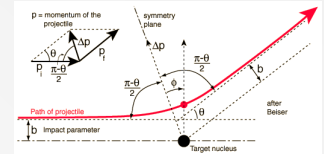


# Oddziaływanie Promieniowania Jonizującego z Materią

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



Opis przedmiotu (syllabus) znajdziemy tu:

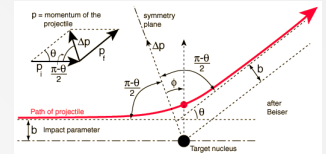
[https://syllabuskrk.agh.edu.pl/2019-2020/pl/magnesite/study\\_plans/stacjonarne-fizyka-techniczna--3](https://syllabuskrk.agh.edu.pl/2019-2020/pl/magnesite/study_plans/stacjonarne-fizyka-techniczna--3)

- ☐ 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!

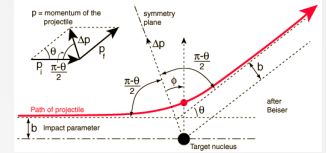
- ☐ **Zaliczenie** – lab./ćwiczenia + projekt, egzamin (0.2 + 0.3 + 0.5)
- ☐ **Materiały** – głównie wykłady oraz literatura polecona w syllabusie:  
 G. F. Knoll, „**Radiation Detection and Measurement**”, Wiley, 2010  
 C. Gruppen, B. Schwartz „**Particle Detectors**”, Cambridge  
 C. Leroy, P-G. Rancoita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

# Detekcja (I)



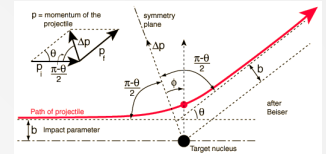
- ❑ Popatrzmy na tytuł naszego wykładu...
  - ❑ Oddziaływanie **Promieniowania** Jonizującego z Materią
    - ❑ Podczas tego wykładu, przez promieniowanie będziemy rozumieć **strumień** dowolnych **cząstek** (zajmiemy się, z braku czasu tylko wybranymi typami)
  - ❑ **Oddziaływanie** Promieniowania Jonizującego 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

# 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** /dɪˈtɛkʃən/  *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

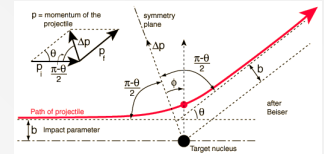
- a *detection* system/device

AN ENCYCLOPEDIA  
BRITANNICA COMPANY



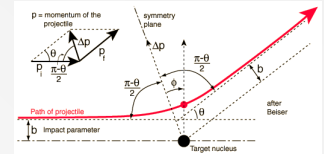
LearnersDictionary.com

# 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.) –  $\text{GeV}^{-1}$  (naturalny)

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

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

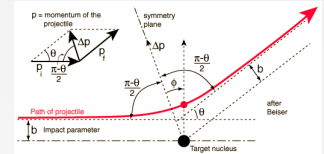
□ Ex. Średnia kwadratowa rozkładu ładunku w protonie

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

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

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

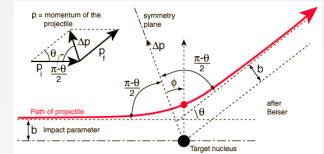
# Intro - detekcja (I)



- ❑ 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 **saturacja** 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

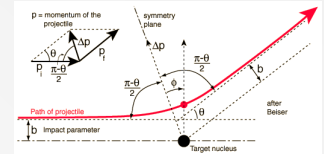


# Intro (II)



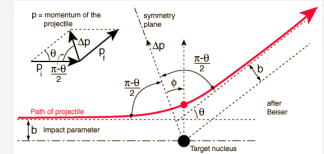
- ❑ Mechanizm oddziaływania **promieniowania** z materią zależy w pierwszym rzędzie od **jego typu**, możemy wprowadzić poniższy ogólny podział:
  
- ❑ Strumienie cząstek **naładowanych (jakie źródła?)**
  - Ciężkie cząstki naładowane
  - Szybkie elektrony
  
- ❑ Strumienie cząstek **obojętnych (źródła?)**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

# Intro (I)



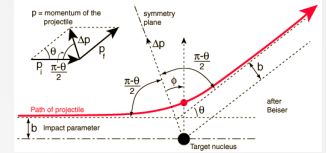
- ❑ **Detekcja** dowolnego typu **promieniowania** opiera się na fakcie, że promieniowanie to **deponuje** (traci) **energię** w materiale czynnym detektora.
- ❑ Energia zdeponowana w obszarze aktywnym może prowadzić do produkcji **nośników ładunku** (np. par elektron-jon lub elektron-dziura).
- ❑ Nośniki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



