

平成21年3月31日現在

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2007～2008
課題番号：19540310
研究課題名（和文） K $\pi$ ハドロニック原子の寿命測定とラムシフト-発展DIRAC実験によるQCDの検証
研究課題名（英文） Lifetime measurement of K $\pi$ hadronic atoms, and the Lamb shift - DIRAC experiment extended
研究代表者 竹内 富士雄 京都産業大学・コンピュータ理工学部・教授 研究者番号：40121537

研究成果の概要：ハドロニック $\pi\pi$ 原子 ( $A_{\pi\pi}$ ) の寿命測定のために開発されてきた DIRAC スペクトロメータ (CERN PS) に新たにより高強度のビーム中で、更に希な現象を測定することができる様に改良を加え、よって K $\pi$  原子 ( $A_{K\pi}$ ) の寿命測定を開始し、現在順調に統計を増やしつつある。日本グループは新しいホドスコープ newSFD を開発し、これも新たに開発した F1-TDC-ADC 回路で読み出すことによって、入射ビームの高強度化と粒子弁別性能の向上に寄与した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：DIRAC 実験,  $\pi^-\pi^+$ 原子, K $\pi$ 原子, ハドロニック原子, CERN PS, 非摂動領域での QCD の検証, シンチレーティングファイバーホドスコープ, トポロジカルトリガーデバイス

## 1. 研究開始当初の背景

$\pi^+$ と $\pi^-$ がクーロン力で結ばれてできるハドロニック $\pi\pi$ 原子 ( $A_{\pi\pi}$ ) を作る。この原子は強い相互作用によって $\rightarrow 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma$ と崩壊するため寿命は $10^{-15}$ 秒程度と非常に短い。この寿命は直接測定するには最も進んだ実験技術を用いてもあまりに短い。しかしもしこれを測ることが出来れば従来熱心に探究されてきた $\pi\pi$ の S 波散乱長 (ここでは  $|a_0 - a_2|$ , 添字は isospin) を、従来の核内  $\pi$

を標的として、加速した $\pi$ との散乱を測定する等の方法と比べ、遥かに信頼性の高い、モデルによらない方法で抽出できる。また一方理論に於ても、一般的に非摂動領域での QCD の精度の高い計算が困難な中で、 $\pi\pi$ の散乱長についてはカイラル摂動論による例外的に高い精度の予想がなされている。よって上述の実験が可能になれば非摂動領域での QCD の有効なテストとなることが期待できる。

$A_{\pi\pi}$ の寿命の直接測定は今のところ無理としても、1985年 L. Nemenov は巧妙な方法によってこれを測定する方法を考案した。

(L. Nemenov, Sov. J. Nucl. Phys. **41**, 629)  
 $A_{\pi\pi}$ は標的に陽子を当てて生成させるが、この標的に重い金属を用い、走っている  $A_{\pi\pi}$ が崩壊する前に強制的に解離を起こさせる。 $A_{\pi\pi}$ の生成断面積と  $A_{\pi\pi}$ の解離の確率は信頼度の高い計算が可能であるから、標的の厚さが分かれば実験的に  $A_{\pi\pi}$ 起源の解離した  $\pi^+$ と  $\pi^-$ を数えることによって  $A_{\pi\pi}$ 原子の寿命を測定することができる。

$A_{\pi\pi}$ の生成断面積は小さいので大強度の陽子ビームを必要とする。また、そこから生成される大量のバックグラウンド粒子の中から  $A_{\pi\pi}$ 起源の解離した  $\pi^+$ と  $\pi^-$ を同定するためには高位置分解能と高時間分解能を持つ検出器 = ホドスコープが必要である。私ども日本グループは1990年代より位置分解型光電子増倍管の開発から発展してシンチレーティングファイバーを位置分解型光電子増倍管で読み出す4次元トポロジカルトリガーデバイスと名付けた検出器を開発してきたが、これがまさにこの実験に必要な条件を満たす。L. Nemenov の主導で CERN PS からの高強度陽子ビームを用い、日本グループはこのホドスコープを担当することで1998年に CERN PS においてロシア、イタリア、スペイン、スイス等のグループと共同で実験 PS212 (通称 DIRAC) を開始し、DIRAC スペクトロメータを建設した。このスペクトロメータの測定精度は非常に高く、これを用いて現在までに 15000 個の  $\pi\pi$  原子を検出し、それによって  $A_{\pi\pi}$  の寿命を  $(2.91^{+0.45}_{-0.38})_{\text{stat}}^{+0.19}_{-0.49})_{\text{syst}} \times 10^{-15}$  秒の精度で測定することができた。この結果の解析はほぼ終了し、論文発表がなされたが、その結果は高く評価された。(例えば B. Adeva et al., J. of Phys. G **30** (2004) は Editorial Board によって Research Highlights of 2004 に選ばれた。)

