

平成22年 6月 1日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008～2009

課題番号：20840047

研究課題名（和文） K中間子原子核探索のための陽子検出器の製作

研究課題名（英文） R&D of proton detector for kaonic nuclei search experiment

研究代表者

藤岡 宏之 (FUJIOKA HIROYUKI)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：30513395

研究成果の概要（和文）：

大強度陽子加速器施設 J-PARC における K 中間子探索実験（E15 実験）では負 K 中間子をヘリウム 3 標的に照射し、そこから放出される中性子を検出することで K^-pp 束縛状態の探索を行う。一方で中性子の代わりに陽子が放出される事象も調べることができれば、それらの比較により反応のアイソスピンに関する情報を引き出すことができると考えられる。本研究では、散乱された陽子と標的で反応せずすり抜けたビーム K 中間子を区別するための陽子検出器の設計・製作を行った。

研究成果の概要（英文）：

An experimental search for kaonic nuclei is planned at J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex). In the experiment, scattered neutrons from a helium-3 target after bombardment with negative kaons will be detected. If one can detect scattered protons as well as neutrons, the comparison of both the two channels will enable us to get a better understanding of the isospin dependence of the reactions. In this work, I have designed a proton detector in order to distinguish the scattered protons from antikaons, which passed through the target without interaction.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,320,000	396,000	1,716,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,520,000	756,000	3,276,000

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：ストレンジネス、K中間子原子核、強い相互作用、J-PARC

1. 研究開始当初の背景

通常の原子核は陽子と中性子だけから構成されるが、反 K 中間子が強い相互作用により原子核に束縛された K 中間子原子核の存

在が近年予想され、最も単純な系である K^-pp という 3 体の束縛状態については様々な理論計算が行われている。

一方、実験によって K^-pp 束縛状態を探索す

る試みもなされている。

イタリア・フラスカティにある電子・用電子加速器 DAΦNE における FINUDA 実験では、負 K 中間子をリチウムや炭素の原子核標的に静止させ、負 K 中間子が原子核に吸収された後に放出される Λ 粒子と陽子を検出した。その結果、両粒子の放出方向に関して強い反対向きの相関を観測したと共に、その不変質量が、始状態と考えられる負 K 中間子と 2 個の陽子の質量和と比べておよそ 100MeV 程度減少したところにピークを持つことが分かった。これらの結果は深く束縛した K_{pp} 状態の存在を示唆するものであったが、それ以外の解釈によっても説明ができてしまう可能性がある。例えば、2 核子吸収によって放出された Λ 粒子と陽子が、それ以外の原子核と終状態相互作用を起こすことにより運動エネルギーを失い、最終的な両粒子の不変質量が減少して見える、という解釈がある。

K 中間子原子核の存在は現時点では確定しておらず、K 中間子原子核の生成と崩壊の一連の反応を同時に測定する実験を行うことで、より詳細な情報が得られると考えられている。

そこで、大強度陽子加速器施設 J-PARC において負 K 中間子ビームを用いた K_{pp} 束縛状態の探索実験 (E15 実験) が提案された。1.0GeV/c の負 K 中間子ビームをヘリウム 3 標的に照射し、前方に散乱されて出てくる中性子を検出する [(K, n) 反応]。そしてミッシングマス法により、生成された K_{pp} 状態の質量を求める。また、 K_{pp} 状態は Λ 粒子と陽子への 2 体崩壊という特徴的な崩壊モードを持つと考えられており、標的の周りに設置した円筒型検出器群によりこの 2 粒子を捉えることで、バックグラウンドを低減する。このように、生成と崩壊による終状態の粒子を全て検出することで、バックグラウンドの不定性を抑えることができ、K 中間子原子核の存否について理解を深めることができると考えられる。

ところで、K 中間子原子核は反 K 中間子と核子の間に働く引力のおかげで束縛するとされているが、2 体間の引力は強いアイソスピン依存性を持つことが知られている。アイソスピンの和が 0 の時に特に強い引力が働くために、負 K 中間子は中性子よりも陽子を強く引きつける。

