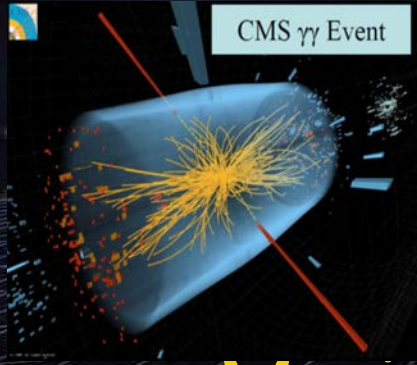


Wszechświat cząstek elementarnych



WYKŁAD 8

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

10.04.2013

Oddziaływania słabe

Cztery podstawowe siły

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.)

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.)

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

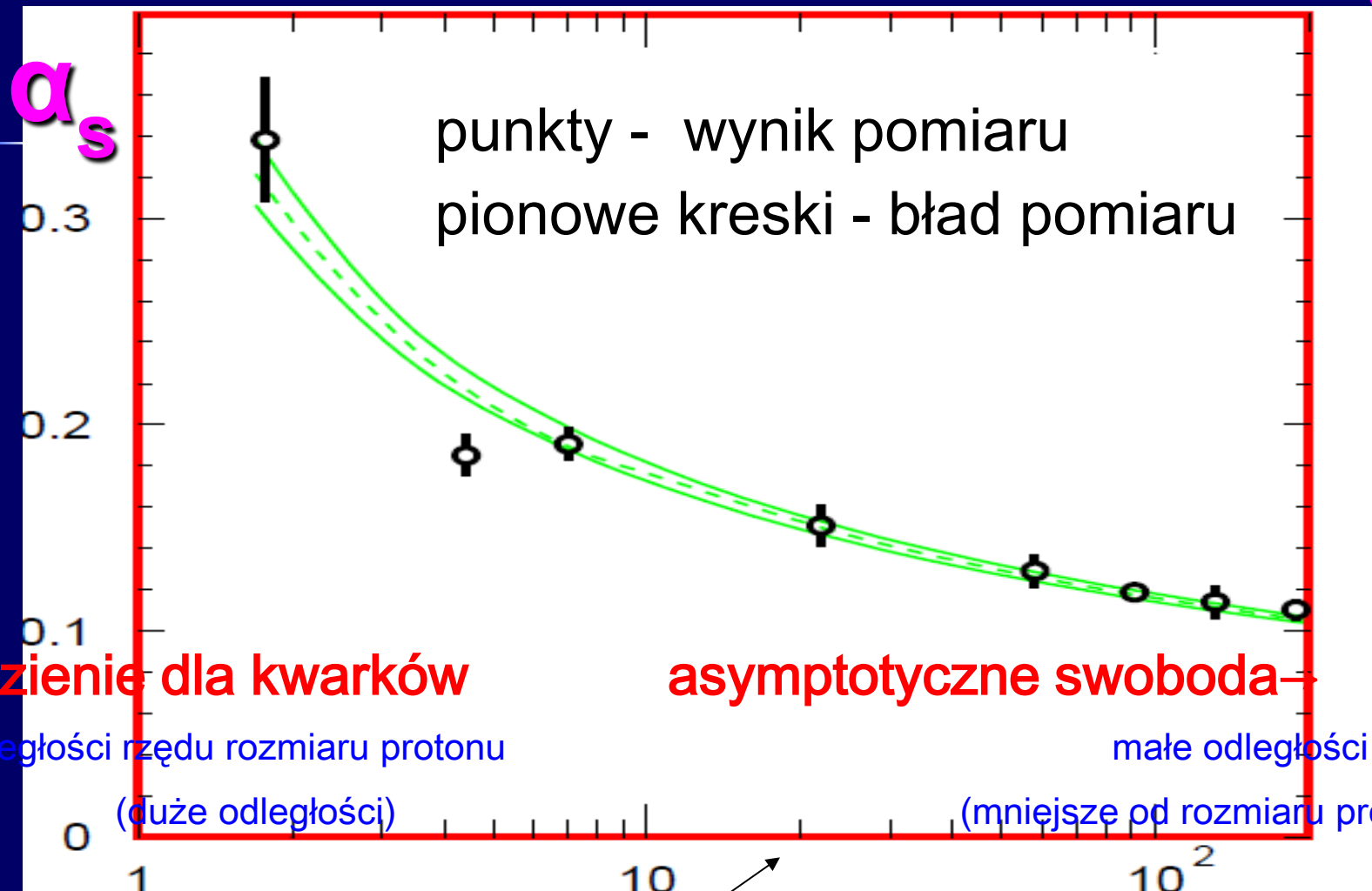
silne (strong fund, color)

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

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

„Biegnąca” stała sprzężenia (dane 2008)

