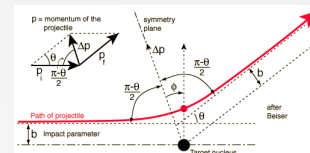


Oddziaływanie Promieniowania Jonizującego z Materią

Tomasz Szumlak, A.Obłąkowska-Mucha

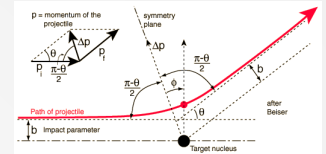
WFiIS AGH
2020, Kraków

Intro (I)



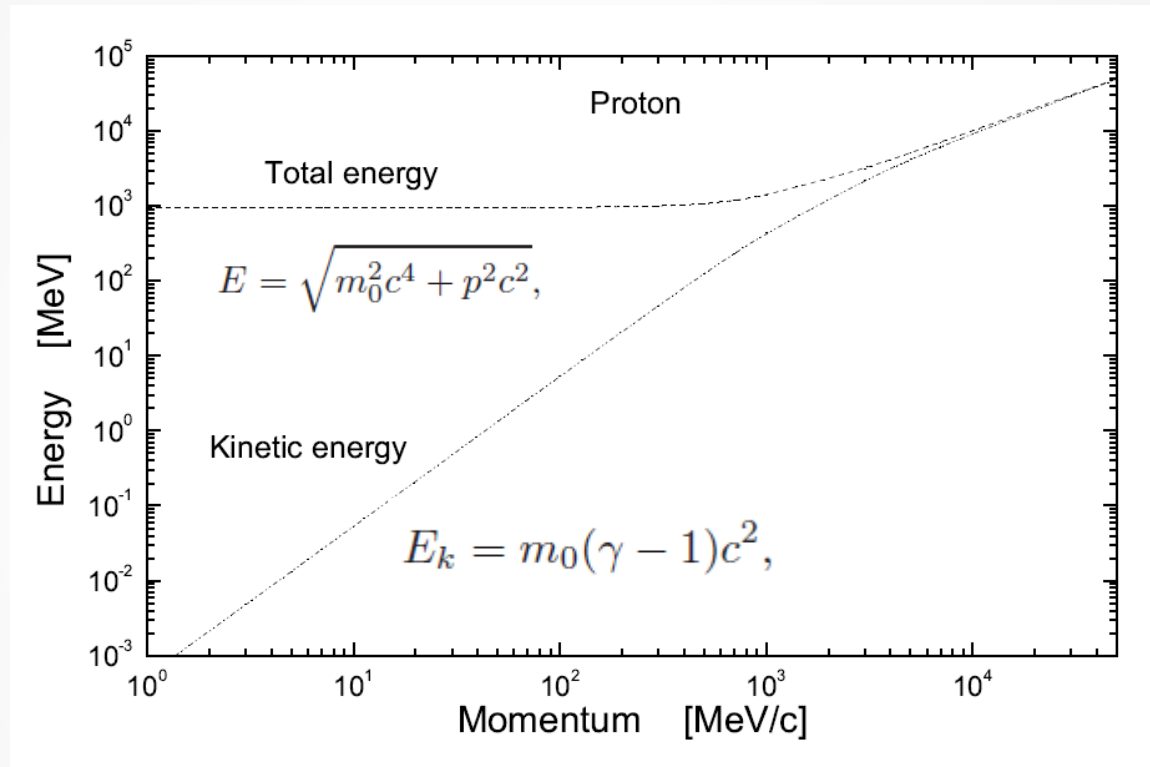
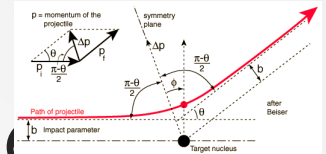
- ❑ **Defekcja** dowolnego typu **promieniowania** opiera się na fakcie, że promieniowanie to **deponuje** (traci) **energię** w materiale czynnym detektora.
- ❑ Energia zdeponowana w obszarze aktywnym może prowadzić do produkcji **nośników ładunku** (np. par elektron-jon lub elektron-dziura).
- ❑ Nośniki 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 γ

Intro (IIb) Relatywistyczne

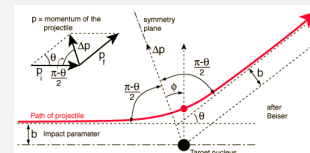


$$\vec{p} = \vec{\beta} \gamma m_0 c$$

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

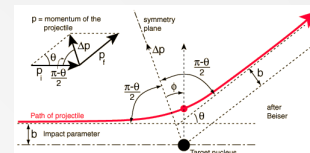
zadanie!

Intro (III)

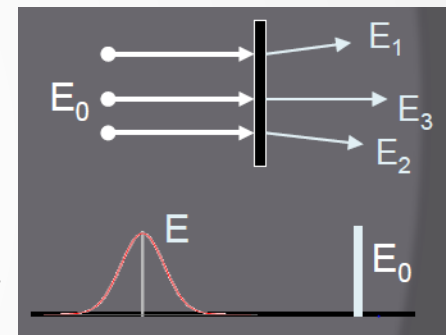


- ❑ W przypadku **cząstek naładowanych** - mogą one oddziaływać elektromagnetycznie (**E.M.**):
 - ❑ z **elektronami atomów** materiału czynnego aparatury detekcyjnej (oddziaływania z jądrami można zaniedbać) – **strata energii**
 - ❑ z **jądrami atomowymi** – straty energii pomijalnie małe, ale duży wpływ **na zmianę kierunku**
- ❑ **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!**

Procesy oddziaływania



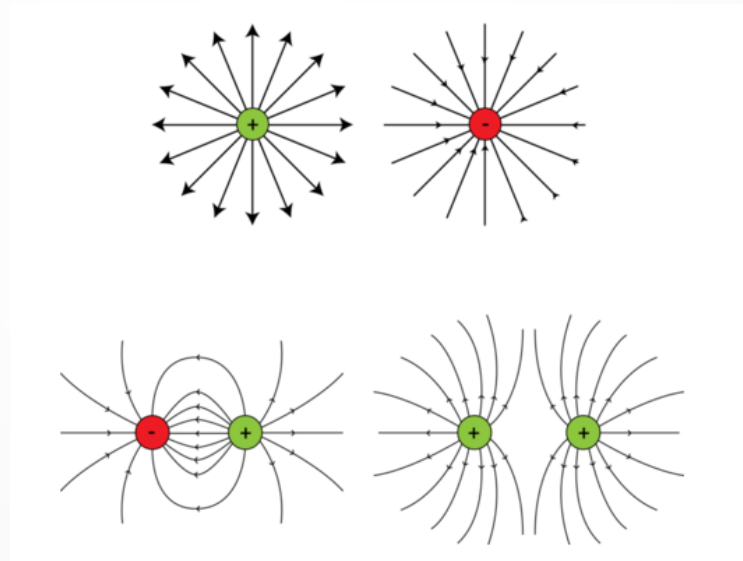
- ❑ Cząstki przechodząc przez materiał oddziałują z wieloma atomami jednocześnie:
 - każdy atom ma wiele elektronów,
 - każdy elektron zajmuje różne poziomy energetyczne i ma różne energie jonizacji i wzbudzenia,
 - każde zderzenie ma inne prawdopodobieństwo przekazania konkretnej porcji energii



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

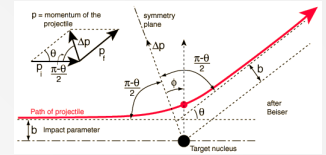
- ❑ Nie jest możliwe wyznaczenie strat energii licząc straty indywidualnych zdarzeń.
- ❑ Można za to policzyć średnie straty energii na jednostkę drogi przebytej przez cząstkę w materiale.

CZĘŚĆ I. Cząstki naładowane

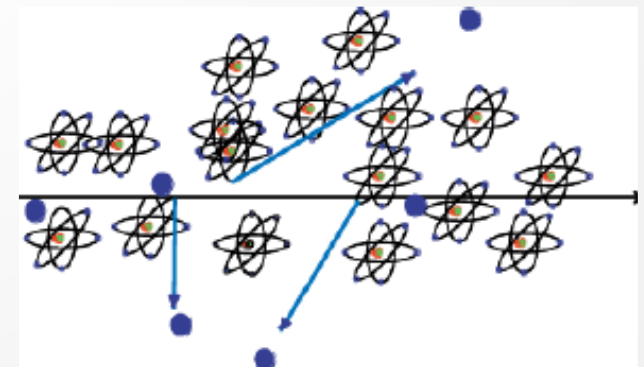
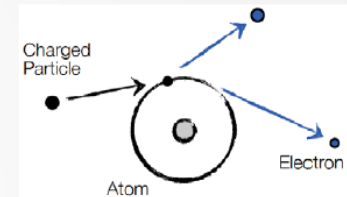


9

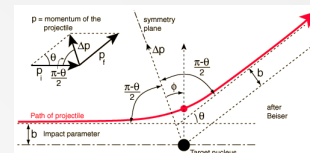
Cząstki naładowane, „ciężkie” (I)



- ❑ 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:

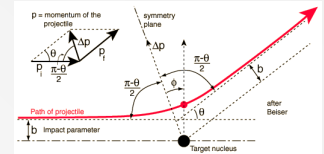
$$\Delta E_{MAX} = 4E_I \frac{m}{M}$$

Masa elektronu

Masa cząstki penetrującej

Energia początkowa cząstki penetrującej

Cząstki naładowane, „ciężkie” (III)



Przykład

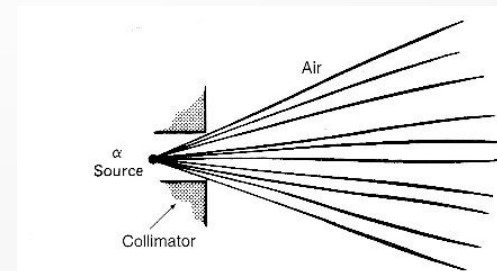
Jeżeli promieniowanie penetrujące składa się z cząstek α , wówczas mamy:

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

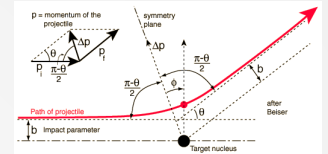
$$\frac{\Delta E_{MAX}^{\alpha}}{E_I^{\alpha}} = \frac{1}{2000}$$

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:

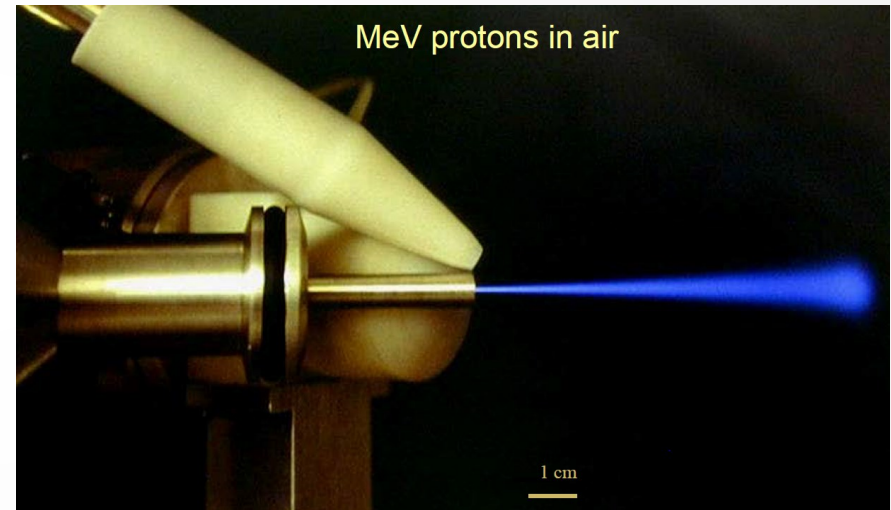
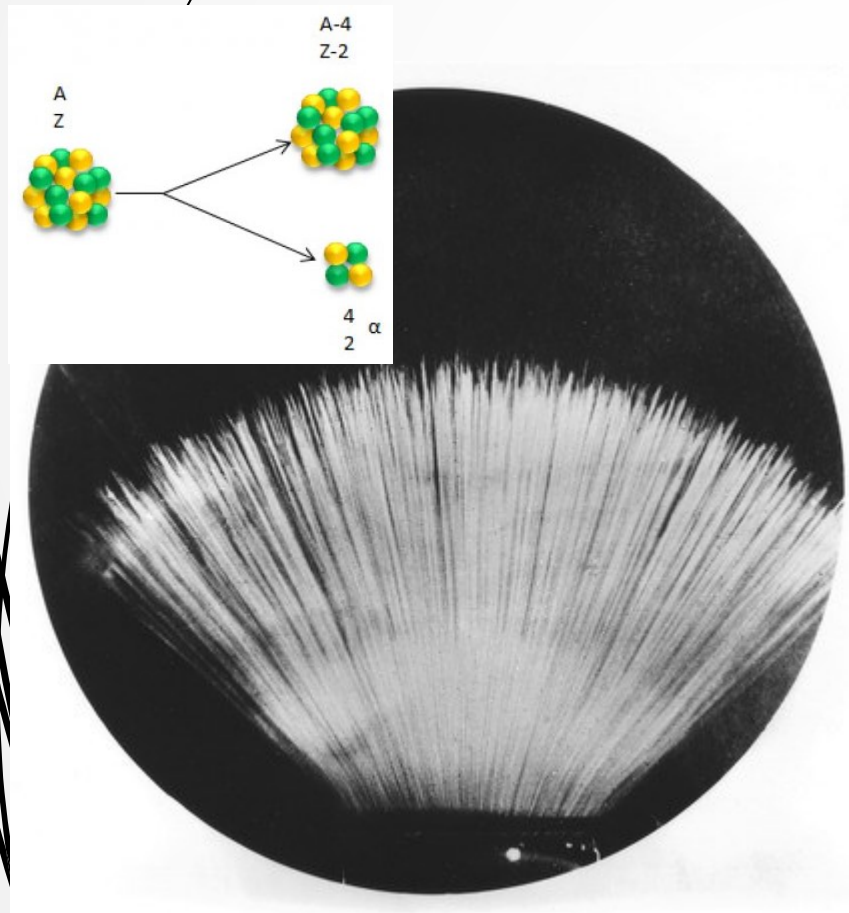
- ❑ Trajektorie cząstek są praktycznie liniowe
- ❑ Zmniejszanie prędkości (energii) odbywa się w sposób ciągły, aż do całkowitego zatrzymania
- ❑ Zasięg cząstek naładowanych jest praktycznie stały i zależy od materiału oraz energii początkowej



Detekcja cząstek α

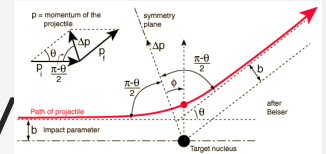


Ponizej – ślady wysokoenergetycznych cząstek α emitowanych przez izotop toru, obserwowane w komorze mgłowej



zasięg protonów w powietrzu

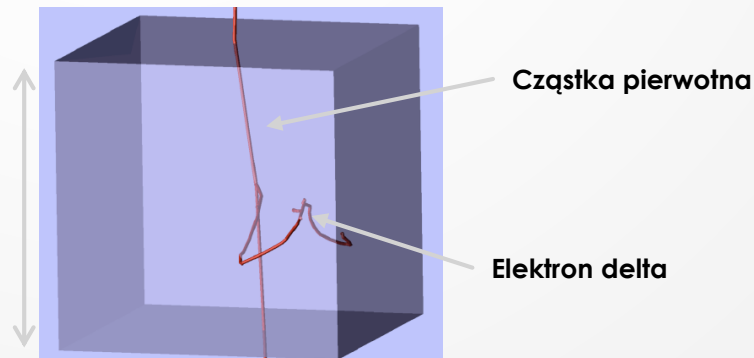
Cząstki naładowane, „ciężkie” (IV)



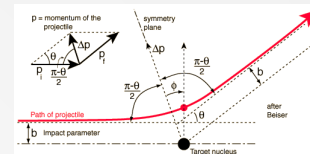
- ❑ Dość często zdarza się, że wybity elektron posiada wystarczająco wysoką energię i sam jest zdolny do jonizacji materiału detektora.
- ❑ Elektrony takie nazywamy „**elektronami delta**” (delta rays) – stanowią one **pośredni** sposób przekazywania energii pomiędzy cząstkami promieniowania oraz medium 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 traczonej** przez cząstki naładowane związana jest właśnie z emisją elektronów delta.

Symulacja elektronów delta
w kryształach krzemu

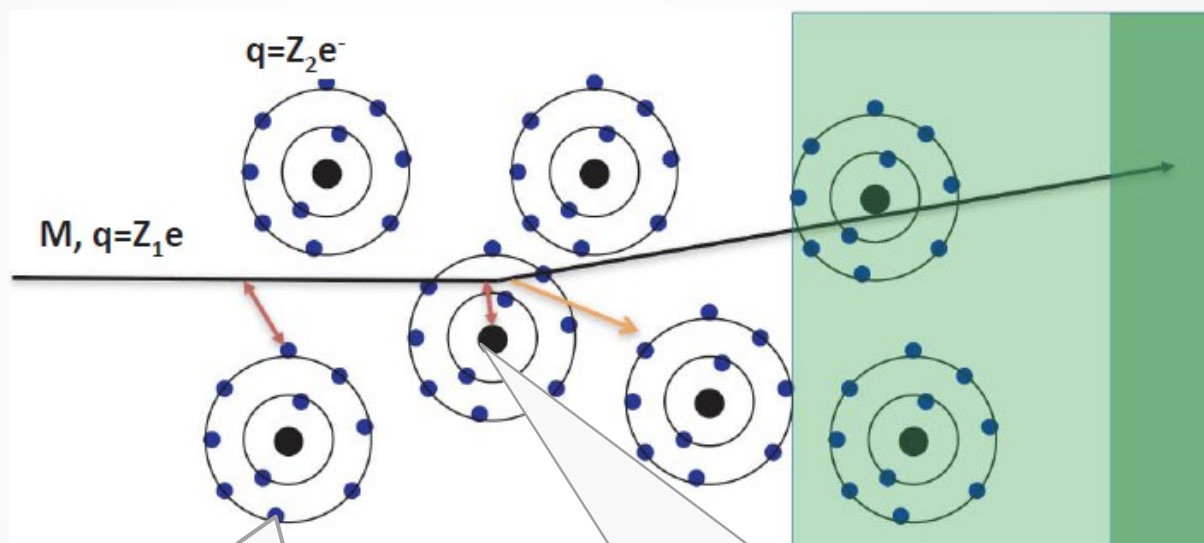
~ 50 nm



Oddziaływania EM



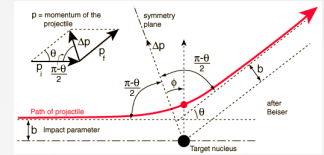
- Większość procesów umożliwiających wykrycie cząstki są to procesy **elektromagnetyczne**



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

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

„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

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**:

ładunek cząstki jonizującej - ze

prędkość cząstki pierwotnej

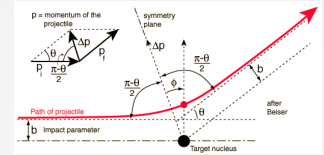
$$- \frac{dE}{dx} = NZ \frac{4\pi e^4 z^2}{m_e v^2} \left[\ln \left(\frac{2v^2 m_e}{I} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

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

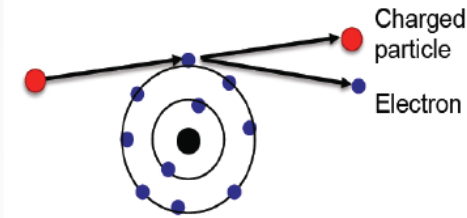
liczba atomowa materiału absorbującego

średnia energia wzbudzenia/ionizacji

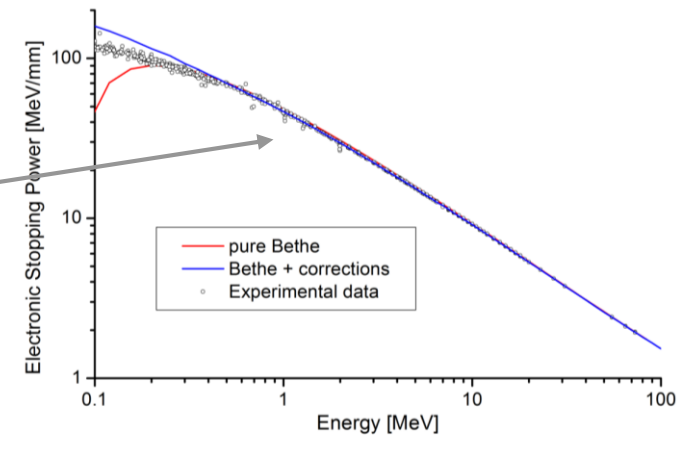
„Stopping power” (II)



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

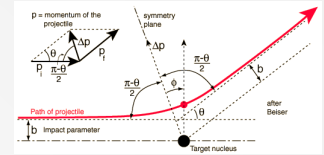


- ❑ Oddziaływanie jest zdominowane przez elastyczne zderzenia z elektronami.
- ❑ Dla cząstek nierelatywistycznych tylko **pierwszy czynnik** przed nawiasem kwadratowym jest **znaczący** (zaniedbujemy β)



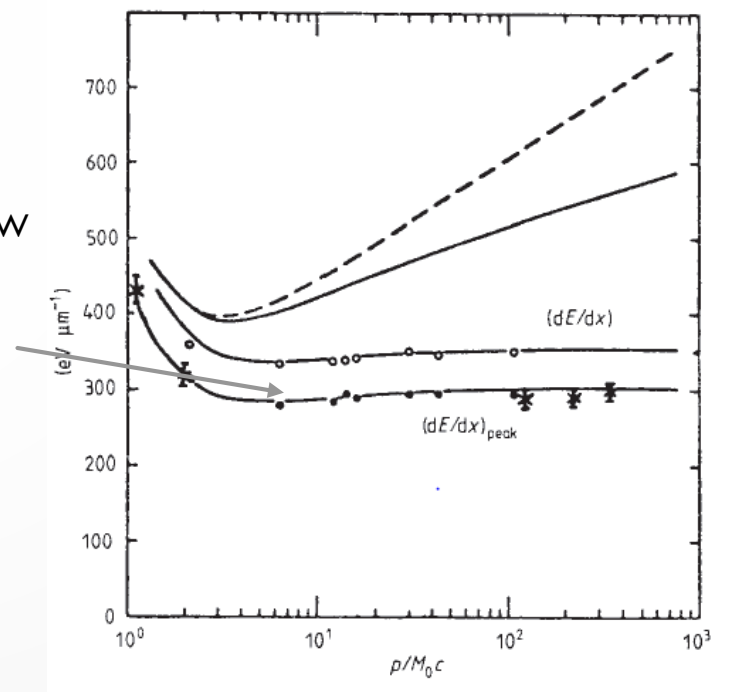
- ❑ Nawias kwadratowy zmienia się bardzo wolno wraz ze zmianą energii – oznacza to, że ogólne własności tej formuły wynikają z zachowania się czynnika przed nawiasem

„Stopping power” (IIa)



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

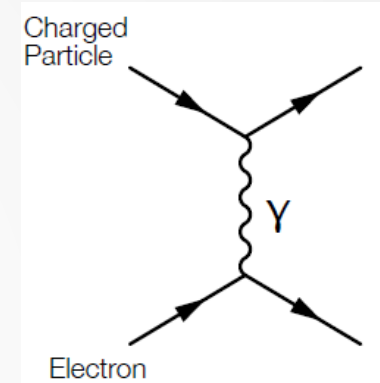
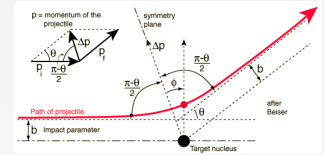
- Poprawki:
- nie wszystkie elektrony (zwłaszcza z wewnętrznych poziomów) biorą udział w oddziaływaniu,
- atomy bliskie trajektorii ekranują dalsze (density effect)



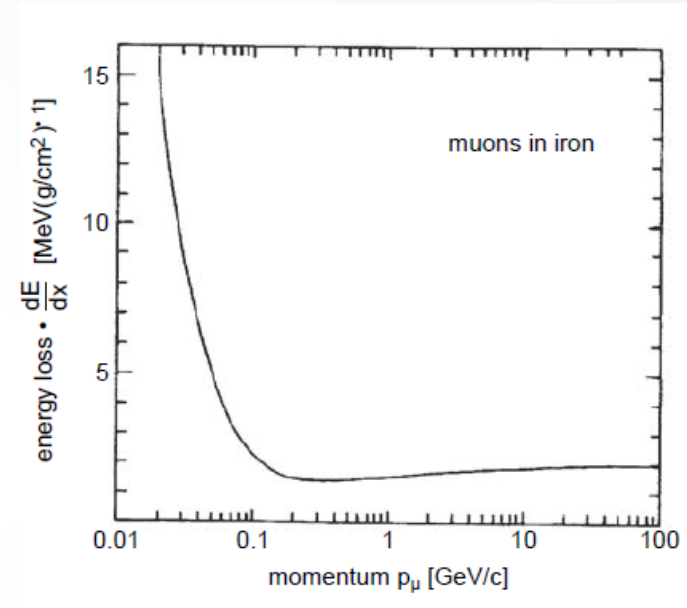
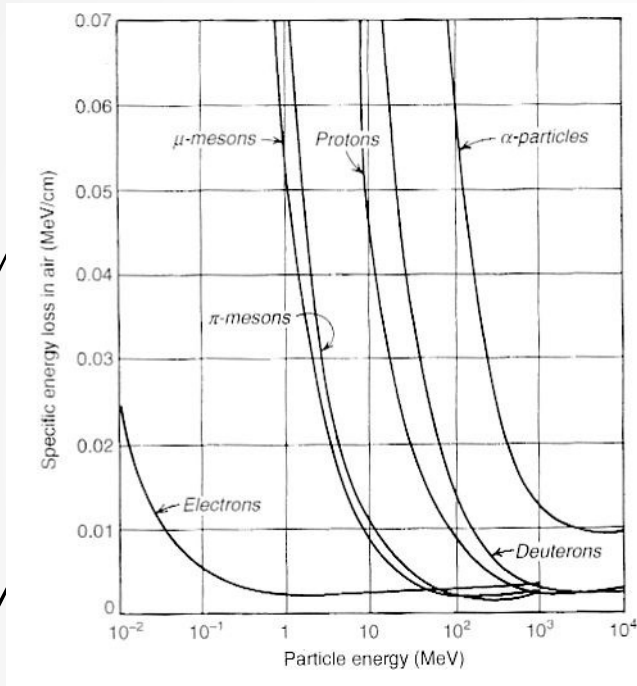
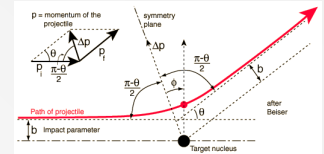
„Stopping power” (III)

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

- ❑ 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



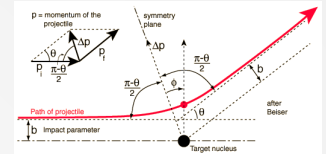
„Stopping power” (IV)



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:

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

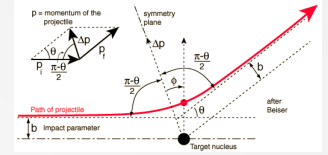
$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e^2 c^2 = 0.1535 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$$

Nowości to:

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

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

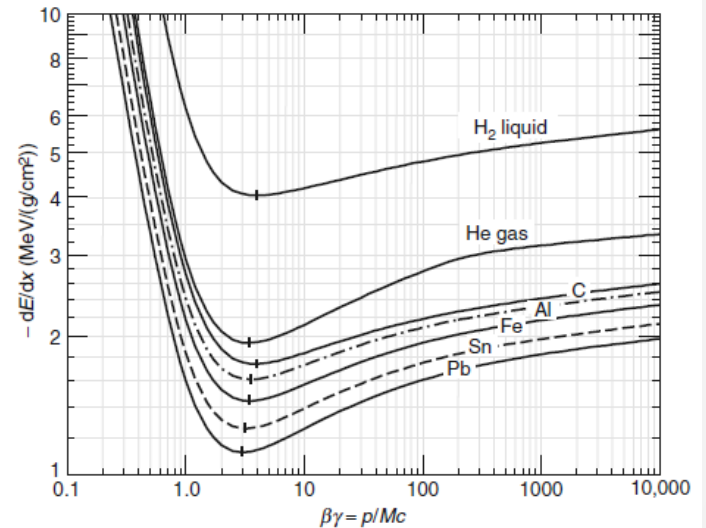
„Stopping power” (VI)



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

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

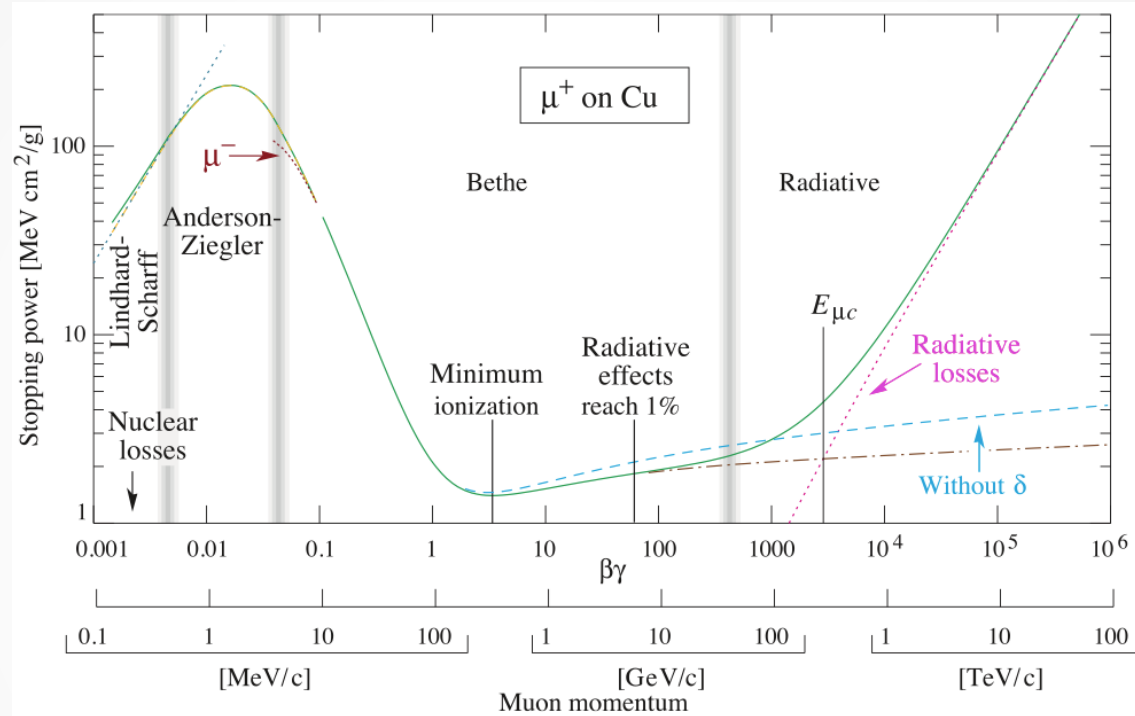
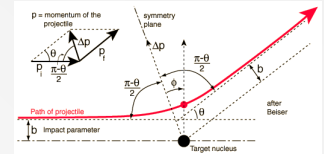
- ❑ Szybki spadek przy niskich energiach $\propto \frac{1}{\beta^2}$
- ❑ Szerokie minimum w zakresie $3 \leq \beta\gamma \leq 4$,
- ❑ MIP – cząstka z dE/dx w pobliżu minimum (dlaczego mion?)
- ❑ MIP we wszystkich ośrodkach (z wyjątkiem wodoru) traci tyle samo energii: 1-2 MeV/(g/cm²)



