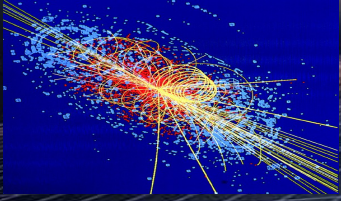


Wszechświat cząstek elementarnych



WYKŁAD 6 24.III.2010

Maria Krawczyk, Wydział Fizyki UW

Oddziaływania kolorowe i bieżąca stała sprzężenia α_s

Oddziaływania słabe

Masa W

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

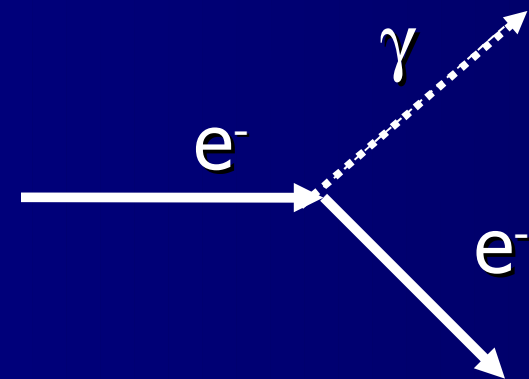
silne (strong fund, color) $\alpha_s = g_s^2/4\pi = 1$

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

Diagramy Feynmana

Diagramy Feynmana – cząstki reprezentujemy przez **linie**, a akt oddziaływania przez punkt przecięcia (**wierzchołek**)

Np. emisja fotonu przez elektron

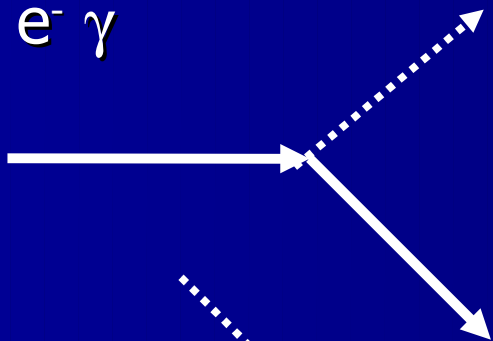


Strzałki na ciągłej linii (fermionowej) dla $e^- \rightarrow$ przepływ ładunku elektrycznego (ujemnego) i pęd, strzałki na linii fotonowej (linia przerywana) \rightarrow pęd

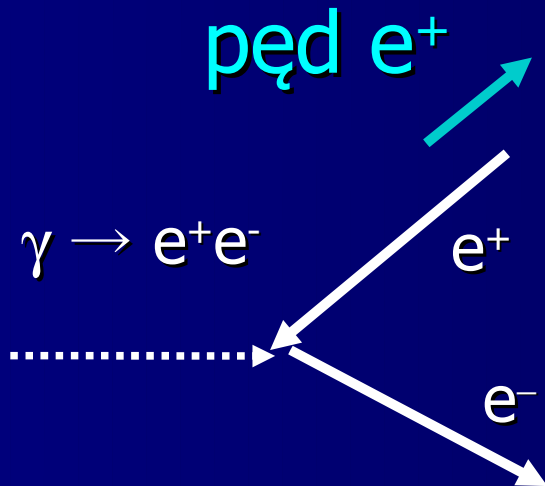
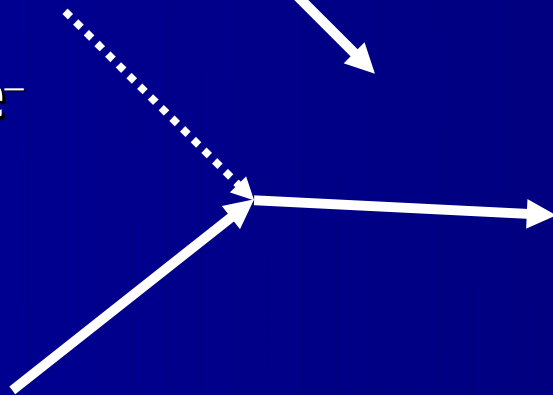
Diagramy Feynmana dla procesów skrzyżowanych

Procesy skrzyżowane z udziałem $e^- e^+ \gamma$

$e^- \rightarrow e^- \gamma$



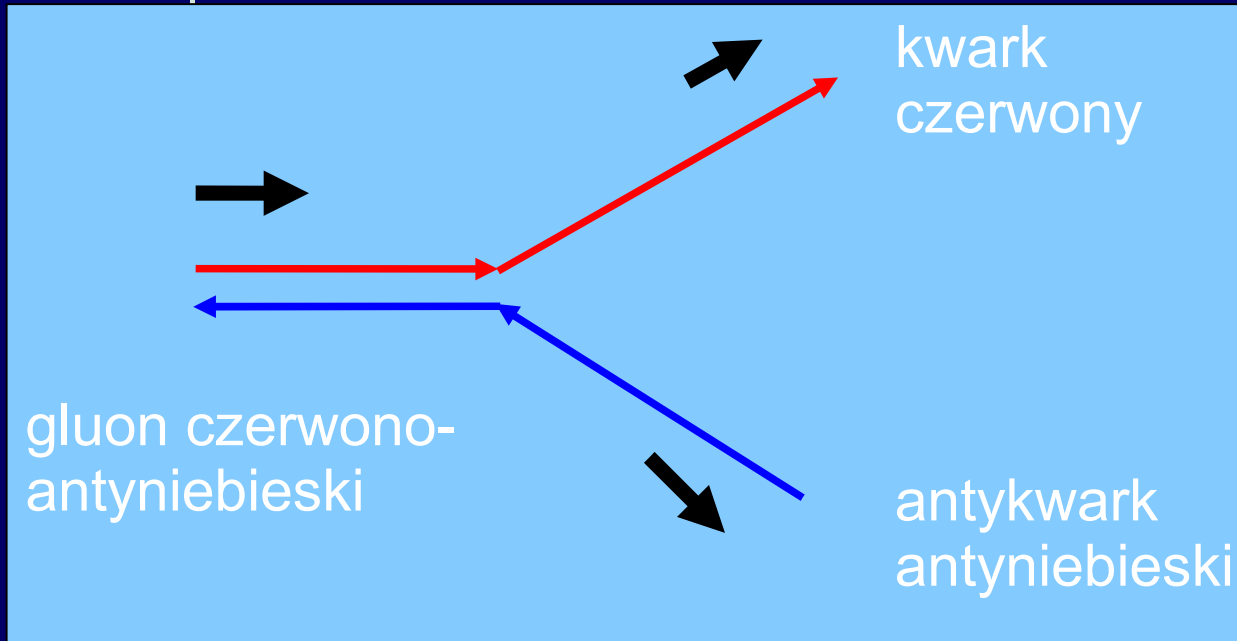
$\gamma e^- \rightarrow e^-$



Dla e^+ przepływ ładunku (ujemnego) w przeciwnym kierunku niż ruch (pęd)


