



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Cząstka Higgsa w LHC

Fizyka I (Mechanika)

Wykład XIII:

- foton jako cząstka
- efekt Dopplera
- efekt Comptona
- cząstki i fale
- Informacje o egzaminie

Świat cząstek elementarnych

Model Standardowy

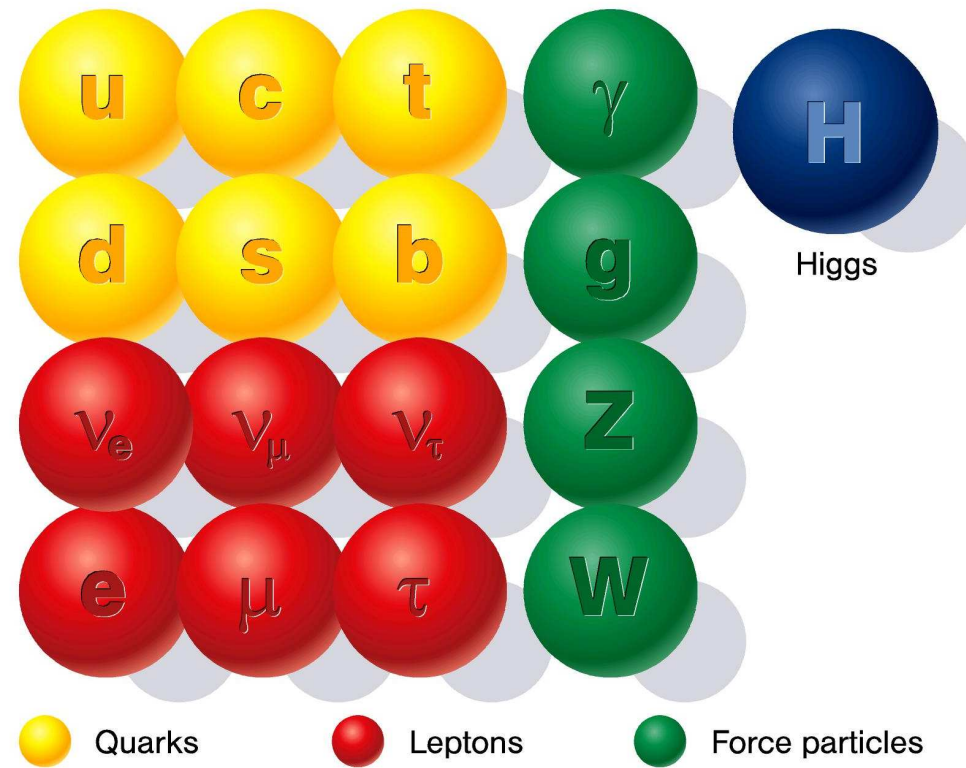
Opisuje całą naszą wiedzę doświadczalną na temat cząstek elementarnych i ich oddziaływań: elektromagnetycznych, słabych i silnych.

Cząstkami modelu są

- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^{\pm} i Z^0
- bozon Higgsa

konieczny dla spójności modelu, "Nadaje masy" wszystkim cząstkom

Ich oddziaływania opisane są w ramach tzw. kwantowej teorii pola (QFT)

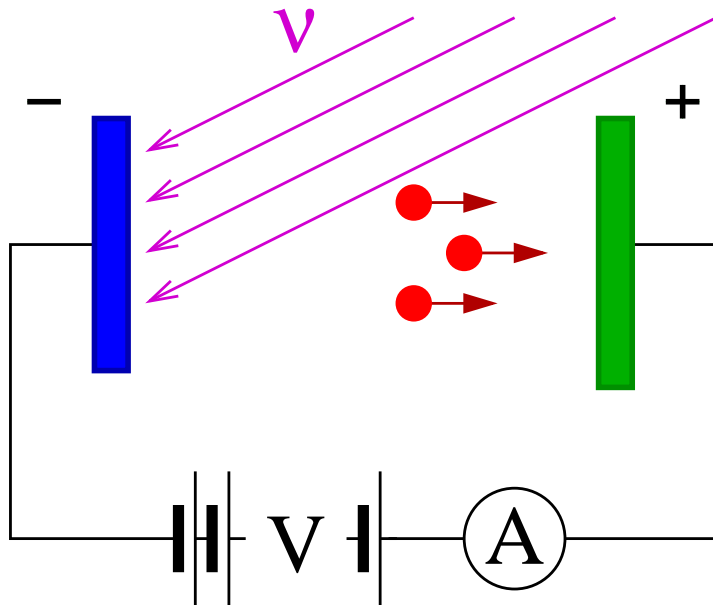


Odkrycie fotonu

Zjawisko fotoelektryczne

Odkryte przypadkowo przez Hertza w 1887 r.

Światło padając na metalową płytkę powoduje uwalnianie elektronów \Rightarrow przepływ prądu.



Doświadczenia wskazały, że energia uwolnionych elektronów zależy wyłącznie od **częstości światła** (długości fali) i **materiału katody**.

Opis falowy przewidywał, że prąd zależy wyłącznie od natężenia światła, a nie zależy od częstości!

Zjawisko fotoelektryczne wyjaśnił **Einstein (1905)** wprowadzając kwanty światła

FOTONY

Energia foto-elektronów:

$$E_e = E_\gamma - W = h\nu - W$$

W - “praca wyjścia”,
minimalna energia potrzebna do uwolnienia elektronu z metalu.

