



東邦大学

2023 年度

東邦大学大学院理学研究科物理学専攻

修士・博士論文予稿集

修士・博士論文発表会

2024 年 2 月 19 日(月)・21 日(水)

発表プログラム:

https://www.toho-u.ac.jp/sci/ph/course/ceremony/phy_event/029473.html

ポリマーゲル線量計を用いた陽子線-X線のパッチ照射に関する精度検証

氏名 川口 太陽 (量子エレクトロニクス教室)

要旨

陽子線と X 線を用いたパッチ照射の照射精度検証のための線量評価方法の確立に向けてゲル線量計を用いて精度検証を行い、その可能性を評価した。放射線治療ではパッチ照射という照射方法が用いられている。パッチ照射では、腫瘍に対して均一に線量を与える必要があるため、2つの照射領域が重なる位置（つなぎ目位置）において線量が均一になっているかを実際の治療照射装置で治療計画毎に確認すること（QA (Quality Assurance : 品質保証) 測定）が重要である。この確認においては 2 次元線量分布の取得が必須となる。一方で、昨今の複雑な照射野に対する QA では、3 次元における QA 測定の必要性も論じられているところである。ゲル線量計は放射線照射によって誘起される水溶液中でのビニルモノマーのラジカル重合反応を利用した化学線量計であり、1 回の照射で 3 次元線量分布を取得することができるため、QA 測定時間の短縮を図ることができる。

本研究では陽子線と X 線を用いたパッチ照射の照射精度検証のための線量評価方法の確立に向けてゲル線量計を用いて精度検証を行い、その可能性を評価した。ゲル線量計の照射精度評価のために、2 次元線量計である Gafchromic EBT3 Film との比較を行った。結果として、ゲル線量計を用いてつなぎ目位置を特定できることを明らかにした。(図 1) 一方で、ゲル線量計に潜在する線量応答の LET 依存性のために、ゲル線量計単独での線量分布導出では不確かさが大きいことがわかった。しかしながら、EBT3 の測定結果を利用することで、ゲル線量計による線量分布の精度を向上できる可能性を示した。(図 2)

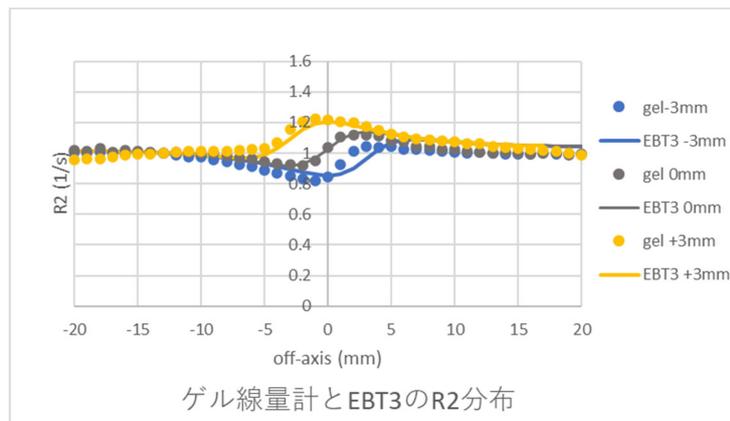


図 1 : ゲル線量計と EBT3 の R2 分布

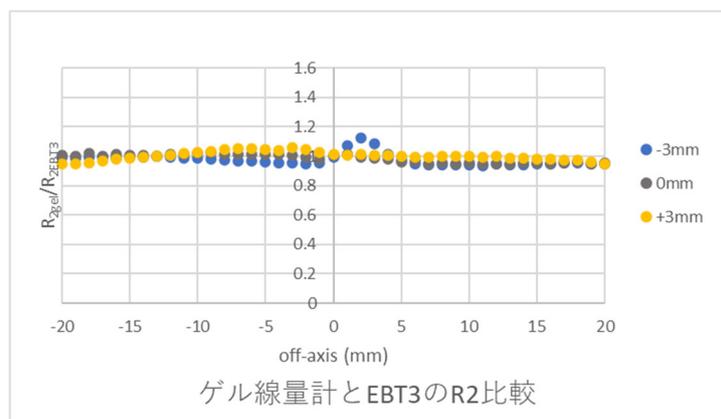


図 2 : ゲル線量計と EBT3 の R2 比較

細胞へのイオンマイクロビーム照射におけるガラスキャピラリー射出イオンの多次元データ同時測定とスポット構造の解明

氏名 稲吉 琴子 (量子エレクトロニクス教室)

生体への粒子線照射は細胞内で重篤な DNA 損傷の誘発が可能で、被ばく線量と障害の程度を知るうえで有用な手段となる。しかしながら、宇宙飛行士の低線量被ばくや、粒子線がん治療の効果を細胞単位で時系列観察するためには、個別の細胞の核を選択的に照射する技術が欠かせない。東邦大学と理化学研究所は共同で、 μm サイズの標的に数 MeV エネルギーのイオンを打ち込む技術を開発しており、ガラス製の注射針に内部を真空に維持できる機能を持たせたフタ付テーパ型ガラスキャピラリービーム光学系という素子を採用している。荷電粒子と物質との相互作用において、電子的阻止能は標的物質内原子のイオン化の指標となるが、本方法は、それが最も高くなる数 MeV 領域のイオンを、細胞核に照射する技術である。この領域では培養液中の飛程は数十 μm 以下しかないので、内部が真空のキャピラリーを細胞に近づけて照射する。入射エネルギーを選ぶことで、阻止能が最大となるブラッグピーク位置を数 μm の精度で設定可能なこと、およびイオンの軌道は直前まで真空中のため多重散乱によるビーム広がりが極めて小さいことが他のマイクロビーム照射法より、原理的には、優位である。しかし今まで進行方向と横方向の揺らぎを同時に測定する手段がなかった。本研究では、進行方向の精度ではイオンのエネルギーを、横方向では 2 次元到達位置を、同時に測定することで、照射スポット構造を多次元的に調べることを目的とする。

実験は、理化学研究所仁科加速器科学研究センターのペレット加速器施設で行われた。水素イオンの加速エネルギーは 1.8~3.4 MeV であった。図 1 (a) 左部分に示すキャピラリーは出口径 20~50 μm 、フタ厚が 8~30 μm またはフタ無しで、キャピラリー出口のすぐ下流 (図の右部分) に ADVACAM 社の半導体検出器アレイ MINIPIX が設置された。図 1 (b) の縦軸はイオンの検出時のエネルギー、横軸はスポット中心からの距離 r である (加速エネルギーが 2.4 MeV、出口径 20 μm 、照射距離 19.7 mm)。このような、エネルギーと 2 次元横方向位置を同時測定した例は、本研究が初めてである。 $E = 1800 \text{ keV}$ の 2 倍の 3600 keV のイベントは単位時間内に 2 つのイオンが 1 ピクセル内に入射した状態を表し、約 2 cm 離れた位置でも半径約 700 μm 以内に集中していることがわかる。すなわち、キャピラリー内輸送時のガラス内壁での非弾性散乱を伴わない最高エネルギーのイオンはスポット中心付近に高密度の微小領域 (コア領域) を形成することが示された。また、厚さ 8 μm のフタ付きキャピラリーでも同様の結果が得られ、フタによる多重散乱の影響は限定的であることも示すことができた。エネルギーがそろっていれば停止位置も局在することから、培養液中の細胞照射においても 3 次元的にブラッグピーク位置が微小体積内に収まることがわかった。さらに、 $E = 1800 \text{ keV}$ 以下では、 r が大きいほどエネルギー損失も大きいという相関関係も定量的に示すことができた。

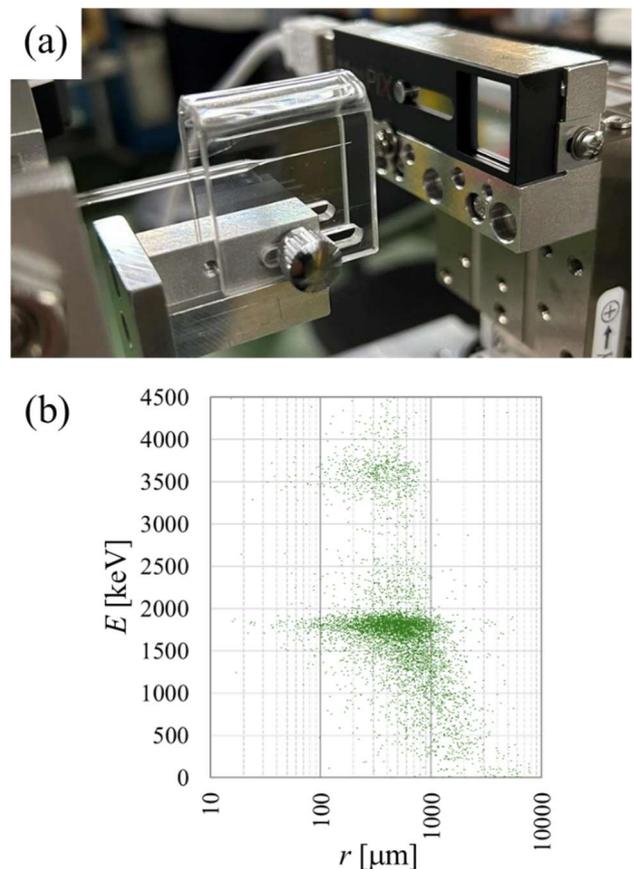


図 1 : (a) 実験セットアップ. (b) イオンエネルギーと中心からの距離 r の 2 次元プロット。縦軸はエネルギー、横軸はビームスポット中心からの距離。

