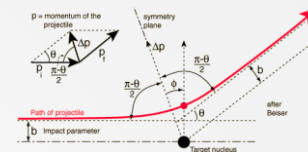


Oddziaływanie Promieniowania Jonizującego z Materią

Tomasz Szumlak, A.Obłąkowska-Mucha

**WFiIS AGH
Kraków**



Opis przedmiotu (syllabus) znajdziemy tu:

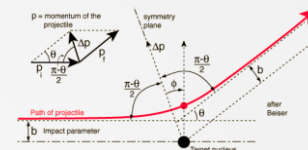
https://syllabuskrk.agh.edu.pl/2019-2020/pl/magnesite/study_plans/stacjonarne-fizyka-techniczna--3

- Wykład: **18** h (~ 8 wykładów)
- Ćw. Tablicowe: **8** h (~4 ćwiczenia)
- Lab. : **8** h (~4 spotkania)
- Projekt: **8** h

Problemy/pytania/sugestie – proszę o maila!

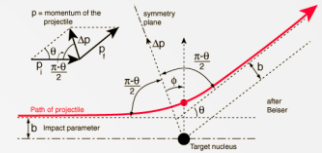
- Zaliczenie** – lab./ćwiczenia + projekt, egzamin (0.2 + 0.3 + 0.5)
- Materiały** – głównie wykłady oraz literatura polecona w syllabusie:
 G. F. Knoll, „**Radiation Detection and Measurement**”, Wiley, 2010
 C. Gruppen, B. Schwartz „**Particle Detectors**”, Cambridge
 C. Leroy, P-G. Rancoita "Principles of Radiation Interaction in Matter and Detection" World Scientific Publishing, 4th Ed. 2016

Detekcja (I)



- ❑ Popatrzymy na tytuł naszego wykładu...
 - ❑ Oddziaływanie **Promieniowania** Jonizującego z Materią
 - ❑ Podczas tego wykładu, przez promieniowanie będziemy rozumieć **strumień** dowolnych **cząstek** (zajmiemy się, z braku czasu tylko wybranymi typami)
 - ❑ **Oddziaływanie** Promieniowania Jonizującego z Materią
 - ❑ Oznacza **procesy fizyczne** związane z własnościami cząstek, które badamy
 - ❑ Oddziaływanie Promieniowania **Jonizującego** z Materią
 - ❑ Jonizacja to proces **zmiany ładunku** atomu lub molekuly poprzez utratę lub „pobranie” elektronów
 - ❑ Oddziaływanie Promieniowania Jonizującego z **Materią**
 - ❑ Dla nas, tytułowa materia będzie oznaczać urządzenie do **detekcji** promieniowania

Detekcja (II)

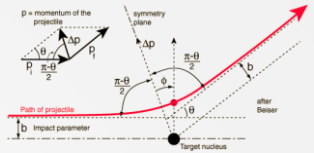


- ❑ Czyli, do „ugotowania tej zupy” potrzebujemy:
 - ❑ Cząstek (elementarnych) – to będzie **promieniowanie**
 - ❑ Wiedzy o ich własnościach – to będzie **oddziaływanie**
 - ❑ Urządzenia, które „zachęci” cząstki do oddziaływania – **medium**

- ❑ Wiemy, że natura obdarzyła nas wieloma typami cząstek
 - ❑ W konsekwencji, spodziewamy się **rozmaitych własności** tych cząstek a co za tym idzie, będziemy potrzebować **różnych typów urządzeń** żeby badać różne cząstki

- ❑ Dodatkowo, własności urządzenia mogą zależeć od tego jaką informację na temat promieniowania chcemy uzyskać


- ❑ Zwykle, będziemy korzystać z urządzeń **hybrydowych**, będących amalgamatem wielu systemów składowych



5

Detekcja (III)

- ❑ Umówmy się, od tego momentu, że to **urządzenie** z poprzednich slajdów będziemy nazywać **detektorem**
- ❑ Powiemy pokrętnie, że detektor to przyrząd techniczny służący do detekcji...
- ❑ **Detekcja** z kolei, za słownikiem, to:

detection /di'tɛkʃən/  *noun*

Save



Learner's definition of DETECTION

[noncount]

: the act or process of discovering, finding, or noticing something

- I don't know how the errors managed to avoid/escape *detection* for so long.
- methods of *crime detection*

— sometimes used before another noun

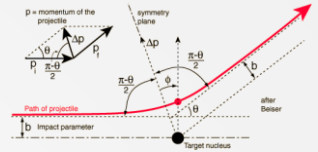
- a *detection system/device*

AN ENCYCLOPEDIA
BRITANNICA COMPANY



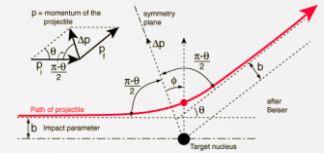
LearnersDictionary.com

Jednostki (I)



- ❑ **Układ jednostek S.I.** (*Système international d'unités*) jest układem naturalnym do opisu zjawisk typowych „**dla naszej skali energii**”
- ❑ Baza systemu **[kg, m, s]**
- ❑ Działa bardzo dobrze i jest dla nas intuicyjny!
- ❑ Problem z opisem zjawisk kwantowych – czyli świata w skali „mikro”
- ❑ Rozwiązaniem jest **zamiana bazy!** **[kg, m, s] → [ħ, c, GeV]**
 - ❑ $\hbar = 1.055 \times 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{s]}$
 - ❑ $c = 2.998 \times 10^8 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$
 - ❑ $\text{GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-10} \text{ [J]}$
- ❑ **Układ naturalny** otrzymamy przy pomocy podstawienia: $\hbar = c = 1$
- ❑ W układzie naturalny wszystkie wielkości wyrażamy w tych samych jednostkach (formalnie energii): **(G)eV**

Jednostki (II)



Energia – $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (S. I.) – GeV (naturalny)

Pęd – $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (S. I.) – GeV (naturalny)

Masa – kg (S. I.) – GeV (naturalny)

Czas – s (S. I.) – GeV^{-1} (naturalny)

Droga – m (S. I.) – GeV^{-1} (naturalny)

