

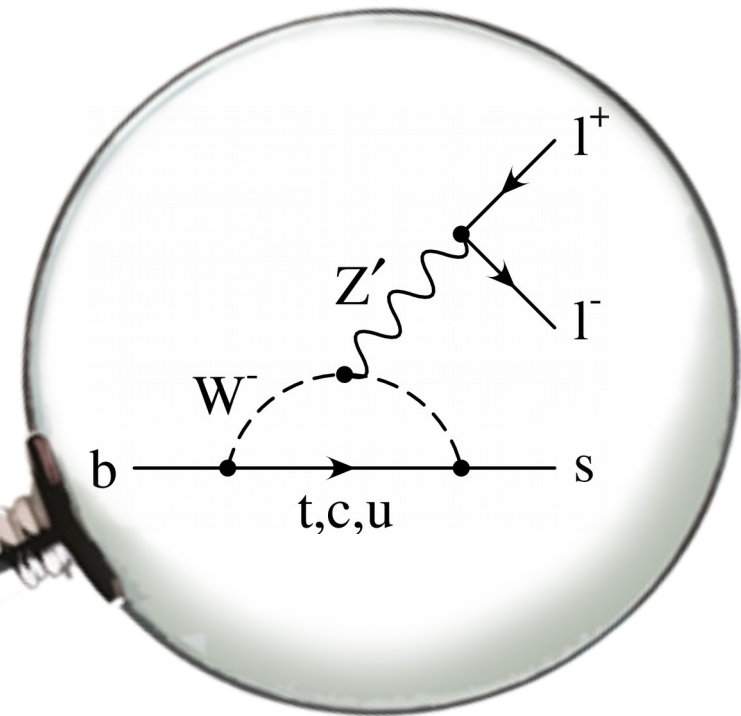
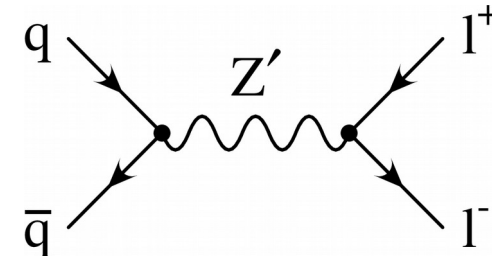
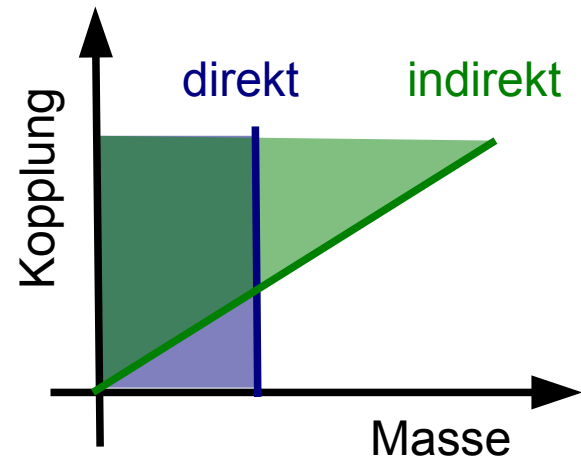
Belle II

Prof. Thomas Kuhr

<http://www.flavor.physik.uni-muenchen.de>

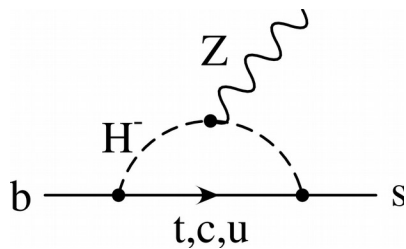
Suche nach neuer Physik

- Es muss bisher unentdeckte Teilchen oder Kräfte geben (z.B. um Baryonasymmetrie zu erklären)
- **Direkte Suche:** Produktion neuer Teilchen → ATLAS, CMS @ LHC
- **Indirekte Suche:** Beitrag virtueller neuer Teilchen zu beobachteten Prozessen → Flavor-Physik

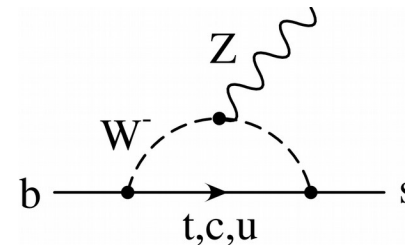


Indirekte Suche

- Vergleich Messung mit Vorhersage für Standardmodell (SM)
- Gute Übereinstimmung bisheriger Messungen mit SM



- Beitrag neuer Physik (NP) klein:
 $|A_{NP}| < |A_{SM}|$

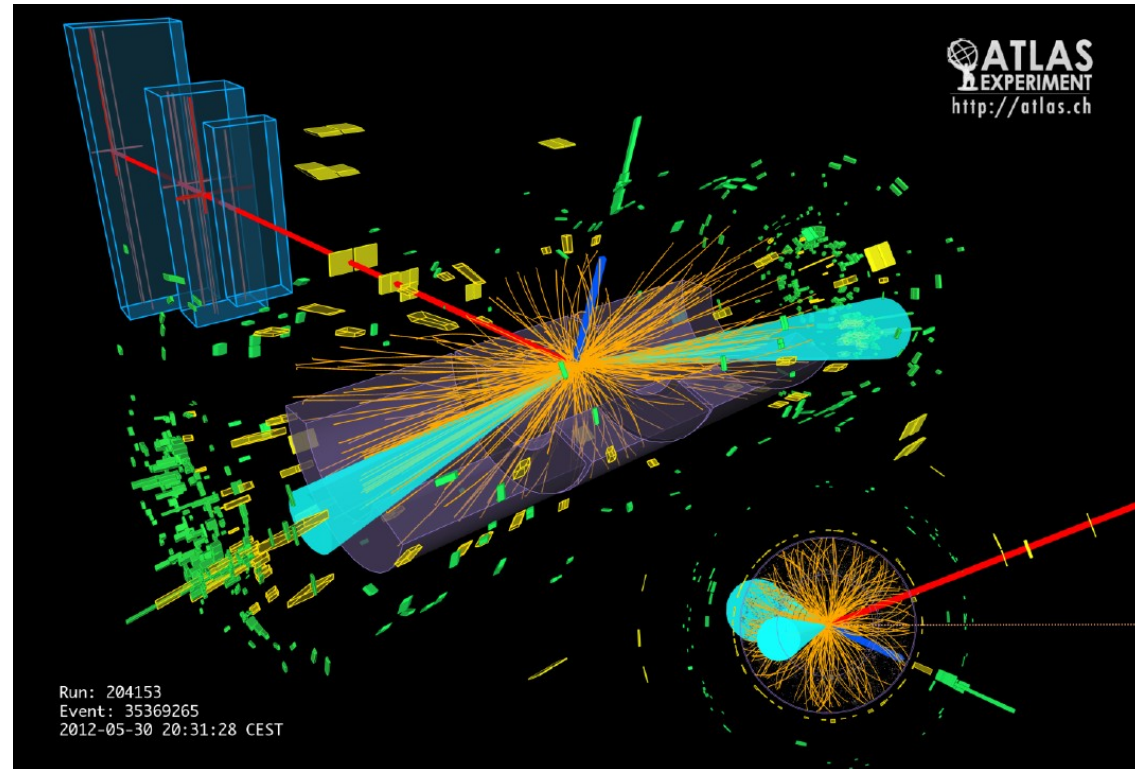
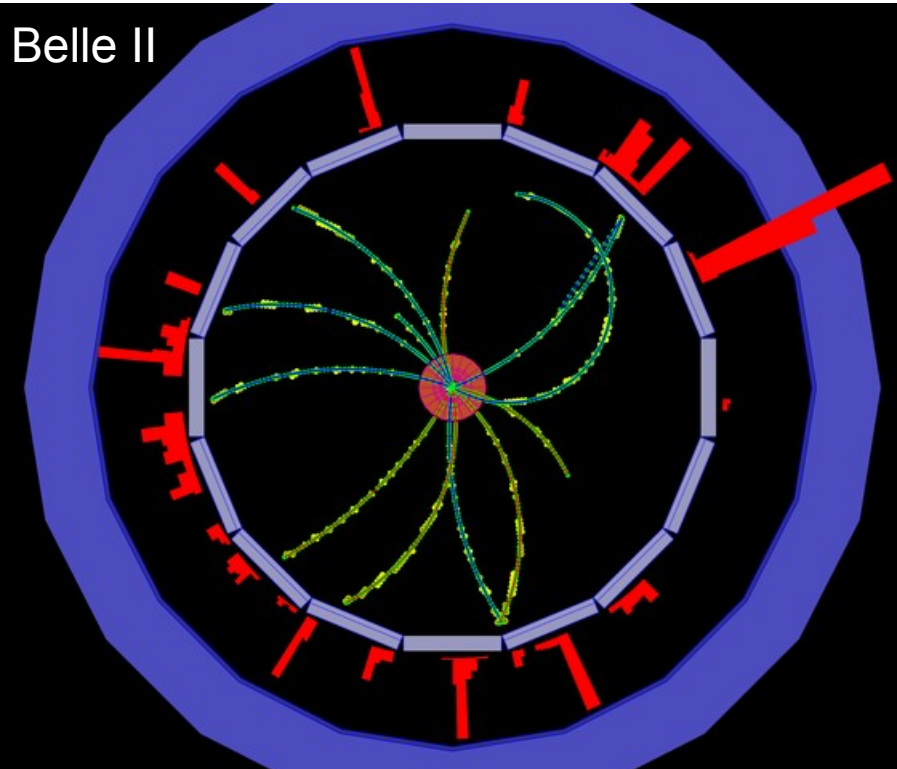


- Experimentell beobachtbar:

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

- Interferenz → CP-Verletzung
- Im SM unterdrückte oder verbotene Prozesse
- ➔ B-Mesonen bieten viele Möglichkeiten nach NP zu suchen
- Hohe b-Quark-Masse → störungstheoretische Rechnungen

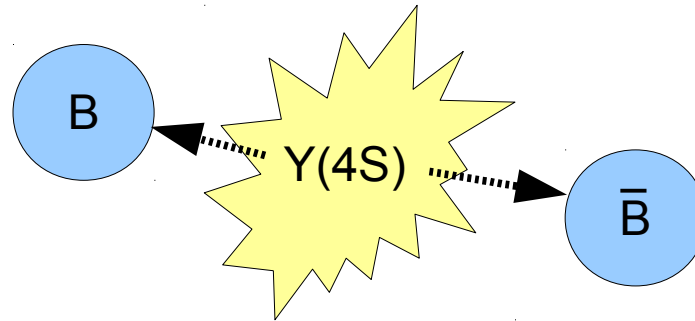
Lepton- / Hadron-Collider



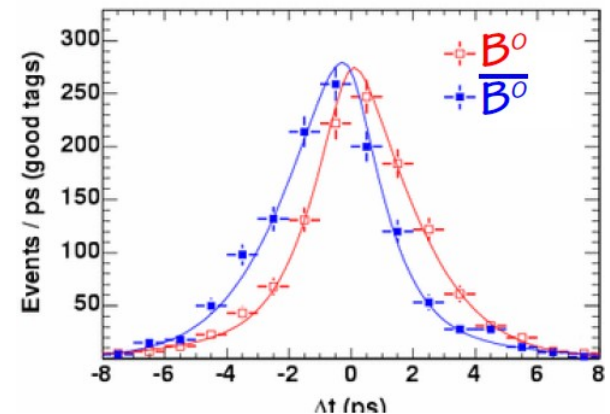
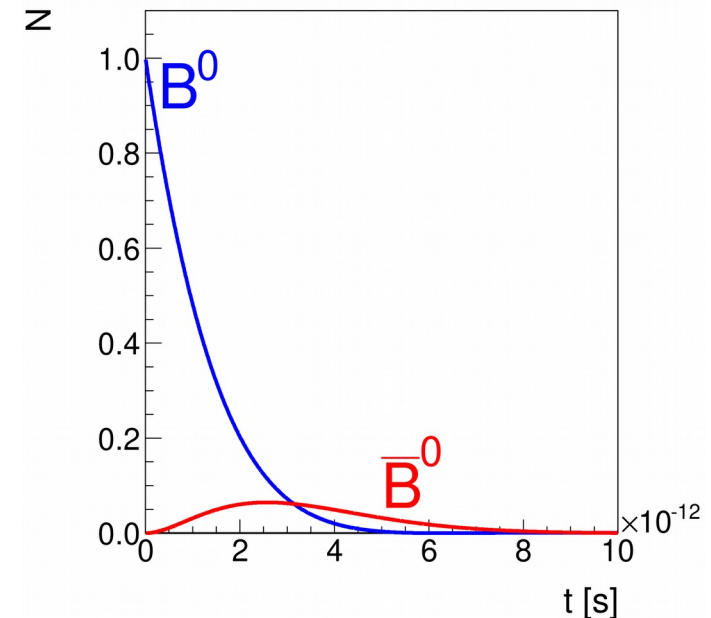
- ✓ Kinematik des Anfangszustands genau bekannt
- ✓ Nur eine Kollision pro Ereignis
- ✓ Ereignisse ohne Fragmentationsprodukte
- Viele Messungen nur an Lepton-Kollidern möglich

B-Fabrik

- Reaktion: $e^+e^- \rightarrow Y(4S) \rightarrow B^0\bar{B}^0$ oder B^+B^- , jeweils $\sim 50\%$
- $m(Y(4S)) = 10,58 \text{ GeV}$, $2 \times m(B) = 10,56 \text{ GeV}$



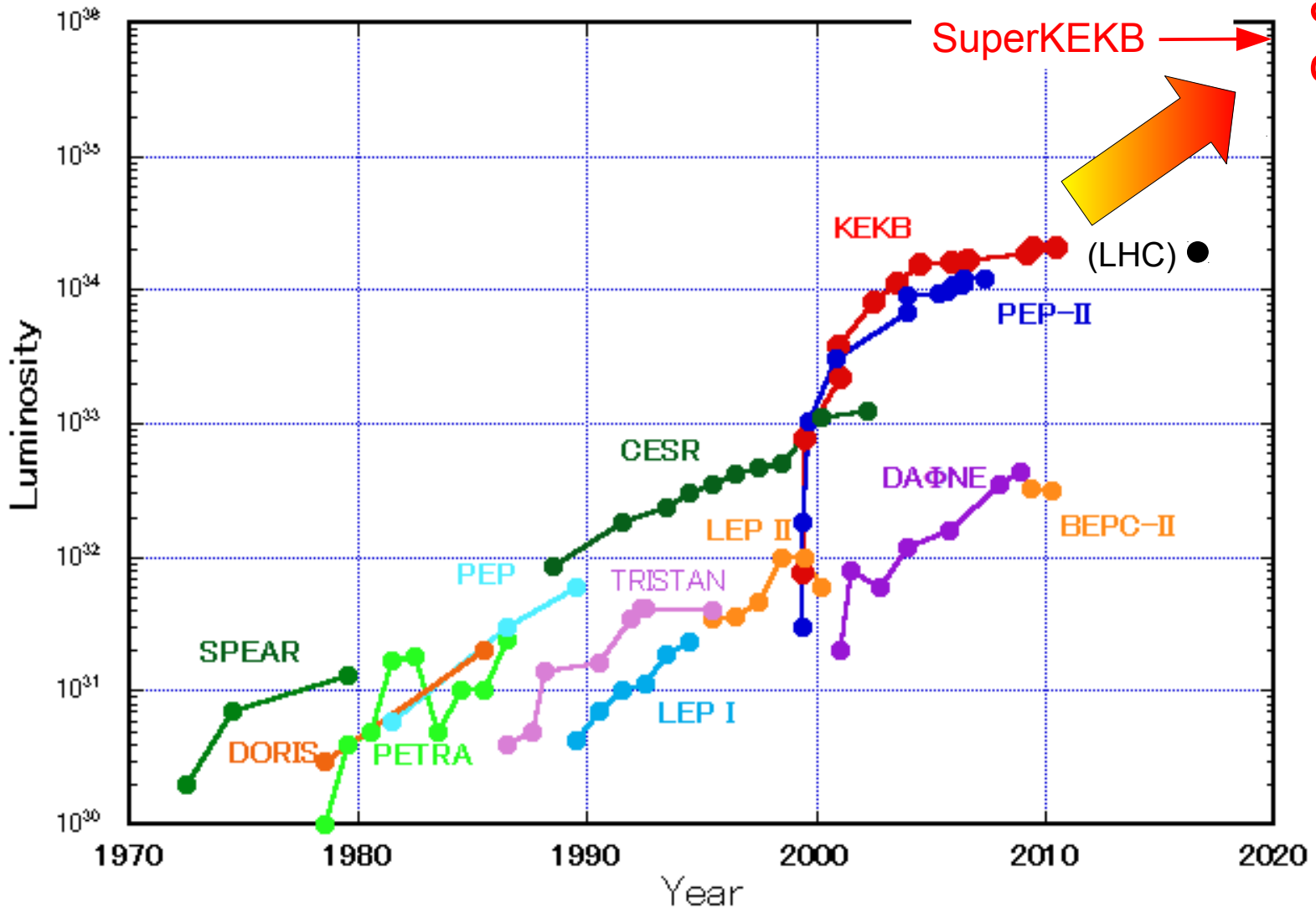
- Oszillation von B^0 -Mesonen
- ➔ CP-Verletzung bei B-Mesonen erstmals beobachtet bei Belle und BaBar
- ➔ Bestätigung des Standardmodells
- ➔ Viel genauere Messungen erforderlich, um kleine Effekte neuer Physik zu sehen



SuperKEKB: 50 ab^{-1}

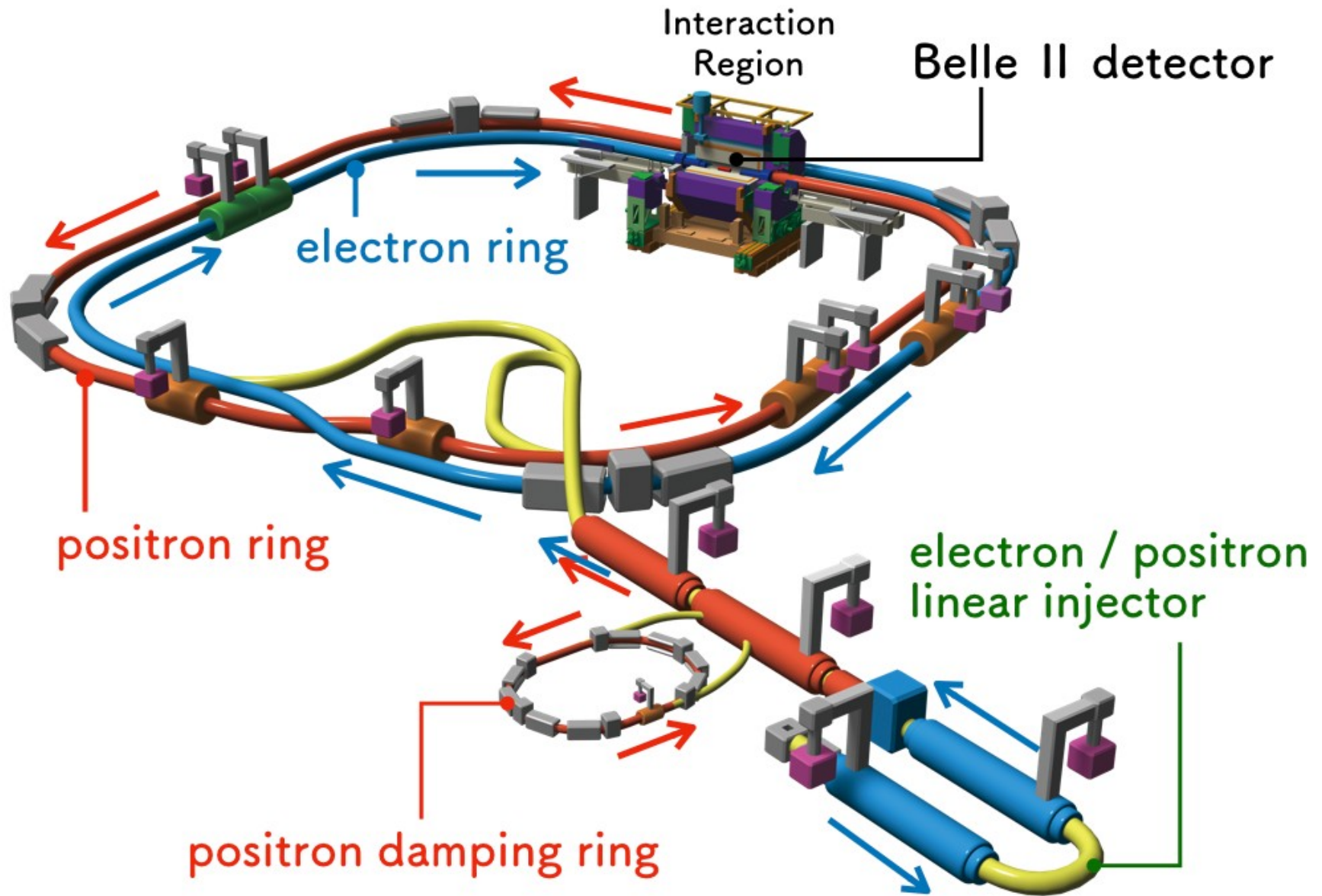
(LHC Run 3: $0,3 \text{ ab}^{-1}$)

Peak Luminosity Trends (e^+e^- collider)

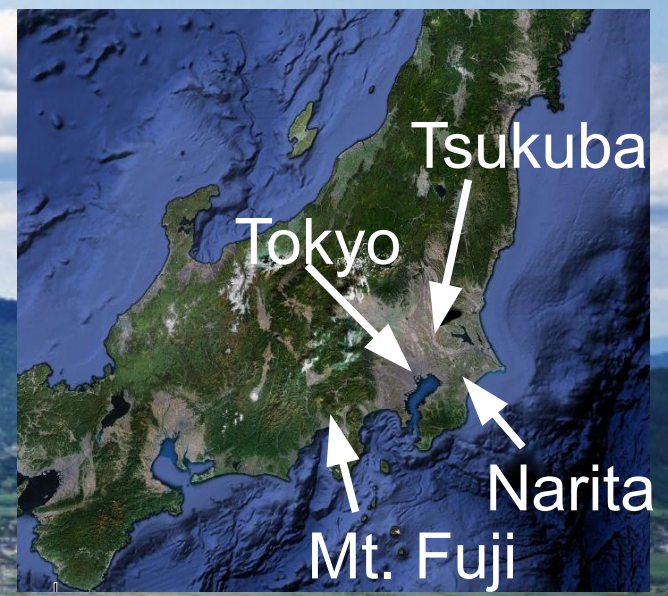


8×10^{35}
 $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

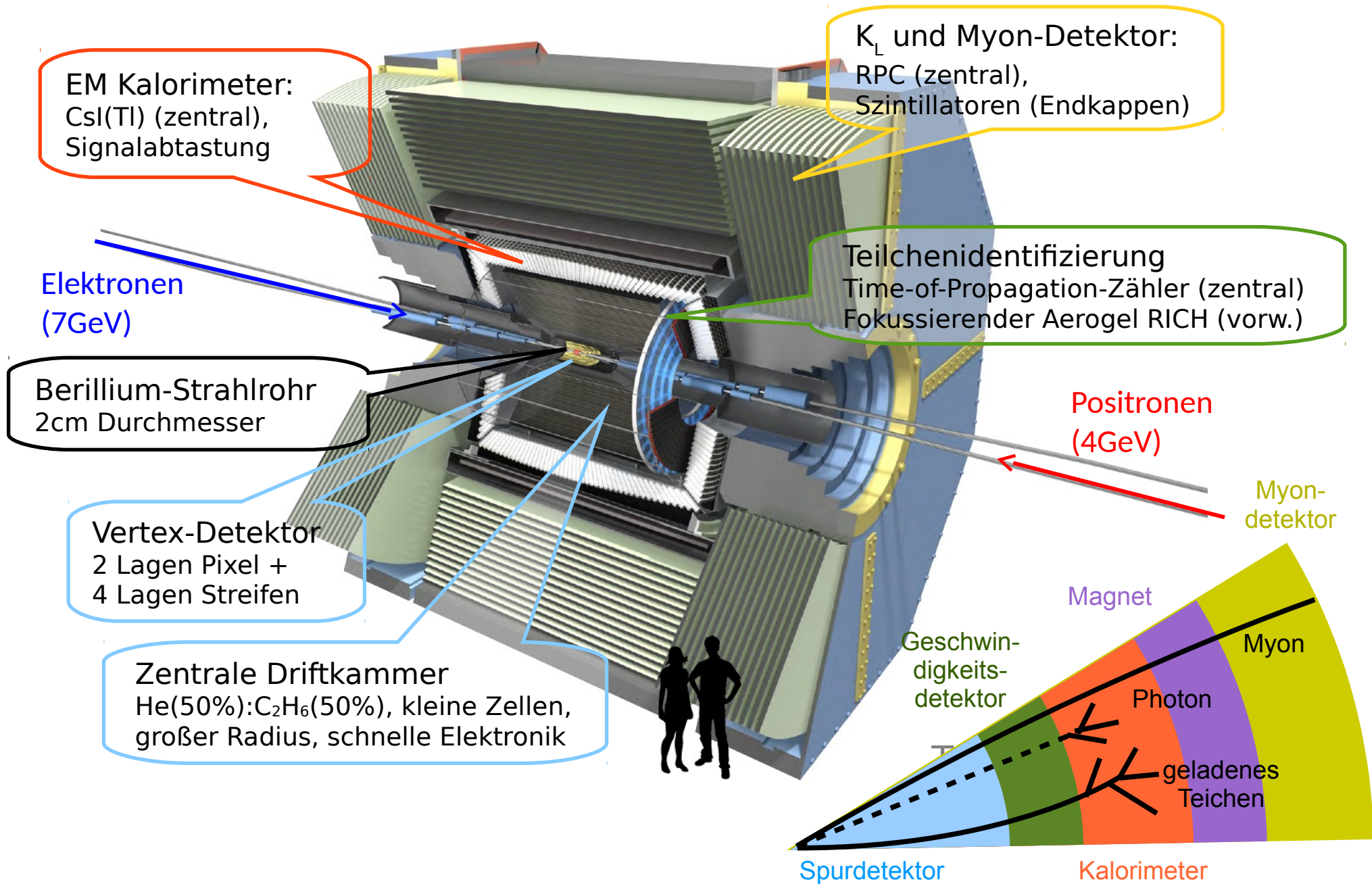
SuperKEKB



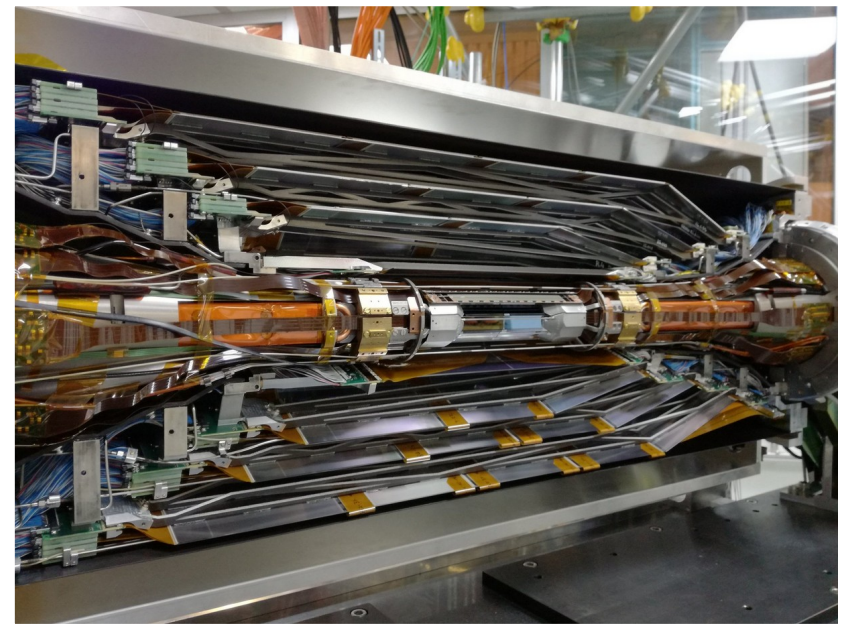
KEK



Belle II-Detektor

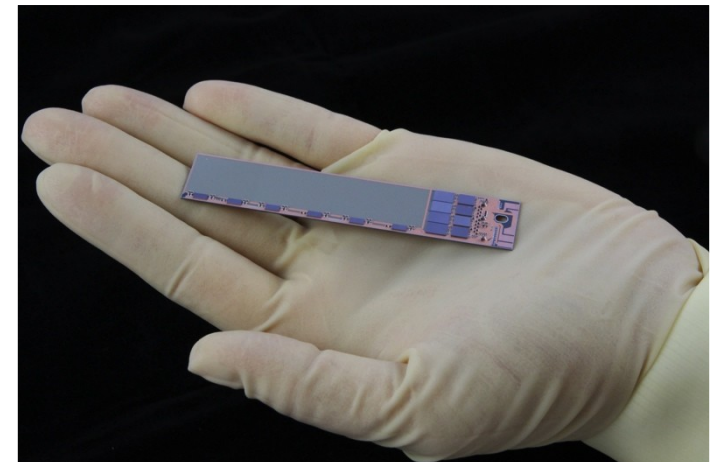
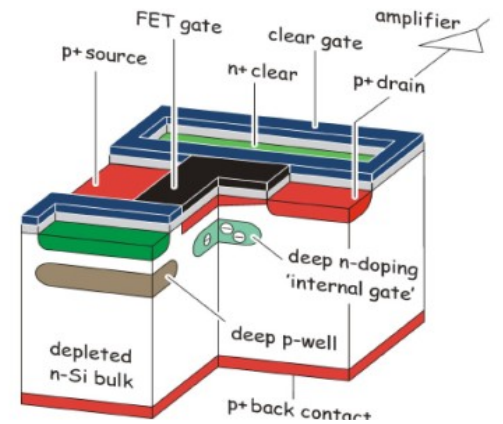
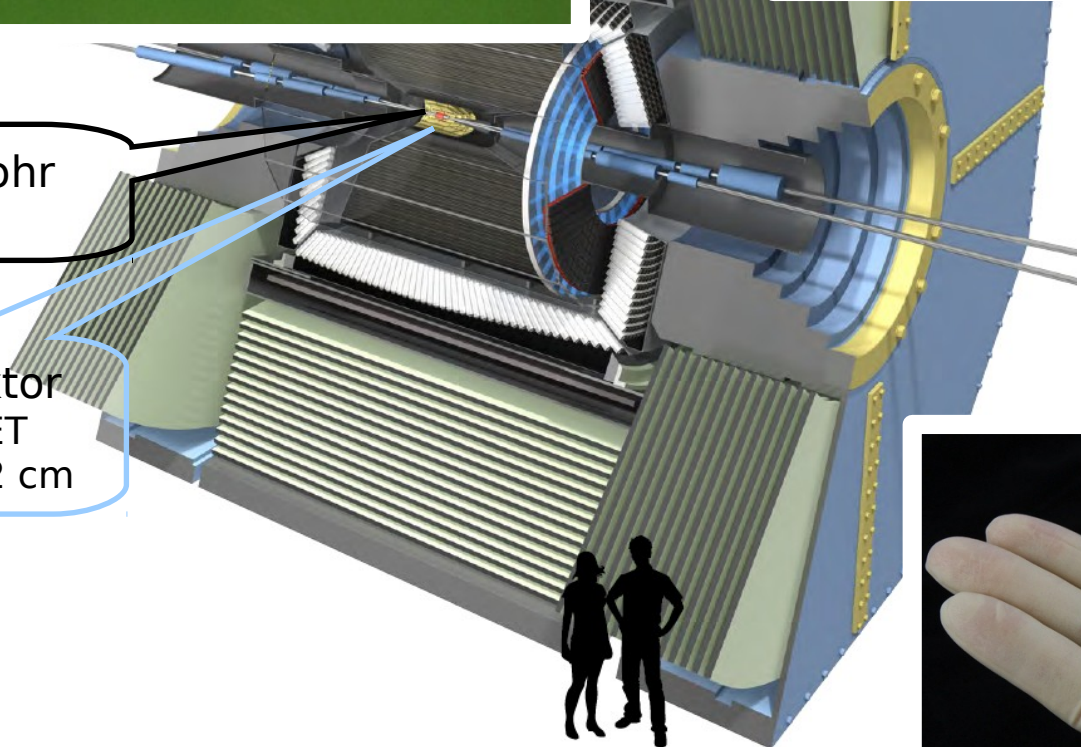


