

楕円曲線暗号で用いる安全で処理効率が良い楕円曲線の選択

教育推進機構自然科学教育センター 安田貴徳

理工学研究科自然科学専攻 ○志賀 尊

概要：将来的に求められる高い安全性レベルに対応するデジタル署名方式 EdDSA の基盤として利用可能な、判別式 -4 の楕円曲線を探索するアルゴリズムを開発した。

1. 研究目的

近年、公開鍵認証方式を選択する際には、RSAよりも楕円曲線暗号に基づくデジタル署名 EdDSAが推奨されることが多い。EdDSAでは、楕円曲線と双有理同値な、ed25519と呼ばれる代数曲線（ツイステッドエドワーズ曲線）が用いられている。この曲線は、現在想定されている安全性レベルに適合するように選択されたものである。そのため、将来、必要とされる安全性レベルが上方修正された場合、ed25519は十分な安全性を満たさなくなり、EdDSAで利用可能な新たな曲線を見つける必要が生じる。しかし、ed25519が発見されたときに用いられたアルゴリズムはスケーラブルではなく、代替となる曲線を容易に見つけられるわけではない。一方で、いくつかの楕円曲線暗号プロトコルでは、判別式が小さい楕円曲線の方が、(ed25519のような) そうでない楕円曲線よりも高い安全性レベルを構成しやすいことが知られている。

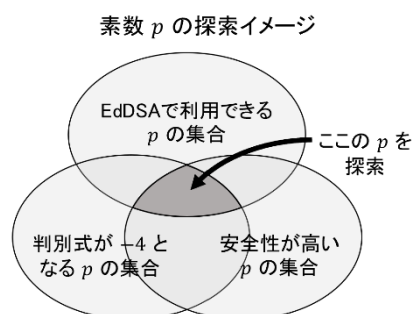
本研究では、将来的に求められるであろう高い安全性レベルに対応するため、EdDSAで利用可能な曲線を、判別式が小さい楕円曲線から構成することを目指す。具体的には、EdDSAで利用可能な（曲線と双有理同値な）判別式 -4 の楕円曲線の基礎体の位数となる素数 p の値を探索するアルゴリズムを考案する。判別式の小さい楕円曲線を用いることには、ed25519では利用できなかった効率的な計算手法を適用できるという利点もある。

2. 開発したアルゴリズムの概要

本研究では、次の条件を満たす素数 p を探索するアルゴリズムを SageMath で実装した。

1. $p = a^2 + b^2$ (a, b は整数で、 $\text{mod } 4$ でそれぞれ $3, 2$ と合同) の形で表せる。
2. $p + 1 - 2a$ は “ $8 \times$ 素数” の形になる。
3. さらに、 $p = 2^n \pm c$ (n, c は正の整数、 c は十分小さい) と表せる。

出力された p に対しては、判別式 -4 のある（有限体 $\mathbb{F}_p$ 上の）楕円曲線が存在し、この楕円曲線と双有理同値な（ $\mathbb{F}_p$ 上の）ツイステッドエドワーズ曲線上で EdDSA が設定できる。 n の値を 260 以上にして探索すると、得られた EdDSA は現在の安全性レベルよりも高いものとなる。実際に $n = 260 \sim 600$ の範囲でアルゴリズムを実行し、条件を満たす p の探索を行った。



3. 応用の可能性

本研究で得られるEdDSAは、将来的に求められる高い安全性レベルに適合するように選択できているだけでなく、署名生成および検証の処理効率にも優れている。そのため、ed25519が現在の安全性要求を満たさなくなった後に用いられる新たなEdDSAとして、標準暗号に採用される可能性は十分にある。

代数幾何と平坦性

理学部応用数学科 山田紀美子
理工学研究科自然科学専攻 ○大枝飛羽

概要：

代数幾何学について発表する。スキームや層のコホモロジーから始めて、平坦射の基本性質、その実例、平坦射により変化する性質と変化する性質を紹介する。

1. 研究目的

代数幾何学の研究では、スキームの上での幾何的情報を代数的情報に書き換えることが必要になる。特に、連接層のコホモロジーや平坦性を持つ代数的構造がスキームのふるまい方という幾何学的構造にどのような影響を与えるのかをまとめる。この発表では、様々な結果を用いるが、個々の結果を集めただけでなく、どのようにこれらの内容がつながっていくかに注目し、発表していく。

