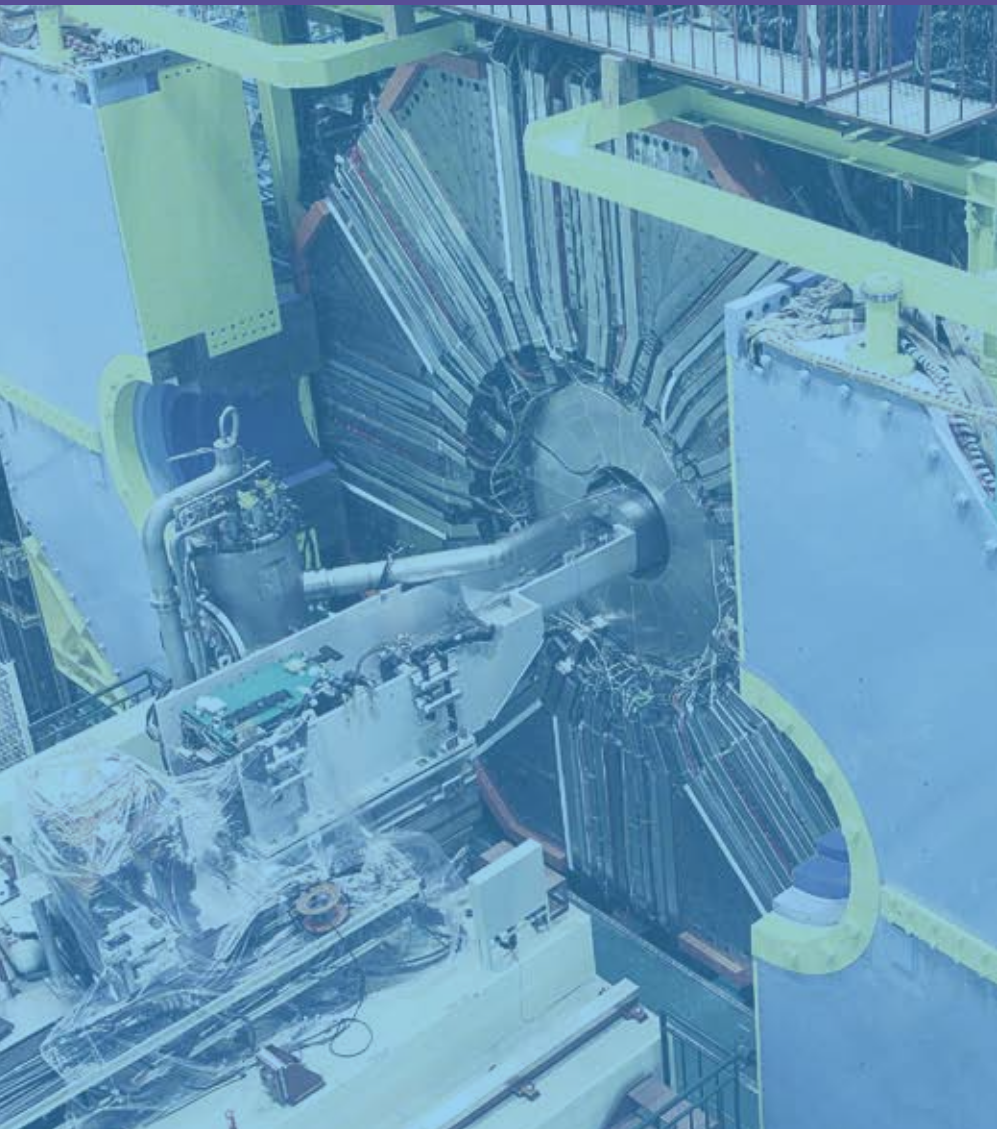


Belle II Experiment



Belle II 実験

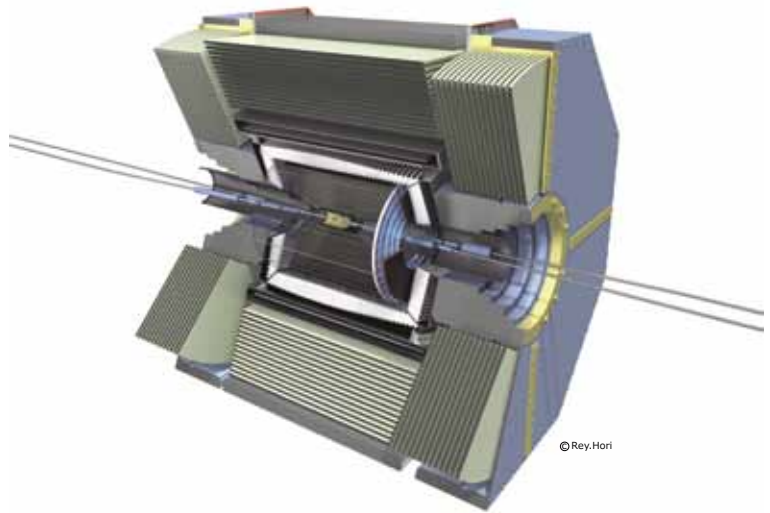
—新しい物理法則を探る—

Belle II

Belle II 実験とは

Belle II (ベル・ツー)実験は Belle II 測定器を用いて行われる素粒子物理学の実験です。

Belle II実験では、前身である Belle 実験で蓄積されたデータの50倍の量のデータを収集・解析することにより、粒子・反粒子の対称性の破れや宇宙初期に起こったはずの極めて稀な現象を再現し、未知の粒子や力の性質を明らかにします。それにより新しい物理法則の解明を図り、宇宙から反物質が消えた謎に迫ります。最先端技術を導入するなどし、2016年の本格的なデータ取得開始を目指して Belle 測定器から Belle II測定器への高度化が行われています。

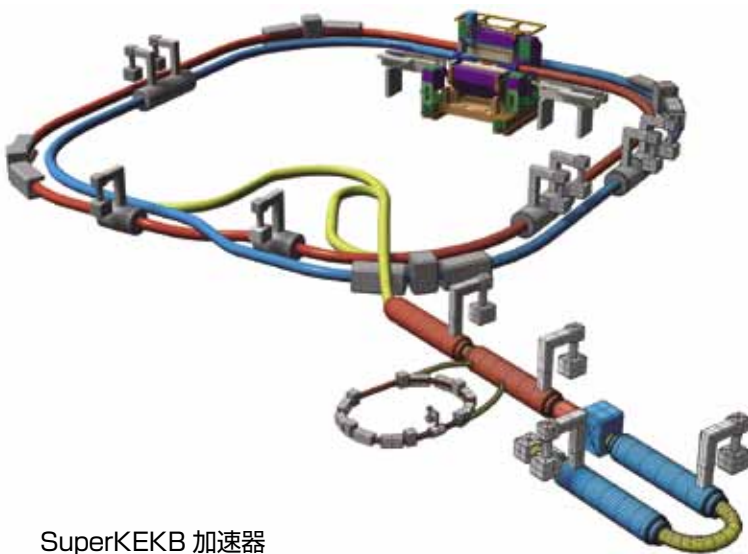


Belle II 測定器

SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 加速器は周長約 3 km の加速器です。電子と陽電子を光速に近い速さまで加速します。Belle II 測定器の位置する衝突点で電子と陽電子を衝突させると、宇宙初期に起きたとされる素粒子の様々な反応が大量に引き起こされます。SuperKEKB 加速器の前身となる KEKB (ケックビー) 加速器は、素粒子の反応をどのくらいたくさん引き起こせるかという加速器の性能に相当する「ルミノシティ」で世界最高記録を達成しました。

