Meritev parametra kršitve simetrije *CP* ($\mathcal{A}_{\mathrm{CP}}$) pri šibkih razpadih barionov Λ_c z detektorjem Belle

Peter Smerkol

Institut Jožef Stefan

Predstavitev doktorskega dela
22.2.2013

Potek

- Uvod
- Eksperiment
- Metoda meritve
- Razvoj metode na simuliranih podatkih
- Analiza izmerjenih podatkov
- Sistematska negotovost
- Povzetek

Kršitev simetrije CP:

- Kršitev simetrije CP ključna pri razlagi asimetrije med snovjo in antisnovjo v vesolju.
- Opis v Standardnem Modelu $\rightarrow$ mehanizem Kobayashi-Maskawa, ne pojasni celotne izmerjene asimetrije.
  $\rightarrow$ iskanje novih izvorov kršitve simetrije CP.

Iskanje kršitve simetrije CP v razpadih čarobnih barionov:

- Kršitev še ni bila opažena v razpadih barionov,
- V razpadih delcev z čarobnim kvarkom je kršitev simetrije CP majhna $\rightarrow$ izmerjena kršitev nad $\mathcal{O}(10^{-3})$ jasen znak fizike izven SM.

Uvod

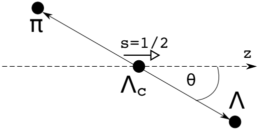
Razpad bariona z spinom 1/2 v barion z spinom 1/2 in mezon z spinom 0 ($B \to B'M$)

Amplitudi za razpad in CP konjugirani razpad:

$$\begin{aligned} A(B \to B'M) &= \overline{u_{B'}}(p_{B'}, s_{B'})[A_S - \gamma_5 A_P]u_B(p_B, s_B) \\ A(\overline{B} \to \overline{B}'\overline{M}) &= \overline{u_{B'}}(p_{B'}, s_{B'})[A_S + \gamma_5 A_P]u_B(p_B, s_B) \end{aligned}$$

Kotna porazdelitev razpadnih produktov (iz vzorca s polarizacijo P_B):

$$\begin{aligned} \frac{dN}{d\cos\theta} &= \frac{N}{2}(1 + P_B \alpha_B \cos\theta) \\ \frac{d\overline{N}}{d\cos\theta} &= \frac{\overline{N}}{2}(1 - P_{\overline{B}} \alpha_{\overline{B}} \cos\theta) \end{aligned}$$



$\alpha_B, \alpha_{\overline{B}}$ - parametra kršitve simetrije P (operator zrcaljenja prostora)

Če kršitve simetrije CP ni, velja $\alpha_B = -\alpha_{\overline{B}} \Longrightarrow$ Asimetrija, ki meri kršitev simetrije CP v razpadu:

$$\mathcal{A}^B_{\mathrm{CP}} = \frac{\alpha_B + \alpha_{\overline{B}}}{\alpha_B - \alpha_{\overline{B}}}$$

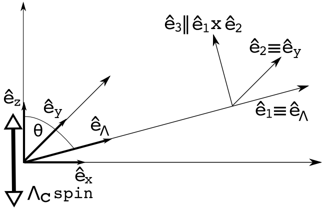
Uvod

Razpadna veriga $\Lambda_c \to \Lambda\pi$, $\Lambda \to p\pi$

Veriga dveh razpadov, opisanih zgoraj. Kotna porazdelitev razpadnih produktov zapisana v pravem sistemu neodvisna od polarizacije:

$$\frac{dN}{d\cos\vartheta_1} = \frac{N}{2}(1 + \alpha_{\Lambda_c}\alpha_\Lambda \cos\vartheta_1), \quad \cos\vartheta_1 = \hat{e}_p \cdot \hat{e}_1,$$

Smer $\hat{e}_1$ definirana za vsak razpad posebej v t.i. emisijskem sistemu Λ. Smer $\hat{e}_p$ smer emisije protona v težiščnem sistemu Λ.



Asimetrija, ki meri kršitev simetrije CP v celotni razpadni verigi:

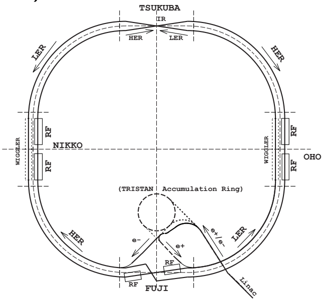
$$\mathcal{A}_{\text{CP}} = \frac{\alpha_\Lambda\alpha_{\Lambda_c} - \alpha_{\overline{\Lambda}}\alpha_{\overline{\Lambda}_c}}{\alpha_\Lambda\alpha_{\Lambda_c} + \alpha_{\overline{\Lambda}}\alpha_{\overline{\Lambda}_c}}$$

α_Λ že izmerjen $\to$ določimo $\mathcal{A}^{\Lambda_c}_{\text{CP}} = \frac{\alpha_{\Lambda_c} + \alpha_{\overline{\Lambda}_c}}{\alpha_{\Lambda_c} - \alpha_{\overline{\Lambda}_c}}$.

Eksperiment

Trkalnik KEKB

Trkalnik e^+ in e^-, energiji 8.0 GeV in 3.5 GeV $\rightarrow$
težiščna energija 10.58 GeV, masa $\Upsilon(4S)$



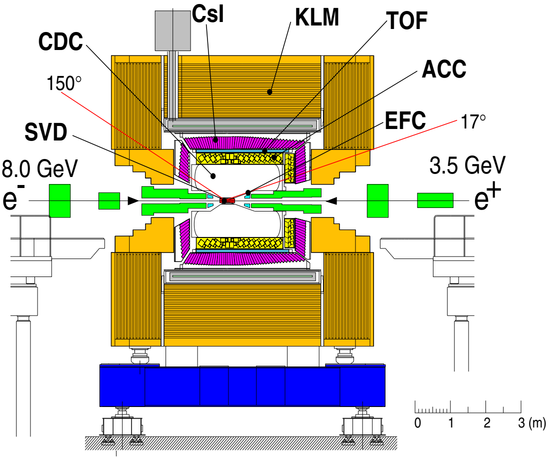
Procesi pri trkih:

- $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\overline{B}$
- $e^+e^- \rightarrow q\overline{q}, q = u, d, s, c$
- Bhabha sipanje, dvofotonski procesi, τ produkcija,...

