



東邦大学

2024 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

2025年2月19日(水)

カゴメ格子およびパイロクロア格子構造を持つ異方的磁性体におけるトポロジカル相

青柳 克 (物性理論教室)

量子もつれによって生じる物性を理解するためのトポロジカル物質の研究が近年精力的に行われている。本研究は、カゴメ格子およびパイロクロア格子上の XXZ 模型に現れる、多者間もつれによって生じるトポロジカル相に関する数値的研究である。

異方性をもつカゴメ格子上のスピン 1/2 XXZ 模型において、3 量子ビットの W 状態の積状態を形成するような対称性の破れを伴わない量子相が現れることが示されており [1]、この相を $2\pi/3$ に量子化するベリー一位相によって特徴づけられることが議論されていた [2]。本研究では量子モンテカルロ法を用いて 3888 スピンまでの大規模な系における量子化ベリー一位相を計算し、W 相が $2\pi/3$ の量子化ベリー一位相によって特徴づけられることを示し、さらに他の相でもそれぞれ特有の結果が得られ、相境界が定量的に再現されることを示すことにも成功した (図 1)。また、3 量子ビット W 相において系のエッジに現れる特徴的な磁性について議論し、エッジ付近に W 相特有の磁性が形成されることを見いだした [3]。

異方性をもつパイロクロア格子上のスピン 1/2 XXZ 模型では、対称性の破れを伴わない 2 つの相、八極子常磁性相 [4,5] および 4 量子ビット W 相が存在し、本研究ではこれら 2 つの相のトポロジカルな性質を調べた。まず、これらのトポロジカル相がエネルギーギャップをもち、XY 面内強磁性相に隣接しているという推測に基づき、量子モンテカルロ法を用いて 32000 スピンまでの系のスピンスティフネスを計算し、スケール解析により相図を得ることでその推測が正しいことを示した。また、これらのトポロジカル相を特徴づけるために系の対称性に基づいて 2 種類の量子化ベリー一位相を導入し、量子モンテカルロ法によって計算することで、2 つのトポロジカル相がこれらの量子化ベリー一位相によって特徴づけられることを示した。さらに、開いた境界条件の系を議論し、その表面における磁性を調べることで高次トポロジカル相が存在することを示し (図 2)、その表面状態およびエッジ状態が、表面およびエッジで定義される量子化ベリー一位相によって特徴づけられることも示した。

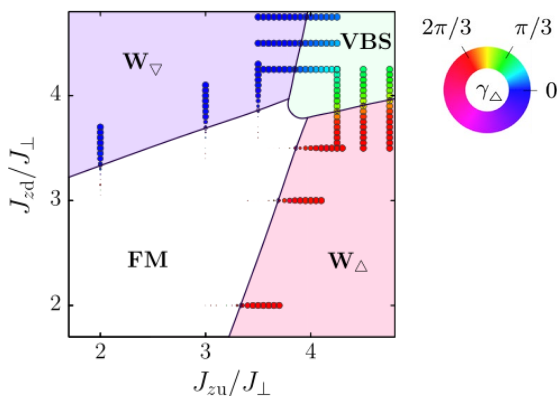


図 1: カゴメ格子 XXZ 模型の相図と量子化ベリー一位相 γ_Δ 。プロットの円が小さいほど誤差が大きい。VBS はバレンスボンド固体相、FM は x - y 面内の強磁性相を表す。

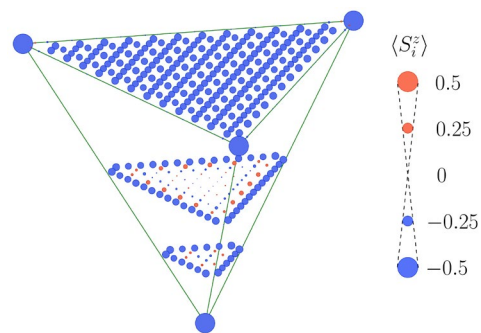


図 2: 四面体上の開いた境界条件をもつパイロクロア格子 XXZ 模型における高次トポロジカル相。各サイト i におけるスピンの z 成分 $\langle S_i^z \rangle$ が、系の内部、表面、辺、角それぞれ特徴的な値を示している。

- [1] J. Carrasquilla, G. Chen, and R. G. Melko, Phys. Rev. B 96, 054405 (2017).
 [2] T. Kawarabayashi, K. Ishii, and Y. Hatsugai, J. Phys. Soc. Jpn. 88, 045001 (2019).
 [3] K. Aoyagi, K. Ishii, Y. Hatsugai, and T. Kawarabayashi, J. Phys. Soc. Jpn. 93, 064703 (2024).
 [4] J. G. Rau, et al., Phys. Rev. Lett. 116, 257204 (2016).
 [5] L. Savary, et al., Phys. Rev. B 94, 075146 (2016).

重力波を用いたスカラーテンソル理論の検証

浅川 直道（宇宙物理学教室）

一般相対性理論はこれまで多くの実験をクリアしており、弱重力場においては綻びが見つかっていない、現在における重力場の標準理論である。しかし、一般相対性理論の枠組みで宇宙の加速膨張を説明するにはダークエネルギーを導入しなければならないことや、一般相対性理論は繰り込みができず重力場を量子化することができないといった、観測と理論的両面の問題点が存在する。これらの問題点の解決に向けて一般相対性理論を拡張した多くの修正重力理論が考案されている。

修正重力理論の一つとしてスカラーテンソル理論がある。スカラーテンソル理論は、そのラグランジアンがスカラー場と重力場の非最小結合項を含む理論である。スカラー場が宇宙の加速膨張を引き起こせることや、繰り込み可能な重力理論である超弦理論のラグランジアンが低エネルギー極限で重力場と非最小結合したスカラー場を伴うことから、一般相対性理論の拡張として有望な理論の一つである。

修正重力理論の有力な検証方法の一つとして重力波観測が挙げられる。スカラーテンソル理論ではスカラーモードの重力波が放射されるため、スカラーモードの重力波が観測されれば強重力場における一般相対性理論の綻びの証拠となるだけでなく、その解析からスカラーテンソル理論の種類を区別することが可能である。スカラーモードの重力波の検出には重力波検出器が 4 台必要となるが、現在稼働中の Advanced-LIGO と Advanced-VIRGO、KAGRA に加えて、LIGO-India が 2030 年代から観測に参加することが期待されるため、近い将来にスカラー重力波を検出できる環境になると期待される。

以上の背景を鑑みて、本論文ではスカラーテンソル理論において放射されるスカラーモードの重力波に対する 2 つの数値的研究を行った。1 つ目はポテンシャルが質量項と自己相互作用項で与えられる場合に、大質量星の重力崩壊で放射されるスカラーモードの重力波放射シミュレーションである。系統的な解析の結果、観測されるスカラーモードの重力波スペクトル密度の傾きから、スカラー場の自己相互作用の種類に対して制限がかけられることが得られた(図 1 参照)。

2 つ目はトポロジカル中性子星と呼ばれる、複数のスカラー場を含むスカラーテンソル理論において存在できる新たな中性子星の振動によって放射されるスカラーモードの重力波計算である。トポロジカル中性子星からはパラメータによらず大振幅のスカラーモードの重力波が放射され、そのような大振幅の重力波の検出は複数のスカラー場の存在の証拠となる可能性があることが分かった。