2. 基本理論から平坦射へ

層のコホモロジーの理論と平坦性の理論を基本とし、スキームの上の複雑な情報がいかにして代数的構造に変換し、どうやって計算していくかを各ステップに分けて説明していく。

○層とコホモロジーの理論

スキームや平坦射は、層と層のコホモロジーの言葉を使って記述される。そのために必要な層の直像層の知識とコホモロジーを計算するためのチェックコホモロジーを導入する。そして、得られる結果などを紹介する。特別な層である連接層の定義と具体例を紹介し、可逆層を導入し、その可逆層の集合がテンソル積で群になる過程を見ていく。

○スキームの定義とその具体例

層の知識を活用し、スキームの定義とその具体例を見ていく。その具体例を通じて、閉点と生成点がそれぞれ極大イデアルと零イデアルに対応していくことを見ていく。そして、今後必要になるスキームの既約、被約、整やファイバー積などの言葉を整理しておく。

○平坦加群の定義とその基本性質

環上の加群が平坦であることの定義、その具体例を紹介する。そして、平坦加群の基底変換、推移律、局所化などの基本的な性質を紹介する。

○平坦射で成り立つ事柄

今まで出てきた内容を駆使し、平坦射について説明する。まず、平坦な基底変換と、コホモロジーの計算が可換であること。ファイバー X_y の次元が急に変化したりしないことを説明する。またヒルベルト多項式が平坦性を仮定すると変数に依存しないことを説明する。そして、平坦性を仮定したとしても、変化が表れてしまうものも存在し、最後にこの事象について具体例を通じて説明する。

これらの内容はヒルベルトスキームへとつながっていく。

3. 応用の可能性

平坦性はパラメータの変化に対し構造を保つ条件で、この性質を現代のデータ解析に応用し、ノイズの影響を抑え、データの形状を安定的に抽出する手法の設計に貢献できる可能性がある。

交代磁性体 KV_2Se_2O の磁気ゆらぎに対する電子相関効果の解析

理工学研究科自然科学専攻 ○山本将悟 理学部物理学科 今井剛樹

概要 : KV_2Se_2O は交代磁性体的な特徴が報告されている一方で、磁気構造や電子相関の役割には未解明な点が残されている。本研究では、特定の磁気秩序を仮定しない常磁性相に着目し温度変化ならびに電子相関効果を伴う磁気ゆらぎの発達を調べる。

1. 研究目的

近年、従来の強磁性や反強磁性の区別を超える新しい磁気秩序の分類として、交代磁性体という概念が提唱されている[1, 2]。交代磁性体は、反強磁性と同様に全体としての磁化はゼロであるにもかかわらず、従来の反強磁性体にはみられないスピン分裂を示す特徴をもつ。そのため、反強磁性体の利点である磁気ノイズの少なさを保ちつつ、強磁性と同様の方法で情報の読み書きが可能であり、高性能なスピントロニクス材料として注目されている。現在、候補物質の探索が活発に進められており、実験的に交代磁性体的な特徴が報告されているは、その有力な候補と考えられている[3]。その磁気構造や電子相関の役割については活発に研究が行われている。先行研究では、 KV_2Se_2O の交代磁性相を対象に第一原理計算と多体電子論的手法を組み合わせた解析がおこなわれ、電子相関を取り入れたバンド構造に相当するスペクトル関数を用いて、低エネルギー電子状態の温度依存性が議論されている[4]。本研究では特定の磁気秩序を仮定しない常磁性相に着目し、温度変化に伴う磁気秩序の発達傾向を調べることで、 KV_2Se_2O における磁性の特徴を明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

本研究では、密度汎関数理論に基づく第一原理計算により、 KV_2Se_2O の V 3d 電子を中心とする、低エネルギー有効モデルを構築し、常磁性相を出発点に動的な電子相関を扱う多体電子論的手法を用いて電子状態と磁気ゆらぎを解析する。温度 T および電子間相互作用をパラメータとして変化させ、スペクトル関数や電子相関の強さを表す指標である準粒子くりこみ因子を求めることで、電子状態の温度依存性を評価する。次に各 V 原子上で局所的な磁気モーメントがどの程度形成されるかを調べるため局所スピンの大きさの指標を表す $\langle S_z^2 \rangle$ 、スピンの応答のしやすさを表す局所スピン感受率 $\chi_{local}(T)$ を計算する。さらに、磁気秩序の波数依存性を明らかにするため、波数依存スピン感受率 $\chi(q, T)$ を評価する。得られた結果を NMR・中性子回折の報告と比較し、電子相関と磁気不安定性の関係を考察する。