α_s



← **więzienie dla kwarków**

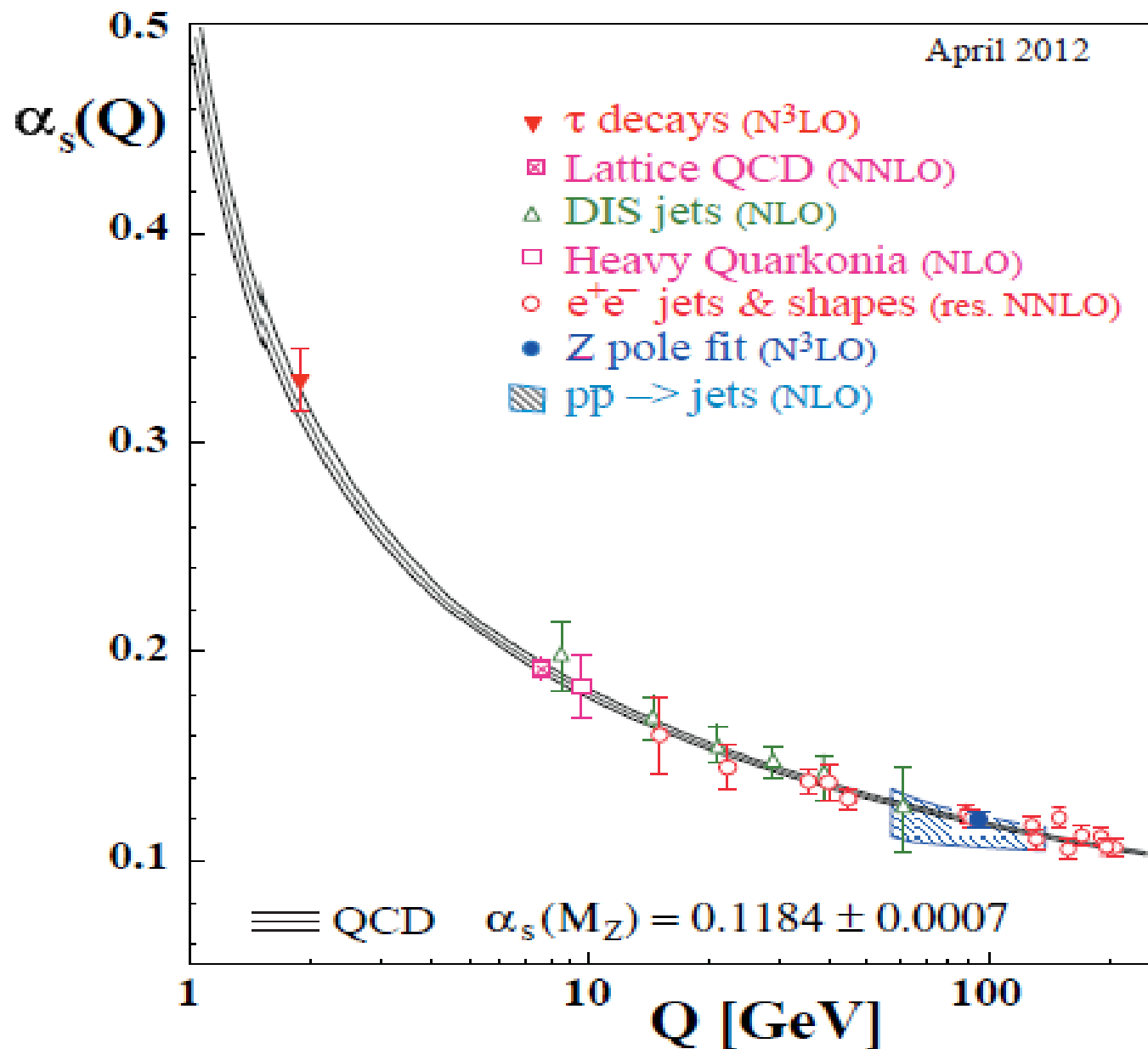
asymptotyczne swoboda →

⋮ odległości rzędu rozmiaru protonu
(duże odległości)

małe odległości
(mniejsze od rozmiaru protonu)

na tej osi pęd (GeV)

April 2012



Oddziaływania słabe

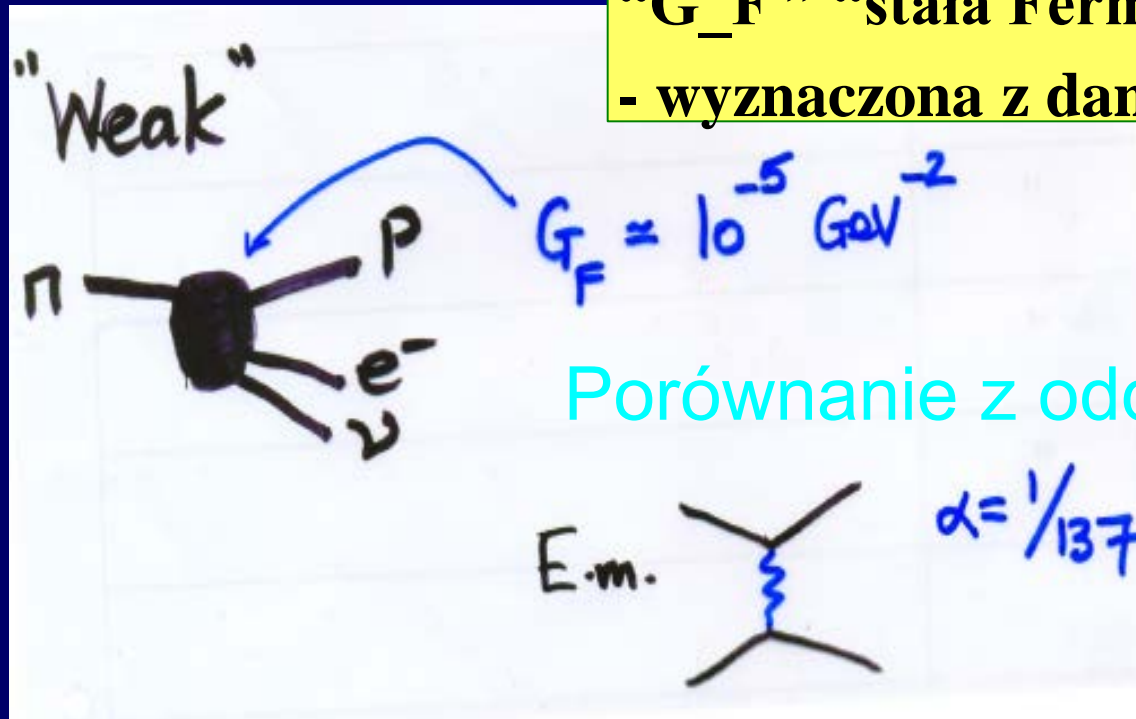
wg. wykładów F. Close w CERN

Model Fermiego (1934)

