

Iskanje redkih razpadov $D^0 \rightarrow \ell^+ \ell^-$ z detektorjem BELLE

Marko Petrič
Univerza v Ljubljani

Mentor: izred. prof. dr. Boštjan Golob
Somentor: izred. prof. dr. Marko Starič

11. september 2008

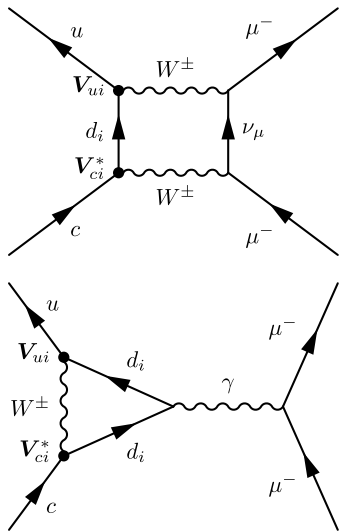
Standardni model elektrošibke in močne interakcije

- Dober opis eksperimentov pri današnjih energijah.
- Ne more biti končen opis.
- Ne upošteva mas nevtrinov, problem hierarhije, . . .

Kje iskati Novo fiziko?

- Neposredno pri visokih energijah (nekaj TeV).
- Posredno pri nižjih enegijah s študijami redkih procesov.

Okusno spreminjajoči nevtralni tokovi



- V drevesnem redu niso mogoči (unitarnost matrike CKM)
- Možni v višjih redih.
- Primer: amplituda $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$:

$$G_F \left(\sum_i \mathbf{V}_{ci}^* \mathbf{V}_{ui} m_i \right)^2 .$$

- Proces redek zaradi podobnih mas in majhnih elementov matrike CKM.
- V zankah možni prispevki doslej neznanih delcev.

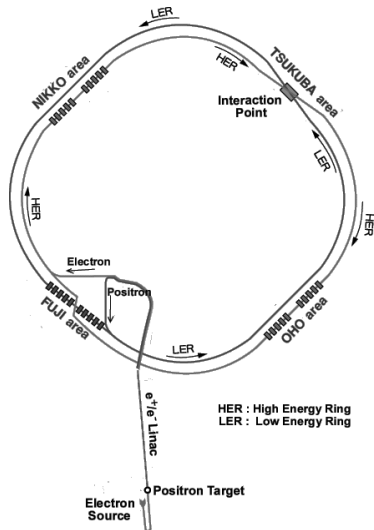
Napovedi

Napovedi standardnega modela in drugih modelov ter izmerjenih vrednosti za razvejitevna razmerja:

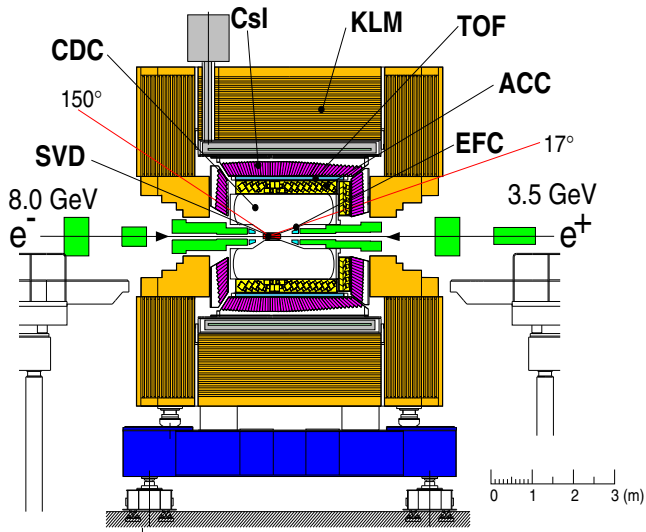
| Kanal | SM | SUSY \cancel{R}_p | več Higgsov | dod. ferm. | eksp. |
|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| $\mu^+ \mu^-$ | 3×10^{-13} | 4×10^{-6} | 8×10^{-10} | 10^{-11} | $< 1 \times 10^{-6}$ |
| $e^+ e^-$ | 1×10^{-23} | 1×10^{-10} | 4×10^{-14} | 10^{-21} | $< 1 \times 10^{-6}$ |
| $\mu^\pm e^\mp$ | 0 | 1×10^{-6} | 7×10^{-10} | 5×10^{-15} | $< 8 \times 10^{-7}$ |

