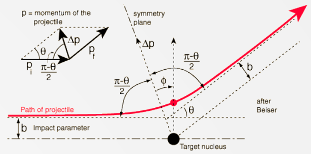
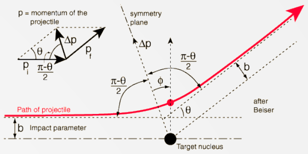


Oddziaływanie Promieniowania Jonizującego z Materią

Tomasz Szumlak, Agnieszka Obłąkowska-Mucha

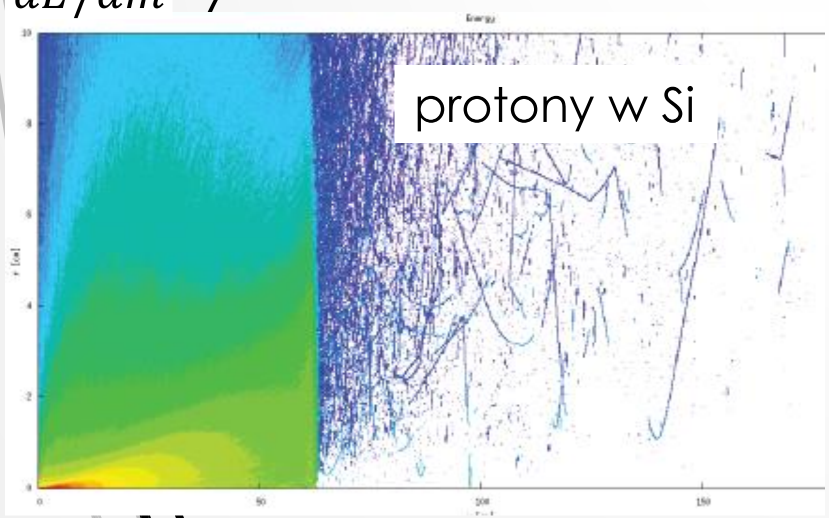
WFiIS AGH
Kraków 2021

Zasięg cząstek (range)

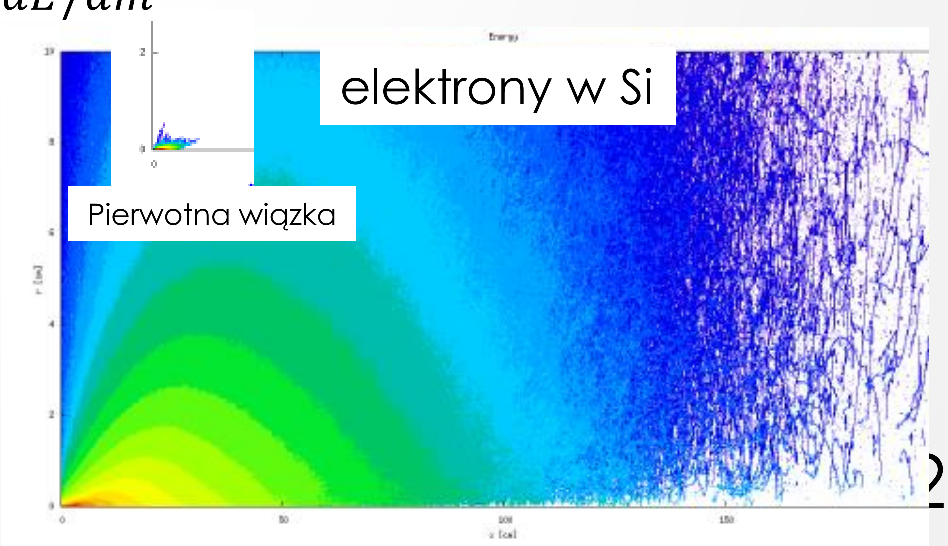


- Już wiemy, że cząstki naładowane tracą energię podczas oddziaływania z materią (detektorem)
- Skoro tak… to jak daleko mogą one penetrować materiał?
  - Musi nastąpić takie moment, w którym cząstka traci całą swoją energię i po prostu zatrzymuje się
  - Wydaje się, że dla danego **typu cząstek**, ich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

