

Wszechświat cząstek elementarnych

WYKŁAD 4 10.III.2010



Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

Spin

- historia odkrycia

- fermiony i bozony

- spin cząstek fundamentalnych

Oddziaływanie słabe i rodziny cząstek fundamentalnych

Siły

- porównania oddziaływań

- stałe sprzężenia

Diagramy Feynmana

Spin - jeszcze jedna liczba kwantowa

- Spin – własny moment pędu (spin=kręt)

like spinning tennis ball

(formalnie opis jak dla orbitalnego momentu pędu L)

Te 'obroty' mogą być tylko pewnego typu → są **skwantowane**. Każda cząstka elementarna ma określoną wartość spinu (→ **s spinowa l. kwantowa**)

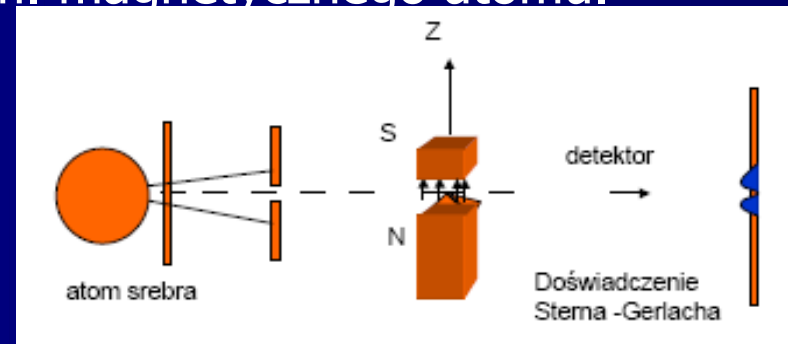
- Kierunek 'osi obrotu' może się zmienić → stany o różnych rzutach **wektora spinu** na wybraną oś (liczba różnych stanów spinowych wynosi **$2s+1$**)
- Przyjmując pewną jednostkę spinu ($\hbar = h/2\pi$) - spiny cząstek elementarnych mogą przyjmować jedynie wartości będące krotnością $\frac{1}{2}$ (**$s = 0, 1, 3/2 \dots$**).

Struktura subtelna linii wodoru: lata 1916-26

A. Sommerfeld – w 1916 opisał ruch elektronu w atomie z uwzględnieniem szczególnej teorii względności (wprowadził „stałą struktury subtelnej” - oddz. elektronu z fotonem). Przewidział **moment magnetyczny atomów** (ruch elektronu po orbicie → mom. magnetyczny dla atomu w polu magn.)

i **tylko dwa możliwe ustawienie wektora** mom. magnetycznego atomu.

Doświadczenie Sterna-Gerlacha 1921 – potwierdziło przewidywania Sommerfelda.



A inni?

- A. H. Compton – postulat 'quantized electron rotation' (1918-21)
- R. Kronig (jako doktorant) – zaproponował spin kilka miesięcy przed Goudsmitem i Uhlenbeckiem 1925 ale został zniechęcony przez Pauliego przed publikacją (*'it is indeed very clever but of course has nothing to do with reality'*)
- W 1926 poprawne relatywistyczne obliczenia wykonał L. H. Thomas i Pauli uwierzył...
- W 1925-6 Goudsmit i Uhlenbeck – hipoteza spinu

http://www.mif.pg.gda.pl/homepages/maria/pdf/NM_3.pdf

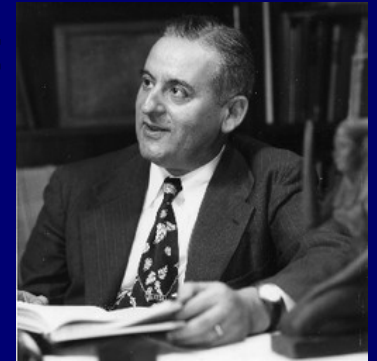
Dziś – **spinotronika** (w kierunku kwantowego komputera)

Odkrycie spinu elektronu: 1925-26



<http://www.ilorentz.org/history/spin/goudsmit.html>

Z Phys. Rev. Letters <http://prl.aps.org/edannounce/PhysRevLett.101.010002>,
(PRL to pismo, które utworzył Goudsmit w roku 1958):



'Goudsmit - while still a graduate student,
he and his fellow student George E. Uhlenbeck
hypothesized that the electron possessed angular momentum
– that is, spin – in addition to mass and charge.

