



UNIVERSITÀ DI PISA

*Search for an Axion-Like Particle in B  
decays at the BABAR experiment and  
projections to the Belle II data sample*

Candidato:  
Michael De Nuccio

Relatore:  
Prof. Francesco Forti

# Sommario

## 1. Introduzione

- ▶ Assioni e Axion-Like Particles
- ▶ Il canale  $B^\pm \rightarrow K^\pm A, A \rightarrow \gamma\gamma$

## 2. B-factories

- ▶ BaBar

## 3. Passi dell'analisi

## 4. Risultati attuali

- ▶ Limite al Branching Ratio (BR)

# Introduzione

Modello Standard (SM):

- ▶ particelle elementari
- ▶ 3 interazioni fondamentali (debole, forte, elettromagnetica)

- Simmetria sotto Carica e Parità (**CP**): violata dalle interazioni deboli (CPV)
- Interazioni forti? Possono violarla ( $\exists$  termine  $\theta \mid \theta \neq 0 \implies$  CPV)

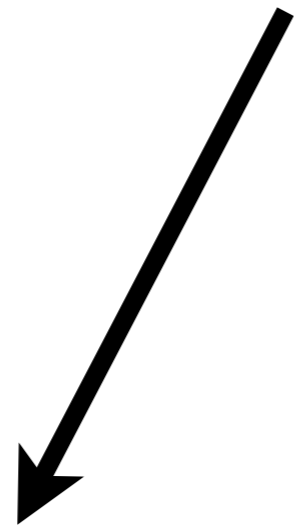
mass	charge	spin	particle
$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	u (up)
$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	c (charm)
$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	t (top)
0	0	1	g (gluon)
$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$	0	0	H (Higgs boson)
$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	d (down)
$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	s (strange)
$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	b (bottom)
0	0	1	$\gamma$ (photon)
$0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	e (electron)
$105.7 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	$\mu$ (muon)
$1.777 \text{ GeV}/c^2$	-1	$1/2$	$\tau$ (tau)
$91.2 \text{ GeV}/c^2$	0	1	Z (Z boson)
$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$1/2$	$\nu_e$ (electron neutrino)
$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	$\nu_\mu$ (muon neutrino)
$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	$\nu_\tau$ (tau neutrino)
$80.4 \text{ GeV}/c^2$	$\pm 1$	1	W (W boson)

No CPV forte osservata  $\implies |\theta| < 10^{-10} \implies$  fine tuning

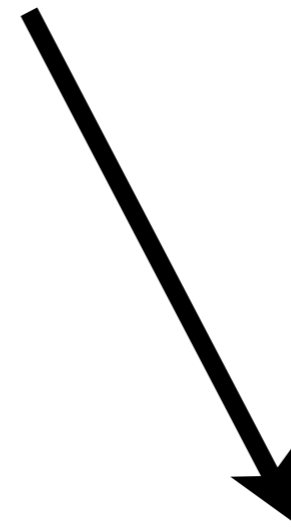
# Introduzione

## Assioni e Axion-Like Particles (ALPs)

Modello di **Peccei e Quinn**:  $\theta$  promosso al rango di particella (rottura spontanea di simmetria), chiamata **assione**  
 $\implies \theta \rightarrow 0$  naturalmente



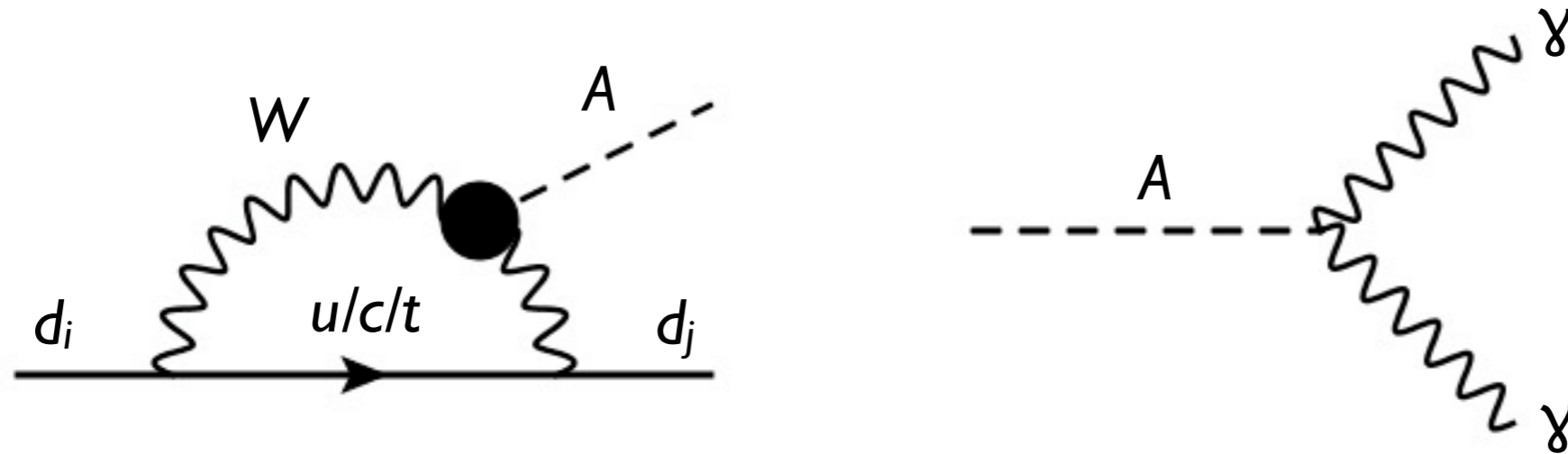
Assione non scoperto  
▶ Massa  $< 10^{-2}$  eV



Lo stesso meccanismo permette l'esistenza di una nuova famiglia di particelle:  
**Axion-Like Particles (ALPs, A)**  
*Neutre, pseudoscalari, massive*

# Introduzione

Modello di ALP considerato



*Modello considerato:*

- $A$  accoppia con  $W^\pm$
- $A$  decade in  $\gamma\gamma$  ( $\sim 100\%$ )
- Prodotta in processi Flavor Changing Neutral Current (FCNC)

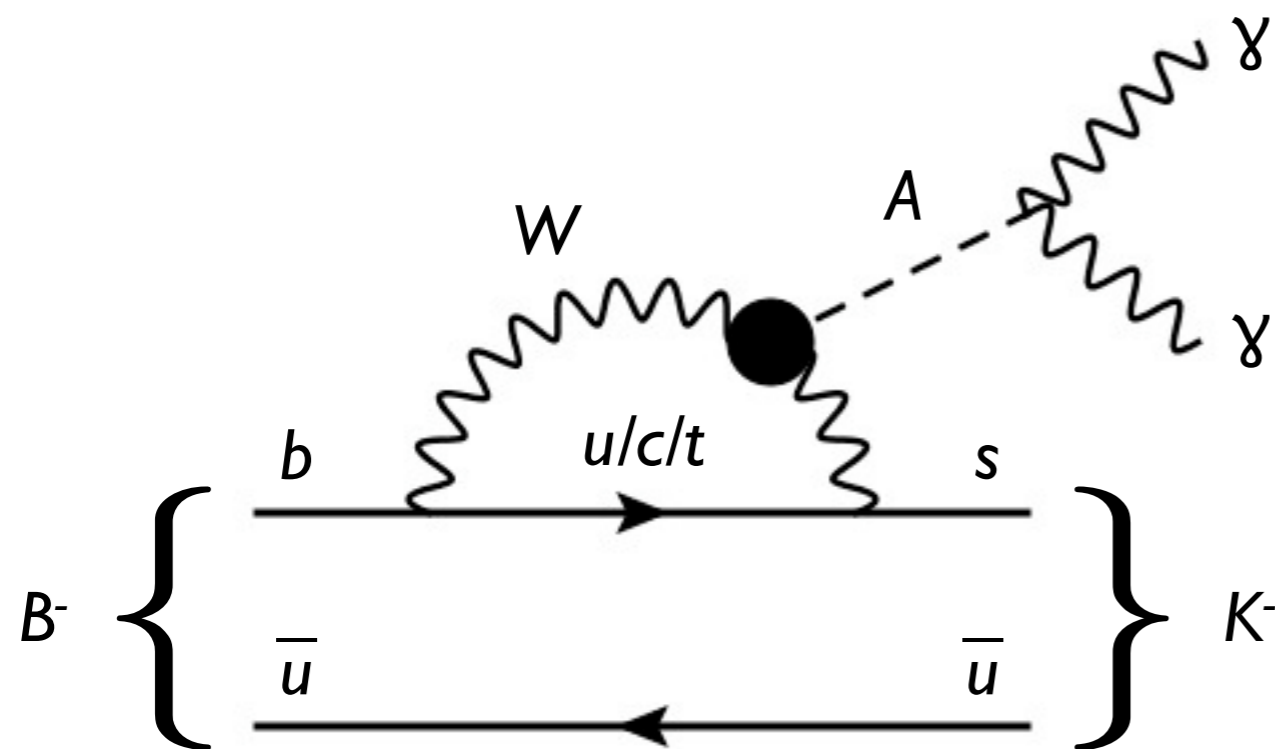
*Possibili canali:*

- $B \rightarrow K^{(*)}A$
- $K \rightarrow \pi A$

- ▶  $B^\pm \rightarrow K^{\pm*}A$
- ▶  $B^0 \rightarrow K^{0*}A$
- ▶  $B^\pm \rightarrow K^\pm A$
- ▶  $B^0 \rightarrow K^0 A$

# Introduzione

IL mio canale:  $B^\pm \rightarrow K^\pm A, A \rightarrow \gamma\gamma$

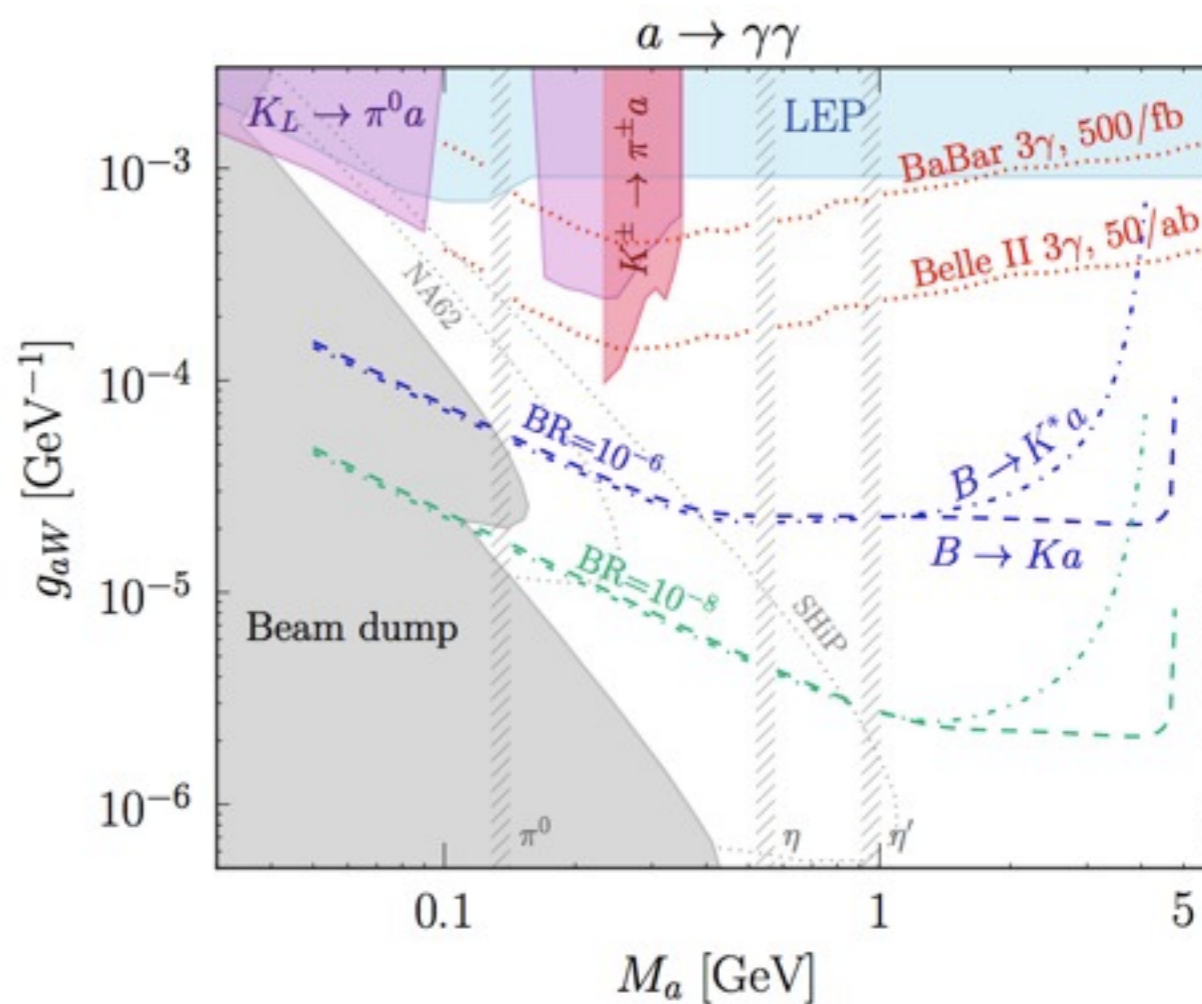


$$B^\pm \rightarrow K^\pm A, A \rightarrow \gamma\gamma$$

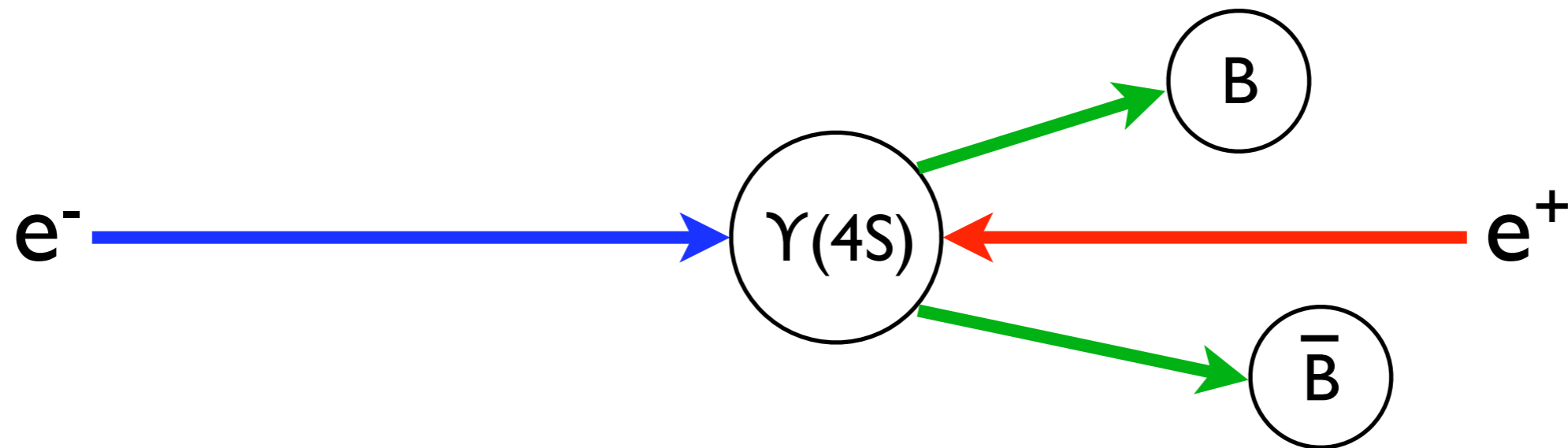
Ricostruzione  $K\gamma\gamma$  e ricerca di una **risonanza difotonica**

Ottima sensitività all'ALP:

- Canale semplice e pulito
- Poco fondo da SM  $B^\pm \rightarrow K^\pm X$ :  
solo  $X = \pi^0, \eta, \eta' \Rightarrow$  **veto** sulle loro masse (zone senza sensitività)
- Mesone B  $\Rightarrow$  **B-factory**



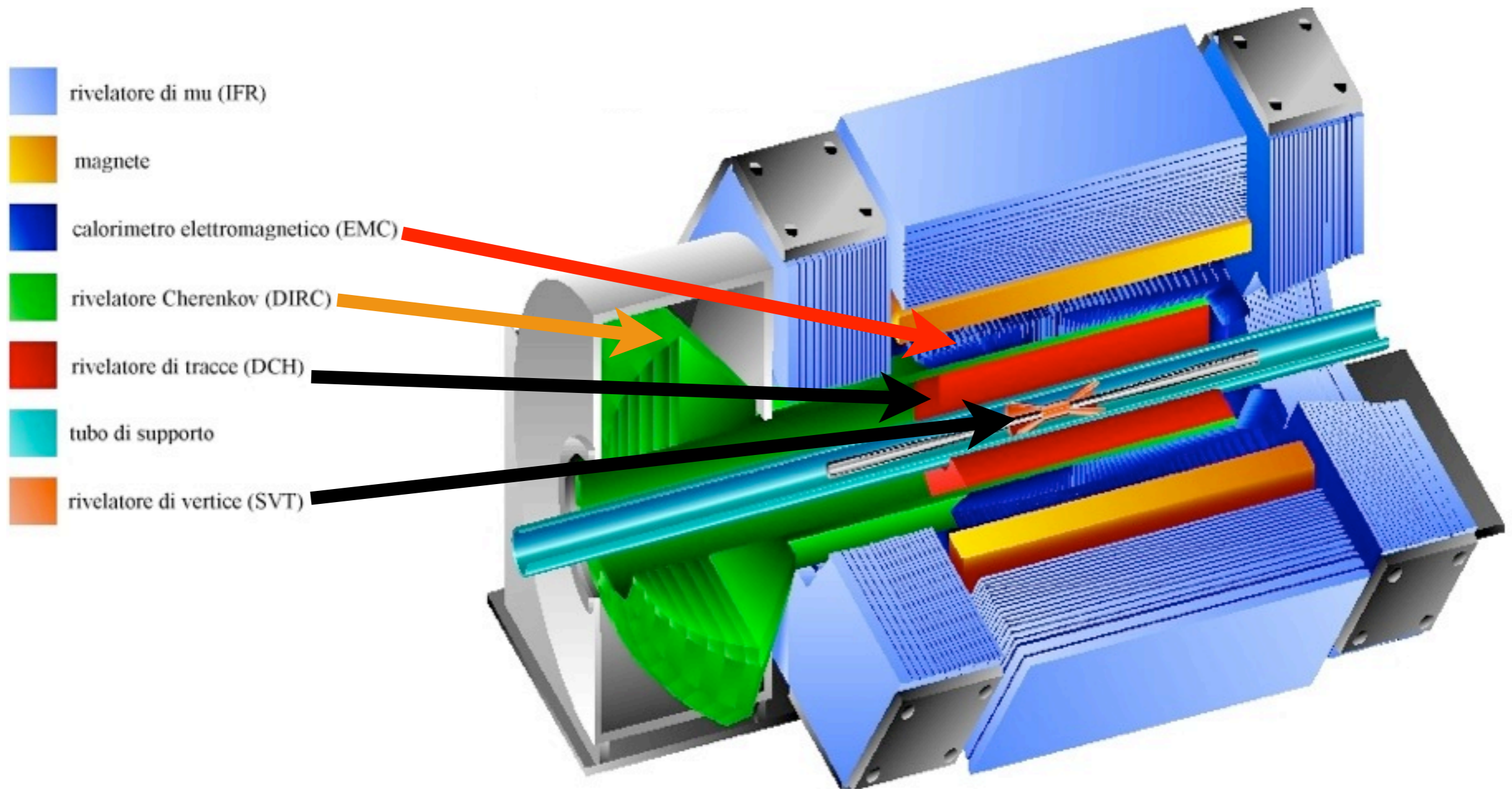
# B-factories



- Acceleratori e detector ottimizzati per produrre e rivelare un gran numero di mesoni B
- $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S)$ , stato legato  $b\bar{b}$  sopra soglia per decadere in  $B\bar{B}$ 
  - ▶ Pro: condizioni iniziali note, alto segnale/fondo, poche tracce
  - ▶ Contro: sezione d'urto piccola
- Passato: BaBar @ SLAC, California & Belle @ KEK, Giappone
- Presente & futuro: Belle II @ KEK, Giappone

# B-factories

## IL rivelatore BaBar



Rilevazione fotoni

Identificazione particelle  
(PID)

Tracciatura particelle  
cariche



# Data sample di BaBar

Run	Period	$\mathcal{L}_{on}$ (fb $^{-1}$ )	# $B\bar{B}$ pairs ( $\times 10^6$ )
1	10/1999 ÷ 10/2000	20.37	23
2	02/2001 ÷ 06/2002	61.32	68
3	12/2002 ÷ 06/2003	32.28	36
4	09/2003 ÷ 07/2004	99.58	111
5	04/2005 ÷ 08/2006	132.33	148
6	01/2007 ÷ 09/2007	78.31	85

- BaBar  $\approx$  90% dati all'energia della  $\Upsilon(4S)$  (*on-peak*)
  - 470  $10^6$  di coppie  $B\bar{B}$
- Rimanente: altre risonanze o *off-peak*
- ▶ Run 3  $\implies$  **control sample** per verificare bontà della simulazione Monte Carlo (MC)
- ▶ Run 3  $\approx$  8% dati totali

# Passi dell'analisi

- *Massa ALP ( $M_A$ ) non vincolata da teoria  $\implies$*

Ricostruisco  $K\gamma\gamma$  e cerco risonanze difotoniche in tutto il range cinematicamente ammesso (0÷4786 MeV)

- *Non ricostruisco l'altro mesone  $B$*

- Selezione** eventi di segnale
- Estrazione **PDFs** per modellare segnale & fondo
- Fit** per estrarre il numero di eventi di segnale (fit simultaneo segnale+fondo)
- Stime di **sensibilità** al BR su BaBar e Belle II
- Prossimi passi: **Toy MC** e **incertezze sistematiche**

Selezione eventi

# Selezione eventi

## Fondi

Fondo fisico **irriducibile**:  $B^\pm \rightarrow K^\pm X$ ,  $X = \pi^0, \eta, \eta'$

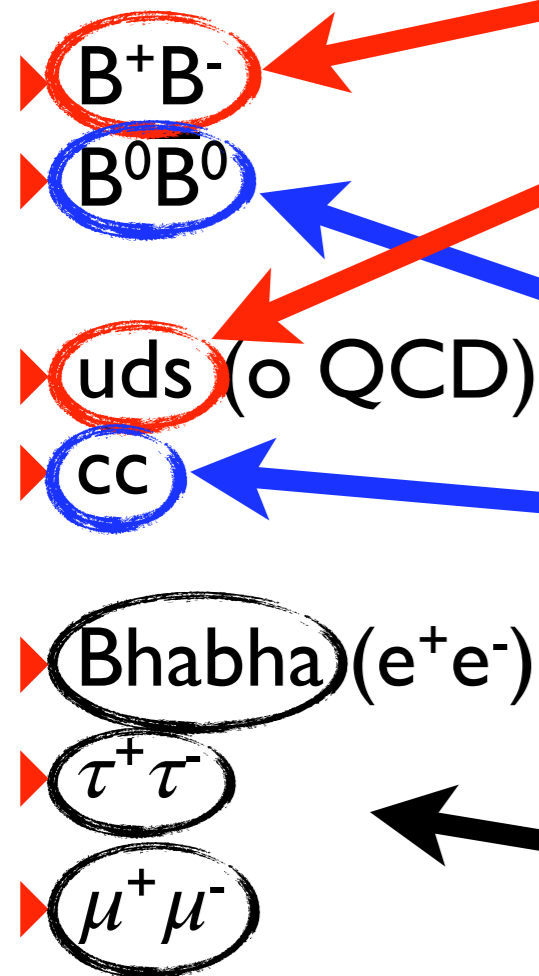
Fondo **combinatorio** (combinazione casuale 2  $\gamma$  + 1 traccia  $\sim K^\pm$ ):

- ▶  $B^+B^-$
  - ▶  $B^0\bar{B}^0$
- } Topologia sferica come il segnale  
Poco fondo combinatorio
- ▶ uds (o QCD)
  - ▶  $\bar{c}c$
- } Fondo direzionale, alta molteplicità  
Alto combinatorio
- ▶ Bhabha ( $e^+e^-$ )
  - ▶  $\tau^+\tau^-$
  - ▶  $\mu^+\mu^-$
- } Fondo direzionale, bassa molteplicità, pochi fotoni  
Quasi irrilevante

Selezione allenata con fondi MC

# Selezione eventi

## Reiezione fondo



Selezione allenata contro queste sorgenti di fondo ( $B^+B^-$ ,  $uds$ )

Non serve allenamento specifico contro  $B^0\bar{B}^0$  e  $c\bar{c}$  perché:

- $B^0\bar{B}^0$  simile a  $B^+B^-$
- $c\bar{c}$  simile a  $uds$

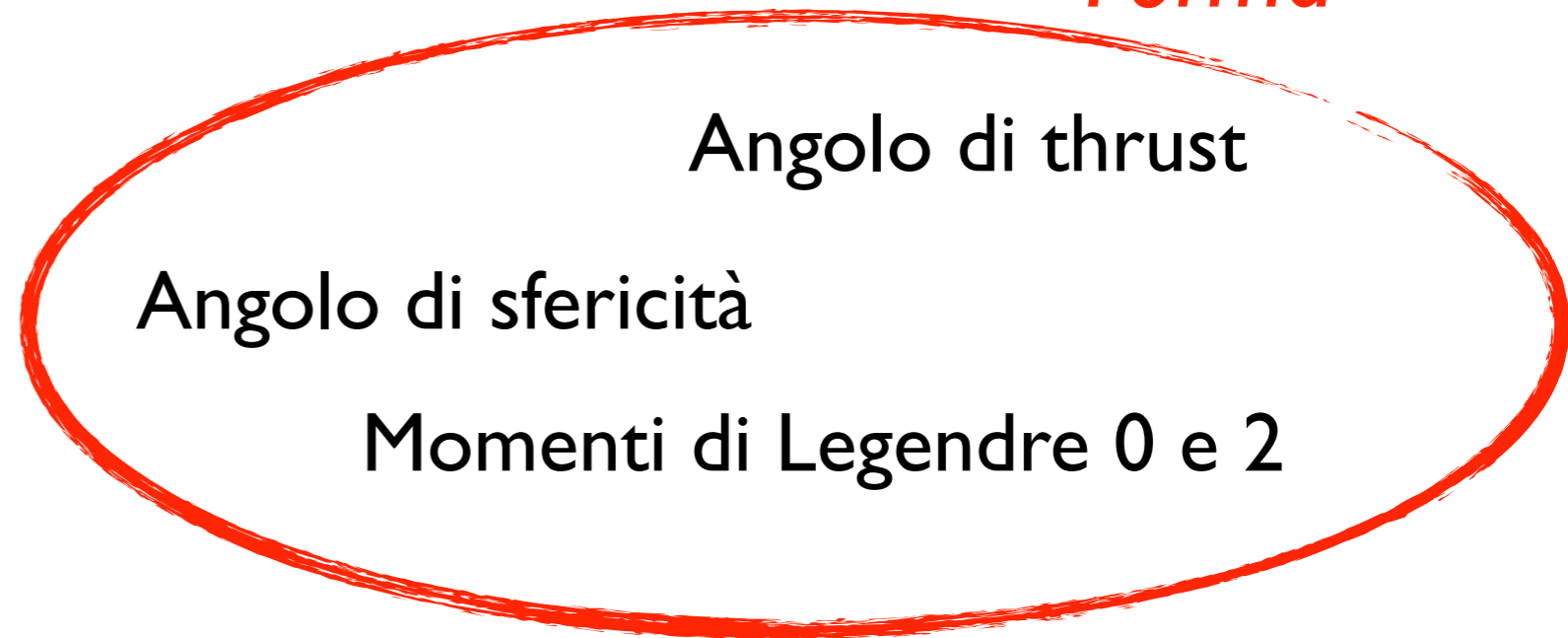
Irrilevanti

# Selezione eventi

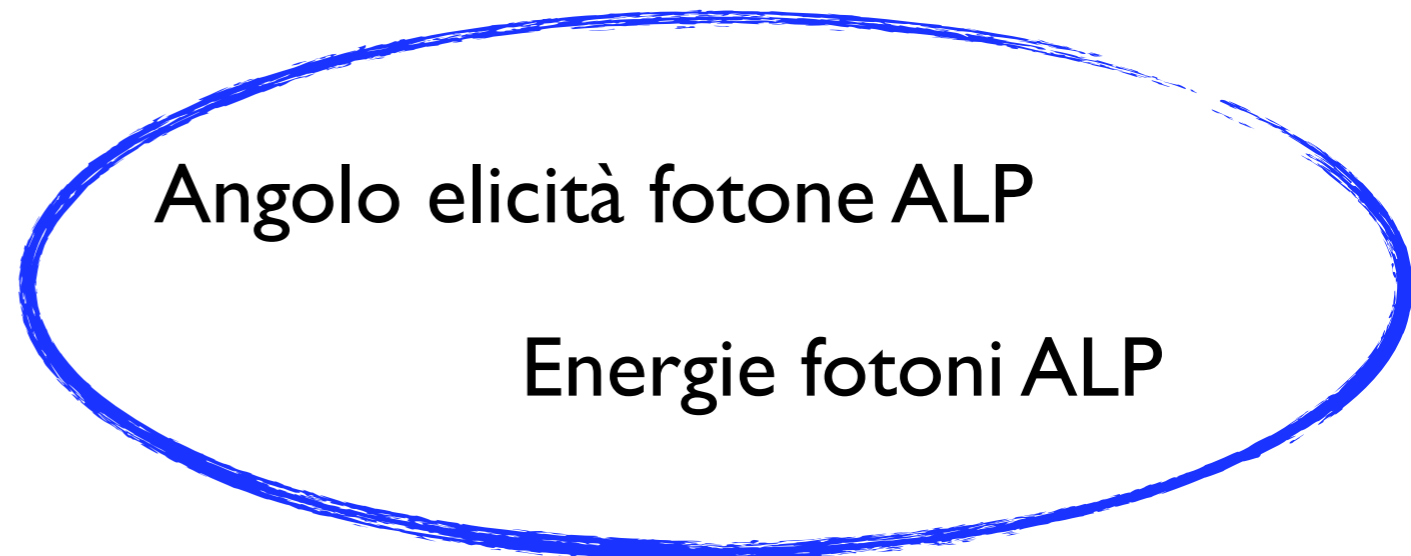
Variabili di selezione

*Cinematiche*

*Forma*



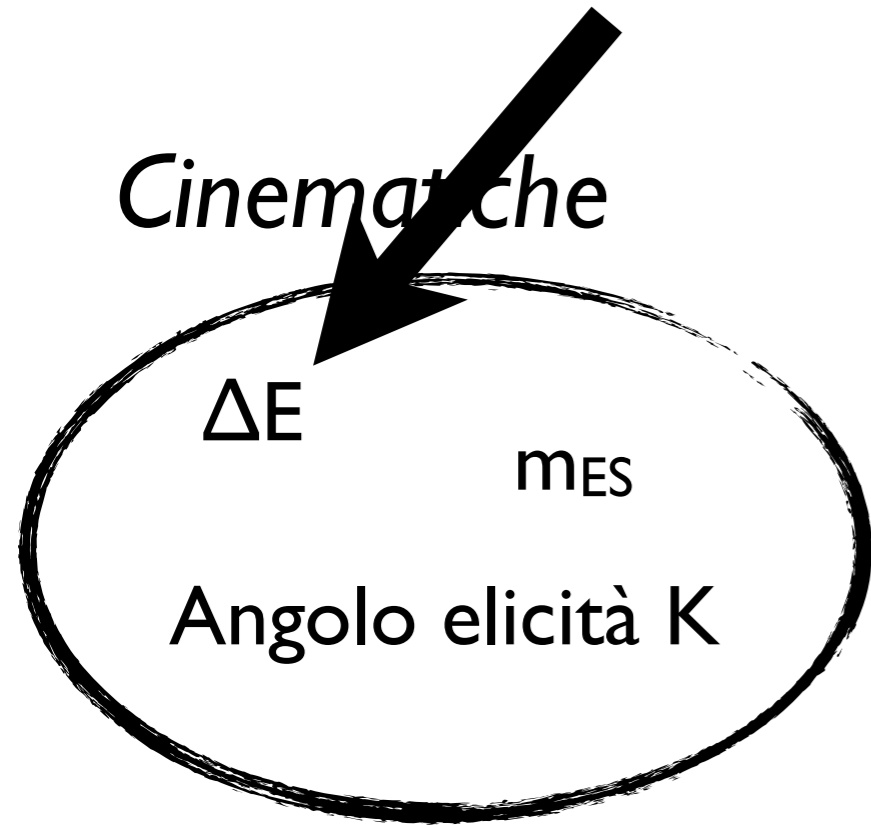
*Dipendenti dalla massa dell'ALP*



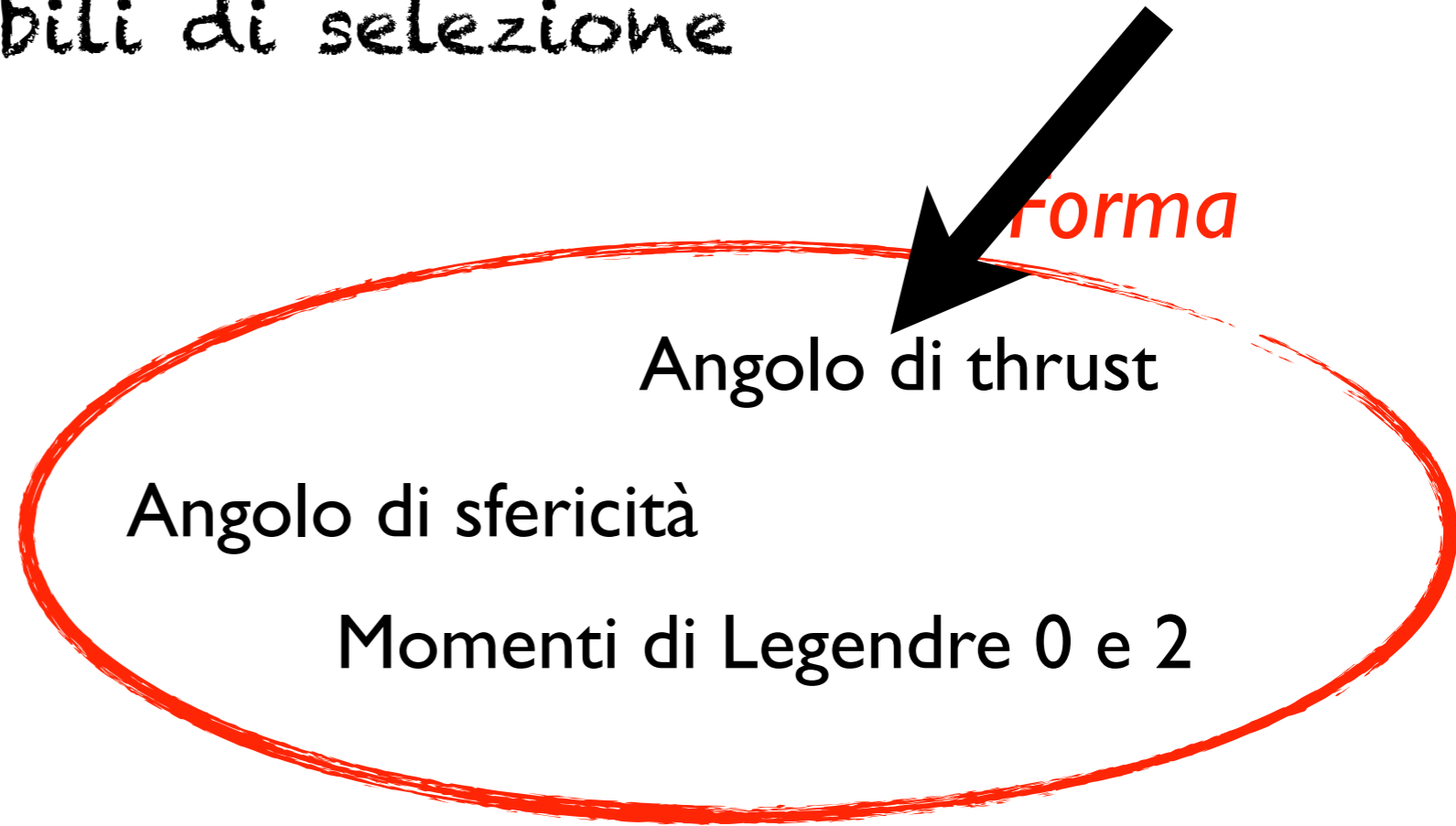
# Selezione eventi

Variabili di selezione

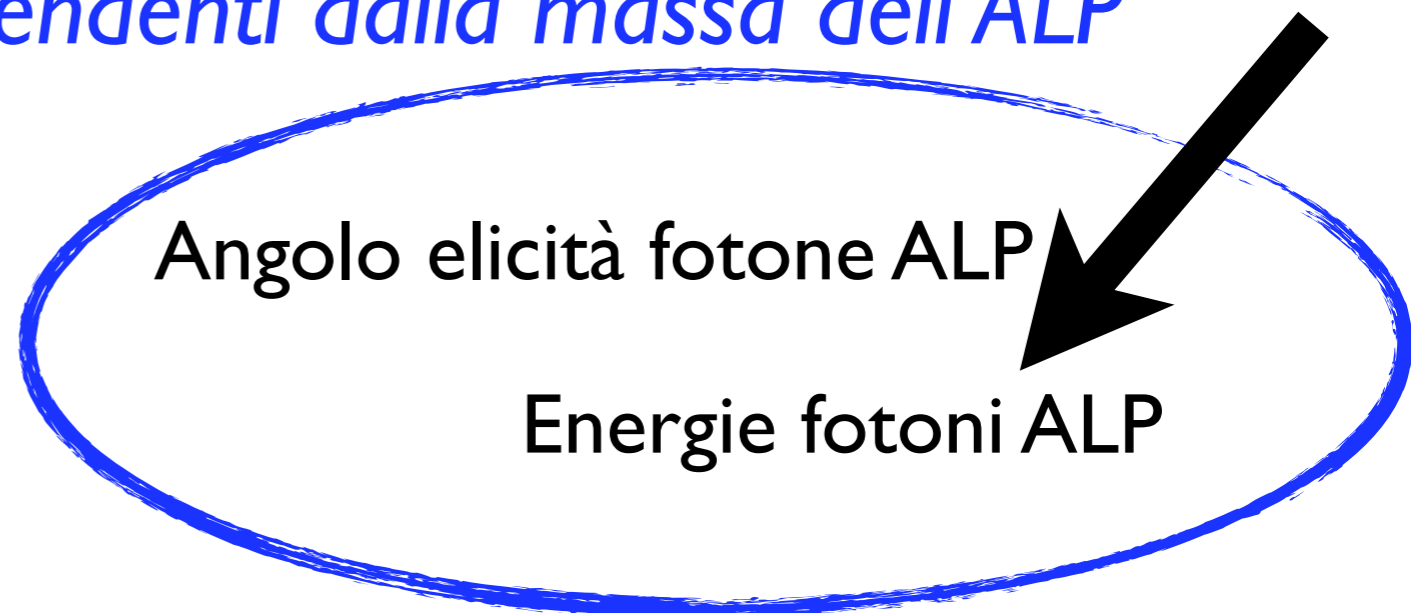
*Cinematiche*



*forma*



*Dipendenti dalla massa dell'ALP*



# Selezione eventi

## Variabili di selezione

$\Delta E$



- ▶  $E^*(K\gamma\gamma) - E^*(\text{fascio})$
- ▶ Calcolata nel centro di massa
- ▶ Mesone B correttamente ricostruito  $\implies \Delta E = 0$

