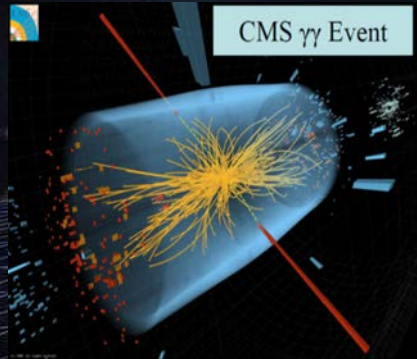


Wszechświat cząstek elementarnych



WYKŁAD 8

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

Oddziaływania słabe

Cztery podstawowe siły- przypomnienie

Oddziaływanie grawitacyjne

Działa między wszystkimi cząstkami, jest to zawsze przyciąganie.

Odpowiedzialne za tworzenie Układu Słonecznego, galaktyk itp.

Oddziaływanie elektromagnetyczne

Ładunki elektryczne mogą się odpychać lub przyciągać.

Odpowiedzialne za tworzenie wiązań atomowych.

Oddziaływanie silne (elementarne i fundamentalne-

jądrowe i kolorowe)

Siły jądrowe działają między nukleonami → przyciąganie; odpowiedzialne za tworzenie jąder atomowych. Wewnątrz nukleonów i innych hadronów (cząstek oddziałujących silnie) - kwarki i siły kolorowe między nimi.

Oddziaływanie słabe (elementarne i fundam.)

DZIŚ

Rozpady promieniotwórcze niektórych jąder np. rozpad beta.

Na poziomie fundamentalnym realizowane między kwarkami, we współpracy z oddziaływaniem e-m (→ oddz. elektroślabe)

Uporządkowanie wg „siły”

- Porównanie: wg „siły” (*strength*) inaczej „natężenia”: grawitacyjne i el-mag – bardzo różne
gravitacja b. słaba, np. dwa protony oddziałują 10^{36} silniej elektromagnetycznie niż grawitacyjnie
- Uporządkowanie wg „siły” oddz. dla *niskich** energii:
silne > elektromagnetyczne > słabe > grawitacyjne
** niskie energie: 1 GeV aż do około 100 GeV*
- Parametr opisujący elementarny akt oddziaływania („siłę”) danego typu oddz. to → **stała sprzężenia**

Stałe sprzężenia

„Siła” elementarnego aktu oddziaływania = stała sprzężenia:

el-m: $e^- \rightarrow e^- \gamma$, $e^- \gamma \rightarrow e^-$ e (ładunek el.)

słabe fund. (*weak fund.*): g ('słaby' ładunek)

$e^- \rightarrow \nu_e W^-$, $\nu_e \rightarrow e^- W^+$

$d \rightarrow u W^-$, $t \rightarrow b W^+$

$d \rightarrow d Z$, $Z \rightarrow \nu \bar{\nu}$

silne (*strong fund., color*): g_s ('silny' ład., ład. kolorowy)

$u_R \rightarrow u_G + g_{R,anty G}$

Prawdopodobieństwo elementarnego aktu oddziaływania*,**

el-m

$$\alpha = \alpha_{el} = e^2/4 \pi = 1/137$$

słabe fund. (weak fund.)

$$\alpha_w = g^2/4 \pi = 1/32$$

silne (strong fund, color)

$$\alpha_s = g_s^2/4 \pi = 1$$

* też nazywamy stałą sprzężenia, ** wartości dla energii 1 GeV

„Biegnąca” stała sprzężenia (dane 2008)