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \rightarrow E^2 = p^2 + m^2$$

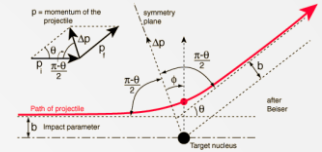
□ Ex. Średnia kwadratowa rozkładu ładunku w protonie

$$(\overline{r^2})^{1/2} = 4.1 [\text{GeV}^{-1}] = X [\text{m}]$$

$$(\overline{r^2})^{1/2} = 4.1 \times \frac{1.055 \times 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}] \times 2.998 \times 10^8 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]}{1.602 \times 10^{-10} [\text{J}]} =$$

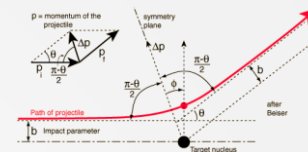
$$= 4.1 \times (0.197 \times 10^{-15}) [\text{m}] = 0.8 \times 10^{-15} [\text{m}]$$

Intro - detekcja (I)



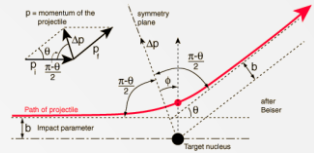
- ❑ Konstrukcja (rodzaj) detektora zależy bezpośrednio od tego jaką wielkość fizyczną chcemy zmierzyć
- ❑ Zwykle jesteśmy zainteresowani:
 - ❑ Detekcją cząstek (wykrycie obecności, np. Geiger-Müller – duże ograniczenia związane z brakiem **zależności** pomiędzy **energiami zdeponowaną a sygnałem** oraz **saturation** dla dużych strumieni cząstek związane z **czasem martwym**)
 - ❑ Pomiar energii (np. detektory krzemowe)
 - ❑ Pomiar położenia, trajektorii oraz pędu
 - ❑ Identyfikacją cząstek
- ❑ Intuicyjnie rozumiemy, że **wykrycie** bądź pomiar **energii** są „łatwe” i nie wymagają (zwykle) skomplikowanych urządzeń hybrydowych
 - ❑ To się może zmienić, jeżeli widmo energii jest szerokie,
 - ❑ Bądź kompozycja strumienia cząstek jest złożona (fotony, elektrony...)
- ❑ Pomiar trajektorii, pędu (wektor!) czy rodzaju cząstki są trudne

Intro (II)



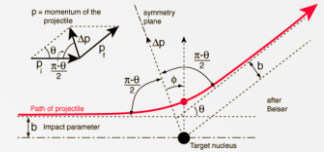
- ❑ Mechanizm oddziaływania **promieniowania** z materią zależy w pierwszym rzędzie od **jego typu**, możemy wprowadzić poniższy ogólny podział:
 - ❑ Strumienie cząstek **naładowanych (jakie źródła?)**
 - Ciężkie cząstki naładowane
 - Szybkie elektrony
 - ❑ Strumienie cząstek **obojętnych (źródła?)**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

Intro (I)



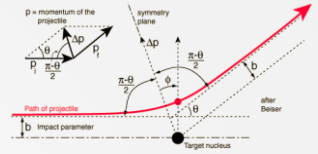
- ❑ **Detekcja** dowolnego typu **promieniowania** opiera się na fakcie, że promieniowanie to **deponuje** (traci) **energię** w materiale czynnym detektora.
- ❑ Energia zdeponowana w obszarze aktywnym może prowadzić do produkcji **nośników ładunku** (np. par elektron-jon lub elektron-dziura).
- ❑ Nośniki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

Cząstki naładowane (I)



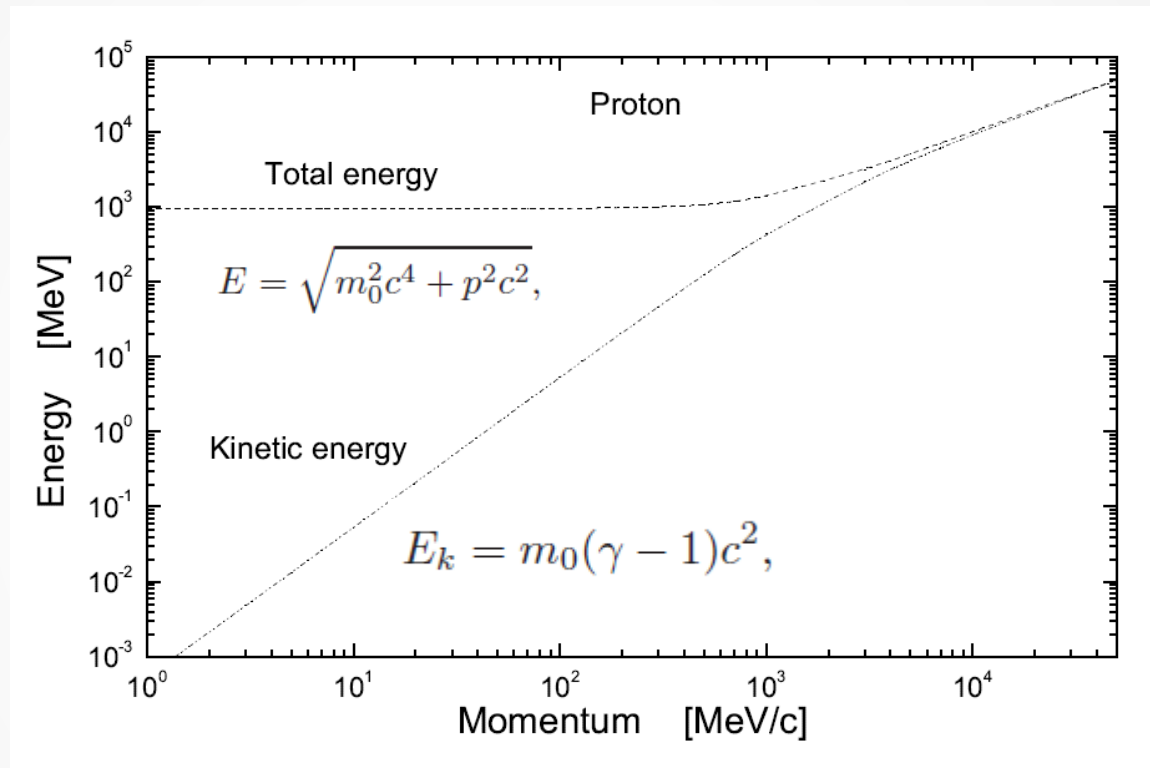
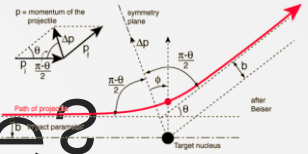
- ❑ Cząstki naładowane oddziałują z dowolnym medium (materiałem) elektromagnetycznie
- ❑ Najbardziej istotna składowa pochodzi od oddziaływań z elektronami atomów materiału (oddziaływania z jądrami atomowymi znacznie mniej prawdopodobne)
- ❑ Główny efekt to **jonizacyjna strata energii**
 - ❑ Wyrażamy go jako jonizacyjną stratę energii na jednostkę długości drogi przebytej w danym medium – dE/dx
 - ❑ Dla danego typu materiału, szybkość strat jonizacyjnych zależy praktycznie tylko od **prędkości cząstki naładowanej**
 - ❑ Detektory stosowane w HEP optymalizowane są dla jak najlepszej detekcji cząstek relatywistycznych, dla których możemy przyjąć w przybliżeniu, że strata energii jest **stała** (wzrost logarytmiczny)
- ❑ Ciekawym faktem jest **słaba zależności** strat jonizacyjnych od **gęstości materiału** detektora – tłumaczymy ją tym, że dla wszystkich pierwiastków jądra atomowe składają się w przybliżeniu z tej samej liczby neutronów oraz protonów