Angolo di thrust



- ▶ Asse di thrust: asse che massimizza la proiezione dei momenti
- ▶ Angolo di thrust: angolo fra gli assi di thrust di  $K\gamma\gamma$  e del resto dell'evento

- ▶ Energia dei  $\gamma$  che compongono il candidato ALP

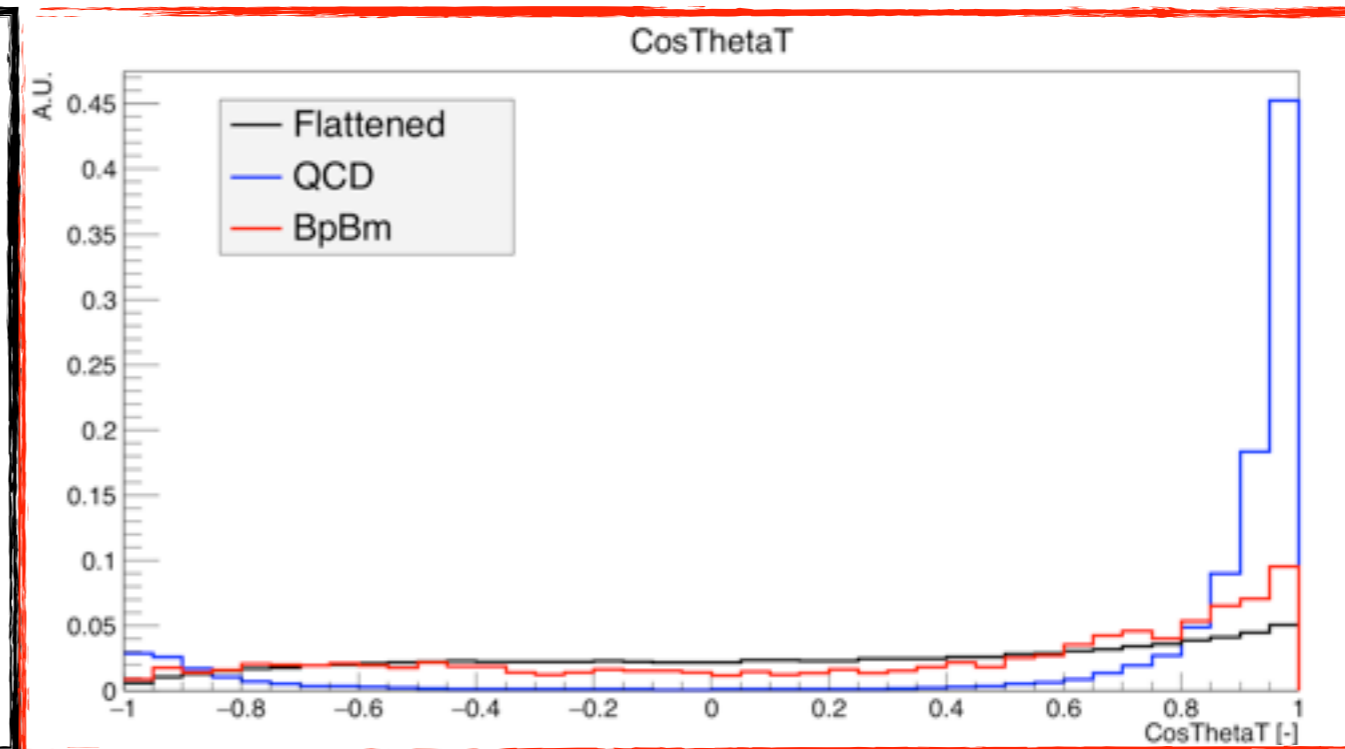
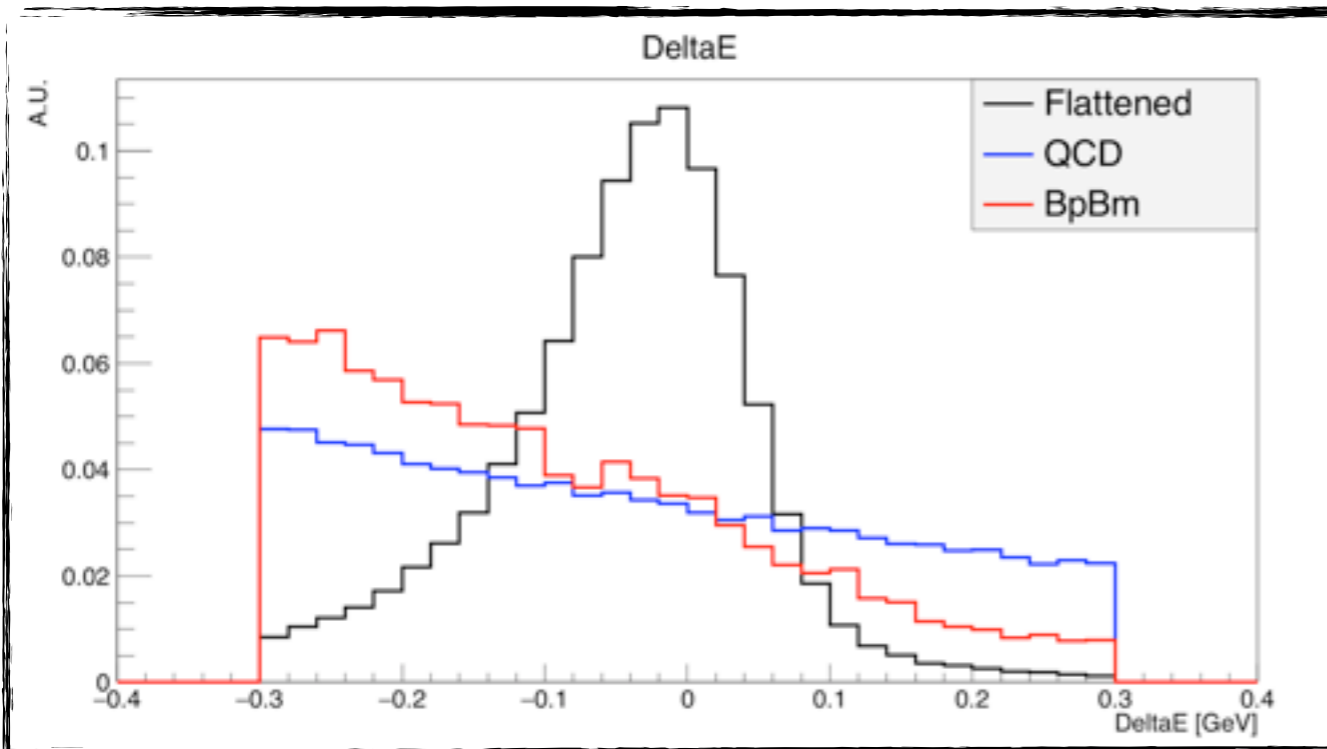
← Energie fotoni ALP

- ▶ Energia del  $\gamma$  più energetico e del  $\gamma$  meno energetico

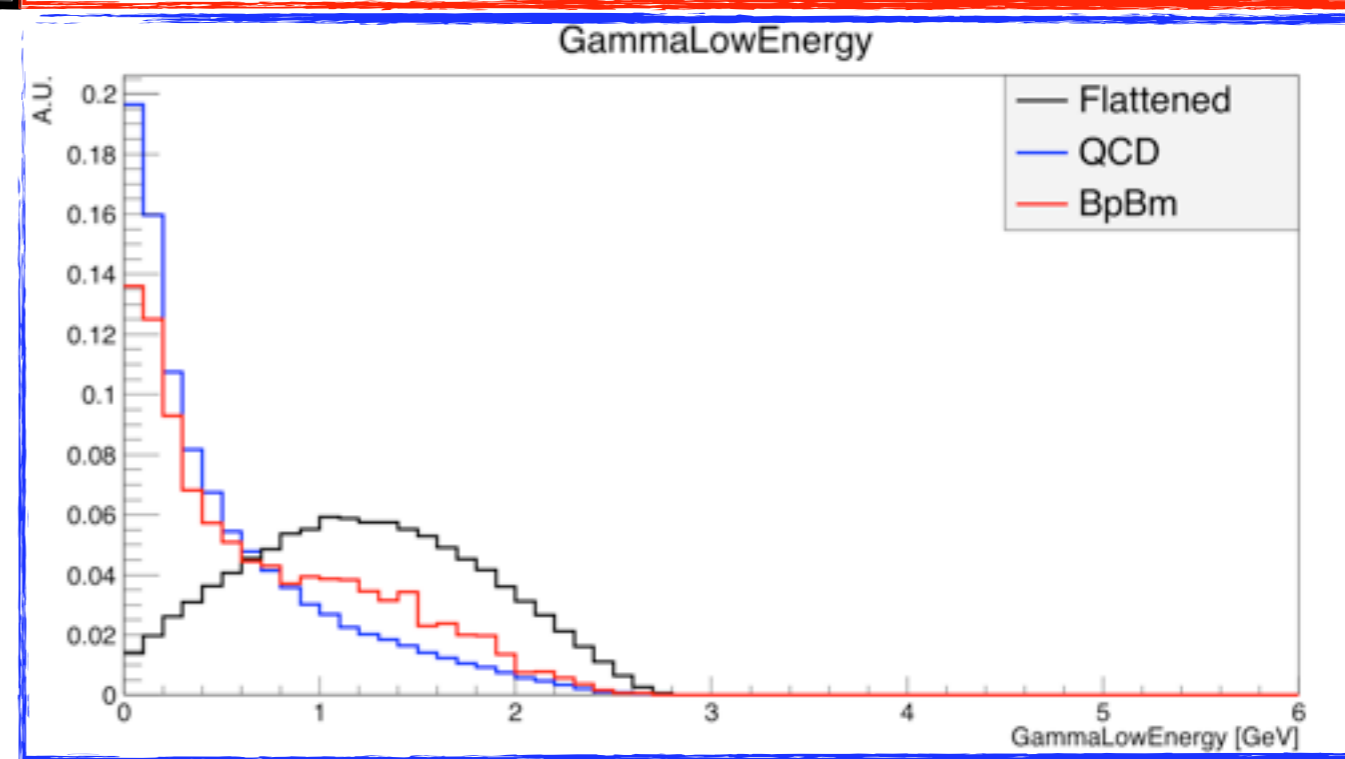


# Selezione eventi

## Variabili di selezione



Variabili dipendenti da  $M_A \implies$   
uso un sample di segnale modificato:  
 $M_A$  **uniforme** (*flattened*)  
Evito introduzione **bias** dovuti ad  
allenamento su massa specifica



# Selezione eventi

## Analisi Multivariata (MVA)

3 **metodi** MVA testati:

- Discriminante di Fisher
- MLP (MultiLayer Perceptron)
- BDT (Boosted Decision Tree)

2 diverse **strategie** testate:

- 1 MVA per rigettare uds e  $B^+B^-$  contemporaneamente
- 2 MVA: una ottimizzata contro  $B^+B^-$ , una contro uds

Come scegliere *metodo* MVA e *strategia*?

⇒ Prendo chi massimizza una

**Figura di Merito** proporzionale alla significatività

⇒  $\chi \propto S/\sqrt{B}$

$$\chi \equiv \frac{N_S^{pas}}{\sqrt{\sum_{j \in Bkg} \sigma_j \frac{N_j^{pas}}{N_j^{gen}}}}$$

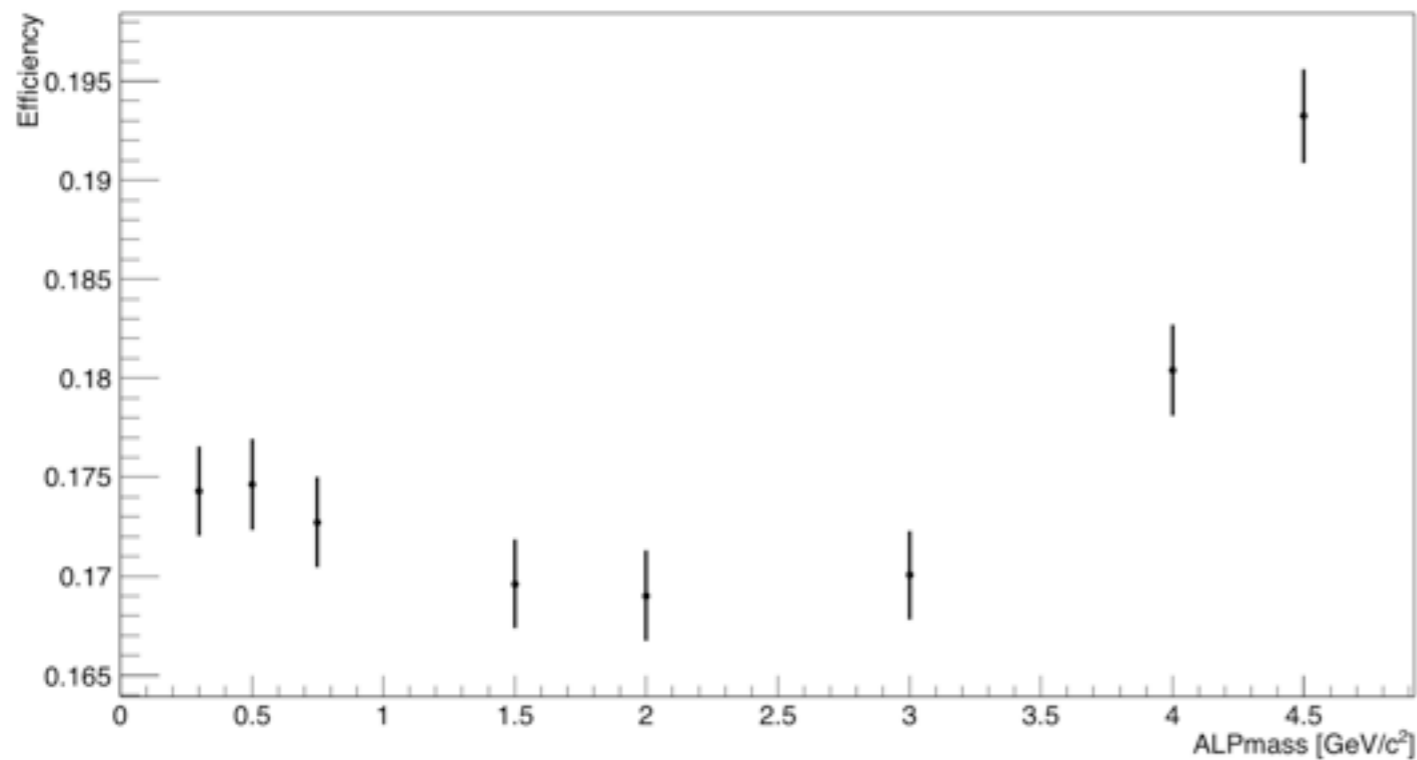
2 BDT

**Selezione  
vincente**

# Selezione eventi

## Efficienza selezione per segnale e fondo

Efficiency vs Signal Mass



Efficienza segnale  $\approx 18\%$

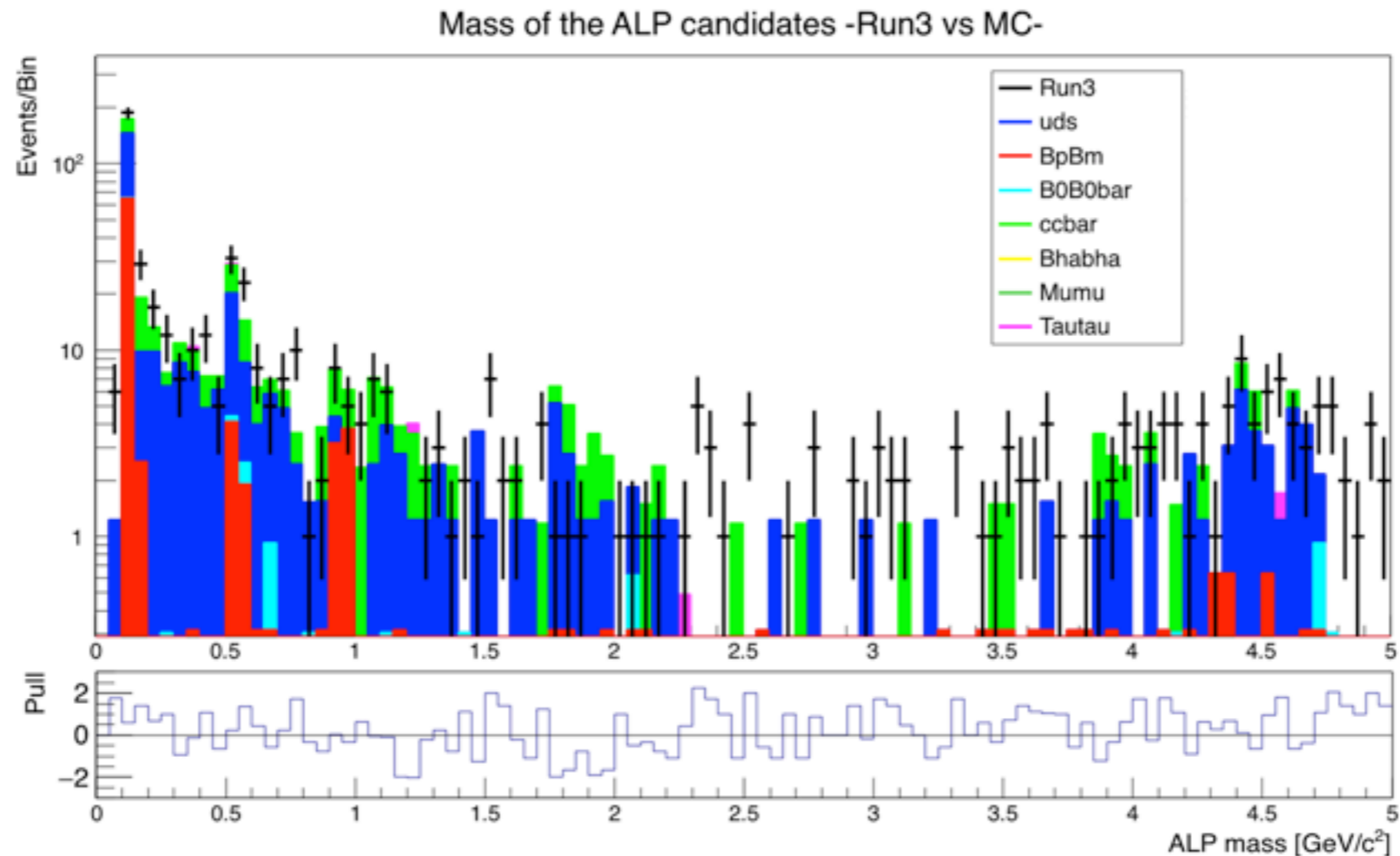
Efficienza fondo  $\approx 10^{-6}$

Bkg process	# events before selection	# events after selection	Efficiency ( $\times 10^{-7}$ )
$B^+ B^-$	$5.59 \times 10^7$	284	$51 \pm 3$
$B^0 \bar{B}^0$	$5.79 \times 10^7$	18	$3.1 \pm 0.7$
uds	$5.50 \times 10^7$	206	$37 \pm 3$
$c\bar{c}$	$3.56 \times 10^7$	108	$30 \pm 3$
$\mu^+ \mu^-$	$7.61 \times 10^7$	0	$0 \pm 0$
$\tau^+ \tau^-$	$5.87 \times 10^7$	7	$1.2 \pm 0.5$
Bhabha	$6.62 \times 10^7$	0	$0 \pm 0$

Contanti anche gli eventi nelle risonanze proibite

# Selezione eventi

## Confronto col control sample



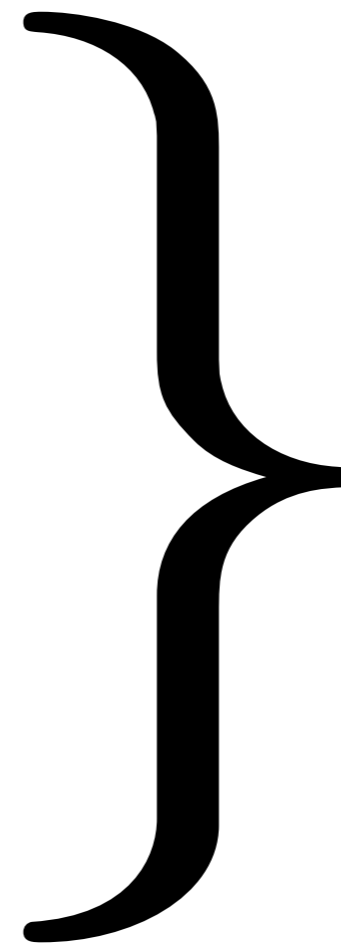
- Buon accordo: quasi ogni bin è in accordo entro  $1 \div 2$  sigma
  - uds e  $c\bar{c}$  fondi dominanti
  - $B^+B^-$  rilevante sotto risonanze proibite
  - Altri fondi irrilevanti
- Deficit numero totale eventi: 2.6 sigma di differenza fra control sample (563) e MC (479)  $\implies$  uso i **dati** per modellare il **fondo**

# Procedura di fit

# Procedura di fit

*Ricerca risonanze finestra-per-finestra in tutto lo spettro*  
*Unbinned maximum likelihood fit*

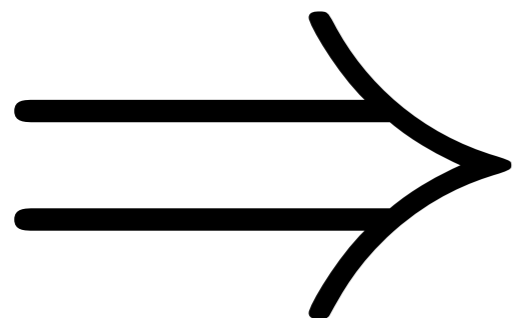
1. Fit simultaneo segnale+fondo alla distribuzione di massa difotonica
2. Frazione della PDF di segnale
3. Numero di eventi di segnale e di fondo
4. Limite (o valore!) del BR



Si ripete per varie ipotesi di massa



**Scan** di tutto lo spettro di massa ammesso



Limite al BR in tutto lo spettro di massa ammesso

$$\text{BR} \iff g_{AW}$$

# Procedura di fit

1. Fit simultaneo segnale+fondo alla distribuzione di massa difotonica
2. Frazione della PDF di segnale
3. Numero di eventi di segnale e di fondo
4. Limite (o valore!) del BR



Mi servono:

- PDF segnale
- PDF fondo

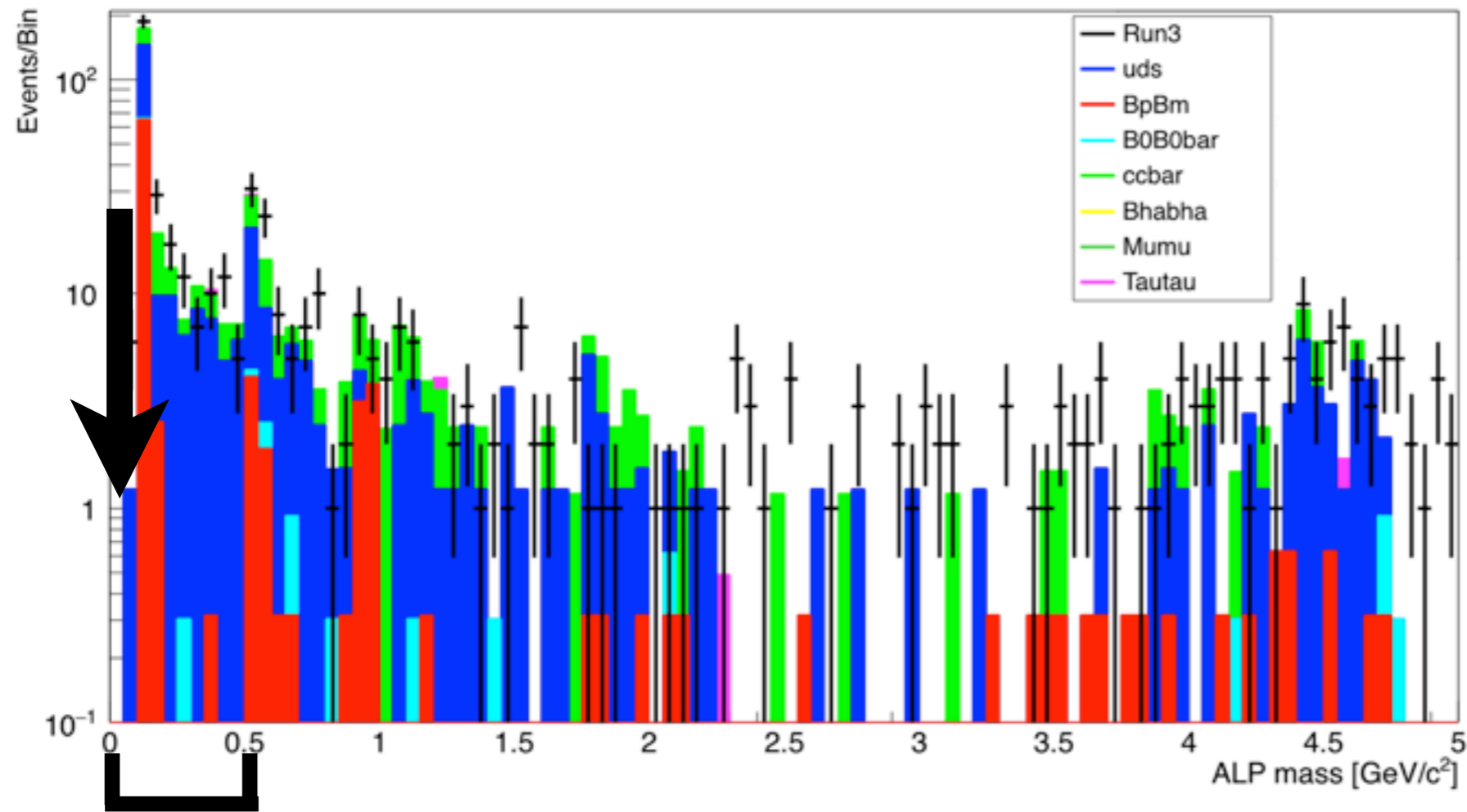
Valide in tutto lo spettro di massa ammesso!



