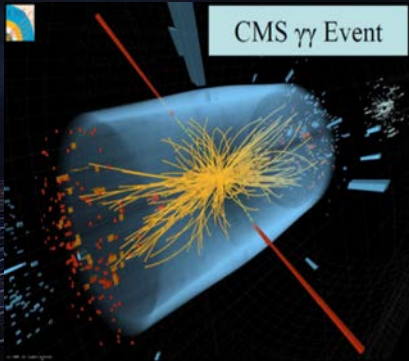


# Wszechświat cząstek elementarnych



## WYKŁAD 5

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

Spin - historia odkrycia

Fermiony i bozony

Oddziaływanie słabe i rodziny cząstek fundamentalnych

sem letni 2013/14

# 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?
- Bardzo ważna cecha - spin decyduje o charakterze zachowania cząstek tego samego typu w grupie..

Elektron, proton, kwarki - spin  $1/2 \hbar$

Foton - spin  $1 \hbar$

Higgs - spin  $0 \hbar$

**Jak został odkryty?**

# Atomy

Opis stanów – liczby kwantowe (liczby całkowite)

główna liczba kwantowa (energia) =  $n$

orbitalna liczba kwantowa =  $l$  ( $0 \leq l < n$ )

magnetyczna liczba kwantowa =  $m$  ( $|m| \leq l$ )  
 $-l, -l+1, \dots, l-1, l$

**Atom wodoru**  
**i atomy wodoropodobne**

najprostsze -

$$E_n = -\frac{Z^2}{2n^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$Z$   
ładunek  
jądra at.

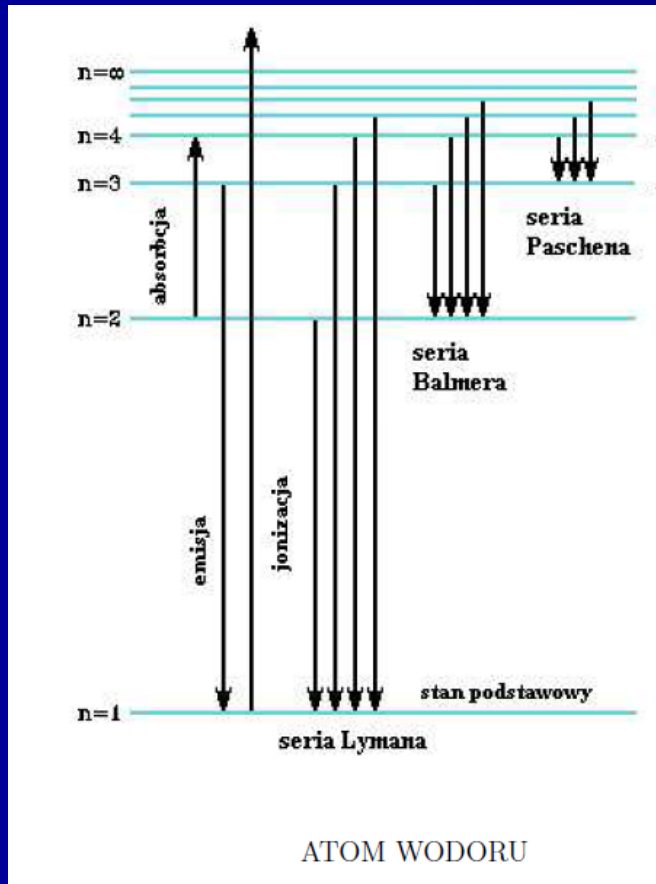
MODEL BOHRA

(orbity – okręgi)

Degeneracja stanów  $n^2$

# Widma (linie widmowe)

atom wodoru Z=1



$$\Delta E_{n_1 n_2} = \frac{\mu}{2} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

