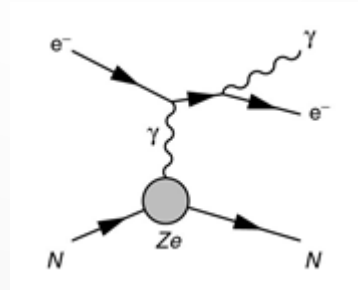


- ❑ Cząstki naładowane mogą podlegać również innym typom oddziaływania prowadzących do strat energii, nie mniej jednak straty jonizacyjne **zachodzą zawsze!**
- ❑ Różne procesy konkurencyjne zależą zwykle od typu cząstek oraz ich energii
  - ❑ Dla mionów, straty jonizacyjne dominują wyraźnie do energii około  $100\text{ GeV}$
  - ❑ Dlatego miony jako jedyne cząstki stabilne posiadają znaczne możliwości penetracyjne (dziesiątki metrów żelaza)
  - ❑ Można to wykorzystać w szybkiej i niezawodniej identyfikacji mionów – niezwykle ważne dla systemów wyzwalań

# Elektrony

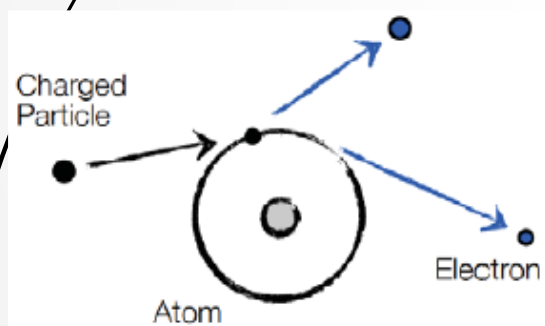
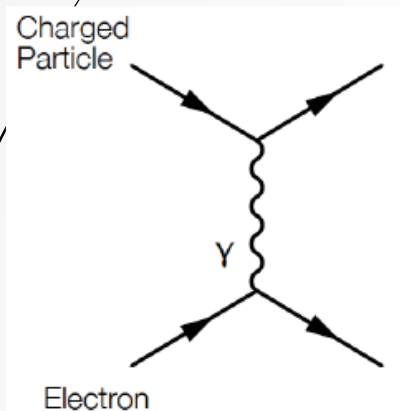


- ❑ Dla niskich energii elektrony, podobnie jak ciężkie cząstki naładowane, tracą energię głównie na drodze jonizacji
- ❑ Powyżej, tak zwanej, energii krytycznej głównym mechanizmem strat energii jest **promieniowanie hamowania** (bremsstrahlung)
- ❑ W zasadzie, elektrony „zawsze są relatywistyczne” i zakładamy, że dominującym sposobem oddziaływania z materią jest dla nich promieniowanie hamowania
- ❑ Inne cząstki naładowane również podlegają temu procesowi, ale jest on **silnie tłumiony przez masę cząstek** ( $m_e^2 / m_\mu^2$ )

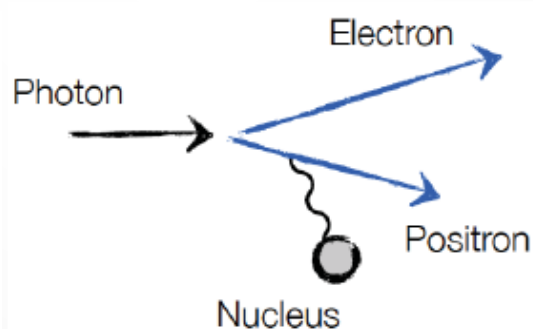
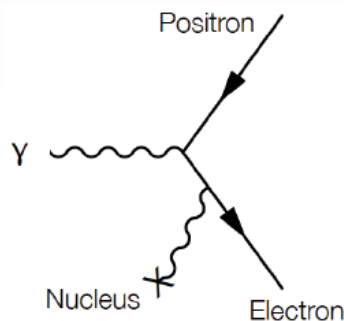


# Oddziaływania elm

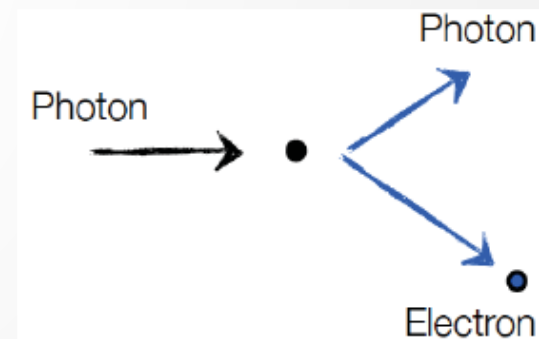
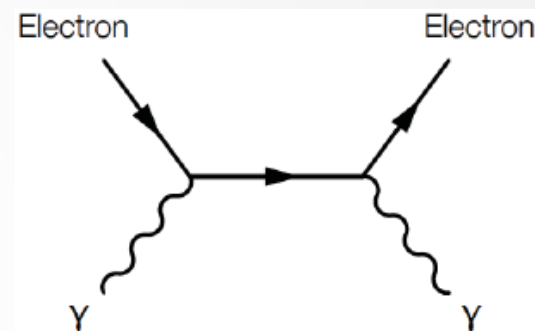
□ Znané procesy umożliwiające detekcję:



