

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400305

研究課題名(和文) 高い時間分解能を持つ電磁カロリメータの開発

研究課題名(英文) Development of electromagnetic calorimeters with a high resolution in timing measurements

研究代表者

上原 貞治 (Uehara, Sadaharu)

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・講師

研究者番号：70176626

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：高いルミノシティ性能を持つ電子陽電子衝突型加速器SuperKEKBにおいて、ビームバンチごとのルミノシティを高速に測定することを主な目的とした電磁カロリメータを開発した。この検出器は輻射バーバー散乱からの光子あるいは陽電子が引き起こす電磁シャワーのタイミングを捕らえ、そのバンチ構造を分離するものである。

検出器2台を加速器の両リングのそれぞれの近くに設置し、加速器の始運転時にビーム・ガス制動輻射からの信号を捕らえることができた。また、そのバンチ構造からほぼ目標となる0.7ns程度の時間分解能を有することを確認した。オンラインで高速にデータ処理をすることについても実用化のめどがたった。

研究成果の概要(英文)：We have developed electromagnetic calorimeters which aim to measure the bunch-by-bunch luminosity of the high-luminosity electron-positron colliding accelerator SuperKEKB. The calorimeters detect electromagnetic showers induced by photons or positrons from the radiative Bhabha scattering and extract bunch structure of the collisions from the timing distribution of the signals. We have installed such two detectors near the two accelerator rings and have succeeded to detect the signals from beam-gas nuclear bremsstrahlung process at the test operation of the accelerator. We confirm the time resolution of the detector, about 0.7ns, is close to the aimed performance, finding that in the bunch structure of the beam signals. We also have a big achievement to take and analyze the data in an online manner.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：粒子加速器 電子陽電子衝突 ルミノシティ 粒子検出器 輻射バーバー散乱

1. 研究開始当初の背景

本研究は、高い強度の衝突型粒子加速器についてバンチ毎のルミノシティの高速測定を行うことを動機として着想された。我々は、1999年～2010年に、電子陽電子衝突型加速器 KEKB において輻射パーバース散乱を測定することによって加速器のルミノシティ（衝突ビームの衝突レート）の変動を測定した。KEKB 加速器は、電子、陽電子のリングのそれぞれの全周に約 1500 の衝突バンチを擁していた。その衝突時間間隔は、一部のバンチ間で約 4ns、多くのところでは 6ns であった。バンチ毎のルミノシティを測定するためには、この 4ns よりもずっと小さい時間分解能を持つ測定器を用いる必要がある。KEKB で用いていたルミノシティモニタの時間分解能は 0.7ns 程度であり、この要求をまずまず満たしていた。

KEKB 加速器のアップグレード計画である SuperKEKB 加速器においては、ルミノシティを向上させるために、より短い時間衝突時間間隔が採用される可能性が高く、標準で 4ns、最短で約 2ns（これが事実上可能な最短時間間隔である）に設定されることが見込まれた。この場合は、0.7ns の時間分解能は十分ではなく、0.5ns 以下にすることが望まれた。また、加速器運転にフィードバックをかける都合上、リアルタイムで精度の良いバンチ毎ルミノシティを知る必要があった。想定したフィードバックの典型的な所要時間は 1 秒～数秒である。

以前の研究および経験によって、ルミノシティモニタにカウンター型の検出器を利用するとして、シンチレータあるいはチェレンコフ輻射体を用いた場合のそれぞれについて、その長所短所や問題点がすでにある程度明らかになっていた。それらを踏まえて、SuperKEKB に向けて、ルミノシティモニタをどのように開発、

改良すればよいかの道筋がある程度見えていた。

世界で実験が行われている高エネルギーかつ高ルミノシティの衝突型加速器実験は LHC, BEPC, RHIC, これに 2010 年に停止した KEKB を加えても少数に限られており、かつ、これらの加速器はそれぞれタイプが大きく異なる。これらの中でも KEKB 加速器、そしてそれを高度化した SuperKEKB 加速器は世界最高のルミノシティを有するもので、本検出器システムをルミノシティモニタとして応用した場合、極めてユニークで価値の高いものとなる。

2. 研究の目的

高エネルギー加速器研究機構では、従来の KEKB の 40 倍のルミノシティをめざして SuperKEKB 加速器の建設が進められている（2016 年 3 月現在、試運転中）。高強度の衝突型加速器で高いルミノシティを達成するためには、正確できめ細かいルミノシティの測定を行い、それを加速器制御系にフィードバックする必要がある。その際、SuperKEKB のようなマルチバンチ型の衝突型加速器（複数のビーム粒子の集団（バンチ）が同時に周回しているタイプの加速器）では、各衝突バンチのルミノシティを測定し、均等にルミノシティが得られているか、バンチ間で特異な干渉等の現象が起こっていないかモニタすることが有用である。本課題は、バンチ毎のルミノシティの測定に使用できる高い時間分解能を持つ電磁力カリメータを開発し、その実用化のための研究を行うものである。

本研究において、ルミノシティの測定のために、電子陽電子衝突で起こる最前方輻射パーバース散乱過程、

電子 + 陽電子 電子 + 陽電子 + 光子

(終状態の粒子はどれも散乱角が小さい。光子は、入射電子または入射陽電子の最前方に放射される)

