Eksperyment LHCb - pierwsze lata zbierania danych i Nowa Fizyka

Marek Szczekowski Instytut Problemów Jądrowych Warszawa

18 kwietnia 2008

1

Fizyka B w Modelu Standardowym

- Powiązana z sektorem zapachów i łamaniem CP w MS najmniej zrozumianą częścią modelu
- Rozpady i oscylacje B określają 5 z 9 elementów macierzy CKM
- Wyraźna hierarchia przejść między kwarkami → przyczyna nieznana
- (Zbyt) wiele parametrów (stałych przyrody w MS) opisujących masy kwarków i leptonów oraz ich mieszanie (6+3+3+4+6=22) / 28
- Kosmologia → Wielki Wybuch (≈ 13.5 10⁹ lat temu) → symetria produkcji materii i antymaterii → anihilacja materii i antymaterii → n_{barion}/ n_{gamma} ~10⁻¹⁰.
 Dlaczego cała materia nie uległa anihilacji ? Do wyjaśnienia potrzebne m.in. łamanie CP.
- MS → łamanie CP → 3 generacje kwarków

Ale stopień łamania CP w MS nie wystarcza do wyjaśnienia bariogenezy \rightarrow potrzebne są inne źródła łamania CP \rightarrow Nowa Fizyka

Fizyka B – pośrednie poszukiwanie Nowej Fizyki

Z wielu względów Model Standardowy (MS) nie może być ostateczną teorią → efektywna teoria przy niskich energiach, przybliżenie bardziej fundamentalnej Nowej Fizyki oczekiwanej przy E ~ O (1 TeV)

Jak szukać Nowej Fizyki (nowe cząstki, nowe symetrie, nowe oddziaływania)?

- → nowe cząstki mogą być bezpośrednio wyprodukowane, jeśli energia jest wystarczająca
- → nowe cząstki mogą pojawiać się jako cząstki wirtualne w procesach pętlowych → mierzalne odchylenia od przewidywań MS.

dużą precyzją.

Fizyka B jest bogatym źródłem procesów pętlowych mierzonych z bardzo



Spektakularne sukcesy podejścia pośredniego

- Γ(K_L⁰ → μ⁺ μ⁻)/Γ(K⁺ → μ⁺ v) << 1 → mechanizm GIM (1970) → przewidywanie czwartego kwarka (c) → obserwacja c (1974)
- Pomiar różnic mas $\Delta m_K \rightarrow przewidywanie masy c$ $\Delta m_K \sim (m_c - m_u)^2 \sin^2\theta_C \cos^2\theta_C$
- Oscylacje B antyB i pomiar $\Delta m_B (1987) \rightarrow przewidywanie masy t$ $\Delta m_B \sim m_t^2 (V_{tb}^* V_{td})^2$
- Łamanie CP (1964) → mechanizm KM (1973) → przewidywanie trzeciej rodziny kwarków → obserwacja b (1977), obserwacja t (1995)

$$\begin{pmatrix} d'\\s'\\b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub}\\V_{cd} & V_{cs} & V_{cb}\\V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\\s\\b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} arg(V_{ub}) = -\beta\\arg(V_{ub}) = -\gamma\\b' & arg(V_{ts}) = \beta_s + \pi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{d}'\\\overline{s}'\\\overline{b}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V^*_{ud} & V^*_{us} & V^*_{ub}\\V^*_{cd} & V^*_{cs} & V^*_{cb}\\V^*_{ud} & V^*_{ts} & V^*_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{d}\\\overline{s}\\\overline{b}\\\overline{b} \end{pmatrix}$$

$$\frac{b}{V_{cb}} \begin{pmatrix} W^-\\V_{cb} & C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V^*_{ud} & V^*_{us} & V^*_{ub}\\V^*_{cd} & V^*_{cs} & V^*_{cb}\\V^*_{ud} & V^*_{ts} & V^*_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{d}\\\overline{s}\\\overline{b}\\\overline{b} \end{pmatrix}$$

$$\frac{b}{V_{cb}} \begin{pmatrix} W^-\\V_{cb} & C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V^*_{ud} & V^*_{us} & V^*_{ub}\\V^*_{cd} & V^*_{cs} & V^*_{cb}\\V^*_{ud} & V^*_{ts} & V^*_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{d}\\\overline{s}\\\overline{b}\\\overline{b} \end{pmatrix}$$

