

Powabne piękno Nowej Fizyki – Drzewa i Pingwiny w LHC

Tomasz Szumlak - AGH, 26/04/2013







Tomasz Szumlak - AGH, 26/04/2013





Tomasz Szumlak - AGH, 26/04/2013





Plan

- Motywacja poszukiwań Nowej Fizyki
- Sprzęt Maszyna LHC i Spektrometr LHCb
- Symetria Materia Antymateria (P, C, CP)
- Drzewa i Pingwiny Nowa Fizyka
- Podsumowanie



Dlaczego Szukamy Nowej Fizyki





Dlaczego "<mark>Stara Fizyka</mark>" – **Model Standardowy** nie jest wystarczająco dobra?

 Bardzo ekonomiczny – otaczający nas Wszechświat zbudowany z dwóch kwarków i dwóch leptonów

- Oddziaływania pomiędzy składnikami materii (kwarki i leptony) opisane poprzez wymianę wektorowych bozonów pośredniczących (γ , W^{+/-}, Z⁰, $g_{\alpha\beta}$)
- Matematyczna struktura oparta na lokalnych symetriach cechowania posiada elegancką interpretację geometryczną (SU(3)_c & SU(2)_L & U(1)_y)
- Sektor cechowania (=oddziaływania) wymaga jedynie 3 parametrów

 Formalizm Modelu jest bardzo elastyczny – umożliwia na rozległe studia fenomenologiczne, które pozwalają przewidywać nowe zjawiska

• Wszystkie dotychczas przeprowadzone badania eksperymentalne w zasadzie zgodne z Modelem Standardowym AGH







Dlaczego "<mark>Stara Fizyka</mark>" – **Model Standardowy** nie jest wystarczająco dobra?

• Oddziaływanie grawitacyjne poza Modelem (unifikacja potencjalnie możliwa przy bardzo dużych energiach – skala Plancka ~ 10¹⁹ GeV)

 Cząstki posiadają masę (eksperyment!), konieczny mechanizm nadawania masy

 Eksperyment uczy nas, że materia i antymateria zawsze produkowane są w jednakowych ilościach... tymczasem widzialny Wszechświat jest zdominowany przez materię - bariogeneza









Materia + Antymateria = Fotony





Dlaczego "<mark>Stara Fizyka</mark>" – **Model Standardowy** nie jest wystarczająco dobra?

• Oddziaływanie grawitacyjne poza Modelem (unifikacja potencjalnie możliwa przy bardzo dużych energiach – skala Plancka ~ 10¹⁹ GeV)

 Cząstki posiadają masę (eksperyment!), konieczny mechanizm nadawania masy

 Eksperyment uczy nas, że materia i antymateria zawsze produkowane są w jednakowych ilościach... tymczasem widzialny Wszechświat jest zdominowany przez materię - bariogeneza

 Dodatkowo - atomy stanowią niewielki procent Wszechświata - ciemna energia i ciemna materia





22% Cold Dark Matter

ALL STATE OF STATE

5% Atoms

73% Dark Energy







Dlaczego "<mark>Stara Fizyka</mark>" – **Model Standardowy** nie jest wystarczająco dobra?

• Oddziaływanie grawitacyjne poza Modelem (unifikacja potencjalnie możliwa przy bardzo dużych energiach – skala Plancka ~ 10¹⁹ GeV)

 Cząstki posiadają masę (eksperyment!), konieczny mechanizm nadawania masy

 Eksperyment uczy nas, że materia i antymateria zawsze produkowane są w jednakowych ilościach... tymczasem widzialny Wszechświat jest zdominowany przez materię - bariogeneza

 Dodatkowo - atomy stanowią niewielki procent Wszechświata - ciemna energia i ciemna materia

• Nadmiarowość (flavor problem) - trzy identyczne (poza masą) pokolenia

• Hierarchia mas



~ 12 rzędów wielkości różnicy pomiędzy masami najlżejszych (neutrina) i najcięższych (kwark t)

Masa kwarku t \approx masie atomu wolframu





Dlaczego "Stara Fizyka" - Model Standardowy nie jest wystarczająco dobra?