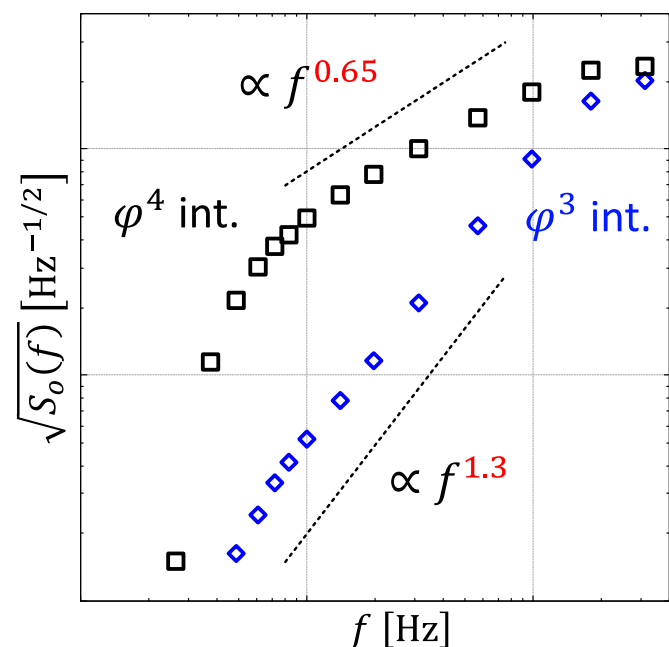


図 1：スカラー場の 3 乗と 4 乗に比例する自己相互作用項を含む場合のスカラーテンソル理論における大質量星の重力崩壊で放射されるスカラーモードの重力波のスペクトル密度。3 乗と 4 乗相互作用ではスペクトル密度のベキが約 2 倍異なる。

宇宙マイクロ波背景放射の散乱光を用いた 3 次元固有速度の測定方法

佐久間 遥己（宇宙物理学教室）

宇宙に存在する天体は様々な方向に固有運動しているが、我々が 3 次元固有速度を直接的に得るのは難しい。視線成分に関しては、赤方偏移と距離が測定できれば導けるが、天球面上における横向き速度成分を赤方偏移から得ることは実質的に不可能である。横向き速度成分を得ることができれば、銀河系外天体の 3 次元固有速度がわかる。この 3 次元固有速度を生み出すのは大域的な物質密度場であり、これは直接的にはダークマター分布、間接的にはダークエネルギーの性質にも結びついている。

そこで本研究では、固有運動する天体中の電子が宇宙マイクロ波背景放射（CMB）を逆コンプトン散乱した際に生じる散乱光の放射強度スペクトル（ストークスパラメータの I ）、および偏光（ストークスパラメータの Q, U ）に着目し、これらを用いた天体の 3 次元固有速度の測定方法を二段階で考察した。まず散乱光の放射強度には、相対論的な横ドップラー効果に類似した高次の効果として、速度の向きに依存したスペクトル形状の変化が生じる。その周波数依存性から、天体の速度の向きについての情報が得られると考えた。次に、散乱前の CMB に温度四重極子モーメントが存在する場合、散乱光に直線偏光が生じる。天体中の電子が等方的な CMB に対して運動している場合、電子の静止系においては四重極子モーメントが生じるため、それによる偏光から天体の視線方向に対する横向き速度の測定ができると考えられる。

放射強度スペクトルに関しては、相対論的な効果を考慮しつつ放射強度スペクトルの定式化を行った。この結果、散乱光のスペクトルの振幅と形を組み合わせることによって速さと方向余弦をそれぞれ測定できることが、原理的には可能になるとわかった。

さらに、方向を特定するために偏光が利用できる。CMB そのものには、もともと微小な四重極子モーメントが存在するので、観測する偏光は (a) 天体の位置での本来の CMB 四重極子モーメント、(b) 固有運動する天体中の電子静止系において生じる見かけ上の CMB 四重極子モーメントによる偏光、の重ね合わせである。速度の情報は (b) から得られるため、(a)(b) を分離する必要がある。そこで (a)(b) に対する両者のジョーンズベクトルの天球面上における方向依存性、および偏光度の周波数依存性を調べ、分離の方法を考察した。分離の結果、(a) がわかればコズミックバリエーションの課題が克服され、四重極子モーメントの測定の精度が向上することが期待される。それに加えて、様々な赤方偏移での四重極子モーメントが観測できれば、その時間進化の情報を得られる可能性がある。また、(b) からは視線方向に対する横向き速度が得られる。このようにして、放射強度スペクトルから速度の方向余弦とその大きさ、偏光から横向き速度が得られ、これらを組み合わせることで 3 次元固有速度の測定が可能になると期待される。

Kerr ブラックホール周りにおけるペンローズ過程の数値的解析

千秋 郁人 (宇宙物理学教室)

ブラックホールは非常に強い重力を持つ天体であり、ブラックホール周りの重力場では一般相対性理論による記述が必要になる。ブラックホールを特徴づける要素に、質量、角運動量、電荷があり、質量と角運動量を持つものを Kerr ブラックホールと呼ぶ。Kerr ブラックホールは回転の影響により、周囲の慣性系を回転方向に引きずる効果があり、特に引きずりが強い領域をエルゴ領域と呼ぶ。エルゴ領域で起こる現象の一つにペンローズ過程がある。ペンローズ過程とは、エルゴ領域に突入した物体-0 を物体-1、物体-2 の 2 つに分裂させ、物体-2 をブラックホールに落下、物体-1 を回収すると、物体-1 が持つエネルギーが物体-0 のエネルギーよりも大きくなるという一連の過程である。

ペンローズ過程によるエネルギーの取り出しは、エルゴ領域において常に実現できるわけではなく、ブラックホールの回転パラメータ a 、物体-0、物体-1、物体-2 の軌道角運動量 L_0 、 L_1 、 L_2 、分裂させる半径 r 等に依存する。本研究では、これらのパラメータを変化させて物体-0 のエネルギー E_0 と物体-1 のエネルギー E_1 との関係を調べ、ペンローズ過程が実現する $E_1 > E_0$ となる条件を数値計算により定量的に調べた。

例えば、 $L_0 = 0$ とし、分裂時の物体-1 の動径方向の速度 v を固定した場合、ブラックホールの回転パラメータ a 、分裂させる物体-1 の軌道角運動量 L_1 はそれぞれ大きいほどペンローズ過程が実現されやすいことが分かった。また、 L_1 を固定した場合、ペンローズ過程を実現させる a には下限値が存在することを定量的に明らかにした。一方、 a を固定した場合には、ペンローズ過程を実現させる L_1 には下限値が存在することも分かった。

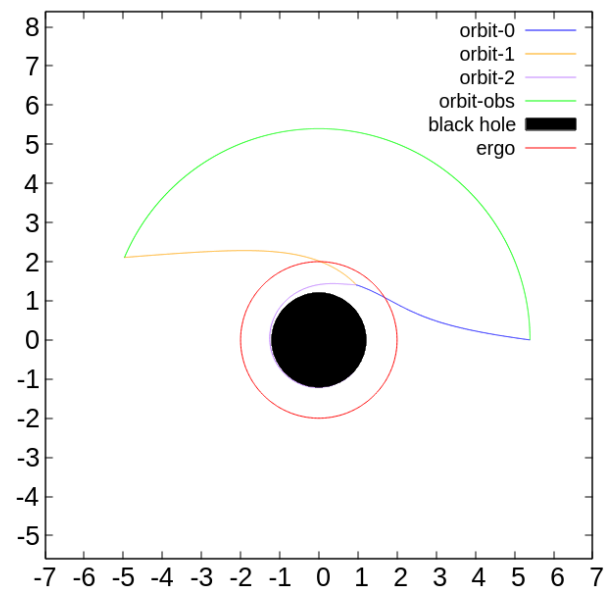


図 1 : ペンローズ過程の粒子の軌道
 $a = 0.98, L_0 = 0, L_1 = 1, L_2 = -1$

変形された Su-Schrieffer-Heeger 模型におけるトポロジカル励起の研究

金丸 将之 (物性理論教室)