DIRAC 実験の成功は理論家を刺激し、ストレンジクォークを含む K メソンと  $\pi$  との散乱長のより高い精度の計算も行われるようになってきた。しかしながら本計画の主目的である  $K\pi$  原子の寿命を測り、散乱長を求める実験を行うことは、 $\pi\pi$  原子に比べて  $K\pi$  原子の生成にはその断面積がほぼ 1 桁も小さいことから更に大強度のビームを必要とするため、バックグラウンドが大きく更にチャレンジングである。

上述のように DIRAC 実験において  $\pi\pi$  原子の同定の鍵となったのは大強度ビームに

由来する多数の荷電粒子中で  $\pi\pi$  原子由来の  $\pi^+$ と  $\pi^-$ を抜き出すことを可能にする日本グループの開発したシンチレーティングファイバーホドスコープ (SFD) であるが、今回我々は4年前から  $K\pi$  原子の検出に向けて従来のホドスコープの倍の granularity と、より優れた時間分解能を持つホドスコープを開発、テストしてきた (newSFD)。これを用いての DIRAC 実験の発展的延長、すなわち CERN PS における  $K\pi$  原子の検出、加えて  $K\pi$  及び  $\pi\pi$  準安定励起状態 (Lamb shift) の測定を目的とするアップグレードが2004年の終りに CERN 研究評議会によって認められ、更に3年の実験が開始出来ることになった。

## 2. 研究の目的

本研究の主な目的は CERN PS における DIRAC 実験を遂行する事によって、 $\pi^-$ と  $\pi^+$ 、或は  $\pi^-$ と  $K^+$ がクーロン力で束縛された  $\pi^+\pi^-$  原子および  $K^+\pi^-$  原子の崩壊寿命を直接測定し、 $\pi\pi$ ,  $K\pi$  中間子の s 波散乱長を求め、これをカイラル摂動理論で計算した散乱長と高い精度で比較することにより非摂動領域での QCD の検証を行うことである。即ち QCD のカイラル対称性の破れについての理解を  $SU(2)_L \times SU(2)_R$  から  $SU(3)_L \times SU(3)_R$  に進めるために  $K\pi$  散乱長を測定する。 $K\pi$  散乱長についても近年精度の高い計算が進められてきた。たとえば Bernard, Kaiser, Meissner(1991)らによる  $a_{1/2} = 0.19 \pm 0.02$ ,  $a_{3/2} = -0.05 \pm 0.02$ , Roessl(1999)による  $a_{1/2} - a_{3/2} = 0.23 \pm 0.01$  (いずれも  $/m_{\pi^+}$ ) という値が発表されてきており、これらの理論計算から予測される  $K\pi$  原子の寿命は約  $4 \times 10^{-15}$  秒である。 $10^{-15}$  秒というハドロニック原子の寿命は現在の実験技術を以てしても直接測定することは難しい。DIRAC 実験においてはこれを薄い標的通過中での原子の解離を惹き起こし、それによって生じた中間子対を検出するという独特の方法を用いて測定出来ることを実証した。

DIRAC 実験の手法を用いれば従来よりも遙かに精度の良い測定ができると考えられる。

さらにこの方法は検出効率が高く、しかも原子の崩壊に特徴的な事象選別が可能となり、精度の高い測定を実現できる。この方法はほかの二中間子原子にも応用することができると考えられる。

## 3. 研究の方法

以下に実験手法の概要を述べる。

1)  $K^+\pi^-$ 原子 ( $A_{K\pi}$ ) の生成: CERN の陽子シンクロトロン(PS)で加速され、遅い取り出しビームラインから引き出された 24 GeV/c 大強度  $1.5 \times 10^{11}$ pps の陽子ビームを数 10~数 100 $\mu$ m 厚の Ti 標的に照射して  $A_{K\pi}$  を生成する。

2)  $K^+\pi^-$ 対原子の解離: 生成された  $A_{K\pi}$  の寿命は  $10^{-15}$  秒の桁なので相対論的速度で標的中を通過中に  $\bar{K}^0 \pi^0$  に崩壊するか、電離し  $K^+\pi^-$ 対に分かれる。したがって  $\bar{K}^0 \pi^0 / K^+\pi^-$  の生成分岐比は標的の厚さにより決まる。