- Manizm nadawania
- Oddziaływanie grawitacyjne poza Modelem (unifile styliniczkań możliwa przy bardzo dużych energiach skala P' cekt (FTTEV)
 Cząstki posiadają masę (eksperyment!), k. to formanizm nad masy
 Eksperyment uczy nas, że materi stylinicze produkowa jednakowych ilościach... tyme on to teo ny Wszechświat jest dominowany przez materice do teo a Dodatkowo atomy styliniczen (poza masą) pokola erarci Motteo jednem) trzy identyczne (poza masą) pokola erarci Motteo jednem) trzy identyczne (poza masą) pokola 🚾 zawsze produkowane są
 - ziki procent Wszechświata ciemna
 - Jem) trzy identyczne (poza masą) pokolenia





Wszystkie eksperymenty działające przy LHC poszukują Nowej Fizyki

źródła pochodzenia masy

• Model Standardowy uzupełniony o mechanizm Higgsa (spontaniczne łamanie symetrii)

- Przestrzeń "wypełniona" polem Higgsa
- Konsekwencja bozon Higgsa
 - Odkryty przez ATLAS i CMS



- hierarchia mas
 - Wyjaśnienie sposobu nadawania masy (różnica wartości mass dla różnych cząstek)
 - Mechanizm Higgsa nie daje możliwości przewidywania wartości mas!
 - Potrzebujemy Nowej Fizyki aby to wyjaśnić





Wszystkie eksperymenty działające przy LHC poszukują Nowej Fizyki

• Tajemnica antymaterii

- Wierzymy, że podczas <mark>Wielkiego Wybuchu</mark>, powstały identyczne ilości materii i antymaterii
- Obserwujemy to w laboratorium!
- Obecnie Wszechświat zdominowany przez materię
 - Nie obserwujemy promieniowania anihilacyjnego
 - Brak anty-atomów (anty-jąder) w promieniowaniu kosmicznym







Phys. Rev. Lett. 110, 141102 (2013)





Warunki Sacharowa dla Wszechświata zdominowanego przez materię

- Niezachowanie liczby barionowej
- Łamanie P, C i CP (P parzystość przestrzenna, C parzystość ładunkowa)
- Bariogeneza zachodzi w stanie nierównowagi termodynamicznej
 - W zasadzie model standardowy spełnia powyższe postulaty
 - W szczególności możliwe procesy łamiące P, C oraz CP
 - Mechanizm CKM przewiduje asymetrię barionową na poziomie

$$rac{n_B-n_{\overline{B}}}{n_\gamma}pproxrac{n_B}{n_\gamma}pprox 10^{-20}$$

• Obserwowana asymetria:

$$rac{n_B-n_{\overline{B}}}{n_\gamma}pprox rac{n_B}{n_\gamma}pprox 6\cdot 10^{-10}$$

- Nowa Fizyka nowe procesy mogące zwiększyć łamanie symetrii CP
- Bezpośredni związek pomiędzy mechanizmem nadawania masy a łamaniem symetrii CP



Maszyna LHC i spektrometr LHCb











CERN's accelerator complex





















LHC - Large Hadron Collider

• Particles used: **Protons** (in proton- proton collisions) and heavy ions (Lead 82+)

- Circumference: 26659 m
- Injected beam energy: 450 GeV (protons)
- Nominal beam energy in physics: 7 TeV (protons)
- Magnetic field at 7 TeV: 8.33 Tesla
- Operating temperature: 1.9 K
- Number of magnets: ~9300
 - main dipoles: 1232
 - quadrupoles: 858
 - correcting magnets: 6208
- Number of RF cavities: 8 per beam
 - Field strength at top energy ≈ 5 MV/m
 - RF frequency: 400 MHz
- Revolution frequency: 11.2455 kHz
- Power consumption: ~180 MW
- Gradient of the tunnel: 1.4%
 - Difference between highest and lowest points: 122 m







LHC Page1	Fill: 3575	E: 0 Ge\	V		26-04	4-13	00:31:49
SHUTDOWN: NO BEAM							
			BIS status and	SMP flags		B1	B2
Comments (04-Ap	mments (04-Apr-2013 18:48:13)		Link Status of Beam Permits			cept	Except
F *** E No beam for	Phone:77600		Glot	nit <mark>Ex</mark>	cept	Except	
	END OF RUN 1 *** or a while. Access requ e estimate: ~2 years	uired	Setup Beam		f	alse	false
			Be	f	alse	false	
time			Moveabl	wed in f	alse	false	
AES: 50ns 1374 130	68 0 1262 144bpi12ini		PM Status R1		PM Status 82	FN	
AFS: 5005_1374_130	68_0_1262_144pp112lhj		PIVI Status B1	ENABLED	PIM Status B2	EN	ABLED