Their motivation was to explain the mystery of doublet and
higher order spectral line splitting.

Their insight furnished a missing link leading to the final
triumph of the then-struggling birth of quantum mechanics.'

Odkrycie spinu elektronu

<http://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/spin/goudsmit.html>



Leiden 1924. From left to right: Dieke, Goudsmit, Tinbergen, Ehrenfest, Kronig, Fermi.
Note: Tinbergen later changed from physics to economy and became the first Nobel laureate in economy (1969).

Fermiony i bozony

- Cząstki o spinie połówkowym → **fermiony**
 - fermiony podlegają statystyce Fermiego-Diraca
 - wykluczenie (zakaz) Pauliego (1925):
dwa fermiony nie mogą znajdować się w tym samym stanie kwantowym
(to tłumaczy budowę atomów – ile elektronów może się zmieścić, czyli ile różnych stanów elektronów, na kolejnych powłokach)
- Cząstki o spinie całkowitym → **bozony**
 - statystyka Bosego-Einsteina
 - im więcej bozonów tym lepiej *(laser, kondensaty)*

Spin cząstek fundamentalnych

- Kwarki i leptony (fermiony) – spin $\frac{1}{2}$
- Nośniki oddziaływań (bozony) :
foton, gluony, bozony W i Z – spin 1
- Spin 0?? – cząstka Higgsa?

Cząstki o spinie 1 – bozony (wektorowe)

Nazwa	symbol	ład. el.	masa
Bozon	W^+	+ 1	80.4 GeV
Bozon	W^-	- 1	80.4 GeV
Bozon	Z	0	91.2 GeV
Foton	γ	0	0
Gluony(8)	g	0	0

(inna nazwa - bozony pośredniczące)

- W^\pm są wzajemnie dla siebie antycząstkami
- γ i Z – są własnymi antycząstkami
- gluon_a \bar{b} antycząstką do gluonu \bar{ab}
(a, b – kolory)
- Hipotetyczny grawiton – spin 2, ład. el. 0, masa 0 (własna antycząstka)

Lewe i prawe cząstki o spinie 1/2

Lewa (lewo-ręczna) cząstka (*left-handed*)



Lewa ? Ale to jest względne (tak, to jest wynik teorii względności!) bo jak minę taką cząstkę (wektor pędu zmienia się na przeciwny) to stanie się ona **prawa** (pravo-ręczną) cząstką. Więc jak jest lewa cząstka to i prawa cząstka musi istnieć → dwa stany cząstki masywnej o spinie 1/2.

Gdy masa cząstki jest równa zero ten argument nie działa!

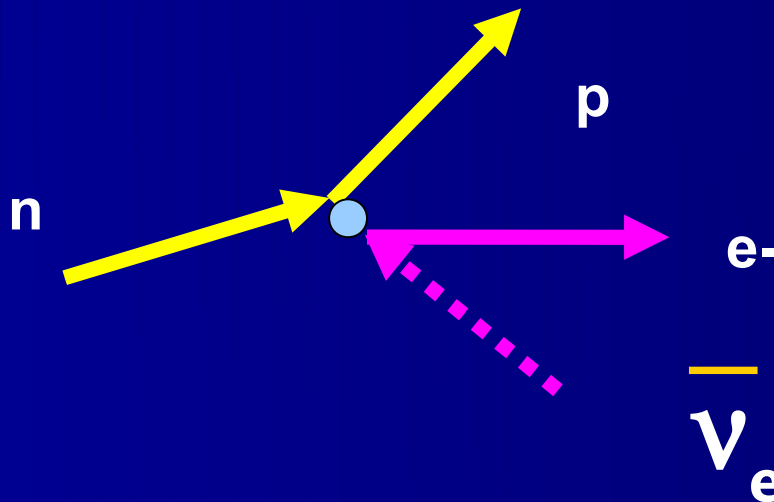
Bezmasowe neutrino - lewe, a antyneutrino - prawe

