

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 9 月 5 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24340058

研究課題名(和文) + -原子散乱長測定によるQCD検証 - 発展DIRACラムシフト測定実験 -

 研究課題名(英文) Precise test of low energy QCD by measuring scattering lengths of $\pi^+\pi^-$ atoms
 -Lamb shift measurement of long lived $\pi^+\pi^-$ atoms in advanced DIRAC experiment

研究代表者

岡田 憲志 (OKADA, Kenji)

京都産業大学・名誉教授

研究者番号：90093385

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)： + -原子のラムシフトと K原子の寿命を同時に測定できるようにDIRAC spectrometerの改造を完成させた。検出器群の高計数率化、K粒子弁別、トラッキングとデータ収集系の強化を行った。同時にこれをCERN-PSからSPSに移設する案も作成した。この装置で + -原子中の長寿命原子を分離同定する方法を開発し、 436 ± 61 個の準安定P状態原子を初めて観測した。これで基底状態の寿命とは異なる散乱長の組合せを与えるラムシフト測定が可能となった。また K原子を 349 ± 62 個初めて観測した。これは低エネルギー領域のQCDの検証をudからudsクォークを含む枠組みに拡大できる。

研究成果の概要(英文)： After investigating the $\pi^+\pi^-$ atom with the ground state lifetime of 3.15×10^{-15} s, the DIRAC spectrometer was upgraded in order to study simultaneously $\pi^+\pi^-$ and π^0K atoms.

The experiment at the CERN PS observed for the first time long-lived states of the $\pi^+\pi^-$ atoms. The number of pion pairs resulting from the breakup of long-lived $\pi^+\pi^-$ atoms amounts to 436 ± 61 , corresponding to $\sigma=7.1$. This observation opens a new possibility to measure energy differences between P and S atomic states (Lamb-shift) and so to determine another combination of $\pi^+\pi^-$ scattering lengths. The π^0K atoms are produced by 24 GeV/c protons interacting with Pt or Ni foil targets. The breakup of π^0K atoms in the targets yields characteristic π^0K pairs with small relative momenta in the pair center of mass system. The experiment observed 349 ± 62 such atomic π^0K pairs, corresponding to $\sigma=5.6$. This is the first statistically significant observation of the strange dimesonic π^0K atom.

研究分野：原子核素粒子実験物理学

 キーワード： 原子・ K原子 散乱長・ K散乱長 ラムシフト カイラル摂動計算 低エネルギー領域のQCD
 検証 原子・ K原子の寿命測定 準安定P状態 CERN-PS加速器

1. 研究開始当初の背景

強い相互作用を記述する標準理論QCDは、漸近的自由と色閉じ込めという2つの特徴を持っている。漸近的自由は、多くの高エネルギー大運動量移行反応によって証明されてきた。(引用①)しかし強い相互作用を理解するためには、クォーク間の距離が大きくなりQCD結合の大きくなる非摂動領域における精度の高い実験と理論の比較が不可欠である。非摂動領域での精度の高いQCD理論計算は難しいが、カイラル摂動計算(ChPT)による π 中間子のS波散乱長は例外的に高い精度で計算できる。我々の実験が刺激となり、カイラル摂動計算は $\pi\pi$ S波散乱長を2.3%の精度で与えるまで発展した。(引用②)理論計算と有意な比較ができる高精度の散乱長測定をする事で非摂動領域でのQCDの検証ができる。

2. 研究の目的

$\pi\pi$ 散乱のS波散乱長 a_0 , a_2 (添字はアイソスピン)を精度よく測定し、カイラル摂動計算値と比較することで、低エネルギー非摂動(色閉じ込め)領域でのQCDを検証する。低エネルギー散乱は $\pi+\pi$ -原子($A\pi\pi$)というエキゾチックな状態を作ることで実現する。原子内の π の束縛エネルギーは3 MeVと非常に小さく、それが2個の π^0 に崩壊する過程は低エネルギーでの $\pi\pi$ 散乱長測定に最適である。しかし、散乱長の測定は多くの場合 a_0 , a_2 の組み合わせとして現れる。我々は $A\pi\pi$ から散乱長を測定する2つの方法を開発した。(a) $A\pi\pi$ の基底S状態が2個の π^0 へ崩壊する寿命を測定する。寿命と散乱長の関係は $\tau \propto (a_0 - a_2)^2$ である。(b) $A\pi\pi$ の2S-2P間のエネルギー差(ラムシフト)を測定する。ラムシフトと散乱長の関係は、ラムシフト $\propto (2a_0 + a_2)$ である。

