

Alla frontiera dell'alta intensità: l'esperimento Belle II

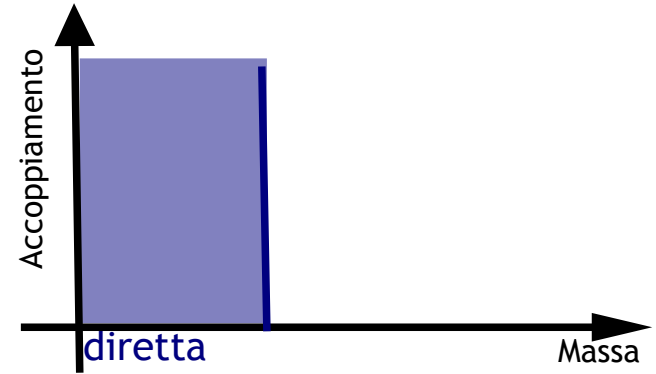
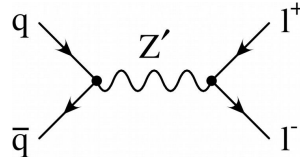
Stefano Moneta

stefano.moneta@pg.infn.it



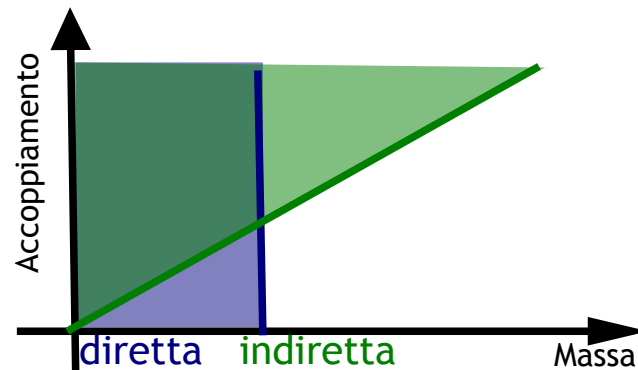
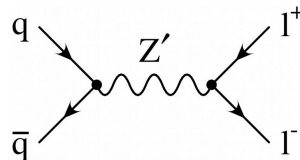
Ricerca di nuova fisica

- **Ricerca diretta**: produzione di nuove particelle
 - Richiede energie pari alle masse della nuova fisica → **frontiera dell'energia**
 - CMS, ATLAS

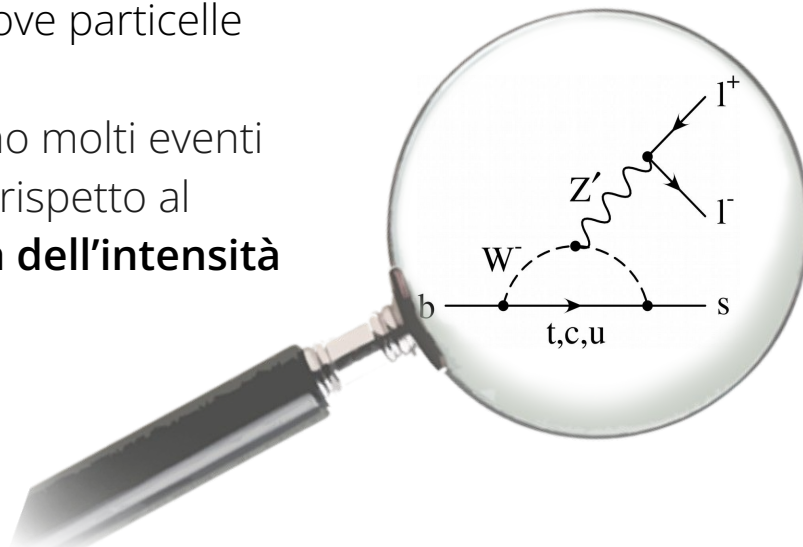


Ricerca di nuova fisica

- **Ricerca diretta**: produzione di nuove particelle
 - Richiede energie pari alle masse della nuova fisica → **frontiera dell'energia**
 - CMS, ATLAS



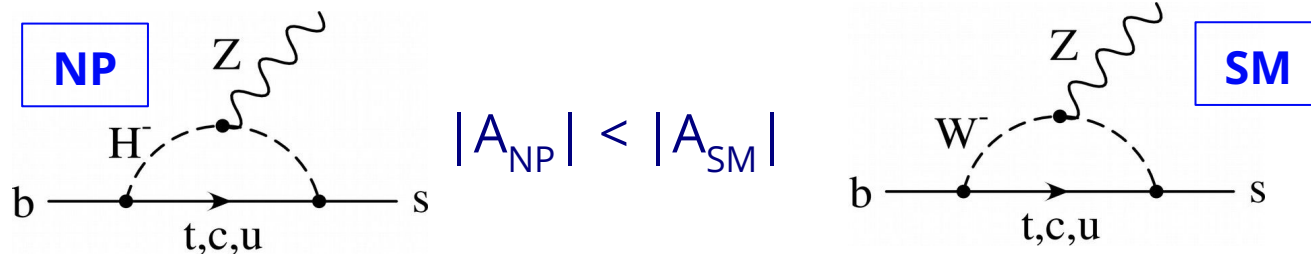
- **Ricerca indiretta**: contributi di nuove particelle all'interno di processi noti
 - Misure di precisione: richiedono molti eventi per scovare piccole differenze rispetto al Modello Standard → **frontiera dell'intensità**
 - Belle II, LHCb, NA62, ...



Misure indirette

- Confronto: misure vs Modello Standard (SM)

Fin'ora generale accordo ($< 3\sigma$) $\Rightarrow$ i contributi della nuova fisica (NP) sono piccoli



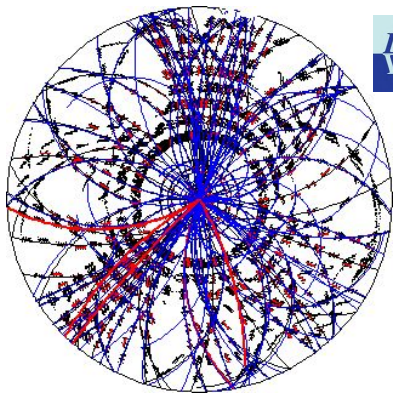
Negli esperimenti misuriamo: $|A_{SM} + A_{NP}|^2 = |A_{SM}|^2 + |A_{NP}|^2 + 2\text{Re}(A_{SM}^* A_{NP})$

- Processi **soppressi** o proibiti nel SM $\rightarrow |A_{NP}|^2$
- Processi SM sensibili alla **interferenza** con NP $\rightarrow \text{Re}(A_{SM}^* A_{NP})$

I quark b danno accesso a molteplici processi sensibili a NP

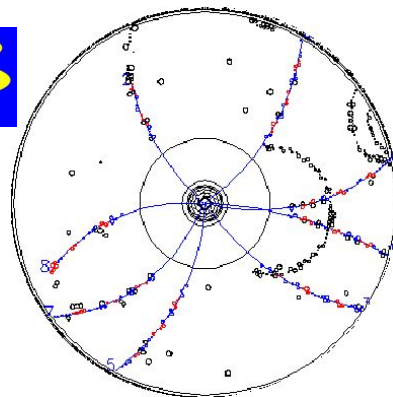
Come si producono mesoni B ?

Collisore
adronico:
 $p\bar{p}$, pp



Interazione **forte** dei quark/gluoni nei
protoni

- ✓ Alto rate di eventi
- ✓ Produzione di tutti i tipi di adroni- B
- ✗ Cinematica iniziale ignota
- ✗ Molti eventi di pile-up



B -factory:
 e^+e^-

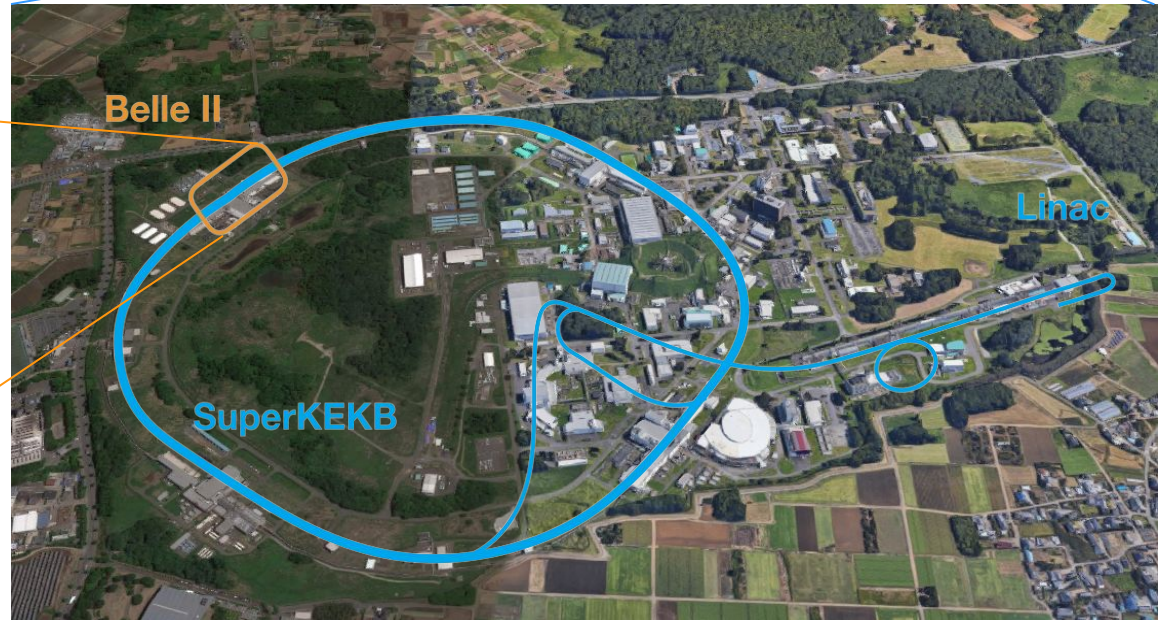
Interazione **elettromagnetica** tra
particelle elementari

