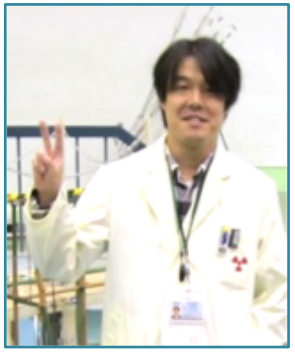
未知への挑戦 ~ 極限宇宙と新しい物理

Belle II 実験 ~ 電子-陽電子加速器が教える新しい素粒子の世界

樋口岳雄
東京大学
カブリ数物連携宇宙研究機構

自己紹介

1997 年頃より
加速器を使った素粒子物理学実験
Belle (ベルと読みます) に
参加しています。



たのしさを演出する写真集

2018 年に始まった、
Belle の後継実験である
Belle II (ベル・ツーと読みます) にも
参加しています。

2012 年より大学の「柏キャンパス」で研究をしています。

手賀沼の花火大会が見えるところに住んでいます。

かしわ好きです

写真: KEK

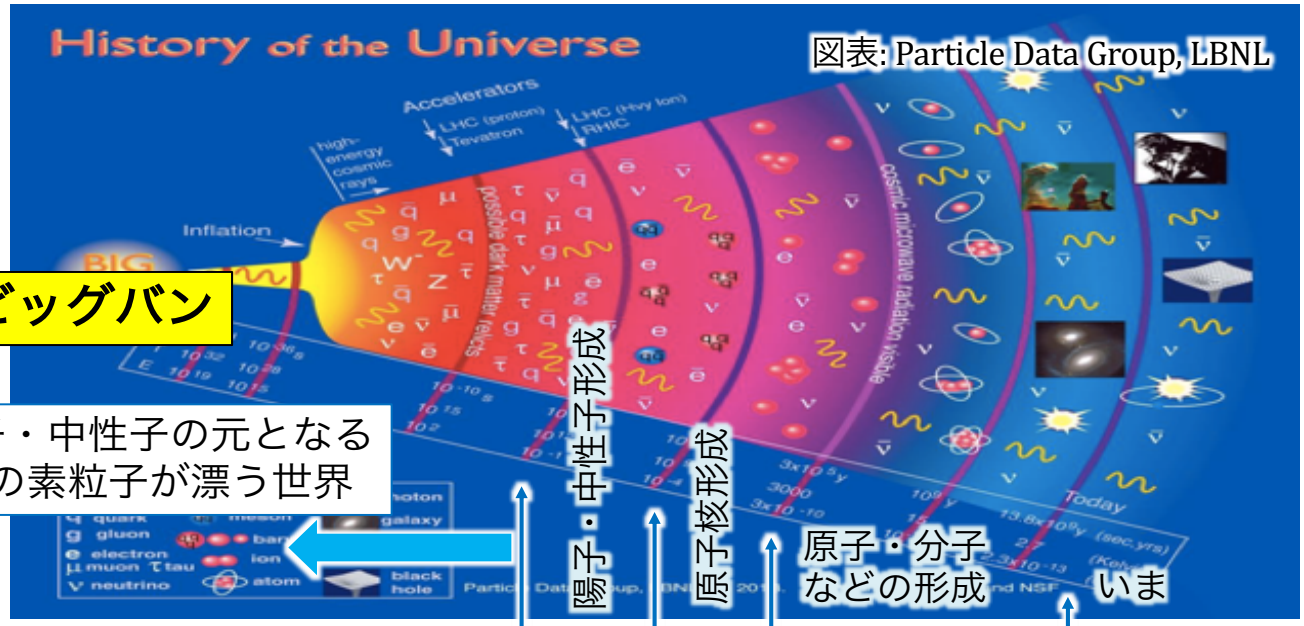
加速器を使った素粒子物理学実験

周 3km

たのしい

物理学

モノとモノとの間に働く力の普遍的な仕組みを解明する学問



ビッグバン

陽子・中性子の元となる生の素粒子が漂う世界

陽子・中性子形成

原子核形成

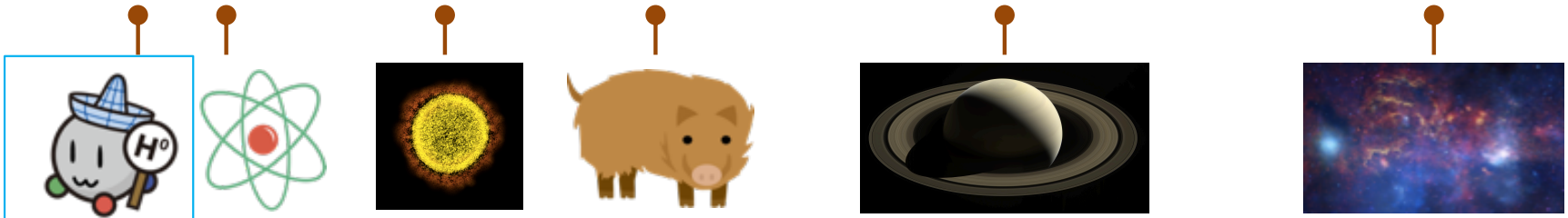
原子・分子などの形成

いま

0.0001 秒 | 100 秒 | 38 万年 | 138 億年

10^{-18} m | 10^{-9} m | 1 m | 10^{9} m | 10^{18} m | 10^{27} m

(対数ものさし)



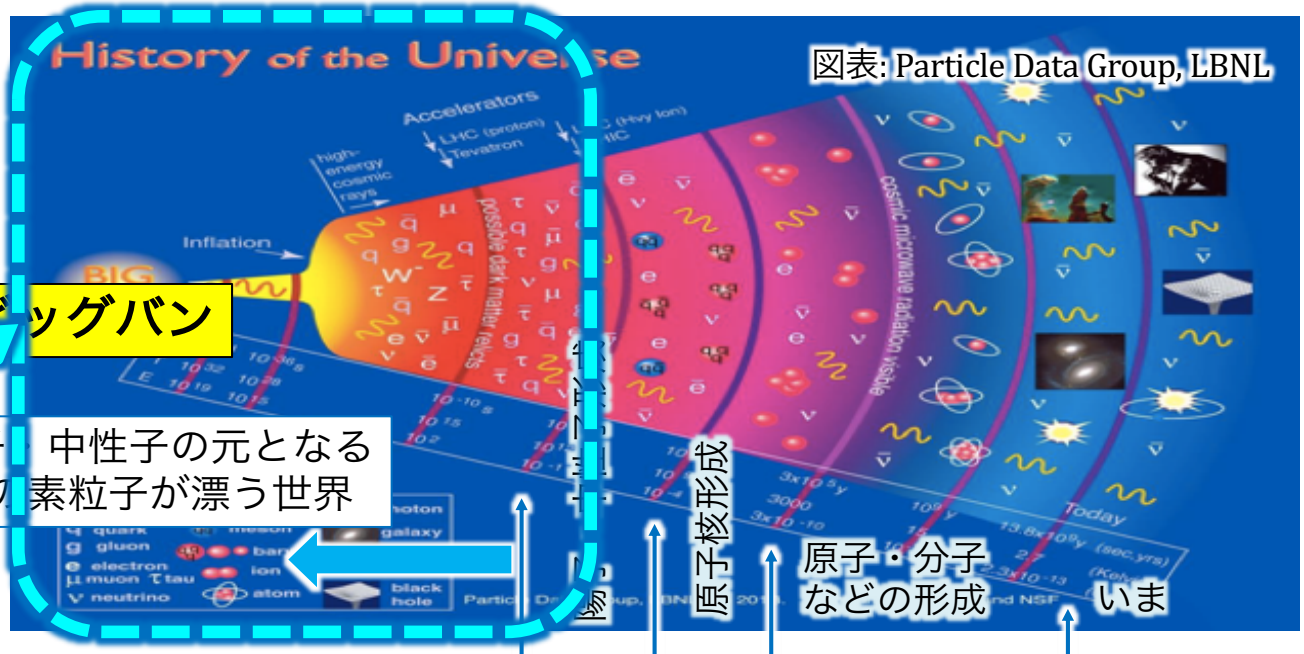
素粒子 | 原子核 | ウイルス | いのしし | 土星までの距離 | 宇宙の半径

イラスト: ひっぐすたん他

宇宙の 138 億年間の歴史にわたり、10^{-18} m から 10^{27} m まで 45 桁も違う大きさのモノを等しく取り扱える理論を作る学問

素粒子物理学

とくにこの辺に
切り込む学問



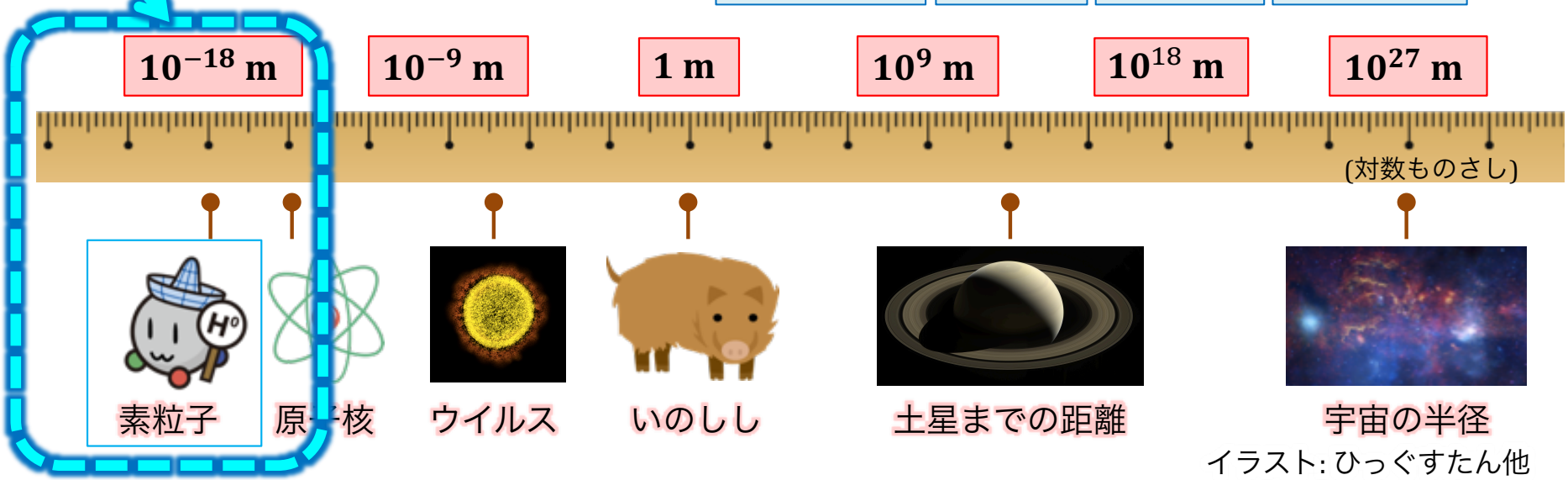
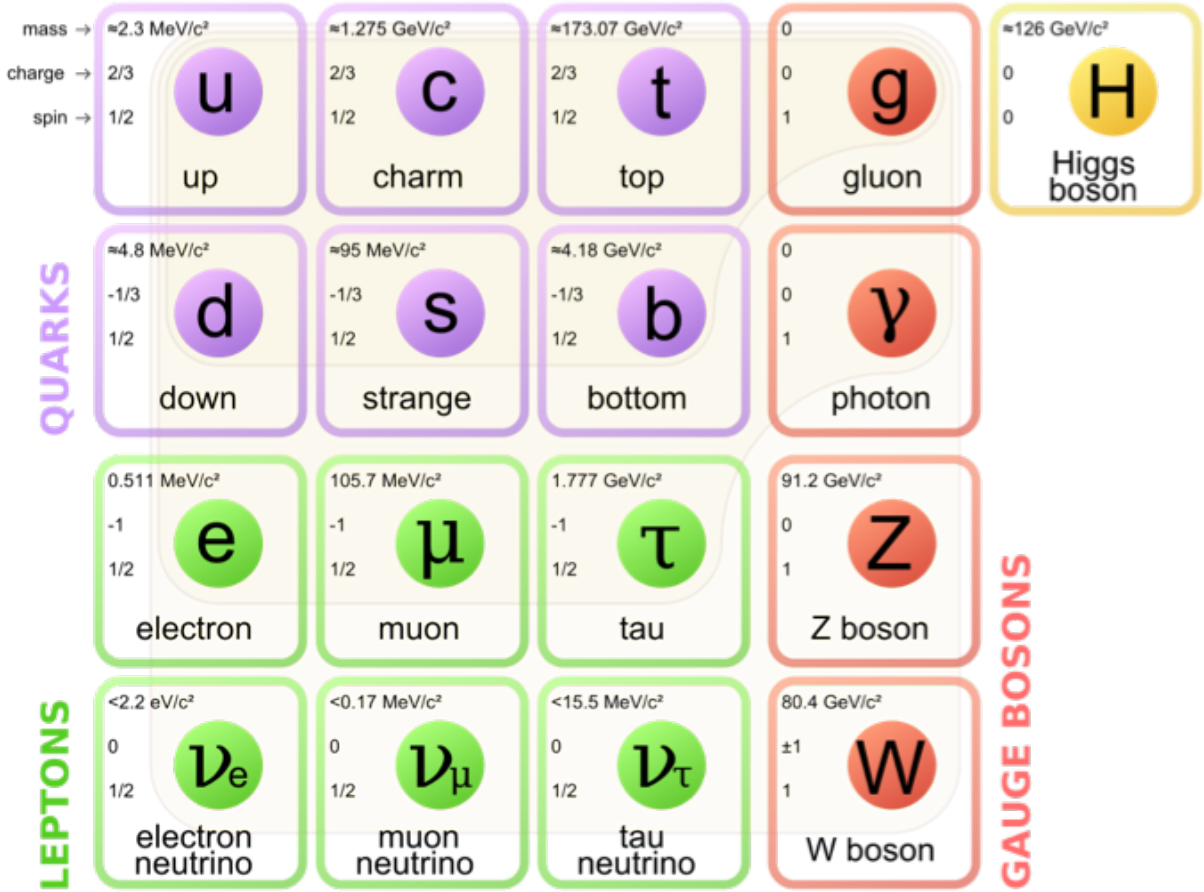


