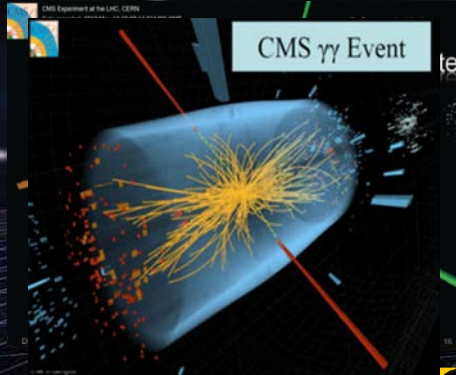


# Wszechświat cząstek elementarnych



## WYKŁAD 6

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

### I. Spin i historia odkrycia

Fermiony i bozony

### II. Oddziaływanie słabe i rodziny cząstek fundamentalnych

Bozon Z i bozony  $W^+, W^-$

# 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' mają tylko pewne wartości → są **skwantowane**. Każda cząstka elementarna ma określoną wartość spinu (**spinowa liczba kwantowa  $s$** )
- Przyjmując za jednostkę spinu  $\hbar$  ( $h/2\pi$ ,  $h$  - stała Plancka) - spiny cząstek elementarnych mają jedynie wartości będące wielokrotnością  $\frac{1}{2} \hbar$  ( **$s = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}$** ).
- Spin jest wielkością wektorową ale tylko niektóre rzuty na wybraną oś możliwe (skwantowanie). Liczba różnych stanów spinowych (polaryzacyjnych) cząstki o niezerowej masie wynosi  **$2s+1$**

# Spin – najbardziej kwantowa cecha cząstek elementarnych

Spin decyduje o charakterze zachowania cząstek tego samego typu w grupie, czy lubią być razem w jednym stanie, czy też unikają siebie... *więcej poniżej.*

elektron, proton	- spin $\frac{1}{2}$	(dwa stany spinowe)
foton	- spin 1	(dwa stany spinowe)
Z i W <sup>+/-</sup>	- spin 1	(trzy stany spinowe)
Higgs	- spin 0	(jeden stan spinowy)

**SPIN- JAK ZOSTAŁ ODKRYTY?**

# Stany kwantowe w atomach

W opisie stanów atomów – liczby kwantowe  
(liczby całkowite)

główna liczba kwantowa (energia) =  $n$

orbitalna liczba kwantowa (orbitalny moment pędu) =  $l$   
( $0 \leq l \leq n-1$ ;  $n$ - stanów)

rzut momentu pędu (l. magnetyczna) =  $m$  ( $|m| \leq l$ )  
( $-l, -l+1, \dots, l-1, l$ ;  $2l+1$  stanów)

**Linie widmowe dostarczają informacji o stanach atomów**

Widma emisyjne - przejścia między różnymi stanami -  
emisja fotonów

widma absorpcyjne - ...//... - pochłanianie fotonów

# Atom wodoru

## i atomy wodoropodobne (wg. Bohra)

Atomy tego typu – stosunkowo łatwe do opisu. 1912

Energia-potencjalna – przyciąganie typu kulombowskiego między jądrem o ładunku  $+Ze$  i elektronem o ładunku  $-e$

$$V(r) = -\frac{Ze^2}{r}$$

Stany są zdegenerowane wzg.  $l, m$ ; energia zależy tylko od  $n$   
(model Bohra, orbity kołowe)

$$E_n = -\frac{\mu Z^2 e^4}{2\hbar^2 n^2}$$

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

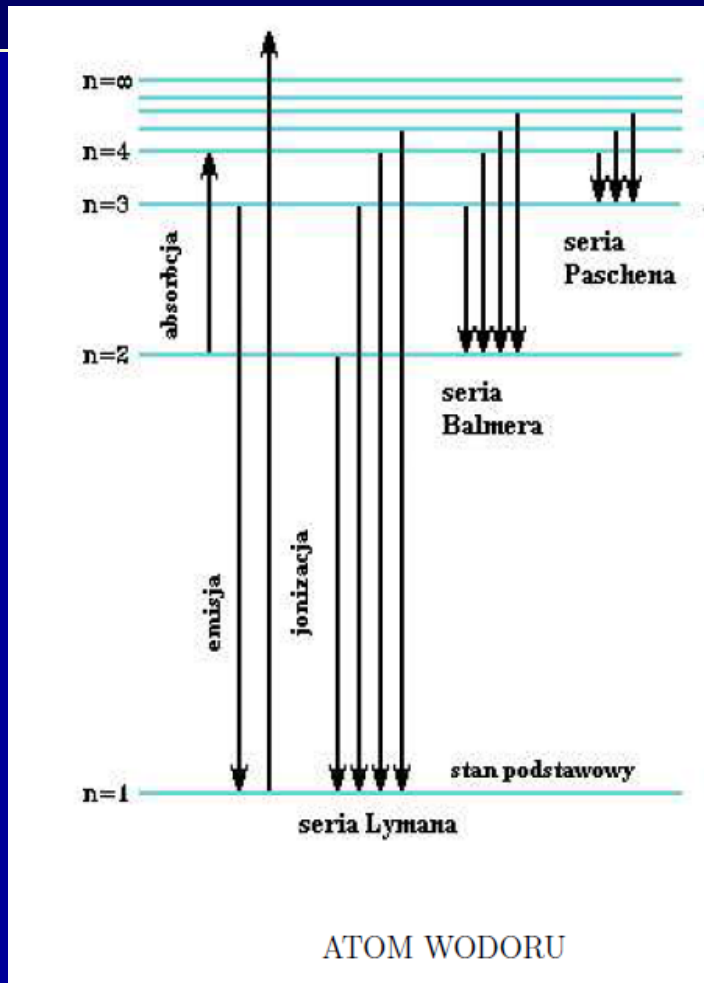
Wiec  $n^2$  stanów zdegenerowanych: *masa zredukowana układu*

- ❖ degeneracja ze wzg. na  $l$ . kwantową  $m$  – bo pole centralne
- ❖ degeneracja ze wzg. na  $l$ . kwantowa  $l$  -- bo pole  $1/r$

Pierwiastki alkaliczne - budowa typu wodoru, pole centralne ale nie całkiem kulombowskie - rozszczepienie na  $n$  poziomów  $E(n,l)$



# Widma (linie widmowe) – atom wodoru wg. Bohra



Dla atomu wodoru  $Z=1$   
(poniżej wzór na różnicę energii w jednostkach atomowych)

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

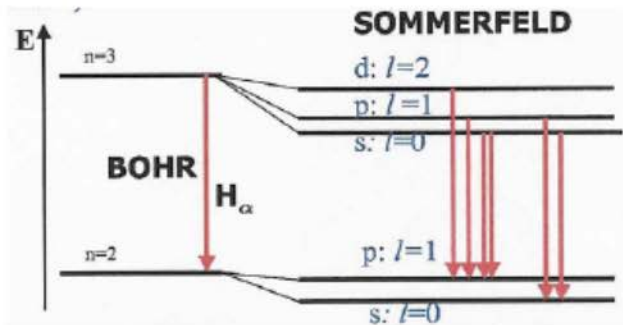
$$\Delta E_{n_1 n_2} = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

Wzory empiryczne Balmera  
1885(95?)

# Poprawka relatywistyczna - rozszczepienie linii widmowych: energia poziomów $E(n, l)$

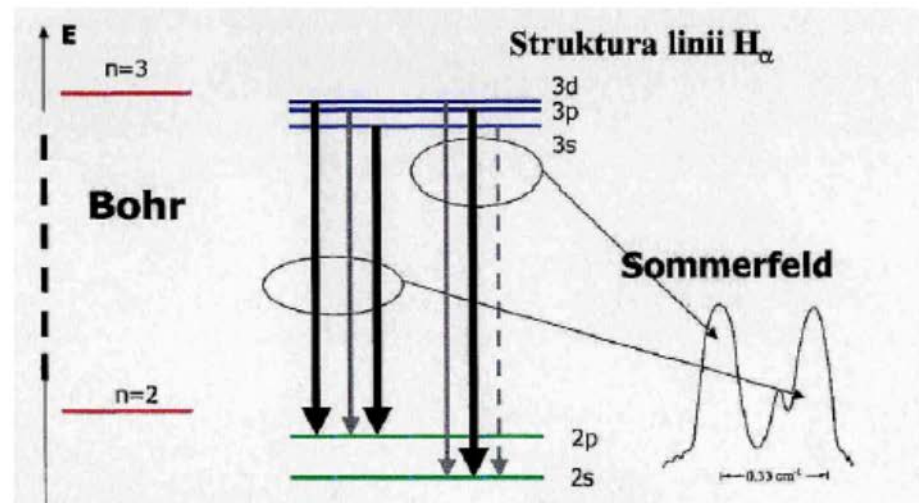
Sommerfeld 1916

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 opisany przez  $n$  rozszczepia się na  $n$  podpoziomów o różnych  $l$ .



