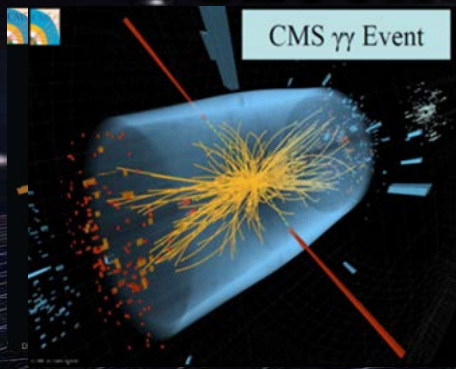


Wszelchświat cząstek elementarnych



WYKŁAD 5 i 6

M. Krawczyk, A.F. Żarnecki-Wydział Fizyki UW

I. Spin i historia odkrycia

Fermiony i bozony

II. Oddziaływanie słabe i rodziny cząstek fundamentalnych

III. 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**)
- Spin jest wielkością wektorową ale tylko niektóre rzuty na wybraną oś możliwe (skwantowanie). Liczba różnych stanów spinowych (polaryzacyjnych) cząstki o niezerowej masie wynosi **$2s+1$**
- 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 – 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 ^{+/-}	- 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)

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

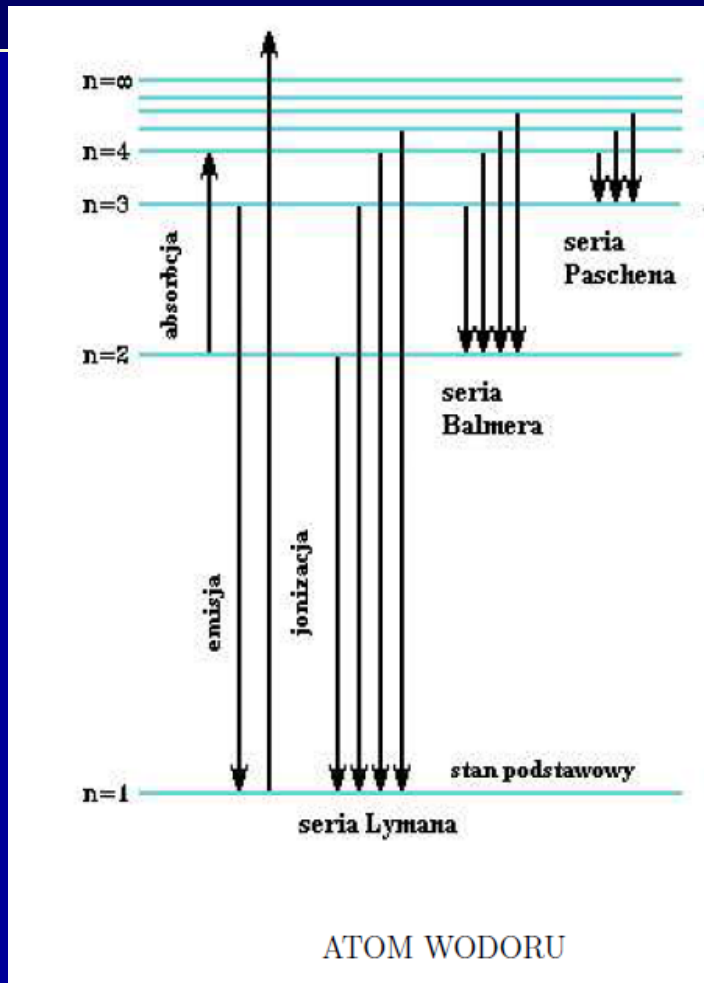
$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

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)

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

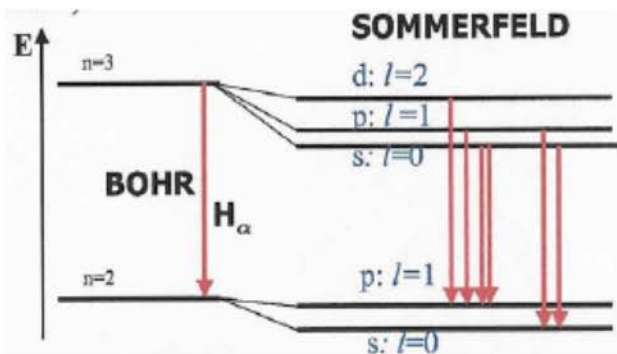
$$\Delta E_{n_1 n_2} = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

Wzory empiryczne Balmera
1885(95?)

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

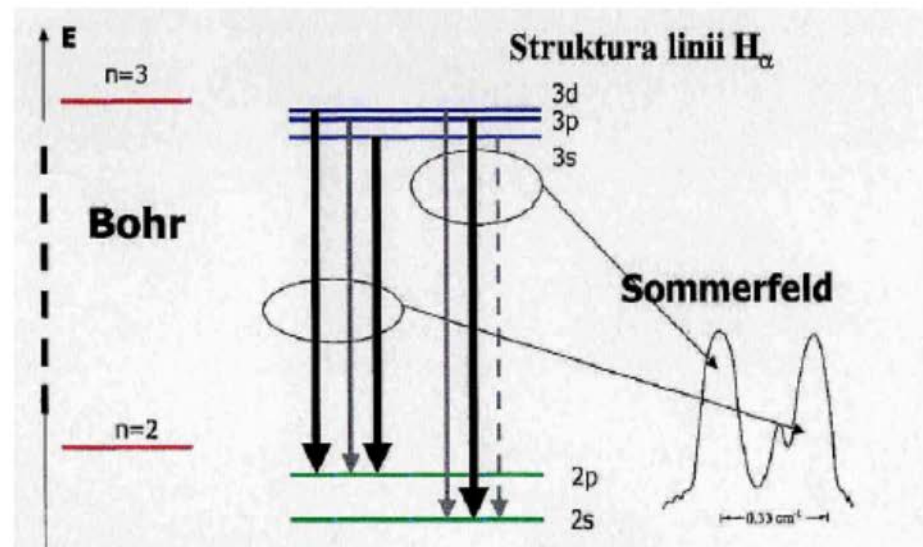
Sommerfeld 1916

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 opisywany 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 – rozszczepienie linii w polu elektrycznym)

Anomalne zjawisko Zeemana

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

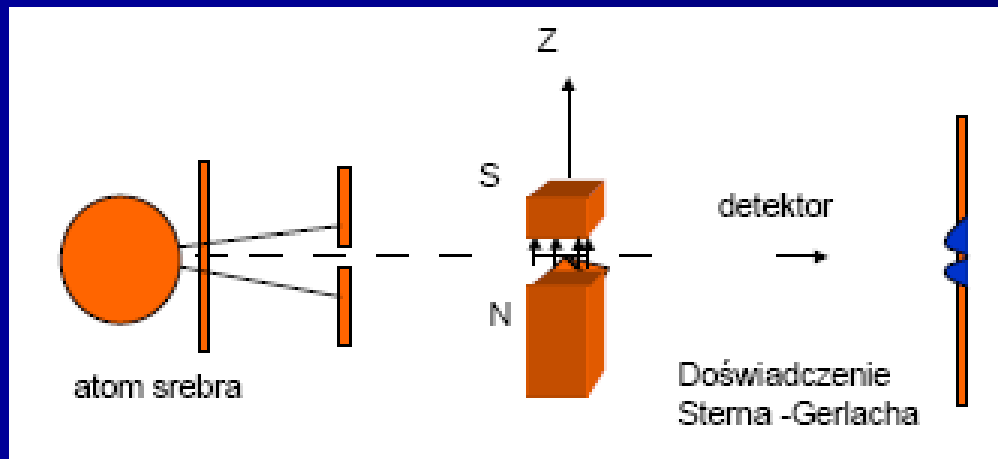
Można było to opisać formalnie wprowadzając liczbę kwantową $j = l \pm \frac{1}{2}$, gdzie $l \hbar$ – orbit. mom. pędu

