第8回 ILCメディア勉強会

電子・陽電子衝突型加速器実験の発展

名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所（KMI）　教授

KEK 素粒子原子核研究所 特別教授

Belle II 実験スポークスパーソン

ILC推進パネル委員

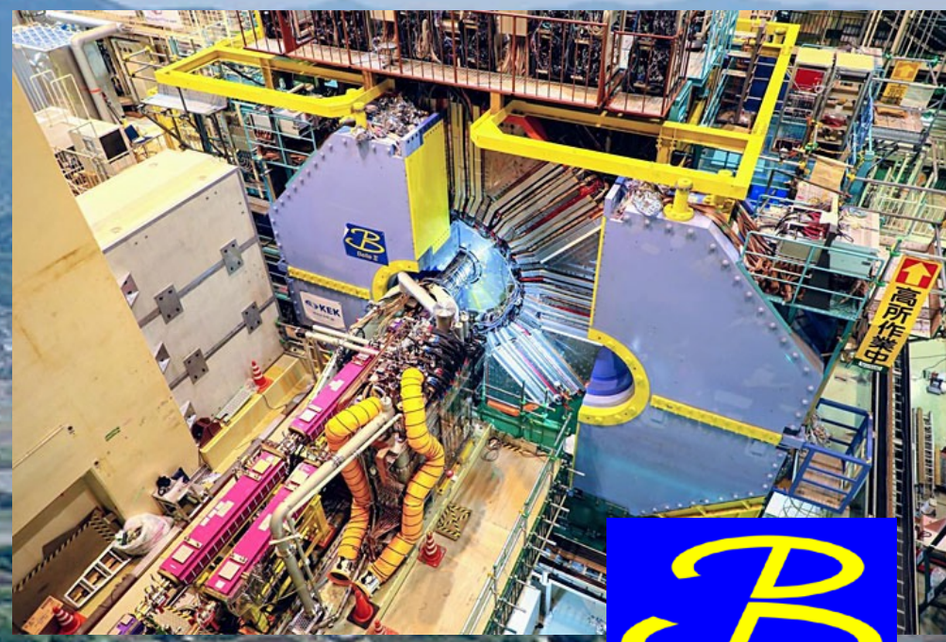
飯嶋　徹

飯嶋

2022年3月8日

SuperKEKB/Belle II 実験

KEK



Belle II

Belle II測定器

一周3キロの主リング

電子

陽電子

SuperKEKB加速器

陽電子ダンピングリング

長さ600mの入射器

Super KEKB

写真提供：KEK/Belle II

KEKB/Belle（第一期）から SuperKEKB/Belle II（第二期）へ

KEKB/Belle実験の成功：「小林益川理論」を実験的検証

小林氏・益川氏　2008年ノーベル物理学賞受賞

Belle測定器

私たちの宇宙の創生には標準理論を超える「新しい物理」が必要！

新物理の探索を目的

SuperKEKB/Belle II実験へ

素粒子と初期宇宙史

宇宙論・宇宙物理

WMAP衛星

ダーク・エネルギー（73%）

ダーク・マター(23%)

物質優勢宇宙

加速器のフロンティア
(エネルギーと強度)

Big Bang !

10^{-44} 力の大統一

超弦理論

$10^{32}/10^{19}$

X ?