Oddziaływanie słabe

Cząstki (p i n) oraz (neutrino elektronowe i elektron) często występują w parach (*duplety*)

np. w rozpadzie neutronu

Odkrycie, Becquerel 1896
radioaktywność β

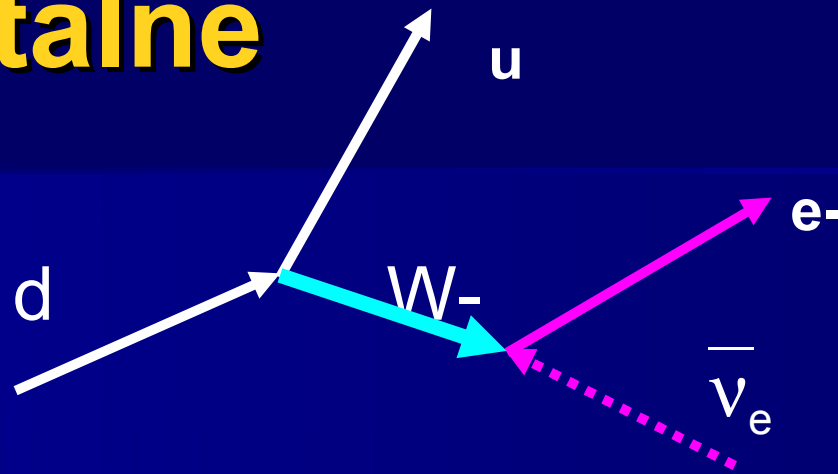


Odpowiedzialne siły są zwane oddz. **słabymi**.

Fermi w 1934 \rightarrow teoria (*sprzężenie punktowe, 4-fermionowe*)

Oddziaływania słabe fundamentalne

Rozpad β



$d \rightarrow u W^-$ i $W^- \bar{\nu}_e \rightarrow e^-$ opisuje stała sprzężenia g (g - „ładunek słaby”) $\alpha_w = g^2/4 \pi = 1/32$ **większa** niż odpowiednie stała sprzężenia dla oddz. elektromagnetycznych e (e -ładunek el.)

$$\alpha_{em} = e^2/4 \pi = 1/137 \text{ (stała struktury subtelnej).}$$

A jednak to słabe jest **słabsze**, bo wymiana masywnej cząstki W kosztuje

Umowa dotycząca diagramu: strzałki na liniach zgodnie z pędem dla fermionów, a dla antyfermionów strzałka przeciwna do pędu;

Pierwsza rodzina =

dwa lekkie dublety fermionów o spinie 1/2

Kwarki	o ład. el.	2/3	u (3 kolory)
		-1/3	d (3 kolory)
Leptony		0	ν_e
		-1	e

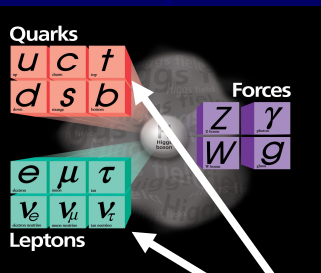
Oczywiście istnieje też pierwsza antyrodzina
np. dublet antyleptonowy:

	ład. el.	
	+1	\bar{e}
	0	$\bar{\nu}_e$

Uwaga: W Modelu Standardowym neutrina bezmasowe, ale ostatnie (lata 2001-2) doświadczenia wskazują, że neutrina mają *niezerową masę* ...

3 rodziny

(inaczej pokolenia, generacje)



- To jest tablica cząstek fundamentalnych.
Rodziny (duplety fermionów o spinie 1/2) są uporządkowane ze względu na masy:
I rodzina - najmniejsze masy, III - największe
(Tablica - jak tablica atomów Mendelejewa, ale tu bez głębszej zasady i regularności)
- Skąd te masy ? Nie wiemy – mamy tylko hipotezy
np. mechanizm Brouta-Englerta-Higgsa
- Czy są dalsze generacje ?
Doświadczenie: raczej nie, o ile neutrina lekkie.
Teoria: ?