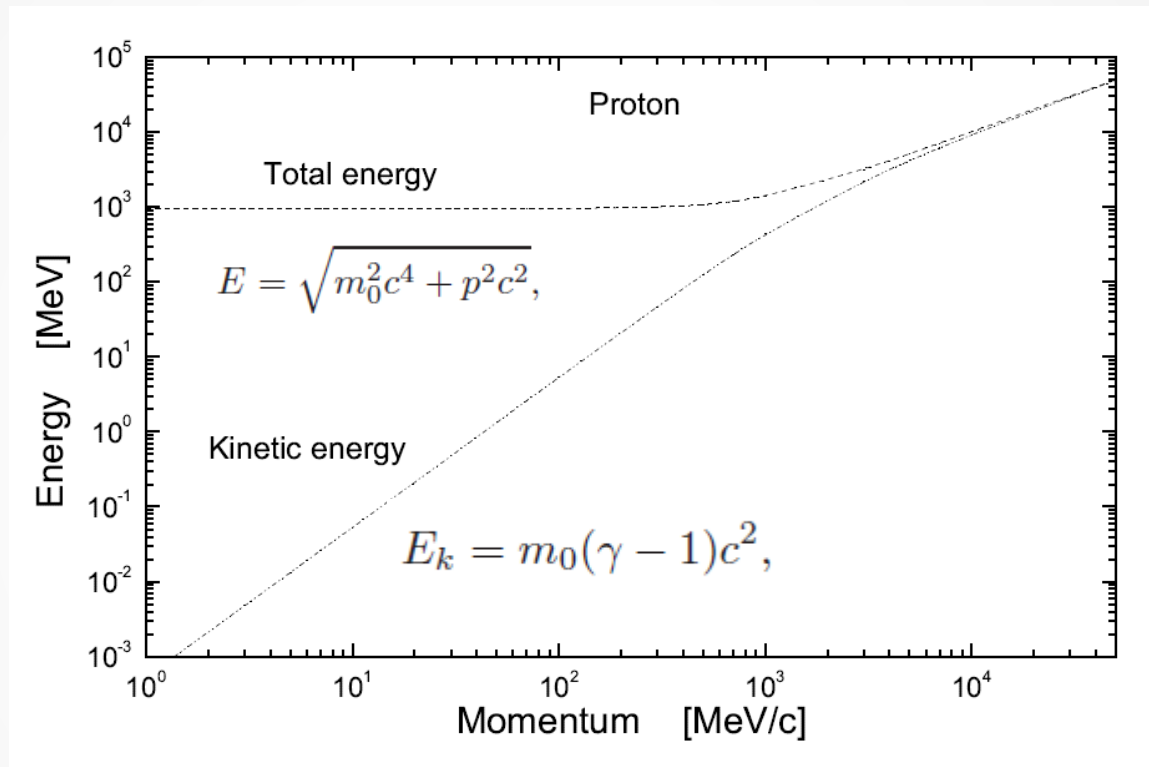
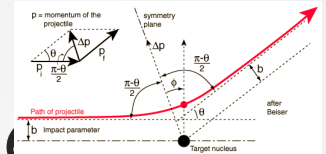
- ❑ Cząstki naładowane oddziałują z dowolnym medium (materiałem) elektromagnetycznie
- ❑ Najbardziej istotna składowa pochodzi od oddziaływań z elektronami atomów materiału (oddziaływania z jądrami atomowymi znacznie mniej prawdopodobne)
- ❑ Główny efekt to **jonizacyjna strata energii**
  - ❑ Wyrażamy 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 zależność** 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  $100\text{ GeV}$
  - ❑ 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

## Intro (IIb) Relatywistyczne:

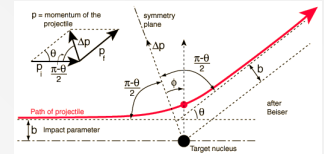


$$\vec{p} = \vec{\beta} \gamma m_0 c$$

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

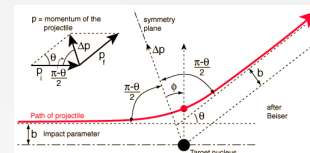
zadanie!

## 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

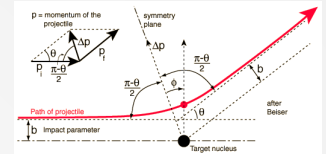


Starta energii protonu w zderzeniu z elektronem

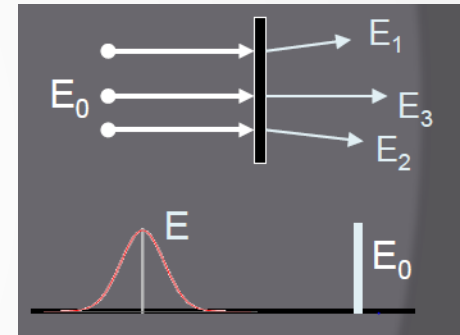
Proton Kinetic Energy, E [MeV]	Qmax [MeV]	Maximum % Energy Transfer 100Qmax/E
0.1	0.00022	0.22
1	0.0022	0.22
100	0.0219	0.22
100	0.229	0.23
1000	3.33	0.33
10000	136	1.4
100000	1060	10.6
1000000	53800	53.8
10000000	921000	92.1

minimalne  $\Delta E$  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 poziom energetyczny i ma różne energie jonizacji i wzbudzenia,
  - każde zderzenie ma inne prawdopodobieństwo przekazania konkretnej porcji energii