Velika luminoznost $\rightarrow$ veliko število zaznanih razpadov mezonov B ($\sim 10^9$), čarobnih hadronov ($\sim 10^9$), ...
Detektor Belle postavljen okoli točke križanja žarkov (interakcijske točke)

Eksperiment

Detektor Belle



Detektorski moduli s specifičnimi nalogami: meritve končnih produktov vseh razpadov $(e, \mu, \pi, K, p, \gamma)$:

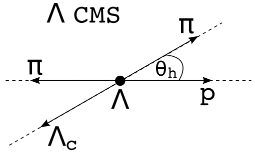
- identifikacija,
- merjenje gibalne količine,
- merjenje energije.

Metoda meritve

$\langle\alpha\rangle$

Meritev $\alpha = \alpha_\Lambda \alpha_{\Lambda_c} \rightarrow$ meritev porazdelitve:

$$\frac{dN}{dcos\theta_h} = \frac{N}{2}(1 + \alpha \cos\theta_h)$$



θ_h - kot med smerema gibalnih količin protona in piona iz Λ_c v težiščnem sistemu Λ, enak kotu ϑ_1.

Predpostavka: kršitev simetrije *CP* majhna ($\alpha \approx \overline{\alpha} = \langle\alpha\rangle, d\alpha << \langle\alpha\rangle$) $\rightarrow$ združimo vzorca za Λ_c^+ in $\overline{\Lambda}_c^-$, izmerimo $\langle\alpha\rangle$:

- Razdelimo vzorec v intervale $cos\theta_h$,
- določimo število signalnih dogodkov s prilagajanjem na porazdelitve po invariantni masi Λ_c^+ in $\overline{\Lambda}_c^-$,
- določimo $\langle\alpha\rangle$ s prilagajanjem linearne funkcije na porazdelitev dogodkov po intervalih v $cos\theta_h$.

Metoda meritve

$\langle\alpha\rangle$

Število rekonstruiranih dogodkov v določenem intervalu $cos\theta_h$:

$$\begin{aligned} N_i^{rec,join}(\cos\theta_{h,i}) &= N_i^{0,join}(\cos\theta_{h,i}) \cdot \\ & Br(\Lambda_c \to \Lambda\pi)(\cos\theta_{h,i}) Br(\Lambda \to p\pi)(\cos\theta_{h,i}) \cdot \\ & \langle\varepsilon\rangle_i(\cos\theta_{h,i}) \end{aligned}$$

- Kotna odvisnost razvejitvenih razmerij določena prej:

$$Br(\Lambda_c \to \Lambda\pi)(\cos\theta_{h,i}) Br(\Lambda \to p\pi)(\cos\theta_{h,i}) = Br^0 \frac{1}{2}(1 + \langle\alpha\rangle \cos\theta_{h,i}),$$

- $N_i^{0,join}(\cos\theta_{h,i})$ kotna odvisnost - asimetrija v produkciji delcev in antidelcev, ker združimo vzorec $\to N_i^{0,join}(\cos\theta_{h,i}) = N_i^{0,join}$

Za $\langle\alpha\rangle$ potrebno določiti tudi odvisnost $\langle\varepsilon\rangle_i(\cos\theta_{h,i})$ - MC simulacija.
Potrebno upoštevati resolucijo meritve detektorja - dogodki padejo v drug interval $cos\theta_h \to$ dekonvolucija.

Metoda meritve

$\mathcal{A}_{\text{CP}}$

Vzorca Λ_c^+ in Λ_c^- ločimo, v intervalih $cos\theta_h$ s prilagajanjem na porazdelitev po masi določimo števila signalnih dogodkov:

$$\begin{aligned} N_i^{rec}(\cos\theta_{h,i}) &= N^0(\cos\theta_{h,i})Br^0\frac{1}{2}(1+\alpha\cos\theta_{h,i})\varepsilon_i(\cos\theta_{h,i}), \\ \overline{N}_i^{rec}(\cos\theta_{h,i}) &= \overline{N}^0(\cos\theta_{h,i})Br^0\frac{1}{2}(1+\overline{\alpha}\cos\theta_{h,i})\overline{\varepsilon}_i(\cos\theta_{h,i}). \end{aligned}$$

Izračunamo rekonstruirano asimetrijo v vsakem intervalu $cos\theta_h$:

$$\mathcal{A}_i^{rec}(\cos\theta_{h,i}) = \frac{N_i^{rec}(\cos\theta_{h,i}) - \overline{N}_i^{rec}(\cos\theta_{h,i})}{N_i^{rec}(\cos\theta_{h,i}) + \overline{N}_i^{rec}(\cos\theta_{h,i})},$$

Predpostavimo majhno kršitev simetrije CP, majhno asimetrijo naprej-nazaj in majhno razliko v izkoristku rekonstrukcije Λ_c^+ in Λ_c^-:

$$dN_i^0 \ll \langle N^0 \rangle_i, \quad d\alpha \ll \langle \alpha \rangle, \quad d\varepsilon_i \ll \langle \varepsilon \rangle_i.$$

Do 1. reda:

$$\mathcal{A}_i^{rec}(\cos\theta_{h,i}) = \mathcal{A}_i^{FB}(\cos\theta_{h,i}) + \mathcal{A}_i^{\varepsilon}(\cos\theta_{h,i}) + \mathcal{A}_{\mathrm{CP}}\frac{\cos\theta_{h,i}}{1+\langle\alpha\rangle\cos\theta_{h,i}}$$

$$\mathcal{A}_i^{FB} = \frac{N_i^0 - \overline{N}_i^0}{N_i^0 + \overline{N}_i^0}, \quad \mathcal{A}_i^{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_i - \overline{\varepsilon}_i}{\varepsilon_i + \overline{\varepsilon}_i}, \quad \mathcal{A}_{\mathrm{CP}} = \frac{\alpha - \overline{\alpha}}{\alpha + \overline{\alpha}}.$$

