

平成22年 6月10日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19540259
 研究課題名（和文） 中高エネルギー中性ビームラインのための
 汎用広面積 n / モニタ検出器の開発
 研究課題名（英文） Development of a beam monitor counter for intermediate energy
 neutrons and photons
 研究代表者
 吉田 浩司（YOSHIDA HIROSHI）
 山形大学・基盤教育院・准教授
 研究者番号：80241727

研究成果の概要（和文）：中性K中間子をはじめとする、中高エネルギーの中性粒子ビームラインで使用できる、汎用の n / モニタ検出器の開発について研究を行なった。検出器は鉛 - プラスティックあるいは鉄 - プラスティックのサンドイッチ構造とし、ビーム強度、エネルギー、ビームプロファイル等をモニタできることを目指した。GEANT4 を用いた数値シミュレーションにより、有効な検出器デザインを追求するとともに、東北大 CYRIC および J-PARC KL ビームラインにおいて、テスト検出器によるビームテストを実施した。

研究成果の概要（英文）：We studied detector designs for monitoring neutrons and photons at neutral beam line of intermediate energy. These detectors assumed to have lead-plastic or iron-plastic sandwich structures. Optimized counter design was considered from many aspects for measurements of beam intensity, energy, profile and so on, by using the Monte-Carlo simulation GEANT4. A prototype counter, which was built for beam surveys of KEK E391a and J-PARC E14, was tested at the neutron beam line of CYRIC and at the KL beam line of J-PARC.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2007年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 2008年度 | 2,300,000 | 690,000 | 2,990,000 |
| 2009年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |

研究分野：数物系科学

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：サンドイッチ型検出器, 線に対する応答, 中性子線に対する応答, n / 分離, 中性Kビームライン

1. 研究開始当初の背景

直接 CP 対称性を破る $K^0_L \rightarrow 0$ 反応は、標準理論により予想されている分岐比は 10^{-11} 程度と大変小さいものであるが、一方で理論計算による不定性も数%程度と大変小さいと考えられていて、CKM 行列要素を決める上できわめて重要な反応である。本研究申請時に得られていたこの反応の実験の上限値は 5.9×10^{-7} であり、上記の予想より 4 桁も大きく、この反応は K 崩壊で残された最大の実験対象といわれている。

このギャップを埋めていくことは、KEK-PS E391a と J-PARC におけるその将来計画において大きな挑戦となっている。山形大学を含めた我々実験グループは、KEK E391a 実験において 3×10^{-10} の感度でこの反応を探索し、その経験を生かして、将来の J-PARC では 3×10^{-13} の感度で実験をおこない、この反応の分岐比を精密に測定することを目指している。(J-PARC における実験計画は E14 として正式に採択された。)

2. 研究の目的

$0 \rightarrow 2$ の kinematics を精度よく決めることが実験の成否を左右するので、Endcap 部に設置されるカロリメーターの性能と並んで、ビームの質が大変重要な要素である。

$0 \rightarrow 2$ 系の横運動量 PT の分解能 PT は K^0_L beam の横運動量の広がりでほとんど決まってしまう。したがって K^0_L beam を極細の pencil beam とし、その入射方向とビーム口径は厳しく制御されなければならない。ビームライン中の n/γ は、物質との相互作用により 0 を生成する。したがって崩壊領域を高真空にし、バックグラウンドの抑制を図るのはもちろんのことであるが、あらかじめ数値シミュレーションやモニタ検出器による測定を通して、ビームライン中の n/γ の様子は詳しく研究されなければならない。

本研究の目的は、KEK-PS E391a の実験装置、特に Barrel counter と呼ばれる鉛 / シンチレーター=サンドイッチ型検出器の建設で培ったノウハウを生かし、J-PARC E14 における K^0_L ビームラインの建設や、その他、中高エネルギーの中性粒子ビームラインで使用できる、汎用の n/γ モニタ検出器を開発することである。 n/γ のビーム強度だけではなく、粒子のエネルギースペクトル、さらには 0 のビームプロファイルや中性子ハローの様子までモニタ可能なように、位置測定機能まで持たせた、広面積で汎用な検出器の開発をめざす。

本研究では以下のような検出器構成を研究の出発点とする。(1) 鉛とプラスチックシンチレーター、あるいは鉄とプラスティッ

クシンチレーターの組み合わせによるサンドイッチ構造とする。(2) ホドスコープや WLS ファイバーを埋め込んだシンチレーターと組み合わせることにより、位置検出性能 (プロファイル測定性能) の獲得を狙う。(3) 検出器はビーム軸に沿って何段かにモジュール化する。入射した線は、1 段目のモジュールで電磁シャワーを形成するが、多くの中性子は 1 段目のモジュールを No Signal ですり抜けてしまう。このようにモジュール出力を論理的に組み合わせることにより、 n/γ 識別をおこなう。

