

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（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20340059

研究課題名（和文） π K 原子の寿命測定による QCD 検証 - 発展 DIRAC 実験 -研究課題名（英文）Test of QCD by measuring a lifetime of π K atoms - Extended DIRAC -

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：荷電 π 中間子と K 中間子が電磁相互作用で緩やかに結合してできている π K 原子の存在を CERN-PS の DIRAC 実験で初めて明らかにした。小さな結合エネルギーで束縛されている原子の崩壊寿命の測定は低エネルギーでの π K 散乱長を与え、カイラル摂動計算との詳細な比較は、色閉じ込め領域での量子色力学の検証になる。今回の研究では、 π K 原子の寿命の下限を 90% の信頼度で 0.8 fs と決めた。また、同時に測定していた $\pi^+\pi^-$ 原子の散乱長を 4% の精度で $|a_0 - a_2| = 0.253m_\pi^{-1}$ と決めた。

研究成果の概要（英文）：The study presents an evidence for the first observation of electromagnetically bound $\pi^\pm K^\mp$ -pairs (π K-atoms) with the DIRAC experiment at the CERN-PS. The observed enhancement at low relative momentum corresponds to the production of π K-atoms. The mean life of π K-atoms is related to the s-wave π K-scattering lengths. We got a lower limit for the mean life of 0.8 fs at 90% confidence level.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2009 年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2010 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度	0	0	0
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：数理系科学

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：2 中間子原子、QCD、S-波散乱長、カイラル摂動計算、 $\pi\pi$ 原子、 π K 原子崩壊寿命、シンチレーティングファイバーホドスコープ

1. 研究開始当初の背景

(1) 標準モデルの枠内における強い相互作用理論である QCD (量子色力学) は、二つの特徴的な性質を持っている。クォークが互いに接近した時にほとんど自由粒子のようにふるまう漸近的自由と、クォークを核子から分離しようとしても単独に取り出すことのできない色閉じ込めである。運動量移行の大きなところでは、多く

の高エネルギー実験によって QCD の予言の正しさが検証されてきた。しかしこれは QCD 理論の一側面すなわち、漸近的自由が検証されたに過ぎない。強い相互作用を完全に理解するためには、QCD の非摂動的な領域での実験的な検証が重要な課題として残されている。粒子間の相対運動量の小さい低エネルギー非摂動領域での精度の高い QCD 理論計算は非常に難しいが、

その中で例外的に精度の高い物理量を予言できるものに、カイラル摂動計算による $\pi\pi$ と πK の S 波散乱長がある。

(2) このうち $\pi\pi$ 散乱は CERN における DIRAC 実験 (PS212) で $\pi\pi$ 原子の寿命を測定した 2005 年までのデータを解析した時点での統計精度ではカイラル摂動計算との矛盾はないことを示した。

$\tau = 2.91 \times 10^{-15} \text{sec}$, $|a_0 - a_2| = 0.264 + 0.033 - 0.020$ (B.Adeva et al, Phys. Lett. B619 50(2005))

今回はこの実験をカイラル摂動計算の可能な πK 原子の崩壊寿命測定にまで拡張した。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、今まで $\pi\pi$ 原子の散乱長測定で検証してきた $SU(2)_L \times SU(2)_R$ 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。この計算では πK の S 波散乱長を 10% の精度、つまり πK 原子の崩壊寿命をおよそ 20% の精度で $\tau = 4.7 \times 10^{-15} \text{sec}$ と予言している。

2. 研究の目的

π 中間子と K 中間子がクーロン力でゆるく束縛した π^+K^- (π^-K^+) 原子を Pt と高エネルギー陽子 (24 GeV) 反応で生成する。まず第一の目的は、 πK 原子の存在を実験的に初めて確認することである。この πK 原子が $\pi^0 K^0$ に崩壊する 10^{-15}sec 位の寿命 τ_{n0} を 20% 以上の精度で測定することにより、次の関係式から π と K 中間子のアイソスピン 1/2 と 3/2 状態の S 波散乱長差 $|a_{1/2} - a_{3/2}|$ を 10% 以上の精度で決める。 πK の原子内での S 状態の相対運動量は 3 MeV/c 以下なので低エネルギーでの散乱長を測定することになる。

$$1/\tau_{n0} \doteq \text{Factor}(a_{1/2} - a_{3/2})^2 |\Psi_{n0}(0)|^2$$

$\Psi_{n0}(0)$: πK 原子の原点での波動関数

第二の目的は πK 原子の寿命を測定する事である。実験的に得られた散乱長をカイラル摂動理論で計算した πK 散乱長と比較することにより、低エネルギー非摂動領域で第二世代の s クォークまでを含んだ QCD の検証を行う。

