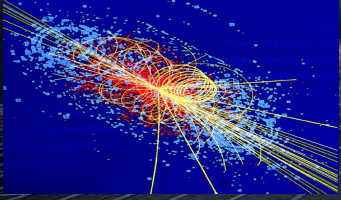


Wszechświat cząstek elementarnych



# WYKŁAD 6

25.III.2009

## Oddziaływania słabe

# Cztery podstawowe siły

Oddziaływanie grawitacyjne

Oddziaływanie elektromagnetyczne

Oddziaływanie silne (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 neutronu na p i antyneutrino el. Na poziomie fundamentalnym realizowane między kwarkami, we współpracy z oddziaływaniem e-m(oddz.elektrosłabe)

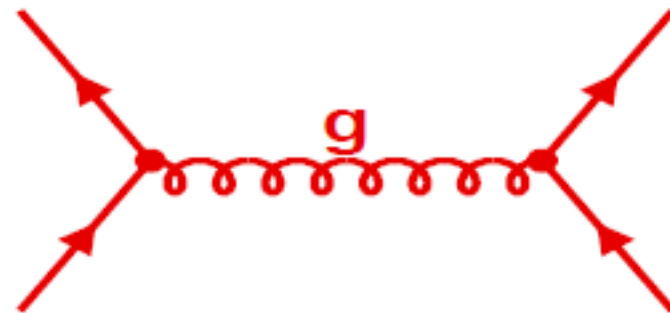
# Siły -> oddziaływania fundamentalne

- Oddziaływania na poziomie fundamentalnym = emisja i pochłanianie bozonów (foton, W/Z, gluon, grawiton?)
  - Klasyfikacja: zasięg (z zasady Heisenberga  $M \sim 1/x$ )  
grawitacyjne i elektromagnetyczne – zasięg nieskończony → masa fotonu (grawitonu?) = 0  
  
silne – zasięg rozmiar protonu  $10^{-15}$  m (tu uwięzienie)  
słabe – zasięg  $10^{-18}$  m (masa nośników 80-90 GeV)
  - Klasyfikacja: „siła” (strength) inaczej natężenie siły  
- stałe sprzężenia  $\alpha$  i  $\alpha_s$ ...
- Silne > elektromagnetyczne > słabe > grawitacyjne**

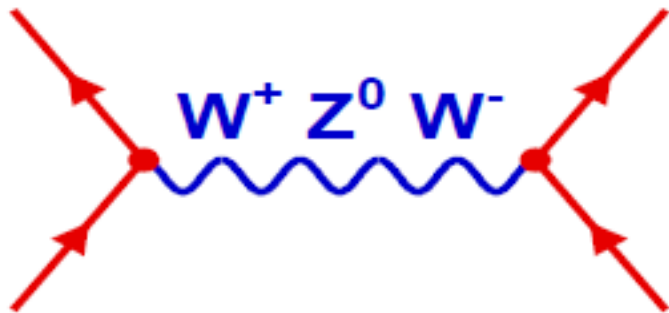
# Diagramy Feynmana



elektromagnetyczne



silne

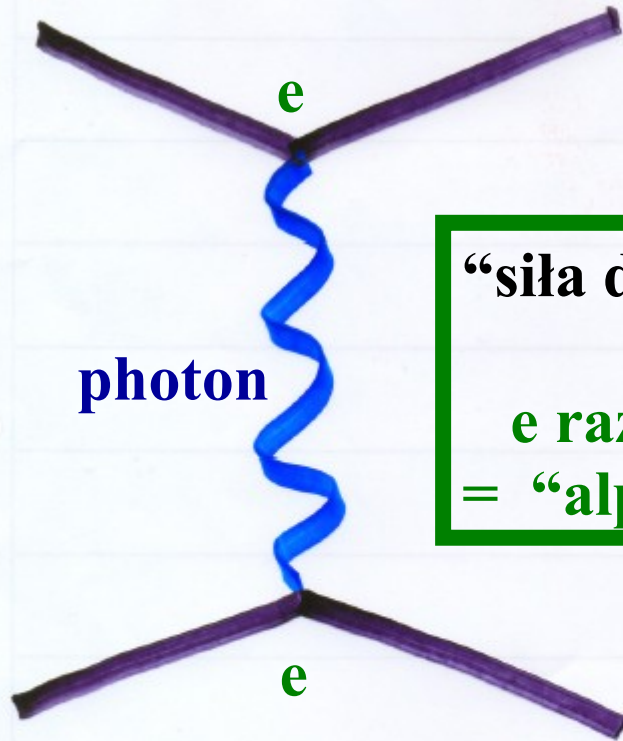


slabe



grawitacyjne

# Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



“siła działania”

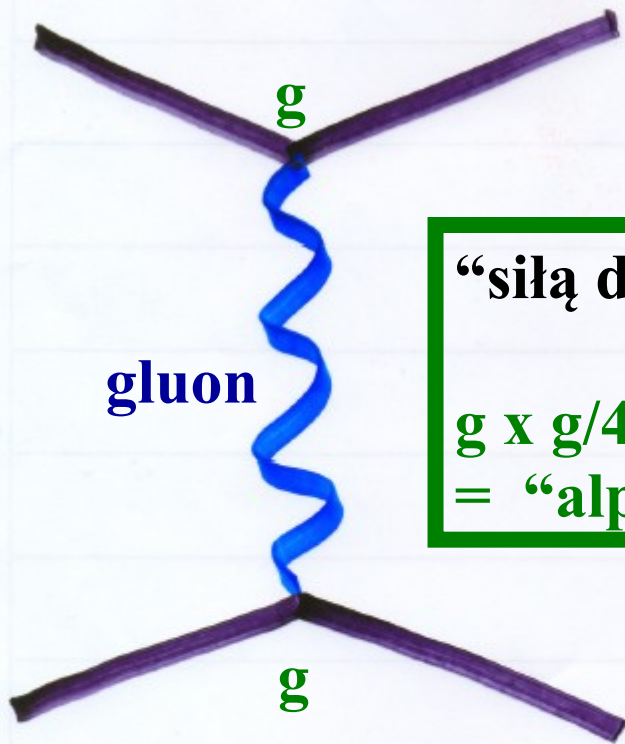
$$e \text{ razy } e/4\pi = 1/137 \\ = \text{“alpha”}$$

$\alpha$

Proces rozpraszania dwóch elektronów

$ee \longrightarrow ee$

# Diagramy Feynmana dla oddziaływań kolorowych



gluon

“siła działania”