Eksperiment Belle

- KEK, Tsukuba, Japonska
- KEKB: asimetrični e^+e^- trkalnik pri energiji $\Upsilon(4s)$
($e^+(3.5\text{GeV}) \rightarrow \leftarrow e^-(8\text{GeV})$)
- Luminoznost: $\mathcal{L} = 1.7 \cdot 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{s}$
- Integrirana luminoznost:
 $\int \mathcal{L} dt = 660 \text{fb}^{-1}$ (850fb^{-1})



Spektrometer Belle



- $B=1.5$ T
- Sledilni sistem:
SVD, CDC
- Identifikacija delcev :
CDC(dE/dx),
ACC, TOF, ECL,
KLM

Način merjenja

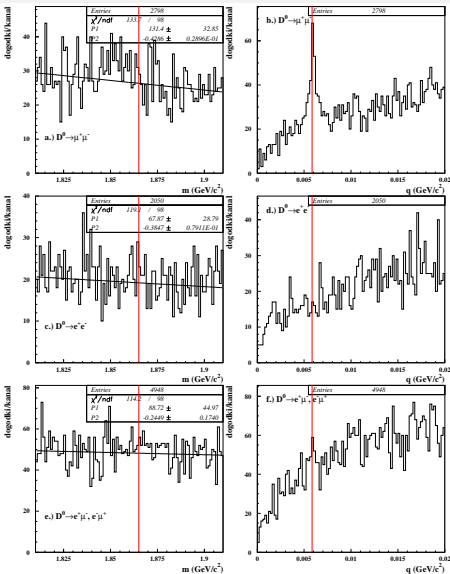
- Iščemo razpade $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$, $D^0 \rightarrow e^+ e^-$, $D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$.
- Razvejitevno razmerje merjeno glede na $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$.
- Zahtevana razpadna veriga $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+$; $D^0 \rightarrow \ell^+ \ell^-$
→ zmanjšanje kombinatoričnega ozadja.

$$\mathcal{B}r(D^0 \rightarrow \ell^+ \ell^-) = \frac{N_{\ell^+ \ell^-}}{N_{\pi^+ \pi^-}} \cdot \frac{\epsilon_{\pi^+ \pi^-}}{\epsilon_{\ell^+ \ell^-}} \cdot \mathcal{B}r(D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)$$

Rekonstrukcija razpadov

- Izmed vseh rekonstruiranih sledi z vsaj dvema zadetkoma v SVD izberemo π , e , μ na podlagi identifikacijskih verjetnosti.
- Nasprotno predznačene delce ($\mu^+\mu^-$, e^+e^- , ...) kombiniramo v D^0 . Zahtevamo $1.81 < m < 1.91 \text{ GeV}/c^2$ in skupni vertex ($m = 1.864 \text{ GeV}/c^2$).
- Kandidati D^0 in π kombiniramo v D^{*+} . Zahtevamo $q = m_{D^{*+}} - m - m_{\pi^+} < 0.02 \text{ GeV}/c^2$ ($q = 5.85 \text{ MeV}/c^2$).
- $p_D^{CMS} > 2.5 \text{ GeV}/c \rightarrow$ zmanjšanje ozadja.

Rekonstrukcija - generična simulacija Monte-Carlo



Ne vsebuje leptonskih razpadov

4× večja statistika

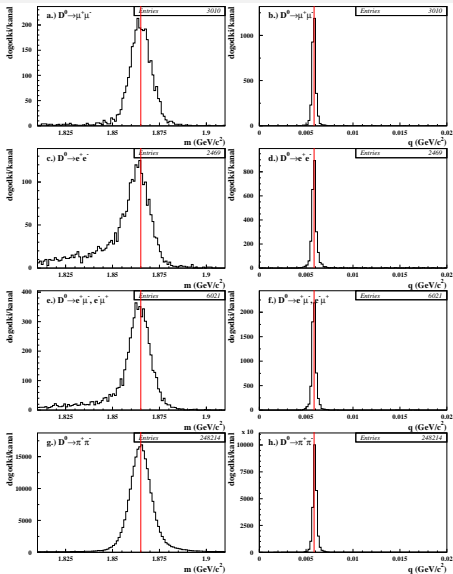
Po rekonstrukciji ostane:

- 2798 dogodkov $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- 2050 dogodkov $D^0 \rightarrow e^+ e^-$
- 4948 dogodkov $D^0 \rightarrow e^+ e^-$

Pri $D^0 \rightarrow e^+ e^-$ in $D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$ ozadje linearno.

