

動的核偏極法による HD 標的開発と新しい 5 個のクォークから成る粒子探索

Development of polarized HD target with dynamic nuclear polarization and search for a new five-quark particle (日本物理学会推薦)

代表研究者 大阪大学 郡 英輝 Osaka University Hideki Kohri
 協同研究者 東京大学 太田 岳史 The University of Tokyo Takeshi Ohta
 広島大学 飯沼 昌隆 Hiroshima University Masataka Inuma

Many four and five quark particles have been found since 2003 and most of the particles are inferred to have $c\bar{c}$ quark pairs. Some theoretical groups predicted that such particles should have strange partners with $s\bar{s}$. For example, three P_c states around 4.4 GeV with $c\bar{c}$ are predicted to have strange partners with masses of ~ 2.08 GeV. At 2.1 GeV, we found a bump which was a candidate for the strange partners with the $\gamma p \rightarrow \phi p$ and $K^+ \Lambda(1520)$ reactions. A polarized hydrogen target is necessary to determine the spin-parity of the bump. We have been developing a polarized HD target with static method. However, dynamic nuclear polarization (DNP) for reducing the consumption of liquid helium is needed. If the DNP is succeeded, the HD target will be the best polarized target. We constructed a cryostat which successfully provided a temperature of about 1.5 K and a magnetic field of 5 T stably and was ready for the DNP. However, the klystron, which emitted microwaves with a frequency of 140 GHz, did not work well. Although the development of the HD target has not been succeeded yet, we are going to continue the development.

研究目的

2003年の5個のクォークから成る粒子の証拠の報告以降、世界中から4個や5個のクォークの粒子の証拠が次々に報告されました。堅実な検証後には、ハドロン(中間子や重粒子)の新しい形態を解明した革新的業績は将来のノーベル賞有力候補に成ります。ハドロンの性質について格子QCDの枠組みによる第一原理計算が急速に進展しているがいまだ不定性は大きく、実験データとの比較が重要であり、実験的にこれらの粒子の存在を確立する試みは非常に重要です。

2019年にLHCbグループが圧倒的な統計量で報告した5個のクォークの粒子 P_c は $c\bar{c}$ クォーク対を含んでいて[1]、 $s\bar{s}$ クォーク対や $b\bar{b}$ クォーク対を含む同様の粒子も存在するはずで、Linらの理論物理学者は P_c を中間子+重粒子である $\bar{D}+\Sigma_c^*$ 、 $\bar{D}^*+\Sigma_c$ の分子的な結合状態と考えていて、 $s\bar{s}$ 対を含む $K+\Sigma^*$ 、 $K^*+\Sigma$ の分子的な結合状態 P_s の質量は約 2.08 GeV と予言しました[2]。我々は、SPRING-8のBL33LEPビームラインにおいて偏極フォトンビームを用いて実験を行ってきました。2005年に $\gamma p \rightarrow \phi p$ 反応[3]の断面

積に Bump 構造がある事を発見して、2010年に $\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda(1520)$ 反応[4]の断面積にも同じ質量約 2.1 GeV の位置に Bump 構造がある事を発見しました。我々が発見した未解明の Bump 構造とこの予言では、ほぼ質量が一致します。このピーク構造は $s\bar{s}$ クォーク対が生成される反応の中間状態で観測されているので、 $s\bar{s}$ クォーク対を含む5個のクォークの粒子 P_s である可能性が理論・実験の両面から考えられます。図1に示すように、 $c\bar{c}$ 以外のクォーク対を含む粒子の発見が今後重要になります。

隠れた $q\bar{q}$ 対	$u\bar{u}$ or $d\bar{d}$	$s\bar{s}$	$c\bar{c}$	$b\bar{b}$
4個のクォーク	σ, κ	$f_0(980)$	X, Y, Z	Z_b
5個のクォーク	$\Lambda(1405)$	P_s	P_c	P_b

既に我々は有力候補を発見済 存在が確立

図1：隠れた $q\bar{q}$ 対を含む4個、5個のクォークから成るマルチクォーク粒子のグループ分類。
 これまで発見された5個のクォークの粒子の中で、スピン・パリティが測定されたものはありません。

