

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17340083
 研究課題名 (和文) Bファクトリー・リニアコライダーの為の超扁平型衝突点ビームパイプの開発 (II)
 研究課題名 (英文) R&D6 of super flat beam pipe for the interaction region of B factory and linear collider
 研究代表者
 片山 伸彦 (KATAYAMA NOBUHIKO)
 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
 研究者番号：50290854

研究成果の概要：高エネルギー加速器研究機構で検討されている Super KEKB Bファクトリーなどの衝突型加速器の衝突点近傍のビームパイプの形状を、ビームのプロファイルに合わせて極小化し、測定器を衝突点に近づける可能性を検討した。これまでの加速器デザインでは、電子・陽電子ビームの電流が大きい、ビームの大きさが大きい、などの理由で超扁平型ビームパイプの工学設計には大きな問題がある事がわかった。しかしながら、加速器グループが最終年度後半になって検討を開始したナノビームオプションでは、超扁平型ビームパイプ使用の可能性が大きく高まった。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2005年度 | 3,100,000 | 0 | 3,100,000 |
| 2006年度 | 2,900,000 | 0 | 2,900,000 |
| 2007年度 | 7,400,000 | 2,220,000 | 9,620,000 |
| 2008年度 | 1,500,000 | 450,000 | 1,950,000 |
| 年度 | | | |
| 総計 | 14,900,000 | 2,670,000 | 17,570,000 |

研究分野：素粒子実験

科研費の分科・細目：物理学・素粒子、原子核、宇宙線、宇宙物理

キーワード：Bファクトリー・加速器・素粒子実験

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー加速器研究機構・国際共同実験グループ Belle は、平成16年7月1日までに、B・反B中間子2億8千万ペアのデータを蓄積し、「B中間子系におけるCP対称性の破れ」の発見に加えて直接的CP対称性の破れなど数多くの成果をあげ、本年8月に開催された第32回高エネルギー物理学国際会議では、70篇以上の論文を発表した。CP対称性の破れの発見により、小林・益川理論を含む標準模型は確立され、B中間子の物理は、超対称性を始め、標準模型を越える物

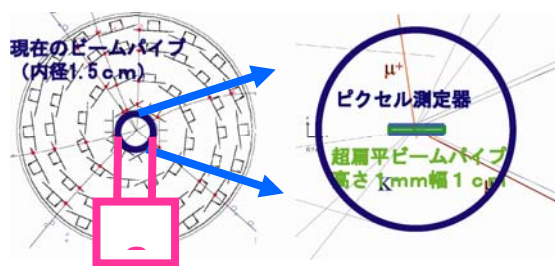
理の発見を目指す、第二段階に突入したのである。この段階では、今までの10～100倍に匹敵するデータを蓄積する事が要求されており、現在世界最高である、KEKB加速器・Belle測定器の大幅な性能向上が必要である。

KEKB加速器とBelle実験の最大の特徴は、衝突する陽電子・電子ビームのエネルギー非対称性である。このために実験の重心系が $\beta\gamma=0.43$ という非常に速い速度で動き、B中間子が崩壊するまでに平均200 μm 飛翔し、二つのB中間子の崩壊位置を測定する事により、B中間子系の、混合を通じた様々な性

質を測定する事が出来るのである。陽電子・電子ビームの衝突、 $B \cdot \bar{B}$ 中間子の生成・崩壊は、超高真空のビームパイプの中で起こる。崩壊位置の測定は B 中間子などの崩壊の際に生成された長寿命の τ 中間子や電子、 τ レプトンなどの荷電粒子の飛跡を、ビームパイプをとり囲むように配置されたシリコン検出器で行う。崩壊位置の測定精度を高める為には最初の測定点をできる限り崩壊位置に近づける事が最も重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高さが1 mm、幅が1 cm程度の超扁平型衝突点ビームパイプを設計し、プロトタイプ機を作製し、 Belle 実験の飛躍的な性能向上の可能性を追究することである。もし、超扁平型ビームパイプを使用する事が出来れば、最近接測定器としてピクセル型検出器を使用して、現在約100 μm である、 B 中間子崩壊位置の測定精度は、20 μm 程度にまで飛躍的に改善できる。これは、加速器の輝度を約4倍に向上すると同程度の効果があると予想される。下左図は現在のビームパイプ、下右図は、本研究で作製する超扁平型ビームパイプに現在のビームパイプを重ねた図である。右図は5倍ほど拡大されている。ピクセル測定器上の測定点と崩壊位置との距離は平均4 mmとなる。現在のビームパイプ・シリコン測定器の約2 cmと比較して、格段に測定精度が高まる事がわかる。



