Analiza podatkov

(od surovih podatkov do fizikalnih rezultatov)

- od surovih do obdelanih pod.
  - **("Raw data -> DST")**
  - **prilagajanje sledi**
  - **doloèanje gib. koliè.**
  - **kalorimetrija (rekon. pljuskov v kalorim.)**
  - **identifikacija delcev (rekon. kota Èerenkova)**

1. del

- umeritev
  - **umeritev sledilnih det.**
  - **umeritev podatkov in MC (RICH)**
- analiza
  - **stat. metode ⇒ druga predavanja**
  - **rekon. pljuskov**
  - **oznaèevanje tež kih (b) kvarkov**
  - **kinem. prilagajanje**
  - **ekskluzivni in inkluzivni kanali**
  - **umetne nevronske mrež e ⇒ druga predavanja**

2. del

Title:
(anal1gz.eps)
Creator:
(ImageMagick)
Preview:
This EPS picture was not saved
with a preview included in it.
Comment:
This EPS picture will print to a
PostScript printer, but not to
other types of printers.

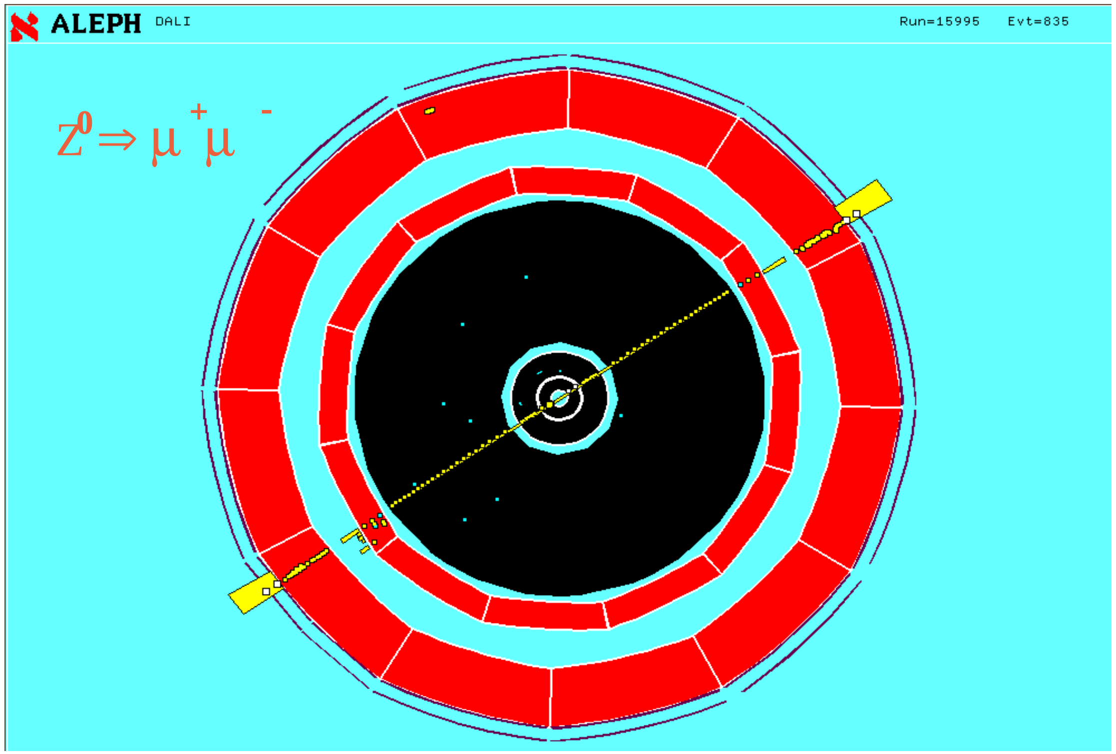
Title:
(anal1agz.eps)
Creator:
(ImageMagick)
Preview:
This EPS picture was not saved
with a preview included in it.
Comment:
This EPS picture will print to a
PostScript printer, but not to
other types of printers.

Od surovih do obdelanih podatkov

- **surovi podatki (Raw data): digitaliziran zapis elektronskih signalov v detektorju**

kateri del detekt.	**vred-nost signala**

neposredno uporabni za grafièno upodobitev



Za statistièno obdelavo podatkov potrebujemo fizikalne kolièine:

$\vec{p}$,E,q,
identifikacijo (m)

- **Obdelani podatki**
DST - Data Summary Tape

Od surovih do obdelanih podatkov

Rekonstrukcija

Postopek "predelave" surovih v obdelane podatke imenujemo rekonstrukcija

primer:

ugotovitev,da gre za $Z^0 \Rightarrow \mu^+\mu^-$ zahteva:
<u>dve sledi z ustrezno p</u> <u>majhno deponirano E</u> <u>μ identifikacijo</u>

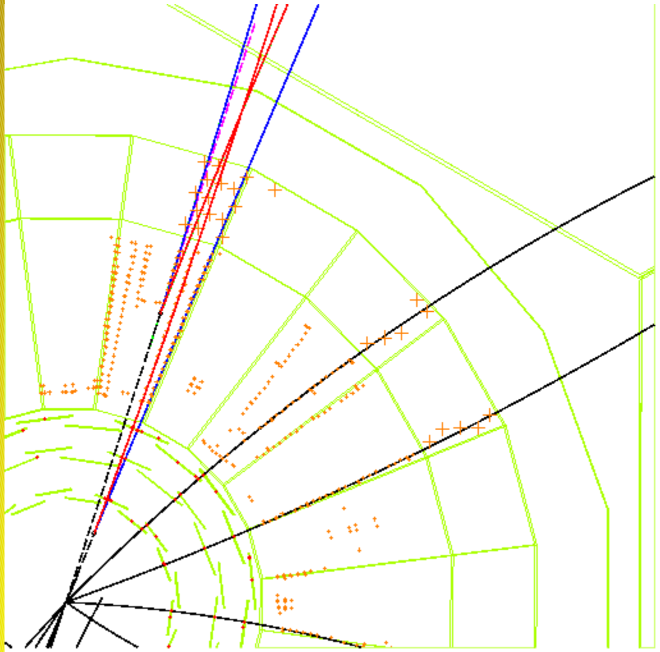
asociacija signalov v sledilnih det. v skupine - sledi; prilagajanje sledi; doloèitev gib. količ.

asociacija signalov v kalorim. v skupine - pljuske; asociacija sledem

preverjanje števila zadetkov v μ det.; asociacija sledem; (za nabite hadrone drugaèni postopki)

Od surovih do obdelanih podatkov

Prilagajanje sledi



- Nabite sledi se gibljejo po vijaènici → vijaènica

- Elektronske signale v sledilnih detektorjih druž imo v skupine - sledi

  ("Pattern recognition")

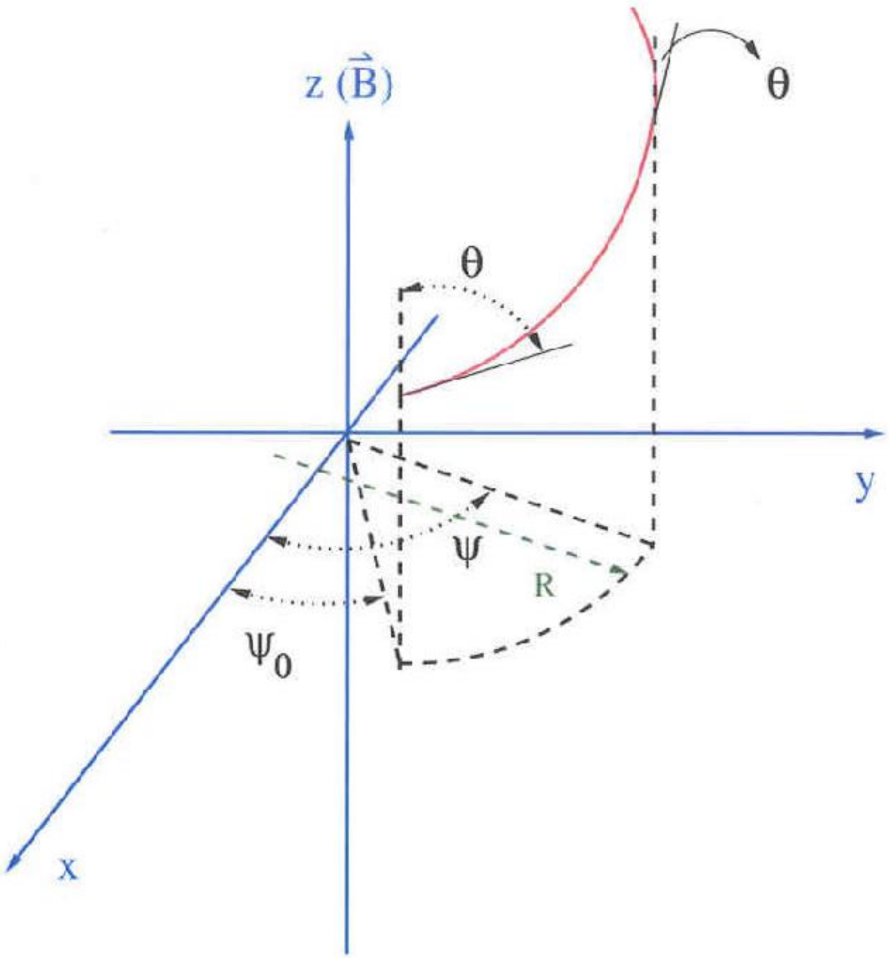
- Skozi izbrane zadetke prilagajamo parametre sledi

  ("Track fitting")

Od surovih do obdelanih podatkov

Prilagajanje sledi

Parametrizacija vijačnice:



$$
\begin{aligned}
x &= x_0 + R(\sin\psi - \sin\psi_0) \\
y &= y_0 - R(\cos\psi - \cos\psi_0) \\
z &= z_0 + R\cot\theta(\psi - \psi_0)
\end{aligned}
$$

Nabito sled lahko torej parametriziramo z nizom petih parametrov v izbrani točki:

npr. $y_0, z_0, \psi_0, \theta_0, R_0^{-1}$

$(x_0 = y_0 / \tan\psi_0)$

Od surovih do obdelanih podatkov

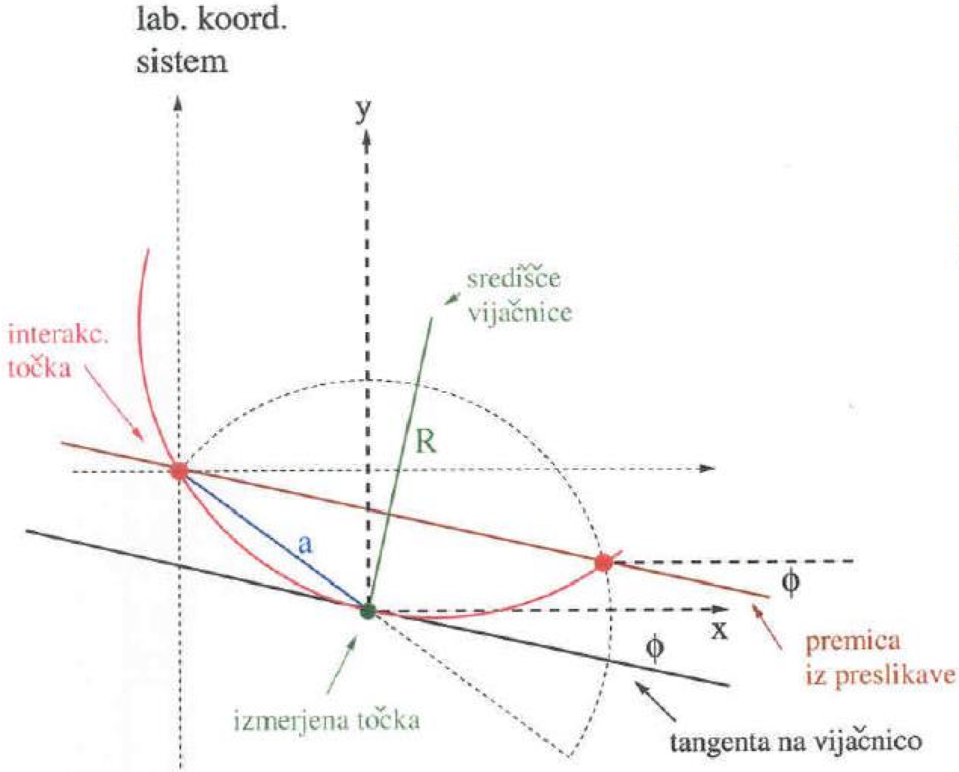
Prilagajanje sledi

Iskanje sledi ("Pattern recognition")
Pri velikem št. zadetkov v det. si težko privošèimo preverjanje kompatibilnosti zadetkov s hipotezo (vijaènico); zato transformacija v transverzalni ravnini

Skica in nekaj enaèb

Algoritem druženja zadetkov v posameznih detektorjih:
-za majhne odseke sledi, rekonstr. v (najnatanènejšem) sledilnem detekt. (TE – “track element”), imamo x_s, y_S, z_S, ϕ_S, R_s, ψ_s
-za vsak TE iz preostalih detektorjev izraèunamo preslikano toèko x’,y’
- izraèunamo ϕ' (kot med x’,y’ in int. toèko)
- preverimo $|\phi' - \phi_s| < \alpha$
- iz $\Delta z = | z - z_s |$ in ψ_s izraèunamo ψ' ($\Delta z = R_s \cot\theta \, (\psi - \psi_s)$)
- preverimo èe $| \psi'(\text{izraèunan}) - \psi'(\text{izmerjen}) | < \beta$

"Pattern Recognition":



Projekcijo vijačnice na transv. ravnino (krožnica) transormiramo v premico:

$$x' = \frac{a^2 x}{x^2 + y^2}$$

$$y' = \frac{a^2 y}{x^2 + y^2}$$

kroznica $(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R^2$

ustreza premici $y' = -\frac{x_c}{y_c} x' + \frac{a^2}{2 y_c}$

$$\frac{dy}{dx}\Big|_{x=0, y=0} = -\frac{x_c}{y_c}$$

Od surovih do obdelanih podatkov

Prilagajanje sledi

Lastnosti takega algoritma:

-minimalno število zank

- α in β lahko ustrezno nastavimo za vsak detektor oziroma njegov del

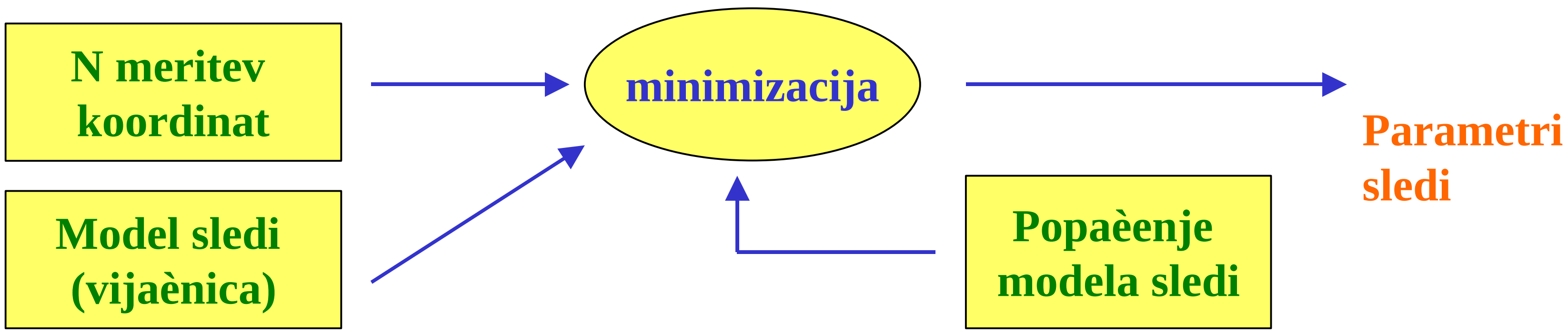
- algoritem uporablja interakcijsko toèko in je zato neprimeren za doloèanje sekundarnih sledi

