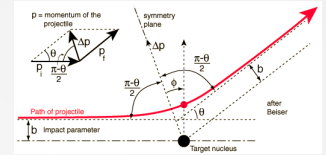


# Oddziaływanie Promieniowania Jonizującego z Materią

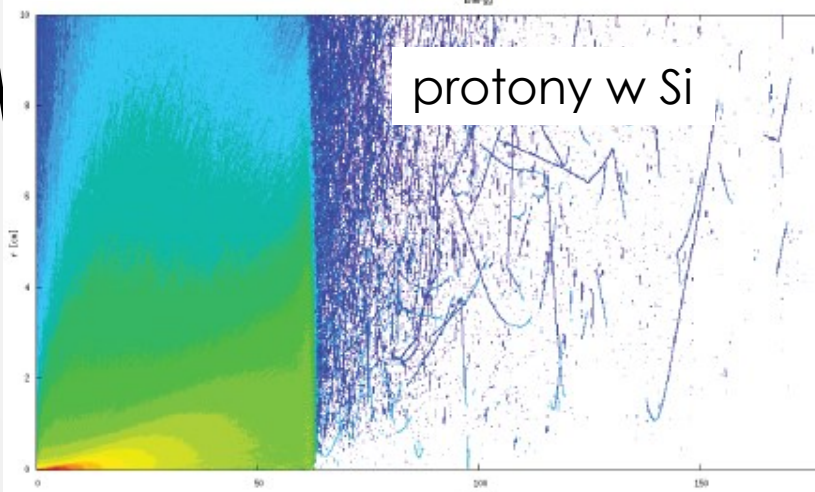
**Tomasz Szumlak, Agnieszka Obłąkowska-Mucha**

# Zasięg cząstek (range)

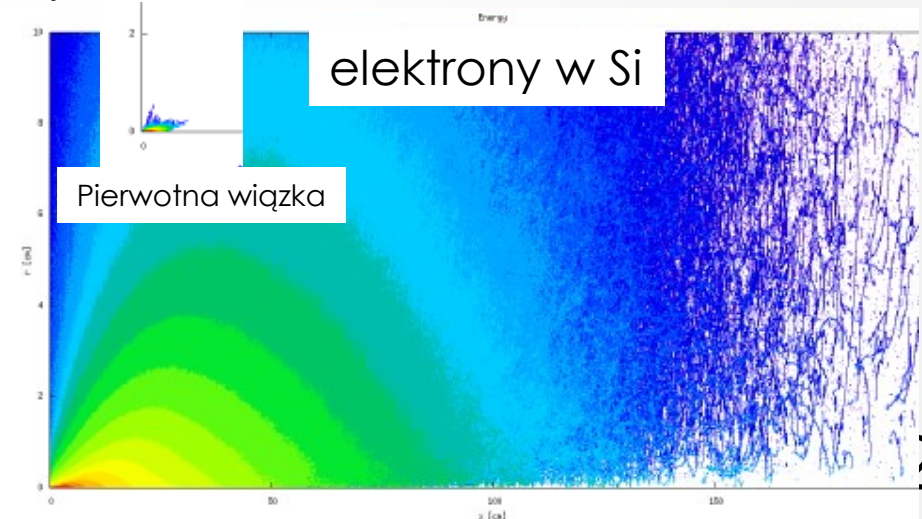


- ❑ Już wiemy, że cząstki naładowane tracą energię podczas oddziaływania z materią (detektorem)
- ❑ Skoro tak... to jak daleko mogą one penetrować materiał?
  - ❑ Musi nastąpić takie moment, w którym cząstka traci całą swoją energię i po prostu zatrzymuje się
  - ❑ Wydaje się, że dla danego **typu cząstek**, ich **energii** oraz **penetrowanego materiału** zasięg powinien być dobrze zdefiniowaną wartością (stałą)
  - ❑ Nie zapominajmy o statystyce – proces depozycji energii jest stochastyczny!