- ✓ Cinematica iniziale nota
- ✓ Puri eventi $B\bar{B}$ dalla risonanza $\Upsilon(4S)$,
senza tracce aggiuntive
- ✗ Basso rate di collisioni utili
- ✗ Solo $B^0\bar{B}^0$, B^+B^-

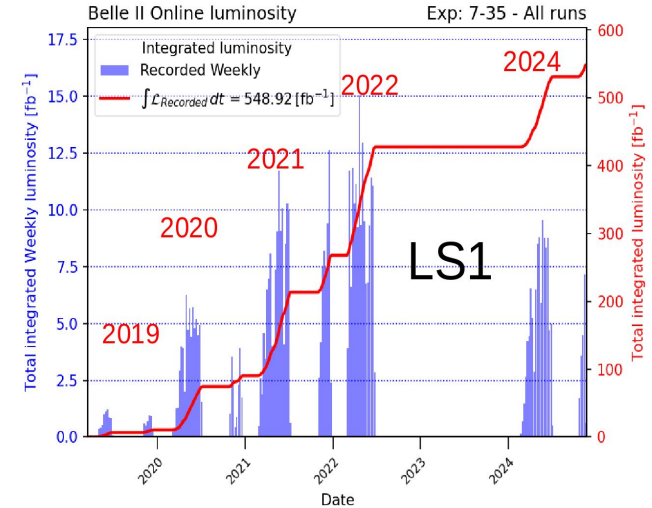
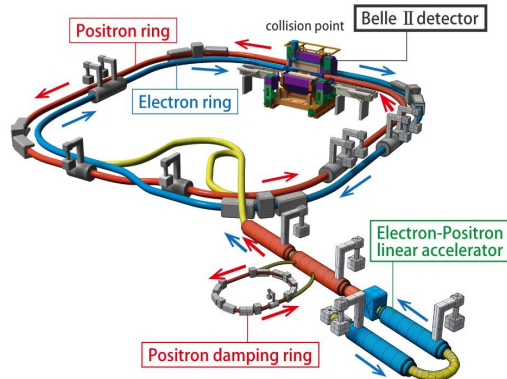
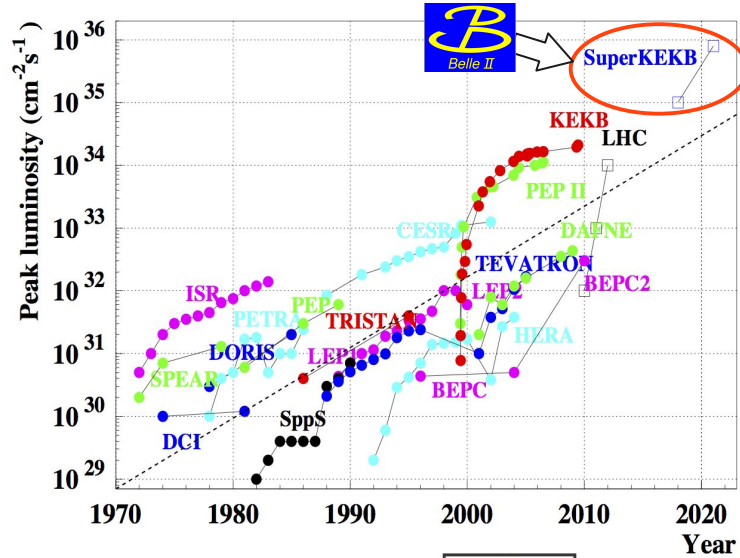
高エネルギー加速器研究機構

Kō Enerugī Kasokuki Kenkyū Kikō

- **Tsukuba**, prefettura di Ibaraki
(~1 ora da Tokyo)
- Principale acceleratore di
particelle in Giappone



La nuova frontiera dell'intensità



- > 500 milioni di eventi **BB** dal 2019
- **Record mondiale di luminosità!**
 $5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Il rivelatore Belle II

Calorimetro elettromagnetico
omogeneo, cristalli CsI(Tl)



Rivelatore di K_L e muoni:
RPC e scintillatori con PMT

elettroni (7GeV)

Beam-pipe in berillio
diametro 2 cm

Rivelatore di vertice:
2 strati Pixel Si+
4 strati microstrisce Si

Camera a deriva:
gas: He(50%) + C₂H₆(50%)

Identificazione K/ π
Time-of-propagation (barrel)
Prox. focusing Aerogel RICH (avanti)

positroni (4GeV)