Reguły wyboru – silne linie, gdy:

$$\Delta l = \pm 1$$





# Normalne zjawisko Zeemana

Pole zewnętrzne, np. magnetyczne lub elektryczne, może łamać symetrię sferyczną i usuwać degenerację stanów ze względu na l. kwantowa  $m$ . Prowadzi to do rozdzielania (rozszczenia) linii widmowych (struktura subtelna linii).

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

*Sód – pierwiastek alkaliczny, wodoropodobny*

Okazało się, że to poszerzenie to tak naprawdę rozdzielanie (rozszczenie) linii widmowych. Zjawisko to potem zaobserwowane dla wielu pierwiastków.

Struktura widm zgodna z liczbami kwantowymi  $l$  i  $m$  w polu magnetycznym - *to normalne zjawisko Zeemana.*

*(zjawisko Starka – rozszczenie linii w polu elektrycznym)*

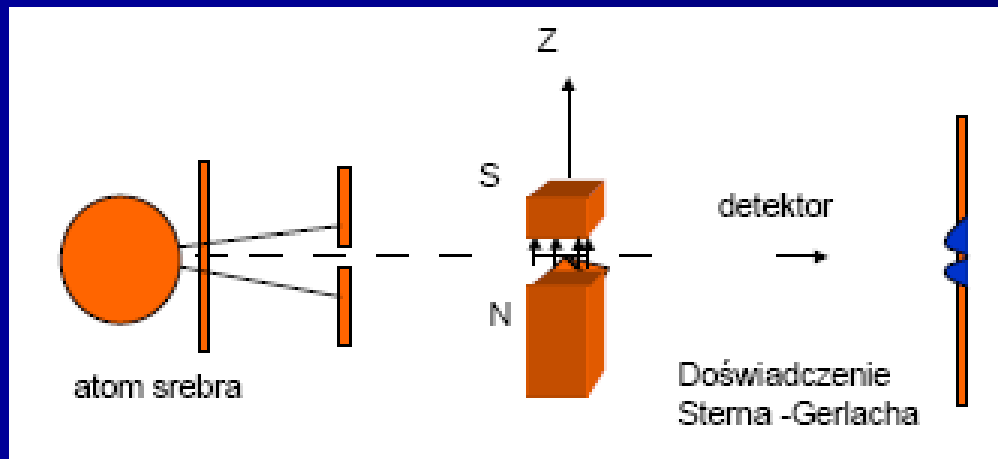
# Anomalne zjawisko Zeemana

Problemem było *anomalne* zjawisko Zeemana polegające na podwojeniu linii widmowych...

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*  
*potrzebne 4 a nie 3 liczby kwantowe;*  
*zasada wykluczenia (exclusion principle))*)

# Doświadczenie Sterna-Gerlacha

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

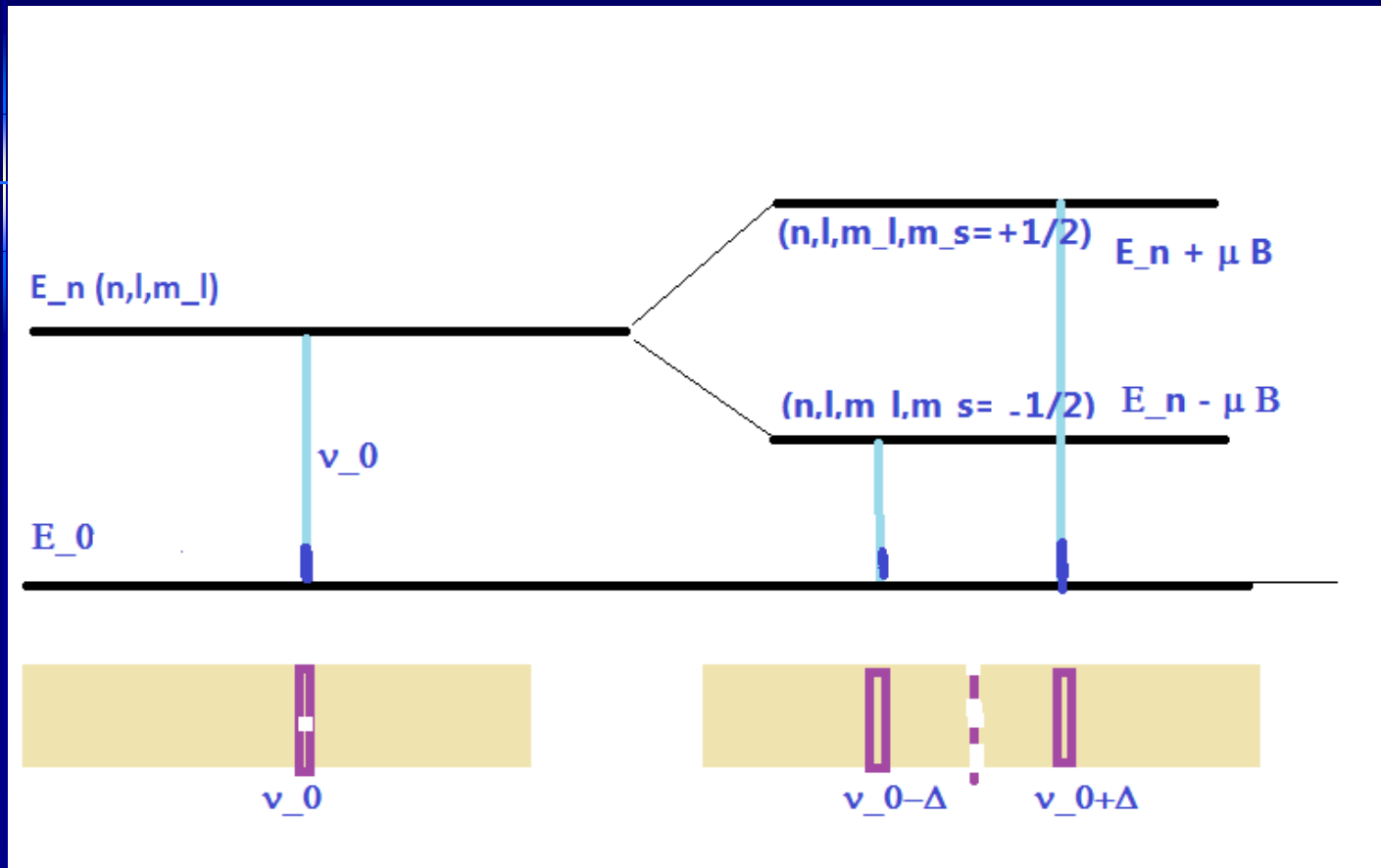


Ruch elektronu po orbicie → moment magnetyczny dla atomu w polu magnetycznym. W atomie srebra wszystkie elektrony, z wyjątkiem jednego, tworzą zamknięte powłoki. Więc o tym efekcie decyduje ten jeden (zewnętrzny) elektron tak jak dla atomu wodoru...

*Polecam:*

*Teoria kwantów, Białynicki-Birula, M. Cieplak, J. Kamiński*

# Podwojenie linii widmowych



Podwojenie linii w polu magnetycznym –

jakby obok momentu magnetycznego opisywanego  $l$ . magnetyczną  $m$  związaną z liczbą orbitalną  $l$  (tu wprowadzono oznaczenie  $m_l$ ), istniał dodatkowy „własny” moment magnetyczny i odpowiednia liczba magnetyczna ozn. na rysunku  $m_s$  związana z „własnym” momentem pędu - przyjmująca tylko dwie wartości.

# Hipoteza 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 wysłała 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
- (czynniki  $\frac{1}{2}$ ) i Pauli uwierzył w spin (*natychmiast zaproponował opis w postaci macierzy  $2 \times 2$ , nazywanych macierzami Pauliego*)

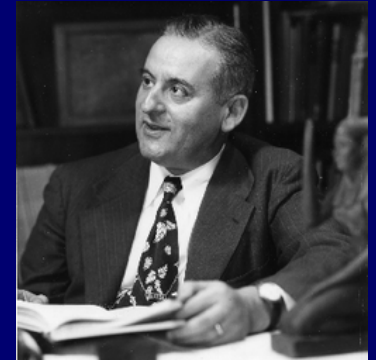
Dziś rozwija się **spinotronika** (*w kierunku kwantowego komputera*)

# Opis odkrycia spinu elektronu: 1925 przez odkrywcę (S. Goudsmit 1971)



<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.'



