

Fisica del τ e ricerche nel settore oscuro con l'esperimento Belle II

Settore τ

- Test LFU nel decadimento del τ
- $\tau \rightarrow \mu\mu\mu$

Settore oscuro

- Scalare oscuro nella transizione $b \rightarrow s$ nel canale $B \rightarrow K S$
- $e^-e^+ \rightarrow \mu^-\mu^+X(\rightarrow \mu^-\mu^+)$

IFAE, 3 – 5 aprile 2024, Firenze

Laura Salutari – INFN Roma 3, per Belle II Italia
laura.salutari@roma3.infn.it



Belle II: esperimento e rivelatore

La *B-factory* a SuperKEKB

- Collisione di fasci asimmetrici $e^- (7\text{GeV}) e^+ (4\text{GeV})$
- Energia di collisione alla $\Upsilon(4S)$: $\sqrt{s} = 10.58\text{ GeV}$

Vantaggi

- Precisa conoscenza condizioni iniziali
- Eventi a bassa molteplicità
- Rivelatore ermetico
- Completa ricostruzione eventi con energia mancante
- Trigger specifici per segnali a bassa molteplicità

- Belle II @ SuperKEKB run 1 (2019 -2022), run 2 (feb 2024 -)
- Luminosità integrata nel run 1: **424 fb⁻¹**
- **Record Mondiale** di luminosità: $4.7 \times 10^{34}\text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

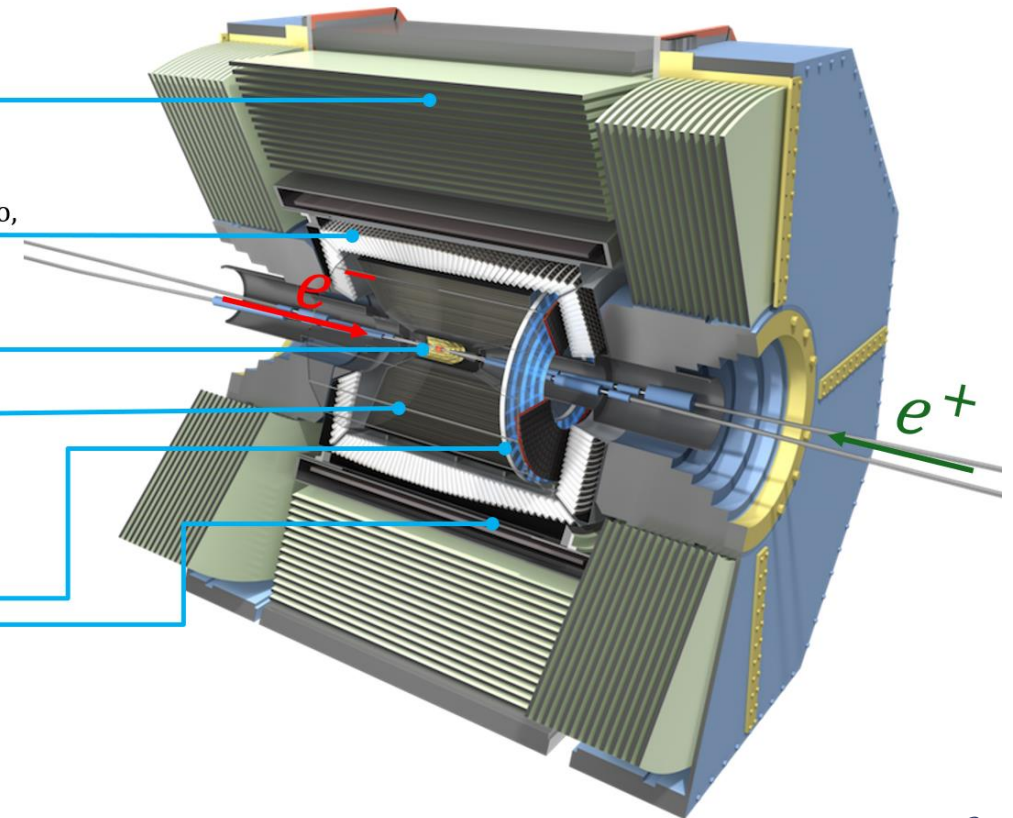
Rivelatore $K^0 e \mu$,
efficienza $\mu_{ID} > 90\%$

Calorimetro elettromagnetico,
 $\sigma(E)$: 4% – 1.6%

Rivelatore di vertice,
risoluzione $15\mu\text{m}$

Camer a deriva centrale:
risoluzione spaziale $100\mu\text{m}$,
risoluzione 5% su dE/dx ,
risoluzione 0.4% su p_T

Sistema di
identificazione di
particelle





Fisica del τ

Fisica del τ

- Elevata produzione di coppie $\tau\tau$
 - $\sigma(e^-e^+ \rightarrow b\bar{b}) \cong 1.1nb$
 - $\sigma(e^-e^+ \rightarrow \tau^-\tau^+) \cong 0.9nb$

Caratteristiche eventi:

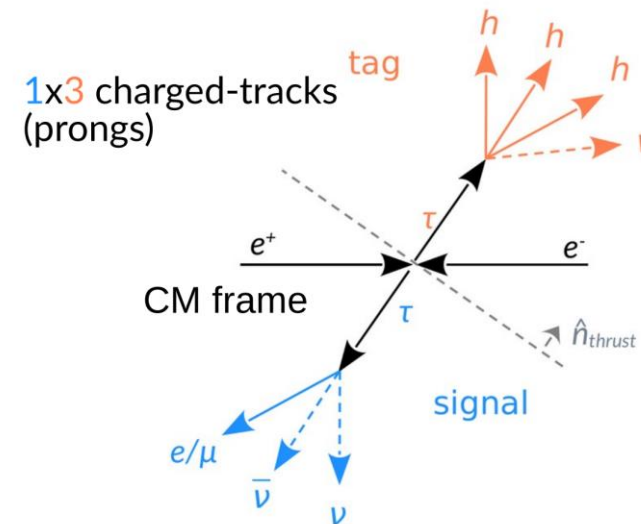
- $ee \rightarrow \tau\tau$ eventi \sim collineari nel centro di massa
- τ decade in neutrini \rightarrow energia mancante

Metodologia di studio:

- Direzione del $\tau \sim$ vettore Thrust (T)

$$T = \max_{\hat{n}_T} \left(\frac{\sum_i |p_i^* \cdot \hat{n}_T|}{\sum_i |p_i^*|} \right)$$

- Separazione evento in due emisferi tramite piano perpendicolare al Thrust



- Ricostruzione topologie di eventi «1x1» o «3x1»

Fisica del τ e LFU

- Universalità del sapore leptónico (LFU) \rightarrow simmetria accidentale del Modello Standard (SM)

- Test universalità $e - \mu$ tramite misura di

$$R_\mu = \frac{Br(\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau)}{Br(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)}$$

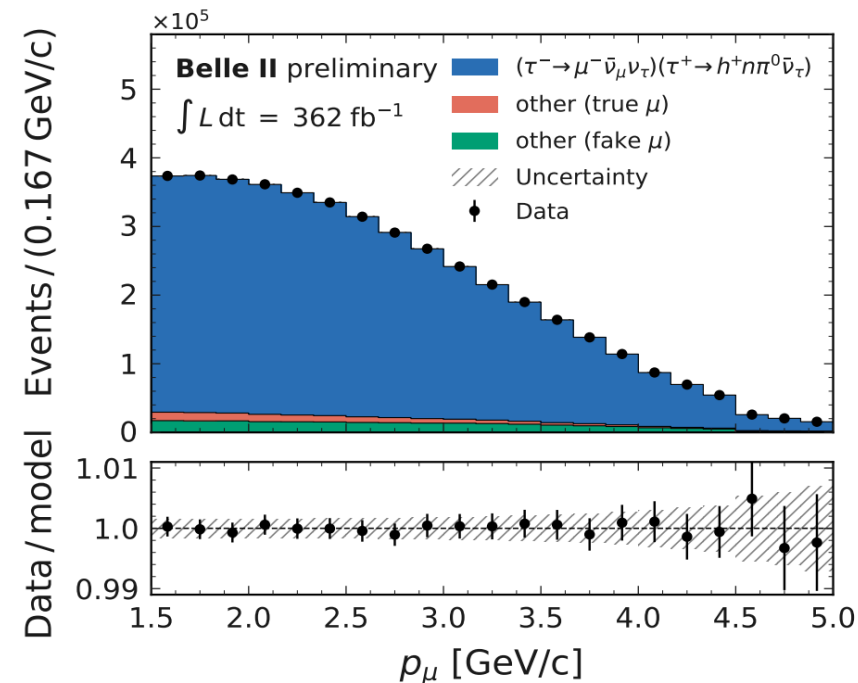
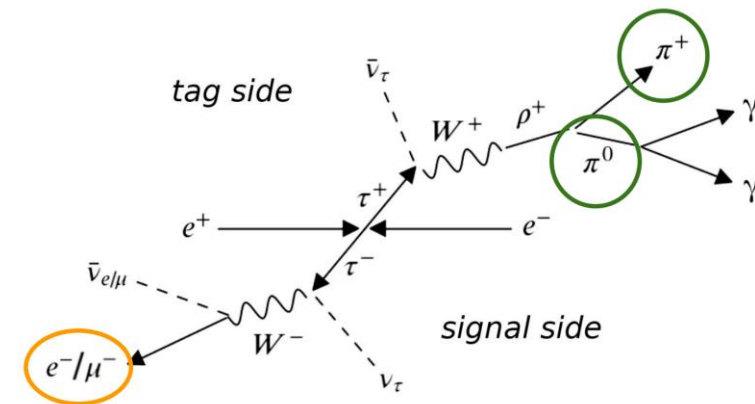
- $R_\mu^{SM} = 0.9726$

- Rapporto parametri di accoppiamento:

$$\left(\frac{g_\mu}{g_e}\right)_\tau = \sqrt{R_\mu \frac{f(m_e^2/m_\tau^2)}{f(m_\mu^2/m_\tau^2)}}$$

