(企画講演) 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

京都大学 高エネルギー研究室 篠原智史

23aSE-08





•KOTO実験

- ・ビーム下流光子検出器と $K_L \rightarrow 2\pi^0$ 崩壊背景事象
- アクリル検出器の原理と電子ビームを用いた応答の 評価
- 新検出器、BHGCのデザイン
- ・2015年KOTO実験でのBHGCの評価

KOTO実験

- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \overline{\nu}$ 崩壊探索を通じて新物理の発見を目指す
- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊
 - CP対称性を直接破る崩壊
 - loop diagramを持ち、新粒子が寄与しうる
 - 崩壞分岐比 : 3.0×10⁻¹¹
 - 理論的な不定性 :~1%
- 崩壊分岐比とその不定性の小ささから新粒子による寄与を大きく捉えることが可能



KOTO実験 @J-PARC

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設(J-PARC)で実験
 –リニアック→RCS→MRと陽子を30GeVまで加速
 –金標的に陽子を衝突させ大量の2次粒子を生成
 –K₁ビームラインに2次粒子を導く





KOTO実験

- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu} \sigma$ 終状態は π^0 由来の2 γ と観測されない ν
- 2γ + Nothingでsignalを同定
 - 2γ:Cslカロリメータ
 - Nothing: Veto検出器



$K_L \to 2\pi^0$ 崩壊背景事象



7

ビームホール光子検出器

ビーム下流にビームホールを抜けるγを捉えるための光子検
 出器 (BHPV) が設置されている

- BHPVはビーム外縁部に対して感度が低い

- 低感度領域による背景事象が問題に



新検出器による背景事象削減





新検出器への要求

- K_L→2π⁰ 崩壊でBHGCが削減すべき背景事象
 検出すべきγ
 - ・エネルギー
 - 飛来位置

・ 設置位置のビーム環境

- KOTO実験はハイレート環境での実験
- 検出器の平均レートが高くなる→偶発的に信号事象をvetoしてしまう
 確率が増える (accidental loss)

- 飛来する粒子	信号事象	
• 種類 • レート	Veto 信号 Vetoの時間窓	

削減すべき背景事象



- 信号事象1イベント(標準理論感度) に対するK₁→2^{π0}崩壊による 背景事象
- 検出すべきγのBHPVへの入射 エネルギー
 - -1 GeV以下: 0.52 ± 0.01
 - -1 GeV以上: 1.38 ± 0.26
 - →高エネルギー領域に高い感度が必要
- 検出すべきγをBHPV後方まで 外挿した際の拡散程度
 - 約 50 cm四方に渡り広がっている

→広範囲を覆う必要





ビーム環境

(100kWビーム時)

23aSE-08





粒子	レート (MHz)
中性子	17
γ	6.3
KL	0.13
電子、陽電子	0.55

・ 飛来する粒子のレートとエネルギー

-中性子やγが支配的 (平均エネルギー:~100 MeV)



中性子に対して低感度である必要

アクリルチェレンコフ検出器

・鉛とアクリルを用いたチェレンコフ型光子検出器 –チェレンコフ閾値と全反射条件の2つを用いる



➡ 中性子由来の反応を減らすことができる

電子ビームを用いたアクリル検出器の評価

• 電子ビームによるアクリル検出器の動作試験

 $-e^{-}$: 500MeV/c $\rightarrow \beta \doteqdot 1$

•本番、実機製作にむけて指標となる

- アクリル検出器の発光量測定 - 発光量のビーム位置応答性測定

・シミュレーションと比較することで応答







シミュレーションとの比較

- ・シミュレーション
 - チェレンコフ光の発生
 - 測定した透過率に基づく ray tracing
 - -獲得光量に対する補正係数
 - ・ PMTの量子効率を反映
- 光量分布を測定
 - 電子ビームをアクリルの中心に入射
 - 補正後のシミュレーションの光量分布は データを概ね再現

