

KOTO 実験におけるビーム外縁部を覆う中性子低感度な光子検出器の開発と性能評価

篠原智史

京都大学 高エネルギー研究室

KOTO 実験は $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊探索により標準理論を超える物理の発見を目的とした、大強度陽子加速器施設 J-PARC で行なわれている国際共同実験である。KOTO 実験では図 1 のように π^0 の崩壊により生じた 2 つの γ を CsI カロリメータで検出する。また、崩壊領域を覆うように veto 検出器群を設置し、 π^0 以外に何も無い (ν は検出されない) ということを保証する。ビーム下流にはビームホールを抜けてくる γ を veto するためのビームホール光子検出器 (BHPV) が設置されている。しかし、この BHPV はビーム中心に関しては高い背景事象削減力を持つ一方で、ビーム外縁部には不感領域があることが判明した。 $K_L \rightarrow 2\pi^0$ 崩壊は veto に使える γ が 2 つしかなく背景事象となりやすい。そのため新検出器を導入し背景事象の削減を図った (図 2)。

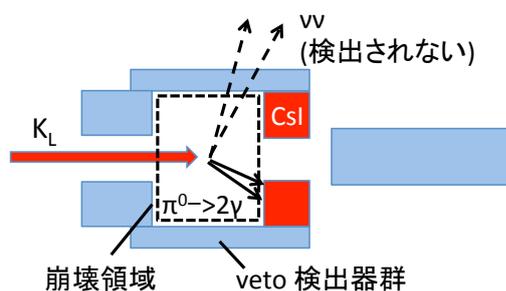


図 1 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の検出イメージ図。2 つの γ を捉える CsI カロリメータとそれ以外に何も無いことを保証するための veto 検出器が全立体角を覆うように配置されている。

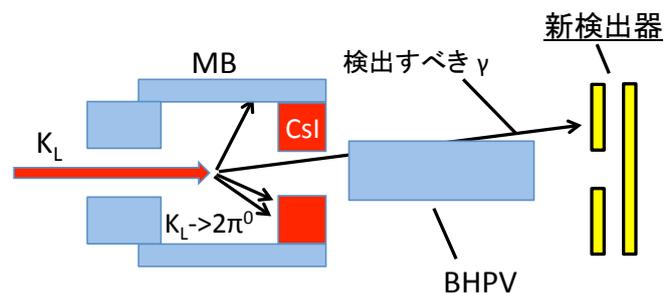


図 2 $K_L \rightarrow 2\pi^0$ 崩壊で背景事象となる例。1 つの γ がバレル型の検出器で veto できず、残りの γ が BHPV の不感領域に飛来し veto できない場合背景事象となる。新検出器でこうした事象の削減を図る。

本研究ではまず BHPV の不感領域による $K_L \rightarrow 2\pi^0$ 崩壊由来の背景事象数を見積もった。結果、標準理論感度で信号事象 1 イベントに対して背景事象は約 1.9 イベントとシグナルよりも多く残ることを明らかにした。また背景事象のうち BHPV に入射する 1 GeV 以上の γ が 1.4 イベントを占めていることがわかった。従って新検出器への要求として高エネルギー γ に対して高い感度を持つということを課した。また KOTO 実験はハイレート環境で行われている。検出器の平均レートが高くなると偶発的に信号事象を veto する確率が増えてしまう。そこで、検出器領域のビーム環境を調査し、ビーム外縁部には大量の中性子、低エネルギーの γ が残存していることを確認した。新検出器はこうした粒子に対して低感度であることが要求される。

示した削減すべき背景事象のためにビーム外縁部を覆う、鉛とアクリルで構成されたチェレンコフ検出器を考案した (Beam Hole Guard Counter、BHGC)。図 3 に示すように入射 γ は鉛内での対生成により電子陽電子になる。それらがアクリルに入射しチェレンコフ光を発生させ、そのチェレンコフ光をアクリル内で伝搬させたのち光電子増倍管で捉えることで γ の検出を行う。また一方で、陽子や荷電パイオンなど、中性子の反応由来の荷電粒子は、電子陽電子に比べ質量が重く速度が遅いため、チェレンコフ発光の閾値を超えにくい。さらに、発光が起きても、チェレンコフ角が小さくアクリル内を伝播する全反射条件をみたしにくい。この 2 つの性質を用い、中性子由来のヒットを削減する。

アクリルチェレンコフ検出器の理解のため電子ビームによる性能評価を行なった。また光学シミュレーションも行い検出器応答の評価をした。結果、シミュレーションはデータをよく再現することができ (図 4)、検出器応答のよい理解が得られた。

