



CZĄSTKI ELEMENTARNE I ODDZIAŁYWANIA

VII CHARM & BEAUTY

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

<http://home.agh.edu.pl/~amucha/>
Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek
D11 p. 111

Czwarty element

Istnienie hadronów z 4. kwarkiem zostało **przewidziane teoretycznie** (w przeciwieństwie do kwarka s).

Oszacowano jego masę na ok. 2 GeV.

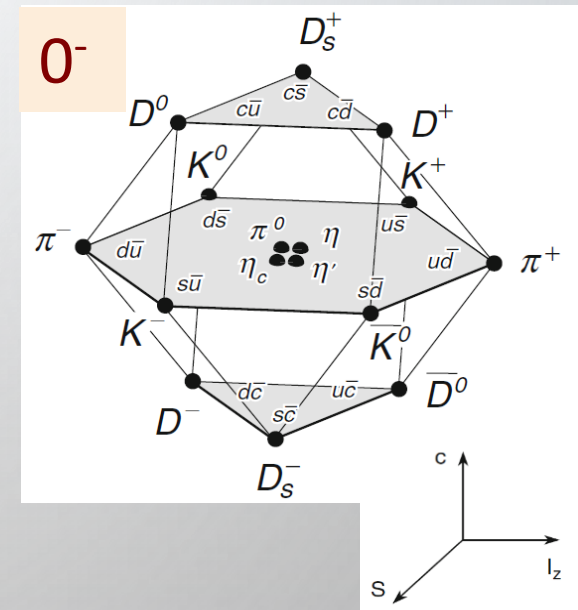
I pokolenie	Q	masa	II pokolenie	Q	masa
u	+2/3	0.35 GeV	c	+2/3	1.5 GeV
d	-1/3	0.35 GeV	s	-1/3	0.5 GeV

Charm – liczba kwantowa c jest zachowana w oddz. silnych i elm, nie zachowana w słabych (podobnie jak s).

Najlżejsze MEZONY POWABNE to skalary $D^0(cu), D^+(cd), D_s^+(cs)$

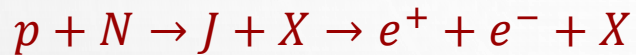
Mezony „czarmowe” wektorowe mają taki sam skład kwarkowy, ale spiny kwarków ustawione są równoległe: $D^{*0}(cu), D^{*+}(cd), D_s^{*+}(cs)$

Rozpady czarmowych mezonów zachodzą poprzez **oddziaływania słabe** $\tau \sim 10^{-12}s$, przeważnie na mezony dziwne (z kwarkiem s).



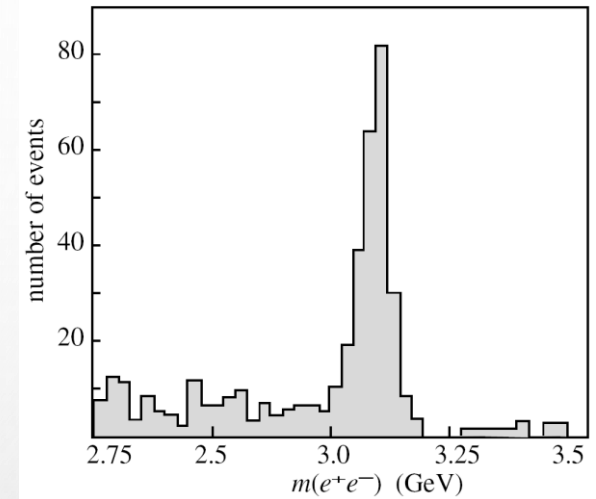
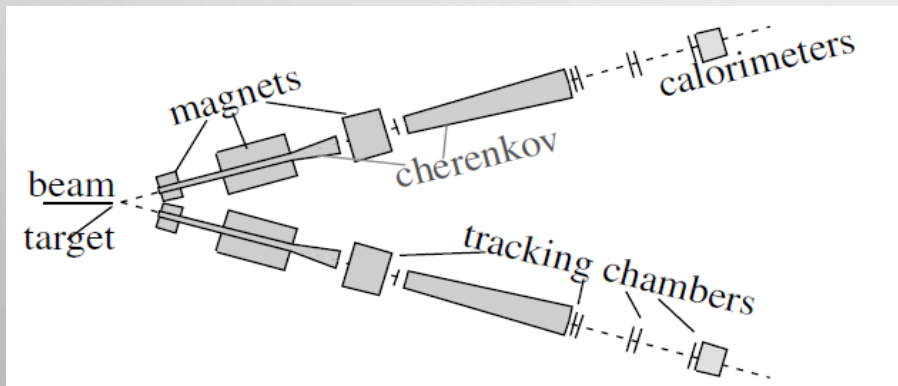
Dwa odkrycia

W 1974 roku w Brookhaven badano produkcję nowej cząstki J w zderzeniach protonów przy najwyższych (wtedy) energiach: $\sqrt{s} = 3.1$ GeV w procesie:



Stan X był dowolny, ale badana cząstka J miała znane liczby kwantowe i miała się rozpadać na elektron i pozyton.

Spektrometr został dedykowany poszukiwaniom wektorowej cząstki o liczbach kwantowych fotonu $J^{PC} = 1^{--}$ rozpadającej się na e^+e^- .



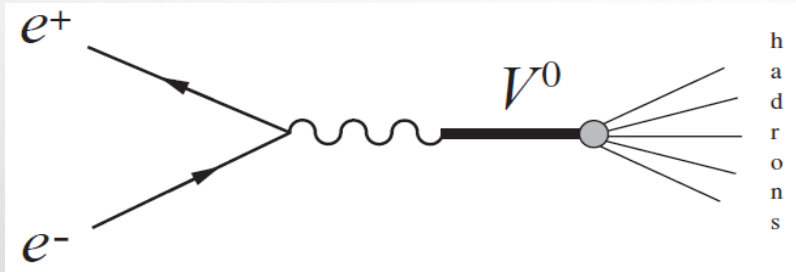
$$J(3097) \\ J^{PC} = 1^{--}$$

Przypadek taki pojawiał się raz na milion.
Najważniejsze-separacja pionów – progowe liczniki Czerenkowa i kalorymetr

Dwa odkrycia – jedna cząstka

Jednocześnie SPEAR na SLACu – akceleratorze e^+e^- pracującym przy $\sqrt{s}=8$ GeV zdecydowano o obniżeniu energii do ok. 3 GeV.