イラスト: ひっぐすたん他

…だが、もうだいぶ理解が進んでしまった。
もったいぶらずにいきなり答合わせをする。

素粒子標準理論 (いきなり答合わせ)

素粒子表



クォーク: 6 種類
陽子や中性子を構成する粒子。

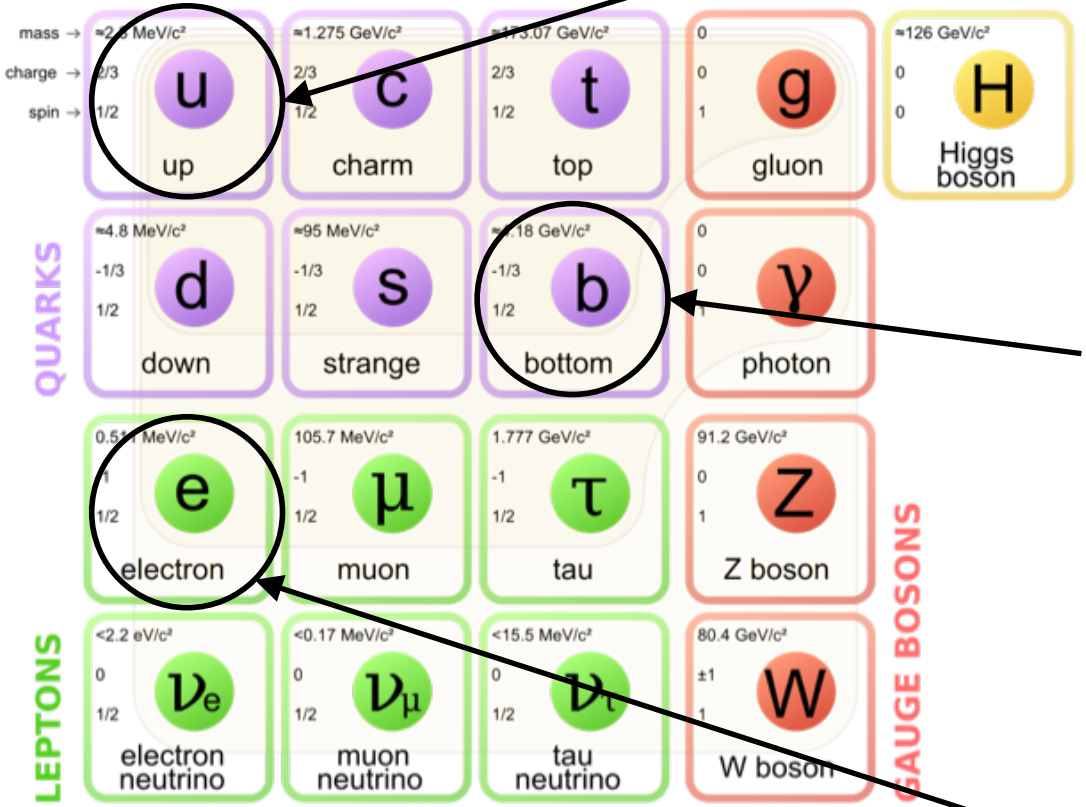
レプトン: 6 種類
電子は素粒子で、このグループ。ニュートリノもここ。

ゲージボゾン: 4 種類
力の伝搬を仲立ちする粒子。光の粒子はこのグループ。

ヒッグスボゾン: 1 種類
粒子に質量を与える仕組みを支える粒子。

粒子-反粒子

イラスト: ひっぐすたん



電気 = $+\frac{2}{3}$

電気 = $-\frac{2}{3}$

電気 = $-\frac{1}{3}$

電気 = $+\frac{1}{3}$

電気 = -1

電気 = $+1$

反粒子: 通常の粒子と同じ重さで
電気の量だけが反転した粒子

小林-益川理論とBelle 実験の歴史

1973 **小林-益川理論**: 小林先生・益川先生が **5 番目のクォークの性質はその反粒子のものと違う**とする小林-益川理論を提唱する。

反粒子: 通常の粒子と同じ重さで電気の量だけが反転した粒子 (例: 電子↔陽電子)

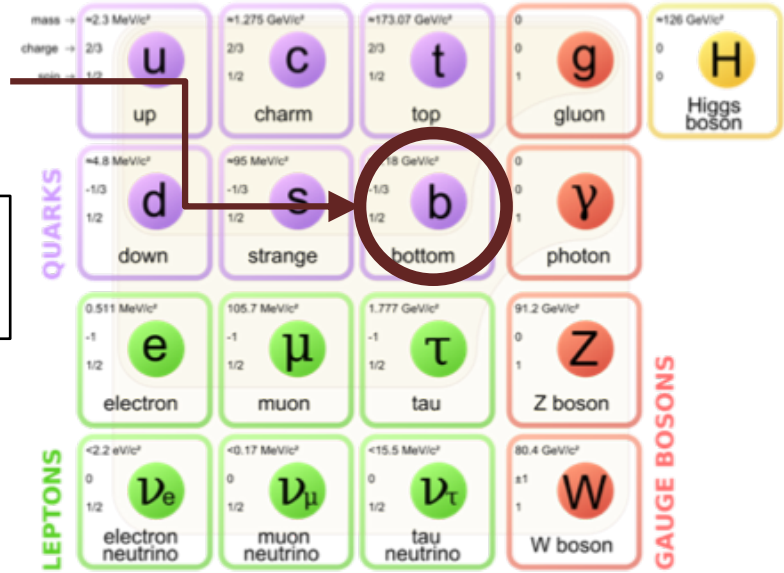


写真: KEK

1988 **Belle 実験の提案**: 三田先生や相原先生が、小林-益川理論の後半を検証する実験を提案する。

本当に 5 番目のクォークは、
その反粒子と性質が違うのか？

写真: 名古屋大学

写真: 東京大学

1999 **Belle 実験が始まる**

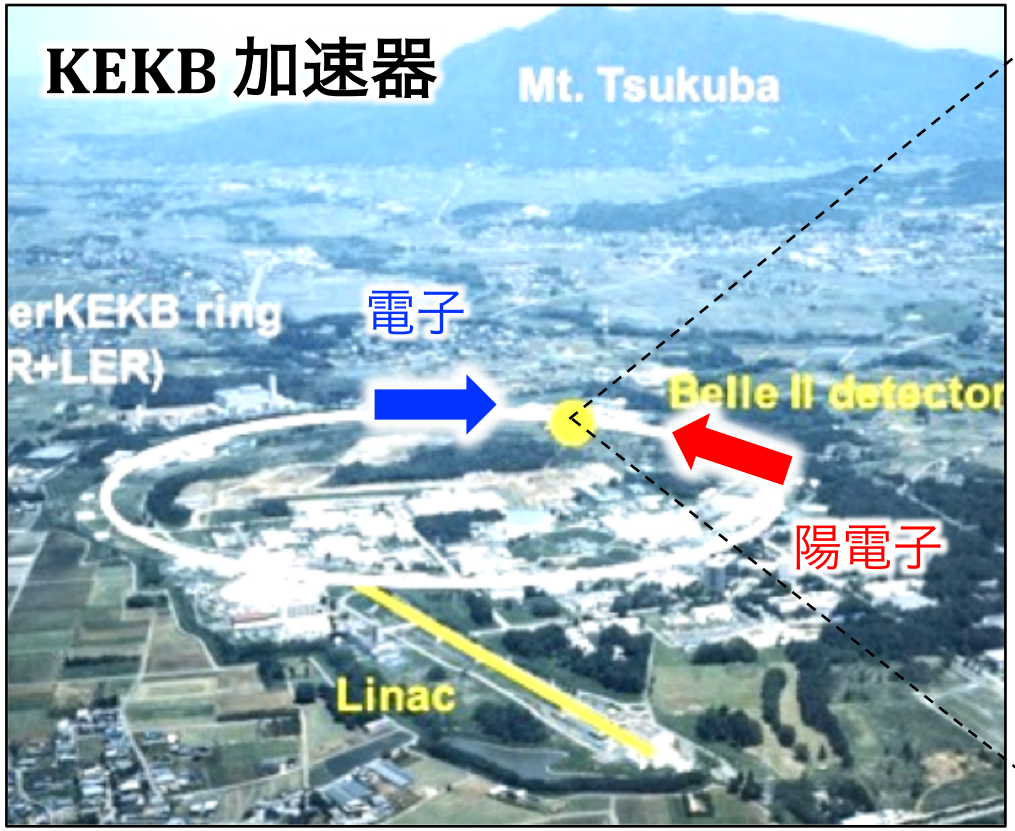
Belle ~~II~~ 実験 (1999 年~2010 年)

