

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800155

研究課題名(和文) Belle II実験におけるビームバックグラウンド計測システムの開発

研究課題名(英文) Development of the beam background monitor for the Belle II experiment

研究代表者

中村 克朗 (NAKAMURA, Katsuro)

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・助教

研究者番号：60714425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：Belle II実験のためのビームバックグラウンド計測器の開発を行った。この計測器として、高い信号収集効率を有するダイヤモンド検出器を開発した。試作器による線源による測定と電流-電圧曲線測定等の試験から、最適な検出器の仕様を決定した。FLUKAによるシミュレーションから測定電流値と放射線量との間の較正にも成功した。SuperKEKB加速器の試運転ビームを用いて、開発したダイヤモンド検出器の性能評価を行った。これにより、十分な性能を確認するとともに、Belle II実験用ビームバックグラウンド計測器として運用可能なことを確認した。

研究成果の概要(英文)：We studied a beam background monitor for the Belle II experiment. For the background monitor, we developed the diamond detector with a high charge-correction-efficiency. Radioactive source measurement and I-V curve measurement were conducted to determine the suitable specification of the diamond detector. And, using the FLUKA simulation output, we succeeded to calibrate between the measured current and the irradiated dose. With commissioning beams of SuperKEKB, we estimated the performance of the developed diamond detectors. As a result, we confirmed excellent performance of the detector, and feasibility to use them as the Belle II background monitoring system.

研究分野：素粒子実験用シリコン崩壊点検出器

キーワード：ダイヤモンド検出器 バックグラウンド計測

1. 研究開始当初の背景

LHC でのヒッグス粒子の発見により、標準模型はニュートリノの振動現象を除いたあらゆる実験結果を矛盾なく説明できるようになった。しかしその一方で、階層性の問題、相互作用の統一問題、暗黒物質などの基本的疑問が依然として未解決のままである。これらの不完全性は超対称性理論や余剰次元などの標準模型を超えた新物理を示唆するものと考えられる。これらの標準模型を超える新しい相互作用を実験的に探索することが、自然界の物理法則を理解する重要な課題となる。

高エネルギー実験（エネルギーフロンティア）と並んで新物理探索の一躍を担うのが、新物理が現れる非常に稀な現象を高統計の実験データをもとに観測する高輝度実験（ルミノシティフロンティア）である。2016年の実験開始が計画されている電子・陽電子コライダー SuperKEKB での Belle II 実験は、現在の世界最高積分輝度の約 50 倍に相当する 50 ab^{-1} もの高統計 B 中間子データを用いて新物理に迫る画期的な高輝度実験である。標準模型を超える新物理の探索において素粒子物理学の発展の一躍を担う高輝度 Belle II 実験は実験開始に向けてその開発が進められている。

新物理探索にとって検出器の長期的な安定動作が必須となる。しかしながら、高エネルギー実験及び高輝度実験においては、ビームバックグラウンドによる検出器への放射線損傷が大きな課題となる。検出器の安定動作を保障するには、常にビームバックグラウンド量を計測し、検出器領域の放射線量を把握しておく必要がある。それにも拘らず、Belle II 実験においてビームバックグラウンドを計測するシステムは十分な議論がなされていなかった。

2. 研究の目的

高輝度素粒子実験である Belle II 実験用のビームバックグラウンド計測器を開発する。特に、Belle II 検出器の最内層に設置される崩壊点シリコン検出器 (PXD・SVD) に対しては重要な課題となる。また、この崩壊点検出器への過度な放射線損傷を防ぐ為に、検出器設置前に設置位置での SuperKEKB 加速器による放射線量を測定する必要がある。この目的においても、ビームバックグラウンド計測器は Belle II 実験の遂行に必要不可欠となる。

そこで本研究では、ビームバックグラウンドを計測する検出器の開発を行う。これを用いて、2016 年初頭に計画されているビーム試験運転を利用したビームバックグラウンド強度測定を行い、実験中の放射線強度の評価を行う。最終的にビームバックグラウンド計測システムの開発・運用を行う。本研究により長期的な Belle II 検出器の動作を保障し、Belle II 実験での新物理探索を成功へと導く。