	補正係数
PMT L (x 正側)	1.15
PMT R (x 負側)	1.03

→得られた補正係数はPMTの量子 効率の違いで説明できる範囲 電子ビームにより得ら れた典型的な波形





光量分布比較

15

入射位値応答の比較

・ 電子ビームの位置を変えて発光量を測定

シミュレーションでは中心入射時に求めた補正係数を用いる



BHGCのデザイン決定

- $K_L \rightarrow 2\pi^0$ 崩壊のシミュレーションにより決定 - BHGCに飛来する γ にはあらかじめ背景事象となる危険性に応じて重み をもたせておく 黄色:鉛
- BHGCのパラメーターを変えて 最適化
 - 鉛厚
 - 設置位置
 - 層構造
- ・背景事象の削減力、簡易さを考慮
 し、デザインを決定する



16

モジュールの配置: 井桁状に4モジュール

残存背景事象数とデザインの関係

各種パラメーターを変えて削減力を比較

- ···BHGCモジュールの鉛厚
 - ・・・鉛とアクリルのサンプリング構造

- 構造

- 鉛厚

- 設置位置 ・・・モジュールとビーム中心の距離



この結果から、鉛厚は10 mm、鉛-アクリルの単層構造、 アクリル中心とビーム中心の距離は190 mmに決定

実機デザインに見込める性能

決定したデザインのもとでの背景事象削減力
 - 信号事象1イベント(標準理論感度)に対しての背景事象数で評価

	検出すべきγ 全エネルギー	検出すべきγ 1 GeV 以上	
w/o BHGC	1.90 ± 0.27	1.38±0.26	0.0%
w/ BHGC	0.66 ± 0.03	0.17±0.03	reduction

 ・背景事象の削減:
 BHPVへの入射エネルギー1 GeV以上のγによる背景事象を 90%近く削減可能なデザイン 信号事象1イベント(標準理論感度)に対して抑えられている

実機デザインでの性能

- 入射粒子に対するefficiency (1モジュール)
- 入射中性子に対してメインであるlow energy領域で低感度を 達成している



2015年度KOTO実験でのBHGCの評価

・デザインをもとにBHGCを製作、2015年3月にインストール

KOTO実験はBHGCと共に物理データを取得

デザイン通りの性能を保証するため

1.BHGCの発光量を確認
-ビームテスト時の光量と比較
-長期安定性についても確認
2.カウンティングレートを算出
-シミュレーションと比較



BHGCインストール

・2015年2~3月にかけて製作、インストールを行った



1p.e. gainの安定性確認

- 物理ラン中に数ランについて1p.e. gainの安定性について調べた
- 4-6月にわたって数%
 で安定
- PMTは安定的に動作 している





BHGCの光量測定

- Cherenkov光の発光量: $\frac{d^2N}{dxd\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \left(1 \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right)$
- →βの不定性を減らすことが重要





- 高速荷電粒子を選定
- ・両読みの合計光量で評価

 平均光量は約20p.e.
- →ビームテスト時と同等の光量を 獲得
- →想定通りの動作を保証
- ・長期安定性についても保証
 - 5%程度で安定
 - 放射線損傷もみられない

→<u>デザイン通りの背景事象の</u> <u>削減を期待</u>



カウンティングレート

- ・実験中のBHGCのレート をチェック
 - 閾値を 2.5 p.e. に設定
- クロックトリガーで取得し
 たデータで試算
- 1チャンネルのレート (29 kW) : ~300 kHz
- シミュレーションはデータ
 をよく再現している
 デザイン通りの性能を発揮
- accidental loss : 1.5 %
 - 小さく抑えられており、運用上も問題ないことを確認





- KOTO実験に用いる新たな光子検出器として、鉛とアクリルで 構成された光子検出器 Beam Hole Guard Counter (BHGC)
 を提案し、開発と性能評価を行った。
 - 信号事象1イベント(標準理論感度)に対して小さく抑えられるデザイン
 - -2015年3月にBHGCは実験エリアにインストール、物理データを取得
 - 検出器の安定動作、シミュレーションの再現性を保証
 - デザイン通りの背景事象の削減を期待
- •BHGCは $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \overline{\nu}$ 崩壊探索に有効な検出器である