Analisi a Belle II con 362 fb^{-1} :

- Lato *segnale*: un e o un μ
- Lato *tag*: un **adrone carico** e almeno un π^0
- Fondi principali:
 - $e^- e^+ \rightarrow \tau^- \tau^+$
 - *Tag* malricostruito $\sim 2.3\%$
 - $\tau \rightarrow h\nu$ con π identificato come e ($\sim 1.3\%$) o μ ($\sim 5.2\%$)
 - $e^- e^+ \rightarrow e^- e^+ \tau^- \tau^+ \sim 0.2\%$
- Fondi soppressi con rete neurale
- **Purezza segnale 94%** con una **efficienza al 9.6%**
- Valore di R_μ estratto da **fit di massima verosimiglianza** basato sul template della distribuzione dell'**impulso del leptone lato segnale**



Fisica del τ e LFU

- Universalità del sapore leptonic (LFU) \rightarrow simmetria accidentale del Modello Standard (SM)

- Test universalità $e - \mu$ tramite misura di

$$R_\mu = \frac{Br(\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau)}{Br(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)}$$

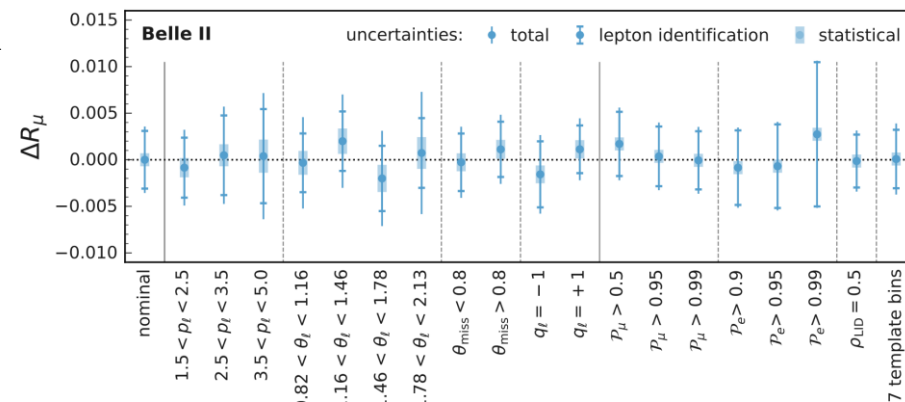
- $R_\mu^{SM} = 0.9726$

- Rapporto parametri di accoppiamento:

$$\left(\frac{g_\mu}{g_e}\right)_\tau = \sqrt{R_\mu \frac{f(m_e^2/m_\tau^2)}{f(m_\mu^2/m_\tau^2)}}$$

Analisi a Belle II con 362 fb^{-1} :

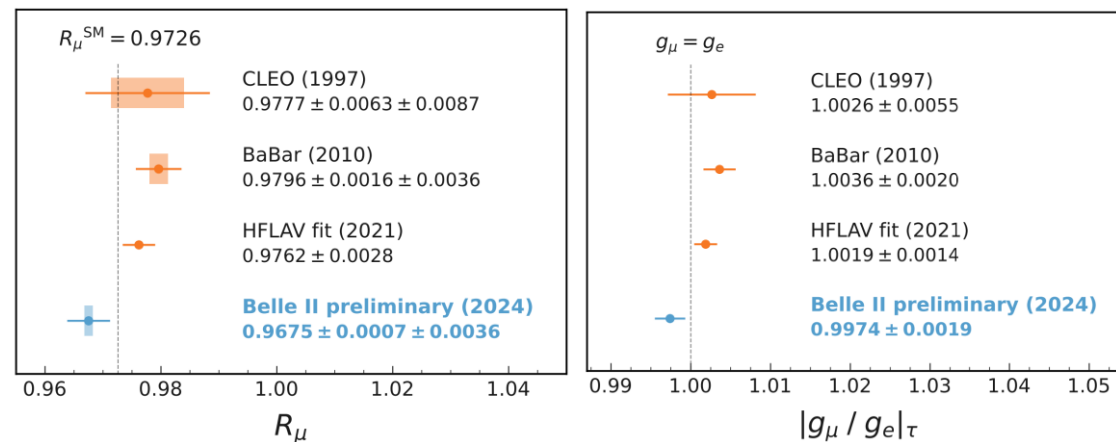
- Controllo stabilità di R_μ prima di analizzare i dati nella regione di segnale
- Errore prevalentemente **sistematico**
 - PID: 0.32%
 - Trigger: 0.10%



