

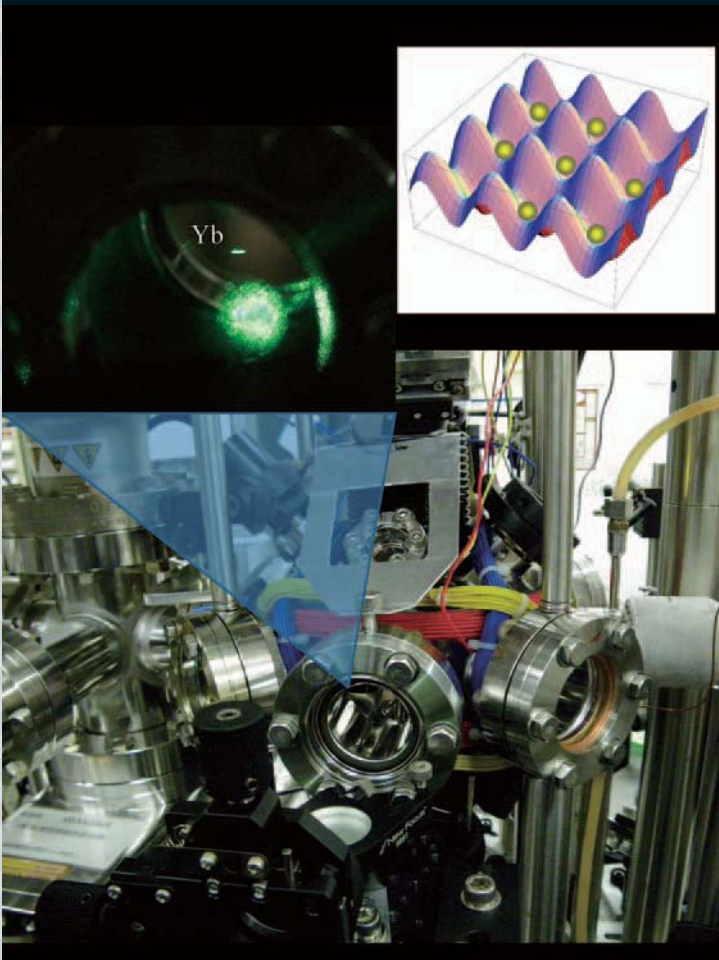
- 宇宙最大の爆発
- 原子時計の発展と秒の定義に係わる国際勧告
- 長基線ニュートリノ振動実験T2Kによる $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動の発見

NO.

4

2014 | VOL. 69

B U T S U R I
日本物理学会誌



日本学術会議と物理学

伊藤早苗 〈日本学術会議物理学委員長〉

日本学術会議物理学委員会委員長として同会議の近況を説明し、物理学との関わりを紹介する。

日本学術会議 (SCJ) の設立以来、日本物理学会との縁は深い。茅、朝永、伏見、久保の碩学が会長として SCJ を指導なさり、基礎研究、学術研究のあり方を説いてこられた道筋で、全国共同利用研究所が構想されて作られ、近年の物理学の振興に大きな働きをしてきた。発足以来の方式は学会を中心とした選挙によって会員が選出され、諸学会と密接な関係が醸される一方、研究連絡委員会単位の活動の細分化も進み、SCJ の改革には久保先生をはじめ多くの方が心を尽くされた。20 期 (2005~2008) 以来、学術を俯瞰的に捉える観点から、会員 210 名、連携会員約 2,000 名を選挙ではなく会員の co-optation により merit base で選考する事となった。従来の 7 部制から、人文社会・生命・理工学の 3 部へと大括りになり、30 の分野別委員会をおく事となった。その一つが物理学委員会であり、7 名の会員と約 70 名の連携会員が活動している。

永宮先生が委員長となり新生日本学術会議の物理学委員会として新しいスタイルを作り出された。そのあとを継いで、2010 年以來、物理学委員長を務めている。この機会に、物理学委員会を支える SCJ 会員を紹介すると、相原博昭、家泰弘、伊藤早苗、岡真、須藤靖、田島節子、観山正見 (五十音順) である。家会員は SCJ の副会長の重責を担っておられ、SCJ 本部の様々な会議を率領するだけでなく SCJ を代表し東奔西走しておられる。相原会員は、第三部の幹事として、理工学全体の中での物理の位置づけを扱う役割を果たしておられる。物理学委員会には三つの分科会 (物性物理学・一般物理学、素粒子物理学・原子核物理学、天文学・宇宙物理学) を置いて機動性を高め

つつ、物理学でのまとまった意見を物理学委員会で形作るようつとめている。

各学会と SCJ の関係が 20 期以來大きく変わったなかで、日本物理学会との連携を図る仕組みが必要とされ、新しいアプローチも始まっている。フォーラムには、SCJ の「学協会連携」活動として第三部では関連する学会の代表と定期的に会合を開いている。物理学委員会が力を入れているのは、日本物理学会理事会との協力で開催している連携インフォーマルミーティングであり、物理学会会員との直接の交流につとめている。

旧 SCJ の初期において、原子核研究所、基礎物理学研究所、物性研究所…を嚆矢として、全国共同利用研究所システムの実現には物理学からの働きかけがプロトタイプになって、日本の学術研究全体を潤してきた。新生 SCJ に於いても、物理学からの働きかけによって学術研究の振興につとめている。SCJ は研究者による意思の表出ができる機関である。たとえば基盤研究の充実という観点から“提言”「物性物理学・一般物理学分野における学術研究の質と量の向上のために」を、国策との関わりでは宇宙政策に関して“要望”「宇宙科学推進に関する要望」を公表するなど、様々な切り口からの意思表示を社会や政策当局に対して行っている。ごく最近では、物理学会会員の注視的であった ILC についての文部科学省への“回答”も家副会長のリーダーシップのもととまとめている。

「学術の大型研究計画 (マスタープラン)」は、学術俯瞰型の活動を重んじる立場から、岩澤部長、永宮・海部両会員の牽引力のもと 21 期にまとめられたもので、大型装置や大規模研究を必要とする研究の総覧を作り、全体のビジョンのもと研究を進めるよう展望を示したものである。さいわい、文部科学省の科学技術・学術審議会の作

業部会の飯吉部会長のリードもあり協働の潮流が生まれ、「ロードマップ」の作成に当たって大きな働きをすることとなった。具体的には、マスタープラン 2010 の 43 件のうち物理学に関連する計画として 20 件程度が取り入れられた。それらが「ロードマップ」に活かされ、既存の大計画を加速するだけではなく、強磁場施設・KAGRA・TMT などの新計画の発足に繋がった。このようにマスタープランの成功は他の学問分野も注目するところである。現 22 期では新しいマスタープラン 2014 の策定の最中であるが、物理学分野に倣えと多くの提案がなされている。新しいマスタープラン作成の道筋において、物理学委員会では (1) 物理学関連分野のシンポジウムを開催して計画群の全体像を練り上げるとともに、(2) 物理学会での理事会と共催のインフォーマルミーティングで意思疎通を図りながら進めている。22 期の SCJ 全体では、マスタープランには多様な学問分野から広く推薦すべきだとの考え方も強い。(21 期で物理学分野ばかり加速された、と考える向きもある。) 物理学の分野の持つ個性を理解してもらおうのは容易ではないが、様々な工夫をこらし、物理学分野の提案を評価いただく努力を強く続けている。

第三部の活動として、学協会連携活動として理工学全体の長期的な展望をまとめる活動も行っており、「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」が発信されている。今期も改訂作業が行われており、日本物理学会の対応に期待している。

SCJ と日本物理学会との実質的な連携と協働体制をより強く作っていく必要があり、皆様のご協力をお願いしたい。

(2013 年 11 月 27 日原稿受付)

巻頭言 Preface

日本学術会議と物理学

“Science Council of Japan” and “Physics”

伊藤早苗 …… 191

Sanae-I. Itoh

現代物理のキーワード Trends

宇宙最大の爆発：ガンマ線バースト

Gamma-ray Burst: The Most Energetic Explosion in the Universe

浅野勝晃 …… 194

Katsuaki Asano

交流 Interdisciplinary

原子時計の発展と秒の定義に係わる国際勧告

Development of Atomic Clocks and the 2013 International Recommendation of the New Secondary Representations of the Second

洪 鋒雷 …… 196

Feng-Lei Hong

解説 Reviews

長基線ニュートリノ振動実験 T2K による $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の発見

Observation of ν_e Appearance in T2K Experiment

坂下 健, 西村康宏, 南野彰宏 …… 204

Ken Sakashita, Yasuhiro Nishimura and Akihiro Minamino

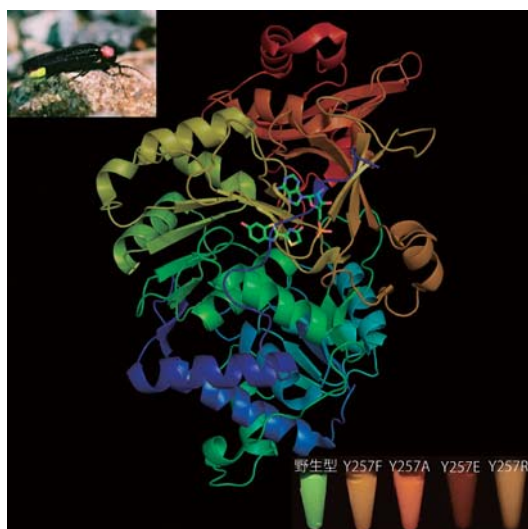
最近の研究から Researches

ヤヌス粒子の2次元分散系における凝集構造

Aggregate Structures in Two-Dimensional Dispersion of Janus Particles

岩下靖孝, 木村康之 …… 213

Yasutaka Iwashita and Yasuyuki Kimura



話題 (ホタル生物発光と物理)

ゲンジボタルルシフェラーゼの構造と、野生型および4種の変異体 (Y257F, Y257A, Y257E, Y257R) を用いた生物発光の違い。ピーク波長と発光色は、566 nm/黄緑 (野生型), 598 nm/オレンジ (Y257F), 610 nm/赤 (Y257A), 608 nm/赤 (Y257E), 594 nm/オレンジ (Y257R)。

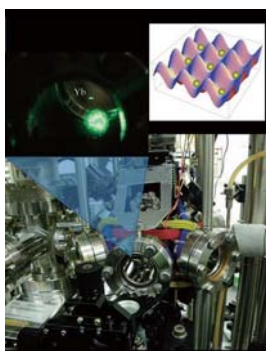


歴史の小径

(ハイゼンベルグ原子炉の謎)

ハイゼンベルグらは第二次大戦終結直前に南独のハイガーロッホの洞窟に重水を減速材とした原子炉を建設したが、重水量が不十分だったため臨界には至らなかった。この原子炉では一辺の長さが5 cmの正方形の天然ウラン片664個がアルミニウムの鎖で重水中に吊るされていた。大戦後、ハイガーロッホの洞窟にミニ博物館が作られ、この図に示されたような炉心の模型が展示されている。

話 題	ホタル生物発光と物理	秋山英文, 望月敏光, 樋山みやび ……	218
JPSJの最近の注目論文から	12月の編集委員会より	安藤恒也 ……	223
PTEPの最近の招待・特集論文から	2014年1月号より	坂井典佑 ……	225
歴史の小径	ハイゼンベルグ原子炉の謎 クラウドウス研究から分かった19世紀物理学の側面	政池 明, 岩瀬 広 ……	227
ラ・トッカータ	第43回天文・天体物理若手夏の学校開催報告 第53回生物物理若手の会夏の学校開催報告 第58回物性若手夏の学校開催報告 2013年度原子核三者若手夏の学校開催報告	八木江里, 林 春雄, 依田 聖, 岡本里夏 …… 中川恵介 …… 香川璃奈, 坂田樹哉 …… 富士香奈, 河底秀幸, 菱谷大輔 ……	230 232 234 237
学界ニュース	2013年度ノーベル物理学賞: F. Englert氏, P. W. Higgs氏 —素粒子の質量の起源に関する機構の理論的発見 2013年度ノーベル化学賞: M. Karplus氏, M. Levitt氏, A. Warshel氏 —複雑な化学系のマルチスケールモデルの開発 第1回湯浅年子賞「金賞」: 市川温子氏	富谷昭夫, 三嶋 剛, 青木 新, 前田沙織, 高知尾 理 …… 九後汰一郎 …… 諸熊奎治 …… 中家 剛 ……	239 242 243 245
新著紹介			245
掲示板	■人事公募 ■学術的会合 ■その他		248
行事予定			252
日本物理学会誌投稿規定			254
会 告	■2015年度の会費減額申込手続き(大学院学生・学部学生)のお願い ■会費納入のお願いと未納者への雑誌発送停止のお知らせ ■朝日賞, 井上學術賞, サー・マーティン・ウッド賞, 島津賞, 本多記念賞, 本多フロンティア賞, 本多記念研究奨励賞, 松尾財団宅間宏記念學術賞の各受賞候補者の推薦について(募集) ■第27回(平成26年度)松尾學術研究助成候補者の募集 ■JPSJ掲載料金等著者負担金額変更のお知らせ ■2014年秋季大会・講演募集掲載号 ■2014年秋季大会の企画募集 ■Plasma Conference 2014(2014年秋季大会領域2)一般講演の募集 ■2014年秋季大会講演募集要項 ■託児室設置について ■2014年3月1日付新入会者 ■Webページによる講演申込の手順(参加登録を含む) ■講演概要集原稿の書き方 ■日本物理学会入会案内 ■日本物理学会入会申込書		258
本会関係英文誌目次			278



表紙の説明

新しい秒の定義の候補となったイッテルビウム (Yb) 光格子時計関連の写真。下の写真は Yb 光格子時計の心臓部となる超高真空装置。Yb 原子はここで冷却, トラップ, 分光及び検出される。真空装置の窓から冷却された Yb 原子が発する蛍光をのぞくことが可能 (写真左上)。文字「Yb」の近くにある横長の緑色の蛍光が2段階のレーザー冷却を経てトラップされた Yb 原子から発せられたものである。その右下にある大きな緑色のスポットは冷却レーザーの散乱光。右上は光格子中に捕捉される Yb 原子のイメージ図である。レーザー光の干渉で作られるポテンシャル場 (光格子) にレーザー冷却された Yb 原子がトラップされる様子を表している。光格子時計を含む次世代原子時計の発展に関する詳細は本号に掲載されている洪鋒雷氏の「交流」記事を参照のこと。

写真提供: 産業技術総合研究所計測標準研究部門

宇宙最大の爆発：ガンマ線バースト

Keyword: ガンマ線バースト

1. 宇宙で最も激しい爆発現象

太陽が解放できるエネルギーの最大値は、理論上 $E = Mc^2$ より 10^{54} erg 程度である。実際には、その寿命 100 億年をかけて、この内の 1% 程度を光やニュートリノとして解放しているにすぎない。一方ガンマ線バーストとは、 10^{52} – 10^{54} erg のエネルギー*1 をわずか数十秒の間に、ガンマ線（典型的には 0.1–1 MeV の光子）として放つ天体現象である。遠方銀河の巨星が一生の最後に起こす爆発で、その中心核がブラックホールへと崩壊し、そこから相対論的ジェットを噴き出していると標準的には考えられている。

観測的には 1 日に数回、突発的に宇宙のある方向からガンマ線が降り注ぐ事象である。1967 年の核実験監視衛星 Vela による発見当時は、これが何を意味しているのか全くわからなかった。しかし 1997 年の BeppoSAX 衛星による X 線残光の発見を契機に、上記の描像が確立していくこととなった。観測と理論の両面からこの現象の理解が進んでいく歴史的経緯には、推理小説を読みとくような面白さがあり、科学史においても教訓的な実例となっている。

とはいえ、ガンマ線バーストには未だ多くの謎が残されており、観測的にも数年おきに新たな進展が得られ続けている。本稿では上記の歴史的経緯は省略し、現在の標準的な描像と理論的な課題について述べたい。

2. 天文学的課題：親星

ガンマ線バーストはその継続時間分布から、数十秒の長さを持つ長い種族と、0.1 秒程度の短い種族とに分けられる。長い種族のバーストが起きた数日後に、同じ位置からの超新星を確認した例がこれまでに数回ある。しかし全てのバーストに超新星が付随しているかどうかはわからない。遠方で暗すぎる場合や、残光の可視光放射が強すぎて、超新星が確認できないこともあるだろう。いずれにせよ、巨星の重力崩壊が長いバーストの起源の第一候補に挙げられる。バーストに付随する超新星は、通常のものよりも速い膨張速度を持ち、その放出エネルギーも一桁大きい値を持っていることから、極超新星と呼ばれている。極超新星の親星の候補は、数十太陽質量の星がその強い星風によって水素やヘリウムの外層を失った天体で、重力崩壊直前には 10^{10} cm 程度の比較的小さな半径を持つ。

後で述べるように、中心のブラックホールはローレンツ因子で 100 を超えるような相対論的ジェットを駆動しなければならない（図 1 参照）。ジェット駆動の物理機構は全く解明されていないが、ブラックホールの周りに降り積も

ったガスからなる、降着円盤の形成が必須であろう。この円盤から放射されるニュートリノのエネルギーの一部を輻射に転換して、その圧力でジェットを加速するモデルや、回転によって増幅された磁場がジェットを駆動するモデルなどが提案されている。バーストの継続時間はブラックホールへの自由落下時間程度だとすれば、外層を失った星の半径は観測と合致している。降着円盤を形成するためには角運動量が必要で、爆発直前まで星の回転を保つ必要がある。ところが、星風による外層の放出は角運動量の損失を伴うことが問題となる。金属量が低い親星では輻射と原子の相互作用が弱いので、星風が抑えられ、星の回転を保つことができる。しかし、この場合、大きな星の外層が残ってしまい、ジェットが星を突き破れなくなってしまう。

観測されているガンマ線バーストの発生頻度は、通常の超新星の 20 万分の 1 以下、極超新星の千分の 1 以下である。ジェットが地球を向いていないバーストを考慮すれば、実際の発生率は直接観測による値の 100 倍程になるかもしれないが、いずれにせよ、かなり稀な現象である。大部分の星の進化とは異なった特殊な進化を辿った星、例えば星内部の対流が星全体をかき混ぜていたり、連星における質量輸送やコアの合体を経ていたりする星が、ガンマ線バーストを起こすのかもしれない。

最近の新しい話題としては、継続時間が 1 万秒を超えるような、Ultra Long ガンマ線バーストの観測的な確立が挙げられる。このような長い継続時間は、半径の大きな星の外層の存在を示唆している。これまで、外層が残った星ではガンマ線バーストは実現しないと予想されていたが、これを覆す観測結果となっている。ガス降着率の変化に敏感な、輻射の圧力が主役のジェットモデルでは、後半の降着

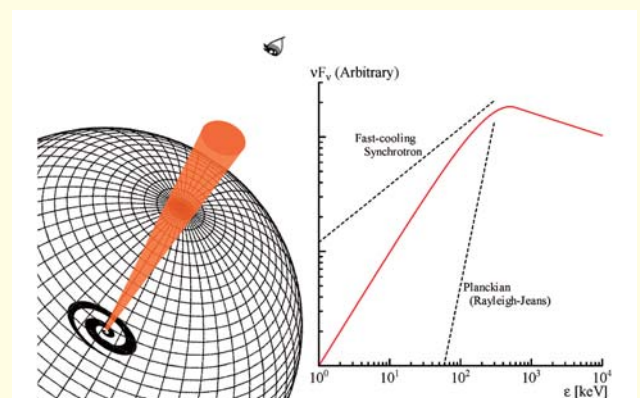


図 1 (左) 巨星中心ブラックホールから相対論的ジェットが噴き出す概念図、(右) 典型的なガンマ線放射のスペクトル。

率が低い時期には活動を止めてしまうため、磁場によるジェット加速モデルの方が有力とされている。

一方、短い種族のガンマ線バーストは、中性子星連星の合体が、その源として有力視されている。将来KAGRAなどの重力波望遠鏡によって連星中性子星合体の重力波が検出されれば、その後に放出されるはずの電磁波の追観測によって、対応天体の同定を目指すことになる。その際にバーストの兆候が確認できるのではと大いに期待されている。ただし多くの場合、ジェットを横から見ることとなり、直接にガンマ線が観測されるのは難しいかもしれない。

3. 宇宙物理学的課題：放射過程

高エネルギーのガンマ線が、電子・陽電子対生成を起こさずに光源から抜け出るためには、光源が我々の方に向かってローレンツ因子で100以上（Fermi衛星の観測例では1,000にまで達する）の相対論的速度で運動していなければならない。相対論的ビーミングによって光子の運動方向が揃うことで、ガンマ線の衝突を回避できる。この相対論的なジェットの運動エネルギーの一部をガンマ線へと変換していると期待されるが、そのメカニズムは全く分かっていない。

図1にあるようにガンマ線スペクトルは、0.1-1 MeVのピークを境に、低エネルギー側と高エネルギー側の2つの冪乗スペクトルで表される。最近のFermi衛星の観測により、高エネルギー側はGeV領域までスペクトルが伸びているのが確認されている。こうした非熱的なエネルギー分布は、衝撃波などで加速された高エネルギー電子からのシンクロトロン放射で説明するのが、宇宙物理学では標準的である。しかし、図1にあるように、低エネルギー側のスペクトルは単純なシンクロトロン放射モデルの予言よりも急なスペクトルとなる。また、ジェット内部に発生する衝撃波では、運動エネルギーをガンマ線に変える効率が非常に悪くなると予想される。

代替モデルとして、光球モデルが提案されており、ここでは熱的な光子がジェットの密度が薄くなった時点で解放されると考えている。このモデルではガンマ線のエネルギー解放効率が高く、光子の典型的エネルギーがMeV程度になるのも自然に説明できる。しかし、図1にあるように、典型的な低エネルギースペクトルは熱的なプランク分布よりも緩やかな分布となっている。また、GeVにまで達する高エネルギー光子を生成するのも難しい。もう一点、興味深いことに、日本のIKAROS衛星の偏光検出器GAPが、ガンマ線バーストから数十%もの偏光検出を最近報告した。こうした高い偏光度は、光球モデルでは実現が難しく、

シンクロトロン放射を示唆しているのかもしれない。

ガンマ線のエネルギー解放機構として、衝撃波に替わり、磁場や乱流の役割などが議論されているが、決め手を欠いているのが現状である。

数十秒のガンマ線放射に続き、X線や可視光で緩やかに減光していく残光が観測されている。星を飛び出したガスは、周囲の星間物質に相対論的衝撃波を作る。これを外部衝撃波と呼ぶが、時間と共に徐々に減速していく。この衝撃波で加速された電子からのシンクロトロン放射が、残光の標準モデルである。残光の発見以降、この標準モデルは、観測をよく説明できるとされてきた。しかし、2004年に打ち上げられたSwift衛星は、残光初期の複雑な振る舞いを明らかにした。初期残光は予想よりも暗く、エネルギー解放の時間スケールも数千秒と、長いものであった。また、X線と可視光では、減光の振る舞いが異なることが多く、単純なモデルでは現象を説明できなくなってしまった。これ以降、逆行衝撃波の寄与や、二重の層構造を持つジェットなど、モデルを複雑化する理論的試みが続いたが、統一の描像を得るには至っていない。

Fermi衛星の大きな成果は、GeV領域で残光を確認したことである。最新の結果によると、ジェットが充分減速していると思われる後期残光から、数十GeVもの高エネルギー光子を検出している。これはシンクロトロン放射の理論的境界を超えたエネルギーとなっている。それにも関わらず、X線からGeVガンマ線まで、スムーズな冪乗のスペクトルを示しており、外部衝撃波の時間発展、あるいは放射過程の再検討を強めている。

紙面の関係で割愛したが、ガンマ線バーストは先ほども挙げた将来の重力波観測に加え、最高エネルギー宇宙線の加速や、ニュートリノ放射の可能性など、他にも話題が豊富な天体である。圧倒的な明るさを用いて遠方宇宙の電離度を探り、星形成史に制限を加えたり、ローレンツ不変性の検証などにも使われたりしている。今後も多波長・多粒子での観測が大いに期待されている天体現象である。

参考文献

- 1) P. Mészáros: Rep. Prog. Phys. **69** (2006) 2259.
- 2) 河合誠之, 浅野勝晃:『ガンマ線バースト』(日本評論社) 出版準備中.

浅野勝晃(東京大学宇宙線研究所)

(2013年10月19日原稿受付)

*1 ただしこれは等方放射を仮定して求めた値なので、実際の解放エネルギーはジェット状の幾何構造を考慮すると、この1%程度かもしれない。

原子時計の発展と秒の定義に係わる国際勧告



洪 鋒 雷

産業技術総合研究所計測標準研究部門

時間の単位である「秒」の定義は現在、セシウム原子のマイクロ波遷移に基づく原子時計で実現されている。セシウム原子時計は、これまで約10年に1桁の割合で精度向上を実現し、発明から50年以上経過した現在では16桁の精度を達成している。しかし、セシウム原子時計の精度向上はいよいよ限界に達している。その主な原因は、時計の周波数変動を引き起こす各種不確かさ要因の限界が16桁目にあることである。また周波数安定度も良くないため、測定には長い時間をかけて積算する必要がある。その結果、セシウム原子時計の精度評価に莫大な時間がかかり、研究の妨げになっている。

ところで、原子の光の遷移周波数がマイクロ波と比べて5桁高いので、光遷移に基づく原子時計（光時計）を用いることで時計の相対精度が5桁上がる可能性がある。また、同時に周波数安定度も大幅に改善されるので、測定にかかる時間も大幅に短縮される。その結果、研究の進展がかなり速くなっている。

さらに、周波数安定度の大幅な向上は光時計を重力ポテンシャルの高精度センサーとして応用する道を開いた。一般相対性理論では、重力は空間を歪ませ、時間の進みを遅らせる。地球上では、重力場が存在し、重力のない宇宙空間に比べて時間がゆっくり進むことになる。原子時計は重力ポテンシャル変化を測定できる唯一のセンサーである。ただ従来のセシウム原子時計だと、高い測定精度を出すには長い積算時間を要するので、その間に起きる重力ポテンシャルの変動は測定できない。光時計は地殻変動などで引き起こされる微小な重力ポテンシャル変動をリアルタイムでモニタリング

できる可能性がある。

光時計に関する研究の飛躍的な発展は、光時計の測定不確かさがセシウム原子時計で制限される事態を招いた。つまり、光時計同士の直接比較によって光時計がより良い再現性を持っていることを示しても、秒の定義であるセシウム原子時計の正確さ以上に周波数を測る（セシウム原子時計の正確さ以上の桁数で光時計の周波数を表現する）ことは原理的にできない。国際度量衡委員会は、このような状況を分析し、「秒の二次表現」という秒の再定義の候補リストを構築することを決めた。いずれセシウム原子時計に代わってより精度の高い光時計を秒の新しい定義にする予定である。そうすれば、新しい秒の定義の正確さも、またそれに基づく周波数計測の精度も少なくとも2桁は上がる見込みである。

光時計は最も精密な量子標準であると同時に、物理の基礎的な問題を解決する上でも役に立つ。基礎物理定数は本当に定数なのか？ それとも時間とともに変動するのか？ 宇宙モデルによっては、初期宇宙での基礎物理定数は現在と違って、さらに現在においても物理定数は変わっていることを示唆している。これまで、キューザーの分光測定結果を解析することにより微細構造定数 (α) のわずかな時間変化が導き出されたが、西アフリカのオクロ鉱山の20億年前の天然原子炉の解析ではキューザーの測定結果を否定している。この問題を解決するもう一つのアプローチが実験室物理の精密計測である。大自然の中の数十億年の時間がもたらした α の変動よりも、数年にわたる原子時計の微小な周波数変動のほうが精度良く測定できるかもしれない。

—Keywords—

原子時計：

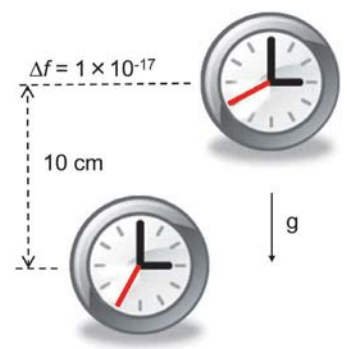
原子の共鳴周波数を利用して、正確な時間を測定する装置。現在、秒の定義を実現しているセシウム原子時計は、セシウム原子の約9.2 GHzの共鳴周波数を利用している。より高い共鳴周波数を使うと原子時計の精度が上がるので、近年、原子の光領域の共鳴周波数を利用した光時計の研究が盛んになっている。

秒の二次表現：

現在の秒の定義であるセシウム原子時計に対して、今後、その性能を上回る可能性を持つ原子時計の候補のリストである。このリストの作成は、将来の秒の再定義を視野に入れた活動となる。現在、中性原子を用いた光時計2種類、イオンを用いた光時計5種類、マイクロ波の原子時計1種類の計8種類がリストに載っている。

原子時計による物理定数恒常性の検証：

原子スペクトルの相対論的補正が $(\alpha z)^2$ に比例する性質によって、原子番号 Z の異なる原子時計の周波数比をとれば、わずかに微細構造定数 α の依存性が残り、それを長期間調べることで α の時間依存性を検証することができる。



原子時計による重力ポテンシャル変化の検出。

1. はじめに

原子時計は、時間や周波数の標準として計測標準の分野に大きく貢献するだけではなく、物理学の基礎研究やGPSなどの応用分野にも大きなインパクトを与えている。時計の精度を18桁上げると、人が歩く速さで動かせば特殊相対性理論の効果が最後の桁で見えるようになる。さらに、異なる原子種で作った時計の高精度比較実験が、物理定数の1つである微細構造定数(α)の恒常性の検証に役に立つと期待されている。原子時計の発展に貢献した多くの科学者がノーベル物理学賞を受賞したのもまた事実である。最近では、ジョン・ホールとテオドール・ヘンシュが2005年に時計の周波数計測に欠かせない光周波数コムを開発した功績などにより、ノーベル物理学賞を受賞している。また2012年のデビット・ワインランドのノーベル物理学賞にも単一イオンを使った超精密原子時計を開発した功績が含まれている。

時間の単位である「秒」の定義は現在、セシウム原子のマイクロ波遷移に基づく原子時計で実現されている。近年、原子の光遷移に基づく次世代原子時計の研究が非常に盛んで、すでにマイクロ波原子時計の性能を凌ぐ光時計が開発されている。いずれ光時計による新しい秒の定義を決めなければいけない。計量標準を司る国際度量衡委員会はこのような状況を見越して、「周波数標準作業部会」を設置し、秒の再定義に必要な情報を集めている(詳細は3.1節を参照)。この作業部会は、2012年9月に国際度量衡局で3年ぶりに会合を開き、新しい秒の定義の候補となる「秒の二次表現」について検討し、周波数標準のリストを更新した。筆者は、日本の計量標準を司る中核機関である産業技術総合研究所(以下、産総研)の代表として会合に出席し、日本国内の光時計の開発状況をまとめて報告し、秒の再定義の議論に参加した。なお、周波数標準作業部会の議論を受けて、国際度量衡委員会は2013年6月に周波数標準リストの更新を勧告した。

ここでは、秒の定義の変遷を振り返りながら、マイクロ波から光への原子時計の発展について説明した上で、2012年に開かれた「周波数標準作業部会」による周波数標準リストの更新状況を紹介し、光時計の将来や秒の再定義の見通しについて述べる。なお、原子時計の研究背景、周波数計測の原理、光格子時計と単一イオン光時計の違い及び秒の二次表現に関する詳細の説明は2010年の日本物理学会誌にまとめたので、そちらを参照していただきたい。¹⁾

2. マイクロ波から光の原子時計へ

秒の定義は、他の単位と同様に常に不確かさの小さいものを目指して変化してきた。もう1つ重要な尺度は、より普遍的な定義の仕方を求めて、「もの」による標準から量子力学の原理を利用した「量子標準」へと進化してきたことである。図1に秒の定義の変遷を示す。

1956年までは、1秒は地球の自転から定義され、1日(平

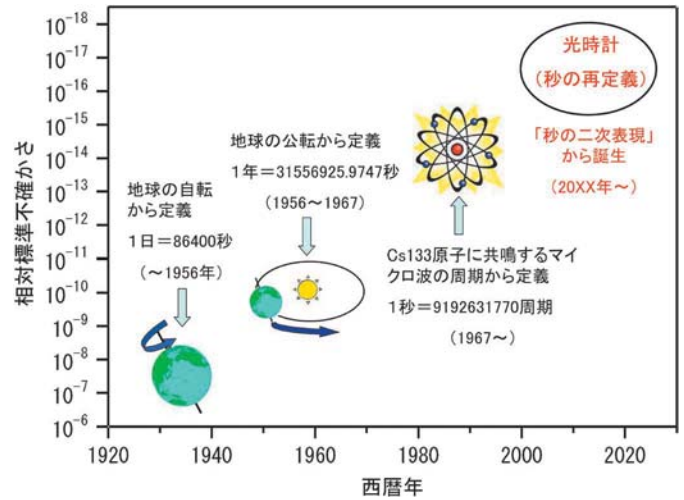


図1 秒の定義の変遷。

均太陽日)の86,400分の1と決められていた。不確かさは 10^{-7} 程度で、潮汐摩擦などによる地球自転の不整が不確かさ要因であった。1956~1967年の間では、1秒は地球の公転から定義され、1太陽年の31,556,925.9747分の1とされていた。この定義による秒の不確かさは約 2×10^{-9} である。この定義が用いる周期現象の周期(1年)が非常に長いので、たくさんの周期を重ねて測定精度を上げるには数十年という長い時間を要する。1967年に、第13回国際度量衡総会において「秒はセシウム133原子の基底状態の2つの超微細構造準位間の遷移に対応する放射の周期の9,192,631,770倍の持続時間である」という新しい定義が採択された。ついに秒の定義は量子標準へと進化し、原子時計が誕生した。セシウム原子時計の不確かさは、これまで約10年に1桁の割合で減少し、エッセンの原子時計から50年以上経過した現在では 10^{-16} のレベルに到達している。

光の周波数はマイクロ波と比べて5桁高いので、光周波数標準を用いることで時間をより細かく測定することが可能となり、時間分解能が一気に5桁上がる。しかし20世紀の終わりまでは、光周波数をカウントすることが非常に困難であった。1999年頃から、ドイツと米国のグループで、モード同期超短パルスレーザーによる「光周波数コム」を用いたレーザー周波数カウンターの提案がなされ、この分野において極めて大きな技術革新が起こった。²⁾高精度な光周波数標準と光周波数コムの組み合わせで「光時計」が誕生する。

光時計は主に「単一イオン光時計」と「光格子時計」の2つのタイプがある(図2)。単一イオン光時計では、レーザー冷却された単一イオンがトラップポテンシャルの底に置かれ、相互作用時間が長いなどの長所がある。最新の報告によると、Al単一イオン光時計の不確かさは 8.6×10^{-18} に達した。³⁾しかし、イオン光時計は単一の粒子からの弱い信号を使うため、周波数安定度が上がらないという欠点がある。

光格子時計は東大工学部の香取氏の提案によるもので、

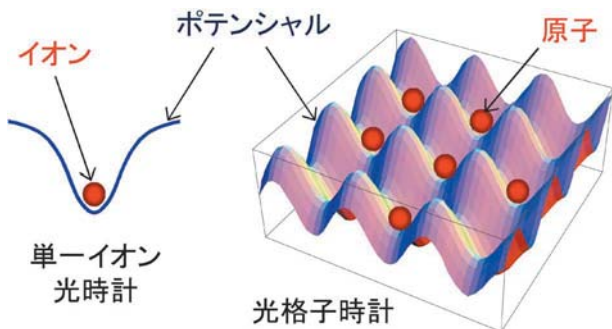


図2 単一イオン光時計及び光格子時計の概念。

レーザー光の定在波で作る光格子ポテンシャルに閉じ込められる多くの原子がすべて信号に寄与するので、周波数安定度が単一イオン光時計よりもよくなる。また、光格子を作るレーザー光の強度に依存した時計遷移の周波数シフト(光シフト)に関しては、上準位と下準位の光シフトが等しくなる光格子波長(魔法波長)の存在が見出され、光シフトが時計遷移の周波数に影響を及ぼさない。⁴⁾ 最初に実現された光格子時計は⁸⁷Srによるもので、⁵⁾ 今や最も研究されている光時計となった。また最近では、¹⁷¹Ybや¹⁹⁹Hgを用いた光格子時計も実現され、光格子時計の研究が広がりを見せている。⁶⁻⁸⁾

3. 光時計の国際勧告

3.1 秒の再定義の候補—秒の二次表現の導入

光時計に関する研究の飛躍的な発展は、光時計の測定不確かさがセシウム原子時計で制限される事態を招いた。つまり、光時計同士の直接比較によって光時計がより良い再現性を持っていることを示せても、秒の定義であるセシウム原子時計の正確さ以上に周波数を測る(セシウム原子時計の正確さ以上の桁数で光時計の周波数を表現すること)は原理的にできない。国際度量衡委員会は、このような状況を分析し、「秒の二次表現」という秒の再定義の候補リストを構築することを決めた。もちろん、秒の二次表現の正確さはセシウムを超えることはできない。しかし、この候補リストの構築は、最も高いレベルにおける再現性の評価や秒の再定義の準備過程における異なる標準の比較にとってたいへん有用である。

秒の二次表現は現段階では以下の判断基準で選ばれている。

- 1) 秒の二次表現として相応しい無摂動の量子遷移の周波数は、その不確かさが評価され、かつピアレビュー付きの科学誌に公表される必要がある。
- 2) その不確かさは、秒の定義を実現しているセシウム一次周波数標準器の10倍以下である必要がある。

国際度量衡委員会とその下部組織である時間・周波数諮問委員会は、秒の二次表現の選定及び管理を「周波数標準作業部会」に任せている(図3)。周波数標準作業部会はさらに、同じ国際度量衡委員会の下部組織である長さ諮問委

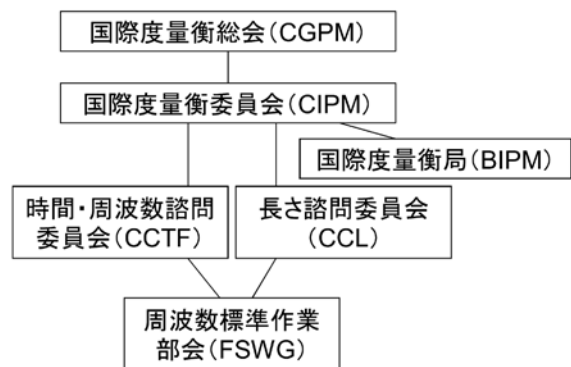


図3 国際度量衡委員会の組織図。

員会から「メートルの定義を実現する波長標準」の選定及び管理も依頼されている。つまり、周波数標準作業部会の主な仕事は、光・マイクロ波問わず、ある単一の周波数リストを作成及び管理し、その中から時間・周波数諮問委員会のために「秒の二次表現」を選定し、長さ諮問委員会のために「メートルの定義を実現する波長標準」を選定することである。

周波数標準作業部会の勧告を受けた国際度量衡委員会は、2006年10月に、マイクロ波時計の⁸⁷Rb及び光時計の⁸⁸Sr⁺、¹⁹⁹Hg⁺、¹⁷¹Yb⁺(四重極子遷移)、⁸⁷Srが秒の二次表現として使えることを決めた。¹⁾ 2009年には、秒の二次表現である⁸⁷Sr光格子時計の新しい研究成果を取り入れて、その周波数値及び不確かさを改訂した。

3.2 秒の二次表現の新しい仲間

周波数標準作業部会は、2012年9月10-11日にパリ郊外の国際度量衡局で会合を開き、光時計の最新研究成果を取り入れ、秒の二次表現を含めた単一周波数リストの更新について議論を行った。各国から報告された光時計の測定結果を検討した結果、新たに¹⁷¹Yb、¹⁷¹Yb⁺(八重極子遷移)、²⁷Al⁺の三種類の光時計を秒の二次表現に加えることを決め、国際度量衡委員会に勧告した。表1に、現在勧告されている全8種類の秒の二次表現を示す。ここでは、新しく秒の二次表現となった光時計の測定結果、勧告値とそれを決めた経緯、性能などについて述べる。

1) ¹⁷¹Yb 光格子時計

¹⁷¹Yb 光格子時計は、すでに2009年に開かれた作業部会において、産総研の当時の測定結果⁶⁾が取り入れられ、単一周波数リストに加えられていた。今回の作業部会では、その後行われた米国立標準技術研究所(NIST)⁷⁾及び産総研の2回目⁹⁾の測定結果を取り入れて、産総研の1回目の測定結果と合わせて、加重平均により勧告周波数値及び不確かさを決めた。図4にそれぞれの研究所の測定結果及び今回決めた勧告値を示した。測定結果の不確かさを表すエラーバーは測定の標準偏差である。横軸は勧告周波数からのずれ、縦の実線は勧告値の中心、点線は勧告値の不確かさ範囲を表している。

それぞれの研究所の測定結果が一致したこと、またこれ

表1 秒の二次表現 (2013年).