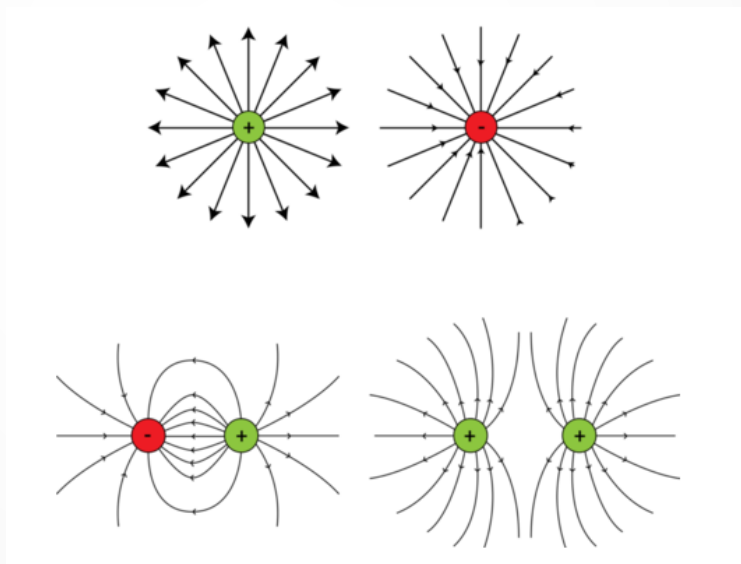


$$E = E_0 - \sum_i \Delta E_i = E_0 - \sum_i \left( \frac{\Delta E_i}{\Delta x} \right) \Delta x = E_0 - \int \frac{dE}{dx} dx$$

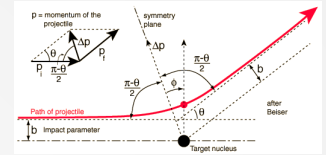
- ❑ Nie jest możliwe wyznaczenie strat energii licząc straty indywidualnych zdarzeń.
- ❑ Można za to policzyć średnie straty energii na jednostkę drogi przebytej przez cząstkę w materiale.



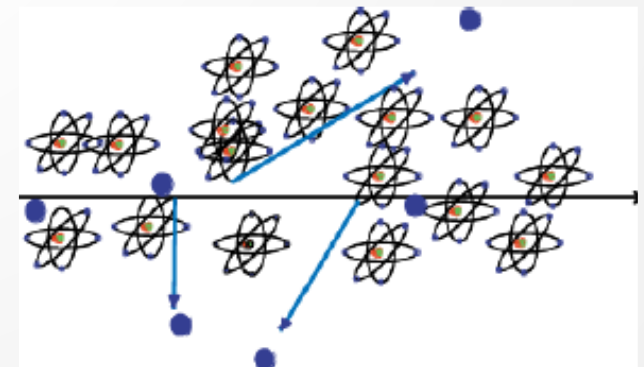
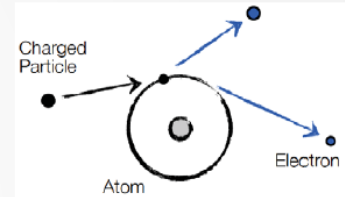
## **CZĘŚĆ I. Cząstki naładowane**



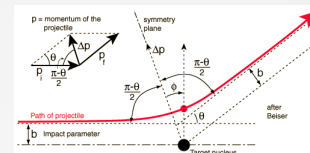
# Cząstki naładowane, „ciężkie” (I)



- ❑ 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:

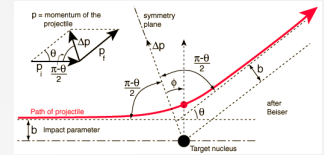
$$\Delta E_{MAX} = 4E_I \frac{m}{M}$$

Masa elektronu

Masa cząstki  
penetrującej

Energia początkowa  
cząstki penetrującej

# Cząstki naładowane, „ciężkie” (III)



## Przykład

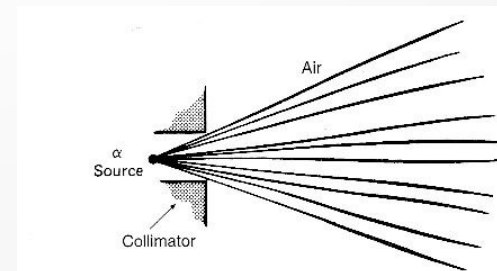
Jeżeli promieniowanie penetrujące składa się z cząstek  $\alpha$ , wówczas mamy:

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

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

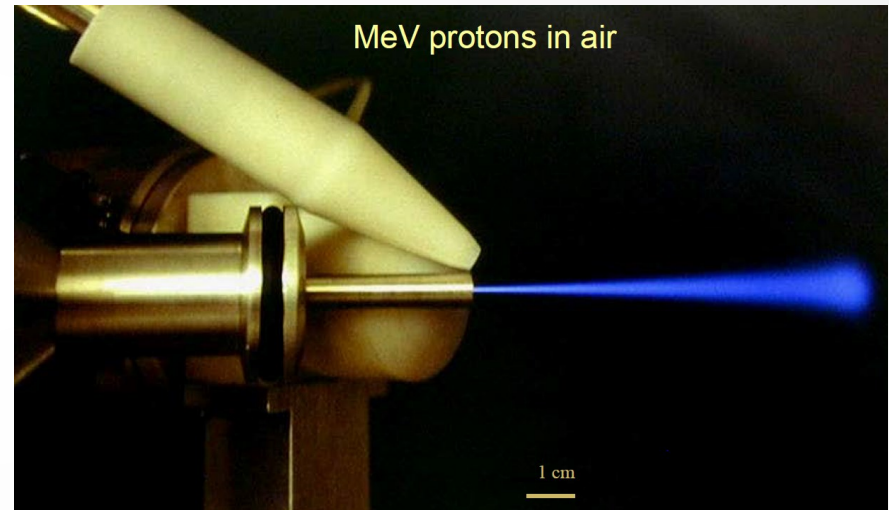
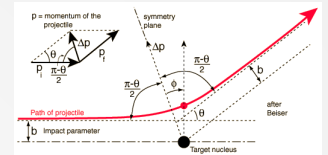
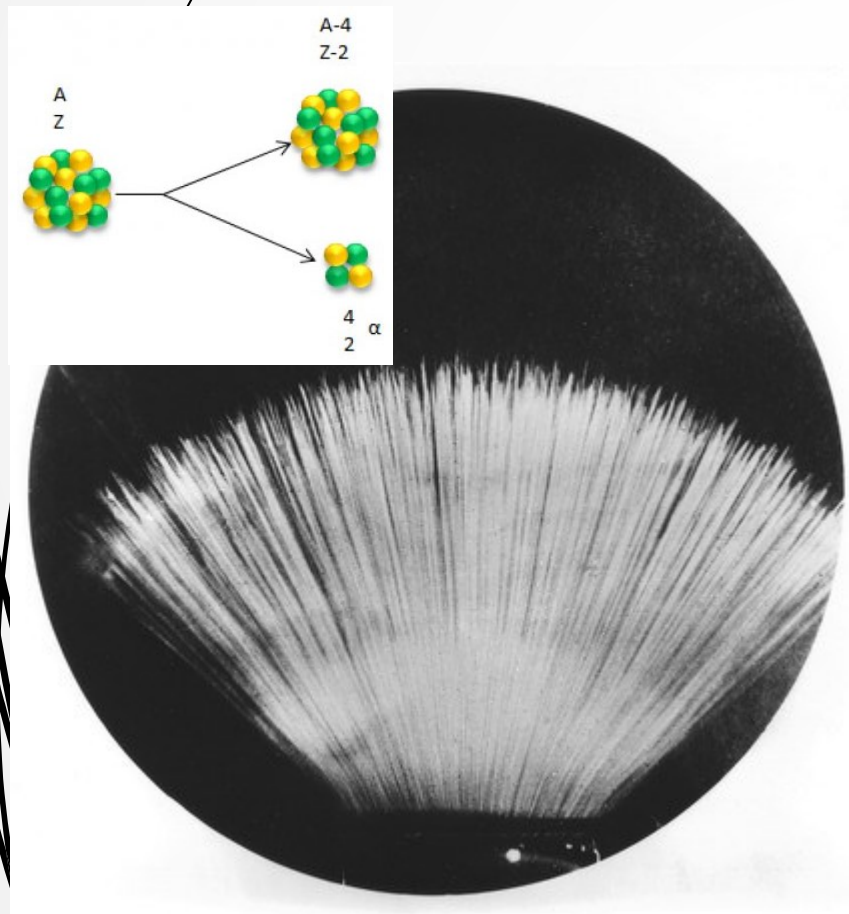
Ciężka naładowana cząstka traci niewiele energii w pojedynczym zderzeniu i nie zmienia znacząco kierunku. Wyjaśnia to podstawowe fakty dotyczące oddziaływania ciężkich cząstek naładowanych z materią:

- ☐ 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



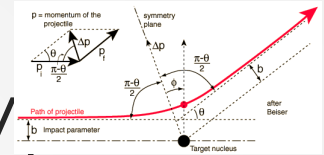
# Detekcja cząstek $\alpha$

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



zasięg protonów w powietrzu

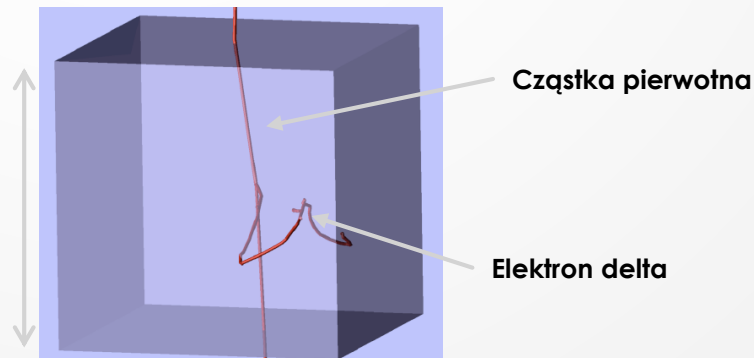
## Cząstki naładowane, „ciężkie” (IV)



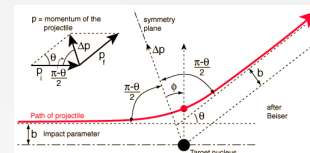
- ❑ Dość często zdarza się, że wybity elektron posiada wystarczająco wysoką energię i sam jest zdolny do jonizacji materiału detektora.
- ❑ Elektrony takie nazywamy „**elektronami delta**” (delta rays) – stanowią one **pośredni** sposób przekazywania energii pomiędzy cząstkami promieniowania oraz medium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