トポロジカル物質の中には、対称性に護られたトポロジカル状態を持つ物質が存在する。例として、カイラル対称性をもち、端が存在する 1 次元の Su-Schrieffer-Heeger (SSH) 模型においては、ゼロエネルギーの固有値をもつエッジ状態が見られる。この模型を代数的に変形することで、従来のカイラル対称性が破れ、一般化カイラル対称性を保存する模型が得られる。そうした系での「バルク・エッジ対応」やエッジ状態の安定性については文献[1,2]より調べられている。本研究では、エッジ状態と同様に、ゼロエネルギー固有状態として現れるトポロジカル励起の一種であるソリトン解が、一般化カイラル対称性を満たす系ではどのように振る舞うのか、また、その系における時間発展についても数値計算を行った。

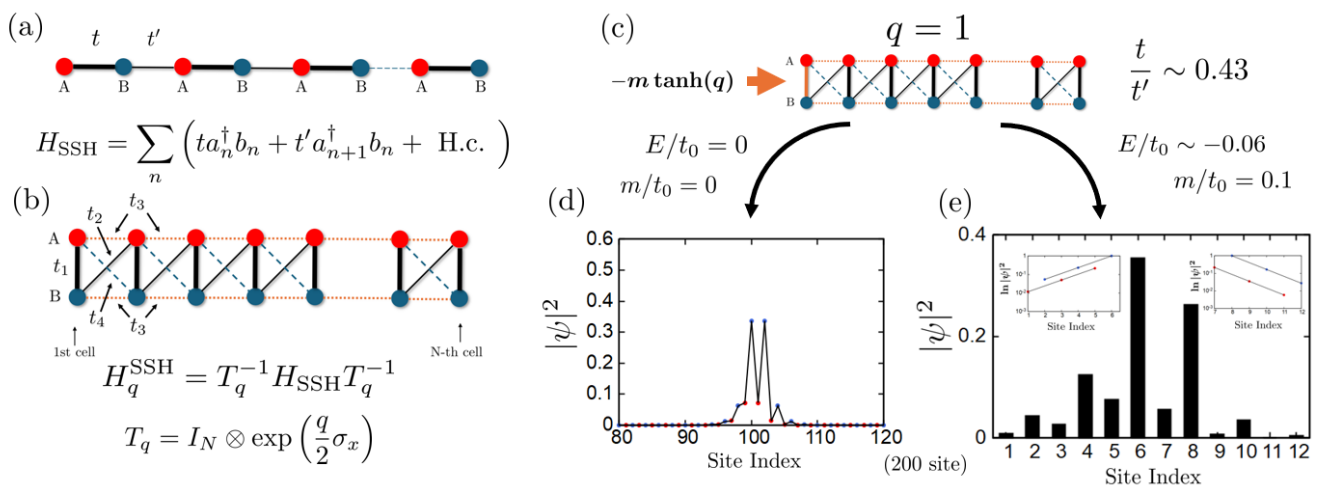
具体的な計算方法として、ソリトン解が存在する SSH 模型のハミルトニアンに対して一般化カイラル対称性を満たすように変形を行い、スタaggerドポテンシャルが存在する系での安定性や小さな系での振る舞いを調べる際には、数値的厳密対角化法を用いた。また、電子格子相互作用が存在する系では反復法を、電場を印加した際の変形した系での時間発展では、文献[3]をもとに反復法と厳密対角化法を合わせて用いた。

結果として、変形を行った系では、ソリトン解は方向によって異なる指数関数的な減衰をしていることが分かった。また、スタaggerドポテンシャルがある値を超えると、波動関数が局在しなくなり、ソリトン解が形成されないことが分かった。小さな系でも、無限系と同様の局在長をもつ非対称なソリトン解をエッジ状態の議論[2]をもとに厳密な固有状態として再現することができた。電子格子相互作用をもつ系では、電子数が半充填からさらに 2 つ多い場合を考え、変形前は 2 つの分離されたソリトン解が安定となるのに対し、変形された系では 2 つのソリトン解が合体しバイポーラロンとなるときにエネルギー的に安定となることを示した。また、変形された SSH 模型における波動関数の時間発展を計算するための自己無撞着方程式を導出し、この式を用いて、電場を印加した際のバイポーラロンの動的な振る舞いを数値計算によって定量的に調べた。

[1] Tohru Kawarabayashi and Yasuhiro Hatsugai, Phys. Rev. B **103**, 205306 (2021).

[2] Tohru Kawarabayashi and Yasuhiro Hatsugai, JPS Conf. Proc. **38**, 011173 (2023).

[3] Yoshiyuki Ono and Akira Terai, J. Phys. Soc. Jpn. **59**, 2893 (1990).



(a) SSH模型。(b) 代数的変形を施したSSH模型。 q は変形の強さ、 σ_x はパウリ行列の x 成分を表す。(c) 境界でのホッピングを調節した (b) の系。(d) (c) の200 siteの系での0エネルギー固有状態であるソリトン解。(e) (c) の12 siteの系で質量項を導入したときのソリトン解。左右で異なる指数関数的な減衰をしている。ここで、 $t_0 = (t + t')/2$ であり、ホッピング積分の平均値を表す。

磁性多層膜における温度勾配下で励起されるスピン波に関する数値的研究

庄子瑛章 (物性理論教室)

エレクトロニクスとマグネティクスとの融合分野であるスピントロニクスにおいて、スピン流と熱流の相互作用が注目され、スピントロニクスと呼ばれている。中でも、スピン流と熱流の相関を扱うスピントロニクスと呼ばれている。スピントロニクス分野では、温度勾配下の強磁性体に対して、熱流と垂直方向に電圧が生じる異常ネルンスト効果に注目が集まっており、磁性体由来の横型熱電効果として研究がおこなわれている。[1]磁性体中の熱電効果では、通常の電子系の温度勾配方向の熱起電力である Seebeck 効果に加えて、スピン波によって伝導電子が運ばれ、温度勾配方向の起電力を生む効果である (マグノンドラッグ効果) も重要な役割を果たしており、実験と理論の両面から調べられている。[2, 3] 電子系の熱起電力を増強する方法はバンドエンジニアリングなどによって提案されているが、マグノンドラッグ効果を増強する方法については明らかになっていない。

本研究では、このマグノンドラッグ効果を増強する系として、GMR で用いられている系として知られている磁性多層膜に注目した。[4]磁性多層膜の層間結合によるマグノン-マグノン散乱により、強磁性層中の指向性スピン波に現れる影響について数値的な解析を行った。計算によって、強磁性体に温度勾配を印加することで勾配方向に進行するスピン波の振幅の増大を確認した。また、磁性多層膜の層間結合によってスピン波バンドの分裂が起こった。(図 1)磁性多層膜の層間に反強磁性結合があるときに、指向性スピン波が増強され、マグノンドラッグ効果がより大きくなることが明らかになった。(図 2)これは反強磁性結合によるスピン波振幅の増大を意味しているものであった。また、異なる磁性材料を用いた多層膜において、磁性層間に反強磁性結合があるときは、下層の強磁性体の交換相互作用が弱いほど上層でのマグノンドラッグ効果が大きくなることが明らかとなった。一方、磁性層間に強磁性結合があるときは、下層内の強磁性交換相互作用が強いほど上層でのマグノンドラッグ効果が大きくなることが明らかとなった。

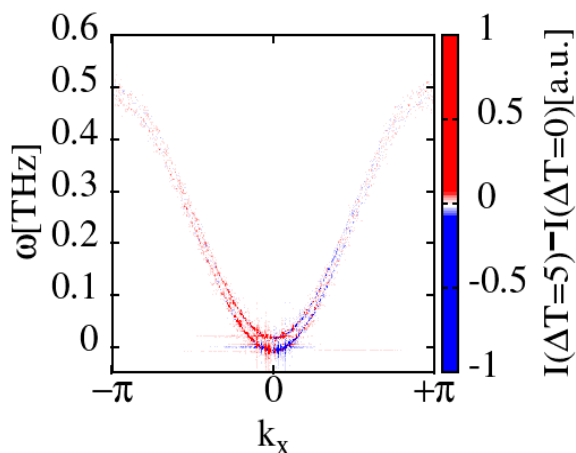
したがって、磁性多層膜を用いることで、指向性スピン波を増大できることから、マグノンドラッグ効果を増強しうることが明らかとなった。

[1] W. Nernst. *Ann. Phys.*, **267**, 760(1887).