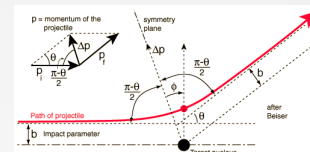
Jonizacja



Kreacja par

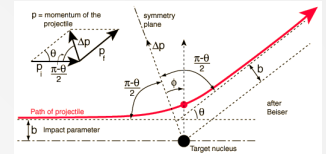


Rozpraszanie Comptona

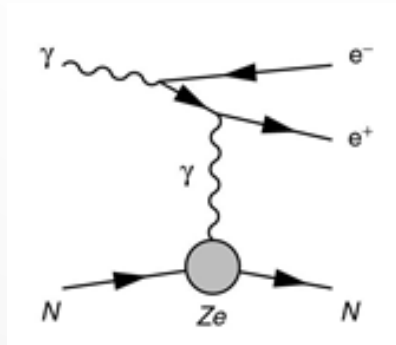




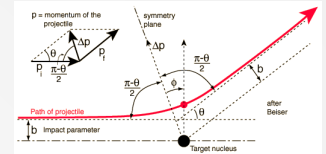
# Fotony



- ❑ **Trzy** główne sposoby oddziaływania – silna zależność od energii
  - ❑ **Efekt fotoelektryczny** dla fotonów o energiach  $\sim keV$  (maksymalna energia wiązań elektronów w atomach)
  - ❑ **Rozproszenie Compton'a** (kwazi-stacjonarny elektron)  $\sim MeV$
  - ❑ **Dysocjacja** do pary elektron-pozyton (**kreacja par**) dominuje dla fotonów o energiach  $> 10 MeV$
- ❑ Uwaga – dysocjacja fotonu może zajść jedynie w polu elektrostatycznym jądra atomowego – zasady zachowania, energia odrzutu
- ❑ Oddziaływanie elektronów i fotonów (o dużych energiach) jest opisane przez tzw. **długość radiacyjną**  $X_0$  ( $\sim cm$ )

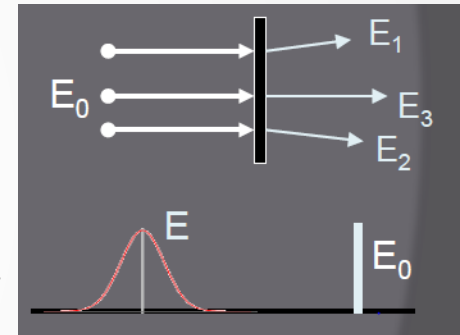


# Procesy oddziaływania



❑ Cząstki przechodząc przez materiał oddziałują z wieloma atomami jednocześnie:

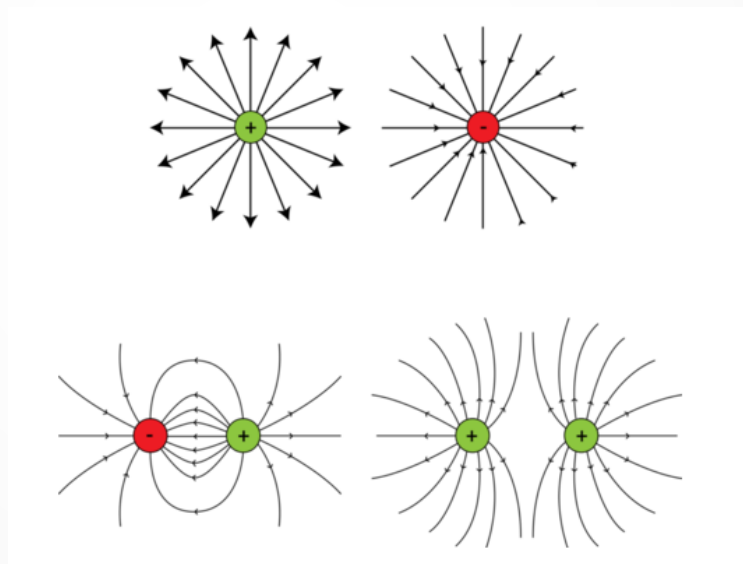
- każdy atom ma wiele elektronów,
- każdy elektron zajmuje różny poziom energetyczny i ma różne energie jonizacji i wzbudzenia,
- każde zderzenie ma inne prawdopodobieństwo przekazania konkretnej porcji energii



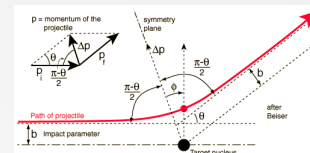
$$E = E_0 - \sum_i \Delta E_i = E_0 - \sum_i \left( \frac{\Delta E_i}{\Delta x} \right) = E_0 - \int \frac{dE}{dx} dx$$

- ❑ Nie jest możliwe wyznaczenie strat energii licząc straty indywidualnych zdarzeń.
- ❑ Można za to policzyć średnie straty energii na jednostkę drogi przebytej przez cząstkę w materiale.

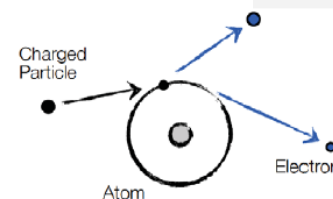
## CZĘŚĆ I. Cząstki naładowane



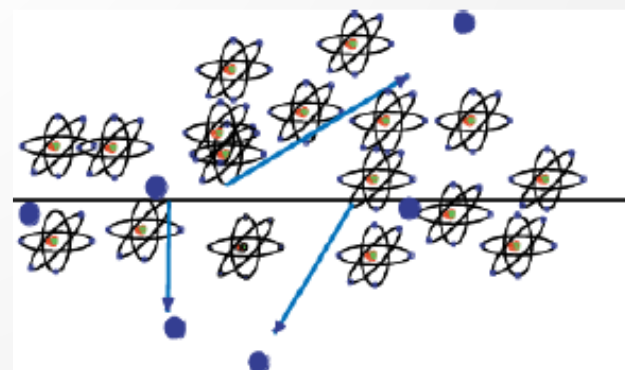
# Cząstki naładowane, „ciężkie” (I)



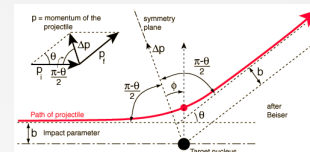
- ❑ Ciężkie cząstki przechodząc przez materię tracą energię poprzez jonizację i oddziaływania silne z jądrami atomowymi
- ❑ Naładowana cząstka przechodząc przez materię pozostawia za sobą:
  - Wzbudzone atomy,
  - Pary elektron-jon (gazy),
  - Pary elektron-dziura (ciała stałe)
- ❑ Ciągłe oddziaływanie E.M. z **chmurami elektronowymi** atomów materiału czynnego detektora
  - Oddziaływania z jądrami (rozpraszanie typu Rutherford'a) możliwe, ale w praktyce zupełnie **zaniedbywalne**
  - Odpowiedź detektorów cząstek naładowanych, mierzona przez elektronikę odczytu, **opiera się na ich oddziaływaniu z elektronami**