実機のデザインのためにビームテストで得られた検出器応答のもとシミュレーション

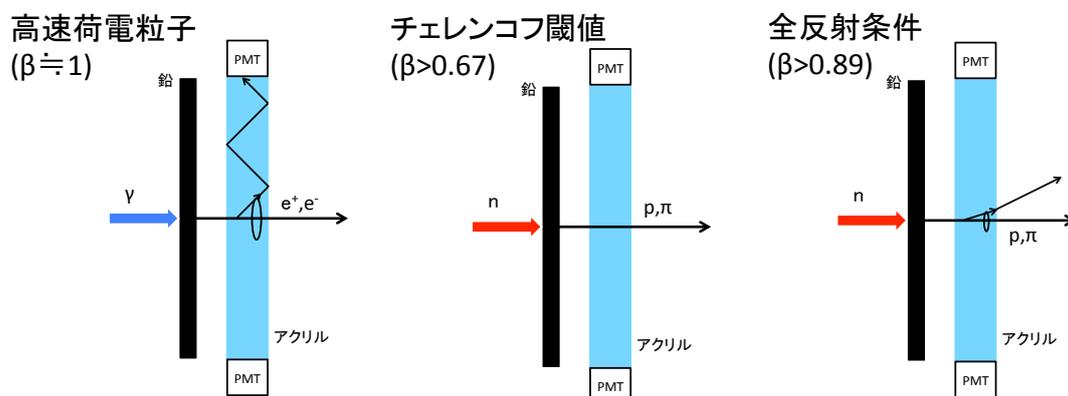


図 3 BHGC 検出原理のイメージ図。

を行い、BHGC デザインの最適化を行なった。最適化の結果、BHGC のデザインは、10 mm の鉛厚、鉛とアクリルの単層構造、ビーム中心からモジュール中心までの距離を 190 mm、threshold を 2.5 p.e. とした。このデザインでは、 $K_L \rightarrow 2\pi^0$ 崩壊由来の背景事象が標準理論感度で 1.9 イベント残存していたものを 0.66 イベントとシグナル事象よりも少なく抑えることができる。さらに、入射 1 GeV 以上のビーム外縁部に飛来する γ が作る背景事象数を 0.17 イベントと 90% 近く削減することができる。

BHGC は 2015 年 3 月にインストールが完了し、2015 年の KOTO 実験物理ランでデータを取得した。BHGC の 1 p.e. キャリブレーションの方法を確立した。また高速荷電粒子を選定する特別なランで BHGC 実機の時間分解能の評価とアクリルチェレンコフ検出器の光量測定を行なった。時間分解能は各モジュールで 0.5 ns 程度とよい時間分解能を達成した。また光量は $\beta \sim 1$ の荷電粒子に対して各モジュールで約 20 p.e. と、ビームテストのときと同等の光量を獲得でき、期待通りの性能を発揮していることがわかった。

1 光子の応答をラン中に定期的に評価することで PMT の安定性を担保した。また光量測定もラン中に定期的に行い、アクリルチェレンコフの発光量が安定していることを確かめ、放射線損傷の影響がなかったことを確認した (図 7)。ビーム中の BHGC の挙動についても評価した。ビーム中でもゲインの変動が有為にはみられないことを確認した。また

