

宇宙の創生に迫る！ SuperKEKBプロジェクト

高橋 将太
Takahashi Shota

標準理論を越えて

私たちの身の周り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」から出来ていることが分かっています。そして、その素粒子の種類やふるまいは「標準理論」という理論にまとめられています。

2012年のヒッグス粒子の発見により、標準理論で予言されていた粒子はすべて発見されました。これで標準理論が完成し、めでたし、めでたし！...となったかという、そんなことはありません。

近年では、暗黒物質やニュートリノ振動のように標準理論の枠組みにはまらない現象が確認されたり、KEKで行ったBelle実験の結果からも標準理論からのずれを示唆する兆候も得られていたり、標準理論が完璧ではないことが分かっています。

標準理論が不完全であるということは、そこに私たちのまだ知り得ない「新しい物理」があることを示唆します。新物理の存在を確かめるためには、Belle実験を大幅に上回る大量のデータを扱った精密測定が必要となります。

KEKBからSuperKEKBプロジェクトへ

2010年6月30日午前9時、KEKBプロジェクトが終了しました¹。1999年に本格稼働を始めた本プロジェクトは、電子と陽電子をほぼ光の速さまで加速して衝突させ、膨大な数のB中間子を生成する「Bファクトリー」と呼ばれる素粒子実験の1つです。

¹ 得られたデータの物理解析は継続中です

KEKの「Bファクトリー」ということで、「KEKB(ケックビー)」と呼ばれています。

B中間子の崩壊の様子を詳細に調べることで、粒子と反粒子のふるまいの違いを表す「CP対称性の破れ」や新粒子の発見など、素粒子物理学における数々の重要な成果をあげてきました。

SuperKEKBプロジェクトは、KEKBプロジェクトを高度化する計画です。加速器の性能を40倍にパワーアップし、収集データ量も50倍に増やすことでKEKBプロジェクトでは到達できなかった新物理の発見に挑戦します。

SuperKEKB 加速器

SuperKEKB加速器は周長約3kmの電子パイプと陽電子パイプを使った衝突型円形加速器です。

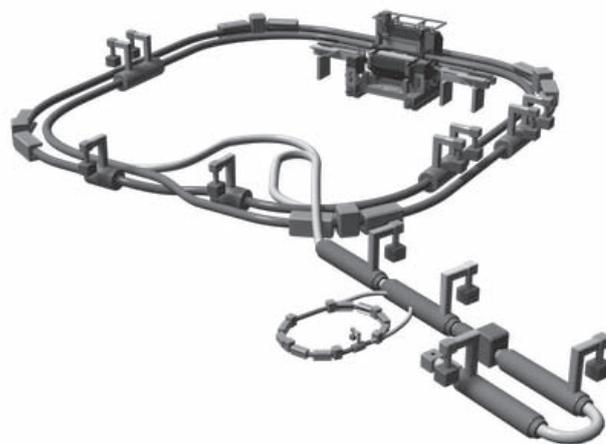


図1 SuperKEKBプロジェクト全体の概要図

SuperKEKB加速器は周長約3kmの主リング2本で構成され、その衝突点にはBelle II測定器が設置されます。また、前段入射器として約600mの線形加速器を利用します

衝突点で電子と陽電子を衝突させ、宇宙初期に起きたとされる素粒子の様々な反応を大量に引き起こします。図1に概要図を示します。

衝突を起こす頻度の指標を「ルミノシティ」と呼び、これは加速器の重要な性能の1つです。前身のKEKB加速器は2009年に $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のルミノシティに到達し、現在でも世界最高記録を保持しています。

SuperKEKB加速器は、KEKB加速器で使ったトンネルや加速空洞などの資産を最大限活用しつつ、「ナノビーム・スキーム」と名付けた、電子と陽電子のビームサイズをこれまでの約20分の1であるナノメートルサイズまで絞り込む方式を採用したり、ビーム電流を2倍に増強したりするための最先端技術を導入。KEKB加速器の40倍のルミノシティである $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を目指します。