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 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 wyzwiania

Intro (IIb) Relatywistyczne?

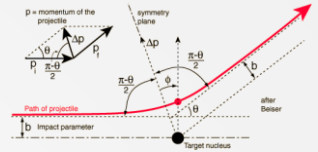


$$\vec{p} = \vec{\beta} \gamma m_0 c$$

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

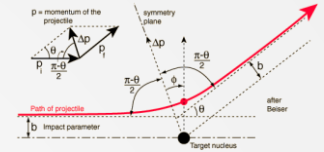
zadanie!

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!**

Straty ciężkich cząstek

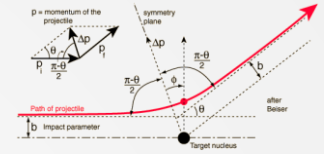


Starta energii protonu w zderzeniu z elektronem

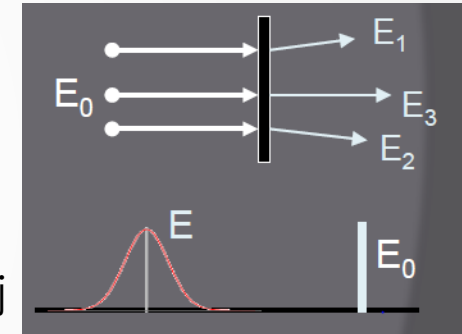
Proton Kinetic Energy, E [MeV]	Qmax [MeV]	Maximum % Energy Transfer 100Qmax/E
0.1	0.00022	0.22
1	0.0022	0.22
100	0.0219	0.22
100	0.229	0.23
1000	3.33	0.33
10000	136	1.4
100000	1060	10.6
1000000	53800	53.8
10000000	921000	92.1

minimalne ΔE wymagane do jonizacji lub wzbudzenia elektronu

Procesy oddziaływania



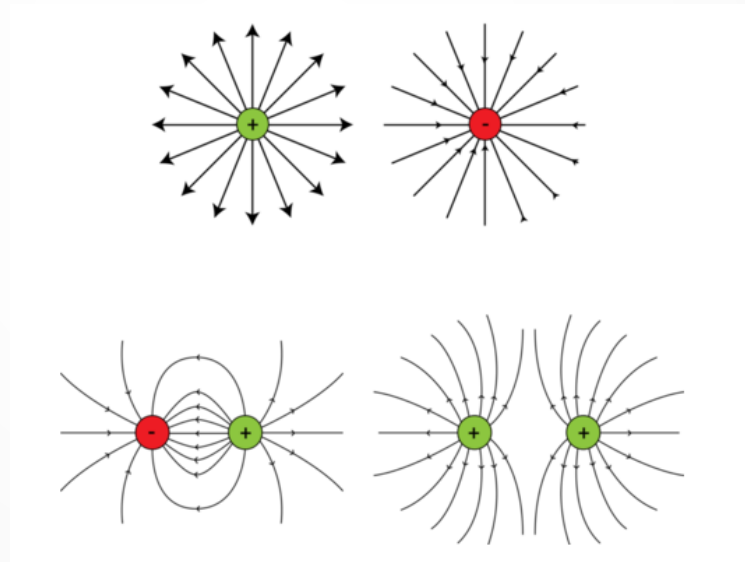
- ❑ Cząstki przechodząc przez materiał oddziałują z wieloma atomami jednocześnie:
 - każdy atom ma wiele elektronów,
 - każdy elektron zajmuje różny poziomy energetyczny i ma różne energie jonizacji i wzbudzenia,
 - każde zderzenie ma inne prawdopodobieństwo przekazania konkretnej porcji energii



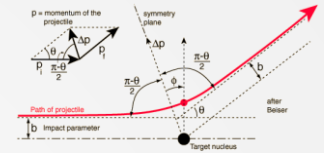
$$E = E_0 - \sum_i \Delta E_i = E_0 - \sum_i \left(\frac{\Delta E_i}{\Delta x} \right) = E_0 - \int \frac{dE}{dx} dx$$

- ❑ 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.