Siły - porównania

Makroskopowo występują dwie siły:

elektromagnetyczna i grawitacyjna

→ duży zasięg w porównaniu z rozmiarem nukleonu

W mikroświecie: dodatkowo siły jądrowe i słabe:

- siły **jądrowe**, które wiążą nukleony (**wymiana pionów**) o zasięgu 10^{-13} cm = 10^{-15} m;

siły jądrowe fundamentalne (kolorowe), które działają między kwarkami (wymiana gluonów), zasięg podobny

- siły **słabe** – rozpad neutronu, zasięg jeszcze mniejszy niż dla sił jądrowych (*teoria Fermiego: oddziaływanie punktowe*);

siły słabe fundamentalne działają między kwarkami i leptonami poprzez wymianę bozonów W / Z

Siły →

oddziaływania w mikroświecie

- Oddziaływania = emisja i pochłanianie bozonów (foton, W/Z, gluon..), wymiana cząstek
- Porównanie: wg „siły” (*strength*) inaczej „natężenia”:
grawitacyjne i el-mag – bardzo różne
grawitacja b. słaba, np. dwa protony oddziałują 10^{36}
silniej elektromagnetycznie niż grawitacyjnie
(tylko dla dużych obiektów grawitacja ważna)

Uporządkowanie wg „siły” oddz. dla *niskich** energii:

silne > elektromagnetyczne > słabe > grawitacyjne

* *niskie energie 1 GeV, aż do około 100 GeV*

„Siła” oddziaływania: stałe sprzężenia

Parametr opisujący elementarny akt oddziaływania np.

$$e^- \rightarrow e^- \gamma, \quad e^- \gamma \rightarrow e^-$$

$$e^- \rightarrow \nu_e W^-, \quad \nu_e \rightarrow e^- W^+$$

$$d \rightarrow u W^-, \quad t \rightarrow b W^+$$

$$d \rightarrow d Z, \quad Z \rightarrow \nu \bar{\nu}$$

$$u_r \rightarrow u_g + g_{r,\text{anti-g}} \quad (r=\text{red}, g = \text{green})$$

→ stała sprzężenia

(prawdopodobieństwo oddziaływania dla energii 1 GeV):

el-m e $(\alpha = \alpha_{\text{el}} = e^2/4\pi = 1/137)$

słabe fund. (weak fund.) g $(\alpha_w = g^2/4\pi = 1/32)$

silne (strong, color) g_s $(\alpha_s = g_s^2/4\pi = 1)$

Zasięg oddziaływania

- **Zasięg** (z zasady Heisenberga, idea Yukawy) wiążemy z masą cząstki przenoszącej oddziaływanie (nośnika oddz.)

$$\lambda \sim 1/M$$

-oddz. grawitacyjne i el-m: **zasięg nieskończony** → masa fotonu (grawitonu?) = 0

-oddz. silne: zasięg \sim **rozmiar protonu 10^{-15} m** (tu uwężenie i bezmasowe gluony nie decydują o zasięgu)

-oddz. słabe: **zasięg 10^{-18} m**, masa nośników 80-90 GeV

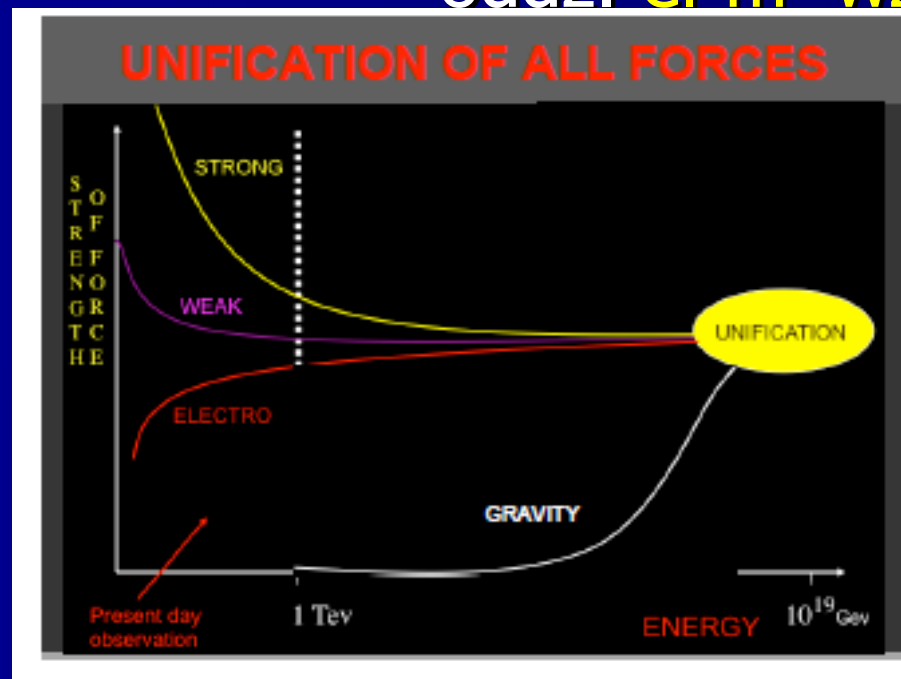
„Siła” oddziaływania zależy od energii (*biegnące stałe sprzężenia*)!