Oddziaływania kolorowe

Przykład elementarnego aktu oddziaływania



gluonu z kwarkami

gluon zwykle oznaczamy linią typu sprężynka



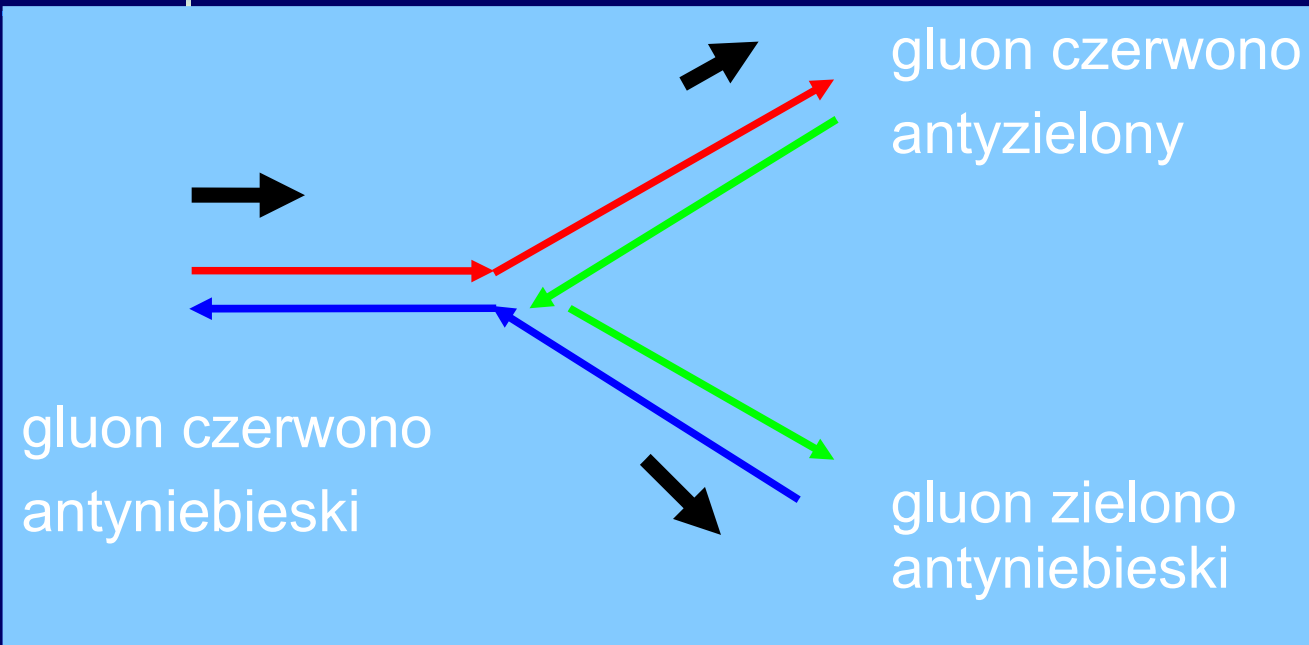
<-- tu 'śledzimy' kolor

- kolorowe linie ciągłe - przepływ ładunku kolorowego (zachowanie koloru)
- czarne strzałki – kierunek pędów cząstek (zachowanie pędu)

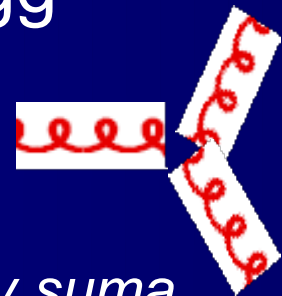
Oddziaływania kolorowe

Przykład elementarnego aktu oddziaływania

gluonów ze sobą



ggg



gdy suma
po kolorach

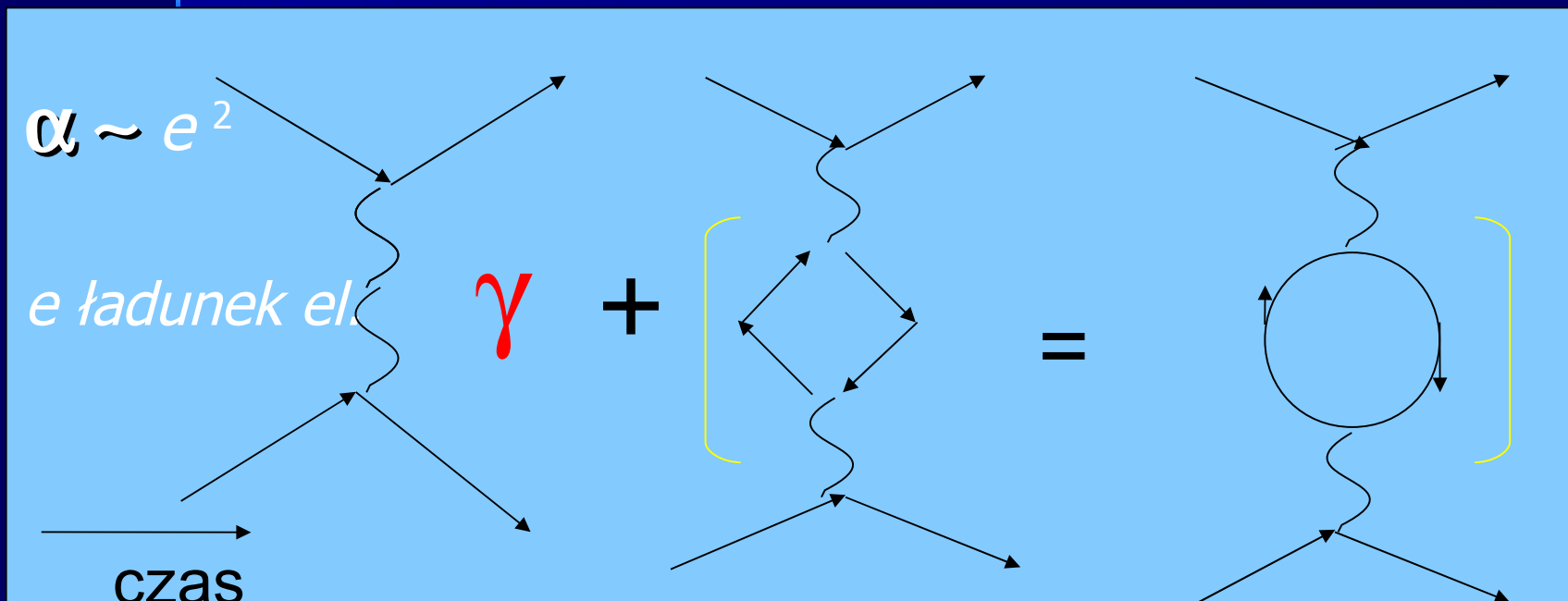
są również
sprzężenia

gggg

- kolorowe linie ciągłe - przepływ ładunku kolorowego (zachowanie koloru)
- czarne strzałki – kierunek pędów cząstek (zachowanie pędu)

Biegająca stała sprzężenia α

Oddziaływanie el-mag: pomiar stałej α w zderzeniu dwóch elektronów $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$