3) 解離  $K^+\pi^-$ 対の特徴: この実験では検出効率が大きく、 $A_{K\pi}$  原子崩壊に特徴的なパターンを示す  $K^+\pi^-$ 対を測定する。 $A_{K\pi}$  は、重心運動量が  $\sim 3$  GeV/c であるのに対し相対運動量は  $< 3$  MeV/c しか持たないので、解離中間子対はほとんど同一方向 ( $\Delta\theta < 1$  mrad) に、同一速度 ( $\Delta E/E < 0.1\%$ ) をもって放出される。これは、標的の下流 3 m の地点で 2 つの荷電中間子の距離が 9 mm 以内という事に対応するが、これを日本グループの開発した Scifi ホドスコープ newSFD によって検出する。

4) 解離  $K^+\pi^-$ 対の検出と同定・運動量の決定:  $K^+$ と $\pi^-$ 粒子は 2 Tesla-m の磁気スペクトロメータによって分離された後、それぞれ、ガス及びアエロジェルチェレンコフカウンター、飛行時間測定、ミューオンカウンターにより  $K^+$ と $\pi^-$ として同定される。

5) トリガー: トリガーは 4 段階に分かれ、条件は下流両翼に設置した縦方向ホドスコープ (VH) 横方向ホドスコープ (HH) とチェレンコフカウンターにより  $K^+$ と $\pi^-$ が検出されたこと (第 1 段), 磁石上流の dE/dx 電荷検出ホドスコープと newSFD により 2 個の粒子の相対速度が小さいこと (第 2 段), dE/dx 電荷検出ホドスコープと VH により運動量が平凡正しいこと (第 3 段), そしてマイクロドリフトチェンバーとドリフトチェンバーの読み出しの結果により各翼の運動量が所期の値であること (第 4 段) を以て形成される。第 2 段のトリガーは当初は newSFD において 9 mm 以内に 2 個の粒子が同時に検出されたことによるが、3) に記したように永久磁石の挿入後は  $K^+$ と $\pi^-$ を別々に検出出来るようになるためトリガーの精度は遙かに向上する。このトリガー信号により、 $A_{K\pi}$  原子崩壊の解離  $K^+\pi^-$ 対は、標的中で大量に発生するバックグラウンド荷電粒子から分離される。

#### 4. 研究成果

図 1 にこの実験のために改良を加えた

DIRAC スペクトロメータの図を示す。

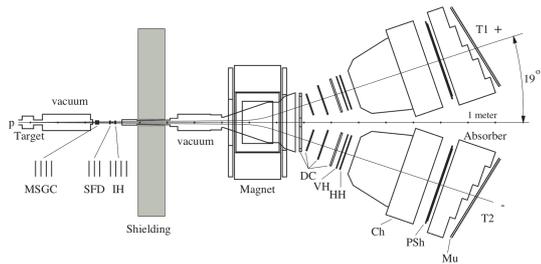


Fig. 1. Schematic top view of the DIRAC spectrometer. Upstream of the magnet: 4 microstrip gas chambers (MSGC), scintillating fiber detectors (SFD, x,y, from 2002 on w), 4 ionization hodoscopes (IH, 2x, 2y). Downstream of the magnet, in each arm of the spectrometer: drift chambers (DC), vertical and horizontal scintillation hodoscopes (VH, HH), gas Cherenkov counters (Ch), preshower detectors (PSh) and, behind the iron absorbers, muon detectors (Mu).

この中で、日本グループの開発したシンチレーティングファイバーホドスコープ newSFD は本実験装置改良の中核をなす物であるが、従来の SFD を改良して作成した新たに直径 280 ミクロンという極細の Scifi 8 層を用い、minimum ionizing particle に対して 12 個以上の光電子を生成できる物で、 $10^8$  /sec の粒子束中で 99.1% の効率を持ち、RMS 60 mm というチェンバー並の位置分解能を持つ。これは  $K\pi$  実験の為にビーム強度を 10 倍しても十分耐えられる、我々の今までの技術集積の上にデザインされた画期的な検出器であり、新しい実験の中ではトリガーとトラッキングの両方に用いられた。(A. Gorin et al., Nucl. Instr. Meth. **A566** (2006) 500)