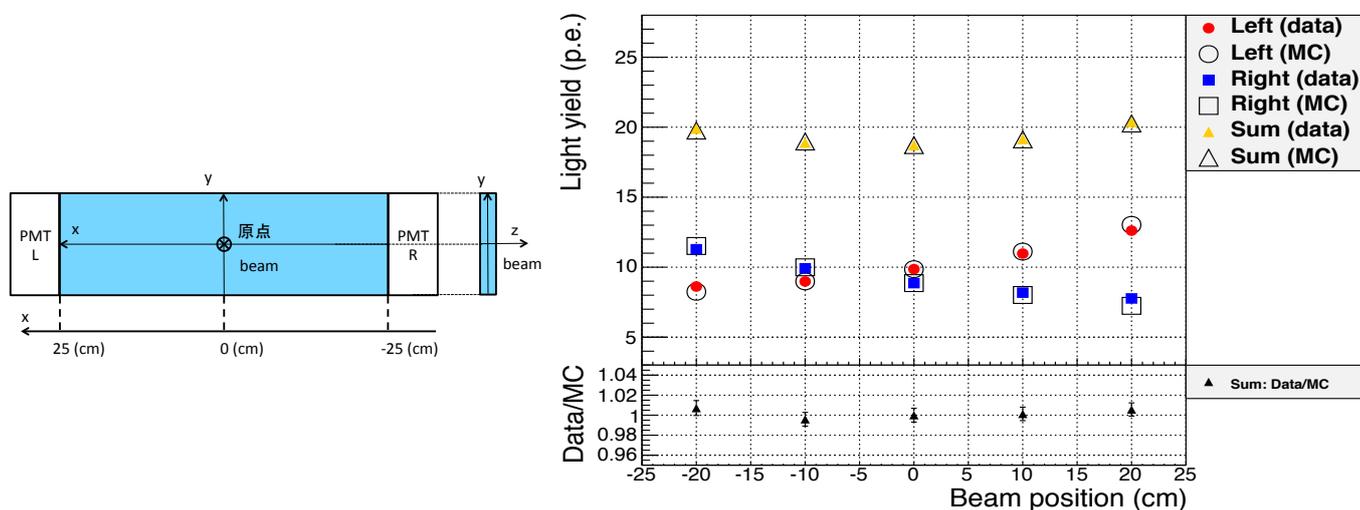


図 4 左図はアクリルの座標系、右図はアクリルの発光量の位置依存性の結果。右図上側のプロットの縦軸は獲得光量を表しており、右図下側のプロットの縦軸は各測定位置での合計光量のデータとシミュレーション結果を比較したものである。右図のレジェンドの Left は x 正側、Right は x 負側に対応する。シミュレーションはデータをよく再現しており、アクリル検出器の応答をよく理解できている。

カウンティングレートはシミュレーションで概ね再現できていることがわかった (図 8)。これら期待通りの動作と安定的な動作から、BHGC はデザイン通りの背景事象を削減できることが示せた。

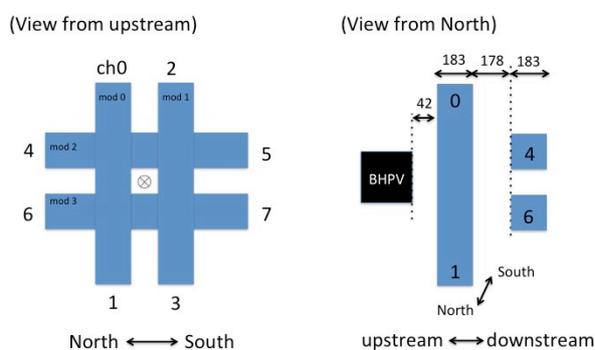


図 5 BHGC のチャンネル ID、モジュール ID

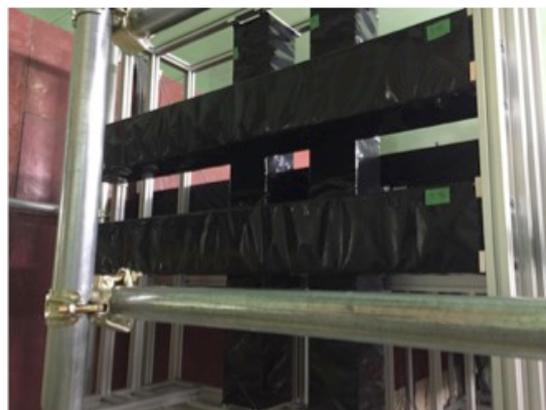


図 6 BHGC 実機のインストール後の様子 (下流側から見た図)。図のモジュールの位置はデザイン通りの位置のもの。

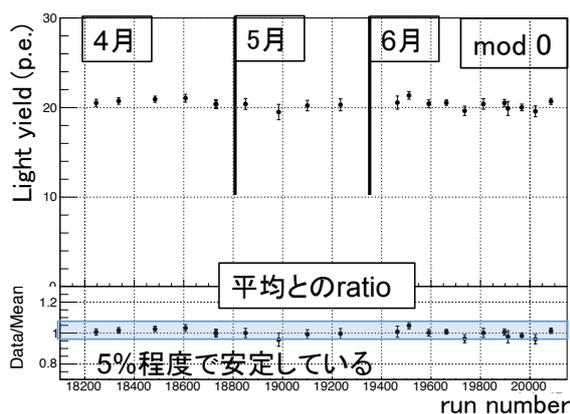


図 7 BHGC 1 モジュールの光量の安定性。上側のプロットは光量、下側のプロットは平均値との比になっており、安定動作をしていることがわかる。

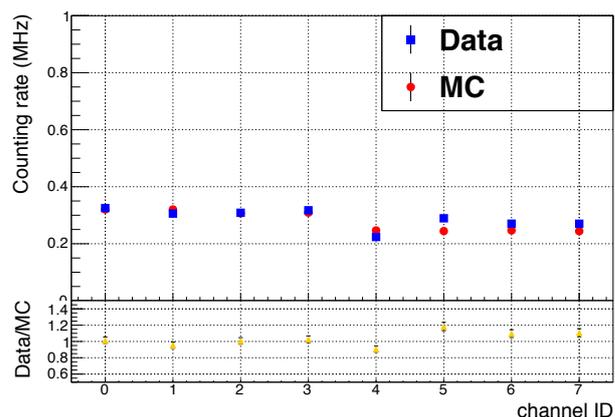


図 8 BHGC のカウンティングレート比較。データはビームパワーが 29.3 kW 時のもの。シミュレーションはデータを概ね再現できている。