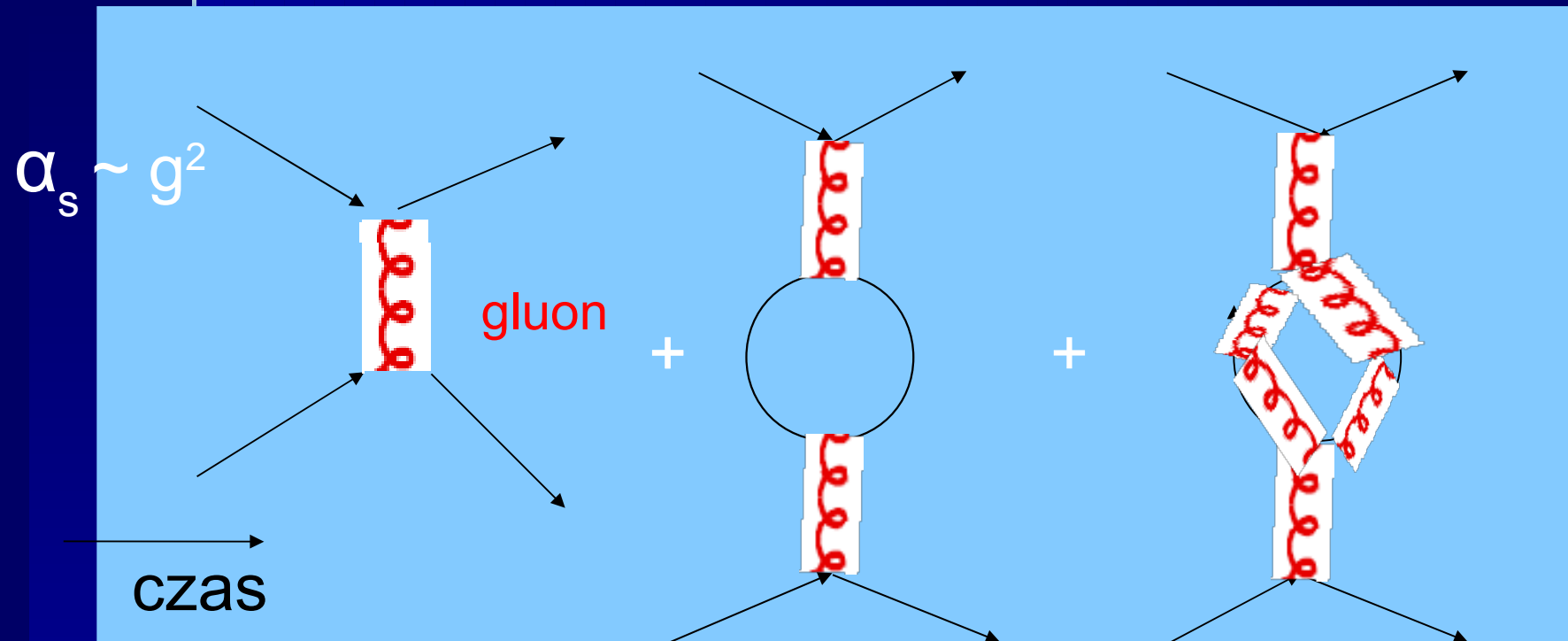
Prawdopodobieństwo tego procesu proporcjonalne do

$$\alpha \times [1 + \text{poprawki}(p)] = \alpha(p).$$

Pętla elektronowa $\rightarrow \alpha$ zmienia się z pędem ('biegnie'); wzrasta dla większych pędów fotonu, czyli większych energii zderzenia

Biegająca stała sprzężenia α_s

Oddziaływanie kolorowe – pomiar stałej sprzężenia α_s w zderzeniu dwóch kwarków (przy zderzeniu dwóch hadronów)



Pętla kwarkowa - efekt podobny jak dla oddziaływań el-mag (powoduje wzrost stałej α_s). Tu dodatkowo pętla gluonowa, która ma **przeciwny** znak \rightarrow

α_s maleje ze wzrostem pędu

„Siła” oddziaływania zależy od energii

'biegnące stałe sprzężenia' !

Ze wzrostem energii: oddz. silne słabną

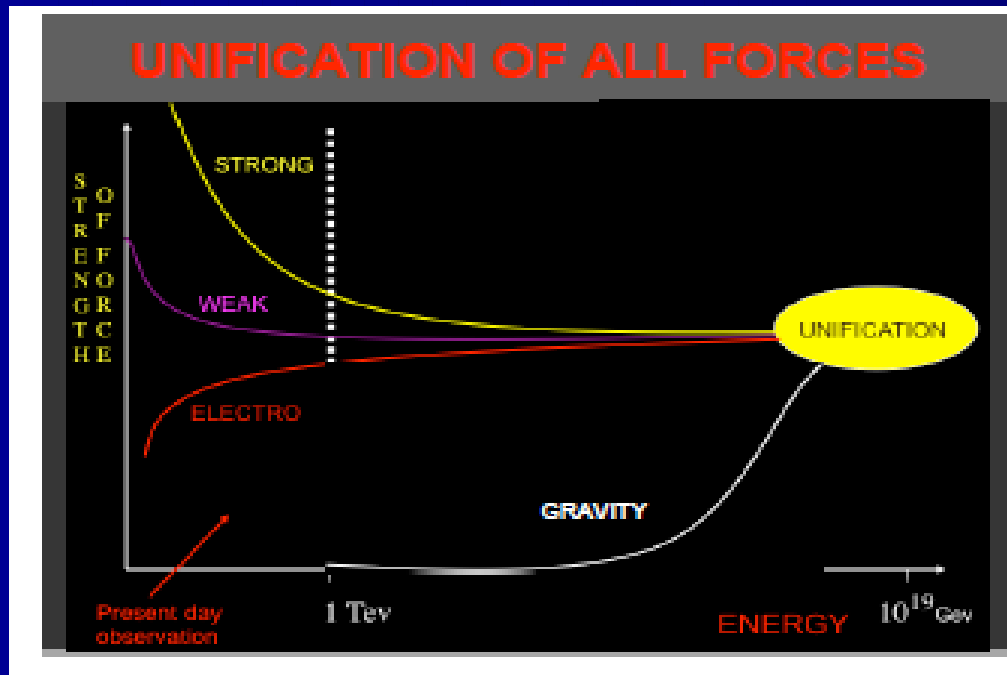
oddz. słabe słabną

oddz. el-mag wzmacniają się

α_s

α_w

α_{el}



D. Gross,
Photon 2005

Na osi poziomej - energia

Biegające stałe sprzężenia

- pytanie o unifikacje

- Stałe sprzężenia zmieniają się wraz z skalą energii (pędu) jako efekt poprawek kwantowych
- Struktura kwantowa danego oddziaływania decyduje o tym czy stała sprzężenia rośnie czy maleje ze wzrostem energii (kluczowy fakt - czy nośniki sił są „naładowane”, czyli czy same ze sobą oddziałują, np. foton – neutralny, a gluony „naładowane”)
- Jeśli jedne stałe sprzężenia rosną a inne maleją, to dla pewnych energii mają te same (lub zbliżone) wartości
pojawia się pytanie o wspólny opis takich oddziaływań
→ unifikacja ?

