

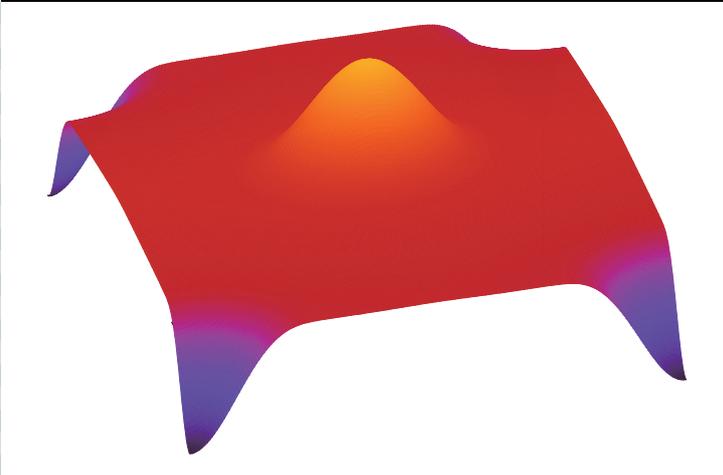
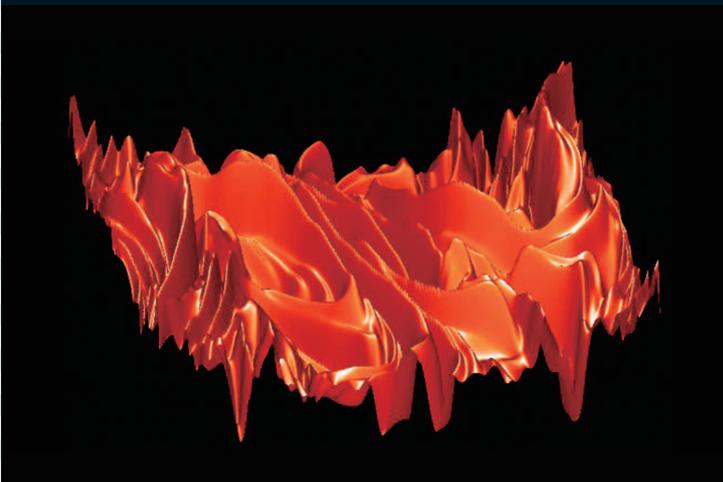
- 物理学70の不思議
- 数え上げ不変量の母関数から見えてくるもの
  - 巨大渦の安定性
- モット転移と高温超伝導体の電子状態
- 変わりゆく物理学研究の諸相

NO.

8

2016 | VOL. 71

B U T S U R I  
日本物理学会誌



# 物理教育委員長として： 「公開講座」と「物理教育シンポジウム」

香取浩子 〈物理教育委員長 h-katori@cc.tuat.ac.jp〉

日本物理学会の常設委員会の一つである物理教育委員会は、その名が示す通り「物理教育」に関わる事項を扱う委員会です。その活動は幅広く、講演会等の開催による物理学の普及・啓発活動、物理チャレンジ・物理オリンピック等の共催・支援、小・中・高校生向けの実験教室開催、高校教員を対象とした実験講習会開催、『大学の物理教育』刊行、教育に関わる他学会・学協会との連携、など多岐にわたります。ここでは、それらの活動の中で開催している「公開講座」「物理教育シンポジウム」について紹介します。

日本物理学会では、会員の最先端の研究成果を広く公開し、市民の科学への関心を喚起する活動を行っています。これは、中・高校生や一般の方々の知的好奇心を刺激し、科学的リテラシーを向上させるためには、研究者が自らの研究成果を自分の言葉でわかりやすく伝える科学コミュニケーションが重要であると考えます。年次大会や秋季大会の際に開催される市民向け講演会もその活動の一つです。また、東京以外の各地域では、市民を対象とした講演会等を各支部が企画・開催することにより、物理の最新情報を社会に向けて積極的に発信しています。これに対し、支部が存在しない東京では、理事会がその任を負い、科学セミナーと公開講座を開催しています。科学セミナーでは、大学生・(中学校以上の)理科教員・一般を対象に、あるトピックスについて2日間にわたり解説を行います。これに対し、公開講座では、高校生・大学生・(小学校以上の)教員・一般を対象に、第一線で活躍している研究者3~4名が最先端の研究をわかりやすく紹介します。物理教育委員会では、物理学の普及・啓発活動の色彩がより強い公開講座の立案・実施を担当しています。

次世代を担う高校生への最先端の研

究紹介は、物理学に対する興味を引き出し、さらに、進路選択やキャリア選択の契機となることが期待されます。また、科学的リテラシーを持った若者の輩出にも繋がると期待されます。そこで、公開講座では高校生にも関心の高いテーマの選択を目指しています。その一方で、公開講座は例年11月に開催していますが、平成22年度から連続採択となっている科研費の研究成果公开发表(B)に申請するため、開催前年の10月には企画を確定させなければなりません。すなわち、公開講座の開催時にホットな物理のテーマを1年以上前に予測して企画する必要があります。研究の先読みができれば、研究者として苦勞することなく研究を進められると思いますが、残念ながらそのような能力を持ち合わせていない私が今年の公開講座を立案することとなり、テーマの選択には大いに悩みました。

昨年は、2014年がラウエ、2015年がブラッグ親子のノーベル賞受賞から100年目であったことから、「結晶と粒子線回折—ブラッグ反射100年」という話題で開催しました。<sup>1)</sup> 講演の一部はYouTubeで公開していますので、是非、覗いていただきたいと思っております。今年ですが、重力波に関する理論が発表されて100年目を迎えることから「一般相対性理論と宇宙—重力波研究の最前線—」という話題で開催します。日本でも進められている重力波の直接検出に向けての取り組みに高校生が興味を持つことを期待して昨年夏に企画したのですが、今年になって直接検出に成功したとの発表があり、<sup>2)</sup> まさにホットな話題となったことに、立案した私自身、大変驚きました。多くの高校生の参加を期待しています。

これに対し、物理教育委員会が主催する物理教育シンポジウムは、物理教育に携わる方・関心のある方を対象としたシンポジウムです。話題により物

理人材を雇用する企業等の関係者に参加を呼びかけることもあります。物理教育に関わる話題を取り上げることから、日本物理教育学会に共催として協力いただいています。比較的新しい企画であり、今年3月に開催した「アクティブラーニングをどう活かすか」が第6回目となります。<sup>3)</sup> 昨今ではアクティブラーニングが教育のキーワードとなっていますが、その言葉の使われ方はさまざまであり、また、批判的な考えも存在します。そのため、物理教育委員会では、高校から大学初年時の教育を念頭に、「基本的な物理概念の獲得のためにアクティブラーニングはどのように活かすことができるのか」を検討するためのたたき台となるシンポジウムを企画しました。シンポジウムでは、事前に参加受付を締切らなければならなかったほど会場を埋め尽くした参加者により、活発に意見交換が行われました。この内容は、『大学の物理教育』第22巻第2号に、講師による講演内容記事、およびテープ起こしによる総合討論等の記事として掲載される予定です。是非、読んでいただきたいと思っております。来年以降もアクティブラーニングに関するシンポジウムを開催し、より効果的な活用法を検討する場を提供したいと考えています。

物理教育委員として2年目の私には委員長としての任は少々重いのですが、物理教育に対する現代社会のニーズに的確に対応した委員会活動ができるよう、努力していきたいと思っております。

## 参考文献

- 1) <http://www.jps.or.jp/public/koukai/koukai-2015-11-07.php>
- 2) B. P. Abbott, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **116** (2016) 061102.
- 3) <http://www.jps.or.jp/committee/kyoiku/sympo.php>

(2016年5月30日原稿受付)

巻頭言 Preface

物理教育委員長として：「公開講座」と「物理教育シンポジウム」  
Foreword as a Chairperson of Physics Education

香取浩子 …… 519  
Hiroko Aruga Katori

物理学70の不思議 70 Challenges and Mysteries in Physics

超大質量ブラックホールはどのようにできたのか？	522
ヒッグス粒子の背後にある物理は何か？	522
20XX年宇宙の旅：クォークから原子核，そして宇宙へ	523
異質な物質同士の理想の出会いとは？	523

現代物理のキーワード Trends

数え上げ不変量の母関数から見えてくるもの  
What the Generating Function of Enumerative Invariants Tells Us

菅野浩明 …… 524  
Hiroaki Kanno

交流 Interdisciplinary

巨大渦の安定性—2次元非圧縮高レイノルズ数の流れの中で  
Stability of Large Vortex—Two-Dimensional Flows of Incompressible Viscous Fluid at Large Reynolds Numbers

岡本 久 …… 526  
Hisashi Okamoto

解説 Reviews

モット転移と高温超伝導体の電子状態—ハバードモデルからの新展開  
Mott Transition and Electronic States of High-Temperature Superconductors—New Development from the Hubbard Model

河野昌仙 …… 533  
Masanori Kohno

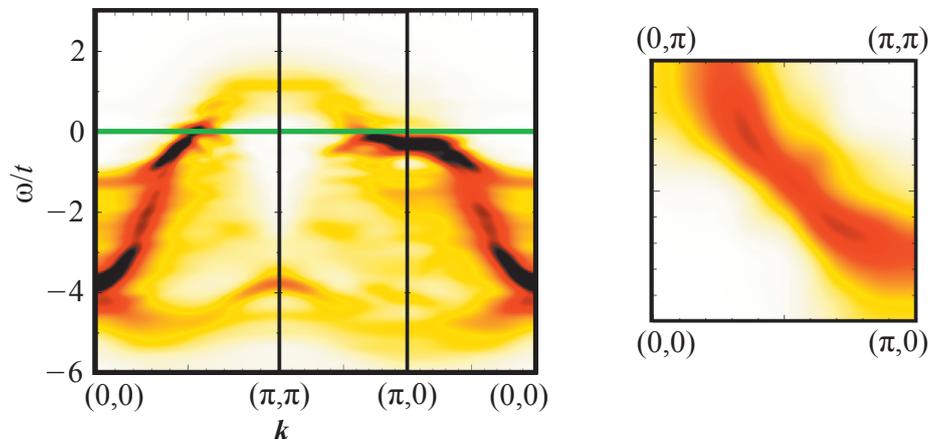
最近の研究から Researches

絶縁層に極性分子をもつ有機超伝導体  
Organic Superconductors Including Polar Molecules in an Insulating Layer

川本 正, 森 健彦 …… 541  
Tadashi Kawamoto and Takehiko Mori

電子の電気双極子モーメント測定のための相対論的量子化学理論の開発  
Development of a Relativistic Quantum Chemical Method for Detection of Electron's Electric Dipole Moment

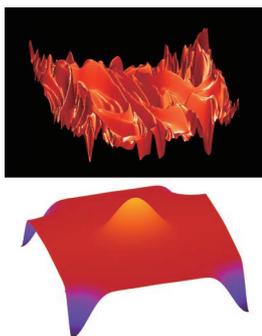
阿部穰里 …… 547  
Minori Abe



解説(モット転移と高温超伝導体の電子状態—ハバード模型からの新展開)

モット転移近傍の電子状態(2次元ハバードモデルの数値計算結果)。波数 $k$ 、エネルギー $\omega$ の電子励起のスペクトル強度分布(左)とそのフェルミレベル( $\omega=0$ )付近の様子(右)。磁気的な励起の影響が強く現れることやスペクトル強度が部分的に減衰することなどの特徴が見られる。図は原著論文 [M. Kohno: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 076401] より一部改変して転載。

話 題	第71回年次大会の仙台開催奮戦記	須藤彰三 ……	552
JPSJの最近の注目論文から	4月の編集委員会より	上田和夫 ……	554
変わりゆく物理学研究の諸相—日本物理学会設立70年の機会に日本における物理学研究の転換点をふりかえる—			
	量子力学が導いた新しい風	伊藤憲二 ……	558
学会報告	第71回年次大会(2016年) 招待・企画・チュートリアル講演の報告	領域委員会 ……	563
学界ニュース	第106回日本学士院賞: 森田浩介氏 科学技術分野の文部科学大臣表彰	玉尾皓平 ……	569
新著紹介			570
掲示板	■人事公募 ■学術的会合 ■その他		572
行事予定			575
会 告	■2017年度会費について手続きのお願い: 正会員のうち大学院学生の会費減額および学生会員(学部学生)の資格継続 ■2017年度の論文誌等購読の変更手続きのお願い ■2016年度科学セミナー ■訂正 ■2016年7月1日付新入会者		577
本会記事	■日本物理学会理事・監事・代議員, 委員会委員 キャリア支援センター, 物理学学術誌刊行センター, 等氏名表		580
本会刊行英文誌目次			589



#### 表紙の説明

流体の粘性が小さいとき, その運動は複雑化し, 乱流となる。これはほぼ正しい命題であるが, 補足説明が必要である。現実の流体はもちろん3次元であるが, 惑星規模の流れのように, 2次元流であるとみなせるものもけっこうある。こうした流れでは, 完全に乱れきったような乱流というものはずしも見いだされない。むしろ, 十分に時間がたった後では, 時間的には不規則であるが, 空間パターンはおとなしいということもある。こういった現象の極地にあるのが, ナヴィエ・ストークス方程式の単峰解である。流れ関数を見てみると, 表紙の上部のようにギザギザした解も見られるが, 時間的に定常で, 下部の図のように峰がひとつ底もひとつといった単純な解も見つかるのである。不思議なことにこうした単調な形状を示す解が粘性の極めて小さいところで現れるのである。さらに, 様々に外力が変わっても現れるという意味で, こういった単峰解が普遍的であることもわかりつつある。詳細は本号に掲載されている岡本久氏の「交流」記事を参照のこと。

## 23

## 超大質量ブラックホールはどのようにできたのか？

最近の天文観測の進展のおかげで、多くの銀河の中心に超大質量ブラックホール (SuperMassive Black Hole; SMBH) が存在することがわかってきた。しかも、質量の大きな銀河ほどより重いSMBHを抱えていることから、銀河とSMBHは何らかのかたちで共進化してきたと考えられている。また、宇宙138億年の歴史のなかで、ビッグバンからたった7億年ほどしか経っていない早期宇宙 (赤方偏移  $z=7$ ) に、約20億太陽質量のSMBHが存在していたこともわかっている。

「種BH」をSMBHに成長させるためには、降着する物質から角運動量を効率よく引き抜き、また重力と拮抗する放射圧にも打ち勝たなければならず (いわゆるエディントン限界)、そう簡単な物理過程ではない。また、銀河衝突にともなうSMBH同士の合体も検討されているが、ガス降着のほうがより重要な寄与をすると考えられている。

従来のシナリオでは、金属量が非常に少ない初代星が爆発した後にはできる、数十から数百太陽質量のBHが種として考えられていた。しかし、これだと初期質量が小さすぎて、 $z=7$ にSMBHをつくるには時間が足りないという問題が、宇宙論的構造形成の観点から指摘されていた。

そこで最近注目を浴びているのが、いわゆるダイレクトコラプスシナリオである。これはガス球を10万~100万太陽質量の中間質量BHに、通常の星を経由せずに直接崩壊させるというものだ。最初からある程度大きいBHを生成すれば、 $z=7$ までにSMBHをつくりやすくなる。宇宙におけるこのような物理過程は実験室では実験できないので、宇宙論的流体力学シミュレーションを用いた検証が始まっているが、まだ決着はついていない。

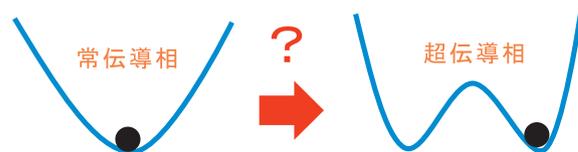
ガスがSMBHに落ちていくと、重力エネルギーを輻射や熱エネルギーとして解放し、高温になって紫外線やX線などを放射する。これが活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) として観測されている天体現象である。磁場駆動によるジェットが吹き出し、近傍の星間物質を圧縮加熱するなどしてフィードバックを及ぼす。これがAGNフィードバックと呼ばれている現象である。銀河は、超新星とAGNからのフィードバックによって自己制御しながら成長してきたと考えられている。このようにSMBH形成は、膨張宇宙における構造形成と密接な関連をもっているため、さらなる研究が待たれるところである。

長峯健太郎 (阪大院理)、会誌編集委員会

## 24

## ヒッグス粒子の背後にある物理は何か？

2012年のヒッグス粒子の発見は記憶に新しい。素粒子の標準模型では、物質を構成する粒子と力を伝える粒子により、我々の宇宙を記述する。力の伝わり方は理論の対称性が支配しており、たとえば電磁気力は位相変換の対称性に基づく。このような理論体系において、力を伝える粒子は質量をもたない。実際、電磁気力は遠隔力であり、力を伝える光子には質量がない。一方、自然界には短距離のみで働く弱い力があり、こちらは質量をもつ粒子が力を伝えると解釈するとうまく記述される。しかし、そのような粒子は理論の予言能力を壊すことが知られていた。そこで、理論と無矛盾な質量を実現するために導入された粒子がヒッグス粒子である。光子は超伝導物質中であたかも質量をもつかのようにふるまうが、同様に、我々の宇宙が超伝導相に転移したため、弱い力を伝える粒子に見かけ上の質量が生じたと考えるのである。ヒッグス粒子はこの相転移の引き金を握る。標準模型では、宇宙が超伝導相に移ることで、それまで同一の対称性で記述されていた力を伝える粒子群が、質量をもたない光子と、質量をもつ弱い力を伝える粒子に分化する。この相転移を「対称性の破れ」とよぶ。これによって、異なる2つの力が統一的に理解されたのである。



それではなぜ対称性は破れたのであろうか？ 標準模型の枠内では、対称性の破れの起源は明らかにされていない。そこで、「自然に」対称性が破れる新しい物理模型が盛んに議論されている。たとえば、高次補正によって常伝導相が不安定となり、自動的 (力学的) に超伝導相に移る可能性が考案されている。超対称性 (フェルミ粒子とボース粒子を入れかえる対称性) をもつ標準模型や、ゲージ・ヒッグス統合余剰次元模型 (力を伝える粒子の余剰次元成分としてヒッグス粒子が現れる)、複合ヒッグス模型 (ヒッグス粒子を、より基本的な粒子からなる複合粒子と考える) などがその候補である。標準模型を超えたこれらの新物理模型は、それぞれ新粒子を予言する。したがって、今後のLHC実験やILC計画などによる新粒子の発見や、ヒッグス粒子の精密測定による新物理の検証が期待される。

津村浩二 (京大院理)、会誌編集委員会



## 25

# 20XX年宇宙の旅：クォークから原子核、そして宇宙へ

この宇宙に存在する物質を構成する原子核は、どこからきたのか？なぜ安定に存在でき、今後どのように進化していくのか？これらの謎に、素粒子理論に直接基づく第一原理計算で答えようという挑戦が今、始まっている。

原子核は陽子や中性子など、バリオンとよばれる粒子から構成されている。バリオンは複数のクォークからなる複合粒子である。クォーク（およびその相互作用をつかさどるグルーオン）の力学は量子色力学（QCD）で記述されるため、原子核の性質は究極的にQCDによって支配される。

しかし、原子核ではバリオン多体系の素励起・集団運動としてkeVからMeV程度のエネルギースケールの現象が観測されるのに対し、QCDが扱うクォーク多体系の典型的スケールはGeV程度である。従来、両者は別々の階層の物理として取り扱われ、それぞれの発展に計算科学が大きな役割を果たしてきた。バリオン多体系の階層では、核子の自由度と核力に基づき、量子多体問題を第一原理的に解く手法が成果をあげている。クォーク多体系（ハドロン）の階層では、格子QCDとよばれるQCDの非摂動的な定式化・第一原理計算手法が、ハドロン単体の性質の計算で成功をおさめている。このようにそれぞれの階層で研究が進

展する一方で、両階層のミッシングリンクをつなぐことは、過去数十年来、見果てぬ夢であり続けてきた。

近年、この2つの階層の架け橋となる核力を含むバリオン間力について、格子QCDにおける導出の定式化が発見された。格子QCD数値計算でバリオン間力を第一原理的に決定するという挑戦も始まっており、クォークから原子核までを統一的に理解することが可能になりつつある。

さらに、バリオン間力のなかで実験的に未解明な部分が大きいハイペロン力（ストレンジクォークがかかわるバリオン間力）や、3つのバリオンの間に働く3体力は、宇宙の極限環境や爆発現象で実現しうる超高密度状態において、力のバランスを左右する。したがって、格子QCDによるこれらの力の決定は、星の進化の終着点における超新星爆発や中性子星・ブラックホールの形成、連星中性子星の合体、これら爆発的現象と深くかかわる宇宙の元素合成など、様々な現象の謎を解き明かすうえで大きな役割を果たすであろう。

20XX年、クォークから原子核までの俯瞰図が得られたとき、これらの謎はどのような解決をみているのだろうか。そして、どのような新たな謎が待ち受けているだろうか。

土井琢身（理研）、会誌編集委員会

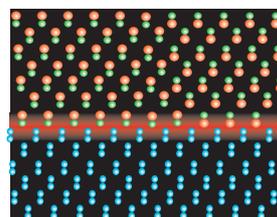
## 26

# 異質な物質同士の理想の出会いとは？

電子機器の心臓部ともいえるトランジスタは、n型とp型の半導体（バイポーラトランジスタ）、半導体と金属と絶縁体（電界効果トランジスタ）など、異なる性質の物質を組み合わせることで機能を発現させる。太陽電池、発光ダイオード、レーザーなど、ほかにも我々の身のまわりに異種の物質の組み合わせを利用した技術は多い。

固体が真空と接する「表面」については、走査トンネル顕微鏡、光電子分光など、原子スケールの構造や電子状態を観察する技術が確立され、表面が結晶内部とは異なる特有の性質を示す物理的なメカニズムもよく理解されている。これと比べると、2つの物質が互いに接する「界面」、とくに固体と固体が接する「埋もれた界面」は、直接観察する手法が限られている。結晶格子間隔の不整合に起因する欠陥や、界面特有の原子結合が生じがちなこともあり、理解がはるかに遅れている。

シリコンをはじめ無機半導体の多くは、表面と結晶内部とは異なる原子構造をとるため、単純に2つの半導体表面をはり合わせても、機能する界面をつくることは非常に難しい。従来は無機半導体結晶の基板の上に、別の無機半導体結晶の薄膜をエピタキシャルに（配列をそろえて）成



長させる方法がとられてきた。しかし、この方法は格子定数が近い結晶同士の組み合わせに限られ、また超高真空が必要なためコストも高くなる。

この状況を一変させたのが、導電性有機分子である。電氣的性質の異なる2種類以上の有機分子層を混ぜたり貼り合わせることで比較的安価に製作でき、一部は有機ELディスプレイや照明として実用化されている。その反面、界面の原子構造の観測や制御が難しいという短所もある。

無機界面と有機界面の長所を併せもつことをめざして、最近では自己組織化を利用して、無機結晶のうえに有機分子を秩序よく並べる「ハイブリッド」界面が注目を集めている。新機能の発現をめざした新たな物質の組み合わせはもちろん、埋もれた界面の原子構造や電子構造を非破壊で観察するための新たな観察手法の開発にも、ブレイクスルーが期待されている。

会誌編集委員会

# 数え上げ不変量の母関数から見えてくるもの

**Keyword:** 位相的場の量子論

## 1. 分配関数と位相不変量 (公理的観点)

場の量子論は公理的にとらえると、時空の次元や計量、理論の対称性、粒子の種類や表現といったデータをインプットとすると、そのアウトプットとして分配関数(相関関数の母関数)を計算する処方箋といえます。重要な点は、この処方箋が対称性や無矛盾性から従う、しるべき性質(公理)を満たしていることです。現在、広く用いられている経路積分法では作用(ラグランジアン密度とそれを積分する時空のデータ)と経路積分の測度がインプットですが、公理的観点からは分配関数が計算できれば、必ずしもラグランジアン密度の存在を仮定する必要はないことに注意します。

一方、位相不変量は同様に幾何学的対象をインプット、整数や多項式をアウトプットとする対応で、インプットの連続的変形という対称性の下でアウトプットが不変なものといえます。古典的な位相不変量であるオイラー標数や写像の巻き付き数は整数値ですが、結び目の量子不変量であるジョーンズ多項式は多項式不変量の例です。最近の幾何学ではさらに進んでベクトル空間や複体(ベクトル空間の列とその間の線型写像の組)をアウトプットとするホモロジー的(圏論的)不変量も盛んに研究されています。

## 2. 位相的相とエネルギー運動量テンソル

素粒子論や統計力学において、理論がどのような相にあるかは相関関数の振る舞いによって特徴付けられると考えられています。自発的対称性の破れ、クォークの閉じ込めといった問題が代表的な例として挙げられます。このような観点から理論に現れる相関関数がすべて位相不変量となる理論を位相的場の量子論と呼びます。これは1988年にE. Wittenが量子重力理論における一般共変性が全く破れていない相(位相的相)を記述する理論は、どうあるべきかという問いに対する一つの答えとして提案した理論です。<sup>1)</sup> 例えば2点関数  $\langle \phi_a(x) \phi_b(y) \rangle$  は2点間の距離  $|x-y|$  の関数と期待されますが、距離を測るために特定の計量を固定した時点で一般共変性が破れてしまいます。仮にあらゆる可能な背景計量に関する経路積分が実行できたとすれば一般共変性が回復できると期待されます。この意味で位相的理論は、計量に関する経路積分を実行した後の“有効理論”と見ることもできます。相関関数が位相不変量となることの物理的判定法は、それらが背景計量に依存するかかどうかです。とくにエネルギー運動量テンソル  $T_{\mu\nu}$  の(任意の)期

待値がゼロになることを、理論が位相的相にあるかどうかの判定条件とすることができます。

## 3. チャーン・サイモンズ理論と量子不変量

背景計量に依らないラグランジアンにより定義される理論は位相的場の量子論になると予想されます。代表的な例が3次元多様体  $M$  上の(非可換)ゲージ場  $A_\mu^a(x)$  に対するチャーン・サイモンズ理論です。その作用は

$$S_{CS} = \frac{k}{4\pi} \int_M d^3x \epsilon^{\mu\nu\lambda} \left( A_\mu^a \partial_\nu A_\lambda^a + \frac{2}{3} f^{abc} A_\mu^a A_\nu^b A_\lambda^c \right) \quad (1)$$

で与えられます。ここで  $\epsilon^{\mu\nu\lambda}$  は完全反対称テンソル、 $f^{abc}$  はゲージ群のリー代数の構造定数です。作用のゲージ不変性からパラメータ  $k$  は整数にとる必要があります。ゲージ場に対する通常的作用(運動項)  $S_{YM}$  と対照的に作用  $S_{CS}$  には多様体  $M$  の計量が全く現れていません。運動項に位相的なチャーン・サイモンズ項を加えた作用  $S_{YM} + S_{CS}$  によって3次元ゲージ場の位相的特徴を記述することはなされていましたが、新たにWittenが提案したのは運動項を落としてチャーン・サイモンズ項のみを考えれば位相的場の量子論が定義できるということでした。この提案とともに、彼が明らかにした3次元チャーン・サイモンズ理論と結び目の量子不変量の関係<sup>2)</sup> は、位相的場の量子論の研究における最初の目覚ましい成果でした。結び目の不変量に関する最近の大きな話題はホモロジー的量子不変量ですが、<sup>3)</sup> この分野は可積分系や位相的弦理論の研究も巻き込んで活発な研究が進んでいます。

## 4. 状態の数え上げ v.s. 経路積分

位相的不変量には、しばしば数え上げを用いた定義と積分の計算を用いた定義の2つがあり、それらが一致するという事実は数学における深い結果となっています。典型的な例は(2次元)曲面  $\Sigma$  のオイラー標数  $\chi(\Sigma)$  です。数え上げによるオイラー標数の計算では  $\Sigma$  の多面体分割を用いて

$$\chi(\Sigma) = V - E + F \quad (2)$$

と定義されます。ここで  $V, E, F$  は多面体分割における頂点、辺、面の数です。一方、 $\Sigma$  の計量  $g_{\mu\nu}$  から定まるスカラー曲率  $R$  を積分して

$$\chi(\Sigma) = \frac{1}{2\pi} \int_\Sigma d^2x \sqrt{g(x)} R(x) \quad (3)$$

からオイラー標数を求めることもできます。

量子論の重要な特徴は状態の重ね合わせ、すなわち量子

状態全体のなすベクトル空間を考えることにあり、状態の  
 数え上げ(ベクトル空間の次元)は量子論と深く結びつ  
 ています。位相的場の量子論の分配関数の計算を位相的相  
 にある状態の(重み付き)数え上げとみなせば式(2)に対  
 応する位相不変量を与えます。これがハミルトニアン  
 的視点による計算です。一方、位相的理論のもつ対称性  
 は非常に大きな対称性であるため、径路積分の計算が  
 有限次元積分に還元される場合があります。このとき残  
 された積分は式(3)に対応する位相不変量となってい  
 ます。これはラグランジアン視点からの計算です。場  
 の量子論ではハミルトニアン計算とラグランジアン  
 計算は一致すると考えられていますが、位相的場の  
 量子論において、この事実が式(2)と式(3)が一  
 致するという数学的に深い結果と対応していること  
 は興味深いことです。

### 5. 分配関数の効用(ソリトンと双対性)

モノポールやインスタントンといったゲージ理論のソ  
 リトンの配位は、拡大された超対称をもつゲージ理論  
 においてBPS状態と呼ばれる超対称性を部分的に保  
 つ状態として現れます。超弦理論におけるD-ブレー  
 ンも、これに相当するソリトンの配位です。専門的  
 になるので詳細は省略しますが、拡大された超対  
 称性をもつ理論にツイストと呼ばれる操作を行う  
 ことにより、位相的理論が構成できる場合があり  
 ます。<sup>1)</sup> この操作の重要な点は位相的相にある状態  
 すなわち  $\langle \text{phys} | T_{\mu\nu} | \text{phys}' \rangle = 0$  が成り立つ状態  
 が元の超対称理論でBPS状態に対応することです。  
 位相的相にある状態はハミルトニアンのゼロ固有  
 値状態であることに注意すれば、分配関数は超対  
 称指数  $\text{Tr}(-1)^F e^{-\beta H} = \dim \mathcal{H}_B - \dim \mathcal{H}_F$   
 となり、超対称理論のソリトンの配位を含む真空  
 構造に関する情報を与えます。ここで  $\mathcal{H}_{B,F}$  は位  
 相的相にあるボソンのあるいはフェルミオンの状態  
 全体のなすベクトル空間です。さらに理論に位相  
 的相にあるBPS状態が保つ超対称性荷電を含む  
 互いに可換な保存量の組  $\{J_i\}$  があると精密化  
 された分配関数として重み付き数え上げ

$$Z(q_i) = \text{Tr} e^{-\beta H - \sum_i \mu_i J_i} = \sum_{\{n_i\}} \dim \mathcal{H}_{\{n_i\}} \prod_i q_i^{n_i} \quad (4)$$

を考えることができます。ここで  $q_i := e^{-\mu_i}$  であり  
 $n_i$  は保存量  $J_i$  に対する量子数です。また  $\dim \mathcal{H}_{\{n_i\}}$   
 は与えられた量子数  $\{n_i\}$  をもつ位相的状態の数を  
 表します。最近、よい性質をもつ多様体上の超  
 対称ゲージ理論について局所化の方法による超対  
 称指数の計算が大きく進展しましたが、<sup>4)</sup> その  
 多くはここで説明した分配関数(4)と深く関係し  
 ています。一般に場の量子論の分配関数は相関関  
 数の母関数となっ

ていますが、位相的理論の分配関数は式(4)のよ  
 うに変数  $q_i$  の形式的べき級数として位相不変量の  
 母関数となります。これに着目すると、不変量を個  
 別に考えるのではなく位相的場の量子論の立場  
 から、それらを母関数としてまとめて見たときの  
 性質を研究するという方向が生まれます。2次元  
 量子重力理論(リーマン面のモジュライ空間の幾  
 何)とKdV階層(ビラソロ拘束条件)の関係<sup>5)</sup>の  
 発見に始まり、位相的場の量子論の多くで、こ  
 のような見方により背後にある隠れた数理論  
 構造(ビラソロ代数やアフィンリー代数などの無  
 限次元対称性や非摂動的な双対性)が見えてき  
 ます。例えば4次元非可換ゲージ理論の電磁双  
 対性には極大超対称性が必要となると予想され  
 ています。電磁双対性においてソリトンの配位が  
 重要な役割を果たすため、これは本質的に非摂  
 動的な性質ですが、ツイストの操作により極大  
 超対称ゲージ理論から得られる位相的理論の分  
 配関数は、インスタントン数  $k$  でラベルされるモ  
 ジュライ空間のオイラー標数  $\chi_k$  を不変量とす  
 る母関数  $Z(q) = \sum_{k=0}^{\infty} \chi_k q^k$  となります。  
 ここで(量子異常を考慮に入れると)電磁双対性  
 は  $Z(q)$  がもつ保形性と呼ばれる数学的性質と  
 して理解できます。<sup>6)</sup>

### 6. おわりに

位相的場の量子論が提唱されてから、すでに4  
 半世紀以上が経過しました。拡大された超対称  
 ゲージ理論から得られる位相的ゲージ理論の最  
 近の研究は、超対称ゲージ理論のインスタント  
 ン効果や双対性が共形場理論や可積分系の理  
 論における量子群対称性の  $q$ -変形や楕円型  
 拡張の問題と深く結びつくことを明らかにしつ  
 つあります。<sup>7)</sup> また位相的弦理論も量子重力  
 理論のトイモデルとして示唆的な成果をあげ  
 ており<sup>8)</sup> 位相的場の量子論の研究は当初の予  
 想以上の大きな広がりを見せています。

#### 参考文献

- 1) E. Witten: Comm. Math. Phys. **117** (1988) 353.
- 2) E. Witten: Comm. Math. Phys. **121** (1989) 351.
- 3) 藤 博之: 日本物理学会誌 **68** (2013) 801.
- 4) PTEP Special Section: Prog. Theor. Exp. Phys. **11B** (2015) 101.
- 5) E. Witten: Nucl. Phys. B **340** (1990) 281; M. Kontsevich: Comm. Math. Phys. **147** (1992) 1.
- 6) C. Vafa and E. Witten: Nucl. Phys. B **431** (1994) 3.
- 7) J. Teschner: arXiv: 1412.7145.
- 8) 大栗博司: 日本物理学会誌 **60** (2005) 850.

菅野浩明(名古屋大学大学院多元数理科学研究科  
 kanno@math.nagoya-u.ac.jp)

(2015年11月24日原稿受付)

## 巨大渦の安定性—2次元非圧縮高レイノルズ数の流れの中で



岡本 久

京都大学数理解析研究所  
okamoto@kurims.kyoto-u.ac.jp

流体力学は古典物理学の問題であり、統計物理学の活躍する乱流理論を除けば物理学的に面白いものではない。こう考える読者は多いのではなかろうか。「大きなコンピュータさえあれば、流体力学のたいていの問題は解ける」という人もいる。だが、コンピュータシミュレーションで現れ出る結果をそのまま鵜呑みにする物理学者はいない。やはり、その物理的背景が理解できるまでは納得できるものではなかろう。流体力学には物理的背景説明の難しい現象は結構あるように思う。私のような数学者としては、以下に述べるような流れ現象の背景説明を物理学の研究者から得たいのである。

考察の対象は2次元の流れである。現実の流れはすべて3次元であるとはいうものの、地球規模の流れのように、高さが横方向に対して極端に小さい場合には2次元流れがよいモデルになると信じている人は多い。2次元には3次元とは異なる特有の現象（例えば乱流の逆カスケードなど）があり、独自のおもしろさがある。

背景説明を期待したい流れ現象はいろいろとあるものであるが、中でも2次元における大規模渦の存在が厄介な問題である。それは非常にしばしば発生し、しかも長時間にわたって維持されるけれども、普遍的な現象と言えるほどの法則性が見つかっていない（ようだ）。だからと言って物理学や数学になじまないということもなかろう。環境が違っていても同じような渦があっちにもこっちにもみられるというのは何か底に潜むものがあるに違いない。

ここでいう大規模渦とは、一言で言えば、

流線のトポロジーが単純である解である。典型的な例は、流れ関数が1点のみで最大値をとり、最小値を取るのも1点で、その他の領域では単調な場合である。そこまで数学的に厳密にしてしまうと発見が困難な場合もあるが、「ほとんど単調」と言える場合も含めて考えれば非常に多くの場合にこうした大規模で単調な解が見つかるのである。統計力学の理論を乱流現象にあてはめるとき、大規模渦は厄介者である。性質の似通ったものが大量にあることが統計力学の前提であるから、典型的な大きさと同程度の渦が1個だけ存在しているというのは好ましくない。それが例外的なものならばよい。しかし、様々な知見の積み重ねによって、大規模渦は不可避であると考えられる研究者は増えてきたように思える。実際、こうした大規模渦の存在は古くから指摘されてきた。一方で、「レイノルズ数が小さいからそうしたものが現れるのであって、レイノルズ数が十分に大きければそのようなものは崩れてしまい、観測されないであろう」という意見もあるかもしれない。しかし、筆者らの研究は、（相当に多くの場合に）どんなにレイノルズ数を大きくしても大規模渦が不可避であることを強く示唆する。しかも、それが、定常な流れという、一番単純なものの中に見つかるのである。

こうした渦の存在を生み出すメカニズムは何か、人それぞれに意見の分かれるところであろう。何らかの意味で関連しそうなのは、「逆カスケード」や「最大エントロピー解」であろう。読者の中から物理的な説明を与える人が現れてくることを期待する。

## —Keywords—

## レイノルズ数:

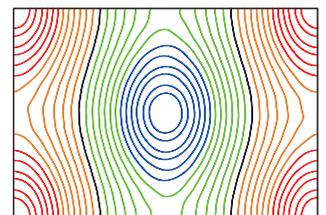
非圧縮粘性流体の中に見られる無次元パラメータの中で最も基本的なもので、流れの安定性・乱れを記述する。

## 逆カスケード:

1967年にロバート・クライクナンが2次元乱流について理論的に予想したもので、これが正しいとすると、大きな渦が自発的に表れてくるのが自然に納得される。

## 最大エントロピー解:

エントロピーというものを何らかの意味で、あるいは天降り式に定義して、そのエントロピーを最大にするような定常流れ（最大エントロピー解と呼ばれる）を計算すると、それが観測されるパターンに定性的に一致する、という予想がある。



典型的な大規模渦。

## 1. はじめに

流体力学の扱う対象は様々であろうが、ここでは非圧縮粘性流体を考え、ナビエ・ストークス方程式で記述できるものとして話を進める。流れは2次元のものだけを考察する。現実の流れは3次元なのだから2次元など机上の空論であろうという批判があることは十分承知しているが、地球規模の空気の流れのように、2次元流がよい近似になっている場合もある。一方で、3次元とは異なる現象が2次元に現れ、それを理解する理論が求められているので、「3次元さえ数値計算できる時代なんだから2次元なんて…」という批判は当たらないはずである。

目標である大きな渦の背景説明としていくつかの事実を列挙する。こうしたものに興味があれば7節に直ちに飛んでいただいて結構である。大きな渦とは、たとえば図1に示されているような流線を持つ解である。レイノルズ数の大きなところでの解であるから、定常解と言っても相応の複雑さを示すかと思いきや、解は極めて対称性の高いものであることがわかる。

## 2. 方程式

速度を  $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3)$ 、圧力を  $p$  とすれば、これらはナビエ・ストークス方程式に従う。2次元と仮定するので、 $\mathbf{v} = (v_1, v_2)$  と書くことにすれば、

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \sum_{k=1}^2 v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} = \nu \Delta v_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i \quad (i=1,2) \quad (1)$$

と

$$\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0 \quad (2)$$

に従う。ここで、 $(f_1, f_2)$  は外から加わる力であり、 $\rho$  は流体の密度、 $\nu$  は動粘性係数と呼ばれる定数である。 $\Delta$  はラプラス作用素であり、

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}$$

で与えられる。

以下では、 $x = x_1$ 、 $y = x_2$  と書き換えることにする。

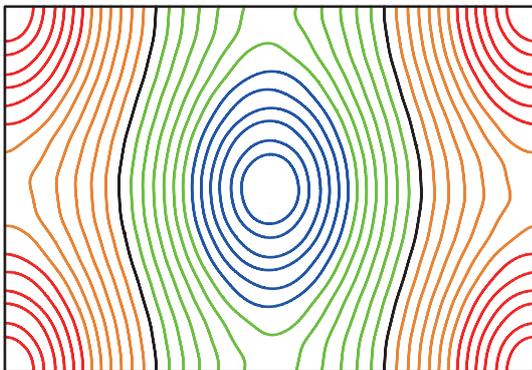


図1  $f = \cos 9y$ .  $R = 5 \times 10^5$ . ある定常解の流線を描いている。ナビエ・ストークス方程式を周期境界条件の下で解いている。赤、黄、緑、青の色は、最大値から最小値に向かって4分の1ずつまとめたところを表している。(3節参照)

結局この方程式さえ解けばよいわけだから、もはや秘密でも何でもなく、あとは計算機を回す時間とお金の問題である。こう思っておられる方々も少なくないのではなからうか。確かに、明日や明後日の天気予報にはこの主張は少しは当てはまるかもしれない。しかし、なかなかそうもいかない場合は多いのである。

もちろん、個々の速度の大きさを知りたいだけならばそ

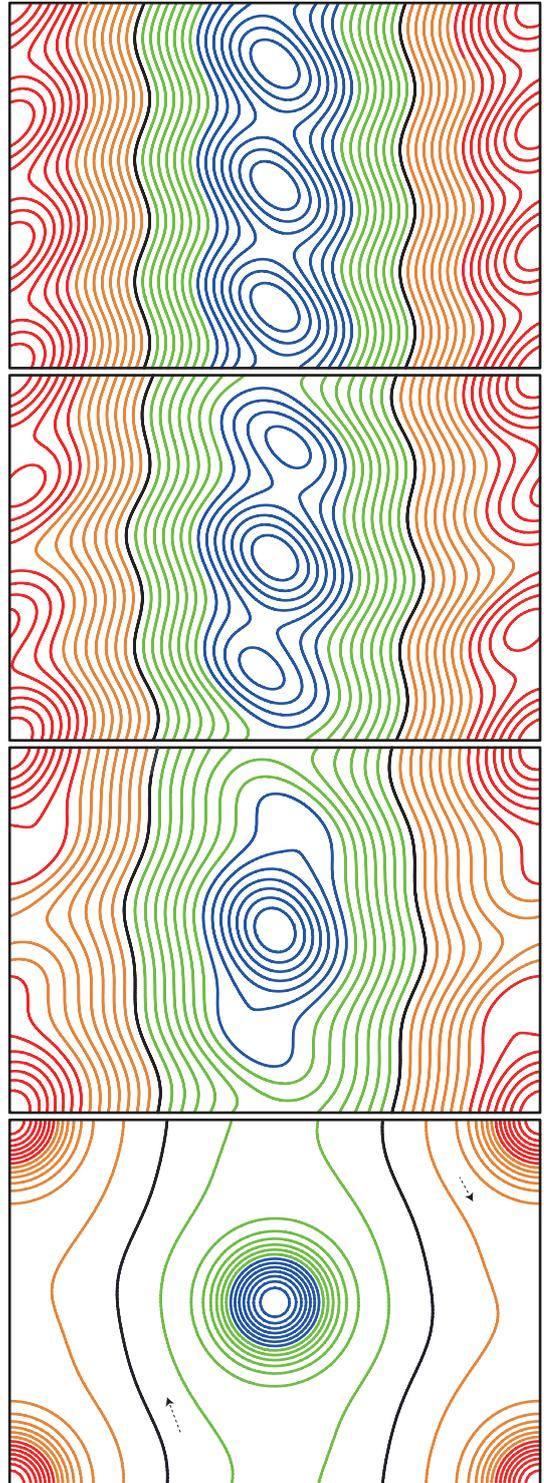


図2  $f = \cos 3y$ . 図の矢印は速度の向きを示している。レイノルズ数は上から順に、 $R = 500, 500, 1,200, 3 \times 10^5$ . 一番上は一次分岐の枝の解であり、他は二次分岐解である。

れでもよからう。しかし、数学の立場としては、(理論物理学の多くの方も同じだと信ずる) 個々の膨大なデータが必要なのではなく、それから総体として何が結論できるかが問題である。たとえ話で言えば、入力が  $a$  ならば出力は必ず  $a$  の簡単な関数  $f(a)$  となる、といった法則が欲しいのであり、個々のデータには興味はない。ビッグデータとの類推で言えば、ひとつひとつのデータは無意味で、「統計的にこういう結論は必定である」といったものを知りたいと願うわけである。

では、そういったことがナビエ・ストークス方程式において可能であろうか？ 過去50年間、多くの統計物理学の専門家が乱流について様々な理論を提唱してきた。それらは流体现象の一部を説明し、大変示唆に富むものが多いけれども、厳密な意味では普遍的な理論とは呼べないものである。<sup>10, 11)</sup>

実際、ナビエ・ストークス方程式の歴史をひもとけば、何か普遍的な性質が見つかったように思えても、何らかの形で反例が出てくるのが常である。「概ねこれこれの性質が成り立つ」ということが言えても、必ずこうなるとは断定できないのである。

以下に出てくる大きな渦も何だか普遍的に見えるのだけれども、決して厳密な意味で普遍的ではないのである。これが悩ましいところである。ここで少し先走りして、大きな渦とは何かを見るために図2を見てみよう。ここにのせた図はすべて、数値的に得られた定常解の流線である。詳しくは後で説明することにして、ここでご注意いただきたいのは、レイノルズ数が500程度ならば渦が3対あるにも関わらず、レイノルズ数が大きいときには一対しかないということである。レイノルズ数が大きくなると流線のトポロジーはむしろ単純化するといつてよいであろう。こうした現象を以下の節で説明したい。

ここでひとつご注意いただきたいのは、レイノルズ数を大きくしていくときの流体の振る舞いを調べるということは、 $R \rightarrow \infty$  の極限値を考えることと同じではないということである。レイノルズ数が非常に大きいけれども有限である場合の振る舞いを漸近的に調べるのが数学の立場である。

### 3. 具体的な設定

上の方程式を2次元で考えよう。ナビエ・ストークス方程式を解くべき流れの領域と境界条件・初期条件が与えられれば、解は決まる。本稿では簡単のために流れの領域は長方形領域とし、周期境界条件で考える。長方形は次のように無次元化する：

$$-\frac{\pi}{\alpha} < x < \frac{\pi}{\alpha}, \quad -\pi < y < \pi.$$

ここで、 $\alpha > 0$  は縦横比で、アスペクト比と呼んでもよい。さて、流れにはレイノルズ数というパラメータ  $R > 0$  が現れる。これは無次元化した粘性係数の逆数である。

流体が非圧縮であるという条件から、流れ関数というも

のが定義できる。これは

$$v_1 = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v_2 = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

で決まる関数  $\psi$  のことである。 $\omega = -\Delta \psi$  を渦度と呼ぶ。

式(1)を  $\psi$  で書き直し、適当に無次元化すると

$$\frac{\partial \Delta \psi}{\partial t} - \psi_x \Delta \psi_y + \psi_y \Delta \psi_x = \frac{1}{R} (\Delta^2 \psi + f), \quad (3)$$

となる。ここで、 $f = (\partial f_1 / \partial y) - (\partial f_2 / \partial x)$  である。これを、 $x$  についても  $y$  についても周期的であるという条件の下で解けばよい。平坦なトーラス上での流れを考えるといてもよい。さて、《レイノルズ数を次第に大きくしていったとき、どういった変化が相空間で起きるのか、考察せよ》これがコルモゴロフが1959年に唱えた問題で、物理学の立場からも数学の立場からも研究されている問題である。<sup>3)</sup> コルモゴロフ問題は球面で考えることも可能である。<sup>19)</sup> こうすると惑星規模の流れの問題に少し近づくことになる。

