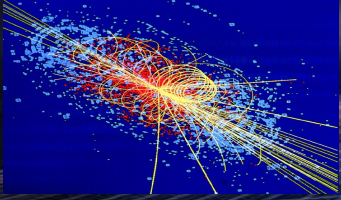


# Wszechświat cząstek elementarnych



## WYKŁAD 4

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

7.III.2012

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  **$2s+1$**

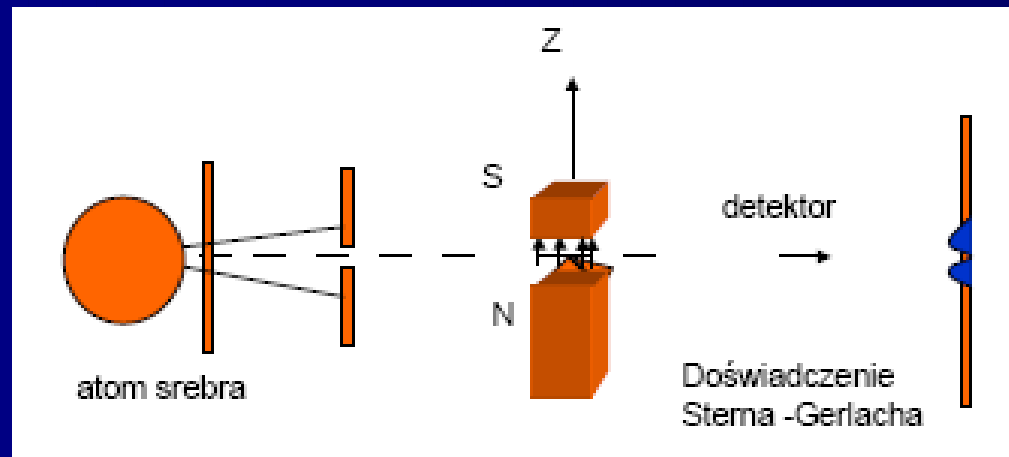
Przyjmując jednostkę spinu  $\hbar$  ( $\hbar = h/2\pi$ ,  $h$  - stała Plancka) - spiny cząstek elementarnych mogą przyjmować jedynie wartości będące wielokrotnością  $\frac{1}{2} \hbar$  ( **$s = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \dots$** ).

# Spin – najbardziej kwantowa cecha cząstek elementarnych

- Jak został odkryty?
- Czy jest ważny?  
Spin decyduje o charakterze zachowań cząstek tego samego typu między sobą...

# 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” do opisu 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):



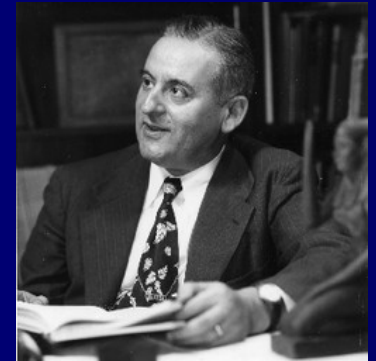
Doświadczenie Sterna-Gerlacha 1921 dla atomu srebra: rozszczepienie (podwojenie) linii widmowych zgodnie z przewidywaniami Sommerfelda. W atomie srebra wszystkie elektrony, z wyjątkiem jednego, tworzą zamknięte powłoki. Więc o tym efekcie decyduje ten jeden elektron...

# 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 na kolejnych powłokach)*
- Cząstki o spinie całkowitym to **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
- Cząstka Higgsa? – spin 0?

*w jednostkach  $\hbar$*

# Cząstki o spinie 1 = bozony wektorowe

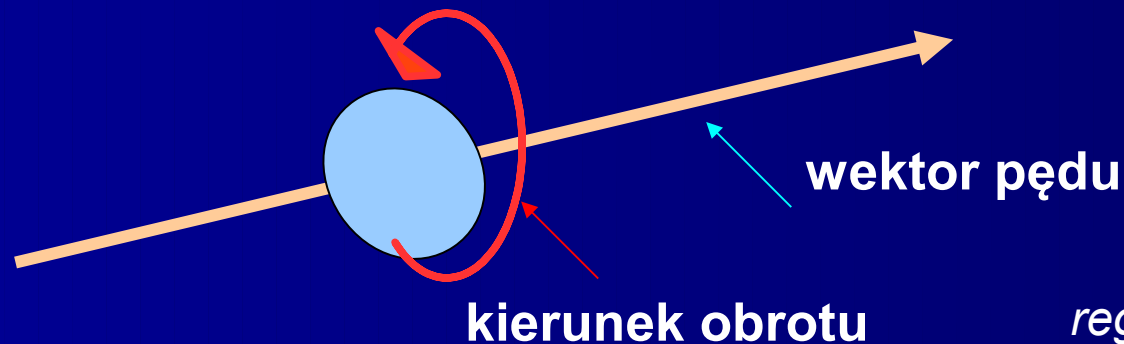
Nazwa	symbol	ład. el.	masa
Bozon	$W^+$	+ 1	80.4 GeV
Bozon	$W^-$	- 1	80.4 GeV
Bozon	Z	0	91.2 GeV
Foton	$\gamma$	0	0
Gluony(8)	g	0	0

