


Risultati recenti nel settore oscuro e nei decadimenti del τ a Belle II

Incontri di Fisica delle Alte Energie IFAE2023

Monastero dei Benedettini, Catania
12 - 14 Aprile, 2023

Luigi Corona - INFN Pisa
per la collaborazione Belle II
 luigi.corona@pi.infn.it



Settore oscuro leggero e misure di precisione

- [1] Abi et al., [Phys. Rev. Lett. 126, 141801 \(2021\)](#)
 [2] G. Caria et al. [Phys. Rev. Lett. 124, 161803 \(2020\)](#)
 [3] R. Aaij et al. [Nature Physics 18, 277 \(2022\)](#)

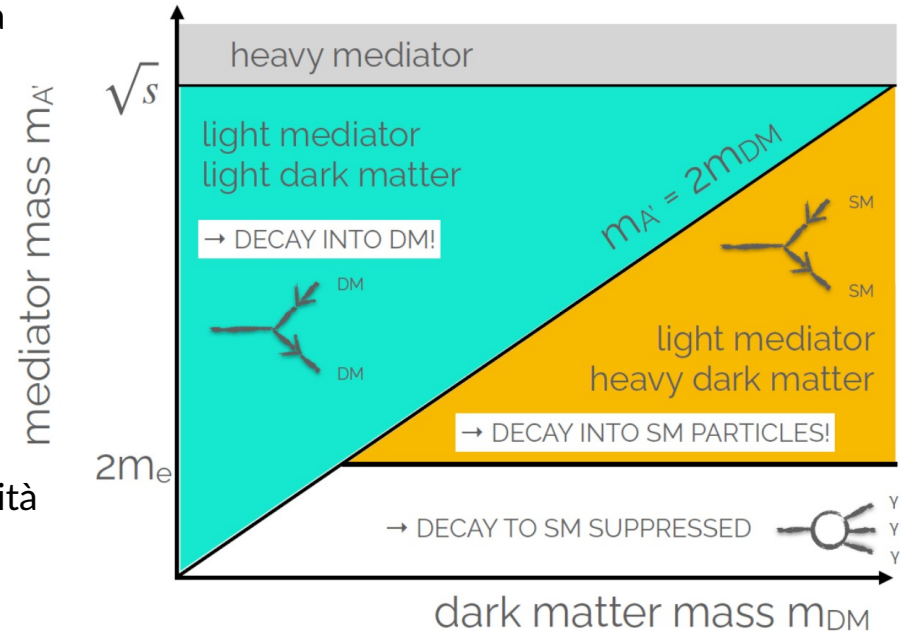
• Settore oscuro leggero

- Nessuna evidenza di materia oscura (DM) alla scala elettro-debole negli esperimenti
- Materia oscura leggera con massa $M \sim \mathcal{O}(\text{MeV-GeV})$ ben motivata teoricamente
- **Mediatori leggeri** che intervengono nell'interazione tra Modello Standard (SM) e DM
- Descrizione teorica attraverso **"portali"** di interazione
- Potrebbero risolvere il "DM puzzle" e spiegare anomalie osservate [1, 2, 3]

• Misure di precisione dei parametri del SM

- Test diretti del SM
- Limiti indiretti sulla fisica "oltre il SM"
- massa del leptone τ : test della violazione dell'universalità leptonica (LUV), test sulle predizione dei BF leptonici e adronici e α_s alla scala della massa del τ

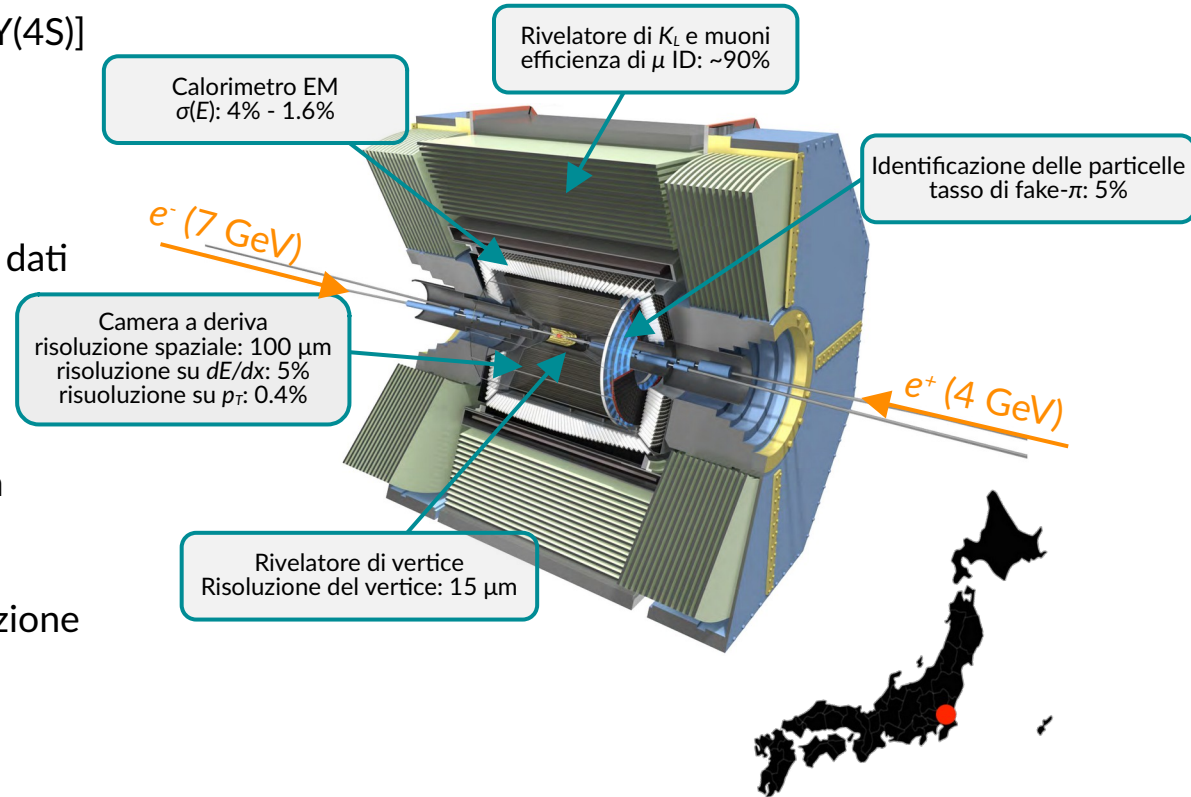
Vector	$\epsilon F^{\mu\nu} A'_{\mu\nu}$
Scalar	$k H ^2 S ^2$
Fermion	$y H L N$
Pseudo-scalar	$\frac{1}{f_a} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} a$

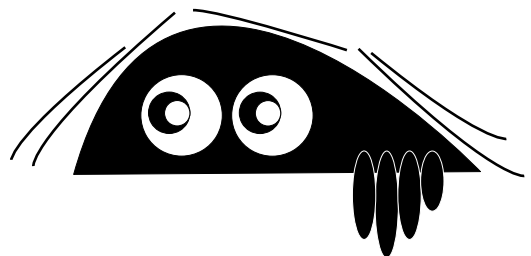


L'esperimento Belle II e SuperKEKB

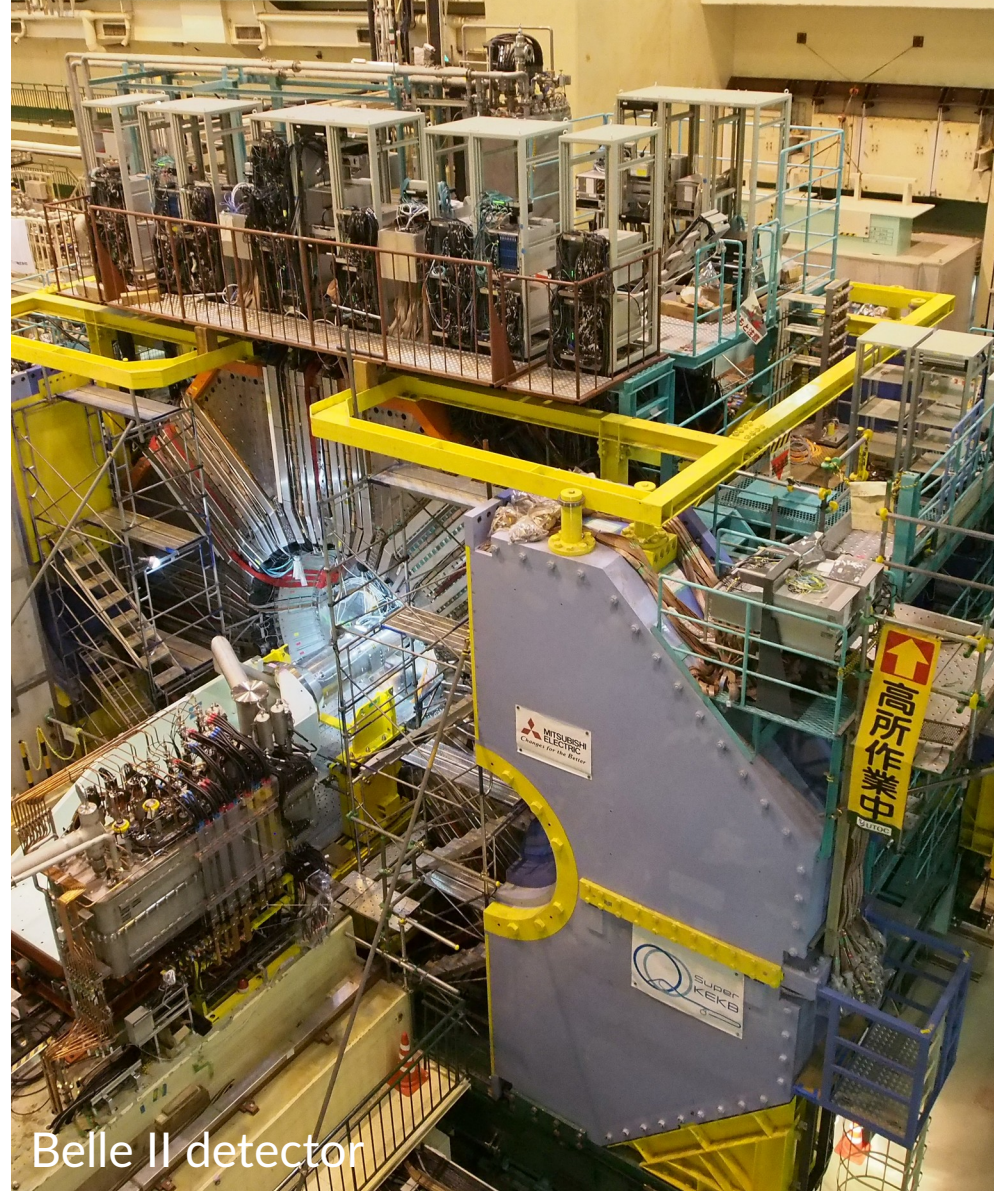
- SuperKEKB è la nuova generazione di B -factory
 - Operato soprattutto a $\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$ [Y(4S)]
- Belle II è l'upgrade di Belle @ KEKB
 - Rivelatore ermetico ad alte prestazioni
- Raccolti 424 fb^{-1} , attualmente non in presa dati
- Condizioni iniziali ben note
- Ambiente pulito (pile-up trascurabile)
- **Linee di trigger dedicate** per eventi a bassa molteplicità (basso numero di tracce)
 - Sopprimere processi di QED con alta sezione d'urto **senza "uccidere" il segnale**
 - Richiede una precisa conoscenza delle accettanze e efficienze del rivelatore