(a)はDIRAC実験(CERNのPS212)として2011年に寿命測定を完了し、そこから $|a_0 - a_2| = 0.2533/M\pi$ (4%)を得ている($M\pi$ は π の質量)。(引用③)DIRAC実験の最終目標は(b)のラムシフトを精度よく測定し($2a_0 + a_2$)を導き、(a)と(b)の結果から散乱長 a_0 と a_2 を分離し、個々にChPTと有意な比較することでQCD標準理論の非摂動領域での有効性を検証することである。

この科研費の研究では、ラムシフト測定に先立って $A\pi\pi$ のP状態が有限の寿命を持った束縛状態として存在することを実験的に確かめる為に、P状態だけを分離して測定する方法を確立し観測することである。また、その結果とCERNのPS/SPS加速器の陽子エネルギーでの原子生成量のシミュレーションからSPSでの実行を実験計画採択委員会(PSPC)に提案する。

3. 研究の方法

$\pi\pi$ 散乱のS波散乱長 a_0 , a_2 が組み合わさった量を観測する二つの方法を説明する。

(1) $\pi+\pi$ -原子の基底状態の寿命測定

$A\pi\pi$ は強い相互作用により2個の π^0 に崩壊する。 $A\pi\pi$ の崩壊では関与する粒子は π 粒子だけなので、従来の π 粒子と核内核子との散乱 $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ などから求める測定に比べ核子の寄与のないモデルに依存しない方法で $\pi\pi$ 散乱長を精度良く得ることができる。(引用④) $A\pi\pi$ の寿命は 10^{-15} 秒台と非常に短く現在の時間直接測定技術では不可能な値であるが、 $A\pi\pi$ を生成した標的中を $A\pi\pi$ が飛行中にクーロン力により $\pi+\pi$ -対へ解離するプロセスと強い力で $2\pi^0$ へ崩壊するプロセスを競合させその割合を測定するという巧妙な手法で測定を可能とした。この割合は標的の厚さと原子の寿命だけで決まる。日本グループが開発したSFDトリガーデバイスと $\pi+$ と $\pi-$ を分別する2アーム分析電磁石を主検出器として測定を行い、2011年までに21,227個の $A\pi\pi$ データを集積し、寿命 $\tau = 3.15 \times 10^{-15}$ 秒(誤差8%)、散乱長差 $|a_0 - a_2| = 0.2533/M\pi$ (誤差4%)を得た。

(2) $A\pi\pi$ のP状態検出とラムシフト測定

$A\pi\pi$ のnS状態とnP状態(nは主量子数)間のエネルギー差はラムシフトと呼ばれ主に真空偏極と強い相互作用によって起こる。強い相互作用による項は散乱長の組み合わせ $2a_0 + a_2$ に比例する。ラムシフト測定の要点は標的中にS状態で生成された $A\pi\pi$ の一部が準安定P状態($\tau \sim 10^{-11}$ 秒)に励起され、荷電中性として標的を出る。相対論的速度のP状態原子に直交させて強い磁場Bをかければ、相対論効果で原子の重心系では両者に直交する方向にローレンツ因子 γ とBに比例する電場が生じ、シュタルク効果のためSとP間で混合が起きる。寿命の短いSはすぐ崩壊するので平衡はPが減少する方向に進行し、Pの寿命が減少したように見える。この効果は電場とラムシフトの比に依存するのでPの実効的な寿命を γ の関数として測定すればラムシフトが求まる。第一段階： $\pi+\pi$ -原子の準安定P状態の生成法と生成数の測定