Rivelatore di muoni

Magnete

Rivelatore di velocità

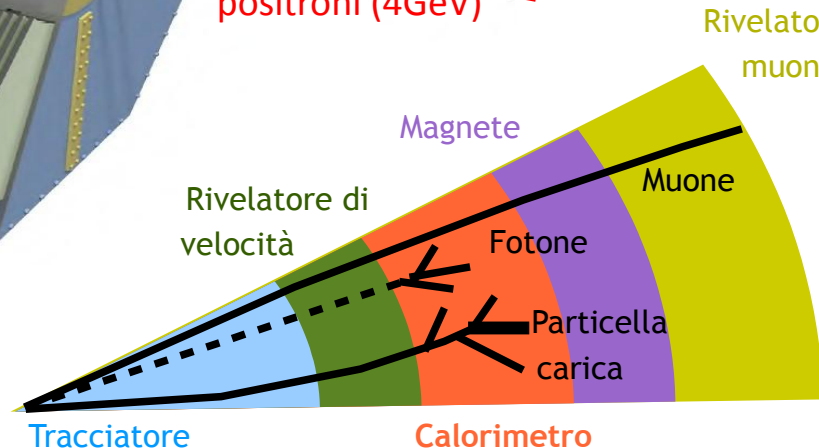
Fotone

Particella carica

Muone

Tracciatore

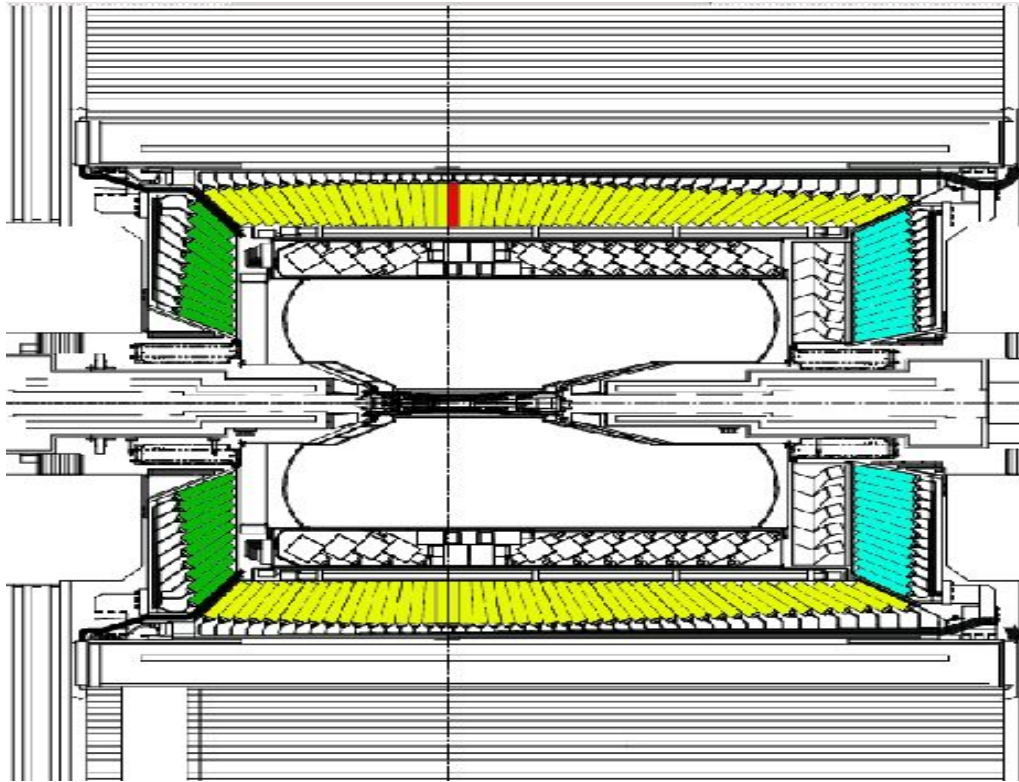
Calorimetro



Il calorimetro elettromagnetico

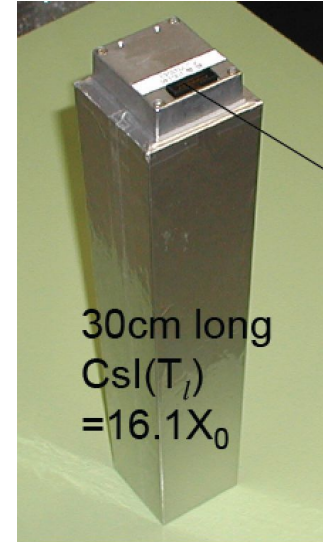


INFN
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



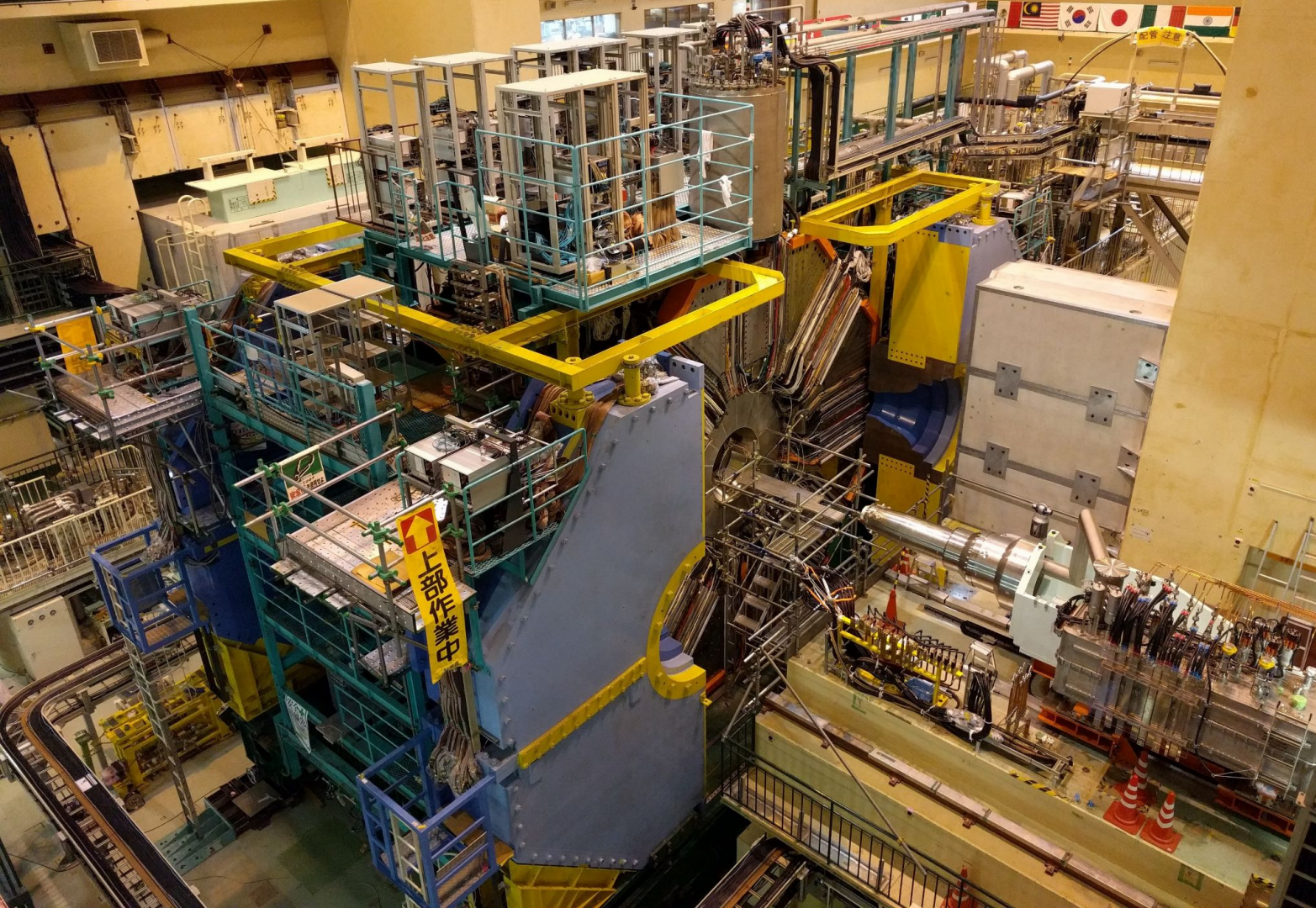
Fondamentale per la fisica dei B :

- Ricostruisce i $\pi^0 \rightarrow$ abbondanti nei decadimenti dei B
- Misura l'energia totale dell'evento (ermeticità)

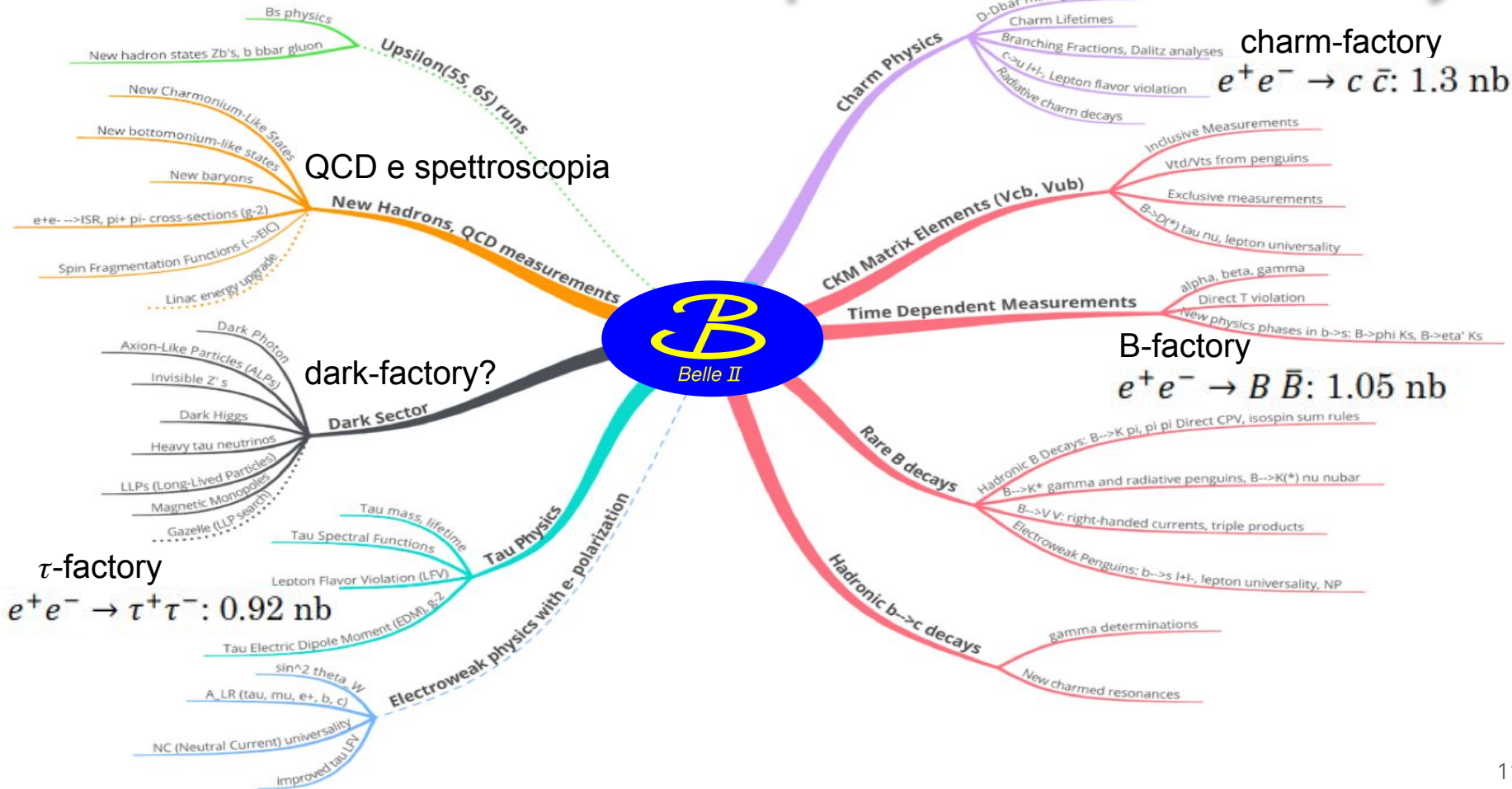


8736 cristalli di
CsI(Tl) letti da
fotorivelatori

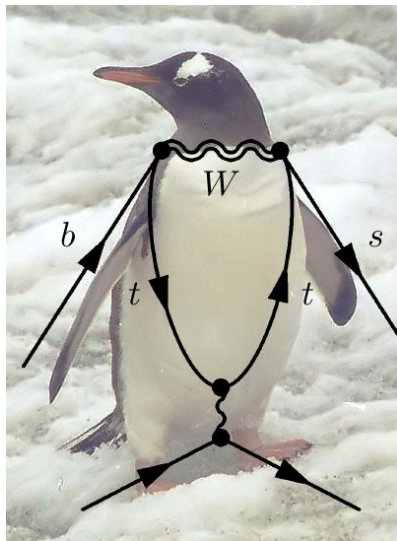
30cm long
CsI(Tl)
 $=16.1X_0$



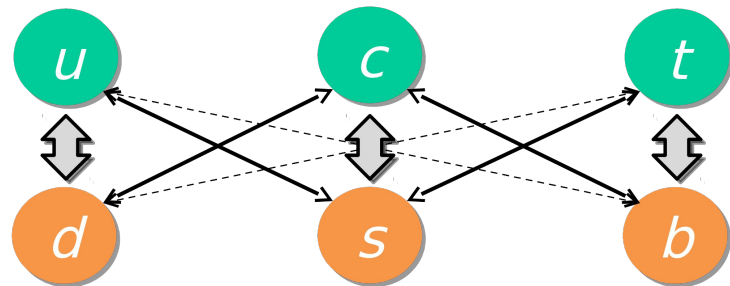
La fisica a Belle II non semplicemente una B-factory!