Belle II 測定器

Belle II 測定器はSuperKEKB加速器の衝突点の周囲を覆う、高さ・幅・奥行がそれぞれ約8m、質量約1,400tの巨大な粒子測定器です。

衝突点で生成されたB中間子は、1兆分の1秒ほどのわずかな時間で、より質量の軽い粒子へと崩壊します。それらの粒子を逃すことなく捉えるために、7つの検出器群と超伝導ソレノイド電磁石を、ビームパイプを軸に層状に重ねた、バウムクーヘンのような構造となっています。

SuperKEKB加速器のルミノシティ増強によって

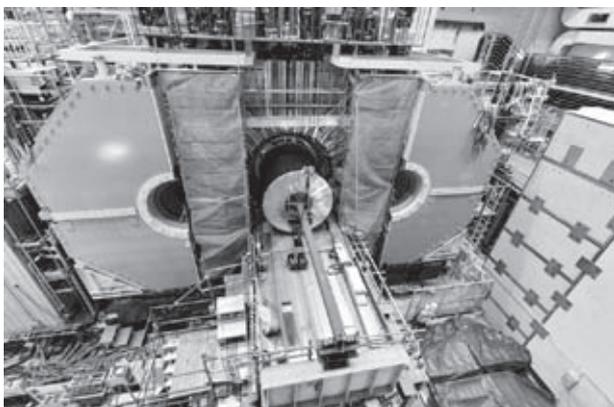


図2 2016年10月に行われた中央飛跡検出器の据え付け作業の様子

このように2017年末のBelle II測定器コミッショニングに向けて、アップグレード作業が大詰めを迎えています。©KEK IPNS/Belle II.

イベントレートは30 kHzへと増加し、ビーム由来のバックグラウンドレートも大幅に増加することが予測されます。これまでと桁違いの高レート環境に耐えられるように、検出要素を高精細化するという設計指針の下、ほとんどすべての検出器群をアップグレードしました。次の節からは、それぞれの検出器群の特徴とBelle測定器から改良された点について簡潔に解説します。

現在は、2017年末に予定されているBelle II測定器のコミッショニングに向けて、着々と据え付けが進められています。図2は、昨年10月に行われた中央飛跡検出器の据え付け作業の様子です。

崩壊点検出器

崩壊点検出器(Vertex Detector; VXD)は、B中間子が崩壊した場所を精密に測定する、実験の鍵となる検出器です。「ピクセル検出器(Pixel Detector; PXD)」と「シリコンバーテックス検出器(Silicon Vertex Detector; SVD)」と呼ばれる2種類の半導体センサーを採用し、PXDが2層、SVDが4層の全6層で構成されています。

PXDはBelle II測定器で導入される新型検出器です。高いビームバックグラウンドでも高精度な崩壊点測定を実現するため、衝突点から約20mmの近傍に設置することで、測定精度が約2倍に向上すると見込まれています。また、SVDはBelle測定器のものよりも半径方向に一回り大きくしました。これらVXDは、2018年末頃の物理測定開始の際に導入されます。

中央飛跡検出器

中央飛跡検出器(Central Drift Chamber; CDC)は、荷電粒子の飛跡を測定し、運動量の決定、エネルギー損失測定による粒子識別、さらには飛跡情報による事象選択トリガーを生成するための検出器です。

Belle測定器と同タイプの、ヘリウムとエタンの混合ガスを使用するドリフトチェンバーを採用していますが、高バックグラウンドに対処するために、内側に近い数層のワイヤー間隔を小さくするなどの最適化と、読み出し回路も刷新することで不感時間を短縮しています。また、使用したワイヤーの総延

長は 100 km にもなります。ワイヤー張りはすべて手作業のため、張り終えるのに約 1 年半かかっています。

電磁カロリメーター

電磁カロリメーター (Electromagnetic Calorimeter ; ECL) は、電子や光子など、電磁シャワーを起こす粒子のエネルギーを測定する検出器です。数十 MeV から数 GeV までの幅広いダイナミックレンジに対して、高いエネルギー分解能が要求されるため、結晶シンチレータを使った全吸収型カロリメーターを採用しています。