- PDF segnale dal MC
- PDF fondo dal control sample

# Procedura di fit

ALP mass spectrum [Run3 vs MC bkgs]



Si ripete per varie ipotesi di massa



**Scan** di tutto lo spettro di massa ammesso

Larghezza finestra  $\propto$   
larghezza segnale



Estremi dello spettro  
 $\implies$  finestre fisse

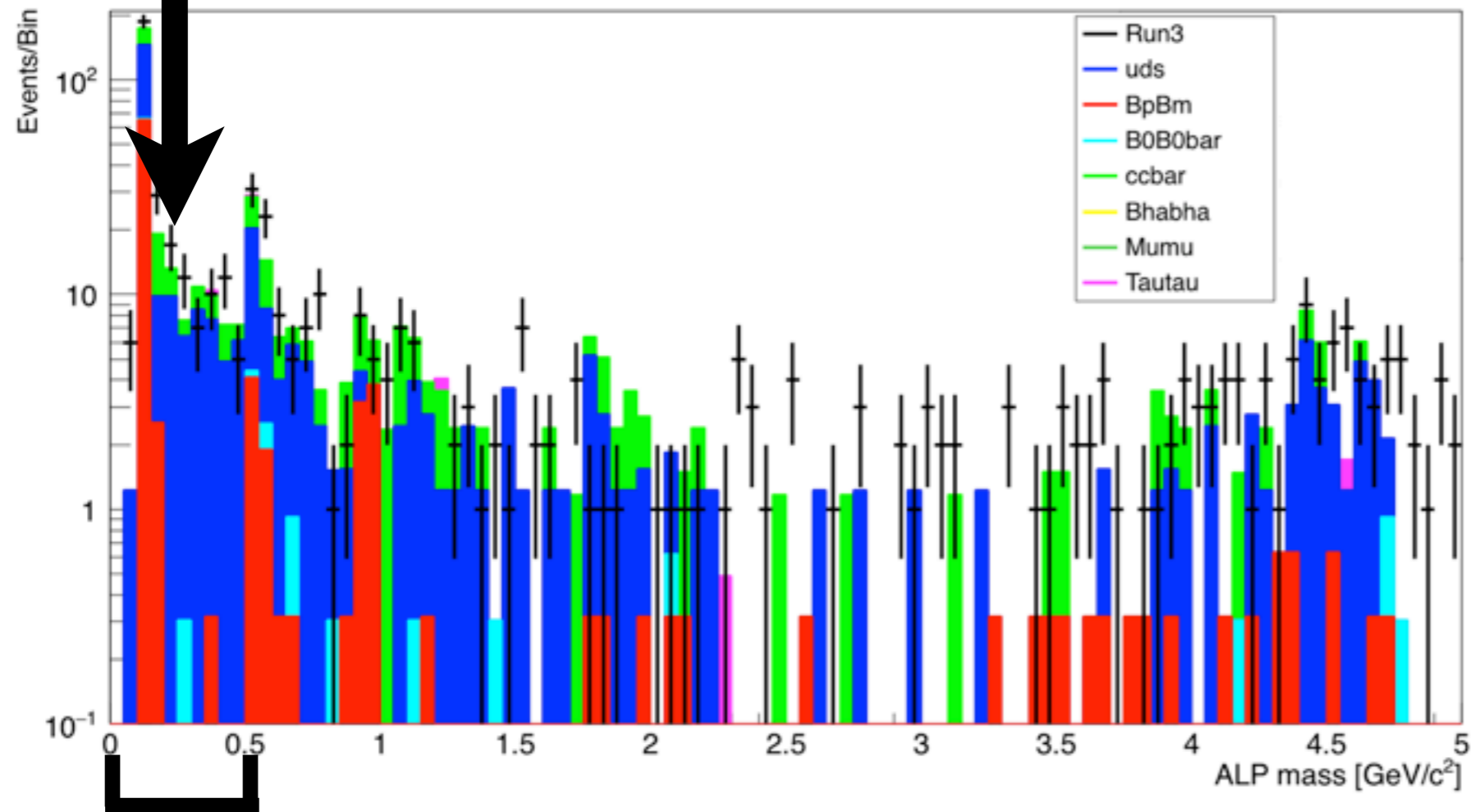


Altrove: segnale al  
centro della finestra



# Procedura di fit

ALP mass spectrum [Run3 vs MC bkgs]



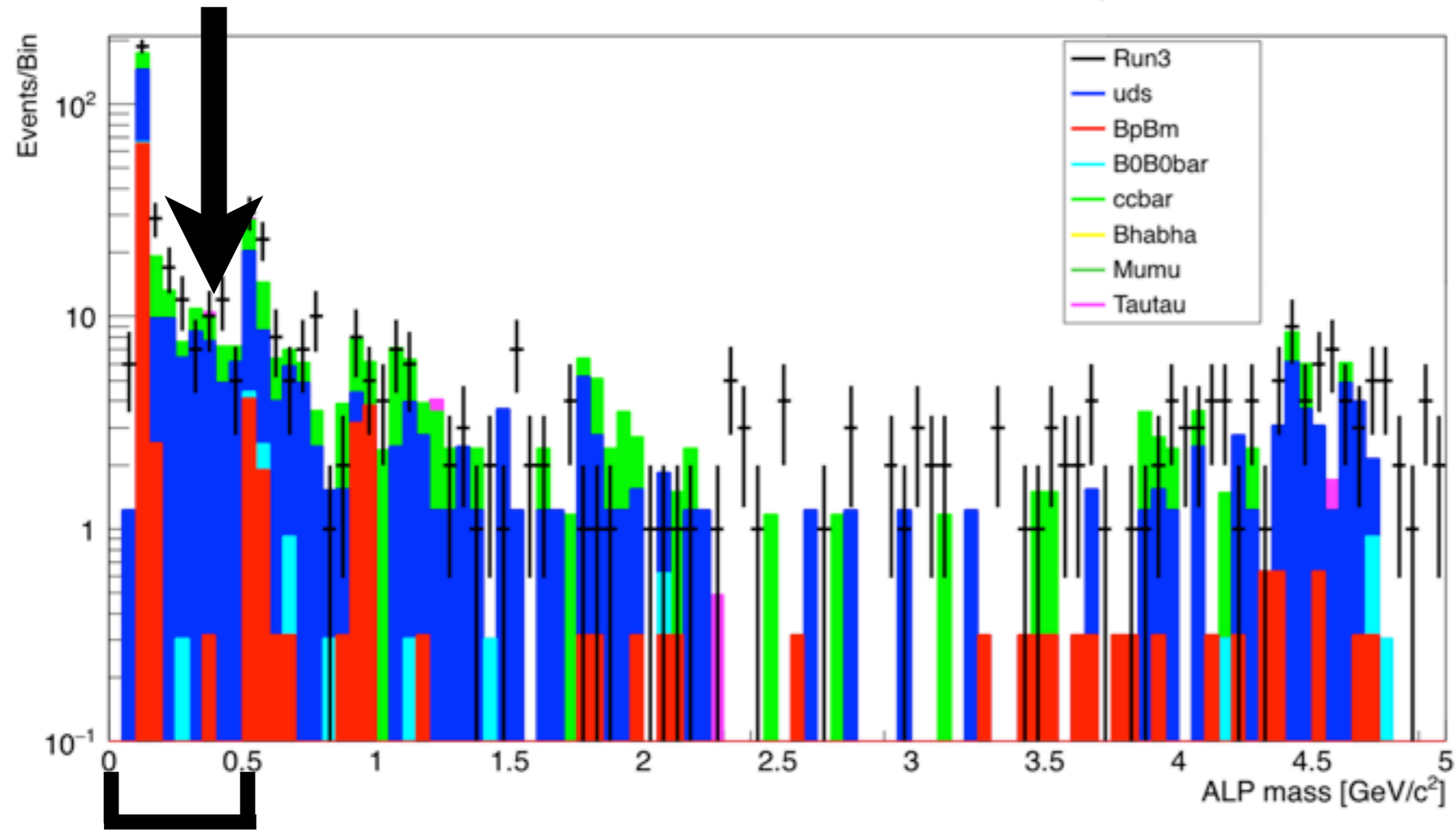
Si ripete per varie ipotesi di massa



**Scan** di tutto lo spettro di massa ammesso

# Procedura di fit

ALP mass spectrum [Run3 vs MC bkgs]



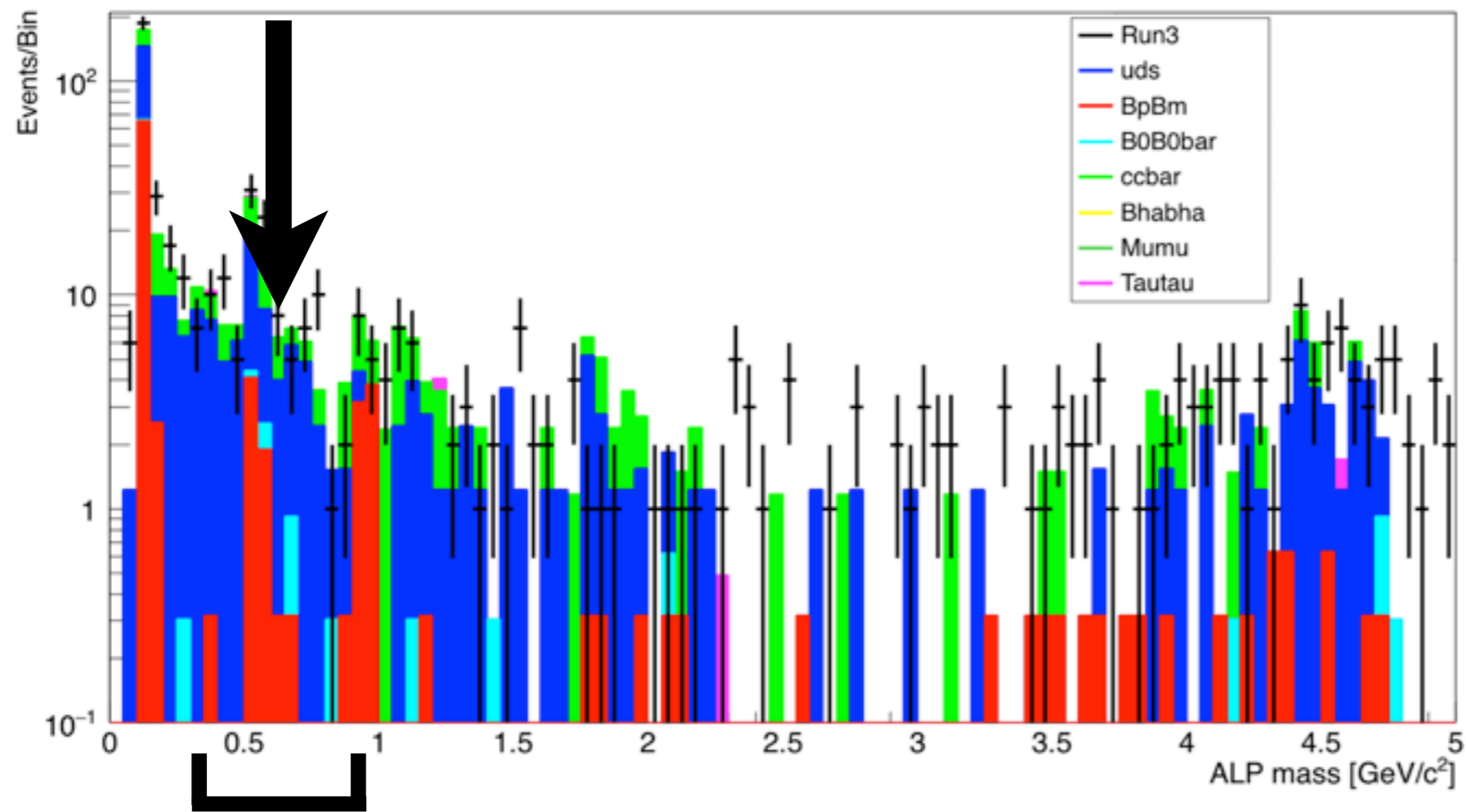
Si ripete per varie ipotesi di massa



**Scan** di tutto lo spettro di massa ammesso

# Procedura di fit

ALP mass spectrum [Run3 vs MC bkgs]



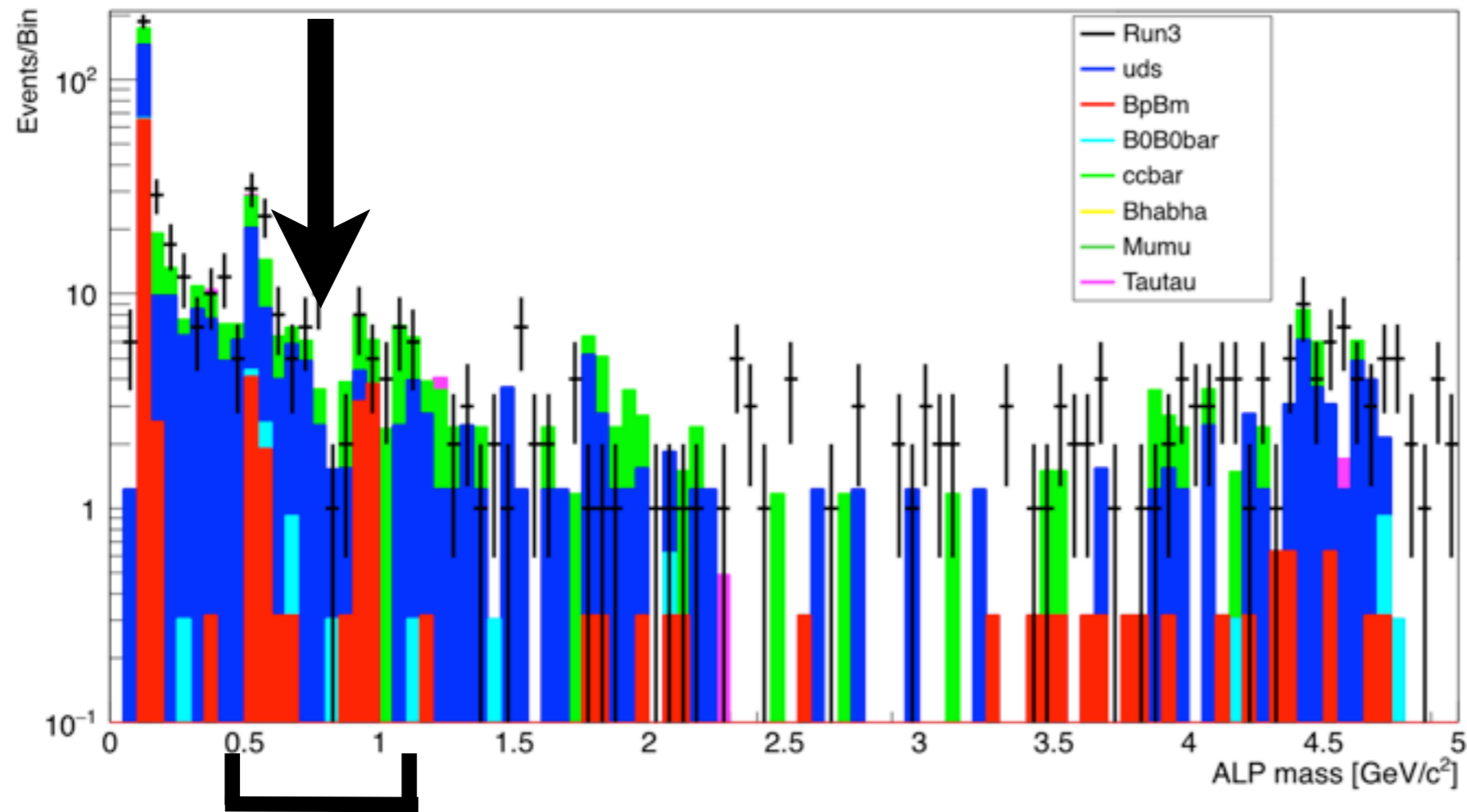
Si ripete per varie ipotesi di massa



**Scan** di tutto lo spettro di massa ammesso

# Procedura di fit

ALP mass spectrum [Run3 vs MC bkgs]



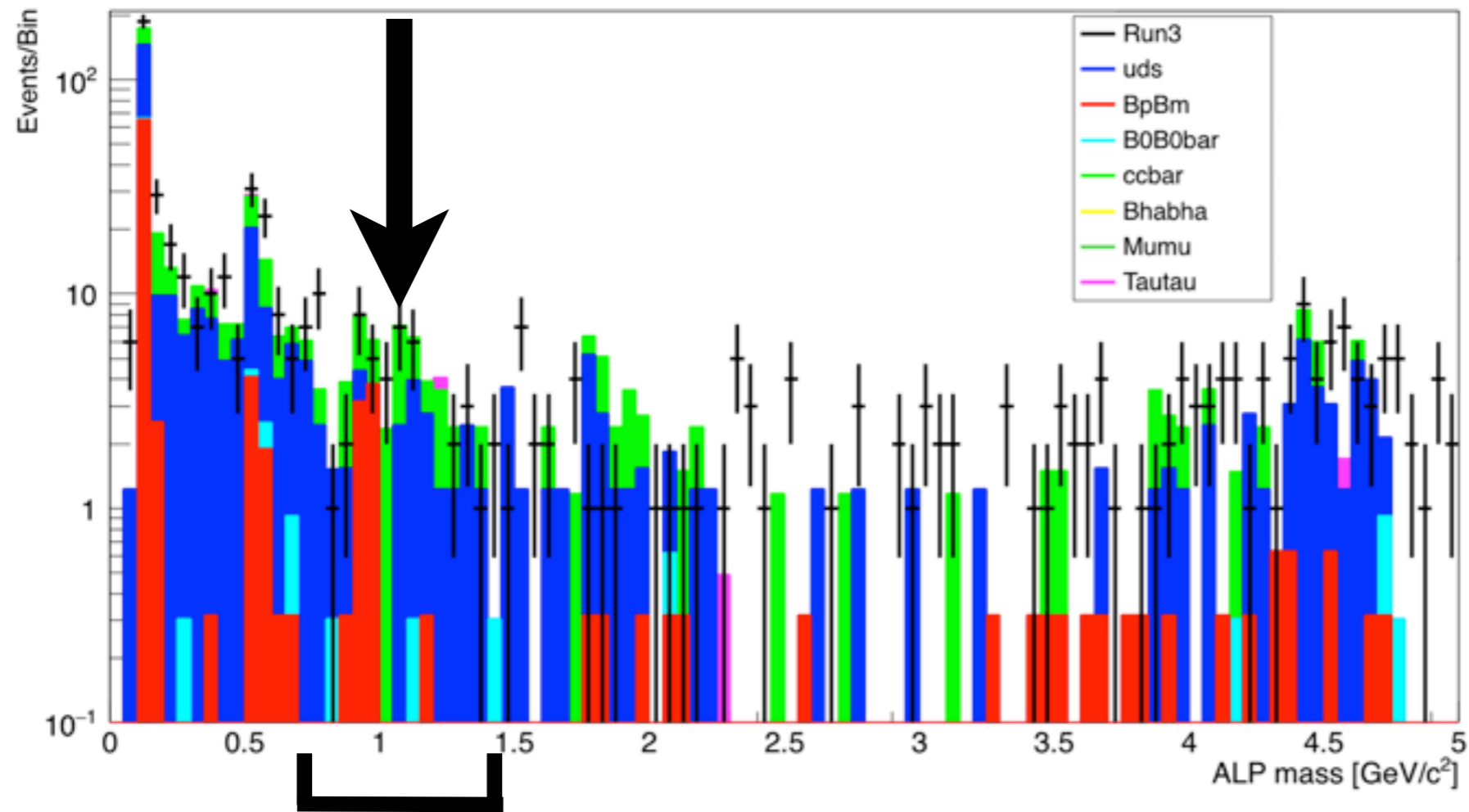
Si ripete per varie ipotesi di massa



**Scan** di tutto lo spettro di massa ammesso

# Procedura di fit

ALP mass spectrum [Run3 vs MC bkgs]



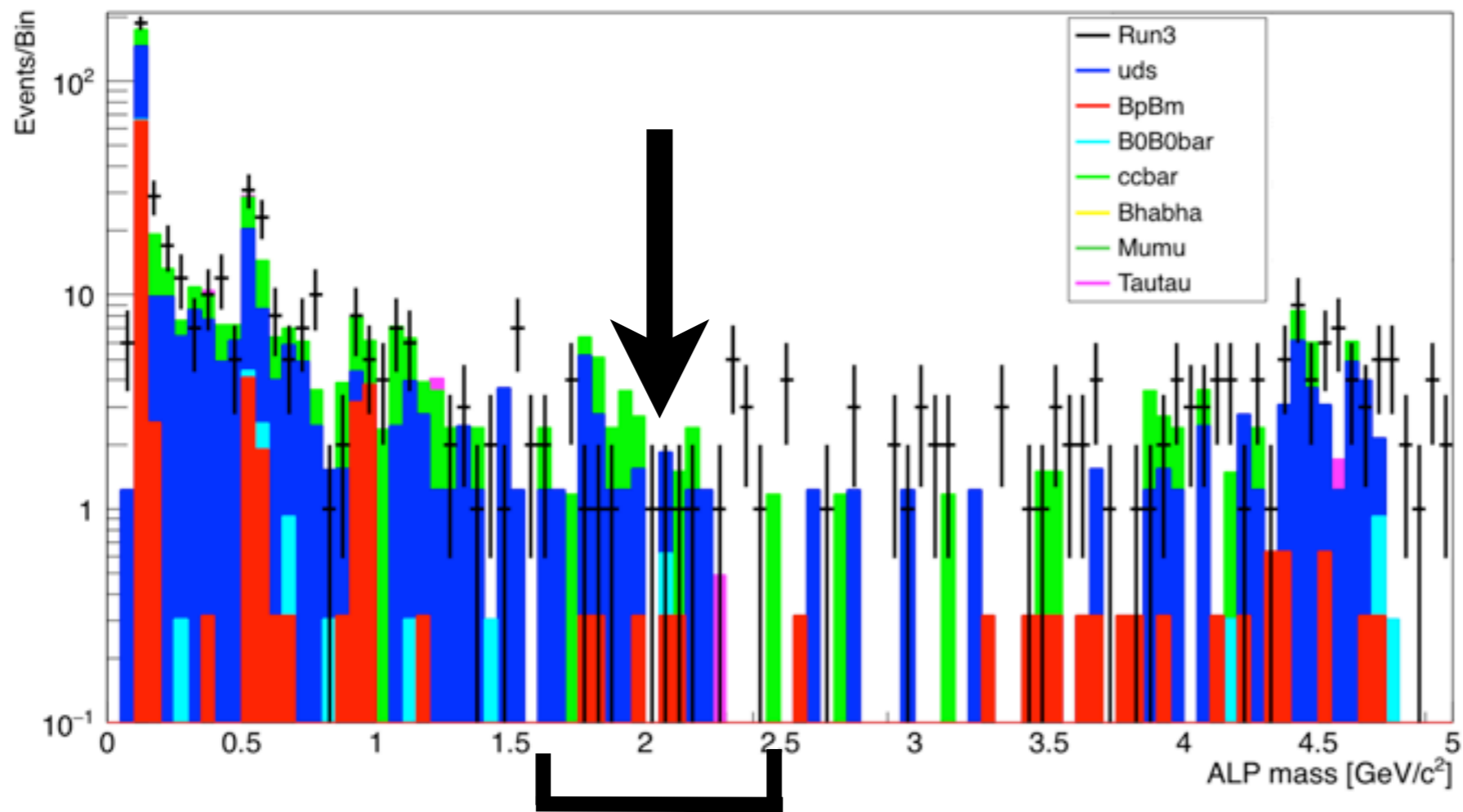
Si ripete per varie ipotesi di massa



**Scan** di tutto lo spettro di massa ammesso

# Procedura di fit

ALP mass spectrum [Run3 vs MC bkg]



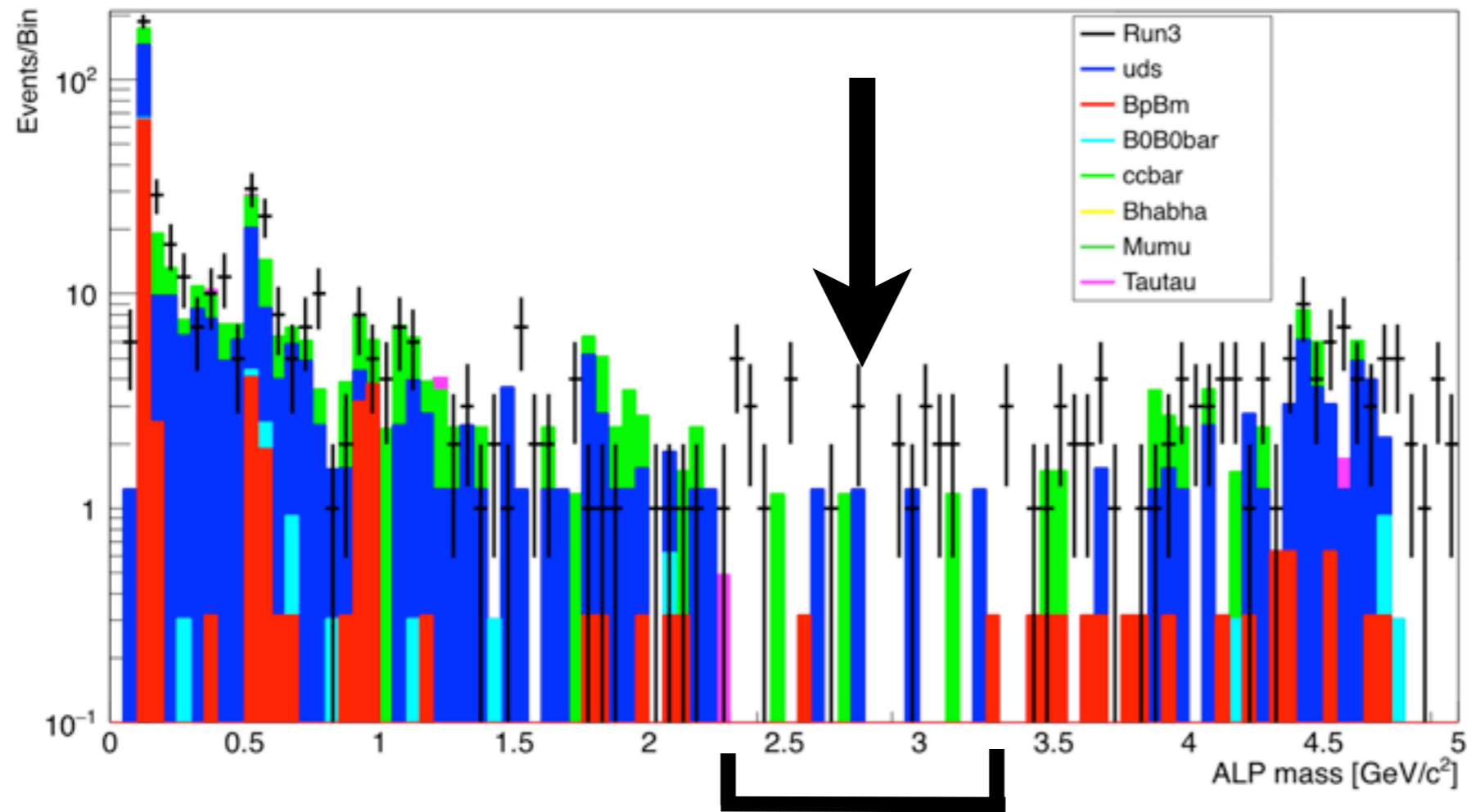
Si ripete per varie ipotesi di massa



**Scan** di tutto lo spettro di massa ammesso

# Procedura di fit

ALP mass spectrum [Run3 vs MC bkgs]



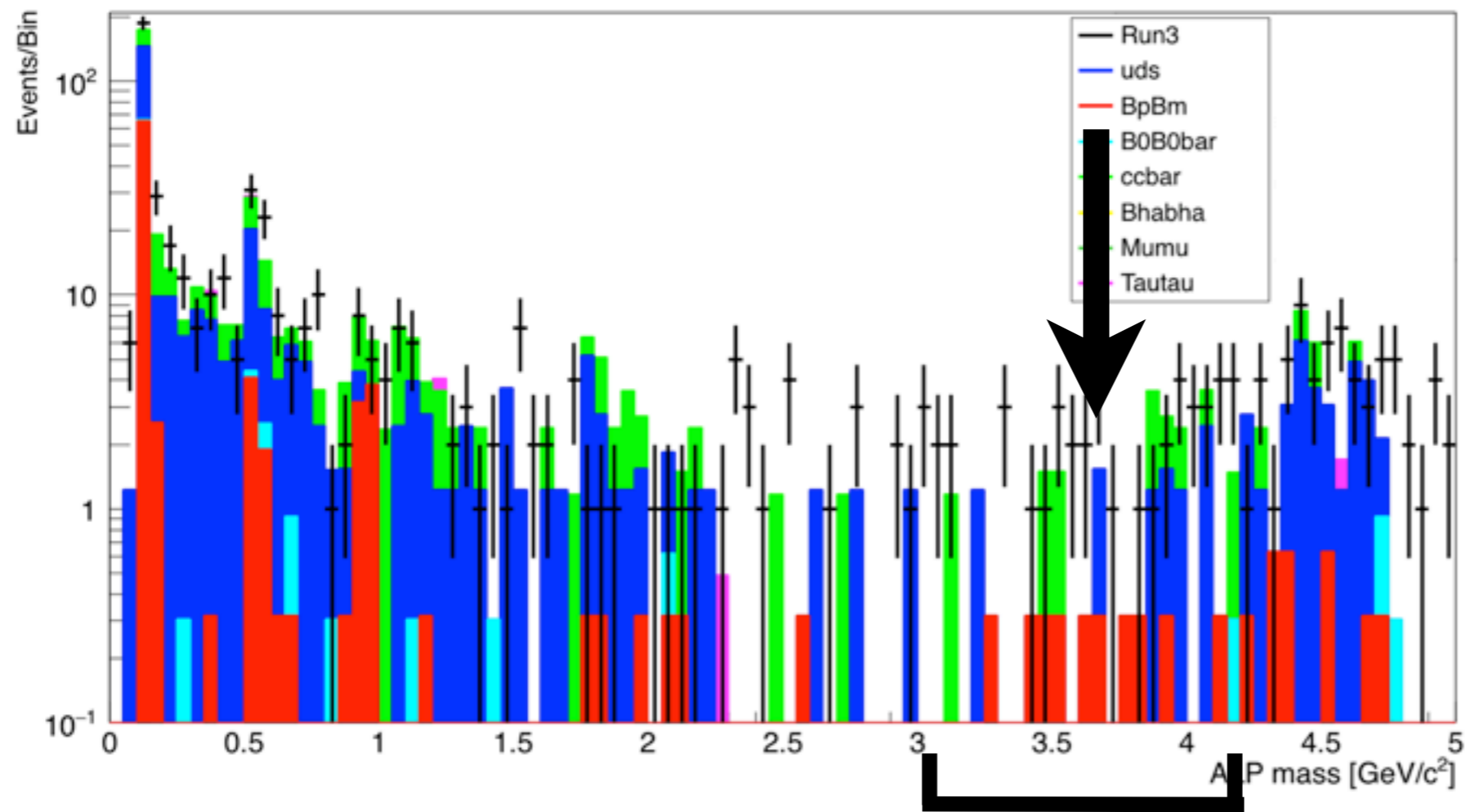
Si ripete per varie ipotesi di massa



**Scan** di tutto lo spettro di massa ammesso

# Procedura di fit

ALP mass spectrum [Run3 vs MC bkgs]



Si ripete per varie ipotesi di massa

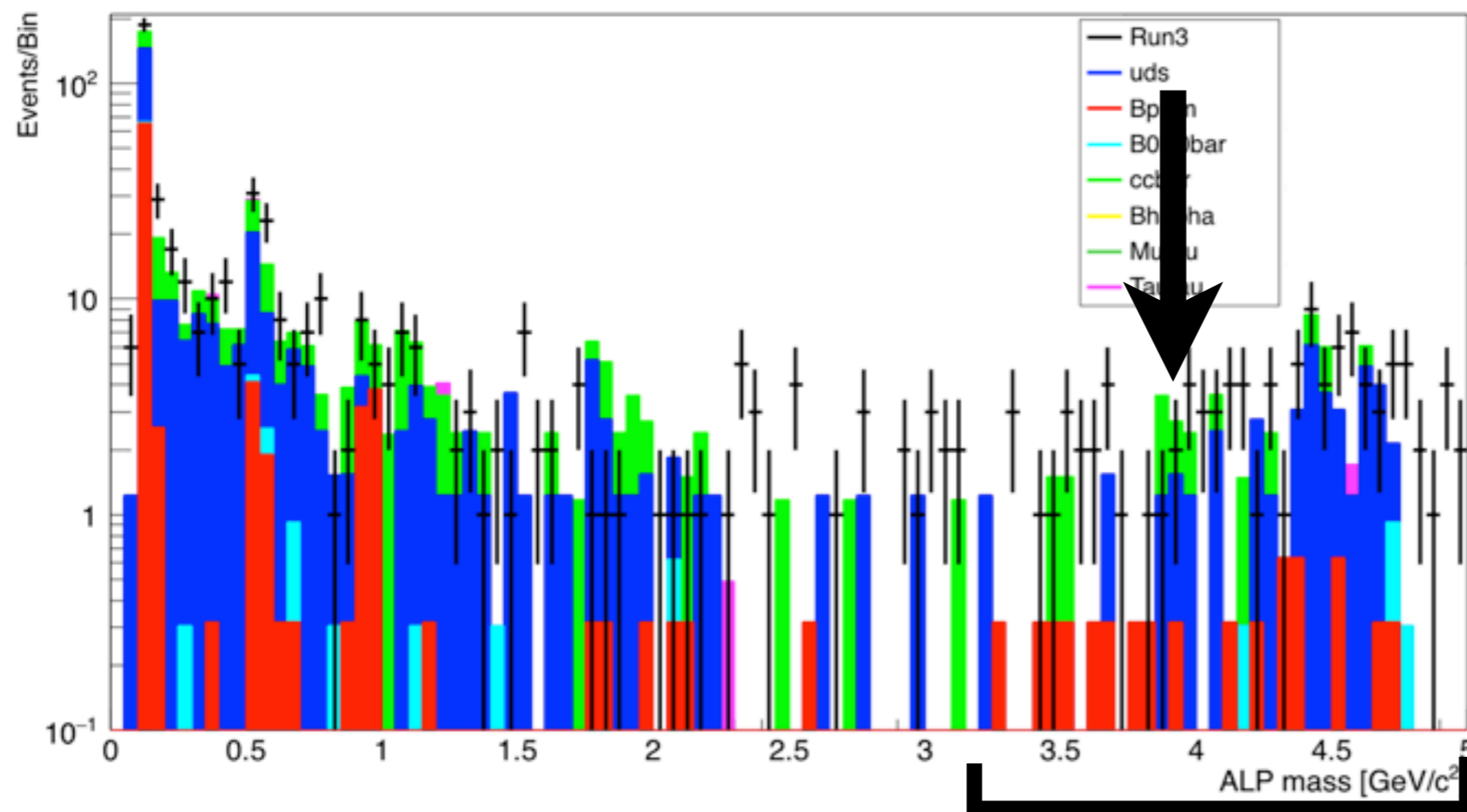


**Scan** di tutto lo spettro di massa ammesso



# Procedura di fit

ALP mass spectrum [Run3 vs MC bkgs]



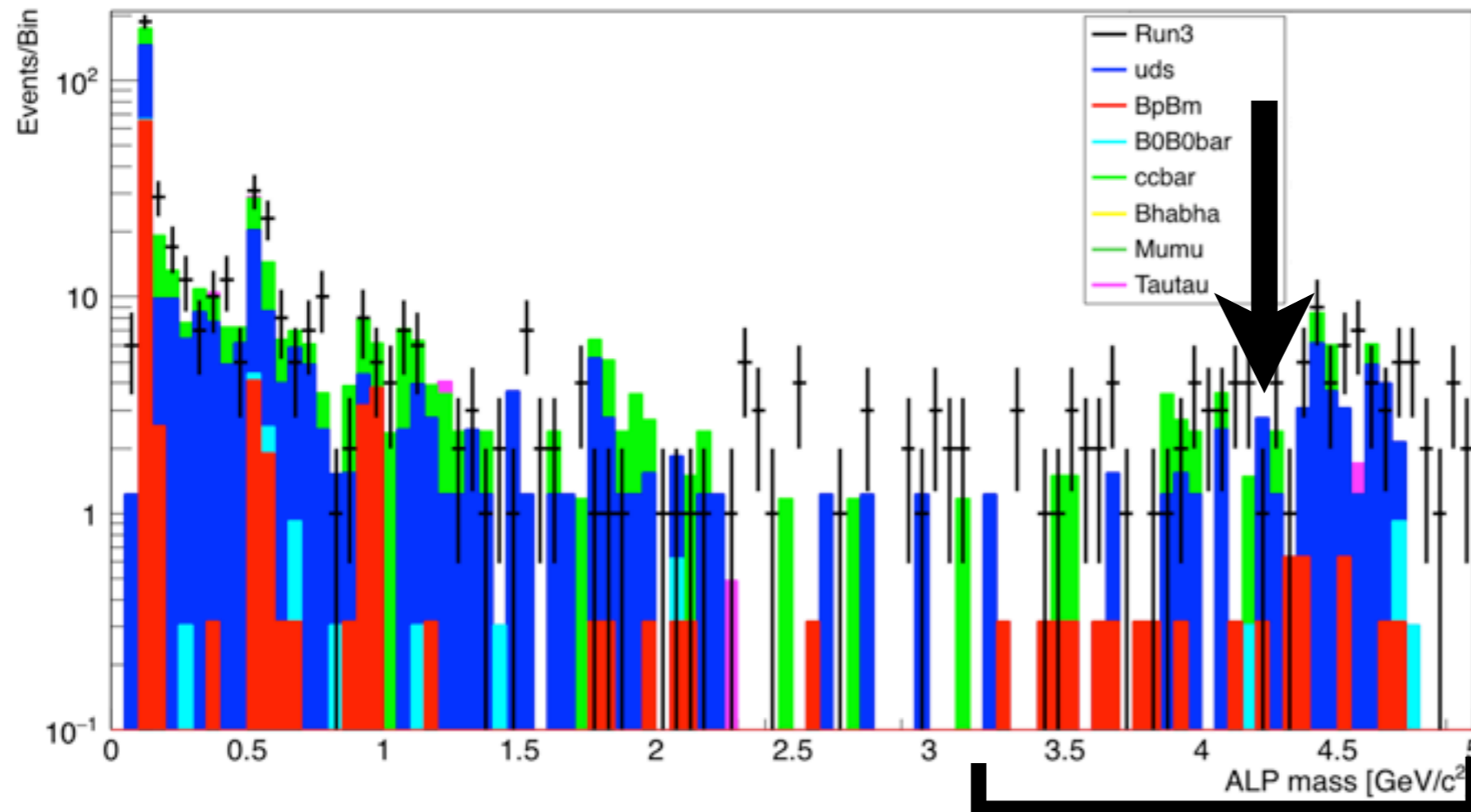
Si ripete per varie ipotesi di massa



**Scan** di tutto lo spettro di massa ammesso

# Procedura di fit

ALP mass spectrum [Run3 vs MC bkgs]