SuperKEKB 加速器では加速された電子と陽電子は幅 20 μm (0.02 mm) 高さ 100 nm (0.0001 mm) までに絞り込むというナノビーム技術をはじめとした最先端技術の導入により KEKB 加速器の40倍のルミノシティを達成し、50倍のデータ蓄積量に相当する「積分ルミノシティ」を Belle II 測定器において可能にします。



SuperKEKB 加速器

宇宙を構成する素粒子

私たちの住む地球や生物、また宇宙を構成する物質には、無限と思えるほどの多様性があります。しかし、それらはすべて、基本となる、「素粒子」から出来ています。

身の回りの物質は原子で出来ており、原子は原子核と電子、さらに原子核は陽子と中性子の集まりで出来ています。そして、陽子や中性子はさらにクォークで組み立てられていることが分かっています。

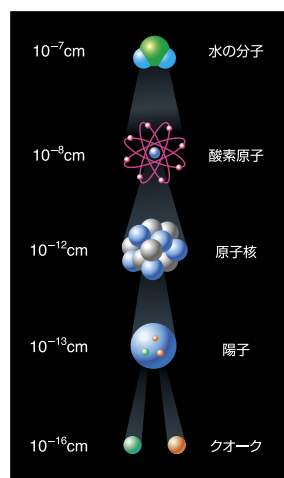
現在の素粒子物理学では、陽子や中性子を作るクォークと、電子とニュートリノの仲間のレプトンが物質を作る素粒子であると考えています。研究ではクォーク、レプトンともに3世代、6種類見つかります。また、素粒子間に働く「強い力」、

「弱い力」、「電磁気力」の力を伝える粒子、2012年に発見された、素粒子に質量を与えるヒッグス粒子があります。これらの

素粒子のふるまいは「標準理論」と呼ばれる理論にまとめられています。



私たちの世界を構成するとされる素粒子



身の回りの物質を細かく分けると全て素粒子から出来ています

宇宙から消えた反粒子

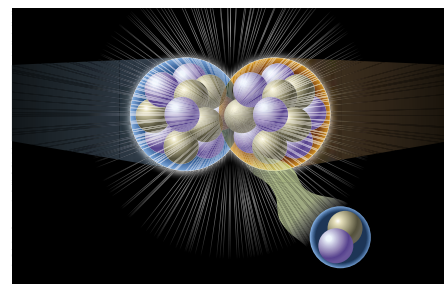
すべての素粒子には、「反粒子」が存在することが分かっています。反粒子は電荷のプラスマイナスが反対である以外、ほとんど粒子と同じ性質を持っています。粒子と反粒子が出会うとエネルギーの塊まりとなって消えてしまいます。