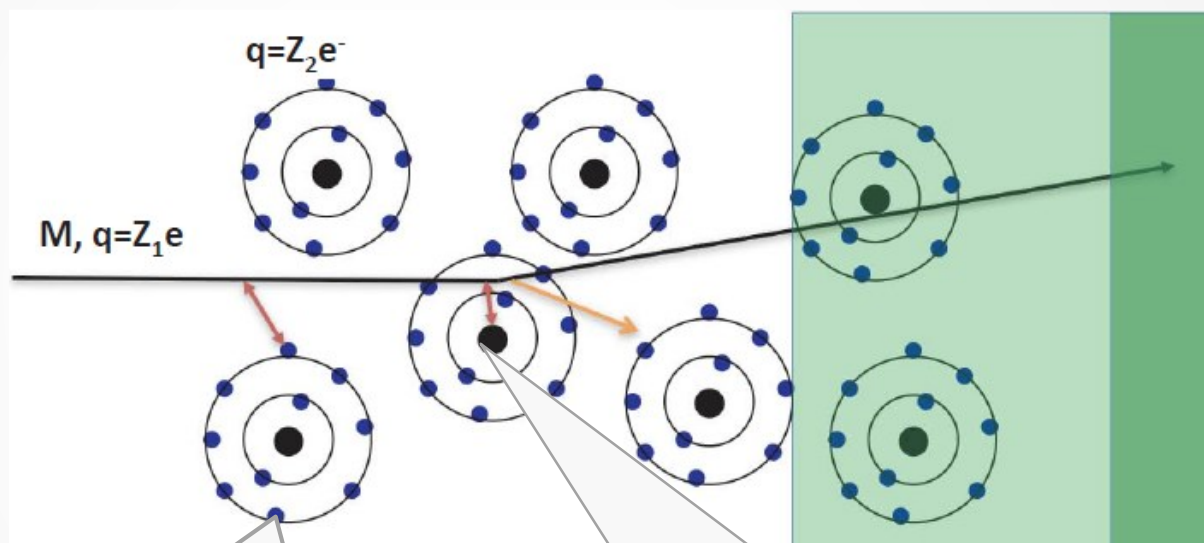
~ 50 nm



# Oddziaływania EM



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

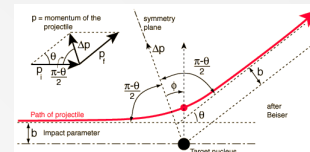


Oddz. z **elektronami atomowymi**.  
Wchodząca cząstka traci energię,  
pozostawiając atomy **wzbudzone lub**  
**zjonizowane**

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

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

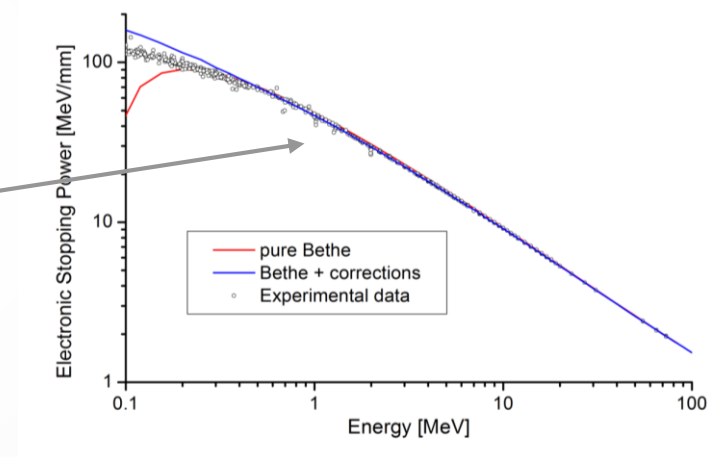
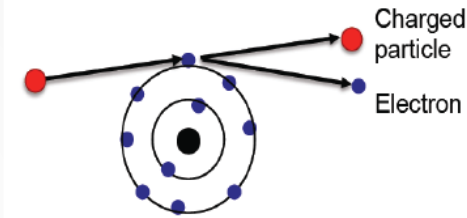
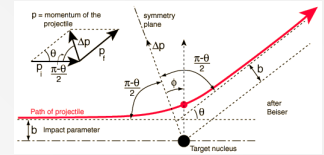


# „Stopping power” (II)

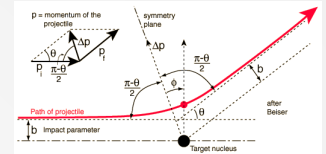
$$-\frac{dE}{dx} = NZ \frac{4\pi e^4 z^2}{v^2 m_e} \left[ \ln \left( \frac{2v^2 m_e}{I} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

