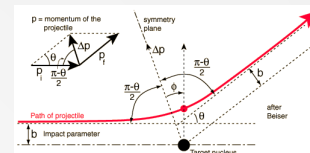


Oddziaływanie Promieniowania Jonizującego z Materią

Tomasz Szumlak, Agnieszka Obłąkowska-Mucha

WFiIS AGH
25.02.2020, Kraków



Opis przedmiotu (syllabus) znajdziemy tu:

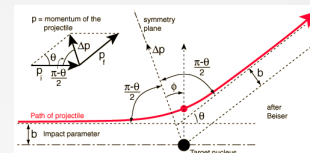
https://syllabuskrk.agh.edu.pl/2019-2020/pl/magnesite/study_plans/stacjonarne-fizyka-techniczna--3

- 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!

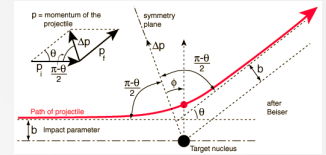
- Zaliczenie** – lab./ćwiczenia + projekt, egzamin (0.2 + 0.3 + 0.5)
- Materiały** – głównie wykłady oraz literatura polecona w syllabusie:
G. F. Knoll, „Radiation Detection and Measurement”, Wiley, 2010
C. Grupen, B. Schwartz „Particle Detectors”, Cambridge
C. Leroy, P-G. Rancoita "Principles of Radiation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



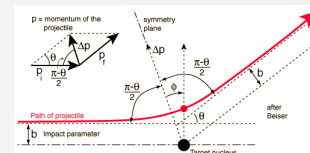
- ❑ Czyli, do „ugotowania tej zupy” potrzebujemy:
 - ❑ Cząstek (elementarnych) – to będzie **promieniowanie**
 - ❑ Wiedzy o ich własnościach – to będzie **oddziaływanie**
 - ❑ Urządzenia, które „zachęci” cząstki do oddziaływania – **medium**

- ❑ 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

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'tekʃən/  *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

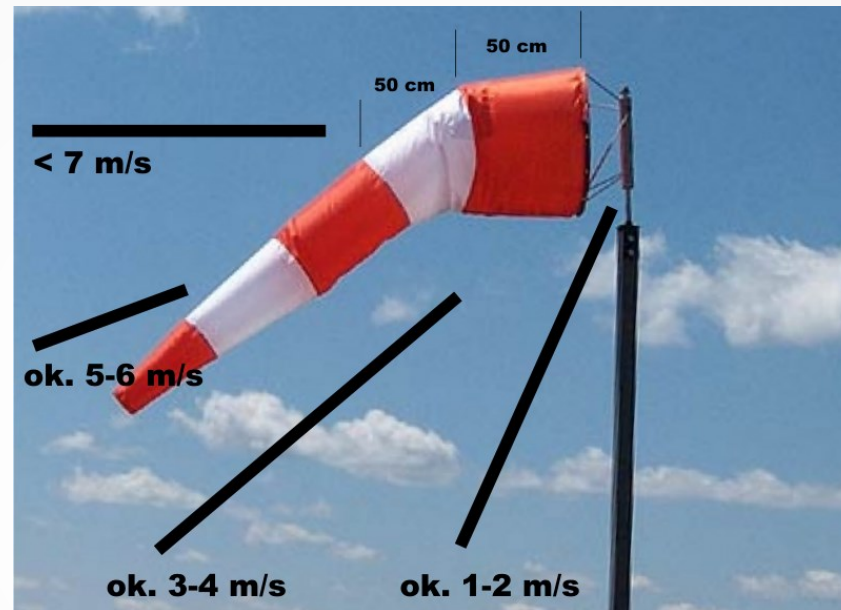
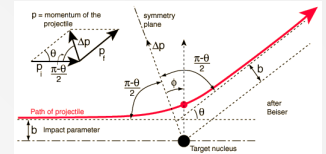
- a *detection system/device*

AN ENCYCLOPEDIA
BRITANNICA COMPANY



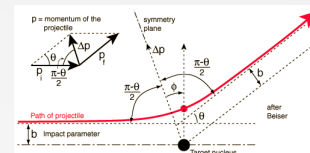
LearnersDictionary.com

Detekcja (IV)



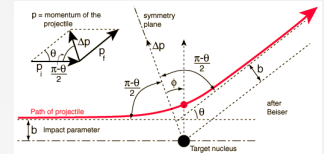
- ❑ Prosty przyrząd do „pomiaru” **wektora prędkości** przepływu powietrza
- ❑ Dzięki takiemu prostemu (i niezawodnemu urządzeniu) możemy:
 - ❑ Potwierdzić „obecność” wiatru
 - ❑ Oszacować kierunek wiatru
 - ❑ Oszacować wartość wektora prędkości
- ❑ Detektory promieniowania „robią” w zasadzie to samo...

