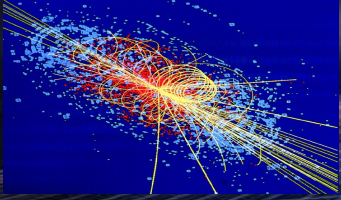


Wszechświat cząstek elementarnych



WYKŁAD 4

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

9.III.2011

Spin - historia odkrycia
Fermiony i bozony
Oddziaływanie słabe i rodziny cząstek
fundamentalnych

Spin - jeszcze jedna liczba kwantowa

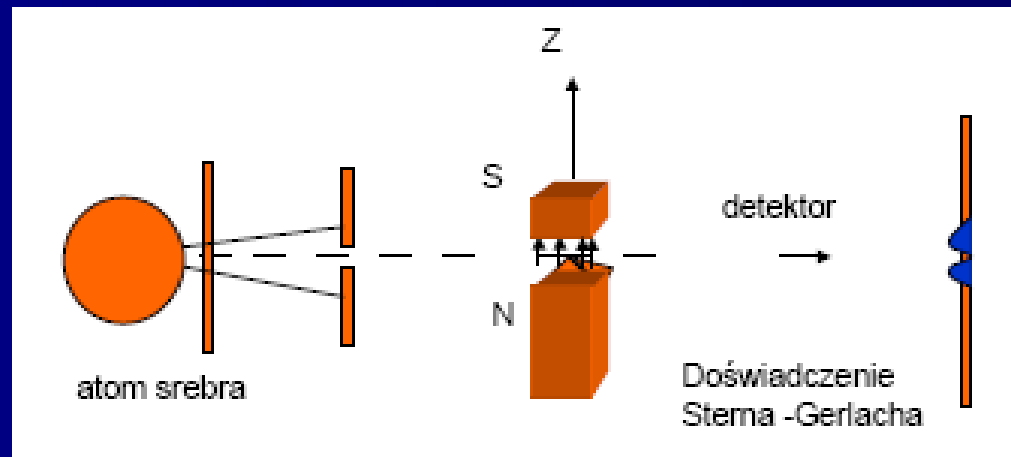
- Spin – „własny” moment pędu (spin lub kręt)
like spinning tennis ball
(to efekt czysto kwantowy; *opis jak dla orbitalnego momentu pędu L , ale tylko formalnie - bo co wiruje w cząstce fundamentalnej ?*)
- Te 'obroty' mogą być tylko pewnego typu → są **skwantowane**. Każda cząstka elementarna ma określoną wartość spinu (**spinowa liczba kwantowa s**)
- Różne rzuty **wektora spinu** na wybraną oś są możliwe; liczba różnych stanów spinowych cząstki o niezerowej masie wynosi **$2s+1$**
- Przyjmując jednostkę spinu ($\hbar = h/2\pi$, h - stała Plancka) - spiny cząstek elementarnych mogą przyjmować jedynie wartości będące wielokrotnością $\frac{1}{2} \hbar$ (**$s = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}$**).

Spin – najbardziej kwantowa cecha cząstek elementarnych

- Jak został odkryty?
- Czy jest ważny?
Spin decyduje o charakterze zachowań cząstek danego typu we „własnym środowisku”

Struktura subtelna widma wodoru (i nie tylko)

A. Sommerfeld – w 1916 opisał ruch elektronu w atomie wodoru z uwzględnieniem szczególnej teorii względności (wprowadził „stałą struktury subtelnej” - oddz. elektronu z fotonem). Obliczył **moment magnetyczny atomów np. wodoru i srebra** (ruch elektronu po orbicie → mom. magnetyczny dla atomu w polu magn.) i przewidział **tylko dwa możliwe ustawienie wektora** mom. magnetycznego atomu (klasycznie dowolnie wiele ustawień):



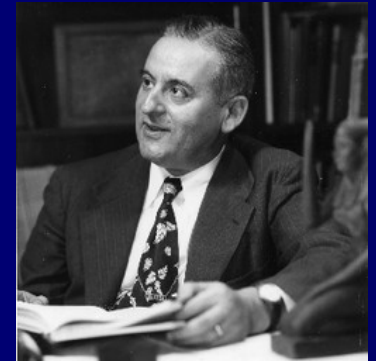
Doświadczenie Sterna-Gerlacha 1921 dla atomu srebra: rozszczepienie (podwojenie) linii widmowych zgodnie z przewidywaniami Sommerfelda. W atomie srebra wszystkie elektrony, z wyjątkiem jednego, tworzą zamknięte powłoki. Więc o tym efekcie decyduje ten jeden elektron...

