

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年3月31日現在

機関番号：34304
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21540306
 研究課題名（和文） K π 原子の寿命測定とラムシフト—発展DIRAC実験による非摂動領域QCDの検証
 研究課題名（英文） Measurement of the life-time of K π atom and its Lamb-shift - Test of QCD in the non-perturbative region by extended DIRAC experiment
 研究代表者
 竹内 富士雄（TAKEUTCHI FUJIO）
 京都産業大学・名誉教授
 研究者番号：40121537

研究成果の概要（和文）：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、 π^- と π^+ 、或は π^- とK+がクーロン力で束縛された $\pi^- \pi^+$ 原子およびK+ π^- 原子の崩壊寿命を直接測定し、 $\pi \pi$ 、K π 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、及びその発展として $\pi^- \pi^+$ 原子およびK+ π^- 原子の励起状態のラムシフトを測定することである。

研究成果の概要（英文）：The main aim of the study is to execute the DIRAC experiment at CERN PS, measure directly the life times of $\pi \pi$ and K π hadronic atoms, and deduce the scattering lengths of $\pi \pi$ and πK pairs. A comparison of those values with those calculated with a high precision by the chiral perturbation theory should allow us to make a test of QCD in the non-perturbative region. Also we aim at the extension of the study in order to investigate the excited states of $\pi \pi$ and K π hadronic atoms, and measure the Lamb shifts.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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 π 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

電荷の異なる2種類の間中子 π^+ と π^- がクーロン力でゆるく結合しあかとも原子の様にふるまう二中間子原子 ($A_{\pi\pi}$) を作る. この原子は強い相互作用によって $A_{\pi\pi} \rightarrow 2 \pi^0$

$\rightarrow 4 \gamma$ と崩壊し, 寿命は 10^{-15} 秒程度と非常に短い. この崩壊寿命を直接測定する事は現在の実験技術においても不可能である. しかしながら, もしこれを測定できれば崩壊寿命の逆数が $\pi \pi$ の S 波散乱長 (ここでは $|a_0 -$

a_2 |, 添字は isospin) に比例することから, 従来 π 粒子と核内核子との散乱 $\pi N \rightarrow \pi \pi N$ などから測定していた $\pi \pi$ 散乱長を核子の寄与なくモデルに依存しない方法で精度良く得ることができる (J.Gasser et al, Phys. Rev. D **64** (2001) 016008). 一方, 理論的には低エネルギーでの散乱は非摂動領域での QCD 計算を必要とするため一般的には正確な計算が難しいのであるが, $\pi \pi$ 散乱長はカイラル摂動計算により例外的に高い精度で求めることができ, 現在では計算手法の進歩によって 1.5% の精度で得られている. (G. Colangelo et al, hep-ph/0007112). それゆえ二中間子原子の崩壊寿命測定実験から理論と同程度の精度で散乱長が得られれば, QCD 理論の中でまだ実験的に十分に検証されていない低エネルギー非摂動領域での QCD の有効なテストになることが期待できる.

1985 年 L. Nemenov は巧妙な方法によって $A_{\pi\pi}$ の寿命を測定する手法を考案した. (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, 標的の厚さが分かっているならば実験的に $A_{\pi\pi}$ 起源の解離した π^+ と π^- 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というものである.

この実験の難しいところは $A_{\pi\pi}$ の生成断面積は小さいので大強度の陽子ビームが必要なこと, 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 π^+ と π^- 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ことである. 京都産業大学を中心とす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て実験を開始した.

2. 研究の目的

[$\pi \pi$ 原子の寿命測定]

Ni 標的を用いた $A_{\pi\pi}$ に関するデータはに関しては, 結果の解析をおわり, フルペーパーとして結果を公表する.

