

平成29年度
卒業研究発表会
(概要集)

平成29年度 3月2日(木) 9:00~16:30

3月3日(金) 9:10~16:45

首都大学東京

都市教養学部 都市教養学科 理工学系 物理学コース

平成 29 年度卒業研究発表会

首都大学東京

都市教養学部都市教養学科理工学系物理学コース

3月2日(木) 9:00~16:30

3月3日(金) 9:10~16:45

場所 11号館 204号室

3月2日(木)

午前9:00~ 宇宙理論(3)、素粒子理論(3)、高エネルギー実験(4)、
高エネルギー理論(2)

午後13:00~ 電子物性(4)、ソフトマター物性(3)、原子物理実験(3)、
強相関電子論(3)

3月3日(金)

午前9:10~ 量子凝縮系理論(4)、宇宙物理実験(7)

午後13:15~ 表界面光物性(3)、原子核ハドロン物理(2)、非線形物理(3)、
ナノ物性(5)

Pre-main-sequence star の安定性

宇宙理論研究室

井上裕貴 13163034

指導教員：政井 邦昭 佐々木 伸

恒星（以下星と呼ぶ）の性質で最も測りやすいものは光度（ L ）と表面有効温度（ T_e ）であり、これをプロットしたものが HR 図と呼ばれる。その HR 図上で大部分の星が分布する帯状の分布を主系列（main sequence）と呼び、水素燃焼の核融合反応をエネルギー源として輝く。この主系列に達する前の星を前主系列星（Pre-main-sequence star）と呼び、重力収縮により解放される重力ポテンシャルエネルギーをエネルギー源として輝く。この前主系列星が重力収縮し、中心温度が水素燃焼可能な温度（ $\sim 10^7 K$ ）に達すると主系列星となる。星はその生涯のほとんどを主系列上で過ごし、中心の水素が枯渇すると主系列から外れて壮年期を迎えるというのが一般的な星の進化過程である。

上で挙げた各エネルギーは主に星の中心付近で生成され、星表面へと輸送されていく。その際の星内部におけるエネルギー輸送は対流と放射の 2 つが存在し、効率の良い方が選ばれる。（星内部の光学的な不透明度が高い場合、放射より対流の方がエネルギー輸送効率は良い。）前主系列星の進化過程の前半は Hayashi トラックと呼ばれ、対流によるエネルギー輸送が主となっている。それに対し前主系列星の進化過程の後半は Henyey トラックと呼ばれ、放射によるエネルギー輸送が主となっている。この変化は、星内部の温度上昇につれ光学的な不透明度が低下することに依るものである。Hayashi トラックよりも低温側の領域は Hayashi の禁止領域と呼ばれ、この領域の星は力学平衡状態にあり得ないことが知られている。

本研究ではこの星の表面温度の下限値を調べるために、前主系列星における対流平衡にある星のモデルを考え、星表面での初期条件を与えて中心に向かって微分方程式を解くことで、各初期条件に対する星の解を求めた。そしてそれらの解の安定性と表面有効温度との関連性を調べることで、対流平衡にある星には表面有効温度の下限値が存在し、その下限値よりも低い表面有効温度を持つ星の解は不安定であることを示した。

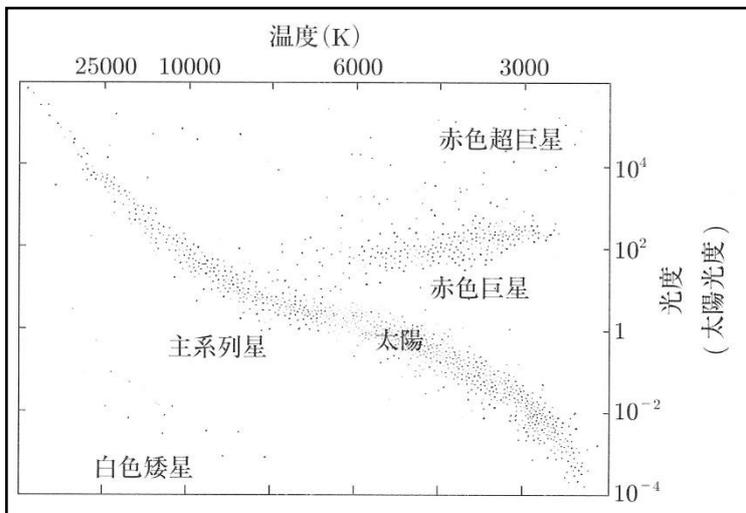


図 1 HR 図

出典 ワードトンプソン&ウィットワース：星形成論

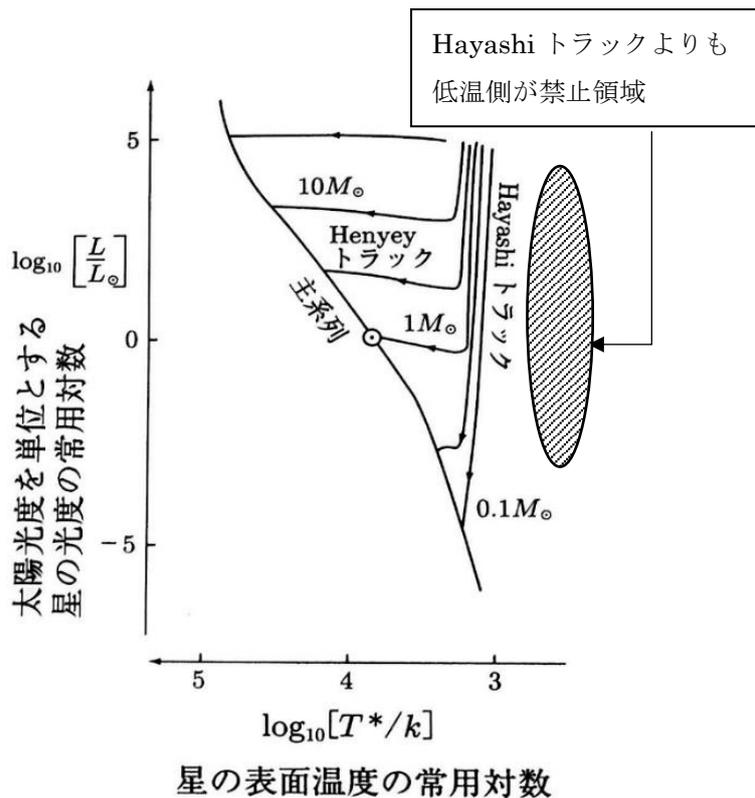


図 2 HR 図上での前主系列星の進化過程（概略図）

出典 ワードトンプソン&ウィットワース：星形成論

中性子星の状態方程式と質量

宇宙理論研究室

橋詰 享亮 13163057

指導教員 政井 邦昭 佐々木 伸

中性子星とは、主に縮退した中性子で構成された星である。半径は約10km、質量は1~2 M_{\odot} となっており、とても狭い領域に大きな質量が存在している。内部は右図のようになっていると考えられている。outer crust では電子の縮退圧で支えられており、白色矮星と同じ状態になっている。outer crust と inner crust の境界では原子核から自由中性子が漏れ出す neutron drip と呼ばれる現象が起こっている。inner crust では電子だけではなく自由中性子の縮退圧も生じている。core では原子核密度($\rho = 2.8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$)を超えた密度になっており、原子核の構造がなくなっている。電子捕獲により中心に近いほど中性子の割合が多くなっており、core ではほとんどが中性子で構成されている。

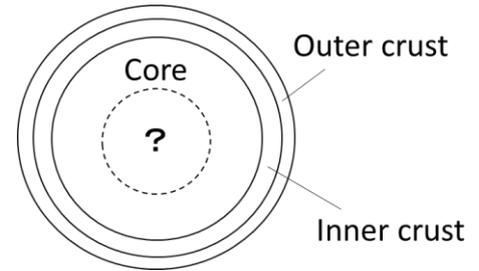


図. 中性子星の内部構造

core を支えているのは主に中性子の縮退圧だが、そのみで中性子星の最大質量を計算すると約0.7 M_{\odot} となる。このことから、中性子星の内部状態を考えるには縮退圧だけではなく、核力などの影響も考慮に入れる必要がある。また、core のような高密度状態ではフェルミ運動が十分に大きいことから、核子から hyperon や quark matter へ相転移する可能性も考えられている。中性子星の core に関してはまだ不明確な点が数多く存在するため、内部状態を考えるには仮定と原子核実験による具体的な値が必要となる。

様々な仮定と実験による値から中性子星の内部の状態方程式(EOS)は調べられてきており、今までにいくつもの予想された EOS が作られてきている。これらの EOS を、一般相対性理論における重力と圧力勾配のつり合いを表す TOV 方程式に代入して解くことにより、中心密度と半径、質量の関係を調べることができる。ただし、TOV 方程式は時間不変で球対称な計量のもとで Einstein 方程式を解いて導かれたものであるため、中性子星の自転や磁場は考慮されていない。この計算を行うと、それぞれの EOS において中性子星の最大質量が存在することが分かる。そのため、実際に観測されている中性子星の質量から EOS の制限を行うことが可能である。

本研究では、core の状態が異なる 3 つの EOS に関して実際に TOV 方程式を用いて計算を行った。TOV 方程式は圧力 P と密度 ρ が polytrope の関係 ($P \propto \rho^{\Gamma}$, $\Gamma = \text{const.}$) である場合にのみ数値的に解くことができる。しかし、実際の EOS では Γ が一定ではないため、直接代入して計算を行うことは難しい。そこで、EOS を七つに区分化し、それぞれを polytrope に近似した EOS (piece-wise polytrope EOS) を使って計算を行った。そして、各 EOS のグラフと最大質量の関係性を調べた。

自己重力系の Gravothermal Catastrophe

宇宙理論研究室

笠原 悠 13163010

担当教員 政井 邦昭 佐々木 伸

星や銀河、星団などのように、系の構成要素自身の作り出す(自己)重力によって形を保っている系を自己重力系という。この自己重力を考慮することにより、宇宙物理では特徴的な現象が現れる。以下では熱力学系と比較して、自己重力系に現れる不安定性の仕組みとその発生条件について簡単に説明する。

球状の断熱壁で囲まれた等温状態の理想気体を考える。通常の熱力学で考えれば系は熱平衡であり、エントロピー極大 ($\delta S = 0$ 、 $\delta^2 S < 0$) の状態になっている。いま系内にある内殻から系内の別の領域にある外殻に熱を移動させれば、内殻(外殻)は熱エネルギーを失う(得る)ことで温度が減少(上昇)する(つまり比熱が正である)。この後系は熱力学第二法則に従って温度勾配の下がる方向へ熱を流出して再び等温、つまりエントロピーが極大の状態へ戻ろうとする。

一方自己重力系では内殻から熱を抜くと、今まで内殻を支えていた圧力が減少するので、重力収縮を起こし、重力エネルギーの変換と収縮過程により温度が上昇する。これは熱(エネルギー)を抜いたにもかかわらず内殻の温度が上昇し、見かけ上の比熱が負であることを示している。外殻も熱を得ることで温度は上昇するが、膨張によりいくらか温度は下がる。これによる内殻での温度変化の収支が外殻での収支を上回れば、内殻の温度が高くなる温度勾配が生じ、再び熱は外殻へと流れだす。このような熱の流出と重力収縮による温度上昇のサイクルを繰り返すことにより、系は等温状態とは別の状態(構造)である「コア・ハロー構造」を形成することになる。系内部の変化が止まらずに状態が変動していくということは、系は安定なエントロピー極大の状態ではないということ ($\delta^2 S > 0$) を示しており、これは重力の効果があるために生じている。このような重力の影響で現れる熱力学的不安定性は Antonov(1962)により発見され、後に Gravothermal Catastrophe (以下 G.C.) と名付けられた。G.C.は、恒星が核融合反応を終えて赤色巨星になる現象などに対応していると考えられている。G.C.が生じる条件としては、等温状態の場合、系の中心と外縁の密度比が臨界値(709)を上回っている(つまり中心が外縁に比べ高密度状態になる)状態で現れるということが示されている。

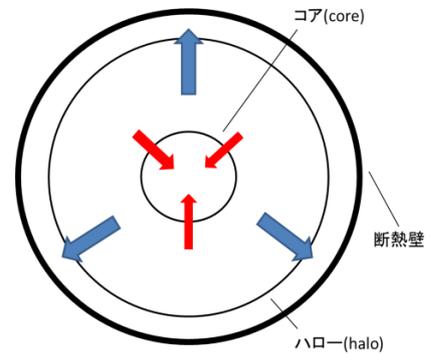


図: 圧縮・膨張によりコア・ハロー構造が形成される様子

Antonov(1962)は球形断熱壁に囲まれた星団を、等温状態のまま議論した。本研究では等温状態の系に摂動を加えた場合に、G.C.がどのように現れるかを確認する。具体的には、球状断熱壁に囲まれた等温状態の自己重力ガス系において、重力と内部圧力の釣り合った平衡解に対して内部での熱の移動という摂動を与えた際の、物理量の変化と $\delta^2 S$ の符号の変化を確認する。

参考文献: Hachisu and D. Sugimoto, Prog. Theor. Phys. 60 (1978), 123.

カイラルアノマリー

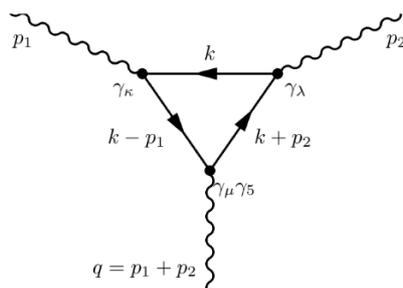
素粒子論研究室

石田 和也 13163072

安田 修 (指導教員)

場の量子論において量子補正を取り込んだ計算を行うと、しばしば古典論で成立していた対称性が破れてしまうことがある。このことを一般にアノマリーと言ひ、様々な場面で出現することが分かっている。その中でも、特に初めてアノマリーとして発見されたカイラルアノマリーについて review する。

カイラルアノマリーは $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ の崩壊過程の解析において 1949年に Steinberger、1951年に Schwinger によって最初に現象論として現れた。後に 1966年、Sutherland のカレント代数と PCAC を用いた π^0 崩壊の計算においてこの遷移振幅は 0 となり実験と矛盾することが判明し、これは Sutherland paradox と知られることになる。そして、この paradox を解決したのが Adler-Bell-Jackiw であり、彼らにより初めて明確にカイラルアノマリーが認識された。カイラルアノマリーは主に、カイラルな理論 (γ_5 が相互作用に現れる理論) において以下のフェルミオンのトライアングルグラフから初めて生じる。このダイアグラムにおいてベクトル、軸性ワード恒等式をすべて成立させることができず、特にゲージ場とカイラルカレントが結合する理論ではゲージ不変性を壊してしまう。これは理論のくりこみ可能性をも脅かすもので、非常に良くない。今回の発表では、まず古典論でのベクトル、軸性ベクトルカレント保存則を導出をしフェルミオン質量 $m=0$ の場合、カイラルカレントは保存することを見る。次にトライアングルグラフにおいて各頂点での保存則 (ベクトル、軸性ワード恒等式) をファインマンダイアグラムを用いて直接計算する。



ワインバーグサラム理論はまさにカイラルな理論だが、実はレプトンとクォークのアノマリーが相殺されて問題ないことが知られている。逆にこの相殺条件のために、クォーク、レプトンの対応が標準模型の世代構成を要求するので、アノマリーは理論の構築に欠かせない重要な要素であると考えられている。

参考文献[1] Lewis H. Ryder, QUANTUM FIELD THEORY Second edition, Cambridge University Press (1996)

[2] 九後汰一郎, ゲージ場の量子論 II, 培風館

自発的に対称性の破れた Yang-Mills 理論の繰り込み可能性

素粒子論研究室

保科 宏樹 13163021

安田 修 (指導教員)

高エネルギー実験の結果と非常に良く合致する標準模型は、Yang-Mills 理論 (非可換ゲージ理論) に Higgs 機構を取り入れた模型である。

場の量子論では物理量は摂動展開によって出てくる散乱過程の振幅として得ることができるが、無限大量が出てくるため、「繰り込み」という操作によって物理量が決定できるモデルにする。実際、pure な (Higgs 機構を入れていない) Yang-Mills 理論は繰り込み可能である。しかし pure な Yang-Mills 理論ではゲージ不変性のためにフェルミオンやゲージボソンの質量が 0 になってしまう。つまり電子やクォーク、W、Z ボソンの質量が 0 となり、今の宇宙での事実と一致しない。そこで理論に Higgs 機構を取り入れることで、まずゲージボソンに質量を持たせ、フェルミオンの質量は、Higgs 場との相互作用を仮定することで生じさせる。そして実験事実と整合性のある理論であるためには、この Higgs 機構を取り入れた Yang-Mills 理論が繰り込み可能であることが必要である。

今回の発表では、まず Higgs 機構について説明する。U(1)ゲージ場と結合し、自己相互作用する複素スカラー場において、Higgs 機構によりゲージボソンが質量を獲得することを概観する。

理論の繰り込み可能性には、粒子の伝播関数の発散次数(運動量の次元)の勘定が欠かせない。Pure な理論では問題なかった massless ゲージボソンの伝播関数は、massive になると、理論の発散機構に悪影響を与えかねないことがわかる。そこで理論のゲージ自由度を利用し、't Hooft ゲージと呼ばれるゲージを選ぶことで、この危機を回避する。

次に、Higgs 機構により自発的に対称性の破れた Yang-Mills 理論を古典場と有効作用によって書き換えることで、pure な理論にあった繰り込み可能な機構に影響を与えないことを概観する。古典場とは、量子効果を入れていない 0 次近似での場である。有効作用とは、古典場と source によって書かれていて、書き換えた理論の量子効果を担っており、古典的極限では古典理論の作用に一致する。元にあった繰り込み可能性に影響を与えないため、自発的に対称性の破れた Yang-Mills 理論は、繰り込み可能であるということとなる。

フェルミオンやウィークボソンに質量が入った理論がしっかりと繰り込み可能である、つまり物理量として無限大という意味のない値ではなく、意味のある有限な値を得られる理論であると示されたことは、非常に意義のあることであり、素粒子物理学において重要なステップであった。

BelleII 実験用粒子識別装置 ARICH の

宇宙線事象の解析

高エネルギー実験研究室

為近 彩智 13163015

角野 秀一 (指導教員)

Belle II 実験は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)に建設されている superKEKB 加速器を用いて 7GeV に加速した電子と 4GeV に加速した陽電子の対消滅による B 中間子対の生成、崩壊過程を BelleII 検出器で大量に観測する実験である。その崩壊過程に含まれるごく稀な事象を精密に調べ、標準模型を超える新しい物理を探索することを目的としている。

BelleII 検出器は複数の検出器から構成される。そのうちの一つである Aerogel Ring Imaging Cherenkov 検出器(ARICH)は、荷電 K/ π 中間子の粒子識別を担う。ARICH はシリカエアロゲル輻射体と光検出器 Hybrid Avalanche Photo-Detector (HAPD) からなり、荷電粒子がシリカエアロゲルを通過する際に放射するチェレンコフ光をリングイメージ(図 1)として HAPD で観測する。このチェレンコフ光のリングイメージの半径の違いから粒子質量を求めることで、粒子識別を行う。

本研究では、ARICH の性能評価のために図 2 のセットアップで行われた宇宙線テストの解析を行った。本セットアップでは飛跡検出器が存在しないため、ARICH のリングイメージ情報をもとに宇宙線の飛跡を求める手法を開発し、平成 28 年 12 月～1 月に収集した宇宙線データの解析を行った。その結果、宇宙線のチェレンコフ光の発光点がエアロゲルの範囲内にあることを確認し、エアロゲルを通過した宇宙線が観測できていることを確認した。またチェレンコフ光の放射角分布を求め、その理論値との比較を行った。