Decadimenti rari dei B

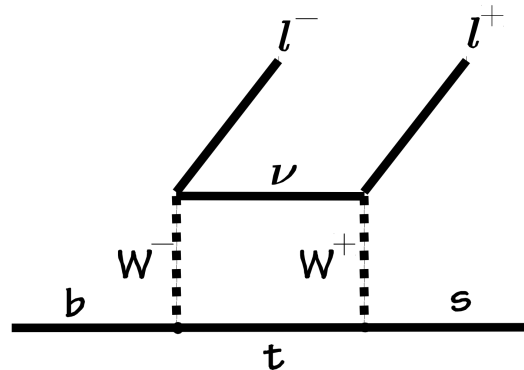
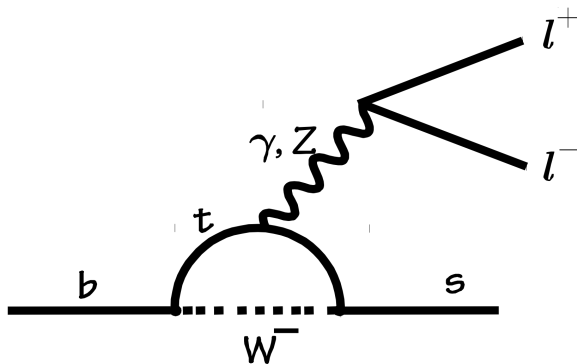


Transizioni $b \rightarrow s$

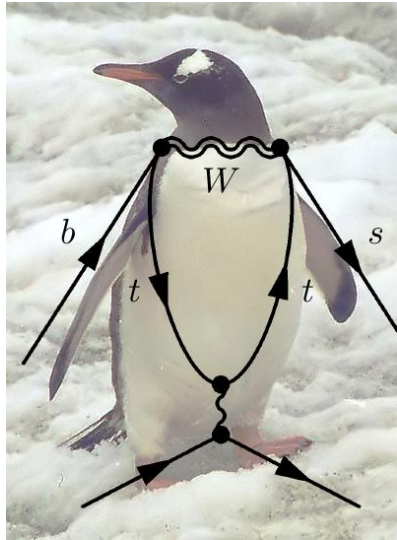


Cambio di “**sapore**” ma stessa carica elettrica

- Avviene solo tramite loop intermedi con particelle virtuali → **soppresso nel Modello Standard**
- Anomalie in questi processo possono indicare **nuova fisica**



Ricerca di “pinguini”



KNOW YOUR PENGUINS



ADELIE

NEAR THREATENED



AFRICAN

ENDANGERED



CHINSTRAP

LEAST CONCERNED



EMPEROR

NEAR THREATENED



ERECT-CRESTED

ENDANGERED



FIORDLAND

VULNERABLE



GALAPAGOS

ENDANGERED



GENTOO

NEAR THREATENED



HUMBOLDT

VULNERABLE



KING

LEAST CONCERNED



LITTLE/BLUE/FAIRY

LEAST CONCERNED



MACARONI

VULNERABLE



MAGELLANIC

NEAR THREATENED



NORTHERN
ROCKHOPPER

ENDANGERED



SOUTHERN
ROCKHOPPER

VULNERABLE



ROYAL

NEAR THREATENED



SNARES

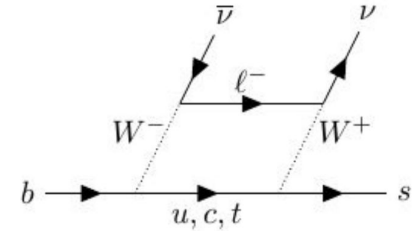
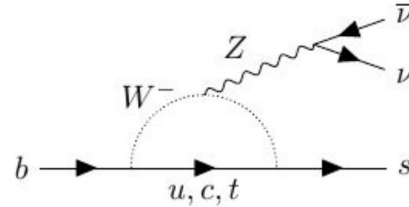
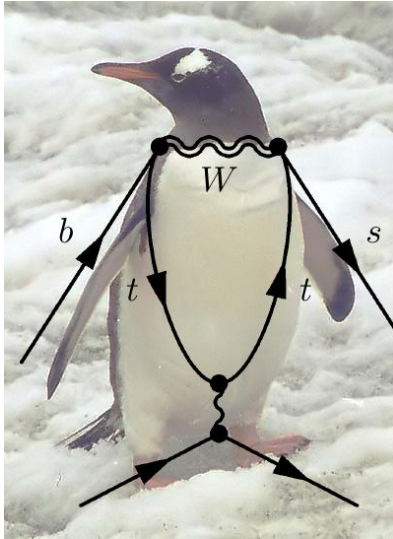
VULNERABLE



YELLOW-EYED

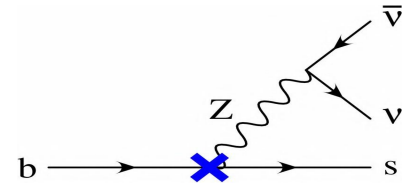
ENDANGERED

Decadimento $B \rightarrow K\nu\nu$



Decadimento $b \rightarrow s$

- nel MS avviene solo indirettamente
 - sensibile a **nuova fisica**
 - doppio Higgs, lepto-quark, ...
 - $\nu\nu$ possono nascondere una nuova particella invisibile
- Predizione teorica accurata
 - $\text{BR}(B^+ \rightarrow K^+ \nu\nu) = 5.0 \times 10^{-6}$



Prima evidenza $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ a Belle II

EDITORS' SUGGESTION | OPEN ACCESS

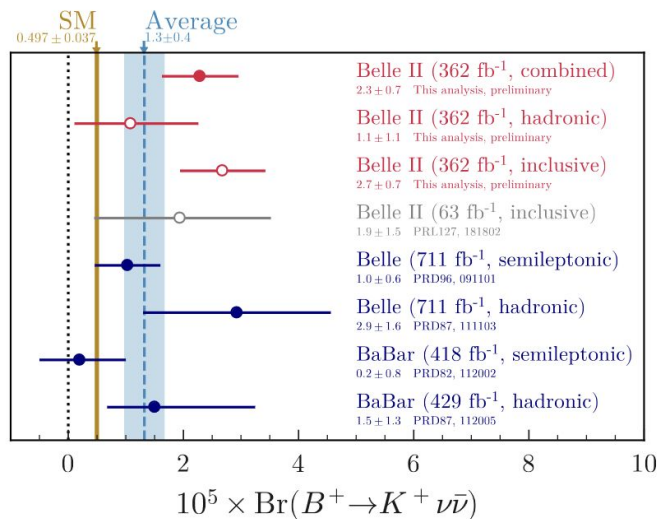
Phys. Rev. D **109**, 112006 – Published 6 June, 2024

Evidence for $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ decays

I. Adachi , K. Adamczyk , L. Aggarwal , H. Ahmed , H. Aihara , N. Akopov , A. Aloisio , N. Anh Ky , D. M. Asner 

et al. (Belle II Collaboration)

likelihood fit. Our inclusive and hadronic analyses yield consistent results for the $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ branching fraction of $[2.7 \pm 0.5(\text{stat}) \pm 0.5(\text{syst})] \times 10^{-5}$ and $[1.1^{+0.9}_{-0.8}(\text{stat})^{+0.8}_{-0.5}(\text{syst})] \times 10^{-5}$, respectively. Combining the results, we determine the branching fraction of the decay $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ to be $[2.3 \pm 0.5(\text{stat})^{+0.5}_{-0.4}(\text{syst})] \times 10^{-5}$, providing the first evidence for this decay at 3.5 standard deviations. The combined result is 2.7 standard deviations above the standard model expectation.