# 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

# 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 powłokową budowę atomów – 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 to bozony wektorowe

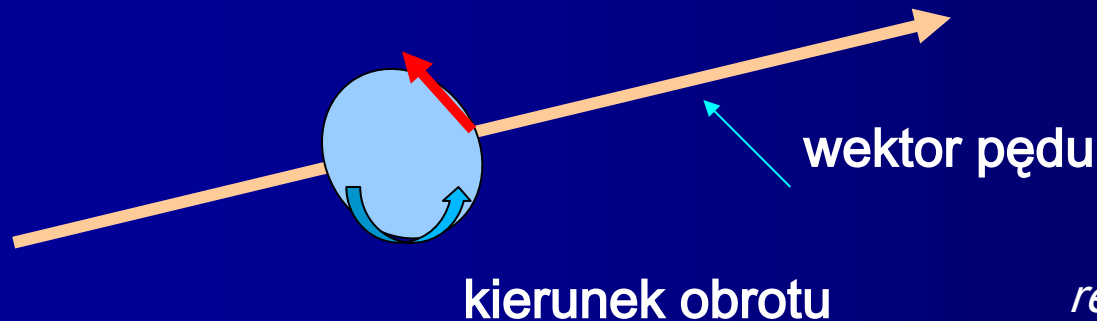
Nazwa	symbol	ład. el.	masa
Bozon	$W^+$	+ 1	80.4 GeV
Bozon	$W^-$	- 1	80.4 GeV
Bozon	Z	0	91.2 GeV
Foton	$\gamma$	0	0
Gluony(8)	g	0	0

(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**



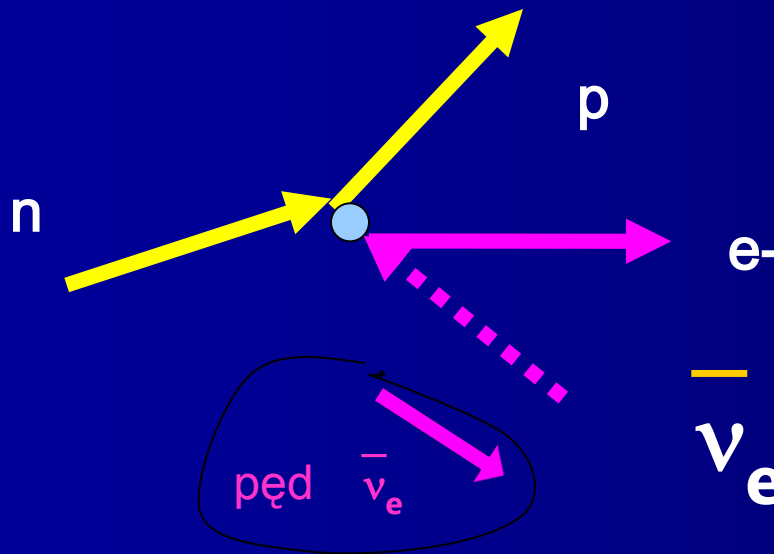
# RODZINY I ODDZIAŁYWANIA SŁABE

# 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 (*sprężenie punktowe, 4-fermionowe*)

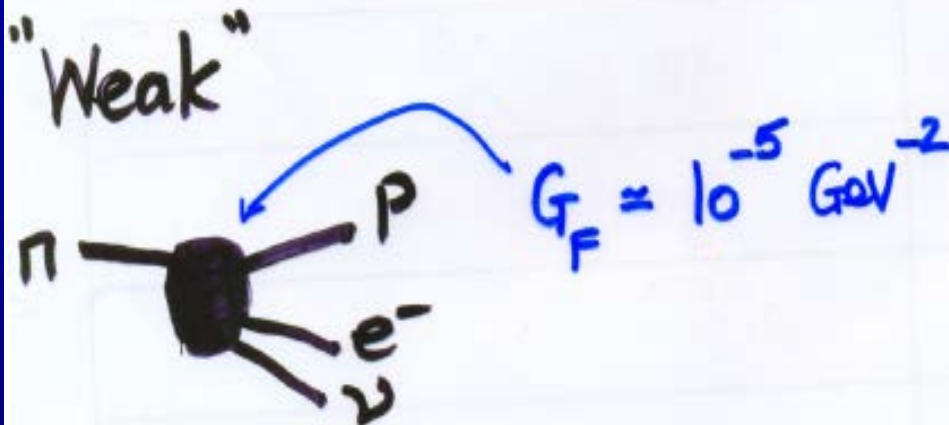
# Oddziaływania słabe

## -model Fermiego

wg. wykładów F. Close w CERN

Model Fermiego (1934) rozpadu beta neutronu:

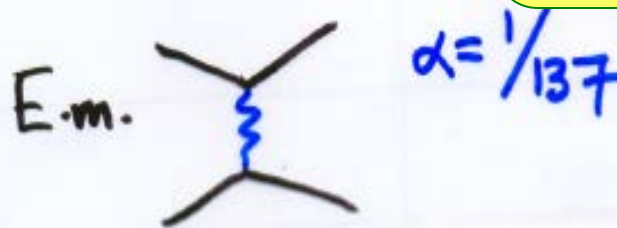
Oddziaływanie punktowe neutronu, protonu, elektronu i neutrina e



prąd hadronowy x prąd leptonowy

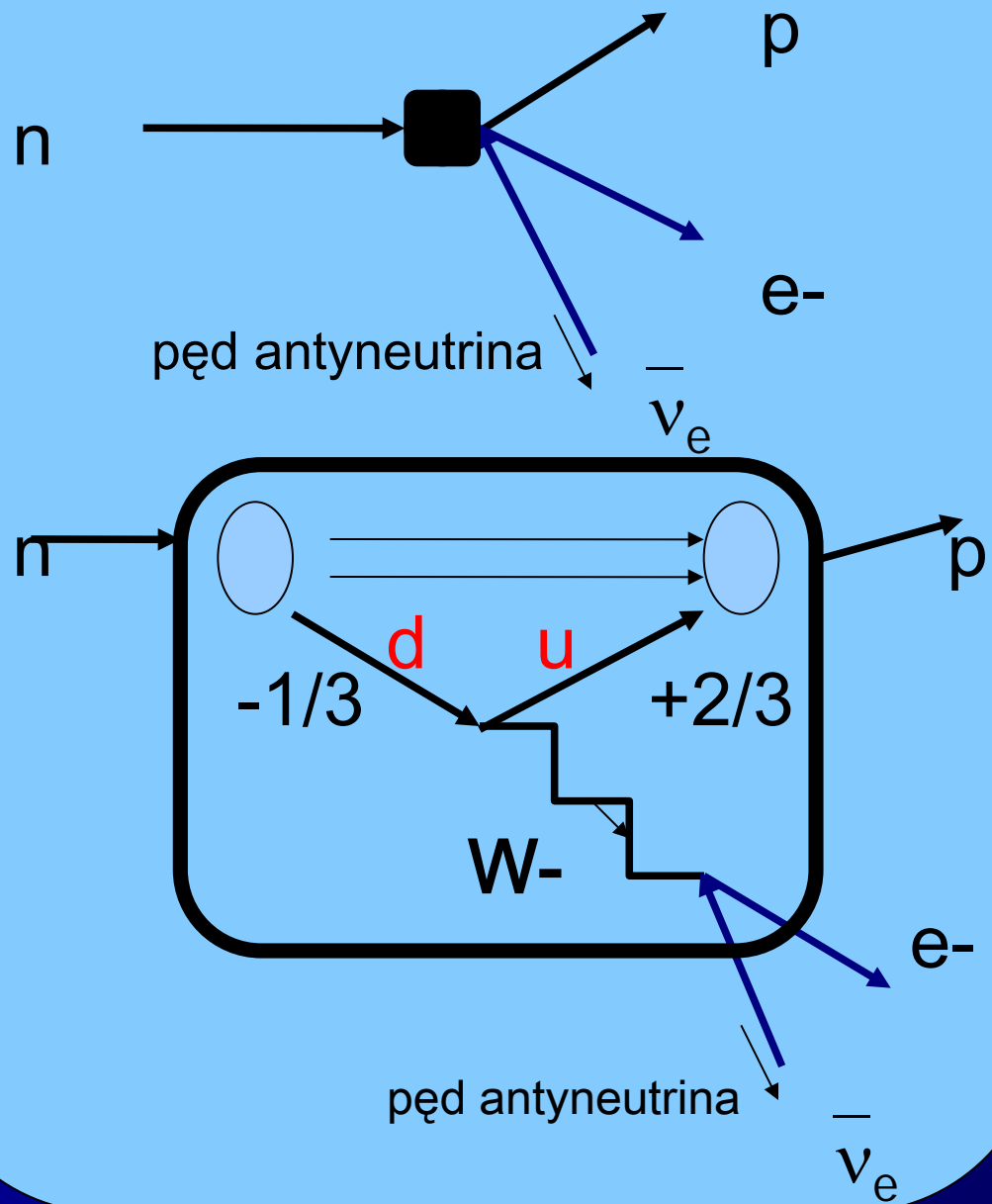
Efektywna „siła” oddziaływania  
“ $G_F$ ” = “stała Fermiego”  
- wyznaczona z danych

Porównanie  
z oddz. el-mag



Teraz przyglądamy się tej czarnej skrzynce reprezentującej oddz. punktowe z dzisiejszą (większą) zdolnością rozdzielczą i widzimy wymianę bozonu  $W$

zachowanie ładunku el.