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

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

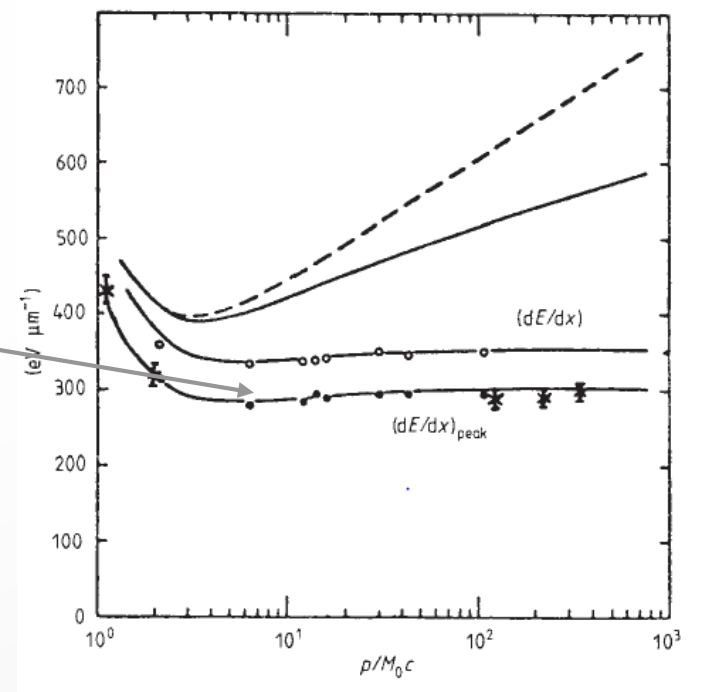


# „Stopping power” (IIa)



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

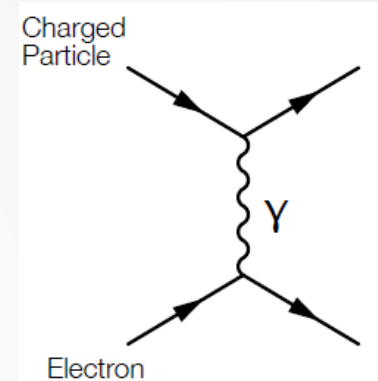
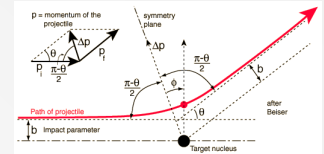
- ☐ Poprawki:
- ☐ nie wszystkie elektrony (zwłaszcza z wewnętrznych poziomów) biorą udział w oddziaływaniu,
- ☐ atomy bliskie trajektorii ekranują dalsze (density effect)



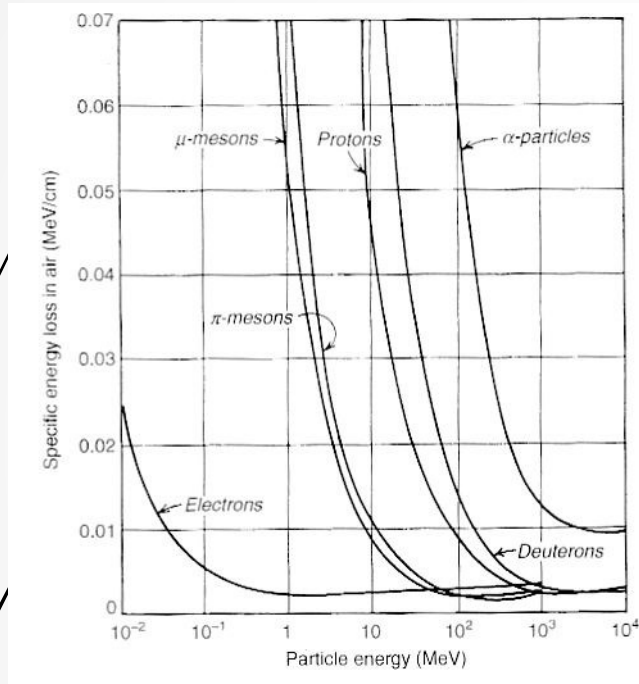
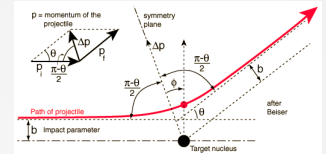
# „Stopping power” (III)

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

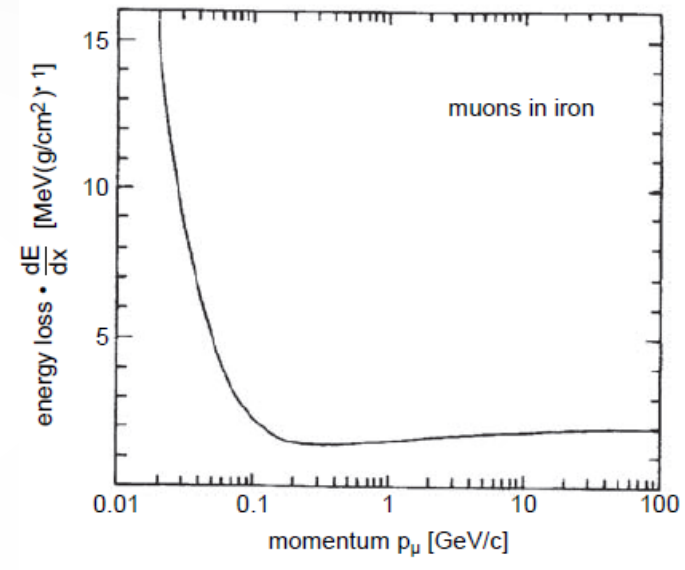
- ❑ Oddziaływanie jest zdominowane przez **elastyczne zderzenia z elektronami!**
- ❑ Strata energii zmienia się proporcjonalnie do  $\frac{1}{v^2}$
- ❑ Wolniejsza cząstka „spędza” **więcej czasu** w pobliżu danego elektronu – zwiększa to przekaz (stratę) energii
- ❑ Dla cząstek o tej **samej prędkości**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