このようなアイソスピン依存性は上記のような生成反応にも影響を及ぼす。E15 実験で測定するのは (K, n) 反応であるが、前方に中性子ではなく陽子を放出する (K, p) 反応を同時に測定することができれば、両者のミッシングマス分布の比較が可能になる。例えば、(K, p) 反応においても、E15 実験で探索している K_{pp} 状態のアイソバリックアナログ状態である K_{pn} 束縛状態を示すピーク

が観測される可能性はあるが、その強度は (K, n) 反応のそれと比べて小さくなると考えられる。

申請者は以上の実験提案をプロポーザルにまとめた (P28 実験)。

2. 研究の目的

P28 実験は、E15 実験のセットアップに若干の修正を加え、前方に散乱された陽子を識別する検出器をインストールすることで実施可能となる。

ヘリウム 3 標的の下流には、測定したい陽子の数と比べて、標的で反応せずにすり抜けた K 中間子のビームが圧倒的に多く通過するため、K 中間子と陽子を高い効率で識別できる検出器をトリガーに加えることがデータ収集にとっては必須である。両者の速度が異なるという特徴に着目し、チェレンコフ検出器を標的のすぐ下流に設置することとした。

チェレンコフ検出器は、屈折率 n の媒質中を c/n (c は光速) 以上の速度を持つ荷電粒子が通過した時に発生するチェレンコフ光を検出することにより、速度に関する情報を引き出すための検出器である。本研究ではガラスの全反射型チェレンコフ検出器を用いることにした。ガラスの周りに反射材を巻かず、チェレンコフ光がガラスと空気の境界面で全反射を起こした場合のみチェレンコフ光が光電子増倍管に到達するようにする。チェレンコフ光の放射角と全反射条件を組み合わせると、荷電粒子が垂直に入射した場合には速度が $c/\sqrt{(n^2-1)}$ 以上の場合に全反射条件を満たす。

屈折率が 1.53 前後のガラスを用いれば K 中間子は全反射条件を満たし、測定したい運動量領域 (1.0–1.4GeV/c) の陽子は全反射条件を満たさないので、全反射チェレンコフ検出器が応答しなかった場合にのみデータを収集すれば、K 中間子ビームが標的をすり抜けた事象を除去することができる。

実際には、ビームも散乱された陽子も角度拡がりを持つため、有限の角度で検出器に入射する。またガラスの屈折率は波長の関数になっているため、チェレンコフ光は波長によってわずかに異なった放射角を持つ。また、全反射条件を満たしてもガラス表面での反射毎に光量が減少することも考慮する必要がある。本研究ではこれらの影響を調べるためにシミュレーションを行うとともに、宇宙線や加速器のビームを用いたテスト実験を通じて全反射型チェレンコフ検出器の性能評価を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

全反射型チェレンコフ検出器に用いるのに適した屈折率を持つガラスとして、Schott 社のホウケイ酸ガラス BK7 と日本板硝子社

のスーパークリアガラスの2種類を検討した。

それぞれのガラスについて内部透過率、屈折率の波長依存性を調べ、それを元にしたGeant4によるシミュレーションを行った。まず5mmの厚さがあれば十分な光量が得られることが分かった。あまり分厚いガラスを用いると、(K, n)反応から出てくる中性子がガラス中で再度反応を起こしてしまう割合が増えてしまうため、今回はガラスの厚さを5mmと決定した。