パリティ非保存の研究に向けた Ba 原子のシュタルク分光

須藤 佳典 (量子エレクトロニクス教室)

シュタルク効果の測定から得られる電気分極率は基本的な原子のデータであり、理論計算の精密な検証を行うことが可能である。一方、原子のパリティ非保存(PNC)の研究は、標準理論の検証や標準理論を超越した新しい物理学に寄与することが期待される。Ba 原子のような複数の安定同位体を持つ重い原子は、高い PNC の効果が期待されており、測定に必要な禁制遷移が PNC 研究の鍵となる。

本研究では、原子の PNC 研究に向けた Ba 原子のシュタルク効果の研究を行った。高分解能原子線レーザー分光法を用いて、Ba 原子の $6s5d\ ^1D_2 - 5d6p\ ^1D_2$ (856.0 nm) 許容遷移及び $6s5d\ ^1D_2 - 5d^2\ ^1D_2$ (856.9 nm) 禁制遷移のシュタルク分光を行った。856.0 nm 遷移について、直線偏光を用いシュタルク分岐及びシフトを観測し、上準位 $5d6p\ ^1D_2$ のテンソル分極率を $-4.845(11)$ MHz/(kV/cm)²、同遷移のスカラー分極率を $-4.743(17)$ MHz/(kV/cm)² と決定した。856.9 nm 遷移について、シュタルク誘起混合 (Stark-induced mixing) により禁制遷移のシュタルクスペクトルの観測に成功し、シュタルク分岐及びシフトの測定から上準位 $5d^2\ ^1D_2$ のテンソル分極率を $4.801(20)$ MHz/(kV/cm)²、同遷移のスカラー分極率を $4.754(38)$ MHz/(kV/cm)² と決定した。これらの分極率は、本研究により初めて決定した値となる。

856.0 nm 許容遷移と 856.9 nm 禁制遷移のテンソル及びスカラー分極率は、大きさが誤差の範囲で一致しており、符号が逆になっている。これは、許容遷移の上準位 $5d6p\ ^1D_2$ と禁制遷移の上準位 $5d^2\ ^1D_2$ との強い Mixing によるものと考えられている。したがって、856.9 nm 禁制遷移は、原子の PNC 測定に適し有力な候補となり、Ba 原子を用いて PNC 研究は可能となる。

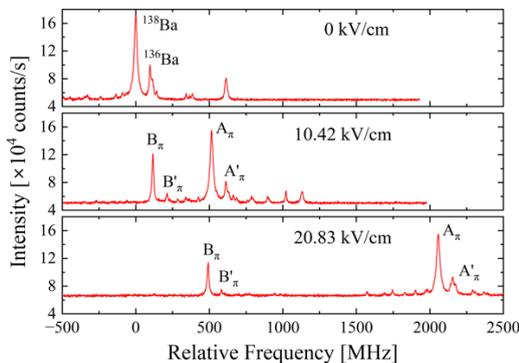


図 1 : 856.0 nm 許容遷移(π 遷移)におけるシュタルクスペクトル

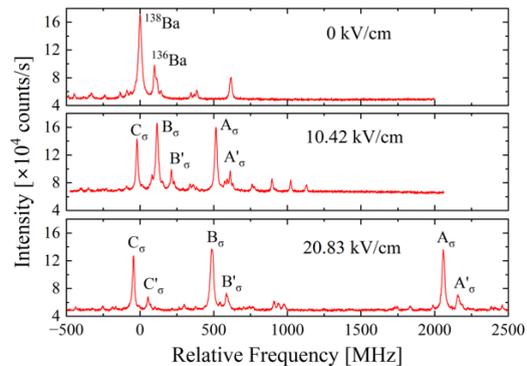


図 2 : 856.0 nm 許容遷移(σ 遷移)におけるシュタルクスペクトル

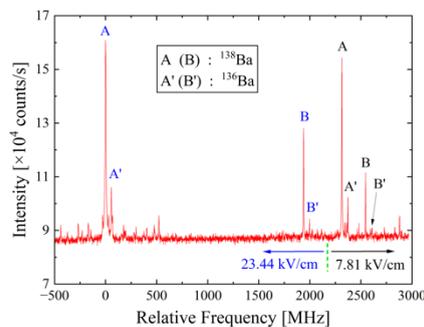


図 3 : 856.9 nm 禁制遷移におけるシュタルクスペクトル

可視波長全域に広がる天文コムの開発

氏名 松本匡史（量子エレクトロニクス教室）

第 2 の地球に代表される系外惑星の探索において正確な視線速度測定が求められている。測定方法はドップラー法と呼ばれ、恒星からの光に含まれる原子や分子の輝線や吸収線の波長変化を高分解能分光器と波長標準を組み合わせて測定する。鉄などの吸収線群についての波長変化量を統計的に処理することで高分解能を得るため、可視波長域において広いスペクトルを持つ波長標準が高い精度の鍵となる。光コムは周波数(波長)精度が高く、新しい波長基準としてファブリ・ペロー共振器による高繰り返し化と可視波長域への波長変換を経て天文コムとして実用化されている。しかし、天文コムの可視波長域におけるスペクトル広がりには未だ改善の余地がある。

本研究では光コムの最終段光増幅器を高出力化することで、さらなるスペクトルの広帯域化を目指す。実験系を図 1 に示す。モード間隔周波数 6.88 GHz の光コムでスペクトル検証実験を行った後に、モード間隔周波数 30 GHz の光コムでスペクトル広帯域化を行った。光コムの繰り返し周波数 f_{rep} が約 254 MHz のモード同期 Er ファイバレーザの出力を Er 添加光ファイバ増幅器 (EDFA) により光増幅し、Free Spectral Range (FSR) が約 1.72 GHz の Fabry-Perot (FP) 共振器を用いて光コムのモードを切り出す。FP の共振器長は、FSR の 4 倍の周波数が f_{rep} の 27 倍の周波数 (約 6.88 GHz) と最も近くなるよう、かつ光コムが最も透過するように安定化制御した。今回は FP 共振器が一つであり、切り出された光コムの不要モード抑圧比は最小で 10 dB と小さいが、スペクトル広帯域化の検証実験には十分と考えている。切り出された光コムを高出力偏波保持型 EDFA (PM-EDFA) によって出力を 1 W まで増幅し、高非線形ファイバを用いて広帯域化を行った。その後、周期分極反転ニオブ酸リチウム導波路 (PPLN-WG) に入射した。結果として、図 2 に示すようにモード間隔周波数 6.88 GHz で可視全域にわたる広帯域光コムの発生に成功した。モード間隔周波数 30 GHz の光コムで同様の結果を得るには 4.4 倍のパルスエネルギー (平均パワー) が必要である。モード間隔周波数 6.88 GHz の光コムのスペクトル広帯域化の結果をもとに、高出力 PM-EDFA を産業技術総合研究所で開発されたモード間隔周波数 30 GHz の光コムに実装した。高出力 PM-EDFA を用いて 3.0 W まで平均パワーの増幅を行い、スペクトル広帯域化を行った結果、先行研究と比べてスペクトルが広がり、可視波長域への波長変換したとき可視波長域の 86% をカバーできる結果が得られた。

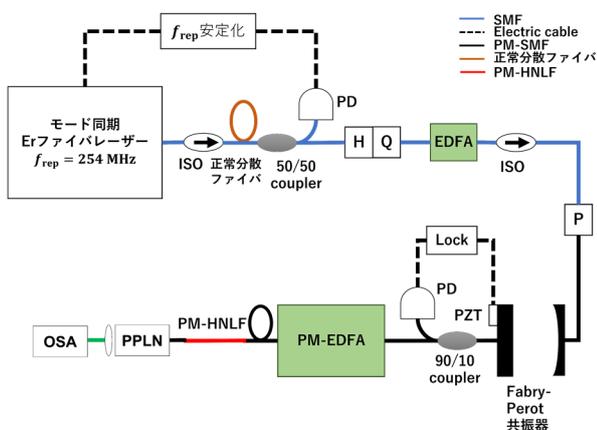


図 1 モード間隔周波数 6.88 GHz コムの可視光発生系

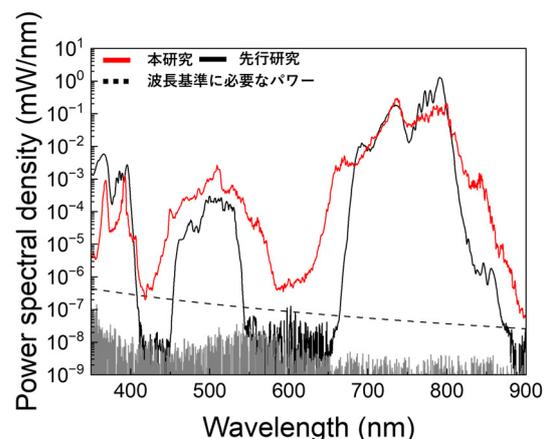


図 2 モード間隔周波数 6.88 コムの可視スペクトル

全偏波保持機構共有型デュアルコムファイバレーザーの開発と THz 域への展開

湯本 拓実 (量子エレクトロニクス研究室)