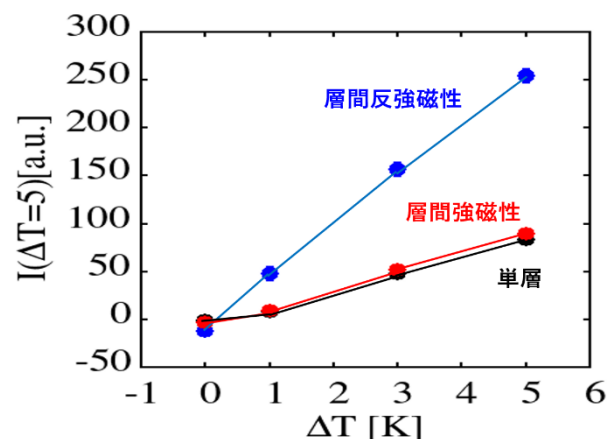
[2] F. J. Blatt, D. J. Flood, V. Rowe, P. A. Schroeder, and J. E. Cox. *Phys. Rev. Lett.*, **18**, 395 (1967).

[3] T. Yamaguchi, H. Kohno, and R. A. Duine. *Phys. Rev. B*, **99**, 094425 (2019).

[4] P. Grunberg, R. Schreiber, Y. Pang, M. B. Brodsky, and H. Sowers. *Phys. Rev. Lett.*, **57**, 2442 (1986).



(図 1)磁性多層膜におけるスピン波バンド



(図 2)層間相互作用の違いにおける温度勾配と指向性スピン波の関係

円偏光照射によるフラストレート磁性体中の単一スカーミオンのトポロジカル量制御

米澤拓磨 (物性理論教室)

本研究では、円偏光を用いたフラストレート磁性体中の磁気スカーミオン構造のトポロジカル量制御に対する数値解析を行った。先行研究[1]の課題であった、単体のスカーミオンのトポロジカルチャージ制御と制御に必要な条件を明らかにすることを研究目的としている。最近接および次近接相互作用を考慮した磁気フラストレーション系を用い、単一スカーミオンを生成した。スカーミオン構造に対する円偏光照射によるトポロジカル逆ファラデー効果 (TIFE) の影響を調べ、円偏光の強度と照射時間においてトポロジカルチャージが反転しやすい条件を示した。また、スカーミオンの反転確率の温度依存性を解析し、トポロジカルチャージが反転する可能性の高い温度域と磁化構造が崩れやすい温度領域を特定した。これらの結果は、スカーミオンを用いたデバイス設計や応用において、トポロジカルチャージ制御の条件を理解するために重要である。

[1] M. Miyata, J. Ohe, and G. Tatara, *Physical Review Applied* **18**, 014075 (2022).

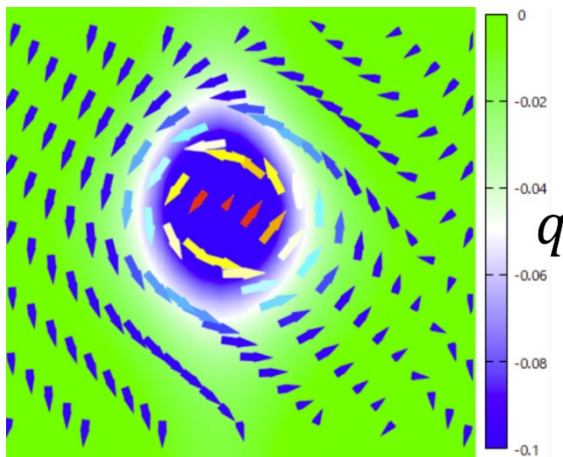


図 1: フラストレート系において生成されたスカーミオンのカラープロット。矢印は磁化ベクトルを表しており、カラーマップはスカラーカイラリティの大きさを示したものの。

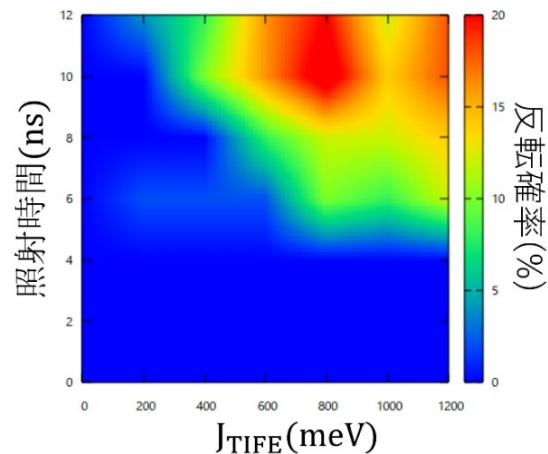


図 2: 単体の磁気スカーミオンに対して円偏光を照射し、トポロジカル逆ファラデー効果 (TIFE) によるトポロジカルチャージが反転した領域を図示した。縦軸は円偏光の照射時間、横軸は円偏光によって加えられたエネルギーである。

双方向動作型デュアルコムファイバレーザを用いた長波長赤外光コムの発生と最適化

窪田 光佑 (量子エレクトロニクス教室)

従来の長波長赤外 (LWIR) 分光法では、インコヒーレントな熱光源を用いたフーリエ変換分光法 (FTS) が主に用いられている。しかし、熱光源を用いることで、集光能力や長距離伝播特性、分光感度が制限される。また、移動ステージを用いるため、スペクトル分解能と測定時間の間にトレードオフの関係が生じる。そのため、LWIR 領域でより高度な分光を実現するには、FTS を超える分光技術が求められる。

そこで、我々は 2 台の光周波数コムを用いたデュアルコム分光法¹⁾に着目した。デュアルコム分光法は、短いデータ取得時間で広帯域・高精度な分光測定を可能とするため、近年注目されている分光手法である。特に、帯域幅・分解能・取得時間・分光感度の点で FTS より優れている。一方で、2 台の光コムを発生させる光源システムと周波数安定化制御系が必要となるため、システム全体が大型・複雑になりやすい。この課題を解決するために、我々はリング型共振器のファイバレーザを用い、時計回り (CW) と反時計回り (CCW) の双方向においてモード同期動作を同時に行うことで、2 台の光コムを同時に発生させる双方向動作型デュアルコムファイバレーザ²⁾の開発を進めている。