Odkrycie fotonu

Natura światła

Fotony to **kwanty** promieniowania elektromagnetycznego. Przenoszą **oddziaływania** między cząstkami naładowanymi.

Mają naturę **korpuskularno-falową**:

- **fala** elektromagnetyczna, opisana równaniami Maxwella $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$
podlega interferencji, dyfrakcji, załamaniu
- **cząstka** o ustalonej energii i pędzie, ale zerowej masie $m_\gamma \equiv 0 \Leftrightarrow \beta \equiv 1$
może zderzać się z innymi cząstkami, być pochłaniana lub rozpraszana

Im **wyższa częstość** (mniejsza długość fali) promieniowania, tym **wyższa energia** pojedynczego fotonu \Rightarrow **wyraźniejsze efekty korpuskularne**

$$E_\gamma = p_\gamma c = h \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \lambda \cdot \nu = c$$

W zjawisku fotoelektrycznym, foton “zderza się” z elektronem, $\gamma + e^- \rightarrow e^-$ (proces typu $2 \rightarrow 1$), i przekazuje mu energię konieczną do opuszczenia metalu.

Jednak foton bardzo długo nie był traktowany jak “prawdziwa” cząstka...

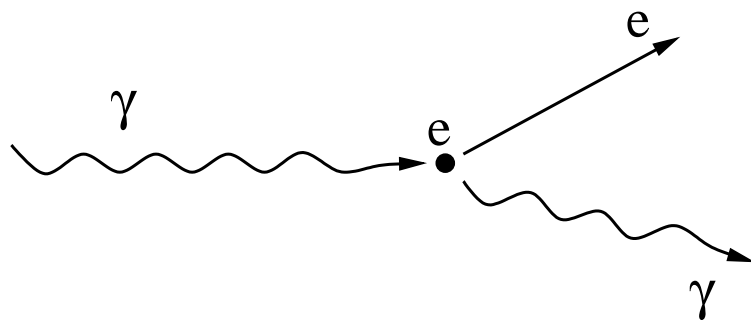
Efekt Comptona

Rozpraszanie fotonów

W wyniku rozpraszania w materii, promieniowanie X stawało się mniej przenikliwe \Rightarrow zmieniła długości fali

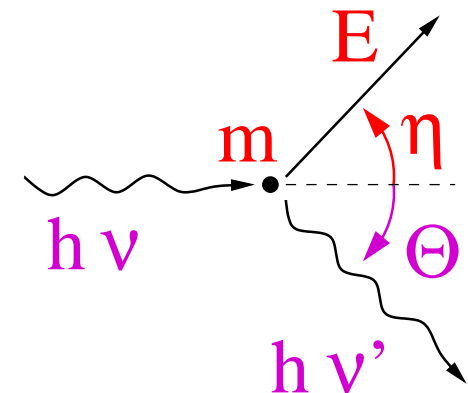
Opis tego zjawiska zaproponował w 1923 roku A.H.Compton.

Fotony promieniowania X rozpraszają się na elektronach w atomie



oddając im część swojej energii.

Relatywistyczne zderzenie dwóch ciał tak samo jak w przypadku cząstek!



Zasady zachowania:

$$E : \quad h\nu + m = h\nu' + E$$

$$p_{\parallel} : \quad h\nu = h\nu' \cos \theta + p \cos \eta$$

$$p_{\perp} : \quad 0 = h\nu' \sin \theta - p \sin \eta$$

Efekt Comptona

Przekształcając otrzymujemy:

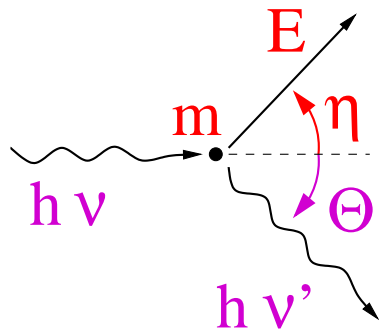
$$\begin{aligned}E &= h(\nu - \nu') + m \\ p \cos \eta &= h(\nu - \nu' \cos \theta) \\ p \sin \eta &= h\nu' \sin \theta\end{aligned}$$

Podnosząc stronami do kwadratu i zestawiając do masy elektronu:

$$\begin{aligned}m^2 &= E^2 - p^2 \\ &= (h(\nu - \nu') + m)^2 - h^2 (\nu - \nu' \cos \theta)^2 - (h\nu' \sin \theta)^2 \\ &= m^2 + h^2\nu^2 + h^2\nu'^2 - 2h^2\nu\nu' + 2mh(\nu - \nu') \\ &\quad - h^2\nu^2 + 2h^2\nu\nu' \cos \theta - h^2\nu'^2 \cos^2 \theta - h^2\nu'^2 \sin^2 \theta \\ \Rightarrow m h\nu &= h\nu' (m + h\nu(1 - \cos \theta)) \\ h\nu' &= \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m}(1 - \cos \theta)}\end{aligned}$$

Efekt Comptona

Wzór Comptona



$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$\nu' = \frac{\nu}{1 + \frac{h\nu}{m}(1 - \cos \theta)}$$