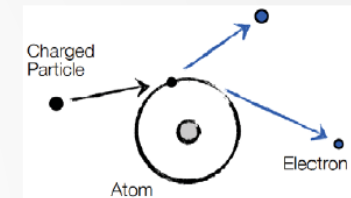
CZĘŚĆ I. Cząstki naładowane



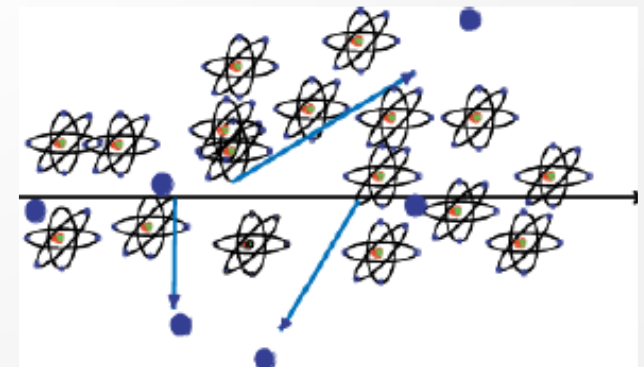
Cząstki naładowane, „ciężkie” (I)



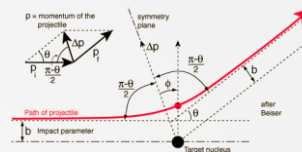
- ❑ Ciężkie cząstki przechodząc przez materię tracą energię poprzez jonizację i oddziaływania silne z jądrami atomowymi
- ❑ Naładowana cząstka przechodząc przez materię pozostawia za sobą:
 - Wzbudzone atomy,
 - Pary elektron-jon (gazy),
 - Pary elektron-dziura (ciała stałe)
- ❑ Ciągłe oddziaływanie 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**.

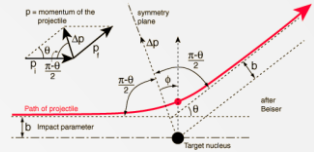
Można pokazać, że **maksymalna energia** przekazana elektronowi w jednym akcie rozpraszania to:

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

Energia początkowa
cząstki penetrującej

Masa elektronu
Masa cząstki
penetrującej

Cząstki naładowane, „ciężkie” (III)



Przykład

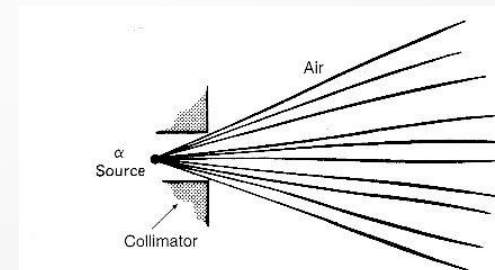
Jeżeli promieniowanie penetrujące składa się z cząstek α , wówczas mamy:

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

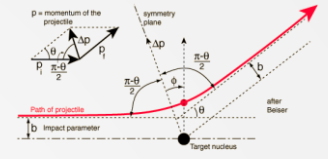
$$\frac{\Delta E_{MAX}^{\alpha}}{E_I^{\alpha}} = \frac{1}{2000}$$

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:

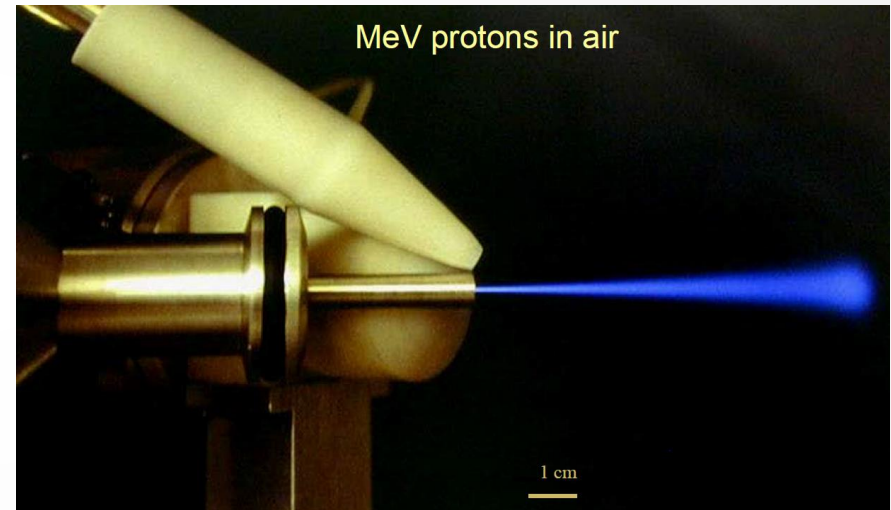
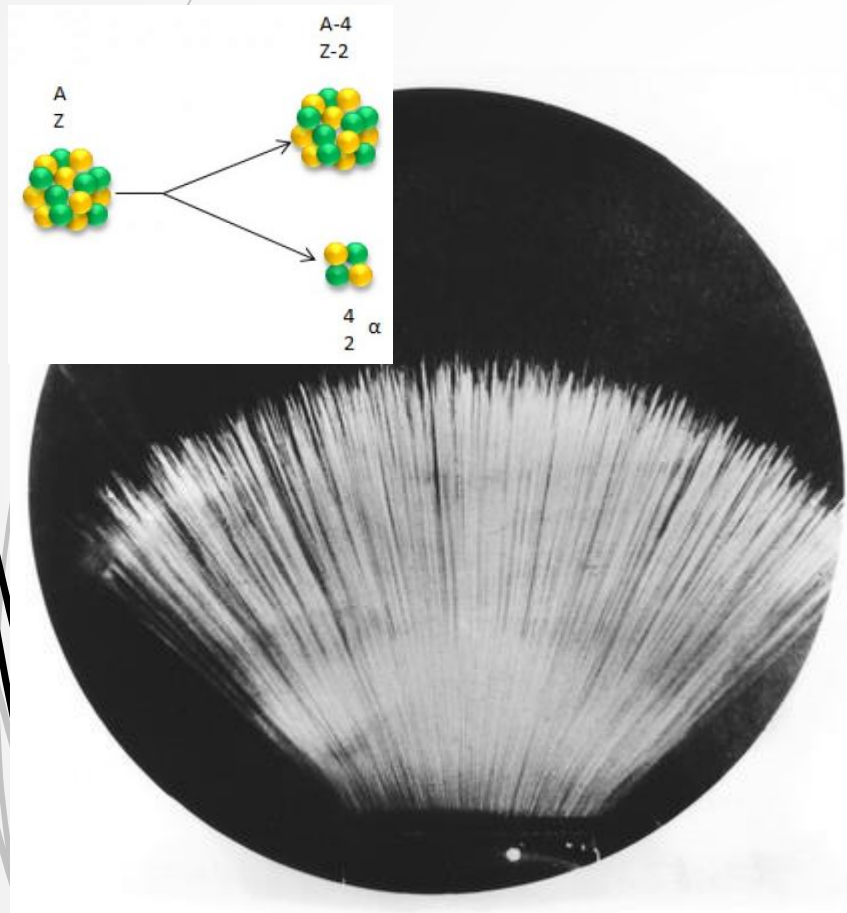
- ❑ Trajektorie cząstek są praktycznie liniowe
- ❑ Zmniejszanie prędkości (energii) odbywa się w sposób ciągły, aż do całkowitego zatrzymania
- ❑ Zasięg cząstek naładowanych jest praktycznie stały i zależy od materiału oraz energii początkowej