本研究では、双方向動作型デュアルコムファイバレーザを用いた LWIR 領域でのデュアルコム分光システムの開発を目指し、LWIR 光コムの発生を試みた。Fig. 1(a)は、デュアルコムファイバレーザを用いた LWIR 光コム発生システムの概略図である。双方向動作型デュアルコムファイバレーザの出力に対し、エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) による光増幅を行い、高非線形ファイバ (HNLF) を用いて広帯域化した後、非線形光学結晶を用いた差周波発生 (DFG) により LWIR 光コムの発生を試みた。EDFA では、チャープパルス増幅 (CPA) と非線形増幅³⁾の 2 手法を試した。CPA では、EDFA の前に分散補償ファイバ (DCF) を接続し、光コムに相当する光パルスの時間幅を数 10 ps に伸長した状態で EDFA に入射した。これにより、EDFA 内での非線形光学効果を抑制することが可能となり、その結果、最大出力 238 mW で、ペDESTALフリーでのパルス幅約 200 fs (Sech² 近似) の光パルスを得た。この光パルスを用いて HNLF によるスペクトル広帯域化を試みたが、6~12 μm の LWIR 光コムを発生させるために必要な広帯域光コムの生成には至らなかった。次に、DCF を取り外し、EDFA に入射するパルスの時間幅を 100 fs 程度に整形し、EDFA を非線形増幅³⁾で動作させた。その結果、最大出力 547 mW でパルス幅 43 fs (Sech² 近似) の光パルスを得た。この光パルスを基に HNLF を用い広帯域化を行った結果、1.4~1.7 μm の広帯域光コムの生成に成功した。さらに、非線形光学結晶として Orientation-patterned リン化ガリウム結晶 (OP-GaP) を用いて、DFG による LWIR コムの発生を試みた。Fig. 1(b)に LWIR 光コムの光スペクトルを示す。測定条件を調整することで、5~12 μm の LWIR 光コムの発生に成功した。Fig. 1(c)は、MCT 光検出器により検出した LWIR 光コムの RF スペクトルであり、光コムを形成していることを確認した。

- 1) I. Coddington, et al., *Optica* **3**, 414-426 (2016).
- 2) Y. Nakajima, et al., *Optics Express* **27**, 5931-5944 (2019).
- 3) J. Takayanagi, et al., *Optics Express* **16**, 12859-12865 (2008).

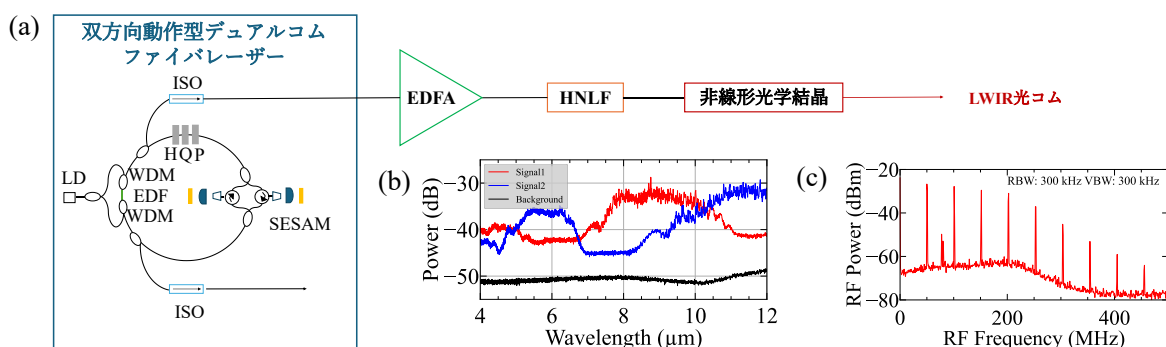


Fig. 1 (a) Experimental setup of bi-directional dual-comb fiber laser and LWIR comb generation system. (b) Optical spectra and (c) RF spectrum of OP-GaP output.

フリーランニングデュアルコムファイバレーザを用いたデジタル信号補正による高感度分光手法の開発

内山 竜成 (量子エレクトロニクス教室)

デュアルコム分光法は、繰り返し周波数 (f_{rep}) がわずかに異なる 2 台の光周波数コムを用いることで実現するフーリエ分光法であり、広帯域・高分解能の分光情報を高速で取得可能である¹⁾。しかし、2 台の光周波数コムを高精度に安定化する必要があるため、システムが複雑かつ大掛かりになる。この課題に対し我々は、デュアルコムファイバレーザの開発を進めており、2 台のレーザ共振器を一体化または密接に配置することで、環境外乱を共有し、受動的に高い相対安定性を実現している^{2,3)}。これにより、複雑な制御系を不要とし、小型・簡便・低コストなデュアルコム分光システムの実現が可能となる。

本研究では、フリーランニングデュアルコムファイバレーザを用いて取得したデュアルコム分光の結果に対して、デジタル信号補正による高感度分光手法の開発を行った。デュアルコムファイバレーザは周波数安定化を行っていないため、残留非共通ノイズの影響で 2 台の光コム干渉波形 (インターフェログラム) およびスペクトル位置が 1 回の測定ごとに変動する。そのため、補正処理なしに積算を行うと吸収信号が潰れて SN 比が悪化する。そこで、周波数領域で 1 回の測定ごとのスペクトル位置変動を検出・補正し、スペクトル位置を揃えた後に積算することで、高感度な信号の取得を実現した。

Fig. 1(a) に示すのは、本研究で用いた双方向動作型デュアルコムファイバレーザ²⁾の構成であり、単一レーザ共振器の時計回り (CW) と反時計回り (CCW) の両方向から光コムを同時に出力し、高い相対安定性を実現している。Fig. 1(b) に示すのは、レーザからの出力光スペクトルであり、帯域幅 55 nm 以上の広帯域スペクトルを有していることが分かる。Fig. 1(c) に示すのはデュアルコム分光の構成であり、2 つの出力をカップラを用いて同一光路上に合波した後、HCN ガスセルとバンドパスフィルタ (BPF) を透過し、受光器とディジタルイザを用いて干渉信号を取得した。BPF は中心波長 1545 nm、帯域幅 40 nm であり、測定可能帯域幅を考慮して Δf_{rep} を 144 Hz に設定した。Fig. 1(d) に示すのは、積算回数 2500 回 (取得時間 17.4 秒) で取得した HCN ガスの透過率スペクトルであり、NIST データベースと良く一致している。これにより、フリーランニングデュアルコムファイバレーザを用いて 1525-1565 nm の広帯域にわたる HCN ガス吸収線の高感度一括取得に成功した。

- 1) I. Coddington, N. Newbury, and W. Swann, *Optica* **3**(4), 414-426 (2016).
- 2) Y. Nakajima, Y. Hata, and K. Minoshima, *Optics Express* **27**(5), 5931-5944 (2019).
- 3) T. Yumoto, W. Kokuyama, S. Matsubara, T. Yasui, and Y. Nakajima, *Opt. Contin.* **2**(8), 1867-1874 (2023).

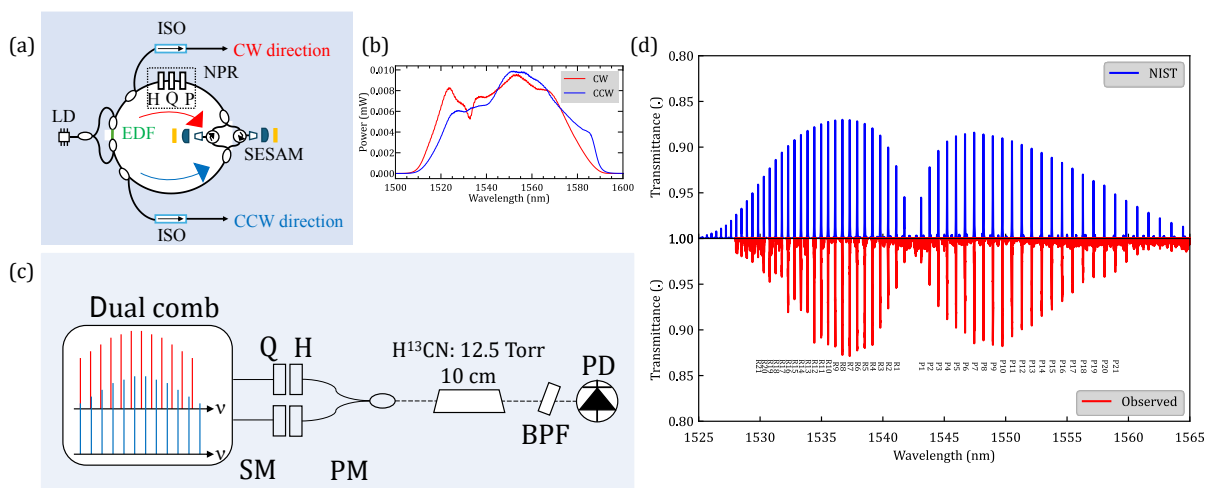


Fig. 1(a) Oscillator configuration and (b) acquired optical spectra. (c) Dual comb spectroscopy configuration and (d) acquired transmittance spectrum.