$$\Delta E_{n_1 n_2} = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

# Rozszczepienie linii widmowych

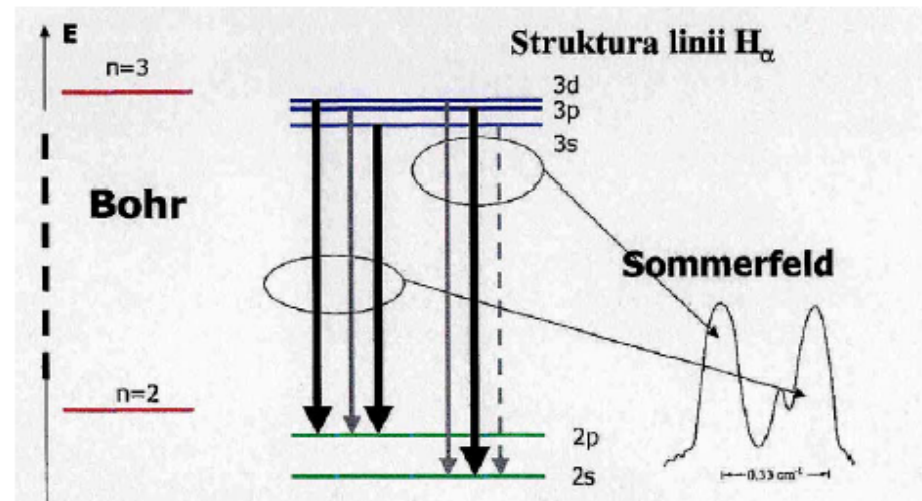
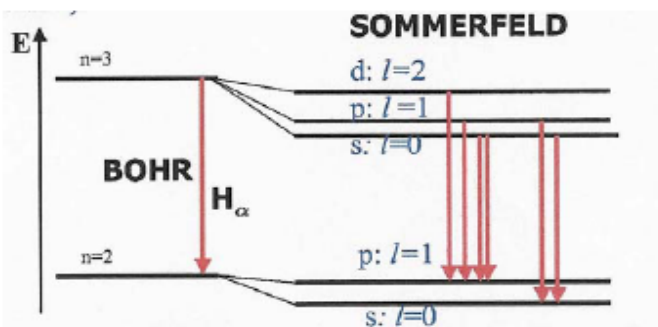
## Atom wodoru - poprawka relatywistyczna Sommerfelda (1916r.)

Poprawka do modelu Bohra – w ogólności orbity mogą być elipsami (tak jak dla planet – Kepler), elektrony przyspieszają, gdy zbliżają się do jądra – relatywistyczny wzrost masy.

Prędkość elektronów w atomie wodoru jest  $<1\%$  prędkości światła i relatywistyczny wzór na pęd i energię powoduje niewielkie zmiany energii orbit o różnych małych półosiach (których długość zależy od orbitalnego momentu pędu  $L$ ).

Sommerfeld policzył wielkości tych zmian energii w zależności od orbitalnej liczby kwantowej  $l$ .

Pokazał także, że wartość orbitalnej liczby kwantowej zależy od  $n$  - głównej liczby kwantowej w modelu Bohra:  $l=0, 1, 2, \dots, n-1$ , zaś poziom opisywany przez  $n$  rozszczepia się na  $n$  podpoziomów o różnych  $l$ .



Reguły wyboru – silne linie, gdy:

$$\Delta l = \pm 1$$

$\Delta n$  – brak ograniczeń

# Atom w polu magnetycznym

Linie widmowe -> przejścia między różnymi stanami z emisją fotonów (widma absorpcyjne -> pochłanianie fotonów)

Stany zdegenerowane energetycznie, ale silne pole magn. pozwala rozdzielić linie widmowe bo ruch ładunku po orbicie -> moment magnetyczny.

Ponieważ orbitalny moment pędu jest skwantowany ( $l=0, 1, 2, \dots$ ) moment magn. też jest. W silnym polu magn. oddziaływanie z tym mom. magn (dokładnie z rzutem na oś) -> rozszczepienie na *wiele* linii (liczba zależy od  $m$  i  $m^{\prime}$ ).

(normalne zjawisko Zeemana)

*Podstawy fizyki współczesnej,  
V. Acosta, C. L. Cowan, B. J. Graham  
Rozdz. 20-22*



# Zjawisko Zeemana

W 1892 P. Zeeman zaobserwował poszerzenie linii widma płomienia sodowego jeśli płomień umieszczano między biegunami elektromagnesu.

Okazało się, że to poszerzenie to tak naprawdę rozdzielenie (rozszczerpienie) linii widmowych. Zjawisko to potem zaobserwowane dla wielu pierwiastków (normalne = zależność od  $l$  i  $m$ )

*Anomalne zjawisko Zeemana* – linie podwojone!!

