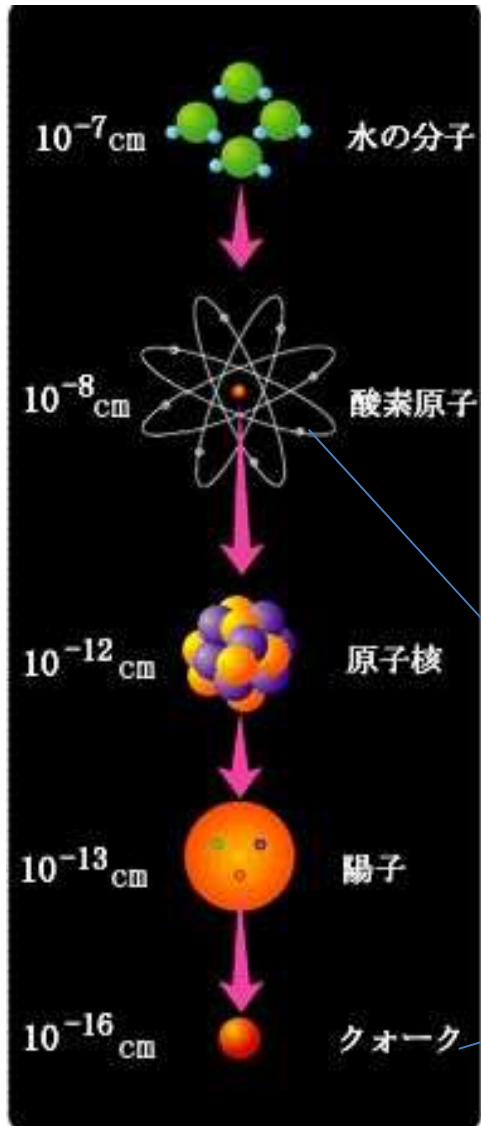


いよいよ始まった宇宙の起源を探る SuperKEKB/Belle II実験

高エネルギー加速器科学研究奨励会
第8回 特別講演会
2018年10月10日

宇野 彰二
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所

素粒子とその間に働く力



原子核 正の電荷
電子 負の電荷 → 電磁力
光子

陽子 正の電荷
中性子 中性 → 強い力
グルーオン

原子力
ウランの崩壊 → 弱い力
W,Zボゾン

クォークと電子(+ニュートリノ) : 基本粒子
陽子(uud) アップクォーク 2つ と ダウングォーク 1つ
中性子(udd) アップクォーク 1つ と ダウングォーク 2つ

電荷

+2/3

-1/3

0

-1

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 eニュートリノ	 μニュートリノ	 τニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

ゲージ粒子

強い力  グルーオン
電磁力  光子
弱い力  W ボゾン Z ボゾン

対応する反粒子

ヒッグス場に伴う粒子

2012年にLHCで発見

H

ヒッグス粒子

素粒子物理学

- 物質の究極の構成要素が何かを突き止めたい。
 - 構成要素そのもの
 - 素粒子の世界での相互作用
- アプローチの仕方
 - 実験的情報の収集→素粒子実験(高エネルギー実験)
 - 理論的理解

素粒子や相互作用の性質は？

- 電荷、質量、スピン
- 力の強さ、性質
- 類似性、規則性
- 保存則、対称性
- 等々

対称性



左右対称



対称性の破れ

電荷

+2/3

-1/3

0

-1

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 eニュートリノ	 μニュートリノ	 τニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

ゲージ粒子

強い力  グルーオン
電磁力  光子
弱い力  W ボゾン Z ボゾン

対応する反粒子

ヒッグス場に伴う粒子

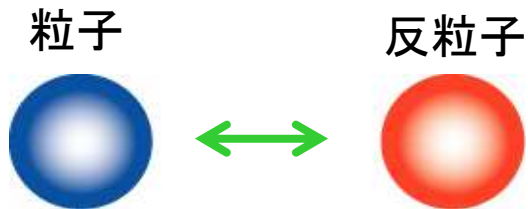
2012年にLHCで発見

H

ヒッグス粒子

物質と反物質

物理法則には「物質」と対等に「反物質」が登場する。



全ての粒子には対応する反粒子があることが大原則。

例:

例:

		質量	スピン	電荷
反粒子	陽子(p)	938MeV	$\frac{1}{2}$	+1
	反陽子($\bar{p}$)	938MeV	$\frac{1}{2}$	-1
反粒子	電子(e^-)	0.51MeV	$\frac{1}{2}$	-1
	陽電子(e^+)	0.51MeV	$\frac{1}{2}$	+1

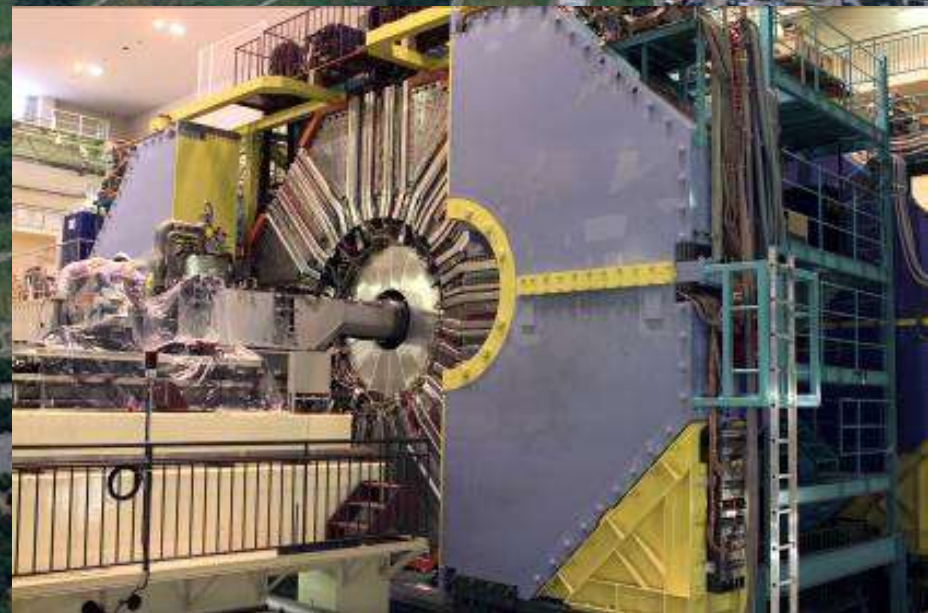
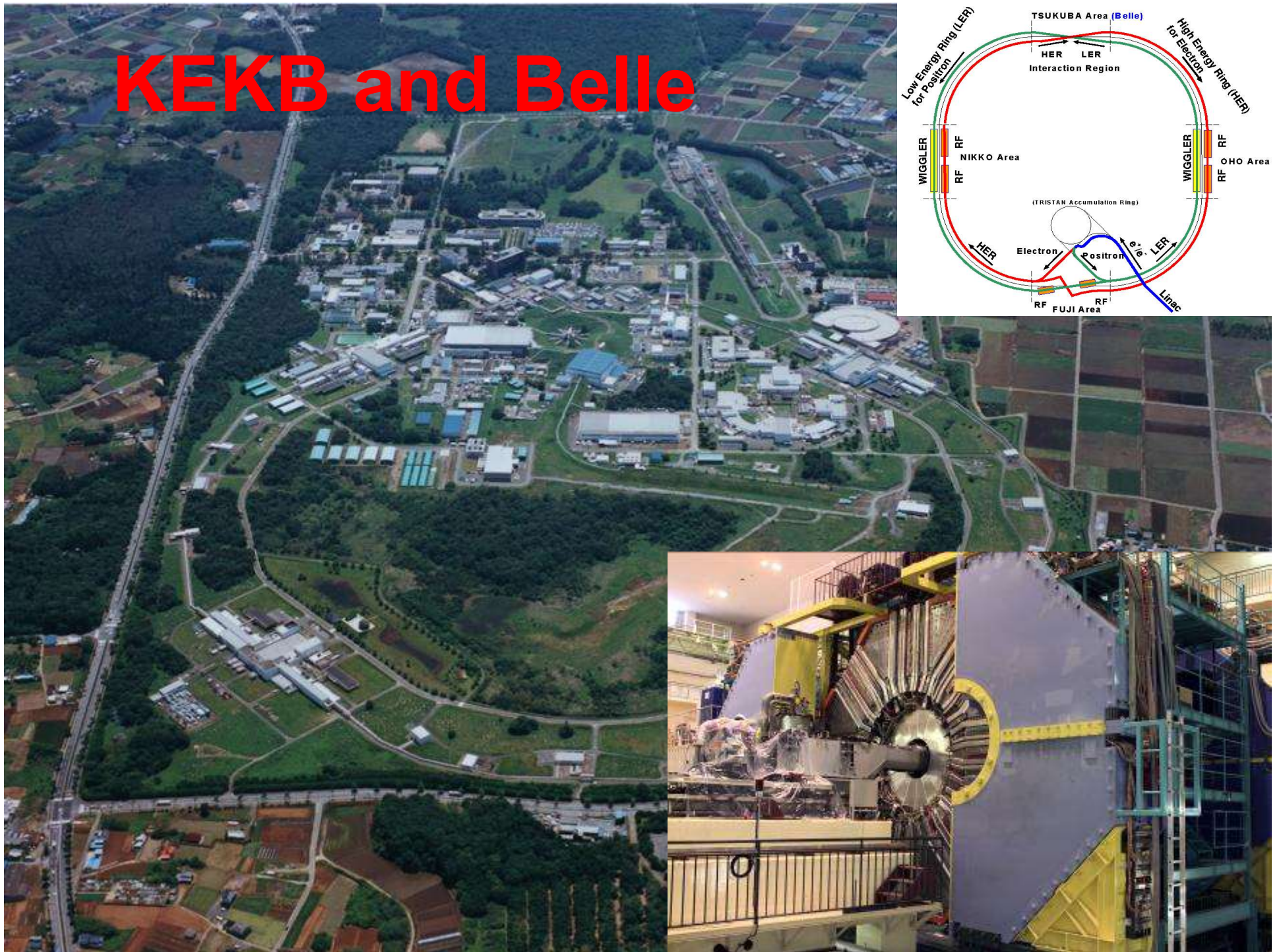
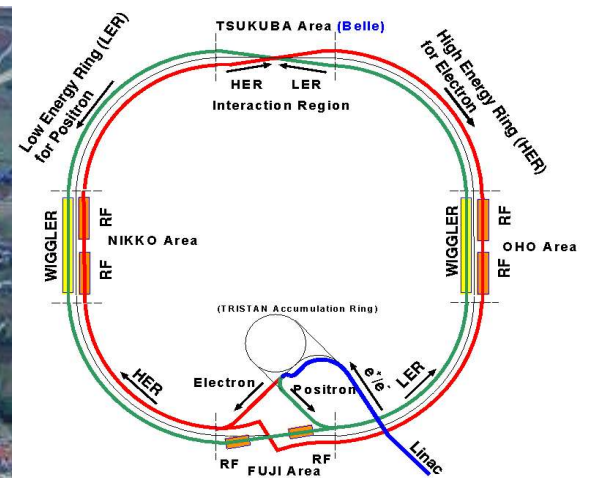
反物質が物質と出会うと対消滅して $E=mc^2$ で決まるエネルギーの光子が放出される。

