

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20922

研究課題名（和文）スピン偏極中性子による超高磁場の直接計測

研究課題名（英文）Direct measurement of ultra high magnetic field by using spin polarized neutron

研究代表者

有川 安信（Arikawa, Yasunobu）

大阪大学・レーザー科学研究所・准教授

研究者番号：90624255

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,600,000円

研究成果の概要（和文）：中性子は電荷がなく、磁気スピンのみをもっている特殊な粒子であり、常温では上か下の核スピン0.5:0.5の割合で存在している。中性子を1kT/10micro mの高い磁場勾配のある点を通過させると、中性子ビームは2方向に分離される。これにより100%偏極中性子を生成できることを発案した。PHITS(2021年リリースver)から中性子が磁場中で偏向させる計算機能が追加され、本研究が想定している実験環境を模擬した計算条件で、中性子を用いた磁場計測が可能であることが証明された。大阪大学のLFEXを用いて中性子偏向実験を実施することができた。引き続き実験を継続する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ハイパワーレーザーを用いた様々な実験において、高強度かつ勾配の高い磁場が発生する。これまでこのような特異な磁場を直接計測する手法がなく、当該分野において大きな問題となっていた。本研究による成果によって中性子を用いてこれを実測できることが示された。また中性子が磁場で曲がった時に、100%スピン偏極した状態になる。これは従来のいかなる偏極中性子よりもコンパクトかつ高純度な偏極中性子の発生方法となる。この新しい中性子科学の知見は学術的に大きな意義がある。また今後この手法が標準化され様々な研究や産業に応用され、社会的意義を生み出すであろうと期待される。

研究成果の概要（英文）：Neutron is a unique particle which does not have electric charge but has magnetic spin, and it has up or down spin with 0.5:0.5 probability. Neutron beam passing through 1 kT/10 micro m very high divergent magnetic field splits toward two directions. We innovated this new method which can generate 100% spin polarized neutron beam. PHITS (ver. 2021) can calculate neutron bending by magnetic field. We demonstrated the magnetic field measurement by neutron beam with our proposed realistic conditions in the simulation. We conducted an experiment by using LFEX in Osaka university to bend neutron by magnetic field for the first time. We are continuing the experiment.

研究分野：中性子科学

キーワード：スピン偏極中性子 レーザー駆動中性子発生

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

中性子は近年、核物理の研究用途のみならず非破壊検査用ラジオグラフィ、中性子回折によるタンパク質構造分析など様々な方面で活用されている。中性子は電荷がなく磁気スピンのみがある特殊な粒子であり、常温・無磁場では上か下の核スピン 0.5:0.5 の割合で存在している。中性子は磁場に感度を持ち、電場に感度を持たないという特異な特徴を持っている。申請者はこれまでにハイパワーレーザーを用いた中性子発生と、その中性子を用いた応用研究を多数行ってきた。

ハイパワーレーザーを用いた研究分野では、近年キロテスラを大きく超えるような超高強度磁場生成が多数実現している。しかしながらそれらの磁場強度を直接測定する手法が存在しない。現在の手法はプロトンを用いたラジオグラフィ測定であるが、プロトンは電場と磁場両方に作用するため、電場と磁場の切り分けが困難である。そこで、申請者らは中性子を用いて磁場を直接測定できる手法を開発しようとして本研究を提案した。

当初計画の手法は、あらかじめスピン偏極した中性子を発生させておいて、その中性子の曲がり方(曲がり角度)から直接磁場強度を見積もるといったものであった。スピン偏極中性子生成手法に関して先行研究があり、それを開発し実証するという計画であった。その手法でスピン偏極重水素を生成しておいてそこにガンマ線を照射して光核反応で中性子を生成するとスピン偏極中性子が生成する。研究を進めるに従い 2021 年の段階で、スピン偏極重水素を生成する代わりに、同手法でスピン偏極水素を生成し、そこに無偏極中性子を透過させて偏極中性子を生成する方が効率の面と実用上良いとの結論が得たため若干の方向修正を行なっている。