クォーク 4 個、5 個、6 個のマルチクォーク粒子を分類するマルチクォーク物理学の完成のためには、スピン・パリティの測定が不可欠です。

私達は偏極 HD 標的の開発を行い、偏極水素標的と偏極光子を使ってこの Bump 構造のスピン・パリティを測定して 5 個のクォークである可能性を探ります。私達は、10 年以上に渡って偏極 HD 標的を開発してきました。偏極方法は、約 10-20 mK の極低温と 17 T の強磁場を使って偏極させる静的核偏極法でした。核偏極を凍結させるためには、触媒として 0.1% 程度加えたオルソ H₂ がパラ H₂ へ崩壊するのを待たなければならないために、約 3 カ月の期間を要する[5]。現在の世界的なヘリウム危機や電気代高騰の中で、この偏極方法では負担が大きすぎる。私達は動的核偏極法を使った偏極 HD 標的の初めての製作に挑戦します。これまでに素粒子・原子核物理実験で使用されてきた偏極標的は、アンモニア (NH₃) やブタノール (C₄H₁₀O) などが多く、図 2 のようにバックグラウンドを大量に生成する重い元素 (C、O、N など) を含んでいます。そして、H₂ は低温において核スピンをゼロに組むパラ H₂ に崩壊するので偏極標的としては成り立たず、D₂ はマグネティックモーメントが小さいために高偏極できません。フェルミ粒子とボーズ粒子から成る HD だけは特別であって、高偏極させることが可能です。HD は水素同位体しか含んでおらず、陽子標的としても中性子標的としても使用できます。もしこの方法を使って短時間で偏極 HD 標的が製作できれば、歴史上最高の偏極標的になります。

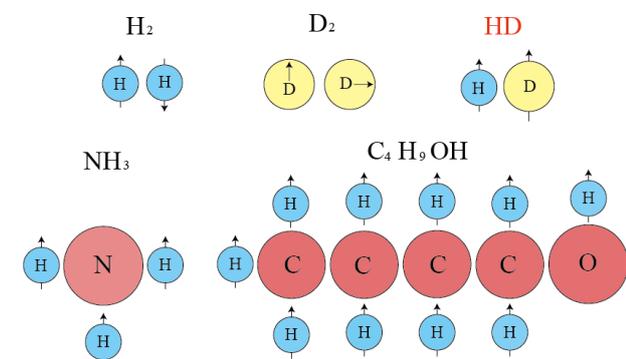


図 2 : 水素同位体 H₂、D₂、HD とアンモニア、ブタノールの分子状態。

研究経過

動的核偏極法を使って核偏極を行うためには、冷却用の冷凍機が必要です。液体ヘリウムを供給して

減圧させて約 1.5 K の低温を作り、5 T の磁場中で標的に 140 GHz のマイクロ波を照射します。研究代表者は、名古屋大学や広島大学と共に J-PARC の偏極中性子ビームを使った偏極ランタン核標的の開発も行っており、動的核偏極用のクライオスタットの製作は 3 人の名古屋大学大学院生と共同で行いました。

マイクロ波の発生装置は高エネルギー加速器研究機構から譲り受けた物であるが、エラーメッセージを出していたので、カナダの CPI 社へ送って修理を受けました。新品の頃は 20 W のパワーが出ていたそうですが、修理後は 10 W のパワーにダウンしてしまいました。

マイクロ波を 2.8 m 離れた標的の位置へ送るために、周波数 140 GHz 用の導波管を冷凍機内へ配置しました。標的は 2 個サンプルボックスに入れて NMR 用のコイルを巻いて、2 本の NMR 用セミリジッド同軸ケーブルを冷凍機内へ配置しました。温度を測定する温度センサー(酸化ルテニウム)を 2 台使用して、1 台を外側からサンプルボックスに接触させて、もう 1 台は液体ヘリウムの液溜に接触させました。

私達は山形大学で偏極標的開発研究をされている研究室においても、動的核偏極法を用いて実験を行ってきました。ガラスデュワーに液体ヘリウムを満タンまで入れてから減圧冷却を開始して、液体ヘリウムが無くなるまで約 6 時間実験をすることができます。しかし、動的核偏極を行った後に核偏極の緩和時間を測定した時には、6 時間の実験時間では不足していました。私達は、数日間にわたって連続運転可能な動的核偏極用冷凍機を製作するために、1 気圧以上の圧力になる液体ヘリウムの液溜と減圧する標的の空間の間に圧力差を作りました。ニードルバルブと呼ばれる針で空けた程度の大きさの穴を通して液体ヘリウムが標的の空間へ入るので、少量ずつ液体ヘリウムを供給することができるので、冷却能力を制御しやすい構造になっています。減圧はメカニカルブースターポンプとスクロールポンプを使って行い、使用済みのヘリウムガスを低温センターへ回収パイプを通じて送ってリサイクルします。

HD を静的核偏極法を使って偏極させていた時に使用していた JASTEC 社製の Nb₃Ti 超伝導磁石を用いて、5 Tesla の磁場を生成しました。液体ヘリウムの供給開始時に、トランスファーチューブの温度が高いために、標的の温度が上昇して超伝導磁石がク