Oddziaływania słabe

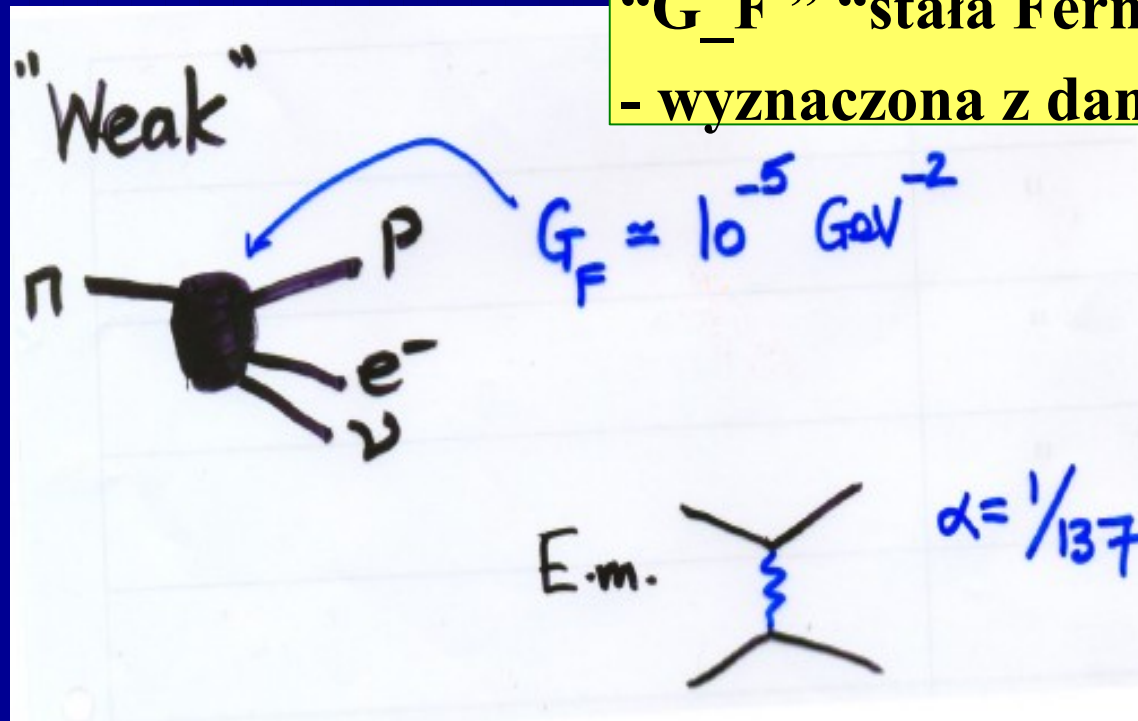
wg. wykładów F. Close w CERN

Model Fermiego (1934)

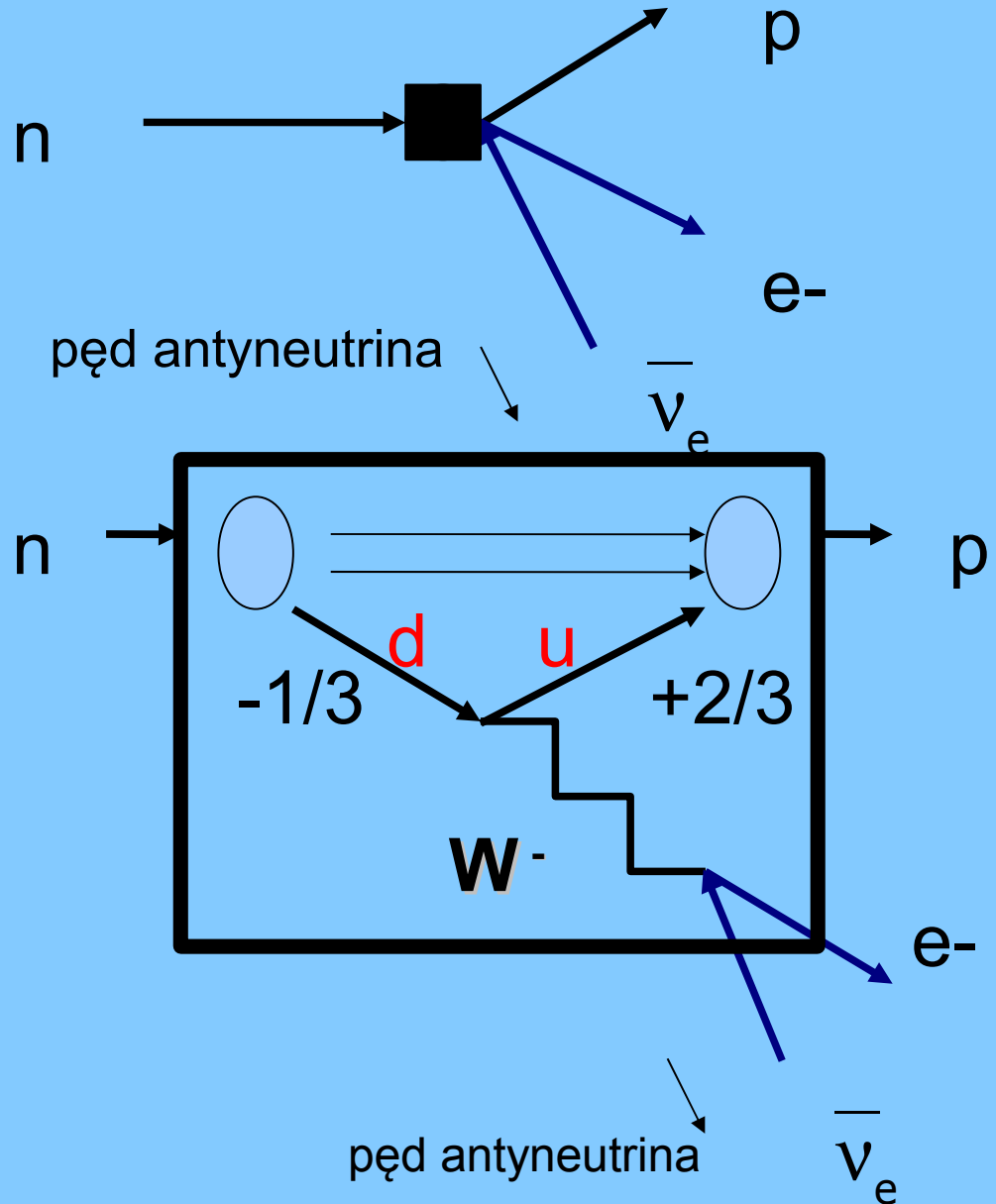
Dla rozpadu beta neutronu

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

- wyznaczona z danych dośw.



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

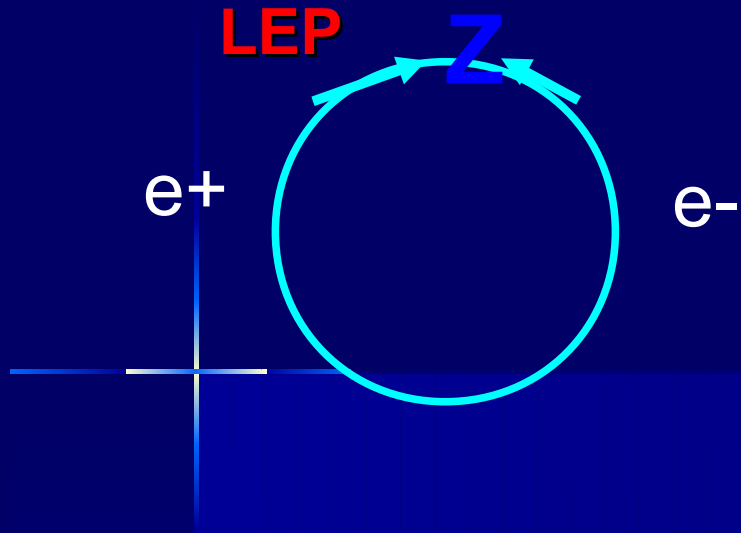


zachowanie ładunku el.