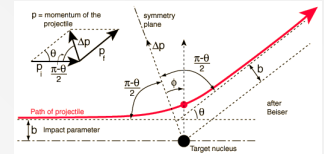
mass stopping power [MeV cm<sup>-2</sup> /g]



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:

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

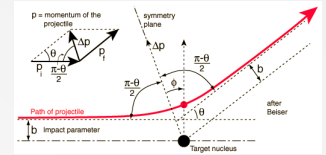
$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.3071 \text{ MeV cm}^2 / g$$

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 -  $\left[ \frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{g} \right]$

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)

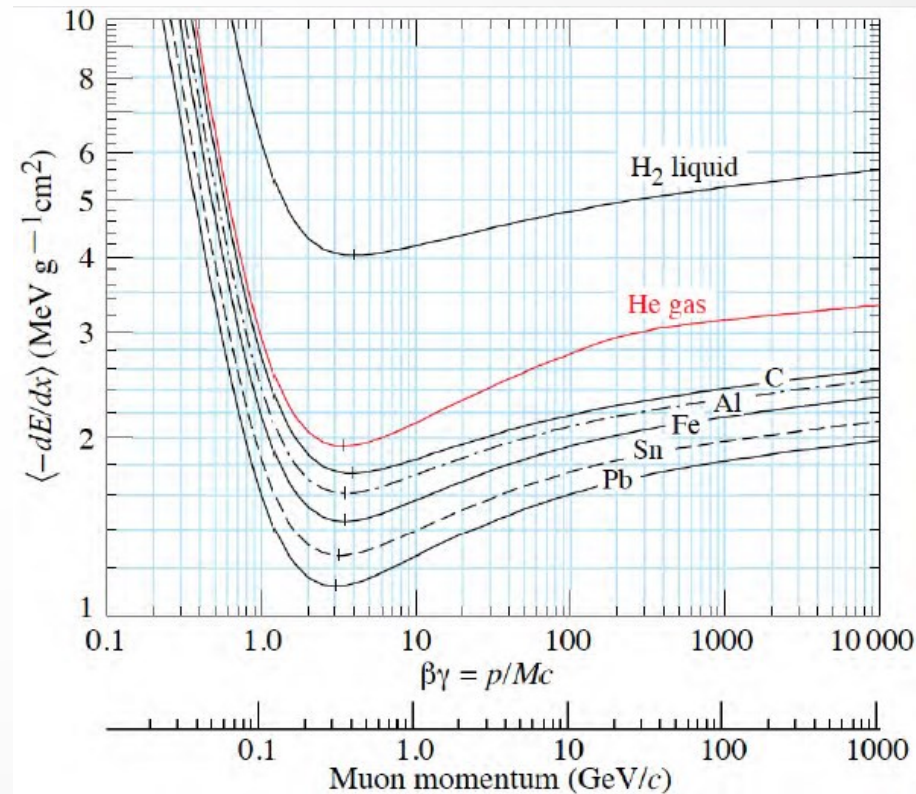


$$-\frac{dE}{dx} = K Z^2 \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{MAX}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

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

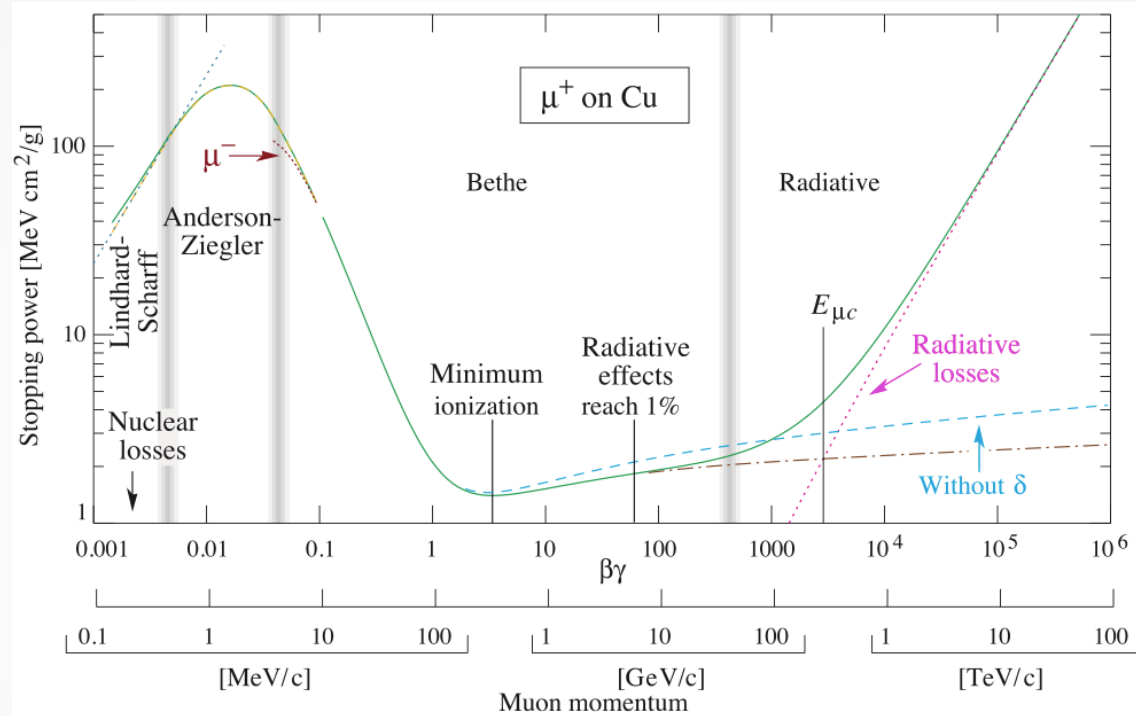
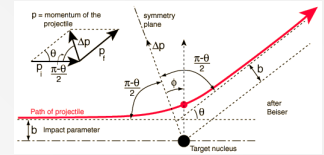
- ❑ Szybki spadek przy niskich energiach  $\propto \frac{1}{\beta^2}$
- ❑ Szerokie minimum w zakresie  $3 \leq \beta\gamma \leq 4$ ,
- ❑ MIP – cząstka z  $dE/dx$  w pobliżu minimum (dlaczego mion?)
- ❑ MIP we wszystkich ośrodkach (z wyjątkiem wodoru) traci tyle samo energii: 1-2 MeV/(g/cm<sup>2</sup>)