3. 研究の方法

本申請のビームパイプとピクセル測定器を使用した、全く新しい崩壊モードの検出について検討する。それは、たとえば $B \rightarrow D1\nu$, 反 $B \rightarrow D\bar{\nu}$ 反応のように、終状態にニュートリノが二つ以上含まれる反応である。超扁平型ビームパイプを使用すると B , D , τ 粒子の崩壊点をはっきりと見る事が出来る。 $\tau \rightarrow \mu + \nu$ を含む崩壊は、二つ以上のニュートリノを放出する為これまでの測定器で同定する事は非常に効率が悪かったが、超扁平ビームパイプとピクセル測定器を使用することにより、 B 中間子の崩壊点と、 τ レプトンの崩壊点を結ぶ直線から、 τ レプトンの運動量の方向、ひい

ては運動量ベクトルまで測定(推定)する事が出来る。この方法を用いて τ ニュートリノの missing mass などにカットをいれて解析を最適化した所、検出効率約2.5%で、S/N 比約10という結果が得られた。 $B \rightarrow D\tau\nu$ 反応の分岐比を1%と仮定すると 1ab^{-1} のデータで約4000 イベントのシグナルが検出できる。すなわち、この崩壊モードに、もし、荷電ヒッグス粒子が関与しているとすれば、その効果による、分岐比の異常が検出できるのである。衝突点ビームパイプの設計は加速器デザインと測定器デザインの双方から相矛盾する厳しい要求を突きつけられる。加速器側は、なるべく径が大きくて変化しないビームパイプが望ましいが、測定器側はできる限り測定点を衝突点に近づけ、測定可能な立体角を最大にし、測定点と衝突点の間の物質量を最少にしたい。

(1) 電子・陽電子ビームは、最終四重極電磁石によって強く絞られ、衝突点の前後で大きく形を変える。また衝突によるダイナミックなビーム・ビーム効果によって軌道や、ビームの形は大きく影響を受ける。更にビーム入射時には、ビーム軌道は振動する。ビームパイプは、これらの効果を全て考慮してその3次元的なプロファイルを決定しなければならない。

(2) KEKB加速器では、有限の交差角を持って電子・陽電子ビームを衝突させるため、ビームは衝突点付近の電磁石により強いシンクロトン輻射を起こす。この放射光や、ビームと残留ガスとによる衝突から来る軌道(位相空間)を外れた粒子がビームパイプに衝突して散乱したり2次粒子やガンマ線を発生したりするが、これらが測定器に入り込み、測定に影響を与える事がある。したがってこれらの光や粒子を最も効果的に排除するような設計を行う必要がある。