Risultato: $R = 0.9675 \pm 0.0007(stat) \pm 0.0036(syst)$

- **Consistente con il valore PDG a 1.4σ**

- Test di LFU $e - \mu$ **più preciso** fornito da un **singolo esperimento**



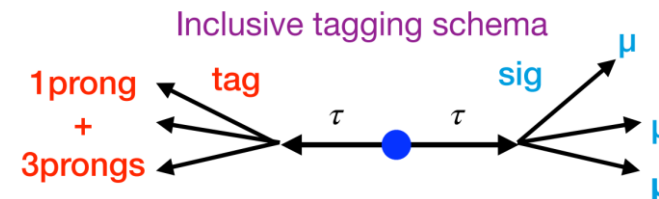
Ricerca $\tau \rightarrow \mu\mu\mu$

- Violazione di sapore leptonic (LFV)
- Nello SM previsti con rate $\sim 10^{-50} \rightarrow$ qualsiasi risultato sperimentale diverso da zero è indice di fisica oltre SM
- Precedente limite più stringente da Belle: 2.1×10^{-8} @ 90% CL con $782 fb^{-1}$

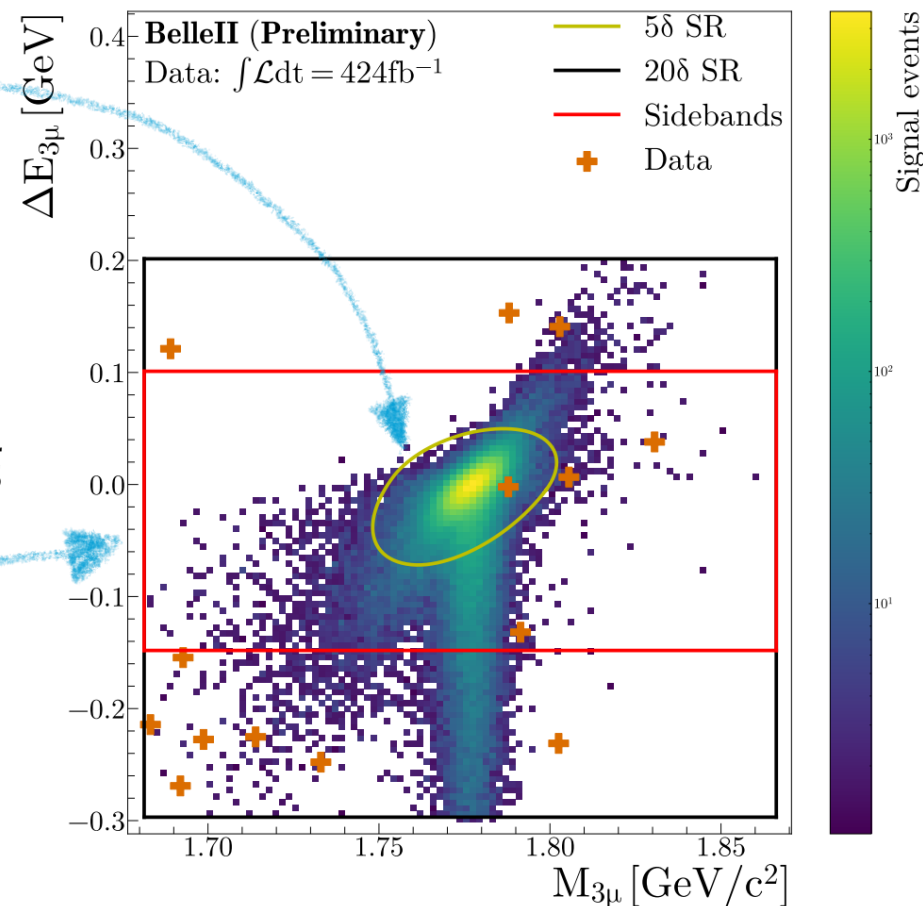
K. Hayasaka et al., *Phys. Lett. B* 687 (2010) 139

Analisi a Belle II con $424 fb^{-1}$:

- Lato *segnale*: tre μ
- Lato *tag*: inclusivo



- Regione di segnale:
 - $\Delta E_{3\mu}$ vs $M_{3\mu}$
 - $\Delta E_{3\mu} = E_{3\mu} - E_{beam}$
- $\epsilon_{sig} = (20.42 \pm 0.06)\%$
- Eventi di fondo attesi $0.5^{+1.4}_{-0.5}$ stimati dalle regioni laterali
- BDT per reiezione del fondo