Trochę historii

- 1864 Maxwell połączył elektryczność i magnetyzm (oddziaływania elektromagnetyczne) – *pierwsza unifikacja sił*
- 1970 Glashow, Weinberg i Salam – propozycja wspólnego opisu oddziaływań słabych i elektromagnetycznych (*częściowa unifikacja*) → oddziaływania elektroślabe (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^- również bozony Z
- Rubbia i van der Meer (utrzymywanie wiązki antyprotonów w akceleratorze) nagroda Nobla 1984

LEP



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

rezonansowo:

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

Z rozpada się demokratycznie na

$q\bar{q}$ e^+e^- $\mu^+\mu^-$ $\tau^+\tau^-$
 $\nu_e\bar{\nu}_e$ $\nu_\mu\bar{\nu}_\mu$ $\nu_\tau\bar{\nu}_\tau$



1/czas życia

~ liczba dziur =
 liczba różnych typów (kanałów) rozpadów

4 doświadczenia →
 zebrano 20 mln bozonów Z

Czas życia bozonu Z

Zasada nieoznaczoności Heisenberga

Niech Δ oznacza niepewność, rozmycie pomiaru danej wielkości:

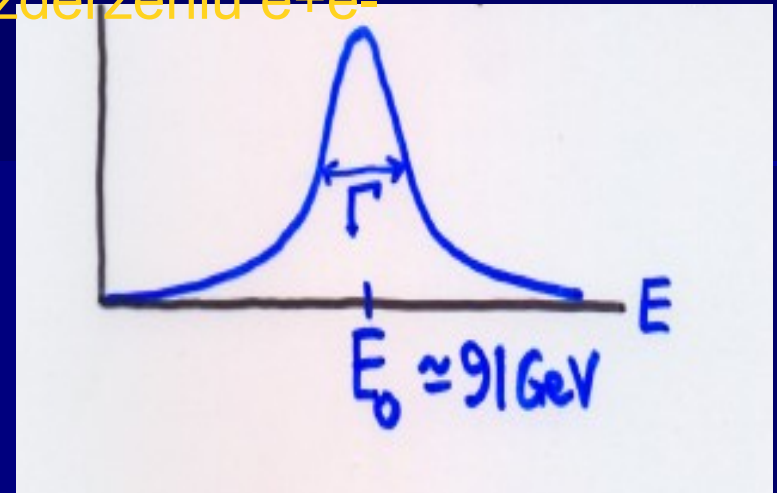
$$\Delta E \Delta t = 6 \times 10^{-25} \text{ GeV/s.}$$

Jeżeli Δt = czas życia cząstki rozpadającej się to rozmycie w energii spoczynkowej (masie) wynosi

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

prawdopodobieństwo produkcji Z

w zderzeniu e+e-



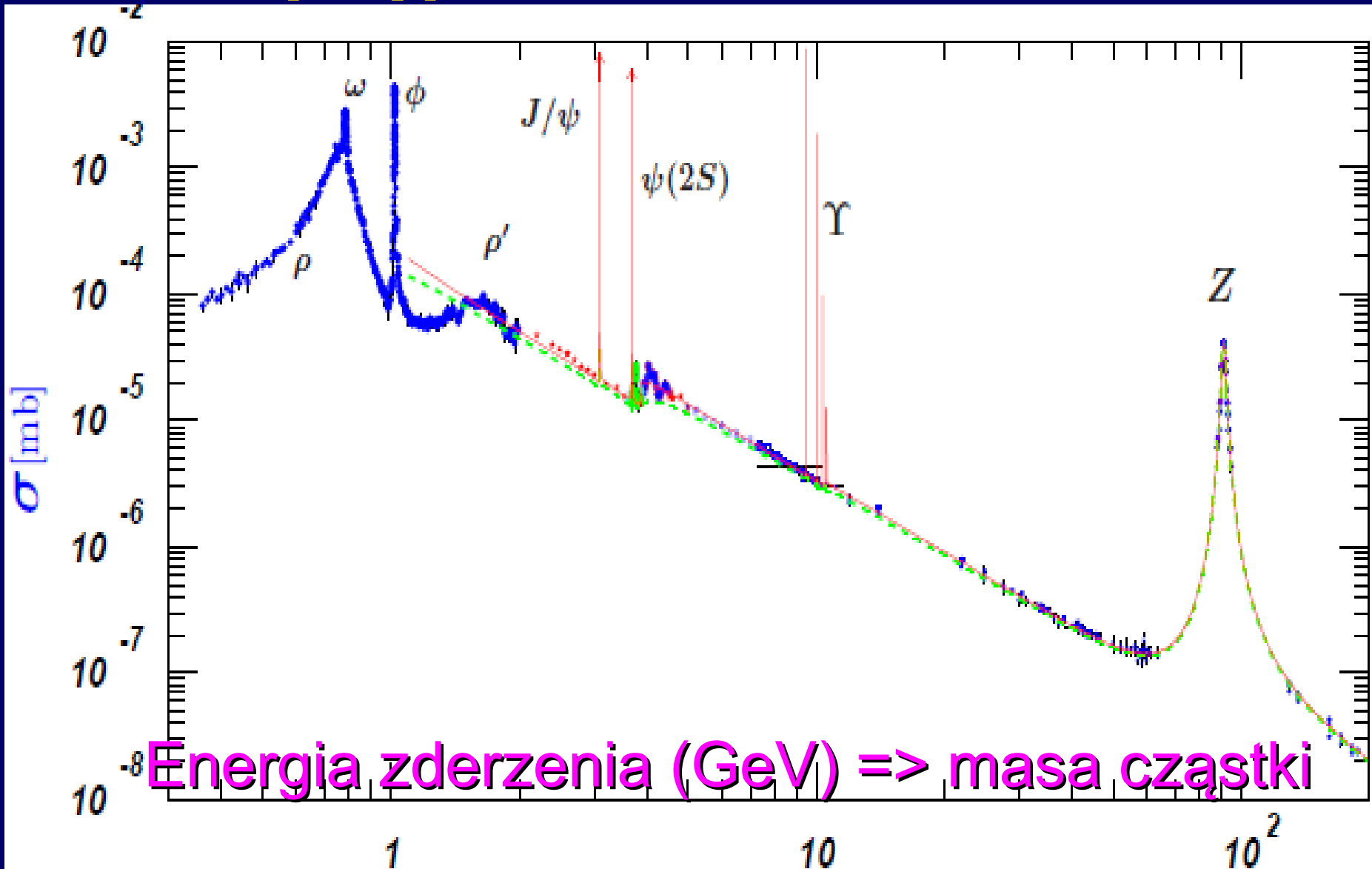
Dla bozonu Z

szerokość poławkowa $\Gamma = \Delta E$
(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-