-vsak TE lahko pripada veè sledem

- èe je v katerem izmed detektorjev na voljo dodatna informacija (smer, energija) jo lahko dodamo v algoritem

Prilagajanje parametrov sledi:

Namen prilagajanja je doloèitev parametrov sledi (vijaènice) v izbrani toèki (najveèkrat v toèki, ki je najbližje interakcijski)



Od surovih do obdelanih podatkov

Prilagajanje sledi

Postopke prilagajanja parametrov sledi razdelimo glede na
-naèin uporabe modela sledi
- naèin upoštevanja popaèenja modela (veèkratno sipanje, energijske izgube)

Globalni postopki	Progresivni postopki	Postopki lomitvenih toèk
‘Global Methods’	‘Progressive Methods’	‘Break Points Methods’

Globalni postopki
prispevek veèkratnega sipanja upoštevamo v matriki napak;
minimiziramo χ^2 vseh merskih toèk hkrati

Nazaj k nekaj enaèbam

Od surovih do obdelanih podatkov

Prilagajanje sledi

Model sledi (pričakovana vrednost merjenih koordinat):

$$\begin{pmatrix} x^n_{\rm exp} \\ y^n_{\rm exp} \\ z^n_{\rm exp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 + R_0^{-1}\left[\sin\psi_n - \sin\psi_0\right] \\ y_0 - R_0^{-1}\left[\cos\psi_n - \cos\psi_0\right] \\ z_0 + R_0^{-1}\cot\theta_0\left[\psi_n - \psi_0\right] \end{pmatrix}$$

5 neodvisnih parametrov, npr. $y_0, z_0, \psi_0, \theta_0, R_0^{-1}$, $x_0 = y_0/\tan\psi_0$.

Če imamo N meritev, vsaka postreže s tremi koordinatami, $\Rightarrow$ model sestavlja N 3-dimenzionalnih funkcij, ki so odvisne od 5 izbranih parametrov:

$$\vec{f}(\vec{p_0})$$

Globalna metoda - minimizacija χ^2 za vse merske točke hkrati:

$$\chi^2(\vec{p_0}) = \left(\vec{f}(\vec{p_0}) - \vec{m}\right)^T \vec{C}^{-1}\left(\vec{f}(\vec{p_0}) - \vec{m}\right)$$

Primer globalnega prilagajanja parametrov sledi - premica:

"Parametrizacija" premice: $y = kx_n + y_0$

N meritev koord. y pri danih x_n:

N	$k\Delta x$	$\sigma_k \Delta x$
2	$y_2 - y_1$	$\sqrt{2}\sigma$
3	$(y_3 - y_1)/2$	$\sigma/\sqrt{2}$
4	$\frac{1}{10}(3y_4 + y_3 - y_2 - 3y_1)$	$\sigma/\sqrt{5}$

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^{N} \frac{(y_n - kx_n - y_0)^2}{\sigma_n^2}$$

minimizacija nam da sistem

$$k \sum_{n=1}^{N} \frac{x_n^2}{\sigma_n^2} + y_0 \sum_{n=1}^{N} \frac{x_n}{\sigma_n^2} - \sum_{n=1}^{N} \frac{y_n x_n}{\sigma_n^2} = 0$$

$$k \sum_{n=1}^{N} \frac{x_n}{\sigma_n^2} + y_0 \sum_{n=1}^{N} \frac{1}{\sigma_n^2} - \sum_{n=1}^{N} \frac{y_n}{\sigma_n^2} = 0$$

za $\mathrm{x_n} = \mathrm{n}\Delta\mathrm{x}$ in $\sigma_\mathrm{n} = \sigma \Rightarrow$

$$k = \frac{1}{\Delta x} \frac{N \sum n y_n - \sum n \sum y_n}{N \sum n^2 - (\sum n)^2}$$

Od surovih do obdelanih podatkov

Prilagajanje sledi

Globalna metoda

-uporabi vse merske toèke hkrati

- ni primerna za hkratno iskanje sledi (za razliko od progresivne metode)
- raèunsko zahtevna (obrat N x N matrike)

Progresivna metoda (Kalmanov filter)

-znani parametri sledi po n meritvah

- uporabimo model sledi, da ekstrapoliramo te parametre do naslednje merske toèke

-parametre po n+1 meritvi dobimo kot povpreèje ekstrapoliranih in izmerjenih parametrov v n+1 merski toèki

Enaèbe in primerjava z globalno metodo

Od surovih do obdelanih podatkov

Prilagajanje sledi

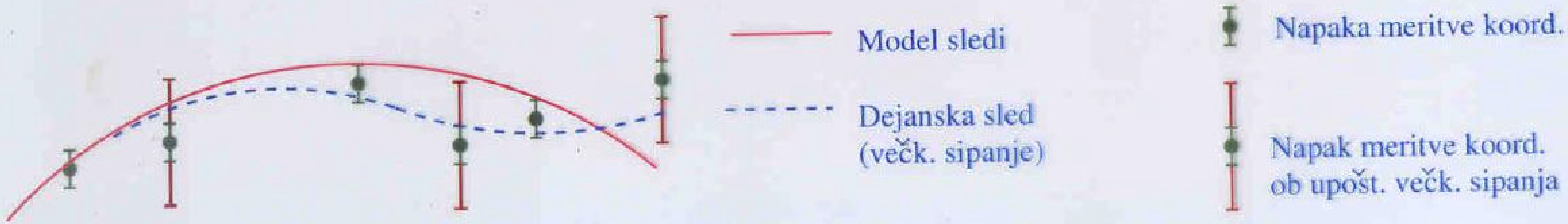
Globalna metoda - matrika napak:

$$C_{ij} = \sigma_i \sigma_j \delta_{ij} + \overline{\epsilon_i^{\mathrm{MS}} \epsilon_j^{\mathrm{MS}}}$$

σ_i - nezanesljivost posamezne meritve; ϵ_i^{MS} - prispevek k napaki meritve zaradi večkratnega sipanja (Molièrova enačba):

$$\overline{\theta_i^{\mathrm{MS}}} = 0$$

$$\sqrt{\overline{(\theta_i^{\mathrm{MS}})^2}} = \frac{13,6\ MeV}{cp\beta} \sqrt{\frac{L}{X_0}} [1 + 0.038 \ln \frac{L}{X_0}]$$



Porazdelitev $(y_{\mathrm{izmer}} - y_{\mathrm{fit}})/\sigma_y$ ("pull") je merilo razumevanja večkratnega sipanja in ne merskih napak.

Od surovih do obdelanih podatkov

Prilagajanje sledi

Progresivna metoda:
(nekaj splošnih enačb, lažje bo s premico)

Poznamo vektor parametrov sledi po n merskih točkah, $\vec{p}_n^F$, in matriko napak W_n

Z upoštevanjem ustreznega modela izvrednotimo ektrapolirane parametre na mestu naslednje meritve, $\vec{p}_n^{Fe}$

Ekstrapoliramo tudi matriko napak, W_n^e

$$W_n^e = D^T W_n D, \text{ kjer je } D = \frac{\partial \vec{p}}{\partial \vec{p}^e}$$

χ^2 sestavimo kot vsoto pripsevka ekstrapolacije in meritve:

$$\chi^2(\vec{p}_{n+1}) = \underbrace{\chi^2(\vec{p}_n^F)}_{\chi^2 \text{ iz n merskih tock}} + \underbrace{\left[\vec{p}_{n+1} - \vec{p}_n^{Fe}\right]^T W_n^e \left[\vec{p}_{n+1} - \vec{p}_n^{Fe}\right]}_{\text{prispevek ekstrapolacije}} + \underbrace{\left[\vec{p}_{n+1} - \vec{p}_{n+1}^{izmer}\right]^T U \left[\vec{p}_{n+1} - \vec{p}_{n+1}^{izmer}\right]}_{\text{prispevek n+1 meritve}}$$

Minimizacija χ^2 nam da sistem enačb za $\vec{p}_{n+1}^F$

Primer progresivne metode - premica:

Poznamo koordinato y in naklon premice izvrednoten iz n merskih točk, $\vec{p}_n^F$, izvrednotimo obe količini v naslednji merski točki, $\vec{p}_n^{Fe}$:

$$\vec{p}_n^{Fe} = \begin{pmatrix} y_n^F + k_n^F \Delta x \\ k_n^F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_n^{Fe} \\ k_n^{Fe} \end{pmatrix}$$

Ekstrapolirana matrika napak:

$$D = \frac{\partial \vec{p}}{\partial \vec{p}^e} = \begin{pmatrix} \frac{\partial y_n}{\partial y_n^e} & \frac{\partial y_n}{\partial k_n^e} \\ \frac{\partial k_n}{\partial y_n^e} & \frac{\partial k_n}{\partial k_n^e} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\Delta x \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$W_n^e = D^T W_n D$$

Primer progresivne metode - premica:

Splošne enačbe $\hookrightarrow$ literatura

Začnemo v izbrani točki, za katero je seveda

$y_1^F = y_1^{Fe} = y_1^m, \ k_1 = k_1^F = k_1^{Fe} = 0$

Začetna matrika napak (za eno samo meritev)

$$W_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma^2} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ od tod sledi } \mathrm{W}_1^e = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma^2} & \frac{-\Delta x}{\sigma^2} \\ \frac{-\Delta x}{\sigma^2} & \frac{\Delta x^2}{\sigma^2} \end{pmatrix}, \quad \mathrm{W}_2 = \mathrm{W}_1^e + \mathrm{U} = \begin{pmatrix} \frac{2}{\sigma^2} & \frac{-\Delta x}{\sigma^2} \\ \frac{-\Delta x}{\sigma^2} & \frac{\Delta x^2}{\sigma^2} \end{pmatrix} \text{ itd.}$$

N	$k^F \Delta x$	$\sigma_k^F \Delta x$
2	$y_2 - y_1$	$\sqrt{2}\sigma$
3	$\frac{1}{5}(3y_3 - y_2 - 2y_1)$	$\sqrt{\frac{14}{25}}\sigma = 0,748\sigma$
4	$\frac{1}{70}(30y_4 - y_3 - 18y_2 - 11y_1)$	$0,524\sigma$

PROGRESIVNO PRILAGAJANJE PREMICE ENAČBE

$$P_n^F \Rightarrow P_n^{Fe} = \begin{pmatrix} y_n^{Fe} \\ A_n^{Fe} \end{pmatrix}\Bigg|_{x_{n+1}} = \begin{pmatrix} y_n^F + \Delta x A_n^F \\ A_n^F \end{pmatrix}\Bigg|_{x_{n+1}}.$$ ekstrap. param.

where $\Delta x = x_{n+1} - x_n$;

$$\mathbf{W}_n \Rightarrow \mathbf{W}_n^e = \mathbf{D}^T \mathbf{W}_n \mathbf{D},$$

where

$$\mathbf{D} = \partial P / \partial P^e = \begin{pmatrix} 1 & -\Delta x \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\therefore \mathbf{D}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & \Delta x \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

By denoting $\mathbf{W}_n$ as

$$\mathbf{W}_n = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} \\ w_{21} & w_{22} \end{pmatrix},$$

and noticing $\mathbf{W}_n$ is symmetric, i.e. $w_{21} = w_{12}$, we get

$$\mathbf{W}_n^e = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\Delta x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} \\ w_{21} & w_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\Delta x \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$ ekstrap. inv. matrika napak

$$= \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} - w_{11}\Delta x \\ w_{12} - w_{11}\Delta x & w_{22} - 2w_{12}\Delta x + w_{11}(\Delta x)^2 \end{pmatrix}.$$

The system equation is

$$(\mathbf{W}_n^e + \mathbf{U})(P_{n+1} - P_n^{Fe}) = \mathbf{U}\begin{pmatrix} y_{n+1}^m - y_n^{Fe} \\ 0 \end{pmatrix},$$ sist. enačb za $\vec{P}_{n+1}$

where

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 1/\sigma^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

By denoting $\mathbf{W}_n^e$ as

$$\mathbf{W}_n^e = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} \end{pmatrix},$$

the above equation can be explicitly expressed as

$$\begin{pmatrix} V_{11} + (1/\sigma^2) & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{n+1}^F - y_n^{Fe} \\ A_{n+1}^F - A_n^{Fe} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (y_{n+1}^m - y_n^{Fe})/\sigma^2 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Its solutions are (again noticing $V_{21} = V_{12}$):

$$y_{n+1}^F = [(y_{n+1}^m - y_n^{Fe})/\sigma^2] / [V_{11} + (1/\sigma^2) - (V_{12})^2/V_{22}] + y_n^{Fe}$$

$$Y_{n+1}^F = [Y_{n+1}^m - Y_n^{Fe}/\sigma^2] / \left[V_{11} + \frac{1}{\sigma^2} - \frac{V_{12}^2}{V_{22}}\right] + Y_n^{Fe}$$

$$k_{n+1}^F = -(Y_{n+1}^m - Y_n^{Fe})\frac{V_{12}}{V_{22}} + k_n^{Fe}$$

Progresivna metoda - večkratno sipanje

V matriki napak upoštevamo prispevek večkratnega sipanja od merske točke n do merske točke n+1:

$$W_n^e = \left[\left[D^T W_n D \right]^{-1} + W_{\mathrm{MS}}^{-1} \right]^{-1}$$

Z ustrezno matriko napak zaradi večkratnega sipanja W_{MS} lahko upoštevamo podrobnosti materijala med merskima točkama n in n+1.