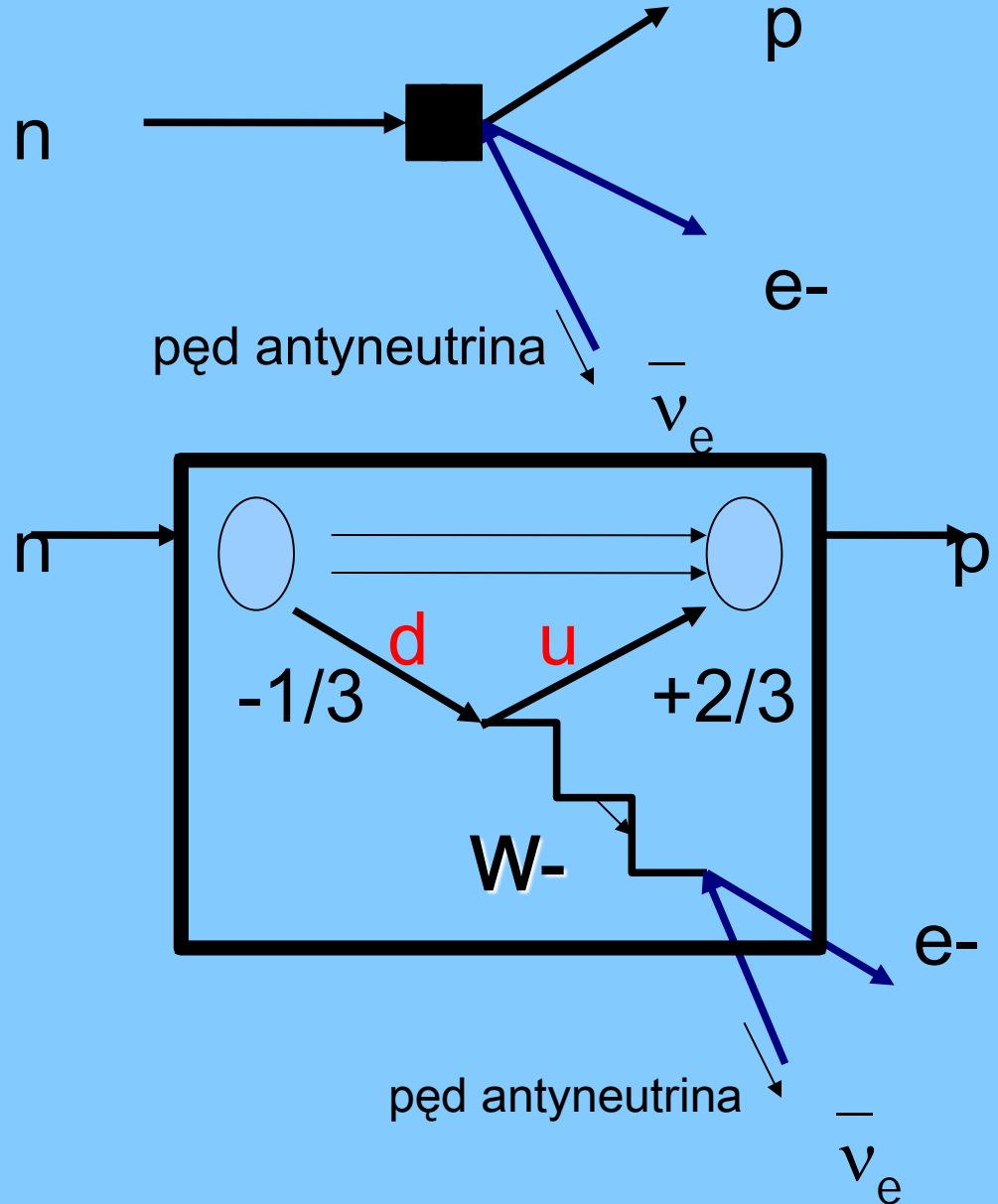
Dla rozpadu beta neutronu

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

- wyznaczona z danych



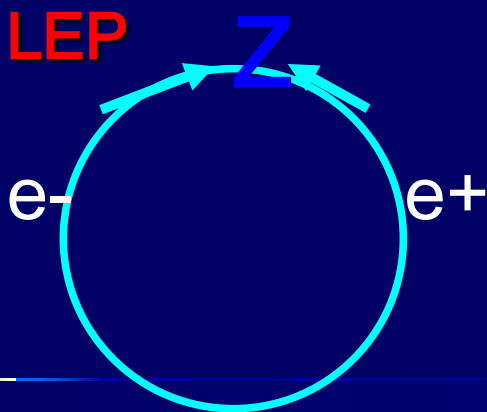
Teraz przyglądamy się tej czarnej skrzynce z dzisiejszą zdolnością rozdzielczą i widzimy wymianę bozonu W



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)
- 1983-4 Zderzenia protonów z antyprotonami w CERN (doświadczenie UA1 i UA2) - w zderzeniach kwarków z antykwarkami powstawały W_+ , W_- i Z
- Rubbia i van der Meer (utrzymywanie wiązki antyprotonów w akceleratorze) nagroda Nobla w 1984 za odkrycie bozonów W/Z



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:

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

Z rozpada się demokratycznie na

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



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

LEP: 4 doświadczenia \rightarrow
 zebrano 20 mln bozonów Z

Czas życia bozonu Z

Zasada nieoznaczoności Heisenberga

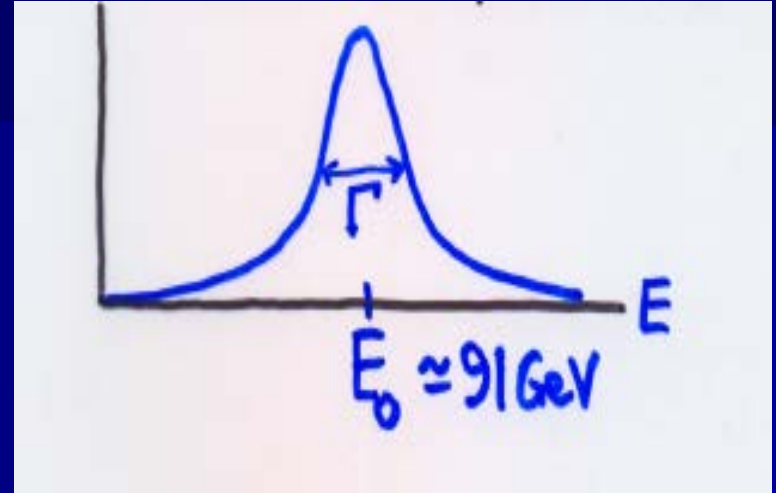
(Δ oznacza niepewność, rozmycie pomiaru danej wielkości):