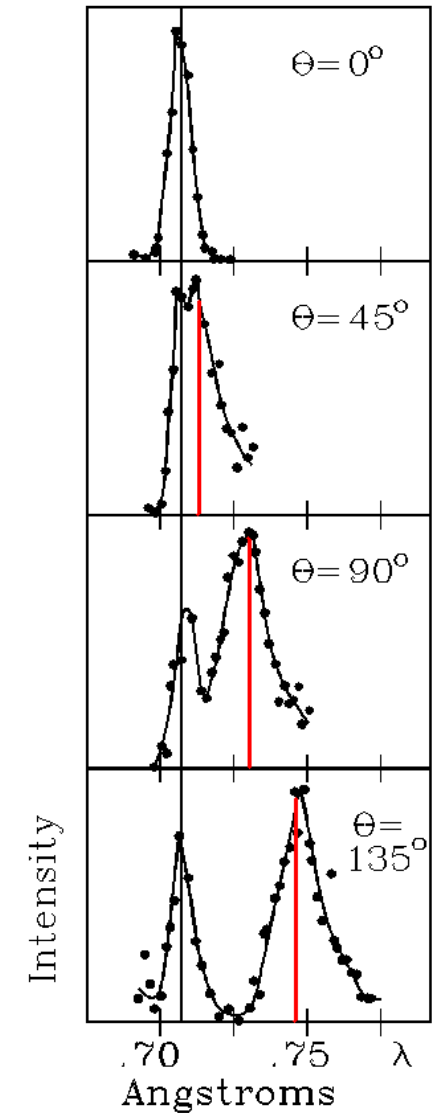
$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m c}(1 - \cos \theta)$$

$$\Delta\lambda = \lambda_c \cdot (1 - \cos \theta)$$

Comptonowska długość fali:

$$\lambda_c = \frac{h}{m c} = 2.43 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 2.43 \text{ pm}$$

odpowiada przesunięciu przy rozproszeniu pod kątem 90°



Efekt Comptona

Małe energie fotonów

W granicy małych energii fotonu $h\nu \ll m$

$$h\nu' = h\nu \frac{m}{m + h\nu(1 - \cos\theta)} \approx h\nu$$

⇒ foton rozprasza się bez straty energii.

Odpowiada to klasycznemu zderzeniu “pocisku”, m_1 , z dużo cięższą “tarczą”, $m_2 \gg m_1$.

Foton zachowuje energię, ale **zmienia się wektor pędu** (kierunek !)

Przykład: odbicie światła widzialnego
 $h\nu = 1.8 - 3.1 eV$ (700 nm - 400 nm)

Energia rozproszonego elektronu:

$$\begin{aligned} E &= h\nu - h\nu' + m \\ &= \frac{h\nu(h\nu + m)(1 - \cos\theta) + m^2}{h\nu(1 - \cos\theta) + m} \end{aligned}$$

W granicy $h\nu \ll m$:

• energia elektronu:

$$E \approx m$$

• pęd rozproszonego elektronu:

$$p \approx h\nu \sqrt{2(1 - \cos\theta)}$$

Efekt Comptona

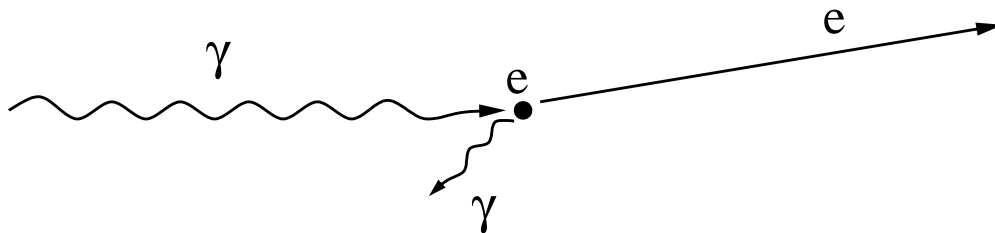
Duże energie fotonów

W granicy dużych energii fotonu $h\nu \gg m$ (przyjmując $\cos \theta \neq 1$, czyli $\theta \neq 0$)

$$h\nu' \approx \frac{m}{1 - \cos \theta} \rightarrow 0$$

$$E \approx h\nu + m$$

\Rightarrow foton przekazuje **spoczywającemu** elektronowi praktycznie całą swoją energię



Odpowiada to klasycznemu zderzeniu ciał o równych masach (zakładając zderzenie centralne i elastyczne)

Dla $h\nu \gg m$ masę elektronu można pominąć - **elektron**, tak jak foton, można traktować jako **cząstkę bezmasową**.

Efekt Comptona

Rozpraszanie do tyłu

W rozpraszaniu na spoczywającym elektronie najniższą energię będzie miał foton rozproszony “do tyłu” ($\cos \theta = -1$):

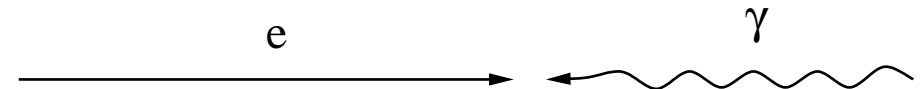
$$h\nu' = \frac{h\nu \cdot m}{2h\nu + m} < h\nu$$

To, że foton zawsze traci energię związane jest jednak z wyborem układu odniesienia!