テラヘルツ (THz) 域は、分子が特有かつ強い吸収線を有する指紋領域といわれる。さらに、THz 波はレーザー光と同等のコヒーレントビームであるため、不透明薄膜やエアロゾル混在ガスへの非接触リモート計測が期待できる。従来の THz 波の発生と検出は、超短パルスレーザーと移動ステージを用いた非同期サンプリング (ASOPS) が広く用いられているが、測定時間と分解能はトレードオフの関係であった。これに対し、光周波数コムを用いたデュアルコム分光法を THz 波の発生と検出に用いることで、高速・広帯域・高分解能な THz 波の測定が実現された。一方、デュアルコム分光法では 2 台の光周波数コムを用いるため、2 台の独立したモード同期レーザー光源と高精度な周波数安定化のための制御系を用いるため、分光システムが複雑かつ大掛かりとなり、あらゆるユーザーによる使用が可能な装置とはいえない。

この課題を解決するために、本研究では制御が不要な機構共有型デュアルコムファイバレーザーを、小型・簡便・堅牢な構成で開発した[1]。さらに、テラヘルツ (THz) 域に対して、デュアルコムファイバレーザーの波長域の拡張を目指した[2]。

Fig. 1(a)に示すように、Micro-optic package を導入した半導体可飽和吸収ミラー (SESAM) 集光光学系と部分反射ミラー (PRM) を用いて、小型かつ堅牢な構成でのレーザー光源を実現した。機構共有方式による共通雑音抑制効果により、生成された 2 台の光周波数コムの繰り返し周波数 f_{rep} の差 Δf_{rep} のアラン偏差 0.02 Hz (平均時間 1 秒) という高い相対周波数安定性を受動的に得た。さらに、シアン化水素 (HCN) ガスのデュアルコム分光を行い、1 ms という短い測定時間で HCN ガス分子の吸収線を検出できた (Fig. 1 (b))。

次に、開発したデュアルコムファイバレーザーの THz 域へ拡張した。Fig. 1(c)に示すようにデュアルコムレーザーと光伝導アンテナ (PCA) を組み合わせて、小型かつ堅牢な構成での THz パルスの発生・検出系を構築した。Fig. 1(d)に示すのは、約 1,111 s 間積算した THz パルスをフーリエ変換して取得した THz 波のスペクトルである。THz スペクトルにおいて空気中の水分子による吸収線が見られる。

最後に、デュアルコム分光法による測定可能帯域幅を拡大するために、デュアルコムファイバレーザーの f_{rep} の高繰り返し化も行った。レーザー共振器長を短尺化することにより、 f_{rep} が 100 MHz 以上でのデュアルコムレーザーの発生を実現した。さらに、 Δf_{rep} のアラン偏差 0.02 Hz (平均時間 1 秒) と高い相対周波数安定性が得られた(Fig. 1 (e) (f))。

これらの結果は、機構共有方式による柔軟なレーザー構成はレーザーセンシングなどデュアルコム分光法を超越した幅広いプラットフォームに適用可能であり、光周波数コムの高いポテンシャルを維持しながら、実用環境への展開を可能にする。

[1] T. Yumoto, W. Kokuyama, S. Matsubara, T. Yasui, and Y. Nakajima, *Opt. Continuum* **2**, 1867-1874 (2023).

[2] T. Yumoto, Y. Nishimiya, W. Kokuyama, Y. Tokizane, T. Yasui, S. Matsubara, and Y. Nakajima, *ALPS2023*, p2-36 (2023).

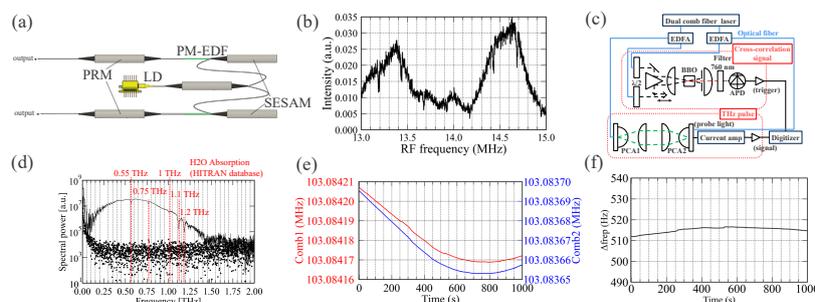


Fig. 1 (a) Experimental setup of an all-polarization maintaining dual-comb fiber laser. (b) Dual-comb spectrum by FFT of interferogram. (c) Experimental setup of THz pulse generation and detection. (d) THz spectrum by FFT of Integrated THz pulse for averaging time of 1,111 s. (e),(f) Temporal variation of f_{rep} and Δf_{rep} .

非磁性キラル物質におけるスピン依存電気伝導に関する数値的研究

五十嵐 宥介 (物性理論教室)

空間反転対称性のない結晶 (キラル物質) を透過する電子には、カイラリティに対応した非自明なスピン分極が誘起される。これはカイラリティ誘起スピン選択則(Chirality-induced Spin Selectivity : CISS)[1]と呼ばれ、外部磁場や磁化を必要としないスピン伝導として注目されている。カイラリティ誘起スピン選択則の起源として、スピン軌道相互作用が考えられているが、1次元の単一チャネル強束縛モデルでは散乱行列の対称性の議論から、スピン軌道相互作用由来のスピン偏極が起きないことがわかっている。これに対して、有限幅の擬1次元系では、スピン偏極はゼロになるとは限らない。

本研究では、このカイラリティ誘起スピン選択則に対して、その起源を探るために数値的研究を行った。具体的には、スピン軌道相互作用が存在する2次元強束縛モデルを用いてらせん構造(図1)を作成し、複数チャネルでのスピン依存電気伝導の計算を行った。グリーン関数法を用いて、スピン依存透過率の計算を行い、最大7%のスピン偏極が起こることがわかった(図2)。さらに研究では、円筒形モデルを用いた計算結果との比較より、らせん構造特有のスピン分極であることを示した。また、通常のスピン分極現象とは異なり、系のサイズを大きくするほどスピン分極が大きくなる特徴があることを明らかにした。スピン分極の大きさはらせんピッチやスピン軌道相互作用の大きさにも依存することが明らかになり、実験で得られる値に関しても言及した。

[1] B. Göhler, V. Hamelbeck, T. Markus, M. Kettner, G. Hanne, Z. Vager, R. Naaman, and H. Zacharias, *Science*, 331, 894 (2011).

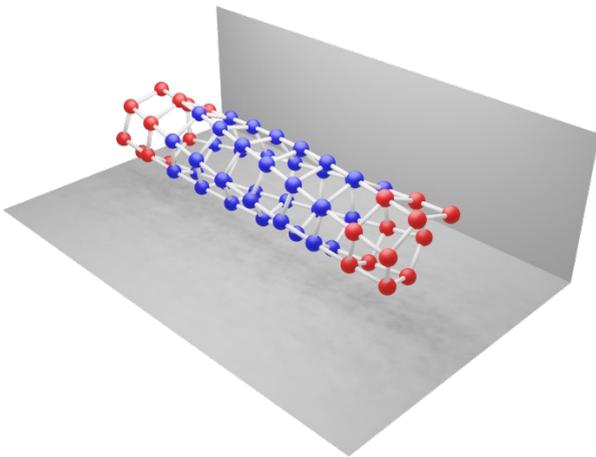


図1 らせん構造モデル。2次元正方格子に端をずらした周期境界条件を課すことで作成した。青点がスピン軌道相互作用を有するサンプル部分、赤点が相互作用を含まないリード部分。