[$K\pi$ 原子の寿命測定]

$A_{\pi\pi}$ の寿命を測定する DIRAC 実験の成功は理論家を刺激し, スtrenジクォークを含む K メソンと π 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. πK 原子の崩壊寿命測定では K 中間子が関与することで s クォークを含むカイラル摂動理論となり, 私たちが今まで $\pi \pi$ 原子の散乱長測定で議論してきた $SU(2)_L \times SU(2)_R$ から一歩進めて $SU(3)_L \times SU(3)_R$ カイラル対称性の破れを検証することになる. πK 散乱長に関しても最近是比较的精度の高いカイラル摂動計算がなされており, S 波散乱長を

$|a_{1/2} - a_{3/2}| = 0.23 \pm 0.01$ と 5% の精度で与えている (Roessl 1999). この値は πK 原子の崩壊寿命にして $\tau = 4.7 \times 10^{-15}$ sec に対応する. これは $\pi \pi$ 原子の寿命よりも長く, DIRAC 実験の手法で十分この計算精度を超える測定が可能である. ただし, K の同定は陽子のバックグラウンドが多く難しい. このためスペクトロメータに改良を加え, aerogel と重ガスを用いたチェレンコフ検出器を追加する. 更に πK 原子生成量が $\pi \pi$ 原子に比べて πK 測定用ジオメトリのスペクトロメータの下でも 50% 以下なので必要な統計量をためるにはビーム強度を増やさなければならない. これに対処するため日本グループは, その責任を持っている上流検出器の granularity を上げ高計数率に耐えられるような改良をスペクトロメータに加え, 2009 年から $\pi \pi$ 原子に加えて πK 原子のデータ取得を開始している. 一部の結果の解析の結果, $A_{K\pi}$ の同定には成功したので, この結果を公表するのに加えて, データ取得を続け, 十分な統計量を蓄えてフルペーパーを発表する予定である.

[$\pi \pi$ 原子の準安定 2P 状態の検出]

さらに本計画では $\pi \pi$ 原子の準安定 2P 状態の検出と Lamb shift の測定準備実験を計画している. 水素原子においても $n = 2$ の

S-state と P-state には Lamb shift と呼ばれるエネルギー差があることが知られており、これは QED によって厳密に計算されるが、 $\pi\pi$ 原子の場合には更に強い相互作用の存在によって Lamb shift の量は変わってくる。この強い相互作用によって惹き起こされる寄与は散乱長 $2a_0 + a_2$ に比例し、計算によれば 0.3eV 程度である。これを精度よく測定できれば A の寿命測定から得られた $|a_0 - a_2|$ と組みあわせて a_0 と a_2 をそれぞれ独立に実験的に決定することが出来る。(その方法については次の実験方法の項にやや詳しく述べる。) そのためには、現在よりもさらにビーム強度を高める必要があり、スペクトロメータの改良が必要となる。具体的には $\pi\pi$ 原子や $K\pi$ 原子が崩壊してできた中間子のイベントを多数の荷電粒子中から抜き出すために電荷検出ホドスコープ(dE/dx カウンタ)を新しくする事を計画している。dE/dx 検出器の役割は、非常に近接した荷電粒子が、本当に2個であるのか、それとも実は1個であるのかを弁別することであり、本スペクトロメータの本質的な部分である。今までは 7 mm 幅の短冊状のプラスチックシンチレータを用いているが、一つの短冊は一秒あたり 10^6 程度の信号を読み出しているが、全体の 15%程度はとりこぼしており今後さらにビーム強度を上げた際に取りこぼす量が大きくなるのは明白である。そのため granularity を上げて問題を解決する。そうすると1つの短冊は細長くなり、粒子のヒットする場所によらないパルス波高を得ることは難しくなる。そこで次項の計画に述べる特別の工夫をしてシングルとダブルの荷電粒子の通過を精度よく分離できるような検出器を日本グループによって制作することが本計画の中心的な課題となる。

3. 研究の方法

以下にこの実験の方法を稍詳しく述べる。

(1) $\pi+\pi^-$ 原子 ($A_{\pi\pi}$) の生成: 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 3×10^{11} pps の陽子ビームを 100 μ m 厚の Ni 標的に照射して $A_{\pi\pi}$ を生成する。