2. 研究の目的

ハイパワーレーザーを用いた超高強度磁場発生実験において、ハイパワーレーザーの一部を使って中性子ビームも発生させ磁場を測定する手法を開発し、その手法を実験的に実証することである。中性子が磁場により偏向するとスピンの分かれた状態が作られ、それはスピン偏極中性子となる。スピン偏極中性子発生そのものも非常に重要であり、磁場の絶対値測定のためにはスピン偏極中性子発生は必須技術である。スピン偏極装置を開発し、実用的なレベルに仕上げるということも重要な目的である。

3. 研究の方法

大阪大学のハイパワーレーザー施設激光 XII 号(エネルギー 3kJ、パルス幅 1ns)と、LFEX は(エネルギー 1kJ、パルス幅 1ps)は 2 装置を 1 箇所に同時照射することが可能である。激光 XII 号を用いて超高強度磁場を発生させ、LFEX を用いて中性子発生を行う。この中性子が磁場を通過してきたものに関して曲がることを実測し、それから磁場強度を測定する。従来手法やシミュレーション予測などと比較し、中性子による磁場計測の妥当性を示す。また PHITS モンテカルロシミュレーションを用いて、中性子-磁場反応の計算を行い、本手法の適用範囲を示す。

また、光トリプレット励起動的核偏極法という手法を用いて、小型装置でありながら、水素または重水素をスピン偏極させる装置の開発を行う。そのスピン偏極重水素をレーザー中性子源ターゲットに用いることでスピン偏極中性子発生が可能かどうかを検証する。

4. 研究成果

理論研究が大幅に進展した。まず中性子は無偏極中性子に関するものから述べる。低エネルギー中性子(650eV 以下)を 10kT/1cm の高い磁場勾配のある点を通させると、中性子ビームは 2 方向に分離され、これにより 100% 偏極中性子を生成できることを発案した。PHITS(2021 年リリース ver3.1)から中性子が磁場中で偏向させる計算機能が追加され、本研究が想定している実験環境を模擬した計算条件で、中性子を用いた磁場計測が可能であることが証明された。図 1 に計算結果を示す。また、これをスピン偏極中性子発生装置と考えることもできる。光トリプレット動的核偏極装置の開発に先んじて、より簡単にスピン偏極中性子を発生させられることが示された。650eV 程度の中性子は、重水素とガンマ線(エネルギーを 2.22MeV に制御する必要がある)によって発生することができる。また 650eV の中性子はジスプロシウムを用いた中性子膜放射化方や、リチウム 6 ガラスシンチレーターカメラなど中性子画像を測定する手法が確立されている。このため、この手法はすべての要求を満たすことができる。ただしこの手法は 10kT 超えの磁場と一緒に中性子が発生できるハイパワーレーザー施設でのみ使える手法である。

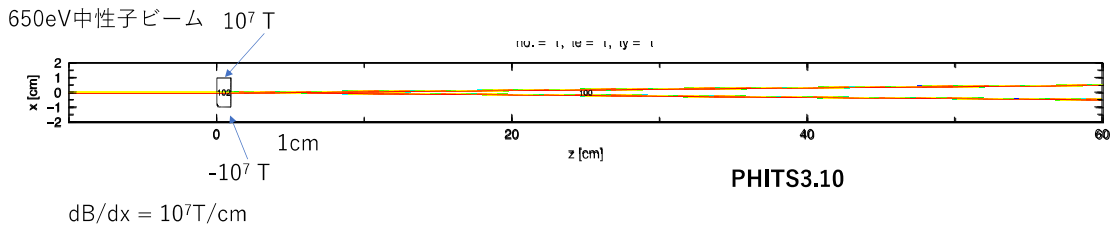


図 1 PHITS シミュレーションによる、中性子の磁場による偏向の計算結果

この原理を実証するため、大阪大学の LFEX を用いて中性子偏向実験を実施することができた。中性子計測系の感度とノイズ対策が不十分であったため明瞭な中性子の分離画像は測定されていない。引き続き実験を継続する。