3. 研究の方法

Belle II 実験における高強度のビームバックグラウンド下での理想的な計測器としてダイヤモンド検出器が挙げられる。ダイヤモンド検出器の利点として、高い放射線耐性、低い温度依存性、単純な検出器構造、が挙げられる。このようにして開発した計測器を用いてビーム試験運転でのビームバックグラウンド強度を測定し、Belle II 実験中の予想されるビームバックグラウンドの研究を行う。また、ビームバックグラウンド計測システムを開発し Belle II 実験に向けて運用する。

この開発での挑戦的な研究課題となるのが、ダイヤモンド検出器からの信号を用いた高速中性子の計測である。これには、ダイヤモンド検出器として、高いエネルギー分解能が必要となる。これはすなわち高い信号収集効率の必要性を意味する。本研究では、この高信号収集効率を持つダイヤモンド検出器の開発を目指す。

4. 研究成果

本研究では、高輝度電子陽電子ビーム衝突を用いた Belle II 実験に最も適切なビームバックグラウンド計測器である、ダイヤモンド検出器の開発に主眼を置いた。

(1) ダイヤモンド検出器の仕様研究

ダイヤモンド結晶としては単結晶ダイヤモンドを選んだ。これまでの高エネルギー実験で使われている多結晶ダイヤモンドに比べてコストは高くなるものの、信号収集効率が格段に良くなるためである。また、この信号収集効率のため、Element6 社による高純度（窒素 5ppb 以下、ボロン 1ppb 以下）のダイヤモンド結晶を用いることとした。製法は近年低コスト化が進んでいる化学気相成長法とした。結晶の大きさは 4.5mm x 4.5mm x 0.5mm のものを用いる。結晶構造や極板さらに検出器へのパッケージ用筐体による性能の違いを研究するため、数種類の試作機を製作して性能を測定した。結果として、まず単結晶では多結晶に比べて約 3 倍もの信号収集率があることが明らかとなった。

結晶板への極板成膜についての研究も、CIVIDEC 社(オーストリア)と共同で行った。ダイヤモンド等の誘電体と金属との接合の場合、注意しなければならないのがショット

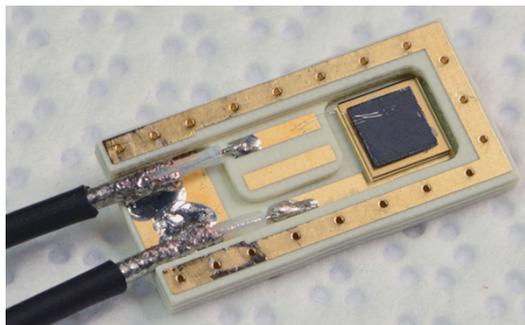


図 1. ダイヤモンド検出器

キー効果である。これは信号の収集率低下の大きな原因となる。これを防ぎオーム接合を実現するために成膜金属と膜厚の選定を行った。極板に関しては、単一の Al 膜と Au/Pt/Ti (250/120/100nm) 膜での比較を行った。現状では両方の極板とも信号収集率及び長期的安定性ととも問題ない結果を得ている。またパッケージ用筐体としては小型かつ放電に強いデザインを選定出来た。図 1 に開発したダイヤモンド検出器の写真を掲載する。

また、信号ケーブル（高電圧ケーブル）は同軸ケーブルを高電圧の印加線とグラウンド線のそれぞれに用いている。同軸ケーブルを採用している理由はダイヤモンド検出器を Belle II 実験の衝突点付近に置くために、ケーブル長が 20m に及ぶことから、伝送中の損失を抑えるためである。