16 countries 60 institutes 819 members



Eksperyment LHCb

- **Misja eksperymentu**: poszukiwanie Nowej Fizyki oraz precyzyjne testy Modelu Standardowego w sektorze ciężkich zapachów (piękno i powab)
- Wyspecjalizowany do pomiarów <mark>rzadkich rozpadów i łamania parzystości kombinowanej CP</mark>
- Komplementarne podejście w stosunku do eksprymentów ATLAS i CMS
 - ATLAS i CMS prowadzą <mark>bezpośrednie obserwacje</mark> High Energy Frontier
 - LHCb wykorzystuje pomiary pośrednie Precision Frontier
 - Wiele przykładów <u>odkryć dokonanych na drodze obserwacji</u> <u>pośrednich</u>, np., kwark c, masa kwarku t itp.
- Bardzo wysokie wymagania co do precyzji rekonstrukcji śladów, parametru zderzenia oraz wierzchołków pierwotnych i wtórnych
- Tryger topologiczny oparty o detektor wierzchołka



wtórny







Spektrometr LHCb













Przy nominalnej energii 7 TeV: $\sigma_{pp}^{inel} \approx 60 \ [mb]$ $\sigma(pp \rightarrow c\bar{c}X) \approx 6 \ [mb]$ $\sigma(pp \rightarrow b\bar{b}X) \approx 0.3 \ [mb]$ Akceptancja LHCb ~ 30% 4 π $\sigma(pp \rightarrow b\bar{b}X) = (89.6 \pm 6.4 \pm 15.5) \ [\mu b]$

PLB 684 (2010) 209









Pseudorapidity (pseudopospieszność), miara kąta polarnego, małe kąty odpowiadają dużej p.-rapidity

$$\eta = -ln\left[tg\left(rac{ heta}{2}
ight)
ight] = rac{1}{2}ln\left(rac{ert ec pert + p_L}{ert ec pert - p_L}
ight)$$





Materia – Antymateria



Symetrie stanowią jedno z najważniejszych narzędzi służących zrozumieniu oddziaływań cząstek fundamentalnych



Jeżeli symetria jest dokładna – stowarzyszona wielkość nie podlega obserwacji

Symetrie związane z transformacjami ciągłymi w czasoprzestrzeni

translacje przestrzenne i czasowe, obroty

Symetrie dyskretne

• inwersja (parzystość) przestrzenna, inwersja (parzystość) ładunkowa,...

Unitarne symetrie cechowania (oddziaływania)

• $U_y(1)$, $SU_L(2)$, $SU_C(3)$

 \rightarrow Jeżeli dana wielkość nie może zostać zaobserwowana oznacza to, że związana jest z dokładną (nie łamaną) symetrią

 \rightarrow Jeżeli wielkość daje się zaobserwować (w zasadzie, np. przez ulepszony eksperyment) to mamy do czynienia z łamaną symetrią




Symetrie dyskretne zasadnicze dla badania różnic pomiędzy materią i antymateria

- \rightarrow Parzystość przestrzenna P
- $\rightarrow \vec{x} = (x_1, x_2, x_3) \rightarrow \vec{x} = (-x_1, -x_2, -x_3)$
 - \rightarrow zmiana skrętności układu wsp.
 - \rightarrow wektory zmieniają znak, wektory aksjalne nie: $\vec{p} \rightarrow -\vec{p}, \vec{L} = \vec{x} \times \vec{p} \rightarrow \vec{L}$

\rightarrow Parzystość ładunkowa C

- \rightarrow zamiana cząstek na antycząstki
- $\rightarrow e^+ \rightarrow e^-, K^- \rightarrow K^+$
- \rightarrow Odwrócenie czasu T
 - \rightarrow Np. zamiana kierunku ruchu cząstek

 $\rightarrow t \rightarrow -t$









Operator parzystości w akcji $P|\psi(\vec{r})\rangle = |\psi(-\vec{r})\rangle \implies P^{2}|\psi(\vec{r})\rangle = P|\psi(-\vec{r})\rangle = |\psi(\vec{r})\rangle$ P - jest operatorem unitarnym $P|\psi\rangle = p|\psi\rangle$ Stan własny Wartość własna Dla operatora parzystości przestrzennej mamy: $p = \pm 1$ $|\psi(\vec{r})\rangle = cos(x) \rightarrow P|\psi(\vec{r})\rangle = cos(-x) = cos(x) = +1|\psi(\vec{r})\rangle$ $|\psi(\vec{r})\rangle = sin(x) \rightarrow P|\psi(\vec{r})\rangle = sin(-x) = -cos(x) = -1|\psi(\vec{r})\rangle$