Od surovih do obdelanih podatkov

Prilagajanje sledi

- **Progresivna metoda**
  -omogoèa hkratno iskanje in prilagajanje sledi
  - pomembne sipalne centre (‘break point’) inherentno vkljuèimo

Poglej enaèbe

- **Metoda lomitvenih toèk**
  Metoda je primerna v primeru omejenega števila predelov na poti delcev, kjer se le le-ti moèno sipljejo;
  v tem primeru dodamo parametrom sledi kot proste parametre prilagajanja še kote sipanja

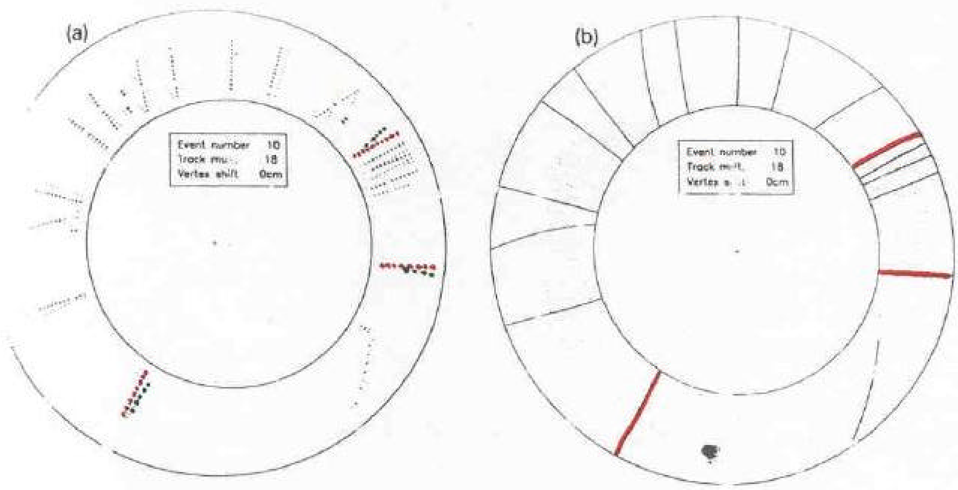
$$\chi^2(\vec{p}_0) \longrightarrow \chi^2(\vec{p}_0,\vec{\theta})$$

ZEUS VXD

progresivno prilagajanje sledi

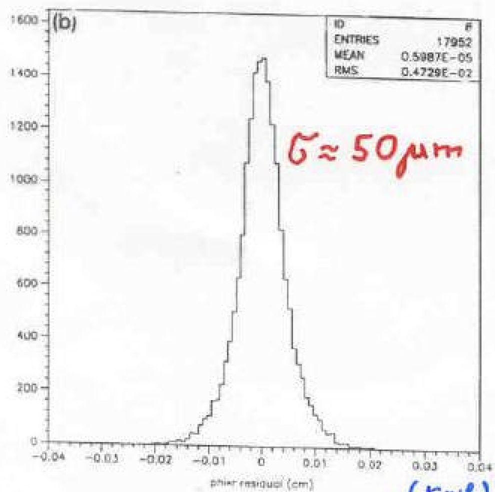
Upoštevati:

- ozadje (sledi, ki ne izvirajo iz int. toč.)
- mrtvi čas (verjetnost, da na žici ni signala)
- ločljivost dveh hkratnih zadetkov



bckg ~ 30%

$\varepsilon_{wire} \sim 1-4\cdot 10^{-2}$



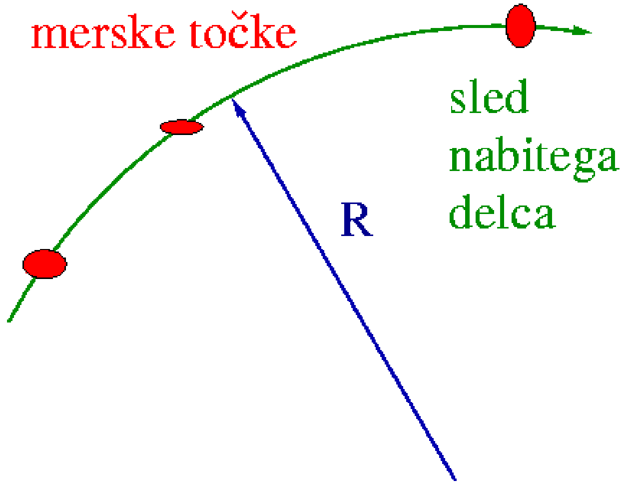
$\varepsilon \approx 96\%$

$(r\times\varphi)^{rek.} - (r\times\varphi)^{MC}$ [cm]

Od surovih do obdelanih podatkov

Meritev gibalne kolièine

V mag. polju: $p_t = q\ B\ R$



Iz ukrivljenosti R doloèimo
komp. gib. količ. transv. na B ⇒
dejanska meritev: iz merskih toèk na ukrivljeni sledi nabitega delca doloèamo ukrivljenost

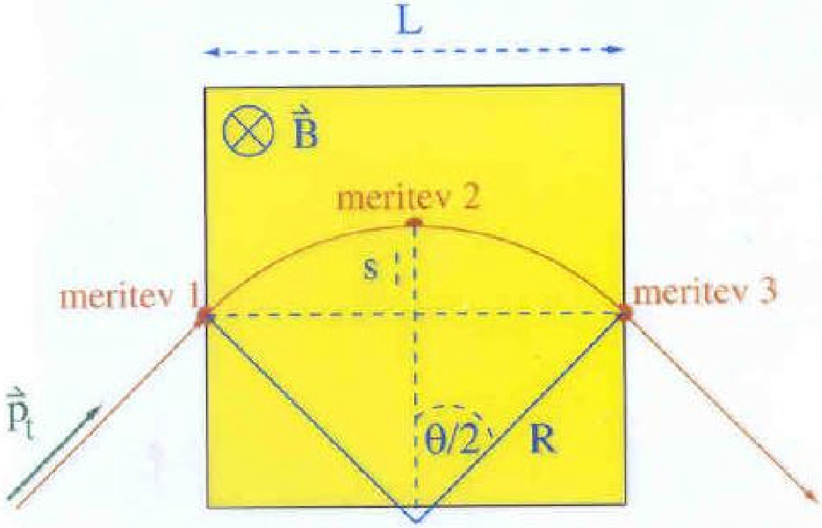
natanènost odvisna od:
- **št. merskih toèk**
- **prostorske loèljivosti**
- **integrala polja BL**
- **gib. Kolièine**

nekaj enaèb

- **veèkratnega sipanja delca v materialu sledilnih detektorjev**

še nekaj enaèb

Meritev gibalne količine



$$p_t = q\ B\ R \Rightarrow R = \frac{p_t}{qB}$$
$$\sin\frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2} = \frac{L}{2R}$$
$$\cos\frac{\theta}{2} = \frac{R-s}{R} \Rightarrow s \approx R\frac{\theta^2}{8}$$
$$s = \frac{B\ L^2\ q}{8p_t}$$

Ce dolocimo s s tremi meritvami, ki imajo enako natancnost σ_x :

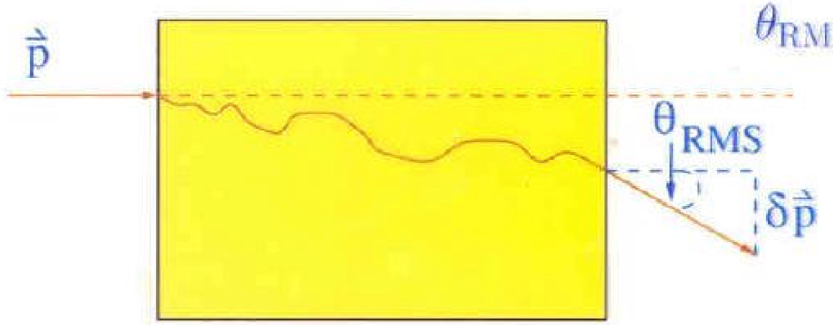
$$s = x_2 - \frac{x_1 + x_3}{2}$$

$$\frac{\sigma(p_t)}{p_t} = \frac{\sigma(s)}{s} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}}\sigma(x)8p_t}{BL^2q}$$

za N ekvidistantnih meritev se izkaze :

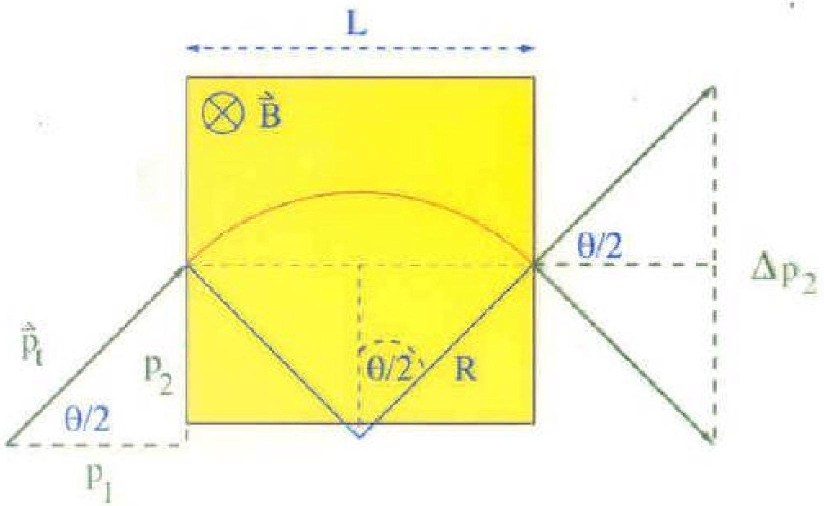
$$\frac{\sigma(p_t)}{p_t} = \frac{\sigma(x)8p_t}{BL^2q}\sqrt{\frac{720}{N+4}}$$

Meritev gibalne količine



$$\theta_{\mathrm{RMS}} \approx \frac{13.6\mathrm{MeV}}{cp\beta} \sqrt{\frac{L}{X_0}}[1 + 0.038 \ln \frac{L}{X_0}]$$

$$\delta p = p \sin \theta_{\mathrm{RMS}}$$



$$\Delta p_2 = 2p_t \sin\frac{\theta}{2} \approx p_t\theta$$

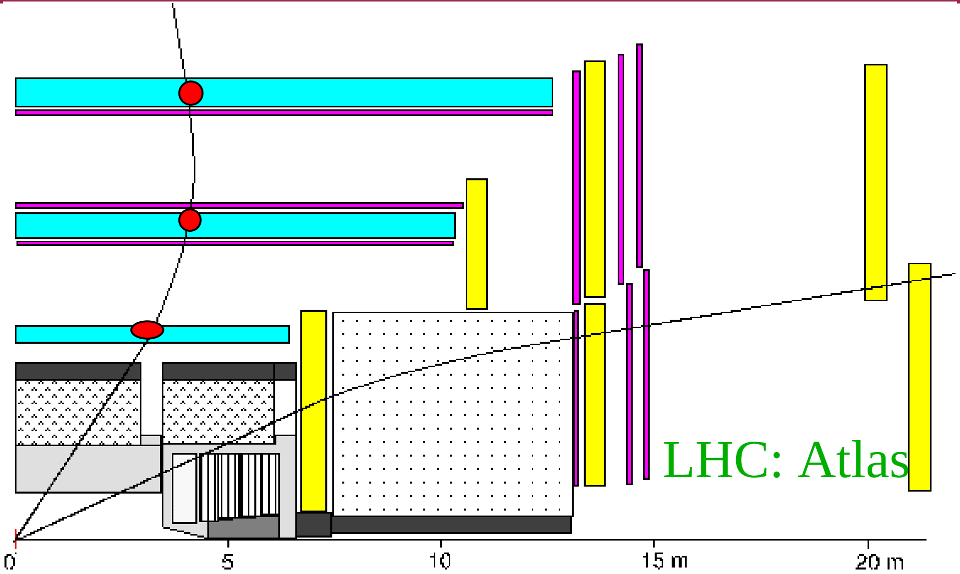
$$\frac{\sigma(p_t)}{p_t} = \frac{\sigma(\Delta p_2)}{\Delta p_2}$$

$$\frac{\sigma(p_t)}{p_t} \approx \frac{p_t \sin\theta_{\mathrm{RMS}}}{p_t\theta} \approx \frac{\theta_{\mathrm{RMS}}}{\theta}$$

$$\frac{\sigma(p_t)}{p_t} \approx \frac{13.6\ \mathrm{MeV}}{qB\sqrt{LX_0}}$$

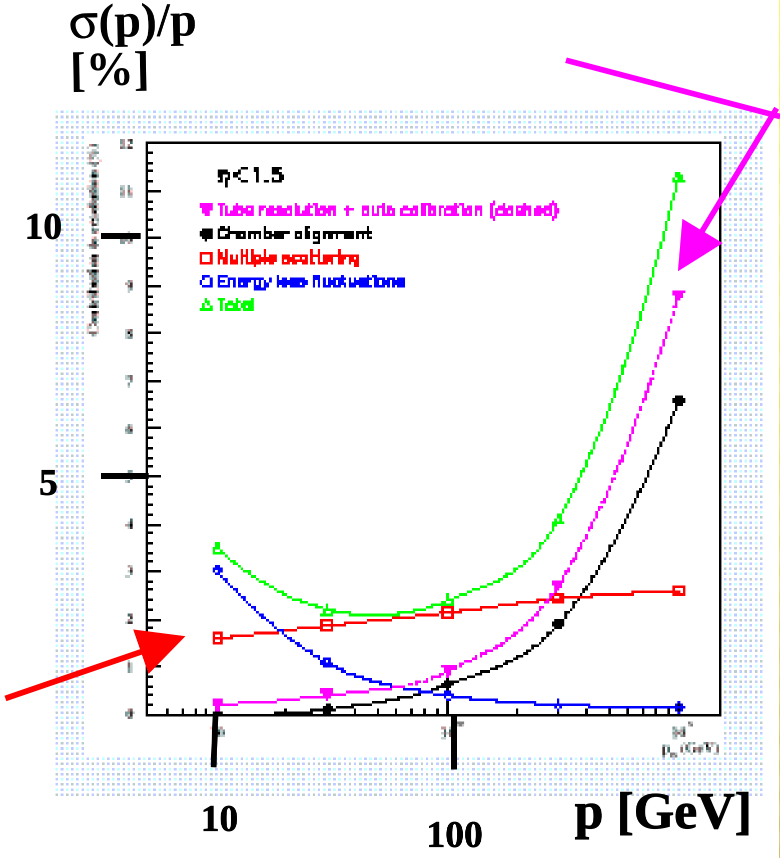
Od surovih do obdelanih podatkov

Meritev gibalne kolièine



Muon Drift Tube chambers (MDT)
3 meritve v obroèastem delu
$\sigma(x)$ = 50 μm
L = 4 m
B = 1T (BL = 3 - 9 Tm)
1000 GeV μ iz W',Z'
=> $\sigma(p)/p$ ~ 10%

Veèkratno sipanje

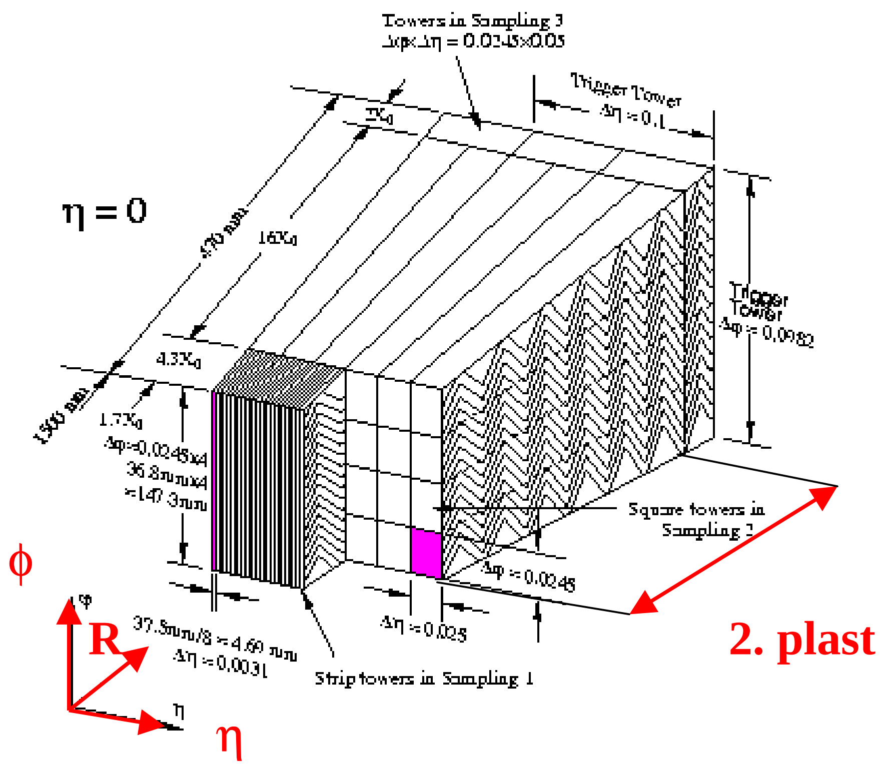


Od surovih do obdelanih podatkov

Pljuski v kalorimetrih

Kalorimetri so granulirani – sestavljeni posameznih celic;
nabit ali nevtralen delec pusti energijo v veè celicah; zanima nas celotna energija delca (ali celo pljuska – hadronski kalorim.);
potrebujemo metodo, da posamezne celice pripišemo posameznim sledem (“clustering”)