で発生する高エネルギー光子、あるいは散乱後の電子または陽電子を検出するシステム(ゼロ度ルミノシティモニタ)を開発する。ここで、検出される光子、陽電子などは、ビームパイプや検出器近辺(検出器本体を含む)で電磁シャワーを起こす確率が高いので、本検出器は、電磁カロリメータタイプの検出器となる。実際、信号の大きさで、電子や光子のおエネルギーを測れることはルミノシティ測定の上からもメリットが大きい。しかし、検出事象ごとにエネルギー(信号の大きさ)が異なることが、時間分解能に影響を及ぼす。

本課題では、検出器の開発に加えて、実際に、SuperKEKB 加速器の運転時に、その衝突強度の状況をルミノシティモニタで継続的に測定することにより、じゅうぶんな性能が達成されていることを確認するとともに、加速器運転にフィードバックがかけられる実用的なデータ収集、解析システムの構築をめざす。

3. 研究の方法

(1)高い時間分解能を実現するためには、チェレンコフカウンターとシンチレーションカウンターを組み合わせることで同一の電磁シャワーを測定し、X線ノイズの除去はチェレンコフカウンターで行い、時間の測定は発生光量の大きいシンチレーションカウンターで行うのがよいというアイデアをまず着想した。しかし、実際にその通りになるかはわからないので、3種類の発光体を用意し、そのいずれかを実地に応じて選択できるようにした。ここでいう発光体は、石英結晶製のチェレ

ンコフ輻射体、プラスチックシンチレータ、LGSO 無機結晶シンチレータの3種である。それぞれの大きさはおよそ15mm角×45mmに対応する体積を持つ平行六面体形状である。LGSO 無機結晶は、身近であまり使用されていない材料であったので、はじめに小型のもので試験を行い、そののち実機サイズのもの製造を依頼した。

(2)このような発光体と光電子増倍管を2セット装備できる電磁カロリメータの検出器体を設計し、2台製作した。最初の予備的な試験は、宇宙線を用いて行った。

(3)並行して、加速器運転時にバンチ毎にルミノシティを測定するためのTDCシステムの動作試験を行った。TDCは、VMEと呼ばれるVMEモジュールの形状を持つもので、今回の目的のために新たに高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所のエレクトロニクスグループによって開発されたものである。これを宇宙線テストに用い、計算機で高速読み出しに実用的なデータ収集プログラムを開発した。なお、ここでは、高速化のために、C言語を用い、マルチバッファ、マルチタスク機能を利用した。開発の過程で、様々のパターンの疑似信号によって読み出し系の性能評価を行った。

(4)検出器とその時間応答性能、およびデータ読み出し系の基本的性能は、2016年2月から開始されたSuperKEKB加速器の試運転(Phase 1)において、実際に測定を行い、その評価を行うこととした。

4. 研究成果

(1)検出器に用いる発光体の選択として、チ

ェレンコフ輻射体には、使用経験のあった石英結晶を採用した。高い集光性能を見込んで平行六面体の形状を採用したところ、光電子増倍管光電面を接着することなしに（放射線による劣化の恐れがあるので、接着剤は用いないことが望ましい）じゅうぶんな信号の大きさが得られることが宇宙線によって確認できた。図1に検出器体の形状を示す。

また、シンチレーションカウンターの材料として、新しいタイプの LGS0 無機シンチレータを採用した。これは、光の強度が強いこと、立ち上がり時間性能が悪くないこと、放射性耐性に優れていること、という利点を持っていて、光電子増倍管の増幅率が不十分な時や、加速器稼働時の放射線環境が比較的良くない時にも安定した性能が期待できるものである。いっぽう、信号のパルス幅が比較的広い（40ns 以上）ので、ルミノシティが向上したのちは、高いレート下での使用に制約がかかると予想する。また、LGS0 は含有原子核の自己崩壊（崩壊）による自身の信号（ノイズ）を有しているが、これはカロリメータとして用いる場合は、信号の大きさに除去できるものであり、むしろ、信号サイズの較正を与える長所と捕らえることもできる。我々は加速器の初期の運転での使用を重視し、この LGS0 無機シンチレータを使用することにした。そして、今回の研究で、宇宙線の測定により、その基本的な性能を確認することができた。

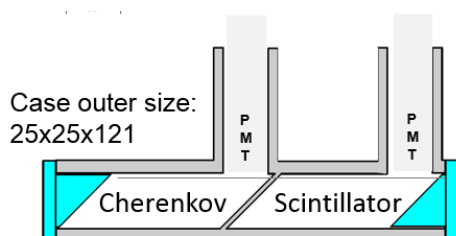


図1：検出器体の形状と構造（長さの単位は mm）

(2) 本研究計画で時間情報を測定し読み出すための VMETDC モジュールが、高エネルギー加速器研究機構のエレクトロニクスグループにより開発され、その協力を得て本研究に利用された。ソフトウェア開発、ハードウェア性能の確認を共同で行った。また、実際の加速器を用いた測定で用いる読み出しシステムとソフトウェアを用いて、最大レートの測定を行った。その結果、当初の目的である毎秒 500 万ヒット（5 MWord/s）のデータを読み出せる性能を持つことを疑似パルス試験によって確認した。