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

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:

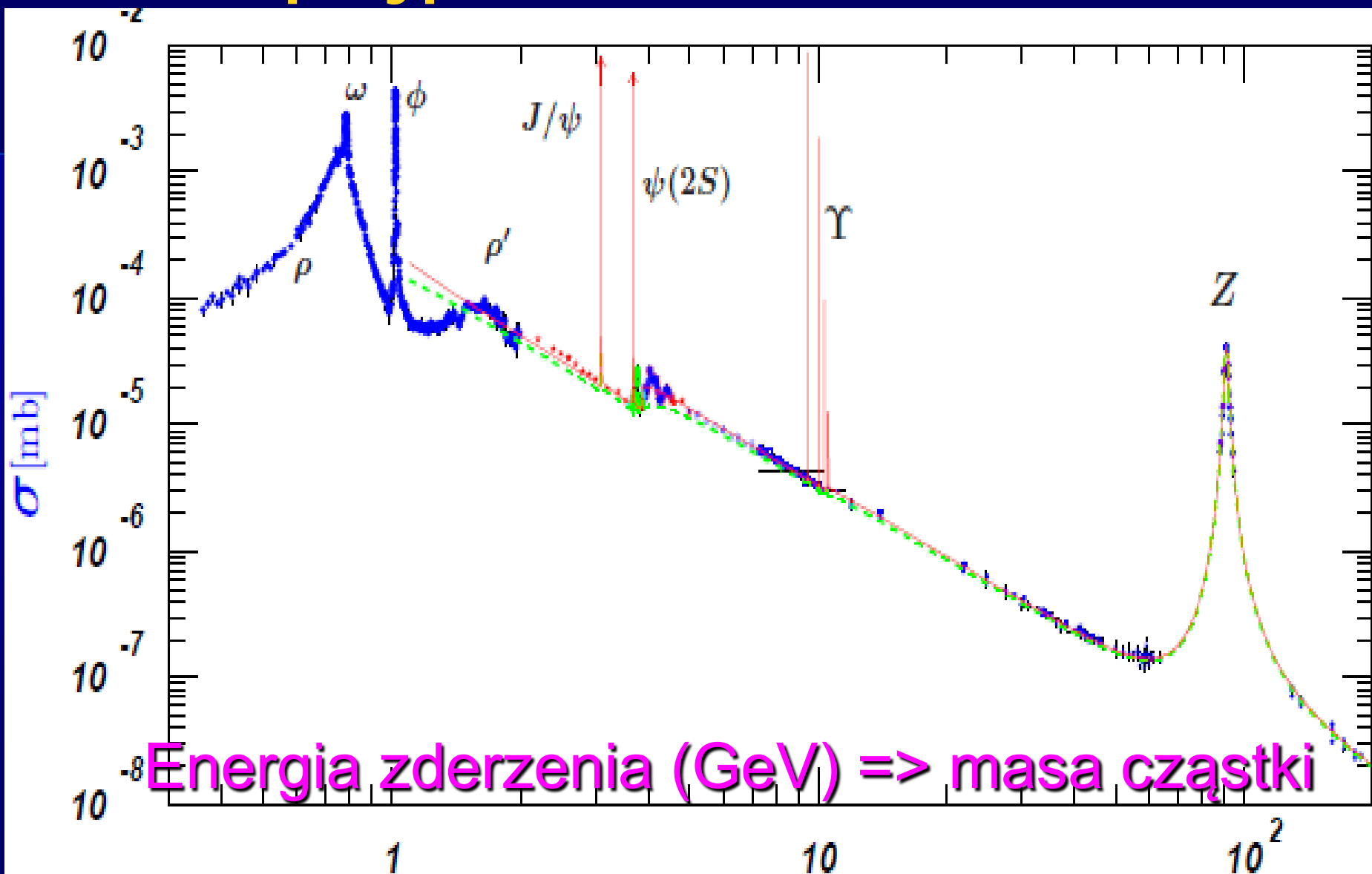


Dla bozonu Z szerokość połówkowa (bo w połowie wysokości „piku”)