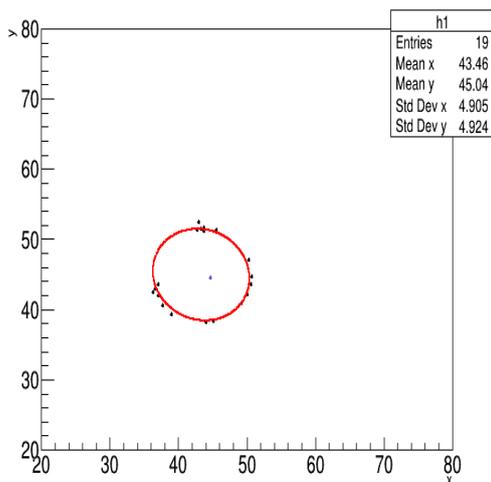


図 1 : リングイメージ

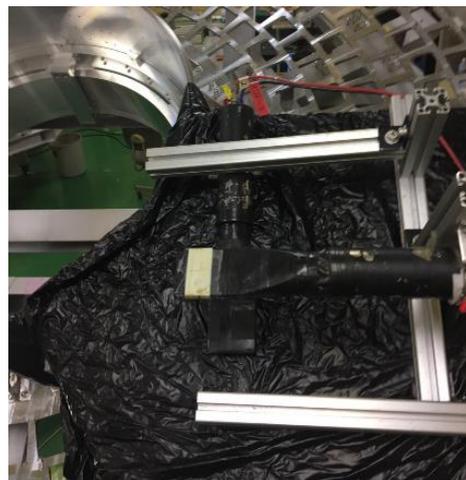


図 2 : 宇宙線テストのセットアップ

ARICH プロトタイプ検出器の ビームテストデータの解析

高エネルギー実験研究室

柿本詩織 13163030

角野秀一 (指導教員)

Belle II 実験は高エネルギー加速器研究機構に設置されている電子・陽電子衝突型加速器 Super-KEKB により、大量の B 中間子対を生成しその崩壊過程を観測することで標準模型を超える新しい物理の探索を行うことを目的とした実験である。

Belle II 検出器は複数の検出器から成る複合型検出器である。そのエンドキャップ部における荷電 π/K 中間子の粒子識別を行う Aerogel Ring Imaging Cherenkov 検出器 (ARICH) の開発が首都大を含むグループにより進められている。ARICH はシリカエアロゲル輻射体と光検出器 Hybrid Avalanche Photo Detector (HAPD) の 2 層構造になっている。荷電粒子がエアロゲルを通過する際に発生するチェレンコフ光を HAPD でリングイメージとして観測し、その半径の違いから粒子の識別を行う。

本研究では、図 1 のセットアップで 2013 年に行われた ARICH プロトタイプに対し斜め方向から荷電粒子が入射する際の π/K 識別能力を調べるために ARICH に対して 30 度の入射角でビームを入射したデータの解析を行った。ビームテストデータで観測されたリング (図 2) と π 中間子と K 中間子を仮定したときのチェレンコフ角から予測されるリングを用いて粒子識別能力の評価を行った。

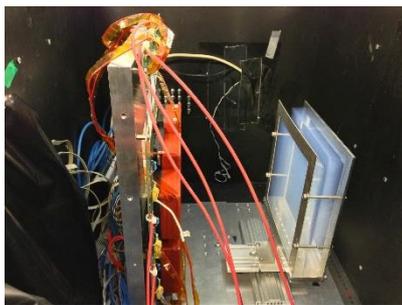


図 1: ビームテストのセットアップ

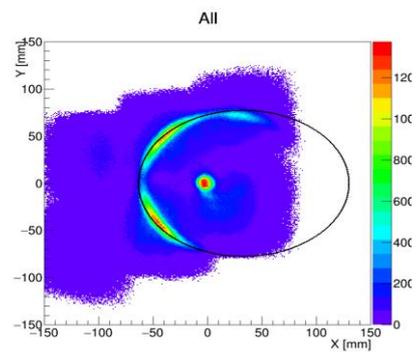


図 2: ビームテストで観測された
チェレンコフリングと計算により
予測されるリング

改良型 UNI 検出器を用いたポジトロニウム 5 光子崩壊事象の観測

高エネルギー実験研究室

吉川 広陽 13163051

汲田 哲郎 (指導教員)

ポジトロニウムは電子と陽電子の電磁相互作用による束縛状態である。ポジトロニウムは通常 2, 3 光子に崩壊し稀に 4 光子以上に崩壊する。ポジトロニウムの 5 光子崩壊過程は高次 QED 現象であり、直接観測は世界でもまだ実現されていないユニークな実験である。

我々は UNI 検出器を用いて 5 光子崩壊事象の検出実験を行っており、高次 QED の検証を目的としている。UNI 検出器は 32 面構造体の 30 面にそれぞれ NaI シンチレーターを配置し、構造体中心で生成したポジトロニウムの光子崩壊を検出する。

しかし、これまでの装置では 3 光子崩壊事象などからのバックグラウンドが非常に大きく、5 光子崩壊事象の検出は難しいことが分かった。我々はシミュレーションに基づき、バックグラウンド低減のため、陽電子線源部、ポジトロニウム生成部、コンプトン散乱遮蔽用鉛シールドの改良を行った。改良された装置を用いたデータ収集は、2017 年 1 月より開始された。

本発表では、今までに行ってきた実験装置の改良と、ポジトロニウム 5 光子崩壊事象解析の現状について報告する。

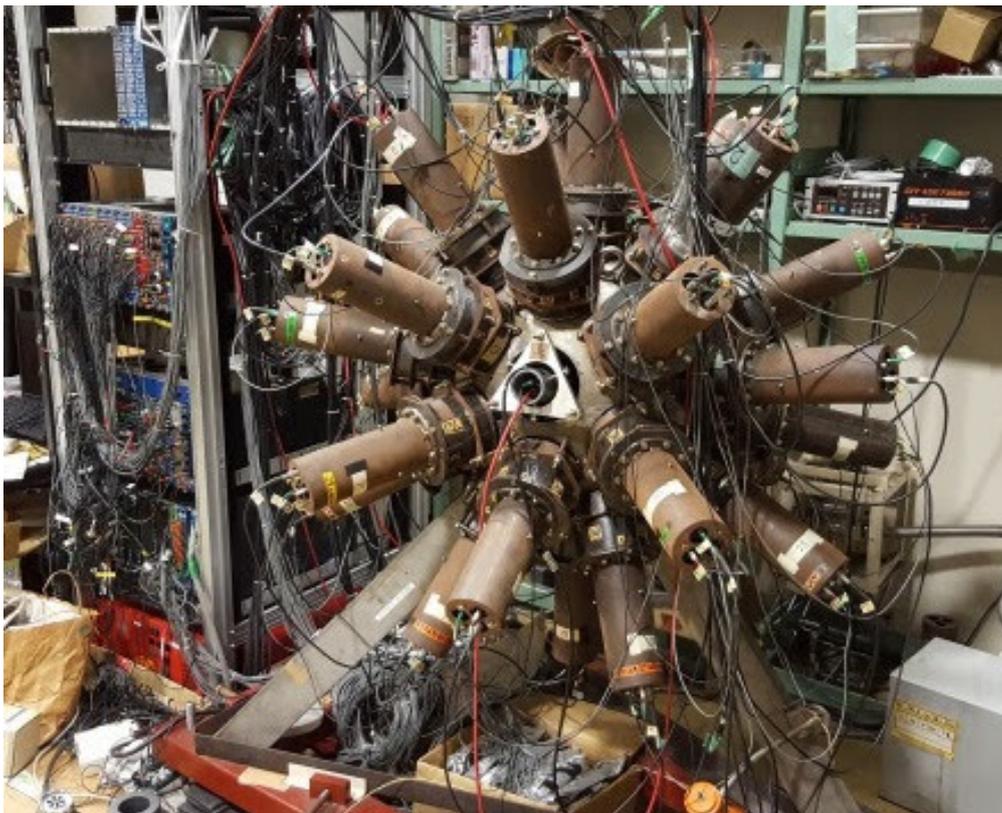


図 1 UNI 検出器外観

宇宙線ミュオンによる岩手山透視に向けた シミュレーション研究

高エネルギー実験研究室

小西 達也 13163008

角野 秀一 (指導教員)

一次宇宙線が大気圏に届く際、一次宇宙線と大気の原子核反応により π 中間子と K 中間子ができ、すぐに二次宇宙線であるミュオンなどに崩壊する。ミュオンは電荷を持ちかつ強い相互作用をしない素粒子であり、電子と比較して非常に重いため高い透過力を持つ。X線を利用したレントゲン検査のように、宇宙線ミュオンを用いた火山や原子炉等の内部構造を見る手法を、ミュオンラジオグラフィイと言う。物体を透過したミュオンの分布を測定することでその内部構造を知ることができる。我々は、この手法を利用して現在岩手山に対して、内部構造の測定を行っている。

現在までに岩手山で収集されているデータでは岩手山方向から飛来するミュオンの数が透過率から予測される数より非常に多いことが分かった。本研究では、検出器方向に飛来するミュオンが山を透過して検出される事象と、別の角度から飛来したミュオンが山中の物質で散乱されて、角度を変えて検出される事象をモンテカルロシミュレーションを用いて理解することを最終目的としている。ミュオンは物質の密度と運動量に応じて透過力および散乱角度が決まる。特に高い運動量(数百 GeV 以上)では物質中でのエネルギー損失や散乱だけでなく制動放射も加味しなくてはならない。それらを総合的に考慮するために GEANT4 を用いてシミュレーションを行った。GEANT4 は、ヨーロッパ原子核研究所(CERN)で開発された、素粒子と物質の相互作用をシミュレートするためのフレームワークである。

本研究発表では、GEANT4 シミュレーションを用いて任意の物質の厚さ、ミュオンの運動量に対するエネルギー損失や散乱角度を定量的に調べた結果について報告し、今後の展望について述べる。



図 1 : 計測装置の設置の様子

BiS₂系層状超伝導体の超伝導特性に対する一軸圧力効果

電子物性研究室

大西 翔太 13163080

東中 隆二, 松田 達磨, 青木 勇二(指導教員)

BiS₂系層状超伝導体は、BiS₂伝導層とブロック層が交互に積層した構造を持ち、元素置換によりブロック層から BiS₂ 伝導層に電子がドーピングされることによって超伝導が発現する(図 1)。Bi の 6p_x, 6p_y 軌道が 2 次元的電気伝導を担っており[1]、電気抵抗率は大きな異方性を持つ[2]。また、Ln(O_{0.5}F_{0.5})BiS₂ (Ln=La)の系において静水圧力の印加により転移温度が上昇することが報告されている[3]。本系が層状構造を持つことを考慮すると、超伝導特性および発現機構を明らかにするためには、単結晶試料を用いて、異方的な加圧効果を調べるのが重要である。様々な元素置換と T_c の関係から、BiS₂ 伝導層面内の化学圧力が T_c と強く相関していることが指摘されているが[4]、これまでに直接的な一軸圧力印加実験は行われていない。本系の結晶構造の一つの特徴は、2 枚の隣接する BiS₂ 伝導層が Van der Waals 力により結合した構造を持つことである。c 軸方向に一軸圧力を印加し、超伝導特性を調べることで、この 2 枚の BiS₂ 伝導層の結合が超伝導にどのように関与しているのか知見が得られる可能性がある。そこで我々は、Nd(O_{0.5}F_{0.5})BiS₂ 単結晶試料を用いて測定を行った。初めに超伝導磁化測定を行うために装置の磁場較正を行った。また、バックグラウンドに対して試料の磁化が 1/500 ほどの大きさであったが、それを抽出する方法を構築した。そして c 軸方向に一軸圧を印加し、c 軸方向の磁化率を測定し、一軸圧に対する T_c の変化を調べた。常圧から 0.38 GPa まで一軸圧を変化させた際の磁化率の温度依存性を図 2 に示す。本測定から Nd(O_{0.5}F_{0.5})BiS₂ の一軸圧に対する T_c、磁化率の有意な変化は見られないことがわかった。また、X 線回折実験より、加圧後の試料は加圧前と比較して結晶構造が変化していないことから、圧力印加による結晶構造の変化は可逆的であることを確認した。今回は試料を圧力媒体に埋め込まない方法を用いたが、今後はさらに高い一軸圧で実験を行うために圧力の異方性を保ちつつ、圧力媒体でさらに高い圧力を印加する方法が必要である。

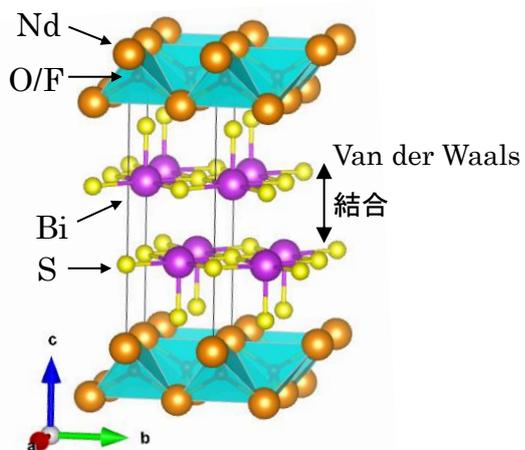


図 1 NdO_{0.5}F_{0.5}BiS₂ の結晶構造

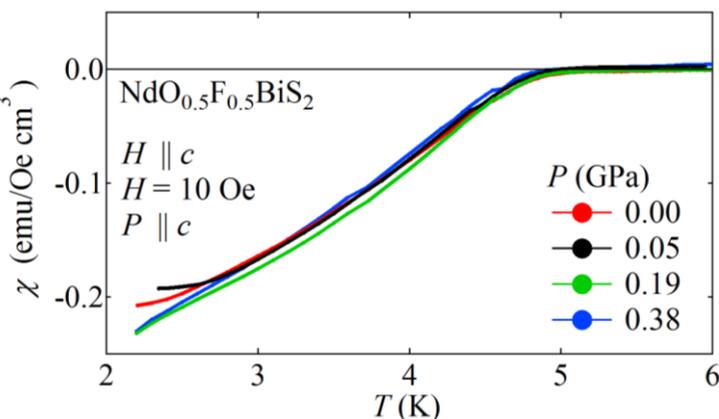


図 2 Nd(O_{0.5}F_{0.5})BiS₂ の磁化率の温度依存性

- [1] T. Sugimoto *et al.* Phys. Rev. B. **92**, 041113(R) (2015).
- [2] M. Nagao *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 083101 (2015)
- [3] T. Tomita *et al.* J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 063704 (2014).
- [4] Y. Mizuguchi *et al.* Sci. Rep. **5**, 14968 (2015).

充填スクッテルダイト化合物 $\text{YbOs}_4\text{Sb}_{12}$ の 超伝導特性とその試料評価

電子物性研究室

岸本美晴 13163018

(指導教員) 松田達磨 東中隆二 青木勇二

強相関電子系希土類化合物として知られる典型物質群の一つに、充填スクッテルダイト化合物 RT_4X_{12} (R : 希土類、 T : Fe, Ru, Os、 X : P, As, Sb) がある。図 1 に示すような結晶構造をとり、12 個のプニクトゲン X が形成する対称性の高いカゴ内に R 原子が位置することで、 f 電子状態の小さな結晶場分裂、あるいは伝導電子との大きな混成効果が起きることで、低温で重い電子超伝導状態や非フェルミ液体的異常を示す系が多数報告されている。また Sm, Yb などは複数の価数状態を取り得るが、この価数の自由度に起因すると考えられる磁場に鈍感な重い電子状態が $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ [1] 等において報告されている。最近、我々は Yb 化合物、特に $\text{YbOs}_4\text{Sb}_{12}$ に注目して研究を行っている。一般に $R =$ 重希土類及び $X =$ As, Sb の充填スクッテルダイト化合物では、結晶育成が難しく、たとえ育成できたとしても希土類の充填率が低下する傾向がある。この充填率の低下が、系の本質的な振る舞いの解明を妨げている。

本研究では常圧・高圧下で Sb 自己フラックス法を用いて $\text{YbOs}_4\text{Sb}_{12}$ の高純度単結晶を育成し、極低温での物性測定を行った。その結果、常圧合成で最大 0.4mm、高圧合成で最大 0.2mm の単結晶が得られ、また高圧合成法においては収量の大幅な改善に成功した。両試料において X 線単結晶構造解析を多数行った。まず格子定数から Yb が 3 価からずれ 2 価寄りであることが分かった。常圧合成試料においては理論値とのずれの小さい解析結果が得られ、充填率は 100% で温度因子も妥当な値であった。高圧合成試料においても理論値とのずれは比較的小さい解析結果が得られたが、充填率や温度因子が物理的に不適当な値であることから、常圧合成した単結晶の結晶性が良いということが分かった。電気抵抗測定の結果では、常圧合成試料の残留抵抗比 RRR は高圧合成試料の値よりも極めて大きく、また常圧合成試料は図 2 の挿入図に示される通り $T_c = 0.46$ K で超伝導転移が見られるが、高圧合成試料は超伝導転移が見られなかった。以上より $\text{YbOs}_4\text{Sb}_{12}$ においては高圧合成よりも常圧合成によって純良な単結晶が得られることが明らかになった。また低温での電気抵抗から見積もられる電子比熱係数 γ は約 $50 \text{ mJ/K}^2 \cdot \text{mol}$ であり、比較的有效質量が増強されている重い電子系であることが示唆される。これより $\text{YbOs}_4\text{Sb}_{12}$ は Yb の価数の自由度に起因した重い電子系超伝導体である可能性を見出した。

[1] A. Yamasaki et al., Phys Rev Lett. PRL 98, (2007) 156402

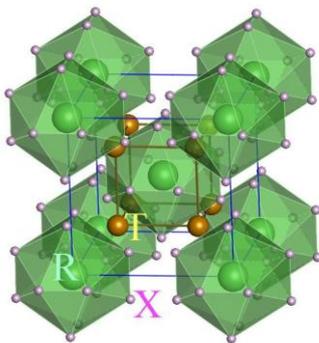


図 1 : 充填スクッテルダイト RT_4X_{12} の結晶構造 (R : 希土類、 T : 遷移金属、 X : プニクトゲン)

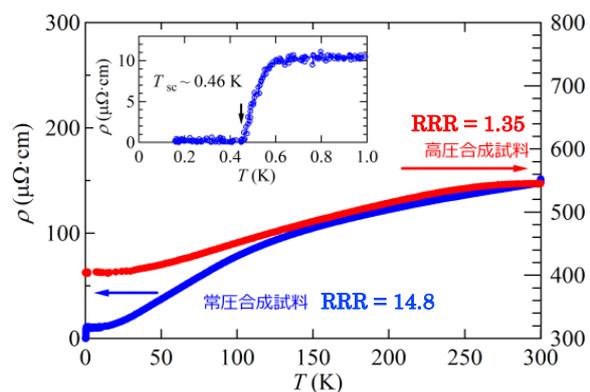


図 2 : $\text{YbOs}_4\text{Sb}_{12}$ の電気抵抗率の温度依存性

SmIr₂Si₂ における構造異性体の結晶育成と低温物性

電子物性研究室

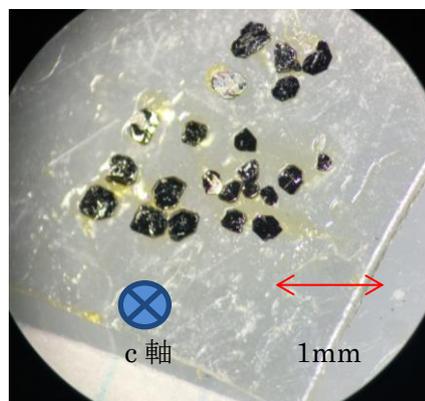
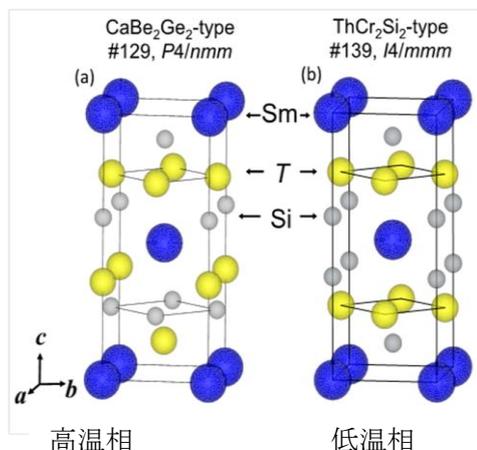
酒井 恭兵 13163084