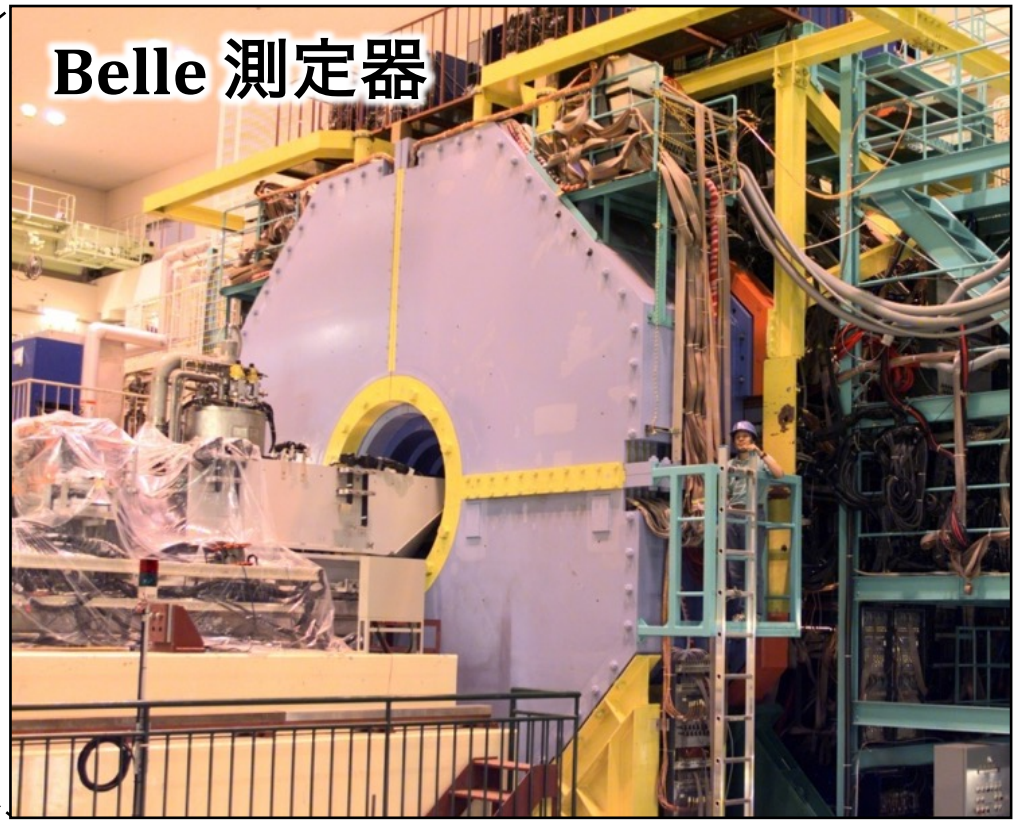
写真: KEK

5 番目のクォークとその反粒子の性質の違いを検証する実験

5 番目のクォークと
その反粒子を量産する装置
1 周 3km の超大型装置

作られた 5 番目のクォークと
その反粒子の性質の違いを
測定する装置



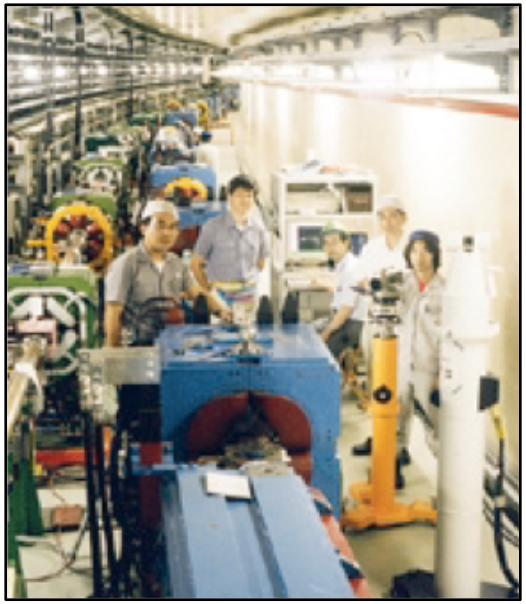


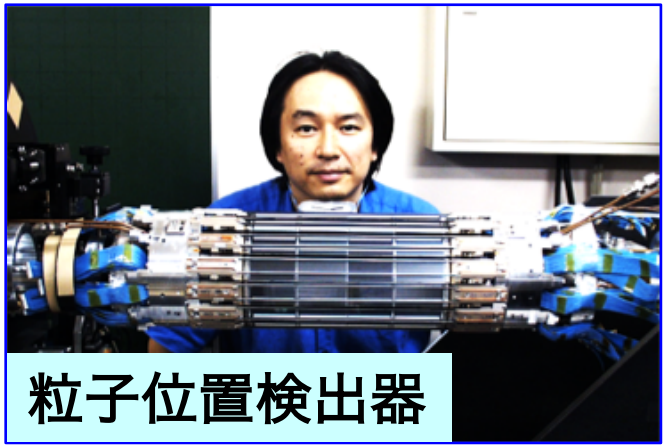
Belle ~~II~~ 実験建設の記録

写真: KEK

5 番目のクォークとその反粒子の性質の違いを検証する実験

加速器の建設





粒子位置検出器

運動量測定装置

粒子種類の識別装置

エネルギー測定装置

粒子-反粒子の性質の違いを調べる

5 番目のクォークとその反粒子の性質の違いを検証する実験

- S が 0 と同じ … クォークとその反粒子の性質は同じ
- S は 0 ではない … クォークとその反粒子の**性質は違う**

「性質の違い」を S という数量で表す

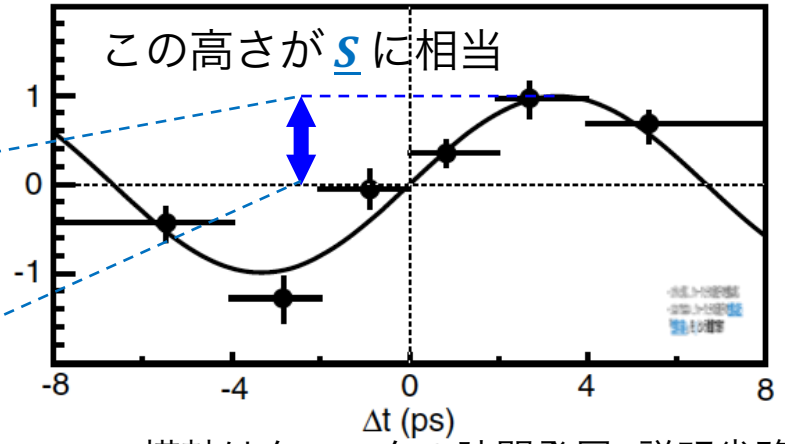
小林-益川理論の予想

答はどっちだ ?!
夏の国際学会で結果を公表するため、力の限りみんなで頑張る。

S の測定結果を発表 (2001 年 7 月 18 日)

$$S = +0.99 \pm 0.14 \pm 0.06$$

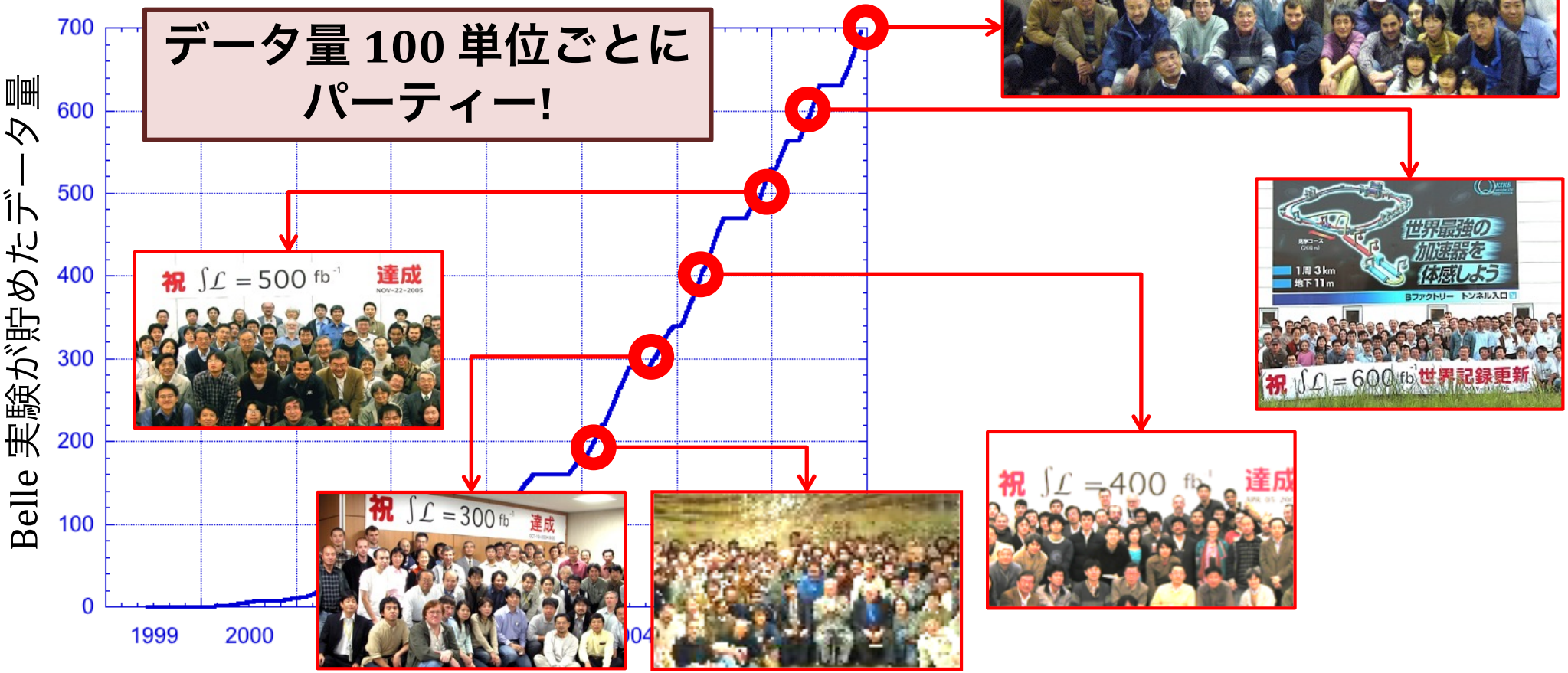
誤差を考えても S は 0 ではない → **性質は違う**



横軸はクォークの時間発展 (説明省略)

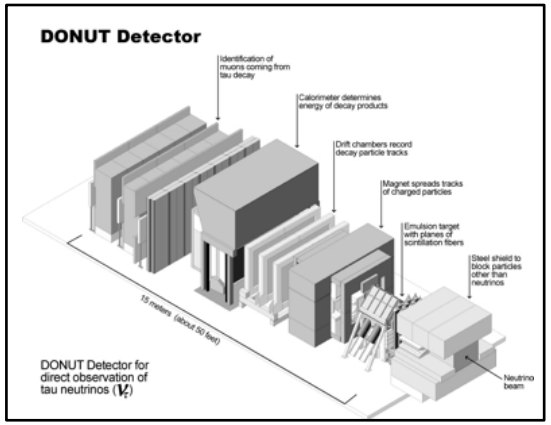
Party! Party! Party!

夏合宿みたいで
楽しいけれど
いつもこんな
では疲れちゃう



素粒子標準理論の完成と…

写真: KEK,
Maximilien Brice/CERN



2000 年
DONUT 実験 ν_τ を発見

2001 年
小林-益川理論完成

2013 年 LHC 実験
ヒッグス粒子を確認

だがしかし…

- 暗黒物質が素粒子表にないのはなぜか
- 粒子と反粒子の差の真の由来はなにか
- …

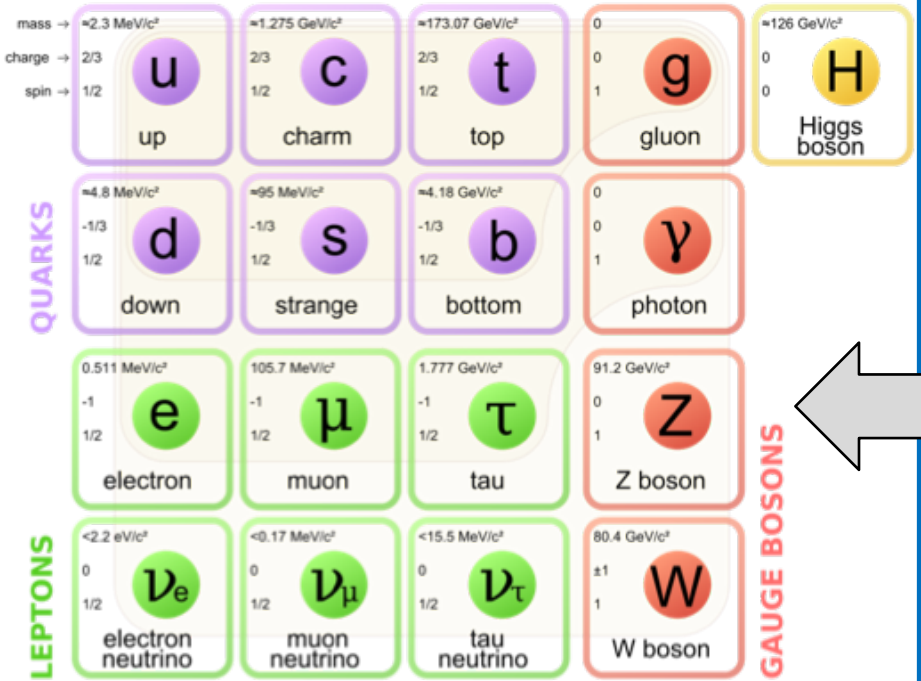
宇宙の出来事をすべてを説明するには
素粒子標準理論だけでは力不足。
素粒子標準理論を超える新理論を探せ

素粒子研究はまだ全然終わってない

標準理論 vs. 新理論

私たちがよく知る素粒子の世界

標準理論の素粒子表

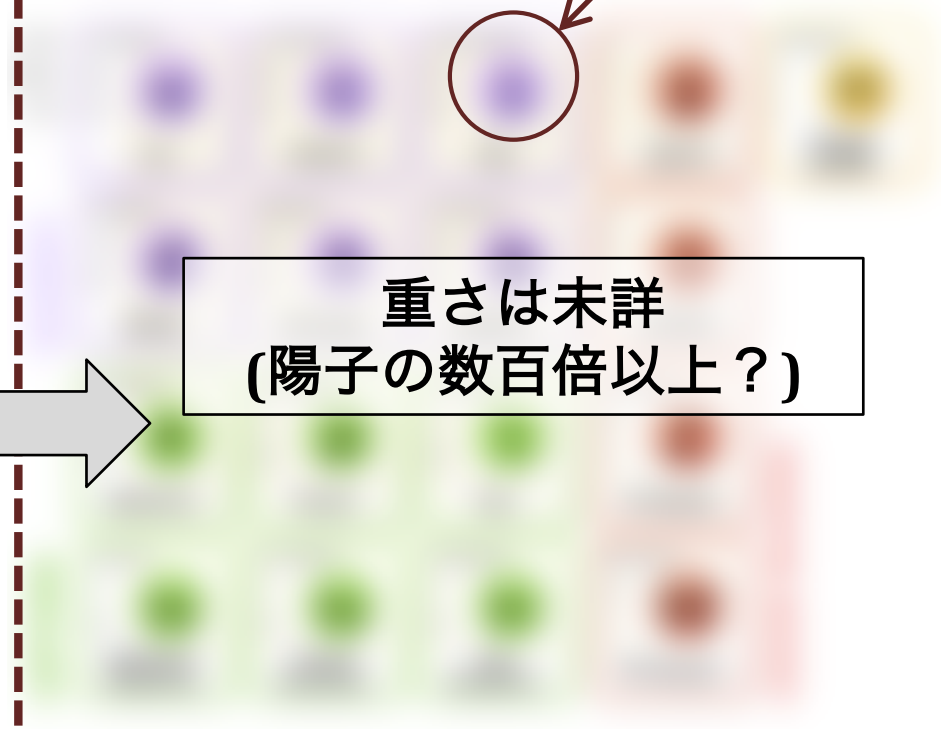


?