- $\mathcal{A}^{FB}$ antisimetrična funkcija polarnega kota θ^* v težiščnem sistemu e^+e^-
- $\mathcal{A}^{\varepsilon}$ lahko odvisna od polarnega kota θ v laboratorijskem sistemu zaradi geometrije detektorja

Predpostavka: odvisnosti se izpovprečita, ker θ_h nekoreliran z θ^* in θ $\rightarrow$ edina kotna odvisnost zaradi $\mathcal{A}_{\mathrm{CP}}$ - lahko določimo s prilagajanjem funkcije $f(x) = k + \mathcal{A}_{\mathrm{CP}}(x/(1+\langle\alpha\rangle x))$.

Razvoj metode na simuliranih podatkih

Rekonstrukcija razpadne verige Λ_c

Rekonstrukcija:

- preselekcija HadronB - zavrže nehadronske dogodke,
- identifikacija π^+, π^-, p^+, p^-,
- kombiniranje p in π v Λ, kombiniranje Λ in π v Λ_c,
- prilagajanje sledi v skupni verteks, izberemo kandidata z najboljšo stopnjo zaupanja prilagajanja.

Selekcija večjega vzorca - selekcijski kriteriji:

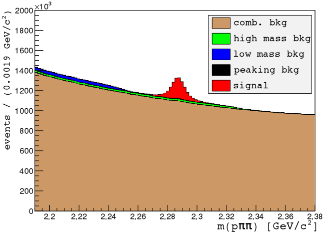
selekcijska spremenljivka	vrednost
$R_{\pi/K}$, $R_{\pi/p}$, $R_{p/K}$, $R_{p/\pi}$	≥ 0.6
$R_{\pi/e}$, $R_{\pi/\mu}$	≤ 0.9
$m(p\pi)$	≥ 1.10 GeV/c^2, ≤ 1.13 GeV/c^2
$m(p\pi\pi)$	≥ 2.19 GeV/c^2, ≤ 2.38 GeV/c^2
$p_{CMS}(\Lambda_c)$	≥ 1.5 GeV/c

Razvoj metode na simuliranih podatkih

Primerjava med simulacijo in merjenimi podatki - skaliranje

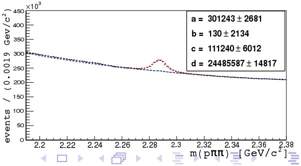
Večji vzorec razdelimo porazdelitev po masi Λ_c glede na izvor:

- signal,
- ozadje z obliko signala - $\Lambda_c \to f_0 p$, $\Lambda_c \to K^0 p$, $\Lambda_c \to p\pi\pi$,
- ozadje z nižjo maso - $\Sigma^0 \to \Lambda\gamma$, $\Lambda \to p\pi$,
- ozadje z višjo maso - razpadi Ξ_c barionov,
- kombinatorno ozadje - naključne kombinacije končnih produktov.



Primerjava z pravimi podatki: tvorimo verjetnostne gostote, pomnožene z prostimi parametri, prilagajamo na merjene podatke:

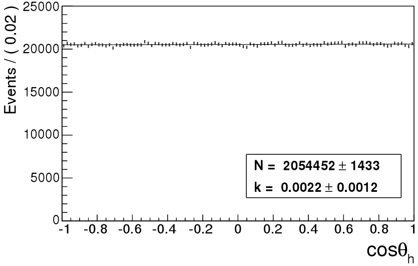
tip prispevka	koeficient skaliranja
signal	1.090 ± 0.010
oz. z nižjo maso	0.726 ± 0.039
oz. z višjo maso	0.000 ± 0.009
komb. oz.	1.330 ± 0.001

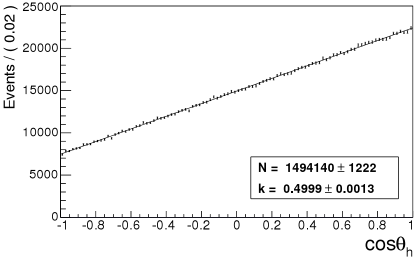


Razvoj metode na simuliranih podatkih

Primerjava med simulacijo in merjenimi podatki - preuteževanje

Linearna kotna odvisnost $cos\theta_h$ ni simulirana $\rightarrow$ preutežimo z naključnim odvzemanjem dogodkov $\rightarrow$ dobimo linearno odvisnost s koeficientom $\alpha = 0.5$.





Po skaliranju in preuteževanju ostane v simulaciji ekvivalent štirikratni količini pravih podatkov.

Razvoj metode na simuliranih podatkih

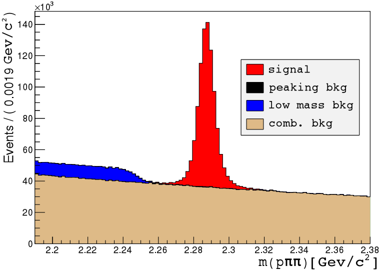
Konstrukcija analiznega vzorca

Optimizacija selekcijskih kriterijev → za vsak kriterij določimo maksimum funkcije

$$FOM = \varepsilon \cdot P, \quad \varepsilon = \frac{N^{rec}_{sig}}{N^{0}_{sig}}, \quad P = \frac{N^{rec}_{sig}}{N^{rec}_{all}}$$

Taka vrsta optimizacije nam da največjo signifikanco signala $N^{rec}_{sig}/\sigma_{N^{rec}_{sig}}$.

