Oddziaływania słabe

Elementy fizyki cząstek elementarnych

Wykład VI

- neutrina
- teoria Fermiego
- mieszanie kwarków
- łamanie CP
- bozony $W^{\pm}$ i Z°

Neutrina

Promieniotwórczość

Odkrycie promieniotwórczości uranu: Henri Becquerel, 1896.

1903 - nagroda Nobla, wraz z M.Skłodowską i P.Curie

E.Rutherford i F.Soddy:
Źródłem promieniowania są przemiany jednych pierwiastków w inne.

Separacja w polu magnetycznym:

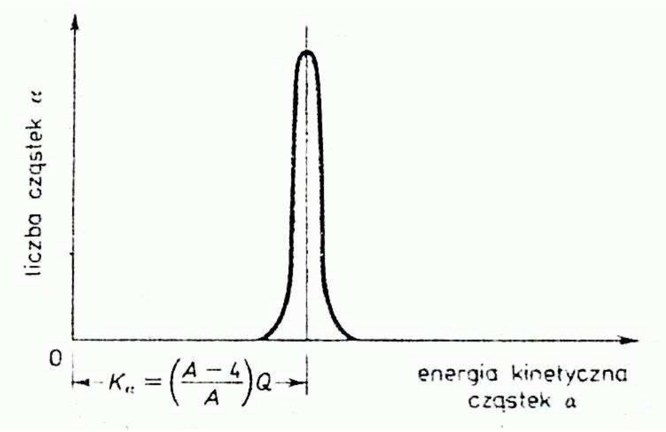
- promieniowanie α - jądra helu
  $$^{238}_{92}U \rightarrow ^{234}_{90}Th + \alpha$$
- promieniowanie β - elektrony (lub pozytony)
  $$^{60}_{28}Co \rightarrow ^{60}_{29}Ni^{\star} + e^{-} \ldots$$
- promieniowanie γ - wysokoenergetyczne fotony
  $$Ni^{\star} \rightarrow Ni + \gamma$$

Oczekiwano, że cząstki promieniowania powinny nieść energię $E_{\circ}$ odpowiadającą różnicy mas izitopów...

Neutrina

Rozpady α i γ

Dyskretne widmo energii:

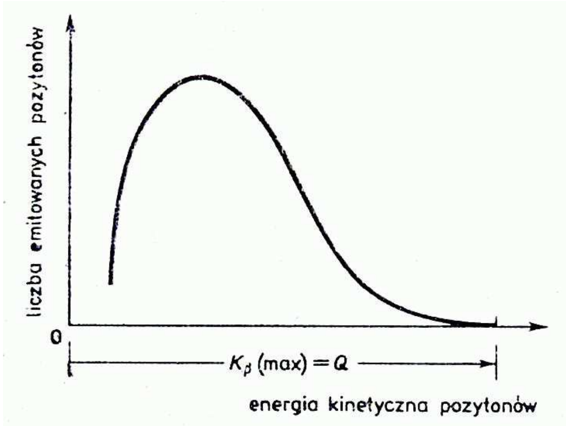


Energia emitowanej cząstki

$$E_\alpha = E_\circ \equiv \Delta m\, c^2$$

Rozpad β

Ciągłe widmo energii:



Naruszenie zasady zachowania energii !?...

Eneria emitowanych elektronów/pozytronów

$$E_\beta \leq E_\circ \equiv \Delta m\, c^2$$

Neutrina

Hipoteza Pauliego

Aby "uratować" zasadę zachowania energii (i momentu pędu) Pauli zaproponował istnienie neutrina: dodatkowej cząstki unoszącej część energii w rozpadzie β:

$${}^{60}_{28}Co \rightarrow {}^{60}_{29}Ni^\star + e^- + \bar{\nu}_e$$

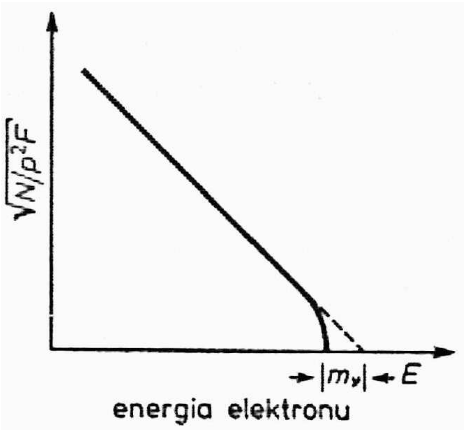
Oczekiwane widmo energii elektronów z rozpadu β:

$$\frac{dN(p)}{dp} \sim p^2\,(E_\circ - E)^2 \sqrt{1 - \frac{m_\nu^2}{(E_\circ - E)^2}}$$

Wykres Kurie

Dla m_ν=0 oczekujemy liniowej zależności

$$\sqrt{\frac{N(p)}{p^2}} \sim E_\circ - E$$



Ewentualne odstępstwa

$\Rightarrow$ pomiar masy neutrina

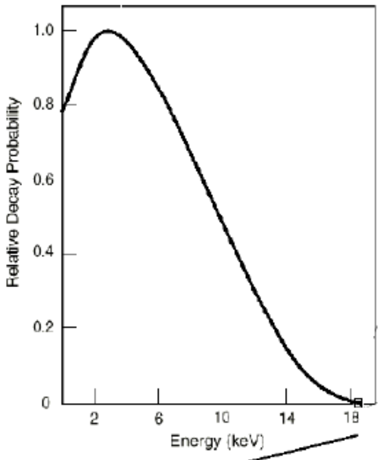
Tritium β decay spectrum

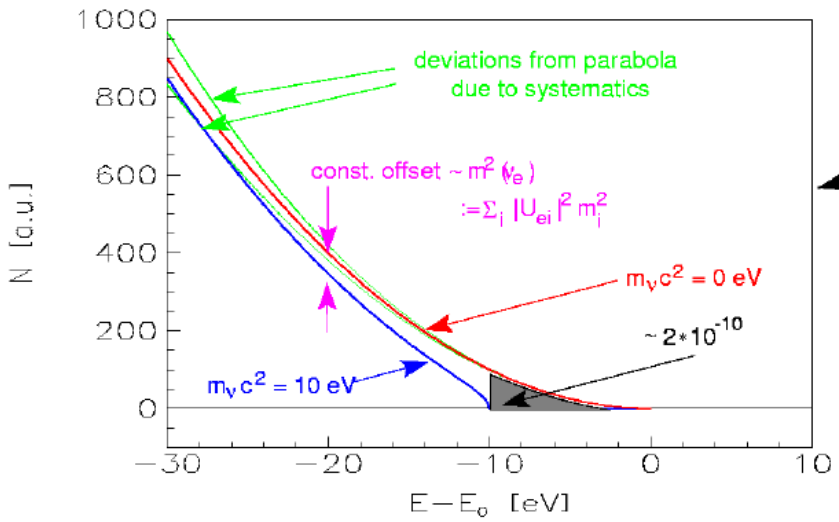
$^3H \longrightarrow {}^3He^+ + e^- + \bar{\nu}_e$:

superallowed

Q = 18.6 keV

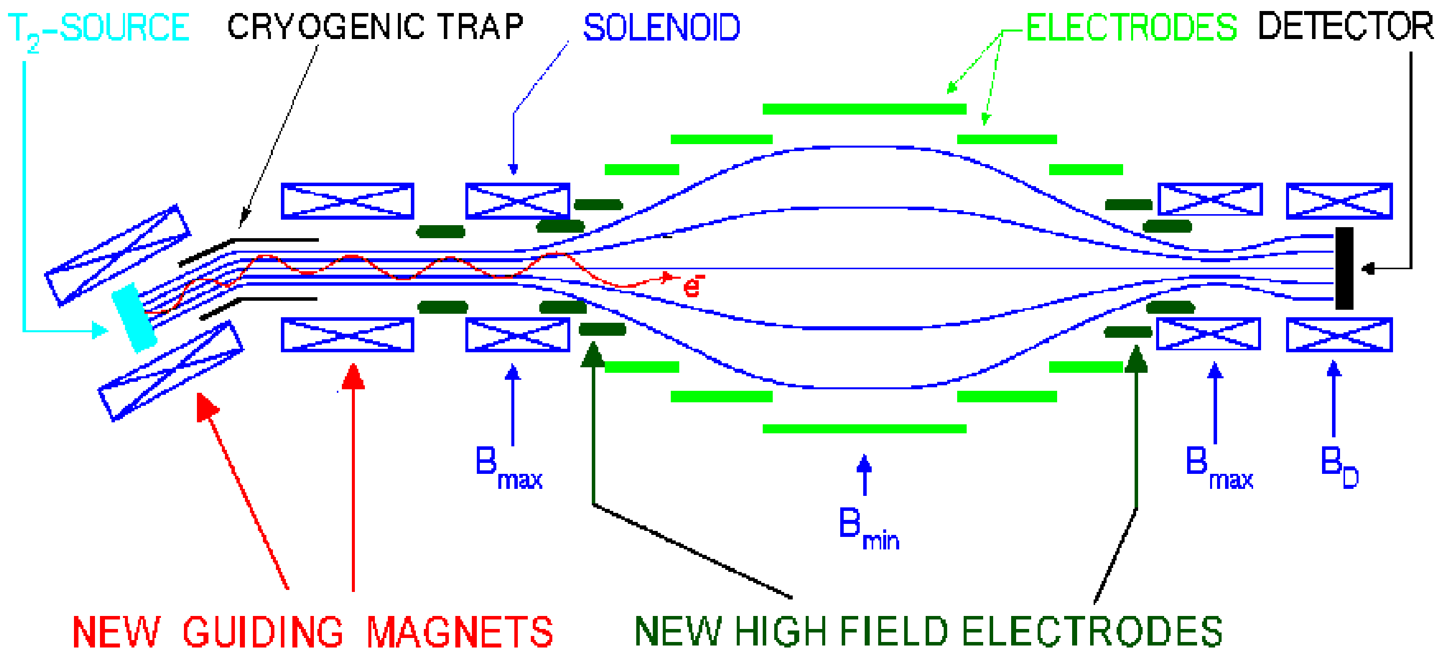
$t_{1/2}$: 12.3 y





Eksperyment w Mainz

Rozkład energii elektronów mierzony poprzez hamowanie w polu elektrostatycznym



Neutrina

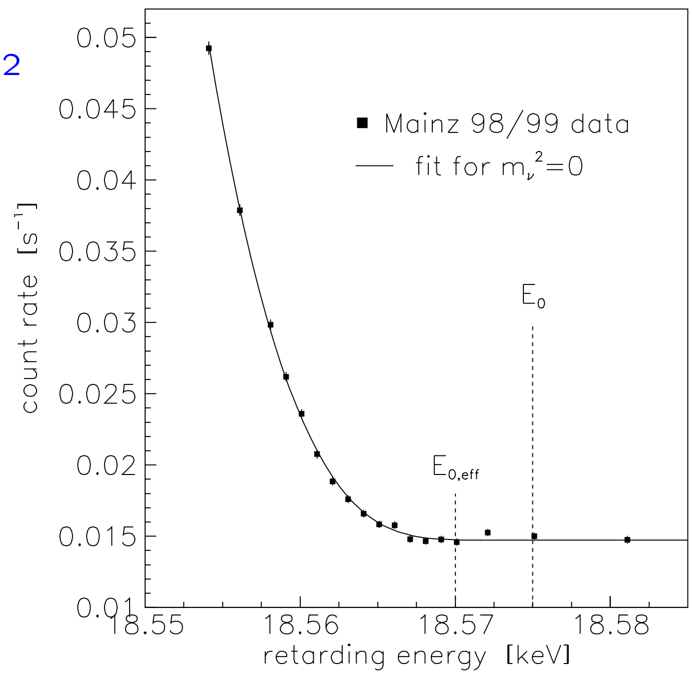
Wykres Kurie

Najnowsze wyniki (Mainz, 2001):

$$m_\nu^2 \;=\; -1.6 \pm 2.5_{(stat)} \pm 2.1_{(sys)}\; eV^2$$

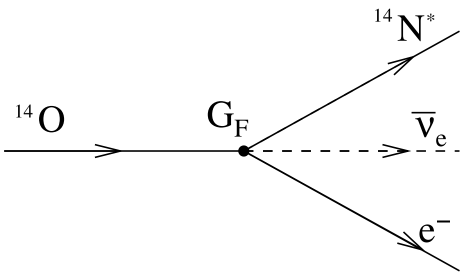
$\Rightarrow$ ograniczenie na masę neutrina elektronowego:

$$m_\nu \;<\; 2.2\, eV \;\; (95\%\, CL)$$

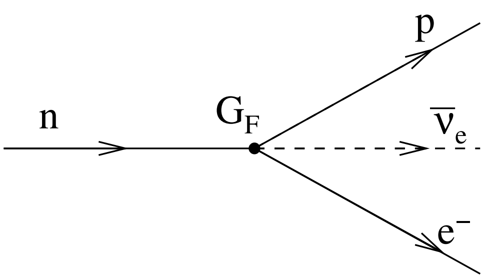


Teoria Fermiego

W 1934 roku Fermi zaproponował teorię rozpadu β:



Na poziomie nukleonów:



Uniwersalne sprzężenie punktowe
$\Rightarrow$ jeden wolny parametr: G_F
(obecnie nazwany "stałą Fermiego")

Czas życia izotopu zależy jedynie od energii rozpadu $E_\circ$

$$\frac{1}{\tau} \;=\; \frac{G_F^2\, E_\circ^5}{30\pi^3}$$

Stała Fermiego ma bardzo małą wartość

$$G_F \;\approx\; 1.2 \cdot 10^{-5}\, GeV^{-2}$$

$\Rightarrow$ długie czasy życia

Teoria Fermiego

Teoria Fermiego zakładała na początku, że oddziaływania słabe mają taką samą symetrię jak oddziaływania elektromagnetyczne.

Model w tym kształcie przetrwał ponad 20 lat.

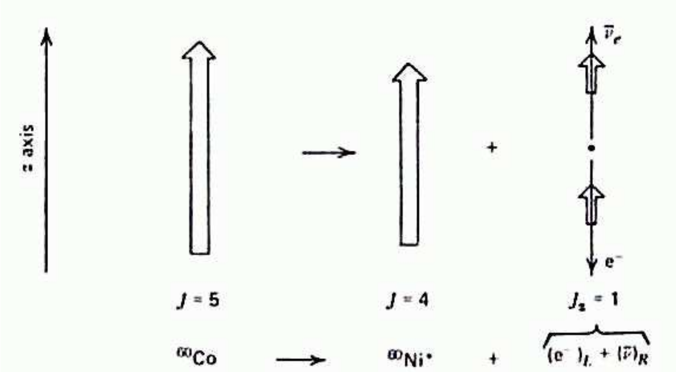
Jednak w 1957 pani C.S.Wu zaobserwowała łamanie parzystości w rozpadzie

$$^{60}Co \rightarrow ^{60}Ni^{\star} + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

Doświadczenie Wu

W niskiej temperaturze większość jąder kobaltu ustawia się spinem wzdłuż kierunku pola magnetycznego.

Obserwujemy nadwyżkę elektronów emitowanych w kierunku przeciwnym do spinu jądra



⇒ elektrony "lewoskrętne" (spin przeciwny do pędu) a anty-neutrina "prawoskrętne" (spin zgodny z pędem)

Teoria Fermiego

Parzystość

Transformacja przystości (P):

$$(x, y, z) \quad \rightarrow \quad (-x, -y, -z)$$

Można uogólnić:

$$\vec{v} \quad \rightarrow \quad -\vec{v} \quad \text{(wektor)}$$
$$\vec{a} \quad \rightarrow \quad \vec{a} \quad \text{(pseudo – wektor)}$$

Opis oddziaływań elektromagnetycznych nie zmienia się przy odwrócenie wszystkich współrzędnych przestrzennych.
⇒ Mówimy, że oddziaływania EM zachowują przystość.

Łamanie parzystości

Spin jest pseudo-wektorem (tak jak moment pędu)
⇒ skrętność cząstki zmienia się przy P $(L \leftrightarrow R)$

Doświadczenie Wu:

$$^{60}Co \quad \rightarrow \quad ^{60}Ni^{\star} + e^{-}_{L} + \bar{\nu}_{e,R}$$

Po odwróceniu współrzędnych:

$$^{60}Co \quad \rightarrow \quad ^{60}Ni^{\star} + e^{-}_{R} + \bar{\nu}_{e,L}$$

Nie obserwujemy !
⇒ oddz. słabe łamią parzystość

Teoria Fermiego

Sprzężenie ładunkowe

Transformacja zamiany cząstki na anty-cząstkę (C).

Rozpad π^-:

$$\pi^- \rightarrow \mu_L^- + \bar{\nu}_{\mu,R}$$

wynik doświadczeń

Po odwróceniu współrzędnych (P):

$$\pi^- \rightarrow \mu_R^- + \bar{\nu}_{\mu,L}$$

Nie obserwujemy !
$\Rightarrow$ łamanie parzystości P

Po zamianie cząstek na antycząstki (C):

$$\pi^+ \rightarrow \mu_L^+ + \nu_{\mu,R}$$

Nie obserwujemy !
$\Rightarrow$ łamanie parzystości C

Złożenie obu operacji:

$$\pi^+ \rightarrow \mu_R^+ + \nu_{\mu,L}$$

Obserwujemy ! $\Rightarrow$

$\boxed{\text{Oddz. słabe zachowują CP}}$

jeszcze do tego wrócimy

Mieszanie kwarków

Po uwzględnieniu łamania parzystości model Fermiego przetrwał kolejne 20 lat...

Problem dziwności

Czas życia kaonu $K^\pm$ zbyt długi w stosunku do pionu $\pi^\pm$ (po uwzględnieniu różnicy mas).

Jeden z kanałów rozpadu:

$$K^- \rightarrow \pi^\circ + e^- + \bar{\nu}_e$$
$$\pi^- \rightarrow \pi^\circ + e^- + \bar{\nu}_e$$

Na poziomie kwarkowym:

$$s \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$
$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

Hipoteza Cabibo

Oddziaływania słabe sprzęgają kwark u z d' - kombinacją kwarków s i d:

$$d' = d \cos\theta_C + s \sin\theta_C$$

Kąt Cabibo: $\sin\theta_C \approx 0.22$

$$\text{Proces}: \quad u \leftrightarrow s \sim \sin^2\theta_C$$
$$u \leftrightarrow d \sim \cos^2\theta_C$$

Oddziaływania słabe mieszają zapachy kwarków, "widzą" inne kwarki niż oddz. silne...

Mieszanie kwarków

FCNC

Teoria Cabibo (1963) poprawnie wyjaśniła wszystkie znane rozpady słabe.