α_s



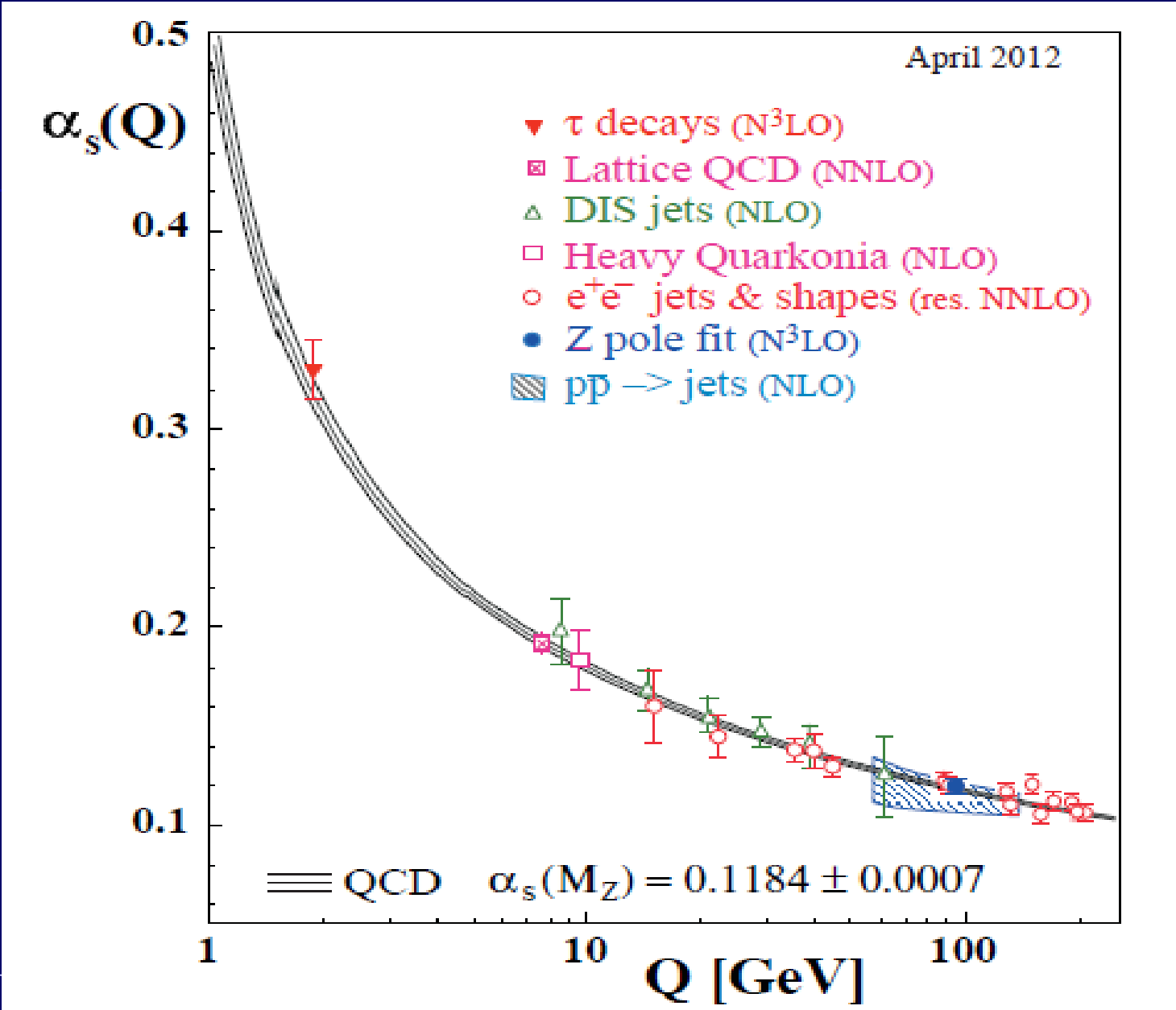
← **więzienie dla kwarków**

asymptotyczne swoboda →

⋮ odległości rzędu rozmiaru protonu
(duże odległości)

małe odległości
(mniejsze od rozmiaru protonu)

Różne doświadczenia (stan na kwiecień 2012)



ODDZIAŁYWANIA SŁABE

Oddziaływania słabe

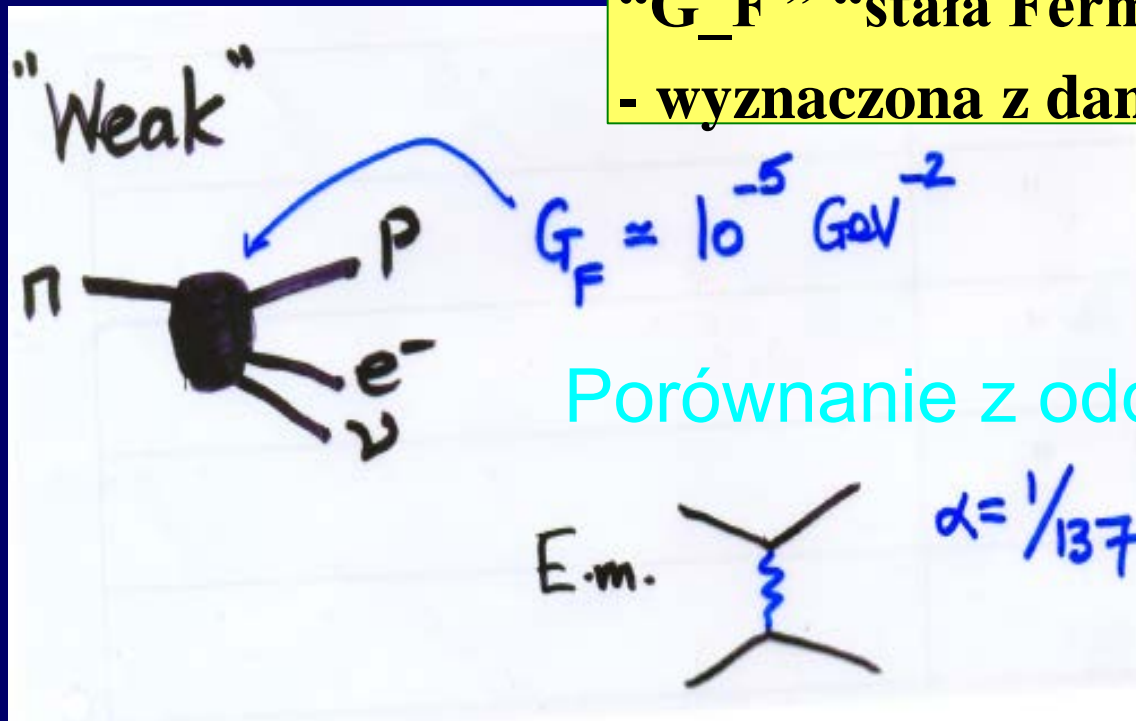
wg. wykładów F. Close w CERN

Model Fermiego (1934)