3. 応用の可能性

交代磁性体をスピントロニクス材料として利用するためには、実際の物質中で磁気秩序がどのように形成され、どのような要因によって安定化・制御されうるかを理解することが重要である。金属的な KV_2Se_2O は、常磁性金属相における電子相関効果が局所モーメント形成や磁気ゆらぎを通じて、磁気秩序の発達に重要な役割を果たしていると考えられる。本研究で得られる知見は、交代磁性相の形成に関わる微視的背景の理解を深めるとともに、今後の材料探索や磁気秩序の制御に向けた基礎的知見となることが期待される。

[1] L. Šmejkal, J. Sinova, and T. Jungwirth, Phys. Rev. X **12**, 031042 (2022).

[2] L. Šmejkal, J. Sinova, and T. Jungwirth, Phys. Rev. X **12**, 040501 (2022).

[3] B. Jiang, *et al.*, Nature Physics **21**, 754 (2025).

[4] Y. Xu, *et al.*, Phys. Rev. B **112**, 125141 (2025).

二次元強磁性体における格子変形に伴うトポロジカルマグノン状態の変遷

理工学研究科自然科学専攻 ○松波龍騎 理学部物理学科 今井剛樹

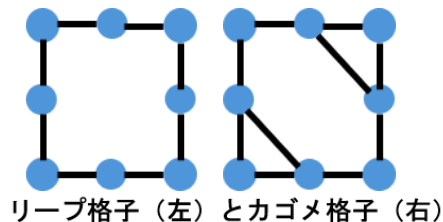
概要：トポロジカル物質のうちトポロジカルマグノンの応用が期待されており、結晶の構造をリープ格子からカゴメ格子へ連続変化させたときのジャロシンスキー守谷相互作用の寄与とトポロジカルマグノンの性質の変化を議論する。

1. 研究目的

トポロジカル絶縁体とは、内部は絶縁体でありながら表面において電流を輸送する特異な電子状態を持つ物質である。この表面伝導性は、電子の波動関数が運動量空間において持つトポロジカルな位相構造に起因しており、数学におけるトポロジーの概念と対応することからトポロジカル絶縁体と称される。不純物や外場の影響に対してトポロジカル状態を安定に保つことができるという特性から、次世代の超低消費電力デバイスや量子コンピュータへの応用が期待されており、近年盛んに研究が行われている。本研究では、トポロジカル絶縁体の派生概念であるトポロジカルマグノンを研究対象とする。マグノンとは、磁気秩序を持つ系においてスピンが集団的に励起した際に生じるスピン波を量子化した準粒子である。熱勾配を印加することでマグノン流を駆動できるため、電荷を用いずに絶縁体中での情報伝搬が可能となり、ジュール熱の大幅な低減が期待される。本研究の目的は格子構造の連続的な変形がトポロジカルマグノンの性質に与える影響を理論的に解明し、幾何学的構造制御によるトポロジカルマグノンの設計指針を確率することである。

2. 研究方法

強磁性体を対象として、リープ格子からカゴメ格子(図)への連続的な構造変化を考察する。カゴメ格子では、その格子対称性からジャロシンスキー・守谷相互作用が発現することが知られており、この相互作用はトポロジカルな性質を議論する上で本質的な役割を担う。格子構造を連続的に変化させることで結晶対称性が変化し、ジャロシンスキー・守谷相互作用の寄与をミクロな観点から解析するこ



とで、熱ホール伝導率・磁気モーメント・マグノンバンド構造およびエッジ状態を指標としてトポロジカル状態の安定性を評価し、格子構造の変化がトポロジカルマグノンの性質に与える影響を明らかにする。

3. 応用の可能性

トポロジカル物質はトポロジーの持つ位相的普遍性により、不純物や外場の影響に対してトポロジカル状態を安定に保つことができるため、次世代デバイスへの応用が期待されている。得られた知見は、幾何学的に制御可能な磁性体系における構造最適化の理論的基盤として活用されることが期待される。

宇宙を説明する様々な重力理論

理学部物理学科 山内大介

理工学研究科自然科学専攻 ○山中大和

概要：アインシュタインの一般相対性理論は重力を時空の“曲率”として表す理論である。これを拡張した非リーマン幾何では、時空の“ねじれ”や“歪み”を用いて重力を記述し、より一般的な時空構造の理解や新たな物理現象の解明を目指している。