エンチする危険性があります。その危険を避けるために、液体ヘリウムが入る層と超伝導磁石の層を高真空にして熱的に断熱する構造にしました。図3は、私達が開発した動的核偏極用冷凍機です。

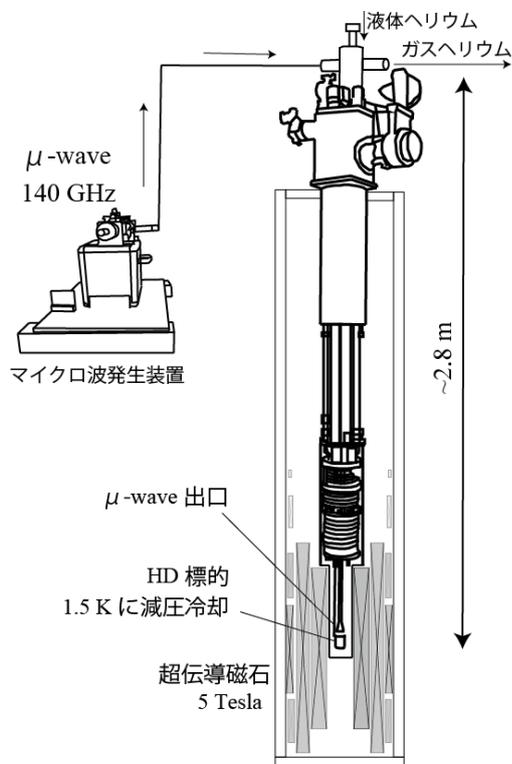


図3：私達が大阪大学にて開発した動的核偏極用冷凍機。静的核偏極用の ^3He - ^4He 希釈冷凍機の内部にある標的取り出し用の穴を使って液体ヘリウムを供給して減圧する。

図4は、動的核偏極用冷凍機を使って LaAlO_3 結晶と水素を含むアラルダイトのサンプルを冷却した時の NMR 信号です。 LaAlO_3 結晶は偏極中性子標的と偏極ランタン標的を使った T-violation の実験で使用するために自作した結晶です[6]。1.5 K の低温と 4.47 Tesla の磁場の熱平衡状態での NMR では、ランタンの NMR 信号は小さくて見えないので、アルミの NMR 信号を測定しました。水素の NMR は、1.5 K の低温と 4.72 Tesla の磁場の熱平衡状態において測定しました。アルミと水素の両方の NMR 信号はしっかり観測できたので、冷却や測定に問題が無い事を確認することができました。

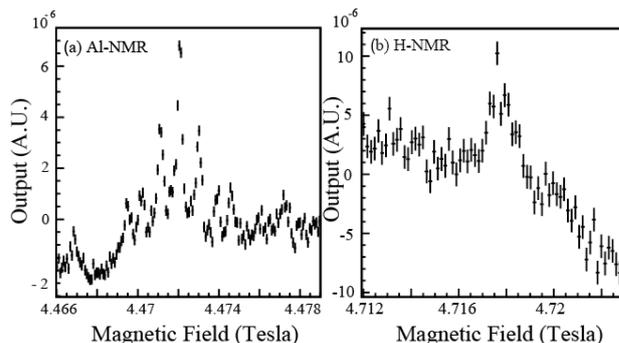


図4：1.5 K と 4 Tesla の熱平衡状態で測定した (a)アルミと(b)水素の NMR 信号。アルミには合計9本のピークが観測できて、水素には1本のピークが観測できる。

液体ヘリウムを動的核偏極用冷凍機へ供給して、減圧冷却テストを行いました。18時ごろに冷却をスタートして、翌日の8時に供給を止めるまでの間、約14時間1.4-1.6 Kの温度にサンプルボックスを冷却することができました。この温度変化に相当する電子の偏極度は97.0-98.4%の変化なので、核子を偏極する時に大きな問題にはなりません。

私達は偏極標的の開発を大阪大学だけではなく、山形大学でも行ってきました。図5は、山形大学においてアラルダイトの陽子を動的核偏極法によって偏極させた結果です。アラルダイトに少量の TEMPO を混ぜて、0.01%程度の不対電子をドーピングしました[7]。約1.5 Kの低温と2.5 Teslaの磁場により偏極させた不対電子と水素に70 GHzの周波数のマイクロ波を照射することにより、10分以内に最高偏極度近くの80%を得る事ができました。山形大学との共同研究の1つとして、スイスにある世界最大の加速器施設である CERN の COMPASS 実験にも参加して、動的核偏極技術を十分に身に付ける事ができました。