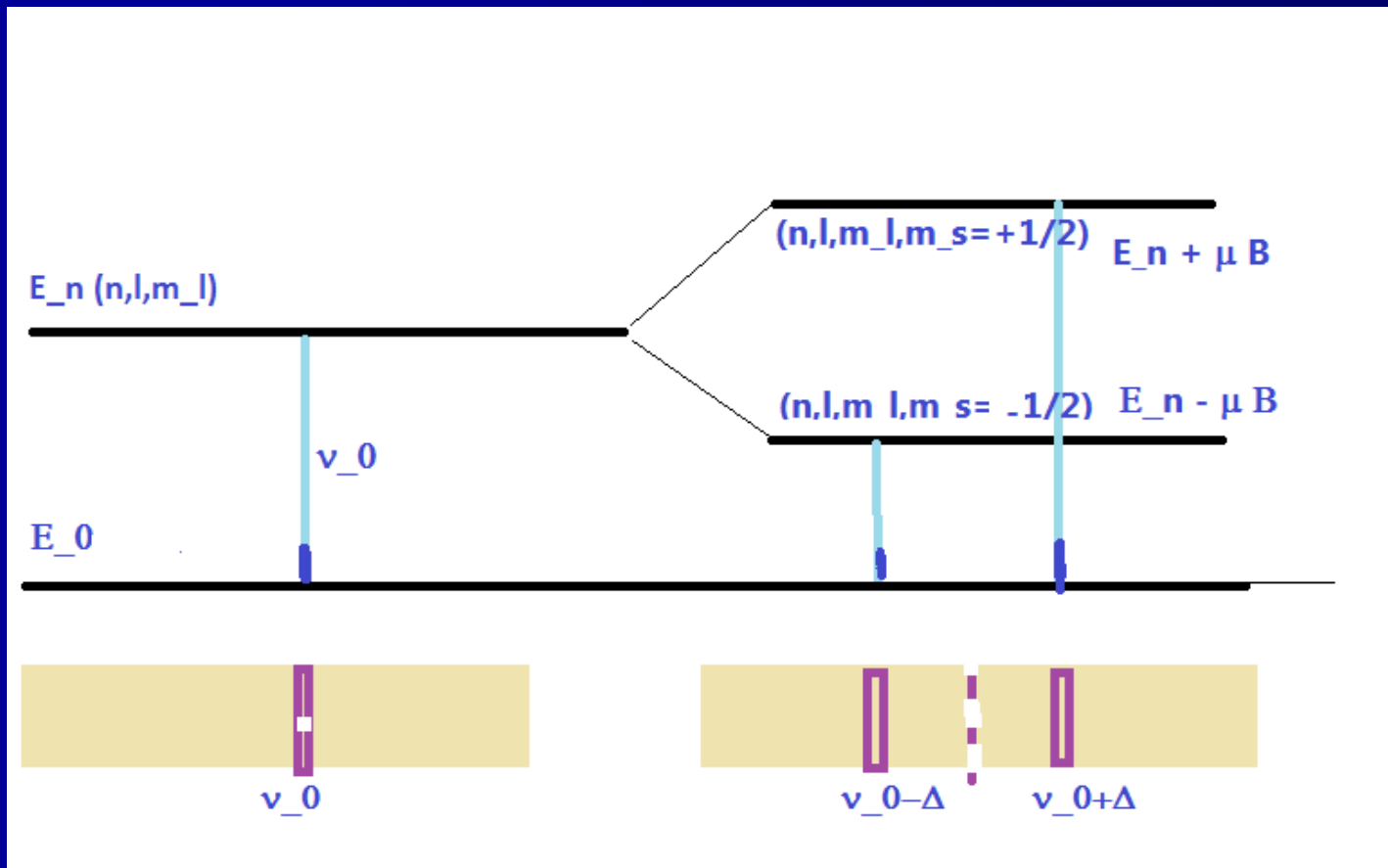
Można było to opisać formalnie wprowadzając liczbę kwantową  $j=l \pm \frac{1}{2}$ , gdzie  $l \hbar$  – orbit. mom. pędu

(*Pauli „two valuedness not describable classically”- 1925*)