多くの方々のご協力によって研究させていただき、結果としてこ のような賞をいただけることになりました。 ここに感謝申し上げます。

特に京都Kaonグループの皆様、東北大学電子光理学研究センターの方々、J-PARCで運営に携わった方々には厚く御礼申し上げます。

またKOTO実験コラボレーターの皆様、京都高エネルギー研究 室の皆様にも感謝申し上げます。 ありがとうございました。

27

END

BHGC実機のデザイン

シミュレーションを行いデザインを最適化

- その他検出器のvetoをかけた状態でBHGCの背景事象削減力、構造 体の簡易さを加味する

BHGCでvetoする前のKL->2pi0崩壊の背景事象数まとめ						
BHPVと関 係ないもの	6.23±0.43					
w/o BHPV	98.4±6.1					
w/ BHPV	2.26±0.27	有感領域内	0.36 ± 0.05	新検出器B 減すべき背	新検出器BHGCが削 減すべき背景事象	
		有感領域外	1.90 ± 0.27	1 GeV以上	0.52±0.01	
				1 GeV以下	1.38±0.26	



2013年5月			Tight threshold and upgraded MB				
BHPVと関係 ないもの	6.23±0.43			BHPVと関係 ないもの	0.72±0.08		
w/o BHPV	98.4±6.1			w/o BHPV	6.90±1.08		
w/ BHPV	2.26±0.27	有感領域内	0.36±0.05	w/ BHPV	0.20±0.06	有感領域内	0.03±0.01
		有感領域外	1.90±0.26			有感領域外	0.17±0.06
w/(BHPV +BHGC)	1.00±0.06	有感領域内	0.35±0.05	w/(BHPV +BHGC)	0.10±0.06	有感領域内	0.03±0.04
		有感領域外	0.66±0.03			有感領域外	0.07±0.04

- BHGCが削減すべき背景事象
- K_I->2π⁰崩壊



even (2gamma->同じπ0)



odd (2gamma->違うπ0)



1p.e.キャリブレーション

- モジュール上部に取り付けたLEDを低 光量で光らせ、1p.e.キャリブレーション
 を定期的に行う
- ポアソン分布とガウシアンたたみ込み
 でフィッティング
- ラン中の安定動作を保証





34

•角度依存性



実機デザインに見込める性能

カウンティングレート予測 - プラスチックシンチレータとも レートを比較

- レートはアクリル検出器の方が 0.67倍と低く抑えられている
- 背景事象削減力は双方とも 変わらないことを確認済み

→アクリル検出器の優位性



37

ビーム状況

2015年4月24日にハドロン施設のビーム利用運転が正式に 再開した



1p.e. キャリブレーション

モジュール上部に取り付けたLEDで較正







10³

10²

Beam loading effect

 1 p.e. gainがbeam on spill時に変動して いないか



	1 p.e. gain (counts/p.e.)
off spill	83.5 ± 1.70
on spill	86.4 ± 1.80



Accidental loss

物理トリガーからBHGCのvetoレートを計算

- accidental lossを評価

- BHGC 8chのorのレート - 3.6 MHz
- veto windowを15 ns
 とすると、accidental lossは -5.3 %



・ビーム環境が悪いにもかかわらず低いaccidental lossを達成

accidental loss

- accidental loss (A.L.)
 - signalを偶発的にvetoしてし まうことによるloss
 - $-A.L. = 1 e^{-RT}$ R:カウンティングレート
 - T: vetoの時間幅
- accidental loss : 1.5 % (15ns window)
 - →低く抑えられている
 - 100 kW (KOTOデザイン値)
 のビーム強度でもlossは5%
 程度
 - デザイン強度でも十分運用が 可能であることがわかった