10^{-36}

新しい物理
~1 TeV

10^{-10}

$10^{28}/10^{15}$

超対称性

10^{-5}

時間（秒）

ゲージ
理論

ヒッグス

H

標準理論

$10^{15}/100$

Z W ℓ $\bar{\ell}$ $\bar{q}$ q ν $\bar{\nu}$

クォーク/レプトン

ニュートリノ

新しいハドロン状態

$10^{12}/0.1$

元素合成

QGP（クォーク・
グルーオン・プラズマ）

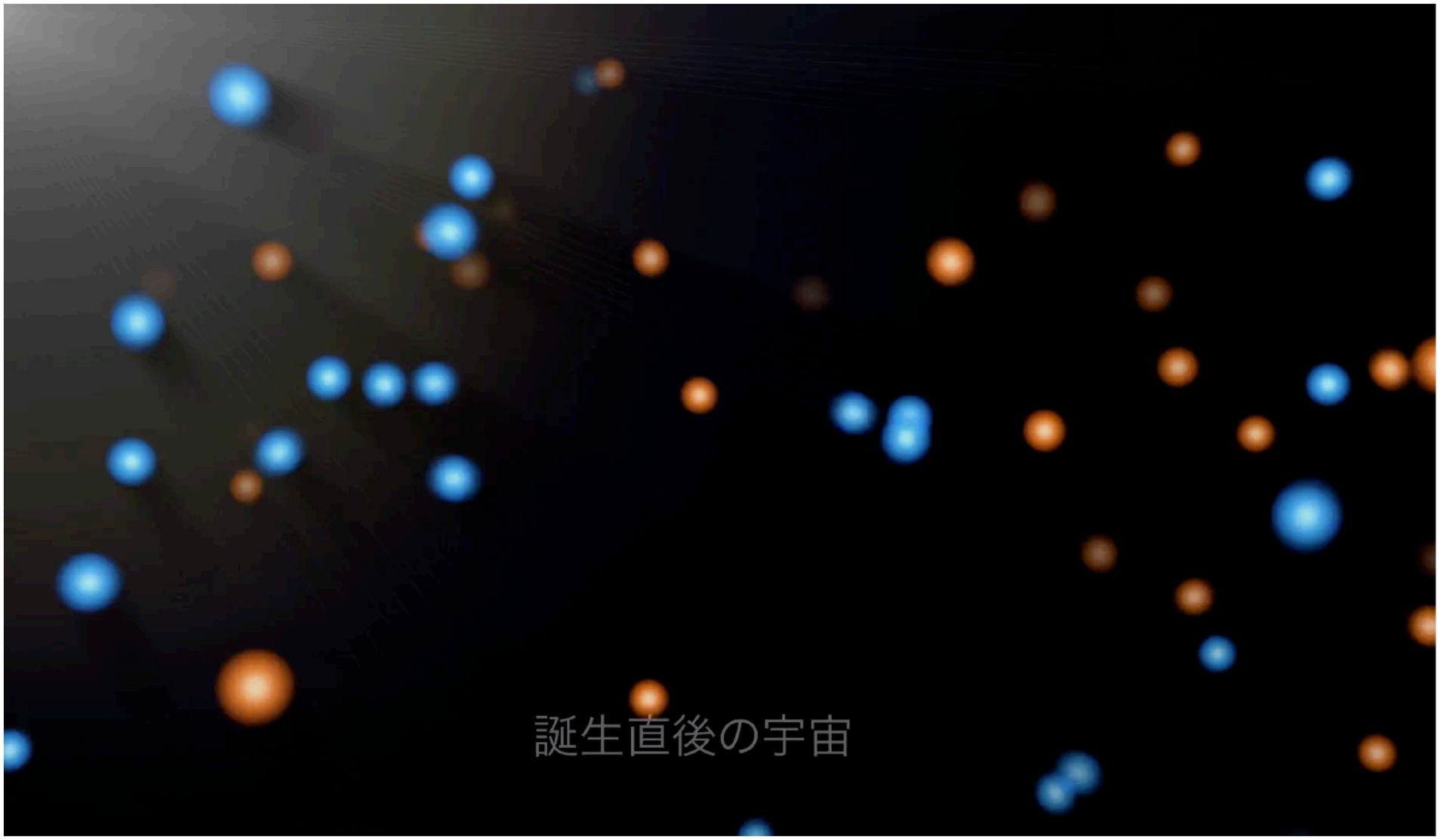
温度/E
（K/GeV）

ハドロン

原子核

p n

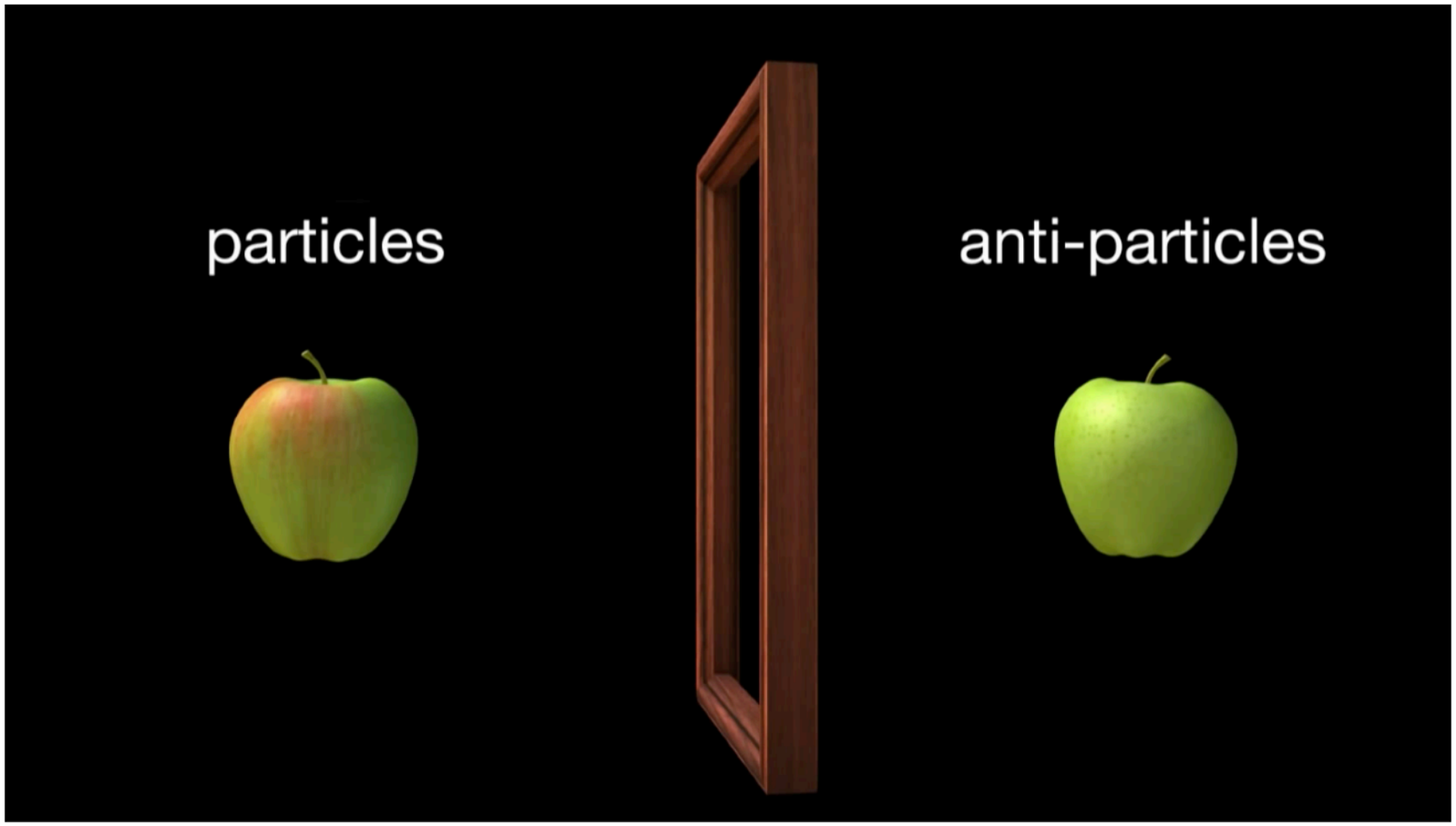
消えた反粒子の謎



動画提供：KEK

粒子　　反粒子

CP 対称性の破れ



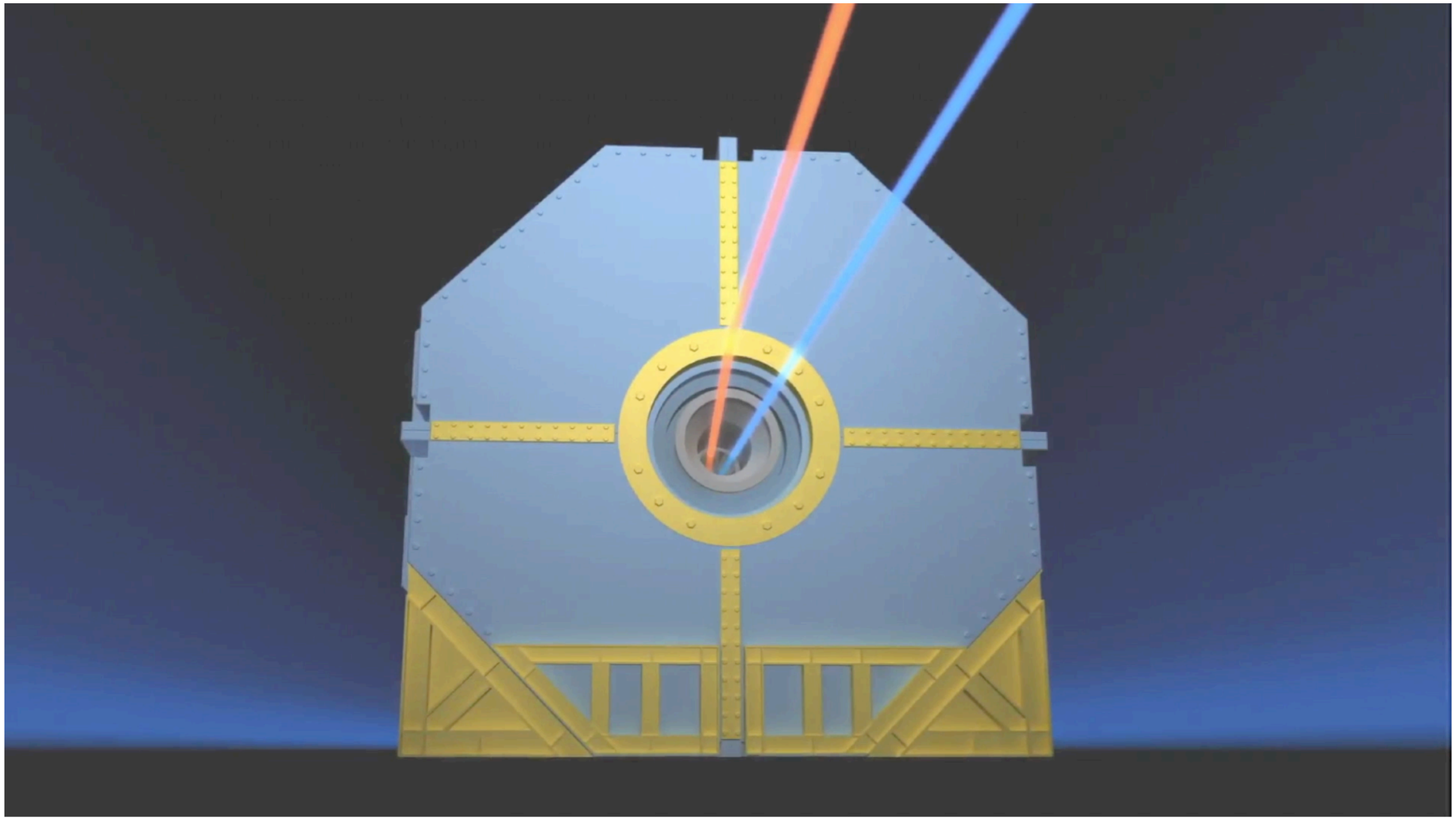
図提供：KEK

粒子と反粒子に働く物理法則の対称性が破れていない
と、物質優勢の宇宙はできない。

この非対称性を **“CP 対称性の破れ”** と呼ぶ。

SuperKEKB/Belle II実験

Belle実験の50倍のB中間子や、チャーム粒子、タウレプトンの崩壊を測定して、新物理の信号検出を目指す



動画提供：KEK

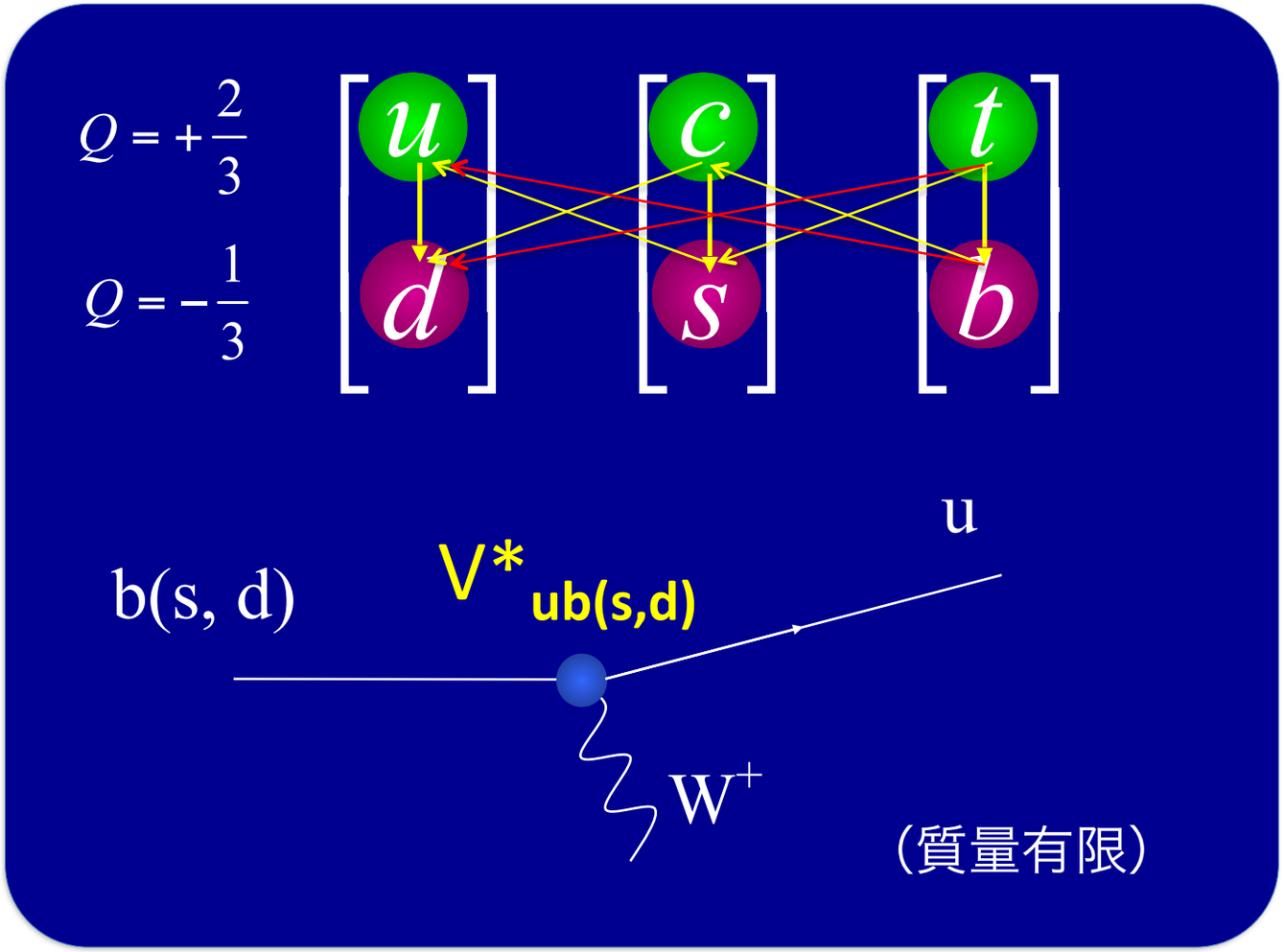
CP対称性の破れの歴史

- 1964年　K中間子の崩壊で発見
- 1973年　小林－益川理論
  - クォークが6種類あればCP対称性は必然的に破れる。
  - 当時知られていたクォークは3種類→後に全て発見された。
- 1981年　三田ら（カーター・三田論文）がB中間子崩壊で大きなCPの破れを予言。

