

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400289

研究課題名(和文) 高運動量二次粒子ビームのための粒子識別検出器の開発

研究課題名(英文) Differential Cerenkov Detector for High-momentum Secondary Particles

研究代表者

成木 恵 (NARUKI, Megumi)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：00415259

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：J-PARCハドロン実験施設の高運動量ビームラインで供給されるK中間子を用い、ストレンジネスを二つ有する(グザイ)粒子分光研究のための検出器開発を行った。

中間子がK中間子の3桁程度多く生成されることから、屈折率が1.05のエアロジェルを用い、発生したリングの分布をMulti-Pixel Photon Counter(MPPC)で能動的に検出するリングイメージングチェレンコフ検出器を新たに開発した。最も重要な性能である角度分解能を測定し、中間子とK中間子を8 $\sigma$ の感度で識別することが可能であることを示した。本研究によって、粒子分光に必要なビーム粒子識別検出器の原理を検証することに成功した。

研究成果の概要(英文)：A RICH type detector has been developed to identify secondary beam particles for the high-momentum beam line at the J-PARC Hadron Facility. It enable us to study cascade baryons systematically which are produced with a 4 GeV/c kaon beam.

The production rate of beam pions are higher by three orders of magnitude compared with that of kaons. Therefore, a differential Cerenkov detector is needed to actively identify beam kaons. At the beam momentum of 4 GeV/c, a suitable radiator are aerogels with a refractive index of 1.05. The Cerenkov ring image is detected with Multi-Pixel Photon Counter (MPPC). As a result of a beam test for a prototype detector, the Cerenkov angle resolution of 3mradian was achieved to demonstrate that beam kaons are separated from pions with 8sigma sensitivity.

研究分野：ハドロン物理

キーワード：バリオン分光 粒子 ハドロン反応

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 物質を構成する最小の粒子はクォークであると考えられている。陽子・中性子など自然界に存在する物質はすべて2種類の軽いクォークで構成される。しかし、小林・益川が予言したとおり、実際にはクォークは6種類あることが知られている。加速器を用いると残り4種類のクォークを人工的に生成することができる。しかしそれらは短時間のうちに軽いクォークに変わってしまうため、安定な物質としては存在しない。最先端の加速器施設で、6種類のクォークが形成する多様な束縛形態を系統的に研究し、クォークの動力学から現在の物質を理解することが現代物理学の大きなテーマである。

本研究では、不安定なクォークのうちの一つであるストレンジクォークに注目した。これまで軽いクォークで構成されるクォークの多体系については比較的研究が進められてきた。しかし、ストレンジクォークを含むクォーク多体系、特にクォーク3つで構成されるバリオンと呼ばれる粒子についてはまだ情報が少ない。

(2) 近年、国内のJ-PARCにおいて大強度ハドロンビームの利用が現実的となった。特に、ストレンジクォークを含むK中間子の良質なビームが供給されるようになった。現在、世界で唯一となる、5~20 GeV/c 運動量領域の大強度二次粒子を供給する高運動量ビームラインが建設中である。これにより、ストレンジクォークを2つ含むバリオンである粒子の系統的な研究が可能となる。ストレンジクォークを含むハドロンは生成確率が小さく、またすぐに崩壊してしまうため、今日の大強度陽子加速器施設J-PARCをもってして初めて系統的な研究が可能となった。ビームとなる二次粒子には、中間子、K中間子などの種類がある。研究利用には、これらを識別するための検出器開発が必須となる。

### 2. 研究の目的

最先端の加速器施設を利用することによって、これまでに実験的な情報がほとんどない粒子を生成し、その諸性質を決定する。これにより、クォークの相互作用を支配する量子色力学(QCD)に基づいた物質の理解を目指す。この最終目的のために、本研究ではビーム粒子同定のための検出器の開発を行う。K中間子ビームを液体水素標的に照射すると、粒子が生成される。このとき、標的から散乱されたK中間子、あるいは粒子の崩壊によって生成された陽子・中間子を検出し、粒子の質量および崩壊幅を測定する。そのためには、ビーム粒子と散乱粒子双方に対して、粒子識別検出器と飛跡検出器が各々必要となる。本研究では、このうちビーム粒子識別のための検出器を開発し、動作原理の確立をめざす。

### 3. 研究の方法

本研究では、ストレンジクォークを含むバリオン生成のために必要となる、ビーム粒子用の粒子識別検出器を開発する。

K中間子を液体水素標的に照射し、粒子およびその励起状態( $K^*$ )を生成する。このとき同時に生成される $K^+$ 中間子を測定することで、質量欠損法を用いた粒子生成イベントの同定が可能である。また、あるいは $K^*$ はただちに崩壊し、最終的に、K中間子および陽子などの粒子を生成する。これらの崩壊粒子を測定することで、信号感度の高い測定をめざす。ここで第一に重要となるのがビーム粒子の識別である。