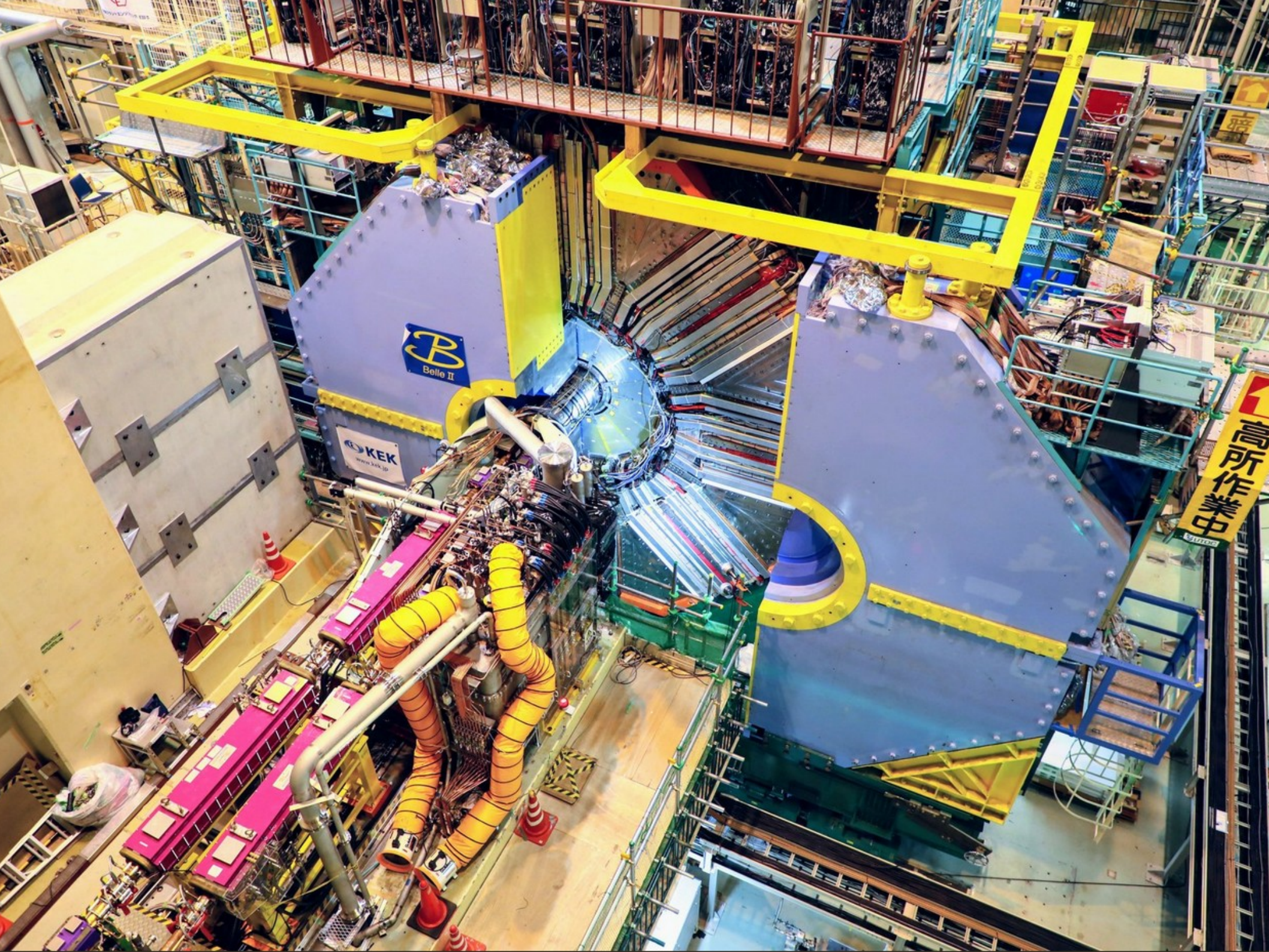
Pixel Vertex Detektor



Berillium-Strahlrohr
 $r = 1.0$ cm

Vertex-Detektor
2 Lagen DEPFET
 $r = 1.4$ and 2.2 cm



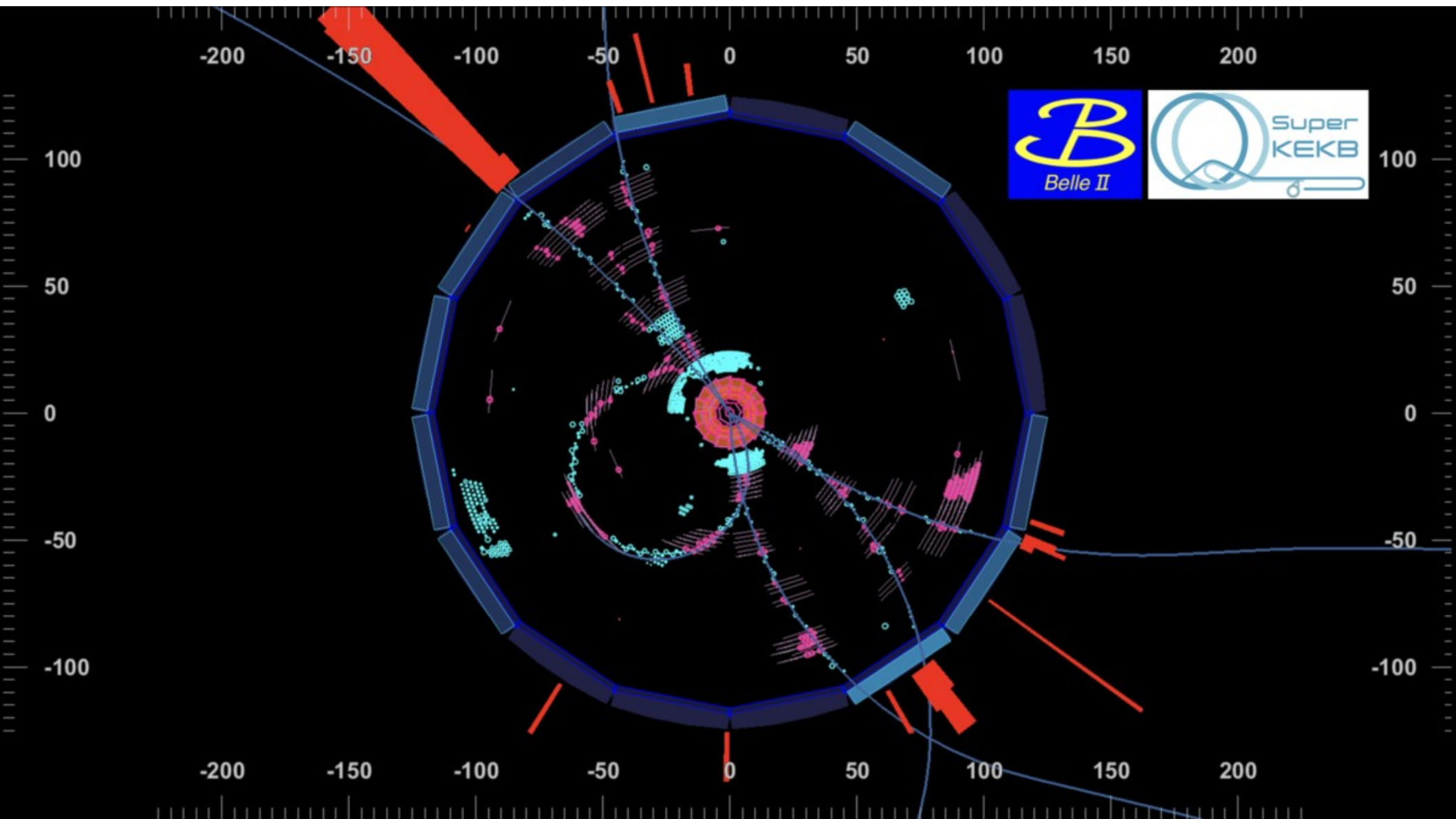


Belle II

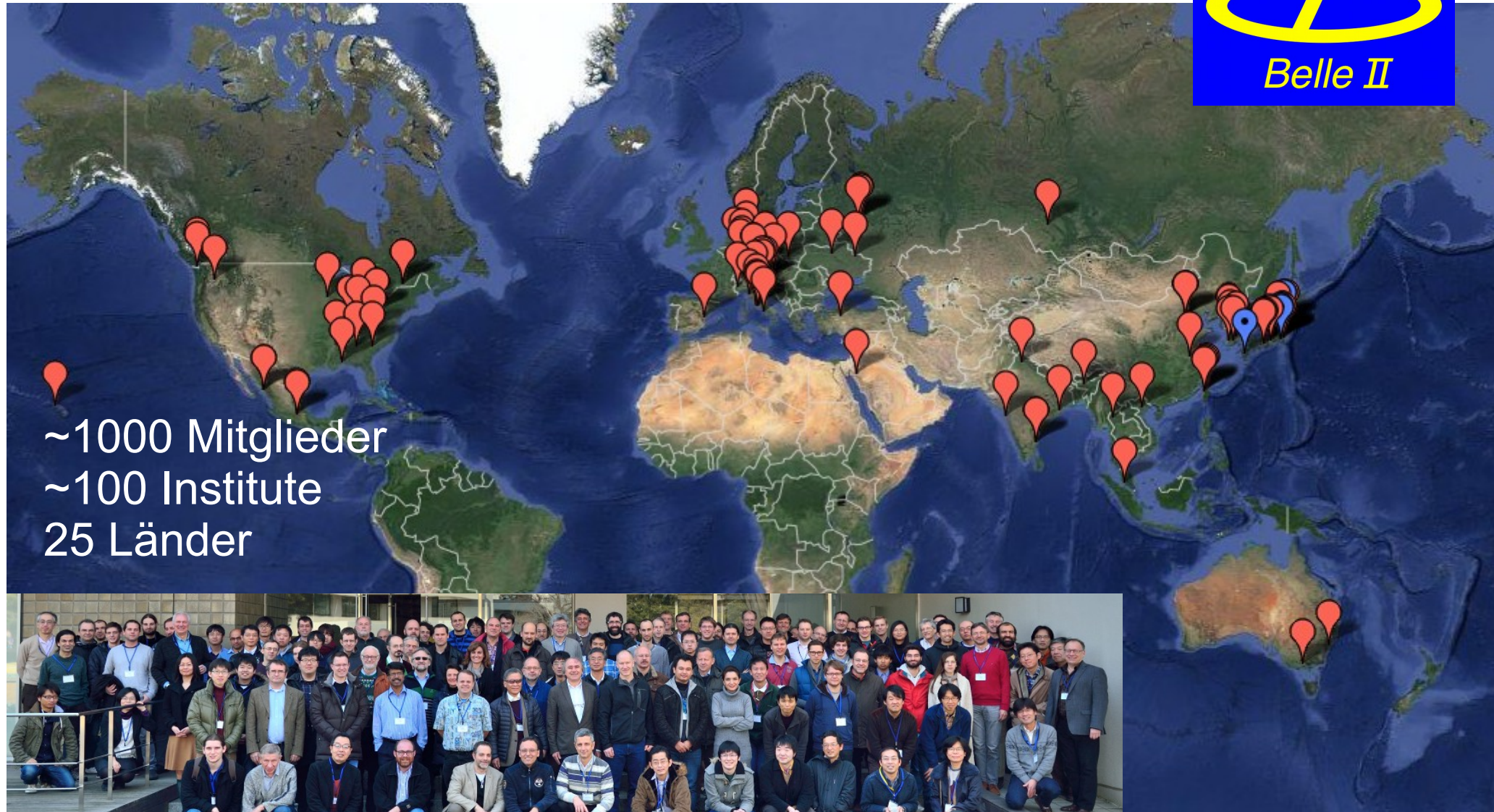
KEK
www.kek.jp

高所作業中

Start der Datennahme am 25.3.2019



Belle II Kollaboration



~1000 Mitglieder
~100 Institute
25 Länder

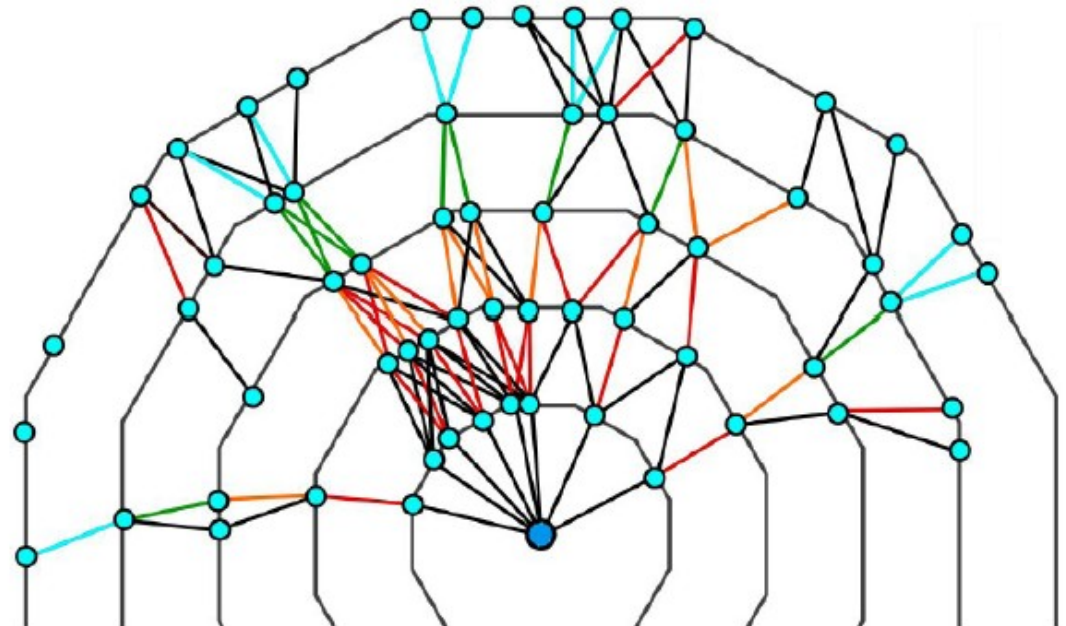


Computing und Software

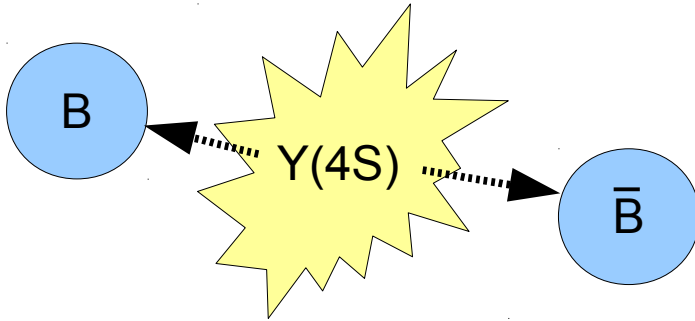
- Erwartete Rohdatenrate vergleichbar mit ATLAS
- Daten-Speicherung und Verarbeitung an Zentren weltweit



- Software für Simulation, Rekonstruktion und Analyse
- ~1.000.000 Zeilen C++ und Python-Code
- ~100 Autoren

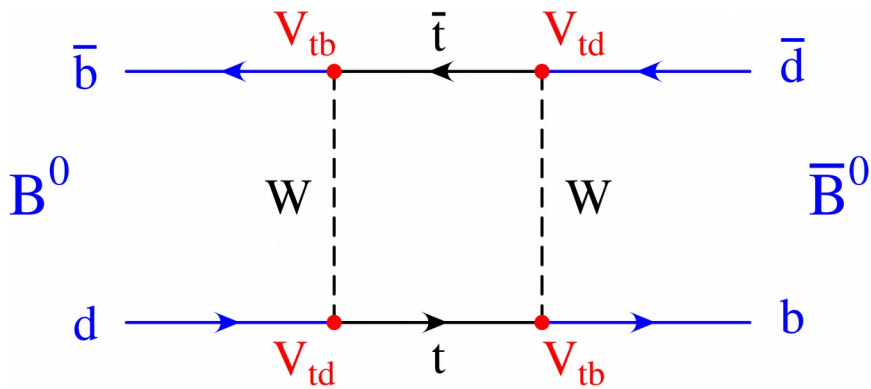