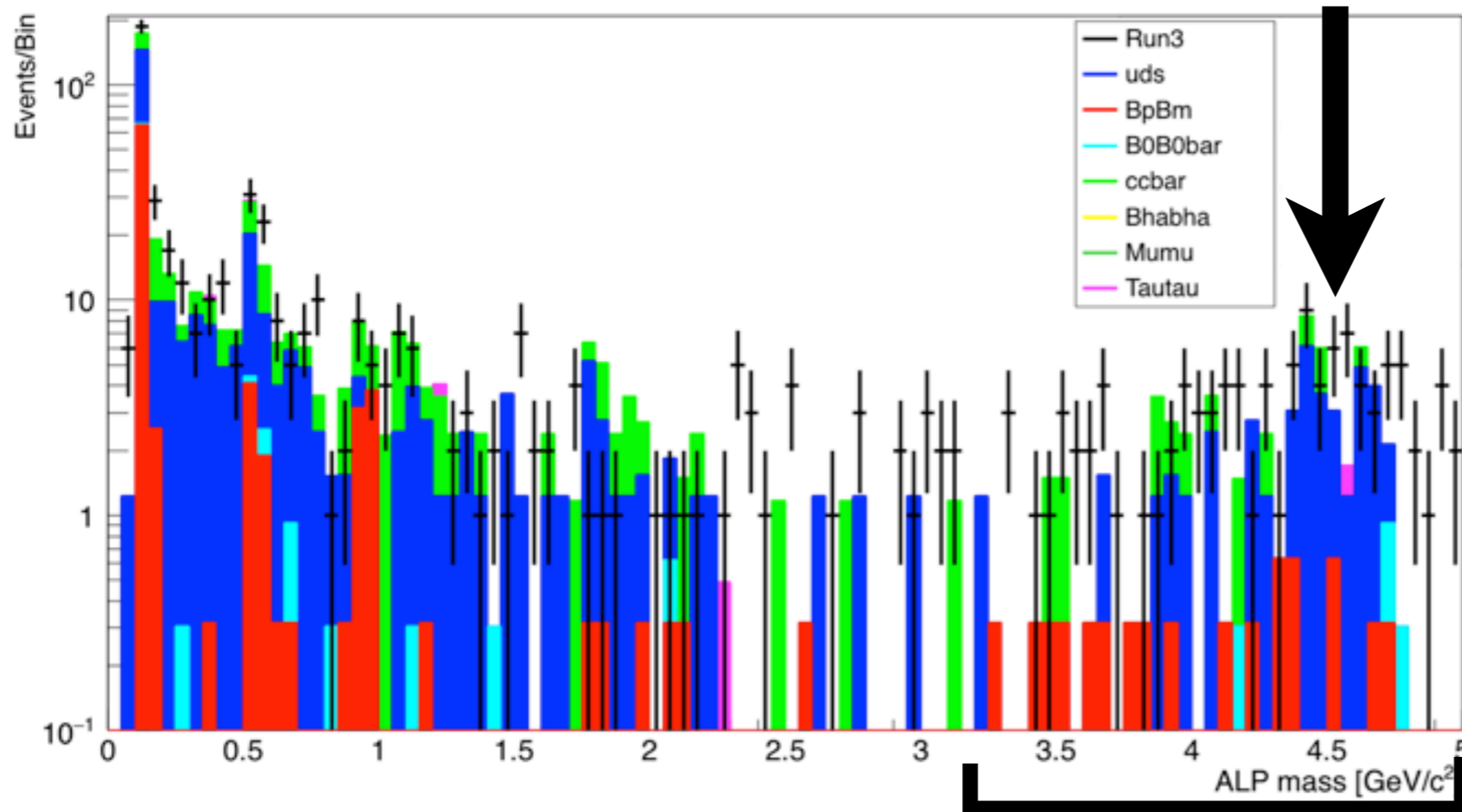
Si ripete per varie ipotesi di massa



**Scan** di tutto lo spettro di massa ammesso

# Procedura di fit

ALP mass spectrum [Run3 vs MC bkgs]



Si ripete per varie ipotesi di massa

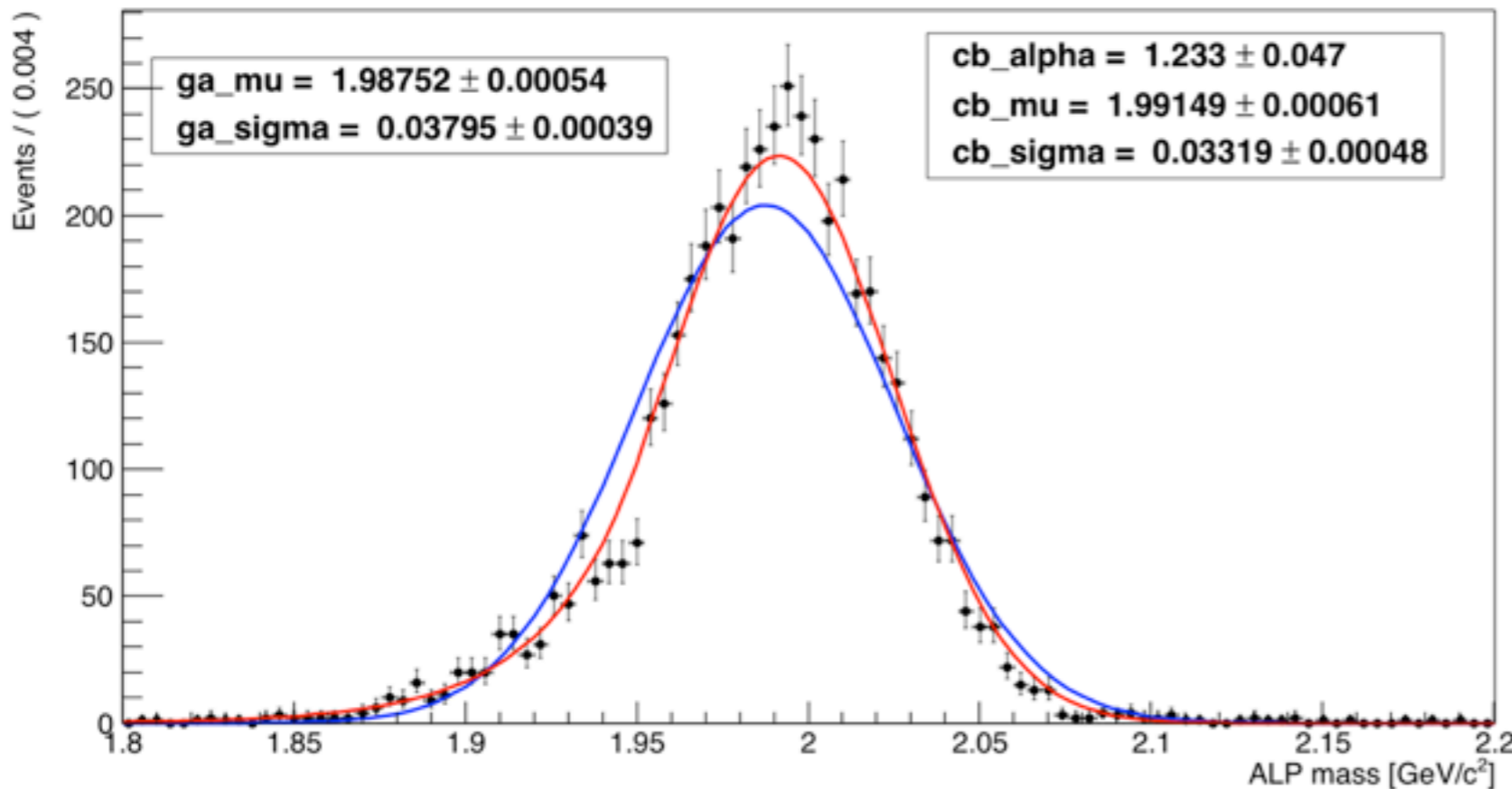
**Scan** di tutto lo spettro di massa ammesso

Estrazione delle PDFs

# Estrazione delle PDFs

## PDF di segnale

Mass Distribution of the ALP candidates, n = 80, -2 GeV-



- Picco di segnale MC fittato con:
  - ▶ gaussiana
  - ▶ Crystal Ball (CB, gaussiana con coda di potenza)
- Fittati tutti i segnali MC (varie  $M_A$ )



$$CB(x; \mu, \sigma, \alpha, n) = \begin{cases} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, & \text{for } \frac{x-\mu}{\sigma} > -\alpha \\ A \cdot (B - \frac{x-\mu}{\sigma})^{-n}, & \text{for } \frac{x-\mu}{\sigma} \leq -\alpha \end{cases}$$

Scelta la CB

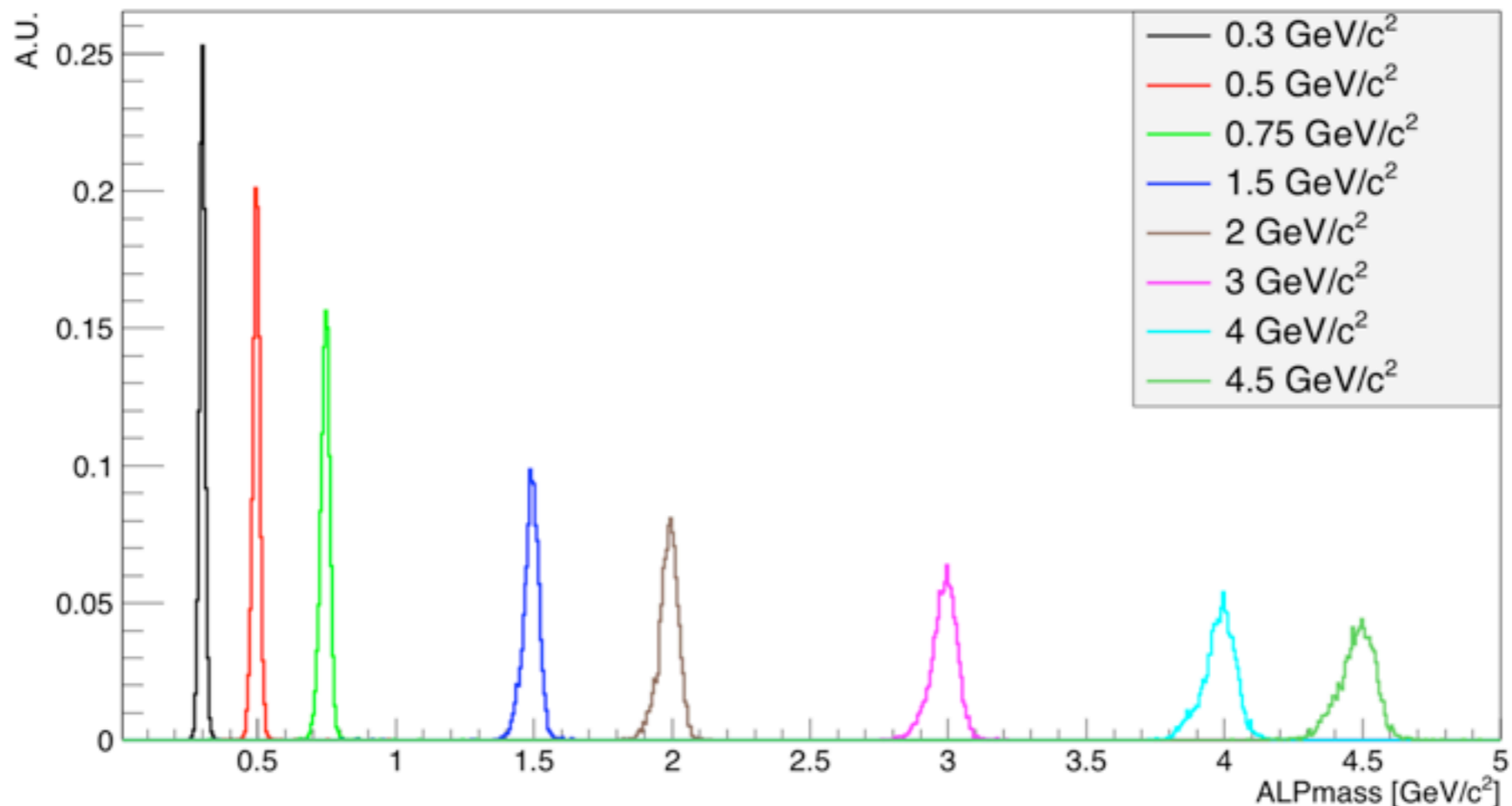


$\chi^2_{\text{Red}} \text{ fit con CB} \approx 0.43 \div 0.93$   
 $\chi^2_{\text{Red}} \text{ fit con gaussiana}$

# Estrazione delle PDFs

## PDF di segnale

ALP mass -after selection-

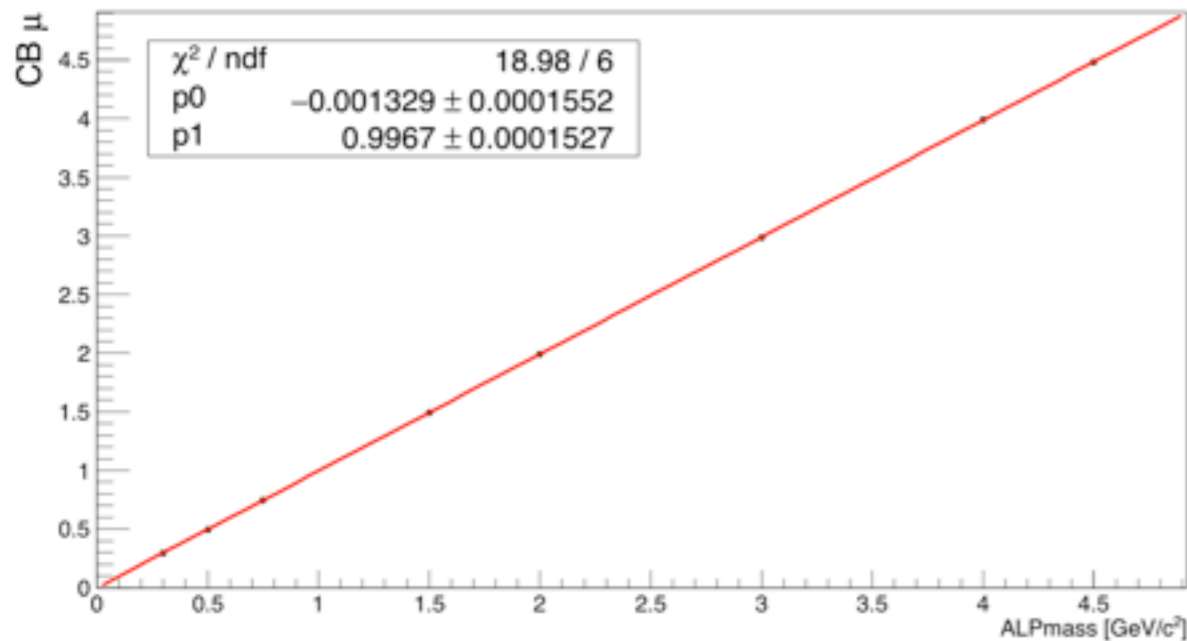


- ▶ Parametri della CB di segnale dipendono da  $M_A$
- ▶ Numero finito di MC samples di segnale  $\implies$  per descrivere il segnale in tutto lo spettro è necessario **interpolare** i parametri  $\mu, \sigma, \alpha, n$
- ▶ Durante il fit contemporaneo segnale+fondo  $\implies$  i parametri sono **fissati** (frazione di PDF di segnale libera)

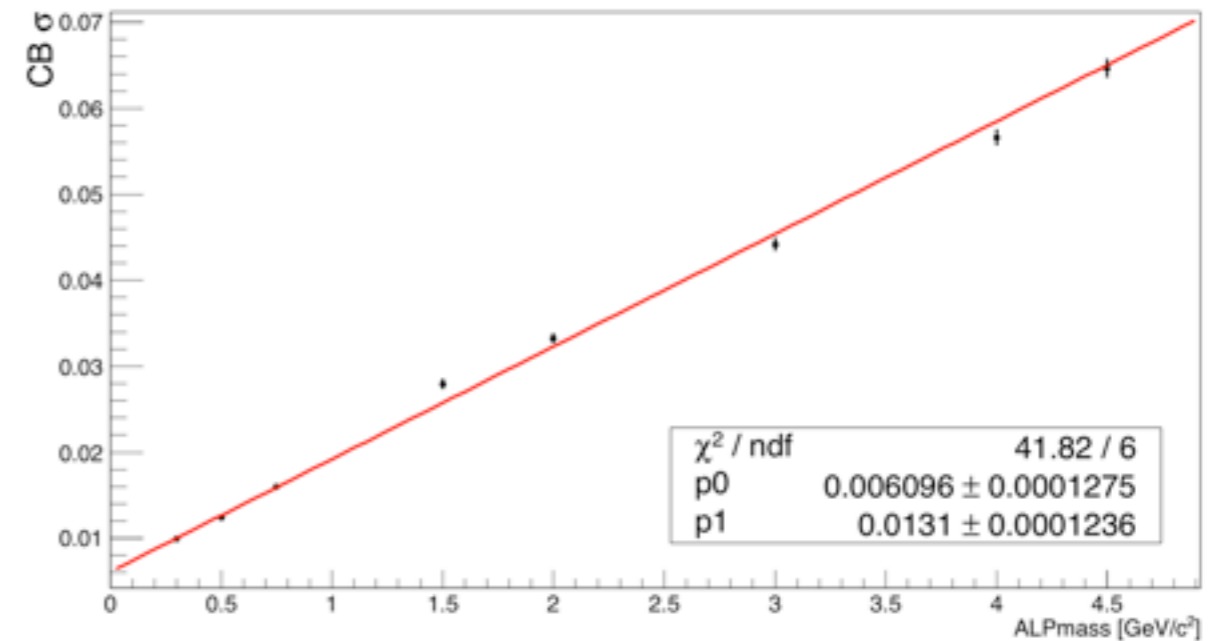
# Estrazione delle PDFs

## Parametri della Crystal Ball

CB  $\mu$  vs ALP mass, n = 80



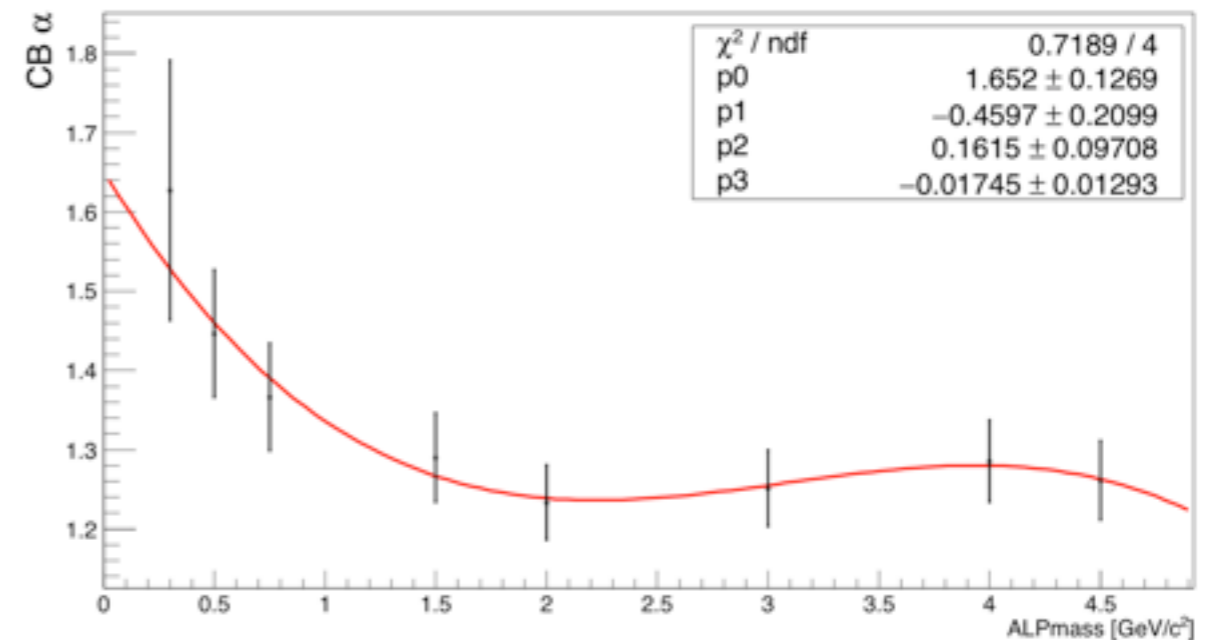
CB  $\sigma$  vs ALP mass, n = 80



Polinomi di basso grado (no specializzazione):

- ▶  $\mu$  e  $\sigma$ : polinomio di 1° grado
- ▶  $\alpha$ : polinomio di 3° grado
- ▶  $n$ : fissato a 80 per stabilizzare il fit

CB  $\alpha$  vs ALP mass, n = 80

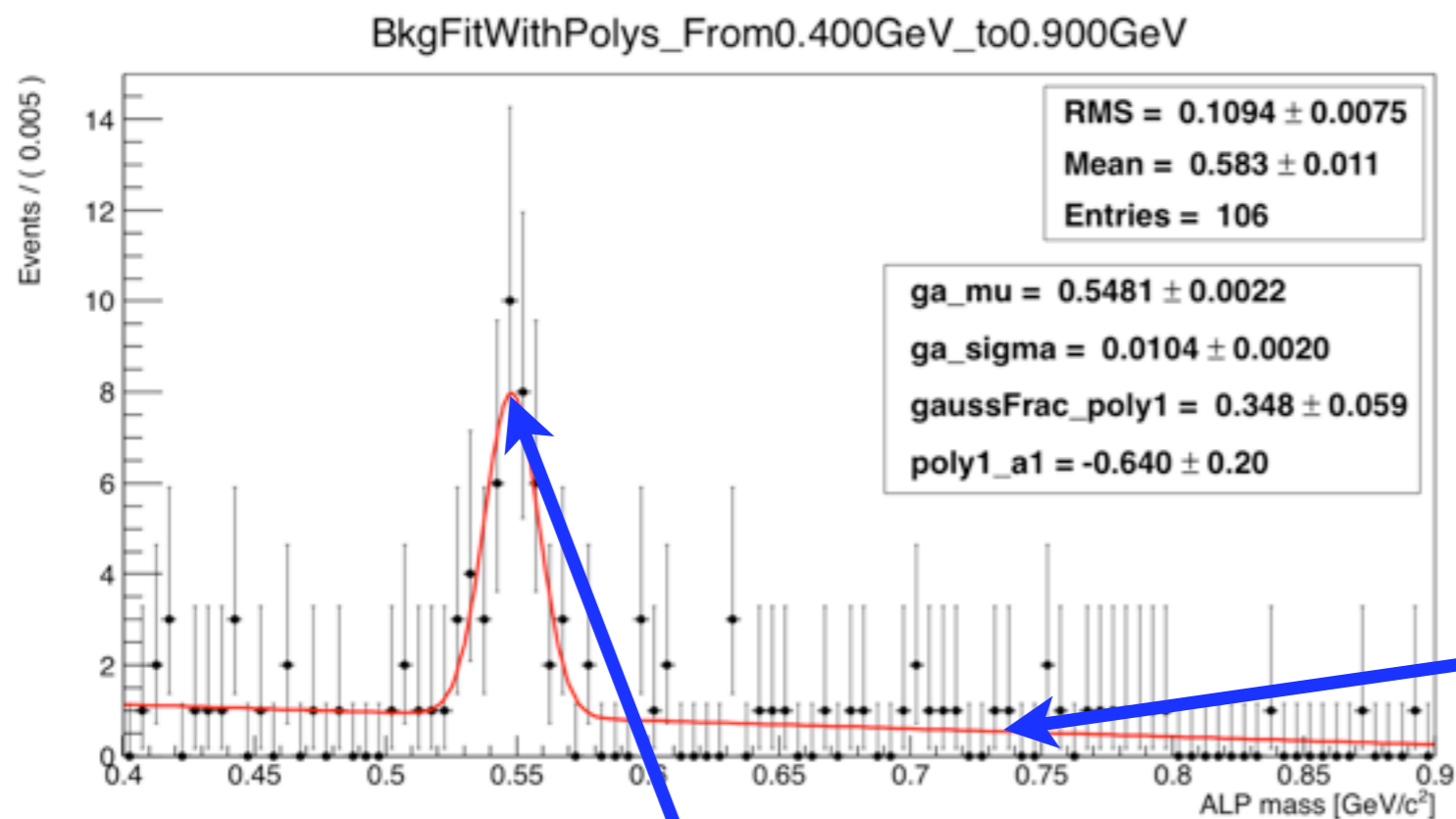


# Estrazione delle PDFs

## PDF di fondo

PDF fondo: 2 componenti

- Continua (polinomio)
- Peaking (gaussiana)



Componente continua:

- ▶ PDF del fondo dai dati per maggiore affidabilità
- ▶ Evitare specializzazioni su control sample



- **Polinomi di basso grado**
- **Parametri liberi**

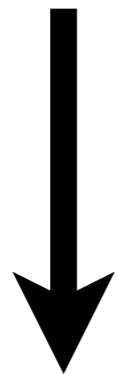
Componente peaking: finestra di fit include  $\pi^0, \eta, \eta'$   $\implies$   
risonanza fittata con una gaussiana



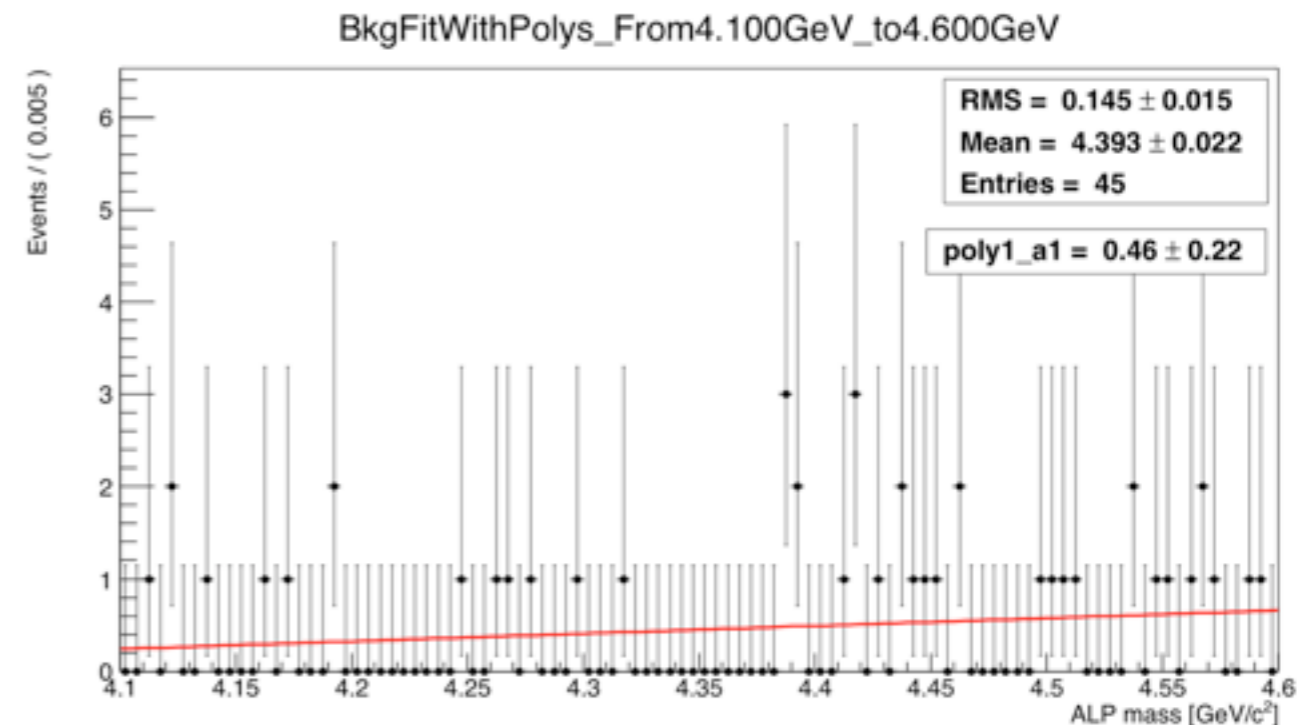
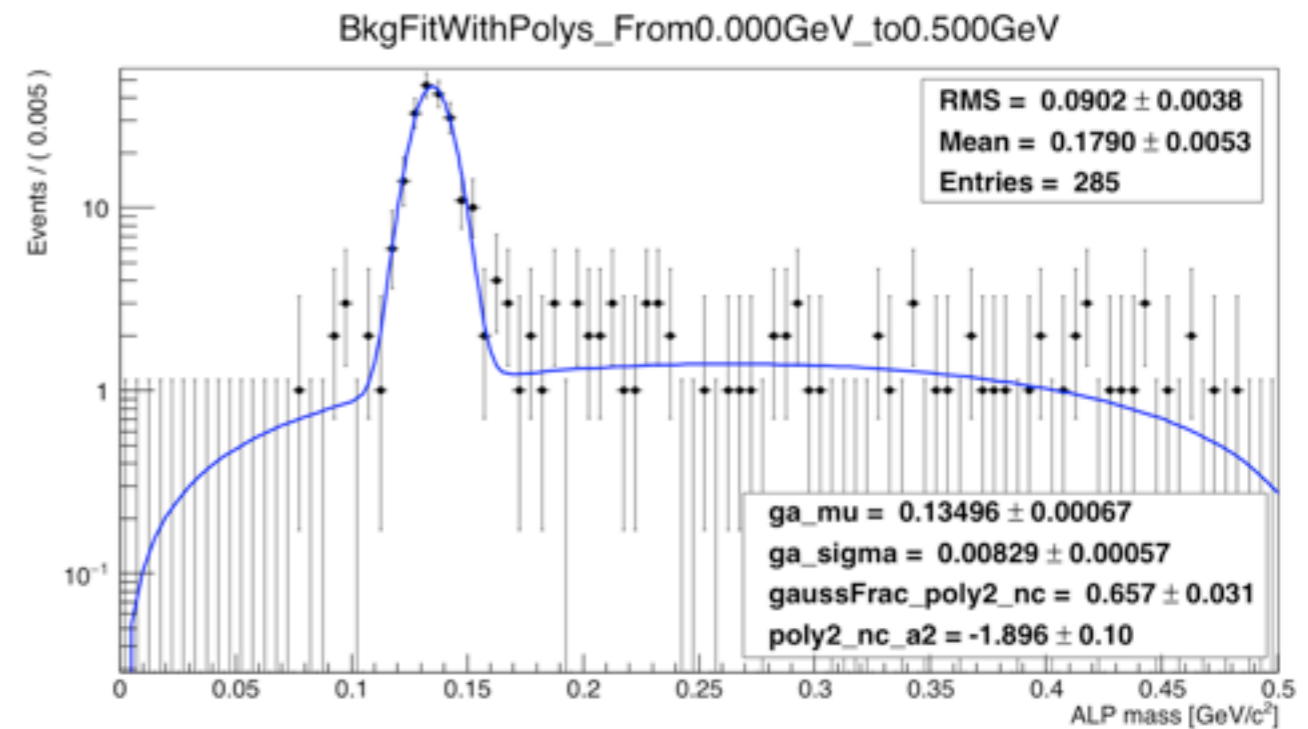
# Estrazione delle PDFs

PDF di fondo

0 eventi per  $M_A = 0$



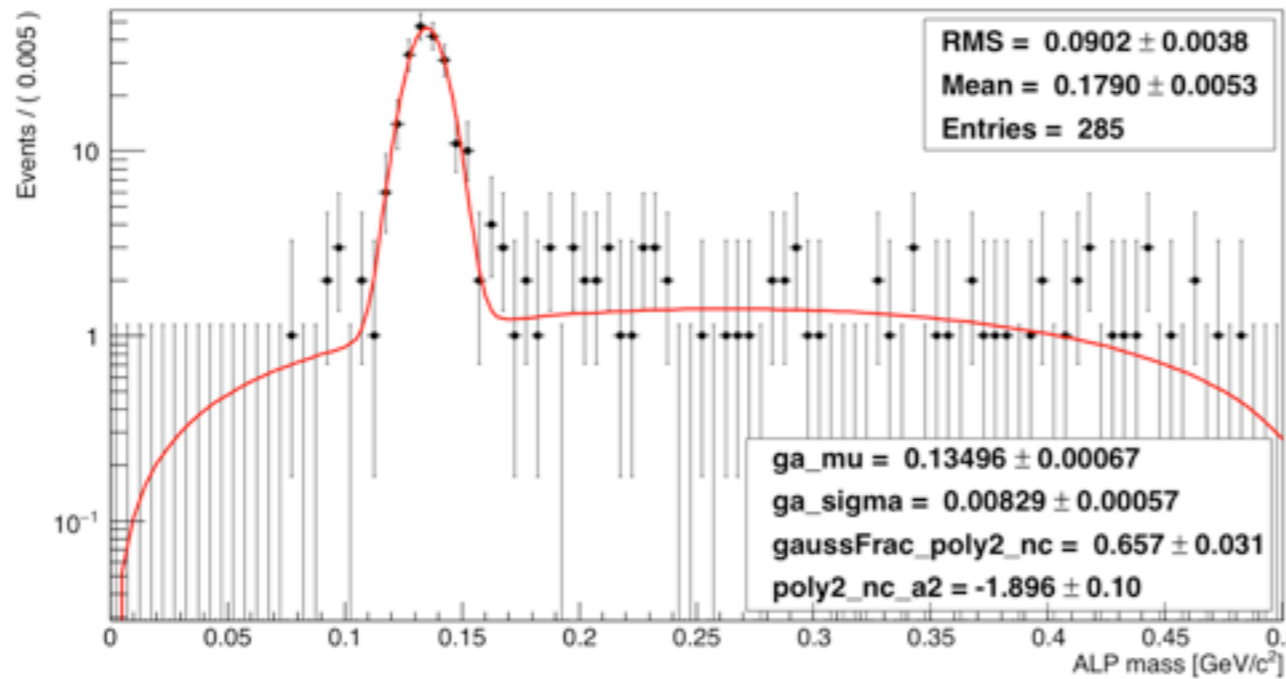
- ▶ Finestra che include  $M=0$ :  
polinomio di *secondo* grado  
**senza costante**
- ▶ Polinomio di *primo* grado  
altrove (costante + lineare)