逆に、エネルギーをもった光子から、物質と反物質をペアで生成することができる。

基本的には、
粒子と反粒子は、同じ物理法則に従う。

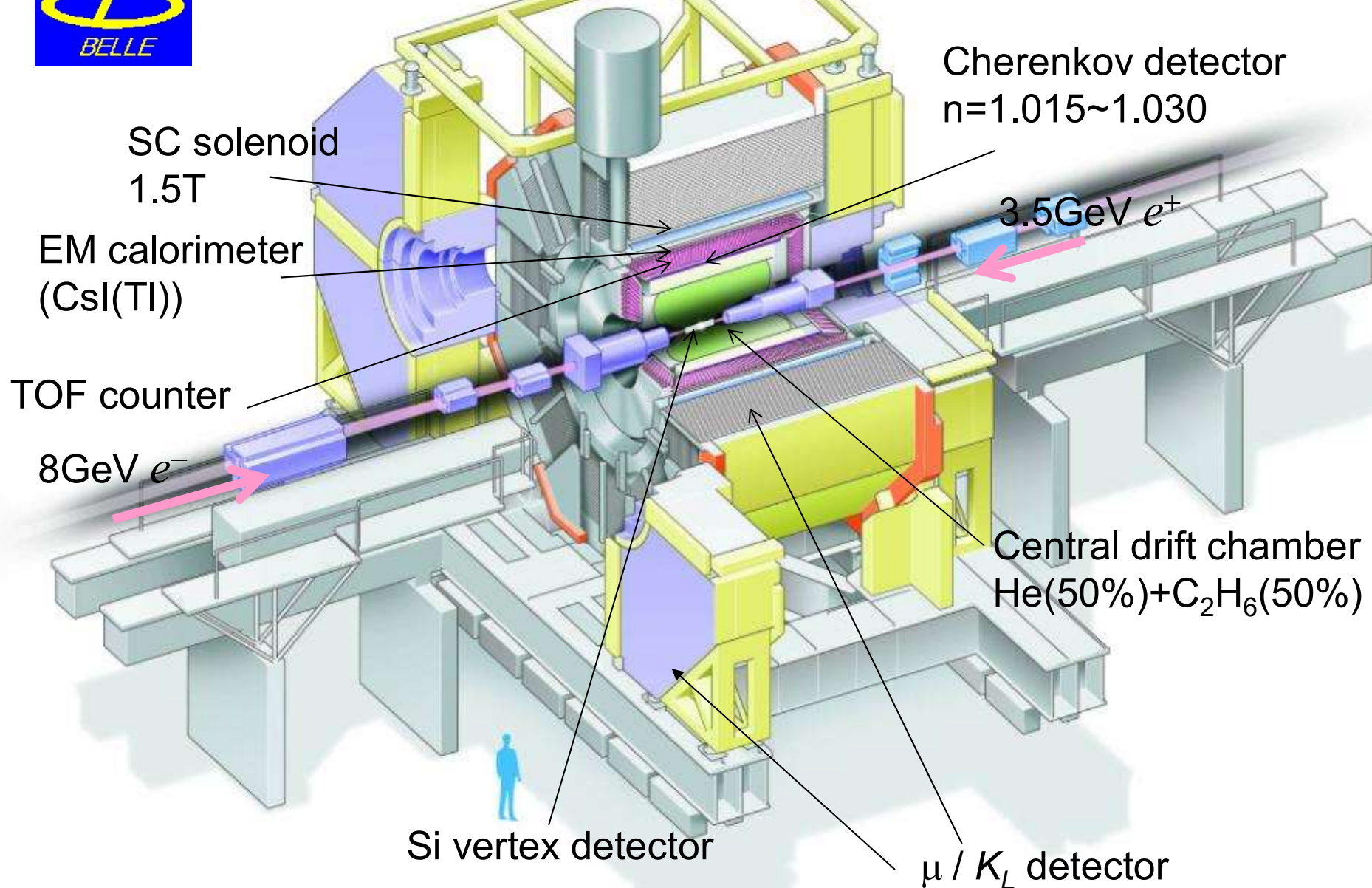
➡ CP対称性 ➡ CP対称性の破れ

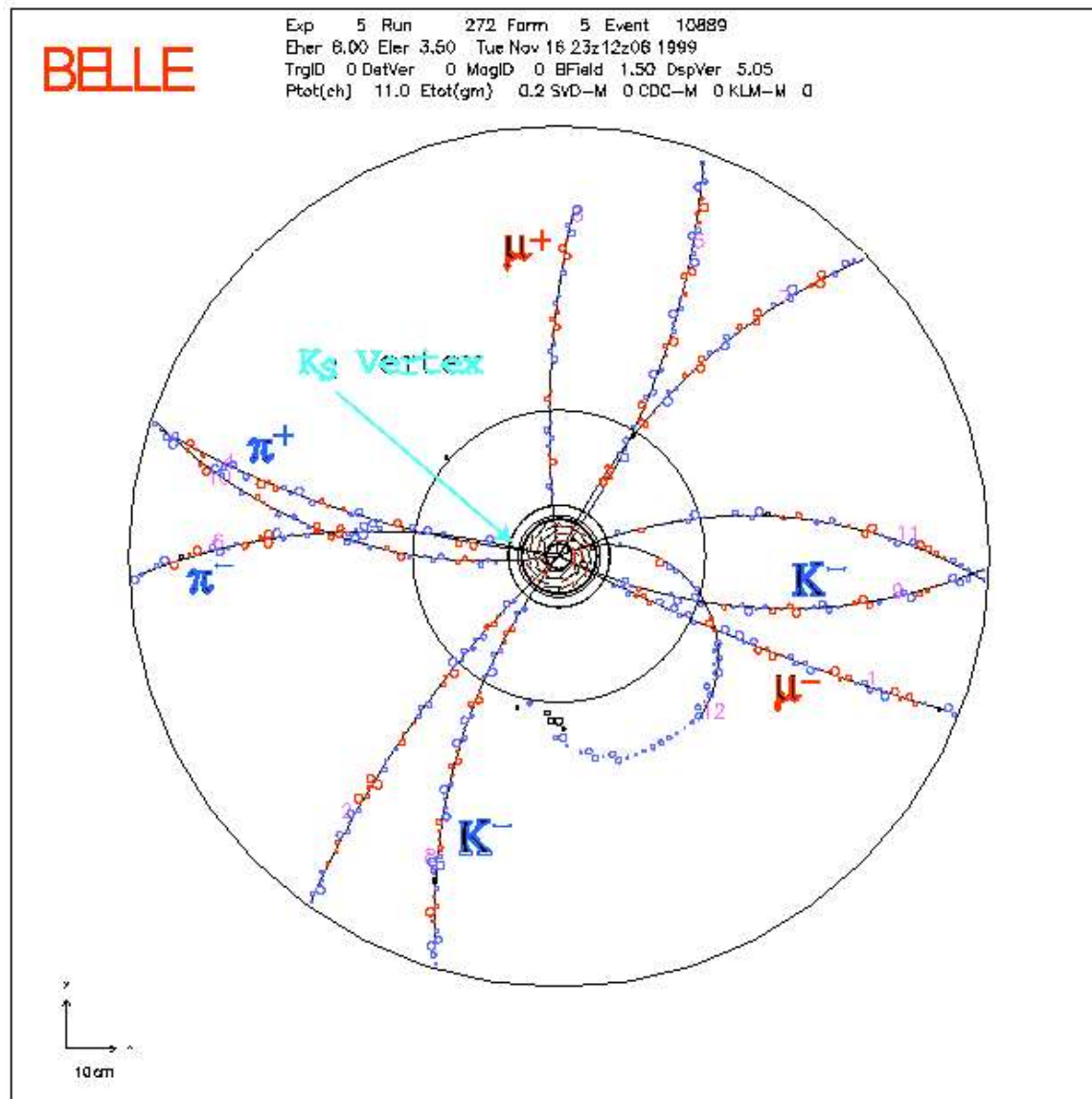
KEKB and Belle





Belle 検出器 巨大なデジタルカメラ





素粒子反応事象 (イベント)

電子・陽電子衝突によって
毎回違うイベントが起こる。

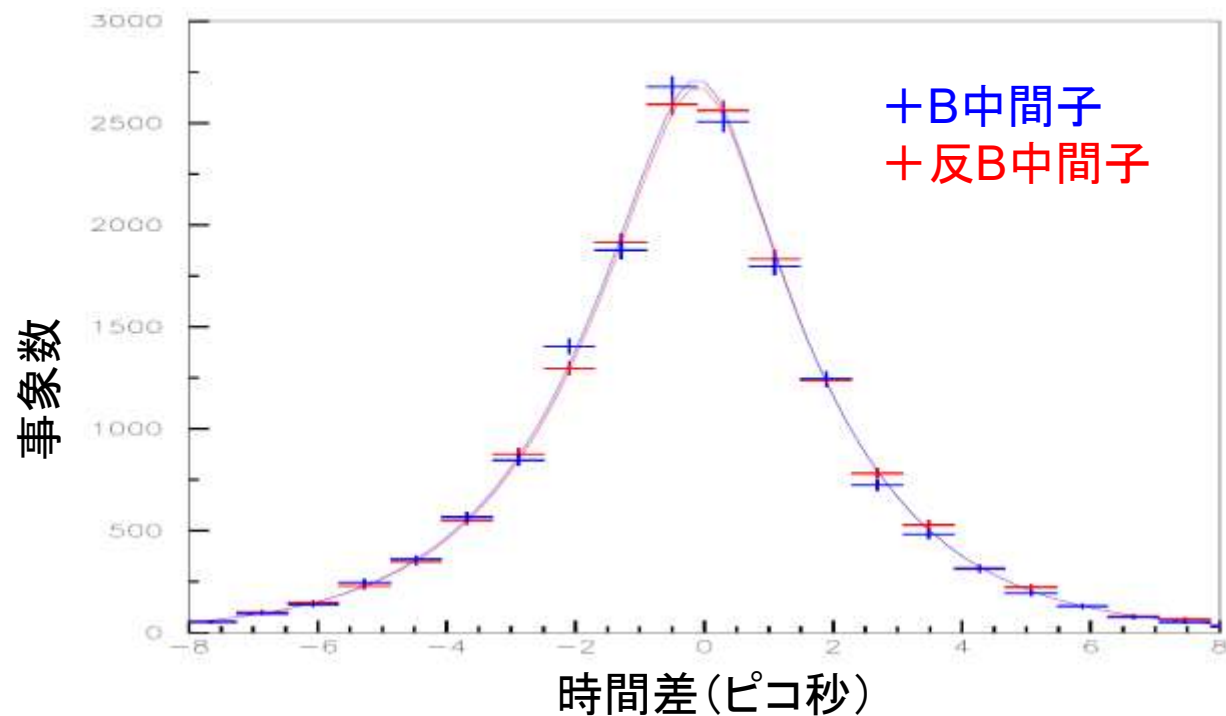
それを巨大デジタルカメラで
記録し続ける。

毎秒約500枚: Belle
毎秒3万枚まで可能: Belle-II

蓄積されたデータで何かに
注目して解析する。

実験結果

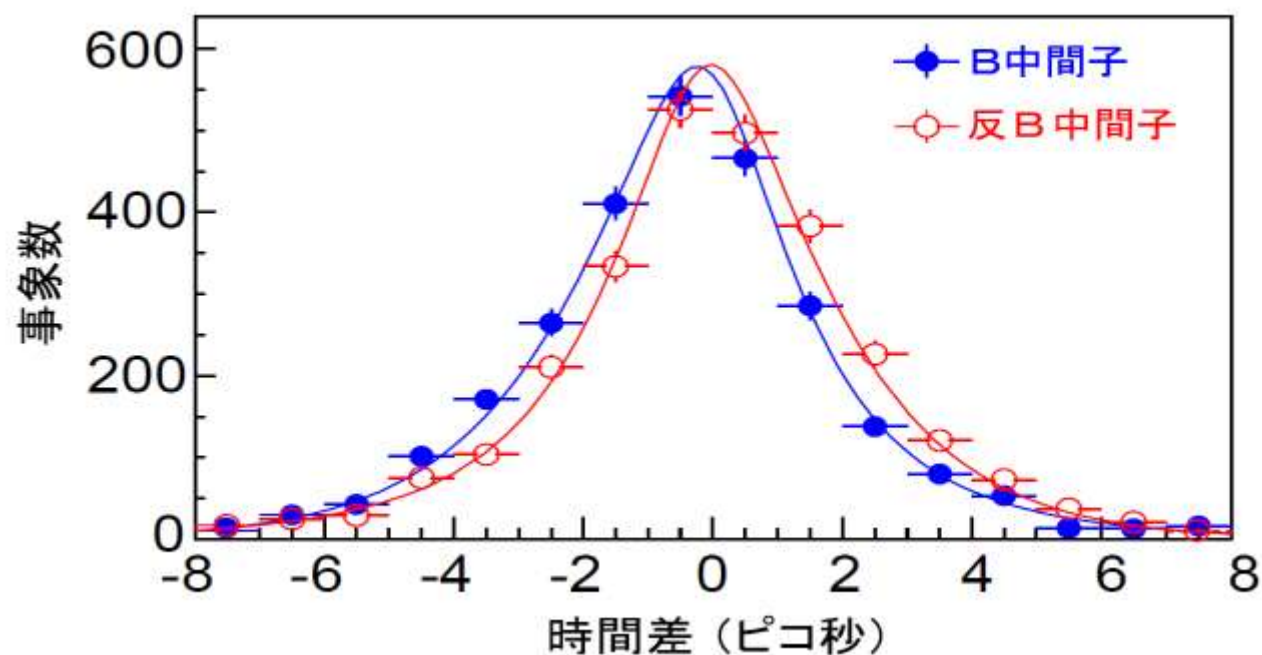
$$B^{\pm} \rightarrow J/\psi K^{\pm}$$



$$B^0 \rightarrow J/\psi K_s$$

$$\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_s$$

この崩壊が起こるのは
1000回に1回
J/ψがレプトン対に
壊れるのは、10回1回



2008年ノーベル物理学賞

小林・益川両先生

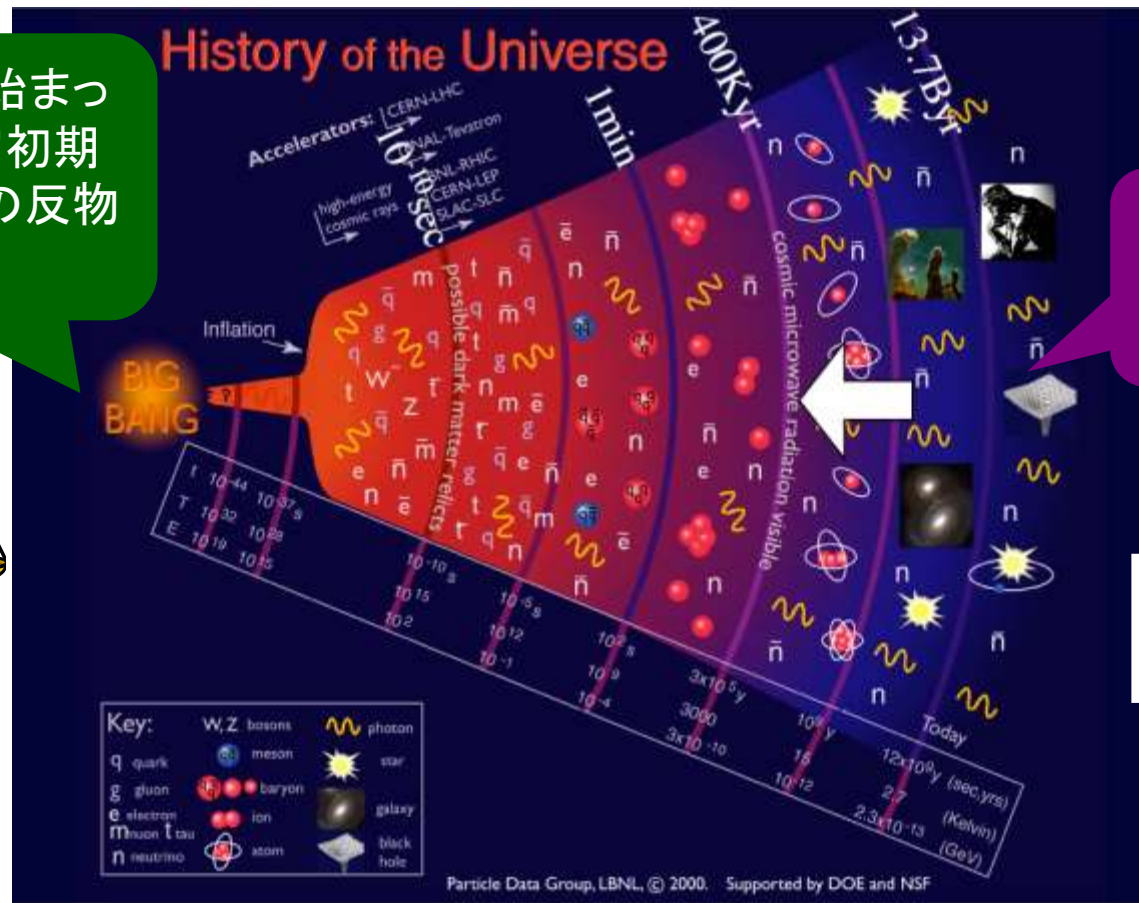
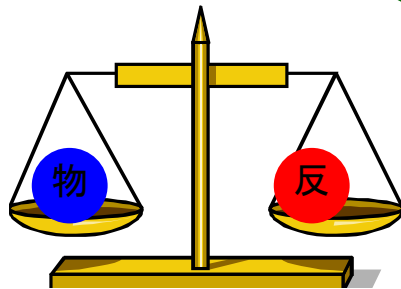
2003年には実験的には確立