Pri $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ dodatno ozadje zaradi refleksije $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$.

Rekonstrukcija - signalni Monte-Carlo



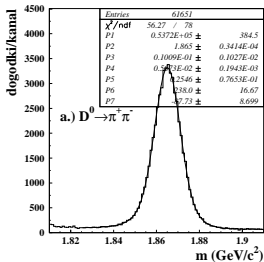
Simulacija potrebna za določitev sprejemnosti.

Pri $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ in $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ porazdelitev po m simetrična.

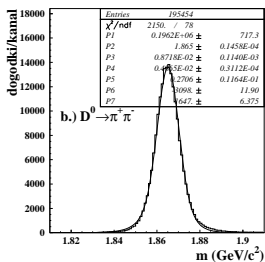
Pri $D^0 \rightarrow e^+ e^-$ in $D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$ porazdelitev po m asimetrična zaradi zavornega sevanja elektrona.

Primerjava podatki : Monte-Carlo za $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

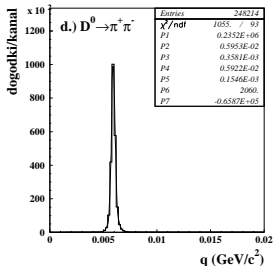
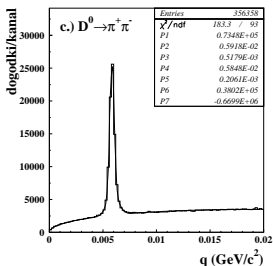
Merski podatki



Simulacija



Porazdelitev po m 20% ožja.



Porazdelitev po q 30% ožja.

Optimizacija rezov

Z optimizacijo bi radi zmanjšali relativno statistično napako. Ker so iskani procesi zelo redki, optimiziramo reze tako, da maksimiziramo:

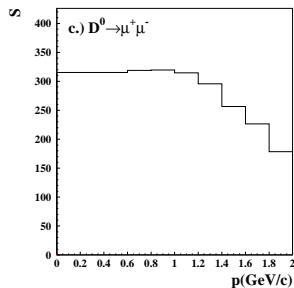
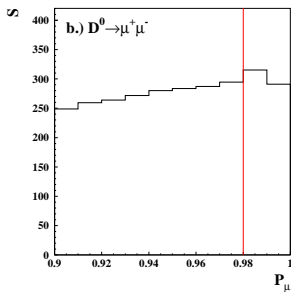
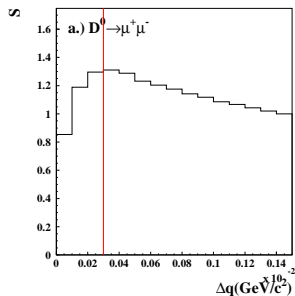
$$\frac{N_{\text{sig}}}{\sigma_{\text{sig}}} \approx \frac{N_{\text{sig}}}{\sqrt{N_{\text{ozad}}}} = S \quad .$$

Optimizacija je slepa \rightarrow dogodki iz simulacije Monte-Carlo.

Optimiziramo količine:

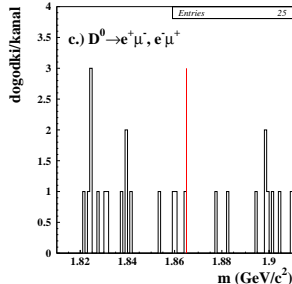
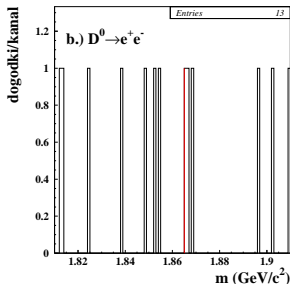
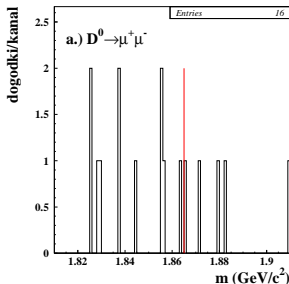
- rez na odmiku parametra q od nominalne vrednosti (Δq),
- rez na identifikacijski verjetnosti za hčerinska delca mezona D^0 ,
- minimalno zahtevano gibalno količino za hčerinska delca mezona D^0 .