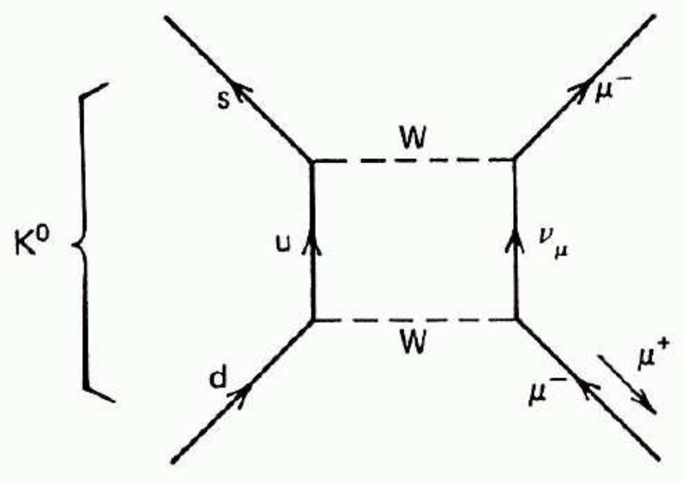
Przewidywała także nowe procesy typu FCNC (Flavour Changing Neutral Currents), procesy neutralne ze zmianą zapachu.

Oczekiwany rozpad:

$$K^{\circ} \rightarrow \mu^{+}\mu^{-}$$

Na poziomie kwarków:

$$d\,\bar{s} \rightarrow \mu^{+}\mu^{-}$$



Jednak rozpadów takich nie udało się zaobserwować !

⇒ teoria wymaga dopracowania

Mieszanie kwarków

Czwarty kwark

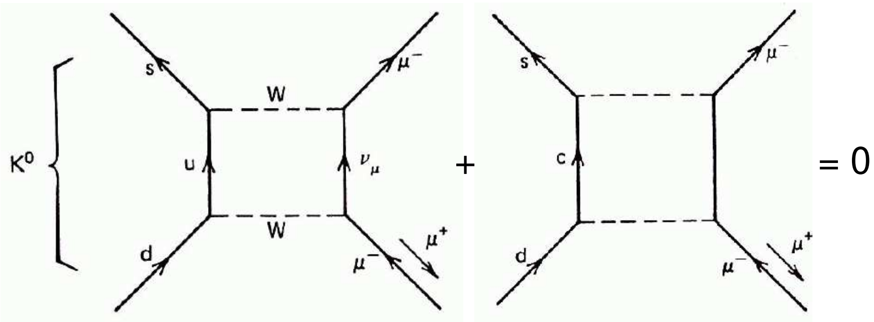
W 1970 roku Glashow, Iliopoulos i Maiani (GIM) zaproponowali wprowadzenie dodatkowego, czwartego kwarku c.

Wkład z wymianą kwarku c kasuje wkład do FCNC od diagramu z wymianą kwarku u:

W modelu GIM oddziaływania słabe sprzęgają

- kwark u z kwarkiem d'
- kwark c z kwarkiem s'

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_C & \sin\theta_C \\ -\sin\theta_C & \cos\theta_C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$



$$\sin\theta_C \cos\theta_C \quad + \quad -\sin\theta_C \cos\theta_C \quad = 0$$

Kwark c odkryto "dopiero" w 1974 roku...

Mieszanie kwarków

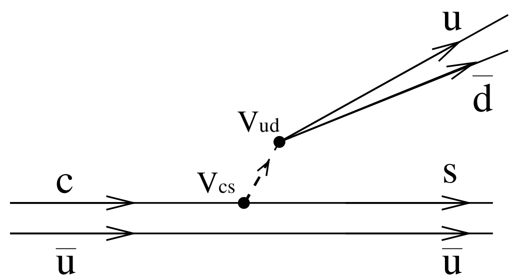
Macierz CKM

Dla sześciu kwarków (trzech pokoleń) mamy macierz mieszania 3×3.

CKM - Cabibbo, Kobayashi , Maskawa (1972)

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Przykład: rozpady mezonu D° $(c\bar{u})$



$$\begin{array}{llll} 3.8\% & D^\circ \rightarrow K^-\pi^+ & \sim |V_{cs}V_{ud}|^2 & \sim \cos^4\theta_C \\ 0.015\% & D^\circ \rightarrow \pi^-K^+ & \sim |V_{cd}V_{us}|^2 & \sim \sin^4\theta_C \end{array}$$

Obecne wyniki doświadczalne (PDG'2004):

$$\begin{pmatrix} 0.9739 \text{ to } 0.9751 & 0.221 \text{ to } 0.227 & 0.0029 \text{ to } 0.0045 \\ 0.221 \text{ to } 0.227 & 0.9730 \text{ to } 0.9744 & 0.039 \text{ to } 0.044 \\ 0.0048 \text{ to } 0.014 & 0.037 \text{ to } 0.043 & 0.9990 \text{ to } 0.9992 \end{pmatrix}$$

Mieszanie kwarków

Parametryzacja

Parametryzacja Wolfenstein'a macierzy CKM:

$$V = \begin{pmatrix} 1-\lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1-\lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\lambda \approx \sin\theta_C$$
$$A,\ \rho,\ \eta \sim 1$$

Elementy V_{td} i V_{ub} mogą być zespolone !

$\Rightarrow$ bezpośrednie łamanie CP w oddziaływaniach słabych

(w odróżnieniu od łamania pośredniego, poprzez mieszanie stanów o różnej symetrii)

Bardzo subtelny efekt...

Bezpośrednie łamanie CP zaobserwowano jedynie w rozpadach mezonów K° i B°

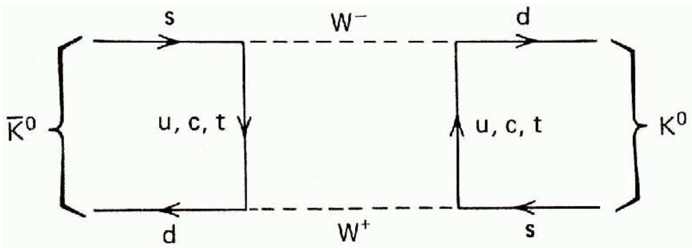
Łamanie CP

Mieszanie K°

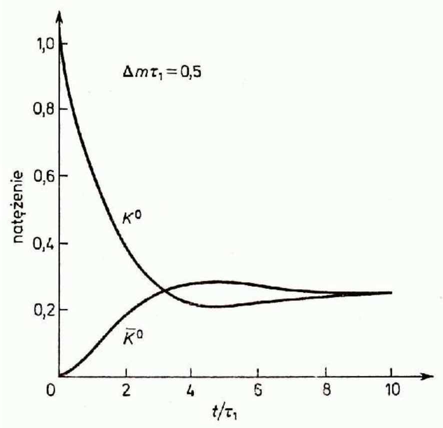
W oddziaływaniach silnych produkowane są pary kwark-antykwark: cząstki K° $(\bar{s}d)$ i $\bar{K}^\circ$ $(s\bar{d})$

Stany te różnią się tylko dziwnością, która nie jest zachowana w oddziaływaniach słabych.

⇒ możliwa jest przemiana $K^\circ \leftrightarrow \bar{K}^\circ$



Wyprodukowane K° bedzie jednocześnie rozpadać się i oscylować w $\bar{K}^\circ$:



K° i $\bar{K}^\circ$ nie są "dobrze zdefiniowanymi" stanami fizycznymi: nie możemy wyznaczyć masy ani czasu życia.

Łamanie CP

Mieszanie K°

Stanami fizycznymi (o zdefiniowanej masie i czasie życia) są K_L (długo życiowy, "long") i K_S (krótko życiowy, "short").

Można je przedstawić jako kombinacje

$$K_L \sim K_2 + \varepsilon K_1$$
$$K_S \sim K_1 - \varepsilon K_2$$

gdzie K_1 i K_2 są stanami o zdefiniowanej przystości CP

$$K_1 \sim K^\circ + \bar{K}^\circ \quad (CP = +1)$$
$$K_2 \sim K^\circ - \bar{K}^\circ \quad (CP = -1)$$

Wartość CP danego stanu wskazuje jak zmienia się on (jego funkcja falowa) pod wpływem danego przekształcenia:

$$CP(K_1) = +K_1$$
$$CP(K_2) = -K_2$$

Gdyby CP było ściśle zachowane, stany K_1 i K_2 nie mogłyby się mieszać ⇒ $\varepsilon = 0$

Okazuje się, że stany fizyczne K_L i K_S nie są stanami własnymi CP

$$\boxed{\varepsilon \approx 2.3 \cdot 10^{-3}}$$

⇒ łamanie CP w oddziaływaniach słabych (przez mieszanie)

Łamanie CP

Łamanie CP w rozpadach B°

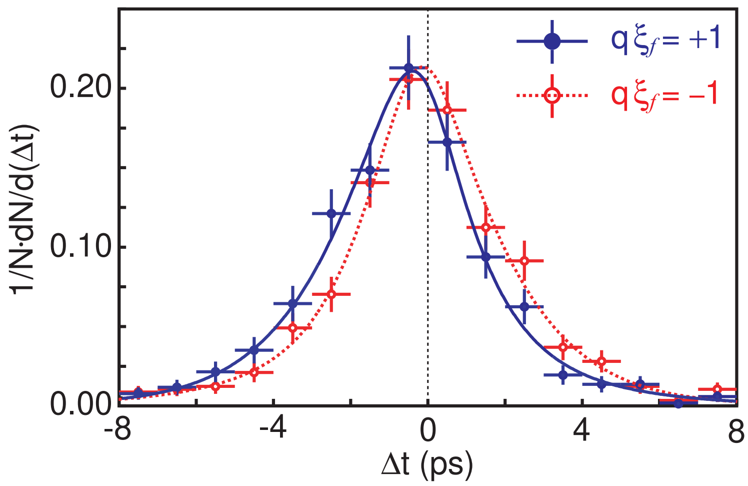
B° i $\bar{B}^\circ$ mają wspólne kanały rozpadu:

$$B^\circ\ (\bar{B}^\circ)\ \rightarrow\ J/\Psi\ K_L^\circ\quad (CP=+1)$$
$$\rightarrow\ J/\Psi\ K_S^\circ\quad (CP=-1)$$

Wartość CP stanu końcowego określa czy funkcja falowa zmienia znak przy operacji CP

Gdyby CP było ściśle zachowane, rozpady B° i $\bar{B}^\circ$ na stany o określonym CP zachodziłyby tak samo...