- ❑ Każda z naładowanych cząstek penetrujących materiał detektora „czuje” w każdym momencie **wiele elektronów**



# Cząstki naładowane, „ciężkie” (II)



- ❑ W zależności od odległości (cząstka - elektron) możliwe jest
  - Przeniesienie elektronu na wyższą powłokę – **wzbudzenie atomu** materiału absorbującego.
    - **fotony** emitowane przez wzbudzone atomy mogą być rejestrowane przez detektory fotonów.
  - Usunięcie elektronu z atomu – **jonizacja**
    - Jeżeli w detektorze będzie pole elektryczne, **elektrony i jony** z jonizacji mogą być zbierane przez elektrody i przetwarzane przez układy elektroniczne.
- ❑ Zarówno wzbudzenie jak i jonizacja zachodzą **kosztem energii** cząstki naładowanej, co skutkuje również **zmniejszeniem jej prędkości**.

Można pokazać, że **maksymalna energia** przekazana elektronowi w jednym akcie rozpraszania to:

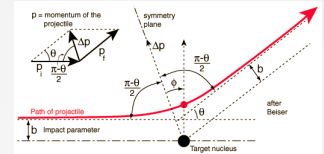
$$\Delta E_{MAX} = 4E_I \frac{m}{M}$$

Masa elektronu

Masa cząstki  
penetrującej

Energia początkowa  
cząstki penetrującej

# Cząstki naładowane, „ciężkie” (III)



## Przykład

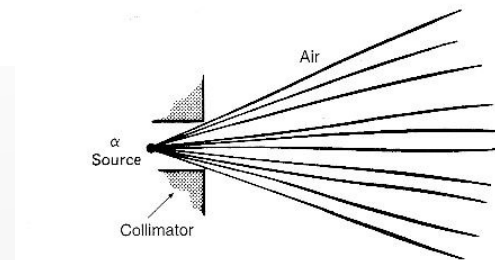
Jeżeli promieniowanie penetrujące składa się z cząstek  $\alpha$ , wówczas mamy:

$$\Delta E_{MAX}^{\alpha} = 4E_I^{\alpha} \frac{m_{e^{-}}}{M_{\alpha}} = 4E_I^{\alpha} \frac{0.5 [MeV]}{4000 [MeV]}$$

$$\frac{\Delta E_{MAX}^{\alpha}}{E_I^{\alpha}} = \frac{1}{2000}$$

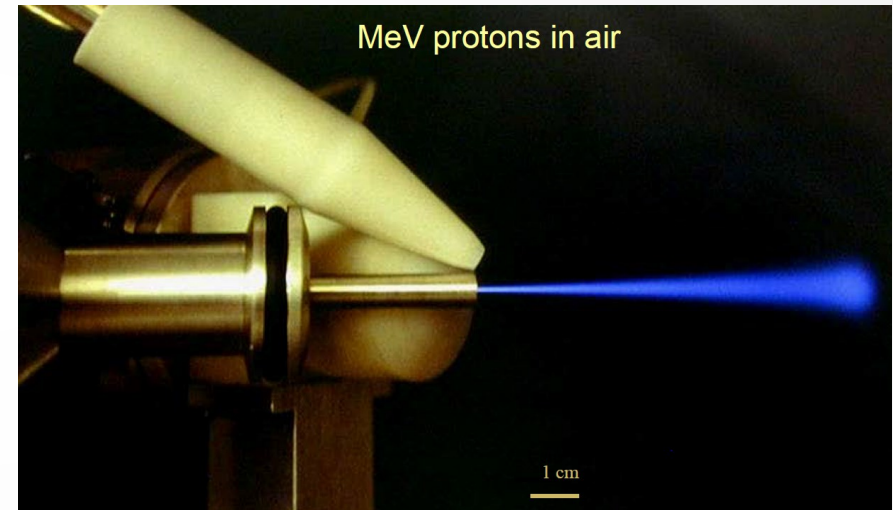
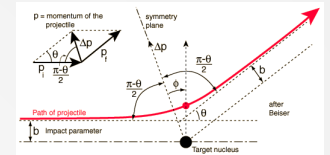
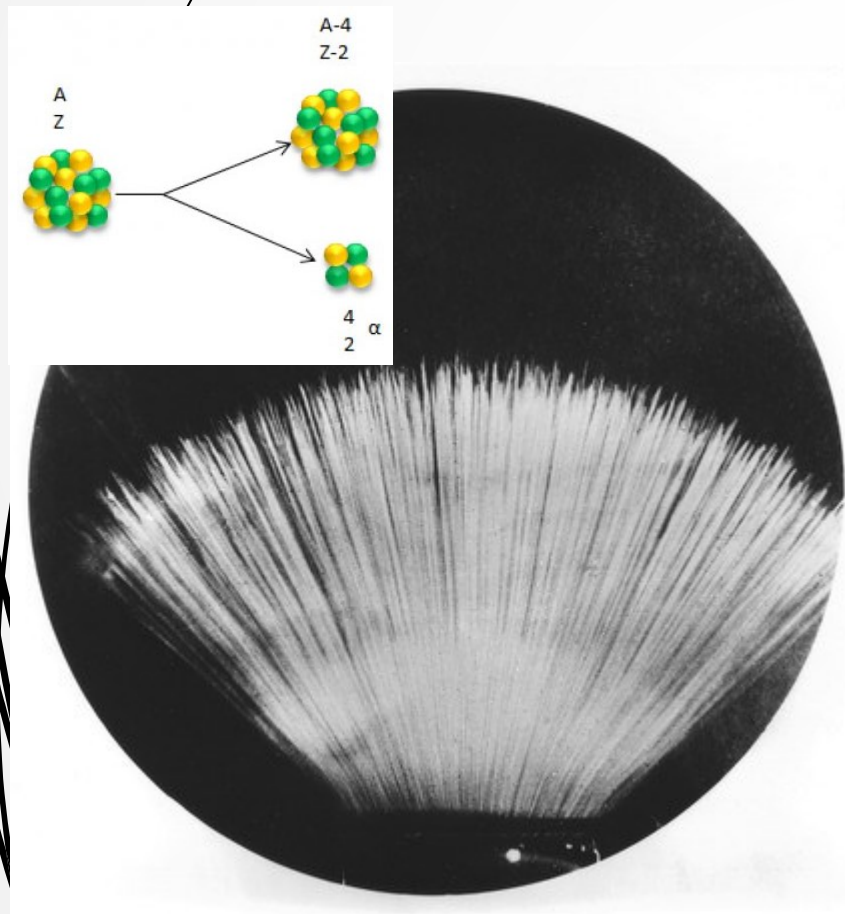
Ciężka naładowana cząstka traci niewiele energii w pojedynczym zderzeniu i nie zmienia znacząco kierunku. Wyjaśnia to podstawowe fakty dotyczące oddziaływania ciężkich cząstek naładowanych z materią:

- ☐ Trajektorie cząstek są praktycznie liniowe
- ☐ Zmniejszanie prędkości (energii) odbywa się w sposób ciągły, aż do całkowitego zatrzymania
- ☐ Zasięg cząstek naładowanych jest praktycznie stały i zależy od materiału oraz energii początkowej



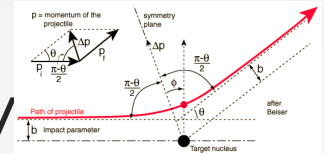
# Detekcja cząstek $\alpha$

Poniżej – ślady wysokoenergetycznych cząstek  $\alpha$  emitowanych przez izotop toru, obserwowane w komorze mgłowej



zasięg protonów w powietrzu

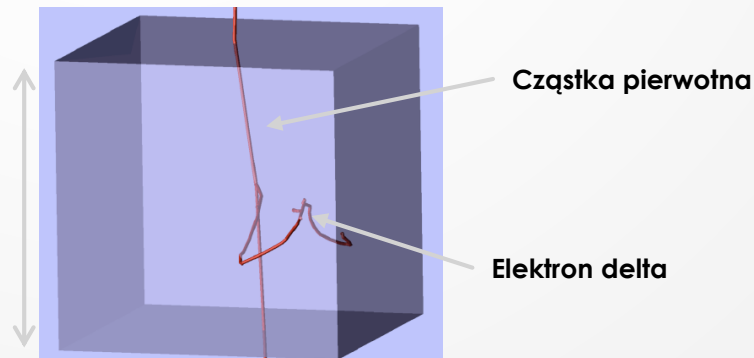
# Cząstki naładowane, „ciężkie” (IV)



- ❑ Dość często zdarza się, że wybity elektron posiada wystarczająco wysoką energię i sam jest zdolny do jonizacji materiału detektora.
- ❑ Elektrony takie nazywamy „**elektronami delta**” (delta rays) – stanowią one **pośredni** sposób przekazywania energii pomiędzy cząstkami promieniowania oraz medium pochłaniającym.
- ❑ Zasięg elektronów delta jest zawsze dużo mniejszy niż pierwotnej cząstki, oznacza to, że efekty jonizacyjne związane z nimi zachodzą **blisko trajektorii** cząstki pierwotnej.
- ❑ W typowych warunkach **większość energii traconej** przez cząstki naładowane związana jest właśnie z emisją elektronów delta.

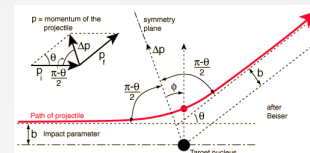
Symulacja elektronów delta  
w kryształach krzemu

~ 50 nm

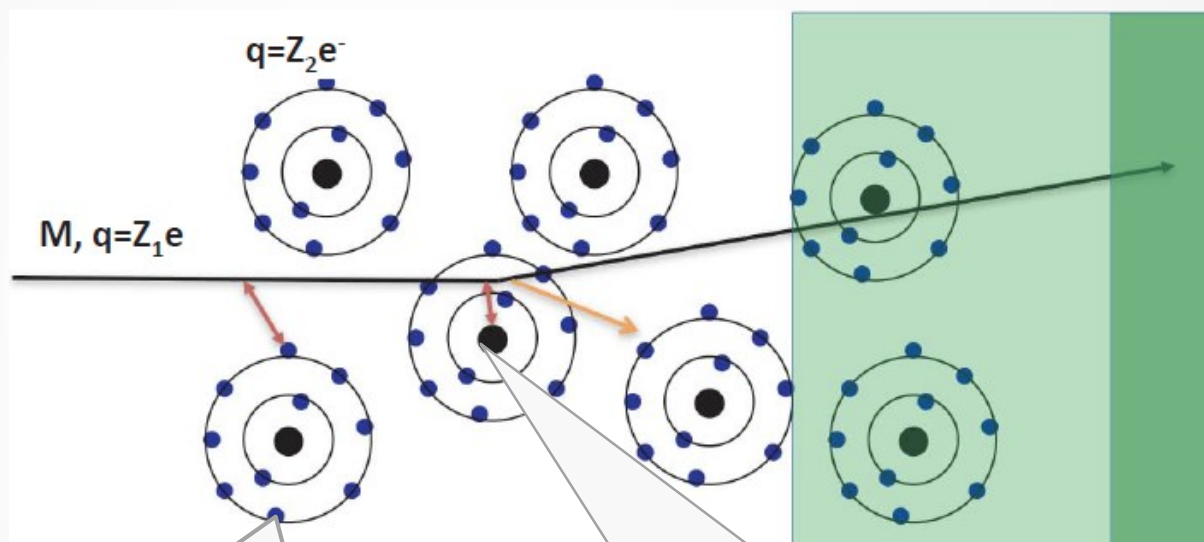




# Oddziaływania EM



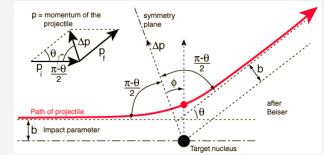
- Większość procesów umożliwiających wykrycie cząstki są to procesy **elektromagnetyczne**