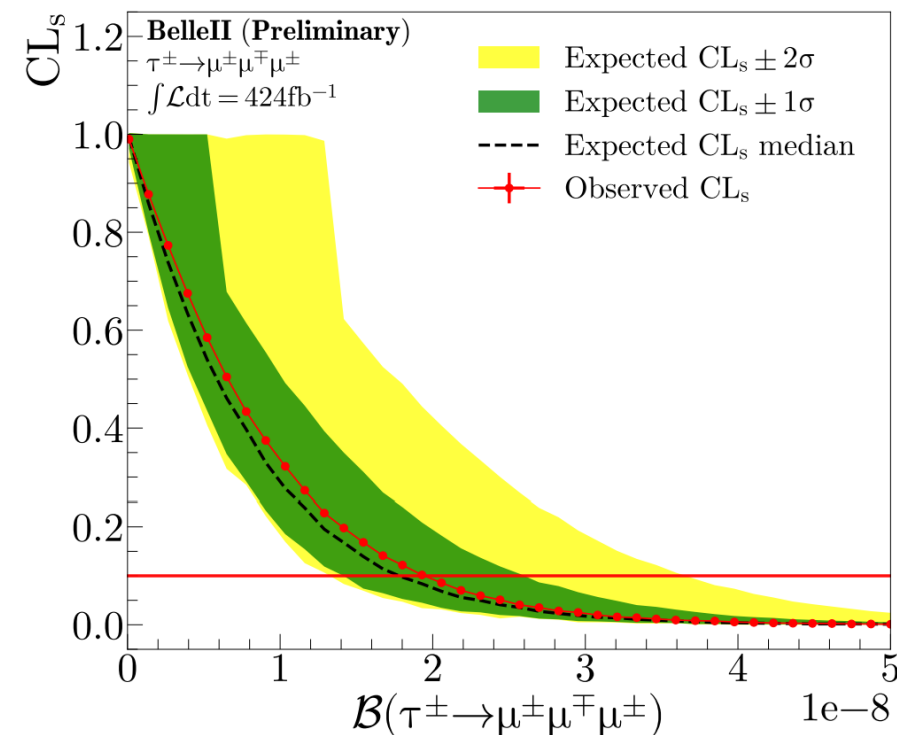
Ricerca $\tau \rightarrow \mu\mu\mu$

- Violazione di sapore leptonic (LFV)
- Nello SM previsti con rate $\sim 10^{-50} \rightarrow$ qualsiasi risultato sperimentale diverso da zero è indice di fisica oltre SM
- Precedente limite più stringente da Belle:
 2.1×10^{-8} @ 90% CL
con $782 fb^{-1}$

Analisi a Belle II con $424 fb^{-1}$:

- **Un evento** trovato nella regione di segnale
- **Nessun eccesso significativo** nel dataset utilizzato
- **Risultato:** limite al 90% CL:
 1.9×10^{-8}
- **Limite più stringente** ad oggi

LHCb: 4.6×10^{-8} ($2.0 fb^{-1}$) [2]
BaBar: 3.3×10^{-8} ($468 fb^{-1}$) [3]
CMS: 2.9×10^{-8} ($131 fb^{-1}$) [4]
Belle: 2.1×10^{-8} ($782 fb^{-1}$) [1]
Belle II: 1.9×10^{-8} ($424 fb^{-1}$)



[1] K. Hayasaka et al., *Phys. Lett. B* 687 (2010) 139

[2] R. Aaij et al., *JHEP* 02 (2015) 121

[3] J. P. Lees et al., *Phys. Rev. D* 81 (2010) 111101

[4] A. M. Sirunyan et al., *JHEP* 01 (2021) 163



Ricerche nel settore oscuro

Ricerca $B \rightarrow K S$

- Particella scalare S del settore oscuro con proprietà *higgs-like*, che accoppia con higgs SM tramite mixing θ
- Ricerca nella segnatura di una particella con **lunga vita media**, tale da produrre un vertice staccato rispetto all'IP
- **Prima** ricerca di questo tipo a Belle II
- Interpretabile anche come particella pseudoscalare (ALP)

Analisi a Belle II con $189fb^{-1}$:

[PRD 108 \(2023\) L111104](#)

- Canali: $B^+ \rightarrow K^+ S(\rightarrow x^- x^+)$ e $B^0 \rightarrow K^{*0}(\rightarrow K^+ \pi^-) S(\rightarrow x^- x^+)$
 - $x^- x^+ = [e^- e^+, \mu^- \mu^+, \pi^- \pi^+, K^- K^+]$

- Varie ipotesi di vita media: $0.001 < c\tau_S < 400 \text{ cm}$

- B ricostruito totalmente, vincolo sulla massa $M_{bc} = \sqrt{s/4 - |\vec{p}_B^*|^2}$

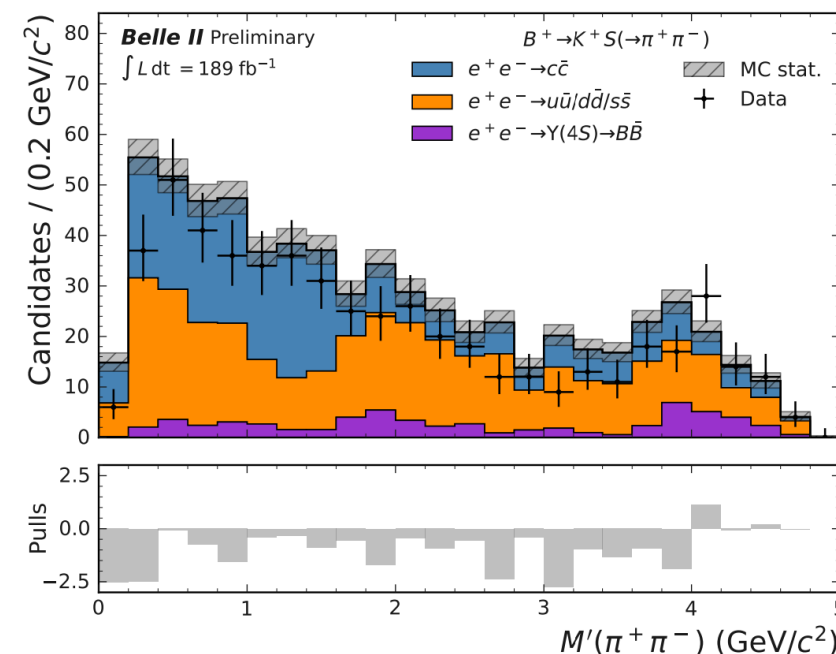
- S ricostruito in due particelle uguali con fit al vertice e massa ridotta