Optimizacija rezov



| Kanal | $\Delta q [\text{MeV}/c^2]$ | P_e | P_μ | $p_e [\text{GeV}/c]$ | $p_\mu [\text{GeV}/c]$ |
|---------------------------------|-----------------------------|-------|---------|----------------------|------------------------|
| $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ | 0.3 | 0 | 0.98 | 0 | 0 |
| $D^0 \rightarrow e^+ e^-$ | 0.3 | 0.91 | 0 | 0 | 0 |
| $D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$ | 0.3 | 0.99 | 0.91 | 0 | 0 |

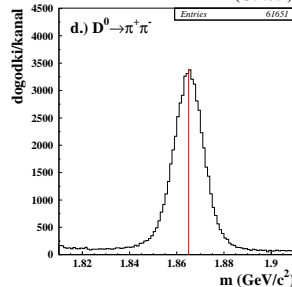
Porazdelitev merski podatkov po optimizaciji



Po rekonstrukciji ostane:

- 16 dogodkov $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- 13 dogodkov $D^0 \rightarrow e^+ e^-$
- 25 dogodkov $D^0 \rightarrow e^+ e^-$
- 61651 dogodkov $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

Leptonskih razpadov ne opazimo.



Prilagajanje

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

- Oblika signala iz $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$
- Kombinatorično ozadje: linearno
- Refleksija $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$: porazdelitev iz $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ z mionsko maso
- Prilagajamo: $f(x) = N \cdot f_s(x) + f_r + a(1 + bx)$

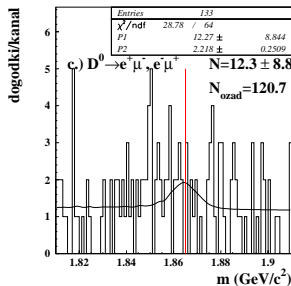
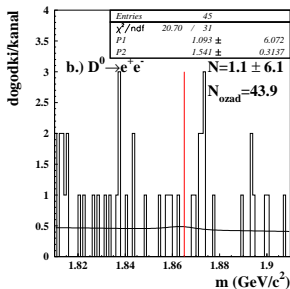
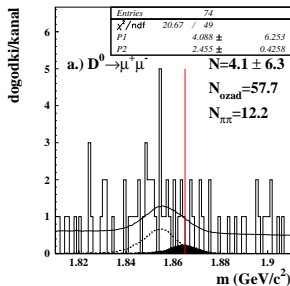
$$D^0 \rightarrow e^+ e^- \text{ in } D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$$

- Oblika signala iz signalne simulacije MC
- Ozadje linearno - kombinatorično ozadje
- Prilagajamo: $f(x) = N \cdot f_s(x) + a(1 + bx)$

$$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

- Prilagajamo: $f_m(x) = G(\bar{x}_1, \sigma_1, A_1, x) + G(\bar{x}_2, \sigma_2, A_2, x) + A_3 + A_4 x$

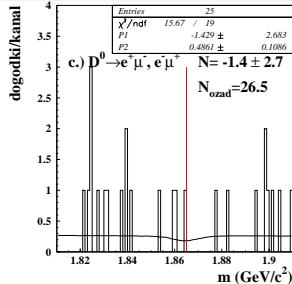
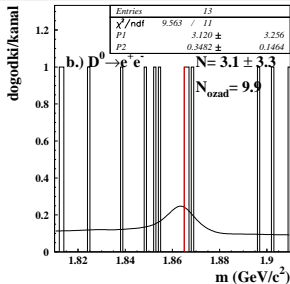
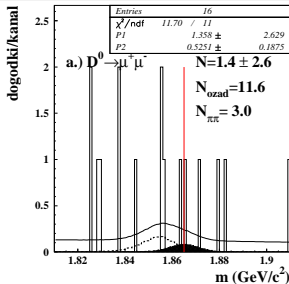
Test prilaganja na simulaciji Monte-Carlo