日常世界には反粒子で出来た反物質は見つかっていません。反粒子が現在の宇宙に見つかっていないことを説明するのは難しく、素粒子物理学における大きな謎となっています。

たとえば、加速器で人工的に宇宙誕生直後の高エネルギー状態を再現すると、必ず粒子と反粒子が対になって生成されます。つまり、宇宙誕生直後には、ビッグバンの高エネルギー状態から作られた、粒子と反粒子が同じ数だけ存在したはずです。

粒子と全く同じ数だけ存在した反粒子は、ほとんど粒子と対になり消滅し、何らかの理由で粒子だけが現在の宇宙に残ったと考えられます。なぜ反粒子

は我々の宇宙から消えてしまったのか、Belle II 実験が解き明かそうとしている謎の一つです。



粒子と反粒子は出会うとエネルギーとなり消えてしまいます

Belle II

Belle 実験の成果：小林・益川理論の実証

Belle II 実験の前身となる Belle 実験は 1999 年から 2010 年まで運転し、約 8 億個の B 中間子・反 B 中間子対データを蓄積しました。小林誠・益川敏英両博士の 2008 年ノーベル物理学賞受賞に貢献した CP 対称性の破れの実証をはじめ、素粒子物理学における数多くの成果を挙げました。

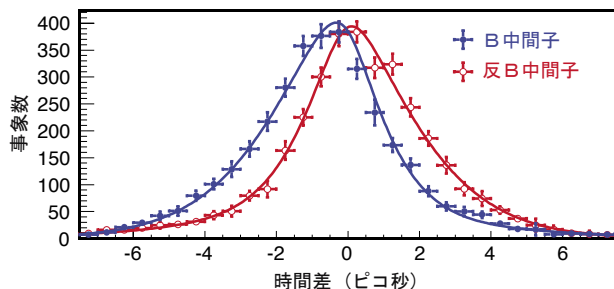
粒子と反粒子性質の違い CP 対称性の破れ

粒子と反粒子の性質の違いを理解することは、消えた反粒子の謎を解く鍵です。素粒子物理学では、これは CP 対称性の破れと呼ばれ、1964 年に中性 K 中間子で初めて見つかりました。1973 年、小林誠と益川敏英の両博士は、クォークが 3 世代、6 種類あれば CP 対称性の破れが起こる事を示しました。当時見つかっていたクォークは 3 種類だけでしたが、その後約 20 年の間に残りの 3 つのクォークが発見され、有力な理論となりました。

Belle 実験による CP 対称性の破れの発見

小林・益川理論では、3 世代目のボトムクォークを含む B 中間子で CP 対称性が大きく破れることが予言されました。これを実証するため、Belle 実験は開始されました。

大量の B 中間子と反 B 中間子を生成する KEKB 加速器と、それらの崩壊までの 1 兆分の 1 秒ほどの時間差を測定する Belle 測定器の性能により、2001 年、ついに CP 対称性の大きな破れを発見し、小林・益川理論の予言を確かめました。



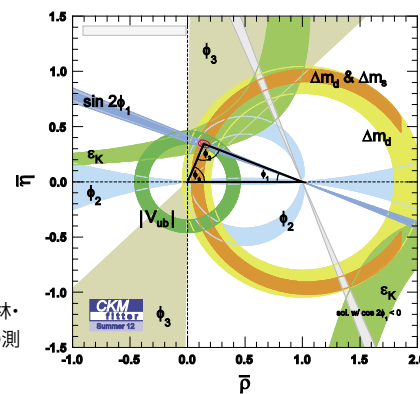
B 中間子と反 B 中間子の崩壊の時間差から CP 対称性の破れを実証しました



小林誠博士と
益川敏英博士

残された謎の解明に向けて Belle から Belle II 実験へ

Belle 実験では様々な測定を行い、それらがほぼ小林・益川理論で説明出来ることを確かめました。しかし一方で、宇宙に生き残った粒子の数を説明するには、小林・益川理論の CP 対称性の破れでは小さすぎることも分かってきました。また、標準理論が不完全であることを裏付けるような兆候が、Belle 実験の一部の結果から得られています。これらを確かめるには、Belle 実験を大幅に上回る大量のデータが必要です。