Produktion und Zerfall von B-Mesonen



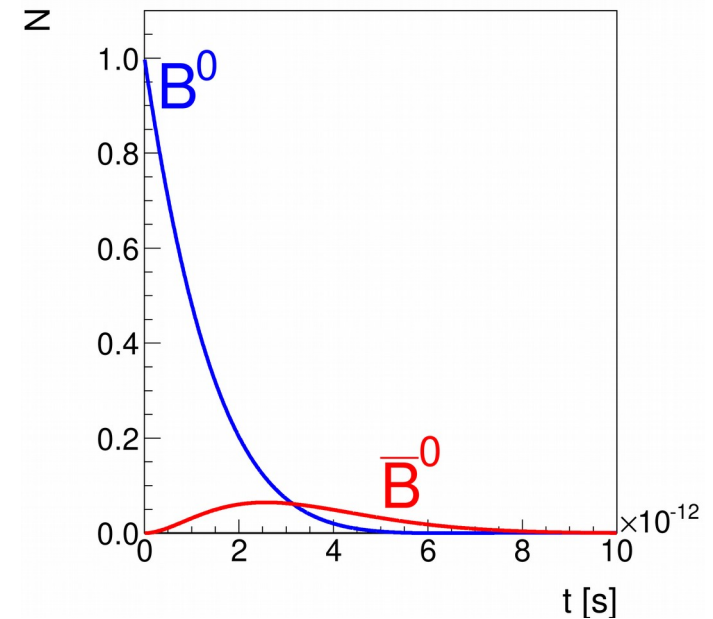
- $e^+e^- \rightarrow Y(4S) \rightarrow B^0\bar{B}^0$ (50%)
 $\rightarrow B^+B^-$ (50%)

- $m(Y(4S)) = 10,58 \text{ GeV}$
- $2 \times m(B) = 10,56 \text{ GeV}$



- Eigenzustände des Hamiltonoperators:
 $|B^0_{1,2}\rangle = p|B^0\rangle \pm q|\bar{B}^0\rangle, p, q = 1/\sqrt{2}$
 $|B^0_{1,2}(t)\rangle = \exp(-im_{1,2}t - \frac{1}{2}\Gamma_{1,2}t) |B^0_{1,2}\rangle$

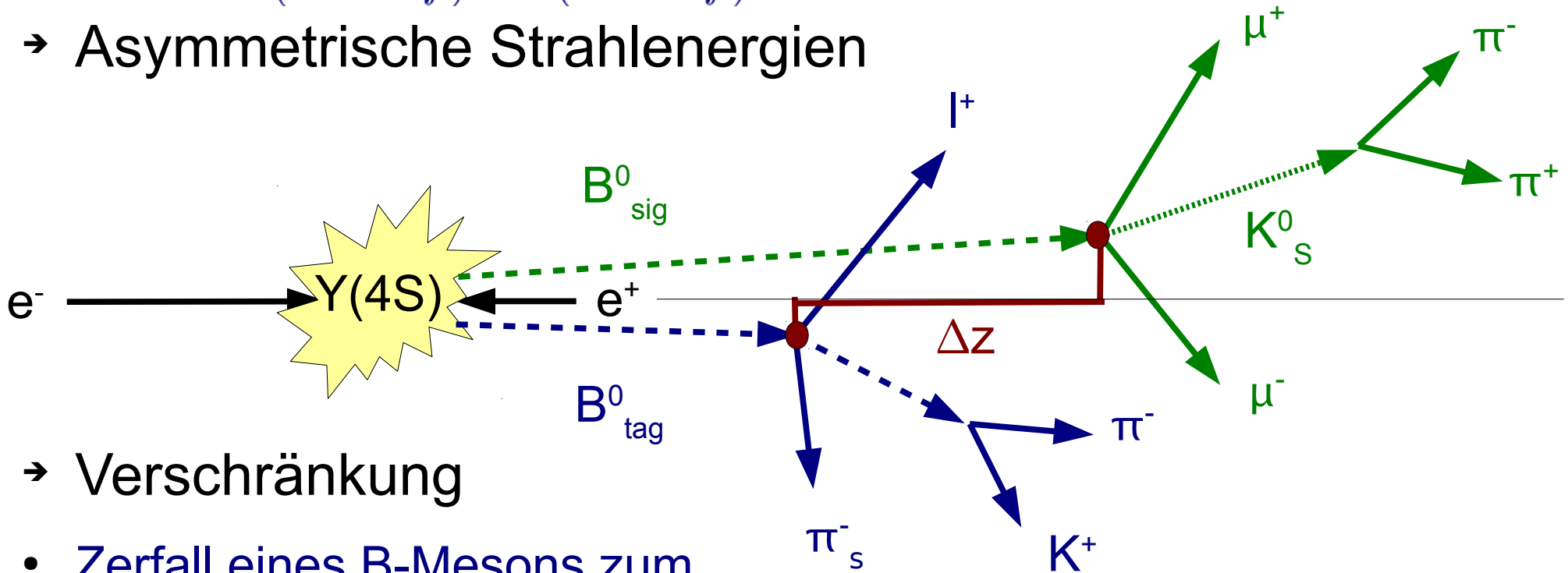
➔ Oszillationen → zeitabhängige CP-Verletzung



CP-Verletzung

$$a_f(t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f) - \Gamma(B^0 \rightarrow f)}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f) + \Gamma(B^0 \rightarrow f)} \approx -\xi_f \sin(2\phi_1) \sin(\Delta mt)$$