Bにおける大きなCPの破れは、小林–益川理論を含む標準理論の最終課題のひとつであった。

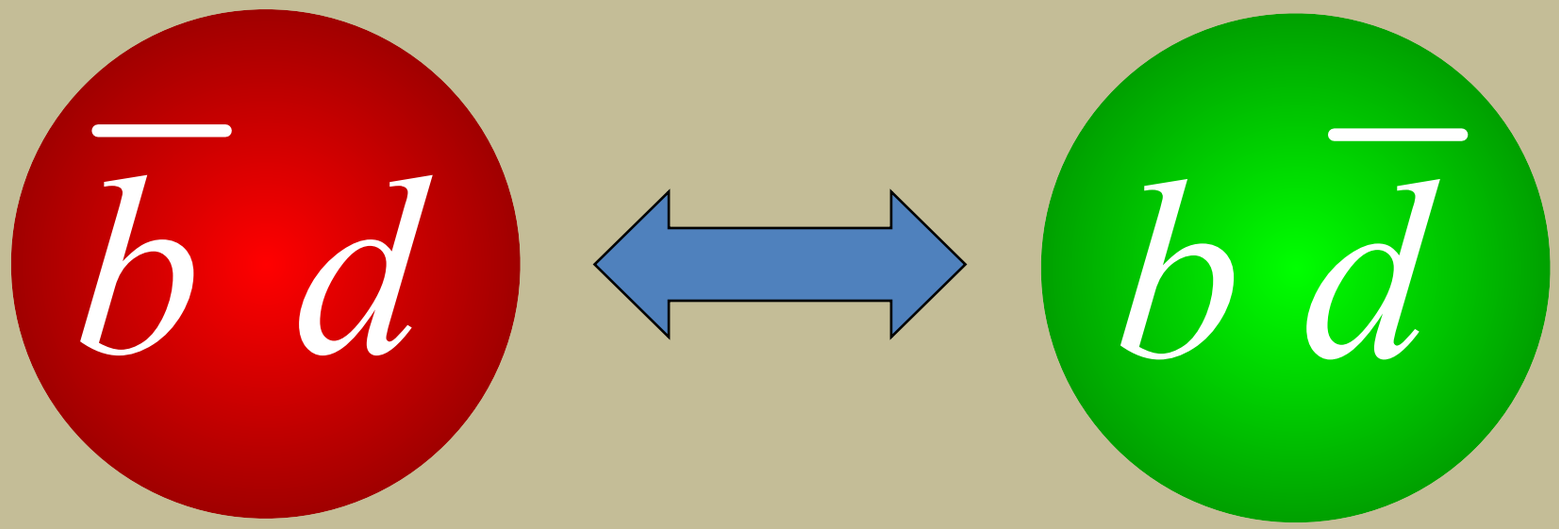
小林-益川理論

- クォークは6種類あり、3つの世代を構成する。
  - 当時知られていたクォークは3種類。
- クォークは世代間で混合し、この時CPが破れる！



ヒッグス機構
⇒ 質量＋混合
⇒ CPの破れ

B中間子



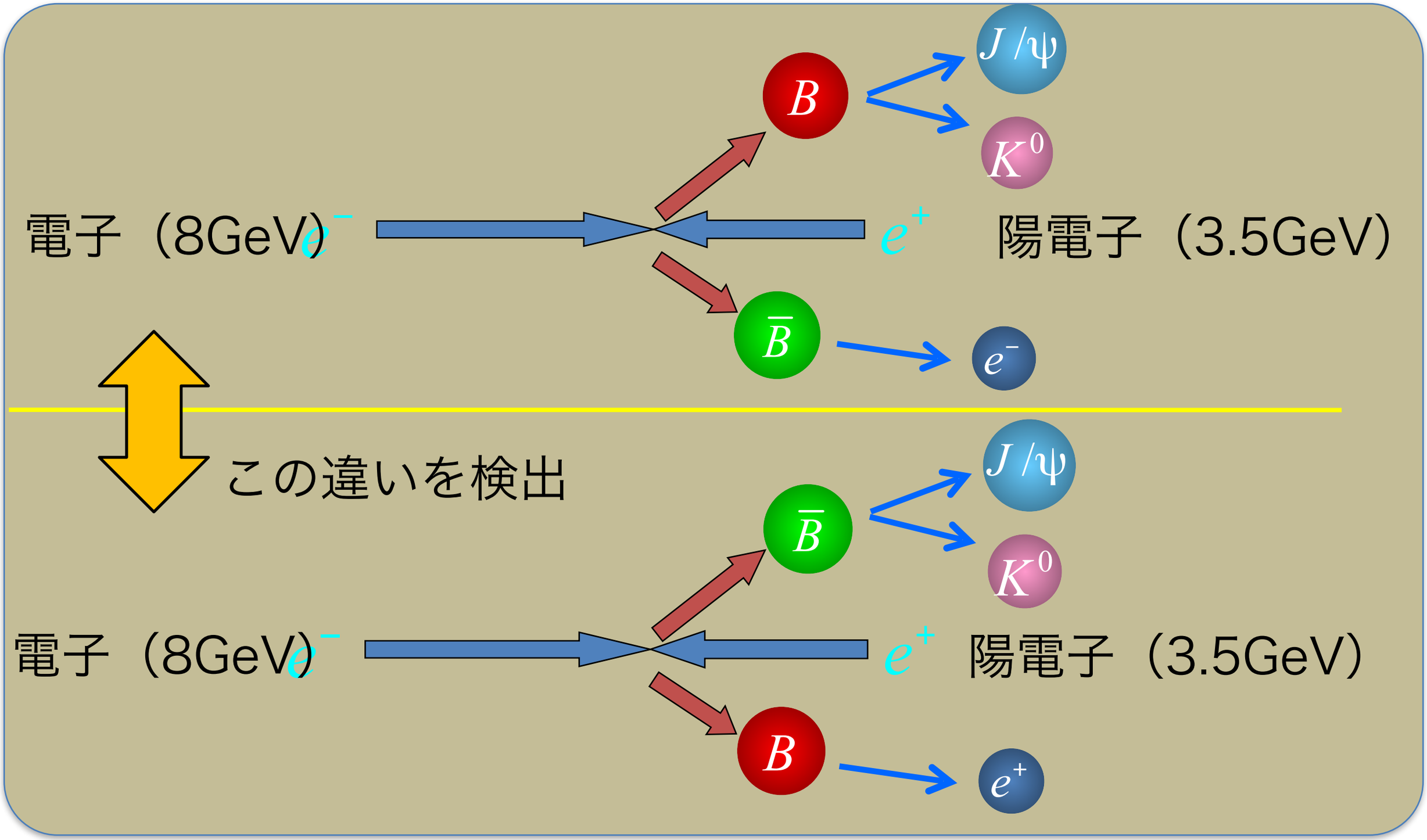
B中間子　　反B中間子

質量は陽子の約5倍程度（$m_B = 5.28 GeV/c^2$)
寿命は0. 000 000 000 00152 秒（$\tau_B = 1.52$ ps）

Bファクトリーで崩壊の違いを精密に測る。

Bファクトリー（B工場）での測定

電子-陽電子衝突で大量の$B\bar{B}$中間子対を生成する。



実験のがんばりどころ

- B中間子寿命はわずか1.5ピコ秒しかない！
  - 1ピコ秒＝0.000000000001秒
  - 飛行距離は20ミクロン程度。

➡ 非対称エネルギー衝突（8GeV電子＋3.5GeV陽電子）

- B中間子が前方に勢いよく飛び出す。

➡ 寿命が延びる

- 飛行距離は200ミクロン程度。

最先端の技術を使えば測定可能

加速器の挑戦

- 見たい崩壊($B^0 \rightarrow J/\psi Ks$)はめったにおこらない（10万回に1回）。

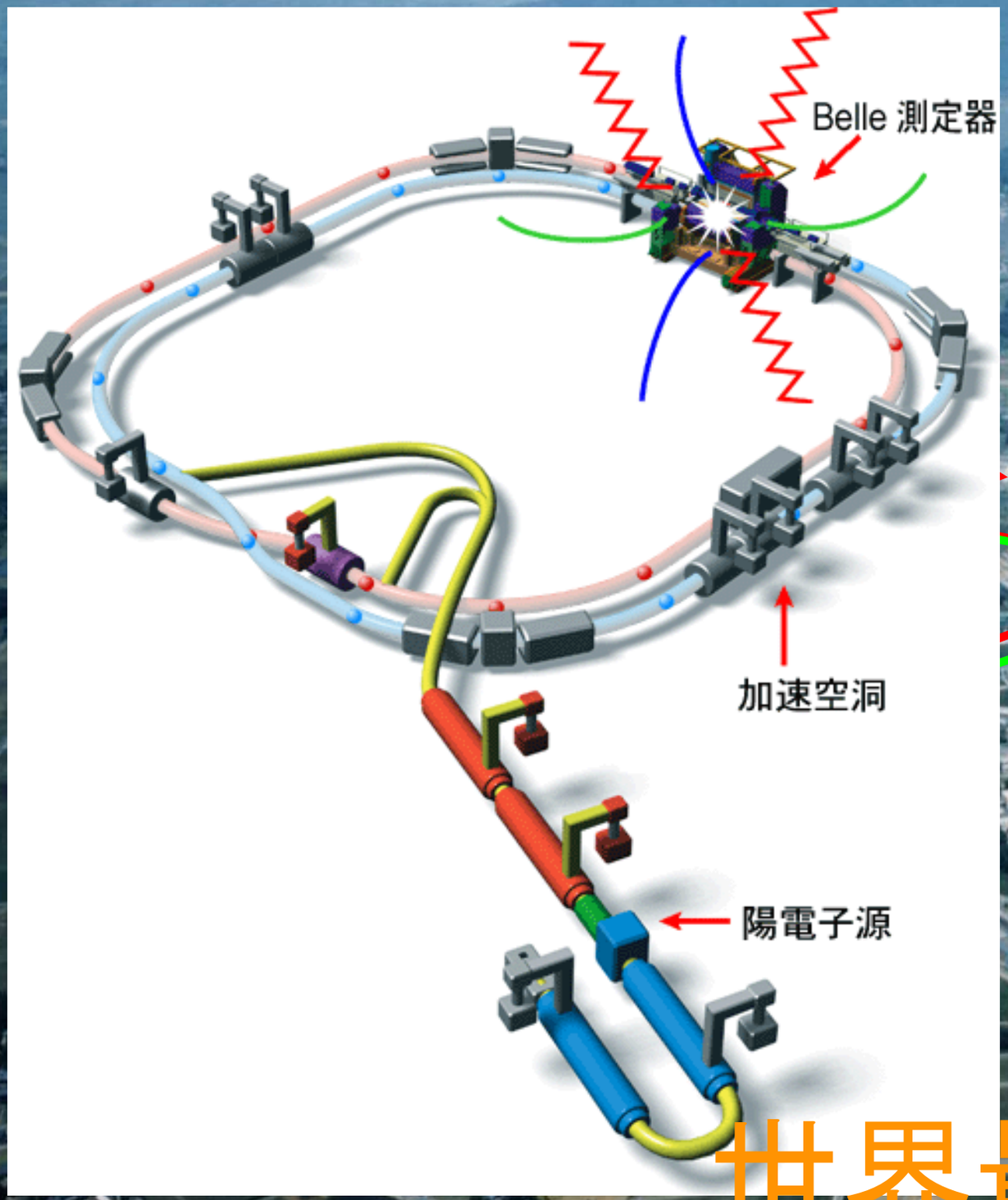
➡ 高輝度（ルミノシティー）の電子－陽電子衝突を実現

➡ 年間に1億個のB－反B中間子対を生成

“B中間子工場（Bファクトリー）”

KEKB加速器は世界最高強度のマシン

KEKB加速器



- 世界最高強度を誇る加速器で大量のB中間子と反B中間子を生成。
- 主要目的：粒子-反粒子（CP）対称性の破れの謎を解明。

ルミノシティー
$2.1 \times 10^{34}\ cm^{-2}s^{-1}$!

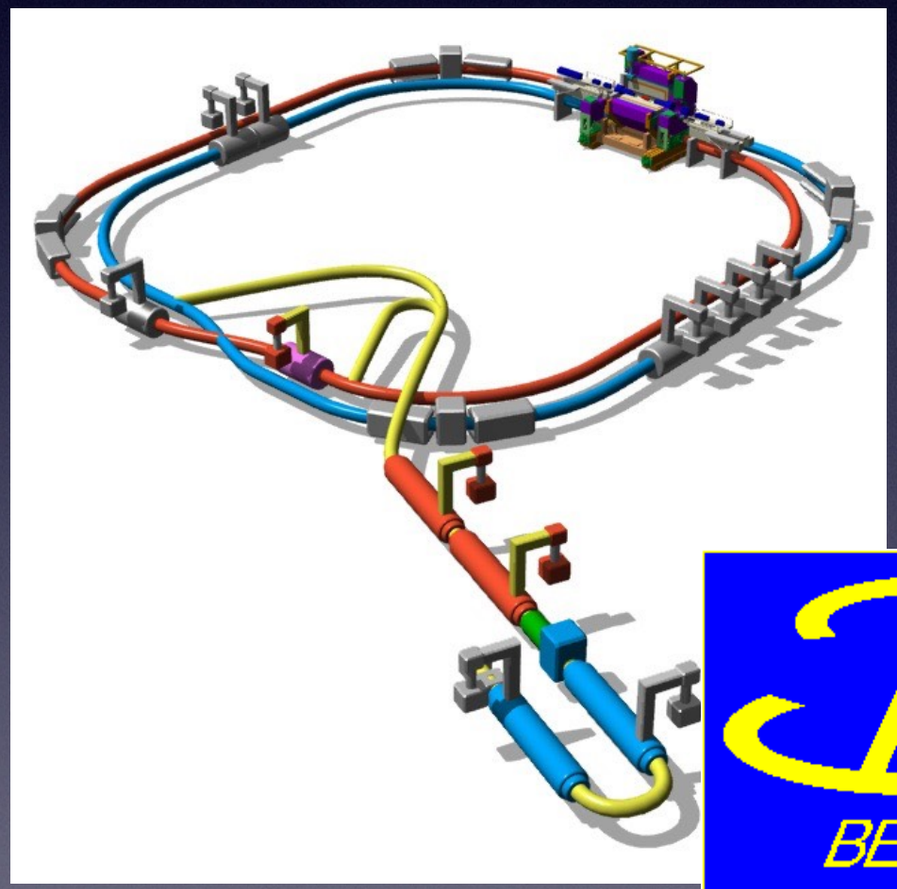
年間約2億対のBBを生成

世界最高輝度を達成！

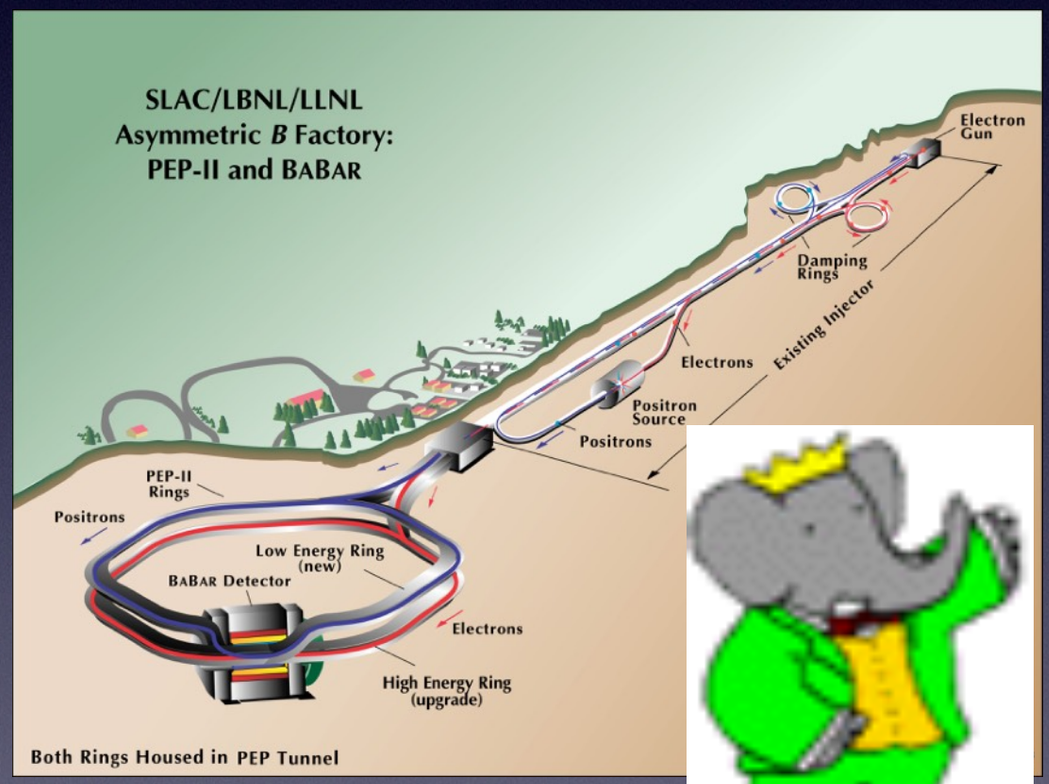
The B Factories (1998~)

The two B factories have successfully achieved the design luminosity, and contributed to confirmation of the CP violation.