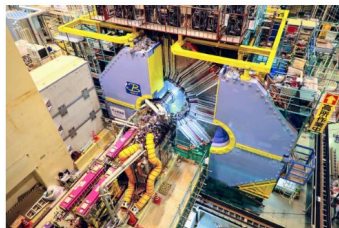


- **Combinazione** di due metodi di ***B*-tag** complementari
- **Prima evidenza (3.5 σ)** di un decadimento $B \rightarrow K \nu \bar{\nu}$
- **Deviazione di 2.7 σ dal Modello Standard**

Prima evidenza $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ a Belle II

EVENTI DI RARA BELLEZZA OSSERVATI PER LA PRIMA VOLTA DA BELLE II

27 Novembre 2023



L'esperimento Belle II al laboratorio KEK in Giappone, a cui lavora una grande collaborazione internazionale di cui l'INFN è uno dei principali componenti, ha ottenuto la prima evidenza di un decadimento particolarmente elusivo del mesone B carico, una particella composta da un quark beauty (bellezza) ed un antiquark. Lo studio, presentato in anteprima lo scorso luglio alla conferenza della European Physical Society ad Amburgo, e recentemente in un seminario dedicato al CERN, è stato ora pubblicato su arXiv ed inviato alla rivista Physical Review D. Si tratta di un risultato che parla molto italiano perché l'analisi dei dati è stata condotta da un gruppo italiano della

Sezione di Perugia dell'INFN, in collaborazione con gruppi tedeschi dei laboratori KIT e DESY, francesi del CNRS di Strasburgo e con il KEK.



Decadimento Mesone B, impresa ardua ma riuscita, che cos'è?

L'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PERUGIA GIOCA UN RUOLO CHIAVE

9 dicembre 2023 | Indirizzatura, Scienza



Facebook Twitter LinkedIn YouTube Instagram

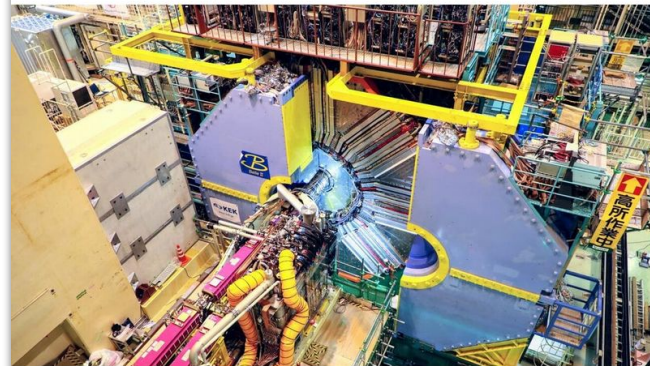
Decadimento Mesone B, impresa ardua ma riuscita, che cos'è?

L'Università degli Studi di Perugia, attraverso il suo Dipartimento di Fisica e Geologia, ha partecipato attivamente alla scoperta di un fenomeno raro e difficile da individuare nel campo della fisica delle particelle. **Questa scoperta riguarda il decadimento del mesone B carico**, una particella composta da un quark beauty e un antiquark. L'esperimento, denominato Belle II, è stato condotto presso il laboratorio KEK di Tsukuba, in Giappone, e ha coinvolto una vasta collaborazione internazionale.

PERUGIA TODAY

Decadimento del mesone B carico, la scoperta dei ricercatori dopo venti anni di esperimenti

La professoressa Claudia Cecchi, responsabile del gruppo Belle II all'Unipg: "La qualità del lavoro e l'interesse dei risultati testimoniano la maturità della collaborazione e ci rendono ottimisti e motivati nell'affrontare le sfide del prossimo futuro"



L'Università di Perugia annuncia con una nota che "l'esperimento Belle II nel laboratorio giapponese Kek di Tsukuba, a una settantina di chilometri da Tokyo, ha ottenuto la prima evidenza di un decadimento particolarmente elusivo del mesone B carico, una particella composta da un quark beauty e un antiquark". Lo studio, prosegue la nota, "è stato presentato recentemente in un seminario dedicato al CERN e pubblicato su arXiv, è in corso di pubblicazione sulla rivista Physical Review D".

L'esperimento, specifica l'ateneo, "è frutto di un'ampia collaborazione internazionale in cui il Dipartimento di Fisica e Geologia dell'Unipg è fra i principali protagonisti".

Il gruppo Belle II di Perugia



Claudia Cecchi
(capogruppo)
Professoressa
associata



Elisa Manoni
Prima ricercatrice
INFN



Maurizio Biasini
Professore
associato



Stefano Moneta
Assegnista di
ricerca INFN



La collaborazione Belle II

≈ 1100 membri attivi

≈ 120 istituzioni da 3 continenti

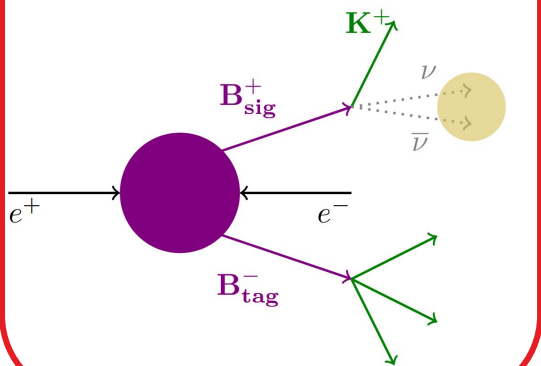


**Belle II general
meeting,
ottobre 2024**

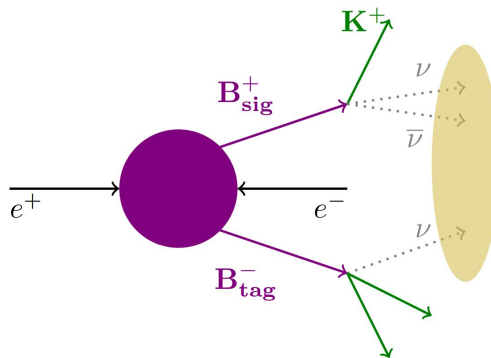
Metodi di B -tag

Prima evidenza $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$

Tag adronico

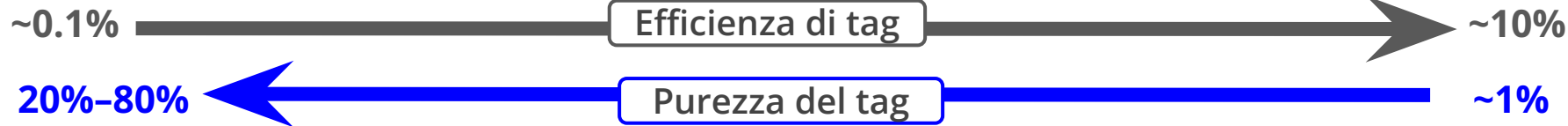
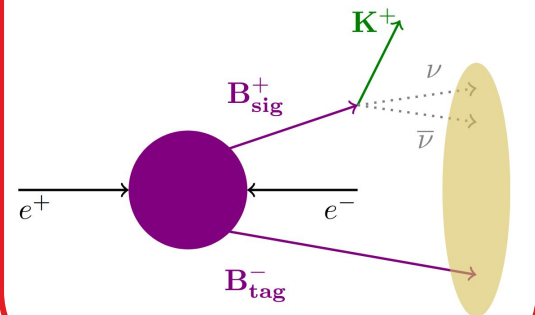


Tag semileptonico



Prima evidenza $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$

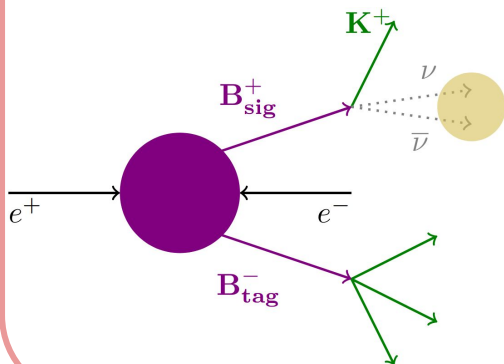
Tag inclusivo



Metodi di B -tag

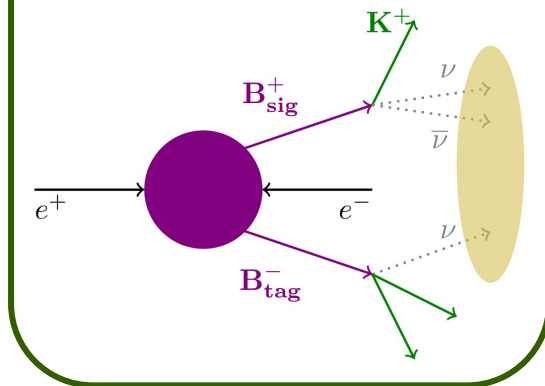
Prima evidenza $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$

Tag adronico



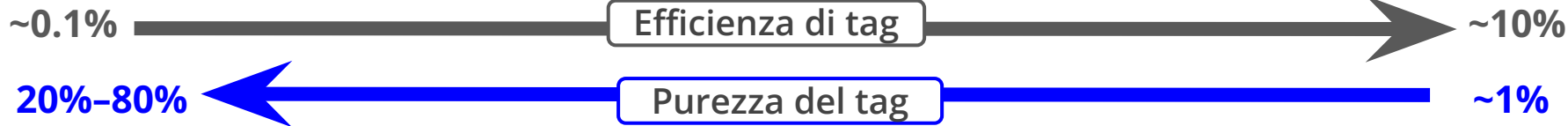
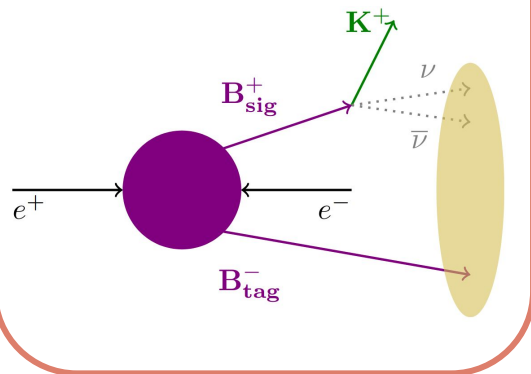
Tag complementare $\rightarrow$ da esplorare!