(2) ダイヤモンド検出器の性能評価方法の確立

放射線に対する応答を測定することでこの結晶の性能を評価した。まず、Am241 からの α 線に対するパルス電流の時間幅を測定することで、 α 線が結晶の表面数 μm で止められることから、結晶内の電子-正孔キャリアの移動度を測定することができる。この結果と理想的なダイヤモンド結晶での移動度と比較することで結晶の純度を評価した。次に電流-電圧曲線を測定することで、暗電流が十分に小さいことを確認した。これも結晶純度の評価となる。さらに、1 時間の Sr90 からの β 線の照射を行い、検出器に流れる電流値を測定した。この電流値の時間変化を見ることにより、ビームバックグラウンド下での検出器の長期安定性を評価した。この β 線の照射により得られたランダウ分布が図 2 である。

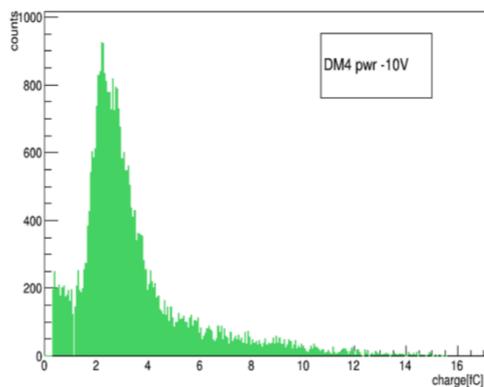


図 2. β 線照射により得られたランダウ分布

Sr90 からの β 線の照射試験に関しては、ジオメトリを再現した FLUKA でのシミュレーションを行い、測定された電流値が再現できることを確認した。この結果を用いて、FLUKA による予想電流値と測定電流値を比較する

ことにより、測定電流値から検出器の放射線量との間の較正を行えることを確認した。図 3 は、測定した 3 つの試作ダイヤモンド検出器に対する較正值の印加電圧に対する依存性である。

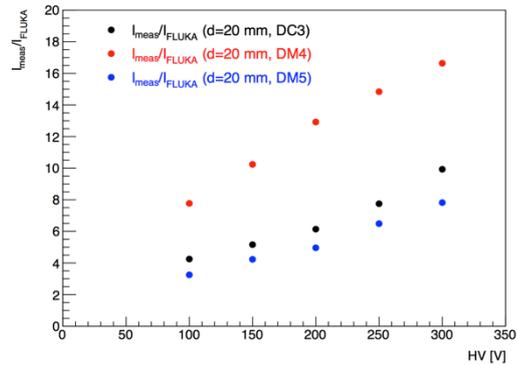


図 3. 3 つの試作検出器に対する較正值

(3) 読み出し回路の開発

ダイヤモンド検出器読み出し回路の開発にも着手した。フロントエンド回路として、まずはテストベンチでの試験用に AH501 (CAEN) を用いた。しかしながら磁場環境に置かれ様々な遠隔制御が必要になるため、Elettra (Italy) と協力して AH501 を改良した読み出し回路開発に着手した。試作機として 4ch 入力・130MHz サンプリングの 16-bit ADC に FPGA (Stratix III) を搭載した回路 (図 4) を開発した。

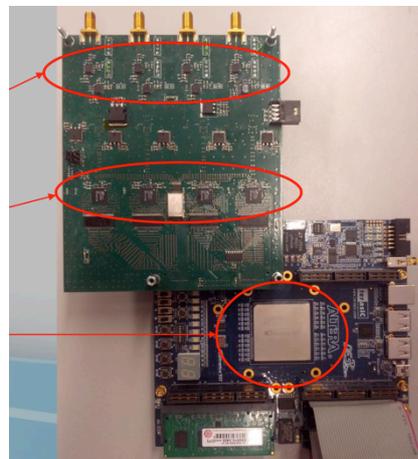


図 4. 試作の読み出し回路

この読み出し回路は信号の読み出しとして十分な性能があることを確かめた。現在はデータ通信用の FPGA 用ファームウェアを開発中である。この開発の後に、この試作回路を基にした実験用回路を製作する。