1. 研究目的

重力理論の1つとして時空の“曲率”（曲がり具合）で重力を表すアインシュタインの一般相対性理論がある。この理論は時間の遅れ、ブラックホール、などの様々な物理現象を予言し、宇宙論物理を大きく発展させた。しかし、宇宙が膨張している理由や宇宙の約95%を占める未知の物質（ダークマター・ダークエネルギー）など、一般相対性理論では説明できない部分がある。それを解決する方法の1つとして時空の“ねじれ”と“歪み”を用いた重力理論を考える。

2. 重力

古典力学では、物体の運動はニュートンの運動方程式によって記述され、重力は物体間に働く力として扱われてきた（図1）。ニュートン力学と呼ばれるこの考え方は、日常的な運動や低速での現象を十分に説明することができる。しかし、光速に近い速度で運動する物体や強い重力場における現象では、ニュートン力学では説明できない問題が生じた。そこで、重力を新たな視点から捉える一般相対性理論が提案された。

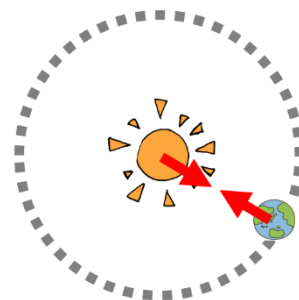


図1 物体どうしが引き合う力

一般相対性理論では、物体間に直接力が働くのではなく、物質やエネルギーによって時空そのものが曲がることで重力として観測される現象が生じると考えられている（図2）。この理論によって重力による光の曲がり、ブラックホール、時間の遅れ、重力波（時空の波）の存在が予言された。一方で、一般相対性理論では時空の構造を主に曲率によって記述しているため、より一般的な時空の性質や新たな物理現象を扱うには拡張が必要となる場合がある。そこで、時空のねじれや歪みを取り入れた非リーマン幾何における重力が研究されている。

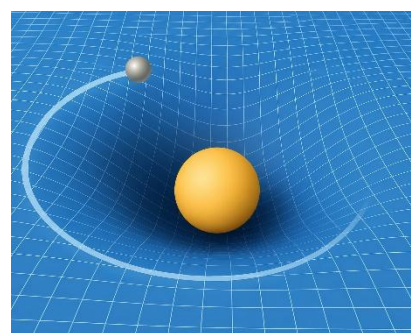


図2 時空の曲率と物体の運動

非リーマン幾何とは、一般相対性理論で用いられるリーマン幾何を拡張した時空の幾何構造である。一般相対性理論では時空の曲率によって重力を記述するのにに対し、非リーマン幾何では時空のねじれや歪みなどを導入することで、より一般的な時空構造を扱うことが可能になる。このような時空の幾何の拡張を考えることで、一般相対性理論では扱うことが難しい物理現象を記述し、理解できる可能性が示唆されている。

3. 応用の可能性

非リーマン幾何における重力理論は、宇宙のより深い理解につながる可能性がある。現在の理論では十分に説明できない現象を理解するための手がかりになると考えられている。

アストロメトリ法の宇宙論への応用

理学部物理学科 山内大介

理工学研究科自然科学専攻 ○前岡 凜

概要：超軽量ダークマター (ULDM) の観測手法として確立しつつあるアストロメトリ (天体の位置観測) を、同じスカラー場モデルであるダークエネルギーへ拡張し、観測的制約を得ることを目指す。

1. 研究目的

2024年にDESIが発表した観測データは、アインシュタインが約100年前に提唱した宇宙定数モデルでは説明がつかず、時間変化する動的なダークエネルギーモデルへの関心が急速に高まっている。本研究では、その中でも最も単純なスカラー場モデルであるクインテッセンスに着目し、ULDMの検証で培われたアストロメトリの手法を適用する新たな観測的アプローチを提案する。

2. アストロメトリによるスカラー場の検出

アストロメトリとは、天体の「見かけの位置」を極めて高い精度で測定する観測技術である。Gaiaのような衛星は、同じ星を何度も観測し、そのわずかな位置のズレや動きの変化を積み重ねることで、星の固有運動や年周視差、さらには重力による光路の曲がりまでを抽出する。星の見かけの位置は、視線方向に沿った重力ポテンシャルの勾配の積分値として決まる。もし銀河内の物質分布に空間的なゆらぎや時間変動があれば、星の軌道や見かけの位置にごく小さなゆらぎが現れる。アストロメトリはそのような微小な重力変動を、光路のわずかな曲がりや星の位置の時間変化として間接的に測定する手段である。