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

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

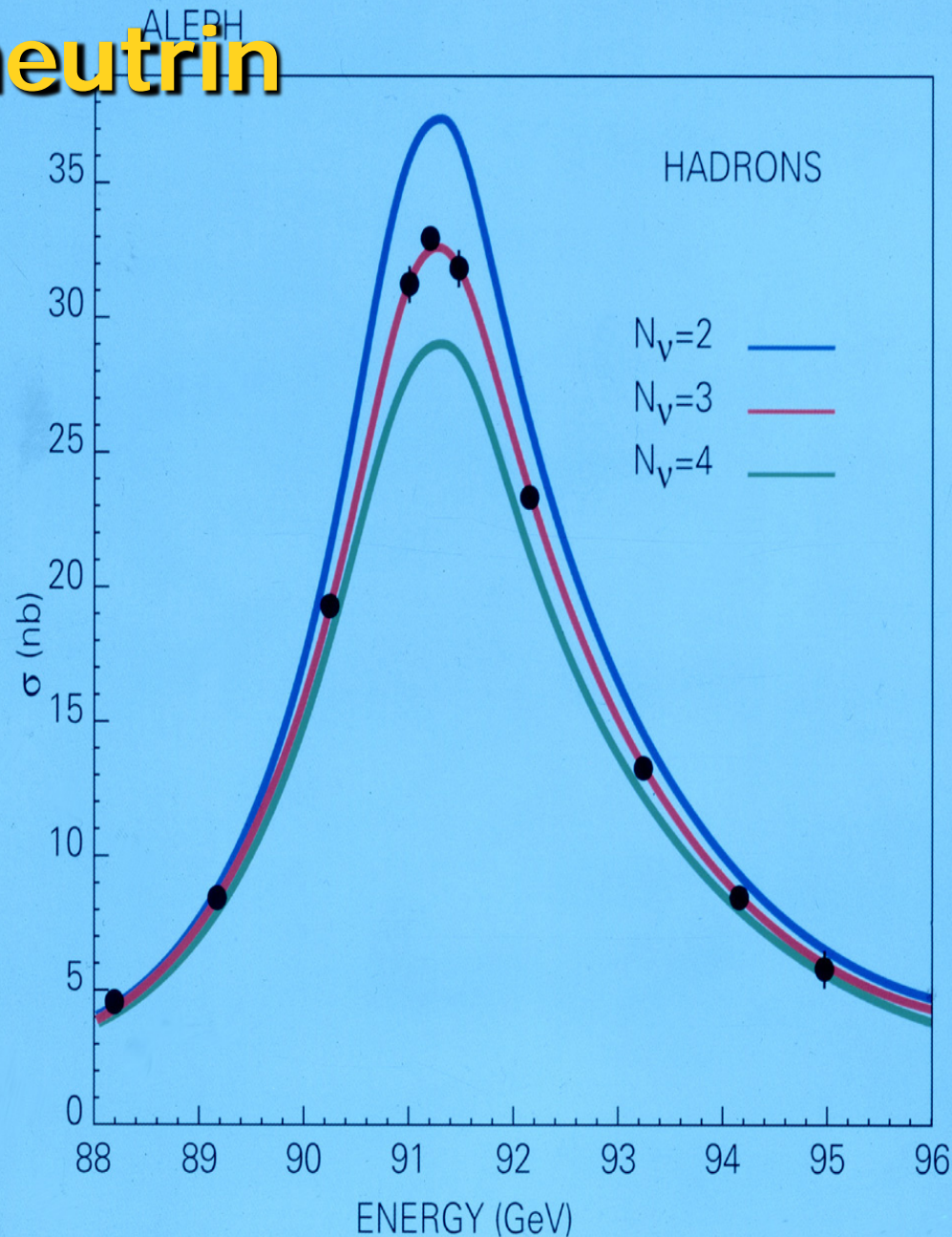
Liczba przypadków w zderzeniach $e+e^-$



Liczba lekkich neutrin

Z pomiaru szerokości połówkowej bozonu Z można wyznaczyć ile jest lekkich neutrin (lekkich 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 pary $\nu \bar{\nu}$



Zgodność dla $N_\nu = 3$!

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

Reguła Feynmana (obliczanie prawdopodobieństwa procesu)

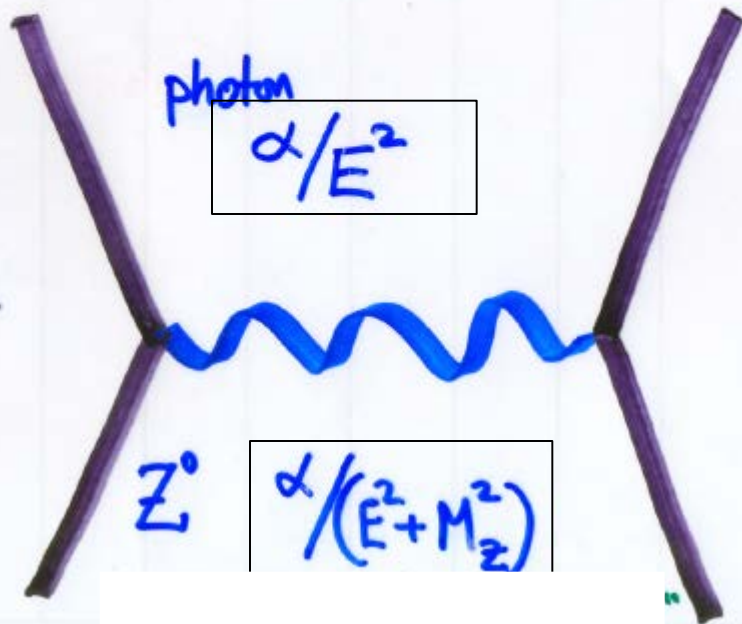
Jeżeli energię E przenosi “wirtualna” cząstka, (wirtualna bo w procesie pojawia się tylko między elementarnymi aktami oddziaływania)

