

# Le particelle e le loro tracce.

Ovvero:

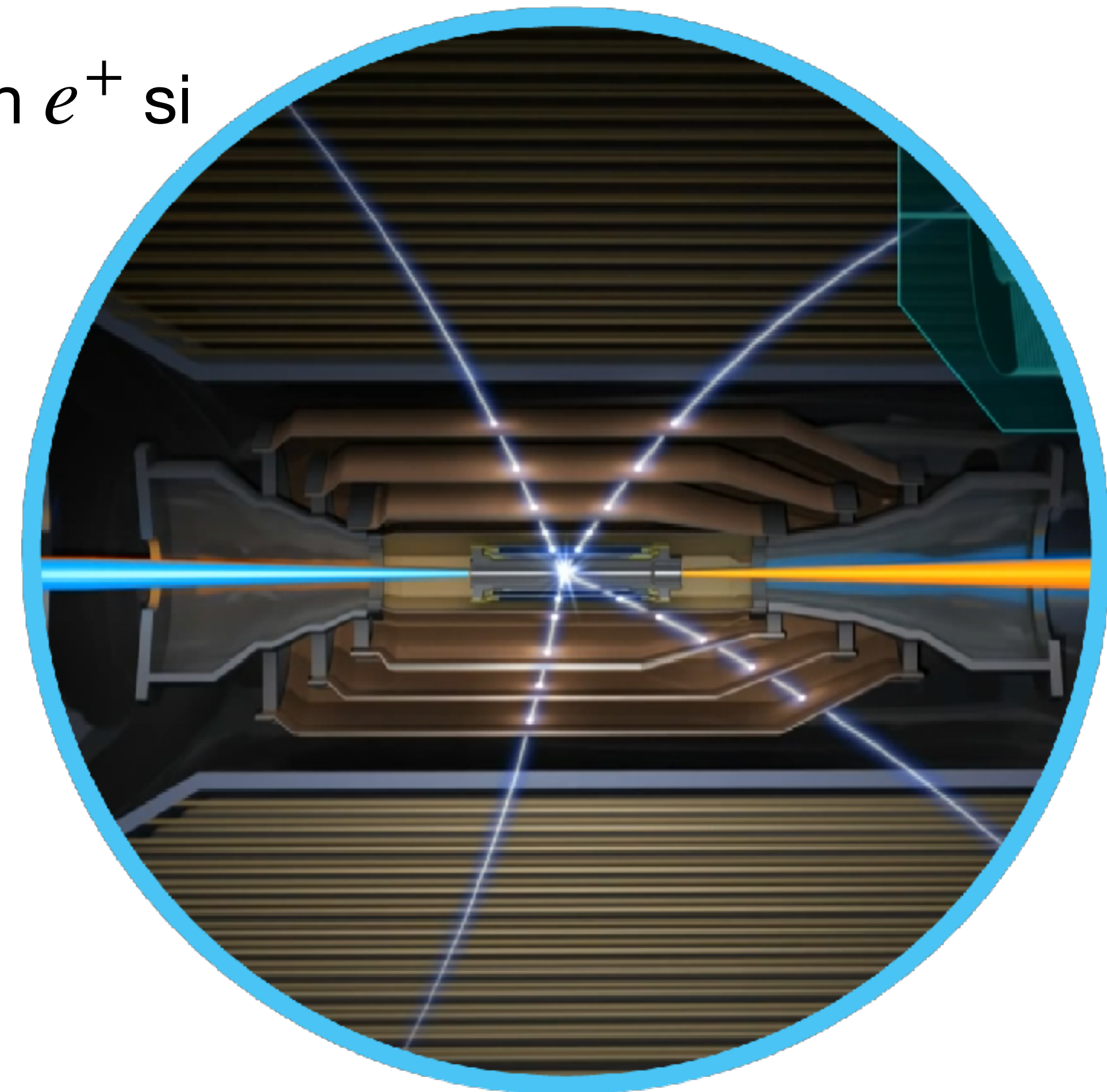
come ricostruire l'albero dai pezzi di frutta nella macedonia.

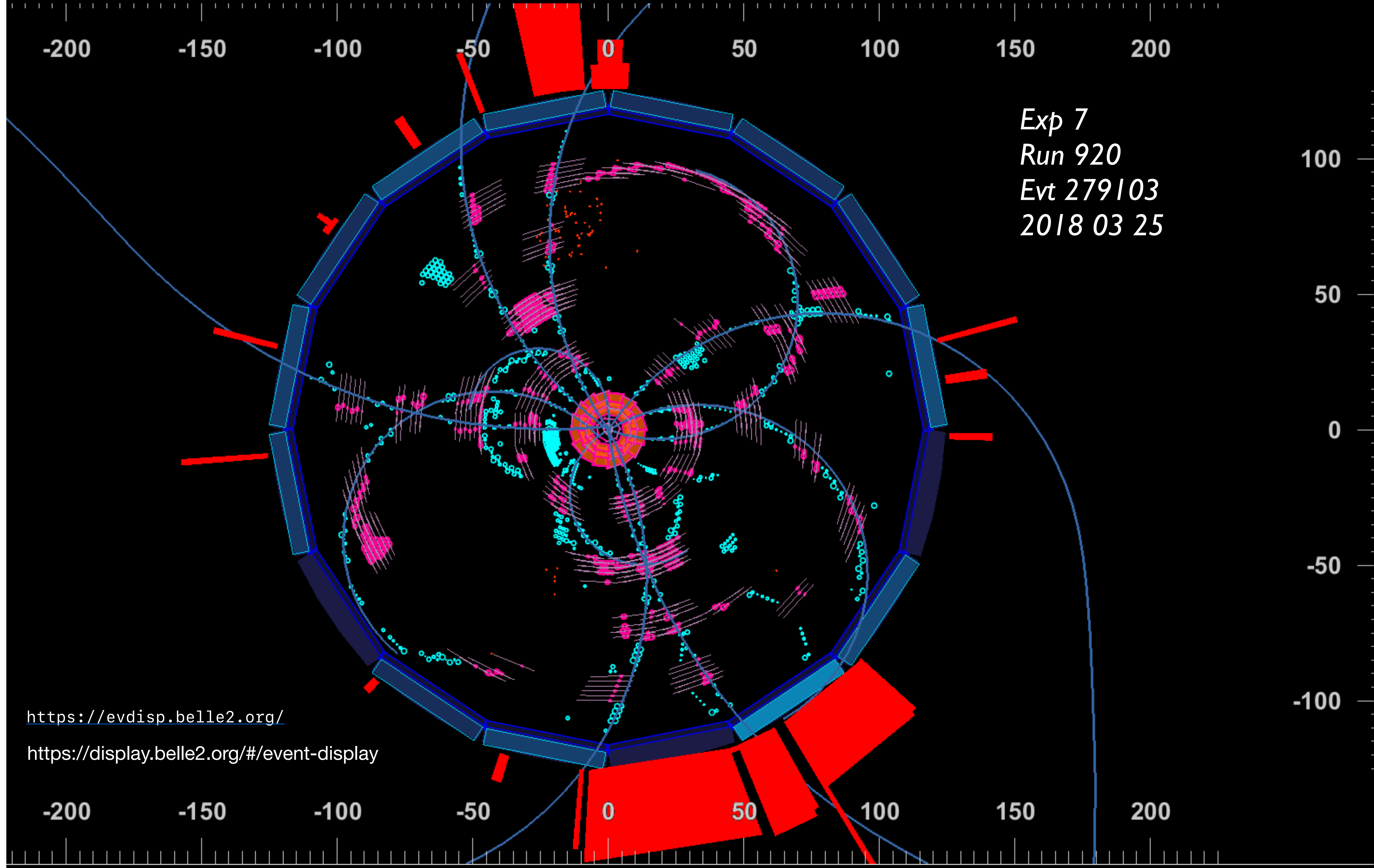
Eugenio Paoloni, Belle II Masterclass 26 marzo 2024