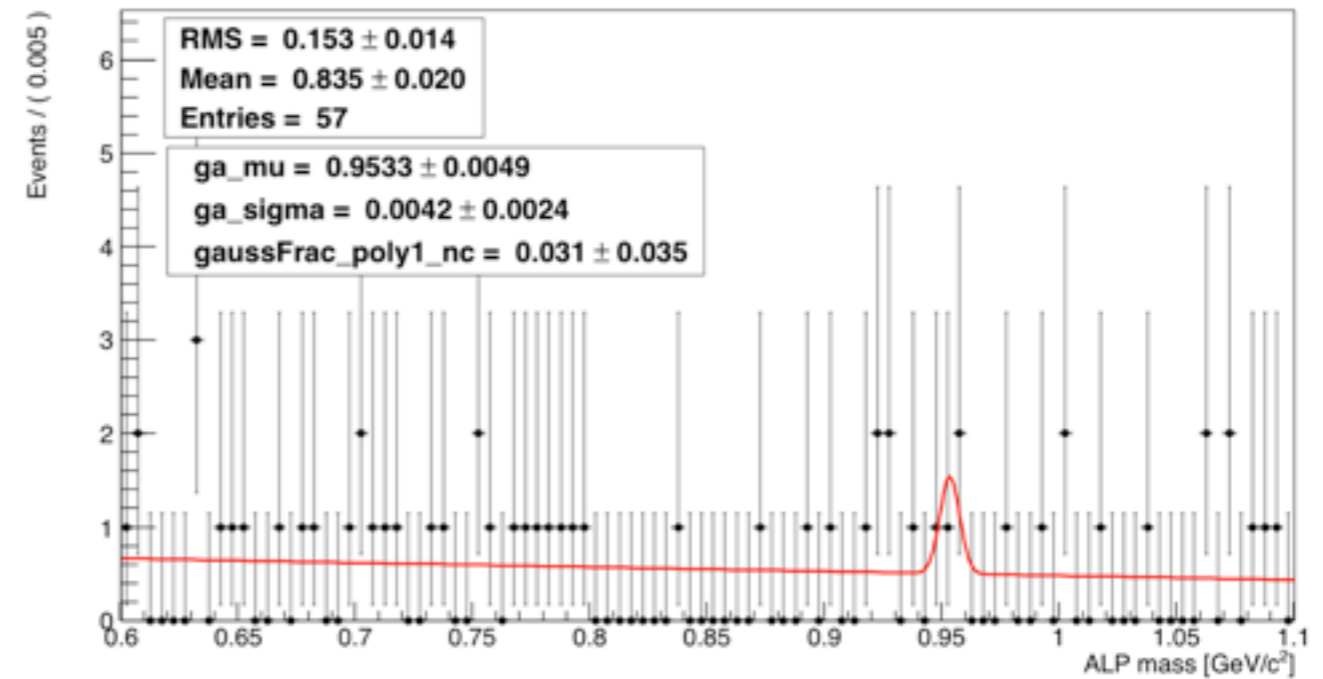
# Estrazione delle PDFs

## PDF di fondo

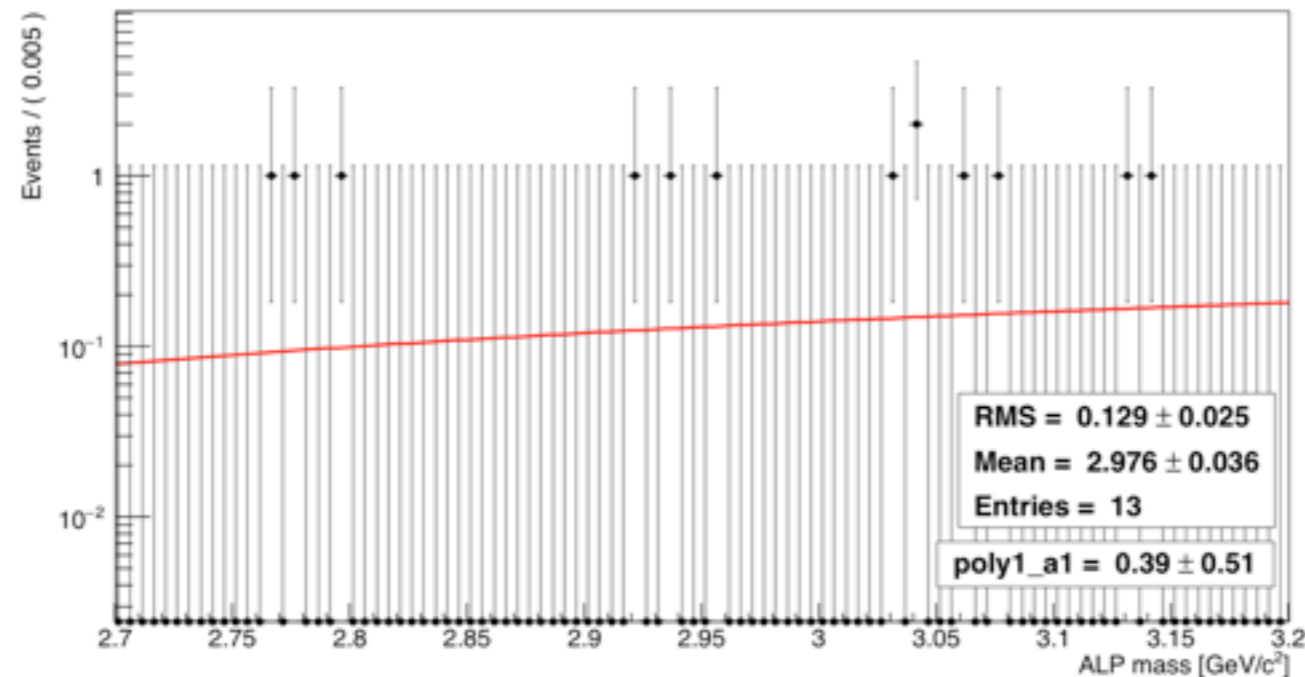
BkgFitWithPolys\_From0.000GeV\_to0.500GeV



BkgFitWithPolys\_From0.600GeV\_to1.100GeV



BkgFitWithPolys\_From2.700GeV\_to3.200GeV



Fit at control sample

# Fit al control sample

## Scopi

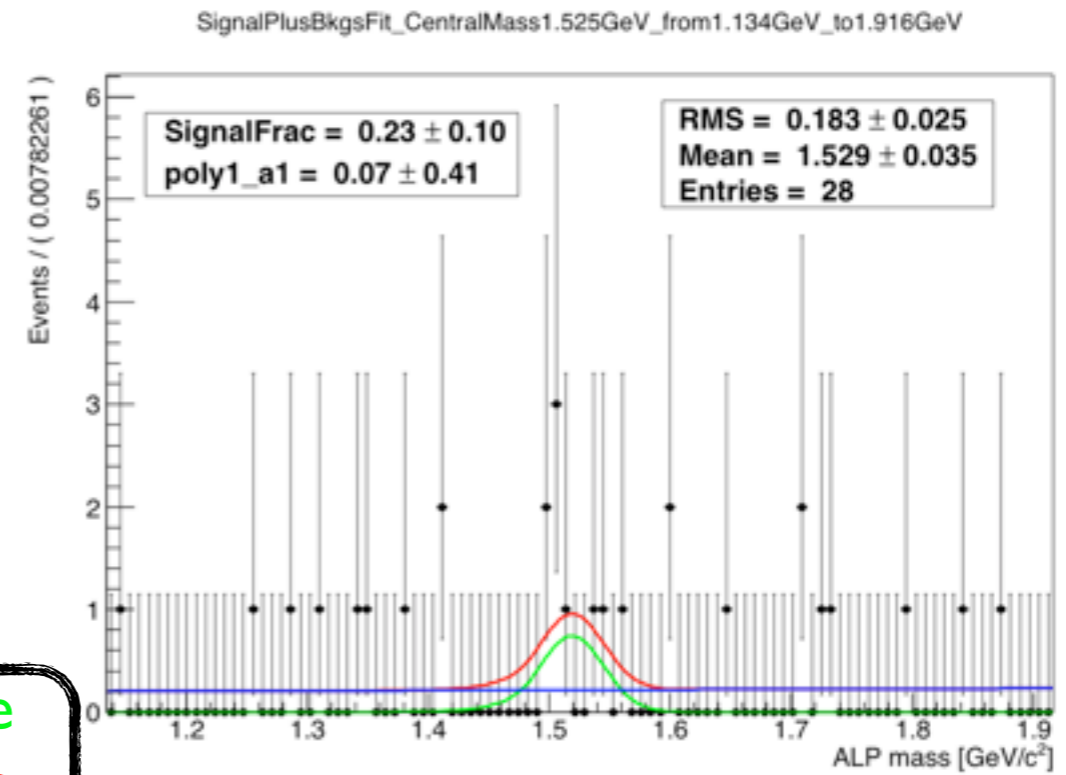
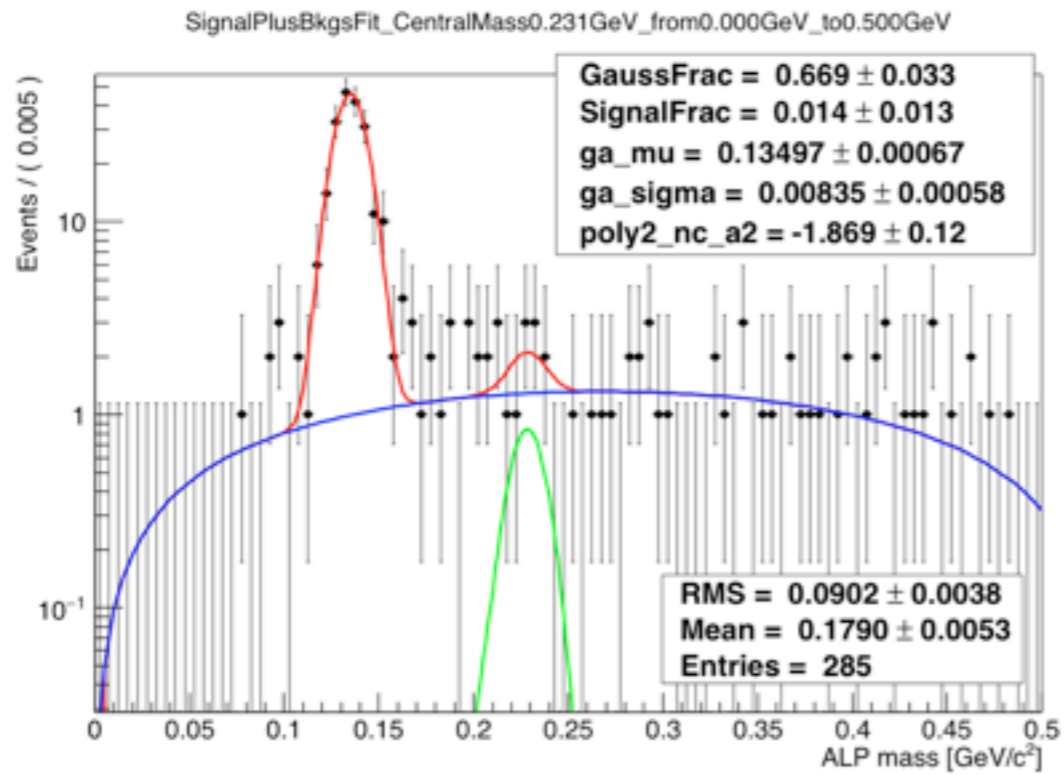
### Scopi del test:

- Verificare **stabilità** procedura di fit segnale+fondo
- Verificare risultati nell'**ipotesi nulla**:
  - ▶ Ipotesi nulla  $\iff$  *niente segnale*
  - ▶ Distribuzione del numero di eventi di segnale: *media 0*
  - ▶ Statistica è abbastanza alta  $\implies$  distribuzione *gaussiana*

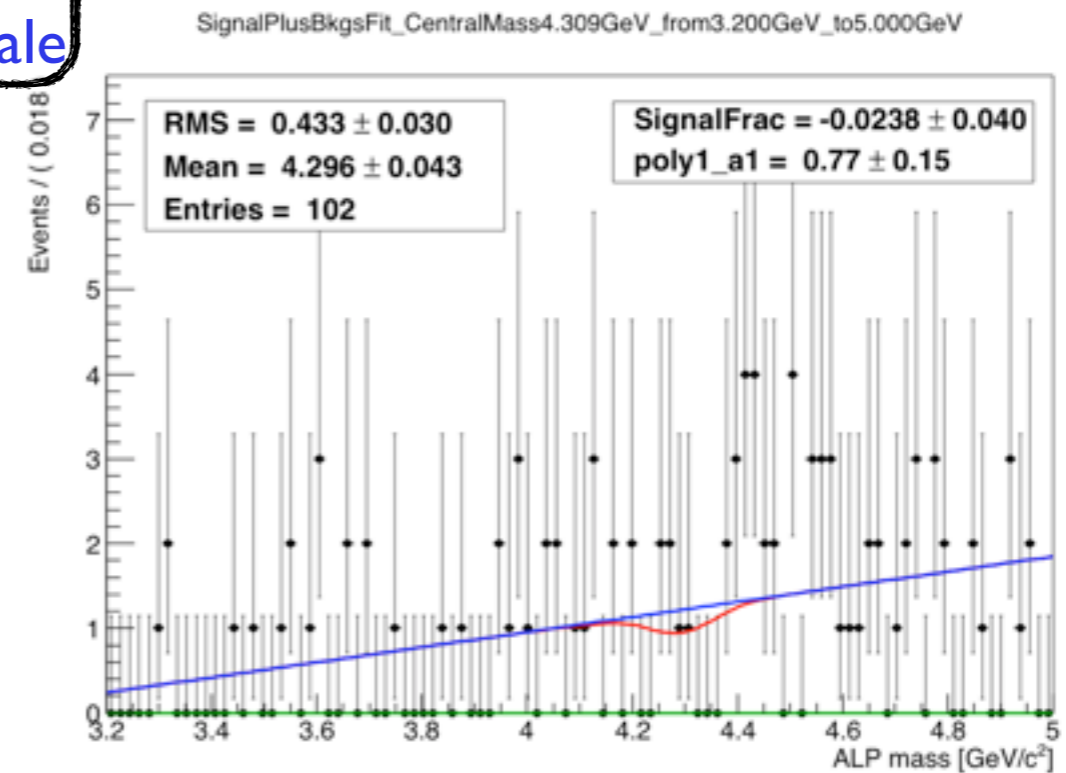
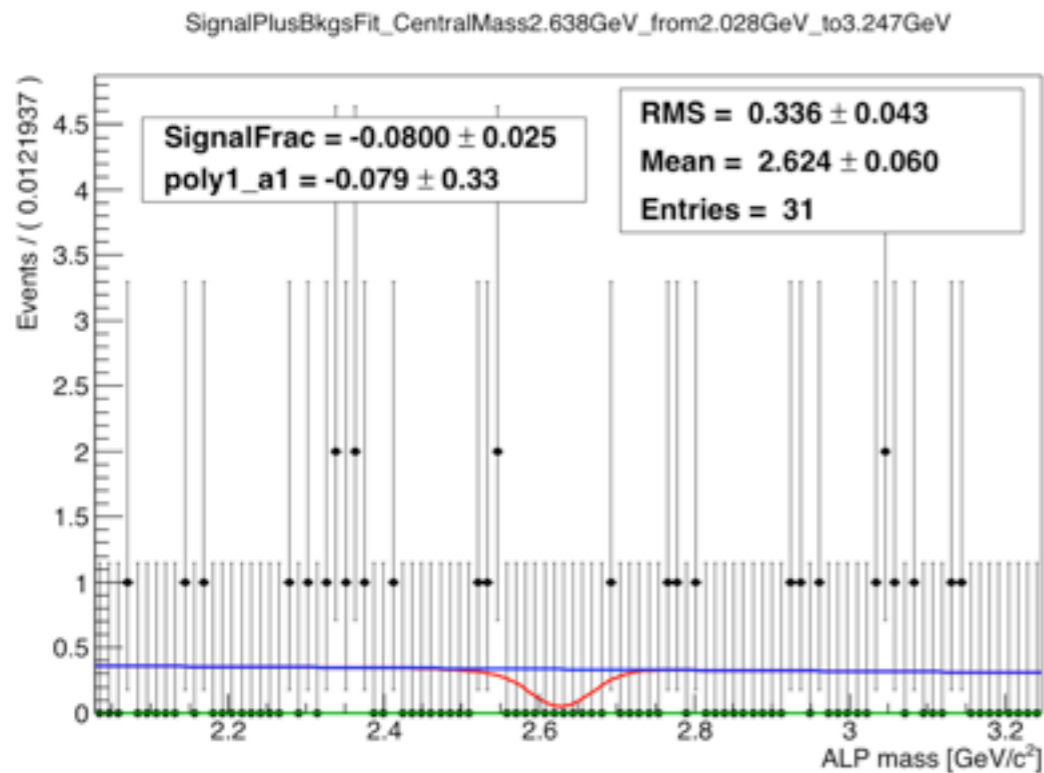
- Finestra di fit:  $\pm 15 \sigma_{\text{segnale}}$
- Step:  $0.5 \sigma_{\text{segnale}}$
- Regione iniziale: 500 MeV/c<sup>2</sup>
- Regione finale: 1800 MeV /c<sup>2</sup>

# Fit al control sample

## Esempi di fit



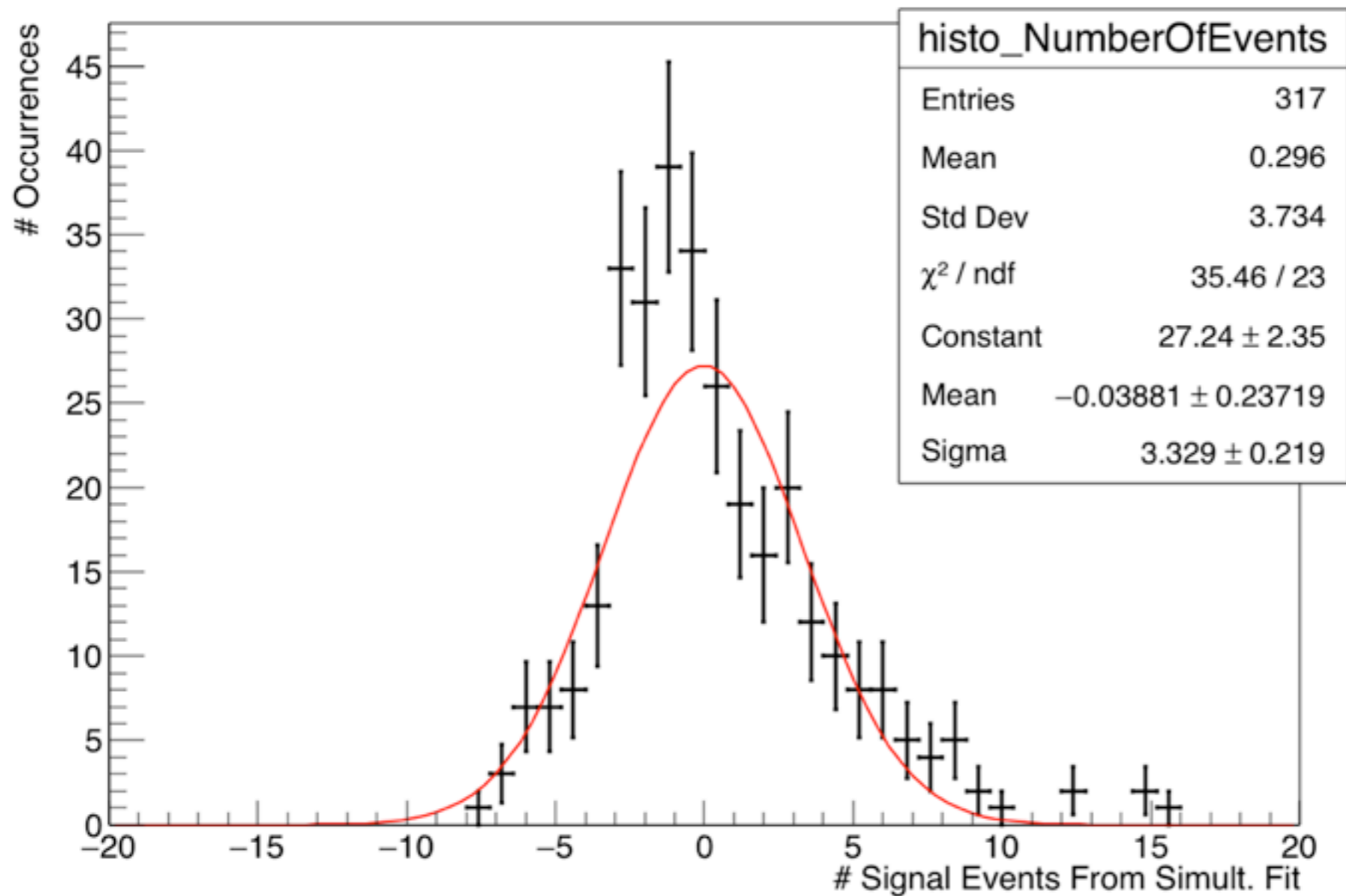
Segnale  
 Somma  
 Polinomiale



# Fit al control sample

## Distribuzione del numero eventi di segnale

Number of Signal Events from Fit ( $M_L=0.50, M_R=1.80, K=15, M_{CL}=0.35, M_{CR}=4.00, d=2$ )



- Media  $\approx 0$
- $\chi^2_{\text{red}} \approx 1.5$
- Asimmetria data dalla statistica non sufficientemente alta

Stime e prossimi passi

# Prossimi passi

## Toy MC

**Toy MC:** simulazione per studiare il comportamento di una *specific parte* di una analisi statistica

- ▶ Simulazione **frazione  $f_s$**  di segnale a **massa  $M_A$** : il fit restituisce  $M_A$  e  $f_s$  o introduco **bias**?
- ▶ **Ipotesi nulla** ( $f_s = 0$ ): distribuzione del max # eventi di segnale che estraggo in tutto lo spettro (*look elsewhere effect*)
- ▶ **Diverse PDF** (fondo & segnale) per valutare sistematiche
- ▶ Fit data samples simulati **con e senza** PDF di segnale  $\implies$  distribuzione del rapporto delle likelihood (per stima raffinata limite BR)



# Prossimi passi

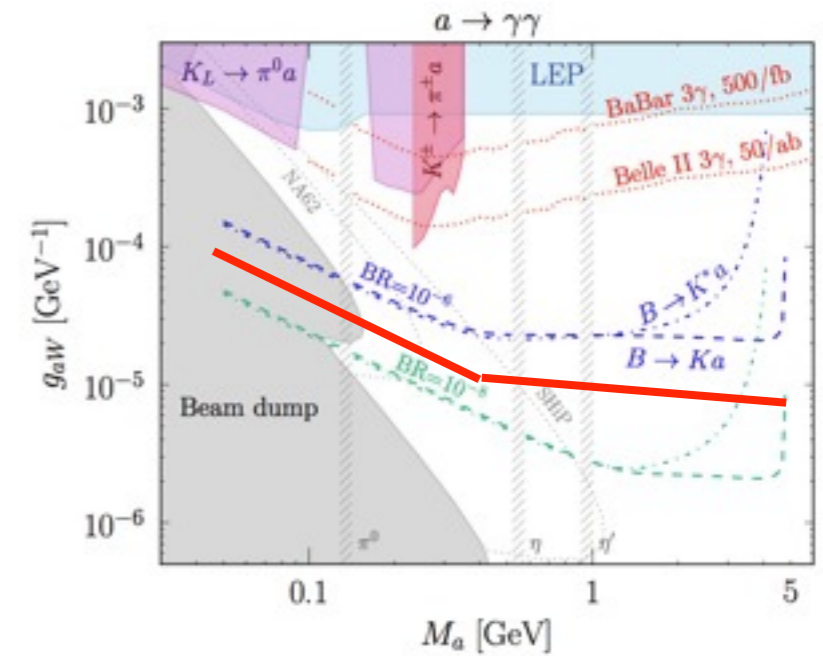
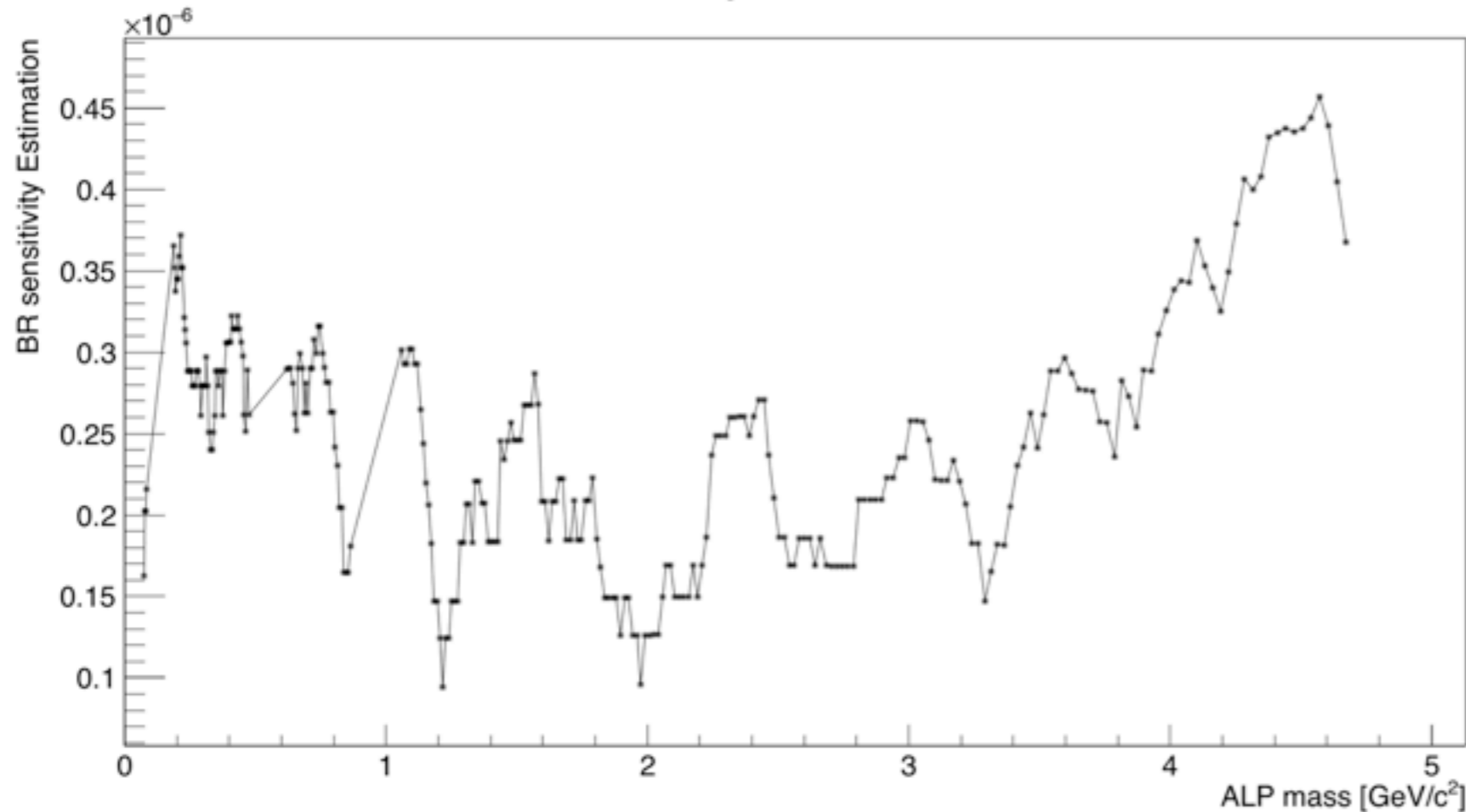
## Incertezze sistematiche

- **PDF di fondo:** usare diversi polinomi per modellare il fondo
- **PDF di segnale:** usare altre PDF per modellare il segnale o modificare i parametri della CB
- **Efficienze:** efficienze di identificazione dei fotoni, di tracking, dell'MVA (valutabili tramite le risonanze proibite)
- **Luminosità:** la luminosità integrata dei Runs di BaBar è nota con un'incertezza  $\sim 0.4\%$

# Stima sensitività BR

Data sample di BaBar

BR Sensitivity vs ALP mass, 90%



- ▶ Approssimazione *cut&count*
- ▶ *Ipotesi nulla* (tutti gli eventi sono di fondo)
- ▶ Credibility Interval = 90%



Limite superiore  
@ BaBar  
 $\approx 3 \times 10^{-7}$

# Stima sensitività BR

Proiezioni a Belle II

## Belle II:

- Presa dati 2019÷2025
- ~ 70 volte la luminosità di BaBar
- ~ 100 volte il data sample di BaBar
  - 50  $\text{ab}^{-1}$
  - 50 miliardi di coppie  $B\bar{B}$
- Maggiore copertura angolare
- Rivelatori migliorati
- Più fondo



Statistica 100 volte  
superiore



Limite 10 volte migliore



Limite superiore  
@ Belle II  
 $\approx 3 \times 10^{-8}$

Il mio lavoro di tesi ha incluso anche una  
*collaborazione* con questo esperimento



Stimatore **tempo di passaggio** nel  
rivelatore di vertice (SVD) per  
riduzione fondo fuori tempo

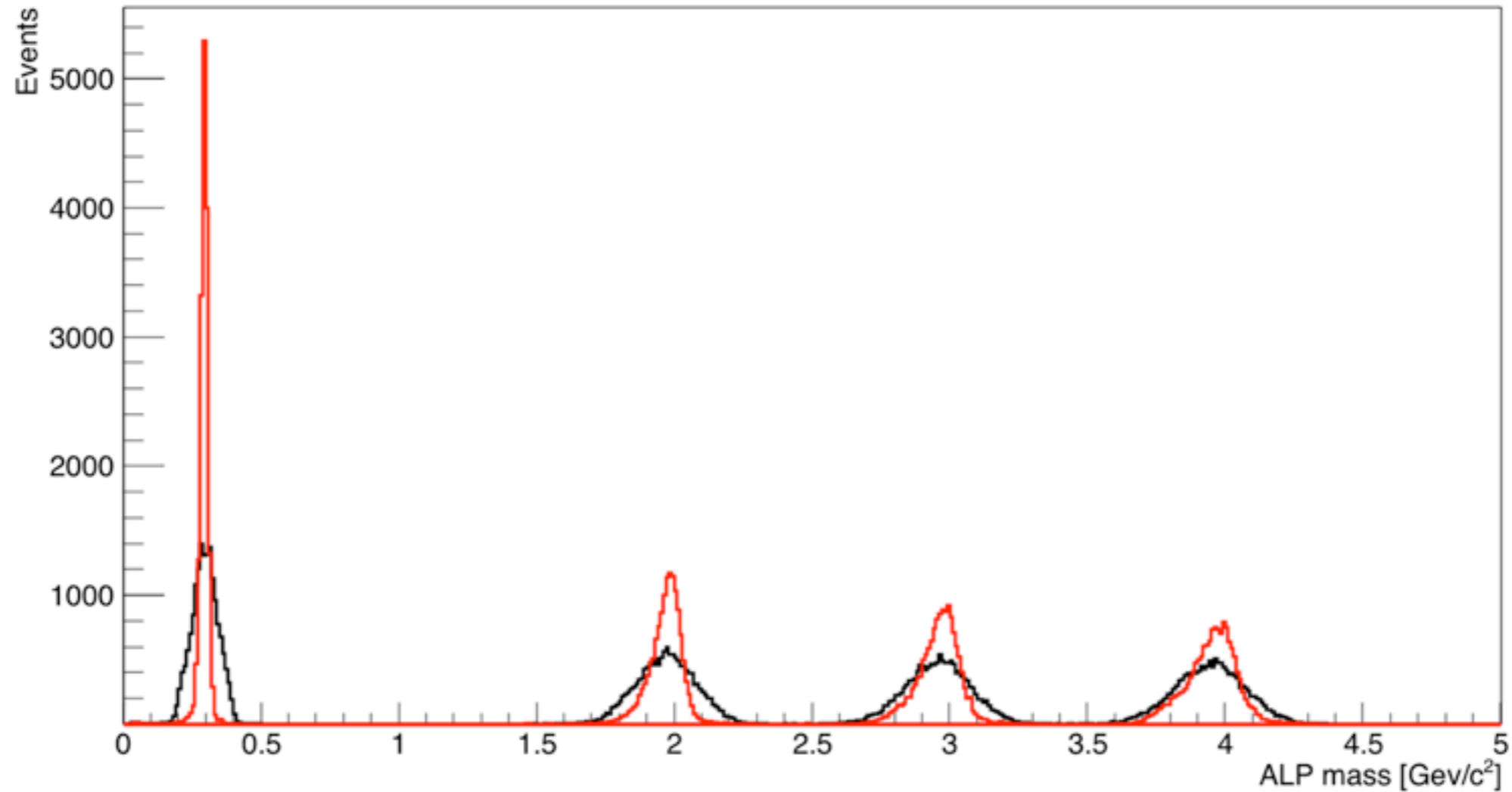
*Grazie!*

Backup

# segnale flattened

1/4

ALP mass Broadened vs Natural

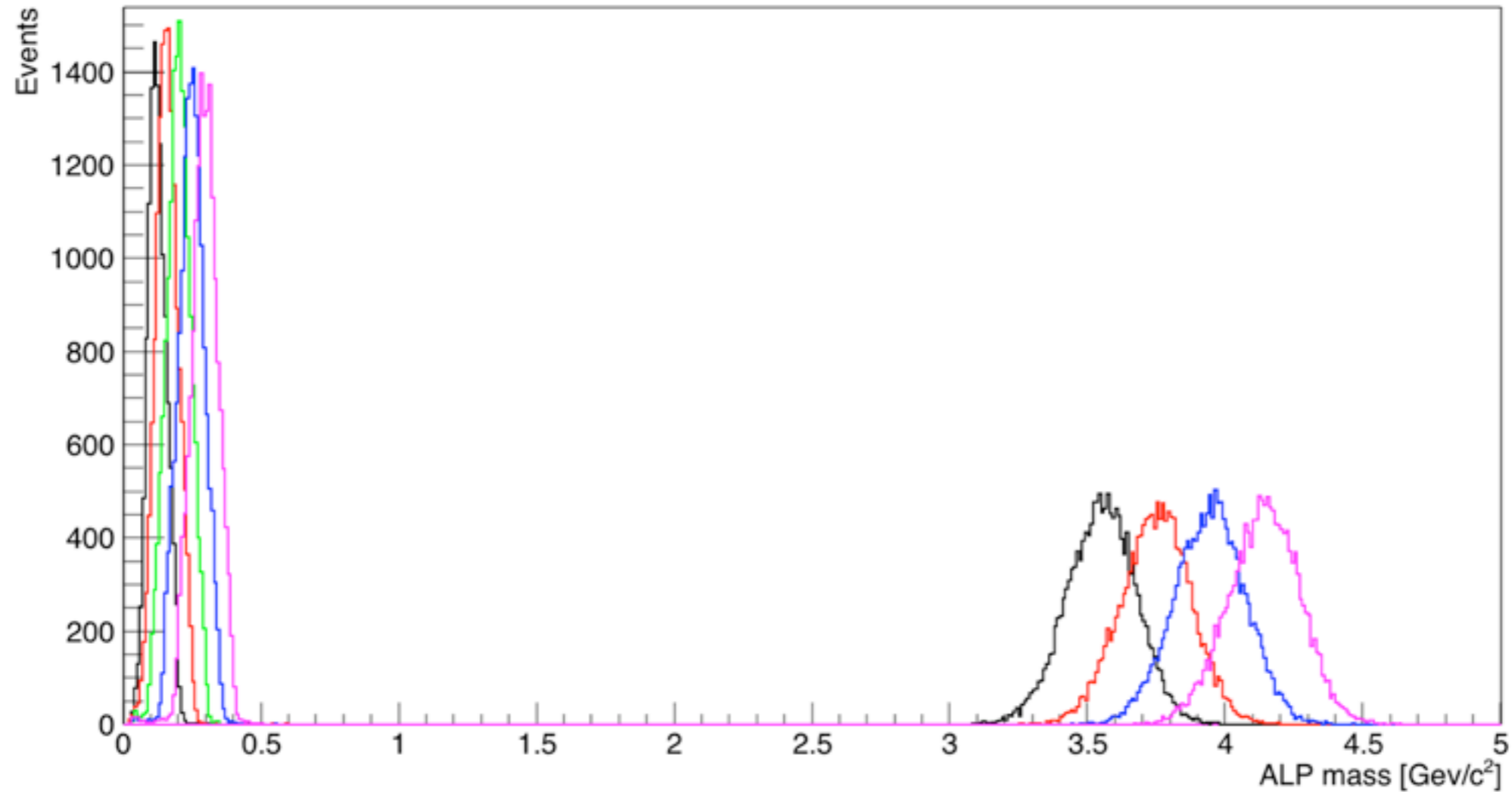


I: generazione di samples di segnale MC modificati (allargati, *broadened*)