未発見の新理論の世界

どれかが暗黒物質粒子？

新理論の素粒子表 (未発見)



重さは未詳
(陽子の数百倍以上？)

ここのつながりも不明。

粒子-反粒子の性質の違いを調べる

5 番目のクォークとその反粒子の性質の違いを検証する実験

- S が 0 と同じ … クォークとその反粒子の性質は同じ
- S は 0 ではない … クォークとその反粒子の**性質は違う**

「性質の違い」を S という数量で表す

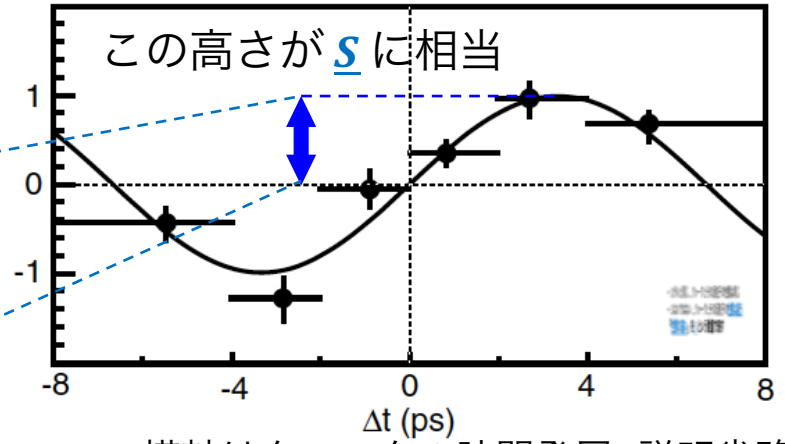
小林-益川
後半の
予想

答はどっちだ ?!
夏の国際学会で結果を公表するため、力の限りみんなで頑張る。

S の測定結果を発表 (2001 年 7 月 18 日)

$$S = +0.99 \pm 0.14 \pm 0.06$$

誤差を考えても S は 0 ではない → **性質は違う**



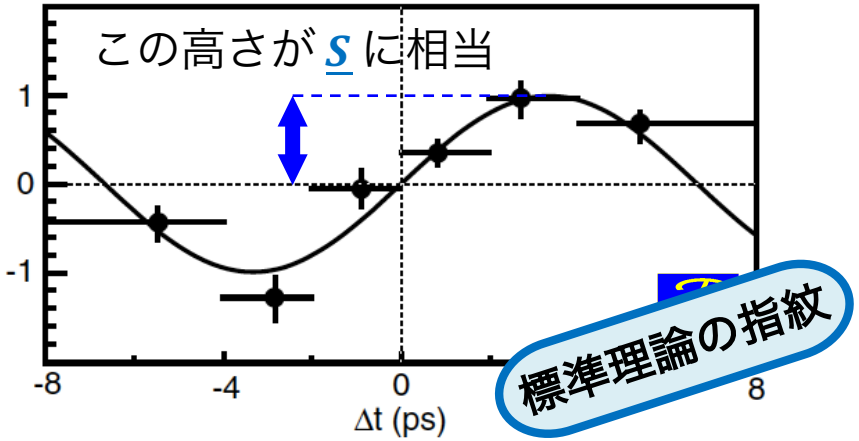
横軸はクォークの時間発展 (説明省略)

新理論のあぶり出し

変化の様式	標準理論	新理論
① $b \to c\bar{c}s$	とても影響を受ける	あっても影響はほぼない
② $b \to sq\bar{q}$	とても影響を受ける	あれば影響を受けるかも

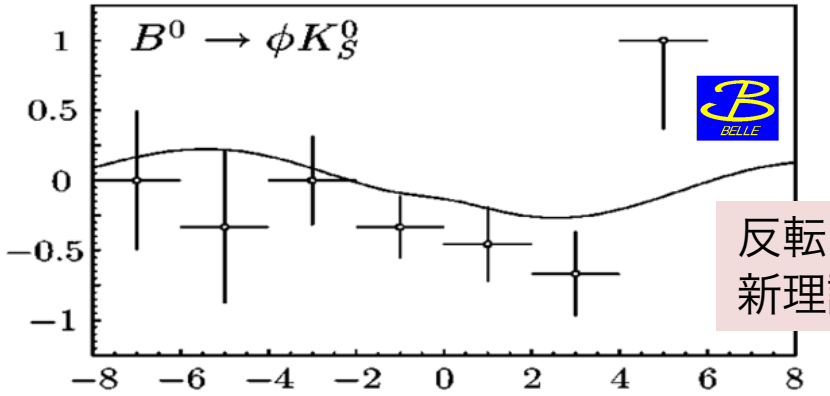
① $b \to c\bar{c}s$ (データ量 ~29 単位)
標準理論の検証 (2001 年)

標準理論の検証なので、新理論の影響を受けにくいクォークの変化様式を使った



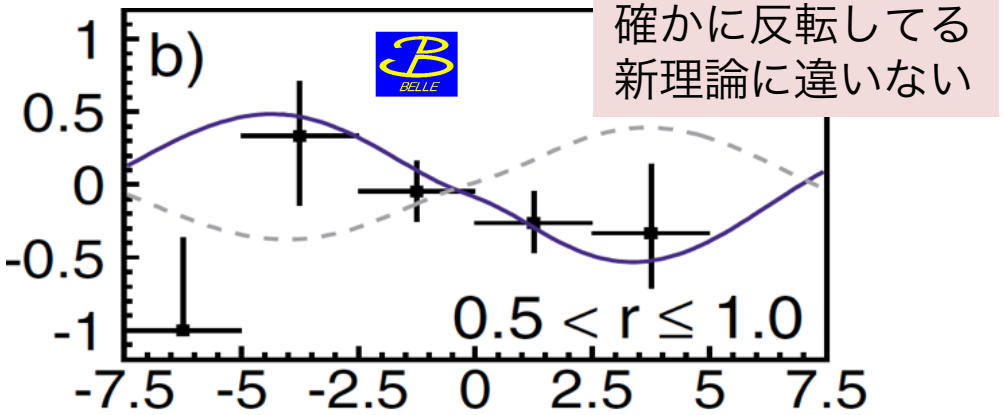
② $b \to sq\bar{q}$ (データ量 ~78 単位)
新理論発見への挑戦 (2002 年)

標準理論の**指紋を基準に**、こんどは新理論の影響を受けやすい様式の指紋を調べた



② $b \to sq\bar{q}$ (データ量 ~140 単位)
新理論発見への挑戦 (2003 年)

念のためデータを増やして再確認

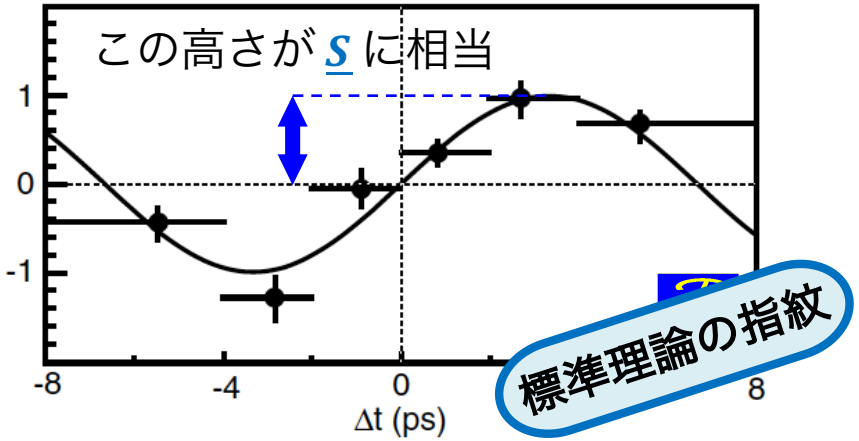


新理論のあぶり出し

変化の様式	標準理論	新理論
① $b \to c\bar{c}s$	とても影響を受ける	あっても影響はほぼない
② $b \to sq\bar{q}$	とても影響を受ける	あれば影響を受けるかも

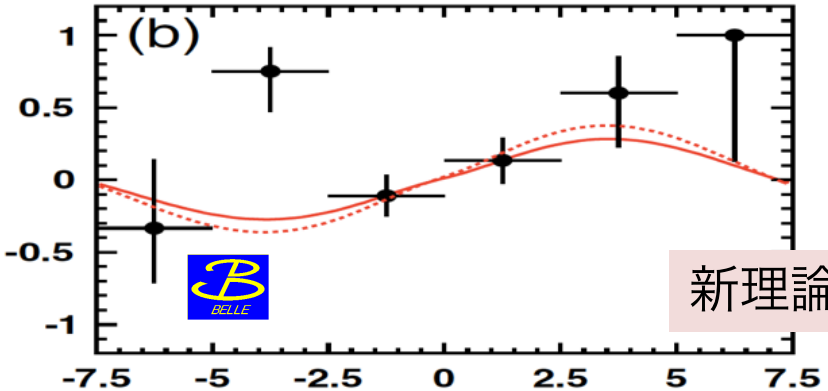
① $b \to c\bar{c}s$ (データ量 ~29 単位)
標準理論の検証 (2001 年)

標準理論の検証なので、新理論の影響を受けにくいクォークの変化様式を使った



② $b \to sq\bar{q}$ (データ量 ~657 単位)
新理論発見への挑戦 (2010 年)

Belle 実験のほぼ全データで最終確認



新理論消えた…

新理論にたどり着くには
データが足りない

Belle から Belle II へ

もっとデータを集められるように実験を改良しよう

Belle 実験 → **Belle II 実験**
KEKB 加速器 → **SuperKEKB 加速器**
Belle 測定器 → **Belle II 測定器**

- KEKB の 40 倍の早さで素粒子反応を提供できる加速器を造る
- 約 10 年の運転で Belle 実験の 50 倍のデータを貯める

J. Particle Accelerator Society of Japan, **4**, 252 (2011).

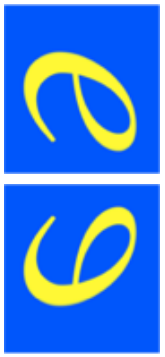
Belle, Belle II

Belle や Belle II 実験が詳しく調べる「5 番目のクォーク」は
beauty クォークと呼ばれることがあります。

Beauty をフランス語の Belle と訳したのが
Belle や Belle II 実験の名前の由来です。

また、電子と陽電子を衝突させて beauty クォークを作ることから
B = electron (電子) + nortcele (電子の逆綴り) (後述)
というシャレにもなっています。

=



さらに、実験のロゴも e と e の逆写しが
衝突して B ができています。

加速器 = 初期宇宙生成器

写真: KEK, Maximilien Brice (CERN)
イラスト: ひっぐすたん

高速粒子の衝突によって
ビッグバン直後の超高熱な
初期宇宙の素粒子反応を再現

ぶつける粒子は実験の目的に応じて決める

電子・陽電子をぶつける
SuperKEKB 加速器 (日本)

陽子同士をぶつける
LHC 加速器 (欧州)