受賞記念パーティで

宇宙から消滅した反物質

宇宙は“無”から始まったとすれば、宇宙初期には物質と等量の反物質があったはず。



現在の宇宙には反物質は見つからない。



137億年

宇宙の進化の途中で反物質が消え去った!?

消え去っていなければ星も生物も存在できなかったはず。



宇宙から反物質を消し去る鍵：CP非対称性

物質優位な宇宙を作るためのサハロフの3条件：



A. サハロフ

- 1) 宇宙が非平衡状態にあるときに、
- 2) バリオン数を保存せず、かつ、
- 3) **CP非対称**な素粒子反応が起こること

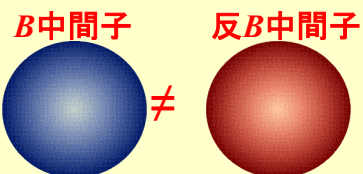
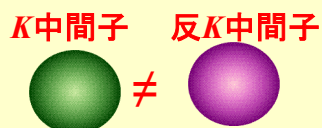
CP非対称性：

物理法則が「粒子」と「反粒子」で異なること。ほとんどの場合、物理法則はCP対称。



地上の実験で知られているCP非対称性

2種類の間接子でCP非対称性



B中間子のCP非対称性はKEKBで証明

小林・益川理論
(1973年)

KEKBなどにより実験的に
よく検証された理論

例外を除き
よく説明

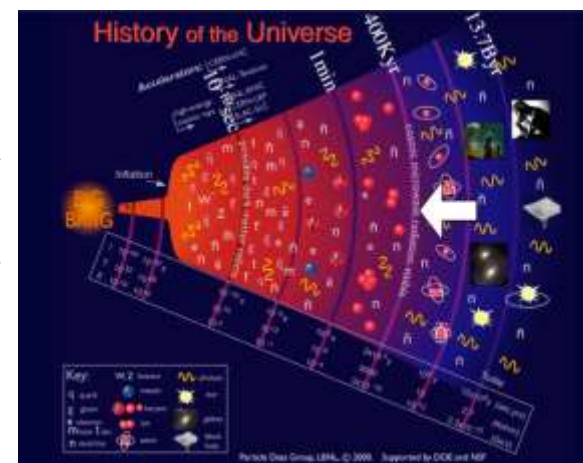
物質優位性の
理解には不十分

影響を与えて
いるはず

未知の物理法則
(20XX年)

小林・益川理論以外にCP対称性を
破る物理法則があるはず。

宇宙から反物質を
消したCP非対称性



SuperKEKB/Belle-II

高統計実験

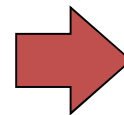
- 大量のデータが必要（確率現象）
 - 素粒子の世界の相互作用の理解
 - 高いエネルギー状態を垣間見ることが可能。
 - 非常に稀な現象として高いエネルギーの現象が起こる。

量子効果 : $E \cdot \Delta t \sim h/2\pi$

→ たくさんのデータの中から面白い現象を探し出す。

- より多くのデータを作り出すことが可能な
粒子加速器が必要

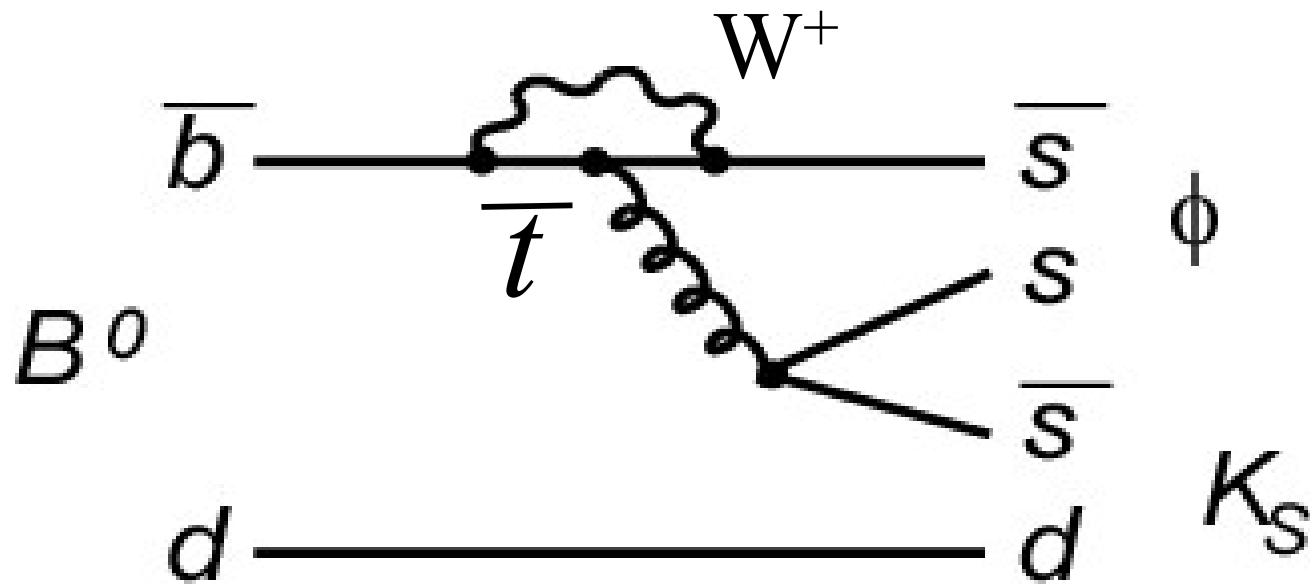
- 加速する粒子の数を増やす。
- 粒子束をより小さくする。



KEKB
(SuperKEKB)

新しい物理が見えやすいー例

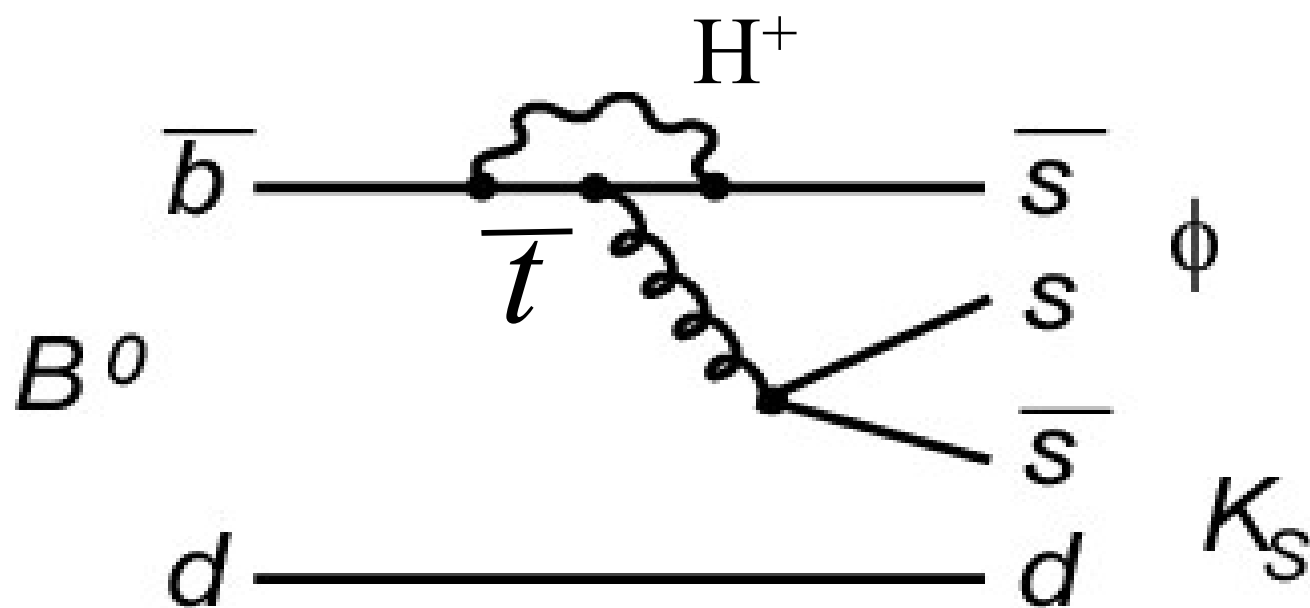
$b \rightarrow s$ 遷移



標準模型でも起こりにくい、すでに発見されている崩壊
($B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ よりも起こりにくい)

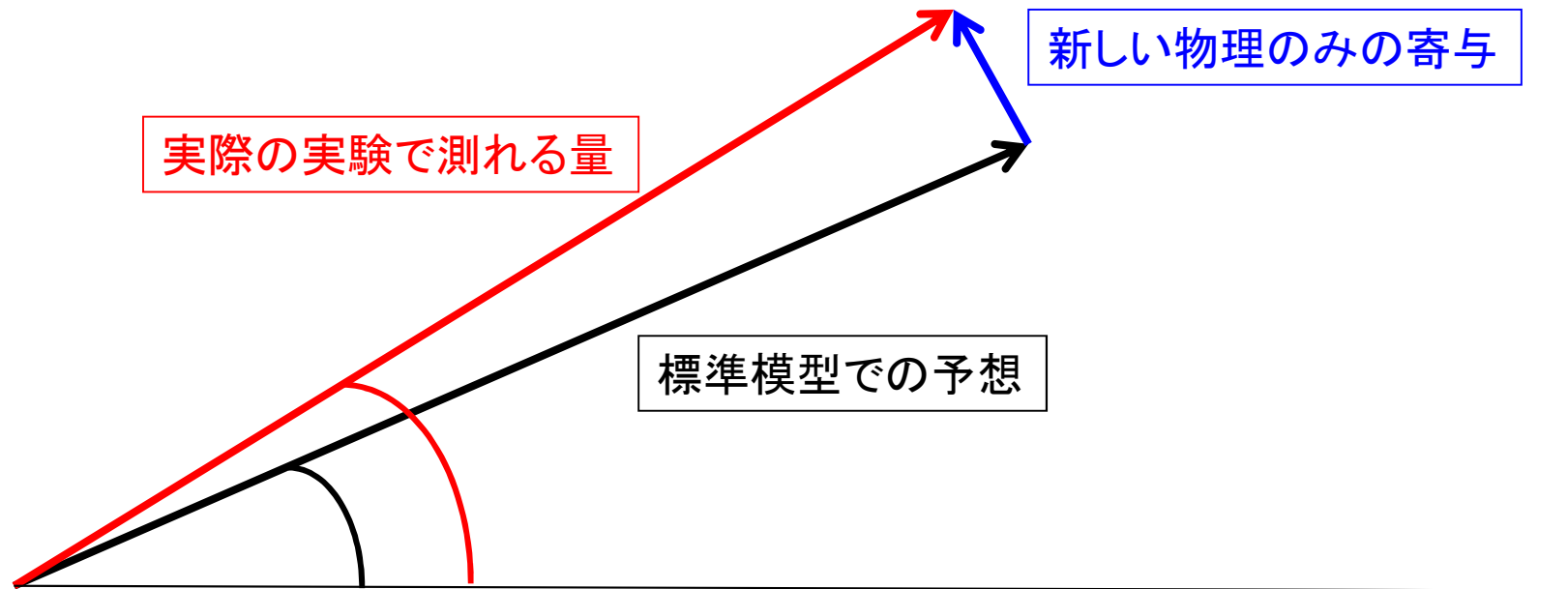
新しい物理が見えやすいー例

$b \rightarrow s$ 遷移



超対称性理論では荷電ヒッグス粒子が存在する

長さの違いは小さいが、



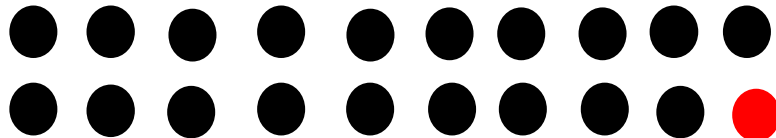
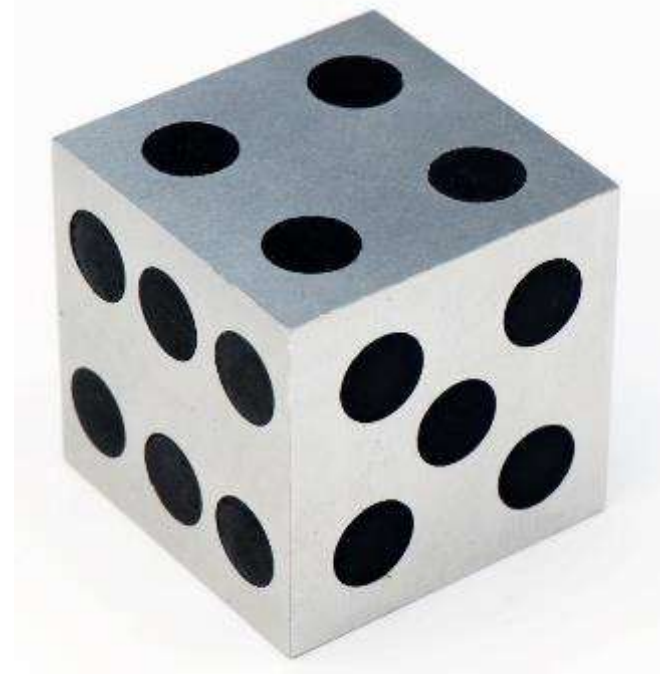
角度の違いなら測れる