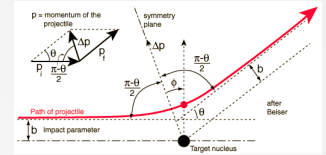
$dE/dm$



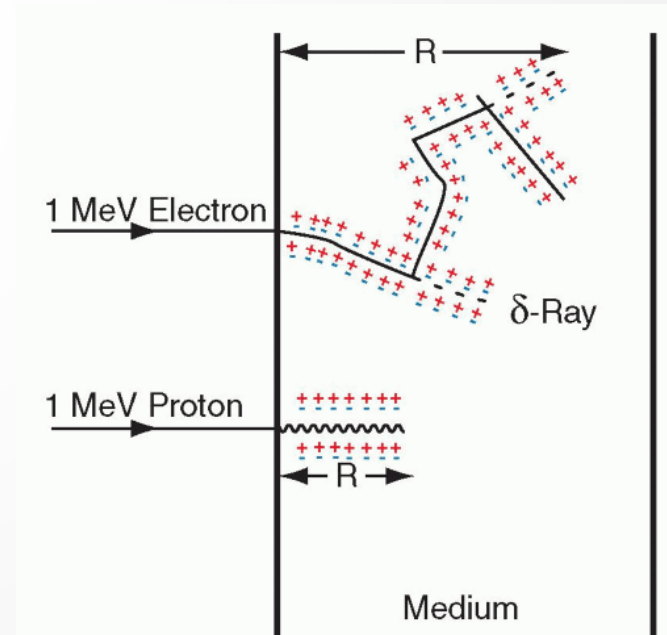
$dE/dm$



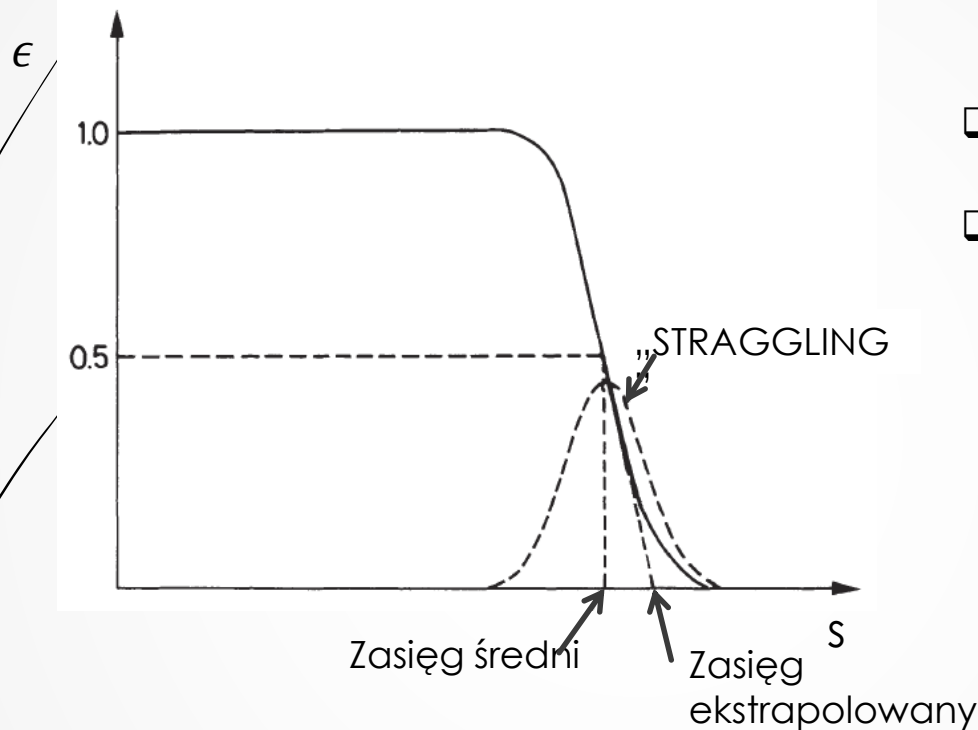
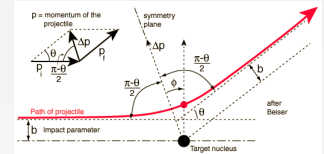
# Zasięg cząstek (range)



- ❑ Zasięg to średnia droga, jaką cząstka pokonuje, zanim osiągnie zerową prędkość.
- ❑ Pomiar zasięgu cząstek są w zasadzie dość proste
  - „Produkujemy” wiązkę cząstek o danej energii, a następnie naświetlamy nią badany materiał
  - Używając różnych grubości materiału możemy zmierzyć współczynnik transmisji (liczba cząstek za materiałem do liczby cząstek padających)
  - Krzywa transmisji wygląda interesująco...