$$g \times g/4\pi \sim 1/10 \\ = \text{“alpha}_s\text{”}$$

$\alpha_s$

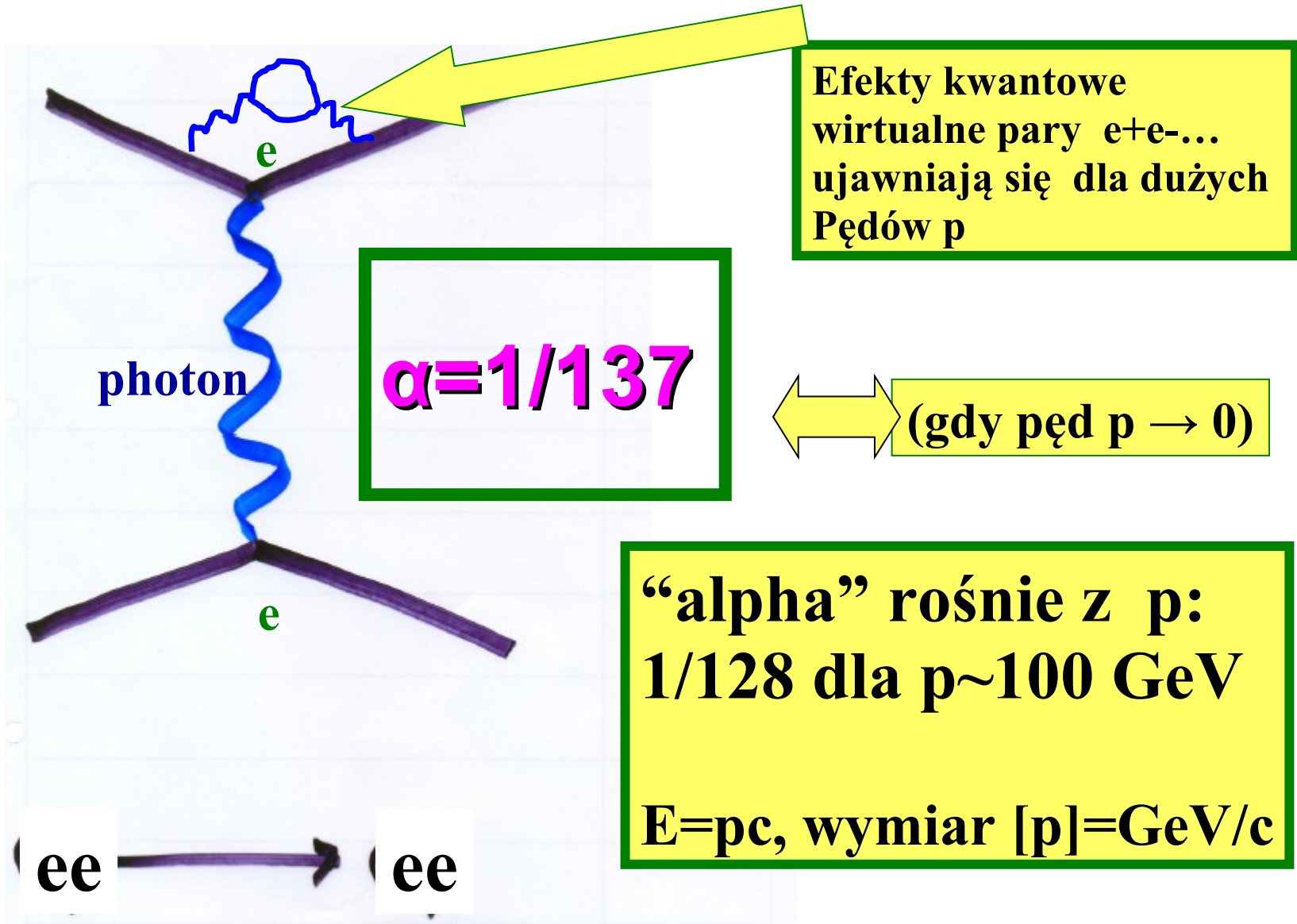
Proces rozpraszania dwóch kwarków

qq



qq

# Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



Efekty kwantowe wirtualne pary  $e^+e^-$ ... ujawniają się dla dużych Pędów  $p$

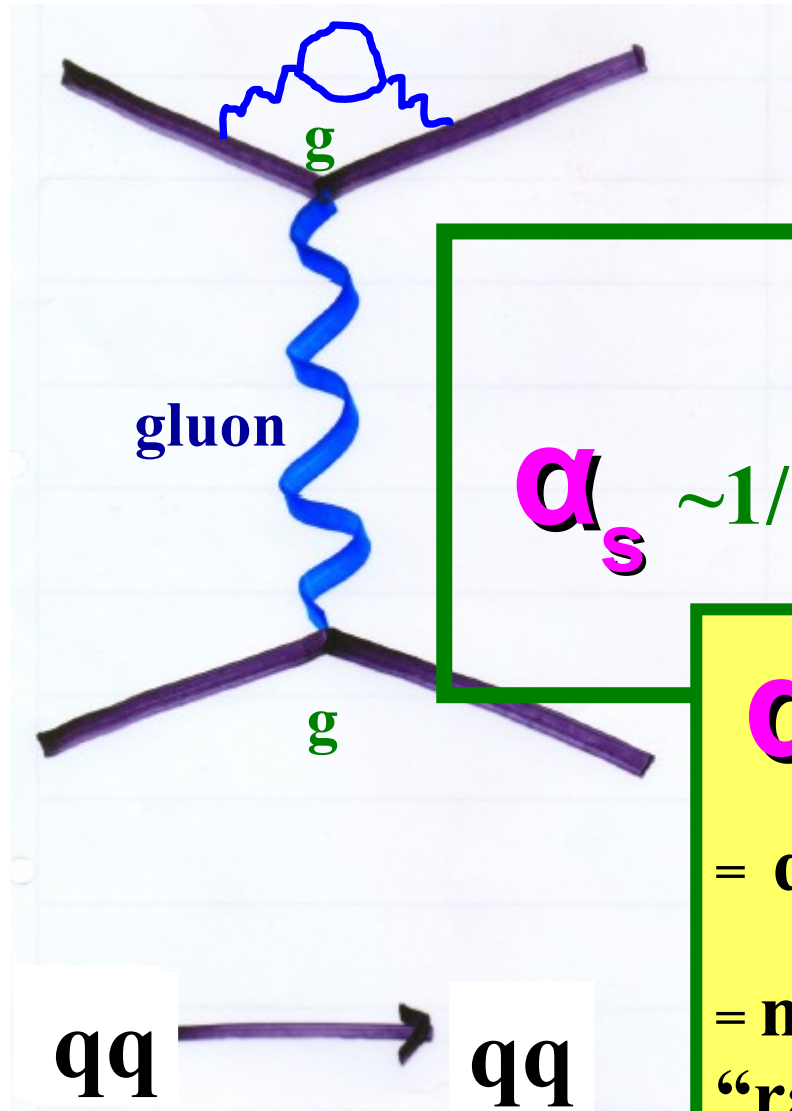
$$\alpha = 1/137$$

(gdy pęd  $p \rightarrow 0$ )

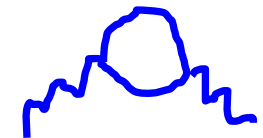
“alpha” rośnie z  $p$ :  
1/128 dla  $p \sim 100$  GeV

$E = pc$ , wymiar  $[p] = \text{GeV}/c$

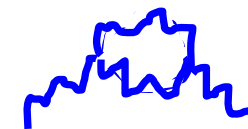
# Feynman diagrams for chromomagnetic interaction