Vedere [presentazione di Stefano Moneta](#)





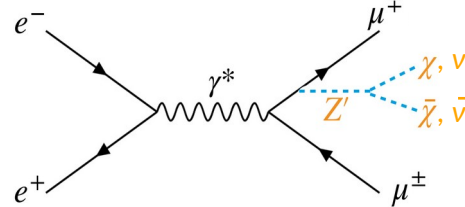
Risultati recenti sul settore oscuro a Belle II



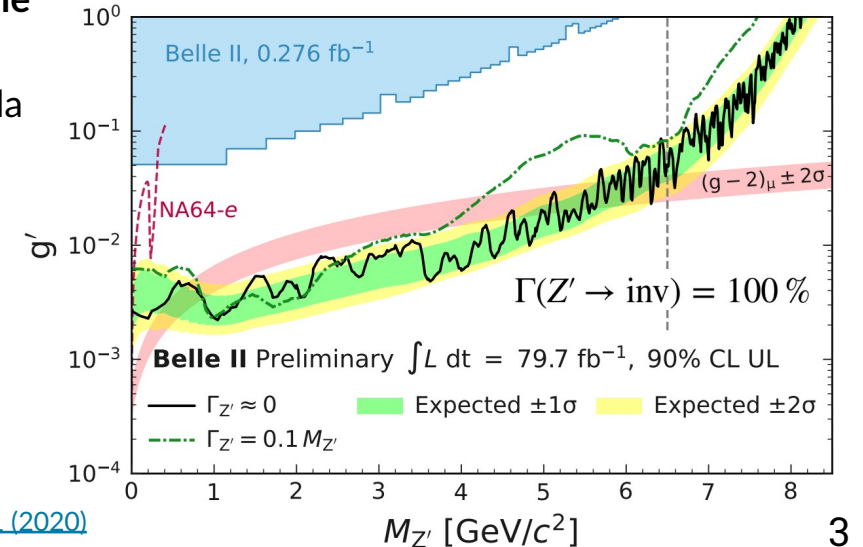
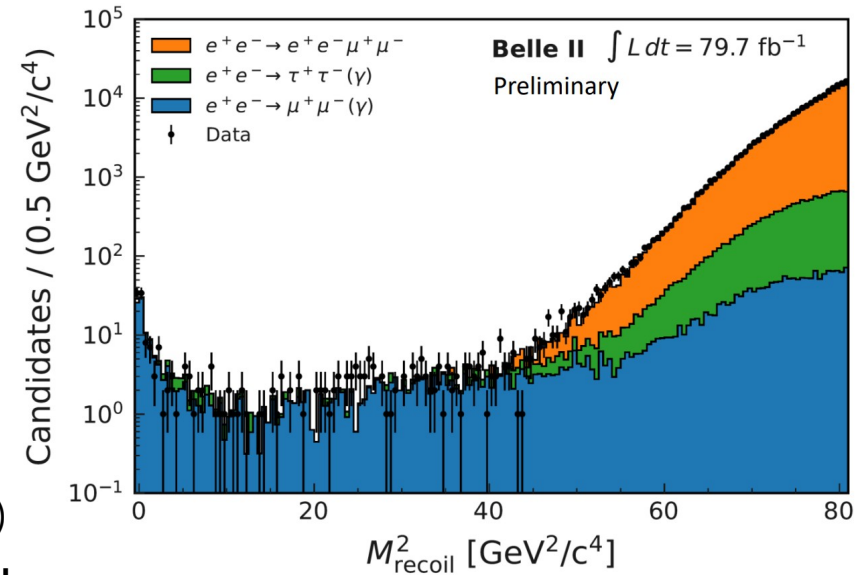
Belle II detector

$Z' \rightarrow$ invisibile

[arxiv:2212.03066](https://arxiv.org/abs/2212.03066)



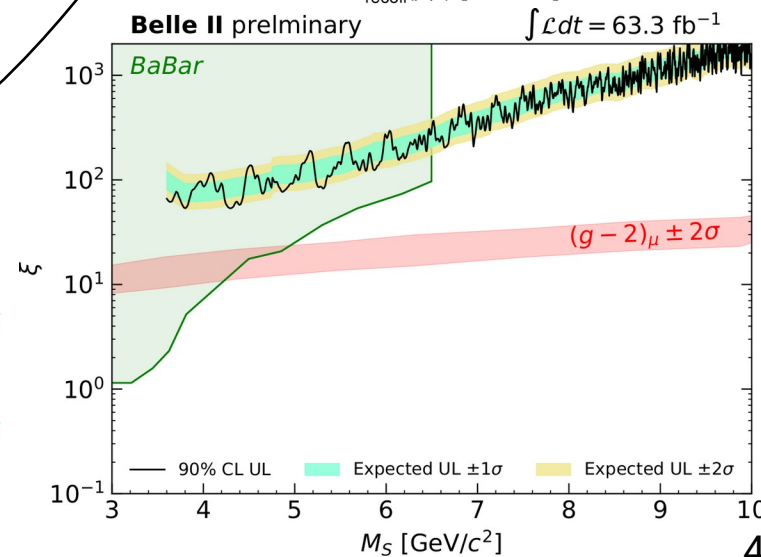
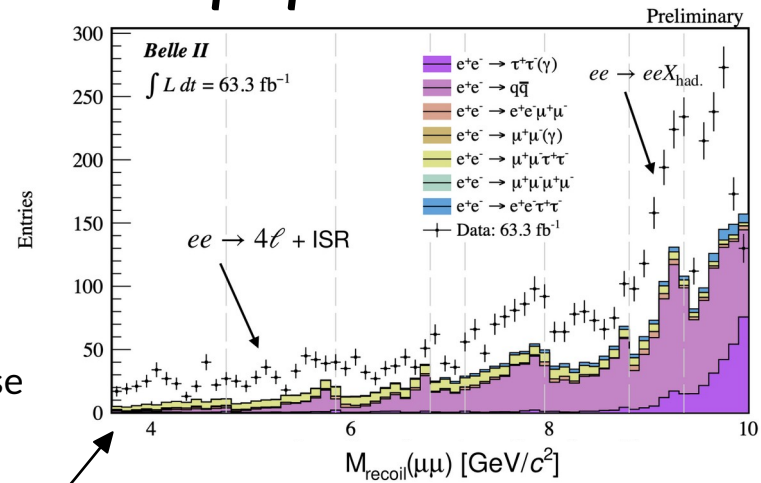
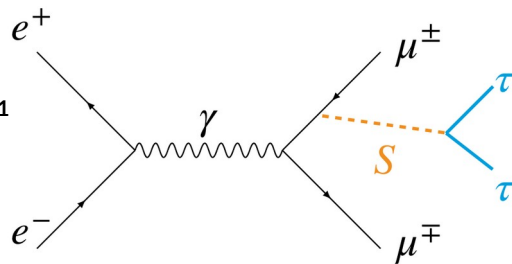
- Nuovo bosone massivo Z' introdotto nel modello $L_\mu - L_\tau$ [1]
 - Accoppia solo alla seconda e terza generazione di leptoni
- Ricerca del processo $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^- Z', Z' \rightarrow \text{inv.}$
 - Aggiornamento di [3] con 0.276 fb^{-1}
- Segnale, **picco stretto nella massa di rinculo rispetto a $\mu^+ \mu^-$** (M_{recoil})
- Fondi, in particolare $e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^- (\gamma)$, soppressi mediante **rete neurale** allenata simultaneamente su tutte le masse dello Z' [2]
 - Basata sulle proprietà dello Z' che è emesso come radiazione da stato finale (FSR)
 - Fondi residui $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^- (\gamma)$ e $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^- (\gamma)$
- Da fit 2D **nessun segnale significativo osservato in 79.7 fb^{-1}**
 - Regione interessante per $(g - 2)_\mu$ esclusa per $M_{Z'} \in (0.8, 5.0) \text{ GeV}/c^2$, per $\Gamma(Z' \rightarrow \text{inv.}) = 100\%$



[1] Altmannshofer et al., [JHEP 106 \(2016\)](#)
 [2] F. Abudinén et al., [Eur. Phys. J. C 82, 121 \(2022\)](#)
 [3] Belle II Collaboration, [Phys. Rev. Lett. 124, 141801 \(2020\)](#)

Ricerca di una risonanza $\tau\tau$ in $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\tau^+\tau^-$

- Stato finale a quattro tracce: τ decadono in una particella carica (e, μ, h)
- Segnale, **picco stretto nella massa di rinculo rispetto a $\mu^+\mu^-$** $M_{\text{recoil}}(\mu\mu)$
- **Reiezione del fondo mirata a ridurre la contaminazione da eventi con energia mancante non associata alla segatura di segnale**
 - ➔ Soppressione del fondo basata su otto classificatori allenati su diverse regione di massa di rinculo
 - ▶ Basati sulle proprietà della **risonanza**, FSR, e del sistema $\tau\tau$
- **Segnale estratto tramite fit alla distribuzione $M_{\text{recoil}}(\mu\mu)$**
 - ➔ **Fondo stimato direttamente sui dati per minimizzare l'impatto di processi non simulati correttamente**
 - ➔ **Fondo liscio** → non problematico
- **Nessun eccesso significativo in 63.3 fb^{-1}**
 - ➔ **Limiti al 90% CL per scalare leptofilico con $m_S > 6.5 \text{ GeV}/c^2$ [1]**

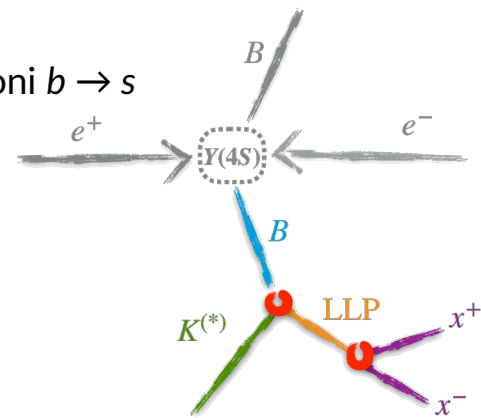


[1] BaBar, [PhysRevLett.125.181801](https://arxiv.org/abs/1205.1818)

Scalare a vita lunga nelle transizioni $b \rightarrow s$

Nuovo per Moriond

- Ricerca di un **nuovo scalare S** prodotto nei decadimenti del mesone B nelle transizioni $b \rightarrow s$
 - S può accoppiare con l'Higgs del SM con angolo di mescolamento θ_s
 \rightarrow Particella a vita lunga (LLP) naturale per piccoli angoli di mescolamento θ_s
 - Ottime performance nella ricostruzione del vertice LLP sono necessarie