→ CP不変性の破れの大きさを測る

とにかくたくさんの事象が必要



実際のサイコロが正六面体でなく、
どこかに「かけ」があるかどうか知りたい

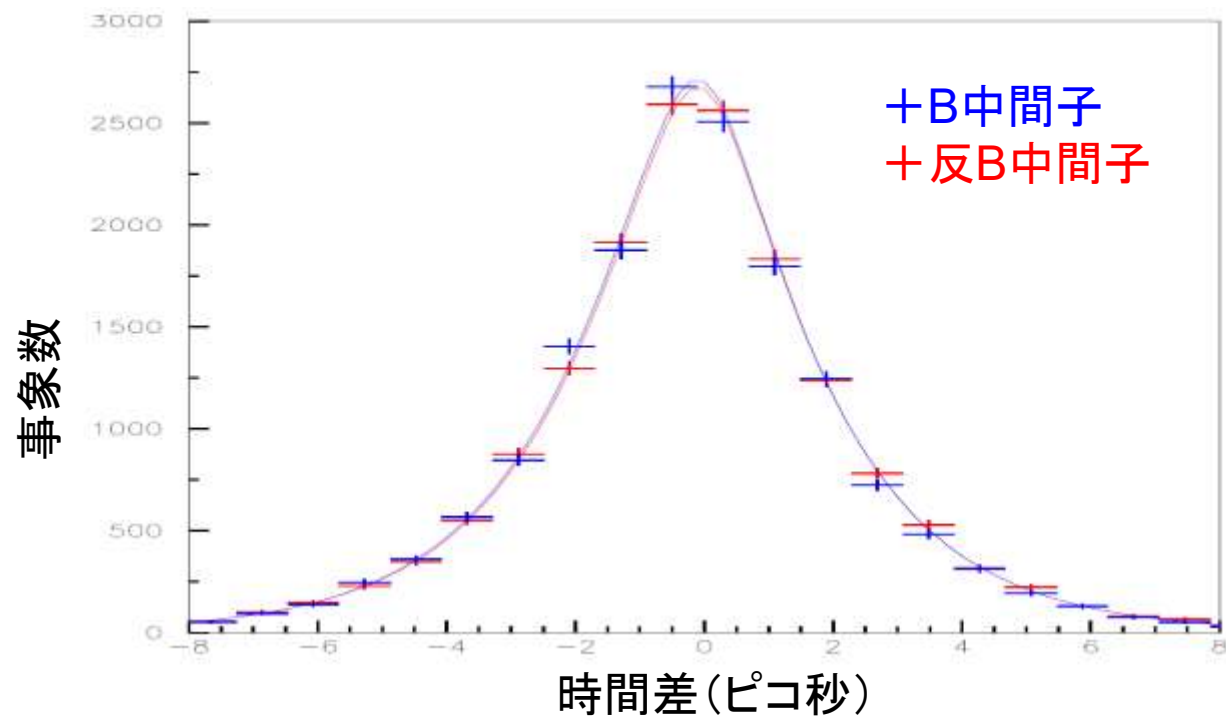


赤玉が出たらサイコロを振れる

例えば、1の出る確率が本当に
 $1/6$ かどうか調べる必要がある。

実験結果

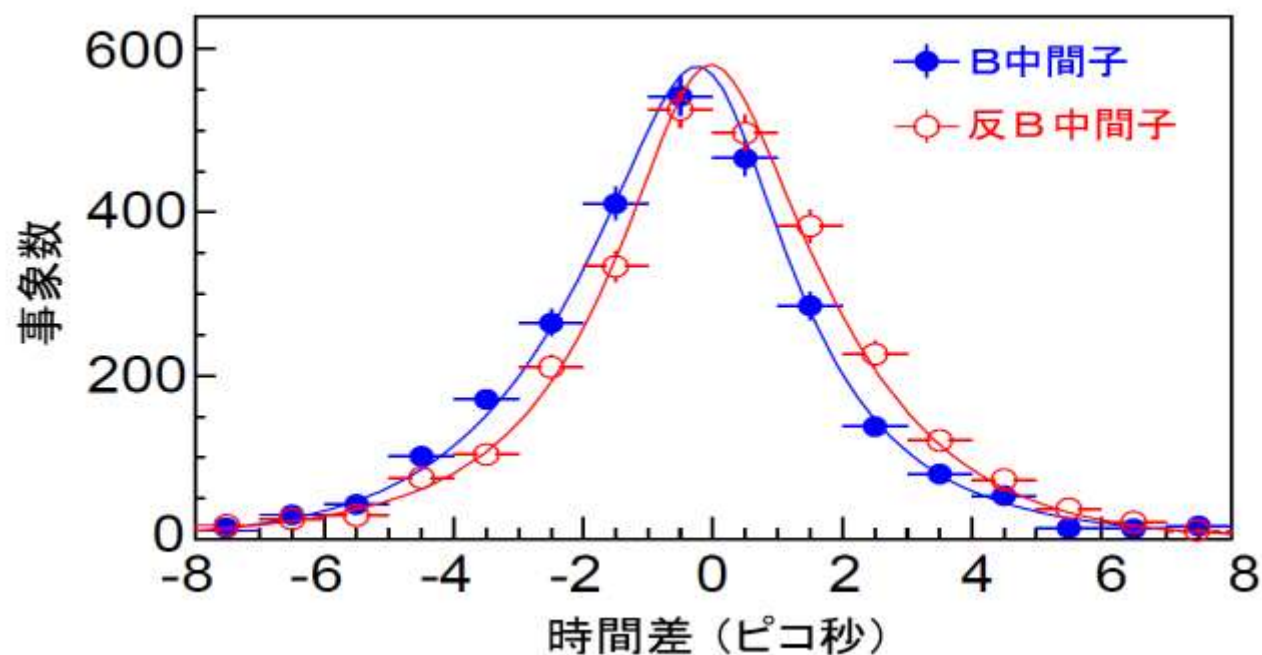
$$B^{\pm} \rightarrow J/\psi K^{\pm}$$



$$B^0 \rightarrow J/\psi K_s$$

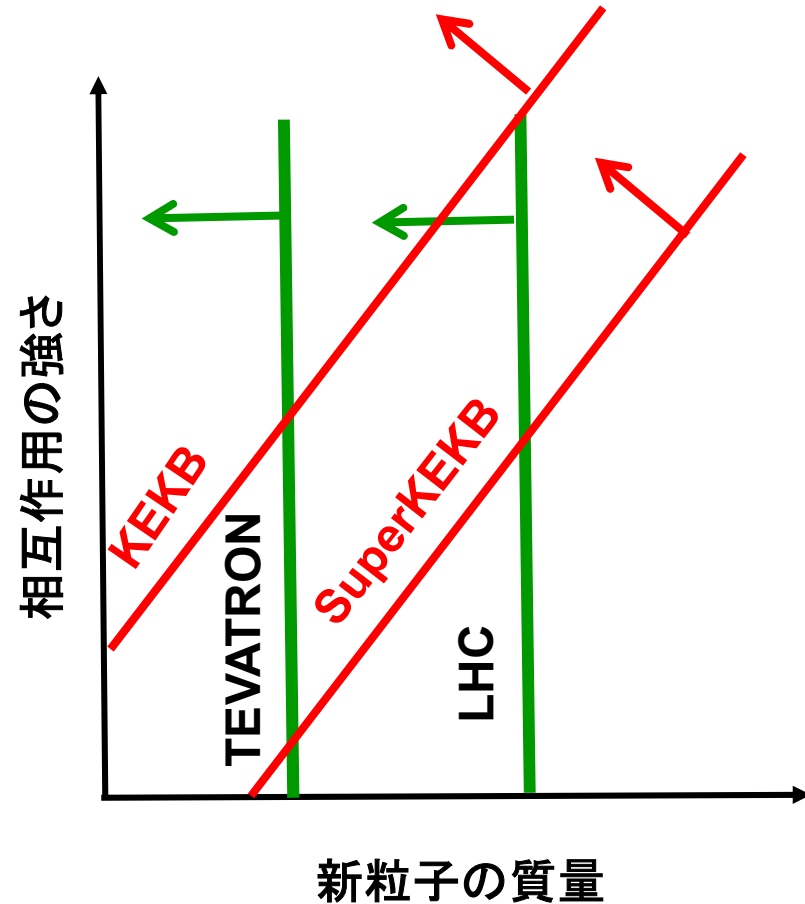
$$\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_s$$

この崩壊が起こるのは
1000回に1回
 J/ψ がレプトン対に
壊れるのは、10回1回



LHCとSuperKEKB

- 相補的
- LHC
 - 最高エネルギー実験
 - 新粒子の発見
 - ビームエネルギーに比例した質量領域に制限
- SuperKEKB
 - 高統計実験
 - 相互作用の理解
 - 質量と相互作用の強さの両方の兼ね合いの領域を制限



予想していなかったBファクトリーの成果

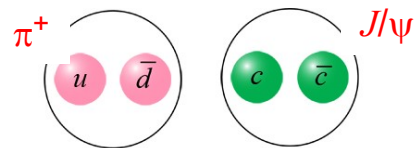
4個のクォークからなる新粒子の発見

陽子、 π 中間子などのハドロンはクォークから成り立っている。

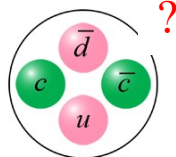
クォーク			
電荷	世代		
	I	II	III
$+\frac{2}{3}e$	u アップ	c チャーム	t トップ
$-\frac{1}{3}e$	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム

Bファクトリー以前の知識・理解

中間子は2個のクォークで構成

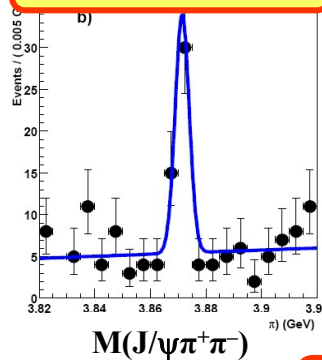


4個以上のクォークからなる粒子はあるのだろうか？

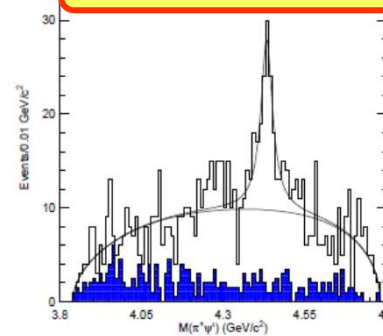


Bファクトリーによる新たな知識・理解

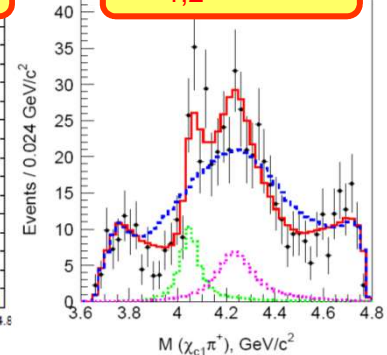
X(3872)の発見



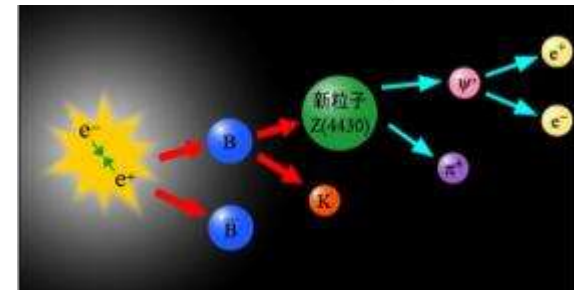
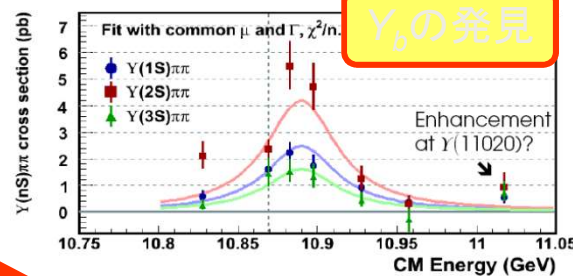
Z+(4430)の発見