# Krzywa zasięgu

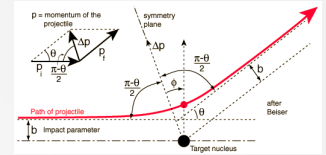


- $\epsilon$  – współczynnik transmisji cząstek
- $s$  – grubość absorbera

$$[R] = \frac{g}{cm^2}$$

- Nawet w przypadku cząstek o tej samej energii zasięg nie jest liczbą stałą – statystyczny rozrzut deponowanej energii
- W rezultacie obserwujemy **rozzrut** zasięgu penetracji, który nazywamy „**straggling**”-iem

# Wyznaczanie zasięgu

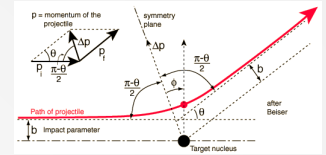


- ❑ W przybliżeniu rozrzut zasięgu można opisać przy pomocy rozkładu normalnego, którego wartość średnia odpowiada współczynnikowi transmisji cząstek  $\epsilon = 0.5$
- ❑ Zasięg wyznaczony przy  $\epsilon = 0.5$  nazywamy też „zasięgiem średnim” co oznacza grubość materiału przy której absorbowanych jest około 50% cząstek z wiązki pierwotnej
- ❑ Prowadząc prostą styczną do krzywej zasięgu w punkcie  $\epsilon = 0.5$  dostaniemy estymator tak zwanego zasięgu efektywnego (która lepiej odzwierciedla grubość absorbera zatrzymującego wszystkie cząstki)
- ❑ Obliczenia „teoretyczne” zasięgu można w zasadzie przeprowadzić używając formuły BB, zapiszemy:

$$s(E_{kin}^0) = \int_0^{E_{kin}^0} \left( \frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

- ❑ Formuła ta nie uwzględnia niestety MS oraz innych sposobów przekazu energii (w szczególności „katastroficznym”)

# Wyznaczanie zasięgu



- ❑ Biorąc pod uwagę te problemy – musimy posłużyć się efektywną formułą półempiryczną:

$$s_{eff}(E_{kin}^0) = s_{eff}^0(E_{kin}^{min}) + \int_{E_{kin}^{min}}^{E_{kin}^0} \left( \frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

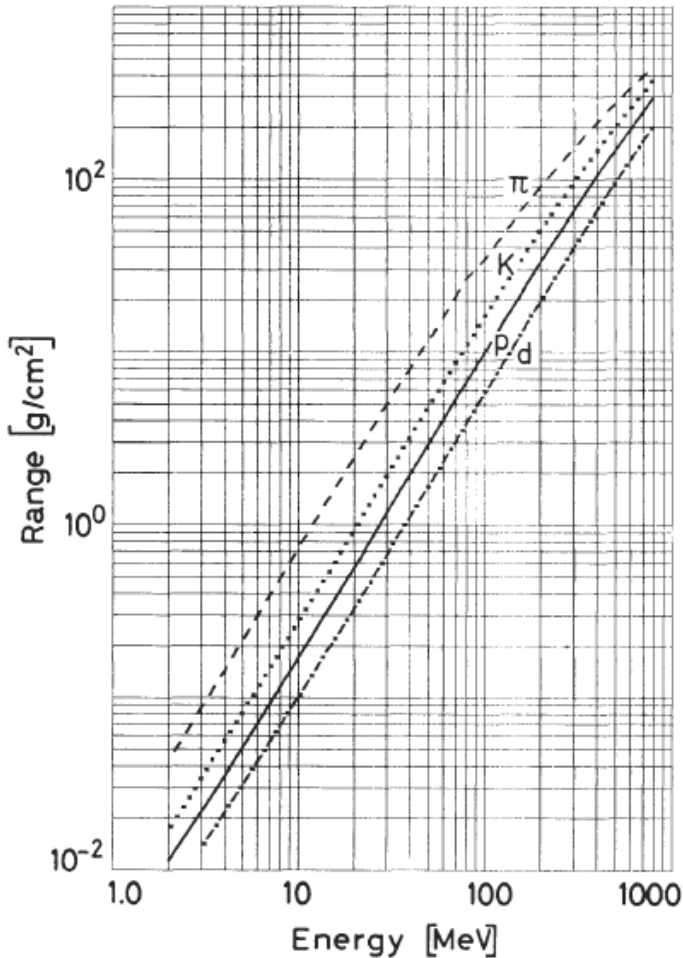
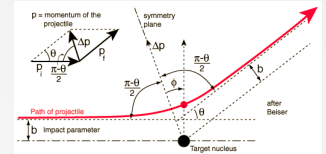
- ❑ Energia odcięcia oznacza minimalną wartość energii cząstki przy której formuła BB jeszcze obowiązuje, składnik  $s_{eff}^0(E_{kin}^{min})$  wyznaczany jest doświadczalnie i opisuje straty energii przy b. niskich energiach
- ❑ Zakładając, że dla niezbyt wysokich energii równanie BB jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu prędkości:

$$\left( -\frac{dE}{dx} \right)_{ion} \propto \beta^{-2} \propto E_{kin}^{-1}$$

- ❑ Zasięg powinien być proporcjonalny do kwadratu energii:

$$s_{eff}(E_{kin}^0) \propto E_{kin}^2$$

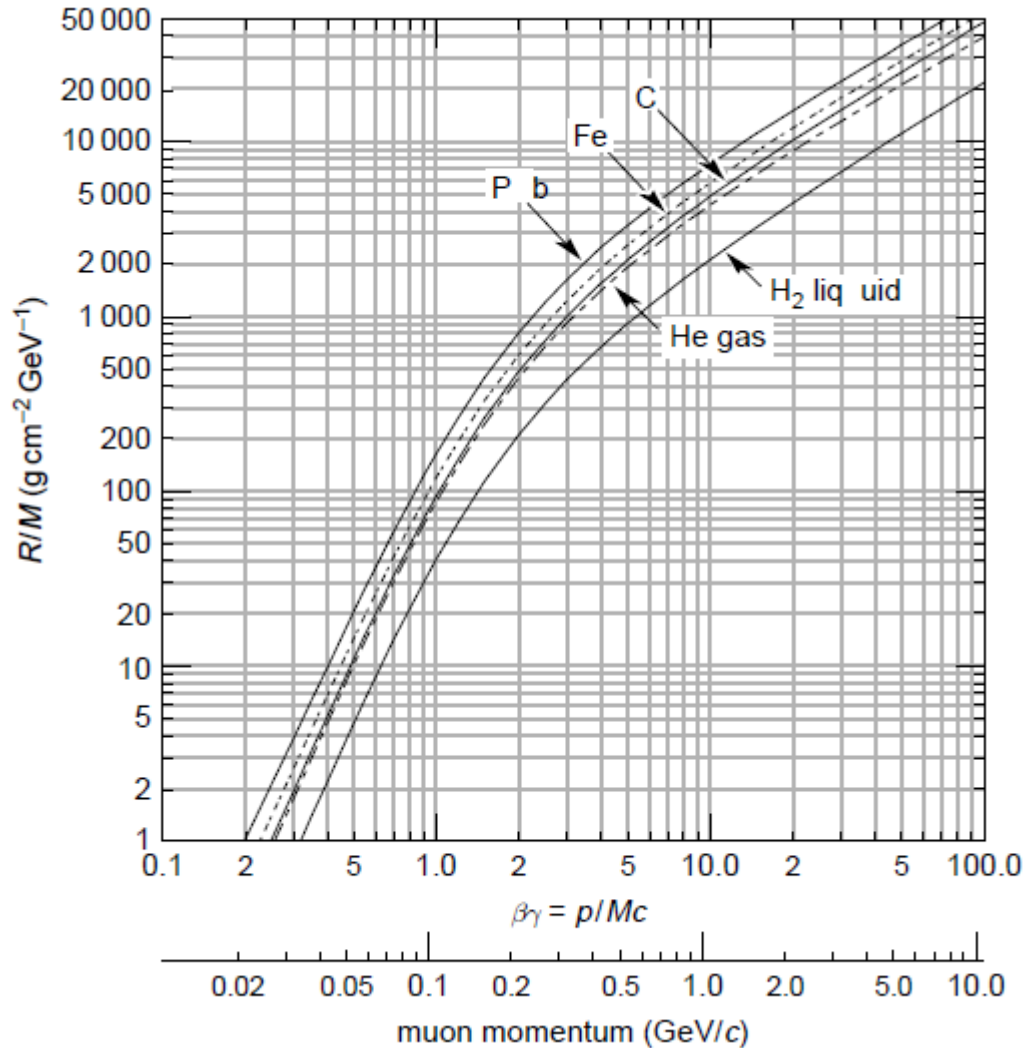
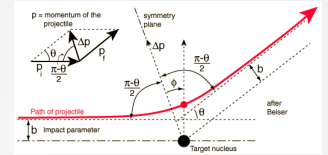
# Pomiar zasięgu