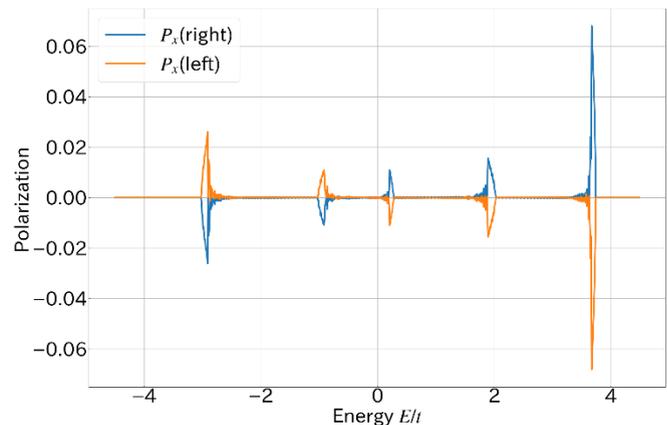


図2 らせん構造モデルを透過する伝導電子のスピン偏極。横軸は伝導電子のエネルギー。らせんのカイラリティ(right, left)に依存したスピン偏極が現れる。

らせん磁性体中の磁化構造に対する数値的研究

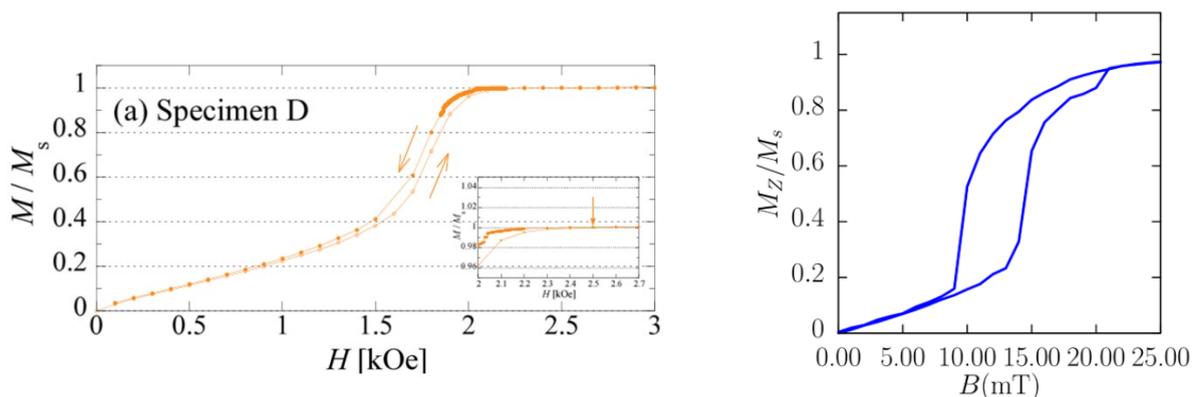
金田 純 (物性理論教室)

強磁性結合と一軸性 Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用が共存する磁性体中では、螺旋磁気構造が形成される。螺旋軸垂直方向に磁場を印加することによって、らせん構造が周期的にほどけ、カイラルソリトン格子と呼ばれる磁気超格子構造ができる。ねじれた磁化構造がソリトンとして振る舞いトポロジカルに安定のため、磁化曲線はヒステリシスを示す。CrNb₃S₆ の微小薄膜試料を用いた実験ではヒステリシスが観測されているが、バルク試料を用いた実験ではヒステリシスは観測されていない[1]。この違いを明らかにするために、磁化構造の磁場掃引による変化を数値シミュレーションを用いて解析した。

解析方法として、古典ハイゼンベルグ模型を用いて、磁化のダイナミクスを表す Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を 4 次のルンゲクッタ法で数値的に解いた。最近接強磁性相互作用と DM 相互作用、磁気異方性効果を用いてらせん構造を形成し、らせん軸に対し垂直方向に磁場を加えることで磁化曲線の計算を行った。また、有限温度の効果として、揺動散逸定理から求められるランダム磁場を印加した。

解析結果として、薄膜試料を再現した 2 次元正方格子モデルでは、増磁過程においてトポロジカルに安定なねじれた磁化構造は解消されず、ある閾磁場において強制強磁性状態になる。減磁過程においては、ねじれた磁化構造は系の端からしか生成することができず、ゼロ磁場近くの閾磁場において螺旋磁化構造になる。このため磁化曲線はヒステリシス構造になる。2 次元正方格子モデルを層状に重ねた 3 次元モデルでも同様に磁化曲線にヒステリシス構造が見られ、バルク試料の実験における磁化曲線の再現はできなかった。次に、強磁性相互作用・DM 相互作用を一部の値をゼロにすることで、格子欠陥による影響を疑似的に再現し計算を行うとヒステリシス構造が小さくなるがソリトンの保存ができないことが分かった。磁化配置を六方最密構造のように変え計算を行ったが、磁化曲線にヒステリシス構造が見られた。強磁性相互作用の一部を反強磁性相互作用に変える、磁気双極子相互作用を加える等を行ったが、いずれもヒステリシス構造を有する薄膜試料の実験結果を再現し、バルク構造で得られるような磁化曲線は得られなかった。このことから、最近接における相互作用や磁気双極子相互作用だけではバルク試料の再現は難しく、実験試料における構造欠陥などの効果を取り入れる必要があると考えられる。

[1] M. Mito et al, *phys. Rev. B* **97**, 024408 (2018)



図：(左) CrNb₃S₆ のバルク試料における磁化曲線。(右) 反強磁性相互作用を含んだモデルの磁化曲線の計算結果。

Mn サイトの化学置換が NdBaMn₂O₆ の物性に与える効果

清水寛太 (磁気物性学教室)

要旨

ペロブスカイト型 Mn 酸化物は、磁場を印加すると電気抵抗が数桁以上減少する超巨大磁気抵抗(CMR)効果を示す[1]。この CMR 効果は、磁気センサーや磁気ヘッドなど次世代の磁気デバイスとして応用が期待されている。しかし、CMR 効果は室温以下で発現することが多いため、応用化が難しい。そこで本研究では、室温付近で CMR 効果の発現が期待できる A サイト秩序型ペロブスカイト型 Mn 酸化物 RBaMn₂O₆ に着目した。RBaMn₂O₆ (R = 希土類)室温付近で電荷・軌道秩序絶縁体(CO/OOI)相、強磁性金属(FM)相、A 型反強磁性(AF(A))相が多重臨界点を形成しているため、室温での CMR 効果の発現が期待される[2]。CMR 効果は、磁場印加により CO/OOI-FM 転移が起こることで発現する。しかし、RBaMn₂O₆ の CO/OOI 相は安定で、磁場に対して堅牢である。CO/OOI 相は化学置換による乱れの影響を受けやすいため、本研究では NdBaMn₂O₆ の Mn サイトを化学置換し、その電子相に与える効果を調べた。

先行研究[3]では、Mn サイトを Cr で置換した NdBaMn_{2-x}Cr_xO₆ ($x = 0.10$)の磁気特性について調べられ、室温付近以下で FM 相が強くなることが確認された。そこで本研究では、NdBaMn_{2-x}Cr_xO₆ ($x = 0 - 0.18$)の磁化測定、電気抵抗率測定を行い、Cr 置換が物性に与える効果をより詳細に調べた。

単相の NdBaMn_{2-x}Cr_xO₆ 試料は $x = 0 - 0.15$ の範囲で得られた。図 1 に NdBaMn_{2-x}Cr_xO₆ ($x = 0.10$)の $H = 1, 10, 30, 50$ kOe における磁化の温度依存性を示す。 $H = 1$ kOe では、温度低下に伴い室温付近で常磁性相から FM 相への転移が起こる。そして、250 K 以下で CO/OOI 相への転移を示す磁化の減少が見られる。また、Ti 置換した試料と比べると、Cr 置換による T_c の低下は小さい。印加磁場の増加により、 T_{CO} の低下が見られ、 $H = 50$ kOe では CO/OOI 転移を示す磁化の減少は見られない。しかし、Ti 置換した試料よりも磁場誘起の CO/OOI-FM 転移は鈍く(ブロードで)、FM 相の飽和磁化は理論値の 2/3 程度である。これは、磁場誘起の FM 相に、CO/OOI 相が残っているためであると考えられる。これらの原因として、Cr 置換した NdBaMn₂O₆ の A サイトの秩序度が完全でないことが関係していると考えられる。また、電気抵抗率測定より、磁気抵抗効果を確認できた。しかし、磁気抵抗の変化率が小さく、CMR 効果と言えるほどの変化は観測できなかった。

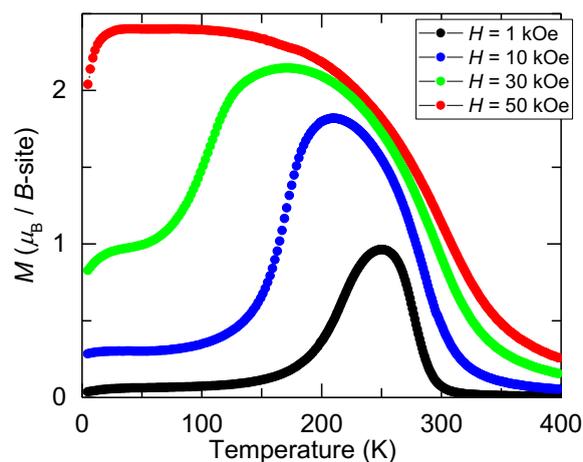


図 1 NdBaMn_{2-x}Cr_xO₆ ($x = 0.10$)の $H = 1, 10, 30, 50$ kOe における磁化の温度依存性

[1] Y. Tokura: Rep. Prog. Phys. **69** 797 (2006).

[2] D. Akahoshi, Y. Okimoto, M. Kubota, R. Kumai, T. Arima, Y. Tomioka, and Y. Tokura: Phys. Rev. B **70** 064418 (2004).

[3] 人見理花: 2021 年度東邦大学理学部物理学科卒業論文.

