

令和4年11月11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

加速器で生成される電子と陽電子を超高速で見分ける技術を世界で初めて開発  
— 標準理論を超える物理を探索する実験の高効率化に期待 —

本研究成果のポイント

- ・ SuperKEKB<sup>※1</sup>加速器では、電子と陽電子を光速近くまで加速して正面衝突させるが、自然界にはわずかしかな存在しない陽電子を人工的につくる時電子も同時に混じって出て来るため、陽電子だけを効率よく分離する技術が求められている。
- ・ 電子と陽電子は数十～数百ピコ秒<sup>※2</sup>というわずかな時間差で出てくるが、新たに開発された広帯域ビームモニター<sup>※3</sup>と呼ばれる装置ではリアルタイムできれいに見分けることができ、陽電子の捕獲・分離する効率を大きく高められることがわかった。標準理論を超える物理を探索する実験のカギとなるルミノシティ<sup>※4</sup>の向上につながることを期待される。
- ・ このビームモニターは放射線量が非常に高いところでも動作するため、この技術は原子炉の炉心近くや宇宙空間といった厳しい放射線環境下での量子ビーム計測へ広く応用できる可能性がある。

【概要】

高エネルギー加速器研究機構（KEK）加速器研究施設研究グループのムハンマド・アブダル・レーマン（Muhammad Abdul Rehman）博士研究員、現中国科学院高能物理研究所（IHEP）研究員 諏訪田剛（すわだ つよし）教授は、KEK 電子陽電子線形入射器の陽電子捕獲部<sup>※5</sup>に広帯域ビームモニターを新たに設置し、電子・陽電子捕獲過程の可視化に世界で初めて成功しました。

陽電子捕獲部とは、SuperKEKB に要求される陽電子を効率よく生成し捕獲するための装置です。詳細なシミュレーションによると、陽電子捕獲部の中では陽電子だけでなく電子も同時に捕獲されます。電子と陽電子は複雑な捕獲過程を経て、電子の後に陽電子（又は陽電子の後に電子）が、加速条件に依存して 20-280 ピコ秒<sup>※5</sup>離れて走行します。両者の時間差は極めて短いので、これまでの研究では陽電子捕獲部における電子・陽電子の同時分離計測に成功した例がありませんでした。

今回、広帯域パルス計測技術を取り入れたビームモニター（図1参照）の導入により、電子・陽電子の同時分離計測に初めて成功し（図2(a), 2(b)参照）、走行時間差の定量的計測が可能になりました。図1に示すように、形状は至って単純な棒状の電極です。綿あめは細い糸状の飴ですが、箸を使うとこれをうまく絡めとることができます。この電極は、まるで綿あめの箸のように、電子・陽電子から放出される電磁気力線を超高速に絡めとることができます。この棒状電極が今回の広帯域パルス計測を実現するカギとなりました。

ビーム試験を実施したところ、電子・陽電子の走行時間差が加速位相に依存して複雑に相関していることが可視化により分かりました（図2(c)参照）。これは陽電子の高効率捕獲につながる重要な知見です。

この成果は、現在 KEK が進めている SuperKEKB や次世代の大型線形加速器における陽電子生成の高効率化と安定化に大きく貢献するだけでなく、超短パルス計測技術を利用するリアルタイム計測システムへの応用が期待されます。

## 【背景】

現在、KEK では SuperKEKB プロジェクトによる高エネルギー素粒子実験が精力的に行われています。7GeV（70 億電子ボルト）の電子と 4GeV（40 億電子ボルト）の陽電子を衝突させ、生成される B 中間子群の崩壊現象から、素粒子の標準理論を超える現象を探索することが目的です。

SuperKEKB は、電子と陽電子を供給する入射器とこれらを衝突させるリング加速器で構成されます。B 中間子を大量に生成させるには、大量の電子と陽電子を入射器から効率的に周長 3km のリング加速器に供給して正面衝突させることが重要です。

陽電子は、自然界には大量に存在しないため、タングステンなどの重金属標的に高エネルギー電子を照射し、金属中の原子核と電子との電磁相互作用を利用して人工的に生成させます。標的ではほぼ等量の電子と陽電子が生成されますが、大きな角度をもって放出されます。その後、電子と陽電子は直後にある陽電子捕獲部に同時に捕獲されます。陽電子捕獲部では電子と陽電子は、強力な電磁気力により複雑な捕獲過程を経て集められ、電子・陽電子ビームへと形成されます。現在の捕獲効率は 50%程度で 100%ではありません。この捕獲効率をできるだけ向上させることが本研究の目的です。