Pauli: „two valuedness not describable classically”- 1925
potrzebne 4 a nie 3 liczby kwantowe;
zasada wykluczenia (exclusion principle)

→ struktura subtelna widma

Doświadczenie Sterna-Gerlacha

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

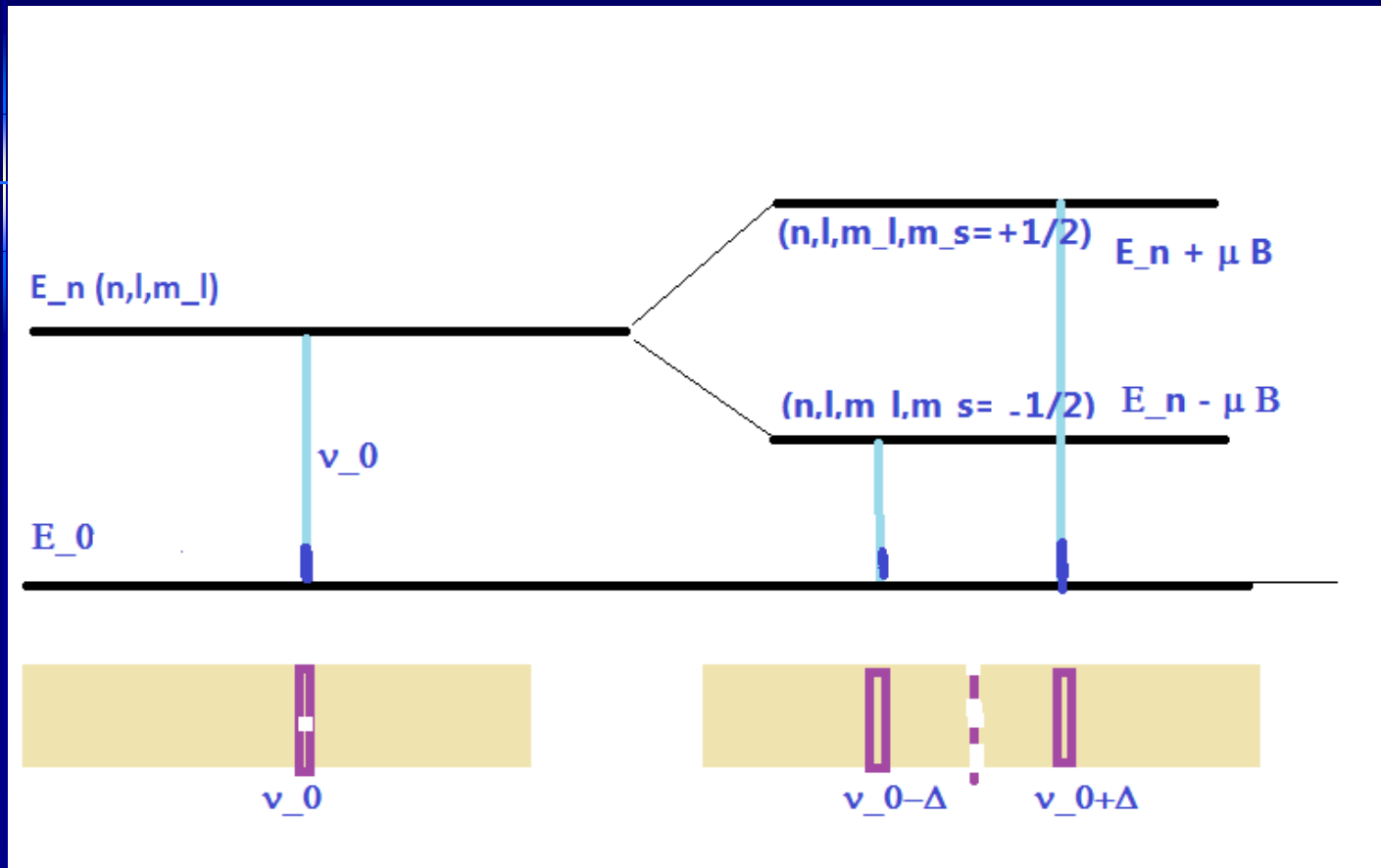


Ruch elektronu po orbicie → moment magnetyczny dla atomu w polu magnetycznym. W atomie srebra wszystkie elektrony, z wyjątkiem jednego, tworzą zamknięte powłoki. Więc o tym efekcie decyduje ten jeden (zewnątrzny) elektron tak jak dla atomu wodoru...

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
- (czynnik $\frac{1}{2}$) i Pauli uwierzył w spin (*natychmiast zaproponował opis w postaci macierzy 2×2 , nazywanych macierzami Pauliego*)

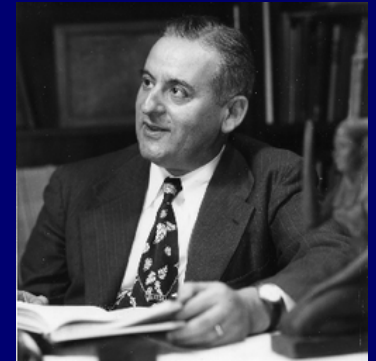
Dziś rozwija się **spinotronika** (*w kierunku kwantowego komputera*)

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 – 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 to bozony wektorowe

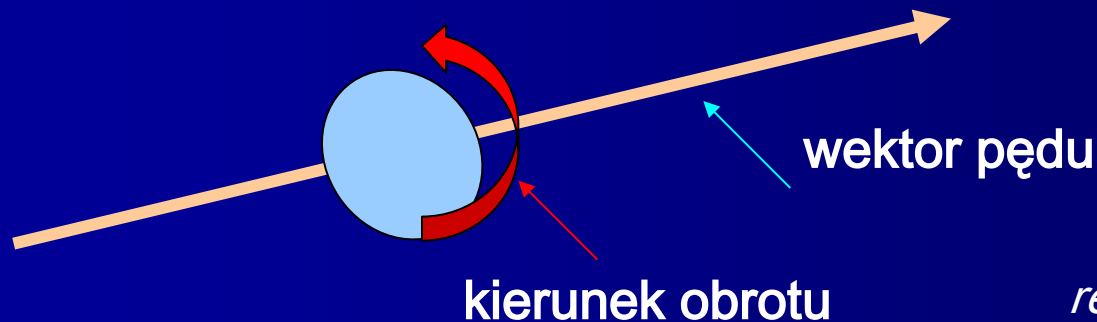
Nazwa	symbol	ład. el.	masa
Bozon	W^+	+ 1	80.4 GeV
Bozon	W^-	- 1	80.4 GeV
Bozon	Z	0	91.2 GeV
Foton	γ	0	0
Gluony(8)	g	0	0

(inna nazwa - bozony pośredniczące)

- W^\pm są wzajemnie dla siebie antycząstkami
- γ i Z – są własnymi antycząstkami
- gluon $a \bar{b}$ antycząstką do gluonu $\bar{a} b$
(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