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)

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

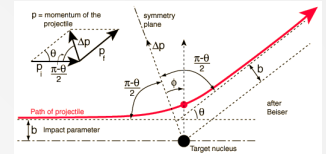
□ Ex. Średnia kwadratowa rozkładu ładunku w protonie

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

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

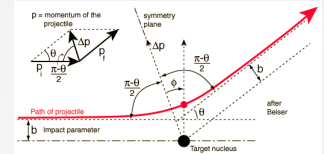
$$= 4.1 \times (0.197 \times 10^{-15}) [\text{m}] = 0.8 \times 10^{-15} [\text{m}]$$

Big Picture



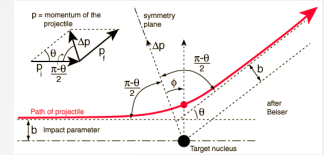
- ❑ Często warto jest zacząć zgłębianie wiedzy od ogólnego spojrzenia na całość
- ❑ Kilka faktów, które powinniśmy mieć zawsze w głowie
 - ❑ Biorąc pod uwagę charakterystyczne skale **odległości** oraz **czasu** reakcji (przedział Heisenberga!), możemy powiedzieć że **efektywnie** detektor znajduje się w **nieskończoności** w stosunku do źródła
 - ❑ Spośród wszystkich typów cząstek jakie mogą zostać wyprodukowane w rozmaitych reakcjach oddziaływania, jedynie **fotony**, **elektrony**, **protony**, oraz **neutrino** są stabilne
 - ❑ W zależności od przeznaczenia detektora, inne cząstki też mogą być uważane za „stabilne” (piony, miony czy neutrony)
 - ❑ Nowoczesne detektory hybrydowe mogą obserwować **bezpośrednio** cząstki, dla których średnie czasy życia wynoszą około 10^{-12} [s]
 - ❑ **I jeszcze raz – bez względu na typ cząstki i oddziaływania jakim podlega w materiale czynnym – obserwowany sygnał pochodzi z jonizacji**

Intro - detekcja (I)



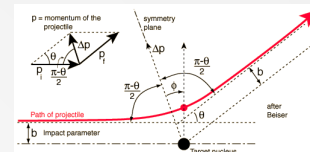
- ❑ Konstrukcja (rodzaj) detektora zależy bezpośrednio od tego jaką wielkość fizyczną chcemy zmierzyć
- ❑ Zwykle jesteśmy zainteresowani:
 - ❑ Detekcją cząstek (wykrycie obecności, np. Geiger-Müller – duże ograniczenia związane z brakiem **zależności** pomiędzy **energiami zdeponowaną a sygnałem** oraz **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 (III)



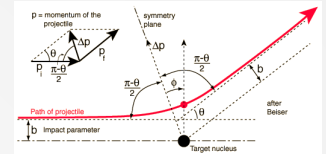
- ❑ Pamiętajmy – jedynie **elektrony, fotony, protony** oraz **neutrino** są stabilne!
- ❑ Pozostałe cząstki rozpadają się po przebyciu dystansu $l = \gamma v \tau$
 - ❑ $\gamma^{-1} = \sqrt{1 - v^2/c^2}$
 - ❑ τ – średni czas życia
- ❑ Biorąc pod uwagę dylatację relatywistyczną, za cząstki „stabilne” możemy uważać takie, które charakteryzują się czasem życia $\sim 10^{-10}$ s
 - ❑ Dodajemy więc do naszej listy **miony** μ^+/μ^- , **piony** π^+/π^- oraz **kaony** K^+/K^- (cząstki dziwne), neutrony
- ❑ Posiadając takie „narzędzia”, możemy podzielić sposoby oddziaływania tych cząstek z materią na trzy szerokie klasy
 - ❑ Oddziaływanie **ciężkich cząstek naładowanych**
 - ❑ Procesy elektromagnetyczne z udziałem **fotonów** oraz **elektronów**
 - ❑ Procesy silne z udziałem **naładowanych** oraz **neutralnych hadronów**

Cząstki naładowane (I)



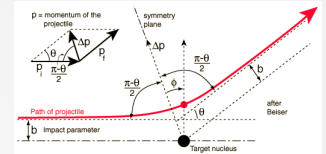
- ❑ Cząstki naładowane oddziałują z dowolnym medium (materiałem) elektromagnetycznie
- ❑ Najbardziej istotna składowa pochodzi od oddziaływań z elektronami atomów materiału (oddziaływania z jądrami atomowymi znacznie mniej prawdopodobne)
- ❑ Główny efekt to **jonizacyjna strata energii**
 - ❑ Wyrażamy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