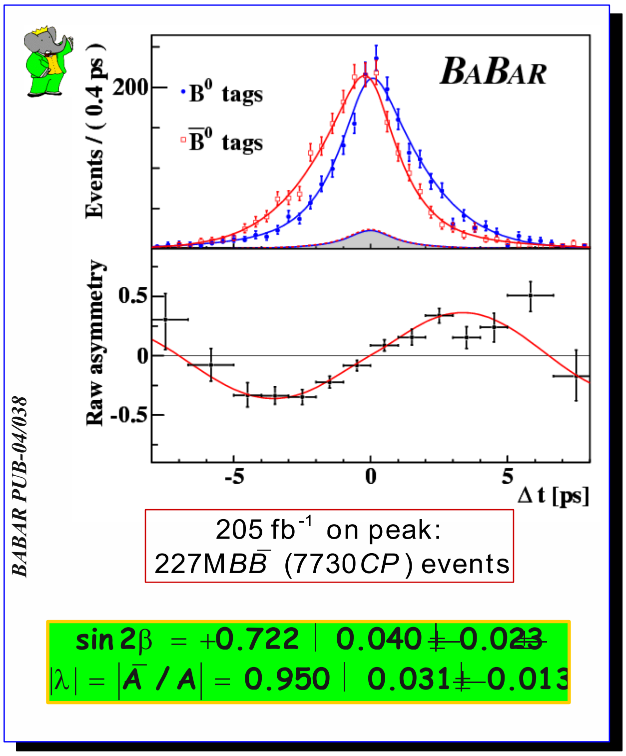
Obserwujemy asymetrię w różnicy czasów rozpadu: B° szybciej niż $\bar{B}^\circ$ rozpada się do stanu o $CP=+1$.

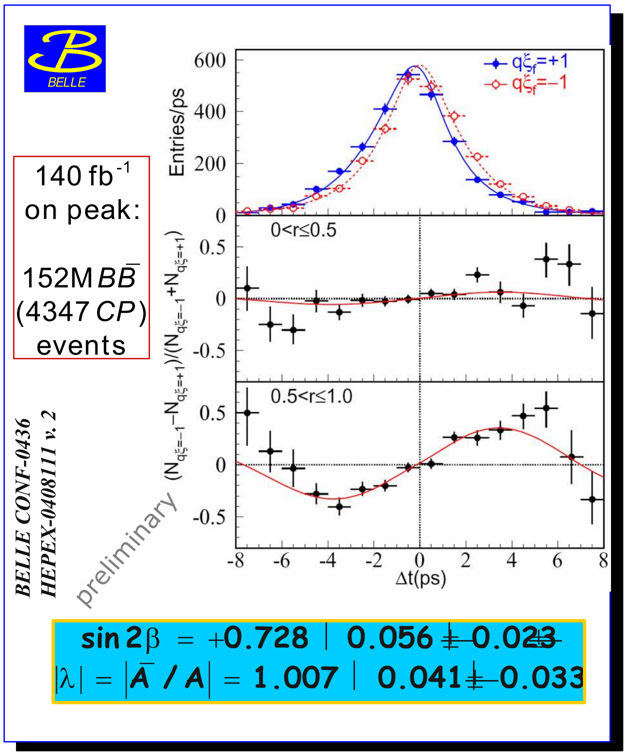


Dla stanu o $CP=-1$ odwrotnie...

Konferencja w Moriond, marzec 2005

Eksperymenty przy "fabrykach B": BaBar w SLAC (Kalifornia) i Belle w KEK (Japonia)





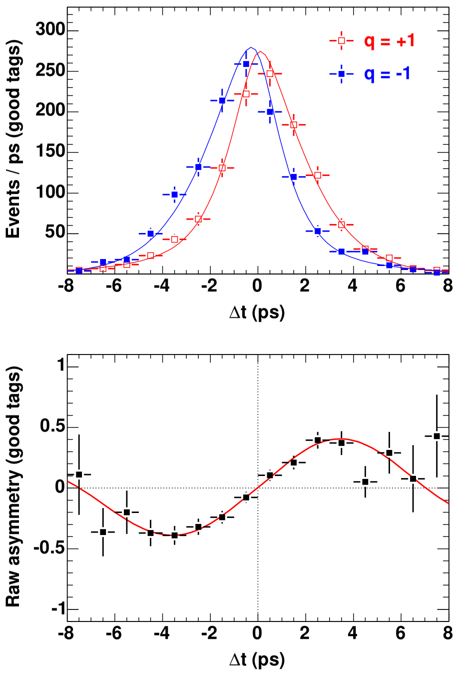
Łamanie CP

Łamanie CP w rozpadach B°

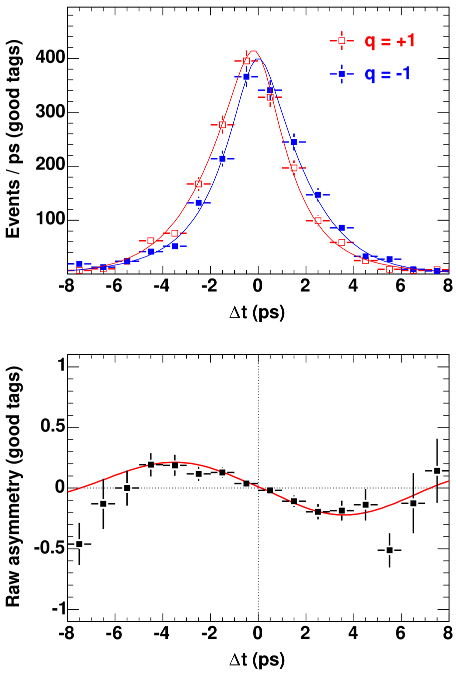
Wyniki Belle

Lato 2005

$B^\circ \to J/\Psi\ K^\circ_L$



$B^\circ \to J/\Psi\ K^\circ_S$



Łamanie CP

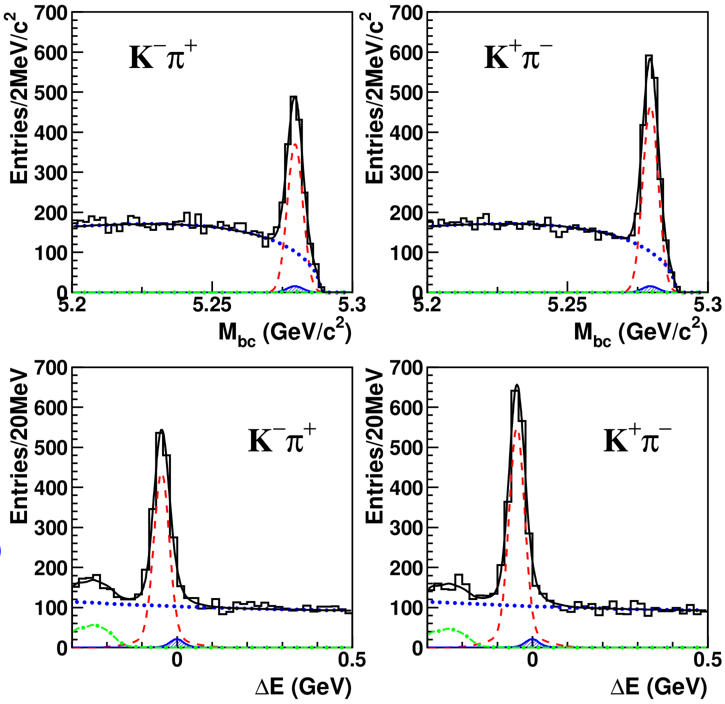
Łamanie CP w rozpadach B°

Łamanie CP obserwujemy też porównując rozpady na stany końcowe nie będące stanami własnymi CP.

$$\mathcal{A} \;=\; \frac{BR(\bar{B}^\circ \to K^-\pi^+) - BR(B^\circ \to K^+\pi^-)}{BR(\bar{B}^\circ \to K^-\pi^+) + BR(B^\circ \to K^+\pi^-)}$$

Wyniki Belle 2005:

$$\mathcal{A} \;=\; -0.113 \pm 0.022_{(stat)} \pm 0.008_{(syst)}$$



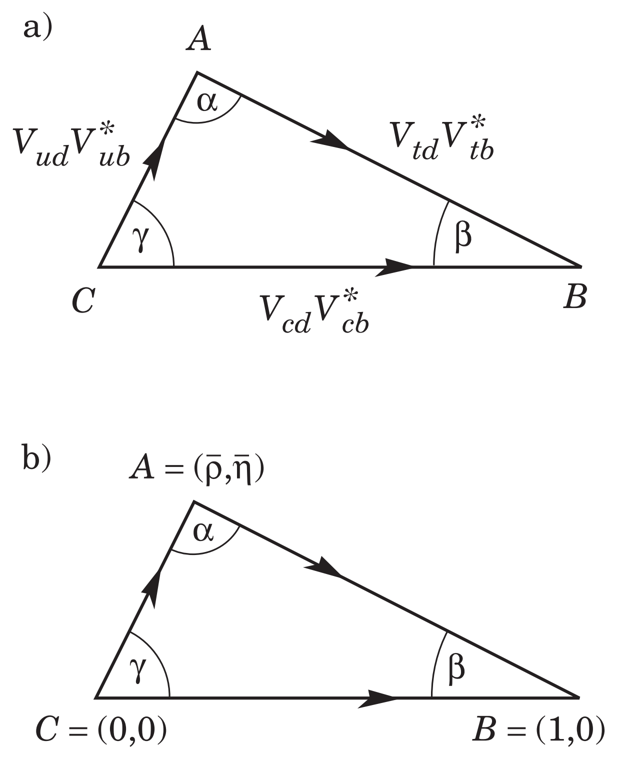
Łamanie CP

Podsumowanie

Dzięki nowym wynikom eksperymentów "Belle" i "BaBar" (pomiary w sektorze B°), oraz NA48 i KTeV (pomiary w sektorze K°) wiemy obecnie ponad wszelką wątpliwość, że CP jest łamane w oddziaływaniach słabych...