Kombinacja $|\psi(\vec{r})\rangle = cos(x) + sin(x)$ nie jest stanem własnym operatora P

Mamy również wielkości, które zmieniają znak pod wpływem operatora parzystości przestrzennej – pseudoskalary (zwykle iloczyny skalarne wektora i **pseudowektora**)



AGH

Niezachowanie parzystości przestrzennej w oddziaływaniach słabych

 \rightarrow Motywacja: tzw. "tajemnica $\tau - \theta$ ": $\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, $\theta^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$

ightarrow Badanie asymetrii przestrzennej w rozpadach ${}^{60}Co
ightarrow {}^{60}Ni + e^- + \overline{v}$





C.S. Wu et. al., Phys. Rev. 105, 1413 (1957)



$$I = 1 + \alpha \left(\frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}}{E} \right) = 1 + \alpha \frac{\nu}{c} \cos(\theta); \ \alpha = -1$$

Parzystość przestrzenna, P, jest maksymalnie (100%) łamana przez oddziaływania słabe! Nowa wersja tego eksperymentu wykorzystywana do poszukiwania Nowej Fizyki





Oddziaływania słabe łamią również maksymalnie symetrię ładunkową C Mimo tego, operacja kombinowana, CP, wydaje się być ściśle zachowana



 \rightarrow Późniejszy eksperyment pokazał, że również CP nie jest zachowane (układ $K^0 - \vec{K}^0$) Christensen, Cronin, Fitch and Turlay, 1964



Symetria względem operacji T jest również łamana - CPLEAR



AGH

 $K^0
ightarrow \overline{K}{}^0
eq \overline{K}{}^0
ightarrow K^0$ $A_T = (6.6 \pm 1.6) imes 10^{-3}$

Pozostaje jeszcze jedna symetria - CPT

→ Kwantowa teoria pola (dowolna), niezmiennicza względem tr. Lorentza powinna również być niezmiennicza względem tr. CPT

- \rightarrow Masy i czasy życia cząstek i antycząstek identyczne
- \rightarrow Te same wartości momentów magnetycznych
- ightarrow Najbardziej precyzyjny test tej symetrii: $\left|rac{(m_{K^0}-m_{ar{K}^0})}{m_{K^0}}
 ight|<10^{-18}$



Drzewa i pingwiny – Nowa Fizyka



AGH











Oddziaływania słabe jako <mark>jedyne</mark> (wg Modelu Standardowego) <mark>zmieniają</mark> zapach fermionów

W sektorze kwarkowym dominują tzw. przejścia naładowane:

 $L \propto U_i \gamma^{\mu} (1 - \gamma_5) V_{ij} D_j W_{\mu}$







Niezwykła idea – oddziaływania silne i słabe sprzęgają się do "innych" stanów – mieszanie kwarków

Cabbibo wprowadził macierz mieszania aby wyjaśnić różnice w częstościach rozpadów cząstek dziwnych

Niezachowanie dziwności w sektorze kwarkowym można opisać jednym parametrem – kąt mieszania

$$\theta_{c} = 13.1^{o}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_{L} = \begin{pmatrix} u \\ d\cos\theta_{c} + s\sin\theta_{c} \end{pmatrix}_{L}$$

$$d' = d\cos\theta_{c} + s\sin\theta_{c}$$

Używając tego formalizmu, można stwierdzić, że stany własne oddziaływań słabych są "obrócone" w stosunku do stanów własnych oddziaływań silnych



Teraz zyskaliśmy "słabą uniwersalność"



$$\Gamma\left(\mu^{-} \to e^{-} \overline{\nu}_{e} \nu_{\mu}\right) \propto g^{4}$$
$$\Gamma\left(n \to p e^{-} \overline{\nu}_{e}\right) \propto g^{4} \cos^{2} \theta_{c}$$
$$\Gamma\left(\Lambda^{0} \to p e^{-} \overline{\nu}_{e}\right) \propto g^{4} \sin^{2} \theta_{c}$$

Mechanizm Cabbibo działał świetnie z wyjątkiem jednego rozpadu...

$$K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



Mechanizm GIM (1970 Glashow, Iliopoulos and Maiani)



Aby wyjaśnić wszystkie obserwacje eksperymentalne model GIM wprowadził nowy typ kwarku - kilka lat przed jego odkryciem!