(指導教員) 松田達磨 青木勇二

これまで我々は Sm 化合物における強相関電子物性を研究するなかで、SmPt₂Si₂ において磁気モーメントの部分無秩序的磁気秩序相と、それによって重い電子状態が発現している強相関電子状態の可能性を見出してきた。この物性異常のメカニズムは、結晶構造に起因した複数の相互作用の拮抗が関与していると考えられるが、我々はこの SmT₂Si₂ 系がとる 2 つの結晶構造とその電子状態の違いに注目して研究を行っている。本研究では遷移金属 *T* を Ir(周期表において Pt の左隣)にした SmIr₂Si₂ について注目して研究を行っていた。

SmIr₂Si₂ は育成温度により二つの構造を取りうる物質であり、左下図に示すように低温相では ThCr₂Si₂ 型構造をとり、高温相は CaBe₂Ge₂ 型をとる。SmPt₂Si₂ はこの高温相と同じ CaBe₂Ge₂ 型構造をとることが報告されている[1]。

SmIr₂Si₂ については単結晶育成の難しさから測定に必要な大きさの試料が得られず、これまで電気抵抗率しか測定されていなかった。そのために、低温相においてより大きな SmIr₂Si₂ 単結晶の合成を目的として Sm, Ir, Si, Sn フラックスそれぞれの量を変え、単結晶育成条件を探り、試料合成に挑戦した。測定に用いた試料の純良性を示す残留抵抗比 (R_{300}/R_2)=270 であり、また dHvA シグナルを観測できたうえに複数の高調波が観測できたことから、この試料は非常に高純度であると言える。この試料の場合、磁化測定には約 0.5 mg 以上のサンプル量が必要になるため、微小な単結晶を 20 個程度収集し磁化測定に用いた(右下図)。その結果、SmIr₂Si₂ の低温での磁気異方性の観測に初めて成功した。また高温相については多結晶試料の育成を試み、X 線解析実験により試料の評価を行ったので報告する。



磁化測定に用いたサンプルの様子

[1] M. Vališka et al., J. Alloys Compounds **574**, 459 (2013),

RGa₆の単結晶を用いた極低温物性測定

電子物性研究室

添川一樹 12163093

東中隆二 松田達磨 青木勇二 (指導教員)

強相関電子系希土類化合物は、希土類元素のもつ f 電子の自由度に起因した重い電子状態や非フェルミ液体的な振る舞いなど特異な物性を示す。 $RTrX_5$ (R :希土類、 Tr :遷移金属、 X :Ga,In) で表される三元化合物では、典型的重い電子系超伝導体 $CeCoIn_5$ 等が発見され精力的に研究が行われてきた。近年、我々は $CeThIn_5$ に類似した結晶構造を持つ $RThGa_6$ に注目して研究を行っている。図1(a)(b)に示すように、両構造とも正方晶系であり、 $RThGa_6$ では、 $CeThIn_5$ と比較して、Ga サイトの局所対称性が低下するという違いがあるものの、極めて酷似している構造であることが分かる。本研究では、さらにこの $RThGa_6$ の基本構造となる RGa_6 (図1(c)) について高純度単結晶を用いた極低温物性測定を行った。 RGa_6 は二元系ではあるが、複雑な二元温度状態図をもっているため、単結晶試料育成が難しく、近年まで詳細な物性研究がなされていなかった。 RGa_6 系の中でも $CeGa_6$ は、多結晶の研究から低温 2 K まで磁気転移等が見られず[1]、近藤効果と RKKY 相互作用が拮抗する量子臨界点近傍に位置する物質として、我々は興味深い低温物性が期待できると考えた。

PPMS を用いた低温 0.4 K までの比熱の温度依存性測定の結果(図2)より、ゼロ磁場において 2 K 付近から 1.5 K にかけて、複数の相転移に伴う複雑な比熱の構造が見られることが分かった。全体として λ 型の振る舞いを示すが、温度 $T_1 \sim 2$ K において肩構造を持ち、さらに $T_2 \sim 1.5$ K 付近にシャープなピーク構造を示す。磁場印加とともにこの転移はブロードになり T_1 は高温側へ T_2 は低温側へと変化していく。さらに、6 T の磁場中では転移が抑制され、ショットキー型の振る舞いになる事が分かった。エントロピーを見積もると T_1 において $R \ln 2$ の 80% 放出する立ち上がりを見せ、そこから緩やかに上昇する振る舞いを見せる。この振る舞いは C/T において転移温度より充分高温側から温度降下とともに比熱の上昇を見せることに由来する。この原因として、2つの可能性が考えられる。一つは磁気転移に伴う高温側での short range order の発達、もう一つは近藤効果によるものである。電気抵抗測定の結果からは、まず T_1, T_2 において超伝導転移は確認されないことから磁気転移の可能性が高いことが分かる。また転移点以上において近藤効果を示す物質に特徴的な抵抗の $-\ln T$ 依存性がみられないことから、常磁性状態の比熱に見られる振る舞いは、short range order に原因するものである可能性が高いことが分かった。本研究では、単結晶を用いた詳細な構造解析等も行い、構造パラメータに関する特徴についても調べたので報告する。

[1] Y. Tagawa, J. Sakurai and Y. Komura: Less-Common Met. **119**, 269 (1986).

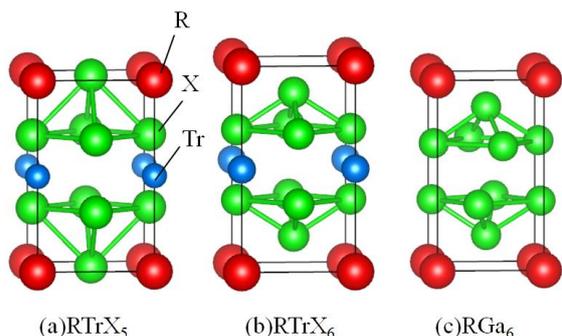


図1: $RTrX_5, RTrX_6, RGa_6$ の結晶構造

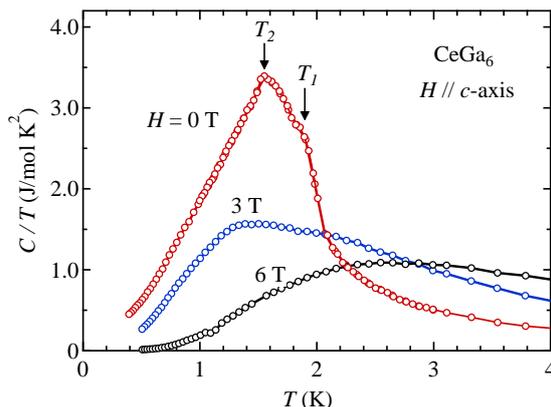


図2: $CeGa_6$ の比熱の温度依存性

相互作用の時間遅れによる凝集パターンの粒子形状依存性

ソフトマター物性研究室

首都大学東京 都市教養学部 都市教養学科 理工学系 物理学コース 4年

15263003 本多崇稔

自然界において、雪の結晶や高分子結晶など、樹枝状パターン (RDP: Radial Dendritic Pattern) を形成する系は多く存在することが知られているが、高密度系の RDP 形成のメカニズムはまだ解明されていない。これに対し、Lennard-Jones ポテンシャルを利用した凝集モデルの研究が行われている^[1]。この研究の発展系として、我々はその粒子形状と凝集パターンとの関係を探ることにした。

本研究で用いるモデルは、粒子間の引力相互作用を誘起させる領域を制限することが特徴である。その領域はシミュレーション領域の中心を発生源とし、系全体に一定速度で円形に広がっていく。これにより、中心付近にある粒子と比べて、外側にある粒子では引力相互作用の誘起に時間遅れが生じることとなる。引力相互作用の働く領域の境界は相互作用のトリガーとみなすことができ、境界が広がる速度を v_{tri} とする。このモデルの area fraction $\phi = 0.88$ (粒子数 $N = 9000$)、 $v_{tri} = 10^{-5}$ 、粒子の縦横比 $\alpha = 1.0$ (円) の条件において、樹枝状パターンが形成されることが報告されている。^[1] (図 1)

本研究では、粒子の形状を楕円形にした場合、凝集パターンはどう変化するかをシミュレーション実験によって調べた。粒子の楕円形を再現するために用いたポテンシャルは Gay-Berne ポテンシャルで

ある。本研究の計算条件は、 $\alpha = 1.0, 1.1, 1.3, 1.5$ の 4 通りとし、 $\phi = 0.68$ ($N = 7000$)、 0.88 の 2 通り、 $v_{tri} = 10^{-1}, 10^{-5}$ の 2 通りについて、合計 16 通りである。

$\phi = 0.88, v_{tri} = 10^{-5}, \alpha = 1.5$ の条件における凝集パターンを図 2 に示す。図 2 の計算条件は、先に示した図 1 の計算条件のうち、 α の値のみを変えたものであるが、凝集パターンの明らかな違いが確認された。 $\phi = 0.88, v_{tri} = 10^{-5}$ においても、 α のその他の値についても凝集パターンを調べたところ、 α の値が大きくなるにつれて、クラスターの数が増加していく傾向が得られた。この α の値とパターンとの関係について、粒子の移動速度と v_{tri} を比較することにより考察を行った。

本研究においては、シミュレーションに要する時間などの都合により、1 通りの初期配置に対してのみシミュレーション実験を行った。今後の展望としては、複数の初期配置に対して計算を行い、統計的な解析などを行うことで、より精度の高い議論ができると考えている。

[1]: Oikawa, N. and Kurita, R. A new mechanism for dendritic pattern formation in dense systems. *Sci. Rep.* **6**, 28960; doi: 10.1038/step28960 (2016)

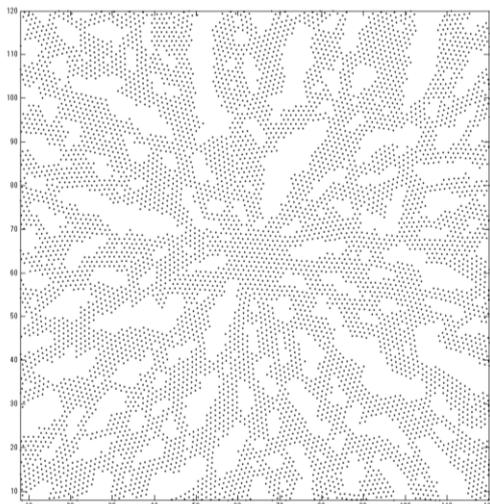


図 1. $\phi = 0.88, v_{tri} = 10^{-5}, \alpha = 1.0$ の凝集パターン

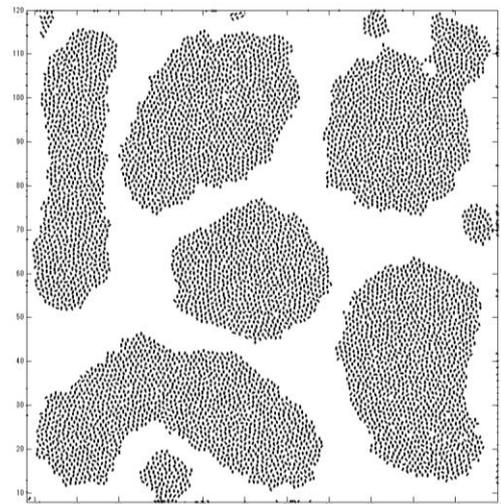


図 2. $\phi = 0.88, v_{tri} = 10^{-5}, \alpha = 1.5$ の凝集パターン

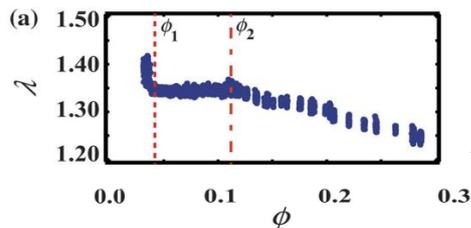
泡沫における superdry-dry 転移の解析

ソフトマター物性研究室

柳沢 直也 13163043

栗田 玲、及川 典子 (指導教員)

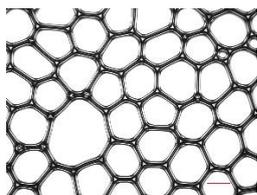
泡沫 (foam) とは、液体や固体中に気泡 (bubble) が混み合って内包されている状態のことであり、2つの相の性質をもち合わせるため、機能性が高く、ビールの泡・洗剤・発泡スチロールなど、日常生活の多くの場面で利用されている。液体・気体泡沫を記述する重要なパラメーターの1つに液体分率 ϕ (泡沫全体積に対する液体体積の割合) がある。泡沫は従来、内包されている気泡の形状によって経験的に分類されてきた。 ϕ が低く、形状が多面体 (多角形) のときを **dry** 状態、 ϕ が増加し、形状が球形 (円形) のときを **wet** 状態と呼んだ。それぞれの状態で物理的性質 (粘弾性など) が異なることは知られていたが、**dry** と **wet** の明確な定義は曖昧なままであった。先行研究において、泡沫の崩壊過程に注目し、気泡の形状の ϕ 依存性を調べたところ、 ϕ_1, ϕ_2 で気泡の形状が不連続に変化することが分かった。 $\phi < \phi_1$ を **superdry**、 $\phi_1 < \phi < \phi_2$ を **dry**、 $\phi_2 < \phi$ を **wet** と状態をそれぞれ命名した。**dry-wet** 転移は気泡の再配置と関係があり、泡沫の弾性と表面張力の競合によって起こることが分かった。一方、**superdry** では気泡の形状が内部まで大きく歪んでいるのに対し、**dry** では歪みが表面に局在し、内部の歪みは解消されていた。これは表面張力の伝播という力学特性が異なっていることを意味するが、その起源についてはよく分かっていない。[1]



気泡の形状の歪み具合 λ の液体分率 ϕ 依存性

[1]:Yujiro Furuta, Noriko Oikawa & Rei Kurita. Close relationship between a dry-wet transition and a bubble rearrangement in two-dimensional foam. Scientific Reports 6, (2016)

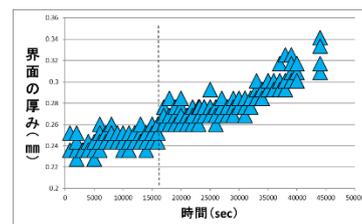
本研究では、**superdry-dry** 転移の物理的な起源の解明を目指す。**superdry** では気泡同士が押し合い、気泡内の圧力は高まっており、**dry** では気泡の押し合いが弱まるため、圧力が小さくなると予想した。気泡と気泡の間にある液膜は、厚み方向に水との圧力差によって曲げられる。この曲率半径を精度良く測定するために、顕微鏡を用いて泡沫の崩壊過程のマイクロ観察を行った。その結果、界面の厚みは初期では一定だったものの、ある時刻を境に増加し始めることを見つけた。今回はこれについての解析と考察、**superdry-dry** 転移との関係について発表する。



t=1000sec



t=44000sec



界面の厚みの時間変化

粉体における構造と force chain の関係性

ソフトマター物性研究室

沖山 綾馬 13163038

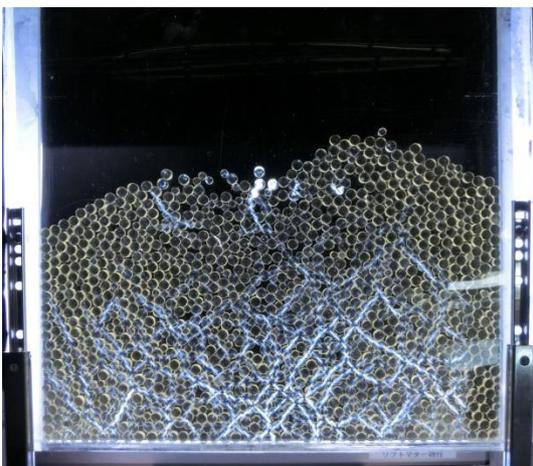
栗田 玲 及川 典子 (指導教員)

粒子径に分布があり、数マイクロから数ミリの大きさの粒子集団を粉体という。粉体は固体粒子の集まりであるにも関わらず液体や気体のような流動性を持っている。このような力学的挙動は摩擦や非弾性衝突による非平衡系によるため統計力学的な記述が難しく、粉体の持つ性質によって引き起こされる現象には理解が進んでいないものが多く存在している。また粉体はその粒子径分布と摩擦によって **force chain** と呼ばれる力のネットワーク構造を内部に形成する。砂山を作り底面の圧力分布を測定すると、その分布が砂山の作り方に依存することが知られている。これは **force chain** の構造が砂山の作り方によって変化するからである。

粉体の力学的挙動を記述するために **force chain** の理解は不可欠であるが、**force chain** のメカニズムについてほとんど理解されていない。我々は粉体のミクロな内部構造との関係に注目して研究を行った。

force chain を観測する方法の一つとして光弾性法が使われる[1]。アクリルやプラスチックなどの透明で一様な物質に力を加えて光を入射させると、屈折率異方性が生じることで複屈折を起こすことが知られている。このような物質で粉体のモデルを作り光を入射させることで **force chain** を観測すること出来る。

今回の発表では作成した二次元粉体モデルに対して光弾性法を用いた **force chain** の観測結果と、装置を使用した今後の展望について述べる。



(1) 二次元粉体モデルと **force chain**

中性子星合体による重元素合成機構解明へ向けた 多価イオンの可視分光

原子物理実験研究室 阿久津卓土
指導教員 田沼肇

1 はじめに

重元素の起源としては長らく超新星爆発が有力であったが、最近の研究によって中性子星合体の可能性が高いとする説も浮上してきた。中性子星合体は重元素合成によって可視光を放つことがわかっているため [1], そのスペクトルを測定できれば、重元素の放出量がわかり、合成機構とその起源を解明できる。

但し、これを行うためには著しく不足している重元素の分光データを整備する必要がある。そこで本研究では、まず可視分光システムを立ち上げ波長較正と動作確認を行なった。そして、重元素の一つである Er (エルビウム, 原子番号 68) 多価イオンの生成と可視領域での電荷交換分光測定を行った。

2 可視分光システム

可視分光システム (図 1) の概要は次のとおりである。まず、ECRIS (電子サイクロトロン共鳴イオン源) で生成した多価イオンを磁場によって価数選別し、中性標的ガスと衝突させる。ここで、電荷交換によって励起状態が生成すると、より安定な状態へ遷移する際に発光する。この発光をレンズでファイバーへ集光し、分光器を通して CCD カメラで観測することで分光測定を行う。本システムの波長較正には、水銀の既知の発光線を用いた。

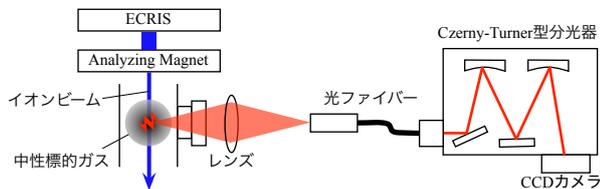


図 1 可視分光システム概略。

3 Er 多価イオンの生成と可視分光

ECRIS で生成した酸素プラズマによってチェンバー内の金属 Er ロッドをスパッタし、さらに電子衝撃によって電離させることで Er 多価イオンを生成した。マスマスペクトルを図 2 に示す。Er は 4 価から 10 価程度まで生成されており、スペクトルの細かな分裂は同位体 (質量数 162-170) によるものである。

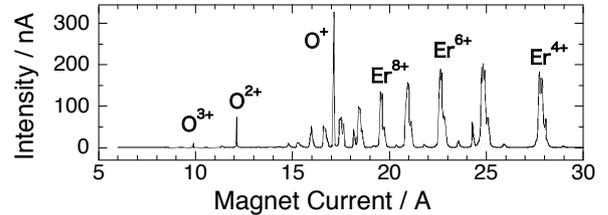


図 2 Er 多価イオンのマスマスペクトル。

次に 6 つの衝突系 $\text{Er}^{4+}/\text{Er}^{5+} - \text{Ar}/\text{O}_2/\text{N}_2$ で可視領域の分光測定を行ない、454 nm 付近に幅広いピークを確認した。Ar 標的での測定結果を図 3 に示す。強度はビーム強度、測定時間、標的のガス圧で規格化した。図 3 からわかるように、このピークの強度は入射多価イオンが Er^{4+} のときより Er^{5+} のときのほうが強かった。低価数イオンでは一電子捕獲よりも二電子捕獲が支配的となる場合があることから [2], このピークは Er^{3+} の発光と考えられる。

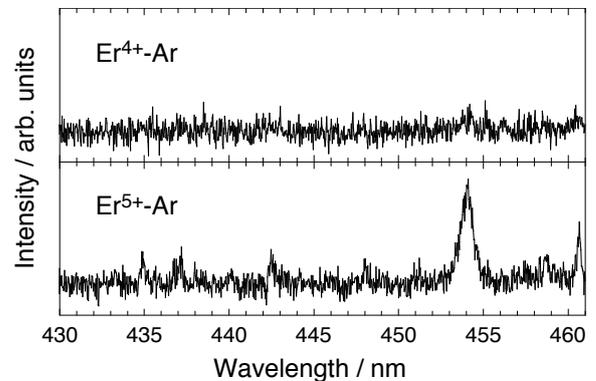


図 3 Ar 標的での Er 多価イオンの分光測定結果。

4 今後の展望

測定時間、ビーム強度が不十分な実験の再実験や、観測していない領域での実験、Er の価数を変えた実験をした上で、理論計算と比較して遷移を同定していく。また Er 以外の重元素にも同様に取り組み、重元素の分光データ充実を目指す。

参考文献

- [1] M. Tanaka, K. Hotokezaka, “Radiative transfer simulations of neutron star merger ejecta”, 2013, *ApJ* **775**, 113.
- [2] K. Ishii, A. Itoh, K. Okuno, “Electron-capture cross sections of multiply charged slow ions of carbon, nitrogen, and oxygen in He”, 2004, *PRA* **70**, 042716.