図 2 にこの検出器を示す。

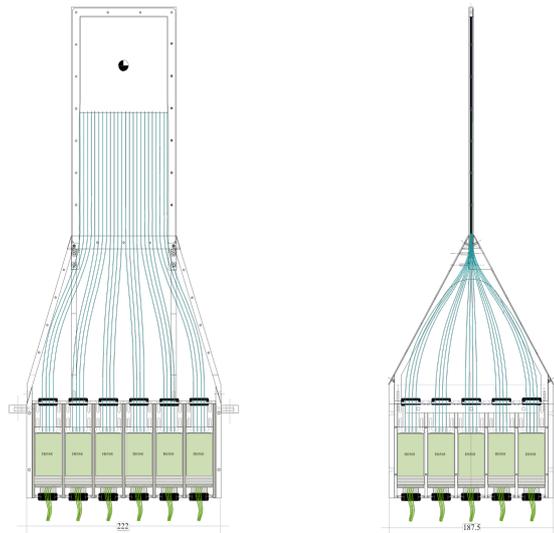


Fig. 2 newSFD の断面図 480 コラムのシンチレーティングファイバーを 30 の PM (Hamamatsu H6568MOD) で読み出している。

この 10cm  $\times$  10cm, XY 2 面のホドスコープ 2 面のうち、1 面は、この実験のために新

たに開発された FITDC-TDC-ADC 回路をもちいて読み出しを行った。FITDC-TDC-ADC は Freiburg グループの開発した F1 チップを用いて新たに DIRAC グループで開発した多重ヒット TDC であるが、TDC として 120 ps の分解能を持つ上に、多重の各ヒットの ADC 情報をデジタル化して取り出す事を可能にする。このことは DIRAC 実験のように強バックグラウンド粒子束の中から希な現象を拾い出すためには非常に有用なものであることがこの実験によって証明された。また newSFD について言えば、今まで LeCroy 3377 回路を用いて読み出して居たときの時間分解能が 660 ps であったのに較べて 450 ps 以下と大きく向上させることが出来て、atomic pair event の弁別に役立った。これは従来の DIRAC 実験で主に用いられた LeCroy3377 TDC に代わりより安価で高速高性能の読み出し回路であり、日本グループの担当する検出器の外のすべてのシンチレータを用いた検出器の読出しにも使われている。

現在、データの質を確かめつつビーム強度を増しながらデータ取得を継続中である。データ取得、及びその解析は順調に行われており、解析結果については、 $K^+\pi$  原子に関するプレリミナリーな結果を Physics Letters 誌に公表した。又  $\pi\pi^+$  原子データに関するフルペーパーはほぼ完成しており、近く公表の予定である。

さらに本計画においては  $\pi\pi$  ( $K\pi$ ) 原子の準安定状態 (2P 状態) の検出、Lamb shift の測定も同時に目的としている。これは、2P 状態と 2S 状態の準位差における強い相互作用寄与分は  $2a_0 + a_2$  ( $2a_{1/2} + a_{3/2}$ ) に比例するので、準安定状態の同定はクォーク凝縮に関連して興味深いだけでなく散乱振幅の 2 つの要素の分離を可能とするものであるが、現在この為の準備が薦められており、日本グループはそれに必要な永久磁石の製作を担当している。

## 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 3 件)

- ① B. Adeva et al., Evidence for  $\pi K$ -atoms with DIRAC  
Physics Letters B674 (2009) 11-16  
(査読有)
- ② F. Takeuchi, M Chiba, A. Gorin, K.

Okada and A. Ryazantsev

Detection of a strange meson and its life-time measurement - Test of QCD in the non-perturbative region (Test and tuning of the newSFD detectors at T11 beam line)

Bulletin Inst. Comprehensive Res.  
Kyoto-Sangyo Univ. V (2007) 57-76  
(査読無)

- ③ 岡田憲志 竹内富士雄 千葉雅美  
低エネルギー領域における QCD 検証 -  $\pi^+\pi$  原子の寿命・散乱長測定実験 DIRAC -  
京都産業大学総合学術研究所所報第 5 号  
9-14 (2007)  
(査読無)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

竹内 富士雄 (TAKEUTCHI FUJIO)  
コンピュータ理工学部・教授  
研究者番号：40121537

### (2) 研究分担者

岡田 憲志 (OKADA KENJI)  
コンピュータ理工学部・教授  
研究者番号：90093385  
千葉 雅美 (CHIBA MASAMI)  
首都大学東京・理工学研究科・助教  
研究者番号：60128577  
小林 正明 (KOBAYASHI MASA AKI)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・名誉教授  
研究者番号：40013388  
岩下 芳久 (IWASHITA YOSHIHISA)  
京都大学・化学研究所・准教授  
研究者番号：00144387  
杉本 章二郎 (SUGIMOTO SHOJIRO) (平成 19 年度)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・名誉教授  
研究者番号：20044753

### (3) 連携研究者

杉本 章二郎 (SUGIMOTO SHOJIRO) (平成 20 年度)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・名誉教授  
研究者番号：20044753