selekcijska spremenljivka	vrednost
$R_{\pi/K}$, $R_{\pi/p}$ (oba piona)	≥ 0.6
$R_{\pi/e}$, $R_{\pi/\mu}$ (oba piona)	≤ 0.9
$R_{p/K}$, $R_{p/\pi}$	≥ 0.6
$p\pi$, $p\pi\pi$ st. zaupanja	$\geq 10^{-3}$
$m(p\pi)$	≥ 1.1126 GeV/c^2, ≤ 1.1186 GeV/c^2
$m(p\pi\pi)$	≥ 2.19 GeV/c^2, ≤ 2.38 GeV/c^2
$p_{CMS}(\Lambda_c)$	≥ 2.2 GeV/c



- $cos\theta_h$ interval razdelimo na 10 enako širokih intervalov,
- določimo porazdelitev po invariantni masi Λ_c v vsakem intervalu,
- s prilagajanjem določimo funkcijo iz katere izračunamo število signalnih dogodkov.

Za vsak interval enak funkcijski model z naborom prostih parametrov, normiran na celotno število dogodkov:

$$M(x;\vec{p}) = \sum_i N_i M_i(x;\vec{p}_i), \quad \int M(x;\vec{p})dx \equiv N_{exp}(\vec{p}).$$

Model prilagajamo na vse intervale istočasno z minimiziranjem funkcije

$$-lnL(\vec{p}) = -\sum_{j=1}^{N_{bin}=10} \sum_{H_j(x_i)} M(x_i;\vec{p}_j) - Poisson(N_{obs}| \sum_{j=1}^{N_{bin}=10} N_{exp,j}(\vec{p}_j)),$$

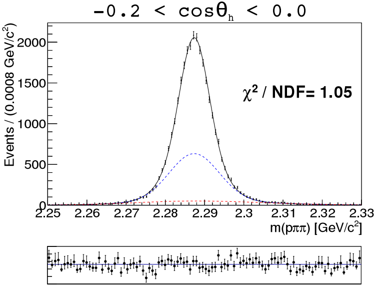
Razvoj metode na simuliranih podatkih

Prilagajanje na signalne dogodke

Model: dve Gaussovi funkciji in ena asimetrična Gaussova funkcija:

$$M_S(m_{p\pi\pi};\vec{p}) = \sum_{i=1}^{N_{bin}=10} N_{1,i}\Big[G(m_{p\pi\pi};m_i,\sigma_{1,i}) + n_{12}G(m_{p\pi\pi};m_i,s_{12}\sigma_{1,i}) + n_{13}AG(m_{p\pi\pi};m_i,s_{13l}\sigma_{1,i},s_{13r}\sigma_{1,i})\Big]$$

parameter	vrednost
n_{12}	0.710 ± 0.060
n_{13}	0.156 ± 0.010
s_{12}	1.741 ± 0.018
s_{13l}	4.008 ± 0.056
s_{13r}	4.856 ± 0.071



Razvoj metode na simuliranih podatkih

Prilagajanje na vse dogodke

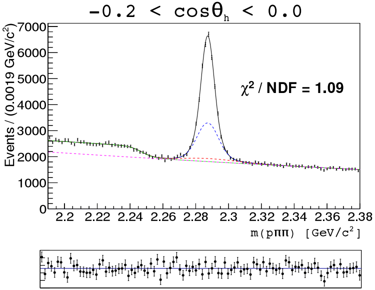
Model: model za signalne dogodke s nekaterimi parametri fiksiranimi, sigmoidna funkcija in polinom Čebiševa 2. stopnje:

$$M_G(m_{p\pi\pi};\vec{p}) = \sum_{i=1}^{N_{bin}=10} \left[M_S(m_{p\pi\pi};\vec{p}) + N_{b1,i} S(m_{p\pi\pi}; m_b, w_b) + N_{b2,i} CH(m_{p\pi\pi}; c_1, c_2) \right]$$

Števila signalnih dogodkov in napake določimo po

$$R_i = N_{1,i}(1 + n_{12} + n_{13}), \quad \sigma_{R_i} = \sigma_{N_{1,i}}(1 + n_{12} + n_{13})$$

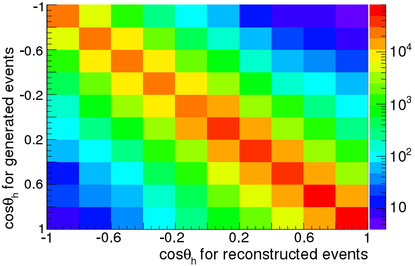
interval	R_i
0	16181 ± 242
1	19446 ± 250
2	22676 ± 259
3	26263 ± 266
4	30653 ± 280
5	34972 ± 291
6	37750 ± 296
7	42074 ± 302
8	46803 ± 310
9	51212 ± 310

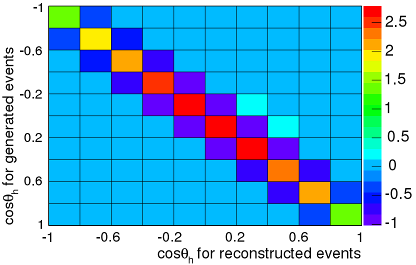


Razvoj metode na simuliranih podatkih

Dekonvolucija

Končna resolucija meritve $cos\theta_h \rightarrow$ prava porazdelitev konvoluirana z resolucijsko funkcijo $\rightarrow$ potrebna dekonvolucija.
Resolucijska matrika (M_{ij}) - 2D razdelki po rekonstruirani in pravi vrednosti $cos\theta_h \rightarrow$ invertiramo $\rightarrow$ dekonvolucijska matrika (q_{ij}).



