

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654087

研究課題名(和文) 中性K中間子ベータ崩壊の発見

研究課題名(英文) Discovery of Beta Decay for Neutral Kaon

研究代表者

南條 創 (Nanjo, Hajime)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40419445

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：K中間子のベータ崩壊発見を目指し、これを実現する検出器の開発を行ってきた。特に大強度中性子、ガンマ線入射環境で、荷電粒子検出効率99%の検出器を、ガスワイヤーチェンバーにより実現した。これは多線式比例係数管(MWPC)の一種、Thin Gap Chamberと分類されるものであり、12 μ mの薄いカソードと、CF₄とn-pentaneの混合ガス3.2mm厚で、合計5mg/cm²と非常に低物質質量でありながら、荷電粒子検出効率99%を実現した。さらにこの検出器を実際に利用する大強度KLビームラインにインストールし、動作検証を行った結果、ヒットレートも十分低く抑えられ、安定動作することを実証した。

研究成果の概要(英文)：A detector which enables the KL beta decay search experiment has been developed. A thin gap chamber is constructed with cathodes of 12- μ m thick aluminized mylar film and a 1.6-mm-thick gas volume of CF₄ and n-pentane gas mixture. In spite of its thickness of 5mg/cm², it can be operated in high-flux neutron and gamma beam line with 99% charged particle efficiency. It was tested in the actual high intensity KL beam line and was proved to be operated stably in it with an allowable hit rate.

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：KLベータ崩壊 thin gap chamber

1. 研究開始当初の背景

中性 K 中間子のベータ崩壊 (KL ベータ崩壊) は、 $KL \rightarrow K + e + \nu$ という崩壊であり、長寿命中性 K 中間子と荷電 K 中間子の質量差、わずか 4MeV を通じて起こる崩壊である。この崩壊は、以下 3 つの特徴をもつ。1) 崩壊分岐比が、小林益川行列の行列要素 $|V_{ud}|$ に比例し、この測定が出来る。2) 未発見モード。3) $KL \rightarrow K + e + \nu$ と、 $KL \rightarrow K + e + \bar{\nu}$ と、両方が可能であり、この分岐比の差を測定することで、CP 非保存を測定できる。

(1) V_{ud}

小林益川行列のユニタリティの破れは、新物理を意味するが、現在 2.5σ 程度、1 から小さい値となっており、新物理の可能性もあり、注目に値する。この観点で、 V_{ud} の測定は重要である。 V_{ud} は原子核の超許容遷移のベータ崩壊から最も精度よく決定されている。これには、核構造などの不定性があり、また、中性子のベータ崩壊からの値とも矛盾している。そこで、より不定性の少ない、 π 中間子のベータ崩壊が注目され、0.3% の精度で V_{ud} を決定しているが、まだ精度が不十分である。この状況の中、K 中間子のベータ崩壊も、同様に理論的な不定性が小さく、また、日本の J-PARC 加速器に於いて、大強度中性 K 中間子ビームラインも建設され、高統計での測定も視野に入ってきていた。この観測、測定が実現すれば、KL ベータ崩壊による高精度 V_{ud} 測定の実現となり、新物理探索の重要なプローブとなると考えた。

(2,3) KL ベータ崩壊の発見、CP 非保存

KL ベータ崩壊は、わずか 4MeV のエネルギー差で実現しており、標準理論の予測分岐比は、 0.5×10^{-8} と稀な崩壊モードである。実験的な同定も難しく、未だ探索事例はな