→ To będzie spin elektronu – własny moment pędu

To jest przykład struktury subtelnej widma

# Podwojenie linii

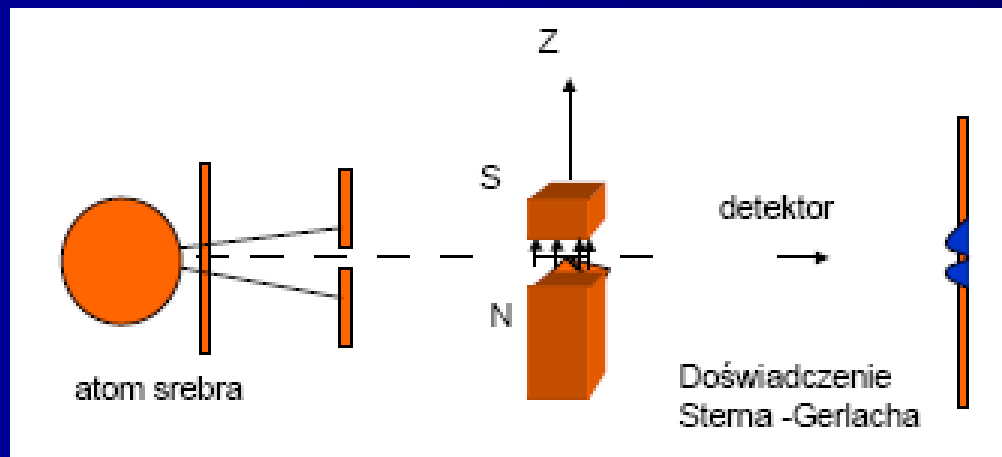


# Doświadczenie Sterna-Gerlacha

Doświadczenie Sterna-Gerlacha 1921 dla atomu srebra:  
rozszczenie (podwojenie) linii widmowych w polu magnetycznym

Ruch elektronu po orbicie → moment magnetyczny dla atomu.

W atomie srebra wszystkie elektrony, z wyjątkiem jednego, tworzą zamknięte powłoki. Więc o tym efekcie decyduje ten jeden (zewnątrzny) elektron tak jak dla atomu wodoru...

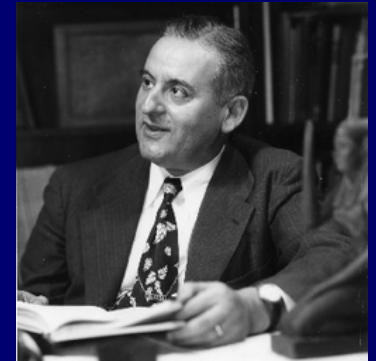


# Odkrycie spinu elektronu: 1925



<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)  
*(Bohr i Pauli – ostry sprzeciw)*
- 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 (*i natychmiast zaproponował ich opis w postaci macierzy 2x2, nazw: macierze Pauliego*).

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

W przyrodzie tylko dwa typy cząstek elementarnych:

- 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 – tylko tyle elektronów może się zmieścić na danej powłoce ile różnych stanów elektronów może się na niej realizować, następny elektron musi znaleźć się na wyższej powłoce..)*
- Cząstki o spinie całkowitym to **bozony**
  - statystyka Bosego-Einsteina
  - im więcej bozonów tym lepiej *(laser, kondensaty)*

# Spin cząstek fundamentalnych

*w jednostkach  $\hbar$*

- 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

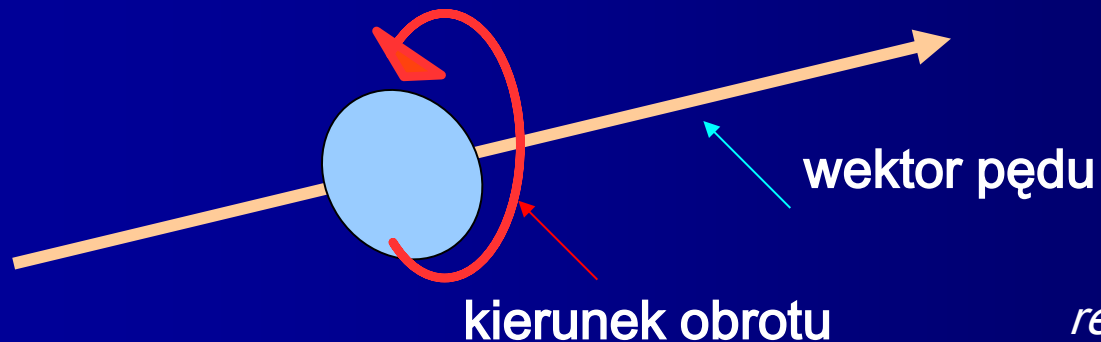
Nazwa	symbol	ład. el.	masa
Bozon	$W^+$	+ 1	80.4 GeV
Bozon	$W^-$	- 1	80.4 GeV
Bozon	Z	0	91.2 GeV
Foton	$\gamma$	0	0
Gluony(8)	g	0	0

(inna nazwa - bozony pośredniczące)