三方晶 PtBi₂ の輸送特性における化学置換効果

織田百合奈（磁気物性学教室）

遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)は、ファンデルワールス結合した層状化合物であり、バルク試料においては密度波秩序状態と超伝導との共存や非自明なトポロジーを持つ電子状態、バレー自由度の物理といった多様な物性を示すことが知られている。また、単層試料や自然超格子系においては局所的な空間反転対称性の破れにより、非従来型の超伝導が発現する事が明らかになっており、その物理の解明やデバイスへの応用が期待されている。しかし、後者については試料の単層化に伴う、試料の劣化や、空間反転対称性の破れがマクロな物性に反映され得る自然超格子系の例がまだ少ないといった材料の難点からの問題がある。

本研究で対象とする三方晶 PtBi₂ は、TMD がとる構造の一つである 1T 型と類似した構造をとる。極性が発現する様に歪んでおり、大域的な空間反転対称性が破れた構造となっている[1]。さらに、電子バンド計算からフェルミ準位近傍にワイル点や三重縮退点を有するトポロジカルに非自明な電子状態を持つことが知られているが、これらの非自明なトポロジーにより生じる物性については未解明である。PtBi₂ 薄片状デバイスでは二次元超伝導に特有な Berezinskii–Kosterlitz–Thouless 転移が観測されている事[2]、Rh 置換により超伝導転移温度が上昇する事[3]が明らかになっているが、その詳細な置換依存性や超伝導と非自明なトポロジーの相関については明らかになっていない。そこで、三方晶 PtBi₂ における超伝導特性の解明及び三重縮退点に起因する物性の解明を目的とし、化学置換効果によるキャリア制御した単結晶育成と、磁場下における熱力学量及び輸送係数の測定を行った。

本研究で育成した三方晶 PtBi₂ 単結晶試料は磁化及び電気抵抗率に明瞭な量子振動を示すとともに、 $T \sim 1$ K 付近に超伝導転移のオンセットと考えられる電気抵抗率の減少が観測され、過去の報告と同様に高移動度の超伝導体であることが分かった。これに対し、ホールドープを狙い Pt サイトを Rh 及び Ir で置換した系においては、下図の $x = 0.15$ が示すように置換に伴い超伝導転移のオンセット及び $\rho(T) \sim 0$ となる超伝導転移温度の上昇が見られたが、同時に著しい移動度の低下も観測された。更に置換量を増やすと、構造の不連続な変化及びキャリアの符号変化を伴い、超伝導転移温度が上昇していくが、 $x = 0.3$ では相分離によるものと考ええ、 $T_{c1} \sim 3$ K と $T_{c2} \sim 1.6$ K の二段階の転移を示した。また、同じ仕込み量での電子輸送特性の比較から Ir 置換の方が Rh 置換よりも仕込み量に対する置換効果が大きいことも分かった。さらに、電子ドープを狙った(Pt,Au)Bi₂ では Au 置換量に伴い量子振動及び輸送特性に系統的な変化が見られたがリフシツ遷移や非自明なトポロジーに起因する輸送特性の特徴は観測されなかった。

これらの結果から空間反転対称性の破れた三方晶 PtBi₂ において、その結晶構造及び電子構造を保ちながら化学置換によりキャリアの制御できる範囲は限定的であり、特にホールドープでは乱れの効果が顕著に表れてしまうことが明らかとなった。

参考文献

- [1] M. Kaiser et al., *Z. Anorg. Chem.* **640**, 2742 (2014)
 [2] A. Veyrat et al., *Nano Lett.* **23**, 1229 (2023)
 [3] G. Shipunov et al., *Phys. Rev. Mater.* **4**, 124202 (2020).

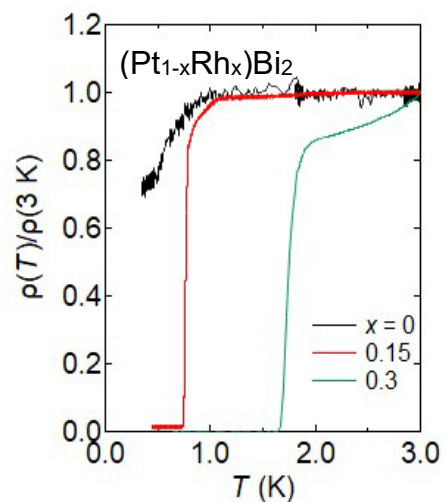


図 Pt_{1-x}Rh_xBi₂ における超伝導転移の Rh 依存性

正方格子を有する磁性トポロジカル半金属 $R\text{AgSb}_2$ ($R = \text{希土類}$) の輸送特性

日下部 颯也 (磁気物性学教室)

正方格子は結晶対称性に護られたバンドの交差を持ち得る典型的な格子の1つである。正方晶 HfCuSi_2 型構造を持つ $R\text{AgSb}_2$ ($R = \text{希土類}$) は、この様な(副)格子を Sb が形成している。更に、本物質系は希土類サイトを有している事で、適切な元素選択により強磁性、反強磁性、磁化プラトー状態を含む磁場誘起相転移といった多彩な磁気秩序を示す事が知られており[1]、電子状態の非自明なトポロジーと磁性の相関を調べる上で理想的な系である。本研究では、金属フラックス法により $R\text{AgSb}_2$ ($R = \text{Nd, Gd, Dy, Ho}$) 単結晶の育成を行い、特に育成した DyAgSb_2 単結晶を用いた、磁化測定及び磁場下における輸送係数の測定を行った。

本研究で育成した DyAgSb_2 単結晶も、過去の報告[1]と同様に反強磁性転移温度 $T_N = 9.7 \text{ K}$ において磁化率におけるカスプと、電気抵抗率 ρ_{xx} の急峻な減少といった特徴を示した(図1)。また、磁場を(001)面内方向に印加すると、印加磁場の大きさに対して磁化が階段状に変化する磁化プラトー状態が観測されるとともに、磁化プラトー状態間の遷移において電気抵抗率とホール抵抗率の大きさが顕著に増大することが分かった(図2)。これらの振舞は伝導電子のスピンの自由度によって電子が散乱されることを示唆している。この描像をより定性的な観点から議論するため磁気秩序状態に依存したキャリアの散乱を緩和時間の磁場依存性として扱った修正2バンドドレーデモデルによる解析を行い、特に[100]方向に磁場を印加した場合には観測結果をよく説明できることが分かった。また、温度上昇に伴いスピン散乱及び磁気ドメイン自由度による散乱は大きくなり、これが2準位系におけるキャリアの非弾性散乱としてモデル化できることも分かった。

これらの結果は、磁化プラトー状態及びその転移過程で生じる非自明な磁気構造が電子系と相関して発現する輸送現象を解明したものであり、磁性化合物においてスピン・電荷自由度の結合によって生じる新しい物性の解明を進めていく上で重要となる成果であった。