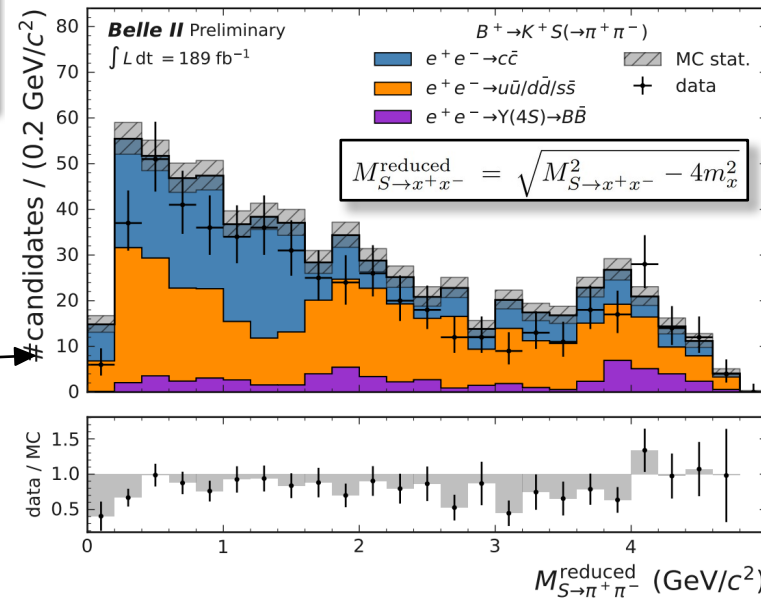
- Ricostruiti otto canali "visibili" esclusivi \rightarrow

$$\begin{aligned}
 & B^+ \rightarrow K^+ S \\
 & B^0 \rightarrow [K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-] S \\
 & S \rightarrow ee / \mu\mu / \pi\pi / KK
 \end{aligned}$$

- Decadimenti del **mesone B**

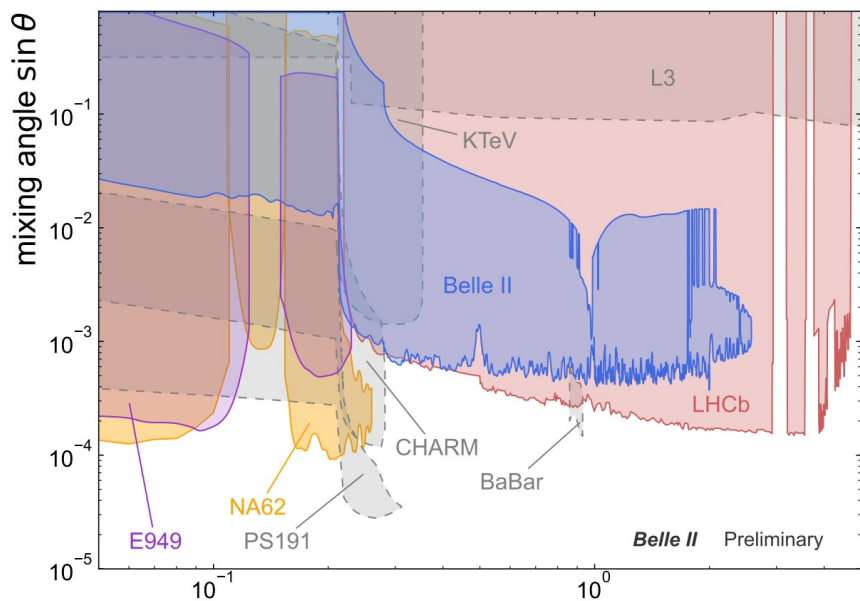
- Decadimento immediato di K o K^* + **due tracce cariche opposte** che formano un **vertice spostato**
- Fondi: combinatorio $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$, K_S vetato nella mass $M_{\pi\pi}$, ulteriori fondi con picchi soppressi da selezioni più strette sui vertici spostati

- Segnale estratto mediante **fit alla massa ridotta** della LLP, separatamente per ciascun canale e vita media



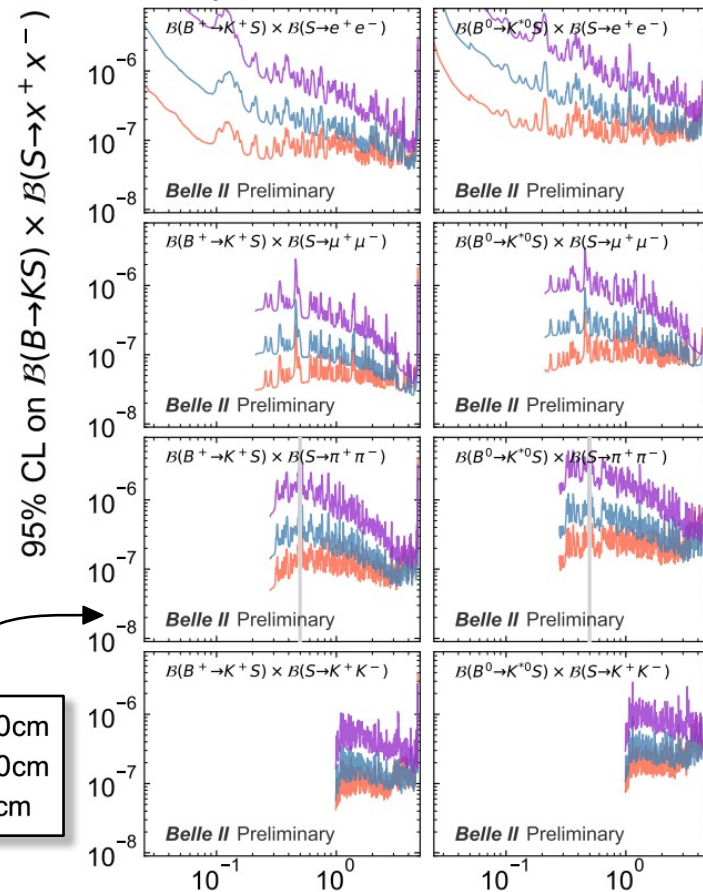
Scalare a vita lunga nelle transizioni $b \rightarrow s$: risultato

- Nessun eccesso significativo osservato in 189 fb^{-1}
 - Primi limiti non dipendenti dal modello al 95% CL su $BF(B \rightarrow K_S) \cdot B(S \rightarrow x^+x^-)$
 - Primi limiti per i decadimenti in adroni
- Interpretazione come scalare "oscuro" S [1, 2]



scalar mass m_S (GeV/c^2)

Limiti per ciascun canale e vita media



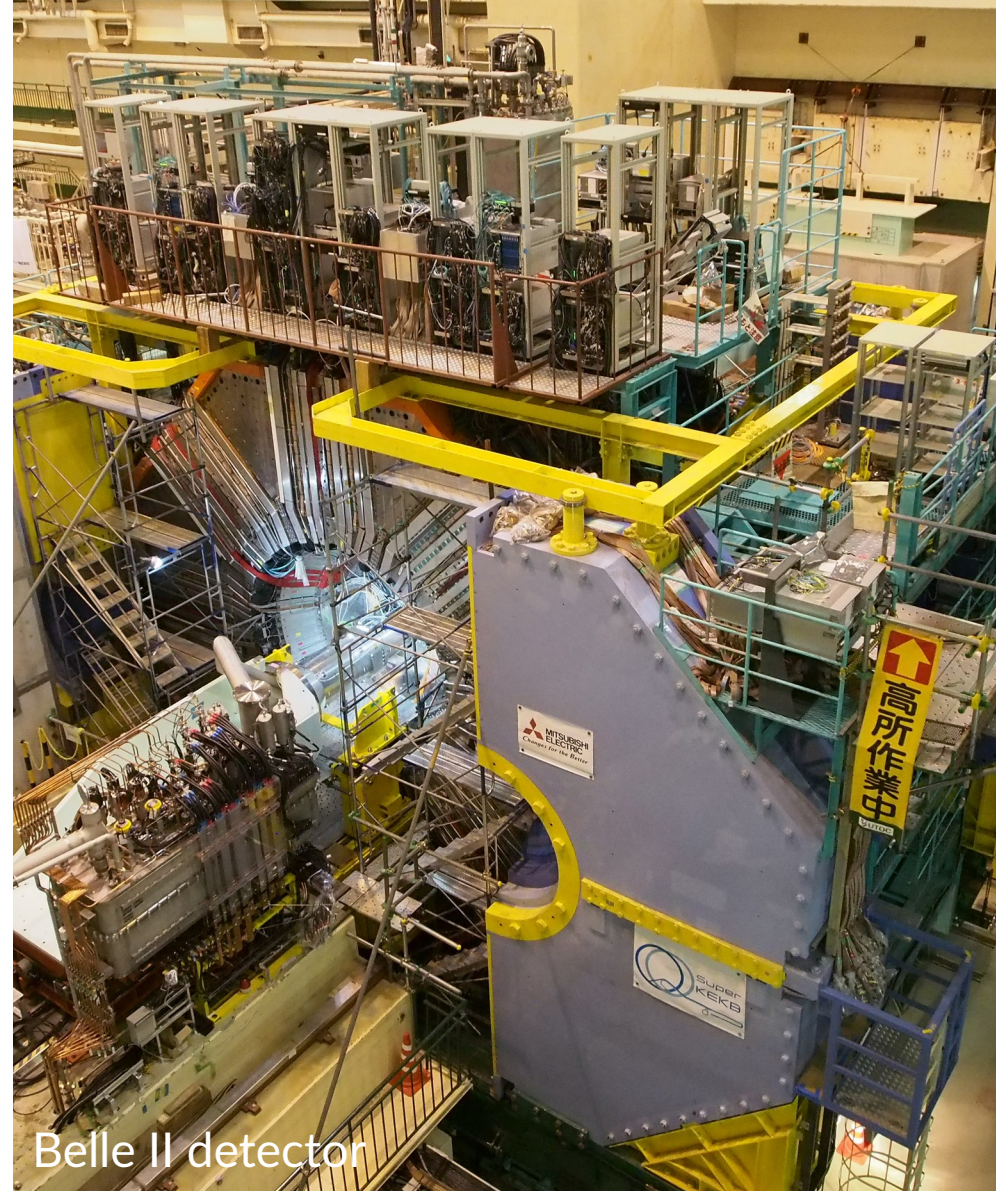
— $c\tau = 50\text{cm}$
— $c\tau = 10\text{cm}$
— $c\tau = 1\text{cm}$

[1] [Phys. Rev. D 101, 095006 \(2020\)](#)

[2] [J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 47 010501](#)

(pseudo-)scalar mass m_S (GeV/c^2)

Risultati recenti sul τ a Belle II



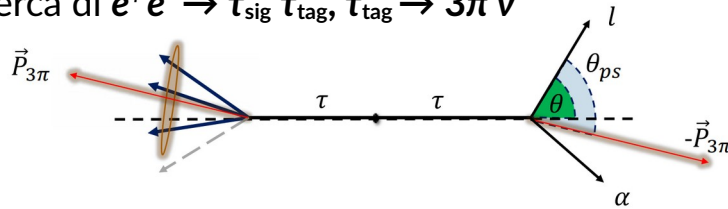
Belle II detector

Decadimento $\tau \rightarrow l \alpha$ (invisible)

[1] M. Bauer, et al. [Phys. Rev. Lett. 124, 211803 \(2020\)](#)
 [2] ARGUS Collaboration, [Z. Phys. C 68, 25 \(1995\)](#)