スカラー場としてモデル化された ULDM は、非常に小さな質量を持つ場として宇宙全体に広がり、波動的なふるまいを示す。その時間的なゆらぎは時空の構造に小さな変化をもたらし、遠方の天体の見かけの位置がわずかに周期的にゆらぐと予測される。この信号は ULDM の質量に依存した振動数を持ち、アストロメトリ観測によって検出可能であることが示されており、現在非常に注目される手法となっている。

同じスカラー場として記述される動的なダークエネルギーモデルの代表であるクインテッセンスについても、ULDM と同様のアストロメトリ的手法が理論的には適用可能である。しかし、クインテッセンスの場合、アストロメトリ信号は周期的ではなく、観測時間内では定常的なドリフトとして現れると予測される。これは、クインテッセンスの有効質量が非常に小さく (あるいはゼロに近く)、その振動周期が宇宙年齢よりも長いためである。その結果、ULDM のような明確な周期信号としての同定が困難であるという課題が生じる。上記の課題を踏まえ、より複雑な運動項を持つ別のダークエネルギーモデルへの拡張を検討する。例えば、運動項に非標準的な構造を持つ k-エッセンスモデルでは、ULDM に類似した振動的な信号が現れる可能性があり、アストロメトリとの親和性が高いと考えられる。

3. 応用の可能性

アストロメトリの宇宙論への応用はあまり研究されておらず、多くの可能性が残されている。アストロメトリにより宇宙論の観測的検証の適用範囲を拡大することが期待される。

超伝導型進行波パラメトリック増幅器における
アナログブラック／ホワイトホールの準固有振動理学部物理学科 山内大介
理工学研究科自然科学専攻 ○前田 環
広島大学, 京都大学**概要：**私たちが暮らす地球から何光年も離れたブラックホールの実態を明らかにするため、ブラックホールと同じ数式で表される別の物理現象を利用し、実験室内でブラックホールの完全な再現を試みた。

1. 研究目的

ブラックホールは光さえも脱出できないほど強い重力を持つ天体であり、近年は重力波観測によってその存在が直接確認された。実際のブラックホールは何光年も離れた宇宙に存在するため、実験室で自由に観測したり条件を変えて調べたりすることはできない。そこで注目されているのがアナログ重力系である。このアナログブラックホールが本物のブラックホールと同じような振る舞いを示すのかを調べるため、その特徴的な振動である準固有振動を高精度に解析することを目的とする。

2. 電気回路によるブラックホールの再現

本研究では、超伝導回路素子 SNAIL を組み込んだ進行波パラメトリック増幅器(TWPA)に着目した。この回路では、「ソリトン」と呼ばれる形を崩さずに伝わる波が回路中を進むことで、光が進めなくなる境界が形成される。[Fig. 1] この境界はブラックホールの事象の地平線と同じ役割を果たし、ブラックホールとホワイトホールの対を電気回路内に実現できることが理論的に示されている。また、外部から摂動を受けると、一定の周期で振動しながら徐々に振幅が小さくなる。この振動は「準固有振動」と呼ばれ、ブラックホール固有の性質を反映する重要な情報である。[Fig. 2] そこで、SNAIL-TWPA 回路に形成されるアナログブラックホールについて波動方程式を導出し、数値解析を行う。従来の解析手法では高次の振動や減衰の大きい振動での解析精度に課題がある。そこで、高精度解析法である Leaver 法を適用し、従来手法との比較を通してより精密な準固有振動解析を目指す。

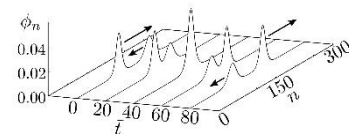


Fig.1. 形を崩さずに伝わる波「ソリトン」

H. Katayama et al., Phys. Rev. Res. 5 (2023) 2, L022055

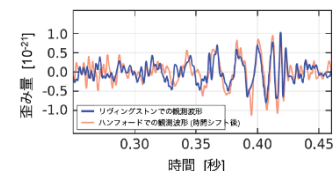


Fig.2. 重力波観測所 LIGO で最初に観測された重力波信号

B. P. Abbott et al. 2016, Phys. Rev. Lett. 116, 061102

3. 応用の可能性

電気回路の中に作られたアナログブラックホールが実際のブラックホールと同様の振る舞いを示すことを高精度に検証できれば、観測だけでは難しかったブラックホールの現象の詳細な解析を実験室内で繰り返し再現・解析できるようになる。さらに、将来的に重力波観測結果との比較やブラックホール物理の検証にも役立つと期待される。