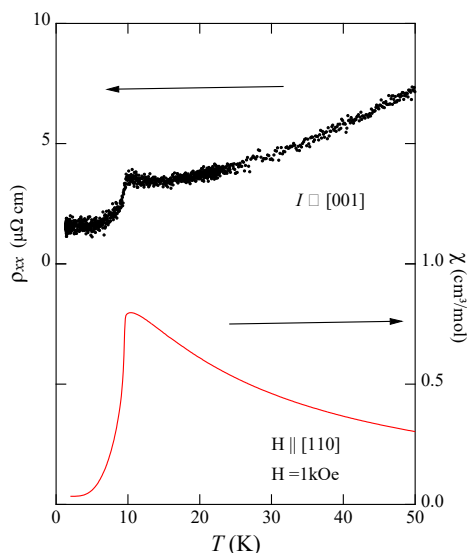


図1: DyAgSb_2 における
電気抵抗率 ρ_{xx} 温度依存性(左軸) 磁
化率 χ 温度依存性(右軸)

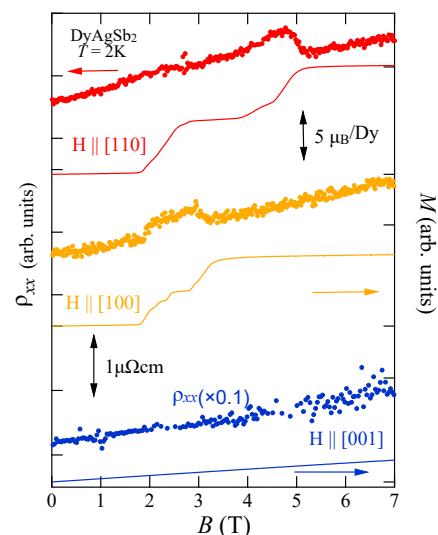


図2: DyAgSb_2 における
各印加磁場方向での
電気抵抗率 ρ_{xx} 磁場依存性(左軸)
磁化 M 磁場依存性(右軸)

[1] K.D. Myers., J. Magn. Magn. Mater. **205**,27 (1999)

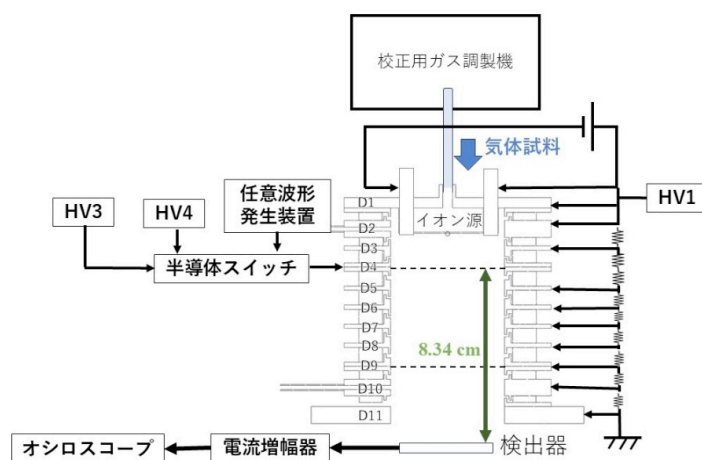
イオン附着型イオン移動度分析装置の開発に向けた基礎研究

氏名 和田 郁乃（原子過程科学教室）

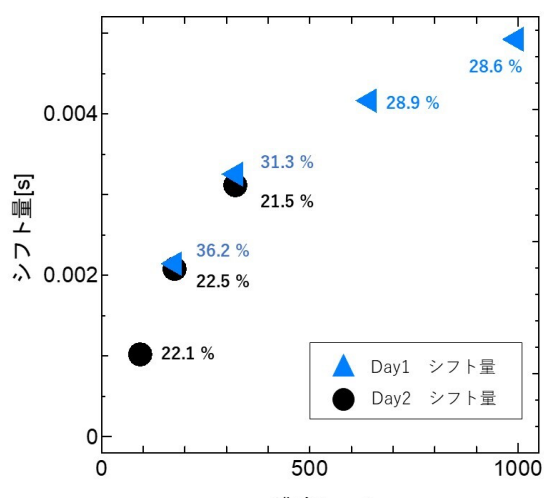
我々は、イオン附着法(Ion Attachment method : IA)技術 にイオン移動度分析 (Ion Mobility Spectrometry : IMS) 技術とイオン集束技術を組み合わせることで、リアルタイムかつ網羅的に空気中の多成分化学物質を分析する可搬型の装置開発を目指して研究を行っている。工場などで使用されている化学物質の中には、人体に有害なものも多く存在する。そのため、作業環境中の正確な化学物質ばく露量を把握することは非常に重要であり、健康被害が現れないと考えられる空気中の化学物質濃度として、ある一定時間の時間荷重平均濃度(Time Weighted Average: TWA)と瞬間的にも超えてはいけない濃度(Ceiling)が定められている。しかし、現在主流の分析技術では瞬間的な濃度を測定することは難しいため、リアルタイム測定可能な新しい分析技術の開発が必要である。

IMS 装置は質量分析計と異なり、真空装置を必要としないため大気圧下での測定を行うことができる。つまり装置は、真空ポンプという重たく大きな装置を必要とせず、装置の小型化、可搬型につながり、作業現場での測定を可能にする。現在市販されている可搬型 IMS 装置は放射性同位体やコロナ放電によりイオン化を行っているが、日本で放射性同位体を用いることには抵抗が大きい。また、コロナ放電ではイオン化できない化学物質がある、コロナ放電で生成されるイオン量や種類が温湿度に大きく依存するなどの問題点がある。そこで本研究では、イオン化方法として、リチウムイオン(Li⁺)を用いたイオン附着法を導入する。これは試料(M)を混合させたガスセル内で Li⁺を M に附着させてイオン化する手法である。イオン附着法はフラグメントフリーイオン化法なので、従来の可搬型 IMS 装置が単一既知物質の定性・定量のみが可能であるのに対して、多成分混合気体の分析も短時間で容易に行うことが可能になる。

本研究では、イオン附着型イオン移動度分析装置の開発に向けた基礎研究として、温湿度の違いが化学物質濃度の測定にどの程度影響されるのかを探ることを目的とした。Li⁺イオン源を用いたイオン附着法とコロナ放電を用いた大気圧イオン化法の 2 種類を用いて、温湿度が異なる条件下でさまざまな化学物質濃度ごとのドリフト時間スペクトルを測定した。その結果の比較から、イオン附着法の方がコロナ放電法よりも温度や湿度による影響が小さいことがわかり、イオン附着法の優位性のひとつを示すことができた。



Li イオン附着イオン源を用いた IMS 装置の概略図



Li イオン附着イオン源を用いた場合のドリフト時間に対するピークシフト量

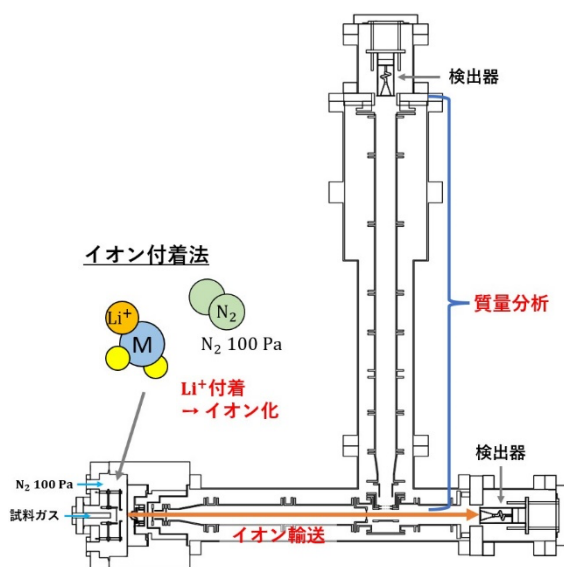
直交型イオン付着飛行時間質量分析装置による呼気分析

氏名 井上 和真 (原子過程科学教室)