Dla rozpadu beta neutronu

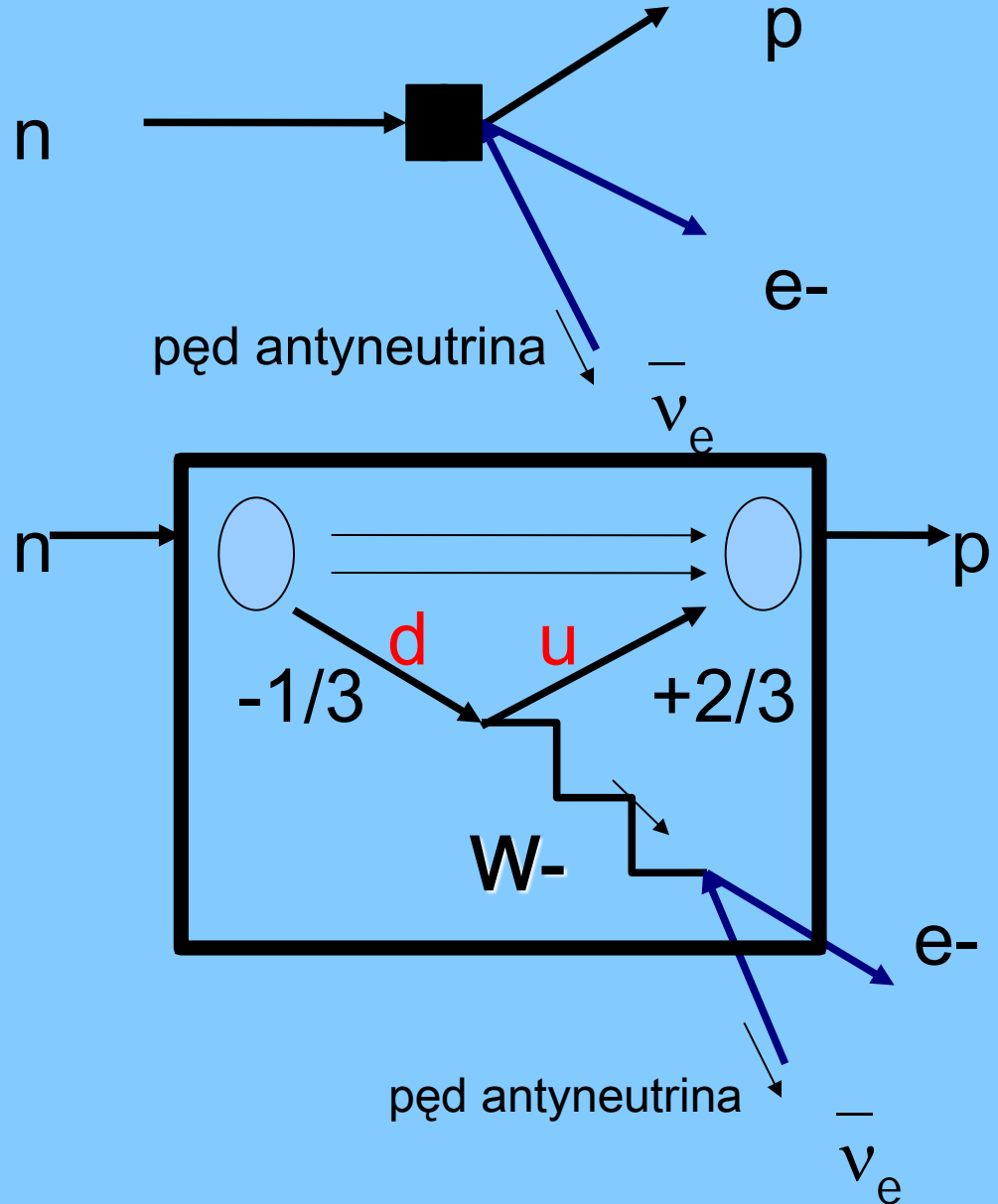
Efektywna „siła” oddziaływania
“ G_F ” “stała Fermiego”

- wyznaczona z danych



Porównanie z oddz. el-mag

Teraz przyglądamy się tej czarnej skrzynce z dzisiejszą (większą) zdolnością rozdzielczą i widzimy wymianę bozonu W



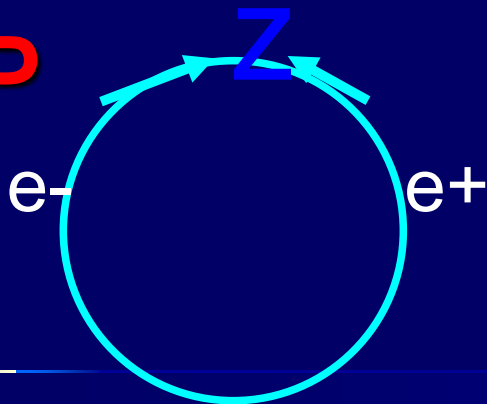
zachowanie ładunku el.

Trochę historii

- 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 *elektrosłabe* (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_- i Z
- Rubbia (kierowanie doświadczeniem) i van der Meer (utrzymywanie wiązki antyprotonów w akceleratorze)
nagroda Nobla w 1984 za odkrycie bozonów W/Z

LEP – MASOWA PRODUKCJA Z

LEP



Large Electron-Positron
collider

LEP (CERN): zderzenia elektronów e^- z pozytonami e^+
W latach 1989-1995 energia zderzenia dobrana tak, aby bozony Z produkowały się rezonansowo: $E_+ + E_- = M_Z = 91$