方式	周波数基準	時計の周波数 (Hz)	不確かさ
光格子時計	$^{87}\text{Sr}, 5s^2\ ^1S_0-5s5p\ ^3P_0$ 遷移	429,228,004,229,873.4	1×10^{-15}
光格子時計	$^{171}\text{Yb}, 6s^2\ ^1S_0 (F=1/2)-6s6p\ ^3P_0 (F=1/2)$ 遷移	518,295,836,590,865.0	2.7×10^{-15}
単一イオン光時計	$^{171}\text{Yb}^+, 6s\ ^2S_{1/2} (F=0, m_F=0)-5d\ ^2D_{3/2} (F=2, m_F=0)$ 遷移	688,358,979,309,307.1	3×10^{-15}
単一イオン光時計	$^{171}\text{Yb}^+, 6s\ ^2S_{1/2} (F=0, m_F=0)-4f^{13}\ 6s^2\ ^2F_{7/2} (F=3, m_F=0)$ 遷移	642,121,496,772,645.6	1.3×10^{-15}
単一イオン光時計	$^{88}\text{Sr}^+, 5s\ ^2S_{1/2}-4d\ ^2D_{5/2}$ 遷移	444,779,044,095,485.3	4.0×10^{-15}
単一イオン光時計	$^{199}\text{Hg}^+, 5d^{10}\ 6s\ ^2S_{1/2} (F=0, m_F=0)-5d^9\ 6s^2\ ^2D_{3/2} (F=2, m_F=0)$ 遷移	1,064,721,609,899,145.30	1.9×10^{-15}
単一イオン光時計	$^{27}\text{Al}^+, 3s^2\ ^1S_0-3s3p\ ^3P_0$ 遷移	1,121,015,393,207,857.3	1.9×10^{-15}
マイクロ波時計	^{87}Rb , 基底状態の超微細遷移	6,834,682,610.904312	1.3×10^{-15}

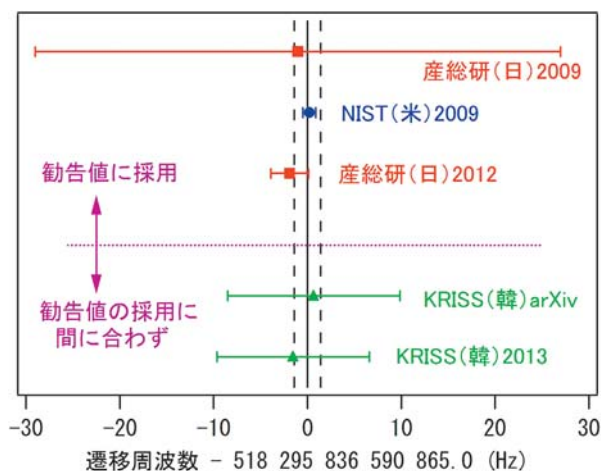


図4 ^{171}Yb 光格子時計の周波数計測と国際勧告値.

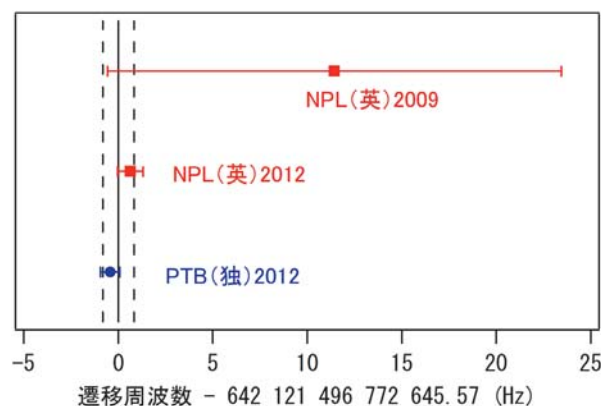


図5 $^{171}\text{Yb}^+$ (八重極子遷移) 単一イオン光時計の周波数計測と国際勧告値.

以外にも韓国, イタリア, 中国など多数の研究機関が研究を行っていることが評価されて, ^{171}Yb 光格子時計が新しい秒の二次表現として勧告された. 今回取り入れた測定結果は2研究機関によるもので, それゆえ勧告値の不確かさは加重平均の2倍とした. 周波数標準作業部会の運用ルールとして, 3研究機関未満の場合, 2研究機関は2倍, 1研究機関は3倍の係数を掛けて不確かさを算出している. Yb 光格子時計の再現性で決まる光時計自身の不確かさは 3.4×10^{-16} で, およそ黒体輻射による時計周波数への影響 (黒体輻射シフト) で制限されている.⁷⁾ Yb 光格子時計は, 室温での黒体輻射シフトが Sr 光格子時計の約半分であり, より高精度の時計開発が望めると期待されている.

ここで韓国の韓国標準科学研究院 (KRISS) の測定結果について言及しておこう. KRISS は測定終了後, 測定結果を科学誌に投稿すると同時に arXiv にも投稿した.¹⁰⁾ 従って, 測定結果はオープンとなり, 実際に産総研の測定結果をまとめた論文でも KRISS の arXiv 論文を引用していた. しかし, 周波数標準作業部会が開かれた9月までに科学誌に投稿された論文は受理されていなかったため, 勧告値を決める上で KRISS の測定結果を用いることはなかった. これは作業部会の取り決めによるもので, 今回の場合, 後に受理された KRISS の論文¹¹⁾ では測定値が改定されていることを考えると, 妥当な取り決めと言えよう. 産総研の

測定結果が迅速に公表できたのは, 応用物理学会の論文誌 APEX の存在が極めて大きいことをここで強調しておこう.

2) $^{171}\text{Yb}^+$ (八重極子遷移) 単一イオン光時計

$^{171}\text{Yb}^+$ (八重極子遷移) 単一イオン光時計は, すでに2009年に開かれた作業部会において, イギリス国立物理学研究所 (NPL) の当時の測定結果¹²⁾ が取り入れられ, 単一周波数リストに加えられていた. 今回の作業部会では, その後行われた NPL の2回目¹³⁾ 及びドイツ物理工学研究所 (PTB)¹⁴⁾ の測定結果を取り入れて, NPL の1回目の測定結果と合わせて, 加重平均により勧告周波数値及び不確かさを決めた. 図5にそれぞれの研究所の測定結果及び今回決めた勧告値を示した. それぞれの研究所の測定結果が一致したことが評価されて, これも新しい秒の二次表現として勧告された. 今回取り入れた測定結果は2研究機関によるもので, 勧告値の不確かさは加重平均の2倍とした. Yb^+ (八重極子遷移) 単一イオン光時計自身の不確かさは 7.1×10^{-17} で, およそ黒体輻射シフトの影響で制限されている.¹⁴⁾ Yb^+ (八重極子遷移) 単一イオン光時計は, 同種イオンの四重極子遷移を用いた光時計と同じ実験装置で実現でき, その結果同一の熱環境及び電磁場環境を共有するので, より高精度の単一イオン光時計比較実験が期待されている.

3) $^{27}\text{Al}^+$ 単一イオン光時計

$^{27}\text{Al}^+$ 単一イオン光時計は今回初登場で, 米国の NIST の測定結果が取り入れられた. NIST の測定結果は2つあって, 1つは直接の周波数測定¹⁵⁾ で, もう1つは Al イオンと Hg

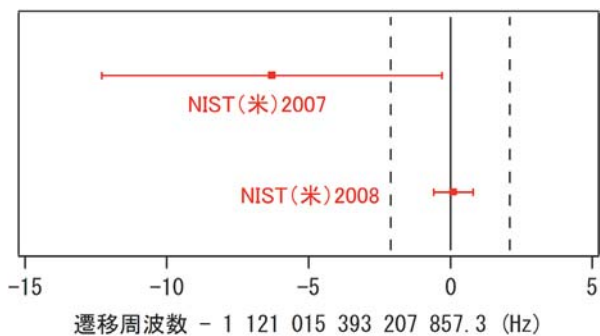


図6 $^{27}\text{Al}^+$ 単一イオン光時計の周波数計測と国際勧告値.

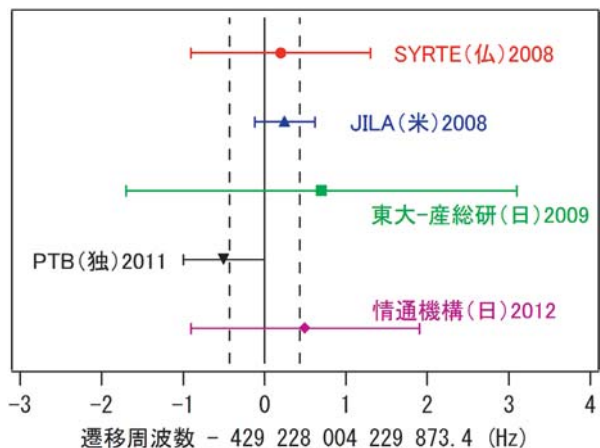


図7 ^{87}Sr 光格子時計の周波数計測と国際勧告値.

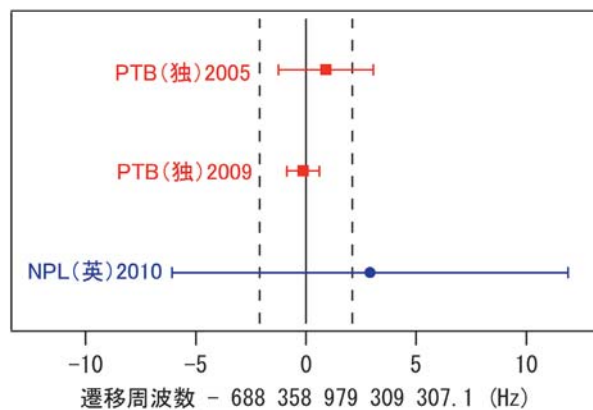


図8 $^{171}\text{Yb}^+$ (四重極子遷移) 単一イオン光時計の周波数計測と国際勧告値.

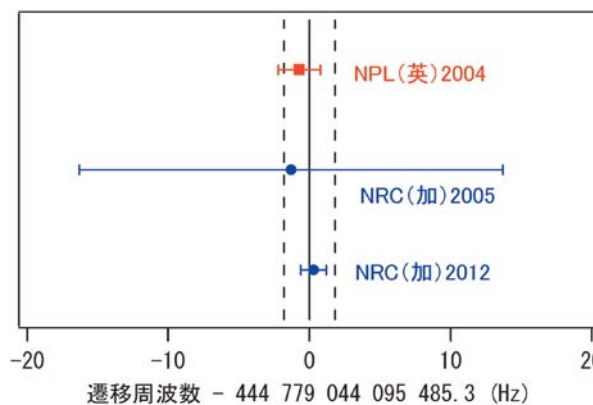


図9 $^{88}\text{Sr}^+$ 単一イオン光時計の周波数計測と国際勧告値.

イオンの周波数比¹⁶⁾及びHgイオンの絶対周波数測定値¹⁷⁾から導かれた測定値である。後者がより小さい不確かさを持っている。作業部会はこの2つの測定結果を加重平均処理して勧告周波数値及び不確かさを決めた。図6にNISTの測定結果及び今回決めた勧告値を示した。NISTが行った2つの $^{27}\text{Al}^+$ 単一イオン光時計の比較結果³⁾(1.7×10^{-17} で一致したこと)が評価されて、これも新しい秒の二次表現として勧告された。今回取り入れた測定結果は1研究機関によるもので、勧告値の不確かさは加重平均の3倍とした。 Al^+ 単一イオン光時計自身の不確かさは 8.6×10^{-18} で、イオンのマイクロモーションによる時計周波数への影響で制限されている。³⁾ Al^+ 単一イオン光時計は、イオンの冷却及び量子状態の読み出しが別の種類のイオンによって行われる「量子理論分光法」を使っており、高感度に遷移スペクトルを測定することができ、他の単一イオン光時計とは技術的に異なる側面を持っている。

3.3 秒の二次表現のアップデート

周波数標準作業部会はさらに、各国から報告された光時計の測定結果に基づいて、すでに秒の二次表現となっている光時計の勧告値の改訂を行った。

1) ^{87}Sr 光格子時計

2009年勧告値の決定に寄与したフランスパリ天文台(LN-SYRTE),¹⁸⁾ 米国のJILA研究所(JILAが研究所の正式名称)¹⁹⁾及び東大-産総研²⁰⁾の測定値に加えて、新たに

PTB²¹⁾及び情報通信研究機構(以下、情通機構)²²⁾の測定結果を取り入れ、加重平均処理して勧告周波数値を決めた。不確かさの一番小さいJILAとPTBの測定値が1 Hzずれていること、また最新の実験結果²³⁾によりそれぞれの研究所が使っている黒体輻射シフトの補正值が変わる可能性があることから、勧告周波数の不確かさを据え置いた。Sr光格子時計の勧告不確かさが 1×10^{-15} で、秒の二次表現の中では最も小さく、ほとんどセシウム一次標準器の不確かさで制限されている。図7にそれぞれの研究所の測定結果及び今回決めた勧告値を示した。Sr光格子時計自身の不確かさは 1.1×10^{-16} で、黒体輻射シフトの影響で制限されている。²⁴⁾

2) $^{171}\text{Yb}^+$ (四重極子遷移) 単一イオン光時計

2009年勧告値の決定に寄与したPTBの測定値²⁵⁾に加えて、新たにPTBの2回目²⁶⁾及びNPL²⁷⁾の測定結果を取り入れ、加重平均処理して勧告周波数値及び不確かさを決めた。NPL測定値の不確かさがPTBの不確かさより10倍大きいので、勧告値の不確かさは加重平均の3倍とした。図8にそれぞれの研究所の測定結果及び今回決めた勧告値を示した。 Yb^+ (四重極子遷移)単一イオン光時計自身の不確かさは 4.5×10^{-16} で、電場勾配とイオンの電気四重極モーメントの相互作用が時計周波数へ与える影響(電気四重極シフト)で制限されている。²⁶⁾

表2 秒の二次表現以外の光周波数標準 (2013年).

波長	レーザー及び安定化基準	周波数	不確かさ
237 nm	$^{115}\text{In}^+, 5s^2\ ^1S_0-5s5p\ ^3P_0$ 遷移	1,267,402,452,899.92 kHz	3.6×10^{-13}
243 nm	$^1\text{H}, 1S-2S, 2$ 光子遷移	1,233,030,706,593,518 Hz	1.2×10^{-14}
266 nm	$^{199}\text{Hg}, 6s^2\ ^1S_0-6s6p\ ^3P_0$ 遷移	1,128,575,290,808,162 Hz	1.7×10^{-14}
532 nm	Nd: YAG レーザー, $^{127}\text{I}_2, R(56)32-0: a_{10}$ 遷移	563,260,223,513 kHz	8.9×10^{-12}
543 nm	He-Ne レーザー, $^{127}\text{I}_2, R(106)28-0: b_{10}$ 遷移	551,580,162,400 kHz	4.5×10^{-11}
633 nm	He-Ne レーザー, $^{127}\text{I}_2, R(127)11-5: a_{16}$ 遷移	473,612,353,604 kHz	2.1×10^{-11}
657 nm	$^{40}\text{Ca}, ^1S_0-^3P_1, \Delta m_J=0$ 遷移	455,986,240,494,140 Hz	1.8×10^{-14}
698 nm	$^{88}\text{Sr}, 5s^2\ ^1S_0-5s5p\ ^3P_0$ 遷移	429,228,066,418,012 Hz	1×10^{-14}
729 nm	$^{40}\text{Ca}^+, 4s\ ^2S_{1/2}-3d\ ^2D_{5/2}$ 遷移	411,042,129,776,395 Hz	1.5×10^{-14}
778 nm	$^{85}\text{Rb}, 5S_{1/2}(F=3)-5D_{3/2}(F=5), 2$ 光子遷移	385,285,142,375 kHz	1.3×10^{-11}
1.54 μm	$^{13}\text{C}_2\text{H}_2, P(16)(\nu_1 + \nu_3)$ 遷移	194,369,569,384 kHz	2.6×10^{-11}
3.39 μm	He-Ne レーザー, $\text{CH}_4, \nu_3, P(7), F_2^{(2)}$, 分解された超微細構造の中央成分 (7-6)	88,376,181,600.18 kHz	3×10^{-12}

3) $^{88}\text{Sr}^+$ 単一イオン光時計

2009年勧告値の決定に寄与したNPL²⁸⁾及びカナダ国立研究機構(NRC)²⁹⁾の測定値に加えて,新たにNRCの2回目の測定結果³⁰⁾を取り入れ,加重平均処理して勧告周波数値及び不確かさを決めた.今回取り入れた測定結果は2研究機関によるもので,勧告値の不確かさは加重平均の2倍とした.図9にそれぞれの研究所の測定結果及び今回決めた勧告値を示した. Sr^+ 単一イオン光時計自身の不確かさは 2×10^{-17} で,黒体輻射シフトの影響で制限されている.³⁰⁾

4) $^{199}\text{Hg}^+$ 単一イオン光時計

Al単一イオン光時計の勧告値の計算にも使ったNISTの最新の測定結果¹⁷⁾を取り入れ,勧告周波数値及び不確かさを決めた.今回取り入れた測定結果は1研究機関によるもので,勧告値の不確かさは測定不確かさの3倍にした. Hg^+ 単一イオン光時計自身の不確かさは 1.9×10^{-17} で,電気四重極シフトなどの影響で制限されている.¹⁶⁾

最後に,秒の二次表現の中で唯一のマイクロ波時計である原子泉方式Rb原子時計も,LEN-SYRTEの新しい測定結果³¹⁾に基づいて,勧告値の改訂を行っている(表1).LEN-SYRTEはさらに,Rb原子泉の長時間測定結果を,国際原子時を校正する手順に則って国際度量衡局に報告している.実際に国際原子時の校正に使われれば,秒の二次表現を用いて国際原子時を校正する最初のケースとなる.

4. その他の光周波数標準

周波数標準作業部会は,秒の二次表現以外の光周波数標準の選定や周波数リストの維持に対しても責任を持っている.表2に秒の二次表現以外の光周波数標準リストを示す(この表にはスペクトルランプなど一部相対的に重要性の低い光源は除外している).この中に,これから秒の二次表現になる可能性のある光時計も含まれているが,長さ諮問委員会のために選定した「メートルの定義を実現する波

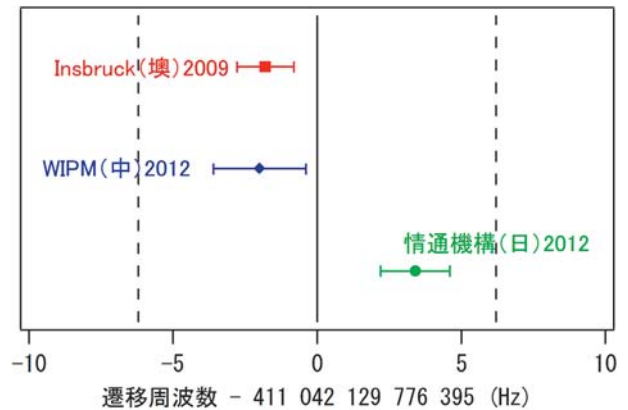


図10 $^{40}\text{Ca}^+$ 単一イオン光時計の周波数計測と国際勧告値.

長標準」も含まれている.波長標準で最もよく利用されているのは633 nmヨウ素安定化He-Neレーザーである.干渉測定における多色レーザーへのニーズから543 nmヨウ素安定化He-Neレーザーや532 nmヨウ素安定化Nd: YAGレーザー, また光通信への応用から1.54 μm アセチレン安定化レーザーや778 nmのルビジウム安定化レーザーが波長標準として開発されている.さらに,3.39 μm メタン安定化He-Neレーザーは歴史的に重要な役割を果たした波長標準である.ちなみに,メートルの定義を実現するには,表2に列挙されている波長標準を利用する以外にも,光周波数コムによるレーザーの周波数計測を利用する方法がある.日本の長さの国家標準は,産総研のヨウ素安定化He-Neレーザーであったが,2009年7月より産総研の光周波数コム装置に改められた.³²⁾

今回の作業部会では,各国から報告された測定結果を検討した結果, $^{40}\text{Ca}^+$, ^{199}Hg , ^1H の三種類の標準について勧告値を更新することを決め,その結果を国際度量衡委員会に勧告した.

1) $^{40}\text{Ca}^+$ 単一イオン光時計

2009年勧告値の決定に寄与したのは,情通機構³³⁾及び

インスブルック大学³⁴⁾の測定値であった。今回は、中国科学院武漢物理数学研究所(WIPM)³⁵⁾と情通機構の2回目³⁶⁾の測定結果が新たに報告された。情通機構の1回目の測定不確かさが大きかったので、それを除いた3つの測定結果について検討することとなった(図10)。インスブルック大とWIPMの測定結果はよく合っているが、この両者と情通機構の2回目の測定結果は合わない。情通機構とWIPMが共同でいろいろと調べた結果、それぞれの絶対周波数測定はおよそ問題ないことがわかったが、それ以上のことはわからない。作業部会では、今後の研究成果に期待したいとの意見が多数出た。今回は、3つの測定結果を加重平均ではなく、通常の平均処理をして、勧告周波数値及び不確かさを決めた。測定結果に不一致があったので、勧告値の不確かさは平均処理の標準偏差の2倍とした。

2) ¹⁹⁹Hg 光格子時計

¹⁹⁹Hg 光格子時計は今回初登場で、LEN-SYRTEの測定結果⁸⁾が取り入れられた。今回取り入れた測定結果は1研究機関によるもので、勧告値の不確かさは報告された測定結果の不確かさの3倍とした。

3) ¹H

今回は、ドイツのマックスプランク量子光学研究所(MPQ)から新たな測定結果³⁷⁾が報告された。以前の測定の不確かさが大きかったので、今回は新しく報告された測定結果だけを採用した。今回の測定結果は1研究機関によるもので、勧告値の不確かさは報告された測定結果の不確かさの3倍とした。

5. おわりに

光時計に関する研究開発は、今後ますます盛んになるだろう。単一イオン光時計と光格子時計の競争はしばらく続くものと思われる。光格子時計の優位性の1つは、たくさんの原子の寄与による時計遷移の高い信号対雑音比である。その結果、光格子時計においては、より高い周波数安定度の実現が可能である。この高い周波数安定度の実現には、狭線幅時計遷移レーザー光源が鍵となっており、より狭い線幅(<1 Hz)のレーザー光源の開発が重要な研究課題となっている。また、光格子時計の不確かさを制限しているのは黒体輻射シフトの影響で、この周波数シフトが環境温度の4乗に逆比例するので、原子の環境を冷やす「冷却型光格子時計」が黒体輻射シフトの影響から逃れる有効な方法となる。

次の周波数標準作業部会は2015年に開かれる予定である。それまでに、光時計の研究がどのくらい進化するのだろうか。光時計自身の不確かさが現在の秒の定義であるセシウム原子時計の不確かさよりも小さいので、絶対周波数計測(セシウム原子時計との比較)ではなく、光時計同士の比較がたいへん重要となる。異なる光時計の比較から、極めて小さい不確かさで光時計の周波数比を決定することができる。この光時計周波数比の計測こそが光時計の実力

を示す有力な手段である。周波数標準作業部会は、各国の研究機関から光時計周波数比の測定結果を集めて、より高精度な光時計の評価を行う予定である。今後5-10年をかけて、新しい秒の定義を決めるために必要な光時計に関する研究成果が揃うのを待って、秒の再定義を行うことを目指す。光時計は最も精密な量子標準であると同時に、物理定数の恒常性を検証する有効なツールや重力ポテンシャルの高精度センサーなどとして、基礎科学と実用技術の両面で多くの研究成果を生み出すことは間違いないであろう。

参考文献

- 1) 洪 鋒雷: 日本物理学会誌 **65** (2010) 80.
- 2) 洪 鋒雷: 応用物理 **79** (2010) 546.
- 3) C. W. Chou, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 070802.
- 4) 香取秀俊: 応用物理 **81** (2012) 656.
- 5) M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi and H. Katori: Nature **435** (2005) 321.
- 6) T. Kohno, *et al.*: Appl. Phys. Express **2** (2009) 072501.
- 7) N. D. Lemke, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 063001.
- 8) J. J. McFerran, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 183004.
- 9) M. Yasuda, *et al.*: Appl. Phys. Express **5** (2012) 102401.
- 10) C. Y. Park, *et al.*: arXiv: 1112.5939.
- 11) C. Y. Park, *et al.*: Metrologia **50** (2013) 119.
- 12) K. Hosaka, *et al.*: Phys. Rev. A **79** (2009) 033403.
- 13) S. A. King, *et al.*: New J. Phys. **14** (2012) 013045.
- 14) N. Huntemann, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 090801.
- 15) T. Rosenband, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 220801.
- 16) T. Rosenband, *et al.*: Science **319** (2008) 1808.
- 17) J. E. Stalnaker, *et al.*: Appl. Phys. B **89** (2007) 167.
- 18) X. Baillard, *et al.*: Eur. Phys. J. D **48** (2008) 11.
- 19) G. K. Campbell, *et al.*: Metrologia **45** (2008) 539.
- 20) F.-L. Hong, *et al.*: Opt. Lett. **34** (2009) 692.
- 21) St. Falke, *et al.*: Metrologia **48** (2011) 399.
- 22) A. Yamaguchi, *et al.*: Appl. Phys. Express **5** (2012) 022701.
- 23) T. Middelmann, S. Falke, C. Lisdat and U. Sterr: Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 263004.
- 24) R. Le Targat, *et al.*: Nat. Commun. **4** (2013) 2109.
- 25) 周波数標準作業部会文書: CCL-CCTF/06-11 (2006). http://www.bipm.org/wg/CCL/CCL-CCTF/Allowed/2006/JWG_CCL-CCTF2006_questionnaire_PTB.pdf
- 26) Chr. Tamm, S. Weyers, B. Lipphardt and E. Peik: Phys. Rev. A **80** (2009) 043403.
- 27) S. Webster, *et al.*: IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control **57** (2010) 592.
- 28) H. S. Margolis, *et al.*: Science **306** (2004) 1355.
- 29) P. Dubé, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 033001.
- 30) A. A. Madej, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 203002.
- 31) J. Guéna, *et al.*: IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control **59** (2012) 391.
- 32) 産総研のプレスリリース (2009年7月16日) —「長さの国家標準」が新方式に. http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2009/pr20090716/pr20090716.html
- 33) K. Matsubara, *et al.*: Appl. Phys. Express **1** (2008) 067011.
- 34) M. Chwalla, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 023002.
- 35) Y. Huang, *et al.*: Phys. Rev. A **85** (2012) 030503.
- 36) K. Matsubara, *et al.*: Opt. Express **20** (2012) 22034.
- 37) C. G. Parthey, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 203001.

著者紹介

洪 鋒雷氏: 専門は量子エレクトロニクス。レーザー分光、レーザーの周波数安定化、光周波数コム及び光周波数標準の開発に従事。

(2013年8月17日原稿受付)

Development of Atomic Clocks and the 2013 International Recommendation of the New Secondary Representations of the Second

Feng-Lei Hong

abstract: Atomic clocks play important roles not only in the field of measurement and standards, but also in basic research of physics. The

International Committee for Weights and Measures (CIPM) has updated the list of next generation atomic clocks (“the secondary representations of the second”) for future redefinition of the second. We introduce the history of the definition of the secondary, the development of the optical clocks, and the international recommendation of the new secondary representations of the second.

日本物理学会誌 第69巻 第5号 (2014年5月号) 予定目次

巻頭言

私の夢……………霜田光一

最近のトピックス

アイソン彗星 (C/2012 S1) ……………渡部潤一

現代物理のキーワード

固体電子系のトポロジー……………野村健太郎

解説

超対称ゲージ理論における局所化の方法……………細道和夫

超伝導体におけるマヨラナフェルミオン……………佐藤昌利

シリーズ「量子論の広がり—非局所相関と不確定性—」

概要

冷却イオンの量子エンタングルメント生成

……………野口篤史, 豊田健二, 占部伸二

最近の研究から

高温QCDにおけるU(1)カイラルアノマリー

……………青木愼也, Guido Cossu, 深谷英則, 谷口裕介

重力波を聞き, 電磁波を見る—電磁波対応天体

……………久徳浩太郎, 仏坂健太

JPSJの最近の注目論文から 1月の編集委員会より

……………安藤恒也

ラ・トッカータ

Foundational Questions Institute 主催エッセイコンテスト

……………鹿野 豊

学界ニュース

第17回久保亮五記念賞: 紺谷 浩氏 ……………松田祐司

第7回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞: 川崎雅裕氏,

郡 和範氏, 諸井健夫氏……………久野純治

追悼

吉川圭二先生の思い出……………糸山浩司, 窪田高広

新著紹介

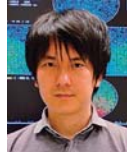
AAPPS だより

会員の声

長基線ニュートリノ振動実験 T2K による $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の発見

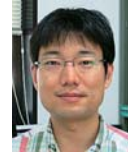


坂下 健

高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所

西村 康宏

東京大学宇宙線研究所



南野 彰宏

京都大学大学院理学研究科

素粒子の一種であるニュートリノは、フレーバーと呼ばれる3つの種類 (ν_e, ν_μ, ν_τ) に分けられる。これら電荷を持たないニュートリノは、電荷を持つ電子・ミュオン・タウの3つの素粒子と対応し、合わせてレプトンと称されている。「ニュートリノ振動」は、ニュートリノが質量を持つため、あるフレーバーから別のフレーバーに変化する物理現象である。この説明は素粒子物理学において重要な研究テーマの1つである。

東海-神岡間長基線ニュートリノ振動実験 (T2K) は、3種間のニュートリノ振動のうち、ただ1つ未発見であった ν_μ と ν_e の間の振動「 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動」の長期測定を2010年から開始した。茨城県東海村にある大強度陽子加速器を用いて生成された ν_μ が、295 km先の岐阜県神岡町にあるスーパーカミオカンデで ν_e として出現する事象を探索する。

この $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の確率は、ニュートリノのフレーバー混合具合を表す3つの混合角のうちの1つ、 θ_{13} の大きさでほぼ決まる。もし θ_{13} がゼロでなければ、まだレプトンでは知られていない「粒子・反粒子と空間対称性 (CP) の破れ」が探索可能となり、ニュートリノ振動の測定によって宇宙創生の謎を解き明かす可能性を秘めている。しかし、 θ_{13} は他の2つの混合角より値が小さく、どこまで大きさを持つか詳細は不明であった。

T2K 実験では、2013年4月までに 6.39×10^{20} 個の陽子から生成された ν_μ ビームから、28事象の ν_e 出現事象候補を測定し、背景事象数は $\theta_{13}=0$ の時に4.6事象と見積もら

れた。ここから、 7.5σ の有意度で θ_{13} がゼロでない大きさを持つ結果となり、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の発見となった。

一方、原子炉から生じる反電子ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$ の反粒子) が別のニュートリノになり消失する量を測定する3つの実験グループが、2011年のT2K実験最初の結果に続いて θ_{13} の測定値を報告した。これらの実験はCP対称性の破れの大きさに依存せずに θ_{13} を測ることができるため、ここ数年で混合角 θ_{13} は精度よく分かってきた。

残された課題であるレプトンCP対称性の破れの探求には、原子炉ニュートリノ実験によるさらに精密な θ_{13} の測定と、CP対称性の破れの大きさにも感度を持つ加速器ニュートリノ測定の双方が重要となる。また、T2K実験ではこれに加えて、 ν_μ の反粒子ビームを使い、単独でもCP対称性の破れを測定する予定である。

T2K実験では、ニュートリノ振動で ν_μ から ν_τ や ν_e へ変化しなかった ν_μ 残存量も測定して、他の混合角 θ_{23} などを詳細に決定できる。2012年6月までの 3.01×10^{20} 個のビーム陽子数のデータを解析して、 $\sin^2 \theta_{23} = 0.514 \pm 0.082$ 、 $|\Delta m_{32}^2| = 2.44^{+0.17}_{-0.15} \text{ eV}^2$ と世界最高レベルの精度を達成した。

—Keywords—

θ_{13} と δ_{CP} :

ニュートリノの3つの質量固有状態 (ν_1, ν_2, ν_3) と3つのフレーバー固有状態 (ν_e, ν_μ, ν_τ) は互いに混合しており、牧-中川-坂田行列 (MNS 行列) で関係づけられる。MNS 行列は 3×3 のユニタリー行列であり、3つの実数 ($\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$) と1つの複素数 ($e^{i\delta_{CP}}$) の計4つのパラメータを持つ。 δ_{CP} が0度や180度でない場合は $e^{i\delta_{CP}}$ が虚部を持ち、CPの破れを引き起こす。

ニュートリノ振動 :

上記のようにニュートリノの質量固有状態とフレーバー固有状態は同一ではない。ニュートリノ生成時のフレーバー固有状態はMNS行列を用いて質量固有状態の重ねあわせで書ける。ニュートリノの質量が異なると、飛行に伴い次第に質量固有状態の間で位相のずれが生じ、もう一度香りの固有状態に戻すと別のフレーバーが現れる。ニュートリノ生成点から離れた位置でニュートリノを観測し、ニュートリノフレーバーの変化を調べる実験をニュートリノ振動実験という。

1. はじめに

ニュートリノ振動は、ある種類（弱い相互作用のフレーバー固有状態）のニュートリノが飛行中に別の種類のニュートリノに変化する物理現象で、ニュートリノに質量がある場合に限り起こる。1998年にスーパーカミオカンデ実験がニュートリノ振動を世界で初めて発見した。¹⁾ この結果は、素粒子の標準モデルで質量がゼロとされてきたニュートリノにも質量があることを示す大きな発見である。この発見以後も世界のさまざまな実験でニュートリノ振動の研究が続けられており、ニュートリノ振動の測定はニュートリノの質量など標準モデルを超えた物理を探索する有力な手法として確立されてきた。^{*}

T2K実験では、このニュートリノ振動を用いて素粒子物理学に残された課題の解明を行う。本解説では、まずニュートリノ振動研究の現状を紹介したあと、第3章でT2K実験の概要を説明し、第4章では電子ニュートリノ (ν_e) 出現事象測定の目的と最新結果、第5章ではミューニュートリノ (ν_μ) 消失事象の精密測定の目的と最新結果を解説する。そして第6章ではT2K実験の今後の見通しを紹介する。

2. ニュートリノ振動研究の現状

ニュートリノが質量を持つ場合、フレーバー固有状態は質量固有状態の混合状態として表すことができる。例えば、2世代間での混合の場合、フレーバー固有状態 ν_α と ν_β は

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

と、質量固有状態 ν_1, ν_2 の混合状態である。ここで、 θ は混合角と呼ばれるパラメータで2世代間の混合の割合を表す。始状態に ν_α だったニュートリノが距離 L km を飛行後に ν_β へ変化している確率は

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{21}^2 L}{E_\nu} \right) \quad (2)$$

となる。ここで、 E_ν はニュートリノのエネルギー（単位は GeV）で、 Δm_{21}^2 はニュートリノ質量の二乗差（ $=m_2^2 - m_1^2$ ）である。つまり、振動確率はその大きさが混合角で決まり、そして質量二乗差と飛行距離とエネルギーで決まる周期で変化する。例えば、長基線ニュートリノ振動実験では、飛行距離を固定して飛行後の各フレーバーのニュートリノ数の変化やエネルギー分布を測定することで振動確率のパターンを捉えて、混合角や質量二乗差を決める。また、ニュートリノ源とそのエネルギー、検出器の設計と配置を適切に選ぶことで、測定可能な振動モードが決定される。例えば、太陽や原子炉から発生する電子ニュートリノは 10 MeV 以下のエネルギーを持ち、電子ニュートリノの減少量からニュートリノ振動を見積もる。また、宇宙線の大気中衝突や加速器からの荷電粒子崩壊により、10 GeV 領域

^{*}1 フレーバー混合の研究は、クォークでも K や B 中間子などを用いて長年続けられてきており、標準モデルの検証や新しい物理を探索する有力な手法である。

辺りまでのエネルギーを持つミューニュートリノが得られ、飛来後のミューニュートリノ減少や電子ニュートリノ出現を見てニュートリノ振動を測れる。タウニュートリノ (ν_τ) は、タウレプトンの生成閾値が 3.5 GeV と高く、すぐに多くの粒子へ崩壊するため検出が難しい。しかし、数は少ないもののスーパーカミオカンデや OPERA 実験でミューニュートリノから出現したタウニュートリノが観測されている。²⁾

これまでの実験結果から、3世代の間で混合が起こっていることが有力とされている。^{*2} 3世代の間の混合は、 3×3 の混合行列 (U_{PMNS}) を用いて、 $\nu_l = \sum_{j=1}^3 U_{lj} \nu_j$ ($l=e, \mu, \tau$) と表すことができる。 U_{PMNS} は、4つのパラメータ：3つの混合角 ($\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$) と1つの複素位相 (δ_{CP}) で記述される。最近、原子炉からのニュートリノを測定する複数の実験や今回解説する T2K 実験によって θ_{13} がゼロでない値として測定された。この最近の白熱した展開については、第4章で詳しく説明する。また、複素位相 δ_{CP} の値はまだ不明である。

原子核等を構成するクォークでは、粒子・反粒子の交換 (C) と空間の反転 (P) を同時に行う CP 変換で対称性が破れていることが分かっているが、ニュートリノや電子等が属するレプトンではまだ分かっておらず、この解明は素粒子物理学の大きな課題である。もし δ_{CP} が有限な場合、レプトンでも CP 対称性が破れていることを意味する。第4章で詳しく説明するように、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動モードの確率は $\sin 2\theta_{13} \times \sin \delta_{\text{CP}}$ という項を含む。最近の研究で θ_{13} がゼロでないことが分かったので、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を測定することでレプトンでの CP 対称性の破れを探索できる。CP 対称性の破れは物質優勢の宇宙を説明できる有力な候補でもあるので、ニュートリノ振動で CP 対称性の破れが見つければ、物質優勢宇宙の解明に繋がる重要な手掛かりとなる。

現在までに混合角と質量二乗差は、

$$\theta_{12} = (34 \pm 1)^\circ, \quad \theta_{23} = (40_{-2}^{+5})^\circ, \quad \theta_{13} = (9.1 \pm 0.6)^\circ \quad (3)$$

$$\Delta m_{21}^2 = (7.50 \pm 0.20) \times 10^{-5}, \quad |\Delta m_{32}^2| = (2.32_{-0.08}^{+0.12}) \times 10^{-3} \quad (4)$$

(質量二乗差の単位は eV^2) と測定されている。 ν_3 の質量が ν_2 より大きい (これを質量階層性という) は、まだ分かっていない。これまでの測定から混合行列 U_{PMNS} は、

$$\begin{pmatrix} 0.82 & 0.55 & 0.16 \\ -0.49 & 0.52 & 0.55 \\ 0.20 & -0.65 & 0.70 \end{pmatrix} \quad (5)$$

と分かってきている (各値の誤差は省略している。また $\delta_{\text{CP}} = 0$ と仮定している)。この U_{PMNS} は、対角以外の成分が大きく、混合がクォークの場合に比べて大きい (クォークの場合は、世代を超えた混合は小さい)。このレプトンとクォークの間の違いは、新しい物理のヒントになっている

^{*2}1 いくつかの実験では別の Δm^2 でのニュートリノ振動の兆候が示されて、4世代以上での混合の可能性も残っている。

る可能性もある。

ニュートリノ振動物理で残っている課題をまとめると、

1. $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動 (ν_e の出現現象) を確実に発見する
2. 混合角 θ_{23} や Δm_{32}^2 の精密測定
3. 質量階層性 (m_2 と m_3 のどちらが大きい) の決定
4. レプトンでの CP 対称性の測定 (δ_{CP} の測定)

である。T2K 実験では、項目 1 と 2 を当初の目的として実験を行っている。前述の通り $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動モードは δ_{CP} を含むため、項目 1 を達成した後にこの現象を詳しく測定することで項目 4 を探求できる。また、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の確率は θ_{23} の値にも依存するので、この確率の測定精度を上げるために θ_{23} の精密測定も重要である。 θ_{23} の精密測定は、質量階層性の決定にも重要な役割を果たす。T2K 実験では、項目 2 を ν_μ がニュートリノ振動により減少する事象の精密測定により達成する。

3. T2K 実験

T2K 実験^{*3}では、J-PARC 大強度陽子加速器 (茨城県東海村) で ν_μ を大量に生成して、295 km 先のスーパーカミオカンデ (岐阜県神岡町) に向けて飛ばし、この飛行中に起こるニュートリノ振動について研究している。

実験全体の概要を図 1 に示す。295 km 先の後置検出器 (スーパーカミオカンデ) で測定されたデータを、振動を考慮して予測した反応数やエネルギー分布と比較してニュートリノ振動を捉える。その際、J-PARC で生成したニュートリノの数やエネルギー分布 (振動する前の量) を前置検出器で測定し、これをニュートリノの親粒子の運動量分布などの情報と合わせて、スーパーカミオカンデでの分布を正確に予測している。

T2K 実験のセットアップ (飛行距離とニュートリノのエネルギー) は、測定感度を高めるように決められた。測定したいニュートリノ振動モードの質量二乗差は $\sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ であるので、 $L=295 \text{ km}$ で振動確率が最大になるように $E \sim 0.6 \text{ GeV}$ のニュートリノを使用する (図 2)。

実験ではオフ軸法を用いて、0.6 GeV 付近のほぼ単色のエネルギーを持つニュートリノビームを抽出する。これは、ビーム中心方向をスーパーカミオカンデの方向から僅かにずらすことで、運動力学的に検出器の方向にある特定のエネルギーのニュートリノを集める手法である。T2K 実験では、ビームを検出器の方向から 2.5 度傾けている。また、この方法により高いエネルギーのニュートリノを排除することで、それらに多い背景事象 (信号と見誤ってしまう事象) を減らすことができる。

ニュートリノビームは J-PARC 大強度陽子加速器からの陽子を用いて以下の流れで生成される。まず、約 2 秒に 1 回、30 GeV まで加速した陽子を加速器から取り出して炭素ターゲットに照射する。次に、陽子と炭素の反応から生

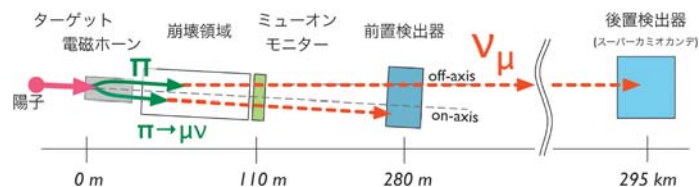


図 1 T2K 実験の全体図。

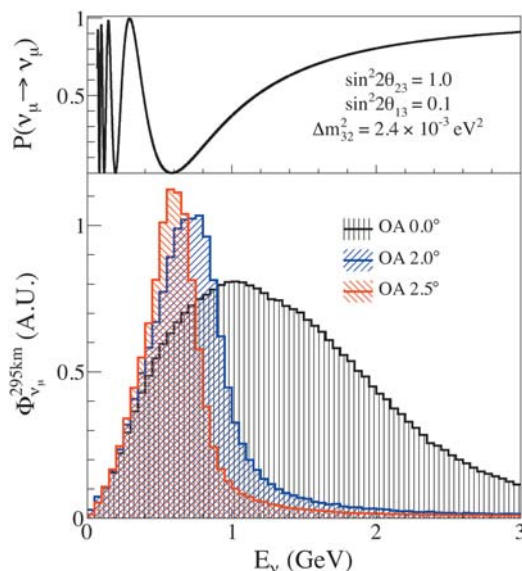


図 2 ν_μ が残る確率 (上段) とビームのエネルギー分布 (下段)。ビームエネルギーは、ビームが角度 0 度、2 度そして 2.5 度の場合を示している。2.5 度の場合、振動確率の最大値とエネルギーのピーク (0.6 GeV) が一致する。

成されたパイ中間子や K 中間子を電磁ホーンと呼ばれる収束装置でビーム軸方向に集める。これらの粒子は、110 m の崩壊領域の中で自然に崩壊 (例えば $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$) して ν_μ を作る。ビームの方向や強度は、崩壊領域下流に設置されたミュオンモニターと呼ばれる検出器で、ニュートリノと一緒に生成されたミュオンをビーム取り出し毎に測定して安定性などを常時モニターする。

このように生成されたビームはほぼ ν_μ が占めるが、約 1% ほど ν_e が含まれている。この ν_e は、 ν_e 出現事象の測定で背景事象になるため、その正確な割合などの理解が必要となる。この ν_e 生成の元となるパイ中間子や K 中間子の生成断面積分布は CERN SPS の NA61 実験で実際に測定し、⁴⁾ また ν_e 反応については生成直後のニュートリノビームを前置検出器で測定するなど背景事象の正確な見積もりを行っている。

前置検出器は、ビーム軸上の“オン軸検出器 (INGRID)”とスーパーカミオカンデと同じ角度上の“オフ軸検出器 (ND280)”の 2 つの検出器から構成される。共にターゲットから 280 m 下流に設置されている。INGRID では、ニュートリノを直接測定して主にニュートリノビームの強度や方向をモニターする。一方、ND280 は多様なターゲットと検出器から構成され、0.2 テスラの強磁場内で荷電粒子の飛跡を検出して振動前のニュートリノエネルギー

*3 東海から神岡 (Tokai to Kamioka) の頭文字をとって、T2K 実験という実験名になっている。実験の詳細は文献 3 を参照されたい。

ギースベクトル・フレイバーの測定、そしてニュートリノ反応断面積の研究を行う。

スーパーカミオカンデは、岐阜県神岡鉱山内の地下1,000 mに設置された直径39.3 m、高さ41.4 mの円筒型の水チェレンコフ検出器であり、ニュートリノが水中で散乱して荷電粒子が放出された場合に発生するリング状のチェレンコフ光を約1万2千本の50 cm径光電子増倍管で捉える。荷電レプトンの粒子識別や運動量、方向測定に高い性能を持っており、電子をミューオンと見誤る確率は約1%である。T2K実験以外の多目的観測を常時行っているスーパーカミオカンデでは、時間情報からパルス状のT2Kニュートリノビームを分離する。GPSを用いてJ-PARCとスーパーカミオカンデの時間を同期することでT2Kニュートリノビームを検出する。不感時間や選出時の損失も少なく、選別効率は99%を超える。

J-PARCニュートリノ施設では、2004年から新しく建設が始まり（加速器施設は2001年から）、2009年にはニュートリノビーム生成、検出器の試験運転を行い、2010年から物理データの収集を始めた。2011年には東日本大震災のためデータ収集が中断したが、1年間の復旧を経て2012年から収集を再開した。実験開始から加速器の強度を徐々に上げてきて、現在は230 kWで運転を行っている。このときの取り出し毎の陽子数は、 1.2×10^{14} 個で世界最大強度である。また、設計強度である750 kWの早期到達を目指してさらなる陽子数の増強や取り出し周期の短縮を計画している。現在までにT2Kでは 6.6×10^{20} 個のビーム陽子数のデータを記録している。本解説では、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の解析については2013年4月までのデータ（ 6.39×10^{20} 個のビーム陽子数）、*4 ν_μ 消失事象の解析については2012年6月までの 3.01×10^{20} ビーム陽子数のデータについて最新の解析結果を説明する。

4. $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の発見

4.1 ニュートリノ振動と ν_e 出現事象

本章では ν_e の出現を検出して $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を探る。ニュートリノ振動パラメータのうち、詳細が不明であった θ_{13} と δ_{CP} はこの $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と深く関わるため、まずは $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ を観測して θ_{13} を見積もることがT2K実験の最初の目標である。 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動確率は以下の近似式で表される。

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \Delta_{31} - \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \cos \theta_{13} \times \sin \Delta_{32} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{21} \sin \delta_{CP}, \quad (6)$$

$$\Delta_{ij} = 1.27 \Delta m_{ij}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}] / E_\nu [\text{GeV}]. \quad (7)$$

この確率は第一項でほぼ決まるため、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の観測は θ_{13} の測定に繋がる。 θ_{13} は他の2つの混合角に比べ小さいことは分かっていたが、それが0に近いのか、測定可能

なほどの有限値を持つのかどうかは分かっていなかった。仮に $\theta_{13} = 0$ であるとする、上記二項を含むほとんどの項は消え、振動確率は非常に小さくなる。一方、 θ_{13} がある程度の大きさを持てば、第二項が消えずに δ_{CP} の値が原理的には測定可能となる。電磁ホーンの極性を反転して得られる反粒子 $\bar{\nu}_\mu$ ビームを用いた場合、 $\delta_{CP} \rightarrow -\delta_{CP}$ となり第二項のみ正負が逆転するため、CP非保存項と呼ばれる。振動確率の差、 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$ を取れば、 $\sin \delta_{CP}$ を含む第二項のみ残り、 δ_{CP} の測定が可能になる。

一方、 θ_{13} に関しては $\bar{\nu}_e$ 消失を原子炉実験により測定することでも測れる。この場合の振動確率は $P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e)$ 以外 $\approx \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \Delta_{31}$ となり、他の振動パラメータの影響を受けにくい統計量が高ければ精密に測れる。

近年までは、2003年にフランスの原子炉実験Choozで出された上限値 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.15$ ⁶⁾のみが知られていたが、2011年6月にT2K実験より θ_{13} の下限値が与えられたことを皮切りに、続々と θ_{13} の測定結果が報告されるようになった。同じく加速器により $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を測るMINOS実験の報告が続き、原子炉実験であるフランスのDouble Chooz、中国のDaya Bay、韓国のRENO実験が1年足らずで θ_{13} の測定値を公表した。このうち、Daya BayとRENO実験の結果はその時点でのT2K実験による測定精度を上回り、これまで上限値しか知られなかった θ_{13} の値を精密に測定する段階へと移行した。これはここ数年の大きな進展であり、MINOS実験以外はまだ測定を継続しているために今後も高精度な θ_{13} の測定値が得られていくはずである。

θ_{13} の精密測定が可能な原子炉実験による $\bar{\nu}_e$ 消失観測と、 θ_{13} 以外にも感度がある $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の観測では、共通して θ_{13} の測定が可能であるが、ニュートリノ振動パラメータの決定に関して相補的な役割を担う。双方で θ_{13} の精密測定が可能になってきた今では、 δ_{CP} などの詳細が不明なニュートリノ振動パラメータの全容を明らかにしていく時代へと移行しつつある。特に、 δ_{CP} の測定によるレプトンセクターのCPの破れの検証は、ニュートリノの特質を明らかにするだけに留まらず、物質優勢の宇宙創生に関わる謎を解明する重要な手掛かりとなる。

本章では、T2K実験で混合角 θ_{13} を見積もり、これまで知られていなかった $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の存在を確立するまでを記述する。

4.2 ν_e 事象選別

ν_μ ビームの飛来中に起こる $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を探るには、 ν_e の出現量を測れば良い。 ν_μ の消失量に関しては、 θ_{23} により ν_τ へ振動し失われる方が優勢であるためここでは使用しないが、次章 ν_μ 消失事象を使った解析で紹介する。ここでは、295 km離れた後置検出器、スーパーカミオカンデで、ビームからのニュートリノ事象を観測し、 ν_e 出現事象候補を選び出すまでを解説する。

検出されたニュートリノ事象から ν_e のみ選び出すため、電子型の1チェレンコフ・リング(=1荷電粒子)を選ぶ。

*4 本解説の執筆中に、 6.57×10^{20} 個のビーム陽子数を用いたさらに新しい結果が発表されている。⁵⁾

表1 スーパーカミオカンデ有効体積内で観測されたニュートリノ事象数と、選別された ν_e 事象数。2013年4月までの 6.39×10^{20} ビーム陽子数を用いた。ニュートリノ・反ニュートリノは計数時に区別していない。括弧内は $\sin^2 2\theta_{13}=0$ を仮定している。

$\sin^2 2\theta_{13}$ =0.1 (=0)	データ	シミュレーション期待値内訳			
		$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ CC信号	1) ν_μ CC	2) ν_e CC	3) NC
ν 観測数	363	24.79	234.40	14.39	76.50
ν_e 候補	28	16.43 (0.38)	0.06 (0.06)	3.05 (3.29)	0.87 (0.87)
選別効率	—	66.3%	0.0%	21.2%	1.1%

これは、電子ニュートリノ反応として最も多い荷電カレント(CC)準弾性散乱($\nu_e + n \rightarrow e^- + p$)からの電子を選別することに相当し、ニュートリノのエネルギー(E_ν^{rec})は

$$E_\nu^{\text{rec}} = \frac{m_p^2 - (m_n - E_b)^2 - m_\ell^2 + 2(m_n - E_b)E_\ell}{2(m_n - E_b - E_\ell + p_\ell \cos \theta_\ell)} \quad (8)$$

で表される。 m_p , m_n , m_ℓ は陽子、中性子、電子の質量であり、 p_ℓ , E_ℓ , θ_ℓ は、再構成された電子の運動量、エネルギー、ビーム方向からの散乱角を表す。 ℓ は電子やミュオンの属するレプトンを表し、 ν_e でなく ν_μ の場合(5章)では、電子ではなくミュオンのものを用いる。 $E_b=27$ MeVは、 ^{16}O 核子の平均結合エネルギーである。

間違っって選び出される背景事象としては、

- 1) ν_μ から生じたミュオンが、スーパーカミオカンデ内で崩壊して電子になった、または電子と誤って識別された場合の荷電カレント散乱(ν_μ CC)
- 2) ν_μ ビーム生成時に1.2%ほど混入した ν_e の荷電カレント散乱(ν_e CC)
- 3) 中性カレント(NC)散乱により生じたパイ中間子等が挙げられる。1) ν_μ CCは、ミュオン崩壊から電子が現れるまでの遅延時間(ミュオンの寿命 $2.2 \mu\text{s}$ による)から取り除く。2) ν_e CCには、 ν_μ ビームを生成するパイ中間子に混ざり込んだ、 K 中間子の崩壊から来るエネルギーの高い1,250 MeV以上のものを取り除く。3)は100 MeV以下の低エネルギー事象を除去すると共に、 π^0 から通常崩壊して生じる2つのガンマ線を仮定して尤度を計算し、 π^0 らしいものは除去する。

表1は、データ観測数とシミュレーションを用いた予想数の ν_e 選別前後の内訳^{*5}を示す。スーパーカミオカンデの有効体積(22.5 kton)内では、363事象のニュートリノが観測され、そのうち28事象が ν_e 出現事象候補として選別された。選別前に全体の7%であった $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ CC純度は選別後に80%となり、純度良く ν_e 候補事象を選別できている。 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動で現れた ν_e は66.3%と高い残存率で選別され、大きな不定性となりうる背景事象は、選別前に比べ1.2%まで削減できた。選別された28事象は、シミュレーションによる背景事象の期待値4.0に比べ有意に多く、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の存在を示唆している。また、 $\theta_{13}=0$ を仮定した場合(括弧内)の ν_e 事象期待値総数4.6よりも多いことから、有意に大きい θ_{13} 値が期待される。さらに、 $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$ を

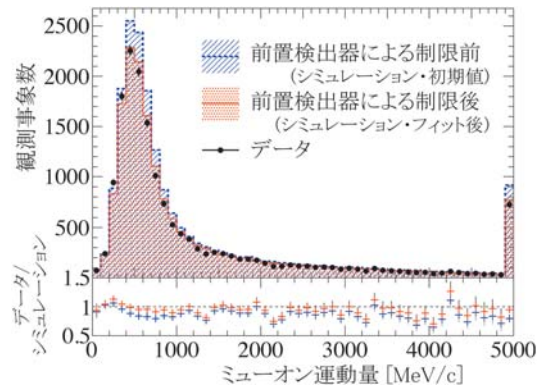


図3 前置検出器による運動量分布。シミュレーションは誤差・規格化を元に調整され(赤)、測定データ(黒点)と一致している。

表2 ν_e 出現事象数の相対誤差内訳。括弧内は、前置検出器の測定結果を元に誤差を抑える前の値。

誤差内訳	$\sin^2 2\theta_{13}$ = 0.1,	= 0
A) ν フラックスと断面積 (前置検出器による制限前)	3.0% (26.9%)	4.9% (22.2%)
B) 前置検出器で制限しない ν 断面積	7.5%	6.7%
C) ν_e 選別・終状態	3.5%	7.3%
計 (前置検出器による制限前)	8.8% (28.2%)	11.1% (24.5%)

仮定した場合^{*5}では、20.5事象数が期待される。4.4節では、観測された28事象と合うよう θ_{13} を求めていく。

4.3 ν_μ ビーム測定と系統誤差

T2K実験では、ニュートリノ振動の前後をそれぞれ前置・後置検出器で測定することで、ニュートリノフレーバーの変化量を相対的に比較すると共に、共通する系統誤差を相殺・軽減させる。つまり、前置検出器で元の ν_μ ビームを詳細に把握することで、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の測定精度が向上する。

前置検出器では、 ν 振動前に ν_μ CC散乱からの運動量・散乱角度分布を測定して、シミュレーションがデータと一致するようにパラメータを調整した。これらパラメータは、フラックスと散乱断面積に関わるもので、外部の実験で予め求められていた値と誤差を初期値として尤度関数を構築し、予想運動量・散乱角度分布がデータと合うよう最尤推定量を求めた。不定性を精度よく求められるよう、検出された飛跡を元に、パイ中間子を伴わない場合、1つ伴う場合、多く生成される場合の3通りに区分して分布を求め、それぞれに測定したい各散乱が純度良く集められた。図3は、前置検出器で測定した事象のうちパイ中間子を伴わない場合の運動量分布であり、フィットによりシミュレーションがデータとよく一致した。結果として、フラックスと散乱断面積に関するパラメータに対して、その値と誤差に制限を与えた。

表2は、 ν_e 事象数に対する誤差の内訳を $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動あり

^{*5} 4章では、断りがない限り $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$ (または0)、 $\sin^2 \theta_{12}=0.31$ 、 $\sin^2 \theta_{23}=0.5$ 、 $\Delta m_{21}^2=7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ 、 $\Delta m_{32}^2=2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ 、 $\delta_{CP}=0$ を仮定した。

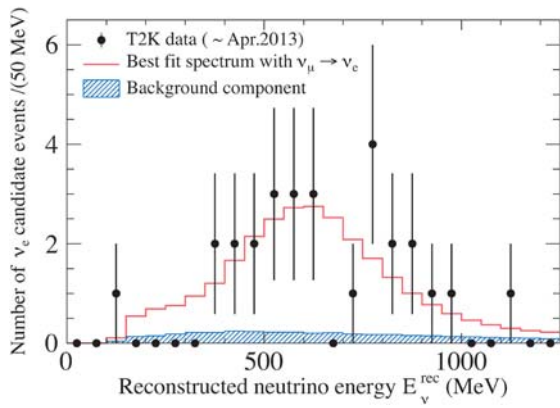


図4 観測されたデータのニュートリノエネルギー分布(点)と、最尤推定で $\sin^2 2\theta_{13}=0.15$ が得られた際のシミュレーション分布(実線、空白領域が $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ を示す)。 $\delta_{CP}=0$ と質量正常階層を仮定した。

($\sin^2 2\theta_{13}=0.1$ を仮定) と $\sin^2 2\theta_{13}=0$ の場合で示した、括弧内は前置検出器測定で制限しない外部実験のみから決めた誤差を表し、前置検出器測定により $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動がある場合の誤差は 28.2% から 8.8% と大幅に削減されていることが分かる。内訳 A) は前置検出器による測定で誤差が削減されたフラックス・断面積の不定性、B) はその測定で制限していない不定性、C) はスーパーカミオカンデにおける相互作用と前節で述べた ν_e 選別時の不定性を合わせた誤差である。スーパーカミオカンデにおける ν_e 選別誤差は、T2K データと並行して取られた大気ニュートリノ観測データを用いて求められている。A) と C) では誤差の相関も求められ、次節の振動パラメータ導出で取り込まれる。

4.4 ニュートリノ振動パラメータ θ_{13} の見積もり

観測された ν_e 事象と誤差が分かったところで、最尤法により混合角 θ_{13} を求める。シミュレーションの予想値を左右するニュートリノフラックス・断面積・検出効率などのパラメータは、それぞれに見積もられた系統誤差と共に、ニュートリノ振動パラメータと合わせて尤度関数を構築する。尤度関数は以下の3項からなる。

- ν_e 事象のデータ観測数とシミュレーション予想値をポアソン分布仮定の元に比較する項、
- ν_e の持つ物理量分布を確率密度関数として背景事象からニュートリノ振動を区別する項、
- パラメータを系統誤差内に留めその相関も合わせて制限する項。

今回は2通りの独立した解析で結果の整合性を確かめた。うち1つはニュートリノエネルギーを元に確率密度関数を構築する方法である。ニュートリノ振動確率はエネルギーにより異なるため、ビームに元から含まれる背景事象のエネルギー分布と異なった形を取り、その違いを元に感度を向上できる。図4は、観測された28 ν_e 事象のエネルギー分布を点で表す。尤度関数が最大となるよう観測事象にフィットして得られた $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 予想分布(実線)は、そのうちの背景事象を示す網線領域に比べ、非常に良く一致している。この時、 θ_{13} の最尤推定量は $\sin^2 2\theta_{13}=0.15$ と求められた。

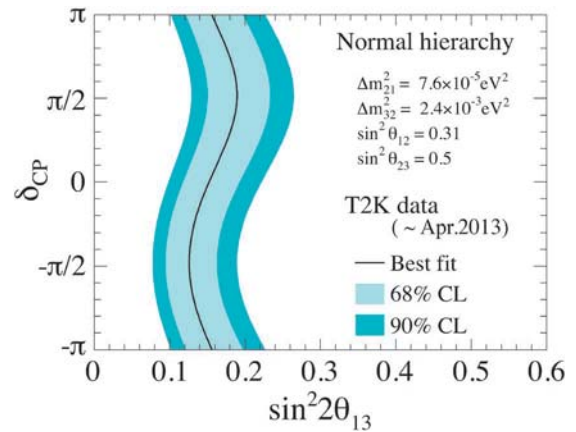


図5 各 δ_{CP} の仮定ごとに示した θ_{13} の信頼領域(青色)と最良適合値(実線)。質量正常階層を仮定した。

もう1つの方法では、運動量と荷電粒子の散乱角を用いており、より細かな情報で $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ を背景事象から区別する。両者でほぼ同じ結果が確認され、後者の方法で $\delta_{CP}=0$ と質量正常階層 ($m_3 > m_2$) を仮定した場合は $\sin^2 2\theta_{13} = 0.150^{+0.039}_{-0.034}$ 、逆階層 ($m_3 < m_2$) を仮定した場合は $\sin^2 2\theta_{13} = 0.182^{+0.046}_{-0.040}$ (誤差は 1σ) と求められた。

図5は今回得られた $\sin^2 2\theta_{13}$ の最良適合値および68%と90%信頼度(CL)の取る領域を δ_{CP} ごとに描画している。現在 θ_{13} に最も強い制限を与えている Daya Bay による測定値は、 δ_{CP} によらず $\sin^2 2\theta_{13} = 0.090^{+0.008}_{-0.009}$ ⁷⁾ であり、今回得られた結果と若干の食い違いが見られる。これは、 θ_{13} 以外の振動パラメータを求めずにある一定値として仮定しているためであるが、近いうちにこの影響も考慮される予定である。今後外部のニュートリノ実験により測定された各振動パラメータの値とその誤差を取り入れ、また次章の ν_μ 消失事象解析と同時に求める複合的な見積もりを行うことにより、 δ_{CP} などの未知のパラメータにも制限をつけられると期待され、ニュートリノ物理の全体像が近いうちに明らかになっていくであろう。

今回の重要な結論である $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の発見は、 $\theta_{13}=0$ を仮定した時に比べて、28の観測事象がどれだけ振動後の証拠として有意であるかを見積もって結論付けられた。尤度関数が最尤推定後取る値を $\theta_{13}=0$ で得られる値と比べ、 7.5σ の有意性で θ_{13} が0でない、つまり $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動が起きていると見積もられた。これは、どちらの質量の階層性でも、また他の振動パラメータがどの値を取っても 7σ 以上の有意性を保つ。また、 $\theta_{13}=0$ を仮定した 10^{15} 通りの模擬実験と比較するなど、他の手法で見積もっても同様の結果が得られ、背景事象の揺らぎから見紛う誤認率は1兆分の1以下となる高い精度で $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の存在を実証した。

5. ν_μ 消失モードの観測結果

この章では、T2K実験の2012年夏までのデータ (3.01×10^{20} ビーム陽子数) を用いた ν_μ 消失モード ($\nu_\mu \rightarrow \nu_X (X \neq \mu)$) の観測結果⁸⁾を紹介する。

表3 スーパーカミオカンデ有効体積内で観測されたニュートリノ事象数と、選別された ν_μ 事象数 ($\sin^2 \theta_{23}=0.5$ と $|\Delta m_{32}^2|=2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ で振動した場合)。2012年夏までの 3.01×10^{20} ビーム陽子数を用いた。ニュートリノ・反ニュートリノは計数時に区別していない。

	データ	シミュレーション			
		信号 ν_μ CCQE	背景事象 ν_μ CC残り ν_e CC NC		
ν 観測数	174	34.4	88.8	7.9	40.5
ν_μ 候補	58	31.3	23.3	0.03	3.2
選別効率	—	90.9%	27.8%	0.4%	7.9%

T2K実験のニュートリノエネルギー ($\sim 0.6 \text{ GeV}$) と基線長 (295 km) において, $\nu_\mu \rightarrow \nu_X (X \neq \mu)$ 振動は, 振動角 θ_{23} と質量差 $|\Delta m_{32}^2|$ で支配される. そして, ν_μ の生存確率 (J-PARCで ν_μ として生成されたニュートリノが, スーパーカミオカンデに ν_μ として到達する確率) は, 3世代間の振動を考えると, 次の近似式で計算できる.

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \sim 1 - \sin^2(|\Delta m_{32}^2| \cdot L/4E) \times (\cos^4 \theta_{13} \cdot \sin^2 2\theta_{23} \text{ 主要項} + \sin^2 2\theta_{13} \cdot \sin^2 \theta_{23}) \text{ 2次の項} \quad (9)$$

ここで, L と E は, ニュートリノの飛行距離とエネルギーである. 式(9)の主要項は, $\theta_{13}=0$ とすると, 2世代間 ($\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$)での振動確率の式に一致する. また, 式(9)の2次の項は, 同じ $\sin^2 2\theta_{23}$ の値に対して, $\theta_{23} < \pi/4$ と $\theta_{23} > \pi/4$ で異なった値を持つため, 3世代間の振動を考える場合は, $\sin^2 2\theta_{23}$ ではなく $\sin^2 \theta_{23}$ を測定する必要がある. 最近の高精度な θ_{13} の測定を受けて, θ_{23} の精密測定の重要性が増している. 理由は, θ_{23} の値が, $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の測定結果の解釈および δ_{CP} の測定に大きく影響するためである. さらに, 大気ニュートリノや長基線加速器ニュートリノによる質量階層性の研究においても, θ_{23} の測定精度が重要となる.

後置検出器であるスーパーカミオカンデでの ν_μ 候補事象の選別基準のうち, 主なものを以下で述べる.

- ・再構成されたチェレンコフリングの数が1個で, その発生位置が検出器の有効体積内である.
- ・そのチェレンコフリングを発生した荷電粒子が, 検出器内部で停止し (全エネルギーを落とし), μ と粒子識別され, 200 MeV/c以上の運動エネルギーを持つ.
- ・ μ の崩壊電子の数が1個以下である.

この事象選別の結果, スーパーカミオカンデで58個の ν_μ 候補事象が見つかった. 表3に, ν_μ 選別前後の観測, 期待数を示す. 信号モードである ν_μ の荷電カレント準弾性散乱 (CCQE) 事象は, 高い効率 (90.9%) で選別された. 一方, 背景事象の選別効率は, 低く抑えられている.

スーパーカミオカンデの ν_μ 候補事象数に対する系統誤差を, 表4にまとめる. 系統誤差の導出については, 大部分が $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の解析と共通なので, 説明を省略する. 系統誤差の合計は, 前置検出器での測定により, 25.3%から13.5%まで制限される.

表4 ν_μ 候補事象数に対する系統誤差 ($\sin^2 \theta_{23}=0.5$ と $|\Delta m_{32}^2|=2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ で振動した場合). 括弧内は, 前置検出器の測定結果による制限がない場合.

誤差内訳	$\delta N/N$
ν フラックス+ ν 反応断面積 (前置検出器による制限前)	4.2% (21.7%)
前置検出器で制限しない ν 反応断面積	6.2%
ν_μ 選別・終状態	11.0%
計 (前置検出器による制限前)	13.5% (25.3%)

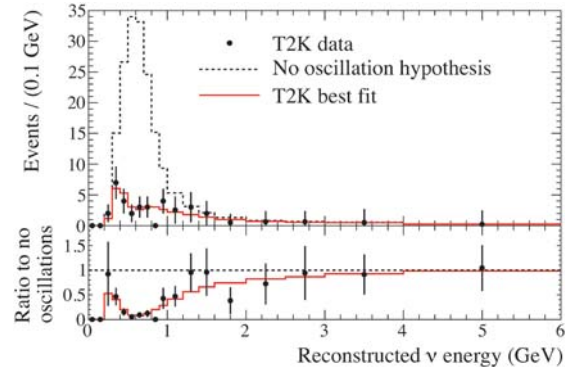


図6 上図: スーパーカミオカンデで観測された ν_μ 候補事象のニュートリノエネルギー分布 (誤差棒付きの点) と, ニュートリノ振動がない場合 (点線) および尤度関数が最大となる場合 (実線) の予想スペクトラム. 下図: ニュートリノ振動がない場合との比.

振動解析のインプットが揃ったので, いよいよ, 振動角 θ_{23} と質量差 $|\Delta m_{32}^2|$ を求める. 今回の解析では, ニュートリノエネルギーに対して, 確率密度関数を準備した. この確率密度関数は, 振動パラメータ ($\sin^2 \theta_{23}$ と $|\Delta m_{32}^2|$)と系統誤差パラメータの関数である. $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の解析と同様に, 尤度関数を構築し, 尤度関数が最大となるように, 振動パラメータと系統誤差パラメータの空間でフィットを行った結果, 最尤推定点が, $\sin^2 \theta_{23}=0.514 \pm 0.082$, $|\Delta m_{32}^2|=2.44^{+0.17}_{-0.15} \text{ eV}^2$ (誤差は 1σ)と求められた. このとき, θ_{23} と $|\Delta m_{32}^2|$ 以外のニュートリノ振動パラメータは一定値^{*6}とし, 質量標準階層を仮定した. 図6に, 観測された事象のニュートリノエネルギー分布, 振動がない場合と尤度関数が最大となる場合の予想スペクトラムを示す. 振動がない場合の予想事象数は204.7で, 最尤推定点での予想事象数は57.9であった. ニュートリノ振動により, 事象数が大きく減少していることが分かる. 図7に, 今回の測定によって得られた最尤推定点および68%と90%の信頼領域を示す. 続いて, 他の実験結果との比較を目的に, 上記の結果を $\theta_{23} < \pi/4$ と $\theta_{23} > \pi/4$ で統合し, $\sin^2 2\theta_{23}$ と $|\Delta m_{32}^2|$ に対しての最尤推定点および信頼領域を得た. その結果が図8で, T2K実験は, 世界最高レベルの精度で振動角 θ_{23} と質量差 $|\Delta m_{32}^2|$ を決定していることが分かる.

*6 $\sin^2 2\theta_{13}=0.098$, $\sin^2 2\theta_{12}=0.857$, $\Delta m_{21}^2=7.50 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$, $\delta_{CP}=0$ とした.

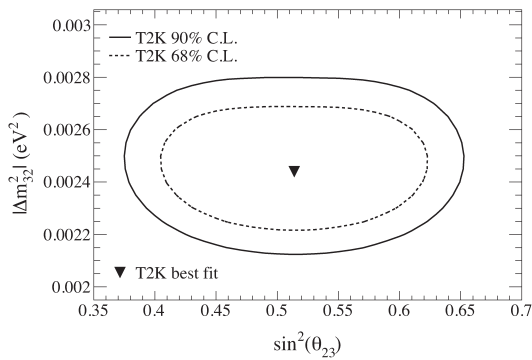


図7 ν_μ 消失モードの観測から得られた、 $\sin^2 \theta_{23}$ と $|\Delta m_{32}^2|$ に対しての、最尤推定点および68%と90%の信頼領域。

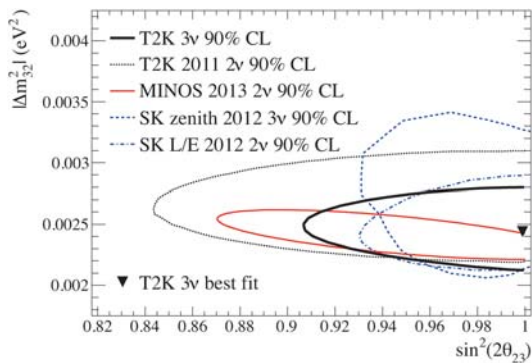


図8 ν_μ 消失モードの観測から得られた、 $\sin^2 2\theta_{23}$ と $|\Delta m_{32}^2|$ に対しての、最尤推定点および90%の信頼領域(線で囲まれた領域内)。⁸⁾ 比較のために、T2K実験(2011年)、⁹⁾ スーパーカミオカンデ実験(大気 ν)、¹⁰⁾ MINOS実験¹¹⁾の結果を示す。凡例の2ν(3ν)は、2世代間(3世代間)ニュートリノ振動を仮定したことを表す。

6. 今後の展望

T2K実験の結果から ν_e 出現現象の存在が確立し、また、 ν_μ 消失事象の解析から θ_{23} 、 Δm_{32}^2 が精度よく分かってきた。さらには、原子炉実験の測定から θ_{13} の値も精度よく決まってきた。つい2年程前までは θ_{13} の値は未知であったが、現在では約6%の精度で分かっており、短い期間にニュートリノ振動の理解に大きな進展があったと言える。

今後のニュートリノ物理の課題、特にニュートリノ振動実験で探求できる課題は主に3つある。まず、レプトンセクターにおけるCP対称性の破れの発見である。T2K実験では引き続き $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を測定して、また電磁ホーンの極性を反転させて得られる $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 振動も測定して δ_{CP} の探求を行う。さらには、測定量が δ_{CP} に依存しない原子炉実験の結果と比較することで、 δ_{CP} 測定へのヒントを探る。振動パラメータの精密測定も重要な課題である。引き続き ν_μ 消失事象の測定を続けることで、 θ_{23} の精度を上げる。 θ_{23} の精密測定は、第2-第3世代間の混合の割合が最大か否かの解決にも繋がる。もし混合が最大であれば、何かの対称性を示している可能性がある。3つ目の課題は、質量階層の決定である。質量階層の違いはニュートリノが地球内部を通過するときを生じる物質効果により測定できるが、T2K実験の長基線295 kmでは物質効果が小さく、質量階層への感度が小さい。質量階層は、基線長がより長い実験

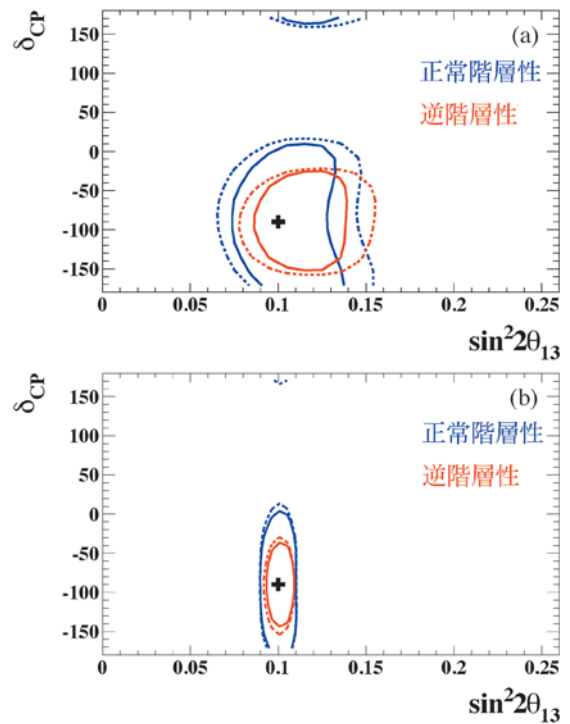


図9 実験で 7.8×10^{21} のビーム陽子数を貯めたときの δ_{CP} への感度。図は、真の値が $\delta_{CP} = -90^\circ$ (図中の黒い+印)で正常階層性を仮定したとき、90%の有意度で許容できる振動パラメータ($\sin^2 2\theta_{13}$, δ)の範囲を示している。(a) T2K実験でニュートリノと反ニュートリノのビーム陽子数が50%と50%の場合、(b) (a)に原子炉実験の結果($\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$ として5%の相対誤差で測定)を加えた場合。青い線は解析で正常階層を仮定した場合、赤い線は逆階層性を仮定した場合。実線と点線は実験の系統誤差の影響(点線が系統誤差あり)を示している。

(例えば米国のNOvA実験)や大気ニュートリノの測定によって決定されることが期待されている。

T2K実験では、今後の測定によって残された課題がどこまで明らかにできるか、現在分かっている実験の系統誤差などの効果も考慮して実験感度の見積もりを行った。今後の測定では、これまでのビーム陽子数の10倍以上のデータ(7.8×10^{21})を収集する予定である。ここでは、CP対称性の破れに対する感度と振動パラメータの予想到達精度について紹介する。

6.1 CP対称性の破れへの感度

図9は、複素位相 δ_{CP} の値が -90° と仮定した場合、実験で90%の有意度で許容できる振動パラメータ($\sin^2 2\theta_{13}$, δ_{CP})の範囲である。ニュートリノと反ニュートリノのビーム陽子数は、50%と50%の割合を仮定している。図9の(b)は、T2K実験のデータに加えて、原子炉ニュートリノ実験からの $\sin^2 2\theta_{13}$ の測定結果(5%の精度を仮定)を加えた場合の範囲を示している。

CP対称性の破れの感度は、 δ_{CP} の値だけでなく $\sin^2 \theta_{23}$ の値や質量階層性にも依存する。それぞれの場合を検討した結果、 $\delta_{CP} = +90^\circ$ で質量階層性が逆階層性($m_1 > m_3$)の場合に最も高い感度を示し、T2K実験の測定から 2.5σ 程度の有意度でCP対称性の破れの兆候を掴む可能性もある。

6.2 振動パラメータの予想精度

図10は、ビーム陽子数を増やして行く時の $\sin^2 \theta_{23}$ の測

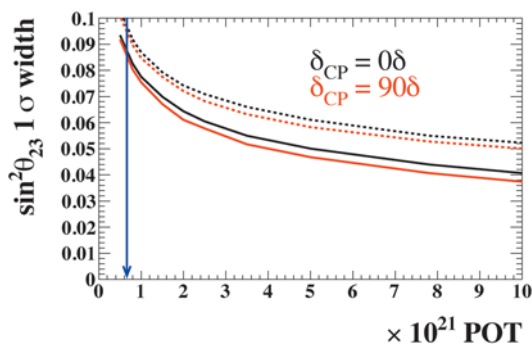


図10 ビーム陽子数 (POT) を増やして行く時の $\sin^2 \theta_{23}$ の測定精度. $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$, $\delta_{CP} = 0^\circ$ (or 90°), $\sin^2 \theta_{23} = 0.5$, $\Delta m_{32}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, また質量階層性は正常階層性を仮定している. 実線は統計誤差のみ, 点線は現在分かっている実験の系統誤差も含めたときを示している. ニュートリノと反ニュートリノのビーム陽子数は, 50%と50%の割合を仮定している. 青の矢印は現在のビーム陽子数を示している.

定精度を示している. ここでは, $\sin^2 \theta_{23}$ の値が0.5, そしてニュートリノと反ニュートリノビームの陽子数は50%と50%の割合を仮定している. 現在のビーム陽子数 6.39×10^{20} と比べると, 全データの 7.8×10^{21} のビーム陽子数で, $\sin^2 \theta_{23}$ の精度を0.05~0.06に向上できる. また, 図10の点線は現在の系統誤差を仮定した場合を示し, 実線は系統誤差がない場合(統計誤差のみの場合)を示している. 系統誤差がない場合にできるだけ近づけるように, ν フラックスや断面積などについてT2K自身の測定や他の実験の高精度な結果を用いて系統誤差の改善を行っていく.

7. さいごに

ここ数年, ニュートリノ振動の研究で次々と新しい結果が発表された. 電子ニュートリノ出現現象が発見され, 振動パラメータの測定精度も向上した. そして, ニュートリノ振動の研究は次のステップに向けて進みつつある. T2K実験も今後残された課題に向けて研究を進めていく. その中で, また何かサプライズがあることを期待したい.

T2K実験は, 世界の11の国, 59の大学・研究所から集まった約500名で構成されています.

最後になりますが, 実験を進めるにあたってJ-PARC加速器グループをはじめいろいろな方々の御支援, 御協力を頂きました. この場をお借りして感謝と敬意を表したいと思います.

参考文献

- 1) Y. Fukuda, *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration]: Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 1562.
- 2) K. Abe, *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration]: Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 181802; N. Agafonova, *et al.* [OPERA Collaboration]: Phys. Lett. B **691** (2010) 138.
- 3) K. Abe, *et al.* [T2K Collaboration]: Nucl. Instrum. Meth. A **659** (2011) 106.
- 4) N. Abgrall, *et al.* [NA61/SHINE Collaboration]: Phys. Rev. C **85** (2012) 035210; N. Abgrall, *et al.* [NA61/SHINE Collaboration]: Phys. Rev. C **84** (2011) 034604.
- 5) K. Abe, *et al.* [T2K Collaboration]: Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 061802.
- 6) M. Apollonio, *et al.* [Chooz Collaboration]: Eur. Phys. J. C **27** (2013) 331.
- 7) F. P. An, *et al.* [Daya Bay Collaboration]: arXiv: 1310.6732 [hep-ex] (2013).
- 8) K. Abe, *et al.* [T2K Collaboration]: Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 211803.
- 9) K. Abe, *et al.* [T2K Collaboration]: Phys. Rev. D. **85** (2012) 031103.
- 10) Y. Itow: Nucl. Phys. B-Proc. Suppl. 235236, p. 79, the XXV Int. Conf. Neutrino Physics and Astrophysics (2013).
- 11) P. Adamson, *et al.* [MINOS Collaboration]: arXiv: 1304.6335 [hep-ex] (2013).

著者紹介

坂下 健氏: 専門は素粒子実験. 現在は, 加速器を用いたニュートリノ振動実験を行っている.

西村康宏氏: 専門は素粒子・宇宙線実験. ニュートリノ研究の将来計画とフレーバー物理の研究に携わる.

南野彰宏氏: 専門は素粒子実験. 現在の研究対象は, ニュートリノ.

(2013年9月27日原稿受付)

Observation of ν_e Appearance in T2K Experiment

Ken Sakashita, Yasuhiro Nishimura and Akihiro Minamino

abstract: Neutrino oscillation, a phenomenon where a certain flavor neutrino can later be measured as a different flavor neutrino, is an important research subject in the particle physics. In Tokai-to-Kamioka long baseline neutrino oscillation experiment (T2K), our primary motivation is (1) observation of $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillation (ν_e appearance) and (2) precise measurement of $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillation (ν_μ disappearance). Recently, there is a significant progress on the understanding of neutrino oscillation. T2K experiment reported the indication of $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillation in 2011, and subsequently the value of mixing angle, θ_{13} , which was the last parameter describing the neutrino oscillation model, was determined by several experiments using reactor neutrinos in 2012. T2K experiment also established the $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ in this year. We now go toward remaining subjects on neutrino physics such as a discovery of CP violation in lepton sector and a determination of mass hierarchy by neutrino oscillation experiments. We report the recent results of ν_e appearance and ν_μ disappearance and future prospects in T2K experiment.

ヤヌス粒子の2次元分散系における凝集構造

岩下 靖孝 〈九州大学大学院理学研究院〉

木村 康之 〈九州大学大学院理学研究院〉

近年の微粒子合成手法の発展により、様々な「パッチ粒子」—粒子表面に物性の異なる領域（パッチ）を持つ異方的なコロイド粒子—が実現できるようになり、従来の等方的な粒子とは異なるエキゾチックな振る舞いが注目されている。^{1,2)} 近距離の粒子間相互作用は一般に表面物性に依存するため、パッチ粒子は方向に依存した異方的な相互作用を持つ。また直径が10 nm- μ m程度（メソスケール）の微粒子であるため、原子・分子よりは遥かに大きい、十分に熱運動できる程度には小さい。そのためパッチ粒子はパッチの数や配置などの異方性により、多様な秩序構造を自己組織的に形成すると予想されている。³⁾ 例えば望ましいフォトリックバンド、機械強度、触媒特性などに必要な微細構造（メソ構造）を、パッチ構造を通じ実現できる可能性がある。

また歴史的にコロイド分散系は、粒子多体系の相挙動を解明するためのモデル系としても研究されてきた。等方的な粒子の場合、例えば気-液相分離や結晶化など、かなりの部分が実験・理論の両面から解明されている。しかし異方的コロイド粒子系の研究は未だ端緒についたばかりである：コロイド分散系と言っても食品やインクなど実に多様であり、当然異方的な粒子も多い。特にタンパク質などの生体高分子は異方的コロイド粒子としての側面を持つため、その相挙動の理解は生物科学においても重要である。パッチ粒子系はこのような研究における単純なモデル系としても注目されている。^{4,5)}

これまでのところ、パッチ粒子分散系特有の相挙動や新規な相に関しては、主に理論・シミュレーションにより研究が進められてきた。^{1,2)} 一方、実験でもコロイド粒子によるカゴメ格子結晶が初めて実現されるなど、興味深い構造形成が報告されてい

る。⁶⁾ しかし実験では異方的な相互作用の制御が困難であるため、理論と比べると研究例はかなり限られており、特に相挙動の系統的な研究には至っていない。

これに対して我々は分散媒の臨界現象により誘起される粒子間相互作用^{7,8)}を利用することで、パッチ間の引力を温度により連続的かつ可逆的に制御することに成功した。⁹⁾

そこで最も単純なパッチ粒子であるヤヌス粒子（半球パッチを持つ粒子）¹⁰⁾の2次元分散系に対しこの手法を用い、分散状態の引力依存性を調べた。⁹⁾ その結果、平衡状態で有限サイズのクラスターを形成する「安定クラスター相」を見出した。また、クラスターサイズは引力の増加に伴い増大するが、その際に4粒子からなる4量体を単位構造として1次元的に成長し、構造に階層性が現れることが分かった。このような挙動は等方的な粒子で見られるものと大きく異なり、異方性により本質的に異なる凝集・自己組織化が現れることを明確に示している。凝集構造の階層性は最近シミュレーションによっても示唆されており、¹¹⁾ 様々な異方的コロイド粒子系の自己組織化との関連が興味深い。

またパッチ粒子の単純なモデル系を用いたシミュレーションを行ったところ、実験結果を非常によく再現し、作製した粒子が単純なパッチ粒子として振る舞っていることも分かった。よって本研究は、パッチ粒子系における有用な実験手法を確立したものとと言える。今後、本手法を含む実験による研究、更なる理論的研究の進展により、パッチ粒子系の多様な相挙動が解明されることを期待している。

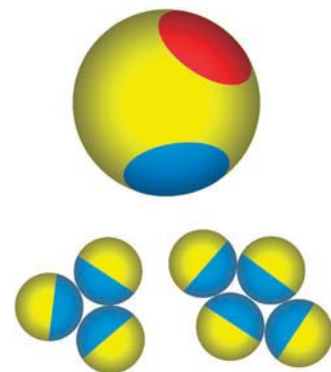
—Keywords—

パッチ粒子：

粒子表面に物性の異なる領域（パッチ）を持つコロイド粒子。パッチによる異方的な粒子間相互作用を持ち、その自己組織化/自己集合が注目されている。また表面の異方性を利用した自己駆動粒子として、アクティブマターの研究にも活用されている。作成手法として、微粒子表面の部分的修飾、多相高分子液滴の重合、ブロック共重合体のミセル化など、様々なものが提案されている。

安定クラスター相：

気体→液体あるいは結晶などの凝縮転移では、一般に凝縮相は巨視的なスケールに成長し、最終的な平衡状態では一つの大きなドメインとなる。一方、界面活性剤分子の場合、溶液中である臨界濃度を超えると球状・紐状などの形態の小凝集体（ミセル）を形成し始めるが、一定の濃度においてはミセルは有限な平衡サイズを持ち、成長し続けることはない。このように、有限サイズの凝集体が分散した平衡状態を総称して安定クラスター相と呼んでいる。



(上) パッチ数2の粒子の模式図、(下) ヤヌス粒子のクラスター。

1. はじめに

タンパク質などの生体高分子や様々な製品に活用されている無機ナノ粒子の中には、多様な異方的コロイド粒子が存在する。このような粒子は、形状・磁化・表面物性などにより相互作用が異方的となるため、等方的な粒子にはない特徴的な凝集あるいは自己組織化挙動を示す。^{1,5,12,13}特に異方的な引力による凝集現象を記述する理論として、粒子の「低価数」に注目したものがある^{1,2,14}：価数は引力相互作用できる最大の最近接粒子数（結合ボンドの数）として定義され、同じ大きさの球の間に等方的かつ短距離の引力が働く場合、3次元なら12、2次元では6となる。引力が異方的であれば相互作用する方向が制限され、等方的な場合より少ない価数を持つことになる。

現在、このような異方的な相互作用をする粒子、あるいは低価数粒子のモデルとして「パッチ粒子」が注目されている。^{1,2,15}この粒子は表面に物性の異なる領域（パッチ）を持ち、低価数粒子の場合はパッチ間に引力が働く。即ちパッチ構造が価数や結合ボンドの向きを与える。近年、理論・シミュレーションを用いた研究により、パッチ粒子の価数の減少による興味深い相挙動が報告されている。例えば平衡状態で有限サイズの凝集体が形成される安定クラスター相が現れ、また粒子の気-液相分離が抑制される。^{1,2}また低価数粒子の凝集現象は、タンパク質の凝集^{4,5}や新規なコロイド結晶/凝集構造との関連からも研究されている。^{3,6}

このように、パッチ粒子分散系の相挙動に関する理論・シミュレーションによる研究には近年大きな進展が見られる一方で、実験による研究例は未だ非常に乏しい。その最大の理由は、相挙動の研究にはパッチ粒子間の異方的な相互作用と熱エネルギーの比を制御することが不可欠であるにも関わらず、実験ではそれが難しいことにあると考えられる。

そこで本研究では分散媒の臨界現象を利用することで、温度を通じてパッチ間引力を制御することに成功した。この手法を用い、半球パッチを持つヤヌス粒子¹⁰の分散状態の引力依存性を調べたところ、等方的な粒子には見られない特徴的な凝集挙動、特に凝集構造の階層性を観察することに成功した。この結果はパッチ粒子の集団的挙動において、1粒子の結合価だけでなく、相対的に安定なクラスターの結合価が大きな影響を与えることを明確に示している。さらにシミュレーションを行った結果と比較したところ、我々の実験系が単純なパッチ粒子分散系として振る舞っていることが確認された。

2. 手法

2.1 実験

シリカ粒子を単層に並べ、50 nmの厚さで金を蒸着し半球の金パッチを作製した。金パッチ面を3-メルカプト-1-プロパンスルホン酸ナトリウムで修飾し静電斥力を与え、

溶液中での不可逆凝集を抑制している。

このヤヌス粒子を、臨界組成の2,6-ルチジン水溶液（28.6 wt%）に分散した。この溶液は下限臨界温度（LCST）型の相分離を示し、¹⁶ 臨界温度 $T_c = 33.60^\circ\text{C}$ であった。この溶液の相溶状態の臨界点近傍において、粒子間には表面状態に依存した相互作用が生じ、その強さは臨界点に近づくにつれ単調に増加することが知られている。^{7,8} そのため、上記のヤヌス粒子間には異方的な相互作用が生じ、その強さを温度を通じ連続的に制御できるものと期待される。

この試料を平行平板セルに封じ、底面に沈殿した粒子の2次元分散状態を光学顕微鏡により観察した。

2.2 シミュレーション

単純なパッチ粒子のモデルを用いたモンテカルロ・シミュレーションを行い、実験結果と比較した（手法の詳細は文献9を参照）。粒子は剛体球とし、パッチ同士が近接した場合にのみ粒子間に引力が働く。¹⁷ 引力はパッチ上では均一とし、引力の及ぶ面間距離は直径の1/20とした。^{7,13} また粒子が2次元面内で相互作用する場合、その相互作用する平面（粒子の中心が存在する面）上での半球パッチの大きさは、粒子の垂直方向の向きによらず常に半円となる。そこで完全な2次元系、即ち粒子を半円の引力パッチを持つ円盤とした。（垂直方向の回転の寄与は後述する。）シミュレーションのステップ数は十分長く取って平衡化させ、かつ各パラメータにおいて4回のシミュレーションを行った。粒子数は2,000である。

3. 凝集構造の形成

まず実験結果について説明する。粒子の面積分率 $\phi = 0.37$ では、臨界点からの温度差 $\Delta T = T - T_c = -8.60$ K から -0.50 K では粒子はランダムに分散していた（図1(a)）。この温度から0.01 K/分でゆっくりと昇温したところ、やがて粒子はクラスターを形成し、そのサイズは徐々に大きくなった。 $\Delta T = -0.20$ K では、ほとんどの粒子が3量体あるいは4量体のクラスターを形成している（図1(b)）。これらは界面活性剤のミセル状の構造をしていることが分かる；金パッチが引き付けあい、シリカ半球は外側を向いており、シリカ面間の凝集は見られない。さらに昇温すると4量体の数が増加し、やがて主に4量体が1次元的に集合したクラスター（1Dクラスター）が形成された（図1(c)）。また高濃度の試料（ $\phi = 0.54$ ）では、4量体の占める割合がさらに高かった（後述）。

顕微鏡像からも示唆されるように、パッチ間凝集は固着的ではなく、凝集下でも粒子の向きは水平・垂直方向に揺らいでいる。また低価数粒子の相挙動にはクラスターの分岐やループ構造が大きく影響すると考えられているが、^{1,2} それらはほとんど観察されていない。実際、ほとんどのクラスターにはループを形成できるほどの長さはない。

さらに昇温すると、 $\Delta T = -0.05$ K でシリカ面間の引力も顕著に観察された。最終的には、 $\Delta T = -0.03$ K でシリカ面

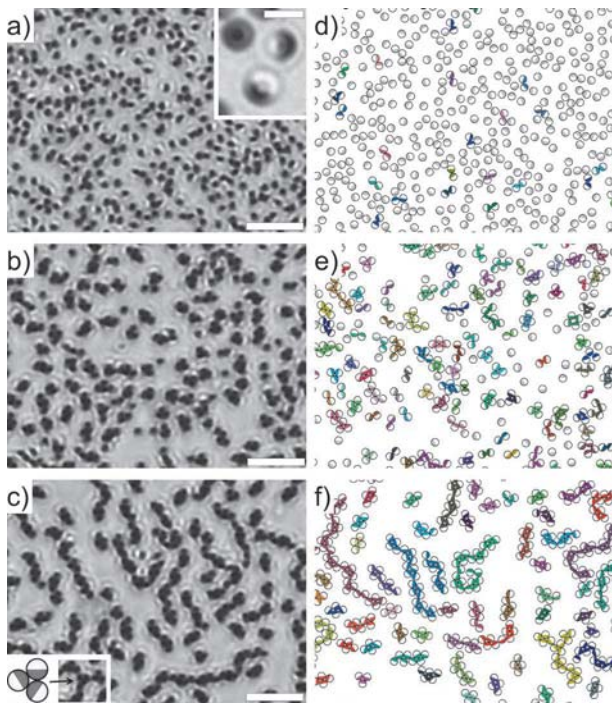


図1 ヤスス粒子分散系の典型的な様子。 $\phi=0.37$ 。白い部分がシリカ面、黒い部分あるいは色のついた部分がパッチ面。(a)-(c): 顕微鏡像。(a)は $\Delta T = -0.50$ K, (b)は -0.20 K, (c)は -0.10 K。スケールバー: (a)の内挿図は $2 \mu\text{m}$, 他は $10 \mu\text{m}$ 。文献9より転載。(d)-(f): シミュレーション画像。(d)は $e_b = 1.0k_B T$, (e)は $5.0k_B T$, (f)は $8.0k_B T$ 。クラスター毎に異なるパッチ色を割り当てている。

間も金面間と同様に安定に凝集するようになり、1Dクラスターが連結(パーコレート)したゲル構造が形成された(顕微鏡像は文献9を参照)。

上記の構造変化は、温度変化に対して可逆的である。またシリカ間引力が顕著でない範囲 ($\Delta T < -0.05$ K) では、凝集状態はこのゆっくりとした温度変化 ($\pm 0.01 \text{ K min}^{-1}$) に単純に追従し、時間的な緩和は見られなかった。つまり凝集状態がほぼ定常に達している。また実際、熱揺動により頻繁に凝集構造が組み変わる様子も観察されている。よって我々はこの小クラスター及び1Dクラスター状態はほぼ平衡化されており、即ち安定クラスター相であると考えている。⁹⁾

次にシミュレーションによる構造形成の結果について説明する。 $\phi=0.37$ では、パッチ間の相互作用ポテンシャル(結合エネルギー) e_b が小さい場合、粒子はランダムに分散した(図1(d))。 e_b の増加につれ、実験とほぼ同様のクラスター形成が見られた(図1(e), (f))。このように、実験結果は「均一なパッチ間引力を持つヤスス粒子」を用いたシミュレーションとよく一致している。

4. クラスターサイズの引力依存性

実験における構造発展の詳細を調べるため、画像解析によりクラスターのサイズ分布を求めた。粒子が金パッチ間で接触している場合、結合しているとみなす。各クラスターを構成する粒子数 N の見積もり誤差は $\pm 10\%$ 以内である。

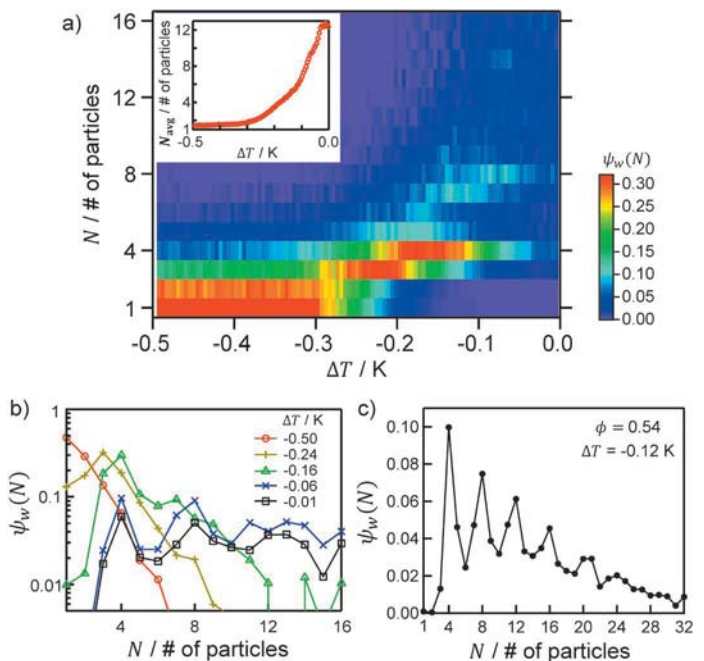


図2 実験で得られたクラスターのサイズ分布の温度依存性。(a) クラスターの重量分率 $\psi_w(N)$ を ΔT と N に対しプロットした ($N \leq 16$)。内挿図は平均クラスターサイズ N_{avg} の温度依存性。(b) 典型的な $\psi_w(N)$ を N に対してプロットした。(c) $\phi=0.54$, $\Delta T=-0.12$ K における $\psi_w(N)$ 。 $N_{\text{avg}}=9.9$ 。文献9より転載。

$\phi=0.37$ の場合、画像内の粒子数 $N_{\text{tot}} \approx 7,000$ 、 $\phi=0.54$ の場合 $N_{\text{tot}} = 9,950$ である。

図2(a), (b) から、構造が段階的に発展していることが分かる。 $\psi_w(N)$ は大きさ N のクラスターの重量分率であり、大きさ N のクラスターに含まれる全ての粒子数を N_{tot} で割ったもので与えられる。 $\Delta T = -0.50$ から -0.30 K では、ほとんどの粒子は単量体である。次に $\Delta T = -0.23$ K 前後では3量体の比率が最も高く、 $\Delta T = -0.17$ K 前後では4量体が多い。

ΔT がさらに増加すると、より N の大きなクラスター、即ち1Dクラスターが増加し、このとき $N=8$ に2つ目のピークが現れる。このような複数ピークの出現は、高濃度の試料 ($\phi=0.54$) でより顕著になり、 N が4の倍数のところに明確なピークが観察されている(図2(c))。ここで $\Delta T = -0.05$ K 以上ではシリカ面間引力が無視できないため、以下の安定クラスター相の議論では考慮しない。

シミュレーションにおいても、パッチ間結合エネルギー e_b の増加に伴い、実験とよく一致する結果が得られた(図3)。つまり、この解析結果からも、単純な2次元モデルとパッチ間引力の増加が、実験におけるヤスス粒子系の挙動を良く再現することが分かる。また、垂直方向の回転の影響を調べるため、球状の粒子が3次的に回転するモデル(並進は2次元)でも同様のシミュレーションを行った。さらに底面との相互作用を考慮したシミュレーションも行った(詳細は文献9)。これらの結果と上記2次元モデルとの違いはごく僅かであり、垂直方向の回転の自由度は凝集構造にほとんど影響していないことが分かった。

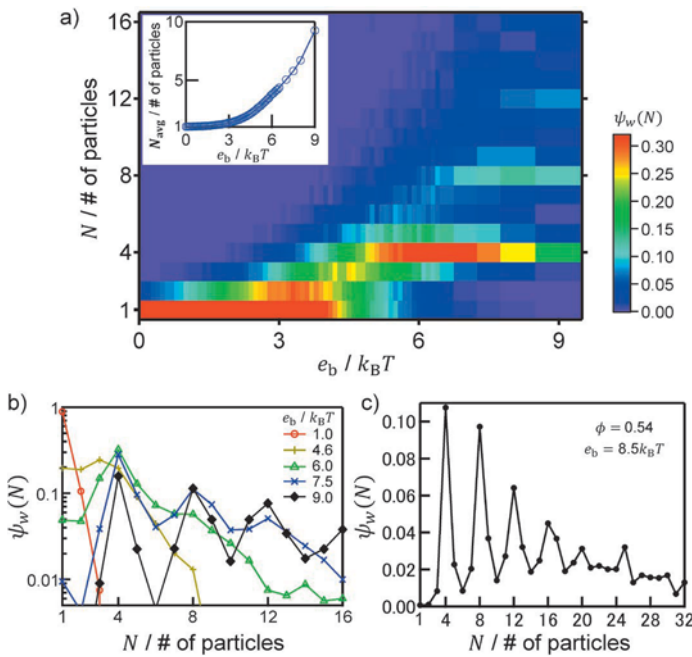


図3 シミュレーションで得られたクラスターのサイズ分布の引力ポテンシャル (結合エネルギー) e_b 依存性. 4回の試行の平均値. (a) $\psi_w(N)$ を e_b と N に対してプロットした ($N \leq 16$). 内挿図は平均クラスターサイズ N_{avg} の e_b 依存性. (b) 典型的な $\psi_w(N)$ を N に対してプロットした. (c) $\phi = 0.54$, $e_b = 8.5k_B T$ における $\psi_w(N)$. $N_{\text{avg}} = 11.0$. 文献9より転載.

ここで実験とシミュレーションの結果を文献と比較し、異方的な粒子間相互作用を大まかに評価する. 文献7の測定によると, 例えば $\Delta T \sim -0.2 \text{ K}$ において, 我々の実験と同様の条件下では親水粒子間の臨界性誘起引力ポテンシャルは $k_B T$ 程度となる. 我々の粒子のシリカ面は親水化処理をしていないため, 引力はより弱いと考えられ, 実験結果と一致している.

一方金パッチ間は, 図2(a)と図3(a)の比較から $\Delta T \sim -0.2 \text{ K}$ における $e_b \sim 5k_B T$ と見積もられ, 上記文献値よりかなり大きい. 岡本らの理論によると, 粒子表面が解離基を持つ場合, 選択的溶媒和により引力が強くなる.⁸⁾ また臨界点近傍以外での挙動から, van der Waals 引力の寄与が数 $k_B T$ 程度あるものと考えられる.¹⁸⁾ これらが大きな e_b の起源であると考えている.

5. クラスター構造の定性的議論

上記の観察及び解析結果は, 1Dクラスターが階層的構造を持つことを示している. 即ち, 粒子は4量体を形成し, その4量体が単位構造となって1Dクラスターを形成している. ここではクラスターの内部エネルギーと熱揺動から, 安定クラスター相の構造形成機構を定性的に議論する.

各クラスターの内部エネルギーは, 短距離引力を仮定すると $U = -N b_p e_b$ と書ける. ここで b_p はクラスター内の1粒子あたりの結合ボンドの数である. 平面内の球のパッキングから, 半球パッチは3つの結合ボンドを形成できる (価数は3である) ので b_p の最大値は1.5であり, かつボンドは 180° 内になければならない. また隣接ボンド間角度は

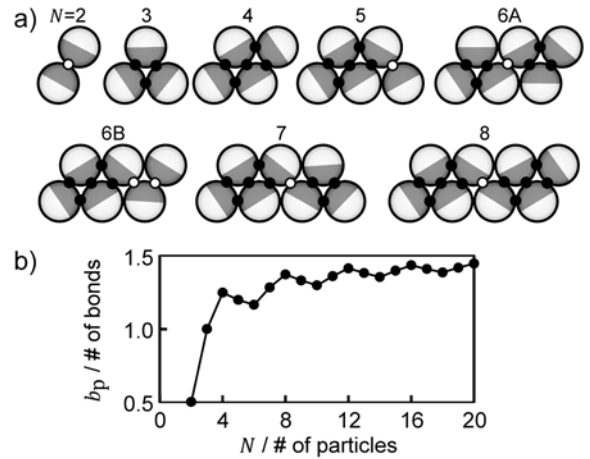


図4 内部エネルギー最小となるクラスター構造. (a) $N=2$ から8におけるクラスター構造の模式図. 小さな黒丸 (●) は金パッチ間の結合ボンドを表し, クラスターの2つの部分を単一のボンドがつながっている場合は特に白丸 (○) で表す. クラスターは直鎖だけでなく, 例えば8量体の左下に4量体を付加することにより 60° 曲がった構造もできる. (b) 1粒子あたりの結合ボンド数 b_p の N 依存性 ($N \leq 20$). 文献9より転載.

60° 以上となる.

これらの条件下で, 内部エネルギー最小 (結合ボンド数最大) となるクラスター構造を図4(a)に示した. $N > 8$ の構造は, $N=5$ から8のクラスターの端に4量体を付加したものととなる. (6量体はボンド数が等しい2つの異性体を持つ.)

図4(b)にこれらのクラスターの b_p をプロットした. 明らかに, N が4の倍数, 即ち4量体の鎖の内部エネルギーが小さいことが分かる. 実際, 4量体鎖では未結合ボンドは両端に1つずつあるのみであり, N の増加に伴い b_p は最大値である1.5に漸近する. この内部エネルギーから, e_b あるいは ϕ の増加に伴う4量体鎖の形成 (N が4の倍数のピークの増強) が説明できる: いずれのパラメータもその増加が, 自由エネルギーのうち, エントロピーの寄与に対する内部エネルギーの相対的な寄与を増加させるからである.

次にクラスター内の結合構造に注目して, 構造の段階的形成や階層性について考える. 図4(a)を見ると, 3量体と4量体のみ単一ボンド結合 (○で表されるボンド) を持たない. つまり, 全ての粒子が複数のボンドで結合しているため, 1つのボンドの結合エネルギーでは凝集時のエントロピーの損失を賄えないような低い温度 (小さな結合エネルギー) において, まずこれらのクラスターが形成される.

次に温度上昇 (結合エネルギーの増加) に伴い単一ボンド結合が安定になると, 内部エネルギー的に好まれる構造, 即ち4量体鎖が形成される. ここで図4(a)の8量体を見ると, 4量体鎖では各4量体が単一のボンドで繋がっているため, 熱揺動力下では主に4量体間でクラスターは分離すると考えられる (4量体自体を切断するには必ず複数のボンドを切る必要がある). このとき4量体は2つの未結合ボンド (2つの結合価) を両端に持つ粒子のように振る舞い, 1次元状に繋がる. このようにして構造の階層性が現れる.

この階層的クラスター構造は、単純なパッチ（あるいは低価数）粒子系であっても、1粒子ではなく安定なクラスターの結合価がその凝集挙動を支配する可能性を示している。このようなパッチ粒子系における構造の階層性の存在は、3次元系のシミュレーションによっても最近示唆された。¹¹⁾ 我々の系では、多くのパッチ粒子系のシミュレーションや界面活性剤分子系のような類似の系と異なり、コロイド粒子間の相互作用は短距離である。この短距離性によって取り得る粒子配置がより離散的となり、階層性を顕著にしていると考えられる。構造の離散性を強める他の要因には、低次元性とパッチの小ささが挙げられる。本研究は実際に低次元系であるが、これらへの依存性は今後の課題である。

6. おわりに

我々は実験においてヤヌス粒子の異方的な凝集を制御し、特に安定クラスター相の凝集状態を制御することに成功した。またシミュレーションとの比較や定性的な議論により、この凝集構造は単純な2次元モデルにおけるパッチ間引力の変化で説明できることを示した。凝集機構に関しては、比較的安定な小クラスターを単位構造として大きなクラスターが形成される階層性があることが分かった。最も単純なパッチ粒子であるヤヌス粒子によるこの結果は、低価数コロイド粒子系一般において階層性が本質的に重要な役割を果たし得ることを示している。

以上のように、我々はパッチ粒子分散系の有用な実験手法を確立するとともに、その基礎的な構造形成機構の一端を解明することができた。パッチ粒子系は低価数コロイド系のモデルとして、多様な異方的コロイド粒子系における凝集及び自己組織化機構の解明や制御に資するものである。本研究成果が、この分野の今後の進展に貢献できれば幸いである。

本研究は日本学術振興会科学研究費若手研究(B) 23740319、及び公益財団法人倉田記念日立科学技術財団倉田奨励金の助成を受けて行われました。ここに感謝致します。

参考文献

- 1) F. Sciortino and E. Zaccarelli: *Curr. Opin. Solid State Mat. Sci.* **15** (2011) 246.
- 2) E. Bianchi, R. Blaak and C. N. Likos: *Phys. Chem. Chem. Phys.* **13** (2011)

- 6397.
- 3) 例えば, Z. Zhang and S. Glotzer: *Nano Lett.* **4** (2004) 1407; F. Romano and F. Sciortino: *Soft Matter* **7** (2011) 5799; F. Romano, E. Sanz, P. Tartaglia and F. Sciortino: *J. Phys.: Condens. Matter* **24** (2012) 064113.
- 4) M. Hloucha, J. F. M. Lodge, A. M. Lenhoff and S. I. Sandler: *J. Cryst. Growth* **232** (2001) 195; N. Dorsaz, L. Filion, F. Smalenburg and D. Frenkel: *Faraday Discuss.* **159** (2012) 9.
- 5) S. C. Weber and C. P. Brangwynne: *Cell* **149** (2012) 1188; P. Li, S. Banjade, H.-C. Cheng, S. Kim, B. Chen, L. Guo, M. Llaguno, J. V. Hollingsworth, D. S. King, S. F. Banani, P. S. Russo, Q.-X. Jiang, B. T. Nixon and M. K. Rosen: *Nature* **483** (2012) 336.
- 6) 例えば, Q. Chen, J. Yan, J. Zhang, S. C. Bae and S. Granick: *Science* **331** (2011) 199; Q. Chen, S. C. Bae and S. Granick: *Nature* **469** (2011) 381.
- 7) C. Hertlein, L. Helden, A. Gambassi, S. Dietrich and C. Bechinger: *Nature* **451** (2008) 172.
- 8) R. Okamoto and A. Onuki: *Phys. Rev. E* **84** (2011) 051401; *J. Chem. Phys.* **136** (2012) 114704.
- 9) Y. Iwashita and Y. Kimura: *Soft Matter* **9** (2013) 10694.
- 10) A. Walther and A. H. E. Mueller: *Soft Matter* **4** (2008) 663; S. Jiang, Q. Chen, M. Tripathy, E. Luijten, K. S. Schweizer and S. Granick: *Adv. Mater.* **22** (2010) 1060.
- 11) Z. Preisler, T. Vissers, F. Smalenburg, G. Munao and F. Sciortino: *J. Phys. Chem. B* **117** (2013) 9540.
- 12) S. C. Glotzer and M. J. Solomon: *Nat. Mater.* **6** (2007) 557.
- 13) Y. Min, M. Akbulut, K. Kristiansen, Y. Golan and J. Israelachvili: *Nat. Mater.* **7** (2008) 527.
- 14) M. Wertheim: *J. Stat. Phys.* **35** (1984) 19; *ibid.* **35** (1984) 35.
- 15) Q. Chen, J. Yan, J. Zhang, S. C. Bae and S. Granick: *Langmuir* **28** (2012) 13555.
- 16) C. A. Grattoni, R. A. Dawe, C. Yen Seah and J. D. Gray: *J. Chem. Eng. Data* **38** (1993) 516.
- 17) N. Kern and D. Frenkel: *J. Chem. Phys.* **118** (2003) 9882.
- 18) 臨界点近傍以外ではヤヌス粒子は分散しており、図3(a)と比較すると結合エネルギーは $3k_B T$ 以下程度と見積もられる。一方で我々が粒子を密充填した際には、臨界点近傍以外でも金パッチ間凝集が見られることを確認している(未掲載)。これは数 $k_B T$ の結合エネルギーが存在することを意味する。

(2013年12月6日原稿受付)

Aggregate Structures in Two-Dimensional Dispersion of Janus Particles

Yasutaka Iwashita and Yasuyuki Kimura

abstract: A Janus colloidal particle with an attractive hemisphere has three valences on the hemisphere in two dimensions. With experiments and simulations, we study the dependence of the stable cluster phase of the colloids on this attraction. With weak attraction, small micellar clusters, mainly tetramers, form. These clusters aggregate into linear chains with the increase of the attraction; *i.e.*, a small cluster behaves as a unit structure with two valences. This hierarchical structure suggests the importance of, not only the particle valence, but the valence structure of clusters in the phase behavior of low-valence particles.

ホタル生物発光と物理

秋山 英文 (東京大学物性研究所)

望月 敏光 (東京大学物性研究所)

樋山 みやび (東京大学物性研究所)

生物工学・遺伝子工学の発展のおかげで、ホタルや他の生物発光が、実験および理論の物理学研究者にとって、とても魅力的な題材になってきた。新たな研究交流・出会いの呼び水となることを願いつつ、ホタル生物発光研究と物理学の接点について、個人的な体験・見地に基づくインフォーマルな形での話題提供をしたい(通常の解説記事としてではなく、著者らの経験に基づく「話題」寄稿のため、自分たちの仕事の紹介・引用が多いことをご容赦願いたい)。この拙文から、生物関連の研究が、現代物理学の様々な分野の研究者にとって、意外に近い存在であることを感じ取って頂ければ幸いである。

1. はじめに

私たちのグループの主専門は、半導体ナノ構造物理、光デバイス物理である。それが、あるきっかけからホタル生物発光研究にも関わり始め、10年以上になった。バイオ分野の論文を読むと、そこには生物・器官・細胞・操作・現象などたくさんの方が登場し、無数の新出単語と出会うことになる。当初はそのことだけでも苦痛だった。少ない基礎法則をもとに万事を理解しようとする物理学的思考との根本的な違いのせいか、あるいは無機物ばかりに馴染みすぎた石頭のせいか、「ホタルの気持ちが解らない」などとぼやきながらよく学生と首を傾げた。しかし、私たちにも生物としての環境適応能力があったようで、自分で実験して実地で学び、時に生物系研究室の現場を見学し、様々な人達に会い助けてもらいつつ、気づいてみれば楽しく研究を行えるようになっていた。

2. ホタル生物発光

発光生物は多数存在するが、その中でもホタルは最もよく研究されてきた生物である。^{1,2)} ホタル生物発光系には、非常に広い応用があり、生物工学の欠かせないツールとして普及している。^{3,4)} ホタル生物発光については、古くから、その発光効率が高いこと、反応条件によって発光色が緑色から赤色まで変えられることなどが知られているが、微視的機構は未解明である。²⁾

ホタル生物発光は、図1に示すとおり、(発光基質)ルシフェリン(a)が、 Mg^{2+} イオンやATPとの反応中間体(b)を経て、酸素と反応し、 CO_2 を放出し、酸化物のオキシルルシフェリン(c)の励起状態となり、それが基底状態に

落ちる時に光子を放出する過程による。²⁾ ただし、これらの試薬の水溶液を作って混ぜてみてもそれだけでは反応は進まない。その混合溶液にルシフェラーゼというタンパク質を加えてやると、それが酵素=触媒として働いて、試験管中でも見事に美しい発光が実現される。生物発光は、酸化化学反応のエネルギーで発光する広義の化学発光だが、生物起源の酵素タンパク質の寄与がある点で、狭義の化学発光と区別される。この酵素タンパク質・ルシフェラーゼの役割を理解することこそが、生物発光研究の核心である。

人間を含め生物の体内では、様々なタンパク質が酵素として働き、消化や代謝など全ての生体反応を効率よく進めている。生物発光も酵素反応の一例である。酵素反応を物理の研究対象として考えるとき、反応の進行を光プローブによってモニターすることができる生物発光は格好の研究題材となると思う。

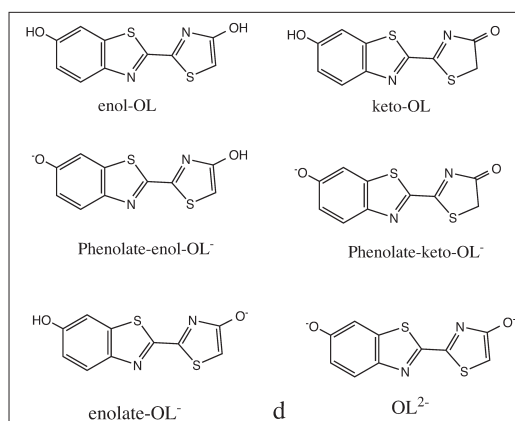
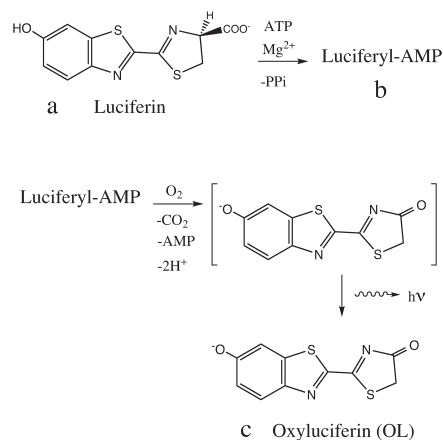


図1 ホタル生物発光の反応式と、ホタルルシフェリン(a)、ルシフェリン・AMP反応中間体(b)、オキシルルシフェリン(c)、オキシルルシフェリンの異性体・イオン状態(d)。



図2 子供教室で、ホタル生物発光の実験を行う小学生。

今日では、ルシフェリンやルシフェラーゼなど生物発光反応に必要な試薬は、メーカーから購入可能なので、上記の実験は誰でも簡単に行うことができる。余談になるが、筆者は、このデモ実験を研究室見学を訪れた人々によく見せる。すると、大人も子供も「わあーっ」という感嘆の声をあげる。また、この実験は安全かつ簡単であり、子供科学教室などで小学生に実験してもらうのにも良い教材である(図2)。

黎明期(1950年代)の研究では、大変な苦労があったようだ。^{2,5)} ジョンズ・ホップキンス大・生物学科のマキロイ先生らは、ボルチモア近郊の北米産ホタルを1匹1セントで子供たちに集めてもらい、その尻尾の発光器部分を集めて、そこからルシフェリンやルシフェラーゼの抽出・精製・結晶化などを行ったそうだ。ルシフェラーゼを得る実験でホタル約6千匹、約9mgのルシフェリン結晶を得る実験でホタル1万5千匹を要したという。⁵⁾ 2008年ノーベル化学賞受賞の下村脩先生も生物発光の先駆研究者であり、発光物質の抽出精製を、ホタル、ウミホタル、オワンクラゲなどについて行った。100~200mgの発光物質イクオリンを得るために2.5トンのオワンクラゲを要したという。⁵⁾ 緑色蛍光タンパク質が、その際の副産物として得られたことはご存知の方も多いと思う。

3. 量子収率

ホタル生物発光は、非常に高い発光効率(量子収率)を持ち、その値は88%というのが定説だった。¹⁾ しかし、この値は50年以上前の1959年に報告された値で、追試の報告が無かった。当時、生物学科のマキロイ先生は、同大学化学科・ホワイト先生らと、ホタル生物発光物質の特定を行っていた最中で、ルシフェリンの分子構造や性質はまだわかっていなかった。そこに、物理学博士のポストクのセリガー博士が加わり、量子収率などの光学計測実験が行わ

れ88%という値が得られた。当時の限られた実験装置・環境の中で、とても大変な実験であったと思う。2年後の1961年にルシフェリンの分子構造が決定され、さらに、光学異性体(D体とL体)の存在や、D体のみが生物発光に寄与し、D体とL体の変換が起きて両者が等量化する現象(ラセミ化)が迅速に起こることなどが、わかっていった。その結果、量子収率測定に用いられたルシフェリン試料は、ラセミ化のため発光に寄与するD体の純度が恐らくは約1/2に低下していたことが後からわかった。もしそうであれば、88%の実験結果は176%と再解釈されなければならない。もちろん、100%を超える値はあり得ない。追試の必要性が指摘され、当時セリガー博士ら自身もそれを十分に認めていた。²⁾ しかし、試料をゼロから作り直し、校正と光学計測を吟味しやり直すことは容易ではなかったようで、検証や追試は結局なされなかった。そのままいつしか88%という値だけが分野外まで広く知れ渡り、定着してしまっただけだ。

私たちは、生物発光・化学発光の絶対光量スペクトル計測分光装置を開発し、2008年に、北米産ホタル生物発光の量子収率の最大値(pH=8.0)として、 $41.0 \pm 7.4\%$ ($k=1$)を報告した。⁶⁾ 「 $k=1$ 」の表記は、 $\pm 7.4\%$ が1シグマ(標準偏差)分の不確かさに相当するという意味である。41%という量子収率は、これまで定説だった88%の約半分、他の発光生物の量子収率(ウミホタル28%、オワンクラゲ17%)²⁾に大分近い値となった。

2006年5月に、著者の一人(秋山)と大学院生の安東頼子氏、共同研究者の近江谷克裕先生は、前述の下村脩先生のご自宅(アメリカ・ウッズホール)を訪ねた。41%という量子収率を論文発表するに先立って意見を伺うためであった。下村先生は非常に厳しく、容易には結果を認めてくれなかった。特に、市販のルシフェラーゼ試料を実験に用いた点を問題視された。市販品は、フリーズドライ処理をしているので、ダメージを受けているかもしれないということであった。ならばということで、私たちは帰国後、北米産ホタルの尻尾を取り寄せ、ルシフェラーゼを抽出・精製し、“生”のルシフェラーゼを用いて実験を行い、結果の再現を確かめた。安東氏らはその結果を持って2007年12月に下村先生宅を再訪問した時には、下村先生も結果に納得され、激励を下さったという経緯がある。

4. 色変化と定量計測

地球上には日本産ゲンジボタル・ヘイケボタルや北米産ホタルなど、様々な種類のホタルが存在する。ホタルは種類が異なっても、図1の反応は共通である。発光基質・ルシフェリンの分子構造(a)も同じである。

一方、酵素タンパク質のルシフェラーゼは、ホタルの種類ごとに異なる。興味深いことに、このルシフェラーゼの構造を変えると、緑色から赤色まで発光色を変化させることができる。ホタル生物発光の発光色は、反応溶液のpH

や温度、2価金属イオン添加などの影響によっても起きることが知られている。²⁾

これらの色変化の機構を説明するため、歴史的に様々な微視的モデルが提唱されてきた。しかし、未だに結論は出ていない。色変化の機構は、ホタル生物発光研究における最大の謎の一つとなっている。

私たちは、様々な原因で生じる色変化の特徴を定量的に把握するために、自家製の絶対光量スペクトル計測分光装置を用いて定量測定を行ってきた。⁶⁻⁸⁾ 例えば、図3上は、ゲンジボタルの生物発光スペクトルの温度依存変化の測定結果である。⁸⁾ 温度の上昇と共に発光色が黄緑から赤へと変化する様子がわかる。(なお、ここでの生物発光は、試験管内の水溶液反応実験による。活きたゲンジボタルは30°Cを超す暑い夏の晩でも黄緑で発光している。) スペクトルデータは、図3中央・下に示したように、2.2 eV, 2.0 eV, 1.85 eVにそれぞれピークを持つ3つのガウス型発光成分の強度変化として定量解析できることがわかった。

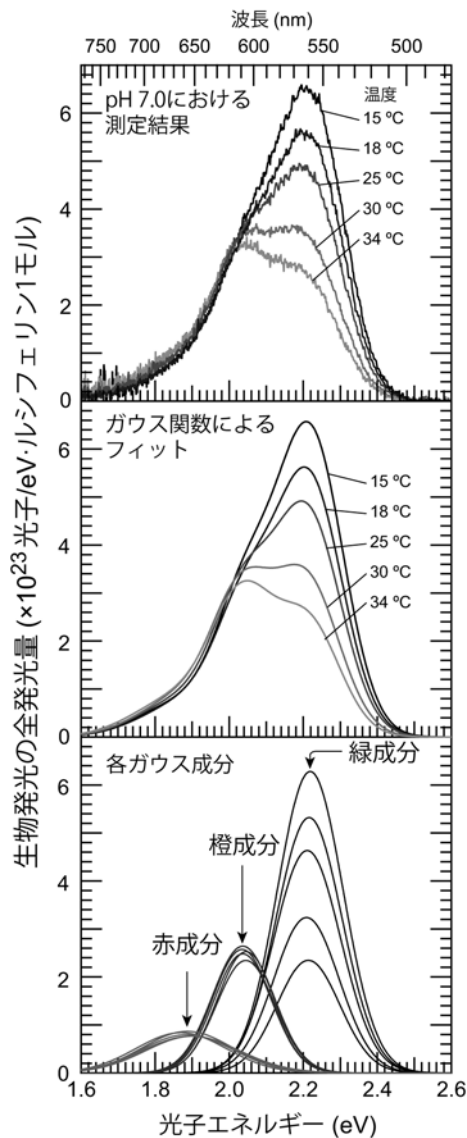


図3 ホタル生物発光(水溶液反応)の絶対量スペクトルの温度依存性。実験結果(上)と3つのガウス成分による解析(中, 下)。

さらに、2.2 eVの緑ピーク成分の強度だけが温度に依存して変化し、一方、2.0 eVと1.85 eVにピークを持つオレンジと赤の2成分の強度は温度にあまり依存しないことがわかった。これらの結果は、pHや2価金属イオン添加濃度を変えた場合の変化とも酷似していた。結論として、色変化を解釈するためには、各発光成分のエネルギー(波長)シフトよりも、強度変化を説明しなければならない。

5. 遺伝子工学, 生物学, 構造生物学

今日では、様々な種類のホタルのルシフェラーゼについて、タンパク質の設計図に相当するDNAが得られている。よって、ルシフェラーゼを生物学的手法で合成することができる。⁴⁾ すなわち、大腸菌の中に、ルシフェラーゼのDNAを導入して増やし(クローニング)、大腸菌の中で対応するタンパク質を作らせること(生合成)ができる。またDNAの塩基配列は読み解かれていて、タンパク質を構成するアミノ酸の配列もわかっている。人間がDNAの配列を一部改変して、自然界には存在しないルシフェラーゼを造り出すこともできる。これを変異体(ミュータント)と呼ぶ。一方、天然と同じ構造のものは野生型と呼ぶ。野生型および変異体のルシフェラーゼは大学の多くの研究室でも生合成することが可能になっている。キッコーマン社などのメーカーでは、各種の変異体ルシフェラーゼを合成・精製し、試薬として販売している。おかげで、生物学に疎い私たちのような物理実験研究者でも、容易にホタル生物発光の実験ができる。

今日では、構造生物学の目ざましい発展により、野生型や上記の様々な変異体ルシフェラーゼを合成し、結晶化し、X線構造解析を行うことによって、タンパク質の構造を決定することが可能になった。⁹⁾ オキシルシフェリン分子を内部に保持した状態での構造も得られている。それらの構造データは、データベースに登録され、世界中の研究者が

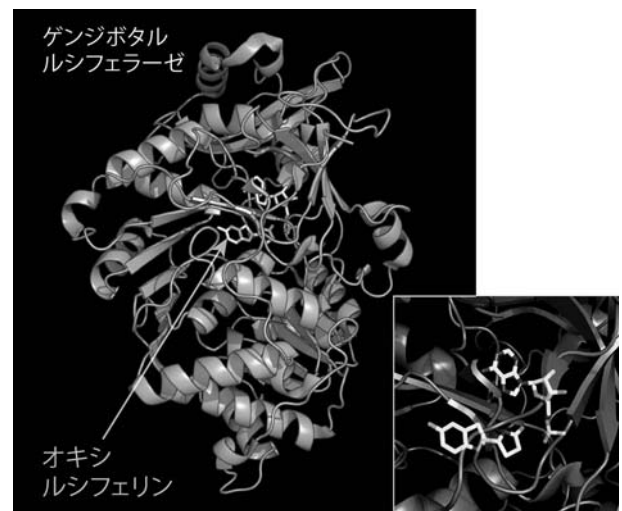


図4 ゲンジボタルのルシフェラーゼ構造(リボンモデル)。^{9,10)} 約550個のアミノ酸残基からなる。ルシフェラーゼの反応中心に、オキシルシフェリン分子がある。右挿入拡大図に、切り離されたオキシルシフェリンとAMPの配置を示す。(目次参照。)

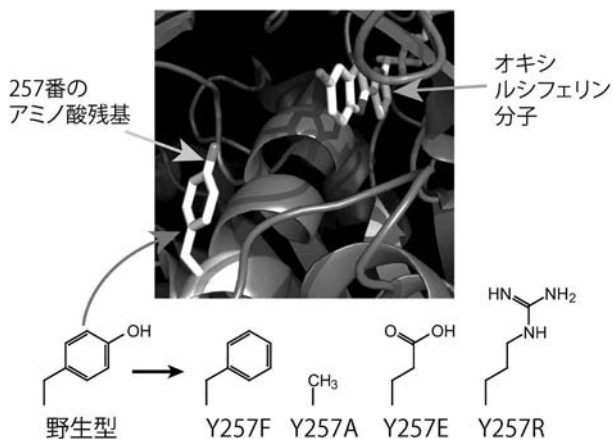


図5 ゲンジボタルルシフェラーゼの野生型 (WT) と、257 番アミノ酸残基をチロシン (略号 Y) からフェニルアラニン (略号 F), アラニン (略号 A), グルタミン (略号 E), アルギニン (略号 R) に置換した4種の変異体 (Y257F, Y257A, Y257E, Y257R) の構造の違い.^{9, 12)} (目次参照.)

参照・活用できるようになっている。^{9, 10)} 構造データを3次元的に表示するためのPCソフトも普及している。図4は、そのデータベースからダウンロードしたデータを用いて描いた野生型ゲンジボタル・ルシフェラーゼとそこに保持されたオキシルシフェリンの立体構造図である。ホタルルシフェラーゼは約550のアミノ酸 (正確にはアミノ酸残基という) がペプチド結合で連なった巨大分子である。理論物理研究者は、このようなオキシルシフェリン分子とそれを取り巻くタンパク質酵素の電荷分布をデータとして入手し、計算に用いることができる。¹¹⁾

6. 変異体ルシフェラーゼ

ここで、具体例として、私たちが変異体ルシフェラーゼに対して定量測定を行った研究例を一つ紹介したい。¹²⁾ 野生型のゲンジボタルルシフェラーゼでは257番目のアミノ酸はチロシン (略号 Y) である。これをフェニルアラニン (略号 F) に置換した変異体を Y257F のように表記する。同様に、アラニン (略号 A), グルタミン (略号 E), アルギニン (略号 R) に置換すると、変異体 Y257A, Y257E, Y257R が得られる。図5は、野生型 (WT) および Y257F, Y257A, Y257E, Y257R 変異体ルシフェラーゼの構造の違いと、発光分子オキシルシフェリンとの位置関係を表す。これらを用いて、生物発光を測定すると、目次のカラー写真で示したように、生物発光の発光色は、黄緑 (野生型), オレンジ (Y257F), 赤 (Y257A), 赤 (Y257E), オレンジ (Y257R) のようになった。定量スペクトル計測を行ったところ、図3の場合と同様に3つのガウス成分に分解され、色変化は、顕著な強度変化と僅かなピーク波長変化として起きていることがわかった。

7. 第一原理 (量子化学) 計算

タンパク質構造の効果を取り入れ、第一原理 (量子化学) 計算により、生物発光の違いを理解しようとする試みが盛

んになってきていることは既に上で触れた。しかし、それらの試みには幾つかの壁がある。

図1dに示すように、オキシルシフェリンには、多くのイオン状態や、ケト型やエノール型の異性体などが存在する。これらのうちのどの構造が、発光の起源かはまだ特定できていない。量子化学計算を行えばどれが最安定かわかるだろうとも思えるが、水分子の存在のため正確な計算は今のところ難しい。

水分子の効果は、一度タンパク質の存在を除外して、水溶液中でのオキシルシフェリンの各イオン状態のエネルギーを計算してみるとよくわかる。例えば、普及している量子化学計算手法で分極連続体モデル近似を用いて、1価と2価のイオンの自由エネルギー差を計算し、pKa値 (1価と2価の電離平衡の中央に相当するpH) を計算すると、例えば8~9程度の値であるべきものが、30~40のような極端に大きな値になってしまう。¹³⁾ 水溶液中での電離平衡、すなわちpH依存の安定性や濃度が正しく計算できないのである。これは、水の溶媒効果、すなわち水素結合により立体網目構造をとる水分子の影響、に対する平均場近似がとても悪いことに起因する。

別の困難もある。分子系の光吸収での光学遷移の始状態はスピン1重項基底状態 S_0 の最安定構造、光励起蛍光 (フォトルミネッセンス) の光学遷移の始状態はスピン1重項励起状態 S_1 の安定構造である。よって、 S_0 や S_1 状態の安定構造を量子化学計算で決定することができれば、光吸収や光励起蛍光の評価はできる。ところが、生物発光の光学遷移の始状態は化学反応を経由して作られる非平衡状態である。従って、平衡状態・安定状態だけではなく、反応中間体-遷移状態などを含む反応ポテンシャル面を知る必要がある。また、発光スペクトル各成分の強度変化を説明し、さらに、生物発光の高い量子収率を理解するためには、複数の電子状態に対応する反応座標ポテンシャルの交差や反発を知り、非輻射遷移レートを記述する必要がある。

これらは、どれも第一原理計算・量子化学計算のフロンティアに位置する課題である。解決のためには、量子化学計算・第一原理計算の手法開発に携わる専門家の助けが必須である。

8. 人造物質

変異体ルシフェラーゼは人間が作り出す人造物質 (エンジニアード・マテリアル) であり、その意味で、MBE成長で作製した半導体ヘテロ構造と似ている。実際、私たちは、ホタル生物発光を、半導体ヘテロ構造デバイスの高効率発光と、同じような感覚で捉えて、研究を進めている。

上では、酵素であるルシフェラーゼの構造を人工的に変えた変異体について述べた。一方、基質分子であるルシフェリンを、似た構造のアナログ (類似分子) へと変え、発光色を変える研究もある。ルシフェリン-ルシフェラーゼ反応は酵素反応であり、鍵と鍵穴の関係が存在するが、割

とおおらかな関係で、鍵が多少違っていても反応が進むのだ。薬学では、そのような手法を用いて、生体内の酵素反応を調節する。

もし、さらに工夫を加えて、鍵を差し込んだ状態で保持しておいて、光をあてると鍵が回って反応開始するようなシステムを開発できれば、超高速分光の手法を用いて研究が飛躍的に進むと思う。実現のためには、有機合成・薬学などの専門家の協力が不可欠である。

9. 物理学がはたす役割

私たちが、上記のホタル生物発光の量子収率や定量分光の測定実験を行うことになったのは、生物発光や化学発光の定量計測のための現代的な分光装置や校正ツールの開発・活用を民間企業および産総研と共同で進めていたからだった。¹⁴⁾

生物発光や化学発光の応用では、発光の強度情報を取得する機会が多い。例えば、免疫学的測定法（イムノアッセイ）では、血液中のホルモンや、土壌中の汚染物質など、混合物中の微量物質を、免疫機構（抗原・抗体反応）を利用して検知し、その量を生物・化学発光の発光強度として測定する。免疫組織化学応用では、同様の方法を、ガン腫瘍などに特徴的な抗原の検出・定量測定に用いる。しかしながら、微弱発光強度自体を絶対値で評価・表現する習慣はない。

微弱発光や蛍光の計測は、バイオに限らず物理分野の基礎研究でも広く行われている。しかし、指向性のない微弱放射光の測定では、光量の測定は任意単位 (arb. unit) や相対光量単位 (RLU=Relative Light Unit) でなされ、絶対値情報は破棄されているのが通常である。

私たちは、微弱発光や蛍光の光量を定量評価する技術・ツールの開発が、基礎はもちろん、生物発光の応用分野の発展のカギを握ると信じ、最近、微弱発光の計測標準を開

発するプロジェクトを開始した。¹⁵⁾ 計測標準は物理学である。直接には産業・応用と無縁だとも思える基礎物理研究が、実社会の成長に貢献する一つの形を証明したい。

10. むすび

上述のような生物発光と物理の接点に位置する課題を克服して、神秘的な生物発光現象の核心に迫りたい。そのため、物理の各専門分野からの協力を得たい。筆者らは生物発光研究に携わるようになってから、生物学、医学、薬学、有機化学、量子化学理論、民間企業、NPO、芸術家など、多分野・多数の方々との出会いがあり、お互いに助け合って仕事を進めてきた。その中で、物理分野研究者との出会いは残念ながら未だ稀である。本稿の読者の中から、謎解きに参加してくれる仲間が一人でも多く現れることを強く願う。

参考文献

- 1) H. H. Seliger and W. D. McElroy: *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **1** (1959) 21; *Archs. Biochem. Biophys.* **88** (1960) 136.
- 2) O. Shimomura: *Bioluminescence: Chemical Principles and Methods* (World Scientific, 2006).
- 3) Y. Ohmiya: *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** (2005) 6368.
- 4) 中津 亨: *日本結晶学会誌* **52** (2010) 81.
- 5) V. Pieribone and D. F. Gruber: *Aglow in the Dark* (Harvard Univ. Press, 2005).
- 6) Y. Ando, *et al.*: *Nature Photonics* **2** (2008) 44.
- 7) Y. Wang, *et al.*: *Photochem. Photobiol.* **87** (2011) 846.
- 8) T. Mochizuki, *et al.*: submitted.
- 9) T. Nakatsu, *et al.*: *Nature* **440** (2006) 372.
- 10) RSCB Protein Data Bank-2D1S (<http://www.rcsb.org/pdb/explore.do?structureId=2D1S>).
- 11) For a review and S. Hosseinkhani: *Cell. Mol. Life Sci.* **68** (2011) 1167.
- 12) Y. Wang, *et al.*: *Sci. Rep.* **3** (2013) 2490.
- 13) M. Hiyama, *et al.*: *Chem. Phys. Lett.* **577** (2013) 121.
- 14) 秋山英文, 安東頼子, 王 瑜: *現代化学* **473** (2010) 21.
- 15) JST 先端計測プロジェクト「微弱発光標準光源開発による発光蛍光計測定量化」(秋山英文, 2013.10.1 発足).

(2013年10月10日原稿受付)

応用物理 第83巻 第4号(2014年4月号) 予定目次

特集: 放射線, ビーム応用, 半導体A(シリコン)

解説

シリコンナノ構造デバイスのキャリア輸送特性と熱配慮設計
.....内田 建
シリコンフォトマルチプライヤー.....大須賀慎二

最近の展望

原子層エレクトロニクスに向けたカルコゲナイド系層状物質の
基礎物性と薄膜形成手法.....上野 啓司, 塚越一仁
非晶質有機半導体デバイスの光学設計自由度の拡張:

分子配向制御と屈折率制御.....横山大輔
半導体技術が支える放射線イメージング.....高橋浩之

研究紹介

50~4,000 eV 領域の軟 X 線平面結像型分光器の開発と

電子顕微鏡への応用.....今園孝志

軟 X 線顕微鏡と蛍光顕微鏡によるシアノバクテリアの観察

.....竹本邦子

PET/MRI 装置山本誠一

ホッとひといき, ほか

半導体センサチップ開発と異分野融合による発展

.....石田 誠, 澤田和明

いまだ聞けない がんの画像診断.....縄野 繁

アルツハイマー病の発症前診断は可能か?.....樋口真人

植物にも放射線イメージング!?.....河地有木

鉄系超電導と IGZO の 2 つが同時に来た細野秀雄

安藤恒也 (JPSJ編集委員長)

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2013年11月に掲載可となった中から2013年12月の編集委員会を選んだ“Papers of Editors' Choice” (JPSJ注目論文) を以下に紹介します。図に関しては、原図はカラーのものでもモノクロで印刷しているので不鮮明になる場合がありますが、その場合は、物理学会のホームページの「JPSJ注目論文」にカラー版を載せていますので、そちらをご覧ください。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、合わせてご覧ください。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っています。物理学会会員からのJPSJへの自信作の投稿を期待します。

超伝導の内部で実現する不思議な磁気秩序～「Q相」をめぐる～

超伝導と磁性の相互作用の問題は物性物理学における最重要課題の一つである。超伝導についての標準的な理論であるBCS理論によれば、超伝導は結晶の格子振動に起因するフォノンによって電子同士が対を組み超伝導になるとされている。一方、実用化されつつある銅酸化物高温超伝導体や鉄系超伝導体、希土類・アクチノイド化合物の重い電子系超伝導体など、興味深い超伝導体の多くはそれ以外の機構によって超伝導になると考えられている。このうち、有力なものの一つが、磁性に起因したスピンのゆらぎによる超伝導である。

通常の超伝導体は、図1左図に示すように「金属の顔」であるフェルミ面に等方的にギャップが開くために、電気伝導を担う電子が磁性を持つことを妨げる。一方、上に挙げた興味深い超伝導体の多くは、フェルミ面のギャップにノードができることで、磁性を持つことが可能になる。しかし現実には、超伝導になって安定化した物質が、低温でさらに磁性を持つようなケースはこれまでほとんど知られていなかった。

最近、CEA-Grenoble (フランス原子力庁) と東北大金研の研究グループは、典型的な重い電子系超伝導体 CeCoIn_5 にNdをわずかに置換した物質 ($\text{Ce}_{0.95}\text{Nd}_{0.05}\text{CoIn}_5$) において、超伝導相内部で磁性が出現し、その磁性が「Q相」と呼ばれる特殊な磁気秩序状態であることを発見した。この成果は日本物理学会の発行する英文誌 Journal of the Physical

Society of Japan (JPSJ) の2014年1月号に掲載された。

純粋な CeCoIn_5 は、超伝導状態で磁場を加えていくと、超伝導が壊れる寸前の高磁場・極低温で「Q相」という磁気秩序が現れることが知られている。「Q相」は超伝導中でしか現れず、非整合という特殊な磁気秩序状態であることが知られている。磁性と超伝導の関係を調べる上で、「Q相」は要となる秩序相であり、多くの理論モデルが提唱されるとともに微視的な測定手段による詳細な実験が待たれていた。

今回発見された「Q相」はゼロ磁場で発現しており、これまでに知られていた「Q相」とはその意味で異なっている。しかし、非整合な磁気秩序状態という意味では同じである。非整合な磁気秩序状態は、フェルミ面同士がぴったり重なり合うネスティングという状態をつくることが知られている。今回の成果は、図1右図に示すように、このネスティングが超伝導ギャップのノードを作っていることを示唆するものとして注目に値する。

実用化が期待される多くの超伝導体は磁性と密接な関係があり、その発見機構を解明することは新物質を開発する上でも重要な課題である。今回の成果は、基礎研究の立場から超伝導の発見機構に迫るものであり、今後の物質開発という点からも大きな波及効果を持つ。

原論文

Magnetic Order in $\text{Ce}_{0.95}\text{Nd}_{0.05}\text{CoIn}_5$: The Q-Phase at Zero Magnetic Field

Stéphane Raymond, Scheilla M. Ramos, Dai Aoki, Georg

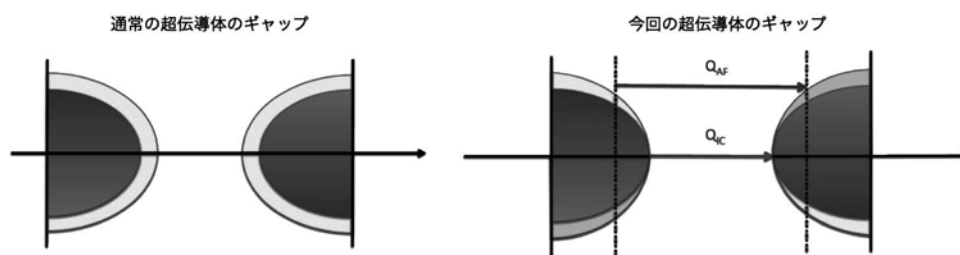


図1 通常の超伝導体のギャップ (左図) と今回の超伝導体のギャップ (右図)。通常の超伝導体はフェルミ面に等方的にギャップ (薄い灰色の部分) が開くが、 $\text{Ce}_{0.95}\text{Nd}_{0.05}\text{CoIn}_5$ はノードができる。ノードは Q_C で特徴付けられる非整合な磁気秩序状態「Q相」と結びついている。 Q_{AF} は反強磁性伝播ベクトル。

〈情報提供：Stéphane Raymond (CEA-Grenoble)
青木 大 (東北大学金属材料研究所,
CEA-Grenoble)〉

キャリア濃度の精密制御により見いだされた BiS₂ 系層状超伝導体における絶縁体-超伝導転移

銅酸化物高温超伝導をはじめとして、Sr₂RuO₄ や Na_xCoO₂·H₂O におけるエキゾチックな超伝導に代表されるように、層状構造を有する低次元物質は非従来型超伝導の宝庫として注目を集めてきた。さらに近年は、LaO_{1-x}F_xFeAs 等の鉄系超伝導体の発見を契機に、酸素に加えてプニクトゲンやカルコゲン等を含む混合アニオン物質の開拓が精力的に進められ、層状超伝導体はますます多様化しつつある。一昨年、首都大学東京の水口らは新たに混合アニオン物質 Bi₄S₄O₃ や LaO_{1-x}F_xBiS₂ 等において 10 K を超える超伝導転移を発見したが、これにより CuO₂ 面、FeAs 層に続く超伝導層として、BiS₂ 層が注目を集めた。例えば LaO_{1-x}F_xBiS₂ では、O²⁻ を F⁻ で置換し BiS₂ 層へ電子キャリアをドーピングすると超伝導相が出現し、キャリア濃度あまり依存しない幅広い超伝導ドームが形成されるとの報告がなされた。ところが、希土類元素の種類により超伝導が出現し始めるキャリア濃度(フッ素置換量 x) が大きく異なる、抵抗率の大きさがキャリア濃度の変化に対して非単調な振る舞いを示す、など未だ不可解な点も多い。これらの原因として、フッ素ドーピングによるバンド構造の変形が関与している可能性が第一原理計算から指摘されている。このため、BiS₂ 層での超伝導発見メカニズム解明に向け、理想的な電子ドーピング法の確立が急務であった。

最近、東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻のメンバーを中心とする研究グループは、元素置換を施しても元のバンド構造が変化しない(リジッドバンド的)と理論的に予想されている SrFBiS₂ なる母物質(図 1(a))に着目し、Sr²⁺ を La³⁺ で系統的に置換した多結晶体を高压合成することにより、BiS₂ 層への本質的な電子ドーピング効果を解明した。詳細な輸送・熱力学特性の測定の結果、超伝導相は絶縁体相と隣接しており、特に相境界ではキャリア濃度に非常に敏感な絶縁体-超伝導転移が形成されていることを初めて明らかにした。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of Physical Society of Japan (JPSJ) の 2014 年 1 月号に掲載された。

図 1(b) に示すように SrFBiS₂ ($x=0$) はバンド絶縁体であるが、La (=電子)ドーピング量を増加させると系統的に抵抗率が減少する。電子を 42% 程度ドーピングするとほぼ金属状態へ転移し、それに伴い約 3 K の低温において超伝導が

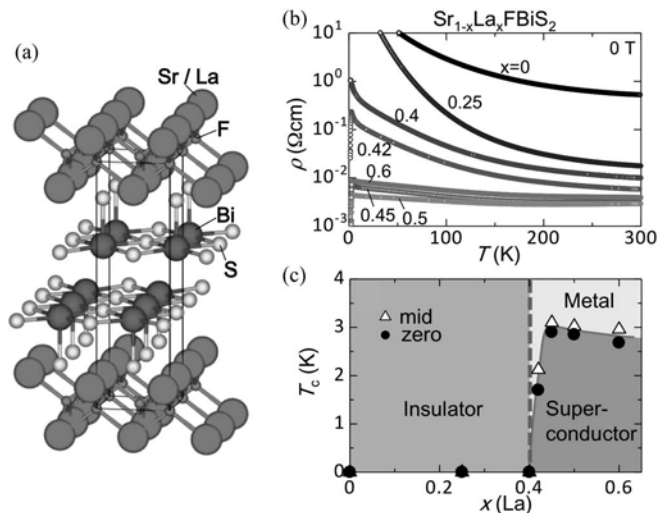


図 1: (a) Sr_{1-x}La_xFBiS₂ の結晶構造。(b) Sr_{1-x}La_xFBiS₂ (0 ≤ x ≤ 0.6) 多結晶体の電気抵抗率の温度依存性 (0 T)。(c) Sr_{1-x}La_xFBiS₂ (0 ≤ x ≤ 0.6) の La ドープ量 (x) に対する電子相図。超伝導転移温度 (T_c) は電気抵抗率が通常状態 (9 T 印加時) の 50% (mid), および 10% (zero) となる温度として定義している。

出現する。転移温度のキャリア濃度依存性は特徴的で、電子濃度を 60% から 45% へ減少させると、2.8 K から 3.0 K へ徐々に上昇する(図 1(c))。さらに電子濃度を減少させると、転移温度は急激に減少し、電子濃度が 40% では完全に消失する。このような絶縁体-超伝導転移は、過去に BiS₂ 系物質で報告された振る舞いと大きく異なっており、BiS₂ 層へ理想的に電子ドーピングした場合の超伝導相図として、実験・理論の両面から注目される結果である。

さらに今回明らかとなった超伝導特性は、同様の層状バンド絶縁体で、少数キャリアドーピングで比較的高い転移温度 (~15 K) を示す窒化物超伝導体 Li_xZrNCl と類似していることも指摘されている。しかし Sr_{1-x}La_xFBiS₂ では超伝導に 40% 以上のキャリア濃度が必要であり、またホール効果測定から、超伝導となる金属相のフェルミ面は電子型だけでなく正孔型も共存する複雑な構造であることが明らかとなった。これは最新の第一原理計算の結果と一致しており、理論的には非従来型のペアリング機構も予想されている。今後、詳細な超伝導メカニズム解明や高い転移温度実現に向け、さらなる研究の展開が期待される。

原論文

Insulator-to-Superconductor Transition upon Electron Doping in a BiS₂-Based Superconductor Sr_{1-x}La_xFBiS₂

Hideaki Sakai, Daichi Kotajima, Kosuke Saito, Hiroki Wadati, Yuki Wakisaka, Masaichiro Mizumaki, Kiyofumi Nitta, Yoshinori Tokura and Shintaro Ishiwata: J. Phys. Soc. Jpn. **83** (2014) 014709

〈情報提供：酒井英明 (東京大学大学院工学研究科)

石渡晋太郎 (東京大学大学院工学研究科)〉

坂井典佑 〈PTEP編集委員長〉

日本物理学会が発行している Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP) の Invited Papers で2014年1月号に掲載されたものを以下に紹介します。

この紹介記事は国内の新聞社の科学部、科学雑誌の編集部で電子メールで送っている「紹介文」をこの欄のために少し書き直したものです。専門外の読者を想定し、「何が問題で、何が明らかになったのか」を中心とした読み物であるので、参考文献などはなるべく省いています。なお、図に関しては、原図はカラーのものでもモノクロで印刷しているので不鮮明になる場合がありますが、その場合は、物理学会のホームページの「PTEP招待論文」にカラー版を載せていますので、そちらをご覧ください。

内容の詳細は、末尾に挙げる PTEP のホームページから閲覧・ダウンロードして下さい。PTEP はオープン・アクセス誌であり、閲覧・ダウンロードは無料です。

PTEP 編集委員会では、興味深いトピックスについて、Invited Papers の提案を受けて審議し、原稿を依頼しています。これによって、PTEP と物理学への関心を高めることを目指しています。物理学会会員からの PTEP への自信作の投稿を期待します。

極限高密度物質を回転させるとカラー磁場の渦が発生する

物質が極限状態で、どうなっているのかということは素朴な疑問である。日常感覚では及びもつかない高温や高密度な環境下において、物質はどのような様子を示すのだろうか？ 物質は原子の集まりで、原子は原子核とその周りを回る電子から成る。原子核は陽子と中性子からできているが、陽子や中性子はクォーク3つから成る。不思議なことに現在の宇宙の温度ではクォークは単独で存在できず、陽子や中性子の中に閉じ込められている。ところが、宇宙の始まりのビッグバンから数十マイクロ秒後の初期宇宙までさかのぼると、宇宙は非常に高温で原子や原子核の構造は融けてしまい、クォークが解放されてスープのような状態になっている。この状態はクォーク・グルーオン・プラズマ状態と呼ばれており、近年盛んに理論と実験の両面から研究されている。

さて、宇宙で最も高密度な状態は、中性子星の内部で実現されていると思われる。物質をそこまで高密度の状態にすると、やはり原子核の構造が融けてしまい、陽子や中性子でできた「核物質」になる。本論文ではこうした状況で起こる興味深い現象を主に取り上げる。中性子は2つずつ組になり粘性なしに流れる、いわゆる超流動状態になり、陽子も2つずつ組になり電気抵抗なしに電流を運ぶ、いわゆる超伝導状態になる。中性子星は高速で回転しているので、回転軸に沿って渦が形成される。しかも超流動体であるために、超流動渦という、強さが量子化された渦(水中の渦と異なり渦の強さを1つ2つと数えることができる渦)になる。また中性子星には超強磁場があるので、磁場も量子化され超伝導渦に閉じ込められる(1つ2つと数えることができる磁場)。これらの渦が中性子星のダイナミクスに様々な影響を与える。

核物質をさらに圧縮してより高密度にすると、今度はクォークが解放されクォーク物質になる。特に低温で高密度の状態では、クォーク物質はカラー超伝導体になる。通常

の金属は低温になると超伝導体になるが、そこでは電子が2つずつ組んで電気抵抗を受けずに電流を運ぶ。一方、カラー超伝導体中では、クォークが2つずつ組んでカラー電流(電子のような電荷を持つ粒子の流れを電流というが、カラー電流はカラー電荷を持つクォークの流れのこと)が抵抗なしに流れる。特に高密度の極限では、同時に超流動状態でもあることが予言されている。もし、カラー超伝導体が高速回転している中性子星の中心部で実現している、その回転のために必ず超流動渦が生成され、三角形の格子状に整列する。この渦は非アーベリアン渦と呼ばれ、超流動渦であると同時にカラー超伝導渦でもある。この新しい渦により、金属超伝導と類似の、あるいは新奇な現象が現れる。

非アーベリアン渦は、遠方では普通の超流動渦と同じように振る舞い、図1のように渦で輪を作ると、安定に形を保ったまま進行する。しかし、渦の内部に近づくると新しい性質が見えてくる。最も基本的な構造は渦の色と香りである。この色と香りは渦周辺に局在する新しい軽い粒子(南部ゴールドストーン粒子)によるもので、その粒子が渦内部の低エネルギー励起に対応する。電磁波が渦格子に入射すると、渦に局在する南部ゴールドストーン粒子によって渦に平行な方向の電場が減衰し、渦格子は偏光板の役割をする(図2)。

ところで、異なる相の境界に渦が突き刺さると、プージャムという構造が現れる。プージャムという名前は超流動 ^3He の境界に現れる構造に対して Mermin が初めて用いたものである。プージャムは、もともとは Lewis Carroll の詩「The Hunting of the Snark」に出てくる怪物の名前であり、アリゾナの砂漠にあるサボテンのこともである。超流動 ^3He と同様に、カラー超伝導と核物質の境界には「カラフルな」プージャムが現れる(図3)。このようなカラフルなサボテン状の構造が中性子星内部で発生しているかもしれない。

現在の宇宙は、クォークが単独で存在できない「閉じ込

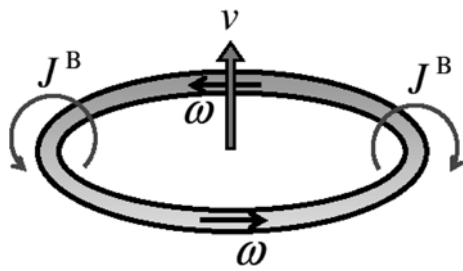


図1 渦輪.

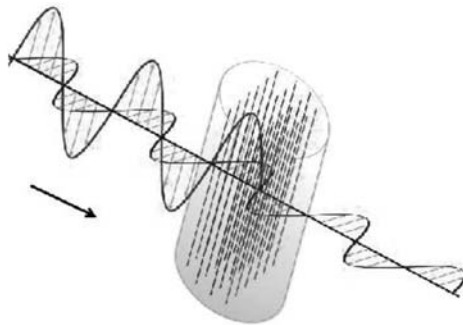


図2 偏極板としての渦格子.

め相」であり、高密度な環境で起こるカラー超伝導相は全く異なる状態である。しかし、両者は双対性あるいは連続性という特別な関係で結ばれているという予想がある。ところで、閉じ込め相でクォークが核子の中に閉じ込められているのはなぜか、という疑問は未だ明確な答えが与えられていない素粒子物理学の大問題であるが、答えの候補の一つにモノポール（磁気単極子）の凝縮仮説がある。磁荷を帯びたモノポールの凝縮が電荷を持つクォークを閉じ込めるのである。一方、カラー超伝導で凝縮を起こしているのは、カラー電荷を持つクォーク対である。それならば、カラー磁荷を持つモノポールが閉じ込められているのではないだろうか？ 実際、量子的なカラーモノポールと反モノポールが非アーベリアン渦によって閉じ込められることが示された。このことは、逆に、双対性を認めるならば、閉じ込め相でのモノポール凝縮によるクォークの閉じ込めを示している。

ところで、通常、超伝導体の渦の内部にはフェルミオンが局在する。s波超伝導ではフェルミオンのエネルギーはゼロではないが、カイラルp波超伝導ではフェルミオンのエネルギーがゼロになることが理論的にわかっている。さらにこのゼロ・エネルギーのフェルミオンは、粒子自身が反粒子と同じなので、マヨラナ・フェルミオンと呼ばれる。マヨラナ・フェルミオンが渦に局在すると、通常のボソン、フェルミオン、エニオンとも異なる、非アーベリアン・エニオンという不思議な粒子として振る舞うことがIvanovによって理論的に示された。さらに、非アーベリアン・エニオンの交換は、交換する際の経路の詳細によらずに、そのトポロジーだけによるので、雑音に強い「トポロジカル量子計算」に使えるということがKitaevによって提唱されている。このために、マヨラナ・フェルミオンを実験的に

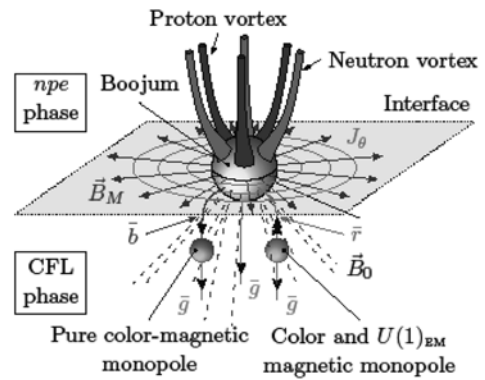


図3 ブージャム.

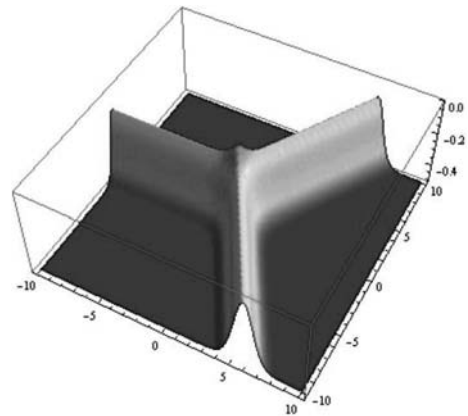


図4 ドメイン壁接合.

検出しようと世界中で激しい競争が繰り広げられている。一方、カラー超伝導においては、非アーベリアン渦にゼロ・エネルギーのマヨラナ・フェルミオンが3つ局在することが示された。カラー超伝導に特有な点は、1つの渦にマヨラナ・フェルミオンが3つ存在するため、Ivanovの非アーベリアン・エニオンを多自由度に拡張したものになっていることである。

高密度極限のカラー超伝導相では、カイラル対称性も自発的に破れており、フラックスを伴わない別種の非アーベリアン（軸性）渦が存在する。ただし、軸性量子異常の効果で軸性ドメイン壁が接合している（図4）。軸性量子異常の効果で、軸性ドメイン壁は背景磁場中で強磁場を発生することが、Sonらによって明らかにされた。この機構は、マグネターという宇宙最強の磁場を持つ中性子星の強磁場の起源を説明する一つの候補として提唱された。

このように、高密度クォーク物質には、多種多様な渦やドメイン壁が存在しており、理論的に興味深いばかりでなく、様々な現象が予言されている。

原論文（2014年1月10日公開済み）

Vortices and Other Topological Solitons in Dense Quark Matter

M. Eto, Y. Hirono, M. Nitta and S. Yasui: Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 012D01 (2014), DOI: 10.1093/ptep/ptt095, [arXiv: 1308.1535 [hep-ph]]

〈情報提供：新田宗土（慶應義塾大学日吉物理学教室）〉

ハイゼンベルグ原子炉の謎

政池 明 ◇

岩瀬 広 〈高エネルギー加速器研究機構〉

ナチスドイツが大戦中に原爆を作らなかった理由については70年経った現在でも多くの謎が残されており、科学史や原子炉の研究者による論争が続いている。米国が原爆を開発し、製造に踏み切った動機はナチスが原爆を作るに違いないと信じていたことにあった。よく知られているように原爆を開発するきっかけとなったとされる1939年のアインシュタイン (A. Einstein) からルーズベルト (F. Roosevelt) 宛ての書簡にもそのことが記されている。

大戦勃発直後から米英両国はドイツの科学者、なかんずくハイゼンベルグ (W. Heisenberg) が原爆開発にどのように関わっているかについて非常に神経を尖らせ、それに関する情報を得るべく必死の努力を続けていた。^{1,4)} 更にハイゼンベルグを暗殺する計画さえも真剣に検討されていた。³⁾

戦争終結直前の1945年3月米国はドイツの原爆開発の状況を検証するために物理学者ハウトスミット (S. A. Goudsmit) らを中心とするアルソフ特殊部隊をひそかにドイツに送り込んだ。ところが、ドイツでは原爆はおろか臨界に達するような原子炉さえ完成していなかったことが判明して、連合国側は驚き、かつ胸を撫で下ろすことになる。

大戦後ドイツの原爆開発に関して多数の著書が出版されたが、それらの中でハイゼンベルグの原爆開発計画への関わりが最大の問題点として議論されている。ハイゼンベルグ自身が自らの果たした役割について多くを語らなかったこともあって、21世紀になった今でも論争が続けられている。

20世紀後半に出版された著書にはハイゼンベルグの大戦中の行動について好意的と思えるものが多かった。^{1,3,5)} ところが大戦中の1941年秋のハイゼンベルグとボーア (N. Bohr) のコペンハーゲンにおける会談を主題とした演劇『コペンハーゲン』が1998年から世界各地で上演され、⁶⁾ この会談が一般の人々の間で大きな関心をもたれるようになった。そのためボーアが自分の死後50年経つまで公開するなど遺言していたハイゼンベルグ宛の未投函の私信が50年を待たずに公開され、⁷⁾ この会談についてのボーア側の見解が明るみに出て、真実を再考する動きが強まっている。⁴⁾

ハイゼンベルグ側によれば、「この会談でハイゼンベルグはドイツが原子力の開発に取り組んでいることを明かし、その道義上の問題についてのボーアの考えを尋ねた。更に、物理学者が原爆製造の是非を決定することになるかもしれないと考えて、両陣営の物理学者が協力して原爆の製造を

阻止する合意を得ることはできないかと聞き質した。」とされている。

一方ボーアは上記の書簡で「ハイゼンベルグが『ドイツは必ず勝利する。また我々は原爆を開発するためのあらゆる手段を取っている』と述べたことに衝撃を受けた。」と記している。更に「ハイゼンベルグがナチス当局と共謀し、おそらく両陣営の科学者たちがそれぞれの政府に従わない合意を提案するふりを装って連合国の原爆開発計画を頓挫させるためにボーアを巧みに操ろうとする含みがあったとボーアは解釈している」とアクゼル (A. D. Aczel) は記している。^{4,7)} ハイゼンベルグがこの会談で何を目的として何を述べたかは歴史上の大きな謎としていまだに残されたままである。

1938年末のウランの核分裂発見後、各国がこぞって連鎖反応の実現を目指した研究を始めたが、米国ではシカゴでフェルミ (E. Fermi) らが進めていた黒鉛を減速材として用いたCP-1炉が1942年に臨界に達した。一方その頃ドイツではハイゼンベルグが「原爆の製造は理論的には可能だが、すぐ完成させることは技術的に難しい」という趣旨のことを述べたためもあってか、最優先課題とはならなかった。ハイゼンベルグらは熱中性子の吸収断面積が小さい重水を減速材として用いて連鎖反応の可能性を追求した。重水炉はそのままでは原爆として用いることは困難であるが、重水炉によってプルトニウムを作ることが可能であることはハイゼンベルグも知っていた。しかし公の場でそれを強く主張することはなかった。^{1,3,5)} もっとも次の目標として原子炉によるプルトニウム製造を念頭に入れていたかどうかについては明らかでない。

当時、世界の重水の生産はノルウェーのリューカンにある工場に大きく依存していたので、1939年に連合国とドイツの間でノルウェーに備蓄されていた重水の争奪戦になり、間一髪之差で連合国が重水を確保してパリのジョリオ (F. Joliot) の研究所に保管したが、ナチスのパリ侵攻直前に運び出された話が知られている。その後ノルウェーの重水工場は連合軍により爆破され、2年間は生産不能とされていたが、ナチスは6週間で重水の生産を再開する。しかし1943年11月の猛爆によって遂に閉鎖に追い込まれた。

ハイゼンベルグらは天然ウランと重水を用いた試験炉による実験を繰り返した末、敗戦間近になってドイツ南西部シュバルツバルト (黒い森) 地方のハイガーロッホの丘の上にある教会の地下の洞窟に重水炉を建設する。1945年2月末にこの原子炉では中性子増倍度*1が6.7に達したが、

臨界には至らなかった。同年4月20日ハイガーロッホ炉はアルソス部隊によってフランス軍の総攻撃に先回りして接収される。原子炉の炉心は近くの畑に埋められていたが、すぐに発見されて徹底的に調べられた。大戦後この洞窟にミニ博物館が作られ、現在では再現された炉心が公開されている。

ハイガーロッホ炉が臨界に達しなかった理由については原子炉学者の間でも意見が一致しているわけではない。

ハイゼンベルグは臨界量の計算に当時知られていたペラン (F. Perrin) の中性子拡散方程式⁸⁾を使わず、独自に導出した式⁹⁾を用いている。この式を解くには積分を必要とするのでペランの式に比べ扱いにくい面もあるが、フランス人であるペランに対抗して独自色を出したのだという説もある。

ハイゼンベルグの計算法は、大戦後他の方法と比較して論じられてきたが、¹⁰⁾ 21世紀になってからも論争は続いている。

深井祐造は「大戦によって完全に隔離された状態で独立に同じ課題を解決するために発揮しなければならなかった知力に差があり、これが成功と失敗の結果につながった。(ハイゼンベルグの計算法では) 開発の道筋を簡単には示せない形を持っているのに、何故独自に開発した計算法に固執していたのか? そのために最適化の正確な考えに到達することが出来ずに、連鎖反応実現に必要な最小限の資材の確保が旨く実行できなかった…戦時の独の民族優越意識が失敗に導かれた本当の原因であったと思う。…」と主張している。¹¹⁾

一方、小林啓祐はハイゼンベルグらの計算法を詳細に説明した後「深井の主張はハイゼンベルグの論文の外部境界条件に関する記述の誤読によるもので、この理論は現在の原子炉物理の知識に照らしても合理的な扱いである。…ハイゼンベルグらが主張した境界条件は物理的にも、数学的にも明解なもので、臨界半径推定のために使用したことにユニークさがある」と記している。¹²⁾

ハイガーロッホ炉の形状、パラメータの詳細は戦後ハイゼンベルグ自身によって公表された。⁹⁾ それによると炉心は直径 ϕ と高さ h が124 cmの円筒形で、その周りは厚さ40 cmの黒鉛遮蔽体で覆われている。燃料体は一辺の長さが5 cmの金属ウランの立方体664個でできており、それらは図1(a)のように炉心の天井から78本のアルミニウムの鎖で等間隔に吊るされて重水に浸されている。

これらのパラメータを用いればこの原子炉が臨界状態になりうるか否かを計算することができる。^{11,12)} しかし、解析的に評価するにはやや複雑な形状であり、臨界の可能性についての決定的な結論を得ることは困難である。

一方、現在ではモンテカルロ法によって直接この炉の臨

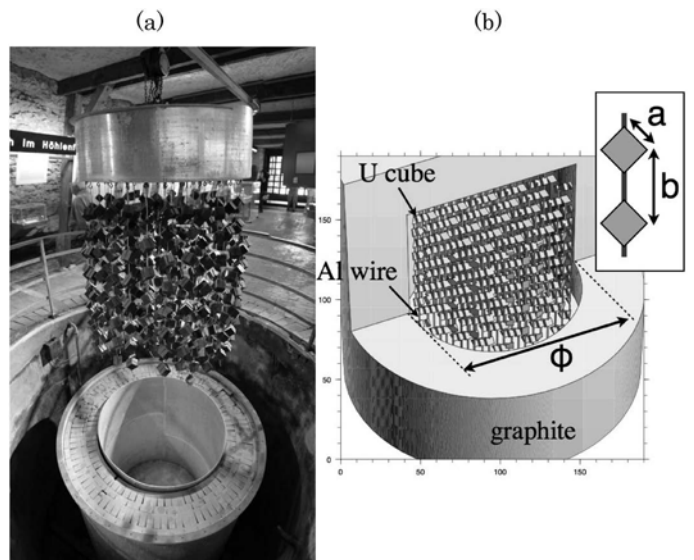


図1 (a) ハイゼンベルグが第二次大戦終結直前に南独ハイガーロッホに建設した重水炉の炉心の内部。重水中に一辺の長さが5 cmの正方形の天然ウラン片664個をアルミニウムの鎖で吊るしている。(b) モンテカルロ法によるハイガーロッホ炉の計算体系。一辺 a cmの立方体による間隔 b cmの面心立方構造の繰り返し形状とした。炉心の直径 ϕ と高さ h は等しい。炉心は重水で満たされている。(目次参照。)

界の可能性を再現することが可能である。最近、筆者の一人 (H. I.) によって計算された結果を以下に示そう。¹³⁾

炉心における中性子の実効増倍係数 k_{eff} を次のように定義する。

$$k_{\text{eff}} = [\text{中性子発生数}] / [(\text{中性子吸収数}) + (\text{中性子漏洩数})]$$

$k_{\text{eff}} > 1$ の状態ならば中性子発生数が吸収数と炉心からの漏洩数の和より大きいので連鎖反応が持続する。

モンテカルロ法によってハイガーロッホ炉の k_{eff} を再現してみよう。直径 ϕ cm、高さ h cm ($\phi = h$)の炉心に、一辺の長さ a cmのウラン立方体を b cmの間隔で面心立方構造に並べる。ウランは天然金属ウランとし、アルミワイヤを直径6 mmとして計算に含めた。炉心は重水で満たされており、その周りは厚さ40 cmの黒鉛で覆われている。先ず中心に中性子の点線源を置き、十分時間が経ったときの炉心内における中性子の分布とエネルギースペクトルを求めた。これを初期状態として入力し、異なる ϕ , a , b の組に対して k_{eff} を計算し、臨界となる条件を探った。

図2に ϕ 及び h がハイガーロッホ炉と同じ124 cmの場合の計算結果を示す。炉心全体にウラン片が分布しているとすれば $a=5$, $b=20$ のときハイガーロッホ炉とウラン量が一致する。 a 及び b を変化させても k_{eff} は1に届かない。ところが、図3に示したように ϕ 及び h を132 cmまで大きくすれば $k_{\text{eff}} > 1$ となる a , b の組ができる。つまりハイガーロッホ炉よりも炉心のサイズをほんの少し大きくして重水の量を増やせば臨界になることが分かる。この図のように $a=5$ cmのとき、 $b=21\sim 23$ cmで $k_{\text{eff}} > 1$ となるが、このときのウラン量は $64,300\sim 84,400$ cm³であり、ウランに関してはハイガーロッホ炉 (83,000 cm³) で十分であったとい

*1 中性子源を炉心の中心に置いた時、ウラン及び重水がある場合とない場合の炉心から放出される中性子数の比。ハイゼンベルグはこの値の測定を基にして臨界半径を求めた。

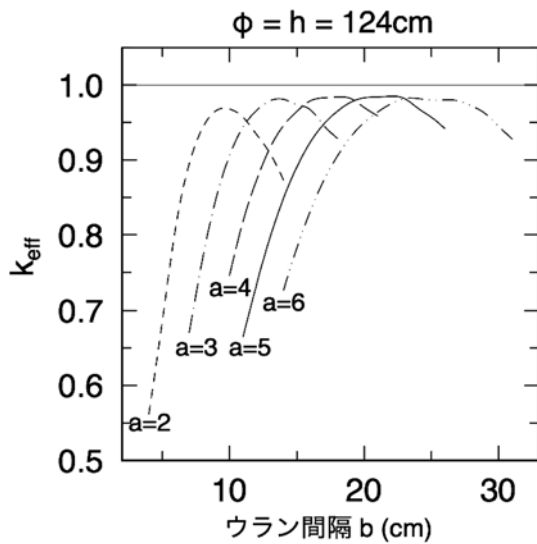


図2 ハイガーロッホ炉と同じサイズの炉心(直径 ϕ 及び高さ h が共に124 cm)の場合のモンテカルロ法による k_{eff} の計算値. ウラン片の一边 a をパラメータとする. 横軸はウラン片の間隔 b , 縦軸は k_{eff} .

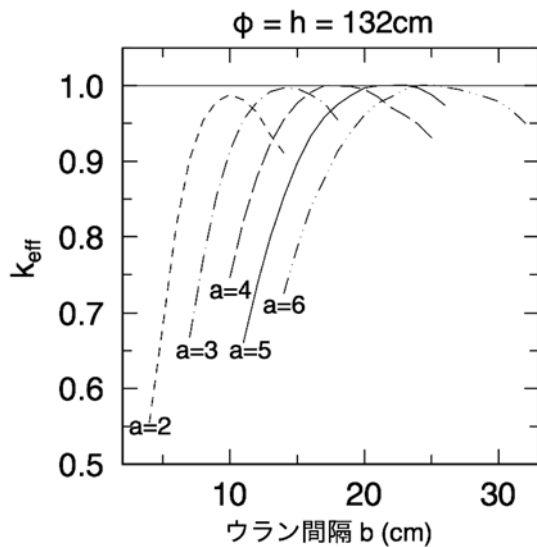


図3 $\phi = h = 132$ cm としたときの図2と同様の計算結果. ウラン片の一边 a , 間隔 b に対する k_{eff} の計算値.

える. ウラン片の大きさの妥当性については種々の議論があるが,^{9, 11, 12)} ハイガーロッホ炉のような形状の原子炉ではペランの方程式を用いても解析的に厳密な解を求めることは難しく, モンテカルロ法によってはじめて正確な計算

が可能となる. この計算によれば一辺が4~6 cmの正方形がほぼ適切なサイズであることが分かる. なお, 計算では当時と比べて詳細にデータベース化された中性子に対する断面積を用いている.

この計算結果は連合国とドイツの重水争奪戦がドイツの原爆開発の結末に重大な影響を与えたことを物語っている. ハイゼンベルグは敗戦直前の1945年2月初めに連合軍の猛爆撃を潜り抜けて可能な限りの重水とウランをベルリンからハイガーロッホまで運んで $k_{\text{eff}} > 1$ の状態を作り出そうと試みたが, それでもまだ重水の量が不十分で, 最後まで臨界に至らなかったわけである.

なお, 米国では1944年に重水炉で連鎖反応を実現し, その後フェルミとジラード(L. Szilard)によって特許が出願された.¹⁴⁾ この原子炉は直径183 cm, 高さ225 cmのタンクに直径2.8 cmの天然金属ウランの燃料棒を136本挿入したもので, ハイガーロッホ炉に比べずっと余裕をもった設計になっている. また, 日本で原子力の研究が始められた1950年代の半ばに重水炉の臨界値を計算した資料も残されている.¹⁵⁾

筆者の一人(A. M)が小林啓祐氏にハイガーロッホ炉の解析的計算法についてご教示いただきましたことを感謝します.

参考文献

- 1) ロベルト・ユンク:『千の太陽よりも明るく』(文芸春秋新社, 1958).
- 2) D. Irving: *The Virus House* (Parforce UK Ltd., 1967).
- 3) トマス・パワーズ:『なぜ, ナチスは原爆製造に失敗したか』(福武書店, 1994).
- 4) アミール・D・アクゼル:『ウラニウム戦争』(青土社, 2009).
- 5) アーミン・ヘルマン:『ハイゼンベルグの思想と生涯』(講談社, 1977).
- 6) マイケル・フレイン:『コペンハーゲン』(劇書房, 2001).
- 7) <http://nba.nbi.dk/papers/docs/cover.html>
- 8) F. Perrin: *Comptes Rendus* **208** (1939) 1573.
- 9) W. Heisenberg and K. Wirtz: *Kernphysik und Kosmische Strahlen, Teil II* (1948) 143-165.
- 10) S. Weart: *Am. J. Phys.* **45** (1977) 1049.
- 11) 深井祐造: *科学技術史* **7** (2004) 41.
- 12) 小林啓祐: *科学技術史* **11** (2010) 67.
- 13) H. Iwase: to be submitted.
- 14) E. Fermi and L. Szilard: U.S. Patent #2708656 (1944年12月出願).
- 15) 浅見哲夫: 原子炉設計の基礎研究委員会昭和29年度報告 日本学術振興会 (1955) 5.

(2013年10月22日原稿受付)

クラウジウス研究から分かった19世紀物理学の側面

八木江里 〈八木江里科学史研究所〉

林 春雄 〈八木江里科学史研究所〉

依田 聖 〈八木江里科学史研究所〉

岡本里夏 〈総合研究大学院大学総合科学研究科〉

1. はじめに

R. クラウジウス (Clausius, 1822-88年) がエントロピーを提案, 熱力学第1, 2法則を以下の文章で述べたことは良く知られている: “宇宙のエネルギーは一定である”.

“宇宙のエントロピーは極大値へ向かう” (1865年)

私 (八木) は学部4年生の頃からこの壮大な宇宙観と非(不)可逆過程の不等号表示とに引きつけられ, いつかこれらの起源と背景とを研究してみたいと考えていた.

幸いにも物理学史仲間の故辻哲夫氏 (1928-2012年) が責任編集されていた物理科学の古典10巻の1冊にクラウジウスの熱理論論文集を取り上げて頂くことができた. そこで, クラウジウスの熱力学関係の最初の1850年の論文を東大物理図書室の Ann. d. Phys. 誌からコピーを作り翻訳しようとしたが簡単ではなかった. その理由は, 彼の“1次(階)の(完)全微分方程式” (die vollständige Differentialgleichung erster Ordnung) が意味している内容が理解できなかったからであった.¹⁾ そこで私は, 彼の目指す力学的熱理論の全体像を理解する研究を行う方向へと向かった. この目的のために実行したいいくつかの取り組みについて簡単に述べよう.

2. クラウジウス研究の開始

先ずクラウジウスの未出版のノート類を多数所蔵しているドイツ博物館の図書館 Archives 室に, 1976年からしばしば訪問, クラウジウスが残した手書きのノート類から, 彼が先行研究論文, 著書等を読んで残している重要な部分を見つけ出して検討した. 1979年夏には, かつて留学 (1960-63年) したエール大学大学院の科学史医学史学科に D. プライス (Price) 教授を訪問, J. W. ギブス (Gibbs, 1839-1903年) を中心にした熱, 統計力学史の研究で著名な M. クライン (Klein) 教授を紹介して頂き, 国際的にみたクラウジウス研究の状況について, 意見を交換する機会をもった. 更に, クラウジウスの最初の論文集の第1, 2巻 (1864, 1867年) に収録されている17論文から全ての方程式, 約500個を取り出してデータベースを作成, 分析した. 上述の成果として, 私の国際会議での報告, 雑誌論文としての発表が行われ, それらを集めた英文論文集を2002年に出版することができた.²⁾ 私の研究を Google 検索で知ったということで, 突然, ポーランドの Koszalin 工科大学からメールが

来た. クラウジウスの生誕地として記念塔の建設を始めるための2009年秋のシンポジウムの第1番目に行う講演の依頼であった.³⁾ その後も, この計画を支援するために, 私は2010, 2011, と2013年とに Koszalin を訪問してきた. この貢献に対して, Clausius Tower Society から名誉会員の称号を送られた.

3. クラウジウスのエントロピー

クラウジウスのエントロピー提唱につながる熱力学関連の4つの論文, 第I論文 (1850年), 第IV論文 (1854年), 第VI論文 (1862年), 第IX論文 (1865年) の仮訳を私 (八木) は2002年に定年を迎える頃までほぼ完成した. ここでなされたエントロピー導入過程を要約しておこう: 力学的熱理論という立場から, 1周した際の保存力がする仕事がゼロになるのと同様に, カルノーサイクルを1周した際に可逆過程でゼロになるような物理量を求めようと試みた結果がエントロピーの発見になっている. 彼は熱から仕事 (その逆) の変化を第1変換と呼び, それに加えて熱の高温から低温 (その逆) の移動を第2変換と位置づける. そしてこれら2つの変換の値を温度と熱との関数として表すことで, 可逆過程でゼロになる物理量 Q/T (Q : 熱量, T : 絶対温度) を見出す. そこで, すべての可逆な周期過程に対する

Clausius	(1850): The first law of thermodynamics $dQ = dU + A \cdot R \frac{a+t}{v} dv \quad (a+t = T, 1854)$ where dU indicates the energy of a gas.
Clausius	(1854): $\int \frac{dQ}{T} = 0$ (reversible cyclical process)
Clausius	(1862): $\int \frac{dQ + dH}{T} + \int dz \geq 0$ Z : “disgregation”, H : heat of the body.
Clausius	(1865): “energy of the body”: $dU = dQ - dv$, or $dQ = dU + dv$. “entropy”: $dS = \frac{dQ}{T}$ (reversible process), or $\int \frac{dQ}{T} \leq 0$ (reversible & irreversible processes). 1. The energy of the universe is constant. 2. The entropy of the universe tends to a maximum.
Clausius	(1870): Virial Theorem $\sum \frac{m}{2} v^2 = -\frac{1}{2} \sum (Xx + Yy + Zz)$

Ed. by Haruo Hayashi from Yagi's *Historical Approach to Entropy* (Tokyo, 2002), p.30.

図1 Clausius 年表 (1850-1870).

第2主法則が表示される(1854年)。一方で、熱について現象論的基本法則『熱は高温から低温へのみ(自然に)流れる』および、摩擦による熱の発生現象等から、打ち消されない変換の存在を認識して非(不)可逆過程の不等号表示が導かれる。数式については“クラウジウスの年表(図1)”を参照。ここで彼が、最初は熱源の受け取る熱を正(+にしていたが、最後(1865年)には気体(作業物質)の受け取る熱の方を正にしていることに留意。

上に述べた自作のデータベースには、彼の17論文から番号のついていない全ての約500個の方程式を70ページの1冊に印刷してある。一瞥すると、クラウジウスが、常に第1、第2主法則を一組の関連した方程式として取り扱い、それらの解析的表示に努力してきたことが良く分かる。さらに、気体論の論文以外では、クラウジウスのA(仕事の熱等量)を用いて熱量単位で方程式を記述していることも明らかになった。この時期の彼の基本的な関心は“熱とは何か?”であったと思われる。

4. 研究会を組織

2004年からは、関心を持って研究に協力してくれていたかつての教え子たちとその友人で翻訳研究会を月1回の割合で私の仕事場(川越の八木江里科学史研究所、NPO学術研究ネット所属)で開いて来た。その成果としてこのたびクラウジウス熱理論論文集、『エントロピーの起源としての力学的熱理論』を完成することができた。ここには、クラウジウスの最初の論文集から選んだ7論文が翻訳(抄訳)、解説されている。⁴⁾

当時、クラウジウスが力学的熱理論(Mechanische Wärmetheorie)と呼んだ分野は、現在、熱力学と言われる分野をこえて広範な分野を含んでいた。すなわち、蒸気機関の理論、気体論、輻射理論、電気理論である。そこで、以下のようにこれらの分野の論文を選んで全訳(あるいは抄訳)した。⁵⁾ 蒸気機関の理論の第V論文(1856年)は林、輻射理論の第VIII論文(1864年)は依田、電気理論の第XII論文(1853年)は林と岡本が担当、それぞれの内容を担当者から以下に紹介する(八木記)。

5. 蒸気機関の理論

クラウジウスが技術問題について扱った論文は、この第V論文(1856年)以外にはないので特殊であるが、当時の時代背景のもとに展開されてきた力学的熱理論であれば当然であろう。当時の技術分野での理論は熱素説に基づいており、それと力学的熱理論との違いを鮮明にすることが彼にとって重要な課題であった。

この論文はエントロピー概念への足がかりを得た第IV論文までの結論を利用して、当時の技術者にとって基本的なマニュアルであったF. M. G. ドゥ パンプルル(de Pambour, 1795-1878年)の『蒸気機関の理論』から得られる結論と力学的熱理論から得られる結論とを比較検討し、クラ

ウジウスの理論が蒸気機関の現象に合致した結論が得られることを示すことにあった。

ドゥ パンプルルの理論は、まず第1に、ワットの法則(潜熱と顕熱の和が温度によらず一定)を採用し、飽和水蒸気の断熱状態での膨張・圧縮でも、過熱や凝縮は起こらず、常に飽和水蒸気の状態を保つという見解と、第2に、この飽和水蒸気の状態にもボイル・シャルルの法則が適用できるという見解とを基礎にしている。一方、クラウジウスは第IV論文までに得られた第1・2主法則、すなわち、

$$Q = A \cdot W \quad (A: \text{クラウジウスの仕事の熱当量})$$

$$\int \frac{dQ}{T} = -N$$

を基礎にしている。ドゥ パンプルルの設定条件自身を力学的熱理論の2法則によって定式化し、それによって得られる値と、ドゥ パンプルルの理論自身から得られる値とを比較検討する形で、両者の値の違いがどうして生ずるかを説明するという論文である。同時に、この論文は、力学的熱理論による定量的な応用を提示するものにもなっており、その後の蒸気機関の進展にも寄与したものと考えられる(林記)。

6. 輻射理論

クラウジウスの第VIII論文(1864年)の冒頭には熱現象の特徴を言い当てたフレーズ『高温物体から低温物体への熱の移動と、低温物体から高温物体への熱の移動との間には違いがあり、後者は起こりえず前者は自然に起こる』があげられている。本論文はここを出発点として論旨を展開する。

この論文が書かれた時期は、クラウジウスがW. トムソン(Thomson, 1824-1907年)やW. ランキン(Rankine, 1820-1872年)と論争しながらエントロピー概念を深めて行った時期である。W. トムソンは「力学的エネルギーの散逸に向かう自然の普遍的傾向」を書き、またランキンは「宇宙の力学的エネルギーの再集中」を書く。このトムソンの論文は地球の『熱的死』を予言し、またランキンは宇宙の『再起性』に言及する。これらの論文が本論文にも引用されるので、クラウジウスも「宇宙」を取り上げ、熱力学的宇宙像を考察している論文かのような様相を最初に見せる。

しかしクラウジウスが出発点としたのはキルヒホフの2つの完全黒体間の輻射の関係式である。本論文を「輻射理論」とした理由である。だがこの論文の主題はあくまで冒頭の第2主法則に関するものである。熱輻射により物体をそれ自身より高い温度まで上昇させることができるが、クラウジウスはこれを第2主法則を否定する現象と取られることを問題視した。彼は熱輻射の法則と第2主法則とが矛盾なく成立していることを示し、後年M. プランク(Planck, 1858-1947年)がKirchhoff-Clausiusの法則と呼ぶ関係式を導出した。

その後1865年にクラウジウスは熱力学の法則を全宇宙

に適用し“宇宙のエネルギーは一定である”“宇宙のエントロピーは極大値へ向かう”という有名なフレーズにまとめあげた(依田記).

7. 電気理論

クラウジウスの電気理論は、この論文集には第X, XI, XII, XIIIの4論文が掲載されている。まず第X論文では、第1法則を電流から生じる熱に適用し、第XI論文では均質導体に電気が流れているとして、電位をG.グリーン(Green, 1793-1841年)の導入したポテンシャル関数 V で表し、電位の勾配を dV/dx で表した。導体中の電気微粒子 dq が力を受け、この力が仕事をすれば、なされた仕事はポテンシャルの増加として現れ、これに第1法則を適用することで、導体中に発生する熱を求めた。一部翻訳(紹介)がなされた第XII論文では、この第XI論文の結論を(前段階)J-C.ペルチエ(Peltier, 1785-1845年)の熱電流に適用し熱電池に発生する電位差が温度に比例し温度の上昇とともに増加することを導いた。クラウジウスは、この論文で2種類の異なる金属が接する部分に転移層と言う極めて微小な空間を想定して、そこでの微粒子の振る舞いを考察している(林、岡本記)。

8. 終わりに

以上のように、19世紀のクラウジウスの力学的熱理論

は、伝統的なニュートン力学から出発しながらも、20世紀にそれぞれが発展するような幅広い諸分野を包含していたことが理解されるのではなかろうか。図1に理解を助けるための年表を示す⁶⁾(八木記)。

注と文献

- 1) 独立変数 x と y の関数 $U(x, y)$ が完全微分である条件は、 x と y で U を微分する場合に微分の順序によらず等しいこととされている。これに加えてクラウジウスは、 x と y の間に特定な関数関係があり、それを利用して積分可能になる場合に1次のオーダの完全微分方程式が構成されると記述している。第1論文(1850)付録A, B(1864)で解説。
- 2) E. Yagi: *A Historical Approach to Entropy, Collected Papers of Eri Yagi and her Coworkers* (Int. Pub. Institute, Tokyo, 2002) 196 pp. 及び付録: E. Yagi: *A Supplement of the Collected Papers of Eri Yagi and her Coworkers, A Database from R. Clausius's Abhandlungen I-XVII* (Eri Yagi Institute for History of Science, Kawagoe, Japan, 2002) 72 pp.
- 3) E. Yagi: Book of Abstract, 4th Symposium on Vacuum based Science and Technology, September, Kozsalin, Poland (2009) p. C1-R. Clausius's contribution to the first & second laws of thermodynamics.
- 4) ルドルフ・クラウジウス著、八木江里監訳、八木江里、林 春雄、依田 聖、岡本里夏共訳『クラウジウス熱理論論文集: エントロピーの起源としての力学的熱理論』(東海大学出版会, 2013).*
- 5) 気体論の訳は既に以下のように出版されているので取上げなかった: クラウジウス著、杉山滋郎訳「われわれが熱と呼ぶ運動形式について」『近代熱学論集』(朝日出版社, 1988) pp. 411-433.
- 6) Clausiusの年表(1850-70年)(図1).

(2013年11月26日原稿受付)

* 編集委員会注: 本号「新著紹介」欄に書評記事あり。



第43回天文・天体物理若手夏の学校開催報告

中川 恵介 (新潟大学大学院自然科学研究科)

第43回天文・天体物理若手夏の学校(主催:天文・天体物理若手の会、後援:日本天文学会)が2013年7月29日から8月1日にかけて、宮城県の蔵王ロイヤルホテルにて開催されました。総勢347名の方に参加していただき、盛況のうちに終えることができました。2013年度は「変化」をテーマとし、様々な試みを行いました。本稿では、その夏の学校について報告させていただきます。

1. 夏の学校について

夏の学校は、天文・天体物理若手の会の主要な活動の一環として、天文学・天体物理学を研究する若手研究者のために毎年開催されている研究会です。最大の特徴は、「全ての運営が大学院生によって行われること」であり、全国を5地域に分けて5年持ち回り制で事務局を構成しています。2013年度は北海道大学、東北大学、筑波大学、茨城大学、新潟大学に加え、自ら参加を志願した弘前大学の6

大学で共同して運営しました。

夏の学校は「参加者の研究を促進する」「若手研究者同士の交流を深める」の2点を目的としており、参加者による口頭発表、講師を招いての招待講演、ポスターセッション、公募による全体セッションが行われます。今回の全体セッションは「夏の学校の今後を考える」というタイトルで行われました。また、新たな企画として、銀河・銀河団分科会主催の「ポスターアワード講演」が行われました。これらの企画の詳細については後述いたします。夏の学校は合宿形式を取っており、全ての参加者が発表会場と同じホテルで寝食を共にすることで、学年や所属機関、専門分野を超えた交流を深めることができます。

2. 参加者数と会場

2013年度は招待講師23名を含む347名の方に参加していただきました。400名を超えた前年度に比べると大幅に

減ってはいますが、2005年度以降はおおよそ350名前後であり、例年並みという結果になりました。

会場については、最大数400人を収容でき、かつセッションの行える設備・環境のあるホテルを探した結果、宮城県の蔵王ロイヤルホテルとなりました。駅からのアクセスが悪いという難点はありませんでしたが、その代わりにホテルの設備や食事、セッション会場については大多数の参加者の方から「満足」とのアンケート回答をいただきました。

3. 企画内容

夏の学校のメイン企画となるのが、分科会講演とポスターセッションです。これらの企画は、研究分野を「重力・宇宙論」「コンパクトオブジェクト」「宇宙素粒子」「太陽・恒星」「銀河・銀河団」「星間現象」「星形成・惑星系」「観測機器」の8つの分科会に区分けして行われます。分科会ごとに座長団が結成され、事務局と連携して準備をしたり、当日の会場運営を行ったりします。

分科会講演は参加者による口頭発表と招待講師による講演から構成され、3パラレルセッション形式で行われます。招待講演を行っていただく講師の方は、大学院生である座長団が「今、話を聞いてみたい研究者」の方に直接、依頼します。従って、若手研究者が最先端の研究に触れる貴重な機会となっており、いずれの講演も会場が満員になる盛況ぶりでした。

ポスターセッションの時間には多くの参加者が活発な議論を交わしていました。ポスターは開催期間中、セッション会場の近くに常時掲示されており、ポスターセッションの時間外にも議論を通して交流を深めている様子が見られました。

2013年度は142名が口頭発表を行っており、ポスターセッションを行った105名と合わせれば参加者の約76%が研究発表を行っています。これは夏の学校が多くの若手研究者にとって積極的に発表できる場となっていることの現れだと考えています。

4. 新たな試み

夏の学校は2013年度で43回目を迎えました。しかし、大規模になり過ぎたことによって事務局の負担が増大し、運営が困難な状況に陥りつつあります。また、研究会としての質が低下しているのではないかと、との声もありました。

我々は夏の学校を今後も継続させていくために、「集録の事前提出」「全体企画・夏の学校の今後を考える」「ポスターアワード講演」などの試みを行いました。また、参加者同士の議論を促進するための工夫も行いました。

まず、今まで開催後に集めていた集録を開催前に集め、一定数を超えた場合は査読を行うという方針を取りました。これに関して、「準備不足の発表が減った」などの肯定的な意見がある一方、「MIには厳しすぎる」といった参加者の負担増加に対する意見が多く寄せられました。ただ、講

演数が非常に多かった前年度に比べ、適度に講演数が抑えられたことで余裕のあるプログラムを組むことができ、後述するポスターアワード講演やセッション後の議論の時間を確保することができた、という面もありました。

「夏の学校の今後を考える」では、夏の学校の大規模化に伴う事務局の負担の大きさを参加者に説明し、今後取るべき対策について議論を行いました。前半では事務局の構成や仕事内容を紹介し、後半では次年度の事務局が実施する予定の対策を基にして今後の夏の学校の在り方について意見を交わしました。参加者からは「5年持ち回り制」などの夏の学校の根本的な制度に対する意見が多く出されました。具体的な結論を出すことはできませんでしたが、この企画を通して事務局と参加者とで問題意識を共有できたように思います。

ポスターアワード講演は、事務局の姿勢に共鳴した銀河・銀河団座長団が独自に企画し、主催した企画です。夏の学校では毎年、ポスターアワードと称して投票を行い、表彰していましたが、この企画は表彰されたポスター発表者の方に、分科会の枠を越えて講演してもらおうというものです。アンケートでは100%の回答者が「参加して良かった」と回答しており、非常に有意義な企画となりました。また、座長団が独自に企画を行うことは今までになかったことであり、夏の学校という研究会の独自色を強めることができたという意味でも重要なものとなりました。

他に、参加者同士の交流をより深めてもらうためにセッション後に講演者と自由に議論できる時間を設けました。ポスターセッションにおいては発表者と連絡が取れるように連絡板のようなメモを設置しました。前者に関しては、多くの分科会で有効利用する参加者が見られ、アンケート結果も好評でしたが、後者に関してはあまり活用されておらず、次年度以降の課題点となりました。

5. 補助金について

夏の学校では、開催地と学生の所属機関との距離により旅費負担差を減らすため、旅費の補助を行っています。これは、遠方の学生や財源を持たない院生などが平等に参加できるようにすることで、できるだけ多くの若手研究者に研究推進の機会を提供したいという考えによるものです。

しかし、夏の学校の開催主体は学生であるため、特定の出資主体が存在しません。従って、旅費補助のほぼ全てを、夏の学校の趣旨に賛同してくださった研究機関、団体、企業、研究者個人の方々からの寄付によって賄っています。ここで全ての名前を挙げることはできませんが、今回も非常に多くの皆様から援助をしていただきました。この場を借りて、御礼申し上げます。

6. 今後の夏の学校について

新たな試みに関しては賛否両論あり、次年度も継続していくか、あるいはより良い方法はないか十分に検討する必



図1 参加者の集合写真.

要があります。しかし、参加者へのアンケートには、2013年度事務局の新たな試みを行う姿勢について、多くの肯定的な意見が寄せられました。夏の学校は「大学院生自身が運営する研究会」であり、今回は参加者の立場だった方も、

いずれは運営側になる可能性が大いにあります。従って、今回の夏の学校で参加者と事務局が問題意識を少しでも共有できたことは大きな意味があったと思います。我々の姿勢がきっかけとなり、2014年度以降の事務局が更に、より良い夏の学校の形を追求していくことを期待しています。

最後になりましたが、夏の学校の開催にあたり、多くの機関や企業、研究者の皆様にご多大なるご支援とご協力をいただきましたこと、この場を借りて厚く御礼申し上げます。この夏の学校という研究会を通して、我々若手研究者一同は一人前の研究者となれるよう努力してまいりますので、今後とも引き続きご支援していただきますよう、お願い申し上げます。

非会員著者の紹介

中川恵介氏：1987年生まれ。新潟大学大学院自然科学研究科博士課程3年在籍。専門は超新星爆発。

(2013年8月24日原稿受付)



第53回生物物理若手の会夏の学校開催報告

香川璃奈 (九段坂病院)

坂田樹哉 (東京理科大学)

1. 生物物理若手の会とは

生物物理学とは、生物を物理学的な観点から説明しようとする学問分野です。蛋白質の動態観察や分子シミュレーション、理論的な細胞動態の解析まで、様々な手法・解析対象を持つ研究者が生命の理解に向けて日々研鑽を積んでいます。生物物理若手の会は、生物物理学と周辺分野を専門とする大学院生を中心とする若手研究者が集う全国組織です。生物物理学会よりも早く生まれた歴史があり、生物物理には若手が盛り上げる文化が根付いています。若手の会は各支部(北海道/関東/中部/関西)での支部セミナーが定期的に開催されているだけでなく、年に1回、夏の学校を開催しています。

生物物理若手の会夏の学校は、合宿形式をとり、例年全く異なる学生が全ての企画運営を行うことが特徴です。夏の学校の開催目的は2点です。1つ目は、合宿形式によって生物物理学およびその周辺の諸分野の若手研究者同士の全国規模での分野横断的な交流と議論を効率的に行い研究学術的発展と若手研究者育成に寄与すること。2つ目は学生が企画運営を全て行うことで組織運営の訓練を積んだ社会にも通用する若手研究者の成長の機会を与えることです。

2. 第53回夏の学校開催報告

夏の学校は2013年度で53回目を迎えました。2013年9月6日(金)~9日(月)に、静岡県伊豆長岡温泉えふでの宿八の坊にて「NO BORDER~先端を知り、境界をつなぐ~」をテーマに行われました。16名の先生方にご講演いただき、86名の参加者が盛り上げて下さいました。今回の夏の学校では「NO BORDER」を目指す「能動的な」夏の学校の実現のために初の試みが多く行われましたので、ご報告させていただきます。

A. 海外講師の招聘

今回はスタッフの強い希望により、分子動力学計算で世界をリードするD. E. Shaw ResearchのXu Huafeng先生の来日公演が実現しました。英語での講演に参加者がついていけるのか心配でしたが、議論時間でも質問が相次ぎ、研究内容のみならず企業に就職後にアカデミックに戻ったキャリアや海外での研究環境についても意見を聞くことができました。参加者アンケートでも英語での講義に対する批判意見は全く見受けられませんでした。英語の講演にも食らいついて行く参加者の姿勢に若手研究者の勢いを感じました。

B. 周辺分野：複雑ネットワークと機械学習，離散最適化問題の講義

生物物理分野には馴染みが薄いが今後確実に理解が必要になる分野ということで，複雑ネットワークと機械学習，離散最適化問題（“数え上げお姉さん”の動画で有名）の講義を設けました。難解な内容ながらも具体例とユーモアを交えて解説して下さる先生の講義に参加者も高く満足してくれているようでした。

C. メディアで活躍している講師の招聘

科学と社会の乖離は最も大きな境界線の一つでしょう。文化の違う2つの世界をつなぐ場を作りたいという意図で，WIRED編集長の若林恵先生を講師として呼びました。科学技術をオシャレに文化として伝えることに成功している紙およびオンライン雑誌の編集長（文学部出身）の話が，参加者の興味関心と一致するの不安でした。しかし，ふだんの研究生生活では絶対に聞くことができない分野の話に参加者からは率直な意見質問が飛び交い，それに真摯に答えて下さる先生の姿勢に，参加者は社会の中での自分の立ち位置を再確認することができたと思います。

D. 充実した議論時間

参加者が講義内容を能動的に理解できるように，各講義について1時間以上の議論時間を設けました。それぞれの講義のオーガナイザーに，議論形式について「参加者が能動的に講義に参加できるような議論形式を考えてもらいたい」とだけ伝え，詳細は任せました。その結果，講義した先生のみならず学生も参加するパネルディスカッション，講義に関係する特定の課題を与えて解決方法を議論する，質問と先生からの回答をリアルタイムでスライドに表示する質疑応答，グループ毎に意見や質問を話し合ってから先生に質問する，などそれぞれ工夫された議論形式がそれぞれのセッションで採用されました。

E. 学生によるハンズオンセミナー

日常の研究生生活の中で，異分野についても理解したいけれども機会がないと不満と不安を感じている学生は多いと思います。そこで，学生が講師役となり，全くの異分野の人に対してゼロから基本を教えてもらうハンズオンセミナーを企画しました。自分のノートパソコンでシミュレーションを行う計算ハンズオンセミナーと，実験計画を実際に立ててみる実験ハンズオンセミナーを開催しました。講師が学生という気軽さからか質問が相次ぎ，隣の席の人と教え合い一緒に考える光景が多く見られました。学生のニーズを掘り上げることに成功した企画だと自負しています。

F. 合気道

スタッフの知り合いの生物物理学研究者に合気道の師範を持っている先生がいたことから，毎朝任意参加での合気道講習会が開催されました。朝7時からの講習会に人が集まるのだろうか心配していましたが，毎日20~30人の学生が集まりました。研究者が毎日使える心と体の整え方を学び，体を動かす絶好の機会になりました。

G. “コラボ探し”

くじ引きで急に決まった2,3人組で40分間で研究立案を行い計画書にまとめ発表し質疑応答を受ける，という企画を行いました。いずれも即興案とは思えない完成度の高さであり，質疑応答もまさに真の研究立案に対してのやりとりそのものとなりました。この試みを通して，学部生にとっては将来の研究生生活を夢見る機会が得られ，また大学院生にとってはいつもと違う柔軟な着想を得る訓練となり，充実した時間だったと感じています。

3. 夏の学校に運営スタッフとして関わること

これらの企画を実現するために，運営スタッフは1年間にわたり多くの議論と準備を重ねてきました。当夏の学校の運営メンバーは毎年全員入れ替わることが特徴です。運営に関わることは，自分が研究生生活で足りないと感じていることを企画として実現できるだけでなく，組織運営についても学ぶことができ，社会人として成長できる絶好の機会であると確信しています。2013年度の運営スタッフは所属も学年も専門もバラバラのメンバー11名で構成されました。その中で物理学を学ぶ学部生として運営に参加したスタッフもいます。以下，運営に参加した学部生の感想を紹介いたします。

学部3年生として運営に参加した感想

今回の夏の学校には運営スタッフとして，また，大学で物理学を学んで3年目になる1人の学部生として参加させていただきました。

まず，運営スタッフとしての感想を述べたいと思います。一番苦心をしたのは，運営スタッフとしての活動と本業である学部生としての授業や課題を両立させることでした。しかし，この1年間，この2つを両立させられるように努力し，自分よりも全ての面で経験が豊富な大学院生を中心としたスタッフのメンバーと関わることにより，多くのことを得ることができたと考えています。例えば，活動に参加し始めた段階では議論に慣れていませんでしたが，月に1回開かれる会議に参加して行くうちに「議論に参加する態度」を身につけることができました。また，「与えられた仕事をどのようにすれば早く片付けることができるのか」や「期限が設けられている中で突然生じた問題に対してどのように対処すればよいのか」といった課題を自分自身に課し，それらに対する自分なりの解決法を考え，実行して周りのメンバーからのフィードバックを得ることで，この1年間を通して様々なことを学べたのではないかと考えています。さらに大学院生の方々と交流の中で具体的な大学院生活というものも思い描くこともできました。

次に，物理学を学ぶ学部生として，夏の学校に参加させていただいた感想を述べたいと思います。今回の夏の学校の内容は，多くが情報科学や生物学関連のものであったので，普段から量子力学や電磁気学，統計力学などの純粋な物理学を学んでいる私にとっては，今までに見たことな



図1 昼食時間中も議論が続く参加者と内橋貴之先生(金沢大 写真中), 野地博行先生(東大 写真右).



図2 お酒片手にポスターを囲み, 研究の話に夜な夜な花が咲くのが夏の学校の特長です.



図3 集合写真. 2013年度は学部生や女性の参加者が多くにぎやかな会となりました.

い全く新しい世界が広がっており, 大変刺激的でした. しかし, その中にも, 自分が普段から触れている物理学の香りを感じるものも含まれていたため, 物理学と生物学や情報科学などのつながりを感じることもできて, 生物物理学という分野の学際性と, それに起因する学問としての面白さを実感することができました. また, 今回の夏の学校の参加者は様々なバックグラウンドを持ち, 学部生から一般の方々まで幅広い層から構成されていたため, 他の参加者と交流することにより, 生物物理学に対する多様な視点や考え方を知ることができ, 私にとって非常に大きな刺激になったと思っています. 特に, 同学年の学部生との交流では, 普段学んでいる物理学について語り合うだけでなく, 同じ分野に興味を持った者同士で大学生活や進路などについても語り合うことができたので, 大変有意義な経験となりました.

今回は“no border”をテーマとした夏の学校でしたが, この“no border”というのは分野と分野, 実験と理論などの間に存在する“境界”を克服したいという考えの下, 設定されたものでした. しかし, 自分なりに考えてみると, 克服すべき“境界”の中には「歓迎されるべき境界」と「歓迎されざるべき境界」というものが存在するように思われました. 私の考える「歓迎されるべき境界」というのは分野と分野, 実験と理論の間の境界のように, お互いに議論を交わしたりすることでより高次なものへと止揚され得るような生産的なものです. 一方, 「歓迎されざるべき境界」というのは, 人と人との間の“境界”です. これは他者や他分野などとの交流を避けることで生まれ, 学問の発展を

妨げる最も非生産的なものであるもので, 直ちに克服されなくてはならないものであると私は考えています. 今回の夏の学校を改めて振り返ると, 先述のような「歓迎されるべき境界」が多く存在していた良い会であったと思われます. 最後に, このような経験をさせて下さった皆様に, この場を借りて深く感謝申し上げます.

4. ぜひ, 生物物理若手の会へ!

今回の夏の学校の内容について, twitterの#生物物理学のハッシュタグにて共有されているものもたくさんありますので, ご覧いただければ幸いです. これをお読みの皆さんの中にも, 解析対象として生物を選びたいけれどもなかなか勉強ができずに悩んでいらっしゃる方, 同じようなモチベーションを持つ若手研究者と仲良くなりたい方, 若手の会の運営に関わってみたいと思う方がいらっしゃるかと思います. 是非とも <http://bpwakate.net> (こちらも2013年の夏の学校運営スタッフが大幅改訂しました) をご覧いただき, MLへの登録, あるいは我々スタッフへの連絡をしていただければと思います.

非会員著者の紹介

香川璃奈氏: 九段坂病院初期臨床研修医. 慶応義塾大学医学部出身. 興味があることは生体分子の機能と水和の関係. 医療情報分野も気になっている.

坂田樹哉氏: 東京理科大学理工学部物理学科3年生. タンパク質科学や非平衡系の物理学に興味を持っている.

(2013年9月20日原稿受付)

第58回物性若手夏の学校開催報告

富士香奈 〈奈良女子大学大学院人間文化研究科〉
 河底秀幸 〈東京大学大学院新領域創成科学研究科〉
 菱谷大輔 〈奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科〉

物性若手夏の学校は、物性物理の分野を中心とした学術研究に興味を抱き始めている全国の大学院生を対象としたサマースクールである。物性物理に関する基本概念の習得や発表スキルの向上を目的とした企画を通して、参加者に研究の楽しさを強く実感してもらうことが、本夏の学校の最大の狙いである。例年、参加者は200名近くになる。その中には、日本物理学会内で数多くの領域を有する物性分野以外に、化学・生物分野の参加者も含まれる。参加者同士の交流促進の企画を利用し、若手研究者の分野の垣根を取り払ったネットワーク作りも、本夏の学校の魅力の一つである。

1. 概要

第58回物性若手夏の学校は2013年8月12日～16日までの5日間、滋賀県高島市、琵琶湖畔の白浜荘で開催された。参加者は総勢180名(男性：161名、女性：19名)となった。2013年は、強相関分野では最大級の国際会議(SCES2013)を事前に控えていたことと、開催時期をお盆に設定したことで、準備局は、参加者募集に関して不安を抱いていた。しかし、例年並みの多くの人に参加してもらうことができ、スタッフ一同ほっと胸をなでおろした。これは、若手研究者にとって、本夏の学校が重要なイベントになっていることの証かもしれない。

プログラムは例年通りの形式で、「学ぶ、伝える、議論する」という研究を進める上で不可欠な技量を養うことを目的とした構成となっている。午前には招待講師による講義、午後に参加者による発表企画、というのが一日の大きな流れで、4日目午後には、最先端の話題を中心として、講義

と異なる講師による集中ゼミが行われた(表1)。

発表企画としては、グループセミナー、ポスターセッション、分科会の3つを実施した。対外的な発表経験が乏しい若手にとって、これらは、プレゼンテーション能力の向上や他者との議論の機会として重要である。グループセミナーは、7人前後のグループで、自分の研究について発表と議論をし合う企画である。各グループは、研究内容や学年が偏らないように構成した。ポスターセッションはポスター発表の企画である。今回の発表件数は92件で、全参加者180人の半数に達した。分科会は、発表10分・質疑応答5分の口頭発表の企画であり、参加者の発表以外に、各分野で活躍されている若手研究者による30分の招待講演も実施した。発表件数は41件で、前年と比べて増加した。

2. 若手の姿～当日の様子から～

当日は参加者それぞれが用意した各企画を存分に活用し、5日間をさらに盛り上げてくれた。初日の開校式後に行われる講義プレビューでは、講演を依頼した講師の方々から講演内容のアウトラインを紹介していただき、参加者はそれを参考に興味ある講義を自由に選択することができる。中には光物性の実験が専門だが、数値シミュレーションの講義を選択したり、3日間別々の講義に参加するといった人もいて、積極的に他分野へ目を向けようとする姿勢が見られた。特に、研究テーマを模索中の人や、現在の研究テーマに対して新たな視点で取り組みたいと考える人にとって、本夏の学校への参加から物性の各分野へ視野を広げ、多分野の知識を吸収していくきっかけを作ることができたのではないかと感じている。

表1 講義・集中ゼミの講師・演題一覧。

企画	講師(敬称略)	演題
講義	加藤岳生 権島祥介 高田康民 田中耕一郎 西森 拓 新田宗土	メゾスコピック系の物理—基礎から最近の話題まで— “人工知能”のための統計力学 第一原理からの超伝導理論 テラヘルツ光物性物理学—電子系、スピン系、格子系の新しいプローブ 「こんな研究アリですか？」—自然・生命現象モデリング入門 物性における量子化渦と素粒子・宇宙における宇宙ひも
集中ゼミ	浅野健一 今田正俊 筒井 泉 羽田野直道 細野秀雄 森 健彦	電子正孔系の物理 高温超伝導体の物理 量子力学の基礎に関する最近の話題 複雑系ネットワーク：統計物理学の視点 酸化半導体の機能開拓 分子性半導体の特異な電子状態：強相関からゼロギャップまで



図1 講義プレビューの様子.



図2 講義の様子.



図3 ポスター会場の様子.



図4 懇談会の様子.

講義・集中ゼミなどの講演では日を追うごとに積極的に質問する人が増え、講師の先生が提示した問題に関して意見を提案するなど、白熱した議論が展開されていた。また講師の先生方と参加者の距離が近く、休憩時間にも講師の先生に質問したり、講演内容に関して熱心に議論する姿が見られた。講演後は、先生方が楽しそうに物理を語る姿に刺激を受けたという意見もあり、多くの参加者にとって、先端の知識を得るだけでなく自らの研究に臨む姿勢を見つめ直したり、研究することの楽しさを改めて感じてもらう機会となったようである。

グループセミナー、ポスターセッション、分科会といった発表企画では、多くの参加者が研究発信を行った。特に本夏の学校では参加者の分野の多様性から、他分野の聴衆に向けての説明・質疑への対応の機会が多くなる。たとえ対外的な発表経験が豊富にあったとしても、他分野の人にも理解できるように説明することはなかなか難しい。この難しさを体感することで、伝える技術の大切さや自分の研究の意義を再確認してもらうことを意図した。グループセミナーの発表者の中には発表内容を書いたスケッチブックを持参し、そこに追加の書き込みをしながら発表するなど、わかりやすく伝えようとする各々の工夫が見られた。ポスターセッションでは体育館を会場として使用し、扇風機フル稼働の中で熱い議論が展開されていた。「ポスター発表で分野の異なる方からも意見が得られてよかった」といった感想も多く、夏の学校での発表を通して、新たな視点やモチベーションの向上など今後の研究の糧となるものを多

数掴んでくれたのではないだろうか。

これらの企画の他にも、毎晩夕食後に行われる懇談会や食事の場など様々な場面で議論が展開されていた。懇談会は様々なバックグラウンドを有する参加者が一同に会する場であり、異分野間交流や若手研究者間のネットワーク構築には欠かせない。各企画でお呼びした先生にも参加いただき、講義等では伝わりきらない話を交えた先生との交流も行われた。講師の先生は院生時代に夏の学校に参加（もしくはスタッフを）された方も多く、その時の体験談や現在の夏の学校との違い、といった話題も盛り上がった。また研究議論以外にも、研究室での生活や各個人・各分野の悩みなどを語り合う姿も見られた。研究テーマ設定での悩み、実験での測定の悩み、解析手法での悩み、ライフプランでの悩みなどなど、分野は違えど若手研究者同士、共有できるものは意外と多いものである。普段の研究生活では出会うことのできない人との出会い、互いのモチベーションを刺激し合うことによって、研究に取り組む前向きな姿勢を得てくれたのではと感じている。

3. 「物性若手」の魅力

広大な物性分野全体から参加者が集まることによって可能となる「異分野間交流」に、分野間の垣根を取り払う若手の勢いをプラスすることによって、そこには物性物理の明日を担う研究者達の熱い議論が生まれていた。その中で得られる分野間のネットワーク・研究へのモチベーションは、普段の研究生活ではなかなか得ることのできないもの

である。興味を持たれた方は、是非自らの分野の枠にとらわれること無く果敢に（もしくは気楽に）第59回物性若手夏の学校へ参加していただきたい。多分野の若手研究者が集まる5日間の共同生活という非日常な体験から、自分と異なる視点・発想・人との出会いを得てもらいたい。物性若手夏の学校が様々な分野との出会いの場として今後ますます発展し、物性科学を盛り上げる原動力となっていくことを祈っている。

本会開催において京都大学基礎物理学研究所・東京大学物性研究所・東北大学金属材料研究所・材料科学技術振興

財団からの援助、日本物理学会・応用物理学会・日本化学会からの後援、各協賛企業・個人からの支援を受けた。準備局員一同、心から感謝申し上げます。

非会員著者の紹介

菱谷大輔氏：1990年兵庫県生まれ、2012年長岡技術科学大学工学部電気電子情報工学科卒。現在奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科修士課程在学中、専門は半導体デバイス。

(2013年10月2日原稿受付)



ラ・トッカータ
La Toccata

2013年度原子核三者若手夏の学校開催報告

富谷 昭夫 〈大阪大学理学研究科〉

三嶋 剛 〈東京大学大学院理学系研究科〉

青木 新 〈神戸大学大学院理学研究科〉

前田 沙織 〈東京工業大学大学院理工学研究科〉

高知尾 理 〈東京大学宇宙線研究所〉

1. 原子核三者若手夏の学校とは

原子核三者若手夏の学校は、主に素粒子・原子核・高エネルギー物理学の大学院生が集まって行われる滞在型研究会です。近年では参加者が約300人という規模で開催されており、上記分野の大学院生同士が交流できる場としては最大のものになっています。本研究会は、第一線で活躍されている研究者の方を講師としてお招きした講義やレビュートークと、大学院生による研究発表によって成り立っており、それに加えて講師・大学院生間や大学院生同士の交流を深めるための企画も行っています。

本記事では2013年度の原子核三者若手夏の学校の活動について報告を行います。原子核三者若手夏の学校は1955年度の第1回から数えて2013年度で第59回目となる伝統ある研究会であり、本研究会が現在どのように活動しているのかを本記事を通じて日本物理学会の皆様にご紹介いただければと思います。

2. 2013年度活動報告

2013年度原子核三者若手夏の学校は、8月4日から9日の6日間にわたって愛知県蒲郡市にあるホテルたつきにて開催され、素粒子論パートには166人、原子核パートには87人、高エネルギーパートには36人の参加者が集まりました。本研究会は例年、大学院生自身によって運営されており、2013年度は東京大学を中心に、大阪大学、新潟大学、大阪市立大学が全体の運営に関わる役職校を務めました。

また、各パート毎にも役職校が存在し、素粒子論パートは神戸大学と山形大学、原子核は東京工業大学と東京大学、高エネルギーパートは東京大学が準備を進めました。以下では、三者共通の活動について東京大学の三嶋が、各パートの活動についてはそれぞれの役職校から青木、前田、高知尾が報告を行います。

2.1 三者共通の活動

三者共通での活動は、夏の学校初日の三者共通講義、共通講義の講師を囲む会、二日目に行われたポスター発表、三日目に開催された懇親会です。

三者共通講義では理化学研究所仁科加速器研究センターの初田哲男氏をお招きして「QCDがもたらす多様な世界」という題目で講義をしていただきました。講義の導入では若手に向けたアドバイスとしてSteven Weinbergの「Four Golden Lessons」という記事をベースに、研究分野によらず当てはまる心構えを教えてくださいました。講義前半ではQCDの基礎的かつ難解な概念である漸近的自由性・クォークの閉じ込め・カイラル対称性の破れについて、元論文による歴史的背景や数値シミュレーションとの関係の紹介を織り交ぜつつ分かりやすく説明していただき、後半では高エネルギー重イオン衝突と中性子星という最先端の話題について解説していただきました。共通講義後には新しい試みとして参加者全員での写真撮影を行いました(図1)。写真撮影後に開催された囲む会には約150人の学生が参加し、初田氏と共にお酒を飲みながら、研究についての議論



図1 三者共通講義講師，初田氏を囲んで。

や歓談などで大変盛り上がりました。

二日目の午後に行われたポスター発表では多数の学生が参加し、いたるところで活発な議論を交わしていました。また、三日目の夕方には参加者同士の交流を深めるための企画として懇親会を開催しました。研究分野や所属を問わず、多くの大学院生と知り合える機会となったことと思います。

2.1.1 素粒子パート

素粒子論パートでは、例年通り現象論、弦理論、場の理論のそれぞれの分野について、3名の講師の方をお招きして講義をしていただきました。現象論の講義は林青司氏（東京女子大学）、弦理論は土屋麻人氏（静岡大学）、場の理論は中村純氏（広島大学）に担当していただきました。林氏には「階層性問題と標準模型を超える物理」というタイトルで、前半は標準模型の概要と標準模型が抱える問題点、特に階層性問題について説明していただきました。講義の後半では、ご自身のこれまでの研究内容について話して下さり、学生全員が熱心に耳を傾けていました。土屋氏には「行列模型による超弦理論の非摂動的定式化」というタイトルで講義をしていただき、非臨界次元の弦理論が行列模型によって非摂動的に定義されることを見たのち、行列模型における時空の出現について、いくつかの例を交えながら話していただきました。最後には、この行列模型における3+1次元の膨張宇宙の出現についての最近の結果を話して下さり、我々学生にとっては、最先端の研究に触れる貴重な機会となりました。中村氏には「格子QCDシミュレーション入門」というタイトルで講義をしていただきました。格子ゲージ理論とコンピュータシミュレーションについて、基礎的なところから丁寧に教えて下さり、コンピュータシミュレーションにあまり馴染みのない学生にとっても、親しみやすい内容でした。講義の終わりには「Lattice Tool Kit」を用いた数値計算の方法と実例を示して下さり、数値計算などを試みる良いきっかけになりました。

各講義が行われた日の夜には講師を囲む会が催されました。囲む会の運営には、素粒子論パート準備校（兼現象論講義録作成校）の神戸大学と、弦理論、場の理論の講義録作成校である北海道大学、金沢大学が当たりました。これ

には約半数の学生が出席し、講師の方との議論や歓談、学生同士の交流や意見交換を楽しむ姿が見られました。

夕食後に行われた研究会では、3日間で総勢23名の学生が、各々の研究や興味を持った事柄に関しての口頭発表を行いました。超対称性理論や重力理論など、様々な内容の発表があり、どの発表に対しても皆積極的に質問をしていました。講義をして下さった先生方にも出席していただき、発表者にとっても聞き手にとっても、大変刺激のある研究会になったと思います。また、学生主体の夏の学校ならではのユーモアを交えた発表もあり、時折笑い声上がるなど、3日間とも終始良い雰囲気の研究会になりました。

最後になりましたが、お忙しい中、我々学生のためにこの夏の学校で講義をして下さり、また、講義録の作成ならびにWeb上での公開を快諾下さった、林青司氏、土屋麻人氏、中村純氏に、心より感謝いたします。

2.1.2 原子核パート

原子核パートでの講義は、原子核分野、ハドロン分野、実験分野の最前線の研究をそれぞれの専門分野で活躍されている講師の方々に話していただきました。北海道大学の木村真明氏からは「中性子魔法数の破れと変形共存現象」というタイトルで原子核分野の講演をしていただきました。講義の前半では、数々の実験による観測量から、不安定核が持つ特異な構造に関してどのような知見が得られるのか、理論模型によってどのように求められるのか説明をしていただき、後半では中性子魔法数の破れと変形共存現象に注目し、現在得られている実験情報と理論研究の結果と将来の展望に関して解説をしていただきました。大阪大学の北澤正清氏からは「有限温度・有限密度QCD入門」というタイトルでハドロン分野の講演をしていただきました。前半はQCDや有限温度場の理論等の基本概念について解説していただき、後半は、QCD物性に関する理解の現状を、冷却原子系等物性物理との関連などに注目しながら核実験を通して概観をする内容となりました。広島大学の志垣賢太氏からは「高エネルギー原子核衝突を用いた極限状態の実験的探究」というタイトルで実験分野の講演をしていただきました。2000年稼働の米国RHIC加速器における成功と2009年稼働のCERN LHC加速器における初期成果を研

究施設の概要から説明していただき、現在活発に議論が行われている話題に焦点を当て技術的側面を含めて話をさせていただきました。

学生が主体となる研究会では、口頭発表者24名、ポスター発表者20名と多くの参加者が発表しました。修士2年の方を中心に、核構造や核反応、ハドロン分野について理論実験両分野とも活発な議論が交わされました。研究会にはレビュートーカーとして、理化学研究所の鷺山広平氏とKEKの関原隆泰氏に参加していただきました。鷺山氏には「微視的反応モデルによる低エネルギー重イオン反応」というタイトルで、時間依存ハートリーフォック理論を用いた結合チャンネルモデルにおける低エネルギー物理に関する話をしていただき、関原氏には「カイラル動力学で生成されるハドロン共鳴状態とその構造」というタイトルで $\Lambda(1405)$ の共鳴状態をカイラル動力学の観点から考察していく話をしていただきました。また、懇親会にも講師の方も含め多くの方が参加し、各々が大学を超えて親睦を深め合うことができました。

2.1.3 高エネルギーパート

高エネルギーパートは、8月4日から7日の日程で開催されました。前年度のパート総会で話し合った結果に基づき、2013年度は例年度より1日短縮した日程でした。高エネルギーパートは例年、他パートよりも人数が少なく、実験期間等によりまとまった時間が取りにくいといった意見が出たことが主な理由です。

8月4日は午前、午後と分けて合計12人の参加者が自身の研究内容について発表しました。発表内容は宇宙暗黒物質を探索するためのXMASS実験、原子核乾板を用いた暗黒物質、ニュートリノ実験、OPERA実験、J-PARK、KOTO実験、高エネルギー加速器実験のための検出器の開発やX線天文学に関する話まで非常に多岐にわたりました。各々が日頃の研究成果をわかりやすく発表しており、普段接することの少ない他分野の研究についても幅広い知識を得るとても良い機会になりました。

8月5日には東北大学ニュートリノ科学研究センターから古賀真之氏をお招きし、「大型二重ベータ崩壊観測実験の近況」と題して二重ベータ崩壊について講義していただきました。ニュートリノがマヨラナ粒子であれば、二重ベータ崩壊で生じた2つのニュートリノが対消滅する可能性

があるため、1960年代からニュートリノのマヨラナ性を検証する実験としてニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索が行われてきました。二重ベータ崩壊の発生機構等の基礎から始まりカムランド禅実験の近況、後半には世界各国での実験についてわかりやすく、かつ先生の実体験も踏まえてお話ししていただきました。

8月6日には東京大学素粒子物理国際研究センターから山下了氏をお招きし、「国際リニアコライダー計画～目指す物理、計画概要と現状～」と題して講義をしていただきました。国際リニアコライダー計画は世界が協力して技術開発と計画推進を進めてきた電子と陽電子のエネルギーフロンティア実験です。同月に国内の候補地が決まるという大変お忙しい時期にも関わらず快く引き受けて下さり、加速器とは何ぞやという話からホットな話題を含めた貴重なお話を伺うことができました。また、今後研究を進めていく上での様々な助言もいただきました。

研究会後の講師を囲む会では、今回は日程の都合上講師の方をお誘いすることができませんでしたが、参加者間でお酒を酌み交わし交流を深めました。遠いところお越しいただいた講師のお二方、参加いただいた学生の皆様、本当にありがとうございました。

3 最後に

上記の活動を通じて、三分野の多くの大学院生がそれぞれに知識を深め、さらに今後の研究活動で生かされるであろう若手同士の繋がりを得ることができました。そしてこの夏の学校が、物理学の今後の発展に貢献するものとなったと信じています。2013年度原子核三者若手夏の学校は基礎物理学研究所研究会であり、基礎物理学研究所・素粒子論グループ・原子核談話会のご後援のもと運営され、成功のうちに終わらせることができました。ありがとうございました。

非会員著者の紹介

富谷昭夫氏： 大阪大学理学研究科物理学専攻博士後期課程。素粒子論、QCDなどのゲージ理論の相構造に興味がある。

青木 新氏： 神戸大学理学研究科物理学専攻素粒子論研究室M1。宇宙論、特に、インフレーションを通してマイクロな世界を探求することに興味がある。

(2013年11月2日原稿受付)

2013年度ノーベル物理学賞： F. Englert 氏， P. W. Higgs 氏—素粒子の質量の起源に 関する機構の理論的発見

九後汰一郎* (京都産業大理)

2013年度のノーベル物理学賞は、ブリュッセル自由大学のFrançois Englert氏とエディンバラ大学のPeter W. Higgs氏との二人に、「素粒子の質量の起源に対する我々の理解に貢献した機構の理論的発見」に対し、授与された。

この授賞理由の「機構」には関係詞節が続いていて、「予言された基本粒子が、CERNのLHC(大ハドロン衝突型加速器)におけるATLAS実験およびCMS実験によって最近発見され、立証された」機構、と説明されている。

この予言された基本粒子とは、今日ヒッグス粒子と呼ばれる(スピン0)スカラー粒子のことである。ヒッグス粒子は、1970年代に成立した素粒子の標準模型において、特別な地位を占める。

標準模型では、クォークやレプトンのディラック場が皆、左手型成分が2重項で右手型成分が1重項と、弱アイソスピンSU(2)_wのゲージ対称性の異なるタイプの表現に属しているため、ゲージ対称性を保つ質量項は存在しない。また、ゲージ場自身もゲージ対称性がある限り質量項が存在しない。それ故、標準模型ではゲージ対称性が壊れない限り、物質粒子も力を媒介するゲージ粒子も質量を持っていないのである。そこで、標準模型に含まれる唯一のスカラー場である、SU(2)_w 2重項のヒッグス場が自発的に真空期待値を得ることによってゲージ対称性を破る。ヒッグス場が期待値を持つと、ヒッグス場の共変微分運動項がゲージ場の質量項を与え、クォーク・レプトンとヒッグス場との湯川結合項がクォーク・レプトンのディラック質量項を与える。

このようにして標準模型での基本的な粒子は、全てがヒッグス場によって

質量を与えられる。このことが、巷ではヒッグス場が「神の粒子」と名付けられる所以である。

正確には、ヒッグス場は、ゲージ場に質量を与えて吸収されてしまう非物理的粒子の成分と、真空期待値の揺らぎの自由度に相当する質量を持つ物理的粒子の成分とを含み、「ヒッグス粒子」と呼ばれるのは後者の物理的粒子の方である。今回LHCの実験で存在が確認されたのは、もちろんこのヒッグス粒子である。

今回のノーベル賞は、「ヒッグス粒子の発見によって立証された機構」の提唱者に与えられたので、一般には「神の粒子=ヒッグス粒子を理論的に予言した業績に対して与えられた」という大雑把な理解が流布しているが、正確には、そうではない。「素粒子の質量の起源に対する我々の理解に貢献した機構」を理論的に発見した業績に対してなのである。

実際、授賞対象の1964年のEnglert-Broutの論文では、主な関心は「ゲージ場がゲージ不変性と矛盾せずに質量を持ちうるか?」という点にあり、有質量で残るヒッグス粒子についてはあらわには触れていない。当時、強い相互作用をするハドロンの中で、 ρ メソンや ω メソンなどのベクトル中間子をヤン・ミルズ場で記述しようとするJ.J.桜井の試みなどが注目を集めていたが、その質量項は手で加えられゲージ不変性があからさまに壊されていたからである。

彼らの論文では、先ず一番簡単な複素スカラー場 ϕ のGoldstone模型に電磁場を結合させた系(超伝導のGinzburg-Landau模型の相対論版)を議論した。そこで、複素場 $\phi(x) = (\phi_1(x) + i\phi_2(x))/\sqrt{2}$ のポテンシャル項 $V(\phi)$ がワインボトルの底のような形を持っていると、場 $\phi(x)$ はゼロでない真空期待値をとる。U(1)ゲージ不変性から、 V の値はワインボトルの底 $|\phi|^2 = (\phi_1^2 + \phi_2^2)/2$ が一定の円周上、で縮退しており、真空は円周上のどこを選んでも良いが、どこかを選ぶのでU(1)対称性を自発的に破る。実部 ϕ_1

に期待値 $\langle\phi_1\rangle \neq 0$ を生じるとすると、その期待値に直交する虚部 ϕ_2 は、U(1)回転で動く方向なのでポテンシャルの値が変化せず、質量ゼロの粒子を記述する。 ϕ_2 はU(1)の自発的破れに対応した南部-Goldstone (NG) 粒子を与える。

さて、このU(1)対称性が局所ゲージ不変性に「昇格」した今の模型では、スカラー場の共変微分 $D_\mu\phi = (\partial_\mu - ieA_\mu)\phi$ で書かれた運動項 $|D_\mu\phi|^2$ から、場の2次の“相互作用項”

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = m\partial_\mu\phi_2 \cdot A^\mu + (m^2/2)A_\mu A^\mu \quad (1)$$

を生じる。ただし $e\langle\phi_1\rangle = m$ と記した。これらの相互作用項は、ゲージ場 A_μ の自己エネルギー $\Pi_{\mu\nu}$ に、摂動の最低次で

$$\Pi_{\mu\nu} = m^2(g_{\mu\nu} - k_\mu k_\nu/k^2) \quad (2)$$

の寄与を与える。この第1項は、(1)式第2項の寄与であり、確かにゲージ場の質量項の形をしている。第2項は、(1)式第1項のNG場 ϕ_2 と A_μ の遷移相互作用項を通じて A^μ が ϕ_2 に転化して伝播するグラフの寄与である。Englert-Broutの強調したのは、この自己エネルギーがカレント保存則(ゲージ不変性) $k^\mu\Pi_{\mu\nu} = 0$ を満たすことである。このためには、第2項の $1/k^2$ の極が必要であったのだが、それが質量ゼロのNG粒子 ϕ_2 の伝播グラフで与えられたのである。かくして、ゲージ場はゲージ不変性と矛盾せずに質量を持つこと、そのためにゲージ対称性の自発的破れに伴うNG粒子の存在が本質的であることが示された。

しかし、(2)式で $1/k^2$ の極を与えた質量ゼロのNG粒子は物理的粒子として出てこないのか?という重大な疑問について、Englert-Broutの論文は、全く触れていない! そもそもゲージに依るフォトン伝播関数を計算していない。後の1966年刊行のEnglert-Brout-Thiryの論文では、ランダウゲージを採用し、(2)式の自己エネルギーの寄与が分母に回ったフォトン伝播関数

$$\langle TA_\mu A_\nu \rangle = \frac{g_{\mu\nu} - k_\mu k_\nu/k^2}{k^2 - m^2} \quad (3)$$

* 益川塾

を得ている。著者達は、極 $k_\mu k_\nu / k^2$ は、質量ゼロのNG粒子の寄与であることを指摘した上で、「それは常に $k_\mu k_\nu$ に比例する形で保存カレントに結合しているので、観測されない」とあっさりと言っている。このことはそれ程単純ではない。U(1)群の場合なら非自明な議論で証明可能であるが、彼らの議論の主なターゲットのSU(3)等の非可換群のヤン・ミルズ場の場合、実は正しくない。このゼロ質量NG粒子が出てくる確率はゼロにはならず、Faddeev-Popovゴーストが出る確率と相殺するということが後々の発展でわかる。

ローレンツ共変なゲージでやる限り、質量ゼロのNG粒子は必ず現れる、のである。これは、Goldstoneの定理の帰結であり、相対論的な場の理論では、この定理が非常に単純明快に証明されているので、「NG粒子を逃れられる」かどうかは当時大きな問題であった。しかし、Englert-Broutは、そのことを余り深刻に問題にしなかった、ということが成功の要因であった。

非相対論的な物性系においては、超伝導におけるゲージ不変性を議論した1960年の南部の論文でもすでに認識されていたように、クーロン相互作用の下で電子ガスの集団励起モードが有質量のプラズモン・モードとなるように、超伝導でのNGモードは電磁場の縦波となって、電磁場が質量を持ちマイスナー効果が起こる。Andersonはこのことを1962年の論文で再度吟味し、相対論的な場合には、ゲージ場がスピン1の有質量ベクトル粒子になるはずだと結論した。

1963年にA. KleinとBen Leeは、非相対論的なシステムでGoldstoneの定理を詳細に分析し、逆に相対論的系でもNGモードを逃れることが可能である、と示唆した。が、すぐさま、W. Gilbertにより、相対論的系では運動量 k^μ 以外の4ベクトルが存在しないのでそれは無理だと反論された。

これに対し、まさにゲージ理論は、相対論的な系でありながらローレンツ共変でない定式化が可能である、と気づいたのがHiggsである。電磁気学のクーロンゲージでは、電磁場の

空間成分に対する横波条件 $\nabla \cdot \mathbf{A} = \partial_\mu A^\mu - (n^\mu \partial_\mu)(n^\nu A_\nu) = 0$ を課すので、特定の4ベクトル $n^\mu = (1, \mathbf{0})$ が存在する。このためKlein-Leeの指摘通りゼロ質量NG粒子を逃れることができると指摘したのが、HiggsのPhys. Lett.の論文(1964年7月27日受理)である。この論文は非常に短く、極めてわかりにくい、少なくともクーロンゲージでは ϕ_2 のNG粒子が現れないことを初めて真正面から示した論文である。これだけだと、逆に、ゲージ場が質量を持つようになるとか、真空期待値の方向の揺らぎモード ϕ_1 が有質量の物理的粒子=ヒッグス粒子を与えよとか、の話が無い。Higgsは、一週間後にそれらのことを古典場の理論の枠内で証明する論文を書く。しかしこれはPhysics Lettersから掲載不可とされたので、少し改訂した版をPhys. Rev. Lett.誌に投稿(8月31日受理)し直し、掲載決定された。この時Higgsはレフェリーから、ほぼ2ヶ月前の6月26日に同誌に投稿されたEnglert-Broutの論文を知らされ、コメントするよう促された。彼は、20年後の1984年にある会議で南部に会い、この時のEnglert-Brout, Higgsの両論文のレフェリーが南部であったことを明かされたという。

議論を古典場の理論の枠内に限ったのは、そこではNG場である ϕ_2 をあからさまにゲージ場に吸収する変数変換ができたからである。今様の言い方をすれば、くり込みのできないユニタリーゲージの変数を採ったことに相当し、ゲージ不変な場のみで書かれるため理論の物理的内容が見やすい、わかりやすい論文になった。

くり込み可能な共変ゲージで、必ず現れるNG粒子が実際に非物理的粒子であり、物理的空間には現れない、ということを最初に示したのは1967年のT. W. Kibbleの論文¹⁾である。物理的部分空間を、Schwinger流の汎関数補助条件やGupta-Bleuler流の補助条件で指定し、それを証明している。益川敏英は「Kibbleの論文が出て初めてHiggs機構がわかった」と言っている。しかし厳密に言えば、Schwinger流の補助条件は強すぎるし、Gupta-Bleulerの補助条件は今のモデルで一番簡単な

(ダイポールゴーストの出ない) Landauゲージでは使えない、という問題がある。これがU(1)ゲージ理論の場合でも完全な議論になるには、中西裏によるダイポールゴースト場の量子化や中西-Lautrupの補助条件の理論²⁾まで待たねばならない。非可換群のヤン・ミルズゲージ理論の場合は、Faddeev-Popovゴースト、くり込み、BRST対称性と補助条件、などの後々の発展を待って初めてきちんとした理解に到達できるのである。

参考文献

- 1) T. W. B. Kibble: Phys. Rev. **155** (1967) 1554.
- 2) N. Nakanishi: Prog. Theor. Phys. **49** (1973) 640.

(2014年1月2日原稿受付)

2013年度ノーベル化学賞： M. Karplus 氏, M. Levitt 氏, A. Warshel 氏 — 複雑な化学系のマルチスケールモデルの開発

諸熊奎治(京大)

2013年度ノーベル化学賞はマーチン・カープラス(M. Karplus, ハーバード大学, ストラスブール大学), マイケル・レヴィット(M. Levitt, スタンフォード大学), アリエ・ウオーシエル(A. Warshel, 南カリフォルニア大学)の3氏に“複雑な化学系のマルチスケールモデルの開発”に対して授与された。

理論化学・計算化学の分野での受賞は、1998年のウォルター・コーン(W. Kohn)とジョン・ポープル(J. A. Pople)以来15年ぶりであり、この分野の研究者として大変大きな喜びである。この30年余をとっていても、この分野からの受賞はほかに、1981年の福井謙一とロアルド・ホフマン(R. Hoffmann)および1992年のルドルフ・マーカス(R. Marcus)を数えるのみで、大変寂しい思いをしてきた。理論と実験が手を取り合って発展してきた物理学と違い、伝統的に経験の学問であった化学では理論化学が市民権を得るにはずいぶん長い時間がかかった。量子力学は1927年にはハイトラウと

ロンドンによって化学結合の説明に取り入れられた。以来今日まで多くの理論化学研究者の努力によって複雑な化学系を効率よく取り扱う理論的方法が開発され、コンピュータの高速化と相俟って、最近では化学のあらゆる分野で、理論化学・計算化学の寄与なしには研究が進まなくなっている。

授賞理由の発表によると、『本年度の受賞者は、古典力学および量子力学理論の両者に基づいた、巨大な複雑化学系をモデル化するのに使われる方法論を開発した。複雑分子の重要な中心部はより精度の高い量子力学を用い、周辺部はより計算の容易な古典力学で取り扱い、両領域間の相互作用をうまく取り入れることで、複雑分子全体の化学的性質を記述しようとした。』となっている。引用されている最も重要な論文は次の2報である。A. Warshel and M. Karplus: *J. Am. Chem. Soc.* **94** (1972) 5612 および A. Warshel and M. Levitt: *J. Mol. Biol.* **103** (1976) 227. 1972年の論文は、古典力学と量子力学を組み合わせて分子の構造やエネルギーを表そうとする原始的ではあるが最初の論文とされている。ここでは、分子の基底状態と励起状態のポテンシャル面を記述する為にシグマ電子とパイ電子を分離し、前者は経験的な結合距離や結合角と結合のねじれ角に依存するポテンシャル関数(古典力学)で表し、後者はPariser-Parr-Pople (PPP)法と呼ばれる半経験的な量子力学的方法で表し、有機共役分子の基底状態と励起状態の幾何構造と振動構造を計算に應用している。実は古典力学と量子力学を組み合わせて分子の構造やエネルギーを表そうとする最初の論文は、パイ電子をヒュッケル法で、シグマ電子は原子対間非結合ポテンシャルで表したB. Honig and M. Karplus: *Nature* **229** (1971) 558であると思われるが、なぜか受賞理由の引用文献の中にこの論文は無く、無視されている。1976年の論文では、分子を量子力学部分と古典力学部分にわけ、分子全体のエネルギー V を $V = V_{\text{classical}} + V_{\text{quantum}} + V_{\text{quantum/classical}}$ (古典部分、量子部分および両者間の相互作用の和)で表すことを提案した。この“加算”方式はその後、量子力学/

分子力学(QM/MM)法と呼ばれる複雑分子系の計算によく使われるマルチスケール法の一般式となった。この論文では、量子力学としては半経験的自己無撞着法を用い、分子力学(古典力学)としては、結合距離、結合角、ねじれ角、ファンデルワールス相互作用、静電作用の和で、また、量子/古典相互作用はファンデルワールス相互作用と静電作用の和で表す。この論文では、提案したQM/MM法をあまりテストもせず、勇敢にリボザイムの反応におけるカルボニウムイオンの誘電的、静電的、立体的安定性の計算に使っている。

その後理論的方法論の開発とコンピュータの高速化によって、1970年代とは比べ物にならない高精度の理論計算が可能になったが、それでもすべての複雑な化学の諸問題を量子力学のみで計算することは不可能である。その後も、量子力学と古典力学を組み合わせたマルチスケールな方法論が、触媒、化学材料、生体分子など複雑分子系の理論化学的研究を大きく発展させる原動力となった。今回の授賞にこのような応用研究が含まれていないのは、残念というほか無い。今後、化学の研究に大きなインパクトを与えつつあるこの分野の寄与がより頻繁に認められることを祈っている。

2013年化学賞に関するノーベル委員会の科学的背景の説明には、さらにより正確なモデルや応用に関してこの分野に貢献した人々として、ガオ(J. Gao, ミネソタ大, 半経験的QM/MM法, 1996)、マセラス(F. Maseras)と諸熊(エモリー大, IMOMM法, 1995)、シン(U. C. Singh)とコールマン(P. A. Kollman (故))(カリフォルニア大, ab initio QM/MM MD法, 1986)、セン(H. M. Senn, グラスゴー大)とティール(W. Thiel, マックスプランク研)(QM/MM, バイオ, 2009)の7人をあげている。2013年3月ストラスブルグで行われた“複雑分子系の化学理論”国際会議では、このうちの3人もカープラスとともに講演した。

諸熊らのIMOMM法、その一般形ONIOM法は、分子を全体系とその一部であるモデル系にわけ、高レベルと低レベルの2つの方法を用いて3つの

計算を行い、分子全体のエネルギー V をこれらの“差分”あるいは“外挿”法で $V = V(\text{model, high}) + V(\text{real, low}) - V(\text{model, low})$ と表すもので、QM/MM法の“加算”法と発想が違う。ONIOM法では、QMとMMも組み合わせだけでなく、異なる近似のQMとQMの組み合わせQM: QMや三層のQM: QM: MMも可能で、古典力学では精度が充分でないような系で便利に利用されている。

カープラス教授は、1930年オーストリアのウイーンで生まれ、ナチスに追われて8歳の時に家族とともにボストンに移住した。3歳年上の兄ロバートは、後に著名な物理学者となり、量子電磁力学(QED)を用いた電子の磁気能率の計算と、子供達への物理学教育への貢献がよく知られている。マーチンは幼少の頃からこの兄の影響を大きく受けて科学に興味を持ち、高校時代は特に野鳥の観察に熱中して、17歳で初の科学論文M. Karplus: *Massachusetts Alcidis* (ウミガラス) (*Bull. Mass. Aud. Soc.* **31** (1947) 21, 119, 151)を発表している。ハーバード大卒業、カリフォルニア工科大学でポーリング(L. Pauling)教授の下で博士号を取得、オックスフォード大学でクールソン(C. Coulson)教授の下で博士研究員をへて、1955年イリノイ大学、1960年からコロンビア大学、1966年からハーバード大学教授である。カープラスの研究は、研究場所を変えるごとに、実験からの要請をうけて全く新しい理論化学の研究分野を無から開発することに特長がある。イリノイ時代には分子の電子状態、特に分子の核磁気共鳴(NMR)の理論研究を行い、特に分子中のHCCH部分のプロトン-プロトン結合定数の2面角依存性を表すカープラス式は50年をへた今でもタンパク質のNMRにおいて主鎖のねじれ角の決定に使われている。コロンビア時代には、化学反応中の原子運動を古典力学で記述するいわゆる古典トラジェクトリー法を用いて、当時分子線などの新しい実験手法によって大きな発展があった $H + H_2$ や $K + CH_3I$ などの化学素反応の動力学(Molecular Dynamics, MD)の研究を行い、この分野に大き

なインパクトを与えた。筆者がカープラス研究室に博士研究員として招かれたのもこの頃で、反応動力学と遷移状態理論の関連などについて研究をし、また、世界で始めて古典トラジェクトリーの結果を16mm映画に記録した。ハーバードに移動してからは、1970年に、子供の頃からの夢に回帰するとして、それまでほとんど手のついていなかった生体分子系の動力学と反応の理論研究に転向し、QM/MM法の開発のほか、分子力学を使ったタンパク質の古典動力学(MM MD)計算などに多くの独創的な方法論の開発と応用を行った。多くの人が、生体分子系の動力学と反応の理論研究で彼がノーベル賞をもらうべきだと思っていた。彼の自伝：M. Karplus: "Spinach on the Ceiling; A Theoretical Chemist's Return to Biology" (Ann. Rev. Biophys. Biomol. Struct. 35 (2006) 1) は、彼の幼少の頃からの天才ぶりと優れた研究者との多くの出会いが描かれていて、一読をお勧めできる。

ウオーシェル教授は、1940年イスラエルに生まれ、ワイツマン研究所でPh.D.、カープラスのもとで博士研究員、ワイツマン研究所とケンブリッジ大で研究員をした後、1976年から南カリフォルニア大の教授である。その後、主に半経験的な量子力学を使っ

たQM/MM法を武器に、タンパク質による酵素反応機構の研究に顕著な成果を上げている。著者とはハーバードでは重なりはなかったが、同門として学会や南カリフォルニア大訪問の際にしばしば会って親しい。

レビット教授は、1947年南アフリカ生まれ、ケンブリッジ大でPh.D.、ワイツマン研究所で博士研究員としてウオーシェルと共同研究を行った。同研究所で教授の後、1987年からスタンフォード大教授である。マルチレベルの研究に対する寄与は最初の論文以来ほとんどないが、タンパク質のフォールディングやパッキングに関するMMおよびMDによる研究で成果を上げている。

(2013年12月1日原稿受付)

第1回湯浅年子賞「金賞」： 市川温子氏

中家 剛〈京大院理〉

京都大学大学院理学研究科の市川温子氏が「第1回湯浅年子賞「金賞」」を受賞しました。受賞の業績は「ニュートリノ振動実験への寄与」で、2013年に新しいタイプのニュートリノ振動を発見した加速器ニュートリノ実験

(T2K実験)への多大な寄与が認められました。

「湯浅年子賞」は「お茶の水女子大学賞」の一つとして、国際的に活躍した女性物理学者である湯浅年子博士の自然科学に対する功績を記念して設立されました。受賞対象者は、自然科学の諸分野において顕著な研究業績をあげた女性です。この名誉ある第1回金賞を物理学者が受賞したことは、物理学界において朗報です。

市川氏の主たる業績は、T2K実験で「ニュートリノビーム生成法の研究」を進展させ、「ミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動の発見」に大きく寄与したことです。発見そのものはT2K実験グループ全体の成果ですが、市川氏がデザインしたニュートリノビーム生成器が決定的に重要な役割をはたしました。その業績は世界的に広く認められています。

市川氏の研究姿勢は、湯浅年子博士が信条としていた『Jusqu'au bout, 最後まで徹底的に』と合致しています。氏は老若男女に分け隔てなく接するとても明るい性格で、物理の分野をさらに活性化させることのできる、日本を代表する女性科学者です。市川氏の今後の一層のご活躍を祈念しています。

(2014年1月7日原稿受付)

新著紹介

S. Weinberg

Lectures on Quantum Mechanics

Cambridge Univ. Press, New York, 2013, xix + 358p, 25 × 18 cm, \$75.00 [大学院・学部向]
ISBN 978-1-107-02872-2

藤川 和男 〈理研仁科セ〉

Weinbergが書いた量子力学の教科書ということで、一体どのような教科書なのだろうか、一昔前のLandau-Lifshitzの『古典力学』とか『場の古典論』のような全く斬新な見方から量子力学を再構成しているのだろうか、と考えながらページを開いた。最初目次を見て非常に手堅い教科書という印象

を持ったが、読んでみると過去の教科書にないトピックスも多く含まれており所々に工夫が見られた。また類書には見られない量子力学の解釈(コペンハーゲン解釈)に対するかなり詳細な個人的見解が与えられており期待に反しない楽しい書物である。評者の個人的な経験になるが、Weinbergのカイラ

ル対称性の自発的な破れに関する講義を1970年のBrandeis大学での夏の学校(大学院生から博士研究員向けのもの)で聞いたときに、驚く程手堅く一步一步計算をして、学生に分からせながら講義をしていたことを思い起こした。その意味では、この教科書はWeinbergらしい実際に計算して納得できることに重点をおいて親切に書かれた教科書と言える。いわゆるヒッグス機構を用いて、電磁相互作用と弱い相互作用の統一理論を提案するという大きな業績を上げた研究者ではあるが、そのスタイルはFeynmanとかLandau

とは違っている。

著者も最初に書いているように、標準的な量子力学の教科書としては Dirac によるものと Schiff によるものがある。Dirac の教科書は量子力学とは何かがわからなくなった時に読むと明快になり、Schiff の教科書はひたすら量子力学に地道に慣れるというスタイルである。Weinberg が本書で提案しているのは、過去の教科書の内容を整理して論理的に理解しやすい形に再構成し、同時に最近の量子力学の基礎に関係した発展およびこれまでに取り上げられなかったテーマ（例えば対称性の考察等）を加えて、現代的な視点から統一的に議論することである。レベ

ルはアメリカの大学院での1年間の講義を想定している。日本で言えば、残念ながらこのレベルの講義はないが、学部の4年生レベル以上の学生が直接の対象と言える。（余談になるが、日本の大学院での基礎科目の講義は今後大いに工夫する必要がある。）本書の記述は、理路整然としており Weinberg らしく明快で見事である。断熱位相（Berry 位相）とかエンタングルメント等も簡潔に説明されているが、Weinberg によるこれらのテーマの批判的な評価を含むより詳細な解説が将来期待されるところである。

シュレーディンガー方程式との類推で Dirac 方程式を議論するのは、その

本質の理解には繋がらないという理由で、Dirac 方程式を本書では一切議論していない。著者の言う通りであるが、他方 Dirac 方程式による水素原子の解とか最近物性物理で重要なスピン・軌道結合の自然な導出等は他の教科書を参照する必要がある。

本書は量子力学を勉強する学部高学年から大学院の学生に新鮮な構成の教科書を提供すると同時に、今後日本人の研究者が教科書（過去にも力作が見られたが）を書くときにも大いに参考になるのではないかと。

（2013年9月3日原稿受付）

加藤岳生

ゼロから学ぶ統計力学

講談社、東京、2013、222p、21×15 cm、本体2,500円（ゼロから学ぶシリーズ）

[学部・一般向]

ISBN 978-4-06-154676-9

小林晃人（名大院理）

本書は統計力学の基本をわかりやすく解説することに特に注意を払われたうえで、幅広い読者が興味をもって読み進められるようにさまざまな工夫のなされた入門書である。

本文は語り口調の生きた言葉の講義形式によって進められる。エルゴード仮説、N次元超球の体積、位相空間など初学者が躓く原因になりやすい言葉は出てこない。それでいて平易な例や挿絵を多用することにより、さりげなく必要な知識は導入され、最終的に統計力学の骨格に当たる部分はすべて説明される。すなわち著者の言葉を借りれば「初学者にとって難解な言葉の使用をできるかぎり避け、これだけわかっているならば統計力学は大丈夫という内容を厳選した」教科書となっているのである。また講義形式の本文の合間に「おもしろゼミナール」と題された会話形式のコーナーが織り込まれている。ここではエルゴード仮説など本文では避けられた言葉がわかりやすく説明され、統計力学におけるそれらの概念の位置付けが理解できるようになっている。またこのコーナーでは物理学者の

生態が学生の視点から描かれ、物理学者に対する親しみや興味を引く内容となっている。

本書は前提知識をできるかぎり必要としないように工夫がなされている。必要となる知識は高校までの物理の知識と大学初学年程度の微積分の知識だけである。多くの教科書では熱力学を基礎として統計力学に進む。しかし本書の重要な特徴の一つは、すべての熱力学の関係を統計力学の考え方のみから導く点にある。熱力学が不要だということではないが、熱力学で培われた概念を背景としつつも熱力学の助けを借りず、統計力学の枠組みの中に埋め込まれた熱力学の関係式を掘り起こしてゆく。したがって読者は予備知識としての熱力学の前提知識を要求されないのである。やがて本書は気相から液相への相転移現象で締めくくられる。ここでも平易な例と挿絵が多用され、著者一流のくだけた語り口でわかりやすく解説がなされている。そして相転移現象は熱力学量に異常な振る舞いがでる場所であること、数学的に言えば熱力学関数が特異点を持っていること



が示される。この特異点を生じさせるメカニズムが統計力学に備わっていることの説明を以て、「統計力学のみがこの特異性を生み出せる学問である」という本書の結論にたどり着く。

統計力学に関する名著は多く、優れた教科書が刊行されているが、その中で本書は統計力学を初めて学ぶ人、最短経路で統計力学の知識を習得したい人、高校生で高校の数学や物理に飽き足らなくなっている人など、多くの読者のニーズに応えられるよう工夫がなされている。本書を読破したならば、さらに進んだ教科書を読みこなすこともできると思われる。物性を専門としない学生に対しての講義・指導にあたられている会員にもぜひ一度手に取っていただきたい良書である。

（2013年9月9日原稿受付）

ルドルフ・クラウジウス著，八木江里監訳，八木江里，林 春雄，依田 聖，岡本里夏共訳

クラウジウス熱理論 論文集；エントロピーの起源としての 力学的熱理論*

東海大学出版会，神奈川，2013，xxviii+369p，22×16 cm，本体4,000円〔専門向〕
ISBN 978-4-486-01946-6

佐々真一（京大院理）

「宇宙のエネルギーは一定である。宇宙のエントロピーは最大に向かう。」1865年に出版されたクラウジウスによる論文の結語がこの有名なフレーズである。この論文により、「エントロピー」という名前とその定義が与えられた。これらの事実は多くの文献で紹介されている。しかし、ずっと不思議に思っていたことがあった。現在の知識では、クラウジウス等式から熱に関係する状態変数を定義するのは直ちにできそうだが、歴史では11年かかっている。何故11年も必要だったのか。クラウジウス論文集の英訳を何度か眺めたことはあったのだが、全体像をつかめなままだった。いつか理解したいと思っていたときに日本語訳がついに出版された。背景や用語が分からないまま文脈を推測しながら読むときには、日本語で読める恩恵は極めて大きい。11年の謎を自分なりに理解して気持ちよくこの紹介記事を書いている。

このようなはっきりした動機があったとしても、一般的な物理学协会会员が最初から読むのはやはりつらいだろう。最初にとりあげられる1850年の論文では、カルノーの法則が検討されるが、「自由な熱」「潜んでいる熱」「内的な仕事」「外的な仕事」などの概念に面喰って先にすすむのは困難である。何はともあれ、まずは、山場の1865年の論文から読むのが良いように思う。その論文の前半では、クラウジウス等式が意味する積分可能条件の数学的帰結が議論されており、記号を少し変更すれば現在でも馴染みの話である。その後で、クラウジウス等式からかなり唐突にエントロピーが定義される（フェルミなどの伝統的な熱力学本と同じである）。これでは11年の謎が分からない。1854年の論文でクラウジウス等式に

関連して完全微分概念が述べられているし、積分可能条件を使ってクラペイロン＝クラウジウスの式が導出されているので、11年かかったのは数学の問題ではないだろう。

エントロピー導入に時間が必要だった理由を解く鍵は、エントロピーが定義された後で議論される10ページ程の「物理的表示」の説明にある。実は、この表示は1862年の論文で示されている。その論文では、最初に1854年のクラウジウス等式およびクラウジウス不等式の復習をし、「これらは厳密な数学的な証明がなされているとはいっても、それはなお理解されにくい抽象的な形を持っている。そこで、この法則のもたらす真の物理的な原因の探求に進みたいと思う。」と論文の動機を述べている。ただし、1862年の論文でも、物体に含まれる「状態変数としての熱量」や「熱によってされる内的小および外的な仕事」が使われるので、すらすら読めない。そして、「物体の分散度」という新しい量が導入される。これらの概念は現代には存在しないので、21世紀の読者には解釈が必要になる。まるでパズルを解くようである。しばらく格闘すると分かった。物体の分散度とは「構成要素の配置のエントロピー」に他ならない。そして、状態変数としての熱量は「構成要素の運動エネルギー」であり、熱の変換値と呼ばれているのは「運動量空間のエントロピー」である。つまり、1862年の論文でエントロピー概念が登場しているのである。1865年の論文で物体の分散度は「配列の変換値」と認定され、変換に相当するギリシア語を使ってエントロピーと名付けられたのだった。

それでは、1854年から1862年までの8年は何だったのか。この理由が1862年の論文の冒頭に記されている。「私の法則の残りの部分について（発

表を）今まで遅らせてきた。なぜなら物体に含まれる熱について現在まで広く行われてきた考え方と、明らかに異なる結果をそれがもたらすからである。したがって、それについて再検討することが望ましいと思われた。しかしながら、年とともにますます次のように確信するようになった。すなわち科学的基礎にもとづくより、むしろ大部分が慣習に基づいている。このような考え方にあまり大きな価値をおくべきではないと一。」状態量としての熱の概念と測定量の関係についての混乱が残っていたのである。例えば、クラウジウスは比熱と真の比熱を区別しようとしている。

今から考えれば何を迷っているのかわかりにくいかもしれない。しかし、歴史に沿って振り返ると、それまでであった慣習の一部を捨てるのが簡単でなかったことが分かる。この転回を抑えてから、冒頭の1850年の論文に戻れば、言葉の翻訳もある程度まで可能だし、当時の状況も分かるのではないだろうか。そして、抽象的な考察をしながらも、クラウジウスは、気液転移、蒸気機関、熱電効果などの具体例を念頭においていた。例えば、1856年の論文で蒸気機関において非補償変換（現在のエントロピー生成）を具体的に計算しているし、1853年の論文では熱電効果の考察をしている。輻射に関する1864年の論文の解説とともにこれらの論文も本書では紹介されている。

本書は、科学史の資料として、専門家および熱力学の愛好家が手に取るような本かもしれない。しかし、エントロピーが熱力学を超えて発展しようとしている21世紀に、その誕生ドラマに触れるのも楽しいと思う。この紹介記事に興味を持った方がいれば幸いです。

（2014年1月16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。

* 編集委員会注：本号「歴史の小径」欄に関連記事あり。

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/kejiban.html>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: kejiban@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)

■立教大学理学部物理学科助教

1. 助教1名
2. 理論物理学研究室
3. 理論物理学における宇宙物理学分野。物理学科専門科目を担当。
4. 2014年9月1日以降早期
5. 2015年3月31日迄、評価に基づき単年度契約で4回迄更新可
6. 博士号取得者(着任時迄の取得見込者含)
7. ○履歴書(連絡先、e-mail明記) ○研究業績リスト(査読誌、その他に分割) ○主要論文別刷5編以内(コピー可) ○研究業績概要(約1,500字) ○今後の研究計画と教育に対する抱負(約1,500字) ○照会可能者2名の氏名、所属、連絡先(電話、e-mail等)
8. 2014年4月18日(金)必着

9. ①171-8501東京都豊島区西池袋3-34-1 立教大学理学部物理学科 田口 真
②同学科 小林 努 tsutomu rikkyo.ac.jp
10. 封筒に「応募書類(理論物理学宇宙)在中」と朱書き簡易書留で送付。応募書類原則不返却。必要に応じて面接を行うことがある。提出された個人情報については、教員任用業務、連絡、手続の為のものであり、他の目的に使用することはない。

■高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所技術職員

1. 技師又は准技師1名
2. 中性子科学研究系
3. 物質構造科学研究所・中性子科学研究系に所属し、J-PARCにおいて中性子検出器システムの開発・保守の中核を担うと共に、中性子実験機器の運転・保守を行う。勤務地は東海キャンパス。
4. 2015年4月1日以降早期
5. なし
6. 中性子検出器について熟知し、開発する能力を有すること。物質科学実験用機器の運転及び保守ができ、特に実験を安全に行う為の対策を講じる能力があること。中性子を用いた物質科学研究についての基礎知識を有することが望ましい。
7. ○履歴書(履歴事項の後に公募番号、研究施設名称、e-mail明記) ○今迄の仕事の概要(経験業務は具体的にどのような装置・設備に関するものか。その中で担当した役割やアピールしたい点について具体的に記述) ○業績リスト、講演リスト ○志望動機及び抱負(A4,1枚以内) ○上記書類は履歴書を除き全てA4横書とし、各々別業として各業に氏名を記入
8. 2014年4月21日(月)17時必着
9. ①305-0801つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究機構総務部人事労務課人事第二係
②業務内容について:物質構造科学研究所 村上洋一 電話029-864-5589。提出書類について:総務部人事労務課人事第二係 電話029-864-5117
10. 封書に「技術職員公募(機構技術14-1)書類在中」と朱書き郵送の場合は書留送付。本機構は、男女共同参画を推進しており、女性の積極的な応募をお待ちしている。(http://geo.kek.jp/index.html)

■東京大学大学院工学系研究科准教授

1. 准教授1名
2. 物理工学専攻
3. 物性理論。広い意味での第一原理計算手法の開拓とそれによる物性科学と物理工学の推進。
4. 決定後早期
5. なし
6. 博士号取得者
7. ○履歴書 ○今迄の研究概要(約2,000字) ○研究・教育に対する抱負(約2,000字) ○業績リスト(論文、著書、総説等) ○国内外招待講演リスト ○教育実績 ○その他参考となる実績リスト(受賞・新聞発表、学会活動、社会貢献等) ○主要論文別刷又はコピー5編 ○推薦書(又は意見書)2通、又は照会可能者2名の氏名と連絡先
8. 2014年4月30日(水)
9. ①113-8656東京都文京区本郷7-3-1 東京大学工学系研究科物理工学専攻 鹿野田一司 電話03-5841-6830
kanoda ap.t.u-tokyo.ac.jp
10. 封筒に「教員応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付。応募書類原則不返却。連絡用e-mail明記のこと。

■筑波大学研究基盤総合センター助教

1. 助教(テニュアトラック教員)1名
2. 応用加速器部門/筑波大学数理物質系物理学域に所属し研究を行う。理工学群物理学類/数理物質科学研究科物理学専攻の教育を担当。
3. 筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門業務の維持管理と研究利用支援。既存の研究グループと協力し、原子核実験研究、ビーム利用研究、加速器の高度化を推進。
4. 決定後早期
5. テニュアトラック期間は5年。期間満了時迄に審査を行い、可とされた場合にテニュアを付与。
6. 博士号取得者又は取得見込者。第一種放射線取扱主任者の資格があるか取得の意思があること。
7. ○履歴書 ○研究業績リスト ○主要論文別刷5編 ○研究概要 ○研究計画と教育に関する抱負 ○その他特記事項 ○推薦書2通
8. 2014年5月2日(金)必着
9. ①305-8577つくば市天王台1-1-1 筑波大学研究基盤総合センター 新井達郎
②数理物質系物理学域 小沢 顕
ozawa tac.tsukuba.ac.jp

10. 封筒に「応用加速器部門助教 応募書類在中」と朱書し簡易書留で送付。応募書類不返却。

■理化学研究所研究系職員

[I]

1. 研究員(定年制職員)1名
2. 田原分子分光研究室
3. 先端的分光計測を開発・駆使して複雑分子系の基礎研究を行う研究者。
4. 2014年10月1日以降早期
5. なし(60歳定年)
6. 関連分野の博士号取得者。1年以上の海外研究歴を有することが望ましい。
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究業績一覧
○主要論文別刷5編以内 ○推薦書2通(最低1通は日本以外に籍を置く研究者からのもの) ○今迄に獲得した外部資金リスト ○今迄の研究概要と今後の抱負
8. 2014年5月23日(金)17時必着
9. 351-0198 和光市広沢2-1 理化学研究所情報基盤棟3階 外務・研究調整部研究調整課 rps-saiyo25 riken.jp
10. 封筒に「田原分子分光研究室研究員応募書類在中」と朱書し簡易書留又は書留で送付。

[II]

1. 研究員又は技師1名
2. 仁科加速器研究センター加速器基盤研究部
3. RIBF加速器の大強度化と高安定化に携わると共に、次期計画として検討中の超伝導線形加速器・超伝導マイクロトン開発の中心的役割を担い、大強度ビーム加速に特化した研究開発を行う。
4. 5, 8は[I]に同じ。
6. 理工学系の博士号取得者。加速器に関する研究・開発経験不問。研究員として応募される方は1年以上の海外研究歴を有することが望ましい。
7. ○履歴書(写真貼付) ○発表論文及び研究・技術開発業績リスト ○今迄の研究・技術開発業績概要(2頁以内) ○採用後の抱負(2頁以内) ○獲得した外部資金リスト ○主要論文別刷5編以内 ○現職の所属長を含む推薦書2通
9. ①351-0198 和光市広沢2-1 理化学研究所 外務・研究調整部研究調整課
②rps-saiyo25 riken.jp
10. 封筒に「加速器基盤研究部研究員(又は技師)応募書類在中」と朱書し簡易書留又は書留で送付。詳細は

http://www.riken.jp/careers/researchers/20140303_4/ 参照。

■大阪大学大学院基礎工学研究科物質創成専攻准教授

1. 准教授1名
2. 物性物理工学領域電子関連物理講座・強相関系理論グループ
3. 物性理論。学部では基礎工学部電子物理科学科・物性物理科学コースの教育を担当。着任後は強相関系理論グループの藤本聡教授と協力して教育研究を行う。
4. 決定後早期
5. なし
6. 学部及び大学院における講義が可能な方
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究業績リスト(競争的資金獲得状況、招待講演発表件数、受賞歴等含) ○主要論文別刷5編迄(コピー可、投稿中可) ○今迄の研究概要(約2,000字)と今後の研究計画書(1,000字以上) ○教育についての抱負(1,000字以上) ○照会可能者2名の氏名、所属、連絡先(外国籍研究者も可) ○以上の文書を印刷した紙媒体1部と電子ファイル(pdf形式)を収録したCD又はDVDを1枚提出
8. 2014年5月31日(土)消印有効
9. 560-8531 豊中市待兼山町1-3 大阪大学大学院基礎工学研究科物質創成専攻領域 井元信之 電話06-6850-6445 imoto mp.es.osaka-u.ac.jp
10. 封筒に「准教授応募」と朱書し簡易書留で送付。提出書類原則不返却。

■東京理科大学理学部2部物理学科助教

1. 助教2名
2. 物性理論：鈴木彰研究室、物性実験：趙新為研究室
3. 物性理論：鈴木彰教授と協力して研究室のテーマに沿った理論研究を行う。物性実験：趙新為教授と協力して研究室のテーマに沿った実験・理論の研究を行う。理学部2部物理学科における学部演習授業や研究室の運営に関わる諸事項を行う。
4. 2015年4月1日以降早期
5. 当学科では着任時から5年を目処に転出。
6. 博士号取得者か着任迄の取得見込者。経験は不問だが、研究・教育に意欲のある方。
7. ○履歴書(写真貼付) ○業績リスト ○主要論文別刷3編以内 ○研究業績

概要(A4, 2頁) ○今後の研究計画及び教育に対する抱負(A4, 2頁) ○推薦書1通(宛先に直送) ○照会可能者1名の連絡先

8. 2014年6月1日(日)
9. 162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3 東京理科大学理学部2部物理学科 鈴木 彰 電話03-3260-4271 Fax 03-5261-1023

■東京理科大学理工学部教員

1. 准教授又は専任講師2名
2. 物理学科
3. 実験的研究。「強相関電子系の物理」「光物理」の分野において各1名。
4. 2015年4月1日
5. 65歳定年制
6. 博士号取得者。私学教育の現状を理解し、着任後、独立した研究室を運営し、学部及び大学院の教育と研究に熱心に取り組める方。
7. ○応募する専門分野と研究分野を表すキーワード5個以内 ○履歴書(e-mail明記) ○研究業績リスト(原著論文、外部資金獲得リスト等) ○主要論文別刷5編以内 ○研究概要(約2,000字) ○研究計画(約2,000字) ○教育経験及び教育に対する抱負(約2,000字) ○照会可能者2名の連絡先
8. 2014年6月16日(月)必着
9. ①278-8510 野田市山崎2641 東京理科大学理工学部物理学科 浜田典昭
②hamada ph.noda.tus.ac.jp
10. 封筒に「人事応募書類在中」と朱書し簡易書留で送付。応募書類不返却。

■奈良先端科学技術大学院大学教授

1. 教授1名
2. 物質創成科学研究科
3. センシングデバイス
4. 2015年4月1日以降早期
5. なし
6. 博士号取得者。物理、化学、生物、電子工学等の分野にとらわれず、LSI、MEMS、TFT等の固体素子からバイオセンサーまで広く含めた領域において、センシングデバイスの高い研究実績を持ち、将来的には研究科内だけでなく、情報科学研究科又はバイオサイエンス研究科との連携に積極的に取り組めること。物質創成科学研究科の大学院生の教育と上記公募分野の最先端研究の推進に意欲的に取り組めること。
7. ○履歴書(本学所定様式：http://www.naist.jp/job/recruit_01_j.html 参照) ○

教育研究等業績一覧(本学所定様式:
<http://www.naist.jp/job/pdfs/youshiki04.doc> 参照) ○2名からの推薦状

- 2014年6月30日(月)必着
- 630-0192生駒市高山町8916-5 奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科 垣内喜代三 kakiuchi ms.naist.jp
- 封筒に「教員応募関係」と朱書き簡易書留で送付。

■東京大学物性研究所助教

[I]

- 助教1名
- 中性子科学研究施設(柴山研究室)
- 中性子散乱,特に小角中性子散乱法を用いたソフトマターの構造・ダイナミクスの研究に従事し,中性子散乱法の開発に意欲のある若手研究者希望. 中性子散乱経験不問. 全国共同利用に関連する業務(実験設備の維持・管理・改良,共同利用者の実験支援等)を分担.
- 決定後早期
- 5年,再任1回可(審査有)
- 修士課程修了,又は同等以上の能力者
- 履歴書(略歴可) ○業績リスト(重要論文に○印) ○主要論文別刷約3編(コピー可) ○研究業績概要(約2,000字) ○研究計画書(約2,000字) ○推薦の場合は推薦者が以上の書類及び推薦書を送付. 応募の場合は応募者が以上の書類を送付し,所属長・指導教員等が応募者についての意見書を直送.
- 2014年6月30日(月)
- ①277-8581 柏市柏の葉5-1-5 東京大学物性研究所総務係 電話04-7136-3207 [issp-somu kj.u-tokyo.ac.jp](http://www.issp.somu.kj.u-tokyo.ac.jp)
②柴山充弘 電話04-7136-3418 [shibayama issp.u-tokyo.ac.jp](http://www.shibayama.issp.u-tokyo.ac.jp)
- <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/jobs/detail/jokyou2506-shibayamaken.html> を必ず確認.

[II]

- 助教1名
- 極限コヒーレント光科学研究センター(近藤研究室)
- 真空紫外から軟X線領域までの極限レーザー光源を駆使した角度分解,スピン分解,時間分解等の先端的な光電子分光の装置開発及び実験に重点を置くと共に,放射光も活用しつつ,凝縮系物理学の研究を推進. 今迄の経験は不問だが,この計画に参画し,物性研究

の新たな領域を開拓することに意欲のある研究者を希望.

- 4, 5, 8, 9①は[I]に同じ.
- 博士課程修了,又は同等以上の能力者(取得見込)
- 履歴書(略歴可) ○業績リスト(重要論文に○印) ○主要論文別刷約3編(コピー可) ○研究業績概要(約2,000字) ○研究計画書(約2,000字) ○推薦の場合は,推薦書 ○応募の場合は所属長・指導教員等による意見書(作成者から直送)
- ②近藤 猛 電話04-7136-3367 [kondo1215 issp.u-tokyo.ac.jp](http://www.kondo1215.issp.u-tokyo.ac.jp)
- <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/jobs/detail/jokyou2507-kondoken.html> を必ず確認.

■早稲田大学理工学術院教員

- 専任講師,准教授又は教授1名
- 基幹理工学部電子光システム学科,基幹理工学研究科電子光システム学専攻
- 光通信システム,光エレクトロニクス関連分野.学部及び大学院教育を担当.
- 2015年4月1日迄の早期
- なし
- 博士号取得者
- 履歴書(写真貼付) ○研究業績リスト(著書,論文,国際会議論文,特許等) ○主要論文別刷5編以内(コピー可) ○今迄の研究要約及び着任後の研究・教育についての抱負(A4,約5枚) ○推薦状2通,又は照会可能者2名の氏名,連絡先 ○書類選考結果返送の為の返信用封筒(80円切手貼付,住所・宛名記載)
- 2014年7月28日(月)必着
- ①169-8555東京都新宿区大久保3-4-1 早稲田大学基幹理工学部電子光システム学科連絡事務室 電話03-5286-3011
②同学科 庄子習一 電話03-5286-3384 [shojis waseda.jp](http://www.shojis.waseda.jp)
- 封筒に「早稲田大学電子光システム学科教員応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付. 応募書類不返却. 詳細は <http://www.eps.sci.waseda.ac.jp/> 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)

■セラミックス大学2014(CEPRO2014)

主催 日本セラミックス協会教育委員会
日時 2014年5月~11月の月1回土曜日(8月は除く)

場所 東工大,中央大,東海大,東京理科大学,工学院大,学習院大,上智大

内容 セラミックスの研究や開発等に従事されて間もない方,又はこれから始めようとする方,セラミックスの研究や開発に改めて取り組もうとする方,開発に必要な基礎やノウハウを知りたい方等が持つ様々な疑問に答えるセミナー. 講義内容:微粉末合成,成形と焼結,粉体・焼結体構造,情報検索の技術,状態図・熱力学,結晶化学,粉末X線回折,液相からの合成,バイオセラミックス,導電性,ナノハイブリッド,気相からの合成,誘電性,電池とエネルギー問題,ガラス・光物性,光触媒,電子顕微鏡観察と計算科学,機械的性質,磁性,セメント他.

定員 120名

参加費 47,000円,学生13,000円

参加申込締切 定員になり次第

連絡先 169-0073東京都新宿区百人町2-22-17 日本セラミックス協会
岡村智子 電話03-3362-5231
[tokamura cersj.org http://www.ceramic.or.jp/ikyoku/cepro2014-info.html](http://www.ceramic.or.jp/ikyoku/cepro2014-info.html)

■第10回ESR入門セミナー

主催 電子スピンスサイエンス学会

日時 2014年5月16日(金)13:00~18日(日)12:00

場所 八王子セミナーハウス(八王子市下柚木1987-1 電話042-676-8511)

内容 今後ESRを使用したい学部学生,大学院生,企業技術者等を対象として,電子スピンスサイエンスやESR測定の入門から応用迄を分かり易く解説する合宿形式のセミナー.

定員 50名

参加費 20,000円(宿泊費2泊分,食費5食分,テキスト作成代込)

申込 e-mailにて(氏名,所属(学生,大学院生は研究室と学年),連絡先(電話,Fax,e-mail),性別,会員(学会名)・非会員の別を明記)

参加申込締切 2014年4月16日(水),定員

になり次第締切
連絡先 444-8585 岡崎市明大寺町字西郷中
38 分子科学研究所 中村敏和, 山崎由
実 電話0564-55-7367 sest ims.ac.jp
その他 詳細は<http://www.sest.gr.jp/> 参照.

■第57回表面科学基礎講座

主催 日本表面科学会
協賛 日本物理学会
日時 2014年6月4日(水)~5日(木)
場所 大阪大学コンベンションセンター
(565-0871 吹田市山田丘1-1 電話06-
6879-7171)

内容 「表面・界面分析の基礎と応用」に
ついて, 初心者, 若手研究者, 技術者を
対象として, 入門的且つ具体例を豊富に
挙げて解説する事を目的とした講座.

定員 100名
参加費 30,000円, 学生5,000円(テキスト
ト代, 消費税込)
参加申込締切 2014年5月30日(金)
連絡先 113-0033 東京都文京区本郷2-40-
13 本郷コーポレイション402 日本表
面科学会事務局 電話03-3812-0266
Fax 03-3812-2897 shomu sssj.org
その他 詳細は<http://www.sssj.org> 参照.

■第10回核融合エネルギー連合講演会

—発電実証に向けた核融合研究の発展と
拡がり—

主催 プラズマ・核融合学会, 日本原子力
学会
共催 日本物理学会
日時 2014年6月19日(木)~20日(金)
場所 つくば国際会議場エポカルつくば
(305-0032 つくば市竹園2-20-3 電話
029-861-0001)

内容 核融合エネルギーの研究開発におけ
る炉心プラズマや核融合工学を始めとす
る多くの関連研究分野の成果の検証と伴
に, 発電実証に向けた核融合研究の発展
と拡がりについて広範な議論を展開する.
招待講演, 基調講演, シンポジウム, パ
ネルディスカッションを予定.

参加費 6,000円, 学生3,000円
申込 HPより

参加申込締切 2014年5月23日(金)
連絡先 464-0075名古屋市千種区内山3-1-
1-4F プラズマ・核融合学会
電話052-735-3185 Fax 052-735-3485
plasma jspf.or.jp <http://www.jspf.or.jp/>
10rengo/
その他 最新情報はHPで確認のこと.

■第33回電子材料シンポジウム (EMS-33)

主催 電子材料シンポジウム運営委員会
日時 2014年7月9日(水)~11日(金)
場所 ラフォーレ修善寺(410-2415伊豆市
大平1529 電話0058-72-3311)

内容 半導体をはじめとした様々な電子材
料の物理と化学, そのエレクトロニクス
への応用

定員 未定
参加費 HP参照
各種申込締切 HP参照
連絡先 432-8011 浜松市中区城北3-5-1
静岡大学電子工学研究所 光野徹也
電話053-478-1336 Fax 053-478-1336
rtkouno ipc.shizuoka.ac.jp
<http://ems.jpn.org/>

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

■高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所放射光共同利用実験課題公募(平成26年度後期)

対象 当施設の放射光及び低速陽電子を利用する実験. 大学等の研究者(科学研究費助成事業の申請資格を有する企業等の基礎研究含む).

応募要領 実験課題申請システム(<https://pmsweb.kek.jp/k-pas/>)を利用した電子申

請. 申請受付は一般課題, 特別課題は4月中旬, 大学院生奨励課題は4月下旬開始予定. 具体的な申請書作成等に関する詳細は<http://uskek.kek.jp/apply/pf.html> 参照.
応募締切 一般課題, 特別課題: 2014年5月中旬. 大学院生奨励課題: 2014年5月下旬. 予備実験・初心者型課題は, 2014年度からは随時受付.

問合せ先 305-0801 つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究機構研究協力部研究協力課共同利用支援室共同利用係 電話029-864-5126 kyodo1 mail.kek.jp
その他 研究成果は公表頂く.

■科学技術ソフトウェア研究者等の国際会議への参加支援(平成26年度)

対象 国外で開催される科学技術ソフトウェア, 計算科学, 計算機科学, シミュレーション技術等の分野の国際会議発表者に対して参加費・旅費等を支援する.

公募人員 若干名
助成費用 1件につき, 10万円を限度
公募資格 大学又は大学院に在籍する学生
応募締切 第1回: 2014年6月16日(月),
第2回: 2014年10月10日(金)
問合せ先 319-1106 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4 高度情報科学技術研究機構総務部 鈴木 電話029-282-8352
Fax 029-282-0625

その他 詳細は<http://www.rist.or.jp> お知らせコーナーを参照.

■会員専用ページ: ユーザ名とパスワード

本会 web site (<http://www.jps.or.jp/>) の会員専用ページには, 各種変更届, 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. 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す.)

4月ユーザ名 : 14Apr
パスワード: Gustav837
5月ユーザ名 : 14May
パスワード: Enrico465

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
2014年			
4/4~7	The 10th Int. Conf. of Computational Methods in Sciences and Engineering 2014	Athens (Greece)	68-11
5月~11月	セラミックス大学2014 (CEPRO2014)	首都圏各地	69-4
5/12~13	第30回量子情報技術研究会 (QIT30)	名古屋市	69-2
5/14~17	OIST国際ワークショップ「新規な量子物質と量子相」(NQMP2014)	恩納村(沖縄)	69-2
5/16	日本磁気学会第196回研究会「有機/分子磁性材料の現状と今後の展開」	東京	69-3
5/16~18	第10回ESR入門セミナー	八王子市(東京)	69-4
5/17	量子スピン系の物理	東京	69-3
5/22	食品ハイドロコロイドセミナー2014~初心者のためのハイドロコロイド研究法の解説~	東京	69-3
5/22~23	第31回希土類討論会	東京	68-12
5/23	第25回食品ハイドロコロイドシンポジウム	東京	69-3
5/28~31	第31回強誘電体応用会議	京都市	69-3
6/4~5	第57回表面科学基礎講座	吹田市(大阪)	69-4
6/19~20	第10回核融合エネルギー連合講演会—発電実証に向けた核融合研究の発展と拡がり—	つくば市(茨城)	69-4
7/7~11	The 19th Int. Conf. on Ultrafast Phenomena	宜野湾市(沖縄)	69-3
7/9~11	第33回電子材料シンポジウム(EMS-33)	伊豆市(静岡)	69-4
9/7~10	日本物理学会2014年秋季大会(中部大学)(物性)	春日井市(愛知)	日本物理学会
9/18~21	日本物理学会2014年秋季大会(佐賀大学)(素粒子, 宇宙線, 宇宙物理)	佐賀市	日本物理学会
10/8~11	日本物理学会2014年秋季大会(ハワイ)(核物理)	ハワイ島	日本物理学会 ・アメリカ物理学会合同
11/2~6	The 7th Int. Symp. on Surface Science	松江市	68-4
11/18~21	Plasma Conf. 2014 (2014年秋季大会領域2)	新潟市	日本物理学会, 応用物理学会, プラズマ・核融合学会
2015年			
3/21~24	日本物理学会第70回年次大会(早稲田大学)	東京	日本物理学会
9/16~19	日本物理学会2015年秋季大会(関西大学)(物性)	吹田市(大阪)	日本物理学会
9/25~28	日本物理学会2015年秋季大会(大阪市立大学)(素粒子, 核物理, 宇宙線, 宇宙物理)	大阪市	日本物理学会

編集後記

この編集後記の依頼のメールが送られてきた1月30日は、ちょうど理研のSTAP細胞のプレスリリースの翌日で、小保方晴子さんのニュースで騒がれていた日だった。酸性溶液で培養するだけで、細胞が初期化するのは生物学の常識を覆すすばらしい研究成果である。その後、論文の不備や再現実験の成功例がないなど問題が指摘されているが、この4月号が会員に送られる頃には再現報告があっていて欲しいものである。物理でもこれだけ飛躍のある研究ができて欲しい。あれば、学会誌で特集が組める。比べると、物理は積木細工とは言わないま

でも理論や法則の積み重ねでできていると思う。生物学は原則があっても例外がでてくるのでうらやましい気もする。普遍性を見いだそうとするか、多様性を探求するかアプローチはいろいろあるとして、生物は物理学者にとっても興味深い研究対象であると思う。今月号ではホタルの発光の効率の高さについて記事があるので是非ご覧きたい。

その他に今月号にはガンマ線バーストの天体現象から、原子時計、ニュートリノ、コロイドの凝集、19世紀の熱力学の歴史、夏の学校報告と多彩な記事が掲載されている。僕の学生の時には夏の学校で合気道をしようという発想は誰からもでなかった。

これまで専門外の記事は面白そうだと読み始めても途中で脱落し最後までたどり着けないことが多かった。今年からリードページが加わり、概要はなんとか掴めるようになった。最初、編集委員会でリードページの話聞いたときは仕事が増えるのでいやだなと思ってしまった。が、こうやって出来上がった記事を見るとわかりやすくなって読みやすくなったと思う。編集委員になって一年近くたった。まだ編集委員では小さく隠れているが、様子はわかってきた。できるだけ多くの物理学会員に興味を持ってもらえそうな研究を読みやすい記事にして少しでも紹介していきたい。

野口博司 <

編集委員

宮下 精二(委員長), 森川 雅博,
井岡 邦仁, 石岡 邦江, 今村 卓史,
岡田 邦宏, 沖本 洋一, 加藤 岳生,
角野 秀一, 桑本 剛, 小島智恵子,
関 和彦, 岸根順一郎, 高須 昌子,
常定 芳基, 長谷川修司, 松尾 泰,
松本 重貴, 水崎 高浩, 南 龍太郎,

望月 維人, 野口 博司, 李 哲虎,
目良 裕, 山本 隆夫, 渡邊 康,
平野 哲文
(支部委員)
奥西 巧一, 黒岩 芳弘, 小山 晋之,
酒井 彰, 中村 光廣, 野村 清英,
前田 史郎, 松井 広志, 水野 義之,
山崎 祐司

新著紹介小委員会委員

平野 哲文(委員長), 大江純一郎,
片山 郁文, 桂 法称, 加藤 進,
小芦 雅斗, 合田 義弘, 郡 宏,
長谷川秀一, 廣政 直彦, 間瀬 圭一,
宮原ひろ子, 三輪 光嗣, 山本 貴博

第70期(2014年3月31日~2015年3月31日)理事・監事

会 長	兵 頭 俊 夫	副会長(会長予定者)	藤 井 保 彦
庶 務 理 事	石 田 憲 二 ・ 小 林 富 雄 ・ 櫻 井 博 儀 ・ 柴 田 利 明 ・ 須 藤 彰 三 ・ 松 川 宏 ・ 三 沢 和 彦		
	森 初 果		
会 計 理 事	川 村 光 ・ 柴 田 利 明(兼任) ・ 松 井 哲 男 ・ 松 川 宏(兼任)		
会誌編集委員長	宮 下 精 二	JPSJ 編集委員長	安 藤 恒 也
			PTEP 編集委員長 坂 井 典 佑
刊 行 委 員 長	大 槻 東 巳	監 事	波 田 野 彰 ・ 三 宅 康 博

本誌を複製される方に (Notice about photocopying)

(参照: 本誌 47 (1992) 4 号会告)

本誌に掲載された著作物を複製したい方は, (社)日本複製権センターと包括複製許諾契約を締結されている企業の方でない限り, 日本物理学会が複製権等の行使の委託をしている次の団体から許諾を受けて下さい.

(In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright clearance by the copyright owner of this publication.)

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F
一般社団法人学術著作権協会
電話 03-3475-5618 Fax 03-3475-5619 info jaacc.jp

アメリカ合衆国における複製については, 下記 CCC
に連絡して下さい.

Copyright Clearance Center, Inc.
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Phone 1-978-750-8400 Fax 1-978-646-8600

なお, 著作物の転載・翻訳のような, 複製以外の許諾は, 直接日本物理学会へご連絡下さい.

日 本 物 理 学 会 誌 第 69 卷 第 4 号 (平成 26 年 4 月 5 日発行) 通巻 774 号

©日本物理学会 2014

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.