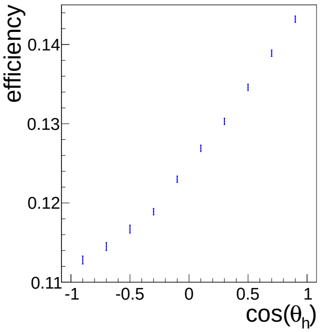


Razvoj metode na simuliranih podatkih

Kotna odvisnost izkoristka rekonstrukcije

Določimo za vsak interval $cos\theta_h$, napaka Poissonska:

$$\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{N_{R,i}}{N_{G,i}}, \quad \sigma_{\langle \varepsilon \rangle_i} = \sqrt{\frac{N_{R,i}(N_{G,i} + N_{R,i})}{N_{G,i}^3}}.$$

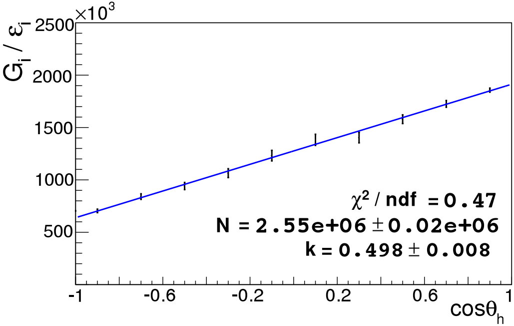


interval	$\langle \varepsilon \rangle$
0	0.1128±0.0005
1	0.1145±0.0005
2	0.1167±0.0005
3	0.1189±0.0004
4	0.1230±0.0004
5	0.1269±0.0004
6	0.1303±0.0004
7	0.1346±0.0004
8	0.1389±0.0004
9	0.1432±0.0004

Razvoj metode na simuliranih podatkih

Določanje $\langle\alpha\rangle$

Prilagajamo funkcijo $f(x;N,\langle\alpha\rangle)=\frac{1}{2}N(1+\langle\alpha\rangle x)$ na porazdelitev $T_i=G_i/\langle\varepsilon\rangle_i$ po $\cos\theta_h$.



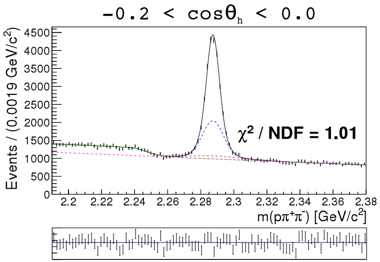
Primerjava rezultata z generirano vrednostjo:

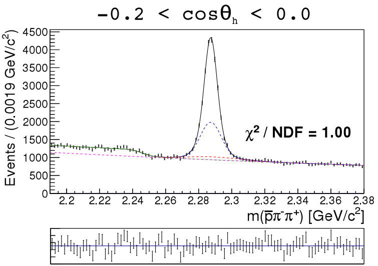
$$\langle\alpha\rangle_{rec}=0.498\pm0.008,\quad \langle\alpha\rangle_{gen}=0.501\pm0.001.$$

Razvoj metode na simuliranih podatkih

Določanje $\mathcal{A}_{\mathrm{CP}}$

- Ločimo vzorca za Λ_c^+ in $\overline{\Lambda}_c^-$,
- prilagajamo vzorca, model enak kot za skupni vzorec, fiksirane vrednosti določene na signalnih dogodkih,
- dekonvoluiramo števila dogodkov s prej določeno dekonvolucijsko matriko.

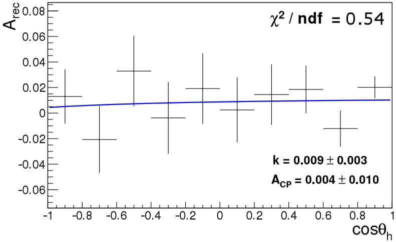




Razvoj metode na simuliranih podatkih

Določanje $\mathcal{A}_{\mathrm{CP}}$

Za vsak interval določimo rekonstruirano asimetrijo $\mathcal{A}^i_{rec} = \frac{G_i - \overline{G}_i}{G_i + \overline{G}_i}$.
Prilagajamo funkcijo $g(x; k, \mathcal{A}_{\mathrm{CP}}) = k + \mathcal{A}_{\mathrm{CP}} \frac{x}{1 + \langle\alpha\rangle x}$ na porazdelitev $\mathcal{A}^i_{rec}$ po $\cos\theta_h$.



Primerjava rezultata z generirano vrednostjo:

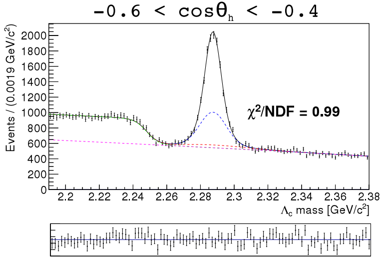
$$\mathcal{A}^{rec}_{\mathrm{CP}} = 0.004 \pm 0.010, \quad \mathcal{A}^{gen}_{\mathrm{CP}} = -0.003 \pm 0.003.$$

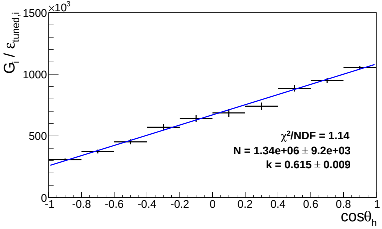
Pričakovana stat. napaka: $\sim$0.014 $\rightarrow$ metoda z zanesljivostjo, boljšo od stat. napake, ne kaže pristranskosti.

Analiza izmerjenih podatkov

Rezultat za $\langle\alpha\rangle$

Enak postopek kot pri simulaciji (prilagajanje na maso Λ_c, dekonvolucija, prilagajanje linearne funkcije na porazdelitev dekonvoluiranih števil dogodkov, popravljenih z izkoristkom rekonstrukcije).