GeV

LEP: 4 doświadczenia →
zebrano 20 mln bozonów Z

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

Czas życia bozonu Z

W mechanice kwantowej działa zasada nieoznaczoności

Heisenberga

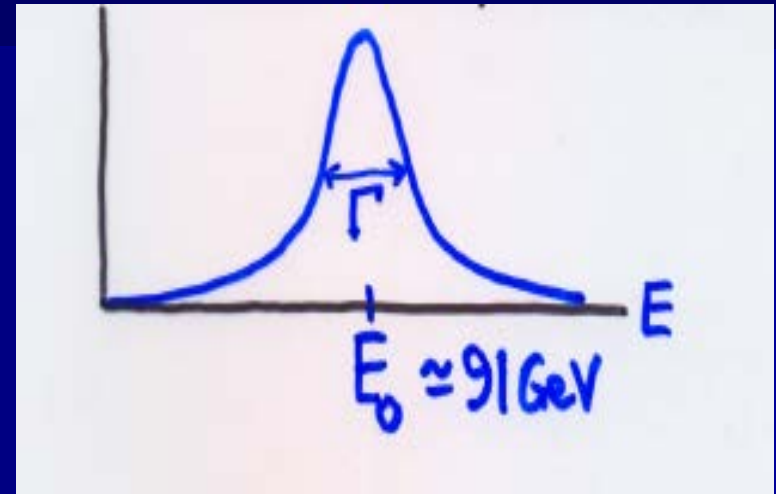
Niech Δ oznacza niepewność (rozmycie) pomiaru danej wielkości fizycznej, to dla czasu i energii mamy związek:

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

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

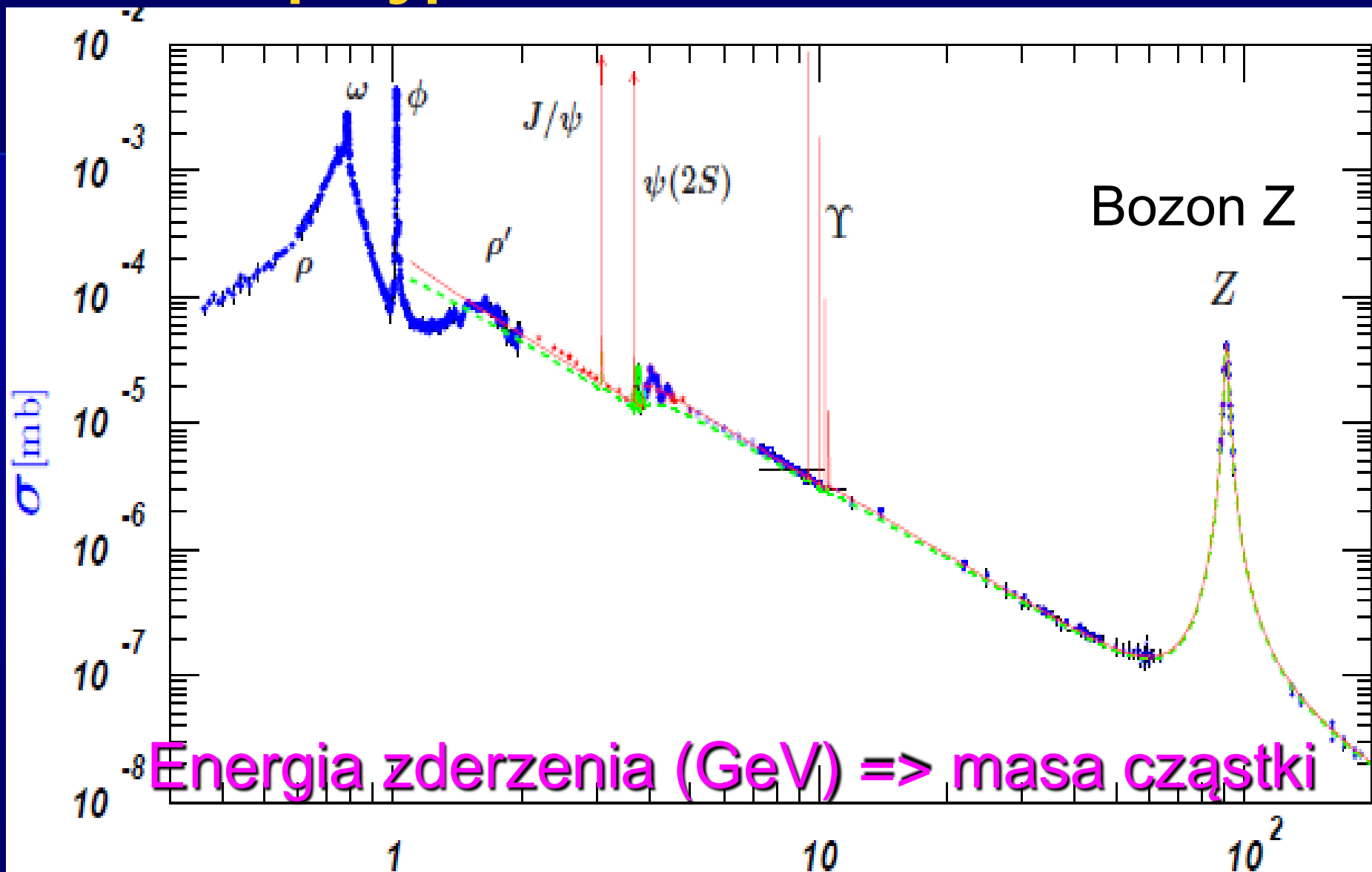


Dla bozonu Z rozmycie energii (szerokość połówkowa bo w połowie wysokości „piku”)