Oddz. z **elektronami atomowymi**.  
Wchodząca cząstka traci energię,  
pozostawiając atomy **wzbudzone lub**  
**zjonizowane**

Oddz. z **jądrami atomowymi**.  
Cząstki są **odchylone** w wyniku wielokrotnych  
„miękkich” rozpraszających oraz (rzadko) z jądrem  
Zmiana kierunku jest źródłem **promieniowania**  
**hamowania** (bremsstrahlung)

# „Stopping power” (I)



**Strata energii,  $S$ ,** cząstki naładowanej przechodzącej przez materiał detektora może być wyrażona w formie różniczkowej:

$$S = - \frac{dE}{dx}$$

elementarna strata energii  
cząstki pierwotnej w danym  
medium

„minus” reprezentuje  
stratę energii

Element długości trajektorii  
cząstki pierwotnej w medium  
absorpcyjnym

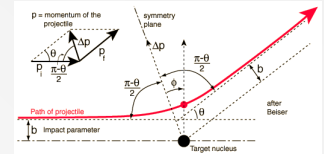
- Stopping power jest to wartość oczekiwana szybkości strat energii na jednostkę długości.

Jednostka:  $[S] = \text{MeV} \cdot \text{cm}^{-1}$

**Mass Stopping Power:** stopping power podzielona przez gęstość materiału:

$$S = - \frac{dE}{\rho dx} \quad [\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$$

# „Stopping power” (II)



**Strata energii,  $S$** , cząstki naładowanej przechodzącej przez materiał może być spowodowana:

- zderzeniami (collision stopping power): suma strat od miękkich i twardych oddziaływań;
- promieniowaniem (radiative stopping power) – głównie bremsstrahlung

Przybliżone równanie opisujące „szybkość” utraty energii przez cząstkę naładowaną przechodzącą przez ośrodek z prędkością  $v = \beta c$  w procesach wzbudzeń i jonizacji ośrodka nazywamy **formułą Bethe'go**:

$$-\frac{dE}{dx} = NZ \frac{4\pi e^4 z^2}{m_e v^2} \left[ \ln \left( \frac{2v^2 m_e}{I} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

ładunek cząstki jonizującej -  $ze$

prędkość cząstki pierwotnej

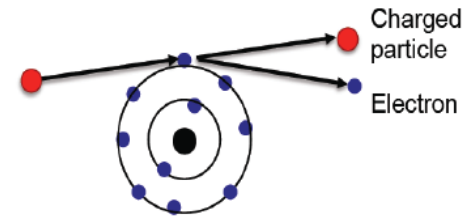
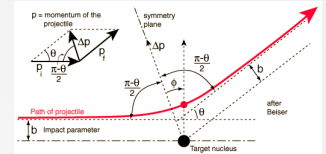
koncentracja atomów absorbera  $N = \frac{\text{liczba atomów}}{\text{objętość}}$

liczba atomowa materiału absorbującego

średnia energia wzbudzenia/ionizacji

# „Stopping power” (II)

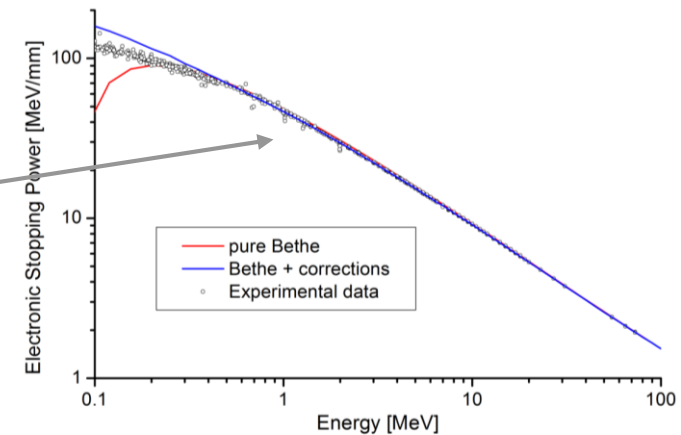
$$-\frac{dE}{dx} = NZ \frac{4\pi e^4 z^2}{v^2 m_{e^-}} \left[ \ln \left( \frac{2v^2 m_{e^-}}{I} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$



❑ Oddziaływanie jest zdominowane przez elastyczne zderzenia z elektronami.

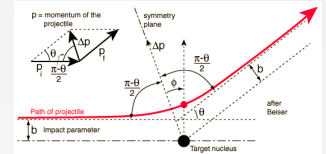
❑ Dla cząstek nierelatywistycznych tylko **pierwszy czynnik** przed nawiasem kwadratowym jest **znaczący** (zaniedbujemy  $\beta$ )

❑ Nawias kwadratowy zmienia się bardzo wolno wraz ze zmianą energii – oznacza to, że ogólne własności tej formuły wynikają z zachowania się czynnika przed nawiasem



Zadanie: policzyć *mass collision stopping power* w wodzie dla protonów o energii 1 MeV;  
projekt: zbadać zależność BB od rodzaju ośrodka, prędkości, energii.

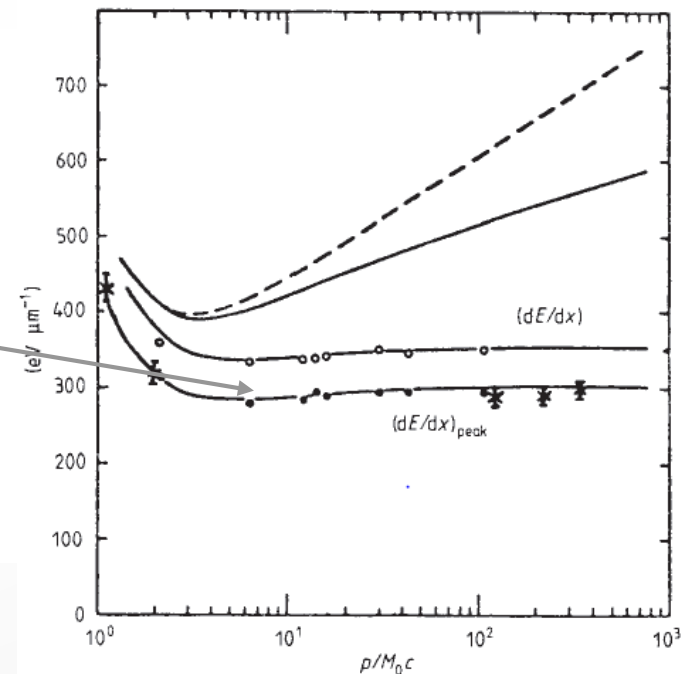
# „Stopping power” (IIa)



$$-\frac{dE}{dx} = NZ \frac{4\pi e^4 z^2}{v^2 m_{e^-}} \left[ \ln \left( \frac{2v^2 m_{e^-}}{I} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

