

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 —

岡田 憲志
竹内 富士雄
千葉 雅美¹

Abstract

The DIRAC experiment (PS212) aims to measure the lifetime of $\pi^+\pi^-$ atoms using 24GeV/c proton beam provided by the CERN PS. The precise measurement of the lifetime enables to determine an s-wave pion-pion scattering length in a model independent way. The $\pi\pi$ scattering length has been calculated by means of Chiral perturbation theory with a precision of 2.5%. We analyzed a part of collected data and deduced the lifetime as $\tau = [2.91+0.49-0.62] \times 10^{-15}$ s. The lifetime corresponds to the scattering length $|a_0 - a_2| = 0.264+0.033-0.020m_\pi^{-1}$. The errors are mostly due to statistics.

In this DIRAC experiment, Japan group has developed a topological trigger device consisting of scintillating-fibre hodoscopes (SFD), peak-sensing circuits (PSC), ADC/TDC hybrid read-out circuits (F1) and trigger logic circuits. They can select out online a real $\pi^+\pi^-$ pair due to a dissociation of $\pi^+\pi^-$ atom from a huge amount of background events. As the second stage of the DIRAC we measure a lifetime of πK -atoms. For the πK measurements, we developed new high resolution scintillating fibre hodoscopes (HRH) made of 280 μ m fine fibres. We found that the HRH has an excellent spatial resolution of 75 μ m and a time resolution of 0.56ns in rms.

1. はじめに

強い相互作用を記述する標準理論である量子色力学(QCD)は、漸近的自由(asymptotic freedom)と色閉じ込め(color confinement)という2つの特徴を持っている。このうち漸近的自由は、多くの高エネルギー大運動量移行反応によってその正しさが証明されてきた。しかし強い相互作用を全面的に理解するためには、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となっている。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 π 中間子のS波散乱長がある。最近この計算はS波散乱長を2.5%以上の精度で¹⁾、つまり $\pi^+\pi^-$ 原子の崩壊寿命を $\tau = 2.9 \pm 0.1 \times 10^{-15}$ secと予言してい

¹ 首都大学東京大学院理工学研究科

る。実験では、理論計算と有意な比較ができ QCD の検証を可能とするために、バックグラウンドが少なく統計精度の高い測定を行わなければならない。

われわれは、欧州合同原子核研究機構(CERN)でロシア、スイス、イタリア、スペイン、フランス、ルーマニア、チェコと国際共同実験を行っている。CERN の陽子シンクロトロン(PS)で加速された 24 GeV/c の陽子ビームを薄い金属箔標的にあて $\pi^+\pi^-$ 原子を生成し、その原子が $\pi^0\pi^0$ に崩壊する寿命を測定する。しかし π^0 の測定は難しい上に 10^{-15} sec 台の直接時間測定は不可能である。そこで DIRAC 実験のスポンサーである L. Nemenov 博士が提案した方法は、 π^0 の代わりに原子を生成した標的の中を原子が通過中にクーロン相互作用で π^+ と π^- に解離する現象を利用し $\pi^+\pi^-$ 対の生成量を測定する。この量は標的の厚さと原子の寿命で決まるため直接時間測定をすることなく 10^{-15} sec 台の寿命を求めることが可能となった。

この研究の第一の特色は、 $\pi^+\pi^-$ 原子というユニークな状態を直接生成しその $\pi^0\pi^0$ への崩壊寿命を測定するので、従来の $\pi N \rightarrow \pi\pi N$ 反応による $\pi\pi$ 散乱長測定に比べ、相互作用の中に核子の寄与がなくモデルによらない信頼性の高い散乱長を求めることができることである。また実際は、 $\pi^0\pi^0$ を検出する代わりに競争過程である標的通過中の解離 $\pi^+\pi^-$ 対を測定するので検出効率が高く、しかも原子の崩壊に特徴的な事象選別が可能となり、精度の高い測定が実現できる。第二に、実験技術的には解離した 2 個の π 粒子間の距離をリアルタイムで識別するトポジカルトリガー検出器の開発により、膨大な量のバックグラウンドから $\pi^+\pi^-$ 原子の崩壊に伴う $\pi^+\pi^-$ 対だけを効率よく選別可能となった。日本グループが開発したシンチレーティングファイバホドスコープ²⁾とトリガーロジック回路³⁾でこのトリガー系を実現している。