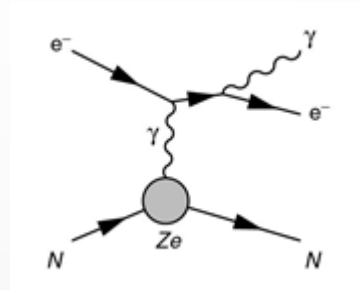


- ❑ Cząstki naładowane mogą podlegać również innym typom oddziaływania prowadzących do strat energii, nie mniej jednak straty jonizacyjne **zachodzą zawsze!**
- ❑ Różne procesy konkurencyjne zależą zwykle od typu cząstek oraz ich energii
 - ❑ Dla mionów, straty jonizacyjne dominują wyraźnie do energii 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

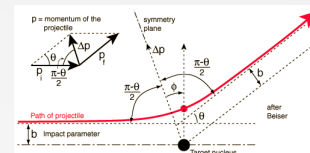
Elektrony



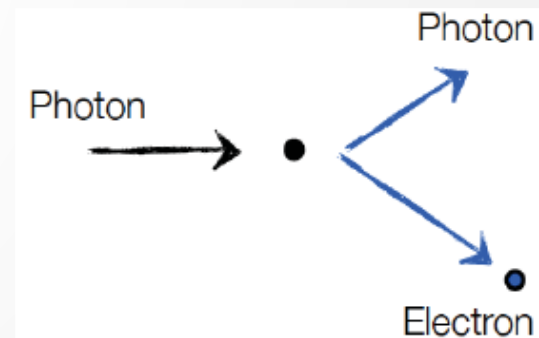
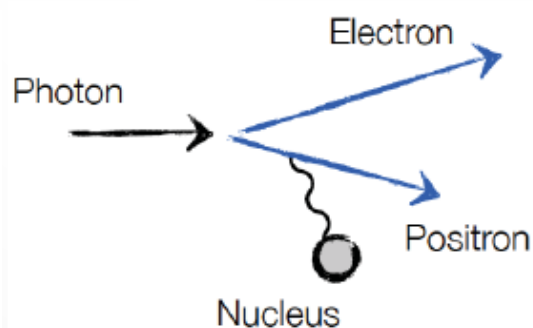
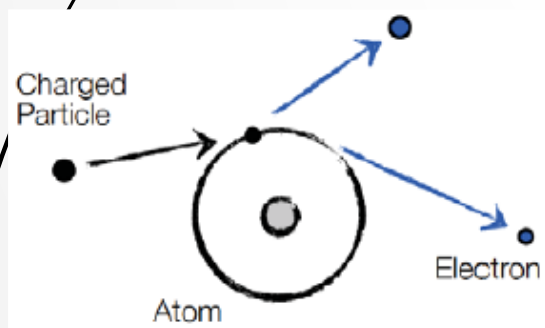
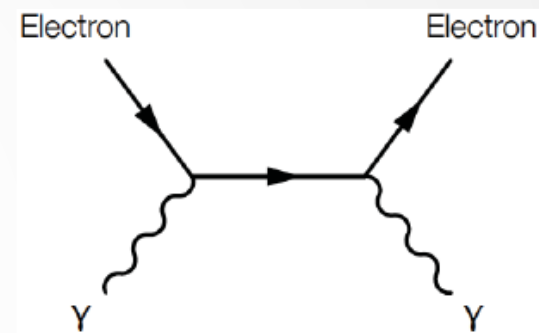
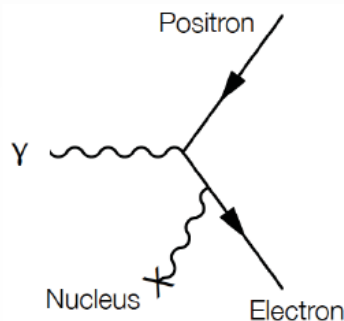
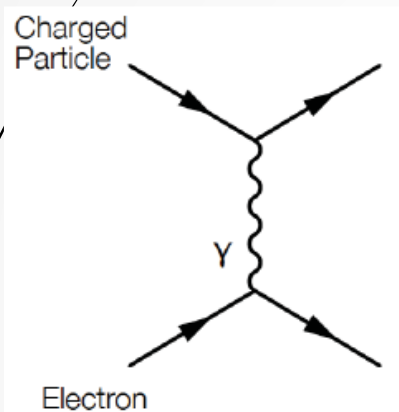
- ❑ Dla niskich energii elektrony, podobnie jak ciężkie cząstki naładowane, tracą energię głównie na drodze jonizacji
- ❑ Powyżej, tak zwanej, energii krytycznej głównym mechanizmem strat energii jest **promieniowanie hamowania** (bremsstrahlung)
- ❑ W zasadzie, elektrony „zawsze są relatywistyczne” i zakładamy, że dominującym sposobem oddziaływania z materią jest dla nich promieniowanie hamowania
- ❑ Inne cząstki naładowane również podlegają temu procesowi, ale jest on **silnie tłumiony przez masę cząstek** (m_e^2 / m_μ^2)