実際の測定結果と数値シミュレーションによる結果とを、より詳細に比較検討できるような検出器の実現をめざす。

3. 研究の方法

計算機シミュレーションによる最適化

主に GEANT4 を用いて、線や中性子に対する応答を調べながら検出器構成の最適解を探っていく。

(1) サンドイッチ構造

(i) プラスティックシンチレーターと組み合わせる金属の検討。鉛の他に最適なものはあるか。

(ii) 鉛とプラスチックシンチレーターの厚さ。

(2) 粒子線に対する検出器の応答

(i) 線に対する応答。検出器内での電磁シャワーの成長を詳細に調べ、検出器内部での発光分布を類推し、集光系の最適配置を考察する。また、検出器の位置分解能も検討する。

(ii) 中性子に対する検出器の応答。検出器内での核反応の様子を詳細に調べ、陽子などによる検出器内での発光分布や光量を調べる。中性子ハローの形を仮想的に作り、シミュレーション上で検出器に入射させる。そのとき、検出器によってハロー分布がどのように再現されるか詳細に調べる。

(3) 位置測定性能

(i) 集光系の幾何学的配置を検討する。

(ii) シャワーや反跳粒子の分布傾向の簡便な関数化は可能か調べる。

(4) 検出器の時間応答

(5) モジュール構成と n/γ 分離効率の最適化

テストモジュールの製作あるいは改良

計算機シミュレーションの結果と、シンチレーターなどの素材についてのベンチテス

トの結果を受けて、テストモジュールを設計する。また製作コストを考慮し、既存のカウンターの改良により、本研究の目的が達成できるかも検討し、必要な作業を行なう。

宇宙線測定によるベンチテスト

ビームテスト

東北大 CYRIC および J-PARC KL ビームラインにおいて、テスト検出器によるビームテストを実施し、中性子線および線に対する検出器の応答性能を測定する。

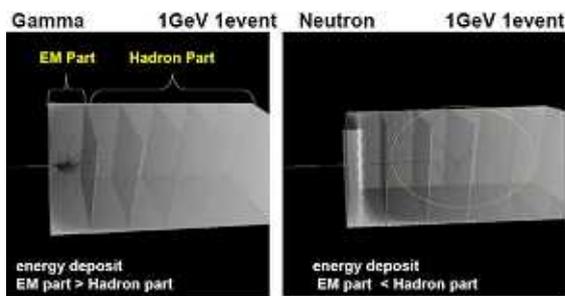
セットアップなど、実験条件を詳細に指定して、GEANT4 などによる数値シミュレーションを行い、取得した実験データとの比較検討を行う。まずはエネルギー分解能などの基本性能、Sampling Effect や Punch Through などによる検出器の不感率などの実験データが、それらのシミュレーションを通して理解できるものなのかどうかを慎重に検討し、検出器内での電磁シャワー、中性子、陽子、その他のハドロン粒子等の振る舞いへの理解を深める。

そのあと、山形大学グループのこれまでのさまざまな無機シンチレーターについての研究や、KEK E391a の検出器についての研究の成果も参照しながら、入射線、中性子線に対する応答関数を作ることを試みる。