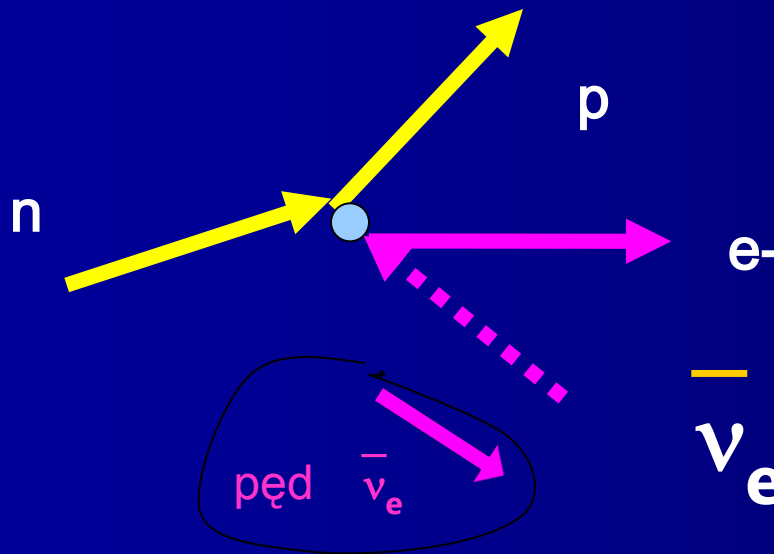
RODZINY I ODDZIAŁYWANIA SŁABE

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 β



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*)

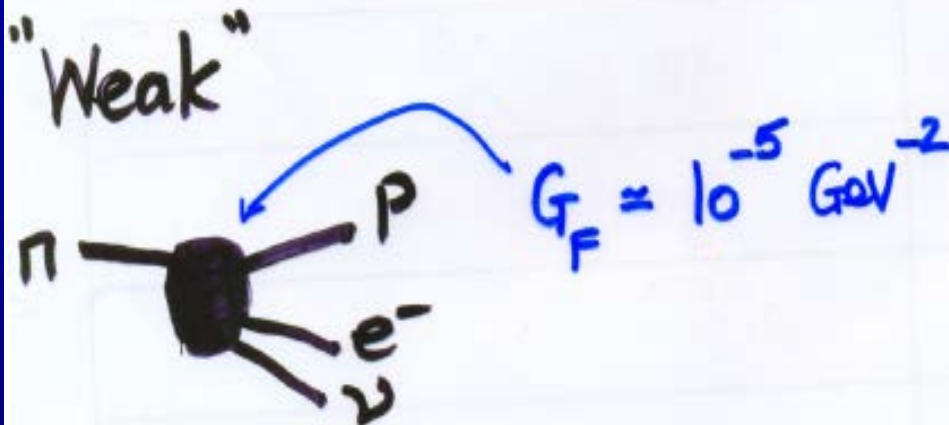
Oddziaływania słabe

-model Fermiego

wg. wykładów F. Close w CERN

Model Fermiego (1934) rozpadu beta neutronu:

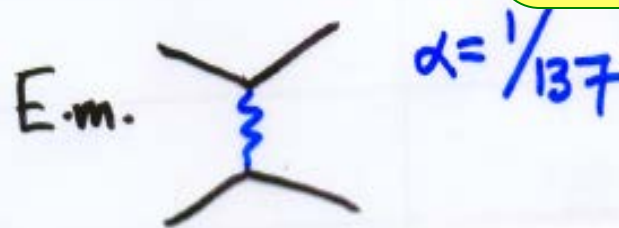
Oddziaływanie punktowe neutronu, protonu, elektronu i neutrina e



prąd hadronowy x prąd leptonowy

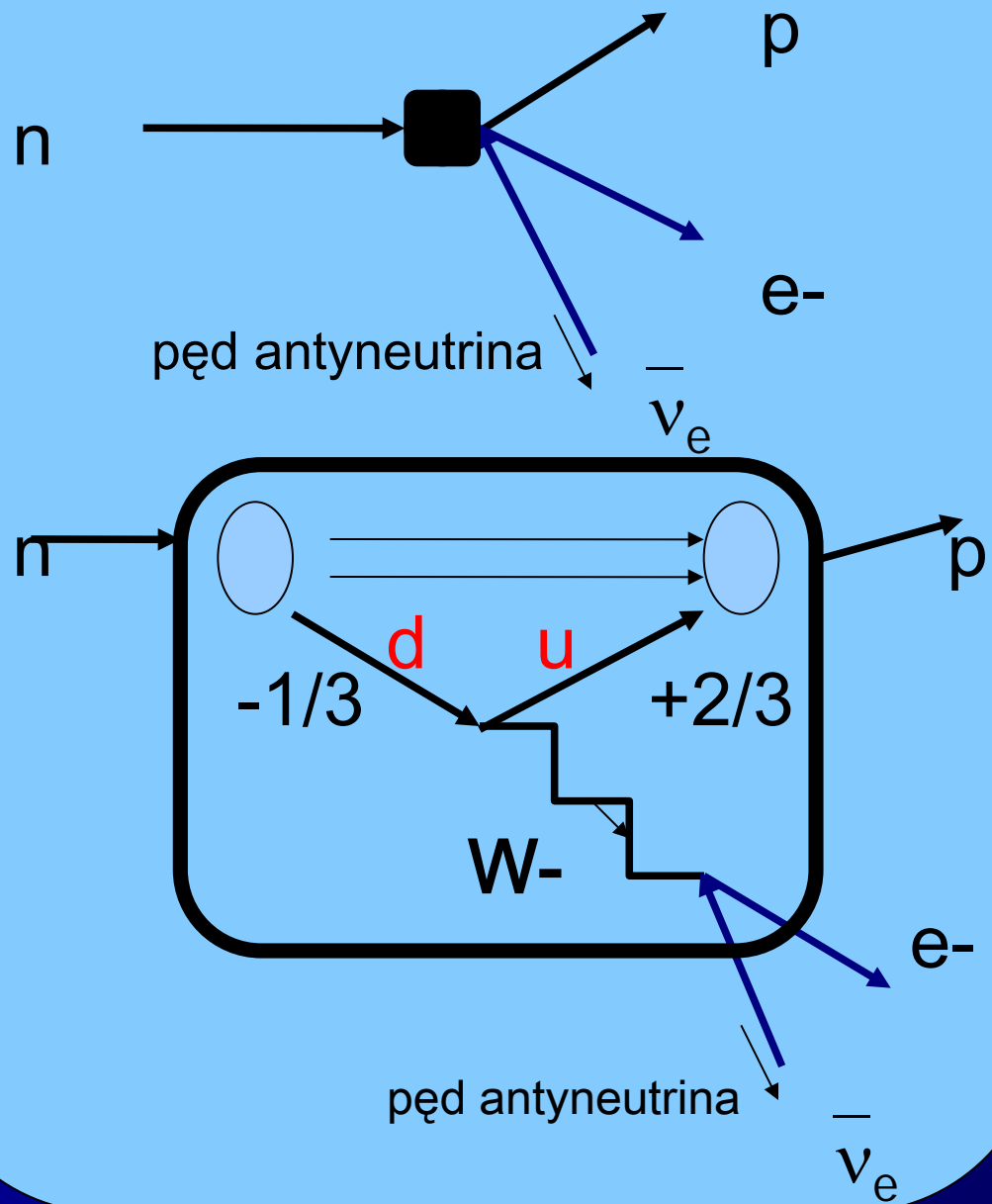
Efektywna „siła” oddziaływania
“ G_F ” = “stała Fermiego”
- wyznaczona z danych

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.