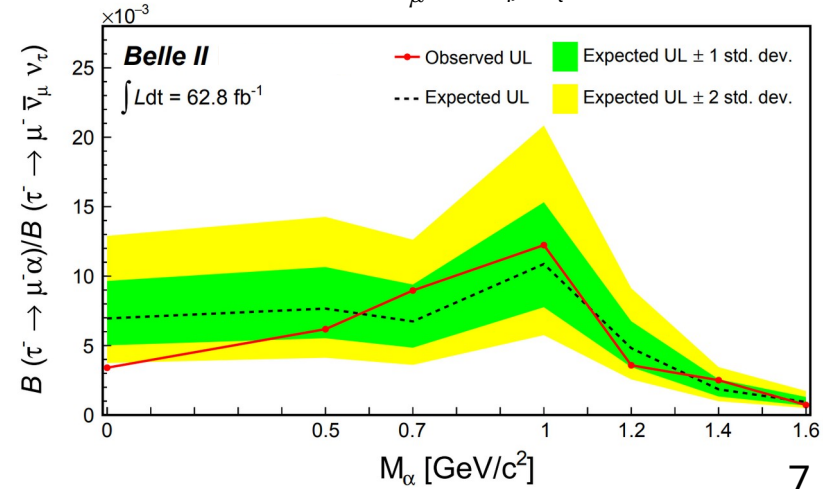
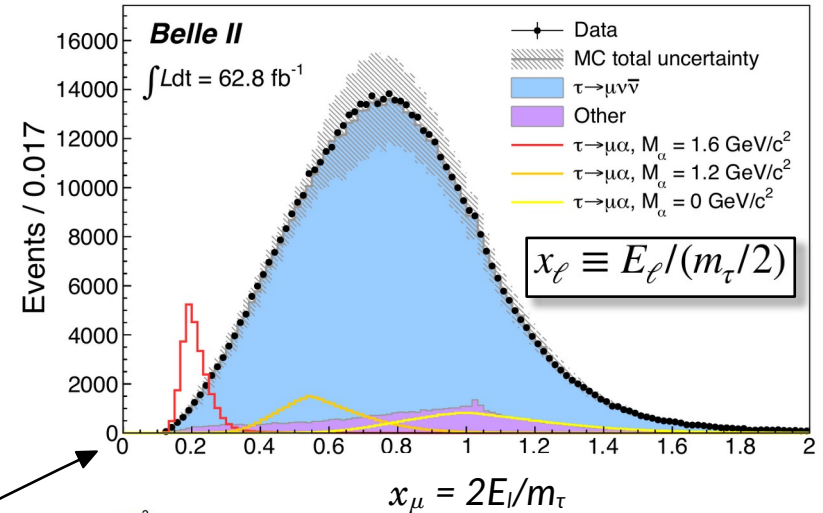
[arxiv:2212.03634](https://arxiv.org/abs/2212.03634)

- Violazione del sapore leptonic nei carichi (LFV) è prevista in diverse estensioni del SM \rightarrow mai stata osservata
- Decadimenti del τ in nuovi bosoni α che mediano processi LFV sono predetti in diversi modelli teorici [1]
- Ricerca di $e^+ e^- \rightarrow \tau_{\text{sig}} \tau_{\text{tag}}, \tau_{\text{tag}} \rightarrow 3\pi \nu$
- La presenza di neutrini non permette di definire il sistema a riposo del τ_{sig}
 - \rightarrow Sistema di riposo del τ_{sig} approssimato
- Ricerca di un picco nello spettro di energia del leptone normalizzato x_l (nel sistema di riferimento di riposo del τ_{sig} approssimato) sopra il fondo irriducibile di SM $\tau \rightarrow l \bar{\nu}$
- Nessun eccesso osservato in $62.8 \text{ fb}^{-1} \rightarrow$ limiti da 2.2 a 14 più stringenti rispetto ai precedenti messi da ARGUS [2]



$$\hat{p}_\tau \approx -\frac{\vec{P}_{\text{tag}}}{|\vec{P}_{\text{tag}}|}$$

$$E_\tau \approx \sqrt{s}/2$$

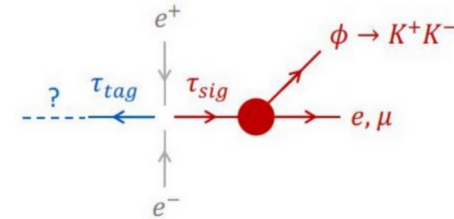


Decadimento LFV $\tau \rightarrow l \phi$

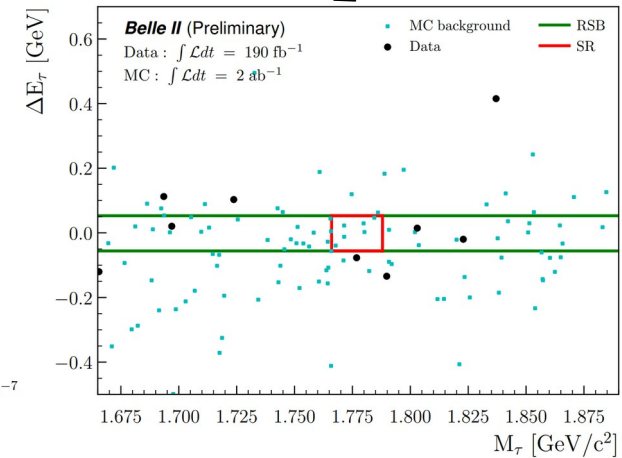
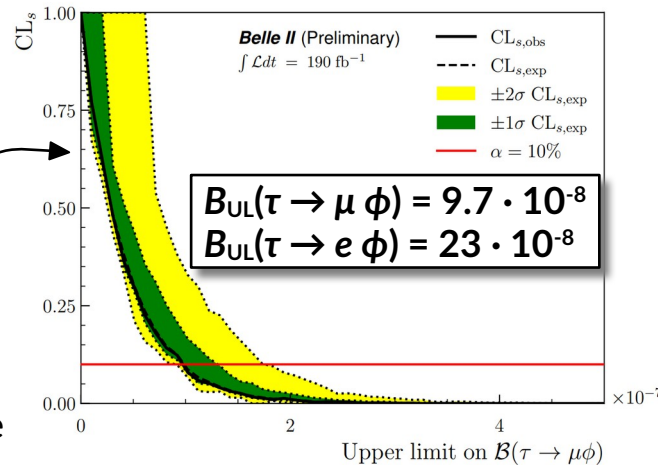
Nuovo per Moriond

[1] Andrei Angelescu, et al., [Phys. Rev. D 104, 055017 \(2021\)](#)
 [2] B. Aubert et al., BaBar, [Phys. Rev. Lett. 103 \(2009\)](#)
 [3] Y. Miyazaki et al., Belle, [Phys. Lett. B 699 \(2011\)](#)

- $BF(\tau \rightarrow l \phi)$ potrebbe essere incrementato a $10^{-11} - 10^{-8}$ per via di nuovi mediatori [1]
- Ricostruito solo $\tau_{sig} \rightarrow l \phi$, $\phi \rightarrow K^+ K^-$ e tutto il resto considerato come "Rest of Event" (ROE)
 - risultati precedenti ottenuti ricostruendo $\tau_{tag} \rightarrow l/h (v_l) \nu_\tau$ [2, 3]
- Soppressione del fondo continuo basato su **classificatori BDT** allenati sulla cinematica del segnale e del ROE
- **Conteggio Poissoniano** nella **regione di segnale (SR)** nel piano $\Delta E = E_{sig}^* - E_{beam}$ vs M_τ



- Fondo atteso in **SR** valutato in regioni di controllo (**RSB**)
- **Nessun eccesso osservato in 189 fb^{-1}**
 - **Limiti superiori al 90% CL su $B(\tau \rightarrow l \phi)$**
 - Confrontabili con risultati precedenti
 - Risultato limitato soprattutto dalla statistica. Statistica due volte superiore è già disponibile

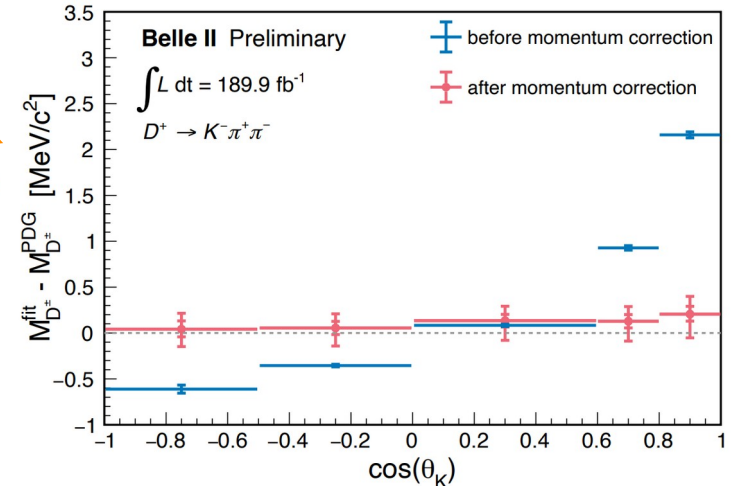
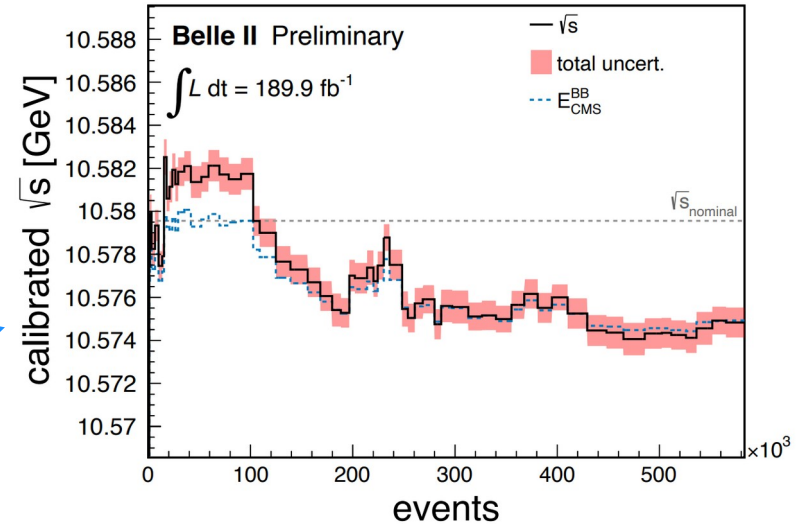