い。世界に先駆け、本崩壊を発見し、新規 CP 非保存観測モードを開拓することも同様意義深いものであると考えた。

2. 研究の目的

KL ベータ崩壊の発見、100 事象の観測を行い、KL ベータ崩壊を用いた、 V_{ud} 測定及び CP 非保存モードの開拓を目指すものであった。

3. 研究の方法

J-PARC に建設された新規大強度 KL 中間子ビームラインを用いる。このビームラインでは、陽子ビームを標的に衝突され、その崩壊粒子をコリメータで絞り、荷電粒子を磁石で排除し、20m の長尺ビームラインとすることで、短寿命粒子を崩壊させきる。そして、ビームライン出口以降では、KL 中間子のほか、中性子、ガンマ線の中性粒子が飛来する。本崩壊はわずか 4MeV のエネルギー差で起こるため、飛行している KL 中間子の崩壊に対して、崩壊生成粒子の荷電 K 中間子、電子は、前方にブーストされやすく、中性 K 中間子ビーム中へ崩壊していきやすい。そこで、中性子、ガンマ線が大量に含まれるビーム中に、荷電粒子検出器を設置し、荷電 K 中間子、電子の同定を行うことで本崩壊モードの発見を目指す。

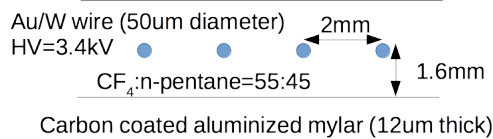
この手法のポイントは、中性ビーム中で稼働する荷電粒子検出器である。中性子、ガンマ線との反応による高ヒットレートを抑制すべく、低物質量のガス検出器、MWPC を用いる。さらにその中でも、wire-cathode ギャップの短い、thin gap chamber というタイプを用いることで、比較的高ヒットレート環境でも、安定に動作することが期待された。こういった難しい環境下でも性能を発揮する検出器の開発についても、このような実験の可

性能を拓くものであり、重要な意義がある。

また荷電 K 中間子の同定には、チェレンコフ発光を用いる。特にフィッチタイプと呼ばれる検出器を用い、荷電粒子の速度に対して、上限、下限の範囲内の粒子にのみ発光を観測できる。

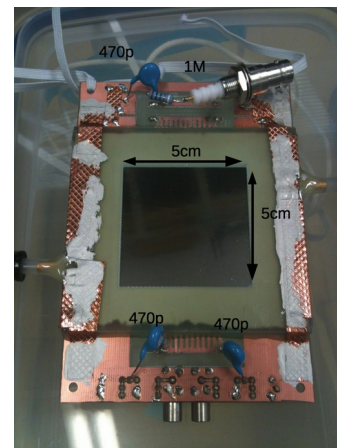
4. 研究成果

実験を実現させるべく検出器のプロタイプの製作を重ねた。特にチャレンジングであった、高ガンマ中性子入射環境で動作する MWPC、Thin Gap Chamber を応用したガス検出器について詳述する。下図のような構造であり、従来の Thin Gap Chamber と比べ、

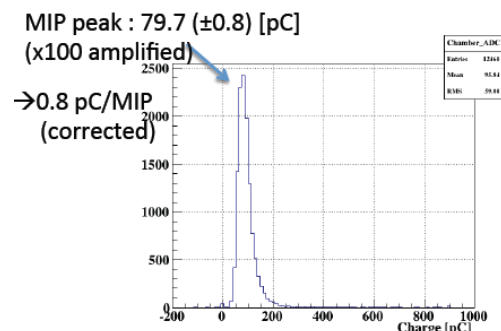


カソード面を薄いアルミナイズドマイラーフィルムで製作したことが、大きな差である。この物質が増加すると、そこでビーム中のガンマ線が反応し、電子陽電子が生成され、1cm²あたり 1MHz を越える高いヒットレートをもたらす。この為、極力薄い 12um 厚みのフィルムを選択した。アルミ蒸着面が電極になるが、さらにこの上にカーボン塗料を塗布することで、カソード面の電極を形成した。これは、光電効果を引き起こす仕事関数が高いカーボンを用いることで、ガス増幅時に発生する大量の紫外線光子がカソード面で光電効果を起こし、広いエリアで続発信号を発生し、動作が不安定になることを防ぐものである。薄いフィルムにすることに