- Dla dużych energii oddz. silne słabną
oddz. słabe słabną
oddz. el-m wzmacniają

α_s

α_w

α_{el}

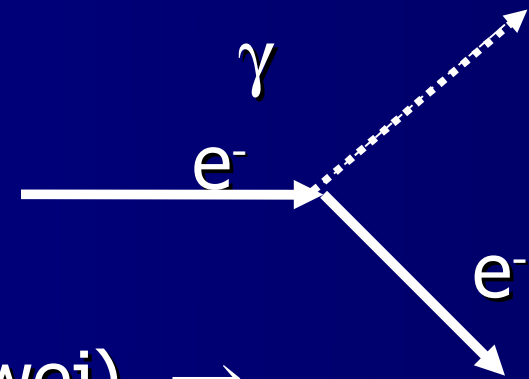


D. Gross,
Photon 2005

Diagramy Feynmana

Diagramy Feynmana – cząstki reprezentujemy przez linie a akt oddziaływania przez punkt przecięcia (**wierzchołek**)

Np. emisja fotonu przez elektron



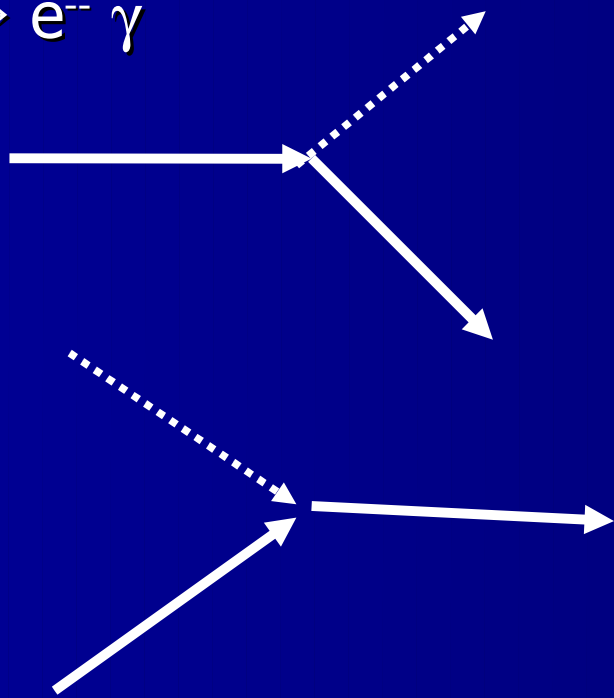
Strzałki na ciągłej linii (fermionowej) \rightarrow

przepływ ład. el. (ujemnego, e^- = cząstka) i pęd,
strzałki na linii fotonowej (linia przerywana) \rightarrow pęd