Odkrycie spinu elektronu: 1925



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

Z Phys. Rev. Letters (PRL) <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.

← subtelna struktura linii widmowych

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

Historia odkrycia spinu

- A. H. Compton: postulat 'quantized electron rotation' (1918-21)
- R. Kronig (jako doktorant) zaproponował „spin kilka miesięcy przed Goudsmitem i Uhlenbeckiem, ale został zniechęcony przez Pauliego przed publikacją (*'it is indeed very clever but of course has nothing to do with reality'*)”
- W 1925 Goudsmit i Uhlenbeck – hipoteza spinu (*Pauli uważa, że to bzdury; jednak ich opiekun naukowy Ehrenfest wysyła ich pracę do publikacji i komentuje, że są tak młodzi, że mogą sobie pozwolić na nierozsądną pracę*)
- W 1926 poprawne relatywistyczne obliczenia L.H.Thomasa i Pauli uwierzył w spin..

Dziś rozwija się **spinotronika** (*w kierunku kwantowego komputera*)

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 to **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 (fermionów!), na kolejnych powłokach)
- Cząstki o spinie całkowitym to **bozony**
 - statystyka Bosego-Einsteina
 - im więcej bozonów tym lepiej *(np. fotony: lasery)*

Spin cząstek fundamentalnych

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

Cząstki o spinie 1 = bozony wektorowe

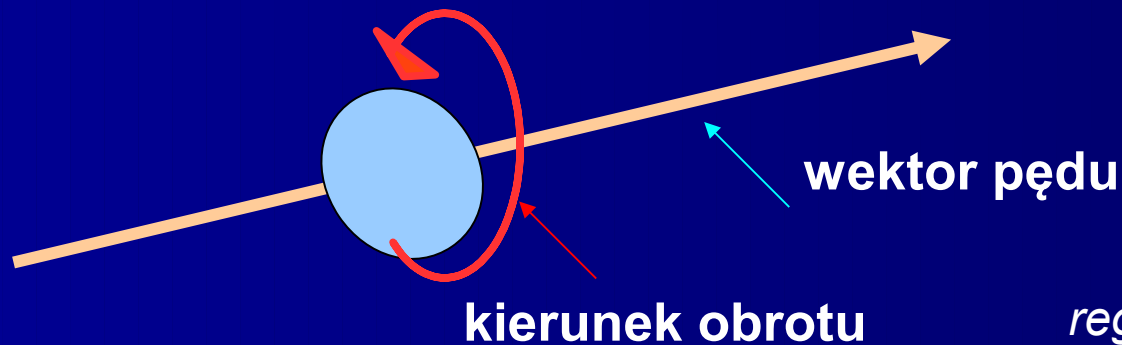
Nazwa	symbol	ład. el.	masa
Bozon	W^+	+ 1	80.4 GeV
Bozon	W^-	- 1	80.4 GeV
Bozon	Z	0	91.2 GeV
Foton	γ	0	0
Gluony(8)	g	0	0

(inna nazwa - bozony pośredniczące)

- W^\pm są wzajemnie dla siebie antycząstkami
- γ , Z – każda jest własną antycząstką
- gluon_a \bar{b} antycząstką do gluonu \bar{a} b
(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!