① DIRACスペクトロメータの改造

$A\pi\pi$ の寿命測定を行った時と同じスペクトロメータを使用する。標的中で解離した $\pi+$ と $\pi-$ 対を上流側検出器群newSFD、 dE/dx で相対運動量9 MeV/c以下の $\pi+$ と $\pi-$ 対を2粒子と同定し飛跡を与える。解析電磁石で $\pi+$ と $\pi-$ を分離後後方検出器群ドリフトチェンバー、縦型ホドスコープ、横型ホドスコープ、チェレンコフ検出器、ミュオン検出器などで2粒子相関、粒子種類同定、飛行時間測定、トラッキングを行う。(引用⑤)ビーム強度を3倍に増やすため計数率に弱かった電離検出 dE/dx ホドスコープを2倍に細分化しファイバーとPSPMで読み出す。またnewSFD-Y面の読み出し回路をADC/TDCのハイブリッドF1回路に更新する。

② 二重標的と弱磁場永久磁石の設置

P状態の $A\pi\pi$ を生成するために100 μm 厚のBe標的とその10 cm後方に $A\pi\pi$ 解離用の2.1 μm

厚のPt標的を設置する。この標的の組み合わせはP状態の $A\pi\pi$ 数が最も数多くスペクトロメータで検出できるように種々の標的核種と厚さのシミュレーションから得られた結果である。(引用⑥) 二つの標的の間に粒子の進行方向と垂直に弱い永久磁石を設置し、第一標的内で発生した相対運動量の小さな荷電粒子対をスペクトロメータの受容口径の外に排除する。

③ S状態 $A\pi\pi$ からP状態 $A\pi\pi$ 生成

CERNのPSで加速された $24\text{GeV}/c$ 陽子を強度 $4 \times 10^{11}\text{pps}$ でBe第一標的に照射する。一つのBe原子核から多重発生した π 中間子の中で方向と速さの揃った π^+ と π^- 対が nS 状態の $A\pi\pi$ を作る。生成比は $1/n^3$ に比例するので $1S=83\%$, $2S=10.4\%$, $3S$ 以上 $=6.6\%$ の割合でできる。 $1S$ 状態の原子の寿命は 3.15×10^{-15} 秒である。 nS 状態の $A\pi\pi$ がBe標的の中を相対論的速度($1 \sim 6\text{GeV}/c$)で通過する間に、Be原子の電場と相互作用をして寿命の長い準安定 nP 状態に励起される。 $1S$ の 23% , $2S$ の 32% が $2P$ となる。励起されなかった短寿命のS状態は $2\pi^0$ に崩壊するか解離して π^+ と π^- 対で放出される。準安定P状態 $A\pi\pi$ はおよそ 10^{-11} 秒の長い寿命を持つので、解離により減少しながらもBe標的から荷電中性原子として射出し真空中を飛行する。この量は、生成された $A\pi\pi$ の6%程度と計算されている。

④ P状態原子の検出

第一標的内で解離してできた荷電対は永久磁石で軌道を外れる。中性原子の内、短寿命のS状態 $A\pi\pi$ は 10cm の真空中で全て $2\pi^0$ に崩壊するが長寿命のP状態原子はほとんど崩壊する事なく第二標的のPt薄膜に入射する。Ptは原子番号が大きいため解離の確率が大きく $2.1\mu\text{m}$ 厚で入射P状態原子の約 20% が $\pi^+\pi^-$ 対に解離する。原子の進行方向に射出した荷電 $\pi^+\pi^-$ 対はDIRACスペクトロメータにより高効率で検出される。この収量から第一標的で生成されたP状態 $A\pi\pi$ の数を得る。ここで求めた値は、ラムシフトを求めるための強磁場による $P \rightarrow S$ への遷移確率の分母になる値である。