# segnale flattened

2/4

ALP mass Broadened Overlaid

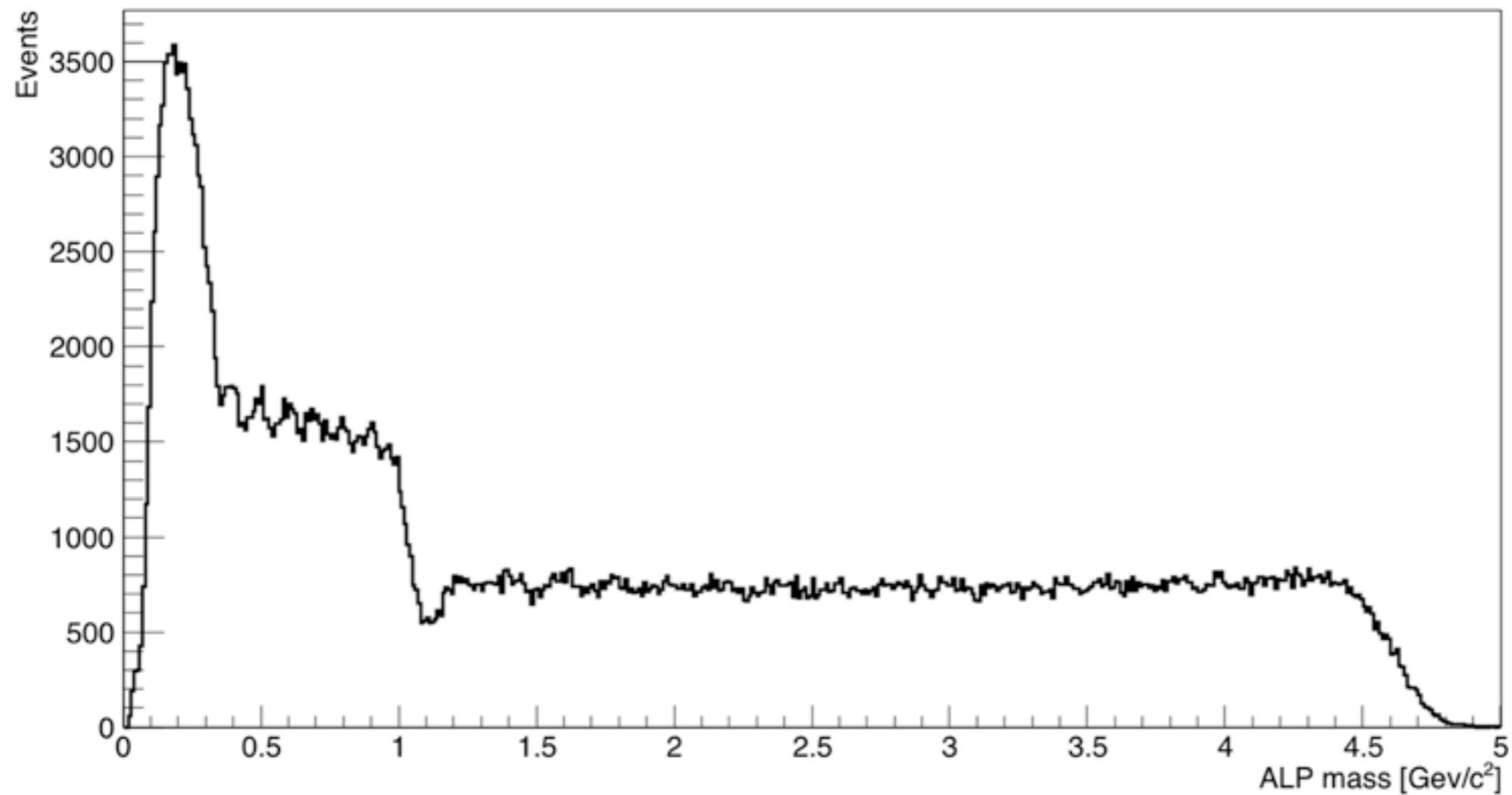


2: step fra le diverse  $M_A$  generate abbastanza stretto da garantire sovrapposizione fra le distribuzioni

# segnale flattened

3/4

ALP mass Broadened Merged



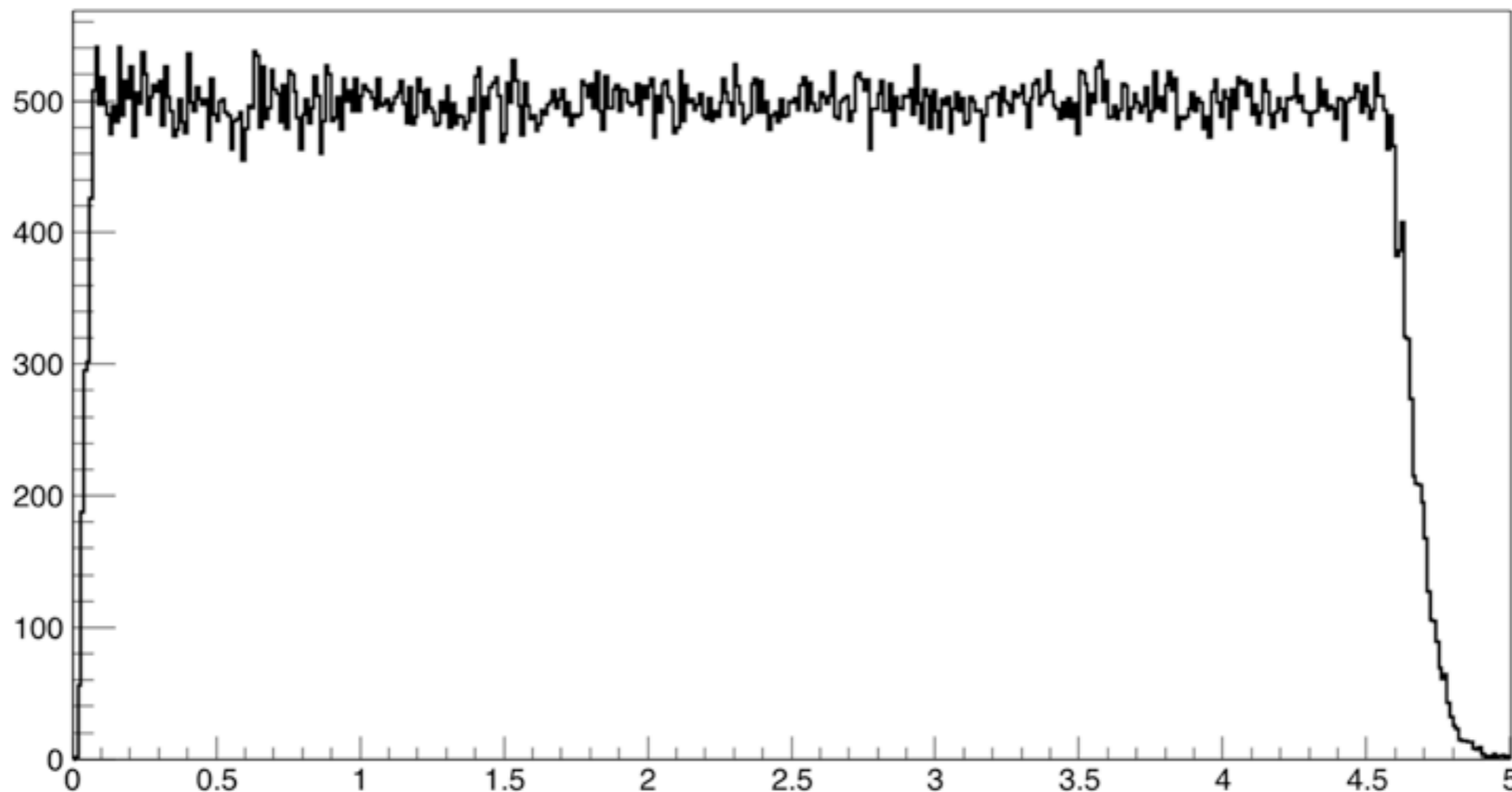
3: fusione dei vari samples di segnale allargati



# segnale flattened

4/4

ALP Mass Flattened

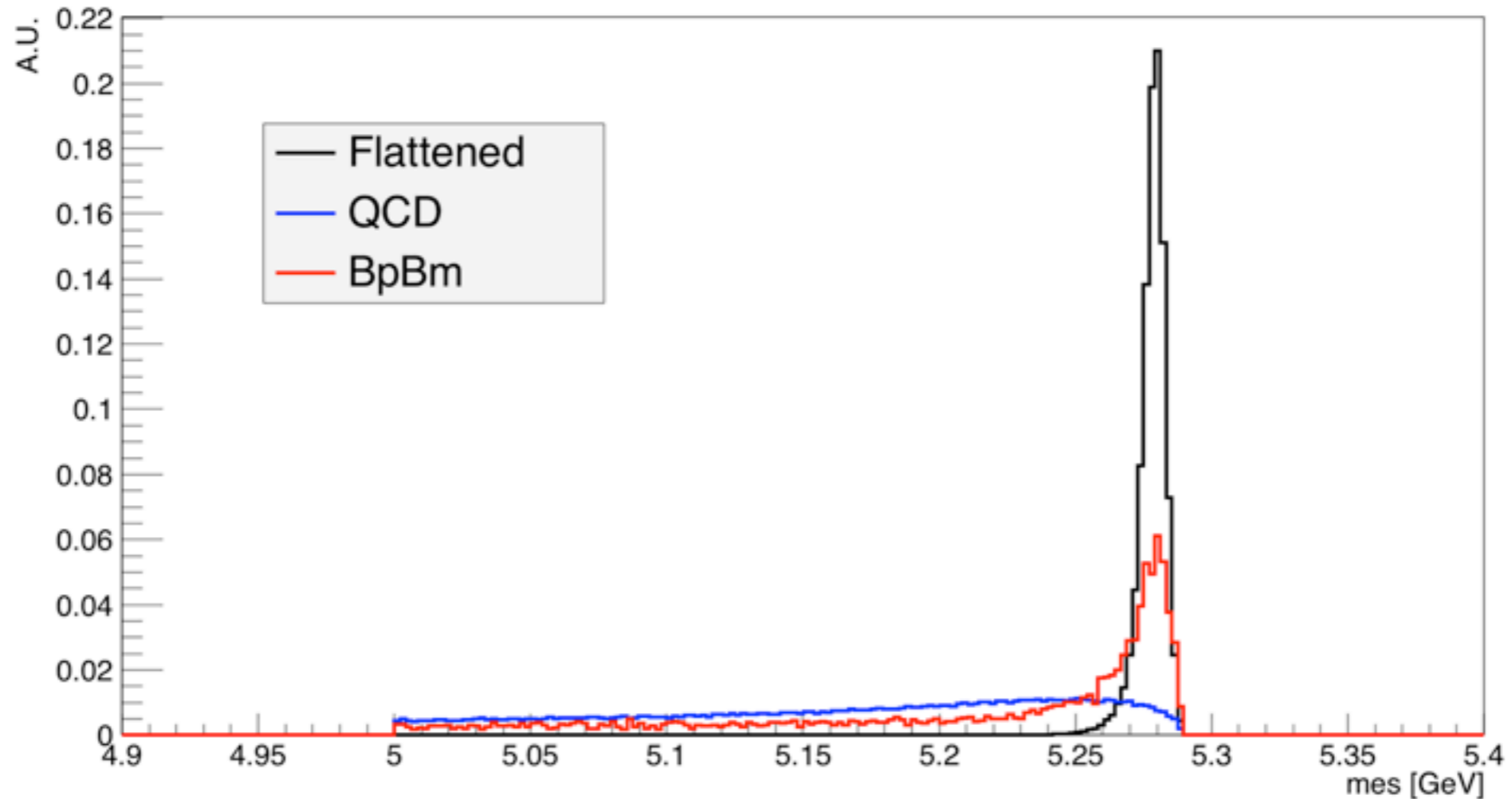


4: eliminazione casuale degli eventi in eccesso fino a rimanere con un numero medio costante di eventi per bin (500)

# Variabili di selezione

$m_{ES}$

mes



$$m_{ES} = \sqrt{\left(\frac{\frac{s}{2} + \vec{p}_B \cdot \vec{p}_0}{E_0}\right)^2 - |\vec{p}_B|^2}$$

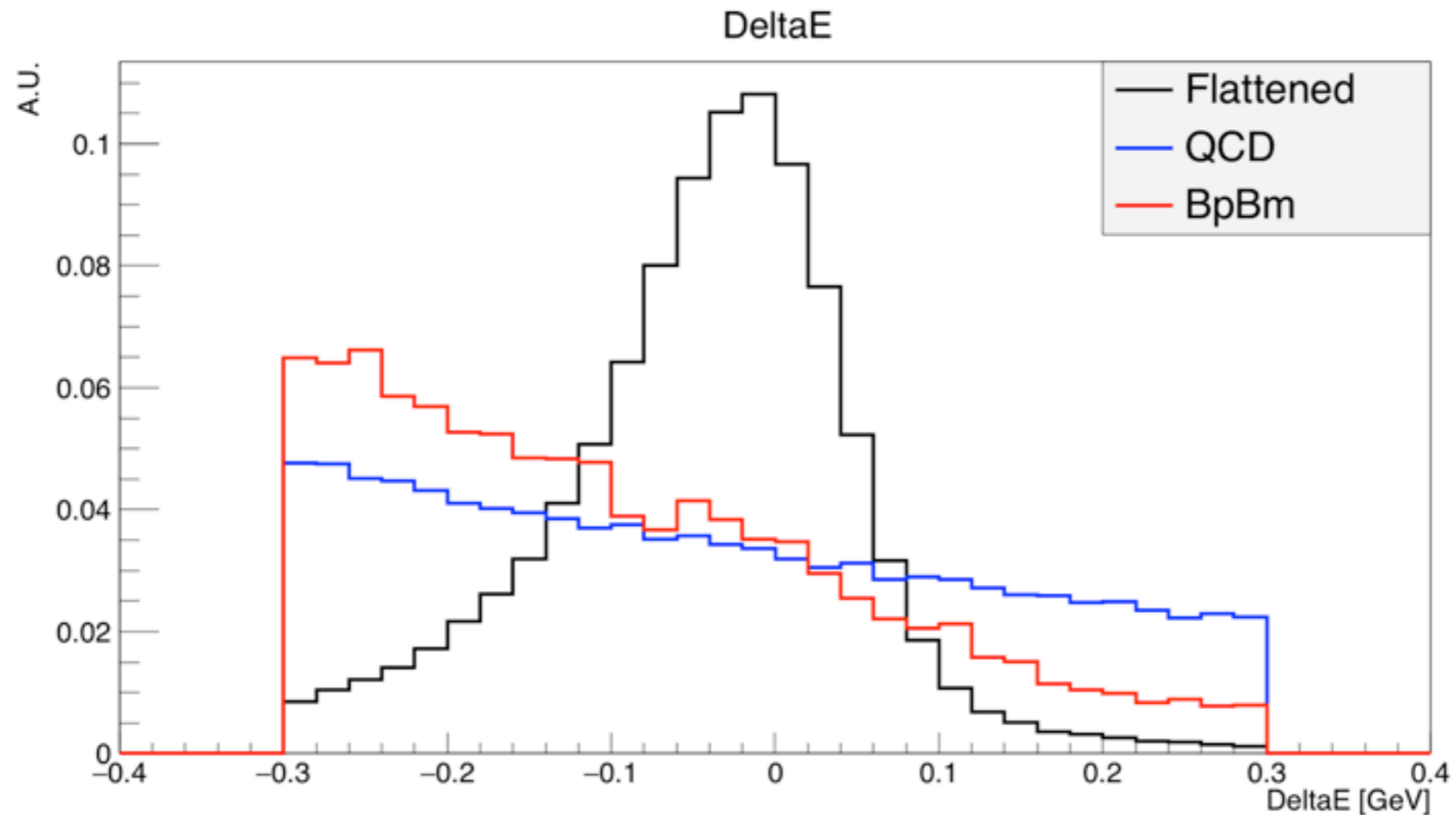
$\sqrt{s}$  = energia nel CM

$(E_0, \vec{p}_0)$  = quadrimomento fasci

$(E_B, \vec{p}_B)$  = quadrimomento candidato B

# Variabili di selezione

$\Delta E$

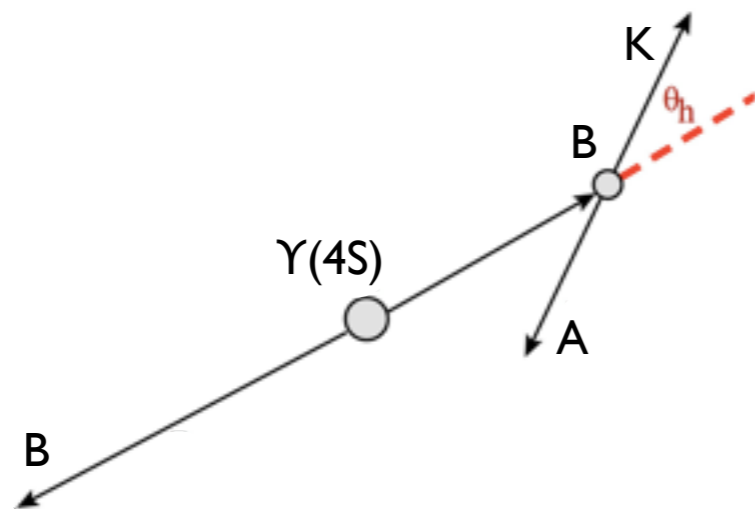
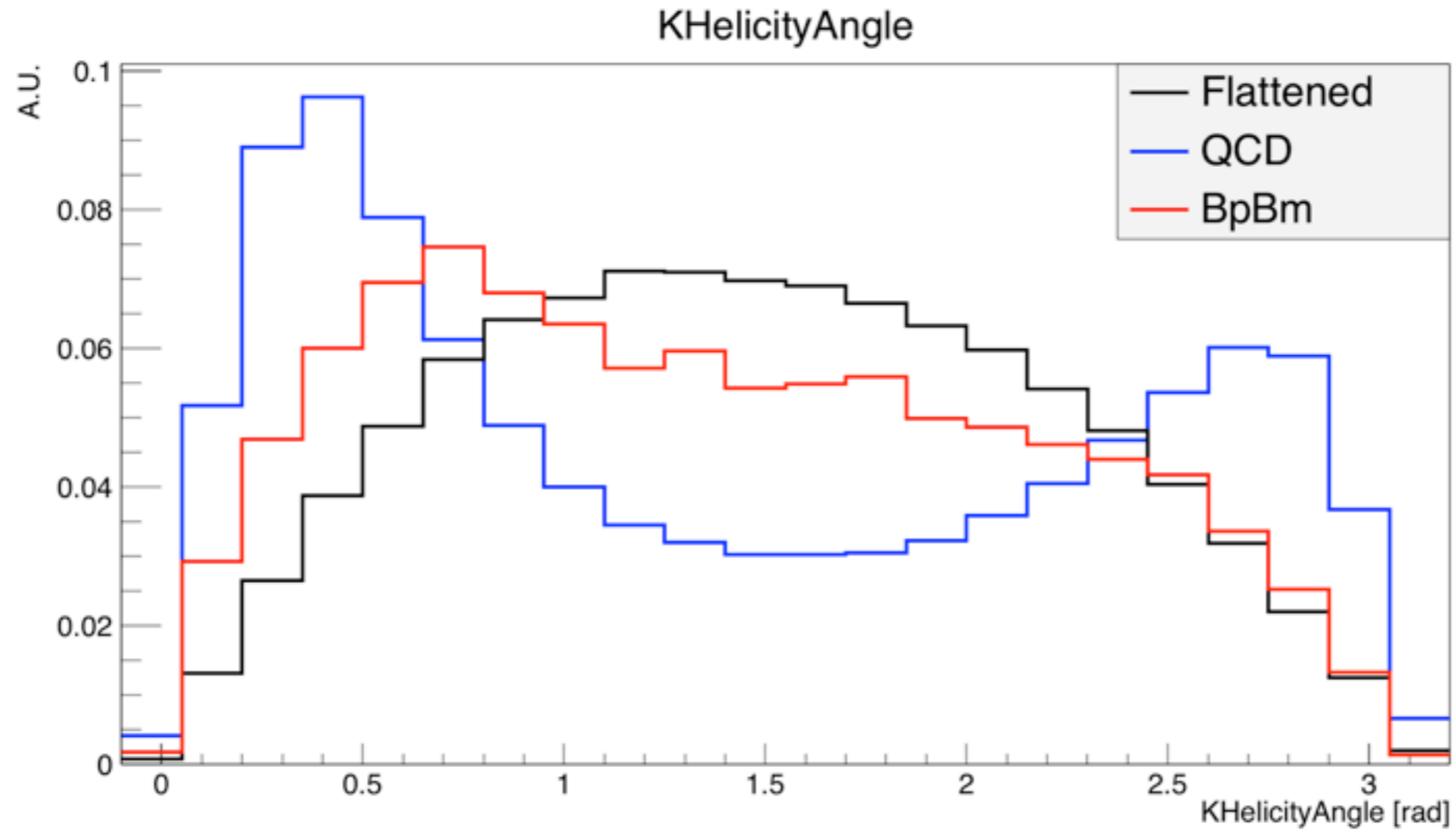


$$\Delta E = E_B^* - E_{beam}^*$$

$E_B^*$  = energia candidato B  
 $E_{beam}^*$  = energia fascio  
Calcolate nel CM

# Variabili di selezione

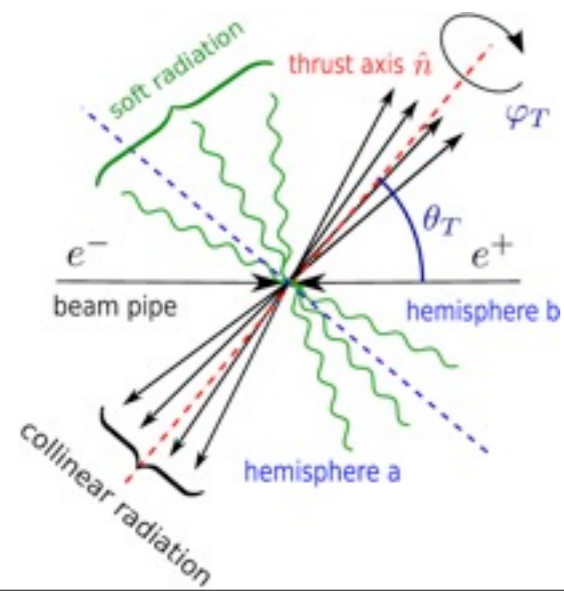
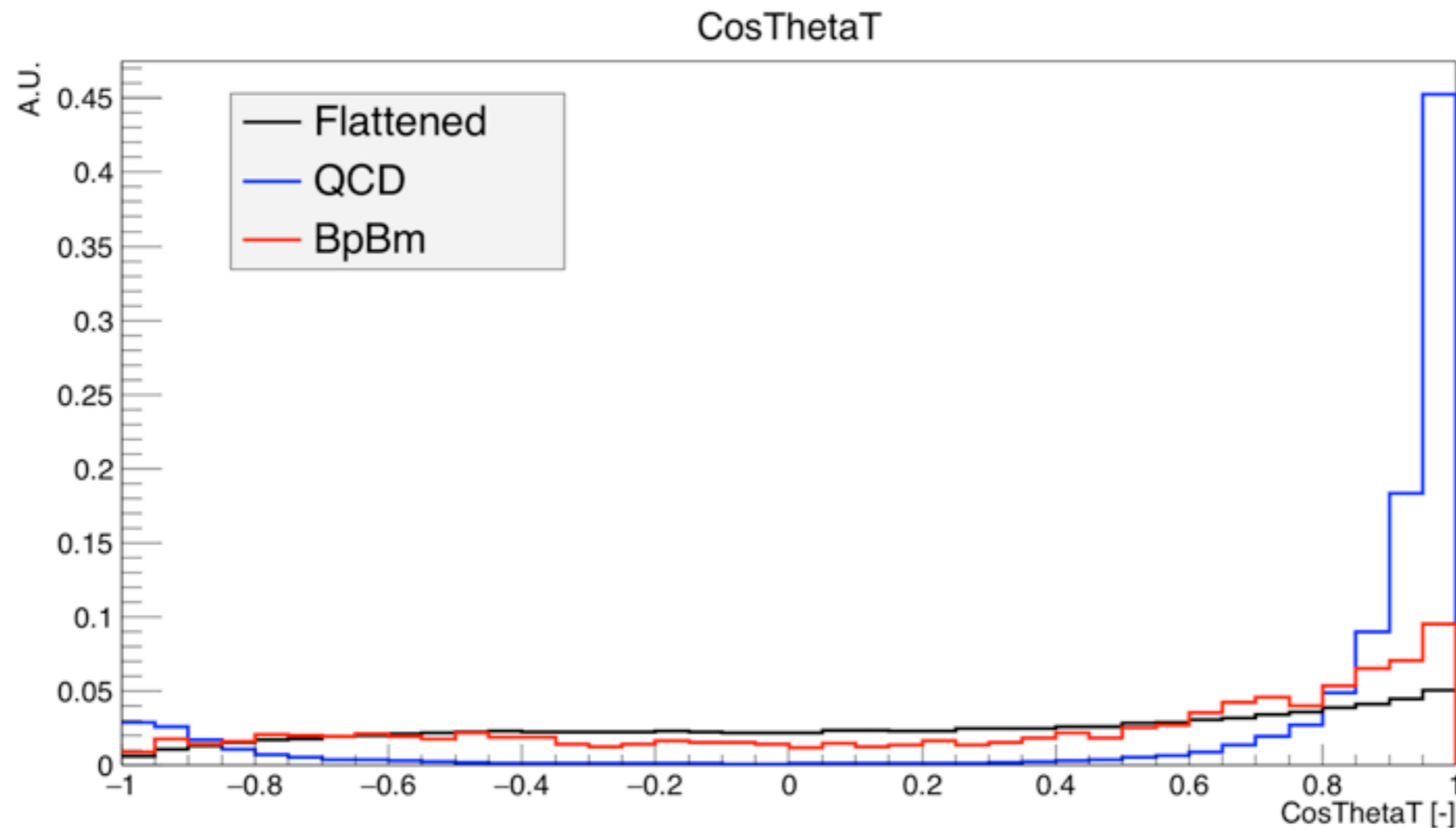
## Angolo di elicità del K



Angolo fra K e  $Y(4S)$  nel SDR di B

# Variabili di selezione

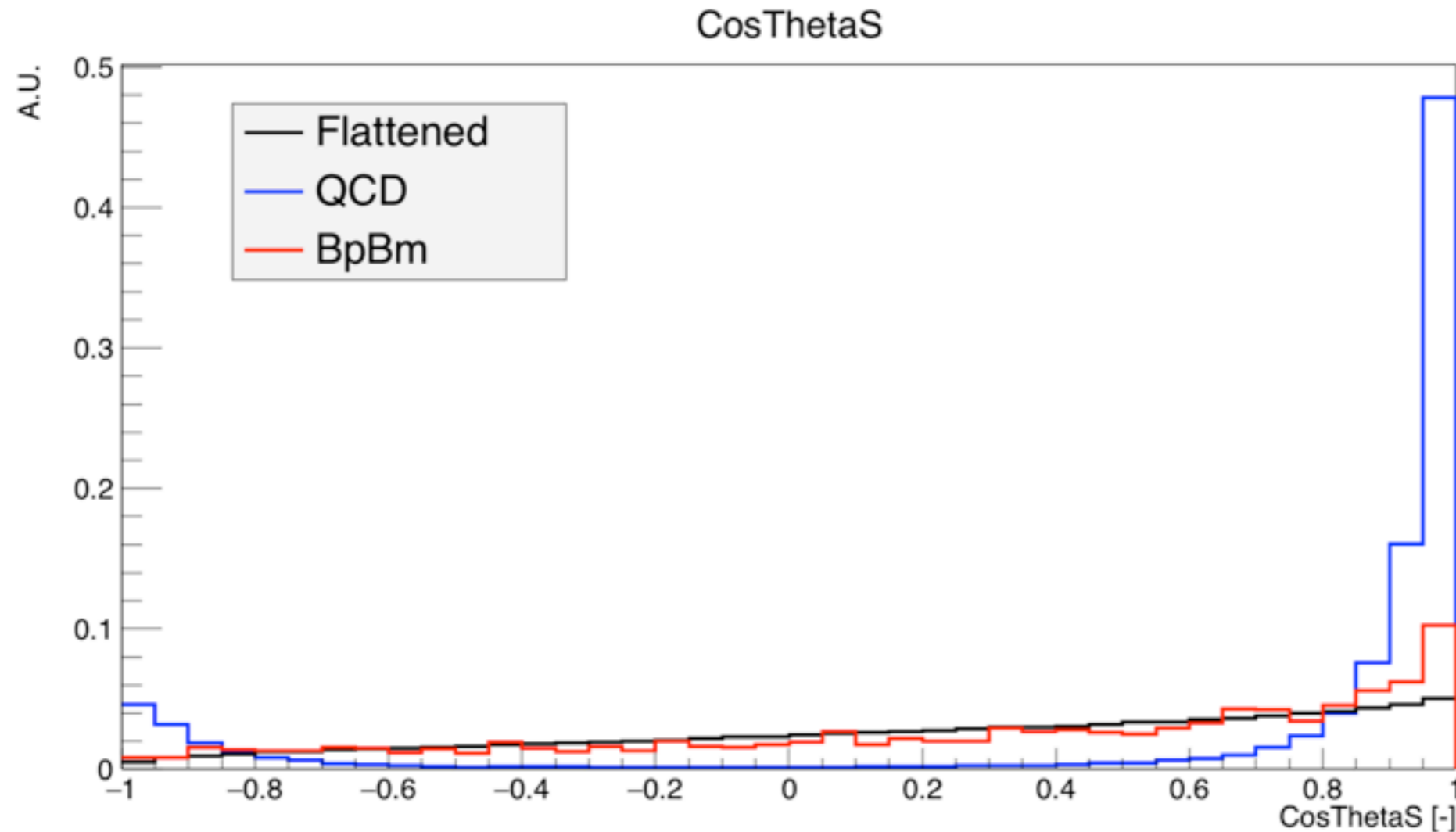
## Coseno angolo di thrust



- ▶ Coseno dell'angolo fra gli assi di thrust del candidato B e del ROE
- ▶ Asse di thrust: asse che massimizza la proiezione del momento del gruppo di particelle considerato

# Variabili di selezione

## Coseno angolo di sfericità



$$S^{\alpha,\beta} = \frac{\sum_{i=1}^N p_i^\alpha p_i^\beta}{\sum_{i=1}^N |\vec{p}_i|^2}$$

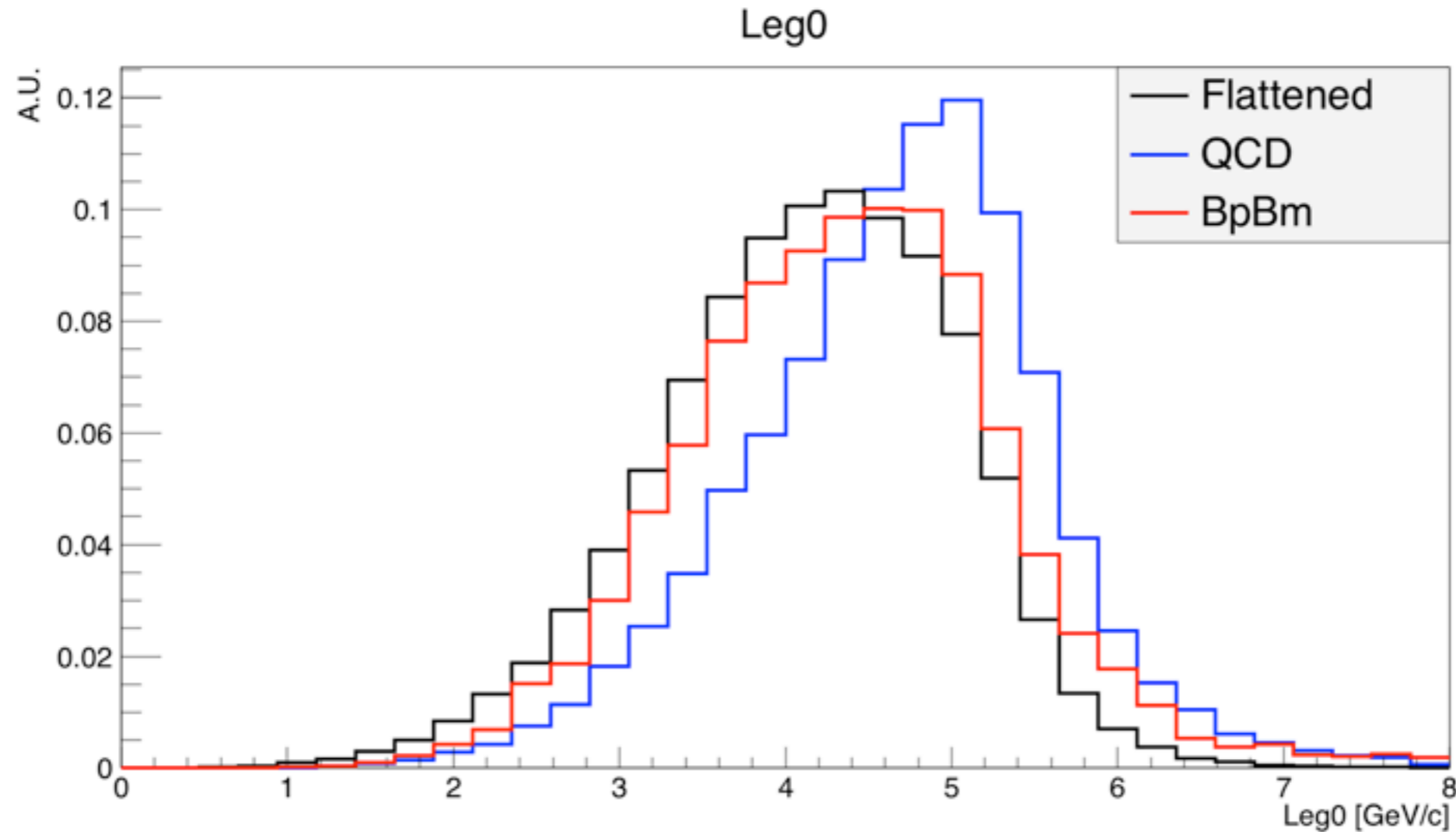
$$\alpha, \beta = x, y, z$$

Autovettore con  
autovalore più alto:  
asse di sfericità del  
gruppo di particelle