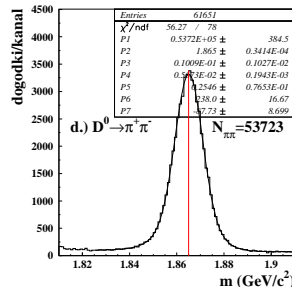
| Kanal | število dogodkov |
|---------------------------------|----------------------|
| $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ | $4.1^{+6.7}_{-5.8}$ |
| $D^0 \rightarrow e^+ e^-$ | $1.1^{+6.5}_{-5.7}$ |
| $D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$ | $12.3^{+9.3}_{-8.4}$ |

⇒ Konsistentno z nič

Prilaganje na merske podatke



| Kanal | število dogodkov |
|---------------------------------|-------------------------------|
| $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ | $1.4^{+3.0}_{-2.3}$ |
| $D^0 \rightarrow e^+ e^-$ | $3.1^{+3.6}_{-3.0}$ |
| $D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$ | $-1.4^{+3.1}_{-2.3}$ |
| $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ | $(5.37 \pm 0.04) \times 10^4$ |



Konsistentno z nič \rightarrow ocenimo zgornjo mejo.

Sistematska napaka pri štetju dogodkov

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

- Normalizacija refleksije
- Nastavek za ozadje

| Kanal | refleksija | ozadje | skupaj |
|-------------------------------|------------|--------|--------|
| $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ | 0.0019 | 0.0025 | 0.0031 |

$$D^0 \rightarrow e^+ e^- \text{ in } D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$$

- Oblika signala
- Nastavek za ozadje

| Kanal | oblika | ozadje | skupaj |
|---------------------------------|--------|--------|--------|
| $D^0 \rightarrow e^+ e^-$ | 0.068 | 0.060 | 0.091 |
| $D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$ | 0.41 | 0.0065 | 0.41 |

Sistematska napaka zanemarljiva glede na statistično napako.

Zgornja meja

Zgornje meje števila signalnih razpadov (90% stopnja zaupanja)

| Kanal | $N \pm \sigma_{stat.} \pm \sigma_{sist.}$ | N_{zg} |
|---------------------------------|---|----------|
| $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ | $1.4^{+3.0}_{-2.3} \pm 0.0$ | 6.3 |
| $D^0 \rightarrow e^+ e^-$ | $3.1^{+3.6}_{-3.0} \pm 0.1$ | 9.1 |
| $D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$ | $-1.4^{+3.1}_{-2.3} \pm 0.4$ | 4.2 |

Z enačbo $\mathcal{B}r_{zg}(D^0 \rightarrow \ell^+ \ell^-) = \frac{N_{zg}}{N_{\pi^+ \pi^-}} \cdot \frac{\epsilon_{\pi^+ \pi^-}}{\epsilon_{\ell^+ \ell^-}} \cdot \mathcal{B}r(D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)$ dobimo:

| Kanal | $\mathcal{B}r_{zg}$ (90% C.L.) |
|---------------------------------|--------------------------------|
| $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ | 3.1×10^{-7} |
| $D^0 \rightarrow e^+ e^-$ | 4.4×10^{-7} |
| $D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$ | 1.8×10^{-7} |

Ostale sistematske napake

V $\mathcal{B}r(D^0 \rightarrow \ell^+ \ell^-) = \frac{N_{\ell^+ \ell^-}}{N_{\pi^+ \pi^-}} \cdot \frac{\epsilon_{\pi^+ \pi^-}}{\epsilon_{\ell^+ \ell^-}} \cdot \mathcal{B}r(D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)$ so naslednje napake:

- Napaka na razvejitevem razmerju $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$.
- Napaka na številu pionov.
- Napaka na sprejemnosti.
- Napaka na izkoristku identifikacije.

Seštejemo kvadrature relativnih napak

| Kanal | σ |
|---------------------------------|----------|
| $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ | 8.1% |
| $D^0 \rightarrow e^+ e^-$ | 5.0% |
| $D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$ | 5.2% |

Zgornje meje popravimo za faktor $1 + \sigma$.