次に偏極中性子の直接発生について述べる。重水素と中性子の素粒子理論的解析を行った。重水素をスピン偏極させ、そこにガンマ線を入射させるガンマ線エネルギーが 3MeV 以上の時のみスピン偏極中性子が発生し、3MeV 以下のエネルギーの時はスピン偏極中性子が発生しないことが明らかとなった。また 3MeV のガンマ線の場合 0.3MeV 以上の中性子が生成する。磁場による中性子の偏向を計算したところ、このような高エネルギーの中性子では、10kT 程度の磁場では曲がり角が小さすぎて、実験で検出することが困難である。従って重水素スピン偏極によるスピン偏極中性子発生計画は理論的に問題があることがわかり、別の手法を取ることにした。代わりに同じ手法で水素をスピン偏極させることもできる。この場合、無偏極中性子ビームをスピン偏極水素に入射させると、スピン偏極中性子を発生することができる。これはガンマ線・中性子エネルギーによらず、またハイパワーレーザーがなくても実現できる手法である。

光トリプレット励起動的核偏極にスピン偏極水素生成装置の開発に関して、装置開発が大きく進んだ。大阪大学レーザー科学研究所にスピン偏極実験装置が完成した。主要な装置は、先行研究がある大阪大学基礎工学研究科(分担者、根来氏ら開発)の装置を用いており、波長 589nm のレーザー装置は有川が新たに開発したものである。図 2 に示すのが開発した装置写真である。サンプルとして部分重水素化ペンタセンドープパラターフェニル結晶を用いる。先行研究でこの材料が最も高感度に偏極することが知られている。0.4T の磁場内にサンプルを置き、そこに波長 589nm のレーザー光を照射する。そこで電子がスピン偏極した状態が作られる。そこに電子スピン状態と核スピンの間のエネルギーに対応する周波数の電磁波を照射することで電子スピンから水素の核スピんに、スピン-スピン相互作用によりスピン移動をさせる。この操作を 50Hz で 1 分から 10 分継続し、最後にスピン偏極したかどうかを核磁気共鳴計測によって計測する。それらのシステムをコンパクトに収めることに成功した。これだけの小型装置で核スピン偏極実験ができる装置が完成したことは大きな成果である。すでに水素のスピン偏極を示す信号が得られているが、まだ問題が残っており信号値は大変小さい。偏極率としては 0.1%以下(比は 0.499:0.501)、詳細データにはならずであった。これは光トリプレット励起強度不足と、観測用の核スピン共鳴電磁波計測系のインピーダンスマッチング不良が原因であり、引き続き開発を続けることで、成果が得られる見込みである。