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

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

Liczba przypadków w zderzeniach $e+e^-$



Liczba lekkich neutrin

ALEPH

LEP

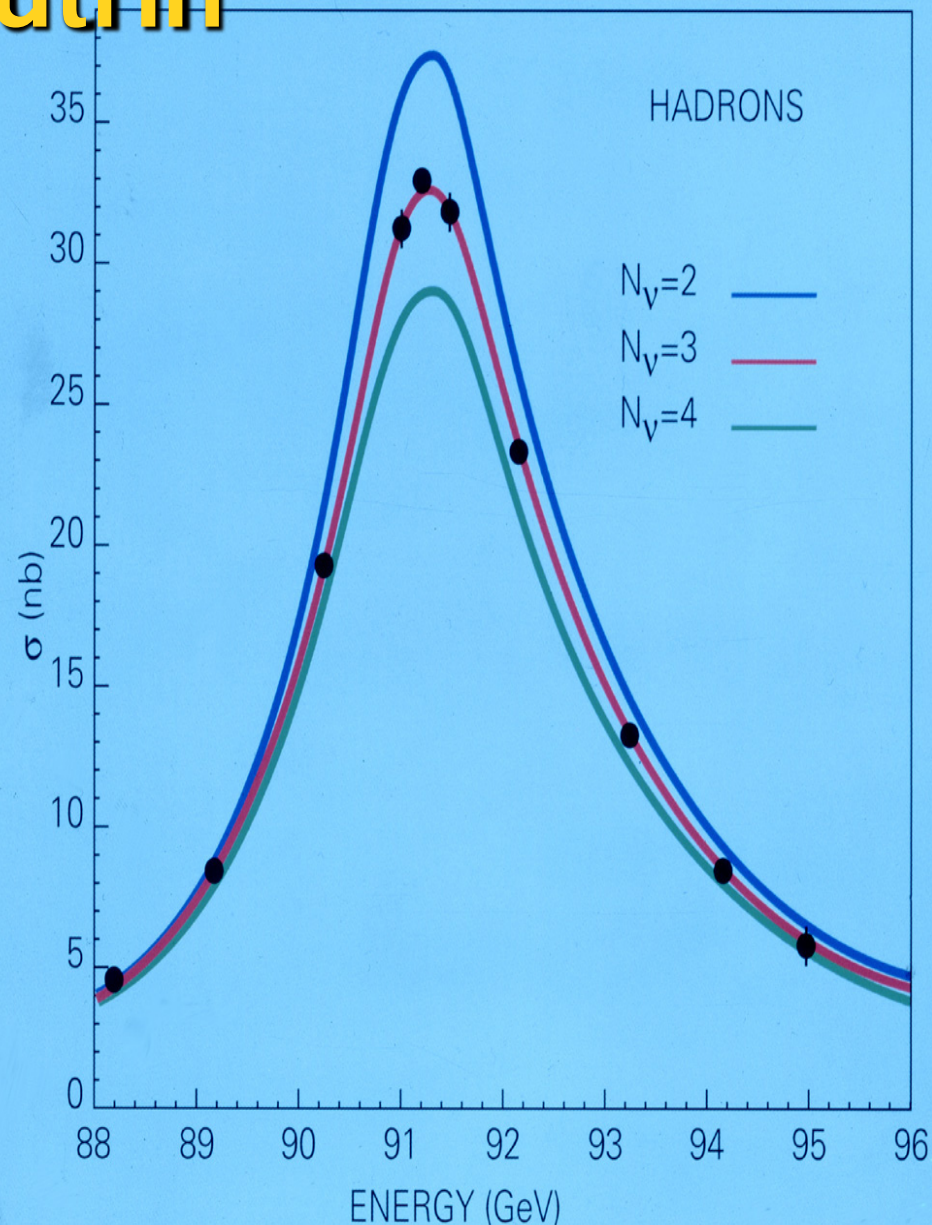
Z pomiaru szerokości połówkowej bozonu Z można wyznaczyć ile jest lekkich neutrin (lekkih tzn. takich na które może się rozpaść spoczywający bozon Z, czyli z masą $\ll 45$ GeV)

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 typy par $\nu \bar{\nu}$

Zgodność dla $N_\nu = 3$!



