

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 6月 8日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740188

研究課題名（和文） $\Lambda(1405)$ 粒子精密分光のための液体重水素標的の開発研究課題名（英文） Development of a liquid deuterium target for precision spectroscopy of $\Lambda(1405)$

研究代表者

飯尾 雅実 (Masami Iio)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・研究員

研究者番号：00469892

研究成果の概要（和文）： Λ 粒子の第一励起状態である $\Lambda(1405)$ は、負パリティのバリオンの中で最も軽く、その質量が単純なクォークモデルで説明できないため、その性質を調べることはクォーク結合によるハドロン形成メカニズムの明解が繋がる。そこで、J-PARCにおける $d(K, n)$ 反応を利用した $\Lambda(1405)$ 精密分光実験(E31)を行うために、液体重水素標的の開発研究と実機製作を行った。E31実験において、標的容器は円筒型粒子検出器群の中心に配置され、検出器の立体角を十分に確保するために冷凍系から分離される。そのため、本標的は、標的容器へ流入する熱を液体重水素自身の対流により輸送し、1.3 m離れた熱交換器で吸収させ、標的容器の温度を約20 Kで維持するようにデザインされた。冷却試験の結果、少量の水素液化し、標的容器を20 Kで保持することが出来た。

研究成果の概要（英文）： $\Lambda(1405)$ regarded as the first excited state of Λ , the mass is the smallest in all negative parity baryons. Because it can't explain by the simple quark model, to study nature of $\Lambda(1405)$ is one of the good probes to understanding of hadron formation. Therefore, to perform a precision spectroscopy of $\Lambda(1405)$ using $d(K, n)$ reaction at J-PARC (E31), we have developed a liquid deuterium target system. In the E31 experimental setup, the target cell is placed at the center of the cylindrical detector system. To maintain a large acceptance of detector system, the target cell is separated from the cryostat. D_2 condensed in the heat exchanger moves to the target cell 1.3 m away through a lower pipe by gravity. The D_2 vapor returns to the heat exchanger through the cell's upper pipe. Finally, the heat load at the cell is transported to the heat exchanger by circulation of liquid D_2 itself. In a cooling test, small amounts of D_2 gas were condensed in the cryogenic system. By excellent operation using the circulation method, liquid D_2 was maintained at 20 K in the target cell.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：加速器科学

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：原子核（実験）、低温標的

1. 研究開始当初の背景

原子核を構成する核子は、アップ(u)とダウン(d)の2種類のクォーク3つからできている

代表的なバリオンである。これらは自然に多く存在するものであるが、クォークが結合しバリオンになる過程は未だに良くわかって

いない。そこで、比較的簡単に生成できるストレンジクォーク(s)を不純物として混ぜることで、クォーク多体系のふるまいを理解しようという研究が長年行われてきた。その最も簡単な粒子が Λ 粒子(uds)であるが、その第一励起状態である $\Lambda(1405)$ は、特にその性質が注目されている。

$\Lambda(1405)$ は、u, d よりも重いsクォークを含んでいるにも関わらず、負パリティのバリオンの中で最も軽く、その質量が単純なクォークモデルで説明できないことから、この粒子は純粋に3クォークから構成されているのではなく、マルチクォーク状態、あるいはメソン-バリオンの分子的な共鳴状態ではないかという議論もなされてきた。そんな中、1997年に行われたK中間子水素原子X線分光実験(KEK-PS E228)により、K中間子-陽子間の相互作用が強い引力であることが示唆された。この結果をもとに、赤石氏、山崎氏は、 $\Lambda(1405)$ がK中間子-陽子の束縛状態であると考へ、2体系(Kpp)、3体系(Kppn)のK中間子原子核の存在を予言し、現在も世界中でこの探査実験が行われている。また、最近の理論研究では、 $\Lambda(1405)$ エネルギー付近に二つの極があらわれることが報告されており、今まで単一の粒子として考えられていた $\Lambda(1405)$ 共鳴が、エネルギーの近い二つの粒子の共鳴の複合ではないかと示唆されている。