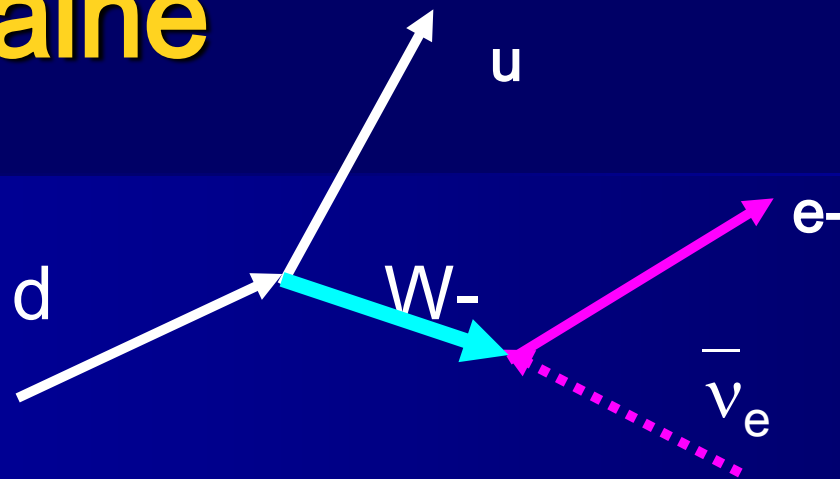


Oddz. elektroślabe: bozony W^+ , W^- , Z

- 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 elektroślabe (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 doświadczeniem) i van der Meer (utrzymywanie wiązki antyprotonów w akceleratorze)
Nagroda Nobla w 1984 za odkrycie bozonów W/Z

Oddziaływania słabe fundamentalne

Rozpad β



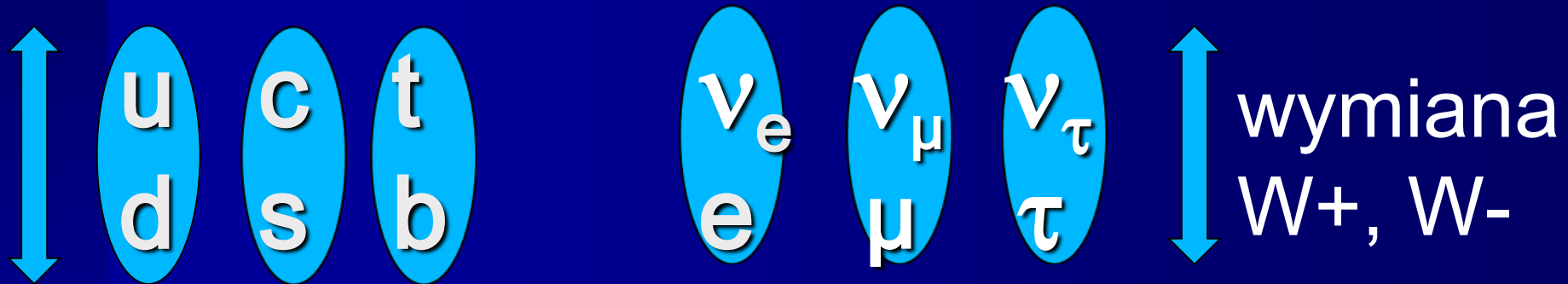
wierzchołki $d \rightarrow u W^-$ i $W^- \bar{\nu}_e \rightarrow e^-$ opisuje stała sprzężenia g (g - „ładunek słaby”) $\alpha_W = g^2/4 \pi = 1/32$ **większa** niż odpowiednia stała sprzężenia dla oddz. elektromagnetycznych e (e -ładunek elektryczny)

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

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):



nazwa

CC „charged current”

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 doświadczenia (lata 2001-2) wskazują, że neutrina mają bardzo małą ale *niezerową masę* ... **NOBEL 2015!**

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 ν_{μ}

-1 **μ (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 ν_τ

-1 **τ (taon -)**

Oczywiście istnieje też trzecia antyrodzina

np. dublet antyleptonowy:

ład. el.

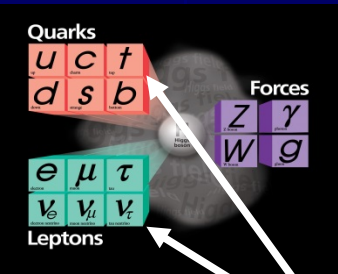
$+1$ **$\bar{\tau}$ (taon +)**

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

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

3 rodziny

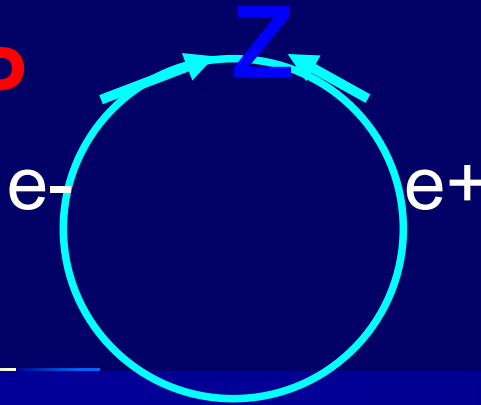
(inaczej pokolenia, generacje)



- 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)

zderzenia elektronów e^- z pozytonami e^+
W latach 1989-1995 energia zderzenia
dobrana tak, aby bozony Z produkowały się rezonansowo:

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

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

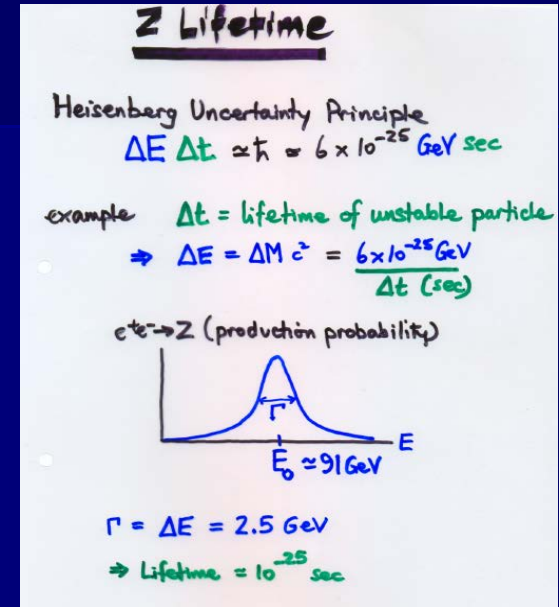
Niech Δ oznacza niepewność, rozmycie pomiaru danej wielkości fizycznej, to dla czasu i energii mamy związek:

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

Jeżeli Δt = 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 :