図1に示すように、ビームとして生成される二次粒子の構成比は、K中間子を1とすると、中間子が約1000倍程度と圧倒的に多い。これは、中間子が軽いクォークのみで構成されるのに比べ、K中間子がストレンジクォークを含むことから生成断面積が小さいこと、およびK中間子がより早く崩壊して輸送中に失われるためである。従って、従来の閾値型のチェレンコフ検出器では数の少ないK中間子を取りこぼす確率が高く、目的のためには能動的にチェレンコフ光のリングイメージを測定する、いわゆる差分型チェレンコフ検出器が必要となる。

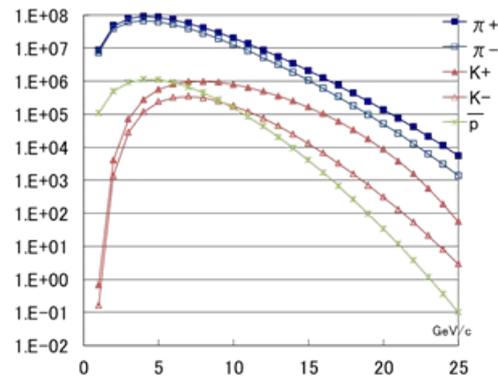


図1：高運動量ビームラインの二次粒子強度。横軸はビーム運動量[GeV/c]

粒子を生成するのに適当な運動量は4GeV/cである。この運動量に対して十分な識別能力を持たせる設計とする。検出器は、チェレンコフ光を発生させるための輻射体と光検出器、およびチェレンコフ光を反射して効率よく光検出器まで導くための光学系で構成する。最終的な原理検証のため、開発において重要となるのは、チェレンコフ光の角度分解能である。必要な性能を持つ検出器を試作して性能評価を行い、原理検証を行う。

### 4. 研究成果

図2に測定器の概念図を示す。左側から入射するビーム粒子に対して輻射体のエアロジェルでチェレンコフ光を発光させ、生じたチ

エレンコフリングイメージを鏡で1回反射させた後、Multi-Pixel Photon counter(MPPC)で検出する設計とした。MPPCは、アバランシェ・フォトダイオードをピクセル型化した光検出器で、リングイメージの検出に適している。

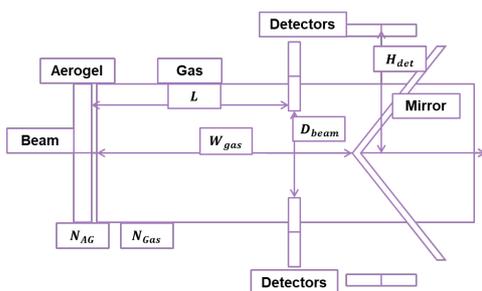


図2：検出器の概念図

輻射体として屈折率が 1.05 のエアロジェルを用いることとした。この場合の光量とチェレンコフ光の角度広がりを表 1 にまとめる。は粒子の速度である。

		K
	0.999	0.992
チェレンコフ光の角度 [ラジアン]	0.308	0.285
光電子数/cm	5.8	4.9

表 1：運動量 4GeV/c、屈折率 1.05 の輻射体を用いた場合の諸元

検出器の重要な性能として以下の2点がある。

- 光量  
、K中間子両方に対して十分な光量を確保する必要がある。K中間子の光量が1cmあたり5光電子程度であるので、輻射体の厚みとして2cm程度を確保する。
- 角度分解能  
最終的に両者を識別感度は、チェレンコフ光の角度分解能で決まる。運動量 4GeV/c の粒子に対して両者の角度の差は 23 ラジアンである。ビーム運動量の広がりや考慮して、K中間子に対して99%の検出効率を保ったまま、中間子の混入を $10^{-4}$ に抑えることを可能とする値として、要求性能は2.8ミリラジアンとした。

以上の性能を評価するため、試作機を製作して性能試験を行った。中間子と発光量が同じ電子を用い、リングイメージの検出能力を測定した。また、K中間子に対応した輻射体を用いて選別能力を検証した。図3に得られたチェレンコフリングの例を示す。各セルはMPPCのピクセルに対応する。また、各ピクセルの色は光量の大小を表す。これにより、MPPCで正しくチェレンコフリングの像が検出されていることが分かる。