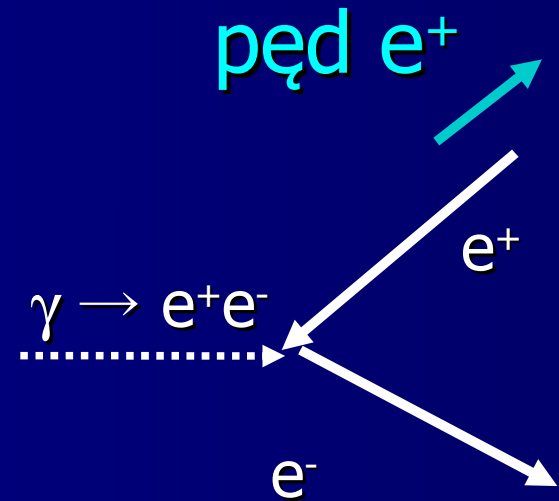
Diagramy Feynmana cd

Procesy skrzyżowane z udziałem $e e \gamma$

$$e^- \rightarrow e^- \gamma$$



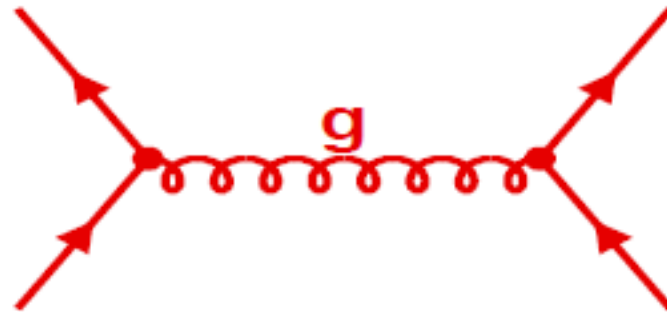
$$\gamma e^- \rightarrow e^-$$



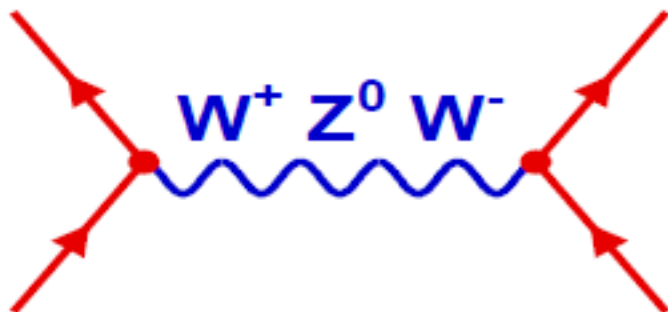
Diagramy Feynmana cd



elektromagnetyczne



silne



slabe



grawitacyjne

Stałe fundamentalne

c – fizyka relatywistyczna

prędkość światła

\hbar – fizyka kwantowa

stała Plancka $h/2\pi$

G – grawitacja

stała grawitacyjna
(Newtona)

Stała struktury subtelnej

Ładunek elektryczny e

Wielkość ($e^2/4 \pi \hbar c = 1/137$) – α

(stała struktury subtelnej)

→ ważna w relatywistycznej, kwantowej teorii
ładunku elektrycznego

Elektrodynamika kwantowa (lata 20-30 XXw)

α - miarą „siły” oddziaływania (sprzeżenia)
elektronów i fotonów (prom. e-m)

Grawitacja - skala Plancka

- Zanedbujemy grawitację dla pojedynczych cząstek elementarnych i przy obecnych energiach
- Kiedy może być ważna w mikroświecie?
Z G , h i c możemy utworzyć wielkość
 $(\hbar c/G)^{1/2}$ - masa Plancka

Skale Plancka :

długość 10^{-35} m, masa (energia) 10^{19} GeV

→ relatywistyczna, kwantowa grawitacja,
ale wciąż poszukujemy takiej teorii

Pytania do wykładu 4

Ile różnych stanów różniących się rzutem wektora spinu na wybraną oś ma cząstka o spinie s ?

Czy mogą istnieć cząstki elementarne o spinie $7/2$?

Czy w Modelu Standardowym istnieje prawe neutrino?

Zasięg sił słabych jest większy czy mniejszy od zasięgu sił jądrowych?

Na czym polega rozpad beta neutronu na poziomie fundamentalnym?

Podaj ładunek elektryczny fotonu.

Ile razy kwark b jest cięższy od protonu?

Wypisz wszystkie bozony pośredniczące (wraz z antybozonami).

Czy istnieją cząstki fundamentalne o spinie $3/2$?

Czym różnią się fermiony od bozonów?

Spin bozonu Z wynosi ..?

Z jaką cząstką kwark t stanowi dublet ?

Wypisz antyleptony z II rodziny.

Między jakimi cząstkami działają siły jądrowe a jakimi siły kolorowe?

Czy grawitacja jest ważna w mikroświecie dla niskich energii ?

Wypisz 3 elementarne akty oddziaływania z udziałem cząstek z I rodziny.

Co oznacza strzałka na linii fotonowej na diagramie Feynmana?