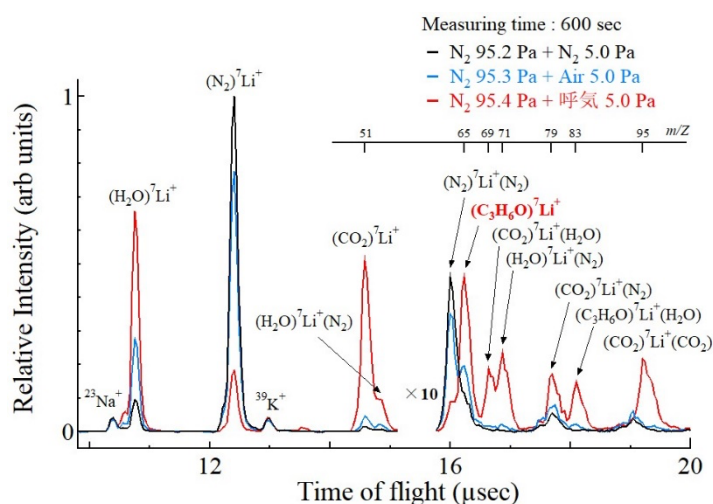
本研究室で開発を続けているイオン付着飛行時間質量分析装置では、質量分析の際のイオン化法としてイオン付着法を採用している。イオン付着法は、第三体ガス中で減速したアルカリ金属イオンを中性粒子に直接付着させることでイオン化を行う手法であり、フラグメンテーションを起こさずに 1 成分につき 1 ピーク検出という理想的なイオン化が可能のため、未知の気体試料の測定に有利とされている。そこで本研究室では、アルカリ金属イオンに Li^+ 、第三体ガスに N_2 を採用して、呼気分析装置の開発を計画した。

呼気分析は、疾患と関連のある揮発性有機化合物が呼気にどれだけ含まれるかを分析し、患者の健康状態を診断する臨床検査法の 1 つである。呼気分析の利点として、血液検査などに比べ、肉体的・精神的な負担が少なく、現段階で呼気の採取に資格が必要なく、感染症のリスクが少ないことなどが挙げられる。呼気分析を行うには、呼気中の極微量成分(ppm レベル)を定性・定量分析する必要があるが、イオン付着飛行時間質量分析装置を直交型に改良したことによる欠点の克服が課題であった。すなわち、バックグラウンドの低減、検出感度の向上と計測時間の短縮、分解能の向上、装置の安定性が求められる。これまでの研究で、バックグラウンドの低減と検出感度の向上に成功しており、本装置での呼気分析が期待できる状況となっている。

本研究では、装置の安定性と更なる検出感度の向上を図るため、簡易 RF カーペットを考案した。これは、イオン化室出口のオリフィス電極に数 MHz の高周波パルス電圧を印加することで、電圧上昇時に Li^+ をイオン化室内に閉じ込め、 Li^+ と気体試料分子の衝突回数を上昇させる狙いをもつものである。簡易 RF カーペット導入の結果、 Li^+ のカウント数を減少させつつ、付着イオンのカウント数の上昇に成功し、装置の安定性と検出感度の向上に成功し、短時間での呼気中の極微量成分の測定に成功した。しかし、実験の結果、イオン付着法によるイオン化メカニズムが、直接付着だけでなく $(\text{N}_2)\text{Li}^+$ を経由して付着する移行付着が存在すること、2 つの中性粒子が Li^+ を挟むクラスターイオンが生成され 1 成分につき 1 ピーク検出とは限らないことが判明し、量子化学計算によってそれが裏付けられた。この現象により精密な定量分析は困難となったものの、呼気成分のような気体試料中の極微量成分を短時間で定性分析可能な装置開発に成功した。



直交型イオン付着飛行時間質量分析装置の概略図



呼気分析時の飛行時間スペクトル

ガラスベース原子核乾板を用いた薄型エマルシヨンスペクトロメーターの再現性

佐野 元哉 (素粒子物理学教室)

現代の素粒子物理学は標準理論 (Standard Model) を用いて記述される。この理論は素粒子とその間に働く力を説明する。しかし、暗黒物質や暗黒エネルギー、ニュートリノ質量、物質反物質の非対称性など、標準理論では説明できない現象も存在する。これらを解明することが現代物理学の目標である。

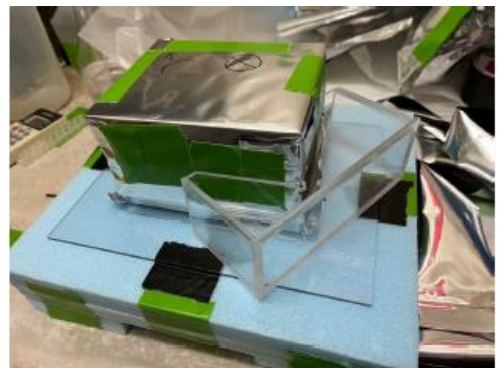
タウニュートリノはニュートリノの中で最後に発見された粒子であり、検出例が少ない。また、反粒子である反タウニュートリノは未だ直接検出されていない。これにより、タウニュートリノと反タウニュートリノの精密測定は、新しい物理の発見が期待される。

本研究室では、ニュートリノと反ニュートリノを識別し、その運動量を測定するための Compact Emulsion Spectrometer (CES) を開発している。CES は、高密度かつ大量の物質中で効率的に反応を起こす必要があるニュートリノ実験において、最小限の体積で測定を行うことが可能である。さらに、反応点直下に設置することで、電子を含む崩壊過程の検出も可能である。

2005 年に原理検証実験が行われた実験。磁場中に入射した荷電粒子の持つ運動量の逆数と曲がりの大きさ (sagitta) には良い相関が確認された。しかし、原子核乾板のベース素材であるポリスチレンは熱膨張率が大きく、また、乳剤の引っ張りによる歪み等が複合的に重なることで、乾板の平面性が失われ、sagitta の測定が可能な有効面積は乾板中央部に限られていた。

これを受け、2017 年のビーム照射実験では、3 種のベース素材を用意して、それぞれに支持体を挟んだものとそうでないものを用意して実験を行った。結果、200 μm 厚のガラスベースに、支持体を挟まない CES が最も良い性能を示した。また、有効面積の拡大が確認された。2019 年と 2020 年の宇宙線照射実験では、500 μm のガラスベースを使用し、平面性を高めるための新しい CES 枠を採用した。また、運動量測定のために Emulsion Cloud Chamber (ECC) を CES 下流に設置し、それぞれの飛跡に運動量情報を付与し、運動量ごとの解析を行った。結果として、6 GeV/c の領域まで 2.5σ の電荷識別精度が確認され、ベース厚の向上により位置測定精度と角度測定精度が最大 2.1 倍向上した。しかし、ECC の運動量分解能の不足により、高運動量領域の測定精度の検証が行えなかった。

本研究では、再現性の確認を目標に、2020 年度の実験環境を再現し、宇宙線照射実験を行った。また、先行研究で確認の取れなかった、6 GeV/c 以降の運動量領域の測定を目指し、ECC の積層数を増やし、標的層を鉛からタングステンに変更することで、運動量分解能の向上を図った。結果として、ECC のハンドリングミスにより運動量のごとでの解析には至っていないが、全 sagitta 分布を用い、2020 年度 CES のデータとの比較を行うことで、2020 年度のデータとの再現性が確認された。



宇宙線照射セットアップ図