Angolo di sfericità:  
angolo fra gli assi di  
sfericità del candidato  
B e del ROE

# Variabili di selezione

## Momento di Legendre 0

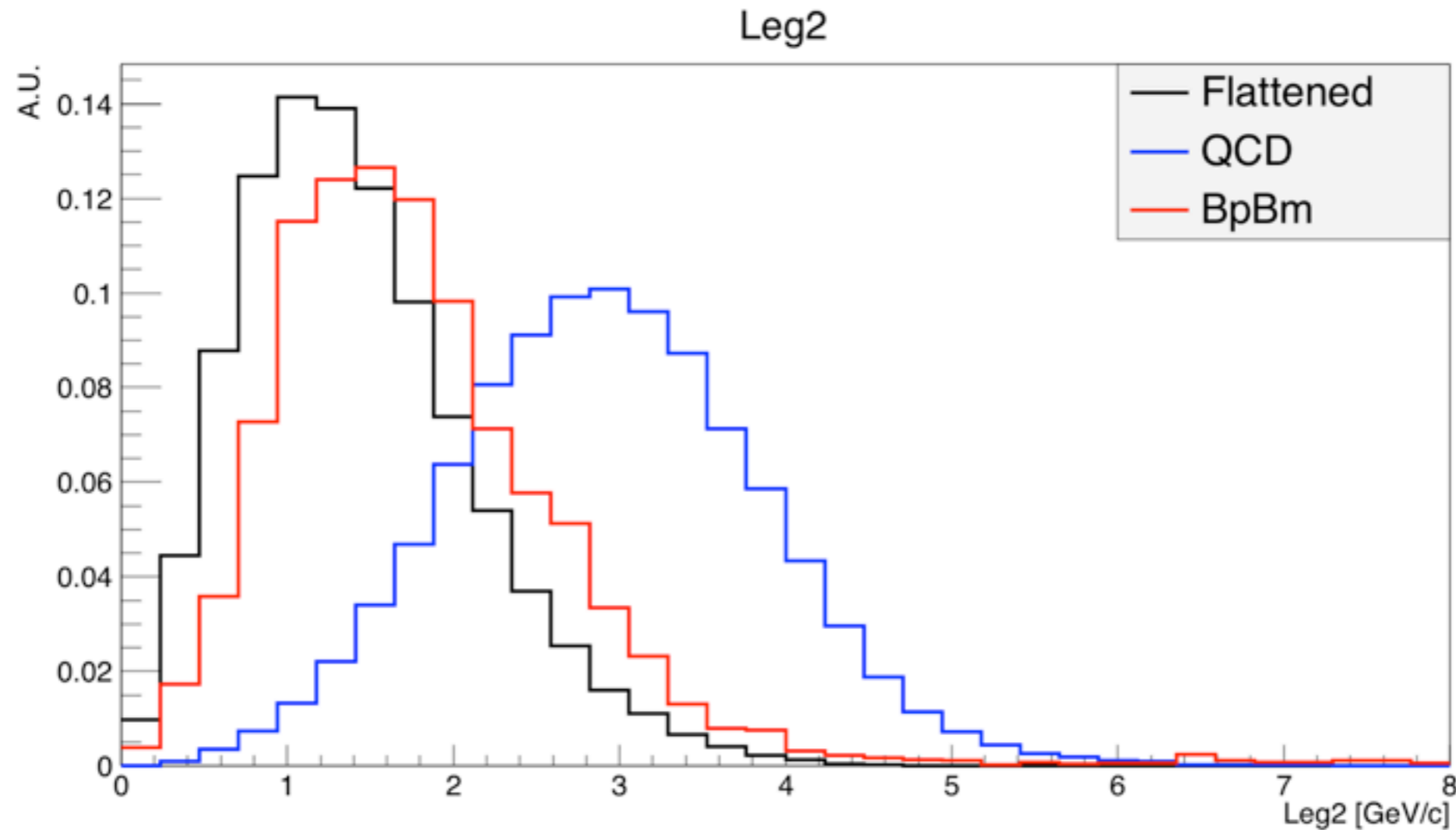


$$L_0 = \sum_{j \in ROE} p_j$$

Valori più alti per eventi jet-like

# Variabili di selezione

## Momento di Legendre 2



$$L_2 = \sum_{j \in ROE} p_j \cos^2(\theta_j)$$

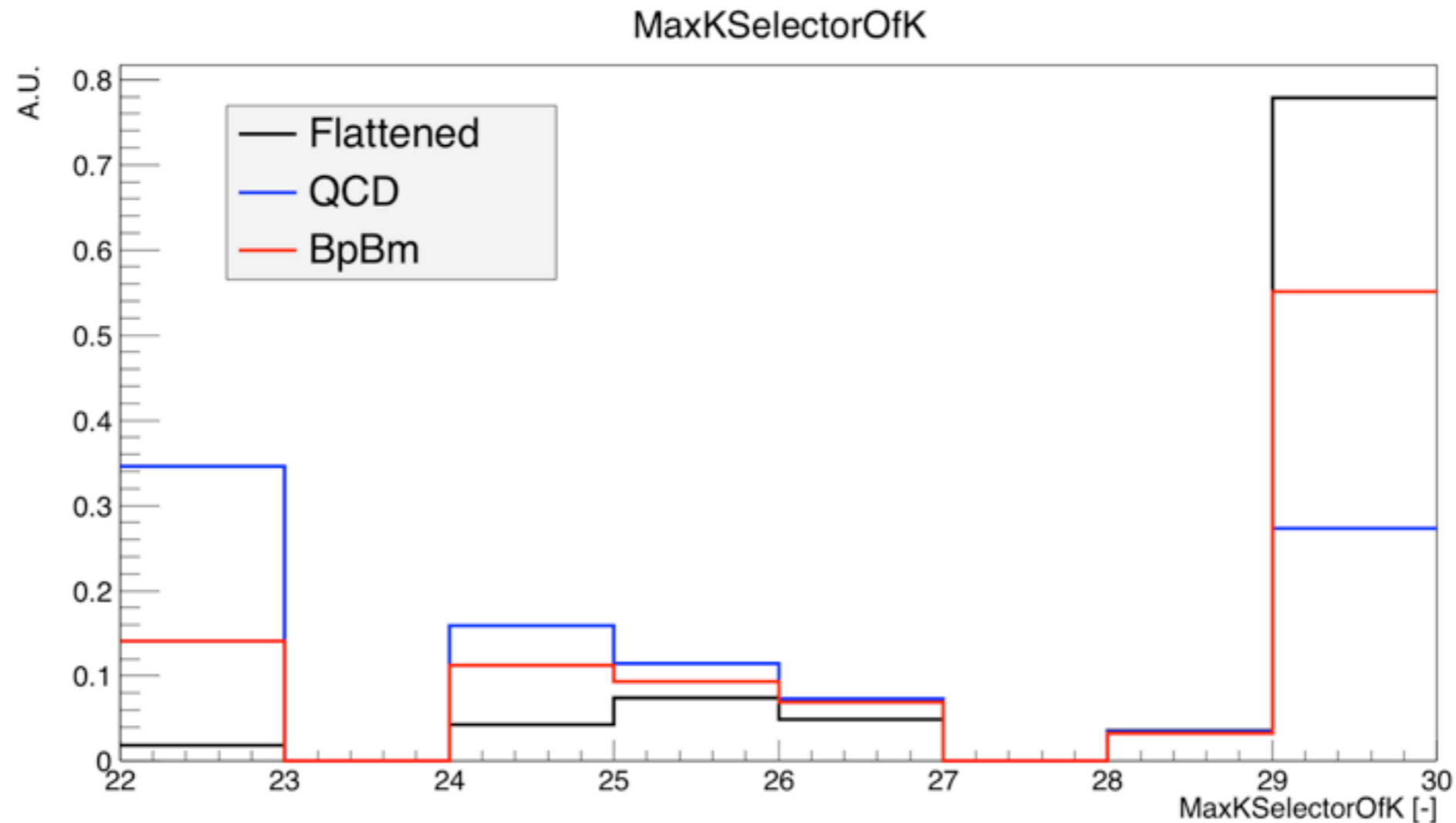
Valori più alti per eventi jet-like

Angolo fra particella  $j$  e asse di thrust del candidato B



# Variabili di selezione

Massimo selettore del K

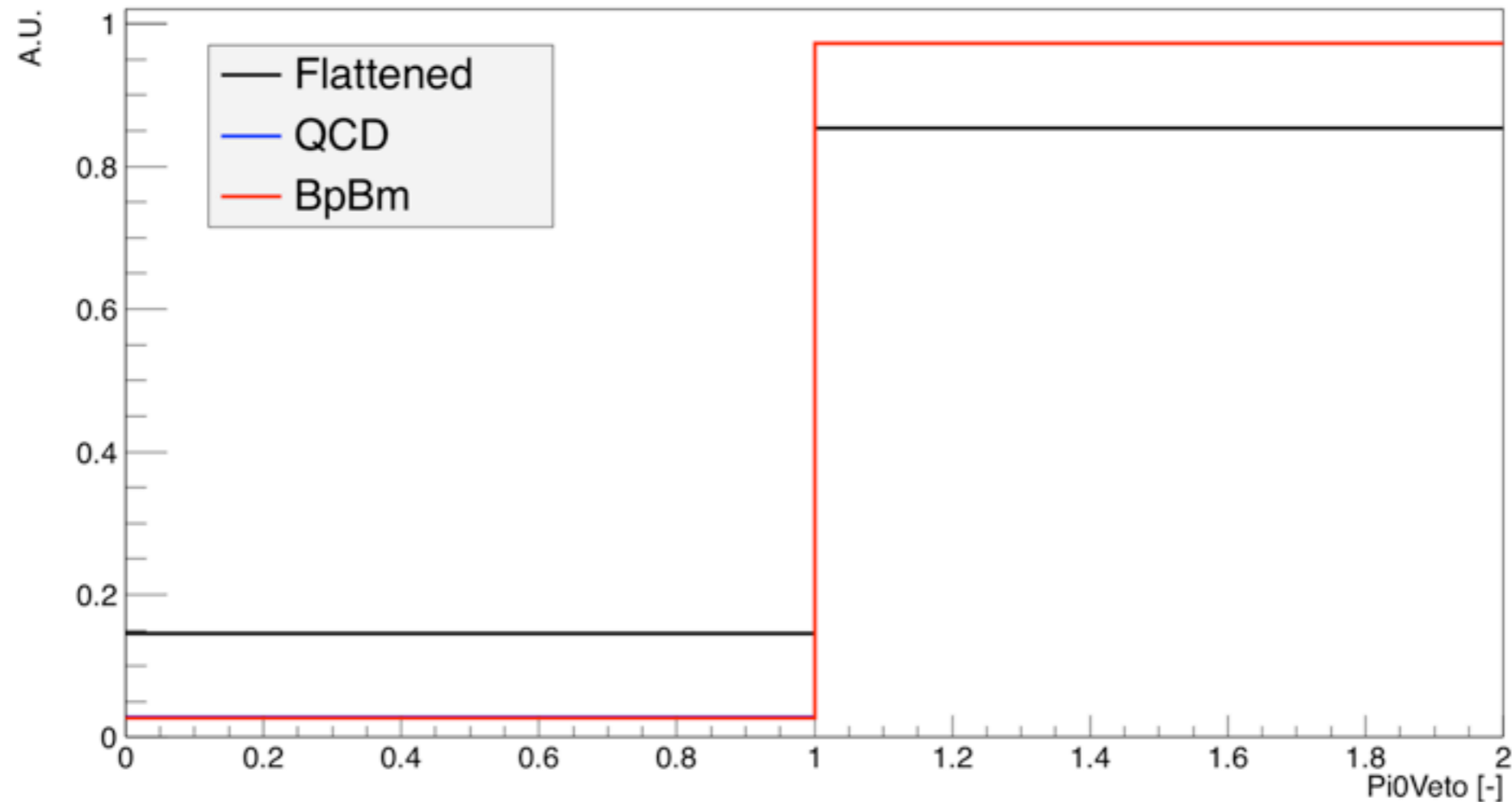


KMKaonMicroSelection: più è alto il numero, maggiore è la probabilità che la traccia sia un vero  $K^\pm$

# Variabili di selezione

## Veto fotonico

Pi0Veto



Candidato ALP =  $\gamma_A + \gamma_B$

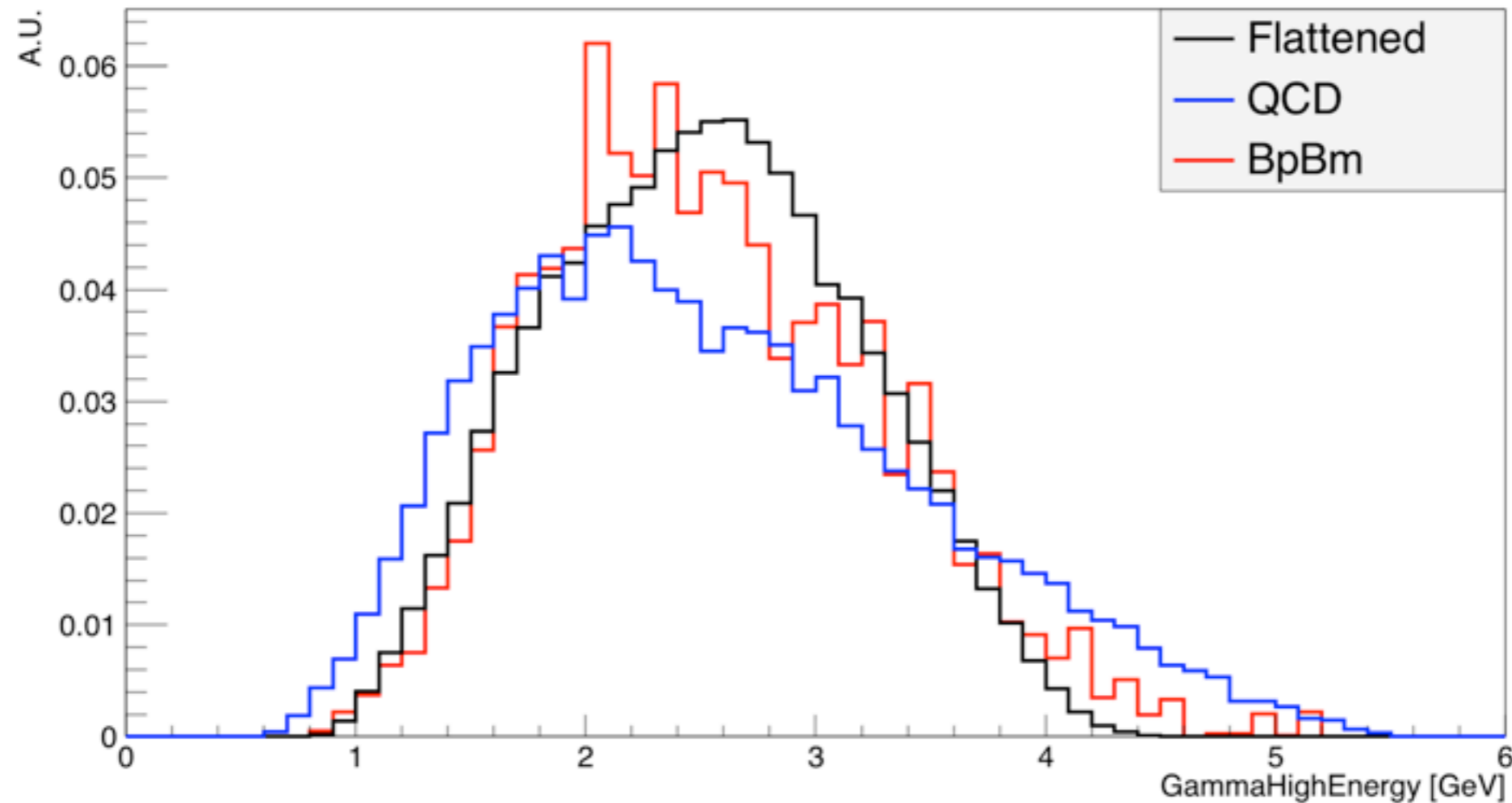
Nell'evento  $\exists \gamma_X \mid M(\gamma_A \gamma_X) \vee M(\gamma_B \gamma_X) \implies \text{veto} = 1$

QCD (uds) e  $B^+B^-$  sono sovrapposti

# Variabili di selezione

Energia del fotone più energetico

GammaHighEnergy

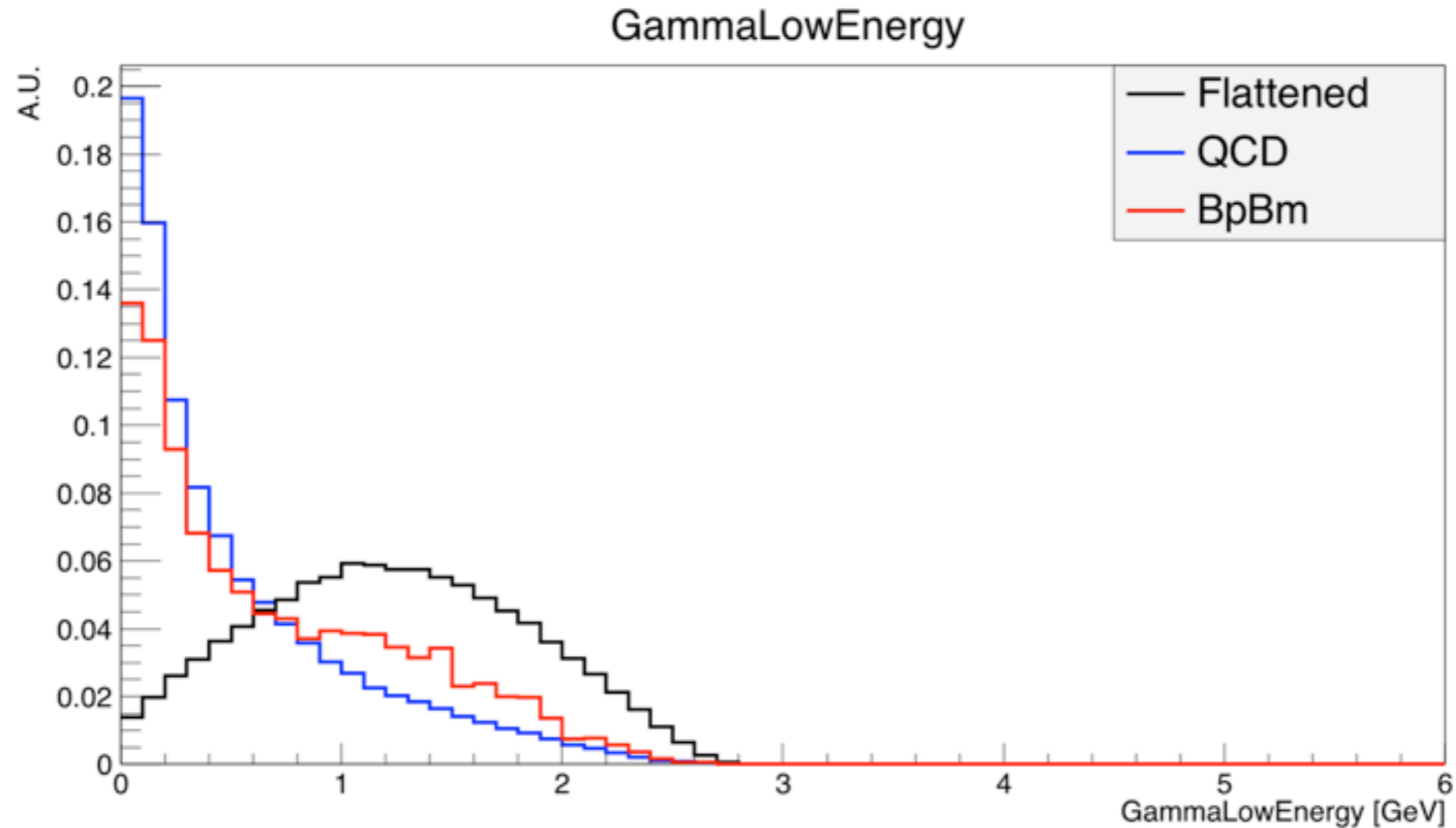


Candidato ALP =  $\gamma_A + \gamma_B$

Energia del più energetico fra  $\gamma_A$  e  $\gamma_B$  ( $\equiv \gamma_H$ )

# Variabili di selezione

## Energia del fotone meno energetico



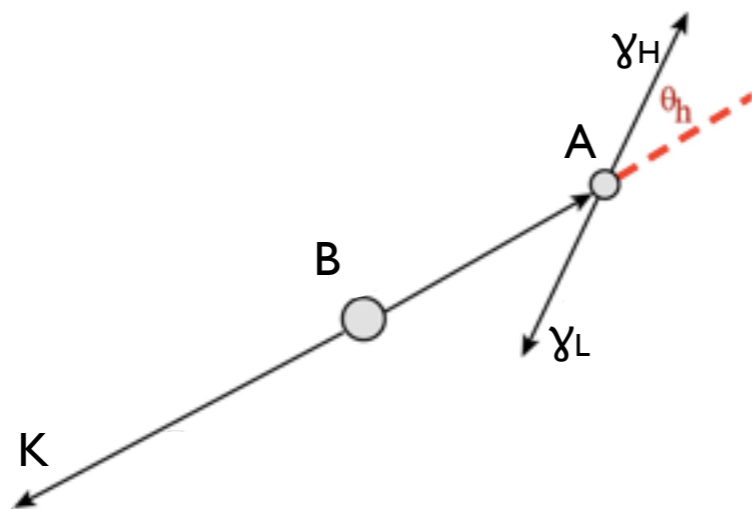
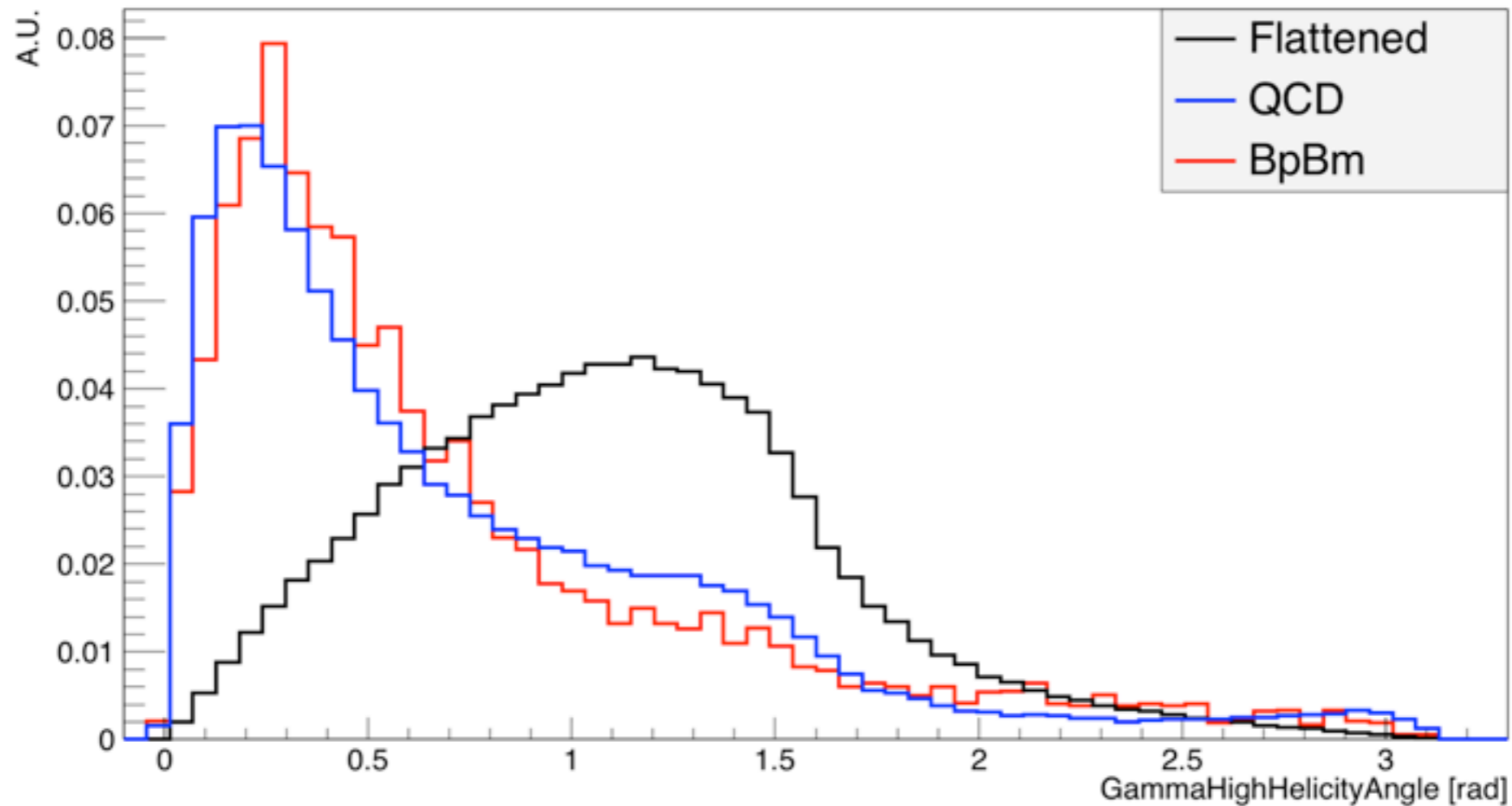
Candidato ALP =  $\gamma_A + \gamma_B$

Energia del meno energetico fra  $\gamma_A$  e  $\gamma_B$  ( $\equiv \gamma_L$ )

# Variabili di selezione

Angolo di elicità del fotone più energetico

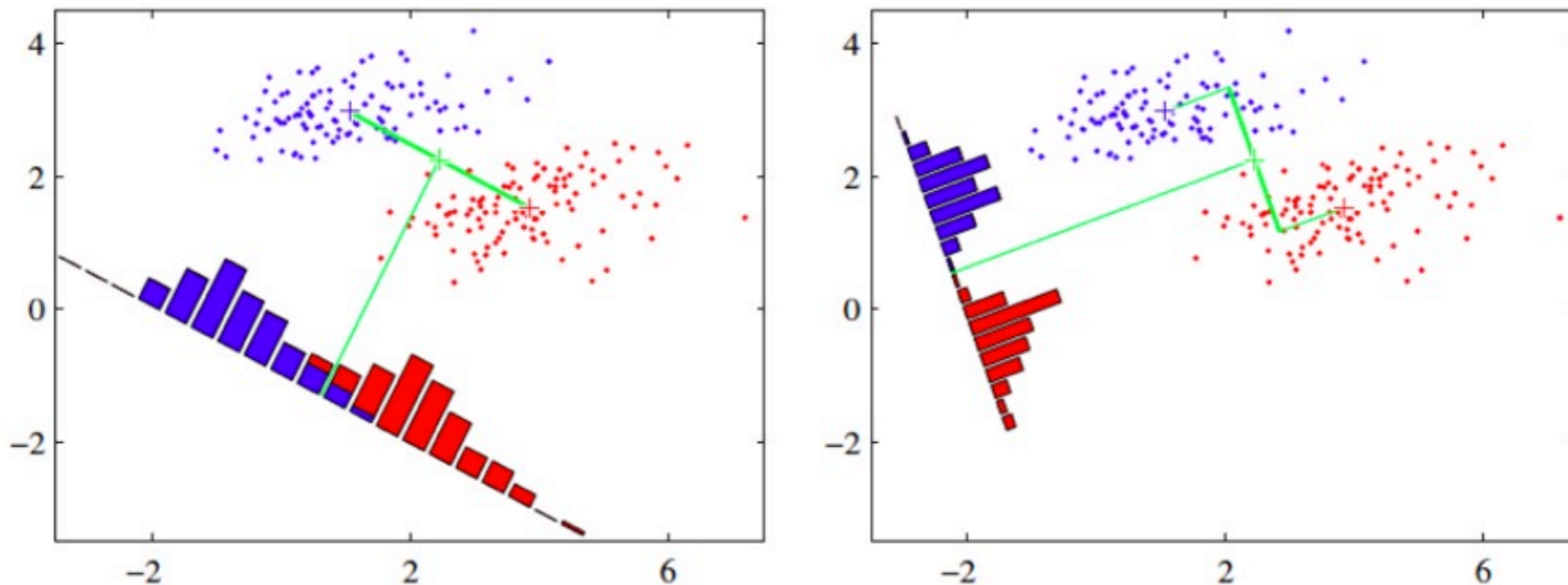
GammaHighHelicityAngle



Angolo fra B e  $\gamma_H$  nel SDR di A

# Fisher

## Discriminante di Fisher



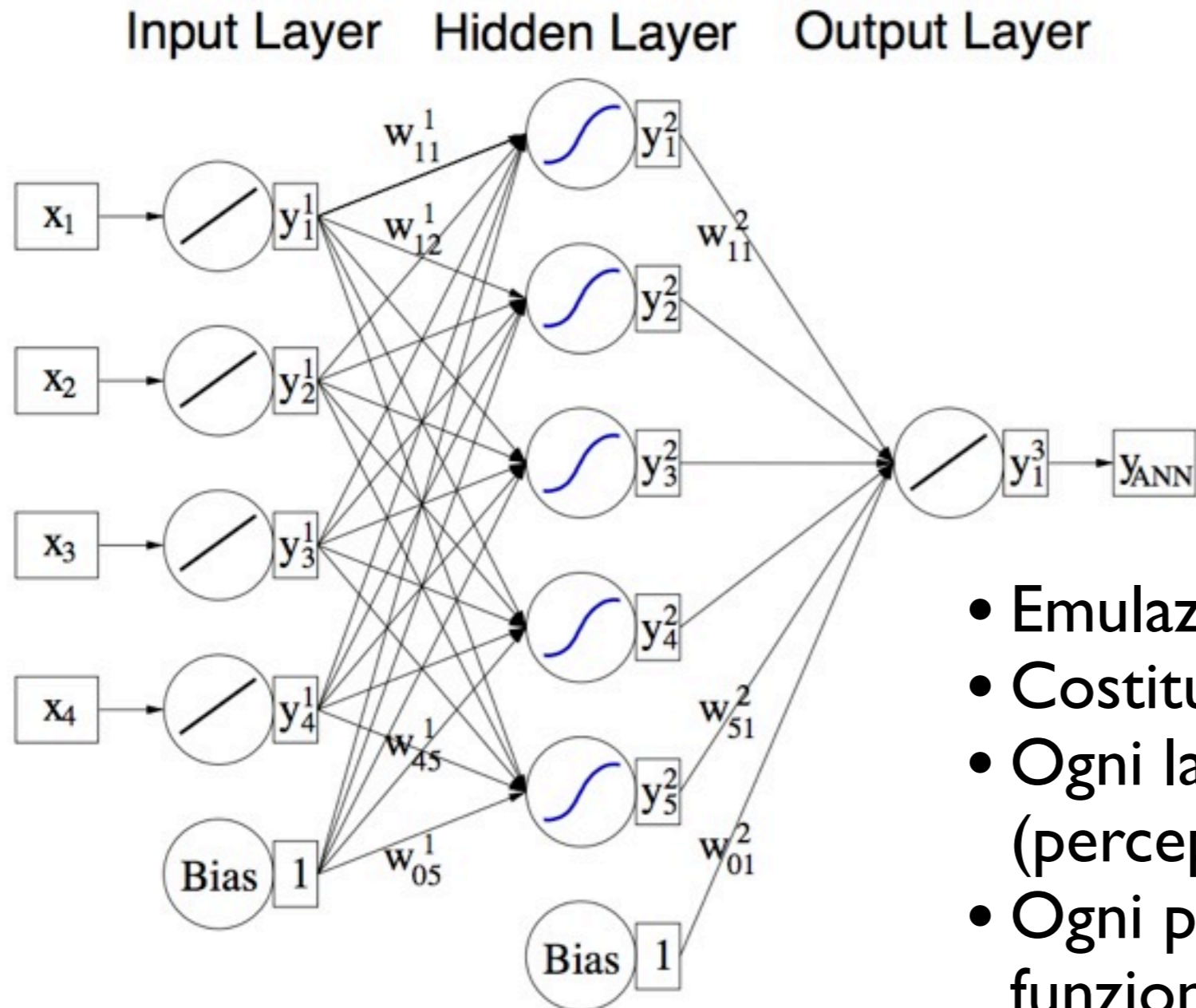
Ricerca di un asse sul quale sia massimizzata la distanza fra le proiezioni delle distribuzioni delle variabili di segnale e di fondo

$$S = A + \vec{B} \cdot \vec{x}$$

Output scalare →  $S$  ← Vettore delle variabili dell'evento  
Offset →  $A$  ←  
Asse di proiezione ←  $\vec{B}$