4. 研究成果

計算機シミュレーションによる研究

上記計画に基づいて GEANT4 を用いて、線、中性子線に対する応答性能、位置測定性能についての研究を行なった。

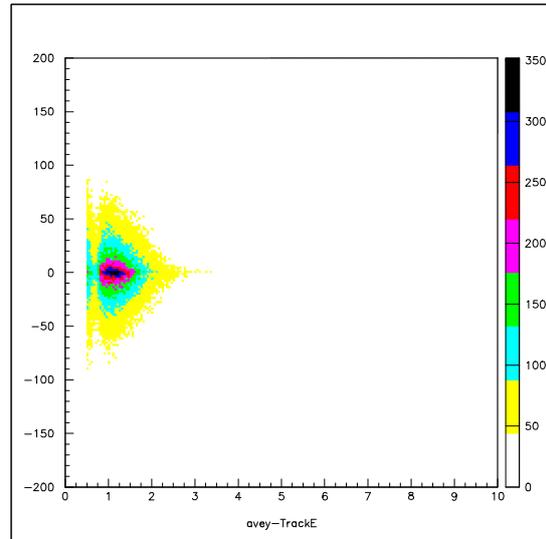


(図) サンドイッチ検出器内の粒子の振る舞い。
(左図) 線入射 (右図) 中性子線入射

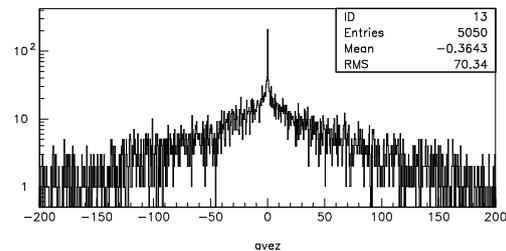
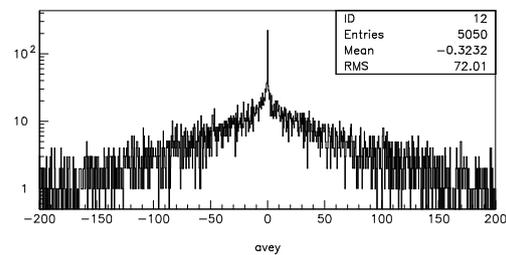
中性子入射に対しては、プラスチックシンチレーター内の荷電粒子が入射中性子の進行方向 1mm 以内の範囲にピークをつくること判った。このことから中性子の位置測定が可能な検出器の製作は可能であると結論できた。

中性子入射位置近傍のピークの高さと、そ

のベースラインにおけるイベント数の比を P/B ratio と定義し、検出器デザインやデータ解析等により、この値が改善できるかを探った。



(図) 位置分布と Track のエネルギー相関図。
縦軸が位置分布で、横軸が Track のエネルギー。



(図) プラスティックシンチレーター内における位置分布。P/B ratio を 2 倍以上改善できた。

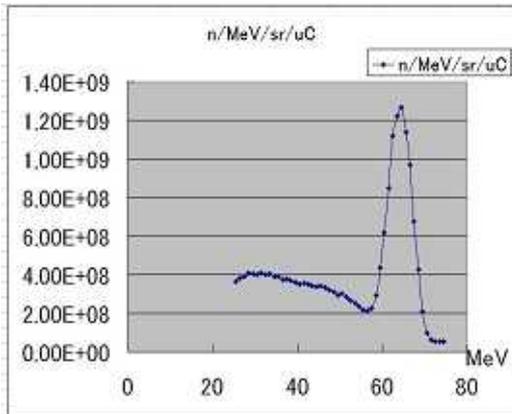
ビームテスト

(i) 東北大 CYRIC

約 65MeV の準単色の中性子ビームを実験に利用することができるのが CYRIC の利点である。GEANT4 などの数値シミュレーションコードにおいては、中性子を含め、中間エネルギー領域におけるハドロン反応のデータの不定性が大きいので、ビームテストによるコード検証は重要である。

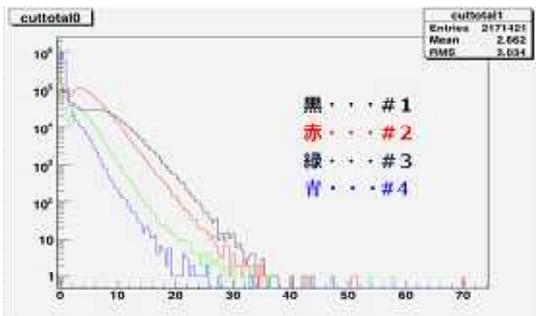
鉛 4mm / プラスティック 3.7mm の 25 層を電磁シャワーモジュールとし、鉄 4mm / プラスティック 3.7mm の 25 層を中性子モジ

ルールとして、検出器をくみ上げ実験を行なった。またエネルギー較正は宇宙線測定により行なった。



(図) CYRIC の準単色中性子ビームのエネルギースペクトル。

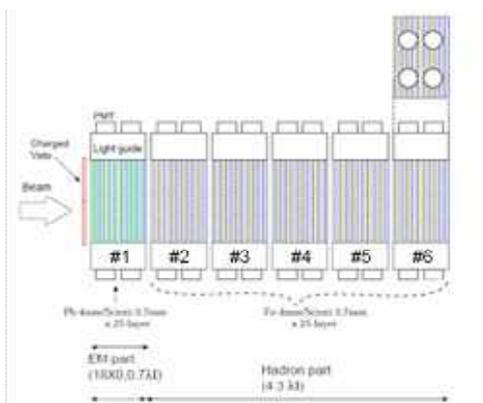
4つのモジュールについて、下図のようなエネルギー分布を得ることができ、現在、位置測定のために挿入されたホドスコブデータの解析とも合わせて、数値シミュレーションとの比較を行なっているところである。