(układ związany z początkowym elektronem)

Rozpraszanie na wiązce elektronów

Możemy jednak rozważyć rozpraszanie fotonów o energii $h\nu$ na przeciwbieżnej wiązce elektronów o energii $E_e \gg m$.



Transformacja Lorentza do układu elektronu:

$$\gamma = \frac{E_e}{m}$$
$$\beta \approx 1$$

Energia fotonu w układzie elektronu:

$$h\nu^* = \gamma(1 + \beta)h\nu$$
$$\approx \frac{2E_e}{m} \cdot h\nu \gg h\nu$$

Photon Collider

Rozpraszanie na wiązce elektronów

Przyjmijmy, że foton rozprasza się “do tyłu” ($\cos \theta = -1$). Energia rozproszonego fotonu w układzie elektronu:

$$h\nu^{*'} = \frac{h\nu^* \cdot m}{2h\nu^* + m} \\ \approx \frac{2E_e h\nu \cdot m}{4E_e h\nu + m^2}$$

Wracając do układu laboratoryjnego: (transformacja taka sama, bo pęd foton zmienił kierunek)

$$h\nu' \approx \frac{2E_e}{m} \cdot h\nu^{*'}$$

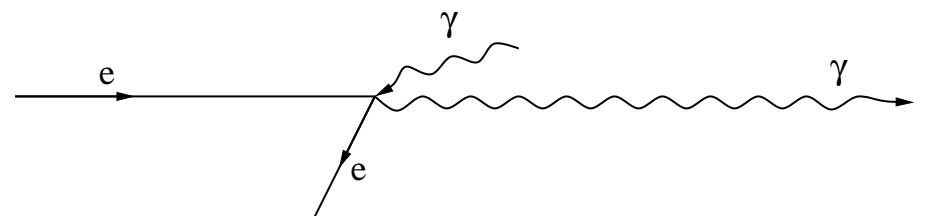
Otrzymujemy:

$$h\nu' \approx E_e \cdot \frac{4E_e h\nu}{4E_e h\nu + m^2}$$

Wysokie energia wiązki, $4E_e h\nu \gg m^2$

⇒ elektron może przekazać fotonowi

większość swojej energii.



Przykład: dla $E_e = 250\text{GeV}$ i $h\nu = 1\text{eV}$
 $h\nu' \approx 200\text{GeV}$

Efekt Dopplera

Klasycznie mamy dwa przypadki:

Ruchome źródło

Źródło o częstości ν poruszające się z prędkością v względem ośrodka. Częstość dźwięku mierzona przez nieruchomego obserwatora

$$\nu' = \frac{\nu}{1 + \frac{v}{c}}$$

Ruchomy obserwator

Obserwator porusza się z prędkością v względem ośrodka i źródła dźwięku

Mierzona częstość:

$$\nu' = \nu \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

Jeśli źródło i/lub obserwator poruszają się z dużymi prędkościami

⇒ należy uwzględnić dylatację czasu

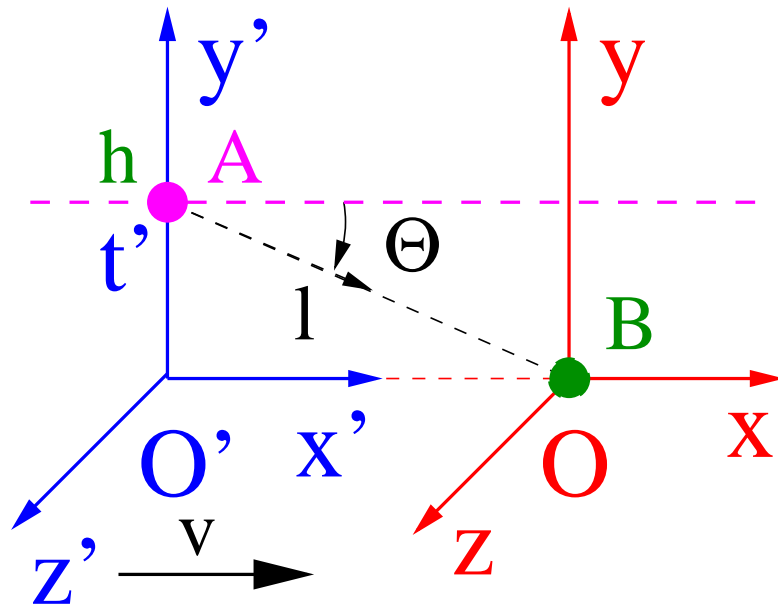
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta)(1 + \beta)}}$$

⇒ Pełna symetria !