(2) $\pi+\pi^-$ 原子 ($A_{\pi\pi}$) 原子の解離: 生成された $A_{\pi\pi}$ の寿命は 10^{-15} 秒の桁なので相対論的速度で標的の中を通過中に $\pi^0\pi^0$ に崩壊するか、電離し $\pi+\pi^-$ 対に分かれる。したがっ

て $\pi^0\pi^0/\pi+\pi^-$ の生成分岐比は標的の厚さにより決まる。

この段階ではまだ標的中で励起されて P-state になった $A_{\pi\pi}$ は計測されない。

(3) 解離 $\pi+\pi^-$ 対の特徴: この実験では $A_{\pi\pi}$ 原子崩壊に特徴的なパターンを示す $\pi+\pi^-$ 対を測定する。 $A_{\pi\pi}$ は、重心運動量が数 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、解離中間子対は殆ど同一方向 ($\Delta\theta < 3$ mrad) に、同一速度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。粒子のトラッキングについては micro drift chamber によって redundancy をます。更に距離が非常に小さくトラッキングによっては分けられない粒子対については本計画の主要な対象である新しい dE/dx 検出器によって粒子数を測定する。

(4) 解離 $\pi+\pi^-$ 対の検出と同定・運動量の決定: 2つの π 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、重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、ミュオンカウンターにより同定される。粒子の運動量は大型のドリフトチェンバーによる軌道のリコンストラクションによって決定される。

(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垂直ホドスコープ(VH)、水平ホドスコープとチェレンコフカウンターにより π^+ と π^- 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 検出器と VH により運動量が大体正しいこと(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)を以て構成される。

(6) ラムシフト: 次に第1標的の後方 2 mm のところに 2 μ m 厚の第2標的を挿入し、さらに小型の永久磁石を挿入してこの間に磁場を生成する。これによって Ni 標的中で解離を起こした $\pi+\pi^-$ 対は sweep out され、今まで観測されなかった準安定状態の $A_{\pi\pi}$ 原子に起因する $\pi+\pi^-$ 対が測定される。ここまでが第1段階である。

(7) 第2段階としては日本グループが用意することになっている強磁場を生成する永久磁石を設置し、準安定状態の原子（主に $2P$ ）を強い磁場中を高速で走らせることによりその重心系で強い電場を感じさせて $2P - 2S$ の混合状態を作り出して寿命を短くし、重金属標的中で解離を促し、これによって準安定状態の原子を同定し Lamb shift を測定する。このためには短い経路に非常に強い磁場を与えられる永久磁石を用いる。

4. 研究成果

【 $\pi\pi$ 原子の寿命測定】

前述の J. Phys. G 30 (2004) の論文発表後さらに $100\ \mu\text{m}$ の Ni 標的を用いた $A_{\pi\pi}$ の測定が続けられた。この結果は本計画の間に解析が続けられ、2009 年に論文として発表された (B. Adeva et al., Physics Letters B704 (2011) 24)。その結果の一部をここに示す。入射陽子が 1 個の Ni 核と衝突して核内で生成された N 個の $A_{\pi\pi}$ は多くは 2 個の $\pi^0 \rightarrow 4\gamma$ となって放出されるが、一部は Ni 標的中で乖離を起し 2 個の π として標的から飛び出す。この数を n とする。これらの π 対の特徴はその相対運動量 Q が小さいことである。相対運動量 Q は標的中を走る際の多重散乱によって多少大きくなるが、それでも $3\ \text{MeV}/c$ 以下に止まる。