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

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 dla bozonu Z lub fotonu

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

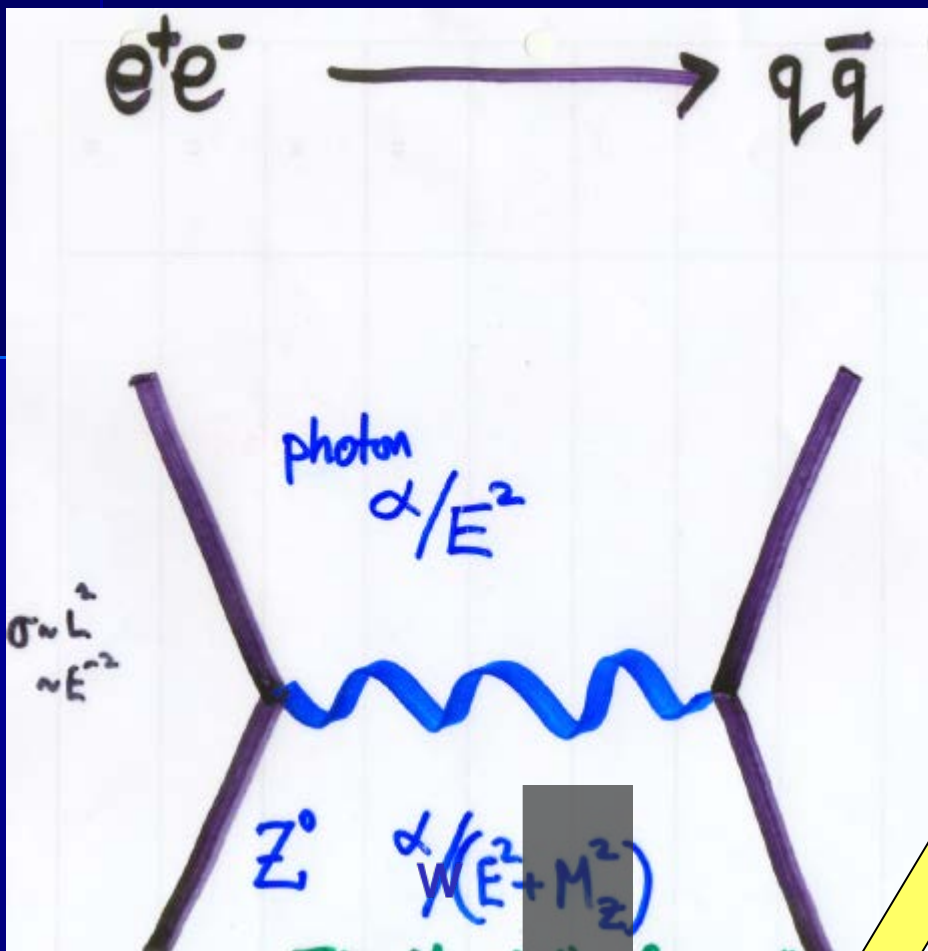
photon

$$\alpha/E^2$$

Z^0

$$\frac{\alpha}{W(E^2+M_Z^2)}$$

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



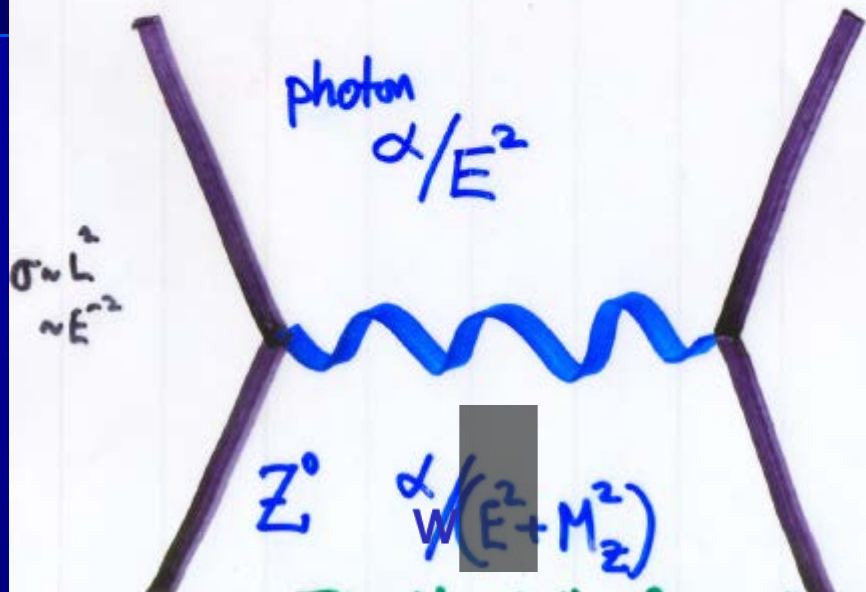
Reguła Feynmana

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

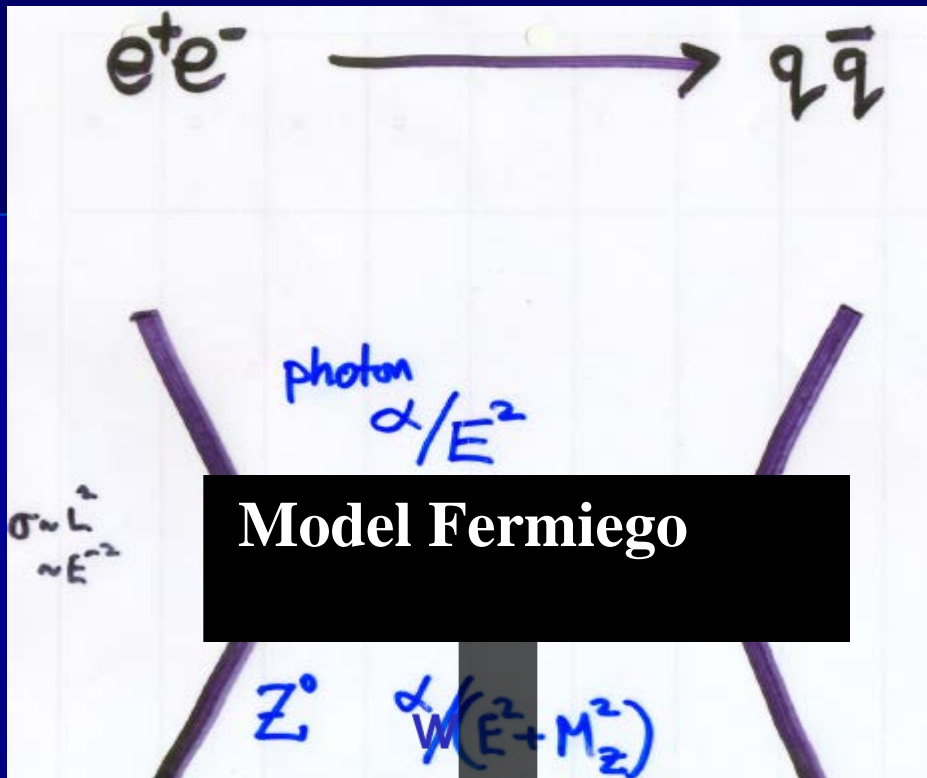
Jeżeli energię E przenosi
“wirtualna” cząstka Z o masie
 M to czynnik