Namen asociacije pljuskov v kalorimetrih:
- izboljšano razmerje signal/šum z upoštevanjem korelacije med celicami (vzrok korelac.: razvoj pljuska)
- loèevanje EM in hadronskih pljuskov
- iskanje izoliranih delcev (e, γ, μ)



ATLAS LiAr EM kalorim.:
harmonikasta geom;
3 plasti v R;
2. plast: $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.025 \times 0.025$
$\eta = -\ln(\mathrm{tg}\,\Theta/2) \Rightarrow$ 4 cm X 4 cm)

Od surovih do obdelanih podatkov

Pljuski v kalorimetrih

Rekonstrukcija pljuskov poteka v nekaj korakih:

-osnovna izbira celic

izključitev celic na podlagi znanega šuma (“online”);
izbor celic z visokim signalom (“seed”) ter okoliških
celic z morebitnim nižjim signalom
$E_i/E_{šum,i}$ a (a=3,4,...) in $E_j/E_{šum,j}$ b (b=2,3,...);

-asociacija celic v pljuske

veè znanih algoritmov, npr. algoritem Mulguisina slika

Hadronski kalorim. predvsem za meritev energije hadr. pljuskov;

natanènost rekonstrukc. se kaže v loèljivosti inv. mase para hadr. pljuskov slika

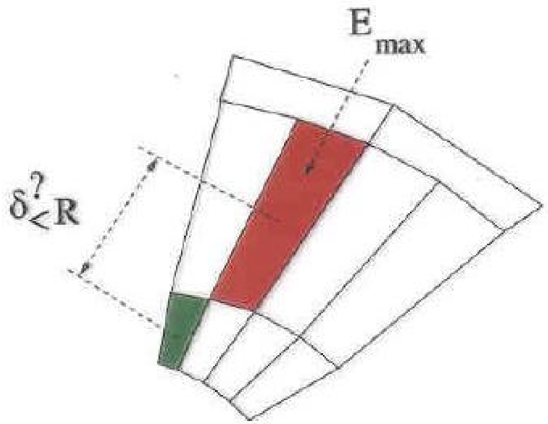
Optimizacija rekonstr. pljuskov v kalorim. odvisna od:
eksper. okolja (luminoznost);
prouèevanega fiz. procesa;

Algoritem Mulguisina

- Poiščemo celico z maksimalnim signalom E - predstavlja začetni pljusk; začetno velikost pljuska postavimo enako prostroski ločljivosti detektorja R_0
- Poiščemo celico z naslednjim največjim signalom E
- Izračunamo razdaljo med to celico in pljuskom: če je razdalja manjša od velikosti pljuska $\Rightarrow$ celico pripojimo pljusku;

  izračunamo *lahko* nov center pljuska (uteženo); novo velikost pljuska *lahko* določimo kot maksimalno razdaljo med centrom in posamezno celico;

  če je razdalja večja od velikosti pljuska definiramo celico kot nov pljusk in postavimo velikost na R_0
- Ponavljamo, dokler ne izčrpamo vseh celic



Lastnosti algoritma:

smer in velikost pljuska konstantna:

$$\begin{aligned}
E_{k+1} &= E_k^{\text{pljusk}} + E_k^{\text{celica}} \\
\eta_{k+1}^{\text{pljusk}} &= \eta_k^{\text{pljusk}} \\
\phi_{k+1}^{\text{pljusk}} &= \phi_k^{\text{pljusk}} \\
R_{k+1}^{\text{pljusk}} &= R_0
\end{aligned}$$

smer pljuska preračunana, velikost pljuska konstantna:

$$\begin{aligned}
E_{k+1} &= E_k^{\text{pljusk}} + E_k^{\text{celica}} \\
\eta_{k+1}^{\text{pljusk}} &= \left(E_k^{\text{pljusk}}\eta_k^{\text{pljusk}} + E_k^{\text{celica}}\eta_k^{\text{celica}}\right)/\left(E_k^{\text{pljusk}} + E_k^{\text{celica}}\right) \\
\phi_{k+1}^{\text{pljusk}} &= \left(E_k^{\text{pljusk}}\phi_k^{\text{pljusk}} + E_k^{\text{celica}}\phi_k^{\text{celica}}\right)/\left(E_k^{\text{pljusk}} + E_k^{\text{celica}}\right) \\
R_{k+1}^{\text{pljusk}} &= R_0
\end{aligned}$$

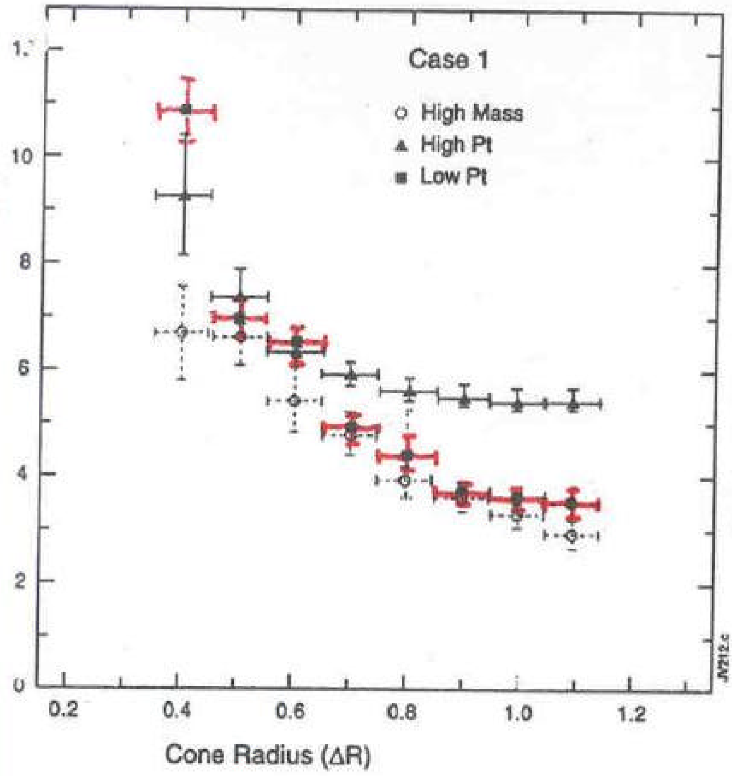
smer pljuska preračunana, velikost pljuska preračunana:

$$\begin{aligned}
E_{k+1} &= E_k^{\text{pljusk}} + E_k^{\text{celica}} \\
\eta_{k+1}^{\text{pljusk}} &= \left(E_k^{\text{pljusk}}\eta_k^{\text{pljusk}} + E_k^{\text{celica}}\eta_k^{\text{celica}}\right)/\left(E_k^{\text{pljusk}} + E_k^{\text{celica}}\right) \\
\phi_{k+1}^{\text{pljusk}} &= \left(E_k^{\text{pljusk}}\phi_k^{\text{pljusk}} + E_k^{\text{celica}}\phi_k^{\text{celica}}\right)/\left(E_k^{\text{pljusk}} + E_k^{\text{celica}}\right) \\
R_{k+1}^{\text{pljusk}} &= max(R_k, \delta)
\end{aligned}$$

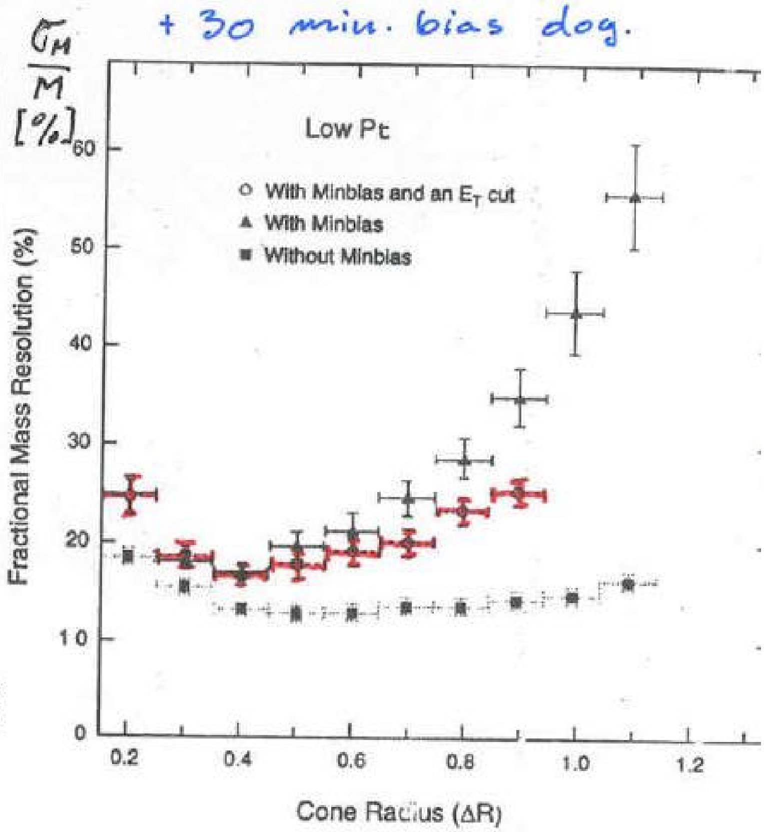
Natančnost določanja inv. mase
para hadronskih pljuskov

Simulacija LHC

posamezen dogodek



posamezen dog.
+ 30 min. bias dog.



z večanjem velikosti pljuska rekonstr. večji del energ. ⇒ ⇒ boljša ločljivost

z manjšanjem velikosti pljuska rekonstr. manjši del energ. ⇒ slabša ločljivost

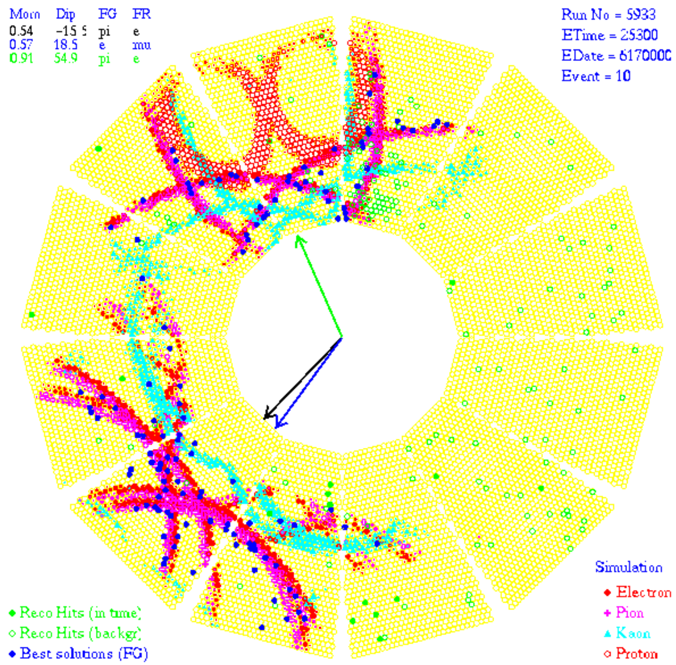
z večanjem velikosti pljuska rekonstr. del energ. ostalih dog. ⇒ ⇒ slabša ločljivost

Od surovih do obdelanih podatkov

Identifikacija delcev

Detektorji obroèev Èerenkova:

signali v fotonskem detektorju => radij obroèa => Èerenkov kot => β delca (masa)



BaBar - DIRC

Veliko število γ - nemogoèe upoštevati vse kombinacije;

sled nabitega delca (preko enaèb, odvisnih od geometrije detektorja) podaja središèe obroèa;

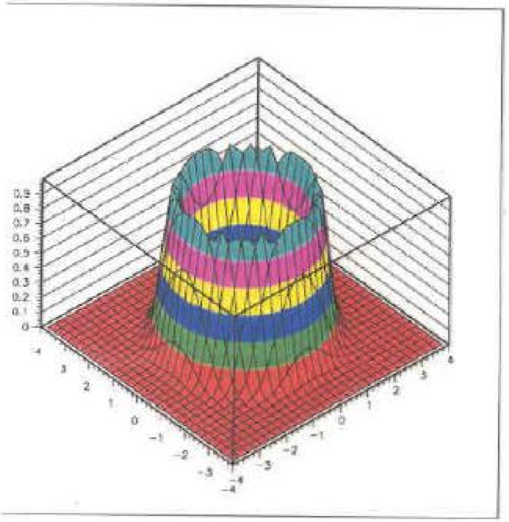
upoštevamo le γ "dovolj blizu" prièakovanega kota

$$\theta_c = \theta_c^{exp}(m_i) +- N\sigma_\theta$$

Od surovih do obdelanih podatkov

Identifikacija delcev

Funkcija maksimalne zanesljivosti za N fotonov, pričakovan signal $N_{\rm exp}$, prost parameter število fotonov ozadja $N_{\rm bg}$:



$$\mathcal{L}(N_{\rm bg}) = \mathcal{P}_{\rm Poisson} \prod_{i=1}^{N} \mathcal{P}_i$$

$$\mathcal{P}_{\rm Poisson} = \frac{(N_{\rm exp} + N_{\rm bg})^N \; e^{-(N_{\rm exp}+N_{\rm bg})}}{N!}$$

$$\mathcal{P}_i = \frac{N_{\rm exp}}{N_{\rm exp} + N_{\rm bg}} \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{\frac{-(\theta_i-\theta_C)^2}{2\sigma_i^2}}}_{\text{Gaussova porazdelitev } \gamma \text{ okoli } \theta_C(p_i,m_i)} + \frac{N_{\rm bg}}{N_{\rm exp} + N_{\rm bg}} \underbrace{\frac{\theta_i}{6\theta_C\sigma_i}}_{\text{enakomerna porazdelitev po povrsini detekt. } \propto \theta_i}$$

Tako izračunano funkcijo maks. zanesljivosti primerjamo z enako funkcijo ob predpostavki, da so fotoni zgolj ozadje: $N_{\rm exp} = 0$, $N_{\rm bg} = N$

$\Rightarrow$ merilo za verjetnost da množica fotonov izvira iz delca z (p_i, m_i).