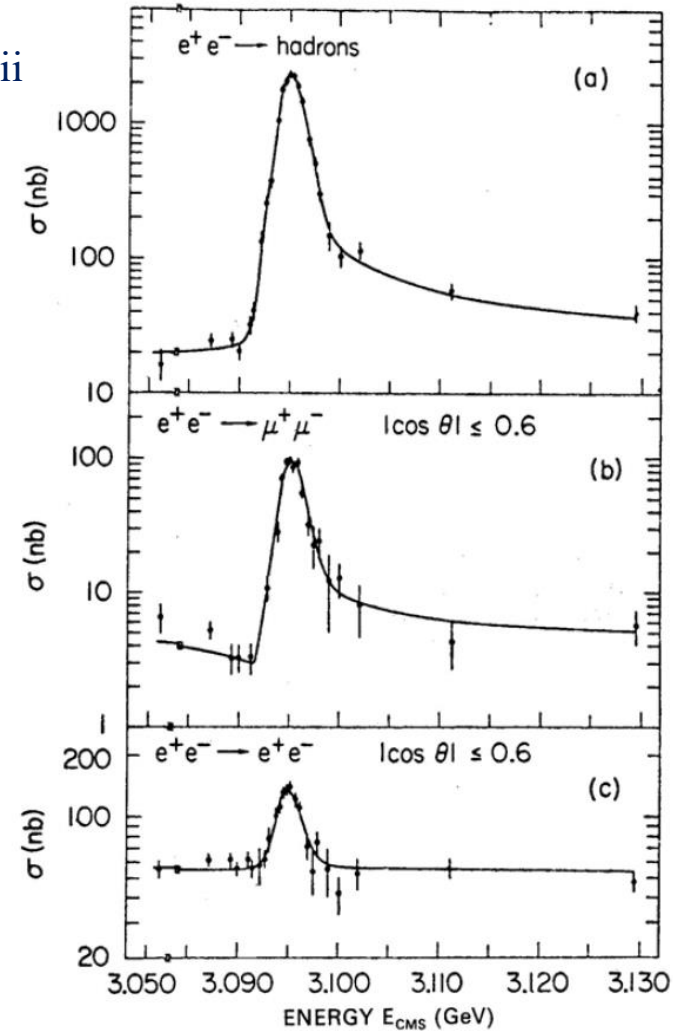
Zaobserwowano znaczny rezonans w stanach końcowych z hadronami, mionami i elektronami:



Skoro dwa eksperymenty odkryły ten sam stan, to dano mu nazwę:

$$J/\Psi (3097) \\ J^{PC} = 1^{--}$$

Dygresja o
REZONANSACH

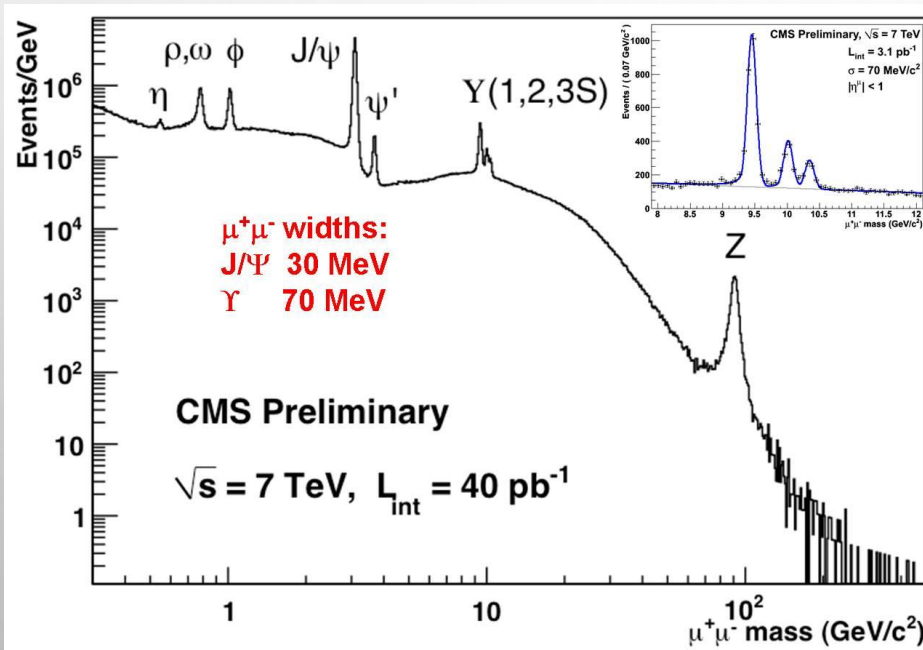


Rezonanse

Dotychczas omawiane cząstki miały na tyle długi czas życia, że mogły być obserwowane bezpośrednio.

Jeśli masa hadronu jest wystarczająco duża, aby rozpadł się on poprzez oddziaływania silne – nawet w czasie 10^{-24} s to rozpadają się w miejscu powstania (prawie).