- 1 秒あたり世界で最もたくさん初期宇宙を作れる (たくさんデータを作れる)。
- 新理論の素粒子がかかわる素粒子反応の様子を精密に調べるのが得意。

- 宇宙開闢後 10^{-10} 秒くらいまで遡れる (最も高いエネルギーを実現できる)。
- 未知の素粒子を人工的に作る試みをし、その存在の有無を確認するのが得意。

SuperKEKB 加速器

- 初期宇宙を何回も作る

● 電子

● 陽電子

Belle II 測定器
@ 衝突点 = 初期宇宙生成点

☑ はやい

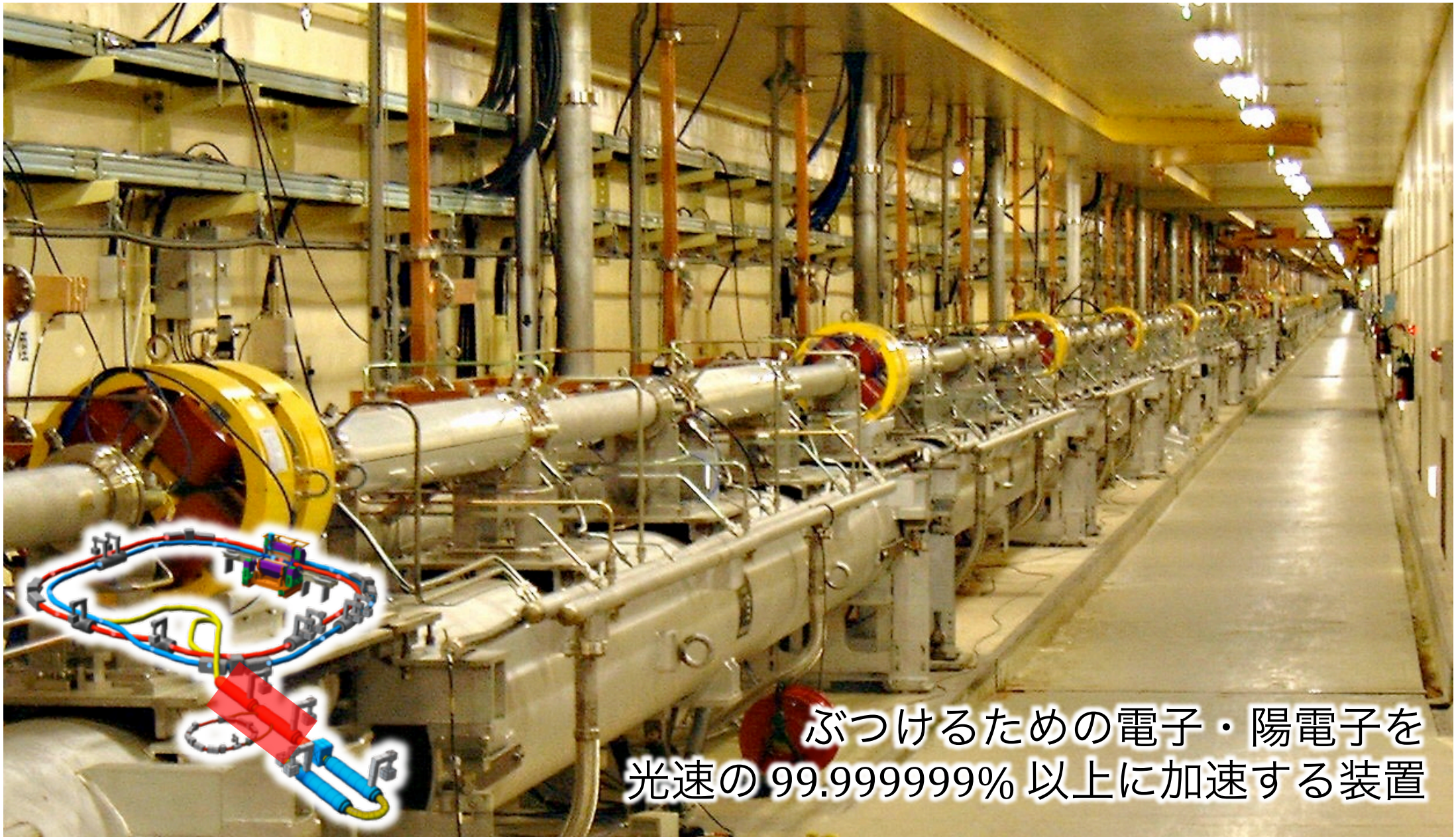
☑ おおきい

☑ かっこいい

写真・イラスト:KEK

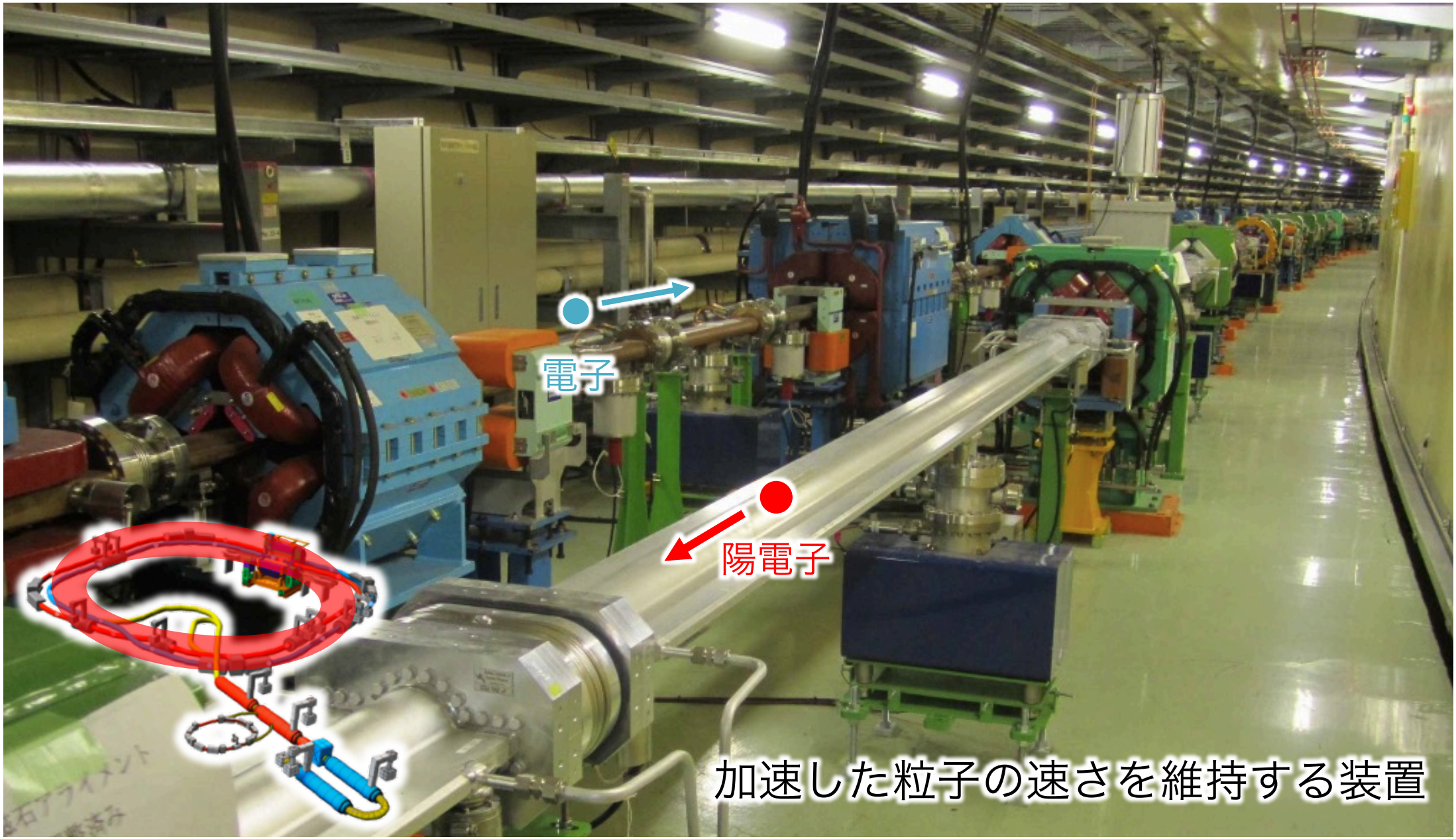
線形加速部 (400m)

写真: KEK



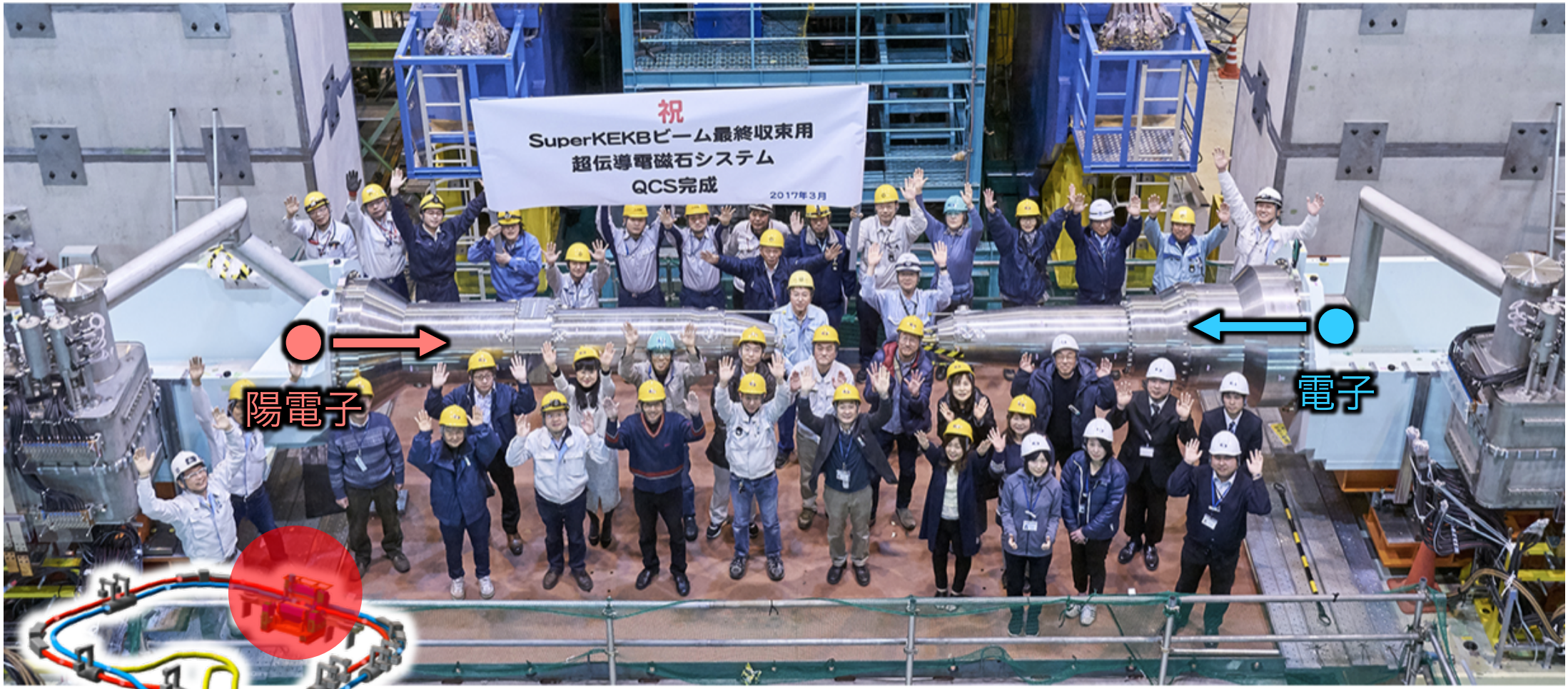
周回軌道部 (1 周 3km)

写真: KEK



粒子の衝突点 (初期宇宙生成点)