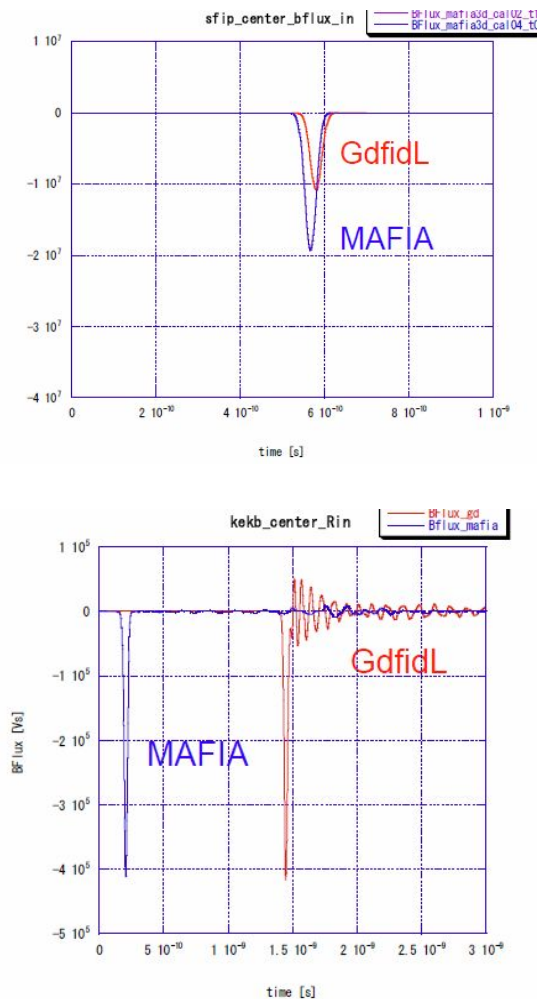
(3) 電子・陽電子ビームに誘起されるイメージカレントは、表皮効果によってビームパイプの表面を流れるが、オーミックロスのために発熱する。ビームパイプ径や形状が、ビームの進行に対して変化すると、ハイヤーオーダーモードの電磁波が立ち、やはりビームパイプ表面で発熱する。特にハイヤーオーダーモードが定在波的になってしまい、共鳴してしまうと異常な発熱が起こり、危険である。

(4) 測定器側では、超扁平なビームパイプの利点を生かして、出来る限り衝突点の近くにピクセル測定器を配置したい。ビームパイプの材質は、強度の割には最も物質量が少ないベリリウムを使用するが、壁面の厚みは、冷却用の液体も含めて、強度の許す限り薄くしたい。イメージカレントのオーミックロスを最小にする為の銀(あるいは金)の層もできる限り薄くしたいが、測定器に対する電磁シールド効果にも配慮しなければならない。

測定器側は、幾何学的な部分については、幾つかの典型的な物理プロセスに関してシミュレーションを行い、観測の統計誤差が最小になるようにビームパイプの形状と測定器の形状を最適化することができる。加速器側も、発熱や、バックグラウンドの影響についてはシミュレーションを行う事が出来、安全係数を見込んで設計を行う事は出来る。

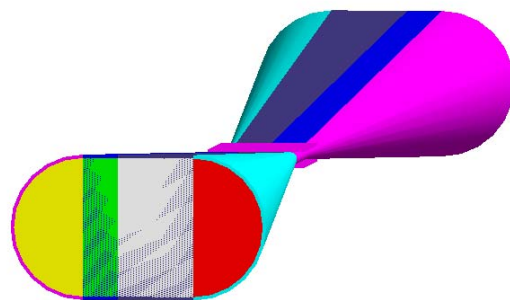
4. 研究成果

本研究は、加速器のデザインと同時に行われる、衝突点ビームパイプの設計に関する予備研究であった。研究方法に記した加速器デザインと超扁平ビームパイプデザイン（すなわち、より良い測定器）との矛盾は明らかで、あらかじめ予想していた殆どすべての点で、工学的に極めて製作が難しいという計算結果を得た。例えば、上記イメージカレントによるオーミックロス、GdfidL、MAFIA という、ふたつの有限差分による、3次元における電磁場計算プログラムを使用して計算を行ったが、上図が超扁平ビームパイプ、下図が現在のKEKB IRである。

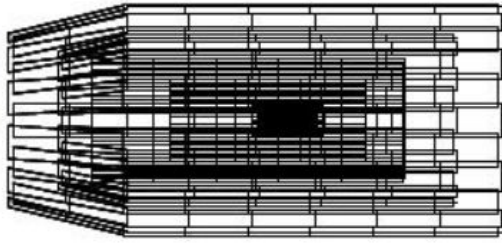


カレントはこれに比例する)は、KEKB IRの約50倍である事がわかった。逆にインピーダンス及びハイヤーオーダーモードロスに関しては、超扁平ビームパイプデザインでは、非常に緩やかなテーパを持つ1mの長さの導入部を持つため、現在のKEKB IRよりも小さい事がわかった。これらの結果は、KEKB加速器グループの打ち合わせで複数回にわたって報告された。