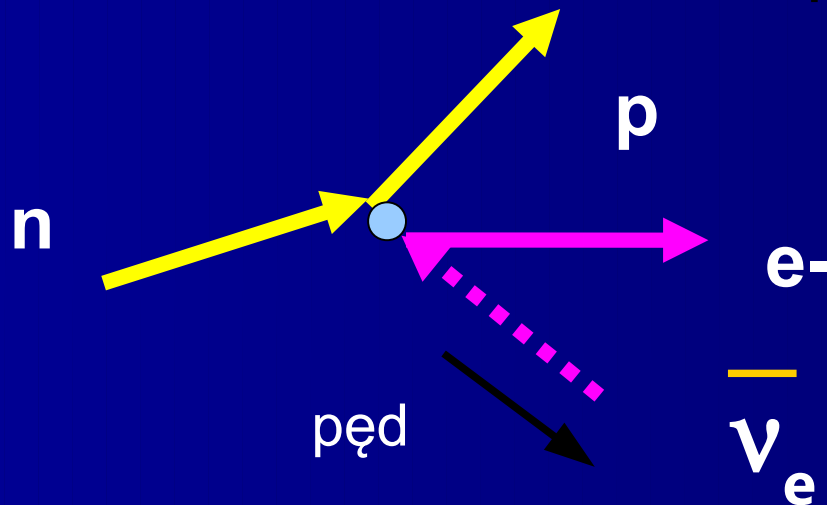
W Modelu Standardowym: bezmasowe neutrina – tylko lewe, a bezmasowe antyneutrina - tylko prawe

Oddziaływanie słabe

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

np. w rozpadzie neutronu

Odkrycie, Becquerel 1896
radioaktywność β



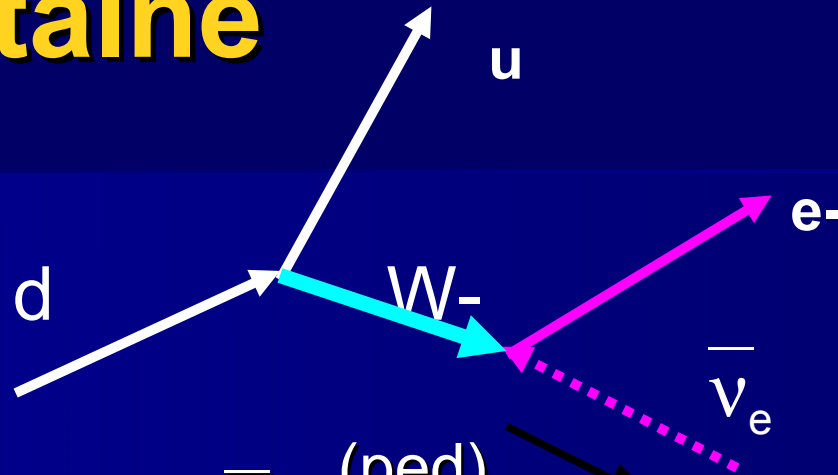
Odpowiedzialne siły są zwane oddziaływaniami **słabymi**.

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

Oddziaływania słabe fundamentalne

Uwaga: tylko lewe cząstki !

Rozpad β



$d \rightarrow u W^-$ i $W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$ (pęd) 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 elektryczny) $\alpha_{em} = e^2/4 \pi = 1/137$ (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 (elektron e-)

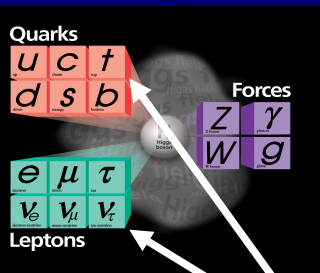
Oczywiście istnieje też pierwsza antyrodzina
np. dublet antyleptonowy:

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

Uwaga: W Modelu Standardowym neutrina bezmasowe, ale ostatnie (lata 2001-2) doświadczenia wskazują, że neutrina mają b. małą ale *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-Higgosa
- Czy są dalsze generacje ?
Doświadczenie: raczej nie, o ile neutrina lekkie.
Teoria: ?

Pytania do wykładu 4

- Ile stanów różniących się rzutem wektora spinu na wybraną oś ma cząstka masywna o spinie s ?
- Czy mogą istnieć cząstki elementarne o spinie $7/2$?
- Czy w Modelu Standardowym istnieje prawe neutrino?
- 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
- Na czym polega rozpad beta neutronu na poziomie fundamentalnym?
- Podaj ładunek elektryczny fotonu.
- Wypisz wszystkie bozony pośredniczące (wraz z antybozonami).