冷却過程研究に向けたグリシン正イオンの蓄積実験

原子物理実験研究室

栗山みさき 13163059

古川 武, 田沼 肇 (指導教員)

近年、イオンビームトラップや静電型イオン蓄積リングなど、原子・分子イオン蓄積技術が飛躍的に発展し、孤立環境下にある原子分子の研究が精力的に進められている。特に、高温な、つまり高振動励起状態にある孤立分子の輻射冷却過程は、競合する遅延解離過程との比較から、宇宙空間での分子存在量を紐解く鍵にもなる重要な事象である。中でも孤立環境でのアミノ酸分子の冷却過程は、生命の起源にも関連した興味深いトピックスの一つである。

本研究では、アミノ酸の中で最も構造が単純なグリシンの孤立環境下での冷却過程観測に向けて、静電型イオン蓄積リング(E-Ring)を用いたイオン蓄積を行った。E-Ringはレーストラック型のイオン蓄積装置で、装置内部は 10^{-9} Pa 台の高真空に保たれており、残留ガスなど粒子との衝突が少ないため長時間にわたる(秒程度)イオン蓄積が可能である。図1に実験の概略図を示す。ペレット状(粉末状のグリシンを圧縮プレス機で押し固めたもの)のグリシン試料とグラファイト試料を半円ずつ組み合わせ合わせた試料に対してパルス Nd:YAG レーザー光(波長: 266 nm, パワー: 5 mJ/pulse)を照射し、レーザーアブレーション法で正イオンを生成した。生成されたイオンは電場でおよそ 15 keV まで加速され E-ring 内に入射した。一方の直線部分の延長線上に中性粒子検出器 (MicroChannel Plate, MCP) を設置し、高温な蓄積イオンの遅延解離過程によってできた中性粒子収量の蓄積開始からの時間変化を測定した。得られた中性粒子信号を離散フーリエ変換(DFT)して得られた周回周期から蓄積イオン質量を求めたところ、質量数が 76 であり、グリシンに水素が付加した正イオンであると考えられる。

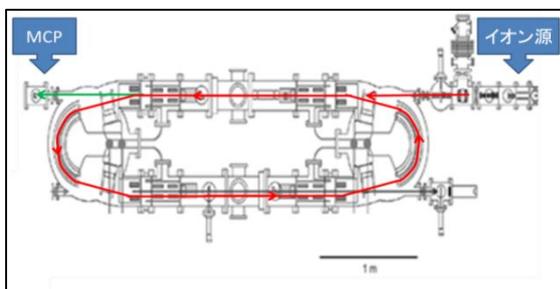


図 1: E-Ring 全体の概略図。イオン源で生成後のイオンは赤い矢印で示した軌道で周回する。周回中、直線部で解離した中性粒子は緑の矢印に沿って MCP で検出される。

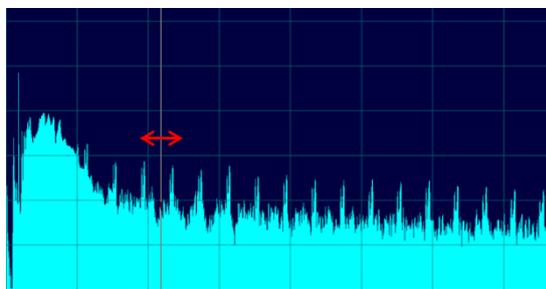


図 2: グリシンイオンの蓄積結果。横軸は蓄積開始からの時間、縦軸は対数目盛の中性粒子収量。周回ごとの直線部で解離した中性粒子を検出するため、周期的な信号が得られる。赤の両矢印で表したイオンの周期は $39.99 \mu\text{s}$ であった。

炭素クラスター負イオンのポアンカレ蛍光測定

原子物理実験研究室

吉田 茉生 (13163078)

田沼 肇, 古川 武 (指導教員)

孤立環境に置かれた高温、つまり高振動状態にある分子の冷却される過程は、原子分子物理学だけでなく宇宙での分子合成進化にも関連した重要な事象である。これまで衝突などにより生成された高温な星間分子は、電子励起エネルギーが電子基底状態の振動エネルギーに変換されるという内部転換の後、振動遷移により赤外線としてエネルギーを放出することで冷却が進むと考えられてきた(図1)。この過程は数ミリ秒~数秒という長い時定数を持つ。このため生成直後の高温で不安定な負イオンは冷却により安定となる前に壊れ、宇宙のような孤立環境下では存在しにくいとされていた。

しかし分子によっては内部転換の逆過程である逆内部転換により振動エネルギーが電子励起エネルギーに変換され、さらに電子遷移によってポアンカレ蛍光とよばれる光を放出して基底状態に戻るといった過程が存在する(図1 赤線)。この過程は振動輻射過程に比べはるかに速い数マイクロ秒という時定数をもつ。本過程によって急速に冷却されると負イオンでも壊れる前に安定となり生き残りやすくなるため、宇宙空間にこれまでの予想よりはるかに多くの負イオンが存在することが期待される。

ポアンカレ蛍光の研究は近年始まったばかりで、特に蛍光の直接観測は炭素鎖分子負イオン C_6^- に対して原子物理実験研究室の静電型イオン蓄積リング(TMU E-ring)を用いて行われたのみである。私はこの E-ring を用いて C_6^- に加えて C_4^- からのポアンカレ蛍光観測を行った。E-ring は 10^{-9} Pa 台という超高真空下でイオンを長時間(数秒程度)蓄積可能な装置であり、孤立分子の冷却過程観測に適している。実験は E-ring にレーザーアブレーションイオン源で生成した高温な C_n^- ($n: 2-6$) イオンを入射し、直後約 0.2 ms 間、E-ring の光学窓に設置した集光レンズと光電子増倍管から成る光検出系で検出される光強度の時間変化を測定した。励起準位に関する理論計算の文献値から C_4^- と C_6^- それぞれのポアンカレ蛍光波長を推測し、目的の波長の光だけを透過するバンドパスフィルター(C_4^- : 460(7)nm, C_6^- : 607(35)nm)を使用した。測定の結果、 C_4^- の蛍光は C_4^- 用フィルターだけでなく C_6^- 用フィルターを通して観測された。このことはポアンカレ蛍光のスペクトル構造が幅広いことを示唆しており、このようなスペクトル構造を取る原因など新たな興味を持たれる結果と言える。

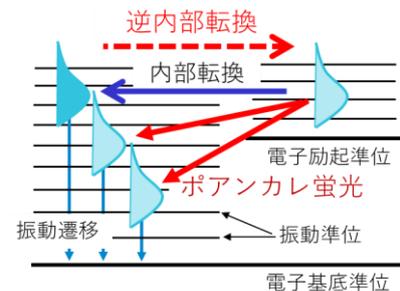


図1 分子の振動過程の模式図

赤の矢印が新たに分かったポアンカレ蛍光による冷却過程

ダイヤモンド格子上の超伝導状態の解析

強相関電子論研究室

石飛 尊之 13163020

指導教員: 服部 一匡

Onnes による超伝導の発見 (1911) 以来約 50 年の間、この現象に対する微視的な理論は確立されなかった。1957 年、Bardeen, Cooper, Schrieffer によって発表された BCS 理論は、種々の実験値を再現した。BCS 理論では電子の間にフォノンの交換による有効引力が働き、重心運動量 0 の電子対 (Cooper pair) が形成され、対がボーズ凝縮することで励起に有限のギャップを生じる。BCS 理論はゲージ対称性を破る平均場理論であり、超伝導状態では $\langle c_k c_{-k} \rangle \neq 0$ であるのが、この理論の著しい特徴である。以下の秩序変数 Δ_k はフェルミ面上でのギャップを与え、 Δ_k をギャップ関数と呼び、以下のギャップ方程式を満たすように自己無撞着に決定される。

$$\Delta_k = - \sum_{k'} V_{k,k'} \langle c_k c_{-k} \rangle = - \sum_{k'} V_{k,k'} \frac{\tanh(\frac{1}{2}\beta E_{k'})}{2E_{k'}} \Delta_{k'}$$

ここで、 $E_k = \sqrt{\epsilon_k^2 + |\Delta_k|^2}$ 、 ϵ_k はフェルミ面を基準としたエネルギー、 β は逆温度である。

BCS による論文では、ギャップ関数が等方的で波数によらないと仮定していたが、 ^3He の超流動や高温超伝導体の発見以降、ギャップ関数にノードが存在するものを非従来型超伝導と呼び、注目を集めている。ギャップのノード構造は系の対称性から厳密に決められることもあるが、螺旋、映進の対称操作をもつような非共型な系に対しては、対称性による分類がなされていないものが多く、近年盛んに研究されている。

本研究では、そのようなものの中で、映進の対称操作をもつダイヤモンド格子上の超伝導状態を解析する。

s 電子系に対し、ハミルトニアン $H = H_0 + H'$ を考える。ここで H_0 は第 4 近接点までのホッピングを考慮したもの。相互作用 H' は以下のオンサイト U 及び最近接のクーロン相互作用 V と交換相互作用 J を考慮した。

$$H' = U \sum_i (n_{ai\uparrow} n_{ai\downarrow} + n_{bi\uparrow} n_{bi\downarrow}) + V \sum_{\langle i,j \rangle} \sum_{\sigma\sigma'} n_{ai\sigma} n_{bj\sigma'} + J \sum_{\langle i,j \rangle} \sum_{\sigma\sigma'} S_{ai} \cdot S_{bj}$$

ここで、 a, b は単位胞内の 2 つの原子を、 i, j は単位胞の位置を、 σ, s はスピンを表す。このハミルトニアンに BCS 理論を適用し、転移温度、ギャップ関数などを解析した。まず、電子数、 U, V, J を変化させ、発現したギャップ関数を対称性で分類した。ダイヤモンド格子は空間群 $Fd\bar{3}m$ に属し、格子点での局所点群は T_d であり、ギャップ関数は T_d の既約表現で分類される。等価でない関数が同じ既約表現に属することがあり、今回のモデルでは d_{yz} 波と $g_{x^2y^2}$ 波、 p_x 波と $h_{xy^2z^2}$ 波が同じ表現 T_2 に属する。ただし、スピン軌道相互作用を考えない今回のモデルでは、前者 2 つはスピン三重項、後者 2 つはスピン三重項のギャップ関数となり、両者は混成しない。図 1 にサイトあたりの電子数 1.2、 $U = 3$ (最近接ホッピングを 1 としている) での V - J 相図を示す。A 相は常伝導、B 相は T_2 スピン三重項 ($p_x, h_{x^2y^2z}$) 波、C 相は T_2 スピン三重項 (d_{xy}, g_{z^2xy}) 波である。広い領域で p_x 波成分の大きいギャップ関数が得られた。図 2 にサイトあたりの電子数 1.2 でのフェルミ面と、 $U = 3, V = 0, J = -2$ でギャップ関数のフェルミ面上でのノードを示す。 $k_x = 0$ でフェルミ面上にラインノードができていいる。発表ではノード構造についての詳細と、計算の手法について述べる。

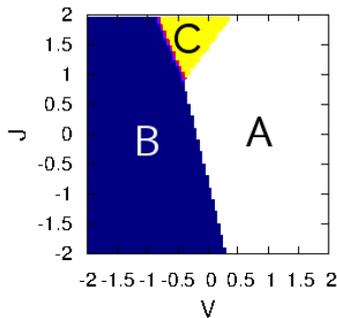


図 1: BCS 理論による V - J 相図。サイト数あたりの電子数 1.2、 $U = 3$

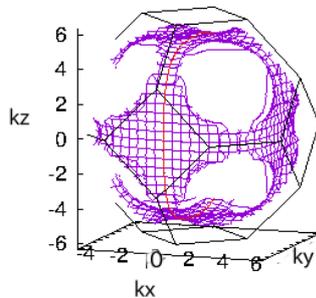
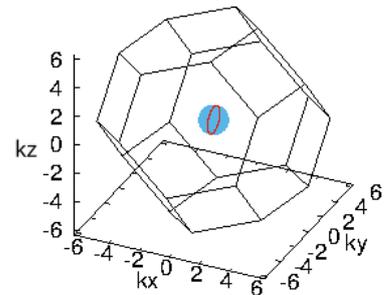


図 2a: サイト数あたりの電子数 1.2 での

外側のフェルミ面 (紫) と Δ_k のノード (赤). 図を見やすくするため一部だけを



内側のフェルミ面 (青) と Δ_k のノード (赤). 黒い枠はブリルアンゾーンの境界の境界。

正二十面体スピン模型におけるスピン相関

強相関電子論

13163006 今泉誠司
指導教員：服部一匡

正三角形の各頂点に配置されたスピンの反強磁性的に相互作用する模型を考える。図1 (a)のように二つのスピンの向きを決めると三つ目のスピンはどの向きを向いてもかならずエネルギーを損してしまい、全ての相互作用エネルギーを最低にすることができない。このような系をフラストレートした系と呼ぶ。また、フラストレートした系はスピンの安定な向きをきめる異方性の符号や大きさにおいて多彩な相転移がおこる事が知られている。

本研究では、正二十面体スピン模型のスピン相関について厳密対角化法を用い解析を行った。(図1(a)参照)正二十面体は正三角形を面として構成されているが、その五回対称性の為、並進対称性と相容れない。このようなクラスターは図1(b)のように並進対称性のない準結晶化合物においてしばしば実現しており、注目を集めている[1]。

本研究で用いたハミルトニアンは正二十面体上の反強磁性ハイゼンベルグ模型に異方的相互作用を加えた以下のハミルトニアンである。

$$H = J \sum_{\langle i,j \rangle} S_i \cdot S_j + K \sum_{\langle i,j \rangle} (r_i \cdot S_i)(r_j \cdot S_j)$$

ここで、 $J > 0$ は最近接点間の反強磁性相互作用、 K は異方的相互作用、 r_i は正二十面体の中心から頂点 i の方向の単位ベクトルを表す。厳密対角化法により全固有エネルギーを求めると、図2のように K の関数として二つの異なる基底状態が実現することが明らかになった。発表では、これらの基底状態でのスピン相関と比熱の温度依存性について議論する予定である。

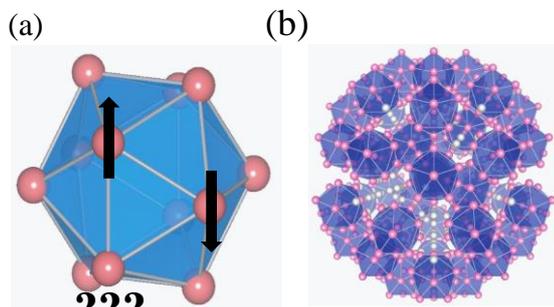


図1: 正二十面体クラスター [1]

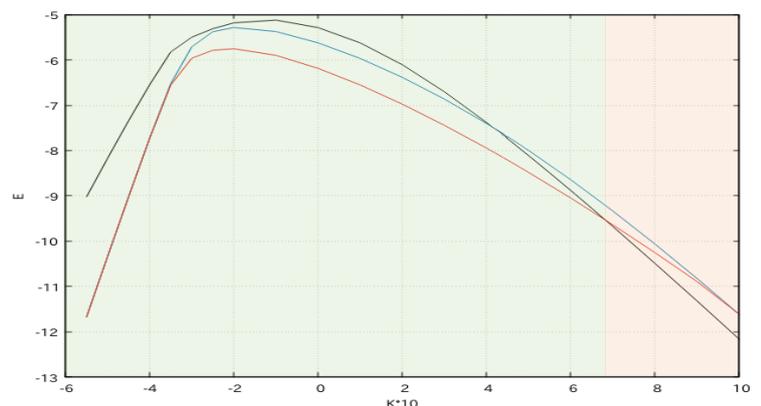


図2: 低エネルギースペクトルの K 依存性

参考文献

[1] S. Matsukata et al., J. Phy. Soc. Jpn **83**, 034705 (2014)

平均場近似によるアンダーソンモデルの解析

強相関電子論研究室

中村 憲吾 13163012

堀田 貴嗣 (指導教員)

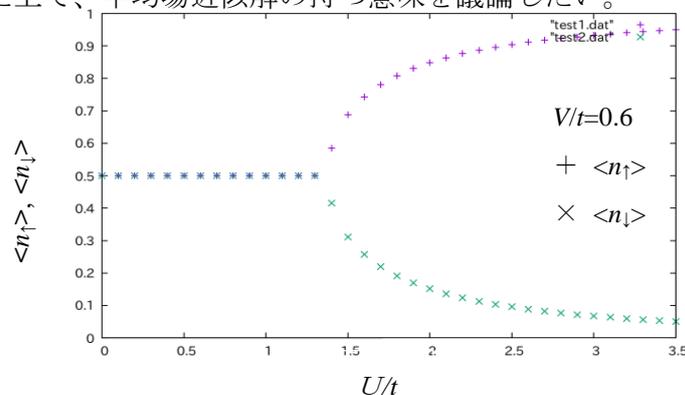
金属に微量の磁性不純物を混ぜると、低温で電気抵抗に極小が現れるという現象は1930年代には知られていたが、その機構は1964年に近藤淳によって明らかにされ、金属中の磁性不純物に関する諸問題は、現在では「近藤効果」と総称されている。近藤効果を調べるモデルはいくつかあるが、そのうち、1961年にアンダーソンが提案したモデルが代表的なものの一つである。アンダーソンモデルは、今ではほぼ完全に解かれているが、本研究ではあえて平均場近似で解析し、厳密対角化法によって解いた結果と比較することで、電子相関の物理を理解する第一歩とすることにした。

本研究では、次のような形のアンダーソンモデルを考える。

$$H = -t \sum_{i,\sigma} (c_{i\sigma}^\dagger c_{i+1\sigma} + c_{i+1\sigma}^\dagger c_{i\sigma}) + V \sum_{\sigma} (c_{1\sigma}^\dagger d_{\sigma} + d_{\sigma}^\dagger c_{1\sigma}) + \varepsilon_d \sum_{\sigma} n_{\sigma} + U n_{\uparrow} n_{\downarrow}$$