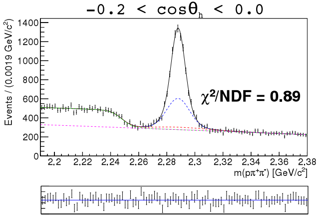


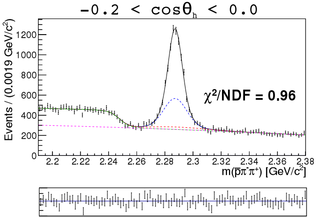


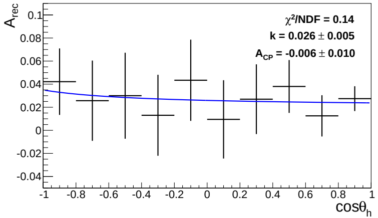
Rezultat:

$$\langle\alpha\rangle = 0.615 \pm 0.009$$

Enak postopek kot pri simulaciji (prilagajanje na maso Λ_c^+ in Λ_c^-), dekonvolucija, prilagajanje funkcije $g(x)$ na porazdelitev rekonstruirane asimetrije po $cos\theta_h$).







Rezultat:

$$\mathcal{A}_{\mathrm{CP}} = -0.006 \pm 0.010,$$

Uporabimo svetovni povprečji za parametra α_Λ in $\mathcal{A}_{\mathrm{CP}}^{\Lambda}$ [1]:

$$\alpha_\Lambda = 0.642 \pm 0.013, \quad \mathcal{A}_{\mathrm{CP}}^{\Lambda} = 0.006 \pm 0.021.$$

ter upoštevamo enačbi

$$|\langle \alpha_{\Lambda_c} \rangle| = |\frac{\langle \alpha \rangle}{\alpha_\Lambda}(1 + \mathcal{A}_{\mathrm{CP}}^{\Lambda})|, \quad \mathcal{A}_{\mathrm{CP}}^{\Lambda_c} = \frac{\mathcal{A}_{\mathrm{CP}} - \mathcal{A}_{\mathrm{CP}}^{\Lambda}}{1 - \mathcal{A}_{\mathrm{CP}}\mathcal{A}_{\mathrm{CP}}^{\Lambda}}.$$

Rezultata:

$$|\langle \alpha_{\Lambda_c} \rangle| = 0.964 \pm 0.014(\mathrm{stat.}) \pm 0.020(\alpha_\Lambda) \pm 0.020(\mathcal{A}_{\mathrm{CP}}^{\Lambda}) = 0.964 \pm 0.032,$$

$$\mathcal{A}_{\mathrm{CP}}^{\Lambda_c} = -0.012 \pm 0.010(\mathrm{stat.}) \pm 0.021(\mathcal{A}_{\mathrm{CP}}^{\Lambda}) = -0.012 \pm 0.023.$$

[1] Beringer J. *et al.*: *Review of Particle Physics, Phys..Rev. D86 (2012)*

Sistematska negotovost

Izvori

- Negotovost pri rekonstrukciji sledi ($0.35\%/sled$). Pri meritvi $\mathcal{A}_{\mathrm{CP}}$ se pokrajša.
- Končno število dogodkov pri dekonvolucijski matriki. Določimo z MC simulacijo.
- Nezanesljivost parametrov, ki so fiksirani v modelu za prilagajanje; določimo z MC simulacijo.
- Zanemaritev ozadja z enako obliko kot signal. Ocenimo tako, da to ozadje izpustimo in ponovno izračunamo rezultate.
- Predpostavka, da asimetrija naprej-nazaj ni funkcija $cos\theta_h$. Ocenimo z MC simulacijo. Pride v poštev samo za $\mathcal{A}_{\mathrm{CP}}$.
- Predpostavka, da asimetrija zaradi rekonstrukcije delcev in antidelcev ni funkcija $cos\theta_h$. Ocenimo z ponovitvijo analize za razpadno verigo $\Sigma^* \to \Lambda\pi, \Lambda \to p\pi$, kjer je to edina možna asimetrija. Pride v poštev samo za $\mathcal{A}_{\mathrm{CP}}$.

Sistematska negotovost

Povzetek

izvor	$\sigma^{syst}_{\langle\alpha\rangle}$	$\sigma^{syst}_{\mathcal{A}_{\mathrm{CP}}}$
nabite sledi	0.011	n.a.
dekonvolucija	0.001	zanemarljivo
fiksirani par.	0.003	0.001
ozadje z enako porazd.	zanemarljivo	zanemarljivo
$\mathcal{A}_{FB}$	n.a.	0.004
$\mathcal{A}_{\varepsilon}$	n.a.	0.002
vsota	0.011	0.005

Povzetek

Izmerili smo $\langle\alpha_{\Lambda_c}\rangle$ in $\mathcal{A}_{\mathsf{CP}}^{\Lambda_c}$ za razpad $\Lambda_c \to \Lambda\pi$.

$$
\begin{aligned}
|\langle\alpha_{\Lambda_c}\rangle| &= 0.964 \pm 0.014(\mathrm{stat.}) \pm 0.020(\alpha_\Lambda) \pm 0.020(\mathcal{A}_{\mathsf{CP}}^{\Lambda}) \pm 0.017(\mathrm{syst.}) \\
\mathcal{A}_{\mathsf{CP}}^{\Lambda_c} &= -0.012 \pm 0.010(\mathrm{stat.}) \pm 0.021(\mathcal{A}_{\mathsf{CP}}^{\Lambda}) \pm 0.005(\mathrm{syst.}).
\end{aligned}
$$

Izmerjena vrednost se ujema z dosedanjimi meritvami in je za red velikosti natančnejša od teh. Rezultati ne kažejo na signifikantno kršitev simetrije CP velikostnega reda $\mathcal{O}(10^{-2})$.