Rezultat

| Kanal | $\mathcal{B}r$ (90% C.L.) | |
|---------------------------------|---------------------------|------------------------|
| | meritev | PDG 2008 |
| $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ | $< 3.4 \times 10^{-7}$ | $< 1.3 \times 10^{-6}$ |
| $D^0 \rightarrow e^+ e^-$ | $< 4.6 \times 10^{-7}$ | $< 1.2 \times 10^{-6}$ |
| $D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$ | $< 1.9 \times 10^{-7}$ | $< 8.1 \times 10^{-7}$ |

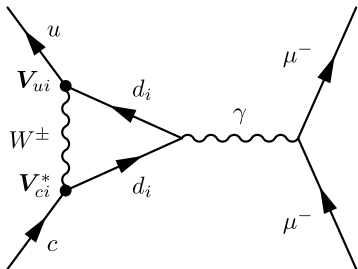
Zaključek

- V diplomskem delu sem iskal redke razpade $D^0 \rightarrow \ell^+ \ell^-$.
- Razpadov nisem opazil.
- Določene so bile zgornje meje razvejitvenih razmerij.
- Zgornje meje za razpada $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ in $D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$ sta zmanjšani za faktor 4, za razpad $D^0 \rightarrow e^+ e^-$ pa za faktor 2.5.
- Zgornje meje so še vedno precej višje od napovedi Standardnega modela.
- S takšno občutljivost meritve je moč preveriti napovedi nekaterih razširitev Standardnega modela.
- Izmerjene meje bodo znatno omejile vrednosti prostih parametrov v takih modelih (npr. napoved SUSY \cancel{R} ni v skladu z meritvijo).

Mezoni D

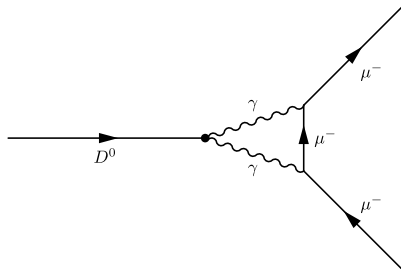
Prispevke delimo na dva dela

Prispevki kratkega dosega



$$\text{Br}(D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) \approx 10^{-18}$$

Prispevki dolgega dosega

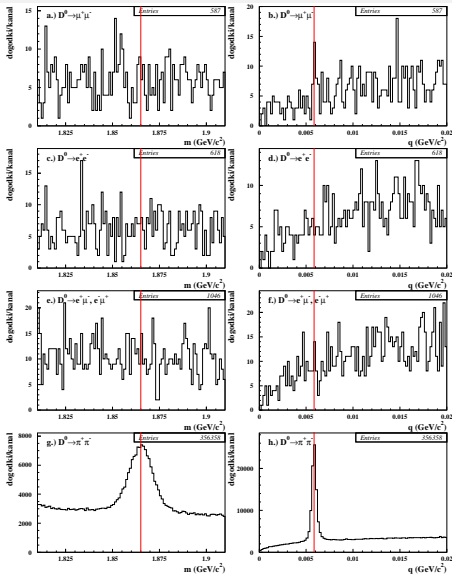


$$\text{Br}(D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) \approx 3 \times 10^{-13}$$

Sprejemnost določena iz signalne simulacije Monte-Carlo

| Kanal | N_0 | N | ϵ [%] |
|---------------------------------|---------|--------|------------------|
| $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ | 21648 | 2003 | 9.25 ± 0.20 |
| $D^0 \rightarrow e^+ e^-$ | 20170 | 1864 | 9.34 ± 0.20 |
| $D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$ | 44067 | 4510 | 10.23 ± 0.14 |
| $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ | 1102492 | 195454 | 17.73 ± 0.04 |

Rekonstrukcija - merski podatki



Po rekonstrukciji ostane:

- 587 dogodkov $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- 618 dogodkov $D^0 \rightarrow e^+ e^-$
- 1046 dogodkov $D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$
- 356358 dogodkov $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

V leptonskih kanalih signal ni opazen.
Ozadje zmanjšamo z ostrejšimi rezi
(optimizacija).

Primerjava refleksija : podatki