陽電子捕獲部では電子と陽電子は並走しながら走行します。電子と陽電子の走行時間差は極めて短いので、従来の技術では電子と陽電子の同時分離計測は極めて困難です。このように、陽電子捕獲部においては電子・陽電子捕獲過程の動的な可視化は極めて困難でした。本計測技術は、2頭が出走する競馬に例えることができます。一番先にゴールに到着するのはどちらの馬かを判定する技術に似ています。2頭の馬の到着に大差があれば判定は容易です。しかし、ごくわずかな差であれば容易には判定できません。その差を大きく拡大することが可能なビデオ判定による精密測定が必要になります。電子・陽電子の走行時間差の計測もこの技術と同様です。

高効率かつ安定な陽電子の生成は、リング加速器への安定供給という観点から重要な課題の一つです。これを実現するには、陽電子捕獲部における電子・陽電子のリアルタイムな同時分離計測により、常時、生成効率と安定性を監視する必要があります。そこで研究グループは、劣悪な放射線環境下にもかかわらず、非破壊で同時分離計測が可能なビームモニターを設置することにしました。

新規開発のビームモニターでは、棒状の電極を電子と陽電子にできるだけ近づけて、90度毎の4ヶ所に取り付けました。この電極によりわずかな走行時間差でも大きく拡大され精密計測が可能になりました。さらに、4つの電極により電子と陽電子の通過位置も同時分離計測が可能になりました。本成果は、KEK で独自に開発された計測技術により初めて

実現されました。

### 【研究内容と成果】

本システムは、ビームモニター、耐放射線信号伝送ケーブル及び広帯域オシロスコープから構成されます。特に、システム全体の周波数応答の広帯域化が今回の超短パルス計測を可能にしました。

本成果の主目的は、入射器の陽電子捕獲部における電子・陽電子捕獲過程の動的可視化への応用ですが、厳しい放射線環境下でも安定した超短パルス計測が可能であることが初めて実証されました。

最近の加速器技術の進展によると、電子ビームのみならず陽電子、イオン、放射光など多様で高品質な量子ビームが生成されるようになりました。利用分野は、産業応用のみならず、医学、薬学、環境や宇宙などに広がっています。今後の利用研究の発展のためには、極短パルス量子ビームの発生やその可視化技術は欠かせません。本計測技術は、研究用の高エネルギー加速器のみならず厳しい放射線環境下にある量子ビーム施設においても広範な応用が期待されます。

本研究成果は、英国学術誌『*Scientific Reports*』オンライン版（2022年11月3日：英国時間）にてオンライン公開されました。

Tsuyoshi Suwada, “Direct Observation of Positron Capture Process at the Positron Source of the SuperKEKB B-Factory”; *Scientific Reports* **12**, 18554 (2022); [DOI: 10.1038/s41598-022-22030-5].