Identifikacija delcev

Pri večjem številu fotonov lahko izvedemo grupiranje:

- foton z najmanjšo razdaljo (v enotah σ_C) do pričakovanega kota θ_C;

- v obroč dodajamo fotone, ki so od prvega oddaljeni za manj kot $k\theta_C$; pri tem pri vsakem dodanem fotonu izračunamo povprečen θ_C:

$$\theta_C = \frac{\sum_i \frac{w_i}{\sigma_i^2}\theta_i}{\sum_i \frac{w_i}{\sigma_i^2}} \qquad \sigma_C = \frac{1}{\sqrt{\sum_i \frac{w_i}{\sigma_i^2}}}$$

(z utežmi w_i lahko upoštevamo ozadje)

- to nadaljujemo, dokler ne zmanjka fotonov, nato ponovimo s preostalimi fotoni in za ostale masne hipoteze

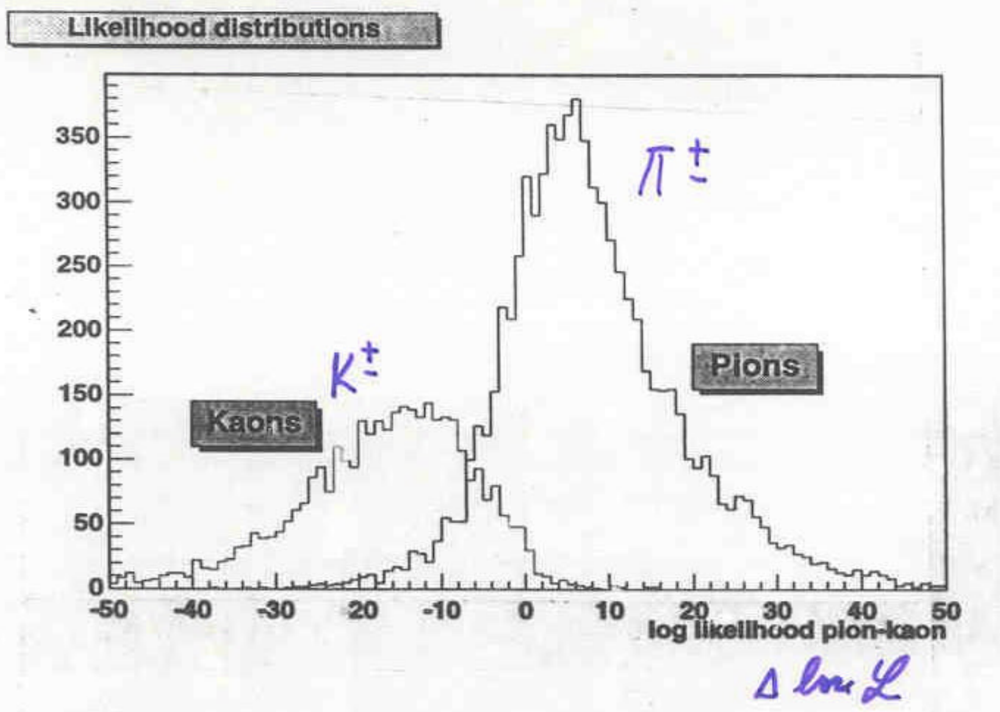
$\Rightarrow$ rezultat je skupina obročev (vsak z N^i_{ring} fotoni) za vsako masno hipotezo

HERA-B:

LOČEVANJE $K^{\pm}/\pi^{\pm}$

- Funkc. maks. zaneslj.

$$\mathcal{L}(\pi^{\pm}, \text{ne } K^{\pm}) / \mathcal{L}(K^{\pm}, \text{ne } \pi^{\pm})$$



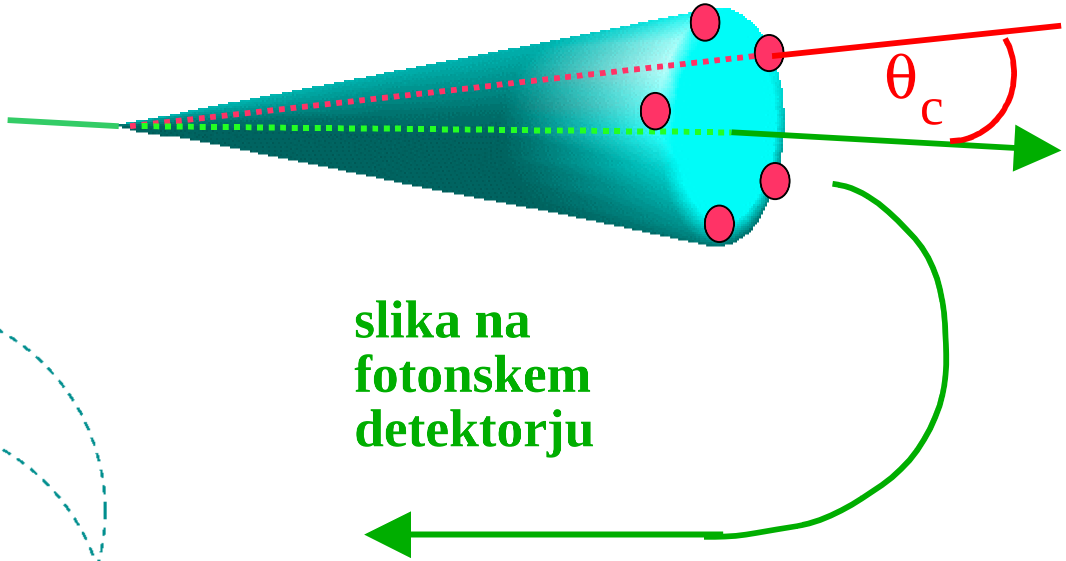
Od surovih do obdelanih podatkov

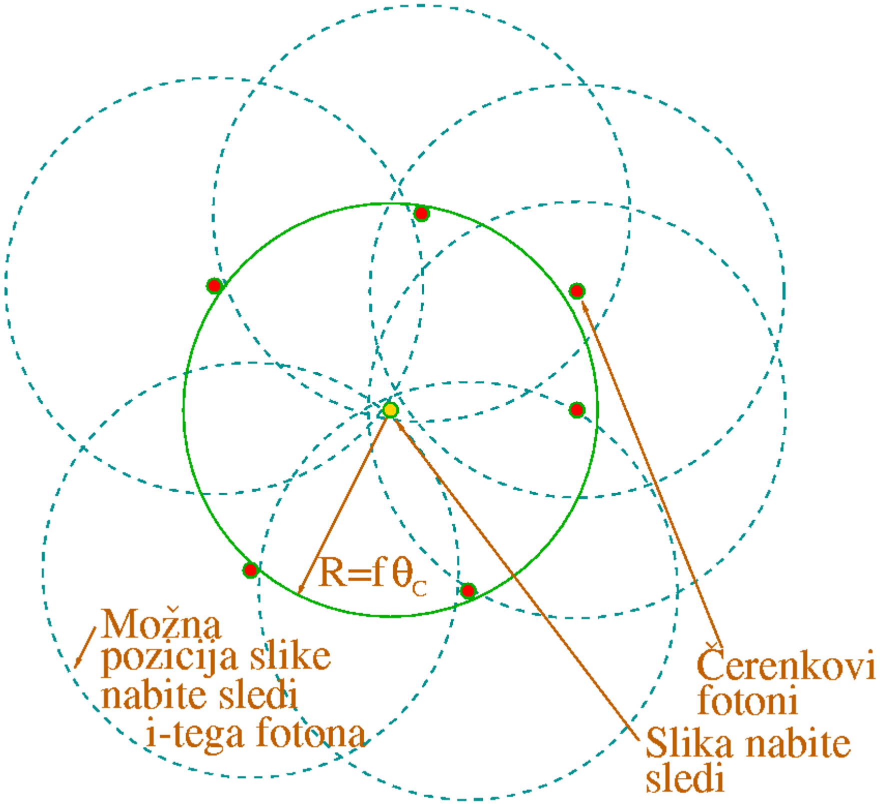
Identifikacija delcev

Samostojno iskanje obroèev

HERA B:

histogramska metoda





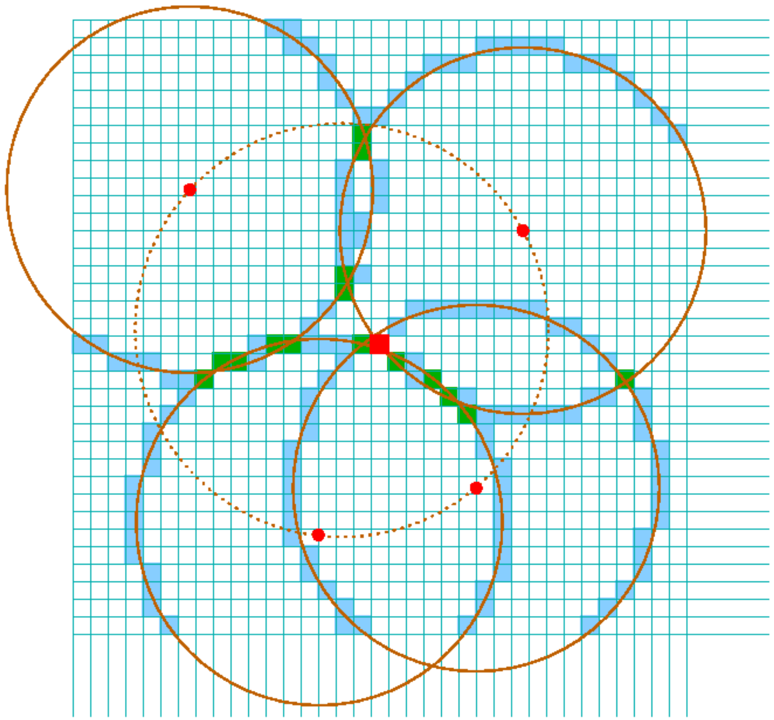
dodatna meritev za prilagajanje sledi ali koordinata sledi nepoznana

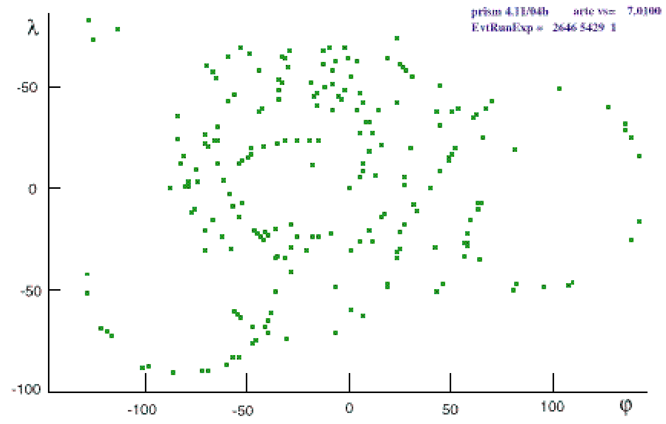
$$\theta_c = \kappa(\beta)\ \theta_0$$

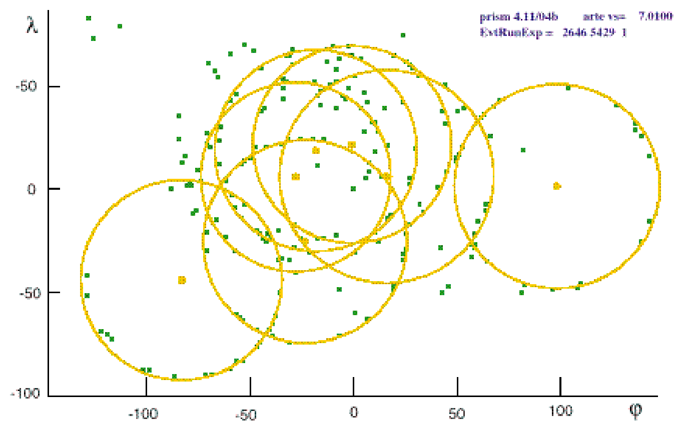
$$\theta_0 = \theta_c(\beta=1)$$

Od surovih do obdelanih podatkov

Identifikacija delcev



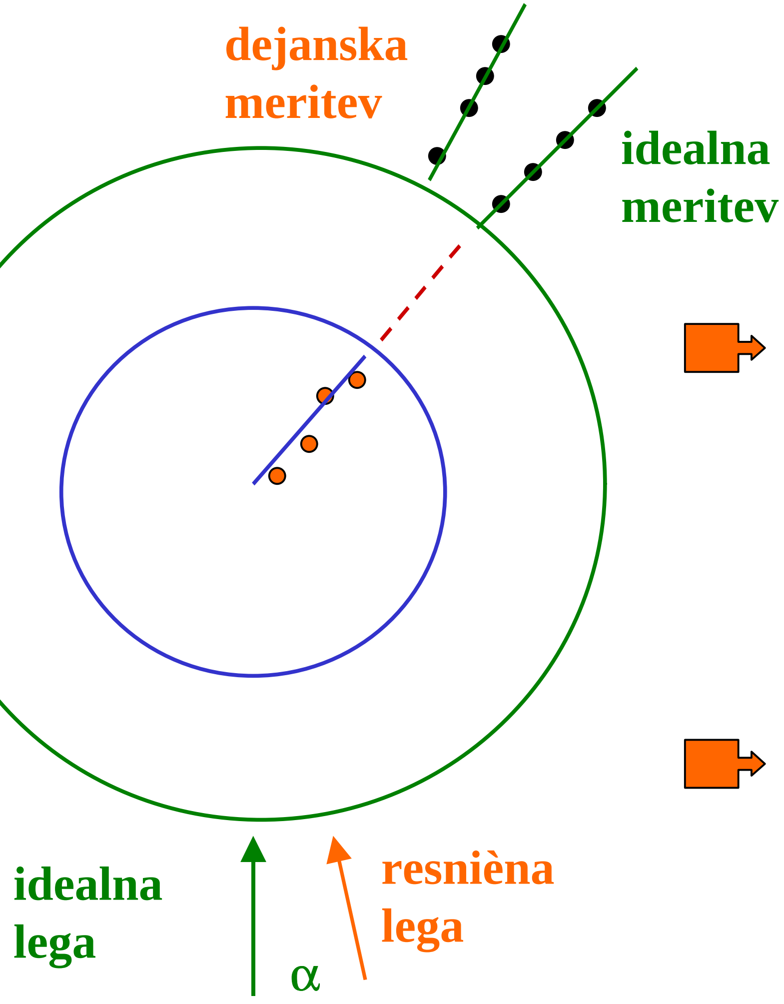




-poskusimo z $\theta=\kappa(\beta_1)\theta_0$
-vsem celicam, ki vsebujejo i-ti obroè poveèamo utež
-ponovimo z $\theta=\kappa(\beta_n)\theta_0$
-najveèjo vsoto utež i ima središèe obroèa

Umeritev

Umeritev sledilnih detektorjev



Umeritev sledilnih detektorjev:
posamezne detektorje moramo pravilno orientirati med seboj, sicer sledi popaèene

Za vsako umeritev potrebujemo vzorec (sledi, razpadov), za katerega poznamo odziv detektorja

enaèbe

Umeritev sledilnih detektorjev

Opis premika med detektorji

Relativni premik detektorjev glede na referenčnega opišemo z nizom majhnih parametrov $\vec{\alpha}$ (translacija, rotacija, lahko tudi časovni zamik,...)