Belle 実験などの測定による小林・益川理論の検証状況。すべての測定が、ほぼ一点で一致する

積分ルミノシティ



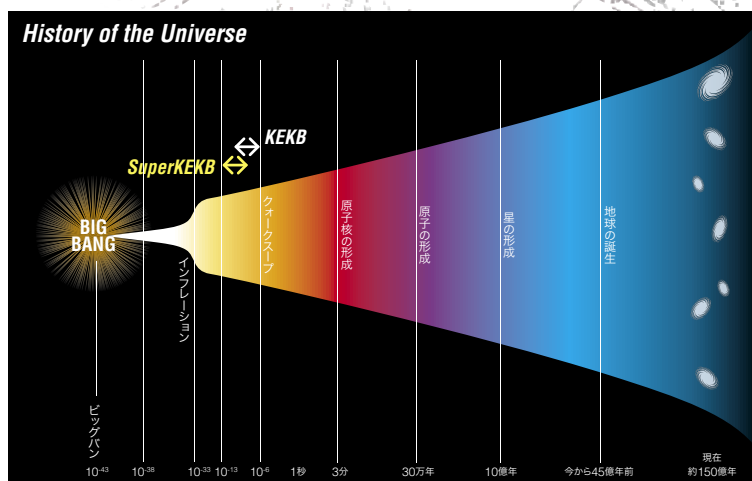
Belle 実験の蓄積データ量と主な成果

Belle II 実験：50倍のデータ量によって新しい物理法則を探る

宇宙初期の隠された物理法則の探索

Belle II 実験で探索するのは、宇宙誕生直後に働いていた未知の物理法則です。

宇宙初期の超高エネルギー状態では、小林・益川理論を超える CP 対称性の破れを持つ、未知の物理法則が働いていたと考えられます。このような新しい物理理論では、超対称性粒子や余剰次元の存在など、新しい粒子や新しい物理現象が予言されます。Belle 実験の50倍のデータを使った超精密測定により、新しい物理現象を探索します。



B 中間子崩壊に現れる瞬間的な超高エネルギー状態

新しい物理探索の鍵の一つが、ペンギン崩壊※です。この崩壊では、B 中間子のボトムクォークが、瞬間的にほかの粒子に変化する中間状態を経由します。この特徴を利用して、未知の質量の重い粒子の影響を調べることが出来ます。量子力学の不確定性関係により、中間状態に初期宇宙のような超高エネルギー状態が現れる事が許されるからです。

ペンギン崩壊は数万個の B 中間子の中で 1 回起こるような稀な崩壊なのですが、Belle 実験でその測定が可能であることが示されました。Belle II 実験のデータ量で、その性質を精密に測定し、未知の物理の影響を調べることが可能になります。

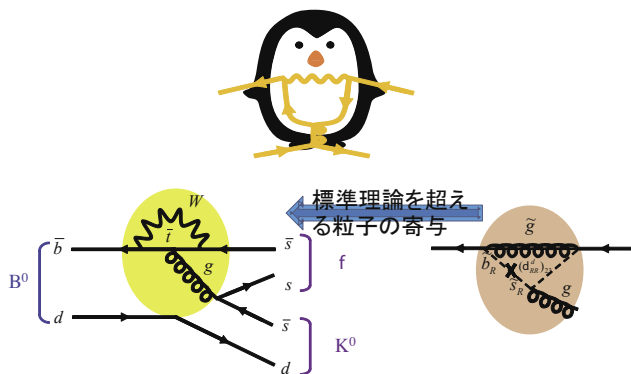
※反応のダイアグラムがペンギンに似ていることから、ペンギン崩壊と呼ばれる

多様な測定による新しい物理法則の「DNA 解析」

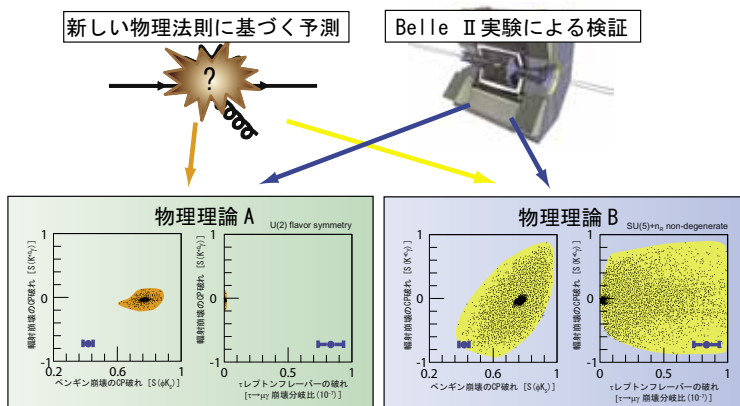
Belle II 実験では、B 中間子のペンギン崩壊、タウレプトンに伴う崩壊、高エネルギー光子に伴う輻射崩壊、タウレプトンのレプトンフレーバー非保存崩壊、D 中間子の物理など、幅広い素粒子現象を検証します。

未知の粒子の性質や相互作用の法則により、これらの素粒子現象への影響の現れ方は異なります。Belle II 実験での様々な測定結果を DNA パターン解析のように比較することで、新しい物理法則を解明する手がかりが得られます。

素粒子標準理論を超える物理現象を発見し、その物理法則を解明することが Belle II 実験の大きな目標です。



標準理論と超対称性理論におけるペンギン崩壊のファインマン図



Belle II 実験で期待される測定値 (誤差棒付きデータ点) と 2 種類の理論予想値の比較例

Belle II 測定器

電子と陽電子の衝突によって生成されたB中間子は、1兆分の1秒ほどの時間でいくつかの質量の軽い粒子に崩壊します。

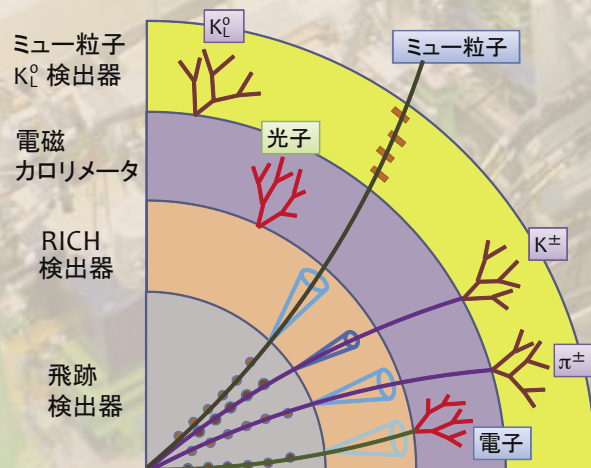
Belle II 測定器は、衝突点の回りを覆う、高さ、幅、奥行きそれぞれ約8 mの大きな粒子測定器です。B中間子の崩壊を逃さず捉えます。

B中間子の崩壊で飛び出してくる粒子の数と種類には多数の組み合わせがあります。Belle II 測定器で捉えたデータを解析し、飛び出してきた粒子を詳細に調べることによって、どのようなB中間子の崩壊が起こったかを再構成することが出来ます。

◎ Belle II 測定器で検出する粒子

Belle II 測定器で捉えられる主な粒子は、ハドロン粒子である π 中間子、K中間子とレプトン粒子である電子とミュー粒子、及び光子です。それぞれの粒子は、測定器内で特徴的な様々な反応を起こします。

右図は、飛び出して来た粒子がBelle II 測定器の検出器でどのように検出されるのかを模式的に表したものです。



反応で生じた粒子が検出器内でどのように検出されるかを示す模式図

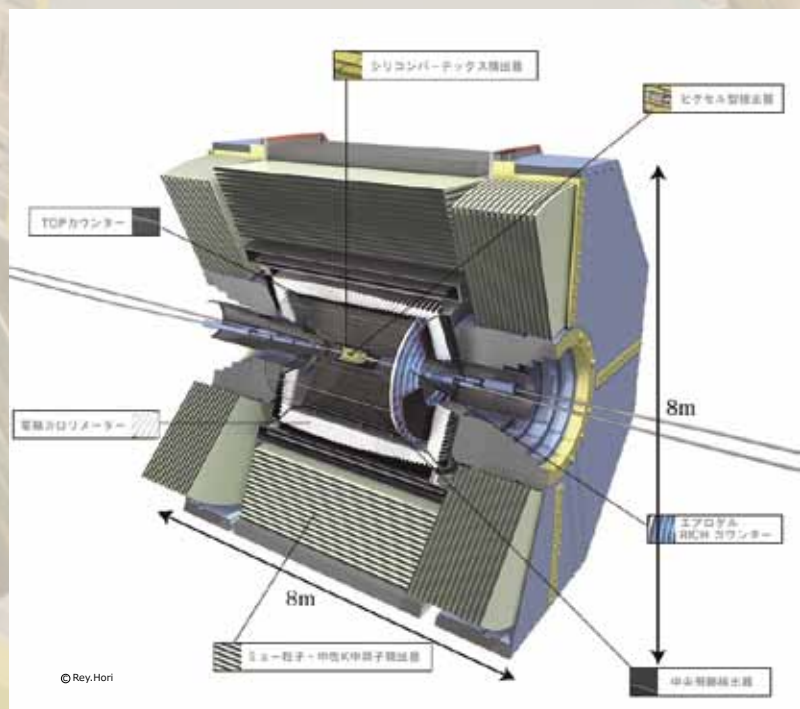


◎ Belle II 測定器内の検出器の役割

Belle II 測定器は、測定器内で起こる反応を信号として捉えるため、様々な役割を持った検出器群で構成されています(下図)。

- ◎粒子の崩壊点を測定する：崩壊点検出器(VXD) (PXD 検出器 /SVD 検出器)
- ◎荷電粒子の飛跡を捉え、運動量を測定する：中央飛跡検出器(CDC)
- ◎粒子の種類を識別する：
 - ・ RICH 検出器(TOP カウンター /ARICH 検出器) → K 中間子と π 中間子を識別
 - ・ ミュー粒子 K_L^0 中間子検出器(KLM) →ミュー粒子の識別と中性の K_L^0 中間子の検出
- ◎電子の識別と光子のエネルギーの測定：電磁力ロリメーター(ECL)

Belle II 測定器では、以前の Belle 測定器に比べ、検出器の高精細化、粒子識別能力の強化、読み出し回路の高性能化、などが行われます。



Belle II 測定器を構成する検出器

Belle II

Belle II 測定器を構成する検出器

崩壊点検出器

Vertex Detector (VXD)

VXD は B 中間子の崩壊点を測定するための 2 種類の半導体センサー (PXD: ピクセル検出器、SVD: シリコンバーテックス検出器) によって構成されます。これらは荷電粒子がシリコン板を通過すると作られる電子の塊を電気信号として取り出し、荷電粒子の通過位置を測定できます。Belle から Belle II への改造では、ビームパイプの内径を 3 cm から 2 cm とさらに小さくし、衝突点のより近くに各ピクセル 50 μm 角の PXD を搭載することで崩壊点測定精度を約 2 倍程度向上させています。また SVD は Belle の半径 88 mm から 135 mm へと大型化し、Ks 中間子が π 中間子に崩壊する過程の検出効率を 30% 向上させることを目指します。



シリコンバーテックス検出器の 3D 図面



ピクセル検出器の模型

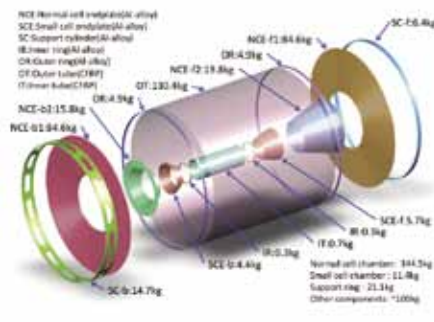
中央飛跡検出器

Central Drift Chamber (CDC)

Belle II の中央飛跡検出器は、半径約 1.1 m の円筒形状内に多数 (56,576 本) の細い金属ワイヤーを張り巡らせたガス放射線検出器です。荷電粒子が通ると、ガス分子がイオン化され、近くのワイヤーに電気信号として検出されます。再構成した飛跡から、精密に運動量を求めることができます。また、信号の大きさから粒子の種類に対する情報も得られます。金メッキ無しのアルミニウム合金ワイヤーやヘリウムとエタンを混合したガスを充填するなど、物質量を極限まで抑え、粒子の軌道に影響を与えないように設計されています。



中央飛跡検出器のフレーム



中央飛跡検出器を構成するパーツ

粒子識別検出器

Time of Propagation カウンター (TOP)、 Aerogel RICH カウンター (ARICH)

高速の π 中間子、K 中間子が物質内を通過すると、チェレンコフ光と呼ばれる光を円錐状に放射します。TOP と ARICH は高感度の光検出器で光の粒 (光子) 一つ一つを検出し、 π と K の放射角度の違いを測定して粒子識別を行います。

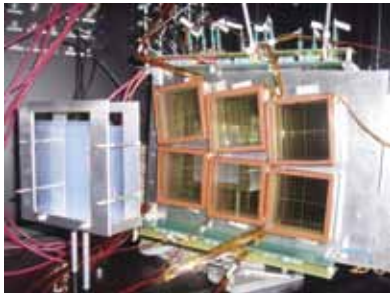
TOP カウンターは、長さ 2.7 m、幅 45 cm、厚さ 2 cm の細長い石英板の放射体と端部のマイクロチャンネルプレート型光電子増倍管で構成されます。放射角度の違いは、石英板の端までのチェレンコフ光の伝搬時間 (time of propagation) の違いとなります。この時間差を約 200 億分の 1 秒の高精度で測定します。

ARICH は、空気を多く含む軽い固体であるシリカエアロゲルを放射体とし、チェレンコフ光の円錐の形を新たに開発したハイブリッドアバランシェ光検出器のスクリーンで測ります。シリカエアロゲルは、Belle 実験でも使われ、さらに高透明度化されました。

二つの検出器によって、 π 中間子の検出効率は 97% まで向上し、K と間違える確率を Belle の 1/5 に抑えます。



TOP カウンターに使用される石英板



ARICH 検出器のテストの様子

超伝導ソレノイド電磁石

電磁カリメータの外側にはソレノイド型超伝導電磁石が設置され、1.5 テスラの強磁場を測定器内部に作ります。中央飛跡検出器内の荷電粒子は、この磁場によってローレンツ力を受けて曲げられ、螺旋軌道を描きます。曲がり方の大きさから、運動量を測定することができます。コイルはニオブ・チタン合金という超伝導材を使った電線でつくります。この電線を液体ヘリウムで -268℃まで冷却して超伝導状態にします。超伝導状態では、わずか 3 mm × 3 mm の断面積の電線に 4,160 アンペアという大電流を流すことができます。



超伝導ソレノイド電磁石

電磁カリメーター Electromagnetic Calorimeter (ECL)

ECL はタリウムをドーブしたヨウ化セシウム (CsI (Tl)) 結晶シンチレーターを用いた電子や光子がもつエネルギーを測定する装置です。電磁相互作用を起こす粒子、主に電子や光子が結晶に打ち込まれると、エネルギーを失い、そのエネルギーに比例した量の光を出します。その光の量をフォトダイオードで測ることにより粒子のエネルギーを、結晶の位置により到来方向を測定します。結晶は $5.5 \times 5.5 \times 30 \text{ cm}^3$ ほどの大きさで、粒子の入射位置を測定するため 8,736 本で衝突点を囲んでいます。透明な結晶を用いた全吸収型カリメーターとしては最大級の大きさで、総重量は約 43 t あります。



電磁カリメーター



CsI (Tl) 結晶とフォトダイオード

ミュー粒子・ K_L^0 粒子検出器 K_L^0 and Muon Detector (KLM)

物質を通り抜けやすい性質を持っているミュー粒子と、電氣的に中性で物質と反応するまでは検出できない K_L^0 中間子を検出するために設置されています。鉄製の Belle II 構造体とその隙間に挿入された粒子検出器から構成され、Belle II で最も大きく重い検出器です。比較的低いバックグラウンドの場所には、ガラス板の間にアルゴンなどからなる混合ガスを入れた検出器、エンドキャップ部など高バックグラウンドに曝される場所では、プラスチックシンチレーターと光検出器が使われます。



ミュー粒子・ K_L^0 粒子検出器 (写真中央)



KLM 検出器シンチレータの一部

Belle II

Belle II 実験のデータ収集と解析

Belle II 測定器では大量の反応事象が観測されます。それらのデータを取捨選択し、記録し、さらにはデータ解析の環境を構築し、維持することが大変重要です。

トリガー

必要な事象を素早く取捨選択

トリガーは、興味のある特定の事象のみに反応し取捨選択することのできる電子回路です。Belle II 実験では、B中間子の崩壊事象以外にも、様々な電子・陽電子反応事象や、ビームとビームパイプ内の残留ガスの反応などのバックグラウンド事象が発生します。トリガーは、各検

出器より絶え間なく送られてくるトリガー専用信号を常時監視します。取捨選択の判断は、専用に開発されたハードウェアにより、事象が生じてから5マイクロ秒以内に素早く行われます。

データ収集システム

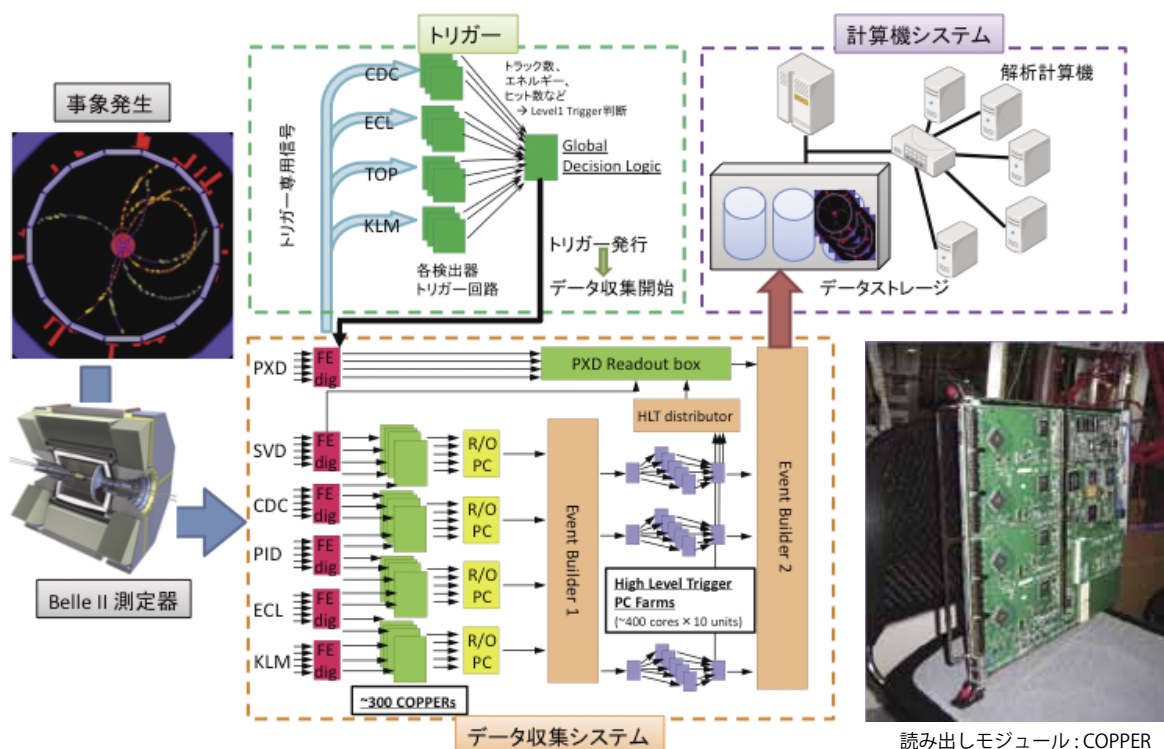
各検出器のデータをとりまとめ、効率的に記録

Belle II 測定器を構成する各検出器から送られる大量のデータをとりまとめ、不要なデータを取り除き、効率よく記録するのがデータ収集システムです。

約300枚のCOPPERモジュールで分散

して読み出されたデータはイベントビルダーにより一つにまとめられ、ハイレベルトリガーに送られます。数百台のパソコンで構成されたハイレベルトリガーシステムは、事象データを解析し、最終的に必要なデータのみを取り出します。

データ収集システムはこの一連の作業を毎秒3万回行う処理能力を持ち、毎秒30ギガバイト送られてくるデータを毎秒1ギガバイト程度に圧縮して記録します。



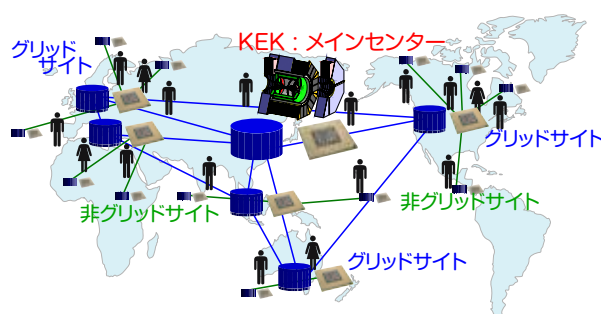
計算機システム

全世界的な分散データ解析環境

Belle II 実験では、実データおよびシミュレーションを含め、最大年間数10ペタバイト(1ペタバイトは1,000テラバイト)という大量のデータが生成されます。これら大量のデータを素早く処理、解析し、研究成果をいち早く世界に発信するため、世界中にある協力研究機関・大学の計算機システムをネットワークで結び、あたかも一つの巨大計算機のように機能するグリッドやクラウドと呼ばれる最先端の

分散型計算機環境を取り入れています。特に実験の中心となる高エネルギー加速器研究機構・計算科学センターでは核となる計算機システムの準備が進んでおり、

既に約3,000コアのCPU、7ペタバイトのディスク、16ペタバイトの階層型ストレージシステムを導入しています。



分散型計算機環境(グリッド)の模式図



計算科学センターの計算機システム

国際共同実験

Belle II コラボレーション

Belle II 実験は2013年2月現在世界20の国と地域の約70の大学・研究機関に所属する約460名の研究者が参加する国際共同実験です。研究者が一同に会す

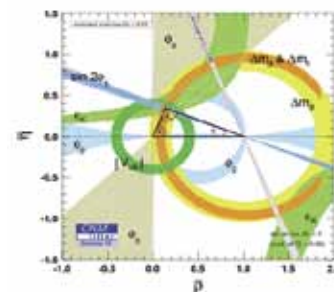
る年3回のコラボレーション全体会議をはじめ、実験に参加する世界中の研究者により多種多様な会議が開催され、日々活発な議論が行われています。こうして

議論を重ねながら、Belle II 測定器の建設のほか、データ収集や物理解析を国際共同で実施しています。

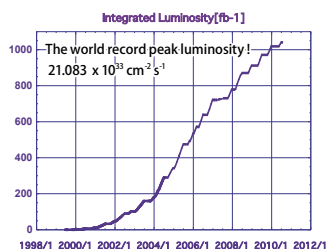


Belle II 実験に参加する研究者の集合写真

年表



1964 年	K 中間子の崩壊により CP 対称性の破れが発見される
1973 年	クォークが 6 種類存在することにより CP 対称性の破れが起きるとする「小林・益川理論」発表
1981 年	三田一郎博士 B 中間子の精密測定により小林・益川理論の検証可能性を提唱
1987 年	P.Oddone 博士が非対称 B ファクトリーを構想、高崎史彦博士が KEK での建設の検討開始
1994 年	KEKB 加速器と Belle 測定器の建設開始、実験名が「Belle (ベル)」と決まる
1999 年	Belle 実験開始
2001 年	B 中間子における CP 対称性の破れを実証、KEKB 加速器が世界最高ルミノシティを達成
2002 年	$b \rightarrow s$ 過程での CP 対称性の破れの異常を発見
2003 年	$B \rightarrow K\ell\ell$ 崩壊の発見
2004 年	新粒子 X(3872) の発見
2005 年	$B \rightarrow K\pi$ における CP 対称性の直接的破れの発見、 $B \rightarrow \rho\gamma$ 崩壊の発見
2006 年	$B \rightarrow \tau\nu$ 崩壊の発見
2007 年	D 中間子混合の発見、4 つのクォークからなる新粒子 Z(4430) ⁺ の発見
2008 年	小林誠・益川敏英両博士 ノーベル物理学賞受賞
2010 年	Belle 実験終了
2011 年	SuperKEKB プロジェクト開始記念式開催。本格的に KEKB 加速器と Belle 測定器の高度化作業が開始される
2015 年	SuperKEKB 加速器が稼働予定 (2014 年度)
2016 年	Belle II 測定器がデータ取得開始予定
2022 年	積分ルミノシティ (データ取得量に相当) KEKB の 50 倍達成予定



Belle II 実験グループ

<http://belle2.kek.jp/>
<http://belle2pb.kek.jp/>



大学共同利用機関法人
 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
 〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
<http://www.kek.jp/ja/>