Incontri di Fisica delle Alte Energie, Catania, 12 Marzo 2023

Misure di oscillazione e di violazione di CP nei decadimenti $D^0 \to h^- h^+$ a LHCb

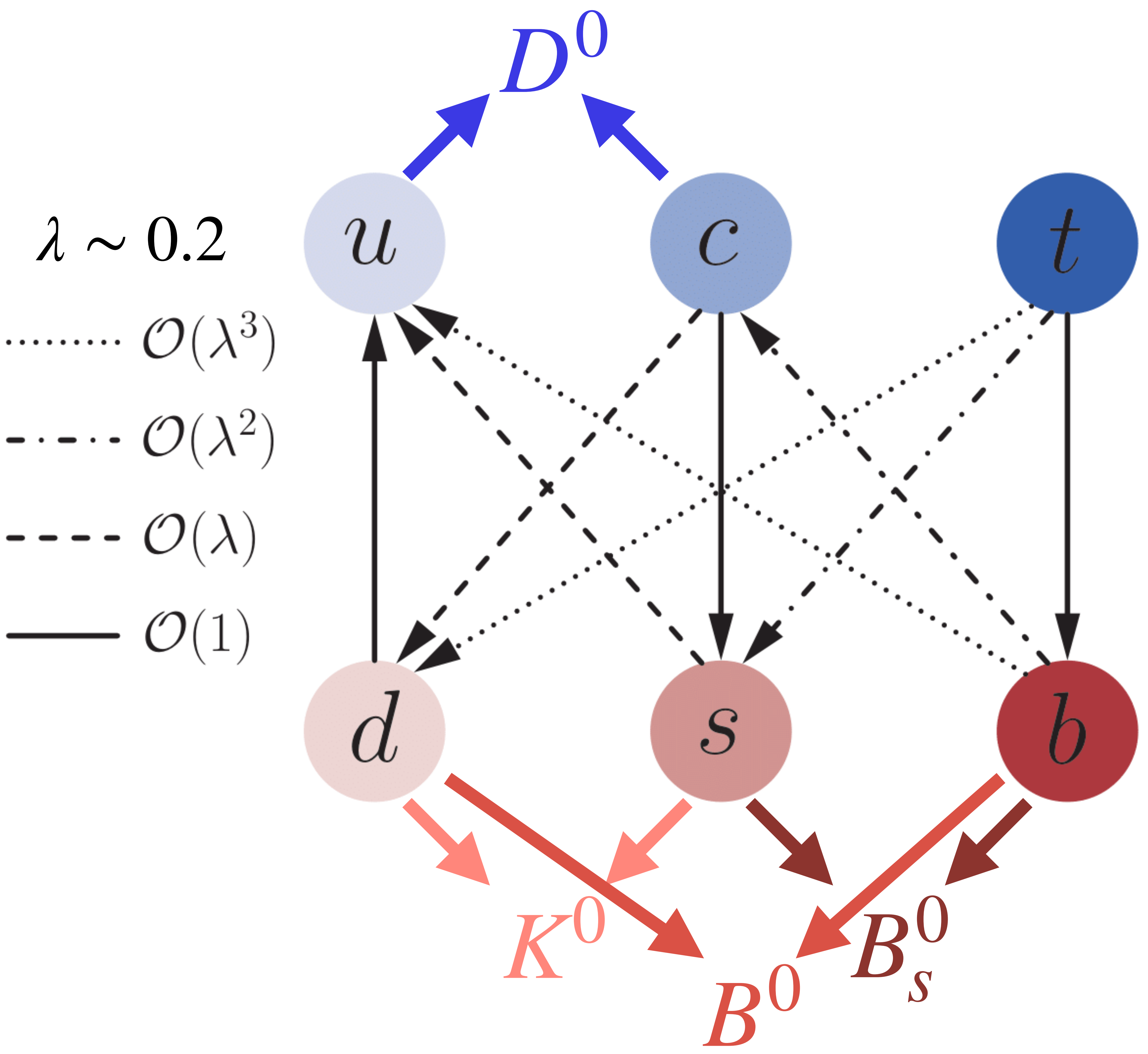
NICO KLEIJNE

Perché il Charm?

Unici mesoni neutri contenenti quark di tipo *up* in cui si possono osservare mescolamento e violazione di CP

A causa della soppressione CKM, mescolamento e CPV sono predetti essere piccoli $\sim 10^{-3}$

Predizioni teoriche più accurate sono complicate da effetti di QCD non perturbativa



Perché il Charm?

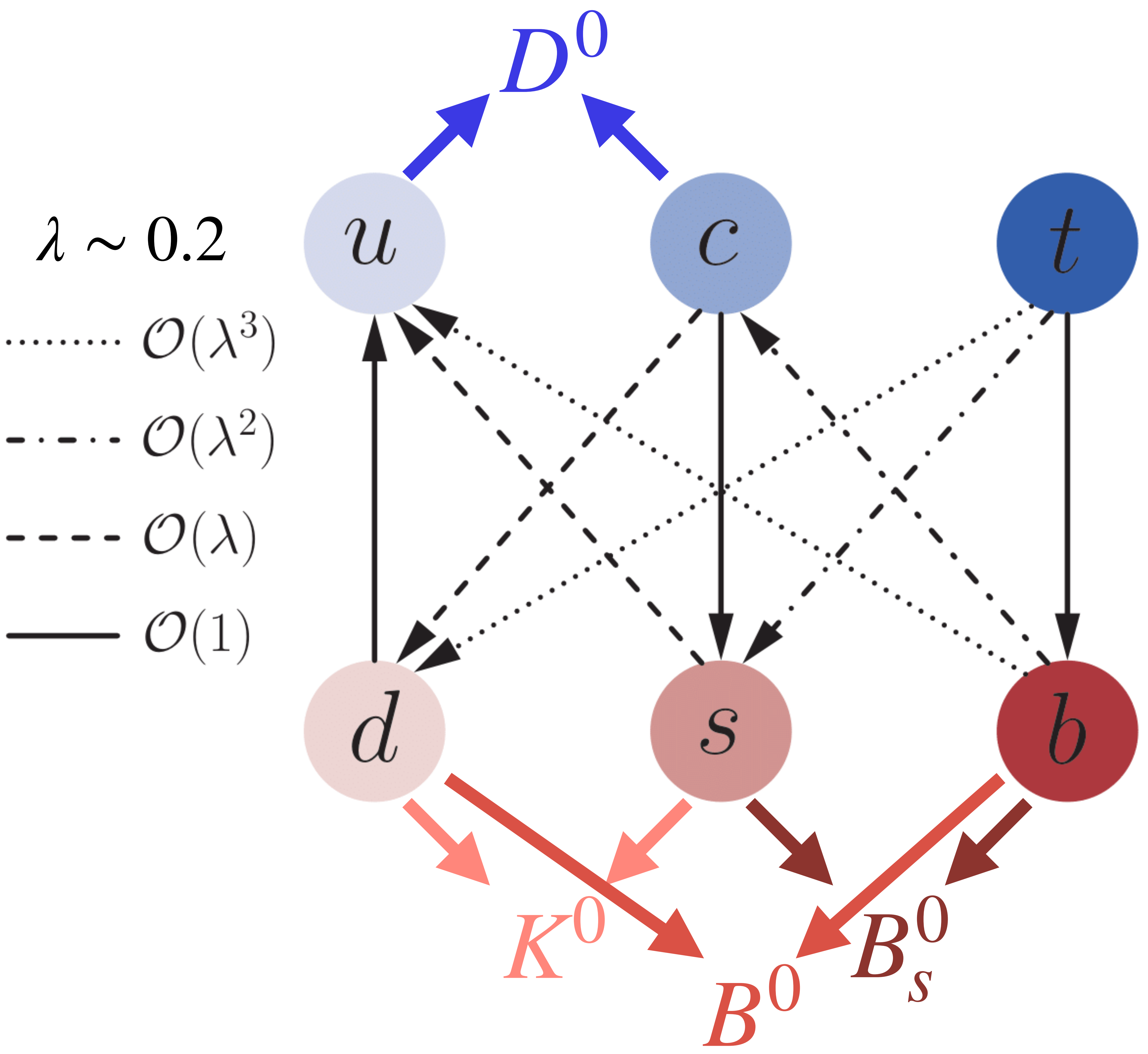
Unici mesoni neutri contenenti quark di tipo *up* in cui si possono osservare mescolamento e violazione di CP

A causa della soppressione CKM, mescolamento e CPV sono predetti essere piccoli $\sim 10^{-3}$

Predizioni teoriche più accurate sono complicate da effetti di QCD non perturbativa

Violazione di CP osservata per la prima volta da LHCb nel 2019

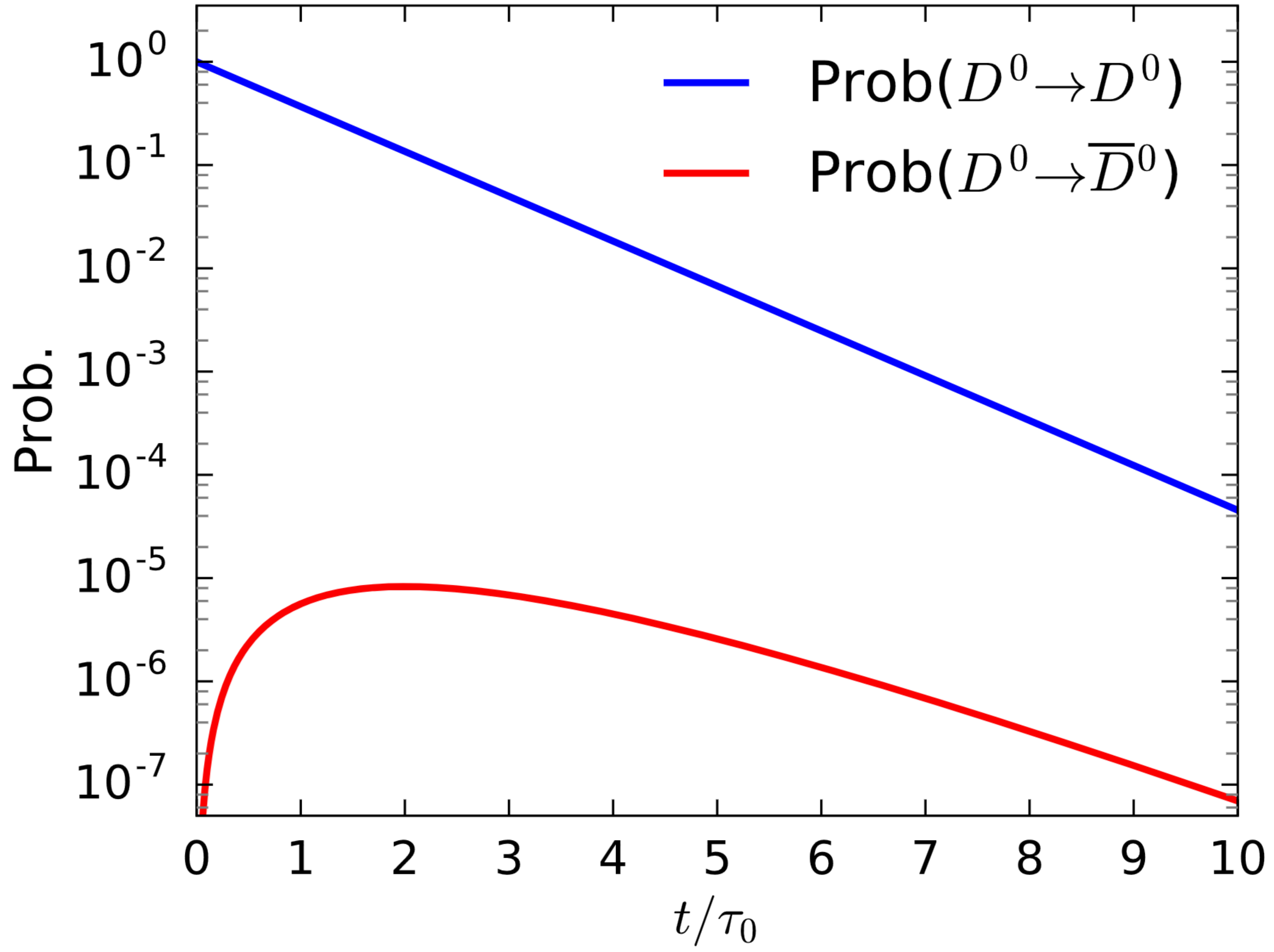
$$\boxed{\Delta A_{CP} = (-15.4 \pm 2.9) \times 10^{-4}}$$



Mescolamento nel Charm

Gli autoscatti di sapore del D^0 sono diversi dagli autoscatti di evoluzione temporale:

$$|D_L\rangle = p|D^0\rangle + q|\bar{D}^0\rangle \qquad |D_H\rangle = p|D^0\rangle - q|\bar{D}^0\rangle$$



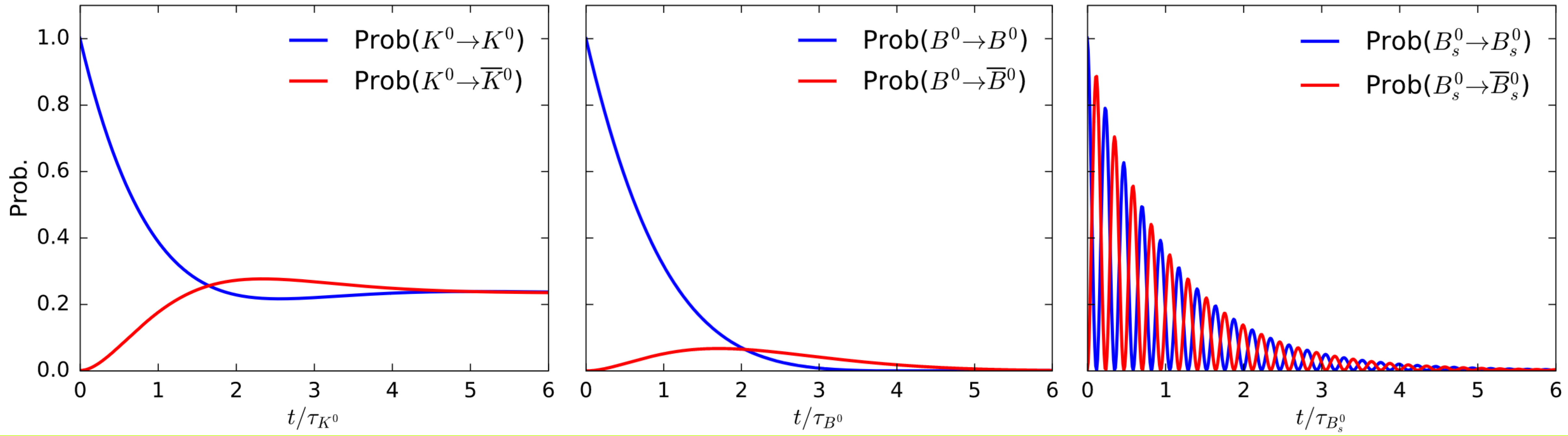
Attualmente le misure dei parametri di mescolamento sono dominate da LHCb:

$$x \equiv \frac{m_H - m_L}{\Gamma} = 0.41 \pm 0.04\,\%$$

$$y \equiv \frac{\Gamma_H - \Gamma_L}{2\Gamma} = 0.65 \pm 0.02\,\%$$

[HFLAV 08/22]

[PRL 127.111801, PRD 105.092013, PRD 97.031101]



Violazione di CP nel Charm

Nei decadimenti del D^0 in $f = K^-K^+, \pi^-\pi^+$ (singolo-Cabibbo soppressi e CP pari) si ha:

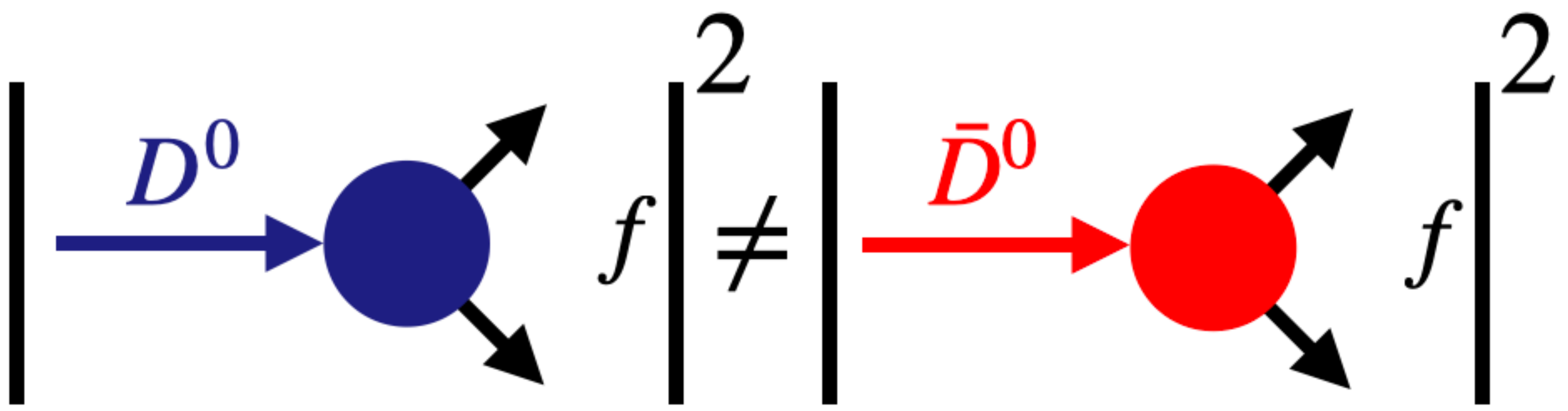
$$A_{CP}(f,t) = \frac{\Gamma(D^0 \to f,t) - \Gamma(\bar{D}^0 \to f,t)}{\Gamma(D^0 \to f,t) + \Gamma(\bar{D}^0 \to f,t)} \approx a_f^d + \Delta Y \frac{t}{\tau_{D^0}}$$

Violazione di CP nel Charm

Nei decadimenti del D^0 in $f = K^- K^+, \pi^- \pi^+$ (singolo-Cabibbo soppressi e CP pari) si ha:

$$A_{CP}(f,t) = \frac{\Gamma(D^0 \to f,t) - \Gamma(\bar{D}^0 \to f,t)}{\Gamma(D^0 \to f,t) + \Gamma(\bar{D}^0 \to f,t)} \approx a_f^d + \Delta Y \frac{t}{\tau_{D^0}}$$

CPV nel decadimento

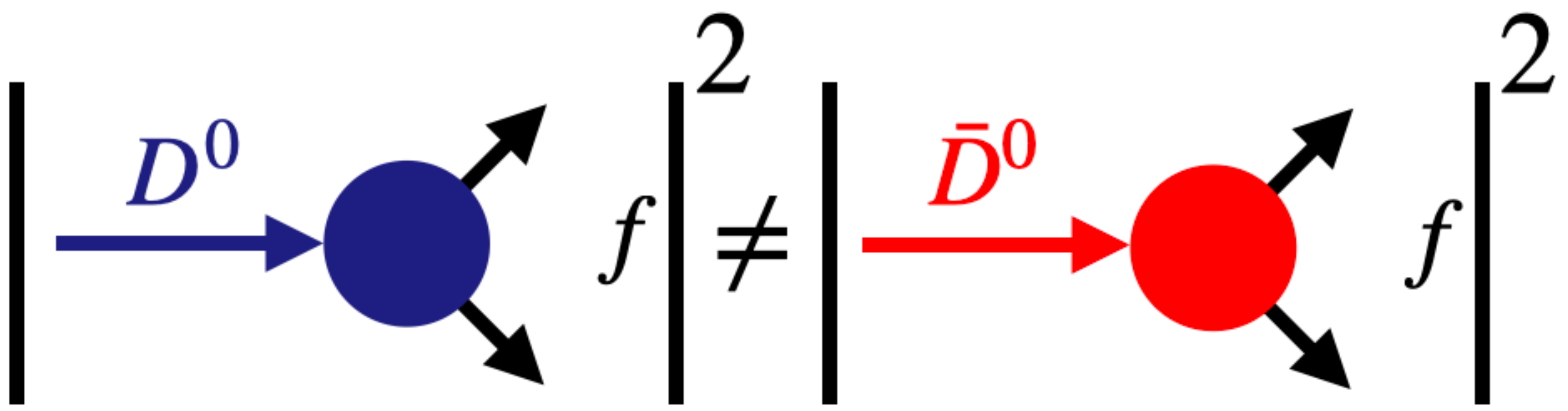


Violazione di CP nel Charm

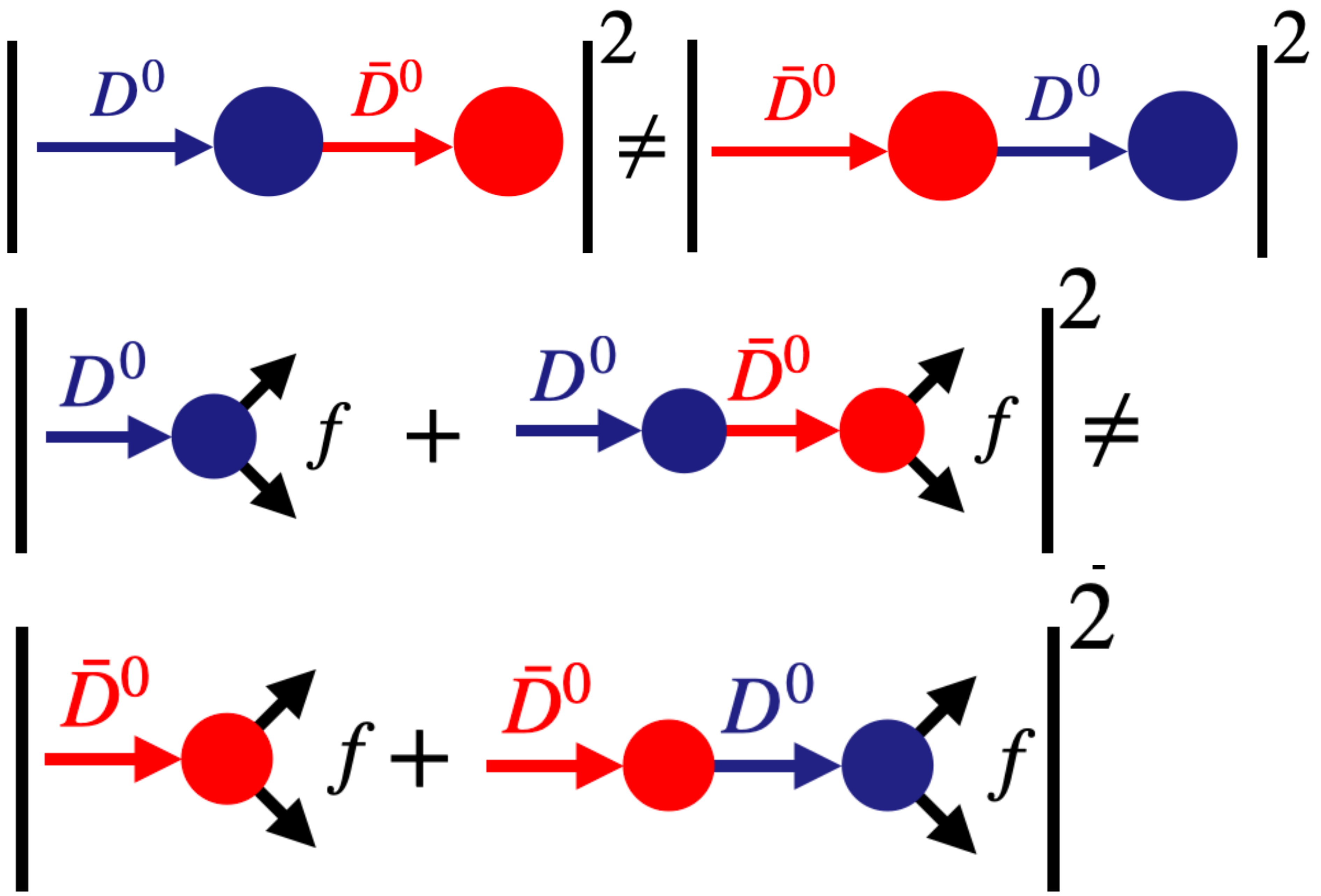
Nei decadimenti del D^0 in $f = K^-K^+, \pi^-\pi^+$ (singolo-Cabibbo soppressi e CP pari) si ha:

$$A_{CP}(f,t) = \frac{\Gamma(D^0 \to f,t) - \Gamma(\bar{D}^0 \to f,t)}{\Gamma(D^0 \to f,t) + \Gamma(\bar{D}^0 \to f,t)} \approx a_f^d + \Delta Y \frac{t}{\tau_{D^0}}$$