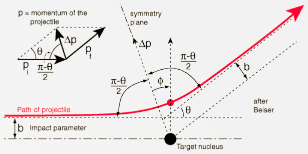
dE/dm



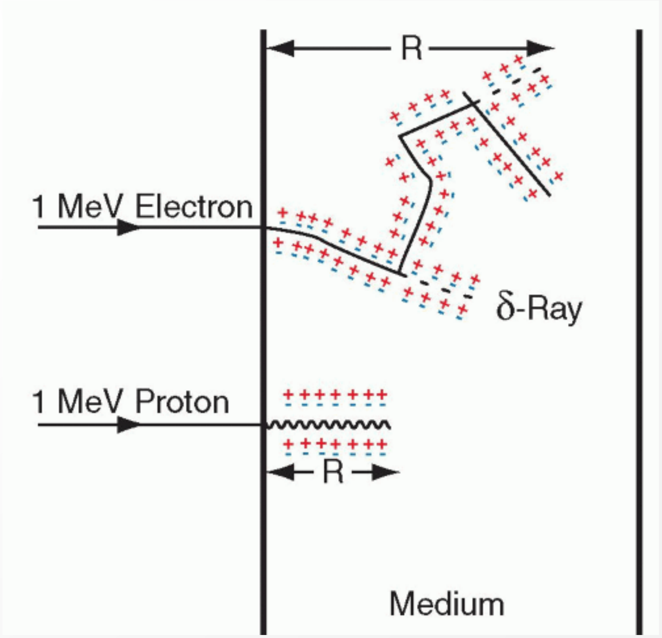
dE/dm



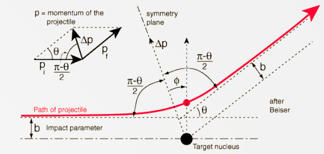
Zasięg cząstek (range)

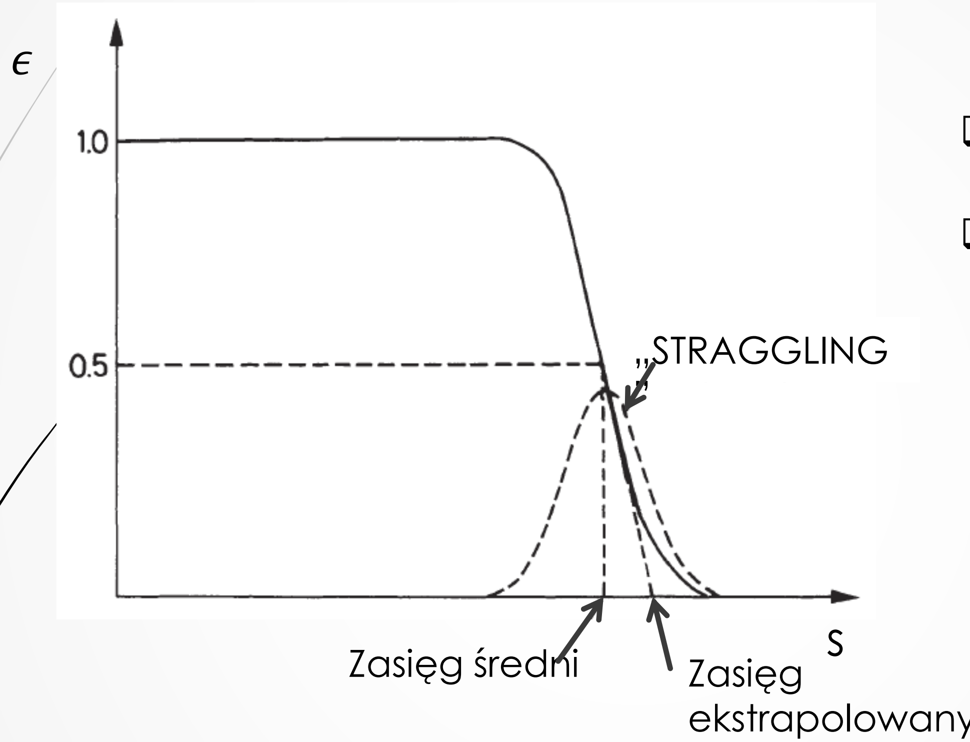


- Zasięg to średnia droga, jaką cząstka pokonuje, zanim osiągnie zerową prędkość.
- Pomiary zasięgu cząstek są w zasadzie dość proste
  - „Produkujemy” wiązkę cząstek o danej energii, a następnie naświetlamy nią badany materiał
  - Używając różnych grubości materiału możemy zmierzyć współczynnik transmisji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



Krzywa zasięgu



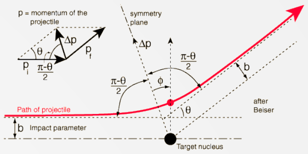


- ❑ ϵ – współczynnik transmisji cząstek
- ❑ s – grubość absorbera

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

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

Wyznaczanie zasięgu



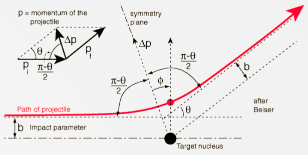
- W przybliżeniu rozrzut zasięgu można opisać przy pomocy rozkładu normalnego, którego wartość średnia odpowiada współczynnikowi transmisji cząstek $\epsilon = 0.5$
- Zasięg wyznaczony przy $\epsilon = 0.5$ nazywamy też „zasięgiem średnim” co oznacza grubość materiału przy której absorbowanych jest około 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:

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

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

Wyznaczanie zasięgu



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

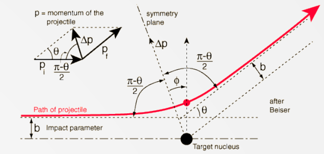
$$s_{eff}\left(E_{kin}^{0}\right) = s_{eff}^{0}\left(E_{kin}^{min}\right) + \int_{E_{kin}^{min}}^{E_{kin}^{0}} \left(\frac{dE}{dx}\right)^{-1} dE$$

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

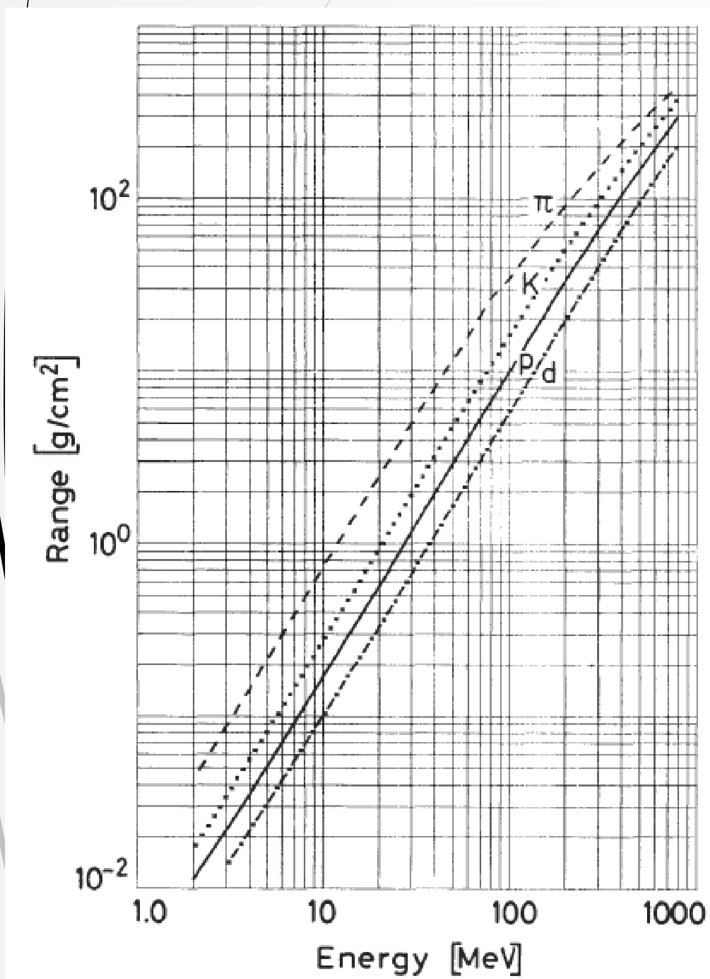
$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{ion} \propto \beta^{-2} \propto E_{kin}^{-1}$$

- Zasięg powinien być proporcjonalny do kwadratu energii:

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

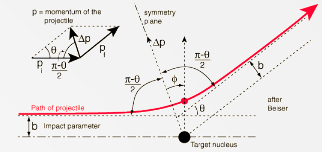


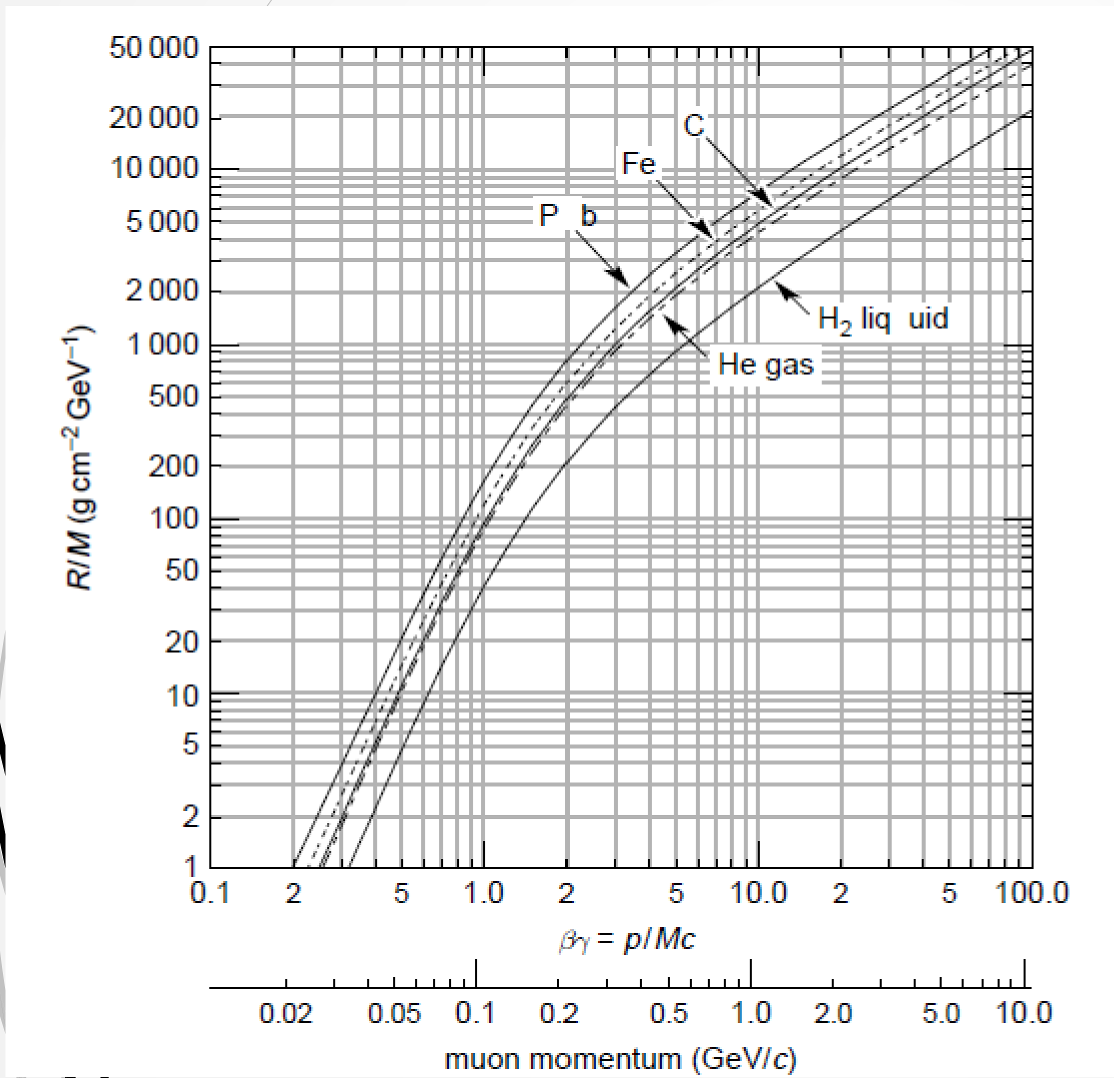
Pomiar zasięgu



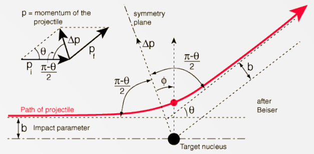
- Pomiary zasięgu wykonane dla różnych cząstek (aluminium)
- W skali log-log zasięg ma charakter liniowy, nasze „grube" przybliżenia są więc całkiem dobre!
- Dokładne dopasowanie daje nam zależność pomiędzy zasięgiem a energią w postaci: $s_{eff}\left(E_{kin}^{0}\right) \propto E_{kin}^{1.75}$
- Znajomość 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





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



Skalowanie zasięgu

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

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

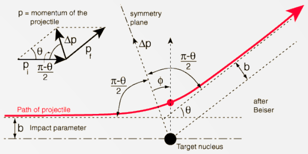
$$\frac{s_{eff}^{(2)}\left(E_{kin}^{(02)}\right)}{s_{eff}^{(1)}\left(E_{kin}^{(01)}\right)} = \frac{M_2}{M_1}\frac{z_1^2}{z_2^2}$$

- 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: ρ_i - gęstości materiałów, A_i - masa atomowa

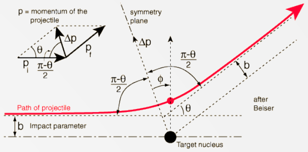
Przykład



- 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** (~300 MeV dla mionów)
  - Dla plastikowego scyntylatora minimalna jonizacja wynosi $\sim\frac{dE}{dx} \approx 1.9\left[\frac{MeV}{g/cm^2}\right]$, z uwagi na prawie stałą wartość strat energii możemy stratę energii policzyć jako (przyjmujemy, że gęstość plastiku wynosi $1.03\ [\frac{g}{cm^3}]$):

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

  - 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 $\mathbf{600\ \mathit{do}\ 400\ \mathit{MeV}}$?
  - 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

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

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 taurusa.
- Lokalnie można spróbować zainstalować program z:

https://fluka.cern/