Detekcja cząstek α

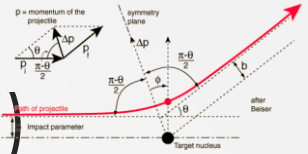


Poniżej – ślady wysokoenergetycznych cząstek α emitowanych przez izotop toru, obserwowane w komorze mgłowej



zasięg protonów w powietrzu

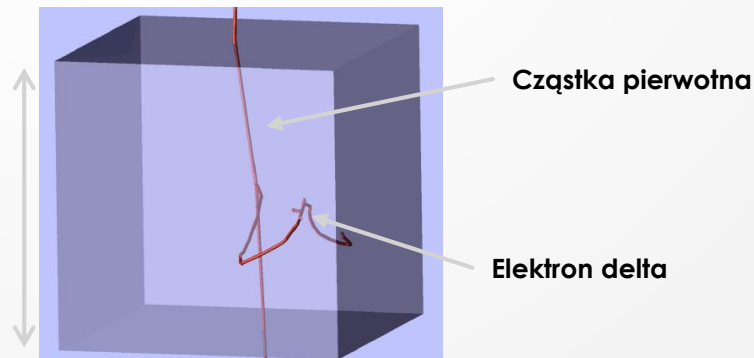
Cząstki naładowane, „ciężkie” (IV)



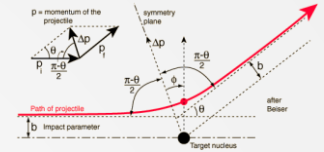
- ❑ Dość często zdarza się, że wybity elektron posiada wystarczająco wysoką energię i sam jest zdolny do jonizacji materiału detektora.
- ❑ Elektrony takie nazywamy „**elektronami delta**” (delta rays) – stanowią one **pośredni** sposób przekazywania energii pomiędzy cząstkami promieniowania oraz medium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

Symulacja elektronów delta
w kryształach krzemu

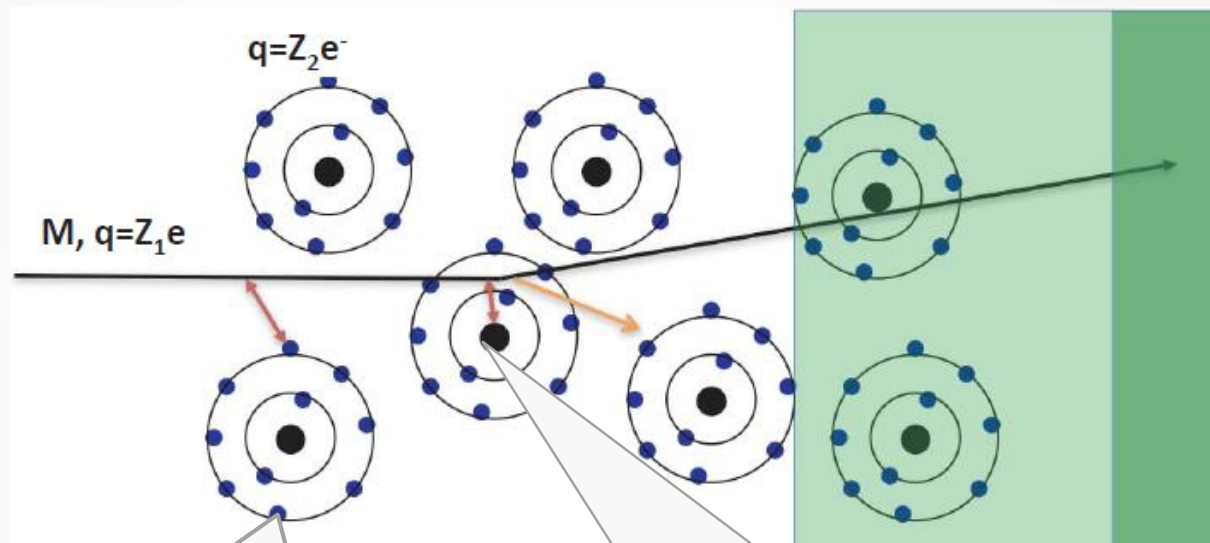
~ 50 nm



Oddziaływania EM



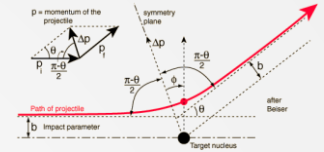
- Większość procesów umożliwiających wykrycie cząstki są to procesy **elektromagnetyczne**



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

Oddz. z **jądrami atomowymi**.
Cząstki są **odchylone** w wyniku wielokrotnych
„miękkich” 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**:

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

ładunek cząstki jonizującej - ze

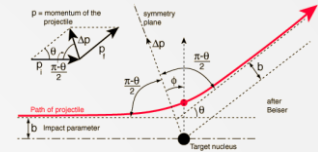
prędkość cząstki pierwotnej

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

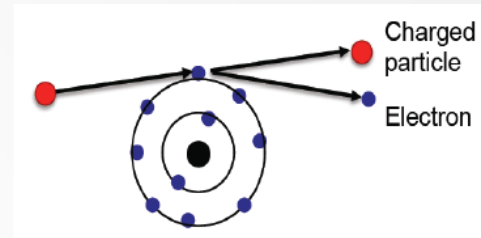
liczba atomowa materiału absorbującego

średnia energia wzbudzenia/ionizacji

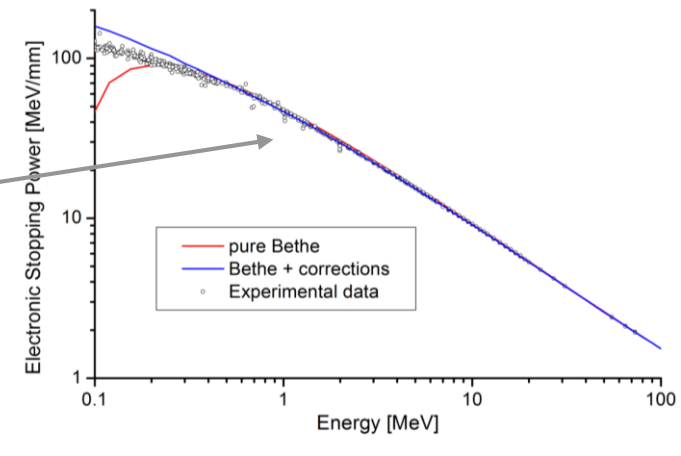
„Stopping power” (II)



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

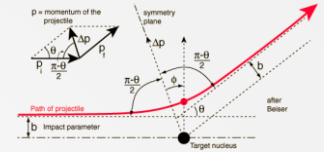


- ❑ Oddziaływanie jest zdominowane przez elastyczne zderzenia z elektronami.
- ❑ Dla cząstek nierelatywistycznych tylko **pierwszy czynnik** przed nawiasem kwadratowym jest **znaczący** (zaniedbujemy β)



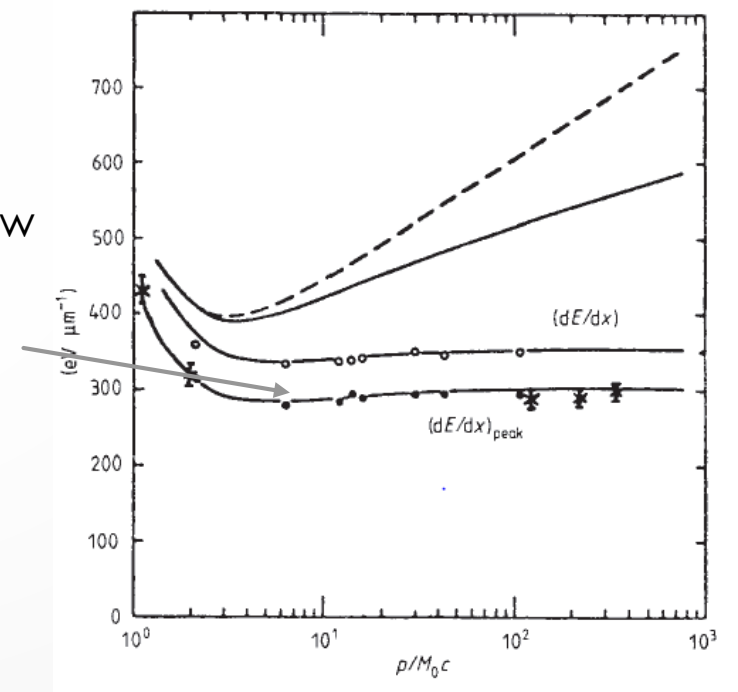
- ❑ Nawias kwadratowy zmienia się bardzo wolno wraz ze zmianą energii – oznacza to, że ogólne własności tej formuły wynikają z zachowania się czynnika przed nawiasem

„Stopping power” (IIa)



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

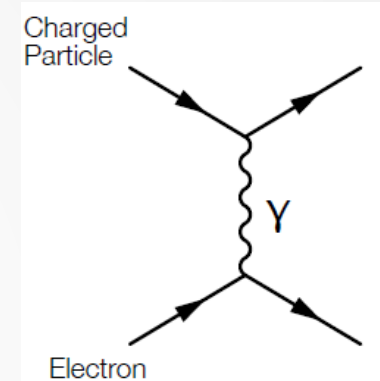
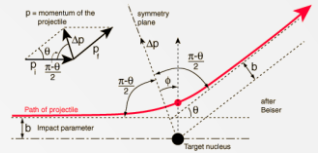
- Poprawki:
- nie wszystkie elektrony (zwłaszcza z wewnętrznych poziomów) biorą udział w oddziaływaniu,
- atomy bliskie trajektorii ekranują dalsze (density effect)



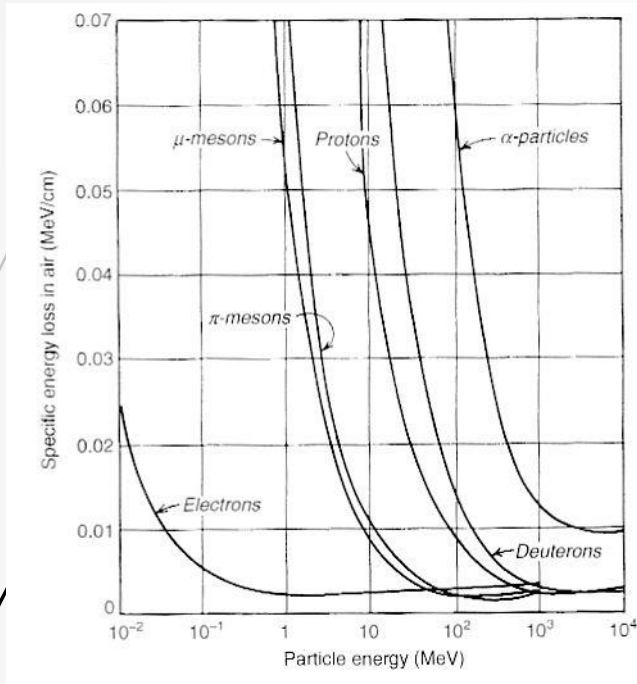
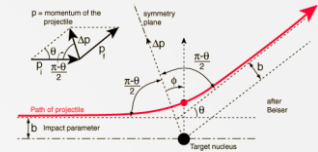
„Stopping power” (III)