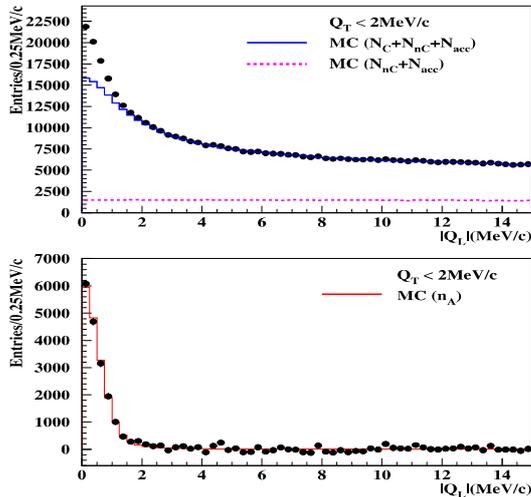


図 1

図 1 は放出された π 対の Q 分布であり、この 0 附近での enhancement に $A_{\pi\pi}$ 起源の π 対はすべて含まれている。ここに寄与するバックグラウンドの対としては、図 2 (a) のような Accidental pair, (b) のような長寿命の中間粒子を経て対として観察される non-Coulomb

pair, そして、(c) のような核内で生成された 2 つの π で、 $A_{\pi\pi}$ 状態を通らず、単に終状態相互作用によって Q の小さいところで enhance された Coulomb pair 等がある。図

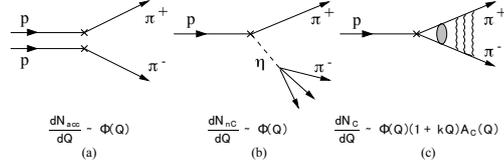


図 2

1 の上の図で点は小さい Q の領域で観測された事象数、実線は厳密なシミュレーションによって計算されたバックグラウンドの yield を表している。その差として $A_{\pi\pi}$ 起源の atomic pair が図 1 の下の図のように求められ、21227 対と言う yield が得られた。

ここから求められた n と N の比から $A_{\pi\pi}$ の寿命が求められた。結果は $\tau = [3.15 \pm 0.20 - 0.19(\text{stat}) + 0.20 - 0.18(\text{sys})] \times 10^{-15}\ \text{s}$ であった。これは散乱長にして $|a_0 - a_2| = [0.2533 \pm 0.0078 - 0.0080(\text{stat}) + 0.0072 - 0.0077(\text{sys})] / M_{\pi^+}$ に相当する。即ち結論として初期の通り寿命は 9% の精度で、亦散乱長は 4% の精度で求められた。これに対しカイラル摂動理論で求められた寿命は $\tau = (2.9 \pm 0.1) \times 10^{-15}\ \text{s}$, $a_0 - a_2 = (0.2659 \pm 0.004) / M_{\pi^+}$ である。

【 $K\pi$ 原子の寿命測定】

$A_{\pi\pi}$ 寿命測定の成功に力を得て、 $A_{K\pi}$ ハドロニック原子の寿命測定が試みられた。DIRAC スペクトロメータをそのまま用いた場合、 K と π では大きく質量が異なるために acceptance が小さくなってしまう。そのためにスペクトロメータのセットアップを変更して acceptance を良くすることも議論されたが、結局大きな変更は加えずに $A_{K^-\pi^+}$, $A_{K^+\pi^-}$ それと $A_{\pi\pi}$ も同時に観測するというオプションが選ばれた。スペクトロメータ磁石による deflection 角は atomic pair の K の方が小さいので、その小さい所に

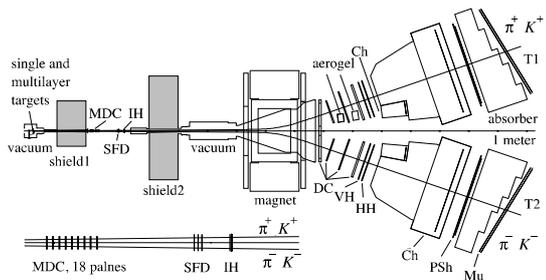


図 3

aerogel cerenkov 検出器と、重ガス cerenkov

検出器を加えて（図3参照）測定を開始した（それ以外にスペクトロメータに加えた日本グループによる改良については前項参照）。2009年には $A_{K\pi}$ ハドロニック原子の同定に成功し、結果をletterとして論文に発表した。図4、5はそれぞれまだ統計は少ないものの、