→ **czynnik $1/(E^2+M^2)$**

M- masa wymienianej cząstki

← tu dla bozonu Z lub fotonu

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



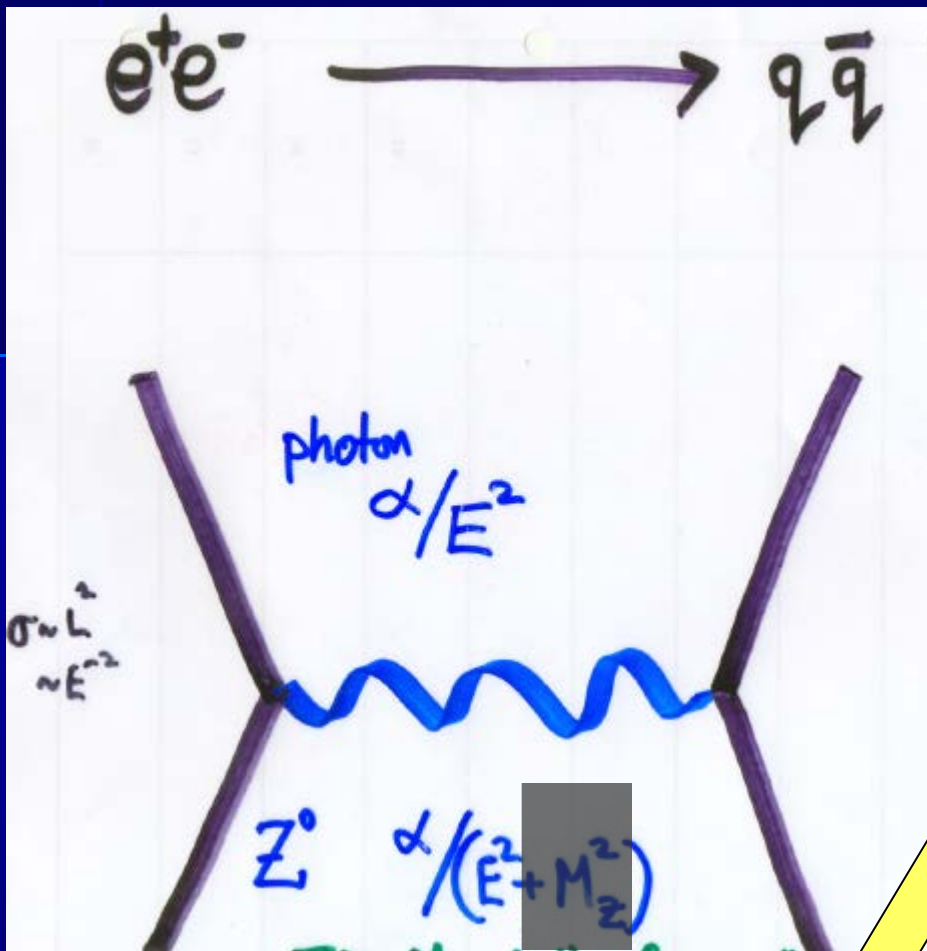
photon

$$\alpha/E^2$$

Z^0

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

$$\sigma_{e^+e^-} \sim \frac{1}{E^2}$$

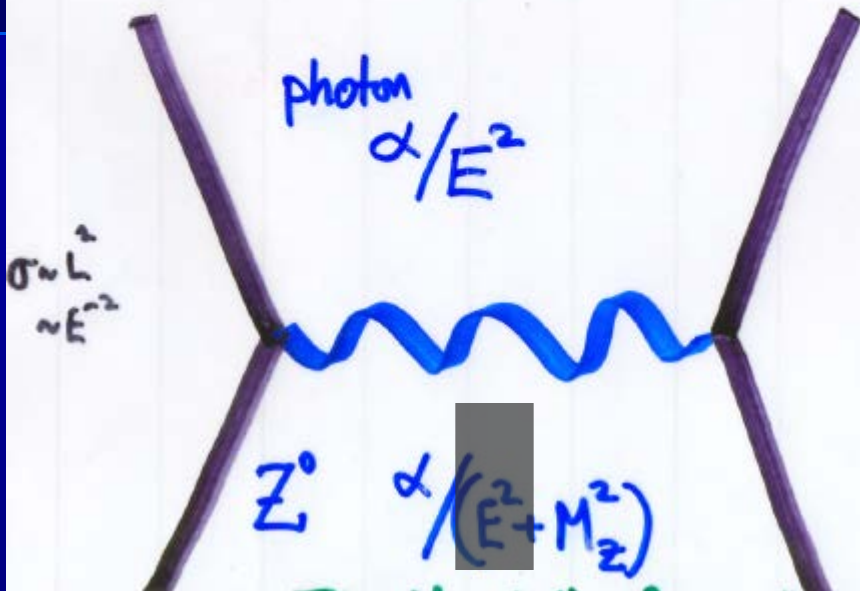


Reguła Feynmana

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

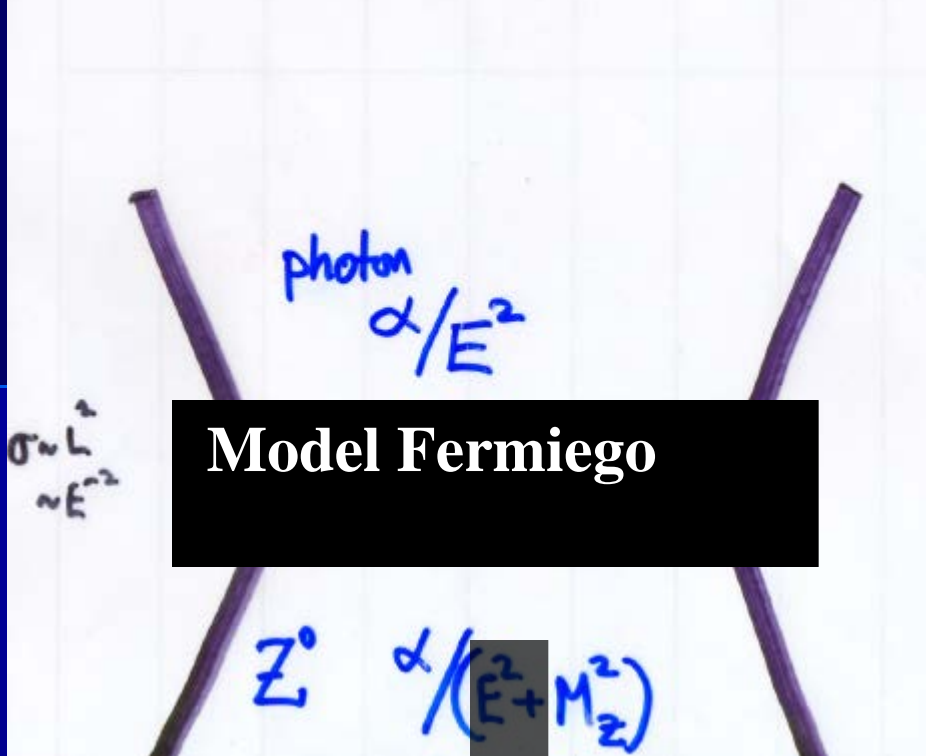
Jeżeli energię E przenosi
"wirtualna" cząstka Z o masie M
to czynnik

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



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

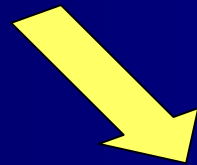
Ale dla $E \ll M$ to tylko $1/M^2$



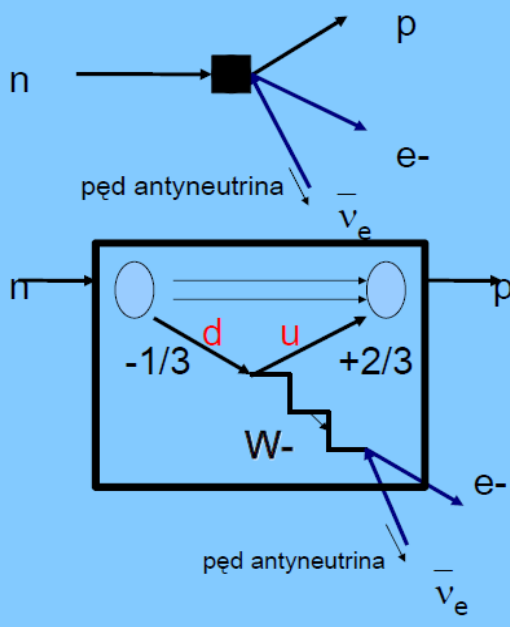
Reguła Feynmana

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 !
(bez wymiany energii)



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

Czy “słaba siła” bo sprzężenie małe, czy dlatego, że masa W duża??