(図) 4つのモジュールのエネルギー分布の変化 (横軸の単位は MeV)

(ii) J-PARC KL ビームライン

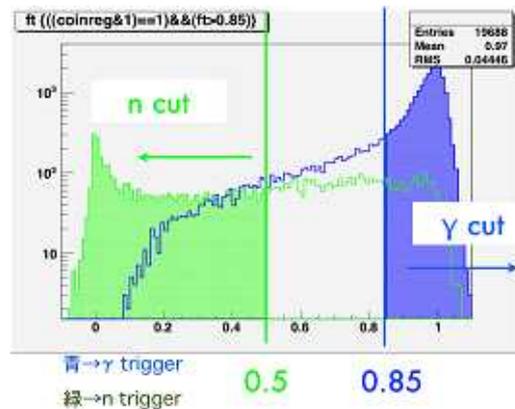
J-PARC KL ビームラインにテスト検出器を設置し、実地で n/γ の測定を試みた。



(図) 実験に用いられたテスト検出器

鉛 4mm / プラスティック 3.7mm の 25 層を電磁シャワーモジュールとし、鉄 4mm / プラスティック 3.7mm の 25 層を中性子モジュールとして、前者 1 台、後者 5 台からなる検出器を構成した。また位置検出に係る性能を検討するため適宜プラスチックシンチレーターホドスコブを挿入した。(有感領域は 40x40cm²)

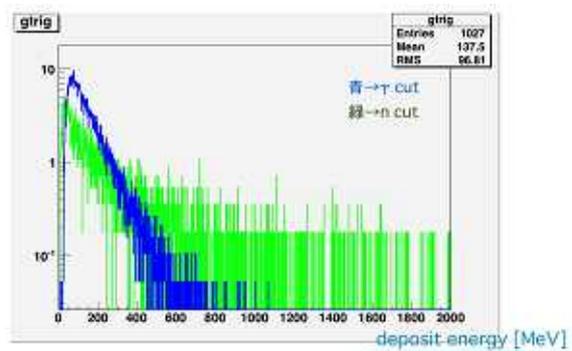
電磁シャワーパート (#1) での獲得エネルギー (F) と全モジュール (#1 - #6) の獲得エネルギー和 (T) の比を F/T ratio と定義し、数値シミュレーションの結果を参照しながら、 n/γ 識別を試みた。



(図) トリガーデータ (青) n トリガーデータ (緑) に対する F/T ratio スペクトル。F/T > 0.85 を 事象、F/T < 0.5 を中性子事象とした。

プライマリビームの SEC 情報を用い、エネルギースペクトルを規格化し、Core n/γ のエネルギー分布強度を求めた。

現在、それに引き続き、それぞれのモジュールの時間データ等の解析を詳細に行ない、Core n/γ 事象のデータをシェイプアップし、数値シミュレーションとの詳細な比較を行なっているところである。



(図) cut, n cut 後のテスト検出器の応答スペクトル (全モジュール和)

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)

Y. Tajima, J.K. Ahn, H.Y. Yoshida, et al.,
(計49名, 筆頭除きABC順48番目), Barrel
photon detector of the KEK $K^0_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$
experiment, Nuclear Instruments and
Methods in Physics Research **A592** (2008)
pp. 261-272. (査読有)

[学会発表](計1件)

佐々木 未来, KOTO 実験 KL ビームラインの Core と中性子の測定, 日本物理学会第65回年次大会, 2010年3月22日, 岡山大学.

[その他]

修士論文・卒業研究等

上林 智亮, J-Parc KL ビームラインモニタ用 n/\bar{n} 検出器 Cerberus の改良, 山形大学理工学研究科博士前期課程修士論文, 2009年3月.

黒田 結花, 中性子ビーム実験による Cerberus の性能測定, 山形大学理学部卒業研究, 2010年3月.

佐々木 未来, J-PARC 中性 K 中間子ビームラインでの Cerberus による n/\bar{n} の測定実験, 山形大学理学部卒業研究, 2010年3月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 浩司 (YOSHIDA HIROSHI)
山形大学・基盤教育院・准教授
研究者番号: 80241727

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

田島 靖久 (TAJIMA YASUHISA)
山形大学・基盤教育院・准教授
研究者番号: 50311577

佐々木 未来 (SASAKI MIKI)
山形大学・大学院理工学研究科・
博士前期課程1年

上林 智亮 (KAMIBAYASHI TOMOAKI)
山形大学・大学院理工学研究科・
博士前期課程2009年修了

黒田 結花 (KUROTA YUKA)
山形大学・理学部物理学科・2010年卒業