Z+_{1,2}の発見



Y_bの発見

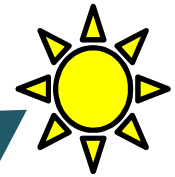


- ▶ Bファクトリー実験ではこれまでに12種類の新しい粒子を発見。
- ▶ このうちX(3872)、Z(4430)などは4個のクォークから成る新粒子。
- ▶ この発見によって、「多クォーク粒子」の物理学が開かれた。

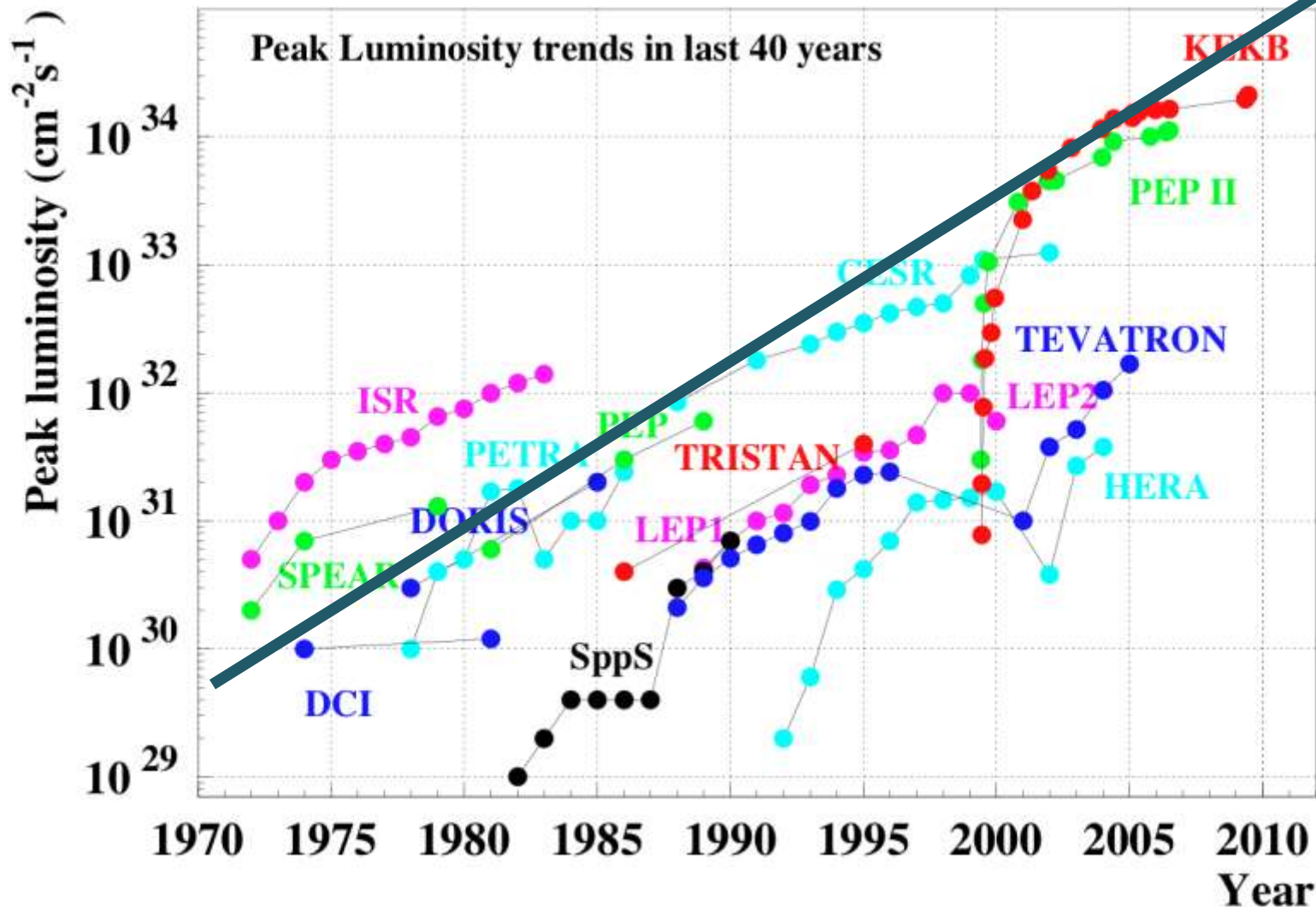
世界最高のルミノシティ(輝度)

単位時間当たりの素粒子事象を作り出せる能力

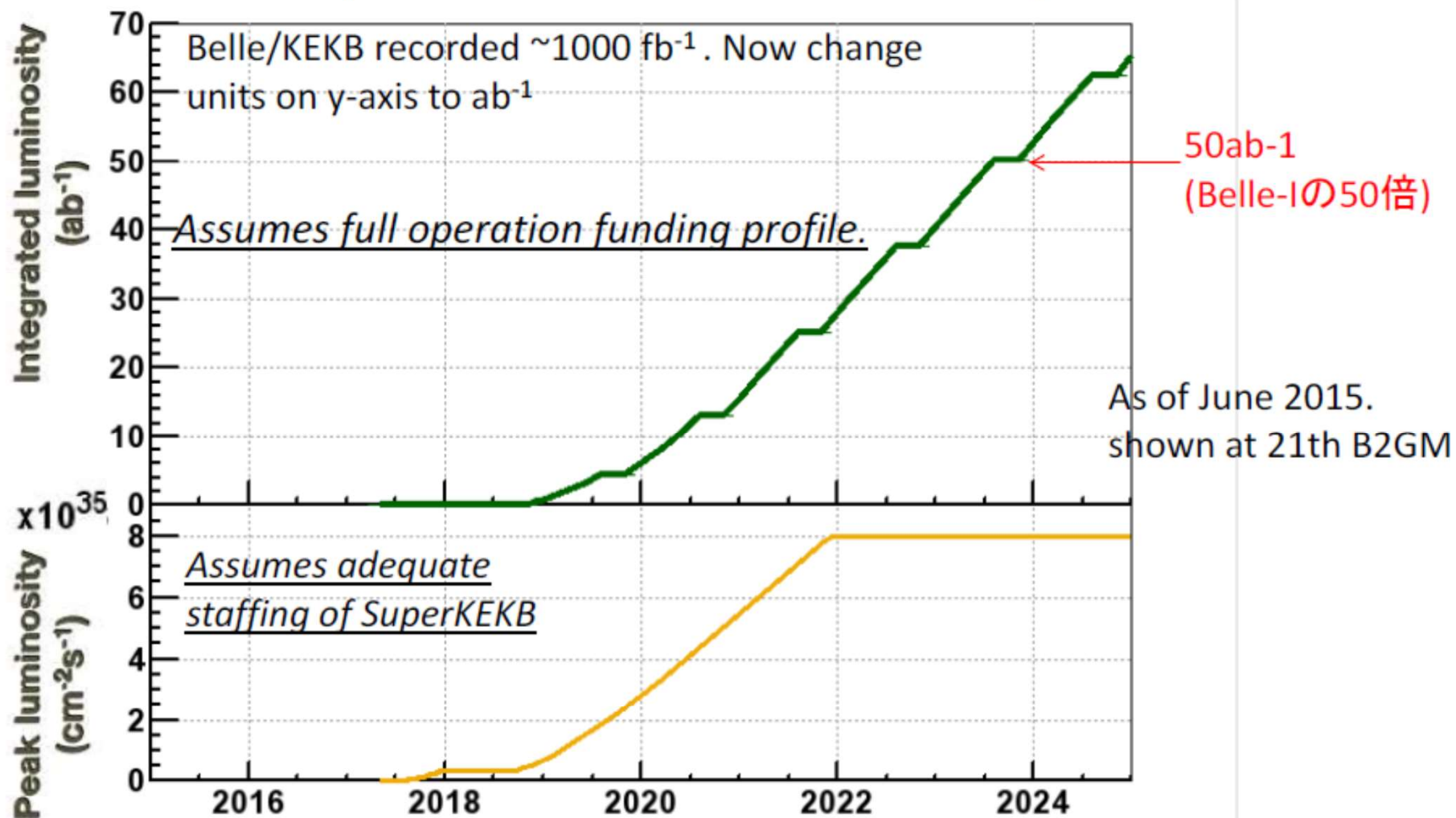
現在の40倍を目指す



$L = 8 \times 10^{35} / \text{cm}^2 / \text{sec}$

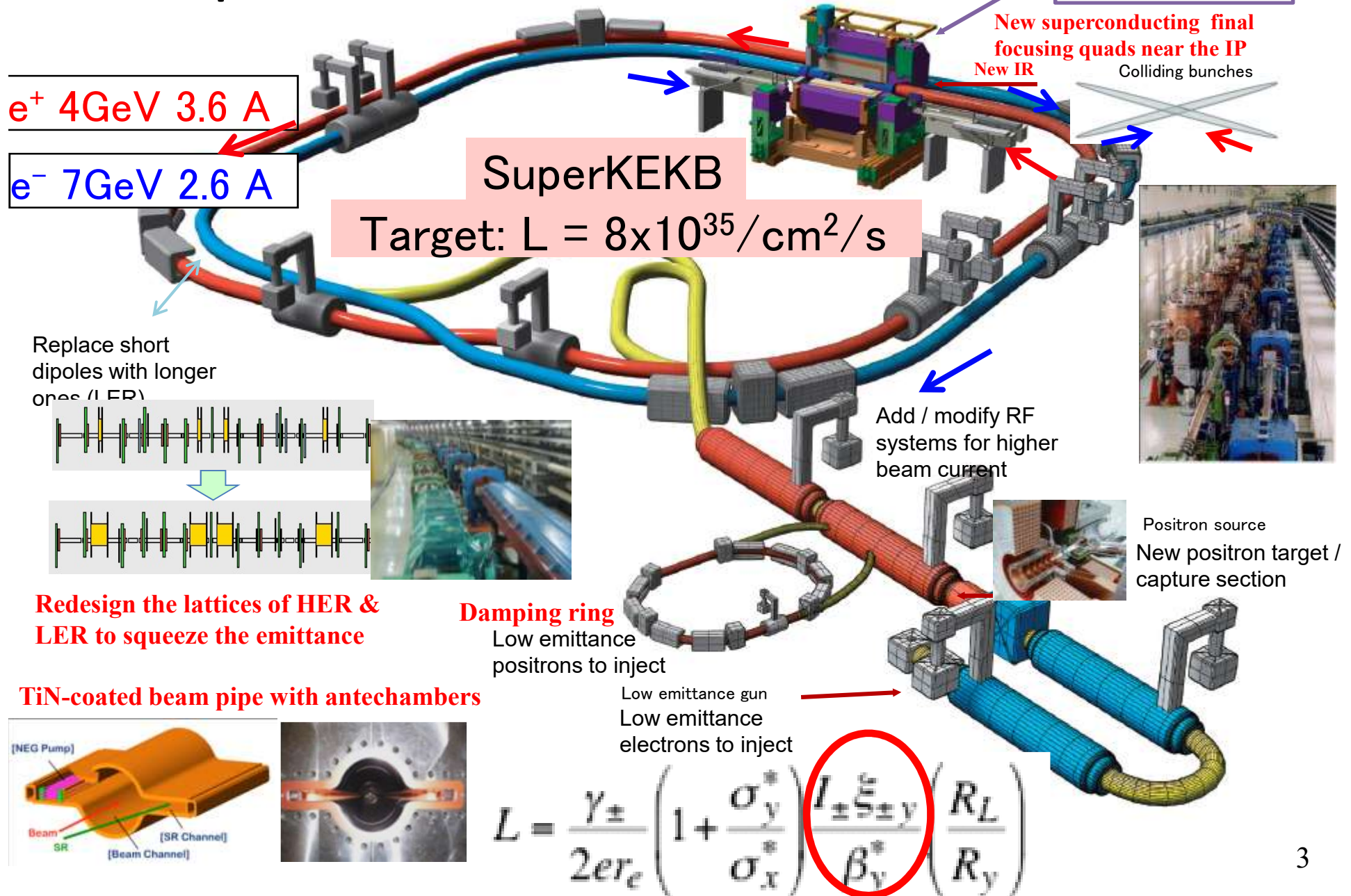


Latest SuperKEKB Luminosity Profile



2024年に目標の50 ab^{-1} に到達予定(相当順調に進んだ場合)