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



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

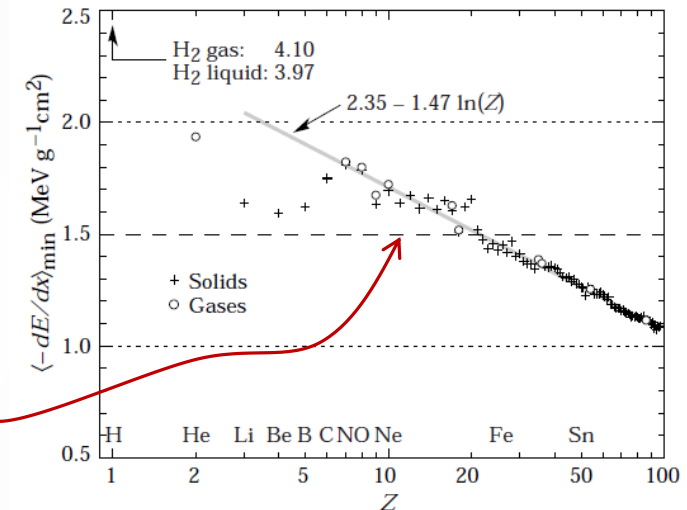
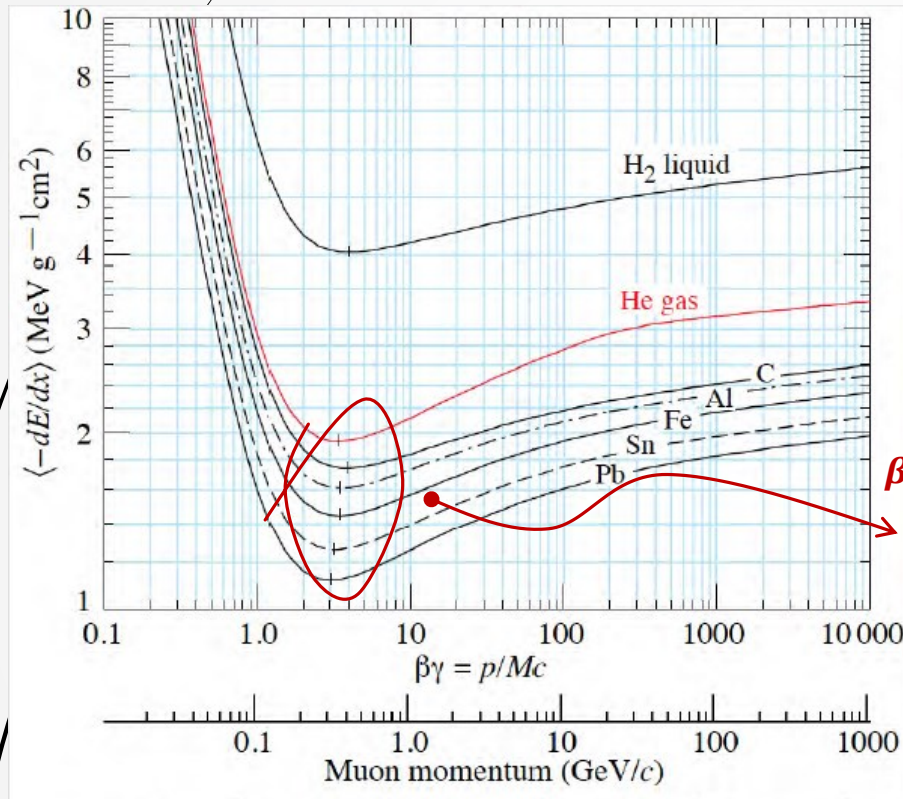
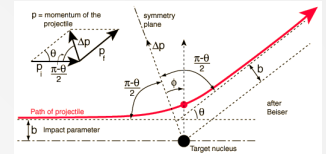
# „Stopping power” (VII)



- ❑ 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!