Liczymy, że pośrednie obserwacje dokonywane przez LHCb przyniosą podobny sukces

Pamiętamy również, że najpiękniejsza teoria może zostać zniszczona przez jedną obserwację doświadczalną



Macierz CKM niezwykle jest niezwykle intrygująca



$$\sum_{j} V_{ij} V_{jk}^* = \mathcal{S}_{ik}$$

$$\sum_{i=1}^{3} \left| V_{ij} \right|^{2} = 1 , \quad j = 1,2,3 \qquad \sum_{i=1}^{3} V_{ij} V_{ik}^{*} = 0 , \quad j,k = 1,2,3 , \quad j \neq k$$

$$V_{ud}V_{ub}^{*} + V_{cd}V_{cb}^{*} + V_{td}V_{tb}^{*} = 0$$

$$V_{us}V_{ub}^{*} + V_{cs}V_{cb}^{*} + V_{ts}V_{tb}^{*} = 0$$

$$V_{ud}V_{us}^{*} + V_{cd}V_{cs}^{*} + V_{td}V_{ts}^{*} = 0$$

$$V_{ud}V_{td}^{*} + V_{us}V_{ts}^{*} + V_{ub}V_{tb}^{*} = 0$$

$$V_{cd}V_{td}^{*} + V_{cs}V_{ts}^{*} + V_{cb}V_{tb}^{*} = 0$$

$$V_{ud}V_{cd}^{*} + V_{us}V_{cs}^{*} + V_{ub}V_{cb}^{*} = 0$$





A teraz pingwiny (i pętle), czyli jak poszukujemy nowej fizyki







A teraz pingwiny (i pętle), czyli jak poszukujemy nowej fizyki

 \rightarrow Szukamy procesu (ów), który nie powinien posiadać wkładu od NF

 \rightarrow Diagramy drzewkowe reprezentujące elektrosłabe prądy naładowane (dominujące w MS)

 \rightarrow Precyzyjny pomiar parametrów, które mogą zostać opisane teoretycznie

→ Teraz, musimy znaleźć procesy, które mogą zostać zmodyfikowane przez NF (np. wymiana nowych cząstek) – tłumione przejścia zmieniające zapach kwarków poprzez prądy neutralne – Flavor Changing Neutral Current (FCNC)

→ Precyzyjny pomiar odpowiednich parametrów

Procesy FCNC stanowią idealne laboratorium do poszukiwania NF

Zabronione na poziomie diagramów drzewkowych w MS, możliwe tylko jako przejścia wyższego rzędu – diagramy pętlowe





Teraz już naprawdę będą pingwiny...





Teraz już naprawdę będą pingwiny...





Teraz już naprawdę będą pingwiny...





Teraz już naprawdę będą pingwiny...







Bardzo obiecujący rozpad rzadki (BR ~ 10⁻⁶) $B_d \rightarrow K^{*0}(892)\mu^+\mu^-$

- \rightarrow Jeden z tzw. "złotych" kanałów eksperymentu LHCb
- $\rightarrow \text{Proces FCNC}$
- \rightarrow Przejście **b** \rightarrow **s**



- Stosunkowo skomplikowany stan końcowy (czterociałowy)
 - Bogata fenomenologia (duża liczba obserwabli)
- Ale, wszystkie cząstki naładowane wydajność detekcji
- Opis teoretyczny w oparciu o OPE (Operator Product Expansion)
 - Rozdziela efekty pochodzące od oddziaływań słabych i silnych







$$A(B \to f) = \langle f \left| \mathcal{H}_{eff}^{(bs)} \right| B \rangle = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_i V_{CKM}^i \mathcal{C}_i(\Lambda) \langle f | Q_i(\Lambda) | B \rangle$$





Analiza

 $\widetilde{\Gamma}_{\overline{B}^0_{\mathrm{d}}} = \frac{d\Gamma_{\overline{B}^0_{\mathrm{d}}}}{d\theta_I d\theta_K d\phi dq^2} \propto \sum_i I_i A_i$



 $\frac{d^2\Gamma}{dq^2d\cos\theta_l} = \frac{3}{8} \left[(1+\cos^2\theta_l)H_T(q^2) + 2\cos\theta_l H_A(q^2) + 2\sin^2\theta_l H_L(q^2) \right],$ $A_{FB}(q^2) = \frac{\int_0^1 d\cos\theta_l \frac{d^2\Gamma}{d\cos\theta_l dq^2} - \int_{-1}^0 d\cos\theta_l \frac{d^2\Gamma}{d\cos\theta_l dq^2}}{\int_{-1}^1 d\cos\theta_l \frac{d^2\Gamma}{d\cos\theta_l dq^2}}.$