Massa del leptone τ : sistematiche

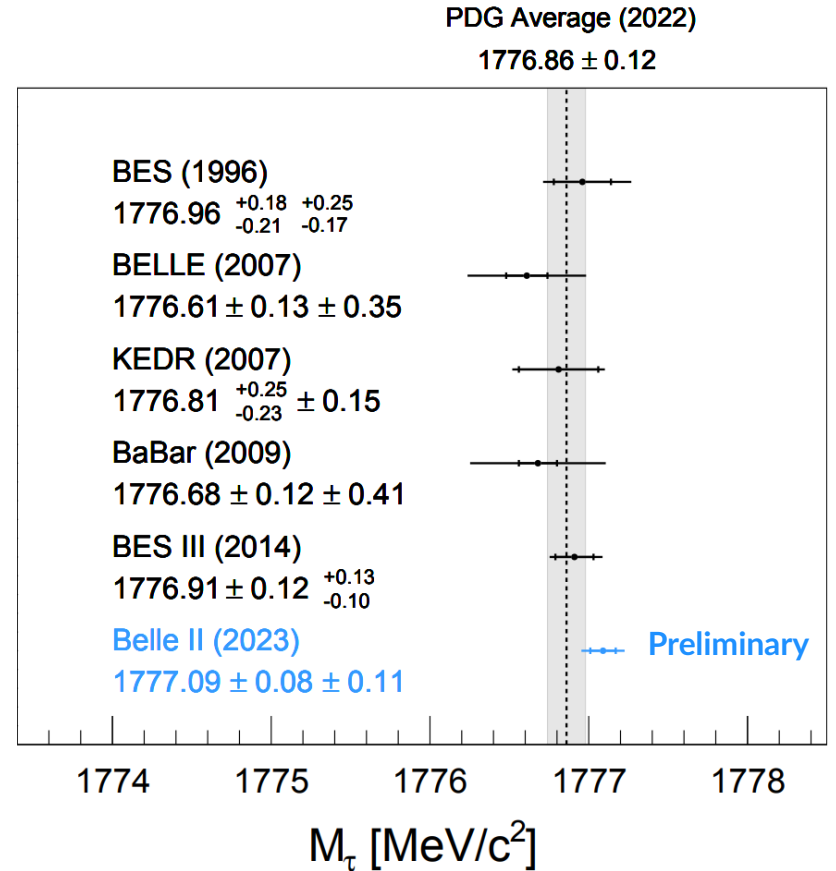
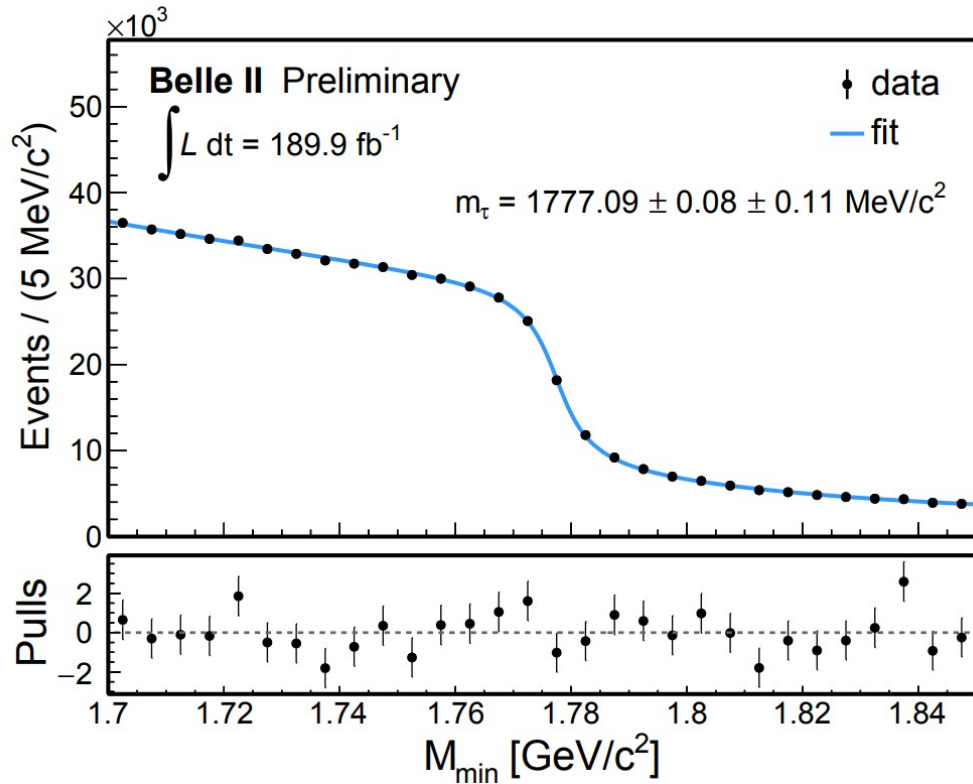
- Banco di prova per le possibilità di fare misure ad alta precisione a Belle II
- Avere sotto controllo le incertezze sistematiche è cruciale

$$M_{min} = \sqrt{M_{3\pi}^2 + 2(E_{beam} - E_{3\pi})(E_{3\pi} - P_{3\pi})} \leq m_{\tau}$$

Source	Uncertainty [MeV/c ²]
Knowledge of the colliding beams:	
Beam energy correction	0.07
Boost vector	≤ 0.01
Reconstruction of charged particles:	
Charged particle momentum correction	0.06
Detector misalignment	0.03
Fitting procedure:	
Estimator bias	0.03
Choice of the fit function	0.02
Mass dependence of the bias	≤ 0.01
Imperfections of the simulation:	
Detector material budget	0.03
Modeling of ISR and FSR	0.02
Momentum resolution	≤ 0.01
Neutral particle reconstruction efficiency	≤ 0.01
Tracking efficiency correction	≤ 0.01
Trigger efficiency	≤ 0.01
Background processes	≤ 0.01
Total	0.11



Massa del leptone τ : risultato



- Misura più precisa al mondo di $m_\tau = 1777.09 \pm 0.08_{\text{stat}} \pm 0.11_{\text{syst}}$ con 189 fb^{-1}

Sommario e conclusioni



- Belle II ha una **sensibilità unica** al **settore oscuro leggero** e progressivamente guiderà la sua esplorazione alla frontiera di luminosità

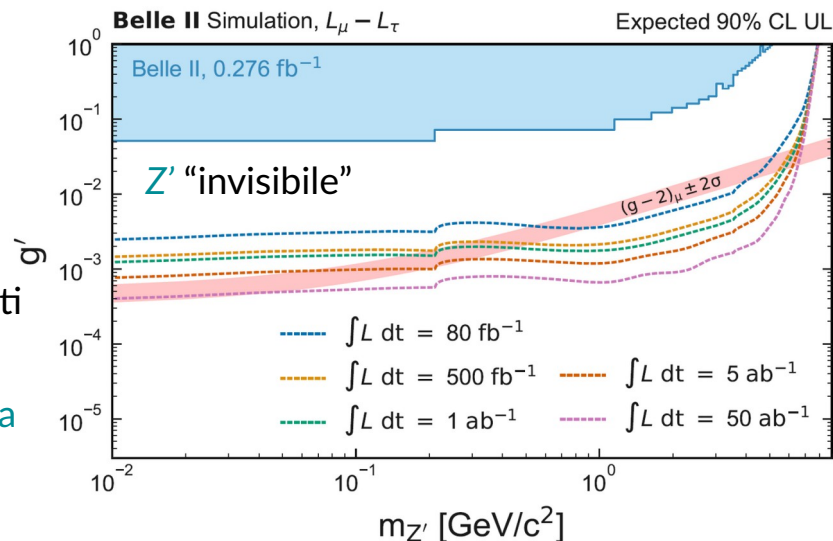
→ Complementare ai collisori ad alta energia e agli esperimenti di beam dump



- Belle II conferma le proprie possibilità nelle **misure di altissima precisione**

- ▶ Ricerca di uno Z' "invisible" in $ee \rightarrow \mu\mu Z'$ [arxiv:2212.03066](https://arxiv.org/abs/2212.03066)
- ▶ Ricerca di una **risonanza $\tau\tau$** in $ee \rightarrow \mu\mu\tau\tau$
- ▶ Ricerca di uno **scalare a vita lunga** in transizioni $b \rightarrow s$ **Nuovo**
- ▶ Ricerca di uno scalare LFV invisibile in $\tau \rightarrow l\alpha$ [arxiv:2212.03634](https://arxiv.org/abs/2212.03634)
- ▶ Ricerca del decadimento LFV $\tau \rightarrow l\phi$ **Nuovo**
- ▶ Misura della **massa del leptone τ** **Nuovo**

Snowmass paper [arxiv:2207.06307](https://arxiv.org/abs/2207.06307)



Se non ne avete ancora abbastanza del settore oscuro a Belle II
→ [poster di Laura Salutati](#)

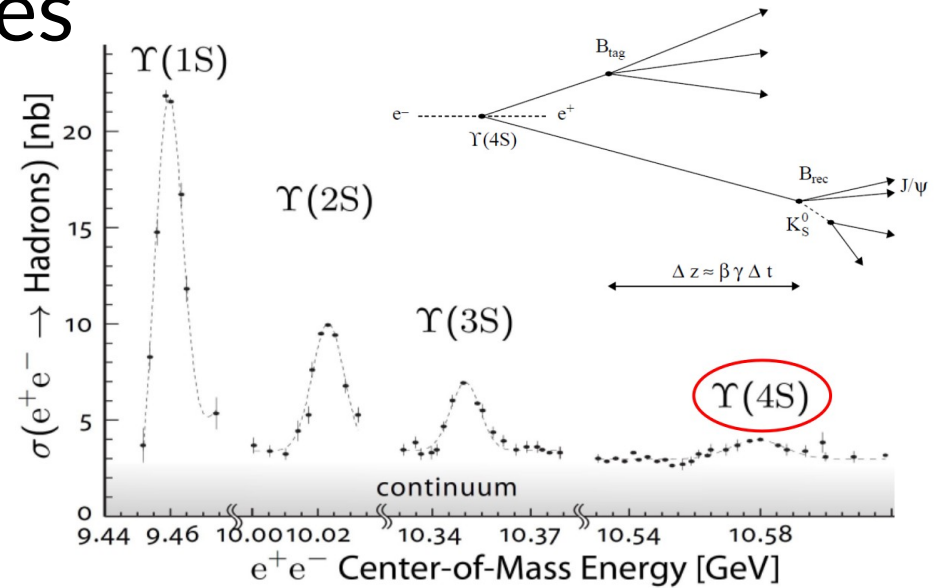
Grazie! =)


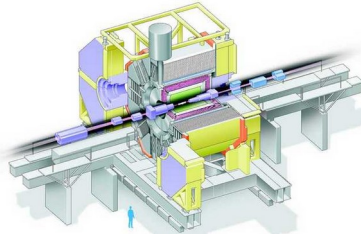


Lucidi di riserva

Esperimenti alle B-factories


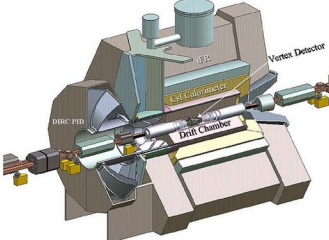
- Collisori e^+e^- asimmetrici ottimizzati per la produzione di coppie di mesoni B , ma anche mesoni D , leptoni τ , ...
- Le collisioni avvengono alle risonanze $Y(nS)$
 - Soprattutto alla $Y(4S)$: $\sqrt{s} = 10.58$ GeV appena sopra la soglia di produzione di $B\bar{B}$
 $BR(Y(4S) \rightarrow B\bar{B}) > 96\%$
- Energie dei fasci asimmetriche: boost alle coppie $B\bar{B}$, per misure di violazione di CP dipendenti dal tempo
- Alta luminosità di picco $L > 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



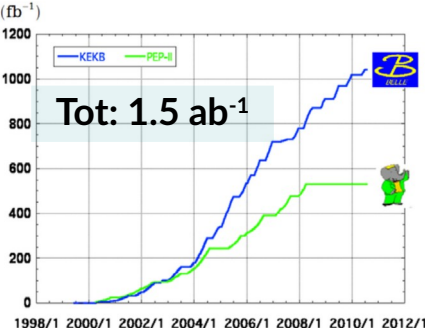
Belle@KEKB, KEK, Tsukuba (JP)
1999–2010, $\int L dt = 1 \text{ ab}^{-1}$