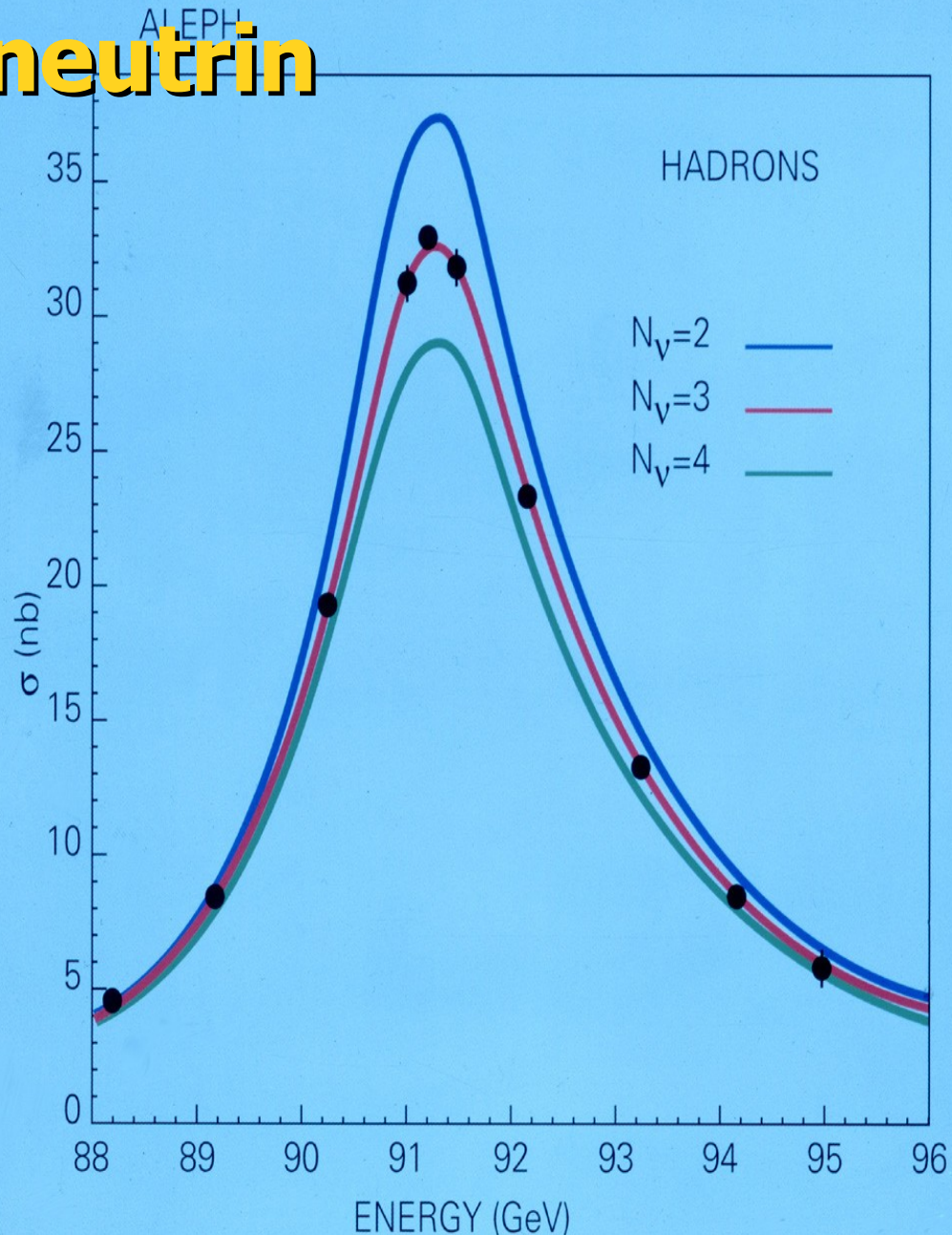


Liczba lekkich neutrin

Z pomiaru szerokości połówkowej bozonu Z można wyznaczyć ile jest lekkich neutrin (lekkich tzn. takich na które może się rozpaść 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 $N_\nu = 3$!