→ Asymmetrische Strahlenergien

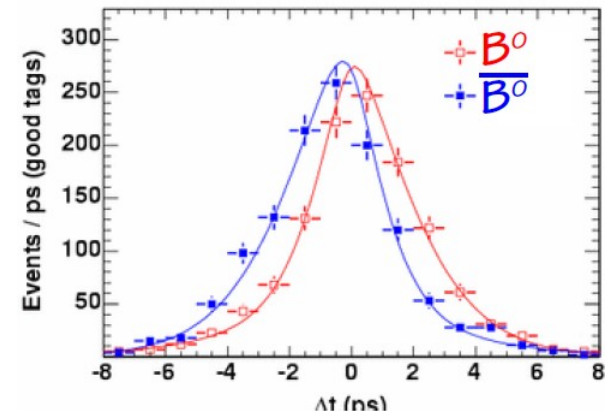


→ Verschränkung

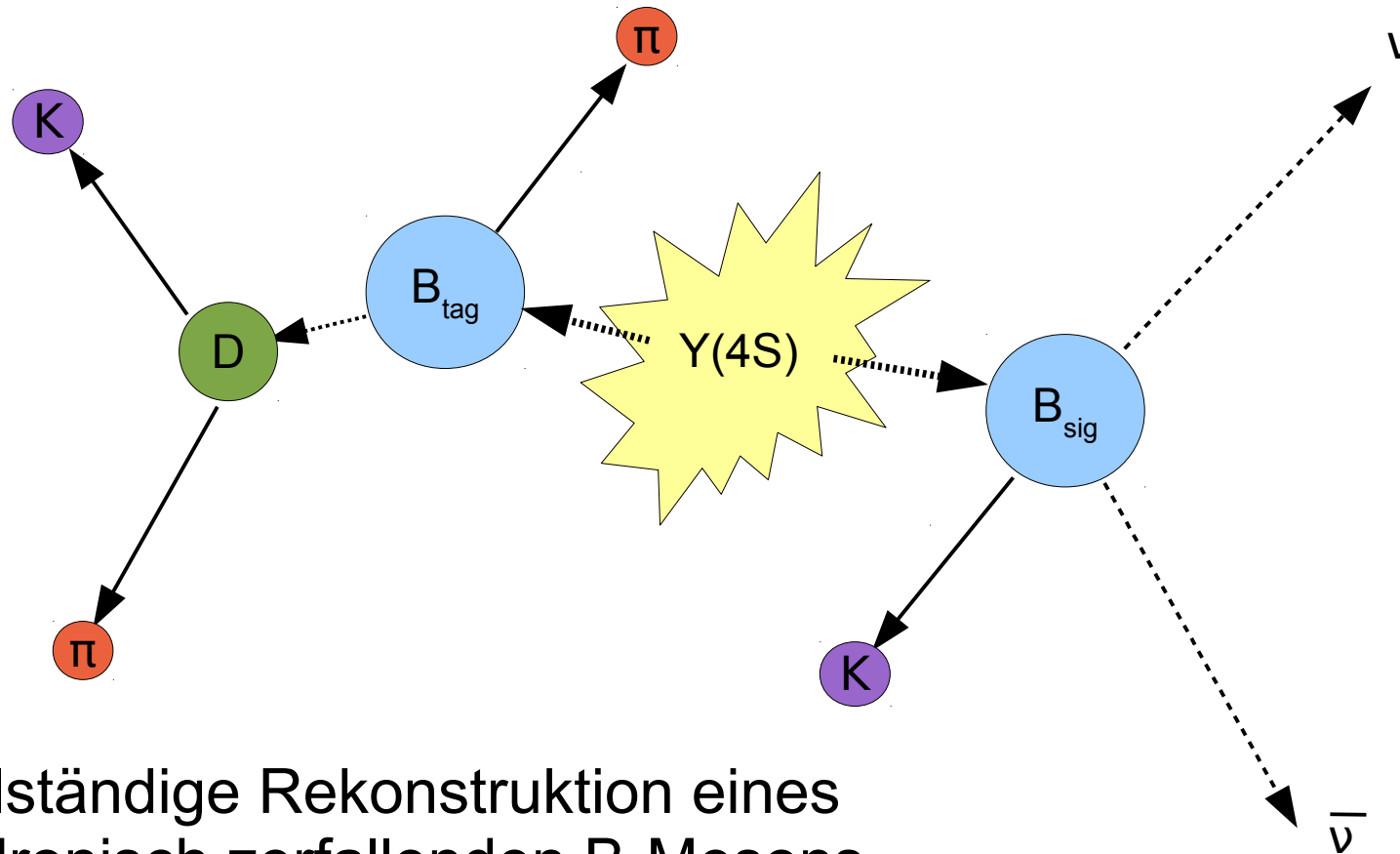
- Zerfall eines B-Mesons zum Zeitpunkt t_{tag} im Flavor-Eigenzustand Q → Flavortagging

- Anderes B-Meson ist zum Zeitpunkt t_{tag} im Flavor-EZ \bar{Q}

- Zeitmessung: $\Delta t = t_{\text{sig}} - t_{\text{tag}} = \Delta z / c\beta\gamma$

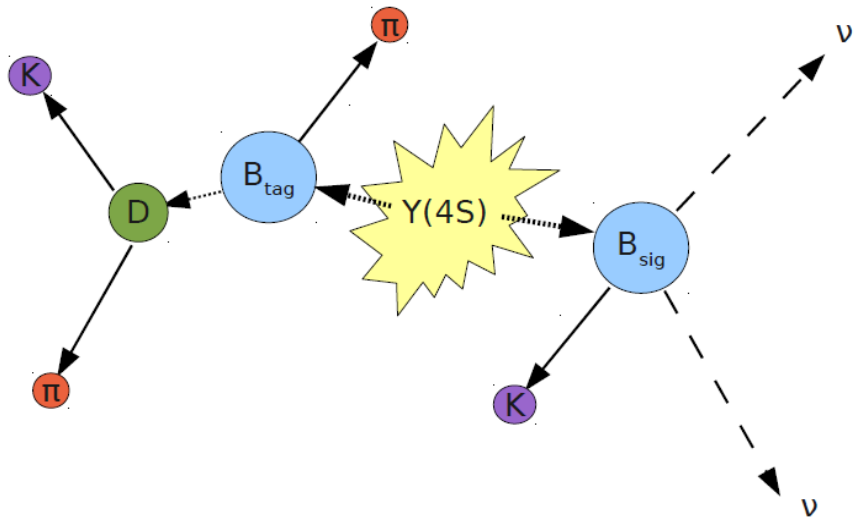
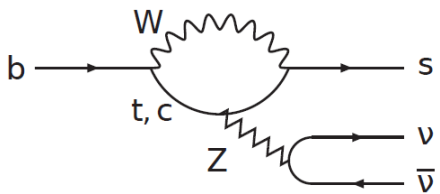


Vollständige Rekonstruktion

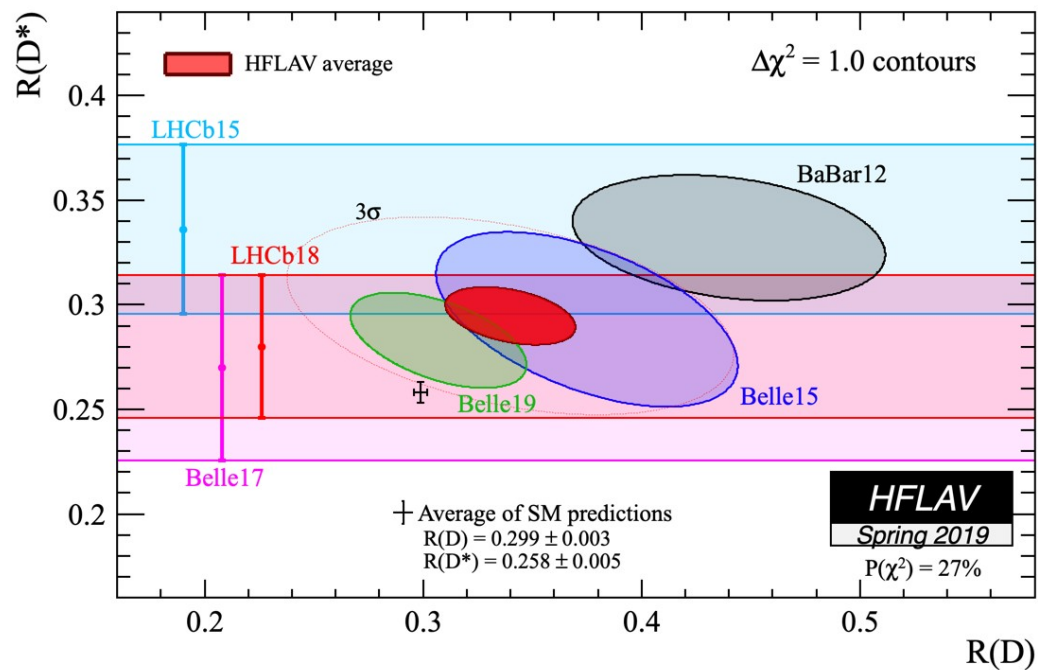
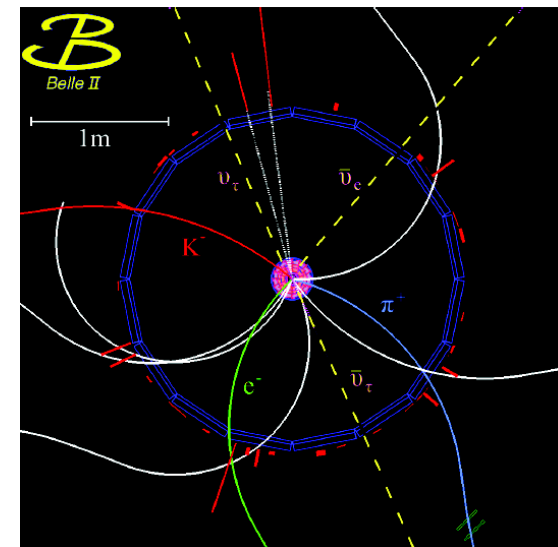
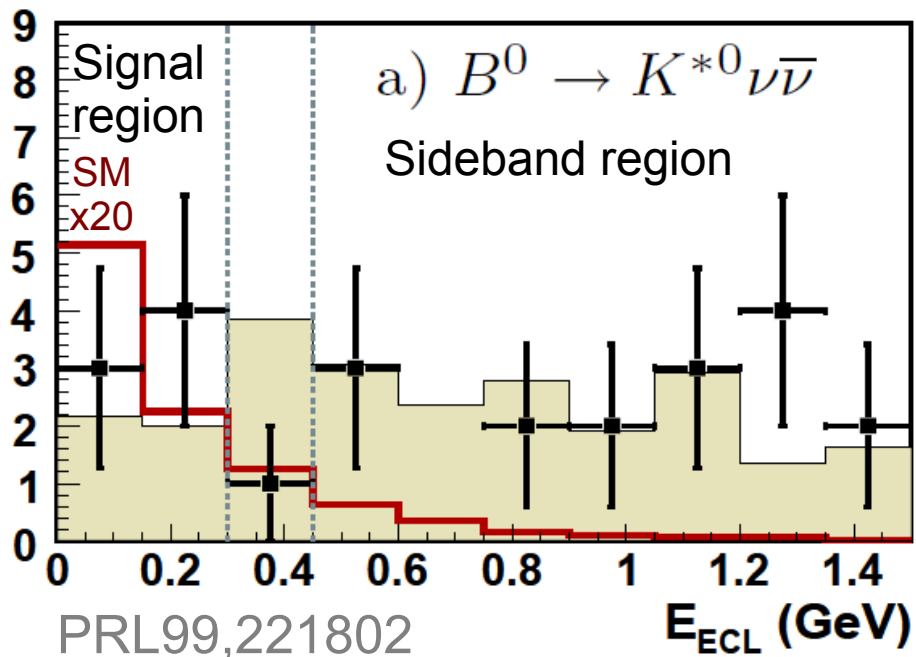