Obecny stan Modelu Standardowego i poszukiwań Nowej Fizyki

" Im bardziej zaglądali do środka tym bardziej prosiaczka tam nie było… "



Zagadka zapachów w Nowej Fizyce

Nowa Fizyka \rightarrow nowe człony w lagranżjanie np.opisujące wkłady do Δm dla neutralnych mezonów K, D, B, B_s:

$$L_{\Delta F=2} = \frac{g_{sd}}{\Lambda_{NF}^2} \left(\overline{d_L} \gamma_\mu s_L\right)^2 + \frac{g_{cu}}{\Lambda_{NF}^2} \left(\overline{c_L} \gamma_\mu u_L\right)^2 + \frac{g_{bd}}{\Lambda_{NF}^2} \left(\overline{d_L} \gamma_\mu b_L\right)^2 + \frac{g_{bs}}{\Lambda_{NF}^2} \left(\overline{s_L} \gamma_\mu b_L\right)^2$$

Ale te Δm są dobrze pomierzone i zgodne z przewidywaniami Modelu Standardowego:

$$\Delta m_{\rm K}/m_{\rm K} \sim 7.0 \ 10^{-15}$$

 $\Delta m_{\rm D}/m_{\rm D} \leq 2 \ 10^{-14}$
 $\Delta m_{\rm B}/m_{\rm B} \sim 6.3 \ 10^{-14}$
 $\Delta m_{\rm Bs}/m_{\rm Bs} \sim 2.1 \ 10^{-12}$

1. Jeśli $g_{ii} = O(1)$ to $\Lambda_{NF} = O(10^3 - 10^4)$ TeV

2. Jeśli $\Lambda_{NF} = O(1)$ TeV to struktura zapachów NF jest bardzo szczególna: $g_{ii} \le 10^{-4} - 10^{-7}$

Y.Nir, arXiv:hep-ph/07081872

Przypadki bb

LHC \rightarrow b. duży przekrój czynny na produkcję kwarków pięknych (~ 0.5 mb)

wierzchołek oddziaływania pp Kwarki b i anty-b produkowane B_0 parami, w większości pod małymi i b-hadron skorelowanymi kątami (PYTHIA) π^+ Rozkład kątowy bb Pomiar czasu własnego w rozpadzie B: $t = m_{\rm B} L / pc$ a więc długości rozpadu L (~ 1 cm w LHCb) i pędów *p* dla produktów rozpadu (~ 1–100 GeV) Należy oznakować stan wyprodukowanego B: had czy było to B czy \overline{B} Iradi Można użyć ładunku leptonu lub kaonu z rozpadu

drugiego hadronu b w przypadku

 π^+

Produkcja kwarków b w LHCb

- spektrometr jednoramienny dla małych kątów
 1.9 < | η | < 4.9 (15 300 mrad)
- średni pęd B ≈ 80 GeV/c
- tryger dla stosunkowo małych p_T
- typowa zdolność rozdzielcza pomiaru czasu życia :

σ ≈ 40 fs (≈ 3% т)

- typowa zdolność rozdzielcza w masie: 14 – 18 MeV/c²
- bardzo dobra identyfikacja cząstek
- 2 fb⁻¹ rocznie (10⁷ sek)





Świetlność w LHCb

Problem przekrywania się n przypadków (pile-up) z tego samego przecięcia wiązek. Rozkład Poissona:

 $<n> = L \sigma_{inel} / f$, $\sigma_{inel} \approx 80 \text{ mb}$, f = 30 MHzPrzy $< L > = 2 \ 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (maks. 5 $10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

- \rightarrow czyste przypadki : < n > = 0.5
- → mniejsze uszkodzenia radiacyjne (VELO 8 mm od wiązki)

 \rightarrow N = σ_{b}^{\int} L dt = 10¹² wyprodukowanych przypadków z b rocznie

Scenariusz (optymistyczny ?) dla scałkowanej świetlności:

- 2008 : < 0.1 fb⁻¹ ?
- − 2009 : ~ 0.5 fb^{−1}
- − 2010 : ~ 2 fb⁻¹ / rok



Detektor LHCb

VELO: Vertex Locator , detektor wierzchołka TT, T1, T2, T3: detektory śladowe RICH 1 – 2: detektory promieniowania Czerenkowa ECAL, HCAL: kalorymetry M1–M5: stacje komór mionowych



Detektor w holu UX85



LHCb w holu eksperymentalnym



LHCb wirtualny



13

Detektor Wierzchołka VELO – vertex locator



RICH-1 + 2











Identyfikacja cząstek w licznikach Czerenkowa



Detektor Zewnętrzny

- 3 stacje (2 * 6 ram C), każda z 4 płaszczyznami modułów
- Każdy moduł \rightarrow 2 warstwy słomek z kaptonu/AI.
- σ (p) / p = 0.35 0.55 % dla p do ~120 GeV/c

Warszawski system monitorowania położeń ram - RASNIK Rozprowadzenie gazu i chłodzenia Rozprowadzenie LV, HV, ECS/TFC, etc. 9+9 modułów 130 modułów (ok.15 000 słomek) wyprodukowanych w Warszawie 17 $2 \times 2 \times 9$ modułów elektroniki Front-End

Tryger w LHCb



Początki zbierania danych

Przy jakiej świetlności system zbierania danych w LHCb zostanie wysycony (→ potrzebny tryger) ?

- Całkowity przekrój czynny dla pp σ_{MB} ≈ 100 mb
- Szybkość zapisu danych w LHCb R ≈ 2 kHz
- Odpowiadająca świetlność L = R / σ_{MB} ≈ 2 10²⁸ cm⁻²s⁻¹
- 10⁸ przypadków MB w 14 godzin:
 - 5 milionów przypadków z cząstkami powabnymi (c)
 - 0,5 miliona przypadków z cząstkami pięknymi (b)
- Ustawianie i sprawdzanie trygera
- Kalibracja detektorów: alignment, RICH ($\pi/K/p$), kalorymetry (π^0)
- Efekty systematyczne: symetria azymutalna produkcji cząstek, n⁺/n⁻
- Dopasowanie programów Monte Carlo

Analiza fizyczna \rightarrow nie ma danych przy tych energiach \rightarrow wszystko jest nowe !

Kalibracja identyfikacji cząstek w RICH



Program badań w fizyce zapachów w LHCb

- Precyzyjne pomiary łamania CP, rzadkich rozpadów B, ...
 - Pośrednie poszukiwania Nowej Fizyki w rozpadach opisywanych przez diagramy pętlowe
 - Pomiar rozpadu $B_s \rightarrow \mu\mu$
 - Parametry mieszania B , w szczególności faza mieszania dla B_s
 - Łamanie CP w ekskluzywnych hadronowych rozpadach pingwinowych b \rightarrow sss
 - Łamanie CP w amplitudach rozpadów B (np. B \rightarrow K π)
 - Pomiary ekskluzywnych rozpadów $b \rightarrow s I^+I^-$ and $b \rightarrow s\gamma$ (tzn. struktury chiralnej) \triangleleft
 - Pomiar różnicy słabych faz między V_{ub} i V_{cb} (kąt γ) z pomiarów rozpadów drzewowych B \rightarrow DK
 - Poszukiwanie LFV w leptonowych rozpadach B (np. $B_s \rightarrow \mu e$)
 - Poszukiwanie NF w sektorze cząstek powabnych (mieszanie D, łamanie CP, rzadkie rozpady)
 - Spectroskopia hadronów b, stany związane ciężkich kwarków, ...
 - Jeśli NF zostanie znaleziona przez ATLAS/CMS, LHCb dostarczy komplementarnych informacji badając strukturę zapachową NF
 - W przeciwnym przypadku, można badać fizykę przy znacznie wyższych energiach niż osiągane w pomiarach bezpośrednich