SuperKEKB and Belle II



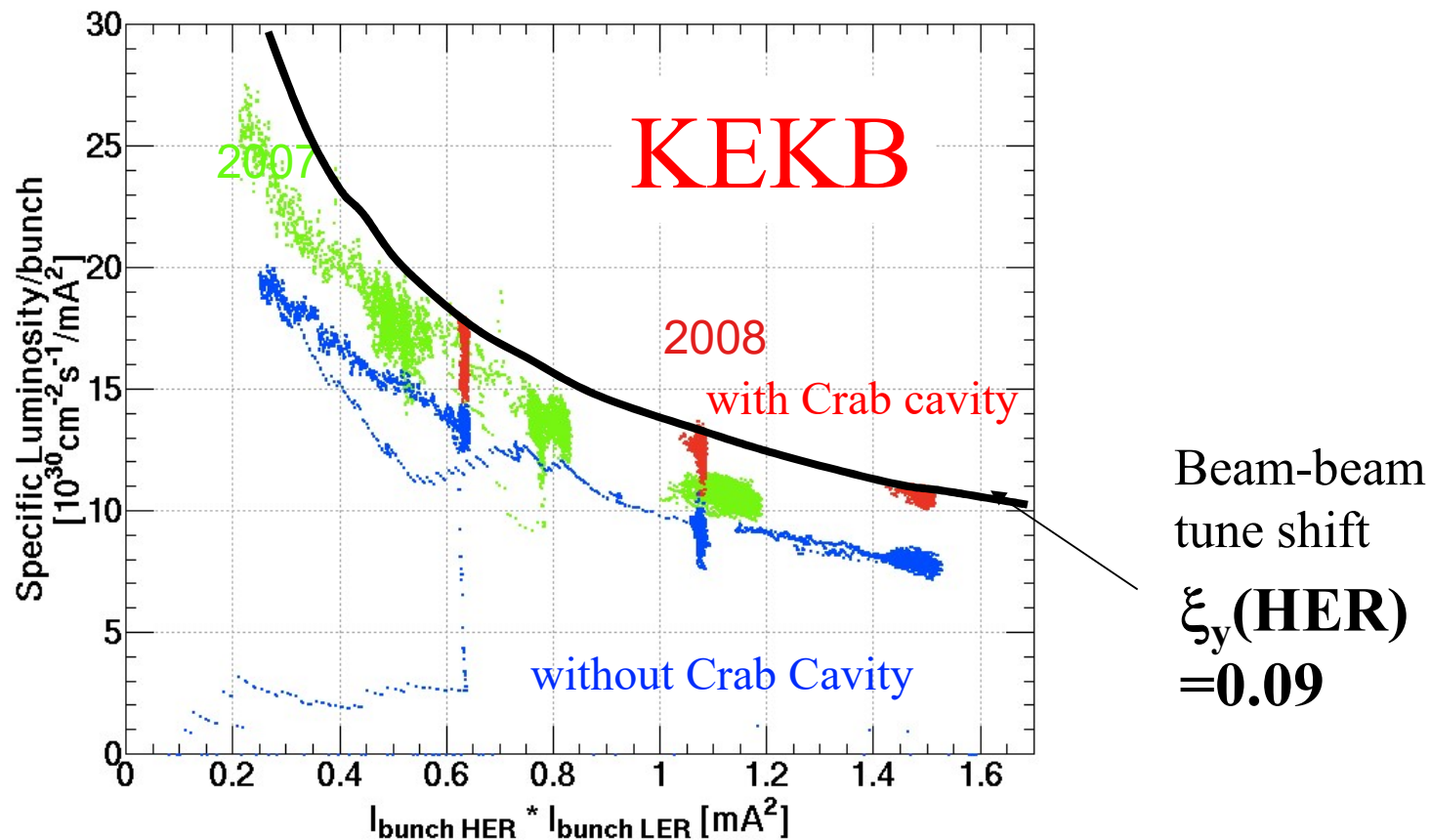
ルミノシティが上がるポイント

- いくつかの理由によりバンチ毎のルミノシティには限界がある。
 - ビーム・ビームチューンシフトリミット
 - バンチが長くなってしまう。
 - 大きなバンチ電流は、各ハードウェアに損少を与える。
 - $1.2 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$: 現在のKEKB
 - この値は、他の加速器とそれほど変わらない。
- 高いルミノシティは、バンチ数が多いという意味。
 - 2バンチ@TRISTAN
 - ~30 バンチ@CESR (LEP) プレッセルという方式(1個のリング)
 - ~1600バンチ@ KEKB や PEP-II 2個のリング (LHC)
 - 正しくは、単位時間に衝突するバンチ数が多い。
- 加速器リングに入れられるバンチ数には限界がある。
 - KEKBリング場合: 5000 (KEKB運転実績: ~1600) RFの周波数

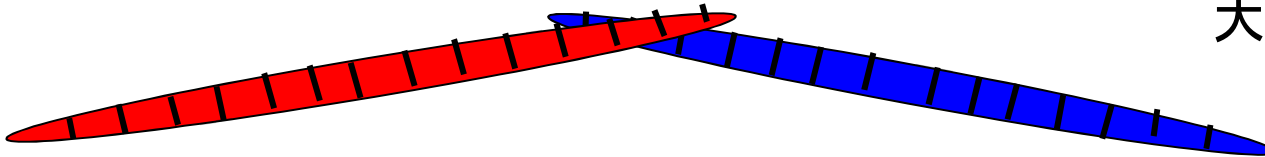
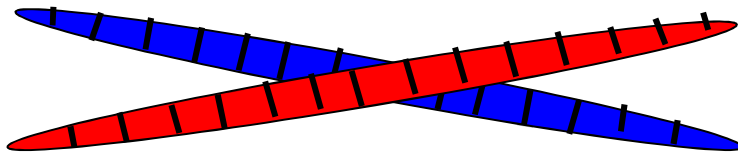
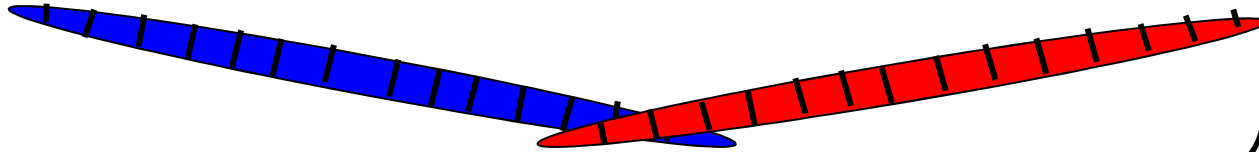


スーパーバンチ (ナノビーム) アイデアは、
飛躍的にバンチ数を増やせる。

電流で規格化した バンチ当たりのルミノシティ



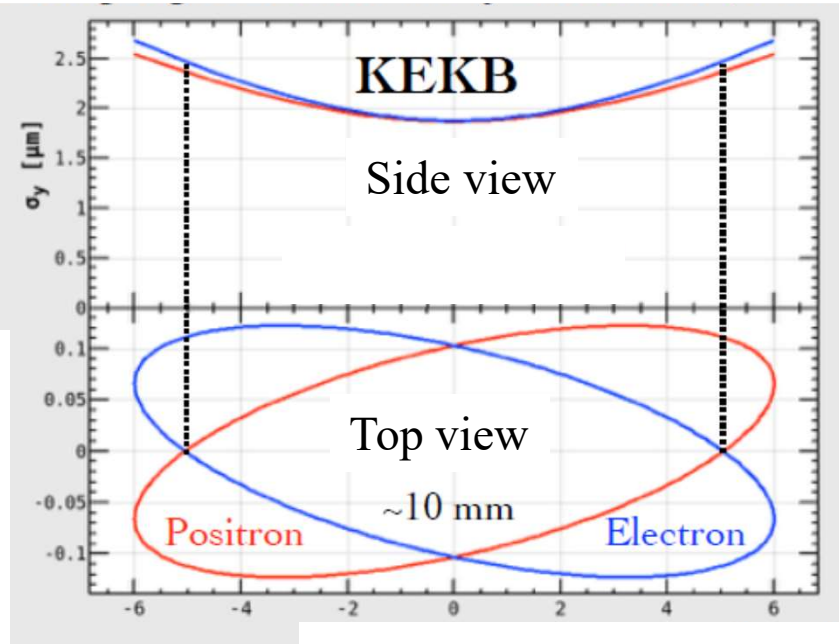
スーパーバンチ (ナノビーム)



バンチ内のそれぞれの場所(サブバンチ)が、反対側のサブバンチとそれぞれ独立に衝突する。これによって、バンチ数が飛躍的に増やせる。
これを可能にするためには、バンチ長よりもバンチ幅がかなり小さいことが大事。衝突角度も比較的大きめである必要がある。

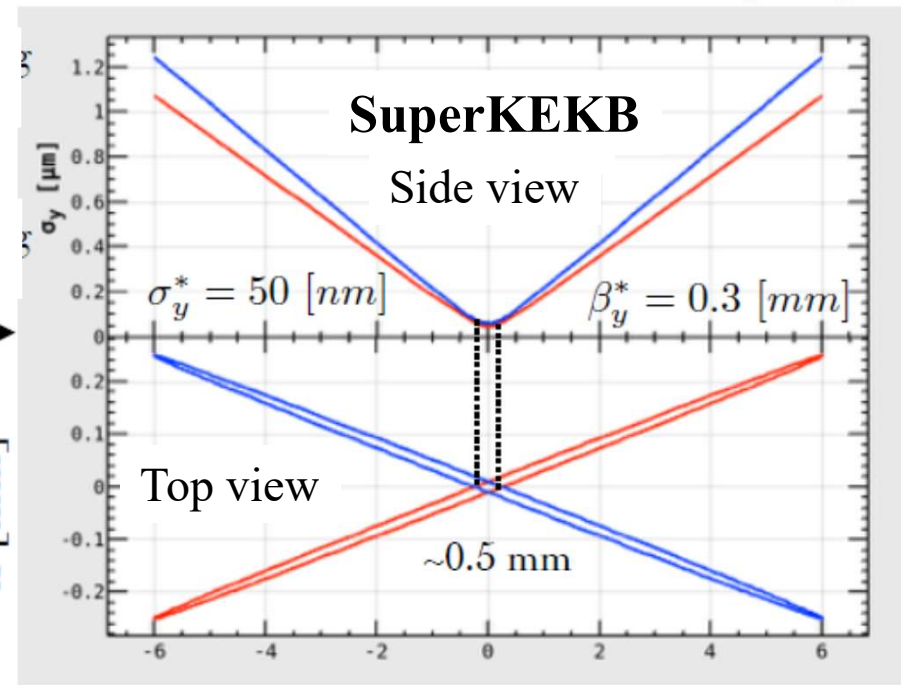
Nano beam collision

Horizontal position (mm) Vertical beam size (μm)

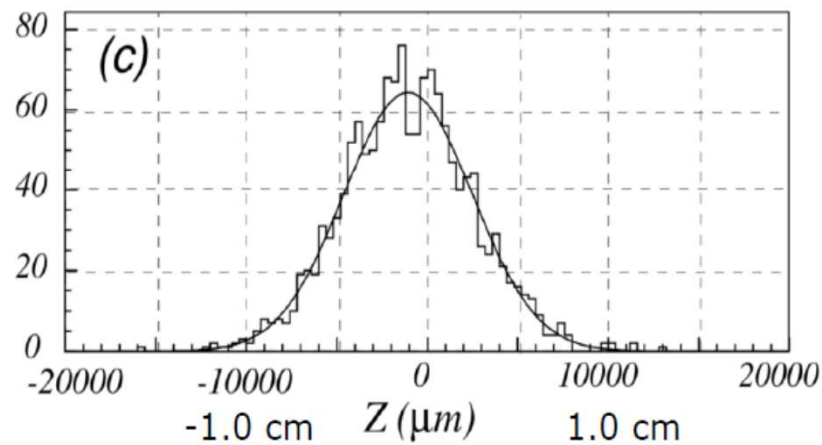


Longitudinal position (mm)

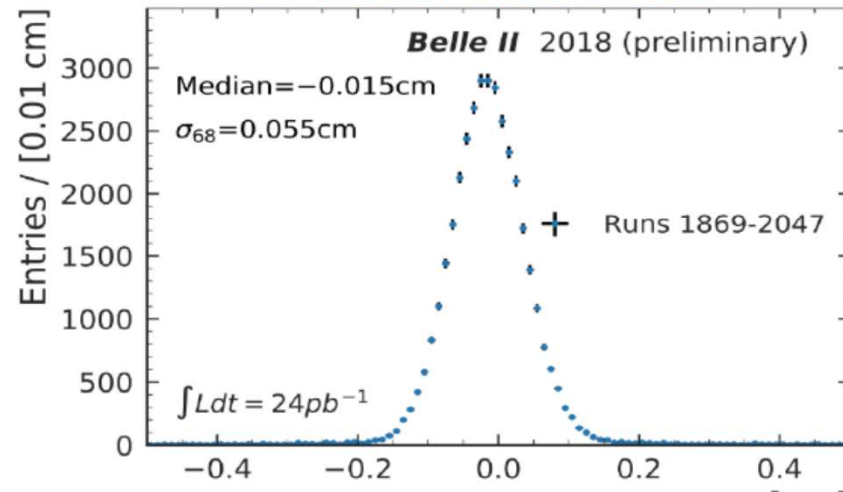
x [mm]