BACKUP

Kotna odvisnost razpadnih produktov za $B \to B'M$

Šibek razpad, parnost ni ohranjena.
Za vzorec z $P_B = 1$ (spin gor), ima končno stanje lahko $l = 0$ (S) ali $l = 1$ (P)
Dovoljena končna stanja (zaradi ohranitve vrtilne količine):

$$\begin{aligned}
\psi_1 &= A_S Y_0^0 s_{1/2} = A_S \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \\
\psi_2 &= -A_P(-\sqrt{\frac{1}{3}}) Y_0^1 s_{1/2} = -A_P(-\sqrt{\frac{1}{3}})(\sqrt{3}\cos\theta) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \\
\psi_3 &= -A_P(\sqrt{\frac{2}{3}}) Y_1^1 s_{-1/2} = -A_P(\sqrt{\frac{2}{3}})(-\sqrt{\frac{3}{2}}\sin\theta e^{i\varphi}) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Končno stanje superpozicija:

$$\psi_f = \psi_1 + \psi_2 + \psi_3 = (A_S + A_P\cos\theta) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + (A_P e^{i\varphi}\sin\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Kotna porazdelitev:

$$\frac{dN}{d\cos\theta} = \psi_f^* \psi_f = 1 + \alpha_{\Lambda_c}\cos\theta, \quad \alpha_{\Lambda_c} = \frac{2Re(A_S^* A_P)}{|A_S|^2 + |A_P|^2}$$

Funkcije pri prilagajanju - podrobno

$$
\begin{aligned}
G(x; m, \sigma) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right], \\
AG(x; m, \sigma_l, \sigma_r) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_l}(1-\theta(x-m))exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_l^2}\right] + \\
&\quad + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r}\theta(x-m)exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_r^2}\right], \\
S(x; m, w) &= \frac{1}{1+exp\left[\frac{x-m}{w}\right]}, \\
CH(x; c_1, c_2) &= 1 + c_1 x + c_2(x^2-1).
\end{aligned}
$$

Dekonvolucija - podrobno

Resolucijsko matriko M normiramo po vrsticah da dobimo konvolucijsko matriko P (verjetnost, da dogodek pade v katerikoli interval je 1):

$$\sum_i p_{ij} = 1 \rightarrow p_{ij} = \frac{M_{ij}}{\sum_k M_{kj}}$$

Invertiramo P da dobimo dekonvolucijsko matriko Q:

$$Q = P^{-1}$$

Prava števila signalnih dogodkov dobimo iz rekonstruiranih:

$$G_i = \sum_j q_{ij} R_j$$

Napaka:

$$\begin{aligned}
\sigma^2_{G_i} &= \sum_j R_j^2 \sigma^2_{q_{ij}} + \sum_j \sum_k q_{ij} q_{ik} R_{jk} \sigma_{R_j} \sigma_{R_k}, \\
\sigma^2_{q_{ij}} &= \sum_a \sum_b q^2_{ia} \frac{M_{ab} \sum_{c \neq a} M_{cb}}{(\sum_c M_{ab})^3} q^2_{bj}
\end{aligned}$$

Prilagajanje za določitev $\langle\alpha\rangle$

Prilagajamo funkcijo

$$f(x; N, \langle\alpha\rangle) = \frac{1}{2}N(1 + \langle\alpha\rangle x)$$

z minimiziranjem (prilagajanje χ^2 z korelacijami - napake so korelirane zaradi dekonvolucije)

$$\chi^2(N, \langle\alpha\rangle) = (\vec{T} - \vec{f}(x; N, \langle\alpha\rangle))^T V^{-1}(\vec{T} - \vec{f}(x; N, \langle\alpha\rangle)),$$

kjer je V kovariančna matrika:

$$V_{ij} = T_i T_j \left(\frac{\sum_k \sum_l q_{ik} q_{jl} R_{kl} \sigma_{R_k} \sigma_{R_l}}{G_i G_j} + \delta_{ij} \frac{\sum_k R_k^2 \sigma_{q_{ik}} \sigma_{q_{jk}}}{G_i G_j} + \delta_{ij} \frac{\sigma_{\langle\varepsilon\rangle_i} \sigma_{\langle\varepsilon\rangle_j}}{\langle\varepsilon\rangle_i \langle\varepsilon\rangle_j} \right).$$

Prilagajanje za določitev $\mathcal{A}_{\text{CP}}$

Prilagajamo funkcijo

$$g(x; k, \mathcal{A}_{\text{CP}}) = k + \mathcal{A}_{\text{CP}} \frac{x}{1 + \langle\alpha\rangle x},$$

z minimiziranjem (prilagajanje χ^2 z korelacijami - napake so korelirane zaradi dekonvolucije)

$$\chi^2(k, \mathcal{A}_{\text{CP}}) = (\vec{\mathcal{A}}_{rec} - \vec{g}(x; k, \mathcal{A}_{\text{CP}}))^T V^{-1} (\vec{\mathcal{A}}_{rec} - \vec{g}(x; k, \mathcal{A}_{\text{CP}})),$$

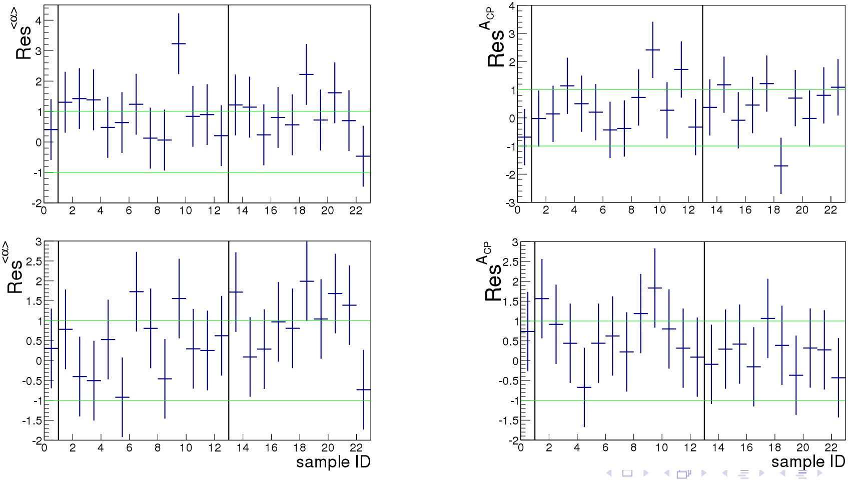
kjer je V kovariančna matrika:

$$\begin{aligned} V_{ij} &= \frac{4}{(G_i + \overline{G}_i)^2 (G_j + \overline{G}_j)^2} \Big(\overline{G}_i \overline{G}_j \sum_k \sum_l q_{ik} q_{jl} R_{kl} \sigma_{R_k} \sigma_{R_l} + \\ &+ G_i G_j \sum_k \sum_l q_{ik} q_{jl} \overline{R}_{kl} \sigma_{\overline{R}_k} \sigma_{\overline{R}_l} + \\ &+ \delta_{ij} \sum_k (R_k \overline{G}_i - \overline{R}_k G_i)(R_k \overline{G}_j - \overline{R}_k G_j) \sigma_{q_{ik}} \sigma_{q_{jk}} \Big) \end{aligned}$$