ここで、 $c_{i\sigma}$ および d_{σ} は、 i サイトにおけるスピン σ の伝導電子および不純物サイトのスピン σ の局在電子の消滅演算子、 t は伝導電子の跳び移りエネルギー、 V は局在電子と伝導電子の混成、 ε_d はエネルギー準位、 $n_{\sigma} = d_{\sigma}^\dagger d_{\sigma}$ 、 U はクーロン相互作用である。本研究では、不純物サイトの平均電子数は1とし、伝導電子系の境界条件は開放端とする。また、今回の計算はすべて絶対零度で行った。

一つの粒子は周囲の粒子から様々な力を受け運動しているが、周囲の粒子の密度を平均化して相互作用の効果を扱うのが平均場近似である。実際の計算では、平均場ハミルトニアンを対角化して不純物サイトの平均電子密度 $\langle n_{\uparrow} \rangle$ と $\langle n_{\downarrow} \rangle$ を自己無撞着に求める。その結果、下図のように、 U が小さいときは $\langle n_{\uparrow} \rangle = \langle n_{\downarrow} \rangle$ と金属的であるが、 U が大きくなると $\langle n_{\uparrow} \rangle \neq \langle n_{\downarrow} \rangle$ の磁性解が生じることがわかった。これはもちろん、アンダーソン自身による平均場近似の結果と同じである。本研究ではさらに、小さいサイズではあるが、厳密対角化法によってアンダーソンモデルを解き、磁性解のエネルギーが高くなっていることを確認した上で、平均場近似解の持つ意味を議論したい。



平均場近似による不純物サイトの平均電子数の U 依存性。全サイト数=10で計算した。

ボーズ・アインシュタイン凝縮した冷却原子の数値解析

量子凝縮系理論研究室

土居 彩香 13163009

佐倉 叶恵 13163033

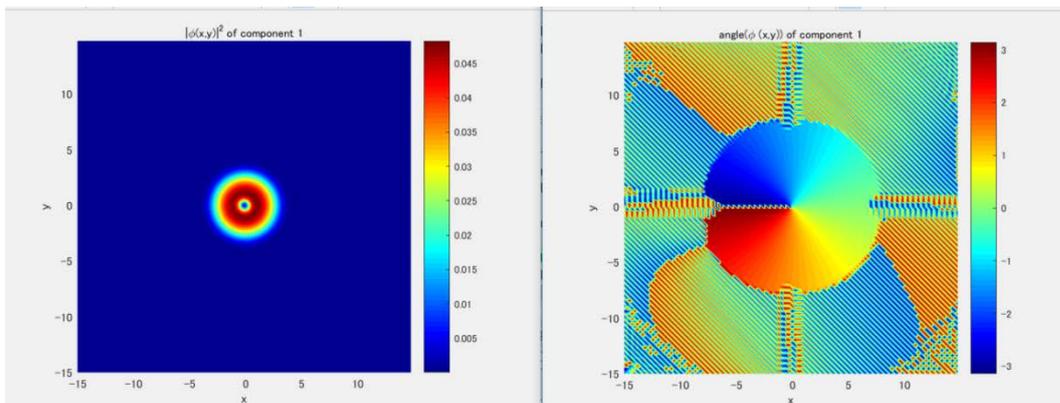
森 弘之 (指導教員)

粒子を冷却していき、絶対零度の近くまで冷やされたときボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) が起こる。ボーズ・アインシュタイン凝縮とは、多数のボーズ粒子が 1 つの量子状態を占めることで現れる物質の状態のことである。ボーズ・アインシュタイン凝縮が起こると、個々の粒子の微視的な量子状態の効果が巨視的なスケールの粒子集団の凝縮現象として発現する。アルカリ金属原子気体凝縮の一般的な流れは、まず予備冷却された気体原子を超真空中で大量に集める。次に磁場トラップに移行し断熱圧縮し、最後に蒸発冷却法により冷却する。冷却方法として蒸発冷却の他にレーザー冷却も挙げられる。

偶数個のフェルミ粒子から構成される原子は、ボーズ粒子と見なすことができる。上記の通りこの原子から成る集団をレーザー冷却するとボーズ・アインシュタイン凝縮し、ボーズ原子は、1 つの最低エネルギー状態を占有するようになる。そこで、相互作用ある場合の BEC の構造についてグロスピタエフスキー方程式 (GP 方程式) に基づいて考えると、平均粒子間距離に比べ十分に小さいとき、非一様なボーズ気体の絶対零度の性質を説明することができる。

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi(r) + V(r)\psi(r) + U_0|\psi(r)|^2\psi(r) = \mu\psi(r)$$

本実験では MATLAB を使用し冷却原子の数値解析を行う。変化させるパラメータは外部ポテンシャルや GP 方程式の質量、相互作用、角速度である。調和型ポテンシャルと比較しそれぞれの関係性を観察する



調和型ポテンシャルにおける粒子密度 (左) と位相 (右)

ϕ^4 模型に対する実空間くりこみ群の適用と Wilson-Fisher 固定点の解析

量子凝縮系理論研究室

13163061

清水貴勢

指導教員

大塚博巳

くりこみ群は臨界現象の解析において最も有用な手法の一つである。粗視化とスケールリングにより短いスケールの揺らぎを排除することで、臨界現象において本質的な長いスケールの現象を取り出すことができるため、従来の数値計算や平均場理論に代わる手法として注目を集めてきた。その中でも摂動論的くりこみ群方程式はその汎用性から様々な系の解析に用いられている。本研究では連続化した Ising 模型である ϕ^4 模型:

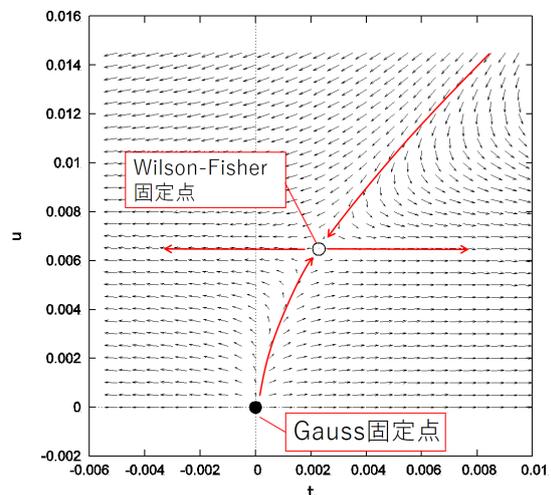
$$\mathcal{H} = \int d^d r \left[\frac{1}{2} (\nabla S(r))^2 + ta^{-2} S(r)^2 + ua^{d-4} S(r)^4 + ha^{-d/2-1} S(r) \right]$$

の摂動論的くりこみ群方程式を導出し、Wilson-Fisher 固定点を解析することで Ising 模型の臨界指数を計算する方法をまとめた。但、 $S(r)$ は連続化した場のスピンを表し、 a は格子間隔を表す。 t, h, u は Gauss 固定点からみたスケールリング変数で、 t, h はそれぞれ温度と磁場に対応している。この模型は4次元以上では Gauss 固定点における臨界現象を示すが、4次元以下では Gauss 固定点において u が有意な変数となるために Gauss 固定点における臨界現象は観測できない。そこで、四次元以下で u が有意でない変数となるような固定点を探すために、 ϕ^4 模型の分配関数を Gauss 固定点からのずれで展開し、演算子積展開を用いた粗視化により実空間くりこみを行うことで摂動論的くりこみ群方程式を導出し、これを解析した。その結果 t と u に関するくりこみ群 flow の図が得られ (図1)、 u が有意でない変数になるような固定点が Gauss 固定点の付近に見つかった。

そこで $\varepsilon = 4 - d$ を用いてこの固定点の位置を Gauss 固定点からのずれで表し、3次元における臨界指数を ε の一次までの摂動で求めた。一方3次元 Ising 模型の臨界指数は有限サイズスケールリングを用いた数値計算により求められている [1]。発表当日はこの数値計算結果と摂動解の比較に加え、くりこみ群の解説も行う。

参考文献

[1] A. M. Ferrenberg and D. P. Landau, Phys. Rev. B **44**, 5081(1991).



二次元 XY 模型に見られる Berezinskii-Kosterlitz-Thouless 転移について

量子凝縮系理論研究室

13163029

渡邊智行

指導教員

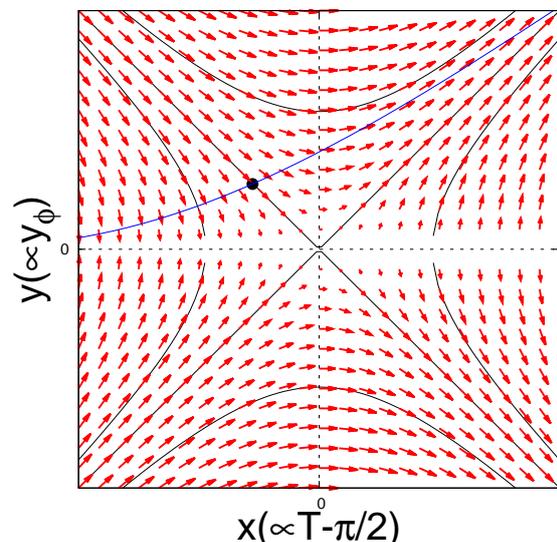
大塚博巳

2016 年ノーベル物理学賞の受賞理由の中の重要なテーマの一つとして Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 転移と呼ばれる現象の解明がある。この理論によって従来相転移が起きると考えられていなかった二次元連続スピン系での相転移を説明することが可能となった。[1] 本研究では以下のハミルトニアンで表される二次元 XY 模型を扱う:

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j, \quad \mathbf{S}_i = (\cos \theta_i, \sin \theta_i) \quad (1)$$

但、 \mathbf{S}_i は正方格子状のスピン、 J はスピン間相互作用を表し、和は最近接格子点対についてとる。この系の特徴は Ising 模型等がもつ離散対称性と異なり位相の周期性から連続対称性をもつことである。これによりスピンの渦状に並ぶことが許され、その渦に注目することで BKT 転移を解析することができる。低温で渦は電荷中性条件を満たす渦対として励起されるが転移点を越えることで渦が単体で存在できるようになる。二次元 sine-Gordon モデルがこの転移を扱う際の有効理論となる。このモデルは最近接スピンはほぼ同じ向きとするガウスモデルに対して渦を表す項が摂動として作用しているとみなすことができる。更にこのモデルを用いて BKT 転移のくりこみ群を用いた解析が可能となる (清水氏の講演を参照)。結果のくりこみ群フローを右図に示す。

また BKT 転移をとらえるのに役立つ物理量としてヘリシティモジュラスがある。は系の一方向に対して位相ひねりを加えた際の自由エネルギーの応答として定義されるが、それをモンテカルロシミュレーションを用いて調べることによりが BKT 転移点にて不連続になる様子を確認した。発表当日は解析の詳細と結果の考察、や相関関数の数値計算の詳しい結果を示す。



参考文献 [1] J.M. Kosterlitz and D.J. Thouless, J. Phys. C 6, 1181 (1973).

図1 くりこみ群方程式のフロー (横軸は温度、縦軸は渦密度を表す尺度になるフガシティー、青実線は現実の系での操作を表す。)

「すざく」衛星による地球周辺からの太陽風電荷交換X線放射の系統探査

宇宙物理実験研究室 伊師大貴

1996年、彗星からのX線放射の発見をきっかけに電荷交換反応が注目されるようになった (Cravens et al. 1997 J. Geophys. Res. Lett.)。電荷交換反応とは、中性原子と高階電離したイオンの衝突により中性原子の電子がイオンに移動する反応であり、イオンの外殻に捕捉された電子はX線の輝線を放出して基底状態に落ちて行くが、そのスペクトルには禁制線や高励起状態からの輝線が含まれる。さらに、 10^{-16} cm^2 もの大きな反応断面積を持つため、惑星周辺の希薄なガスを捉える新たな手段として注目されている。

近年、X線天文衛星「すざく」などによって、地球周辺からの太陽風イオンによる電荷交換反応 (Solar Wind Charge eXchange : SWCX) が発見されてきた (Fujimoto et al. 2007 PASJ, Ezoe et al. 2010 PASJ, Ezoe et al. 2011 PASJ, Ishikawa et al. 2013 PASJ など)。これらは全てのX線観測においてバックグラウンドとなるため重要な上、WIND衛星など太陽風観測衛星のデータを併用すれば、大気密度や磁気圏構造などの地球環境を探ることが可能である。

先行研究において、「すざく」衛星による地球周辺からのSWCX放射の系統探査が行われた (Ishikawa, K. 2013 Ph. D thesis, Tokyo Metropolitan University)。SWCX放射の観測には、低いバックグラウンドと高いエネルギー分解能を誇る「すざく」衛星のX線CCD検出器が適しており、2005年8月から2011年9月の2031データ中38データでSWCX放射の検出に成功した。

本研究では、2011年10月から2015年5月の1024データに対してSWCX放射の系統探査を行った。具体的には、(1) SWCX放射のOVIIとOVIIIの輝線が支配的な0.5–0.7 keVでのX線強度の時間変動とWIND衛星が観測した太陽風陽子フラックスの時間変動を比較し、それぞれの変動に相関が見られるデータを選び出す、(2) 選び出されたデータに対して、X線強度が変動している時間帯を増光時、変動していない時間帯を平穏時と定義し、それぞれのイメージを比較して増光領域を確かめる、(3) OVIIの輝線が支配的な0.52–0.6 keVでのX線強度と太陽風陽子フラックスの相互相関関数を計算し、「すざく」衛星とWIND衛星の位置の違いによる数1000秒の時間遅れを確かめる、(4) これらが確かめられたデータのうち、増光によるスペクトルがC,N,Oからの6本の輝線と0.3 keV以下の増加分を合わせた計7つの成分で表せられるものを地球周辺からのSWCX放射とみなす、という4段階で評価した。本発表では、先行研究の結果と合わせて、SWCX放射の検出数と太陽活動の相関などの考察を行う。

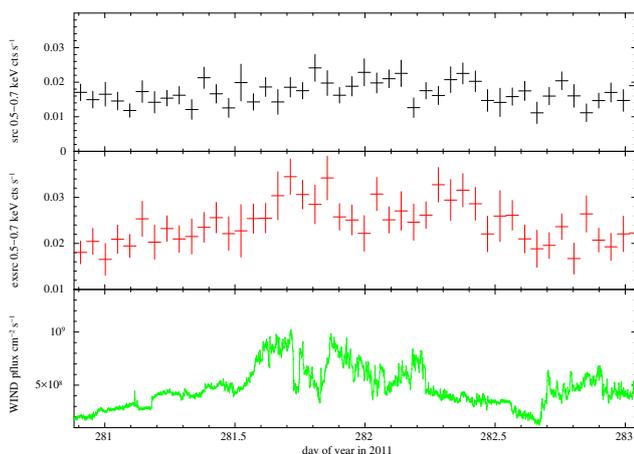


図 1: 0.5–0.7 keV での観測天体 (上段) とバックグラウンド (中段) の X 線強度の時間変動と太陽風陽子フラックスの時間変動 (下段)。

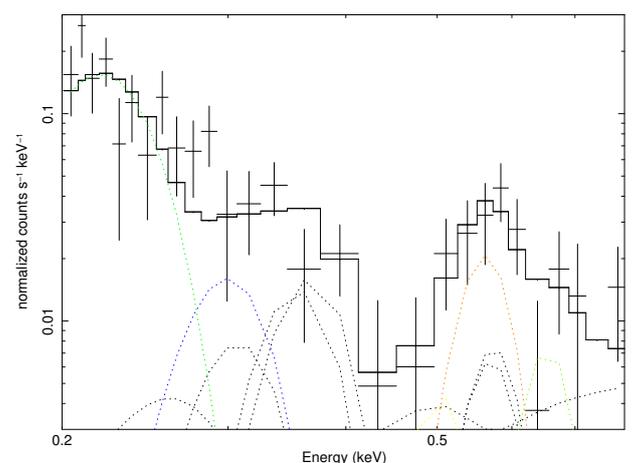


図 2: SWCX 放射による増光スペクトル (黒十字) と SWCX モデルフィッティングの輝線成分 (点線)。

超小型バイナリブラックホール探査衛星 ORBIS 搭載に向けた MEMS X 線光学系の振動試験

宇宙物理実験研究室

野田 悠祐 13163097

X 線天文学において、X 線を集光し結像するための X 線望遠鏡は必須である。X 線はほとんどの物質に対し屈折率が 1 よりも小さいため、可視光のように直入射を用いて集光をすることができない。よって X 線望遠鏡では X 線を反射鏡上で全反射させて集光する斜入射光学系が用いられる。また現在主流となっている X 線天文衛星の多くは、性能を追求した巨大かつ、莫大な開発費が必要な衛星である。そのため、国際協力を含めた多くの機関が協力し、一つの衛星を作り上げることが多く、その衛星を一つのミッションで長い期間に渡り運用することは難しい。よってバイナリブラックホールのような、観測に長期間の長さが必要とされている物の観測のために、ミッションを限定し、少人数で開発できる、低予算、小型の衛星の需要が生じている。そこで首都大学東京航空宇宙システム工学域を中心に開発されている超小型バイナリブラックホール探査衛星 ORBIS がある。しかし X 線の集光に用いる望遠鏡部分は、前述したような工法で作られたものは質量が大きすぎて搭載することが不可能である。したがって従来のものとは異なる、小型、軽量かつ性能の良い望遠鏡が必要とされている。

そこで我々は Micro Electro Mechanical Systems(MEMS) 技術を用いた、新しい X 線光学系、MEMS X 線光学系を開発している。シリコンウェハーにドライエッチングで幅 $20\mu m$ 、深さ $300\mu m$ 程度の高アスペクト曲面穴構造体を製作し、高温アニールで穴の側壁を平滑化することで、この側壁を反射鏡として用いる。そして高温塑性変形で球面変形を行い、重金属膜付を行うことで反射率の向上を図り、これを 2 段に重ねることで超軽量の Wolter I 型斜入射光学系が完成する。

本研究では ORBIS 搭載に向けて、実際の打ち上げ時に用いる予定の仕様の MEMS X 線光学系、ホルダを用いた初めての振動試験を、東京大学中須賀研究室にある振動試験装置と振動発生器をお借りして行なった。与える振動レベルは H-IIA ロケットの Qualification Test(QT) レベルのもので、X、Y、Z 軸それぞれについて加振を行なった。結果として MEMS X 線光学系、ホルダ共に振動に無事耐えることが出来た。本発表では振動試験の詳細と、その結果について紹介する。

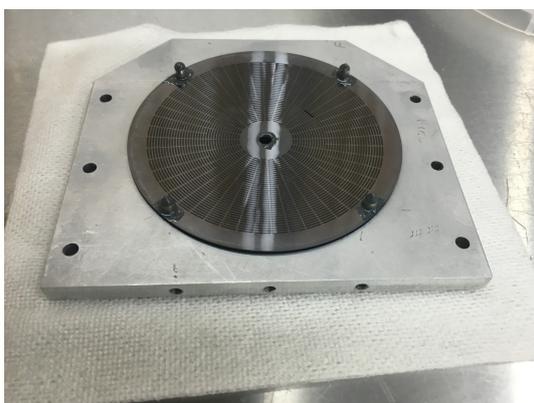


図1 MEMS ミラーを用いた Wolter I 型斜入射光学系



図2 超小型バイナリブラックホール探査衛星 ORBIS

化学機械研磨を用いた MEMS X線光学系の形状改善に向けた研究

宇宙物理実験研究室
13163013 藤谷 麻衣子

本研究では、マイクロマシン (MEMS) X線望遠鏡の性能改善に向けて、化学機械研磨プロセスの導入を検討した。

X線天文学において天体からの微弱な X線を集光し結像する光学系は必要不可欠である。また X線に対する物質の屈折率は 1 よりもわずかに小さいために、可視光のように直入射を用いたレンズでは集光することは困難である。そこで X線望遠鏡では X線を反射鏡上で全反射させる斜入射光学系が広く用いられている。将来の X線天文学には軽量で優れた光学系が求められている。そこで我々は新しい MEMS X線光学系を独自に考案し、開発を進めている。これはシリコンドライエッチングによって幅 $20\ \mu\text{m}$ 、深さ $300\ \mu\text{m}$ 程度の高アスペクト比の曲面穴を持った光学系である。また高温アニールにより反射面の平滑化を行い、高温塑性変形で構造体を球面に曲げ、2段に重ねて Wolter I型光学系が完成する。これまでの MEMS X線光学系の製作では、シリコンドライエッチング後に曲面穴の側壁の両端にバリやくぼみが必ず出来てしまい、本来集光できるはずの X線を妨げるという問題点があった。