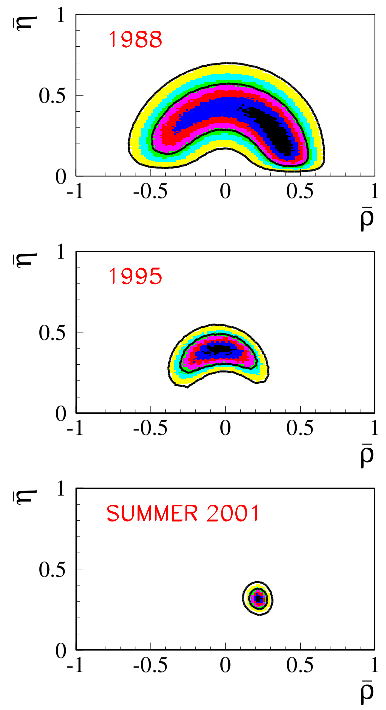
$$\boxed{\eta > 0}$$

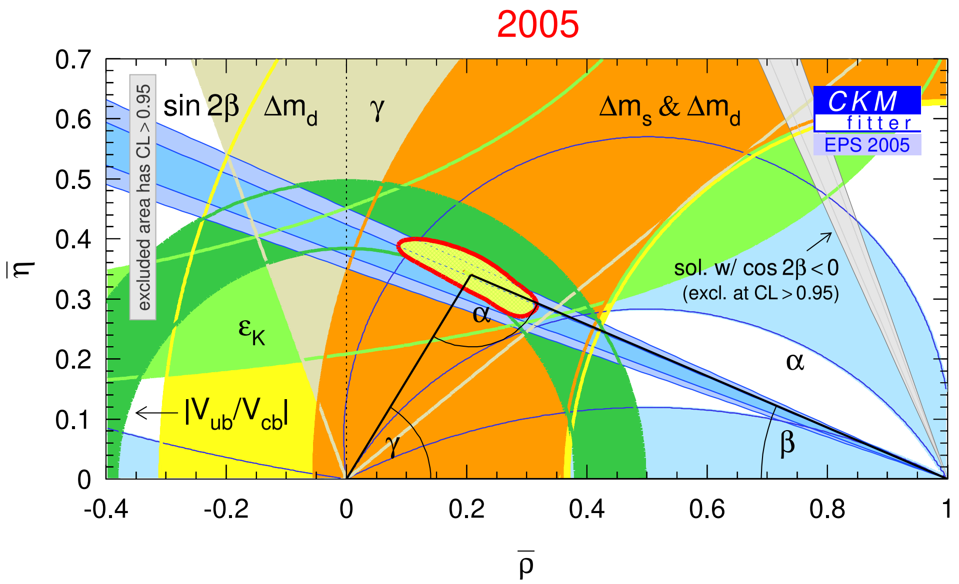
η możemy przedstawić jako wysokość tzw. trójkąta unitarności $\Rightarrow$



Łamanie CP

Ogromny postęp





Bardzo dobra zgodność wszystkich pomiarów.

Suma katów trójkąta $\sim 180^\circ$ ($\pm 10\%$)

Bozony $W^{\pm}$ i Z°

Oddziaływania NC

1963: pierwsza wiązka neutrin w CERN

⇒ początek precyzyjnych pomiarów oddziaływań neutrin

Eksperyment Gargamelle
komora pęcherzykowa, 4.8 metra długości, około 12 m^3 freonu (CF_3Br).

Oprócz reakcji oczekiwanych jako "odwrotne" procesy β

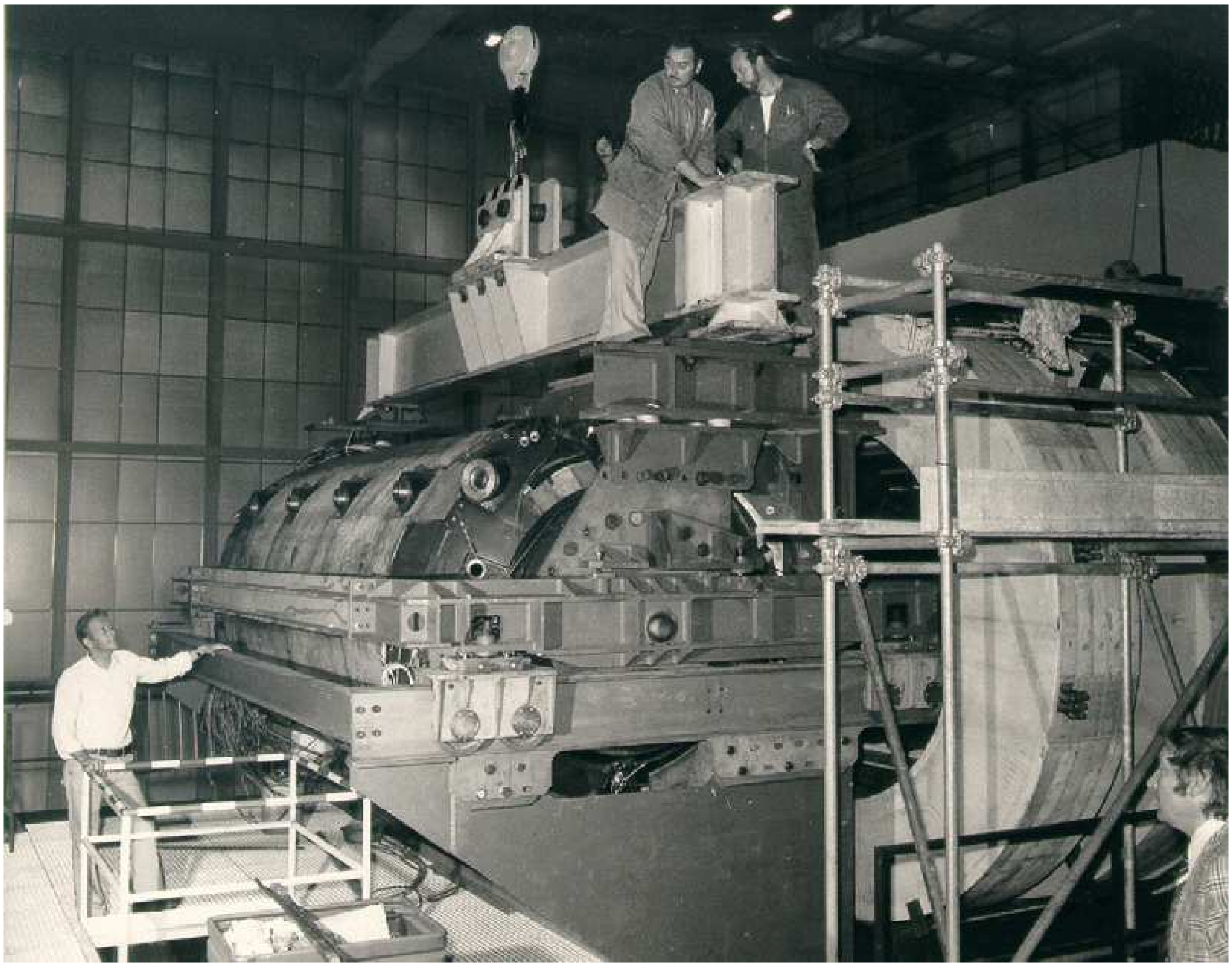
$$\begin{aligned} \nu_e\, n &\rightarrow e^-\, p \\ \nu_e\, N &\rightarrow e^-\, X \end{aligned}$$