# Studiamo le particelle elementari.

- \* I dati che analizzeremo sono stati raccolti dall'esperimento Belle II a Tsukuba (Giappone).
- \* Ogni 4 nanosecondi facciamo collidere un pacchetto di  $e^-$  con un pacchetto di  $e^+$ .
- \* In media una volta ogni 10 000 collisioni un  $e^-$  ed un  $e^+$  si annichilano e generano nuove particelle: essendo un fenomeno assai raro lo chiamiamo "Evento".
- \* Queste particelle hanno vita brevissima. Esse:
  - \* o si disintegrano e producono altre particelle che a loro volta possono disintegrarsi,
  - \* o sono sufficientemente stabili da poter essere osservate nei nostri rivelatori.
- \* Questi "eventi" sono scritti in un enorme database.





<https://evdisp.belle2.org/>

<https://display.belle2.org/#/event-display>

# Un'analogia ludico gastronomica: Fruit Ninja

- Immaginate di avere una bella ciotola di macedonia.
- Il vostro compito è determinare quanti e quali frutti ha affettato il Ninja per riempire la ciotola.
- Come fare? È un bel puzzle!
  - combiniamo pezzi con lo stesso colore & sapore,
  - sappiamo la massa che hanno mediamente kiwi, fragole, arance, banane, lamponi etc.
  - dobbiamo tener conto delle bucce finite altrove e del succo schizzato via (per non sottostimare la massa)



# Cosa c'entra con la fisica delle particelle?

- \* Le particelle che vogliamo studiare equivalgono ai frutti.
- \* Le forze fondamentali della natura sono il Ninja e disintegrano le particelle.
- \* Le particelle osservate sono i pezzi di frutta.
- \* Chiamiamo “Evento” la ciotola di macedonia
- \* Il nostro compito è combinare assieme le particelle osservate per ricomporre il puzzle delle particelle che si sono disintegrate prima di essere osservate.
  - \* Conosciamo con estrema precisione la massa delle particelle.
  - \* Abbiamo idee molto precise delle regole per combinare assieme i pezzi.
  - \* Alle volte il compito riesce, altre volte no perché non abbiamo raccolto tutti i pezzi o abbiamo perso troppo succo o abbiamo combinato male i pezzi.

# Le particelle che osserviamo nel rivelatore

## I pezzi di frutta nella ciotola di macedonia

- \* Gli elettroni ( $e^-$ ) ed i positroni ( $e^+$ )
- \* I muoni ( $\mu^+$ ,  $\mu^-$ ) i parenti pesanti degli elettroni
- \* I pioni carichi ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ) le particelle più leggere composte da un quark ed un anti quark
- \* Le particelle Kappa ( $K^+$ ,  $K^-$ ) le particelle più leggere composte da un quark di sapore “strano” ed un secondo quark leggero
- \* I protoni ( $p$ ) e gli anti protoni ( $\bar{p}$ ) le particelle più leggere composte da tre quark
- \* I fotoni di alta energia (gamma,  $\gamma$ )

*Come si misura  
la massa  
delle particelle?*



# L'energia, la massa e l'impulso.

\*

$$E = mc^2$$

è valida per una particella di massa  $m$  **ferma**.  
E se si muove? Dove metto l'energia cinetica?

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + p^2c^2}$$
$$mc^2 = \sqrt{E^2 - p^2c^2}$$

queste valgono più in generale per una particella di massa  $m$  con quantità di moto di modulo  $p$

\* Ricordate per le particelle finali: misuriamo  $\vec{p}$  e conosciamo  $m$  e da questi misuriamo  $E$

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$



Albert Einstein



# Mettere assieme i pezzi

\* ***Nella disintegrazione l'energia e la quantità di moto si conservano.***

\* Ad esempio il pione neutro decade in due fotoni:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma_1 + \gamma_2$$

\* L'energia del  $\pi^0$  è la somma delle energie dei due fotoni.

$$E(\pi_0) = E(\gamma_1) + E(\gamma_2)$$

\* L'impulso del  $\pi^0$  è la somma degli impulsi dei due fotoni.