Jak w QED, w QCD



ale również



$\alpha_s$  maleje z pędem

= duża dla małych  $p$

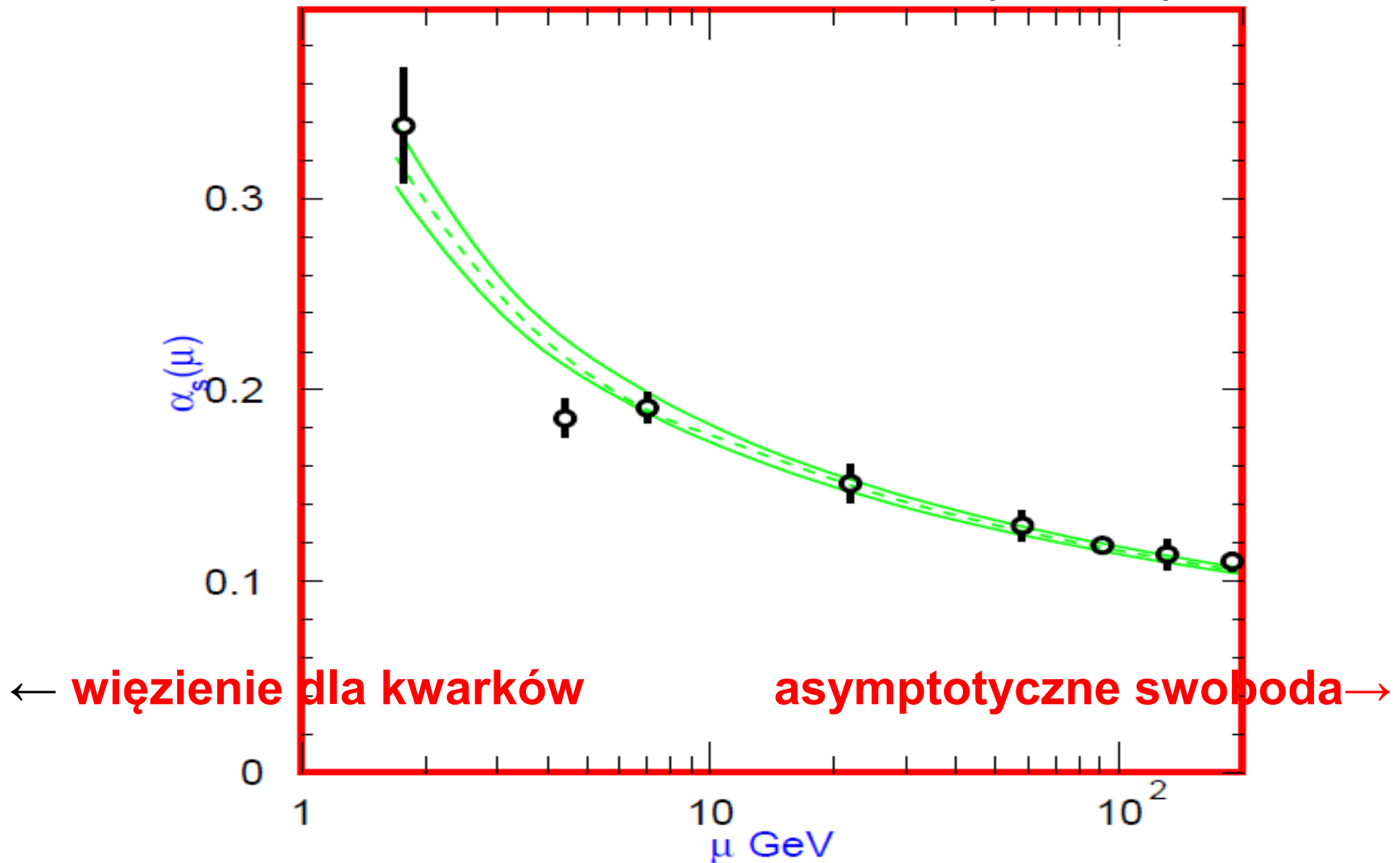
SILNE ODDZIAŁYWANIA!

= mała dla dużych  $p$

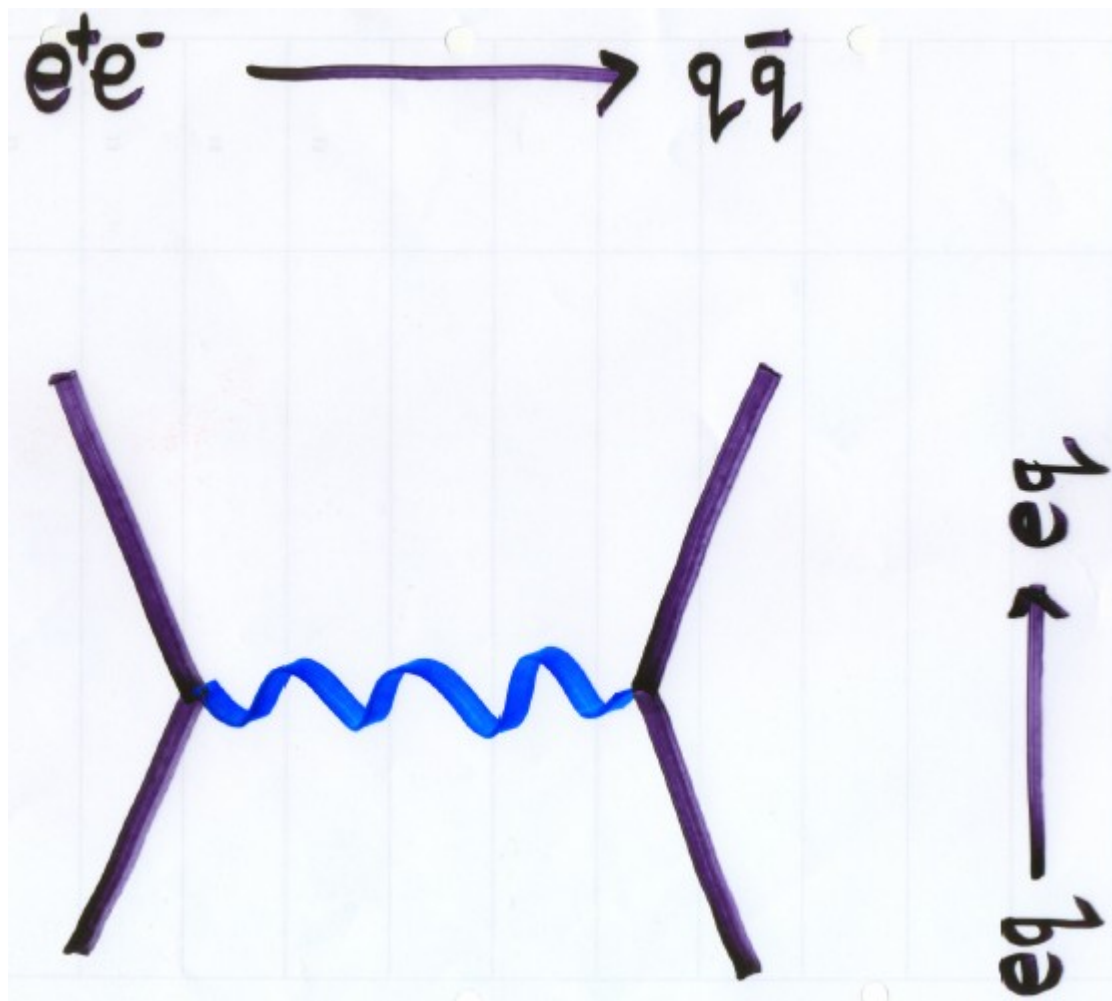
“rachunek zaburzeń QCD”