2000 年 6 月より本実験が始った DIRAC 実験第一フェーズである $\pi^+\pi^-$ 原子の寿命測定実験では、目的の統計精度 10% に必要な総計 2×10^4 個の $\pi^+\pi^-$ 原子の崩壊データを取得して 2004 年にビームタイムを完了しデータ解析中である。2005, 2006 年の準備期間を経て DIRAC 第二フェーズ πK 原子の寿命測定が 2007 年から始まる。

2. シンチレーティングファイバホドスコープと DIRAC スペクトロメータ

DIRAC 実験における検出器群⁴⁾は図 1 のように配置されており、電磁石(図中の Magnet)で π^+ と π^- を分離し各々の運動量を測定する 2 つのアームを持つスペクトロメータを構成している(DIRAC Spectrometer)。電磁石より左側を上流(前方)検出器系、右側を下流(後方)検出器系と呼び、最も左端に $\pi^+\pi^-$ 原子を生成する標的(Target)がある。24 GeV/c の陽子ビームは左から入射し標的中で作られた $\pi^+\pi^-$ 原子は標的を通過中にクーロン相互作用により π^+ と π^- に解離する。原子の重心運動が GeV/c であるのに対して原子中の $\pi\pi$ の相対運動量は高々 3 MeV/c であるため解離後の π 粒子間の最大開き角度は 3 mrad である。標的から 3 m 下流のシンチレーティングファイバホドスコープ(SFD)上で 2 個の π 粒子間の距離は最大でも 9 mm しか離れていない。前方検出器はマイクロストリップガスチェンバー(MSGC)、SFD、dE/dx ホドスコープ(IH)であり主に同時計測した 2 粒子の同定を行

う。分析電磁石(Magnet)で左右に分離され運動量分析された π^+ と π^- はそれぞれ別のアーム上にある後方検出器群に入る。運動量測定のため粒子の軌跡を検出する 4 面のドリフトチェンバー(DC)、後方での同時計数と飛行時間法で粒子を同定するための縦方向ホドスコープ(VH)と横方向ホドスコープ(HH)、粒子を同定するチェレンコフカウンタ(Ch)、ミュー粒子を同定するプレシャワーカーウンター(PSh)とミューカウンター(Mu)からできている。

QCD の検証とは無関係であるが、このスペクトロメータによる実験が正確に行われている証拠として Λ 粒子の質量 M_Λ が $1115.790 \text{ MeV}/c^2$ 標準偏差 $\sigma=0.395 \text{ MeV}/c^2$ の世界記録で測定され、測定系全体のジオメトリー、エネルギー較正、運動量測定などの正しさと優秀さを実証した。