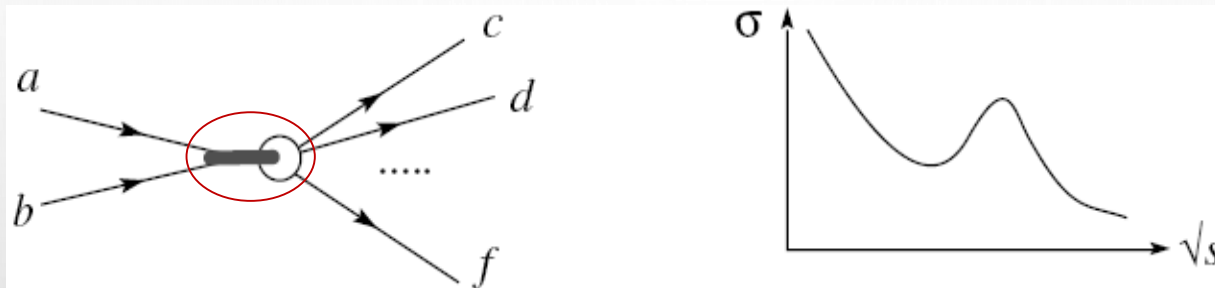
O takich stanach mówimy **REZONANSE**.



Rezonanse

Ewidencja rezonansów możliwa jest poprzez:

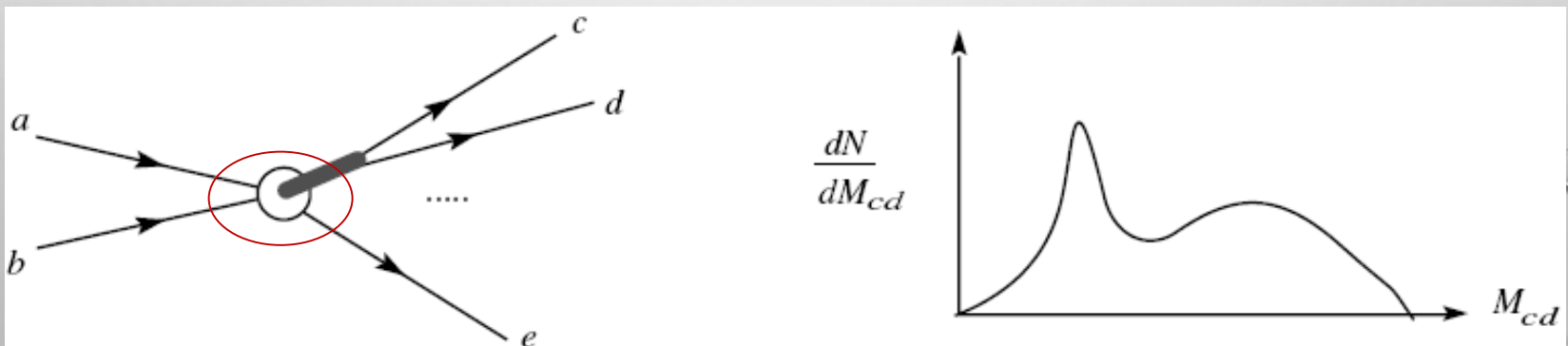
- obserwację maksimum w procesie produkcji



LUB

- obserwację maksimum na spektrum masy niezmienniczej stanów końcowych:

$$M_{cd} = \sqrt{(E_c + E_d)^2 - (\vec{p}_c + \vec{p}_d)^2}$$



Krzywa rezonansowa

Funkcja falowa rozpadającego się stanu:

$$\Psi(t) = \Psi(0)e^{-iE_R t} e^{-t/2\tau} = \Psi(0) e^{-t(iE_R + \Gamma/2)} \quad \tau = 1/\Gamma$$

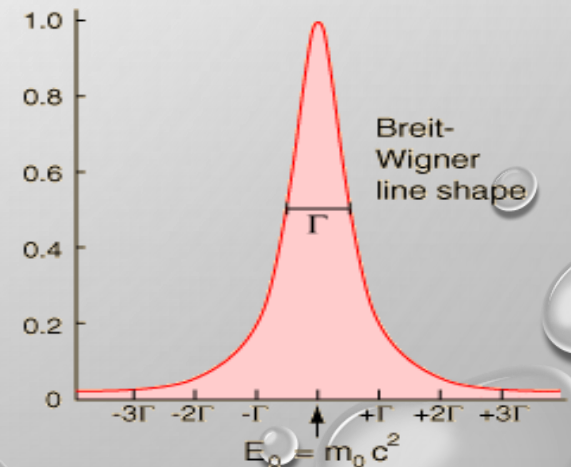
Po czasie „0” stan o energii E_R ewoluuje w czasie i może się rozpaść – prawd. znalezienia cząstki po czasie t:

$$I(t) = \Psi^* \Psi = \Psi(0)^2 e^{-t/\tau}$$

Zależność energetyczna jest transformatą Fouriera wykładniczej zależności od czasu (zad*):

$$\begin{aligned} \Psi(E) &= \int \Psi(t) e^{iEt} dt = \Psi(0) \int e^{-t[\Gamma/2 + iE_R - iE]} dt \\ &= \frac{K}{(E_R - E) - i\Gamma/2} \end{aligned}$$

$$\sigma(E) = \Psi(E)\Psi^*(E) = \sigma_{max} \frac{\Gamma^2/4}{(E - E_R)^2 + \Gamma^2/4}$$



Rezonanse

Wzór Breit-Wignera (nierelatywistyczny), z uwzględnieniem spinu wszystkich cząstek:

$$\sigma(E) = \frac{(2J + 1)}{(2s_a + 1)(2s_b + 1)} \frac{4\pi}{E^2} \frac{\Gamma_i \Gamma_f}{(E - M_R)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

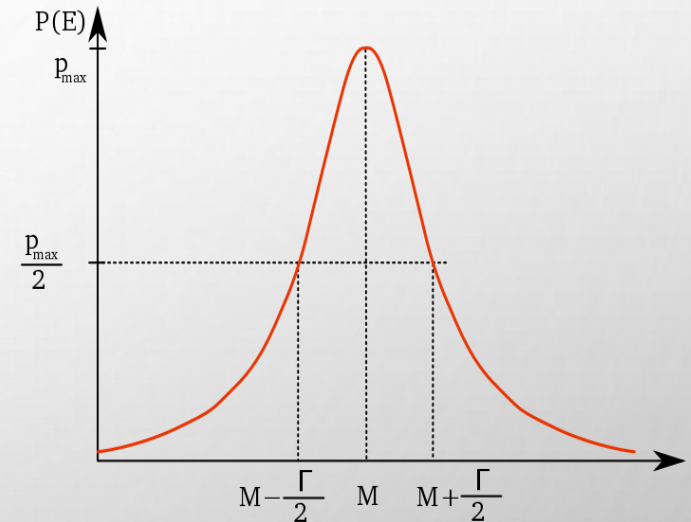
Wzór relatywistyczny (prawie identyczny kształt):

$$\sigma(E) = \sigma_{max} \frac{M^2 \Gamma^2}{(s - M^2)^2 - M^2 \Gamma^2}$$

Parametry rezonansów:

M – masa, Γ – szerokość, J – całkowity spin,

Γ_i, Γ_f – szerokości cząstkowe stanów początkowego i końcowych.