Prima generazione di B-factories

BABAR@PEP-II, SLAC (USA)
1999–2008, $\int L dt = 0.5 \text{ ab}^{-1}$

Integrated luminosity of B factories



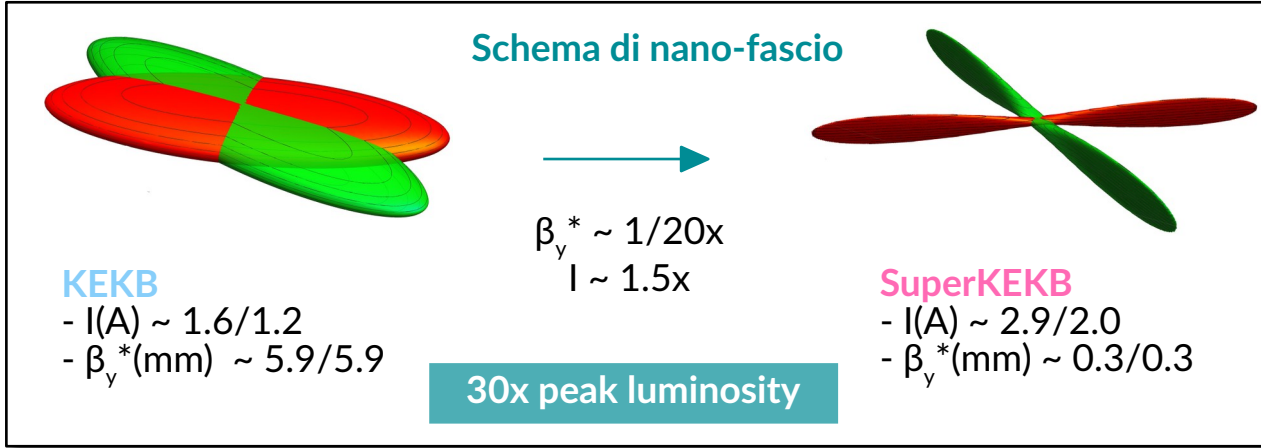
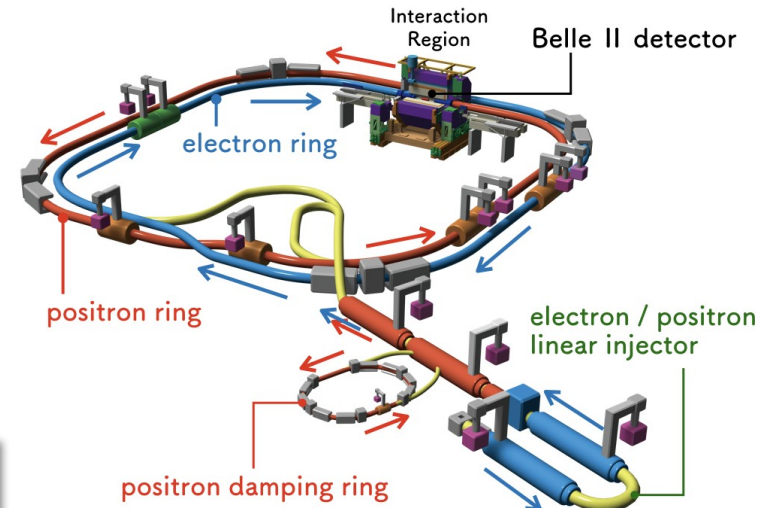
Tot: 1.5 ab^{-1}

> 1 ab^{-1}
On resonance:
 $Y(5S)$: 121 fb^{-1}
 $Y(4S)$: 711 fb^{-1}
 $Y(3S)$: 3 fb^{-1}
 $Y(2S)$: 25 fb^{-1}
 $Y(1S)$: 6 fb^{-1}
Off reson./scan:
 $\sim 100 \text{ fb}^{-1}$

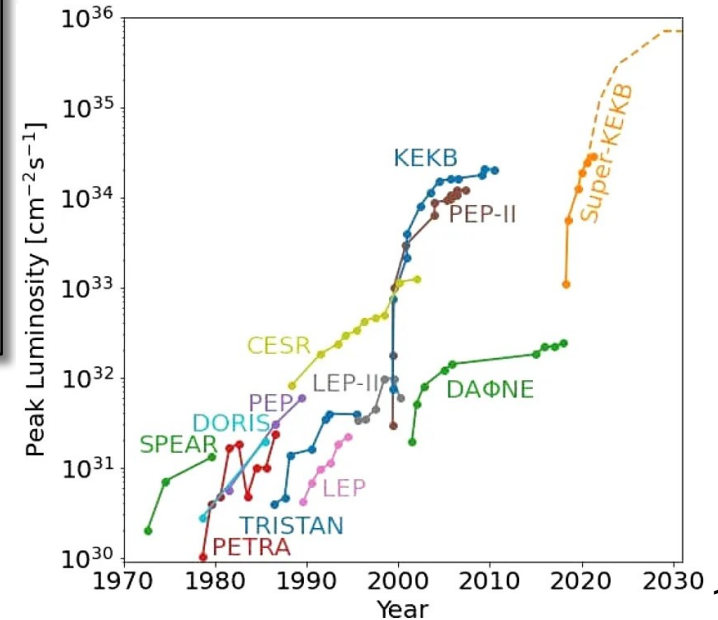
$\sim 550 \text{ fb}^{-1}$
On resonance:
 $Y(4S)$: 433 fb^{-1}
 $Y(3S)$: 30 fb^{-1}
 $Y(2S)$: 14 fb^{-1}
Off resonance:
 $\sim 54 \text{ fb}^{-1}$

SuperKEKB

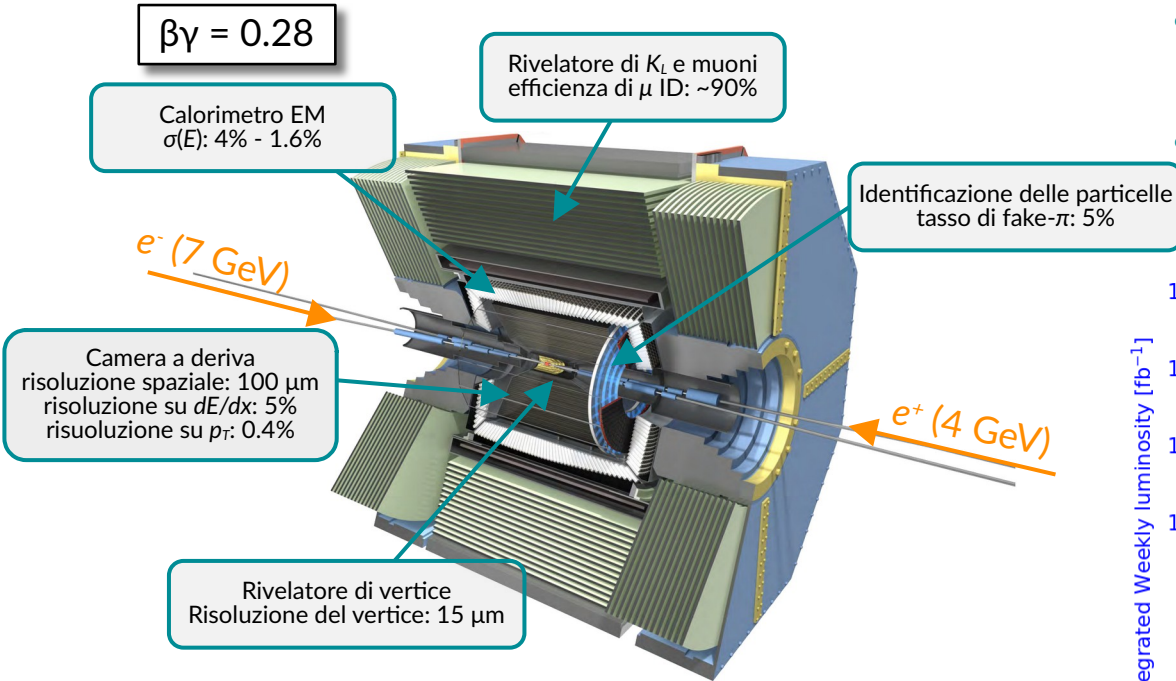
- Nuova generazione di B-factory → fornisce luminosità a Belle II
- Energie dei fasci asimmetriche: e^- (7 GeV) / e^+ (4 GeV)
Opera soprattutto alla $Y(4S)$, ma previste prese dati da $Y(2S)$ a $Y(6S)$
- Progettato per raggiungere la luminosità di picco più alta al mondo



- Record mondiale di luminosità raggiunto nel 2021: $3.8 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- $I(e^-/e^+) = 820/1034 \text{ mA}$ and $\beta_y^* = 1 \text{ mm}$
- Luminosità di picco obiettivo: $6.5 \cdot 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

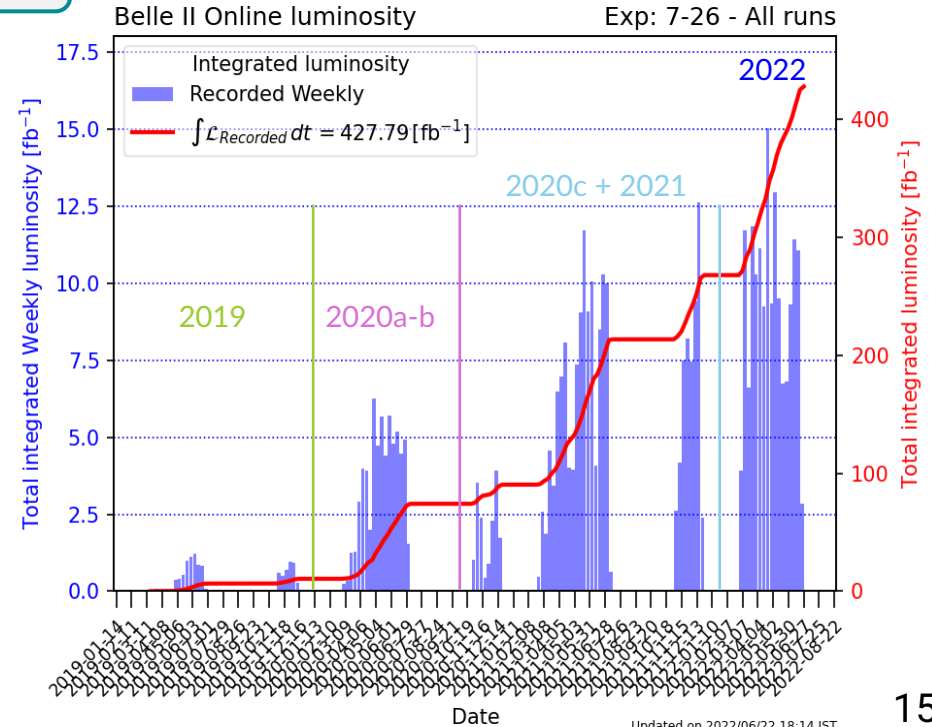


Belle II at SuperKEKB

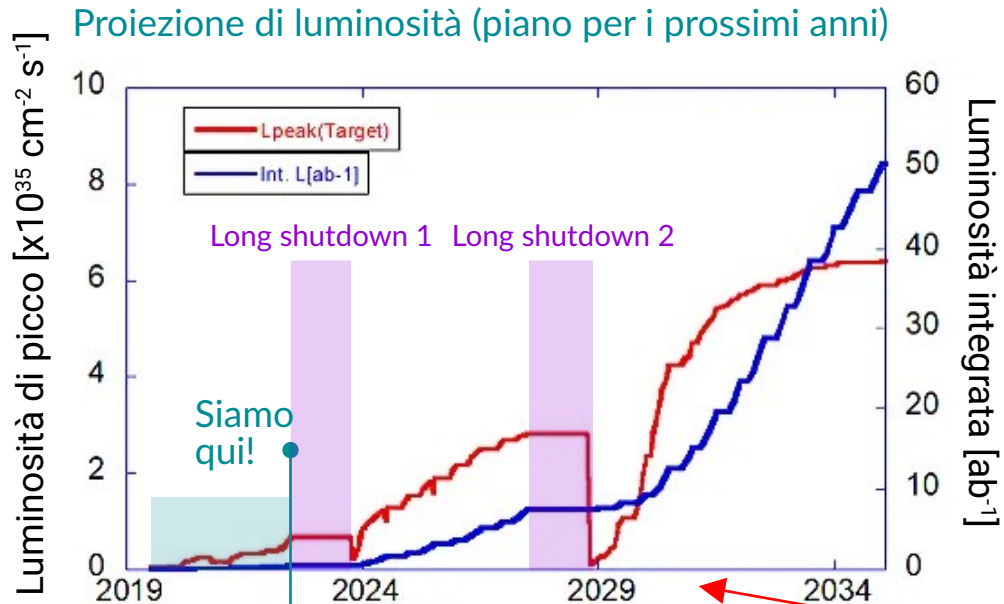


- Aggiornamento di Belle@KEKB \rightarrow risoluzioni e identificazione di particelle (PID) migliori, capacit  di far fronte a fondo maggiore
- Ricopre pi  del 90% dell'angolo solido totale