- Vollständige Rekonstruktion eines hadronisch zerfallenden B-Mesons
- Impuls und Ladung des Signal-B-Mesons bekannt
- Alle verbleibenden Teilchen gehören zum Signal-B-Meson
- **Rekonstruktion von Zerfällen mit Neutrinos**

Seltene Zerfälle



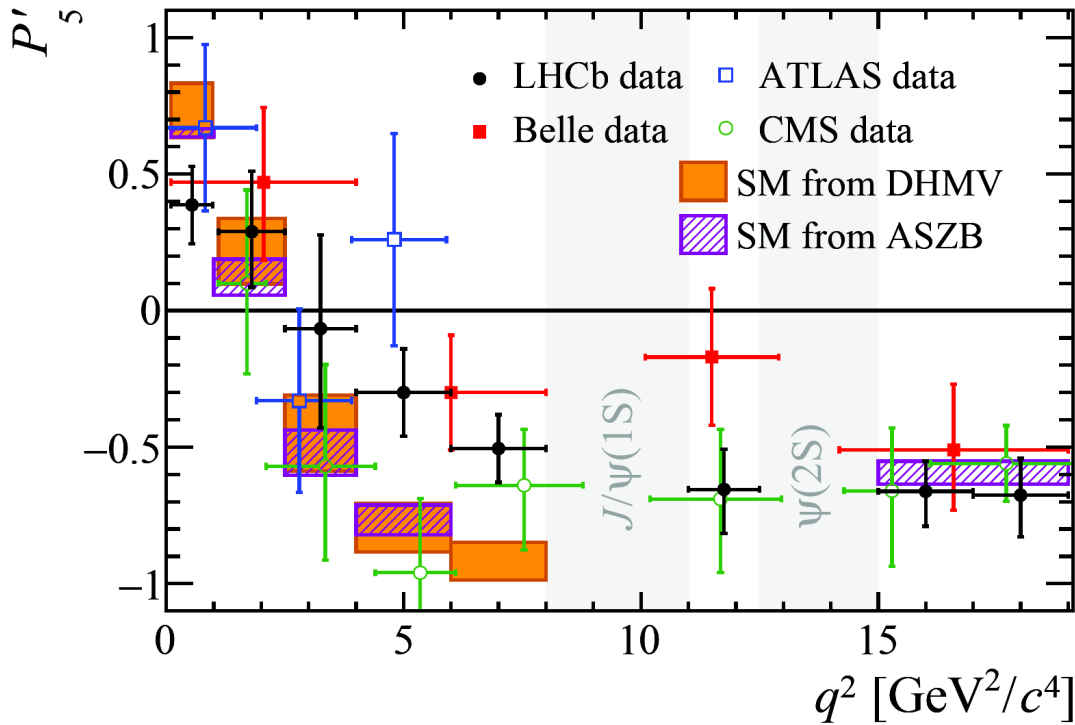
← extrapolation with MC



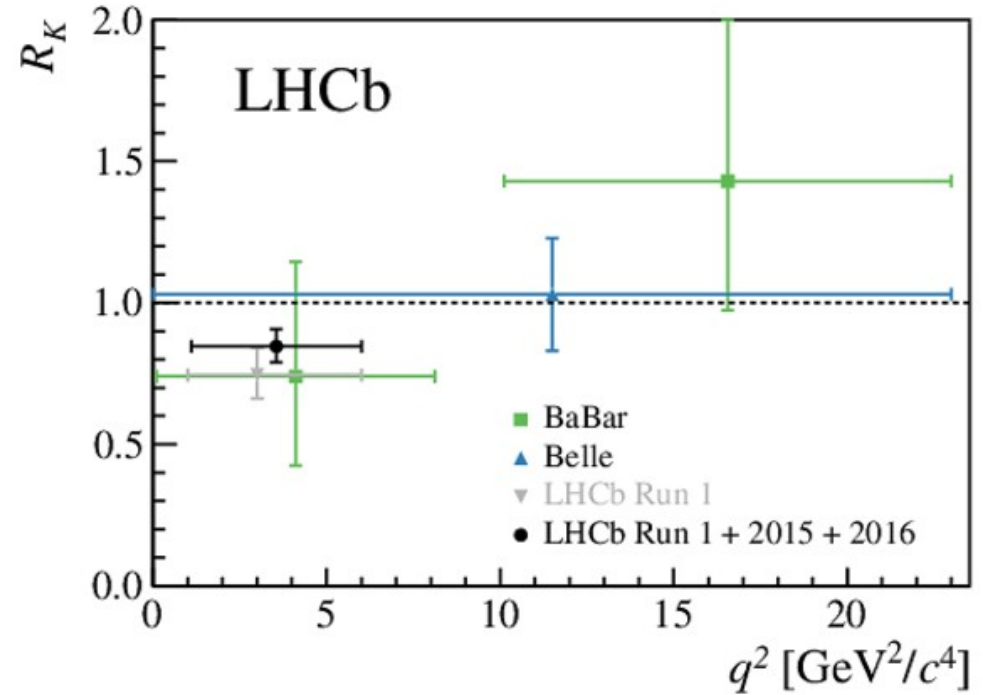
$$R_{D^{(*)}} = \frac{\text{Br}(B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu_{\tau})}{\text{Br}(B \rightarrow D^{(*)} l \nu_l)}$$

Inklusive Zerfälle

$B \rightarrow K^* l^+ l^-$



$BR(B \rightarrow K \mu^+ \mu^-) / BR(B \rightarrow K e^+ e^-)$



→ Hinweise auf Neue Physik auch in $B \rightarrow X_s l^+ l^-$?

• $B \rightarrow X_s \gamma$

• Inklusiv rekonstruiertes B_{tag}

• ...

Weitere Themen bei Belle II

- Messung von Zerfällen von Charm-Hadronen ($e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$)
- Messung von Zerfällen von tau-Leptonen ($e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$)
- Suche nach und Vermessung von exotischen Hadronen
- Messung von Υ -Zerfällen
- ...

Typische Analyse

- Ziel: (Limit auf) Verzweigungsverhältnis oder Parameter von CP-Verletzung von Zerfällen $X \rightarrow Y$
- 0. Simulation von Signal und Untergründen
 - ➔ Untergründe: Kontinuum ($e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$), komb., ähnliche Zerfälle
- 1. Rekonstruktion der Zerfallskette
 - ➔ In inverser Reihenfolge
- 2. Selektion von Kandidaten zur Verbesserung des Signal-zu-Untergrund-Verhältnisses (Optimierung mit Simulationsdaten)
 - ➔ Variablen: inv. Massen, Impulse, Winkel, PID, ..., NN, BDT, ...
 - ➔ Effizienz von Rekonstruktion und Selektion
- 3. Bestimmung der physikalischen Parameter durch Anpassung von Verteilungen
 - ➔ Oft Parametrisierungen angepasst an Simulationsdaten
- 4. Bestimmung von systematischen Unsicherheiten
 - ➔ Blinde Analyse: Daten erst anschauen, wenn Analyse “fertig”