そこで、光学系の表面を削ることでバリやくぼみを減らして形状を改善する方法を検討した。本来の $300\ \mu\text{m}$ より厚い $400\ \mu\text{m}$ で光学系の製作を行い、化学機械研磨により表面を両側 $50\ \mu\text{m}$ ずつ削った (D-process 社)。これにより形状は改善した。また、研磨前後の有効面積の変化についてシュミレーションを行った。本発表ではこの概要と結果、今後の取り組みについて紹介する。

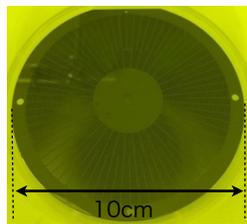


図1 シリコンドライエッチング後の MEMS X線光学系の写真。

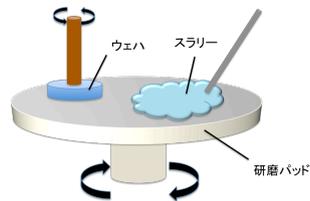


図2 化学機械研磨の概念図。

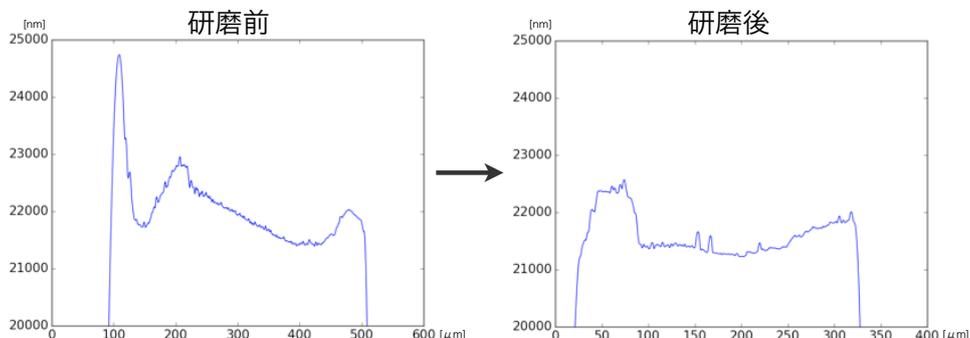


図3 化学機械研磨前後の MEMS X線光学系反射鏡側面の典型的なプロファイル。

TES 型 X 線マイクロカロリメータの加速器環境下での性能評価

宇宙物理実験研究室
13163056 早川亮大

現代の X 線天文学において、検出器はより精密な分光性能を要求されている。そこで、我々のグループでは、高いエネルギー分解能をもつ検出器として、超伝導遷移端温度計 (TES: Transition Edge Sensor) 型マイクロカロリメータの開発および、運用を進めている。TES 型マイクロカロリメータは、超伝導薄膜の相転移時の急激な電気抵抗の変化を利用することで、優れたエネルギー分解能を実現することのできる検出器である。

また、我々のグループでは、TES 型 X 線マイクロカロリメータの地上応用の一環として、ハドロン原子の X 線分光測定を行っている。この測定は、強い相互作用の性質を解明する上で非常に重要であり、宇宙においても、高密度原子核や、中性子星の状態方程式に制限をかけることを目指している。TES を宇宙で用いる計画はあるが、まだ一度も宇宙実証されていないため、過酷な地上実験に応用することで、技術成熟度を高めることも目的である。

我々のグループではこれまで、準備実験として 2014 年 10 月にスイスの Paul Scherrer Institute (PSI) にて、炭素をターゲットに π 中間子を用いた $\pi -^{12}\text{C}$ の X 線分光測定を行い、6keV の X 線をエネルギー分解能 $\Delta E \sim 5\text{eV}$ で測定することに成功した。

本研究では、地上応用であるハドロン原子 X 線分光測定に向け、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 内の K1.8BR ビームライン上に断熱消磁冷凍機を含む冷却環境の構築を行い、TES の基礎性能評価を行った。基礎性能を評価した TES 素子の ^{55}Fe 線源による $\text{MnK}_{\alpha 1}$, $\text{MnK}_{\alpha 2}$ のエネルギースペクトルを図 2 に示す。

今回は、基礎性能評価の一環として、はじめてビームの有無の環境下で、クロストークの影響を評価した。ビームのない状況下でのクロストークレート (クロストークイベントと入射 X 線の比) は、 $0.13\% \pm 0.10\%$ (誤差はピクセルごとの標準偏差) であり、ビーム下では $2.31\% \pm 0.42\%$ であった。ビームなしの環境下では、クロストークレートが低いことから、荷電粒子由来の同時刻イベントが主であると考えた。

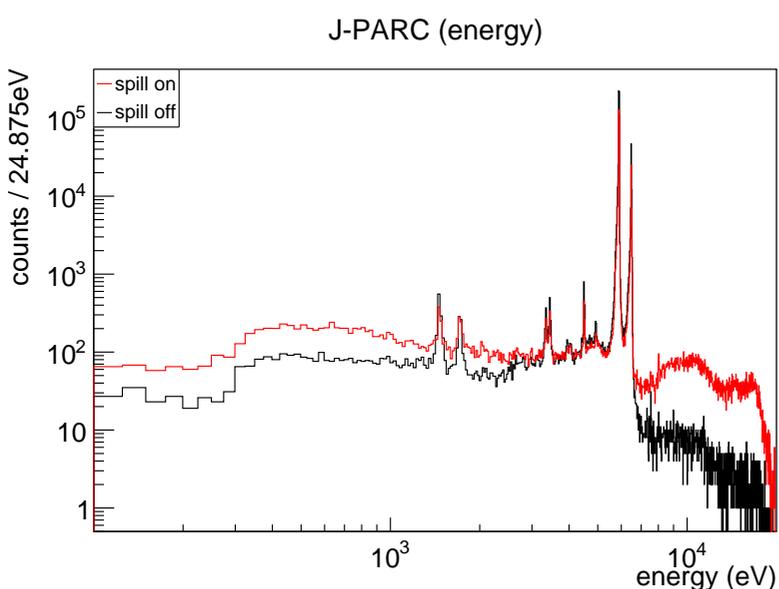


図 1 ビーム環境下で得られた X 線スペクトル。全 240 ピクセルの合計のヒストグラム。同測定であるが、spill on がビームがきている時間帯のエネルギースペクトル、spill off がビームがきていない時間帯のエネルギースペクトルを表している。エネルギー 6000 ~7000 付近の鋭いピークは今回試料として用いた ^{55}Fe 線源による MnK_{α} , MnK_{β} のイベントである。

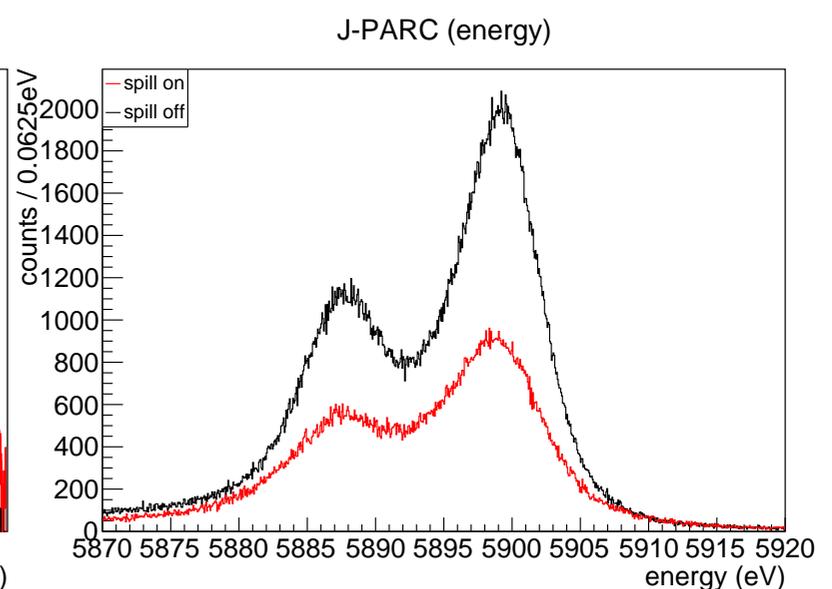


図 2 図 1 の MnK 付近を拡大したスペクトル。2 つの山はそれぞれ $\text{MnK}_{\alpha 1}$ と $\text{MnK}_{\alpha 2}$ のピークである。

X線回折による TES の結晶構造の研究

宇宙物理実験研究室 13163076 山田 陽平

大橋 隆哉 山田 真也 (指導教員)

宇宙の密度比率の大部分はダークエネルギー (73%) やダークマター (23%) で構成されており、バリオン (通常の物質) は全体の 4% 程度にすぎない。さらに、バリオンの中でも認知されているものはわずかであり、ほとんどがミッシングバリオンやダークバリオンと呼ばれる未知の物質である。これらの大部分は WHIM(中高温銀河間物質) と呼ばれるガスであると考えられており、観測的にはほとんど検出されていないが、ダークマターの分布及び宇宙のフィラメント構造をトレースしていることから、その分布を知ることは極めて重要であるとされている。

我々のグループでは、WHIM の観測を目指す小型 X 線天文衛星 DIOS(Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) への搭載に向けた超伝導遷移端温度計 (Transition Edge Sensor = TES) 型マイクロカロリメータの開発を行っている。この TES 型マイクロカロリメータは入射 X 線光子のエネルギーによる素子の微小な温度上昇を、超伝導遷移端の急激な抵抗値の変化を利用して測定する検出器である。TES 型マイクロカロリメータは 100 120mK の範囲での極低温下で動作させることで、WHIM が出す酸素輝線を観測するために要求される数 eV のエネルギー分解能を得ることが可能である。

これまでに、基板を製作する際に生じる表面粗さが TES の超伝導転移を阻害している原因の一つであることがわかっている。また、金属薄膜の結晶性と超伝導転移に深い関わりがあるという先行研究がある。そこで、基板上的 TES の正常な転移を確認することを目指す一環として、X 線回折による TES の結晶構造を調べることにした。本研究では、基板の上に Ti,Au を成膜した状態のベタ膜の X 線回折測定を行い、得られる図 1、図 2 のような回折ピークを定性的に分析した。本発表ではその方法と結果、および考察を行う。

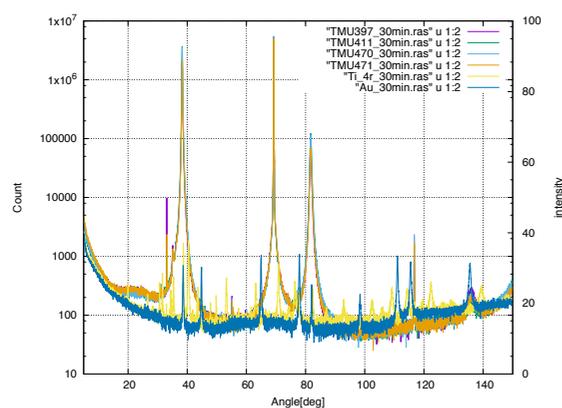


図 1 TES と Ti,Au の回折ピーク

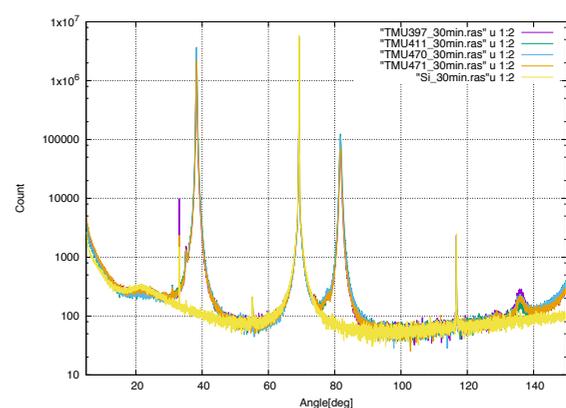


図 2 TES と基板の回折ピーク

JAXA 宇宙科学研究所標準平行X線光源室用可視光平行光源の立ち上げと平行度評価

宇宙物理実験研究室

指導教員 大橋 隆哉, 石田 學
13163046 浅井 龍太

宇宙科学研究所の特殊実験棟1階には30mの長さのX線ビームラインが設置されており、首都大やその他研究グループが検出器の性能評価に用いている。しかし、X線を発生させ測定を行うには真空層に入れる必要があるため時間がかかり、そのため測定中に検出器の異常がわかった場合ビームラインからすぐに取り出し対応することもできない。

そこで真空槽に入れる前にX線観測装置の性能を簡易的に測定できるように、可視光の平行光源を設置する。

本実験ではドブソニアン望遠鏡を組み立て横に倒し、接眼部からピンホールを通して光を出すことで平行光源として利用している。望遠鏡は安価、熱伝導率が0に近い、大口径が得やすいなどの理由から、Sky Watcher ドブソニアン望遠鏡「DOB 18」を採用した(図1)。

望遠鏡を標準平行X線光源室に設置し光軸を調整した後、セオドライト(方位角と仰角の傾きを計測するため角度計測器)を2台用いて焦点距離の調節を行った。具体的には、光源と主鏡の距離を変えることで望遠鏡から射出される光のelevationが変わるので、焦点距離を変えながら2台のセオドライトで同じelevationで測定する距離を平行光を出す位置として求めた。

さらに今回の実験では性能評価として、平行光源の平行度を評価した。具体的には、平行光の領域ごとの光線方向(elevationとazimuth)の分布を測定することで平行光源全体の平行度を得た。平行度を求めるために、セオドライトを動かしそれぞれの測定点で平行度の測定と、ペンタプリズムに反射させた平行光をセオドライトで測定する2通の方法で測定を行った。前者の測定では平行光全体のelevationがおおよそ±5秒角以内で得られたが、azimuthは足場の影響でセオドライトの水準が正確に定まらなかったため適切な結果は得られなかった。後者の測定では平行光全体のazimuthが±5秒角以内、elevationは±15秒角以内として得られた。また、得られた結果からazimuthとelevationの差がわかる2次元マップを作成した(図2)。本論文ではこれらの具体的な測定方法、および研究結果について述べる。



図1: 平行光源として設置した望遠鏡

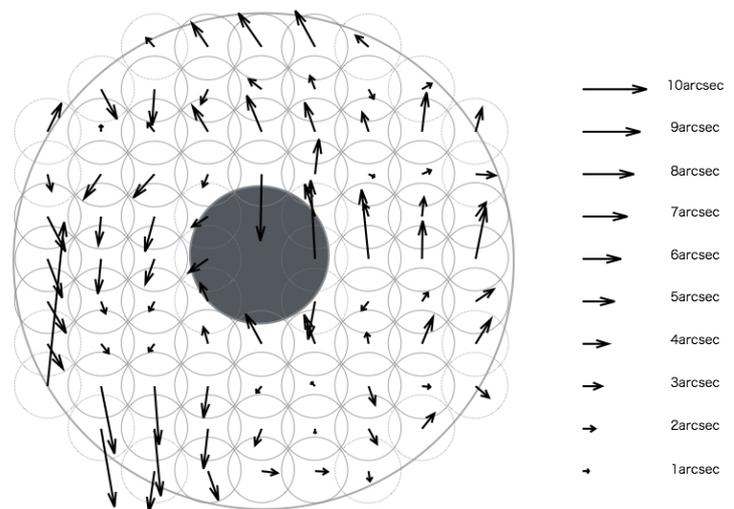


図2: 2次元マップ

宇宙流体速度場解析を目指した ヘルムホルツホッジ分解の基礎研究

14163078 宇宙物理実験 伊藤 慧

流体の挙動は非線形偏微分方程式で表される為、解析的に扱うのは困難であり数値シミュレーションを用いる。この結果から物理的性質を適切に取り出すために多くの解析手法が存在するが、一般的であるのがヘルムホルツ分解である。

ヘルムホルツ分解は速度場を 2 つの速度場、発散なし場、回転なし場に分ける。しかしながらこの分解は開領域を対象としており、境界が存在する閉領域においては境界面上で分解が正常に行われぬ恐れがある。

そこで、近年ヘルムホルツホッジ分解 (HHD) という新たな手法が提唱されている。ヘルムホルツホッジ分解 (HHD) では、ベクトル場を発散なし場、渦なし場、ハーモニック成分の 3 種類に分解する。ハーモニック成分は一樣流、または境界面による流れを含むとする。

流れ場の解析法は、X 線天文衛星「ひとみ」におけるペルセウス座銀河団のガス運動の観測結果 [Hitomi collaboration 2016] からわかるように宇宙流体の研究にも考慮されるべき事柄である。

本研究では、ケルビンヘルムホルツ不安定性 (KHI) という流れ場を用いる。KHI は密度が異なる二つの流れの境界面で生じる不安定性であり、宇宙流体においても銀河の渦状腕における星形成の要因とも考えられており重要だとされている。

そこで、本研究では KHI のシミュレーション結果に HHD を実行、及びその考察を行い、HHD の効果を考察することを目的とする。

まず初めに、HHD を行うために用いる naturalHHD というコードの性能評価を目的として、各成分の内一つのみを含んだベクトル場を作成し、これらを合わせたベクトル場に対して HHD を行い 3 成分に分解した。結果、分解した 3 成分と、最初に作成したベクトル場とそれぞれ一致する事を確認した。その後求めた 3 成分に対してもそれぞれ HHD を行い、含まれる成分を確認した。その結果、適切に分解できた事がわかり、ハーモニック成分は境界部での影響によって生じる為境界で値が大きくなっている事を確認した。

その後 PLUTO という宇宙流体力学における偏微分方程式を計算するソフトウェアを用い、スケールを銀河規模に設定した KHI 場を作成した。結果、高レイノルズ場 (1000) と低レイノルズ場 (100) の二種類の KHI を適切に作成することができた。

作成した KHI 場に対して HHD を行なった所、KHI 場に対しても適切に分解が行われた。流れ場の特徴的な物理量として各速度場の最大値をプロットし、そして流れ場の形状を比較すると、レイノルズ数が 1000 の場合においてはレイノルズ数が 100 の場合に比べて不安定性が大きい事がわかり、乱流が生じているのではないかと考えた。

ヘルムホルツ分解では値が大きいハーモニック成分が他の成分に含まれてしまう為、このような結論に至る事ができない。閉領域かつ一樣流が成分として存在する場合、HHD は有用であると結論づけられる。