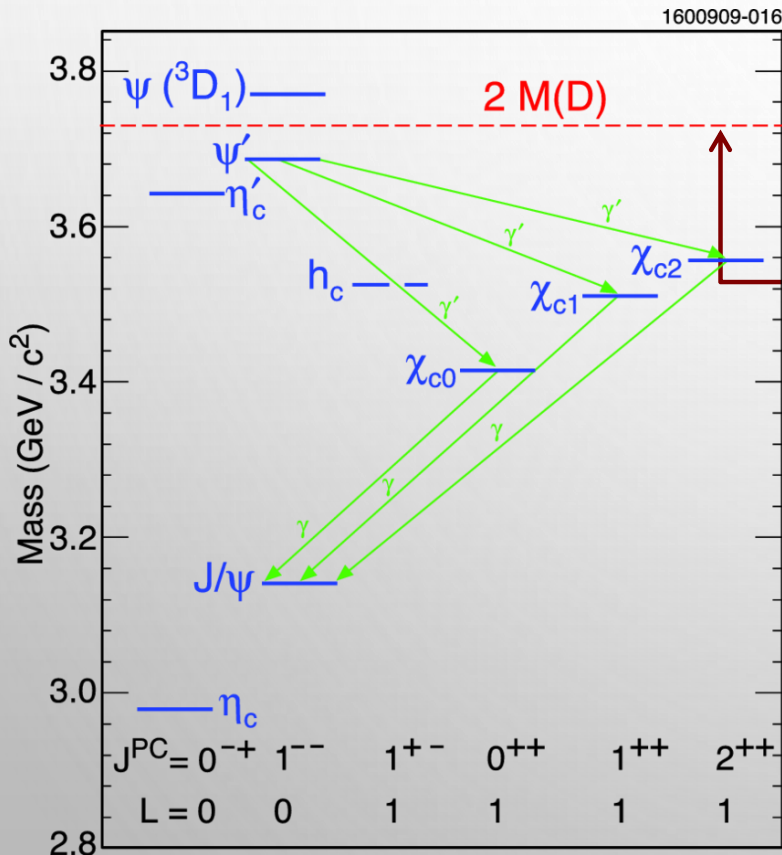
$$\sigma(E) = \frac{3\pi}{s} \frac{\Gamma_e \Gamma_f}{(E - M_R)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

wracając do powabu:

Czarmonium

Odkryta cząstka była niezwykle wąska. Obecna wartość: $\Gamma(J/\psi) \sim 87$ keV

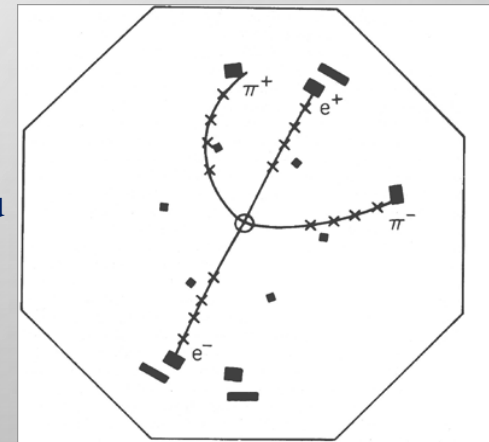
Po dokładniejszych skanach przy stopniowo zmienianej energii odkrywane były nowe stany, wszystkie o małej szerokości.



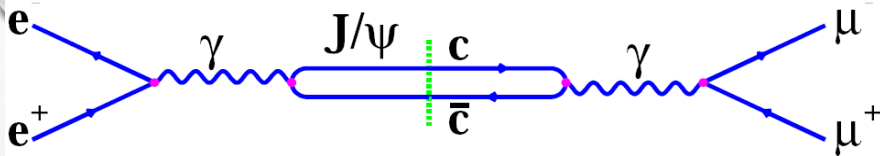
Z rozkładów doświadczalnych obserwowana szerokość ok. 3 MeV wynika z rozdzielczości detektorów, ale wyznaczenie przekroju czynnego umożliwia wyznaczenie szerokości (splot-konwolucja).

Rozpad J/ψ na dwa powabne mezony jest niemożliwy (zbyt mała masa) – rozpad na lekkie cząstki (np. leptony) zachodzi b. rzadko

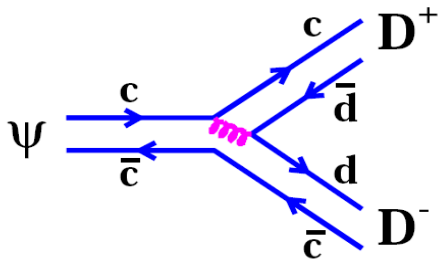
śląd cząstek w przypadku wyjaśnia nazwę ψ