# Biegająca stała sprzężenia – dane doświadczalne (2008)



# Diagramy Feynmana dla oddziaływań elektromagnetycznych



# Nośniki sił

foton

e-m

gluon

silne

**Diagram Feynmana dla QCD analogicznie**

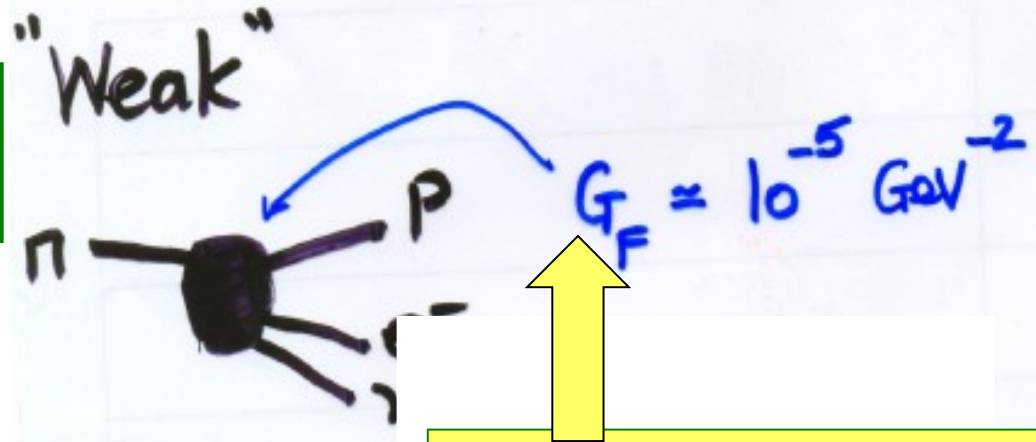
**QED: elektron; pozyton; foton**

**QCD: kwark; antykwark; gluon**

# **Historia elektroslabych oddziaływań wg F. Ciosa**

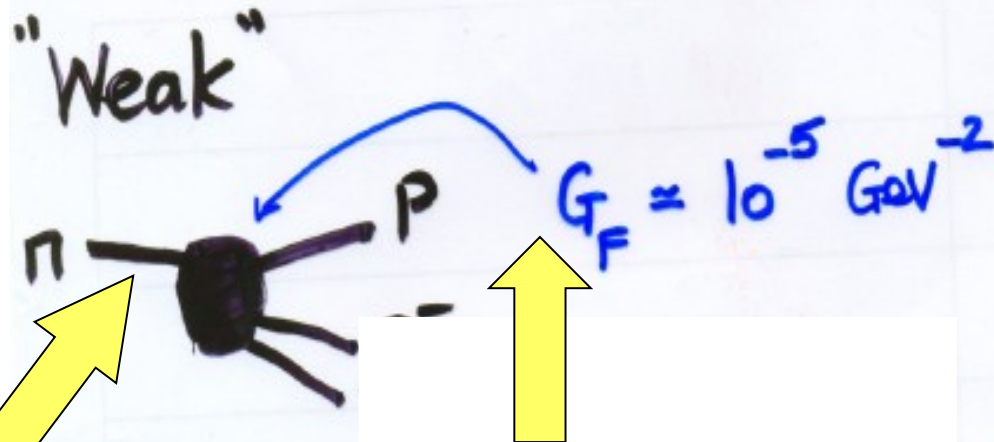
## **Sily słabe**

**Model Fermiego (1934)  
Dla rozpadu beta neutronu**



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

**Model Fermiego (1934)  
Dla rozpadu beta n**

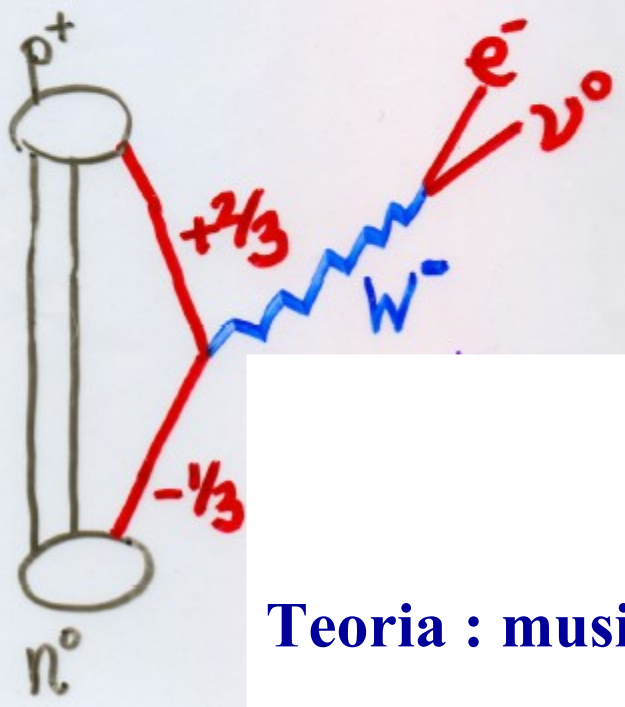


Teraz przyglądamy się tej czarnej skrzynce z dzisiejszą zdolnością rozdzielczą i widzimy wymianę bozonu W

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



foton	e-m
gluon	silne
W	słabe



**Teoria : musi istnieć neutralny partner  $W^{+/-} \Rightarrow Z$  odkryty**

# The Electroweak Story F. Close

1864

Maxwell unifies electricity and magnetism  
→ electromagnetism

100 years later

Glashow Salam Weinberg propose unification of Electromagnetic and weak electro-weak

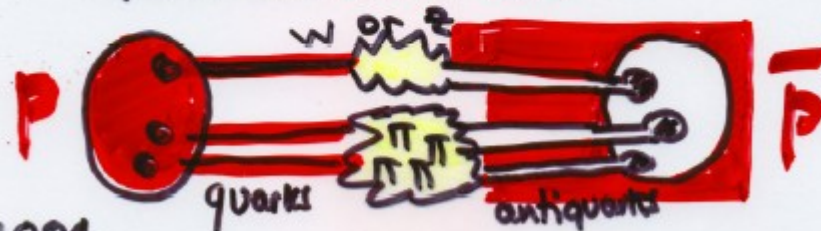
They use Higgs mechanism

→ predict force carriers

→ masses predicted.  $W^+ W^- Z^0$   $(m_\gamma = 0)!$

1983-84

W and Z particles found by CERN experiments UA1 + UA2



1984

Rubbia + van der Meer → Nobel Prize



1989-95 LEP



Tune  $E_+ + E_- = M_Z c^2 = 91 \text{ GeV}$

LEP 4 experiments  
20 million  $Z^0$

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 rozpadów

e-

## Czas życia bozonu Z

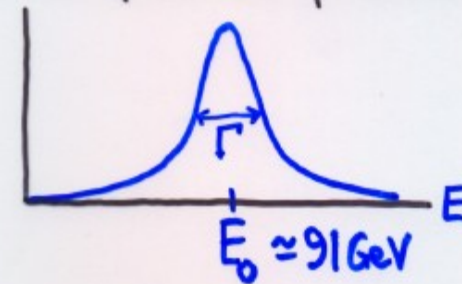
Zasada nieoznaczoności Heisenberga

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

jeżeli  $\Delta t$  – czas życia cząstki  
to

$$\Rightarrow \Delta E = \Delta M c^2 = \frac{6 \times 10^{-25} \text{ GeV}}{\Delta t \text{ (sec)}}$$

$e^+e^- \rightarrow Z$  (production probability)