ECL で使用する結晶シンチレータは、タリウムを添加したヨウ化セシウム結晶で、Belle 測定器からの変更はありませんが、シンチレータ光の減衰時間が $1.3\mu\text{s}$ と長いため、バックグラウンドレートの増加に伴う信号のパイルアップが問題になります。その対策として、波形信号をそのまま読み出す方式に変更しました。

粒子識別検出器

パイ中間子と K 中間子を識別する検出器と、中性 K 中間子とミュー粒子を識別する検出器があります。

パイ中間子とK中間子を識別する検出器

パイ中間子と K 中間子を識別する検出器は 2 種類あります。エンドキャップ部分に設置される「ARICH カウンター」とバレル部分 (測定器の中央胴体部) に設置される「TOP カウンター」で、どちらの検出器もリングイメージ型チェレンコフ検出器 (RICH 検出器) です。荷電粒子の速度が物質中の光速を越えていると、進行方向前方に円錐状のチェレンコフ光を放出します。パイ中間子と K 中間子が放射するチェレンコフ光の放射角度の違いを測定して粒子を識別します。

Belle 測定器では、チェレンコフ光の有無を数える閾値型カウンターでしたが、Belle II 測定器ではリングイメージ型にすることで、通過粒子に関する情報量を増やし、より正確な粒子識別を可能にします。これらの検出器により、パイ中間子と K 中間子と間違える確率を Belle 測定器の 1/5 に抑えます。

中性K中間子とミュー粒子を識別する検出器

中性 K 中間子 / ミュー粒子識別検出器 (K_L^0 and Muon Detector; KLM) は、Belle II 測定器の最外層に位置する検出器で、内部の検出器とは反応しない中性 K 中間子とミュー粒子を捉えます。鉄板と検出器を交互に並べたサンドイッチ構造をしており、Belle II 測定器の質量の大部分を占めています。

Belle 測定器の結果から、バレル部の内側の層とエンドキャップ部はバックグラウンドレートが高くなるのが分かっているため、不感時間がなくなるように、応答の早いプラスチックシンチレータを使った検出器に交換しました。

超伝導ソレノイド電磁石

超伝導ソレノイド電磁石は、Belle 測定器のものを再利用し、カロリメーターの外側に設置されています。大きさは外径 2.2 m、内径 1.7 m、長さ 4.4 m の円筒形で、1.5 テスラの強磁場を Belle II 測定器の内部に形成します。荷電粒子は、この磁場によるローレンツ力を受けるため、螺旋軌道を描きます。このときの螺旋の向きや曲がり具合から、通過した粒子の電荷や運動量を求めることができます。

データ収集システムとコンピューティング

ルミノシティ増強により、データ収集システムと物理解析のためのコンピューティングにも大規模な増強が必要になります。

衝突頻度の増加と検出器を高精細化した結果、検出器からのデータ転送量は 1 秒間に最大 30 GB という膨大な量となり、そのまますべてを記録することは現実的ではありません。そこで、通常であれば記録したデータに対して行うような事象選択をリアルタイム処理で実現し、データ量を毎秒 1 GB 程度までに削減します。

リアルタイムの事象選択を経て、記録することになったデータは解析処理用計算機へ送られます。Belle II 実験では取り扱うデータ量が大幅に増えるため、世界中に分散している計算機をネットワークで有機的に繋ぎ、その上で解析する分散計算環境を採用しました。

Belle II 国際コラボレーション

SuperKEKB プロジェクトは、大型加速器 SuperKEKB と大型粒子測定器 Belle II からなる巨大プロジェクトです。日本だけでなく世界 23 の国と地域から約 700 名の共同研究者が参加する、国内でも類をみない大規模な国際共同研究プロジェクトです。図 3 は、2017 年 2 月に開催されたその全体会議の際に撮影された集合写真です。

2016 年 2 月から 6 月にかけて加速器の試運転を行い、想定以上の順調な成果を得ています。4 月 11 日には「ロールイン作業」を行い、測定器と加速器を一体化させるマイルストーンを達成。アップグレード作業もいよいよ大詰めを迎え、2017 年末の測

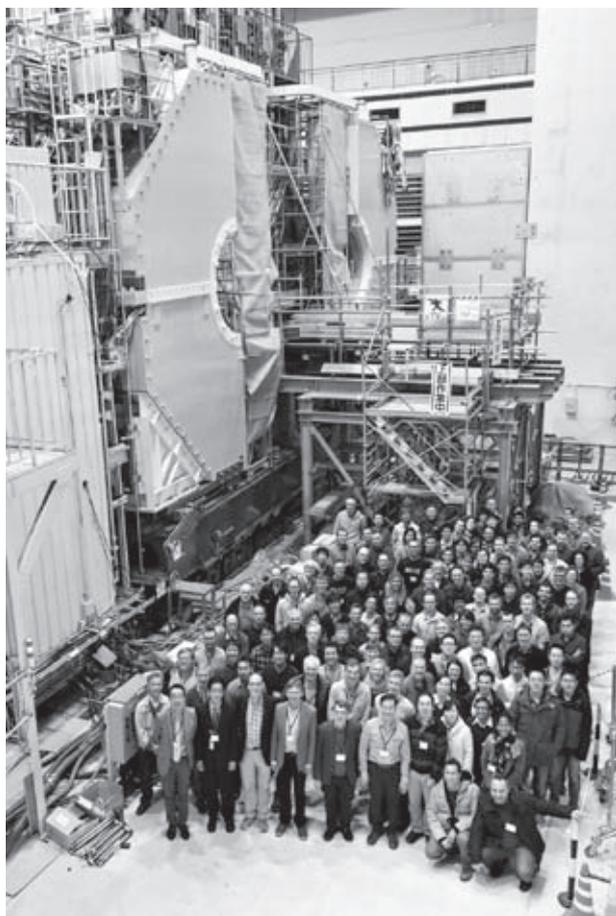


図 3 Belle II 国際コラボレーションの集合写真

2017 年 2 月 6 日から KEK で行われた全体会議の期間中に撮影。©KEK IPNS / Belle II

定器コミッショニングを経て、2018 年に物理測定を開始する予定です。今後も本プロジェクトの動向にご注目ください！

公式サイトからの情報発信

Belle II 国際コラボレーションは、一般向けウェブサイトと Facebook・Twitter を使って最新情報を発信しています。また、KEK の YouTube チャンネルで実験紹介 PV も公開しています。本稿を読んで興味を持たれた方はぜひフォローをお願いします。

- ・ Belle II 実験 公式サイト - belle2.jp
- ・ belle2japan - Facebook
- ・ @belle2japan - Twitter
- ・ Belle II 実験「新物理への扉」 - YouTube

参考文献

本稿を執筆するにあたり、高エネルギー物理研究者会議が発行する「高エネルギーニュース」への Belle II 実験の共同研究者による一連の寄稿が大いに参考になりました。以下に、参考にしたバックナンバーを挙げておきますので、もっと詳しく知りたいという方はご参照ください。

- ・ 飯嶋徹他, 高エネルギーニュース, Vol.29 (No.4) 201-213 (2011)
- ・ 小磯晴代, 高エネルギーニュース, Vol.30 (No.3) 193-197 (2011)
- ・ 谷口七重, 高エネルギーニュース, Vol.32 (No.4) 241-246 (2014)
- ・ 住澤一高, 高エネルギーニュース, Vol.33 (No.1) 27-31 (2014)
- ・ 宮林謙吉, 高エネルギーニュース, Vol.33 (No.2) 108-114 (2014)
- ・ 伊藤領介他, 高エネルギーニュース, Vol.33 (No.3) 196-204 (2014)
- ・ 原隆宣, 高エネルギーニュース, Vol.34 (No.1) 13-18 (2015)
- ・ 海野祐土他, 高エネルギーニュース, Vol.34 (No.2) 105-114 (2015)
- ・ 森井友子他, 高エネルギーニュース, Vol.35 (No.2) 97-101 (2016)
- ・ 鈴木一仁他, 高エネルギーニュース, Vol.35 (No.3) 155-166 (2016)
- ・ 《Belle II 測定器ロールイン》世界最強加速器と合体～KEK × niconico 実況生中継

(高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
素粒子原子核研究所 広報コーディネータ)