秩序型ペロブスカイト型 Mn 酸化物 $\text{NdBaMn}_2\text{O}_6$ の元素欠損効果

氏名 服部央弥 (磁気物性学教室)

要旨

ペロブスカイト型 Mn 酸化物は、臨界点付近の電荷・軌道秩序絶縁体相に磁場を印加することで、磁場誘起の強磁性金属転移による超巨大磁気抵抗 (CMR) 効果を示すことが知られている[1]。だが、通常のペロブスカイト型 Mn 酸化物における CMR 効果は室温より低い温度で発現することが多く、デバイスなどの実用化には至っていない。

A サイト元素が層状に規則配列した構造を持つ秩序型ペロブスカイト型酸化物 $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ ($R = \text{希土類}$) では、強磁性金属 (FM) 相、電荷・軌道秩序絶縁体 (CO/OOI) 相、A 型反強磁性 (AF(A)) 相が室温付近で多重臨界点を形成していることが報告されているため[2]、室温での CMR 効果が期待されている。しかし、 $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ の CO/OOI 相、AF(A) 相は磁場に対して堅牢なために磁場誘起相転移による CMR 効果は発現しない。

そこで、本研究では $R\text{BaMn}_2\text{O}_6$ への乱れの効果に着目した。乱れの効果は多重臨界点付近の電子相、特に CO/OOI 相に対して大きな影響を与えることが期待される。本研究の目的は、 $\text{NdBaMn}_2\text{O}_6$ の A サイトに元素欠損の乱れ (構造的乱れ) を導入し、乱れが多重臨界点付近の物性に与える影響を調べることである。

図 1 に $\text{NdBa}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_{6-\delta}$ の磁気相図を示す。酸素欠損量 δ はヨウ素滴定法で決定した。Ba 欠損による乱れを導入することで、強磁性転移温度 (T_c) は $0 \leq x \leq 0.10$ で上昇傾向を示し、電荷・軌道秩序転移温度 (T_{co}) は $0 \leq x \leq 0.05$ で上昇傾向、 $0.05 \leq x \leq 0.12$ で減少傾向を示す (図 1)。通常の場合、構造的な乱れを導入すると転移温度 (T_{co} , T_c) は減少するので、これは興味深い結果である。 T_c の上昇の主な原因は、Ba 欠損により酸素欠損が生じ、Mn の平均価数が減少するためである (電子ドープ効果)。一方、 $0 \leq x \leq 0.05$ における T_{co} の上昇は、Ba 欠損により $\text{NdBaMn}_2\text{O}_6$ の構造歪みが大きくなる (バンド幅がせまくなる) ためであると考えられる。そして、 $0.05 \leq x \leq 0.10$ での T_{co} の減少は、 x の増加にともなう Mn の平均価数の減少 (電子ドープ効果) と Ba 欠損による乱れの相乗効果によるものと考えられる。

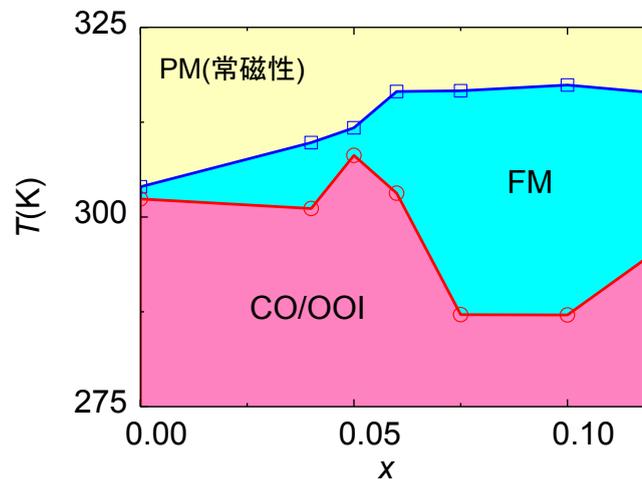


図 1: $\text{NdBa}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_{6-\delta}$ の磁気相図 ($0 \leq x \leq 0.12$)

[1] Y. Tokura, Rep. Prog. Phys. **69** 797 (2006).

[2] D. Akahoshi, Y. Okimoto, M. Kubota, R. Kumai, T. Arima, Y. Tomioka, and Y. Tokura, Phys. Rev. B **70** 064418 (2004).

Ray-Tracing Code による wormhole 時空の検証について

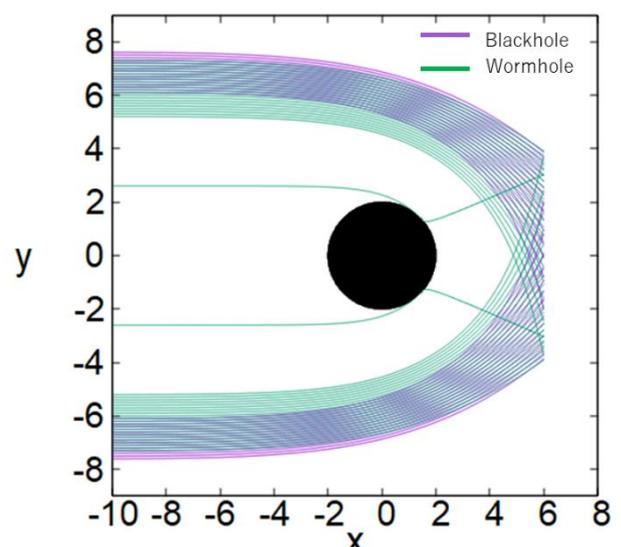
佐藤 由芽 (宇宙物理学教室)

ワームホールは時空の 2 点をつなぐトンネルのようなものであり、アインシュタイン方程式の解として得られる。ただし負の圧力等の仮定が必要となるため現実的には存在しないと考えられてきた。これに対し、最近の研究では人が通れるようなワームホールが安定に存在できる可能性が指摘されている。そこで本研究ではワームホールが存在するかどうかを検証することを目的とし、ワームホール時空と Schwarzschild ブラックホール時空における“シャドウ”の違いについて調べた。

ワームホールの種類は唯一ではなく、アインシュタインとローゼンが考えたアインシュタインローゼン橋、電荷をもつ家電ワームホール、電気・磁気力線が伸びているウィーラーのワームホールなど多くの種類がある。そこで、さまざまなワームホール時空の検証を可能にするために、時空計量を特定することなく、一般の球対称時空におけるシャドウのコードを以下の工程を踏んで作成した。

まず、一般の球対称時空における測地線方程式の導出を行った。次にコードを作成し、そのテストを行った。1 つ目のテストはブラックホール周りで円軌道を描けることを確認することである。シャドウを見るためには測地線方程式を正しく解き、光子の軌道を知らねばならない。有効ポテンシャル等から初期値を決めることで不安定円軌道が描けたので、正しく測地線方程式を解くコードが完成した。2 つ目は時空のゆがみによる補正効 (Tetrad 効果) のテストである。ブラックホール等重力の強い場所では時空が歪められる。時空の歪みを考慮した形で光を放てるように Tetrad 系を用いる。Tetrad を用いて BH 周りで光子を等方的に放出した場合、光子がブラックホールにつかまらない角度の限界は 135° までであった。これを実際にシミュレーションしてみたところ再現できた。

一般球対称時空におけるコードが完成したので、Schwarzschild ブラックホールとワームホールの場合それぞれでシャドウを描き両者の比較を行った。本研究では、遠方では Schwarzschild ブラックホールと同じに見えるワームホール時空として、Morris-Thorne ワームホールを採用した。光源から無限遠離れた観測者対し、ワームホール/ブラックホールの中心から反対側に $r = 6 \frac{GM_{BH}}{c^2}$ 離れ、観測者の視線方向に対し垂直な直径 $8 \frac{GM_{BH}}{c^2}$ の光源が作るシャドウを考えた。シャドウを比較した結果、シャドウのリングはワームホール時空の方が $0.6 \frac{GM_{BH}}{c^2}$ 太く、位置もブラックホールとは異なることが分かった(図参照)。空間の歪み方が両者で異なることからシャドウの観測によりブラックホールとワームホール区別ができることがわかった。



中高温銀河間物質の非平衡電離過程

室岡 美奈（宇宙物理学教室）

近年では観測的・理論的な研究によって宇宙のエネルギー組成が精度よく測定されてきている。大半(約 95%)を占めているのは正体不明のダークエネルギーとダークマターであり、通常物質(バリオン)はわずか約 5%であると示唆されている。ただし、そのバリオンですら大半は未だ直接的には検出されておらず、それらはダークバリオンと呼ばれ宇宙の未解決問題の一つとなっている。

ダークバリオンの候補はいくつか挙げられているが、その有力候補が温度 $10^5 - 10^7 \text{K}$ で希薄な中高温銀河間物質(WHIM)である。WHIM は密度が希薄で放射が弱いため、観測にかからなかったこととも整合性がとれている。今までに WHIM に関する観測的・理論的研究の多くは電離平衡を仮定していた。しかし、WHIM 中のイオンは低温($\sim 10^6 \text{K}$)、低密度($\sim 10^{-6} \text{cm}^{-3}$)の状況下では電離平衡から乖離する可能性がある。そこで、本研究では電離平衡を仮定せず、観測に用いられる重元素の非平衡な電離過程を数値的に解いた。またその結果を用いて、どのようなイオンの吸収線の強度が相対的に大きくなるのか調べた。今回は重元素の中でも宇宙における存在量が多い酸素・窒素・炭素に着目した。

まず、活動銀河核などからの放射による光電離が無視できる状況下では、各イオンの存在比が電離平衡を仮定した場合とは数十%程度異なり、各元素でヘリウム型イオンが卓越する結果となった。一方で、光電離が衝突電離よりも卓越するような状況下では、電離が速く進むようになるため、水素型イオンの割合が大きくなった。