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) →

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

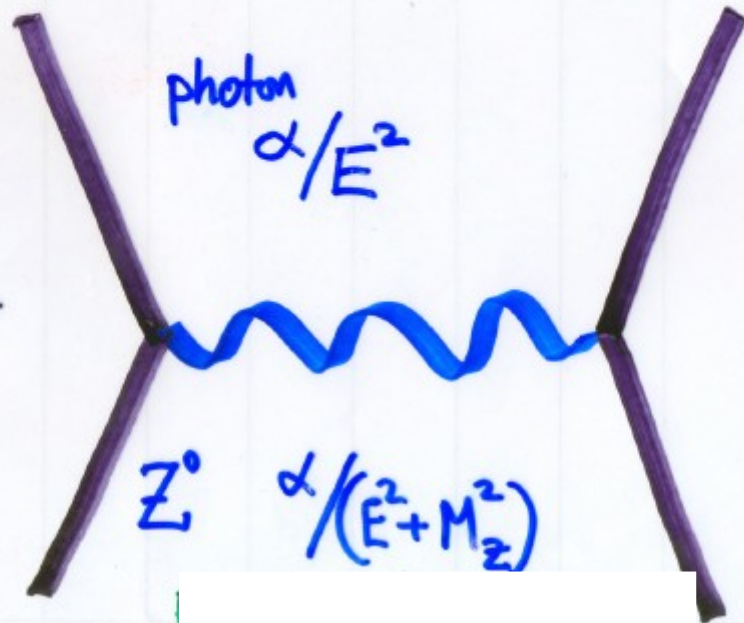
M - masa cząstki

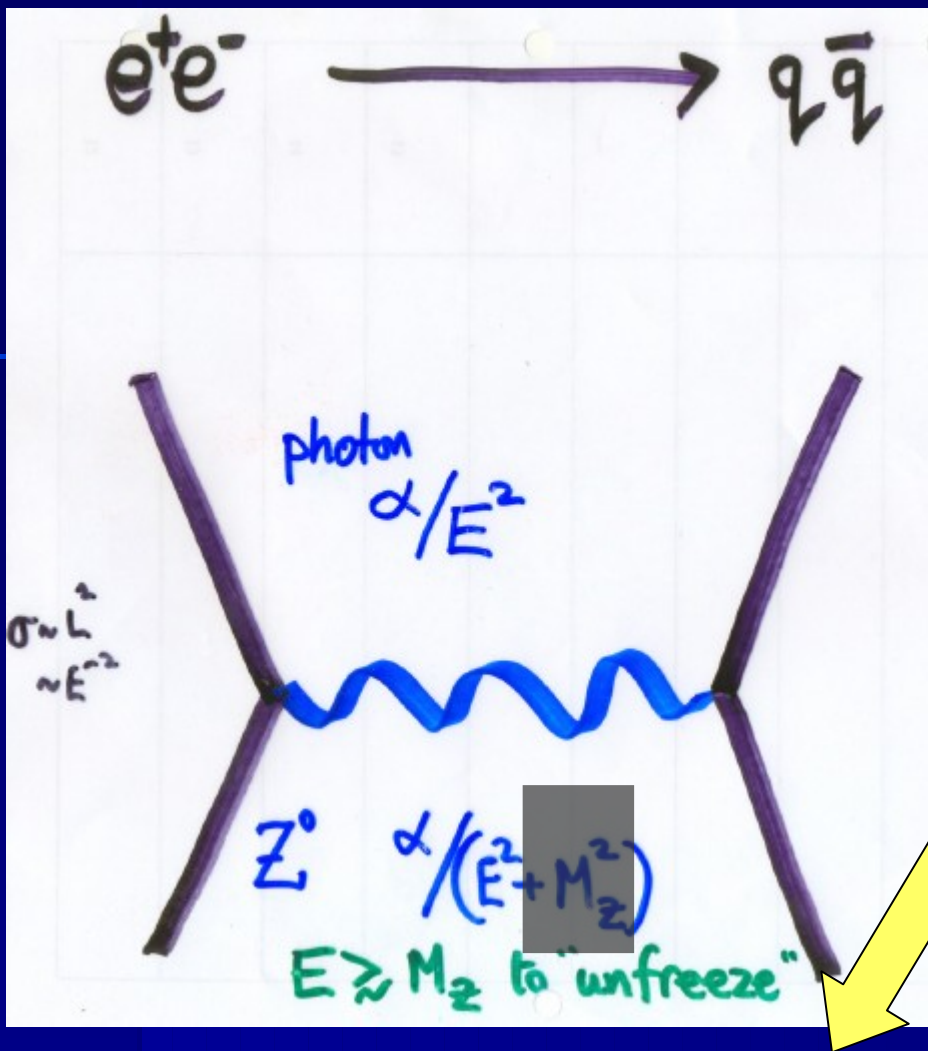
← tu dla bozonu Z lub fotonu

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

foton

bozon Z

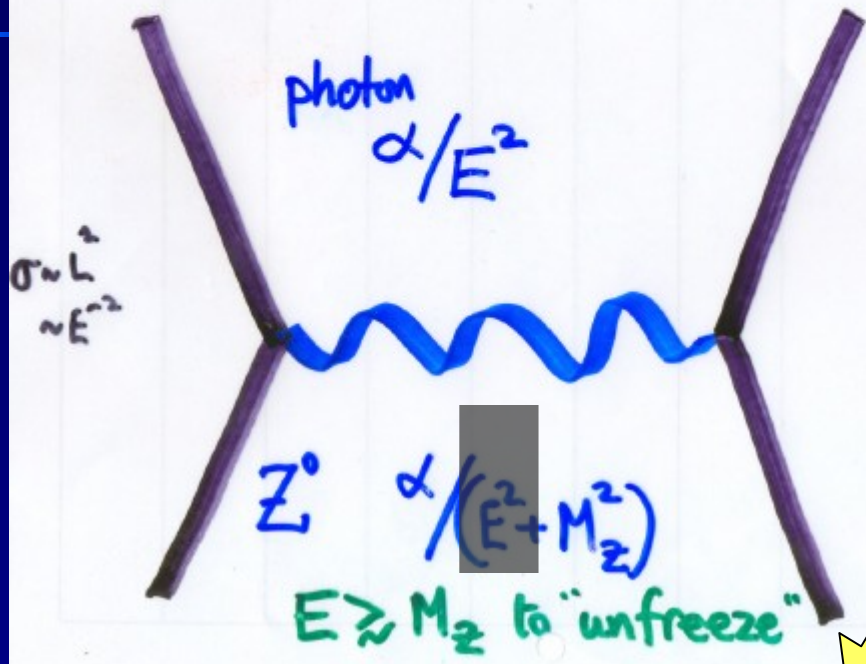




Reguła Feynmana

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

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



Reguła Feynmana

Jeżeli energię E przenosi
 "wirtualna" cząstka (foton; Z)
 to czynnik

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

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

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



photon
 $\propto 1/E^2$

Model Fermiego

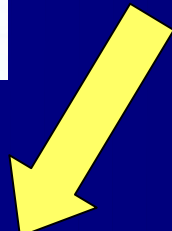
$Z^0 \propto 1/(E^2 + M_Z^2)$

$E \gg M_Z$ to "unfreeze"

$\sigma_{tot} \sim E^{-2}$

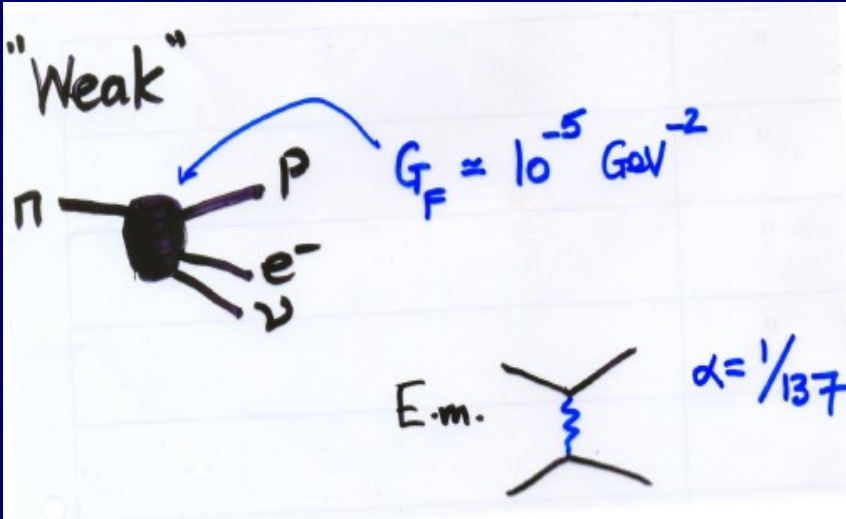
Reguła Feynmana

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



Model Fermiego !

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



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

Odpowiedź = duża masa W
 → Model Weinberga-Salama

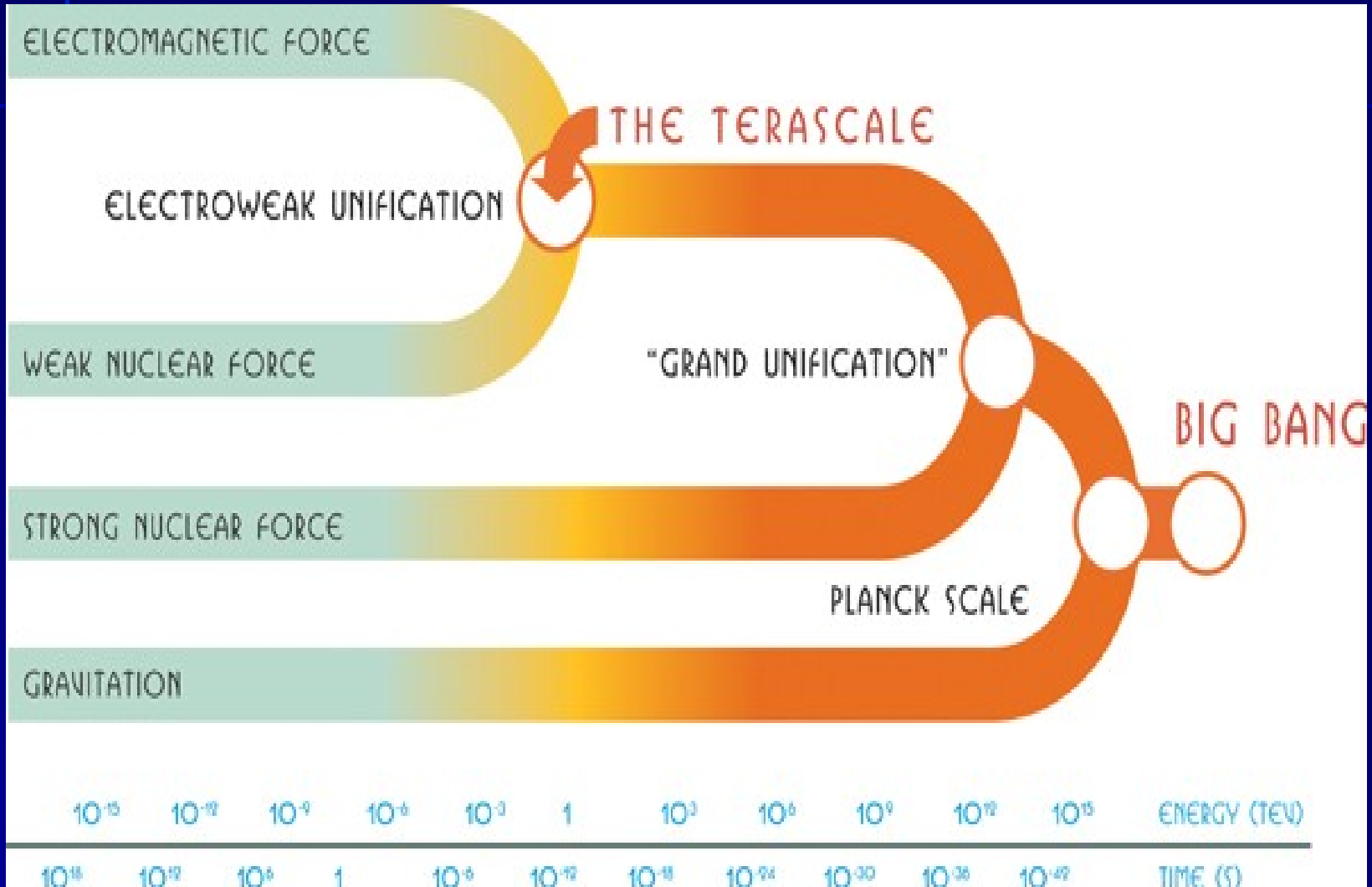
Masa bozonu $W^{+/-} = 80 \text{ GeV}$

Masa bozonu Z 91 GeV

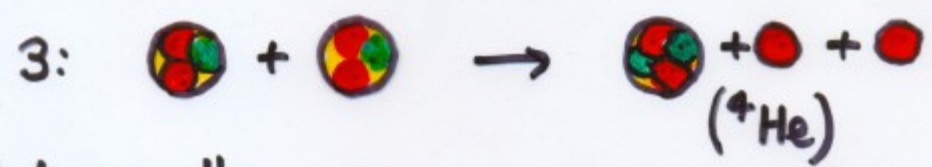
jedyne masywne nośniki fundamentalne

- Oddziaływania słabe i el-mag – podobna „siła” oddziaływania dla dużych energii $\sim 1 \text{ TeV}$
- Opis teoretyczny wspólny → oddz. **elektrosłabe**