これらと並行して超扁平ビームパイプとその周りのピクセル測定器による、測定精度と効率の改善をより正確に見積もるため、測定器のシミュレーションプログラムの大幅な改良を行った。従来 Belle 実験のシミュレーションは Geant3 というフォートランで書かれたツールを使用していたが、新しく測定器を大幅に作り直す際に、現在主流となっている Geant4 という新たに C++ で書かれたツールキットを使用する事にして、これは本科研費とは別に予備研究を行っていたのだが、本科研費でビームパイプとピクセル測定器の詳細なシミュレーションを行うため、SVD、CDCなどの外側の測定器もすべて新しく書きおろした。また、ビームパイプは半割にしたコーンを両側に持ち、両端がレストラック状でありしかもビームが有限角で交差する為に軸対称ではない、複雑な形を、様々な形状要素を用いて実現した。(Geant4 自身もある形状を記述する部分にバグがあり、修正を依頼した。)あまりきれいな図ではないが、ビームパイプの形状を載せる。(GdfidL と MAFIA で使用したのも交差角を省略した以外はこれと似た形である。)



上図の中央のくびれの部分が超扁平型ビームパイプであり、その上下にピクセル測定器が設置されている。ビームパイプに続いて SVD 測定器も Geant4 で記述した。SVD 測定器は前方部分を衝突点に近づける為に傾斜させている。



中央ドリフト測定器を含めてモンテカルロシミュレーションを行い、現 Belle 測定器用の立体再構成プログラムを書き換えて、超扁平ビームパイプの場合と、通常のビームパイプの場合の測定精度を正確に求めた。その違いは、予想通りで、大幅な改善が得られる事がわかった。

しかしながら工学設計の難しさはいかんともしがたく、プロトタイプ機的设计及び製作はできなかつた。

Super KEKB 加速器デザインは、本研究最終年度前半までは、現在の KEKB 加速器のデザインを踏襲して、24 倍にルミノシティを増やす為に電流量を 4 倍にし、バンチ長を半分にし、ビームビームチューンシフトリミットをクラブキャビティを用いて 3 倍に高める、と言う事を基本にしていた。しかし最終年度後半に行われた加速器レビューで、いわゆるナノビームオプション、と言われる、リアコライダーにインスパイアされた新しい方式によるルミノシティの向上方法の検討を始める事が提案され、現在加速器グループではこのオプションを検討している。必ずしもこのオプションによる加速器のデザインが完成したわけではないが、もしこのデザインだと、ビームカレントは、前のデザインの 9.4/4.1A に対して、3.3/1.9 と半分以下であり、衝突点におけるビームサイズは $69\mu\text{m} \times 0.9\mu\text{m}$ に対して $11\mu\text{m} \times 84\text{nm}$ となり、原理的には更に小さいサイズの衝突点ビームパイプも可能である。これらの加速器の設計変更は、超扁平ビームパイプの実現可能性を大きく高めると思われるが、2009 年 5 月現在、加速器 (ビーム光学等) の設計は終了しておらず、それらの終了を待ってもう一度超扁平ビームパイプ実現の可能性を検討してみたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

- ① Japan Physics Society Annual meetings, Geant4 simulation of Super Flat Beam pipe, Atsuko Kibayashi and Nobu Katayama, 2007. 9. 21, Hokkaido University

- ② Computing in High Energy and Nuclear Physics, GEANT4E Track Extrapolation in the Belle Experiment, Leo Piilonen and Nobu Katayama, 2009. 3. 25, Prague, Czech

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片山 伸彦 (KATAYAMA NOBUHIKO)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
研究者番号：50290854

(2) 研究分担者

赤井 和憲 (AKAI KAZUNORI)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授
研究者番号：10184061

尾崎 均 (OZAKI HITOSHI)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師
研究者番号：10177214

樹林 敦子 (KIBAYASHI ATSUKO)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究員
研究者番号：30436711
(2007 年度)

(3) 連携研究者

樹林 敦子 (KIBAYASHI ATSUKO)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究員
研究者番号：30436711
(2008 年度)