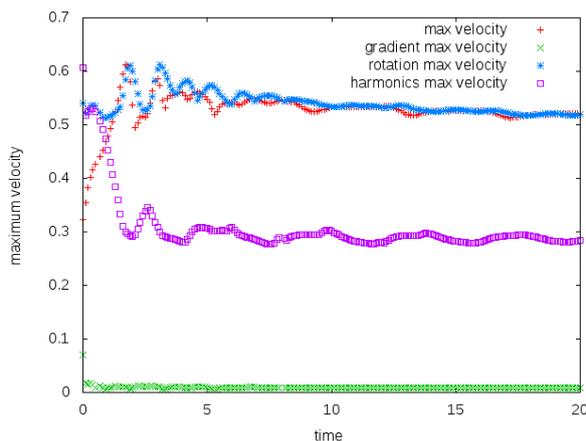


図1 高レイノルズ場における各速度成分の最大値

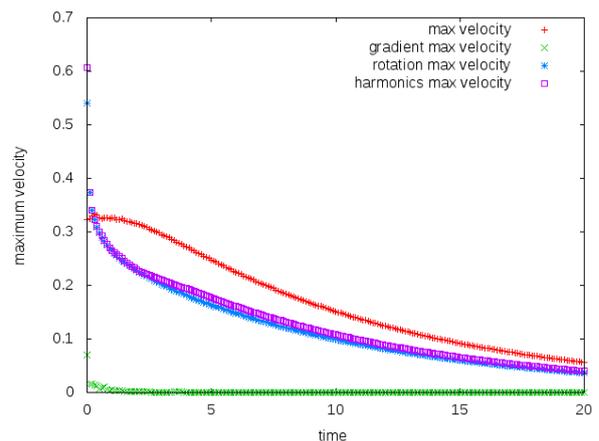


図2 低レイノルズ場における各速度成分の最大値

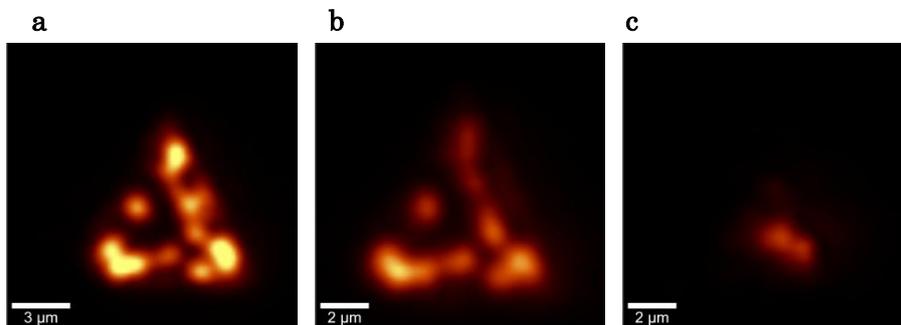
単層遷移金属カルコゲナイドの電界効果局所光物性の研究

表界面光物性研究室

青木 孝晶 13163019

指導教員：蓬田 陽平、柳 和宏

遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)は、遷移金属元素一つに対して 16 族元素であるカルコゲンが二つ結合した二次元層状化合物である。単層化によりバルクでは見られない新しい物性が見出され、近年、極めて活発に研究がなされている。二硫化モリブデン(MoS_2)や二硫化タングステン(WS_2)は、多層の場合は間接遷移型であるが、単層の場合は直接遷移型のバンド構造を持ち、明確な発光を検出することができる。この発光は、構造欠陥の存在などにより、束縛励起子型発光やトリオン発光など、大きくその性質が変わることが知られているが、局所構造と発光特性との関係は未だ正確には理解できておらず、その解明は TMDC の光物性の理解において重要な課題となっている。これまで我々は、近接場分光法を駆使して MoS_2 の局所発光強度と局所吸収スペクトル等の局所光物性を研究してきた。そこで本研究では、同研究を発展させ、イオン液体を用いた電気二重層キャリア注入法と顕微分光測定を組み合わせ、試料の構造不均一性を局所光物性から明らかにし、局所電子構造、さらにキャリア注入によりそのフェルミレベルとの関係を解明することを目的に研究を行った。本研究では初めに MoS_2 単層試料にキャリアドーピングしながら発光強度を測定するデバイスを作製し、顕微分光測定を行った。その結果、電子ドーピングをすると発光が減少することが確認できたが、ホールドーピングでは試料が壊れてしまい発光の減少を観測することができなかった。 WS_2 でも同様の実験を行った際には、図 1,2 のように電子ドーピングで発光の減少を観測できたが、図 3 のように、やはりホールドーピングでは試料が壊れてしまい観測することができなかった。現在、更なる測定用デバイスの改良を行っており、その背景の検証を行っている。



(a) WS_2 発光マッピング(電圧印加なし) (b) WS_2 電子ドーピング発光マッピング(0.75V 印加)
(c) WS_2 ホールドーピング発光マッピング(-0.5V 印加)

リチウムイオン電解質を用いたキャリア注入法の研究

表界面光物性研究室

岡田 遼太郎 13163060

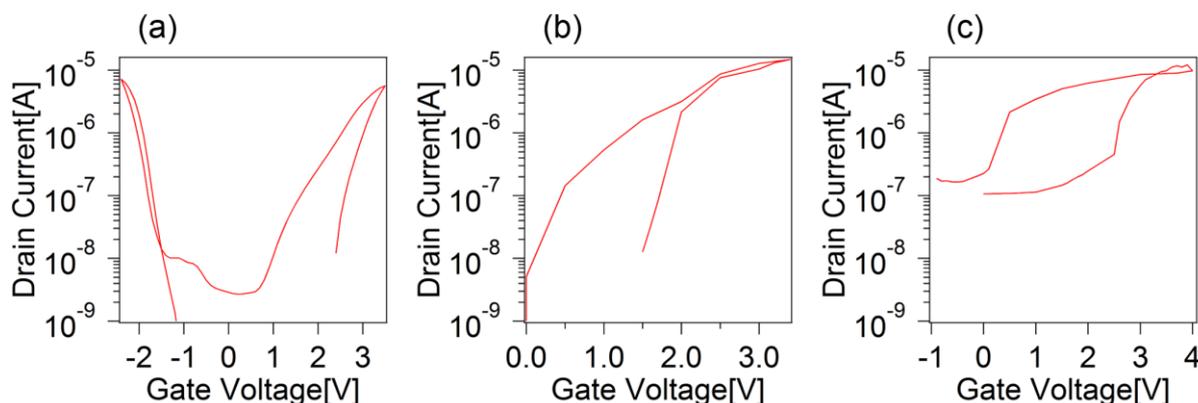
指導教員： 蓬田 陽平、柳 和宏

研究背景：我々は層状の遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDCs) である WS_2 をチューブ状にした多層 WS_2 ナノチューブ (WS_2NT) について、多数の WS_2NT がネットワーク構造を形成した WS_2NT 薄膜デバイスに対しイオン液体を用いた電気二重層法キャリア注入を行い、その両極性輸送特性および熱電特性を明らかにした^{[1][2]}。一方、このような層状化合物では、イオン半径の小さいリチウム (Li) イオンを層間にインターカレーションさせることによりキャリア密度を制御できることが知られており、イオン半径の大きいイオン液体分子よりも高密度キャリア注入ができる可能性がある。そこで我々は WS_2NT ネットワーク系および層状化合物系におけるさらなる高キャリア密度下での物性を解明すべく、リチウム (Li) イオン電解質を用いたキャリア注入法の研究を行った。

実験内容：電解質には粉末状の過塩素酸リチウム ($LiClO_4$) をポリエチレングリコール (PEG) に溶かしたのを用いた。PEG は分子量により室温で液体・固体のものが存在し、それぞれに十分な量の $LiClO_4$ を溶かした。次に有機溶媒に分散させた WS_2NT をメンブレンフィルターで減圧濾過し WS_2NT ネットワーク系薄膜を作製した。金電極を蒸着させた SiO_2 基板にその薄膜を転写し作製した WS_2NT 薄膜デバイスに液体・固体の Li イオン電解質を用いてキャリア注入を行った。

実験結果：イオン液体を用いた場合と、液体・固体それぞれの Li イオン電解質を用いた場合の印加ゲート電圧に対するソースドレイン電流の依存性 (対数) を下図に示す。イオン液体を用いた場合には WS_2NT ネットワーク系への電子・ホール注入が行えており、トランジスタの性能を示す指標として ON/OFF 比を見積もると 10^3 程度であることが確認できる (図 a)。Li イオン電解質を用いた場合では正のゲート電圧を印加した際、Li イオンにより電子がドープされている (図 b, c)。そして、液体 Li イオン電解質では ON/OFF 比が 10^3 程度でイオン液体と同程度 (図 b)、固体 Li イオン電解質では 10^2 程度とイオン液体よりも小さいことが分かった (図 c)。これは固体電解質においては WS_2NT ネットワーク系全体へ電解質が染み渡ることが難しく Li イオンによるキャリア注入が有効的に行えなかったためと考えられる。

まとめ：Li イオン電解質を用いた WS_2NT ネットワーク系の薄膜トランジスタを作製し、Li イオンによる電気二重層法キャリア注入に成功した。固体 Li イオン電解質を用いた場合にはイオン液体に匹敵するほどのキャリア注入を実現するには至らなかったが、一方液体の Li イオン電解質を用いたキャリア注入法ではイオン液体と同程度の ON/OFF 比を得ることができた。 WS_2NT ネットワーク系さらには他の層状化合物系への Li イオンインターカレーションを用いた物性制御を目指して、電解質の作製条件の探索を今後も行っていく。



図：各キャリア注入法におけるソースドレイン電流のゲート電圧依存性
(a) イオン液体, (b) 液体 Li イオン電解質, (c) 固体 Li イオン電解質

参考文献：[1]Sugahara et al., APEX 9, 075001 (2016), [2]Kawai et al., APEX 10, 015001 (2017)

高純度精製ナノチューブにおける熱輻射発電

表界面光物性研究室

一ノ瀬遙太 13163069

指導教員：蓬田陽平、柳和宏

研究背景：光吸収によって生じる局所温度上昇を物質の持つ熱電変換能で電力へと変換するエネルギー変換機構を光熱電変換機構という。それは、半導体材料で見られる電荷分離型光エネルギー変換機構では困難な、バンドギャップ以下のテラヘルツ・遠赤外光の光エネルギーを変換可能という特徴を持つ。単層カーボンナノチューブ(SWCNTs)は比較的大きなゼーベック係数を備えており、また、我々の研究室ではこれまで、フェルミレベルをシフトさせた SWCNTs にレーザー光を当て光熱電変換が可能であることを明らかにしてきた。SWCNTs は、軸に平行の表面プラズモン吸収帯の存在により、遠赤外光を効率よく吸収するという特徴がある。そこで本研究では熱源(黒体炉)から発せられる遠赤外光により SWCNTs において光熱電変換が可能かどうか研究した。

実験内容：SWCNTs は合成の過程で様々な種類のカイラリティが混在するため、熱電素子などのデバイスに用いる場合には分離精製を行うことが性能を上げるために必要不可欠である。本研究では、密度勾配遠心分離法を用いて精製した直径 1.4nm の半導体型 SWCNTs とゲルクロマトグラフィー分離法を用いて精製した直径 0.75nm の半導体型(6,5) SWCNT を用いた。(6,5)については更なる高純度化を目指し、従来の単一カイラリティ分離法では困難であった金属型 SWCNTs の除去を、CO₂ バブリングという工夫を用いて pH を精密に制御することで分離に成功し、99%以上の純度を実現した。

得られた試料薄膜の片側に黒体炉熱源から放射した熱輻射光を照射し、温度差とその時に生じた光熱起電力を測定した。従来の分離法で得た半導体 SWCNTs は温度差に応じた起電力を顕著に観測し、最大で温度差約 4K、起電力約 600 μ V までのぼり、さらには体温程度の 30 $^{\circ}$ C の熱源に対しても明瞭な起電力を得ることができた。一方、高純度(6,5)は金属型の完全な分離によって抵抗値が大幅(>10⁴)に増大し、キャリアをドーピングしていない状態では絶縁体に似た振る舞いをした。その結果、原理的に電圧計では起電力を測定することが困難であった。

まとめと今後の展望：(6,5)SWCNTs はそのバンドギャップの広さから、大きなゼーベック係数を持つことが理論的に示されている。電気二重層キャリア注入を用いてフェルミレベルを最適な領域にシフトさせて実験を行うことにより、高純度単一カイラリティ試料で更なる大きな熱輻射光からの発電が期待できる。

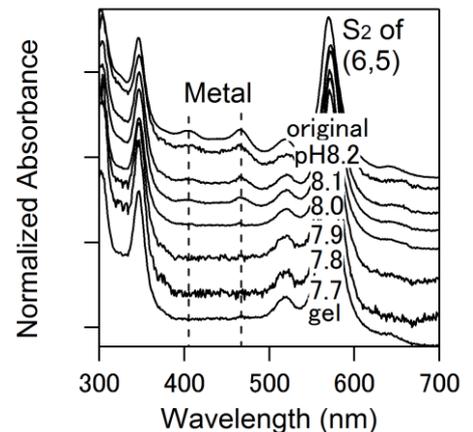


図1 (6,5)の金属型分離

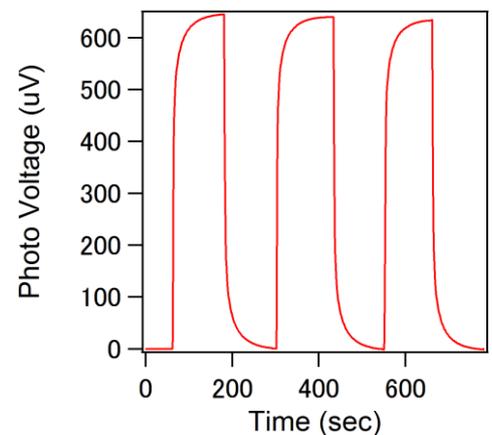


図2 熱輻射光からの起電力

ダイクォークのサイズを考慮した

クォーク・ダイクォークモデルにおける重いバリオン

原子核ハドロン物理研究室

隈川 健斗 13163049

慈道 大介 (指導教員)

ハドロンは π 中間子のようにクォークと反クォークで構成されているメソンと、陽子のように3つのクォークで構成されているバリオンの2つに分けられる。ハドロン内のクォークはカラーを持ち、無色となるように閉じ込められている。バリオンにおいて、2つのクォークが結合し、1つの粒子として3つ目のクォークと結合するような粒子をダイクォークと呼び、そのようなモデルをクォーク・ダイクォークモデルと呼ぶ。この描像がよく見える例として Λ_c 粒子が挙げられる。

サイズを考えたダイクォークを回転剛体子として扱い、クォークと回転剛体子の2体系として考えてシュレディンガー方程式を解く。ダイクォークとクォーク間の相互作用は、 $c\bar{c}$ メソンの質量スペクトルを説明するポテンシャル

$$V_{q\bar{q}} = -\frac{4\alpha\hbar c}{3r} + k_0r$$

において、 Λ_c 粒子はクォーク同士であるので、 $V_{qq} = \frac{1}{2}V_{q\bar{q}}$ として求める。

重いバリオン Λ_c 粒子のダイクォークのサイズを決めるのに p 軌道の励起エネルギーを基準とすると、サイズが $\rho=1.1\text{fm}$ 程度となるとき実験値とあった。次に $\rho=1.1\text{fm}$ をダイクォークのサイズと仮定して Λ_c 粒子について議論すると、観測されている $\Lambda_c(2880) 5/2^+$ は d 軌道の基底状態として励起エネルギーを説明できる。実験では粒子の種類で状態とスピン・パリティが特定されていない Λ_c or $\Sigma_c(2765) ??$ ほどの軌道でも説明することはできなかった。

したがって、これらの結果から Λ_c or $\Sigma_c(2765) ??$ が $\Lambda_c(2765) ??$ として成立するのならば、 Λ_c 粒子においてダイクォーク描像が成立しないことがわかった。

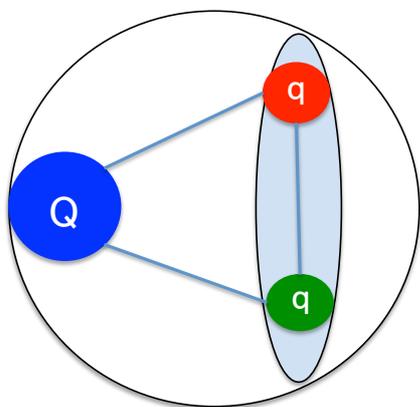


図 1:クォーク・ダイクォークモデル

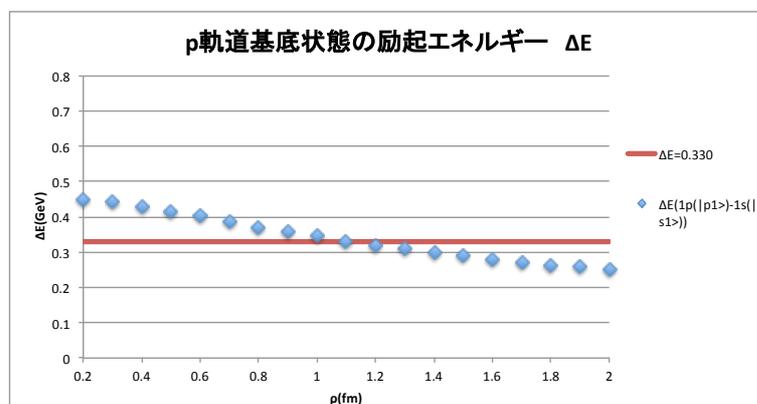


図 2:ダイクォークサイズの決定

Nambu-Jona-Lasinio 模型における クォーク質量の生成

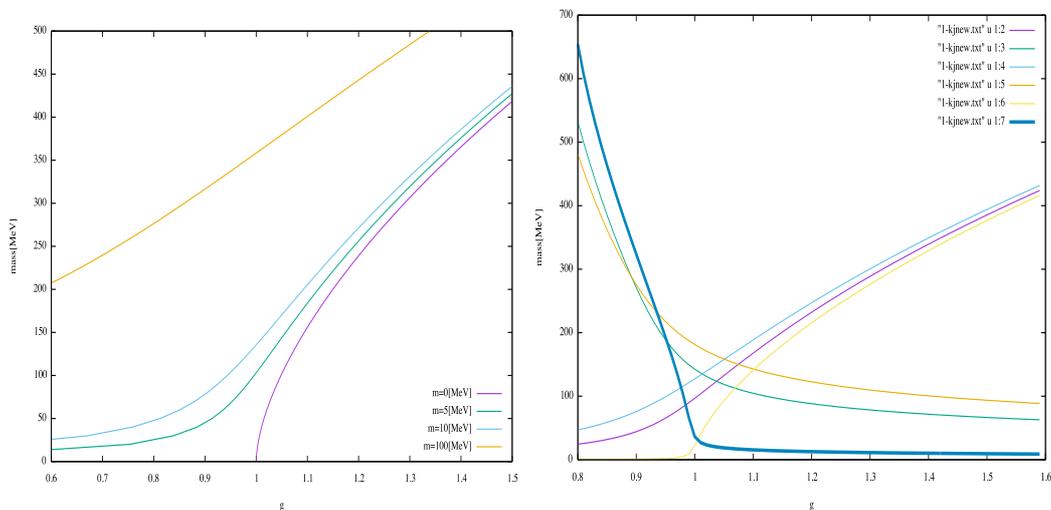
原子核ハドロン物理研究室

13163055 河野 晋之介
(指導教員) 慈道 大介

原子核の構成要素である陽子や中性子は核子と呼ばれ、それらは3つのクォークから形成されている。しかし、核子の質量が約1000MeVである一方、核子の構成要素となるuクォークやdクォークは約10MeV程度であり、実際の質量のわずか数パーセントにしかならない。すなわち、核子をはじめとしたハドロンの質量を得ているということは、それらを構成しているクォークがそれに足るだけの質量を獲得しているということに他ならない。その質量獲得の要因となるのが、カイラル対称性の自発的破れである。

カイラル対称性を有する模型には、クォークの場を用いてラグランジアンを記述するNambu-Jona-Lasinioモデル(通称NJLモデル)がある。このモデルはクォークの閉じ込め機構を持たないが、カイラル対称性の自発的破れや4点相互作用が考慮されているモデルである。

今回の卒業研究においては、NJLモデルを用いて、カイラル対称性が自発的に破れることによりクォークが質量を獲得することと、それに伴い π 中間子が南部・ゴールドストーンボゾンとして振る舞うことを確認する。(下部左:クォーク質量/下部右: π 中間子/グラフの横軸はいずれもクォーク間相互作用の強さ)



市場におけるオピニオンダイナミクス

非線形物理研究室

肱岡 厚志 12163088

田中 篤司 (指導教員)