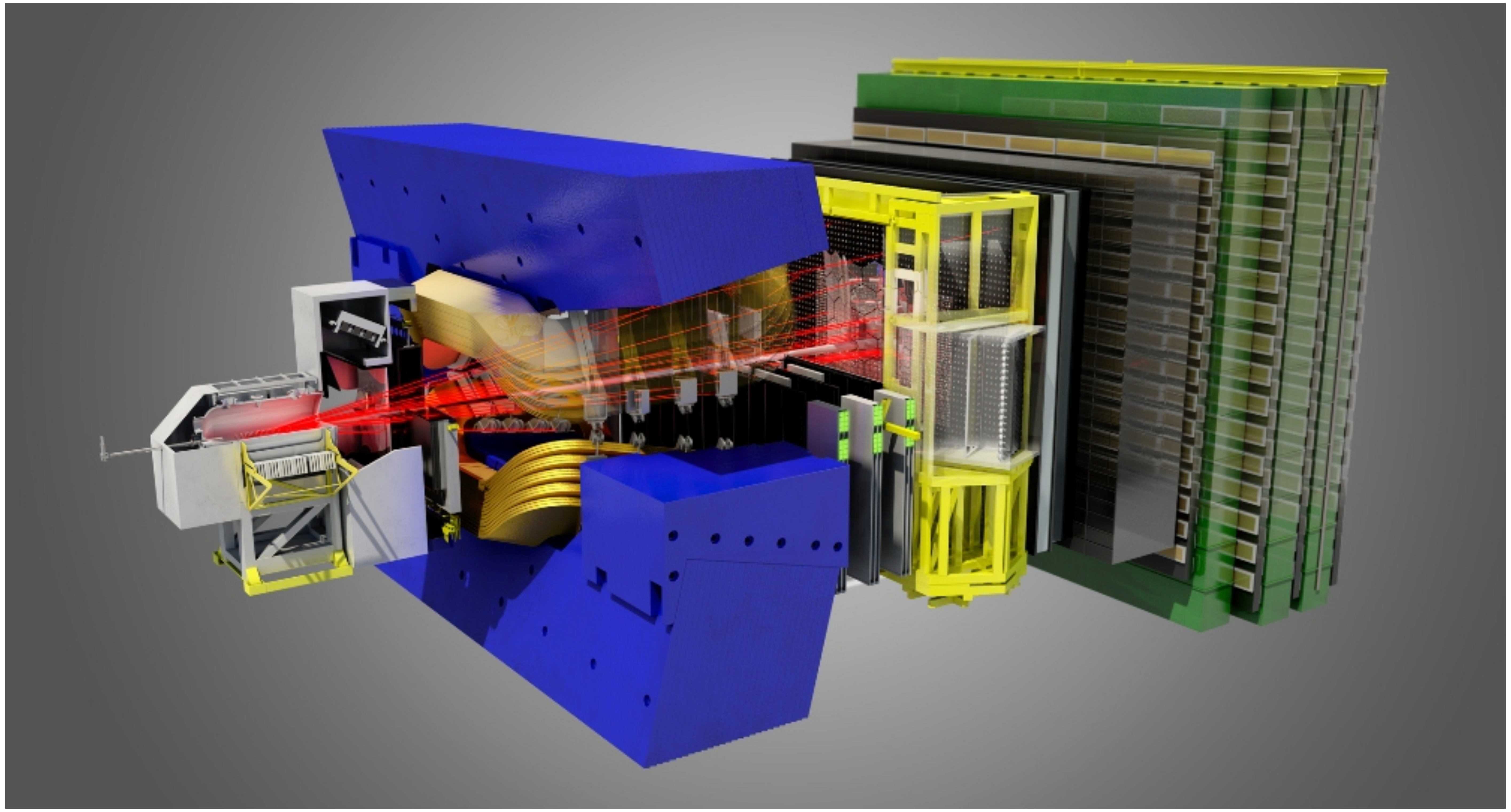
CPV nel decadimento



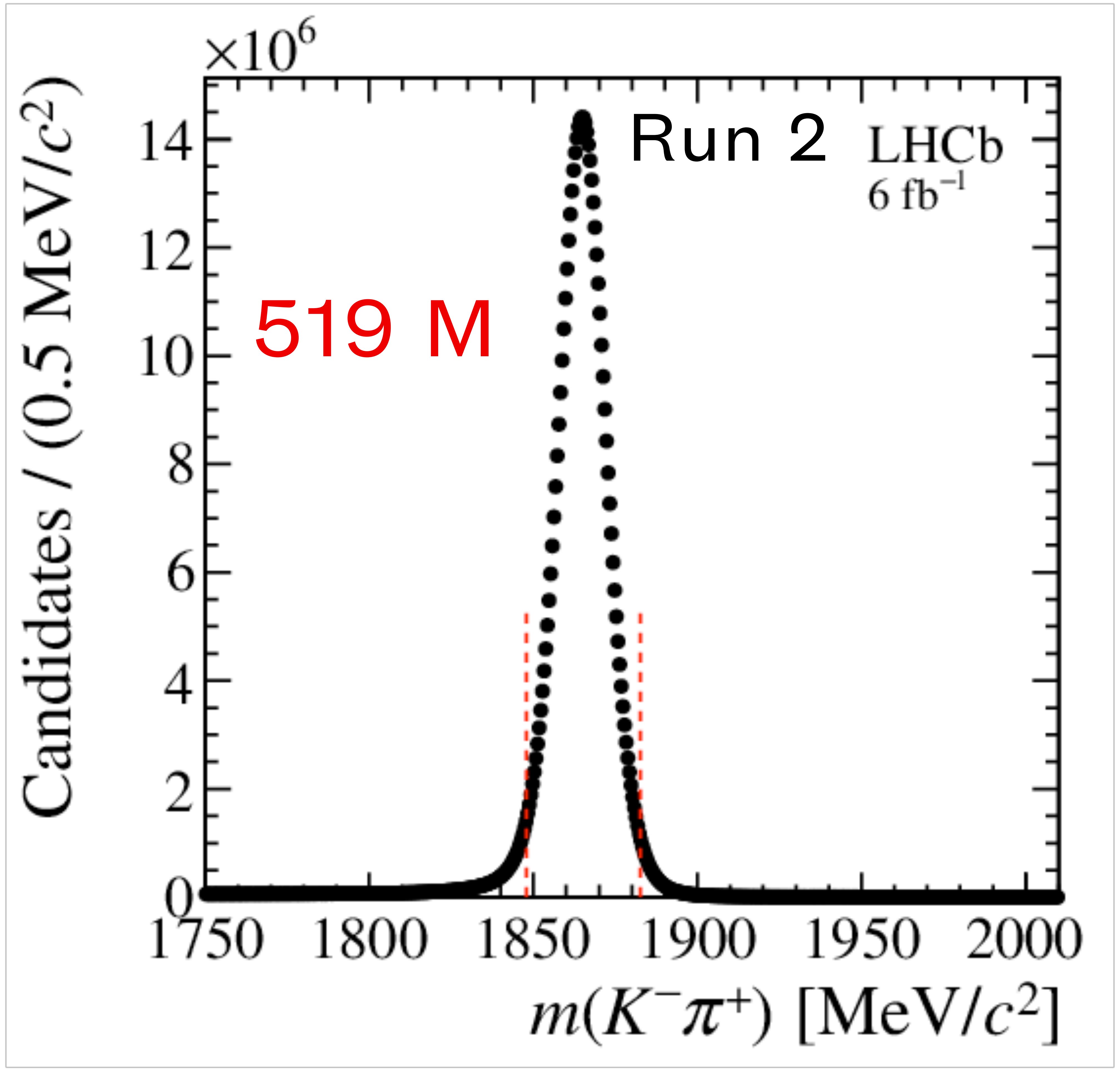
CPV dipendente dal tempo



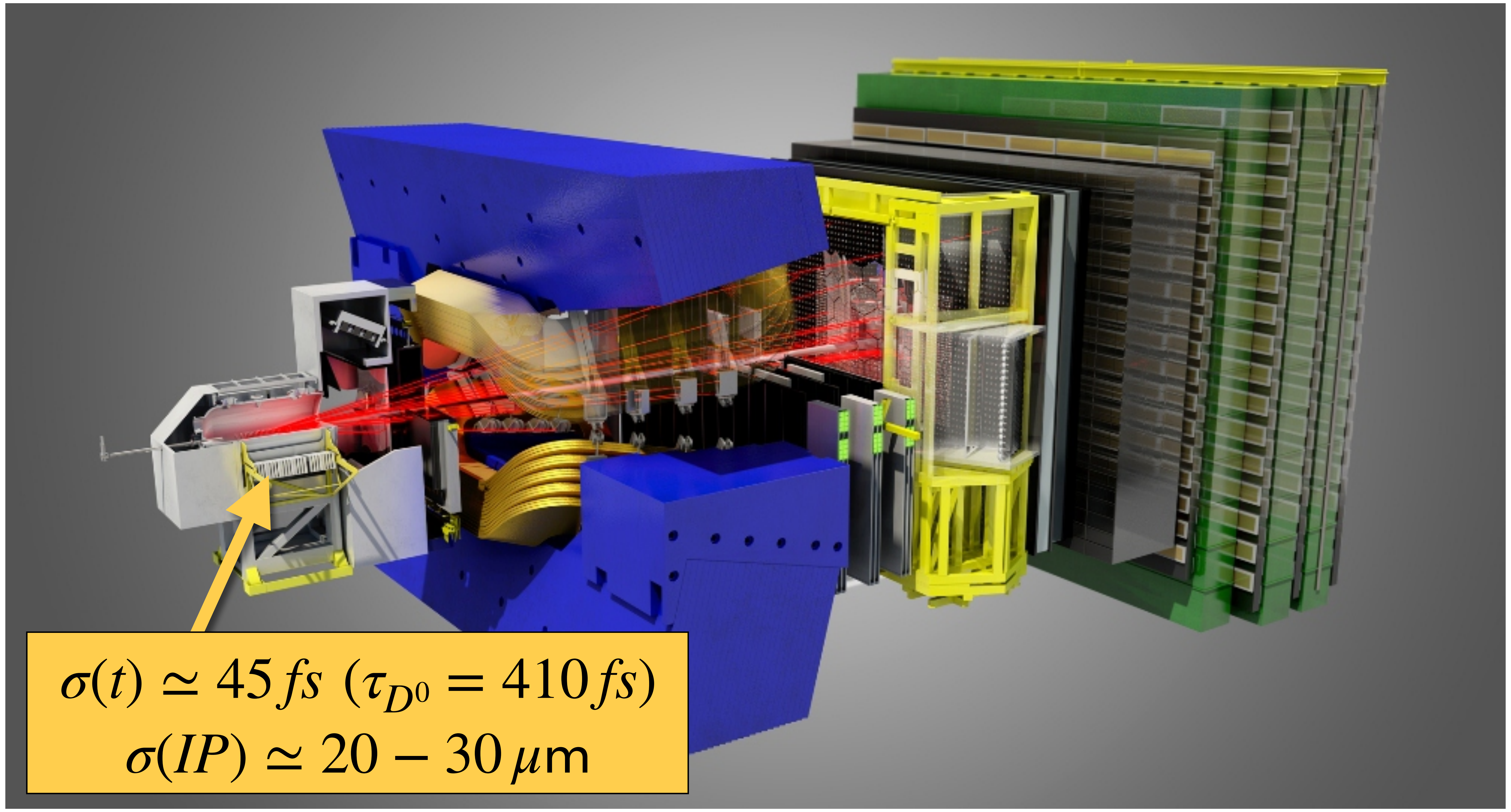
LHCb, una fabbrica di Charm



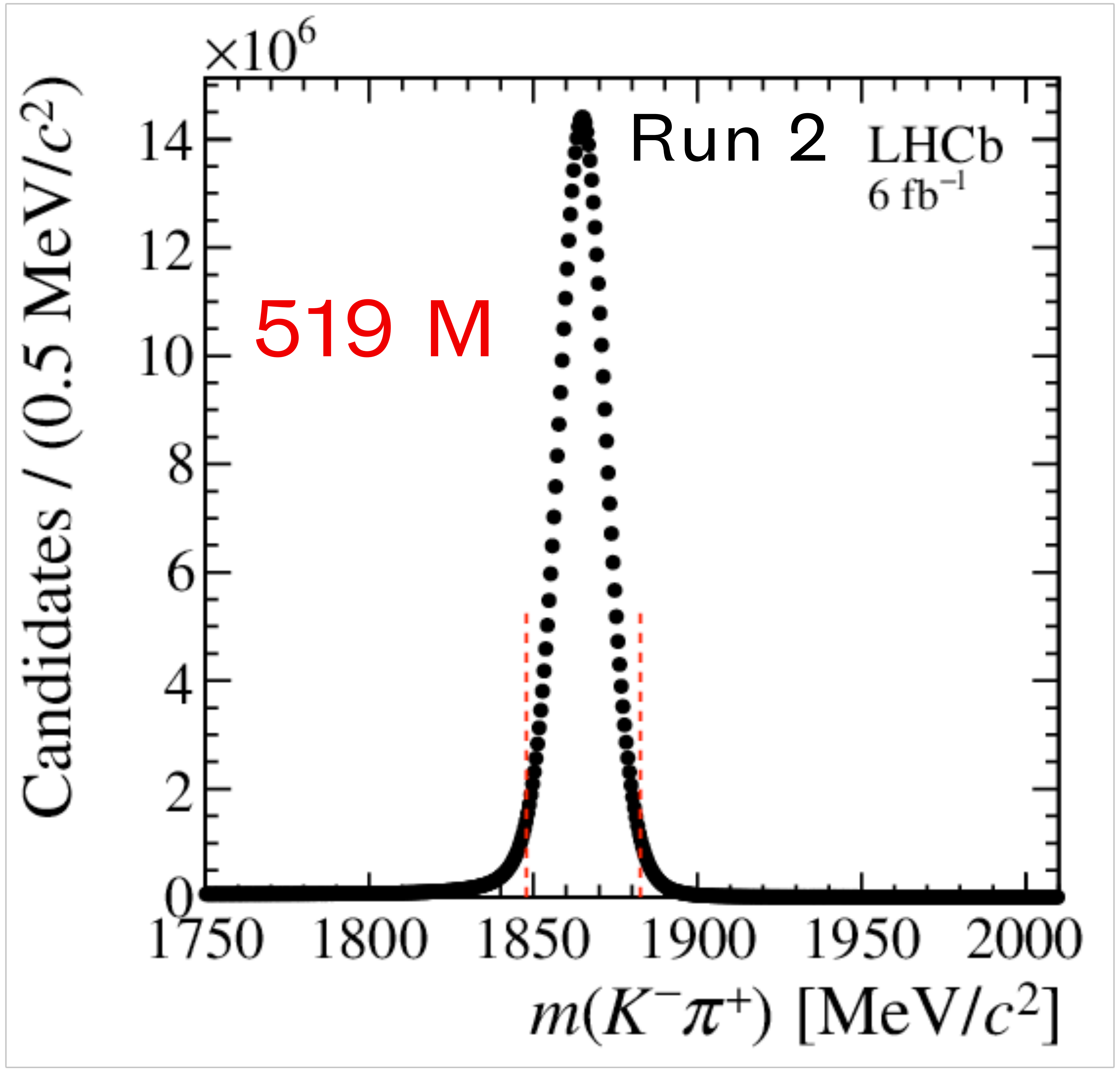
$\sigma(pp \to c\bar{c}) \simeq 20\,\sigma(pp \to c\bar{c}) \simeq 2.4\,\text{mb}$



LHCb, una fabbrica di Charm

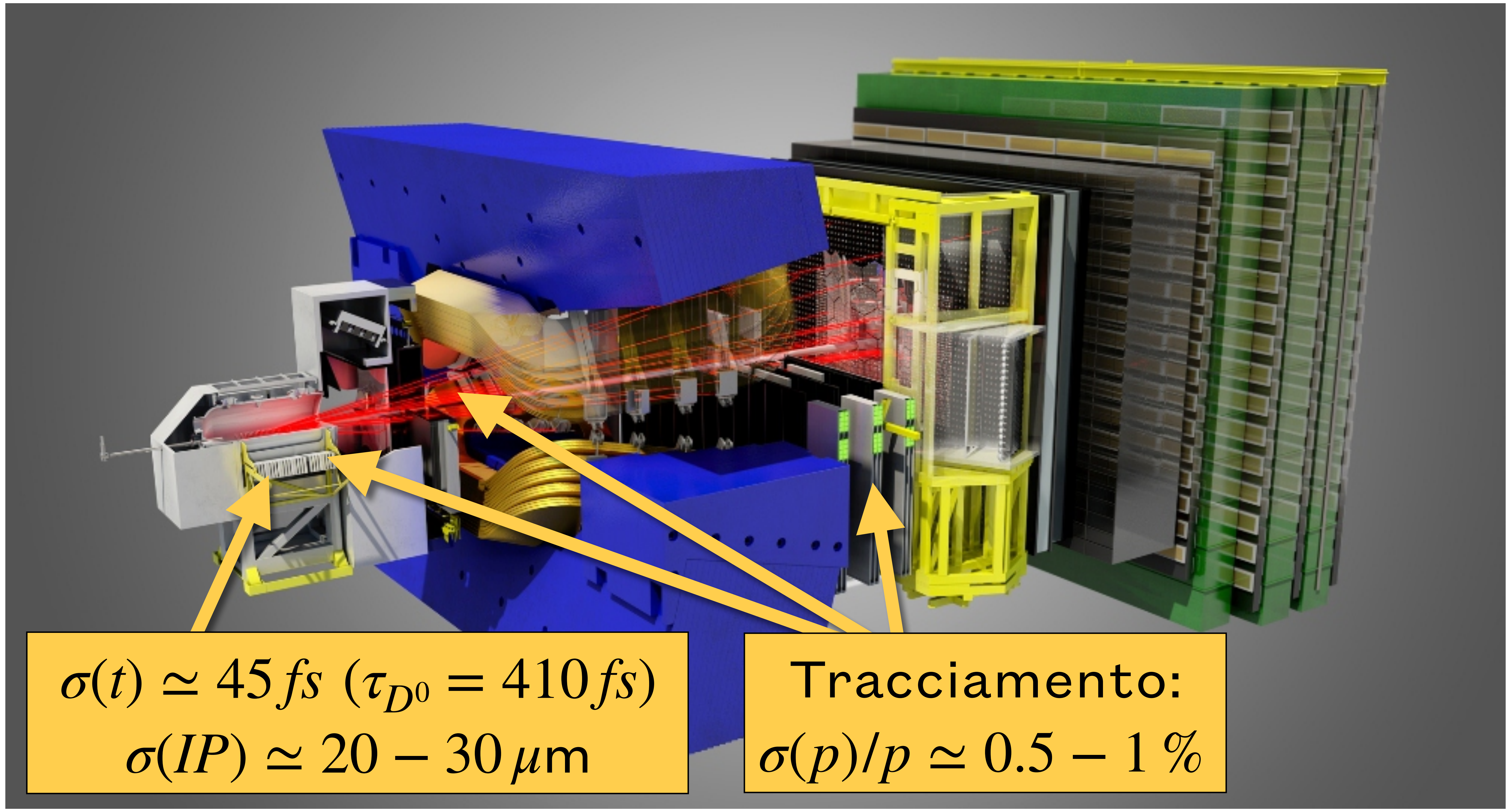


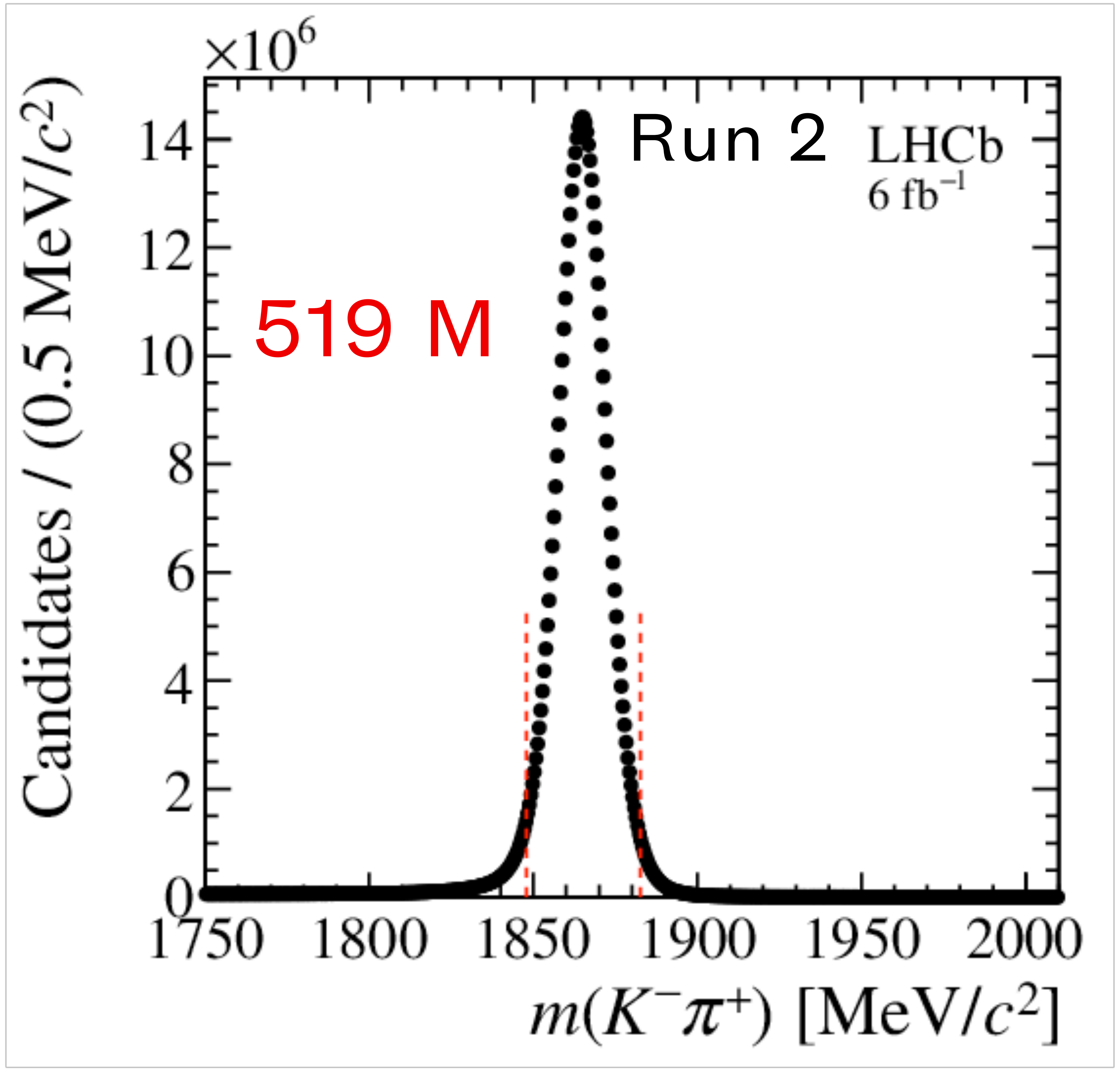
$$\sigma(t) \simeq 45\,fs\ (\tau_{D^0} = 410\,fs)$$
$$\sigma(IP) \simeq 20 - 30\,\mu\text{m}$$



$$\sigma(pp \to c\bar{c}) \simeq 20\,\sigma(pp \to c\bar{c}) \simeq 2.4\,\text{mb}$$