- Prime collisioni durante presa dati di commissioning il 26 Aprile 2018
 - \rightarrow 0.5 fb^{-1} raccolti nel 2018
- Prime collisioni con detector completo a Marzo 2019
 - \rightarrow 424 fb^{-1} raccolti in 3 anni
- Luminosit  integrata obbiettivo: **50 ab^{-1}** (x30 Belle + BaBar)

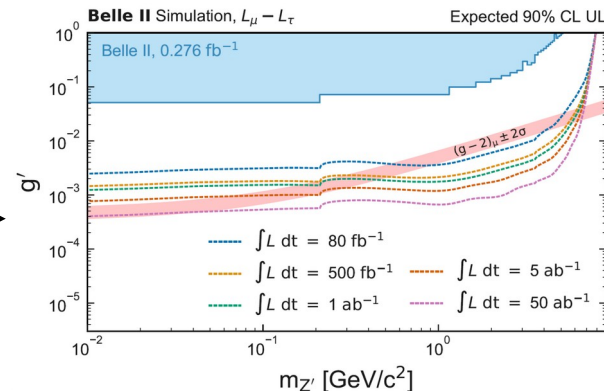


Prospettive a Belle II

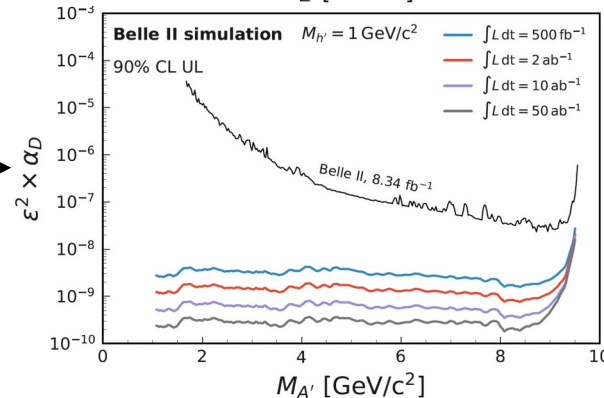


★ Snowmass:
[arxiv:2207.06307](https://arxiv.org/abs/2207.06307)

$Z' \rightarrow \text{invisible}$



$h' \rightarrow \text{invisible}$

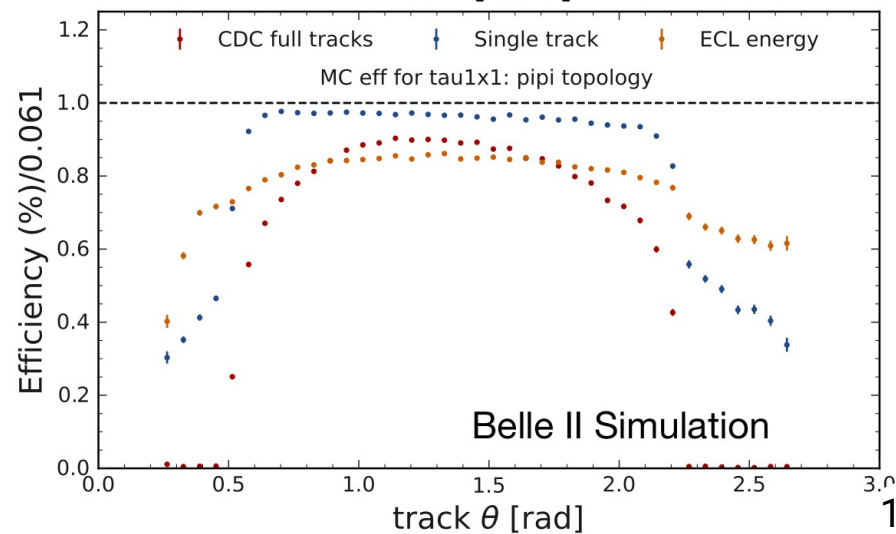
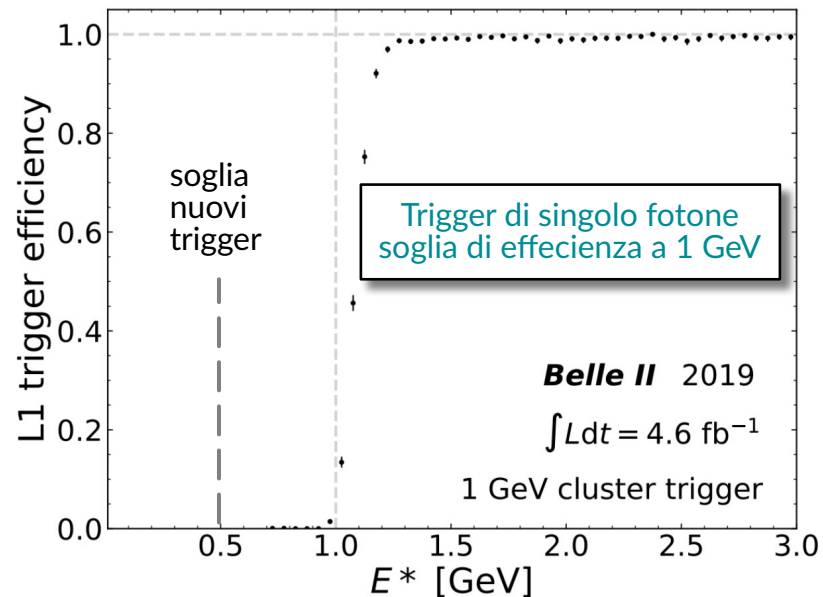


- 424 fb⁻¹ raccolti
- **I risultati ottenuti son fortemente limitati dalla statistica**
 - risultati “world-leading” già pubblicati con set di dati iniziale (< 20% del set di dati raccolto)

- Nei prossimi anni, Belle II raccoglierà un set di dati 100 volte maggiore rispetto a quello raccolto finora
- ➔ **Belle II guiderà l'esplorazione del settore oscuro leggero nell'intervallo di massa MeV-GeV**

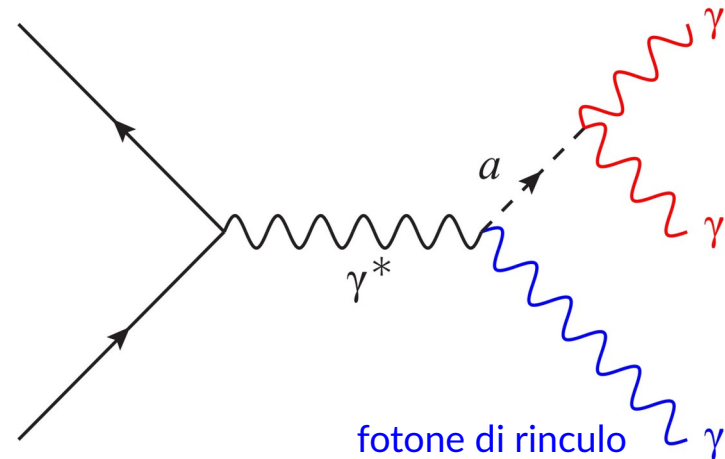
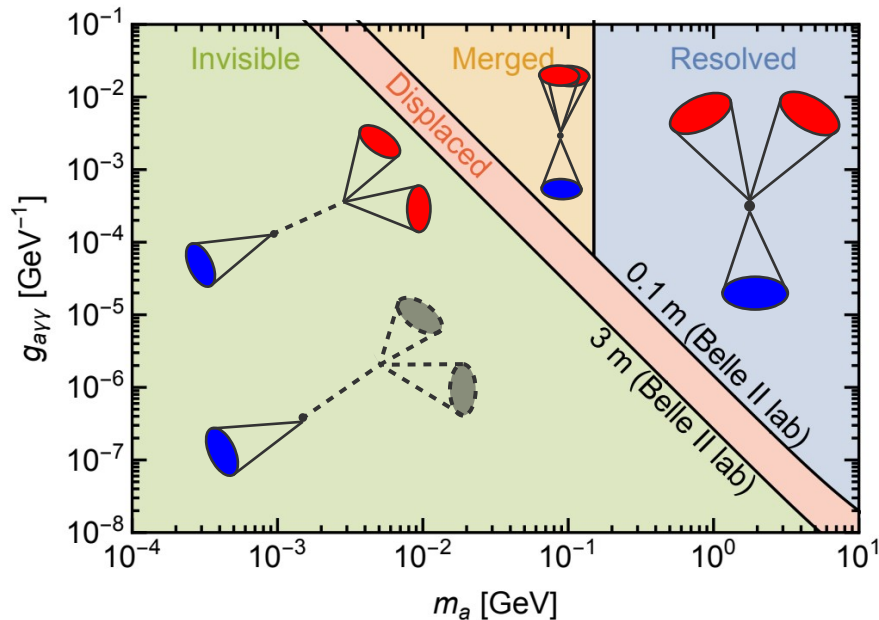
Trigger per eventi a bassa molteplicità

- Trigger a due livelli
 - Trigger di primo livello (L1) hardware: < 30 kHz
 - Trigger di alto livello (HLT) software: < 10 kHz
- **Linee di trigger dedicate** per eventi a bassa molteplicità (basso numero di tracce)
 - Sopprimere processi di QED con alta sezione d'urto **senza “uccidere” il segnale**
 - **Richiede una precisa conoscenza delle accettanze e efficienze del rivelatore**
- Esempi
 - Trigger di singolo fotone
 - Trigger di singolo muone
 - Trigger di singola traccia



Axion-like particles (ALPs)