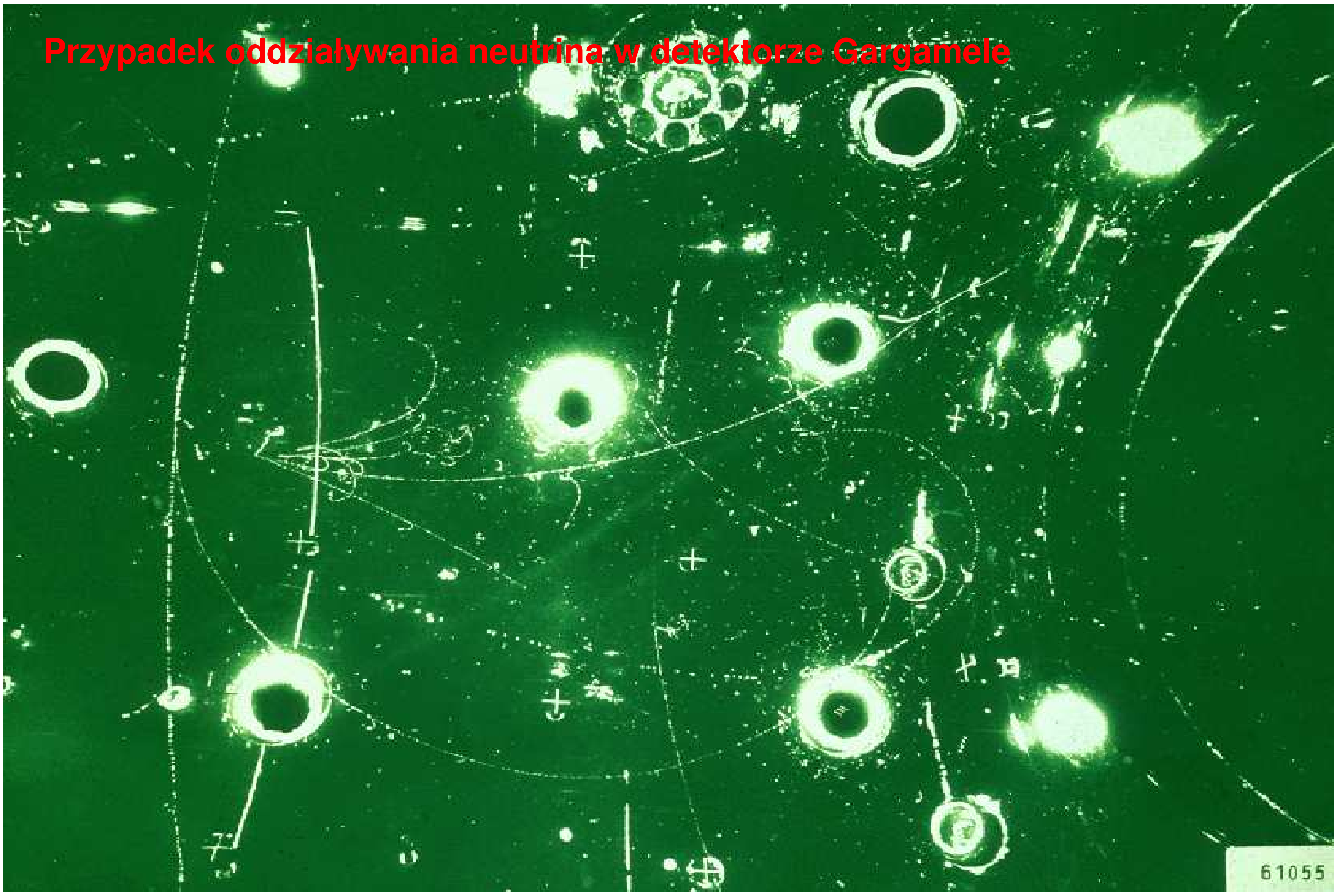
zaobserwowano także procesy bez przekazu ładunku (tzw. prądy neutralne "Neutral Currents"; 1973):

$$\begin{aligned} \nu_e\, n &\rightarrow \nu_e\, p\, \pi^- \\ \nu_e\, N &\rightarrow \nu_e\, X \end{aligned}$$

Nowe wyniki wymagały nowego opisu...

Detektor
Gargamelle





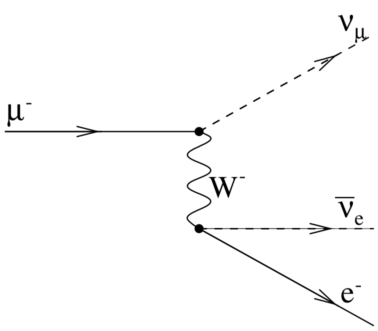
Bozony $W^{\pm}$ i Z°

Model Weinberg'a-Salam'a

Nowy model oddziaływań słabych (1968)

Oddziaływanie zachodzi przez wymianę bardzo masywnego bozonu $W^{\pm}$ lub Z°.

Rozpad mionu:



"Słabość" oddziaływania nie wynika ze stałej sprzężenia a z dużej masy bozonu:

$$G_F \sim \frac{g^2}{m_W^2}$$

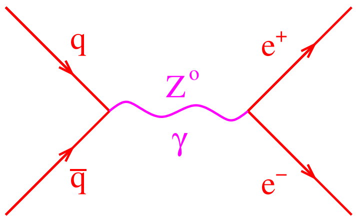
Przyjmując, że sprzężenie g powinno być takie jak dla oddziaływań EM, Weinberg i Salam przewidzieli masy bozonów $W^{\pm}$ i Z°:

$$m_W \sim 80\ GeV$$
$$m_Z \sim 90\ GeV$$

Bozony $W^{\pm}$ i Z°

Odkrycie

W zderzeniach $p\bar{p}$ możliwa jest anihilacja pary $q\bar{q}$ w wirtualny foton lub bozon Z°, które następnie mogą się rozpaść na parę leptonów ($e^{+}e^{-}$, $\mu^{+}\mu^{-}$, $\tau^{+}\tau^{-}$):



Jest to tzw. process Drela-Yana. Wkład od wymiany Z° $\Rightarrow$ maksimum w masie niezmienniczej pary leptonów.

Wyniki UA1 (1983):

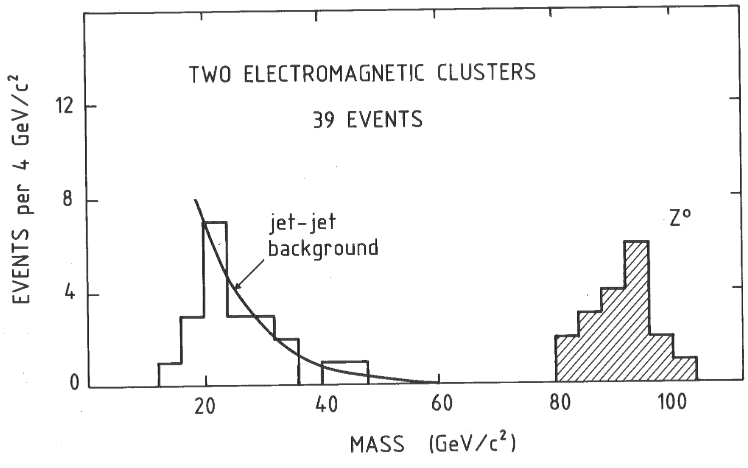
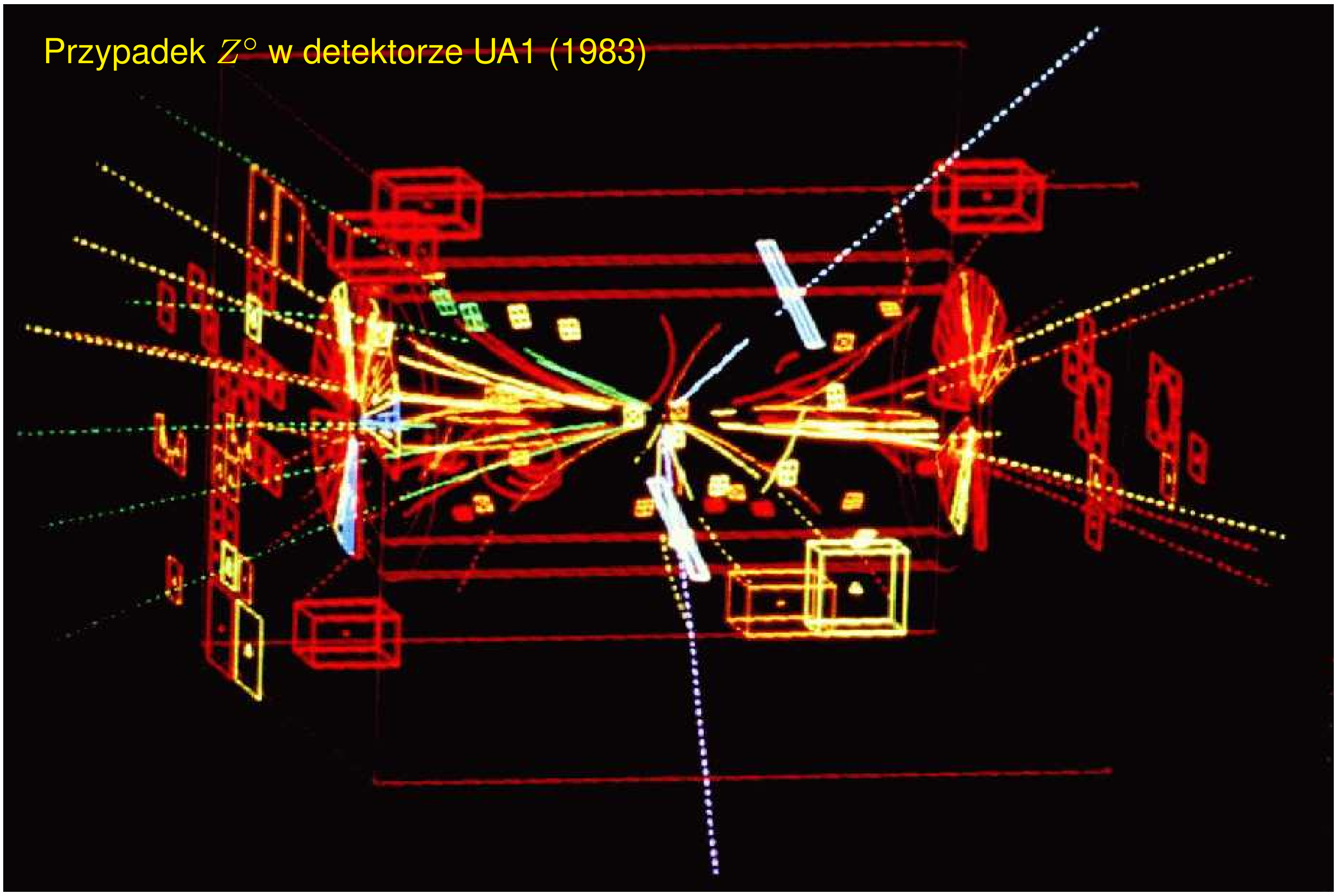


Fig. 1



Bozony $W^{\pm}$ i Z°

Odkrycie

W zderzeniach $p\bar{p}$ możliwa jest też “anihilacja” pary $q\bar{q}'$ w bozon $W^{\pm}$:

$$u\bar{d} \rightarrow W^{+} \rightarrow e^{+}\nu_{e}$$

Proces z produkcją neutrina
$\Rightarrow$ niezachowanie pędu poprzecznego

Odkrycie bozonów $W^{\pm}$ i Z° przypisujemy eksperymentom UA1 i UA2 przy akceleratorze SPS w CERN.