KEKB / Belle



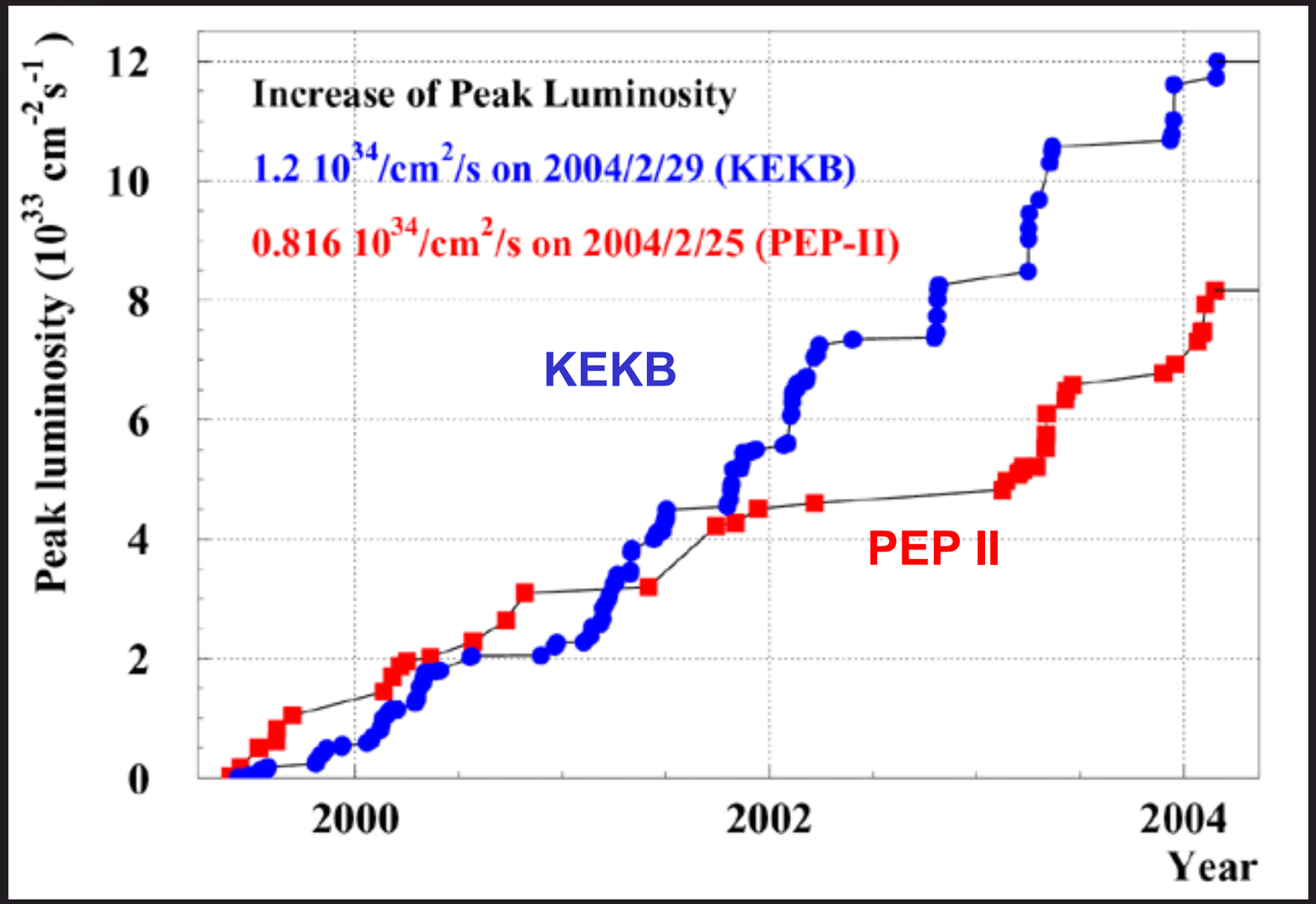
PEP II / BaBar



Luminosity ~$10^{34}cm^{-2}s^{-1}$ ➡ ~10 $B\bar{B}$/s ➡ 10^{8} $B\bar{B}$/year

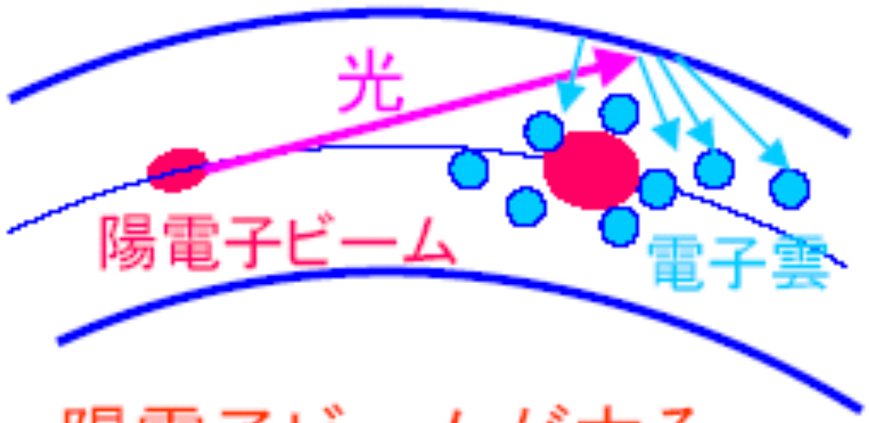
日米の熾烈な競争

- 米国SLAC研究所のPEP II/BaBar実験とのルミノシティーの比較



“太る”ビームとの闘い

陽電子ビームよ、細くなれ。

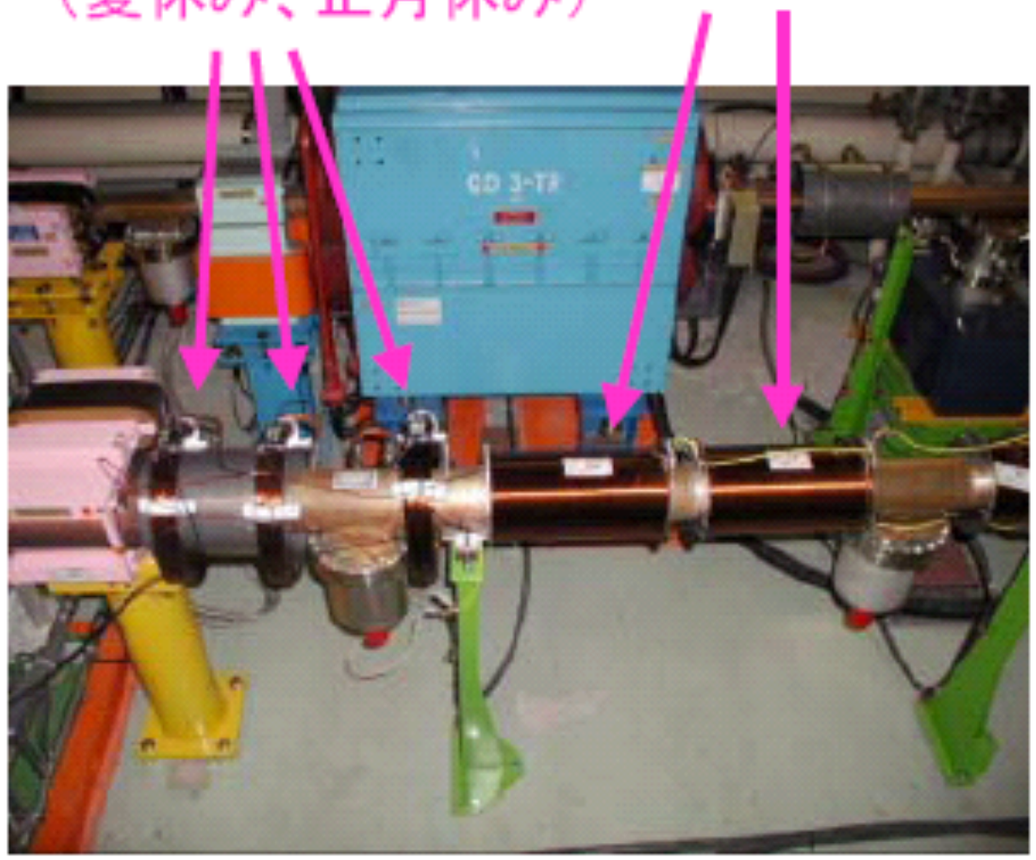


陽電子ビームが太る。
大変困った！

対策：磁場で電子雲を
壁に引き留めよ。

→大きく改善。

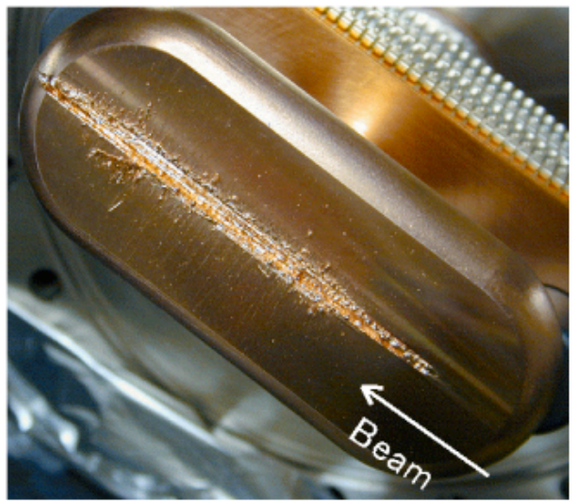
陽電子リング全周に、せっせと
ソレノイドコイルを巻いた。
（夏休み、正月休み）

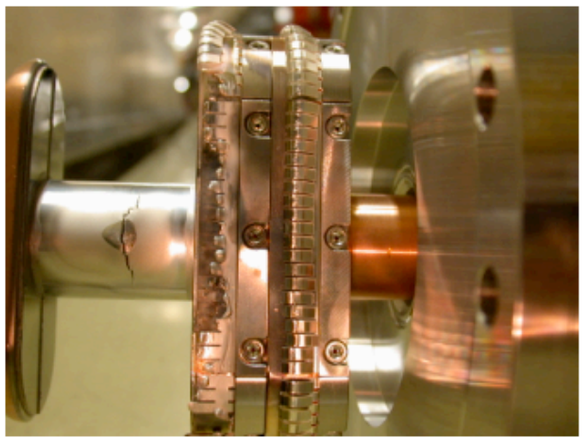


大電流との闘い

大電流によるトラブル

Movable Mask

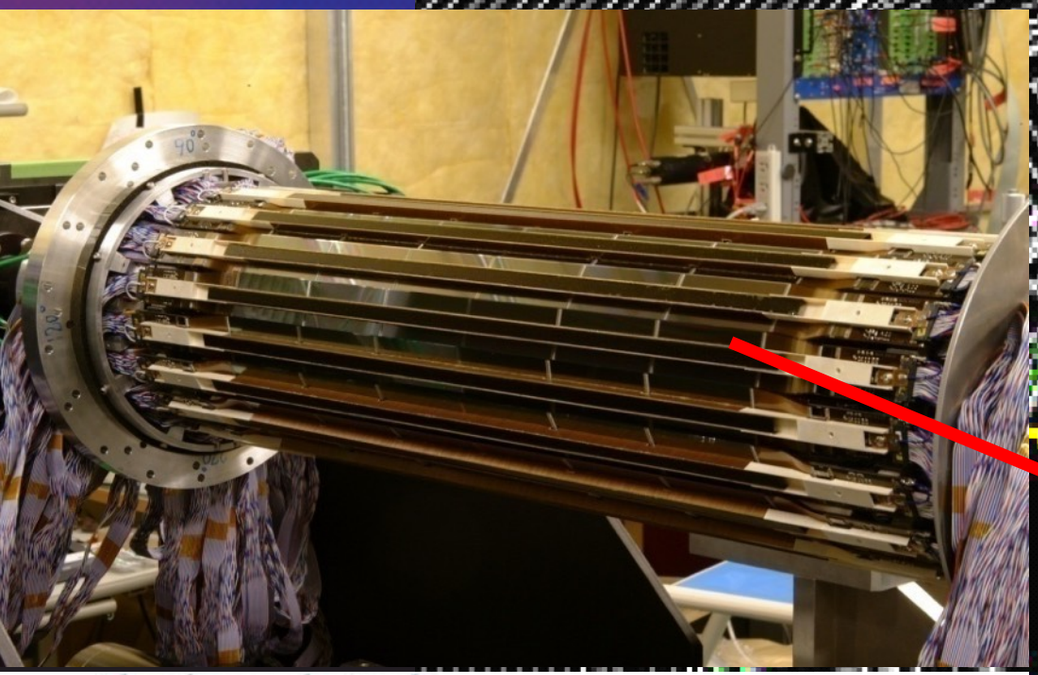


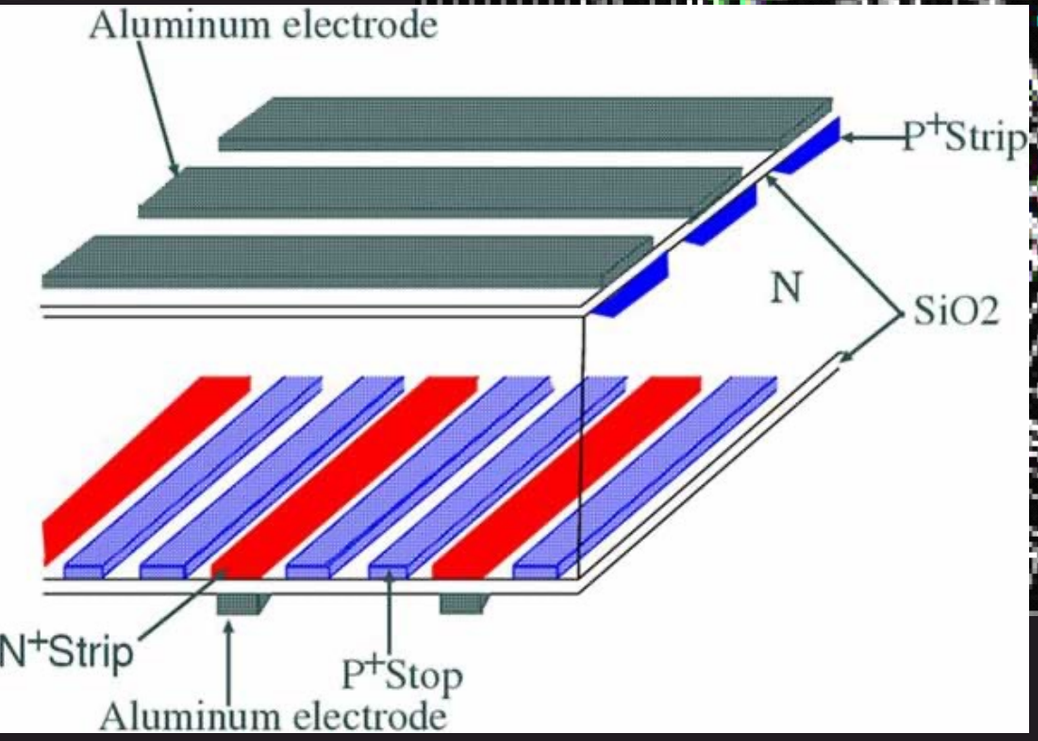