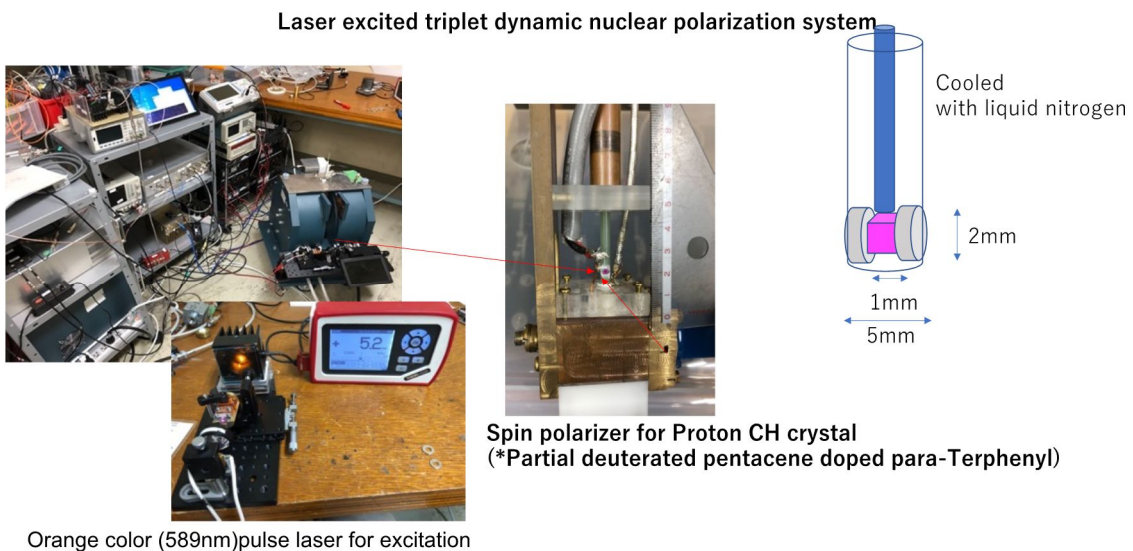


図 2 開発したコンパクトスピン偏極生成装置

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 8件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 ArikawaYasunobu, OtaMasato, NakajimaMakoto, Shimizu Tomoki, Segawa Sadashi, Khoa Phan Thanh Nhat, Sakawa Youichi, Abe Yuki, Morace Alessio, Mirfayzi Seyed Reza, Yogo Akifumi, Fujioka Shinsuke, Nakai Mitsuo, Shiraga Hiroyuki, Azechi Hiroshi, Kodama Ryosuke, Kan Koichi, Frenje Johan,	4. 巻 91
2. 論文標題 The conceptual design of 1-ps time resolution neutron detector for fusion reaction history measurement at OMEGA and the National Ignition Facility	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 063304 ~ 063304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5143657	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Arikawa Yasunobu, Morace Alessio, Abe Yuki, Iwata Natsumi, et al.	4. 巻 5
2. 論文標題 Demonstration of efficient relativistic electron acceleration by surface plasmonics with sequential target processing using high repetition lasers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013062, 013069
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevresearch.5.013062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Mori Takato, Yogo Akifumi, Arikawa Yasunobu, Hayakawa Takehito, Mirfayzi Seyed R., Lan Zechen, Wei Tianyun, Abe Yuki, Nakai Mitsuo, Mima Kunioki, Nishimura Hiroaki, Fujioka Shinsuke, Kodama Ryosuke	4. 巻 11
2. 論文標題 Feasibility study of laser-driven neutron sources for pharmaceutical applications	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 High Power Laser Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 e-20-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/hpl.2023.4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yogo A., Lan Z., Arikawa Y., Abe Y., Mirfayzi S.?R., Wei T., Mori T., Golovin D., Hayakawa T., Iwata N., Fujioka S., Nakai M., Sentoku Y., Mima K., Murakami M., Koizumi M., Ito F., Lee J., Takahashi T., Hironaka K., Kar S., Nishimura H., Kodama R.	4. 巻 13
2. 論文標題 Laser-Driven Neutron Generation Realizing Single-Shot Resonance Spectroscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 011011-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.13.011011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Morace A., Abe Y., Honrubia J. J., Iwata N., Arikawa Y., Nakata Y., Johzaki T., Yogo A., Sentoku Y., Mima K., Ma T., Mariscal D., Sakagami H., Norimatsu T., Tsubakimoto K., Kawanaka J., Tokita S., Miyanaga N., Shiraga H., Sakawa Y., Nakai M., Azechi H., Fujioka S., Kodama R.	4. 巻 12
2. 論文標題 Super-strong magnetic field-dominated ion beam dynamics in focusing plasma devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10829-1~10829-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-10829-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ota Masato, Kan Koichi, Komada Soichiro, Wang Youwei, Agulto Verdad C., Mag-usara Valynn Katrine, Arikawa Yasunobu, Asakawa Makoto R., Sakawa Youichi, Matsui Tatsunosuke, Nakajima Makoto	4. 巻 18
2. 論文標題 Ultrafast visualization of an electric field under the Lorentz transformation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 1436 ~ 1440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-022-01767-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mori Takato, Yogo Akifumi, Hayakawa Takehito, Mirfayzi Seyed R, Lan Zechen, Wei Tianyun, Abe Yuki, Arikawa Yasunobu, Nakai Mitsuo, Mima Kunioki, Nishimura Hiroaki, Fujioka Shinsuke, Kodama Ryosuke	4. 巻 49
2. 論文標題 Thermal neutron fluence measurement using a cadmium differential method at the laser-driven neutron source	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 065103 ~ 065103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6471/ac6272	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yogo Akifumi, Mirfayzi Seyed Reza, Arikawa Yasunobu, Abe Yuki, Wei Tianyun, Mori Takato, Lan Zechen, Hoonoki Yuki, Golovin Daniil O., Koga Keisuke, Suzuki Yosuke, Kanasaki Masato, Fujioka Shinsuke, Nakai Mitsuo, Hayakawa Takehito, Mima Kunioki, Nishimura Hiroaki, Kar Satyabrata, Kodama Ryosuke	4. 巻 14
2. 論文標題 Single shot radiography by a bright source of laser-driven thermal neutrons and x-rays	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 106001 ~ 106001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac2212	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計4件(うち招待講演 2件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 有川安信, 佐藤透A, 香川晃B,C, 根来誠B,C, 北川勝浩B,C, 中尾采美, 浅野将唯, 安部勇輝, Alessio Morace, 余語覚文, 中井光男, 白神宏之, 兒玉了祐,
2. 発表標題 スピン偏極重水素の核分解反応を用いた低エネルギー・スピン偏極・高指向性中性子の発生に向けた研究
3. 学会等名 日本物理学会春季大会
4. 発表年 2020年~2021年