第三の目的は、同時に測定している $\pi\pi$ 原子の寿命測定の統計精度を上げ、4% の精度での散乱長を得る事である。

3. 研究の方法

(1) πK 原子の生成: CERN の陽子シンクロトロン (PS) で加速された 24 GeV/c 強度 $3 \times 10^{11} \text{pps}$ の陽子ビームを、総厚さ 10 ~ 100 μm の Pt (Ni, Ti, Be) 薄膜標的に照射する。ひとつの原子核から同時に多重発生した π 粒子と K 粒子の中で方向と速度の揃った対が原子状態 $A_{\pi K}$ を作る。

(2) πK 原子の解離: $A_{\pi K}$ は強い相互作用によりおよそ $4.7 \cdot 10^{-15} \text{sec}$ の寿命で π^0 と反 K^0 に崩壊するが、一方この原子はほぼ光速で標的中を通過しているため電磁的相互作用で π^+ と K^- (π^- と K^+) にも解離する。 $\pi^0 K^0$ 崩壊と $\pi^+ K^-$ ($\pi^- K^+$) 解離は競争過程であり、その分岐比は標的の厚さと原子の寿命の長さで決まる。解離プロセスの断面積は強い相互作用に比べて大きく 10^{-21}cm^2 (1 kbarn) のオーダーである。 $\pi^+ K^-$ 対の収量から寿命が求まる。

(3) 解離 πK 粒子対の特徴: 精度良く測定することが難しい π^0 や K^0 検出の代わりに、検出効率の大きい解離した $\pi^+ K^-$ ($\pi^- K^+$) 粒子対を測定する。 $A_{\pi K}$ の重心運動の運動量がおよそ 6.5 GeV/c であるのに対し、原子内部での相対運動量は最大 3 MeV/c なので、解離 πK 対の進行方向の最大開き角は分布のすそまで含めてわずか 2 mrad であり、解離 2 粒子は特徴的な空間・運動量相関分布を示す。これは 4 m 下流に設置したトリガー用 newSFD 上で πK の距離が 0 ~ 8 mm に対応する。newSFD はリアルタイムでこの距離を測定しトリガー条件に加える。

(4) πK 粒子対の同定用検出器群 (DIRAC spectrometer): 標的と分析電磁石の間の検出器を上流側 (前方) 検出器群と呼び、マイクロドリフトチェンバー (MDC)、高分解能シンチファイバーホドスコープ (newSFD)、dE/dx 電荷検出ホドスコープ (IH) で構成する。分析電磁石以降は π と K に分離しそれぞれ左右のアームに乗った下流側 (後方) 検出器群で測定する。後方検出器群は、トラッキング用 4 対のドリフトチェンバー (DC)、縦方向ホドスコープ (VH)、横方向ホドスコープ (VH)、粒子識別用ガスチェレンコフ検出器 (C)、ミューオン検出用のプレシャワー (Psh) + 鉄ブロック + ミュー検出器 (Mu) で構成する。

(5) データ取得 (DAQ) 用トリガーの設定: トリガーは 3 段階で行う。

第 1 トリガー: π^+ と K^- (π^- と K^+) は 2 Tesla \cdot m の磁気スペクトロメータで分離された後、それぞれ C カウンター、Mu カウンター、飛行時間測定で粒子識別され、左右の VH と HH で π と K の同時計数時間情報を得る。

第 2 トリガー: 磁石上流に設置した X, Y 2 面の newSFD と U 面用 SFD および dE/dx 電荷検出ホドスコープにより 2 粒子間距離が 17 mm 以内の事象だけを抽出する。これは πK 相対運動量 7 MeV/c 以下に対応する。

第 3 トリガー: 下流のドリフトチェンバー群のデータと分析電磁石を使った π と

K粒子の軌跡追求で正常な軌跡と運動量を要求する。これら3種のトリガー条件を満足した事象のデータをコンピュータで取得する。

4. 研究成果

$\pi\pi$ 原子と同様に、 πK 原子も 10^{-15} sec 代の寿命で存在する事を実験的に示すことができた。2009年までのデータ解析で得られた πK 原子の数は 173 ± 54 個であった。26 μ m 厚の Pt 標的で生成した πK 原子がその標的内で解離し荷電 π と K になる確率 P_{br} と πK 原子の寿命の関係は図1のようになり、観測された πK 対から寿命を求めることができる。