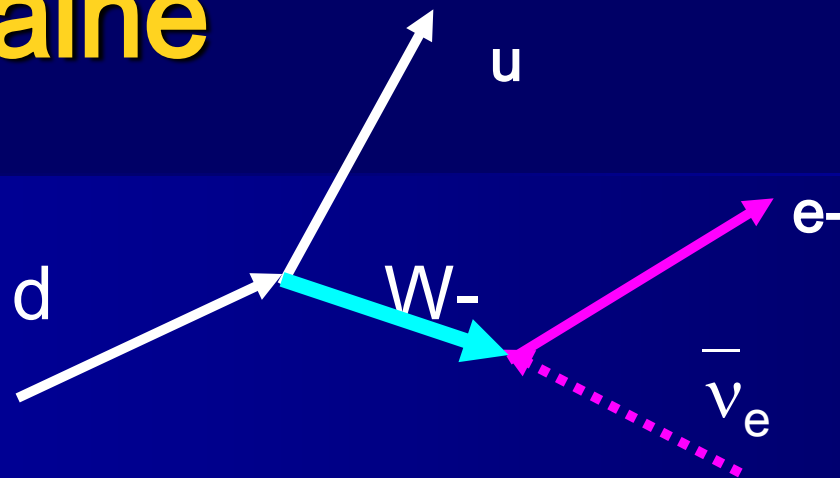


# Oddz. elektroslabe: bozony $W^+$ , $W^-$ , $Z$

- 1864 Maxwell połączył elektryczność i magnetyzm (oddziaływania elektro-magnetyczne) – *pierwsza unifikacja sił*
- 1970 Glashow, Weinberg i Salam – propozycja wspólnego opisu oddziaływań słabych i elektro-magnetycznych (*częściowa unifikacja*) → **oddziaływania elektroslabe (electro-weak EW)**.  
Przewidzieli istnienie oprócz  $W^+$ ,  $W^-$  również  $Z$  (inne ozn.  $Z^0$ )  
*Nagroda Nobla w 1979*
- 1983-4 Zderzenia protonów z antyprotonami w CERN (doświadczenie UA1 i UA2) - w zderzeniach kwarków z antykwarkami powstawały  $W^+$ ,  $W^-$  oraz  $Z$ .  
Rubbia (kierowanie doswiadczeniem) i van der Meer (utrzymywanie wiązki antyprotonów w akceleratorze)  
*Nagroda Nobla (1984) za odkrycie bozonów  $W/Z$*

# 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)

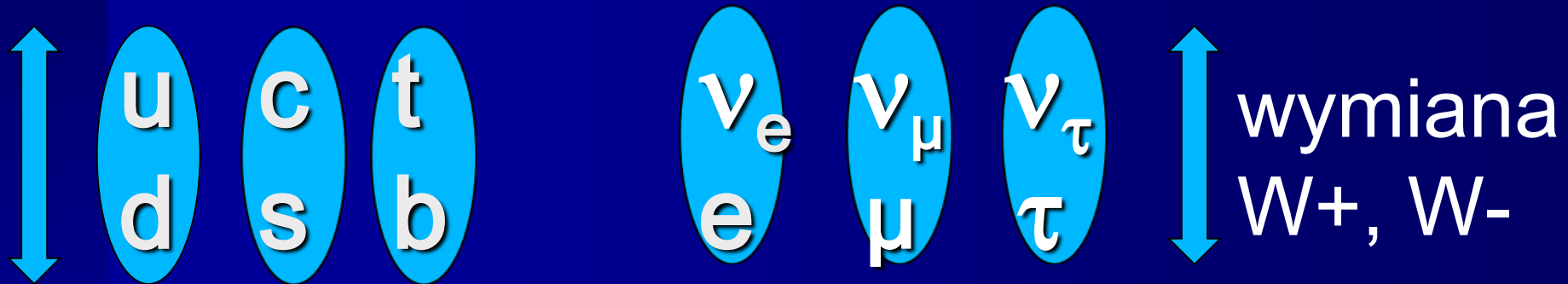
$$\alpha_{em} = e^2/4 \pi = 1/137 \text{ (stała struktury subtelnej).}$$

Słabe oddz. jest jednak **słabsze**, bo wymiana masywnej cząstki  $W$  'kosztuje'



# RODZINY (POKOLENIA)

W oddziaływaniach słabych  
cząstki o spinie  $\frac{1}{2}$  (kwarki i leptony)  
uczestniczą w parach (dubletach):



CC „charged current”

# Pierwsza rodzina =

dwa lekkie duplety 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.

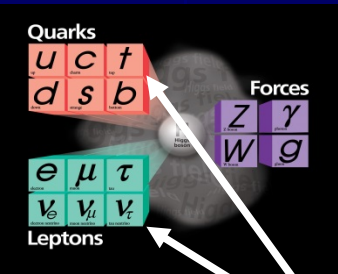
$+1$   **$\bar{\tau}$  (taon +)**

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

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

# 3 rodziny

*(inaczej pokolenia, generacje)*

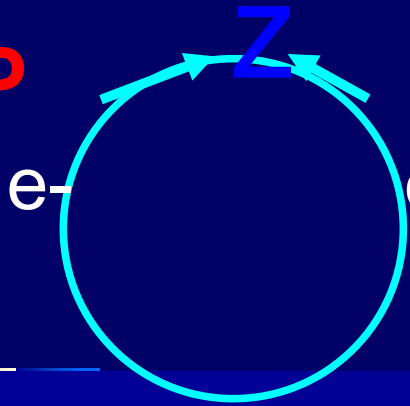


- To jest tablica cząstek fundamentalnych. Rodziny (duplety fermionów o spinie  $1/2$ ) są uporządkowane ze względu na masy: I rodzina - najmniejsze masy, III - największe (Tablica - jak tablica atomów Mendelejewa, ale tu bez głębszej zasady i regularności)
- Skąd te masy ?  
mechanizm Brouta-Englerta-Higgsa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



**BOZON Z**

LEP



Zderzacz LEP (CERN, 1989 - 2002r)

$e^-$ -zderzenia elektronów  $e^-$  z pozytonami  $e^+$

W latach 1989-1995 energia zderzenia  
dobrana tak, aby bozony  $Z$  produkowały się rezonansowo:

$$E^+ + E^- = M_Z = 91 \text{ GeV}$$

Po powstaniu bozon  $Z$  rozpada się demokratycznie na

pary: kwark-antykwar, lepton-antylepton  
(np.  $e^+e^-$ , neutrino el i antyneutrino el.)



1/czas życia  
~ liczba dziur =  
liczba różnych  
typów (kanałów)  
rozpadów

LEP: 4 doświadczenia →  
zebrano 20 mln bozonów  $Z$

# Czas życia bozonu Z

W mechanice kwantowej działa zasada nieoznaczoności

Heisenberga

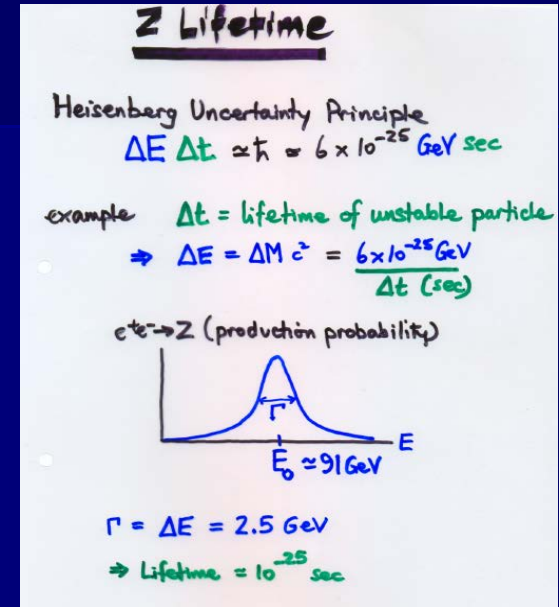
Niech  $\Delta$  oznacza niepewność, rozmycie pomiaru danej wielkości fizycznej, to dla czasu i energii mamy związek:

$$\Delta E \Delta t = 6 \times 10^{-25} \text{ GeV/sec.}$$

Jeżeli  $\Delta t$  = czas życia cząstki rozpadającej się, to rozmycie w energii spoczynkowej (masie) wynosi

$$\Delta E = 6 \times 10^{-25} \text{ GeV/sec}/\Delta t$$

prawdopodobieństwo produkcji Z w zderzeniu  $e^+e^-$  w funkcji energii zderzenia ma taki kształt :