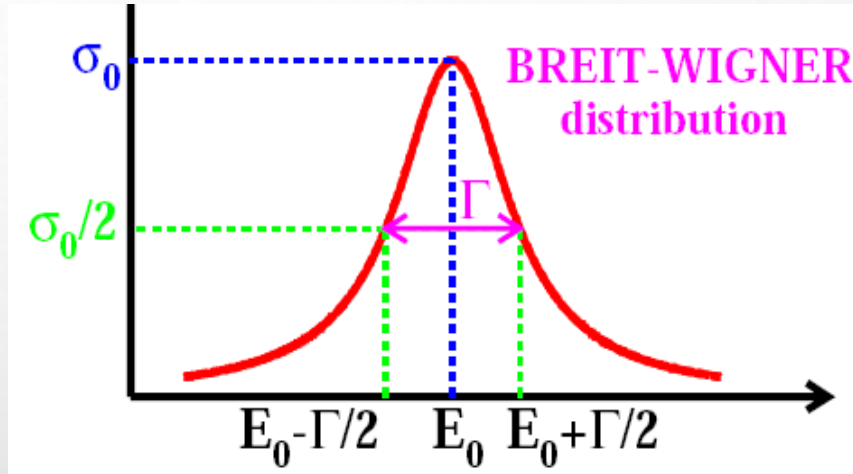
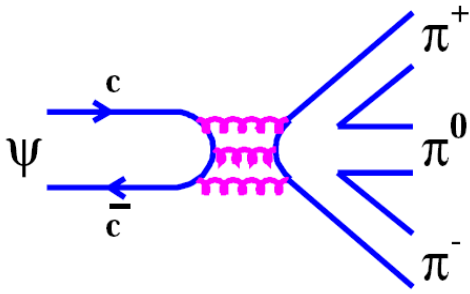
Szerokość rezonansu



IF $m(\psi) > 2m(D)$



IF $m(\psi) < 2m(D)$

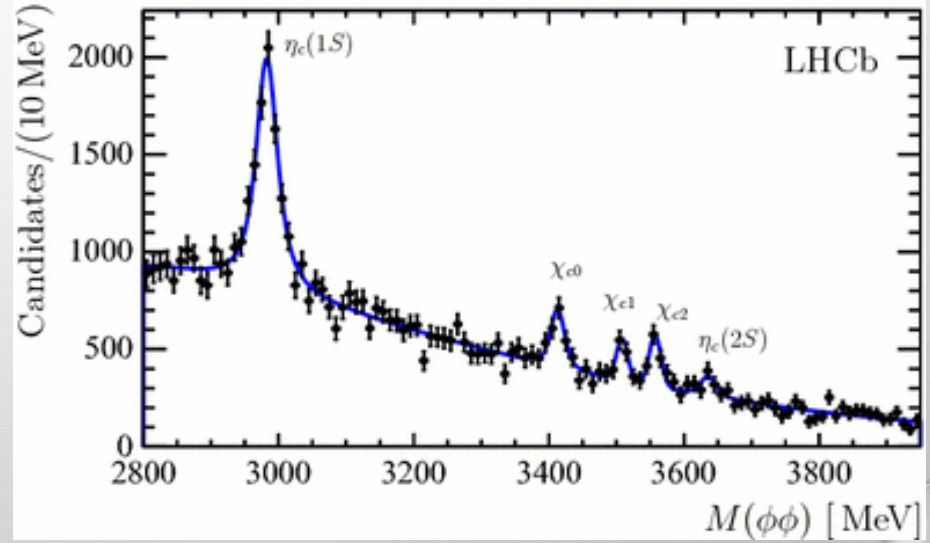
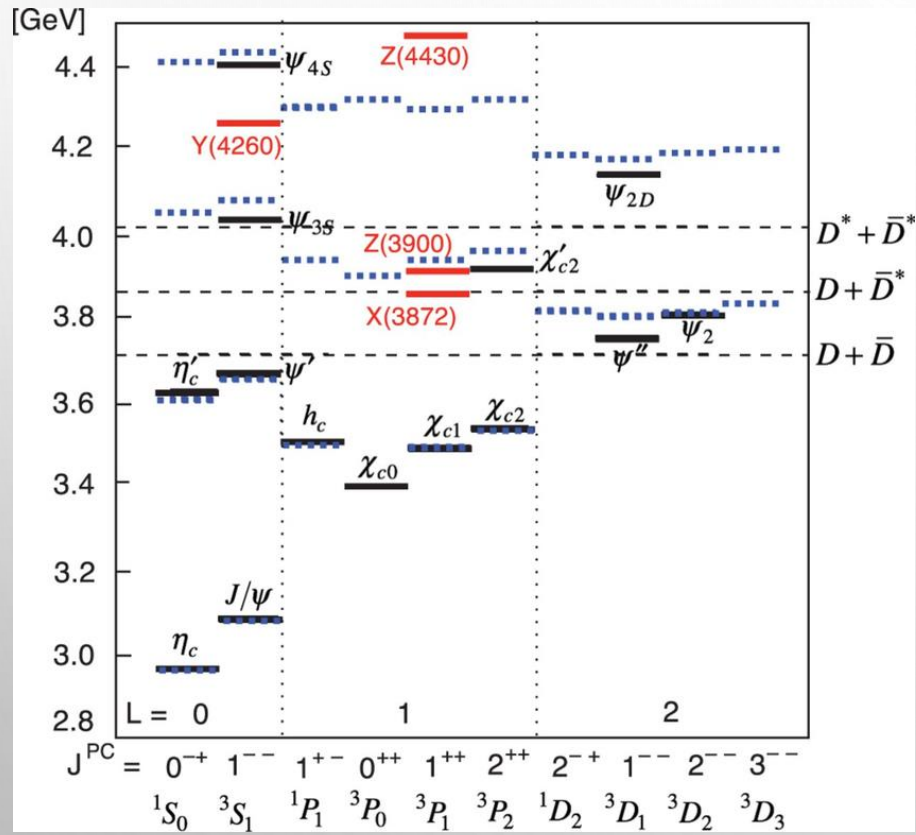


Rozpad na mezony D dozwolony -normalna szerokość dla rozpadów silnych, $\Gamma(\Psi'')=24 \text{ MeV}$