Bardzo rzadkie rozpady : $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$



${\rm B_s} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ w LHCb

- "Łatwy" dla trygera i selekcji
 → efektywność rekonstrukcji ≈ 10 %
- Główny problem: odrzucenie tła (MC → ograniczona statystyka)
 - największe tło od b $\rightarrow \mu$, b $\rightarrow \mu$
 - dominujący kanał ekskluzywny $B_c \rightarrow J/\psi(\mu\mu) \ \mu \ v \ mały$
- Wykorzystanie zalet detektora:
 - dobra identyfikacja mionów,
 - dokładna rekonstrukcja wierzchołka,
 - dobra zdolność rozdzielcza w masie B_s (18 MeV/c²)

 $\begin{array}{l} 0.05\,\text{fb}^{-1} \Rightarrow \text{wynik lepszy od CDF+D0} \\ 0.5\,\,\text{fb}^{-1} \Rightarrow \text{wykluczenie wartości BR aż do MS} \\ 2\,\,\,\text{fb}^{-1} \Rightarrow \,\,3\sigma \,\text{ewidencja sygnału MS} \\ 6\,\,\,\text{fb}^{-1} \Rightarrow \,\,5\sigma \,\text{obserwacja sygnału MS} \end{array}$



Najbardziej obiecujący kanał do szybkiego odkrycia NF w LHCb !

Asymetria CP w $B_s \rightarrow J/\psi \phi$

- Dominacja jednej amplitudy ⇒ nie ma łamania CP w rozpadzie
- Odpowiednik dla B_s złotego rozpadu $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$

$$A_{CP}(t) = \frac{\Gamma\left(\overline{B_s^0}\left(t\right) \to f\right) - \Gamma\left(B_s^0\left(t\right) \to f\right)}{\Gamma\left(\overline{B_s^0}\left(t\right) \to f\right) + \Gamma\left(B_s^0\left(t\right) \to f\right)}$$

$$A_{CP}(t) = -\frac{\eta_f \sin \phi_S \sin(\Delta m_S t)}{\cosh\left(\frac{\Delta \Gamma_S t}{2}\right) - \eta_f \cos \phi_S \sinh\left(\frac{\Delta \Gamma_S t}{2}\right)}$$

faza $\phi_s = -2\beta_s$ jest odpowiednikiem $\phi_d = 2\beta$ dla B : - ϕ_s bardzo mała w Modelu Standardowym $\phi_s^{SM} = -\arg(V_{ts}^2) = -2\lambda^2\eta = -0.0368 \pm 0.0018$ - może być znacznie większa przy NF







Faza mieszania ϕ_s dla mezonów B_s

Ale ponieważ $B \rightarrow V V$ to potrzebna jest analiza kątowa, żeby oddzielić wkłady od stanów z CP-ujemnym i CP-dodatnim

- Jak dotąd:
 - Nie znaleziono łamania CP
 - Wynik D0 (1.1 fb⁻¹, ~1k $B_s \rightarrow J/\psi \phi$)
 - φ_s = -0.79 ± 0.56 + 0.14 0.01 [PRL 98, 121801 (2007)]
- Czułość LHCb z 0.5 fb⁻¹:

~33k przypadków B_s \rightarrow J/ $\psi(\mu\mu)\phi$ (bez znakowania), B_{bb}/S = 0.12, σ_t = 36 fs

$$\sigma_{\text{stat}}(\phi_{\text{s}}) = 0.046$$



- Docelowo:
 - Można dodać (J/ $\psi\eta^{(')}$, $\eta_c\phi$, D_sD_s)
 - Przy 10 fb⁻¹, można otrzymać ewidencję >3σ dla łamania CP ($φ_s ≠ 0$), nawet jeśli tylko MS

Ograniczenia na Nową Fizykę z pomiarów fazy w oscylacjach B_s





$A_{FB} (B \rightarrow K^* \mu \mu)$

Efektywność ~ 1% \rightarrow 7300 przyp./ 2 fb ⁻¹ Tło:

B/S → 0.5+0.2 dla 90% CL

bb: $b \rightarrow \mu, b \rightarrow \mu$

bb: $b \rightarrow \mu, c \ (c \rightarrow \mu)$

Problem:

Funkcja akceptancji $a(\theta_1, m_{uu}^2)$ Czułość:

przy 0.07 fb⁻¹ konkurencja z BaBar i Belle



	0.5 fb ⁻¹	2 fb ⁻¹	10 fb ⁻¹
σ(S ₀)	0.8 GeV ²	0.5 GeV ²	0.3 GeV ²

Przykłady fizyki B w LHCb z 0.5 fb⁻¹

Kanał rozpadu	Liczba przyp. dla 0.5 fb ⁻¹	Stat. czułość dla 0.5 fb ⁻¹	Świetlność potrzebna do zrównania się z konkurencją *
B _d →J/ψ(μμ)K _S	59k	σ(sin(2β)) = 0.04	2 fb ⁻¹
$B_s \rightarrow D_s^- \pi^+$	35k	σ(∆m _s) = 0.012 ps ^{₋1}	0.2 fb ⁻¹
$B_s \rightarrow D_s^-K^\pm$	1.6k	σ(γ) = 21 deg	-
B _s → J/ψ(μμ)φ	33k	σ(φ _s) = 0.046	0.3 fb ⁻¹
$B_d \to \phi K_S$	230	$\sigma(\sin(2\beta_{eff})) = 0.46$	8 fb ⁻¹
$B_s \rightarrow \phi \phi$	780	σ(Δφ ^{NP}) = 0.22	_
$B^+ \rightarrow D(hh)K^{\pm}$ $B^+ \rightarrow D(K_S \pi \pi)K^{\pm}$	16k 1.3k	σ(γ) = 12–14 deg	0.3 fb ⁻¹
$B_d \to \pi^+\pi^-$	8.9k	σ(S, C) = 0.074, 0.086	1–2 fb⁻¹
$B_s \rightarrow K^+K^-$	9.0k	σ(S, C) = 0.088, 0.084	-
$B_d \to \rho \pi \to \pi^+ \pi^- \pi^0$	3.5k	α	2 fb ⁻¹
$B_d \rightarrow K^{*0}\gamma$	15k	A _{CP}	0.4 fb ⁻¹
$B_s \to \phi \gamma$	2.9k	A _{CP} (t)	-
$B_d \to K^{*0} \mu^+ \mu^-$	1.8k	σ(q² ₀) = 0.9 GeV²	0.1 fb ⁻¹
B _s → µ⁺µ⁻	18	BR _{sм} at 90%CL	0.05 fb ^{−1}

* Zakładając (zbyt) proste skalowanie $1/\sqrt{N}$ statystycznych niepewności dla obecnych wyników z Tevatronu (\rightarrow 16 fb⁻¹) i fabryk B (\rightarrow 1.75 ab⁻¹)

Podsumowanie

(scenariusz na początek)

- Uruchamienie detektora:
 - − Pierwsza wiązka (^(U)) i pierwsze zderzenia bez pola magnetycznego:
 - → ustalenie procedury zbierania danych,
 - → sprawdzenie synchronizacji czasowej poszczególnych detektorów,
 - → sprawdzenie programów rekonstrukcji przypadków dla rzeczywistych danych,
 - → określenie wzajemnych położeń detektorów (alignment)
 - Pierwsze zderzenia z włączonym magnesem (obie polaryzacje):
 - → Kalibracja pędu, energii, identyfikacji cząstek, … oraz sprawdzenie alignment'u,
 - → analiza podstawowych rozkładów (zdolności rozdzielcze, …) i uruchomienie trygera,
 - → przetestowanie modelu obliczeniowego z rzeczywistymi danymi (użycie centrum Tier1 i analizy w GRID),
 - \rightarrow jak najszybsze przejście do wiązek 25ns i świetlności 2×10³² cm⁻²s⁻¹

Podsumowanie

(scenariusz na początek c.d.)

- Fizyka:
 - Podstawowe pomiary (np. produkcja J/ ψ , σ_{bb} , …)
 - Zasadniczy program badań (fizyka B, poszukiwanie NF) może zacząć się bardzo wcześnie już od 0.1 0.5 fb⁻¹ z konkurencyjnymi wynikami np. dla Bs $\rightarrow \mu\mu$, $\phi_s z Bs \rightarrow J/\psi\phi$.

Wyniki z eksperymentów CDF i D0, a w przyszłości z LHCb oraz CMS i ATLAS, dowodzą, że zderzacze hadronowe określane często jako "discovery machines" są również miejscem bardzo dokładnych pomiarów.

Dodatkowe