筆者がまだ若かった頃、アーノルドの論文<sup>8)</sup>に接し、ここに数学と流体物理学の面白い交流を読み取ることができた。これが筆者の研究の始まりである。

### 4. 力学系理論の立場 (古典的)

コルモゴロフの問題は、力学系理論を流体力学に応用せよ、というふうに解釈することもできる。そこで、本節において既存の理論(のごく一部)を振り返ることにする。

レイノルズ数が小さいとき(すなわち粘性が大きいとき)には単純な流れパターンがみられるだけで、それほど面白い現象がみられるわけではない。いわば、方程式はただ一つの解のみを安定に持つ状態である。しかし、 $R$  を大きくしていくとより複雑なパターンがみられるようになる。これがいわゆる分岐である。分岐(bifurcation)とは、多分ポアンカレが最初に使った言葉ではないかと思われるが、それまで一つしかなかった平衡状態が二つ(以上)になることからこういう言葉が選ばれたのであろう。新たに生まれた解は元々の解よりも複雑なことが多い。

分岐は1回ではなく何回も起きるし、分岐するのは平衡状態とは限らず、時間周期解や時間二重周期解も出てくる。これが何度も起きれば(そしてそれはレイノルズ数さえ十分に大きければ何度でも起き得るはず)任意の自然数  $n$  よりも大きな数の独立な周波数  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$  ( $n < m$ ) を持つ振動現象が出現する。これはとても複雑であるから、乱流もこうした分岐で記述し得るであろう。著名な物理学者ランダウはこういうふうに述べた。<sup>7)</sup> 力学系理論を流体力学に当てはめた説明としては古い部類に属するこの予想は「ランダウのシナリオ」として流体力学では有名である。これは乱れの発生のあたり、言い換えれば、それほどレイノルズ数が大きくない場合には間違いではないが、これだけで乱れた流れを記述できるわけではない。比較的レイノルズ数が小さい場合でもナビエ・ストークス方程式の解

はカオスになり得る。ランダウが知らなかった「低次元力学系のカオス」は今や流体力学で実現することはよく確認されている。

しかし、時間変数で見るとカオス的である解が、空間変数で見ると全然カオス的でないということもある。したがって、乱流におけるカオスの適用範囲はそれほど広いものではない。

一方で、力学系理論は典型的な振る舞いを問題にし、特殊な場合を無視することに長所がある。ある場合にはいつまでたっても（つまり、いくらレイノルズ数を上げていっても）安定性が失われず、一番単純な解がいつも安定である、ということも知られている。このような例はユドヴィッチ (Iudovich) あるいはマルキオロ (Marchioro) によって得られている。<sup>3,16)</sup> (球面上の流れについても、佐々木他<sup>19)</sup>によって同様の結果が得られている。) したがって、数学者が満足できる程度に慎重な言い回しをすれば、「[...] という性質が典型的に見られる」ということになる。しかし、現場で具体例を計算すれば例外は結構あるというのはよく経験するところである。

## 5. 定常な流れ

定常な流れとは  $v$  が時間  $t$  に依存しないものである。定常解は、レイノルズ数が何であっても少なくとも1個は存在する。<sup>3)</sup> これはルレイ (J. Leray) が1934年に証明した定理であり、ある意味で驚くべき定理である。なぜならば、レイノルズ数が大きいときには流れは乱流となり、定常状態が発現することは普通はないからである。

ラジゼンスカヤ (O. Ladyzhenskaya) さんから直接聞いた話によると、彼女がこの定理を説明したとき、すでに数学的な証明があるにもかかわらず、ランダウもコルモゴロフもアーノルドも信用しなかったということなので、こうした鋭敏な頭脳にとっても直観に反するものだったのだろう。

もちろん、存在するといっても、多くの場合にそれは不安定であり、実験で見るとは難しい。しかし、ある場合にはレイノルズ数をいくら大きくしても安定性を失わない定常解というものもあるのである (上述)。以下に述べる大きな渦も、レイノルズ数が大きいにもかかわらずしばしば安定である。

## 6. 2次元乱流と逆カスケード

2次元乱流は物理学の立場から長きにわたって研究されている。<sup>9,20)</sup> 2次元乱流と3次元乱流の大きな違いは、2次元では乱流状態になっても大きな構造の渦が存在することである。それはレイノルズ数をいくら大きくしてみてもつぶれることはない。一方、3次元乱流では、大きな構造が見られることもあるが、一様で等方的な乱流があるとなれば渦は次第に壊れていってどんどん小さな渦に変遷していくものと思われている。<sup>1,2,5,6,10)</sup> こうした現象はカスケード現象と呼ばれている。3次元乱流ではカスケードは1方

向のみである：大きなスケールから小さなスケールへ向かっていく。2次元乱流ではカスケードは2方向に存在する。小さいスケールへとカスケードし、かつ大きなスケールへもカスケードする。これは1967年にクライクナン (R. Kraichnan) が理論的に予想したことで、現在では現象論的な正しさが確認されている。<sup>9)</sup>

もちろん、厳密な意味でエネルギーのカスケードとは何かと聞かれれば答えに窮してしまう。だが、この曖昧模糊としたカスケード理論が同時に予想するエネルギースペクトルの形が数値実験などで確認されているという意味で、カスケード理論は正しいと言うしかないであろう。数学者としてはしかるべき文献、たとえば木田・柳瀬<sup>2)</sup> をご覧になっていただくことを期待するのみである。

さて、クライクナンの逆カスケード理論が正しいとすれば、大きな渦にはエネルギーが供給され続ける。したがって、小さな渦の影響が大きな渦に現れてくるというわけである。クライクナンは1967年の論文<sup>15)</sup> で、

If energy is fed in at a constant rate to a band wave number  $\sim k_i$  and the Reynolds number is large, it is conjectured that a quasi-steady-state results with a  $-(5/3)$  range for  $k \ll k_i \dots$

と述べている。この準定常状態とは何なのか、人によって様々に解釈し得るものと思うが、筆者は、統計的な平衡状態という意味であろうと想像する。

## 7. コルモゴロフ問題と渦

さて渦である。渦度は  $\text{curl } v$  であるが、2次元の場合、

$$\omega = -\Delta\psi$$

で与えられるスカラー量であるとしてよい。

渦度の重要性はそこにこそ物理的に普遍的な性質があると思われているからである。しかし、以下で説明する渦については、流れ関数  $\psi$  に普遍的(?) な性質があると私はみなしている。

さて、前節で述べたように2次元では逆カスケードがみられるが、これは小さなスケールの運動が大きなスケールの運動に影響を及ぼしているともみなすことも可能であろう。こういうふうに述べれば、そのような現象は確かに観測されている。<sup>21)</sup>

5節で述べたように、どんなにレイノルズ数が大きくても少なくとも一つは定常解が存在する。この定常解は逆カスケードとどういう関係を持ち得るであろうか？ 私は、韓国のキム・ソン Chol (Kim Sun-Chul) 氏とともに、様々な外力のもとで、レイノルズ数を大きくして定常解を計算してみた。その結果、極めて多くの場合に1対の渦が確認された。たとえば、図1のような流れパターンである。

ここで注意いただきたいのは、式(3)における外力  $f$  は

何度も振動していることである。したがって、レイノルズ数が中程度の大きさのときには、外力が $k$ 回振動していれば解も $k$ 回振動する、か、あるいは、 $k$ 対の渦が存在する。しかし、レイノルズ数さえ十分に大きければ、一番大きな渦だけが生き残り、図1のようなパターンが見えてくることである。

次節においてもう少し詳しく述べよう。

## 8. 具体例

$\alpha=0.7$ で、外力が $f(x,y)=\cos ky$ ,  $k=2, 3, 4, \dots, 10$ の場合に定常解の分岐を数値的に調べてみる。<sup>13, 14)</sup> まず、レイノルズ数が何であっても

$$\psi(x,y) = -\frac{1}{k^4} \cos ky$$

は式(3)の定常解である。対応する速度ベクトル場の流線は水平軸に平行な直線で、何ら面白いものではない。レイノルズ数が小さければこれは安定であり、初期条件が何であっても解はこの定常解に吸い込まれていく。しかし、レイノルズ数を上げていくとあるところで安定性を失う。そこでどういう解が発生するかが問題となる。

調べてみると、どの $k$ でも似たようなことが起きる。図2は $k=3$ の場合で、レイノルズ数が低いときには三つ目の

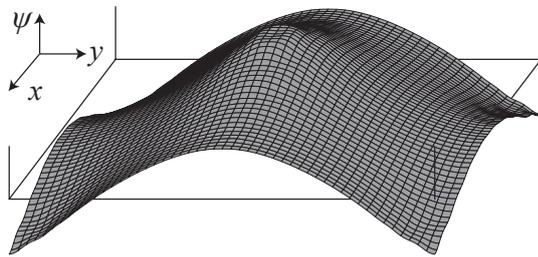


図3  $\alpha=0.7$ ,  $f=\cos 8y$ ,  $R=7 \times 10^5$ のときの、関数 $z=\psi(x+\pi/\alpha, y+\pi)$ の鳥瞰図。峰が中央に来て単峰性が見やすくなるようにするため $\psi(x+\pi/\alpha, y+\pi)$ を描いているが、 $\psi(x,y)$ と同じものである。

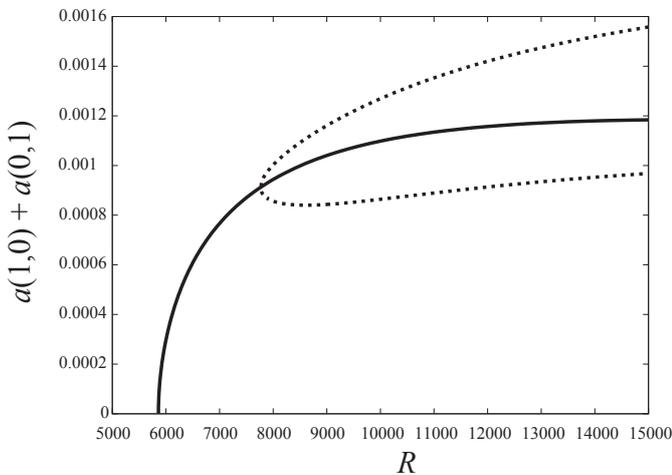


図4  $\alpha=0.7$ ,  $f=\cos 8y$ のときの、分岐図式。横軸はレイノルズ数を表し、縦軸は解をフーリエ展開したときの二つの典型的なフーリエ係数の和を表す。横軸は自明な解に対応し、実線は1次分岐解、破線は2次分岐解を表す。単峰となるのは2次分岐解のうちレイノルズ数の大きなものである。

パターンが出ているが、大きくなると一組だけが生き残る。

$R=3 \times 10^5$ のときには、大きな負の渦と大きな正の渦があって、レイノルズ数の小さいときに見える小さな渦は消えている。こういった状態を単峰解 (unimodal solution) ととりあえず呼んでおくことにする。単峰解は鳥瞰図を見るとわかりやすい。図3がそれである。

さらに、文献13, 14で見せられなかった場合として、 $k=8$ の場合をお見せしよう。この場合には自明な解からある定常解が分岐する。そしてレイノルズ数をあげていくとその分岐解からさらに別の定常解が2次分岐する(図4)。2次分岐の解はレイノルズ数が小さいうちは単峰ではないが、レイノルズ数が上がっていくと、単峰解になっていく(図5)。

外力が少しくらいずれても、あるいは $\alpha$ が少々変わっても、丸い渦のトポロジーは変化を受けない。つまり単峰解は摂動に対して強い。適当な枠組みの中で構造安定であるということが期待できそうである。これも数値的に確認す

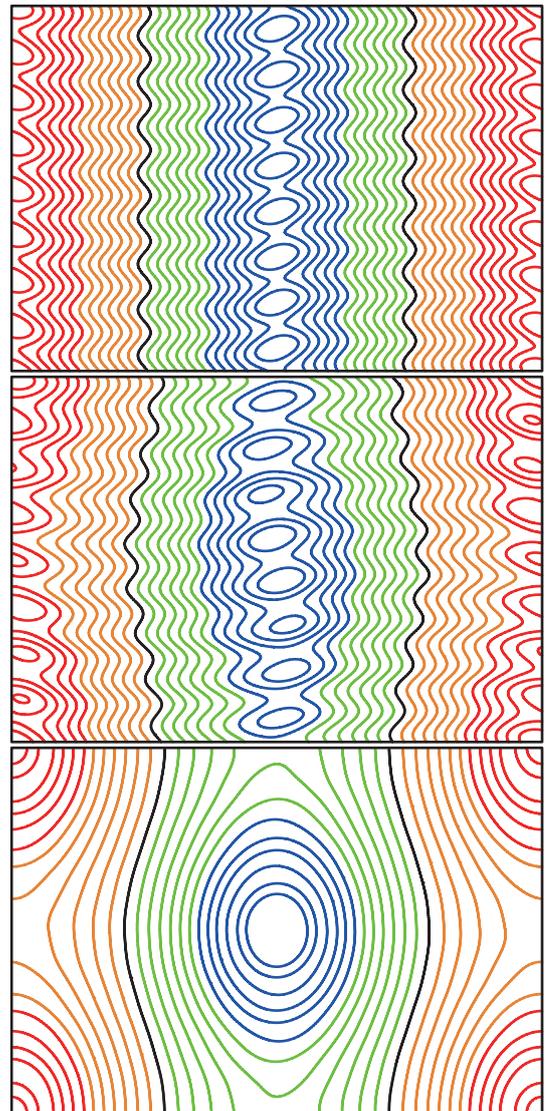


図5  $f=\cos 8y$ . レイノルズ数は上から順に、 $R=10,000, 10,000, 7 \times 10^5$ . 一番上は一次分岐解(図4の実線)であり、他の二つは二次分岐解(同じく点線)である。

ることができた。

外力としてはいくらでも複雑なものがあり得る。  $\cos ky$  だけでなく  $\cos(ax)$ , あるいは,  $\cos(ax+ky)$  などでもよいわけである。こうした多くの外力でいろいろと調べてみる<sup>14)</sup>と、非常に多くの場合に単峰解または、実質上単峰解とみなしてよいような解が現れる。しかも多くの場合にその定常解は安定である。したがって、何かこうしたものを生み出すからくりがありそうである。それが乱流の逆カスケード理論と関係があるかもしれない、というのはすぐに思いつくことであるが、では、それを定量的に表すことができるかと言えば話はそう簡単ではない。

ここで注意しておきたいことがある。それは、レイノルズ数が大きいとき、定常解もまた数多く存在し得るという事実である。上に述べた単峰解の存在は、「すべての定常解が単峰になる」という意味ではない。大多数の定常解はでこぼこして単峰とは程遠い。上で述べたことは、「数ある定常解の中で少なくとも一つは単峰である」という主張である。図6のような単峰とは似ても似つかぬ定常解はいくらでも存在する。そうした“多峰解”は常に不安定である。

また、ある場合には単峰の定常解がどう探してみても見つからないこともある。その場合でも、時間について周期的な解(それは定常解からホップ分岐して得られる)が安定になって、しかも空間的に見れば単峰である、ということもある。<sup>4,14)</sup>したがって、《外力が何であっても、レイノルズ数が十分大きければ、(時間変数については複雑かもしれないが)空間変数について単純に見える(流線のトポロジーが単純であるという意味で)解が少なくとも一つはある》という予想が一番無難であろう。この予想が正し

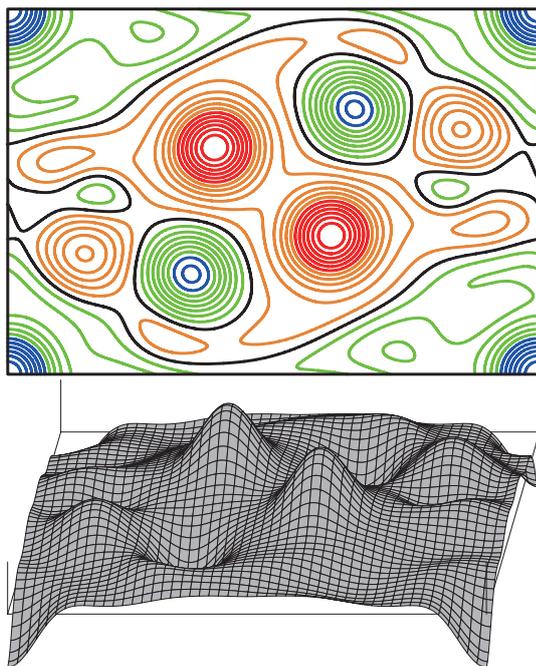


図6  $\alpha=0.7$ ,  $f=\cos 4y$ ,  $R=30,000$  のときのある定常解。極小点が7個存在し、極大点が8個存在する。流線と鳥瞰図。

いのかどうか、正しいとしてそれをどう解釈すべきなのか、筆者はよくわからないので、それ以上述べることは控えた。普遍性からは程遠いということもない。実際、図1の流線パターンと図5の単峰パターンとは恐ろしくよく似ているが、外力はそれぞれ  $\cos 9y$  と  $\cos 8y$  である。このパターンは他の  $k$  の値でも共通していることが多い。

こうした大きな渦の存在は決してコルモゴロフ問題に限るものではなく、もっと一般の2次元流あるいは2次元のとみなせる流れの中に見つかるものと思う。たとえば、問題は違うけれども、宮崎氏周辺の研究<sup>12,17)</sup>には我々の得た流線パターンと非常によく似たものが見られる。

## 9. おわりに

2次元乱流では普遍的な法則が成り立ちにくいと言われている。3次元のように小さなスケールでの普遍的な性質というのが期待できず、代わりに、大きな渦が小さな渦と相互作用するために、どこでも成り立つような簡単な法則が期待できないというのである。

これは確かにそうであろうが、私共の計算で、「大きな渦のトポロジーには広い共通性がみられる」ということは言えそうである。しかしながら、これを定量的な法則と呼ぶことはできそうもない(少なくとも今は)。

普段からいろいろとアドバイスをいただいている、山田道夫さん(京都大学)、木村芳文さん(名古屋大学)、大木谷耕司さん(シェフィールド大学)にこの場を借りて感謝したいと思います。

## 参考文献

- 1) 後藤俊幸:『乱流理論の基礎』(朝倉書店, 1998).
- 2) 木田重雄, 柳瀬眞一郎:『乱流力学』(朝倉書店, 1999).
- 3) 岡本 久:『ナビエ-ストークス方程式の数値』(東京大学出版会, 2009).
- 4) 岡本 久, S.-C. Kim: *ながれ* **32** (2013) 417.
- 5) 巽 友正:『流体力学』(培風館, 1995).
- 6) J. フォン・ノイマン著, 伊東恵一編訳:『数理論理学の方法』(ちくま学芸文庫, 2013) pp. 335-414—最近の乱流理論(岡本 久, 山田道夫訳).
- 7) ランダウ・リフシッツ:『流体力学1』(東京図書, 1970).
- 8) V. I. Arnold: *Proc. R. Soc. Lond.* **434** (1991) 19.
- 9) G. Boffetta and R. E. Eche: *Annual Rev. Fluid Mech.* **44** (2012) 427.
- 10) A. J. Chorin: *Vorticity and Turbulence* (Springer, 1994).
- 11) U. Frisch: *Turbulence* (Cambridge Univ. Press, 1995).
- 12) S. Funakoshi, T. Sato and T. Miyazaki: *Fluid. Dyn. Res.* **44** (2012) 031407.
- 13) S.-C. Kim and H. Okamoto: *Jpn. J. Indust. Appl. Math.* **27** (2010) 47.
- 14) S.-C. Kim and H. Okamoto: *Nonlinearity* **28** (2015) 3219.
- 15) R. Kraichnan: *Phys. Fluid* **10** (1967) 1417.
- 16) C. Marchioro: *Commun. Math. Phys.* **105** (1986) 99.
- 17) T. Miyazaki, H. Miyamoto, S. Funakoshi and S. Taguchi: to appear in *J. Phys., Conference Series*.
- 18) K. Obuse, S.-i. Takehiro and M. Yamada: *Phys. Fluid* **22** (2010) 056601.
- 19) E. Sasaki, S.-i. Takehiro and M. Yamada: *J. Fluid. Mech.* **774** (2015) 224.
- 20) P. Tabeling: *Physics Rep.* **362** (2002) 1.
- 21) A. J. Majda and X. Wang: *Nonlinear Dynamics and Statistical Theories for Basic Geophysical Flows* (Cambridge Univ. Press, 2006).

### 著者紹介

岡本 久氏： 力学系理論の流体力学への応用に興味があるが、偏微分方程式論からみたナビエ・ストークス方程式にも足を突っ込んでいる。日本数学会、日本流体力学会、日本応用数学会、SIAM (Society for Industrial and Applied Mathematics)、各学会の会員である。

(2016年2月1日原稿受付)

### Stability of Large Vortex—Two-Dimensional Flows of Incompressible Viscous Fluid at Large Reynolds Numbers Hisashi Okamoto

abstract: At very large Reynolds numbers the Navier-Stokes equations can possess a pair of large stationary vortices. This seemingly counter-intuitive phenomenon seems to be true in two-dimensions, and is demonstrated by numerically computing many Kolmogorov flows.

## 日本物理学会誌 第71巻 第9号 (2016年9月号) 予定目次

### 巻頭言

JPSJを国際的な一流学術誌に ..... 上田和夫  
物理学70の不思議

フェルミ粒子系の数値計算はなぜ難しい? : 負符号問題

量子コンピュータは実現するのか?

スピンの流れを制御する: スピントロニクスへの挑戦

地震予知はなぜ難しい?

現代物理のキーワード

より速く、より明るく ..... 石川哲也

### 解説

宇宙密度揺らぎの振幅問題—標準宇宙論への警告!—

..... 高橋龍一

行列模型による超対称ゲージ場の量子論の解明と進展

..... 糸山浩司

### 最近の研究から

宇宙ガンマ線観測による暗黒物質探査 ..... 水野恒史, 田島宏康

レーザーアシステッド電子散乱による光ドレスト原子の観測

..... 歸家令果, 森本裕也, 山内 薫

### 実験技術

静電型イオンビームトラップの技術とその応用

..... 齊藤 学, 春山洋一

### 話題

重力波望遠鏡を用いた地震速報 ..... 安東正樹

JPSJの最近の注目論文から 5月の編集委員会より

..... 上田和夫

PTEPの最近の招待・特集論文から 2016年6月号より

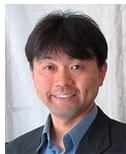
..... 坂井典佑

### 追悼

平尾泰男先生を偲ぶ ..... 中井浩二

### 新著紹介

# モット転移と高温超伝導体の電子状態 —ハバードモデルからの新展開



河野 昌仙

物質・材料研究機構国際ナノ  
アーキテクトニクス研究拠点  
KOHNO.Masanori@nims.go.jp

電気を抵抗なく流す超伝導状態を常温・常圧で実現することができれば、我々の生活が一変するだろうと言われている。現在得られている超伝導体の中で、常圧で最も高い温度で超伝導状態になるものは、銅酸化物の高温超伝導体である。通常、絶対零度（ $-273.15^{\circ}\text{C}$ ）近くまで冷やさなければ超伝導状態にはならないが、銅酸化物の高温超伝導体では約 $-140^{\circ}\text{C}$ で超伝導状態になるものもある。このことから、常温超伝導の実現に向けて、銅酸化物の高温超伝導のメカニズム解明が強く望まれている。しかし、そこには物性物理学の古くからの難題が立ちはだかっているのである。

高温超伝導のメカニズムを探る上で重要となるのは、高温超伝導の舞台となる超伝導相周辺の電子状態である。興味深いことに銅酸化物高温超伝導体では、電気を抵抗なく流す超伝導状態が、電気を流さない反強磁性的絶縁体（モット絶縁体）から電子密度を少し変えることによって得られるのである。このことから、銅酸化物の高温超伝導はモット絶縁体近傍の特異な電子状態と関係しているのではないかと考えられるようになった。つまり、高温超伝導の問題は、モット絶縁体に近づくにつれて電子状態がどのように変化するかという問題とかがわっている。この問題こそ、銅酸化物高温超伝導体が発見されるずっと以前から物性物理学の中心的課題の一つとして論争的になってきたモット転移の問題なのである。

モット転移の問題は、相互作用する電子の根本的な見方にかかわる量子多体効果の問題である。通常、モット絶縁体から十分に離れた金属状態では、伝導を担う電子は

粒子のように動き回る。即ち、電荷 $-e$ とスピン $\hbar/2$ を運ぶ電子が系の性質を特徴づけている。しかし、モット絶縁体では、電気（電荷）を流さずに磁気（スピン）を動かすことができる。直感的には、電子の電荷はクーロン反発力で退け合うために安定な電荷配置から動かすことができないが、電子のスピンを回転させることにより、小さなエネルギーで磁気的な揺らぎを伝えることができる。即ち、モット絶縁体の低エネルギー領域では、電荷とスピンの自由度が分離している。モット転移の問題は、電荷とスピンを運ぶ粒子のように振る舞っていた金属中の電子が、どのようにしてモット絶縁体の電荷とスピンの自由度が分離した状態へと変化するのかという問題である。銅酸化物の高温超伝導は、まさにこの電子状態の描像が移り変わるモット転移の近傍で観測されているのである。

本稿では、モット転移の問題に関して、最近著者が行った理論研究の結果に基づいて解説を行う。前半では、モット転移は電子の動きをスピン自由度に残したまま電荷自由度が凍結する現象として特徴づけられることを述べる。そして後半では、銅酸化物高温超伝導体で観測されている電子状態の様々な異常な振る舞いを、モット転移の観点から統一的に説明する。

本稿では高温超伝導のメカニズムの解明には至らないが、その舞台となるモット転移近傍の電子状態と、長年の課題であるモット転移の本質に対して、明快な描像を与えることを目的としている。この描像によって、モット転移や高温超伝導体の理解が一層深められれば幸いである。

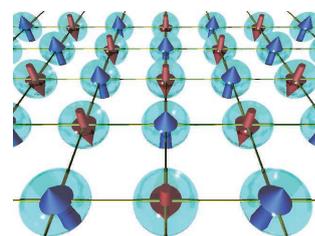
## —Keywords—

### 銅酸化物高温超伝導体：

1986年にベドノルツとミュラーがランタンとバリウムを含む銅酸化物で超伝導転移温度( $T_c$ )が30 Kを超えることを見出し、ほどなくイットリウムとバリウムを含む、 $T_c > 90$  Kの銅酸化物が見つかった。それまで超伝導状態を記述するのに有効と考えられてきたBCS理論では、電子格子相互作用を起源とする超伝導の転移温度は高くてもせいぜい40 Kであると考えられていたので、この結果は驚くべきものであった。30年を経た現在でもなお様々な実験結果を矛盾なく説明する理論があるとはいえず、様々なアプローチが試みられている。これらの物質群に共通する特徴として、1.結晶構造に銅と酸素からなる2次元面( $\text{CuO}_2$ 面)を有し、元素置換等によってこの面にキャリアを導入することにより超伝導が発現する、2.キャリアの導入されない物質は反強磁性絶縁体となる、などが挙げられる。

### モット絶縁体：

通常的自由電子的描像では本来金属となるべき物質において、電子間の強いクーロン相互作用のために絶縁体となる物質が存在する。このような物質をモット絶縁体と呼ぶ。多くのモット絶縁体では、電子のスピン間相互作用によって反強磁性秩序が生じる。



## 1. はじめに

現代のエレクトロニクス材料をはじめとする典型的な金属や半導体の性質は、結晶中の電子を粒子とみなす描像によって理解することができる。電子は単独では粒子として振る舞うことを考えると、この描像は当然のことと思われるかもしれない。しかし、電子間相互作用が強く働く系（強相関係）では必ずしもこの描像が成り立つとは限らない。強相関係では電子は周りの電子によって強く影響を受けるため、電子の状態は電子密度が変わると変化する。電子密度が低い金属状態では電子は自由粒子のように振る舞うが、電子密度が高くなり、ある電子密度に達すると、低エネルギー領域でスピンと電荷の自由度が分離したモット絶縁体の状態になる。ここで素朴な疑問が生じる。電子密度が金属状態のものからモット絶縁体のものへと変わる際に、電子はどのようにして粒子的な状態からスピンと電荷が分離した状態へと変化するのだろうか。このモット転移の問題は、電子状態に対する根本的な見方と電子間相互作用の効果（電子相関）がかかわる問題であり、長い間物性物理学の中心的課題の一つになっている。本稿では、モット転移の問題について、従来の描像と比較しながら最近の研究結果<sup>1-6)</sup>をもとに解説する。5節以降では、モット転移と銅酸化物高温超伝導体の電子状態との関連について述べる。<sup>2-5)</sup>

まずモット転移を考える準備として、通常の金属と絶縁体の描像について確認する。典型的な金属の結晶中では、伝導電子が自由粒子のように動き回る。ただし、原子核や内殻電子による周期的ポテンシャルのために、電子のエネルギーは一定の波数領域（ブリルアンゾーン）毎に周期的になり、有限の幅をもつエネルギーバンドを形成する（図1）。絶対零度の最安定状態（基底状態）では、電子は化学ポテンシャル（フェルミレベル）以下のエネルギー状態を占める。フェルミレベルがバンド内にあれば、電子を小さなエネルギーで動かすことができるため金属になる。一方、フェルミレベルがバンド間にあると電子は実質的に動けなくなる。電子を動かすには電子を上バンドまでもち上げなければならないため、大きなエネルギーが必要になるからである。このような絶縁体はバンド絶縁体と呼ばれている。

このように、電子を周期的ポテンシャル中の自由粒子のようにみなす描像（バンド描像）は、典型的な金属の性質をよく説明することが知られている。また、伝導電子間に働くクーロン相互作用の効果を、電子の有効質量が増大するものとして取り入れた理論（フェルミ液体理論）は、金属の性質を説明する標準的な理論として確立している。

これに対して、モット絶縁体は伝導電子間のクーロン反発力によって電荷が実質的に動けなくなった状態と見なすことができる。簡単のために、図2(a)に示すように、電子が隣の格子点に飛び移ると運動エネルギーが $t (> 0)$ 下がり、2つの電子が同一格子点上に来るとクーロン反発力

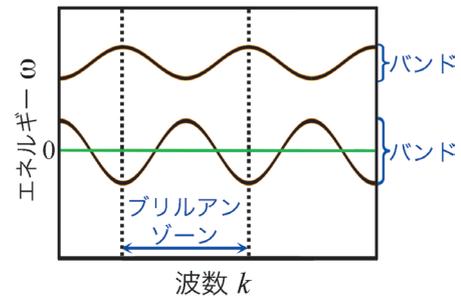


図1 典型的な金属のバンド構造の模式図。縦軸はフェルミレベルから測ったエネルギー $\omega$ を、横軸は波数 $k$ を表す。 $\omega=0$ の直線はフェルミレベルを示す。基底状態ではフェルミレベル以下の状態が電子で占有される。

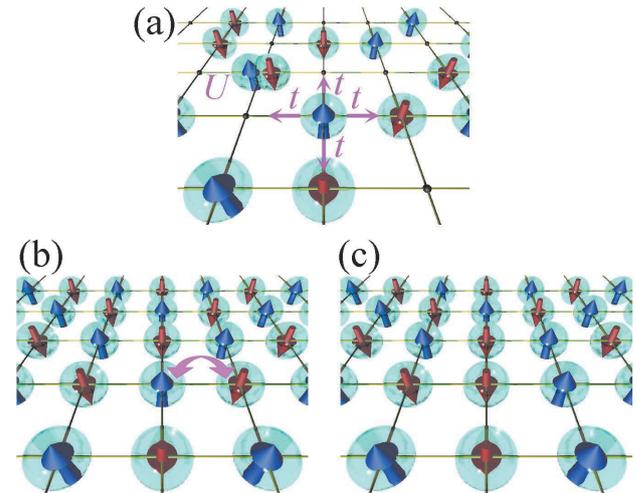


図2 (a) ハバードモデルの模式図。薄青色の球は電子の電荷を、青と赤の矢印は電子のスピン（青は上向き、赤は下向き）を、黒丸は結晶の格子点を表す。(b) モット絶縁体の基底状態の模式図。上向きスピンと下向きスピンの交互に並ぶ。(c) (b)の状態からスピン配置を変化させた状態。

のために相互作用エネルギーが $U (\gg t)$ 上がるモデル（ハバードモデル<sup>\*1)</sup>を考える。電子数と格子点の数が等しい電子密度（ハーフフィリング）では、電荷は実質的に動けなくなる [図2(b)]。電荷が動いて電荷分布が変化すると、エネルギーが $U$ 程度上昇してしまうからである。一方、電子のスピンは小さなエネルギーで動かすことができる。例えば、図2(b)の赤紫色の矢印で示すように、反対向きのスピンをもつ電子を入れ替えたとする。入れ替わる前の状態 [図2(b)] と後の状態 [図2(c)] とではスピン配置が変化しているが、電荷分布は変化していない。つまり、クーロン反発力によるエネルギー $U$ よりもずっと小さなエネルギーでスピン配置を変化させることができる。

このようにモット絶縁体では、電荷を動かすには $U$ 程度の大きなエネルギーが必要となる（電荷励起に大きなギャップが開く）が、スピン状態は小さなエネルギーで変化させることができる。このことから、モット絶縁体の低

\*1 ハバードモデルは次式のハミルトニアンで定義される。

$$\mathcal{H} = -t \sum_{\langle i,j \rangle, \sigma} (c_{i,\sigma}^\dagger c_{j,\sigma} + c_{j,\sigma}^\dagger c_{i,\sigma}) + U \sum_i n_{i,\uparrow} n_{i,\downarrow} - \mu \sum_{i,\sigma} n_{i,\sigma}$$

各項は電子の運動、相互作用、化学ポテンシャルの項を表す。ここで、 $\langle i,j \rangle$  は隣接する格子点 $i,j$ を表し、 $c_{i,\sigma}$ と $n_{i,\sigma}$ はそれぞれ格子点 $i$ でのスピンの向き $\sigma (\uparrow, \downarrow)$ の電子の消滅演算子と数演算子を表す。

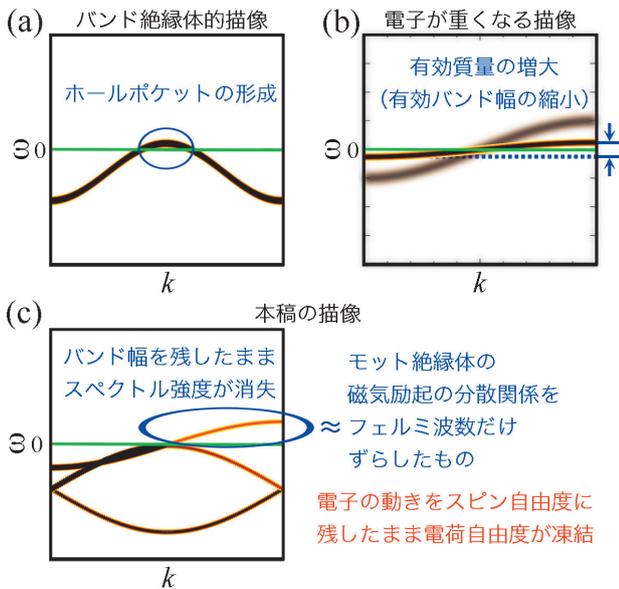


図3 (a) バンド絶縁体的描像. (b) 電子が重くなる描像. (c) 本稿の描像.

エネルギーの性質は、各格子点上にスピンを配置したスピン自由度だけのモデルで表すことができる。

電子を粒子とみなす描像（バンド描像やフェルミ液体描像）と電荷が局在したスピンモデルの描像は、それぞれ金属とモット絶縁体の低エネルギーの性質をよく説明する。では、モット転移において両者の描像はどのように整合するのだろうか。電子が粒子として振る舞うと考えている限り、スピンと電荷が分離した状態を表すことができない。一方、電荷が局在したスピンモデルの描像では、スピンと電荷が一緒に動くという粒子の状態を表すことができない。

モット転移に対する従来の基本的な考え方として、主に以下の2通りの可能性が議論されてきた。<sup>7,8)</sup>

・バンド絶縁体的描像

モット絶縁体は、電荷励起にギャップがあるため、バンド絶縁体と同様にフェルミレベル周辺にギャップが開いたバンド構造を示す。その状態から電子を少量取り除く（ホールをドーピングすると、バンド絶縁体の場合と同様に、絶縁体のフェルミレベルの下のバンドの上部にホールが入る（ホールポケットが形成される）[図3(a)]. 伝導を担う粒子はモット転移近傍ではドーピングされたホールである。

・電子が重くなる描像

モット絶縁体は、電子間相互作用の効果によって電子の有効質量が発散し、電子が動けなくなった状態である[図3(b)]. 伝導を担う粒子はモット転移の直前まで自由電子と本質的に同じ電子である。

これらはそれぞれバンド絶縁体からの類推と電子相関によって電子が重くなるという考え方に基づくものである。本稿ではモット転移の特徴を正確に理解するために、これら従来の描像にとらわれずに、モット転移近傍の電子状態を調べ直すことから始める。

## 2. 1次元系のモット転移

モット転移に関して、次元に依らない本質的な特徴があるとすれば、それは1次元系においても現れるはずである。1次元系であれば、モット転移を示すモデルの厳密解が知られており、非常に高精度な数値計算を行うこともできる。そこで、まず1次元系のモット転移近傍の性質を詳細に調べ、モット転移の特徴を抽出する。

格子点が直線上に並んだ1次元ハバードモデルを考える。金属側からモット転移に向けてどのように変化するかを考えるために、まず電子がいないところに電子を1つ加えた場合を考える。加えた電子以外には電子がいないため相互作用は働かず、バンド構造<sup>\*2</sup>は1本の曲線で表される[図4(a)]. フェルミレベルがバンド内を上昇すると電子密度が高くなる。相互作用がない場合 ( $U=0$ ) は格子点を飛び移る自由電子系であり、電子密度が変わっても曲線の形も強度（スペクトル強度）も変化しない。フェルミレベルがバンドの中央に達してハーフフィリングになっても金属状態のままである。しかし、相互作用が強い場合は、フェルミレベルがバンド内に入ると、 $U$ 程度高いエネルギー領域にスペクトル強度が現れ、バンド構造が徐々に変化する。そして、ハーフフィリングではバンド絶縁体のようにフェルミレベル周辺にギャップが開いたモット絶縁体の状態になる[図4(b)].

モット転移の特徴を抽出するために、モット転移直前での電子状態に着目する。図4(b)と(c)とを比較すると、モット絶縁体から電子を少量取り除くと、モット絶縁体の場合にはなかった曲線が下のバンドの直上に現れることがわかる。<sup>1)</sup> このような振る舞いは、従来のバンド絶縁体的描像や電子が重くなる描像では説明することができない。バンド絶縁体的描像では、モット絶縁体の状態から電子を少量取り除いても、モット絶縁体の下のバンドの上部にホールが入るだけで、バンド構造は変化しないと考えられる[図3(a)]. 一方、電子が重くなる描像では、電子の有効質量が発散して絶縁体になるとすると、フェルミレベルでの曲線の傾きがゼロになり、有効バンド幅がゼロになると考えられる[図3(b)]. では、ホールをドーピングすることによって誘起された曲線はどのように理解すれば良いのだろうか。

厳密解を用いて調べた結果、この曲線はモット絶縁体の磁気励起の分散関係（エネルギーと波数の関係）を波数  $\pm\pi/2$  だけずらしたものになることがわかった。<sup>1)</sup> つまり、磁気励起の分散関係は  $\omega = v_{1D} |\sin k|$  と表される[図4(e) 緑実線]のに対し、ドーピングによって誘起された状態の分散関係は、同じ  $v_{1D}$  を用いて  $\omega = -v_{1D} \cos k$  [図4(d) 青破線] ( $\omega > 0$ ) と表される。ここで、 $v_{1D}$  は磁気伝播（スピン波）

<sup>\*2</sup> バンド構造の曲線は、加えた電子 ( $\omega > 0$ ) または取り除いた電子 ( $\omega < 0$ ) のエネルギーと波数の関係を表し、曲線上の強度はそのエネルギーと波数をもつ電子を加える ( $\omega > 0$ ) または取り除く ( $\omega < 0$ ) ことのできる確率を表す。

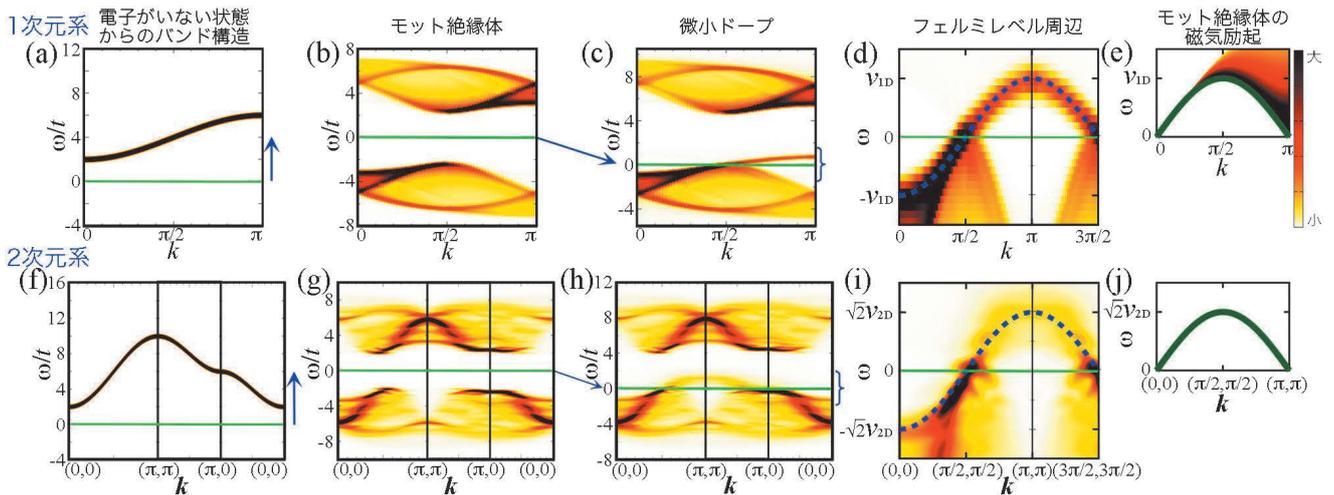


図4 ハバードモデル ( $U/t=8$ ) のスペクトル強度分布 [(a)-(d) 1次元系, (f)-(i) 2次元系]. (a), (f) 電子がない状態からのバンド構造. (b), (g) モット絶縁体 (ハーフフィリング). (c), (h) 微小ドーピング. (d), (i) (e), (j) フェルミレベル周辺の拡大図 [(i) は  $k_x=k_y (=k)$ ]. 青破線は  $\omega = -\tilde{v} \cos k$  を示す. (e), (j) モット絶縁体の低エネルギー有効モデル (ハイゼンベルグモデル) の磁気励起スペクトル (スピン間相互作用の強さ  $J=4t^2/U$ ) [(e) 1次元系, (j) 2次元系].<sup>3)</sup> 緑実線は  $\omega = \tilde{v} |\sin k|$  を示す.  $\tilde{v} = v_{1D} (= \pi J/2)$  [(d), (e)],  $\sqrt{2}v_{2D} (\approx 2.36J)$  [(i), (j)]. (b)-(d) 動的密度行列繰り込み群法 (60 格子点) の結果. (g)-(i) クラスタ摂動理論 (4×4 格子点) の結果. 文献1-3 より一部改変して転載.

の速さであり、その大きさは  $U \gg t$  の極限ではスピン間相互作用の強さ  $J (= 4t^2/U)$  を用いて  $\pi J/2$  と表されることが知られている。なお波数が  $\pm \pi/2$  ずれるのは、電子数が1つ変わると基底状態の波数がフェルミ波数 (フェルミレベルでの波数) だけ変わるためである (4節)。

バンド構造の曲線は電子のエネルギーと波数の関係を表すことから、磁気励起との対応は、金属中の電子はその動きをスピン自由度に残したままモット絶縁体の状態へと変化することを意味している。また、曲線上のスペクトル強度は電子の粒子としての性質を表すことから、モット絶縁体に近づくにつれてスペクトル強度が徐々に消失することは、電子は粒子としての性質を徐々に失うことを意味している。これらのことと、電子は電荷とスピンの自由度をもつことを考え合わせると、「モット転移では、電子の動きをスピン自由度に残したまま電荷自由度が凍結する」という描像 [図3(c)] が浮かび上がる。<sup>1-3, 5, 6)</sup> この描像は、モット転移の原因であるクーロン反発力が、電荷間に働く力であることも整合している。

では、このような特徴は1次元系の特殊性によるものなのか、それとも次元に依らないモット転移に本質的なものなのだろうか。次節ではこの点を明らかにするために2次元系の結果を示す。

### 3. 2次元系のモット転移

電子がない極限では自由電子的なバンド構造を示し [図4(f)], ハーフフィリングではフェルミレベル周辺にギャップが開く [図4(g)] のは、 $U \gg t$  のハバードモデルの次元に依らない一般的性質である。では、2次元ハバードモデルのモット絶縁体から電子を少量取り除いたときに、電子状態はどのように変化するのだろうか。数値計算の結果、1次元系の場合と同様に下のバンドの直上に曲線が現

れることがわかった [図4(h), (i)].<sup>2)</sup> この曲線の性質を明らかにするために、モット絶縁体の磁気励起の分散関係と比較する。2次元ハバードモデルのハーフフィリングの磁気励起は、 $U \gg t$  では次式の分散関係をもつスピン波モードによって表される。

$$\omega = \sqrt{2}v_{2D} \sqrt{1 - \left( \frac{\cos k_x + \cos k_y}{2} \right)^2}. \quad (1)$$

ここで、 $v_{2D}$  は  $k_x$  (または  $k_y$ ) 方向のスピン波の速さを表し、その大きさは  $U \gg t$  ではスピン間相互作用の強さ  $J (= 4t^2/U)$  を用いて  $1.18\sqrt{2}J$  程度になることが知られている。式(1)で  $k_x = k_y (=k)$  とすると、 $\omega = \sqrt{2}v_{2D} |\sin k|$  となる。このモット絶縁体の磁気励起の分散関係 [図4(j) 緑実線] とモット転移近傍の電子励起の分散関係とを比較すると、1次元系の場合と同様に、ドーピングによって誘起された  $\omega > 0$  の曲線は、モット絶縁体の磁気励起の分散関係をフェルミ波数だけをずらしたものの [ $k_x = k_y (=k)$  で、 $\omega = -\sqrt{2}v_{2D} \cos k$ ; 図4(i) 青破線] と解釈できることがわかる。<sup>2)</sup> この結果から、本稿のモット転移の描像 [図3(c)] は、1次元系に限らず、より一般的に成り立つものと考えられる。

### 4. ドーピング誘起状態の一般論

1次元と2次元のハバードモデルの結果 (2節と3節) は、モット絶縁体の磁気励起を反映した状態がドーピングによって下のバンドの直上に現れることが、モット転移の特徴であることを示している。この節では、ドーピング誘起状態の一般論について述べる。<sup>6)</sup>

$\omega > 0$  のスペクトル強度は、加えた電子の各エネルギーと波数における存在確率を表している。モット絶縁体の基底状態 [図2(b)] に電子を加えると、既に他の電子で占有されているところに入るため、 $U$  程度エネルギーが上昇す

る。したがって、モット絶縁体のギャップ内にはスペクトル強度は現れない [図4(b), (g)]. これに対して、モット絶縁体から電子を1つ取り除いた基底状態に電子を加えた場合には、加えた電子は1格子点分だけ空いた隙間に入ることができる。したがって、電子を加えることによって、モット絶縁体の基底状態 [図2(b)] やスピンを動かした低エネルギー状態 [図2(c)] を取ることができる。後者の状態はモット絶縁体の磁気励起状態に対応することから、1つ電子を取り除いた基底状態に電子を加えた励起状態には、モット絶縁体の磁気励起状態が現れることになる。ただし、電子を取り除くと基底状態の波数が無限小ドーブのフェルミ波数だけ変わる (フェルミレベルの電子が取り除かれる) ため、分散関係はフェルミ波数だけずれる。

このようにドーピングによって電子励起に新たな状態が現れることは、モット絶縁体のスピンと電荷の分離 [電荷励起には大きなギャップが開くが、低エネルギー領域に磁気 (スピン) 励起状態が存在すること] を反映している。通常バンド絶縁体の場合と比較すると、バンド絶縁体から1つ電子を取り除いた基底状態に電子を加えても、バンド絶縁体の基底状態に戻るか、加えた電子が上のバンドに入るしかない。バンド絶縁体の最低磁気励起エネルギーはバンドギャップの大きさと同じである<sup>\*3</sup> (スピンと電荷が分離していない) ためである。

以上のことは、量子数の観点から次のように説明することができる。モット絶縁体の基底状態は、電子数  $N$  (= 格子点の数)、波数  $0$ 、スピン  $0$  をもつとする。そこから電子 (スピン  $\hbar/2$ ) を1つ取り除いた基底状態は、通常、電子数  $N-1$ 、波数  $k_F$ 、スピン  $\hbar/2$  をもつと考えられる。ここで、 $k_F$  は微小ドーブ極限でのフェルミ波数である。この状態に波数  $k$  の電子を加えると、得られる状態は電子数  $N$ 、波数  $k+k_F$ 、スピン  $0$  または  $\hbar$  をもつ。このスピン  $\hbar$  の状態は、モット絶縁体 (電子数  $N$ ) の波数  $q=k+k_F$  の磁気励起状態と同じ量子数をもつため重なりをもつことができる。モット絶縁体の磁気励起状態が  $\omega=f(q)$  の分散関係を示すとすると、ドーピング誘起状態は  $\omega=f(k+k_F)$  の分散関係を示す。したがって、一般にモット絶縁体から1つ電子を取り除いた基底状態に電子を加えると、モット絶縁体の磁気励起状態がフェルミ波数だけずれた分散関係で現れる。ただし、フェルミ波数で囲まれた領域 (フェルミ面の内側) は下のバンドに電子が詰まっているとすると、電子を加えたときの低エネルギー励起状態としてスペクトル強度が現れるのは、フェルミ面の外側の波数領域に限られる。以上の議論は次元に依らない。実際、1次元と2次元ハバードモデルの結果はこの議論と符合している [図4(d), (e), (i), (j)].