Predpostavimo linerano zvezo:

$$\vec{q}^{\text{ izmer}} - \vec{q}^{\text{ e}} = S\vec{\alpha}$$

$\vec{q}^{\text{ izmer}}$: vektor meritev (koordinat, kotov) v nekem detektorju;
$\vec{q}^{\text{ e}}$: vektor enakih količin, ekstrapoliran od referenčnega detektorja do detektorja, s katerim izmerimo $\vec{q}^{\text{ izmer}}$;
S: matrika, odvisna od merjenih koordinat, modela sledi in geometrije detektorjev;

V preprostem primeru je vektor $\vec{\alpha}$ sestavljen iz treh translacij in treh rotacij:

$$\vec{\alpha} = (\eta_x \ , \ \eta_y \ , \ \eta_z \ , \ \epsilon_x \ , \ \epsilon_y \ , \ \epsilon_z)$$

Umeritev sledilnih detektorjev

Določitev relativnega premika:

Minimiziramo χ^2:

$$\chi^2 = \sum_{k \in \text{merske točke}} [\vec{q}_k^{\ \text{izmer}} - \vec{q}^{\ e} - S_k\vec{\alpha}]^T W_k^{-1} [\vec{q}_k^{\ \text{izmer}} - \vec{q}^{\ e} - S_k\vec{\alpha}]$$

kar nam da za rešitev:

$$\left(\sum_{k \in \text{merske točke}} S_k^T W_k^{-1} S_k\right)\vec{\alpha} = \sum_{k \in \text{merske točke}} S_k^T W_k^{-1} (\vec{q}_k^{\ \text{izmer}} - \vec{q}^{\ e})$$

Rezultat so premiki $\vec{\alpha}$, za katere popravimo izmerke v posameznem detektorju

Umeritev

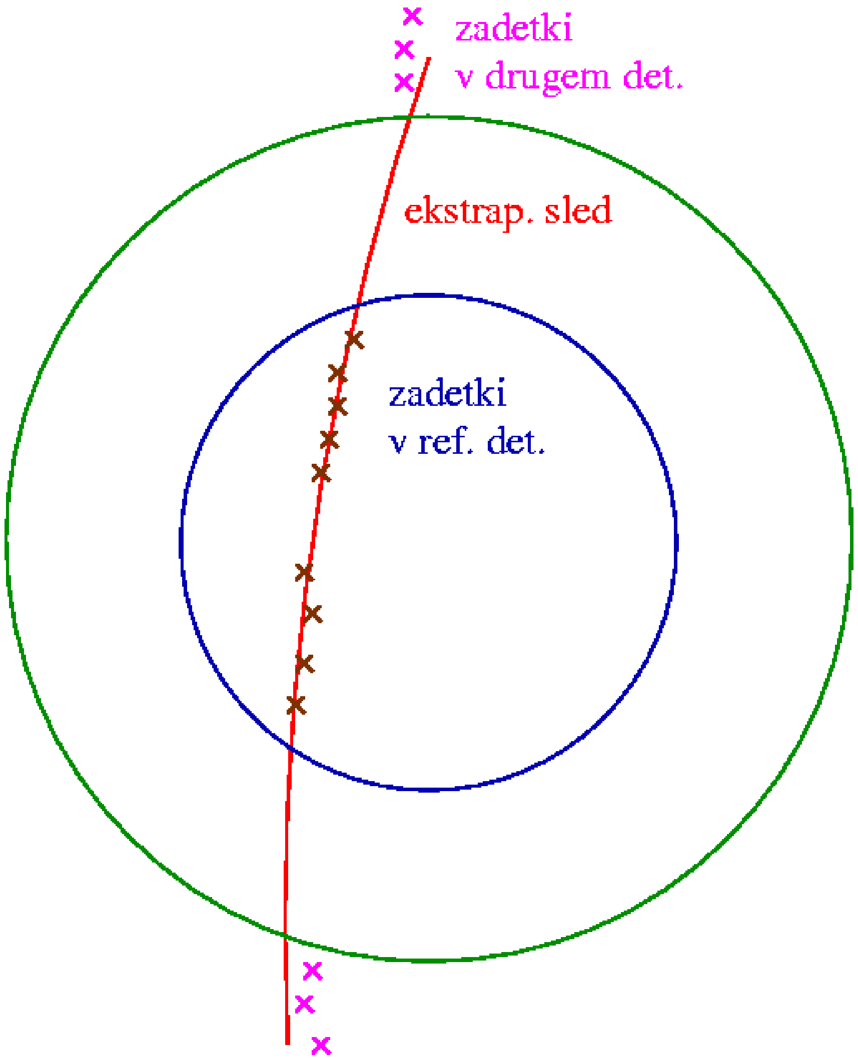
Umeritev sledilnih detektorjev

Primeren vzorec sledi predstavljajo kozmièni žarki

Umeritev lahko izvedemo tudi z ustreznimi razpadi, npr. LEP:
$Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$;

slednji tudi za ilustracijo uspešnosti metode

slike



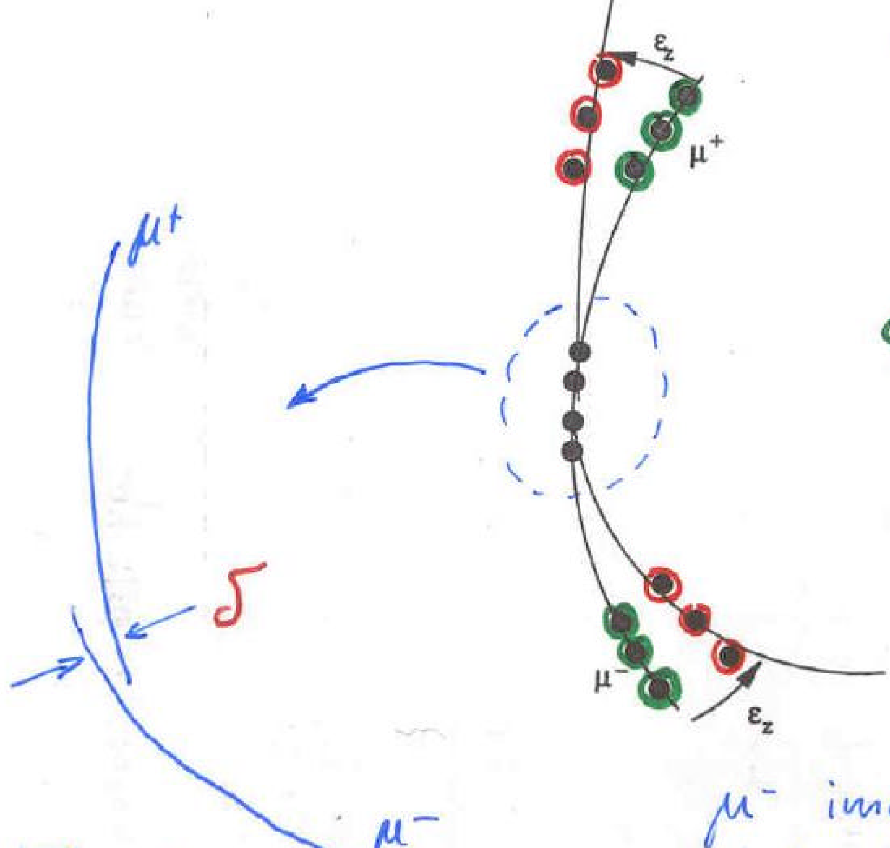
Popačenje sledi

zaradi napačne medsebojne orientacije detektorjev

μ^+ ima večji izmerjen kot ekstrap. krivinski R

o izmerjeni zadetki v zasukanem det.

o ekstr. zadetki

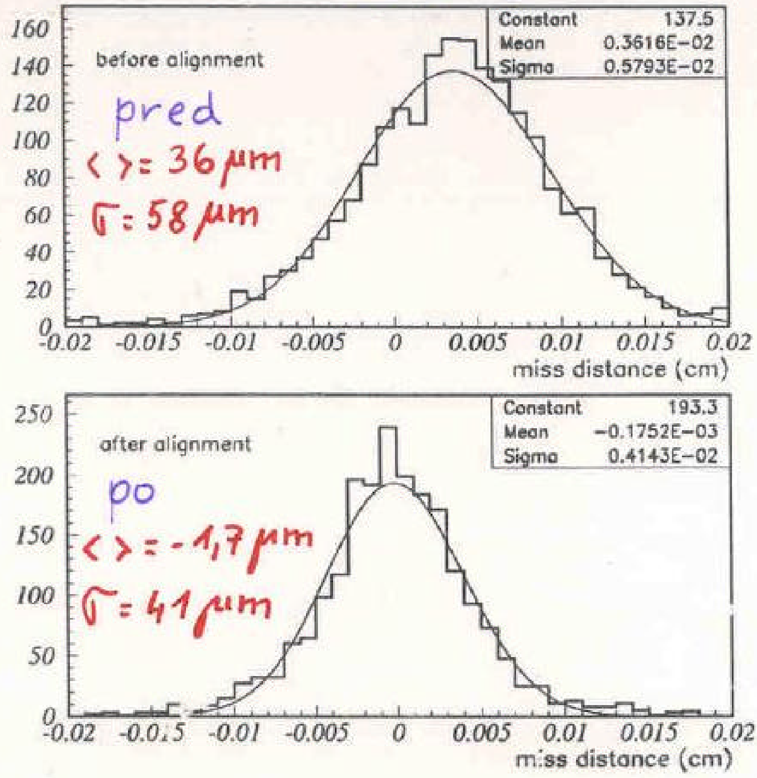


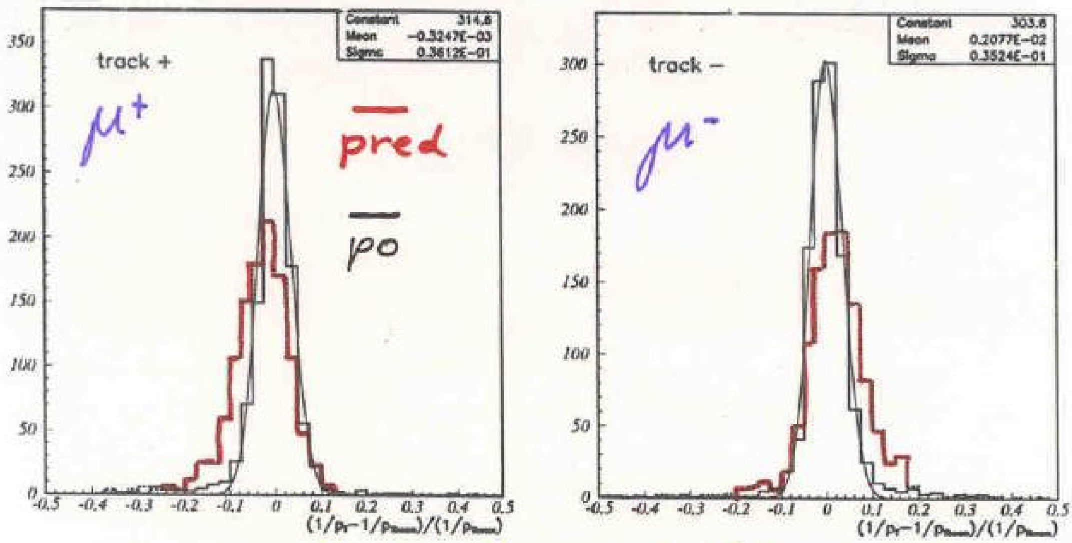
μ^- ima manjši izmerjen kot ekstrap. krivinski R

podaljška izmerjenih sledi se ne sekata v interakcijski točki

ORIENTIRANJE VD DELPHI

δ [cm]





$$\left[\frac{1}{p_t} - \frac{1}{p_t(\text{ekst.})}\right] \Big/ \frac{1}{p_t(\text{ekst.})}$$

Umeritev

Umeritev podatkov in MC

- **Detektorji potrebujejo umeritev**
  za natanèno razumevanje signalov, katere povzroèijo detektirani delci (tipièen primer – kalorimetri).

  Uporaba MC simulacije zahteva natanèno usklajevanje simuliranega odziva detektorja, da simulirani dogodki kar najbolj verno popišejo realno meritev.

- **Kratek primer umeritve detektorja obroèev Èerenkova**
  -delci v snovi z lomnim koliènikom n sevajo Èerenkove fotone;
  za rekonstrukcijo kota Èerenkova potrebno natanèno poznavanje n
  -pri rekonstrukciji $\theta_è$ nabitega delca uporabljamo napako $\sigma(\theta_è)$ posameznega fotona;
  potrebujemo zanesljivo oceno te napake

Umeritev

Umeritev podatkov in MC

Kot za vsako umeritev:
vzorec sledi z znanim odzivom

$$\cos \theta_{è} = 1 / \beta n$$

uporabimo sledi z $p > 6$ GeV/c^2; tudi protoni tedaj $\beta = 1 - 10^{-2}$

$$\cos \theta_{è} = 1 / n$$

Meritev kota Èerenkova za take sledi da vrednost lomnega koliènika n

Za take sledi izmerimo porazdelitev

$$[\theta_{è}(\text{izmer}) - \theta_{è}(\text{priè})]/\sigma_{è}$$

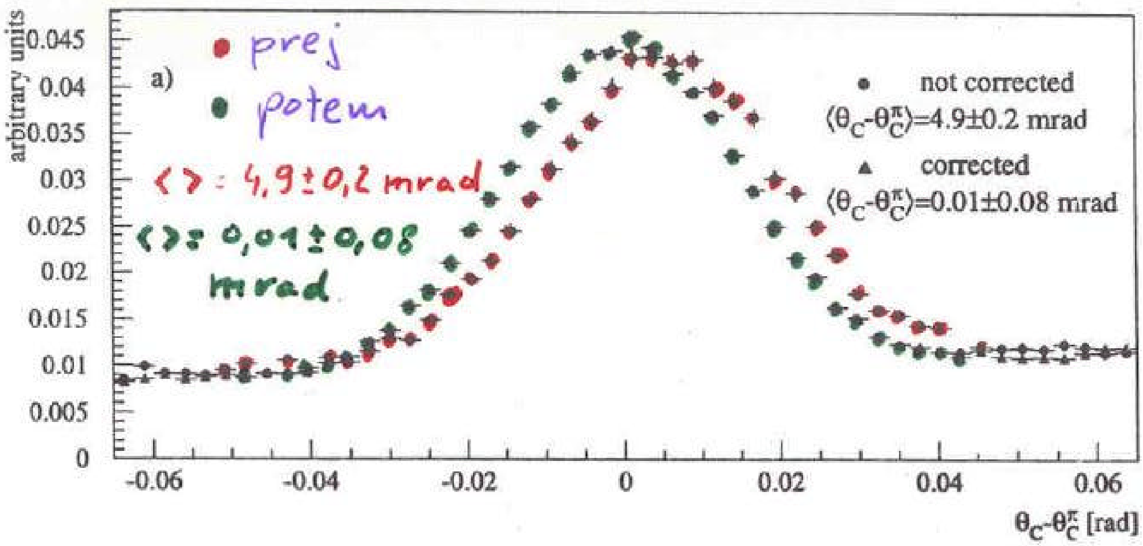
(‘pull’)

povpreèna vrednost: 0
širina porazdelitve: 1
Èe širina porazdelitve ni 1 => popravimo napako