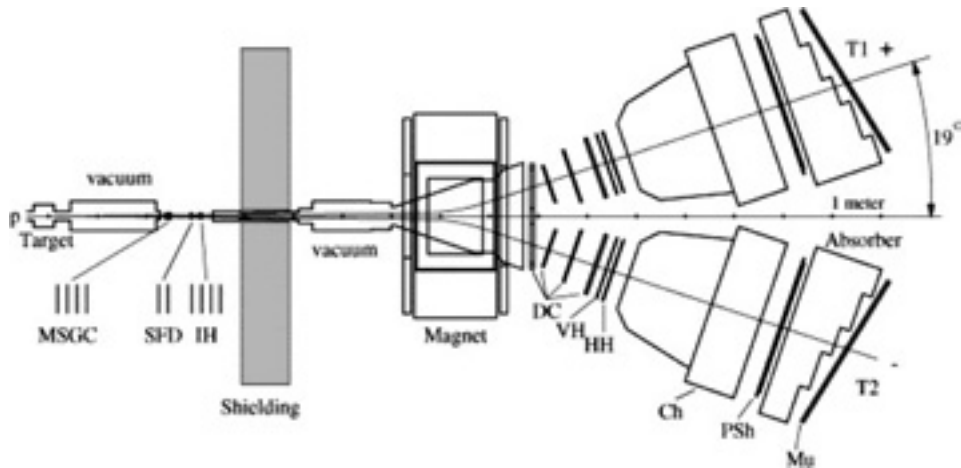


図1 DIRAC スペクトロメータ

SFD：日本グループの開発したシンチレーティングファイバホドスコープ

上流(前方)検出器系：Magnet より左側の検出器群

下流(後方)検出器系：Magnet より右側の検出器群

超微細シンチレーティングファイバホドスコープ

$\pi^+\pi^-$ 原子が標的中を通過中にクーロン相互作用で解離して出来た $\pi^+\pi^-$ 対が分析電磁石によって左右に大きく分離されて検出されるずっと上流(図1のSFDの位置)で2個の π 粒子が同定されていないならば、1)粒子の運動量を決めるための軌道追跡(トラッキング)ができない2)前方検出器系と後方検出器系との同時計数(第二トリガー)が保障されずにバックグラウンドの非常に多い測定になる。日本グループの開発したシンチレーティングファイバホドスコープ²⁾はデータ取得のためのトリガーとオフライン解析のためのトラッキングという二つの大きな役割を持っている。 $\pi^+\pi^-$ 原子内の2粒子の相対運動量が原子の並進運動量の0.3%しかないため、解離後の3m下流(SFDの位置)でも $\pi^+\pi^-$ 粒子間の距離は0mmから最大でも9mmしか離れていない。日本グループは、この2粒子の位置と時間を精確に効率よく分離検出し、しかもリアルタイムで2粒子間の距離信号を生成するシンチレー

ティングファイバースコープとその読み出し回路からなるトリガーシステムを開発製作した。第一フェーズの $\pi^+\pi^-$ 原子実験では 0.5mm 直径のファイバーを使用して 250 列で感受領域が 10cm 角のホドスコープを製作し実験を行った結果膨大なバックグラウンドから真の $\pi\pi$ 対を多く含む事象でデータ収集系にトリガーをかけることに成功した。

よりビーム強度が要求される第 2 フェーズ πK 原子測定用の DIRAC 実験用に高分解能超微細シンチレーティングファイバースコープ (HRH: High Resolution Scintillating-fiber Hodoscope) を開発した⁵⁾。実際の HRH は直径 280mm の極細シンチレーティングファイバーを 1 列 7 本重ねて 480 列作り感受領域が 98.5mm 角の 480 コラム検出部と 30 本の 16ch 位置検出型光電子増倍管 (16chPSPM) の信号読み出し部からなっている。この HRH のプロトタイプ (240 コラム) の性能試験を行った結果、各コラムで発生した光電子数は最小電離粒子に対して平均 11 個と十分多く検出効率は 98.6% と非常に高い値を示した。また検出位置分解能は標準偏差値で $75\mu\text{m}$ とドリフトチェンバー級の良い値を与えた。時間分解能も TDC の分解能も含めて標準偏差値 0.56nsec の満足できる値を与えた。

このプロトタイプ HRH2 面を X-Y 方向に組み合わせて 2 次元的な位置測定ができるように配置した設定でプラスチックシンチレーターでできた直径 6mm の M6 をトリガー検出器としてデモンストレーション用の測定を行った。図 2 はその HRH の 2 次元像であるが、1mm ピッチのねじ山までが鮮明に見えているだけでなく、周りの空間に対応する場所の雑音が非常に少ないことが判る。