1次元ハバードモデルでは、モット絶縁体の磁気励起

の分散関係 [図4(e)] を無限小ドーブでのフェルミ波数 ( $\pm\pi/2$ ) だけずらすと、ギャップレス点がフェルミ面上に位置し、ドーピング誘起状態はギャップレスになる [図4(d)]. 2次元ハバードモデルの数値計算結果も同様な振る舞いを示している [図4(i), (j)]. このように、モット絶縁体の磁気励起がギャップレスの場合は、無限小ドーブでのドーピング誘起状態もギャップレスになると考えられる。

なお、モット絶縁体から取り除いた電子の数 (ドーブ量) が増えると、電子のいない格子点の数が増えるため、加えた電子が低エネルギー状態に入る確率が高くなる。したがって、ドーピング誘起状態のスペクトル強度は増大する。このことから、ドーブ量が増加するにつれて自由粒子的な振る舞い [図4(a), (f)] へと徐々に変化するものと考えられる。

以上の一般論も、本稿の描像 [図3(c)] を支持している。

## 5. 高温超伝導体の異常な電子状態

銅酸化物高温超伝導体は2次元  $\text{CuO}_2$  面をもつ層状構造の物質であり、 $\text{CuO}_2$  面の電子密度をモット絶縁体のものから少し変えることによって超伝導状態が実現する。このことから、高い超伝導転移温度などの超伝導の異常性は、2次元系のモット転移近傍の特異な電子状態と関係しているのではないかと考えられるようになった。

本稿の前半では、モット絶縁体のスピンと電荷の分離を反映して、モット転移近傍では従来の描像ではとらえ難い特徴が現れることを述べた。銅酸化物高温超伝導体でも、次の (1)-(6) のような電子状態の異常な振る舞いが観測されており、それぞれの波数およびエネルギー領域で様々な描像に基づいて解釈されてきた。<sup>7-13)</sup> (以下、波数は  $0 \leq k_y \leq k_x \leq \pi$  のもので代表することとする。)

- (1) モット絶縁体から電子を少量取り除くと、ギャップ内にスペクトル強度が現れる。
  - (2) 分散関係に折れ曲がり (キंक) が生じ、キंक直下では急峻な傾きを示してスペクトル強度が極端に減少する振る舞い (ウォーターフォール) が現れる。
  - (3) 1次元系で知られているスピン自由度に関連した励起 (スピノン) や電荷自由度に関連した励起 (ホロン) の分散関係に類似した振る舞いが現れる。
  - (4) モット転移近傍で、フェルミレベル付近の状態密度が小さくなる振る舞い (擬ギャップ) が現れる。
  - (5) 波数  $(\pi/2, \pi/2)$  から離れた波数領域のスペクトル強度が欠落したようなフェルミ面 (フェルミアーク) が現れる。
  - (6) 波数  $(\pi, 0)$  周辺の広い波数領域にわたって、平坦な分散関係を示すバンド構造 (平坦バンド) が現れる。
- 以下では、前半で示したモット転移の新しい描像をもとに、これらの振る舞いを2次元系のモット転移近傍の性質として統一的に説明する。<sup>2-5)</sup>

<sup>\*3</sup> バンド絶縁体の磁気励起状態は、例えば、電子が詰まった下のバンドから  $\downarrow$  向きスピンの電子を取り除き、電子がいない上のバンドに  $\uparrow$  向きスピンの電子を付け加えることによって得られる。この磁気励起に必要な最小のエネルギーはバンドギャップの大きさと同じである。

## 6. 1次元系と2次元系の電子状態の類似性

2次元ハバードモデルのモット絶縁体にホールをドーピングすると、下のバンドの直上にモット絶縁体の磁気励起を反映した状態が現れることを3節で述べた。このドーピング誘起状態 [図5(a) I] は、銅酸化物高温超伝導体で観測されている、ドーピングによってギャップ内に現れるスペクトル強度 [5節 (1)] に対応すると考えられる。

このドーピング誘起状態は、2節と3節で見てきたように、1次元系のもと同様な性質を示す。つまり、1次元系でも2次元系でも、モット転移に向けてスペクトル強度が消失するが、分散関係はモット絶縁体の磁気励起の分散関係をフェルミ波数だけずらしたものと変化する。このような類似性はドーピング誘起状態に限らず、2次元系の波数  $(0, 0) - (\pi, \pi)$  の広範なエネルギー領域で現れる (図6)。

この類似性を説明するために、スペクトル強度の分布が1次元系のものから2次元系のものへとどのように変化するかを考える。無限本の1次元鎖が2次元平面上に平行に並んでいるとする。それらが弱く結合すると、鎖に垂直な方向の波数  $k_y$  に依存してスペクトル強度の分布が変化する。鎖間結合を強くして2次元系に近づけていくと、スペクトル強度の大きいところは、波数  $(0, 0)$  付近では  $\omega$  が低くなる方へ、波数  $(\pi, \pi)$  付近では  $\omega$  が高くなる方へ移動するが、波数  $(\pi/2, \pi/2)$  付近ではあまり変化しないことが、鎖間結合の摂動論によって示唆される。<sup>2, 14)</sup> このことを考慮すると、2次元系で現れるモット転移近傍の特徴的な曲線 [図6(b)] は主に1次元系のもの [図6(a)] から鎖間結合によって変化したものと解釈することができる。<sup>2)</sup>

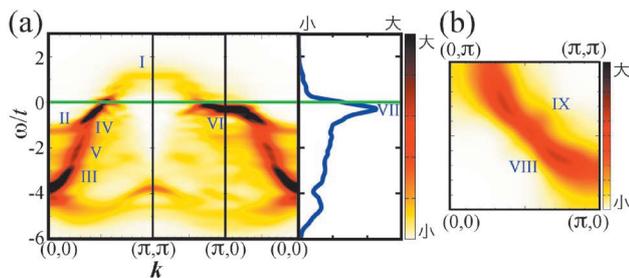


図5 2次元ハバードモデル ( $U/t=8$ ) のモット転移近傍の特徴 [クラスター摂動理論の結果]。 (a) スペクトル強度分布 (左) とその状態密度 (右)。 (b) フェルミレベル付近のスペクトル強度分布。 文献2より一部改変して転載。 I: ドーピング誘起状態, II: スピノンの励起, III: ホロンの励起, IV: キンク, V: ウォーターフォール, VI: 平坦バンド, VII: 擬ギャップ, VIII: フェルミアーク, IX: ホールポケットの兆候。

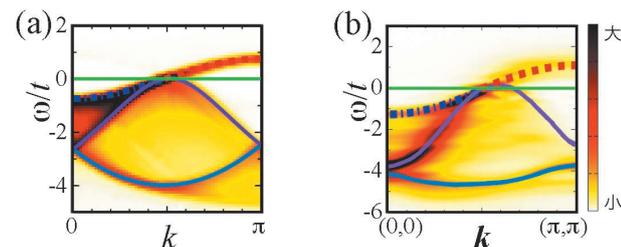


図6 ハバードモデル ( $U/t=8$ ) のモット転移近傍のスペクトル強度分布と特徴的な曲線。 (a) 1次元系, (b) 2次元系。 文献1-3より一部改変して転載。

図6(a)で、 $\omega > 0$  の赤破線は2節で議論したドーピング誘起状態を示す。 $\omega < 0$  の青鎖線は主にスピン自由度を反映した励起 (スピノン) を、実線の曲線は主に電荷自由度を反映した励起 [ホロン ( $\omega < 0$ ) と反ホロン ( $\omega > 0$ )] を示す。<sup>1, 15)</sup> これらの曲線は鎖間結合によって図6(b)の対応する曲線に変化すると考えられる。実際、2次元系のドーピング誘起状態は1次元系のもと同様な振る舞いを示す (2節, 3節)。さらに、1次元系のスピノンのバンド幅はモット転移直前でドーピング誘起状態のも的一致するが、2次元系でも同様に、スピノンに由来するバンド幅はドーピング誘起状態のもとはほぼ一致することが数値計算の結果わかった。<sup>2)</sup> 即ち、図6(a)と(b)の赤破線と青鎖線の分散関係は、モット転移直前で  $\omega = -v_{1D} \cos k$  (1次元) と  $\omega = -\sqrt{2}v_{2D} \cos k$  (2次元) のように表すことができる [図4(d)と(i)の青破線]。このように、2次元系の波数  $(0, 0) - (\pi, \pi)$  の特徴的な曲線は1次元系のもと同様な性質を示し、その起源を1次元系に遡ることができる。<sup>\*4)</sup>

これらの結果から、銅酸化物高温超伝導体で観測されている1次元系のスピノンとホロンに類似した励起は、それぞれ1次元系のスピノンとホロンが鎖間結合によって変化したものと解釈することができる [5節 (3)]。また、スピノンに由来する曲線 [図5(a) II] とホロンに由来する曲線 [図5(a) III] との分岐 [図5(a) IV] は、銅酸化物高温超伝導体で観測されているキンクに対応すると考えられる [5節 (2)]。さらに、キンク直下のウォーターフォールの振る舞いも2次元ハバードモデルで再現できることが数値計算の結果わかった [図5(a) V; 5節 (2)]。もし電子が粒子のように振る舞うとすると、バンド構造は1つの曲線で表されるため、このような振る舞いを説明するにはキンクの上で大きな修正が必要となる。

なお、以上の考察によると、波数  $(\pi/2, \pi/2)$  付近の性質は1次元系の波数  $\pi/2$  付近の性質とあまり変わらないことが示唆される。1次元系ではモット絶縁体の下のバンドの上端は、波数  $\pi/2$  周辺のホロンによるものである [図4(b)]。2次元系の数値計算でも同様な振る舞いが波数  $(\pi/2, \pi/2)$  周辺に現れることから [図4(g)]、微小ドーピング領域では、波数  $(\pi/2, \pi/2)$  の少し  $(\pi, \pi)$  側にホールポケットの兆候のようなものが残ると考えられる [図6(b) 紫実線; 図5(b) IX]。ただし、その強度はモット転移近傍でも小さく、ドーピング量が増加すると消失する。

## 7. 2次元系の波数 $(\pi, 0)$ 周辺の性質

2次元ハバードモデルのモット転移近傍の波数  $(\pi, 0)$  周辺の性質は、フェルミレベルの少し下にある平坦な分散関

<sup>\*4)</sup> 1次元系では金属相でも  $\omega \rightarrow 0$  でスピンと電荷の分離 (有効ハミルトニアンが電子ではなく独立したスピンと電荷の自由度で表されること) が起こると考えられている (朝永・ラッティンジャー液体)。<sup>15)</sup> 本稿ではスペクトル強度分布の全体的な振る舞いの類似性について述べており、2次元系の金属相の  $\omega \rightarrow 0$  の性質についてはより詳細な研究が必要である。

係をもつ状態 [図5(a) VI] によって特徴づけられる。この状態は、銅酸化物高温超伝導体で観測されている平坦バンド [5節 (6)] に対応する。以下では、この状態が擬ギャップ<sup>\*5</sup>やフェルミアークとどのように関係するのかについて説明する。

図5(a)に示すように、スペクトル強度の状態密度(波数平均したスペクトル強度)が最大になる $\omega$ は、主に平坦バンドの $\omega$ に対応している。この平坦バンドは、電子間相互作用がなければハーフフィリングで $\omega=0$ にある。しかし、電子間に斥力相互作用が働くと、モット転移近傍で $\omega<0$ に押し下げられる。このため、状態密度の主ピークの位置も $\omega<0$ となり、フェルミレベルに向けて状態密度が減少する。つまり、擬ギャップが現れる [図5(a) VII; 5節 (4)]。この擬ギャップの大きさは、微小ドーブ極限では $U \gg t$ のときにスピン間相互作用の強さ $J (=4t^2/U)$ にほぼ比例することから、反強磁性的揺らぎに関係すると考えられる。<sup>2)</sup>ドーブ量が増加すると、フェルミレベルが下がり、擬ギャップが小さくなる。そして、平坦バンドや状態密度の主ピークが $\omega=0$ を横切ると擬ギャップが閉じる。なお、電子が次近接の格子点にも飛び移れる場合には、擬ギャップの大きさは、その飛び移りの強さにも依存する。<sup>4)</sup>

フェルミ面の形状は平坦バンドとフェルミレベルとの相対位置関係に強く依存する。モット転移近傍では平坦バンドがフェルミレベルより下に位置するため、波数 $(0, 0) - (\pi, 0)$ にフェルミレベルを横切る状態はない(図5)。また、波数 $(\pi, 0) - (\pi, \pi)$ のフェルミレベル周辺にあるスペクトル強度はモット転移に向けて消失する [図4(g), (h)]。したがって、モット転移近傍ではフェルミレベル周辺のスペクトル強度は主に波数 $(\pi/2, \pi/2)$ 付近のみに残り、フェルミアーク的振る舞いが現れる [図5(b) VIII; 5節 (5)]。ドーブ量が増加して擬ギャップが閉じると、フェルミレベルが平坦バンドよりも下になり、相互作用がない場合のような波数 $(0, 0)$ を囲むしっかりとしたフェルミ面が形成される。

## 8. おわりに

モット転移を示す最も単純化したモデルであるハバードモデルによって、銅酸化物高温超伝導体で観測されている電子状態の様々な異常な振る舞い(ドーピング誘起状態、スピノ的励起、ホロンの励起、キルク、ウォーターフォール、平坦バンド、擬ギャップ、フェルミアークなど)を統一的に説明した。<sup>2)</sup>モット転移近傍の特徴は、スペクトル強度の減衰や、異なるエネルギースケールで特徴づけられる状態が現れることである。前者はモット転移に向けて電子が粒子として振る舞う描像が悪くなることを反映しており、後者は反強磁性的モット絶縁体の近傍で、磁気的なエネルギーで特徴づけられる状態が電子励起に強く現れることと関係している。本稿ではこのようなモット転移近傍の

特徴を説明するために、まず1次元系でモット転移近傍の特徴を正確に抽出し、それを指針として2次元系に議論を拡張した。なお、2重占有(同じ格子点に2つの電子が来ること)を排除したモデルである $t$ - $J$ モデルでも、ドーピング誘起状態を含めた下のバンドで同様な結果が得られている。<sup>5)</sup>このことから、2重占有の存在は本稿で議論したモット転移近傍の特徴には本質的な影響を及ぼさないと考えられる。

本稿で示したモット転移の描像は、電子の動きをスピン自由度に残したまま電荷自由度が凍結するというものである。絶縁体側からは、モット絶縁体の低エネルギーの磁気励起状態が、ドーピングによってフェルミ波数だけずれて電子励起に現れると言うことができる。<sup>1-3, 5, 6)</sup>この特徴はモット絶縁体のスピンと電荷の分離を反映しており、通常のバンド絶縁体にドーピングを行った場合とは異なる。

モット転移近傍の電子状態については、これまで日本物理学会誌で論争が繰り返されてきた。<sup>16-20)</sup>本稿で示した描像は、これまで議論されてきた様々な描像(フェルミ液体、スピン揺らぎ、スレーブ粒子など)と共通する部分がある。例えば、ドーピング誘起状態は、モット転移近傍ではスピン揺らぎ(スピン波)に関係した分散関係を示すが、ドーブ量が増加するとスペクトル強度が増大してフェルミ液体の準粒子とみなせるものへと変化する。モット絶縁体のスピンと電荷の分離を反映した特徴が、モット転移近傍で現れることは、概念的にはスレーブ粒子の描像に近い。

本稿ではモット転移の一般的特徴を明らかにするために、モット転移近傍でのスペクトル強度分布の全体的な振る舞いに注目して解説を行った。2次元系のフェルミレベル極近傍の性質(基底状態がフェルミ液体か、超伝導状態か、それ以外の状態かなど)や高温超伝導のメカニズムの解明は、今後の課題として残されている。

モット転移が絶対零度でドーピングに対して連続的な場合について議論したが、実際の物質では本稿では考えられていない様々な要因のために1次転移になることが少なくない。しかしながら、モット転移のエッセンスを含む最も単純化したモデルであるハバードモデルで得られた特徴やその兆候は、銅酸化物高温超伝導体で観測されているように、モット転移近傍の物質で一般的に現れると考えられる。

従来の粒子的な電子描像では、モット絶縁体の下のバンドの上部にホールが入ることや、フェルミレベル周辺の分散関係が平坦化することによって、モット転移が特徴づけられると考えられてきた。これに対して本稿では、モット絶縁体から電子を取り除くと磁気励起のエネルギーをもつ電子状態がフェルミレベルの直上に出現し、電子密度を上げてモット絶縁体に近づけると、フェルミレベル直上の電子状態がバンド幅を残したままスペクトル強度を失うことを述べた。このようなモット絶縁体のスピンと電荷の分離を反映した電子状態の出現や消失こそが、従来の描像ではとらえ難いモット転移らしさの顕れ(モット転移の特徴)

\*5 擬ギャップには幾つかの種類があるが、ここではスペクトル強度の状態密度の主ピークで定義される擬ギャップについて議論する。

であり，強相関系の醍醐味の一つと言えるであろう。

#### 参考文献

- 1) M. Kohno: Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 106402.
- 2) M. Kohno: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 076401.
- 3) M. Kohno: JPS Conf. Proc. **3** (2014) 013020.
- 4) M. Kohno: Phys. Rev. B **90** (2014) 035111.
- 5) M. Kohno: Phys. Rev. B **92** (2015) 085128.
- 6) M. Kohno: Phys. Rev. B **92** (2015) 085129.
- 7) M. Imada, A. Fujimori and Y. Tokura: Rev. Mod. Phys. **70** (1998) 1039.
- 8) 今田正俊：日本物理学会誌 **54** (1999) 79; 藤森 淳： *ibid.* 83; 瀧川 仁： *ibid.* 90; 十倉好紀： *ibid.* 98; 鹿野田一司： *ibid.* 107; 今田正俊： *ibid.* 115.
- 9) E. Dagotto: Rev. Mod. Phys. **66** (1994) 763.
- 10) A. Damascelli, Z. Hussain and Z.-X. Shen: Rev. Mod. Phys. **75** (2003) 473.
- 11) J. Graf, G.-H. Gweon, K. McElroy, S. Y. Zhou, C. Jozwiak, E. Rotenberg, A. Bill, T. Sasagawa, H. Eisaki, S. Uchida, H. Takagi, D.-H. Lee and A. Lanzara: Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 067004.
- 12) 藤森 淳, 吉田鉄平：日本物理学会誌 **62** (2007) 815.
- 13) 今田正俊：物性研究・電子版 **3** (2014) 031208; 今田正俊：日本物理学会誌 **66** (2011) 88.
- 14) 河野昌仙：日本物理学会誌 **65** (2010) 881.
- 15) 川上則雄, 梁 成吉：『共形場理論と1次元量子系』(岩波書店, 1997).
- 16) 守谷 亨：日本物理学会誌 **54** (1999) 48; 福山秀敏： *ibid.* 123; 今田正俊： *ibid.* 124; 守谷 亨： *ibid.* 126.
- 17) 岡部拓也：日本物理学会誌 **54** (1999) 562; 今田正俊： *ibid.* 565.
- 18) 守谷 亨, 上田和夫：日本物理学会誌 **52** (1997) 422; 福山秀敏： *ibid.* 176; 三宅和正： *ibid.* 191; 永長直人： *ibid.* 194.

- 19) 守谷 亨：日本物理学会誌 **58** (2003) 616; 守谷 亨： *ibid.* **59** (2004) 791; 小形正男： *ibid.* **59** (2004) 796.
- 20) 山田耕作：日本物理学会誌 **63** (2008) 151; 藤森 淳, 吉田鉄平： *ibid.* 151.

#### 著者紹介

河野昌仙氏： 専門は物性理論. 特に強相関電子系や量子スピン系について, 数値計算や厳密解などを用いて研究を行っている.

(2016年1月29日原稿受付)

### Mott Transition and Electronic States of High-Temperature Superconductors—New Development from the Hubbard Model

Masanori Kohno

abstract: The nature of the Mott transition is discussed based on recent theoretical results for the one- and two-dimensional Hubbard models. The Mott transition is characterized by freezing of the charge degrees of freedom in a single-particle excitation that leads continuously to the spin excitation of the Mott insulator. Various anomalous features observed in cuprate high-temperature superconductors are explained in a unified manner as properties of a two-dimensional system near the Mott transition.

## 絶縁層に極性分子をもつ有機超伝導体

川本 正 〈東京工業大学物質理工学院 kawamoto@o.cc.titech.ac.jp〉

森 健彦 〈東京工業大学物質理工学院 mori.t.ae@m.titech.ac.jp〉

通常の超伝導は電子-フォノン相互作用によって電子対が形成される Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 理論で説明されているが、非フォノン型の電子対形成による非BCS型の超伝導についても多くの議論が続けられてきた。そのために、様々な超伝導物質の開発とその構造・物性の研究がなされている。多様な超伝導物質のなかで、例えば、銅酸化物高温超伝導体や鉄系超伝導体では、超伝導を担う伝導層の間に絶縁層が挿入された層状構造が特徴的である。ドナー分子とアニオン分子からなる有機超伝導体でも、伝導を担うドナー層と、ドナーから電荷を引き抜き結晶を支える役割のアニオン絶縁層とが交互に積層した構造が一般的である。なかでも、ドナー分子が2量体を構成して井桁状に配列した $\kappa$ 型と呼ばれる $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>X [BEDT-TTF: bis(ethylenedithio)tetrathiafulvalene, X: アニオン]は2次元電子系をもち、有機超伝導体のなかでは最も高い10 Kを超える $T_c$ をもつ物質が発見されている。このなかで、アニオン絶縁層に溶媒分子を包含するドナー・アニオン・溶媒分子の3成分系物質では、溶媒分子が極性分子の場合、分極がドナー層の電子状態に影響を及ぼしている。非BCS型超伝導機構のひとつにGinzburgが提案したモデルがあり、そこでは金属層を誘電体層で挟んだ層構造での層間相互作用で励起子による電子対形成の可能性が示されている。極性溶媒分子を包含する3成分系有機超伝導体には、このようなモデルとの関連も示唆される。

3成分系である(DMEDO-TSeF)<sub>2</sub>[Au(CN)<sub>4</sub>] (THF) [DMEDO-TSeF: dimethyl(ethylenedioxy)tetraselenafulvalene, THF:

tetrahydrofuran]には2種類の $\kappa$ 型超伝導体が発見されている。そのひとつ $\kappa_H$ 相ではアニオン層に包含された極性溶媒分子THFが強誘電的に配列して1枚のアニオン層を形成しており、ドナー層を挟んで反強誘電的に配列した構造をとっている。この物質のドナー層間の相互作用は角度依存性磁気抵抗によりインコヒーレント(電子の層間移動よりも層内散乱の頻度が大きい)であることが明らかになった。つまり、たわみのない2次元フェルミ面をもつことになるが、Shubnikov-de Haas (SdH) 振動では断面積がわずかに異なる2つのフェルミ面が観測された。この物質には独立な2種類の $\kappa$ 型ドナー層がある。SdH振動の結果は2つのドナー層のバンド充填率が異なることを意味する。極性溶媒分子の影響でバンド充填率の異なる伝導層が単結晶を構成していると考えられる。

1994年に開発された超伝導体(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Ag(CF<sub>3</sub>)<sub>4</sub>(TCE) [TCE: 1,1,2-trichloroethane]には多形があることが知られていたが、 $T_c \sim 11$  K相の構造は不明のままであった。放射光を用いた構造解析の結果、ドナー分子の配列が全く異なる2種類のドナー層、伝導層と電荷秩序層、が極性溶媒分子TCEを包含したアニオン層を挟んで交互に積層した新奇な構造であることが明らかになった。この電荷秩序層には2種類の配列パターンがあり、対称心のあるストライプ型の物質は $T_c = 9.5$  Kで、対称心のないチェッカーボード型の物質では $T_c = 11.0$  Kである。さらに電荷秩序層をもたない物質は $T_c = 2.6$  Kと低くなる。分極した電荷秩序層の存在が $T_c$ を上昇させていることになる。

## —Keywords—

## 非BCS型超伝導:

フェルミ面近傍の電子間に引力が働くとギャップが開き超伝導が発生するが、この引力の発生機構が電子格子相互作用であるものをBCS型超伝導と呼ぶ。これに対し、それ以外の引力機構による超伝導を非BCS型超伝導と呼び、現在までに様々なモデルが提案されている。

## Shubnikov-de Haas 振動:

金属物質の抵抗値が外部磁場の逆数に対して周期的に振動する現象。自由電子のバンド構造が磁場中でランダウ量子化されるため生じる。振動の振動数からフェルミ面の状態を知ることができる。

## 多形:

同一の化学的組成でありながら、複数の異なる結晶形を取る現象。本稿では、結晶を構成するドナー分子とアニオン分子の数は同じだが、その配列のパターンが異なるような複数の多形結晶を議論している。

## 1. はじめに

分子性導体において分子が井桁状に配列した $\kappa$ 型と呼ばれる構造を有する $\kappa$ - $D_2X$  ( $D$ : ドナー分子,  $X$ : アニオン) は2次元電子系をもつ物質である (図1(a)-(c)). なかでも $\kappa$ -(BEDT-TTF) $_2X$ において有機超伝導体のなかでは最も高い $T_c \sim 10$  K級の物質が複数発見されている.<sup>1-3)</sup> ここでアニオンはドナー分子から電子を引き抜き結晶を支える役割を果たす. 伝導性はドナー層が担い, その間にアニオン絶縁層が挿入された層状構造となっており, 銅酸化物高温超伝導体におけるブロック層と類似する構造が形成されている. このアニオン層に結晶成長で用いた溶媒分子が包含される, ドナー・アニオン・溶媒分子の3成分系の有機超伝導体が少なからず存在する. 3成分系物質の共通点として, 溶媒分子が抜けてしまうと超伝導を示さなくなることが挙げられる. もちろん結晶構造が変わってしまうためと考えられるが, 溶媒分子が極性分子である場合には, ドナー層の伝導電子に相互作用を及ぼしている可能性がある.

本稿ではアニオン層に極性溶媒分子を包含した3成分系

の有機超伝導体の構造と電子物性について紹介する. 白旗・今久保らによって開発された $\kappa_H$ -(DMEDO-TSeF) $_2$ [Au(CN) $_4$ ](THF)ではバンド充填率が異なる伝導層が交互に積層しており,  $T_c = 4.4$  K (midpoint)で超伝導がみられる. ここではアニオンの[Au(CN) $_4$ ] $^-$ が厚い絶縁層を形成しているのが特徴で, THFの分極の影響も重要である. 一方, 1994年にSchlueterらによって開発された $T_c \sim 11$  Kの超伝導体(BEDT-TTF) $_2$ Ag(CF $_3$ ) $_4$ (TCE)は結晶構造が未知のままであったが, 近年構造が明らかになった. この物質では2種類のドナー層がアニオン層を挟んで積層しているが, ひとつは伝導層でもうひとつは電荷秩序層である. したがって, アニオン層・電荷秩序層・アニオン層という厚いユニットがブロック層を形成している. アニオン層には極性溶媒分子TCEが包含されている. どちらの物質もGinzburg超伝導を彷彿させるような構造が特徴である.<sup>4)</sup>

## 2. 2種の(DMEDO-TSeF) $_2$ [Au(CN) $_4$ ](THF)

超伝導を示す2種類の(DMEDO-TSeF) $_2$ [Au(CN) $_4$ ](THF)の結晶構造を図1に示す.<sup>5)</sup>  $\kappa_L$ 相 ( $T_c = 2.2$  K (midpoint))の溶媒分子は室温では乱れており,  $\kappa$ 型ドナー層の結晶学的に独立な分子はひとつである (図1(a)).  $\kappa_L$ 相は,  $T_d = 209$  Kに溶媒分子の秩序化による構造相転移がある.<sup>6)</sup> この転移により直方晶から2つの単斜晶のドメイン構造へと変化する. 対称性の低下により, 独立なドナー分子も1から2へ増加し, 2つの独立な2量体から構成される $\kappa$ 型へと変化する (図1(b)). すなわち, 等価な2量体から非等価な2量体への構造相転移である. 一方,  $\kappa_H$ 相には室温においても乱れないが結晶学的に2種類のドナー層がある (図1(c)と(d)). したがって,  $\kappa_L$ 相と $\kappa_H$ 相の大きな違いは結晶学的に異なる2量体によるドナー層 ( $\kappa_L$ 相)か, 結晶学的に2種類のドナーにより2種類のドナー層が構成されるか ( $\kappa_H$ 相)となる.

これらの物質はアニオン層が厚いという観点からも興味深い. 層状物質は伝導層間相互作用の大きさにより2つに分類される. 層間方向のトランスファー積分を $t_{\perp}$ , プランク定数を $\hbar$ , 層内の緩和時間を $\tau$ として, 層内での散乱頻度 ( $\tau^{-1}$ )よりも層間の移動頻度 ( $t_{\perp}/\hbar$ )が大きい場合はコヒーレントな層間伝導と呼ばれ, たわんだシリンダー状のフェルミ面をもつ (図1(e)). 一方,  $t_{\perp}/\hbar \ll \tau^{-1}$ の極限はインコヒーレントな層間伝導と呼ばれる.<sup>7,8)</sup> この領域では層間伝導は層間のトンネル頻度に比例し, フェルミ面は各々ひとつの伝導層でのみ定義される (図1(f)).

層間伝導のコヒーレンスを実験で明らかにする方法として, 角度依存性磁気抵抗の伝導層平行近傍磁場下における抵抗ピークの有無がよく知られている. この抵抗ピークは花咲らによって考察され, 層間トランスファー積分 $t_{\perp}$ を見積もる方法となっている.<sup>9)</sup> 層間伝導がコヒーレントなら, たわんだシリンダー状のフェルミ面が存在し, フェルミ面のたわみのため面平行の強磁場では小さな閉軌道ができる.

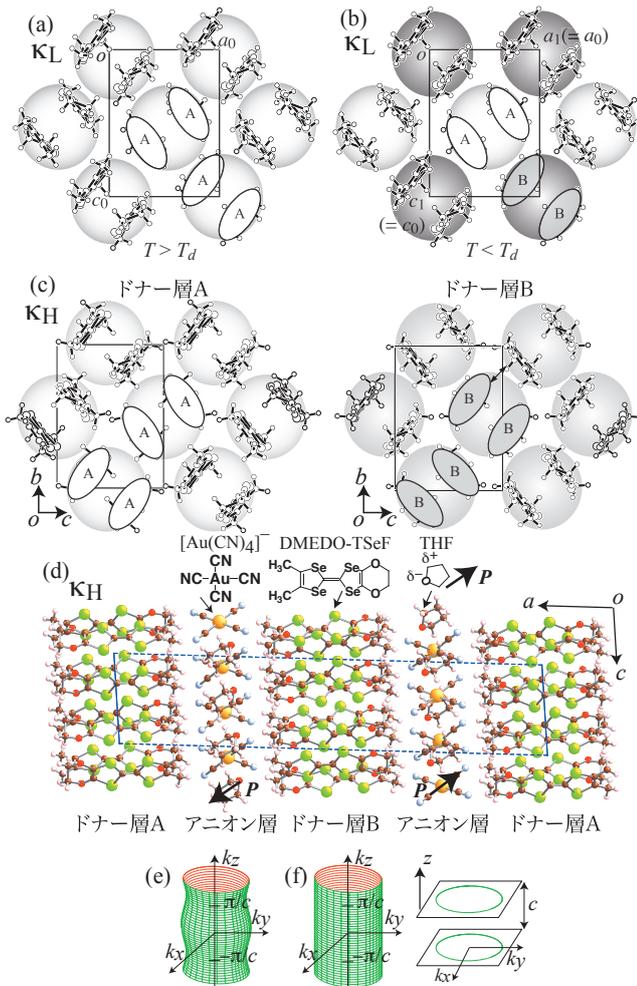


図1 (DMEDO-TSeF) $_2$ [Au(CN) $_4$ ](THF)の(a)  $\kappa_L$ 相の室温での結晶構造と(b)低温 ( $T < 209$  K)での構造. (c)  $\kappa_H$ 相のドナー分子長軸方向から眺めた2種類のドナーシートと(d)  $ac$ 面投影した構造. (e) 層間伝導がコヒーレントな場合と(f) インコヒーレントな場合のフェルミ面. (f)の右側は層間方向だけ実空間で描いたもの.

それにより抵抗ピークが現れる。これまでにこの抵抗ピークが現れない物質としては $\beta''$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>SF<sub>5</sub>CH<sub>2</sub>CF<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>が知られているが、他の物質ではピークが観測されており、コヒーレントな層間伝導であると考えられている。<sup>10,11)</sup> 他には半導体超格子を用いたコヒーレント系とインコヒーレント系で角度依存性磁気抵抗の振る舞いの違いが報告されている。<sup>12)</sup>  $t_{\perp}$ が十分小さくなるためには、厚い絶縁層をもつ物質が必要である。我々はDMEDO-TSeF超伝導体がこの条件を満たす可能性があると考え、今久保グループから試料を提供してもらい実験を行った。

2次元性の強さは超伝導の上部臨界磁場 $H_{c2}$ から議論できる。<sup>13,14)</sup>  $H_{c2}$ の $T_c$ 近傍での温度依存性の傾きから見積もられた $T=0$  Kでの面垂直方向のコヒーレンス長 $\xi_{\perp}$ は $\kappa_L$ 相 $\kappa_H$ 相ともに3 Å程度で、実効的な伝導層の厚み(～19 Å)に比べて十分短い。さらに $H_{c2}$ の角度依存性は面平行磁場でカuspを伴うTinkham型に振る舞うことから、2次元超伝導体であるといえる。

層間伝導がコヒーレントか否かを明らかにするために米国タラハシーの強磁場研究所で角度依存性磁気抵抗の実験を行った(図2(a))。磁場と伝導面の法線とがなす角を $\theta$ とすると、通常は磁気抵抗 $R(\theta)$ の大まかな振る舞いは $R(0^\circ) < R(90^\circ)$ となる。 $\kappa_H$ 相ではこの振る舞いが12.5 T以下で逆転している。このようなバックグラウンド反転は、半導体超格子のインコヒーレント系において観測されている。<sup>12)</sup> また、磁場が面平行になる $\theta=90^\circ$ で抵抗ピークが観

測されるが、ピーク幅は明らかに磁場が強くなるほど小さくなっている。<sup>15)</sup> このピーク幅は面垂直方向の磁場成分でスケールされているようにみえる(図2(b))。これは花咲らのコヒーレンスピークではない。彼らの得た関係式ではピーク幅は磁場の強さによらない。実際、彼らの測定結果では磁場に依存しない抵抗ピークが示されている。Kennettらはインコヒーレント系においてこのような磁場に依存する抵抗ピークがあり得ることを理論的に示した。<sup>16)</sup> 彼らによるとこれはアンダーソン局在であり、 $\theta=90^\circ$ では面間方向の磁場成分はゼロであるが、そこからずれると面間方向の磁場成分は大きくなり、負の磁気抵抗が現れるため、あたかも抵抗ピークのようにみえるというものである。すなわち、この物質はインコヒーレント系であると考えられる。

$\kappa_H$ 相のフェルミ面を明らかにするために、物質・材料研究機構の強磁場施設でSdH振動の測定を行った(図2(c))。<sup>15)</sup> 明瞭なSdH振動が観測され、2つの閉軌道の存在が示唆される。結晶学的には2種類の $\kappa$ 型伝導層AとBが存在するが、バンド計算で得られるフェルミ面の断面積は同じであり、その形状も瓜二つである。しかし、伝導層のバンド充填率が異なっていれば、フェルミ面の断面積は当然異なる。このフェルミ面( $\beta$ 軌道)の断面積( $S_{\beta}$ )は分子の平均電荷を $\rho_{av}$ と表記すると第1ブリルアンゾーンの断面積( $S_{BZ}$ )と $S_{\beta}=2\rho_{av}S_{BZ}$ の関係にある。観測された2つのSdH振動数の差からドナー分子の電荷は+0.475と+0.525と見積もられる。バンド充填率が通常の $\kappa$ 型伝導体と異なり実効的に1/2からずれていることは、抵抗の温度依存性にも現れている。通常の $\kappa$ 型は100 K付近にブロードな抵抗ピークをもつ。実際 $\kappa_L$ 相では抵抗ピークが観測される。しかし $\kappa_H$ 相は金属的な振る舞いを示す。これはバンド充填率が実効的に1/2からずれていることを示唆している。ここでもう一度構造をみると、THFは[Au(CN)<sub>4</sub>]<sup>-</sup>の真上に存在しているため、THFの $\delta^-$ 側(O原子側)のアニオンの電子密度は減少し、 $\delta^+$ 側では増大していると考えられる(図2(d))。その結果アニオンの $\delta^-$ 側(THFの $\delta^+$ 側)に挟まれたドナーA層はアニオンの $\delta^+$ 側に挟まれたB層よりも結晶成長の過程で+電荷が多くなると考えられる。極性溶媒分子THFの特殊な配列により、ドナーA層とB層のバンド充填率に差が生じたものと考えられる。

一方、 $\kappa_L$ 相のSdH振動では小さな $\alpha$ 軌道と磁気貫通軌道である $\beta$ 軌道がひとつずつ観測される(図3(a))。<sup>17)</sup> これは構造相転移による対称性低下のため $\kappa_L$ 相ではブリルアンゾーン境界でフェルミ面にギャップが開くのに対し、 $\kappa_H$ 相では高い対称性によりギャップが開かないこととよく一致する(図3(b))。また、 $\kappa_L$ 相の角度依存性磁気抵抗にはバックグラウンド反転は見られない(図3(c))。さらに、面平行近傍磁場での抵抗ピークのピーク幅は磁場依存性を示さないため、コヒーレントな層間伝導であると考えられる(図3(d))。<sup>18)</sup> しかし、ピーク幅から見積もられる層間のトランスファーは $t_{\perp}=0.26(2)$  meVであり、SdH振

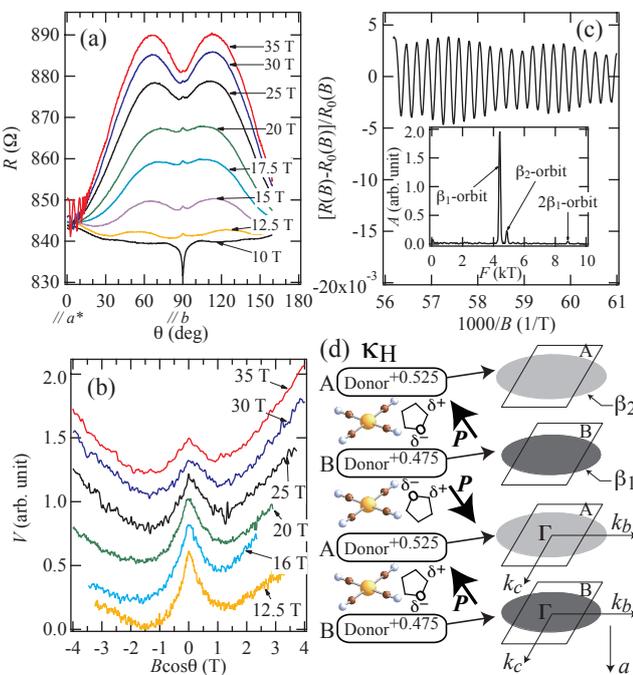


図2 (a)  $\kappa_H$ 相の1.2 Kでの角度依存性磁気抵抗。  $\theta \leq 20^\circ$ の強磁場下での振動はSdH振動であり、 $\theta=90^\circ$ での抵抗のディップは超伝導によるものである。(b)  $\kappa_H$ 相の伝導層平行近傍の磁場による抵抗ピーク。ピーク幅は $B \cos \theta$ でスケールされている。(c)  $\kappa_H$ 相のSdH振動(振動成分を磁場の逆数に対して示している)。挿入図は高速フーリエ変換スペクトル。(d)  $\kappa_H$ 相の実空間での伝導層・アニオン層の積層構造(左)とそれに対応するフェルミ面(右)。

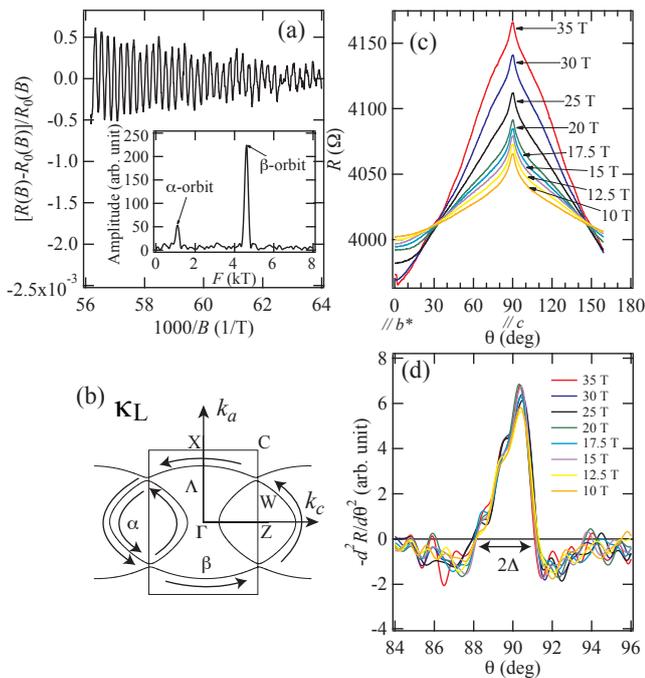


図3 (a)  $\kappa_L$ 相のShdH振動。挿入図は高速フーリエ変換スペクトル。(b)  $\kappa_L$ 相のフェルミ面。ゾーン境界のギャップは強調してある。(c)  $\kappa_L$ 相の1.2 Kでの角度依存性磁気抵抗。(d)  $\kappa_L$ 相の伝導層平行近傍の磁場による抵抗ピーク。ピークを強調するため2回微分を示している。

動のデイングル温度から  $\hbar/\tau$  は 1.59(3) meV と見積もられるので  $\hbar/\tau \approx 6t_{\perp}$  である ( $\hbar/\tau < t_{\perp}$  ではない)。この結果は、コヒーレンスピークが消えるとされる  $\hbar/\tau \gg t_{\perp}$  を満たすほど  $t_{\perp}$  が十分小さい ( $\hbar/\tau$  が十分大きい) 物質ではないということを示している。 $\kappa_L$ 相の層間伝導は  $\kappa_H$ 相とは異なりコヒーレントである。 $\kappa_H$ 相では2つの大きさの異なるフェルミ面をもつ伝導層が交互に積層した構造であるため、層間をトンネルする確率は通常の層状物質のそれよりも小さくなり、インコヒーレントな層間伝導が実現する。一方、 $\kappa_L$ 相では結晶学的に独立なドナー層はひとつであり、バンド充填率はどの層も同じである。これは  $\kappa_L$ 相がコヒーレントになることと矛盾しない。 $\kappa_L$ 相では  $\hbar/\tau > t_{\perp}$  であるものの、ぎりぎりコヒーレントの領域にあるものと考えられる。なお、極性溶媒分子を包含した絶縁層の影響が層間伝導やバンド充填率に現れている  $\kappa_H$ 相の  $T_c$  は  $\kappa_L$ 相の2倍である。しかし、溶媒分子が超伝導転移にどのような影響を及ぼしているのかは現時点では何も明らかにされていない。

### 3. (BEDT-TTF)<sub>2</sub>Ag(CF<sub>3</sub>)<sub>4</sub>(TCE) の多形

米国のSchlueterらは、1994年にBEDT-TTFと[Cu(CF<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]<sup>-</sup>の組み合わせによる2種類の新超伝導体 ( $T_c = 4.0$  K と  $T_c = 9.2$  K) の発見を報告した。<sup>19)</sup> 六角板状結晶である低  $T_c$  相は、 $\kappa$ 型の分子配列を有する  $\kappa_L$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu(CF<sub>3</sub>)<sub>4</sub>(TCE) であることが明らかにされた。一方、針状結晶である高  $T_c$  相の結晶構造は不明であった。CuからAgへとアニオンの中心金属を変えても同様に2種類の超伝導体が報告されている。<sup>20)</sup> Ag(CF<sub>3</sub>)<sub>4</sub>塩においては低  $T_c$  相の転移温度は2.6 K

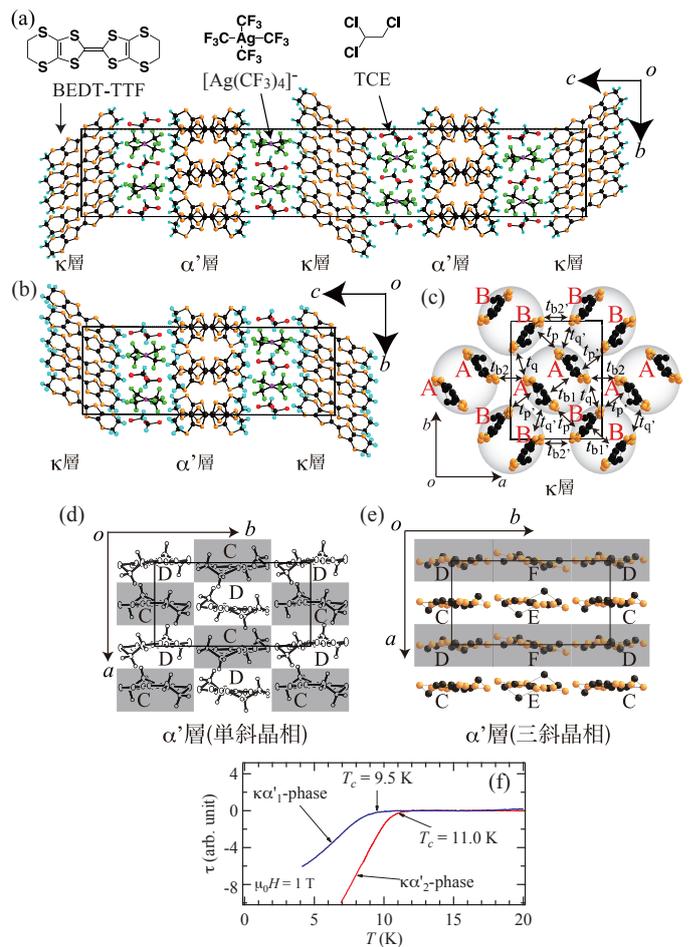


図4 (BEDT-TTF)<sub>2</sub>Ag(CF<sub>3</sub>)<sub>4</sub>(TCE) の2種類の高  $T_c$  相の結晶構造。(a)  $\kappa\alpha_2$ 相(単斜晶)。(b)  $\kappa\alpha_1$ 相(三斜晶)。(c) 分子長軸方向から見た  $\kappa$ 型分子配列(単斜晶相の  $\kappa$ 層を示している)。(d)  $\kappa\alpha_2$ 相(単斜晶)の  $\alpha'$ 層。(e)  $\kappa\alpha_1$ 相(三斜晶)の  $\alpha'$ 層。影をつけた分子はほぼ+1の電荷をもち、つけていない分子はほぼ0価である。(f)  $\kappa\alpha_1$ 相と  $\kappa\alpha_2$ 相の磁気トルクの温度依存性。

で、高  $T_c$  相の超伝導転移は 11.1 K と 9.4 K の2段階で見られるとされた。1995年にAg(CF<sub>3</sub>)<sub>4</sub>塩の高  $T_c$  相の格子定数が報告された。<sup>21)</sup>  $\kappa$ 型の伝導層を4枚含む大きな単斜晶の単位格子であるとされたが、結晶構造は示されなかった。

我々はSchlueter博士に試料を提供してもらい、高エネルギー加速器研究機構の放射光施設Photon FactoryのビームラインBL-8Aを利用して、単斜晶の大きな単位格子をもつ相の構造を明らかにした。この相におけるBEDT-TTFの配列は単なる  $\kappa$ 型ではなく、 $\kappa$ 型のドナー層と  $\alpha'$ 型(分子が交互にねじれながら積層している)のドナー層がアニオン層を挟んで交互に積層するという全く予想しなかったものであった(図4(a))。我々はこの構造をSchlueter博士に報告したが、彼らもまた独立に構造解析に成功したという返事であった。彼らの見出した構造は我々の構造と酷似しているが、低  $T_c$  相と同じ大きさの単位格子で単斜晶ではなく三斜晶であった(図4(b))。<sup>23)</sup> 三斜晶相と単斜晶相のどちらの構造が高  $T_c$  相なのか。X線回折で2種類の物質を明確に区別できる試料を探し出し、マイクロカンチレバーを用いた磁気トルク測定により超伝導転移を検出した。<sup>24,25)</sup> その結果、高  $T_c$  相は2種類存在し、単斜晶相が

$T_c = 11.0$  Kで三斜晶相が $T_c = 9.5$  Kであることが明らかになった。<sup>26)</sup> Schlueterらによる最初の発表から実に18年である。

2種類の高 $T_c$ 相の構造に共通する最大の特徴は2種類のドナー分子配列 ( $\kappa$ 型と $\alpha'$ 型) がアニオン層をはさんで交互に積層している点である (図4(a) と (b)). 我々が解明した単斜晶相の構造から見ていく。<sup>26)</sup> ドナー・アニオン・溶媒の組成比は2:1:1であり, 乱れはない, 大きな単位格子が特徴であり ( $c$ 軸の長さはおよそ75 Å), 単位格子あたりドナー層とアニオン層がそれぞれ4枚含まれている。 $\kappa$ 層において結晶学的に独立なドナー分子は2つ (AとB) であり, A同士もしくはB同士で2量体を形成している (図4(c)). また,  $\kappa$ 層を構成するドナー分子が傾いてシートを形成しているが, その傾き方は一層ごとに反転している。

$\alpha'$ 層では結晶学的に独立な分子はCとDの2分子である (図4(d)). ドナー分子は分子長軸が交互に $31^\circ$ 程度ねじれながら $a$ 軸方向にスタックしてカラムを形成している。アニオン層において結晶学的に独立な分子はアニオンが2つと極性溶媒分子TCEが2つである。TCEに乱れはないため分極には秩序があり, TCEの分極がランダムになっている $\kappa_L$ 相とは対照的である。

有機超伝導体ではドナー分子とアニオン分子の組成比からドナー分子の形式電荷は一義的に決まる。例えばドナー・アニオン比が2:1組成で結晶学的に独立なドナー分子が1つであれば, すべてのドナー分子は+0.5価となる。しかし独立な分子が2つの場合には一義的には決まらない。このような場合にはドナー分子の結合距離から価数を見積もる方法が知られている。<sup>27)</sup> この方法を用いると $\kappa$ 層ではAとB双方とも+0.4(1)程度の値が得られる。 $\alpha'$ 層においてはCが+0.97(9)でDが+0.18(10)となり, ホールが多い分子と少ない分子を黒と白で塗り分けると, チェッカーボード型の電荷秩序が形成されていることが分かる (図4(d)). 単斜晶相の空間群 $P2_1/n$ は対称心のある空間群であるが,  $\alpha'$ 層は対称心のない位置にある。したがって誘電分極 $P$ が生じてよいことになる。超伝導を担う $\kappa$ 層が電荷秩序をもつ $\alpha'$ 層に挟まれている構造は (アニオン層を間に挟むが) Ginzburg超伝導を彷彿させる構造である。 $\kappa$ 層は極めて大きな絶縁層 (アニオン層・ $\alpha'$ 層・アニオン層) によって隔てられている。絶縁層の厚みはおよそ25 Åにも達し, 酸化物高温超伝導体や鉄系超伝導体よりも大きな層間距離である。したがって, 2次元性の強い層状超伝導体である。

三斜晶相においても, ドナー分子が $\kappa$ 層と $\alpha'$ 層を形成し, 溶媒分子を含んだアニオン層を挟んで交互に積層した構造は単斜晶相と同じである (図4(b)). 単位格子は2枚のドナー層を含み,  $\kappa$ 層を構成する分子の傾き方はすべて同じである。 $\kappa$ 層において独立な分子は2分子 (AとB) であり, 単斜晶相と同様2種類の2量体が存在する。空間群は $P\bar{1}$ であり,  $\alpha'$ 層ではすべてのドナー分子が対称心上に存在し

ているため独立な分子は $4 \times 0.5$ 分子 (C, D, E, F) である (図4(e)). 結合距離から電荷を見積もると,  $\alpha'$ 層ではストライプ型の電荷秩序が形成されていることが分かる。単斜晶相の $\alpha'$ 層は対称心のない電荷秩序層であるが, 三斜晶相の $\alpha'$ 層には対称心がある。

我々はこれら新型構造の名称として, ドナーシート2枚 ( $\kappa$ 層と $\alpha'$ 層) を1単位と考えて三斜晶相を $\kappa\alpha'_1$ 型とし, その2単位構造をもつ単斜晶相を $\kappa\alpha'_2$ 型とした。これら2物質の結晶学的に独立な原子数は154 (水素原子を除くと116) であり, 最も複雑な構造の超伝導体のひとつであると思われる。図4(f)に示すように, 超伝導転移温度は $\kappa\alpha'_1$ 相と $\kappa\alpha'_2$ 相とで明らかに異なり,  $\kappa\alpha'_1$ 相が $T_c = 9.5$  Kで $\kappa\alpha'_2$ 相では11.0 Kである。これらはSchlueterらの最初の報告で2段階転移が見られた温度とよく一致している。つまり, 彼らは2種類の高 $T_c$ 相を一緒に測定していたため, 2段階転移が観測されたと考えられる。3種類の多形における構造の特徴を表1にまとめておく。

$\kappa\alpha'_2$ 相では結晶構造解析から $\kappa$ 層分子の平均電荷が+0.5を若干下回る可能性が示された。量子振動が観測されれば伝導層のバンド充填率は極めて精度よく決まる。我々は物質・材料研究機構の強磁場施設を利用してde Haas-van Alphen (dHvA) 効果を測定した (図5).<sup>28)</sup> dHvA振動で

表1 3種類の(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Ag(CF<sub>3</sub>)<sub>4</sub>(TCE)における構造の特徴。

	$\kappa_L$ 相	$\kappa\alpha'_1$ 相	$\kappa\alpha'_2$ 相
$T_c$ (K)	2.6	9.5	11.0
晶系	直方晶	三斜晶	単斜晶
溶媒分子の乱れ	あり	なし	なし
独立な2量体 ( $\kappa$ 層)	1	2	2
電荷秩序層 ( $\alpha'$ 層)	なし	あり	あり
電荷秩序パターン	—	ストライプ	チェッカーボード
$\alpha'$ 層の対称心	—	あり	なし

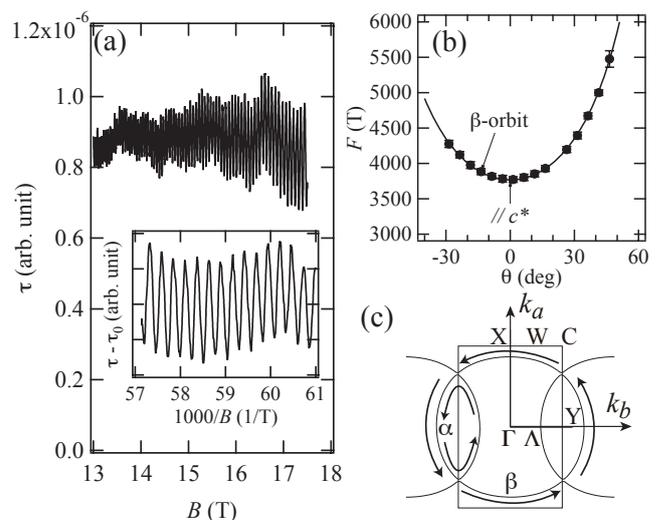


図5 (a)  $\kappa\alpha'_2$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Ag(CF<sub>3</sub>)<sub>4</sub>(TCE)のdHvA振動 ( $\theta = -8.6^\circ$ ). 挿入図は振動成分を磁場の逆数に対して示したものを。(b) 高速フーリエ変換して得られたdHvA振動数の角度依存性。シリンダー状フェルミ面を反映して $1/\cos\theta$ で振る舞う (実線)。(c) 1分子の平均電荷を+0.5価として計算したフェルミ面。

観測された $\beta$ 軌道の断面積は第1ブリルアンゾーンの101(1)%であることから、1分子あたりの平均電荷は $\rho_{av} = +0.505(5)$ と決まる。この結果 $\kappa$ 層は他の $\kappa$ 型超伝導体と同様に実効的に1/2充填率バンドをもつといえる。このことから $\alpha'$ 層は1/4充填率ホールバンドであることが一義的に決まり、電荷秩序が形成されることと矛盾しない。

#### 4. おわりに

ドナー分子・アニオン分子・極性溶媒分子の3成分からなる層状有機超伝導体の構造と電子状態に関して紹介させていただいた。銅酸化物高温超伝導体のブロック層に相当するアニオン絶縁層に含まれる極性溶媒分子の配列が伝導層のバンド充填率に影響を及ぼしたり、ブロック層に電荷秩序層を含むと $T_c$ が上昇していることは有機超伝導体におけるブロック層の重要性を示唆している。今後の研究でこの特異なブロック層をもつ構造と超伝導との関係を解明していきたい。

本研究は論文の共著者の方々との共同研究であり、そのすべての方々に感謝致します。また、高エネルギー加速器研究機構の放射光施設(課題番号2008G546, 2010G529)、物質・材料研究機構と米国タラハッシーの国立強磁場研究所の強磁場施設の共同利用システムのおかげで本研究を推進できました。最後に、タラハッシーで一緒に研究を行った故J. S. Brooks教授の思い出にこの小文を捧げたいと思います。

#### 参考文献

- 1) T. Ishiguro, *et al.*: *Organic Superconductors*, 2nd ed. (Springer, Berlin, 1998).
- 2) N. Toyota, *et al.*: *Low-Dimensional Molecular Metals* (Springer, Berlin, 2007).
- 3) 有機伝導体のドナー分子の配列パターン分類に関する総説としてT. Mori, *et al.*: *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **71** (1998) 2509; *ibid.* **72** (1999) 179; *ibid.* **72** (1999) 2011.
- 4) V. L. Ginzburg: *Contemp. Phys.* **9** (1968) 355.
- 5) T. Shirahata, *et al.*: *Chem. Commun.* (2006) 1592.
- 6) T. Kawamoto, *et al.*: *Phys. Rev. B* **76** (2007) 134517.
- 7) R. H. McKenzie, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **81** (1998) 4492.
- 8) P. Moses, *et al.*: *Phys. Rev. B* **60** (1999) 7998.
- 9) N. Hanasaki, *et al.*: *Phys. Rev. B* **57** (1998) 1336.
- 10) J. Singleton, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002) 037001.

- 11) J. Wosnitzer, *et al.*: *Phys. Rev. B* **65** (2002) 180506(R).
- 12) T. Osada, *et al.*: *J. Phys. Soc. Jpn.* **75** (2006) 051006.
- 13) T. Kawamoto, *et al.*: *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) 054706.
- 14) T. Kawamoto, *et al.*: *Phys. Rev. B* **85** (2012) 014504.
- 15) T. Kawamoto, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **109** (2012) 147005.
- 16) M. P. Kennett, *et al.*: *Phys. Rev. B* **78** (2008) 024506.
- 17) T. Kawamoto, *et al.*: *Phys. Rev. B* **83** (2011) 012505.
- 18) T. Kawamoto, *et al.*: *J. Phys. Soc. Jpn.* **83** (2014) 015002.
- 19) J. A. Schlueter, *et al.*: *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* (1994) 1599; *Physica C* **230** (1994) 378.
- 20) J. A. Schlueter, *et al.*: *Physica C* **233** (1994) 379.
- 21) J. A. Schlueter, *et al.*: *Adv. Mater.* **7** (1995) 634.
- 22) U. Geiser, *et al.*: *Acta Crystallogr., Sect. B* **51** (1995) 789.
- 23) J. A. Schlueter, *et al.*: *J. Am. Chem. Soc.* **132** (2010) 16308.
- 24) C. Rossel, *et al.*: *J. Appl. Phys.* **79** (1996) 8166.
- 25) E. Ohmichi, *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **73** (2002) 3022.
- 26) T. Kawamoto, *et al.*: *J. Phys. Soc. Jpn.* **81** (2012) 023705.
- 27) P. Guionneau, *et al.*: *Synth. Met.* **86** (1997) 1973.
- 28) T. Kawamoto, *et al.*: *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** (2013) 124704.

(2016年2月8日原稿受付)

### Organic Superconductors Including Polar Molecules in an Insulating Layer

Tadashi Kawamoto and Takehiko Mori

abstract: We report structural and electronic properties of molecular layered superconductors including polar molecules in an insulating layer,  $\kappa_{H-}(\text{DMEDO-TSeF})_2[\text{Au}(\text{CN})_4]$  (THF) and the third polymorph of the organic superconductor  $(\text{BEDT-TTF})_2\text{Ag}(\text{CF}_3)_4$  (TCE). For the first compound, the angular-dependent magnetoresistance shows incoherent interlayer transport. However, two closed Fermi surfaces are observed in quantum oscillation. This indicates that crystallographically independent layers have different charge densities, *i.e.* interlayer charge disproportionation, which is due to the electric dipole of THF. For the later compound, the crystal consists of alternating stacks of two types of donor sheets,  $\kappa$ - and  $\alpha'$ -types, and the unit cell includes four donor layers. This structure is similar to another high- $T_c$  phase, in which the unit cell contains two donor layers. The superconducting transition temperatures are approximately 11.0 and 9.5 K for the four-layered and two-layered phases, respectively. Superconductivity is attributed to the  $\kappa$ -type conducting layer, because the  $\alpha'$ -type layer is in a charge-ordered state. This is in agreement with the de Haas-van Alphen oscillation, which indicates that the  $\kappa$ -layer with an effective half-filled band is the conducting layer. In both superconductors, the superconducting layer is sandwiched by polar insulating layers. This reminds us the Ginzburg superconducting mechanism.

# 電子の電気双極子モーメント測定のための 相対論的量子化学理論の開発

阿部 穰里 (首都大学東京大学院理工学研究科 minoria@tmu.ac.jp)

ビッグバン理論によると宇宙誕生時には、高密度のエネルギー状態から粒子と反粒子が同数生成したと考えられている。しかしながら、現在の宇宙は粒子からなる物質のみでほぼ形成されており、どこかで粒子と反粒子の数が非対称になったと考えざるを得ない。粒子・反粒子数が非対称になるための必要条件として、荷電共役変換Cと空間反転Pを同時に行うCP変換に対する対称性の破れ(CPの破れ)が挙げられる。CP対称性破れは、小林-益川理論(標準理論)にも組み込まれており、 $K^0$ 中間子、 $B^0$ 中間子崩壊実験においても確認されている。しかしながら標準理論や既存の観測結果から推測されるCP対称性の破れの効果は非常に小さく、現宇宙の物質優勢のシナリオを定量的には説明できない。したがって標準理論とは異なるCPの破れを含む新しい理論や、その証拠となる物理量の観測に興味を持たれており、その一つの候補として素粒子の電気双極子モーメント(Electric Dipole Moment: EDM)の観測が挙げられる。

素粒子に非ゼロのEDMが存在すると仮定すると、EDMは粒子のスピン軸に沿って定義される(左図参照)。EDMがスピン軸に平行と仮定し、この状態に時間反転操作を行うと、スピンの向きは反転する。一方EDMは電荷×距離の次元を持つため、時間反転の影響を受けない。時間反転操作前後を比較すると、EDMの向きがスピン軸から測って真逆になるため、T反転操作で物理描像が変化している。つまりEDMを非ゼロの値で観測できれば、T対称性の

破れが観測されることになる。また、CPT定理を仮定すると、T反転はCP反転と等価であることから、EDMの観測はCP対称性破れの観測を示す。EDMの観測としては中性子、陽子、電子などの素粒子やそれらの複合粒子に対して幅広く試みられているが、核スピンゼロの常磁性原子や分子においては、電子に起因するEDMに絞って観測することができる。

ただし、直接1電子のEDMが測定できるのではなく、電子EDM( $d_e$ )と周囲の電場との相互作用エネルギーが観測量となる。また、この電場に相当する量(分子においては特に有効電場 $E_{\text{eff}}$ と呼ばれ、分子内の核や電子が作る電場に起因する)は、相対論的量子力学に基づく電子状態理論からのみ計算可能である。したがってこの研究は、“原子・分子の電子状態理論”、“原子分子分光”、および“素粒子理論”の3つの異なるフィールドの共同研究で成り立っている。

分子を対象とした実験は原子に比べて歴史が浅く、これまで報告された有効電場を求める理論研究は、多くの近似を含んでいた。そこで我々は、4成分ディラック法を基にした一体レベルで厳密な相対論法を用い、また、電子状態理論の金字塔とされる結合クラスター(Coupled Cluster: CC)法に基づいた有効電場計算プログラムを開発した。本手法をYbF分子に対して適用し、有効電場を23.1 GV/cmとして決定した。さらに、有効電場が大きいほど実験感度も向上するため、大きな有効電場を持つ分子を探して提言している。

## —Keywords—

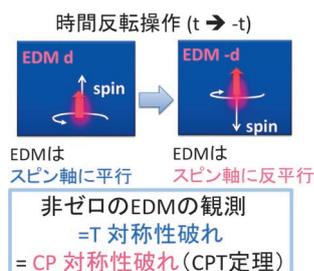
### CPT 定理:

C, P, Tを同時に変換すると、すべての物理描像は不変であるという定理。これまで受け入れられている物理法則(量子力学の法則やローレンツ不変性)ではすべてCPT定理が成り立っている。

### 結合クラスター法(CC法):

高精度電子相関理論の一種。ハートリー-フォック法などを基にして得られる単一スレーター行列式に対して、励起クラスター演算子を指数関数にした演算子を作用させ、より正確な波動関数を記述する手法。

1, 2電子励起クラスターのみを考慮する、Coupled Cluster Singles and Doubles (CCSD)法および、CCSD法に対してさらに摂動的に3電子励起も考慮するCCSD(T)法では、分子構造や分光学的定数の実験値を高い精度で再現することが知られている。ただし計算コストが高いため、原子数の少ない小分子への適用に限られる。本研究では、決定した波動関数から物性値の計算を行う必要があるため、CCSD(T)法ではなくCCSD法に基づく波動関数を採用している。



## 1. 電子 EDM 実験

EDM (Electric Dipole Moment) 測定 の 歴史 は、1950 年 に 報告 された ラムゼー (N. F. Ramsey) と パーセル (E. M. Purcell) の 論文 から 始まる。<sup>1)</sup> また 多く の EDM 測定 は、以 下 で 示す ラムゼー に よって 提案 された 実験 方法 に 基づいて 行われて いる。

EDM は スピン に 依存 した 量 である ため、系 に対して 電 場 と 磁 場 を 平行 に 印加 すれば、式 (1) の よう に ラムゼー 共 鳴 周 波 数 の 中 に 現れる ( $B$ : 外部 磁 場,  $\mu$ : 磁 気 モーメント,  $E$ : 電 場,  $d$ : EDM)。

$$h\nu_+ = \mu \cdot B + d \cdot E \quad (1)$$

また、電 場 と 磁 場 を 反 平行 に 印加 すると、その 効果 は 逆 向 き に 現れ

$$h\nu_- = \mu \cdot B - d \cdot E \quad (2)$$

の よう に、先 ほ ど と は 異 なる ラムゼー 共 鳴 周 波 数 が 得 ら れ る。そ こ で 二 つ の 共 鳴 周 波 数 の 差  $\Delta\nu$  を 求 め て、第 1 項 の ゼー マン 項 を キャンセル させ、EDM の 寄与 を 抽出 する。微 小 な 共 鳴 周 波 数 の 差 を 求 め る ため に、非 常 に 高 精 度 に ラムゼー 共 鳴 周 波 数 を 測定 する 必要 が 有る。こ れ ま で 報 告 さ れ て いる 観 測 で は、い ず れ も 実 験 に よる 測定 誤 差 の 方 が 測定 値 より も 大 き く、電 子 EDM ( $d_e$ ) の 確 定 値 は 得 ら れ て い ない。し か し な が ら 時 代 と と も に 実 験 精 度 は 向 上 し て お り、 $d_e$  の 上 限 値 は 引 き 下 げ ら れ て いる。2002 年 に は Berkeley グループ の レガ ン (B. C. Regan) ら に よって、Tl 原子 の 測定 から  $d_e$  の 上 限 値 が  $2.0 \times 10^{-27}$  e cm である と 報 告 さ れ た。<sup>2)</sup> (た だ し 1 e cm は SI 単 位 系 で  $1.60218 \times 10^{-21}$  C m である。) また 近 年 で は、分 子 を 用 いた 測定 で 上 限 値 が 更 新 さ れ て お り、YbF 分 子 で  $10.5 \times 10^{-28}$  e cm (2011 年、Imperial Collage London),<sup>3)</sup> ThO 分 子 で  $0.87 \times 10^{-28}$  e cm (2013 年、ACME)<sup>4)</sup> と し て 上 限 値 が 報 告 さ れ て いる。

標 準 理 論 で 予 言 さ れ て いる  $d_e$  は  $10^{-38}$  e cm より 小 さ い と さ れ て お り、今 の 実 験 精 度 が 数 桁 向 上 する 程 度 で は 観 測 する こ と は でき ない。し か し 図 1 に 示 す よう に、超 対 称 性 (super symmetry: SUSY) 理 論<sup>\*1</sup> など の 新 し い 理 論 の い く つ か は、現 在 の 測定 限 界 に 近 い 値 を 予 言 し て いる。<sup>5)</sup> も し こ れ ら の 新 し い 理 論 の い ず れ か が 正 し い の で あ れ ば、あ と 数

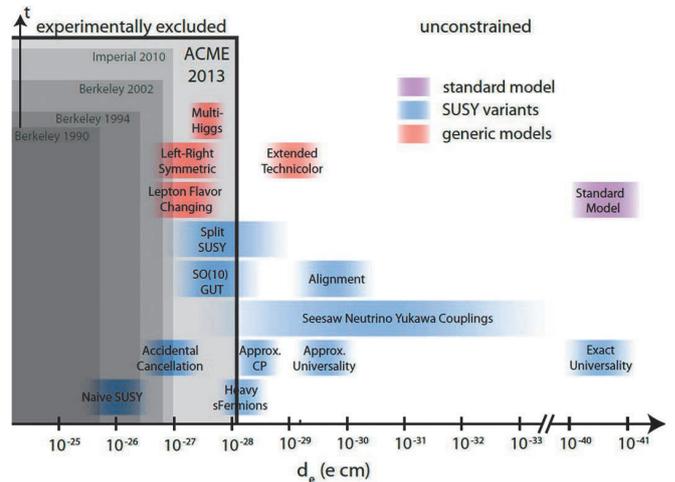


図 1 電 子 EDM ( $d_e$ ) の 様 々 な 新 し い モデル に よる 予 測 値 と 最 近 の 実 験 で 排除 され た  $d_e$  の 領 域。出 典：E. Petrik: *Science in the News* (Harvard University) <http://sitn.hms.harvard.edu/flash/2014/looking-closer-the-search-for-the-electron-electric-dipole-moment/>

桁 実 験 精 度 を 向 上 する こ と で、EDM の 確 定 値 が 観 測 さ れ る の で は ない か と 期 待 さ れ て いる。そ の ため 現 在 も、YbF、ThO 分 子 と も に、よ り 高 精 度 な 測定 に 向 けて 実 験 が 進 め ら れ て いる。さ ら に 他 に も HfH<sup>+</sup> 分 子 (JILA),<sup>6)</sup> FrSr 分 子 (東 大、青 木),<sup>7)</sup> BiO 分 子 (東 工 大、金 森) など で 電 子 EDM 測定 が 検 討 さ れ て いる。また 放 射 性 原子 である Fr 原子 に対して 東 北 大、酒 見 グループ で 実 験 が 行 わ れ て いる。<sup>8)</sup>

原子 と 分 子 の 測定 上 の 大 き な 違 い と し て、式 (1) に お ける 電 場  $E$  が 極 性 2 原子 分 子 に お いて 非 常 に 大 き い こ と が 挙げ ら れ る。原子 の 場合、式 (1) 中 の  $E$  は、外部 電 場  $E_{\text{ext}}$  と 理 論 計 算 より 求 ま る 原子 固 有 の 増 幅 因 子  $R$  の 積 で 表 さ れ る。一 方、分 子 の 場合 は、内部 電 場  $E_{\text{int}}$  に 起 因 する 有 効 電 場  $E_{\text{eff}}$  と し て 表 さ れ る。実 験 室 で 印 加 可 能 な 外部 電 場  $E_{\text{ext}}$  は、10-100 kV/cm オ ー ダー であり、増 幅 因 子  $R$  も Tl 原子 で  $-500$  程 度 と な っ て いる。<sup>9)</sup> 一 方、分 子 の 場合、YbF の 有 効 電 場  $E_{\text{eff}}$  が 23.1 GV/cm、ハロ ゲン 化 水 銀 (HgX) に お いて は 約 100 GV/cm 程 度 に な る ため、原子 の 時 の 電 場 より も 数 桁 大 き く な る。 $d_e$  と 相 互 作用 する 電 場 が 大 き け れ ば、 $\Delta\nu$  も 大 き く な る の で、原子 より も 分 子 を 用 いた 場合、測定 感 度 が 大 き く 向 上 さ れ る と 期 待 でき る。

## 2. 理 論

### 2.1 EDM 演 算 子

中 性 の 原子 や 分 子 に 外部 電 場 を 作用 し、荷 電 粒 子 の EDM と の 相 互 作用 を 測 ろ う と す る と、外部 電 場 の 効果 を 打ち 消 す よう に 粒 子 が 動 いて し ま い、結 局 EDM と の 相 互 作用 エネルギ ー は 測定 でき ない と い う こ と が、非 相 対 論 の 枠 組 み で 証明 さ れ て いる (シ ュ ッ プ の 定 理)。<sup>10)</sup> し か し な が ら、こ れ を 相 対 論 的 量 子 力 学 の 枠 組 み で 考 え 直 す と、この 打ち 消 し あ い は お こ ら ず に、相 互 作用 エネルギ ー は 非 ゼ ロ で 定義 さ れ る。し た が っ て EDM の 相 互 作用 エネルギ ー を 記 述 する に は、相 対 論 的 量 子 力 学 の 取 り 扱 い が 不 可 欠 と な る。

\*1 超 対 称 性 が 成 り 立 つ 理 論 で は、す べ て の フェルミ 粒 子 (ボーズ 粒 子) の それ ぞ れ に、対 応 する ボーズ 粒 子 (フェルミ 粒 子) が 存在 する。た だ し 現 在 確 認 さ れ て いる 素 粒 子 に対して こ れ ら 対 と な る べき 粒 子 (超 対 称 粒 子) は 標 準 理 論 の エネルギ ー 領 域 で ひ と つ も 見 つ か っ て い ない こ と から、この 低 エネルギ ー 領 域 で は、同 質 量 の フェルミ-ボーズ 粒 子 対、と い う よう な 文 字 通 り の 超 対 称 性 が 成 り 立 っ て いる わ け で は な さ ぞ う である。し か し、電 子 や クォーク など 標 準 理 論 の 粒 子 が 関 わ る 過 程 の 高 次 の ループ に 超 対 称 粒 子 が 出 現 する、と い う こ と は 考 え ら れ る。こ う し て 超 対 称 性 理 論 で は、仮 想 粒 子 と し て 寄 与 でき る 粒 子 の 種 類 が 標 準 理 論 の 場合 に 比 べ て 格 段 に 増 え、こ れ ら 仮 想 粒 子 の 放 出・吸 収 の 過 程 で CP 対 称 性 を 破 る 位 相 が 相 殺 さ れ ない 結果、大 き な EDM が フェルミ 粒 子 に 形 成 さ れ る こ と が 可 能 である。一 方 標 準 模 型 で は、仮 想 粒 子 の 種 類 は 限 ら れ る ため、た だ 一 つ の CP を 破 る 位 相 (小 林-益 川 の 位 相) し か 現 れ ない。こ の 効果 は 低 次 過 程 で は 放 出 と 再 吸 収 で 相 殺 さ れ る ため、EDM は 非 常 に 小 さ く な る。

電子 EDM 演算子は、相対論的に共変な形式で以下のよう  
に定義される。

$$\hat{h}_{\text{eEDM}} = -d_e \beta \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E} = -d_e \begin{pmatrix} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E} & 0 \\ 0 & -\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E} \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで  $\boldsymbol{\sigma}$  は  $2 \times 2$  のスピン行列、 $\mathbf{E}$  は電場ベクトル、 $\beta$  は Dirac 行列、 $d_e$  が未知数である 1 電子 EDM の大きさである。以降、分子に限定して話を進めると、分子における電場  $\mathbf{E}$  は、式(4)に示す原子内の原子核と電子が形成する電場の和 (= 内部電場  $\mathbf{E}_{\text{int}}$ ) に相当する。

$$\mathbf{E}_{\text{int}} = \mathbf{E}_{\text{nuc}} + \mathbf{E}_{\text{elec}} \quad (4)$$

## 2.2 有効電場 $E_{\text{eff}}$

分子の場合、観測量である相互作用エネルギー  $\Delta E$  は、非摂動の電子波動関数  $\Psi$  に対する、 $N_e$  個の多電子 EDM ハミルトニアン  $\hat{H}_{\text{eEDM}}$  の一次摂動として記述できる。<sup>\*2</sup>

$$\begin{aligned} \Delta E &= \langle \Psi | \hat{H}_{\text{eEDM}} | \Psi \rangle \\ &= -d_e \sum_i^{N_e} \langle \Psi | \beta \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{E}_{\text{int}} | \Psi \rangle \equiv d_e E_{\text{eff}} \end{aligned} \quad (5)$$

相互作用エネルギーから  $d_e$  を除いた値は有効電場  $E_{\text{eff}}$  として定義され、理論計算でしか求められない。波動関数  $\Psi$  は相対論的な 4 成分波動関数であり、多くの場合、式(6)のような二体演算子をクーロン相互作用で近似した多電子ディラック-クーロン (DC) ハミルトニアンの解が用いられる。

$$\hat{H}_{\text{DC}} = \sum_i^{N_e} \left[ c \alpha p_i + \beta c^2 - \sum_A^{N_A} \frac{Z_A}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{R}_A|} \right] + \sum_{i>j}^{N_e} \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \quad (6)$$

ここで  $c$  は光速、 $p$  は運動量演算子、 $\alpha$  と  $\beta$  は Dirac 行列、 $\mathbf{r}$  と  $\mathbf{R}$  は電子と核の位置座標、 $Z$  は核電荷を表している。

また内部電場を含む式(5)のハミルトニアンは、特に電子の電場項が電子の確率密度にも依存するため、実際の計算は複雑である。しかしながら以下のような式変形を行うと

$$\begin{aligned} & -d_e \sum_i^{N_e} \beta \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{E}_{\text{int}} \\ &= \left[ -d_e \sum_i^{N_e} \beta \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \nabla_i, \hat{H}_{\text{DC}} \right] + 2ic d_e \sum_i^{N_e} \beta \gamma_5 p_i^2 \end{aligned} \quad (7)^{*3}$$

第一項の期待値はゼロになるため、有効電場は運動量演算子の 2 乗と Dirac 行列を含む一体の有効演算子の期待値として簡単な形式で再定義される。<sup>11)</sup>

$$E_{\text{eff}} = 2ic \sum_i^{N_e} \langle \Psi | \beta \gamma_5 p_i^2 | \Psi \rangle \quad (8)$$

<sup>\*2</sup> より厳密には振動・回転状態も考慮するべきだが、計算コストがかかるため、平衡核間距離での電子波動関数を用いた計算が今のところ一般的である。また原子では、外部電場と EDM ハミルトニアンが加わった 2 次摂動エネルギーとして、相互作用エネルギーを考える必要がある。

<sup>\*3</sup> ちなみに非相対論の枠組みでは式(7)は

$$-d_e \sum_i^{N_e} \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{E}_{\text{int}} = \left[ -d_e \sum_i^{N_e} \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \nabla_i, \hat{H}_{\text{NR}} \right]$$

となり、本文同様  $\hat{H}_{\text{NR}}$  の解で期待値を取るとゼロになる。したがって非相対論においては有効電場の一次摂動エネルギーはゼロになってしまう。

## 2.3 波動関数理論 (結合クラスター法)

多電子 DC 演算子の厳密な波動関数を求めることは原理的に不可能なので、実際にはより厳密解に近い近似解を求める必要がある。特に孤立分子に対する電子状態理論は理論化学分野で盛んに研究が進められており、独立粒子近似を超えた理論を化学では電子相関理論と呼ぶ。

高精度電子相関理論として確立されている方法に結合クラスター (CC) 法がある。この方法では、励起演算子で形成されるクラスター演算子  $\hat{T}$

$$\begin{aligned} \hat{T} &= \hat{T}_1 + \hat{T}_2 + \dots + \hat{T}_{N_e} \\ &= \sum_{i,a} t_i^a \hat{a}_i \hat{a}_a^\dagger + \sum_{i>j, a>b} t_{ij}^{ab} \hat{a}_i \hat{a}_j \hat{a}_a^\dagger \hat{a}_b^\dagger + \dots \end{aligned} \quad (9)$$

に対する指数関数演算子を、参照関数  $\Phi$  に作用させることで、与えられた基底関数系での厳密解を表現する。

$$|\psi_{\text{CC}}\rangle = \exp(\hat{T}) |\Phi\rangle \quad (10)$$

通常は参照関数としてディラック-フォック (Dirac-Fock: DF) 波動関数などの単一スレーター行列式を用いる。また式(9)の  $\hat{a}_a^\dagger$ ,  $\hat{a}_i$  は生成、消滅演算子を表し、 $i, j$  は参照関数における占有軌道、 $a, b$  は非占有軌道を表すラベル、 $t_i^a$  等はクラスター振幅と呼ばれる最適化変数である。

$\hat{T}$  に含まれる励起演算子は多電子励起を含めるほどに計算コストが増大し、一般の分子では簡単に計算不能となる。そのため計算コストと精度のバランスから、1, 2 電子励起で展開を打ち切る CCSD (Coupled Cluster Singles and Doubles) 法や CCSD 法に 3 電子励起の効果を摂動的に取り込んだ、CCSD (T) 法が慣用的に用いられる。

## 3. 計算方法・過去の研究例との比較

2 章の理論を踏まえて、我々の有効電場の計算方法をまとめると、次の 3 つのステップに分割できる。(i): 式(6)の DC ハミルトニアンに対して、DF 波動関数を求め、参照関数とする。(ii): CCSD 法で  $t_i^a$ ,  $t_{ij}^{ab}$  クラスター振幅を決定し  $\psi_{\text{CCSD}}$  を求める。(iii): 得られた  $\psi_{\text{CCSD}}$  で式(8)の有効電場期待値を計算する。本研究では、(i) のステップにおいて UTChem プログラムを、(ii) のステップにおいて DIRAC08 プログラムを用い、(iii) については独自のプログラムを開発した。<sup>12)</sup>

分子の有効電場を求める過去の研究は 1990 年代から報告されている。しかしその多くが、4 成分ディラック法ではなく相対論的な近似を加えた手法に基づいているか、4 成分法ではあるものの電子相関の考慮が不十分な方法となっている。有効電場は直接的には実験で求められないため、理論計算値を信じるしかなく、より精度の高い方法論を用いて計算することが望ましい。またこれまで、実験の相互作用エネルギーの確定値が得られていなかったため、有効電場計算の精度よりも実験の精度の向上が重要視されてきた。しかしもし、近い将来に実験で確定値の観測に成功した場合、今度は有効電場の理論値の精度が重要となっ

てくる。

4成分法に基づく高精度な電子相関理論計算が可能になったのは比較的最近のことであり、我々の行っているCC法以外では、一般化された活性空間配置間相互作用法(GASCI法)を用いた研究をフレイグ、ナヤック(T. Fleig, M. K. Nayak)が報告している。<sup>13)</sup> どちらの理論が高い精度を与えるかは、厳密には細かな計算条件に依存してしまうが、GASCI法はThO分子などで重要となる電子励起状態を取り扱えるメリットがある。しかし計算コストが高すぎるために、電子相関を考慮する際の軌道の数CCSD法よりは少なくなる。一方、CCSD法は、基底状態で、かつ一つの電子配置が主配置となる系においては、GASCI法よりもより効率的に電子相関を取り込むことが可能となる。

## 4. 計算結果

### 4.1 YbF分子

YbFはEDM測定においてもっとも長い歴史を持つ分子であり、有効電場計算のベンチマーク分子となっている。そこでYbF分子の有効電場を、DF法とCCSD法で決定し表1にまとめた。<sup>12)</sup> 基底関数には非常に高精度な結果を与えることが知られている非縮約型Dyall-QZ基底を用いている。<sup>14)</sup> 一般に量子化学分野でCCSD計算をする際には、内殻電子からの励起配置を除外する凍結コア近似を行う。しかしながら有効電場は、重原子核近傍の電子状態に影響を受けるので、内殻電子を励起させた電子配置も重要になりうる。そこで電子相関に含める電子数を49電子、69電子、79電子と変化させて、内殻励起配置の影響を調べた。さらに有効電場は対応する実験値が存在しないため、得られた計算値の精度を直接は議論できない。そこで実験値が存在する類似の物性値として、分子の電気双極子モーメントPDMと、核スピンと電子スピンの相互作用定数である超微細構造定数を求めた。超微細構造定数については、ここでは分子軸に平行な成分のみを求めている。

まず、DF法でのPDMと超微細構造定数 $A_{||}$ を実験値と比較すると、どちらもよい一致を示していない。これはどちらの物性に対しても、独立粒子近似では精度が不十分であることを示している。次にCCSD法の結果と比較すると、電子相関を考慮することで改善がみられている。特にCCSD法(79電子)では、凍結コア近似を用いずに79個あるYbF分子中のすべての電子に対して、電子励起配置を考慮した計算を行っているが、実験値に対するPDMと $A_{||}$ の誤差は、それぞれ8%と7%となっており、DFよりもよい一致を示している。したがってCCSD法(79電子)による有効電場の値23.1 GV/cmに関しても10%以内の誤差で計算値が求められていると考えられる。またYbF分子の実験論文<sup>3)</sup>で $d_e$ の上限値として報告されている値 $10.5 \times 10^{-28} e \text{ cm}$ は、Kozlovらによる半経験的方法で求めた26 GV/cmの有効電場を用いている。<sup>15)</sup> これをより精度の高い我々の有効電場の値で計算し直すと、 $d_e$ の上限値は

表1 YbF分子における有効電場とその他の物性値。

計算方法	有効電場 $E_{\text{eff}}$ (GV/cm)	分子の電気双極子 モーメント PDM (Debye)	超微細構造定数 $A_{  }$ (MHz)
DF	18.2	3.21	6,239
CCSD (49 電子)	22.7	3.59	—
CCSD (69 電子)	23.1	3.60	—
CCSD (79 電子)	23.1	3.60	7,913
実験値	—	3.91 (4)	7,424 (81)

表2 HgX分子における有効電場 (GV/cm)。

計算方法	HgF	HgCl	HgBr	HgI
DF	104.3	103.6	97.9	96.9
CCSD	115.4	113.6	109.3	109.3

$11.8 \times 10^{-28} e \text{ cm}$ に修正される。

### 4.2 HgX分子 (X=F, Cl, Br, I)

今まで測定対象とされていない分子に関しても、より大きな有効電場を持つ分子が存在しないか検討するために、ハロゲン化水銀分子の計算を行った。表2に示しているのは、非縮約Dyall-DZ基底を用いたDF法および凍結コア近似を用いないCCSD法で求めた有効電場の値である。<sup>16)</sup> どのハロゲンにおいてもHgX分子では、YbF分子に比べて非常に大きな有効電場を示すことが明らかになった。これらの値は、ThO分子の計算値75.6 GV/cm<sup>13)</sup>を凌駕し、これまで報告されている分子の中で最大となっている。先に述べたように、有効電場が大きければ相互作用エネルギーも大きくなるため、観測がきわめて有利となる。

現在最小の上限値を観測しているThO分子は、電子励起状態( $^3\Delta$ )を用いた測定であり、ラムゼー共鳴を測定する際の磁場との相互作用時間は、励起状態の寿命により制限される。一方HgX分子であれば、基底状態ですでに大きな有効電場が得られており、寿命の問題を気にしなくてよい。またHg原子においては、レーザー冷却による磁気光学トラップに成功しており、Br原子のレーザー冷却に成功すれば、これらの原子から光会合を用いて分子を作成すれば、超低温冷却分子として高感度に相互作用エネルギーが測定可能である。

さらにHgX分子は極性が強く分子内の電気双極子モーメントPDMも比較的大きい。実は分子を用いた測定では、分子を配向させて分子軸の正・負方向に磁場を印加させる必要がある。したがって電子EDMと相互作用させるためではなく、分子を整列させるために外部電場が必要である。小さな外部電場で分子が配向できる方が望ましく、そのためには小さい回転定数で大きなPDMを持つ分子が有利である。その点においてはHgBr, HgClがよい候補となっている。以上の観点から、HgX分子は今後のEDM測定において極めて有力な候補であるといえる。<sup>16)</sup>

## 5. まとめ

本稿では近年注目が高まっている、分子中の電子EDM

測定について、素粒子理論的背景、実験の測定原理、理論化学による有効電場の計算方法や最新の計算結果について簡単に紹介した。また、本稿では YbF や HgX 分子の有効電場計算の結果を紹介するとどまったが、“なぜ”水銀が特異的に大きな有効電場を示すのかという理由の解明については、現在学術論文を執筆中であり、近い将来に発表できる予定である。さらに励起状態の有効電場が計算できる新たな理論開発も現在進行中であり、実験のみならず、理論計算分野においても EDM 研究が大きく進展できるよう日々邁進している。

本研究は、共同研究者で親友のゴパクマル (Gopakumar) 博士とともに、長く地道な議論を重ねてプログラム開発を行ったものである。理論に関しては原子 EDM の専門家である現東工大のダス (Das) 教授に大変丁寧に教えていただいた。HgX 分子の実験的なアイデアは共著者のトロント大ヴァータ (Vutha) 博士によるものである。プラサンナ (Prasanna) 氏、砂賀彩光氏、筒井隆史氏は本研究の応用計算や理論開発に精力的に取り組んでいる若き精鋭である。波田雅彦教授は同じ研究室に所属しており、開発までの長い期間、多くの議論をしていただいた。これらの方々をはじめとする共同研究者の皆様、および学会等でいつも議論をしていただいている皆様に深い感謝を示したい。さらに本稿の推敲に対してお忙しい中コメントをしていただいた東工大の旭耕一郎教授、東大の青木貴稔博士、日本物理学会誌への執筆をご紹介いただいた田沼肇教授にも厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) E. M. Purcell and N. F. Ramsey: R. Phys. Rev. **78** (1950) 807.
- 2) B. C. Regan, E. D. Commins, C. J. Schmidt and D. DeMille: Phys. Rev. Lett. **88** (2002) 071805.
- 3) J. J. Hudson, D. M. Kara, I. J. Smallman, B. E. Sauer, M. R. Tarbutt and E. A. Hinds: Nature **473** (2011) 493.
- 4) The ACME Collaboration; J. Baron, *et al.*: Science **343** (2014) 269.
- 5) N. Fortson, P. Sandars and S. Barr: Physics Today **56**(6) (2003) 33.
- 6) [http://jila.colorado.edu/bec/CornellGroup/edm\\_ion\\_trap/](http://jila.colorado.edu/bec/CornellGroup/edm_ion_trap/)

- 7) T. Aoki, *et al.* Proceedings of 5<sup>th</sup> International Workshop in Fundamental Physics Using Atoms 2011, ed. N. Sasao (Okayama, 2011), pp. 118-120.
- 8) 酒見泰寛: 原子核研究 **52** (2007) 46.
- 9) H. S. Nataraj, B. K. Sahoo, B. P. Das and D. Mukherjee: Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 200403.
- 10) L. I. Schiff: Phys. Rev. **132** (1963) 2194.
- 11) B. P. Das: in *Aspects of Many-Body Effects in Molecules and Extended Systems*, ed. by D. Mukherjee (Springer, Berlin, 1989) p. 411.
- 12) M. Abe, G. Gopakumar, M. Hada, B. P. Das, H. Tatewaki and D. Mukherjee: Phys. Rev. A **90** (2014) 022501.
- 13) T. Fleig and M. K. Nayak: J. Mol. Spect. **300** (2014) 16.
- 14) A. S. P. Gomes, K. G. Dyall and L. Visscher: Theor. Chem. Acc. **127** (2010) 369.
- 15) M. G. Kozlov: J. Phys. B **30** (1997) L607.
- 16) V. S. Prasanna, A. C. Vutha, M. Abe and B. P. Das: Phys. Rev. Lett. **114** (2015) 183001.