Sprzężenie $\alpha_W = g^2/4\pi = 1/32$ większe niż el-magnetyczne, więc odpowiedź = bo duża masa W

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

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

Masa bozonu $W_{\pm} = 80 \text{ GeV}$, bozonu $Z = 91 \text{ GeV}$

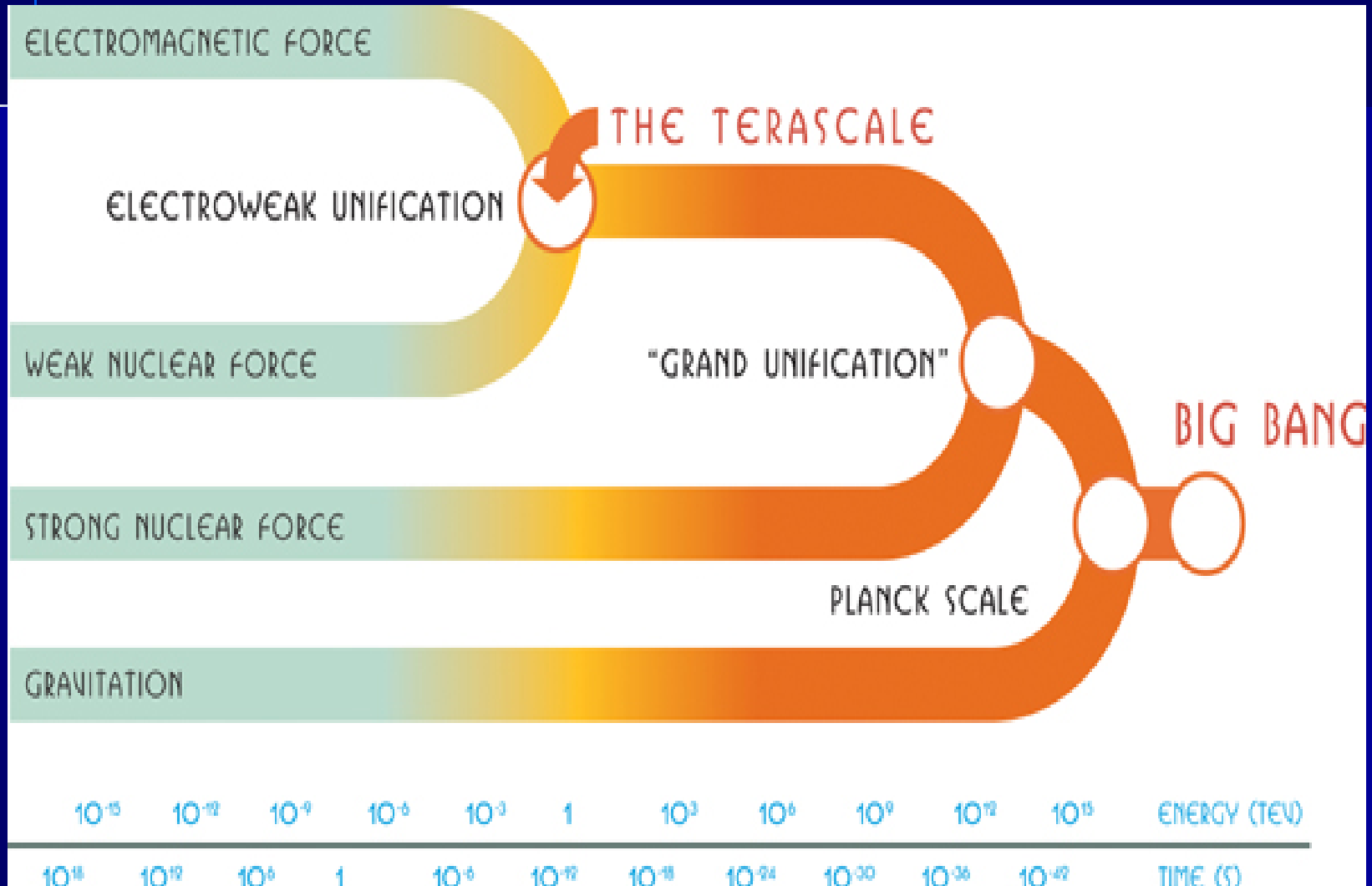
jedyne masywne nośniki fundamentalne (Model Weinberga-Salama)

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

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**

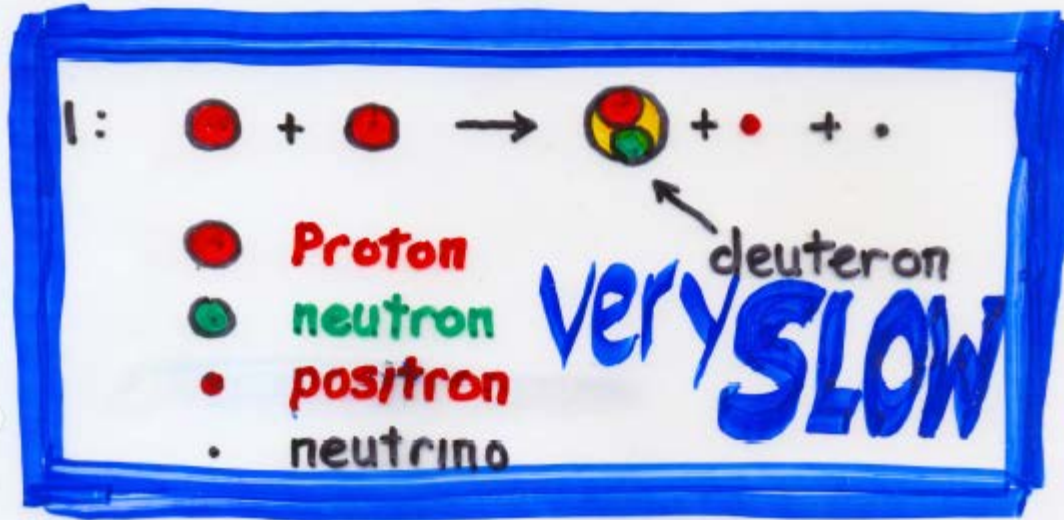
deuteron



Net result:



At the heart of the Sun:



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

WEAK

Procesy „silne” = „szybkie”

STRONG

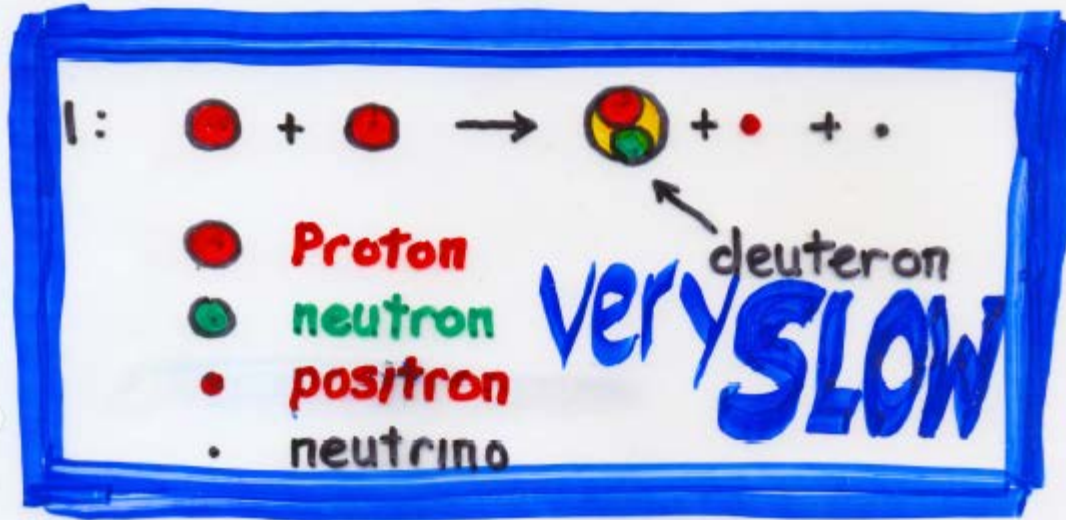


Net result:



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

At the heart of the Sun:



Net result:



wypromieniowana energia

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

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 8

- Kiedy powstała teoria opisująca pierwszą unifikację sił?
- Kiedy odkryto bozony W i Z?
- W zderzeniu wiązek jakich cząstek odkryto bozon Z?
- Ile bozonów Z wyprodukowano w zderzaczu 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”?

Siły - porównania

W makro- i mikroświecie występują:

- **grawitacja** - działa między wszystkimi cząstkami, jest to zawsze przyciąganie; odpowiedzialna za tworzenie Układu Słonecznego, galaktyk..

- **siły elektromagnetyczne (e-m, el-mag)** - ładunki elektryczne mogą się odpychać lub przyciągać (np. wiązania atomowe).

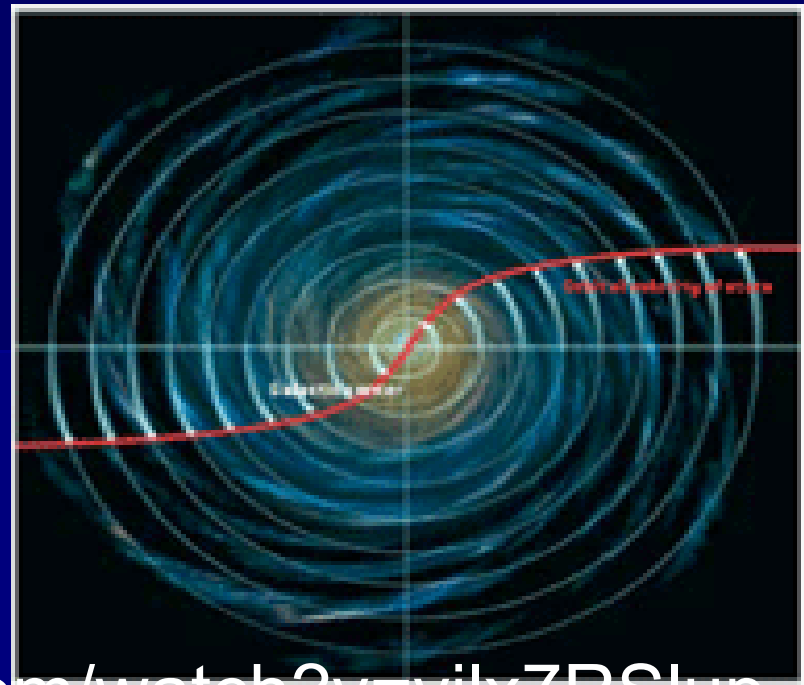
W mikroświecie dodatkowo występują:

- siły **jądrowe** wiążące nukleony (**wymiana pionów**) w jądra atom.,
zasięg 10^{-15} m

 - siły jądrowe fundamentalne (kolorowe)**, działające między kwarkami (wymiana gluonów), zasięg podobny

- siły **słabe** np. rozpad neutronu, zasięg mniejszy niż dla sił jądrowych (oddziaływanie punktowe)

 - siły słabe fundamentalne** działają między kwarkami i leptonami (wymiana bozonów W / Z)



<http://www.youtube.com/watch?v=vilx7RSIupS>

Strona eksperymentu CDMS: <http://cdms.berkeley.edu/>

Posłuchaj, jak grają cząstki ziemskiego promieniowania oraz ciemna materia (film na z youtube tłumaczący ideę eksperymentu i przekładający wskazania aparatury pomiarowej na... muzykę):