$$\nu' = \nu \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}$$

Efekt Dopplera

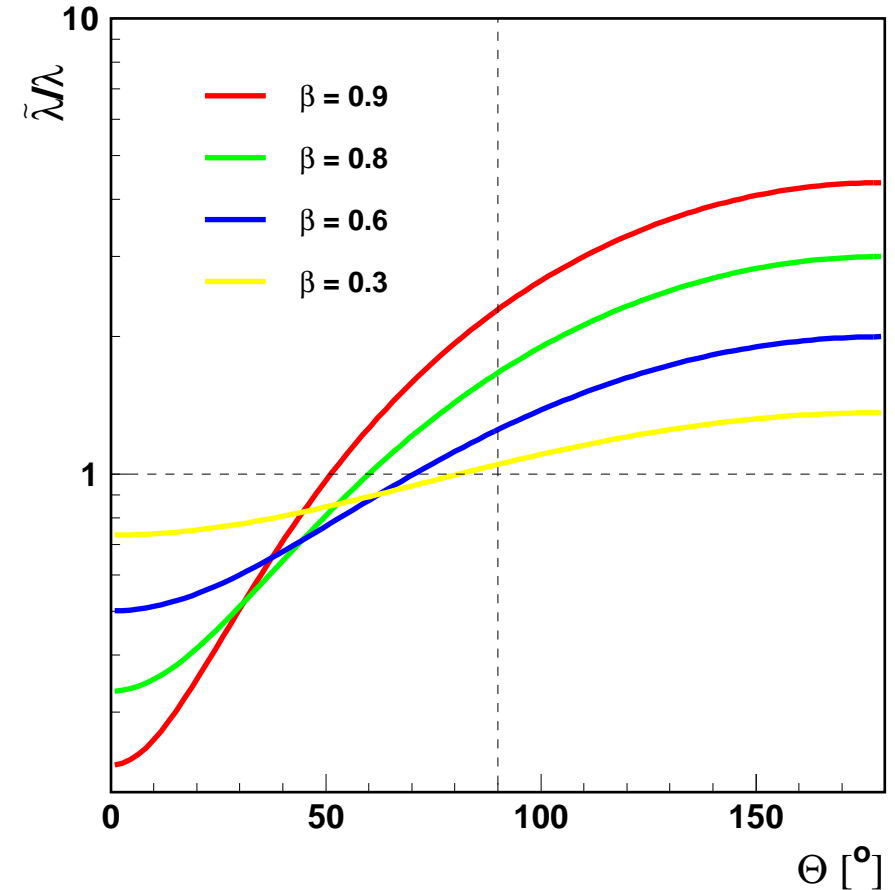
Przypadek ogólny



Przesunięcie długości fali:

$$\begin{array}{l} \text{mierzona} \\ \text{emitowana} \end{array} \frac{\tilde{\lambda}}{\lambda} = \frac{\tilde{T}}{T} = \gamma(1 - \beta \cos \Theta)$$

Θ - rejestrowany w O kąt lotu fotonu (!)
 $(\pi - \Theta)$ - kierunek obserwacji

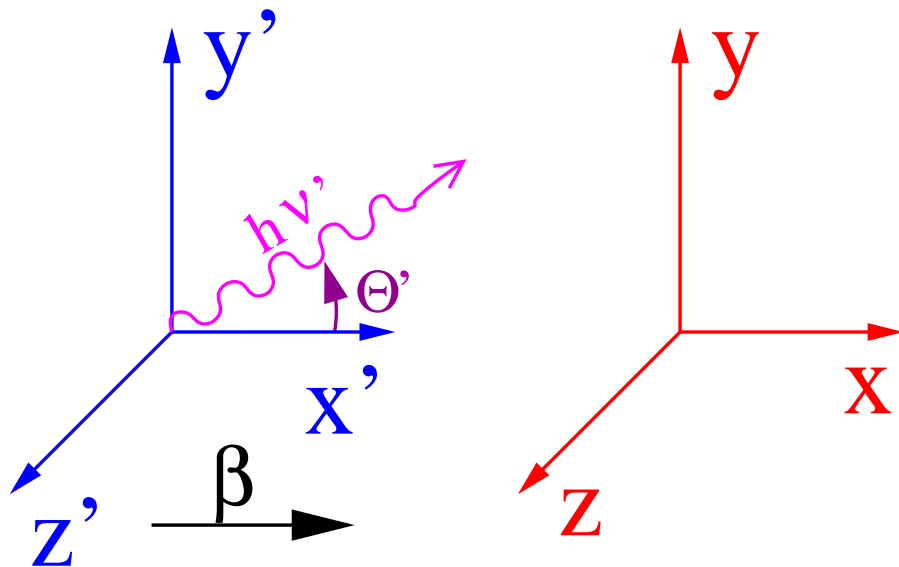


Zmiana częstości także dla $\Theta = 90^\circ$!!!
 Klasycznie nie ma zmiany częstości...

Efekt Dopplera

Alternatywne podejście

Wyrażenia na **relatywistyczny efekt Dopplera (dla światła)** wynikają wprost z **transformacji Lorentza** !



W układzie O' foton emitowany jest pod kątem θ' do osi X' :

$$\begin{aligned} E' &= h\nu' \\ c p'_x &= h\nu' \cos \theta' \\ c p'_y &= h\nu' \sin \theta' \\ c p'_z &= 0 \end{aligned}$$