#### 非会員著者の紹介

阿部穰里氏: 首都大学東京理工学研究科分子物質化学専攻助教。専門の相対論的量子化学を様々なサイエンスに応用することを喜びとし、物理や地学分野にアプローチ中。

(2016年1月7日原稿受付)

#### Development of a Relativistic Quantum Chemical Method for Detection of Electron's Electric Dipole Moment

Minori Abe

abstract: Observation of the electric dipole moment (EDM) of an elementary particle is attractive as a probe of CP violation, a necessary condition to explain matter-antimatter asymmetry in universe. In particular, the precision of electron EDM (eEDM) measurements in *molecules* has been drastically improved nowadays. For the eEDM detection, collaborations of particle physics, atomic molecular optics (AMO), and relativistic quantum chemistry is necessary. This article reviews the basic background of EDM in particle physics, experimental strategy, and relativistic theoretical chemistry to calculate effective electric field ( $E_{\text{eff}}$ ), a requisite to extract the value of eEDM from an experimental observable. We recently developed a program to calculate  $E_{\text{eff}}$  accurately and in this article, we discuss our calculated values of  $E_{\text{eff}}$  in YbF and HgX (X: halogen) molecules. HgX are found to be promising candidates of new eEDM experiment because of its large  $E_{\text{eff}}$ .

## 第71回年次大会の仙台開催奮戦記

須藤 彰三\* 〈東北大学大学院理学研究科 suto@surface.phys.tohoku.ac.jp〉

第71回年次大会を、2016年3月19日から22日の日程で仙台・東北学院大学泉キャンパスを会場として開催しました。今後に役立てられればと思い、実行委員長の目に見えてきたこと、準備から開催までを振り返ってみました。また、舞台裏を見ることで、皆さんの学会に参加する意識も変化するかもしれません。意外なことが多く起きました。参加した皆さんからは、「会場の配置がコンパクトで、移動しやすく講演を聞きやすかった」、「講演会場が広がった」、そして「体育館の1フロアで、ポスター発表、企業展示、設立70周年・創立140周年記念展示があり、参加しやすかった」等の好意的な感想が聞こえてきました。一方、「宿が取りにくかった」、「会場が遠かった」、「食堂が割高だった」等の指摘も聞かれました。

始まりは、4年前、2012年6月のメールでした。事務局担当者から仙台開催を打診されたことに始まります。春・秋の大会での講演が、大学院生の教育にとっても重要であること、私自身、学会の講演・交流を通して研究・教育活動を発展させてきたことが脳裏をよぎりました。これは引き受けないといけないと判断しました。その判断の背後には、2003年の第58回年次大会を東北大学と東北学院大学の共催で開催した経験があり、比較的容易に開催できるのではないかという見通しがあったからです。加えて、2016年春は東日本大震災後5年目を迎えることとなります。皆さんに復興の様子を見ていただき、周りの方々に報告して欲しいと思いました。

“思い”と“現実”は、常に相反するもののようです。早速、東北大学の1・2年生約5,000名が講義を受ける川内北キャンパスで使える部屋数を調べてみました。驚きです。全く足りないことに気づきました。物理学会の年次大会は延べ6,000名、1日当たり2,000名の参加をめどに設計しています。悠に間に合いそうなのですが…。不思議に思って調べてみると、2009年に大規模改修があり、100名程度の中教室の多くが49名定員の小教室に改修されていました。小人数教育の流れです。急いで、東北学院大学、宮城教育大学とも連絡を取り、開催可能性の検討を始めました。いくつかの可能性の中で、過去に他学会の開催実績がある、東北学院大学教養学部泉キャンパスで開催する方向で調整を図ることにしました。

2014年1月、中心となって計画した星善元（東北学院大工）、坂本泰伸（東北学院大教養）、村上弘志（東北学院大

教養）、それに私の4名で集まり実施計画を打ち合わせました。星先生は前回の仙台大会での副実行委員長、村上先生は2009年第64回年次大会（立教大学）の実行委員の経験があり、とても頼もしく感じました。これ以後、この3名の先生方には、東北学院大学本部・事務局と開催日程、使用する部屋の予約、使用料の交渉、東北学院大学から実行委員の依頼等、大会運営のほとんどをお願いすることになります。実行委員会には、宮城教育大、東北大多元研、東北大金研からも参加をお願いしました。物理学会東北支部活性化のためにも、この機会に、できるだけ仙台の物理ネットワークを広げておきたかったのです。

そうこうするうちに、事務局から「年次大会・（秋季）大会等準備マニュアル」も送られてきて、後は順調に進むかと思われました。先ず決めなければならないのは、開催日程です。東北学院大学の学事歴と合わせて、大会設備の荷物搬入は3月17日（木）午後、会場設定は18日（金）、会期は3月19日（土）から22日（火）に決定しました。併せて、通常3日目に設定されている総合講演を2日目に実施することにしました。20日（日）午前中は、礼拝のため大学に入構できないからです。

次は、宿の手配をお願いする旅行業者の選定です。事務局の担当者が業者に連絡し、2014年5月に泉キャンパスで選考面接を行いました。その少し前に、3月18日（金）から20日（日）まで、日本循環器学会が仙台で開催されることが分かりました。大会は10,000名規模で、物理学会6,000名の倍近くです。全く注意していませんでした。従来、仙台では東北学院大学と東北大学以外で6,000名を超える研究集会はできませんでしたが、仙台市が国内外の大きな会議誘致に積極的に動き出していました。仙台国際センター増築を計画し、2015年3月に16万5千人規模の国連防災会議、2016年3月に循環器学会、同5月にG7財務相会議と戦略を練っていました。

旅行業者選定の面接には、JTB、東武トップツアーズ、近畿日本ツーリストの3社から応募がありました。案の定、既に循環器学会と契約しているJTBは、仙台市内に十分な部屋数は確保できないと回答してきました。今回は、約1,000室を確保していただいた東武トップツアーズをお願いしました。この辺の経緯が情報として、「仙台には宿がない」と皆さんに流れたのではないかと思います。仙台市内には、ホテル客室が約15,000室、旅館の客室約2,700室があり、横浜市とほぼ同数の部屋があります。最終的に、物理学会のサイトを通して、1日当たり約1,400名の方々

\* 実行委員会委員長

の予約を受け、会期中に宿泊していただきました。一時予約が難しくなった時期もありますが、開催1か月前には空きができました。急いで、期間中に一つのホテルに連泊できるように東武トップツアーズに作業を進めていただきましたが、どの程度改善されたのでしょうか？ いつもより1か月早く学会誌に宿泊案内を掲載していただいたのですが、もう少し効率的に宿泊予約ができるシステムはないのでしょうか？

ようやく、会場、宿泊のめどが立ち、2014年9月の物理学会理事会で正式に開催の承認をしていただきました。実行委員会を22名の方々にお願いし、大会準備マニュアルに従って、職務を分担しながら進めました。講演会場、総合受付、本部・アルバイター控室、託児室、ポスターセッション会場、総合講演会場、市民科学講演会会場、Jr.セッション会場等の検討と決定を順次行っていました。事務局大会担当の方々3名にも順次、参加していただき、2015年2月に施設見学と1年前打ち合わせ、3月に早稲田大学での第70回年次大会からの引き継ぎ、10月には半年前打ち合わせ、大会Webも立ち上げました。12月の3か月前打ち合わせ、2016年2月の最終打ち合わせを経て、開催に漕ぎつけました。

17日の設備搬入、18日の会場設定、そして学会期間中の運営に関して大きな力を感じたのは、36名のアルバイターの方々です。いつもは、物理学科を中心に募集するので男子学生が多いのですが、今回は教養学部の学生で約半数が女子学生でした。17日午後、5トンコンテナで、ポスターボード約150枚が届いた時には、とても大きな壁のような重さを感じました。アルバイターの学生が一番驚いたのは、ドレスコードがないことだったようです。物理学会にはいくつかの美学があります。服装もその一つで、「形式にとらわれず、自由な雰囲気の中で、本質的な成果を議論する」ことは、驚きだったようです。私も学生時代に、物理学会のアルバイターとして働きました。当時は講演会場の中でのタイムキーパー役もあり、学生ながら、分かりやすい発表とそうでない発表のスタイルを感じながらベルを鳴らしていた記憶があります。

19日、いよいよ大会初日です。早朝、小雨が降っていたこともあり、うまく滑り出せるように、本部には緊張感がありました。経験豊かな事務局担当者が大会運営および総合受付の指揮を始めました。実行委員全員も持ち場に散っていきました。私は、本部の総合受付の見渡せる位置に席を見つけ、窓から参加者の皆さんの動き、大会の流れが滞らないように注意を払っていました。8時前に到着する方もおりました。バスが着く毎に大勢の集団が総合受付、会場の中に消えていきました。歩く方も多くおられました。プログラムに掲載した地図には、地下鉄駅から歩けるように目印を入れました。9時には、共同通信社の取材も入りました。そのようにして1日目は、大過なく過ぎました。

20日、午前には総合講演、午後には市民科学講演会が開催

されました。現地実行委員会には、市民科学講演会の企画が任されています。総合講演は、理事会企画です。2015年4月にニュートリノと重力波観測の二つの話題を選びました。東北大学の実験施設も同じ神岡鉱山地下にありますが、仙台市民が聞いたことがなく、興味を持ちそうな話題と考えました。驚きです。10月には梶田隆章先生がノーベル物理学賞を受賞しました。加えて、2016年2月12日に米国のLIGOグループが、初めて重力波を観測したとのニュースが飛び込んできました。梶田先生には急遽、午後の市民科学講演会での講演もお願いすることになりました。会場には約500名の市民が集まり、そのうち50組程度の親子連れが参加してくれたのが印象的でした。終了後、その親子連れ一人一人に、梶田先生が握手し、サインし、笑顔で写真に納まっていたことにはとても感謝しています。この中から、次の物理学を支える研究者が生まれることを期待したいものです。

21日、Jr.セッション開催日です。実行委員会では、大会準備マニュアルの指示の他に、仙台独自の“おもてなし”をできないかと考えていました。そんな折、Jr.セッションの会場として、礼拝堂を使わせていただくことができるようになりました。礼拝堂には、とても大きなパイプオルガンとステンドグラスがあります。そこで、大学オルガニスト、教養学部教授の今井奈緒子さんに演奏会の開催をお願いし、快く引き受けていただきました。パイプオルガン特別演奏会は、第一部（一般向け）13:00-13:30、第二部（Jr.セッション参加者向け）14:20-14:40が行われ、第一部は200名程度、第二部は300名程度の聴衆が、独特の音色に酔いしれていました。

22日、あつという間に最終日です。窓の外に、スーツケースを抱え、忘れた人を探している東武トップツアーズの女性係員を見つけました。しばらくすると本部に届けられました。大会期間中、傘、PCの変換ケーブル、ポスターのケース、デジタルカメラ、飲みかけのペットボトル等多くの忘れ物が届けられました。律儀に、物理学会では、半年間保管するとのこと。お昼には、第72回年次大会開催予定の大阪大学の実行委員と引継ぎを行いました。午後には、撤収作業が始まりました。

参加された皆さんは、今回の学会でどのような成果が得られたのでしょうか？ どのように感じられたのでしょうか？ すべてボランティアで運営し、経費削減のために、構内のバスなどの交通整理も実行委員で行いました。

前回の仙台大会（2003年3月）の総合講演は、前年ノーベル物理学賞を受賞した小柴昌俊先生だったのを覚えている人はいるでしょうか？ 今回の仙台大会の総合講演は、昨年ノーベル賞を受賞した梶田隆章先生でした。この次仙台で開催するときには、また会員のどなたかがノーベル賞を受賞することを期待して、筆を置きたいと思います。

（2016年5月24日原稿受付）

上田和夫 (JPSJ編集委員長 ueda@jps.or.jp)

## $\lambda$ 型構造をもつ有機超伝導体のギャップ構造の対称性

非従来型超伝導の起源・機構の解明は固体物理学の中でも重要な課題の一つである。有機物で発現する多くの超伝導状態も非従来型であると考えられているが、微結晶の熱容量を高感度に測定することの困難さから正確な議論が行われていない物質が多く存在する。本研究では近年開発された微小単結晶で測定可能な高感度熱容量測定装置を用いて有機超伝導体 $\lambda$ -(BETS) $_2$ GaCl $_4$ の低エネルギー励起構造を電子熱容量から正確に議論した。この超伝導相は電子相関から生じる秩序相には隣接していないにも関わらず電子間斥力を起源とする $d$ 波超伝導状態をとっていることが報告された。

単体金属などをはじめとする物質群で見られる超伝導状態は従来型として電子-格子相互作用を介した電子間引力で説明されるBCS理論によって理解されてきた。しかし銅酸化物系超伝導体をはじめ、様々な系で他の自由度が起源となり発現する非従来型超伝導の可能性が考えられている。有機化合物において発現する超伝導もスピンや電荷の自由度に関わる非従来型超伝導の可能性が議論されているが、多くの有機超伝導体は未だその詳細に不明な点が存在する。有機超伝導体では非常に良質な単結晶が得られるため量子現象の本質的な議論が可能であり、これまで量子振動やFFLO超伝導状態などを対象にした研究で注目されてきた。しかし超伝導の起源に関する実験的研究は他の超伝導体と比べて少ない。それは結晶多形の問題から大量合成が難しく、また単結晶も微小なために正確な熱力学量の議論が困難であるという測定上の問題点にあった。

通常、有機化合物に関わらず非従来型超伝導の多くは超伝導の隣接相として何らかの秩序相をもつ。その秩序状態は強い電子相関による電子の局在化が原因であることが多く、例えば反強磁性転移や電荷秩序転移などの電子の自由度に関わった秩序相となる。そのため超伝導は秩序相の起源となる自由度が作るゆらぎを媒介にして発現している可能性が高いと考えられる。実際に母物質にMott反強磁性相をもつ銅酸化物系超伝導体や $\kappa$ -(BEDT-TTF) $_2$ X系有機超伝導体などで見られる超伝導は反強磁性スピンゆらぎを媒介にして発現していると考えられている。本研究で測定が行われた有機超伝導体 $\lambda$ -(BETS) $_2$ GaCl $_4$ は図1のような二次元的な分離積層構造をもっており、伝導層平面状のBETS分子が二量化することでそのDimerが $\pi$ 電子を一つもった半充填バンド状態である。そのため電子相関が強い領域でMott反強磁性を示すと予想される。しかし実際には強相関領域と考えられるCl原子をBr原子に徐々に置換し

た $\lambda$ -(BETS) $_2$ GaBr $_x$ Cl $_{4-x}$ で $x$ が0.8を超えると極低温まで電荷・磁気秩序を示さない絶縁状態を示すことが知られている。類似塩の $\lambda$ -(BEDT-STF) $_2$ GaCl $_4$ でも同様な振る舞いが報告されており、混晶による影響ではなく本質的な状態であると考えられる。このような相と隣接した超伝導状態でも $\kappa$ -(BEDT-TTF) $_2$ X系有機超伝導体と同じようなスピンゆらぎを起源とした非従来型超伝導か熱力学的な側面から非常に興味をもたれていた。

最近、大阪大学大学院理学研究科化学専攻、北海道大学大学院理学研究院物性物理学専攻のメンバーを中心とする研究グループは、有機超伝導体 $\lambda$ -(BETS) $_2$ GaCl $_4$ の超伝導対称性を決定するため、微小単結晶での測定が可能な高感度熱容量測定装置を開発し、その装置を用いて正確に準粒子の低エネルギー励起構造を調べた。その結果この超伝導状態は電子間相互作用を起源とする $d$ 波超伝導と呼ばれる状態であることを初めて熱力学的な視点から明らかにした。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌JPSJの2016年4月号に掲載された。

一般的に超伝導の起源を議論する場合は超伝導転移によって生じるエネルギーギャップの構造から超伝導波動関数の対称性を決定する。熱容量は低エネルギーの励起構造の検出に強く、ギャップ構造の議論に重要な情報を与えてくれる熱力学量である。従来型超伝導では波数空間で等方的なギャップをもつと予想されるために物理量は $\exp(-E_g/k_B T)$ のような熱活性型で表されるが、電子間相互作用を介して発現するような非従来型超伝導の場合はギャップが波数に依存して位相を反転させる必要があり、これによりノードが生じるため、そこでギャップレスな励

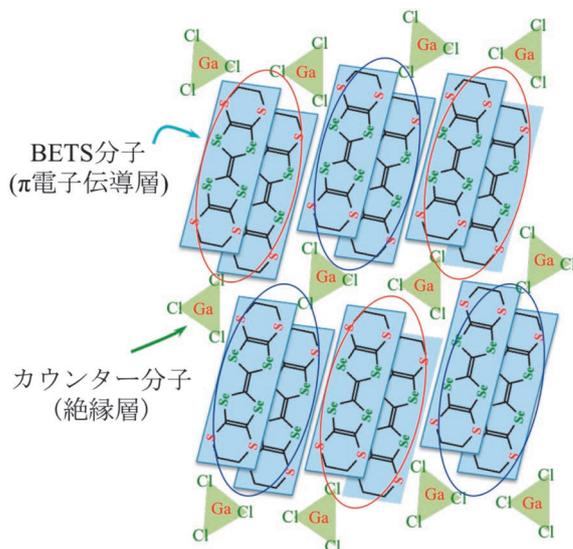


図1  $\lambda$ -(BETS) $_2$ GaCl $_4$ の構造模式図。

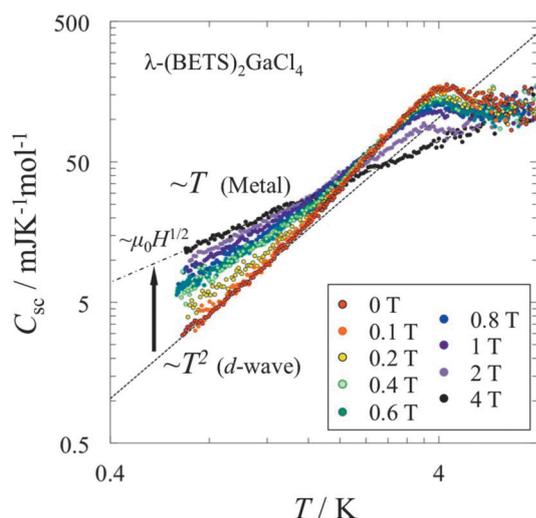


図2  $\lambda$ -(BETS) $_2$ GaCl $_4$ の低温電子熱容量。

起となる。その低エネルギー励起により物理量はノードの形状に従い $T^n$ のような冪乗になると予想され、また係数は運動量空間上でのノード近傍におけるギャップの角度微分によって特徴づけられる。本研究の結果、図2のように $\lambda$ -(BETS) $_2$ GaCl $_4$ の電子熱容量が低温で $T^2$ に比例した振る舞いを見せることを検出し線形ノードが存在することがわかった。またその係数は波動関数が波数空間で四回対称性をもっている可能性が高いことを示しており、磁場による電子熱容量回復が $\mu_0 H^{1/2}$ に従うことからこの塩の超伝導状態が二次元 $d$ 波超伝導状態であることを明らかにした。

本研究結果はこれまで測定が困難であった有機超伝導体の正確な熱容量測定の結果、電子由来の秩序相には隣接していない超伝導相においても電子間斥力を起源とした非従来型の $d$ 波超伝導状態が成り立っていることが実証された。隣接した絶縁相の起源を含めた議論や、これまで測定が困難であった他の有機超伝導体についても今後の研究の展開が期待される。

## 原論文

Thermodynamic Evidence of  $d$ -Wave Superconductivity of the Organic Superconductor  $\lambda$ -(BETS) $_2$ GaCl $_4$

S. Imajo, N. Kanda, S. Yamashita, H. Akutsu, Y. Nakazawa, H. Kumagai, T. Kobayashi and A. Kawamoto

J. Phys. Soc. Jpn. **85** (2016) 043705.

〈情報提供：今城周作 (大阪大学大学院理学研究科)  
中澤康浩 (大阪大学大学院理学研究科)〉

## News and Comments

Electrons Ride on a  $d$ -wave through Pairing in a BETS Superconductors

K. Kanoda: JPSJ News and Comments **13** (2016) 06.

## 複数の電子軌道が絡んだ多重スピン揺らぎが生み出す鉄系超伝導

鉄系高温超伝導では、鉄の異なる電子軌道にいる複数の

電子が伝導に寄与するため、電子の併せもつスピンと軌道の二つの特徴が超伝導の起源とどのように関係しているかが発見以来の大きな争点となってきた。本研究は、鉄系超伝導の典型物質LaFeAsO系において元素置換により構造と電子ドーパ量を制御して広範な組成域にわたって系統的に核磁気共鳴 (NMR) 実験を行い、鉄の複数の縮退電子軌道が絡んだ多重反強磁性スピン揺らぎが、鉄系超伝導転移温度の上昇と極めて深く関係していることを明らかにした。今後、幅広い鉄系物質全体を理解する上で一つの重要な指針を与える研究成果である。

2008年に鉄を含む化合物で新しい高温超伝導が発見されて以来、類似構造で超伝導が続々と発見され、最近では超薄膜化でさらなる高温超伝導が報告されるなど将来夢の室温超伝導が実現する可能性のある新しい素材として世界中で注目されている。一方で、なぜこの物質群で超伝導が起きるのか？その謎を解き明かそうとする基礎研究が世界中で繰り広げられている。超伝導の発見には、物質中の電子二つが組となるクーパー対が形成されることが必須であり、対形成には電子同士が引き合う何らかの引力機構が必要となる。近年高温で起こる超伝導には、従来から知られる格子振動を媒介とする機構では理解できないものがあることがわかってきた。鉄系高温超伝導では、反強磁性秩序相や構造転移点に隣接して起こるため、スピン揺らぎや軌道揺らぎなど新しい引力機構が有力候補として挙がっているが、発見後8年を経てなお収束に至っていない。

最近、大阪大学大学院基礎工学研究科物質創成専攻および理学研究科物理学専攻のメンバーを中心とする研究グループは、鉄系超伝導が物質のどのような性質と関連しているかを調べるため、元素置換 ( $x, y$ ) による組成の変化に対して超伝導転移温度 ( $T_c$ ) が非単調に大きく増減する鉄系物質LaFe(As $_{1-x}$ P $_x$ )(O $_{1-y}$ F $_y$ )系に着目した。核磁気共鳴 (NMR) 実験で系統的に電子状態を調べた結果、複数の電子軌道が絡んだ反強磁性スピン揺らぎが鉄系超伝導転移温度の上昇と極めて強く関連していることを明らかにした。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌JPSJの2016年5月号に掲載された。

対象としたLaFe(As $_{1-x}$ P $_x$ )(O $_{1-y}$ F $_y$ )系は、元素置換の組成の変化で構造 ( $x$ ) および電子ドーパ量 ( $y$ ) を制御でき、図1(a)に示すように超伝導転移温度 ( $T_c$ ) が極めて大きく変化するため、超伝導と関係する因子を探るにはとても優れた系である。著者らは磁気や超伝導など多数の電子が創発するさまざまな物質の性質 (物性) を微視的な観点から明らかにできる核磁気共鳴 (NMR) 法を用いて、その電子状態を広い組成域にわたって系統的に調べた。

その結果、図1(b)に示すように超伝導転移温度  $T_c$  が高い組成域で反強磁性スピン揺らぎが特に発達していることがわかった。さらに詳しく解析を進めると、反強磁性スピン揺らぎの性質は、有限のエネルギー域に特徴をもつものと、低エネルギー域に特徴をもつものの2種類あ

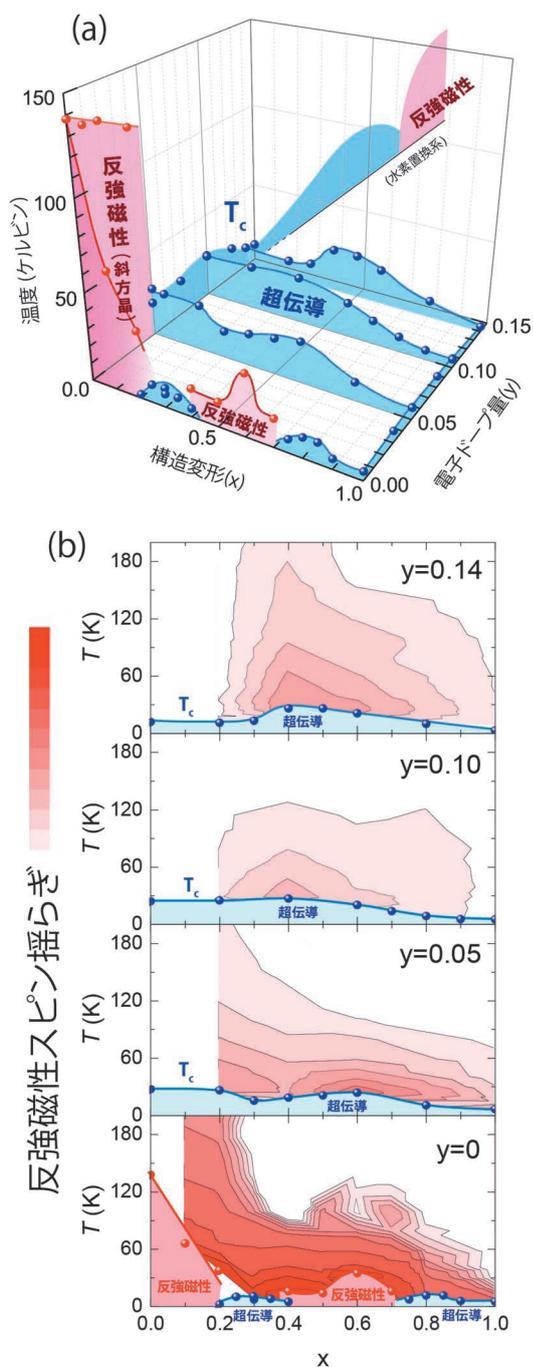


図1 (a) 研究対象  $\text{LaFe}(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)(\text{O}_{1-y}\text{F}_y)$  系の超伝導相図と (b) NMR で観測された反強磁性スピン揺らぎの強度の等高線図. 超伝導転移温度 ( $T_c$ ) が高い組成域で、反強磁性スピン揺らぎが特に増大していることがわかる.

ることがわかり、理論との比較から、前者の反強磁性スピン揺らぎは鉄の三つの電子軌道 ( $dx_y/dx_z/dy_z$ ) に由来するもの、後者は二つの電子軌道 ( $dx_z/dy_z$ ) に由来するものと対応していることがわかった. それらが合流する組成域にかけて比較的高い超伝導転移温度 ( $T_c$ ) が現れていることから、広いエネルギー域にわたる反強磁性スピン揺らぎが超伝導に有利に働いていると解釈できる. 以上の結果、 $\text{LaFe}(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)(\text{O}_{1-y}\text{F}_y)$  系の複雑な超伝導相図は、鉄の複数の縮退電子軌道に由来する多重反強磁性スピン揺らぎに起因していると結論された.

高温超伝導現象の代表例である銅酸化物では、単純に

「単一バンド」で反強磁性相をもつ「スピン」が共通する特徴であったのに対し、鉄系では異なる電子軌道の複数の電子が「多バンド」をなし、電子の「スピン」と「軌道」の二面性が絡んだ複雑な電子相図となる. そのため、超伝導と深く関係する因子を抽出することは容易ではなく、統一的理解を阻む大きな要因となってきた. 本研究により、縮退軌道の要素が構造 ( $x$ ) や電子ドーパ量 ( $y$ ) によって変わり、鉄系固有の「多軌道性に関わる多重スピン揺らぎ」の特徴は変遷しながらも、高温超伝導現象と常に密接な関係にあることが示された. 今後、鉄系超伝導全体の統一的理解を進める上で重要な視座を与える研究成果であり、さらなる高温超伝導を開発する上で一つの重要な指針を与える研究成果でもある.

#### 原論文

Multiple Antiferromagnetic Spin Fluctuations and Novel Evolution of  $T_c$  in Iron-Based Superconductors  $\text{LaFe}(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)(\text{O}_{1-y}\text{F}_y)$  Revealed by  $^3\text{P}$ -NMR Studies

T. Shiota, H. Mukuda, M. Uekubo, F. Engetsu, M. Yashima, Y. Kitaoka, K. T. Lai, H. Usui, K. Kuroki, S. Miyasaka and S. Tajima

J. Phys. Soc. Jpn. **85** (2016) 053706.

〈情報提供：椋田秀和 (大阪大学大学院基礎工学研究科)〉

#### News and Comments

Antiferromagnetic Spin Fluctuations; What else?

K. Ishida: JPSJ News and Comments **13** (2016) 05.

#### 招待論文「軟 X 線放射光光電子分光によるウラン化合物の電子状態研究」

Electronic Structures of Uranium Compounds Studied by Soft X-ray Photoelectron Spectroscopy

S. Fujimori, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, A. Fujimori, H. Yamagami, Y. Haga, E. Yamamoto, and Y. Ōnuki: J. Phys. Soc. Jpn. **85** (2016) 062001.

アクチノイド化合物は超伝導や多様な磁性、さらにはそれらの共存といった特異な性質を示すことが知られている. 特に近年では  $\text{PuCoGa}_5$  における「高温」超伝導 ( $T_{SC} = 18 \text{ K}$ ) や  $\text{URhGe}$ ,  $\text{UCoGe}$  における強磁性相と超伝導相の共存など、特異な物性が見出されて注目を集めている. また、物性物理学の 30 年来の謎である  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  における「隠れた秩序相」も、いまだに多くの研究者の興味を引き付けている. これらの興味ある物性はアクチノイド  $5f$  電子によって支配されているが、 $5f$  電子は遍歴的な性質と局在的な性質を同時に示しており、その統一的理解は容易ではない状況にある. 本招待論文では、特に近年 SPring-8 において発展した軟 X 線光電子分光法を利用し、多くのウラン化合物の  $5f$  電子状態を研究した結果について総合的に紹介している. 各化合物に対する軟 X 線角度分解光電子分光実験の結果得られたバンド構造およびフェルミ面をバンド計算の結果と比較することにより、その遍歴性・局在性を明

らかにしている。また、内殻光電子分光法を利用し、ウラン原子サイトの局所電子構造に関する議論を行っている。多くの超伝導体や磁性体などの電子構造を幅広く網羅しており、一般の物性研究者にも有用な解説となるであろう。

〈情報提供：藤森伸一，竹田幸治，岡根哲夫，斎藤祐児，藤森 淳，山上浩志，芳賀芳範，山本悦嗣，大貫惇陸〉

## 招待論文「超伝導体におけるマヨラナ粒子とトポロジー」

Majorana Fermions and Topology in Superconductors

M. Sato and S. Fujimoto: J. Phys. Soc. Jpn. **85** (2016) 072001.

トポロジカル超伝導体が注目される理由の一つは、マヨラナ粒子に起因する様々な異常物性、とりわけフェルミ統計ともボーズ統計とも異なる非アーベル量子統計の実現と、そのトポロジカル量子計算への応用が期待されているゆえであろう。本招待論文は、上記の事項を含むトポロジカル超伝導とそこで実現するマヨラナ粒子に関する包括的なレビューとなっている。扱われている題材は、トポロジカル超伝導の基本的性質、対称性による分類とトポロジカル不変量に関する入門的解説にはじまり、実際の候補物質に関する実験の現状、マヨラナ粒子の特異な性質である非アーベル統計、非局所相関（量子テレポーテーション）、準粒子の分数化の解説、マヨラナ粒子の熱伝送現象、トポロジカル量子計算への応用、トポロジカル分類への電子間相互作用の影響、ワイル超伝導、などとなっている。トポロジ

カル超伝導に関するレビュー論文はすでにくくつか存在するが、本論文の特徴は、上述のようになり網羅的にトピックを取り上げ、簡にして要を得た説明を与えている点にある。また、初学者には原論文のみでは理解が難しいと思われる式の導出について、部分的ではあるが、独自の視点から丁寧な説明を与えている。また、実験の現状については、 $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  や  $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  に関してはすでに存在する優れたレビューに譲り、その他の候補物質である量子細線-超伝導接合系、 $\text{In}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ 、 $\text{UPT}_3$ 、ディラック半金属超伝導体  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ 、およびワイル超伝導体の候補物質である  $\text{URu}_2\text{Si}_2$ 、 $\text{UCoGe}$  等を取り上げている。本テーマに興味を持つ学生や専門外の物性研究者が、基本概念とテーマの全体像、研究の現状を掴むのに適した解説となっている。

〈情報提供：佐藤昌利（京都大学基礎物理学研究所）

藤本 聡（大阪大学大学院基礎工学研究科）〉

日本物理学会が発行している Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の論文で2016年3月に掲載可となった中から2016年4月の編集委員会が選んだ“Papers of Editors' Choice” (JPSJ注目論文) を紹介します。なお、紹介文は物理学会のホームページの「JPSJ注目論文」でも公開しています。論文は掲載から約1年間は無料公開しています。また、関連した話題についての解説やコメントがJPSJホームページの「News and Comments」覧に掲載される場合もありますので、合わせてご覧下さい。JPSJ編集委員会では物理学のあらゆる分野の興味深い論文を「注目論文」としてこの欄で紹介したいと思います。物理学会会員からのJPSJへの自信作の投稿を期待します。

## 応用物理 第85巻 第8号 (2016年8月号) 予定目次

### 総合報告

有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の現状と展望  
.....内田 聡, 他

### 最近の展望

地下資源探査への応用を目指した高温超伝導 SQUID の開発  
.....波頭経裕

### 研究紹介

タンパク質の動的挙動に及ぼす水および熱活性の影響：  
広帯域誘電分光法による観測.....山本直樹, 他  
共蒸発分子誘起結晶化法による有機薄膜成長とその応用  
.....嘉治寿彦  
配向制御された液晶エラストマ/ゲルの刺激応答特性  
.....浦山健治

### 基礎講座

熱物性 (熱拡散率, 比熱) 測定のコツ .....森川淳子  
APEX/JJAP だより  
APEX/JJAP の現状と最近の取組み .....山田 明  
ホッとひといき  
昆虫の翅を基板に用いたものづくり.....棚橋一郎

### Inside Out

The Struggle and Journey to Pursue a Scientific Career and a Happy  
Family Life ..... Satria Zulkarnaen Bisri  
Science As Art  
Flower of whisker .....松本 凌, 他

# 量子力学が導いた新しい風

伊藤 憲二 (総合研究大学院大学先端科学研究科 ito\_kenji@soken.ac.jp)

量子力学の導入前後における、日本の物理学の研究活動・研究方法の変化の1側面について、特に当時の状況と仁科芳雄の役割を中心に論じる。

## 1. はじめに

本稿の課題は、量子力学の導入による日本の物理学の変化である。それは、前者が後者を引き起こしたという一方向の因果関係ではない。むしろ、量子力学を1つのきっかけとして日本における物理学の研究のしかたが変化したことが、日本への量子力学の導入だというべきなのである。量子力学の原論文の掲載された雑誌の日本への輸入をもって、量子力学の導入とは言えまい。それらが読まれ、翻訳され、教科書に書かれ、大学で講義され、さらに量子力学の考え方、思想が日本に入ったと言えたとしても、量子力学の導入と言うには不十分である。量子力学は問題を解き、新たな知識を生み出す機能をもつのであり、そのような機能が発揮されて初めて量子力学の導入と言うべきだからだ。現在の科学史は学問を人間の営みとして見ようとするが、それは学問を抽象的な知識・情報の集合体だけでなく、研究に関係した様々な人たちの営みとしての複合体としてとらえようとするのである。

この観点からは量子力学の導入をあたかも何かの物品の輸入と見るのは不適切である。そこで著者は学問の伝播を共鳴現象のアナロジーで考えることを提案している。研究活動をその実践の相においてみる限り、その伝播とは、ある場所における研究活動に呼応して他の場所でそれに近い研究活動が起こることである。それが起こるためには、単一の原因ではなく、様々な条件や構造が備わっていなければならない。その条件は必ずしも元の場所と同じでない。さらに、それが伝播であるならば、何らかの媒介が元の場所から、次の場所に働いていなければならない。学問の伝播の分析はこの2つの点、即ちその研究を再現するための条件と、その研究を引き起こした媒介を見ることになる。

これを量子力学の日本への導入に適用すると、欧州における研究活動とその環境、日本における研究活動とその環境、さらに欧州と日本の間であって、日本での量子力学の研究活動を引き起こした媒介を見る必要がある。これに関連して著者はいくつかの機会に書き、かつ現在執筆中の仁科芳雄についての著作にも詳しく論じているので、ここでは量子力学の日本への移入における仁科芳雄の役割を新たな観点で見ることに話題を絞る。日本での量子力学の研究の開始において、仁科が大きな役割を果たしたこと、特に仁科がコペンハーゲンにおける物理のやり方、いわゆる

「コペンハーゲン精神」を日本に取り入れたということがかなり前から言われてきた。他方で、仁科以前からすでに量子力学の導入が進められていたことも指摘<sup>1)</sup>されている。本稿はこれらを踏まえて、仁科の果たした役割を上記のような研究活動の伝播のモデルのもとで再検討し、それによってこの時期の日本の物理学の変化の一面を描こうとするものである。

## 2. 「コペンハーゲン精神」と量子力学

ボーアの研究所や、いわゆる「コペンハーゲン精神」についてはすでに多くが書かれ、日本語でも紹介されているので、多言を要しないであろう。「コペンハーゲン精神」については、はっきりした共通理解があるわけではなく、様々な記述があるが、Niels Bohr Archivesの歴史家オーセルー(F. Aaserud)<sup>2)</sup>は「研究の進め方とか、雰囲気の種類」であり、「とらわれない考え方とか、各自が研究を進める自由」が特徴で、ボーアを中心とした討論と共同研究からなるものとする。私<sup>3,4)</sup>は、これにほぼ従いつつ、それをボーアの研究所を律した規範としてとらえ、「遊び心のある好奇心」(playful curiosity)と「協働」(collaboration)の二つを軸とするものととらえる。

このうち前者は、亀淵迪<sup>5)</sup>が言うように、遊びと仕事が渾然一体としていたと言ってもよい。卓球や、映画鑑賞や、悪戯、悪ふざけが研究と入り混じっていた。例えば、ある物理学者は、トイレを中から鍵をかけて、そのまま窓から出て入れなくし、そのフロアの研究者を困らせた。そういった悪戯と不可分だったのが好奇心であった。フリッシュ(O. Frisch)<sup>6)</sup>は、ボーアの研究所の同僚たちが子供っぽい悪戯に耽るのを見て、それは科学者が子供と同様、強い好奇心をもっているからだと考えた。良い科学者は子供のような好奇心を保たねばならないが、子供の特徴のうちそれだけを保つのは容易ではなく、他の子供っぽさも保つというのだ。研究が遊びであるというのは、それだけが主要なルールだということでもある。「明晰に、真直ぐに考える能力だけで、人間が判断される」なら、礼儀作法は問われない。それはワイスコップ(V. Weisskopf)<sup>7)</sup>のように、より礼儀作法に煩いドイツから来たばかりの研究者を驚かせた。

第二の点、「協働」というのは、ボーアの「人生に対する態度の根源的な要素」<sup>8)</sup>であり、彼にとって科学は「人間の協力の最も進んだ形の一つ」で、よりよい人間関係へ導くはず<sup>9)</sup>のものだった。彼の仕事のしかたはつねに協働であり、助手を反響板として口述筆記させ、その助手に遠慮

なく意見を言わせた。<sup>10)</sup> 研究所では、原稿執筆、研究計画立案どころか手紙を書くのにも集団的な手法が取られた。<sup>11)</sup> 堀健夫<sup>12)</sup>によれば、この旺盛な協力的精神が研究者に単独では得られないインスピレーションを与え、個人的能力を超越した集団的創造力が働いたという。

上記の二つの軸は強化し合った。協働的研究は、仲間同士で、和気藹々と研究することで、さらに研究を遊びに近くした。研究における協働の一つの形は、自由な討論であったが、それはインフォーマルな雰囲気の中で行われた。研究所のコロキウムやセミナーでは、聴衆は発表者の話をいつでも中断し、質問や批判的なコメントをした。時間制限もなく、礼儀作法を無視した真剣な討論が続けられ、そこにしばしば、ユーモラスなコメントや聴衆からの爆笑が混ざった。<sup>13)</sup> 討論は講義だけでなく、あらゆる機会に行われ、食堂は特に良い場所となった。<sup>14)</sup>

遊び心に満ちた集団での自由な討論は、新しい考えを生み出すのに向いており、当時の物理学の状況に適していた。古い理論の枠組みが限界に達し、確固たる地盤が失われている物理学の変革期においては、若い学者の斬新なアイデアこそ、新地平を切り開く可能性があった。1920年代前半の量子論の中心にあったのはボーアの原子模型だったが、これはアド・ホックな要素や矛盾を含む理論で、その基礎がはっきりしなかった。この状態で手探りを進めるにはボーアの討論や対話による集団的な方法は有効だった。その物理的な手がかりが対応原理であり、その発展の最終的な成果が量子力学であった。

当然ながらコペンハーゲンだけが量子力学研究の中心地だったわけではなく、欧州の他の場所では他のやり方がなされていた。しかし、ここではコペンハーゲンだけに留め、日本の状況へ移ろう。

### 3. 仁科帰国時までの日本の状況

1920年代の日本では物理学の発展のための様々な社会的状況が形成されていた。1917年に財団法人理化学研究所が設立され、化学と並んで物理学の研究が産業上必要と認知されていた。理研は、第三代所長大河内正敏の改革を経て、研究者が自由に研究を推進するための場所を確保していた。1923年のアインシュタインの来日は最新の物理学の文化的価値に対し、社会的認知が与えられた機会であった。

1920年代から1930年代の初めにかけて、研究機関も増えた。理研に加え、北海道帝国大学(1918年)、旅順工科大学(1922年)、京城帝国大学(1924年)、台北帝国大学(1928年)、東京文理科大学(1929年)、大阪帝国大学(1931年)、といった大学が新設ないし昇格された。わずかに職が増えても就職不安は解消しなかったが、留学機会を増やし、新しい学問の研究拠点の可能性を開いた。

日本にいた研究者と量子力学との最初の接触は、外国の文献を媒介とした。最初期には、若い研究者や学生たちの

読書と読書会活動の中で起こった。彼らは中学・高校時代にアインシュタインの来日によって夢をかきたてられながら、大学に入って失望していた。例えば、朝永振一郎は1926年に京大に進学した時、新しい物理学を学ぶことを期待したが、実際に見出したのは、古い装置で行う古臭い実験や、無味乾燥な数式の氾濫する理論の講義であった。<sup>15)</sup> 京都の物理学の学生たち、朝永、湯川秀樹とその先輩である西田外彦や田村松平は、まずそれぞれ自分たちで本や雑誌を読み始め、やがて共に量子力学を勉強するようになった。<sup>16)</sup> 関東でも若い研究者が独自に量子力学を勉強し始めていた。形式的になってしまった東大物理学科のコロキウムに飽き足らなくなり、若い研究者を中心に、真剣で遠慮のない討論をしたいというのが動機の一つだった。<sup>17)</sup> この「物理学輪講会」は、1926年3月に理研の部屋を借りて始まった。<sup>18)</sup> 参加者の大部分は若い研究者で、中心になったのは土井不曇、金光正道、芝亀吉、鈴木昭、中谷宇吉郎、藤岡由夫の6名、<sup>19)</sup> ほかに菊池正士、富山小太郎、仁田勇、須賀太郎などの若手、寺田寅彦、西川正治、高嶺俊夫ら、年長の学者も若干参加した。最初から量子力学の勉強をすることを意図していたわけではないが、当時重要な最新の論文の多くは量子力学に関するものであった。<sup>20)</sup>

すぐに外国の文献の内容を出版する活動が始まった。物理学輪講会のメンバーは新しい物理学の出現を見て、それを日本に紹介する義務を感じ、量子力学に関する論文の抄訳・紹介をまとめて、1927年1月に岩波書店より出版した。<sup>21)</sup> 1927年には日本数学物理学会誌が創刊され、その最初の巻では、量子力学の基本的な論文が紹介された。<sup>22)</sup> また、東京高等工業学校の竹内時男は、最新の物理学を紹介する文章や外国雑誌の記事の翻訳・紹介を素早く、数多く書き、量子力学についても1927年に本を出した。<sup>23)</sup>

大学における量子力学についての講義も始まった。東大では、「量子論」という講義を担当した坂井卓三は量子力学についての授業を1928年4月に開始した。<sup>24)</sup> 坂井が1930年に出版した教科書<sup>25)</sup>から、この講義は量子力学の原論文や初期の教科書を踏まえたものと推測できる。京都帝国大学でも、1928年の6月から7月に荒木俊馬が量子力学の講義をし、聴講した湯川と朝永に強い印象を与えた。<sup>26)</sup> 荒木は同時期にヨルダン(P. Jordan)の記事<sup>27)</sup>を翻訳・連載<sup>28)</sup>しており、その内容を講義したと思われる。

書物を通して知識を得、それを出版・講義することに加え、欧米での研究を経験した者が日本に来て量子力学について講義することも、1928年から始まった。この年1月に帰国した杉浦義勝は、4月初めの数物学会年会で、「新量子力学とその応用」と題する記念講演を行い、その講義録<sup>29)</sup>は翌年の数物学会誌に掲載された。これは体系的な量子力学の講義だったが、非常な速度で講義を進め、数多くの文献を黒板に書き、初学者への配慮が欠けていた。<sup>30)</sup> 2月にラポルテ(O. Laporte)が来日し、半年間京大と理研

に滞在した。<sup>31)</sup> 彼の京大における分光学の講義は量子力学も含み、聴講した湯川秀樹<sup>32)</sup>にとって最初の体系的な量子力学の講義だったという。12月1日に、ゾンマーフェルトが来日し、<sup>33)</sup> 東京で「波力学と電子論の諸問題」と題する連続講義を行ったが、これは当時執筆中の『原子構造とスペクトル線：波力学的補遺』に即したもので、<sup>34)</sup> 藤岡由夫による講義録<sup>35)</sup>が、翌年数物学会誌に掲載された。これは有山兼孝のような若い研究者<sup>36)</sup>にとって紙上で学んだ量子力学に生身の肉体を与えるもので、強い印象を残した。ゾンマーフェルトは12月下旬に離日し、入れ替わるように仁科芳雄が帰国した。

このように、仁科帰国以前に、量子力学の研究が始まる条件はかなり整っていた。若い研究者はその勉強を始め、その紹介は印刷物になり、学会誌にも掲載され、大学でも講義が始まった。欧米での研究経験のある研究者が来日・帰国し、直接量子力学を伝えた。理研のような研究環境もあった。しかし、それだけでは十分でなかった。量子力学以降の物理学を研究する大学やその他の機関のポストはまだ多くはなく、研究の中心としてグループを形成できる拠点はなかった。さらに、若い物理学者たちは、文献や講演を理解できても、必ずしも自ら研究に踏み出せなかった。彼らに研究の方向とやり方、取り組むべき課題を示す指導者が欠けていたのである。

#### 4. 仁科芳雄の帰国とその活動

帰国した仁科芳雄は理研に復帰し、2年半ほど長岡研究室に所属した。彼は翌1929年の夏にハイゼンベルクとディラックを日本に招聘した。彼らは9月初めに東京と京都で講演した。専門家向けには彼ら自身または共同研究者の最新の研究を紹介し、一般向け講演では、彼らが執筆中であった教科書向け著作から内容がとられた。仁科<sup>37)</sup>自身が「極めて時宜に適した有意義の挙」と書いているように、特に量子力学の勉強を終えつつあった若い世代の物理学者へ大きなインパクトを与えた。<sup>38)</sup>