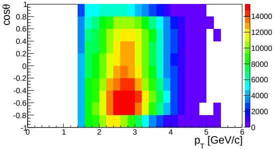
Test linearnosti in konsistentnosti

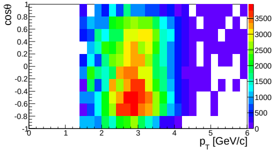
Test linearnosti - generiramo simulacijo z drugačno vrednostjo α in ponovimo analizo

Test konsistentnosti - analizo ponovimo na statistično neodvisnem vzorcu

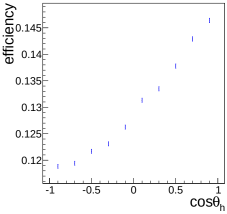


Gibalne količine se razlikujejo $\rightarrow$ na pravih podatkih se spremenita selekcijski kriterij $p_{CMS}(\Lambda_c)$ in $\langle\varepsilon\rangle$ $\rightarrow$ na simulaciji popravimo fazni prostor $(p_T, cos\theta)$ da se ujema z tistim na pravih podatkih





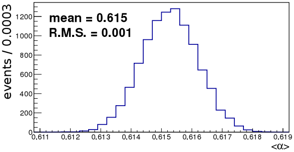
Sprememba $p_{CMS}(\Lambda_c)$ iz 2.2 GeV $\rightarrow$ 2.325 GeV.

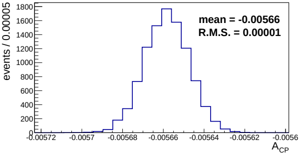


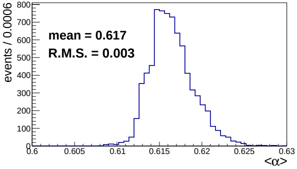
interval	$\langle\varepsilon\rangle$
0	0.1188 ± 0.0004
1	0.1194 ± 0.0004
2	0.1217 ± 0.0004
3	0.1231 ± 0.0004
4	0.1263 ± 0.0004
5	0.1313 ± 0.0004
6	0.1335 ± 0.0004
7	0.1378 ± 0.0004
8	0.1429 ± 0.0004
9	0.1464 ± 0.0004

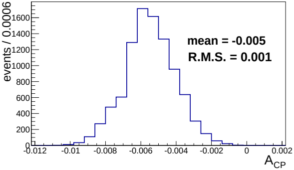
Sistematska napaka

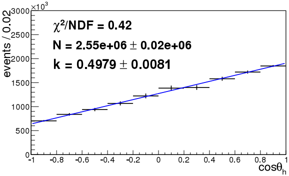
podrobno

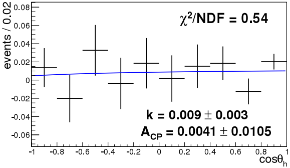






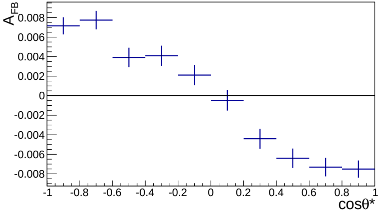


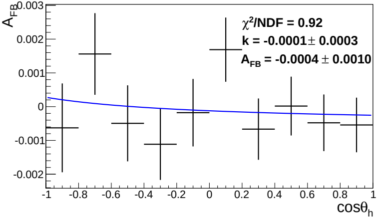


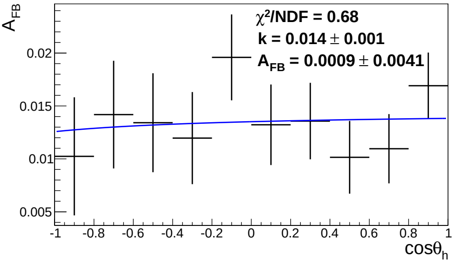


Sistematska napaka

$\mathcal{A}_{FB}$







Sistematska napaka

$\mathcal{A}_{eff}$ - prilagajanje

Funkcija prilagajanja:

$$
\begin{aligned}
M_G(m_{p\pi\pi};\vec{p}) &= \sum_{i=1}^{N_{bin}=10} N_{1,i}\Big(G(m_{p\pi\pi};m_i,\sigma_{1,i}) + n_{12}G(m_{p\pi\pi};m_i,s_{12}\sigma_{1,i}) + \\
&+ n_{13}G(m_{p\pi\pi};m_i,s_{13}\sigma_{1,i}) + \\
&+ \frac{n_{1b}(cos\theta_h)}{1+n_{12}+n_{13}}CH(m_{p\pi\pi};c_1(cos\theta_h),c_{12}(cos\theta_h)c_1(cos\theta_h))\Big), \\
G(x;m,\sigma) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right], \\
CH(x;c_1,c_2) &= 1+c_1x+c_2(x^2-1), \\
n_{1b}(x) &= A_bx+B_b, \\
c_1(x) &= A_{c1}x+B_{c1}, \\
c_{12}(x) &= A_{c12}x+B_{c12},
\end{aligned}
$$

Sistematska napaka

$\mathcal{A}_{eff}$ - rezultati