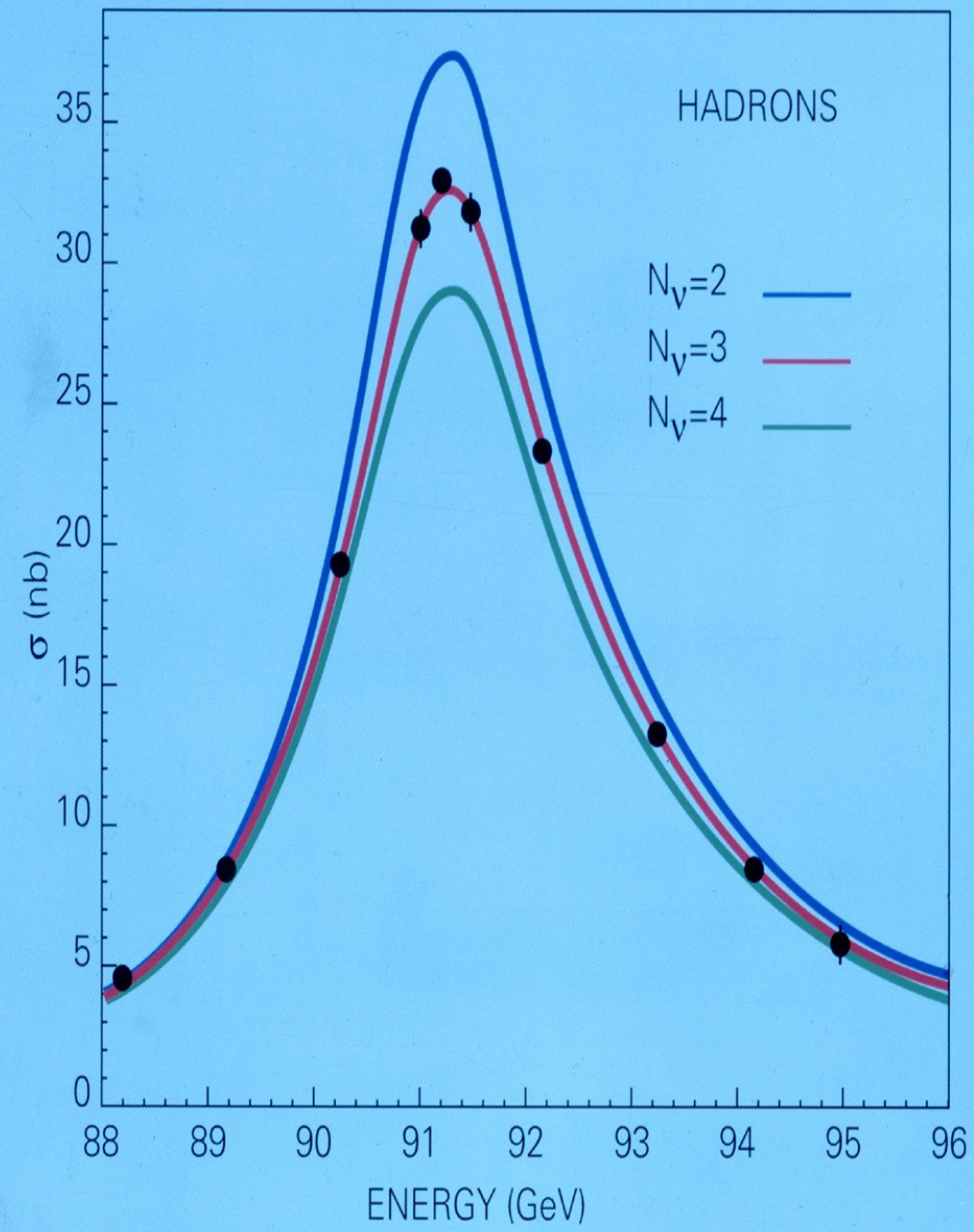


$$\Gamma = \Delta E = 2.5 \text{ GeV}$$

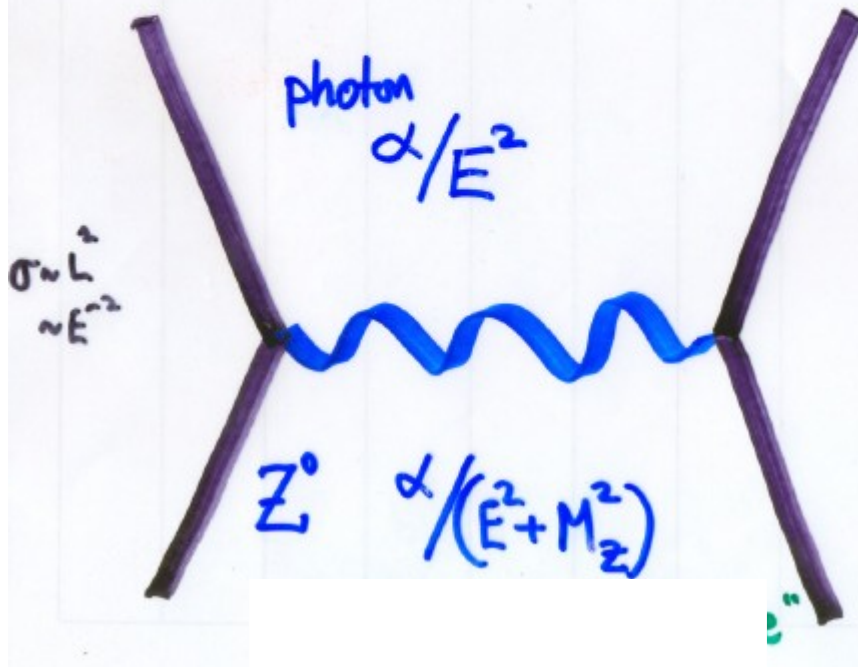
Czas życia

$$= 10^{-25} \text{ sec}$$

ALEPH

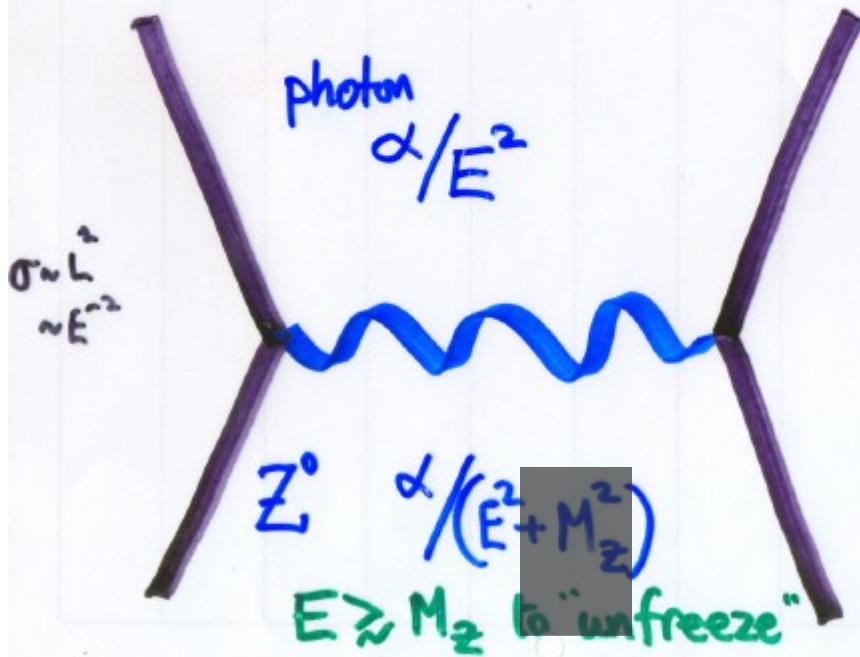


## Wymiana bozonu Z i fotonu - porównanie



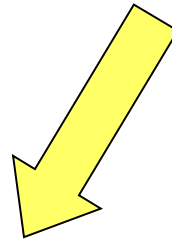
### Reguła Feynmana

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

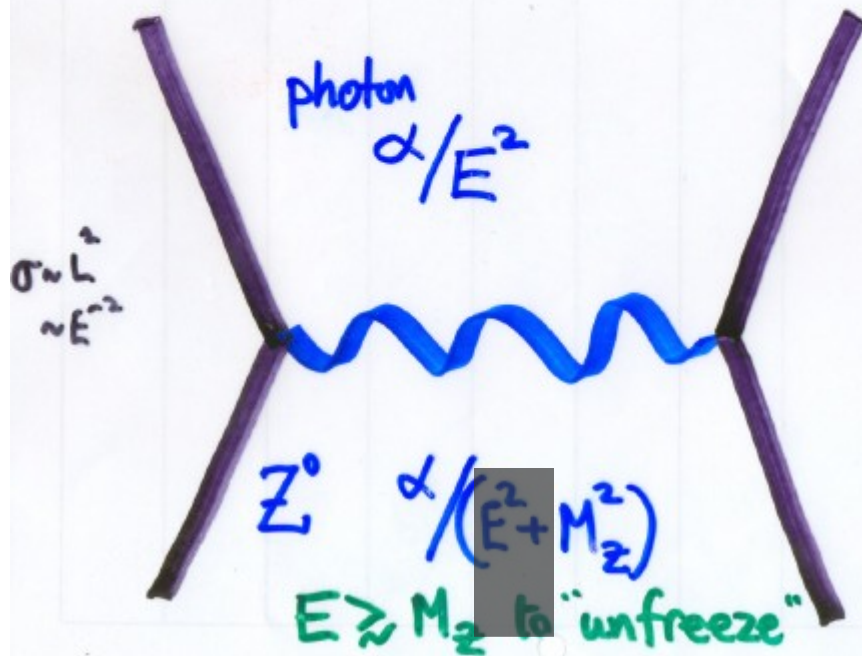


## Reguła Feynmana

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

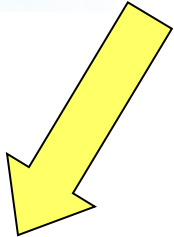


**Dla  $E \gg M$  to w przybliżeniu czynnik  $1/E^2$ ...jak dla fotonu**



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  $1/M^2$**

$$\sigma \sim L^2 \\ \sim E^{-2}$$

## Model Fermiego

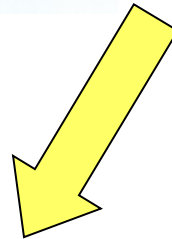
photon  
 $\propto 1/E^2$

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

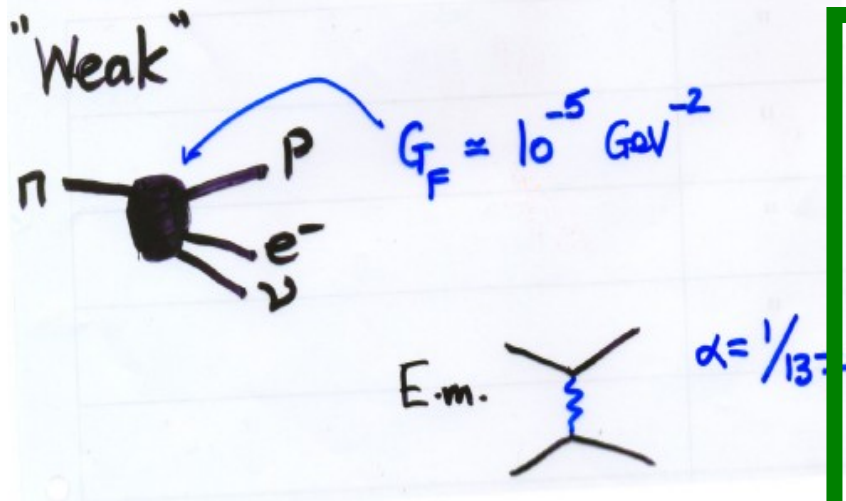
$E \gtrsim M_Z$  to "unfreeze"