翌1930年、杉浦義勝が京都で講義したが、東京での講演と同様、あまり教育的でなかった。杉浦は、黒板の端から端まで届くような長い式を書き、馴染みの薄い特殊関数を用いて、自分の研究の話をした。ディラックやハイゼンベルクの講演はよくわかった朝永<sup>39)</sup>も「あまりに専門的でいっこうにわけがわからなかった」。さらに杉浦は湯川や朝永に課題を与えたが、あまり良いものでなかった。特に湯川には、デイヴィス(B. Davis)による $\alpha$ 粒子の電子吸収をシンチレーションで調べた実験を理論的に解釈せよという課題を与えたが、実験そのものが誤っていた。<sup>40)</sup>

1931年の4月に、仁科自身が京都に来て3週間滞在し、集中講義をした。このとき朝永、湯川だけでなく、坂田昌一、小林稔、武谷三男らも出席した。仁科の特別講義は、ハイゼンベルクの『量子論の物理的基礎』に基づくもので、<sup>41)</sup> 彼自身の研究ではなかったが、朝永によれば、物理

的肉づけと哲学的背景をもった教育的なものであり、量子力学についてもっていたあやふやさを解消した。<sup>42)</sup> 仁科は湯川や朝永と夕食をして個人的に話し、杉浦の課題よりも良いものがあること、デイヴィスの実験の間違いが示されたことを伝えた。<sup>43)</sup>

1931年7月、仁科は理研の主任研究員となり、独立した研究室をもった。研究グループの指導者という役割を負い、その後仁科の行った研究はすべて共同研究である。仁科は理論と実験の両方の分野で数人から出発したが、その規模を次第に拡張し1940年初めには100名を超えた。<sup>44)</sup> 研究室だけでなく、仁科は理研の内外に広いネットワークを作り、全国的な研究集団の核となった。研究集団が拡大する中で仁科は、ボーアの研究所でのやり方、すなわち遊びと研究が一体になった自由で堅苦しくない雰囲気と、討論を多く取り入れた共同研究をおおよそ再現した。

ボーアの研究所の若い物理学者たちと同様、理研でも様々な遊びが研究と入り混じっていた。昼休みはテニスや野球やサッカーをした。コペンハーゲンでは仁科らは週末に郊外へ散歩に行ったが、東京では仁科らは、西川研や高嶺研とともに時々ピクニックをした。これらは仁科がもちこんだわけではなく、もともと理研で行われていた。<sup>45)</sup> 皆で映画を観に行くこともあった。例えば、坂田が大阪大学へ移るときの送別会には、藤原釜足の映画「只野凡児」を観に行った。<sup>46)</sup> また理研の若い研究者たちはお互いにあだ名をつけ、あだ名で呼びあった。坂田の送別会に「只野凡児」を観たのは、それが坂田のあだ名だったからだ。新聞に連載されていた原作の漫画の主人公が坂田と顔や表情が良く似ていたのでこのあだ名がついた。<sup>47)</sup>

研究活動の中心になったのは、理研で開かれたコロキウムや、セミナーや、輪講会であった。仁科研、長岡研、西川研、高嶺研等、理研の研究室に加えて、東大など理研の外の研究者も集まり、原子物理学の実験と理論の両方が扱われた。<sup>48)</sup> そのような機会では、遠慮のない活発な討論がなされていた。それは1932年に理研に入所した朝永に強い印象を与えた。「理化学研究所で驚いたことは、その全く自由な空気である。先生たちも若いものも、お互いに全然遠慮なく討論するそのありさまである。それからまた東京の連中の頭の回転の早いことである。ゼミナールはこの遠慮のない、血のめぐりの早い連中の全く形式も儀礼も無視した討論で生き生きと進んでいく」。<sup>49)</sup> 食堂が議論の場所となったのもボーアの研究所と同様だった。<sup>50)</sup> 口が悪く、遠慮がないにもかかわらず、仁科研はのびのびとして和やかな集団を作り、研究以外のことでは皆が対等に振る舞い、新しく来たものには温かく配慮したという。<sup>51)</sup>

このような研究グループのあり方は、仁科だけによって実現したわけではない。前節で述べたような仁科の帰国前に起こったことに加えて、さらに3つの重要な要因があった。第1に、当時の理研という環境である。理研は仁科の帰国以前から研究者の「自由な楽園」だったのであり、そ

れは仁科ではなく大河内が作った。そして、仁科研設立の時期には、近い領域の研究指導者（長岡、西川、杉浦、高峰ら）がおり、その下の若手が協力し合う環境ができていた。第2は、これと関連するが、菊池と藤岡の留学である。彼らは1930年に1年ほどライブツィヒのハイゼンベルクのもとに留学し、そこでの理論物理学の共同研究のやり方を目撃し、身に着けていた。<sup>52)</sup> 彼らは帰国後、いったん理研に復帰した。<sup>53)</sup> 朝永に強い印象を与えた理研のセミナーの雰囲気は、仁科だけでなく、菊池と藤岡によるところが大きい。<sup>54)</sup> 第3に、仁科研のできた時期は原子核関係の装置と実験において急激な発展があったことだ。藤岡によると「かつての学界が理論物理の洪水に押し流されたように、この時は原子核、宇宙線に関する新しい実験の論文があとからあとから押し寄せてくる」という状況であり、<sup>55)</sup> 理論もまた触発されて新たな展開を引き起こそうとしていた。新着の雑誌を読むと皆興奮し、討論は非常に熱っぽいものになり、研究への集団的な熱中を促進した。<sup>56)</sup> それは同時に日本の物理学者にとって、欧米に追いつくチャンスだった。朝永<sup>57)</sup> が書いているように根源的な変化は、新たなスタートラインを設定しなおすからだ。量子力学自体がそうで、そこでやや追いついたところに、1932年前後の発展がまた新たなスタートラインを引いたのだった。<sup>58)</sup>

仁科はコペンハーゲンにおける物理学のやり方をそのままちんだのではない。重要なのは、同じような成果をもたらす研究活動を実現することであり、まったく同じ作法に従うことではなかった。例えば、あだ名で呼び合うことはコペンハーゲンでなされていなかったが、日本で遠慮のない討論のできるインフォーマルな研究者集団を形成するのに効果的だった。他方で、ボーアの研究所でなされていた子供じみたいたずらや悪ふざけは理研ではあまりなかった。

こうして実現された研究集団のあり方は、朝永、坂田、小林といった仁科の弟子たちの間に、かなり自覚的に把握された。朝永は、「コペンハーゲン精神」をヘーゲル的なガイスト (Geist) ととらえ、個人に宿るのではなく、研究所の中の個人の間で漂うものであり、個人の成長を助け、集団的な研究における研究の主体とさえ考えた。<sup>59)</sup> 彼ら自身が研究指導者になるさいに、このような研究のやり方を広めた。

このように、仁科以前に十分にポテンシャルの高められた日本の状況があり、そこに仁科や菊池などの媒体と、1932年の原子核物理学の急速な発展がきっかけとなって研究活動のカスケードが起り、新しい物理学の本格的な研究をする集団が日本で生まれた。仁科は決してその唯一の原因でもなければ、唯一の媒介でもなかったが、最も重要な媒介だった。

ここで描いた物理学のやり方のうち、遊びと研究の一体化については、より世知辛くなった現今においては、むしろ困難になりつつあるかもしれない。また言うまでもなく

この時期の物理学の研究者集団は、多様な背景をもった人たちがいても、いわばホモソーシャルな集団だったことも異なる。また昨近の競争の強化は、誰が研究に貢献し、それに責任を負うかをより厳密化した。しかし自由で遠慮のない討論を中心とした協同的・集団的な方法は、良くも悪くも今の日本の物理学や周辺分野ではごく当然のものとして内面化されていると言ってよいだろう。その日本における起源は量子力学の導入時期だったのである。

## 参考文献

- 1) 勝木 渥：日本物理学会誌 **45** (1990) 752.
- 2) F. オーセラー著、矢崎裕二訳：『科学の曲がり角—ニールス・ボーア研究所 ロックフェラー財団 核物理学の誕生』(みすず書房、2016) p. 7.
- 3) K. Ito: *Making Sense of Ryōshirin (Quantum Theory): Introduction of Quantum Physics into Japan, 1920-1940* (Ph.D. Thesis, Harvard Univ., 2002).
- 4) D. Kaiser (ed.): *Pedagogy and the Practice of Science: Historical and Contemporary Perspectives* (MIT Press, 2005) p. 163.
- 5) 亀淵 迪：図書675号 (2005.7) 14.
- 6) O. Frisch: *What Little I Remember* (Cambridge Univ. Press, 1980) p. 85, 101.
- 7) V. Weisskopf: *Physics in the Twentieth Century: Selected Essays* (MIT Press, 1972) p. 55.
- 8) S. Rozental: *Niels Bohr: Memoirs of a Working Relationship* (Christian Ejlertsen, 1998) p. 118.
- 9) S・ローゼンタール編、豊田利幸訳：『ニールス・ボーア—その友と同僚より見た生涯と業績』(岩波書店、1970) p. 319.
- 10) V. Weisskopf: *Physics* 55.
- 11) P. Robertson: *The Early Years: The Niels Bohr Institute, 1921-1930* (Akademisk Forlag, 1979) p. 134.
- 12) 玉木英彦、江沢 洋編：『仁科芳雄—日本の原子物理学の曙』(みすず書房、1991、2005) p. 50.
- 13) P. Robertson: *The Early Years* 135.
- 14) S. Rozental: *Niels Bohr* 21.
- 15) 服部静夫、他：『わが師・わが友 (1)』(みすず書房、1967) p. 16.
- 16) 『朝永振一郎著作集10』(みすず書房、1983) p. 112.
- 17) 勝木 渥：『量子力学の曙光の中で—「物理学輪講会」組織者の一人鈴木昭先生に聴く』(星林社、1991) p. 70.
- 18) 勝木 渥：数理科学 (1984年10月) 6.
- 19) 『朝永振一郎著作集11』(みすず書房、1983) p. 103.
- 20) 藤岡由夫：『科学者休むに似たるか』(講談社、1969) p. 79.
- 21) 物理学輪講会同人編：『物理学文献抄第1輯』(岩波書店、1927).
- 22) 日本数学物理学会誌 **1** (1927) 76.
- 23) 竹内時男：『新量子力学及新波動力学論叢』(大鏡閣、1927).
- 24) 有山兼孝：科学史研究 **21** (1952) 1.
- 25) 坂井卓三：『量子論』(岩波書店、1930).
- 26) T. Ozawa: *Historia Scientiarum* **19** (2009) 29.
- 27) P. Jordan: *Nwn* **15** (1927) 614.
- 28) ペ・ヨルダン：天界 **8** (1928) 3, 62, 111, 179, 215, 265.
- 29) 杉浦義勝：日本数学物理学会誌 **2** (1928) 付録14.
- 30) 武藤俊之助：物性 (1973) 1.
- 31) 藤岡由夫編：『高嶺俊夫と分光学』(応用光学研究所、1964) p. 386.
- 32) 田村松平、他：科学 **37** (1967) 390.
- 33) T. Ozawa: *Historia Scientiarum* **15** (2005) 44.
- 34) 『菊池正士業績と追想』(菊池記念事業会編集委員会、1978) p. 129.
- 35) 日本数学物理学会誌 **2** (1928-1929) 付録89.
- 36) 有山兼孝：物性研究 **29** (1977) 53.
- 37) 仁科芳雄編：『量子論諸問題』(啓明会、1932) p. 3.
- 38) 『朝永振一郎著作集11』p. 63.
- 39) 『朝永振一郎著作集10』p. 212.
- 40) I. Langmuir, et al.: *Physics Today* **42** (1989) 36.
- 41) W. Heisenberg: *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie* (Hirzel, 1930).
- 42) 服部静夫、他：『わが師・わが友 (1)』(みすず書房、1967) p. 22.
- 43) 『朝永振一郎著作集10』p. 212.

44) 財団法人理化学研究所案内による.  
 45) 『理化学研究所 60年のあゆみ』(中央公論社, 1978) p. 86.  
 46) 『朝永振一郎著作集 6』(みすず書房, 1982) p. 58.  
 47) 『朝永振一郎著作集 6』 p. 84.  
 48) 『朝永振一郎著作集 6』 p. 60.  
 49) 服部静夫, 他: 『わが師・わが友 (1)』 p. 23.  
 50) 湯川秀樹, 他: 『真理の場にたちて』(毎日新聞社, 1951) p. 187.  
 51) 松井卷之助編: 『回想の朝永振一郎』(みすず書房, 1980) p. 175.  
 52) 藤岡由夫: 『科学者と人生』(講談社, 1964) p. 215.

53) 藤岡由夫: 『科学者休むに似たるか』 p. 85.  
 54) 服部静夫, 他: 『わが師・わが友 (1)』 p. 23.  
 55) 藤岡由夫: 『科学者休むに似たるか』 p. 86.  
 56) 『朝永振一郎著作集 2』(みすず書房, 1982) p. 299.  
 57) 『朝永振一郎著作集 11』 p. 45.  
 58) 高林武彦: 『ヴァリエター—物理・ひと・言葉』(みすず書房, 1998).  
 59) 『朝永振一郎著作集 6』 p. 246.

(2016年2月8日原稿受付)

### 『大学の物理教育』誌定期購読のすすめ

『大学の物理教育』は、年3回(3月、7月、11月)発行で年間購読料(個人)は1,000円です。購読ご希望の方は、1. 会員番号、2. 氏名(非会員の方は連絡先、送付先住所も)をメール(pubpub@jps.or.jp)またはFax(03-3816-6208)でご連絡下さい。

また、本誌ホームページのURLは次の通りですので、どうぞご覧下さい。

<http://www.jps.or.jp/books/kyoikushi/>

『大学の物理教育』編集委員会

### Vol. 22-2 (7月15日発行) 目次

学生実験が決めた道……………藤井保彦  
**特集 第6回物理教育シンポジウム「アクティブラーニングを  
 どう活かすか」**  
 「アクティブラーニングをどう活かすか」趣旨説明……………須藤彰三  
 日本の授業実践研究に学ぶ……………右近修治  
 到達目標学習課題方式—概念獲得のための授業づくり  
 ………………石井登志夫  
 学びを助けるアクティブ・ラーニングとは？  
 一日米中の物理授業比較から……………土佐幸子  
 「アクティブラーニングをどう活かすか」実施報告と総合討論  
 ………………須藤彰三, 田中忠芳  
**講義室**  
 科学の深い理解を支援するアクティブ・ラーニング  
 ………………齋藤萌木

いつまでクーロンの法則から始めるのか—大学の電磁気学教育  
 ………………小宮山進, 竹川 敦  
**教育実践**  
 マクスウェル方程式から始める電磁気学……………小宮山進  
 空手で力学—誘導発見型ワークショップ物理の導入  
 ………………藤田あき美  
 学部生を中心とした大学間合同卒業研究発表会の実践  
 ………………佐々木 伸, 中村 厚, 澤渡信之  
**連載 物理オリンピックと物理教育**  
 物理チャレンジへの参加をふりかえって……………野添 嵩  
**教育に関する一言**……………佐藤 誠/松浦 執/畠山 温  
**開催情報**  
**寄贈書リスト**  
**編集後記**

# 第71回年次大会(2016年) 招待・企画・チュートリアル講演の報告

## 領域委員会

([A] 登壇者氏名 [B] 報告)

### 【招待講演】

実験核物理領域, 理論核物理領域「新元素合成への挑戦」

中野健一(東工大理工)

[A] 森田浩介(九州大理学研究院)

[B] 森田氏が代表を務める研究グループは、加速器を用いた核融合反応による超重元素合成実験を長年にわたってすすめており、2004年から2012年にかけて理化学研究所で実施された実験で3イベントの113番元素の合成に成功した。特に2012年の事象では崩壊様式がよく分かった原子核への $\alpha$ 崩壊鎖の完全測定に成功し、特性アルファ線のエネルギーと崩壊時間から113番元素の同定を揺るぎないものとした。これにより、国際純正・応用化学連合によって正式に新元素として認定され命名権が与えられたことは、社会的にも大きな反響を呼んだ。

講演では、命名権を与えられたときの裏話から始まり、核融合反応の理論と実験の基礎、超重元素領域の殻構造など、分野外の方を意識した解説を交えつつ、世界の超重元素合成研究の歴史と現状について俯瞰していただいた。世界の超重元素生成実験は118番元素まで到達し、元素周期表の第7周期を完成させているが、次の挑戦となる119番元素以降の第8周期元素の生成についても展望していただいた。多くの聴衆が超重元素生成研究の理解を深めると同時に、輝かしい成果を讃える記念すべき講演となった。

### 領域2「ジャイロ運動論的場の理論の進展」

井戸村泰宏(原子力機構)

[A] 洲鎌英雄(核融合研)

[B] ジャイロ運動論は核融合プラズマにおけるサイクロトロン周波数より低周波の乱流現象を記述する標準的なモデルとなっており、近年では太陽風乱流等の宇宙プラズマへの応用も進められている。講演ではジャイロ運動論の定式化に関して、開発当初の再帰的方法と呼ばれる摂動展開法、その後に導入されたリー変換と呼ばれる微分幾何的手法を用いた手法から、近年、講演者が開発したジャイロ運動論的場の理論に至る研究の歴史を概説していただき、さらに、粒子衝突効果を含めたモデル拡張等の最新の研究についても紹介していただいた。従来の標準的な定式化はジャイロ半径と背景プラズマのスケール長の比、あるいは、乱流揺動の周波数とサイクロトロン周波数の比を展開パラ

メータとする摂動論によって荷電粒子運動のリー変換を構築し、サイクロトロン運動が消去された5次元位相空間における荷電粒子運動と実空間の場の方程式をリー変換でつなぐため、系全体のエネルギー保存や運動量保存が、リー変換の精度に依存していた。一方、ジャイロ運動論的場の理論では、荷電粒子と電磁場を含む系全体のラグランジアンにリー変換を適用して方程式系を導くことによって、リー変換の精度によらず系全体の保存則がネーターの定理によって保証されることをわかりやすく示していただいた。本講演には多くの聴衆が集まり、活発な議論が交わされた。

### 領域5「光による物質制御とそのダイナミクス」

齋藤伸吾(情通機構)

[A] 末元 徹(東大物性研)

[B] フェムト秒領域のレーザーパルスが実現し、ピコ秒、フェムト秒で起こる物質中の超高速現象を実時間領域で直接的に観測し、これを理解することが可能となり、さらには物質制御を目指し、研究が進められている。

講演者の末元徹氏は、フェムト秒レーザー分光の出現と同時期に研究を開始し、超高速分光の進展に精力的に携わり、技術面およびそれを用いた物性探索の面で研究を推し進めてきた。近年では、光誘起相転移などにおける超高速ダイナミクスや、テラヘルツ波パルスによる超高速スピン制御について精力的な研究を行っている。

講演では、強い電子格子相互作用、自己束縛励起子をはじめとして、40年にわたる光物性の流れを振り返りつつ、波束で見る電荷再配列、光誘起相転移ドメイン成長といった励起ダイナミクスについて実験結果を交えて解説を行った。また、電子励起を経由しないテラヘルツ磁場によるスピン制御、光励起とテラヘルツ励起を組み合わせたマクロな磁化のコヒーレント制御といった最近の研究成果まで解説した。さらに、物性光科学という新たなキーワードを示しつつ将来の展望が述べられた。

多くの研究者が聴講し、休憩時間を含め活発な質疑応答が行われる有意義な講演であった。

### 領域8「Ferromagnetism and Superconductivity: evidence on three U intermetallic compounds」

石田憲二(京大院理)

[A] Jacques Flouquet (CEA-INAC Grenoble)

[B] フランス・グルノーブルの原子力庁(CEA)の

Jacques Flouquet氏により、ウラン系化合物で発見されている強磁性超伝導体UGe<sub>2</sub>, URhGe, UCoGeについての共通点や相違点をまとめたレビュー講演が行われた。これら超伝導の基礎物性から、最新の実験結果をまじえ本物質における超伝導発現機構について議論がなされた。会場はほぼ満席であり参加者は160名程度であった。

#### 領域8「四極子近藤格子の理論：Pr 1-2-20系の異常物性をめぐって」

中辻 知 (東大物性研)

[A] 鶴田篤史 (阪大基礎工)

[B] 最近, PrTr<sub>2</sub>Al<sub>20</sub> (Tr = Ti, V), PrTr<sub>2</sub>Zn<sub>20</sub> (Tr = Rh, Ir) などPr 1-2-20系と称される立方晶の重い電子系物質が, 電気四極子秩序と超伝導の共存を示す系として注目されている。常圧において四極子転移温度以上で電気抵抗や比熱などの温度依存性が非フェルミ液体的な温度依存性を示す場合と, PrTi<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>のように常圧で見られたフェルミ液体的な振る舞いが加圧により非フェルミ液体的振る舞いに変化し, 四極子転移温度が消失する圧力に向かって超伝導転移温度が急上昇する場合があるという実験の報告がなされてきた。講演では, 鶴田篤史氏が, これらの系の示す異常な振る舞いをほぼ統一的に再現する理論について報告した。非クラマース二重項Γ<sub>3</sub>を構成する2つのf電子がクラマース二重項をもつ伝導電子と混成するモデルを1/N-展開の方法で取り扱い, 電気抵抗の非フェルミ液体的温度依存性がスケールリング則に従うこと, PrTi<sub>2</sub>Al<sub>20</sub>のように常圧・低温でのフェルミ液体的振る舞いが加圧により非フェルミ液体的振る舞いに移行する理由を解明した。また, 超伝導転移温度が四極子の量子臨界点において急上昇する事実も再現した。聴衆は100名を超えて盛況で, 講演後の議論も活発に行われた。今回の講演は, 広く多極子秩序による量子臨界状態やその近傍での非従来型超伝導の研究に通じるものであり, f電子系のみならず強相関電子系の領域の多くの研究者にとって有益であったと考えられる。

#### 領域8「汎関数繰り込み群法による多軌道強相関電子系の解析」

平島 大 (国際基督教大)

[A] 土射津昌久 (名大理)

[B] 近年2次元強相関電子系においては, 従来の標準的解析手法であるRPAやFLEX近似では理解不可能な新奇現象が多数報告されており, 新しい多体理論の構築が急務である。「汎関数繰り込み群」は上記の近似で無視される多体効果(パーテックス補正)を系統的に取り込む優れた理論体系であるが, 実際に適用する際の安定性や数値計算精度等に問題があり普及が遅れていた。

土射津氏は汎関数繰り込み群の計算手法の改良(RG+cRPA法)によってこれらの問題を解決し, 各種2次元電子系の定量的計算を可能にした。この方法では, 高エネルギー

散乱過程を摂動的に取り扱い, 低エネルギー散乱過程を繰り込み群で精度良く解析することで, 安定した定量的計算を可能とする。

講演ではまず, 汎関数繰り込み群やRG+cRPA法の基礎について, わかりやすく解説していただいた。さらに, 近年銅酸化物高温超伝導体で発見された電荷密度波状態が, 電荷, スピン, 軌道自由度の協奏の結果として, この手法によって初めて説明されることが示された。本講演には多くの聴衆が集まり, 講演後の議論では, 理論・実験の両方の側面から活発に行われ, 関心の高さが伺えた。

#### 領域9「透過電子顕微鏡を用いた溶液からの核生成の“その場”観察」

神子公男 (東大生産研)

[A] 木村勇氣 (北大低温科学研)

[B] 核生成は物質形成の始まりであり, 物理的, 化学的なメカニズムの解明は多分野における重要な課題である。しかし, 核生成は微小な領域でかつ非常に短い時間スケールで起こる現象のために, 直接捉えることが難しく, 実験的に迫るのが困難な現象であるが, 木村氏は透過電子顕微鏡(TEM)を用いて, イオン液体を溶媒に用いた塩素酸ナトリウム溶液中での核生成過程の“その場”観察を行い, 核生成過程における相同定を含め, 動画を使って分かり易く説明がなされた。発表では, 溶解する結晶の近傍で様々な多形の微結晶が生成した後に, 安定相が生き残った結果として新たな結晶が生み出されることなどが, TEMの“その場”観察により立証された。木村氏の研究成果は, 結晶成長における核生成過程の飛躍的な理解に繋がることが期待され, 表面・界面分野にとっても非常に興味深い内容であった。木村氏の講演には他領域の聴衆者も多く参加され, 質疑・討論も活発に行われた。

#### 領域9「カルコゲナイド超薄膜の表面・界面における新奇な超伝導物性」

平原 徹 (東工大理)

[A] 劉 燦華 (上海交通大)

[B] 高品質の機能性薄膜およびそのヘテロ構造を用いた新奇な物性開拓は多くの物理学者の興味を集めている分野である。特にカルコゲナイド薄膜はBi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>やBi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>などのトポロジカル絶縁体やMoSe<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub>などの極薄2次元物質として大きな注目を浴びている。本講演では近年この分野において目覚ましい業績を上げている劉氏を招いて, その新奇な超伝導物性に関するご自身の研究成果について講演いただいた。

最初はSrTiO<sub>3</sub>上の単一ユニットセルFeSe薄膜の高温超伝導を超高真空下での4端子電気伝導測定や磁化率測定で検証した実験結果について説明された。特にバルクFeSeの転移温度が8Kであるのに対し, 単一ユニットセルでは100Kを超えるという驚くべき結果が発表された。後半は

NbSe 上の  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  薄膜におけるトポロジカル状態と超伝導状態の共存の検証, そして理論的に予想されているマヨラナ粒子の出現の有無に関する最新の結果が報告された. マヨラナ粒子を実際に観測したという確固たる実験証拠ではないものの, 理論との厳密な比較を行うことにより, 現状の実験データでもかなり近い証拠が出ているという報告であった.

会場には 100 名近くの聴講者がつめかけ, 質疑応答では多くの質問がなされ活発な議論が行われた.

## 領域 12, 領域 11 [Stirring fluids at low Reynolds numbers, or hydrodynamic collective effects of active proteins in biological cells]

富樫祐一 (広大クロマチン動態数理研究拠点)

[A] Alexander S. Mikhailov (Fritz Haber Institute of the Max Planck Society)

[B] 本講演では, Mikhailov 氏らが最近行った, 溶液や膜内にある分子機械が集団として及ぼす流体力学的効果に関する理論研究について, その背景に遡って解説いただいた. 細胞内の混雑環境において, タンパク分子の能動的な構造変化が, 集団として流体力学的なゆらぎ (流れ) を作り出すことにより, 他の分子の拡散を促進・変調しうることが示された. また, そのようなタンパク分子が生体膜内に埋め込まれた場合についても, 膜を構成する脂質の流れを介して同様に拡散を促進しうることが示され, シミュレーションを用いた最近の試みを交えつつ議論がなされた.

本講演は生物物理合同セッション内にて行われ, ポスターセッションと同時時間帯での開催となったが, 70 名近い聴衆が集まった. 理論的側面のみならず, 実際の生体分子・細胞内環境との関連についても多くの質問が寄せられた. 単に拡散を促進するのみならず, 方向性のある動き (ドリフト) を生ずることもできるという点は, 特に興味を持って受け止められていたようである. 細胞内で能動的に働く分子が, 流体を介して, 受動的な分子にエネルギーを供給し駆動している可能性を示唆した点でも, 新たな見方を与えるものであった.

## 【企画講演】

### 素粒子論領域「第 10 回中村誠太郎賞受賞講演」

吉田健太郎 (京大理)

[A] 授賞式: 菅本晶夫 (お茶の水女子大), 受賞講演「ABJM 理論のラーゼン展開について」初田泰之 (ジュネーブ大) (学会プログラムの作成時の所属は DESY であったが, 講演時にはジュネーブ大学に移動した.)

[B] 素粒子奨学会より, 第 10 回中村誠太郎賞の授賞式がとり行われた. 初田泰之氏 (現: ジュネーブ大学) が受賞をし, その業績説明, および表彰式が行われた. その後, 初田氏による受賞講演が行われた.

11 次元時空上の理論である M 理論の性質の解明は, 弦

理論や様々な次元における場の理論のダイナミクスの理解のために極めて重要である. M 理論の量子論的な定義はいまだ知られていないが, AdS/CFT 対応を仮定すれば,  $AdS_4 \times S^7/Z_k$  時空上の M 理論は Aharony, Bergman, Jafferis, Maldacena によって構成された 3 次元超共形場理論と等価であり, 更に局所化の手法を用いることでその分配関数を有限次元の積分として厳密に表せる. これは ABJM 行列模型と呼ばれ, その分配関数の性質の理解は M 理論研究における最重要課題である.

本企画講演において, 初田氏は, 理想フェルミ気体を用いた単一の手法の枠内で, M 理論における 2 種類のインスタントの寄与を再現する手法について解説した. この手法によれば分配関数は複素平面上の線積分として表現され, 2 種類のインスタント効果は二つの系列の極の寄与として解釈される. 一方の極は, WKB 解析から直ちにわかるが, もう一方の極の情報は, 量子力学的な非摂動効果と関連するため, 知ることが難しい. 初田氏は, 後者の極が WKB 展開を全次数で足し上げた後に新たに現れると予想した. WKB 展開の足し上げは難しいが, パデ近似を用いた外挿により, このような極が期待される位置に確かに存在することを高い精度で示した. この結果はある物理量の非摂動補正が, 別の物理量の摂動展開の足し上げによって説明できる例となっており大変興味深い.

## 素粒子論領域「超弦の場の理論の完全な定式化」

吉田健太郎 (京大理)

[A] 大川祐司 (東大総文)

[B] 弦理論は, 一般相対性理論と量子力学を統一的に記述すると期待されているが, 結合定数に関して摂動的にしか定義されていない未完成の理論である. 粒子を場の理論で記述するように, 弦に対しても場の理論の枠組みで非摂動的な定式化を目指すアプローチは弦の場の理論と呼ばれていて, 例えばタキオン凝縮などの現象の解析でその威力を発揮してきた. 光子や重力子などのボソンだけではなくフェルミオンも記述し, 量子論的な議論ができるタキオンを含まない粒子スペクトラムを実現するためには超弦理論を考える必要がある. しかし, 超弦の場の理論の作用のフェルミオンを記述する部分が構成できないということが, 弦の場の理論の研究における約 30 年間にわたる大きな問題であった.

大川氏は, 昨年 8 月の国友氏との共著論文において, 端点を持つ超弦の場の理論のフェルミオンを記述する部分を含むローレンツ共変でゲージ不変な作用の構成に成功した. これは超弦の場の理論の初めての完全な定式化であり, 弦の場の理論の研究において新たな方向性を切り開くものである. 本企画講演では, フェルミオンを記述する部分を含む作用の構成の困難がどのように克服されたのか, また今後どのような進展が期待されるのかについて解説していただいた.

## 素粒子論領域「宇宙ニュートリノから探る新物理」

浅賀岳彦 (新潟大)

[A] 太田俊彦 (埼玉大)

[B] 2015年のノーベル物理学賞は、ニュートリノ振動の発見で梶田氏が受賞した。実験結果はニュートリノ質量の存在、つまり標準模型を超えた新しい物理の存在を示した。よって、ニュートリノは新しい素粒子理論への架け橋となる重要な素粒子である。また、近年 IceCube 実験により観測された宇宙ニュートリノは、新物理を探るためのこれまでにない探針として世界中で活発に研究が進められている。

本講演では、IceCube 実験により観測された宇宙ニュートリノのエネルギー・スペクトルの特徴的な振る舞い、つまりエネルギーが0.4~1 PeV程度のニュートリノの欠損に着目した。この観測結果がレプトン・セクターの新物理にどのような示唆を与えるかを一般的に解説していただいた。さらに、講演者の研究成果である MeV 領域の質量を持つ粒子により媒介されるレプトン力を導入することで、宇宙ニュートリノの特徴的なスペクトルが再現されること、さらにこの場合ミュオン異常磁気能率における理論と実験の長年の不一致を解消する可能性があることが説明された。当日多くの方に参加していただき、活発な質疑・討論も行われ、大変有意義な講演となった。

## 素粒子論領域「有限温度 QCD における U(1) カイラル anomalies」

青木保道 (名大 KMI)

[A] 深谷英則 (阪大理)

[B] QCD の軸性 U(1) 対称性は量子異常で破れているが、有限温度で回復する可能性があることが指摘されている (Pisarski-Wilczek 1984)。2 フレーバー QCD の有限温度相転移と軸性 U(1) 対称性の関係は、相転移の次数を左右し、ひいては3 フレーバー理論の相図 (いわゆるコロニアプロット) に影響を与える。したがって、現実世界の QCD 相転移のダイナミクスとの関係もあり、この問題の理解はきわめて重要である。これに対し、昨今異なった格子作用を用いた数値的研究が複数のグループによって行われているが、結論は出ておらずむしろ混沌としている状況と言える。

本企画講演では2 フレーバー理論の有限温度相転移において、カイラル対称性が厳密な格子理論を用いた、解析的、数値的の両面からのアプローチで、軸性 U(1) 対称性の高温での回復の可能性についての詳細な報告があった。この問題では格子上のカイラル対称性を厳密に保つことが特異的に重要であり、その数値計算の結果、軸性 U(1) 対称性が回復し、したがって、相転移の次数が一次になる可能性が指摘された。さらに大規模な数値計算によりこの重要な問題の解決が期待される。

## 素粒子実験領域、素粒子論領域「標準模型を超える物理とエネルギーフロンティア実験」

西田昌平 (KEK)

[A] 諸井健夫 (東大理)

[B] LHC でヒッグス粒子が発見され標準模型の粒子はそろった。今後は標準模型を超える物理を発見することが素粒子物理学の最大の目的である。そのような状況でエネルギーフロンティア実験、特に ILC に期待することを諸井健夫氏に講演していただいた。諸井氏は過去に精密測定から多くのことを学んだことを例に挙げ、ILC でも同様にヒッグス粒子と標準模型粒子との結合定数を精密測定することにより、LHC で SUSY などの新物理が発見されなくても、ILC で発見できる可能性があると報告した。

また、現在 LHC で質量 750 GeV に2 光子事象の超過があり世界的に注目されているが、その事象がグルーオン融合過程で生成される新しいスカラー粒子  $\Phi$  と仮定し ILC に適用した。電子陽電子衝突モードで光子の反跳から  $\Phi$  粒子は生成が可能であり、光子光子衝突モードでは 100 fb を超える大きな生成断面積がモデルに依存せず可能であることを示した。この新粒子が本当であるなら、ILC では新粒子の精密測定が可能であり、その背後にある物理の全貌解明を期待すると述べた。

上記二つの物理を遂行するためにはエネルギー拡張性があり、技術的に成熟した加速器が良く、ILC ではそれが可能であり特に光子光子衝突モードの重要性が強調された。

講演に対する興味は高く 160 名を超える聴衆が集まり、議論も活発に行われ充実した企画講演であった。(報告：石川明正 (東北大))

## 素粒子実験領域、ビーム物理領域「いよいよ始まる SuperKEKB! 次世代型高輝度加速器実験の幕開け」

市川温子 (京大理)

[A] 大西幸喜 (KEK 加速器研究施設)

[B] この講演では、KEK 加速器の大西氏より、LHC 後、世界で初めて稼働した陽電子・電子衝突型加速器として注目を集めている SuperKEKB についての報告があった。2018 年本格的データ収集開始予定の SuperKEKB/Belle II 実験のための「スーパーな B 工場」としての役割を果たす SuperKEKB は、B 工場として世界最高性能を持つ KEKB 加速器の 40 倍の輝度を目指す。2016 年前半の衝突なしの調整運転 (Phase 1) から始まり、2017 年後半に開始される衝突実験と最終収束磁石調整 (Phase 2) を経て、2018 年秋の本格稼働 (Phase 3) という予定となっている。2016 年 2 月 8 日に初めてのビーム注入が始まり、18 日に初蓄積となった。その後もマイルストーンを積み重ね順調な立ち上がりとなっている。講演では、加速器の輝度やバンチ構造の概念を簡単な模式図を使い非専門家向けの導入から始まり、如何に高い輝度を得るのかという点を主眼とした解説が行われ、残りの時間は実際に稼働の始まった SuperKEKB 加

速器の現状が現場の苦労話を交えて報告された。一口に「ビーム周回」と受け止めていた事柄について、現場ではどのようなことが起き、どのような努力が成されているかについて理解を深めることができる内容であった。(報告：早坂圭司(新潟大))

#### 素粒子実験領域「Search for Dark Particles at Belle and Belle II」

市川温子(京大理)

[A] Igal Jaegle (Univ. of Florida)

[B] この講演では、フロリダ大学の Igal Jaegle 氏より暗黒物質の候補として近年積極的に探索されている“Dark Particle”についての Belle 実験での探索状況と、Belle II 実験における展望についての報告があった。余剰な U(1) ゲージ相互作用が自然界に隠れていたとして、これの担い手であるゲージボソンの存在を仮定するとき、これを“Dark Photon”と呼ぶ。Belle 実験では、電子・陽電子衝突で生成された Dark Photon が光子に転換された後、Dark Photon が1つ生成された場合と、新種のヒッグス粒子と随伴生成が起きてさらにこのヒッグス粒子が2つの Dark Photon となり結果的に3つの Dark Photon が作られた場合について探索が行われ、通常的光子との結合を最も単純な描像で定式化した場合の結合定数と Dark Photon の質量がなす二次元平面に対して制限が与えられた。講演は、Dark Particle の動機となる暗黒物質の導入から始まり、適宜背景事象の見積もり方法など解析方法の丁寧な解説、将来の展望の紹介が行われ、共同研究者ならずとも理解しやすい内容であり、Belle/Belle II 実験でこの Dark Particle 探索の第一人者として当該解析グループを率いて活躍している Jaegle 氏ならではの、講演であった。(報告：早坂圭司(新潟大))

#### 宇宙線・宇宙物理領域「J-GEM：天体重力波の電磁波追跡観測ネットワーク」

小汐由介(岡山大)

[A] 吉田道利(広島大)

[B] 重力波イベントの追観測を目指す、可視光、赤外線観測および電波観測を含む日本の天体観測ネットワークである J-GEM (Japanese collaboration for Gravitational wave ElectroMagnetic follow up observation) の活動と成果について発表された。重力波を放出する天体はコンパクトで高密度であり、重力波のみならず電磁放射やニュートリノなどでも同時観測が期待できる。追観測が成功すれば重力波観測に確信を与え、その天体の機構解明に迫ることが可能になる。J-GEM は米国 LIGO 実験と協定を結んでおり、先ごろ初観測された重力波イベント GW150914 の追観測を試みた。今回は世界中の他の観測も追観測には成功しなかったが、本講演では J-GEM での追観測の経緯が興味深く語られた。また、中国チベットに設置する望遠鏡、広視野 CCD

などの開発状況・成果が報告された。重力波初観測に関連したホットな話題であり、一方で光・赤外天体観測については物理学会では講演が少ないこともあり、多くの聴衆の関心を引き、企画講演として大成功であった。

#### 領域8「硫化水素の高圧誘起高温超伝導」

竹下 直(産総研)

[A] 清水克哉(阪大基礎工極限科学セ)

[B] 一昨年の12月に arXiv において最初の報告が行われた硫化水素の超高压下における圧力誘起超伝導は、本論文の査読作業が少々長くなったこともあり、現時点まで、これまでの実験事実や理論の立場からのまとめとなるような講演を行う機会を逸してきた。そこで今回、硫化水素の高压下の振る舞いに絞った企画講演を提案した。本講演では実験的な立場からのこれまでの結果のレビューおよび講演者が日本で行った電気抵抗測定による追試と新規の実験的な検証となる圧力下構造解析の結果についての報告が行われた。この種の実験は、高度な実験技術とこれまでの経験が必要であり、結果の追試を行うことのできる研究施設も世界において限られた箇所にしかない。したがって、たとえ追試の結果であっても、貴重な実験結果であるといえる。

講演では、完全に独立した実験においても硫化水素の圧力誘起超伝導が確認されたということ、および高压下構造解析により超伝導相における硫黄原子の位置が同定されたこと、が報告された。これらにより H<sub>2</sub>S から一部単体硫黄が脱離した H<sub>3</sub>S が超伝導の担い手となっていることが示された。

#### 領域8「硫化水素超伝導の理論的研究の現状」

竹下 直(産総研)

[A] 明石遼介(東大院理)

[B] 実験に関する講演に続いて、超高压下の H<sub>2</sub>S、H<sub>3</sub>S の構造に関する理論的な研究成果のレビュー、および種々の結晶構造の候補に対する第一原理計算からの吟味の結果、その際の超伝導転移温度  $T_c$  の予想などが示された。また、計算手法に関する解説も行われた。この超伝導は BCS 理論で説明がつくとされ、したがって各構造の安定性の議論のみならず、超伝導性の実現やその時の転移温度  $T_c$  の予測までかなりの精度で行うことができるという、これまでの種々の高温超伝導体とはやや違った興味深い面がある。構造を含む理論主導の超伝導探索という分野が今後拓かれていく可能性があり、その魅力を感じることができた。

両講演とも250名程度の参加があり、超伝導転移温度の大幅な記録更新という実験事実は日常的に超高压に携わっていない聴者にも魅力的なものであることが窺えた。連続した二講演により硫化水素の高压下超伝導に関する良いまとめができた。この分野への今後の新たな研究者の参加が期待される。

## 【チュートリアル講演】

### 理論核物理領域, 実験核物理領域「中性子過剰な原子核の物理」

木村真明 (北大理)

[A] 宇都野穰 (原子力機構先端基礎)

[B] 中性子数が陽子数に比べて非常に多い中性子過剰核の物理は現在の核物理学において中心的課題となっている。従来知られていた殻構造の秩序は、魔法数の破れや新魔法数の発見によって再構築が求められ、さらには新奇の弱束縛系・非束縛核系や、中性子星の構造を探る鍵となる中性子スキン現象にも注目が集まっている。2007年には理化学研究所に新世代型の不安定核ビーム施設RIビームファクトリー (RIBF) が稼動し、中性子束縛限界にいたる幅広い中性子過剰核の実験が可能となった。理論的にも、第一原理計算や大規模殻模型計算などが、今世紀になって格段に進歩した。中性子過剰核の物理はまさに黄金期を迎えていると言える。このような中性子過剰核の物理を広く鳥瞰し、現状を踏まえた上で、今後の研究の方向性を議論するために、代表的な理論アプローチの一つである殻模型計算の専門家である宇都野穰氏にチュートリアル講演を依頼した。チュートリアル講演では、まず、中性子過剰核でこれまでに知られている諸現象が概説された。続いて、魔法数の破れや新魔法数出現の原因である、「殻進化」とそのメカニズムが解説され、その結果として引き起こされる魔法数20, 28の消滅と新魔法数16, 32, 34の出現などが、具体的な研究例と共に紹介された。さらに、殻進化によって引き起こされるであろう、より重い核での魔法数の変化も議論された。講演内容は、不安定核研究を専門とする研究者、大学院生は勿論、ハドロン物理、原子・分子物理、宇宙物理などの隣接分野の研究者、大学院生にも分かりやすく、魅力的な解説であり、多くの参加者を集め大変有意義であった。

### 領域4「トポロジカル絶縁体とDブレーンの対応」

横井直人 (東北大金研)

[A] 木村太郎 (慶應大日吉物理)

[B] 近年のトポロジカル絶縁体を端緒とするトポロジカル物質の研究においては、ディラック電子や量子異常などの概念が現れ、素粒子理論や原子核理論などとの本質的な関連が指摘されている。本講演では、トポロジーをキーワードにこれらの他分野の間の橋渡しを目指し、物性理論から素粒子・原子核理論まで多岐にわたる分野において量子多体系の理論的研究を行っている木村太郎氏に最近のご

研究について講演していただいた。

講演では、超弦理論におけるDブレーンの導入から始まり、場の量子論における磁気単極子や渦糸などのトポロジカルな配位とDブレーンとの対応を経由して、トポロジカル絶縁体を特徴付ける電子のエネルギーバンドの形状とDブレーンの高次元空間における形状との対応について詳しい説明がなされた。以前から知られていたトポロジカル物質の安定性と超弦理論におけるDブレーンの安定性の議論の数学的類似性を超えて、両者の物理量の間の対応が具体的に示され、この対応によりトポロジカル物性と素粒子理論の研究に対し、お互いに新しい視点が提供されるものと期待される。

講演の参加者は物性物理や素粒子理論の研究者など40名を超え、講演後には活発な質疑応答もなされ有意義な講演となった。今後もこのような学際的な取り組みを継続することの重要性を再認識した。

## 【インフォーマルセッション】

### 宇宙線・宇宙物理領域「重力波の初検出 (GW150914) の持つ意義」

小汐由介 (岡山大)

[A] 田中貴浩 (京都大)

[B] 2016年2月11日にLIGOより発表された重力波の検出は物理学にとって非常に重要な発見であり、特に今後の宇宙物理の研究において大きな進展が期待されることから、急遽、インフォーマルセッションの開催を認めていただきました。セッションでは京都大学の田中貴浩氏に重力波の初検出の意義についての講演をお願いしました。本講演では、まずLIGOによる今回の観測された重力波信号についてのお話があり、続いて、その物理的な意義をブラックホールの物理、初代星起源の連星形成シナリオの観点から詳細に解説をしていただきました。今回の信号は大きなブラックホール合体からの重力波でありましたが、それは専門家にとっても予想外の発見であり、大きな驚きをもって迎えられました。さらに今後の重力波観測における展望について、電磁波やニュートリノなど他の観測とのいわゆるマルチメッセンジャー観測も含めて言及されました。当日は300人を超える収容可能な教室に立ち見が出るほど盛況であり、NHKからの取材がされるなど、内外から大きな注目を浴びていることが改めて示されました。本セッションを契機にさらに重力波研究が進展することを期待したいと思います。

(2016年5月10日原稿受付)

## 第106回日本学士院賞： 森田浩介氏

玉尾皓平\* (理研 tamao@riken.jp)

理化学研究所仁科加速器研究センター超重金属研究グループグループディレクターで九州大学大学院理学研究院教授の森田浩介氏が、113番超重金属の発見のご業績で、第106回日本学士院賞(2016年)を受賞されました。2015年、森田氏の研究チームが、国際純正応用化学連合IUPACから113番元素の発見者として認定され、命名権を与えられたことが高く評価されたものと、心よりお祝い申し上げます。

森田チームによる苦節10年余の113番元素発見物語は、日本物理学会の皆さんは既にご存じのことでしょうから、ここでは、「一家に1枚周期表」を作成してきた立場からこの度の慶事に花を添えたいと思います。113番元素合成の最初のイベント観測は2004年7月23日で、理研からプレス発表されたのが9月28日のことです。文科省のご支援を得て筆者らが「一家に1枚周期表」初版の制作に取り掛かったのとまったく時を同じくしており、すぐさま文科省から、「113番元素はどうするの？」と電話での問い合わせがありました。「もちろん載せません」と答えて、初版では日の丸の国旗と共に「2004年7月23日に日本の理化学研究所で発見された新元素」と記載しました。2005年4月1日、京大から理研に転職した筆者は、その夜、矢野安重仁科センター長(当時)、森田氏らと「113番元素」を肴に呑み交わしたら、何と、その深夜、4月2日未明に第2イベントを観測、筆者は「福の神」と呼ばれることになりました。その後はいくら一緒に呑んでも残念ながらご利益は発揮できませんでした。それでも特別推進研究を2007年度に同時に獲得するというご縁もあり、近くで応援し続けてき