Analiza

 $\widetilde{\Gamma}_{\overline{B}^0_{\mathrm{d}}} = \frac{d\Gamma_{\overline{B}^0_{\mathrm{d}}}}{d\theta_l d\theta_K d\phi dq^2} \propto \sum_i I_i A_i$



 $\frac{d^2\Gamma}{dq^2d\cos\theta_l} = \frac{3}{8} \left[(1+\cos^2\theta_l)H_T(q^2) + 2\cos\theta_l H_A(q^2) + 2\sin^2\theta_l H_L(q^2) \right],$







Przewidywania teoretyczne







 $egin{aligned} q^2(A_{FB}=0) &= 4.0 - 4.3\,{
m GeV^2}/{\it c^4} \ q^2(A_{FB}=0) &= 4.9\,\pm\,rac{1.1}{1.3}\,{
m GeV^2}/{\it c^4} \end{aligned}$

$$\Re \{ C_9^{eff} \} = -\frac{2\hat{m}_b}{\hat{s}_0} C_7^{eff} \frac{1-\hat{s}_0}{1+M_{K^\star}^2 - \hat{s}_0}.$$







Grupa Krakowska koordynuje prace związane z pomiarem asymetrii ładunkowej przód-tył A_{FB} przy pomocy metody Parzena

 \rightarrow Bezpośrednia rekonstrukcja kształtu rozkładu w postaci ciągłej funkcji

 \rightarrow Mniejsze niepewności związane z wyznaczeniem punktu zerowego asymetrii

$$f_n^{f/b} = \frac{1}{nh} \sum_{i/1}^{i/n} K\left(\frac{q_i^2 - q^2}{h}\right)$$







Podsumowanie

- Pierwsza część zbierania danych przez eksperyment zakończona w 2013
- Spektrometr działa bez zarzutul
- Pomiary wykonane przez LHCb wiądące pod względem precyzji
- Nowa Fizyka w pomiarach pośrednich
- Potencjalnie jedyny eksperyment mogący odkryć
 NF
- Grupa Krakowska jest w grzel













Operation conditions of the LHCb in 2012

- Beam energy = 4.0 [TeV] (15 % increase of the b-bbar x-section w.r.t. 2011)
- Keep the luminosity at L_{inst} = 4.0 x 10³² [cm⁻²s⁻¹]
- Average number of visible interactions per x-ing slightly higher μ = 1.6
- HLT (High Level Trigger) input ~ 1.0 MHz, output ~ 5 kHz (upgraded HLT farm and revisited code)
- Over 2 fb⁻¹ of p-p collision data recorded between 2010 and 2012







Operation conditions of the LHCb in 2012 • Beam energy = 4.0 [TeV] (15 % increase of the b-bbar x-section w.r.t. 2011) • Keep the luminosity at L_{inst} = 4.0 x 10³² [cm⁻²s⁻¹] • Average number of visible interactions per x-ing slightly higher μ = 1.6 • HLT (High L HLT farm and revisited LHCb Efficiency breakdown pp collisions 2010-2012 code) FULLY ON: 93.05 (%) Over 2 fb⁻¹ HV: 0.54 (%) VELO Safety: 0.85 (%) DAQ: 2.85 (%) Fill 2195 DeadTime: 2.88 (%) p collisions 2010-2012 Instantaneous Luminosity (ub⁻¹.s⁻¹) 3000 2500 2000 1500 0.8 1000 0.6 0.4 LHCb 500 0.2 0 🔽 01/04 01/05 31/05 30/06 30/07 28/10 27/11 27/12 0 Date 10h 13h 16h 19h 22h 01h 04h Date: 2011-10-08





The RUN I officially finished on 14/02/2013

LHCb spectrometer, in general, and the VELO in particular performed SUPERBLY

Both – the detector and its infrastructure were pushed to the limits surpassing any initial expectations

Will be back in 2015...