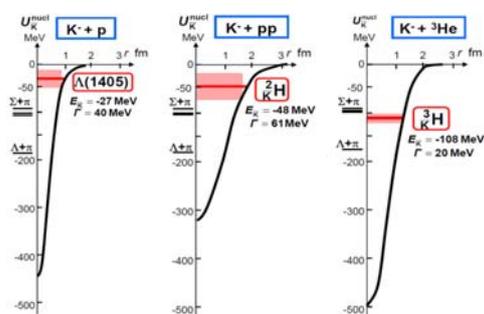


図 1. K-N 束縛状態

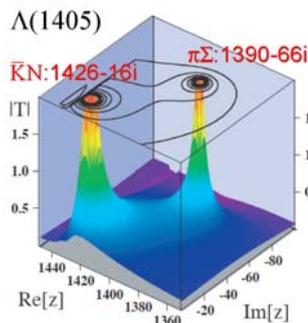


図 2. 二極共鳴状態

実験的研究としては、日本では Spring-8 (LEPS)、アメリカでは J-lab (CLAS)でガンマ線をを用いた実験が行われているが、完全に議論の決着をつけるための $\Lambda(1405)$ 生成事象の観測数が不足している。そこで、我々は J-PARC における $d(K, n)$ 反応を利用した $\Lambda(1405)$ の精密分光実験(E31)を計画し、その実現のために、本研究費を用いて液体重水素標的の開発研究と実機製作を行った。

2. 研究の目的

図 3 に E31 実験のセットアップを示す。実験は J-PARC ハドロン実験施設内の K1.8BR ビームラインで行われ、運動量 1.0 GeV/c の K中間子を重水素に照射し、反応により生成される中性子を標的から 15 m 下流に配置された飛行時間測定用シンチレーションカウンター群で検出することで $\Lambda(1405)$ が同定される。 $\Lambda(1405)$ の内部構造を詳しく調べるために、崩壊後の粒子は標的の周りを囲んだ円筒型粒子検出システム(CDS)で検出され、崩壊モードの毎にスペクトル解析が行われる。本研究の目的は、E31 実験を実現するために、上記実験条件を満たすような液体重水素標的の実機を開発するものである。

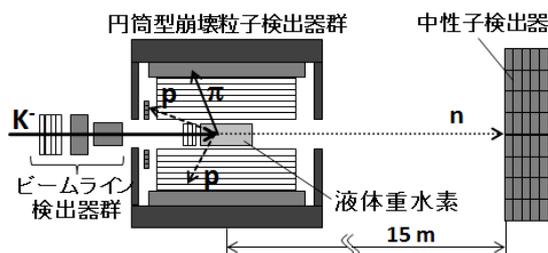


図 3. E31 実験のセットアップ

標的に対する第一の要求は、より多くの重水素を CDS の中心に配置することである。そこで、重水素(沸点 23.8 K、融点 18.7 K)を気体よりも圧倒的に密度の高い液体するために、標的容器を冷却し約 20 K に維持することにした。また、液体を保持するために断熱用の真空容器と標的容器は、外圧と抗するために強固な構造でなければならない。しかし、それらに用いられる材料は、ビームもしくは反応後の粒子が検出器に到達するまでの障害となるだけでなく、バックグラウンド事象を発生してしまう。したがって、ビーム方向や検出器の立体角内の物質量は極力少なくする必要がある。

最後に、重水素は着火エネルギーが非常に低く、空気中で一定濃度酸素と混ぜると(爆発下限界/空気中 5%)、静電気等でも容易に着火する。標的は高電圧で動作する検出器で取り囲まれており、絶対に重水素が漏洩してはならない。そこで、標的容器、熱交換器、配

管などの重水素ラインは全て、ヘリウムガスのリークレートが 10^{-10} Pa \cdot m³/sec 以下になるようなリークタイト性を満たすように設計された。

3. 研究の方法

液体重水素標的は、全ての粒子検出器に対し十分な立体角を確保するため、標的容器を冷凍機から 1.3 m 離れた”L 型”の構造にし、CDS の中心に標的容器を配する。図 4 に液体重水素標的の構造を示す。