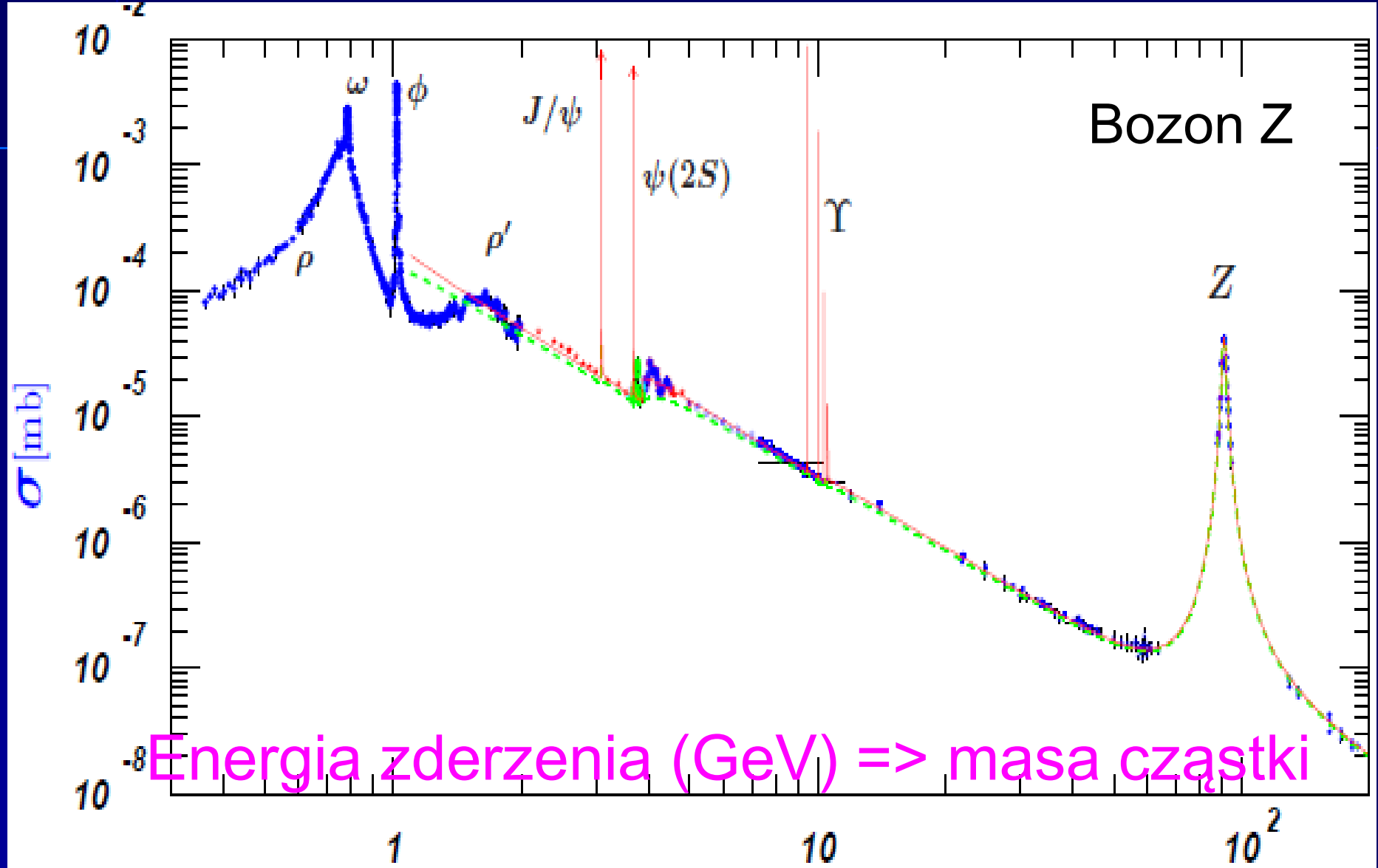


Dla bozonu Z rozmycie energii (szerokość połówkowa bo w połowie wysokości „piku”)

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-



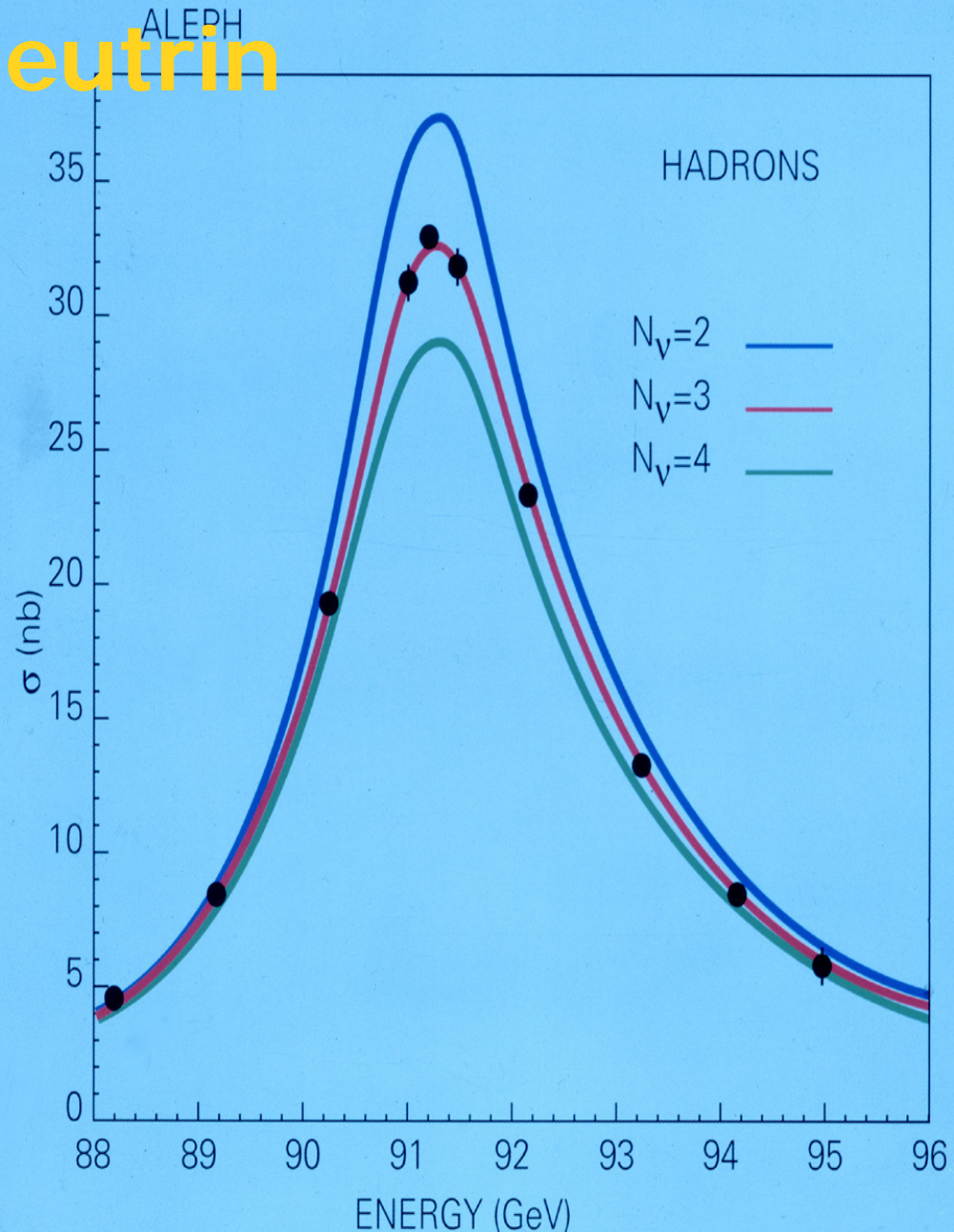
Liczba lekkich neutrin

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 $N_\nu = 3$!