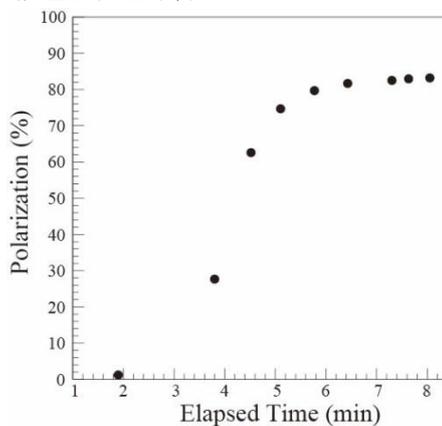


図5：山形大学で行った水素の動的核偏極実験での陽子の偏極度。

身に付けた動的核偏極技術を使って、大阪大学で開発した冷凍機にインストールしたアラルライトの水素を偏極させようと実験を行いました。またしてもマイクロ波の発生装置からエラーメッセージが出たために、残念ながら HD 標的を核偏極させる事はできませんでした。

考察

目的としていた HD 標的の動的核偏極の成功まで研究が到達しなかった理由は2つ考えられます。1つは、マイクロ波の発生装置 (klystron) が老朽化して故障してしまった事です。1度目の故障を修理したのは想定内でしたが、あれだけ注意深く使用していたにも関わらず2度目の故障が起こったのは想定外だったので2年間という期間内には対応できませんでした。もう一つの理由は、HD を偏極させるために不対電子をどうやって混ぜるかに関して考えが十分ではなかったです。アメリカのジェファーソン研究所の C.D. Keith と国際会議で会った時に、エアロジェルに加熱した TEMPO を吸わせる方法を伝授してもらっていましたが、その前の段階でトラブルが起こりトライできませんでした。

動的核偏極法による偏極 HD 標的は、開発に成功すれば歴史上最高の偏極標的であり、将来素粒子・原子核物理研究を加速促進できます。また、将来のエネルギー源として重要な核融合には、DT(重水素三重水素)が使用される可能性が高く、DT の核スピンをそろえた時に断面積が 1.5 倍になると予測されています。偏極 HD の技術はそのまま偏極 DT にも使用できるので、本研究の波及効果は大きいです。もう少し時間がかかりますが、本研究が成功するまでしっかり努力していきたいです。

研究の発表

口頭発表

1. 時間反転対称性の破れ探索実験のための偏極 La 核偏極開発の現状
伊東佑起、、、郡英輝、、三浦大輔
日本物理学会秋季岡山理科大学 2022 年 9 月 7 日
2. 時間反転対称性の破れの探索に向けた偏極 La 核偏極開発の現状
伊東佑起、、、郡英輝、、三浦大輔
日本物理学会春季オンライン 2023 年 3 月 23 日

3. Current status of polarized La target development for T-violation search with slow neutron
I.Ide, ..., H. Kohri, ..., M. Yosoi
19th workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry, Mainz, Germany, 26-30 Sep. 2022.

誌上発表

1. Current status of polarized La target development for T-violation search with slow neutron
I. Ide, ..., H. Kohri, ..., M. Yosoi
Proceedings of Science PSTP2022, 038, 2023
2. Combination of crystal growth with optical floating zone and evaluation of Nd³⁺:LaAlO₃ crystals with the dynamic nuclear polarization of ¹³⁹La and ²⁷Al
K. Ishizaki, ..., H. Kohri, ..., M. Yosoi
Submitted to Review of Scientific Instruments, arXiv:2402.07378 (2024)

参考文献

1. Observation of a narrow pentaquark state Pc(4312) and the two-peak structure of the Pc(4450)
R. Aaij et al., Phys. Rev. Lett. 122, 222001 (2019)
2. Decay behavior of the strange and beauty partners of Pc hadronic molecules
Y.H. Lin et al., Nucl. Phys. A 980, 21 (2018)
3. Near-threshold diffractive ϕ -meson photoproduction from the proton
T. Mibe, ..., H. Kohri et al., Phys. Rev. Lett. 95, 182001 (2005)
4. Near-threshold $\Lambda(1520)$ production by the $\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda(1520)$ reaction at forward K^+ angles
H. Kohri et al., Phys. Rev. Lett. 104, 172001 (2010)
5. Monitoring the build-up of hydrogen polarization for polarized hydrogen-deuteride (HD) targets with nuclear magnetic resonance (NMR) at 17 T
T. Ohta, ..., H. Kohri et al., Review of Scientific Instruments 91, 095104 (2020)
6. Measurement of nuclear spin relaxation time in lanthanum aluminate for development of polarized lanthanum target
K. Ishizaki, ..., H. Kohri et al., Nucl. Instr. Meth. A 1020, 165845 (2021)
7. Thermosetting polymer for dynamic nuclear polarization: Solidification of an epoxy resin mixture including TEMPO
Y. Noda et al., Nucl. Instr. Meth. A 776, 8 (2015)