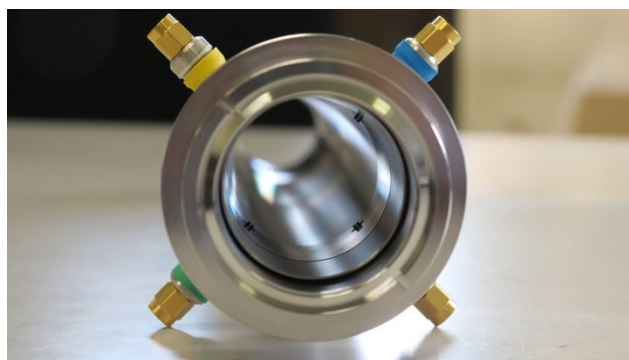


図1. 電子・陽電子同時分離計測が可能な広帯域ビームモニター.  
モニター内壁からわずかに張り出した棒状の電極が、90度毎の4ヶ所に取り付けています。

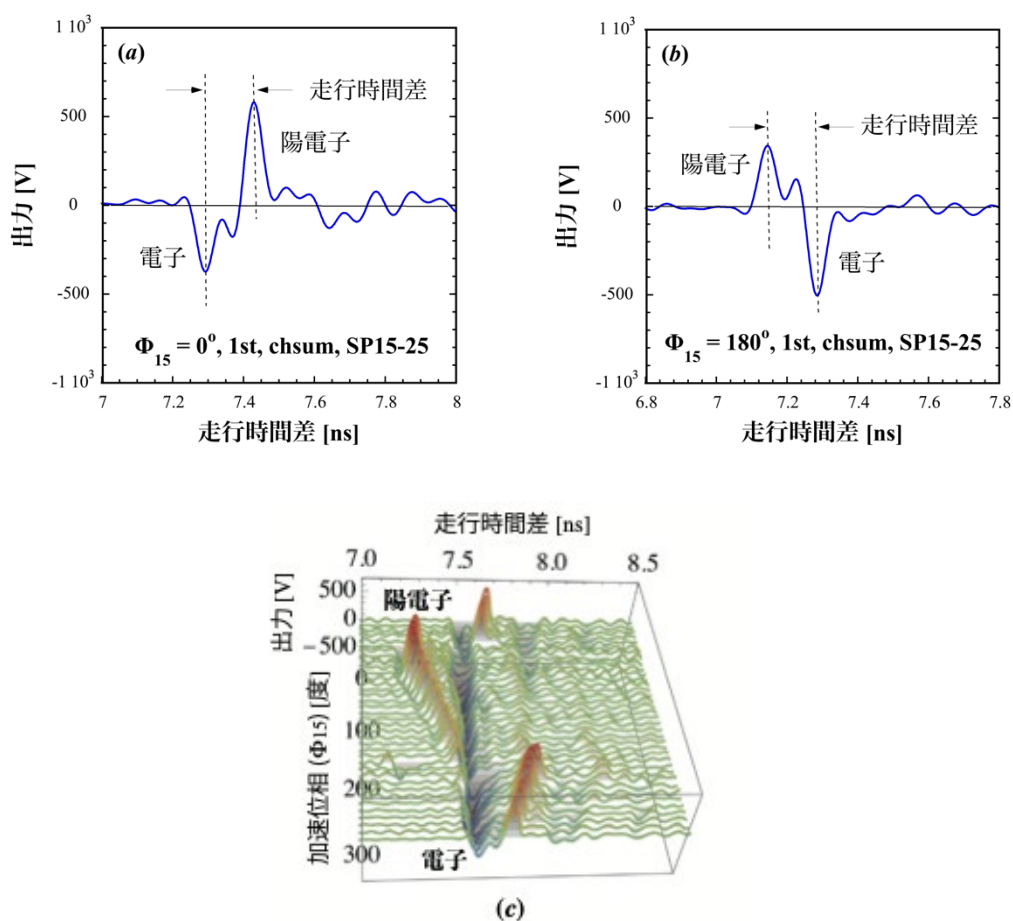


図 2. 広帯域ビームモニターにより計測された信号波形.

(a) 先行信号（負極性）が電子、後続信号（正極性）が陽電子の計測例（加速位相 0 度）、走行時間差 137 ピコ秒.

(b) 先行信号（正極性）が陽電子、後続信号（負極性）が電子の計測例（加速位相 180 度）、走行時間差 140 ピコ秒.

(c) 加速位相を変化させた時の前後方ビームの走行時間差の変化を示します. 電子（青）を基準として陽電子（赤）との走行時間差の変化が明瞭に可視化されることがわかります. 電子に対し陽電子が左側（右側）に位置する時は、陽電子（電子）が電子（陽電子）の前方に存在することを示しています. 加速位相に対する走行時間差の変化は複雑ですが、電子と陽電子の走行順位は加速位相が、50 度と 230 度の 2 点で明瞭に逆転していることがわかります.

### 【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

加速器研究施設 教授 諏訪田 剛

TEL : 029-864-5684

E-mail : tsuyoshi.suwada@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 勝田 敏彦

Tel: 029-879-6046

Fax: 029-879-6049

E-mail : [press@kek.jp](mailto:press@kek.jp)

## 【用語解説】

### ※1. SuperKEKB

高エネルギー加速器研究機構のプロジェクトで、2008年に小林誠・益川敏英両氏のノーベル物理学賞受賞に貢献した電子・陽電子衝突型加速器（KEKB）と電子と陽電子を衝突させて生成した粒子を観測する測定器（Belle）の40倍の性能向上を目指した加速器（SuperKEKB）と測定器（Belle II測定器）を用いた素粒子実験。

### ※2. ピコ秒

10の-12乗秒のこと。

### ※3. 広帯域ビームモニター

広い周波数帯域でビームの位置や電荷などビームの特徴を計測する装置。

### ※4. ルミノシティ

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。

### ※5. 陽電子捕獲部

標的で生成された陽電子を強い磁気力で集束し、同時に電気力で加速することで効率よく捕獲しながら陽電子ビームを形成する装置。