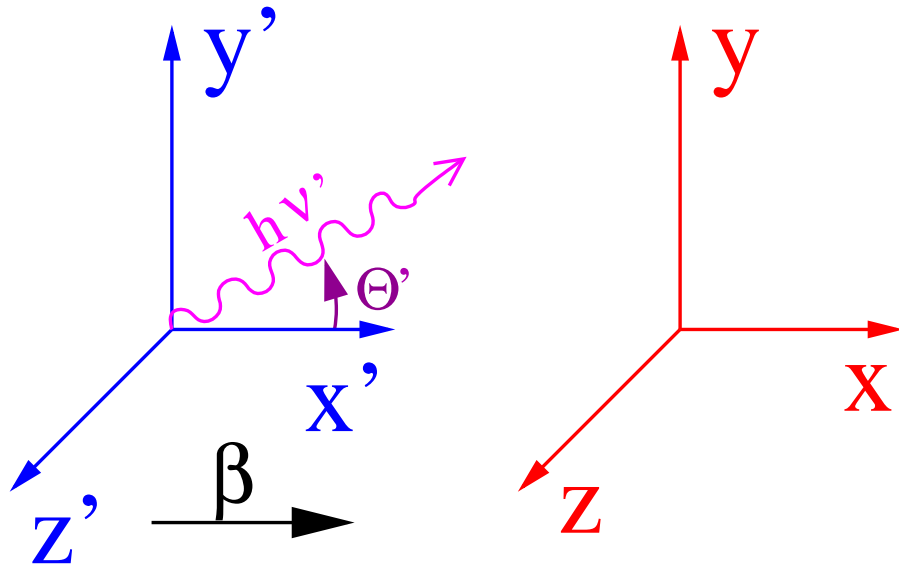
W układzie O , z transformacji Lorentza:

$$\begin{aligned} h\nu = E &= \gamma E' + \beta \gamma p'_x \\ &= h\nu' \gamma (1 + \beta \cos \theta') \end{aligned}$$

Efekt Dopplera

Alternatywne podejście

Wyrażenia na relatywistyczny efekt Dopplera (dla światła) wynikają wprost z transformacji Lorentza !



Otrzymujemy:

$$\nu = \nu' \gamma (1 + \beta \cos \theta')$$

Dla $\theta' = 0$ mamy:

$$\nu = \nu' \frac{1 + \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \nu' \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}$$

częstość (energia) rośnie

Dla $\theta' = \pi$ mamy:

$$\nu = \nu' \frac{1 - \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \nu' \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}$$

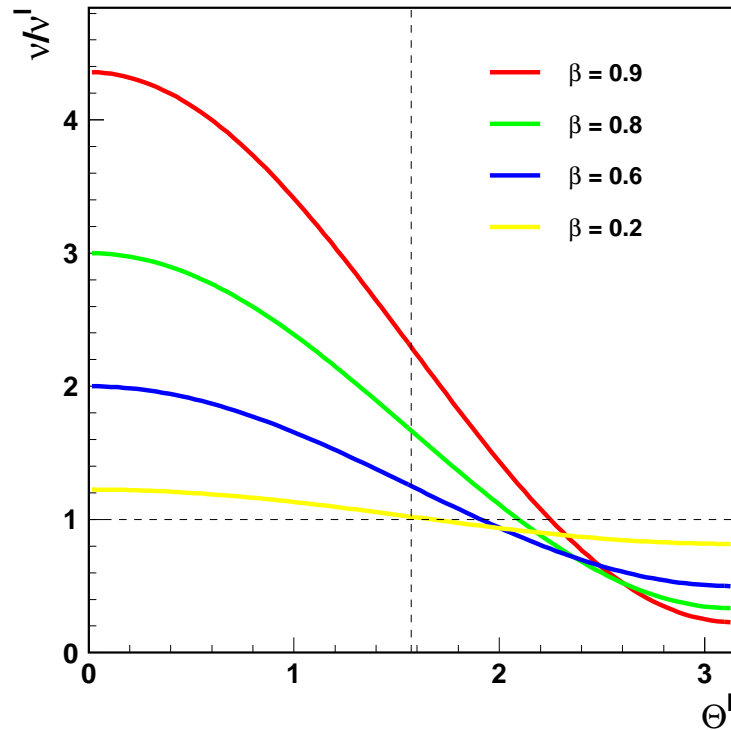
częstość (energia) maleje

Efekt Dopplera

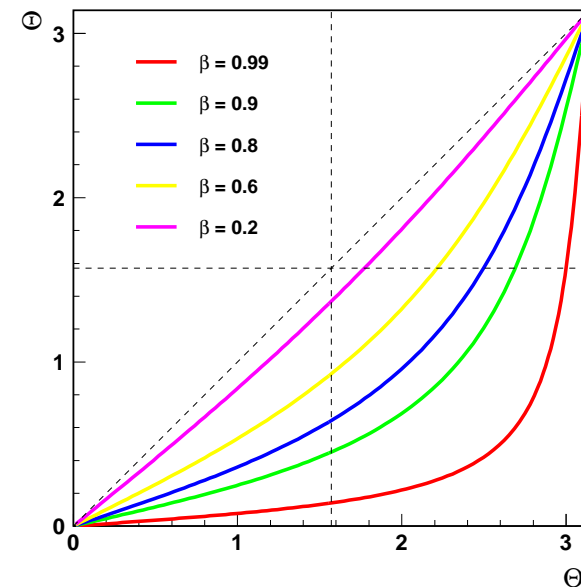
Rozkłady kątowe

Zależność częstości od kąta **emisji**

Obserwowany kąt lotu fotonu:



$$\cos \theta = \frac{p_x}{E} = \frac{\beta + \cos \theta'}{1 + \beta \cos \theta'}$$



Dla $\theta' = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \nu = \gamma \nu' > \nu'$
poprzeczny efekt Dopplera

Dla $\theta' = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \cos \theta = \beta \Rightarrow \theta < \frac{\pi}{2}$

Izotropowe promieniowanie szybko poruszającego się ciała jest skolimowane w kierunku ruchu...