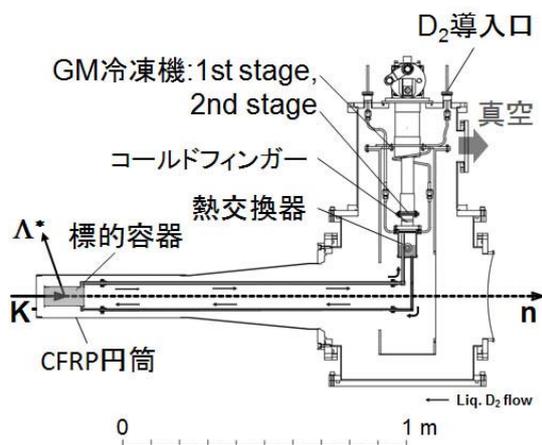


図 4. 液体重水素標的の構造

標的システムの冷却は、2 段コールドヘッドの GM 冷凍機を用い (1st stage: 35 W @15 K, 2nd stage: 1.5 W @4.2 K)、2nd stage コールドヘッドの先端に熱伝導率の高い無酸素銅を用いたコールドフィンガーと呼ばれる部品を取りつけ付け、そのコールドフィンガーに同じく無酸素銅で製作された重水素液化用の熱交換器を取り付ける。外部から導入された重水素ガスは、熱交換器内で冷却され液化し、重力によって熱交換器の下部のパイプを通り、約 1.3 m 離れた標的容器に導かれる。液体 (ガス) を効率よく対流させるため、出口のパイプ直径を入り口側より大きくすることで、逆流するよりも抵抗が小さくなるように配慮されている。標的容器の温度が 23.8 K まで下がると、容器内に液体が溜まり始め、最終的に熱交換器と標的容器が液体で繋がる。標的容器へ流入した熱は、液体重水素の循環により熱交換器まで輸送されそこで吸収される。

標的容器や熱交換器への熱流入を軽減するために、輻射熱シールドを用いるが、輻射シールドは、GM 冷凍機の 1st stage コールドヘッドからの伝導冷却によって冷やされる。したがって、このシステムは、液体窒素や液体ヘリウムといった寒剤を一切使用しないため、ランニングコストの面でも非常に優れている。

バックグラウンド事象軽減のために、ビームが通過する部分や粒子検出器の立体角の範囲内の物質量を可能な限り少なく抑えることが重要である。そこで、真空容器の CDS の立体角内の円筒部分 (T=1 mm, ID=150 mm, L=523 mm) は、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を用いて製作された。

標的容器も物質量の削減が必要であるが、20 K 程度の低温環境で、差圧 3 気圧の内圧に耐えうる強固な構造も必要である。そこで、両方の条件を満たす構造として、試作機は、ポリエチレンテレフタレート (PET) を用いた厚さ 0.3 mm、内径 68 mm、長さ 120 mm の円筒の両端に、ビームウィンドウとして厚さ 0.05 mm のステンレス膜を溶接したステンレス製フレームを差し込むことで製作された。接合には低温用接着剤 STYCAST 1266 が用いられた。図 5 に標的容器試作機の構造を示す。

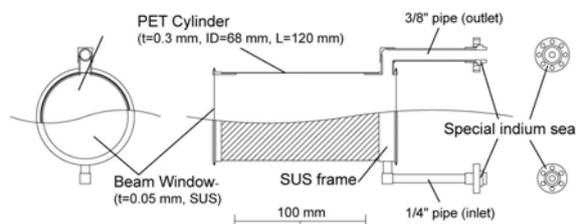


図 5. 標的容器の構造

差圧 4 気圧での耐圧試験を行った結果、変形・破損などが観測されず、漏れもないことが確かめられたので、冷却試験に使用した。

放射線防護観点から、本実験中は装置へのアクセスが極端に制限される。そこで、GPIB 規格のネットワークコントローラーを利用し、LabVIEW と呼ばれるグラフィカルプログラミングツールを用いて、遠隔でコントロールできるようなデータ収集兼温度制御システムを構築した。

4. 研究成果

2010 年度は、液体重水素標的装置の主要部分である、重水素用熱交換器、放射シールドボックス、断熱真空容器などの詳細設計を行い、順次製作していった。また、温度、圧力、真空度などの計測方法を詳細に検討し、各種センサーや読み出し機器などを購入した。

2011 年度は、前年度に製作、購入した各種部品を組み立て、様々な試験を行った。早期のフィードバックに開発を効率的に進めるために、試験は段階的に行われた。

第一段階のテストとして、最初に断熱真空容器を組立て、GM 冷凍機、コールドフィンガー、熱交換器を配置し、真空気密試験を行った。熱交換器に深刻なリークを発見したが、解体し修復した結果、目標の気密性を確保で