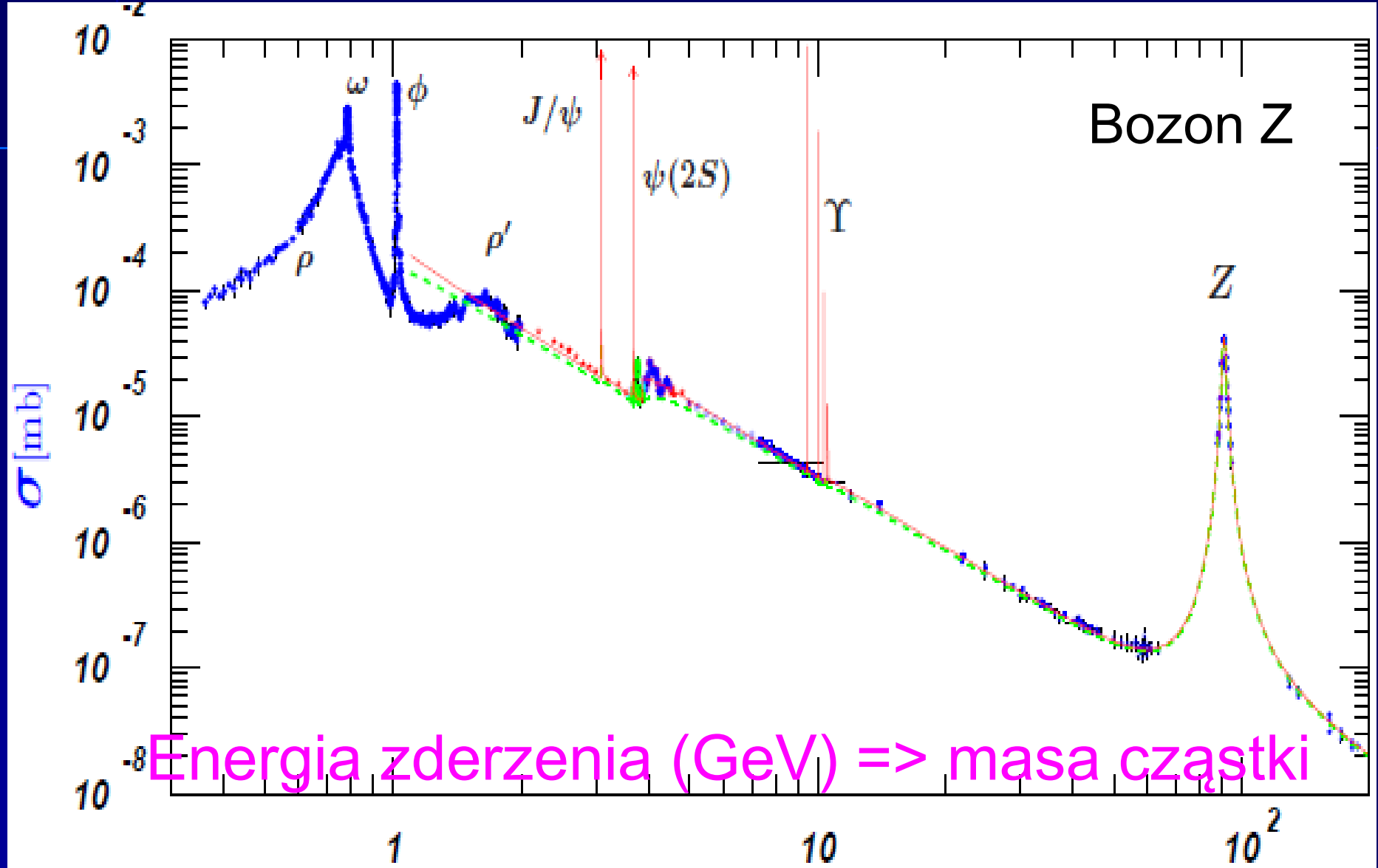


Dla bozonu Z rozmycie energii (szerokość połówkowa bo w połowie wysokości „piku”)

wynosi  $\square \Delta E = 2.5 \text{ GeV}$

stąd czas życia  $\Delta t \sim 2 \times 10^{-25} \text{ s}$

# LEP: liczba przypadków w zderzeniach e+e-



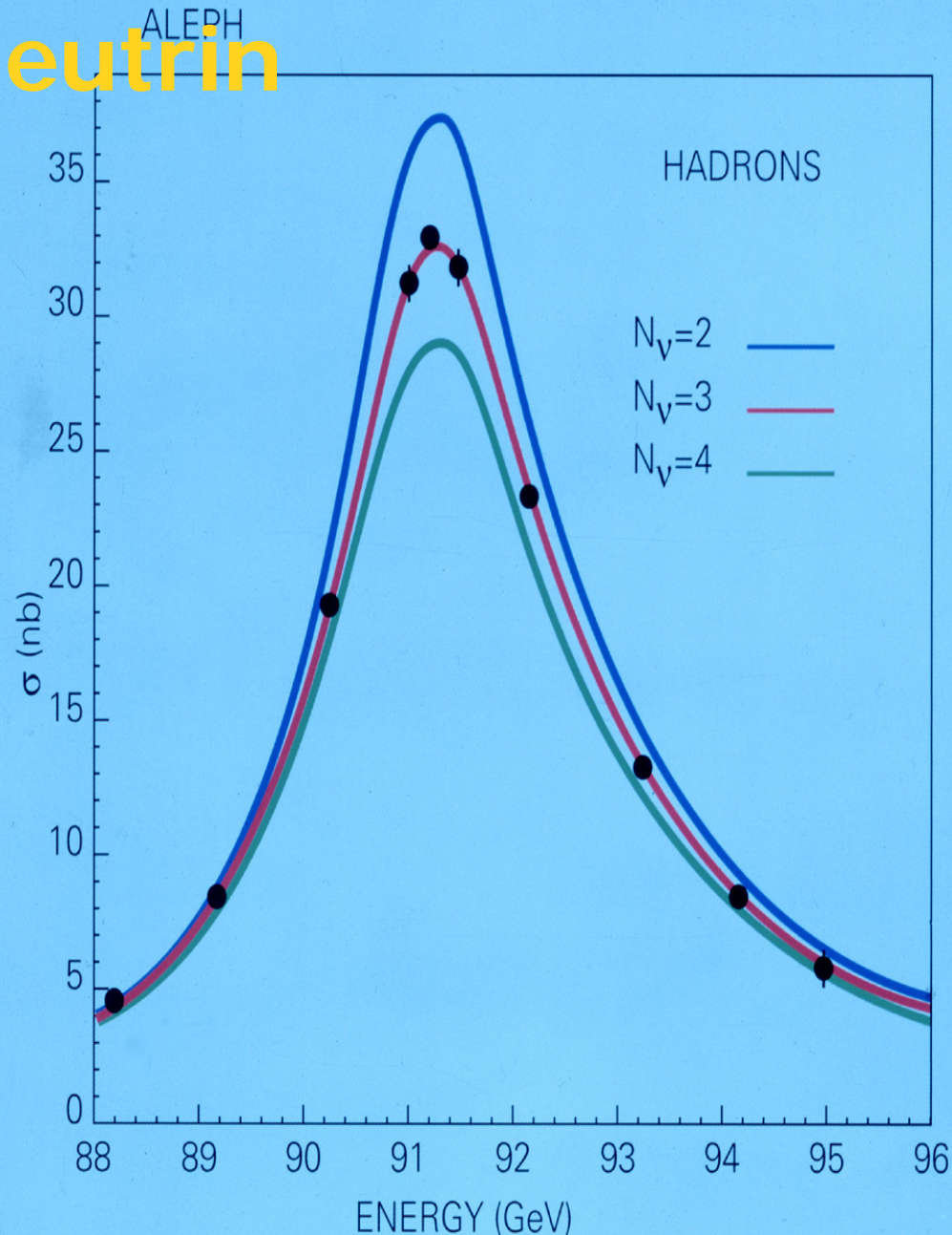
# Liczba lekkich neutrin

Z pomiaru szerokości połówkowej bozonu Z można wyznaczyć ile jest lekkich neutrin - lekkich tzn. takich na które może się rozpaść produkowany (w spoczynku) bozon Z

Na osi pionowej – prawdopodobieństwo produkcji bozonów Z, rozpadających się na znane cząstki (hadrony) i przewidywania dla tej wielkości, jeśli możliwe są rozpady na