第二標的以降の荷電対測定手法は検出器群とデータ取得システムを含めS基底状態 $A\pi\pi$ の寿命測定と全く同じであるので測定系の系統誤差の違いは少ない。

この科研費の研究での計測は、(2)①~④までであるが、第二段階としてDIRACスペクトロメータをSPSに移設して計画しているラムシフトの測定手法も述べておく。

⑤ $A\pi\pi$ の $P \rightarrow S$ 状態間遷移とラムシフト測定弱磁場永久磁石に代えて同じ位置に強磁場永久磁石を挿入する。相対論的速度($A\pi\pi$ の重心運動 $4.5\text{GeV}/c$ の時ローレンツ因子 $\gamma \sim 16$)で真空中を飛行するP状態の $A\pi\pi$ に、進行方向と直交する方向に 2Tesla 程度の強い磁場 B をかけると原子の重心系では相対論的效果のため $E = \beta \gamma B \sim \gamma B$ の電場が発生する。この $A\pi\pi$ の重心運動の γ に比例する電場はP状態とS

状態との混合を引き起こす。S状態の寿命は $\sim 10^{-15}$ 秒と短いため磁場通過中 $\sim 10\mu\text{m}$ で $2\pi^0$ に崩壊する。そのため混合は常にP状態が減少する方向に進行する。これはP状態の寿命 τ_{2p} が変化し実効寿命 τ_{eff} になったと捉えれば $\tau_{\text{eff}} = \tau_{2p} / (1 + 120 |\xi|^2)$, $|\xi|^2 \sim E^2 / (\text{lamb-shift})^2$ と書ける。実効寿命を求めればラムシフトすなわち $(2a_0 + a_2)$ が求まる。強磁場による $P \rightarrow S$ 状態間遷移を生き残ったP状態 $A\pi\pi$ は④の手順と同様に第二標的Ptで解離させスペクトロメータで $\pi^+\pi^-$ 対の運動量分布を測定する。測定する $A\pi\pi$ の重心運動量は $1 \sim 7\text{GeV}/c$ に分布しており対応する γ は $4 \sim 25$ となる。そのため強磁場の値が一定でも実効寿命は重心運動量に依存し変化する。実効寿命 τ_{eff} の γ 依存性からラムシフトの大きさを決定できる。

4. 研究成果

(1) DIRACスペクトロメータの改造

$A\pi\pi$ の基底S状態寿命測定に成功したスペクトロメータを、より生成量の少ない励起P状態のラムシフト測定に使用するために上流側検出器群の高計数率化、トラッキングの精密化、フロントエンド回路を含むデータ収集系の強化を行った。また $\pi^+\pi^-$ 原子と同時に πK 原子のデータを取得するためにK中間子の粒子弁別用アエロゾルチェレンコフ検出器を追加した。ラムシフト測定にはシュタルク効果を使うので強磁場を発生する永久磁石を挿入する装置を標的真空槽の中に準備した。図1は完成したDIRACスペクトロメータの俯瞰図である。(発表論文②)

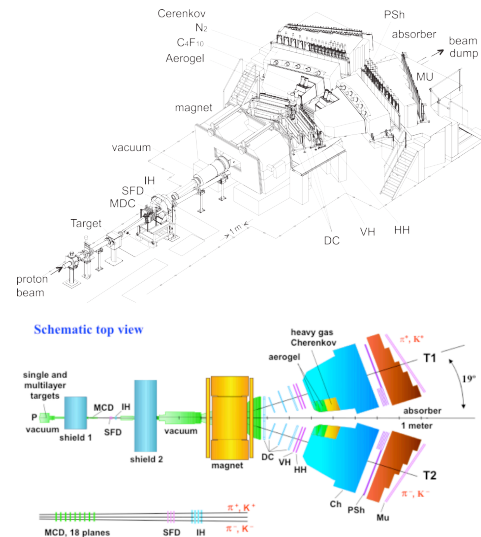


図1 改造後のDIRACスペクトロメータ
上：俯瞰図 下：平面図

P状態の $A\pi\pi$ を検出するために、標的箱の中には弱磁場永久磁石と 10cm 下流に第二標的Ptが格納されている。ラムシフト測定時はこの磁石を強磁場永久磁石に置き換え $P \rightarrow S$ 遷移を起こさせる。