チェレンコフ検出器の光電子増倍管で測定される光電子数はポアソン分布に従うため、平均光電子数を大きくすることにより検出効率を高めることができる。そのための工夫としてウルトラバイアルカリを光電面とする量子効率の高い光電子増倍管を用いることも検討した。今回の研究ではヘッドオン型のH6522とメタルパッケージ型のR7600U-203(ともに浜松ホトニクス社製)を用いた。前者は有効面積が大きい光電面はバイアルカリであるのに対し、後者は $18.1 \times 18.1 \text{mm}^2$ の有効面積しか持たないが、ウルトラバイアルカリの光電面のために量子効率は高くなっている。チェレンコフ光は短波長のほうが多く放射されるために、紫外領域にも感度があるほうがよい。そのため両者はともにUVガラス窓を持つ。

ガラス・光電子増倍管の様々な組み合わせについてシミュレーションを行った。その際に、ビーム光学シミュレーションから見積もられたビームの位置、角度拡がり、検出したい陽子の運動量領域や角度領域を考慮し、粒子の入射角度や入射位置による平均光電子数の依存性を調べた。それによれば、ビームの拡がりを考慮してもK中間子が入射した場合には十分な数の光電子数が検出され、逆に散乱した陽子については入射角が3度以内であればチェレンコフ光はほとんど光電子増倍管に到達しないことが分かった。

K中間子、陽子どちらの場合も入射角が大きくなってくると、全反射条件が変わってくるため、ガラスのどちらかの方向にだけチェレンコフ光が何度も反射されやすくなる。そのため、ガラスの左右の側面に光電子増倍管を取り付けて、両方の面にチェレンコフ光が到達したときにビームが通過したとみなすことにした。

これらのシミュレーションの結果を踏まえて、 $50 \times 50 \text{mm}^2$ のBK7・スーパークリアを輻射体とするチェレンコフ検出器、ならびにP28実験で必要となる有効面積 $200 \times 200 \text{mm}^2$ のBK7ガラスを輻射体とするチェレンコフ検出器を製作し、東北大学電子光物理学研究センターにおいて陽電子ビームを用いた性能評価を行った。

4. 研究成果

2009年12月に東北大学電子光物理学研究センターの陽電子ビームラインにおいて、試作したチェレンコフ検出器の性能評価を行った。陽電子ビームの入射位置や入射角度を変えながら測定を行い、平均光電子数の変化を調べた。

シミュレーションで見積もられた光電子数と比較して実際に測定で得られた光電指数は少なかったが、位置依存性や角度依存性の傾向についてはほぼ一致することを確認した。シミュレーションとの不一致については、反射に伴う損失や、ガラスと光電子増倍管の接着面での損失などが原因であると考えている。

また光電子増倍管による光電子数の違いも調べ、シミュレーションの結果と概ね一致することも確認した。

この性能評価はほぼ光速の陽電子ビームを用いたものであったため、実際のP28実験における識別能力を評価するために、実験結果をシミュレーションに反映させた。その結果、 $200 \times 200 \text{mm}^2$ の大きさを持つスーパークリアに対して左右の側面にそれぞれ4個のR7600U-203を取り付けた場合の粒子識別能力が高いことが分かった。この場合、光電子数4.5に閾値を設けることでK中間子は98%以上の検出効率で同定することができ、また陽子の場合には、両側の光電子増倍管を鳴らしK中間子と誤認されてしまう割合は入射角度にも依るが数%以内に抑えられることが分かった。この粒子識別能力はP28実験を遂行するにあたっては十分であることを確認した。

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0件)

〔学会発表〕(計2件)

(1) 藤岡 宏之, 佐田 優太, 野海 博之, 榎本 瞬, and the E15 collaboration, 『J-PARC E15 実験における $\Lambda(1405)$ の構造研究の可能性』、特定領域研究「ストレンジネスで探るクォーク多体系」第4回研究会、2008年10月29日、石川県加賀市

(2) 藤岡 宏之, 『K中間子原子核: J-PARC 実験』、KEK研究会『J-PARCの物理: ハドロン・原子核研究の新しい局面』、2008年8月7日、高エネルギー加速器研究機構

〔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

藤岡 宏之 (FUJIOKA HIROYUKI)
京都大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：30513395

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：