2, 3 lub 4 pary  $\nu \bar{\nu}$

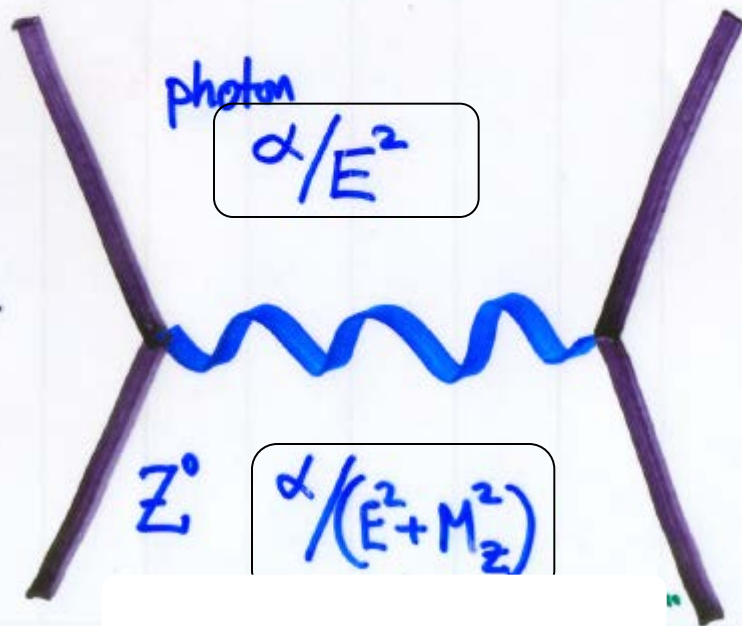
**Zgodność dla  $N_\nu = 3$  !**



# SŁABOŚĆ ODDZIAŁYWAŃ SŁABYCH

# Porównanie wymiany bozonu Z i fotonu w procesie produkcji pary kwark-antykwarek w zderzeniu $e^+ e^-$

$e^+ e^- \longrightarrow q \bar{q}$



Reguła Feynmana (obliczanie prawdopodobieństwa procesu):

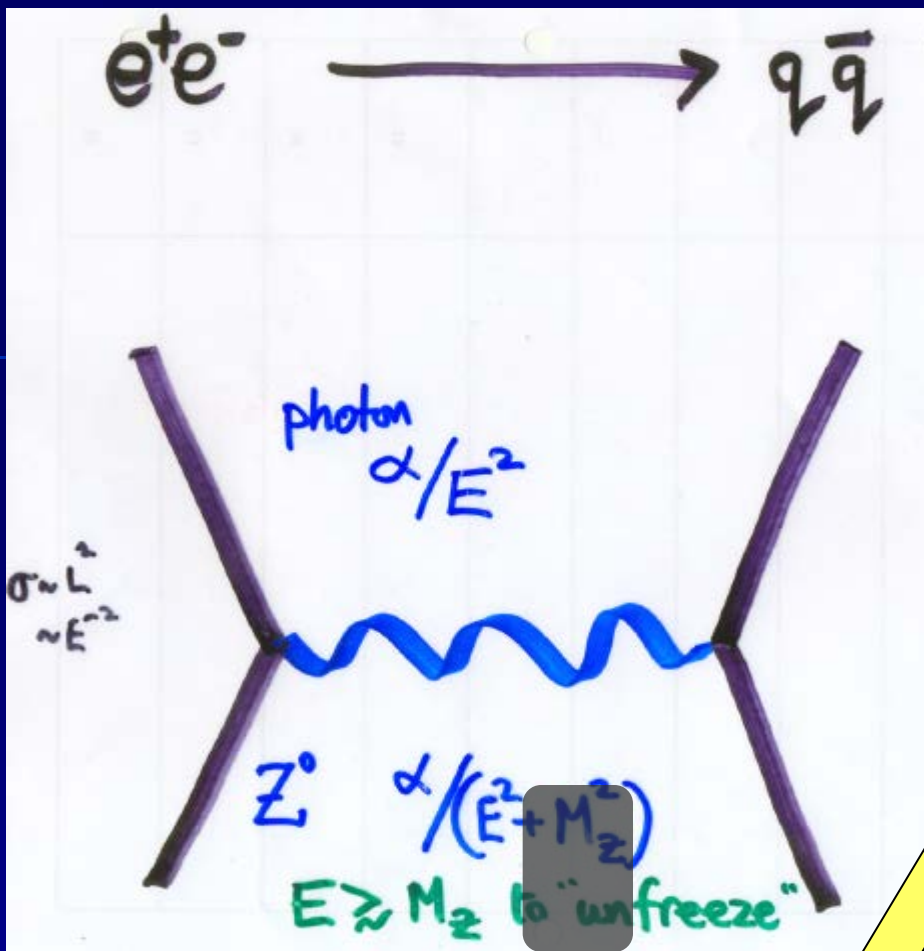
Jeżeli energię  $E$  przenosi “wirtualna” cząstka (wirtualna bo w procesie pojawia się tylko między elementarnymi aktami oddziaływania)

→ **czynnik  $1/(E^2 + M^2)$**

**$M$**  - masa wymienianej cząstki

← tu podano wyrażenie dla bozonu  $Z$  i fotonu





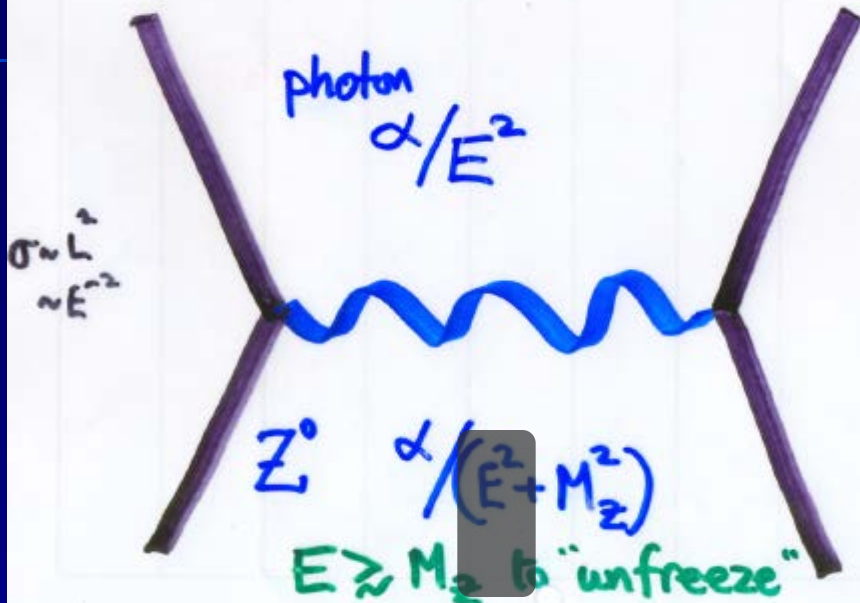
### Reguła Feynmana

Jeżeli energię  $E$  przenosi  
 "wirtualna" cząstka  $Z$  o masie  $M$   
 to czynnik  $1/(E^2 + M^2)$ ,

ale

Dla  $E \gg M$  to w przybliżeniu czynnik  $1/E^2$ ...jak dla fotonu

$e^+e^- \longrightarrow q\bar{q}$



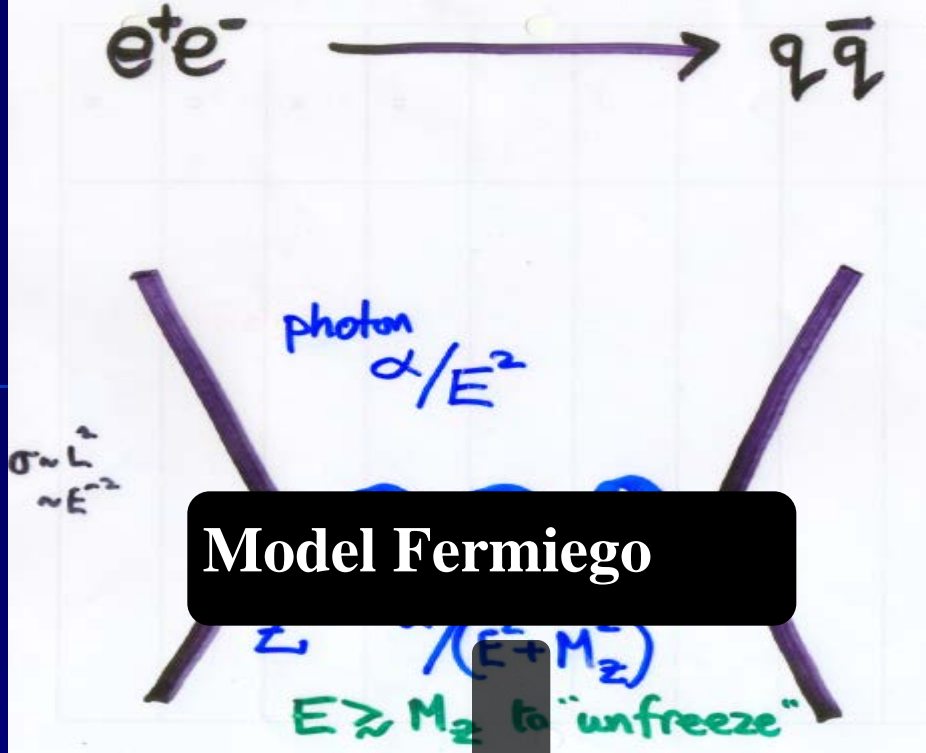
## Reguła Feynmana

Jeżeli energię  $E$  przenosi  
"wirtualna" cząstka  $Z$  o masie  $M$   
to czynnik