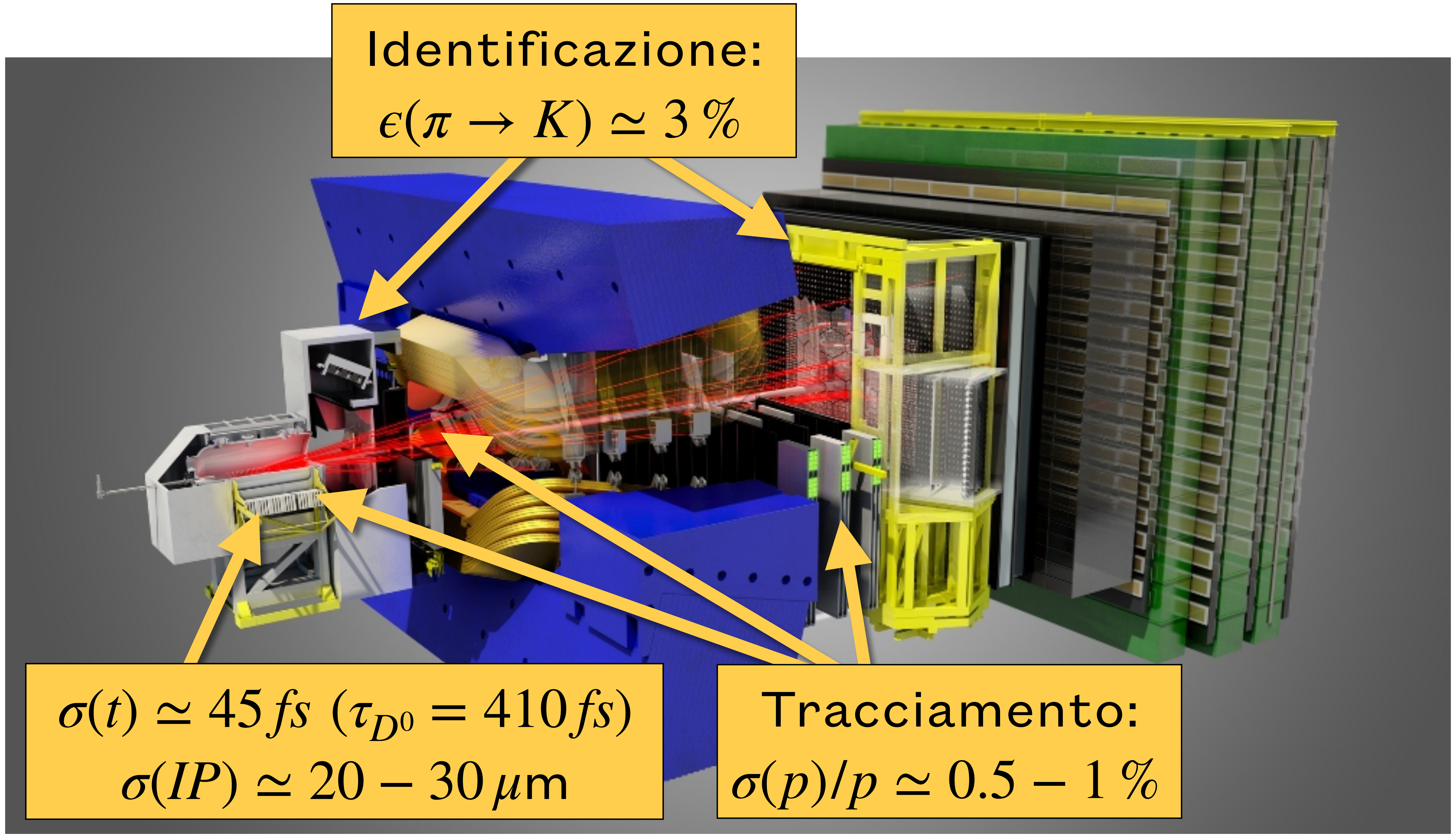
LHCb, una fabbrica di Charm



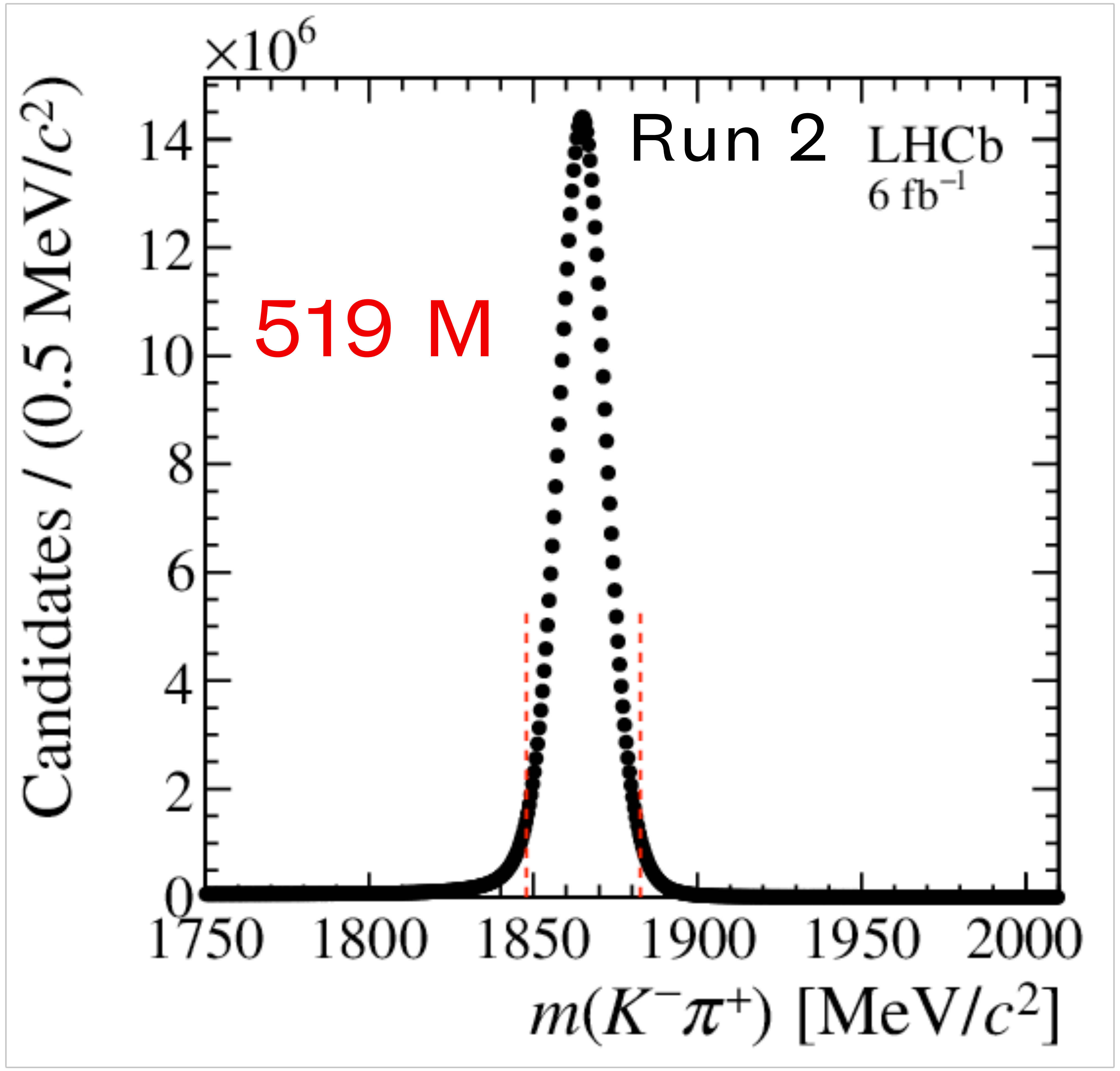


$\sigma(pp \to c\bar{c}) \simeq 20\,\sigma(pp \to c\bar{c}) \simeq 2.4$ mb

LHCb, una fabbrica di Charm

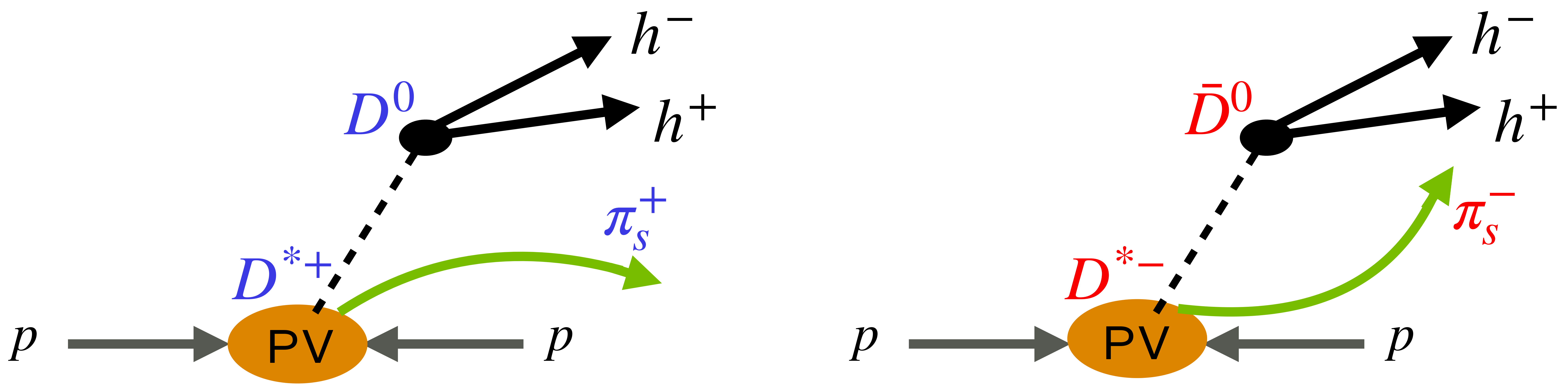


$\sigma(pp \to c\bar{c}) \simeq 20\,\sigma(pp \to c\bar{c}) \simeq 2.4$ mb



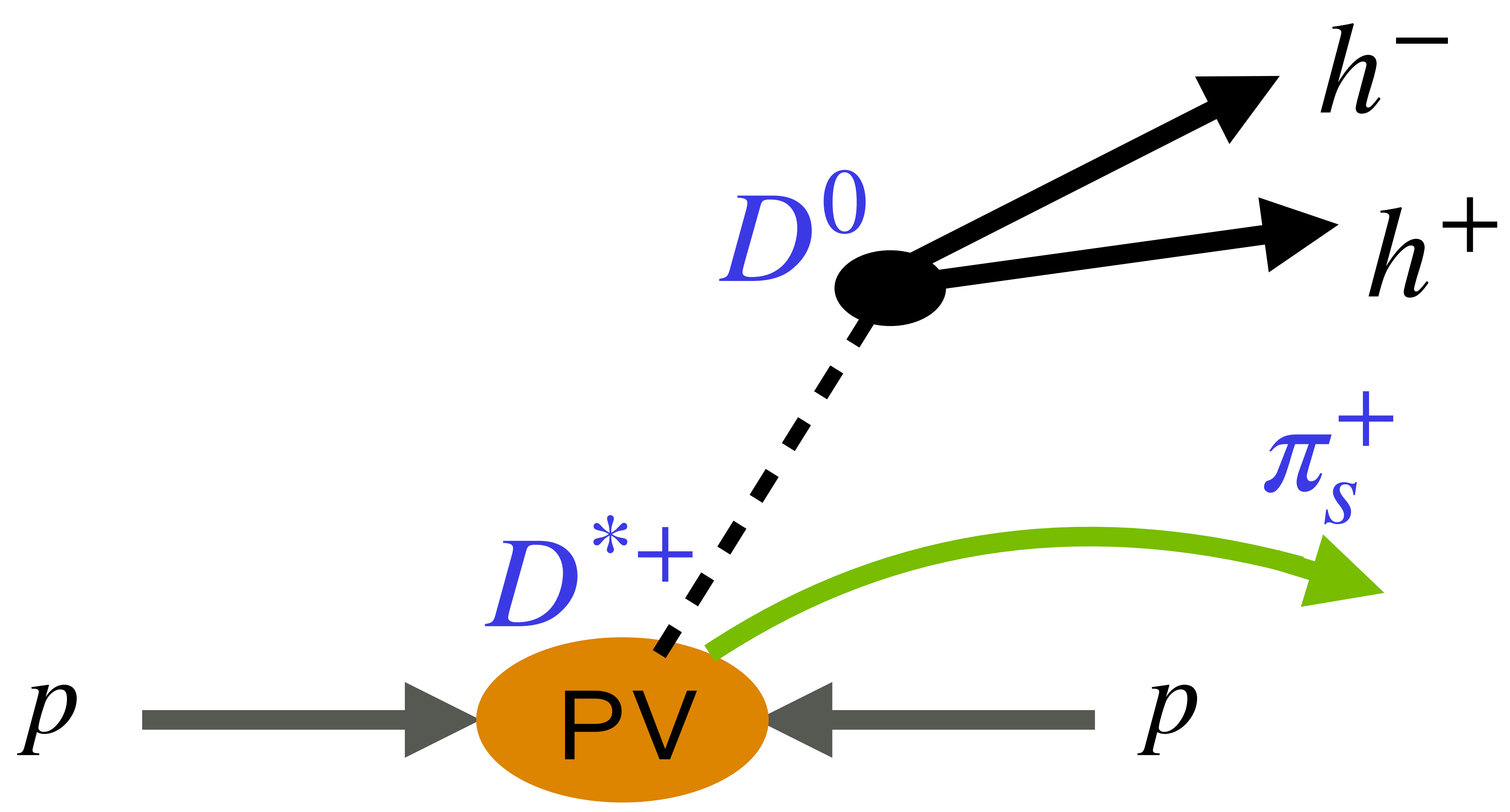
Asimmetrie sperimentali

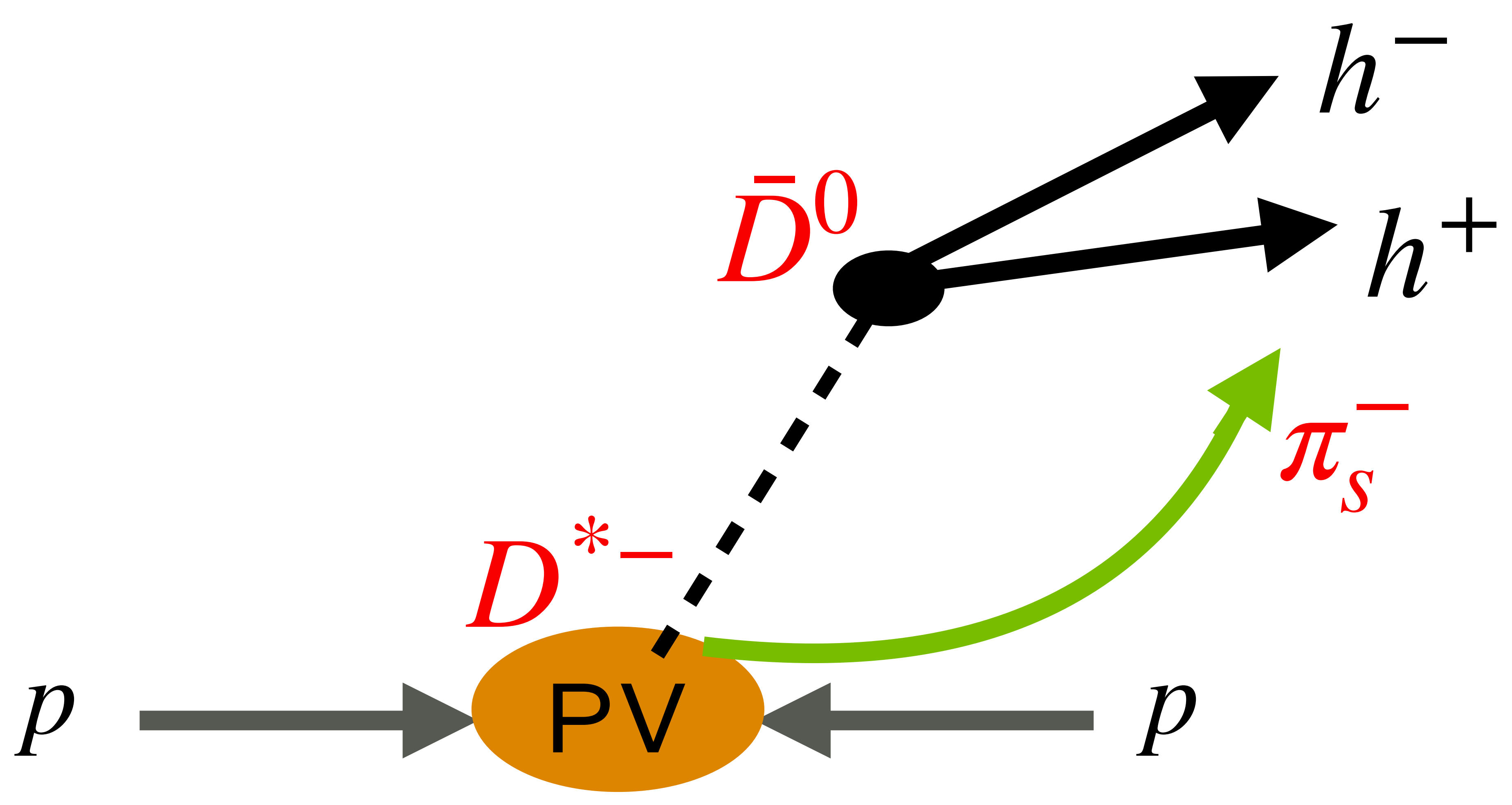
Per assegnare il sapore del mesone neutro si sfruttano i decadimenti del D^*



Asimmetrie sperimentali

Per assegnare il sapore del mesone neutro si sfruttano i decadimenti del D^*

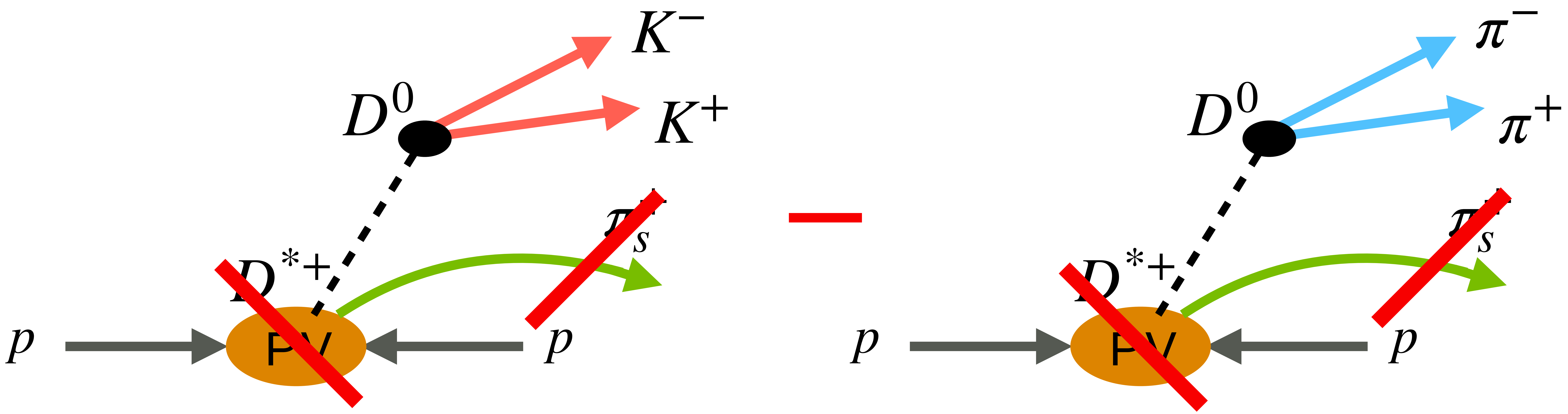




Questo processo introduce delle asimmetrie spurie $\sim 1\,\%$

$$A_{raw}(D^0 \to f) = \frac{N(D^0 \to f) - N(\bar{D}^0 \to f)}{N(D^0 \to f) + N(\bar{D}^0 \to f)} = A_{CP}(f) + A_P(D^*) + A_D(\pi_s)$$

L'osservabile d'oro: ΔA_{CP}



La differenza delle asimmetrie osservate cancella le asimmetrie spurie

$$\Delta A_{CP} = A_{raw}(K^-K^+) - A_{raw}(\pi^-\pi^+) = A_{CP}(K^-K^+) - A_{CP}(\pi^-\pi^+) = \Delta a^d_{CP} + \Delta Y \frac{\Delta\langle t\rangle}{\tau(D^0)}$$