WYKŁAD 6

SŁABOŚĆ ODDZIAŁYWAŃ SŁABYCH

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

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

photon

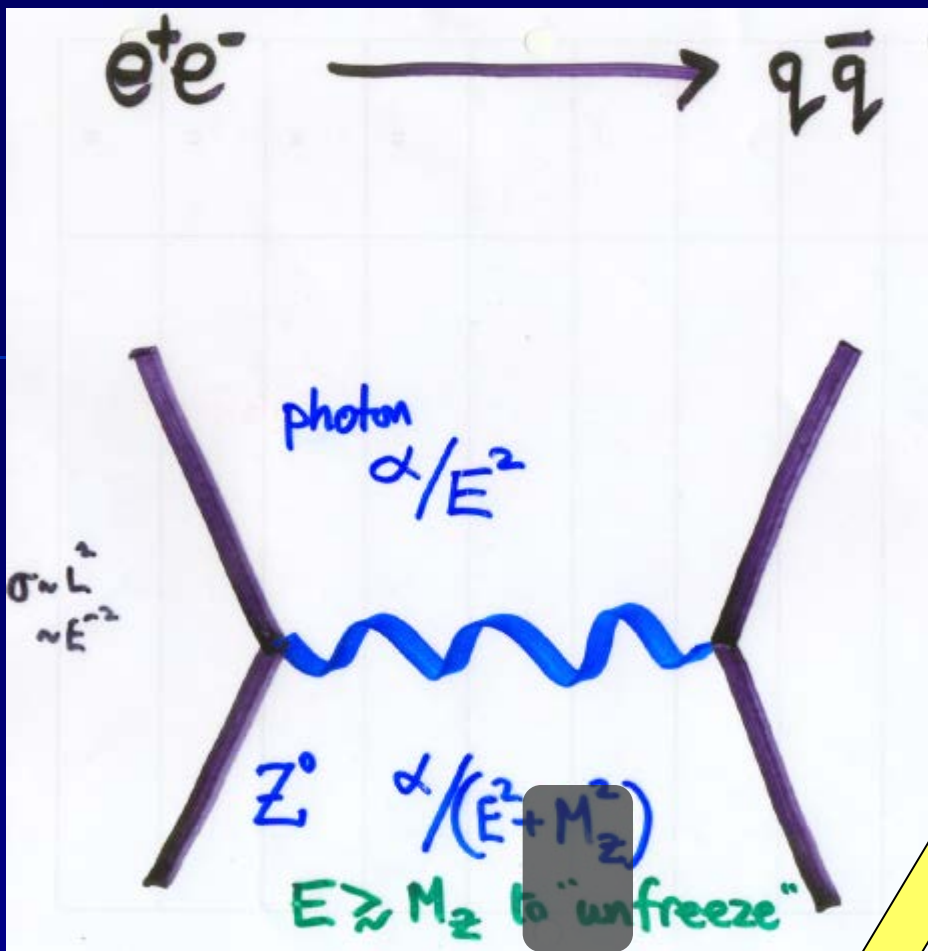
$$\alpha/E^2$$

$$\sigma \sim \frac{1}{E^2}$$

Z^0

$$\alpha/(E^2 + M_Z^2)$$

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



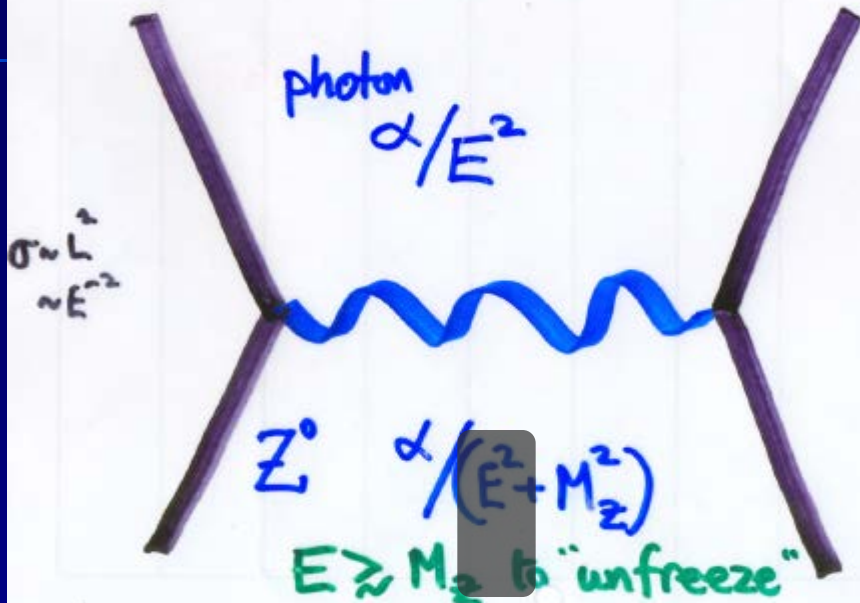
Reguła Feynmana

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

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