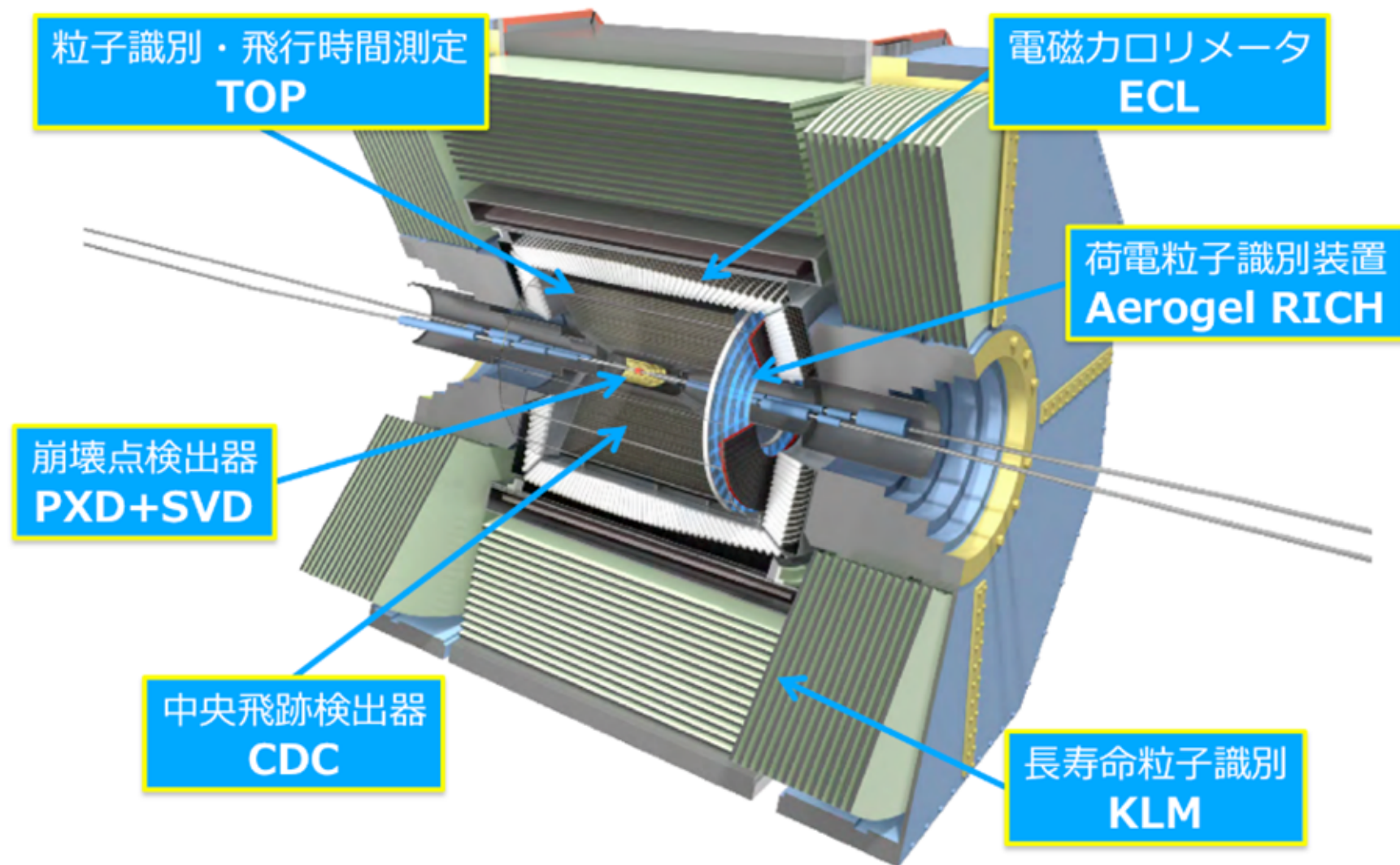
Belle case 1999 data



Z vertex distribution



Belle II 検出器 巨大なデジタルカメラ





Belle II 検出器に求められる性能

目標: $L = 8 \times 10^{35} / \text{cm}^2 / \text{sec}$

▶ イベントレートが高い (×40)

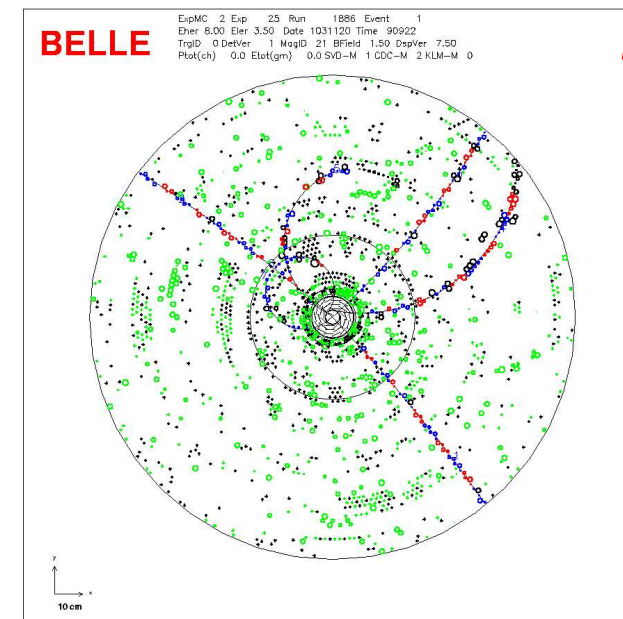
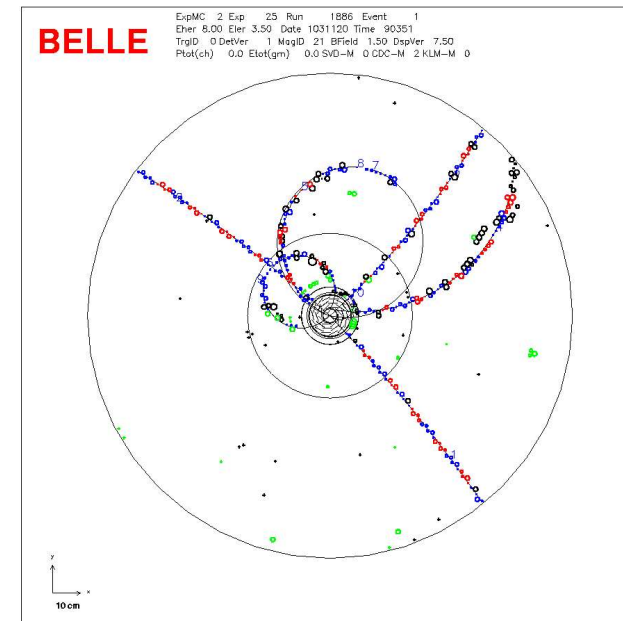
- 500枚/秒から3万枚/秒

▶ 大きなビームバックグランド(×20)

- 検出器を細かくする。
- 時間方向に分離する

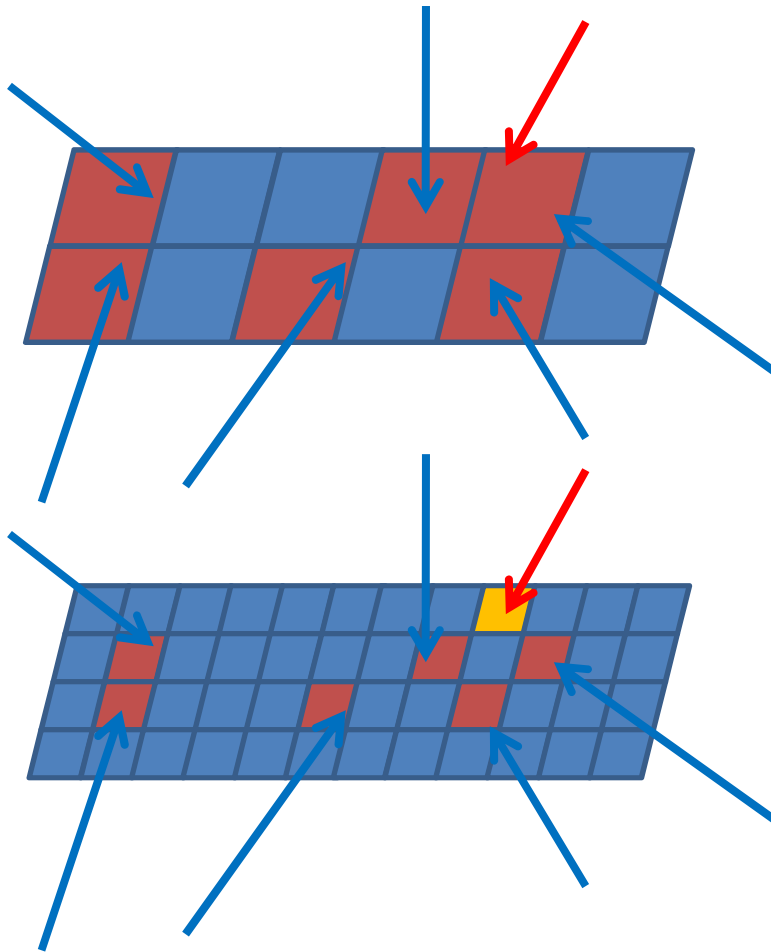
▶ 改良点

- より良い粒子識別
- より精確な崩壊点の測定



大きなビームバックグラウンドに対する対処 (1)

読み出しサイズを細かくする

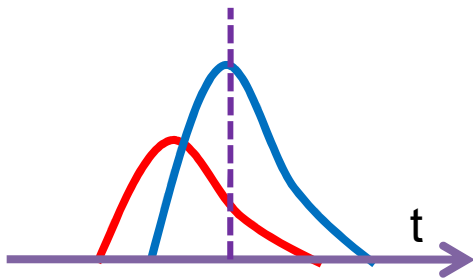


Belle
大きな検出器セル
信号が重なってしまうことがある。

Belle II
検出器を細分化することによって
信号が重なってしまう確率を下げ、
より確実に測定する。

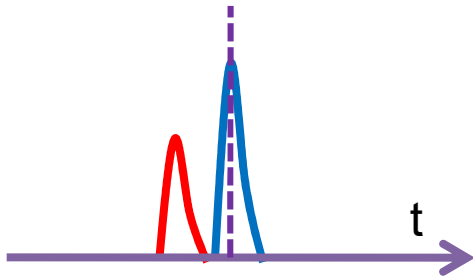
大きなビームバックグラウンドに対する対処 (2)