(4) SuperKEKB 加速器での試作ダイヤモンド検出器の性能試験

平成 28 年 1 月から約 5 ヶ月間にわたり SuperKEKB 加速器において実験開始に向けた試運転が行われた。この試運転のビームを用

いて、開発したダイヤモンド検出器試作器によるビームバックグラウンド計測試験を行った。この計測には、図5のように、ビームパイプ周辺の異なる4箇所それぞれダイヤモンド検出器（計4台）を設置した。

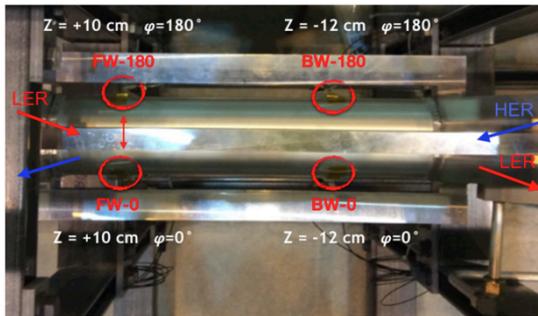


図5. ダイヤモンド検出器設置位置 (SuperKEKB 加速器・筑波実験棟衝突点位置)

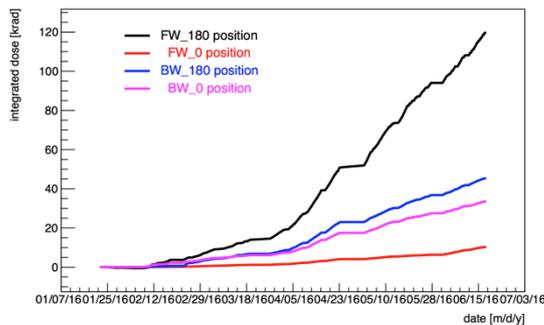


図6. ダイヤモンド検出器により測定した SuperKEKB 加速器試運転時の放射線量

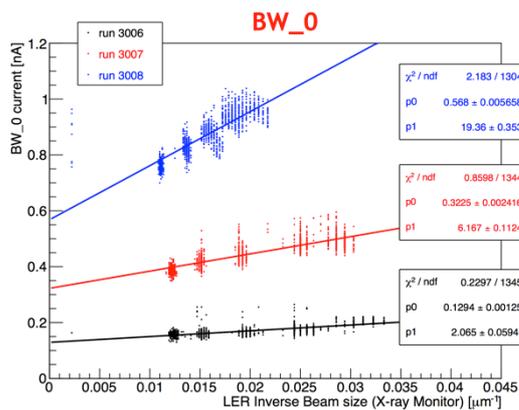


図7. 測定電流値の LER ビームのビームサイズ依存性。青、赤、黒のデータはそれぞれ HER ビームのビーム電流 540mA、360mA、160mA での結果である。

これによりビームバックグラウンド線量測定が可能であることを確認した。さらにこれにより、試作の検出器信号の読み出し回路が十分な性能を持つことを確認した。図6はダイヤモンド検出器により測定した SuperKEKB 加速器の試運転時の放射線量である。

また、図7に LER ビームのビームサイズを変更した時の、測定電流値の変化を示す。これは、ビームサイズの変更による Touschek 散乱によるビームバックグラウンドの増加を示している。以上の測定により、ダイヤモンド検出器が、Belle II 実験のバックグラウンド計測器として十分な性能を持っていることを確認した。

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 1 件)

- ① L. Vitale, K.R. Nakamura, et al.
 “Belle II VXD radiation monitoring and beam abort with sCVD diamond sensors”, Nuclear Inst. And Methods in Physics Research, A 824 (2016) 480 (査読有り)

[学会発表] (計 1 件)

- ① Katsuro Nakamura, The Belle II SVD detector, VERTEX2016 Elba (Italy), 2016 年 9 月 25 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

[その他]
 ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 克朗 (Katsuro Nakamura)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子
核研究所・助教

研究者番号：60714425

F

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

Livio Vitale

University of Trieste and INFN Trieste