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

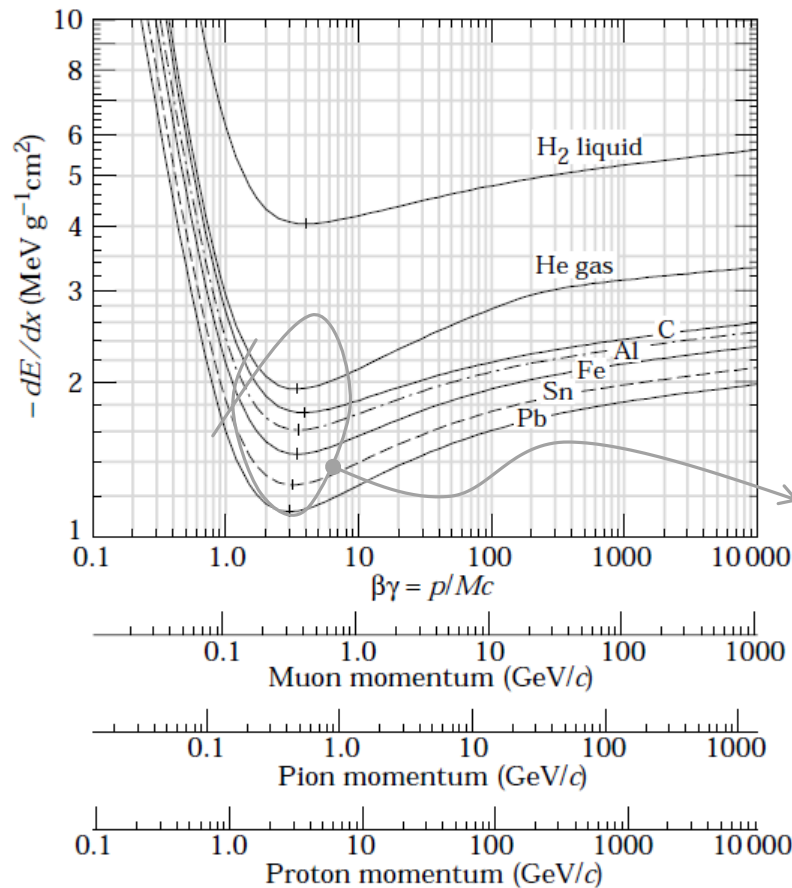
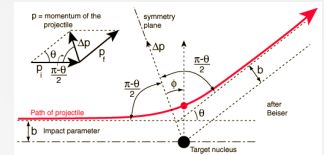
- Straty energii rosną dla $\gamma > 4$ (wzrost logarytmiczny)

„Stopping power” (VII)

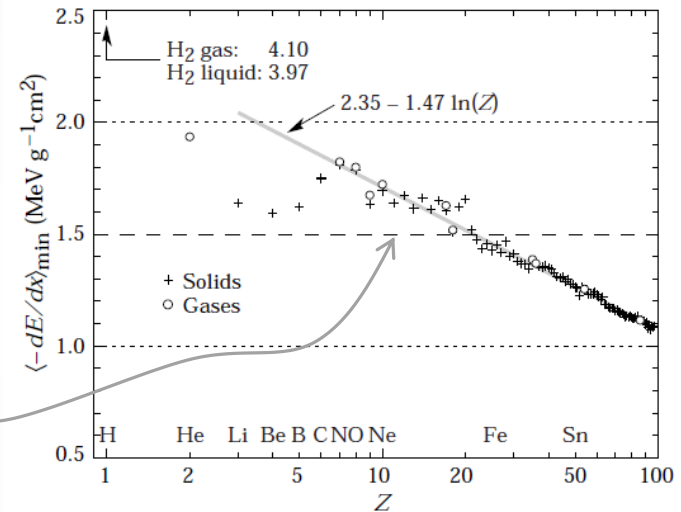


- ❑ Średnia strata energii $\langle -dE/dx \rangle$ dodatnio naładowanych mionów w szerokim zakresie pędów (9 rzędów wielkości), straty jonizacyjne dominują dla mionów o pędach poniżej $\sim 100 \text{ GeV}$
- ❑ Minimum jonizacji (uniwersalna wartość dla różnych cząstek i absorberów) występuje dla $\beta\gamma \approx 3$.
- ❑ Dla najwyższych energii dominuje strata przez promieniowanie. 22

„Stopping power” (VIII)



$\beta\gamma \approx 3$



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