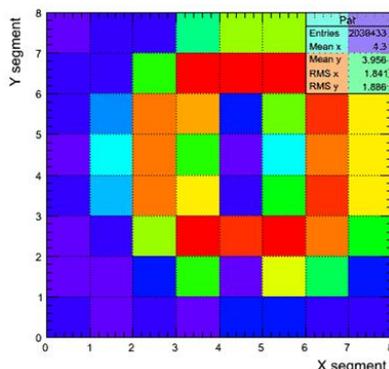


図3：測定したチェレンコフリング

光量は試算通り 10 光電子程度あることが分かった。また、チェレンコフ光の発生角度を求め、その分布を得た(図4)。この角度分布の広がりから角度分解能を見積もったところ、2.8 ミリラジアンという結果が得られた。これは要求性能通りである。

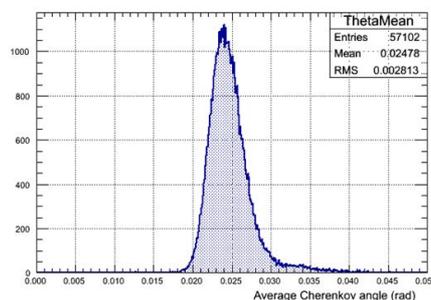


図4：チェレンコフ角度分布

以上から、要求を満たす粒子識別検出器の製作が可能であることを示すことができた。以上より、J-PARC ハドロン実験施設・高運動量ビームラインにおいて 粒子分光研究を行うために必要な、ビーム粒子識別検出器の原理検証に成功したと言える。

実機製作の際には、中間子が生成するチェレンコフリングを遮蔽板で遮光する機構を導入する予定である。この運動量領域での中間子ビームは、高運動量ビームラインが世界で唯一となるため、実際の中間子に対する性能評価を施設完成後に行いたいと考えている。

## 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 5 件)

M. Naruki, Search for Pentaquark + in Hadronic Reaction at J-PARC, Acta Physica Polonica. B 47, 2016, 385-390, 査読有, DOI: 10.5506/APhysPolB.47.385  
K. Shirotori M. Naruki(12番目) 他 21名, Charmed Baryon Spectroscopy Experiment at J-PARC, JPS Conference

Proceedings, 8, 2015, 022012, 査読有,  
DOI: 10.7566/JPSCP.8.022012  
W. J. Briscoe, M. Döring, H. Haberzettl,  
D. M. Manley, M. Naruki, I. I.  
Strakovsky, E. S. Swanson, Physics  
opportunities with meson beams,  
European Physical Journal A 51, 2015,  
129, Review, 査読有,  
DOI: 10.1140/epja/i2015-15129-5  
K. Shirotori, M. Naruki (6 番目)他 11  
名, Spectroscopy of charmed baryons at  
the J-PARC high-momentum beam line,  
Journal of Physics, Conference Series,  
569, 2014, 012085,  
DOI: 10.1088/1742-6596/569/1/012085  
M. Moritsu, M. Naruki (41 番目) 他 75  
名, High-resolution search for the +  
pentaquark via a pion-induced reaction  
at J-PARC, Physical Review C, 90, 2014,  
035205,  
DOI: 10.1103/PhysRevC.90.035205

〔学会発表〕(計 7 件)

M. Naruki, Baryon Spectroscopy with  
Kaon Beams, International Conference  
on the Structure of Baryons, 2016  
16th-20th May 2016, Tallahassee (USA)  
M. Naruki, Hadron physics programs at  
high-momentum beamline, Meson in  
Nucleus 2016(MIN16), 31st July - 2nd  
August 2016, Yukawa Institute for  
Theoretical Physics(Kyoto・Kyoto)  
M. Naruki, Search for Pentaquark  
Theta+ in Hadronic Reaction at J-PARC,  
JAGIPELLONIAN Symposium on Fundamental  
and Applied Subatomic Physics,  
7th-12th June 2015, Krakow(Poland)  
M. Naruki, Hadron Physics at J-PARC,  
The 31st Reimei Workshop on Hadron  
Physics in Extreme Conditions at  
J-PARC, 18th-20th Jan. 2016, Advanced  
Science Research Center JAEA (Tokai・  
Ibaraki)  
M. Naruki, Cascade Baryon Spectroscopy,  
International workshop on physics at  
extended hadron experimental facility  
of J-PARC, 5th-6th May 2016, KEK Tokai  
Campus(Tokai・Ibaraki)  
M. Naruki, Cascade Baryon Production  
with high-momentum beamline, J-PARC  
Workshop “チャームバリオンの構造と生  
成 II, 2014 8/7-9(東海村・茨城県)  
M. Naruki, Hadron Spectroscopy with  
High-momentum Secondary Beam, Hadron  
Physics Symposium, 17th-19th April  
2014 Nagoya University(Nagoya・Aichi)

〔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

成木 恵 (NARUKI, Megumi)  
京都大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 0 0 4 1 5 2 5 9

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

山我 拓巳 (YAMAGA Takumi)