$$M'(x^- x^+) = \sqrt{M^2(x^- x^+) - 4m_x^2}$$

- Ricerca di un picco nella distribuzione $M'(x^- x^+)$

- Fondo: $e^- e^+ \rightarrow B\bar{B}$, $e^- e^+ \rightarrow q\bar{q}(\gamma)$, $e^- e^+ \rightarrow \tau^- \tau^+(\gamma)$, $B \rightarrow K K_S^0(\rightarrow \pi^- \pi^+)$, piatto in M'

- Campione di controllo, $B \rightarrow K K_S^0$, paragone fra dati e simulazione



Ricerca $B \rightarrow K S$

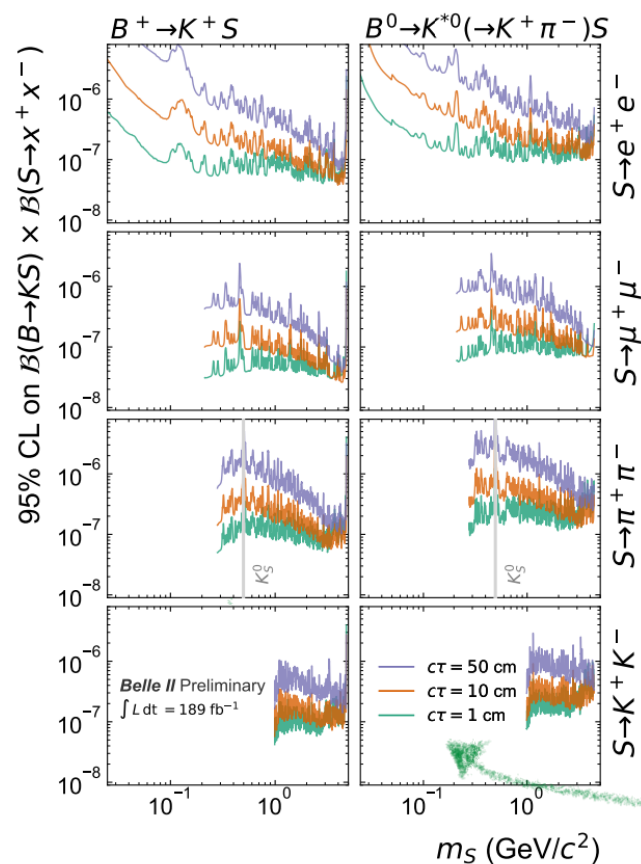
- Particella scalare S del settore oscuro con proprietà *higgs-like*, che accoppia con higgs SM tramite mixing θ
- Ricerca nella segnatura di una particella con **lunga vita media**, tale da produrre un vertice staccato rispetto all'IP
- **Prima ricerca di questo tipo** a Belle II
- Interpretabile anche come particella pseudoscalare (ALP)

Analisi a Belle II con 189fb^{-1} :

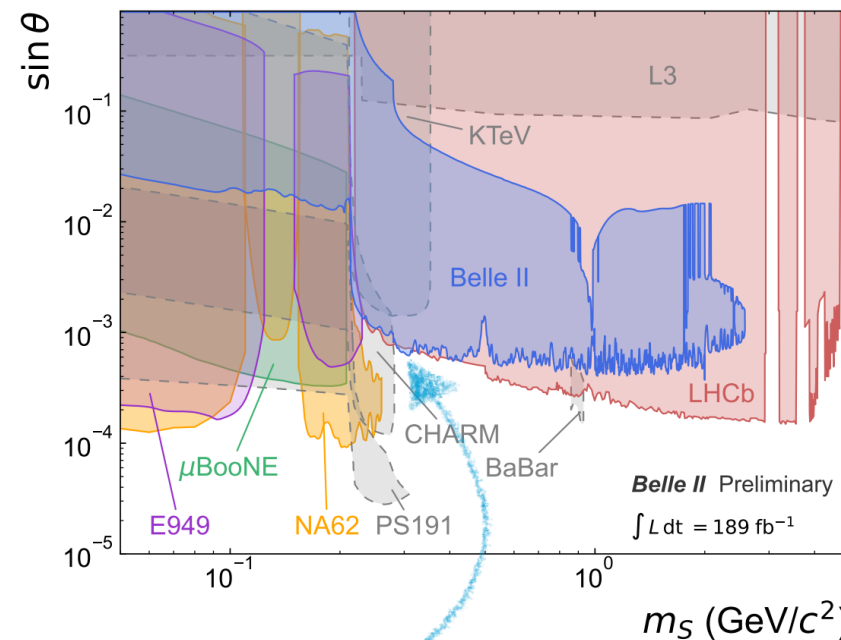
[PRD 108 \(2023\) L111104](#)