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



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

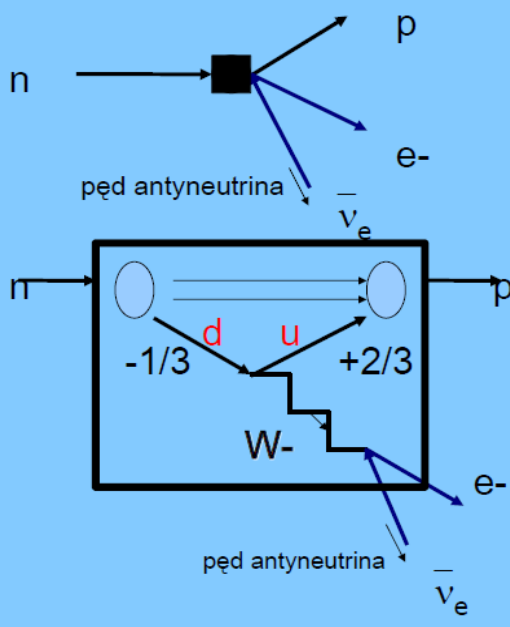
Jeżeli energię E przenosi
 "wirtualna" cząstka Z o masie
 M to czynnik $1/(E^2 + M^2)$

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

To jest Model Fermiego !

Czyli gdy wymieniana jest cząstka $Z \rightarrow$ wyrażenie bez wymiany energii. Porównując z wymianą fotonu – to jak oddz. punktowe w Modelu Fermiego !

Tu przykład z wymianą bozonu Z , ale model był stworzony dla procesów z wymianą $W^{+/-}$



$$G_F \approx 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

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

$$\alpha_W = g^2 / 4 \pi = 1/32$$

większa niż el-magnetyczne, więc odpowiedź => bo duża masa W!

$$G_F / \sqrt{2} = g^2 / 8 M_W^2$$

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

Masa bozonu W+/- = 80 GeV, bozonu Z = 91 GeV

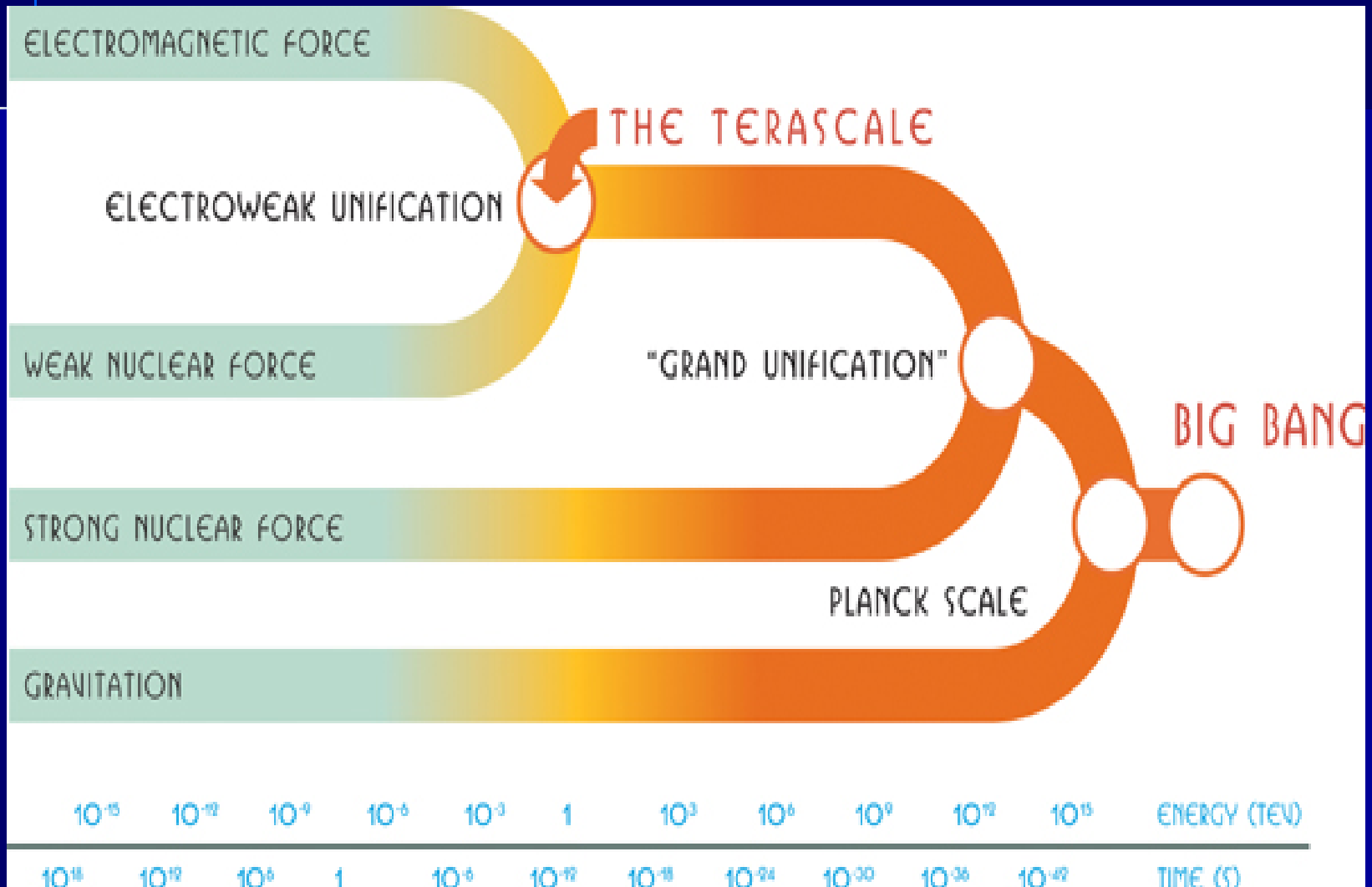
jedyne masywne nośniki fundamentalne (Model Weinberga Salama)

Oddziaływania słabe i el-mag – podobna „siła” dla energii ~ 1 TeV

wspólny opis teoretyczny → oddz. **elektrosłabe**

(unifikacja oddz. el-mag. i słabych)

UNIFIKACJA



W sercu Słońca procesy:

Z wykładu
F. Close'a
(CERN)

At the heart of the Sun:



 **Proton**

 **neutron**

 **positron**

 **neutrino**

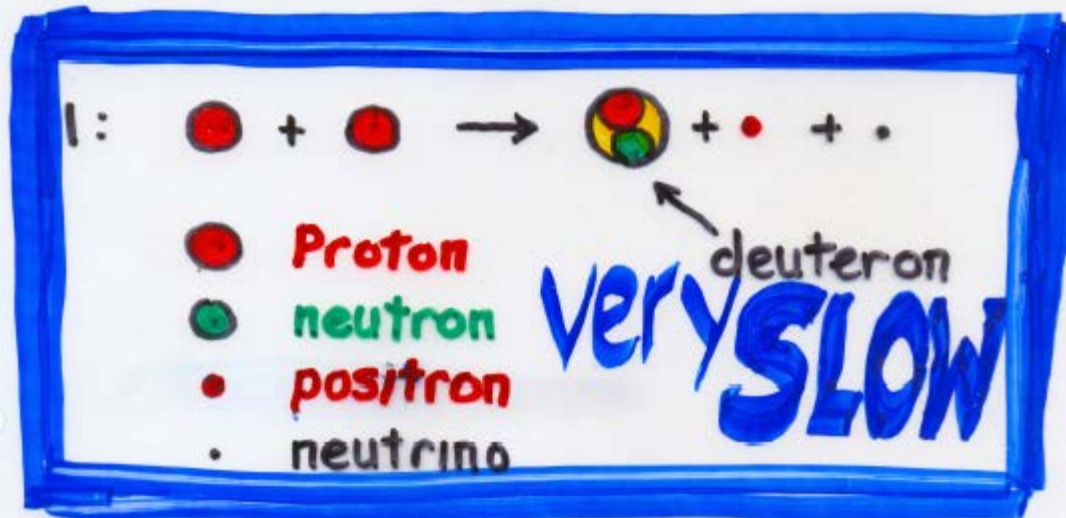
deuteron



Net result:



At the heart of the Sun:



Net result:



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

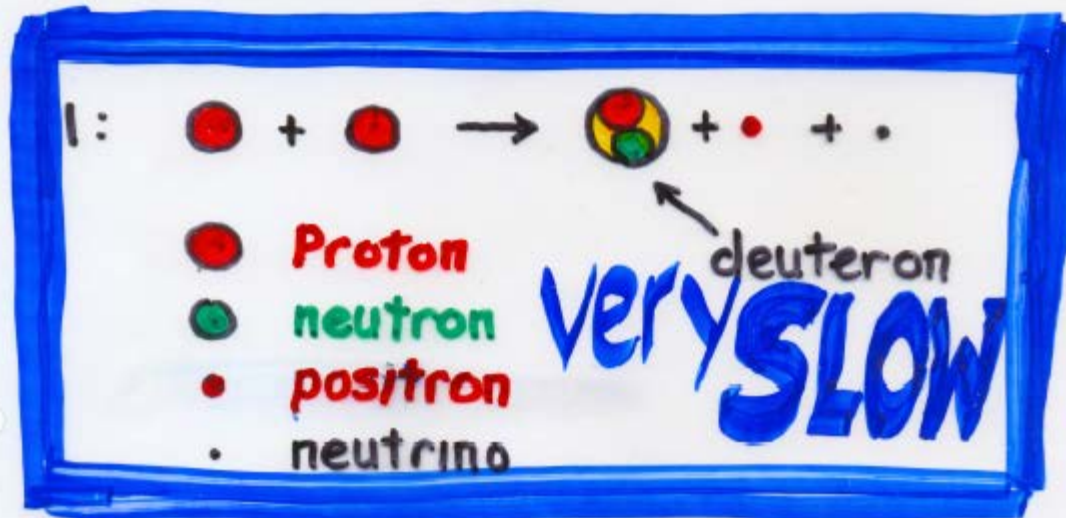
Procesy „słabe” = małe prawdopodobieństwo, więc „powoli” zachodzą

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

\rightarrow 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 8

- Kiedy powstała teoria opisująca pierwszą unifikację sił?
- Kiedy odkryto bozony W i 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”?