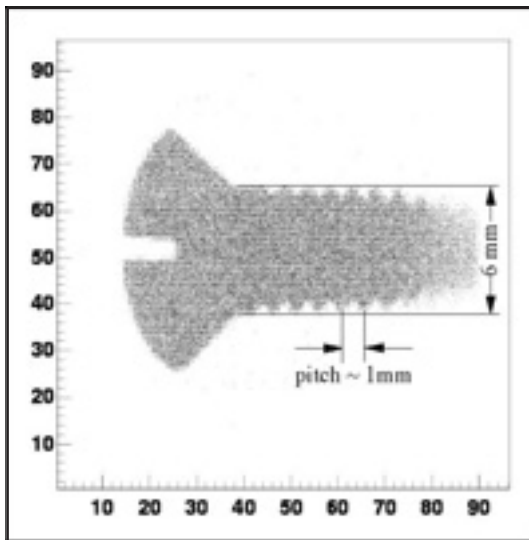


図 2 X,Y 2 面の HRH でビームを使い撮った 6mm ϕ のビスの像。1mm ピッチのねじ山が鮮明に見えている。

3. $\pi^+\pi^-$ 原子の崩壊寿命と S 波散乱長

第一フェーズの DIRAC 実験では総計 2×10^4 個の $\pi^+\pi^-$ 原子の崩壊データを蓄積し、目的の統計精度 10% で寿命を得る予定である。現在、取得データの約 30% を解析した結果を図 3 に示す⁶⁾。クォーク間によって作られる $\pi^+\pi^-$ 対など全てのバックグラウンドを除去した後の $\pi^+\pi^-$ 原子の解離によるスペクトルを π^+ と π^- の相対運動量 Q の関数として示している。破線はモンテカルロシミュレー

ジョンから期待される分布を表している。

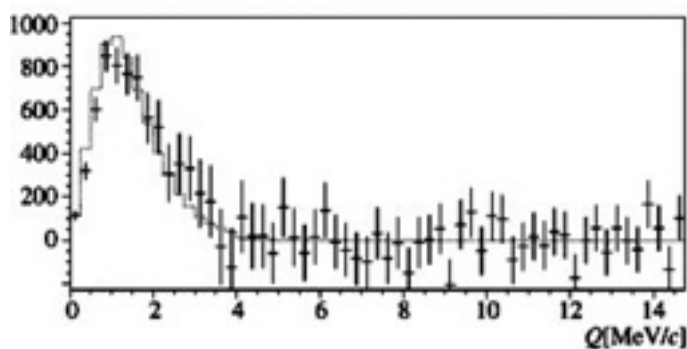


図3 バックグラウンド除去後の $\pi^+\pi^-$ 原子の解離による相対運動量 Q の分布

$Q < 3 \text{ MeV}/c$ 領域に $\pi^+\pi^-$ 対に対応する明瞭なピークが見られる。ここから $\pi^+\pi^-$ 原子の寿命が初めて得られその値は、

$$\tau = (2.91 + 0.49 - 0.62) \cdot 10^{-15} \text{ sec}$$

であり、これに対応する $\pi\pi$ の S 波散乱長は、

$$|a_0 - a_2| = (0.264 + 0.033 - 0.020) \text{ m}_\pi^{-1}$$

となった。誤差には統計誤差と系統誤差を含んでいるが大部分は統計的なものであり残りのデータ解析で当初の精度が得られることが期待できる。

おわりに

この研究は科学研究補助金課題番号 12440069, 14340079, 15340205 の補助の下で行われた。

参考文献

- 1) G. Colangelo, J. Gasser, H. Leutwyler, Nucl. Phys. **B603** (2001) 125
- 2) V. Agoritsas et al., Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. **A411** (1998) 17
A. Gorin et al., Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. **A421** (1999) 60
A. Gorin et al., Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. **A452** (2000) 280
- 3) L. Afanasyev et al., Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. **A491** (2002) 376
- 4) B. Adeva et al., Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. **A515** (2003) 467
B. Adeva et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **30** (2004) 1929
- 5) A. Gorin et al., Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. **A566** (2006) 500
- 6) B. Adeva et al., Phys. Letters **B619** (2005) 50