Diagramy z niepołączonymi liniami są silnie tłumione -reguła Zweiga- (trzy gluony)

rozpad tłumiony – mała szerokość

Spektrum czarmonium



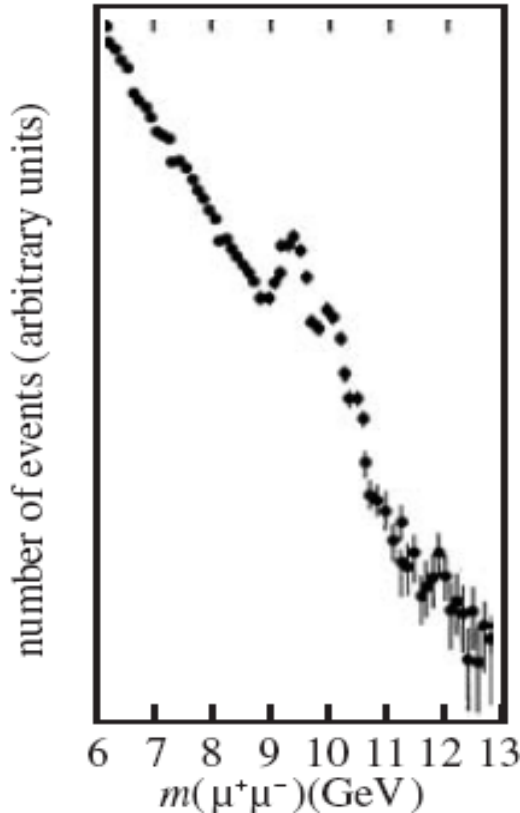
Trzecie pokolenie

Skoro mieliśmy trzy pokolenia leptonów, powinno być również 3. pokolenie kwarków. W 1977 w Tevatronie odkryto stan związany kwarków b anty-b.

$$p + (Cu, Pt) \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$$

Nazwano ten stan $\Upsilon(9460)$
Oszacowano $m(b) = 4.7 \text{ GeV}$

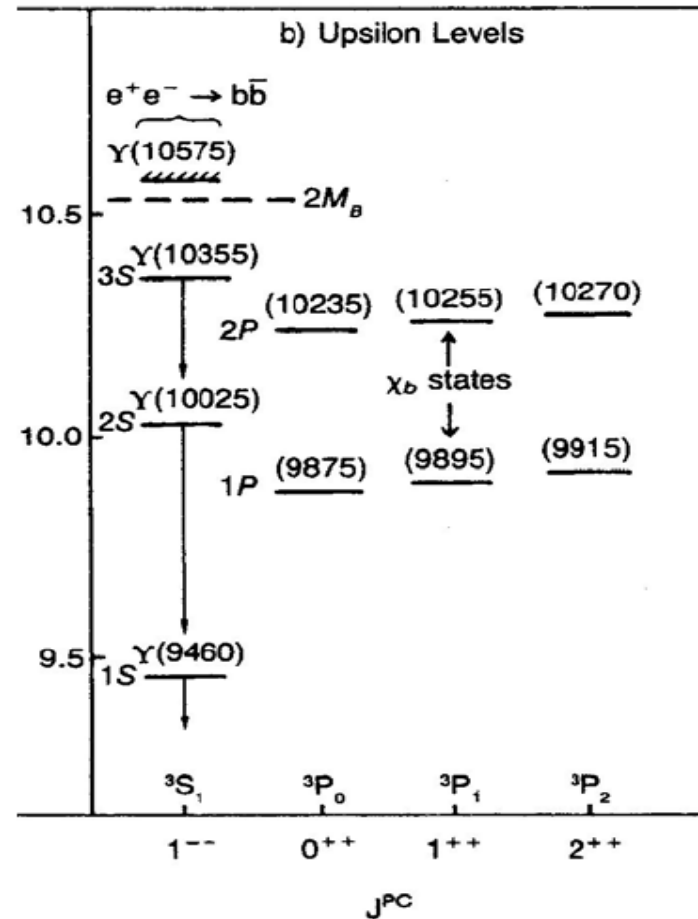
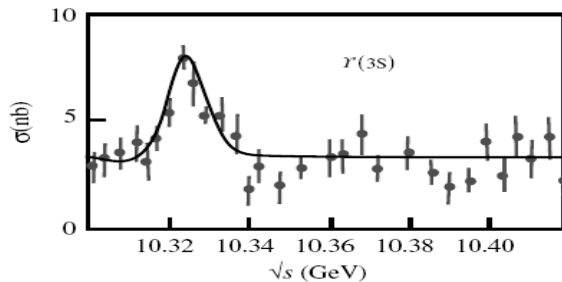
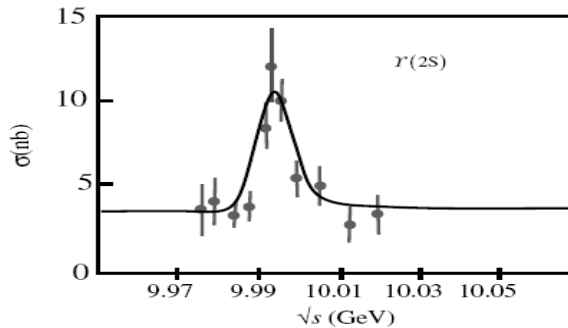
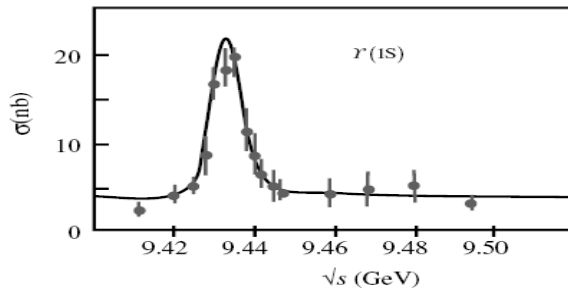
no i odkrywano nowe stany....