参考文献

- [1] H. Katayama et al., Phys. Rev. Res. 5 (2023) 2, L022055
- [2] D. Yamauchi et al., 2605.11565 (2026)

射影平面の配置族とその自由分解の退化について

理学部応用数学科 坂内真三

理工学研究科自然科学専攻 ○宮本俊幸

概要：本研究では、射影平面 $\mathbb{P}^2$ 内の点配置、曲線配置の幾何学的退化に伴う代数構造の変化を考察する。Macaulay2 での計算実験を通し、配置が特殊な場合へと退化する際の「自由分解の構造変化」を調べ、その過程を観察し、曲線の幾何学的特徴と代数的特徴の関係を明らかにする。

1. 研究目的

代数幾何学および可換代数論において、射影空間内の点集合の定義イデアルや代数曲線の定義イデアル、Jacobianイデアルの自由分解はそれらの配置の代数的な特徴を与える。射影平面 $\mathbb{P}^2$ 内の少数の点からなる点配置や低次の曲線からなる曲線配置に対する自由分解の個別的な計算はよく知られている一方で、配置の幾何学的な変形・退化に伴い、代数的特徴がどのように変化するかの包括的な研究は多くは見当たらない。本研究では、個別的な配置ではなく、配置族についてのパラメータ付きの自由分解の計算を行うことで、パラメータの特殊化による、自由分解の退化の状況と、配置族の幾何学的な退化の間の相互関係について研究する。最終的には「点配置や曲線配置が幾何学的に退化していく様子を、代数的なデータである自由分解だけでどこまで正確に記述できるか」という問いの具体的な場合についての回答を与える。

2. 点配置および曲線配置の自由分解の退化の計算実験

自由分解の退化を観察するために、Macaulay2 を用いて以下の 2 つの独立した計算実験を行った。第一に、少ない個数の点からなる点配置族の定義イデアルのパラメータ付きの自由分解とその退化について計算を行う。第二に、次数が低い平面曲線族の Jacobian イデアルのパラメータ付きの自由分解とその退化について計算を行う。具体的な配置族に関して計算を行うことで、パラメータを持つ曲線配置や点配置が幾何学的にどう退化・変化していくかを、実験・検証した。実験を通して、幾何的なサイドの特異曲線、可約曲線への退化と、代数的なサイドの自由分解の構造の退化との間にどのような差異や連動性があるかを詳細に観察し、まとめた。

3. 応用の可能性

本研究で具体的に得られた点配置の自由分解のデータ、および曲線の特異曲線への退化のデータは、今後の研究において両者の代数幾何学的な関係性を精密に検証するための重要な基礎基盤となる。また、配置族についての代数・幾何の両面のデータが得られていることから、新たな興味深い配置を発見する手掛かりとして利用する可能性がある。

ヤングタブローと RSK 対応の組み合わせ論

理学部応用数学科 阿部 拓
理工学研究科自然科学専攻 ○村上 優

概要：ヤング図形は整数の分割を表す図形であり、ヤングタブローとはヤング図形に数字を書き入れたものである。本発表では、RSK 対応と呼ばれる数列からヤングタブローへの変換を具体例を交えて紹介し、その数学的意味や応用について解説する。

1. 研究目的

ヤングタブロー（図2）は、整数の分割を表すヤング図形（図1）にある条件に従って数字を書き入れたものであり、組合せ論でよく用いられる対象である。また、RSK対応は、数列や行列をヤングタブローに対応させる代表的なアルゴリズムである。この対応によってヤングタブローが構成される仕組みに興味を持ち、その性質についてこれまで調べてきた。本発表では、具体例を用いてヤングタブローの基本的な性質とRSK対応の仕組みを説明する。また、それらが組合せ論における数え上げ問題の中でどのように利用されているのかを紹介することを目的とする。