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

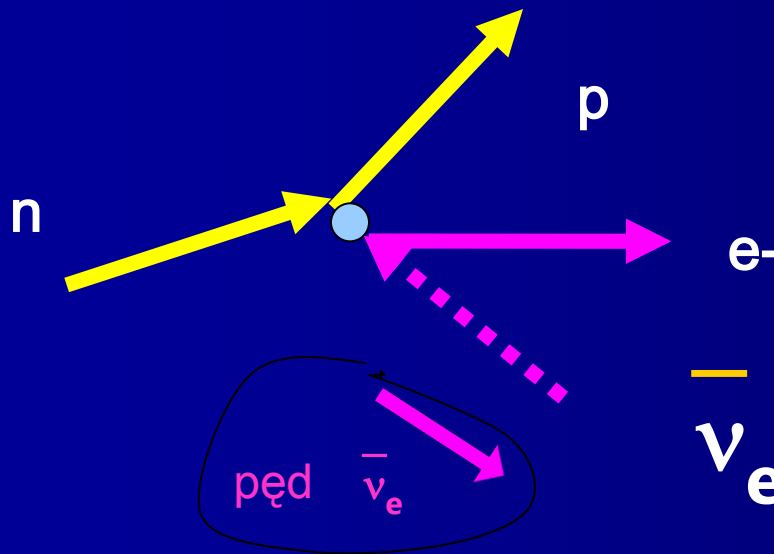
**Bezmasowe neutrino – tylko lewe,**  
**a bezmasowe antyneutrino - tylko prawe**

# Oddziaływanie słabe

Cząstki (p i n) oraz (neutrino elektronowe i elektron) występują w niektórych procesach w parach (*dubletach*)

np. w rozpadzie neutronu

*Odkrycie, Becquerel 1896*  
*radioaktywność  $\beta$*



wektory (ciągłe linie) oznaczają pędy cząstek

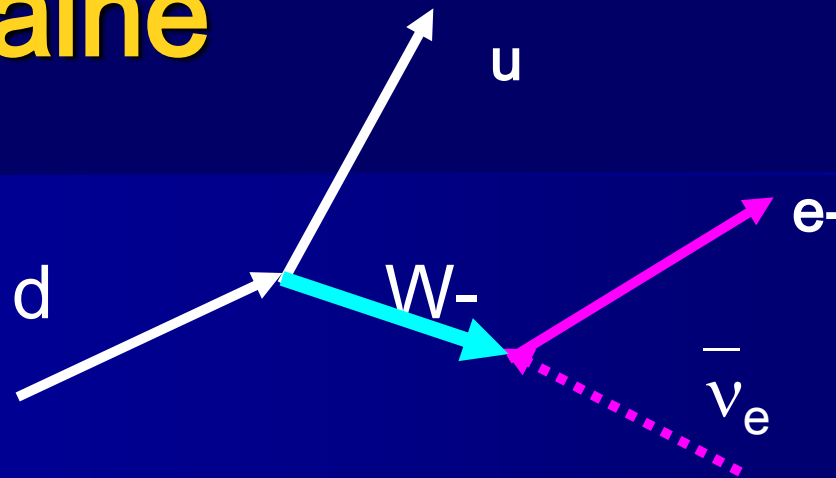
Umowa: strzałki na liniach zgodnie z pędem dla fermionów, a dla antyfermionów strzałka przeciwna do pędu;

Odpowiedzialne siły są zwane oddziaływaniami **słabymi**.

E. Fermi w 1934 → 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'

# 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	$\nu_e$
		-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 doświadczenia (lata 2001-2) wskazują, że neutrina mają bardzo małą ale *niezerową masę* ...

# Druga rodzina = dwa duplety fermionów o spinie 1/2

Kwarki o ład. el.  $2/3$  **c** (3 kolory)

$-1/3$  **s** (3 kolory)

Leptony  $0$   $\nu_{\mu}$

$-1$   **$\mu$  (mion -)**

Oczywiście istnieje też druga antyrodzina  
np. dublet antyleptonowy:

ład. el.

$+1$   $\bar{\mu}$  (mion+)

$0$   $\bar{\nu}_{\mu}$

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

# Trzecia rodzina =

dwa ciężkie duplety fermionów o spinie 1/2

Kwarki o ład. el.  $2/3$  **t** (3 kolory)

$-1/3$  **b** (3 kolory)

Leptony  $0$   $\nu_\tau$

$-1$   **$\tau$  (taon -)**

Oczywiście istnieje też trzecia antyrodzina

np. dublet antyleptonowy:

ład. el.

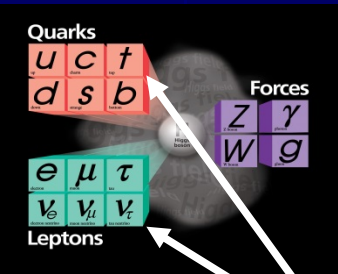
$+1$   **$\bar{\tau}$  (taon +)**

$0$   $\bar{\nu}_\tau$

Uwaga: W Modelu Standardowym neutrina bezmasowe, ale doświadczenia (lata 2001-2) 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 ?  
mechanizm Brouta-Englerta-Higgsa
- 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.