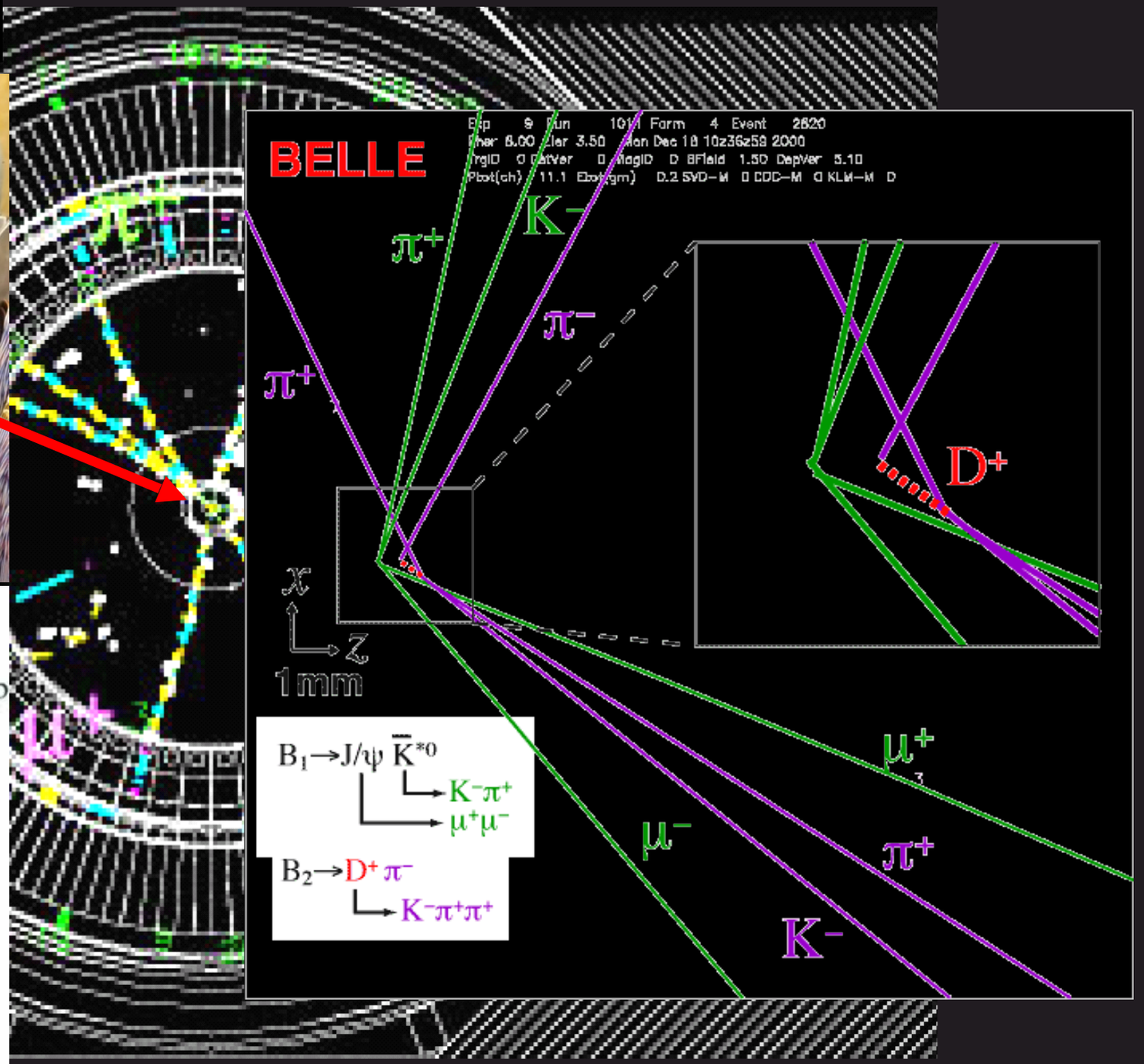
LER Septum Chamber

B中間子崩壊点再構成

シリコンバーテックス検出器



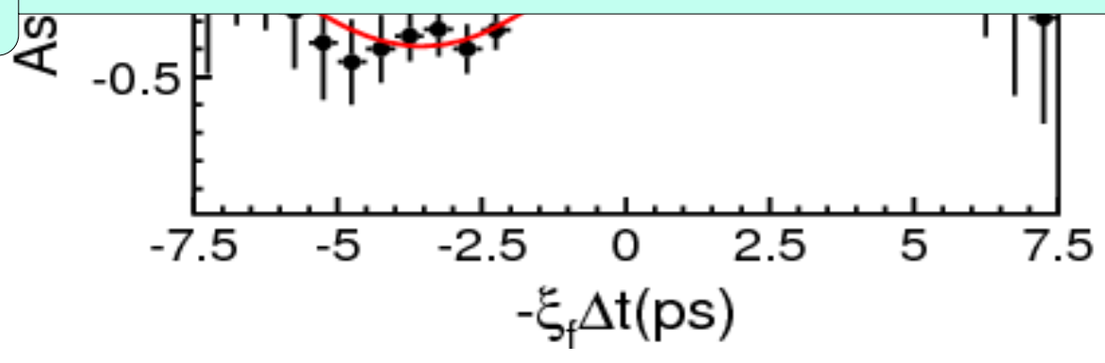


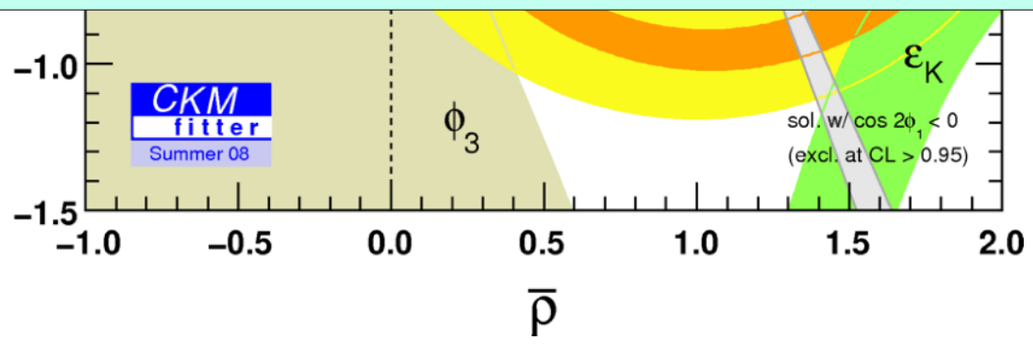


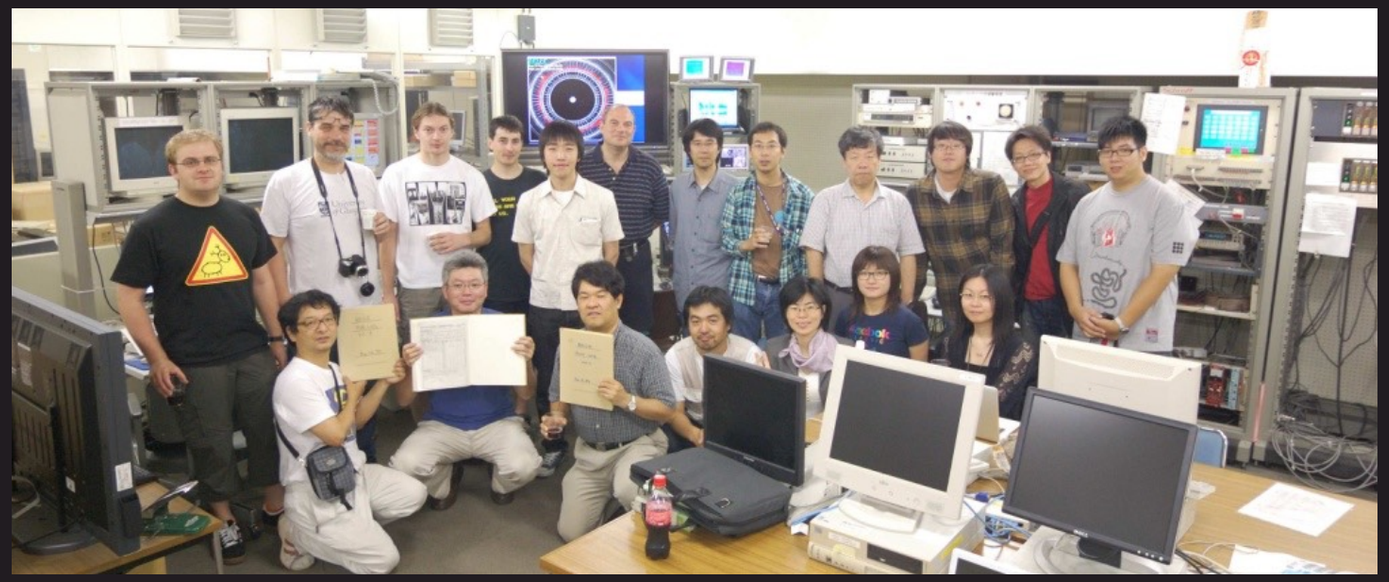
Bファクトリーによる小林-益川理論の検証

Press release from the Academy

"As late as 2001, the two particle detectors BaBar at Stanford, USA and Belle at Tsukuba, Japan, both detected broken symmetries independently of each other. The results were exactly as Kobayashi and Maskawa had predicted almost three decades earlier. "







2010年6月KEKB/Belle 実験完了！

新物理の探求

Belle

素粒子の物理

粒子・反粒子の違い（CP対称性の破れ）

（小林益川理論）