The VELO performance

- Basic requirements and design
- Signal and noise
- Time and spatial alignment
- Single hit resolution (spatial resolution)
- Vertex and IP resolutions
- Velo tomography with hadronic vertices
- Summary



Design and requirements

Base-line requirements

AGH

- extreme hadronic radiation environment due to VELO closeness to the beam
- first active strips at ~ 8 mm
- particle fluence of up to 5×10¹³ 1 MeV n_{eq}/cm² /1 fb⁻¹
- small material budget (sensor thickness 300 μ m)
- high intrinsinc spatial resolution (analogue readout & fine strip pitch: ~ 40 100 μ m)

What do we want from the VELO

- primary and secondary (displaced) vertex reconstruction
 - b- and c-hadrons lifetime measurement $O(10^{-12})$ s
 - impact parameter (IP) ~ mm
 - flight distance ~ cm
- vital part of the HLT (software High Level Trigger)









- Surrounds the LHCb luminous region
- Unique R- Φ geometry with floating 40–100 μm strip pitch
- Each module (R+Φ) mounted on carbon fiber support paddle
- Oxygenated n⁺-on-on sensors (one pair of n⁺-on-p)
- Optimized for
 - tracking of particles originating from beambeam interactions
 - fast 3D tracking done on-line







Signal and noise



AGH



Time and spatial alignment



- The purpose of the time alignment
 - Set the ADC sampling time (digitisation of the analogue signal)
 - Optimise S/N, minimise bunch cross-talk
- Spatial alignment

AGH

- Precise assembly
- Mechanical and optical survey
- Software alignment with tracks
- Closely monitored, stable over time






Single hit resolution



- Intrinsic spatial resolution
 - Combination of fine strip pitch and analogue read-out
 - Multi-strip clusters improves the resolution
- The resolution described in an abstract 2D parameter space
 - Projected angle (strip geometry), θ_p
 - Strip pitch, P
- <u>Best spatial resolution at the LHC ~ $4\mu m$ (for optimal P and θ_p)</u>





Vertex resolution

$$\sigma_{PV} \quad N = \frac{A_0}{N^{A_1}} + A_2$$



- Vertex resolution, $\sigma_{\text{PV}},$ parametrised as function of the number of track N
- Consistent with the design performance
- Some degradation observed as a function of pile-up (more than one PV per beam crossing)
- Performance for N=25
 - X/Y ~ 13 μm
 - Z ~ 69 μm









- Impact parameter (IP) is defined as a perpendicular distance between a particle's trajectory (track) and a fixed point in space (usually the PV)
- The IP resolution is driven by:
 - Single hit resolution
 - Distance between the PV and the first measurement
 - Multiple scattering
- $-\sigma_{IP} = 13.2 + 24.7/p_T \mu m$



LHCb VELO Preliminary



VELO imaging - tomography

LHCb VELO Preliminary



- VELO "tomography"
 - Use vertices from hadronic interaction with the detector material
 - Build the material map based on the vertices distribution
- Precise material description is vital for IP measurement





The VELO performance - Summary

- Great overall performace of the VELO in 2010 2012
 S/N ~ 18
- Best spatial resolution ~ 4 µm
- Impact parameter resolution σ_{IP} = 13.2 + 24.7/p_T μ m
- PV resolutions: $\sigma_{Ip(x,y)} = 13 \ \mu m$, $\sigma_{Ip(z)} = 69 \ \mu m$





Radiation hardness of the VELO

- Study of leakage current vs. temperature (IT scan)
- Effective depletion voltage (EDV)
- Cluster finding efficiency measurement
- Second metal layer effect





front-end



AGH

IT scans



- Bulk and surface currents
 - Bulk or surface dominated sensor are present
- Influence of the surface component after irradiation is negligible
- Fitting the data points with the exponential model allows to measure the effective band gap E_g





Currents evolution



- Bulk current increase with fluence, i.e., delivered luminosity
- Trend plot (current as a function on time)
- The mean value of bulk current follows the MC predictions
- The leakage current vs. sensor coordinate along the beam line
 - Scaled to the common temp. 21° C
 - Good agreement with the simulation



- Type inversion expected for n+-on-n
- Initial drop of the V_{FD} for n+-on-p sensors followed by increase
- C-V scans used to perform the initial measurements for the VELO during the detector assembly
- Once the system is operational this cannot be repeated
- Alternative method is needed







- "Unbiased" information using tracks
 - exclude tested sensors from the track fit
 - perform the voltage scan (0 150 V) for them
 - measure the charge deposited within a window around the track intercept
- Plot the MPV value of the fitted Landau vs. bias voltage



Charge collection efficiency (CCE)



- Initial decrease of the V_{FD} with delivered luminosity confirmed!
- Inner part of the VELO sensors (low radius) is type inverted
- The minimal value of the $V_{FD} \sim 20 V$
- Inversion at ~ 10 15 \times 10 12 $\rm n_{ea}$

AGH

- Is the Hamburg model valid? Let's compare!