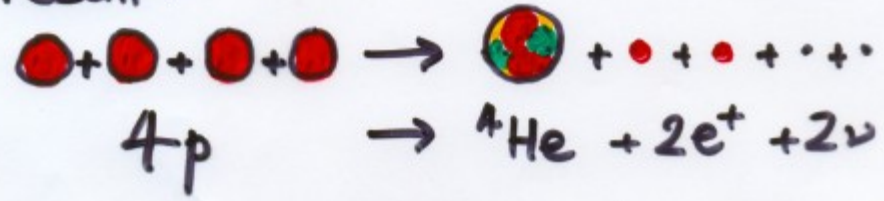
UNIFIKACJA



At the heart of the Sun:

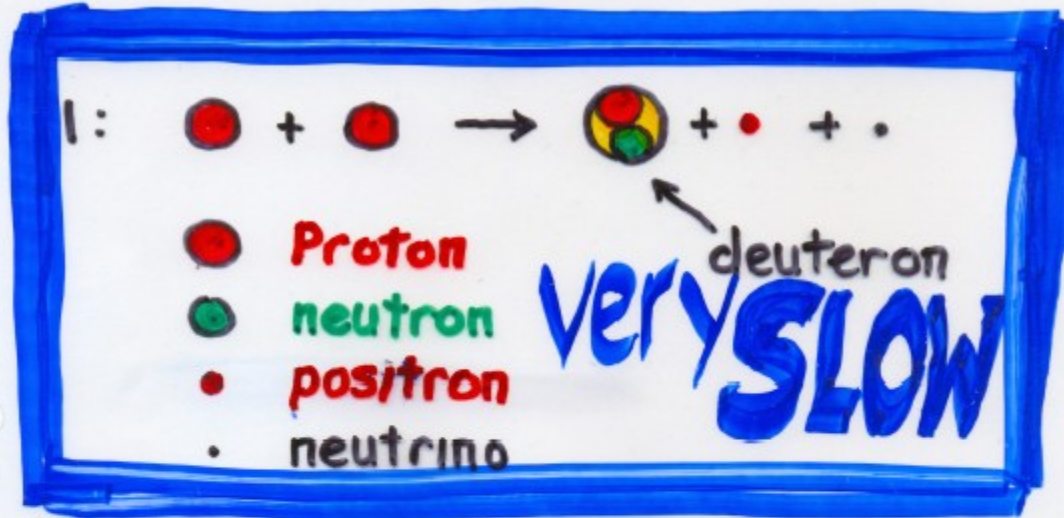


Net result:



Z wykładu
F. Close'a
(CERN)

At the heart of the Sun:

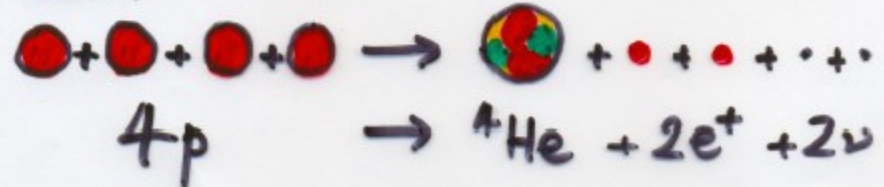


WEAK



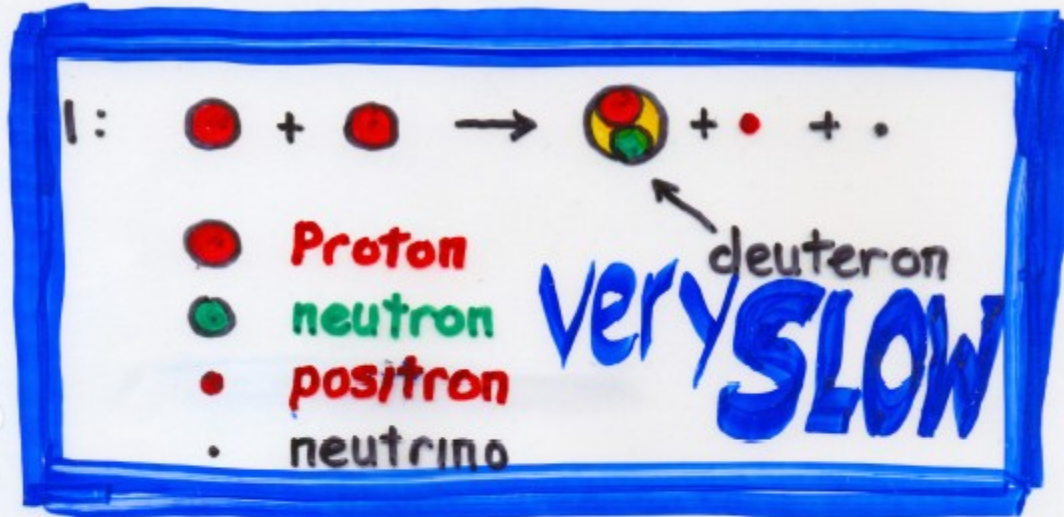
STRONG

Net result:

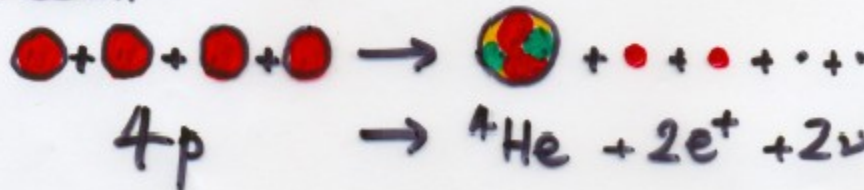


$\Delta E = \Delta M c^2: \quad ^4\text{He} + 4p \approx 28\text{MeV}$

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 6

- Na jakie kwarki rozpada się gluon zielono-antyczerwony?
- W zderzenie kwarku niebieskiego i antykwarku antyczerwonego produkowany jest gluon o jakim kolorze?
- Kwark niebieski promieniuje gluon niebiesko-antyzielony w elementarnym procesie $q \rightarrow g q$ i zmienia kolor. Na jaki?
- Wypisz wszystkie możliwe kolory dwóch gluonów, które w procesie $gg \rightarrow g$ produkują gluon czerwono-antyzielony.
- Co powoduje biegnięcie stałych sprzężenia? Dlaczego stała struktury subtelnej niemaleje, a stała sprzężenia dla sił kolorowych maleje ze wzrostem energii?
- Ile wynosi stała Fermiego?
- Kiedy powstała teoria opisująca pierwszą unifikację sił?
- Kiedy odkryto bozon Z? Ile wynosi jego masa i szerokość połówkowa?
- Skąd wiemy, że są tylko 3 pokolenia neutrin?
- Czy oddziaływania słabe są „słabe” bo masa W jest duża?