写真: KEK

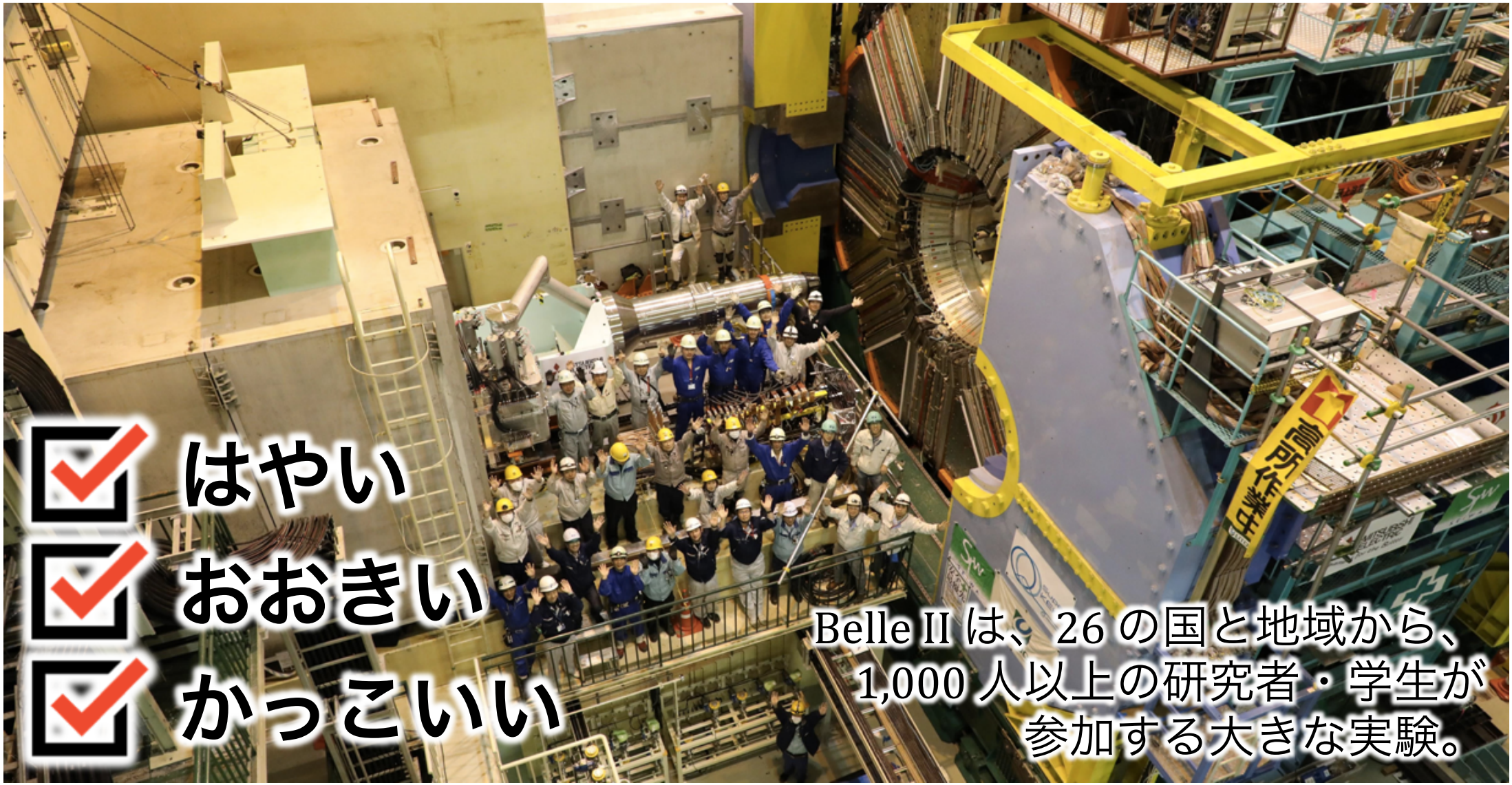


Belle II 測定器

Belle II 測定器

- 初期宇宙のふるまいを調べる

写真: KEK



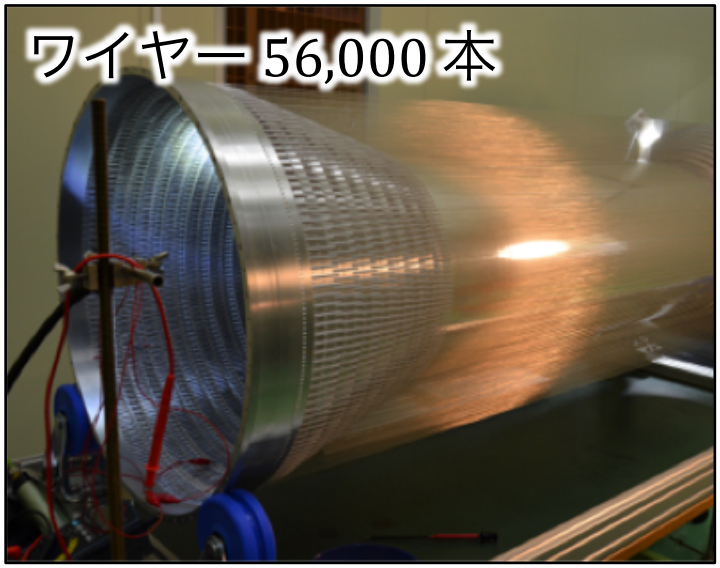
Belle II 測定器のサイズ感

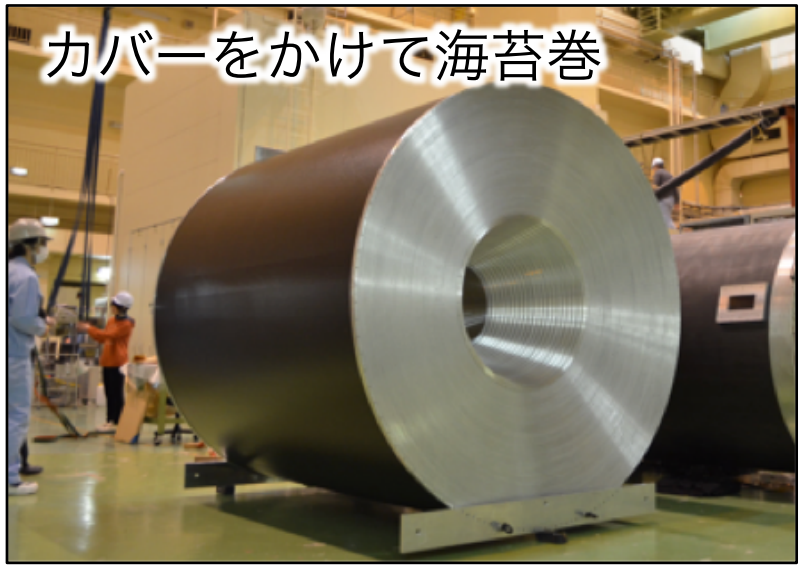
動画: KEK; https://www.youtube.com/watch?v=NQ9KINzWBNg

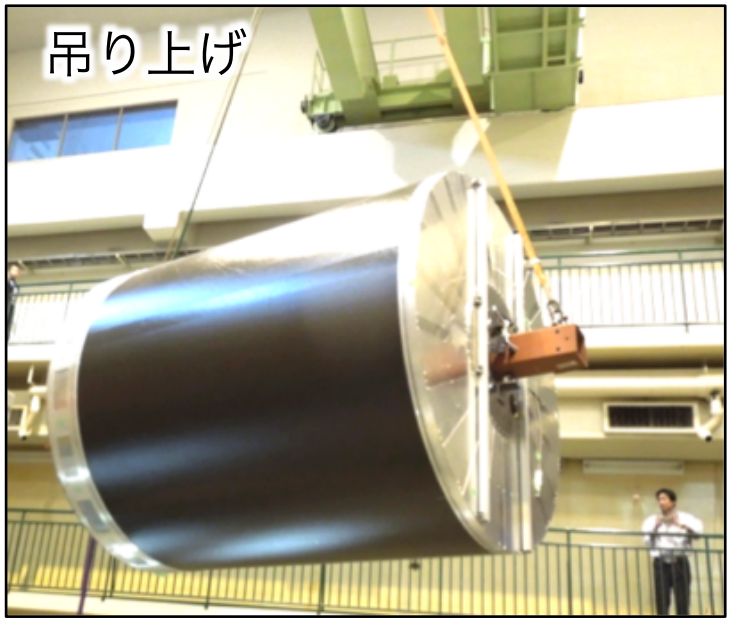
Belle II 測定器は Amazon で売っていないので
自分たちでイチから作るしかない (売ってたら迷わず買う)。