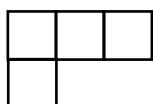


図1：4の分割(3,1)を表すヤング図形

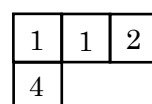


図2：ヤングタブロー

2. ヤングタブローと RSK 対応

ヤング図形は整数の分割を表す図形であり、標準・半標準ヤングタブローは、そのヤング図形に条件を満たすよう数字を書き入れたものである。ヤングタブローを構成する方法の一つに、数字を順に挿入していくバンパと呼ばれる操作がある。RSK 対応は、このバンパ操作を用いて、ワード(数列)や非負整数行列から 2 つの半標準ヤングタブローの組を構成するアルゴリズムである。その具体的な対応の一例を図 3 に示す。この RSK 対応を用いることで、標準ヤングタブローの個数に関する組合せ論的等式が得られ、標準ヤングタブローの個数を与えるフック長公式の証明にも RSK 対応は用いられる。

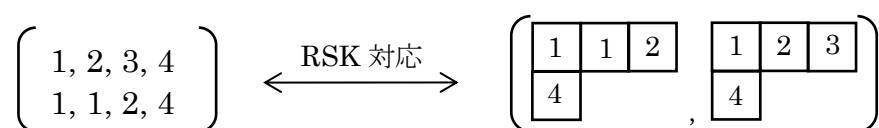


図 3 : RSK 対応の具体例

3. 応用の可能性

RSK対応は組合せ論だけでなく、対称群の表現論やSpringer fiberの幾何などにも応用されている。本発表では、ヤングタブローとRSK対応の基本的な考え方を理解するとともに、それらがさまざまな数学分野につながっていることを知るきっかけになればと考えている。

シミュレーションから探る太陽系に似た環境と宇宙の見える物質

理学部物理学科 長尾桂子

理工学研究科自然科学専攻 ○中條初萌

中京大学, 総合研究大学院大学

概要: ダークマターは宇宙に存在する未知の物質である。ダークマターの正体を調べる上で、太陽系周辺のダークマターの性質を推定することは重要である。本研究では、シミュレーションを用いて太陽系周辺の環境を選別し、その場所のダークマターの性質を推定した。

1. 研究目的

ダークマターは、宇宙全体の物質の約85%を占めている未知の物質である。太陽系周辺のダークマターの性質を正しく知ることは、ダークマターを探す実験の結果を正しく理解するために重要である。また、天の川銀河の成り立ちや、ダークマターがどのような物質なのかを明らかにすることにもつながる。しかし、ダークマターは光を出さないため、望遠鏡などで直接見ることができない。そのため本研究では、シミュレーションのデータを用いて太陽系周辺に似た環境を探し出し、その選び方によってダークマターの性質がどのように変わるのかを調べた。

2. 太陽系周辺の環境の選び方

星や銀河などの宇宙の構造がどのように作られ、現在の姿になったのかを理解するために、宇宙の進化をコンピュータ上で再現する宇宙論的シミュレーションが行われている。本研究では、その一つである Illustris-TNG50 [1] を用いた。図1に天の川銀河の模式図を示す。太陽系は天の川銀河の中心から約2万7000光年離れた銀河円盤上に存在している。そのため、シミュレーションの中でも同様の場所を選ぶ必要がある。しかし、どのような条件で太陽系周辺を選ぶかによって結果が変わる可能性がある。そこで、以下の2つの異なる方法で、天の川銀河に似た銀河から太陽系周辺に近い環境を選んだ。

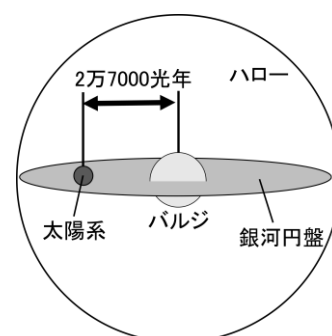


図1: 天の川銀河の模式図

(ア) 銀河中心からの距離を用いて選ぶ方法

(イ) 銀河内の星を用いて銀河円盤上の環境を選ぶ方法

図2に手法(イ)で抽出されたダークマターの分布を示す。リング状の構造が見られることから、太陽系が存在する銀河円盤に沿ったダークマターを取り出せていることが確認できる。