State	Quark	M (MeV)	Γ/τ	J^{PC}	I
$\Upsilon(1^1S_3)$	$b\bar{b}$	9460	54 keV	1^{--}	0
$\Upsilon(2^1S_3)$	$b\bar{b}$	10023	32 keV	1^{--}	0
$\Upsilon(3^1S_3)$	$b\bar{b}$	10355	20 keV	1^{--}	0
$\Upsilon(4^1S_3)$	$b\bar{b}$	10580	20 MeV	1^{--}	0
B^+	$u\bar{b}$	5279	1.6 ps	0^-	1/2
B^0	$d\bar{b}$	5279	1.5 ps	0^-	1/2
B_s^0	$s\bar{b}$	5368	1.5 ps	0^-	0
B_c^+	$c\bar{b}$	6286	0.5 ps	0^-	0

Bottonium

Późniejsze wyniki (CLEO 1980):

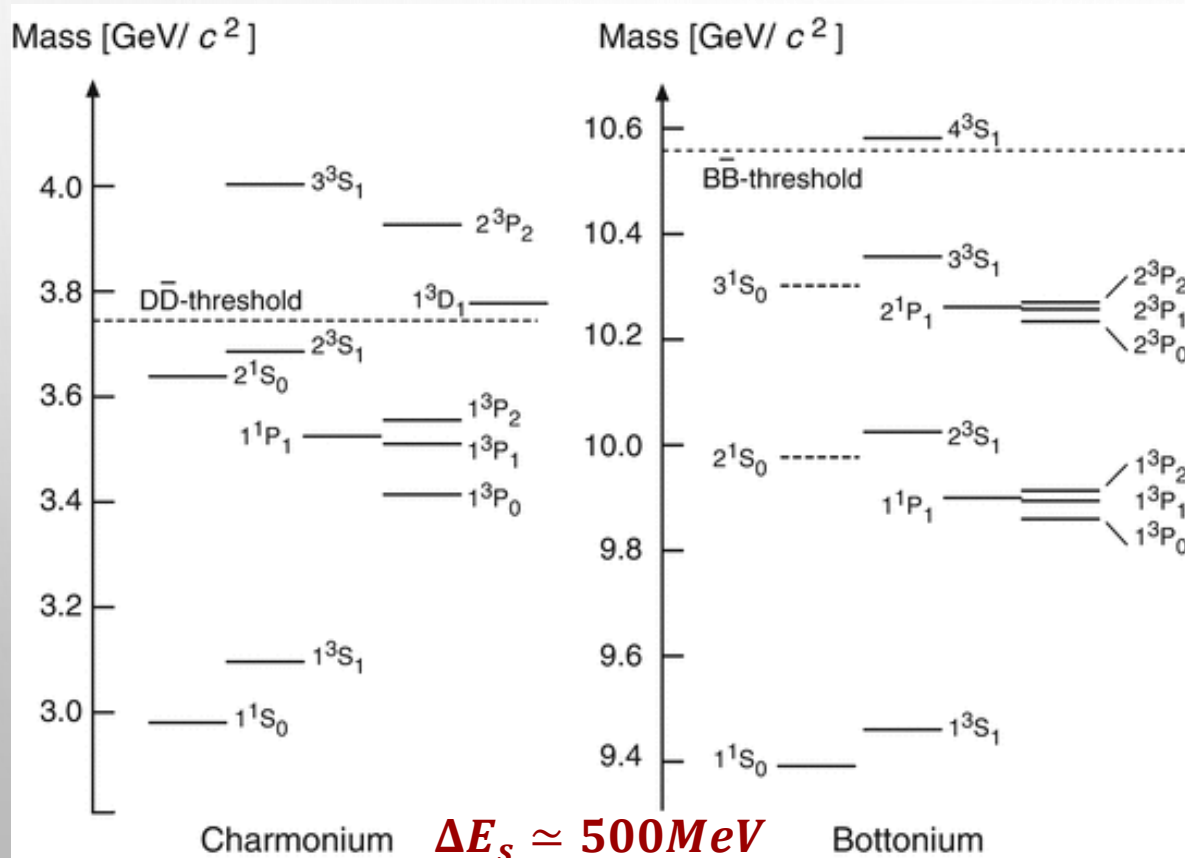


Spektrum „bottonium”

Model potencjalny

Odkrycie dwóch stanów związanych ciężkich kwarków i ich całego spektrum porównuje się do układu pozytonium (elektron – pozyton), który oddziałuje ze sobą poprzez potencjał kulombowski

$$V_{em} = -\frac{\alpha_{em}}{r}.$$



A zatem część potencjału przy małych odległościach (nierelatywistyczną, bo kwarki ciężkie) oddz. silnych można zapisać jako:

$$V_{QCD} = -\frac{4 \alpha_s}{3 r}$$

Ostatni element

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} +\frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} \end{matrix}$$

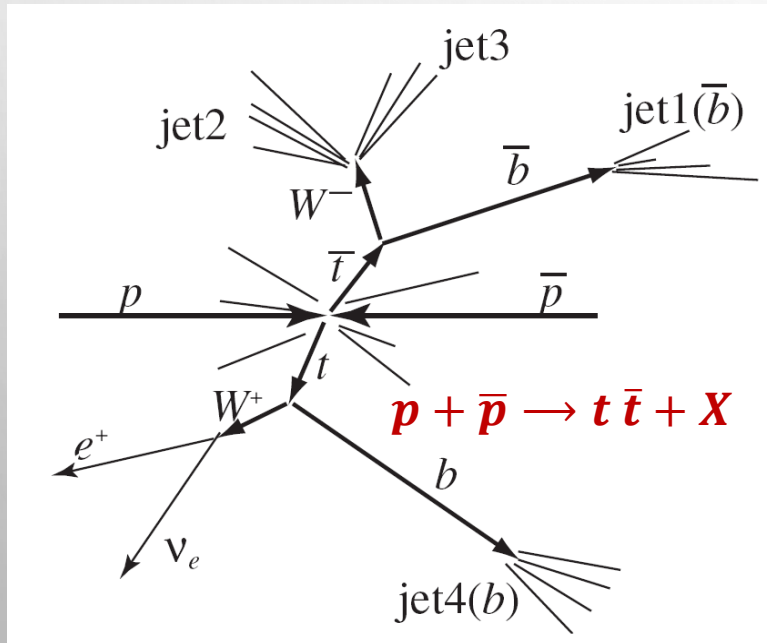
Poszukiwanie „brata” kwarka b o ładunku $Q=+2/3$ zajęło 20 lat.