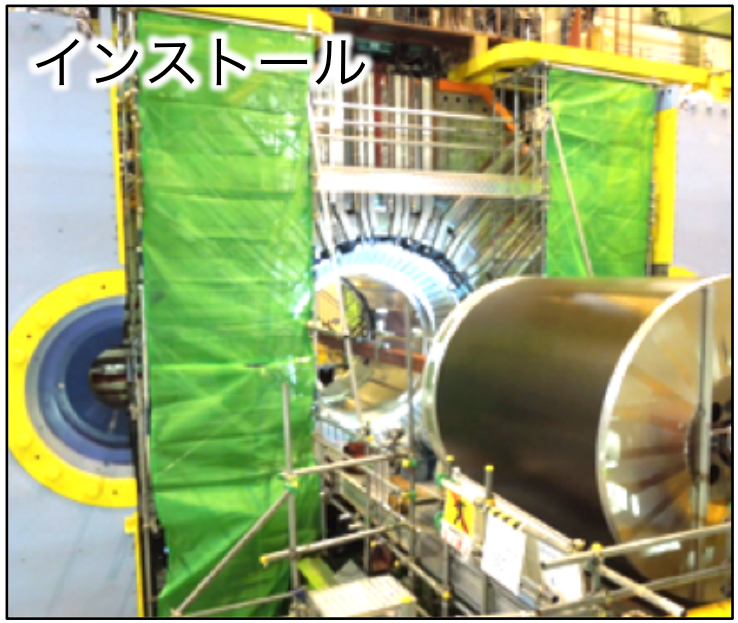
たとえば粒子の速さを調べる装置

写真: Belle II



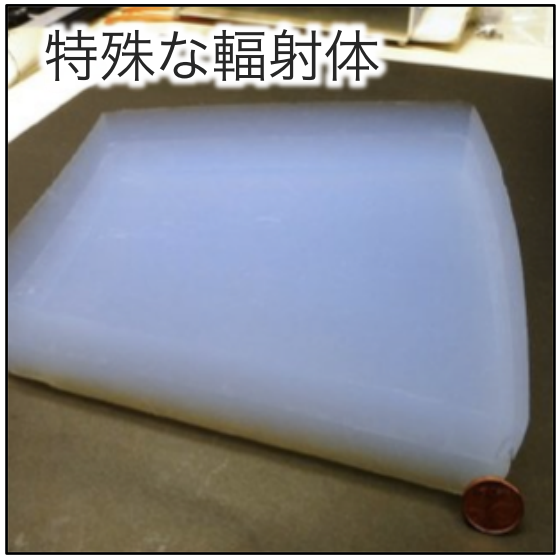


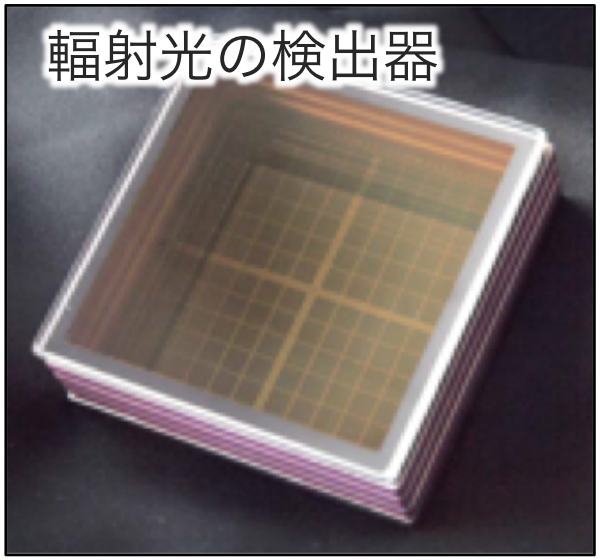


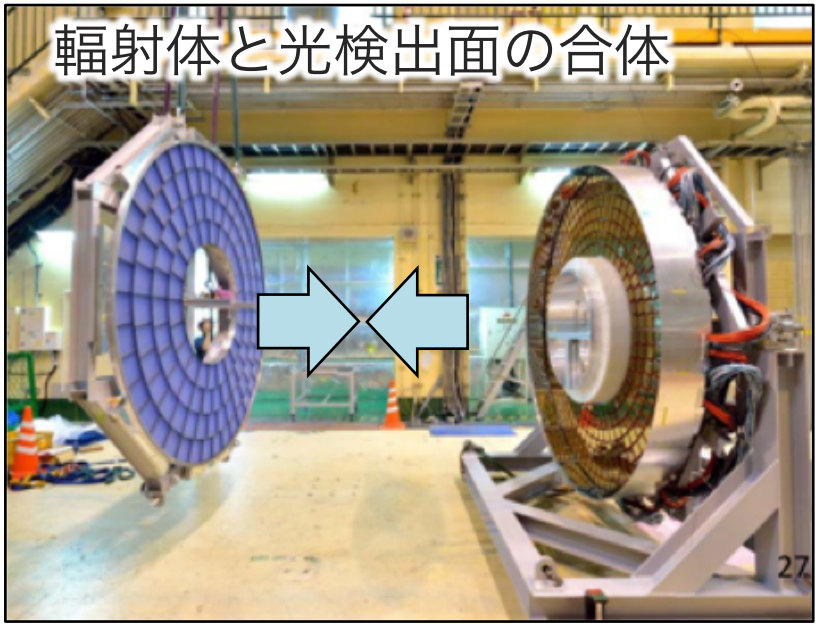


たとえば粒子の種類を調べる装置

写真: Belle II



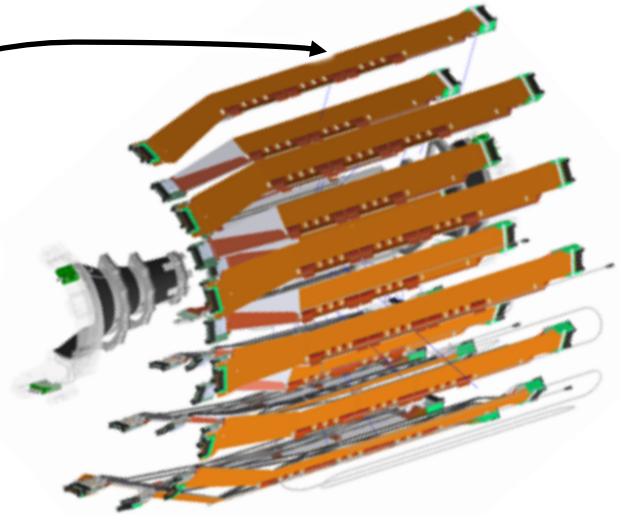


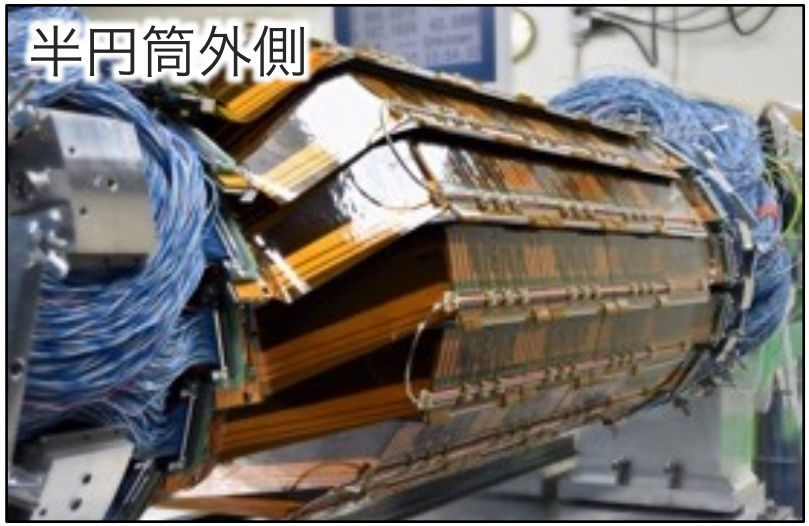


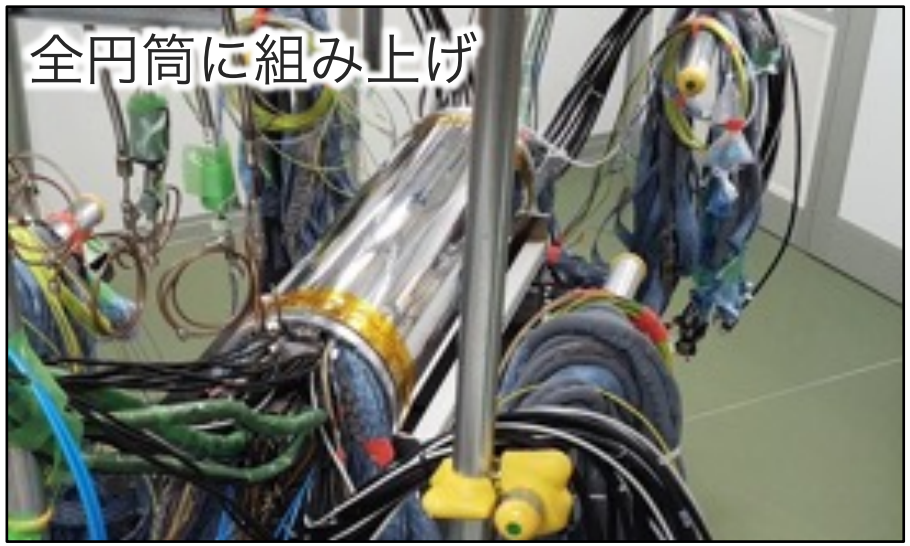
たとえば粒子の位置を調べる装置

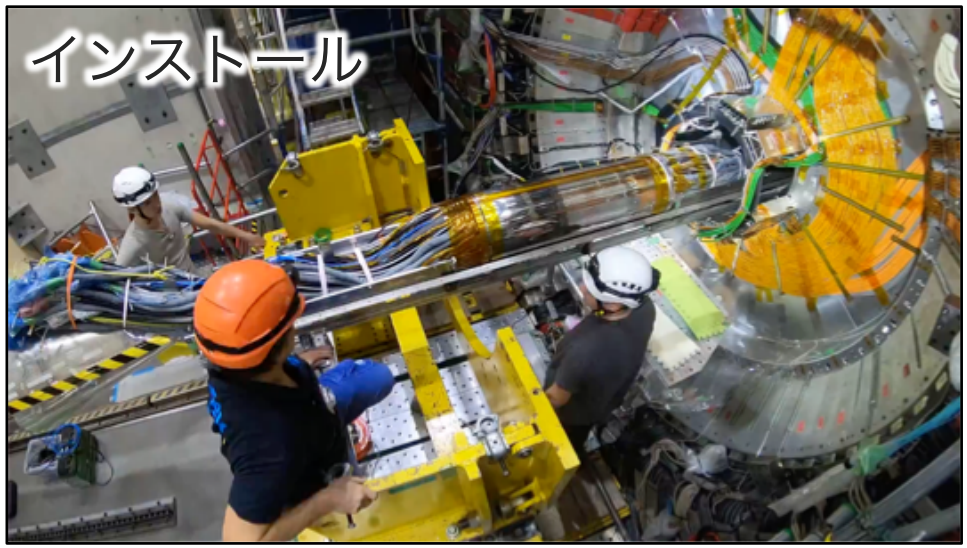
(半分以上を IPMU の実験室で製作)

写真: Belle II







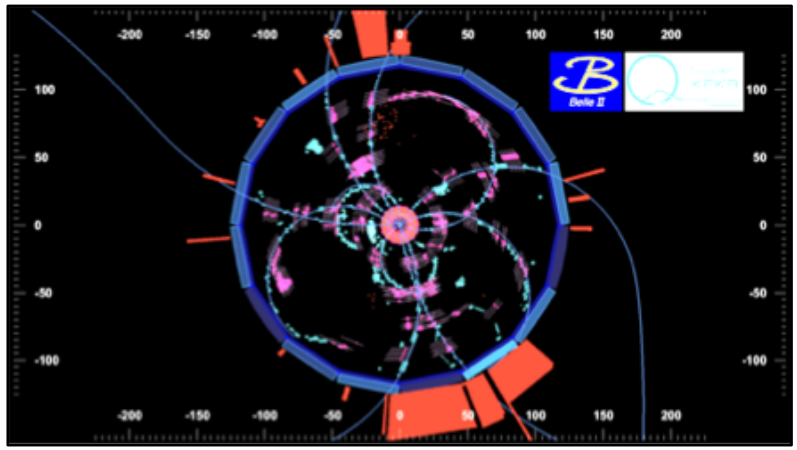


9 年の準備を経て本格運転が始まる

2019 年 3 月 25 日、加速器のデータを測定器が測定
実験が本格的に始まる

Belle II 実験の制御室で喜びあう研究者たち
(2019 年 3 月 25 日 19:44 頃)

写真・画像: Belle II



記録された「初期宇宙」事象 (測定器の輪切り)

国際会議

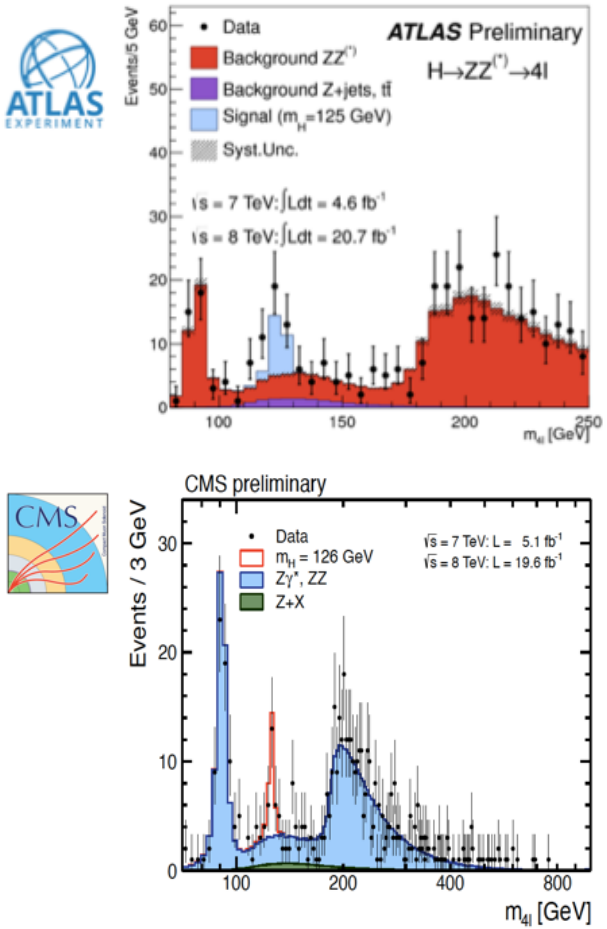
- 素粒子・原子核関連の研究で有名な夏の国際会議には Lepton-Photon と ICHEP があります。奇数年の夏に Lepton-Photon が、偶数年の夏に ICHEP が開かれます。
- 先週の月曜日から一昨日まで ICHEP 2020 が開かれていて、実験・理論のさまざまな研究グループから最新の結果が報告されていました。

ソウルで開かれた ICHEP 2018 の記念写真
参加登録者数は 1,160 人

Belle II 助走中の世の中のできごと

ヒッグス粒子の確認が報告される

国際会議 Moriond QCD 2013 にて
ATLAS と CMS の両実験が独立に報告
(2013 年 3 月 14 日)



Proc. of the Rencontres de Moriond, QCD and high energy interactions (2013)

Higgs 先生にノーベル物理学賞 (2013 年)

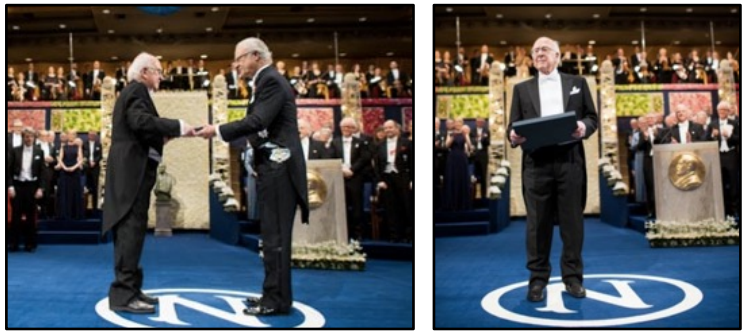
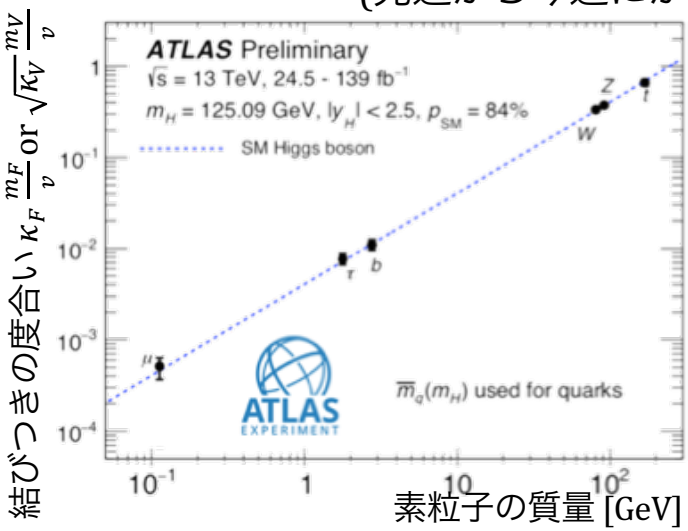