本発表では、方法(ア)と(イ)で得られたダークマターの量や速さを比較し、太陽系周辺に似た環境を選ぶ方法の違いによって結果がどのように変化するかを紹介する。

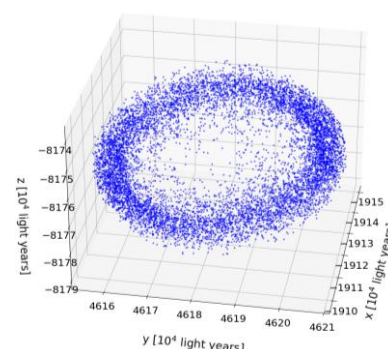


図2: 方法(イ)で取り出されたダークマターの分布

3. 応用の可能性

宇宙から飛来するダークマター粒子を地下の実験施設で検出しようとする試みがある(ダークマター直接検出実験)。この実験において、検出器に飛来する粒子を検出するためには、太陽系周辺におけるダークマターの「量」や「速さ」を正しく見積もることが不可欠である。本研究によって、シミュレーションから太陽系周辺の環境をより適切に抽出する条件が明らかになれば、検出器に飛来するダークマター粒子の頻度を正確に予測でき、ダークマターの性質解明につながる。

参考文献 IllustrisTNG project: <https://www.tng-project.org/> [1]

地球の重力で生じる高密度暗黒物質領域

理学部物理学科 長尾桂子

理工学研究科自然科学専攻 ○中村共喜

国立勤益科技大學

概要：暗黒物質の軌道が地球の引力によって変化し、特定の位置で密度が高くなる、これによって、暗黒物質は対消滅し、生成された粒子が地球にどれだけの量が向かってくるかについて計算を行った。

1. 研究目的

宇宙に存在する暗黒物質は、光を放出せず直接目で見ることのできない未知の物質である。しかし、暗黒物質は質量を持つため、地球の重力の影響を受ける。よって、宇宙空間を移動する暗黒物質は、地球の重力によって軌道が変化する。その結果として、局所的に暗黒物質の密度が高くなり、暗黒物質が対消滅する確率が上昇する。対消滅により生成される粒子を地球上で検出できれば、暗黒物質を間接的に観測することができる。

2. 地球の重力による暗黒物質の軌道変化

地球に向かって飛来する暗黒物質が地球の重力によって密度が高くなる距離は、暗黒物質の初期速度や地球の密度などに依存し、速度が速いほど地球から離れた位置になる。また、地球の密度が一樣である場合と現実と同じように地球の密度が一樣でない場合では粒子の軌道の変化が異なる。ここで、地球内部の密度が一樣であると仮定した場合、暗黒物質の密度が地球表面上で高くなる様子を図1に示した。図1では1目盛を地球半径約 $R_E=6367\text{km}$ とし、暗黒物質の速度は約 6km/s とした。しかし、実際には地球の密度は一樣密度ではなく、中心の密度が最も高く徐々に密度が低くなっていく構造になっており、暗黒物質の速度が 6km/s では地球内部で密度が高くなってしまふ。暗黒物質の密度が、実際の地球の表面上で高くなるのに必要な速度は、図1の条件とは異なり、暗黒物質の速度が約 17km/s の場合である。今回の研究では、暗黒物質の速度分布として存在確率が最も高いと考えられている速度である約 240km/s の場合に着目する。暗黒物質の速度分布で速度約 240km/s が多いと考えられる理由は、地球を含む太陽系が銀河系内を速度約 240km/s で移動しているためである。速度約 240km/s の暗黒物質が一樣でない地球の重力によって軌道が変化する場合、地球の中心から約 $100 \times R_E$ だけ離れた位置で密度が高くなると分かっている。したがって、地球から約 $100 \times R_E$ 離れた領域で暗黒物質の密度が局所的に高くなり、暗黒物質の対消滅が起きやすくなる。これによって生成される粒子の量について調べ、地球に向かってくる量について計算を行った。

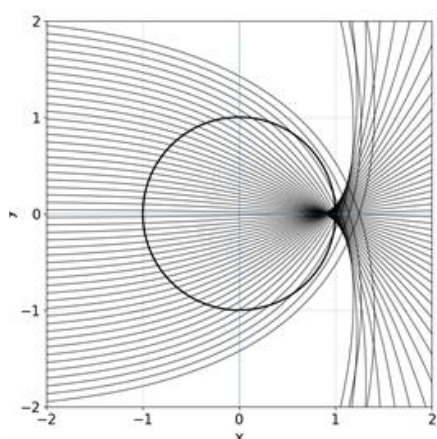


図1 暗黒物質の軌道

3. 応用の可能性

地球の重力の影響で暗黒物質の軌道が変化することで、暗黒物質の密度が局所的に高くなり、暗黒物質の対消滅が引き起こされ、標準模型粒子が対生成する。生成された粒子が地球に向かってくる量が検出器で検出するに十分な値だった場合、生成されて粒子を実際に検出できる可能性が生じる。