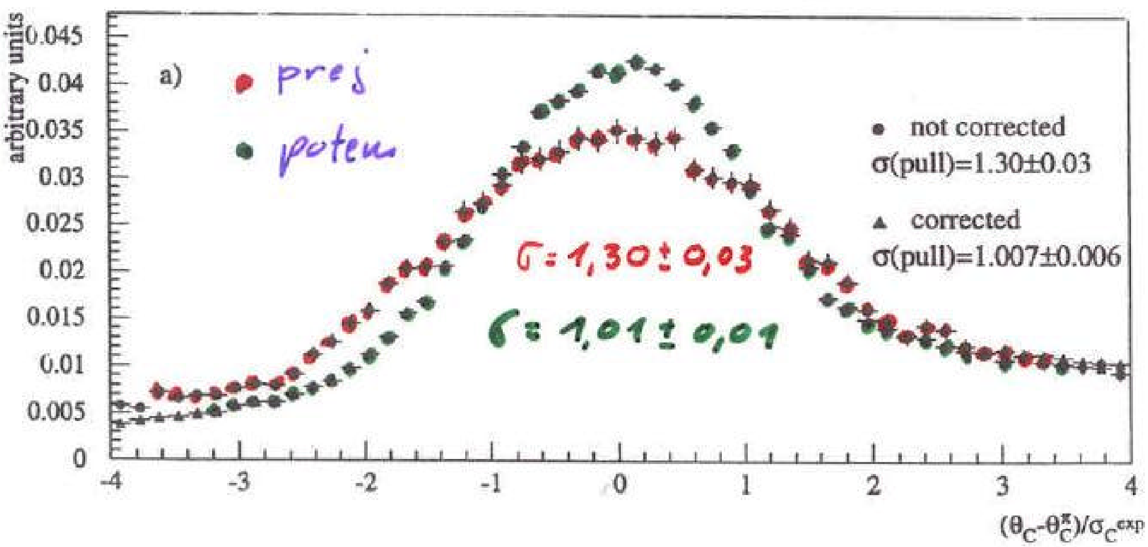
Slike

Umeritev detektorja RICH (DELPHI)

θ_c(izmer) - θ_c(prič) [rad]



pull

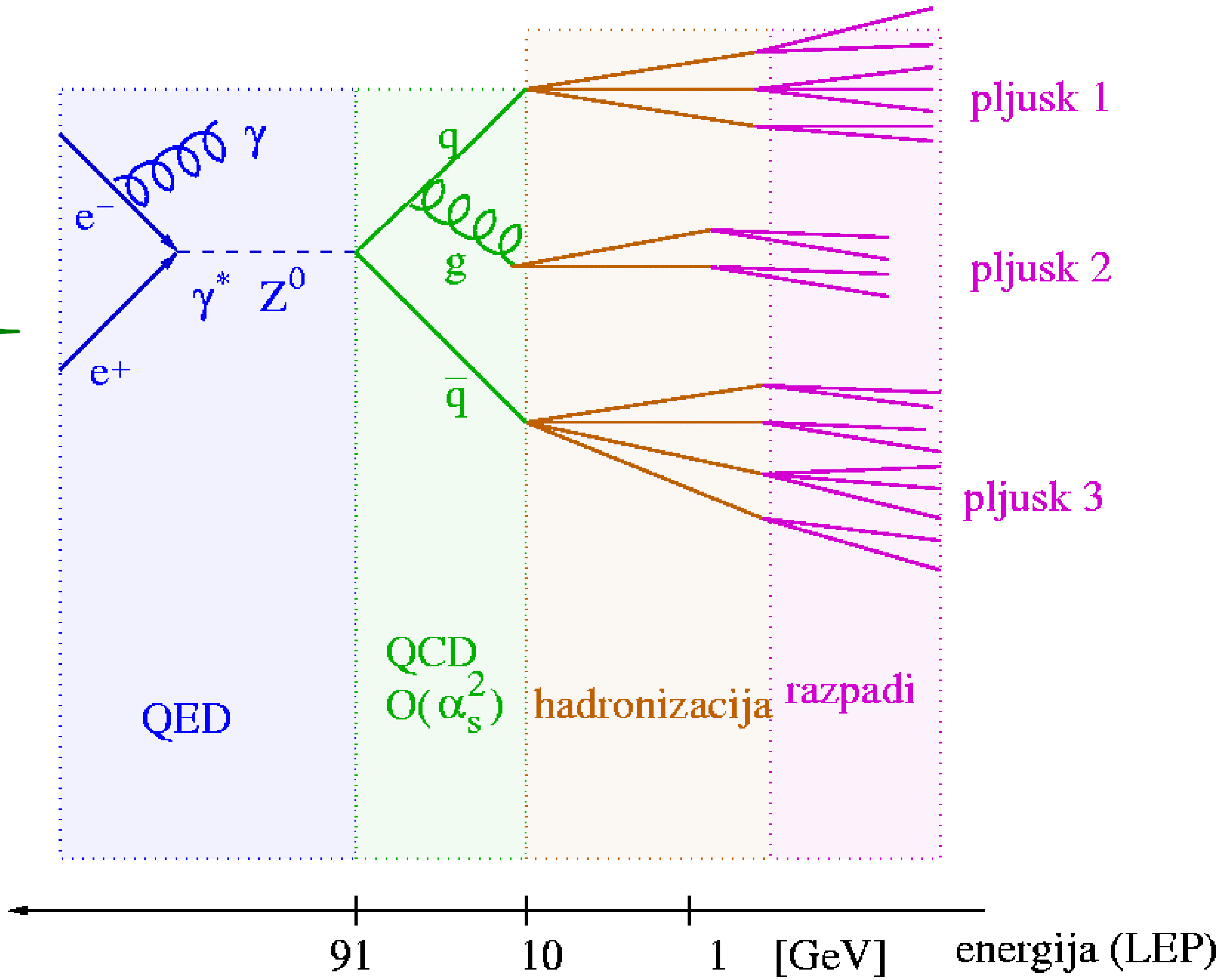


Analiza

Rekonstrukcija hadronskih pljuskov

- Vsi procesi s q $\Rightarrow$ hadronski pljuski

Primer formacije pljuskov pri $e^+ e^- \rightarrow Z^0$ (LEP)



- V detektorjih izmerimo pljuske, iz katerih želimo sklepati o procesih na nivoju partonov

Analiza

Rekonstrukcija hadronskih pljuskov

Rekonstrukcija pljuskov – eksperimentalna metoda (katere sledi pripišemo posameznem pljusku)
opazljivke (št. pljuskov, št. sledi v pljusku, kotna porazdelitev pljuskov, ...) morajo biti izražljive s parametri teorije

Definicija hadr. pljuska mora biti primerna za eksperimentalno uporabo in teoretiène izraèune, èe naj primerjamo napoved teorije z eksperimentom

Algoritem za druženje sledi v pljuske

Resolucijski parameter y_{cut} **èe dve sledi** $y_{ij} < y_{cut}$ **združimo v pljusk**	**Naèin kombiniranja sledi, npr.** $\vec{p}_{jet} = \vec{p}_i + \vec{p}_j$

tabela

Rekonstrukcija hadronskih pljuskov

Algoritmi

algoritem	resolucijski param.	kombiniranje	opombe
JADE	$y_{\mathrm{cut}} = M_{ij}^2/E_{\mathrm{mer}}^2 = 2E_iE_j(1-\cos\theta_{ij})/E_{\mathrm{mer}}^2$	$p_k = p_i + p_j$	ohranja E in $\vec{p}$
p	$y_{\mathrm{cut}} = (p_i + p_j)^2/E_{\mathrm{mer}}^2$	$\vec{p}_k = \vec{p}_i + \vec{p}_j$ $E_k = \lvert\vec{p}_k\rvert$	ohranja $\vec{p}$
DURHAM	$y_{\mathrm{cut}} = 2\,\min(E_i^2, E_j^2)(1-\cos\theta_{ij})/E_{\mathrm{mer}}^2$	$p_k = p_i + p_j$	LO in NLO log izračuni

p_i: vektor četverec gib. kol.
$\vec{p}_i$: vektor gib. kol.

Višji redi v perturbacijski QCD so narejeni v približku brezmasnih partonov
$\Rightarrow$ zato tudi resolucijski parametri za brezmasne partone

Rekonstrukcija hadronskih pljuskov

Kvaliteta algoritmov

Za vse algoritme obstajajo napovedi perturbativne QCD do $\mathcal{O}(\alpha_s^2)$, npr. relativno št. pljuskov v trku e^+e^-:

$$
\begin{aligned}
R_2 &= 1 - A(y_{\rm cut})\frac{\alpha_s(\mu)}{2\pi} - [B(y_{\rm cut},\mu) + C(y_{\rm cut})]\left(\frac{\alpha_s(\mu)}{2\pi}\right)^2 \\
R_3 &= A(y_{\rm cut})\frac{\alpha_s(\mu)}{2\pi} + B(y_{\rm cut},\mu)\left(\frac{\alpha_s(\mu)}{2\pi}\right)^2 \\
R_4 &= C(y_{\rm cut})\left(\frac{\alpha_s(\mu)}{2\pi}\right)^2
\end{aligned}
$$

Zgornje napovedi + hadronizacijski model $\Rightarrow$ primerjava napovedi za partone in hadronske pljuske

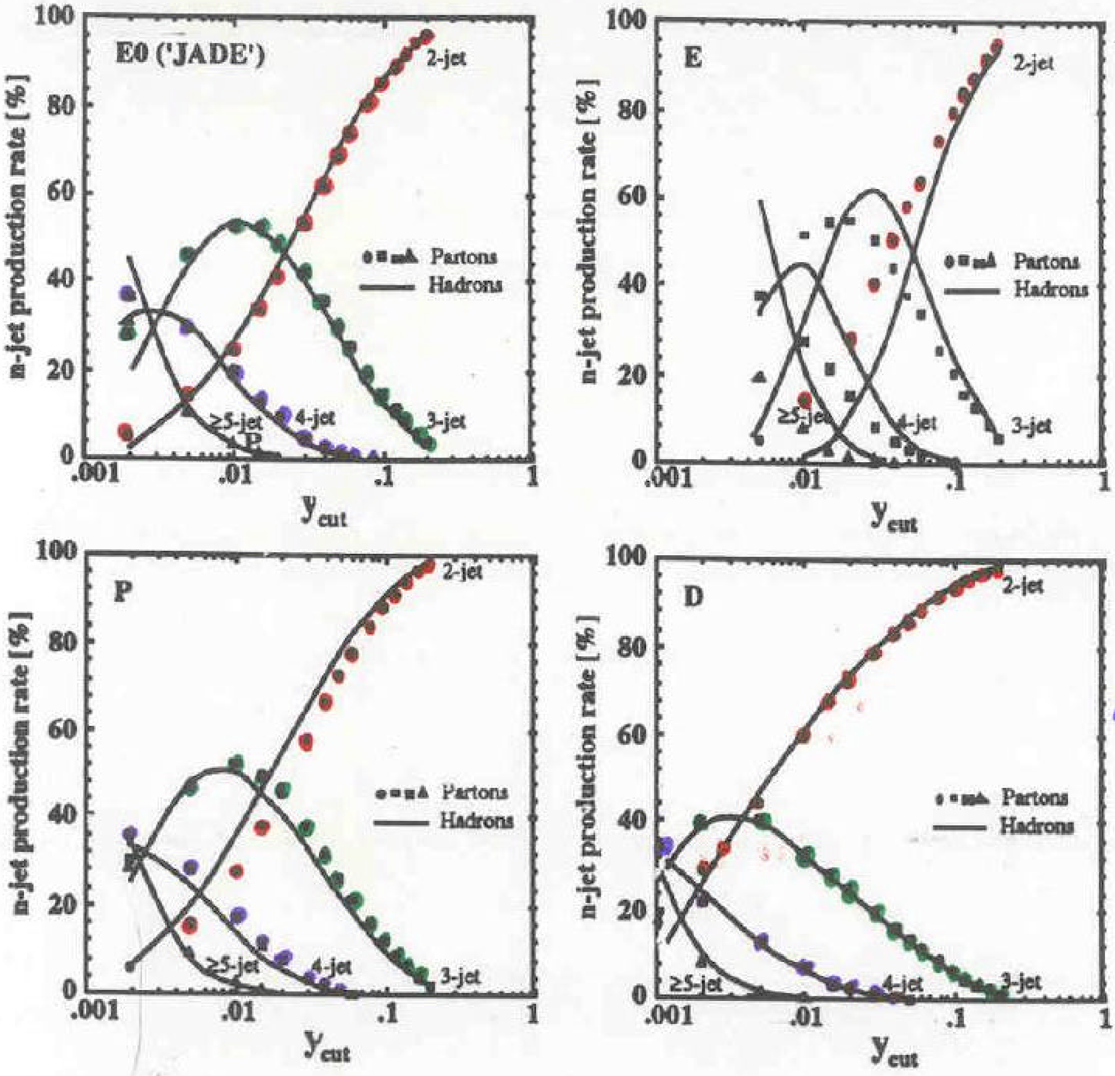
Relat. št. pljuskov
v trku e^+e^-
partoni/hadroni

— hadroni
● partoni 2 pljuska
● partoni 3 pljuski
● partoni 4 pljuski

JADE

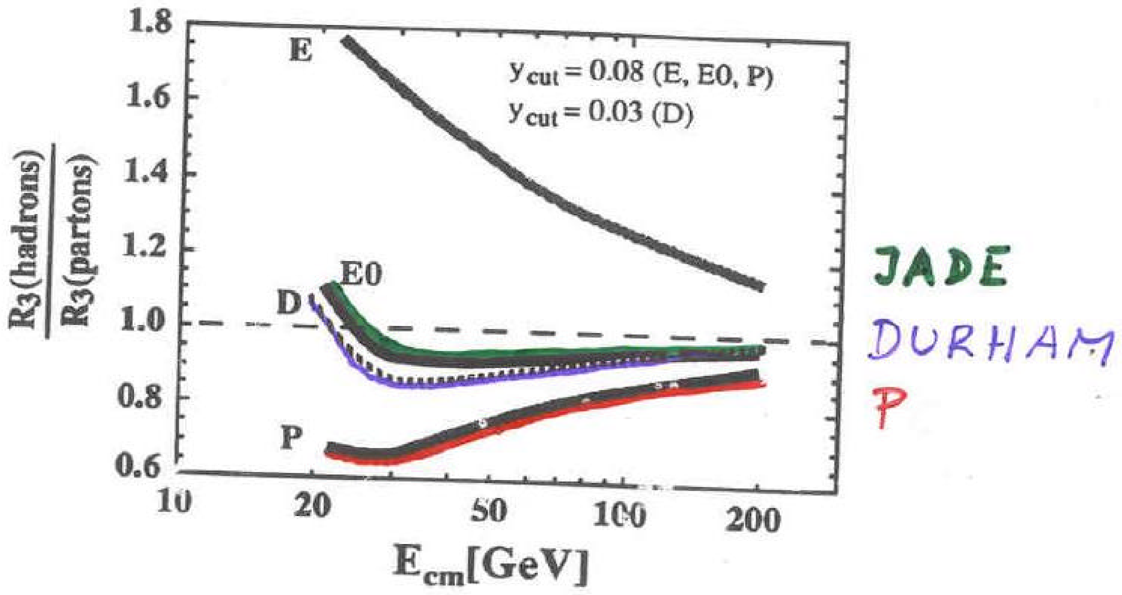
P

DURHAM



$E_{cms} = 91$ GeV

Št. trkov e^+e^- s
tremi pljuski
hadroni / partoni



Analiza

Oznaèevanje težkih kvarkov

- Pogosto želimo med razliènimi **hadronskimi pljuski** doloèiti tiste, ki izvirajo **iz težkih (b) kvarkov**

  H^0 (m < 150 GeV/c^2) $\rightarrow b\bar{b}$ v > 50% primerov, oscilacije in kršitev simetrije CP v sistemu mezonov B,...