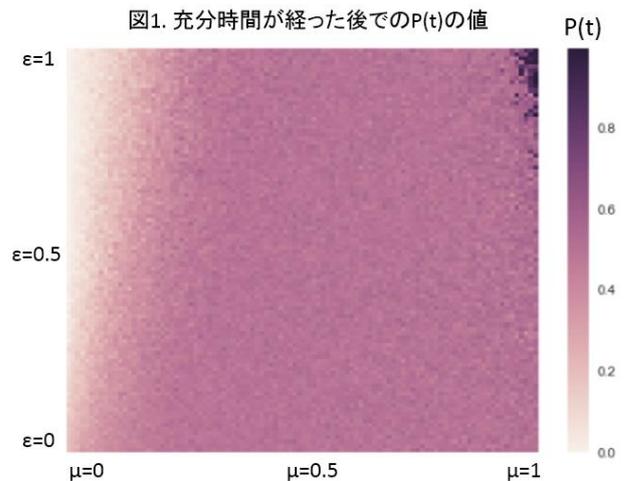
1970年代以来、社会物理学はソーシャルネットワーク、疫病の伝染、選挙など様々な問題に取り組んできた。オピニオンダイナミクスは社会物理学において主要なテーマの1つで、人々の意思決定を理解することを目的としている。本研究では、S. Galamによって考案されたモデルを拡張し、株式市場における人々の意思決定メカニズムの理解を試みた。

まず Galam のモデル[1]を説明する。Galam モデルでは、 N 人のエージェント集団が政治の議論に参加していると見立てた。2つの S :Support、 O :Oppose の意見があるとする。ある時点での S の意見を持つ人の割合を $P(t)$ とする。この集団をランダムに3人組みの小集団に切り分け、小集団内で意見交換を行う。意見交換においてマイノリティの意見はマジョリティの意見に変わる。これを1ステップとし、繰り返しこのステップを行う。

次に本研究の設定を紹介する。本研究では、政治における Galam のオピニオンダイナミクスのモデルを株式市場における売り・買いの意見形成と読み替える。株式市場での売り・買いの意見形成は、2つの過程、①対話 (=参加者の直接的な意見交換) と②価格 (\approx 集団全体の意見) を通じた意見交換によって決定されると仮定した。①では Galam と同じモデルを採用し、 S を買い、 O を売りで見立てた。①のステップの後、②では各人が価格 (\approx 集団全体の意見 $P(t)$) を見て意見を変える。集団全体において S (買い) の支持者が多く $P(t)$ が大きい場合は、需要が多いため価格が高い場合と考えられる。この場合、エージェントは O (売り) に意見を変える。一方、 $P(t)$ が小さい場合は、価格が低い場合なので、エージェントはこのステップにおいて S (買い) に意見を変える。このように「安く買って高く売る」という市場において一般的とされる性質を取り入れた。各①、②の作用の強さを ϵ 、 μ とした。

数値実験の結果としては ϵ 、 μ の値により3つの相が確認された。 μ が低い値では、 $P(t)$ が0または1に偏る層があり (図1の白い領域)、別の相として μ を増大させた場合に、売り買いの情勢は平衡状態になり、 $P(t)$ が0.5に落ち着く。一方、 ϵ 、 μ が大きい場合において $P(t)$ の振動現象が発見された (図1の濃色の領域)。

今後の展望としては、本研究によりセンチメント (売り・買いの情勢) に対する投資家の意見交換の活発度や市場への信頼度の影響予測に資することを期待する。



[1] S. Galam, Sociophysics: “A review of Galam models”, International Journal of Modern Physics C, Volume 19, Issue 03, pp. 409-440 (2008)

太陽系は安定か

学修番号 15263001 阪部政武

非線形物理研究室

指導教員 田中篤司

はじめに

太陽系の安定性は次の二つの理由で保たれている。その一、太陽を中心として惑星などの小天体を結びつけている万有引力は距離の逆二乗の力です。このタイプの力のもとの楕円運動は安定である。その二、太陽の質量は太陽系の 99.866% を占めていて圧倒的に大きい。私は今までこのように理解していたが、ラスカルの講演録を読むと、サスマン、ウィズダムとラスカルらは太陽系がカオス的だということです。

①300 年の歴史

太陽系の安定性の問題はニュートンの重力の法則の表明までさかのぼる。ニュートンは「光学」の本の最後に、彗星の摂動によって太陽系の安定性が損なわれるかもしれないと表明。以来、300 年間、多くの天文学者、数学者達が太陽系の安定性を論証してきた。ラグランジュ、ラプラスは惑星間の影響を摂動で調べて太陽系は安定していると「証明」した。しかし、ポアンカレは重力で相互作用する三体問題の運動方程式を積分することは不可能であることを示した。さらに天文学者達が計算している摂動級数が無限時間においては発散するので、これまでの証明は不完全であることを示した。

②数値計算

最近二十数年間のコンピュータを使つての数値計算により、太陽系の惑星の軌道運動はカオス的であることが分かった。惑星の軌道運動がカオス的ということは初期条件にずれがあると、そのずれが経過時間とともに指数関数的に大きくなり、惑星の軌道の予測は出来なくなることを意味する。

カオスかどうかは数値計算で、リャプノフ時間を求めて調べる。ラスカルは地球型惑星（水星、金星、地球、火星）のリャプノフ時間は 500 万年と求めた。さらに、様々な初期条件について調べたところ、34 億年後に地球型惑星に不安定化が起こり、惑星間の衝突の可能性も出てくることが示された。

文献

Laskar, Prog. Math. Phys. **66**, 239 (2013)

矩形スパイラル状ビリヤードにおける異常な拡散

非線形物理研究室

溝口悠樹 13163083

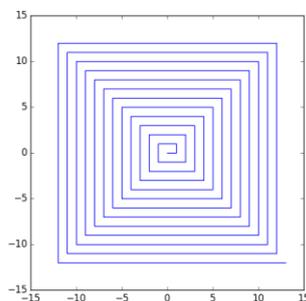
首藤 啓 (指導教員)

系が通常の拡散過程に従う場合、(たとえば1次元の場合) 拡散の様子は以下の拡散方程式によって記述される。

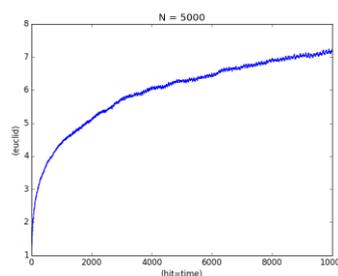
$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

ここで D は拡散係数と呼ばれる量で、拡散の速さを示す指標であり、 $D := \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\langle x^2 \rangle}{2t}$ によって定まる。一方、自然現象に現れるすべての拡散過程が上記の拡散方程式で記述されるわけではない。本研究では、矩形スパイラル状ビリヤード系における拡散過程を数値的に調べ、粒子の拡散の様子が通常の拡散過程に従わない、いわゆる異常拡散を示すことを見出したのでその結果を報告する。

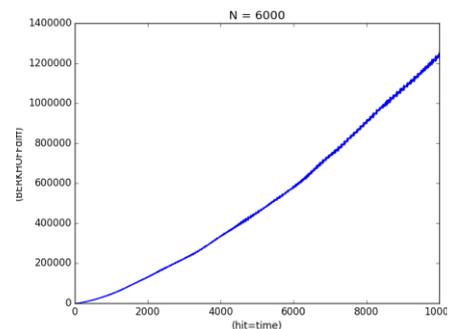
矩形スパイラルビリヤード系とは、図1に示すように、スパイラル状の領域内で弾性衝突を繰り返しながら運動する質点の動力学であり、領域の複雑さにも関わらずカオスが発生しないことが知られている。ここで、スパイラルの中心を初期位置として、初期位置からのユークリッド的な距離を観測量とした場合、並びに、壁面に沿った距離と角度の2つの変数を座標(バーコフ座標と呼ばれるもの)とした場合の2通りについて拡散の様子を調べたところ、前者については subdiffusion (通常の拡散より遅い拡散)、後者については superdiffusion (通常の拡散より速い拡散) が数値的に観察された。とくに、後者の superdiffusion については、その背景に、ビリヤード内を特殊な角度を保ったまま弾道的(ballistic)に運動する軌道が存在することが明らかになった。



(図1) 矩形スパイラル状ビリヤード



(図2) 初期位置からのユークリッド的な距離の時間変化



(図3) 矩形スパイラル状ビリヤードのバーコフ座標における位置の二次モーメントの時間変化

ReドープMoS₂原子層の合成と電気伝導特性の評価

ナノ物性研究室 13163090 吉村 真太郎

指導教員: 宮田 耕充、 真庭 豊

遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) 原子層は、原子3個分の厚さを持つ二次元半導体であり、特異なスピン・バレー物性やエレクトロニクス応用より注目を集めている。TMDCの物性や応用研究を進めるために、含まれる不純物の役割を理解し制御していくことが重要な課題となっている。特に、理論的には二硫化モリブデン(MoS₂)においては、NbやReをMoと置換することで、それぞれホールや電子がドープされると予測されている[1]。現在まで、Nbを不純物として置換したTMDC原子層の合成に関する研究が報告されているが、その研究例は非常に少ない[2,3]。本研究では、代表的な半導体TMDCである二硫化モリブデン(MoS₂)にReをドープした系に着目し、その電気伝導特性の理解を目的とした。

試料は、化学気相成長 (CVD) 法を用いて、サファイア基板上に結晶を成長させた。光学顕微鏡観察より、MoS₂とRe-dope MoS₂共に、10 μ m程度のサイズの結晶が基板上に確認された(Fig.1a, b)。Reドープ試料のラマンスペクトルでは、対称性の乱れに由来するLAモードの増強が観測され、Reの置換を示唆している(Fig.1c)。電気抵抗の温度依存性では、Reをドープによる活性化エネルギーの変化が観測されなかった。これはRe由来の不純物準位が深く、他の浅いギャップ内準位がMoS₂の電気伝導特性を支配しているためと解釈できる。今後は、電界効果等を利用し、電気伝導特性の詳細な評価を進めていく予定である。

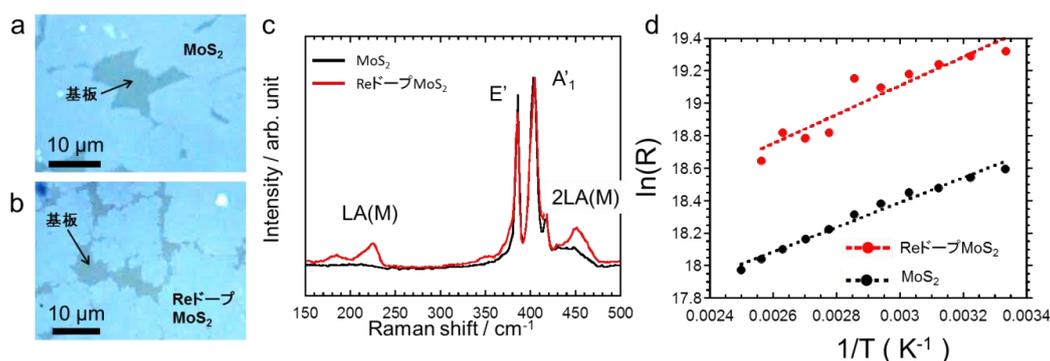


Fig.1 (a)MoS₂と(b)ReドープMoS₂の結晶の光学顕微鏡像。MoS₂とReドープMoS₂の(c)ラマンスペクトルと(d)電気抵抗の温度依存性。

[1] K. Dolui, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **88**, 075420 (2013).

[2] J. Suh, *et al.*, *Nano. Lett.*, **14**, 6976-6982 (2014).

[3] S. Sasaki *et al.*, *Appl. Phys. Express*, **9**, 071201 (2016).

単層 WSe₂ の合成と電気伝導特性の評価

ナノ物性研究室 13163098 高口 裕平
指導教員： 宮田 耕充、 真庭 豊

遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)は、多様な光・電気特性を持つ二次元層状物質として基礎物理とデバイス応用の観点から注目を集めている。代表的な TMDC である MoS₂ や WSe₂ は半導体であり、これらをチャンネルに用いた電界効果トランジスタ(FET)が報告されてきた。特に、WSe₂ は単層において両極性動作を示し、その合成法の開発やキャリア制御による各種電子素子への展開が期待されている。本研究では、化学気相成長(CVD)を用いた単層 WSe₂ の合成方法の確立と、その FET 特性および紫外線照射によるホールドープの結果について報告する。

単層 WSe₂ は酸化タングステンとセレンを原料とし、ハライドアシスト CVD 法により SiO₂/Si 基板上に作製した[1]。光学顕微鏡観察(Fig.1a)、発光・ラマンスペクトルより、50 nm 程度の単層 WSe₂ の成長を確認した。FET 作製のために、シャドーマスクを用いて Cr(1 nm)/Pd(10 nm)/Au(40 nm)を試料に電極として蒸着した (Fig.1b)。作製した FET にバックゲート電圧(V_g)をかけ、ソースドレイン電流(I_d)の測定を行ったところ、ゲート電圧が負側に行くにつれ I_d が上昇する p 型特性が確認された。ホールドープのために試料に大気中で紫外線照射を行ったところ、照射時間の増加に伴ってしきい値電圧が正側にシフトする傾向が見られた。興味深いことに、多層 WSe₂ への紫外線照射と比較し[2]、本研究の単層 WSe₂ ではしきい値電圧がより大きくシフトすることがわかった。この結果は、単層 WSe₂ の方が総体積に対する表面積の比が大きく、オゾン吸着による電荷移動が効果的に起こったためと考えられる。

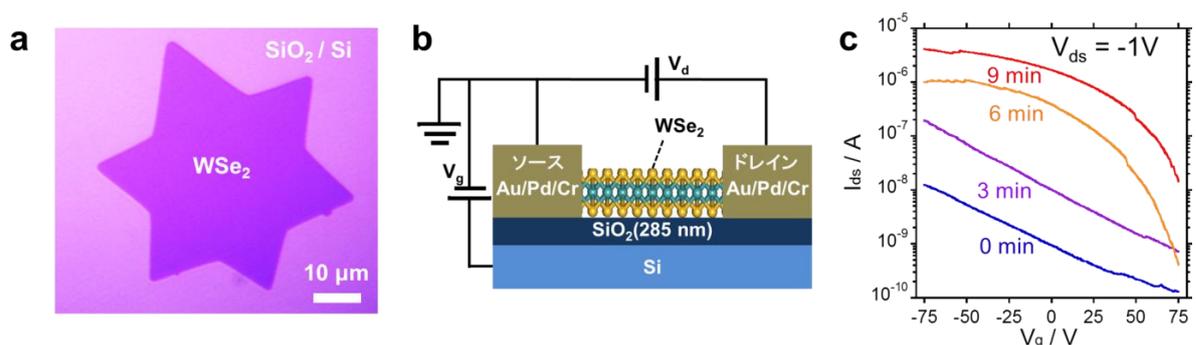


Fig.1 (a) SiO₂/Si 上に成長した単層 WSe₂ 結晶の光学顕微鏡像。(b) 作製した単層 WSe₂ FET のモデル図。(c) 紫外線を 0, 3, 6, 9 分間照射した後のソースドレイン電流のゲート電圧依存性。

[1] S. Li, *et al.*, *Appl. Mater. Today*, **1** 60-66 (2015).

[2] S. Wang, *et al.*, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18**, 4304-4309 (2016)

熱電変換を用いた発電テープの作製

ナノ物性研究室

本郷 直也 13163088

真庭 豊 中井 祐介 (指導教員)

熱電発電とは、物質に温度差をつけると、温度差に比例した電圧が生じるゼーベック効果を利用し電力を得ることである。熱電発電の利点としては、可動部がなくメンテナンス等が不要で長寿命、熱から電気へと直接変換しているため環境への負担が小さいなどが挙げられる。

近年 IoT (Internet of Things) の活用が進み、IoT を支えるセンサー等の機器を稼働させるにはエネルギーハーベスティングが必要になる。エネルギーハーベスティング (energy harvesting) とは、太陽光や照明光、機械の発する振動、熱などのエネルギーを採取し、電力を得る技術のことである。特に身の回りにある僅かなエネルギーを電力に変換し活用することを目的とした技術である。そこで、本研究では“熱”に注目し、工場・自動車などの排熱や体温などの身近な熱の有効利用を目指しテープ状の熱電変換デバイスを作製することを目的とする。

デバイスをテープ状にすることにより様々な形状のものに容易に取り付けることが可能になる。しかし、デバイスをテープ状にする、つまりデバイスを薄くしてしまうと、デバイス内での温度差の確保が困難になってしまう。従来の熱電変換デバイスはp型・n型の熱電材料を直列に接続し、熱流に対して熱電変換材料が平行に配置 (図1) されているものが多い。そこで、熱電変換材料を熱流に対して垂直に配置 (図2) することにより、薄いデバイス内においても線材を長くでき、その熱抵抗を大きくでき、温度差が確保しやすくなると考えられる。これらをふまえ、熱流に対し線材が垂直に配置するテープ状の熱電変換デバイスを作製した。本研究では、熱電変換材料用として銅、コンスタンタンを用いたが、将来的にはカーボンナノチューブ糸によるデバイスを作製予定である。

当日はデバイスの作製方法と起電力の測定結果について発表を行う。

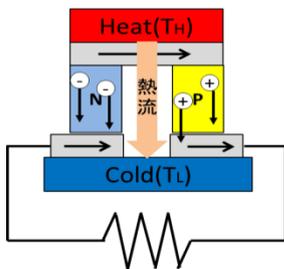


図1.熱電変換素子の基本構造

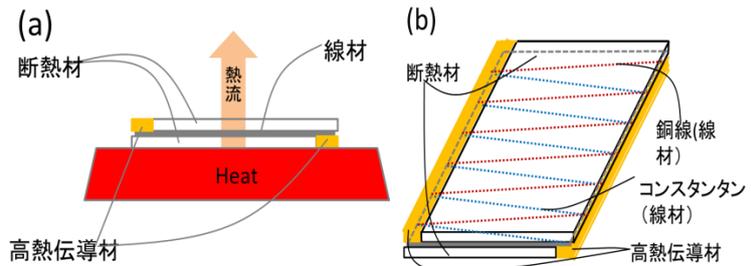


図2. 熱流に対し線材が垂直に配置されたデバイスの略図

(a)テープの断面図 (b)テープを斜め上から見た図

圧力下 ESR 測定手法の改良

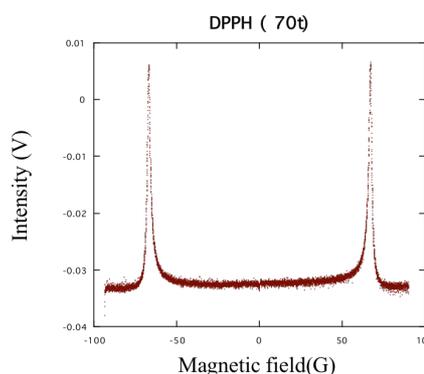
ナノ物性研究室

13163087 嶋崎 真佳

指導教員 真庭 豊 坂本 浩一

超低温、超高压という極限の環境下では通常では見られない物性が多く確認される。しかしそのような環境下で測定を行うことは困難であり、まだ測定されていない物性が多く存在する。物質の磁気的な性質を調べる手段として ESR 測定がある。本研究では、高压下で温度を変化させながら ESR 測定を行う手法の確立を目的としている。

温度変化させながら安定して大きな圧力を加える手段として、本研究ではキュービックアンビル加圧装置を用いる。この装置は6方向から試料へ等方的に力を加え、約10GPaまで加圧することができる。先行研究では加圧して測定を行った際にデータに大きな歪みやノイズが生じるという問題があった。そこで今年度の研究では、今までは単純な立方体であったガスケットを“フィン”付きの立方体に変えるなど改良を行った。¹⁾ フィンには加圧初期の変形を和らげる、アンビルを正しい位置に保持するなどの効果が期待できる。このガスケットで測定を行ったところ油圧装置の表示で70tの力が加わった状態まで、歪みのない信号を得ることができた。しかし、アンビルが破損していたため、表示通りの圧力が加えられていなかった可能性がある。今後の課題としては破損を防ぐためアンビルの素材の再検討、圧力の校正などが挙げられる。



(a)

(b)

(c)

(b)従来の立方体ガスケット (b)フィン付きのガスケット (c)今回測定した信号

1) J.-G. Cheng, K. Matsubayashi, S. Nagasaki, A. Hisada, T. Hirayama, M. Hideo, H.