Kwark t miał być bardzo ciężki i produkowany musiał być w parach.

1995 roku w Tevatronie ogłoszono 27 przypadków przy $\sqrt{s} = 2$ TeV w procesie: $p + \bar{p} \rightarrow t \bar{t} + X$

$$t \rightarrow W^+ + b \rightarrow W^+ + jet(\bar{b}) \quad W \rightarrow e \nu_e$$

$$\bar{t} \rightarrow W^- + \bar{b} \rightarrow W^- + jet(b) \quad W \rightarrow q \bar{q} \rightarrow jet\ 2 + jet\ 3$$

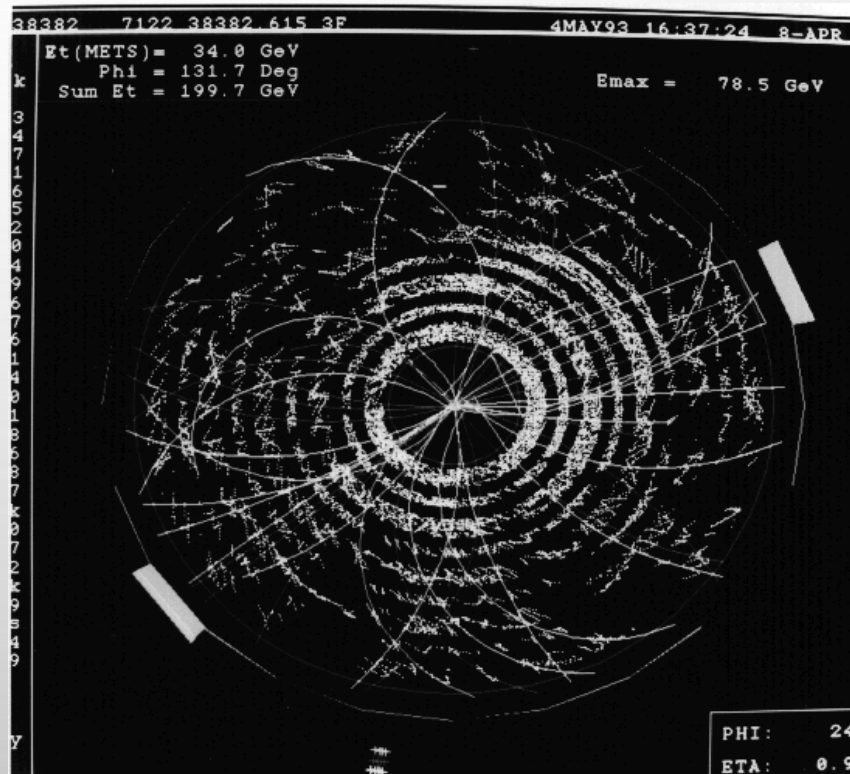
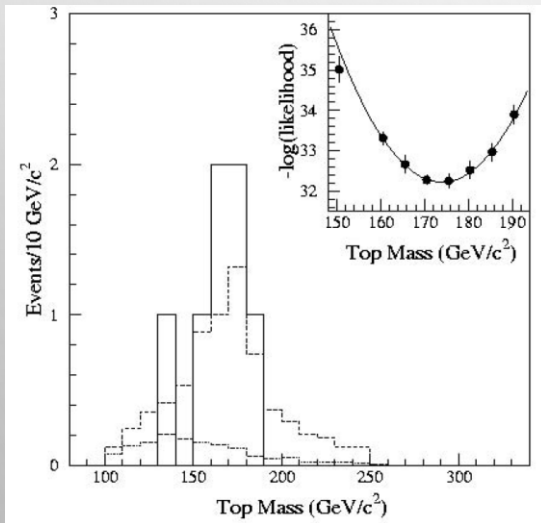
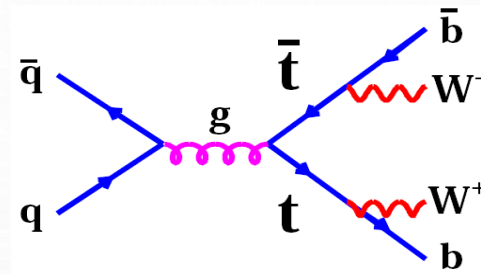
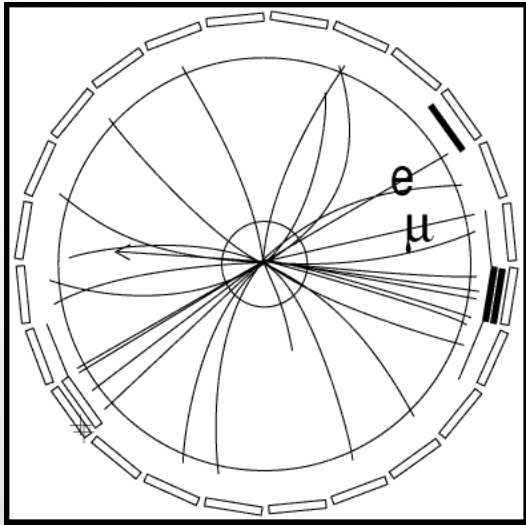


Szuka się:

- jeden elektron (mion),
- jedno neutrino,
- 4 pęki hadronów (2 z b),

tu widać „przemianę” kwarka t w kwark b – jest to możliwe TYLKO w oddziaływaniach słabych

Topowy przypadek



Kwark t

Masa t mogła być wyznaczona **bezpośrednio** poprzez masę produktów jego rozpadu:

$$M(t) = 174.2 \pm 3.3 \text{ GeV}$$

Kwark t jest tak ciężki, że zanim utworzy stan związany, ulega rozpadowi.

Jego czas życia jest krótszy niż typowy czas hadronizacji.

Brak „toponium” !

Brak top - hadronów.