$$1/(E^2 + M^2)$$

Dla  $E \gg M$  to w przybliżeniu czynnik  $1/E^2$ ...jak dla fotonu

Ale dla  $E \ll M$  to tylko  $1/M^2$



## Model Fermiego

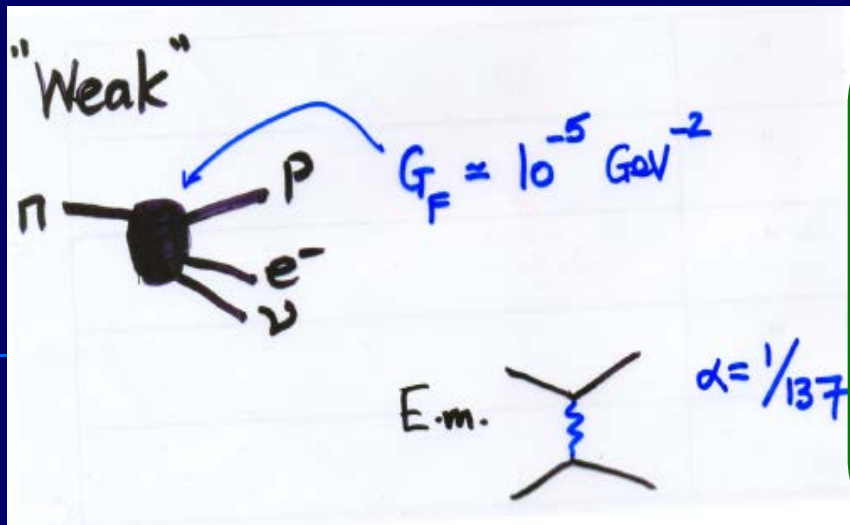
Dla  $E \ll M$  to tylko  $1/M^2$

## Reguła Feynmana

Jeżeli energię  $E$  przenosi "wirtualna" cząstka  $Z$  o masie  $M$  to czynnik  $1/(E^2+M^2)$

Czyli dla wymiany cząstki  $Z$  wyrażenie bez (wymiany) energii. Porównując z wymianą fotonu – to jak oddz. punktowe w Modelu Fermiego !

Tu przykład z wymianą bozonu  $Z$ , a model stworzono dla procesów z wymianą  $W^{+/-}$ .



Czy "słaba siła" jest słaba, bo sprzężenie małe, czy dlatego, że masa W duża??

Sprzężenie  $\alpha_w = g^2/4\pi = 1/32$   
(dla małych energii)

większe niż dla oddz. el-mag.  $\sim 1/137$   
więc odpowiedź: bo duża masa W!

Oddziaływania słabe są "słabsze" niż el-mag. i silne!

Masa bozonu  $W^{+/-} = 80 \text{ GeV}$ , bozonu  $Z = 91 \text{ GeV}$

*są to jedyne masywne nośniki fundamentalne*

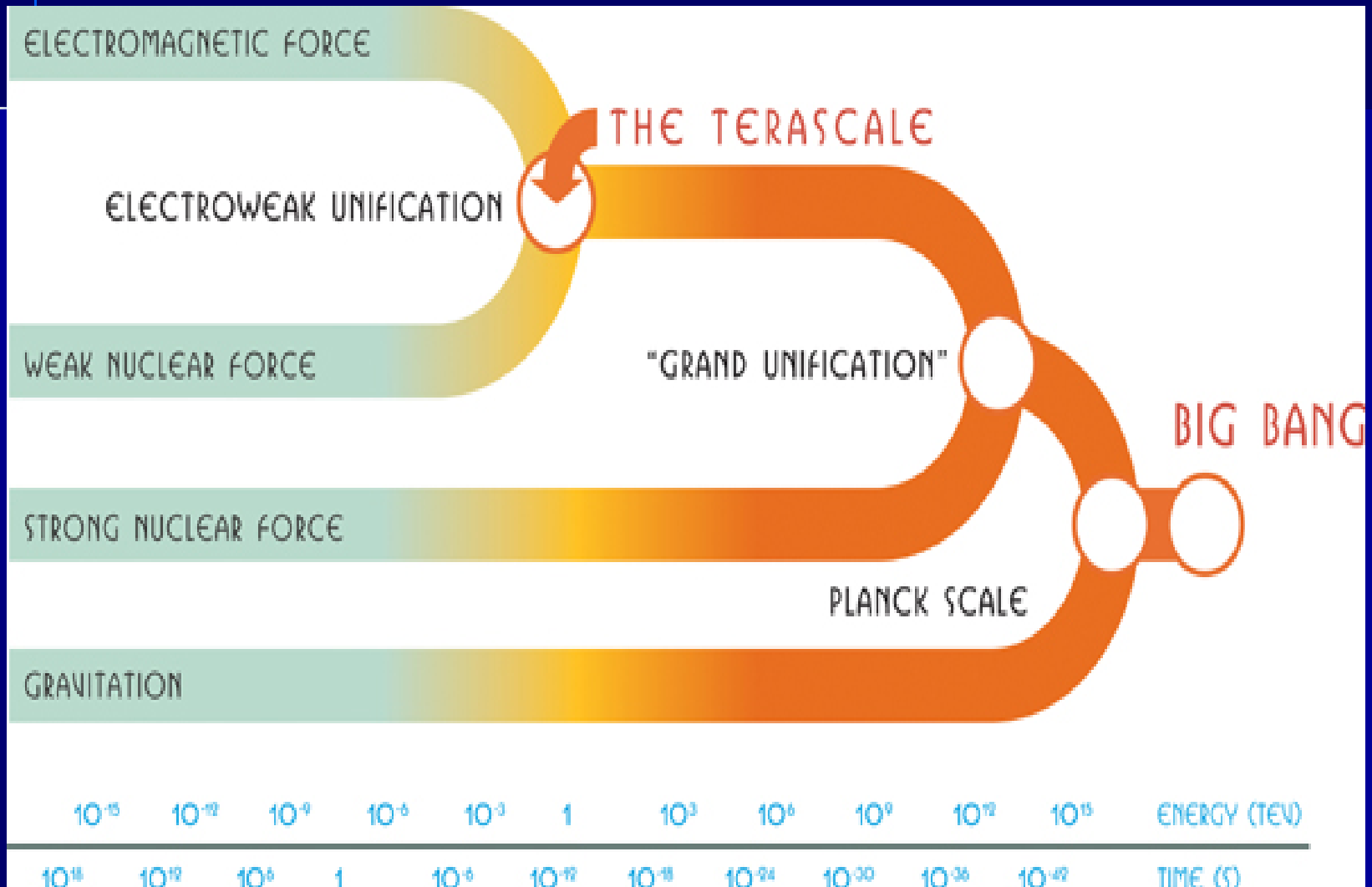
Poprawki kwantowe powodują *biegnięcie* stałych sprzężenia

Oddziaływania słabe i el-mag – podobna „siła” dla energii  $\sim 1 \text{ TeV}$

wspólny opis teoretyczny  $\rightarrow$  oddz. **elektrosłabe**

(unifikacja oddz. el-mag. i słabych)<sub>43</sub>

# UNIFIKACJA



**BOZONY  $W^+$ ,  $W^-$**

# W sercu Słońca procesy:

Z wykładu  
F. Close'a  
(CERN)


At the heart of the Sun:



 **Proton**

 **neutron**

 **positron**

 **neutrino**

deuteron

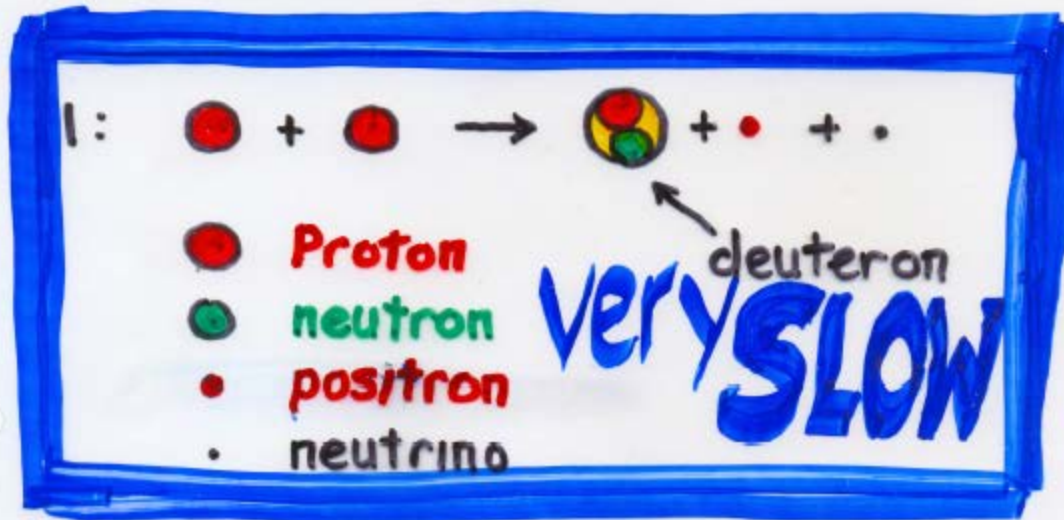


Net result:





At the heart of the Sun:



Procesy „słabe” = małe prawdopodobieństwo, więc „powoli” zachodzą

WEAK



Procesy „silne” = „szybkie”

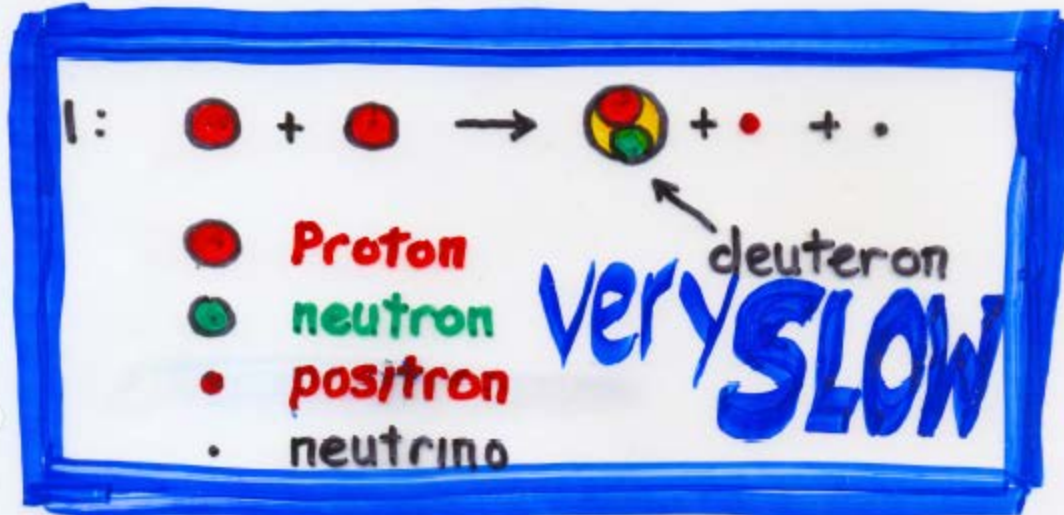
STRONG

Net result:



$\Delta E = \Delta M c^2: {}^4\text{He} + 4p \approx 28\text{MeV}$  ← wypromieniowana energia

# At the heart of the Sun:



Net result:



$\Delta E = \Delta M c^2: {}^4\text{He} + 4p \approx 28\text{MeV}$

wypromieniowana energia

**WEAK**

**STRONG**

→ dlatego Słońce  
świeci od 5 Miliardów  
lat i rozwinęło się życie

**Słabe oddziaływania “słabe” w Słońcu.**

**..ponieważ  $10,000,000\text{K} \sim 1 \text{ keV} \ll 80 \text{ GeV}$**

**...to dlatego Słońce tak długo aktywne,  
że mogliśmy powstać i prowadzić te rozmowę**

Wykład F. Close'a

**We exist because  $M(W)$  is not zero  
→ mass matters**

# Pytania do wykładu 6

- 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

# Pytania do wykładu 6

- Kiedy powstała teoria opisująca pierwszą unifikację sił?
- W zderzeniu wiązek jakich cząstek odkryto bozon Z?
- Ile bozonów Z wyprodukowano w zderzaczach LEP?
- Ile wynosi masa i szerokość połówkowa Z?
- Jak długo żyje bozon Z?
- Skąd wiemy, że są tylko 3 pokolenia lekkich neutrin?
- Ile wynosi stała sprzężenia  $\alpha_W$  dla oddziaływań słabych dla niskich energii?
- Ile wynosi stała Fermiego?
- Kto i gdzie odkrył doświadczalnie bozony W i Z?
- Czy oddziaływania słabe są „słabe” bo masa W jest duża?
- Czy Słońce świeci tak długo dzięki oddziaływaniom słabym czy silnym?
- Ile energii wydziela się w jednym cyklu protonowym w Słońcu?
- Dla jakich energii oddziaływania elektromagnetyczne i słabe mają podobną „siłę”?

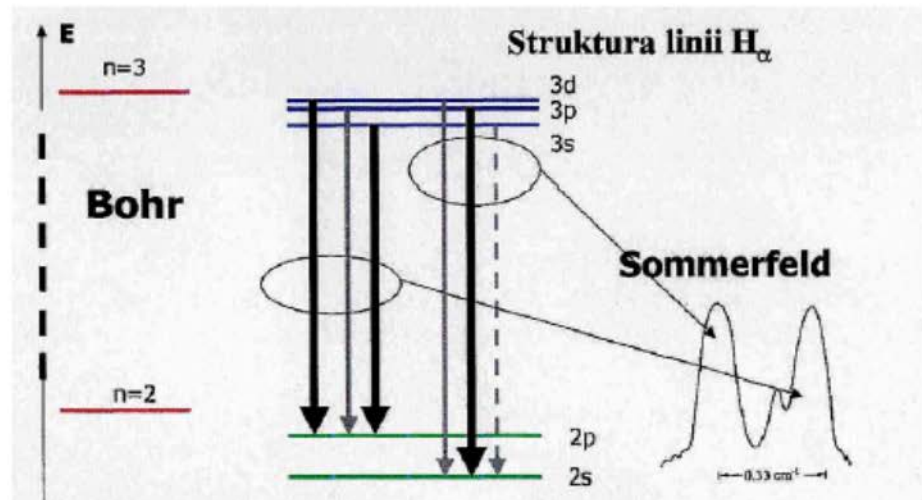
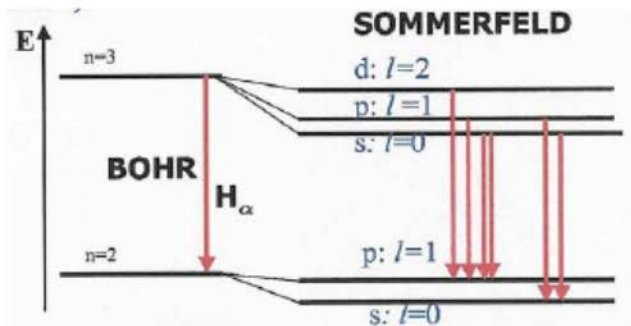


## Atom wodoru - poprawka relatywistyczna Sommerfelda (1916r.)

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  $L$ ).

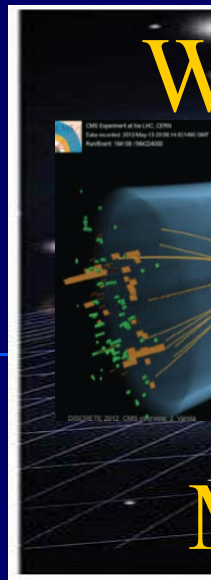
Sommerfeld policzył wielkości tych zmian energii w zależności od orbitalnej liczby kwantowej  $l$ . Pokazał także, że wartość orbitalnej liczby kwantowej zależy od  $n$  - głównej liczby kwantowej w modelu Bohra:  $l=0, 1, 2 \dots n-1$ , zaś poziom opisywany przez  $n$  rozszczepia się na  $n$  podpoziomów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



Reguły wyboru – silne linie, gdy:

$$\Delta l = \pm 1$$

$\Delta n$  – brak ograniczeń



$u$	$c$	$t$	$g$
$d$	$s$	$b$	$W$
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$Z$
$e$	$\mu$	$\tau$	$\gamma$

Odd

h