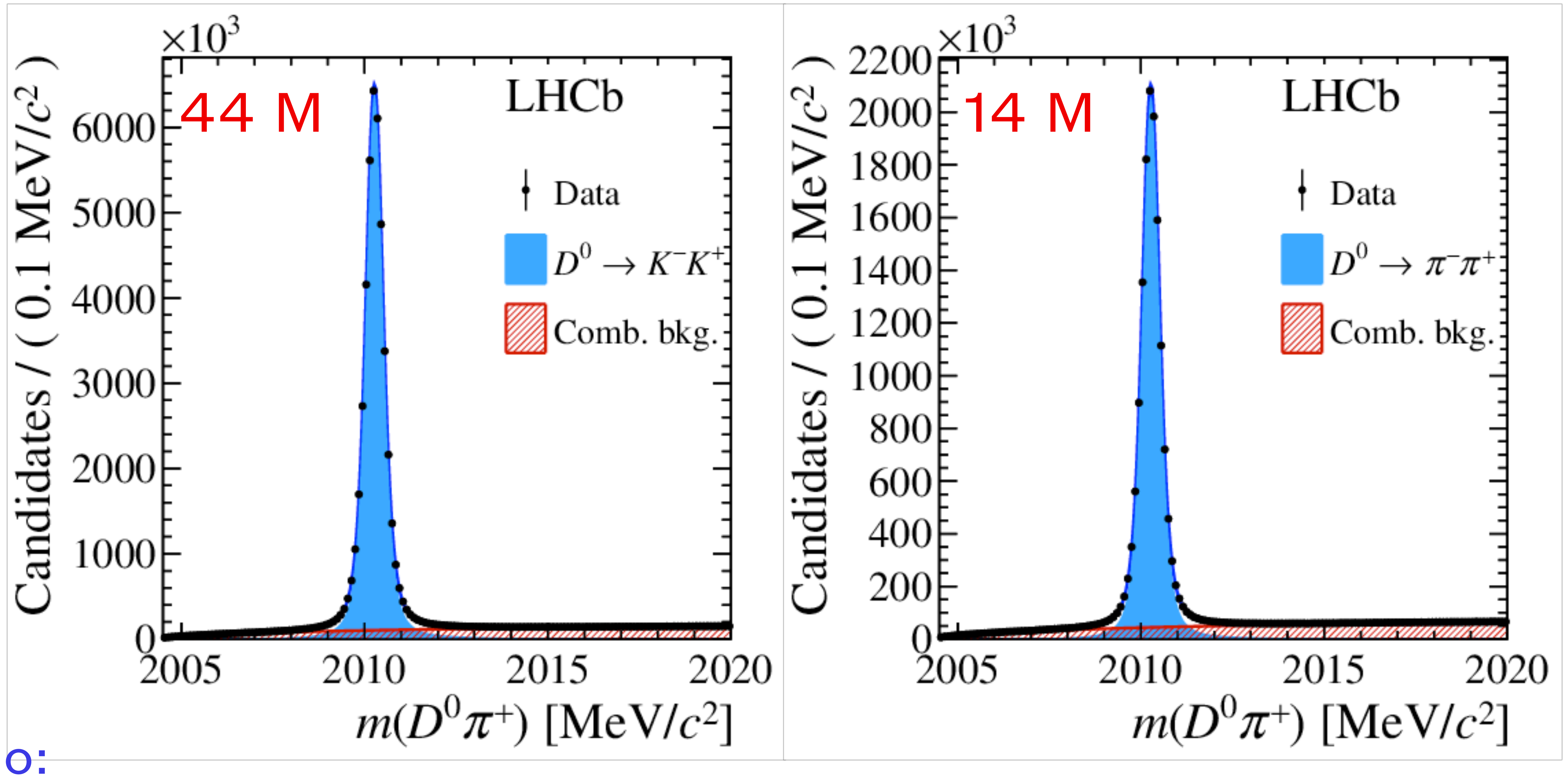
L'osservabile d'oro: ΔA_{CP}

[PRL 122.211803]

Con i dati del Run 2 ($5.9\,\text{fb}^{-1}$) a 13 TeV:

$$\Delta A_{CP}^{\pi-tagged} = (-18.2 \pm 3.2 \pm 0.9) \times 10^{-4}$$

$$\Delta A_{CP}^{\mu-tagged} = (-9 \pm 8 \pm 5) \times 10^{-4}$$



Combinando con il Run 1 ($3\,\text{fb}^{-1}$) a $7-8$ TeV:

$$\Delta A_{CP} = (-15.4 \pm 2.9) \times 10^{-4}$$

Sottraendo il contributo dipendente dal tempo:

$$\Delta a_{CP}^{d} = (-15.7 \pm 2.9) \times 10^{-4}$$

L'osservabile d'oro: ΔA_{CP}

[PRL 122.211803]

Con i dati del Run 2 ($5.9\,\mathrm{fb}^{-1}$) a 13 TeV:

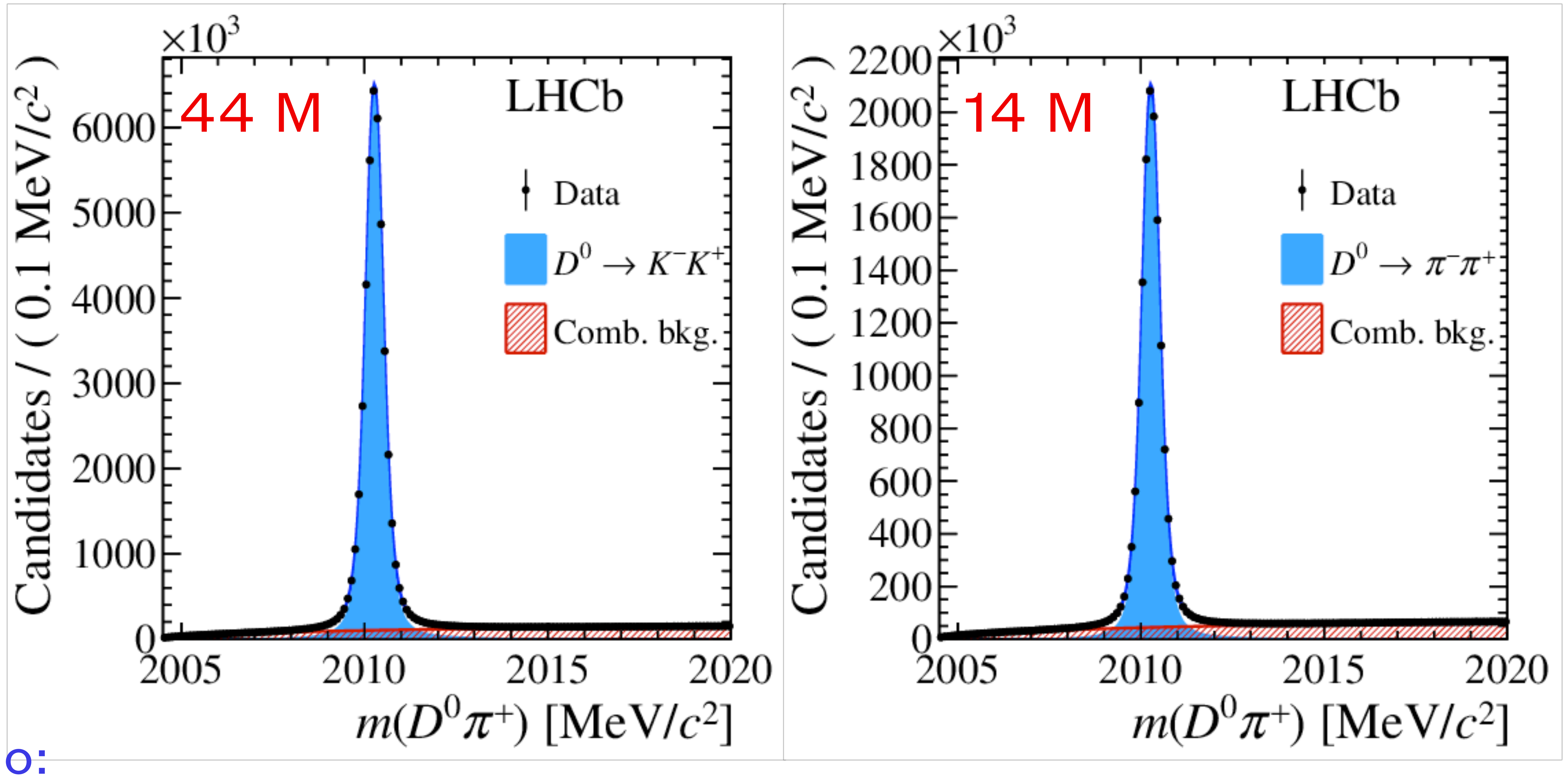
$$\Delta A_{CP}^{\pi-tagged} = (-18.2 \pm 3.2 \pm 0.9) \times 10^{-4}$$
$$\Delta A_{CP}^{\mu-tagged} = (-9 \pm 8 \pm 5) \times 10^{-4}$$

Combinando con il Run 1 ($3\,\mathrm{fb}^{-1}$) a $7-8$ TeV:

$$\boxed{\Delta A_{CP} = (-15.4 \pm 2.9) \times 10^{-4}}$$

Sottraendo il contributo dipendente dal tempo:

$$\boxed{\Delta a_{CP}^{d} = (-15.7 \pm 2.9) \times 10^{-4}}$$



Prima osservazione della violazione di CP nel settore del Charm nel 2019!