次に、光電離が卓越する状況下で各イオンによる吸収線の相対的な強度比を求めたところ、酸素・炭素・窒素のいずれにおいても水素型イオンの $\text{Ly}\alpha$ 線とヘリウム型イオンの $\text{He}\alpha$ w 線($(1s^2\ ^1S_0 \rightarrow 1s2p\ ^1P_1)$)の強度が卓越することが分かった。また、異なる重元素を比較すると、存在量が多い酸素の吸収線($\text{O}^{6+}\text{He}\alpha\text{ w}(573.9\text{eV})$, $\text{O}^{7+}\text{Ly}\alpha(653.7\text{eV})$)が最も強いことが分かった。したがって、非平衡な電離過程を考慮しても、軟 X 線における酸素イオンの吸収線がダークバリオンの検出に最も適していると考えられる。また、高温($> 10^6 \text{K}$)になるほど完全電離に近づくため、どの元素でも全体的に強度が小さくなる結果となった。

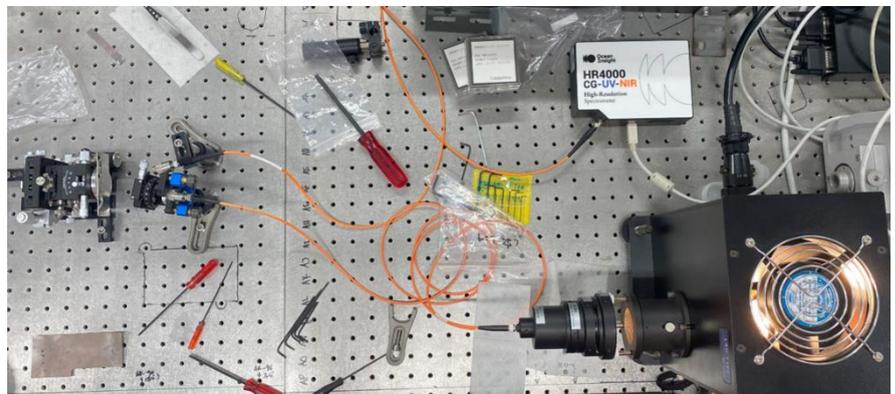
動的カシミール効果の実証実験に向けた定常波表面プラズモンポラリトン励起実験

氏名:田中 希宙 (素粒子物理学教室)

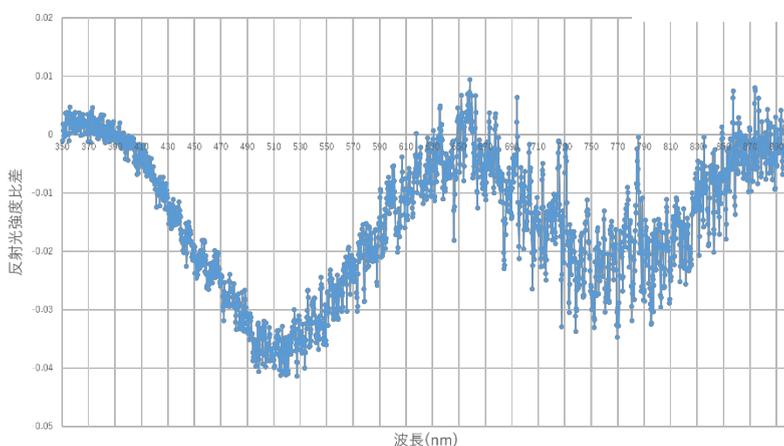
要旨

この世界は粒子の形として存在することのできないエネルギーに満ちているとされ、このエネルギーは、零点エネルギー(量子ゆらぎ)と呼ばれている。この零点エネルギーは式で表すと $\frac{1}{2}\hbar\omega$ と書き表され、各振動に対応した零点エネルギーが存在している。通常、量子ゆらぎは直接観測することのできない定常波だが、この量子ゆらぎによって二枚の金属板の間に引力が発生する静的カシミール効果はすでに何度か実証されており、工業応用の段階に進んでいる。しかし仮想的に二枚の金属板を光速に近い速度で振動させることにより粒子が発生する動的カシミール効果の実証例は一例しかなく、実証時エネルギースケールも限定的であるため、異なる実験系での実証例が求められている。本研究の最終目的はこの動的カシミール効果を先行研究とは違う系を用いて実証することである。

実証実験の際は、表面プラズモンポラリトンと呼ばれる金属電子の振動を利用することで、動的カシミール効果によって生成される光子を増強し、その光子を観測することで動的カシミール効果を実証しようと計画している。本論文ではまず表面プラズモンポラリトンを発生させることのできるクレッチマン配置を作成し、実際に表面プラズモンポラリトンが発生できているかの確認実験を、反射光強度の減少を観測する ATR 法を用いて行った。その後、実質的に金属板に挟まれた系として、凹部の長さが 1 μm の金属グレーティングを作成し、凹部に定常波が発生されたかを判断する基準として、p、s 偏光それぞれの場合で、白色光を金属グレーティングに照射した時の反射光と、銀薄膜を成膜したサンプルの反射光の強度比を見ることで実験的に検証を行った。



反射白色光強度測定時の実験の様子



実験の結果、金属グレーティング試料に p 偏光状態で白色光を照射したときの白色光強度比の方が、s 偏光の状態でも、波長 510nm 帯と波長 770nm 帯において顕著に弱くなっていることが確認できた。

金属グレーティング試料に、p 偏光、s 偏光状態で白色光照射時の反射白色光強度比差

A Study of Tracking Low Energy Protons using the Super Fine-Grained Nuclear Emulsion for searching MeV Scale Dark Matter

ダウディ 由莉香 (素粒子物理学教室)

The existence of a mysterious substance in the universe, the so-called Dark Matter is suggested by many astrophysical observations. Detecting Dark Matter (DM) is one of the most challenging problems in natural science and modern physics, and many experimental groups are trying different approaches to discover this unknown gravitational source.

These conventional DM searches aim to discover WIMPs, the Weakly Interacting Massive Particles, whose mass is usually considered in the $\text{GeV}/c^2 - \text{TeV}/c^2$ region. However, WIMPs with a lighter mass in the MeV/c^2 region are not excluded in pre-existing DM models. The search for these lighter DMs is only done through electron interactions since the velocity of DM is slow, and searching for it with baryons would be very difficult.

This study focused on the MeV/c^2 scale DM model and how it would be possible to detect it with baryon interactions. Although most pre-existing experiments assume only one kind of DM, there are no astrophysical constraints in the possibility of DM existing in more varieties. As the Standard Model has several particles, it is easy to imagine that multiple particles are hidden in the dark sector.

This study considers a scenario in which two (or more) DMs annihilate to a secondary DM in the galactic center. The secondary DM will receive kinetic energy from the mass difference, reaching the Earth. If this process happened in the GeV/c^2 scale, it would be possible to detect it with pre-existing apparatuses such as neutrino detectors. But, if this happens in the MeV/c^2 scale, heavy targets such as Xe, Ge, and Na commonly used in DM searches will have minimal recoil energy below their detection thresholds.

This is where the fine-grained nuclear emulsion (NIT) used in the NEWSdm experiment can be useful, as 42.8% of NIT's atomic fraction is hydrogen (protons). Since protons are lighter in mass, the recoil energy from MeV/c^2 scale DMs will be in the tens of keV. Such protons can be detected with the NIT, and it is the only detector with directional sensitivity capable of detecting these low-energy protons.

The NIT's ability to detect low-energy protons was assessed by directly exposing it to protons using an ion implanter. The results revealed that the NIT can detect protons as low as 10 keV and determine their direction with a resolution of 10-20 degrees. The detection capability in a low-temperature environment used for physical search was also confirmed down to 50 keV with the detection efficiency being 0.13% for 50 keV protons. The background contamination rate was also assessed, which shows a high electron background rejection power.

In conclusion, a physical search utilizing an equatorial telescope and applying these DM search methods was done on a small scale, with a limit put to the DM-Nucleon cross-section of 10^{-26} cm^2 .

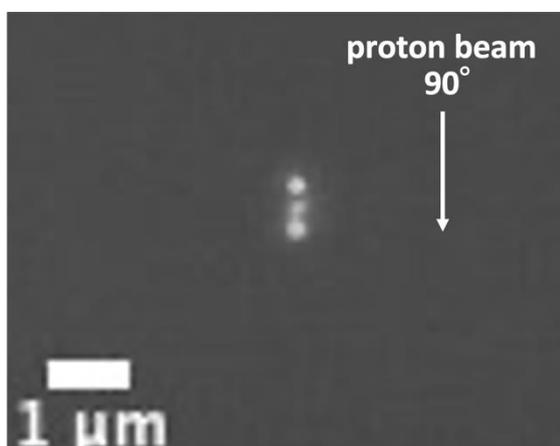


Figure 1: Proton track from 70 keV proton beam.