- **Nessun eccesso** significativo nel dataset utilizzato

- Limiti su $\mathbf{Br}(B \rightarrow KS) \times \mathbf{Br}(S \rightarrow x^- x^+)$



- Limiti sul **parametro di mixing**:



- Limiti **più stringenti** rispetto ad LHCb, dalla ricerca nel canale $K^{(*)} e^- e^+$
- **Primi limiti** per S in adroni
- Limiti **dipendono** dalla vita media

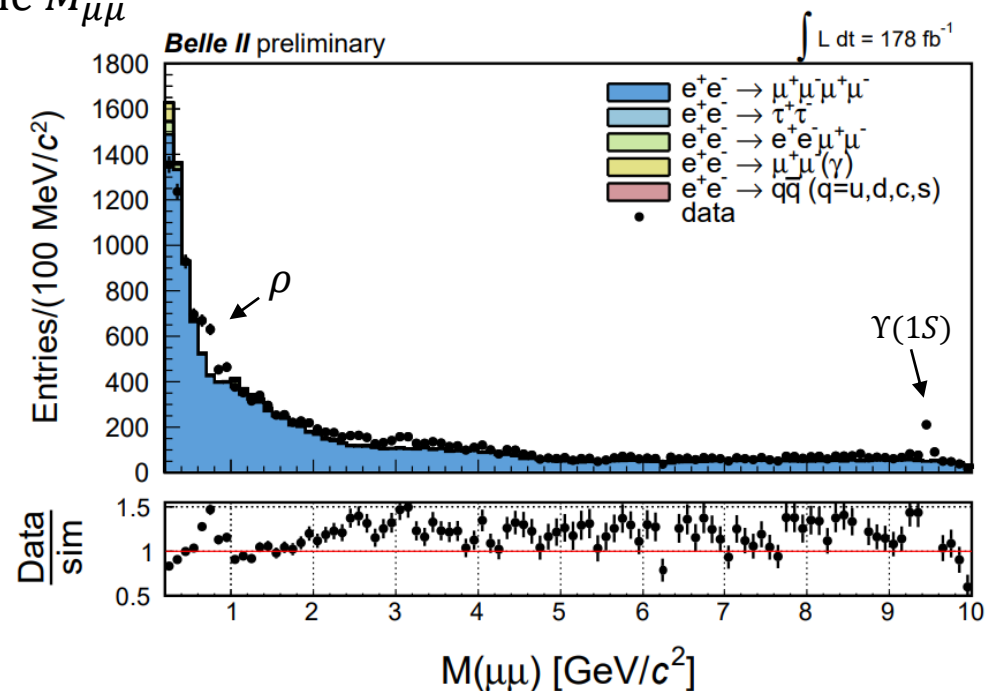
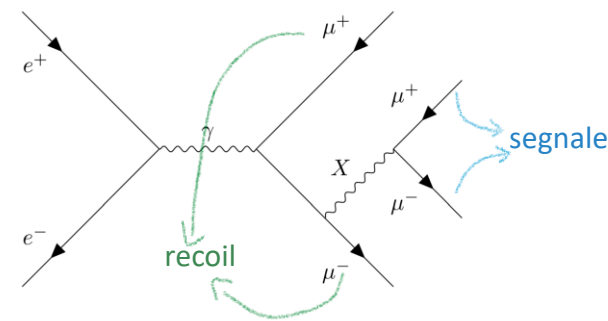
Ricerca $X \rightarrow \mu\mu$

- Rientra in una serie di ricerche mirate a spiegare $(g - 2)_\mu$ e altre tensioni tra predizioni SM e risultati sperimentali
- $X=Z'$: bosone di un modello $L_\mu - L_\tau$ che accoppia solo con la seconda e terza generazione di leptoni
 - Ricerca di Z' in μ già fatta a Babar, Belle, CMS; a Belle II ricerca di Z' in invisibile e τ
- $X=\varphi$: scalare con accoppiamento di Yukawa solo con μ (muon-filico)

Analisi a Belle II con 178fb^{-1} :

- Ricostruite 4 tracce di cui almeno 3 identificate come μ + fit cinematico sulla massa invariante totale $\Upsilon(4S)$
- Due muoni di segnale e due muoni di recoil, 4 possibili combinazioni
- Ricerca di un picco nella massa invariante dei due μ di segnale $M_{\mu\mu}$
- Fondo principale: $e^-e^+ \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^- \mu^+$ soppresso con rete neurale basato su variabili cinematiche (angolo di elicità, impulsi dei μ)
- Monte Carlo **non** include le risonanze e ISR

[arxiv:2403.02841](https://arxiv.org/abs/2403.02841)