- ❑ Pomiar zasięgu wykonane dla różnych cząstek (aluminium)
- ❑ W skali log-log zasięg ma charakter liniowy, nasze „grube” przybliżenia są więc całkiem dobre!
- ❑ Dokładne dopasowanie daje nam zależność pomiędzy zasięgiem a energią w postaci:  
 $s_{eff}(E_{kin}^0) \propto E_{kin}^{1.75}$
- ❑ Znajomość zasięgów dla różnych cząstek ma zastosowanie do szybkiego szacowania ich energii
- ❑ Znajomość zasięgów ma też wielkie znaczenie przy konstrukcji detektorów (wymiary aparatury) oraz...
- ❑ Przy wyznaczaniu osłon (biologicznych oraz technologicznych przed różnymi typami promieniowania



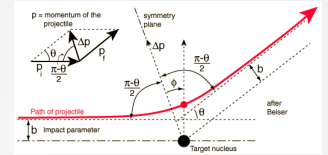
# Pomiar zasięgu



$$[R] = \frac{1}{\frac{\text{MeV cm}^2}{g}} = \frac{g}{\text{MeV cm}^2}$$



# Skalowanie zasięgu



- Z uwagi na to, że straty radiacyjne podlegają skalowaniu możemy zapisać podobne formuły dla zasięgu dla **różnych cząstek** ( $M_i, z_i$ ) w **tym samym materiale**:

$$s_{eff}^{(2)}(E_{kin}^{(02)}) = \frac{M_2 z_1^2}{M_1 z_2^2} \cdot s_{eff}^{(1)}(E_{kin}^{(01)})$$

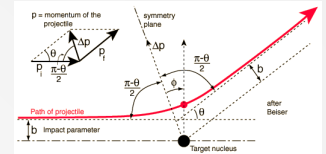
$$\frac{s_{eff}^{(2)}(E_{kin}^{(02)})}{s_{eff}^{(1)}(E_{kin}^{(01)})} = \frac{M_2 z_1^2}{M_1 z_2^2}$$

- Podobną formułę możemy zapisać w przypadku **takich samych cząstek dla różnych materiałów** czynnych (Bragg-Kleeman):

$$\frac{s_{eff}^{(1)}}{s_{eff}^{(2)}} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{\sqrt{A_1}}{\sqrt{A_2}}$$

gdzie:  $\rho_i$  - gęstości materiałów,  $A_i$  - masa atomowa

# Przykład

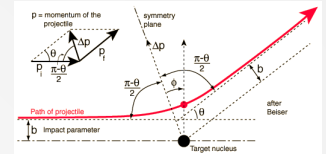


- ❑ Przykład 1. Załóżmy, że chcemy oszacować ilość energii zdeponowanej w liczniku scyntylacyjnym, o grubości 2 cm, przez miony pochodzące z promieniowania kosmicznego
  - Miony z PK posiadają **wysoką energię** (muszą, żeby można je obserwować na Ziemi...)
  - Możemy więc założyć, że są one **cząstkami minimalnie jonizującymi** ( $\sim 300$  MeV dla mionów)
  - Dla plastikowego scyntylatora minimalna jonizacja wynosi  $\sim \frac{dE}{dx} \approx 1.9 \left[ \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2} \right]$ , z uwagi na prawie stałą wartość strat energii możemy stratę energii policzyć jako (przyjmujemy, że gęstość plastiku wynosi  $1.03 \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$ ):