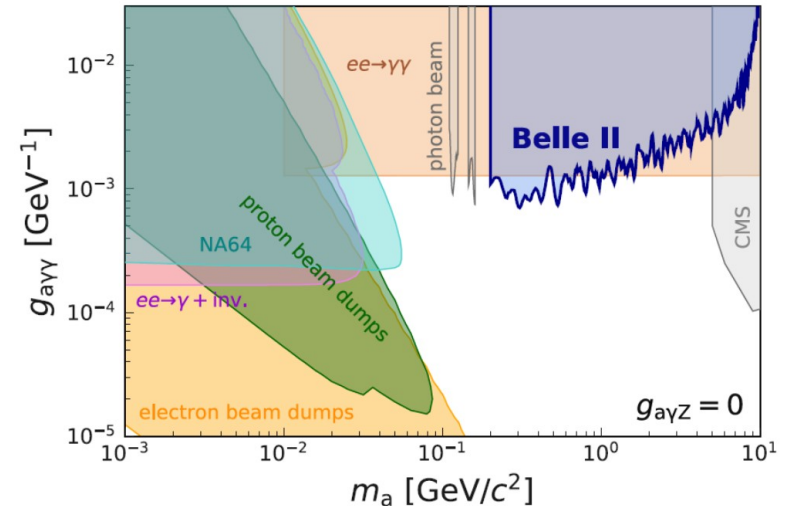
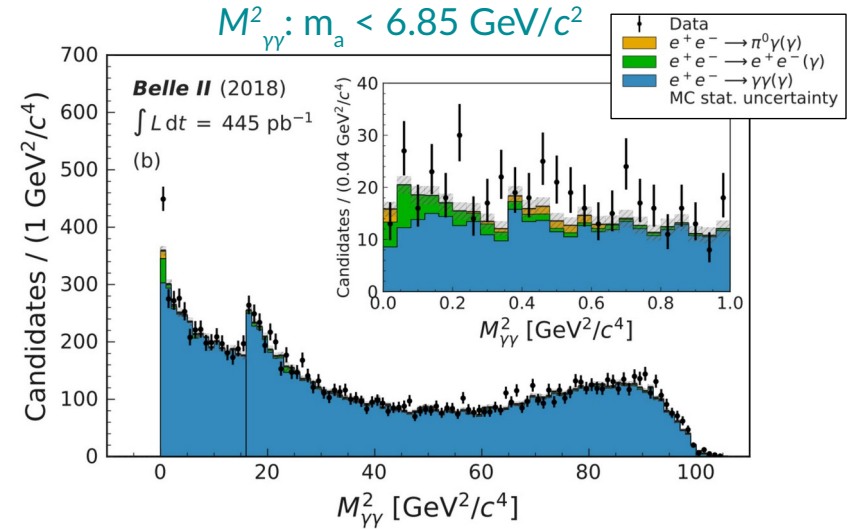
- ALP alla scala del GeV: mediatore pseudo-scalare tra DM e SM
- Se l'accoppiamento ALP-fotone $g_{a\gamma\gamma}$ è dominante, allora $BR(a \rightarrow \gamma\gamma) \sim 100\%$
- Focus sulla regione di massa dove ALP decade immediatamente e i fotoni sono ben risolti da Belle II



Search for an ALP at Belle II

[Phys. Rev. Lett. 125, 161806 \(2020\)](#)

- Selezione degli eventi:
 - trigger dal calorimetro elettromagnetico (efficienza del calorimetro elettromagnetico è quasi del 100%)
 - three- γ invariant mass compatible with collision \sqrt{s}
- Segnale, **picco stretto in $M_{\gamma\gamma}^2$ or M_{recoil}^2**
(a seconda della risoluzione migliore del picco di segnale)
- Fondo principale da $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)$
- Segnale estratto mediante fit
 - Nessun eccesso osservato in 0.445 fb^{-1}
 - Limiti superiori al 95% CL su $g_{a\gamma\gamma}$
 - Migliori limiti al mondo per $m_a \sim 0.5 \text{ GeV}/c^2$



Ricerca del fotone oscuro A'

[1] P. Fayet, [Phys. Lett. B 95, 285 \(1980\)](#)
 [2] P. Fayet, [Nucl. Phys. B 187, 184 \(1981\)](#)

- Estensione U(1) del SM
- Nuovo bosone massivo vettoriale A' con accoppiamento al SM mediante mixing cinetico, con accoppiamento ϵ [1,2]

$$\mathcal{L}_{int} = e \underbrace{\epsilon}_{\text{Interaction strength}} \underbrace{A'_\mu}_{\text{Dark photon field}} \underbrace{J_{em}^\mu}_{\text{Electromagnetic current}}$$

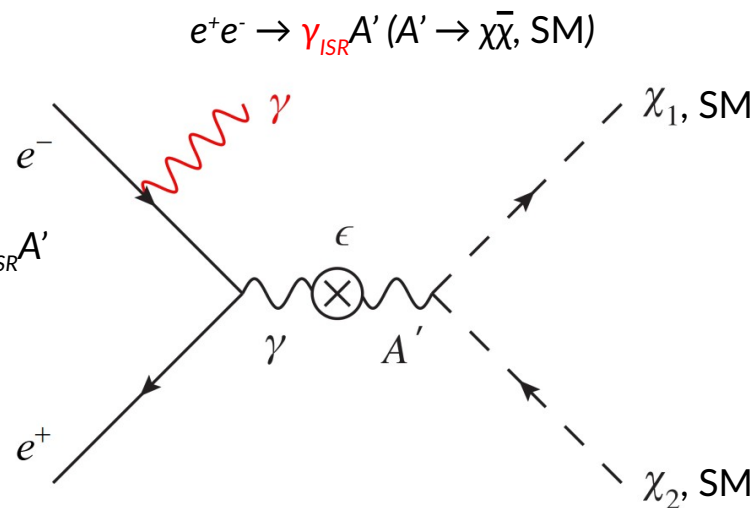
- Può essere prodotto ai collisori e^+e^- mediante diversi processi:

- produzione diretta: $e^+e^- \rightarrow \gamma_{ISR} A'$
- decadimento di mesoni: $\pi^0 \rightarrow A' \gamma$
- dark-higgsstrahlung: $e^+e^- \rightarrow A'^* \rightarrow A' h'$

- **Produzione diretta con ISR particolarmente interessante:** $e^+e^- \rightarrow \gamma_{ISR} A'$

- Due scenari base dipendenti dalla massa di A' :

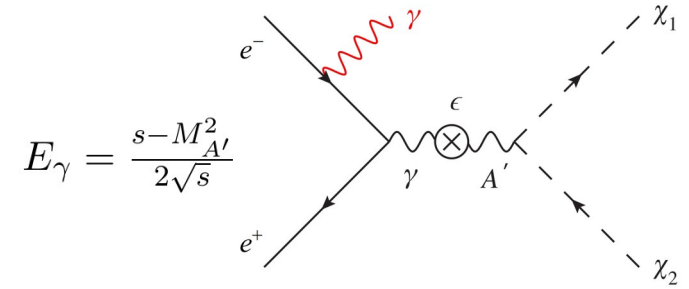
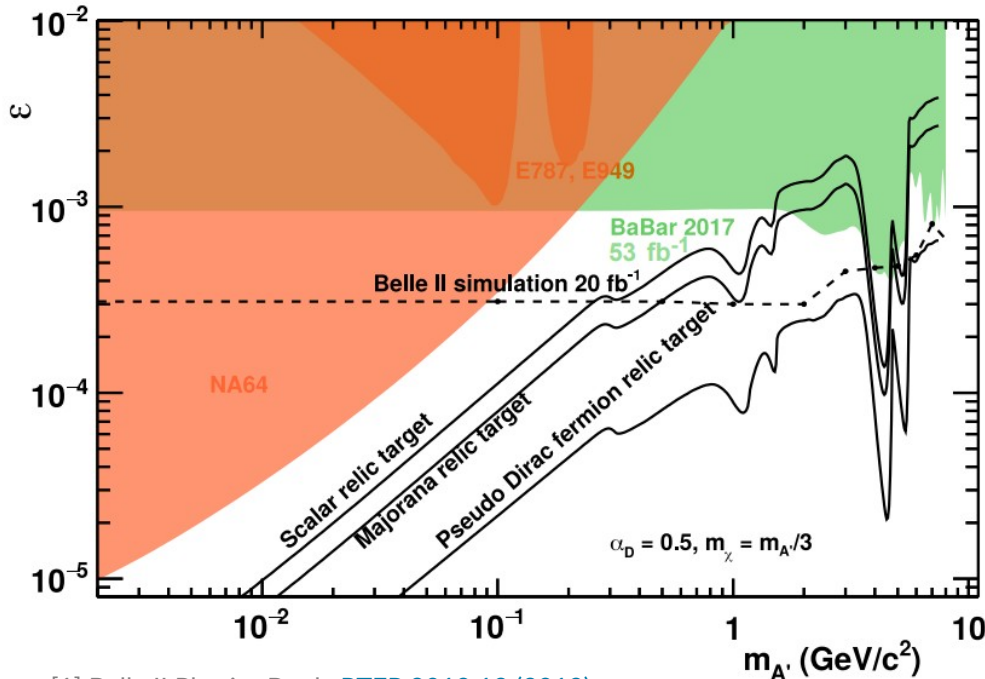
- $M_{A'} > 2m_\chi$: decadimento invisible $A' \rightarrow \chi\bar{\chi}$
- $M_{A'} < 2m_\chi$: decadimento visibile in particelle SM



Fotone oscuro invisibile

- $e^+e^- \rightarrow \gamma_{ISR} A' (A' \rightarrow inv.)$

- Ricerca di singolo fotone: trigger di singolo fotone necessario, presente nel set di dati completo raccolto a Belle II

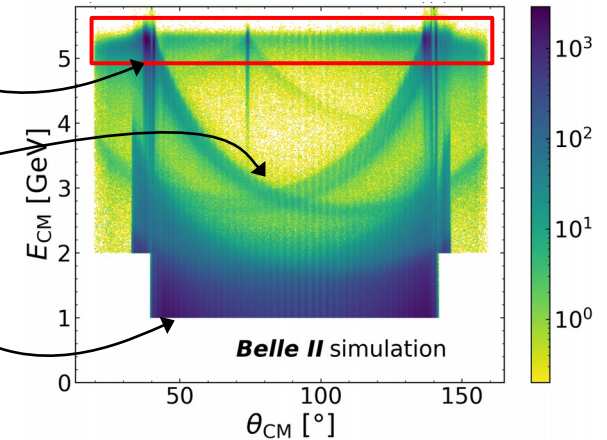


Smulazione del fondo assunto 20 fb^{-1}

$\gamma\gamma$, con fotone non rivelato

$\gamma\gamma\gamma$, con due fotoni non rivelati

$e^+e^-\gamma$, con e^+e^- fuori dall'accettanza del rivelator



- Ci si aspetta che Belle II performi meglio di BABAR [2]:
 - boost più piccolo: **accettanza maggiore**
 - **veto dal rivelatore di muoni**: rigettare eventi con un fotone non rivelato nel calorimetro elettromagnetico
 - **migliore ermeticità del calorimetro**

[1] Belle II Physics Book, [PTEP 2019.12 \(2019\)](#)

[2] Less et al, [Phys. Rev. Lett. 119. 131804 \(2017\)](#)

Fotone oscuro visibile

- BABAR [1]
 - Set di dati completo 514 fb⁻¹
 - Decadimento del fotone oscuro in e^+e^- and $\mu^+\mu^-$
 - Segnale, picco nella massa invariante del di-leptone
 - Fondi: processi di QED $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$, $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma)$ e risonanti da J/ψ , $\psi(2S)$ etc. (vetati)
 - Limiti superiori al 90% CL sull'accoppiamento del mixing cinetico ϵ del $O(10^{-3})$:
- LHCb [2]
 - Migliori limiti nell'intervallo 200 -700 MeV
- Belle II raggiungerà la sensibilità più alta [3]
 - analisi in preparazione

[1] J.P. Lees et al, [Phys. Rev. Lett. 113. 201801 \(2014\)](#)

[2] R. Aaij et al, [PhysRevLett.124.041801 \(2020\)](#)

[3] E. Kou et al, [Prog Theor Exp Phys \(2019\)](#)