写真: Nobel Media

ヒッグス粒子の性質の理解が進む

国際会議 ICHEP 2020 にて
ATLAS と CMS の両実験が独立に報告
(先週から今週にかけて)

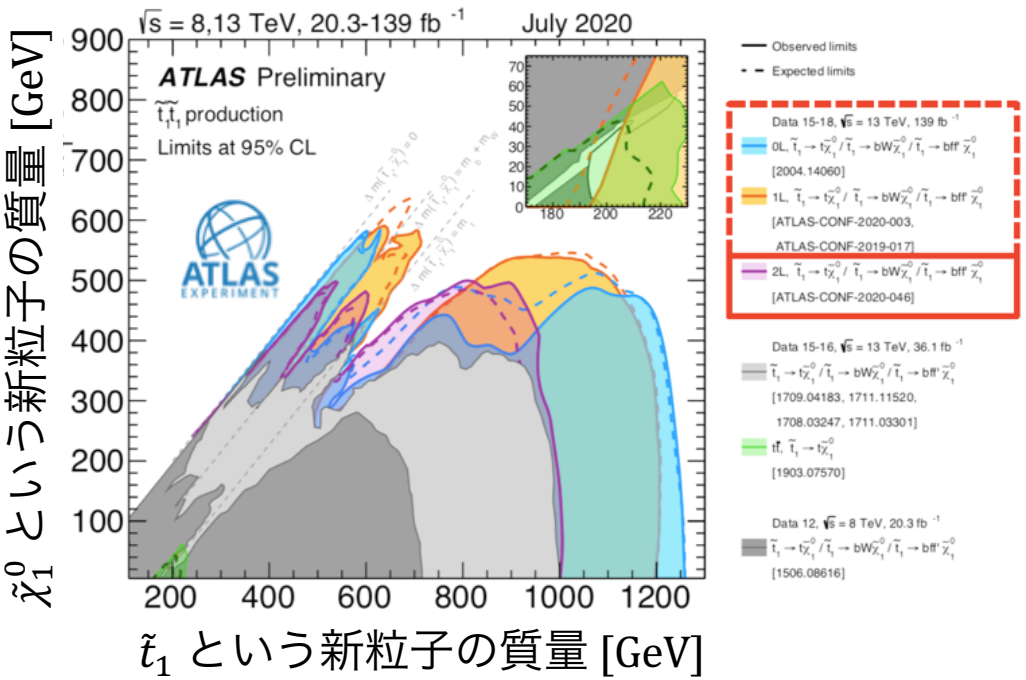


標準理論の予想通り、軽い素粒子ほど、ヒッグス粒子との結びつきの度合いが弱くなる様子が見える。

Belle II 助走中の世の中のできごと

新理論の素粒子が見つからない

国際会議 ICHEP 2020 にて
ATLAS と CMS の両実験が独立に報告
(先週から今週にかけて)



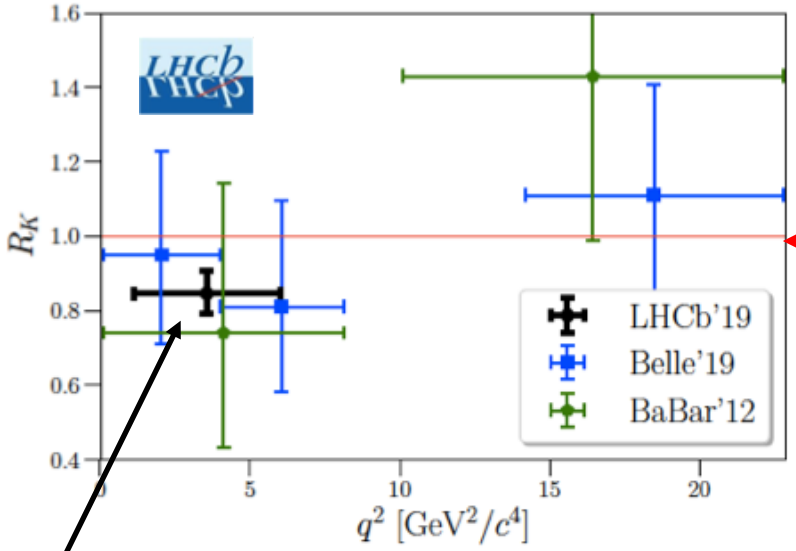
新粒子を探したけれど色のついている領域内に新粒子はいなかった。新粒子を見つけたければ、もっと右上の方 (もっと重い方) を調べなさいという結果。

でも変な現象はちらほら見えている

国際会議 ICHEP 2020 にて LHCb 実験が再録
(先週から今週にかけて)

例

「電子の性質を示す数量」と
「ミュー粒子の性質を示す数量」の比率



Phys. Rev. Lett. **122**, 191801 (2019).

標準理論は比率を 1 と予想

1 ではない…のかな？

$$R_K = 0.846^{+0.060\,+0.016}_{-0.054\,-0.014}$$

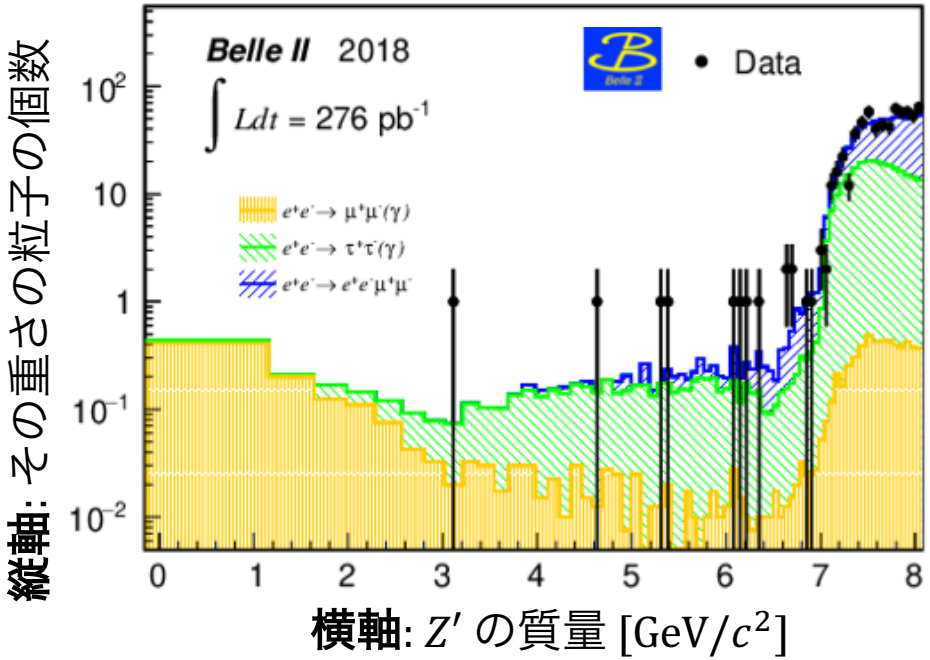
新理論？

新理論にたどり着くには
データが足りない

Belle II 実験も徐々に結果を報告

新粒子 Z' の探索

I. Adachi *et al.* (Belle II Collaboration), Phys. Rev. Lett. **124**, 141801 (2020).



色の部分は、実験技術の限界のせいで、違うのに Z' だと思ってしまう個数の予想。(バックグラウンドという)

残念ながらバックグラウンドを上回る数の Z' 粒子は見つからなかった

2001年の結果の再現

国際会議 ICHEP 2020 にて発表

Belle II 測定器の性能確認を兼ねて

年	実験	S の値
2001	Belle	$+0.99 \pm 0.14 \pm 0.06$
現在の世界平均		$+0.691 \pm 0.017$
2020	Belle II	$+0.55 \pm 0.21 \pm 0.04$

超精密測定による新理論探索

変化の様式	標準理論	新理論
① $b \to c\bar{c}s$	とても影響を受ける	あっても影響はほぼない
③ $b \to u\bar{u}d$	とても影響を受ける	あっても影響はほぼない
④ $b \to c\ell\bar{\nu}$	とても影響を受ける	あっても影響はほぼない
⑤ $b \to u\ell\bar{\nu}$	とても影響を受ける	あっても影響はほぼない
⑥ $b \to u\bar{c}s$	とても影響を受ける	あっても影響はほぼない
⑦ mixing	とても影響を受ける	あっても影響はほぼない

新理論の影響を**受けにくい**変化の様式をあえて選び、それぞれを超精密に測定する。

標準理論とのかすかな食い違いが少しずつ積み重なって、**くっきりとした違い**が浮かび上がる知れない。

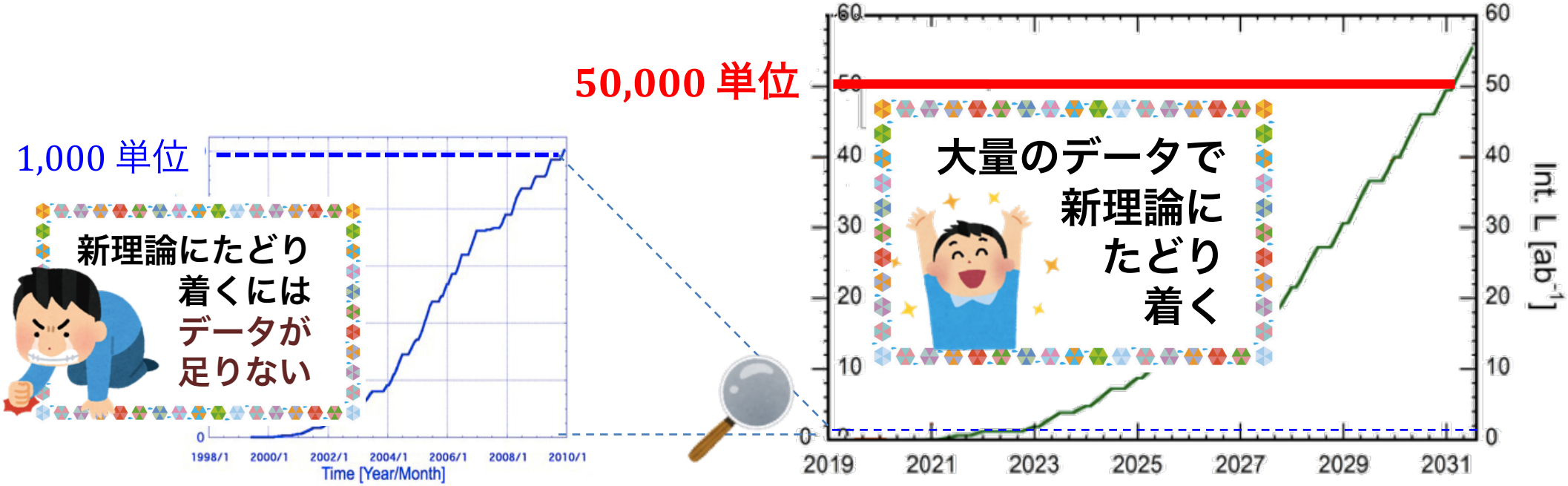
日本の得意分野である超精密測定
+
SupeKEKB 加速器が作る
大量の初期宇宙データ
‖
新理論発見へ

→ **IPMU などで準備中**

Belle II 実験のこれから

SuperKEKB 加速器は、
「初期宇宙生成能力」の世界記録を更新した。

Belle II 実験は、今後、Belle 実験の最大 50 倍になるデータを
駆使して新理論の探索に挑む。



Belle 実験が約 10 年間に貯めたデータ

Belle II 実験が今後約 10 年に貯めるデータ

10 年後に結果をまとめて報告するのではなく、
データが増えたらどんどん結果を報告する。

まとめ

① 小林-益川理論の確立やヒッグス粒子の発見などによって素粒子標準理論が完成した。

② 素粒子標準理論は素晴らしい理論だが限界もある。

③ その限界を乗り越えるため、素粒子標準理論自体を足場として新しい理論の探索が進んでいる。けれども、新理論はなかなか正体を現さない。

④ 大量のデータを特長とする日本の Belle II 実験が、新理論発見の研究についに参入した。エキサイティングな結果はもうすぐ。

これからもどうぞよろしくお願いいたします