時間方向に分割する



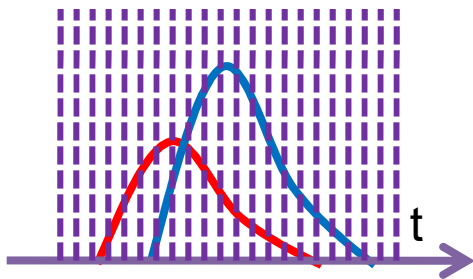
Belle

見たい信号とバックグラウンドの信号が時間的に重なってしまう。



Belle II

信号の時間幅を短くする。
または、信号波形を時間ごとに記録して、解析的に信号を正確に抜き出す。

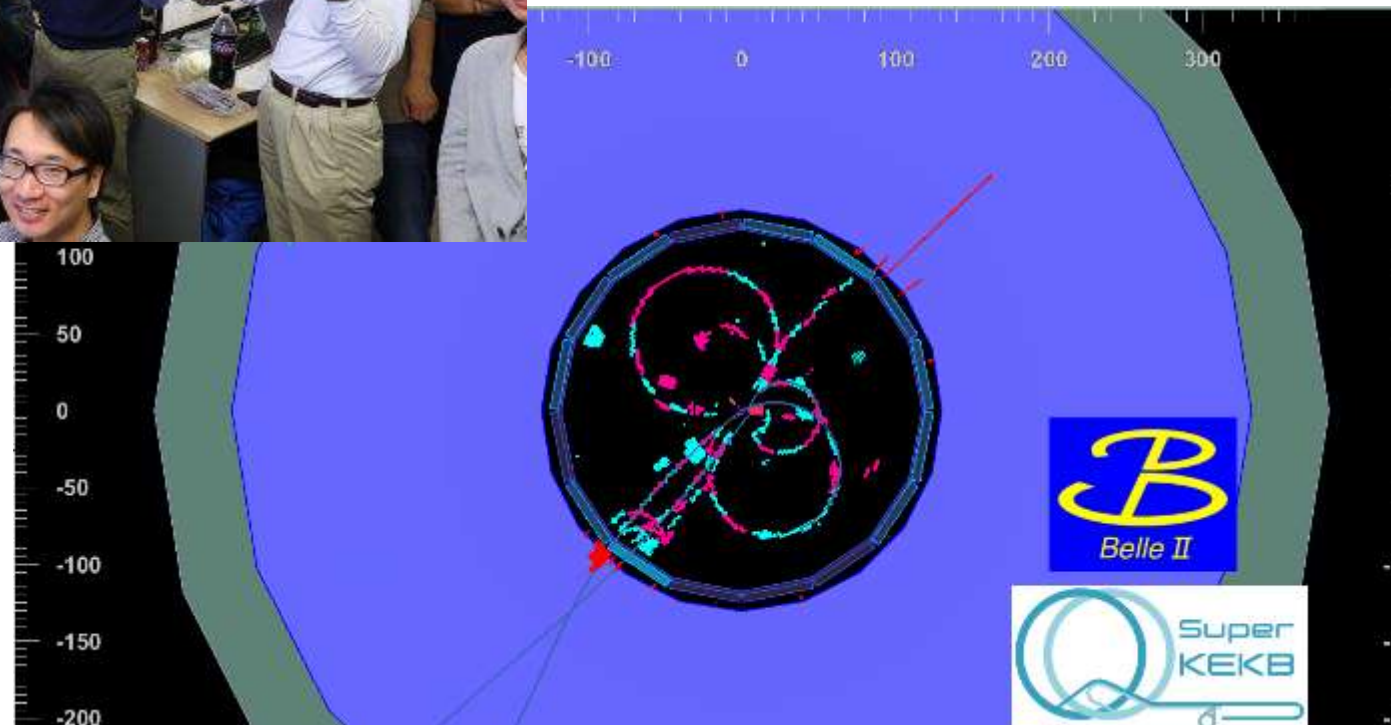


最初の衝突事象

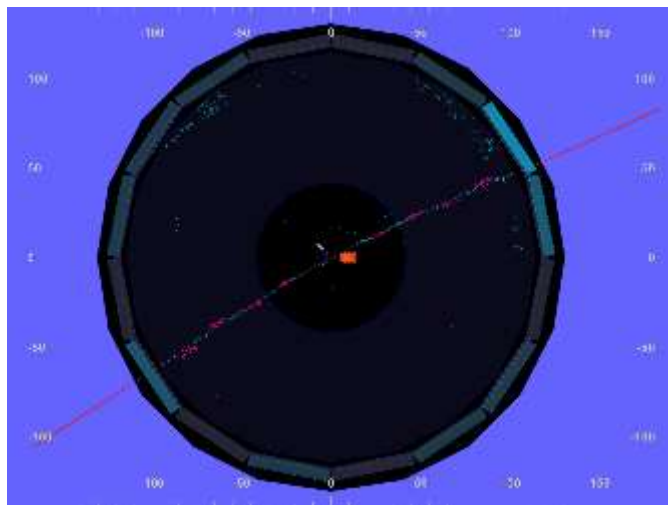
2018年4月26日



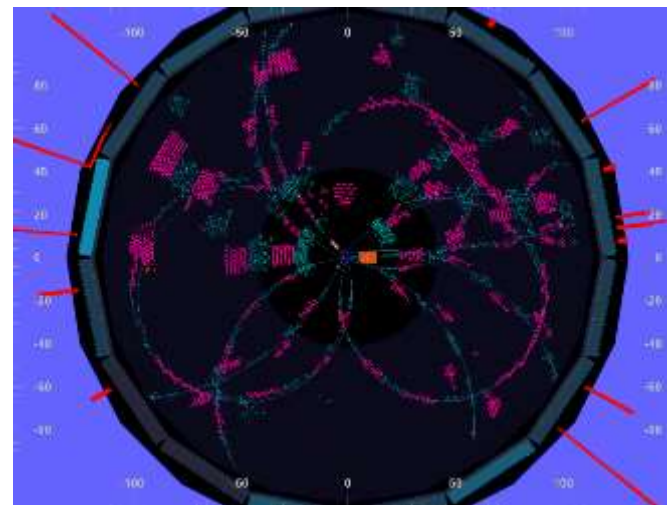
最初の事象



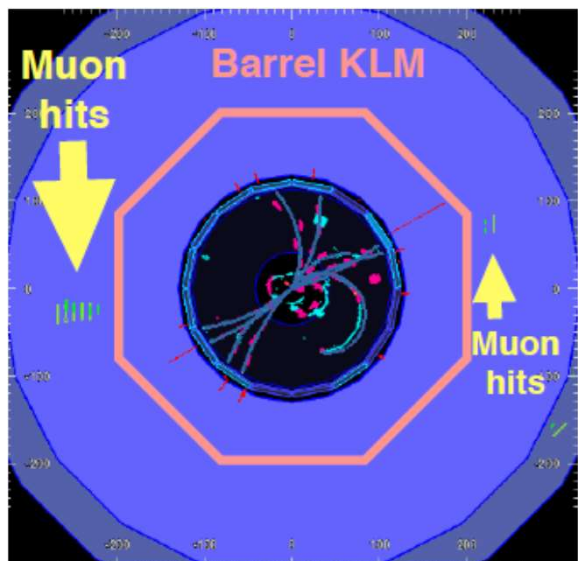
More Events



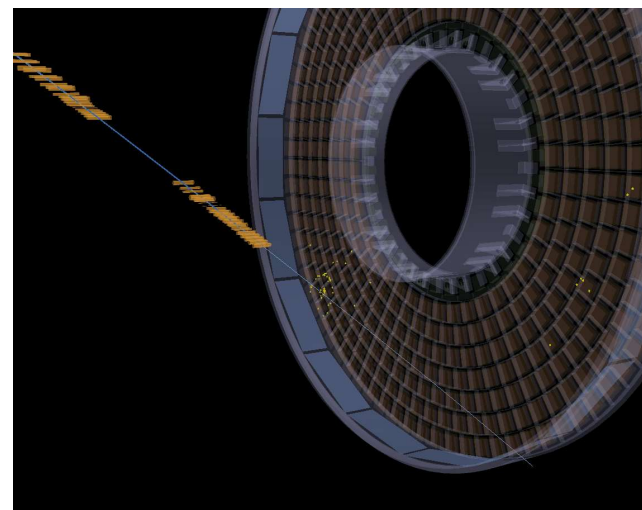
バーバー事象



B中間子崩壊事象



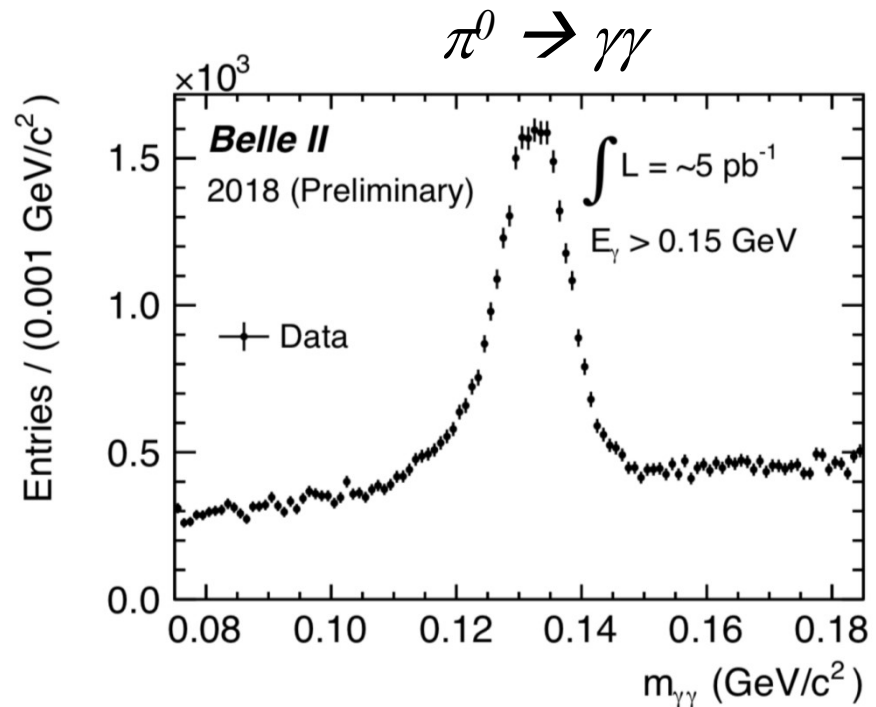
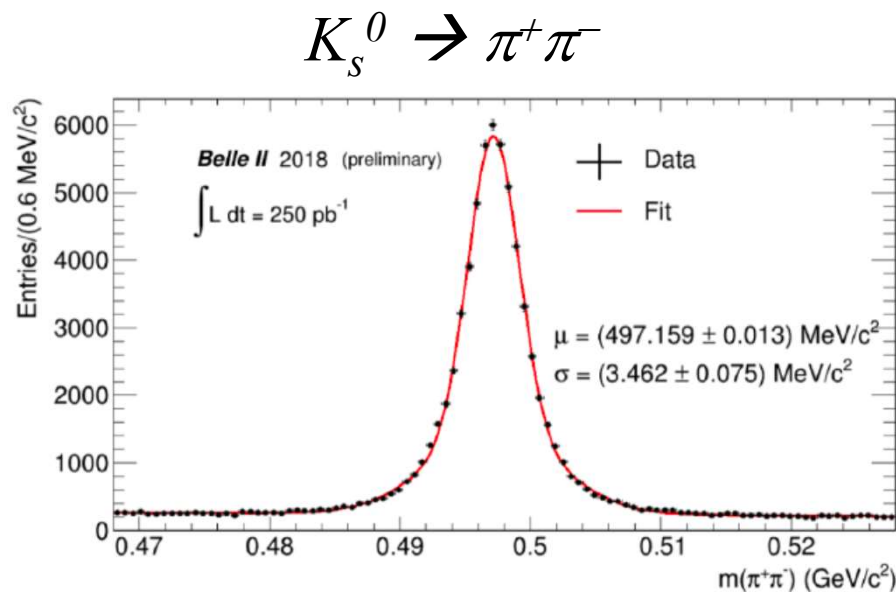
KLM is working.



ARICH is working.

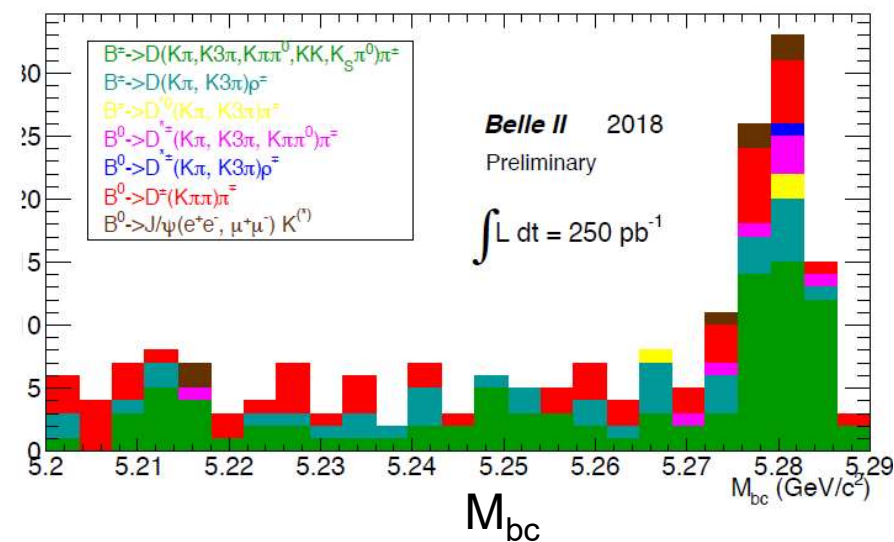
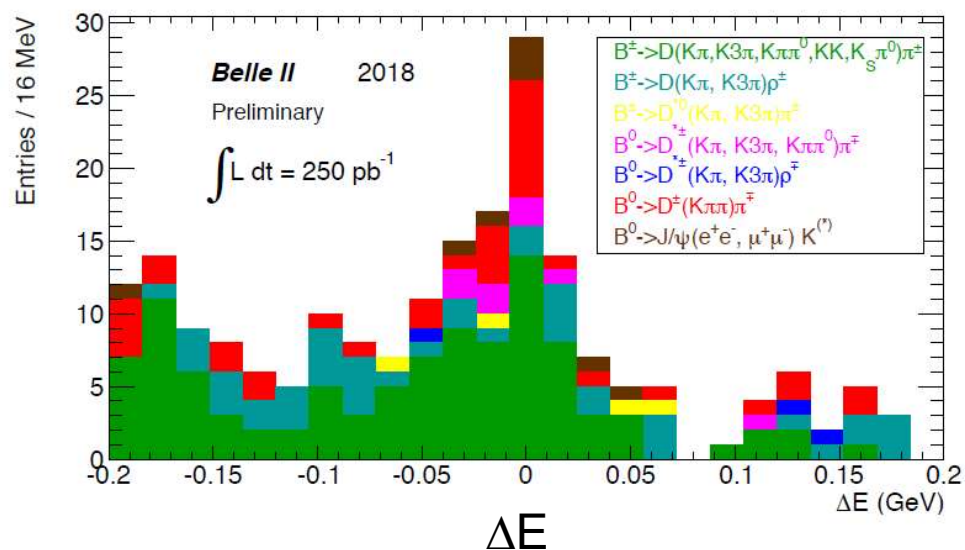
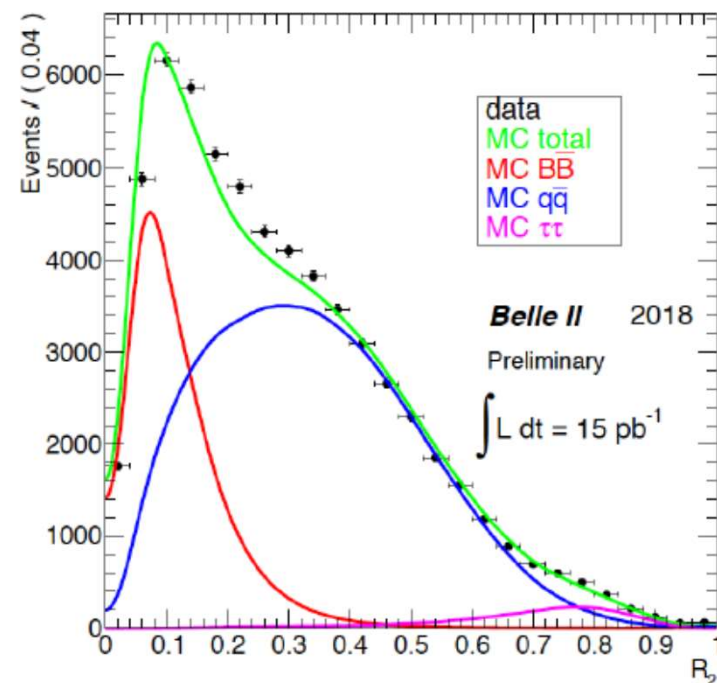
Phase II 運転

- Phase II 運転は、4月末から7月中旬まで行った。
 - 主に、加速器調整
 - 平行して、データ収集; 0.5 fb^{-1} (Belleの2000分の1、Belle II の目標の10万分の1)くらい。
 - 測定器の性能を確認
- 年内は、検出器の改良+最終インストール。来年から、本格運転。



B中間子の再構成

R2 distribution



まとめ

- KEKB/Belle実験でB中間子のCP不変性の破れを発見し、小林・益川両先生のノーベル賞受賞に貢献した。
- 物質優位の宇宙のCP不変性の破れなどまだ解明しなければならない問題を解くカギを得るために進化したSuperKEKB/Belle II実験がまさに始まった。
 - 4月から試験的なデータ取得を開始
 - 来年から本格的なデータ取得予定
- 今後の成果にご期待ください。