



# 平成 30 年度 東邦大学理学部物理学科 東邦大学大学院理学研究科物理学専攻

## 卒業•修士•博士論文予稿集

### 卒業論文発表会

平成31年2月13日(水)・14日(木)

修士 · 博士論文発表会

平成31年2月22日(金)・23日(土)

### 発表会場 理学部 V 号館 1F 5103 室

### 目次

卒業論文発表会プログラム	- 2	2 -
卒業論文要旨	- 3	3 -

修士・博士論文発表会プログラム	22	_
博士論文要旨	23	_
修士論文要旨	24	_

 $9:00 \sim 9:05$ 

### 卒業論文発表会プログラム(講演9分、質疑3分)

※ 状況により時間変更の場合があります。

場所:理学部V号館1F5103室

平成 31 年 2 月 13 日 (水)

開会

- 1. 原子過程科学教室 9:05~10:29
- 2. 物性物理学教室  $10:40 \sim 12:40$

----- 昼休み -----

 3. 磁気物性学教室
 13:30~15:06

 4. 物性理論教室
 15:15~17:15

平成 31 年 2 月 14 日(木)

5.	宇宙物理学教室		$9:00 \sim 10:00$
6.	素粒子物理学教室		$10:10 \sim 11:34$
		昼休み	

7. 量子エレクトロニクス教室 12:30~14:30

### 1 ウランに汚染された瓦礫を対象とする迅速なスクリーニング方法の開発

原子力発電所の廃炉現場等において、ウラン (U) に汚染された瓦礫が発見される可能性がある。この U の分析に蛍光 X 線分析を適用すると、土壌を含む瓦礫には多くのルビジウム(Rb)が含まれることが予 想されるので、分析によく用いられる ULa線は Rb Ka線とエネルギーが近いためピークが重なり U分析 が困難となる。そこで本研究では、ピークが重ならない ULB 線を分析に用いるために、装置の一次 X 線フィルターの最適化を行い、Rb 濃度により La 線と LB<sub>1</sub>線による分析を切り替える新手法を提案し、 Rb 濃度に依らない迅速なスクリーニング法を示した。

#### 2 高強度パルスレーザーを用いた星間分子負イオン生成

原子過程科学教室

### 松崎 美月

高村 晃大

周囲に何もない孤立環境における分子の輻射冷却過程は、宇宙空間での分子合成進化過程など広い 分野に関連した物理事象である。近年、逆内部転換(分子振動エネルギーから電子励起エネルギー への転換)の後に起こるポアンカレ蛍光によって速やかに冷却が進むことが炭素鎖分子負イオン Cmなどで次々と確認されており、ポアンカレ蛍光の詳細研究が望まれている。本研究では、ポアン カレ蛍光の詳細測定実験を目指し、レーザーアブレーション法を用いた C., の生成、および生成イ オンの飛行時間質量分析(TOF)を行った。

### 3 ポアンカレ蛍光精密分光装置の高周波回路開発

### 市川 弘起

近年、孤立環境中にて蛍光放出による分子の冷却から、振動エネルギーが電子励起エネルギーに転換さ れる逆内部転換の後に放出される『ポアンカレ蛍光』の存在が確認された。この急速な冷却過程は宇宙 空間での分子合成進化にも影響するため、分子ごとのポアンカレ蛍光の放出速度やスペクトルの詳細測 定が望まれている。現在、原子過程研究室ではイオントラップを用いたポアンカレ蛍光精密分光実験を 目指して装置開発をしている。本研究では共振条件やトランスの性質の確認をしつつ、イオントラップ を動作する高周波電圧回路製作を行った。

#### LabVIEW ソフトウェアを用いたポアンカレ蛍光観測用集光光学系の制御 4

### 森 大樹

周囲に何もない孤立した環境にある分子の冷却過程は、星間分子の合成進化にも関連した興味深い事 象である。近年、分子振動エネルギーが電子励起エネルギーに転換されて放出される「ポアンカレ蛍 光」により分子が急速に冷却されることが確認され、ポアンカレ蛍光のスペクトルなどの詳細研究が望 まれている。しかし、ポアンカレ蛍光の収量は一般に少ないため、収量向上にために簡便かつ精密な光 学系の調整が必要となる。そこで本研究では LabVIEW ソフトウェアを用いた光学系調整プログラムを作 成し、レンズ位置調整のテストを行った。

### 5 重水素化水素(HD)の電子エネルギー損失スペクトルの測定

### 金杉 優希

これまで本研究室では、さまざまな原子や分子の励起微分断面積の測定を混合ガス法を用いて行って きた。混合ガス法は、標的原子分子のガスにヘリウムガスを混合し、ヘリウムの2<sup>1</sup>P励起ピークと対象と なる励起ピークの強度比から微分断面積を決定する方法である。そこで本研究では、昨年度終了した核 融合科学研究所との共同研究に引き続き、重水素置換分子のうち、特に重水素化水素(HD)の微分断面 積を得るために、高分解能な HD の電子エネルギー損失スペクトルを測定することを目的とした。

### 6 イオン及び電子衝撃を用いる核融合炉材料研究のための実験装置

### 五十嵐 裕雪

核融合のための炉壁材料には、荷電粒子等が衝突した際に構成原子がはじき出されるスパッタリングが 起きにくいという性質を持つことが必要である。なぜなら、スパッタリングにより弾き出された原子が プラズマ内に混入するとプラズマを冷却してしまうからで、材料表面に荷電粒子が入射した際の原子過 程の研究は非常に重要である。本研究では、故障していたイオン及び電子と金属表面の衝突実験装置を 稼働させることを目的とした。イオン源、分光装置の整備を行い、稼働状態に復帰させるめどをつける ことができた。

### 7 飛行時間型質量分析計の小型化、高性能化に関する研究

### 江口 天彩

飛行時間質量分析(Time of Flight= TOF)法は、非常に有用な分析ツールとして多くの分野で利用されて いる。かつて TOF 法は、分解能の点において他の分析器に劣るという欠点を持っていたが、Wiley と McLaren による二段加速法がまずその懸念を払拭し、反射型の登場により分析ツールとしての確固たる地 位を得た。本研究では、TOF 装置の小型化、高性能化に関する知見を得ることを目的とし、二段加速法 を詳しく解析するとともに、三段以上の多段加速についての考察も行った。その結果、TOF 装置の小型 化、高性能化のためのキーともいえる知見を得た。

### 物性物理学教室

### 1 θ-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>TlZn(SCN)<sub>4</sub>における電荷秩序形成過程と比熱

**θ**-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>TlZn(SCN)₄は低温でET分子内の電荷の偏りが 対角型及び水平型のストライプ秩序の競合により電荷のガラス 化の可能性が指摘されているが、結晶化の機構を含めてその定 量的な評価は未だ出来ていない。そこで本研究では、ガラス化 に必要な2K/sにおよぶ高速な温度掃引速度、結晶化に十分な長 時間のアニールが可能なシステムを用いて相転移近傍の比熱を 測定した。その結果、アニール時間による転移に伴う比熱のピ ークがアニール温度の違いにより3つのパターンに分けられる ことが判明した。電荷の偏りの核の生成とその成長の定量的な 評価を試みた。





### 2 $\theta$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>RbZn(SCN)<sub>4</sub>の相転移に伴う比熱測定

θ-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>RbZn(SCN)<sub>4</sub> は電荷秩序を伴った金属-絶縁体 転移を示す。この系は温度掃引を早めると転移に伴う比熱の形 が変わる。このため掃引速度をコントロールできるシステムを 構築し、掃引速度を制御しながら比熱の測定を行った。熱浴を 改良し今まで不可能であった早い等速の温度掃引が可能となっ た。転移近傍において観測される大きな比熱異常が、掃引を早 くすると単調に減少しピークが消滅するため、相転移が大きく 抑制されることが明らかとなった。



増田 聖



down の時間を 45 min で固定したときの 比熱結果

### **3** λ-(BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>4</sub>の比熱測定と新しい解析方法の開発

本研究では、磁気秩序を伴った金属-絶縁体転移を起 こす有機導体 λ-(BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>4</sub>に着目し、比熱の測定を 用いて λ-(BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>4</sub>の相転移の転移機構を明らかに する目的で熱緩和法による比熱測定を行った。しか し、従来までの解析方法では、λ-型特有の鋭い比熱の ピークの測定が不十分であった。そのため、本研究で は緩和曲線の時間微分を用いる新たな比熱の解析方法 の開発をし、転移近傍の緩和曲線に応用した。その結 果、従来までの解析方法で現れていた鋭いピーク後の 落ち込みを防ぐことに成功した。また、試料比熱のピ ークの形状や転移温度等をより鮮明にとらえられるよ うにもなった。



λ-(BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>4</sub>の転移近傍のモル比熱 新しい解析方法(左)と従来までの解析方法(右)

### 4 α - (BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>の電荷秩序とディラック状態

α-(BEDT-TTF)2I3は金属-電荷秩序絶縁体転移を起こし、圧力 下でディラック電子系に移行する。しかし未だこの状態の特有 な比熱の定量的な評価、加圧による電荷秩序転移抑制過程の熱 測定は行われていない。このため圧力下での比熱を測定し電荷 秩序、ディラック電子系の電子状態を評価した。加圧に伴って 転移温度は低下し、10 kbar 下では転移点の異常が消滅した。 これに対し低温で観測される電子比熱はディラック電子状態で は絶縁体状態と比較すると増大し、金属状態のTに比例する温 度依存性ではなくT<sup>2</sup>に近く特異な電子状態であることが分か った。



各圧力における転移温度の変化(左)と 17kbar 加圧時の比熱の変化とγ*T*<sup>2</sup> + β*T*<sup>3</sup>の 比較(右)

### 5 α-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>の中間圧力状態

α-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>は常圧下・低温では電荷秩序絶縁体となるが、 静水圧印加で質量ゼロのディラック電子系が実現される。ディラ ック電子系としてはグラフェンなどが有名であるが、強相関電子 系に隣接したディラック電子系はこの物質が初めてであり、強相 関ディラック電子系の物理展開が期待できる。本研究では電荷秩 序絶縁体からディラック電子系へどのように転移するのかという 問題に取り組み、中間圧力領域でキャリアの易動度とキャリア濃 度を調べた。その結果、中間圧力領域における電荷秩絶縁体相へ の転移近傍ではキャリア易動度の圧力依存性はなく、この相転移 の秩序変数はキャリア濃度であることを明らかにした。

鵜野澤 佳成

杉山 敦



### 6 有機ディラック電子系α-(BEDT-STF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>とα-(BETS)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>における相転移現象と輸送現象

中居 隼風

有機伝導体α-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>への圧力印加により、電荷秩序絶縁 体相に隣接しした質量ゼロのディラック電子系が実現した。本研究 では、電荷秩序絶縁体へどのように実現するのかという問題に取り 組んだ。α-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>の中間圧力領域の低温電子状態を明らか にすることを目的に、BEDT-TTF分子中のSをSeに置換して化学 圧力を加えたα-(BEDT-STF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>とα-(BETS)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>の輸送現象を調べた。 それは常圧下で約80Kと約50Kで絶縁体転移を起こす。この絶縁 体転移の機構として、第一ブリユアンゾーンに近接した二つのディ ラックコーンを持つが、それらがマージすることによるギャップ京 成の可能性が示唆された。さらにスピンが関与した負の磁気抵抗効 果を検出した。



### 7 Et<sub>2</sub>Me<sub>2</sub>Sb [Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>系の電荷整列転移の圧力依存性

Et2Me2Sb [Pd(dmit)2]2は、温度上昇に伴い、低圧領域では電荷 整列相から Mott 絶縁体へ転移を起こすが、高圧下では Mott 絶 縁体の代わりに金属相へ転移し、Mott 絶縁体、金属、電荷整列 の三相が競合する特異な物質である。本研究では、DTA+AC 法 を用いて圧力下の比熱測定を行い、三相の競合する領域で相転 移に伴う比熱メインピークと転移温度より高温で観測されるサ ブピークを観測し、エントロピーの変化を評価した。その結 果、金属相に転移する低、中間圧力領域では転移温度の上昇と メインピークの急激なつぶれが、高圧力領域ではサブピークの 広がりが観測された。

### 8 EtMe<sub>3</sub>P[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>の VB 秩序と超伝導の圧力下比熱

有機伝導体 EtMe<sub>3</sub>P[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub> は磁気的フラストレーションが強 い系であり、低温でスピン一重項を形成した Valence Bond(VB)秩 序を伴う絶縁体状態へ転移し、加圧により VB 秩序状態から 2 種 類の超伝導相へ移行する。本研究では比熱測定を行い、VB 秩序 状態、超伝導への転移の熱的考察を行った。はじめに常圧下で VB 状態への転移に伴う比熱のピークを DTA 法と AC 法を用いて 測定し、AC 法の測定方法の確認をした。次に 0.40GPa の加圧下 では VB 秩序転移と 2 種類の超伝導転移を確認するとともに、 VB 秩序状態と 2 種類の超伝導のよるエネルギーギャップを評価 した。

立脇 奈緒

伊藤

富田 直也

常滋



温度と圧力の相図



温度と圧力の相図

### 9 分子性導体 EtMe<sub>3</sub>P[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>の圧力下における超伝導転移現象

分子性導体 EtMe<sub>3</sub>P[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>の圧力下において二つ の超伝導転移現象が発見された。この圧力下では、こ の超伝導転移が一つは金属状態からのものであり、も う一つは VBO 絶縁体状態からの転移である判明した。 本研究では、この二つ超伝導転移現象の起源の解明を 目的とし、各圧力下での電気伝導性から詳細に調べ た。結果として、低温側での超伝導は金属状態からの 転移であると考えられたが、高温側での超伝導ではア ニール効果によって超伝導破壊が起きた。本研究にお いて低温状態では温度制御により一つの超伝導状態で 安定していることが判明した。



EtMe<sub>3</sub>P[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>の圧カ下における電気抵抗 率の温度依存性(左)とその相図(右)

### 10 分子性導体 EtMe<sub>3</sub>P[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub> における圧力下輸送特性

古典的なバンド理論からは金属であるが、強い電子間 の斥力によって電子が動けなくなる絶縁体の一つにモッ ト絶縁体がある。モット絶縁体は圧力印加やキャリア注 入により金属転移(モット転移)するが、その近傍では 超伝導などエキゾチックな物性が発現し、理論的にも統 一的な理解がまだなされてはいない。本研究では、分子 性導体 EtMe<sub>3</sub>P[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>の圧力下モット絶縁体状態の 輸送特性を明らかにすることを目的とした。結果、例え ば、0.37 GPa の圧力下で、この系の有効質量は真空中 の電子質量の約 3000 倍と信じられないほど重いことが 判明した。移動度がモット転移の秩序変数であることを 示唆する。さらに、散乱機構はキャリアーキャリア散乱 が支配的であるということがわかった。 土田 将人



EtMe<sub>3</sub>P[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>のモット絶縁体状態における 有効質量の圧力依存性

### 磁気物性学教室

### 1 RKKY 型 Heisenberg スピングラス アモルファス Gd<sub>x</sub>Ge<sub>100-x</sub>薄膜の磁気相図

### 萬徳 伸之

当研究室では複雑系のプロトタイプであるスピングラス(SG)の相転移機構解明のため、磁気異方性のごく小さな Heisenberg SG 磁性体を探索してきた。この結果アモルファス(a-)GdSi は異方性が小さく分子場理論で予想される形の H-T 相図を持つことが分かった。しかし、昨年度の a-GdGe はさらに小さな異方性をもち、カイラリティーシナリオと呼ばれる SG の相転移機構についても検証できる可能性が出てきた。そこで、本研究ではこれまで知られていなかった a-Gd<sub>x</sub>Ge<sub>100-x</sub>のxによる磁気相図を調べた。その結果、a-GdSi に比べて全体的に転移温度 T<sub>g</sub>が小さいことが分かった。

### 2 MBE 法で作製した界面の乱れが大きい Fe/Ag/Cr 三層膜における熱残留磁化の緩和の機構

### 月川 泰知

我々の先行研究ではエピタキシャル Fe/Ag/Cr 三層膜は Ag に量子井戸が形成されスピン分極し Ag/Cr 界面でフラストレーションが起きる事を主張してきた。この時、磁化の対数的なゆっくりとした緩和が起きるが、成長温度( $T_s$ )が高くなるにつれ界面の乱れ具合の程度が進み $T_s \gg 100$ ℃では緩和の機構が大きく変化すると思われる。本研究では、これをはっきりさせるため $T_s = 300$ ℃で様々な Ag の膜厚のFe/Ag/Cr 三層膜を MBE 法で作製し磁化測定を行った。その結果、量子井戸による緩和の振動が見られなかったのでバルク的乱れによる Fe の磁気余効が主な緩和機構だと考えられる。

### **3** B サイトを Al で乱したスピネル反強磁性体 CoRh<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

### 村上 汐理

先行研究ではAサイトに幾何学的フラストレーションを持ち低温でスピン液体的な振る舞いを示す CoAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>のBサイトをRhで乱した場合の磁性を調べてきた。その結果、Rhを混ぜていくと低温でスピ ングラス秩序が現れることがわかった。一方、Rhを100%置換したものは、反強磁性体になることがわ かっている。しかし、BサイトにAlを置換して乱した場合、どのような磁性が現れるか知られていな い。そこで、本研究では、そのような研究の母体となるCoRh<sub>2</sub>O<sub>4</sub>を電気炉で作製し、その構造を調べ た。その結果、多少の不純物は見られるものの、ほぼ単相のCoRh<sub>2</sub>O<sub>4</sub>が作製できた。

### 4 NdBaMn<sub>2</sub>O<sub>6</sub>の Ba サイトの希土類置換が磁性に与える影響

### 遠藤 香菜子

RBaMn<sub>2</sub>O<sub>6</sub>(R = 希土類)は室温付近で強磁性金属相、電荷・軌道整列絶縁相、A型反強磁性相が多重臨界 点を形成するため、室温で超巨大磁気抵抗効果(磁場印加により電気抵抗が数桁以上減少する効果)の発現 が期待されている。本研究ではNdBa<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>Mn<sub>2</sub>O<sub>6</sub>(x = 0.05, 0.1)を作製し、電子ドープおよびAサイト秩序構 造の乱れが多重臨界点付近の物性に与える効果について調べた。その結果、電子ドープにより強磁性転 移温度が上昇するのに対し、A型反強磁性転移温度は低下することがわかった。R = Nd, x = 0.1 ではAサ イト秩序構造を乱すことでA型反強磁性相がほぼ消失する。

### 5 NdBaMn<sub>2</sub>0<sub>6</sub>における Mn サイトの Ti<sup>4+</sup>, Ga<sup>3+</sup>置換が磁性に与える効果

### 宮崎 修輔

 $RBaMn_2O_6$  (R = 希土類) は R = Nd で室温付近での超巨大磁気抵抗効果(磁場を印加すると電気抵抗が数桁減少する)の発現を期待されている物質であるが、多重臨界点付近で A 型反強磁性相が確認されているため発現しない。本実験では $RBaMn_2O_6$  における Mn サイトに Ti<sup>4+</sup>, Ga<sup>3+</sup>を置換することで、それが磁性に与える効果を調べた。その結果、Ti<sup>4+</sup> を置換すると A 型反強磁性相が抑制されたため置換量を固定して磁気相図を作成したが、多重臨界点付近で相が混在してはっきりとした臨界点の確認ができなかった。またGa<sup>3+</sup> を置換した場合は A 型反強磁性相と共に強磁性相の抑制が確認できた。

### 6 Eu<sup>2+</sup>/Eu<sup>3+</sup>の混合原子価を持つ新物質の探索(Eu<sub>2</sub>AlO<sub>4</sub>、EuTi<sub>1-x</sub>Sc<sub>x</sub>O<sub>3</sub>)

### 早川 友理

我々は EuTi<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>3</sub>(0.10  $\leq$  x  $\leq$  0.50)が Eu<sup>2+</sup>/Eu<sup>3+</sup>の混合原子価状態をもつ強磁性絶縁体となることを以前 報告したが、その強磁性相の発現の起源はまだ明らかではない。本研究ではその起源をより詳しく調べ るために、Eu<sup>2+</sup>/Eu<sup>3+</sup>の混合原子価を持つ EuTi<sub>1-x</sub>Sc<sub>x</sub>O<sub>3</sub> を作製し、その磁気特性を調べた。EuTi<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>3</sub> と 同様に Sc<sup>3+</sup>で置換することによって EuTi<sub>1-x</sub>Sc<sub>x</sub>O<sub>3</sub> は反強磁性絶縁体から混合原子価を持つ強磁性絶縁体へ と転移した。しかしながら、EuTi<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>O<sub>3</sub>に比べると強磁性相関は弱くなっている。これは Al<sup>3+</sup>と Sc<sup>3+</sup>の イオン半径の差に起因する Eu<sup>2+</sup>-Eu<sup>2+</sup>間の距離の違いや構造の乱れの程度の違いが原因だと考えられる。

### 7 混合原子価を持つペロブスカイト型希土類酸化物 $Ba_{1-x}La_xBO_3$ (B = Pr, Tb) の作製と磁気特性

### 井上 倫太朗

混合原子価を持つペロブスカイト型遷移金属酸化物は高温超伝導や超巨大磁気抵抗効果などの興味深い物性を示すことが知られている。しかし、希土類が混合原子価を持つペロブスカイト型酸化物は数が少なく、それが物性に与える効果についてはほとんどわかっていない。本研究では混合原子価を持つ希土類酸化物 Ba<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>BO<sub>3</sub> (*B* = Pr,Tb)の作製を行い、その磁性について調べた。Ba<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>TbO<sub>3</sub>の x = 0では反強磁性的な振る舞いを示すが、 $0 \le x \le 0.25$ ではxの値が大きくなるにつれて、低温域でフェリ磁性的な成分が現れる。これは Tb<sup>3+</sup>と Tb<sup>4+</sup>の混合原子価の影響だと考えられる。

### 8 カミオカイト型酸化物(Fe<sub>1-y</sub>Zn<sub>y</sub>)<sub>2</sub>Mo<sub>3</sub>O<sub>8</sub>の比熱測定と磁気特性

### 箕輪 優利

 $(Fe_{1-y}Zn_y)_2Mo_3O_8(0 < y < 0.5)は、擬2次元構造を持つ磁性体で、<math>T_{mag2}$ でフェリ磁性転移、 $T_{mag1}$ で反強磁性転移することを我々が報告している。本実験では $(Fe_{1-y}Zn_y)_2Mo_3O_8$ の比熱測定を行うことでその磁気転移の特性を調べた。その結果、y = 0, 1/6の試料においては $T_{mag2}$ より高温側で急激に減少する分子場的な比熱のピークが現れた。y = 2/6の試料では、y = 0, 1/6に比べて比熱のピークが小さくなり、 $T_{mag2}$ 以上でブロードな山が現れた。この結果は、 $T_{mag2}$ 以上から磁気転移が徐々に発達することを示唆している。

### 物性理論教室

1 格子に乱れがある場合の Thouless pump の数値的研究

Thouless pump とは空間的に周期的な結晶構造中の原子 のポテンシャルを時間に対して周期的に変化させることに よって電子を輸送するシステムのことである。本研究で は、格子に乱れがある場合の光格子中の Thouless pump に ついて、時間発展演算子に対して指数演算子の高次分解を応 用し、波束の運動を追うことにより数値的に調べた。具体的 には、ランダムポテンシャル、光格子と異なる波長のポテン シャルなどを導入し、格子に乱れを作った。その結果、どち らの場合も導入したランダムネスの強さがある値を越えると pump しなくなることを確認できた。



増井 淳人



2 2次元系における量子化された Berry 位相の数値的研究

本研究では、グラフェン同様に質量ゼロのディラック電子 をもつ格子模型である  $\pi$ -flux 模型における状態密度と Berry 位相を数値的に計算した。厳密対角化法と解析解を用いて 状態密度を求め van Hove 特異点を確認するとともに、ボン ド秩序を導入すると 2 つのディラック電子の混成によりギ ャップが開くことを確認した。半充填の場合、ボンドのひ ねりに対する Berry 位相は、系の対称性により 0 と  $\pi$ に量 子化することが知られているが、実際、ホッピングの絶対 値の強いボンドでは Berry 位相が  $\pi$ 、それ以外では 0 となる ことが確認できた。

3 乱れた系の量子アニーリングの数値的研究

組み合わせ最適化問題を解く手法の1つである量子 アニーリングをスピン1/2の模型に対して応用した。 量子効果として導入した横磁場の強さを、時間的に変 化させる事により系の基底状態を求めた。スピンの数 や相互作用の大きさを変えて基底状態へ収束するのに 要する時間を具体的に評価した。スピン間相互作用に 乱れのある系についても同様に量子アニーリングを行 うと、強磁性の場合より基底状態への収束に時間がか かる事が分かった。





ギャップを与えたときの π-flux 模型のエネルギーバンド

青山 太陸



4 アニーリング過程における量子効果の数値的研究

本研究では量子アニーリングの数値的研究を行うため、磁性体の イジングモデルに量子効果を導入した。このハミルトニアンを時 間に依存したシュレディンガー方程式に従い、時間発展させるこ とで基底状態を求めた。特に、量子効果の種類によって系のダイ ナミクスにどのような変化が生じるのかを調べた。その結果、量 子効果の種類を変えても収束先は変化しないが最適解への収束の 様子に差が出ることが確認できた。

5 多層ニューラルネットワークを用いた機械学習の研究

本研究では階層型ニューラルネットワークを用いた機械学習 の数値的研究を行った。階層型ニューラルネットワークは入 力層、中間層、出力層から構成される。中間層が無いものを 単純パーセプトロンと呼ぶ。単純パーセプトロンでは線形分 離できる課題しか扱えないのに対し、多層パーセプトロンで は線形分離できない課題でも扱えることが確認できた。また 多層パーセプトロンで中間層を増やした時の学習の速さ、デ ータ数が多数の時の学習の様子、中間層の活性化関数を変え た時の学習の速さなどについて詳しく調べた。 土井公太



大野 海清

横山 菜々



入力値をランダムに設定し、出力値をy = x<sup>2</sup>より上の値を1、下の値を0とした入出力のデータを10000個学習させた時の分類結果

6 ニューラルネットワークを用いた物質設計

本研究はディープラーニングを物理学分野に応用した物質設計と いう分野に注目する。実験から得た三元化合物のデータを用いて機 械学習を行い、未知の三元物質が chiral 物質であるか achiral 物質で あるかを判断するニューラルネットワークを構成し、既知・未知デ ータに対してどの程度の正答率が得られるかを調べる。学習環境を 最適化した結果、既知データは 80%、未知データは 65%の正答率 が得られた。本研究では構成元素の族番号のみを用いたため、情報 が不十分であった。より密な入力情報や学習環境を補うことでさら に精度を上げられると考えられる。



中間層のニューロン数が12個のときの 正答率の学習回数と学習率への依存性 7 らせん磁性体の電流誘起磁化ダイナミクスに対する理論的研究

本研究では、磁場や電流によって誘起される磁気モーメントのダイ ナミクスを数値計算を用いて調べた。特にらせん磁性体中の電流に よる磁化ダイナミクスを調べた。らせん磁化構造体はスピン交換相 互作用及び Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用を導入した Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程式を解くことで得た。LLG 方程式にスピン トルク項と呼ばれる項を導入することで電流誘起磁化ダイナミクス を計算し、らせん構造の移動速度を求めた。その結果、各相互作用 での磁化構造を把握することができ、らせん構造が電流によって駆 動することがわかった。 荻 遼太郎



磁化(矢印)のヘリカル構造

### 8 磁化ダイナミクスから誘起されるポンピングスピン流の数値的研究

非磁性体/強磁性体/非磁性体系では、強磁性体の磁化が歳差運動し ているとき非磁性体に伝導電子スピン流が駆動され、スピンポンピ ング現象と呼ばれる。本研究では、歳差運動する磁化ダイナミクス から誘起されるポンピングスピン流を計算した。具体的には、スピ ン自由度を考慮した強束縛モデルの伝導電子ハミルトニアンより、 Green 関数法を用いて散乱行列を求め、Brouwer の公式によってポン ピングスピン流を求めた。その結果、外部磁場方向に偏極したスピ ン流は直流成分を持ち、その垂直方向に偏極したスピン流は交流と なることがわかった。



勝岡 拓也



各成分(*μ=x, y, z*)のスピン流。横軸は歳 差運動の軸に垂直な面の磁化の射影の 角度、縦軸はスピン流の大きさであ る。*j<sub>x</sub>, j<sub>y</sub>*は交流となっており、*j<sub>z</sub>*は直流 成分を持っている。

### 9 ナノポーラス磁性体中のスピン波励起と熱拡散に関する理論的研究

近年、ナノポーラス磁性体と呼ばれるランダムな空乏構造を持つ磁 性体が作成され、良い熱伝性能を示すため、注目が集まっている。 本研究では、このナノポーラス磁性体中に励起されるスピン波と熱 拡散について数値的解析を行った。まず、ナノポーラス構造を決定 するため Cahn-Hilliard 方程式と呼ばれる拡散方程式を解いた。得ら れた構造を用いて熱拡散方程式を解くことにより熱伝導の様子を計 算した。計算の結果、空乏の端付近に熱の伝わりにくい場所が現れ ることが明らかになった。また、ナノポーラス構造の磁化のダイナ ミクスよりスピン波の拡散を明らかにした。



初期状態の温度を 300(K)とする。熱源 の温度を 473(K), 位置を下の底面とし, 熱拡散率 20(mm<sup>2</sup>/s)刻み幅 5.0(ps), 分割 幅 Δx= Δy= Δz=1/20(um)にしたときに ナノポーラス中を時間とともに、熱拡 散する様子。

Department of Physics, Faculty of Science, Toho University

10 不規則 L10-FePt における有限温度スピンは励起に関する理論的研究

本研究では不規則性を持つ L10-FePt(Fe と Pt の層状構造) におけるス ピン波の伝搬特性を数値的に調べた。その結果、室温程度まではス ピン波のピークは熱の影響を受けにくいが、不規則性が 5% を超え ると特に高エネルギー側でのピークの区別が難しくなることが確認 できた。そのためスピン輸送に利用するためには純度を高くする必 要があると考えられる。なお、熱の効果は Langevin 法に基づくラン ダムな磁場、不規則性は Fe と Pt の置換によって導入した。



清藤 雄我

不規則性 0%の場合(左)と不規則性 10% の場合(右)

### 宇宙物理学教室

### 1 共形不変性と Brans-Dicke 理論

石田 一之眞

重力理論の量子化は究極の統一理論における重要な未解決問題で ある。量子化できる物理理論は、共形変換と呼ばれる、時空計量の 局所的なスケール変換に対する不変性を持つことが知られている。 一方、アインシュタイン理論はこの不変性を持たない。共形不変性 は理論のくりこみ可能性とも関連しており、アインシュタイン理論 の共形不変的拡張について調べることは興味深い。そこで、本論文 ではそのような例の一つである、スカラー場と重力場の結合項を持 つ Brans-Dicke 理論について、その共形不変性を示すとともに、そ の性質について調べた。

### 2 重力の熱力学とその応用

ブラックホール(BH)時空には熱力学的性質が存在することが 知られている。本論文では、BrownとYorkの開発した手法(Phys. Rev. D47 (1993) 1420)に基づいて、BH時空の熱力学的性質の統計 力学的な定式化を導出した。また、この定式化を負の定曲率を持つ 5次元時空(AdS<sub>5</sub>)上における、ブラックブレーン時空および球対 称BH時空に適用し、自由エネルギーを計算した。その結果、ブラ ックブレーンは光子気体と同様の性質を持ち、BH はある質量より 大きい時、ブラックブレーンへの相転移をおこす可能性があること が解った。

### 3 Distance Duality Relation の検証

本研究では、標準宇宙モデルにおいて、宇宙論パラメータの詳細 によらずに成り立つと期待される distance duality relation (光度距離 と角径距離の関係式)の検証を行った。光度距離に対しては Ia 型超 新星爆発、角径距離に対しては銀河団のスニヤエフ・ゼルドビッチ 効果とX線の観測データを用いた。その結果、distance duality relation が誤差の範囲内で成り立つことがわかった。このことか ら、標準宇宙モデルおよび光子数保存が矛盾なく成立することが示 唆される。 大竹 紀慧

佐藤 清

### 4 重力レンズ効果における多重散乱の影響

佐藤 大起

宇宙の遠方に存在する天体が発した光が、複数の天体の重力場 によって多重散乱される場合がある。この時の像は、単一の天体の 重力レンズ効果によって発生した像に対して摂動を含んでいる。そ の摂動は直接観測が難しい矮小銀河の探索にも利用できるため、ダ ークマターの種類の判別などに役立つと期待されている。本研究で は多重散乱によって重力レンズ効果が起こる仕組みを理解し、その 定式化を行う。それを元に、レンズが1つの時の散乱と比べてどの ような摂動が加わるのかをまとめる。

### 5 光子計数型テラヘルツ干渉計の開発に向けた FET の評価

林 優花

天体観測において光子計数型 THz 干渉計の SIS 検出器を運用す るためには、よりリークや雑音の小さい増幅器が必要である。本実 験では、光子計数型 THz 干渉計で用いる条件を満たしている増幅 器を探すために増幅器のリーク電流の測定を行う予定である。FET の評価を行うために、クライオスタットや吸着冷凍機が使えるのか 評価した。また、FET 評価の方法としては半導体パラメータアナラ イザーを用いて 特性を調べる。増幅器として用いるのは1つ目は GaAsFET であり、2つ目は GaAs より高速度で使用できる JPHEMT である。

### 素粒子物理学教室

### 1 ミューニュートリノビームによるニュートリノ原子核反応の二次粒子解析

我々は低エネルギー領域でのニュートリノ原子核反応を詳 細に解析するために NINJA 実験を行なっている。この実験で は高い位置分解能の原子核乾板と鉄板との積層構造を持つ検 出器 ECC を使用して、低運動量の陽子を検出できることが特 長である。2016年2月から5月にかけて ECC に向けてミュー ニュートリノと反ミューニュートリノビームを交互に照射し た。本研究ではミューニュートリノビームによって生成され た合計 262 事象の反応点近傍のチェックを行ない、二次粒子 の thin track、black track、低運動量 black track それぞ れが反応点からどの方向に放出されたかを解析した。 永田 郁弥



ニュートリノ反応事象候補

### 2 低エネルギー領域でのニュートリノ原子核反応モードの解析

我々は Sub-GeV から Multi-GeV の低エネルギー領域におけるニ ュートリノ原子核反応断面積の精密測定を目的とした T60 実験を J-PARC で行っている。本研究では 2016 年 2 月から 5 月にかけて 鉄標的にニュートリノ及び反ニュートリノビームを照射し、実験 を行った RUN6 のデータを使用する。実験から得られた飛跡デー タを用いてニュートリノ原子核反応の解析を行い、シミュレーシ ョンの結果と比較を行った。陽子の運動量分布では 200MeV/c ほ どまで測定できている。これは従来の電気検出器では実現できな かった低い運動量で、大きな成果と言える。一方、π中間子の角 度分布などシミュレーションの結果と一致しないように見えるも のもある。今後の解析による統計向上が期待される。

水野 耕作



実験に使用した検出器

### 3 低エネルギー領域での反ニュートリノ原子核反応の探索と解析

### 高木 秀彰

我々は J-PARC で Sub-GeV から Multi-GeV の低エネルギー領域におけるニュートリノ原子核反応断面積 の精密測定を目的として高い空間分解能を有する原子核乾板を用いた NINJA 実験を行っている。本研究で は原子核乾板に時間情報を付与する多段シフターを運用した RUN6 でニュートリノ及び反ニュートリノビ ームを照射して得られた飛跡データを用いてニュートリノ原子核反応の探索及び反ニュートリノ原子核 反応の解析を行い、シミュレーション結果との比較を行った。その結果、再構成されたミュー粒子はお おむねニュートリノ反応由来のものであることが分かった。π中間子や陽子に関しては、シミュレーシ ョン結果と異なるように見える分布もあるが、現状では統計数が少なく、はっきりしたことは言えな い。今後の統計向上が期待される。

#### SHiP 実験に向けたコンパクトエマルションスペクトロメーターの基礎研究 4

コンパクトエマルションスペクトロメーターは原子乾板と低密度の支持体を 交互に配置する構造で、磁場中での荷電粒子飛跡のサジッタを測定することに より、運動量と電荷符号を測定できるコンパクトな検出器である。SHiP 実験で は、正・反ニュートリノ反応の分離を担う。他の将来計画の実験でも使用する 計画である。本研究では、平面性を保つのに有利なガラスベースをアクリルと 比較して厚みの一様性を評価した。新しいチェンバー構造実現のため、3 種類 の接着剤の接触テストを行い、フィルムへの影響を調べた。

#### SHiP 実験に向けた新薄型エマルションスペクトロメーターの大角度飛跡の再構成 5

我々はタウニュートリノ (v<sub>r</sub>) 反応の詳細解析などを目的とした CERN SHiP 実験を計画している。v,と反v,識別のために娘粒子である荷電レプトン崩壊検 出に加え、その電荷識別が必要となる。そのための Compact Emulsion Spectrometer (CES) はサブミクロンの測定精度が求められるが、CES に用いる原 子核乾板は薄くたわみやすい。そこで、たわみを防いで平面性のよいベース素 材の候補としてアクリル、ポリスチレン、ガラス、原子核乾板を支えるスペー サーとして Rohacell と air gap を用意し、CERN でテスト実験を行った。本研 究では 200 μm ガラスベース + air gap の構造をもつ CES に照射された大角度 粒子飛跡(tan  $\theta = -0.3$ 、 ±6GeV/c、 10GeV/c)の再構成を行った。サジッタは 5.8 $\mu$ m、 $\sigma$ は2.1 $\mu$ mであり、ほぼ予想通りの値が得られた。

#### 6 FPGA ボードを用いたミュー粒子の寿命測定

Cosmo-Z は最新の FPGA ボードを搭載したデータ計測、処理装置である。FPGA とは製造後にユーザーが 内部の論理回路を定義・変更することのできる集積回路である。通常の集積回路は設計時に仕様や機能 が定まり、後から回路を変更することはできないが、FPGA は設計時に特定の仕様や機能が定まっておら ず、ユーザーが後から設定することができる。本研究では Cosmo-Z を用いてミュー粒子の寿命測定実験 の簡略化を目指す。今まで NIM・CAMAC モジュールを同軸ケーブルで配線していた装置を Cosmo-Z で代替 することができれば、配線の時間、モジュールの設置場所など多くのコストを削減し、実験が簡単に行 えるようになる。

#### Ashra/NTA 実験のためのレーザーを用いた大気蛍光現象の模擬試験 7

本研究では Ashra 実験における大気蛍光観測を実現するために山梨県にある 観測所にて2台の集光器を設営し、レーザーのレイリー散乱光で宇宙線由来の 大気蛍光を模擬して試験観測を行った。その結果、光電子増倍管からの信号よ りレーザー散乱光の光子数を全体で 10<sup>14</sup> 個と見積った。このことにより 10<sup>19</sup>eV 付近のエネルギーの空気シャワーを再現し、2 台の集光器で同時観測ができる ことを示した。今後、同実験設備は複数の集光器で同時に観測を行う Ashra 実 験におけるプロトタイプ実験装置としての試験運用が期待される。



小山 彩夏

# beam Air gap をもつチェン バーの概略図

鶴岡

千穂

渡辺 啓介

#### 永澤 陸飛



試験観測の様子

### 量子エレクトロニクス教室

### $12:30 \sim 14:30$

### 1 ダイアモンド検出器の炭素線応答に関する基礎的検討

### 袖山 梨花子

がんの三大治療の一つである放射線治療のうち、炭素線治療は線量集中性や生物学的効果が高いことから国内外において治療施設が増加している。放射線治療において、照射されるビームと治療計画装置で算出した治療照射プランが一致していることを確認することは品質保証(QA)のために重要である。本研究では、非常に小型で位置分解能に優れ、線量・線質を同時に測定できる利点を持つダイアモンド検出器に着目した。本論文ではダイアモンド検出器の炭素線応答に関する基礎的研究として、素子厚の影響と水等価性について検討する。

### 2 紫外線による植物の生長阻害・形態変化

### 前田 浩太朗

紫外線を照射していない小松菜と1分、2分、3分紫外線を照射した小松菜を比べ、生長にどのような影響が表れるのか研究した。また、電気泳動を用いた測定やクロロフィルの測定も行った。紫外線を照射したところ、全長、葉の面積の生長阻害が見られた。クロロフィル比の測定からそれぞれで値が減少した。よって、生長の阻害を確認することができた。

また、分化する前の植物細胞であるカルスを作成し、紫外線を照射し、成長を確認する実験を計画した。しかし、カルスを作成するのに多くの時間がかかってしまい次の工程の結果までを確認することができていない。

### 3 紫外線による植物への成長阻害・形態変化

### 伊藤 喜行

ニンジンのカルスを作成し、そこに紫外線を照射してどのような形態変化や成長阻害が起こるかを研究 する計画をたてた。しかし、カルス誘導が難航した結果形態変化や成長阻害を観察することができなかっ た。また、検証実験として昨年まで行われていた、小松菜の種子に紫外線を照射してどのような形態変化 や成長阻害が起こるかを研究した。根、茎、葉それぞれに対して成長阻害が観察できた。クロロフィル a/b 比は紫外線照射による影響は観察することができなかった。電気泳動では、紫外線によって DNA を構 成する塩基であるチミンが変化していたことが分かった。

### 4 多反射鏡 LIDER を用いた大気エアロゾル及び雲の観測

### 山口 飛鳥

本研究では回転鏡と YAG レーザーを用いて対象物までの距離や散乱光強度を測定できる LIDER 装置の 改良を行った。昨年度では反射鏡 4枚であったが今年度はさらに1枚増やし、5枚の反射鏡を用いた。5枚 の鏡の内 4 枚の鏡には蝶番を取り付けたことにより鏡を歪ませることなく 4 枚の鏡の角度を調整し、焦点 を回転鏡に合わせることが可能になった。また反射鏡の数が 1 枚増加したことでよりバックグラウンドを 軽減することができた。

この装置を用いて上空に照射されたパルスレーザーの後方散乱光を撮影することでエアロゾル分布や高 度変化の様子を調べた。

### 5 大気エアロゾルの観測向上のための多反射鏡の開発

豊田 陸央

本研究の LIDAR 装置では回転鏡、YAG レーザーにより対象物までの距離と散乱光の強度の測定が可能 である。モーターを変更し、背景光を軽減するための回転鏡とメカニカルシャッターの同期を簡易にし た。また、背景光がより強い時間でも測定を可能にするために、干渉フィルターを取り付けて撮影した。

また、レーザー光を捉える反射鏡に使われる鏡の数を4枚から5枚に増やし、それぞれの鏡の角度を調 整可能に改造することで実験の測定精度の向上を図った。

対象物に向けたレーザーの観測により、大気エアロゾル粒子高度分布を、一定時間ごとの撮影を行うことで、大気エアロゾル粒子の分布の時間変化を調べた。さらに、雲の消散係数も調べた。

------ 休憩 ------

### 6 ガラスキャピラリー光学系によるマイクロレーザービームプロファイルの測定:微小ティルト角依 存性

### 森 光正

テーパー型ガラスキャピラリー光学系を使いマイクロレーザービームの照射装置を開発している。波長 375nmの半導体レーザーを用いて出口径が数 10µm のガラスキャピラリーのビームプロファイルをナイフ エッジ法で測定した。この実験で入射レーザービーム方向からキャピラリーを微小に傾けて(ティルト)、 ビームプロファイルのピーク位置の変化、回折パターン、透過パワーを測定、解析しプロファイルのティ ルト角依存性を調べた。

### 7 キャピラリーイオンマイクロビームの直進性へのエネルギー損失成分の影響

### 池亀 真由佳

テーパー型ガラスキャピラリー光学系に MeV エネルギーのイオンを通過させることで簡便にイオ ンマイクロビームが生成できる。出口径が 9.9 µm、大気との隔壁の厚さが 9.1 µm のキャピラリーを 独自に製作し、照射精度を左右するビームの直進性を調べるため、0.5 µm 精度の2次元可動ナイフエ ッジとイオン計数用の半導体検出器を導入した。出力パルスからイオンのエネルギー帯を選択するこ とで、エネルギー損失量に応じたビーム径を導出するオンラインシステムが構築できた。測定ではビ ーム径は損失量に伴って大きくなることを見出し、さらにエネルギー損失成分を金属薄膜でカットす ることでビームの直進性を向上させることに成功した。

### 8 キャピラリーイオンマイクロビームの2次元パターン認識による微細構造評価

### 引間 宥花

MeV エネルギーの H<sup>+</sup> / He<sup>2+</sup>と、テーパー型ガラスキャピラリー光学系でイオンマイクロビームを 生成している。長飛程の H<sup>+</sup>ビームは、core / halo 成分のうち、拡がりが大きい halo のため構造が複雑 で 2 次元パターン認識が必須であるため、固体飛跡検出器 CR-39 の高感度タイプを初導入した。イオ ンの照射痕(ピット)の濃度画像を高速パターン認識するために C++言語などによるソフト群を独自 開発し、core と halo の径など微細構造の定量化を実現した。実験では core 成分を維持し halo のみを 除去するアルミ製減速膜の最適な厚さを見出しビーム径を 1/3 に、および飛程は短いが He<sup>2+</sup>を使用す ることで径を 1/5 まで微細化することに成功した。

### **9** Ba 原子の $6s5d^{3}D_{3}-5d6p^{3}F_{4}$ 遷移のシュタルク効果

### 田澤 隆太

本研究では高分解能レーザー分光法を用いて、Ba 原子の  $6s5d {}^{3}D_{3}$ - $5d6p {}^{3}F_{4}$ 遷移のシュタルク効果の研究を行った。Ba 原子を基底状態から準安定状態に占有させスペクトルを観測した。最大 63.9 kV/cmの電場を印加し、シュタルクスペクトルの測定を行い、同遷移のスカラー分極率を- $54.1(10) \text{ kHz/(kV/cm)}^{2}$ 、上準位  ${}^{3}F_{4}$ のテンソル分極率を- $26.7(11) \text{ kHz/(kV/cm)}^{2}$ と決定した。

### 10 Ba 原子 $6s5d^{3}D_{3}-5d6p^{3}F_{4}$ 遷移のシュタルク効果の研究

### 伊藤 健貴

本実験では、高分解能レーザー分光法を用いて Ba 原子の高励起状態における  $6s5d \, ^3D_3 - 5d6p \, ^3F_4$ 遷移の シュタルク効果を測定した。約 63.9 kV/cmの高電場まで印加することで、シュタルクスペクトルを観察す ることができた。また、本実験では同遷移のスカラー分極率を-54.1(10) kHz/(kV/cm)<sup>2</sup>、上準位 $^3F_4$ のテン ソル分極率を-26.7(11) kHz/(kV/cm)<sup>2</sup>と決定した。

### 修士・博士論文発表会プログラム

※ 状況により時間変更の場合があります。

場所:理学部V号館1F5103室

### 博士課程(講演 30 分·質疑 10 分)

### 平成 31 年 2 月 22 日 (金)

1. 原子過程科学教室

 $13:00 \sim 13:40$ 

### 修士課程(講演20分・質疑5分)

平成 31 年 2 月 22 日 (金)

- 1. 原子過程科学教室 13:40~14:30
- 2. 素粒子物理学教室 14:40~15:05
- 3. 物性理論教室 15:15 ~ 16:05

平成 31 年 2 月 23 日(土)

- 4. 宇宙物理学教室 10:00 ~ 10:50
- 5. 物性物理学教室 11:00 ~ 12:15

----- 昼休み -----

 6.
 量子エレクトロニクス教室
 13:15 ~ 14:55

### 全反射蛍光 X線分析法を用いた汚染水中極微量ウランの迅速分析

### 松山 嗣史(原子過程科学教室)

2011年3月11日の東日本大震災とそれに引き続き生じた津波によって東京電力福島第一原子力発電 所は甚大な被害を受けた。現在福島第一原子力発電所は廃炉が決まり、廃炉に向けての作業が少しず つ進められているところであるが、高温の炉心を冷却するために4000トンにも及ぶ海水を使用したこ とにより、炉心周辺にはウラン(U)を含む汚染水が存在すると予想されている。本研究では、その ような汚染水中のUを高感度かつ迅速に分析する方法を確立することを目指した。それは、今後の廃 炉作業の進捗を左右すると共に、安心安全な作業環境を整えるために重要な役割を演じるはずである。

現在の公定法では、U汚染水の放射能濃度は放出されるα線を計測することで測定されるが、濃縮 作業等に時間がかかる上、Uは長半減期核種のため、この方法の総分析時間は長い。そこで、その信 号強度が原子数に比例する蛍光 X線分析法をU汚染水の放射能濃度測定に使うことを考え、その中で も試料面での X線の全反射特性を利用した全反射蛍光 X線分析法に着目した。しかし、一般的な装置 では、Uの検出下限は実用に耐えうるものではなく、また福島第一原子力発電所に存在すると予想さ れる汚染水には、Uとエネルギーの近い蛍光 X線を放出するルビジウム(Rb)や臭素(Br)も含まれ ると考えられるので、Uの分析は困難であるとされていた。

そこで、本研究では、測定前に試料を簡易濃縮することと、モリブデン(Mo)ターゲットの全反射 型装置を用いることでさらなる測定感度の向上を目指した。Moターゲットから放出される特性 X線 (Kα線)のエネルギーはUL<sub>3</sub>殻電子の励起・電離エネルギーよりもわずかに高く、効率的にL<sub>3</sub>殻空 孔を生成できるので、そこに M<sub>5</sub>殻電子が遷移することで生じる ULα線の観測に有利である。また、 汚染水から U吸着樹脂で Uを選別する方法も開発し、Rbや Br のような共存元素があっても福島第一 原子力発電所の廃炉現場で適用できる分析方法を構築した。

実験では、瓦礫を純水に浸漬することで調製した瓦礫浸漬液に様々な濃度のU溶液を混合することで、実際の汚染水を模したU含有瓦礫浸漬液を調製し準備した。U吸着樹脂を用いて、試料溶液から Uを抽出した後に、簡易エバポレーターで完全に乾固した。そして、その試料の乾燥残渣を元々の溶 液量よりも少ない量の溶液で溶解することで濃縮試料とし、可搬型・卓上型全反射蛍光X線分析それ ぞれで測定した。

濃縮試料を用いることで、可搬型・卓上型装置それぞれの測定感度を濃縮しない場合の 10 倍に向上 させることができ、要求される感度条件は満たされた。また、これらの分析方法の総分析時間は、U 吸着樹脂による化学処理に 2 時間、簡易濃縮に 15 分、滴下・乾燥・測定に 10 分程度と 2 時間半程度 であり、従来のα線計測法よりもはるかに短く、汚染水中のUを高感度かつ迅速に分析するスキーム を確立できた。今後、廃炉作業の進む福島第一原子力発電所の現場での活用を期待している。

### **蛍光 X 線分析法を用いた創傷部のウランおよびプルトニウムの定量分析法の開発**

### 石井康太(原子過程科学教室)

核燃料取扱施設や廃炉に向けての作業が行われている福島第一原子力発電所では、アクチニド(ウラン (U)やプルトニウム(Pu)など)の汚染を伴う創傷事故が発生する可能性がある。α線放出核種である UやPuが傷口から体内に入ってしまうと重篤な内部被ばくをもたらすため、そのような場合にはαサーベ イメータなどを用いてそれらの放射能を測定することになる。しかし、α線の水中飛程は非常に短いため、 UやPuが傷口に付着している場合には血液で遮蔽されてしまいその正確な測定は困難である。そこで、本 研究では血液越しの測定が可能で長半減期核種に対して有効な蛍光 X線分析法を用いた創傷部の U および Puの定量分析法を開発することを目的として研究を行った。

蛍光 X 線分析法では、一般に入射 X 線の経路上に金属箔(一次 X 線フィルター)を置き、その吸収特性 を利用して対象元素の蛍光 X 線付近のエネルギーを持つ入射 X 線を低減する。これにより蛍光 X 線スペク トル中に現れる散乱 X 線を低減し、検出下限を改善する。本研究で用いた装置にもフィルターが付属され ているが、多元素同時分析用に作製されているため、測定対象元素が限定されている場合にはより適した フィルター構成が存在すると考えられる。また、実際にヒトに蛍光 X 線分析を適用する場合には X 線によ る被ばくを伴うことになるため、被ばく線量が算出されている必要がある。そこで、装置付属のフィルタ ーよりも U および Pu を同時に定量する能力に優れたフィルターの探索および被ばく線量の算出を行った。

まず、フィルターを用いずに入射 X 線のスペクトルを測定し、質量減弱係数(X 線の吸収割合)と X 線 の減弱を表す式を用いて各素材・各厚さのフィルターを用いた場合の入射 X 線スペクトルを再現した。次 に、各スペクトルにおける U および Pu の蛍光 X 線のエネルギー周辺のバックグラウンド信号強度とアク チニドを励起・電離するエネルギーを持つ入射 X 線(励起光)の信号強度の関係から最良の検出下限を与 えるフィルター構成を推定した。フィルターの素材には U と Pu の蛍光 X 線周辺のエネルギーを持つ入射 X 線を低減しながらも励起光はある程度維持できると考えられるニッケル(Ni)、銅(Cu)、亜鉛(Zn)を 採用した。そして、その厚さ周辺で創傷部アクチニド汚染モデルに対して実際に測定を行い、検出下限放 射能(Minimum Detectable Activity: MDA)が装置付属のフィルターよりも低くなるようなフィルター構成 を探索した。その結果、MDA はフィルター厚の増加とともに最低値を持つような曲線を描き、最適なフィ ルター構成は厚さ 100 µm の Ni であることが示された。このフィルターで得られた Uと Pu の MDA は、そ れぞれ 3.87±0.06 mBq、107±2 Bq であった。付属フィルターにおける U と Pu の MDA はそれぞれ 4.49± 0.09 mBq、111±2 Bq と測定されたため、Pu については改善することができなかったが、U では MDA を改 善することができた。また、実測した入射 X 線スペクトルと質量減弱係数を用いたシミュレーションから、 フィルター厚の増加に伴うバックグラウンド信号強度の減衰率が励起光の減衰率に比べて大きく、比較的 薄いフィルター厚で信号強度がノイズレベルまで低下するために MDA が最低値を持つことを明らかにし た。この事実は、入射 X 線スペクトルと装置固有のノイズ強度が分かれば各蛍光 X 線分析装置で最適なフ ィルターを推定できることを意味する。

被ばく線量の測定は、ガフクロミックフィルムを用いて行った。ガフクロミックフィルムは、X 線が照 射されると重合反応が生じて黒化するため、事前に黒化度と線量の関係(検量線)を算出しておくことで 黒化度から線量の算出が可能である。実験では、付属フィルターと厚さ 100 µm の Ni フィルターを用いて フィルムに X 線を 5 分間照射し、被ばく線量がそれぞれ 7.96±0.06 mSv/cm<sup>2</sup>、10.13±0.19 mSv/cm<sup>2</sup>である ことが示された。厚さ 100 µm の Ni フィルターの方がわずかに被ばく線量が高かったが、放射線業務従事 者の年間の被ばく線量限度である 500 mSv/cm<sup>2</sup>(皮膚の等価線量の線量限度)と比較すると、それは十分 低いものであった。

以上により、蛍光 X線分析法を用いた創傷部の U および Pu の定量分析法を開発することができた。

### 水素分子のイオン化解離における同位体効果

### 本間 謙太郎 (原子過程科学教室)

水素原子は、原子核とその周りをまわる電子 1 つから構成される最も単純な原子であるが、原子核中の 中性子の数が異なる同位体が存在する。一般に、水素と呼ばれているものは中性子をもたない水素(H) であり、中性子を 1 つもつ重水素(D)、2 つもつ三重水素(T)とあえて区別するときには軽水素とも呼 ばれる。このうち、HとDが自然界に安定同位体として存在するが、T は放射性同位体である。

これらの水素原子が 2 つ結合して形成される分子が水素分子である。同位体を考慮すると、水素分子に は  $H_2$ 、 $D_2$ 、 $T_2$ そして重水素化水素の名をもつ HD、さらに HT、DT が存在しうる。このように、分子の場 合は構成原子の一部または全てが同位体に置換されることがあり、同位体置換によって起こる物性、反応 性の変化を同位体効果と呼ぶ。重い同位体原子に置換されると、その結合は元の結合よりも切れにくくな る。つまり、分子の結合が切れる解離反応において、解離生成するイオンや中性原子の量に変化が現れる ことが期待される。

我々の研究室で過去に行われた  $H_2 \ge D_2$ のイオン化解離の研究結果から、30 eV 以下の励起エネルギー領 域では  $D_2$ からの  $D^+$ の生成量が、 $H_2$ からの  $H^+$ のそれと比べて少なく、25 eV 以下では極端に少ないことを 観測している。この生成量の差を考えるカギとなるのは、25 eV 付近に横たわる二電子励起状態にあると考 えた。二電子励起状態は、2 つの電子が同時に励起状態に遷移した電気的中性状態であり、エネルギー的 に不安定なため自動イオン化、解離性自動イオン化、中性解離などにより崩壊する。励起エネルギー25 eV 以上での  $H^+$ ,  $D^+$ 生成は、解離性自動イオン化を経て起こったものと考えられる。

本研究では、イオン化解離の同位体効果について系統的な理解を得て、そのメカニズムを明らかにする ことを目的に  $H_2$ の 1 つの H が D に置換された HD を対象に実験を行った。HD は換算質量で考えると  $H_2$ と  $D_2$ の中間にあたる存在であり、単純に考えれば、イオン化解離の同位体効果は  $H_2$ と  $D_2$ の中間的なもの になると予測できる。そこで、以前行った  $H_2$ 、 $D_2$ の実験と同様、入射電子エネルギー200 eV、散乱角 6 ° の条件下で散乱電子-イオン同時計測実験を行い、得られた結果を  $H_2$ 、 $D_2$ のそれと比較した。

実験では、分子の励起エネルギーを関数として、分子イオンおよび解離生成するフラグメントイオンの それぞれについて一般化振動子強度分布を得た。H<sup>+</sup>, D<sup>+</sup>の生成を表す一般化振動子強度分布より、二電子 励起状態を経由しないイオン化解離過程では、生成量が H<sub>2</sub> > HD > D<sub>2</sub>となっていることがわかった。一方、 二電子励起状態を経由するイオン化解離では、HD からのフラグメントイオン生成量は H<sub>2</sub> からのそれとほ ぼ同程度であり、当初の予想とは異なる結果となった。この要因としては、以下のことが考えられる。第 1 に HD が H<sub>2</sub>、D<sub>2</sub>とは異なり本質的には異核二原子分子であるため、核の入れ替え対称性が消滅すること、 第 2 に HD は D 側に偏った電荷分布をもつことが解離反応に何かしらの影響を与えたことである。本研究 結果の解析では、以上の点の解明までは至らなかった。なお、これまでの実験結果を基に T<sub>2</sub>のイオン化解 離の予想を行うと、D 置換が進むにつれ、フラグメントイオンの生成が抑制されているため、T<sub>2</sub>から T<sup>+</sup>が 生成する量は D<sub>2</sub>からの D<sup>+</sup>よりもさらに減ると予想できる。また、T<sup>+</sup>の生成が始まる、つまり T<sup>+</sup>の出現エ ネルギーは H<sub>2</sub>、D<sub>2</sub>と大きく異なり、25 eV 付近に横たわる二電子励起状態を経由せずには生成しないと予 想でき、25 eV から反発型ポテンシャルをもつイオンの励起状態が存在する 35 eV 付近までは T<sup>+</sup>の生成が 抑制され、T<sub>2</sub><sup>+</sup>の生成がメインになると考えられる。

### SHiP 実験へ向けたコンパクトエマルションスペクトロメーターの開発

### 河野 歩実 (素粒子物理学教室)

素粒子物理の標準理論はこれまでほぼ全ての実験データを矛盾なく説明できるという大成功にも関わらず、残 された謎も多く、究極の理論とは考えられていない。そこで標準理論を超えた新物理を求め、より高いエネルギ ーの加速器を用いた新しい実験、大強度ビームを用いた高統計の精密実験など様々な実験計画が提案され、実施 されている。CERN-SPSのSHiP実験は後者タイプの実験で、今まで見過ごされてきた「隠れた粒子」の探索と 実験データの少ない ν<sub>t</sub>反応の研究を目的とした国際共同実験計画である。CERN-SPS加速器で加速された 400GeV/c 陽子ビームを原子番号の大きい高密度金属標的に照射し、生成されたπ中間子やK中間子も一気に吸 収させるビームダンプ法を用いて ν<sub>t</sub>を多く含む ν ビームを作り、実験装置に導く。

vr反応はこれまで、DONuT実験で9例、OPERA実験で10例が直接検出されたのみで実験データは決定的に 不足しており、さらに OPERA実験で確認された1例のvr反応を除いて、vr反応によるものか反vr反応によるも のか、区別もできていない。そこで我々は、標的兼検出器であるエマルション・クラウド・チェンバー(ECC)の 下流にコンパクトエマルションスペクトロメーター(CES)を配置したサンドイッチ構造をニュートリノ検出装置 の1ユニットとして用いることで、vr・反vr反応を識別して精密研究しようと計画している。また、反v反応に よるチャーム生成事象を選ぶと、核子中の反ストレンジ・クォークの精密な情報を得ることが可能になるなど、 今までにない研究が可能になる。

KEK PS において行われた CES の先行研究では運動量 0.5GeV/c、1.0GeV/c、2.0GeV/cの正・負荷電ハドロンビームを磁束密度 1T の永久磁石中に設置した小型 CES に垂直に照射、サジッタを測定したところ、ローレンツカ による曲率をもとにした期待値とよく一致しており、電荷符号決定の有意性が 7σ以上とその原理は検証されて いる。しかし、実際の実験に用いるサイズの原子核乾板に対して角度を持った荷電粒子の運動量測定などはなさ れておらず、実用化に向けての研究がまだ必要である。そこで、本研究では原子核乾板のサイズを 10.0×12.5 cm<sup>2</sup>へ拡大した実用型 CES スタックを製作、2017 年 8 月に CERN PS において磁束密度 1T の電磁石中に設置 し、tanθ=0.3 までの角度で 1.0GeV/c から 10GeV/c の運動量の正負荷電ハドロンビームを照射して電荷符号を判 別できるかのテスト実験を実施した。その結果、先行研究では 4 cm<sup>2</sup>であった解析可能範囲を最大約 70cm<sup>2</sup>まで 広げることができた。



Air gap+ガラスフィルムチェンバー

の1次元サジッタ分布

### Kernel Polynomial 法を用いた乱れた2次元ディラック電子系の数値的研究

### 平坂 真央(物性理論)

本論文では、Kernel Polynomial 法(KPM)を用いて厳密対角化では扱えないような大きな系で2次元ディラック電子系の数値研究を行った。特に、ランダムネスの効果について研究し、電荷中性点(E=0) 近傍の状態密度と乱れの強さの関係や、ボンド秩序のヴォルテックス構造に伴って現れる非整数電荷の問題について考察した。

電荷中性点(E=0)近傍の状態密度対するランダムネスの効果に関しては、状態密度を精度よく計算し、ポテンシャルが空間相関の有無や、六角格子模型からパイフラックス模型への模型の変化等によって、ランダムネスの効果がどのように変化するのかを考察した。その結果、ディラック点(E=0)でランダムポテンシャルが存在しても、状態密度が0となる2次元ディラック電子系特有の性質は、ポテンシャルに空間相関が無い場合、一定の強さのランダムネスまで保たれることを六角格子模型で確認した。さらに、六角格子模型からパイフラックス模型へ変化させた場合、より強いランダムポテンシャルに対しても、その性質が保たれることがわかった。これは、van-Hove 特異点の位置の変化に対応していると考えられる。また、ランダムポテンシャルに空間相関があると、少しでもランダムネスがあると、この性質は壊れてしまう事を確認することができた。

ケクレ型ボンド秩序のヴォルテックス構造(図1)に伴って現れる非整数 電荷の問題については、KPM 法の長所を生かし、境界の影響がほとんど ないような大きな系にケクレ型のボンド秩序のヴォルテックス構造を構 築し、局所状態密度(図2)の精密な評価により、ヴォルテックス構造に付 随する非整数電荷の評価を試みた。その結果、ボンド型のランダムネス に対しては、非整数電荷の値は有意な変化を示さないという先行研究の 結果を確認することができた。

本研究では、さらにハミルトニアンを変形し、ディラック・コー ンを傾けた場合において、非整数電荷がどのような影響を受けるかに ついて研究を進めた。すると、変形された系においては、カイラル対 称性の破れによって、ヴォルテックスがなく、ケクレ構造のみの場合 においても、半充填の場合の局所状態密度が一様でなく、電荷密度に 3倍周期の構造が現れることが明らかとなった。このことは、こうし た変形によって非整数電荷に変化が生じる可能性を示唆しているが、 変形による局所状態密度の変化の大きさは、もともとの六角格子の副 格子間にエネルギー差を与えた(スタッガードポテンシャルを与え た)場合の局所状態密度の変化の大きさに比べてかなり小さいことも わかった。このため、非整数電荷の値の対するディラック・コーンを 傾けることの効果は、スタッガードポテンシャルを加える効果に比べ て小さいことが予想される。



図1: ヴォルテックス構造.



図2: ヴォルテックスの中心 サイトの局所状態密度(ケク レのギャップ中にゼロエネル ギー状態のピークが存在す る。スタッガードポテンシャ ルをかけて、このピークが発 生するエネルギー値を変える ことで、非整数電荷が実現す る).

### 内部自由度を持つディラック粒子系の数値的研究

### 藤澤 周平(物性理論)

近年、ディラック電子系の線形分散に起因する特異な振る舞いが注目されている。エネルギーバンドが ー点で交差し、エネルギーの分散関係が線形で円錐(ディラック・コーン)となる。エネルギーギャップは ゼロであり、ディラック電子は質量を持たないので、物質中を高速で移動することが可能である。例えば、 グラフェンや2次元層状構造で傾いたディラック・コーンを持つ有機導体 α - (BEDT - TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>、トポロジ カル絶縁体の表面状態などに現れる。これらの固体では常にディラック・コーンが、同じエネルギーに偶 数個縮退して存在しており、フェルミオン・ダブリングと呼ばれている。一方で、光格子上の冷却原子系 では、非可換ゲージ場を使用することによりフェルミオン・ダブリングを伴わないディラック粒子系が提 案されている。

本論文では、内部自由度としてスピン軌道をもつディラック粒子系に注目して、ディラック・コーンを 傾けた場合の電子状態の振る舞いを数値的に調べた。解析手法としては厳密対角化法によってハミルトニ アンを対角化することによって固有値を求め、エネルギーの状態を求めた。内部自由度の存在によって実 空間上ではカイラル対称性を保ったままディラック・コーンを傾けるような操作をすることが可能である。 従来のカイラル対称性は、傾いたディラック・コーンを持つ模型を含むように一般化されたカイラル対称 性に拡張することできる。トポロジカル絶縁体における Wilson-Dirac 模型に対してディラック・コーンを 傾けるような代数的な変形を行いバンド構造をみると、バンド構造にはエッジ分散がありその波動関数の 空間分布を調べてみるとエッジに局在していることが確認できた。また、Chern 数の評価において半充填で は Chern 数に変化は現れなかったが、磁場を印加し、半充填以外においても計算を行うと Chern 数に変化 が現れることがわかった。そして、非可換ゲージ場を使用することによって、4つのディラック点のエネル ギーを互いにずらすことができる模型において2次元ディラック電子系特有の n=0 ランダウ準位が、カイ ラル対称性を保存するようなボンドランダムネスに対して、どのような安定性を示すのかを数値的に調べ た。特に、ディラック点のエネルギーをずらして、フェルミオン・ダブリングの縮退を解くことの効果や、 staggered ポテンシャルの効果などに注目して研究を行った。その結果、カイラル対称性を保存するような ランダムネスに対するゼロモードの安定性は、ゼロエネルギーでの n=0 ランダウ準位に対しては残るが、 ゼロエネルギーからシフトした n=0 ランダウ準位に対しては損なわれることがわかった。また、カイラル 対称性を破る staggered ポテンシャルを加えても、n=0 ランダウ準位の安定性は残った。このようゼロモー ドの振る舞いは、ディラック・コーンを傾けた場合についても同様にみられることがわかった。



図1:非ゲージ場を用いてディラック 点をずらして、ディラック・コーン を傾けた時のバンド構造。

図2:ディラック・コーンを傾けた時の分裂した n = 0 ランダ ウ準位のランダムネスに対する安定性。右のパネルには staggeredポテンシャルを導入した。

### 銀河団中の非熱的電子によるスニヤエフ・ゼルドビッチ効果

### 和泉 博文 (宇宙物理学教室)

銀河団は宇宙に存在する最大の天体である。銀河団が形成される時間スケールは宇宙年齢と近いこ とから、宇宙と共に進化してきたものと考えられ、宇宙の構造形成の理解に欠かせない天体である。 銀河団は質量比にして約80%のダークマター、十数%の熱的ガス、数%の星で主に構成されている。 さらにシンクロトロン放射の観測により、ローレンツ因子γ~10<sup>4</sup>の非熱的電子の存在が確認されてい るが、そのような非熱的電子がどのように加速されて生み出されたかは分かっていない。加速過程の 解明には、γ~10<sup>4</sup>以外の非熱的電子について調べることが重要であり、その中でもγ~1の非熱的電子 はクーロン散乱により即座に熱的電子に戻されるため、観測されれば加速直後の非熱的電子について の情報が得られることが期待される。

そこで本研究では、γ~1の非熱的電子を直接調べる有力な方法として、スニヤエフ・ゼルドビッチ 効果(SZ 効果)に着目し、理論的な観点から様々な考察を行った。SZ 効果は熱的ガスの観測手段として 広く用いられているが、電子のエネルギー分布を反映することを踏まえて、ここでは非熱的ガスに対 して拡張を行った。その結果、非熱的成分の寄与を特徴づけるものは、非熱的電子と熱的電子のエネ ルギー密度の比であることが明らかとなった。また SZ 効果のスペクトル形から、非熱的成分の寄与 が最大となる周波数は130GHz の辺りであり、この最大値をとる位置はエネルギー密度の比や熱的電 子の温度によって変化しないことが分かった。

ただし、非熱的電子による SZ 効果は微弱であるので、その観測可能性については慎重な議論が必要となる。そこで次に具体例として、メキシコに建設された大型ミリ波望遠鏡(LMT)への搭載が計画されている分光器、*MOSAIC*を用いた観測可能性についての検討も行った。観測が予定されている185~365GHzの範囲において、非熱的電子のエネルギー密度が熱的電子の10%程度以上あれば、4o以上の信頼度で検出できることが分かった。また検出器の感度と信号の周波数依存性からは、200GHzの辺りでの観測が非熱的成分の検出に最も有効であることが示唆される。非熱的電子の寿命と、銀河団中の流体の伝播速度がおよそ1000km/sであることを考慮すると、非熱的電子による SZ 効果は1kpc程度の範囲の広がりをもって観測されると予想される。これは銀河団の典型的な大きさ~1Mpcに対して十分に狭い領域であるため、SZ 効果は電子の加速現場の特定に有効であると期待される。

### 中性子星の状態方程式モデルに対する重力波シミュレーション

### 樋山 拓朗 (宇宙物理学教室)

本研究の目的は、重力波を用いて中性子星を調べるために近似的ではあるが簡便な手法を開発する ことである。中性子星とは、恒星進化の最後に超新星爆発を経て誕生する非常に高密度な天体であ る。星の平均密度が~10<sup>14</sup>g/cm<sup>3</sup>であり、中心部密度は~10<sup>15</sup>g/cm<sup>3</sup>に達すると考えられるため、地球 上でこの密度を実現することは困難である。このような極限の高密度下では未知の物質が存在してい る可能性が高いため、天文、宇宙分野の他にも素粒子や原子核の研究でも注目を集める天体である。 そのため、中性子星の構造を決定する状態方程式の研究は盛んに行われており、理論に基づいた状態 方程式のモデルは多く存在しているが、正しいかは不明である。現在、中性子星の構造を調べる新し い手法として重力波を観測手段として用いる重力波天文学に期待が高まっている。

重力波とは、Einsteinの一般相対性理論から予言されていた時空を光速で伝搬する「さざなみ」と 形容される現象である。そして、予言からおよそ 100 年後の 2015 年に重力波干渉計 LIGO(米国)が ブラックホール連星合体からの重力波を初めて捉えることに成功した。さらに 2017 年には中性子連星 合体からの重力波の初検出にも成功した。重力波の波形はインスパイラル、潮汐変形、合体振動の 3 つのフェーズに分けられる。今回、検出に成功した中性子連星合体では、合体前に生じる波形である インスパイラルと潮汐変形フェーズから得られる情報を用いて、連星系のそれぞれの中性子星に半径 と質量に対して制限を与えることができた。しかし、より重たい中性子星の構造、翻ってより高密度 領域における状態方程式へ強い制限を与えることが可能である、合体振動フェーズの波形は検出に至 らなかった。将来的には合体後の重力波の検出も期待されており、状態方程式モデルへの依存性と波 形予測が重要な課題となっている。

そこで本研究では、連星合体後の中性子星からの重力波の状態方程式依存性を調べるために簡単な 状態方程式を用いて合体後に形成される中性子星をモデル化し、さらに球対称の下で一般相対論的流 体のシミュレーションを行って、中性子星の合体振動を調べた。得られた波形から振動の時間プロフ ァイルをフーリエ変換して特徴的な振動数を抜き出し、その状態方程式依存性を明らかにした。この 手法で得られる振動数は近似的なものではあるがいわゆる数値相対論シミュレーションによる波形計 算に比べて計算量が10<sup>7</sup>以下という大きな利点があり幅広い状態方程式を定性的に調べることに適し ている。

今回本研究では、polytrope 状態方程式 を仮定し、重力波の状態方程式に対する 依存性を調べた。右図に示すように、特 徴的な振動数は数 kHz 帯に現れ、同じ質 量を仮定して、断熱指数を変えて比較し たところ、断熱指数の値が大きいほど現 れる振動数は大きくなることが分かっ た。つまり、polytrope 状態方程式の場 合、圧力に対して密度の変化が敏感にな るほど周波数は大きくなる傾向が明らか になった。



Department of Physics, Faculty of Science, Toho University

### α-(BEDT-TTF) 2I<sub>3</sub>の電荷秩序とディラック電子系の熱的性質)

高須康弘(物性物理学教室)

α-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>は有機分子 BEDT-TTF (bis(ethylenedithio)tetrathiafulvalene)が並んだ伝導層とI<sub>3</sub><sup>-</sup>イオ ンが並んだ絶縁層が交互に積層した構造をとる有機 2 次元伝導体である。α-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> では伝導層 を形成する ET 分子の電荷が、等価に近い金属相から偏りのある電荷秩序を伴う絶縁体相への転移を常 圧下 135 K で起こす。加圧によりこの転移は抑制され、15 kbar 以上では、ディラック電子系になって いると期待されている。ディラック電子系状態では、α-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>は円錐型のバンドが上下から角 を突き合わせた構造をし、その円錐型のバンドをディラックコーン、一点で交わった点をディラック 点と呼ぶ。通常の金属ではエネルギー分散が放物線で与えられるのに対して、この時の電子の有効質 量がゼロとなっているため、ほかの物質では見られない新しい物性が期待されている。しかし、電子 状態の情報は圧力下の測定の比較的簡単な輸送現象と磁場中の磁気共鳴実験に限られており、熱測定 の定量的測定評価がいまだされていなかった。本研究では研究遂行するにあたり、圧力下の比熱を定 量的に評価するため、試料と既知の比熱を有する参照試料に同一の熱量を交流電源より与え、それぞ れの温度振幅を比較して比熱を評価する新たな方法を採用した。

常圧下の電荷秩序転移において、比熱の鋭いピークと比熱の大きな低下が観測された。転移におけ る余剰エントロピーは約 1.4 [J/mol K]となり、核磁気共鳴実験から得られた転移前後の電荷移動を反映 したエントロピー変化とほぼ一致した。加圧により転移は抑制され、転移温度の低下と比熱ピークの 抑制が観測された。6 kbar までの低圧側では転移に伴う比熱の段差に変化はないが、6~9 kbar におい て段差が急激に減少し、12 kbar 以上では転移に伴う比熱異常が観測されなかった。この段差は転移に 伴うバンド構造を反映しているものと考えられる。

無加圧下、低温で電荷秩序絶縁体状態を反映して電子比熱はほとんど観測されない。これに対し電 荷秩序形成を抑えた 12 kbar 以上の圧力下では、2 K以上では格子比熱の温度依存性 T<sup>3</sup>を示し、1 K以 下では通常の金属で期待される電子比熱 T の温度依存性とは異なり、ディラック電子系で期待される T<sup>2</sup>の温度依存性に近づく。さらに、バンド計算結果と比較して、フェルミエネルギーはディラック点 からずれていること、バンド構造も単純な線形分散ではなく、ディラック点に対して非対称な分散を 仮定するとより実験結果を再現することが分かった。

### Z[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>系における圧力下での熱的性質

### 三津谷幸丸(物性物理学教室)

Z[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>系は、アニオン分子[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>層とカチオン層 Zが交互に積層した結晶構造を持った 2 次元 有機伝導体である。アニオン分子は強く二量化し、各二量体間に働く強い電子相関により局在した S = 1/2 スピンを持つ Mott 絶縁体が形成されている。結晶中において、この二量体が三角格子上に配置されてお り、スピン間の反強磁性相互作用が働くため、フラストレーションを起こしている系である。対となるカ チオン分子 Z の選択や圧力により電子相関と三角格子の構造を制御し、Mott 絶縁体からフラストレーショ ンの解消のため電子、格子、スピン系が組み合わされた種々の基底状態への相転移を研究可能な系であ る。本研究では典型的な二つの系、1)電荷整列と格子変形の大きな Et<sub>2</sub>Me<sub>2</sub>Sb[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>、2)Valence Bond Order (VBO) 絶縁体状態と超伝導状態への転移を見せる EtMe<sub>3</sub>P[Pd(dmit)<sub>2</sub>]<sub>2</sub> を用いて、温度、圧力変化させ ながら比熱測定より相転移の研究を行った。加えて、これらの系では圧力下における比熱の定量的な評価 が必須なため、交流法と示唆熱法を組み合わせた新たな方法を開発して研究を遂行した。

### 1. $Et_2Me_2Sb[Pd(dmit)_2]_2$

Et<sub>2</sub>Me<sub>2</sub>Sb 塩は、約70 K で Mott 絶縁相から Charge Separation (CS)相へとヒステリシスを伴う電荷の移動 による鋭いピークを示し、100 K 程度で前駆現象としてカチオンの変形に伴う台形型の小さな比熱異常 (サブピーク)が見られる。約6 kbar 以上の圧力印加により高温相は金属へと移行し、金属-CS 転移とな る。したがって、Mott、金属、CS 相の三つの層が競合する特異な系である。測定の結果、比熱の鋭いピー クから見積もったエントロピー変化は、加圧に伴って減少し、9 kbar 以上で 2 J/mol K 程度になった。これ は低圧で Mott-CS 転移のエントロピー変化の起因となったスピン系と格子系の自由度が加圧によって減少 していき、金属相へと完全に移行した後、電子比熱 γT から見積もられる自由電子系の自由度 2 J/mol K の 変化のみになったと考えられる。また、加圧に伴い台形型のサブピークの温度幅が大きく広がるが、全体 のエントロピー変化は約 30 J/mol K で一定の値を保ち続けた。このことから、圧力によらずカチオンの変 形のエントロピーは一定であることがわかった。

### 2. $EtMe_3P[Pd(dmit)_2]_2$

EtMe<sub>3</sub>P 塩は、25 K 以下で二量体が対を形成するように結晶格子が歪むことで、スピン一重項を形成する 2 次元系物質で初めての VBO 絶縁体状態が発見された。加圧すると4 kbar で、約5 K と 2.5 K で 2 段階の 抵抗減少が観測されており、そのどちらも超伝導転移であることが判明している。この超伝導転移の高温 側の転移では臨界磁場がパウリ極限を越えるため、トリプレット超伝導である可能性が指摘されている。 比熱測定の結果、加圧による VBO 転移温度の抑制、4 kbar で超伝導転移による 2 つの比熱のピークが確認 された。これらから、バルクな超伝導であること、2 つの超伝導状態のエネルギーギャップの見積もりが それぞれ可能となった。

### $\lambda - (BETS)_2 FeCl_4$ の磁気秩序を伴う金属-絶縁体転移の研究

~緩和法の新たな解析方法を用いた臨界現象の観測~

### 峯沢 文弥(物性物理学教室)

磁場誘起超伝導で良く知られている有機導体の $\lambda$ -(BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>4</sub>は、伝導層と絶縁層が交互に積層した結 晶構造を持つ疑二次元性の有機導体である。絶縁層に属する 3d 電子と伝導層に属する $\pi$ 電子間に働 く $\pi$ -d相互作用が磁場誘起超伝導を引き起こす。この系は、8.3 K程度で磁気秩序を伴う金属-絶縁体 転移が観測されている。ここでは一般的な系であれば磁気秩序の主体となる Fe の 3d スピンではな く、遍歴電子であった $\pi$ 電子が反強磁性秩序化を引き起こし、 $\pi$ スピンが作る内部磁場によって、大 きな磁気モーメントを持つ局在電子の 3d スピンの 6 準位のショットキー比熱が転移後の低温部で観測 される。またこの系は Fe 分子を非磁性 Ga 分子で置換することで $\pi$ -d 相互作用をコントロールするこ とができる。本研究ではこの特異な相転移の転移機構解明のため、その臨界現象を比熱測定より詳細 に調べた。 $\lambda$ -(BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>4</sub>は、異常に鋭く大きな比熱のピークを持つため、通常の比熱測定法では転移 付近の正確な比熱が測定することができない。そこで従来の熱緩和法の解析方法を改良し、鋭い比熱 のピークにおける臨界現象を精密に評価可能な新しい手法を開発した。また相転移の次数の決定のた め昇温、降温の両過程に対応可能な測定法も導入した。

比熱測定の結果、二次元性の強い電子構造を有する  $\lambda$ -(BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>4</sub>の比熱の臨界現象では、二次元イジングモデルの log 発散ではなく、べき乗で発散が観測され、その指数が三次元イジングモデルと比較してかなり大きくなることが分かった。この通常とは大きく異なる比熱の臨界現象を理解するため、本研究では転移温度近傍で $\pi$ スピンの自発磁化の成長が $\pi$ -d相互作用を通して常磁性の 3d スピンに内部磁場の増大として働いた場合、比熱の転移近傍の温度依存性がどのようになるのかモデル計算をした。内部磁場をH  $\propto$  ( $T_c - T$ )<sup> $\beta$ </sup> と仮定すると、比熱 C $\propto$  ( $T_c - T$ )<sup> $-\alpha$ </sup>の指数 $\alpha$ は $\alpha = 1 - 2\beta$  ( $\beta > 1$ )を満たし、 $\alpha$ は $\beta$ により決定された。 $\lambda$ -(BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>4</sub>において 2 次元イジング系の自発磁化を $\pi$ スピンが作った場合、本研究の比熱の指数 $\alpha$ に近い値が得られることが分かった。すなわち $\lambda$ -(BETS)<sub>2</sub>FeCl<sub>4</sub>の異常な比熱のピークは、従来の臨界現象とは異なり $\pi$ スピンの反強磁性転移を近くの 3d スピンが感じることでスピンが偏極することで説明できることが判明した。

次に Fe を非磁性の Ga に置換した混晶系を用いて、3d のスピン濃度を希薄化することで臨界現象がどのように変わるか調べた。比熱のピーク温度より低温領域ではべき指数は $\alpha = 1 - 2\beta$  ( $\beta > 1$ )  $\alpha \cong 0.8$  ( $\beta < 1$ )を満たし、Fe の濃度の減少によって $\alpha$ の値は単調に減少する。これに対し高温領域ではべき指数は $\alpha = 1 - 2\beta$  ( $\beta > 1$ )  $\alpha \cong 0.8$  ( $\beta < 1$ )を満たさず、 $\alpha$ は Fe 濃度によらずほぼ一定の 0.8 以上の大きな値となった。ピークの温度より高温領域と低温領域では異なる振る舞いを見せた。低温領域では Fe の希薄化により $\pi$ スピン系のスピンネットワークの次元が2次元から3次元への移行が考えられる。これに対し高温領域では通常の磁性の転移の場合、自発磁化の成長の臨界指数は定義されていない。この系では臨界現象を考えるうえで金属一絶縁体転移の影響も考慮しなければならず、大きな $\alpha$ の値はこの磁気秩序を伴った金属一絶縁体転移の機構解明において重要な知見を与えるものと考えている。

### 大強度イオンビーム用の Xe ガスシンチレーション検出器の開発

### 原田 知也(量子エレクトロニクス教室)

近年、重イオン加速器施設の供給するビーム強度の増加に伴い不安定核での弾性・非弾性散乱といった直接反応の精密測定が可能になりつつある。不安定核ビームでは粒子ごとの識別が必要になるため、大強度ビームに対して放射線損傷が少なく粒子識別能力の高い検出器が要求される。しかし既存の粒子識別用検出器では放射線損傷に弱いもしくは高頻度計測が困難であるといった欠点があるため、 大強度を活かしきれていない現状がある。

そこで我々は新しい粒子識別検出器として Xe ガスを用いたシンチレーション検出器の開発を進めている。ガス検出器のため耐放射線損傷検出器として用いることができる。また Xe は仕事関数が小さいため発光量が大きいという点から高いエネルギー分解能が期待される。

本研究では Xe ガスシンチレーション検出器の試作機を作成し、2017 年に放射線医学総合研究所 HIMAC にて低頻度および高頻度の<sup>132</sup>Xe @290MeV/u および<sup>132</sup>Xe @400MeV/u から生成される 2 次ビ ーム(Z=40~50 近傍)を照射し本検出器の粒子識別能力の評価を行った。

### 後方散乱光の偏光異方性を利用した消散係数の推定

### 辰澤 和哉 (量子エレクトロニクス教室)

大気中に浮遊する液体・固体粒子は大気エアロゾル粒子と呼ばれ、PM2.5 のように人体に影響を及 ぼすものも存在する。それ以外にも地球温暖化やオゾン層破壊など環境問題に対する影響も注目され、 エアロゾルが大気に及ぼす影響の解明が急がれている。エアロゾルといった微粒子を観測するものと して、レーザー光を用いた LIDAR 装置が挙げられる。レーザー光は粒子によって散乱され、その散 乱光を観測することによってエアロゾルの粒径や数密度を知ることができる。レーザーの波長と同程 度以上の大きさの粒子による散乱はミー散乱と呼ばれ、Gustav Mie によって厳密解が求められている。

本研究室では数年前より、YAG レーザー(波長 532 nm)を用いて上空にレーザー光を照射し、エ アロゾルや雲による散乱光を観測している。このとき、散乱光は回転鏡を経由してデジタルカメラに よって撮影される。フーコーが光速を測定した際に用いた技法を応用し、回転鏡を用いて光が往復に かかる時間を画像上でのシフトに変換している。このシフトの大きさにより対象物までの距離(高度) を測定することができる。デジタルカメラを使用する利点として、分光を容易に行うことができる、 弱い散乱光も ISO 感度や絞り値を調整することにより信号を増幅し、観測を可能にするなどが挙げら れる。

本研究は、雲による後方散乱光を観測することによって雲の消散係数の推定を行うことを目的とし ている。光は散乱体を含む媒質中を通過するときに散乱や吸収によって強度は減衰する。この減衰の 度合いが消散係数と呼ばれ、粒子の数密度や大きさにより決定される。雲による後方散乱光のうち入 射光の偏光方向に対して垂直な偏光成分を持つ光を観測した場合、雲表面にはクローバー葉状の強度 分布がみられる。雲の数密度が増加すると光の平均自由行程が小さくなり、多重散乱の確率が大きく なるため、クローバー葉状の強度分布のうち明るい部分と暗い部分の強度比は小さくなる。このよう に、消散係数と強度比は明らかに相関関係を持っており、それらを明らかにするために雲を想定した 後方散乱光を観測するモンテカルロシミュレーションを作成した。雲にレーザー光を照射し、後方散 乱光を偏光フィルターを通して撮影することで強度比を測定し、シミュレーションにより求めた関係 を用いて雲の消散係数の推定を行った。これにより、2018 年 12 月 27 日 18:27:43 に東邦大学理学 部2号館上空に存在していた雲の消散係数は 0.0350±0.0030 m<sup>-1</sup>であると推定された。 Zeeman and Stark Effects of Ba Highly-Excited Level 5d6p  ${}^{3}F_{4}$ 

### 野尻 裕紀(量子エレクトロニクス教室)

Zeeman and Stark effects, the interactions between the atom and magnetic or electric fields, are directly related to the *g* factor and the electric polarizabilities. These quantities are fundamental spectroscopic data and, therefore, provide sensitive tests of the theoretical calculation. The electric polarizabilities are related to studies of atomic parity nonconservation (PNC) and permanent electric dipole moment (EDM). For example, a small PNC amplitude was measured by observing its interference with a large Stark induced electric dipole amplitude, a strongly enhanced PNC effect. Studies of Zeeman and Stark effects are interesting not only from the point of view of the spectroscopy but also from the point of view of the theoretical calculation.

For Ba of a two-electron atom, the *g* factor and the electric polarizability in the ground and lower excited levels have been studied and highly excited states are rarely reported up to now. For the 5*d*6*p* configuration, data of  ${}^{3}D_{J}$  and  ${}^{3}P_{J}$  have been reported, but there are no data determined for  ${}^{3}F_{J}$ . Recently our group measured data for  ${}^{3}F_{2}$  and  ${}^{3}F_{3}$ . To see the systematic behavior for  ${}^{3}F_{J}$ , data of  ${}^{3}F_{4}$  are necessary.

In this study, the high-resolution atomic-beam laser spectroscopy was performed to measure Zeeman and Stark spectra for the highly excited level  $5d6p \ {}^{3}F_{4}$ . Permanent magnets were used to produce magnetic field up to 186.1 G and an electrode apparatus was developed to produce a stable and strong electric field up to 63.9 kV/cm. An electric discharge was used to populate Ba to the metastable state  $6s5d \ {}^{3}D_{3}$ . The transition from  $6s5d \ {}^{3}D_{3}$  to  $5d6p \ {}^{3}F_{4}$  at 706.0 nm was used. We measured Zeeman and Stark spectra and observed splittings and shifts owing to the magnetic and electric fields. By analyze measured spectra, the *g* factor, and the tensor and scalar polarizabilities were determined to be  $g \ {}^{3}F_{4} = 1.06(1), \alpha_{t} \ {}^{3}F_{4} = -26.7(11) \text{ kHz/(kV/cm)}^{2}, \alpha_{s} \ {}^{3}F_{4} - \alpha_{s} \ {}^{3}D_{3} = -54.1(10) \text{ kHz/(kV/cm)}^{2}$ . The data of  $\ {}^{3}F_{4}$  are compared with the data of  $\ {}^{3}F_{2}$  and  $\ {}^{3}F_{3}$ , and systematic behavior for  $5d6p \ {}^{3}F_{J}$  are discussed.

### ガラスキャピラリー光学系による光マイクロビームの透過特性

### 松原 充芳(量子エレクトロニクス教室)

マイクロビームは微細試料の分析や顕微鏡下での細胞への照射効果の観察に利用できる。特に重粒 子線マイクロビームは細胞の放射線応答を研究するうえで欠かせないツールとなってきた。これらの 実験では微小標的の位置は蛍光タンパクによるラベリングで確認できる。そのためには励起光が必要 であるが長時間の励起光照射は蛍光タンパクの退色を招くため、極力短時間に抑える努力が必要だ。 顕微鏡視野内の全細胞に励起光の照射をせず、ガラスキャピラリーマイクロビームの位置選択性を生 かし、標的細胞にのみスポットライト的に照射する方法の確立は重要な課題である。私たちはマルチ 量子マイクロビームを生成し、目では確認できない MeV イオンと同時に光をガラスキャピラリーに 通すことで、マイクロサージェリーを行う際の target lock-on system の確立を目指している。また、紫 外線マイクロビームを研究することで、紫外線による細胞照射に加え、X 線マイクロビームの生成も 視野に入ってくる。

量子エレクトロニクス研究室では、10年ほど前からガラスキャピラリーを用いたマイクロビームの生成の研究を行っている。He-Ne レーザーなどのレーザー光に対し、ガラスキャピラリーにおける光の透過率を測定し、形状解析も行ってきた。光はイオンと異なり、反射、屈折、回折、干渉などの現象がある。ガラスキャピラリーにおける光の透過性を研究することは、マイクロビームの生成のみならず、光と物質の相互作用の解明にも役立ち、物理的にも興味深い。

本研究では可視光領域に加え、新たに紫外線領域でのガラスキャピラリーにおける光の透過特性の 研究を行った。既存の He-Ne レーザー、Ar<sup>+</sup>レーザーに加え 2017 年に新たに導入されたダイオードレ ーザー(波長:  $\lambda$ =375 nm)を用いて、可視から紫外までの光の透過率を測定した。また、キャピラ リー内壁での多重反射の計算方法を用いて反射率を考慮し、光の透過率をシミュレーションし、実験 値と比較した。シミュレーションより光の透過率はキャピラリーの形状や入力ビームのプロファイル に非常に大きな依存性があることがわかった。実験ではレンズによりビームプロファイルを変化させ て、透過率の測定を行った。その結果を基に、透過率と入力ビームのプロファイルやキャピラリーの 形状、屈折率、レーザー波長等との関係性について議論を行った。