Oddziaływania elm



- Znane procesy umożliwiające detekcję:

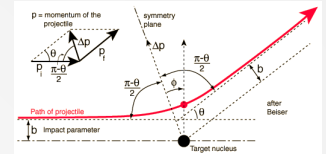


Jonizacja

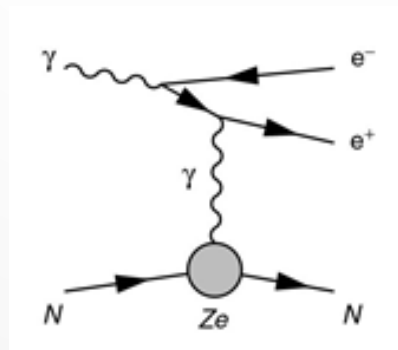
Kreacja par

Rozpraszanie Comptona

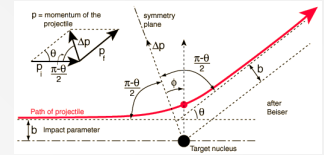
Fotony



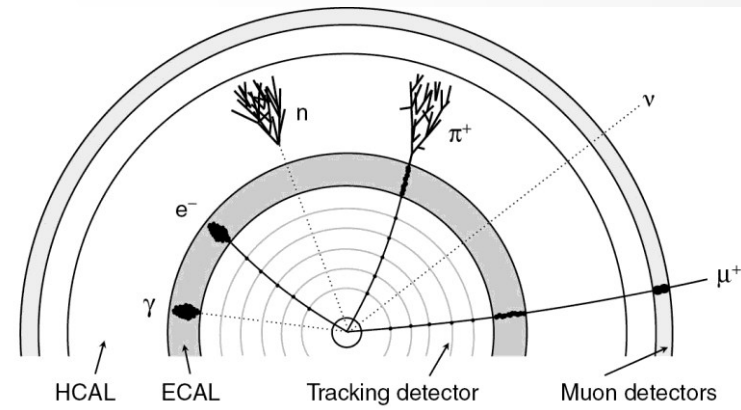
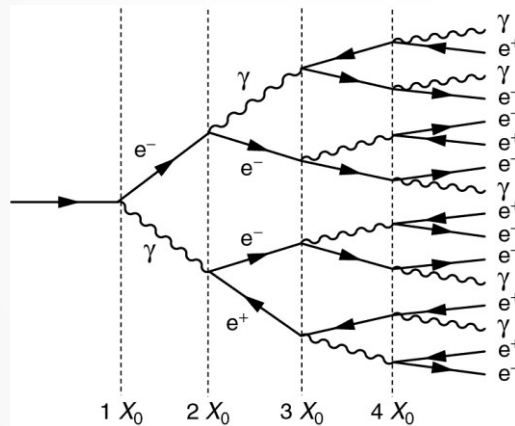
- ❑ **Trzy** główne sposoby oddziaływania – silna zależność od energii
 - ❑ **Efekt fotoelektryczny** dla fotonów o energiach $\sim keV$ (maksymalna energia wiązań elektronów w atomach)
 - ❑ **Rozproszenie Compton'a** (kwazi-stacjonarny elektron) $\sim MeV$
 - ❑ **Dysocjacja** do pary elektron-pozyton (**kreacja par**) dominuje dla fotonów o energiach $> 10 MeV$
- ❑ Uwaga – dysocjacja fotonu może zajść jedynie w polu elektrostatycznym jądra atomowego – zasady zachowania, energia odrzutu
- ❑ Oddziaływanie elektronów i fotonów (o dużych energiach) jest opisane przez tzw. **długość radiacyjną** X_0 ($\sim cm$)



Kaskada elektromag.



- ❑ Oddziaływanie elektronów oraz fotonów z materią jest blisko ze sobą związane! Elektron emituje foton, który podlega dysocjacji do pary elektron-pozyton... itd.
- ❑ Mówimy, że w przypadku fotonów oraz elektronów mamy do czynienia z powstaniem tzw. **kaskady elektromagnetycznej**



- ❑ **Liczba cząstek** w kaskadzie **podwaja się** po przejściu **jednej długości radiacyjnej** przez cząstki tworzące ją – kaskady em. Posiadają małe rozmiary charakterystyczne $\sim 10 \text{ cm}$