$$\vec{p}(\pi_0) = \vec{p}(\gamma_1) + \vec{p}(\gamma_2)$$

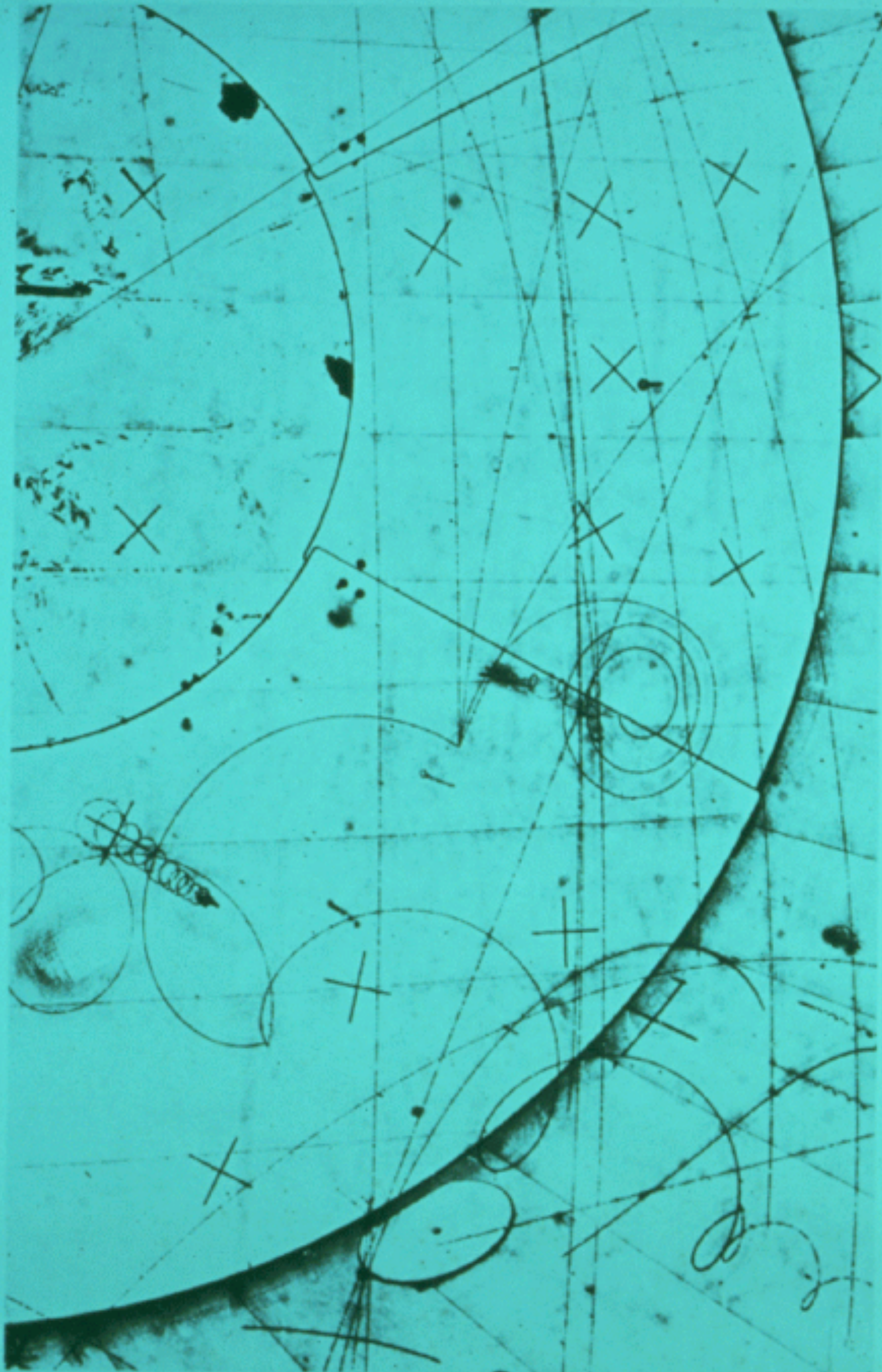
\* Da qui la massa della combinazione di due particelle:

$$m(\pi_0)c^2 = \sqrt{[E(\gamma_1) + E(\gamma_2)]^2 - [\vec{p}(\gamma_1) + \vec{p}(\gamma_2)]^2} c^2$$



# Le particelle che noi ricostruiamo dai pezzi

- \* I pioni neutri che decadono quasi sempre in due gamma  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ .
- \* Le particelle K neutre (Kshort) che decadono molto spesso in due pioni  $K_s \rightarrow \pi^+ \pi^-$
- \* Le particelle  $J/\Psi$  che decadono ad esempio come  $J/\Psi \rightarrow \mu^+ \mu^-, e^+ e^-$
- \* Le particelle  $\Phi$  neutre che decadono molto spesso in  $\Phi \rightarrow K^+ K^-$
- \* Le particelle  $D^0/\bar{D}^0$  che decadono ad esempio in un Kappa ed un pione  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+, \bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$
- \* Le particelle  $D^*$  che decadono molto spesso in pioni ed un  $D$   $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+, D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0 \pi^-$ ,
- \* Le particelle  $B$  cariche che decadono ad esempio in  $B^+ \rightarrow J/\Psi K^+$
- \* Esistono decine e decine di altre particelle e centinaia e centinaia di altre combinazioni di decadimenti possibili: lavoro molto divertente per noi ricercatori!