上流側検出器群に幅 3 mm長さ100 mm厚さ 1 mmのプラスチックシンチレータスラブ32本で1面を構成するdE/dxホドスコープをX-Y-X'-Y'の4面製作した。CERNでの性能試験は両端読み出してMIPS粒子に対して光電子増倍管光電面で26~30個の光電子の発生を達成した。時間分解能は270 psで π 粒子の検出効率は99%で非常によい性能であった。この導入でファイバーホドスコープSFDの弱点である0.5 mm以内の近接粒子の数え落としを補完し超近接粒子でも1粒子か2粒子かの弁別が可能となる。(引用⑦)

$A\pi K$ の準安定P状態の計測のために挿入した永久磁石が粒子放射線のため大きく減磁した。磁石素材の中から最も耐性の大きな磁石を選別するために京大原子炉で中性子照射実験を始めたが照射コースの駆動装置の修理や原子炉の停止のため1回の照射に終わった。磁石成分の耐性データはCERNでの資料を参考にしSm-Co系磁石を選択し、3次元電磁場測定ソフトで磁場測定を行いデータベース化した。ラムシフト測定のための強磁場発生装置の設計では、原子の入射口径60 mmで1 Tmまでを得た。

(2) πK 原子の初検出

πK 原子($A\pi K$)とは π^- と K^+ または π^+ と K^- が水素原子のようにクーロン力で束縛されている状態である。 $A\pi K$ の基底S状態の寿命測定は πK 散乱のS波散乱長 $|a_{1/2} - a_{3/2}|$ (添字はアイソスピン)を与える。 K 中間子の中に存在するsクォークが関与する事でu, dクォークだけからなる $A\pi\pi$ のSU(2)_L x SU(2)_Rの枠組から一步進めてSU(3)_L x SU(3)_Rカイラル対称性の破れの検証へと拡張される。最新のlattice QCDを用いた計算では散乱長差に換算すると $|a_{1/2} - a_{3/2}| = 0.090 \pm 0.005 / M\pi$ と6%程度の精度で与えられている。(引用⑧)

$A\pi K$ はCERNの24 GeV/cの陽子ビームをNi標的に照射して生成した。改造前のDIRACスペクトロメータで行った2008年から2010年までの実験で得たデータから初めて $A\pi K$ の存在を観測した。(発表論文④)ここで検出した $A\pi K$ の個数は 178 ± 49 であり 3.6σ の統計精度に対応する。その後、2011年から2012年にかけて改造DIRACスペクトロメータでデータ取得をした。新しく導入したアエロジェルチェレンコフ検出器で陽子と K^+ の分離、ヘビーガステレンコフ検出器で K^- と π^- の分離ができ、 K 粒子に対するバックグラウンドを減らすことができた。上流側検出器群を高い計数率に耐えられるようにしたことを入射陽子ビームを2~3倍に増やすことができたため効率よい測定が可能となった。その結果、検出した $A\pi K$ の個数は 349 ± 62 であり 5.6σ の統計精度に対応する。

図2は、入射陽子が標的核内の1核子と衝突した時に観測される πK 対の発生機構を模式的に示している。生成した $A\pi K$ が標的内で標的原子とクーロン相互作用で解離してできる

π^-K^+ 対(または π^+K^- 対)を原子 πK 対と呼ぶ。陽子と核内の核子との衝突で K と短寿命の ρ や ω 粒子が発生した時、 ρ や ω の崩壊で発生した π と K がクーロン相互作用で対となる。これをクーロン対と呼び相関がある。また K と長寿命の η 粒子などが発生した時 η が崩壊してできた π と K が対となって検出されることもあるがこの事象は相関の無いバックグラウンドとなる。