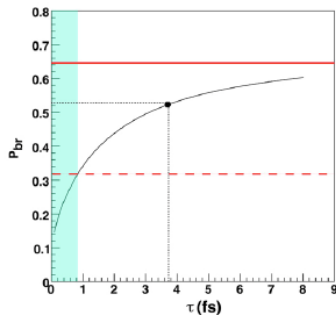


Fig. 1.

今回は πK 原子の存在を実証する事が主目的であったため、解離確率の大きい Pt 標的を用いた。その結果、得られた解離確率 0.65 からは πK 原子の寿命の下限値を決めることができ、90%の信頼度で $\tau > 0.8$ fs を得た。これは πK の S-波散乱長差 $|a_{1/2} - a_{3/2}| < 0.58 M^{-1}$ に対応する。

$\pi\pi$ 原子の生成は 2005 年までの時点で散乱長の精度を約 12% で決定していたが、この πK 実験でも同時にデータを取り続けることができた。図2はバックグラウンドを差し引いた $\pi\pi$ 原子の相対運動量の横成分の分布を表すスペクトルである。相対運動量 2 MeV/c 以下の領域に事象が集中している。

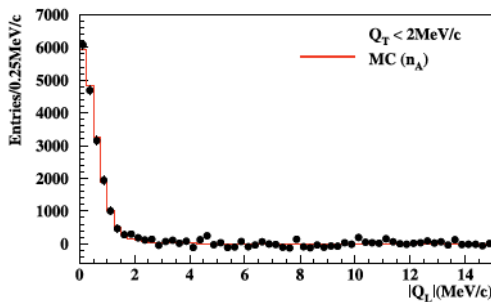


Fig. 2.

現在までの解析では $\pi\pi$ 原子からの解離 $\pi^+\pi^-$ 対を 21,227 個検出し S-波散乱長を $|a_0 - a_2| = (0.2533(+0.0080, -0.0078)_{stat}, (+0.0078, -0.0073)_{sys}) M\pi^{-1}$ と 4% の精度で決定することができた。最新のカイラル摂動計算

(G Colangelo et al., Nucl. Phys. B603 (2001)125)による散乱長差は 0.265 ± 0.004 であり誤差の精度の範囲で QCD との矛盾はない。

$\pi\pi$ 原子の寿命から求めた S-波散乱長は、アイソスピン 0 と 2 の散乱長の差 $|a_0 - a_2|$ で表されている。 a_0 と a_2 を分離して求めるために、別の散乱長の組み合わせを測定しなければならない。我々は、現在の寿命測定用の DIRAC スペクトロメータをそのまま使用して $\pi\pi$ 原子のラムシフトを測定できる事を明らかにした。ラムシフトは散乱長の組み合わせ $2a_0 + a_2$ を与える。予備実験として弱い永久磁石を標的に挿入し短寿命 S-状態からの解離荷電対を排除して、準安定な P 状態の $\pi\pi$ 原子を測定する事に成功し、次期研究計画としている $\pi\pi$ 原子のラムシフト測定に見通しを付けることができた。

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 21 件)

① Determination of $\pi\pi$ scattering lengths from measurement of $\pi^+\pi^-$ atom lifetime
B. Adeva, M. Chiba(9番目), M. Kobayashi(36番目), K. Okada(59番目), F. Takeuchi(80番目), (他90名) Phys. Lett. B704, (2011) 24-29 (査読有)

DOI:10.1016/j.physletb.2011.08.074

② DIRAC 実験における πK 原子の検出とその寿命測定

青垣総一郎、岡田憲志、竹内富士雄、千葉雅美、岩下芳久、小林正明、京都産業大学先端科学技術研究所所報第10号, (2011)75(査読無)

③ CERN PSにおけるDIRAC実験(PS212)用 dE/dx検出器用プラスチックシンチレータの性能評価

青垣総一郎、京都産業大学先端科学技術研究所所報第10号, (2011)63-73 (査読無)

