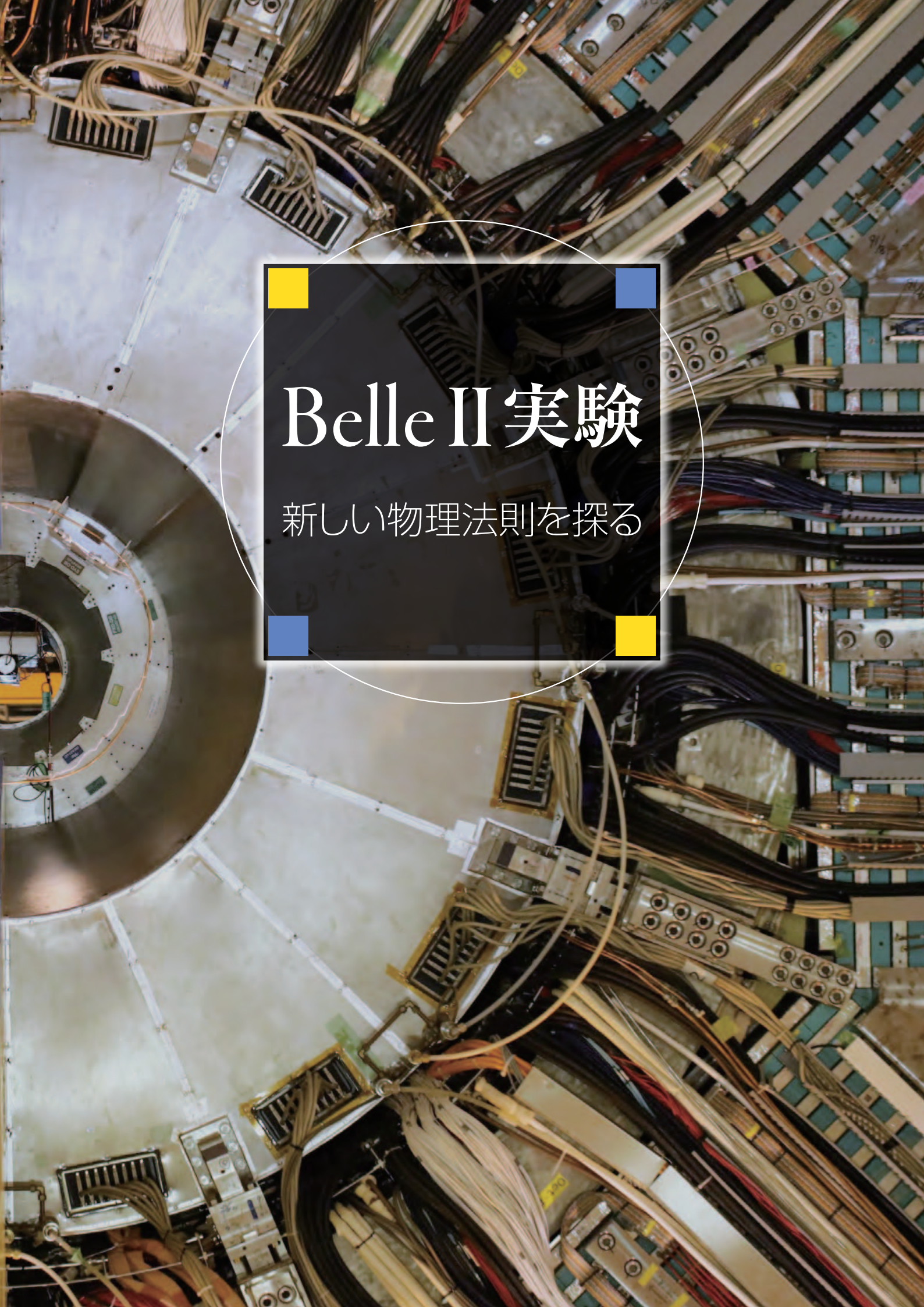


Belle II実験

新しい物理法則を探る

Belle II 実験がめざすもの

素粒子物理学：宇宙の基本法則をもとめて

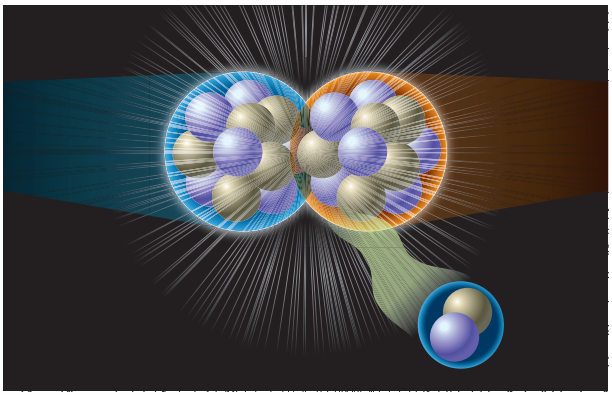
古代ギリシャの哲学者たちの時代より、人類は世界を形作っている物質の根源の姿は何かという疑問を持ち続けていました。私達の住む地球や生物、また宇宙を構成する物質には、無限と思えるほどの多様性があります。しかし、それらはすべて基本となる「**素粒子**」から出来ていると考えられています。この物質の究極の構成要素を調べる素粒子物理学は、20 世紀に入って大きく発展し、原子から原子核、クォークというように、より基本的な構成粒子へと探索が進んできました。非常に高いエネルギー状態だった初期宇宙を理解する上においても、素粒子という極微の世界に働く法則の理解が重要であると考えられています。

宇宙から消えた反粒子の謎

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となって消えてしまいます。我々の宇宙には、反粒子で出来た反物質は、ほとんど存在していません。

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。

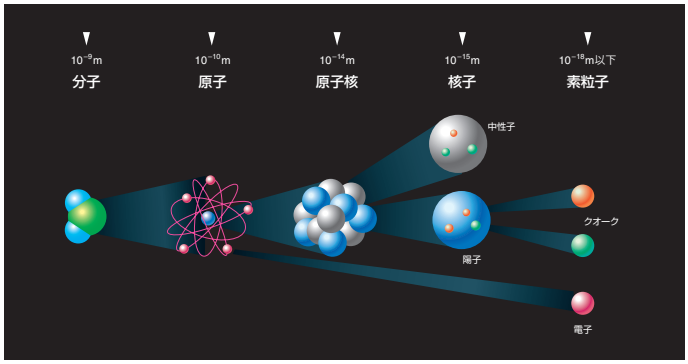
宇宙初期にたくさん存在した反粒子は、ほとんどが対になる粒子とぶつかって消滅し、何らかの理由で粒子だけが現在の宇宙に生き残ったと考えられます。**反粒子が現在の宇宙に見つかっていないことを説明するのは難しく、素粒子物理学における大きな謎**となっています。



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

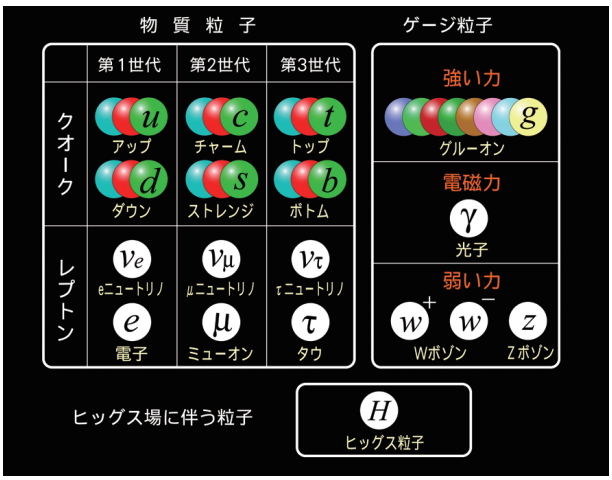
素粒子の「標準模型」を超えて

私達の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ます。現在までの研究で、陽子や中性子を作るクォーク、電子とニュートリノの仲間のレプトンという素粒子がともに 3 世代、6 種類あることが分かっています。それらに加えて、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「**標準模型**」と呼ばれる理論にまとめられています。



身の回りの物質を細かく分けていくと全て素粒子から出来ています

1970 年代に確立した標準模型は、実験結果を非常によく説明してきました。しかし、標準模型で説明できない謎がまだ残っています。宇宙から消えた反粒子の謎や、宇宙のほとんどを占めているといわれる暗黒物質、暗黒エネルギーの問題などは標準模型では説明できていません。現在、素粒子物理学においては、この標準模型を超えた新たな物理法則を探求することが重要なテーマとなっています。



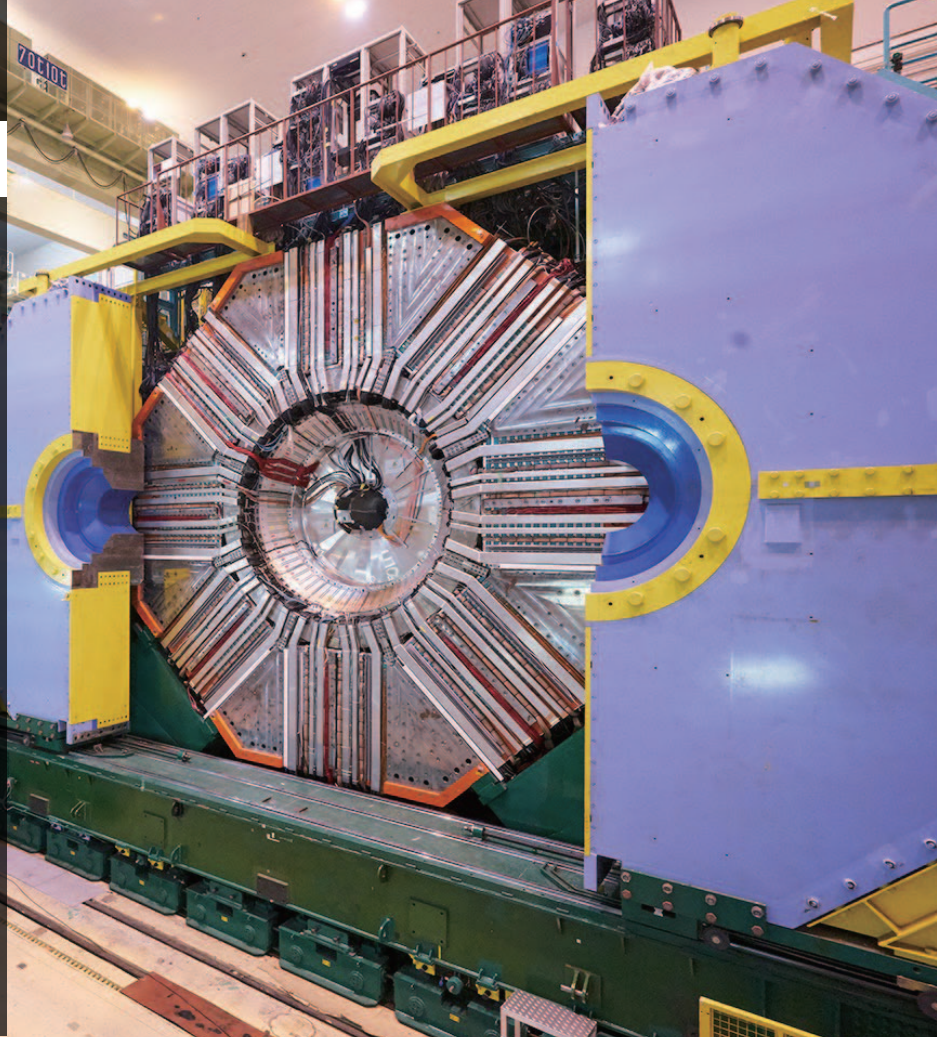
私達の世界を構成するとされる素粒子

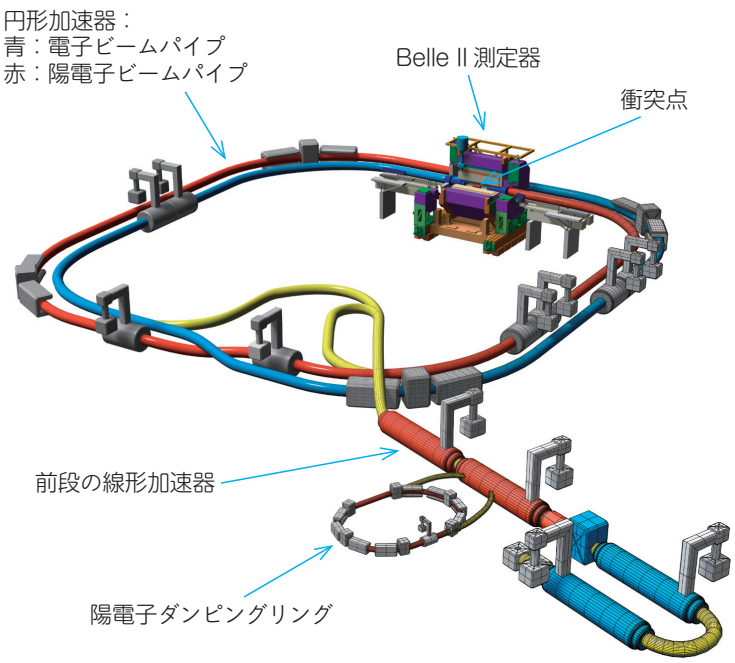
Belle II 実験とは

Belle II（ベル・ツー）実験は Belle II 測定器を用いてつくばの高エネルギー加速器研究機構で行われる素粒子物理学の実験です。特に加速器のビームの衝突で作り出される **B 中間子**という粒子の性質を詳しく調べます。B 中間子は陽子の約 5.6 倍もの重さを持ち、約 1.5 ピコ秒（1 ピコ秒は 1 兆分の 1 秒）で様々な粒子に崩壊します。この B 中間子の崩壊の様子を調べる Belle II 測定器は、1999 年から 2010 年まで行われた前身の Belle 実験で使われていた測定器を、最先端技術を導入するなどして大幅にアップグレードしたものです。

Belle II 実験では Belle 実験で蓄積されたデータの **50 倍のデータ**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目指し、宇宙から反物質が消えた謎に迫ります。

参考：Belle II 実験紹介動画
https://www.youtube.com/watch?v=vnrQcF-jmpM



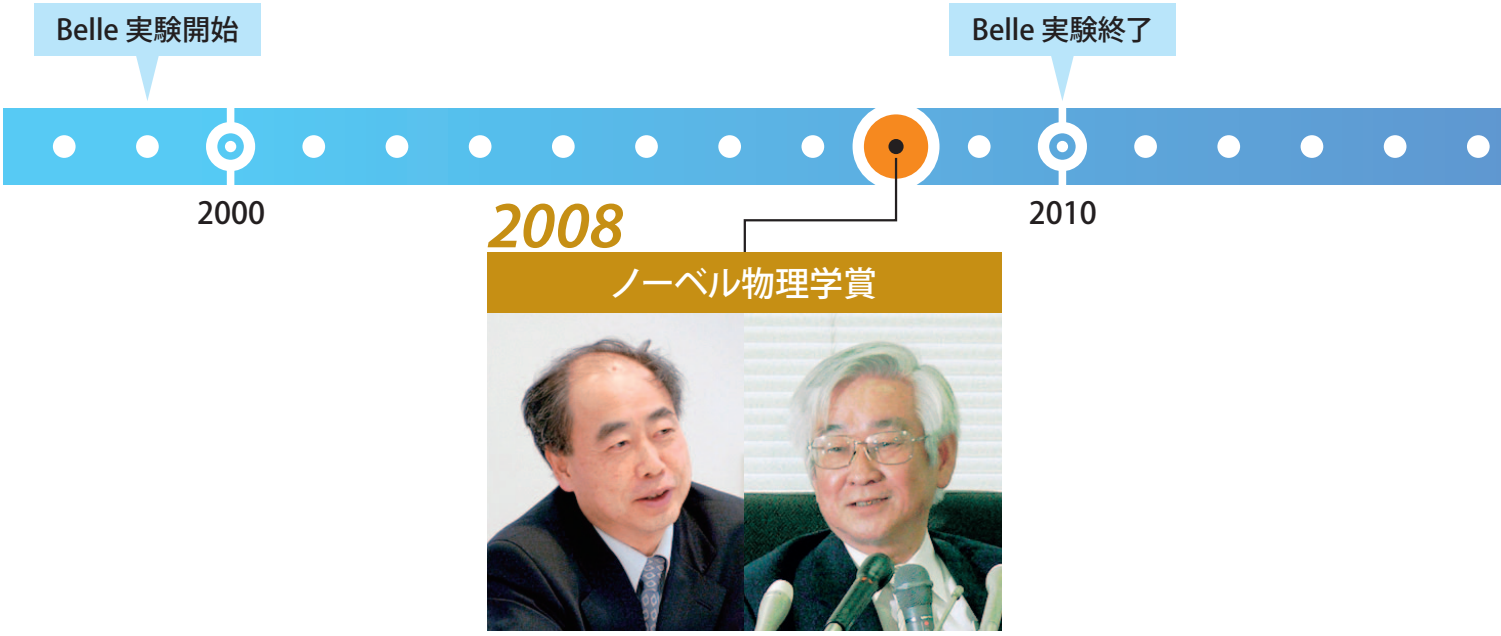


SuperKEKB加速器

SuperKEKB 加速器は周長約 3km の円形加速器です。前段の線形加速器で電子を 70 億エレクトロンボルト、陽電子を 40 億エレクトロンボルトのエネルギーまで加速し、円形加速器の中に入射して互いに反対方向に何度も周回させます。この電子と陽電子を、Belle II 測定器が置かれている衝突点で衝突させると、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。加速器のエネルギーは B 中間子・反 B 中間子の対が衝突によって大量に作られるように設定されており、この加速器はスーパー B ファクトリー（B 中間子をたくさん作り出す工場）と呼ばれることもあります。

SuperKEKB 加速器の前身となる KEKB 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、衝突点でのバンチ（加速された電子と陽電子はそれぞれバンチと呼ばれる固まりとなって加速器の中を周回します）の大きさを幅 20 μm（0.02 mm）高さ 100 nm（0.0001 mm）程度まで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を導入します。これによって、KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティを、また Belle II 測定器におけるデータ蓄積量に相当する「積分ルミノシティ」については 50 倍を達成します。

Belle から Belle II へ

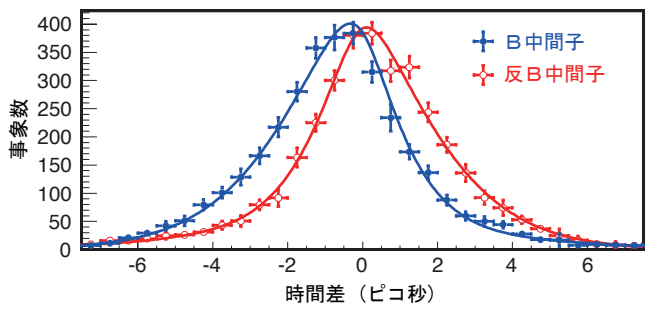


小林誠博士と益川敏英博士

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 年まで行われ、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。その研究成果のハイライトの一つが、**CP 対称性の破れ**に関する小林・益川理論の実証です。

CP 対称性というのは粒子と反粒子の入れ替えと鏡像反転という操作で物理法則が変わらないことを言いますが、1964 年にアメリカで行われた K 中間子の崩壊の測定でこの対称性が破れていることが分かりました。しかしその破れがどのようにして起こるのかは、長年の間未知のままでした。**小林・益川理論**で提唱された CP 対称性の破れのメカニズムでは　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、これを実証することを大きな目的として Belle 実験は開始されました。2001 年に、Belle 実験と、アメリカで同時期に行われていた BABAR 実験は、CP 対称性の大きな破れを発見し、ついに小林・益川理論の予言を確かめました。

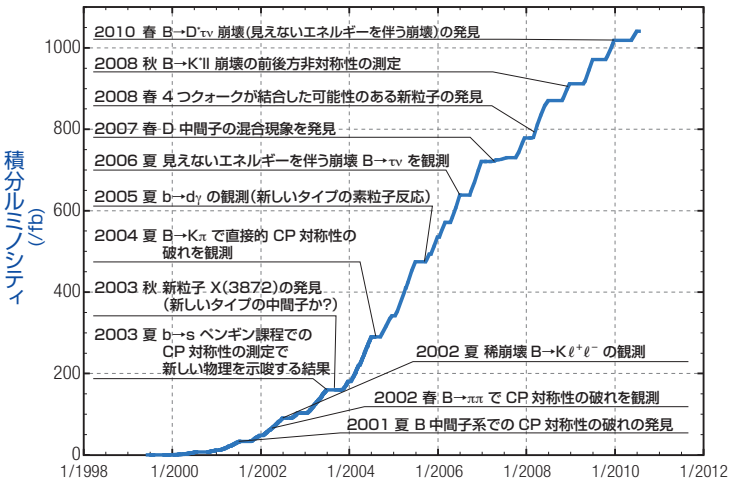


B 中間子と反 B 中間子の崩壊の時間差から CP 対称性の破れを実証しました

残された謎の解明に向けて

Belle 実験では様々な測定を行い、B 中間子の CP 対称性の破れがほぼ小林・益川理論で説明出来ることを確かめました。実験による実証を経て、小林・益川両博士は 2008 年にノーベル物理学賞を受賞されました。

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も得られています。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 実験の蓄積データ量と主な成果

2018

Belle II 実験開始

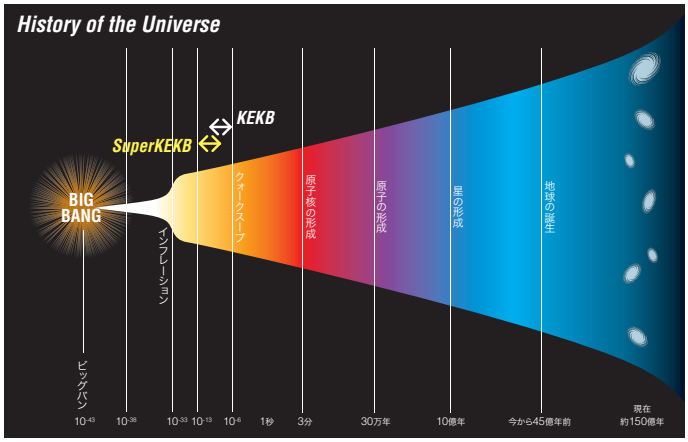
2020

20XX

Belle II 実験で
新しい物理法則の発見 ??

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 II 実験では、Belle 実験の 50 倍のデータを使った超精密測定により、新しい物理法則に従う現象を探索します。

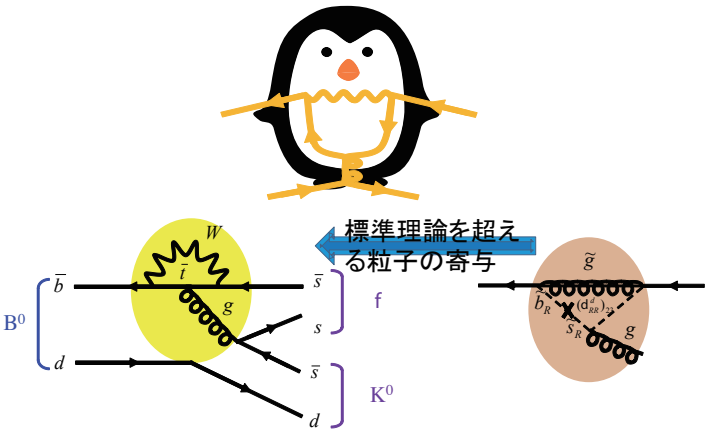


未知の粒子の探索：ペンギン崩壊

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 中間子のボトクォークが、瞬間的に他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、質量の重い未知の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。

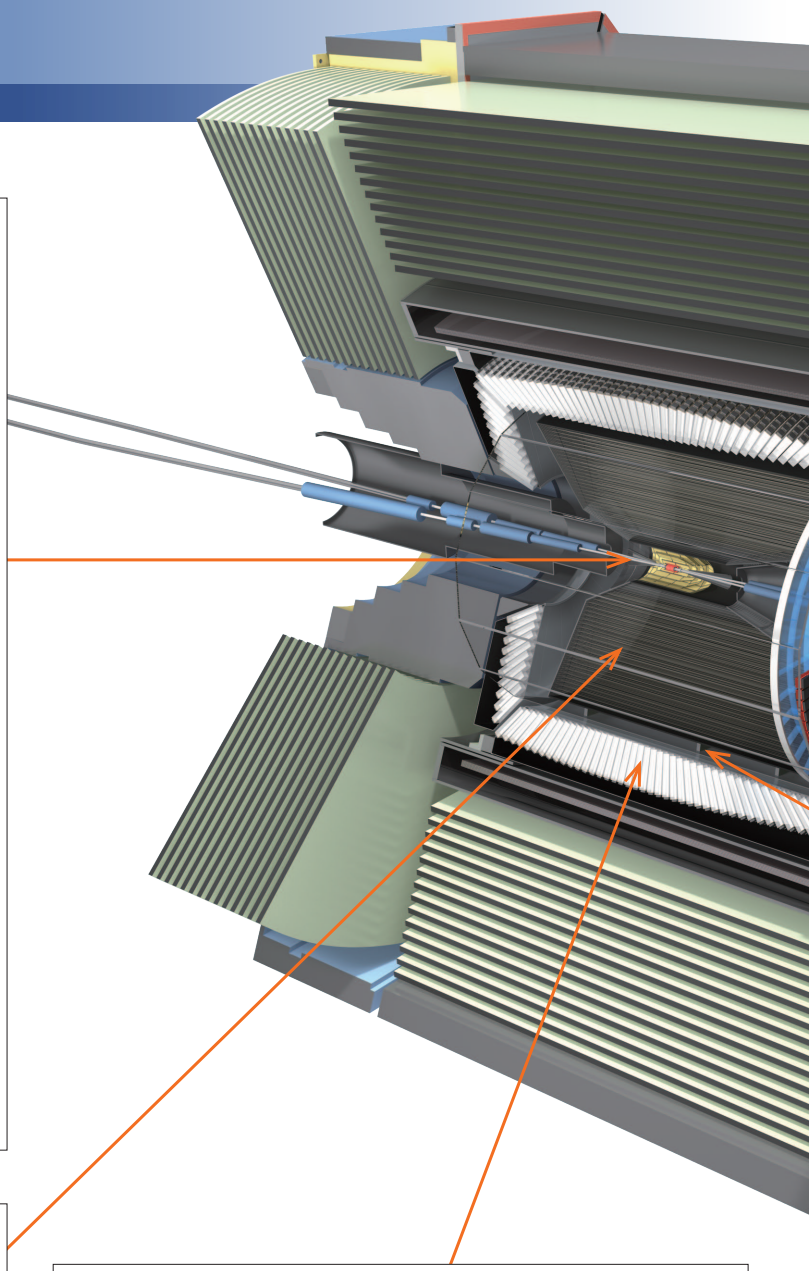
ペンギン崩壊は数万個の B 中間子の崩壊で 1 回起こるような稀な崩壊なのですが、Belle 実験でその測定が可能であることが示されました。Belle II 実験の大量のデータを使って、その性質を精密に測定し、未知の物理の影響を調べることが可能になります。

※反応のファインマン図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



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 測定器



B中間子が崩壊した場所を捉える
崩壊点検出器
Vertex Detector (VXD)

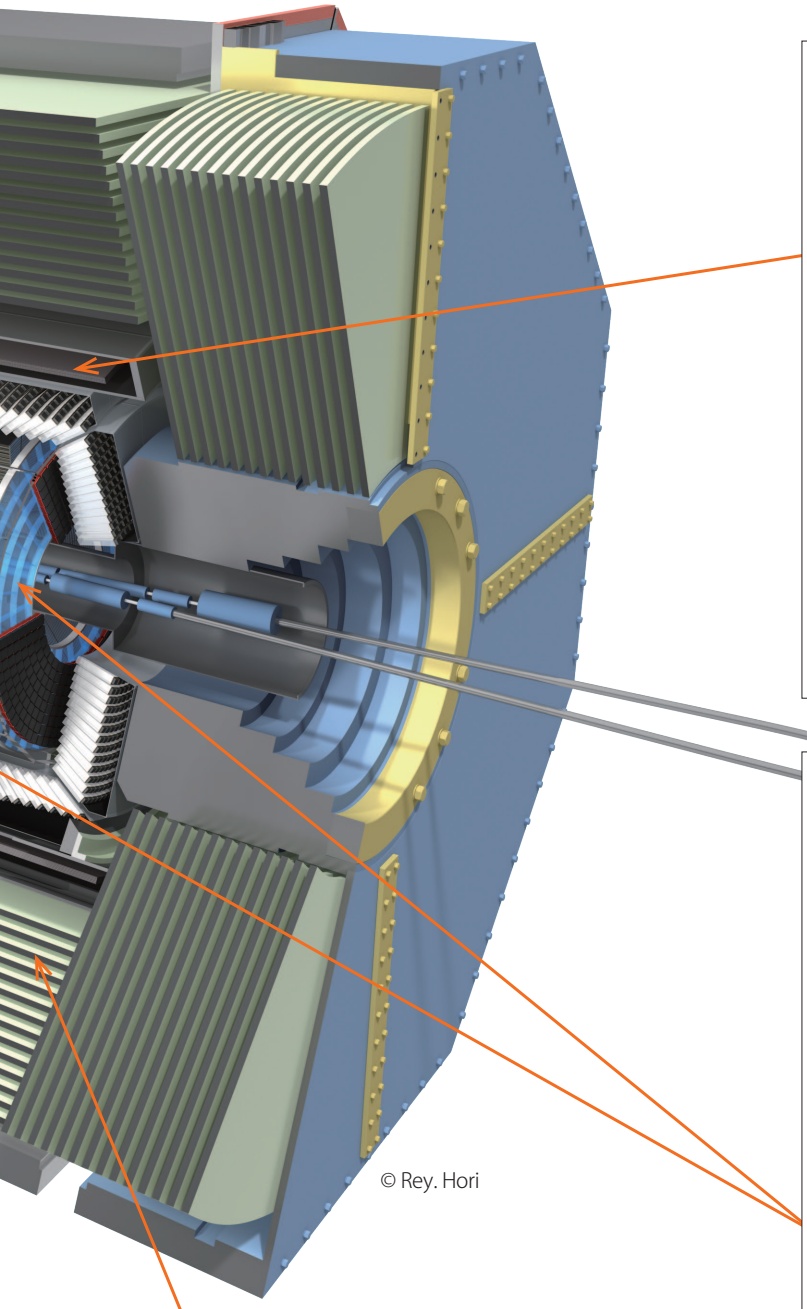
SuperKEKB 加速器で電子と陽電子のビームエネルギーに差をつけているのは、衝突で作った B 中間子が崩壊するまでに、100 ミクロン程度の距離を移動させるためです。この崩壊点の位置情報から、B 中間子の崩壊時間に関する情報を得ることができます。VXD は B 中間子の崩壊点を測定するための 2 種類の半導体センサー（PXD：ピクセル検出器、SVD：シリコンバーテックス検出器）によって構成されており、荷電粒子がシリコンを通過すると作られる電子の塊を電気信号として取り出します。Belle 測定器から Belle II 測定器への改造では、ビームパイプの内径を 3 cm から 2 cm と小さくし、ビームパイプのすぐ外側にピクセルサイズが 50 μm 角程度の PXD を搭載することで、崩壊点測定精度を 2 倍程度向上させています。また SVD はその半径を 88 mm から 135 mm へと大きくし、寿命が比較的長い K^0_S 中間子がビームパイプから飛び出してπ中間子に崩壊する過程の検出効率を、30 % 向上させることをめざします。

粒子の飛跡を漏らさずキャッチ
中央飛跡検出器
Central Drift Chamber (CDC)

Belle II 測定器の中央飛跡検出器は、半径約 1.1 m の円筒形状内に多数（56576 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。この信号をもとに再構成した粒子の飛跡から、運動量を精密に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。検出器にはヘリウムとエタンを混合したガスを充填し、ワイヤーには金メッキ無しのアルミニウム合金ワイヤーを用いるなど、物質量を極限まで抑えて粒子の軌道に影響を与えないような設計になっています。

粒子のエネルギー測定
電磁カロリメーター
Electromagnetic Calorimeter (ECL)

ECL はタリウムを添加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磁シャワーカロリメーターです。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って粒子のエネルギーが分かり、光を出した結晶の位置から粒子の到来方向が分かります。一つの結晶ブロックは 5.5 × 5.5 × 30 cm^3 位の大きさで、8736 本のブロックで衝突点を覆って粒子の入射位置を測定します。透明な結晶を用いた全吸収型カロ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。



© Rey. Hori

荷電粒子を曲げて運動量を調べる

超伝導ソレノイド電磁石

電磁カロリメーターの外側にはソレノイド型超伝導電磁石が設置され、1.5テスラの強磁場を検出器内部に作ります。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。この曲がり方の大きさから、粒子の運動量を測定することができます。電磁石はニオブ・チタン合金超伝導材を使った線材で巻かれたコイルで構成され、液体ヘリウムにより -268℃まで冷却されて超伝導状態になっています。コイル中では最大 4160 アンペアという大電流がわずか断面 3 mm × 33 mm の線材に流れています。

パイ中間子やK中間子の識別

粒子識別検出器

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

B 中間子は衝突点付近で様々な粒子に崩壊しますが、どのような粒子に崩壊したのかを見極めることが、崩壊の様子を知るうえで非常に重要です。Belle II 実験では、衝突点で発生した高速の荷電粒子が物質内を通過した際に円錐状に発する、チェレンコフ光と呼ばれる光を利用します。粒子識別検出器 TOP と ARICH は高感度の光検出器を用いてチェレンコフ光の粒（光子）一つ一つを検出し、B 中間子の崩壊で生じるπ·K 中間子について、それぞれのチェレンコフ光の輻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 の細長い石英板の輻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。輻射角度の違いは、石英板の端までのチェレンコフ光の伝搬時間（time of propagation）の差で測定されます。ARICH カウンターは、空気のような軽い固体であるシリカエアロゲルを輻射体とし、チェレンコフ光のリングイメージを光検出器のスクリーンで捉えます。二つの検出器によって、π中間子の検出効率を 97 % まで向上させるとともに、K 中間子と間違える確率を Belle の 1/5 に抑えます。

ミュー粒子、中性K中間子の検出

ミュー粒子・K^0_L粒子検出器

K^0_L 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、電気的に中性で物質と反応するまでは検出できない K^0_L 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を用い、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を使います。

Belle II 実験を支える各検出器

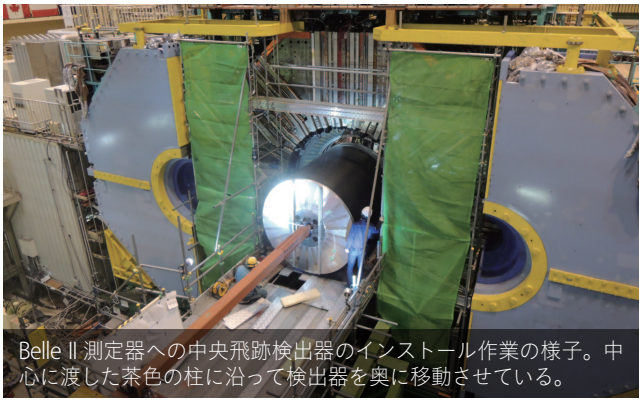
VXD（崩壊点検出器）

衝突点に最も近いところに置かれるピクセル検出器の一部。写真の中の 1 枚のセンサー表面には 40 万個近いピクセルがある。

組み立て中のシリコンバーテックス検出器

CDC（中央飛跡検出器）

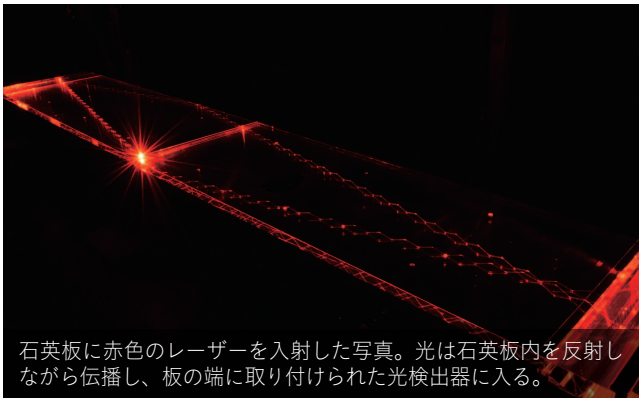
チェンバー内に約 5 万 7 千本のワイヤーを張っていく作業。



Belle II 測定器への中央飛跡検出器のインストール作業の様子。中心に渡した茶色の柱に沿って検出器を奥に移動させている。

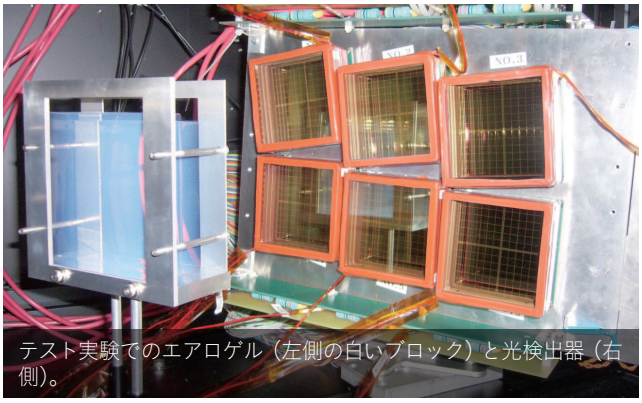
TOPカウンター

TOP カウンターの組み立ての様子。接着された石英板を吊り上げて支持構造体へ降ろしている。



石英板に赤色のレーザーを入射した写真。光は石英板内を反射しながら伝播し、板の端に取り付けられた光検出器に入る。

ARICHカウンター



テスト実験でのエアロゲル（左側の白いブロック）と光検出器（右側）。

完成間近の ARICH 検出器。左のエアロゲル部分と右の光検出器部分をこれから合体させるところ。

ECL（電磁カロリメーター）

CsI 結晶とフォトダイオード。このような結晶のブロックを 8736 本並べて、衝突点の周りを覆う。

エンドキャップ側の電磁カロリメーターを吊り上げて Belle II 測定器に取り付けようとしている。

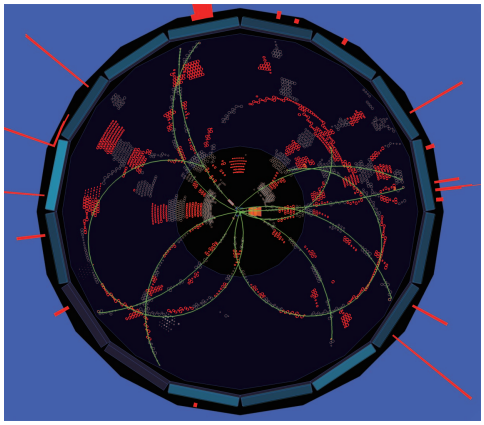
KLM（ミュー粒子・K^0_L粒子検出器）

KLM 検出器の一部。放射線に反応して光を出す棒状のプラスチックシンチレーターを敷き詰めて一枚のプレートが構成される。

KLM 検出器のインストールの様子。シンチレーターが入っている黄色のプレートを、水色の構造体に差し込もうとしている。

電子・陽電子ビーム初衝突の観測

SuperKEKB 加速器による電子・陽電子ビームの衝突事象が、2018 年 4 月 26 日に Belle II 検出器で初めて観測されました。Belle II 実験にとって重要なマイルストーンであり、これによって B 中間子の崩壊といった物理データの収集を開始することが出来ました。



電子・陽電子ビームの衝突で生じた粒子の崩壊の様子を Belle II 検出器で捉えたイベントディスプレイの画像（黄緑の線はデータより再現した粒子の飛跡）

ビーム初衝突のイベントを観測し、喜びもひとしおの Belle II 実験コントロールルーム

最新の情報技術を用いたデータ処理

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。専用に開発されたハードウエアにより、事象が生じてから約 4.5 マイクロ秒で素早く取捨選択の判断を行い、トリガーを発行します。

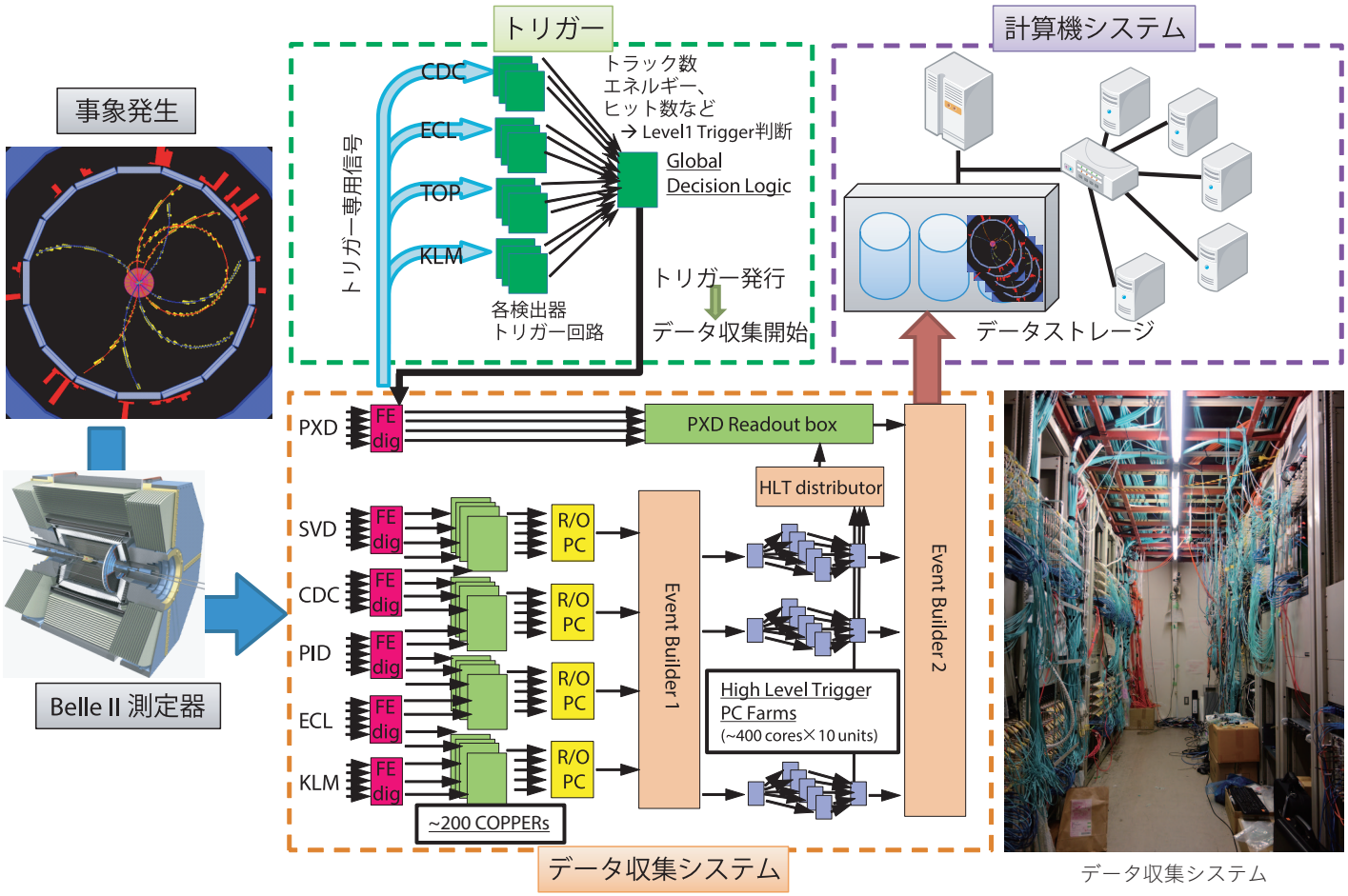
データ収集システム

全検出器のデータをとりまとめて記録

トリガーによりデータ収集が開始され、Belle II 測定器を構成する各検出器から大量のデータが送られてきます。こ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 200 枚の汎用読み出し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。数百台のコンピュータ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 ギガバイト程度に減らして記録します。



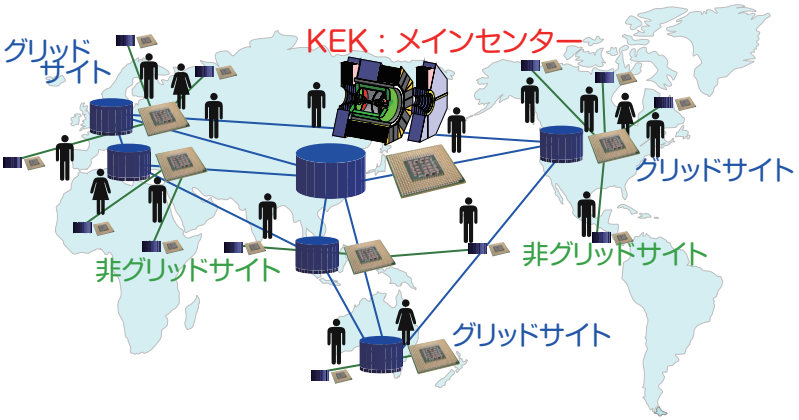
データ収集システム

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年間で最大数 10 ペタバイト（DVD 約 200 万枚に相当）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 10,000 コアの CPU、13 PB のディスク、最大 70 PB の容量を持つ階層型ストレージシステムを導入しています。



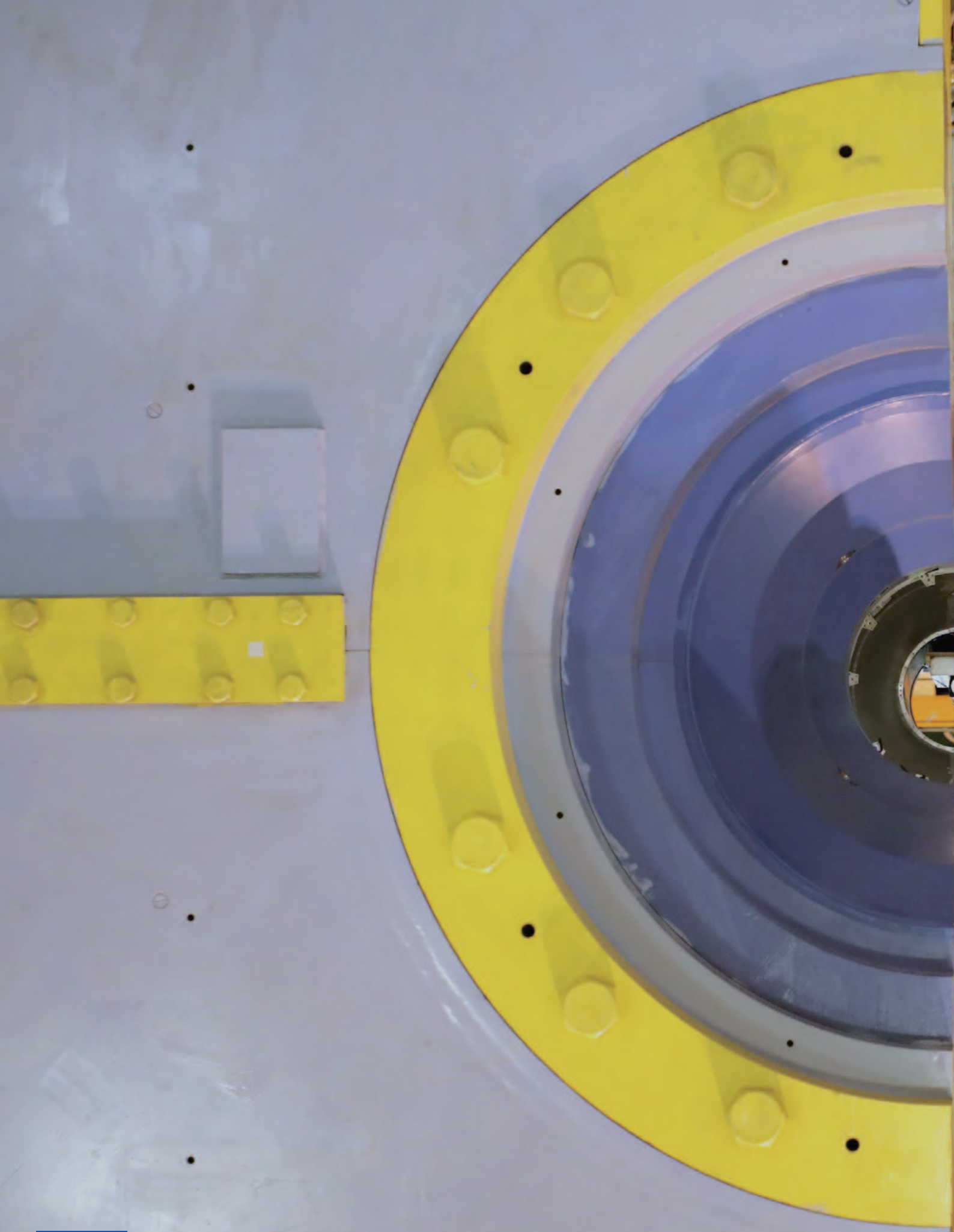
分散型計算機環境（グリッド）の模式図

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 2023 年 8 月現在、27 の国と地域の 124 の大学・研究機関に所属する 1100 人を超える研究者が参加する国際共同実験です。そのうち実験のホスト国である日本の大学・研究機関からは約 180 人が参加しており、世界各国の研究者とともに Belle II 実験での物理研究を進めています。

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ます。



Belle II実験グループ
http://belle2.jp/
公式日本語twitter : @belle2japan
公式日本語Facebook : belle2japan

大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構　素粒子原子核研究所
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1
http://www.kek.jp/

2023. 08