(3) VMETDC を用いる宇宙線を用いた試験によって、宇宙線ミュー粒子すなわち minimum ionization particle に対して、チェレンコフカウンターを用いるシステムが全体として、1.0ns の時間分解能を持っていることを確認した。LGS0 無機シンチレータはそれよりも多少分解能が落ちるもののほぼ 1ns の時間分解能を有することを確認した。

(4) 2016 年 2 月から実施された SuperKEKB 加速器の試運転（Phase1）では電子陽電子衝突は実施されなかったため、ルミノシティの測定をすることはできなかったが、加速器ビームパイプ内に残留しているガスの原子核が特に運転開始当初には多い（ビームパイプから蒸発してくる）と予想されたので、ビーム・ガス原子核制動放射反応でルミノシティモニタの試験運転ができることを予想した。それで、我々は、加速器の両リング（LER、HER）のそれぞれの衝突点下流に検出器を設置することを計画し、それを実施した。

予想される制動放射信号の検出レートについて、SuperKEKB 加速器におけるルミノシティモニタの共同研究に加わったフランス、オルセーの線形加速器研究所（LAL）のグループによって加速器と検出器のシミュレー

ションがなされ、Phase1 でも検出可能な信号が得られることが予想された。検出器の諸性能、予想されるレートに照らし合わせ、LER 下流には、石英チェレンコフ輻射体と LGSO 無機シンチレータの組み合わせの検出器を置き、HER 下流には、石英チェレンコフ輻射体とプラスチックシンチレータの組み合わせの検出器を置くことを決定した。検出器の設置、ケーブル敷設、読み出し系の設置は、LAL グループとの共同作業により、成功裏に実施された。

(5)2016 年 2 月より、加速器の両リングの試運転が開始され、我々のルミノシティモニタ (ZDLM) は LER 入射当初において、リングを半周回ったビームによる信号をとらえることに成功し、加速器グループによる入射調整に貢献した。また、その後引き続き行われた HER の入射においてもいち早く信号を得ることができた。この加速器試運転開始時の測定によって、各カウンターが動作し、信号が得られていることを確認することができた。

引き続き、石英チェレンコフ輻射体が 0.7ns 程度の時間分解能によって、正しくビームのンチ構造を検出していることが確認された。その結果を図 2 に示す。この測定に

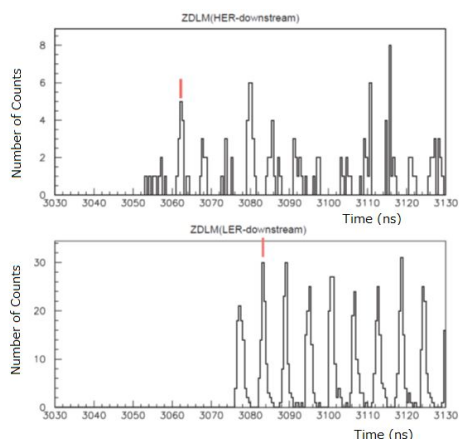


図 2 : HER 下流 (上) LER 下流 (下) のそれぞれの検出器で確認された信号 タイミングのビームバンチ構造

より、電子陽電子衝突が十分なレートで起これば、バンチごとのルミノシティが分離して測定できることが実証された。チェレンコフカウンターによってよい時間分解能が得られた理由は、輻射体のサイズが小さいことが時間分解能と発生光子の収率の双方にプラスに寄与し、収集される光子の絶対量の低下をそれほど招かなかったためと推定される。

その後も、加速器運転の状況変化に伴うレートの変化等重要な情報が継続して得られている。シンチレータの応答についてもデータ収集を継続している。

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)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

Viacheslav Kubyskyi, “Fast Luminosity Monitoring”, 23rd Open Meeting of the Belle II Collaboration, 2016.02.01, 高エネルギー加速器研究機構 (茨城県つくば市)

上原 貞治 “The Zero Degree Luminosity Monitor ” , IP2P3-KEK collaboration on Belle II and BEAST meeting, 2015.01.19 ~ 20, ストラスブル IPHC 研究所、ストラスブル市 (フランス)

上原 貞治 “Zero Degree Luminosity Monitor”, The 3rd BEAST II Commissioning Detector Workshop, 2014.06.02 ~ 04, ハワイ大学、ホノルル市 (アメリカ合衆国) (発表はネット経由)

庄子 正剛、上原 貞治、池野 正弘、内田 智久、田中 真伸 「 Belle II 実験 Zero-Degree Luminosity Monitor 時間計測システム用 TDC モジュールの開発 」 日本物理学会第 69 回年次大会、2014.03.27 ~ 30、東海大学湘南キャンパス (神奈川県平塚市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

Belle II Zero Degree Luminosity Monitor (ZDLM)

<http://openit.kek.jp/project/zdlm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上原 貞治 (UEHARA, Sadaharu)

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：7 0 1 7 6 6 2 6

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者