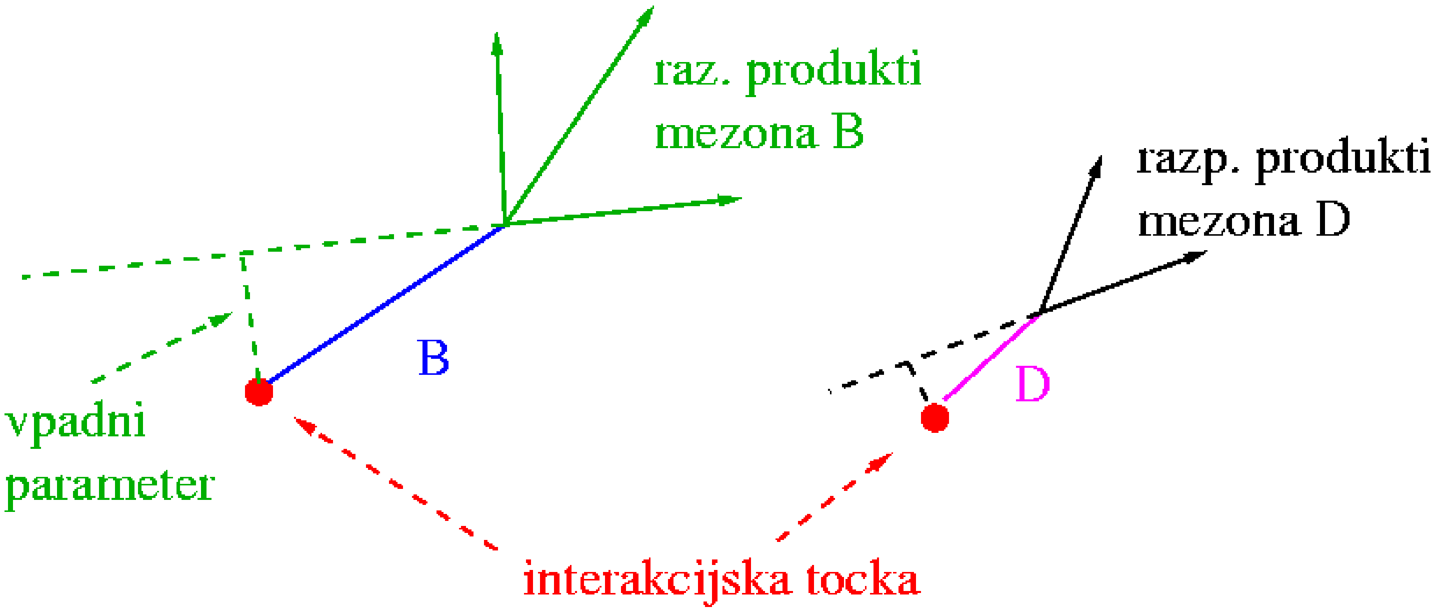
- V ta namen uporabimo **lastnosti hadronov** sestavljenih iz kvarkov b

življenjski èas	masa	energija
1,6 ps	5,3 GeV/c^2	energ. kvarka b v fragmentaciji višja kot energ. lažjih kvarkov

Analiza

Oznaèevanje težkih kvarkov

Življenjski èas:



$$\gamma c\tau_B > \gamma c\tau_D => \delta_B > \delta_D$$

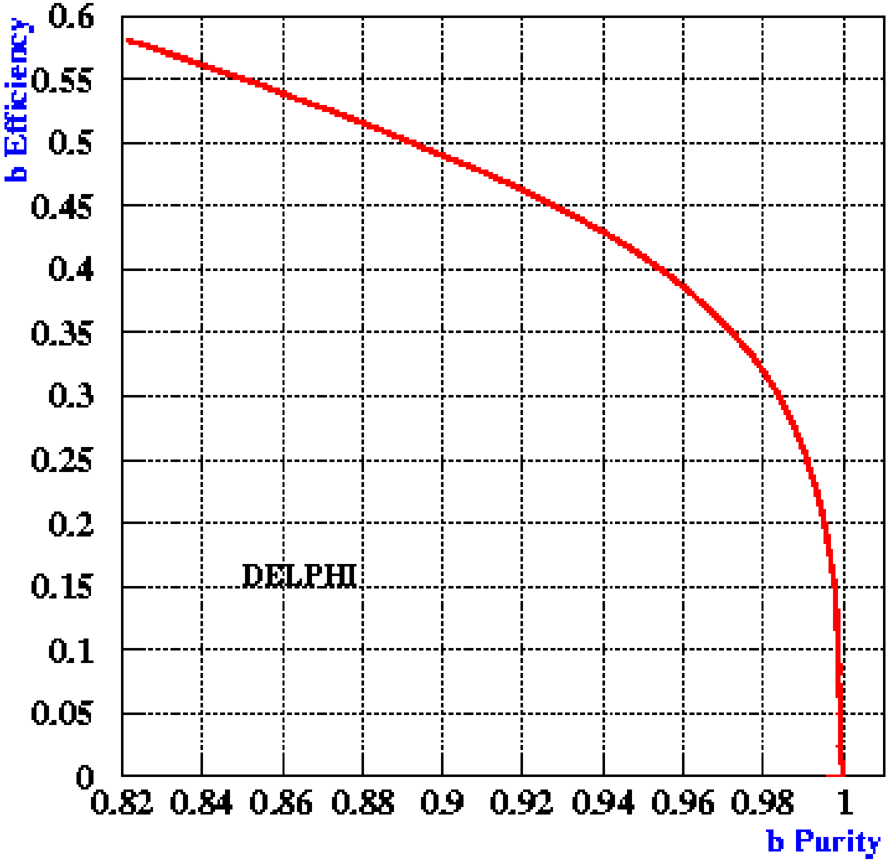
Analiza

Označevanje težkih kvarkov

- **Masa:**
  invariantna masa razpadnih produktov, rapidnost razpadnih produktov

enaèbe

$$\frac{N_b(izb)}{N_b(gen)}$$



$$\frac{N_b(izb)}{N_{vsi}(izb)}$$

- **Vse naštete lastnosti skombiniramo (MC) v eno samo verjetnost, ki jo pripišemo posameznemu pljusku, da izvira iz kvarka b**

Označevanje težkih kvarkov

Masa hadronov B:
Za enostavno oceno vzemimo dvodelčni razpad $B(M) \to X(E_1)Y(E_2)$

$$
\begin{aligned}
\text{rapidity}: \quad y &= \frac{1}{2}\ln\left[\frac{E+p_z}{E-p_z}\right] \\
M^2 &\approx 2E_1E_2(1-\cos\theta) \\
E_1 &\approx E_2 \approx E/2 \\
\cos\theta &\approx 1-\frac{2M^2}{E^2} \\
y &\approx \frac{1}{2}\ln\left[\frac{1+\cos\theta/2}{1-\cos\theta/2}\right] \underbrace{\approx}_{M/E\ll 1} \frac{1}{2}\ln\left[\frac{4E^2}{M^2}-1\right]
\end{aligned}
$$

Povprečno število delcev v razpadu mezona B > kot pri razpadu mezona D
⇒ rapidnost razp. prod. še manjša

Količine za označevanje kvarkov b (DELPHI)

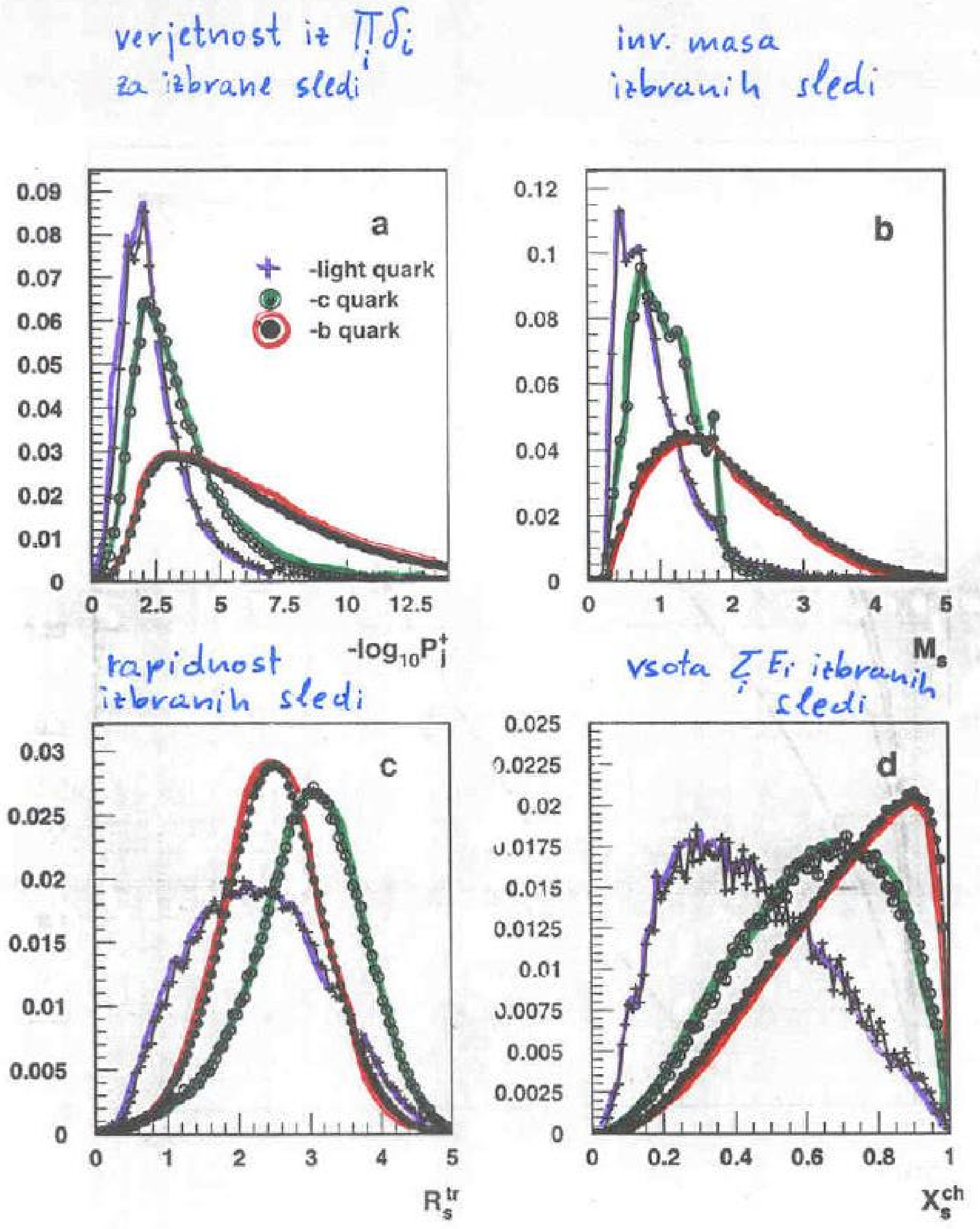


Figure 1: Distributions of discriminating variables used in the tagging.

Analiza podatkov

Zakljuèek

- **Pot od zajema elektronskih signalov v detektorju do analize, ki postreže z merjenimi fizikalnimi kolièinami, vsebuje nekaj pomembnih korakov**

- **Vsak od teh predstavlja samosvoj problem in zahteva specifiène rešitve**

- **Zanesljivost konènih rezultatov meritev je moèno odvisna od kakovosti rekonstrukcije**

Nekaj (nekonvencionalne) literature
(bolj specialistièen dodatek osnovam v uèbenikih)

Prilagajanje sledi:
-P. Billoir, S. Qian, Simultaneous Pattern Recognition and Track Fitting by the Kalman Filtering Method, NIM A294 (1990) 219-228
- P. Billoir et al., Report on Global Track and Vertex Fitting in the DELPHI Detector, DELPHI Internal note 86-99/Prog-61 (1986) (na voljo pri B.G.)
-P. Billoir, Error Propagation in the Helix Track Model, DELPHI Internal note 87-4/Prog-63 (1987) (na voljo pri B.G.)

Meritev gibalne kolièine:
-C. Joram, Particle Detectors, Lectures for CERN Academic Training 1997-98, http://training.web.cern.ch/Training/ACAD/Transparencies/Joram300398/pd1/index.html (del na voljo pri B.G.)

Rekonstr. pljuskov v kalorim:
-M. Bosman et al., Jet Finder Library: version 1.0, ATLAS Internal note ATL-SOFT-98-038 (na voljo pri B.G.)
-P. Loch, Suggestions for a General Energy Reconstruction Scheme for the ATLAS Calorimeters, ATLAS Internal note CAL-NO-91 (na voljo pri B.G.)

Identifikacija delcev:
-I. Arino, L. Garrido, Particle Identification with the HERA-B RICH, HERA-B Internal note HERA-B 99-108 (na voljo pri B.G.)
-M. Battaglia, P.M. Kluit, Particle Identification Using the DELPHI RICH Detectors, NIM A433 (1999) 252-256

Analiza podatkov

Nekaj (nekonvencionalne) literature

(bolj specialistièen dodatek osnovam v uèbenikih)

Umeritev sledilnih det.:

-P. Billoir, J.E. Campagne, Off-line Alignment by Tracks, DELPHI Internal note DELPHI 87-87-Prog-97 (1987) (na voljo pri B.G.)

-A. Andreazza, E. Pioto, The Alignment of the DELPHI Tracking Detectors, DELPHI Internal note DELPHI 99-153-Track-94 (1999) (na voljo pri B.G.)

Umeritev podatkov in MC:

-B. Golob, B. Eržen, Offline Calibration of DELPHI Ring Imaging C herenkov Detector Data, DELPHI Internal note DELPHI 2000-008-Rich-97 (2000) (na voljo pri B.G.)

Rekonstrukcija hadronskih pljuskov:

-S. Bethke, Hadronic Physics in Electron-Positron Annihilation, v High Energy Phenomenology, Proc. of the 42nd Scottish Universities Summer School in Physics (1994), K.J.Peach, L.L.J. Vick, P. Osborne, eds. (na voljo pri B.G.)

Oznaèevanje težkih kvarkov:

-G. Borisov, Combined b-tagging, DELPHI Internal note DELPHI 97-94/Phys-716 (1997) (na voljo pri B.G.)