(inna nazwa - bozony pośredniczące)

- $W^\pm$  są wzajemnie dla siebie antycząstkami
- $\gamma$  i Z – są własnymi antycząstkami
- gluon<sub>a</sub>  $\bar{b}$  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!*

**Bezmasowe neutrino – tylko lewe,**

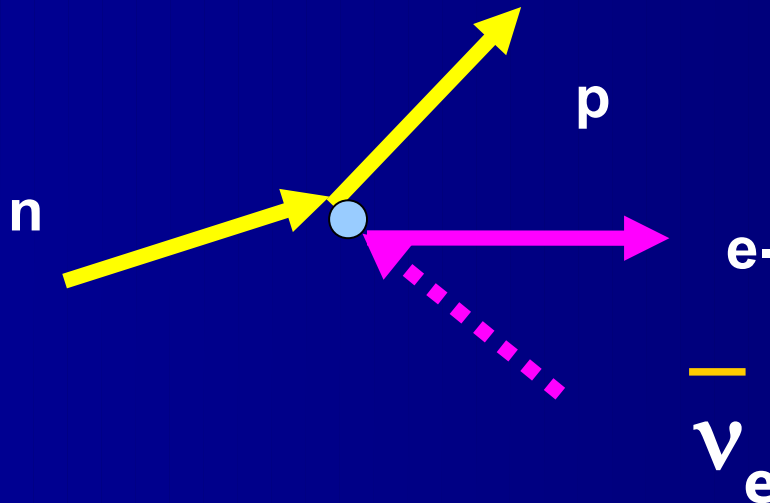
**a bezmasowe antyneutrino - tylko prawe**

# Oddziaływanie słabe

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

np. w rozpadzie neutronu

Odkrycie, Becquerel 1896  
radioaktywność  $\beta$

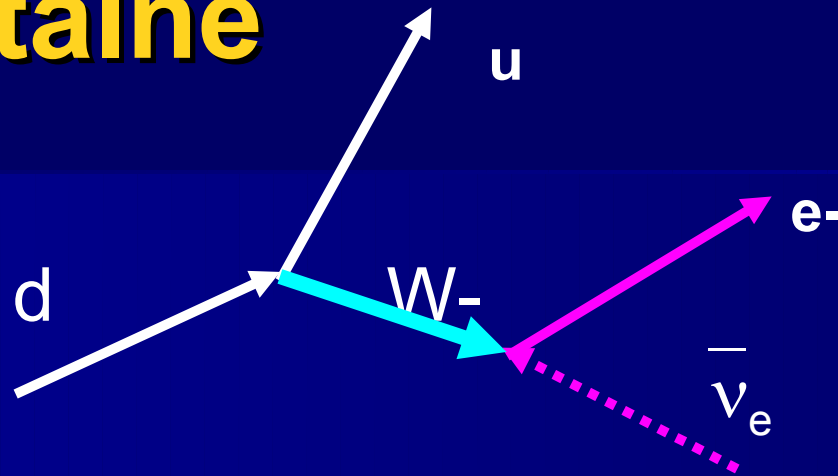


Odpowiedzialne siły są zwane oddziaływaniami **słabymi**.

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

# Oddziaływania słabe fundamentalne

Rozpad  $\beta$



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

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

Słabe oddz. jest jednak **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;

# Oddz. słabe fund.: pierwsza rodzina= dwa lekkie dublety fermionów o spinie 1/2

Kwarki	o ład. el.	2/3	<b>u</b> (3 kolory)
		-1/3	<b>d</b> (3 kolory)
Leptony		0	$\nu_e$
		-1	<b>e</b> (elektron e-)

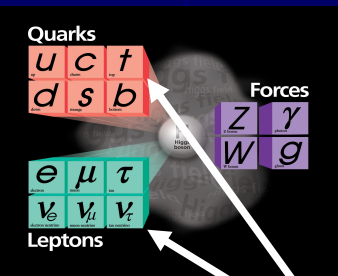
Oczywiście istnieje też pierwsza antyrodzina  
np. dublet antyleptonowy:

	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 masę:  
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 bozony pośredniczące (wraz z antybozonami) dla oddziaływań słabych i elektromagnetycznych