ました。2012年の第3イベントを観測するまで、森田チームの10年余に及ぶ忍耐と不屈の取り組みに改めて深甚の敬意と祝意を表したいと思います。

森田グループによって提案された113番元素の名称と元素記号、Nihonium, Nhが、6月8日にIUPACから公表され、5か月間の公開レビュー中です。日本語名「ニホニウム」は筆者の所属する日本化学会の命名法専門委員会が決定しました。わが国で合成・発見された元素が初めて周期表に載る日も間近です。筆者たちもこれを載せた「一家に1枚周期表」第10版の出版を今から楽しみにしています。

周期表に永遠に残る113番元素。その周期表を手にする子供たちが誇りと憧れを抱いてくれることでしょう。ちょうど筆者らの世代が小学生時代に湯川秀樹博士に憧れたように、そして、その発見物語が森田浩介氏の名前と共に親から子に、子から孫に語り継がれて文化となることも願っています。

この度はまことにおめでとうござい  
ます。119番元素合成、期待しています。

(2016年4月15日原稿受付)

## 科学技術分野の文部科学大臣表彰

2016年4月12日に、平成28年度科学技術分野の文部科学大臣表彰が発表されました。科学技術特別賞、科学技術賞および若手科学者賞の受賞者のうち25名が本会の会員です。受賞おめでとうございませす。以下、賞ごとに五十音順に受賞者名(敬称略)と業績を記載させていただきます。\*

科学技術特別賞

○森田浩介：113番元素の人工合成及びその崩壊過程の確認  
科学技術賞(開発部門)

○清水 禎：高温超伝導体を利用した世界初の超1 GHz NMR装置の開発  
○寺内正己：電子顕微鏡用軟X線発光分析システムの開発育成  
科学技術賞(研究部門)

○北川 宏：元素間融合による革新的ナノ合金の開発と応用研究  
○永目諭一郎、塚田和明、浅井雅人：シングルアトム分析法の開発と超重金属の化学的研究  
○原田秀郎、藤 暢輔：中性子共鳴分光法の大規模革新とその応用研究  
○宮永憲明：先進的ペタワットガラスレーザーの開発研究  
○森 初果：電子とプロトンが関連した機能性有機物質の開発と物性研究  
科学技術賞(理解増進部門)

○崎山智司：産学公民連携型教育プロジェクトによる科学技術の理解増進  
○野村裕美子(吉武裕美子)：女性科学者による女性向けの科学普及啓発若手科学者賞

○家田淳一：ナノ磁性体による磁気エネルギー利用法の理論研究  
○大関真之：量子情報理論を拓く有限次元スピングラス理論に関する研究  
○小川直毅：光制御による電荷-スピン-軌道結合物性の研究  
○桐山淳子(谷口淳子)：ナノ細孔中液体<sup>4</sup>Heを用いた1次元超流動の実験的研究  
○小林浩和：新規ナノ物質の創製と水素機能開拓に関する研究  
○中山耕輔：鉄系高温超伝導体バルク及び原子層薄膜の電子構造の研究  
○林 将光：電流駆動磁化制御と薄膜ヘテロ構造のスピン軌道効果の研究  
○廣理英基：超高強度テラヘルツ光源の開発と非線形分光に関する研究  
○松石 聡：機能性電子化物および酸水素化物の研究  
○宮内雄平：単層カーボンナノチューブの合成及び光物性に関する研究  
○山崎優一：多重計測電子分光による電子波動関数の立体形状の研究  
○山田琢磨：プラズマ乱流におけるストリーマー構造の発見と研究

(2016年4月18日原稿受付、  
文責：会誌編集委員会)

\* 受賞者が本会会員であるかどうかは会員名簿にて確認させていただきましたが、もし、間違いなどありましたら、会誌編集部宛にご連絡いただければ幸いです。

\* 豊田理化学研究所

H. カーオ著, 岡本拓司監訳

## 20世紀物理学史；理論・実験・社会（上）

名古屋大学出版会, 名古屋, 2015, v+299p, 22×15 cm, 本体3,600円 [専門～学部向]

ISBN 978-4-8158-0809-9

H. カーオ著, 岡本拓司監訳

## 20世紀物理学史；理論・実験・社会（下）

名古屋大学出版会, 名古屋, 2015, iv+330p, 22×15 cm, 本体3,600円 [専門～学部向]

ISBN 978-4-8158-0810-5

廣政直彦 (元東海大)

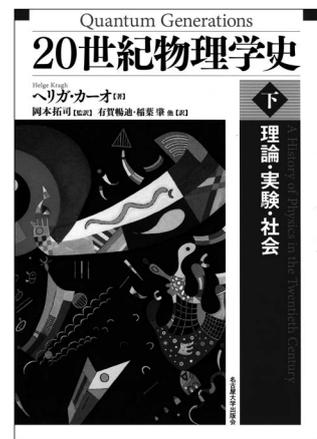
本書は、デンマークの科学史家ヘリガ・カーオの1999年の著書 *Quantum Generation: A History of Physics in the Twenties Century* の全訳である。ただし、今回の日本語への翻訳に当たって、原著者により多くの訂正追加がなされており、「訳者あとがき」にもあるように、改訂第2版といえるものである。

20世紀は物理学にとって大きな変革期であった。しかしそれは、相対性理論や量子力学の形成といった物理学の理論の変革だけでなく、社会における物理学や物理学者の役割の変革期でもあった。また、物理学が専門分化し、多様化してゆく時代でもあった。そのような、複雑化し多様化してゆく20世紀の物理学の様相が、4部29章にわたって記述されている。

第I部では、19世紀末から第一次大戦終結までの、量子論や相対論に代表される物理学の発展や、物理学が産業と結びつき、また戦争をきっかけとして、間接的ではあるが、政治と関わりをもつ状況について述べられている。第II部では、第一次世界大戦終結後から第二次世界大戦の終結までの、ドイツの物理学研究の状況、量子力学や原子核物理学の発展、また量子力学の哲学的問題や原子爆弾の開発といった、思想、政治、社会との関係など、多岐にわたる記述がなされている。特に、第一次大戦後のドイツの物理学の状況や、原子爆弾開発など、物理学が社会や政治と深く結びついてゆく過程についての記述が興味深い。第III部では、第二次大戦後から20世紀末までの、素粒子物理学、場の理論、固体物理学

等の発展、さらに軍事科学やビッグ・サイエンス等について記述されている。この第III部の後半は、歴史的研究があまりされていない分野や、歴史的評価が定まっていない領域もあり、原著者の記述に関して異論があるかもしれない。第IV部では、以上をふまえて、20世紀の物理学の概括がされる。ここでは、第二次大戦後に起こった変化として、物理学が「道具主義的・実用主義的な思考様式」へと転換し、物理学の中に哲学の居場所がなくなったことや、20世紀の物理学からすると、民主主義の自由な精神が科学の発展にとって必要不可欠であるとは必ずしも言えないことなど、興味深い指摘がなされている。これらの指摘は、今後の物理学史のテーマになるかもしれない。

ところで、一般に、物理学は古い理論の限界が明らかになり、それに代わって新しい理論が現れ、より優れた「正しい」理論へと直線的に進むと思われがちである。しかし、物理学の歴史はそのように単純なものではない。ときには、出口のない袋小路に入り込んだり、かつて行き詰まった理論が新たな装いで復活することもある。それは、物理学の研究が物理学者という人間によって営まれているからである。物理学の歴史は、他の歴史と同じく人間の営みの物語であり、個人の思想や哲学、社会や時代の状況などが絡み合い、複雑な様相を呈する。本書は、そのような複雑な20世紀の物理学の歴史を、29章で叙述しているが、この29章を第1章から順番に読む必要はあ



るのもよい。物理学史の面白さを実感できるであろう。また、巻末の参考文献以外に、原著者による文献案内や訳者による注も記載されており、より詳しく調べることができる。本書を読み、物理学史に興味をもつ人が増え、できれば物理学史の研究者が現れることを期待したい。

ところで、本書の内容とは関係ないが、カバーのイラストについて一言述べておきたい。カンディンスキーの「円の周り」が使われており、物理学史の本とは思えないしゃれたカバーになっている。これにより、書店で本書を手に取りやすくなるかもしれない。訳文は読みやすく、一般の読者にも読んでいただきたい本である。書店で本書を手に取り、物理学史の面白さを知る人が少しでも増えることを願っている。

(2016年1月19日原稿受付)

大森賢治編

## アト秒科学；1京分の1秒スケールの超高速現象を光で観測・制御する

化学同人，京都，2015，xi + 178p，22×16 cm，本体3,800円 [専門・大学院向]

ISBN 978-4-7598-1805-5

芦原 聡 (東大生産技術研)

本書を開くと，アト秒パルス発生装置と其中で鮮やかに光るアルゴンプラズマの写真が目に飛び込んでくる。おもとにあるレーザー装置はさておき，高次高調波発生そのものはシンプルな系で起こっているようである。これらの写真に続く，理論と実験データを表すカラー画像は，フェムト秒科学でお馴染みのポンプ・プローブデータとは趣を異にし，質的にも新しい光科学の様相が窺える。

本書はアト秒科学の入門書として編纂されている。アト秒科学は，短時間性の究極を追い求め，高速現象の観測・制御を目指す科学のフロンティアと位置づけられよう。1990年以降のフェムト秒レーザーの進展，特にその高強度化によってもたらされた強光子場科学を足場にして，アト秒領域へ踏み込むものである。フェムト秒科学が原子核の運動の観測・制御を可能にしたのに対して，アト秒科学は原子核の周りに存在する電子の運動の観測・制御を可能にすると期待される。

本書の全5章のうち，2つの章が理論，3つの章が実験の解説となっており，いずれも各分野の専門家によって執筆されている。第1章「アト秒光パルス発生の理論」では，アト秒光パルスの発生や応用を理解するうえで基礎

となる概念とその理論的側面が説明されている。第2章「アト秒領域のダイナミクス—トンネルイオン化の数理」では，原子や分子のトンネルイオン化に焦点を絞り，その数理が詳しく解説されている。第3章「アト秒光パルスの発生の実験」では，超短パルス高出力レーザーの進歩，高次高調波によるアト秒光パルス発生・測定についてまとめられている。第4章「アト秒光パルスの応用研究」では，アト秒光パルスの計測手法およびアト秒科学における分光手法が紹介されている。第5章「アト秒精度の極限コヒーレント制御」では，2つのレーザーパルスを用いて物質中の波動関数の干渉，ひいては物質の量子状態を美しいまでに制御する実験が紹介されている。

アト秒科学には，従来の非線形光学の教科書には書かれていない概念が数多く登場する。本書では，その概念と理論的側面が丁寧に解説されているうえ，付録に用語集がまとめられており，入門者に親切な構成となっている。実験の章でも重要なトピックがわかりやすく紹介されているが，アト秒科学に特徴的な現象や手法がいくつも登場し，興味深い。例えば，高次高調波発生はアト秒パルスを発生するための手法として活用されているが，その物理を巧



みに利用すると原子・分子の構造とダイナミクスを計測できるのである。

本書のまえがきによると，アト秒科学とは，孤立原子・分子から固体にまで至る幅広い物質を対象とし，電子波束の観測・制御を通して，物性の量子力学的な本質の理解や新たな量子機能性の発現を目指す研究領域，ということである。すると，アト秒科学は，今後，その対象を気相原子・分子から界面や固体へと広げ，多面的な発展をするだろう。本書は，その根幹をなす理論と実験技術をまとめており，当該分野を学ぶ科学者・技術者にとって有益な一書になるであろう。

(2016年2月17日原稿受付)

本欄では物理に関する新著を中心に，隠れた良書や学会員にとって有意義な本などを紹介していきます。

紹介書籍の表紙画像につきましては，出版社の許可を得られたもののみ掲載しております。

## 掲示板

毎月1日締切(17:00必着), 翌月号掲載。但し1月号, 2月号は前々月の20日締切。修正等をお願いする場合があります。締切日よりなるべくお早目にお申込み下さい。書式は<http://www.jps.or.jp/books/keijiban.php>にありますので, それに従ってお申込み下さい。webからのお申込みができない場合は, e-mail: [keijiban@jps.or.jp](mailto:keijiban@jps.or.jp) へお送り下さい。必ず Fax 03-3816-6208 へも原稿をお送り下さい。Faxがありませんと, 掲載できない場合がございます。HP掲載をご希望される場合は, 上記URLの「2. ホームページ掲載」をご参照下さい。本欄の各項目の内容につきましては, 本会は関与致しかねますのでご了解下さい。

## 人事公募

### 人事公募の標準書式(1件500字以内)

1. 公募人員(職名, 人数) 2. 所属部門, 講座, 研究室等 3. 専門分野, 仕事の内容(1行17字で7行以内) 4. 着任時期(西暦年月日) 5. 任期 6. 応募資格 7. 提出書類(書類名の前に○印をつけ簡潔に, 1行17字で6行以内) 8. 公募締切(西暦年月日, 曜日) 9. ①書類送付先(郵便番号, 住所, 所属, 担当者名) ②問合せ先(郵便番号, 住所, 所属, 担当者名, 電話, Fax, e-mail等, 必要と思われるもの。①と同じ場合は省略) 10. その他(1行17字で5行以内)

### ■北海道学術大学工学部専任教員

1. 教授, 准教授又は講師1名
2. 生命工学科(一般教育担当教員)
3. 広い意味での物理学分野, 着任後は一般教育科目としての「物理学概論」, 及び工学部専門教育科目としての「物理学」, 「物理学実験」等を担当。
4. 2017年4月1日
5. なし
6. 博士号取得者又は着任迄の取得見込者。私学における教育に理解のある方が望ましい。
7. ○履歴書(写真, e-mail 含) ○教育経歴と教育歴 ○研究業績(論文・著書・特許)目録 ○主要論文・著書の別刷5編以内 ○主要論文・著書の要旨(3編以内を選び, 各約1,200字) ○外部

資金獲得状況・受賞歴等 ○教育と研究の抱負(約2,000字) ○照会可能者2名の氏名, 連絡先

8. 2016年8月29日(月)必着
9. ①064-0926札幌市中央区南26条西11-1-1 北海道学術大学工学部 高橋考太 ②高橋考太 電話011-841-1161(ex.7933) [kohta@hgu.jp](mailto:kohta@hgu.jp) 又は 前田秀基 電話011-841-1161(ex.2268) [h-maeda@hgu.jp](mailto:h-maeda@hgu.jp)
10. 封筒に「教員応募書類在中(物理学)」と朱書き簡易書留で送付。今後の連絡の為に応募に際し件名を「物理学人事」としたe-mailを [butsurei@hgu.jp](mailto:butsurei@hgu.jp) に送付。

### ■東京大学大学院理学系研究科教員

#### [I]

1. 准教授又は講師1名
2. 放射線管理室
3. 放射線関連科学(放射化学, 放射線生物学, 放射線物理学, 放射線管理理学等)
4. 2017年4月1日
5. なし
6. 理学系研究科・理学部において放射線管理室を運営し, 放射線管理に従事。理学系研究科・理学部における教育(例えば放射化学の講義や実習等)・研究を担当。
7. HP参照。
8. 2016年8月31日(水)必着
9. 113-0033東京都文京区本郷7-3-1 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設事務室
10. 封筒に「放射線管理室教員応募書類在中」と朱書き郵便の場合には書留で送付。詳細は<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/recruit/?id=712> 参照。

#### [II]

1. 教授1名
2. 物理学専攻原子核物理学理論
3. ハドロン物理学分野に於いて, 理論研究の新たな展開に意欲的に取り組む方。
4. 2016年4月1日以降早期
- 5は[I]と同じ。
6. 博士号取得者, 又は同等以上と認められる者。
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究業績リスト(原著論文, 総説, 著書, 特許, 受賞, 招待講演, 外部資金獲得実績等に適宜分類。論文等の共著者名は全て記入) ○主要論文別刷5編以内(コピー可) ○今迄の研究概要(A4, 約2枚) ○着任した場合の研究計画(A4, 約2枚) ○照会可能者2名の氏名と連

絡先

8. 2016年8月31日(水)
9. ①113-0033東京都文京区本郷7-3-1 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻長 長谷川修司 ②大塚孝治 [otsuka@phys.s.u-tokyo.ac.jp](mailto:otsuka@phys.s.u-tokyo.ac.jp) 電話03-5841-4134
10. 本研究科では男女共同参画を積極的に推進。詳細は<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/overview/gender/promotion.html>の理学系研究科男女共同参画基本計画を参照。

### ■京都産業大学理学部教員

1. 教授, 准教授又は助教1名
2. 物理科学科
3. 物理科学分野(物性物理学分野, 原子核物理学分野, 宇宙論を除く素粒子物理学分野)の理論系, 物理学と数学の専門教育科目及び全学共通教育科目の講義・演習, 卒業研究, 大学院理学研究科の講義と研究指導等。
4. 2016年度中が望ましい
5. 教授, 准教授の定年は65歳。助教は5年の任期制で審査により准教授に採用される場合あり。
6. 女性に限る。博士号取得者。
7. ○個人調書 ○研究業績リスト ○主要論文5編以内 ○今迄の研究概要及び今後の研究計画 ○外部資金の実績状況 ○教育・研究指導についての抱負 ○学位記の複写又は学位証明書 ○推薦状2通 ○連絡先 ○履歴書等応募書類一式の返却に関わる書類
8. 2016年9月9日(金)必着
9. ①603-8555京都市北区上賀茂本山 京都産業大学理学部物理科学科 山上浩志 ②電話075-705-1902(山上研究室)/1463(理学部事務室) [rigaku-phys-2017@cc.kyoto-su.ac.jp](mailto:rigaku-phys-2017@cc.kyoto-su.ac.jp)
10. 詳細は[http://www.kyoto-su.ac.jp/news/20160627\\_150\\_koubo2.html](http://www.kyoto-su.ac.jp/news/20160627_150_koubo2.html) 参照。

### ■慶應義塾大学法学部助教

1. 助教1名
2. 日吉物理学教室
3. 2限続きの物理学実験クラスにおける実験指導補佐(2週間で約8クラス), 実験授業を実施する為に必要な準備や後片付け, 実験器具・機器の保守や管理等。
4. 2017年4月1日
5. 3年間(予定), 契約は1年毎。適任であると3年後に判断した場合, 専任の

- 助教として新規採用を予定。但し、その後も原則として昇任は認められない。
- 修士号取得者。年齢不問。
  - 履歴書(写真添付・e-mail含) ○業績リスト(業績リストは、論文、学会発表、その他の項目別にリスト化) ○教育に関する抱負(1,600字以内) ○照会可能者3名の氏名、連絡先 ○前記1名からの推薦状 ○結果を通知する為の返信用封筒(82円切手を貼付した定型封筒に返信宛先明記)
  - 2016年9月28日(水)必着
  - 223-8521 横浜市港北区日吉4-1-1 慶應義塾大学法学部 日吉物理学教室
  - 封筒に「物理学有期助教応募書類」と朱書きし必ず書留郵便又は宅配便で送付。応募書類不返却。詳細は<http://www.law.keio.ac.jp/employ/>を参照。

#### ■核融合科学研究所国際特任研究員

- 国際特任研究員1名
- 自然科学研究機構では、プリンストン大学との間で、宇宙/天体プラズマと核融合プラズマに共通する、プラズマ物理学の基本原則を探求する事を目指した国際協力研究を進めており、この枠組みの中に置かれた4つの研究課題に係わる国際共同研究を行う。研究手法としては、理論研究、シミュレーション研究、観測研究、室内実験研究を含む。2年間の始めと終わりの各約2ヶ月間は、核融合科学研究所内に滞在し、国際共同研究のプランニングと纏めの作業を行い、それ以外の期間は、プリンストン大学の研究室に派遣。
- 2017年4月1日
- 2年(年俸制)
- 採用時点の博士号取得者等
- 履歴書 ○研究歴 ○選択した研究課題に対する研究計画書 ○研究業績リスト ○その他選考において参考となる書類
- 2016年9月30日(金)17時必着
- 核融合科学研究所 管理部総務企画課 人事・給与係 電話0572-58-2012
- 封筒に「国際特任研究員公募関係書類」と朱書きし郵送の場合は簡易書留で送付。詳細は<http://www.nifs.ac.jp/jinji/>参照。

#### ■核融合科学研究所ヘリカル研究部助教

[ I ]

- 助教1名
- プラズマ加熱物理研究系粒子ビーム加熱物理研究部門

- 大型ヘリカル装置(LHD)の中性粒子ビーム入射装置(NBI)の安定的な運転の為の性能向上と、NBIによって生成した高エネルギー粒子の計測を通して高エネルギー粒子の閉じ込め特性を明らかにすると共に、ヘリカル型核融合炉の実現に向けた学術研究を推進。プラズマ中の高エネルギー粒子の閉じ込め特性の解明は、環状プラズマ閉じ込めに共通の課題であることから、国内外の共同研究に積極的に参加し、協力的に研究を推進することを求める。
- 決定後早期
- 5年(年俸制)、在任中の業績評価により再任可
- 博士号取得者等
- 履歴書 ○研究歴 ○就任後の抱負 ○推薦書 ○研究業績リスト ○主要論文別刷約3編各4部
- 2016年9月30日(金)17時必着
- 核融合科学研究所 管理部総務企画課 人事・給与係 電話0572-58-2012
- 封筒に「プラズマ加熱物理研究系粒子ビーム加熱物理研究部門(助教)公募関係書類」と朱書きし郵送の場合は簡易書留で送付。詳細は<http://www.nifs.ac.jp/jinji/>参照。

[ II ]

- 助教1名
- 核融合システム研究系高熱流プラズマ対向壁研究部門
- 核融合炉のダイバータなどプラズマ対向機器の高性能化に向け、計測・診断や評価技術を含む熱・粒子負荷試験法の高度化を進めると共に、熱・粒子負荷による損傷の分析、除熱性能変化の評価とその要因分析、燃料粒子や堆積物質の挙動の解明等の研究を行う。更にこれらに基づき、機器の設計指針の導出を行う事、及びこれらに係る共同研究を推進することも求める。
- 4, 5, 6, 7, 8, 9は [ I ] に同じ。
- 封筒に「核融合システム研究系高熱流プラズマ対向壁研究部門(助教)公募関係書類」と朱書きし郵送の場合は簡易書留で送付。詳細は<http://www.nifs.ac.jp/jinji/>参照。

#### ■立教大学理学部助教

[ I ]

- 助教1名
- 物理学科原子核・放射線物理学研究室
- 不安定核等極限系の原子核と基本対称性の実験的研究分野で、家城和夫教授、栗田和好教授、村田次郎教授と協力し

て検出器、実験手法の開発・実験を通して研究を進める方。

- 2017年4月1日
- 1年(但し、4回を限度として更新可)
- 着任時に博士号を有する方
- 履歴書 ○研究業績リスト ○主要論文5編以内 ○競争的資金導入実績リスト ○研究業績概要(約2,000字) ○今後の研究・教育の抱負(約1,500字) ○照会可能者2名の氏名・所属・連絡先
- 2016年9月30日(金)必着
- ①16phys-koubo-2@rikkyo.ac.jp  
②立教大学理学部物理学科 家城和夫 電話03-3985-2376 ieki@rikkyo.ac.jp
- 1つのPDFに纏め、件名を「助教(原子核分野)応募書類」としてe-mailで送付。詳細は<http://www.rikkyo.ac.jp/invitation/careers/professor/>参照。

[ II ]

- 助教1名
- 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9①は [ I ] に同じ。
- 原子物理学の実験的研究分野で、平山孝人教授、2017年度に着任予定の専任教員と協力して原子・分子・クラスター・凝縮性固体表面を対象とした研究を進める方。
- ②立教大学理学部物理学科 平山孝人 電話03-3985-2359 hirayama@rikkyo.ac.jp
- 1つのPDFに纏め、件名を「助教(原子分子・表面分野)応募書類」としてe-mailで送付。詳細は<http://www.rikkyo.ac.jp/invitation/careers/professor/>参照。

### 学術的会合

#### 学術的会合の標準様式(1件500字以内)

掲載されている例を参考にして、次の項目中、必要なものを簡潔に作成して下さい:  
○会合名 ○主催 ○日時(西暦年月日、曜日) ○場所(会場名の後に括弧して郵便番号、住所、電話) ○内容(1行18字で12行以内) ○定員 ○参加費(物理学会員、学生の参加費) ○申込締切(講演、参加、抄録、原稿提出の別を明記) ○連絡先(郵便番号、住所、所属、担当者名、電話、Fax、e-mail等) ○その他(1行18字で5行以内)

#### ■第55回電子スピンスイエンズ学会年会 (SEST2016)

主催 電子スピンスイエンズ学会  
日時 2016年11月10日(木)~12日(土)  
場所 大阪市立大学学術情報総合セン

ター・田中記念館(558-8585大阪市住吉区杉本3-3-138)

内容 物質科学・化学反応・ライフサイエンス・環境問題等に関わる電子スピンスイエンズ研究とその技法の広範な応用及び新しい検出方法・理論の展開を主題とした討論会を開催。

参加費 事前:5,000円, 学生3,000円. 当日:7,000円, 学生4,000円.

発表申込締切及び事前登録締切 2016年8月27日(土)

要旨原稿締切 2016年10月1日(土)

連絡先 第55回電子スピンスイエンズ学会年会(SEST2016)事務局 sest2016@sci.osaka-cu.ac.jp <http://sci.osaka-cu.ac.jp/~sest2016/>

### ■第35回量子情報技術研究会(QIT35)

主催 電子情報通信学会量子情報技術時限研究専門委員会

共催 応用物理学会量子エレクトロニクス研究会

日時 2016年11月24日(木)~25日(金)

場所 高エネルギー加速器研究機構つくばキャンパス小林ホール(305-0801つくば市大穂1-1)

内容 量子情報, 量子計算, 量子暗号等広く量子情報技術に関わる理論的研究, 実験的研究, 計算機科学的研究, 数学的研究及びその他関連分野.

定員 200名

参加費 事前振込:2,500円, 学生1,000円(当日は増額. 懇親会費別途)

申込 <https://staff.aist.go.jp/s-kawabata/qit/qit35/>より

口頭講演締切 2016年10月7日(金)

ポスター発表締切 2016年10月21日(金)

参加登録締切 2016年10月28日(金)

連絡先 筒井 泉(KEK), 磯 暁(KEK), 鶴丸豊広(三菱電機) qit35@ml.post.kek.jp

### ■第30回分子シミュレーション討論会

主催 分子シミュレーション研究会

日時 2016年11月30日(水)~12月2日(金)

場所 大阪大学基礎工学国際棟シグマホール(560-8531豊中市待兼山1-3)

内容 「分子動力学法, モンテカルロ法,

ブラウン動力学法などによる分子集合体の計算機シミュレーション」「分子間相互作用に関する理論および計算」「複雑系, 大規模分子集団の構造や動的性質に関する理論的研究」「分子シミュレーションの産業応用および企業における応用研究」

参加費 事前予約登録5,000円, 学生3,000円

発表申込締切 2016年9月16日(金)

講演要旨原稿締切 2016年10月14日(金)

参加予約申込締切 2016年10月21日(金)

連絡先 560-8531豊中市待兼山1-3 大阪大学大学院基礎工学研究科 松林伸幸(実行委員長) mssjmeeting30@gmail.com <http://sympo.mol-sim.jp/mssj30/>

### ■第30回数値流体力学シンポジウム

主催 日本流体力学会

日時 2016年12月12日(月)~14日(水)

場所 タワーホール船堀(134-0091東京都江戸川区船堀4-1-1)

内容 種々の理工学分野に跨って活動を行っている数値流体力学関連研究者・技術者に対して, 幅広い交流の場を提供する事を目的として, 毎年12月に開催。

参加費 7,000円, 学生2,000円

講演申込締切 2016年9月23日(金)

連絡先 350-8585川越市鯨井2100 東洋大学計算力学研究センター内 CFD30実行委員会事務局 Fax 049-239-1475

<http://www.nagare.or.jp/cfd/cfd30/>

### その他

#### 助成公募の標準様式 (1件500字以内)

- 名称 ○対象(1行18字で7行以内)
- 助成内容 ○応募方法(1行18字で4行以内) ○応募締切(西暦年月日, 曜日)
- 詳細問合せ先(郵便番号, 住所, 所属, 担当者名, 電話, Fax, e-mail等)

その他 ○標題 ○内容 ○連絡先

#### ■第11回凝縮系科学賞候補者推薦依頼

対象 広い意味での凝縮系科学の研究に従事する若い研究者(2016年12月末日現在,

博士学位取得後10年以内の者). 原則として実験系・理論系各1名(該当者が無い場合には見送ることがある).

顕彰 賞状, 盾及び賞金20万円

推薦方法 自薦又は他薦. 候補者についての書類(○略歴 ○全業績リスト ○研究業績概要(A4, 2枚以内) ○主要論文別刷3編以内 ○他薦の場合には推薦書)をe-mailで送付(書式は自由).

推薦締切 2016年9月30日(金)

提出及び問合せ先 名古屋大学理学研究科物理学教室 寺崎一郎 電話052-789-5255 [terra@cc.nagoya-u.ac.jp](mailto:terra@cc.nagoya-u.ac.jp)

その他 授賞式:2016年12月9日(金), 神戸大学. 運営委員:永長直人(委員長), 秋光純, 小野輝明, 鹿野田一司, 柴山充弘, 谷村吉隆, 常行真司, 寺崎一郎, 福山秀敏, 三宅和正, 宮野健次郎. 詳細は<http://prize.condmat.net/>参照.

#### ■会員専用コンテンツ

正会員, 学生会員は本会Website(<http://www.jps.or.jp/>)のマイページよりアクセスしてください. 会員専用コンテンツには, 日本物理学会誌電子版, 刊行委員会報告, 過去の大会プログラム等の情報を掲載しています.

○会誌電子版は, 賛助会員等も本会Websiteよりご利用可能です. アクセスするためのユーザ名とパスワード(今月と来月分)は次の通りです.(英数字は半角入力, 大文字小文字は区別されません.)

8月ユーザ名 : 16Aug

パスワード: James953

9月ユーザ名 : 16Sep

パスワード: Eugene478

#### ■会誌バックナンバー (J-STAGE)

J-STAGE (<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/butsuri-char/ja/>)にて刊行後1年以内の本文PDFをご覧になるには下記の購読者認証が必要です.

2016年購読者番号: butsuri-etsuran

2016年パスワード: Enrico486

# 行事予定

[詳しくは表中の右欄記載の会誌各巻号の掲示板欄(\*印は会告欄)をご参照下さい.]

開催月日	名 称	開催地	会誌巻号または世話人
2016年			
8/3~5	第22回結晶工学スクール(2016年)	東京	71-6
8/3~5	共鳴と非エルミート量子力学	茨木市(大阪)	71-6
8/8~11	第9回固体におけるスピン関連現象の物理と応用に関する国際会議(PASPS 9)	神戸市	71-3
8/8~12	量子力学と非エルミート演算子	京都市	71-6
8/25	第6回講習会「X線反射率法による薄膜・多層膜の解析」	つくば市(茨城)	71-3
9/3~5	第19回XAFS討論会	名古屋市, 瀬戸市(愛知)	71-7
9/4~6	第25回日本バイオイメージング学会学術集会	名古屋市	71-7
9/5~9	第29回コンピューショナル・マテリアルズ・デザイン(CMD)ワークショップ	豊中市(大阪)	71-6
9/6~7	第32回分析電子顕微鏡討論会	千葉市	71-6
9/7~9	第51回フラレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム	札幌市	71-6
9/13~16	日本物理学会2016年秋季大会(金沢大学)(物性)	金沢市	日本物理学会
9/21~24	日本物理学会2016年秋季大会(宮崎大学)(素核宇)	宮崎市	日本物理学会
9/26~28	日本流体力学会年会2016	名古屋市	71-4
9/27~30	京大基研研究会国際ワークショップ「Physics of bulk-edge Physics of bulk-edge correspondence and universality: From solid state physics to cold atoms」	京都市	71-7
9/28~29	第7回社会人のための表面科学ベーシック講座	東京	71-7
10/8	第21回久保記念シンポジウム「超伝導の展開」	東京	71-7
10/10~13	Asian Conf. on Nanoscience and Nanotechnology 2016	札幌市	71-5
10/16~21	7th Int. Symp. on Practical Surface Analysis	Daejeon(韓国)	71-5
10/26~29	第57回高圧討論会	つくば市(茨城)	71-6
10/28~30	第64回レオロジー討論会	豊中市(大阪)	71-5
11/10~12	第55回電子スピンスイエンズ学会年会(SEST2016)	大阪市	71-8
11/17~20	Workshop of Quantum Simulation and Quantum Walks 2016	プラハ(チェコ)	71-7
11/24~25	第35回量子情報技術研究会(QIT35)	つくば市(茨城)	71-8
11/30~12/2	第30回分子シミュレーション討論会	豊中市(大阪)	71-8
12/5~7	第42回固体イオニクス討論会	名古屋市	71-7
12/12~14	第30回数値流体力学シンポジウム	東京	71-8
2017年			
3/17~20	日本物理学会第72回年次大会(大阪大学)	豊中市(大阪)	日本物理学会
9/12~15	日本物理学会2017年秋季大会(宇都宮大学)(素核宇)	宇都宮市(栃木)	日本物理学会
9/21~24	日本物理学会2017年秋季大会(岩手大学)(物性)	盛岡市(岩手)	日本物理学会
10/22~26	The 8th Int. Symp. on Surface Science	つくば市(茨城)	71-5
2018年			
3/22~25	日本物理学会第73回年次大会(東京理科大学)	野田市(千葉)	日本物理学会
9/14~17	日本物理学会2018年秋季大会(信州大学)(素宇)	松本市(長野)	日本物理学会

## 編集後記

コウモリは歴とした哺乳類であるが、イソップ童話にもあるように昔から鳥でも獣でもない中途半端な存在の象徴とされてきた。なぜ、この編集後記でコウモリの話なのか？ それは私がコウモリだからである。「物理学70の不思議」を巡る編集委員会での議論を一般会員に披露できないのは残念であるが、素核宇系と物性系の委員の間で、誌史に残る感動的な激論が繰り返された。誤解かも知れないが極言すると、素

核宇の方々は「共通認識として多くの未解明の謎」を持っている。対する物性系の方々は「それぞれが新しい物質と現象の発見と解明に挑戦」している。この「謎と挑戦」という二つの異なる軸を巡る熱い議論の中、私はどきまぎするばかりで何も発言できなかった。その理由は、私が専門とする原子・分子という研究分野が素核宇にも物性にも属さない、コウモリだからに他ならない、と自己分析している。

私の属する大学は小規模ながらも様々な分野の研究者がおり、卒研や修論の発表会

では素核宇・物性を問わず様々な分野での話を楽しむことができる。そのとき「自分はその分野については素人だから」という免罪符の一言を付けて質問する人は多いが、分野の違いが原因で論争になった経験はない。また、物理教室の会議では異なる分野の方々で議論するが、分野の違いが激論に結びついた記憶はない。しかし、あのときの編集会議の様子は普段とは全く違って、研究に対する信念と情熱がぶつかるような実に激しいもので、気の小さな私は「皆さんとは違う見方をしている分野もあ

るのですが…」と言い出すことが、最後までできなかつた。そこで、編集後記ならば!と思って、ここで書かせて頂くことにした。

原子・分子にも、素核宇ほど壮大ではなくとも「謎」があり、物性ほど波及効果はないとしても「挑戦」を続けている。私は学部時代から原子物理を専門としていた。相互作用が既知である少数多体系の原子について「まだやること残ってるの?」と他分野の先輩に言われたことを未だに根に持っているが、高精度な基礎方程式を立てられることはゴールでなくスタートであり、多体問題が解析的に解けない以上、エレガントな計算と理解を求めて理論的研究は続く。対応する実験も理論値との一致は完全ではなく、ベンチマークと言われる地道なデータ生産だけでなく、新しい実験技術によって新しい測定が可能となって新現象が見つかるというサイクルが続いていて、そう簡単には終わりそうにはない。

他の研究分野の実情を知る機会は多くないにせよ、調べれば何でも判る時代である。しかし、物理学会誌編集委員会には各分野を代表する方々がずらっと揃っていて、いつも興味深い話を聞かせて下さる。何しろ

私はコウモリなので、どの話の理解も中途半端であるが、100%何も判らないという分野はそれほど多くない。実は、私は学部でも院でも化学が専門だった。そして学位を取ってからの3年間は、電気メーカーの研究所のヒラ研究員だった。物理ではない分野を深く知っていること、民間企業の内側と裏側を覗いていたこと、どちらも正統的な物理学者には余り多くない経験である。これらの経歴は、私を別の意味でコウモリにしてくれている。胸を張るほどの自信はないが、コウモリのように色々な分野を飛び回って、そこそこ広い分野を眺めているような気がしているのは、学生時代と社会人時代の少し変わった経験のせいではないかと思う…と書いたところで気が付いた。コウモリは殆ど眼が見えないのではなかったらうか。これでは、たとえ視野は広くとも頭が悪くて理解力が乏しいところまで、コウモリに似ていることになるではないか。書き始めのときには予想できなかったが、最後の最後で自己嫌悪に陥った。最初で最後の編集後記なのに、このネタで書かなきゃ良かった…。

田沼 肇 (tanuma-hajime@tmu.ac.jp)

#### 編集委員

森川 雅博(委員長), 長谷川修司,  
浅井 朋彦, 井澤 公一, 井上 貴史,  
今村 卓史, 枝川 圭一, 江藤 幹雄,  
片山 郁文, 岸根順一郎, 栗田 玲,  
桑本 剛, 小林 由佳, 鈴木 康夫,  
須山 輝明, 田島 俊之, 田中 良巳,  
田沼 肇, 初田真知子, 藤井 芳昭,  
藤崎 弘士, 間瀬 圭一, 松本 重貴,  
望月 維人, 矢向謙太郎, 浅野 勝晃,  
板橋 健太, 藤山 茂樹, 李 哲虎

#### (支部委員)

飯塚 剛, 川口 由紀, 酒井 彰,  
田嶋 直樹, 根本 祐一, 野村 清英,  
星 健夫, 松井 広志, 水野 義之,  
溝口 幸司

#### 新著紹介小委員会委員

浅野 勝晃(委員長), 安藤 康伸  
石原 安野, 宇田川将文, 大西 宏明,  
岡田 邦宏, 貴田 徳明, 越野 和樹,  
小鍋 哲, 小山 知弘, 高岩 義信,  
竹内 一将, 中村 真, 西浦 正樹

#### 本誌の複写をご希望の方へ

日本物理学会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を(一社)学術著作権協会(以下、学著協)に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、学著協より許諾を受けて下さい。

※企業等法人で、(公社)日本複製権センター(学著協が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合を除く(社外頒布目的の複写については、学著協の許諾が必要です)。

※複写以外の許諾(著作物の転載等)に関しては、学著協に委託しておりません。

直接、日本物理学会(E-mail: pubpub@jps.or.jp)へお問合せ下さい。

※日本国外における複写について、学著協が双務協定を締結している国・地域においてはその国・地域のRRO(海外複製権機構)に、締結していない国・地域においては学著協に許諾申請して下さい。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F

Fax: 03-3475-5619 e-mail: info@jaacc.jp

日本物理学会誌 第71巻 第8号 (平成28年8月5日発行) 通巻807号

©日本物理学会 2016

Butsuri

発行者 〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル8F

白 勢 祐 次 郎

印刷所 〒169-0075 東京都新宿区高田馬場3-8-8

株式会社 国 際 文 献 社

発行所 〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル8F

一般社団法人 日 本 物 理 学 会

電話 03-3816-6201 Fax 03-3816-6208

郵便振替 00120-4-167544 定価 1部2,400円 年額25,000円

本誌に掲載された寄稿等の著作権は一般社団法人日本物理学会が所有しています。

■ 2017年度会費について手続きのお願い：正会員のうち大学院学生の会費減額および学生会員(学部学生)の資格継続

—9月30日までに手続きを済ませて下さい—

次の各項に該当する大学院学生と学部学生で、2017年度(2017年1月1日～12月31日)会費に関し学生会員・正会員(大学院学生)としての会費を希望される方は、マイページより申請手続きをとっていただく必要があります。

※申請には在学証明書が必要です(学生証のコピー不可)。

1. 学部学生で入会し、今年大学院に進学した学生会員。
2. 大学院修士課程で入会し、今年博士課程に進学した正会員(大学院学生)。
3. 大学院修士課程または博士課程に、修了予定年限を超えて在籍している正会員(大学院学生)。
4. 学部に修了予定年限を超えて在籍している学生会員。
5. 今年新たに学部または大学院に入学した正会員。
6. 昨年までに上記1,2または5に該当しながら手続きをせず、引き続き在学している正会員。

正会員のうち大学院学生は、必要な手続きをしない場合は、大学院学生であるかどうかを問わず、通常の正会員会費となります。学生会員(学部学生)は、必要な手続きをしない場合は、学生会員の資格を継続できなくなります。

申請期限は2016年9月30日で、期限日を過ぎますと会費減額できませんので、ご注意ください。

2016年10月ご進学予定者も期限は変わりませんので、必ず事前にご連絡下さい。

なお、聴講生および研究生は会費減額の対象とはなりません。

■ 2017年度の論文誌等購読の変更手続きのお願い

—9月30日までに手続きを済ませて下さい—

2017年度(2017年1月1日～12月31日)から論文誌等の購読の開始・変更・中止を希望する方は、マイページから手続きして下さい。

付加会費・購読料は以下の通りです。

- Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)  
JPSJ購読A (online購読権) (9,720円/年)  
JPSJ購読B (online購読権+冊子) (15,120円/年)
- Japanese Journal of Applied Physics (JJAP)  
(online購読権) (3,000円/年)
- 大学の物理教育 (1,000円/年)

注意

本会の会員は、本会からJJAP (online版)を購読できる。本会からの新規購読、本会からの購読中止を希望する会員は、マイページより手続きを行う。但し、本会・応用物理学会両方の会員である場合は、応用物理学会からの購読となる。

■ 2016年度科学セミナー

「素粒子の性質からすべての物理現象を理解する」という還元主義的な見方が通用しない物理法則が2つあります。1つは、大数の法則に支配されるP. W. Andersonの提唱した法則「More is different」であり、2つ目は、南部陽一郎の提唱した「自発的対称性の破れ」です。本セミナーでは「対称性」に目を向けたセミナーを行います。

物理学には、様々な保存則が時間や空間の原点をどこに選んでも不変であるという対称性が潜んでいます。また、自然現象の時間発展を記述する基礎法則もさまざまな力学的対称性を有しています。しかし、不思議なことに、対称な時空と対称な物理法則から生み出される自然現象はしばしばもとの対称性を自発的に破ります。たとえば磁石は、構成する原子の持つスピンの方向がそろって空間のあるひとつの方向を向くことで空間の等方性を破ります。

本セミナーでは、「対称性とその破れ」という一見して難しい概念をキーワードとして、様々な物理現象に切り込もうという主旨です。物理の宴をお楽しみください。

テーマ：「対称性とその破れ」

日時：8月20日(土)～21日(日)

場所：東京大学駒場キャンパス 数理学研究科棟 大講義室

定員：200名(申込順)

参加費：一般2,000円、学生証提示で1,000円(昨年まで参加費無料でしたが、今回より参加費を徴収することになりました)

対象：大学生、(中学校・高等学校・大学等の)教員、一般プログラム(予定)：※敬称略

1. 「対称性と保存則」  
林 青司(東京女子大学現代教養学部)
2. 「自然界の対称性とその破れ」  
久野良孝(大阪大学大学院理学研究科)
3. 「原子核の形と対称性の破れ」  
中務 孝(筑波大学計算科学研究センター)
4. 「分子と結晶の対称性と物性」  
井上克也(広島大学大学院理学研究科)
5. 「粒子と反粒子の対称性の破れ」  
飯嶋 徹(名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構)
6. 「物質中の対称性を破って電気と磁気を結びつける」  
木村 剛(大阪大学大学院基礎工学研究科)
7. 「アインシュタインから南部へ—真空は空っぽでない」  
細谷 裕(大阪大学大学院理学研究科)
8. 「物性物理学における対称性の自発的破れ」  
押川正毅(東京大学物性研究所)
9. 「超対称性とは何か? LHCで探る新しい対称性」  
浅井祥仁(東京大学大学院理学系研究科)
10. 「フラストレーションと対称性の破れ、相転移」  
川村 光(大阪大学大学院理学研究科)

申込・詳細：本会ホームページ(<http://www.jps.or.jp/public/seminar/scisemi2016.php>)をご覧ください。

■ 訂正

前号会告欄p. 508内に誤りがありましたので、以下の通り訂正しお詫びします。

左段下から8行目

(誤) \*詳細は本号後付広告欄C-2を参照

(正) \*詳細は前号後付広告欄C-2を参照

左段下から1行目

(誤) \*詳細は本号後付広告欄C-3を参照

(正) \*詳細は前号後付広告欄C-3を参照

## 日本物理学会理事・監事・代議員，委員会委員 キャリア支援センター，物理系学術誌刊行センター，等氏名表

### I. 第72期理事（任期2016年3月31日～2017年3月31日）

会長	藤井 保彦（元東大・元原子力機構）				
副会長	川村 光（阪大院理）				
庶務理事	板倉 明子（物材機構）	小形 正男（東大院理）		香取 浩子（東京農工大）	
	高須 昌子（東京薬科大生命）	肥山 詠美子（理研仁科研）		村上 修一（東工大理）	
会計理事	井上 邦雄（東北大ニュートリノ研）	小林 研介（阪大院理）*		澤 博（名大工）	
	永江 知文（京大院理）*				
	*は庶務理事兼任				
会誌編集委員長	森川 雅博（お茶の水大理）				
JPSJ編集委員長	上田 和夫（日本物理学会）				
PTEP編集委員長	坂井 典佑（日本物理学会）				
刊行委員長	大槻 東巳（上智大理工）				

### II. 監事

三宅 康博（KEK物構研）（第71～72期，任期2015年3月31日～2017年3月31日）  
林 青司（東女大現代教養）（第72～73期，任期2016年3月31日～2018年3月31日）

### III. 第71～72期代議員（任期2015年3月31日～2017年3月31日）

会員番号	氏名	所属	推薦母体・立候補	会員番号	氏名	所属	推薦母体・立候補
17126E	青山 秀明	京都大学大学院理学研究科	京都支部	42033H	大成誠一郎	岡山大基礎研	領域8
27684E	赤井 光治	山口大国際総合科学部	中国支部	25535H	大西 明	京大・基研	理論核物理
11447E	赤羽 明	埼玉医大医教養教育	立候補	22223J	大橋 正健	東大 宇宙線研	宇宙線・宇宙物理
24134F	浅川 正之	阪大・院・理	理論核物理	25524B	岡本 徹	東大理	領域4
19410E	阿部 浩二	電通大情報理工	立候補	24505D	岡本 祐幸	名大院理	領域12
24450J	網塚 浩	北大理	領域8	22165K	小川 哲生	大阪大学理学研究科	領域5
39267E	雨宮 健太	KEK物構研	立候補	46053D	片岡 幹雄	奈良先端大物質	領域12
35384E	荒木 秀樹	阪大・工学研究科	立候補	34044J	加藤 岳生	東大物性研	領域4
19983F	安藤 晃	東北大工学研究科	領域2	22720G	加藤 勝	大阪府立大学工学研究科	領域6
39893K	石坂 香子	東大院工	領域8	21128F	鹿野田一司	東大工	領域7
24409E	石田 憲二	京大院理	立候補	27666J	川越 清以	九大理	素粒子実験
17512B	伊藤 正久	群馬大理工	領域10	39443E	川崎 慎司	岡山大	領域8
31005A	伊藤 好孝	名大 宇宙地球環境研	宇宙線・宇宙物理	16836D	河田 洋	KEK物構研	立候補
13937J	井上 研三	九大院理	素粒子論	43819A	菊池 満	原子力機構	領域2
21647F	岩崎 雅彦	理研仁科センター	実験核物理	28216G	岸田 英夫	名大工	名古屋支部
31688D	上坂 充	東京大学院工学系研究科	ビーム物理	30366D	木村 康之	九大院理	領域12
19296E	植松 英穂	日大理工	領域13	17926E	栗栖 牧生	愛媛大学理学部	四国支部
37848D	後田 裕	KEK素粒子原子核研究科	素粒子実験	15414J	小泉 大一	明治大学理工	領域10
20968A	上床 美也	東大物性研	領域3	19510K	国府俊一郎	高知大学自然科学系	四国支部
20892C	枝松 圭一	東北大学 電気通信研究所	領域1	21889B	腰原 伸也	東京工業大学理学院	領域5
25152E	江馬 一弘	上智大学理工学部	領域5	18512E	小玉 英雄	京大基研	宇宙線・宇宙物理
22222K	大槻 東巳	上智大理工	立候補	26029E	齋藤 晴雄	東大院総合文化	立候補
28101K	大友 季哉	KEK物構研	立候補	28050A	坂井 伸之	山口大理	中国支部
				39265G	酒見 泰寛	東北大学CYRIC	実験核物理
				35233F	佐崎 元	北大低温研	領域9