きた。次に GM 冷凍機を稼働し、その性能とコールドフィンガーの到達温度を調べた。結果として、コールドフィンガーを 5.02 K まで冷却することができ、冷凍機の性能と装置の断熱構造が良く機能していることが確認された。そして、温度コントローラーの設定値を 20 K に設定し、重水素の代わりに物性が非常に近い水素ガスを導入し液化を試みた。その時の熱交換器内の温度と圧力の相関を図 6 に示す。図 6 において、黒い線は水素の標準飽和蒸気圧曲線を表しており、赤い点が測定値である。測定値が 22.5K 以下で蒸気圧曲線に沿って変化していることから、熱交換器内で水素が液化していると推測できる。

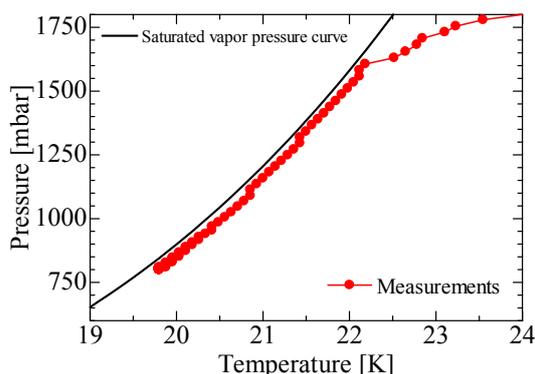


図 6. 熱交換器内の温度と圧力の変化

二段階目のテストは、熱交換器に 2 本のパイプを取り付け、更にその先に標的容器を取り付け、図 4 とほぼ同じ最終形態で行われた。その結果を図 7 に示す。

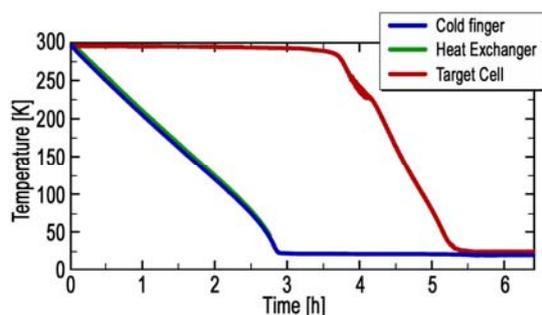


図 7. 冷却試験の結果

青、緑、赤の線がそれぞれコールドフィンガー、熱交換器、標的容器内の温度を PtCo 測温抵抗体で測定した結果である。温度制御をしているコールドフィンガーと熱交換器の温度差がほぼ見られないことから、温度制御が上手く機能していることが分かる。また、熱交換器の温度が 20 K になってから標的容器の温度が下がり始め、最終的にほぼ同じ温

度になっていることから、液体（ガス）が循環し効率良く熱輸送が行われていることが分かる。図 3 の 6 時間後から、条件を変えずに約 10 時間観察続けた結果、 24.5 ± 0.5 K 程度の安定度で保持することが出来た。本テストでは、安全性を考慮し少量の水素しか液化させておらず、標的容器の最上部に配置された温度センサーは液体に浸かっている。したがって、実際に液体で満たされれば、更に良い安定性が期待できる。また、GM 冷凍機には、まだ約 13 W の冷却能力を残していることも確かめられた。

今後の計画として、装置を J-PARC K1.8BR ビームラインに設置して最終的な試験を行う予定ではあるが、結論として、E31 実験のための液体重水素標的装置の開発は成功したと言える。そして、本研究により、 $\Lambda(1405)$ 粒子分光実験の計画を大きく進展させることができ、近い将来クォークが結合によるハドロン形成メカニズムに関する非常に重要な実験データが収集されるだろう。

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)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 川崎新吾, 他, d(K,n)反応によるラムダ粒子の精密分光実験のための液体重水素標的の開発および運転、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 25 日、兵庫県
- ② 飯尾雅実, 他, $\Lambda(1405)$ 精密分光のための重水素標的の開発 (1)、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 11 日、福岡県

[その他]

- ① 川崎新吾, $\Lambda(1405)$ 精密分光実験のための液体重水素標的の開発、修士学位論文、2011 年度、大阪大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯尾 雅実 (MASAMI IIO)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・共通基盤研究施設 超伝導低温工学センター・研究員

研究者番号：00469892

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4)研究協力者

石元 茂 (SHIGERU ISHIMOTO)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速
器研究機構・素粒子原子核研究所・講師

川崎 新吾 (SHINGO KAWASAKI)
大阪大学・大学院理学研究科・大学院生