④ Satellite pulsed tiny neutron source at Kyoto University

Y. Iwashita, T. Nagae, T. Tanimori, H. Fujioka, H.M. Shimizu, Nucl. Instr. Meth. A634 (2011) S97-S99 (査読有)

DOI: 10.1016/j.nima.2010.06.356

⑤ Performance of a 511keV Gamma-ray Imager Using a LYSO(Ce) Crystal Array with Wave-Length Shifter

S. Aogaki and F. Takeuchi, IEEE Trans. Nucl. Sci. 57, (2010)1502-1511 (査読有)

DOI:10.1109/TNS.2010.2043853

⑥ Read-out of LYSO:Ce matrix detector using wave-length-shifter fibers applicable to new PET scanner with high spatial

resolution at low cost. S. Aogaki and F. Takeutchi, 京都産業大学先端科学技術研究所所報第9号,(2010)35-58 (査読無)

⑦ Measurement of 0.511 MeV gamma-rays with a thin long strip of Gd₂SiO₅:Ce³⁺ scintillator
S. Aogaki, S. Isogai, M. Kobayashi, S. Sugimoto, F. Takeutchi and Y. Tamagawa, Nucl. Instr. Meth. A614 (2010) 250-259 (査読有)
DOI:10.1016/j.nima.2009.12.041

⑧ Practical applications of permanent magnet multipoles
Y. Iwashita(1番目), M. Ichikawa,(他11名)
IEEE Trans. Applied Supercond. 20 (2010) 842-845 (査読有)
DOI:10.1109/TASC.2010.2040604

⑨ Evidence for π K-atoms with DIRAC.
B. Adeva, M. Chiba(10番目), M. Kobayashi (34番目), K. Okada(52番目), F. Takeutchi (69番目), (他75名)
Physics Letters B 674, (2009) 11-16 (査読有)
DOI: 10.1016/j.physletb.2009.03.001

⑩ 低価格高分解能PET 制作を目的としたガンマ線イメージャー
青垣総一郎、竹内富士雄
京都産業大学先端科学技術研究所所報第8号、(2009) 27-48 (査読無)

⑪ Rader for salt ultra-high-energy neutrino detector and contribution of W-gluon fusion process to collision of neutrinos against protons
M. Chiba(1番目),Y. Arakawa, (他10名)
Nucl. Instr. Meth. A604 (2009) S233-S235 (査読有) DOI: 10.1016/j.nima.2009.03.066

⑫ A small angle neutron scattering (SANS) experiment using very cold neutrons (VCN)
M. Bleuel, Y. Iwashita(7番目), (他9名)
Physica B, Elsevier, 404 (2009) 2629-2632 (査読有)DOI: 10.1016/j.physb.2009.06.048

⑬ Development of modulating permanent magnet sextupole lens for focusing of pulsed cold neutrons
M. Yamada, Y. Iwashita(5番目), M. Ichikawa, (他22名)
Physica B, Elsevier, 404 (2009) 2646-2651 (査読有)DOI: 10.1016/j.physb.2009.06.132

⑭ Depth of interaction measured with LYSO(Ce) scintillator in a new method
S. Aogaki, H. Kotaka, I. Moritani and F. Takeutchi
京都産業大学先端科学技術研究所所報第7号、(2008) 115-124 (査読無)

⑮ Study on the light insulator between scintillator crystals
H. Kotaka, S. Aogaki, I. Moritani, F. Takeutchi and F.M. Toyama

京都産業大学先端科学技術研究所所報第7号、(2008) 93-114 (査読無)

⑯ Variable permanent magnet sextupole lens for focusing of pulsed cold neutrons
Y. Iwashita(1番目), Y. Tajima, (他5名)
Nucl. Instr. Meth. A586 (2008) 73-76 (査読有) DOI: 10.1016/j.nima.2007.11.058

[学会発表] (計1件)

① S. Aogaki, F. Takeutchi, Performance of a 511keV gamma-ray imager using a LYSO (Ce) crystal array with wave-length shifter, 10th Int. Conf. on Inorganic Scintillators and their Applications, 韓国済州道西帰浦市, June-10 (2009)

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

竹内 富士雄 (TAKEUTCHI FUJIO)

京都産業大学・名誉教授

研究者番号：40121537

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

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 SOUICHIROU)

京都産業大学・コンピュータ理工学部・講師

研究者番号：00582363 (H22→H23：研究分担者)

(3) 連携研究者

小林 正明 (KOBAYASHI MASA AKI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・名誉教授

研究者番号：40013388