Violazione di CP dipendente dal tempo: ΔY

$$A_{raw}(f,t) = \frac{N(D^0 \to f,t) - N(\bar{D}^0 \to f,t)}{N(D^0 \to f,t) + N(\bar{D}^0 \to f,t)} \approx A_0 + \boxed{\Delta Y}\frac{t}{\tau_{D^0}}$$

Contiene asimmetrie spurie

Violazione di CP nel tempo

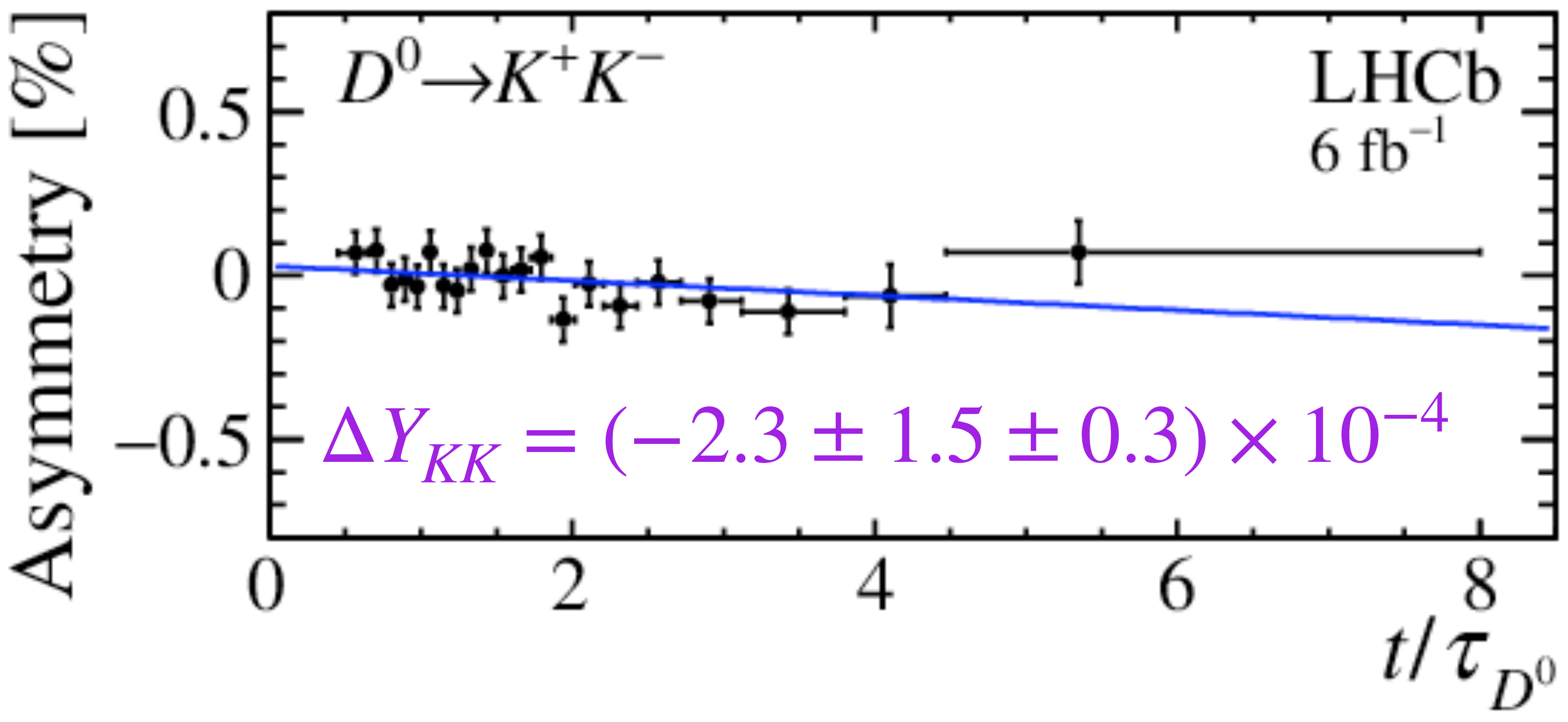
Violazione di CP dipendente dal tempo: ΔY

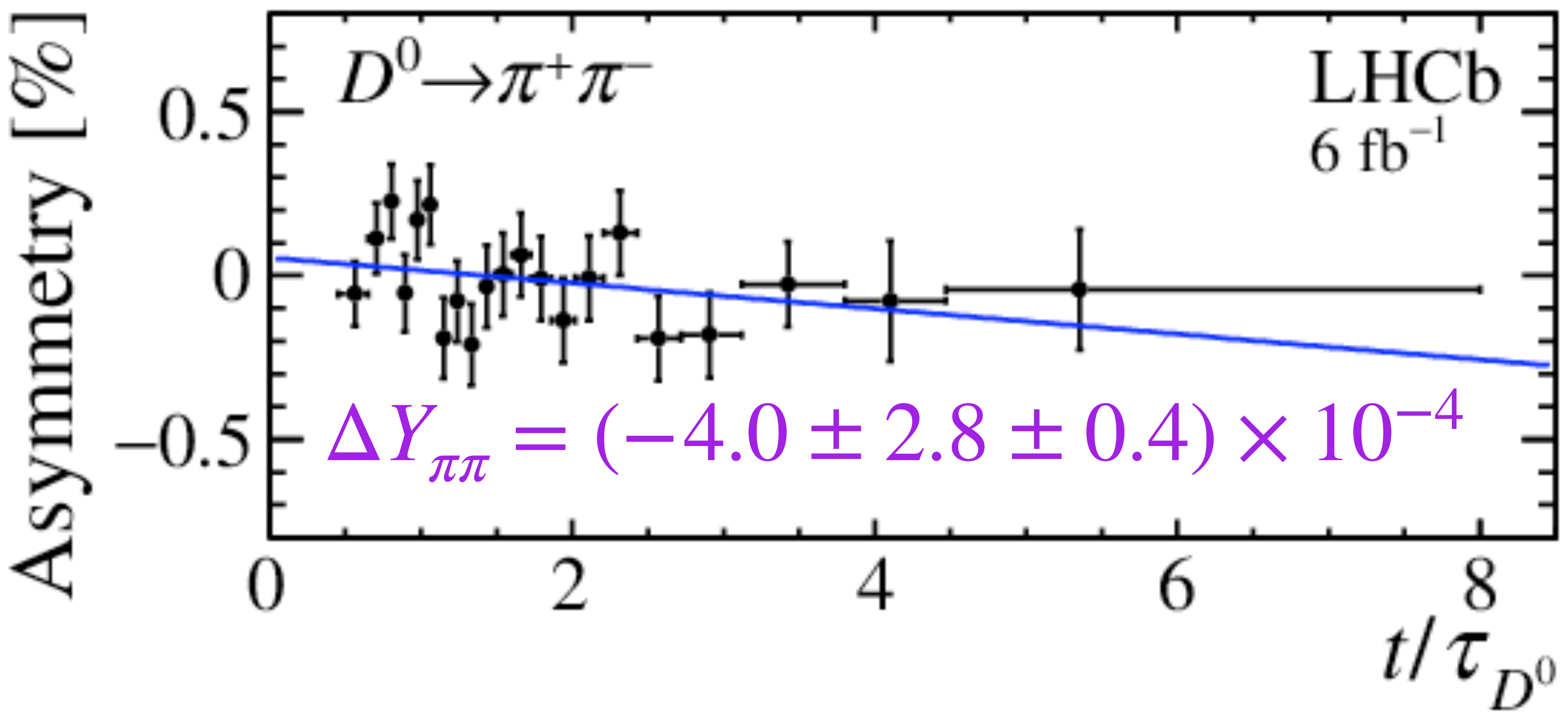
$$A_{raw}(f,t) = \frac{N(D^0 \to f,t) - N(\bar{D}^0 \to f,t)}{N(D^0 \to f,t) + N(\bar{D}^0 \to f,t)} \approx A_0 + \boxed{\Delta Y}\frac{t}{\tau_{D^0}}$$

Contiene asimmetrie spurie

Violazione di CP nel tempo

Con i dati del Run 2 ($5.9\,\mathrm{fb}^{-1}$) a $13\,\mathrm{TeV}$: [PRD 104.072010]





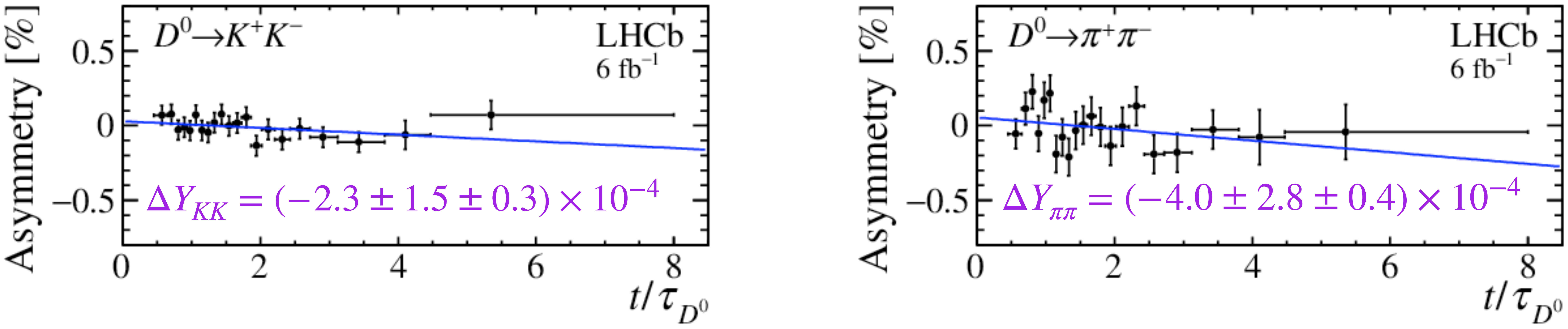
Violazione di CP dipendente dal tempo: ΔY

$$A_{raw}(f,t) = \frac{N(D^0 \to f,t) - N(\bar{D}^0 \to f,t)}{N(D^0 \to f,t) + N(\bar{D}^0 \to f,t)} \approx A_0 + \boxed{\Delta Y}\frac{t}{\tau_{D^0}}$$

Contiene asimmetrie spurie

Violazione di CP nel tempo

Con i dati del Run 2 ($5.9\,\text{fb}^{-1}$) a $13\,\text{TeV}$: [PRD 104.072010]



Ignorando possibili differenze fra K^-K^+ e $\pi^-\pi^+$ e combinando con il Run 1 ($3\,\text{fb}^{-1}$) a $7-8\,\text{TeV}$:

$$\boxed{\Delta Y = (-1.0 \pm 1.1 \pm 0.3) \times 10^{-4}}$$

Misura più precisa mai eseguita nel settore del Charm! (2021)

Violazione di CP nel decadimento: $A_{CP}(K^-K^+)$

Due metodi per cancellare le asimmetrie spurie usando decadimenti Cabibbo favoriti (no CPV)

Metodo 1: $$A_{CP}(D^0 \to K^-K^+) = +A(D^{*+} \to (D^0 \to K^-K^+)\,\pi^+_{soft}) - A(D^{*+} \to (D^0 \to K^-\pi^+)\,\pi^+_{soft})$$
$$+A(D^+ \to K^-\pi^+\,\pi^+) - \left[A(D^+ \to \overline{K}^0\,\pi^+) - A(\overline{K}^0)\right]$$

Metodo 2: $$A_{CP}(D^0 \to K^-K^+) = +A(D^{*+} \to (D^0 \to K^-K^+)\,\pi^+_{soft}) - A(D^{*+} \to (D^0 \to K^-\pi^+)\,\pi^+_{soft})$$
$$+A(D_s^+ \to \phi\pi^+) - \left[A(D_s^+ \to \overline{K}^0\,K^+) - A(\overline{K}^0)\right]$$

Le cinematiche e le selezioni di particelle con ugual colore sono equalizzate per una cancellazione precisa

Violazione di CP nel decadimento: $A_{CP}(K^-K^+)$

[arXiv:2209.03179 sottomesso a PRL]

Con i dati del Run 2 ($5.9\,\mathrm{fb}^{-1}$) a $13\,\mathrm{TeV}$:

Metodo 1: $A_{CP}(K^-K^+) = (13.6 \pm 8.8 \pm 1.6) \times 10^{-4}$

Metodo 2: $A_{CP}(K^-K^+) = (2.8 \pm 6.7 \pm 2.0) \times 10^{-4}$

Combinando i due metodi:

$$A_{CP}(K^-K^+) = (6.8 \pm 5.4 \pm 1.6) \times 10^{-4}$$

Violazione di CP nel decadimento: $A_{CP}(K^-K^+)$

[arXiv:2209.03179
sottomesso a PRL]

Con i dati del Run 2 ($5.9\,\mathrm{fb}^{-1}$) a $13\,\mathrm{TeV}$:

Metodo 1: $A_{CP}(K^-K^+) = (13.6 \pm 8.8 \pm 1.6) \times 10^{-4}$

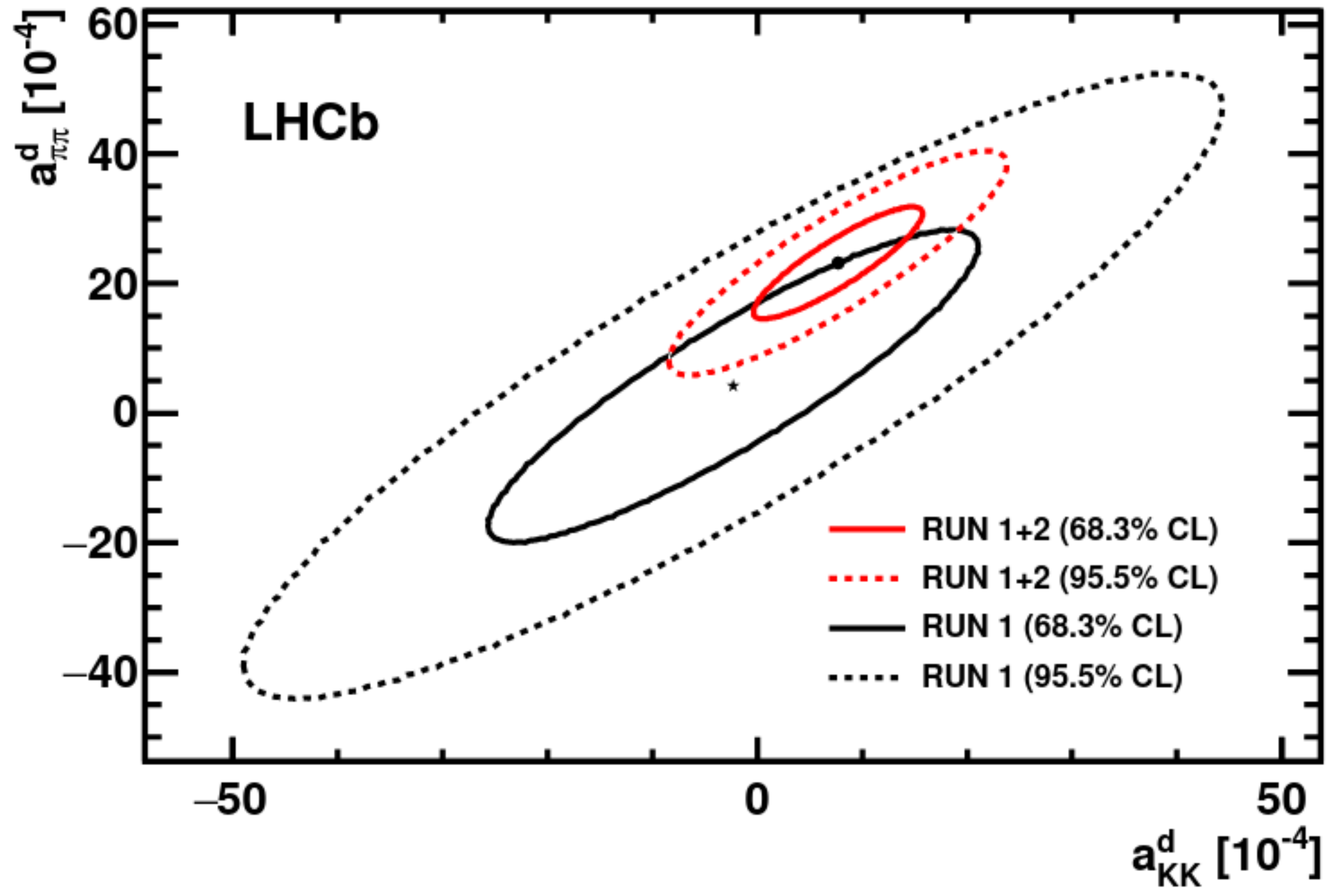
Metodo 2: $A_{CP}(K^-K^+) = (2.8 \pm 6.7 \pm 2.0) \times 10^{-4}$