2008年 小林博士・益川博士

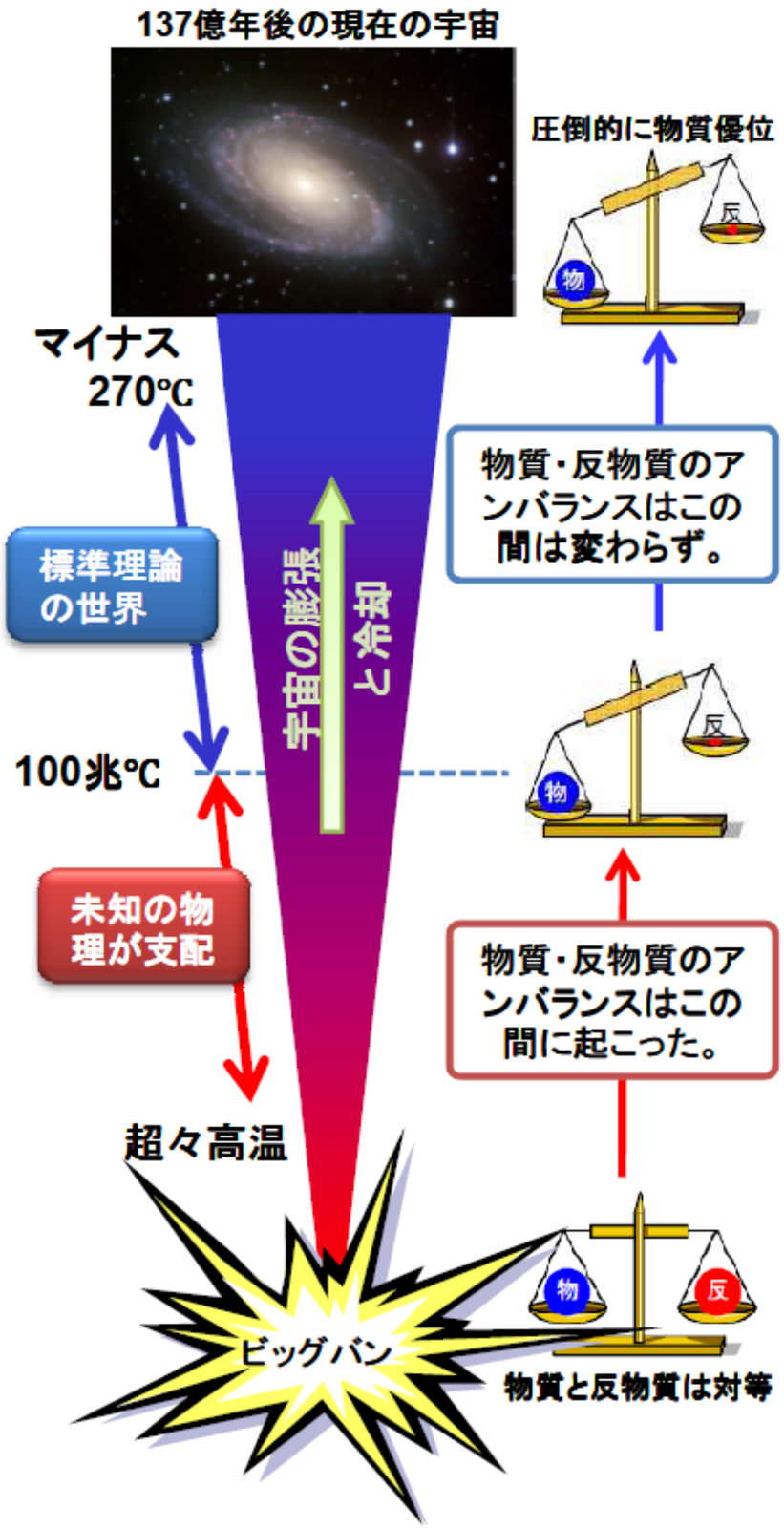
Belle II

新しい物理

新物理におけるCP対称性の破れ

未知の素粒子（暗黒物質候補）の理解

粒子・反粒子の違いから、私たちの物質優位の宇宙ができた可能性



次のチャレンジ＝夢

- Bファクトリー実験で小林益川理論を検証！
- 次のチャレンジ＝夢は「小林益川を超える」、「小林益川が説明できない現象」の発見！

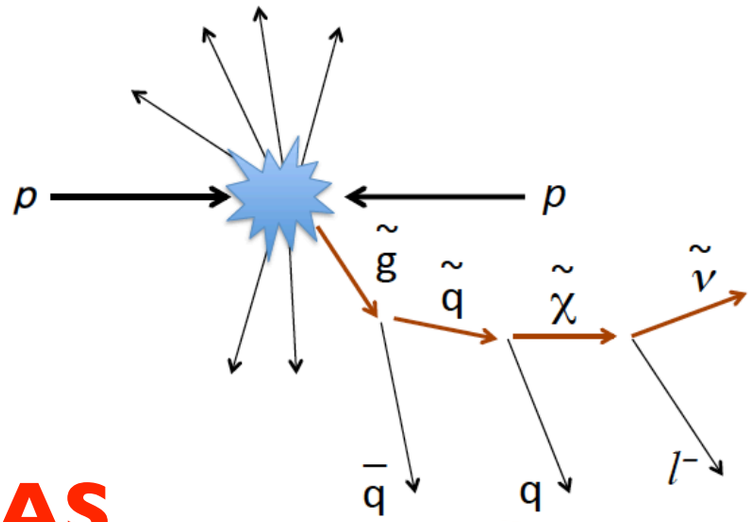
スーパーBファクトリー

次なるノーベル賞へ！

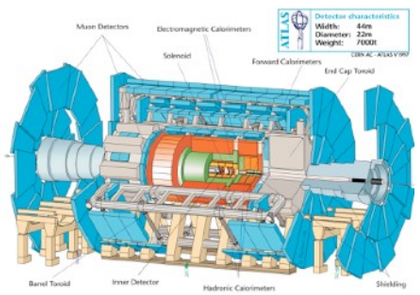
新物理探求の方法

エネルギーフロンティア:

超高エネルギービーム衝突によって、新粒子を直接生成し観測する

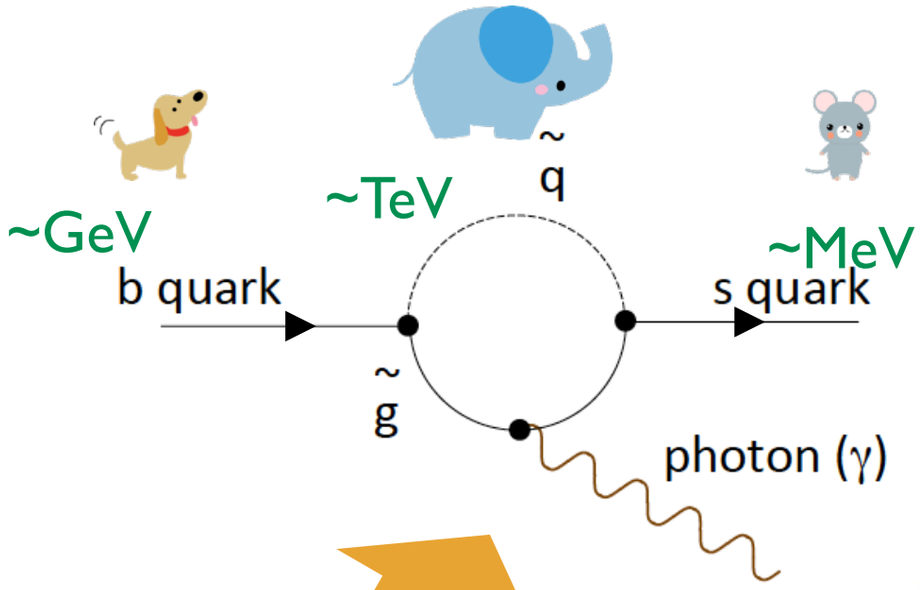


ATLAS

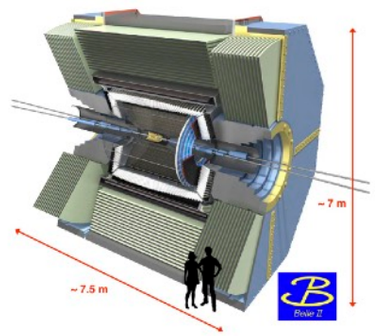


ルミノシティーフロンティア:

既知の素粒子の反応を精密に測定し、標準理論からのズレを見つけ出す。



Belle II



理論研究

t

c **b**

新粒子

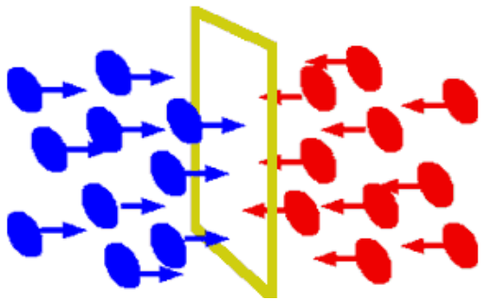
τ

“群盲象を撫でる”