Tag semileptonico



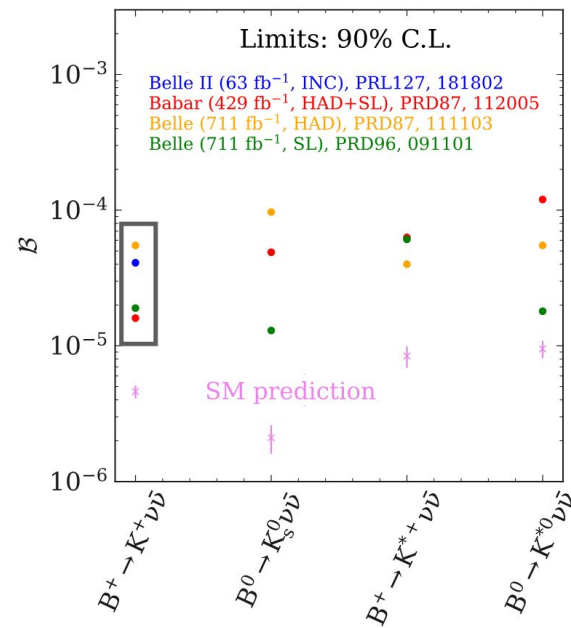
Prima evidenza $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$

Tag inclusivo



Proposte tesi 2025 - analisi dati $B \rightarrow K\nu\bar{\nu}$

- **B -tag semileptonico** → complementare a tag adronico e inclusivo
- Aggiunta di stati finali: K^+ , K_S^0 , K^{*+} , K^{*0}
- Competenze:
 - buona conoscenza linguaggio **python**
 - analisi statistica dei dati (base)
- Interessi:
 - approfondire la fisica dei B e ricerca di nuova fisica
 - algoritmi di ML (classificatori multivariati)
 - metodi statistici avanzati

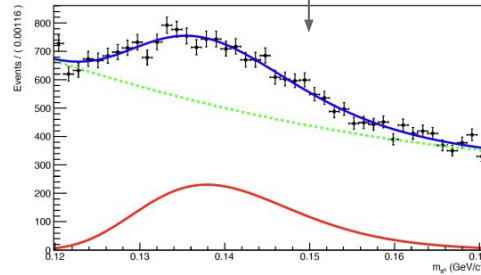
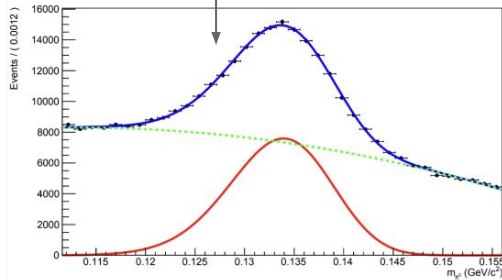
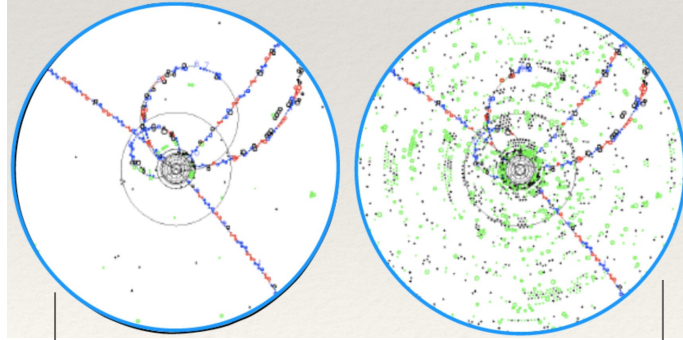


Decay	SM total
$B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$	5.06 ± 0.31
$B^0 \rightarrow K_S^0 \nu \bar{\nu}$	2.05 ± 0.14
$B^+ \rightarrow K^{*+} \nu \bar{\nu}$	10.86 ± 1.43
$B^0 \rightarrow K^{*0} \nu \bar{\nu}$	9.05 ± 1.37

Verso l'alta intensità

condizioni di basso fondo
macchina

condizioni di fondo
macchina x3



Massa ricostruita del π^0

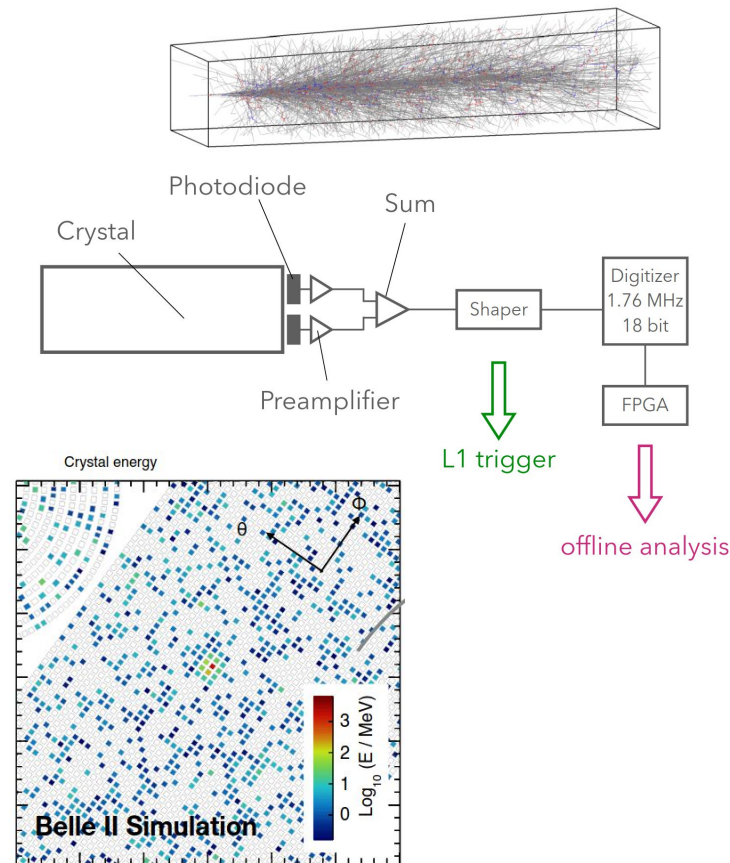
Il **fondo macchina** aumenta con la luminosità e affligge le **performance** del rivelatore.

Necessario studiare:

- L'impatto nella **ricostruzione** di oggetti fisici $\rightarrow$ per calorimetro fotoni e π^0
- Come mitigare l'impatto con un **upgrade** del rivelatore

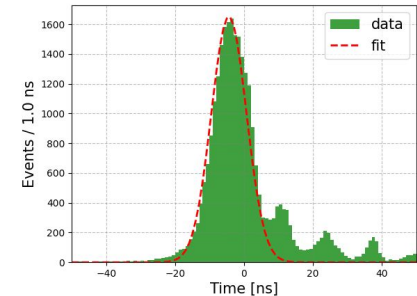
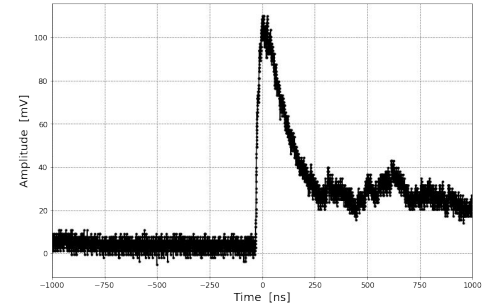
Proposte tesi 2025 - calorimetro e.m.

- Studio impatto dei **fondi-macchina** e implementazione della **ricostruzione** in uno scenario di upgrade
- Competenze:
 - buona conoscenza linguaggio **C++**
 - basi di fisica dei rivelatori, interazione rad.-materia
- Interessi:
 - approfondire il funzionamento di un rivelatore e l'elettronica di front-end
 - funzionamento software di ricostruzione di un esperimento
 - simulazioni detector



Proposte tesi 2025 - calorimetro e.m.