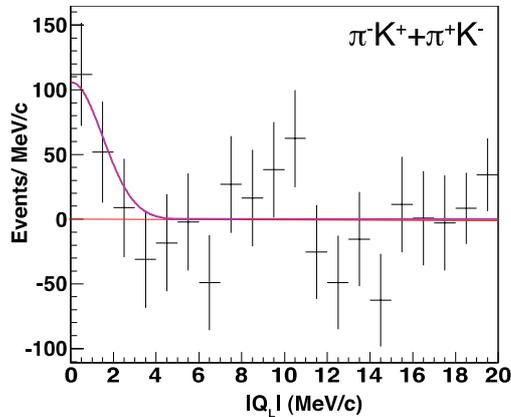


図4

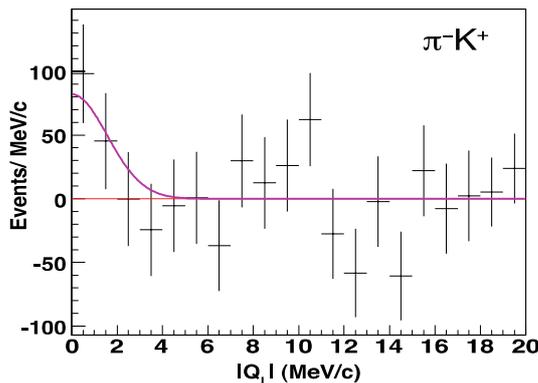


図5

同定された atomic pair を示している。以後測定は続けられ、現在得られた結果の解析が進行中で、近く論文に発表できる予定である。

【 $\pi\pi$ 原子の準安定2P状態の検出】

Be標的の後方2mmのところ、2 μ m厚の第2標的を挿入し、さらに小型の永久磁石を挿入してこの間に磁場を生成する。これによってBe標的中で解離を起こした $\pi^+\pi^-$ 対は sweep out され、今まで観測されなかった準安定状態の $A_{\pi\pi}$ 原子に起因する $\pi^+\pi^-$ 対が測定される。2011年、まずLamb shiftを測定するための第一段階としての実験が開始された。然しながら、日本グループの作成した永久磁石で、予想外の放射線に依る磁気劣化が起り、データの質に影響があった。これは入射ビーム周辺の多くの中性子によるも

のとおもわれ、2012年のビームタイムに向けて、放射損傷の少ない永久磁石の準備が進められている。また、日本グループの担当する new dE/dx カウンタの製作については、2011年中に十分な予備データを取ることが出来、これに基づいて新しいカウンタがデザインされ、京都において検出器を製作した。現在宇宙線をもちいてカウンタのテストがすすめられており、近々CERNに発送する手はずとなっている。

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2件）

① B. Adeva, M. Chiba, M. Kobayashi, K. Okada, F. Takeuchi et al.,

Determination of $\pi\pi$ scattering lengths from measurement of $\pi^+\pi^-$ atom lifetime
Physics Letters **B704** (2011) 24

② B. Adeva, M. Chiba, M. Kobayashi, K. Okada, F. Takeuchi et al.,

Evidence for pi-K atoms with DIRAC;
Physics Letters **B674** (2009) 11-16

〔その他〕

ホームページ

<http://dirac.web.cern.ch/DIRAC/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 富士雄 (TAKEUCHI FUJIO)

京都産業大学・名誉教授

研究者番号：40121537

(2) 研究分担者

岡田 憲志 (OKADA KENJI)

京都産業大学・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

青垣 総一郎 (AOGAKI SOHICHIROH)

京都産業大学・コンピュータ理工学部・講師

研究者番号：00582363
2010年度以降

(3)連携研究者
なし