Charge collection efficiency (CCE)



- Comparison with the Hamburg model for different voltages
- Reasonably good agreement with the model

AGH

- A significant departure from what the model predicts only around inversion point

- But this is hard to measure - need a sufficient electric field to collect the charge





Cluster finding efficiency (CFE)



- It was found that R-type sensors show drop in CFE that depends on their position w.r.t the interaction point

- No significant effect related to Φ -type ones
- This is quite unexpected
- A detailed investigation has been performed...





Cluster finding efficiency (CFE)



- A detailed analysis for a selected downstream R-type sensor (#34) with large amount of data performed

- Effect depends on delivered luminosity
- Increasing the bias voltage did not help on the contrary it made things worse
- This was also unexpected...







Y/mm

Second metal layer effect

- An interesting observation has been made during the analysis
- CFE drops as a function of fluence
 - The outer radial region suffers the most
 - Looks like high CFE is preserved if no routing lines are present









- 1st metal layer coupled to the strips, 2nd metal layer transport signals to the FE

- Different strip geometries routing lines are
 - perpendicular to strips in R-type sensors
 - parallel to strips in Φ -type sensors
- Charge can capacitively couple to routing lines in R-type sensors
- Fake cluster generation (see next slide) and CFE drop







Second metal layer effect



CFE is worst when a hit is far from strips and close to routing lines
This is clearly visible when plotting the 'raw signal'
Fortunately this is no correlation between sensors, thus, no visible effect observed for 'clusters on track'





Radiation hardness of the VELO Summary

• A number of analyses ongoing to monitor and study radiation damage effects for the LHCb VELO

Changes in EDV follow the expectations

 Drop in CFE due to second metal layer effect observed for R-type sensors

No visible degradation in tracking performance though

• A paper regarding these studies sent out for publication







Physics motivation for the LHCb experiment

- study flavour changing and CP violating processes in b- and c-quark sector
- search for New Physics signatures therein

Indirect approach (or probing intensity frontier) complementary to Atlas and CMS

- study higher order box or penguin processes (i.e., that proceed via loop diagrams)
- highly sensitive to new states that can appear at high mass scale
- strongly suppressed (and well predicted) in the SM

Perform precise measurements and look for deviations w.r.t. the theory





AG



The LHCb is a forward spectrometer, angular acceptance 15 - 300 (250) mrad or in other 'pseudo-rapidity language' $\eta = 1.9 - 4.9$

Must provide: excellent position, vertex and momentum resolution & PID

A forward spectrometer is sufficient for the LHCb physics programme since produced b-bbar pairs are strongly correlated and forward peaked







Operation conditions of the LHCb in 2012

- Beam energy \sqrt{s} = 4.0 [TeV] (15 % increase of the b-barb x-section)
- Keep the luminosity at $L_{inst} = 4.0 \times 10^{32} [cm^{-2}s^{-1}]$ for this year
- Average number of visible interactions per x-ing slightly higher μ = 1.6
- Keep high data taking efficiency and quality
- HLT (High Level Trigger) input ~ 1.0 MHz, output ~ 5 kHz (upgraded HLT farm and revisited code)
- Expecting ~ 1.5 fb-1 of recorded data by the end of the year





28/10

27/11

27/12

Date





Time alignment



- Proper setting of the timing and gain are critical for:
 - Cross-talk effects between channels in the same link
 - Uniformity of pedestals and noise
 - Calibration of the signal levels measured
- Vital for setting the timing of the pulse sampling with respect to the LHC beam





Spatial alignment



- Very tight requirements on the VELO alignment
 - Intrinsic hit resolution
 - Impact parameter
 - Decay time resolution
- VELO halves are inserted and centred on the beams for each fill
 - Closing procedure is fully automated
- On-line update of the alignment parameters for the HLT
- Stability evaluated by fitting the PV for each half separately





Survey



















- The overall alignment depends on
 - Precise assembly
 - Mechanical and optical survey
 - Software alignment with tracks

Spatial alignment



- Software based alignment
- Track residuals based
 - Relative sensor alignment
 - Relative alignment of the modules
 - VELO halves alignment
- Sensor misalignment is of the order of 4 μm