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

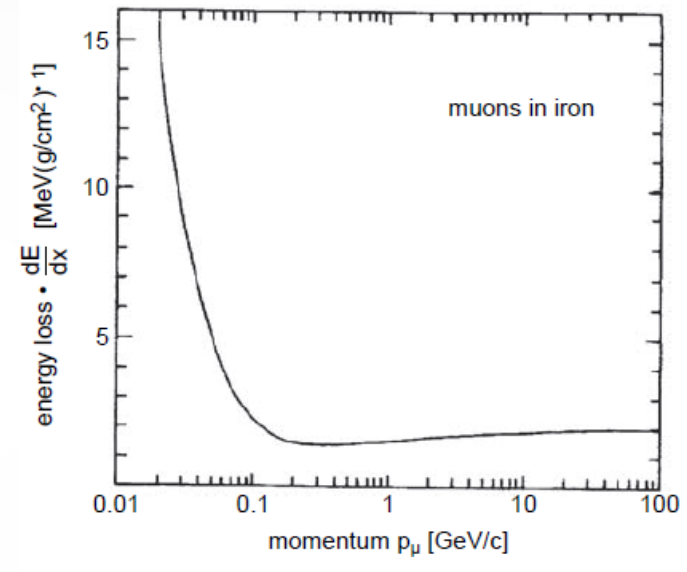
- ❑ Oddziaływanie jest zdominowane przez **elastyczne zderzenia z elektronami!**
- ❑ Strata energii zmienia się proporcjonalnie do $\frac{1}{v^2}$
- ❑ Wolniejsza cząstka „spędza” **więcej czasu** w pobliżu danego elektronu – zwiększa to przekaz (stratę) energii
- ❑ Dla cząstek o tej **samej prędkości** 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)



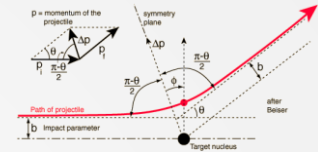
mass stopping power [MeV cm²/g]



Straty energii cząstek naładowanych w funkcji ich energii (pomiar)

- Dla energii powyżej **~ 1000 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:

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

[1] [PDG](#)

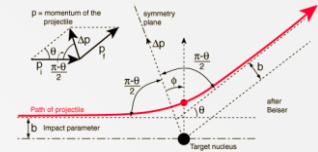
$$\kappa = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.3071 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$$

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!)

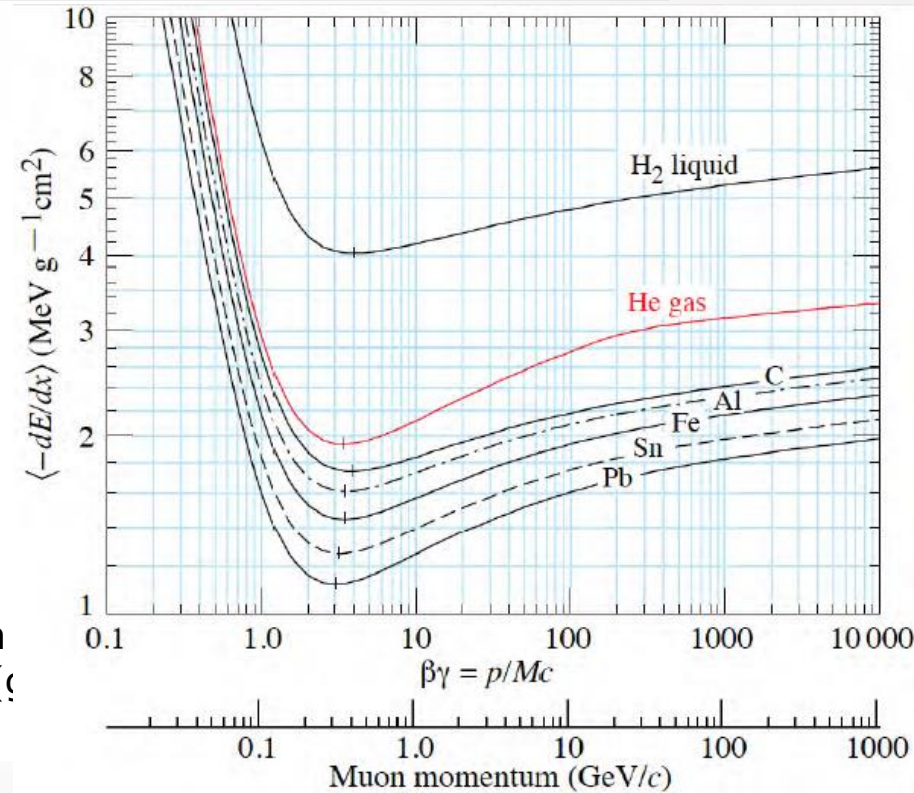
„Stopping power” (VI)