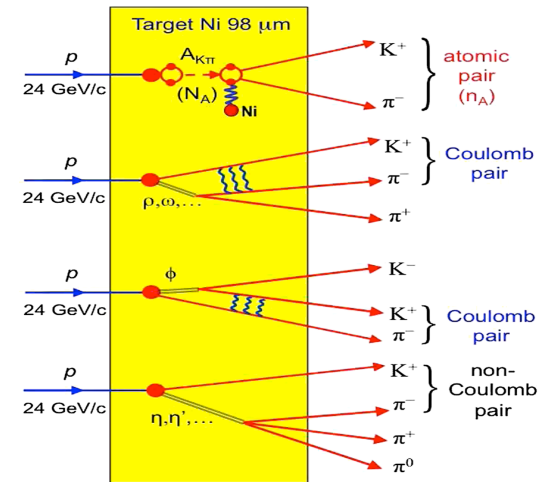


図2 πK 原子の生成と標的内での電離による π^-K^+ 対の発生機構及び雑音となるクーロン対などの発生機構

図3の上は、実験で得られた πK 対の数(+)を πK 間の相対運動量 Q の関数としてプロットとしたグラフである。色付きの破線は上で説明した πK 対の発生機構に対するシミュレーションで得られた結果である。黒い実線はクーロン対と非クーロン対を加算したフリー対(非束縛状態からの)の寄与である。

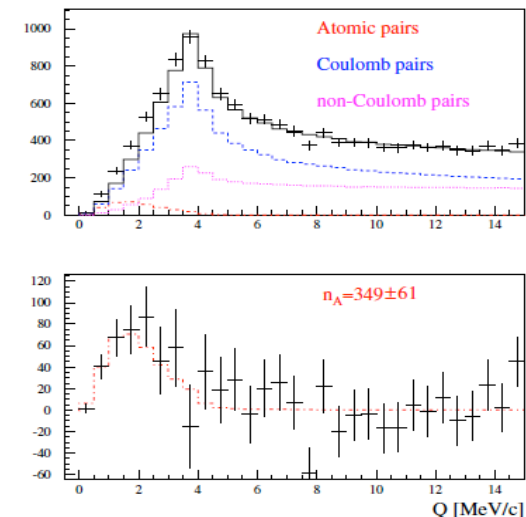


図3 π と K の相対運動量分布 Q

上 実験データ (+) と3種類のシミュレーション
赤:原子対 青:クーロン対 マゼンタ:非クーロン対
黒:クーロン対と非クーロン対の和(フリー対)
下 実験データからフリー対のシミュレーションを引いた分布 (+) と原子対のシミュレーション

図3の下の+印は、実験データからシミュレーションで得られるフリー対の相対運動量分布を引いたもので $\Lambda\pi K$ の解離を起源とする原子対の実験値である。 $2\text{MeV}/c$ あたりにはピークがあり $4\text{MeV}/c$ までの小さな相対運動量の範囲に局在している形はシミュレーションで得られる曲線とよく一致している。またその形は相対運動量が大きくなるにつれ緩やかに増加するバックグラウンドとは大きな違いを見せている。この実験でsクォークを含む πK 原子を初めて統計的にも相対運動量分布でも確実に存在検出することに成功したと言える。(発表論文①)

(3) 準安定P状態 $\pi+\pi^-$ 原子の初検出
ラムシフトの測定にとって必要なのは準安定(長寿命)P状態 $\Lambda\pi\pi$ の存在を検出し、その生成量を得ることである。研究の方法のところで詳しく述べた検出方法を模式的に示したのが第4図である。