$$\Delta E \approx \int_0^x \frac{dE}{dx} dx = \frac{dE}{dx} x = 1.9 \cdot 1.03 \cdot 2 = 3.9 [\text{MeV}]$$

- Ten depozyt powinien być widoczny przy pomiarze amplitudy sygnału z detektora (idealny do kalibracji)

# Przykład



- Terapia protonowa wymaga z reguły zmiany energii wiązki, można to zrobić stosując np. przesłony. Jaka powinna być grubość przesłony wykonanej z miedzi aby zmniejszyć energię wiązki od 600 do 400 MeV?
  - Ponownie możemy odwołać się do równania BB

$$\Delta x = - \int_{600}^{500} \left( \frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

Range (MeV)	$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$	$\Delta x = \Delta E \left( \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right)^{-1}$
600 – 580	1.768	11.31
580 – 560	1.791	11.17
560 – 540	1.815	11.02
540 – 520	1.841	10.86
520 – 500	1.870	10.69
500 – 480	1.901	10.52
480 – 460	1.934	10.34
460 – 440	1.971	10.15
440 – 420	2.012	9.94
420 – 400	2.056	9.73

$$\Delta x_{Cu} = 105.73 \left[ \frac{g}{cm^2} \right] = 11.8 [cm]$$

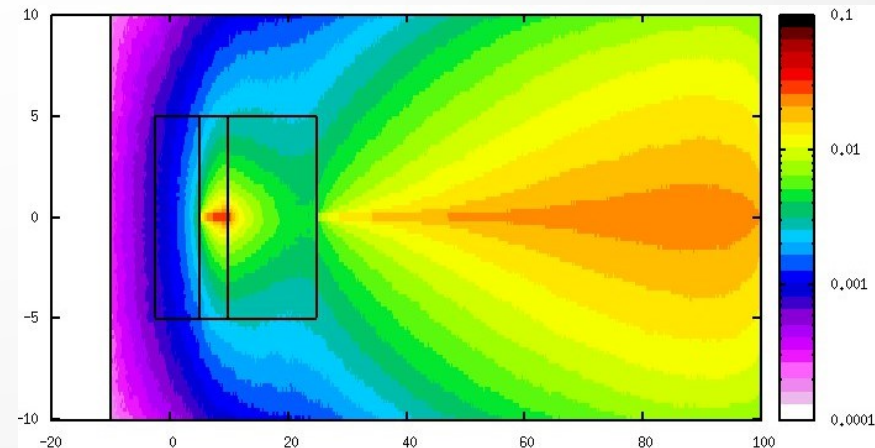


12

# Symulacja

- Symulacje oddziaływania promieniowania z materią przeprowadzamy programem FLUKA.
- Instrukcja jest na: <https://agnieszkamucha.github.io/OPJzM/>
- Będzie on dostępny z naszego grupowego serwera poprzez połączenie z taurus.
- Lokalnie można spróbować zainstalować program z:

<https://fluka.cern/>



# Symulacja

Laboratorium:

## **Oddziaływanie protonów o wysokich i niskich energiach z lekkimi i ciężkimi absorbentami**

- ▶ niskie energie: poniżej 500 MeV
- ▶ wysokie energie: powyżej 5 GeV

Liczba cząstek >10 000, 3-5 cykli.

Proszę porównać (3D i 2D):

- energię straconą przez wiązkę pierwotną,
- energię elektromagnetyczną przekazaną do ośrodka
- strumienie wyprodukowanych cząstek: pionów, protonów, neutronów.

Wyznaczyć zasięg dla 2 lekkich i 2 ciężkich absorbentów, dla dwóch energii, porównać z wartościami z tabel.

Proszę sprawdzić prawo skalowania.