会員番号	氏名	所属	推薦母体・立候補
17931G	佐々木茂美	広島大学放射光センター	ビーム物理
24141F	佐々木 豊	京都大学大学院理学研究科	領域6
16221B	佐々木博之	慶應義塾大学 物理学科	領域1
24285E	澤 博	名大工	領域7
15836A	柴田 利明	東工大理	立候補
53581D	澁谷 憲悟	東大院総合文化	立候補
26490C	下條 冬樹	熊本大院先端	領域6
16059E	白井 泰治	京大工学研究科	立候補
24062D	菅本 晶夫	お茶大理	素粒子論
38274B	鈴木 正	埼玉医大医	領域11
54999F	鈴木 亨	筑波大学附属高校	領域13
55322G	鈴木 博	九大理	九州支部
23026J	鈴木 康文	大阪教育大・物理	領域1
22750H	鈴木 義茂	阪大基礎工	領域3
19194B	須藤 彰三	東北大院理	立候補
38995K	関野 恭弘	拓殖大学工学部	立候補
22649G	瀬戸 秀紀	KEK 物構研	立候補
17537A	大同 寛明	阪府大院工	領域11
24905D	田中 忠芳	金沢工大基礎教育	立候補
22034E	寺内 正己	東北大学多元研	東北支部
23816B	寺崎 一郎	名大理	名古屋支部
24417D	遠山 貴己	東理大理	領域8
22758K	都倉 康弘	筑波大数理物質	領域4
21199D	富塚 明	長崎大学環境科学部	領域13
32036D	永井 康介	東北大学金研	立候補
35813B	中澤 知洋	東大 理	宇宙線・宇宙物理
23063K	長嶋 泰之	東京理科大学 理学部	領域1
19914F	中西 秀	九大理	九州支部
28149K	中家 剛	京都大学理学部	素粒子実験
14990A	並木 雅俊	高千穂大学	立候補
30718G	西谷 滋人	関西学院大・理工	立候補
36882E	西野 晃徳	神奈川大工	領域11
22382G	野尻 浩之	東北大金研	領域3
13439B	野田 幸男	(元東北大)	領域10
16563C	野呂 哲夫	九大院理	実験核物理
30795F	萩野 浩一	東北大・院・理	理論核物理

会員番号	氏名	所属	推薦母体・立候補
21563J	橋本 貴明	福井大工	北陸支部
06273D	波田野 彰	元東京大学	立候補
20698G	初田 哲男	理研・仁科センター	理論核物理
30161J	花咲 徳亮	阪大理	領域7
12846J	兵頭 俊夫	KEK 物構研	立候補
23075E	平山 博之	東工大総理工	領域9
16377F	藤下 豪司	金沢大学国際基幹教育院	北陸支部
18827B	細川 伸也	熊本大院先端	立候補
41483K	細谷 裕	阪大院理	素粒子論
22557A	前野 悦輝	京大院理	京都支部
12354C	増子 寛	元麻布高校	立候補
32857G	松井 哲男	東大院総文	立候補
21579K	松尾 正之	新潟大学 理学部	新潟支部
20940E	松川 宏	青学大・理工	立候補
21237J	松山 秀生	北大理	北海道支部
25217G	三沢 和彦	東京農工大学	立候補
16440G	宮下 精二	東大理物理	立候補
29907G	村尾 美緒	東大・理	立候補
19523D	村上 洋一	KEK 物構研	立候補
26662K	森 初果	東大物性研	立候補
24015F	矢久保考介	北大工	北海道支部
22202F	安江 常夫	大阪電通大	大阪支部
36108H	柳瀬 陽一	京大院理	領域8
21595H	矢花 一浩	筑波大学計科セ	立候補
52922H	山崎 真	国立循環器病研究センター	立候補
26069C	山田 裕	新潟大学 理学部	新潟支部
33775A	八幡 和志	東大理	立候補
42201J	横山 直人	京大工	領域11
16693J	吉澤 正人	岩手大院工	立候補
28748A	吉信 淳	東大物性研	領域9
19820B	吉村 一良	京大理	領域3
22560E	米田 仁紀	電通大レーザー	領域2
19497D	米永 一郎	東北大学金属材料研究所	東北支部
18606J	林 青司	東女大現代教養学部	素粒子論
46939J	和田 健	高エネ研	立候補
20120A	渡辺 純二	阪大生命機能	領域12
34685F	渡邊 威	名工大工	領域11

#### IV. 支部役員

北海道支部	支部長	市村 晃一(北大工)	支部幹事(庶務)	柳澤 達也(北大理)
	支部幹事(庶務)	吉田 絃行(北大理)	支部幹事(庶務)	関根ちひろ(室蘭工大)
	支部幹事(会計)	武貞 正樹(北大理)	支部幹事(会誌編集)	酒井 彰 (室蘭工大)
	支部監事	網塚 浩(北大理)		
東北支部	支部長	吉澤 雅幸(東北大理)	支部幹事(庶務)	木村 宏之(東北大多元研)
	支部幹事(出前授業)	関口 仁子(東北大理)	支部幹事(会計)	神田 浩樹(東北大理)
	支部幹事(会誌編集)	松井 広志(東北大理)	支部監事	須藤 彰三(東北大理)
新潟支部	支部長	武田 直也(新潟大工)	支部幹事(庶務)	大坪 隆(新潟大理)
	支部幹事(庶務)	吉武裕美子(長岡技術科学大工)	支部幹事(会計)	遠藤 浩(新潟県教育庁)
	支部幹事(会誌編集)	根本 祐一(新潟大理)	支部監事	小野 裕明(日本歯科大)
北陸支部	支部長	西村 克彦(富山大工)	支部幹事(庶務/富山県地区)	並木 孝洋(富山大工)
	支部幹事(会計/富山県地区)	池本 弘之(富山大理)	支部幹事(石川県地区)	阿部 聡(金沢大理工)
	支部幹事(石川県地区)	濱田 勉(北陸先端大)	支部幹事(福井県地区/会誌編集)	田嶋 直樹(福井大工)

	支部幹事(福井県地区)	浅野 貴行(福井大工)	支部監事	伊藤 弘昭(富山大工)
名古屋支部	支部長	棚橋 誠治(名大院理)	支部幹事(庶務)	河野 浩(名大院理)
	支部幹事(会計)	原田 正康(名大院理)	支部幹事(会誌編集)	川口 由紀(名大院工)
	支部監事	岸田 英夫(名大院工)		
京都支部	支部長	田中 貴浩(京大理)	支部幹事(庶務)	佐々木 豊(京大理)
	支部幹事(会計)	中家 剛(京大理)	支部幹事(会誌編集)	水野 義之(京都女子大)
	支部監事	山本 潤(京大理)		
大阪支部	支部長	花咲 徳亮(阪大理)	支部幹事(庶務)	中野 岳仁(阪大理)
	支部幹事(会計)	荻尾 彰一(阪市大理)	支部幹事(会誌編集)	溝口 幸司(阪府大理)
	支部監事	身内賢太郎(神戸大理)		
中国支部	支部長	鄭 国慶(岡山大自然)	支部幹事(庶務)	野上 由夫(岡山大自然)
	支部幹事(会計)	岡田 耕三(岡山大自然)	支部幹事(会誌編集)	星 健夫(鳥取大工)
	支部監事	朝日 孝尚(山口大創成科学)		
四国支部	支部長	原口 雅宣(徳島大理工)	支部幹事(庶務)	北川 晃(高知大教育)
	支部幹事(会計)	川崎 祐(徳島大理工)	支部幹事(会誌編集)	飯塚 剛(愛媛大理工)
	支部監事	笠 潤平(香川大教育)		
九州支部	支部長	矢山 英樹(九大基幹教育院)	支部幹事(庶務)	水野 大介(九大理)
	支部幹事(庶務)	中西 秀(九大理)	支部幹事(会計)	小島健太郎(九大基幹教育院)
	支部幹事(会誌編集)	野村 清英(九大理)	支部監事	前多 裕介(九大理)

## V. 委員会

### 1. 会誌編集委員会委員

委員長	森川 雅博(お茶の水大理)	副委員長	長谷川修司(東大院理)
浅井 朋彦(日大理工)	井澤 公一(東工大理学院)	井上 貴史(日大生物資源)	今村 卓史(千葉大理)
枝川 圭一(東大生産技術研)	江藤 幹雄(慶大理工)	片山 郁文(横国大院工)	岸根順一郎(放送大)
栗田 玲(首都大院理工)	桑本 剛(日大量子科学研)	小林 由佳(NIMS)	鈴木 康夫(拓殖大工)
須山 輝明(東大RESCEU)	田島 俊之(国立天文台)	田中 良巳(横国大院環境情報)	田沼 肇(首都大院理工)
初田真知子(順天堂大医)	藤井 芳昭(KEK)	藤崎 弘士(日医大物理)	間瀬 圭一(千葉大理)
松本 重貴(東大IPMU)	望月 維人(青学大理工)	矢向謙太郎(東大CNS)	浅野 勝晃(東大宇宙線研)
板橋 健太(理研)	藤山 茂樹(理研)	李 哲虎(産総研)	

### 2. JPSJ編集委員会委員

委員長 上田 和夫(日本物理学会)

[Head Editors]

小形 正男(東大理)	岡本 博(東大新領域)	長田 俊人(東大物性研)	勝藤 拓郎(早大先進理工)
神戸 振作(原研先端基礎研)	北畑 裕之(千葉大理)	楠瀬 博明(明大理工)	久野 良孝(阪大理)
佐藤 英行(日本物理学会)	長島 順清(阪大名誉教授)	広井 善二(東大物性研)	堀田 貴嗣(首都大理工)
溝川 貴司(早大理工)	三宅 和正(豊田理研)	宮崎 剛(物材機構)	安井 幸夫(明大理工)
山崎 義弘(早大先進理工)	山室 修(東大物性研)		

[Associate Editors]

Alex Amato (Paul Scherrer Inst.)	Alfred Q. R. Baron (理研)	Gerrit E. W. Bauer (東北大金研)	Kamran Behnia (ESPCI)
Jean-Pascal Brison (CEA Grenoble)	Takashi Imai (マックマスター大)	Woun Kang (梨花女子大)	Catherine Pepin (CEA Saclay)
Nic Shannon (沖繩科技大)	Manfred Sigrist (チューリッヒ工科大)	Peter Thalmeier (MPI CPfS)	Timothy Ziman (ILL)
虻川 匡司(東北大多元研)	網塚 浩(北大理)	有田亮太郎(理研)	安食 博志(東京電機大理工)
岩佐 和晃(茨城大フロンティア応用原子科学研究セ)		永崎 洋(産総研)	大橋 洋士(慶大理工)
押川 正毅(東大物性研)	小野 靖(東大新領域)	勝本 信吾(東大物性研)	加藤 雄介(東大総合文化)
樺島 祥介(東工大総合理工)	鎌田 進(KEK)	上久保裕生(奈良先端大物質創成)	川畑 史郎(産総研)
河村 聖子(原研)	河原林 透(東邦大理)	北 孝文(北大理)	木村尚次郎(東北大金研)
上妻 幹旺(東工大理)	河野 公俊(理研)	後藤 彰(山形大)	紺谷 浩(名大理)
齋藤 一弥(筑波大数理物質)	榊原 俊郎(東大物性研)	作村 論一(愛知県大情報科学)	酒見 泰寛(東北大CYRIC)
迫田 和彰(物材機構)	佐々 真一(京大理)	佐藤 憲昭(名大理)	柴田 尚和(東北大理)
柴田 慎雄(横国大名誉教授)	下浦 享(東大理)	首藤 啓(首都大理工)	妹尾 仁嗣(理研)
関野 恭弘(拓殖大工)	武貞 正樹(北大理)	武末 真二(京大理)	田島 節子(阪大理)
多々良 源(理研)	田沼 肇(首都大理工)	常深 博(阪大理)	出口 哲生(お茶大理)

寺前順之介(阪大情報科学)	藤 定義(京大理)	時弘 哲治(東大数理)	永江 知文(京大理)
長尾 道弘(NIST)	中務 孝(筑波大数物)	中畑 雅行(東大宇宙線研)	西森 拓(広大理)
野原 実(岡山大自然科学)	長谷川修司(東大理)	長谷川幸雄(東大物性研)	花栗 哲郎(理研)
濱 広幸(東北大電子光セ)	早瀬 潤子(慶大理工)	福島 孝治(東大総合文化)	福谷 克之(東大生産研)
藤谷 洋平(慶大理工)	藤本 聡(阪大基礎工)	古澤 明(東大工)	堀田 知佐(東大総合文化)
棕田 秀和(阪大基礎工)	村上 匡且(阪大レーザーエネルギー学研セ)		森 初果(東大物性研)
山口 昌英(東工大理工)	横谷 尚睦(岡山大自然)	横山 悦郎(学習院大計算機)	

### 3. PTEP編集委員会委員

委員長 坂井 典佑(日本物理学会)

[執行編集委員]

江口 徹(立教大理)	鎌田 進(KEK/総研大)	木舟 正(東大名譽教授)	九後 太一(京産大理)
小林 富雄(KEK)	下浦 享(東大理)	長島 順清(阪大名譽教授)	初田 哲男(理研)
幅 淳二(KEK)	早川 尚男(京大基研)	前田 恵一(早大理工)	林 青司(東京女子大)

[編集委員]

青木 慎也(京大基研)	青木真由美(金沢大理工)	飯嶋 徹(名大理)	飯田 圭(高知大理)
池田 博一(JAXA)	石橋 延幸(筑波大数理物質)	稲見 武夫(台湾大学)	犬塚修一郎(名大理)
井上 邦雄(東北大ニュートリノ)	今村 洋介(東工大理工)	宇都宮弘章(甲南大自然)	海野 義信(KEK)
大西 明(京大基研)	大野木哲也(阪大理)	岡 真(東工大理工)	岡田 宣親(アラバマ大学)
岡本 宏己(広大先端物質)	川勝 年洋(東北大理)	川上 則雄(京大理)	川越 清以(九大)
川崎 雅裕(東大宇宙線研)	川村 光(阪大理)	川村 嘉春(信州大理)	菅野 浩明(名大多元数理)
久世 正弘(東工大理工)	國廣 悌二(京大理)	久野 良孝(阪大理)	黒田 和明(東大名譽教授)
小高 康史(広大理)	小玉 英雄(京大基研)	後藤 彰(山形大)	酒見 泰寛(東北大CYRIC)
笹尾 登(岡山大極限量子)	設楽 哲夫(KEK)	柴田 大(京大基研)	清水 肇(東北大電子光セ)
白水 徹也(名大多元数理)	住吉 孝行(首都大理工)	田島 俊樹(UC Irvine)	田島 宏康(名大太陽地球環境研)
田中 貴浩(京大理)	田中礼三郎(LAL)	谷村 省吾(名大情報)	谷森 達(京大理)
常深 博(阪大理)	寺澤 敏夫(理研)	永江 知文(京大理)	中尾 裕也(東工大情報理工)
中畑 雅行(東大宇宙線研)	中村 隆司(東工大理工)	中家 剛(京大理)	能町 正治(阪大核物理セ)
野崎 光昭(KEK/JSPS)	野呂 哲夫(九大)	萩野 浩一(東北大理)	橋本 幸士(阪大理)
長谷部信行(早大理工学研)	羽田野直道(東大生産研)	初貝 安弘(筑波大数理物質)	濱 広幸(東北大電子光セ)
濱垣 秀樹(東大原子核セ)	福本 康秀(九大IMI)	細谷 裕(阪大理)	細谷 暁夫(東工大名誉教授)
松尾 正之(新潟大理)	松原 隆彦(名大理)	蓑輪 眞(東大理)	宮下 精二(東大理)
宗像 一起(信州大総合工)	森 俊則(東大素粒子セ)	森 義治(京大工)	諸井 健夫(東大理)
山田 章一(早大理工)	横山 将志(東大理)	吉田 善章(東大新領域創成)	米谷 民明(東大名譽教授)
山下 了(東大素粒子セ)	山中 卓(阪大理)	山本 博章(カリフォルニア工科大学)	

Kiwoon Choi(韓国科学技術院)	Sumit Das(ケンタッキー大)	Eckhard Elsen(ドイツ電子シンクロトン)
Sydney Gales(IPN Orsay)	Fabiola Gianotti(CERN)	Pei-Ming Ho(台湾大学)
Dean Karlen(ビクトリア大)	Ki-Myeong Lee(韓国高等科学院)	Daniel Marlow(プリンストン大)
Alexander S. Mikhailov(フリッツ・ハーバー研)	Berndt Mueller(デューク大)	Rene Ong(カリフォルニア大)
Denis Perret-Gallix(フランス国立科学研究セ)	Manfred Sgrist(チューリッヒ工科大)	Lei-Han Tang(香港バプティスト大)
Henry Tye(香港科技大高等研究院)	Terry Wyatt(マンチェスター大)	Frank Zimmermann(CERN)
Barton Zwiebach(MIT)		

### 4. PTEP企画委員会委員

委員長 横山 将志(東大理)

小沢恭一郎(KEK)	角野 秀一(首都大理工)	黒田隆之助(産総研)	中畑 雅行(東大宇宙線研)
------------	--------------	------------	---------------

### 5. 刊行委員会委員

委員長 大槻 東巳(上智大理工) 副委員長 江口 徹(立教大理)

井上 邦雄(東北大ニュートリノ)	上田 和夫(日本物理学会)	小形 正男(東大理)	坂井 典佑(日本物理学会)
櫻井 博儀(東大理)	佐藤 杉弥(日本工大共通教育系)	佐藤 英行(日本物理学会)	高野 宏(慶大理工)
幅 淳二(KEK)	松井 哲男(放送大)	村上 修一(東工大理工)	森川 雅博(お茶大理)

## 6. 受賞候補等推薦委員会

委員長 藤井 保彦(東大名誉) 幹事 川村 光(阪大院理) 幹事 前田 恵一(早大理工)  
網塚 浩(北大院理) 伊藤 公平(慶大理工) 奥田 雄一(理研) 小林 隆(高エネ機構)  
佐藤 憲昭(名大院理) 多々良 源(理研) 常次 宏一(東大物性研) 永井 康介(東北大金研)  
中村 隆司(東工大院理工) 白田 耕蔵(電通大フォトニク研) 日笠 健一(東北大院理) 保坂 淳(阪大RCNP)  
山崎 典子(JAXA) 渡辺 一之(東理大理)

## 7. 事務局運営委員会委員

委員長 川村 光(阪大院理)  
板倉 明子(物質・材料研究機構) 井上 邦雄(東北大ニュートリノ研) 小形 正男(東大院理) 澤 博(名大院工)

## 8. 物理学史資料委員会委員

委員長 永平 幸雄(大阪経済法科・21世紀社会総合研究センター) 副委員長 岡本 拓司(東大院総合)  
赤羽 明(埼玉医科大) 有賀 暢迪(科学博物館理工) 植松 英穂(日大理工) 岡本 祐幸(名大院理)  
小長谷大介(龍谷大経営) 小林 典男(元東北大金研) 並木 雅俊(高千穂大) 難波 忠清(核総合研アーカイブ室)  
廣政 直彦(元東海大) 高須 昌子(東京薬科大)

## 9. 物理教育委員会委員

委員長 香取 浩子(東京農工大工) 幹事 高須 昌子(東葉大生命科学) 幹事 安田淳一郎(山形大基盤教育)  
植松 晴子(東学大自然) 右近 修治(都市大共通教育) 奥野 剛史(電通大情報理工) 門 信一郎(京大エネ研)  
鈴木 亨(筑波大附属高) 鈴木 康夫(拓殖大工) 高橋 尚志(香川大教育) 田中 忠芳(金沢工大基礎教育)  
兵頭 俊夫(KEK 物構研) 本橋 健次(東洋大理工) 山内 誠(宮崎大工)

## 10. 大学の物理教育編集委員会委員

委員長 佐藤 杉弥(日本工大共通教育系)  
大野 栄三(北大教育) 大原 繁男(名工大工) 興治 文子(新潟大教育) 佐藤 実(東海大清水教養教育/理)  
鈴木 康夫(拓殖大工) 田口 善弘(中央大理工) 田中 忠芳(金沢工大基礎教育) 谷口 和成(京都教育大教育)  
鳥井 寿夫(東大総合文化) 並木 雅俊(高千穂大人間科学) 本多 和仁(静岡大教育) 山本 隆夫(群馬大理工)

## 11. 男女共同参画推進委員会委員

委員長 板倉 明子(物質・材料研究機構) 副委員長 野尻美保子(KEK)  
鹿野 豊(分子科学研) 高安美佐子(東工大院理工) 遠山 貴巳(理科大) 中山 敦子(岩手大)  
永宮 正治(理研) 永廣 秀子(奈良女子大) 福島 孝治(東大院総合) 間宮 広明(物材研)  
本橋 健次(東洋大) 山本 文子(芝浦工大)

## 12. 日本物理学会・応用物理学会連絡会委員

責任者 森 初果(東大物性研)  
板倉 明子(物質・材料研究機構) 小形 正男(東大院理) 倉本 義夫(KEK) 笹尾真実子(東北大名誉教授)  
野尻美保子(KEK)

## 13. 情報システム運用委員会委員

委員長 村上 修一(東京工業大学)  
大槻 東巳(上智大学) 川村 光(大阪大学) 小林 研介(大阪大学) 高須 昌子(東京薬科大学)

## 14. Jr.セッション委員会委員

委員長 香取 浩子(東京農工大工)  
青井 考(阪大核物理セ) 飯沼 昌隆(広大先端物質科学) 河内 明子(東海大理) 北本 俊二(立教大理)  
佐藤 仁(広大放射光セ) 佐藤 実(東海大清水教養教育/理) 白井 正文(東北大通研) 鈴木 亨(筑波大附属高)  
須藤 彰三(東北大理) 高須 昌子(東葉大生命科学) 橘 孝博(早大高等学院) 田中 忠芳(金沢工大基礎教育)  
谷口 和成(京都教育大教育) 種村 雅子(大阪教育大教育) 田村 裕和(東北大理) 寺内 正己(東北大多元研)  
土井 正晶(東北学院大工) 永江 知文(京大理) 中村 琢(岐阜大教育) 並木 雅俊(高千穂大人間科学)  
福田 善之(宮城教育大教育) 藤井 康裕(立命館大理工) 藤田 佳孝(阪大核物理セ) 前田 恵一(早大理工)  
松川 宏(青学大理工) 松多 健策(阪大理) 松山 豊樹(奈良教育大理数教育研セ) 八木 隆志(東海大理)  
吉澤 雅幸(東北大理) 渡辺 純二(阪大生命機能)

### 15. 研究費配分に関する教育研究環境検討委員会委員

委員長 板倉 明子(物材機構)  
 小山 佳一(鹿児島大院理工) 後藤 貴行(上智大理工) 笹尾真実子(同志社大) 佐野 雅己(東大院理)  
 佐野 幸恵(筑波大システム情報) 瀧澤 誠(昭和薬科大薬) 和田 元(同志社大工)

### 16. 広報委員会委員

委員長 小林 研介(大阪大学)  
 板倉 明子(物質・材料研究機構) 井上 邦雄(東北大学) 上田 和夫(日本物理学会) 大槻 東巳(上智大学)  
 坂井 典佑(日本物理学会) 澤 博(名古屋大学) 村上 修一(東京工業大学) 森川 雅博(お茶の水女子大学)

### 17. HP運営小委員会委員

委員長 小林 研介(大阪大学)  
 板倉 明子(物質・材料研究機構) 板橋 健太(理化学研究所) 大槻 東巳(上智大学) 楠瀬 博明(明治大学)  
 兵頭 俊夫(高エネルギー加速器研究機構) 藤山 茂樹(理化学研究所) 本林 透(理化学研究所) 村上 修一(東京工業大学)

### 18. 領域委員会委員

委員長 小形 正男(東大院理) 副委員長 肥山詠美子(理研) 領域外委員 川村 光(阪大院理)  
 櫻井 博儀(理研) 佐久間昭正(東北大工)

領域正副代表(領域代表は領域委員会委員)

領域	代表	副代表
素粒子論領域	波場 直之(島根大院総合理工)	鈴木 博(九大理学院)
素粒子実験領域	杉山 晃(佐賀大理工)	三原 智(高エネ機構)
理論核物理領域	中務 孝(筑波大計算科学セ)	飯田 圭(高知大理)
実験核物理領域	小沢恭一郎(高エネ機構)	中村 隆司(東工大)
宇宙線・宇宙物理領域	中畑 雅行(東大宇宙線研)	田中 貴浩(京大院理)
ビーム物理領域	佐々木茂美(広島大)	羽島 良一(量研機構)
領域1: 原子分子・量子エレクトロニクス・放射線	井元 信之(阪大基礎工)	鈴木 康文(大教大)
領域2: プラズマ	上杉 喜彦(金沢大理工)	政宗 貞男(京都工繊大)
領域3: 磁性	坂井 徹(兵庫県立大物質理)	中村 裕之(京大院工)
領域4: 半導体, メゾスコピック系・量子輸送	都倉 康弘(筑波大数物)	小林 研介(阪大院理)
領域5: 光物性	田中耕一郎(京大院理)	辛 埴(東大物性研)
領域6: 金属(液体金属・準結晶)・低温(超低温・超伝導・密度波)	坪田 誠(阪市大院理)	細川 伸也(熊大院先端)
領域7: 分子性固体	澤 博(名大院工)	岡本 博(東大院新領域)
領域8: 強相関電子系	佐藤 憲昭(名大理)	常次 宏一(東大物性研)
領域9: 表面・界面, 結晶成長	吉信 淳(東大物性研)	渡邊 聡(東大院工)
領域10: 構造物性(誘電体, 格子欠陥, X線・粒子線, フォノン)	田中 良和(理研放射光セ)	吉矢 真人(阪大院工)
領域11: 物性基礎論・統計力学・流体物理・応用数学・社会経済物理	山田 道夫(京大数理)	佐々 真一(京大院理)
領域12: ソフトマター物理・化学物理・生物物理	高須 昌子(東薬大生命)	杉田 有治(理研)
領域13: 物理教育・物理学史・環境物理	高橋 尚志(香川大教育)	中村 聡(佐賀大文教)

## 19. 領域運営委員

領域	分野	領域運営委員		次期領域運営委員候補
		2015年10月～2016年9月	2016年4月～2017年3月	2016年10月～2017年9月
素粒子論領域	素粒子論	吉田健太郎(京大理)	山崎 剛(筑波大数物)	太田 和俊(明学大法)
	素粒子現象論		田中 実(阪大院理)	
素粒子実験領域	素粒子実験	市川 温子(京大理)	大谷 航(東大ICEPP)	東城 順治(九大理)
理論核物理領域	理論核物理	木村 真明(北大院理)	八田 佳孝(京大基礎研)	明 孝之(大工大)
実験核物理領域	実験核物理	吉見 彰洋(岡大基礎研)	高橋 仁(高エネ機構)	伊藤 正俊(東北大サイクロトロン)
宇宙線・宇宙物理領域	宇宙線・宇宙物理	小汐 由介(岡大理)	原田 知広(立教大理)	石徹白晃治(東北大)
ビーム物理領域	ビーム物理	井上 峻介(京大化研)	菅 晃一(阪大産研)	今 亮(高輝度光科学研究セ)
領域1	原子・分子	島田 紘行(農工大)	福澤 宏宣(東北大多元研)	中野 祐司(理研)
	放射線物理	鈴木 拓(物材機構)	関場大一郎(筑波大数物)	池田 時浩(理研)
	量子エレクトロニクス	宇佐見康二(東大先端研)	田中 歌子(阪大基礎工)	東 浩司(NTT物性基礎研)
領域2	プラズマ	藤田 隆明(名大院工)	後藤 基志(核融合研)	西浦 正樹(東大新領域)
	プラズマ	藤岡 慎介(阪大レーザー研)	高橋 和貴(東北大院工)	大島 慎介(京大エネ研)
	プラズマ	本多 充(量研機構)	森田 太智(九大院総合理工)	蔵満 康浩(国立中央大)
領域3	磁気共鳴	小山 岳秀(兵庫県大理)	木村尚次郎(東北大金研)	加藤 治一(高知大理)
	スピントロニクス	安立 裕人(原子力機構)	白石 誠司(京大院工)	三浦 大介(東北大院工)
	磁性	木村 健太(阪大基礎工)	奥西 巧一(新潟大)	高津 浩(京大院工)
領域4	グラフェン	守谷 頼(東大生産研)		菅原 克明(東北大)
	量子ドット		内海 裕洋(三重大院工)	
	トポロジカル絶縁体	塩見 雄毅(東北大金材研)		山影 相(名大工)
	半導体	福島 鉄也(阪大基礎工)	岡野 真人(慶應大理工)	豊田 雅之(東大院理工)
	量子ホール効果		秋葉圭一郎(農工大)	
領域5	イオン結晶・光物性	横谷 尚睦(岡大基礎研)	山田 泰裕(千葉大院理)	堀場 弘司(高エネ機構)
	イオン結晶・光物性	長谷 宗明(筑波大数理)	一宮 正義(滋賀県立大)	上岡 隼人(日大文理)
	イオン結晶・光物性		松原 正和(東北大院理)	
領域6	金属	田原 周太(琉球大理)		島倉 宏典(新潟薬大)
	超低温	村川 智(東大低温セ)		高橋 大輔(足利工大)
	超伝導・密度波		土屋 雄司(名大院工)	
	準結晶		高際 良樹(物材機構)	
領域7	分子性固体・有機導体	山下 智史(阪大院理)	小鍋 哲(東理大総合)	井口 敏(東北大金研)
	分子性固体・有機導体	松井 弘之(東大新領域)	賀川 史敬(理研CEMS)	近藤 剛弘(筑波大数理)
領域8	磁性	八島 光晴(阪大基礎工)	近藤 晃弘(東大物性研)	本多 史憲(東北大金研)
	磁性	三澤 貴宏(東大物性研)	那須 譲治(東工大理工)	赤城 裕(東大院理)
	低温		足立 匡(上智大理工)	
	低温	清水 直(理研)	石田 行章(東大物性研)	笠原 成(京大院理)
	低温	太田 幸宏(神戸RIST)	北川 俊作(京大理)	鮎川 晋也(青学大理工)
領域9	結晶成長	阿久津典子(大阪電通大)	勝野喜以子(成蹊大)	朝岡 秀人(原子力機構)
	表面・界面	深谷 有喜(原子力機構)	石井 史之(金沢大数物)	鈴木 孝将(福岡大)
	表面・界面	國貞 雄治(北大エネマテ)	吉本 真也(東大物性研)	小倉 正平(東大生産研)

領域	分野	領域運営委員		次期領域運営委員候補
		2015年10月～2016年9月	2016年4月～2017年3月	2016年10月～2017年9月
領域10	X線・粒子線	箕田 弘喜(農工大工)	箕田 弘喜(農工大工)	鈴木 宏輔(群馬大)
	X線・粒子線	幸田 章宏(高エネ機構)	鈴木 宏輔(群馬大)	藪内 敦(京大原子炉)
	フォノン		萩 博次(阪大基礎工)	
	格子欠陥	弓削 是貴(京大院工)	河野日出夫(高知工科大)	椎原 良典(豊田工大工)
	誘電体	西松 毅(東北大金研)	藤井 康裕(立命館大理工)	青柳 忍(名市大院シス研)
領域11	統計力学・物性基礎論	泉田 勇輝(名大院情報)	篠原 康(東大院工)	竹内 一将(東工大理工)
	統計力学・物性基礎論	山田 健太(東大院工)	工藤 和恵(お茶の水女子大)	田村光太郎(東工大IIR)
	統計力学・物性基礎論	新里 隆(一橋大)	河村 洋史(JAMSTEC)	坂田 綾香(統計数理研)
	応用数学・力学・流体物理	神中 俊明(慶大自然科学教育セ)	水野 吉規(同志社大理工)	谷 文之(明大研究知財機構)
領域12	ソフトマター物理	住野 豊(東理大理)	吉岡 潤(早大先進理工)	樋口 祐次(東北大金研)
	化学物理	川崎 猛史(名大院理)	客野 遥(神大工)	池田 昌司(東大総合文化)
	生物物理	斉藤 稔(東大院総合文化)	森河 良太(東葉大生命)	立川 正志(理研)
領域13	物理学史		小長谷大介(龍谷大経営)	
	環境物理	矢吹 哲夫(酪農学園大)		阿部 修治(武蔵野大工)
	物理教育	中村 琢(岐阜大教育)	筒井 和幸(阪教大附属高)	梅田 貴士(広大院教育)

## 20. 論文賞選考委員会委員

(選考終了後公表)

## 21. AAPPS委員会委員

注：本会からの委員のみ掲載

委員長 倉本 義夫(KEK)

委員 菊池 満(量研機構) 笹尾真実子(元東北大) 佐々木 節(京大基研) 中野 貴志(阪大核物理研)  
 肥山詠美子(理研) 古崎 昭(理研) 村上 修一(東工大理工) 村上 洋一(KEK)  
 森 初果(東大物性研)

## 22. AAPPS Bulletin小委員会委員

注：本会からの委員のみ掲載

委員長 大槻 東巳(上智大理工)

委員 上田 和夫(日本物理学会) 坂井 典佑(日本物理学会) 肥山詠美子(理研仁科研) 澤田 真也(KEK素核研)  
 永宮 正治(理研) 古崎 昭(理研) 横山 順一(東大院理)

## 23. 選挙管理委員会委員

委員長 高橋 博樹(日大)

栗田 和好(立教大) 古川はづき(お茶の水大)

## 24. 寄付金管理委員会委員

委員長 小林 研介(阪大院理)

井上 邦雄(東北大ニュートリノ研) 澤 博(名大工) 永江 知文(京大院理)

## 25. 学会史展示タスクフォース(任期：2015年12月～2016年6月)

責任者 藤井 保彦(会長)

メンバー 櫻井 博儀(東大・理研) 並木 雅俊(高千穂大) 小林 典男(東北大) 有賀 暢迪(国立科学博物館)  
 千崎 文峰(物理学会事務局)

## Ⅵ. キャリア支援センター

センター長 栗本 猛(富山大院理)

副センター長 川村 光(阪大院理)

運営委員会委員(上記センター長・副センター長に加えて)

蛭名 邦禎(神戸大院人間発達)

須藤 靖(東大院理)

曹 基哲(お茶の水大院人間文化)

並木 雅俊(高千穂大人間科学)

西尾 禎治(広大院医歯薬保健)

坂東 昌子(あいんしゅたいん)

## Ⅶ. 物理系学術誌刊行センター

注: 本会からの委員のみ掲載

副センター長 大槻 東巳(上智大理工)

# 本会刊行英文誌目次

JOURNAL OF THE PHYSICAL SOCIETY  
OF JAPAN, Vol. 85, No. 7, 2016

## INVITED REVIEW PAPERS

Majorana Fermions and Topology in Superconductors .....  
..... Masatoshi Sato and Satoshi Fujimoto

## LETTERS

*Condensed matter: electronic structure and electrical, magnetic, and optical properties*

Chiral Magnetism in an Itinerant Helical Magnet, MnSi — An Extended  $^{29}\text{Si}$  NMR Study — ..... Hiroshi Yasuoka, Kiyochiro Motoya, Mayukh Majumder, Sebastian Witt, Cornelius Krellner, and Michael Baenitz

Resonant Phase Escape from the First Resistive State of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  Intrinsic Josephson Junctions under Strong Microwave Irradiation ...  
..... Yusaku Takahashi, Daiki Kakehi, Shuho Takekoshi, Kazuki Ishikawa, Shin-ya Ayukawa, and Haruhisa Kitano

Investigation of Transport Properties for  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  Thin Films under Magnetic Fields..... Yuichi Sawada, Fuyuki Nabeshima, Yoshinori Imai, and Atsuta Maeda

Observation of a Hidden Hole-Like Band Approaching the Fermi Level in K-Doped Iron Selenide Superconductor ..... Masanori Sunagawa, Kensei Terashima, Takahiro Hamada, Hirokazu Fujiwara, Tetsushi Fukura, Aya Takeda, Masashi Tanaka, Hiroyuki Takeya, Yoshihiko Takano, Masashi Arita, Kenya Shimada, Hirofumi Namatame, Masaki Taniguchi, Katsuhiro Suzuki, Hidetomo Usui, Kazuhiko Kuroki, Takanori Wakita, Yuji Muraoka, and Takayoshi Yokoya

Incommensurate Magnetic Structure in the Cubic Noncentrosymmetric Ternary Compound  $\text{Pr}_5\text{Ru}_3\text{Al}_2$ ... Koya Makino, Daisuke Okuyama, Maxim Avdeev, and Taku J. Sato

Possible Heavy Fermion State of the Caged Cubic Compound  $\text{NdV}_2\text{Al}_{20}$  ..... Takahiro Namiki, Qiankun Lei, Yosikazu Isikawa, and Katsuhiko Nishimura

Conventional  $s$ -Wave Superconductivity in  $\text{BiS}_2$ -Based  $\text{NdO}_{0.71}\text{F}_{0.29}\text{BiS}_2$  Revealed by Thermal Transport Measurements ..... Takuya Yamashita, Yoshifumi Tokiwa, Daiki Terazawa, Masanori Nagao, Satoshi Watauchi, Isao Tanaka, Takahito Terashima, and Yuji Matsuda

Superconductivity Induced by Surface Polishing in  $\text{CeIrSi}_3$  ... Hiroki Iida, Masashi Sato, and Noriaki Kimura

Topological Insulators from Electronic Superstructures ..... Yusuke Sugita and Yukitoshi Motome

Transition from a Metal to a Massless-Dirac-Fermion Phase in an Organic Conductor Investigated by  $^{13}\text{C}$  NMR..... Kazuya Miyagawa, Yohta Sata, Tomotaka Taniguchi, Michihiro Hirata, Dong Liu, Masafumi Tamura, and Kazushi Kanoda

No Detectable Change in In-Plane  $^{29}\text{Si}$  Knight Shift in the Superconducting State of  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  ..... Taisuke Hattori, Hironori Sakai, Yo Tokunaga, Shinsaku Kambe, Tatsuma D. Matsuda, and Yoshinori Haga

Distributed Hybridization Model for Quantum Critical Behavior in Magnetic Quasicrystals ..... Junya Otsuki and Hiroaki Kusonose

Large Upper Critical Field of Superconductivity in the Single Crystal  $\text{U}_6\text{Co}$  ..... Dai Aoki, Ai Nakamura, Fuminori Honda, DeXin Li, and Yoshiya Homma

## FULL PAPERS

### General

Input Response of Neural Network Model with Lognormally Distributed Synaptic Weights..... Yoshihiro Nagano, Ryo Karakida, Norifumi Watanabe, Atsushi Aoyama, and Masato Okada

Viscosity of Liquid Crystal Mixtures in the Presence of Electroconvection ..... Tomoyuki Nagaya, Yuki Satou, Yoshitomo Goto, Yoshiki Hidaka, and Hiroshi Orihara

Topological Quantum Phase Transitions in a Majorana Chain with Spatial Modulation ..... Takumi Ohta and Keisuke Totsuka

Analysis of a Stochastic Model for Bacterial Growth and the Lognormality of the Cell-Size Distribution... Ken Yamamoto and Jun-ichi Wakita

On Immovable Boundary between Coexisting Solutions and Synchronization in a Reaction-Diffusion System ..... Itaru Hataue

Origin of Temperature Gradient in Nonequilibrium Steady States in Weakly Coupled Quantum Spin Systems ..... Toyohiko Ishida and Ayumu Sugita

### Physics of elementary particles and fields

Predictions of the Higgs Mass and the Weak Mixing Angle in the 6D Gauge-Higgs Unification ..... Kouhei Hasegawa, Chong-Sa Lim, and Nobuhito Maru

### Gases, plasmas, electric discharges, and beams

Equilibrium and Steady State of Dense Z-Pinches Superposing a Small Amount of Axial Flux... Mitsuhiro Hashimoto and Tetsu Miyamoto

### Condensed matter: structure and mechanical and thermal properties

Optical Fluctuation of Texture in Nematic Liquid Crystal Droplets ..... Sung-Jo Kim, Sang-In Back, Bohdan Lev, and Jong-Hyun Kim

Numerical Detection of Ergodicity Breaking in a Glass Model ..... Munetaka Sasaki and Koji Hukushima

One-Sample based Single-Valued Estimation of the Interface Profile from Intersubband Integrated Absorption Intensity Data... Dinh Nhu Thao, Nguyen Thanh Tien, Huynh Ngoc Toan, and Doan Nhat Quang

Elastic Softening in  $\text{HoFe}_2\text{Al}_{10}$  due to the Quadrupole Interaction under an Orthorhombic Crystal Electric Field..... Shuhei Kamikawa, Isao Ishii, Yoshihito Noguchi, Hiroki Goto, Takahiro K. Fujita, Fumiya Nakagawa, Hiroshi Tanida, Masafumi Sera, and Takashi Suzuki

Two-Dimensional Crystal Structure Formed by Two Components of DNA Nanoparticles on a Substrate ..... Hiroyasu Katsuno, Yuya Maegawa, and Masahide Sato

### Condensed matter: electronic structure and electrical, magnetic, and optical properties

Band-Renormalization Effects and Predominant Antiferromagnetic Order in Two-Dimensional Hubbard Model ..... Ryo Sato and Hisatoshi Yokoyama

Electronic Origins of Large Thermoelectric Power Factor of  $\text{LaOBiS}_{2-x}\text{Se}_x$  ..... Atsuhiko Nishida, Hirotaka Nishiate, Chul-Ho Lee, Osuke Miura, and Yoshikazu Mizuguchi

Quantum Paraelectric States in  $\text{SrTiO}_3$  and  $\text{KTaO}_3$ : Barrett Model, Vendik Model, and Quantum Criticality ..... Hideshi Fujishita, Shou Kitazawa, Masahiro Saito, Ryosuke Ishisaka, Hiroyuki Okamoto, and Toshihisa Yamaguchi

Mott Transitions and Staggered Orders in the Three-Component Fermionic System: Variational Cluster Approach ..... Takumi Hasunuma, Tatsuya Kaneko, Shohei Miyakoshi, and Yukinori Ohta

Phenomenological Spin Transport Theory Driven by Anomalous Nernst Effect..... Tomohiro Taniguchi

Bloch Oscillation in a One-Dimensional Array of Small Josephson Junctions ..... Hiroshi Shimada, Shunsuke Katori, Srinivas Gandrothula, Tomoaki Deguchi, and Yoshinao Mizugaki

Multi-band Eilenberger Theory of Superconductivity: Systematic Low-Energy Projection ..... Yuki Nagai and Hiroki Nakamura

Effect of Doping on the Electron Spectral Function of One-Dimensional Spin-Charge-Well-Separated Systems ..... Yong Zheng, Fang Liu, Xiaowei Zhang, Junwang Lu, and Hua Zhao

Theory of Orbital Susceptibility in the Tight-Binding Model: Corrections to the Peierls Phase..... Hiroyasu Matsuura and Masao Ogata

Finite-Temperature Properties of Three-Dimensional Chiral Helimagnets ..... Misako Shinozaki, Shintaro Hoshino, Yusuke Masaki, Jun-ichi Kishine, and Yusuke Kato

Role of Grain Boundaries in the Coercivity of Magnetic Thin Films Investigated by a Two-Dimensional Ginzburg-Landau-Type Model ..... Kaoru Iwano, Chiharu Mitsumata, and Kanta Ono

## SHORT NOTES

Perturbative Interpretation of Adaptive Thouless-Anderson-Palmer Free Energy ... Muneki Yasuda, Chako Takahashi, and Kazuyuki Tanaka

**Progress of Theoretical and Experimental Physics**  
**Vol. 2016, No. 5, 2016**

**Letters**

**Nuclear Physics**

Structure near the  $K^- + p + p$  threshold in the in-flight  ${}^3\text{He}(K^-, \Lambda p)n$  reaction.....J-PARC E15 Collaboration

**Theoretical Astrophysics and Cosmology**

Electromagnetic afterglows associated with gamma-ray emission coincident with binary black hole merger event GW150914

.....Ryo Yamazaki, Katsuaki Asano, and Yutaka Ohira

Entropic interpretation of the Hawking-Moss bounce

.....Naritaka Oshita and Jun'ichi Yokoyama

**Papers**

**General and Mathematical Physics**

Design of an analog chaos-generating circuit using piecewise-constant dynamics

.....Tadashi Tsubone, Toshimichi Saito, and Naohiko Inaba

On the effect of exceptional points in the Liouvillian dynamics of a 1D quantum Lorentz gas

.....Kazunari Hashimoto, Kazuki Kanki, Savannah Garmon, Satoshi Tanaka, and Tomio Petrosky

**Theoretical Particle Physics**

Gauge coupling unification in  $SO(32)$  heterotic string theory with magnetic fluxes

.....Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi, Hajime Otsuka, Yasufumi Takano, and Takuya H. Tatsuishi

Heavy-light charm mesons spectroscopy and decay widths

.....Alka Upadhyay, Meenakshi Batra, and Pallavi Gupta

Upper bound on the mass anomalous dimension in many-flavor gauge theories: a conformal bootstrap approach

.....Hisashi Iha, Hiroki Makino, and Hiroshi Suzuki

Matter fields in triangle-hinge models

.....Masafumi Fukuma, Sotaro Sugishita, and Naoya Umeda

Supersymmetry projection rules on exotic branes.....Tetsuji Kimura

Yukawa couplings in 6D gauge-Higgs unification on  $T^2/Z_N$  with magnetic fluxes.....Yoshio Matsumoto and Yutaka Sakamura

**Nuclear Physics**

Deuteron-like neutron-proton correlation in  ${}^{18}\text{F}$  studied with the cluster-orbital shell model approach

.....Hiroshi Masui and Masaaki Kimura

Spin-polarized versus chiral condensate in quark matter at finite temperature and density

.....Hiroaki Matsuoka, Yasuhiko Tsue, João da Providência, Constança Providência, Masatoshi Yamamura, and Henrik Bohr

**Theoretical Astrophysics and Cosmology**

Synergy between ground- and space-based gravitational-wave detectors for estimation of binary coalescence parameters

.....Remya Nair, Sanjay Jhingan, and Takahiro Tanaka

**Beam Physics**

Flux trapping in superconducting accelerating cavities during cooling down with a spatial temperature gradient.....Takayuki Kubo