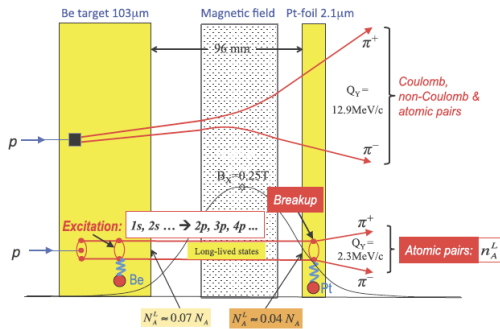


図4 第2標的と永久磁石の挿入により準安定P状態原子を測定する方法

図4の左の黄色が $100\ \mu\text{m}$ 厚のBe第一標的である。左方向から入射した $24\text{GeV}/c$ の陽子ビームと核子の衝突によって多くのクーロン対や非クーロン対の $\pi+\pi^-$ 対が作られ標的から射出する。一方、生成したS状態の $\Lambda\pi\pi$ はBeとの電磁相互作用で一部は解離し原子 $\pi+\pi^-$ 対となって射出する。また一部は励起して長寿命P状態の $\Lambda\pi\pi$ となる。S状態の $\Lambda\pi\pi$ の寿命は 3.15×10^{-15} 秒なので原子のローレンツ因子 $\gamma=16$ でも 10cm 下流の第二標的までに全て $2\pi^0$ に崩壊してしまい検出対象外となる。第一標的と $2.1\ \mu\text{m}$ 厚のPt第二標的(右側の黄色)の間には磁場 $B=0.25\ \text{T}$ ($BL=0.02\ \text{Tm}$)の $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ を素材とする永久磁石(黒のドット部)が設置されている。第一標的内で作られた荷電 $\pi+\pi^-$ 対はこの磁石で互いに反対方向に曲げられ見かけ上大きな相対運動量を持った対となりスペクトロメータの測定範囲外に押しやられる。荷電中性の準安定P状態 $\Lambda\pi\pi$ の寿命は 1.17×10^{-11} 秒なので大半の原子は直進しPt標的に入射する。このP状態 $\Lambda\pi\pi$ をPtで解離してきた原子 $\pi+\pi^-$ 対をスペクトロメータで測定する。
2アームの分析電磁石の下流では、3種類の

チェレンコフ検出器(Ch)と最下流のミュオン検出器で粒子弁別を行いK, e, μ , pを排除し π を選別し、左右のアームの4面のドリフトチェンバー内(DC)に1または2本のトラックのあるイベントだけを取り出す。このトラックを分析電磁石の詳細な磁場分布を使い上流側に引き戻す。上流のプラスチックシンチレータホドスコープ(SFD-x,y,u)と dE/dx ホドスコープ(IH)位置情報及び標的位置を使い粒子軌道を再構築する。
このようにして得られた $\pi+\pi^-$ 対の相対運動量分布の縦方向の成分 Q_L を第5図に示す。

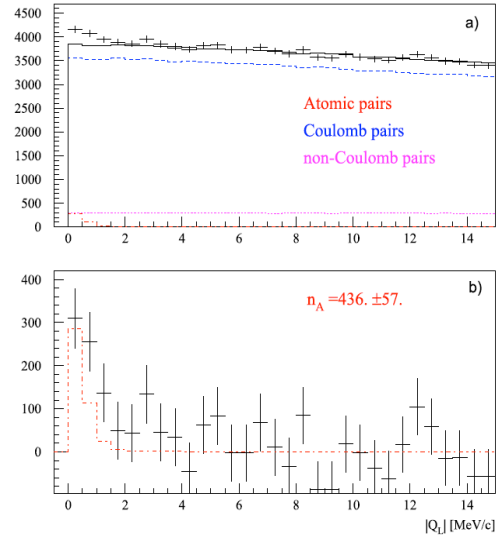


図5 $\pi+\pi^-$ 対の相対運動量分布 $|Q_L|$
a) 実験データ(+)と3種類のシミュレーション
赤:原子対 青:クーロン対 マゼンタ:非クーロン対
黒:クーロン対と非クーロン対の和(フリー対)
b) 実験データからフリー対のシミュレーションを引いた分布(+)と原子対のシミュレーション

図5a)でバックグラウンドであるフリー対に比べて $|Q_L| < 2\text{MeV}/c$ の低エネルギー領域で明らかな余剰量が残っている。実験値からフリー対を引いたイベントを図5b)に示す。準安定P状態 $\Lambda\pi\pi$ がPt箔の中で解離してできた $\pi+\pi^-$ 対のシミュレーションが示す低エネルギー領域にピークを持つ分布と実験値は良い一致をしている。検出された準安定P状態 $\Lambda\pi\pi$ の数と統計誤差は 436 ± 57 であった。これに系統誤差も追加すると 436 ± 61 となる。この結果からラムシフト測定によって新たな散乱長組み合わせの実験値を得る目処がたった。(発表論文③)