Combinando i due metodi:

$$A_{CP}(K^-K^+) = (6.8 \pm 5.4 \pm 1.6) \times 10^{-4}$$

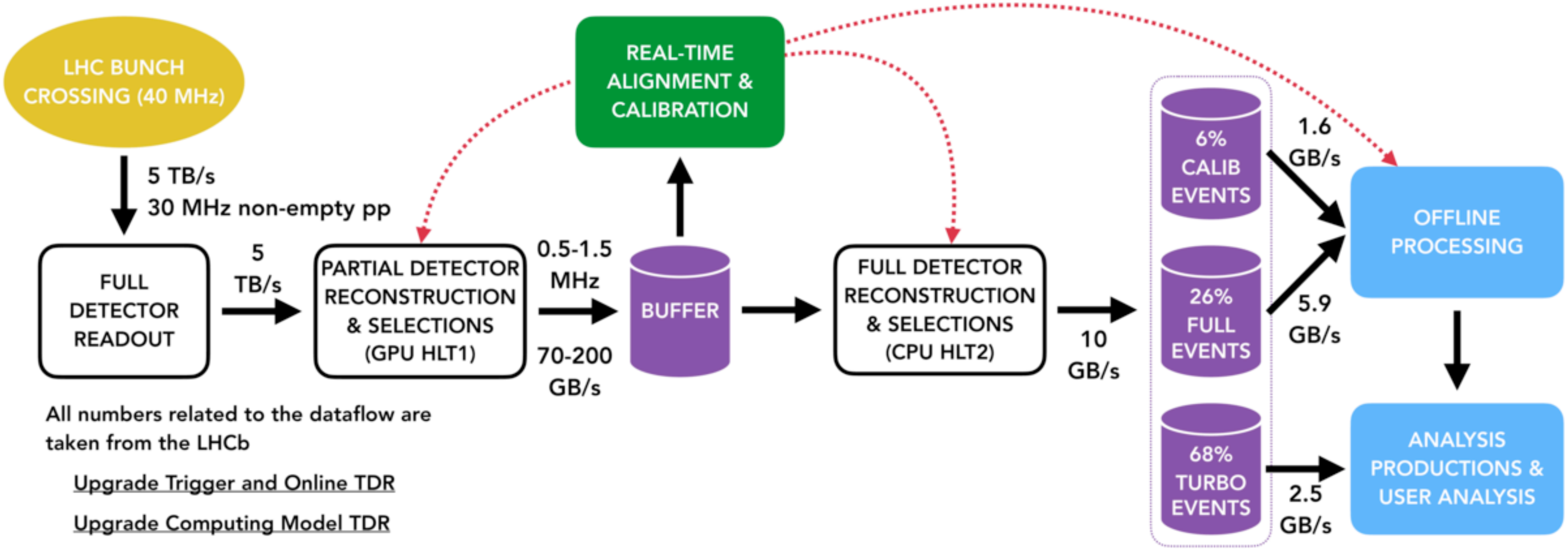
Combinando con il Run 1, ΔA_{CP} e ΔY:

$$\boxed{a^d_{KK} = (7.7 \pm 5.7) \times 10^{-4} \qquad a^d_{\pi\pi} = (23.6 \pm 6.1) \times 10^{-4}}$$



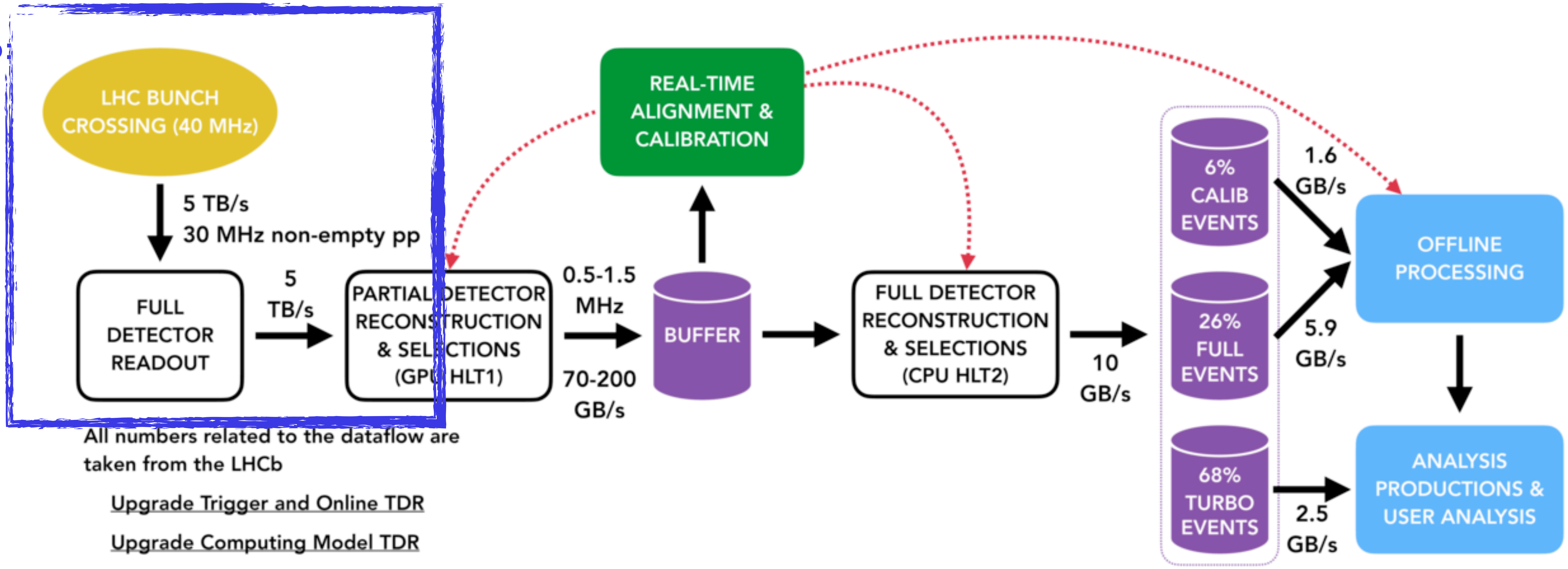
Prima evidenza di violazione di CP in un singolo canale di decadimento a $3.8\,\sigma$! (2022)

Potenziale per l'Upgrade di LHCb



Potenziale per l'Upgrade di LHCb

Solo informazioni di tracciamento: minori asimmetrie



All numbers related to the dataflow are taken from the LHCb

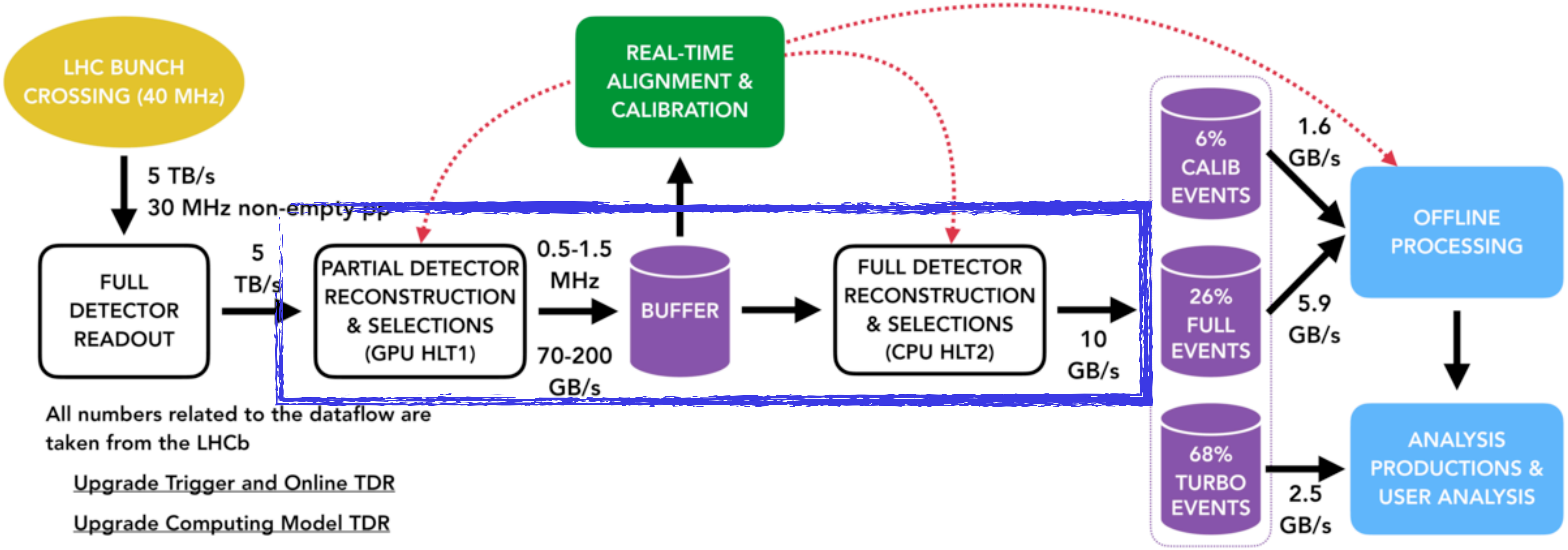
Upgrade Trigger and Online TDR

Upgrade Computing Model TDR

Potenziale per l'Upgrade di LHCb

Solo informazioni di tracciamento:
minori asimmetrie

Selezioni in tempo reale divise su
due livelli software:

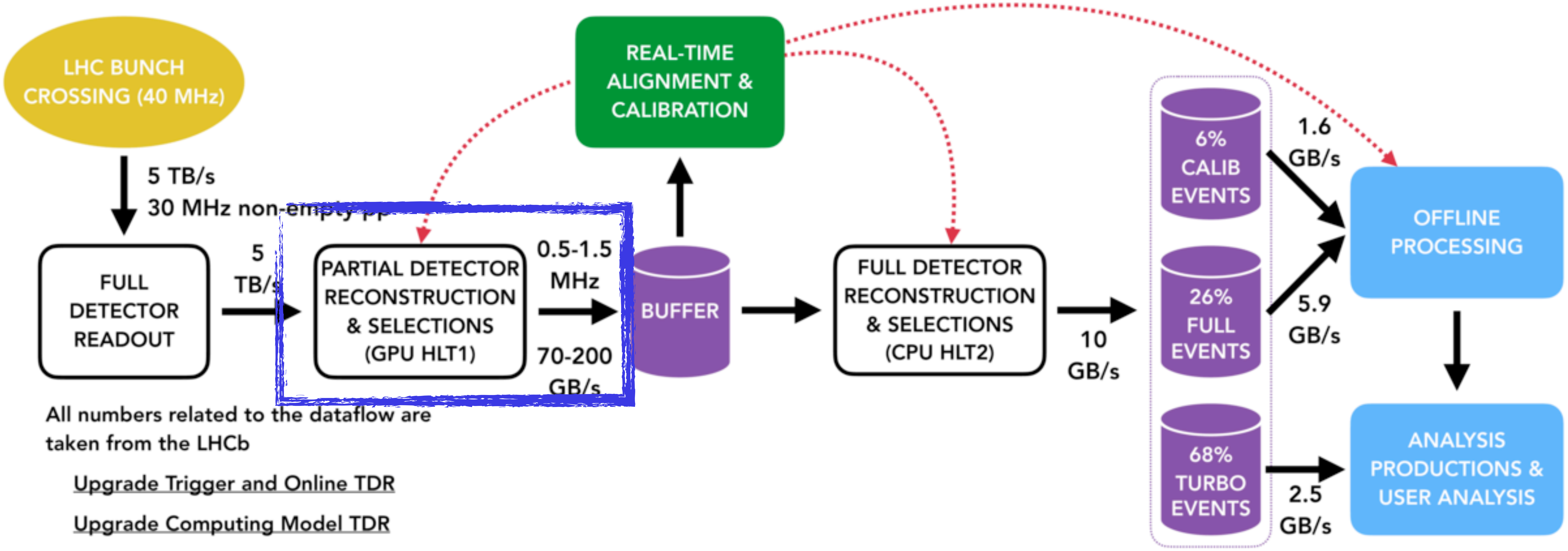


Potenziale per l'Upgrade di LHCb

Solo informazioni di tracciamento: minori asimmetrie

Selezioni in tempo reale divise su due livelli software:

Hlt1: ricostruzione e selezione a 30 MHz su GPU



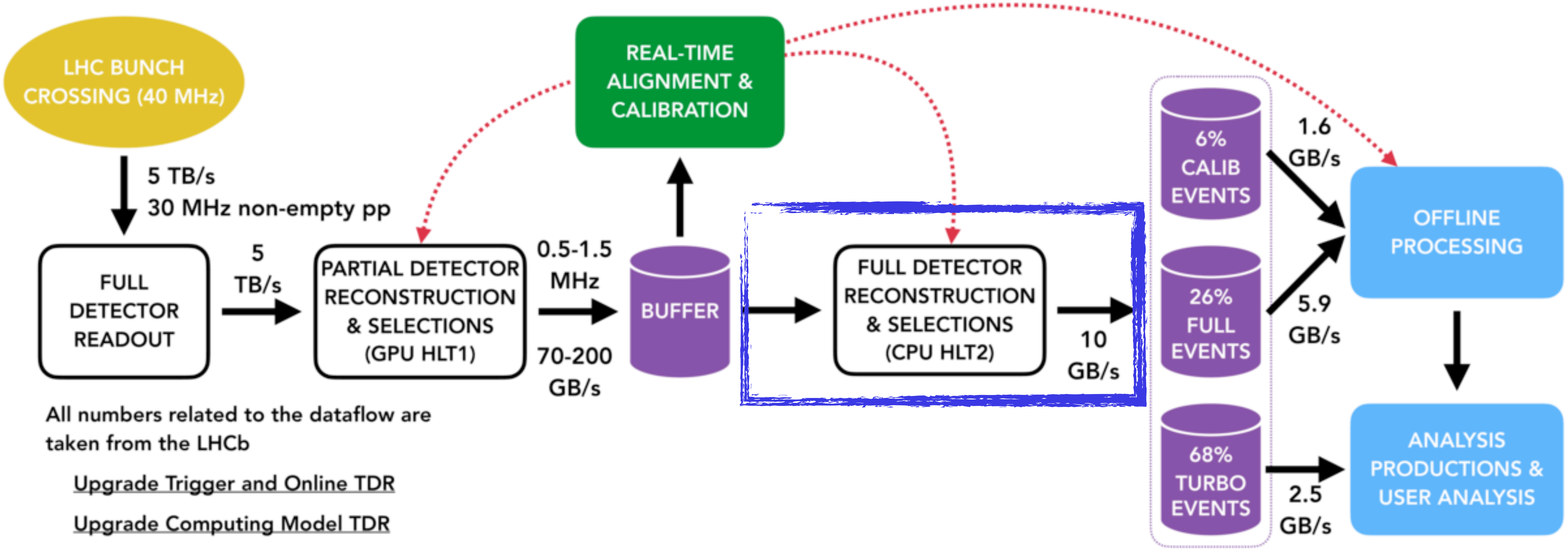
Potenziale per l'Upgrade di LHCb

Solo informazioni di tracciamento: minori asimmetrie

Selezioni in tempo reale divise su due livelli software:

Hlt1: ricostruzione e selezione a 30 MHz su GPU

Hlt2: ricostruzione finale su CPU



Potenziale per l'Upgrade di LHCb

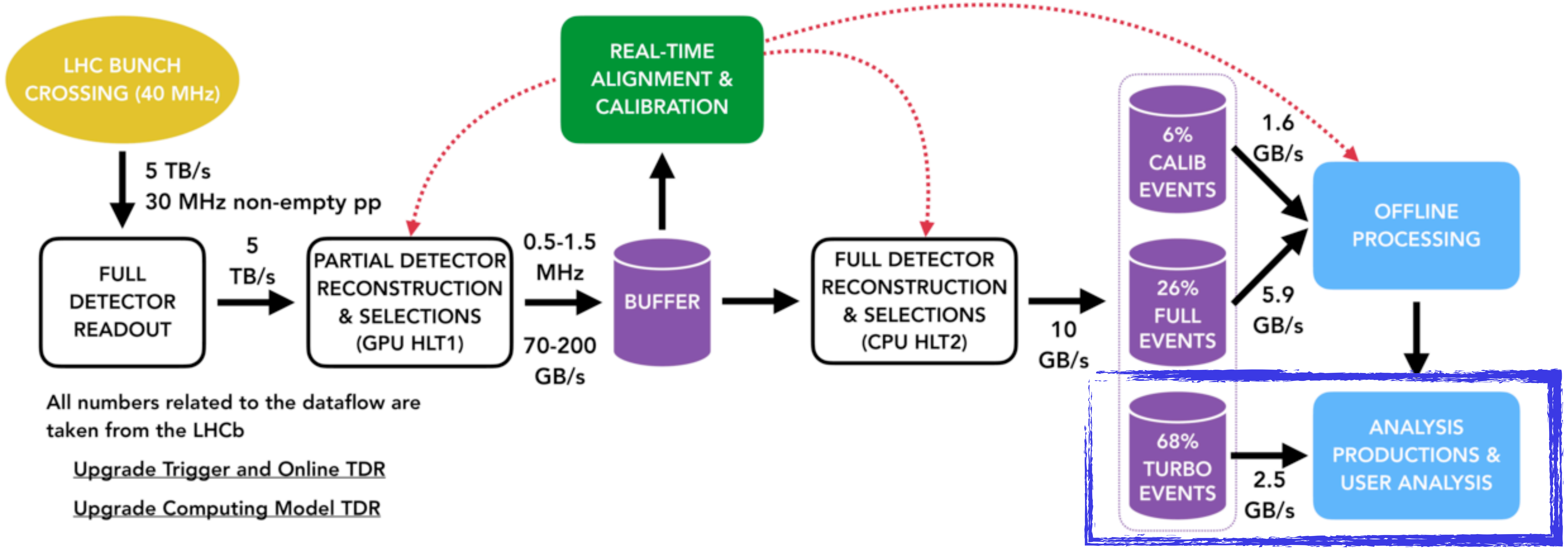
Solo informazioni di tracciamento: minori asimmetrie

Selezioni in tempo reale divise su due livelli software:

Hlt1: ricostruzione e selezione a 30 MHz su GPU

Hlt2: ricostruzione finale su CPU

Nel caso del Charm solo le quantità relative al decadimento di interesse vengono salvate su disco

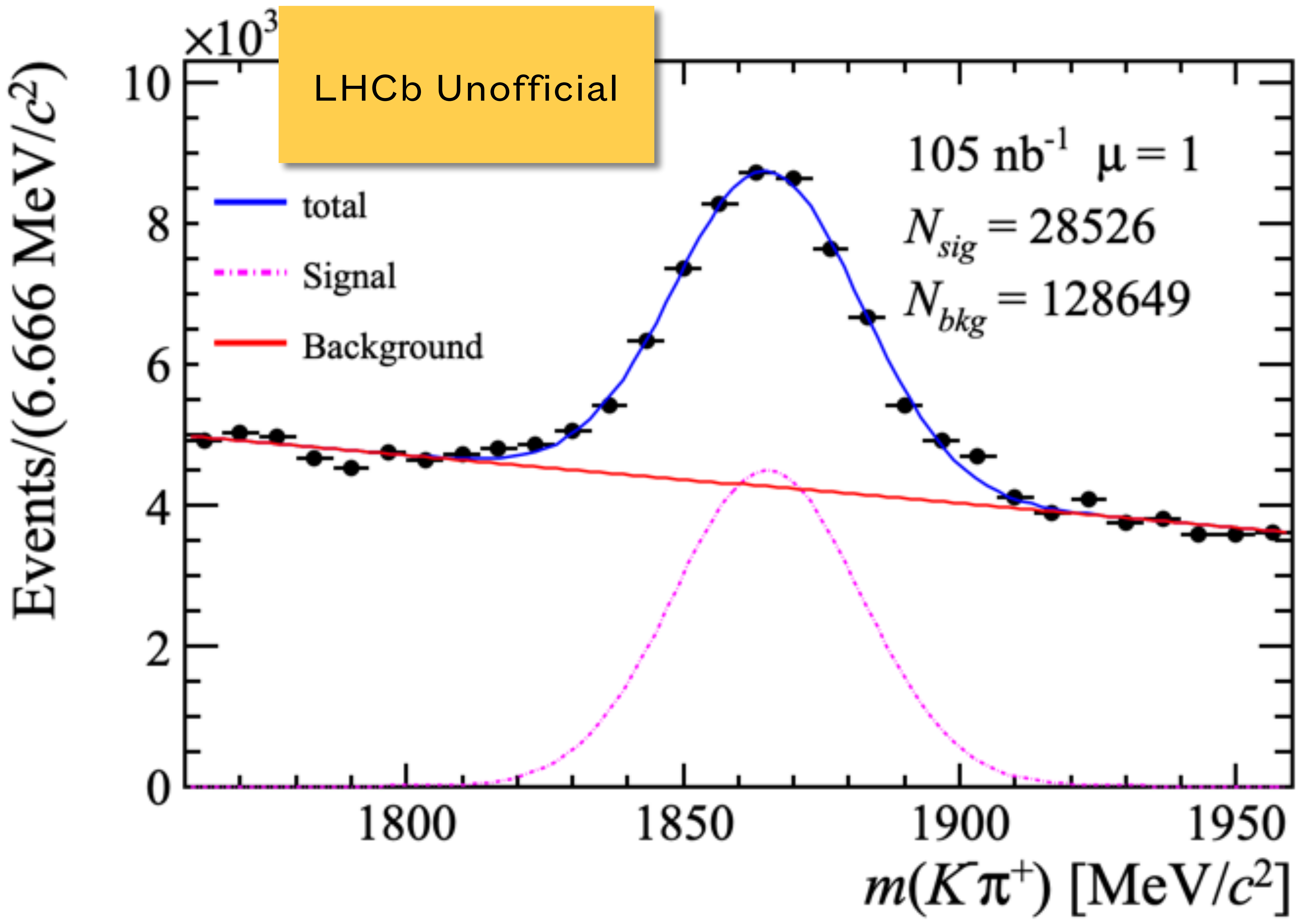


Potenziale per l'Upgrade di LHCb

Nel Run 3 LHCb esegue una selezione in tempo reale che gira a 30 MHz su GPU (Hlt1)

Linee esclusive selezionano vertici secondari compatibili con $D^0 \to hh'$

2022 anno di collaudo per LHCb: primi picchi in massa con ricostruzione Hlt1



Potenziale per l'Upgrade di LHCb

Nel Run 3 LHCb esegue una selezione in tempo reale che gira a $30\,\mathrm{MHz}$ su GPU (Hlt1)

Linee esclusive selezionano vertici secondari compatibili con $D^0 \to hh'$

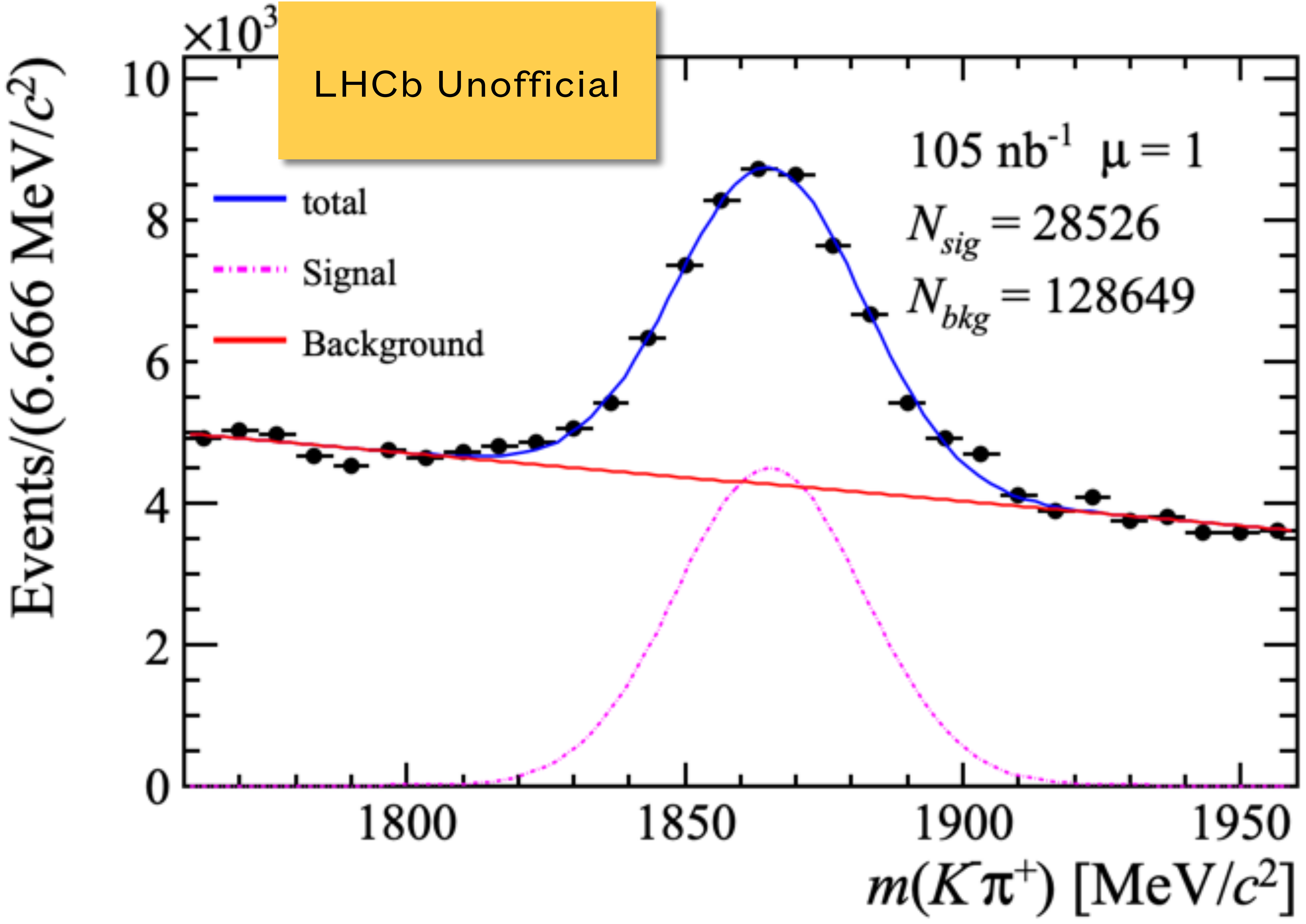
2022 anno di collaudo per LHCb: primi picchi in massa con ricostruzione Hlt1

Molti vantaggi nel ricostruire tutti i decadimenti senza selezioni calorimetriche:

Aumento di efficienza

Minori asimmetrie spurie

Maggiore controllo delle sistematiche



Potenziale per l'Upgrade di LHCb

Nel Run 3 LHCb esegue una selezione in tempo reale che gira a 30 MHz su GPU (Hlt1)

Linee esclusive selezionano vertici secondari compatibili con $D^0 \to hh'$

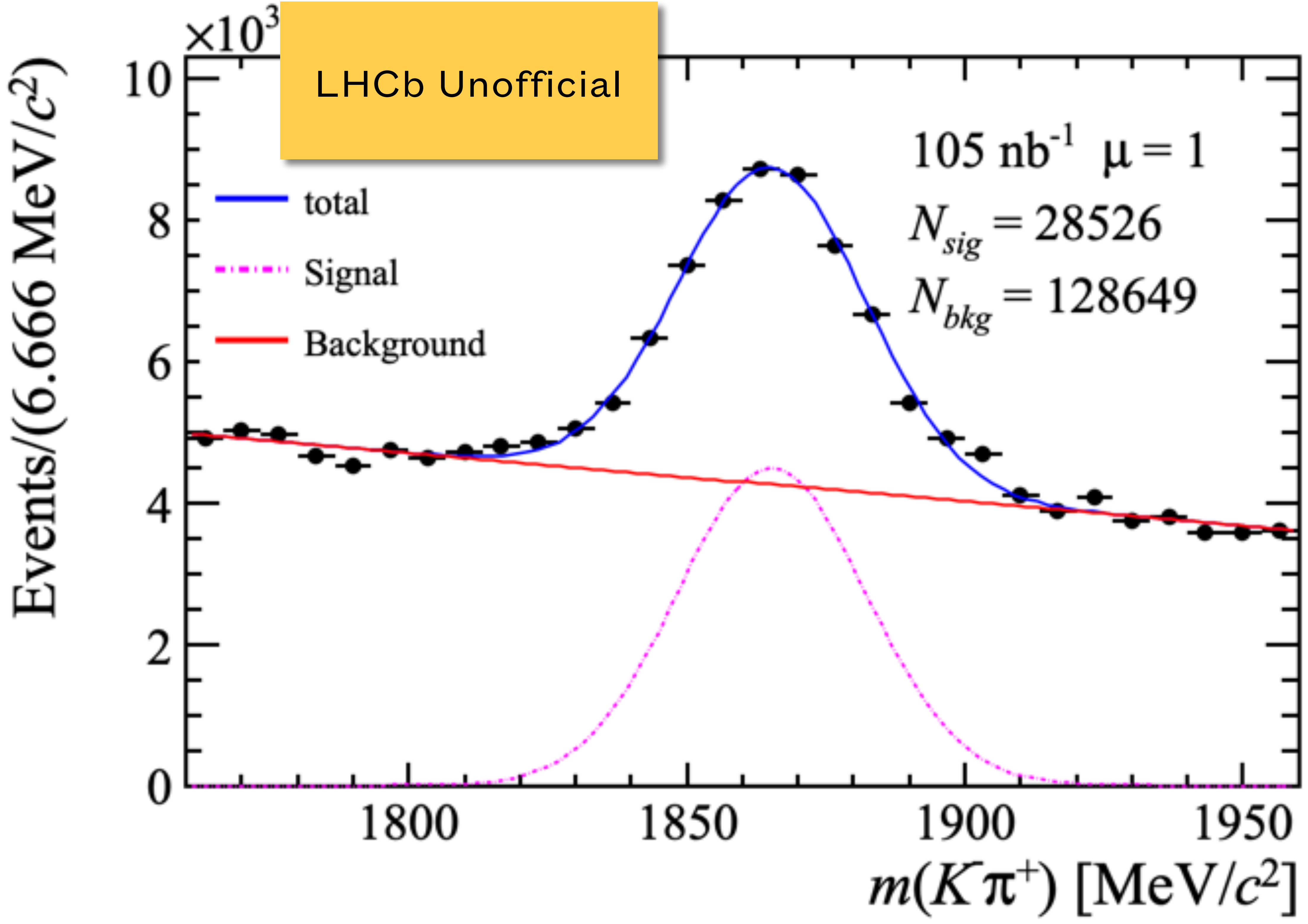
2022 anno di collaudo per LHCb: primi picchi in massa con ricostruzione Hlt1

Molti vantaggi nel ricostruire tutti i decadimenti senza selezioni calorimetriche:

Aumento di efficienza

Minori asimmetrie spurie

Maggiore controllo delle sistematiche



Il Run 3 e oltre permetteranno di esplorare con ancora maggior precisione la violazione di CP nel Charm

Back up

Violazione di CP dipendente dal tempo: ΔY

$$A_{raw}(f,t) = \frac{N(D^0 \to f,t) - N(\bar{D}^0 \to f,t)}{N(D^0 \to f,t) + N(\bar{D}^0 \to f,t)} \approx A_0 + \boxed{\Delta Y}\frac{t}{\tau_{D^0}}$$

Contiene asimmetrie spurie

Misurabile con fit lineare

Le asimmetrie spurie creano differenze fra le distribuzioni cinematiche di D^0 e $\bar{D}^0$

Un ripesamento cinematico elimina le asimmetrie spurie correlate con il tempo di decadimento