# MLP

## MultiLayer Perceptron



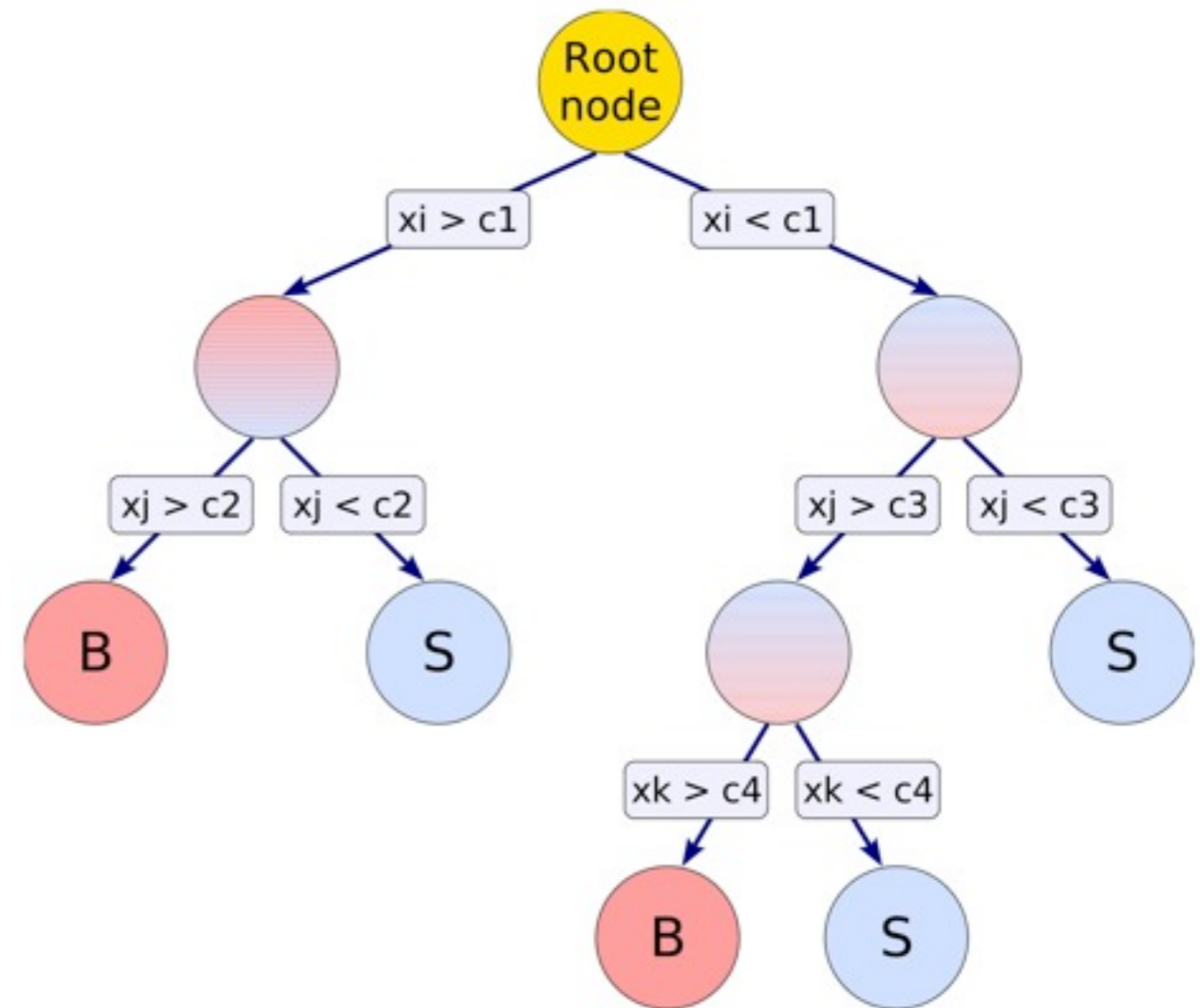
- Emulazione dei neuroni biologici
- Costituito da vari layers
- Ogni layer composto da vari neuroni (perceptron)
- Ogni perceptron: combinazione con funzioni quasi-a-scalino di una combinazione lineare degli input
- Output: +1 segnale, 0 fondo

# BDT

## Boosted Decision Tree

### Decision Tree:

- Ad ogni nodo si sceglie 1 variabile ed un taglio su questa variabile per discriminare segnale/fondo
- Si ripete per N nodi fino ad avere foglie abbastanza pure



### Boosted DT:

- Si costruisce una foresta di DT
- Si parte con 1 DT e si pesano gli eventi a seconda dell'errore
- Si allena un altro DT con questi nuovi pesi
- Si combinano gli output pesati di tutti i DT



# MVA

Confronto metodi e strategie

# Deltaagli BDTs

## Ranking variabili

uds

Rank	Variable	Variable Importance
1	mes	2.215e-01
2	GammaLowEnergy	1.019e-01
3	Leg2	1.002e-01
4	KHelicityAngle	8.933e-02
5	DeltaE	8.571e-02
6	GammaHighHelicityAngle	7.727e-02
7	GammaHighEnergy	7.490e-02
8	CosThetaS	7.456e-02
9	CosThetaT	6.794e-02
10	Leg0	6.067e-02
11	Pi0Veto	4.608e-02

B<sup>+</sup>B<sup>-</sup>

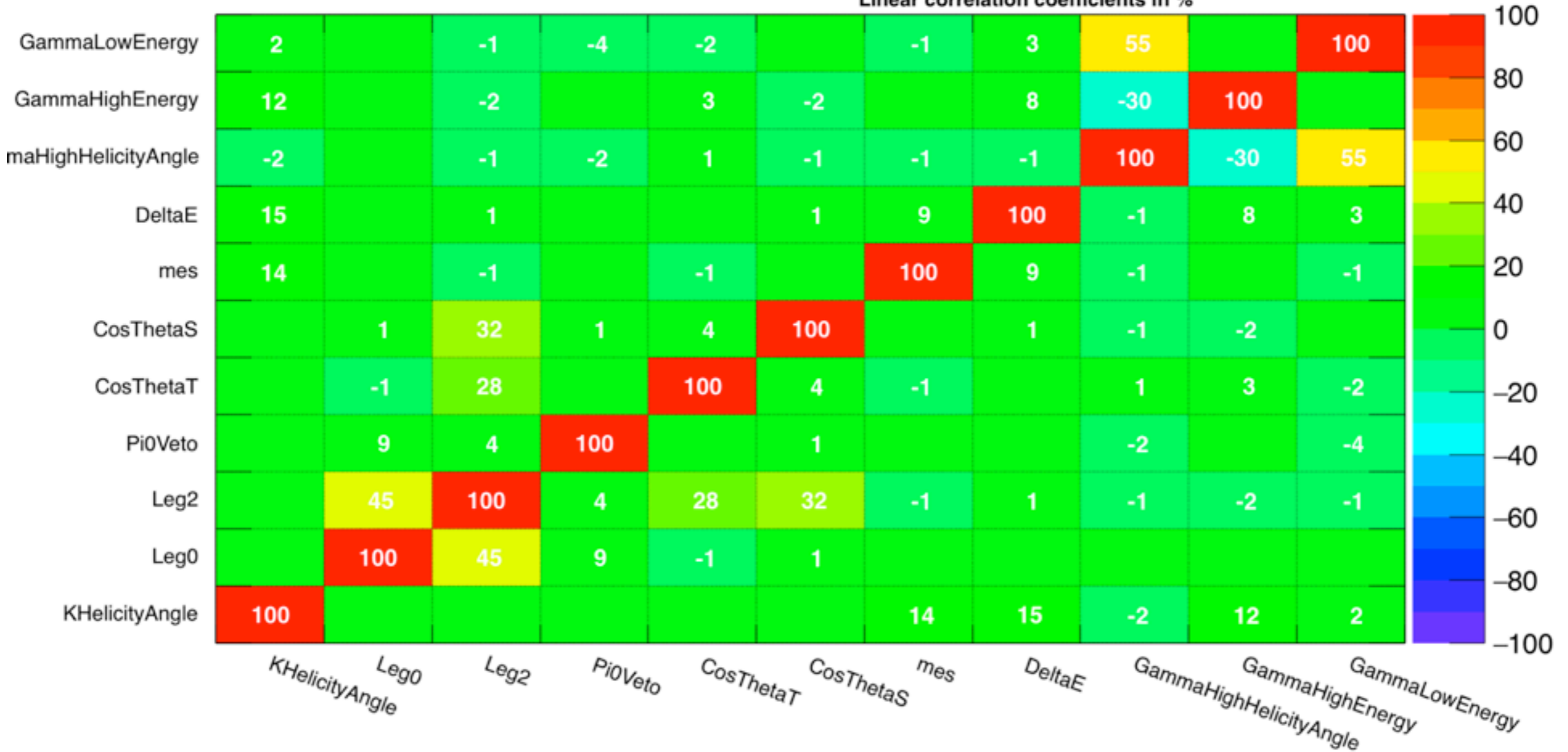
Rank	Variable	Variable Importance
1	GammaHighHelicityAngle	1.520e-01
2	mes	1.258e-01
3	DeltaE	1.119e-01
4	GammaLowEnergy	1.109e-01
5	KHelicityAngle	9.772e-02
6	GammaHighEnergy	7.975e-02
7	CosThetaS	7.540e-02
8	Leg2	7.146e-02
9	CosThetaT	6.778e-02
10	Pi0Veto	5.554e-02
11	Leg0	5.180e-02

# Dettagli BDTs

## Correlazione variabili - segnale

Correlation Matrix (signal)

Linear correlation coefficients in %

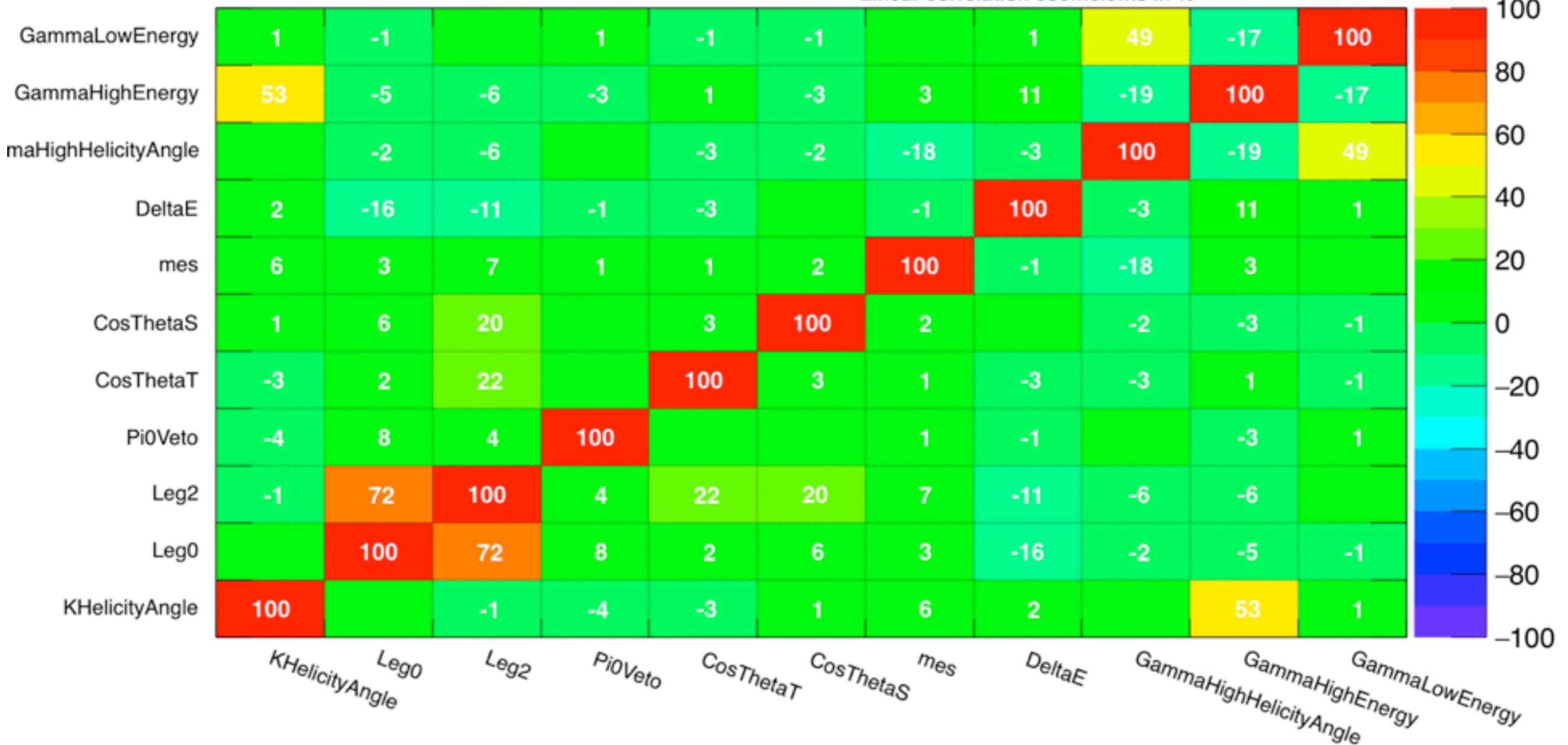


# Dettagli BDTs

## Correlazione variabili - fondo uds

Correlation Matrix (background)

Linear correlation coefficients in %



# Dettagli BDTs

## Correlazione variabili - fondo $B^+B^-$

Correlation Matrix (background)

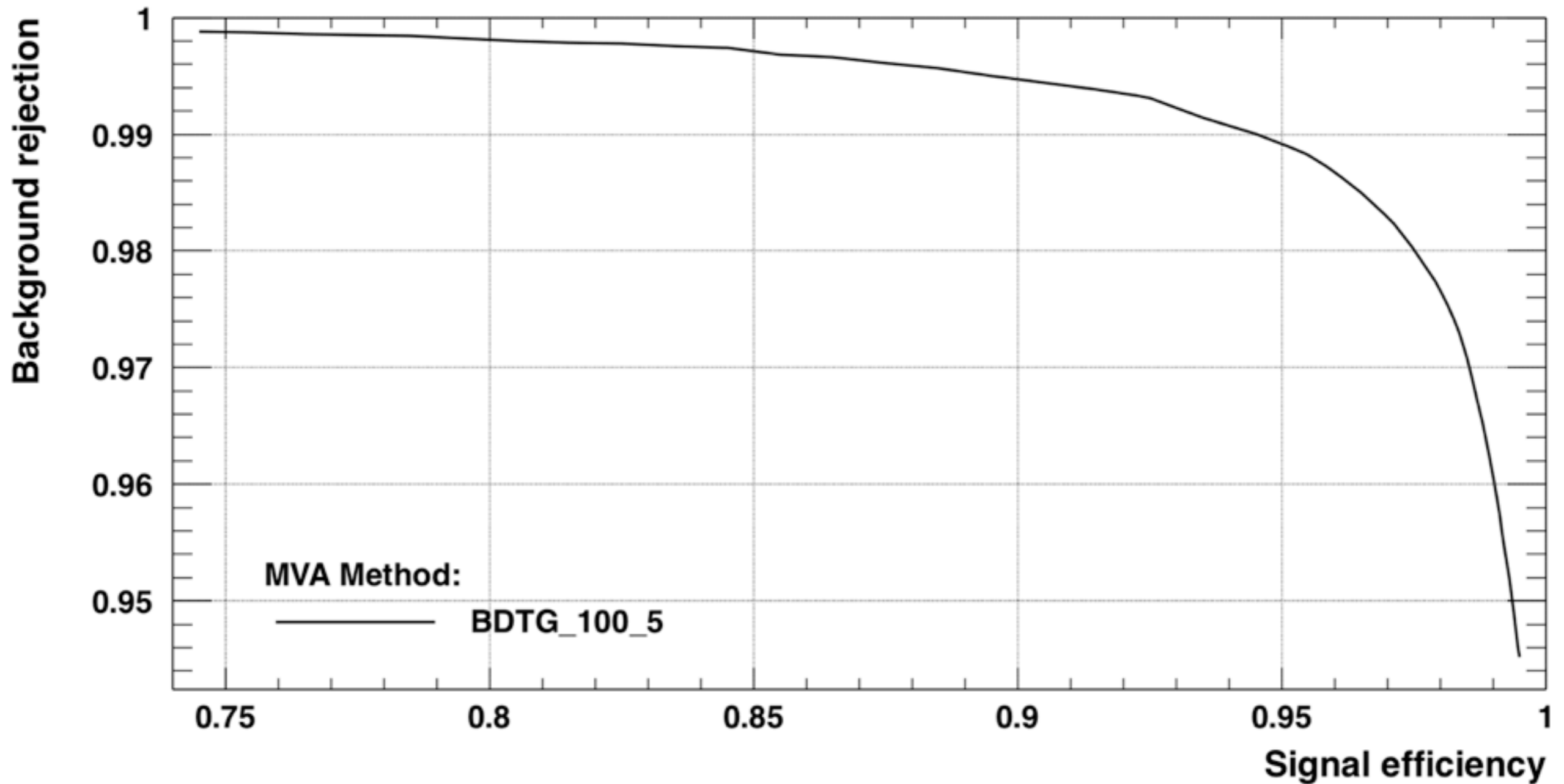
Linear correlation coefficients in %



# Deltagli BDTs

Curva ROC - fondo uds

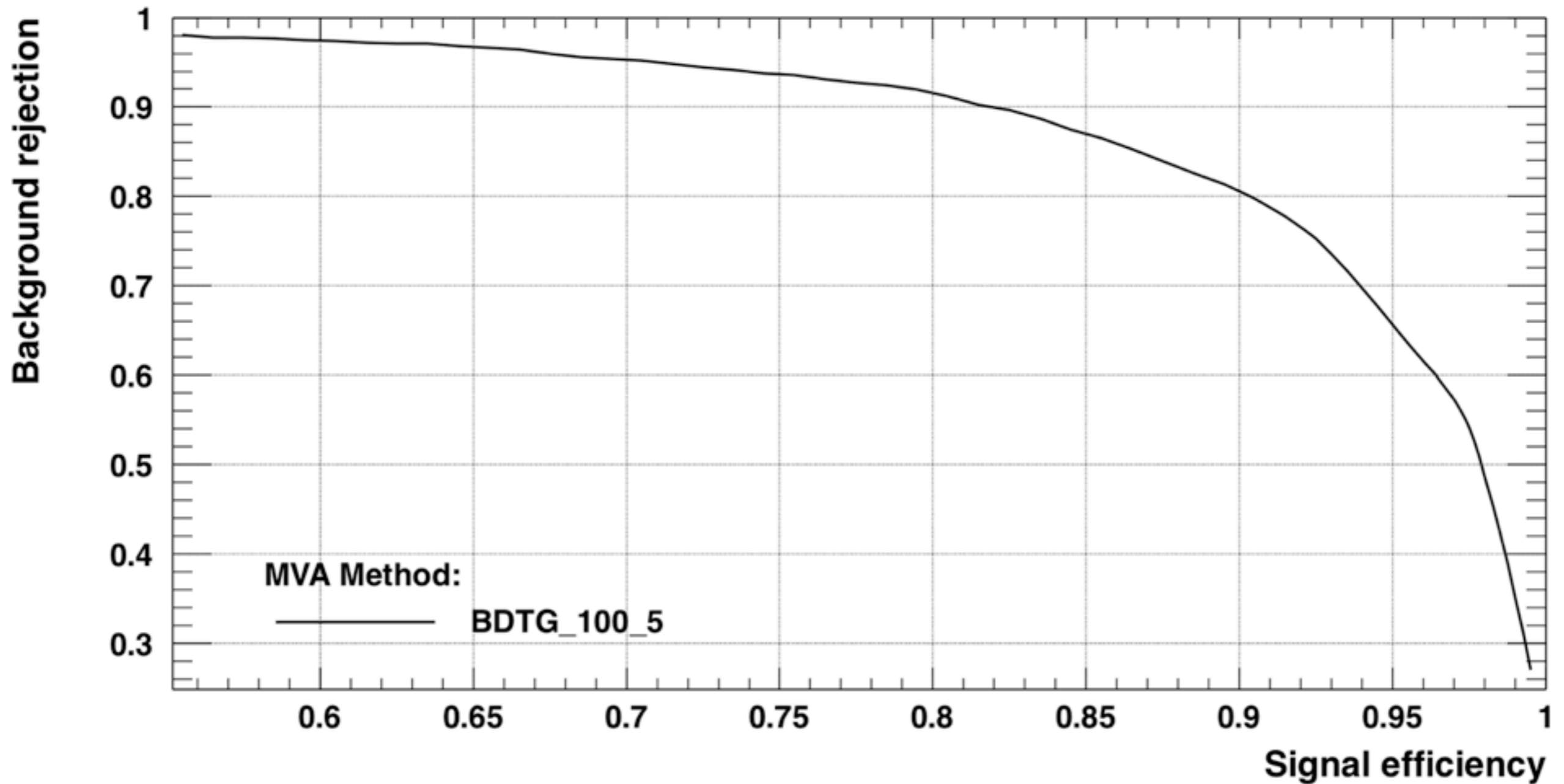
Background rejection versus Signal efficiency



# Dellaagli BDTs

Curva ROC - fondo  $B^+B^-$

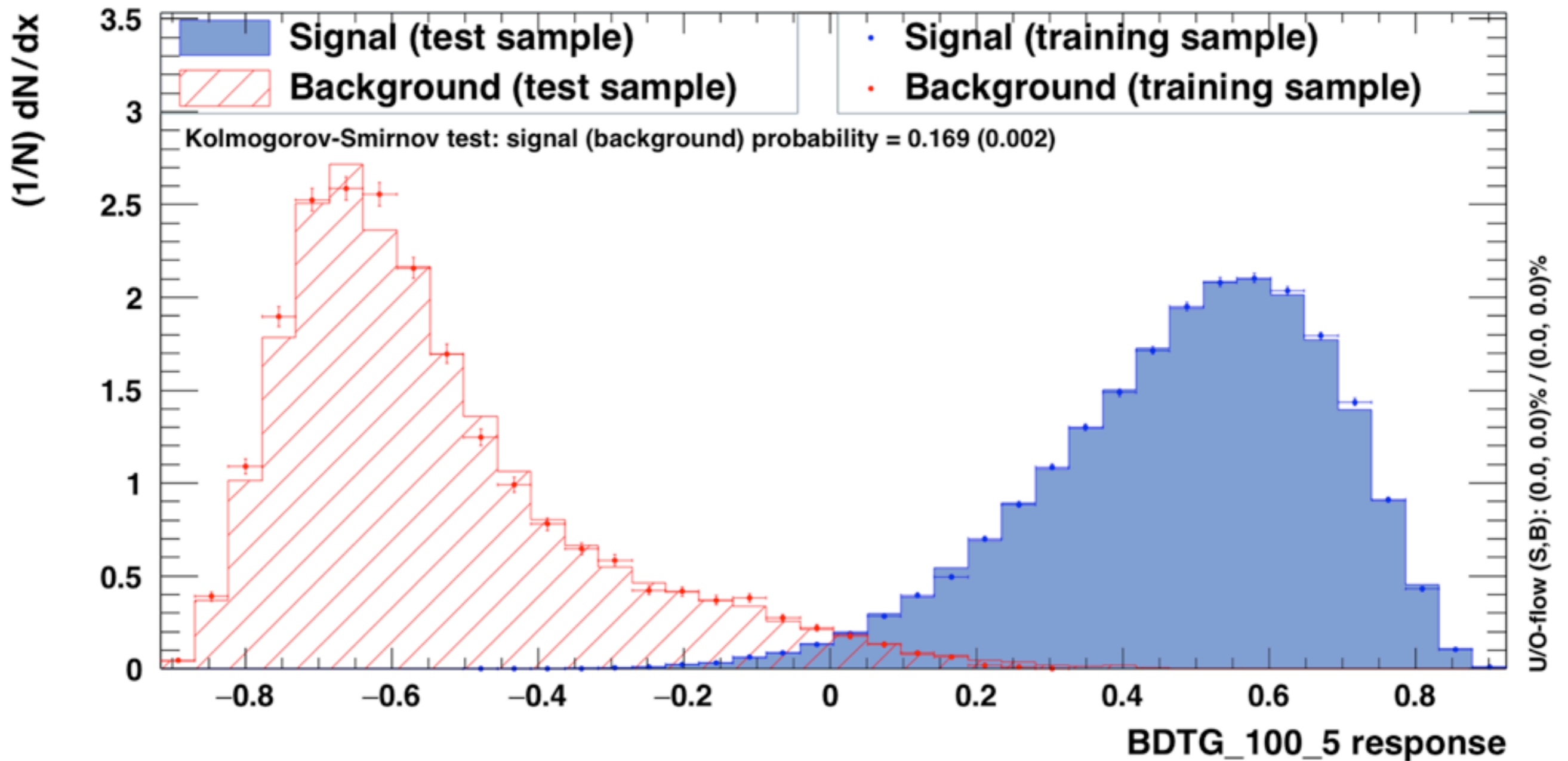
Background rejection versus Signal efficiency



# Deltagli BDTs

Output MVA ottimizzato contro uds

TMVA overtraining check for classifier: BDTG\_100\_5

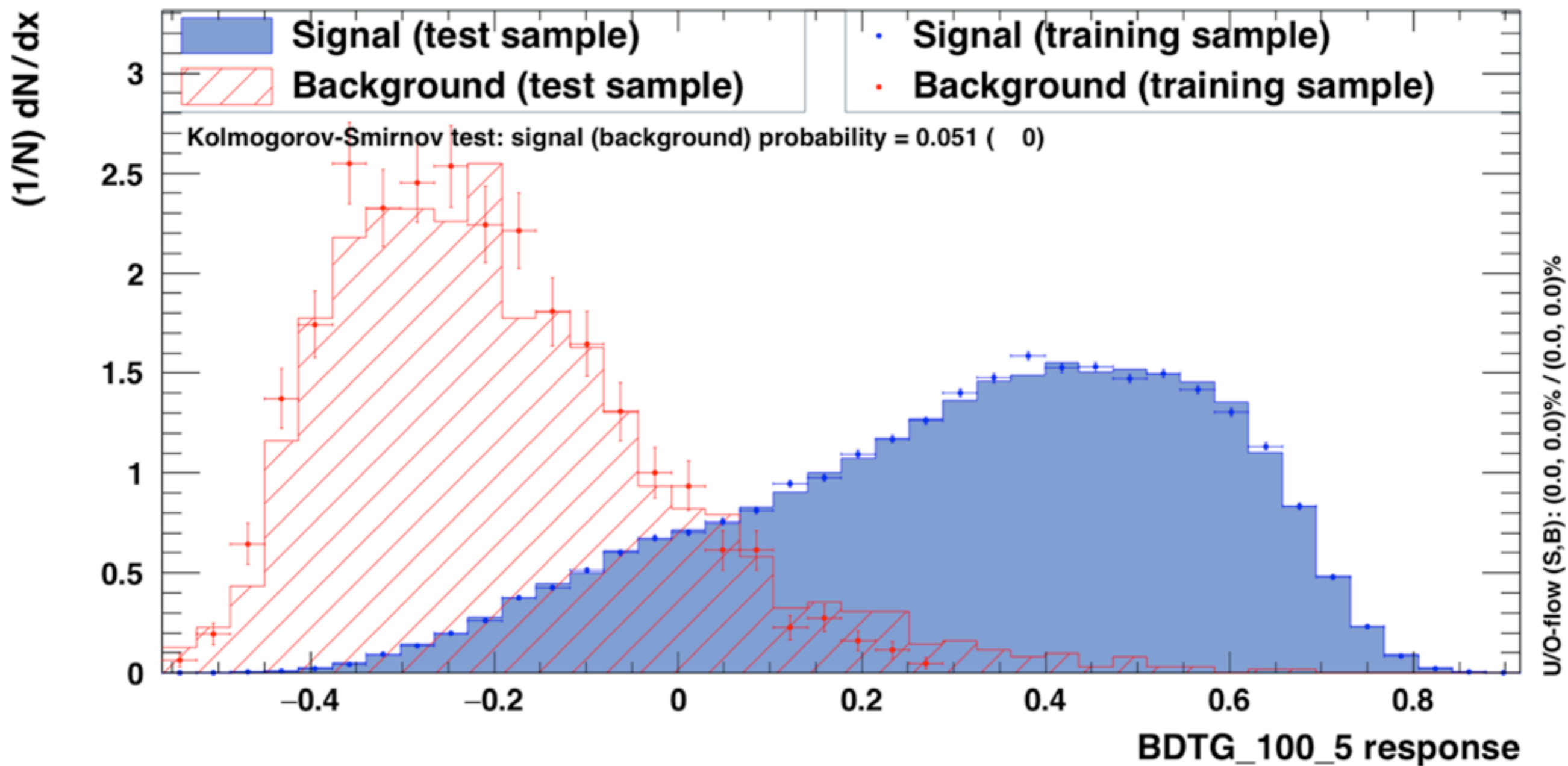




# Deltagli BDTs

Output MVA ottimizzato contro  $B^+B^-$

TMVA overtraining check for classifier: BDTG\_100\_5



# Crystal Ball

$$CB(x; \mu, \sigma, \alpha, n) = \begin{cases} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, & \text{for } \frac{x-\mu}{\sigma} > -\alpha \\ A \cdot (B - \frac{x-\mu}{\sigma})^{-n}, & \text{for } \frac{x-\mu}{\sigma} \leq -\alpha \end{cases}$$

$$A = \left( \frac{n}{|\alpha|} \right)^n \cdot \exp\left(-\frac{|\alpha|^2}{2}\right)$$

$$B = \frac{n}{|\alpha|} - |\alpha|$$

Parametri CB:

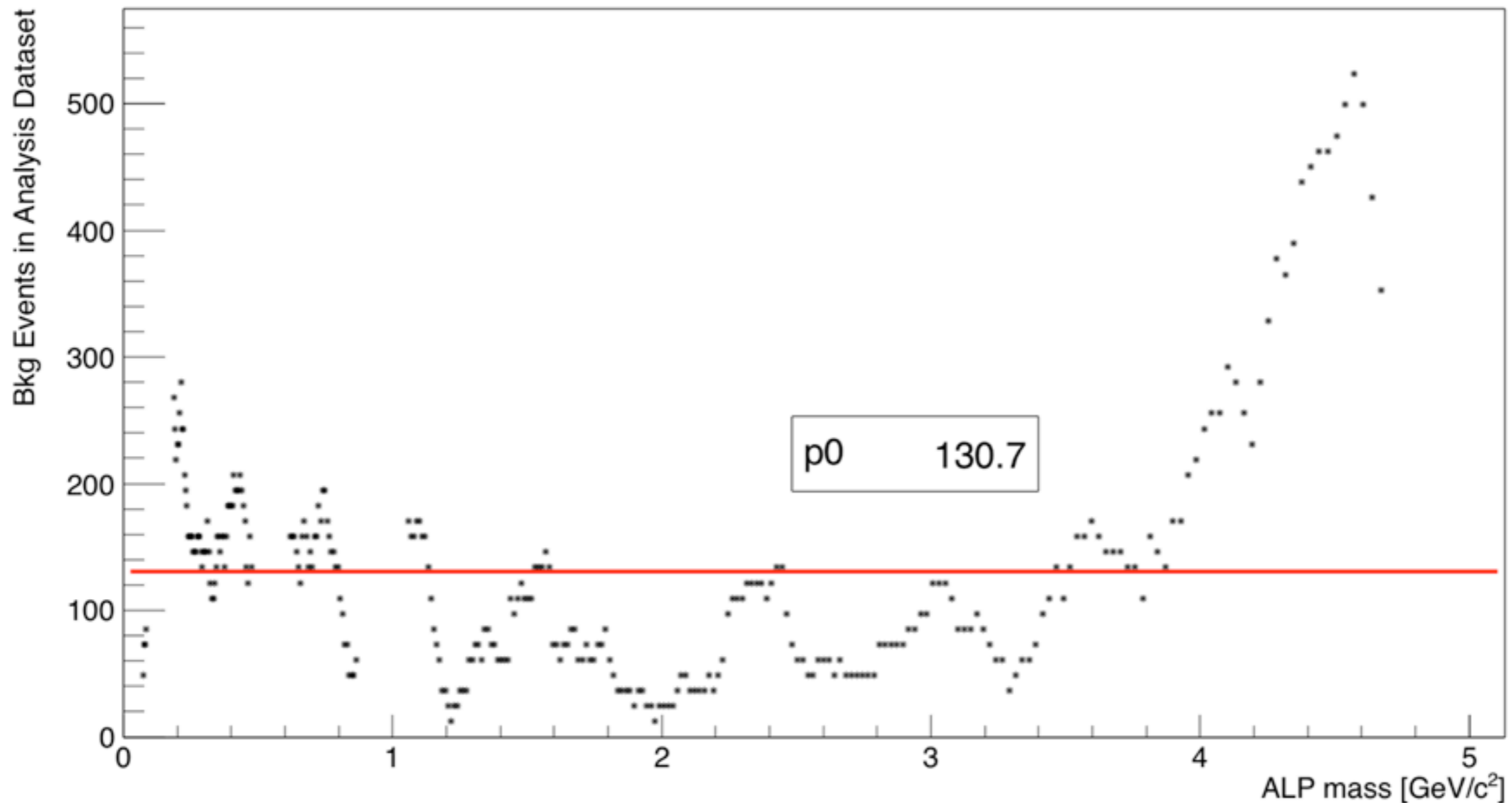
- ▶  $\mu$ : valor medio
- ▶  $\sigma$ : deviazione standard
- ▶  $\alpha$ : per  $x < \mu - \alpha\sigma$  si ha andamento di potenza
- ▶  $n$ : regola l'andamento di potenza della coda

ALP mass (GeV/c <sup>2</sup> )	$\chi_{Red}^2$ Gaussian PDF	$\chi_{Red}^2$ CB PDF
0.3	0.92	0.86
0.5	1.37	0.91
0.75	1.83	0.98
1.5	3.09	1.41
2	3.56	1.24
3	3.94	1.30
4	4.65	2.33
4.5	5.76	2.79

# Eventi di fondo

Proiezioni sul data sample di analisi di BaBar

Extrapolated (on Full BaBar) Background Events vs ALP mass (windows width= $3\sigma_s$ )



# Eventi di segnale

## Proiezioni a diversi BR

Data sample	BR = $10^{-6}$	BR = $10^{-7}$	BR = $10^{-8}$	BR = $10^{-9}$
BaBar Run 3	6.5	1	$\sim 0.1$	$\sim 0$
BaBar Runs 12456	80	8	$\sim 1$	$\sim 0$
Belle II Lower	7000	700	70	7
Belle II Upper	10000	1000	100	10

- ▶  $\epsilon_S = 18\%$
- ▶  $36 \times 10^6 \text{ BB}$  in BaBar Run 3 ( $\mathcal{L} = 32 \text{ fb}^{-1}$ )
- ▶  $\mathcal{L}_{\text{Runs12456}} / \mathcal{L}_{\text{Run3}} = 12.2$
- ▶  $\mathcal{L}_{\text{Belle II}} \in 35 \div 50 \text{ ab}^{-1}$