新粒子を”触る”プローブ

重たいクォーク・レプトン！

ルミノシティ

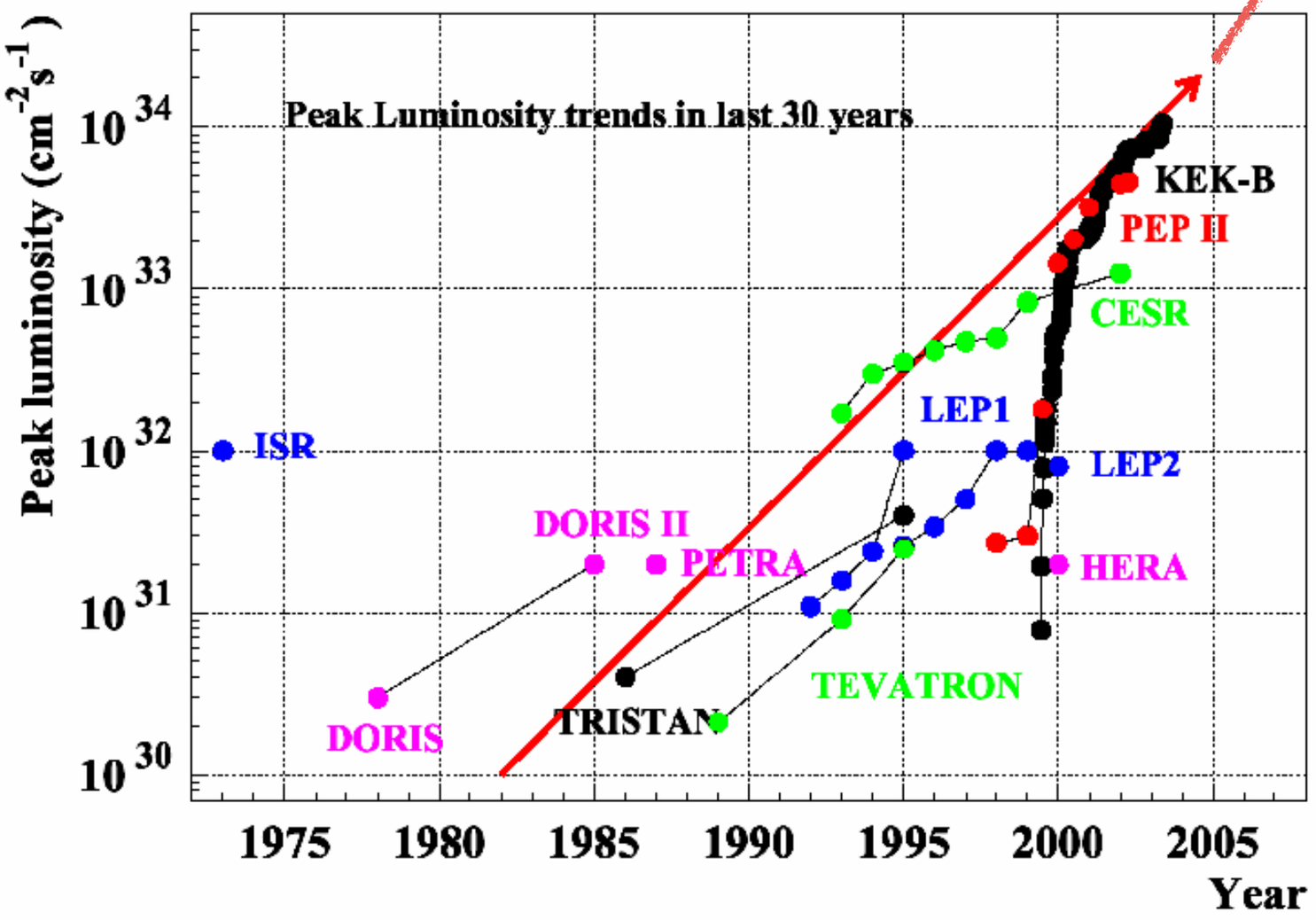


$$\text{ルミノシティ} = \frac{(\text{陽電子の個数}) \times (\text{電子の個数})}{\text{衝突点の面積}} \times (\text{単位時間の交差回数})$$

SuperKEKB

目標値：

$6 \times 10^{35} \mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$



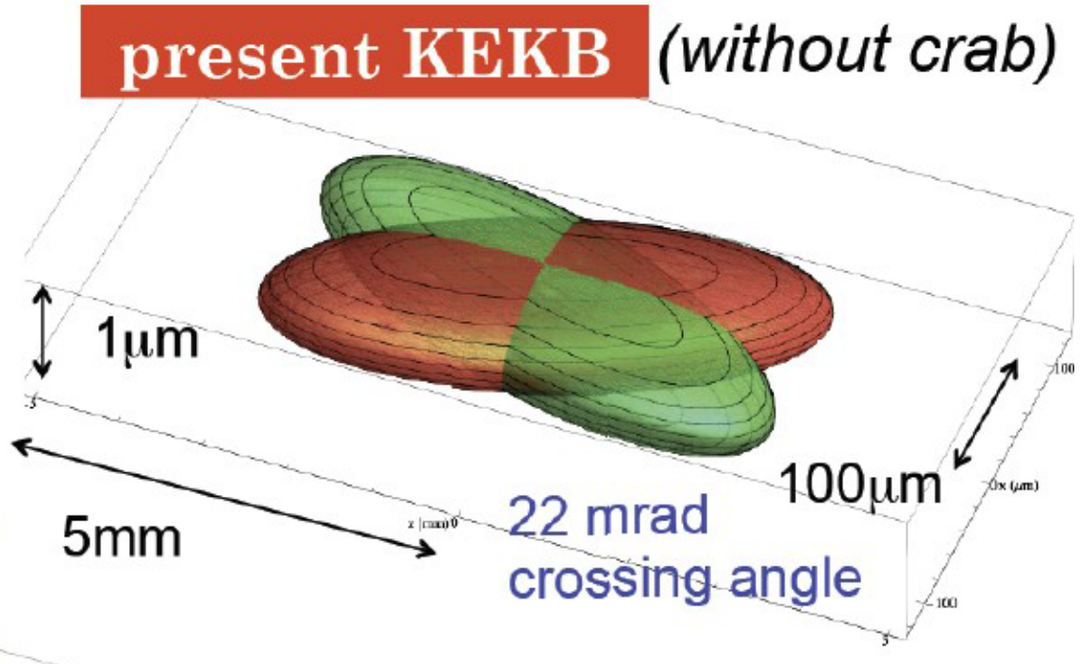
新しい衝突方式

ビームを細くして衝突させる

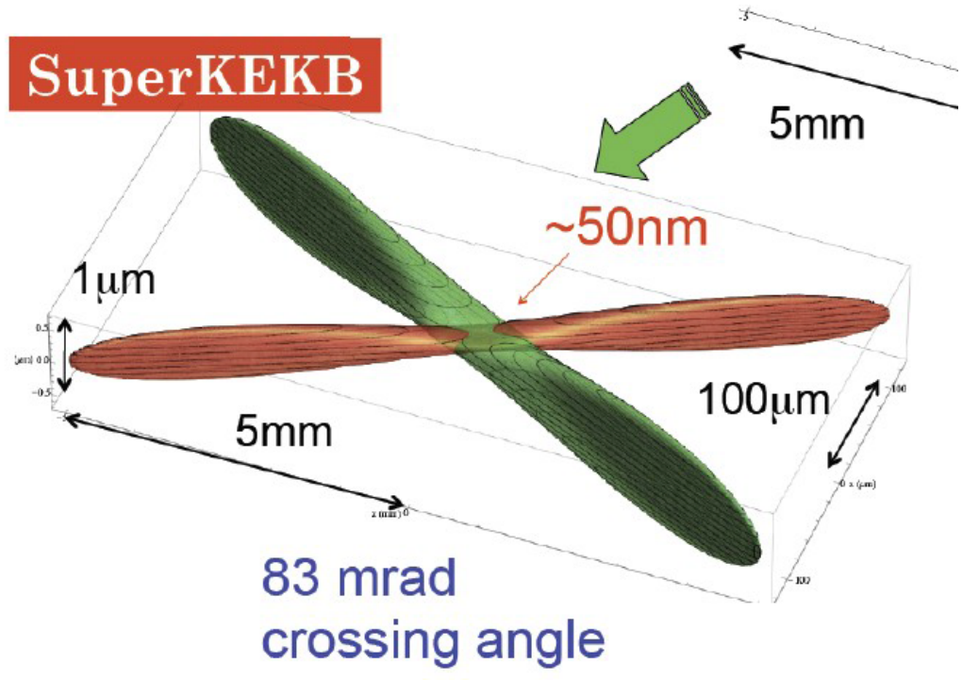
“ナノ・ビーム衝突”