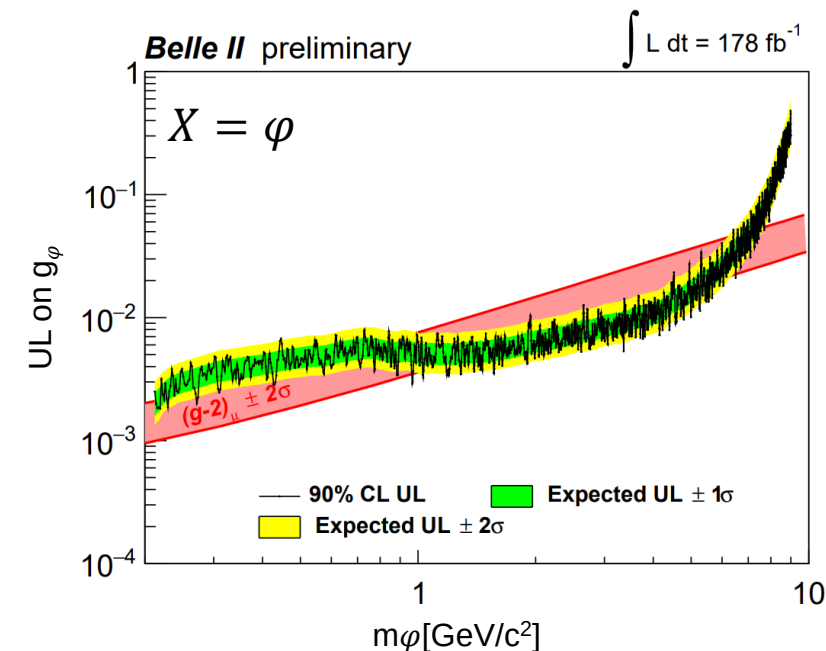
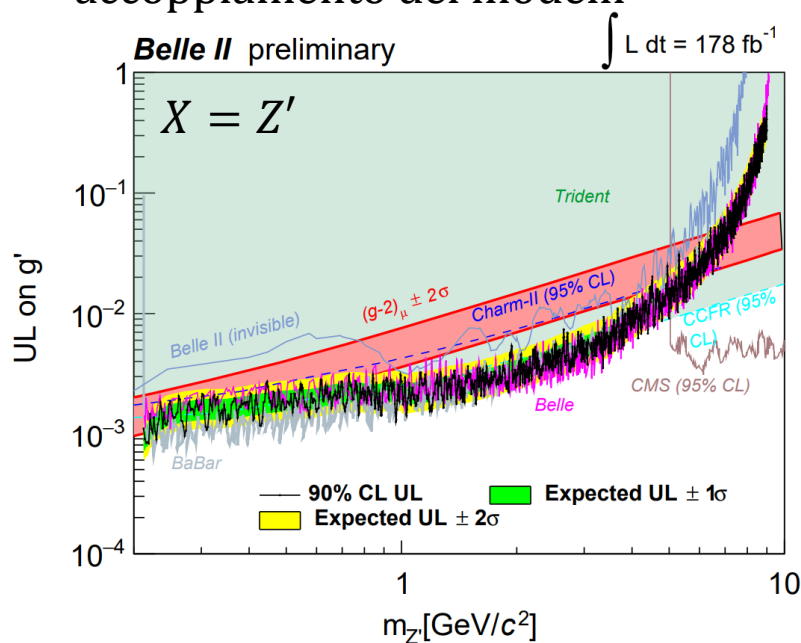
Ricerca $X \rightarrow \mu\mu$

- Rientra in una serie di ricerche mirate a spiegare $(g - 2)_\mu$ e altre tensioni tra predizioni SM e risultati sperimentali
- $X=Z'$: bosone di un modello $L_\mu - L_\tau$ che accoppia solo con la seconda e terza generazione di leptoni
 - Ricerca di Z' in μ già fatta a Babar, Belle, CMS; a Belle II ricerca di Z' in invisibile e τ
- $X=\varphi$: scalare con accoppiamento di Yukawa solo con μ (muon-filico)

Analisi a Belle II con $178fb^{-1}$:

[arxiv:2403.02841](https://arxiv.org/abs/2403.02841)

- Nessun eccesso significativo trovato nel dataset
- Risultati: **limiti superiori** al 90% CL sui parametri di accoppiamento dei modelli



- **Limite competitivo** per il caso Z' con gli studi di Belle ($643fb^{-1}$) e BaBar ($514fb^{-1}$)
- **Primi limiti** sul modello di scalare φ muon-filico

Conclusioni

Argomenti trattati:

Belle II come τ -factory → misure di precisione nel settore del τ

- **Belle II competitivo** nella fisica del τ , con i **limiti più stringenti** nel canale LFV e la **misura più precisa** nella ricerca di LFU

Linee di trigger dedicati a eventi a bassa molteplicità → ottime capacità di analisi nel settore oscuro

- **Primi limiti al 95% CL** su scalare S in adroni
- **Primi limiti al 90% CL** su scalare φ muon-filico

→ Molte analisi in entrambi i settori pubblicate o ancora in fase di studio

Per il futuro:

- Aumento statistica con il nuovo **run II** (iniziato!)
- Miglioramento tecniche di studio nelle analisi

Grazie
dell'attenzione!