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

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

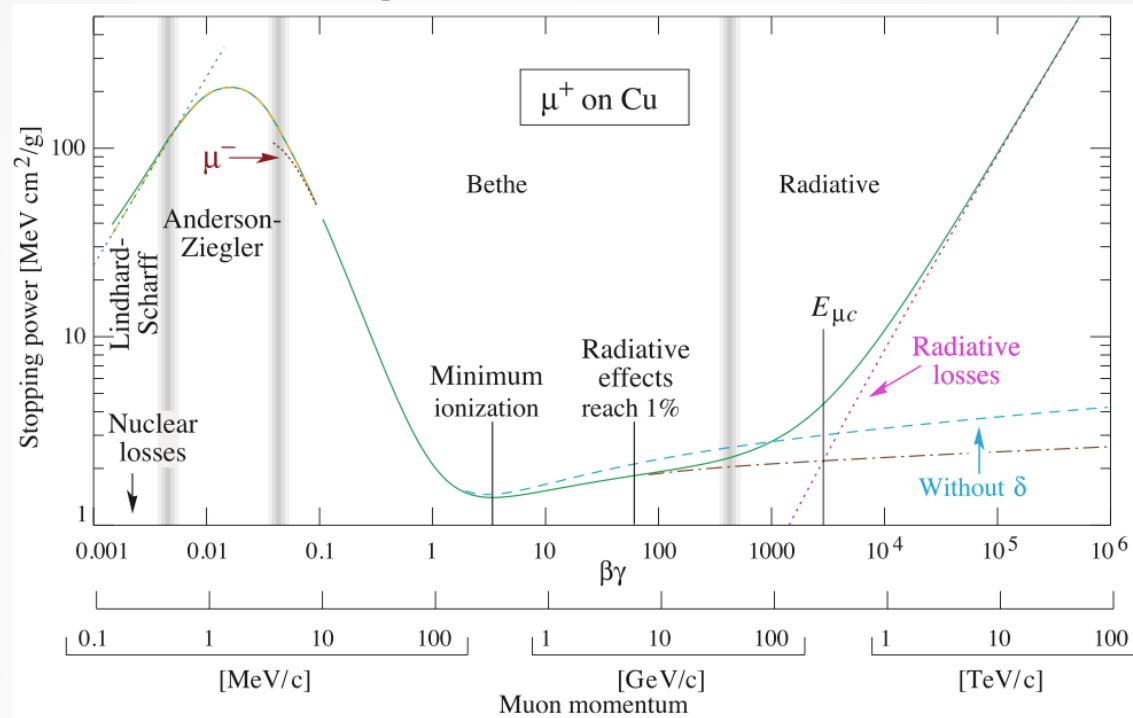
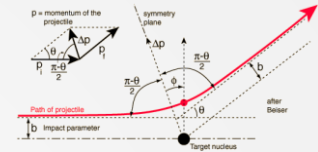
- ❑ Formuła opisuje „mass stopping power” [MeVg⁻¹cm²].
- ❑ Szybki spadek przy niskich energiach $\propto \frac{1}{\beta^2}$
- ❑ Szerokie minimum w zakresie $3 \leq \beta\gamma \leq 4$,
- ❑ MIP – cząstka z dE/dx w pobliżu minimum (dlaczego mion?)
- ❑ MIP we wszystkich ośrodkach (z wyjątkiem wodoru) traci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



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

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

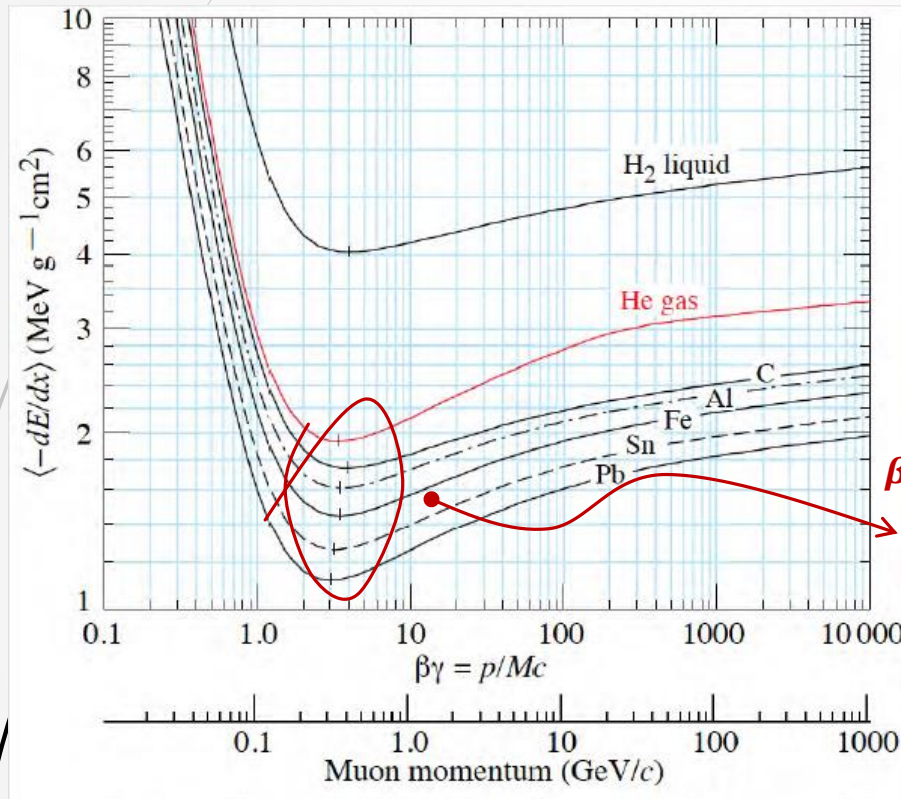
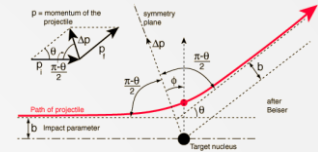
„Stopping power”



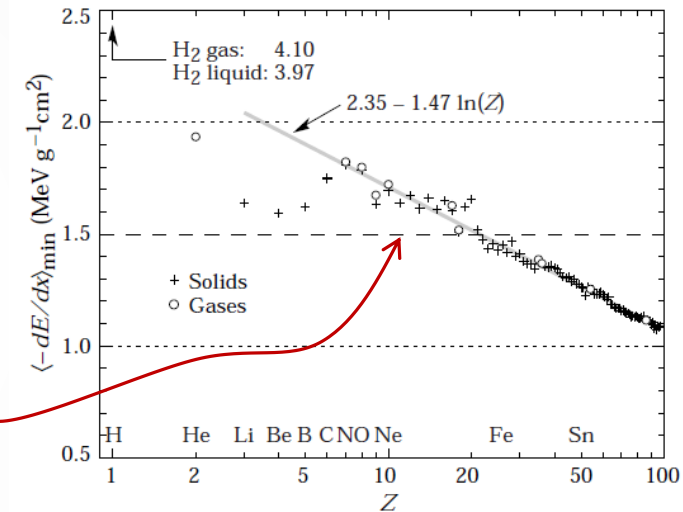
PDG

- ❑ 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. **32**

„Stopping power” (VIII)



PDG



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