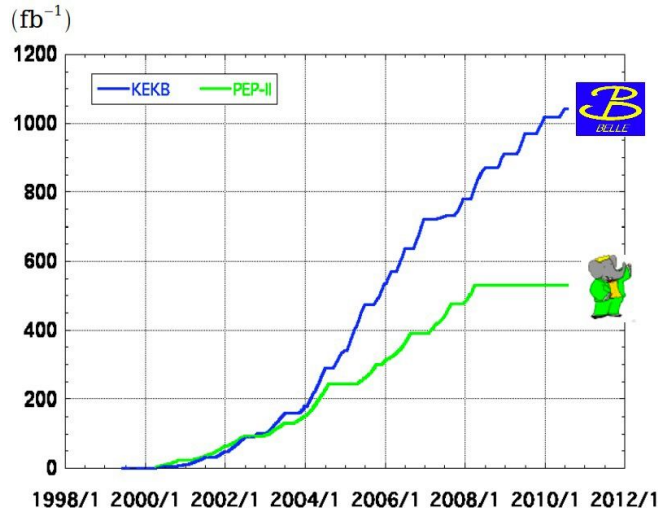
- R&D **lettura cristalli** calorimetro con fotosensori per ottimizzazione risoluzione temporale
- Competenze:
 - esperienza di misure in laboratorio
 - elettronica di base
- Interessi:
 - approfondire calorimetria con cristalli
 - fotorivelatori innovativi (**SiPM**)
 - sviluppo elettronica di lettura



Backup

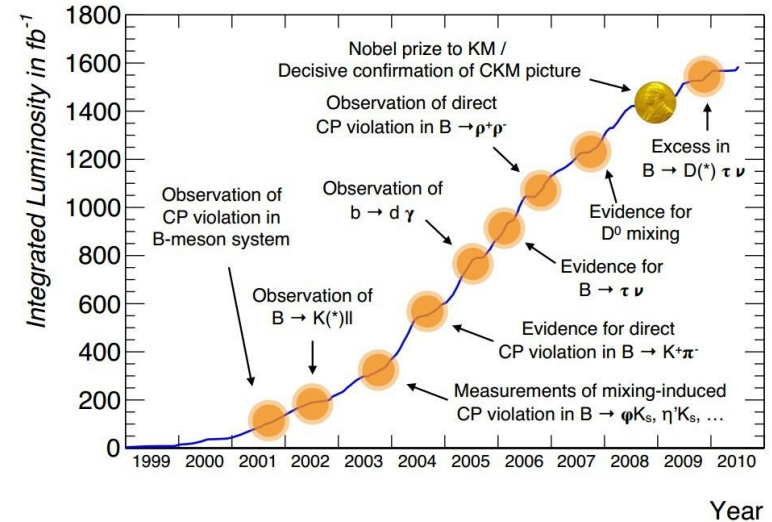


Fisica alle B-factories



> 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:
 $\sim 54 \text{ fb}^{-1}$

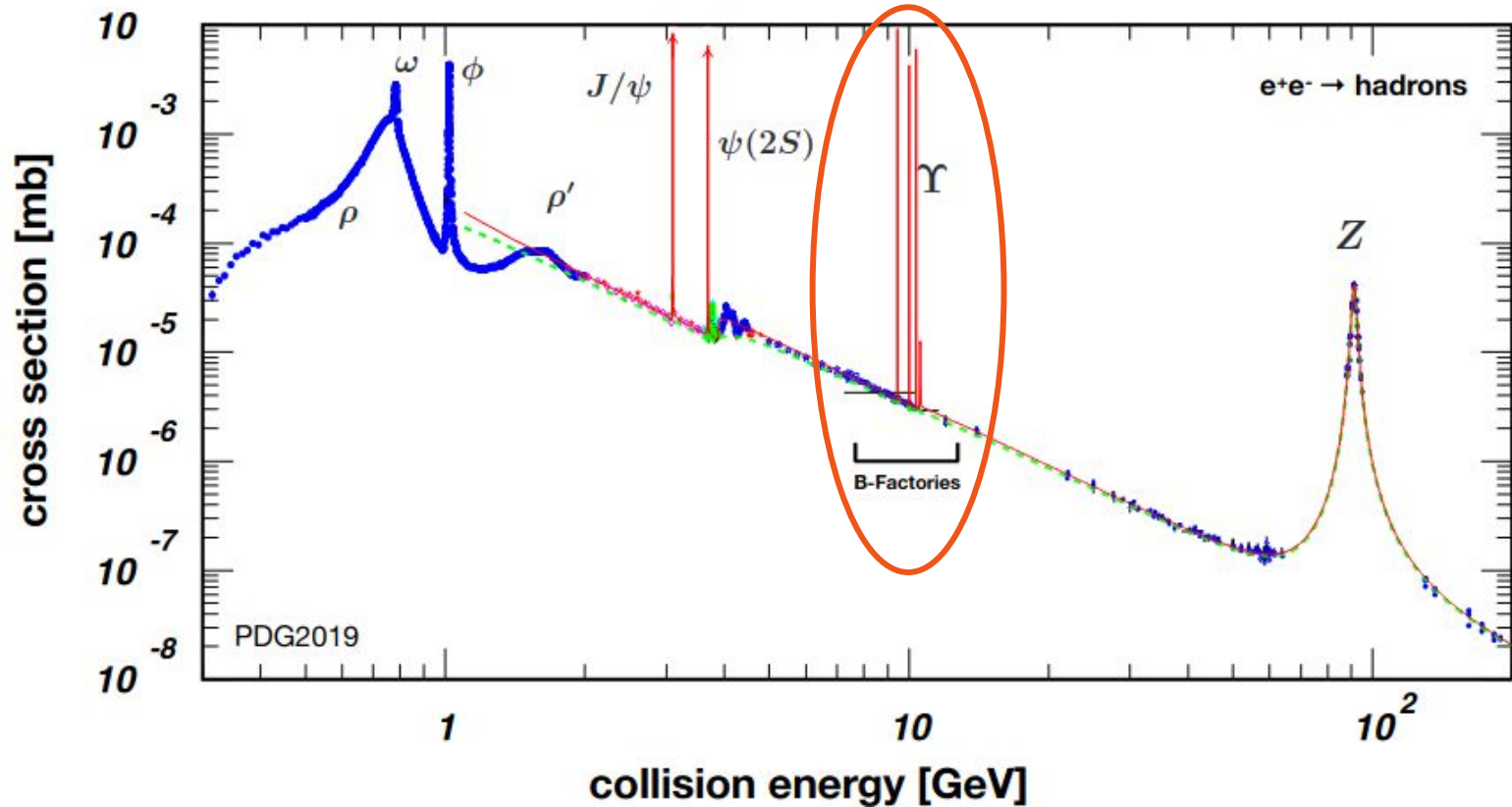


B-factory di 1^a generazione (2000-2010):

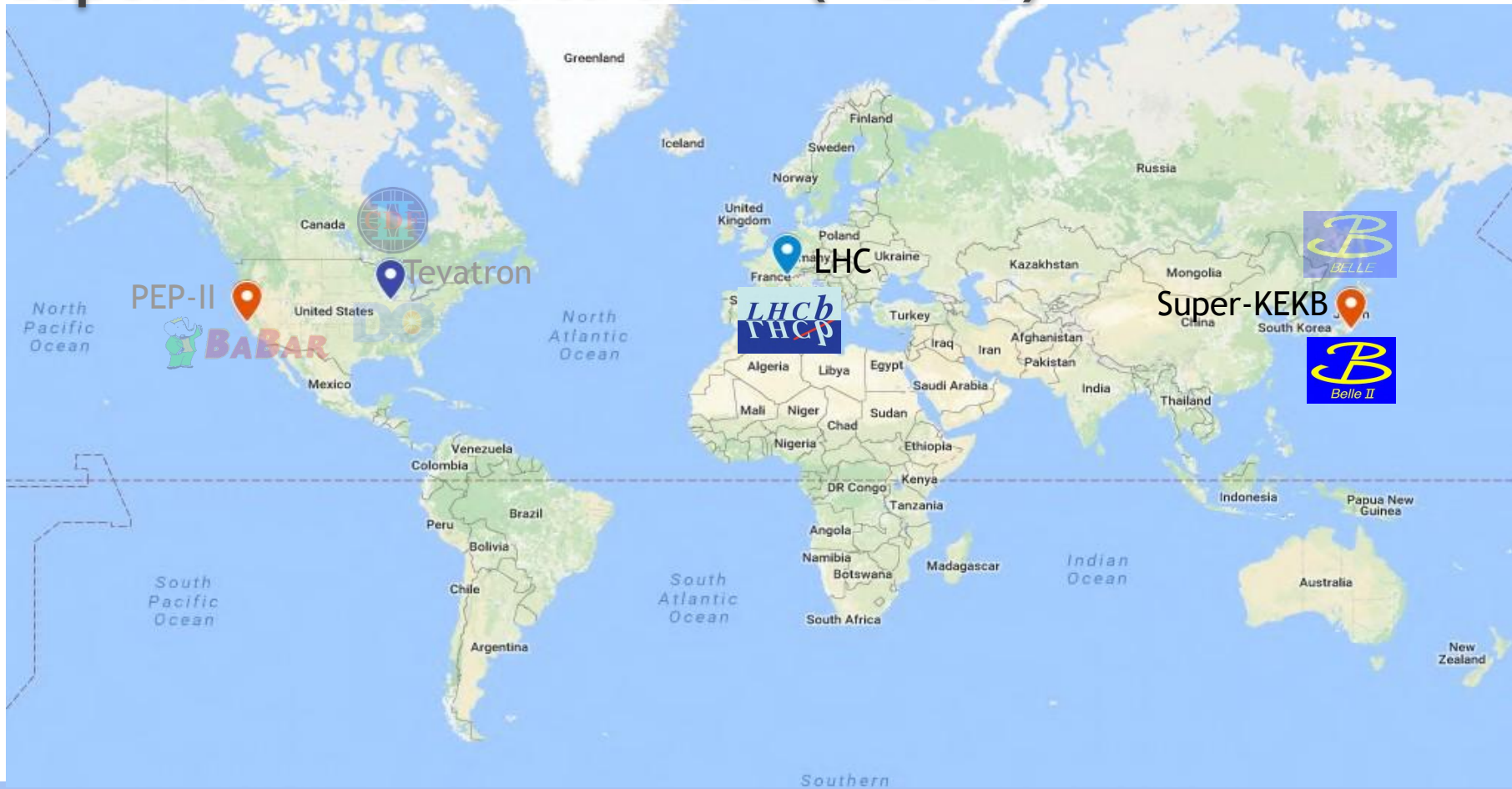
- Belle + BaBar $\rightarrow 1.5 \text{ ab}^{-1}$
- Fondamentale conferma del meccanismo CKM
- Ancora nessuna evidenza di fisica oltre il MS...