AACHEN-BONN-CERN-MUNICH-OXFORD COLLABORATION

WA 21

EVENT 294/0995

$$\nu p \rightarrow D^* p \mu^-$$

$$\downarrow D^0 \pi^+$$

$$\mu^+ \nu$$

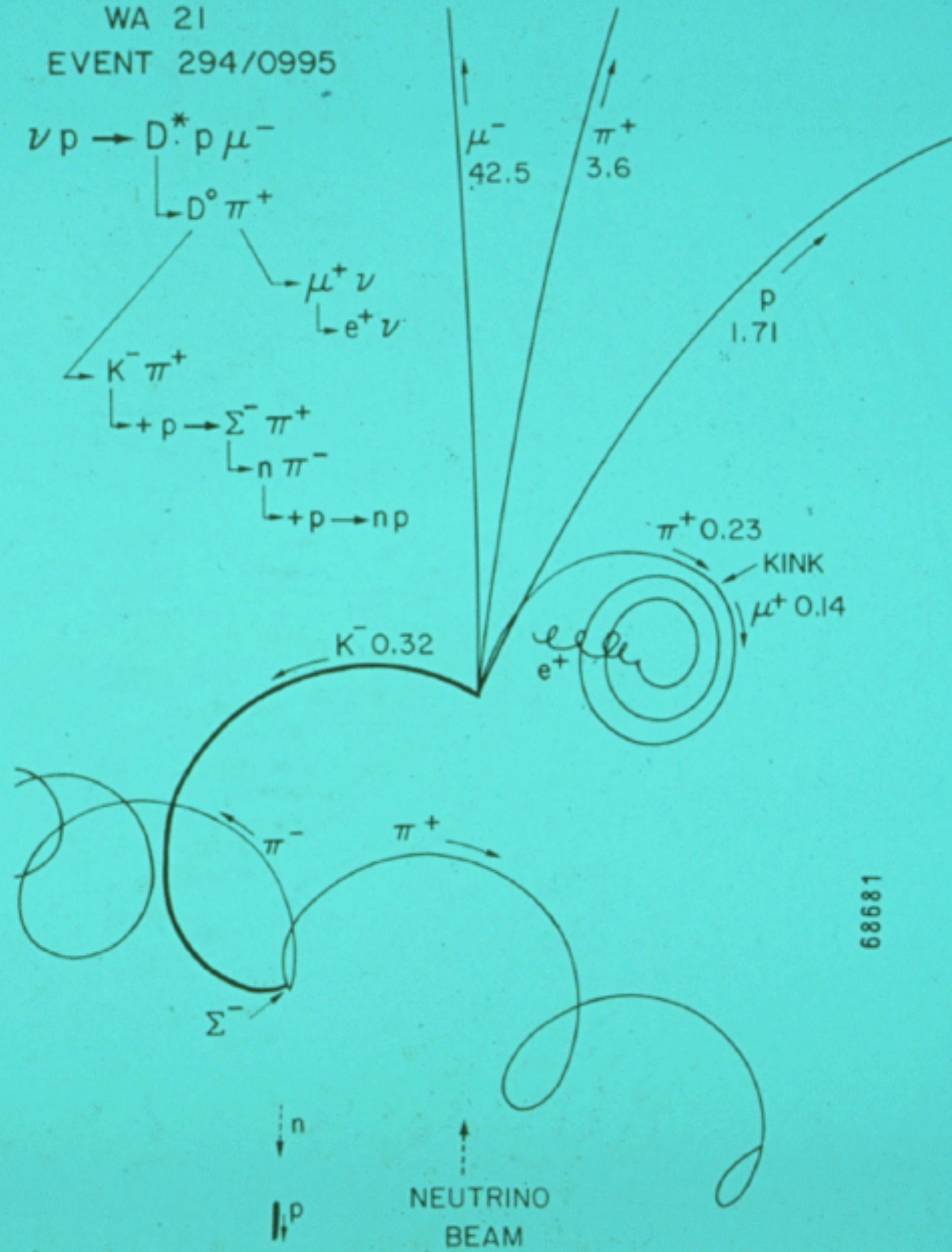
$$\downarrow e^+ \nu$$

$$\downarrow K^- \pi^+$$

$$\downarrow + p \rightarrow \Sigma^- \pi^+$$

$$\downarrow n \pi^-$$

$$\downarrow + p \rightarrow np$$



68681

MOMENTUM IN GeV/c

# Identifichiamo le combinazioni giuste

\* Guardiamo la massa della combinazione di due particelle:

Se la massa è quella della particella che cerchiamo abbiamo combinato i due pezzi giusti!

Se la massa non è quella della particella che cerchiamo abbiamo combinato due pezzi a caso

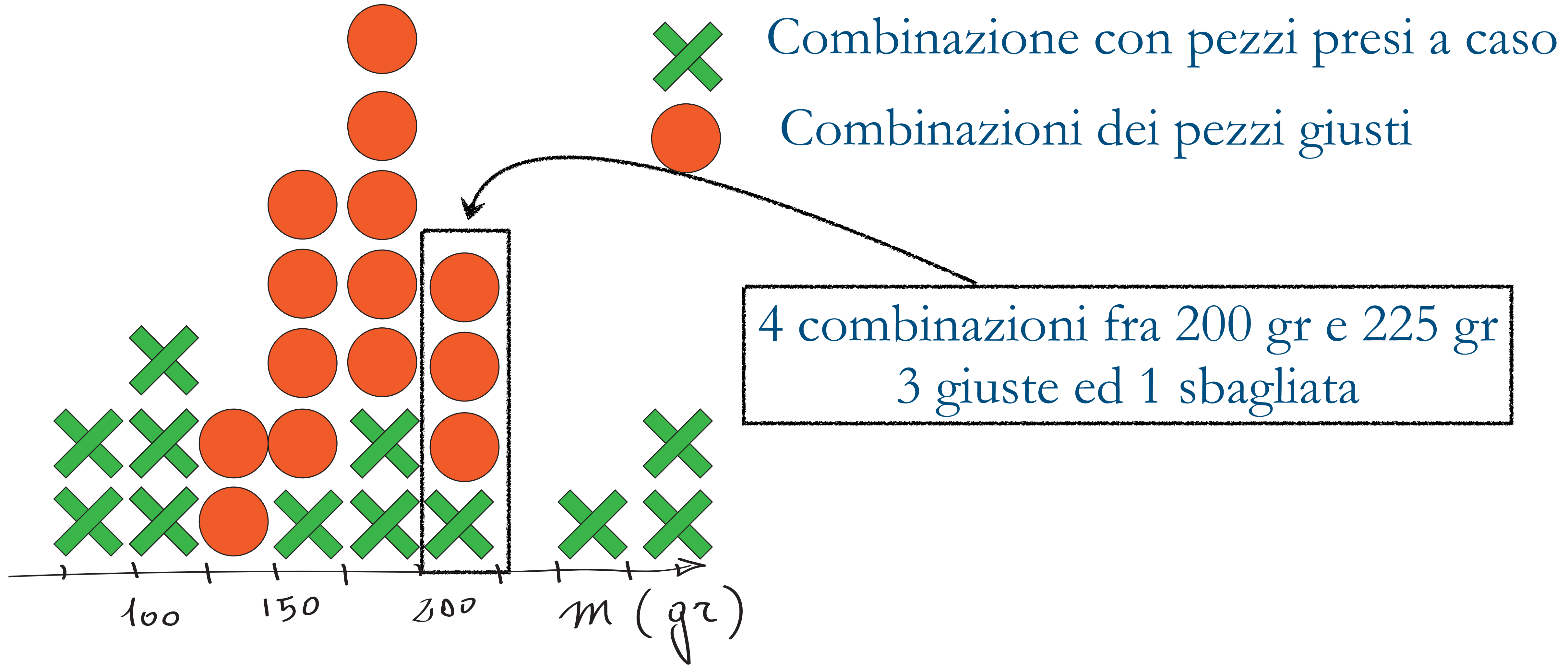
\* Ma... nessuna misura è infinitamente precisa:

\* combinando i pezzi giusti non otteniamo il valore esatto della massa

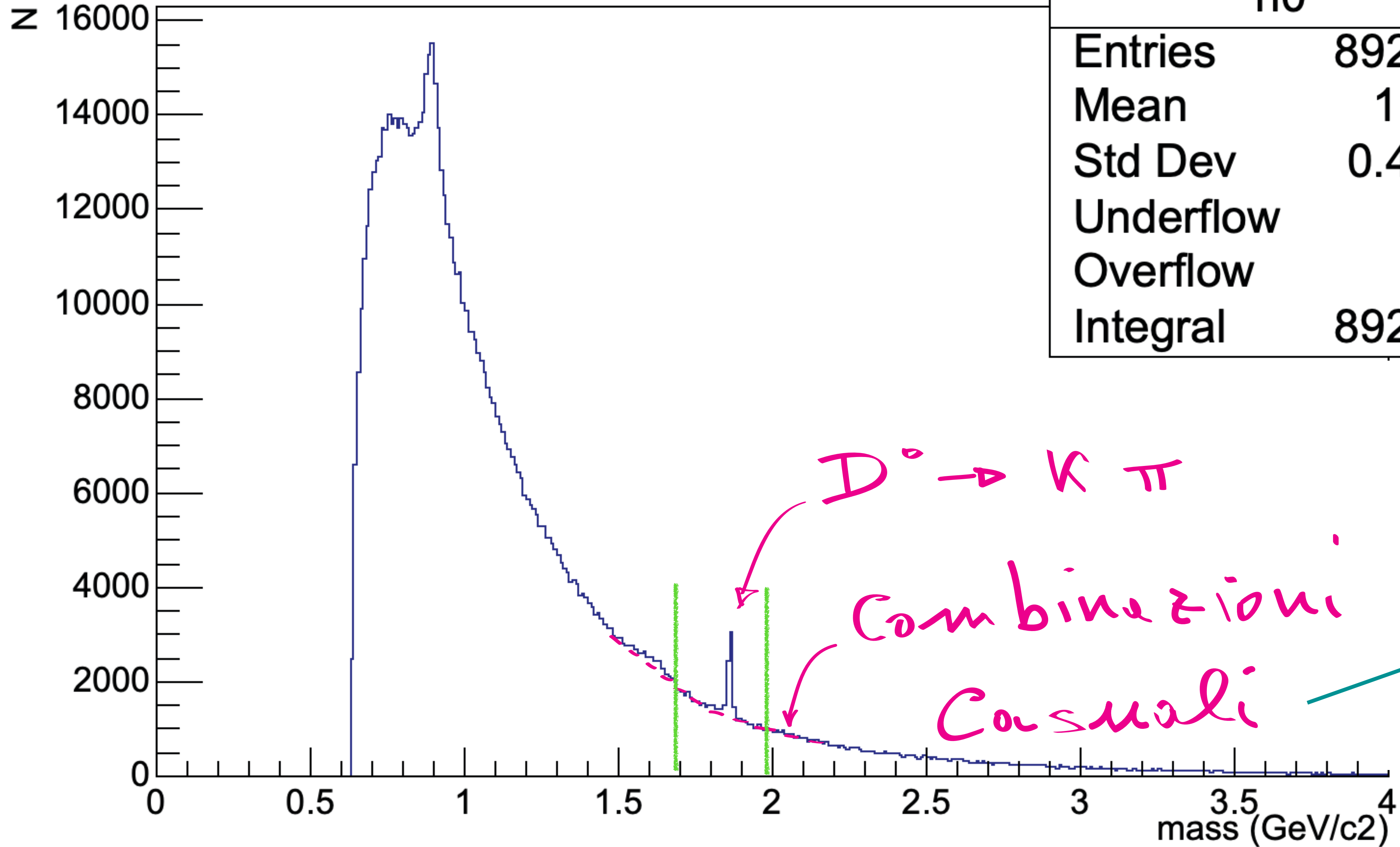
\* combinando i pezzi sbagliati possiamo ottenere un valore della massa molto vicino a quello che stiamo cercando

\* Come fare?

# Costruiamo un istogramma



# pion kaon



h0	
Entries	892413
Mean	1.142
Std Dev	0.4877
Underflow	0
Overflow	0
Integral	892413