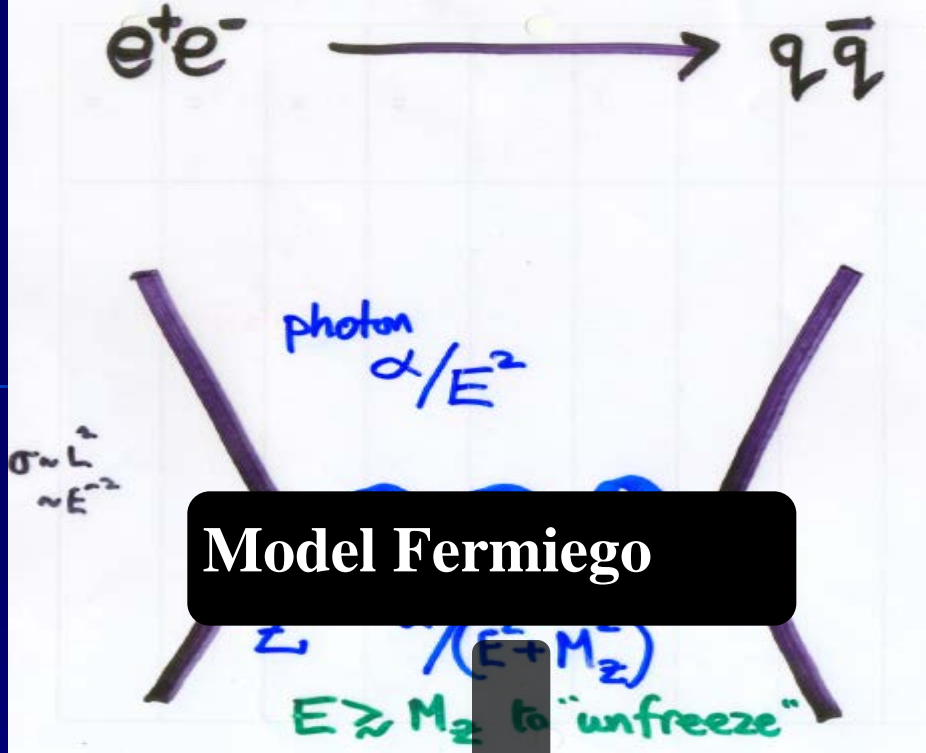
Reguła Feynmana

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 $1/M^2$



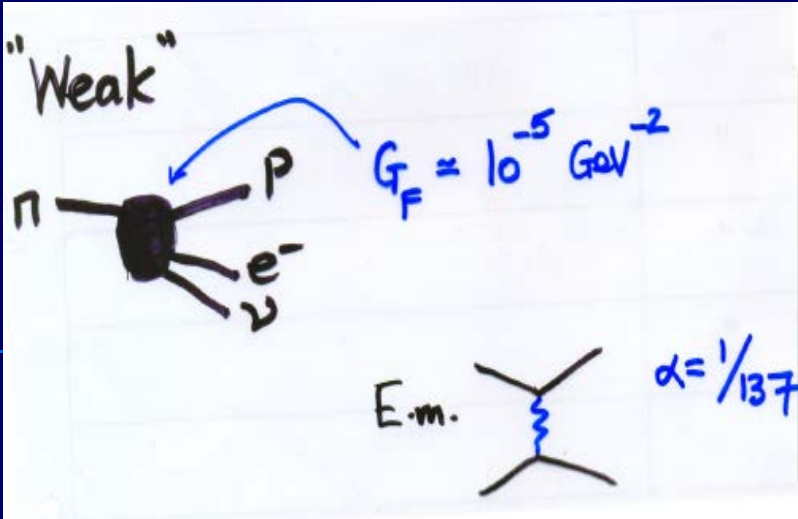
Reguła Feynmana

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

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

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

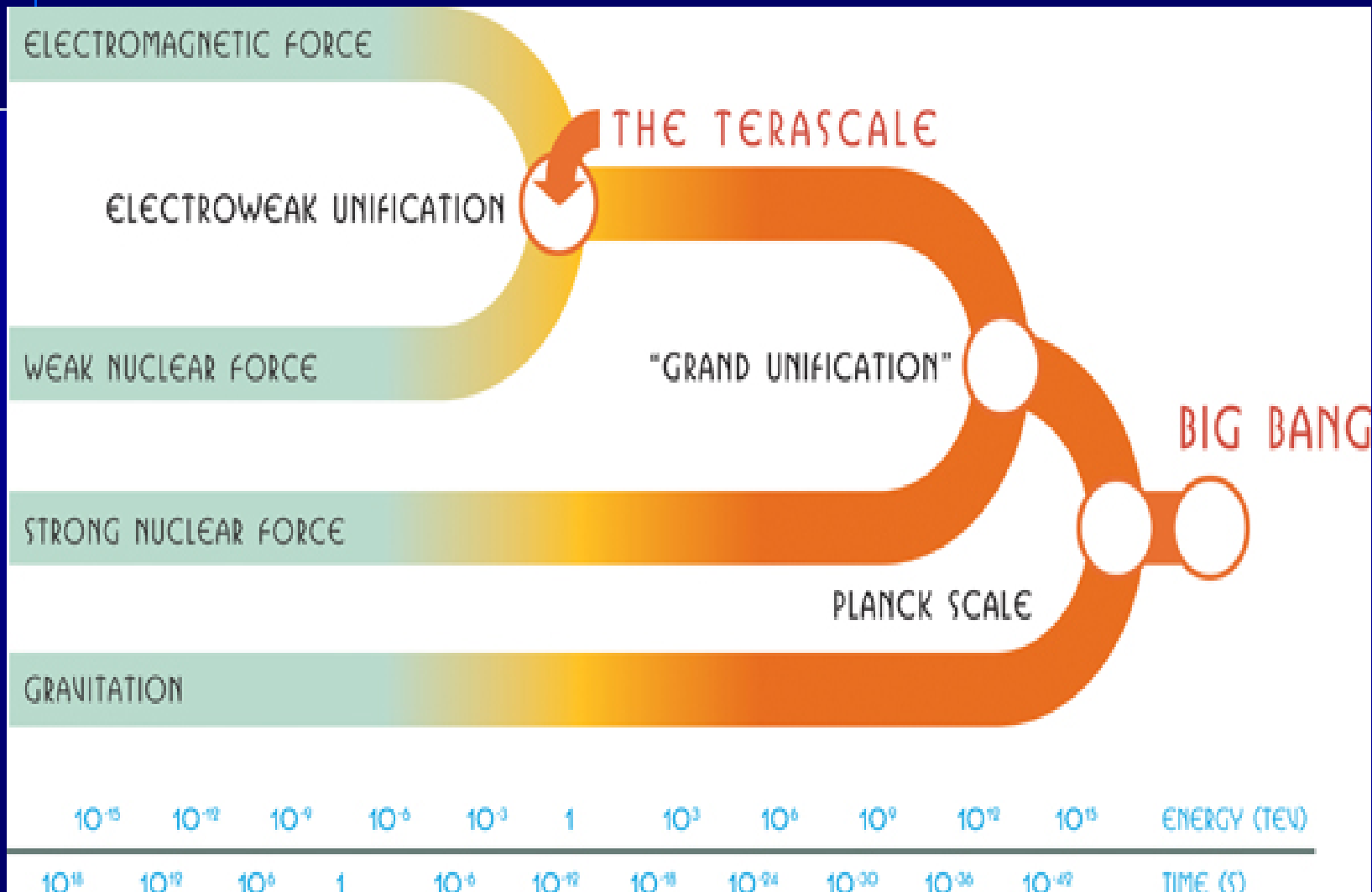
Poprawki kwantowe powodują *biegnięcie* stałych sprzężenia