B Factory

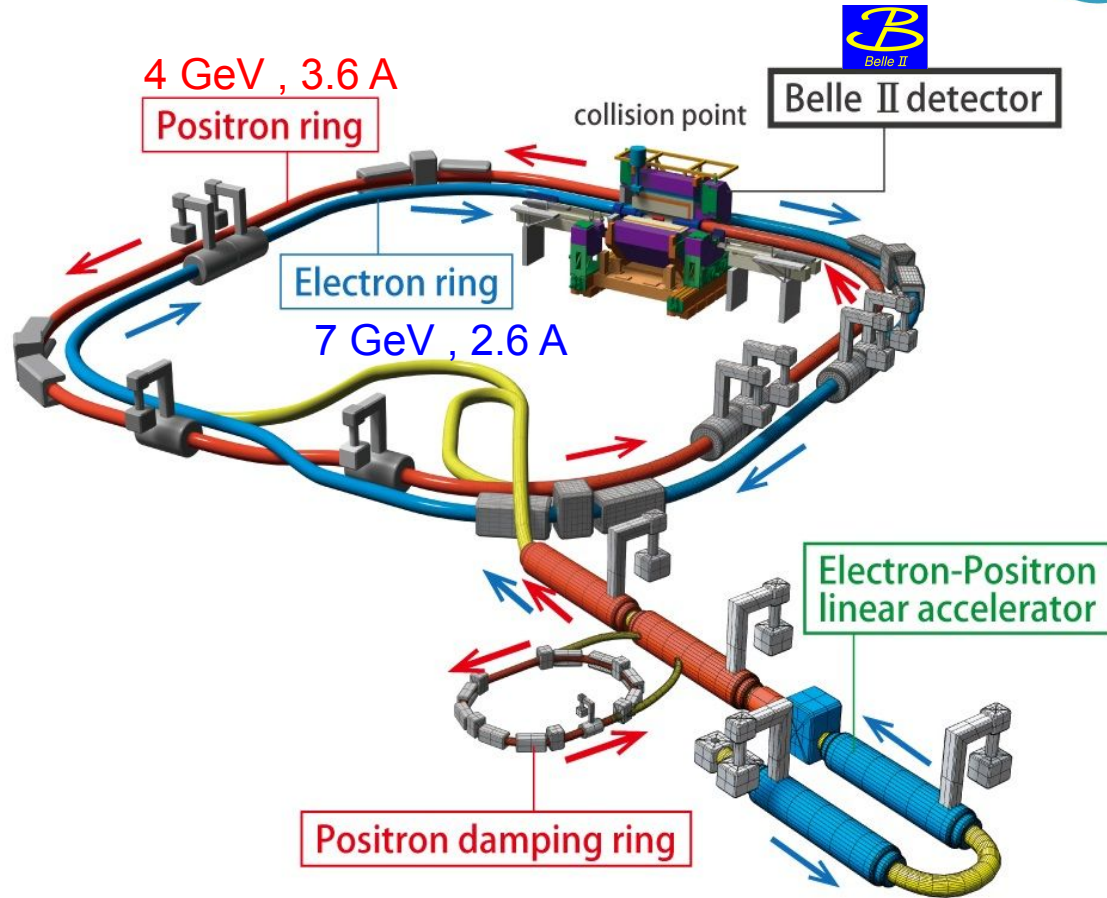
$$M(Y(4S)) = 10.58 \text{ GeV}/c^2$$



Esperimenti di fisica dei B (> 2010)



SuperKEKB (2019 → oggi)



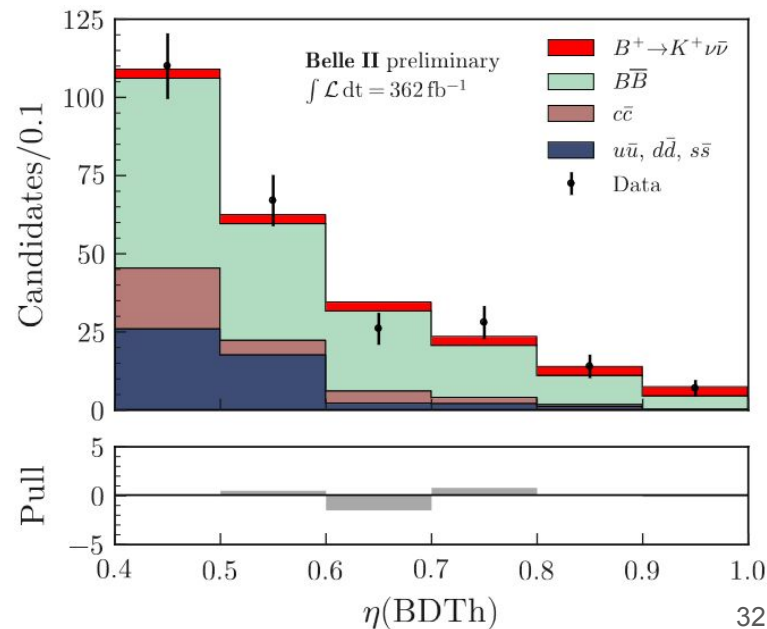
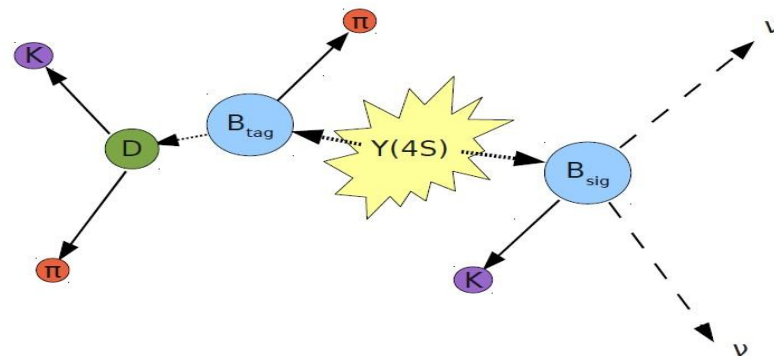
- Infrastruttura di KEKB rinnovata
 - $e^- \rightarrow 7.0 \text{ GeV}$
 - $e^+ \rightarrow 4.0 \text{ GeV}$
 - $\beta\gamma = 0.28$

Confronto con LHCb

Property	LHCb	Belle II
$\sigma_{b\bar{b}}$ (nb)	$\sim 150,000$	~ 1
$\int L dt$ (fb $^{-1}$) by ~ 2024	~ 25	$\sim 50,000$
Background level	Very high	Low
Typical efficiency	Low	High
π^0, K_S reconstruction	Inefficient	Efficient
Initial state	Not well known	Well known
Decay-time resolution	Excellent	Very good
Collision spot size	Large	Tiny
Heavy bottom hadrons	B_S, B_C, b -baryons	Partly B_S
τ physics capability	Limited	Excellent
B-flavor tagging efficiency	3.5 - 6%	36%

Decadimento raro $B^+ \rightarrow K^+ \nu \nu$

1. Ricostruzione B_{tag} con opportuno algoritmo.
Due metodi complementari:
 - a. “tag” adronico
 - b. “tag” inclusivo (new!)
2. Per il B_{sig} si ha solo un K carico
3. L'energia mancante dal detector deve essere compatibile con quella dei due neutrini
4. Si richiede che l'evento non abbia **particelle aggiuntive**
5. Si sfruttano metodi di **analisi multivariata** per combinare più informazione possibile



Upgrade elettronica calorimetro

Elettronica veloce e ricostruzione ottimizzata

- **Tempo di shaping** 500 ns $\rightarrow$ 150 ns
- **ADC** 1.7 MHz $\rightarrow$ 7.9 MHz
- Nuove **FPGA** per ricostruzione online
- Trigger digitale su singolo cristallo