Wyniki UA1 (1983):

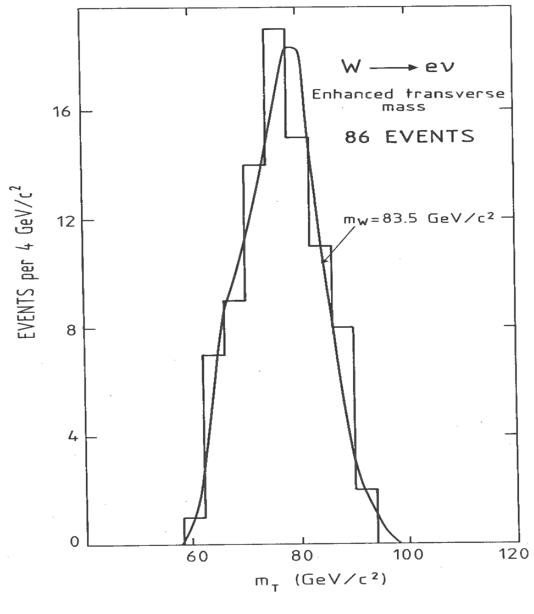
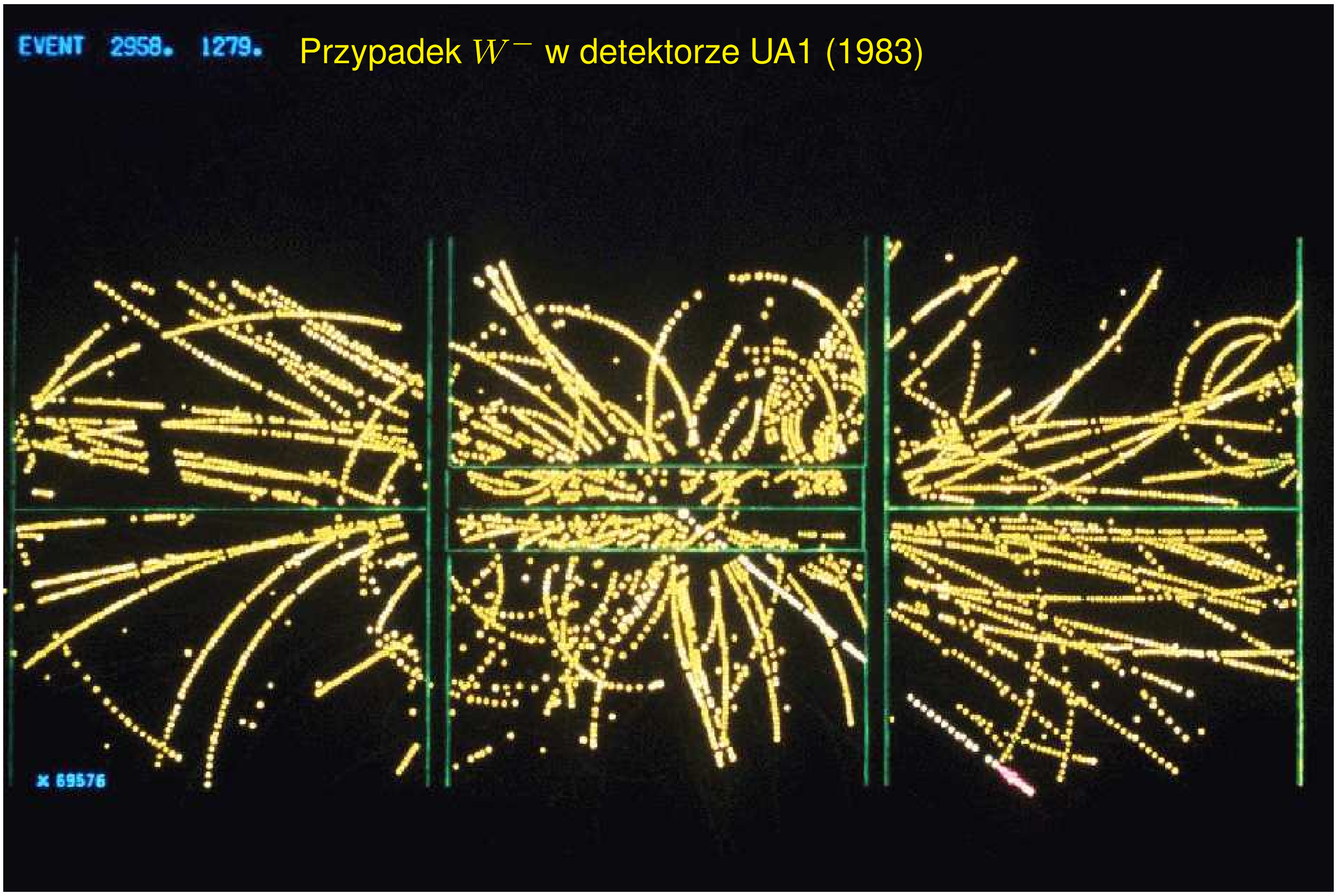


Fig. 3b

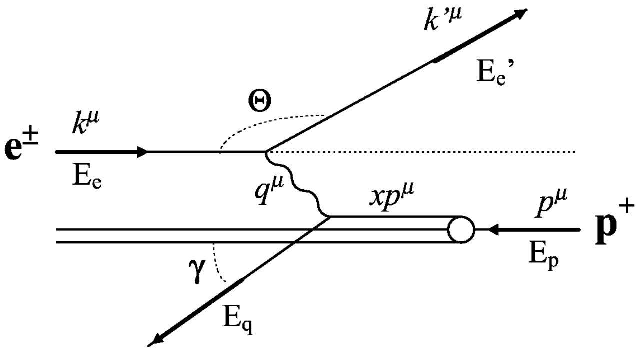
Przypadek W^{-} w detektorze UA1 (1983)



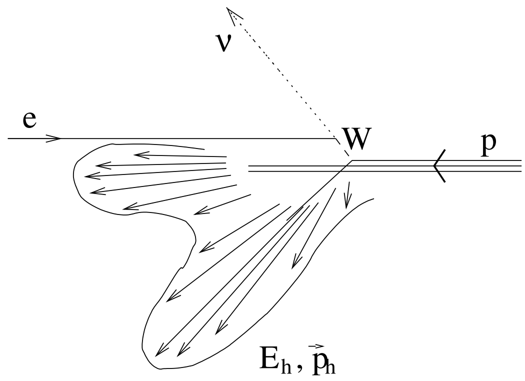
Bozony $W^{\pm}$ i Z°

CC DIS at HERA

W rozpaszaniu $e^{\pm}p$ nośnikiem oddziaływania może być nie tylko γ, ale także Z° i $W^{\pm}$:

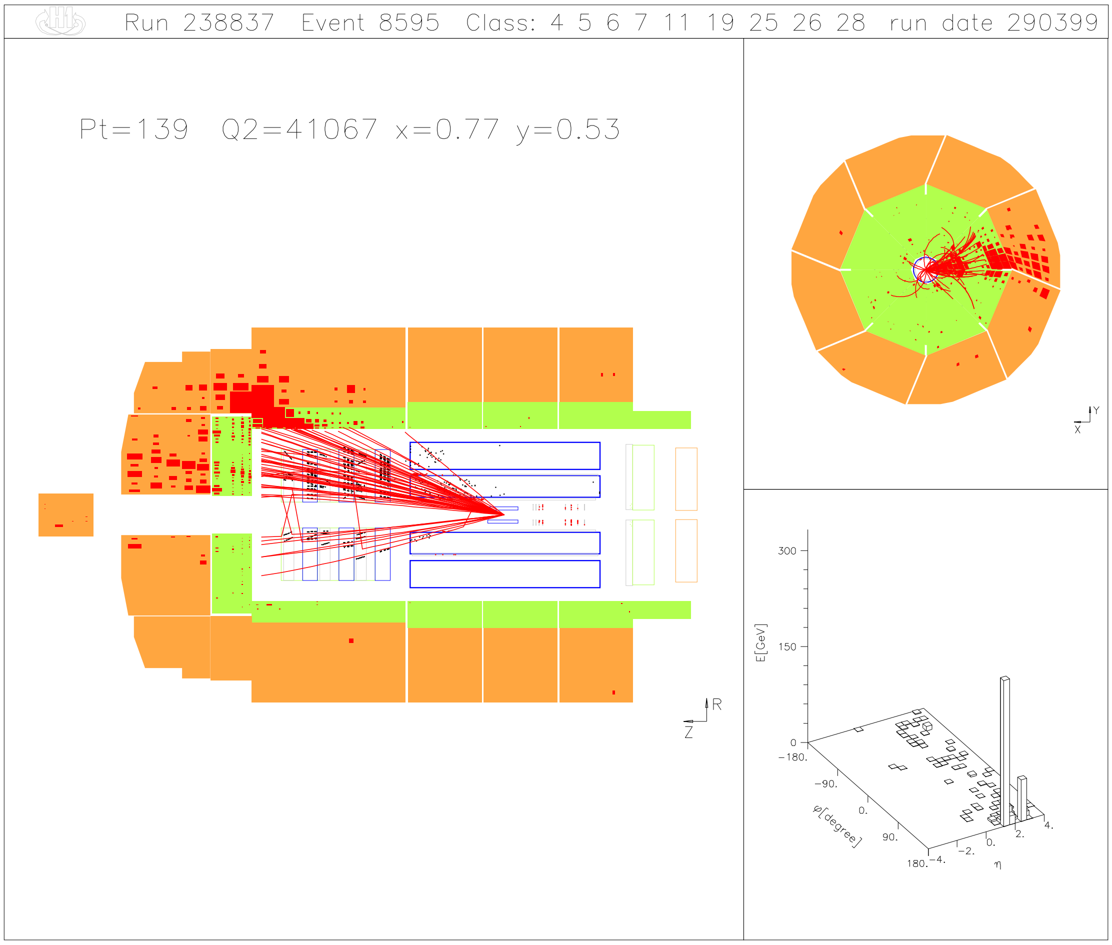


W przypadku wymiany $W^{\pm}$ (prądy naładowane: CC DIS) w detektorze obserwujemy tylko stan hadronowy:

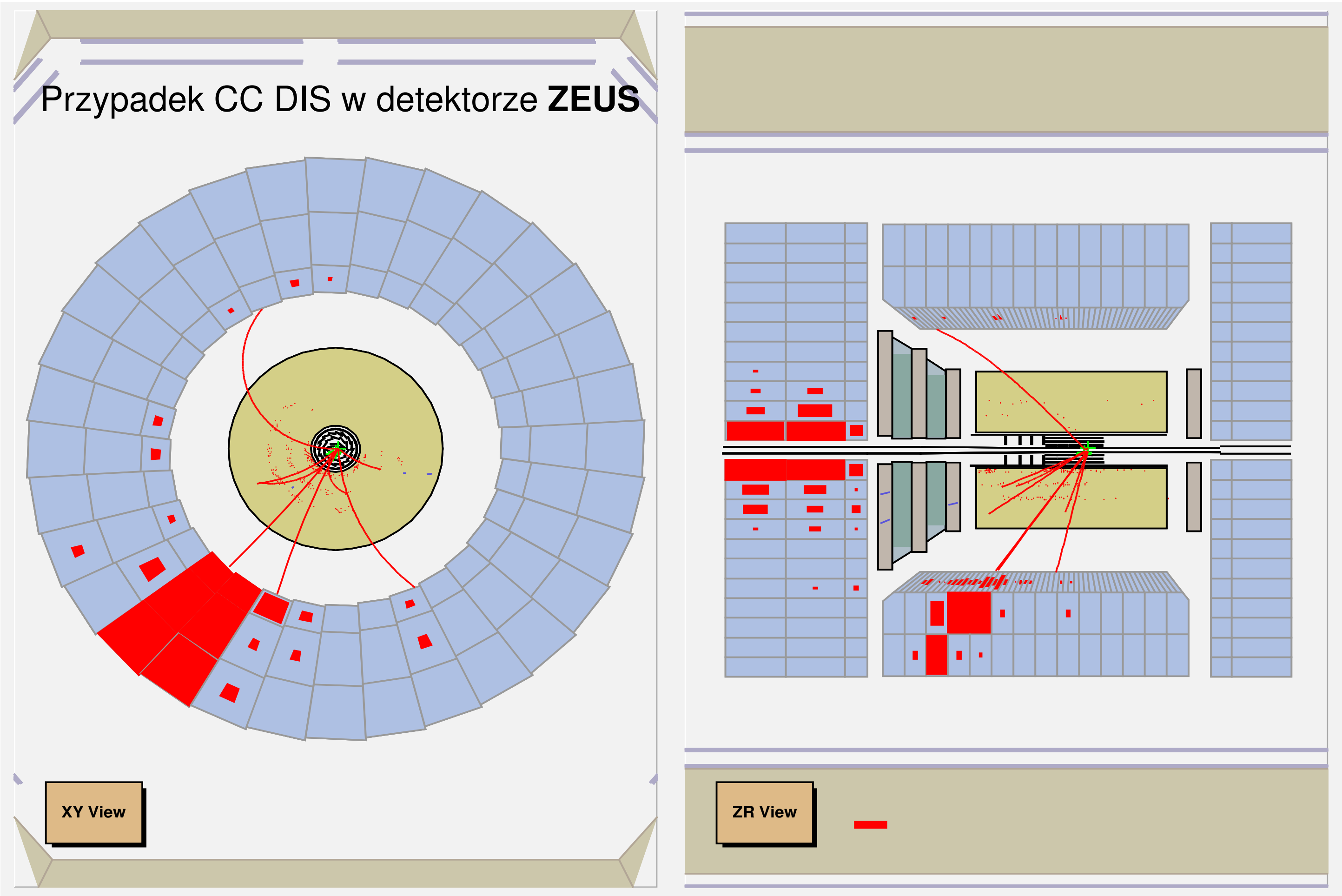


Wystarcza to jednak to pełnej rekonstrukcji zmiennych kinematycznych x, y i Q^2

Przypadek CC DIS w detektorze **H1**



Przypadek CC DIS w detektorze **ZEUS**



Bozony $W^{\pm}$ i Z°

CC DIS at HERA

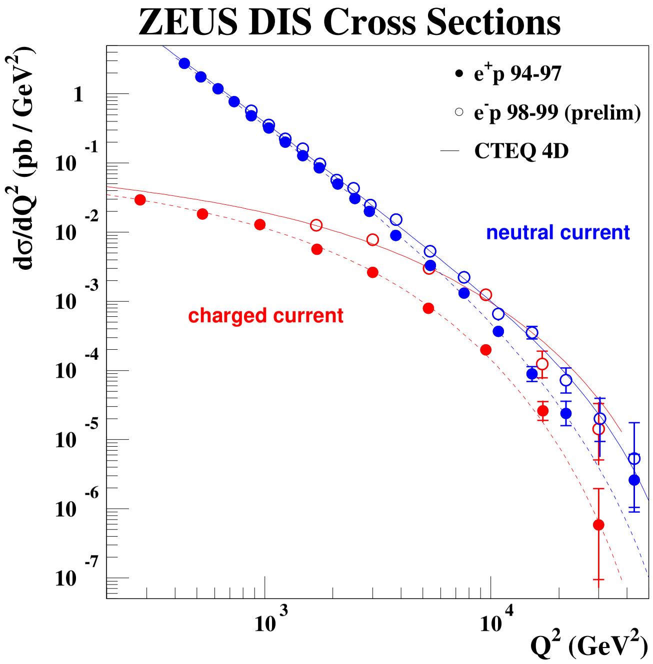
Przekrój czynny na NC DIS
(dominuje wymiana γ):

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} \sim \frac{1}{Q^4}$$

Dla wymiany $W^{\pm}$ (CC DIS):

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} \sim \frac{1}{(M_W^2 + Q^2)^2}$$

W obszarze bardzo dużych Q^2 "unifikacja":



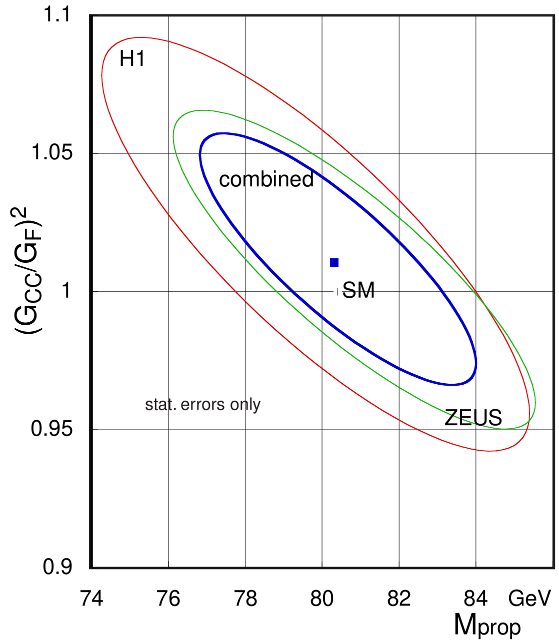
Oddziaływania słabe porównywalne z EM

Bozony $W^{\pm}$ i Z°

CC DIS at HERA

Dopasowując zależność przekroju czynnego na CC DIS od Q^2 można wyznaczyś masę i niskoenergetyczne sprzężenie wymienianego nośnika.

Wyniki H1 i ZEUS:



Pełna zgodność z modelem wymiany $W^{\pm}$

Bozony $W^{\pm}$ i Z°

CC DIS at HERA

W latach 2003-2005 w akceleratorze HERA zderzane były spolaryzowane wiązki elektronów i pozytonów.

Wyniki pomiaru przekroju czynnego na CC DIS w funkcji polaryzacji wiązki potwierdzają, że oddziaływaniom typu CC DIS podlegają jedynie lewoskrętne elektrony i prawoskrętne pozytony:

$$e^-_L\ p \;\rightarrow\; \nu_L\ X$$
$$e^+_R\ p \;\rightarrow\; \bar{\nu}_R\ X$$

Wyniki H1 i ZEUS: