

【リリース日時】

平成 30 年 4 月 26 日 午前 7 時

【本件リリース先】

文部科学記者会、科学記者会、筑波研究学園都市記者会



平成 30 年 4 月 26 日

報道関係者各位

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

SuperKEKB加速器で電子・陽電子の初衝突を観測 — Belle II 測定器による実験がスタート —

本発表のポイント

○ 3 月下旬に本格稼働した日本最大の粒子加速器 SuperKEKB^{*1} の衝突点に設置した Belle II 測定器 (図 1) で、電子・陽電子の初衝突 (ファースト・コリジョン) を意味するハドロン事象^{*2} などが初めて観測されました。

○ Belle II 測定器は、SuperKEKB 加速器が目指す 40 倍のルミノシティ^{*3} (衝突頻度) でも威力を発揮するように改造されており、およそ 10 年の運転期間内に、これまでの 50 倍となる 500 億事象の B 中間子対生成を含む衝突反応データが収集される見込みです。

○ これにより、新しい素粒子の存在を示唆する証拠や、反物質が物質より少ないことを説明する新たな根拠など、これまでの素粒子物理学の理論 (標準理論) を超える新しい物理法則の発見が期待されています。

【概 要】

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は、これまでの世界最高記録の 40 倍のルミノシティ (衝突頻度) を生み出す電子・陽電子の衝突型加速器 SuperKEKB と、衝突点に設置した新生 Belle II 測定器により、新しい物理法則の探索を行う国際共同プロジェクトをホストしていますが、4 月 26 日 午前 0 時 38 分に初めての電子・陽電子の衝突が観測されました。

SuperKEKB 加速器は、小林誠・益川敏英両博士のノーベル物理学賞受賞に結びつく成果を残した KEKB 加速器 (1999 年から 2010 年まで運転) を大幅に改良したものです。衝突点に設置された新生 Belle II 測定器の中心部で、電子と陽電子を衝突させ、対生成される B 中間子・反 B 中間子、D 中間子・反 D 中間子、 $\tau^+ \cdot \tau^-$ などの崩壊を、KEKB/Belle 時代の 50 倍 (B 中間子対 500 億事象に相当) も生み出し、その様子を詳しく分析することを計画しています。

SuperKEKB 加速器は 2016 年 2 月から約 5 ヶ月間、衝突なしでビームを調整し、Belle II 測定器を導入可能な環境に整えるためのフェーズ 1 運転を行った後、2017 年春には Belle II 測定器を衝突点にロールイン。秋から冬にかけて、ビーム衝突点用超伝導電

磁石 (QCS) を両側から挿入して合体させるとともに、陽電子ビームの広がり小さくするためのダンピングリングの立ち上げ調整などを行い、今年3月19日からフェーズ2運転をスタートさせました。その後、3月21日に電子リング、3月31日に陽電子リングへのビーム蓄積 (定常的にビームがメインリングを周回する状態) を達成し、両方のビームを安定させながら衝突点で絞り込み、電子ビームと陽電子ビームのタイミングと軸を合わせる調整を、数週間かけて慎重に進めて来ました。

SuperKEKB 加速器の準備が整ったことを受け、Belle II 実験グループは25日午後10時過ぎ、Belle II 測定器の中央飛跡検出器 (CDC) をはじめとする検出器群の電圧を上昇させて観測を開始。初めのうちは電子・陽電子がビームガスに当たって起きるイベントが多く、反応の様子を表示するコンピュータ画像「イベントディスプレイ」で初衝突を確認できませんでしたが、2時間半後の26日午前0時38分、多数の粒子が飛び散る反応が確認され、「ハドロン事象^{*2} (図2) が起きたと見られる」と判断しました。これと前後し、電子、陽電子が衝突点でぶつかり、ほぼ反対方向に飛び散る Bhabha 散乱^{*2} と見られる反応も観測されました。

SuperKEKB プロジェクトは、KEK がホストし、25 カ国・地域の研究者 750 人以上で組織する Belle II 実験グループで運営されています。実験グループは今後、今年7月までフェーズ2運転を継続し、SuperKEKB 加速器の調整と Belle II 測定器でのデータ収集を続ける予定です。また、夏から秋にかけ、Belle II 測定器の中心部に搭載中のビームバックグラウンド測定装置 (BEAST) から、本番用の崩壊点位置検出器 (VXD) への交換作業などを行い、2019年2月から予定されているフェーズ3運転 (本番の物理ラン) に備える計画です。

【背景】

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。これまでの研究でクォーク、レプトンともに3世代、6種類見つかっています。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。

クォークは単独では存在せず、強い力でクォークと反クォークが結びついた中間子、三つが結びついた陽子や中性子など (バリオン) といった形態で現れます。B中間子は反ボトムクォークと他のクォークが結びついたもので、いくつかの種類が確認されています。

〈消えた反粒子の謎〉

これらすべての素粒子には、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つ「反粒子」が存在します。粒子と反粒子が出会うとエネルギーの塊となり、消えてしまいます。宇宙誕生の直後には粒子と反粒子は同じ数だけ存在したはずですが、なぜか日常世界には粒子から構成させる物質だけしかなく、なぜ反粒子が消えてしまったのかは、大きな謎です。

〈CP対称性の破れ〉

粒子と反粒子の違いを探る上で注目されたのがCP対称性の破れです。CP対称性とは、粒子と反粒子を入れ替え、空間を反転させても区別がつかない性質のことで、当時の素粒子理論では「CP対称性は保存される」と信じられてきました。ところが、1964年、中性のK中間子の実験でCP対称性が破れていることが発見され、多くの物理学者がこれを説明するための理論に苦労する中で、小林誠博士、益川敏英博士がある理論を発表しました。それは、クォークが3世代（6種類）あり、異なる世代のクォークの混合があれば、CP対称性の破れを説明できる、とするものでした。

後に行われた実験などにより、小林・益川理論が正しければ、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明らかになりました。これらを検証する目的で、B中間子を使ったKEKB加速器によるBelle実験、アメリカSLAC国立研究所のBaBar実験が行われ、2001年にKEK、SLACが相次いで出した成果により、小林・益川理論の正しさを実証、二人の2008年ノーベル物理学賞の受賞が実現しました。

しかし、確認されたCP対称性の破れの大きさだけでは、宇宙が物質優位になることを全て説明することができません。標準理論が我々の宇宙を規定するには不完全であることはよく知られており、その理解のためには未知の物理法則を解明する必要があります。実際、未知の物理法則の存在を示唆するような兆候が、Belle実験の一部の結果から得られています。これらを確認するには、Belle実験を大幅に上回る大量のデータが必要不可欠です。SuperKEKB加速器は、こうした物理実験サイドの要望に応え、40倍のルミノシティを実現するための設計を行いました。（3月23日付けプレスリリース「『SuperKEKBプロジェクト』加速器が本格稼働しました」

<https://www.kek.jp/ja/newsroom/2018/03/22/0900/>を参照)

【新生 Belle II 測定器を使った実験】

Belle II 測定器は、SuperKEKB加速器の衝突点の周りを覆う、重さ1400トンの巨大な装置（縦、横、高さは約8メートル）で、いわば素粒子反応を観察する超高精度の「カメラ」です。内部は、中心部からPXD（ピクセル検出器）とSVD（シリコンバレーテックス検出器）から成るVXD（崩壊点位置検出器）、CDC（中央飛跡検出器）、TOPカウンター、エアロゲルRICHカウンター、電磁カロリメーター、ミュー粒子・中性K中間子検出器と、複数の検出器で構成され、電子、陽電子の衝突で生まれたB中間子の崩壊で生じる粒子が飛び出した軌跡を検出し、それらの運動量やエネルギーを測定。さらに π 中間子、K中間子、電子、ミュー粒子、光子などの粒子を識別する機能があります。

B中間子は、わずか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が、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、Belle II 測定器で捉えたデータを解析することで、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。

〈時間・空間的に微細な測定ができるように改造〉

Belle II 測定器では、SuperKEKB加速器のルミノシティが40倍になることに伴い、すべての検出器のデータ収集速度を従来の60倍にあたる毎秒3万回へと高速化し、より多くのデータを集められるようにしました。さらに、増えることが予測されるバックグラウンド（ノイズ）と本来の信号を区別するため、検出器を構成する素子を細分化し、時間的・空間的により微細に測定できるように改造しました。同時に測定器本来の性能である崩壊点位置の特定や、粒子を識別する能力も大きく改良しています。

例えば、VXD（崩壊点位置検出器）では、直径3センチだった衝突点のビームパイプを直径2センチに細くし、衝突点のより近くにPXD（ピクセル検出器）という高精度半導体センサーを新たに設置します。これにより、ノイズ対策に効果が上がるとともに、粒子が崩壊する位置の測定精度が2倍程度に向上する見通しです。さらに、PXDを覆うSVD（シリコンバーテックス検出器）の半径を88ミリから135ミリに拡大し、ノイズ対策と、電荷を持たないため検出器にかからない中性K中間子が関与する反応モードの検出効率改善を両立させました。（フェーズ2では、VXDの代替品・BEASTを搭載。詳しくは【概要】及び【本研究の意義、今後への期待】に記載。）

TOPカウンターとエアロゲルRICHカウンターは、区別が難しかった π 中間子とK中間子を見間違える確率を5分の1程度に減らし、より精密な測定を可能としています。

〈25カ国、750人以上の研究者がタッグを組んで取り組む〉

Belle II 実験には、日本などのアジア・オセアニアや欧米、ロシア、中東など世界25カ国と地域から750人以上の研究者が参加し、これまで測定器の設計や組み立て、試験、調整など多岐にわたる準備を行ってきました。データ収集後のデータ処理についても、KEKの計算科学センターを中心に世界中の協力研究機関・大学の計算機システムをネットワークで結び、今後の物理解析を支えることになっています。

【本研究の意義、今後への期待】

現在のフェーズ2運転は今年7月まで継続され、Belle II 測定器で初めてのデータ収集が行われます。その間も電子・陽電子両ビームの調整は続けられ、順調に進めばフェーズ2運転中にもKEKB加速器の時代に記録したルミノシティの世界記録（ $2.1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）に迫る可能性があります。

また、Belle II 測定器の中心部には、本番用のVXD（崩壊点位置検出器）の代わりに、検出器の一部とビームバックグラウンドなどを測定するBEASTが設置されており、これを本番用のVXD（崩壊点位置検出器）に交換する作業も残されています。これらが終了すれば、いよいよフェーズ3運転（物理ラン）が始まる予定です。

フェーズ2及びフェーズ3運転で期待される成果について紹介します。

〈高いルミノシティで宇宙創成期に近づく〉

Belle II 実験では、宇宙初期の現象を探るため、B中間子の崩壊に現れる瞬間的な超高エネルギー状態を利用します。量子力学の不確定性原理によると、非常に短い時間内では、高いエネルギー状態になることが許されています。そこでは、B中間子のボトムクォークが崩壊する際に、瞬間的に高いエネルギー状態になり、仮想的に質量の重い粒子を作り出した後に、別の粒子群に崩壊することも可能になります。この崩壊の特徴を利用すると、未知の重い粒子の影響を調べることができます。

ただし、超高エネルギー状態を経由するようなB中間子の崩壊は、ごく稀にしか起きないので、なかなか観測することができません。しかし、もし、非常に膨大な数のB中間子を作り出すことができれば、稀にしか起こらない、超高エネルギー状態の僅かな効果でも、観測することが可能になります。

SuperKEKB加速器とBelle II 実験の目標は、非常に高いルミノシティを実現させて大量のB中間子を作り出し、より高いエネルギー状態、つまり宇宙の初期状態を調べる「ルミノシティフロンティア実験」です。これは、より高いエネルギーの加速器を使って未知の重たい粒子を直接生成する、CERN（欧州原子核研究機構）のLHC（大型ハドロン衝突型加速器）の「エネルギーフロンティア実験」と相補的です。

〈超対称性粒子の発見も視野に〉

標準理論において、電磁気力と弱い力が分離するエネルギースケールに対応するヒッグス粒子が予言され、2012年にCERNのLHCにおけるATLAS実験、CMS実験で実際に見つかりました。この粒子を単純な素粒子と考えると、その質量の大きさに別の観点から問題が生じます。超対称性理論はそれを解決するために提唱された新しい理論で、SUSY粒子（超対称性粒子）と呼ばれる新しい粒子群の存在を仮定します。標準理論を超える理論の中で最も有力なものとしてされており、LHCでも精力的にSUSY粒子の探索が行われていますが、未だ発見に至っていません。

大きくアップグレードしたBelle II 測定器による実験の目的は、標準理論では説明がつかない新しい物理現象の探索ですが、大量に作られるB中間子などの崩壊を詳しく調べることで、超対称性粒子など新しい粒子の存在を明らかにする可能性があります。

〈ダークマターの正体に迫る?!〉

宇宙には謎がいくつもあります。その一つが、宇宙が何で出来ているのかわからないということです。観測から判明したのは、宇宙には私たちが知っている物質は5%程度しかなく、残りの95%は暗黒物質（ダークマター）と、暗黒エネルギー（ダークエネルギー）が占めているということです。

ダークマターは直接見ることはできませんが、強い重力を持っているため、光が重力の影響で曲げられる「重力レンズ」の効果で、どこにあるかを知ることができます。それによると、ダークマターは銀河系内には遍く存在し、銀河系とアンドロメダ銀河の間にもたくさんあることがわかっています。このダークマターの正体は、未知の素粒子ではないかという説があり、SUSY粒子もその候補の一つと言われています。

また、ダークマターの候補として、光子が変化して生じるダークフォトン^{*4}の可能性も挙げられており、完成版のVXD（崩壊点位置検出器）を搭載していないフェーズ2運転の段階でも、その発見につながる手がかりが得られる可能性があります。

【山内正則(やまうち・まさのり)機構長のコメント】

7年あまりの建設期間を経て、SuperKEKB加速器における実験が始まったことを大変うれしく思うと同時に、これからこの実験からどのような結果が出て人類の自然理解がどう発展するのか、限りなく期待がふくらみます。これまでいろいろな側面からこの計画を支えてくださった方々に深く御礼申し上げます。

この加速器が自身の持つ世界記録を40倍上回る性能を達成するまでには、まだ困難が予想されますが、世界中から集まった多くの研究者と共に成功に向けて努力を重ねて参ります。

【お問い合わせ先】

〈研究内容に関すること〉

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 教授 後田 裕
E-mail: yutaka.ushiroda@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
加速器研究施設 教授 赤井 和憲
Tel: 029-879-5225
E-mail: akai@post.kek.jp

〈報道担当〉

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
広報室長 引野 肇
Tel: 029-879-6047
Fax: 029-879-6049
E-mail: press@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
素粒子原子核研究所 広報コーディネータ 中村 牧生
Tel: 029-879-6054
Mobile: 090-1420-8141
E-mail: nakamu@post.kek.jp

【用語解説】

※1. SuperKEKB加速器

KEKつくばキャンパス内の地下トンネルに設置された電子、陽電子ビームの衝突型加速器。各リングの周長約3キロメートル、深さ地下約11メートル。衝突ビームの重心系エネルギーは10.58GeV（電子ビームのエネルギーは7GeV、陽電子ビームは4GeV。1GeVは10億電子ボルト）。ビーム電流は、陽電子ビームが1.8Aから3.6A、電子ビームは1.4Aから2.6Aと、それぞれKEKB時代の約2倍を目指している。

※2. Bhabha散乱とハドロン事象

Bhabha散乱・・・電子と陽電子が衝突して起きる散乱のことで、インド人の物理学者、ホーミ・J・バーバー（Homi Jehangir Bhabha）に因んで名前が付けられた。電子と陽電子が対消滅して仮想光子を放出する場合と、電子と陽電子が対消滅せずに仮想光子を交換する場合の2通りの場合がある。

ハドロン事象・・・衝突により、ハドロンが生成・崩壊する事象を指す。ハドロンとは「強い相互作用で結合した複合粒子」という意味で、原子核を構成する陽子・中性子のようにクォーク3個から構成されるバリオンや、湯川秀樹博士の中間子論で知られる π 中間子のようにクォーク2個から構成されるメソンなどがある。B中間子の対生成事象もハドロン事象の一種である。

※3. ルミノシティ（衝突頻度）

ビーム衝突型加速器でお互いのビーム中の粒子が衝突し、起きにくい素粒子反応を単位時間あたりにどれだけ起こせるかの指標。「ルミノシティ」に、目的とする素粒子反応の「断面積」をかけると、単位時間あたりに発生する素粒子反応の総数が導き出せる。KEKB加速器のルミノシティ設計値は $1.0 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、実際にKEKB加速器が出した世界記録は $2.1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。SuperKEKB加速器は $8.0 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を目指している。

※4. 暗黒物質とダークフォトン

暗黒物質は通常物質とは異なる粒子群を構成していると考えられる。これらの粒子は標準理論とは異なる相互作用を持つために通常物質とは反応しないが、暗黒物質界のダークフォトンだけが通常物質の光子と混合して通常物質の粒子対に崩壊できるという可能性が示唆されている。

【参考図】

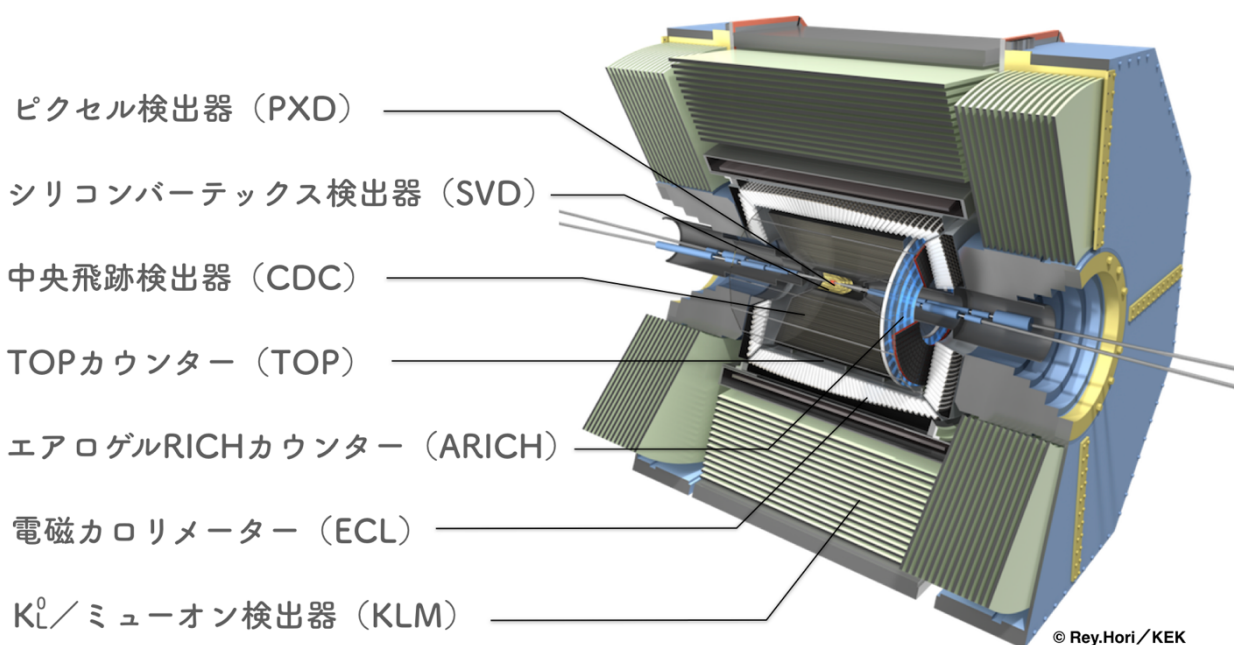


図1 七つの検出器を搭載したBelle II 測定器 (<http://belle2pb.kek.jp/Detector/>より)

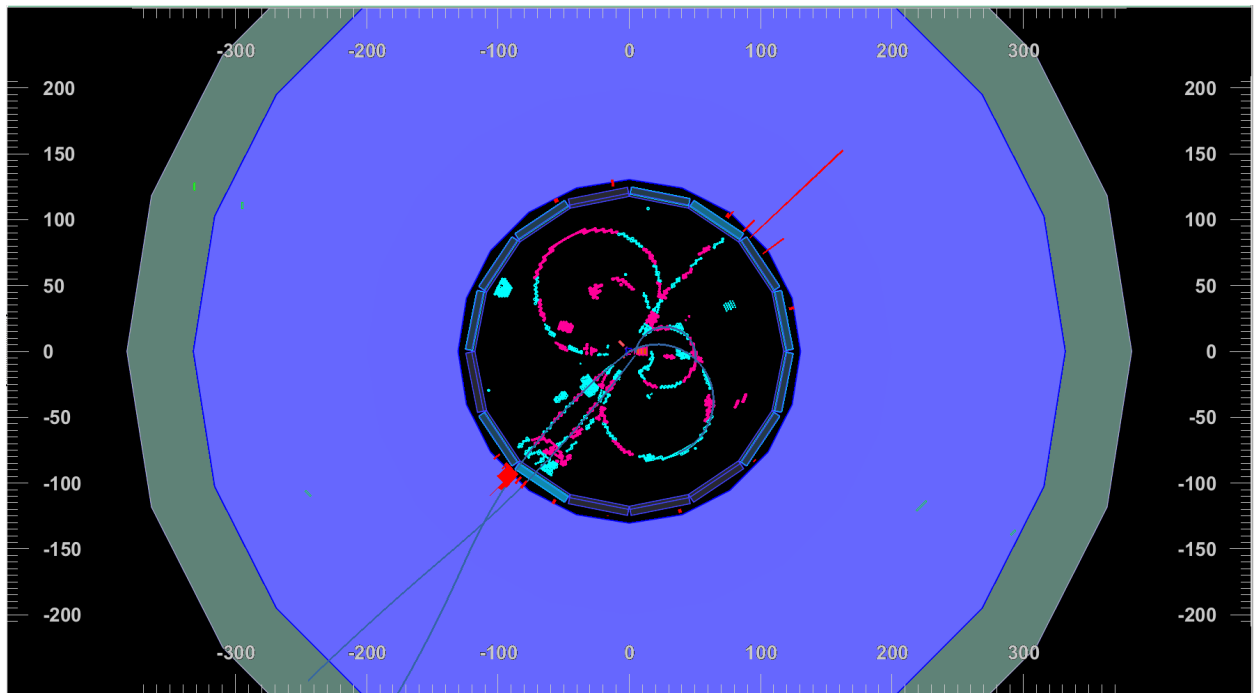


図2 イベントディスプレイに再現されたハドロン事象。ビーム中の電子 (e^-) と陽電子 (e^+) から、重い粒子が生まれ、さらに複数の軽い粒子へと崩壊していく様子が見られる。

(最新の写真・図などはKEKイメージ・アーカイブへ
<https://www.kek.jp/ja/imagearchive/>)