ビーム衝突の様子

KEKB



SuperKEKB



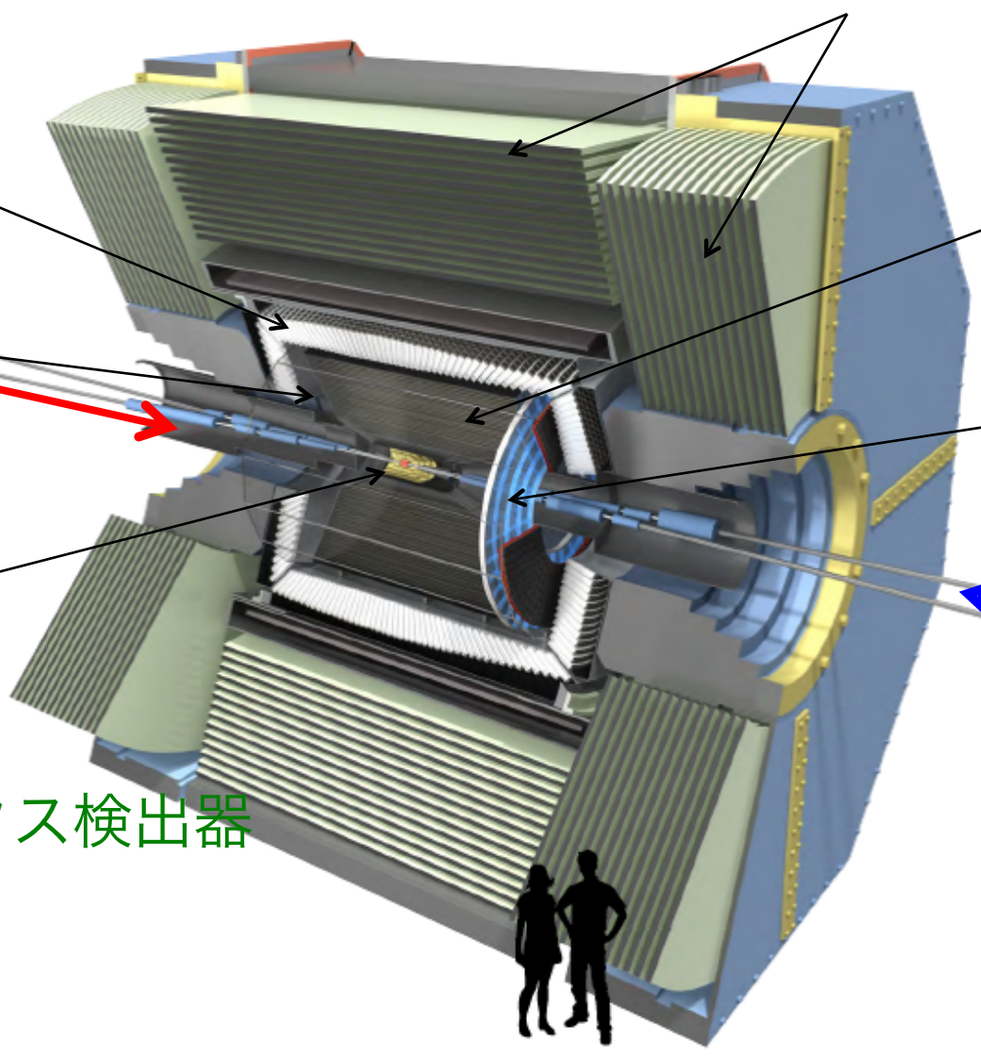
SuperKEKB加速器の概要

「もっと知りたいSuperKEKB加速器」より

http://www-superkekb.kek.jp/documents/SuperKEKB_pamphlet.pdf

Belle II 検出器

- より高い性能
  - エネルギー、運動量、崩壊点の測定精度、粒子識別性能
- より高いバックグランド耐性
- より大量のデータ処理性能



Belle II コラボレーション

26 カ国・地域

123の大学、研究機関から

約1130名が参加（2022.3現在）

計画の議論開始 2000年

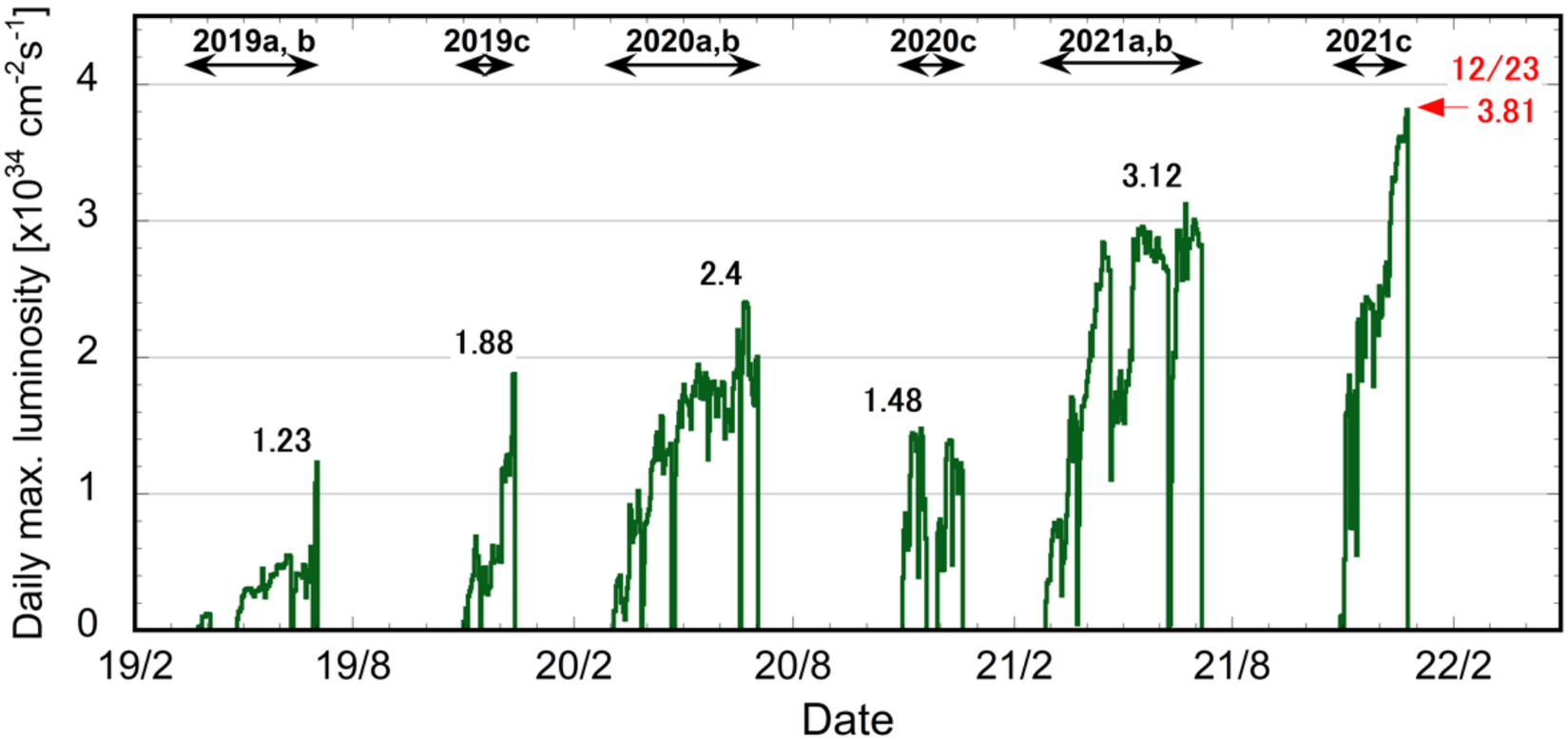
建設開始 2011年

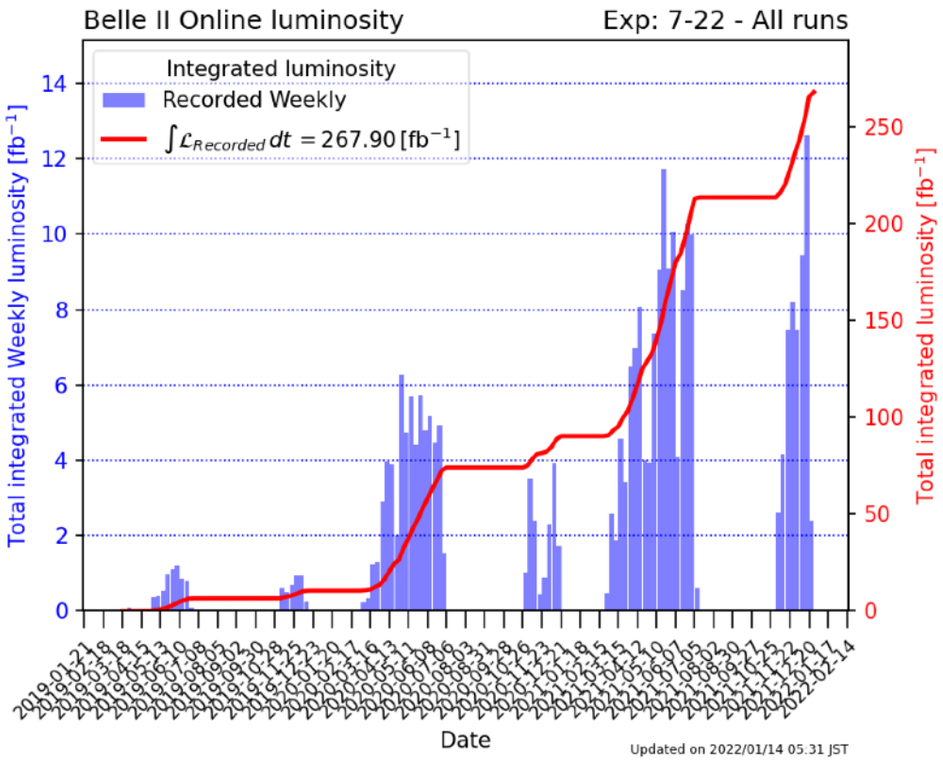
2016/2-2016/6 試験運転

2018/3-2018/7 調整運転　（4/26 初衝突）

2019/3- 本格物理運転

SuperKEKB/Belle II 実験進行状況





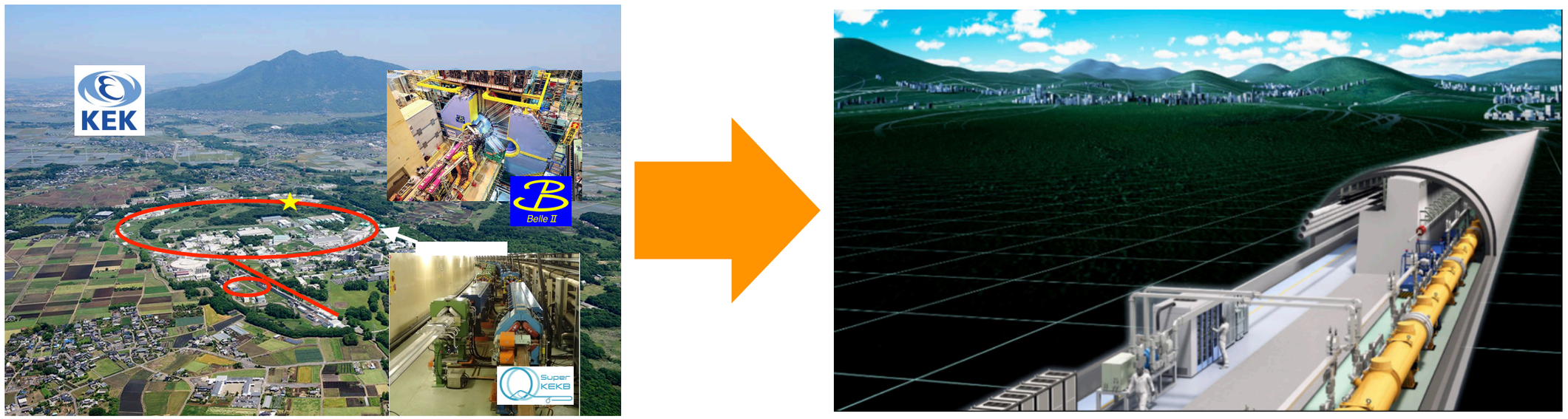
最高ルミノシティ: 3.81 x 10^{34}cm^{-2}s^{-1}

世界最高記録!

積分ルミノシティ= 267fb^{-1}

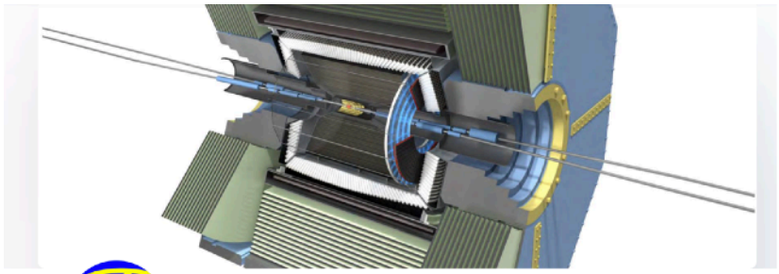
まとめ

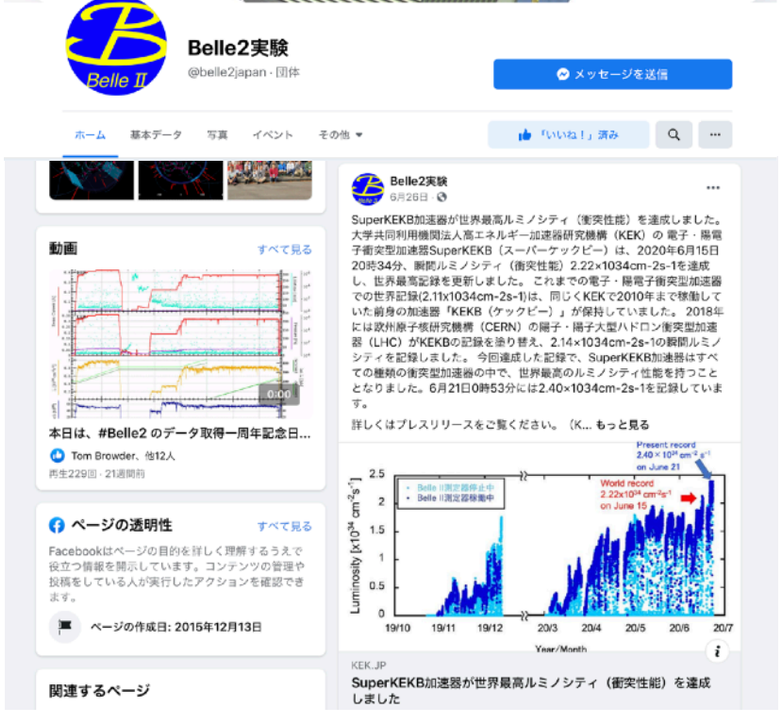
- 新物理探索を目指す SuperKEKB/Belle II実験が進行中。世界最高感度の物理データ獲得を目指している。
- 日本は電子-陽電子衝突型加速器実験のフロントランナー
  - 世界最高ルミノシティを支える加速器技術
  - 精密測定を可能にする測定器技術
  - 国際共同研究の組織
- Bファクトリー（KEKB/Belle →SuperKEKB/Belle II）の成功を、ILCにつなげたい！



SuperKEKB から ILC へ！

Belle II アウトリーチSNS





@belle2collab

@belle2japan (FB, Tw 日本語版)

一般向けウェブ:

belle2.jp (英語、日本語)

本日の図、写真の使用については、お問い合わせください。