1. 発表者名 有川安信, 太田雅人, 中嶋誠, Valynn Mag-usara, 浅野将唯, 中尾采美、安部勇輝, Morace Alessio, 椿本孝治, 吉田英次, 藤岡慎介, 坂和洋一, 中井光男, 白神宏之, 兒玉了祐 大友明, 山田俊樹, 梶貴博, 鎌田隼, 山田千由美
2. 発表標題 レーザー核融合燃焼履歴計測にむけた ポツケルス効果を用いた超高速中性子計測
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年~2021年

1. 発表者名 Yasunobu Arikawa, Masato Ota, Makoto Nakajima, Shoi Asano, Ayumi Nakao, Yuki Abe, Morace Alessio, Shinsuke Fujioka, Youich Sakawa, Mitsuo Nakai, Hiroyuki Shiraga, Ryosuke Kodama, Johan Frenje, Maria Gatu Johnson,
2. 発表標題 Ultra-fast response neutron detector for inertial confinement fusion
3. 学会等名 AsiaAeanPlasmaPhysicsSociety (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年~2021年

1. 発表者名 Yasunobu Arikawa, et al
2. 発表標題 Ultra-high directivity, mono energy, low energy, and spin polarized neutron generation
3. 学会等名 High Energy Density Physics 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年~2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計2件

産業財産権の名称 小型超高時間分解能光・量子パルス測定装置	発明者 有川安信	権利者 大阪大学
産業財産権の種類、番号 特許、K20200008	取得年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 中性子発生方法および中性子発生装置	発明者 有川安信	権利者 大阪大学
産業財産権の種類、番号 特許、K20200335	取得年 2023年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐藤 透 (Sato Toru) (10135650)	大阪大学・核物理研究センター・招へい教授 (14401)	
研究分担者	余語 寛文 (Yogo Akifumi) (50421441)	大阪大学・レーザー科学研究所・准教授 (14401)	
研究分担者	根来 誠 (Negoro Makoto) (70611549)	大阪大学・先導的学際研究機構・准教授 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------