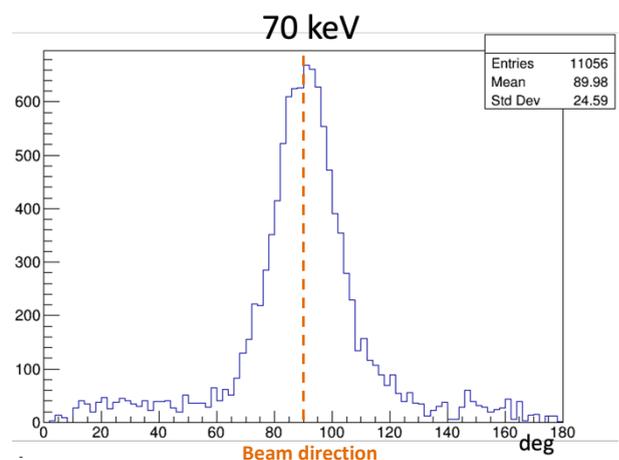
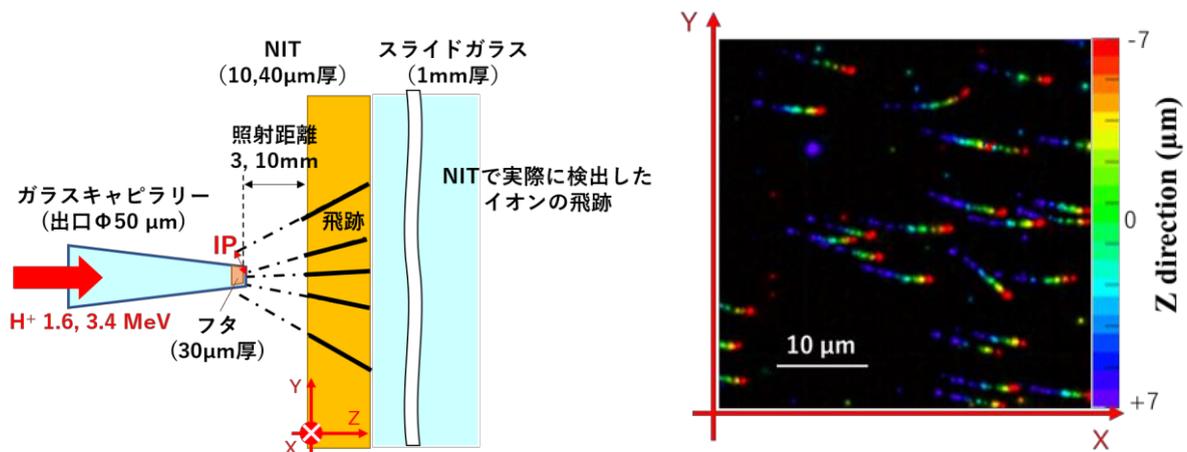


Figure 2: Angular distribution from 70 keV protons shows a peak at the incident angle, 90 degrees.

ガラスキャピラリー由来のイオンマイクロビームの超微粒子原子核乾板によるビームプロファイルの測定手法開発

氏名 宮崎晴吉 (素粒子物理学教室)

マイクロビームとは光子や電子、イオンなどのビームをアパーチャーで細くすることや、集束素子で密度が上がるように絞ることで、ビーム径をマイクロメートルオーダーにしたビームを指す。現在、多くの研究機関でイオンマイクロビームやX線マイクロビームを哺乳類細胞などの核だけに集中的に照射して、放射線効果を調べる研究が進められている。これらの研究により、低線量放射線被ばくの影響を実験室で観察できるようになってきた。イオンマイクロビームを生成する方法として比較的新しいビーム光学素子としてテーパ型ガラスキャピラリー光学系がある。基本的な構造は注射針と同様に中空ということであるが、先端に近づくにつれて内径・外径とも小さくなっていく、つまり、テーパ角を持っている。イオンマイクロビームは従来のイオンビームと比べてミクロンオーダーの領域に対する選択的照射に優れていて、ガラスキャピラリー先端のプラスチック製のフタにより、大気、液体中へのビームの取り出しが可能になっており、医療、工学分野への応用が期待されている。用途に応じて、ビームの拡がりやエネルギー損失を事前に評価する必要があるが、それらは、キャピラリーの出口径の大きさ、照射距離に依存する上に、キャピラリー内壁表面での小角散乱(ラザフォード散乱)によるビーム拡散の悪化、出口付近のガラス壁を貫通することによるエネルギー損失の多いイオンの存在によって正確なビームプロファイルの実測は難しくなっている。イオンマイクロビームの構造として、内壁表面で散乱する成分、出口付近の内壁を貫通する成分で構成される Halo 成分、内壁に触れなかった成分を Core 成分が知られており CR-39 固体飛跡検出器を用いた実測によるビームプロファイルの取得に成功している。しかし、より正確なビームプロファイル取得のために、より高密度照射に優れ、三次元のイオン情報の取得が可能な超微粒子原子核乾板(NIT)を用いたビームプロファイルの実測実験を行い、ビームプロファイルに加えイオン一つ一つの角度情報を取得し、その情報をもとに NIT 表面からキャピラリー出射口までの飛跡の back trace を行い、NIT 表面の distortion 補正に課題はあるが、ガラスキャピラリーによるマイクロイオンビームの精密なプロファイル測定、三次元のイオン情報の取得手法を確立した。



実際のセットアップの模式図(左)と実際に得られる飛跡画像(右)

MRTOF 質量分析器による超ウラン核種精密質量測定のための同 A/q 質量参照イオンの開発

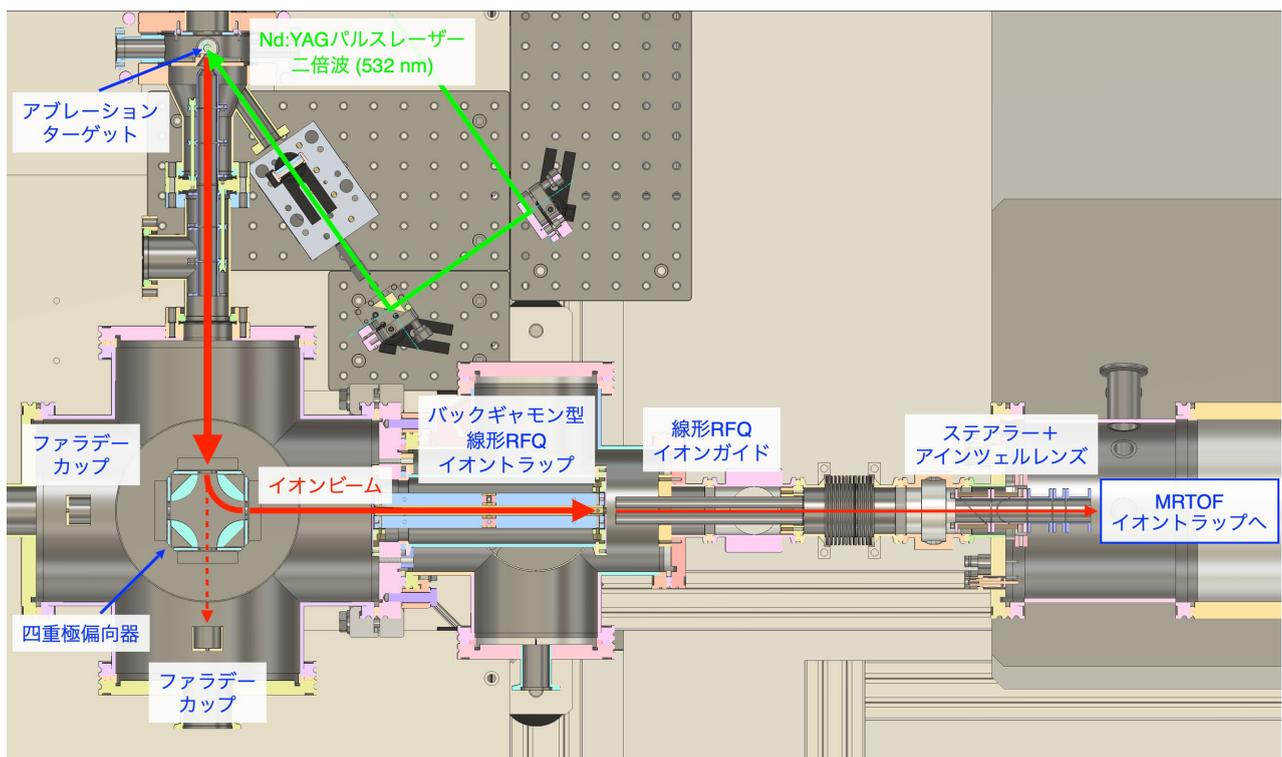
氏名 笹沼 初音 (原子過程科学教室)

原子核の質量は、構成する核子の全結合エネルギーを反映し、原子核の安定性を決定付ける最も重要な物理量の 1 つである。陽子、中性子数が異なる広範囲の核種に対して質量を系統的に評価することは、核構造の進化や安定性の起源を実験的に解明する鍵となる。特に超ウラン元素領域 ($Z > 92$) において、安定性の増大により半減期 100 年以上ともされる原子核の領域「安定の島」の存在が预言されている。安定の島の存在領域や最適な生成核反応の予測精度向上のため、原子核の安定性を直接反映した物理量である質量の当該領域における系統的な精密測定が必須である。