## Reguła Feynmana

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



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  $91 \text{ GeV}$

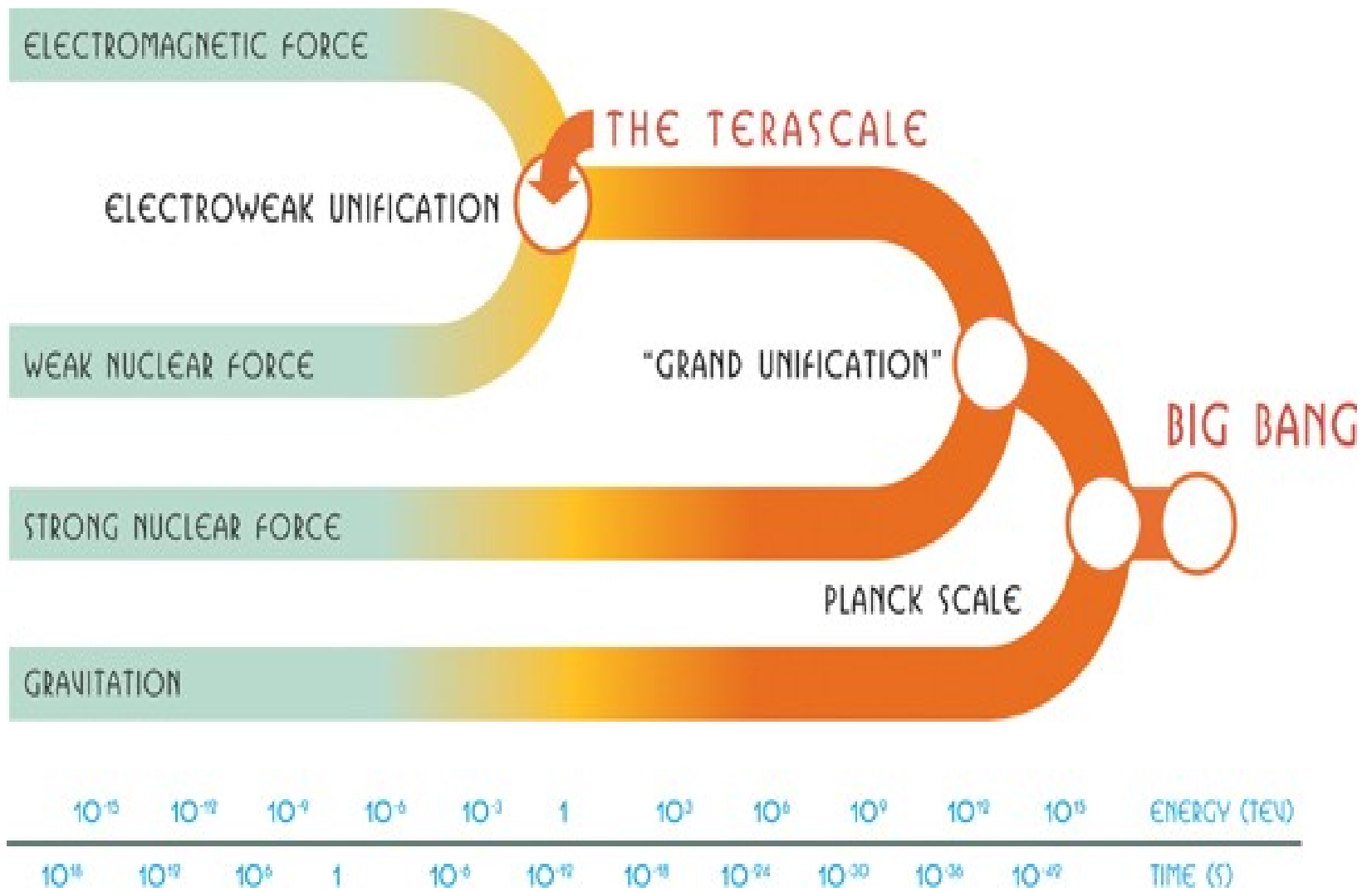
jedyne masywne nośniki fundamentalne

Oddziaływania słabe i e-m – podobna „siła”  
oddziaływania dla dużych energii  $\sim 1 \text{ TeV}$

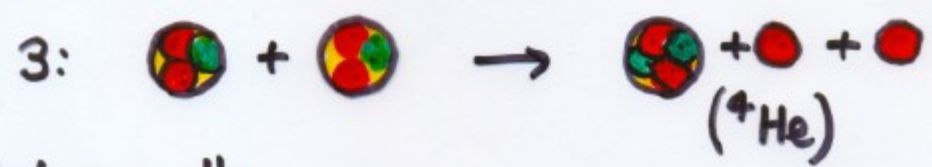
Opis teoretyczny wspólny  $\rightarrow$  oddz. elektroslabe



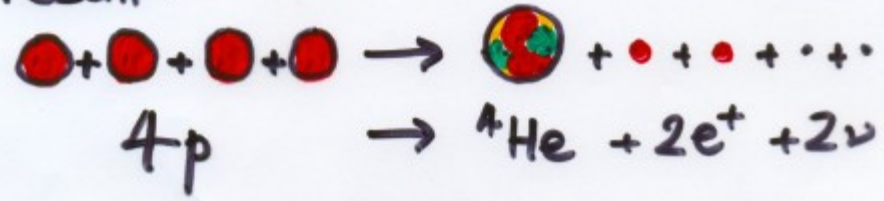
# UNIFIKACJA



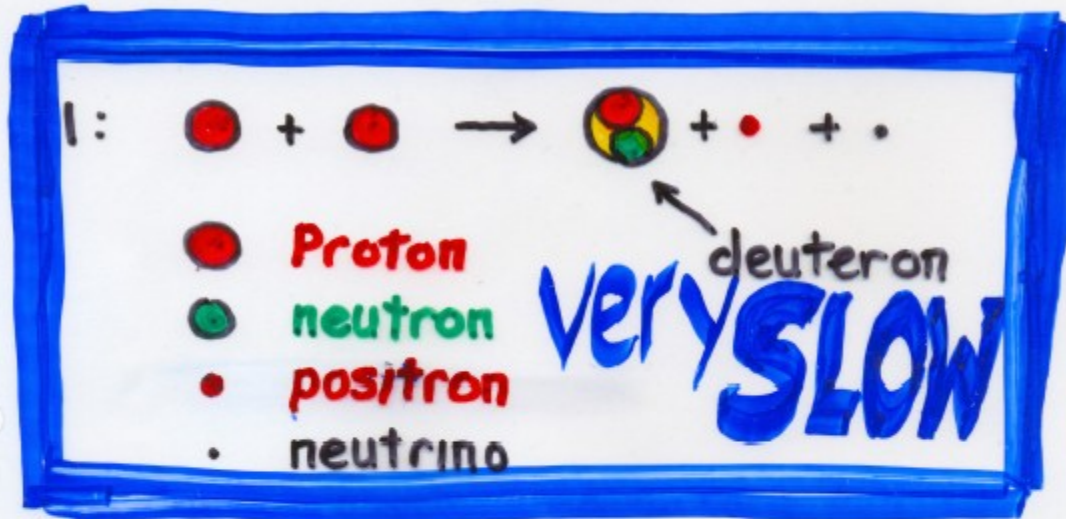
# At the heart of the Sun:



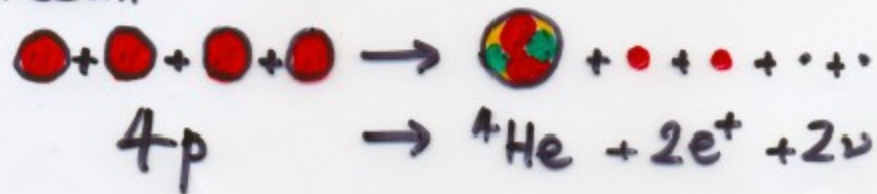
Net result:



# At the heart of the Sun:

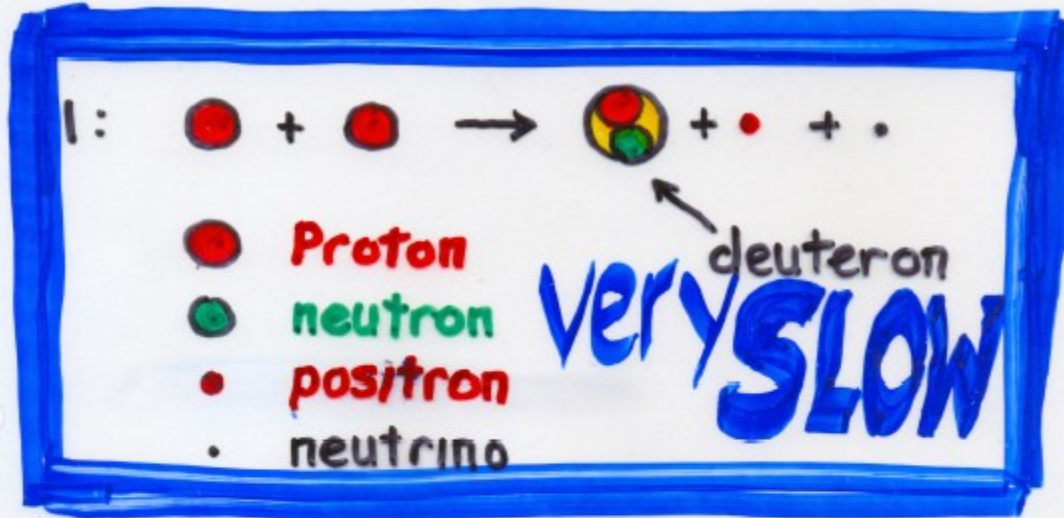


Net result:



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

# At the heart of the Sun:



**WEAK**



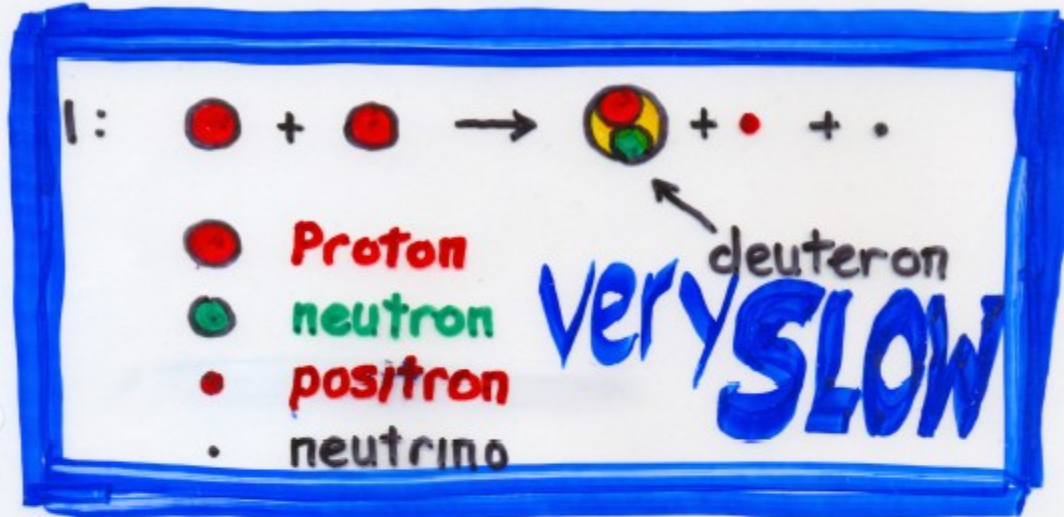
**STRONG**

Net result:



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

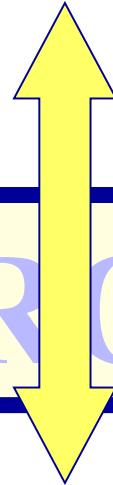
At the heart of the Sun:



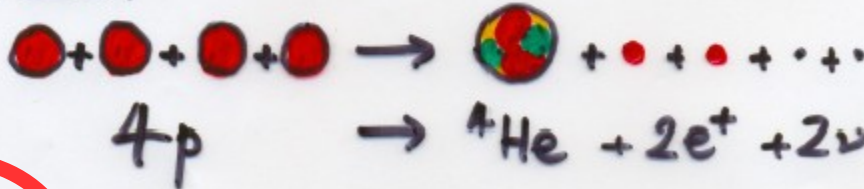
**WEAK**



**STRONG**



Net result:



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

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

▲ wypromieniowana energia

## **Słabe oddziaływania słabe w Słońcu .**

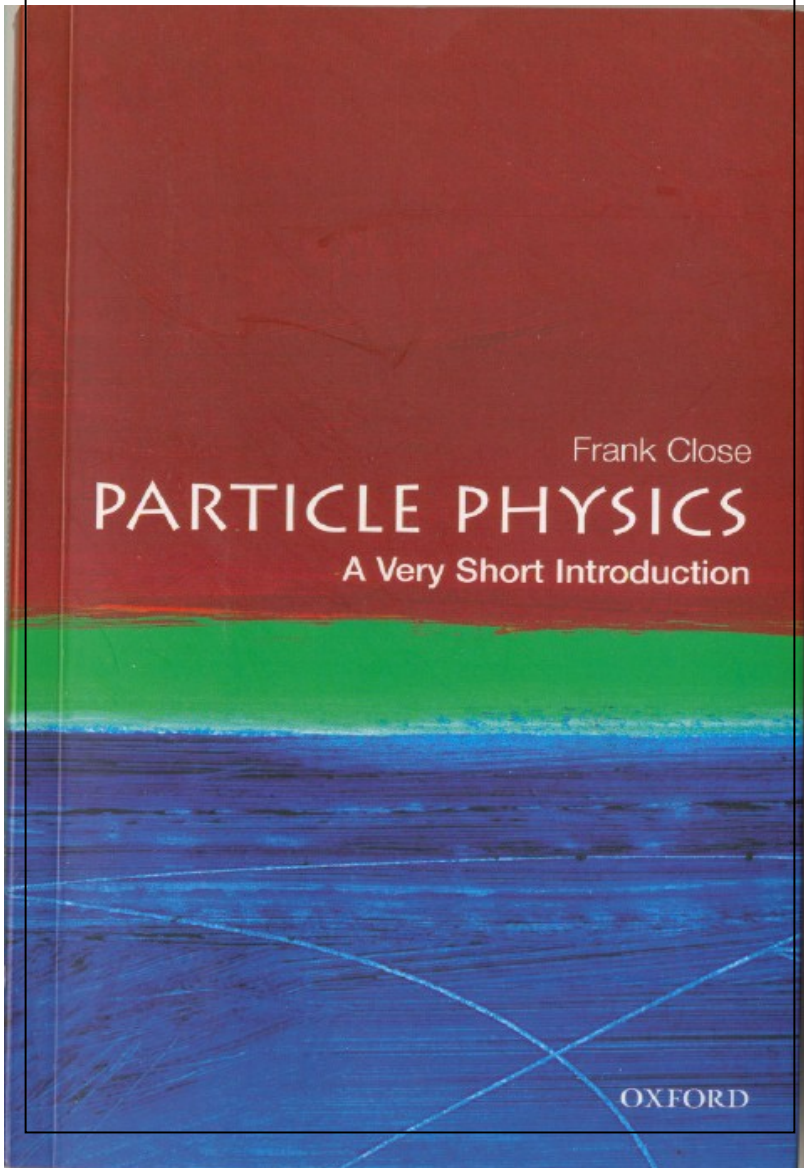
**..ponieważ  $10,000,000\text{K} \sim 1 \text{ keV} \ll 80 \text{ GeV}$**