*D<sup>0</sup> → K π*

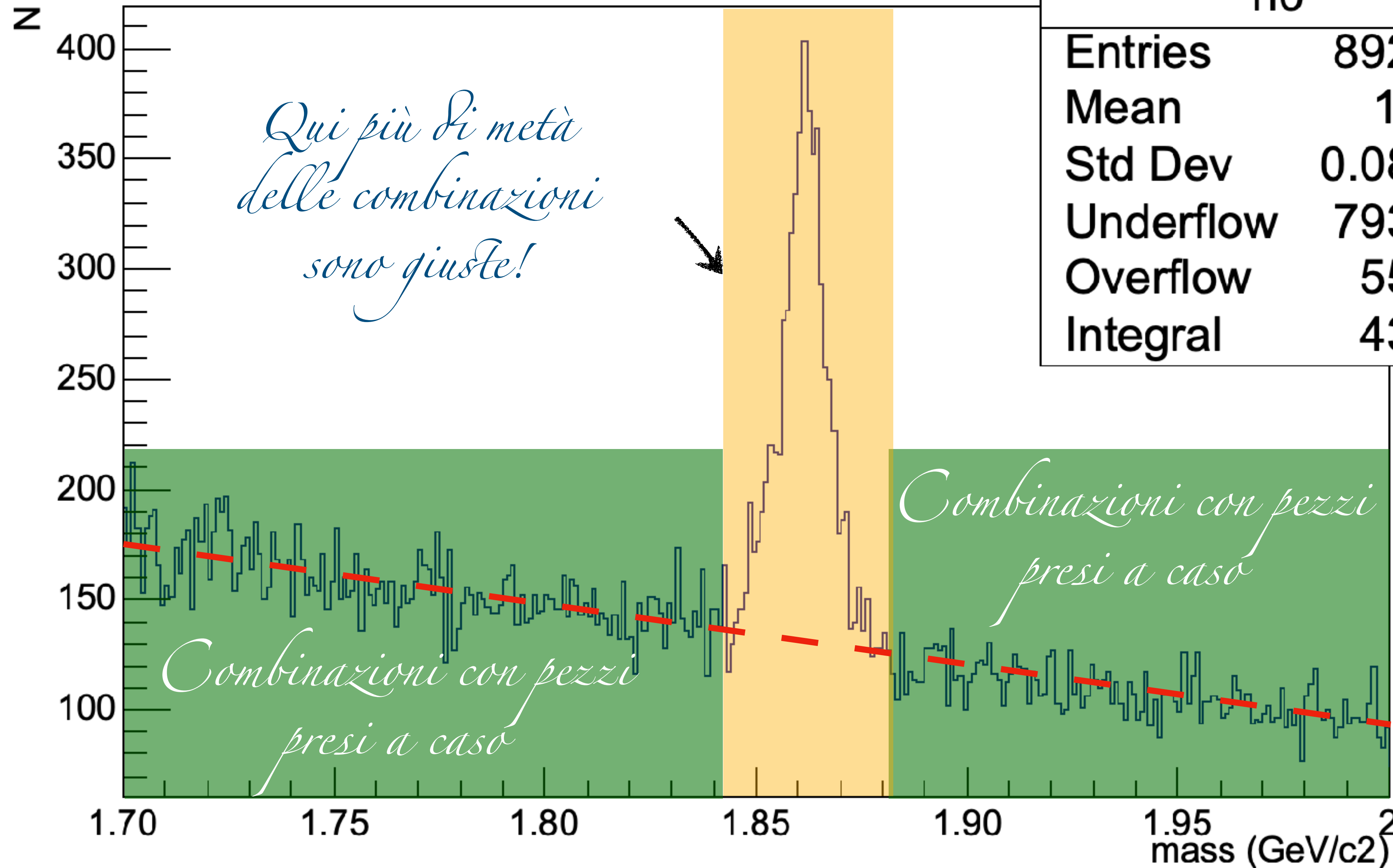
*Combinazioni Casuali*

*D<sup>0</sup>*

*π<sup>+</sup>*

*K<sup>-</sup>*

# pion kaon



*Qui più di metà  
delle combinazioni  
sono giuste!*

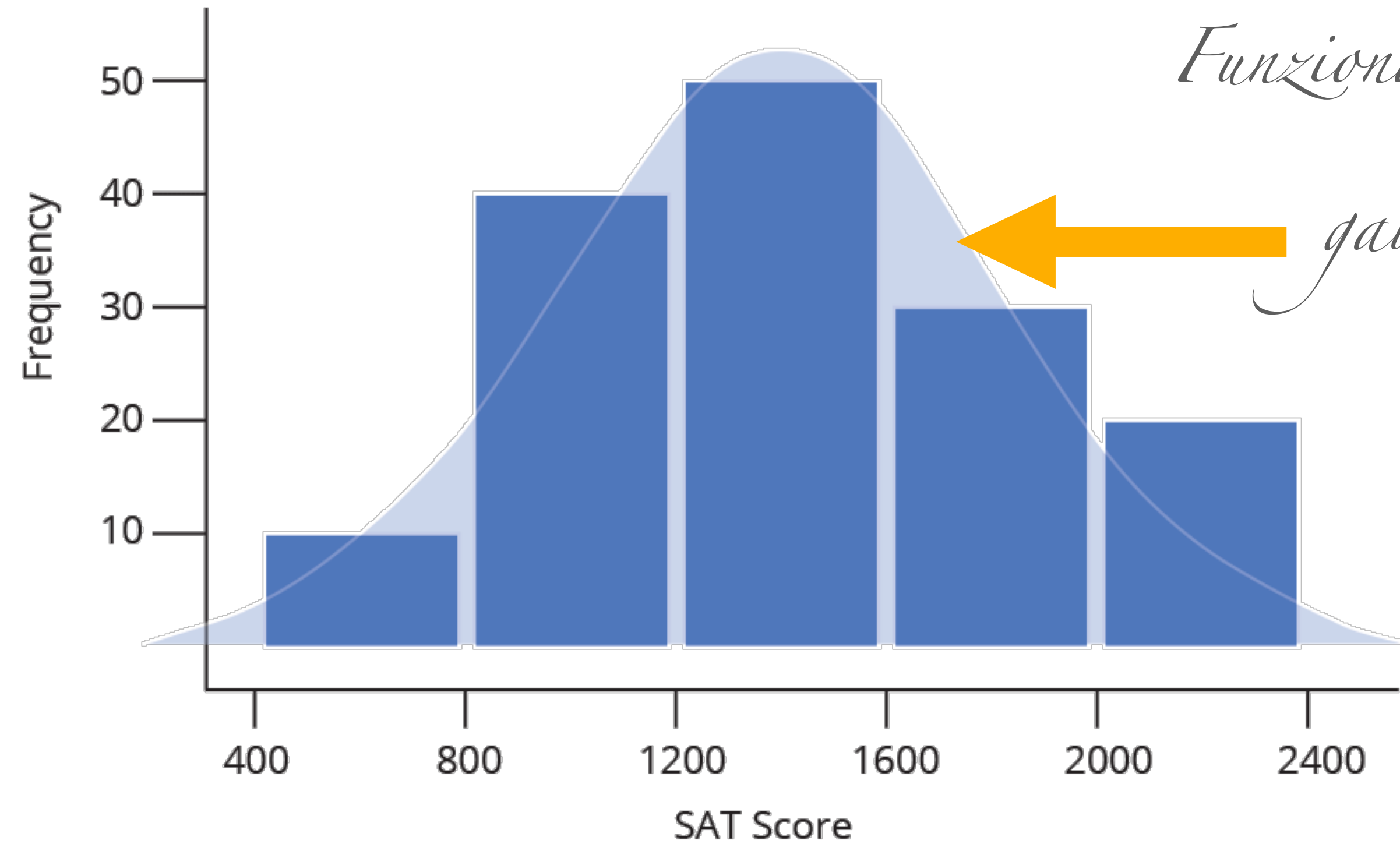
*Combinazioni con pezzi  
presi a caso*

*Combinazioni con pezzi  
presi a caso*

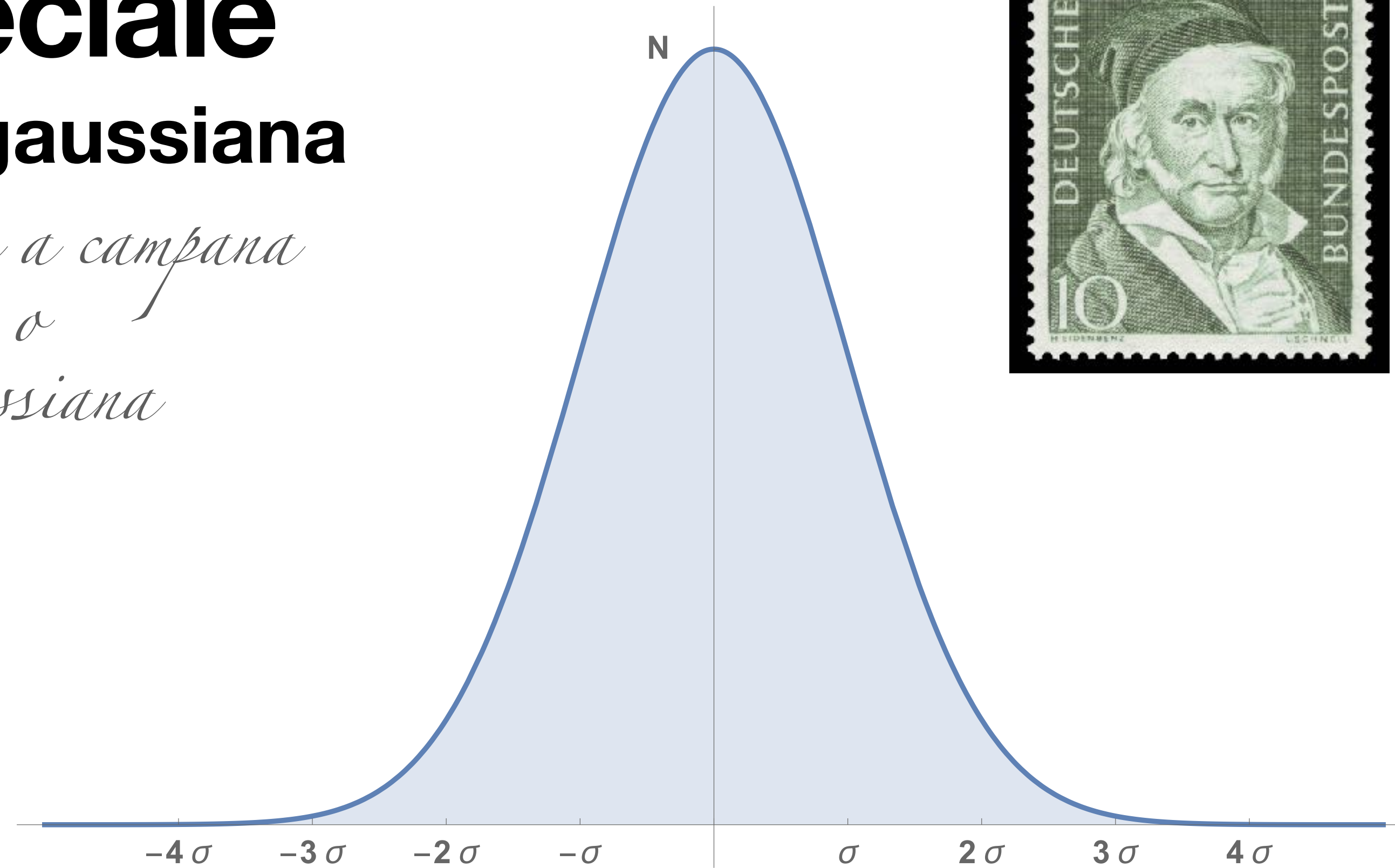


# Una funzione molto speciale

La curva a campana, detta anche gaussiana



*Funziona a campana  
o  
gaussiana*

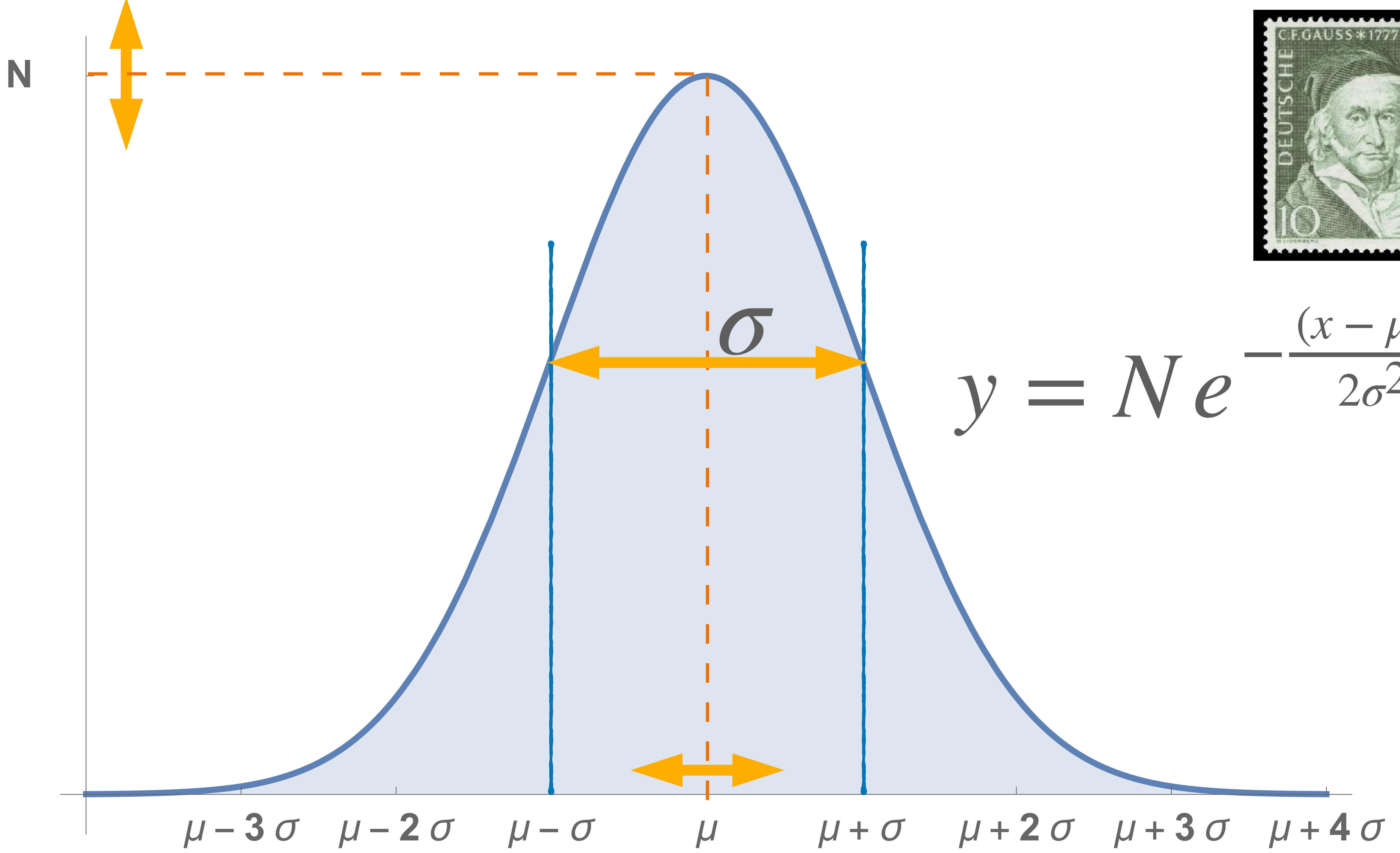