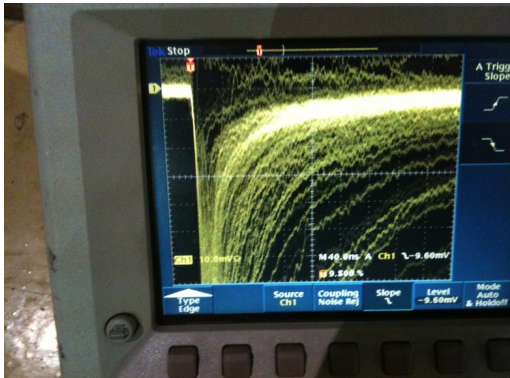
よる大きな問題点は、この撓み、静電気力による引っばり、ガスの差圧による膨れなどにより、ワイヤーとカソードのギャップを一様、一定に保持することが難しい点である。これについては、フィルムを引っ張りながらフレームに接着することで、100um 程度の変位を抑える。Thin Gap Chamber を高ゲインの制限比例領域で動作させることにより、この変位に対しても、ゲイン変動が10%程度におさまる。この観点も Thin Gap Chamber 特有のメリットである。さらに、チェンバーガスに、CF₄:n-pentane=55:45 を採用した。Thin Gap Chamber では、CO₂:n-pentane または CF₄:iso-butane が使用さ



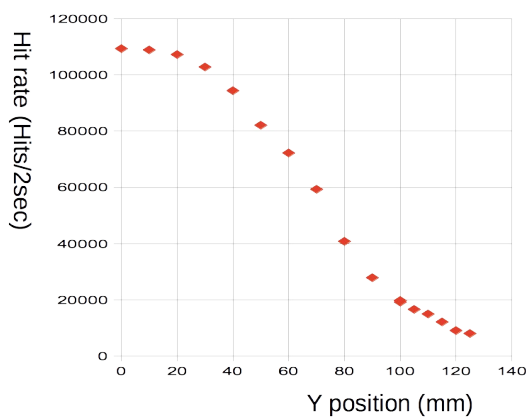
れるが、今回は CF₄ の高速応答による高ヒットレート耐性と n-pentane の高い紫外線光子吸収能力による高ゲイン安定性の両方を兼ね備えるべく、新規の混合ガスを用いた。上図のようなプロトタイプを製作し、特性を評価した。90Sr 線源による β 線に対する応答では、下図 ADC 分



布のような応答を得て、MIPピークの1/4以上を検出することで、99.5%の検出効率を達成した。科研費最終年度の2013年5月には、Thin Gap Chamberを、J-PARCの大強度KL中間子ビームラインにインストールして、動作検証を行った。先のプロトタイプをビーム中に設置し、かつ位置を動かして、ビームの中をスキャンし、ヒットレートと



動作の安定性を確認した。上のオシロスコープの写真から、ビーム中でも大きなゲイン低下が見られず、かつ低エネルギー領域にも大きなレート寄与がないことが分かる。ガス検出器では100eV程度の僅かなエネルギー損失にも感度があるので、通常気にならない低エネルギーのX線などにも影響されるが、実際のビーム中での環境でも



問題にならないことが示せた。上図はビーム中をスキャンした際のヒットレートである。中心部で2秒間で11kヒットで予想通りの応答であり、稼働に問題はないことも確認できた。

以上のことより、実際にこのような検出器により、中性ビーム中で荷電粒子検出が可能なことを実証した。

運悪くこのビームラインが建設された、ハドロン実験施設において、異常ビーム取り出しによる標的溶解、放射能漏れ事故が起り、それ以降のJ-PARC運転がストップしてしまった。このため、2013年後半でのKLベータ崩壊探索が不可能になってしまった。一方、これを実現するための検出器の研究を重ね、大型化や読み出し部分の改良を重ねた。その結果、99%を上回る検出効率で、高ヒットレート環境でも、安定に動作する検出器を生み出すことが出来た。

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 件)

[学会発表] (計 件)

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 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 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

南條 創 (NANJO Hajime)

研究者番号：

40419445

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：