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

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

**→ Mass matters**

# A Very Short Introduction



Coming out in December

NEW

# THE COSMIC ONION

*Quarks and the Nature of the Universe*



Frank Close

# CEL teoretyka

**.. dotrzeć do tych uniwersalnych  
elementarnych praw przyrody,  
z których kosmos może być  
zbudowany przez czyste  
wnioskowanie**

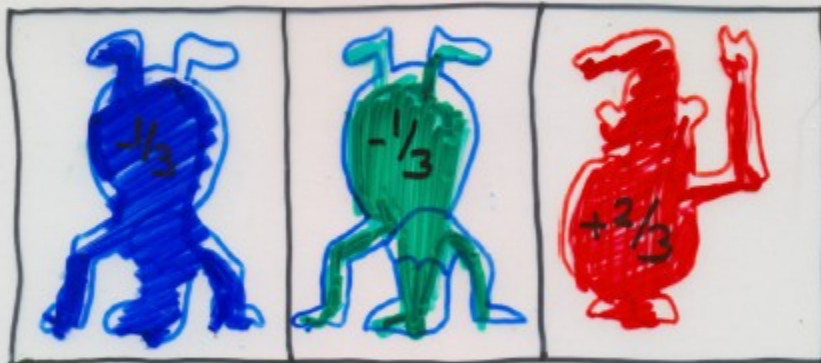
**Albert Einstein**



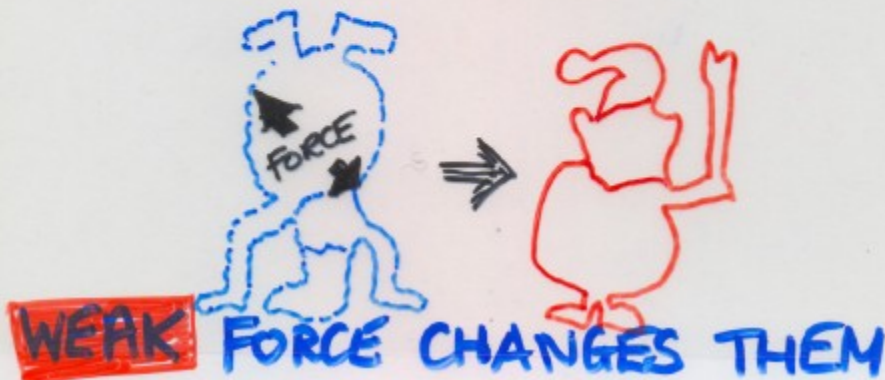
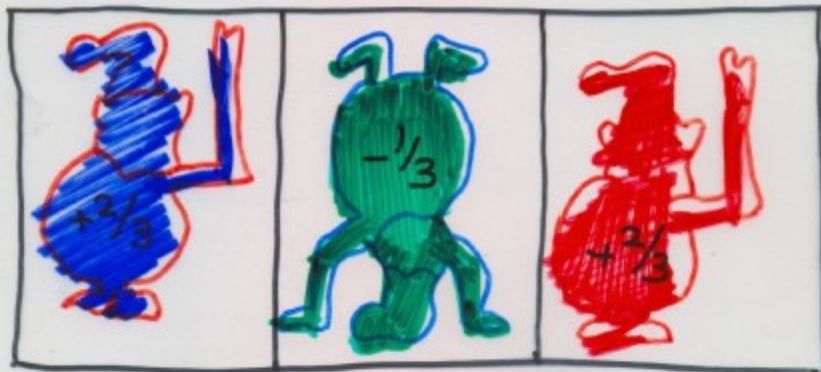
1960s QUARKS

**STRONG** force gives them

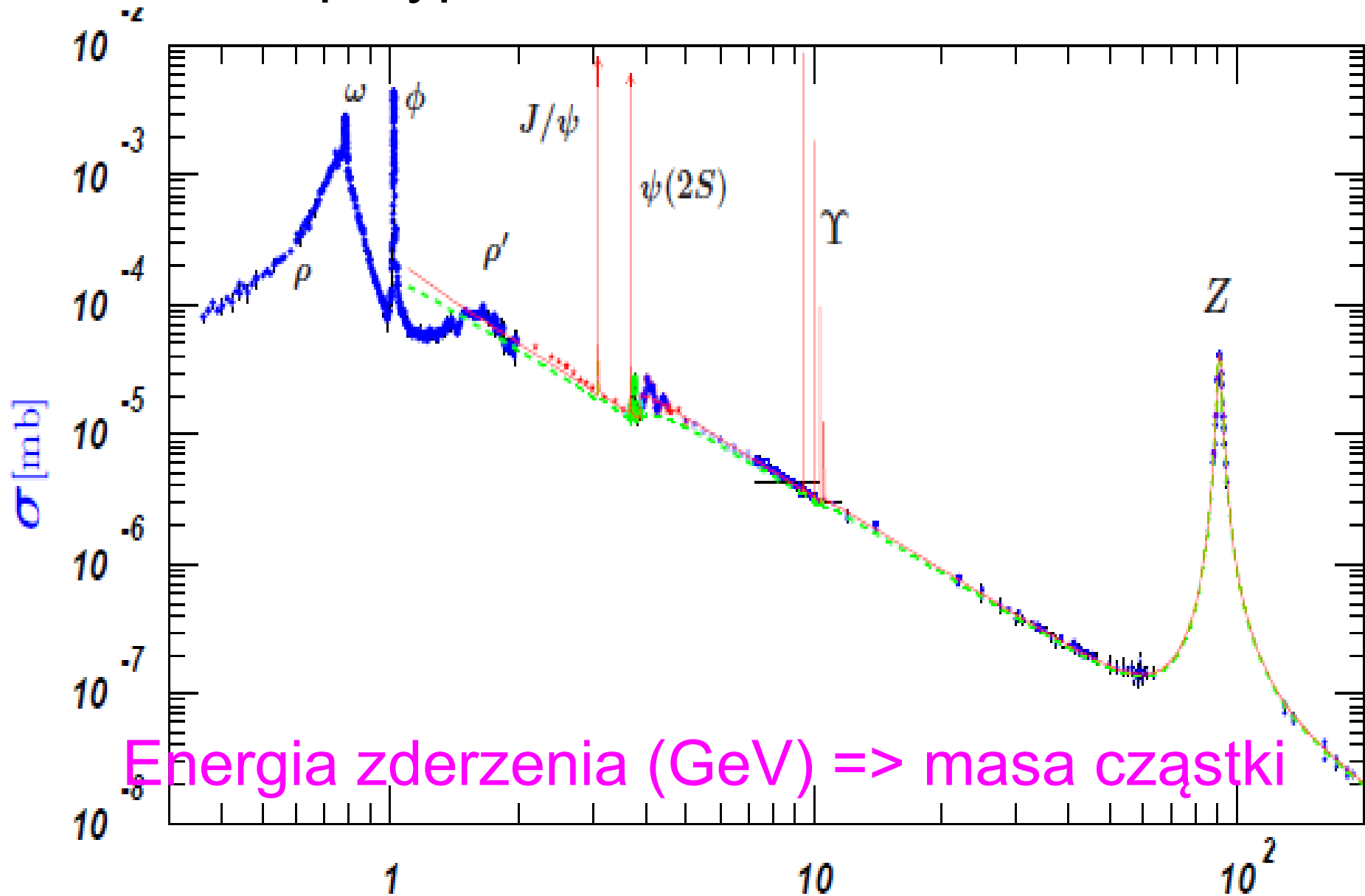
$n^0$



$p^+$



# Liczba przypadków w zderzeniach $e^+e^-$



# 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).