*Diminuendo la larghezza del bin  
ed aumentando il numero di eventi*

*l'istogramma si avvicina ad una funzione continua*

$$y = N e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$





$$y = N e^{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$



# Adattamento dei parametri.

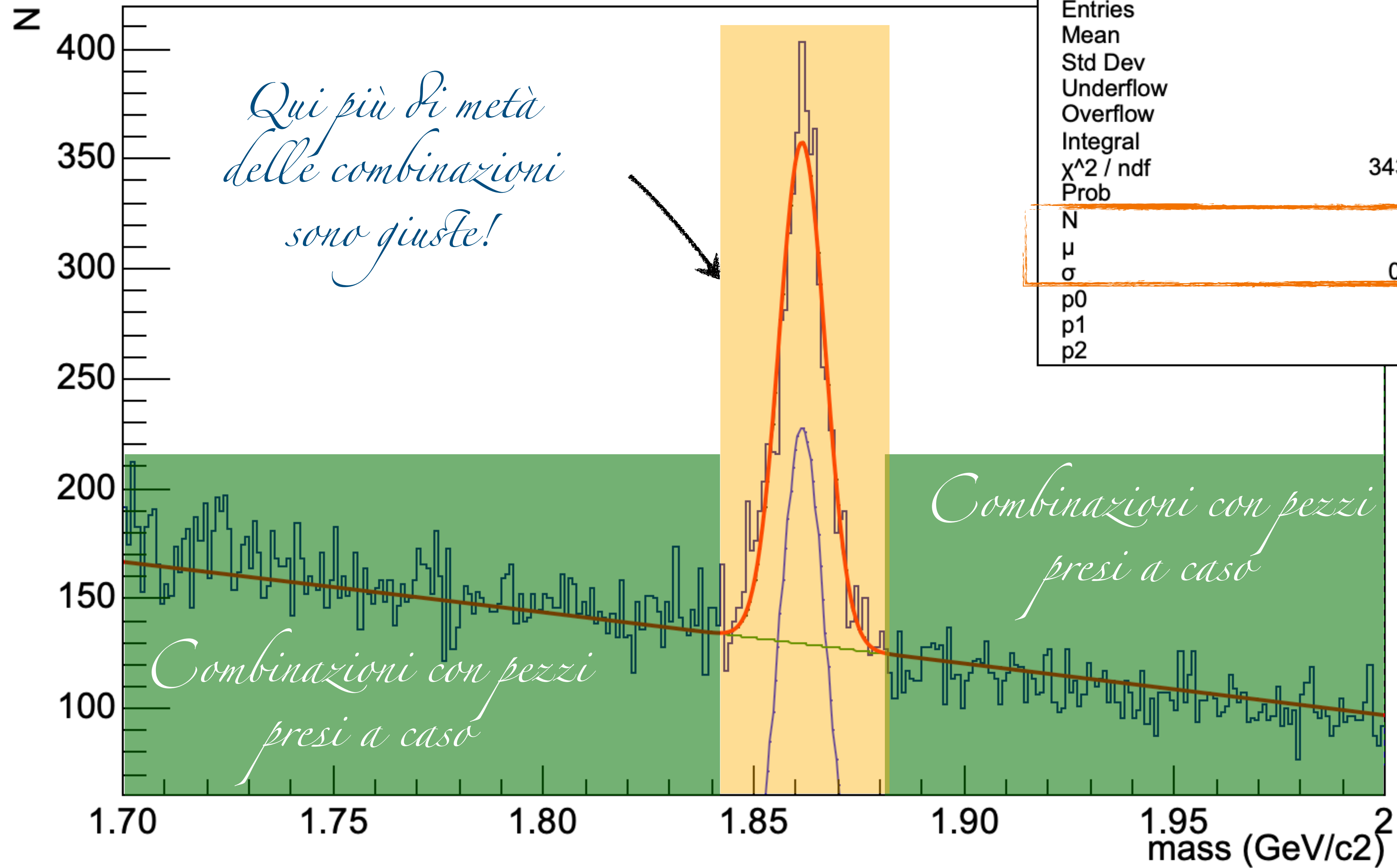
In inglese “fit”.

- Trovata la forma funzionale ( il modello di abito )
- dobbiamo adattare i parametri della funzione in modo che meglio approssimo l'istogramma (prendere le misure alla persona che dobbiamo vestire)
- La procedura che determina i parametri che meglio approssimano l'istogramma prende il nome di *fit* del modello all'istogramma, o semplicemente *fit*.



Copyright CSA Images

# pion kaon



h0	
Entries	892413
Mean	1.836
Std Dev	0.08252
Underflow	793346
Overflow	55708
Integral	43359
$\chi^2 / \text{ndf}$	343.4 / 294
Prob	0.02488
N	228.0
$\mu$	1.861
$\sigma$	0.005437
p0	514.2
p1	-180.5
p2	-14.06

DADOS IN ORIENTALIS

QUEPRIA STOGIA RMI!

Dopo pranzo...