Efekt Dopplera

Rozkłady kątowe

Mamy:

$$\nu = \nu' \gamma (1 + \beta \cos \theta')$$

Możemy jednak zastosować odwrotną transformację Lorentza ($\beta \leftrightarrow -\beta$)

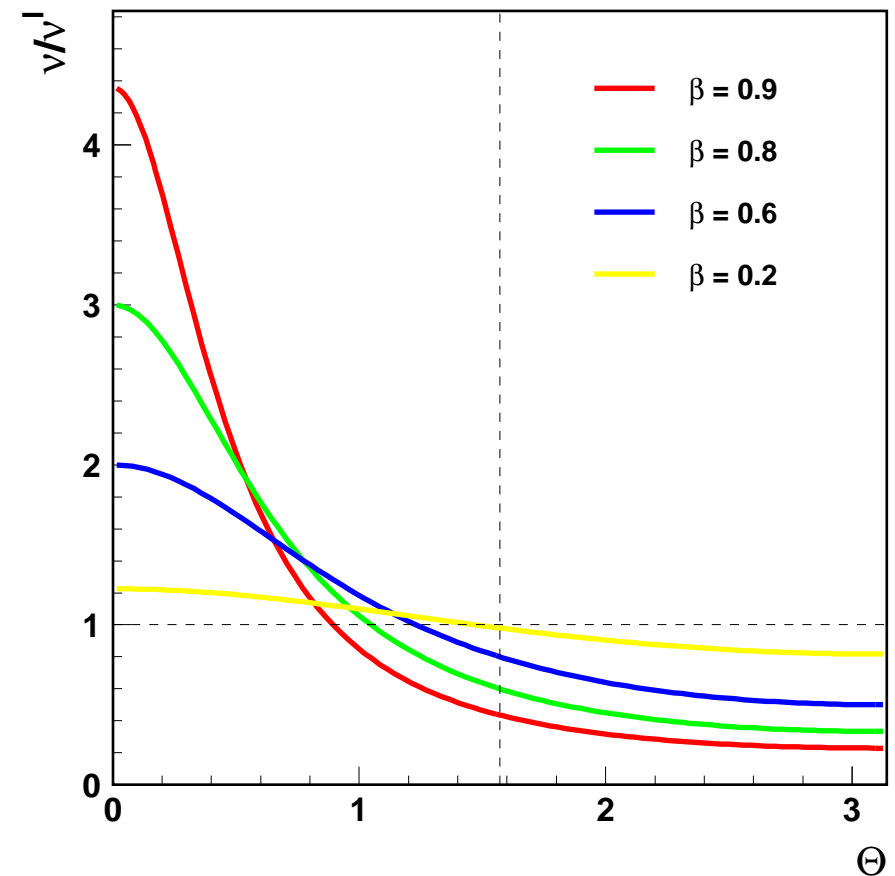
\Rightarrow energia w funkcji kąta **detekcji**:

$$\nu = \frac{\nu'}{\gamma (1 - \beta \cos \theta)}$$

Fotony rejestrowane pod kątem $\theta = \frac{\pi}{2}$ mają

częstość: $\nu = \frac{\nu'}{\gamma} < \nu'$!!!

Zależność częstości od kąta **detekcji**



Podsumowanie wykładu

Najważniejsze elementy wykładu.

Co staraliśmy się Państwu pokazać/przekazać:

- uniwersalność praw fizyki \Leftrightarrow względność opisu
musimy zawsze sprawdzić warunki stosowalności przyjętego modelu
- prostotę równań ruchu
Dla fizyka są najważniejsze. Rozwiązywanie ich to już matematyka...
- potęgę praw zachowania
Dzięki nim możemy znacznie uprościć rozważane zagadnienia...
- prostota i piękno transformacji Lorentza
spójność opisu mimo wielu pozornych paradoksów
nie można być fizykiem nie rozumiejąc szczególnej teorii względności !
- związki z fizyką współczesną
Mechanika jest “fundamentem” całej fizyki...

Podsumowanie wykładu

Najważniejsze zagadnienia wymagane na egzaminie ustnym:
(na ocenę **dostateczną** i **dobrą**)

Wprowadzenie i Kinematyka

- Układ jednostek SI, jednostki pochodne
- Błędy pomiarowe
- Ruch, prędkość, przyspieszenie
- Ruch jednostajny, jednostajnie przyspieszony
- Ruch harmoniczny
- Ruch po okręgu

Podsumowanie wykładu

Równania ruchu

- Zasady dynamiki w ujęciu Newtona
- Pojęcie układu inercjalnego
- Równania ruchu i zasada przyczynowości
rozwiązywanie prostych przykładów
- Ruch w jednorodnym polu elektrycznym i magnetycznym
- Opory ruchu
- Więzy
- Wahadło matematyczne
- Układy nieinercjalne, siła odśrodkowa i siła Coriolisa