## □ Poprawki:

- nie wszystkie elektrony (zwłaszcza z wewnętrznych poziomów) biorą udział w oddziaływaniu, bo np. elektrony z powłoki K mają wyższą prędkość niż te z dalszych powłok (**shell effect**)
- atomy bliskie trajektorii ekranują dalsze (**density effect**)

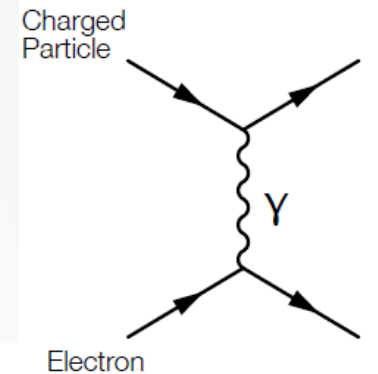
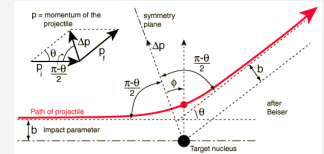


# „Stopping power” (III)

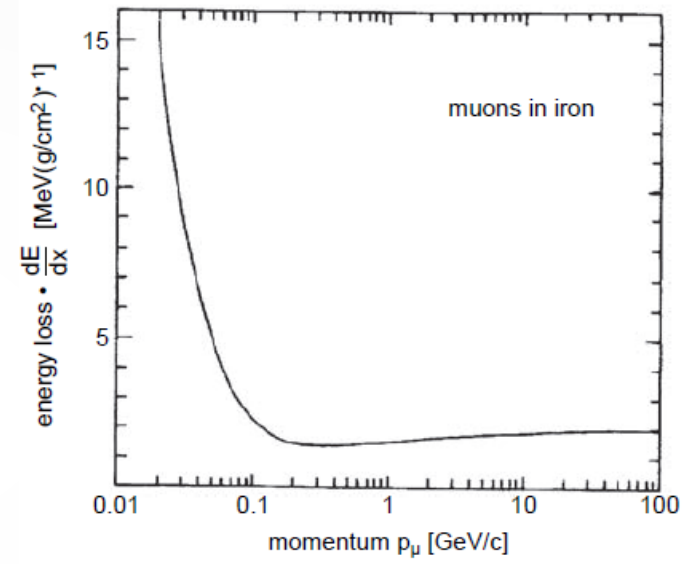
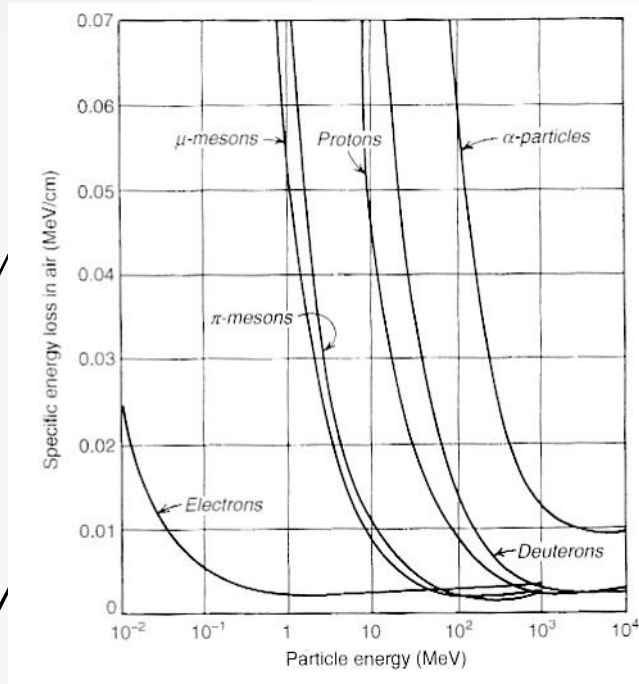
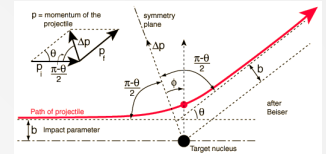
$$-\frac{dE}{dx} = NZ \frac{4\pi e^4 z^2}{v^2 m_{e^-}} \left[ \ln \left( \frac{2v^2 m_{e^-}}{I} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

- ❑ Oddziaływanie jest zdominowane przez **elastyczne zderzenia z elektronami!**

- ❑ Strata energii zmienia się proporcjonalnie do  $\frac{1}{v^2}$
- ❑ Wolniejsza cząstka „spędza” **więcej czasu** w pobliżu danego elektronu – zwiększa to przekaz (stratę) energii
- ❑ Dla cząstek o tej **samej prędkości** strata energii zależy wyłącznie od **ładunku** cząstki pierwotnej (jonizacja dla cząstek  $\alpha \gg$  niż dla p)
- ❑ Straty energii zależą również od rodzaju medium, które absorbuje promieniowanie
  - własności danego materiału dane są przez iloczyn **NZ**, który reprezentuje efektywnie jego **gęstość elektronową**
  - **S** rośnie dla materiałów o dużej liczbie atomowej i gęstości



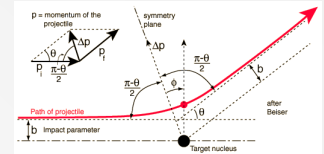
# „Stopping power” (IV)



Straty energii cząstek naładowanych w funkcji ich energii (pomiar)

- Dla energii powyżej  $\sim 1000 \text{ MeV}$  wartości  $\frac{dE}{dx}$  praktycznie **stałe** – minimalnie jonizujące cząstki (MIP)

# „Stopping power” (V)



W zastosowaniach HEP powszechnie używa się zmodyfikowanej formuły Bethe'go, zwaną równaniem Bethe'go-Bloch'a:

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

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e^2 c^2 = 0.3071 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$$

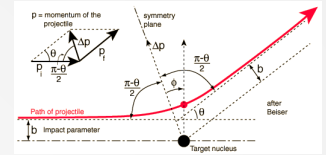
Nowości to:

- ❑ Czynniki Lorentza  $\gamma$
- ❑ Poprawka „gęstościowa” na straty jonizacyjne, istotna dla cząstek ultra-relatywistycznych
- ❑  $T_{MAX}$  - maksymalna energia kinetyczna przekazana elektronowi
- ❑ Jednostki w jakich mierzymy straty energii -  $\left[ \frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{\text{g}} \right]$ , czyli  $dx = \rho \cdot ds$

Powyższy zapis używany jest, aby podkreślić, że straty energii cząstek naładowanych (o tym samym ładunku) są jedynie funkcją  $\beta$  (dla cząstek o najwyższych energiach formuła powyższa zaczyna również zależeć od masy cząstki jonizującej –  $dE/dx$  umożliwia identyfikację cząstek!)



# „Stopping power” (VI)

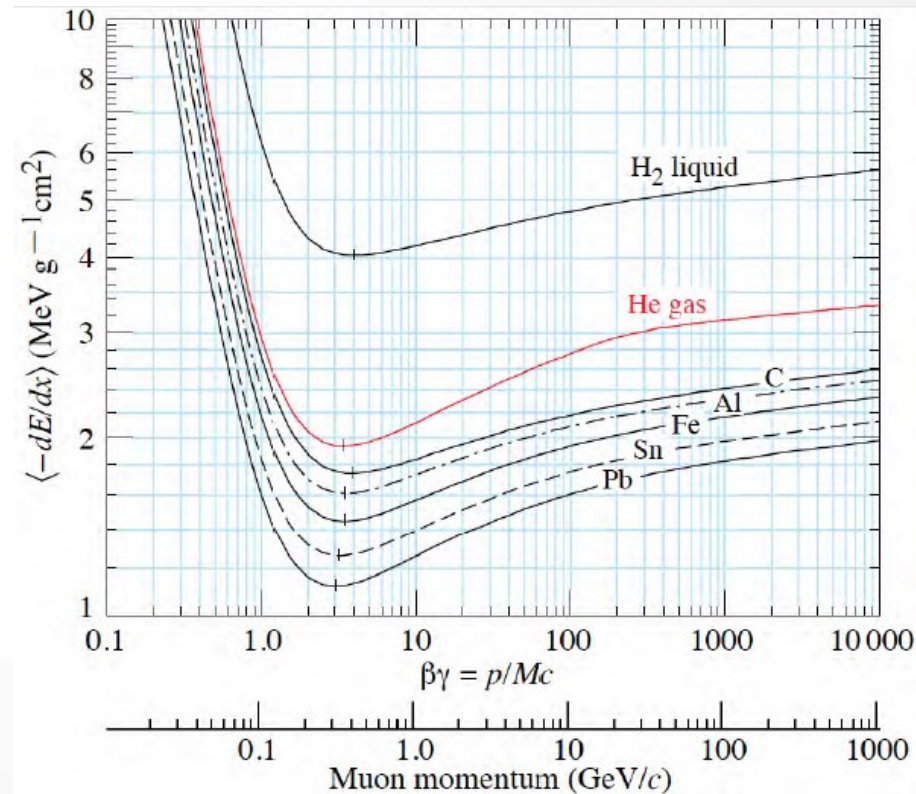


$$-\frac{dE}{dx} = K Z^2 \frac{1}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

$$-\frac{dE}{dx} \propto \frac{Z^2}{\beta^2} \ln(\alpha \beta^2 \gamma^2)$$

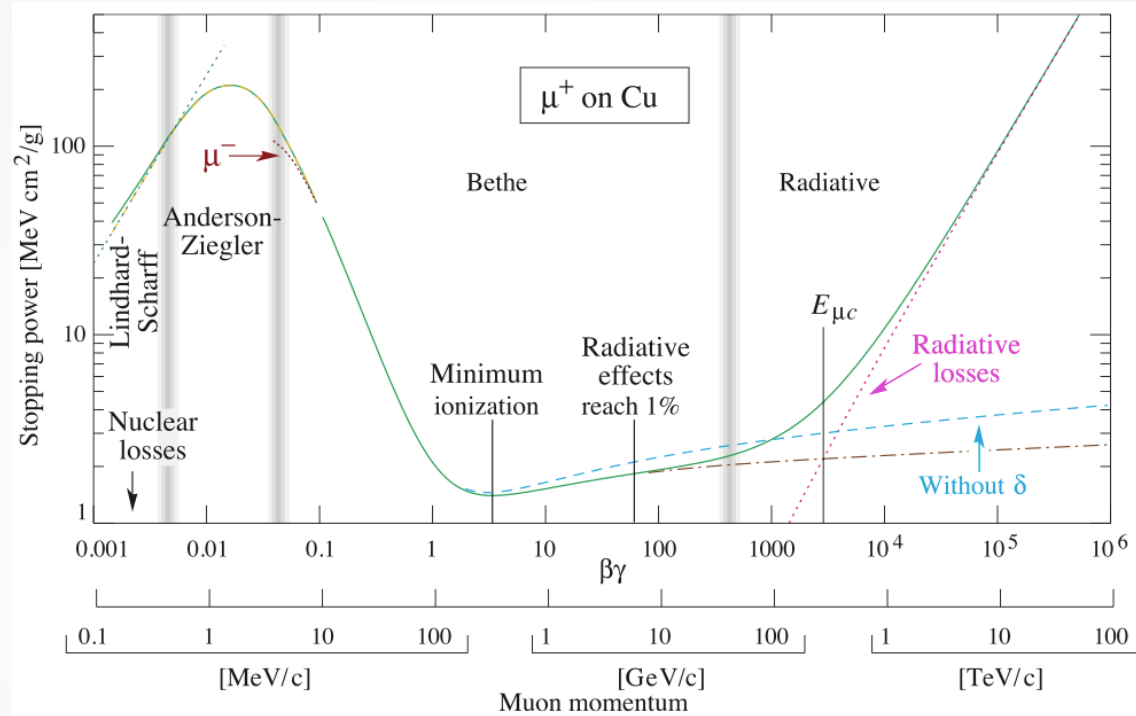
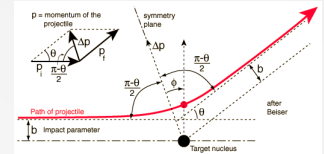
- ❑ Szybki spadek przy niskich energiach  $\propto \frac{1}{\beta^2}$
- ❑ Szerokie minimum w zakresie  $3 \leq \beta\gamma \leq 4$ ,
- ❑ MIP – cząstka z  $dE/dx$  w pobliżu minimum (dlaczego mion?)
- ❑ MIP we wszystkich ośrodkach (z wyjątkiem wodoru) traci tyle samo energii: 1-2 MeV/(g/cm<sup>2</sup>)

$$-\frac{dE}{dx} \min \approx 1 - 2 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}$$



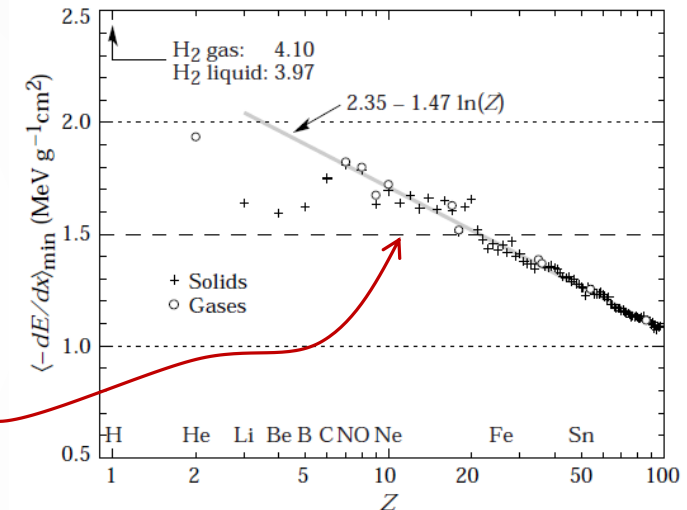
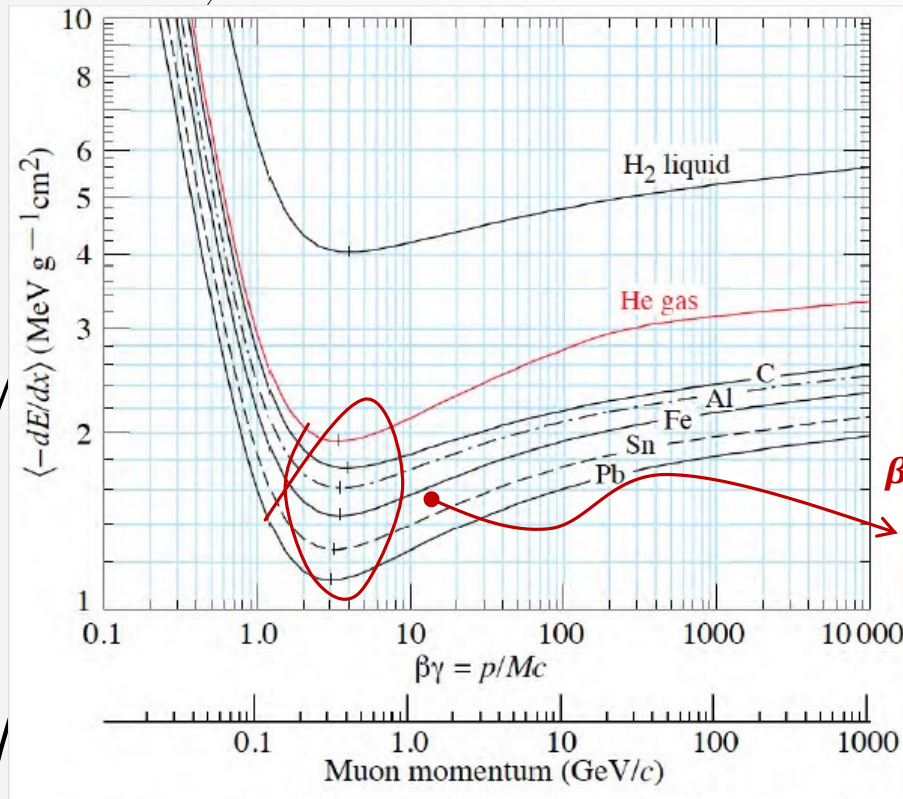
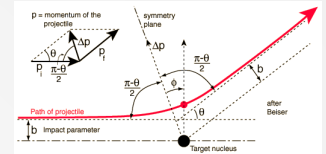
- Straty energii rosną dla  $\gamma > 4$  (wzrost logarytmiczny)

# „Stopping power” (VII)



- ❑ Uśredniona strata energii  $\langle -dE/dx \rangle$  dodatnio naładowanych mionów w szerokim zakresie pędów (9 rzędów wielkości), straty jonizacyjne dominują dla mionów o pędach poniżej  $\sim 100 \text{ GeV}$
- ❑ Minimum jonizacji (uniwersalna wartość dla różnych cząstek i absorberów) występuje dla  $\beta\gamma \approx 3$ .
- ❑ Dla najwyższych energii dominuje strata przez promieniowanie.

# „Stopping power” (VIII)



- ❑ Poza przypadkiem ciekłego wodoru, cząstki o podobnych **prędkościach** charakteryzują się podobnymi **stratami energii** bez względu na absorber!