なお、ラムシフト実験はCERNのSPSで実施することを目指している。2016年9月にCERNで開催された"Physics Beyond Colliders Kickoff Workshop"というコライダー実験とは相補的な観点でPS/SPSを使い素粒子物理の課題を新しい視点で捉える実験提案WSにDIRAC実験の $\Lambda\pi K$ 寿命測定と準安定 $\Lambda\pi\pi$ のラムシフト測定が提案として取り上げられ発表した。
(<https://indico.cern.ch/event/523655/contributions/2246870>) これをもとに現在

SPSC (CERN実験採択委員会)に提出する提案書を作成中である。

<引用文献>

- ① S.Bethke, Prog.Part.Nucl.Phys.58,2007
- ② G.Colangelo et al, Nucl. Phys.B603,2001
- ③ B.Adeva et al, Phys. Letters B 704,2011
- ④ J.Gasser et al, Phys. Rev. D64,2001
- ⑤ B.Adeva et al, J.Phys.G: Nucl.Part. Phys.30,2004
- ⑥ DIRAC collaboration, CERN-SPSC-P-284 Add.5, Nov 22,2009
- ⑦ 青垣総一郎他., 京都産業大学先端科学研究研究所報第12号, 2013
- ⑧ K.Sasaki et al, Phys.Rev.D89,2014

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 4件)

- ① Observation of π^-K^+ and π^+K^- Atoms, B. Adeva, S. Aogaki(6), M. Chiba(10), Y. Iwashita(25), M. Kobayashi(28), K. Okada (41), F. Takeuchi(55) et al, (total 64), Phys. Rev. Letters 117, (2016) 112001-1~112001-6 査読有
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.112001>
- ② Upgraded DIRAC spectrometer at CERN PS for the investigation of π and πK atoms, B. Adeva, S. Aogaki(6), M. Chiba(11), Y. Iwashita(30), M. Kobayashi(33), K. Okada(46), F. Takeuchi(61) et al, (total 71), Nucl. Inst. And Meth. in Phys. Res. A839, (2016) 52-85, 査読有
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.07.049>
- ③ First observation of long-lived π atoms, B. Adeva, S. Aogaki(4), M. Chiba(8), Y. Iwashita(24), M. Kobayashi(27), K. Okada (40), F. Takeuchi(55) et al, (total 64), Phys. Letters B751, (2015) 12-18, 査読有
<http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2015.09.060>
- ④ First πK atom lifetime and πK scattering length measurements, B. Adeva, S. Aogaki(6), M. Chiba(10), Y. Iwashita(28), M. Kobayashi(31), K. Okada (44), F. Takeuchi(60) et al, (total 69), Phys. Letters B735, (2014) 288-294, 査読有
<http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2014.06.043>

[その他]

紹介記事

“DIRAC experiment observes new exotic atom” News on CERN COURIER Vol.56 No.8 (2016) 8

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・名誉教授

研究者番号：90093385

(2) 研究分担者

千葉 雅美 (CHIBA, Masami)

首都大学東京・理工学研究科・客員研究員

研究者番号：60128577

岩下 芳久 (IHASHITA, Yoshihisa)

京都大学・化学研究所・准教授

研究者番号：00144387

神谷 好郎 (KAMIYA, Yoshiro)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：90434323

(平成27年度より研究分担者)

外山 政文 (TOYAMA, Masafumi)

京都産業大学・コンピュータ理工学部・教授

研究者番号：60180189

(平成27年度より研究分担者)

青垣 総一郎 (AOGAKI, Soichiro)

京都産業大学・コンピュータ理工学部・講師

研究者番号：00582363

(平成25年度より海外協力者)

(3) 連携研究者

小林 正明 (KOBAYASHI, Masaaki)

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

(4) 研究協力者

竹内 富士雄 (TAKEUTCHI, Fujio)

京都産業大学・名誉教授