現在、多重反射型飛行時間測定式質量分析器 (Multi-Reflection Time-Of-Flight Mass Spectrograph: MRTOF-MS) を用いた超ウラン核の精密質量測定が進められている。質量決定には質量既知核の参照イオンが不可欠で、高精度・高確度の質量決定のためにはこれらイオンの m/q 差は小さい方が望ましく、したがって同 A/q イオンが理想的である。また、安定の島近傍の核種は生成断面積が極めて小さいため、限られた生成収量の中で複数核種の質量測定を通じて、より詳細な核構造の議論を進めるためには、一核種ごとの測定ではなく、質量数の異なるすべての対象核種を同時に MRTOF に入射、測定する高度な測定法が望まれる。

本研究では、 ^{238}U – ^{294}Og などの超ウラン核種の 2 価イオン ($A/q = 119$ – 147) に対応する同 A/q 質量参照イオンを効率的かつ同時に複数生成するレーザーアブレーションイオン源を開発した。固体の合金ターゲットをレーザーアブレーションすることで、広い質量範囲の質量参照イオンを同時に複数発生させることを確認した。また、イオン源下流のバックギャモン型線形 RFQ イオントラップでは、生成したイオンを捕獲・冷却しつつ、トラップ内の電場勾配によりバンチ化することで、MRTOF への輸送の効率化を図った。

MRTOF に接続したオフラインの質量測定実証実験では、実際に MRTOF を用いて質量参照イオン源で生成したイオンの質量測定に成功した。異なる A/q 質量参照イオンについて効率よくかつ同時に MRTOF へ生成・供給を実現しており、開発した質量参照イオン源の有用性を確認した。



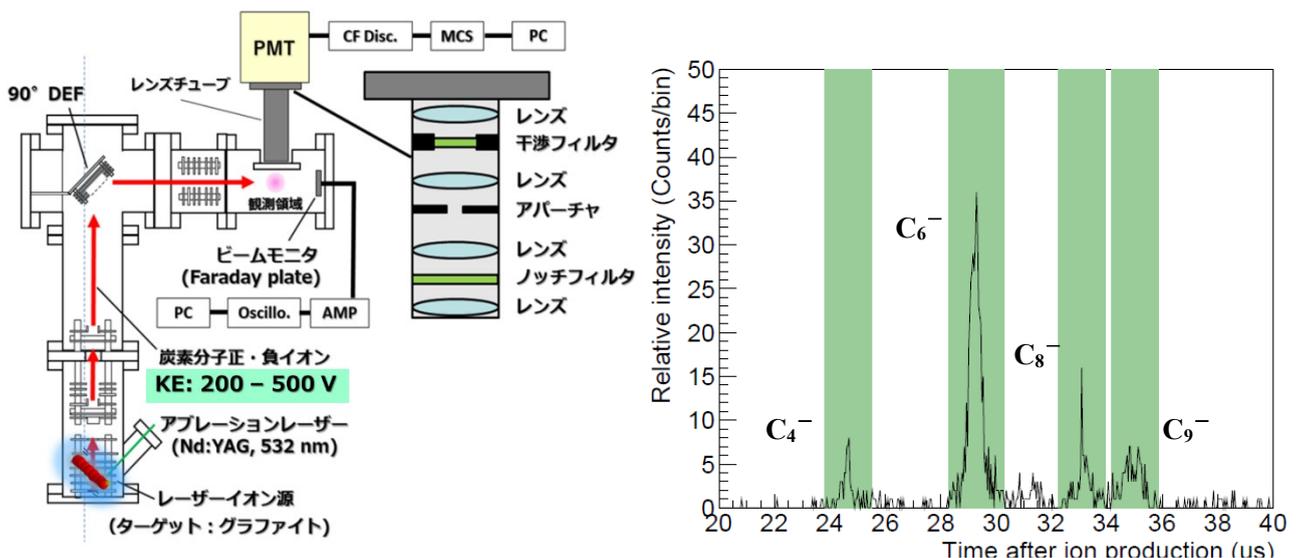
炭素分子負イオンが放つ再帰蛍光の時間減衰測定

氏名 篠原 小雪 (原子過程科学教室)

真空中のような孤立環境において、原子分子衝突などで生成された高温な分子の冷却過程は、宇宙空間での分子合成進化など多くの分野に関係する事象である。主要な冷却過程と考えられてきた振動輻射冷却 (ms-s オーダーの時定数)に加え、近年に反応速度定数が大きい(μs オーダーの時定数)ため分子がより速く冷えて安定化することが可能な再帰蛍光過程が近年に確認された。この過程では、電子励起状態にある分子が高振動励起状態に内部転換した後、高振動励起状態から電子励起状態に逆内部転換し、続けて蛍光を放出することで冷却が進む。これまで炭素鎖分子負イオン C_4^- 、 C_6^- および芳香族炭化水素ナフタレン、アントラセン正イオン ($\text{C}_{10}\text{H}_8^+$ 、 $\text{C}_{14}\text{H}_{10}^+$) から再帰蛍光が直接観測されており、また昨年には我々の研究グループで炭素分子正負イオン約 20 種から再帰蛍光放出が確認され、再帰蛍光は分子一般に起こりうる過程と示唆され再帰蛍光のより詳細な理解が望まれている。

本研究では、レーザーアブレーションイオン源にて生成された高温な炭素分子負イオンが放つ再帰蛍光について、分子種、蛍光波長ごとにその時間減衰を測定した。具体的には、生成イオンに印加する加速電圧を調整してイオン生成から蛍光観測領域に到達するまでの飛行時間 (25-65 μs) を変えながら蛍光強度をインフライト測定し、蛍光の減衰曲線を導出する。観測する蛍光の波長は光検出器 (光電子増倍管, PMT) 直前に設置された干渉フィルター (透過中心波長 600-900 nm) で選別し、イオン強度は観測領域下流に設置したイオンビームモニターにて電流として読み出した。観測した蛍光強度を測定したイオン強度および蛍光観測領域の通過にかかる時間で規格化しイオン生成からの時間ごとに相対的な蛍光強度を求めることで再帰蛍光の減衰を求めた。

得られた再帰蛍光の時間減衰は分子種ごとに違いが見えずどれも似通った減衰が確認された分子種ごとに違いが得られなかったのは、ちょうど観測領域通過中に最も強く蛍光を放つような反応速度定数となる内部エネルギーの分子を選択的に観測したことを意味する また波長ごとにも違いが見えなかったのは同じ内部エネルギーでも様々な電子励起状態に逆内部転換しそれぞれの電子励起準位から対応した波長の再帰蛍光放出したことが原因と考えられる このように一般の蛍光とは大きく異なる再帰蛍光の特徴を本研究で初めて確認することに成功した。



炭素分子負イオン C_{10}^- の構造異性体分離に向けた TIMS の開発

氏名 佐藤 颯太 (原子過程科学教室)

2010年に、宇宙空間で C_{60} フラーレンが発見され、『ぼやけた星間線』や『拡張赤色放射』など、未解明な星間光吸収・輻射反応との関連が示唆されている。また、宇宙空間における C_{60} のような巨大分子の発見は、宇宙空間にてほかにも様々な巨大分子が存在して分子の合成進化シナリオに関わっている可能性が示唆され、星間 C_{60} に多くの注目が集まっている。しかし、宇宙空間における C_{60} フラーレンはその生成過程も未だ明確にわかっていない。現在提唱されている星間フラレン生成過程モデルでは、複数の構造異性体を有する炭素分子負イオンの中でも、直鎖構造とその構造異性体である単環状構造の両方の構造の存在が競合する最小の分子負イオンである C_{10}^- の構造異性化がフラレン生成に重要な寄与を示すことが示唆されている。 C_{10}^- は直鎖構造と単環状構造の間で異性化障壁が高い一方、生成直後は高い内部エネルギーを有した高励起状態にあり、その後内部エネルギーは振動輻射や再帰蛍光放出によって散逸されてゆく。各構造間の異性化は冷却過程によって決まるため、構造ごとの冷却過程を明らかにすることで構造異性化について理解が深まると考えられる。

本研究では、 C_{10}^- の星間空間における冷却過程や生成効率など、構造異性体間の性質差異を調査することを目標に直鎖構造と単環状構造の分離を目指す。イオン源での生成収量が少ない C_{10}^- を効率よく分離し測定系へと供給するため、イオンを蓄積しながら構造異性体分離が可能なトラップ型イオン移動能法 (Trapped Ion Mobility Spectrometry : TIMS) に着目した。TIMS はガス流と対向する電場勾配を利用して、衝突断面積が異なるイオン種ごとに異なる位置にトラップする装置である。TIMS の性能評価用のイオン源には、簡便かつ多くのイオンを生成可能なエレクトロスプレーイオン化 (ElectroSpray Ionization : ESI) 法を採用し、実験を行った。

まず実際に TIMS の設計・製作を行い、同時にイオン光学設計ソフト SIMION によるイオン光学シミュレーションを行い、TIMS 内におけるイオン輸送、衝突断面積ごとのイオン種分離の実現可能性を検討した。TIMS 設計・製作に関しては構造分離に成功している先行研究と同じ実験条件を達成した。また、シミュレーションでは開発した装置の実験条件でイオン種ごと TIMS 内の異なる位置に蓄積されることを確認した。ESI 源を用いてのエタノール正イオンを TIMS 内に導入し、ガス流で TIMS 下流にイオン輸送が成されていること、さらに TIMS への電場印加でイオン輸送を止められることが確認された。異性体分離に向けて TIMS 装置の製作に成功したと言える。