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)₄₄

UNIFIKACJA SIŁ

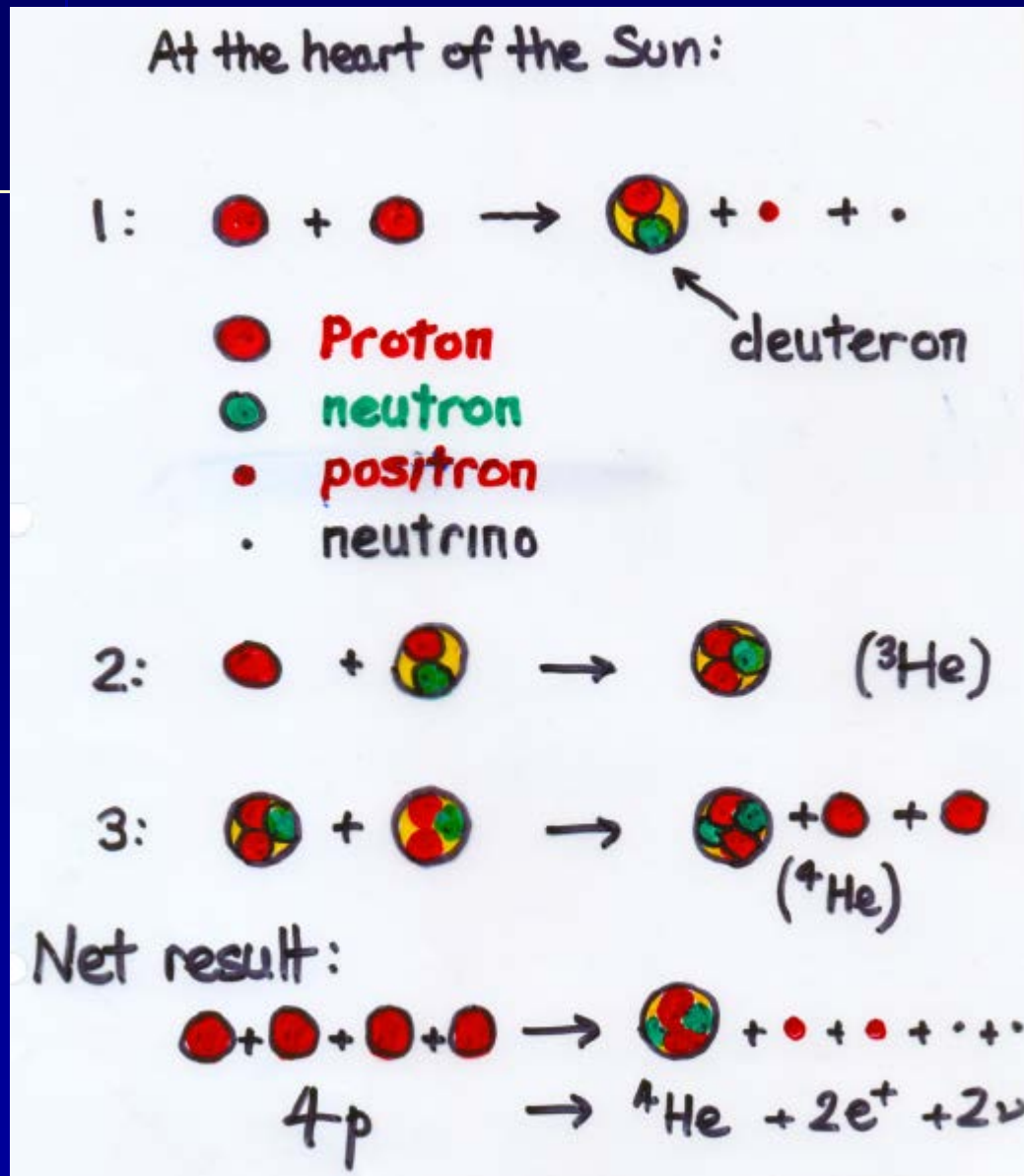


na osi poziomej: zależność od energii

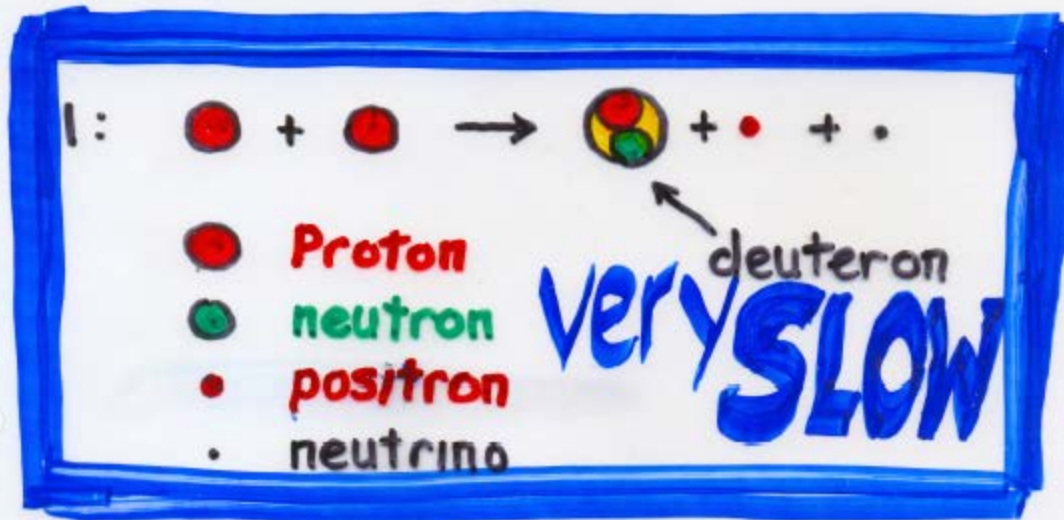
BOZONY W^+ , W^-

W środku Słońca zachodzą procesy:

Z wykładu
F. Close'a
(CERN)



At the heart of the Sun:



Net result:



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

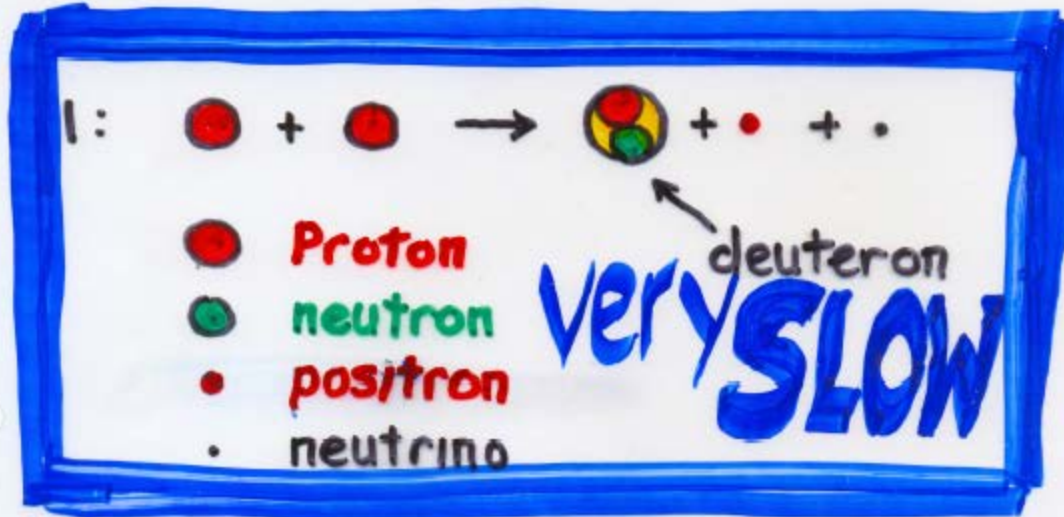
Procesy „słabe” = małe prawdopodobieństwo, więc „powoli” zachodzą

WEAK

Procesy „silne” = „szybkie”

STRONG

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**

SYMETRIE ODDZIAŁYWAŃ SŁABYCH

Oddziaływnie słabe są czułe na stany spinowe cząstek !

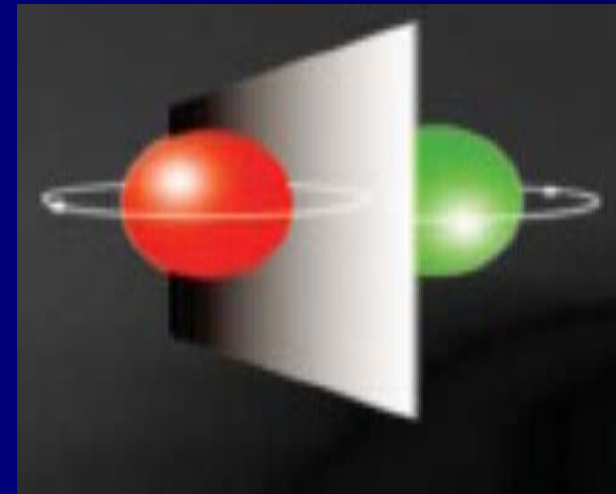
Wiemy, że dla cząstki o spinie $\frac{1}{2}$ możliwe rzuty na określoną oś, np. wyznaczoną przez pęd cząstki, wynoszą $+\frac{1}{2}$ i $-\frac{1}{2} \rightarrow$

prawe R (right) i lewe L (left) cząstki

Oddziaływania słabe działają tylko między lewymi stanami cząstek !

*Yang-Lee 1956
Wu 1957*

A to oznacza, że oddziaływania te nie respektują symetrii względem odbicia (symetria P -parzystości), które oznacza zamianę $L \leftrightarrow R$



Symetria P, C i CP w oddz. słabych

Oddziaływania słabe mają najmniej symetrii

- **Symetria P** (odbicia): zamiany $L \leftrightarrow R$ złamana!
- **Symetria C** (sprzężenia ładunkowego): zamiana cząstki na antycząstkę (ładunku el. na przeciwny) złamana! (C zmienia neutrino L na antyneutrino L, a w przyrodzie nie ma takiego stanu - antyneutrino tylko prawe R)
- **Symetria kombinowana CP** (złożenie operacji odbicia i sprzężenia ład.) neutrino lewe przeprowadza na antyneutrino prawe - OK. *Landau 1957*
- Symetria CP jest prawie (10^{-4}) zachowana.

PRAWIE robi różnicę →

brak symetrii „materia-antymateria” we Wszechświecie

MATERIA - ANTYMATERIA

- Skąd różnica występowania materii i antymaterii we Wszechświecie?
- Postulat Sacharowa (~1960):
Na początku Wszechświata jest tyle materii co antymaterii, ale jeśli łamane są symetrie C i CP może pojawić się mała nadwyżka materii.
- W wyniku ekspansji ten mały efekt doprowadził do stanu obecnego – gdy antymateria wytwarzana jest tylko w laboratoriach, i w promieniowaniu kosmicznym.

więcej na następnych wykładach

Pytania do wykładu 5

- 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 5 i 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 α_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”?
- Czego dotyczy warunek Sacharowa?