Podsumowanie wykładu

Prawa zachowania

- Zasady zachowania pędu i momentu pędu
- Zderzenia niesprężyste
- Siły zachowawcze i zasada zachowania energii
- Zderzenia elastyczne
- Prawa Keplera, tory ruchu w polu sił centralnych
- Ruch ciała o zmiennej masie
- Zderzenia niecentralne
- Doświadczenie Rutherforda

Podsumowanie wykładu

Bryła sztywna

- Równowaga bryły sztywnej
- Dynamika ruchu wokół ustalonej osi:
moment bezwładności, równania ruchu, energia ruchu,
rozwiązywanie prostych zagadnień, np. walec na równi pochyłej
- Żyroskop i precesja
- Tensor momentu bezwładności, osie główne

Podsumowanie wykładu

Szczególna Teoria Względności

- Transformacja położenia i czasu
- Dylatacja czasu i skrócenie Lorentza
- Interwał czasoprzestrzenny i przyczynowość
- Pęd i energia cząstki relatywistycznej
- Transformacja energii i pędu, masa niezmiennicza
- Wykres Minkowskiego
- Paradoks bliźniąt
- Zderzenia relatywistyczne, rozpady cząstek
- Foton jako cząstka, efekt Dopplera

Egzamin

Uzyskanie pozytywnej oceny końcowej z wykładu możliwe jest po pozytywnym zaliczeniu części rachunkowej i zdaniu egzaminu **teoretycznego**.

Część rachunkowa

Zaliczenie części rachunkowej odbywa się na podstawie **obecności** na ćwiczeniach, dwóch kolokwiów, punktów z kartkówek i części rachunkowej egz. pisemnego.

- **Dopuszcza się maksymalnie 5 nieobecność na ćwiczeniach.**
- W ramach kolokwiów: po 3 zadania rachunkowe, maksymalnie po 5 punktów.
- Na ćwiczeniach: 10 kartkówek, maksymalnie 10 punktów.

Dopuszczenie do egzaminu pisemnego: łącznie przynajmniej 15 punktów (na 40).

- Egzamin pisemny: 4 zadania rachunkowe, maksymalnie po 5 punktów.

Do zaliczenia konieczne jest uzyskanie łącznie przynajmniej 25 punktów.

Egzamin

Egzamin pisemny

W dniu **3 luty 2014**, godz. **9⁰⁰ – 14⁰⁰**,
Sala Duża Doświadczalna + Aula (Hoża)

Lista osób dopuszczonych do egzaminu będzie wywieszona w internecie.
Informacja o zaliczeniu ćwiczeń będzie też w systemie USOS.

Bardzo prosimy o wcześniejsze sprawdzenie przydzielonej sali i punktualne przybycie!

Egzamin będzie się składał z dwóch części:

- test “teoretyczny” \Rightarrow 45 minut
krótka przerwa
- 4 zadania rachunkowe \Rightarrow 3 godziny 30 minut

Egzamin

Test “teoretyczny” tak jak na kolowjach

30 pytań z materiału przedstawionego na wykładach
(teoria, wzory, proste problemy rachunkowe)

W miarę możliwości równomiernie rozłożonych tematycznie (2-3 pytania na wykład)

Do każdego pytania 4 odpowiedzi, z czego **dokładnie jedna** prawidłowa.

Punktacja:

- dobra odpowiedź $\Rightarrow +1$
- zła odpowiedź $\Rightarrow -0.5$ (losowe skreślanie nie opłaca się)

Zadania rachunkowe tak jak na kolowjach

4 zadania z całego materiału przerabianego na ćwiczeniach

Materiał obowiązujący do obu kolokwiów (3 zadania)

+ dynamika relatywistyczna (1 zadanie)

Egzamin

Zaliczenie części rachunkowej

Do egzaminu pisemnego dopuszczone będą tylko te osoby, które z kolokwiów uzyskały przynajmniej 15 punktów.

W przeciwnym wypadku, część rachunkowa egzaminu pisemnego będzie traktowana jako kolokwium poprawkowe (osoby te nie piszą testu).

W obu przypadkach warunkiem jest też wymagana obecność na ćwiczeniach.

Do zaliczenia części rachunkowej konieczne jest uzyskanie łącznie (kolokwia + część rachunkowa egzaminu) przynajmniej 25 punktów.

Zaliczenie części rachunkowej jest niezbędne do zdania egzaminu!

Osoby, które z kolokwiów uzyskały nie mniej niż 15 punktów, ale miały zbyt dużo nieobecności na ćwiczeniach będą dopuszczone do egzaminu w sesji poprawkowej.

Egzamin

Po porównaniu wyników części rachunkowej (+kolokwia)
oraz wyniku testu (+ testy kolokwialne) ⇒ propozycja oceny

Egzamin ustny 6 i 7 lutego,

Tylko dla osób, które zaliczyły część rachunkową,
w przypadku gdy:

- wyniki nie pozwalają na jednoznaczną ocenę
lub
- chcą poprawić zaproponowaną ocenę
poprawiając wyniki testu teoretycznego
- nie ma możliwości poprawienia oceny w przypadku
złych wyników obu części (rachunkowej i teoretycznej)

Egzamin poprawkowy

Egzamin pisemny

W dniu 3 marca 2014 (poniedziałek), godz. 8⁰⁰ – 12⁰⁰

Organizacja jak w pierwszym terminie...

Egzamin ustny

Prawdopodobnie 6 i ew. 7 marca...



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej
w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego