

日本物理学会誌

■ ソーラー電力セイル実証機 IKAROS

BUTSURI

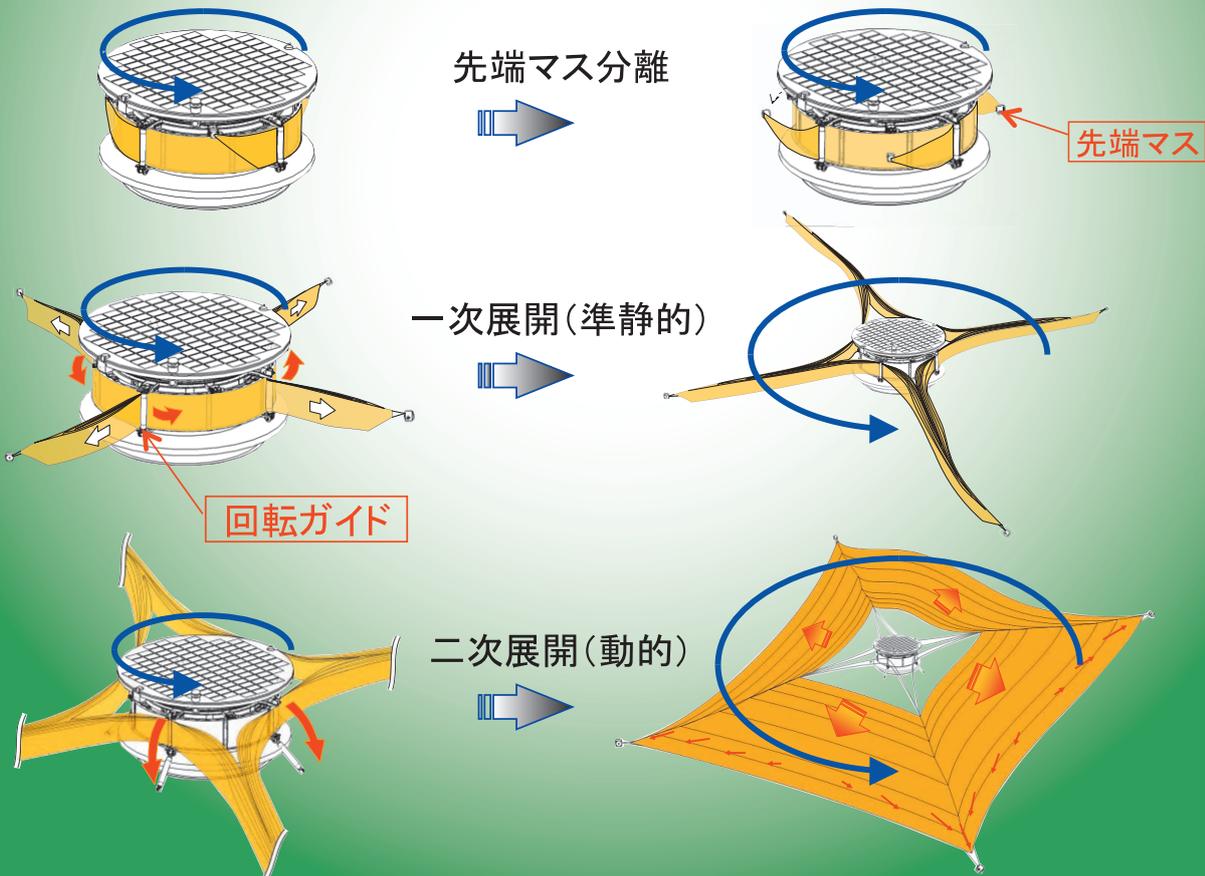
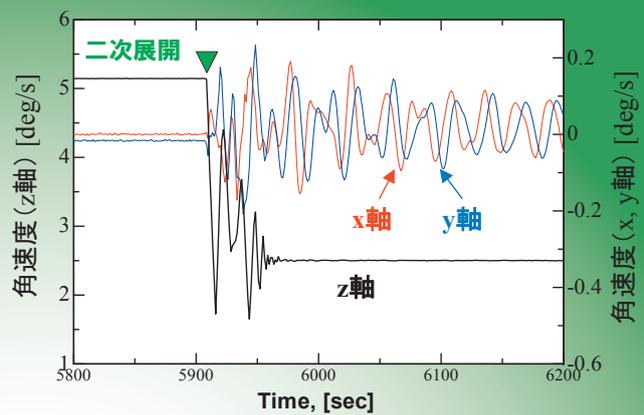
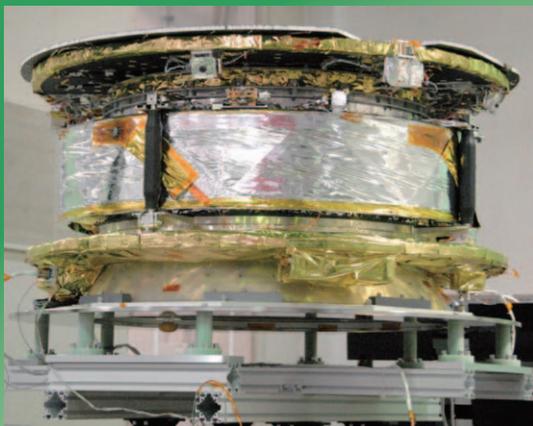
第67巻 第6号(通巻 748号) ISSN 0029-0181

昭和30年 6月13日 第3種郵便物認可

平成24年 6月5日発行 毎月5日発行

2012 VOL. 67 NO.

6



口絵：今月号の記事から	371
巻頭言 物理学って難しい	本林 透 375

最近のトピックス

実験技術	ヒッグス粒子に迫る	浅井祥仁 376
最近の研究から	ソーラー電力セイル実証機 IKAROS	森 治, 津田雄一 378
	パターン形成と結合した液滴の自発運動 <small>口絵</small>	
	二重ベータ崩壊の核行列要素を検証する <small>口絵</small>	北畑裕之, 義永那津人, 永井 健, 住野 豊 385
	エネルギー・スケール変調による量子系の境界条件・トポロジーの制御	矢向謙太郎, 酒井英行 389
	一般化されたハイゼンベルグの不確定性関係の実験的検証 <small>口絵</small>	引原俊哉, 桂 法称, 丸山 勲, 西野友年 394
		長谷川祐司 398

JPSJの最近の注目論文から 2月の編集委員会より	川畑有郷 403
シリーズ「物理教育は今」	

ラ・トッカータ	日本物理学会第7回 Jr. セッション報告	北本俊二, 松尾正之 406
歴史の小径	教養としての物理教育：過去・現在と将来	国府田隆夫 409
追 悼	ガリレオの知財戦略	田中一郎 411
新著紹介	橋本 治先生を偲んで	田村裕和 413
		414

掲示板	■人事公募 ■学術的会合 ■その他	415
行事予定		420

会 告

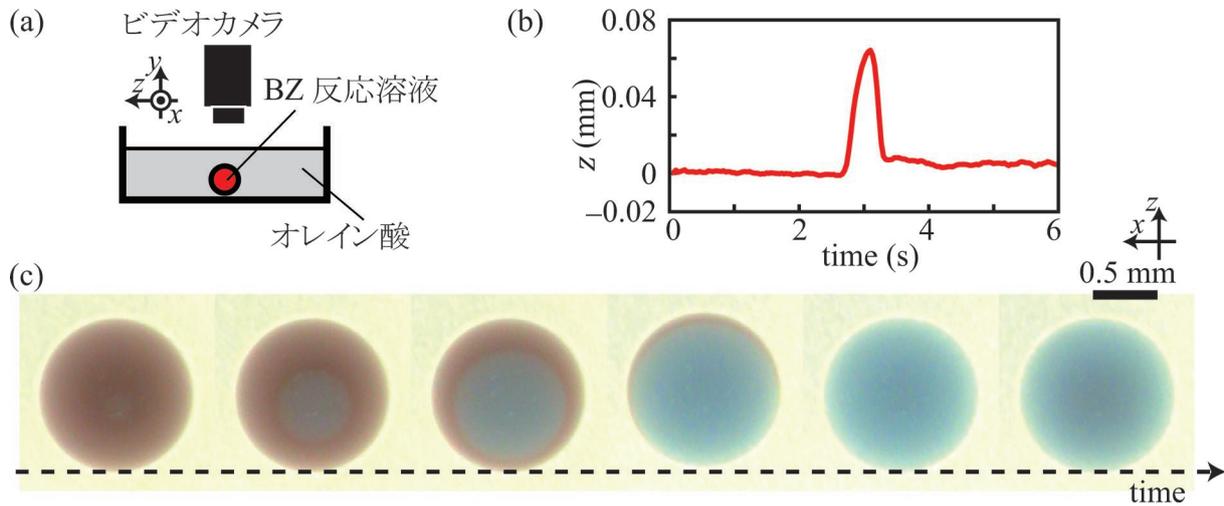
会 告	■事務所移転のお知らせ ■2012年秋季大会の宿泊・交通等の案内 ■大会の宿泊手配業務等の業者依頼について(お知らせ) ■2012年秋季大会会場における託児室の設置について ■2012年秋季大会の参加登録・講演概要集購入のご案内(講演申込者以外の方への案内です) ■第7回日本物理学会若手奨励賞について ■朝日賞, 井上 学術賞, サー・マーティン・ウッド賞, 島津賞, 本多記念賞, 本多フロンティア賞, 本多記念研究奨励賞, 松尾学術賞の各受賞候補者の推薦について(募集) ■2013年~2014年開催 藤原セミナー募集のお知らせ ■2012年度日本物理学会科学セミナーについて ■2012年5月1日付新入会者	422
本会記事	■第68期副会長候補選挙の結果 ■社団法人 日本物理学会 第91回通常総会 一般社団法人 日本物理学会 第92回定時総会 ■第11回代議員懇談会報告 ■第67回年次大会 ■第67回年次大会の忘れ物	428

本会関係欧文誌目次	474
-----------	-----

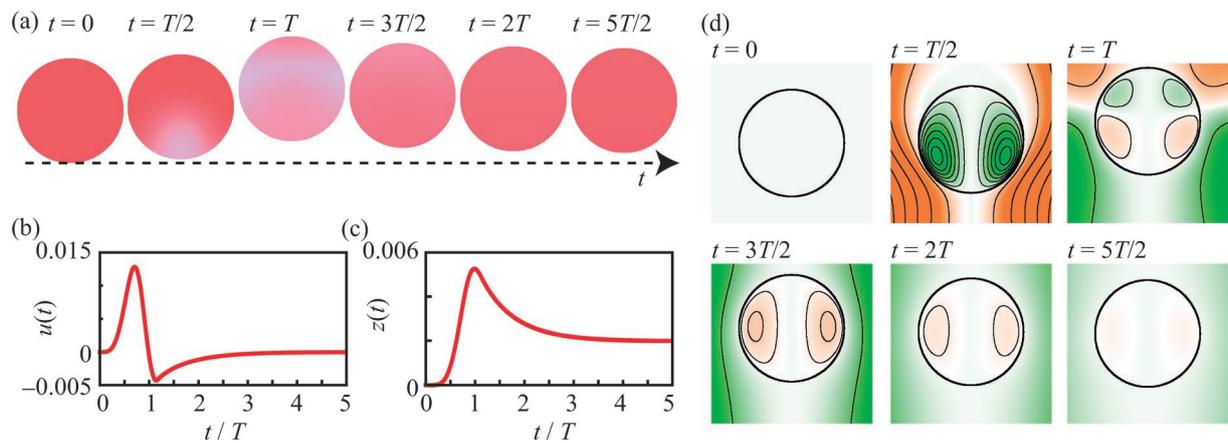
Graphic Page	371
Editorial	
<i>Physics, It's Tricky</i>	Tohru Motobayashi 375
<hr/>	
Recent Topic	
<i>The Tantalizing Hint of Higgs Boson at LHC</i>	Shoji Asai 376
Review	
<i>Solar Power Sail Demonstrator IKAROS</i>	Osamu Mori and Yuichi Tsuda 378
Current Topics	
<i>Spontaneous Motion of a Droplet Coupled with Pattern Formation</i>	Hiroyuki Kitahata, Natsuhiko Yoshinaga, Ken H. Nagai and Yutaka Sumino 385
<i>Looking into the Nuclear Matrix Elements of Double Beta Decay</i>	Kentaro Yako and Hideyuki Sakai 389
<i>Boundary Condition, Topology, and Energy-Scale Deformation in Quantum Systems</i>	Toshiya Hikihara, Hosho Katsura, Isao Maruyama and Tomotoshi Nishino 394
<i>Experimental Demonstration of Generalized Uncertainty Relation</i>	Yuji Hasegawa 398
<hr/>	
JPSJ Selected Papers in the Latest Issue	Arisato Kawabata 403
Physics Education Today	
<i>The Seventh (2011) Junior Session in the 66th Annual Meeting of JPS</i>	Masayuki Matsuo and Shunji Kitamoto 406
La Toccata	
<i>Physics Education for Civil Culture: The Past, Present and Future</i>	Takao Koda 409
The Path to History	
<i>Galileo's Strategy for Intellectual Property</i>	Ichiro Tanaka 411
Obituary	
<i>In Memory of Professor Osamu Hashimoto</i>	Hirokazu Tamura 413
Book Reviews	414
<hr/>	
Notice Board	415
<hr/>	
JPS Announcements	422
JPS News	428

表紙の説明 宇宙空間を航行する宇宙帆船の実証機として、ソーラーセイル「IKAROS」は金星探査機「あかつき」とともに2010年5月に打ち上げられた。世界に先駆けた宇宙技術を実証するために、IKAROSには日本独自のアイデアが盛り込まれ、ミッションの成功によって将来の木星探査等への展望を拓いた。左上の図は、小型ソーラー電力セイル実証機IKAROSの打ち上げ前の写真。直径1.6 m、高さ0.8 mの円筒形の本体の側面に膜面が収納されている。下図は、IKAROSの膜面の展開方式。打ち上げ後、スピンの遠心力を用いて膜面を展開する。(1)先端マス分離、(2)一次展開、(3)二次展開の3つのプロセスに分けられる。一次展開では、膜面の根元を押さえている回転ガイドを本体に対しゆっくりと相対回転することでゆっくりと膜面を繰り出し、十字の形状とする。二次展開では、回転ガイドを倒して一気に膜面を展開し、正方形の展張状態とする。右上の図は、IKAROSの二次展開時の角速度データ。回転ガイド解放後、角運動量保存により、スピン軸であるz軸の角速度が減少している。また、膜面を動的に展開したことで、ニューテーションが発生していることが分かる(数時間後には減衰した)。詳細は本号に掲載されている森 治氏、津田雄一氏の「実験技術」記事を参照のこと。

最近の研究から 「パターン形成と結合した液滴の自発運動」 p.385



Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応は、同心円状やらせん状の空間パターンが自発的に生成することが知られており、非平衡条件下での自発的時空間秩序形成のモデル実験系として広く用いられている。われわれは、このような時空間パターン形成が運動を駆動する系を構築した (H. Kitahata, *et al.*: Phys. Rev. E (2011))。BZ 反応溶液を直径 1 mm 程度の液滴にして油中に沈めたときに見られる液滴の自発的運動を図に示す。(a) は実験装置の模式図、(b) は液滴の重心位置の動きであり、 z 軸は (c) に示す向きに対応する。(c) には液滴の 1 s おきのスナップショットを示す。赤い部分が還元状態、青い部分が酸化状態である。液滴内部で BZ 反応が進み、青い部分が同心円状に広がっていくとともに液滴そのものの重心が運動する様子が見られる。



上図に示した BZ 反応液滴の運動はパターン形成に伴って液滴界面に界面張力の空間勾配が発生するためであると考えられる。そこで, Stokes 方程式を基に解析計算および数値計算を行った。(a) には液滴内の濃度分布, (b), (c) にはそれぞれ液滴の速度と重心位置の時間変化を示す。また, (d) には液滴内外の流れ場のスナップショットを示す。濃度分布および流れは軸対称を仮定しており, 回転軸(縦方向の直径)を含む断面を示す。(a) における濃度は実験と定性的に対応する色で表示している。また, (d) の図では, 右半球において黄緑色の領域は時計回りの, 橙色の領域は反時計回りの流れ場を表す(左半球では逆)。液滴内で青い領域が同心円状に伝播していくにつれて液滴が重心運動する様子が再現できる。これにより, 液滴界面での界面張力差が液滴内外の流れ場を駆動し, その過程で液滴界面を通じた運動量の出入りが起こり, 液滴が運動していることがわかった。

最近の研究から 「二重ベータ崩壊の核行列要素を検証する」 p.389

大阪大学核物理研究センター (RCNP) サイクロトロン施設の概略図。リングサイクロトロン加速器は AVF サイクロトロンを入射加速器に持ち、核子あたりエネルギー 100–400 MeV の良質なビームを 1992 年から供給してきた。現在では、高分解能ビームライン・高分解能磁気スペクトロメタ Grand Raiden との組み合わせにより、300–400 MeV の陽子ビームでエネルギー分解能 20–30 keV FWHM の世界最高レベルの高分解能測定が実現している。



リングサイクロトロン



大阪大学
核物理研究センター
サイクロトロン施設

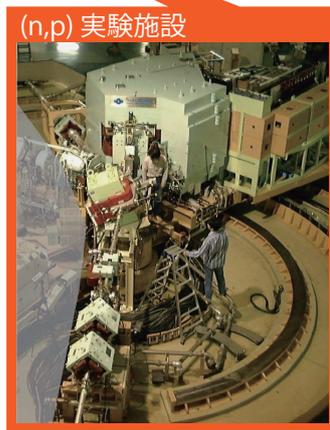
AVF サイクロトロン

中性子飛行時間測定トンネル
(100m)

磁気スペクトロメタ
Grand Raiden + LAS



中性子検出器 NPOL3

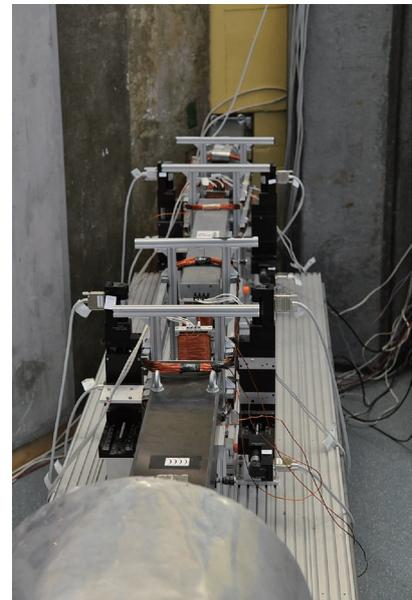
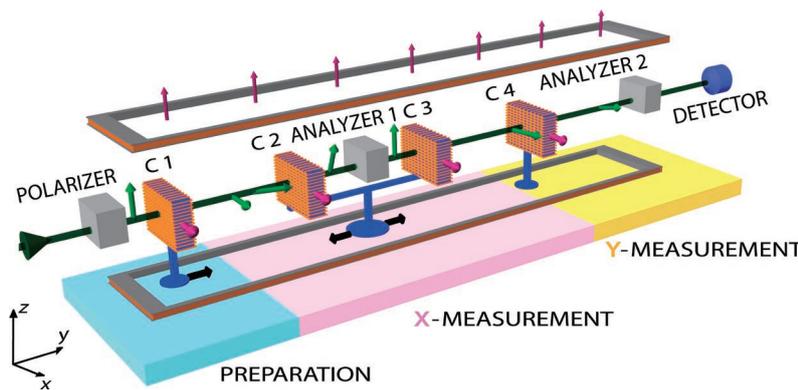


(n,p) 実験施設

本稿で紹介するのは陽子ビームを標的に入射して散乱中性子を測定する「 (p, n) 反応」、中性子ビームを入射して陽子を測定する「 (n, p) 反応」による研究成果である。 (p, n) 反応測定には中性子飛行時間測定施設+中性子検出器 NPOL3 を、 (n, p) 反応測定には大口径磁気スペクトロメタ LAS を用いた (n, p) 実験施設を使用した。



二つの物理量の測定精度の限界に関する不確定性原理は、85年前にハイゼンベルクが提唱し、量子力学の基本原則として有名である。しかし、ハイゼンベルクによる定式化には疑問の余地があることが知られていた。2003年に名古屋大学・小澤が厳密な量子測定理論に基づいた不確定性関係を提示し、ハイゼンベルクが与えた表式が成立しない可能性を示唆した。本稿では、多くの新聞報道がされた、中性子を用いた小澤の不確定性関係の検証実験を紹介する。この実験はウィーン工科大学の小型の研究用 TRIGA 原子炉を使って行った。



不確定性関係の検証の実験配置図(左)と実験装置全体の下流側からの写真(右)。この装置は炉室の写真の左下に設置してあり、第二の偏極アナライザーを追加した中性子偏極解析装置の改良版である。左図にあるように、実験は3段階に分かれ、状態の生成(青)、スピンのx成分の測定(ピンク)、そしてy成分の測定(黄)からなる。スピンの操作には99%以上の操作効率を有するDCコイル・スピン回転器を用い、最終的には装置全体で96%のコントラストが得られた。右の写真には、黄色い遮蔽体直後に設置した偏極子から、前段のx成分の測定と、それに続く後段のy成分の測定装置を経て検出器の遮蔽体までが写っている。

物理学って難しい

本林 透 (広報委員長)

物理学は難しいものの代名詞のようだ。例えば、大正11年にアインシュタインが日本を訪れて講演を行った時、彼の理論をわかる日本人は何人もいない、という説が流布されていた、と物理学とは無関係だった父から聞いた。高校で物理を選択する生徒が多くない理由も、難しいという印象による面があるだろう。物理学にたずさわるのは、どこかその「難しさ」を誇る気持ちがあったり、難しいことをしている自負のようなものを持っていたりするのかもしれない。自負、などと言わなくても、先人が築いた物理学の体系は決して理解がやさしいわけでもなく、また研究の現場では様々な困難に直面しているわけである。一方、専門外の人から「難しいことをされてますな」とか、「えーっ、ぶっ物理？」などと言われると、縁なきものとして遠ざけられているような気がして、淋しい気もする。つい「一步一步進めれば、そんなに難しいわけではないんですよ」などと言ってしまふ。これもまた間違いではないのだが… 物理学会広報の役割の一つは、物理学の意義、面白さを社会に広めることかと思うが、「理解し難い」と自他共に決めつけてしまふと、その道は狭くなってしまふ。

一年前の巻頭言に「皆さんに物理学研究への共感を」というのを広報の目標にしてもよい、と書いた。研究の醍醐味を表現し、それを発信したい、と。では、どうしたら実現できるのだろうか。広報を広辞苑で引いても「ひろく知らせること。また、そのしらせ。」とあり、漢字のとおりで身もふ

たもない感じである。会社の広報は、メディアに金を払って行う広告とは異なり、第三者としての判断によりメディアが記事等にするための情報を提供することであるようだ。このほど、物理学会『知っておきたい物理の疑問55』(ブルーバックス)を編集し、講談社から出版した。物理学会としては久しぶりだが、この出版には中・高校生による研究発表「ジュニアセッション」を世界物理年であった2005年より主催してきたことが背景にある。セッションに参加した科学部や物理部の生徒からの質問と専門家(物理学会)による答をもとにしている。なかなか質問も答も高級というか深い。ぜひ手に取って見てください。広告というか宣伝でした。この本は一般に売られており、上に紹介した会社の広報のあり方と似ている。昨年ジュニアセッションの審査に加わったが、生徒たちの熱心さもあって、専門家、つまり我々物理学会員との質疑応答など、物理学をめぐる真剣な交流が行われていることがわかった。発信だけでなく「受信」も含めた双方向のコミュニケーションが広報の大切な役割だとも言われる。その例でもあるジュニアセッションが『知っておきたい物理の疑問55』の出版に繋がったことは、物理学会としてとても良かったと思う。

広報というと、ホームページが思い浮かぶかもしれない。しかし、学会側から見ると、普通のページの情報発信機能はあまり大きくないように思える。何かを示しても、アクセスしてもらえない限り伝わらない。反対に、情報を

得ようとする人から見ると、よく設計されたページは有用なものである。新しくなった物理学会のホームページも、この方向の充実が期待される。一方、ウェブページにアクセスして情報を得ようとする人は、積極的に質問したり、意見を言ったりする直ぐ手前にいると考えられる。ウェブシステムの持っている機能を活用し、コミュニケーションに双方向性を持たせることはできないか。すでに触れたが、この双方向性こそが本来広報活動が持つべき機能だ、という考えもある。組織側の立場からの情報のみでは一方的で、組織と一般の人の間に、双方の利益をめざして、双方向のコミュニケーションをはかるべき、というのである。難しくも魅力ある物理学を広報し、共感を得るには、双方向のコミュニケーションを様々な面ではかることが有効ではないか。物理学会は会員各自と情報を共有するために「マイページ」と呼ばれる機能を導入しようとしているが、それだけではなく、ホームページを使って、社会に対する双方向的広報活動を発展させることができたらと思う。

もう一つ宣伝したいことは、来年7月に応用物理学会とともに主催する第12回アジア太平洋物理会議(12th Asia Pacific Physics Conference-APPC12)である。12回目にして初めて日本で開催される。両学会員への働きかけに加え、千葉県の幕張で行われる会議の成功を目指し、国際的な広報という、物理学会があまり行ったことがない課題に取り組む必要がある。

(2012年4月2日原稿受付)

ヒッグス粒子に迫る

ヒッグス粒子は標準理論の枠組みの中で唯一未発見の粒子であり、素粒子の質量の起源と考えられている。2011年のLHC実験データに、ヒッグス粒子の可能性のある興味深い信号が観測された。まだ発見と言うには統計的には遠いレベルであるが、ここに簡単にまとめる。2012年中には、ヒッグス粒子について黒白がはっきり着くと期待されている。

2011年LHC加速器¹⁾は順調に調整が進み、最終的には当初の目標の約4倍の衝突輝度($3.7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)にまで達し、1日の取得データ量が2010年の1年分を超えるまでになった。ATLAS, CMS検出器¹⁾それぞれ最終的に積算ミノシティー 5 (fb)^{-1} ($\text{fb} = 10^{-39} \text{ cm}^2$) 以上のデータ²⁾を観測した。

LHCでヒッグス粒子 (H_{SM}) がどのように観測されるかは、文献3に詳しい。比較的軽い(質量120-130 GeV)ヒッグス粒子探索で感度が高い探索チャンネルは、二つの光子 γ に崩壊するチャンネル： $H_{\text{SM}} \rightarrow \gamma\gamma$ 、電弱ゲージボソン W, Z を介して4つのレプトン l あるいは、ニュートリノ ν に崩壊するチャンネル： $WW(\rightarrow \ell^+ \nu \ell^- \nu)$, $ZZ(\rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-)$ の3つである。図1に $H_{\text{SM}} \rightarrow \gamma\gamma$, $H_{\text{SM}} \rightarrow ZZ^*(\rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-)$ のATLAS検出器の結果⁴⁾を示す。横軸は観測された γ やレ

プトン(電子やミュオン)の運動量から再構成した質量である。バックグラウンドは、連続分布になるのに対し、ヒッグス粒子の崩壊で出てきた場合は、ヒッグス粒子の質量に信号が観測される。電子、ミュオン、 γ 共に、エネルギー測定精度が高いため、質量測定の分解能が高く($\sigma = 1.7 \text{ GeV}$ ($H_{\text{SM}} \rightarrow \gamma\gamma$), $\sigma = 3 \text{ GeV}$ ($H_{\text{SM}} \rightarrow 4\ell$)), 綺麗なピークが期待できる。2011年のデータには、図1(a)が示すように、125-126 GeV付近に多少の超過が観測された。バックグラウンドは実験データをフィット(実線)して求めている。126 GeV付近の3つのビンで超過が見られている。まだ綺麗なピークと言うほどでないが、幅3ビン程度に期待される分解能と一致する。一方 $H_{\text{SM}} \rightarrow ZZ^*(\rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-)$ は、再構成された質量が180 GeV以下の領域はバックグラウンドが少なく(~ 0.5 事象/5 GeV)、現在はモンテカルロを基本に評価している。図1(b)に示すように125 GeV付近に3事象観測されている。

これらの統計的な有意さを考える時に、Looking Elsewhere Effect (LEE) を考える必要がある。ヒッグスの質量が125 GeV付近だと思って計算する場合(Local)と、探索領域(110-146 GeV)のどこにでも超過があつて良いと考えて確率を求め、それがたまたま125 GeV付近だったと

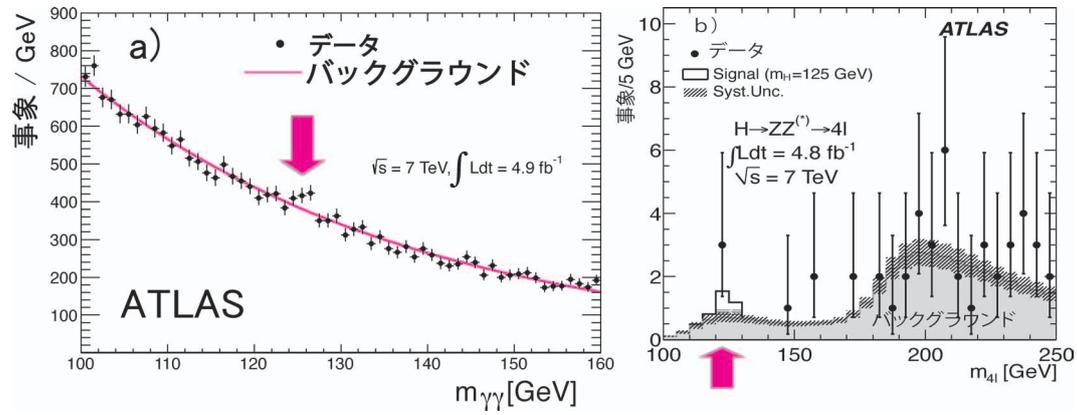


図1 再構成された不変質量分布 (a) $H \rightarrow \gamma\gamma$ 探索, (b) $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4$ レプトン. 黒丸が2011年実験データ, 実線及びヒストグラムがバックグラウンドの分布を示す. 矢印が125-126 GeVのヒントを示す.

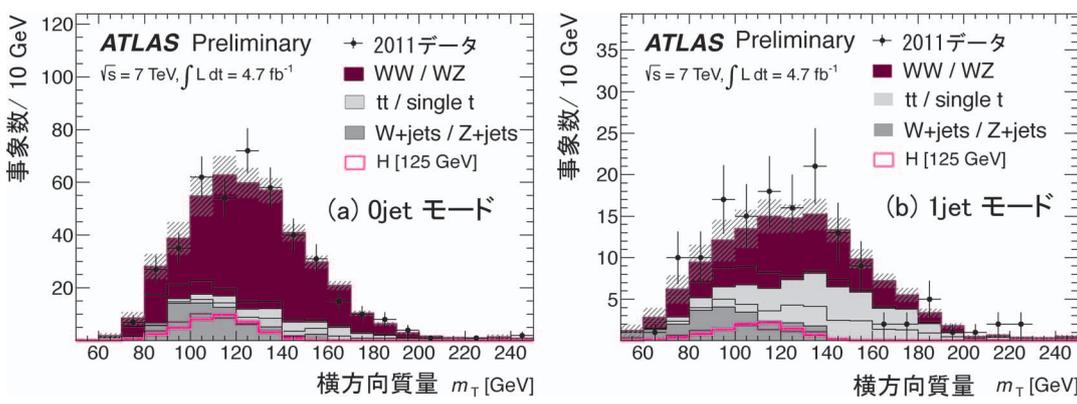


図2 横方向質量 M_T 分布： $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu$. (a) はジェットが付随しない場合：紫色の WW が主なバックグラウンド, (b) はジェットが1本付随する場合：灰色のトップ生成と WW が主なバックグラウンド.

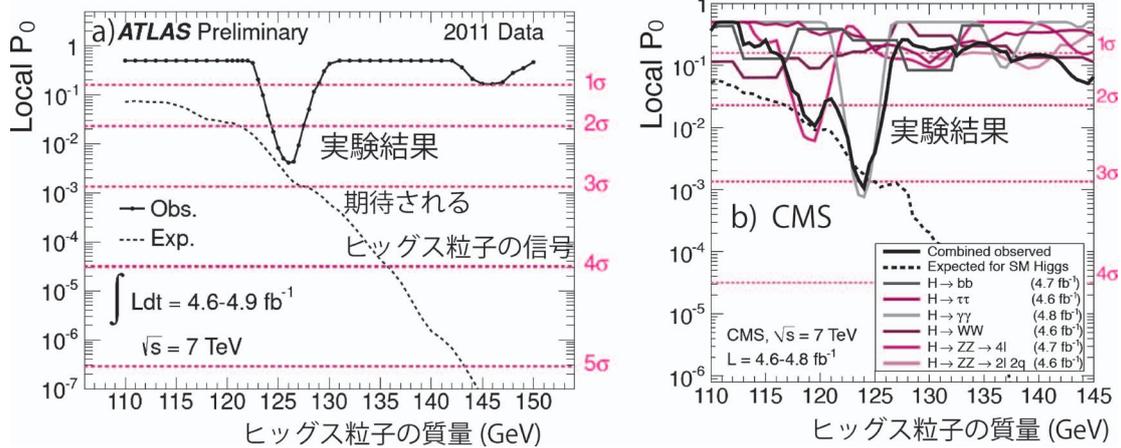


図3 観測された事象をバックグラウンドのふらつきで説明しようとする場合の確率。(a) ATLAS 検出器, (b) CMS 検出器共に実線が2011年の実験結果. 点線は, 標準理論ヒッグス粒子があった場合に期待される信号の強さ.

考える場合 (Global) で結果が違う. 特に統計が少ない場合や, 鋭いピークが期待されている場合に LEE は大きくなる. $H_{SM} \rightarrow 2\gamma$ で観測されたデータがバックグラウンドのふらつきである確率 (P_0) は, Local P_0 で 2.9σ (0.2%) であるが, Global P_0 は 1.5σ となる. $H_{SM} \rightarrow 4l$ (3 事象) の Local P_0 は 2.1σ (1.6%) であるが, Global P_0 は 1σ 以下 (30%) となる.

一方, $H_{SM} \rightarrow WW (\rightarrow l^+ \nu l^- \nu)$ チャンネルは, ν が二つ放出されるため, 不変質量を再構成できず, 横方向質量 M_T を用いる.³⁾ このため綺麗なピークにならず広がった分布になり, 感度が低くなる. 図2はATLAS 検出器で観測された M_T 分布である. 二つのレプトン以外に, ジェットを伴わないもの (0 jet モード) と1つジェットを伴うもの (1 jet モード) に分けてある. 0 jet モードはグルオン融合過程 (GF) で生成された信号が主で, バックグラウンドは, $q\bar{q} \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ が主である. 一方1 jet モードは, GF ばかりでなくベクターボソン融合過程 (VBF) の信号も寄与する. バックグラウンドは, WW ばかりでなくトップクォークペアの生成も効いてくる. 異なるバックグラウンド環境である点が重要である. 図2を見ると0 jet モード側はバックグラウンドの分布と実験データは一致する. 1 jet モードではデータが多めに観測されているが, 有意なレベルではない. CMS 検出器でも同じような結果⁵⁾ になっている.

これら以外に, $H_{SM} \rightarrow \tau\tau$ などを加えて求めた Local P_0 を示したのが図3(a) である. 125-126 GeV 付近だけ P_0 が小さくなり 2.4σ になっている. Global P_0 は, 10% 程度であり, 統計的にはまだまだ不確実である. ただ, 図中の点線は, 標準モデルヒッグスがあった場合の期待される信号の強さであり, 観測された小さな超過は, ヒッグス粒子の信号にはちょうどよい. 図3(b) は, CMS 検出器の結果⁵⁾ である. $\gamma\gamma$ は 124-125 GeV 付近に約 3σ , $H_{SM} \rightarrow 4l$ は 119 GeV (3 事

象), 125 GeV (2 事象) 観測された. これらに WW をはじめ他のチャンネルを加えて計算したものである. ATLAS 同様に 124 GeV に 3.1σ (Local P_0) の超過が観測されたが, Global に考えるとまだ 2.1σ のレベルであり, こちらも, まだまだ統計的には不十分である.

ATLAS, CMS 検出器共に複数のチャンネル (これが極めて重要な点) で, 同じような質量領域 (124-126 GeV) に $2.5-3\sigma$ 程度の超過が観測されたが, まだ統計的なふらつきの可能性もあり, 2012 年の実験が重要である. 2012 年は LHC の重心系エネルギーが 8 TeV に上げられ (ヒッグス生成断面積が 25% 増加), 期待されるデータ量は 15 fb^{-1} となるのでヒッグス粒子についてははっきりしたことが言える. ちなみに 118-127 GeV を除いて, ヒッグス粒子は 600 GeV まで棄却 (95%CL) された. 最後に, ATLAS も CMS も大きなグループであるが, 東京大学の田中純一さん, 増渕達也さん, 中村浩二さん, 山村大樹さんや KEK の津野総司さん, フランス LAL 研究所の田中礼三郎さん, 東大や筑波大の学生の皆さんの特筆に値する大きな活躍で得られた成果である.

参考文献

- 1) 日本物理学会誌 **62** No. 12 (2007) — 小特集「LHC 実験が始まる」.
- 2) 衝突の頻度をあらわす量で, 面積の逆数の次元をもっている. $5 (\text{fb})^{-1}$ は, 陽子自体同士の反応は, 約 500 兆回起きている.
- 3) 浅井祥仁: 日本物理学会誌 **66** (2011) 813 — LHC 実験: テラスケール物理の成果と展望.
- 4) The ATLAS collaboration: hep-ex1202.1414 (2012); hep-ex1202.1415 (2012).
- 5) The CMS collaboration: hep-ex1202.1489 (2012); hep-ex1202.1487 (2012); hep-ex1202.1997 (2012).

浅井祥仁 (東京大学大学院理学系研究科)

(2012年3月4日原稿受付)

ソーラー電力セイル実証機 IKAROS

森 治 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1)
 津田雄一 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1)

JAXAではIKAROS計画において、ソーラーセイルによる推進と薄膜太陽電池による発電を行うことによって、世界で初めてソーラー電力セイルを実証した。IKAROSはスピンの遠心力を利用して200 m²の大型膜面を展開・展張する技術実証型のミッションであり、膜面に太陽光を受けて惑星間軌道で加速・軌道制御を実現し、世界初のソーラーセイルによる航行を達成した。本稿では、IKAROSのミッションおよびシステムについて紹介し、IKAROSの成果やこれを踏まえた今後の展望について解説する。

1. はじめに

「ソーラーセイル」は、太陽光の圧力を膜面(セイル)に受けて宇宙空間を航行する宇宙帆船であり、太陽の光さえあれば燃料なしで推進力を得ることができる。このアイデア自体は約100年前からあり、SFでもよく登場する。しかし、これまで世界中で研究¹⁾が進められているにもかかわらず実現されていなかった。

一方、「ソーラー電力セイル」は、膜面の一部に薄膜の太陽電池を貼り付けてあり、ソーラーセイルと同時に太陽光発電も行う日本独自のアイデアである。ソーラー電力セイルはソーラーセイルにより燃料を節約できるだけでなく、太陽から遠く離れた場所でも、大面積の薄膜太陽電池を利用して探査機に十分な電力を確保できる。この電力を用いて、イオンエンジンを駆動すれば、ソーラーセイルと合わせたハイブリッドな推進が可能となる。

JAXAではこのコンセプトを外惑星探査に適用し、ソーラー電力セイル探査機による木星圏探査計画²⁾を提案している(図1(a))。そして、この計画のリスク軽減のための実験機として開発されたのが、ソーラー電力セイル実証機「IKAROS(イカロス)」³⁾であり、2010年に打ち上げられ、世界初のソーラー電力セイルの実証に成功した(図1(b))。

本稿では、IKAROSのミッションおよびシステムについて紹介し、IKAROSの成果やこれを踏まえた今後の展望について解説する。

2. IKAROSのミッション

IKAROSは以下の4つのミッションによりソーラー電力セイルを実証した。いずれも成功し世界初の快挙となった。

(1) 大型膜面の展開・展張

海外では主として、支柱(マスト)を使って膜面を展開

・展張する方式^{4,5)}が検討されているが、膜面のサイズが大きくなるほど支柱の重量も大きくなるという問題が発生する。一方、JAXAでは数1,000 m²級の超大型膜面を宇宙空間で広げることを見据え、支柱を持たずに遠心力を用いるスピン方式⁶⁾を考案した。ただし、地上での展開実験では空気抵抗と重力の影響を受け、これらを完全に除去することはできない。そこで、IKAROSでは宇宙空間で実際に200 m²の大型膜面を同じ方式で展開・展張することにより、膜面の減衰係数や圧縮剛性など、膜面の挙動に大きく影響を及ぼすパラメータを同定し、数値シミュレーションモデルを構築することを目指した。

(2) 薄膜太陽電池による発電

膜面ハーネス(配線)を含めた薄膜太陽電池システムの宇宙環境における発電性能の評価を目指した。地上でも要素試験は可能であるが、大面積での総合的な評価は不可能である。

(3) ソーラーセイルによる加速

太陽光の圧力は地球軌道近傍において、約 5×10^{-6} N/m²であり非常に小さい。空気抵抗や地球重力の影響を完全に排除できる深宇宙にて膜面の運動やしわ等の影響も含めた膜面全体の光子加速を軌道決定により約半年かけて精度よく評価することを目指した。

(4) ソーラーセイルによる航行技術の獲得

図2にソーラーセイルによる軌道制御の原理を示す。ソーラーセイルは太陽光から受ける力の向きにより加速または減速し、加速時には太陽から遠ざかり、減速時には太陽に近づく。よって膜面を操舵することで軌道を制御し、これを軌道決定により評価することを目指した。

(1), (2)はミニマムサクセスクライテリア, (3), (4)は



(a) 木星圏探査計画 (b) IKAROS計画
 図1 ソーラー電力セイルの計画。

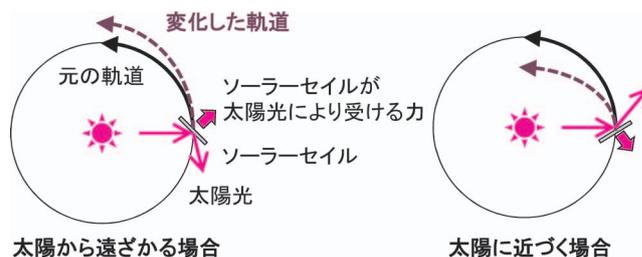


図2 ソーラーセイルによる軌道制御の原理。

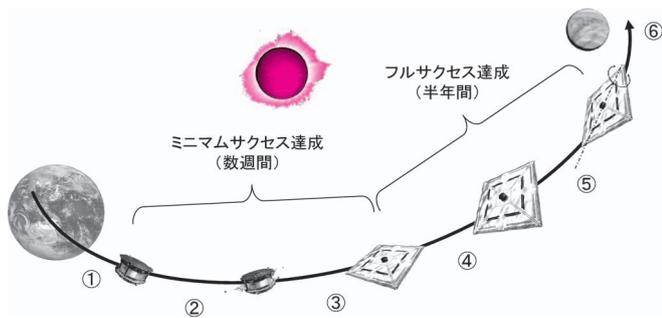


図3 ミッションシーケンス.

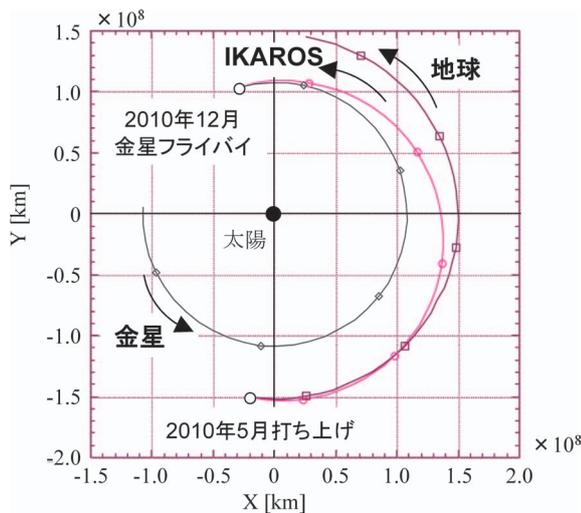


図4 IKAROSの軌道.

フルサクセスクライテリアに相当するミッションである。図3にIKAROSのミッションシーケンスを示す。①IKAROSは種子島宇宙センターからH-IIAロケットにて金星探査機「あかつき」と相乗りで2010年5月に打ち上げられ、図4に示す金星直行軌道に（「あかつき」とは別々に）投入された。②スピンアップし、③遠心力を用いて大型膜面を展開・展張し、薄膜太陽電池による発電を実証した。この時点でミニマムサクセス達成となり、数週間で実現できた。④膜面に太陽光圧を受けることでソーラーセイルとして加速し、⑤膜面の操舵により航法誘導制御を行った。ソーラーセイルの影響を評価するためには光子加速状態での軌道決定が必要であり、これも合わせて実現することでソーラーセイルによる航行技術を獲得した。この時点でフルサクセス達成となり、約半年間で実現できた。⑥ちょうどこの時期に金星に対しフライバイ（接近通過）した。

3. IKAROSのシステム

3.1 本体と膜面

IKAROSの質量は全体で約310 kg（膜面15 kgを含む）である。図5にIKAROSの本体と膜面を示す。IKAROSの本体は直径1.6 m、高さ0.8 mの円柱形であり、打ち上げ時には本体側面に膜面が巻き付けられている。

膜面は一辺14 m（対角で20 m）の正方形であり、厚さは

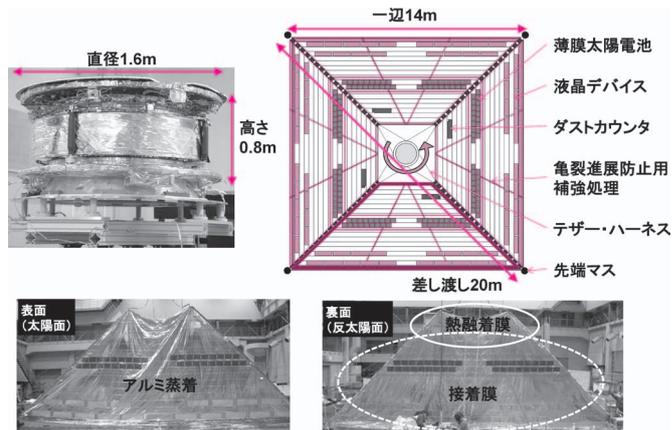


図5 本体と膜面.

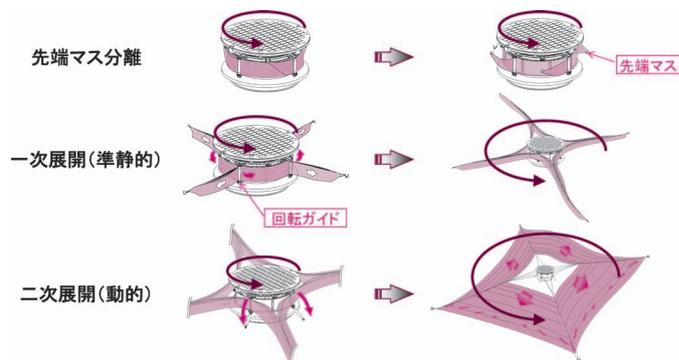


図6 膜面の展開方式.

わずか $7.5 \mu\text{m}$ である。膜材には宇宙環境にも耐えられるポリイミド樹脂⁷⁾を採用し、表面（太陽面）には太陽光を反射するようアルミニウムを蒸着している。また、亀裂の進展を防止するために補強処理が施してある。ポリイミド樹脂を接着で貼り合わせる場合、接着剤のアウトガスの問題や耐宇宙環境性能が問題となるため、熱融着可能なポリイミド樹脂も新たに開発し、膜面の一部に取り入れた。膜面には厚さ $25 \mu\text{m}$ のa-Si（アモルファスシリコン）の薄膜太陽電池⁸⁾以外に液晶デバイス、ダストカウンタ等も貼り付けられている。膜面と本体はテザー（紐）・ハーネスで機械的・電気的に結合されている。膜面の各頂点にはそれぞれ0.5 kgの先端マス（おもり）が取り付けられており、遠心力による膜面の展開・展張をサポートする。

3.2 展開システム

図6にIKAROSの膜面の展開方式⁹⁾を示す。IKAROSはスピンの遠心力を用いて膜面を展開する。膜面展開は主に、(1)先端マス分離、(2)一次展開、(3)二次展開の3つのプロセスに分けられる（いずれのプロセスにおいても、角運動量保存によりスピンレートは低下する）。

- (1) 4つの先端マスを同時に分離する。このとき、先端マスが本体に衝突しないよう事前に十分スピンドウンしておく。
- (2) 本体の側面に巻き付けられた膜面を解きながら展開する。ただし、一気に展開すると姿勢を乱すため、回転ガ

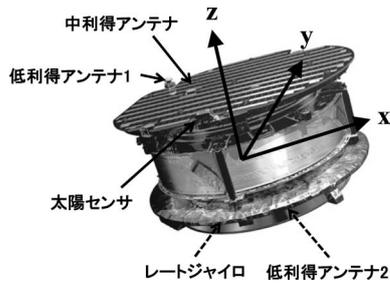


図7 姿勢決定システム機器配置.

イドで膜面の根元を押さえ、本体に対してゆっくりと相対回転することで、準静的に膜面を繰り出す。このとき、膜面が回転ガイドに引っかからず引き出されるよう事前に十分スピンアップしておく。一次展開終了時には、膜面は十字の形状となる。

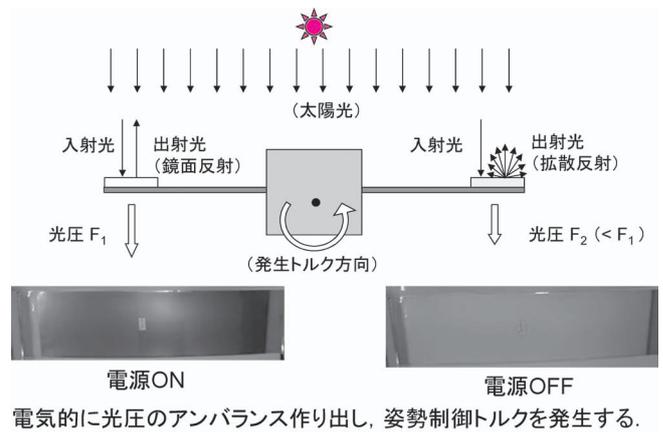
- (3) 4本の回転ガイドを同時に倒して、膜面の拘束を解放し一気に膜面を展開する。このとき振動が発生するが、しばらくすると減衰して、膜面は正方形の展張状態となる。

3.3 カメラシステム

IKAROSは膜面の展開・展張状態を把握するためにモニタカメラおよび分離カメラ¹⁰⁾を搭載している。モニタカメラは水平画角90 deg以上の広角レンズを採用し、4台のカメラヘッドで360 degの視野を持つよう構成されている。分離カメラは、それぞれ直径55 mm、高さ約60 mmの超小型カメラであり、本体から放出されて、離れた視点から撮像したデータをIKAROS本体に無線で伝送する。宇宙空間にて宇宙機自身の全景写真を撮るシステムは世界でも初の試みである。

3.4 姿勢決定システム

図7に姿勢決定システム¹¹⁾関連搭載品の配置を示す。IKAROSはスピンにより姿勢を安定化している宇宙機である。IKAROSでは低コスト化の一環として、通常の探査機のように恒星センサを用いて姿勢決定を行わず、太陽センサと通信電波を利用してスピン軸の慣性系に対する方向ベクトルを算出している。太陽センサにより太陽角(スピン軸と太陽方向のなす角)を求め、ダウンリンク通信のキャリア周波数のドップラーシフト量がスピン軸方向により変化することを地上で計測することにより地球角を算出する。このために、IKAROSの対地上通信アンテナは、いずれもスピン軸からオフセットした位置に配置されている。この方式は、地球と探査機の位置関係により得られる姿勢決定精度が変化する難点があるが、0.1-1 deg程度の精度の姿勢決定を、太陽センサとダウンリンク通信の低利得アンテナだけで構成できる利点がある。また、キャリア電波のドップラー計測を行うだけで姿勢情報を得ることができるため、通信回線のデータ送信状況に比較的依存しない姿勢決定システムが構築可能である。IKAROSはレートジャイロ(角速度センサ)により3軸角速度計測も可能である。



電氣的に光圧のアンバランス作り出し、姿勢制御トルクを発生する。



図8 液晶デバイスの動作原理.

3.5 姿勢制御システム

IKAROSではスラスタ(姿勢制御ロケット)として、新規開発された気液平衡スラスタ¹²⁾を採用した。これは液相で燃料を貯蔵し、気相で噴射するコールドガススラスタシステムで、燃料は代替フロン的一种であるHFC-134aを採用している。推進系としては液相貯蔵のため容積が小さく高圧部を有しない利点がある。また燃料が不燃かつ無毒で、高圧部がないことから、発射場作業時等地上での安全上の取り扱い¹³⁾が比較的簡単であり、相乗りの宇宙機に適したシステムと言える。搭載推薬量は20 kgであり、これでミッション期間中のスピン制御および姿勢制御を賄う(軌道制御は行わない)。

IKAROSでは、気液平衡スラスタ以外にも姿勢制御システムとして膜面端部に液晶デバイス¹⁴⁾を有している。図8のように電氣的に光学特性(鏡面反射率/拡散反射率/吸収率)を変化させることで膜面端部に印加される太陽光圧に不均一を発生させ姿勢制御を実現する。本デバイスは太陽光圧という微小でかつ持続的に作用する力を用いてトルクを発生させるため、インパルス的なトルクによって膜面の振動を励起することがなく、燃料も消費しないという点で有利である。

3.6 オプション機器

IKAROSはソーラー電力セイルミッション以外に以下のオプション機器による理学観測・工学実験も行い、いずれも世界一級の成果を得た。

- (1) ガンマ線バースト偏光検出器 GAP (= GAMMA-ray burst Polarimeter): 散乱型ガンマ線偏光検出器で、ガンマ線バーストの偏光度を世界で初めて測定した。
- (2) 大面積宇宙塵検出器 ALADDIN (= Arrayed Large-Area Dust Detector for INterplanetary Space): PVDF圧電素子薄膜を配置したダストカウンタによって地球より太陽に近

い領域での宇宙塵の分布を解明した。

- (3) VLBI (= Very Long Baseline Interferometry) 計測用マルチトーン送信器¹⁵⁾: 非常に遠くで輝いている電波星を利用して, IKAROS の軌道を正確に測定した。

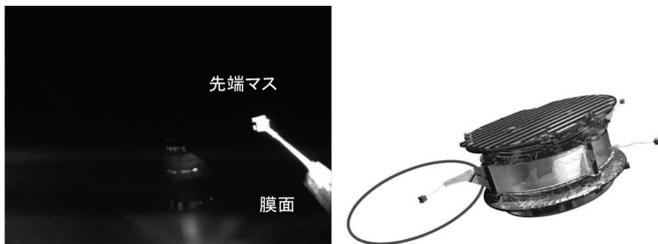
4. 運用結果

4.1 大型膜面の展開・展張

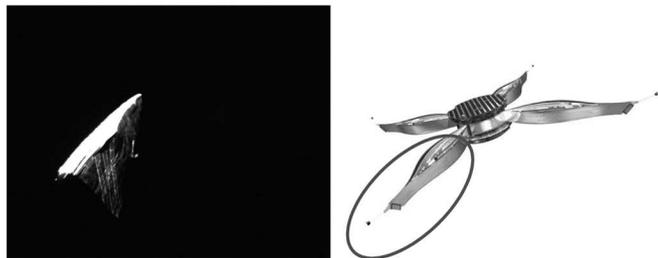
表1に大型膜面の展開・展張に関する運用実績, 図9に

表1 大型膜面の展開・展張に関する運用実績.

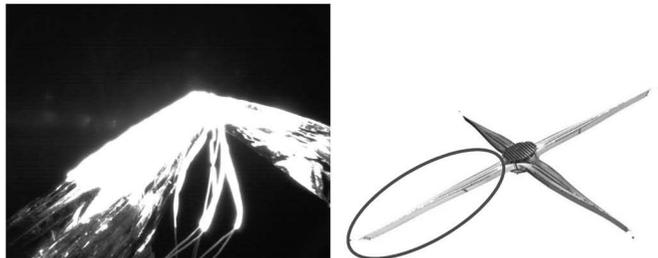
2010年5月21日	打ち上げ, スピン分離 (5 rpm)
2010年5月24日~25日	スピンドアウン (2 rpm)
2010年5月26日	先端マス分離
2010年5月27日~31日	スピンアップ (25 rpm)
2010年6月2日~8日	一次展開 (5 rpm)
2010年6月9日	二次展開 (2.5 rpm)
2010年6月14日	分離カメラ1回目の撮像実験
2010年6月16日	スピンドアウン (1 rpm)
2010年6月19日	分離カメラ2回目の撮像実験



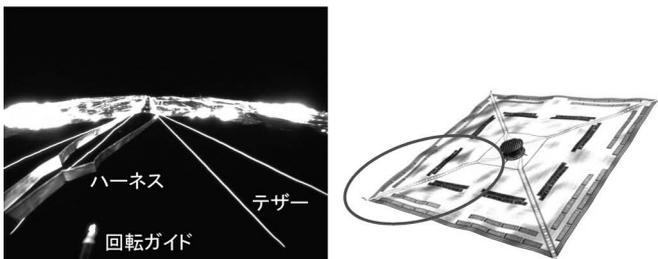
(a) 先端マス分離後



(b) 一次展開途中



(c) 一次展開後



(d) 二次展開後

図9 モニタカメラ画像と膜面状態予想図.

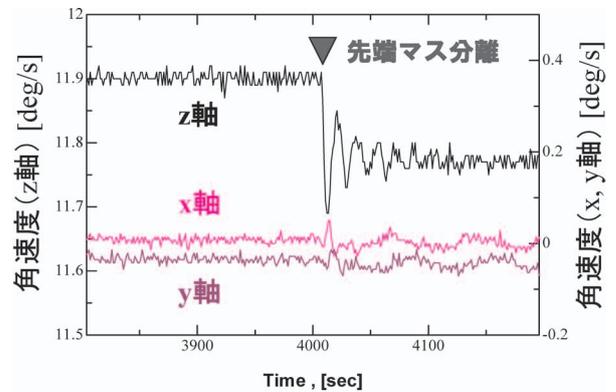
モニタカメラ画像と膜面状態予想図を示す。先端マス分離後のモニタカメラ画像から先端マスが正常に分離されたことが分かる。一次展開は回転ガイドを少しずつ駆動して実施した。モニタカメラ画像から膜面が少しずつ繰り出され、最終的に膜面が十字形状になっていることが分かる。二次展開は回転ガイドを解放して実施した。モニタカメラ画像は膜面が回転ガイドに引っかかることなく展開できていることを示している。

図10に x, y, z 軸の角速度のデータを示す。スピン軸は z 軸となる(x, y, z 軸の定義は図7参照)。先端マス分離後は、図10(a)を見ると角運動量保存により z 軸の角速度が低下しているが、一方で x, y 軸の角速度が0のままであることからニュートーション(首振り運動)は発生しておらず、4つの先端マスがすべて同時に分離されたと考えられる。二次展開では図10(b)のように x, y, z 軸の角速度のデータから、膜面を一気に展開したことで、ニュートーションが発生していることが分かる(数時間後には減衰した)。

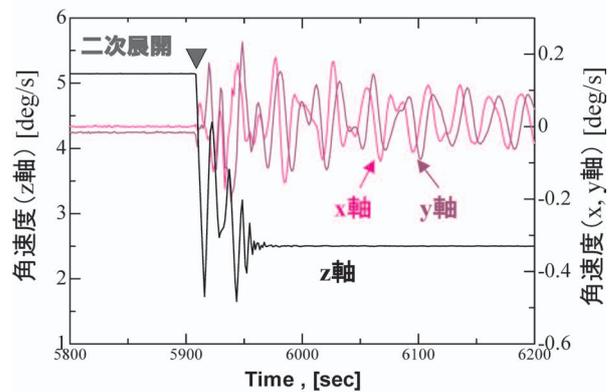
膜面展開後に分離カメラによる全景連続撮影を2回行った。図11に1回目の分離カメラの画像データを示す。膜面が破損なく、正方形に展張していることを確認できた。

4.2 ソーラーセイルによる航行

図12に二次展開前後の太陽光圧がある場合とない場合の速度差履歴を示す。二次展開前の速度差は誤差である。二次展開後の速度差の傾きから太陽光圧による推力は



(a) 先端マス分離時



(b) 二次展開時

図10 x, y, z 軸の角速度.

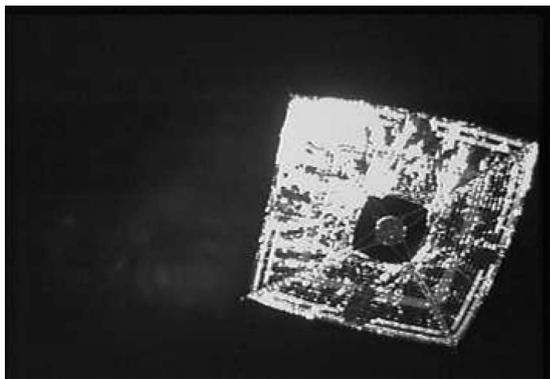


図11 1回目の分離カメラ画像.

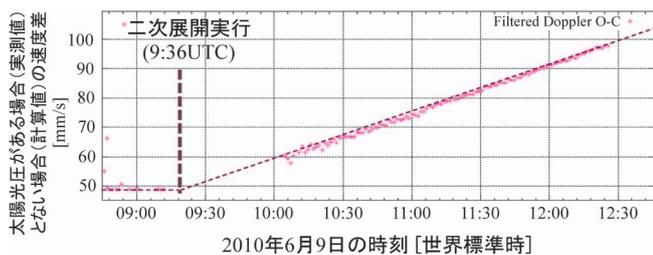


図12 二次展開時の速度履歴.

1.12 mNとなり、ほぼ設計値と一致した。これにより、IKAROSが世界初のソーラーセイルを実証したと言える。

セイル展開後のIKAROSは、その大面積の太陽光受光面のために、スピン型の探査機であるにも拘わらず慣性指向とは大きく異なるダイナミクスで運動している。ソーラーセイルにおいては膜面の向きを制御することが軌道制御となるため、姿勢軌道制御系運用としては最初の1か月はこの太陽光圧による姿勢挙動の同定に費やした。

IKAROSで観測されている、太陽光圧による姿勢運動は、以下の2点に大別される。

- (1) スピンレート変化 (太陽光がセイルにあたることで、「風車」のようにスピンレートが時々刻々変化していく。IKAROSでは一貫して減少傾向にある。)
- (2) スピン軸方向変化 (太陽光がセイルにあたることで、太陽近傍のある点回りに渦巻き運動をしながらスピン軸方向が太陽を追尾する。)

図13に太陽方向を基準としたスピン軸方向の時間履歴(1日毎のプロット)を示す。図中の縦軸は面外太陽角、横軸は面内太陽角である。ここで面外太陽角とは、探査機のスピン軸方向ベクトルと探査機軌道面のなす角であり、面内太陽角とは、スピン軸方向ベクトルの探査機軌道面内への射影ベクトルと太陽方向ベクトルのなす角である。つまり、図13はスピン軸方向ベクトルという2次元ベクトルを、軌道面内と軌道面外成分に分解して表示した図に相当する。スピン軸が慣性指向を行っている場合には、面外太陽角は変化せず、面内太陽角のみが軌道運動によって変化する。図13を見ると、展開直前はスピン軸が慣性指向しており、展開直後から面外太陽角も変化している様子が分かる。展

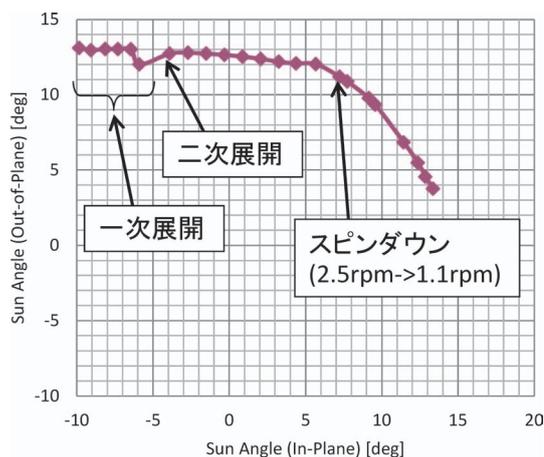


図13 二次展開後のスピン軸の運動.

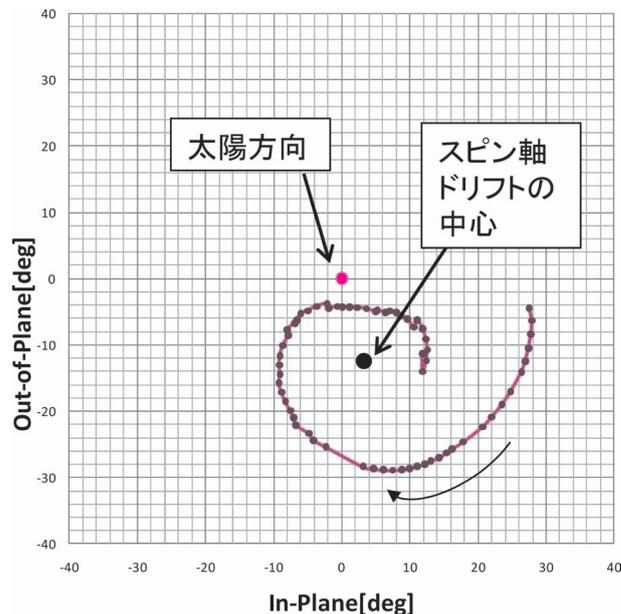


図14 スピン軸の渦巻き運動.

張状態で一定期間スピン軸制御を行わない場合のスピン軸の運動(2010年9月11日~11月30日の1日毎のプロット)を図14に示す。スピン軸が、太陽方向からオフセットした点を中心に渦巻き運動をし、¹¹⁾ スピン軸が太陽追尾する様子が分かる。IKAROSの運用では、太陽指向が必要な場合において本運動を利用し、姿勢制御用の燃料を節約している。

図15に、2回目の分離カメラによって撮影された液晶デバイスのON/OFFの様子を示す。この時点の太陽角は約13 degであり、カメラ自体を太陽方向へ射出したため、鏡面反射光はほとんどカメラに入ってくるが、拡散反射光のみがカメラに入ってくる。したがって、ON状態(鏡面反射)のデバイスは暗く写り、OFF状態(拡散反射)のデバイスは少し明るめに写っている。なお、本実験では、撮影のためON/OFFが交互に並ぶよう制御しており、実際の姿勢制御時のON/OFF状態とは異なっている。

実際にIKAROSの姿勢を制御する実験を実施し、姿勢

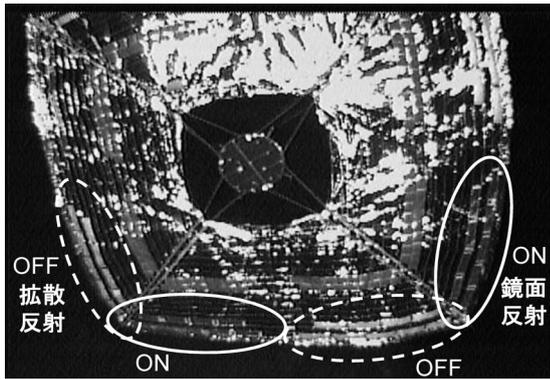


図15 液晶デバイスのON/OFF 状況撮影結果.

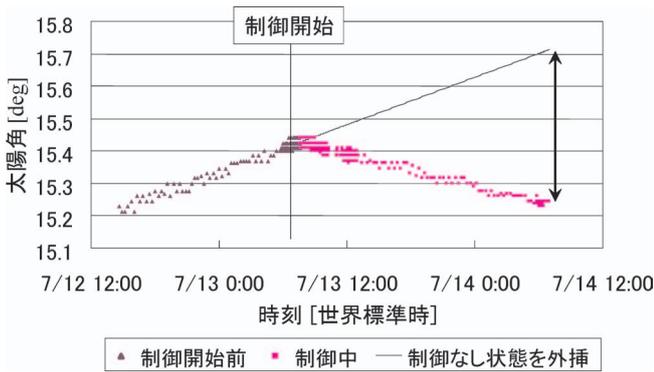


図16 太陽指向制御時の太陽角履歴.

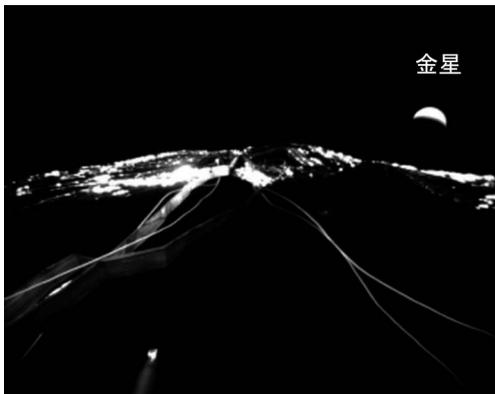


図17 金星フライバイ時のモニタカメラ画像.

制御性能を軌道上で評価した。図16は、制御実験前後の履歴を、太陽角で評価したものである。図の横軸が時刻、縦軸が太陽角である。制御開始以前は、太陽光圧トルクに起因する姿勢ドリフト運動により、太陽角が徐々に増加しているのに対して、液晶デバイスで太陽指向制御することにより、太陽角の増加傾向を逆転させ、太陽角を減少させることに成功した。図16から読み取れる約0.5 deg/dayの姿勢制御性能は、ほぼ設計値通りの制御性能を実証することができたと言える。

IKAROSは、金星探査機あかつきと相乗りにて金星遷移軌道に打ち上げられ、あかつきからは1日遅れの2010年12月8日に、金星からおよそ8万kmの距離をフライバイした(図17, 図18)。この1日の遅れは、ほぼ弾道飛行をす

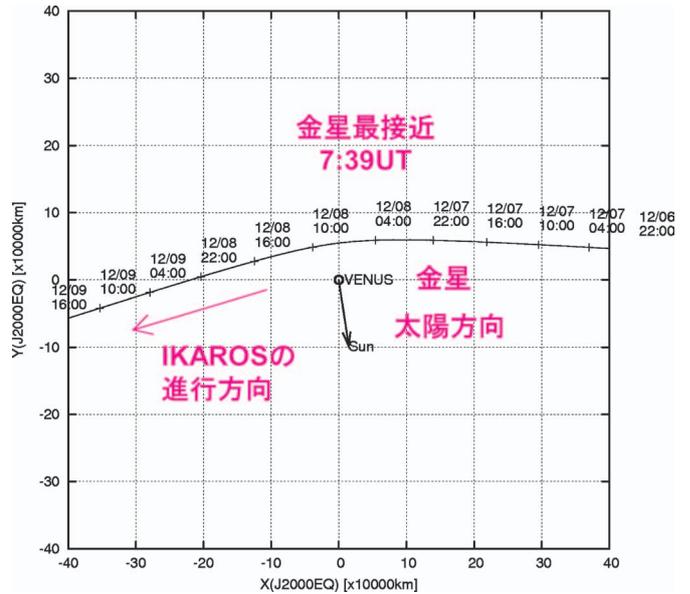


図18 金星フライバイ時のIKAROSの軌道.

るあかつきに対し、IKAROSがソーラーセイルによる非弾道飛行をした結果である。また、あかつきは金星の太陽側へ誘導されたのに対し、IKAROSは上述の非弾動的な効果により、金星の夜側に誘導された(図18)。

5. 今後の展望

5.1 木星圏探査計画

IKAROSによる実証を踏まえて新たにソーラー電力セイル探査機を開発し、光子加速および高性能イオンエンジンを併用した推進により木星圏探査を実現する。この計画では惑星間の巡航飛行環境を利用した複数の科学観測を行うことが大きな特徴であり、①黄道面ダストによって遮られてきた赤外線背景放射の掃天観測、②黄道光の立体的観測、③太陽系ダスト分布のその場計測(直接計測)、④ガンマ線バーストの偏光観測、⑤メインベルト小惑星のフライバイ観測、⑥木星の磁気圏観測、⑦太陽-木星系のラグランジュ点(L4)に存在するトロヤ群小惑星帯のランデブ観測を行うことなどにより、惑星科学や宇宙物理学の大きな進展に寄与する(図19)。なおIKAROSで搭載したオプション機器ALADDINとGAPはそれぞれ上記の③、④の事前検証という位置付けにもなっている。

木星圏探査ソーラー電力セイル探査機は図20に示すように、探査機・木星オービターで構成され、木星フライバイ時にオービターを分離し、木星周回軌道へ投入する。探査機は、2,000 m²のソーラー電力セイルにより電力を確保して高性能イオンエンジンを駆動し、ソーラーセイルと組み合わせたハイブリッド推進を実現する。また、探査機はスピン方式ではなく、ロータ・ステータ方式を採用しており、セイルはスピンの遠心力により展開・展張するが、本体はスピンせずにイオンエンジンを駆動する。さらに探査機は、(イオンエンジンと相補的な)2液推進機関について、

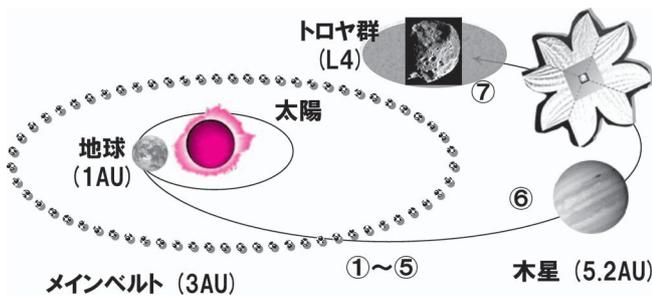


図19 木星圏探査計画における観測I.クルージングフェーズ (①宇宙赤外線背景放射の観測, ②黄道光の立体的観測, ③太陽系ダスト分布のその場計測, ④ガンマ線バーストの観測, ⑤メインベルトフライバイ観測). II. 木星圏近傍 (⑥木星磁気圏観測, ⑦トロヤ群小惑星ランデブ観測).

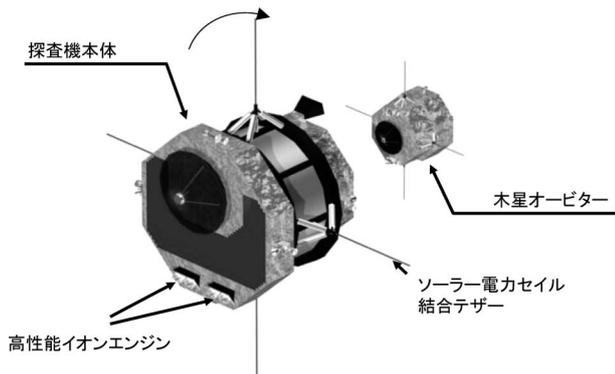


図20 木星圏探査ソーラー電力セイル探査機.

ヒータ電力を削減するため低温動作させて、さらに、これを燃料電池と統合するなど新規技術を数多く採用し、将来必須となる技術の実証を目的に各種工学実験も行う。

本計画は打ち上げから3年後にメインベルト通過、5年後に木星到達、10年後にトロヤ群小惑星到達を想定しており、IKAROSの成果を踏まえて、2020年ごろに打ち上げることで、米欧露が2020年代中盤に実現を目指している木星圏の国際総合探査構想に日本も独自の宇宙機で参画が可能となる。

5.2 個別技術の応用

(1) 薄膜太陽電池

大面積の薄膜太陽電池を用いれば、外惑星領域(木星圏の太陽光強度は地球周辺の25分の1)でも原子力を用いずに大電力を確保できる。宇宙太陽光発電システムの電池にも適している。また、重量制約の厳しい超小型衛星がまとまった電力を確保するための手段となりうる。低コスト化が進めば、商業利用や地球環境にも貢献できる。

(2) スピン型展開・展張方式

本方式は軽量・簡易な機構で大型膜面の展開を実現できるため、ソーラーセイル、薄膜太陽電池の展開はもちろん、これ以外にも広く応用が可能である。

(3) 分離カメラ

分離カメラは離れたところから宇宙機自身を撮影できることが特徴であり、展開構造物の撮影以外にも不具合時の宇宙機の状態確認等に広く応用できる。

6. おわりに

本稿では、IKAROSのミッション・システムを紹介し、開発・運用の概要を報告した。IKAROSは、2010年5月21日に打ち上げられ、4つのミッション(大型膜面の展開・展張、薄膜太陽電池による発電、ソーラーセイルによる加速、ソーラーセイルによる航行技術の獲得)をすべて達成し、世界初のソーラー電力セイルの実証に成功した。同年12月8日に金星に最接近した後は、後期運用として、従来ミッションを継続するだけでなく、大型膜構造の研究や太陽輻射圧を含む軌道決定・誘導制御の研究に寄与する新規テーマも実施している。これらの実績も踏まえて、ソーラー電力セイル探査機による木星圏探査計画を検討中である。

参考文献

- 1) C. R. McInnes: *Solar Sailing, Technology, Dynamics and Mission Applications* (Springer-Praxis, 1999).
- 2) J. Kawaguchi: 35th COSPAR Scientific Assembly, Paris, 2004.
- 3) O. Mori, *et al.*: Trans. Jpn. Soc. Aeronautical and Space Sci., Space Technol. Jpn. 7 (2009) Pd_87-Pd_94.
- 4) G. Greschik and M. M. Mikulas: J. Spacecraft and Rockets **39** (2002) 653.
- 5) J. D. Hinkle, P. Warren and L. D. Peterson: J. Spacecraft and Rockets **39** (2002) 662.
- 6) Y. Tsuda, O. Mori, S. Takeuchi and J. Kawaguchi: Space Technol. **26** (2006) 33.
- 7) R. Yokota, *et al.*: 28th Int. Symp. on Space Technology and Science, Okinawa, 2011.
- 8) K. Tanaka, *et al.*: 61st Int. Astronautical Congress, Prague, 2010.
- 9) H. Sawada: 61st Int. Astronautical Congress, Prague, 2010.
- 10) S. Matunaga, *et al.*: 28th Int. Symp. on Space Technology and Science, Okinawa, 2011.
- 11) Y. Tsuda, *et al.*: 28th Int. Symp. on Space Technology and Science, Okinawa, 2011.
- 12) Y. Kishino, M. Tamura, T. Yamamoto and O. Mori: 61st Int. Astronautical Congress, Prague, 2010.
- 13) T. Yamamoto, O. Mori, H. Sawada and R. Funase: 61st Int. Astronautical Congress, Prague, 2010.
- 14) R. Funase, *et al.*: 61st Int. Astronautical Congress, Prague, 2010.
- 15) H. Takeuchi, *et al.*: 28th Int. Symp. on Space Technology and Science, Okinawa, 2011.

非会員著者の紹介

森 治氏: 博士(工学), 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所助教, IKAROS責任者, 専門は、動力学・制御, 宇宙機システム。
津田雄一氏: 博士(工学), 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所助教, IKAROS副責任者, 専門は、軌道力学・誘導航法制御, 宇宙機システム。

(2011年6月28日原稿受付)

Solar Power Sail Demonstrator IKAROS

Osamu Mori and Yuichi Tsuda

abstract: Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) successfully achieved the world's first solar power sail technology by IKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun) mission in 2010. It demonstrated a photon propulsion and thin film solar power generation during its interplanetary cruise. The sail of 200 m² was deployed and kept extended by centrifugal force of the spacecraft rotation. IKAROS also succeeded in accelerating and controlling the orbit by actively exploiting solar radiation pressure, and thus became the world's first actual solar sailer flying an interplanetary voyage. This paper presents the design of IKAROS solar sail system, operation results and introduces a perspective of this new technology to apply to the next generation mission toward Jupiter and Trojan asteroids.

パターン形成と結合した液滴の自発運動

北畑 裕之* (千葉大学大学院理学研究科 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

義永那津人 (東北大学原子分子材料科学高等研究機構 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)

永井 健 (東京大学大学院理学系研究科 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

住野 豊 (愛知教育大学 448-8542 刈谷市井ヶ谷町広沢 1)

物体の自発的運動は、生物を含む一部の非平衡系に特徴的な現象である。近年、「動くもの」を抽象化した「アクティブマター」が盛んに研究されている。本稿では、系の内部で自己組織的にパターンが形成され、それに伴って自発的に運動する液滴についての実験を紹介する。この実験が、液滴内部の濃度場が従う反応拡散方程式と、界面張力変化を通して引き起こされる流体場との結合により説明できることを解説する。

1. はじめに

近年、非平衡条件下での物体の自発的な運動に焦点を当てた研究が盛んに行われており、このような「動くもの」に関係する系は「アクティブマター (active matter)」という言葉を用いてまとめられている。¹⁾ アクティブマターに関する研究が対象とする系はさまざまなスケールにわたっており、細胞が基板上を這いまわる運動²⁾や、多くの細胞が相互作用しながら形成する組織の運動³⁾といったマイクロメートルスケールの系から、鳥や魚が群れを作っているときの集団運動といったメートルスケールの系⁴⁾までが議論の対象となっている。スケールはさまざまであるが、共通点として、系を抽象化すると「自由エネルギーを消費しながら自発的に動く素子やその集団」として捉えられる点が挙げられる。このような抽象化を行うことによって、理論的研究の幅が広がり、普遍的な性質を明らかにできる。たとえば、変形しながら運動する粒子の基礎モデル⁵⁾や相互作用しながら動き回る素子のモデル^{6,7)}などはその一例である。ここでは、平衡系では見られない動的な現象における秩序が見つかっている。このような研究は生物の運動機構の解明につながる事が期待される。

アクティブマターに関する研究は主に生体材料を用いた実験的研究と、それらを抽象化したモデルに対する理論的研究に大別される。生体材料をそのまま用いると系は複雑になりすぎるため、理論的研究との直接的なつながりを考えるのはより難しい。そこで、われわれは生体材料は使わずに、自発的な運動をする非生物系をデザインして実験を行い、理論的考察とのつながりを常に意識しながら研究を行ってきている。例えば、界面活性剤分子の相間移行のプロセスを利用して液滴が運動する系⁸⁾や、アルコールなど界面活性を持つ物質を周囲に拡散しながら変形しつつ運動する液滴系についての研究などを進めてきた。⁹⁾ 本稿では、液滴内で化学物質の濃度場が自発的にパターンを形成し、その濃度場の空間構造と結合して液滴が自発的に運動する系¹⁰⁾を紹介する。

2. パターン形成と結合した液滴の自発運動

細胞内で運動をつかさどるタンパク質として知られているアクチンフィラメントの重合領域が、時間とともに移動し、らせんが回転しながら動いていくような時空間構造になっていることが、近年報告されている。¹¹⁾ このような現象は、細胞内での時空間パターンと細胞運動が密接に関係していることを示唆している。そこで、非平衡条件下でパターン形成と運動が結合する単純なモデルを考える。

エネルギー散逸系におけるパターン形成は古くから反応拡散系の枠組みで議論されてきた。すなわち、濃度場を時間と空間の関数として表し、濃度場の時間発展を局所的な時間変化 (主に化学反応に相当する) と近傍への拡散の和として表現するものである。ここでは、 $c_i (i=1, \dots, N)$ を N 種類の化学物質の濃度としてその時間発展を

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = f_i(c_1, c_2, \dots, c_N) + D_i \nabla^2 c_i, \quad (1)$$

と表す。 D_i は i 番目の化学物質の拡散係数である。このような反応拡散系の枠組みで空間的に均一な状態が不安定化して、チューリング (Turing) パターンと呼ばれる周期的な構造が自発的に生成したり、パルス構造が伝播することが知られている。一方、反応拡散系に対応する実験として最もよく知られているものの一つにペロソフ・ジャボチンスキー (Belousov-Zhabotinsky) (BZ) 反応がある。BZ 反応は、数種の物質を混合するだけで実現できる簡単なものであるが、攪拌条件下では周期的な色の変化を呈する。また、溶液を静置しておく「化学波」と呼ばれるパルス波が生成、伝播し、図 1 に示すように媒質にターゲットパターンと呼ばれる同心円状のパターンやスパイラルパターンと呼ばれるらせん状のパターンを自発的に作り出す。BZ 反応に対する数理モデルとしてオレゴネーター (Oregonator) が確立されており、現象と実験の対応の良さからもパターン形成の研究によく用いられている。ここで注意しておきたいのは、BZ 反応に代表されるようなパターン形成においては、パターンの伝播する速さで物質が動いているのではなく、物質は単に拡散で近傍に広がっているにすぎないという点である。すなわち、反応拡散系における「波」は状

* JST さきがけ

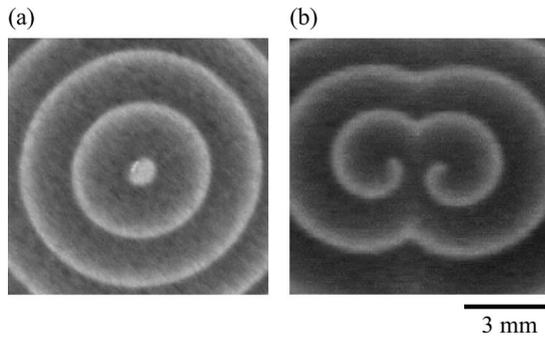


図1 BZ反応溶液に見られる自発的パターン形成. 作成した溶液をメンブレインフィルターに染み込ませるだけで生成する. (a) ターゲットパターン. (b) スパイラルパターン.

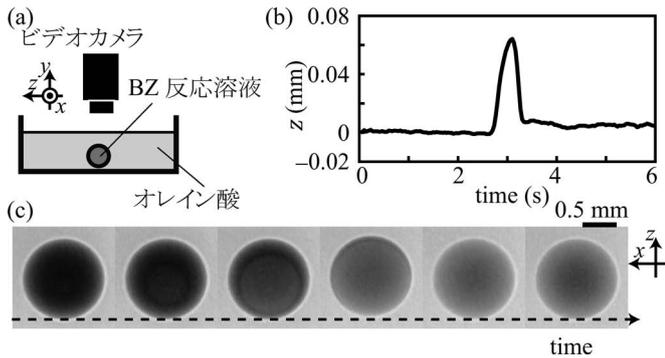


図2 BZ反応液滴の自発的運動の実験. (a) 実験装置の模式図. (b) 液滴の重心位置の動き. z 軸は(c)に示す向きに対応する. (c) 液滴の1sおきのスナップショット. 暗い部分が還元状態, 明るい部分が酸化状態である. (フルカラー口絵参照.)

態が伝播しているのである.

われわれは, このBZ反応をミリメートルスケールの液滴にして油の中に沈めた系を構築した. 鉄錯体を触媒として用いたBZ反応において, 反応溶液は酸化状態と還元状態の間を数秒から数十秒のオーダーで振動する. また, この状態変化に伴って表面張力が変化することが報告されている.¹³⁾ ここで, 油水界面であっても界面張力の差が発生することが知られているため, 油としてはオレイン酸を用いた.

液滴内で化学波が発生すると, 局所的な界面張力の差が生みだされ, 液滴は図2に示すように並進運動する. 濃度揺らぎにより液滴内のランダムな点から化学波(写真では色が薄い部分)が自発的に生成し(1枚目の写真)化学波が同心球状に伝播する(2枚目の写真). 化学波が液滴の下側の界面に到達したとき(3枚目の写真)に界面張力のバランスが崩れて液滴が運動し始める. 化学波の伝播とともに界面張力の勾配が逆転し(4枚目, 5枚目の写真), 液滴の運動方向も逆転し, 最終的には初期位置から少しシフトした位置に液滴は戻る(6枚目の写真).

BZ反応液滴の運動は液滴そのものの界面の界面張力が変化することにより生じる. すなわち, マランゴニ(Marangoni)効果により界面張力勾配が流れを引き起こし, この流れによって液滴が駆動される. そのため, 液滴にかかる力のバランスと液滴まわりの流れ場を考えなければな

らない. そこで, われわれは界面張力が空間分布を持つ球状の液滴の運動について一般的に議論した.

3. 界面張力勾配により駆動される球状液滴

前節で紹介したような液滴内部で化学反応が起きつつ, 液滴が自発的に運動するような系の一般的なモデルを考えたい. まず化学反応に関しては, 反応拡散方程式に移流の効果を入れる必要がある. すなわち, 流れ場を \mathbf{v} として

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla c_i = f_i(c_1, c_2, \dots, c_N) + D_i \nabla^2 c_i, \quad (2)$$

と書ける. BZ反応に対応させる際には化学反応の部分は2変数で記述できることが知られている. すなわち $N=2$ として, $U=c_1$, $V=c_2$ とすると, 前述したオレゴネーターを用いて

$$f_U(U, V) = \frac{1}{\epsilon} \left[U(1-U) - fV \frac{U-q}{U+q} \right], \quad (3)$$

$$f_V(U, V) = U - V, \quad (4)$$

となる. これらの変数 U, V はBZ反応では亜臭素酸(HBrO_2)および酸化状態の触媒($\text{Fe}(\text{phen})_3^{3+}$)の濃度に対応することが知られている. ここで, f, q, ϵ は反応の特徴を決めるパラメータであり, それぞれ反応の閾値, 無次元化した化学反応定数, 反応の時定数に対応する.

また流れ場に関しては非圧縮条件($\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$)を課し, 流体の基礎方程式であるナビエ・ストークス(Navier-Stokes)方程式

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = \eta \nabla^2 \mathbf{v} - \nabla p, \quad (5)$$

で記述することができる. ここで, ρ は密度, η は粘性係数, p は圧力である.

今回のBZ反応液滴の実験においてレイノルズ(Reynolds)数を計算すると0.1程度であり, 流れに乱流的な構造は見られないので, レイノルズ数を0とする近似を行う. 細胞スケールの運動を考えても, 同様にレイノルズ数は十分に小さいとすることができ, ナビエ・ストークス方程式の移流項はほとんど効かないことが知られている.¹²⁾ さらに, 化学反応場に比べて流れ場も定常状態であると仮定すると, ナビエ・ストークス方程式は

$$\eta \nabla^2 \mathbf{v} - \nabla p = 0, \quad (6)$$

と変形される. この形はストークス(Stokes)方程式と呼ばれている. このような近似の結果, 系の時間発展は反応拡散移流方程式(式(2))のみで記述し, 流れ場は化学濃度場に追従するという, 対流構造や運動に関して見通しのよい記述が得られる. 化学濃度場から流体場への結合は, 界面における界面張力が化学物質の濃度の関数であるとすれば自然に導入される. すなわち, γ を界面張力として

$$\gamma = h(c_1, \dots, c_N), \quad (7)$$

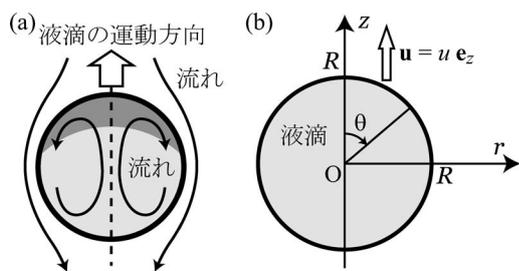


図3 今回考察するモデルの模式図。(a) BZ反応液滴との対応。図中の矢印のように流れが生成され、液滴が駆動される。(b) 液滴の運動を考える際の座標系。系は z 軸周りに軸対称であると仮定し、界面張力 γ は θ にのみ依存するとする。流れ場も r 方向と θ 方向のみを考えればよい。

と表せる。今回のBZ反応に関しては、過去の文献13より、酸化状態の触媒濃度が高いほど界面張力が大きいことが知られているので、 γ は V の増加関数となる。そこで、依存性が線形であると仮定して $\gamma = \gamma_0 + kV$ とおく。

液滴の形状は半径 R の球から変形しないと仮定し、速度 \mathbf{u} で運動しているとする。簡単のため、化学濃度場はある軸に関して軸対称であるとし、図3のように球の中心を原点とする極座標で考える(対称軸が z 軸)。つまり、化学濃度場 c_i は動径 r と極角(対称軸からの角) θ のみの関数 $c_i(r, \theta)$ であるとする。このとき、界面張力は θ のみの関数($\gamma = \gamma(\theta)$)となり、液滴の運動方向は対称軸方向になるため、 $\mathbf{u} = u\mathbf{e}_z$ (ただし、 \mathbf{e}_z は z 軸方向の単位ベクトル)と表せる。

実験室系で考えると移動境界問題となって複雑になるが、液滴が静止している系に座標変換して考えると、境界の位置は動かず、問題は単純になる。すなわち、流れ場が $r \rightarrow \infty$ で $-\mathbf{u}$ ($= -u\mathbf{e}_z$)となればよい。また、界面が動かないので、液滴の界面で法線方向の流速が0、接線方向の流速が液滴内外で一致、という境界条件が与えられる。界面張力に関しては、液滴界面での接線方向のストレスのバランスを考えなければならない。すなわち

$$\sigma_{r\theta}^{(i)} \Big|_{r=R} = \sigma_{r\theta}^{(o)} \Big|_{r=R} + \frac{1}{R} \frac{\partial \gamma}{\partial \theta}, \quad (8)$$

を満たす。また、液滴は周囲の液体から局所的な力は受けるが、全体として力を受けない(合力として0になる)ため“force-free”条件

$$\mathbf{f} = \int dS \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}^{(o)} \Big|_{r=R} = \mathbf{0}, \quad (9)$$

が成り立たなければならない。ここで dS による積分は液滴界面についての表面積分である。

ストークス方程式は線形であるため、これらの条件を与えることにより流れ場および液滴の運動速度 u はすべて求まる。^{14,15)} 界面張力 $\gamma(\theta)$ を $\gamma(\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \Gamma_n P_n(\cos \theta)$ とルジャンドル(Legendre)展開する。ただし、 P_n はルジャンドル多項式である。このとき、液滴の運動速度 u は

$$u = -\frac{2}{9\eta^{(i)} + 6\eta^{(o)}} \Gamma_1, \quad (10)$$

と表すことができる。ただし、添え字(i)と(o)はそれぞれ

液滴の内部、外部を示す。また液滴内外の流れ場も同様に求めることができる。

このような計算から、ナビエ・ストークス方程式の非線形項である移流項を無視しても方向性を持った運動を記述できることがわかる。今回は液滴内部のパターン形成が表面の界面張力勾配の空間不均一性と結合することが運動の原因であるが、界面張力ではない界面物性の空間分布と液滴内部のパターン形成が結合するような運動に対しても同様のアプローチができることが期待される。

4. 数値計算結果

前節で述べた枠組みをもとに、BZ反応液滴の運動の数値計算を行った。すなわち、オレゴネーター(式(3)、式(4))を用いて、反応拡散移流方程式(式(2))を計算し、濃度場と界面張力の関係(式(7))から $\gamma(\theta)$ を導いた。その結果を移流項に反映するとともに、液滴の速度および重心座標、周囲の流れ場を計算することができた。その結果を図4に示す。ただし、時間、空間ともに無次元化して計算している。

液滴の下半分の一点から化学反応波を発生させたところ、化学波は同心球状に伝播し、液滴界面に接触した際に液滴界面に界面張力勾配が生み出され、液滴の内部および外部に対流が発生して、液滴が動き始める。化学波の先端が液滴上部の界面に接触するとともに、液滴内部の対流構造が逆転し、液滴の運動方向も逆転する。このような運動は図2に示した実験結果と対応しており、BZ反応液滴の運動は界面張力勾配が対流を引き起こし、その結果液滴全体の運動が生み出されたものだと考えられる。実際、BZ反応溶液と油相の界面において界面張力勾配により対流が引き起こされることもこれまでに確認しており、¹⁶⁾ 今回行った解析は妥当であると考えられる。

数値計算結果によると、液滴の最終的な位置は初期位置からずれている。これを3節で紹介したようなストークス方程式を基にした解析計算の枠組みで考察する。まず、各点で濃度が始状態と終状態が同じであると仮定する。界面張力の変化が波のように伝わり、時間の原点だけをずらしたただけであるとすれば、たとえ濃度の時間変化が時間反転対称でなかったとしても、液滴は完全に元の位置に戻ることが導かれる。つまり、このずれは液滴内で化学波がそれ自体の曲率や対流の影響により変形することで、濃度の時間変化のプロファイルが場所により異なることが原因であると考えられる。言い換えれば、化学波自体の持つ非線形性や化学波と対流の結合に起因する非線形性が生み出した液滴の変位であると言える。

実験において、液滴内部で起こっている化学波は、図1における(a)のターゲットパターンに対応するものである。(b)のスパイラルパターンに対応するような化学波が発生したときにはどのように運動するのか、というのは自然な興味である。また、実際に先述したように細胞内ではらせん状の状態変化の波が観察されている。液滴は3次元であ

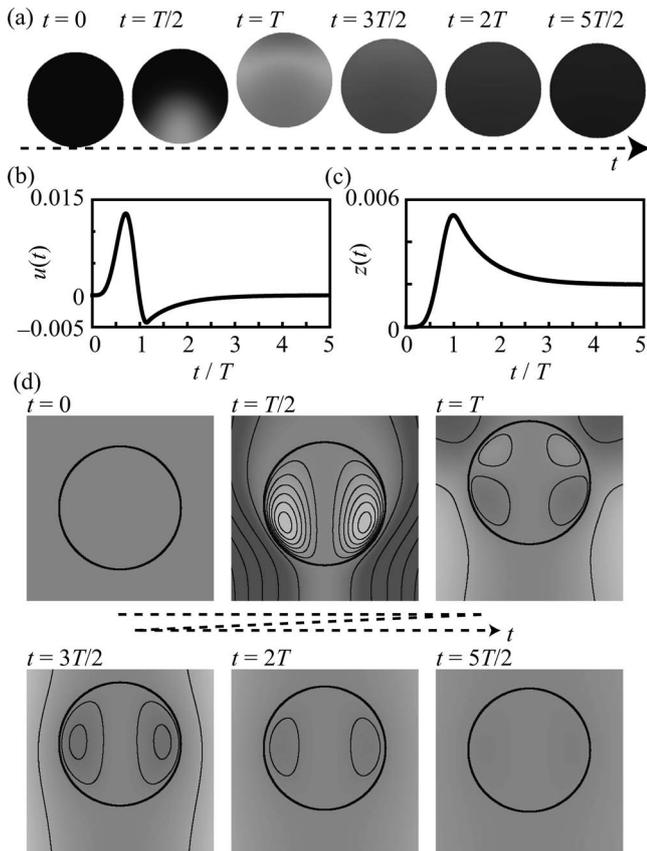


図4 BZ反応液滴の運動に関する数値計算結果。(a)液滴内の濃度分布。軸対称な分布を仮定しており、回転軸(縦方向の直径)を含む断面での分布を示す。酸化状態の触媒濃度に対応する変数 V が大きい領域は明るく、小さい領域は暗く着色した。実験結果の図2の(c)と対応する色になっている。(b) z 軸方向の速度の時間変化。(c) z 軸方向の液滴の重心位置の時間変化。(d)液滴内外の流れ場のスナップショット。流線は流れ関数を基にして描いた。流れは軸対称であり、右半球において明るい領域は時計回りの、暗い領域は反時計回りの流れ場を表す。(フルカラー口絵参照。)

るので、純粋にスパイラルパターンを考えることは難しいが、3次元空間においては、スクロールリング(scroll ring)という構造(2次元断面がスパイラルパターンになる)が知られている。そこで、液滴内でスクロールリングが発生している状況での数値計算を行った。その結果を図5に示す。液滴の内部でらせん波が連続的に生成され、その波が液滴の界面と接触する点が、時間とともに変化していくため、液滴界面での界面張力勾配の向きがほぼ周期的に逆転し、液滴の運動方向も周期的に変化する。今回示した結果においては、スクロールリングの中心が徐々に移動して液滴の外に出てしまうため、最終的に液滴は静止するが、液滴のサイズやパラメータによっては周期的な運動が安定になることも期待される。

5. おわりに

本稿では、液滴内部でパターン形成をしながら球形を保ったまま並進運動する液滴のみを取り扱った。液滴内部に発生しうるパターンは多様であるため、そのパターンに依存してより複雑な運動を考えることもできる。また、このようなストークス方程式を用いた考察は液滴の回転運

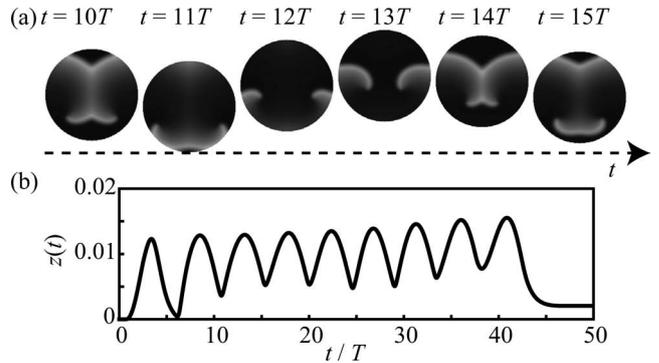


図5 BZ反応液滴の運動に関する数値計算結果。(a)液滴内の濃度分布。軸対称な分布を仮定しており、回転軸(縦方向の直径)を含む断面での分布を示す。酸化状態の触媒濃度に対応する変数 V が大きい領域は明るく、小さい領域は暗く着色した。スクロールリングは $t=2.5T$ に人為的に波の一部を消すことにより発生させた。(b) z 軸方向の液滴の重心位置の時間変化。

動^{17,18)}にも適用することができる。さらには、変形しながら自発運動する液滴⁹⁾に関しても、摂動的な取り扱いにより議論することもできそうである。実験系としては生物とは程遠いシンプルな系であるが、それでも多様な運動が見られ興味深い。用いる物質の性質を変えることにより、運動を制御することも可能になると考えられ、マイクロ流路のアクチュエーターなどへの応用面も期待される。

本研究を行うにあたって太田隆夫教授、佐野雅己教授、吉川研一教授には、さまざまな助言をいただいた。なお、本研究の一部は科学研究費補助金(若手研究(B))の援助を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) S. Ramaswamy: Annu. Rev. Condens. Matter Phys. **1** (2010) 323.
- 2) Y. T. Maeda, J. Inose, M. Y. Matsuo, S. Iwaya and M. Sano: PLoS ONE **3** (2008) e3734.
- 3) F. Siegert and C. J. Weijer: Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **89** (1992) 6433.
- 4) D. J. T. Sumpter: *Collective Animal Behavior* (Princeton Univ. Press, NJ, 2010).
- 5) T. Ohta and T. Ohkuma: Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 154101.
- 6) D. Tanaka: Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 134103.
- 7) T. Vicsek, A. Czirók, E. Ben-Jacob, I. Cohen and O. Shochet: Phys. Rev. Lett. **75** (1995) 1226.
- 8) Y. Sumino, N. Magome, T. Hamada and K. Yoshikawa: Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 068301.
- 9) K. Nagai, Y. Sumino, H. Kitahata and K. Yoshikawa: Phys. Rev. E **71** (2005) 065301 (R).
- 10) H. Kitahata, Y. Yoshinaga, K. H. Nagai and Y. Sumino: Phys. Rev. E **84** (2011) 015101 (R).
- 11) M. G. Vicker: Biophys. Chem. **84** (2000) 87.
- 12) E. Lauga and T. R. Powers: Rep. Prog. Phys. **72** (2009) 096601.
- 13) K. Yoshikawa, T. Kusumi, M. Ukitsu and S. Nakata: Chem. Phys. Lett. **211** (1993) 211.
- 14) J. Happel and H. Brenner: *Low Reynolds Number Hydrodynamics* (Prentice-Hall, NJ, 1965).
- 15) M. D. Levan: J. Colloid. Interface Sci. **83** (1981) 11.
- 16) H. Kitahata, R. Aihara, N. Magome and K. Yoshikawa: J. Chem. Phys. **116** (2002) 5666.
- 17) F. Takabatake, N. Magome, M. Ichikawa and K. Yoshikawa: J. Chem. Phys. **134** (2011) 114704.
- 18) K. Nagai, F. Takabatake, Y. Sumino, H. Kitahata, M. Ichikawa and N. Yoshinaga: submitted.

(2011年12月20日原稿受付)

Spontaneous Motion of a Droplet Coupled with Pattern Formation

Hiroyuki Kitahata, Natsuhiko Yoshinaga, Ken H. Nagai and Yutaka Sumino

abstract: We propose a model experiment and theoretical framework for the spontaneous motion of a droplet coupled with pattern formation through chemical reaction inside it. The nonlinearity of the chemical reaction gives rise to inhomogeneous concentration profile, which leads

to interfacial tension gradient at the droplet interface. The interfacial tension gradient induces self-propulsion of the droplet itself through the surrounding flow due to the Marangoni effect. The experiments are made by using a droplet of Belousov-Zhabotinsky (BZ) reaction medium. Numerical calculations for the dynamics on the concentration profiles inside the droplet together with analytical results on the flow fields at low Reynolds number well reproduce the experimental results.

最近の研究から

二重ベータ崩壊の核行列要素を検証する

矢向謙太郎 (東京大学大学院理学系研究科 113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)

酒井英行* (東京大学大学院理学系研究科 113-0033 東京都文京区本郷7-3-1)

ニュートリノ質量の絶対値を決める目的で、ニュートリノ放出を伴わない 0ν 二重ベータ崩壊の探索が世界各地で行われている。崩壊寿命からニュートリノ質量を導くには核行列要素の理論計算が必要である。はたして、現在の理論計算はニュートリノ質量を導くために十分な精度を持っているのであろうか？ ^{48}Ca が ^{48}Ti に崩壊する二重ベータ崩壊について、中間核 ^{48}Sc のガモフ・テラー (1^+) 状態を経由する核行列要素成分を検証する目的で、荷電交換反応の散乱実験を行い、ガモフ・テラー遷移強度分布を求めた。現在の核構造の理論計算はガモフ・テラー遷移強度分布を再現せず、核行列要素の記述が不十分である可能性を示す結果となった。

1. はじめに：二重 β 崩壊の核行列要素とガモフ・テラー遷移

1.1 二重 β 崩壊とニュートリノ質量

スーパーカミオカンデ実験グループなどにより、ニュートリノ振動の強い証拠が観測されたことはまだ記憶に新しい。ニュートリノ振動から、(1) 三種あるフレーバー (電子型・ミュー粒子型・タウ粒子型) のニュートリノが、有限の質量を持つこと (2) フレーバー固有状態と質量固有状態は異なり、互いに混合していること (3) フレーバー間には小さな質量差があること、が実証されたことになる。ただし、ニュートリノ振動からわかるのは、型の異なるニュートリノの質量の二乗差であって質量そのものではない。また、三種類のニュートリノの有効質量の大小関係もわかっていない。この質量を求めるために注目されているのが、二重ベータ (β) 崩壊である。

二重 β 崩壊は原子核の電荷が2単位変化する過程で、原子核中で中性子 (または陽子) から陽子 (中性子) への変換が2度起こると同時に2個の (陽) 電子が放出される。たとえば、 ^{48}Ca 核は β^- 型の二重 β 崩壊核で、2個の電子を放出しながら中間核 ^{48}Sc を飛び越して娘核 ^{48}Ti に崩壊する*1 (図1)。この二重 β 崩壊は二種類に分類され、2個の (反)

ニュートリノが放出される 2ν モードとニュートリノが放出されない 0ν モードとがある (図2)。もし、 0ν モード崩壊の事象が見つければ、標準模型に反して、ニュートリノがマヨラナ粒子 (ニュートリノと反ニュートリノが同一) であることになり、その半減期から、ニュートリノの質量が決まる。¹⁾ このことから、神岡を含め世界十数か所で 0ν モード二重 β 崩壊事象の探索が進行中である。²⁾ しかし、現在に至るまで決定的な観測例はなく、専らニュートリノ質量の上限値が議論的となっている。現在の上限値は0.3 eV程度である。

1.2 半減期と核行列要素

0ν モード崩壊の半減期 $T_{1/2}^{0\nu}$ は、マヨラナ・ニュートリノ

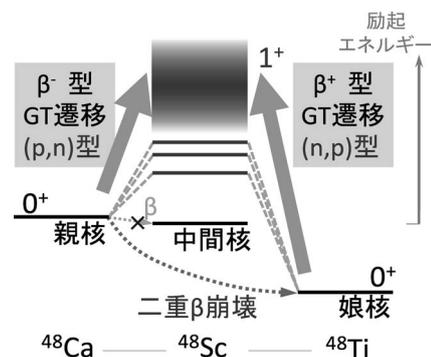


図1 二重 β 崩壊の概念図。 2ν モード崩壊では、中間核の 1^+ 状態を経由する。 0ν モード崩壊では、ほとんど全ての中間状態が寄与する。

* 現所属：理化学研究所仁科センター

*1 ^{48}Ca の場合、崩壊エネルギー的には、 ^{48}Sc の基底状態 (6^+) に崩壊することが可能であるが、 ^{48}Ca の基底状態 (0^+) からの移行角運動量が大きいため無視してよいほどに抑制される。

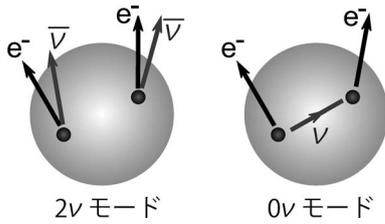


図2 β^- 型の二重 β 崩壊核における 2ν モード崩壊と 0ν モード崩壊. 2個の中性子が陽子に変わるのに伴い, 2個の電子が放出される. 2ν モード崩壊(左)では, 2個の反ニュートリノが放出される. 0ν モード崩壊(右)では, 1つの中性子の β 崩壊で放出されたニュートリノがもう1つの中性子に吸収される.

の有効質量 $\langle m_{\nu, \beta\beta} \rangle$ に,

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\nu, \beta\beta} \rangle^2 \quad (1)$$

という形で結び付けられる. ここで, $G^{0\nu}$ は, 2 (陽) 電子放出の位相空間と弱結合定数で決まる定数であり, 崩壊の Q 値 ($Q_{\beta\beta}$) と親核の陽子数の関数である. $M^{0\nu}$ は, この現象の原子核内での「起こりやすさ」を表す核行列要素と呼ばれる量である. 核行列要素を実験的に直接求めることは不可能で, 理論計算に頼らなければならない. 比較的軽い原子核を対象とする殻模型計算や, より重い核を対象とする乱雑位相近似模型による計算などが行われているが, Bahcallらは, それらの予言を俯瞰して, ^{76}Ge 核の場合に30倍もの不定性が存在すると指摘している.³⁾ この集計には, 研究初期の1980年代の計算も含まれているので, 30倍というのは, 少し大袈裟な値かもしれない. 近年の, より精密な計算によれば, それぞれの計算の不確かさは $\pm 30\%$ 程度, と見積もられている. また, 殻模型の予言は, 乱雑位相近似よりも20-50%小さい傾向があり, この差は, 計算手法の違いから来る核内相関の記述の違いによるものと考えられている.⁴⁾ 殻模型には模型空間が限定される問題, 乱雑位相近似には取り入れられない相関がある問題, がそれぞれ指摘されている. この差異を解消することが理論家にとって大きな目標になっている.

一方, 2ν モード二重 β 崩壊は, 十数個の原子核についてその半減期 ($T_{1/2}^{2\nu} \sim 10^{19-24}$ 年) が測定されており,

$$(T_{1/2}^{2\nu})^{-1} = G^{2\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M^{2\nu}|^2 \quad (2)$$

と表される. 2ν 核行列要素は 0ν 核行列要素と類似の構造をしており, 0ν 核行列要素の理論計算に用いる核内有効相互作用の較正に用いられている. さきに挙げた ^{48}Ca については, 核行列要素が実験から $M^{2\nu} = 0.047 \pm 0.003$ (stat.) ± 0.002 (sys.) MeV^{-1} と求まっている.⁵⁾ この値は, 現時点で最も精度の高い核構造計算である殻模型によるCaurierらの予言 (0.045 MeV^{-1})⁶⁾ や Horoiらの予言 (0.0539 MeV^{-1})⁷⁾ とほぼ一致する.

1.3 核行列要素の内訳

^{48}Ca の例のように, $M^{2\nu}$ を再現するような核構造計算があるとき, その計算が予言する $M^{0\nu}$ は信頼してよいだろう

か. 2つの崩壊モードの核行列要素の類似点と相違点をもう少し詳しく見ていくことにする.

[2ν モード]

2ν モード崩壊は, 中間状態がvirtualであることを除いて, 通常の(一重) β 崩壊が二度起こるのと良く似ている. そのため, 核行列要素も直感的に把握しやすい.

β 崩壊に寄与するフェルミ遷移とガモフ・テラー (GT) 遷移のうち, アイソスピンの変化を伴うGT遷移が 2ν モード崩壊を記述する. GT遷移は, スピン反転 ($\Delta S=1$), アイソスピン反転 ($\Delta T=1$), 角運動量移行ゼロ ($\Delta L=0$) で特徴づけられ, 遷移に関与する中性子・陽子の波動関数の主量子数が増えない ($\Delta n=0$) 遷移である. 始状態 $|0_{\text{g.s.}}^i\rangle$ の β^- 型二重 β 崩壊核 (0^+) が, 娘核の終状態 $|0_{\text{g.s.}}^f\rangle$ に崩壊するときの核行列要素 $M^{2\nu}$ は, 中間核における m 番目のGT状態 $|1^+; m\rangle$ を用いて,

$$M^{2\nu} = \sum_m \frac{\langle 0_{\text{g.s.}}^f \| O_{\text{GT}^-} \| 1_m^+ \rangle \langle 1_m^+ \| O_{\text{GT}^-} \| 0_{\text{g.s.}}^i \rangle}{E_m - E_0 + Q_{\beta\beta}/2} \quad (3)$$

と書ける.^{1,2)} ここで, O_{GT^-} は β^- 型のGT演算子 $\sum_k \sigma_k t_{-k}$ であり, σ はスピン演算子, t_{-} は中性子を陽子に置き換えるアイソスピン下降演算子である. \sum_k 記号については, 原子核に含まれる全ての核子について和をとる. $E_m - E_0$ は中間状態と始状態のエネルギー差である. 親核・娘核から中間核へのGT遷移が完全に記述できれば, $M^{2\nu}$ は理解されたことになる.

[0ν モード]

0ν モードでは, 第1段で生成したニュートリノが第2段で吸収されることに相当する. このとき, 2核子間でパイ中間子を交換すると湯川ポテンシャルが生じるのと同様, ニュートリノ交換に対応するポテンシャルが生じる. このポテンシャルは

$$V \sim \int \frac{1}{\omega(\omega + \langle E \rangle)} \exp(i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{q} \quad (4)$$

と書ける. ここで \mathbf{r} は2核子の相対ベクトルであり, $\omega = \sqrt{q^2 + m^2}$ はニュートリノのエネルギーである. 摂動のエネルギー分母は $\omega + \langle E \rangle$ で書かれ, 厳密には原子核の中間状態に依存する量である. この積分に寄与するニュートリノのエネルギーは50-100 MeV程度になり, 原子核の典型的な励起エネルギーと比べて大きい. そこで, 原子核のエネルギーを平均的な値 $\langle E \rangle$ で置き換えると, 原子核の中間状態の和は, クロージャー関係 $\sum_a |a\rangle \langle a| = 1$ ととることができる.

この, いわゆるクロージャー近似のもと, 0ν モードの核行列要素は, スピン反転を伴う場合 (GT成分) と伴わない場合 (フェルミ成分; F) に分けられ, それぞれ,

$$M_{\text{GT}}^{0\nu} = \langle 0_{\text{g.s.}}^f \| \sum_{j,k} \sigma_j t_{-j} \sigma_k t_{-k} V(r_{jk}) \| 0_{\text{g.s.}}^i \rangle, \quad (5)$$

$$M_{\text{F}}^{0\nu} = \langle 0_{\text{g.s.}}^f \| \sum_{j,k} t_{-j} t_{-k} V(r_{jk}) \| 0_{\text{g.s.}}^i \rangle \left(\frac{g_V}{g_A} \right)^2$$

と記述される. ここで $g_V/g_A (= 1/1.25)$ は極性ベクトル結

合定数と軸性ベクトル結合定数の比である。0 ν モードの核行列要素は、 $M^{0\nu} = M_{GT}^{0\nu} - M_{F}^{0\nu}$ と表される。

式(5)の遷移要素は2つのGT(またはフェルミ)遷移演算子にニュートリノ・ポテンシャルをかけたものである。このポテンシャルがあるために、どちらの遷移も純粋なGT遷移やフェルミ遷移ではなく、ほとんどすべてのスピン・パリティを持つ中間状態が0 ν モード崩壊に寄与する。なかでも、上記ニュートリノのエネルギーに相当する運動量移行(50-100 MeV/c)を伴う、双極子状態($\Delta L=1, J^\pi=0^-, 1^-, 2^-$)が重要な中間状態となる。2 ν モード崩壊の中間状態であったGT状態(1^+)は0 ν モード核行列要素にも寄与する。乱雑位相近似による核構造計算の枠組みのなかでは、GT状態の寄与は核内相互作用にとりわけ敏感であり、 $M^{0\nu}$ 予言の不定性の主要な部分を占めている。¹⁾

このように、 $M^{2\nu}$ と $M^{0\nu}$ には表式上の類似点があるが、その内訳は異なり、 $M^{2\nu}$ を再現する核構造計算が、 $M^{0\nu}$ のGT状態の寄与を正しく予言するとは限らない。 $M^{0\nu}$ 予言の信頼度を高めるには、その不確かさの元になっているGT遷移行列を検証し、裏にある核内相関のモデルを精緻化することが肝要である。

1.4 ガモフ・テラー遷移の測定による核構造計算の検証

本研究の目的は、GT遷移の測定を通し、 $M^{2\nu}$ について現在の理論的記述が妥当かどうか検証することである。

実験的にGT遷移を調べるには、(p, n)型、*²(n, p)型、の荷電交換反応により中間核のGT状態を生成すればよい(図1)。それぞれのGT状態への微分断面積(生成率)から、遷移行列要素の二乗(GT遷移強度*³)が求まる。(p, n)型反応プローブの代表的なものに、(p, n)反応と($^3\text{He}, t$)反応がある。(p, n)反応は、中性子測定を伴うため、典型的なエネルギー分解能は半値全幅で数百keVにとどまるが、入射・出射粒子が核子であることから、高精度で実験を記述することが可能な核反応理論を適用でき、微分断面積の実験値から遷移強度の抽出が高信頼度で行える。一方、($^3\text{He}, t$)反応は、入射・出射粒子が荷電粒子のため、エネルギー分解能がよい(半値全幅<100 keV)ことが大きな利点である。ただし、入射・出射粒子が複合粒子であることを反映して、遷移強度の算出には核反応理論から生じる不確かさが避けられない。(n, p)型プローブの(n, p)反応と($d, ^3\text{He}$)反応*⁴についても同様の長所・短所があり、両者の特長を生かした核構造研究が進められてきた。

大阪大学核物理研究センター(RCNP)での $^{48}\text{Ca}(^3\text{He}, t)$ 反応と、オランダ、グローニンゲン大学KVI研究所での

$^{48}\text{Ti}(d, ^3\text{He})$ 反応で、中間核 ^{48}Sc の低励起の離散的な 1^+ 状態の寄与が調べられた。その結果、励起エネルギー5 MeVまでの領域では、2.5, 3.1, 4.1, 4.8 MeVなどの励起エネルギーに 1^+ 状態が観測され、⁸⁾その遷移強度分布の概略が前述の殻模型の予言^{6,7)}と合致することが明らかになった。5 MeV以上の領域にも、GT巨大共鳴を始めとし多量のGT遷移が存在することが知られている^{9,10)}が、励起エネルギーが高くなるに従って、終状態の状態密度が大きくなり、高分解能測定をもってしても 1^+ 状態を同定して遷移強度を求めるのは困難になってくる。この問題を克服するため、我々は、(p, n), (n, p)反応を用い、高励起状態にまでわたって中間核のGT状態の分布の全体像を得る測定を行った。¹¹⁾

2. 実験：荷電交換反応

我々は、GT遷移を測定して、その強度分布から理論計算を評価するため、RCNPの加速器施設(フルカラー口絵参照)にて、 ^{48}Ca 核、 ^{48}Ti 核を標的として用い、それぞれ(p, n), (n, p)反応により中間核 ^{48}Sc を生成し、30 MeVまでの励起エネルギーでのGT遷移の強度の測定を行った。ビームのエネルギーは300 MeVとした。このエネルギーでは、GT遷移など、スピン反転を伴う励起が主であるとともに、信頼度の高い核反応理論が適用できるという大きな利点がある。この利点を生かし、多重極展開の手法(後述)を用いてGT遷移強度をスペクトルから抽出することができる。^{9,13)}

2.1 (p, n) 反応実験

まず、 $^{48}\text{Ca}(p, n)^{48}\text{Sc}$ 反応の測定を行った。ここでは、標的に陽子ビームを入射し、出射中性子のエネルギーを飛行時間法で測定する。中性子のエネルギーから、残留核 ^{48}Sc の励起エネルギーを知ることができる。実験装置と手法については、文献12, 13に詳しい説明がある。実験室系の角度で、0度から40度のデータを取得した。

2.2 (n, p) 反応実験

次に、 $^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$ 測定を行った。中性子は加速できないため、陽子ビームを ^7Li 標的に入射して擬単色中性子ビームを生成した。これを ^{48}Ti 標的に照射し、(n, p)反応で生成した陽子の運動量を磁気スペクトロメータで測定した。

中性子ビームは2次ビームなので強度が弱く、収量が限られる。そのため、 ^{48}Ti 標的(自然存在比73.4%)には5 g程度の物質質量が必要である。^{*5}本実験においては純度の高い ^{48}Ti を準備することが本質的に重要である。しかしながら、金属状態の ^{48}Ti 材料の入手は困難であった。かわりに99.3%まで同位体濃縮された酸化チタン48を得ることができた。ただし、酸化チタン48をそのまま標的として用いた実験では、酸素起源のバックグラウンドのため、高励起状態の詳細な議論ができないことが過去の実験から知られ

*² 標的核Aに粒子aが入射して核反応を引き起こし、粒子bが出射し、あとに残留核Bが残る反応を、A(a, b)Bと表記する。標的核・残留核を特に問題にしない場合は、(a, b)などと書く。(p, n)反応は、入射粒子が陽子(p)、出射粒子が中性子(n)の反応である。(p, n)型荷電交換反応は、標的核中の中性子1個を陽子1個で置き換える反応を指す。

*³ (p, n)型、(n, p)型反応測定から、GT遷移強度 $| \langle 1_{11}^+ || O_{GT} - || 0_{gs}^+ \rangle |^2$, $| \langle 1_{11}^+ || O_{GT} - || 0_{gs}^+ \rangle |^2 (= | \langle 0_{gs}^+ || O_{GT} - || 1_{11}^+ \rangle |^2)$ がそれぞれ求まる。式(3)参照。

*⁴ 相対エネルギーの小さな(典型的には1 MeV以下)陽子対を ^3He と呼ぶ。

*⁵ 実験にあたり、縦3 cm, 横2 cm, 厚さ約300 mg/cm²の標的を3枚使用した。

ており、¹⁴ 低バックグラウンド実現のために、酸素をどうしても取り除く必要があった。酸化チタンは化学的にきわめて安定であり、還元ノウハウのない我々には手に負えなかった。また、筆者の探した限り、少量の粉末を不純物の混入なく還元してくれる業者も見つからなかった。藁にもすがる思いで、日本チタン協会にメールで問い合わせしてみたところ、驚いたことに数時間後には返信があり、少量の酸化チタン材料についても還元する技術を持つ東大生産技術研の岡部徹教授を紹介していただくことができた。5度にわたるテストのあと、熱カルシウム還元法により、重量純度98%のチタン粉末の精製に成功した。この粉末をプレスして標的を作成し、無事実験を遂行することができた。

2.3 多重極展開

得られた断面積スペクトルは、ほとんどスピン反転 ($\Delta S=1$) 励起に起因するが、GT 遷移 ($\Delta L=0$) 以外の寄与を含んでいる。そこで、GT 遷移強度分布をデータから抽出するのに、多重極展開の手法を用いた。本実験のような中間エネルギーでの原子核散乱の角度分布は、おもに、移行角運動量 (ΔL) に依存し、原子核波動関数の詳細にはよらない。このことを利用して、実験スペクトルを各 ΔL 成分に分解することを多重極展開と呼ぶ。^{9,13)}

こうして得られた微分散断面積の $\Delta L=0$ 成分を運動量移行ゼロに外挿したものは、GT 遷移強度に比例する。笹野らが系統的に調べた比例係数 (GT 単位断面積)¹⁵⁾ を使い、GT 遷移強度分布を得た。⁴⁸Sc について、励起エネルギー 30 MeV までの広い励起状態にわたって GT 遷移強度分布が精度よく求められたのは初めてである。⁴⁸Ca(p, n) 反応

と ⁴⁸Ti(n, p) 反応で得られた GT 遷移強度を図3(a), (b) に示した。なお、フェルミ遷移 ($\Delta S=0$) については、励起エネルギー 6.7 MeV にその寄与が集中することが知られている。図3(a) はそれを引き去った後のスペクトルである。

2.4 結果—殻模型との比較

⁴⁸Ca(p, n) のスペクトル (図3(a)) では、励起エネルギー 2.5 MeV に強く励起された 1^+ 状態があり、3-5 MeV の領域にも、高分解能測定で観測された 1^+ 状態に対応する弱い GT 成分が確認された。高励起側には 11 MeV を中心とした GT 巨大共鳴ピークが現れている。⁴⁸Ti(n, p) スペクトルに観測される GT 励起は総じて弱いが、励起エネルギー 30 MeV まで有意な GT 遷移強度が発見された。

図中の実線は殻模型の予言である。⁷⁾ ⁴⁸Ca, ⁴⁸Sc, ⁴⁸Ti 核の fp 殻核の計算をするにあたり、8 個の核子の自由度のみを考慮し、1s 殻より深く束縛された残りの 40 個 (中性子 20 個、陽子 20 個) は、 0^+ の ⁴⁰Ca 芯を形成する、という標準的な扱いをしている。有効相互作用には、GXPF1A¹⁶⁾ という fp 殻核の記述に最適化した相互作用を用いている。ただし、上記のように限られた模型空間では、取り入れられない相関が存在する。そのため、遷移強度の予言値は、低励起状態について過大評価になることが知られており、前述の計算では、計算結果に経験的な抑制係数 $(0.77)^2=0.59$ をかけた遷移強度を予言値としている。なお、ここでは、実験の励起エネルギー分解能に合わせて理論計算のスペクトルも鈍らせてある。

殻模型計算と実験で得られた GT 遷移強度分布を比較すると、殻模型計算は、両スペクトルの低励起領域をそれなりに良く記述するものの、(p, n) スペクトルで励起エネルギー 15 MeV 以上の領域に、(n, p) スペクトルで 8 MeV 以上の領域に殻模型計算で説明できない遷移強度が存在することが明らかになった。¹⁶⁾ つまり、予想以上に高い励起状態までの中間状態が核行列要素に寄与する可能性があり、殻模型による核構造の記述が不十分であることが示唆される結果となった。

今回の実験で得た遷移強度は、GT 行列要素の二乗に相当するから、式(3)における各中間状態の寄与の符号については情報が無い。かわりに、励起エネルギーのビンごとの寄与を常に正符号で足し上げ、これらの状態の寄与の最大値を論じることができる。こうして作ったいわば核行列要素「上限値」を図3(c) に示した。励起エネルギー 5 MeV 以下の GT 状態については、前述した高分解能測定の結果 (Grewe らによるデータ⁸⁾) があり、上限値 0.083 ± 0.016

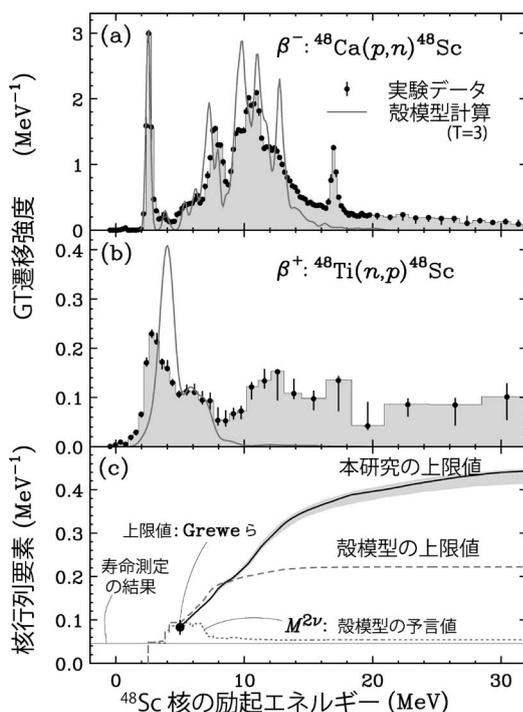


図3 実験で得られた GT 遷移強度分布。(a) ⁴⁸Ca(p, n)⁴⁸Sc 反応について、(b) ⁴⁸Ti(n, p)⁴⁸Sc について示している。(c) は 2ν 核行列要素である。⁴⁸Ca の寿命測定から得られた実験値を横線で示した。詳細は本文参照。

*6 二重 β 崩壊に寄与する成分は、 $T=3$ の GT 状態である。 (p, n) 実験データの励起エネルギー 17 MeV に見えるピークは $T=4$ であるため、後で核行列要素の和を取る際には取り除いてある。また、厳密には、GT 遷移の他に $\Delta n=1$ のアイソベクトル・スピン単極遷移 (IVSM) が混入している可能性がある。その定量的な実験的研究はあまり進んでいないが、IVSM の寄与は、(p, n) スペクトルで 35 MeV 付近に、(n, p) スペクトルで 27 MeV 付近に、¹⁷⁾ それぞれ GT 遷移強度に換算して 0.9 程度と予想される。これは、図3(b) の励起エネルギー 8 MeV 以上の領域の遷移強度の半分までしか説明しない。

MeV⁻¹が得られている。さらに、励起エネルギー 5 MeV 以上について今回の結果を接続し、「本研究の上限値」として示した。破線は殻模型計算から作った上限値であり、Greweらのデータをよく説明する。しかしながら、8 MeV 以上の励起エネルギー領域で (n, p) 型 GT 遷移強度を再現しないため、核行列要素上限値も実験値の半分程度しか説明しない。

2.5 殻模型が $M^{2\nu}$ を再現する理由

殻模型計算は GT 遷移強度分布を十分に説明しないにもかかわらず、なぜ式(2)の直後で述べたように $M^{2\nu}$ を再現するのだろうか。これについては、低励起離散状態のみが $M^{2\nu}$ に寄与するといういわゆる single state dominance (ないしは low-lying states dominance) 仮説が、二重 β 崩壊の研究初期から提唱されてきた。¹⁸⁾ そのメカニズムの詳細は割愛するが、式(3)に照らして考えるなら、巨大共鳴など高い励起状態は (a) GT 遷移行列の積がゼロになっている、または (b) それぞれの積の符号がバラバラで互いに打ち消しあい、全体として有意な寄与がない、のどちらかと解釈される。確かに、Greweらのデータでは、GT 状態のうち最低エネルギーの 2.5 MeV 状態の寄与のみから算出した核行列要素は $M^{2\nu} = 0.028 \pm 0.012 \text{ MeV}^{-1}$ であり、 $T_{1/2}^{\beta\beta}$ から求めた値の 6 割を説明する。⁸⁾ また、図3(c)に載せた殻模型計算(点線)では、2.5 MeV 状態の寄与が 0.049 MeV^{-1} である一方、それ以外の状態の寄与は打ち消しあって総和はわずかになり、より顕著に single state dominance 仮説が支持される。このような核行列要素のキャンセレーションが二重 β 崩壊核の長寿の所以であるのだが、同時に $M^{2\nu}$ の正確な予言が困難な主たる原因になっている。

今回得られた高励起エネルギーの GT 遷移強度が、実際に核行列要素に寄与するか否かは、理論の進展に伴い追って明らかになるであろう。今回の研究は、一見模型と実験結果が一致していた $M^{2\nu}$ について、その内訳となる GT 遷移強度分布は十分に理解されていないことを明らかにし、 $M^{0\nu}$ を予言するには、まずこの GT 遷移強度分布を理解すべきであるという今後の方向性を示したものである。

3. まとめと展望

我々は、二重 β 崩壊の核行列要素の理論的理解を検証するため、その構成要素である GT 遷移行列に立ち戻り、その遷移強度分布を高励起状態にわたって実験的に求めた。現行の殻模型計算では得られない GT 遷移強度が高励起領域に発見され、現在の核行列要素の記述は 0ν モード 2ν モードともに不十分であることを示唆する結果となった。 0ν 二重 β 崩壊核行列要素の予言精度を向上するためには、今回新たに発見された状態を再現する核構造理論モデルの開発が必須である。

核構造計算について、殻模型計算、乱雑位相近似模型計算の両者とも、抑制係数の問題があることを再度指摘しておきたい。図3に示した殻模型の計算結果は、抑制係数を

かけたものであることを述べたが、GT 遷移には、模型非依存の和則が存在するため、「抑制」された GT 遷移が消えてなくなるわけではない。¹³⁾ 遷移強度が高励起状態に移動するメカニズムは、テンソル相関や短距離相関、などの観点から、定量的な理解が試みられてきたが、十分に実験を再現できているとは言い難い。今回新しく観測した GT 遷移強度の多くはこれらのメカニズムによって低励起状態から移動してきたものと解釈されるが、核行列要素にどのような影響をもたらすかは今後の課題である。

本稿では、GT 遷移に着目して核構造計算を検証したが、殻模型計算や乱雑位相近似計算で取り入れられている相関が適切かどうか検証するため、親核・娘核の波動関数を詳しく調べるというアプローチも存在する。さまざまな核子移行反応測定を通して、二重 β 崩壊に関与する中性子・陽子が殻模型の各軌道をどのように占有しているかが研究されている。¹⁹⁾ これらの測定から、⁷⁶Ge 核について、粒子占有確率が核構造計算の予言と有意に異なることが示されたが、この占有確率データを再現するように理論計算のインプットを調整すると、殻模型による $M^{0\nu}$ 予言値が 15% 増加し、乱雑位相近似については 20-30% 減少して両者の差が半分になったとの報告もある。²⁰⁾ 理論模型に依存しない確かな予言に向け、今後の進展が注目される。

核行列要素のキャンセレーションについて触れたが、それと表裏をなす問題として、二重 GT 共鳴状態^{*7}が未発見であることを挙げておきたい。二重 GT 遷移の遷移強度には、ほぼモデルに依存しない和則(二重 GT 遷移強度の総和) $= 6(N-Z)(N-Z-1)$ が成り立ち、²¹⁾ ⁴⁸Ca 核の場合、この和則値は 336 である。このうち、前述の GT 状態を経由して ⁴⁸Ti の基底状態に行く遷移が担うのは、わずかに 0.02 である。残りのほとんどは二重巨大共鳴状態に集中していると期待されているのだが、実験的には未発見なのである。二重 GT 巨大共鳴というメインチャンネルの発見とその理解は、核構造の研究者にとって重要な課題であり、二重荷電交換反応での探索計画が RCNP や RIBF で進行中である。 0ν モード崩壊事象の探索とあわせて、こちらにも関心を持って頂ければ幸いである。

本研究は、RCNP 実験課題番号 E272, E290 に基づく共同研究である。共同研究者の皆様にお礼を申し上げます。科学研究費補助金(文部科学省)特別推進研究[17002003]、同若手 B [10304018] の助成を受けた。

参考文献

- 1) たとえば、武藤一雄：日本物理学会誌 **53** (1998) 589.
- 2) たとえば、F. T. Avignone III, S. R. Elliott and J. Engel: Rev. Mod. Phys. **80** (2008) 481.
- 3) J. N. Bahcall, H. Murayama, C. Peña-Garay: Phys. Rev. D **70** (2004) 033012; Majorana Collaboration: arXiv: nucl-ex/0311013.
- 4) J. Menéndez: J. Phys. Conf. Series **312** (2011) 072012.

^{*7} GT 励起の上にさらに GT 励起が重なった 2 音子状態。遷移演算子は $(O_{GT})^2$ の形を持ち、励起エネルギーは GT 巨大共鳴のエネルギーの倍程度 (15-30 MeV) と予想されている。

- 5) L. Vála, *et al.*: Nucl. Phys. B **188** (2009) 62.
- 6) E. Caurier, *et al.*: Rev. Mod. Phys. **77** (2005) 427.
- 7) M. Horoi, S. Stoica and B. A. Brown: Phys. Rev. C **75** (2007) 034303.
- 8) E.-W. Grewe, *et al.*: Phys. Rev. C **76** (2007) 054307.
- 9) M. Ichimura, H. Sakai and T. Wakasa: Prog. Part. Nucl. Phys. **56** (2006) 446.
- 10) 酒井英行, 市村宗武: 日本物理学会誌 **56** (2001) 492.
- 11) K. Yako, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 012503.
- 12) 酒井英行: 日本物理学会誌 **50** (1995) 202.
- 13) 酒井英行, 若狭智嗣: 日本物理学会誌 **52** (1997) 257.
- 14) W. P. Alford, *et al.*: Nucl. Phys. A **514** (1990) 49.
- 15) M. Sasano, *et al.*: Phys. Rev. C **79** (2009) 024602.
- 16) M. Honma, *et al.*: Eur. Phys. J. A **25** (Suppl. 1) (2005) 499.
- 17) I. Hamamoto and H. Sagawa: Phys. Rev. C **62** (2000) 024319.
- 18) H. Ejiri: J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 2101; M. Ericson, T. Ericson and P. Vogel: Phys. Lett. B **328** (1994) 259.
- 19) J. P. Schiffer, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 112501.
- 20) J. Menéndez, *et al.*: Phys. Rev. C **80** (2009) 048501.
- 21) K. Muto: Phys. Lett. B **277** (1992) 13.

(2011年8月25日原稿受付)

Looking into the Nuclear Matrix Elements of Double Beta Decay

Kentaro Yako and Hideyuki Sakai

abstract: Searches of neutrinoless double beta decay are in progress at many laboratories because it is uniquely related to the absolute scale of the neutrino mass. To deduce the mass from the half-life, one needs the nuclear matrix element, which is available only through theoretical calculations of nuclear structure. This article introduces measurements of charge-exchange reactions to examine the present structure calculations on ^{48}Ca , which is a double-beta-decay nucleus decaying to ^{48}Ti . The distributions of the measured Gamow-Teller transition strengths going to the intermediate nucleus ^{48}Sc are not reproduced by the calculations, suggesting that the description of nuclear matrix elements by these calculations is incomplete.

最近の研究から

エネルギー・スケール変調による量子系の境界条件・トポロジーの制御

- 引原 俊哉 <群馬大学大学院工学研究科 376-8515 桐生市天神町1-5-1 >
 桂 法称 <学習院大学理学部物理学科 171-8588 東京都豊島区目白1-5-1 >
 丸山 勲 <大阪大学大学院基礎工学研究科 560-8531 豊中市待兼山町1-3 >
 西野 友年 <神戸大学大学院理学研究科 657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1 >

物理系の形状(トポロジー)は、系の特性を支配する最も重要な性質の一つである。我々は、量子系の局所的エネルギースケールを空間的に連続変化させることで、系のトポロジーは保ったまま、基底状態のトポロジーを変更できることを発見した。本稿では、その結果と原理を説明し、様々な分野への発展の可能性について議論する。

1. はじめに

物理研究において、考える系の「形状」は最も基本的な要素の一つと言ってよいでしょう。例えば、ある系の端からもう片方の端まで波束や情報を伝播させる場合、系の大きさ(=伝播距離)が長くなるほど所要時間は長く、ノイズの影響も大きくなります。ここで「空間を捻じ曲げ、系の両端をつなぐ」、言い換えれば「系の境界条件・トポロジーを変更する」操作を想像してみましょう。もしそんな操作ができれば、新たに出来た「近道」を利用することで、伝播効率は劇的に改善されるでしょう。この例のように、境界条件・トポロジーは、物理現象が起こる舞台設定自体を変化させてしまう力をもっています。

この境界条件・トポロジーの効果の研究には、長い歴史があります。例えば、物性研究においては、基底状態の縮退度や物理量のシステムサイズ依存性が境界条件によって変化することは古くから知られています。最近では、開放

端における局在状態の形成など、状態のトポロジー依存性を通して系の本質に迫る研究が「トポロジカル秩序」などの新しいコンセプトのもと、活発に議論されています。

一方、実在の系においては、境界条件・トポロジーは容易に変更できるものではありません。まず、大抵の試料は開放端(表面)をもつバルク物質となります。物質合成技術の発達は、リング状、チューブ状など様々なトポロジーをもつ物質の作成を可能にしましたが、その自由度は未だ限られています。また、いずれにせよ一度試料を作成してしまえば、その形状は通常は変更不可能です。

この「トポロジー」の問題に関して、我々は最近、エネルギースケール変調による量子状態のトポロジー制御という新しい手法を提案しました。具体的には、開放端をもつ一次元量子系において、系の局所的エネルギースケールをサイン二乗関数に従い空間変化させると、系には端があるにもかかわらず、その基底状態は一様な周期系の基底状態

と全く等価になる、というものです。つまり、サイン二乗変形 (sine-square deformation, 以下 SSD と略します) は、系の形状を棒状に保ったまま、基底状態の両端をつなぎ、波動関数のトポロジーをリング状に変化させます。SSD によりハミルトニアンは空間的に非一様になるにもかかわらず、基底状態は周期系と同じ並進対称性をもつようになります。この SSD の機構は、フーリエ変換、パウリの排他律といった基本的な手法・原理に基づくシンプルな理論で説明でき、物理の様々な分野への展開が期待されます。

本稿では、SSD のもたらす効果とその動作原理について紹介し、多様なトピックへの応用・展開について議論します。

2. サイン二乗変形の効果とそのメカニズム

まずは SSD が系に及ぼす効果についてまとめます。ここでは例として次元自由フェルミ粒子系を考えますが、後述のように、より一般の次元量子系や高次元系への拡張も容易に可能です。

以下のハミルトニアンを考えましょう。

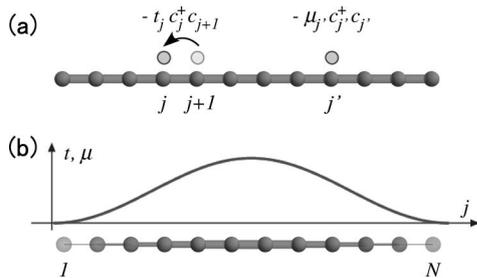


図1 (a) ハミルトニアン (1) 中の各項の概念図。\$-t_j c_j^\dagger c_{j+l}\$ は、格子点 \$j+1\$ から \$j\$ への粒子の飛び移り、\$-\mu_{j'} c_{j'}^\dagger c_{j'}\$ は格子点 \$j'\$ にある粒子のポテンシャルを表す。(b) SSD の概念図。飛び移り積分 \$t_j\$、化学ポテンシャル \$\mu_j\$ を、サイン二乗関数 \$\sin^2[\pi(j-1/2)/N]\$ に従い、図のように空間変調させる。

$$\mathcal{H} = -\sum_{j=1}^N t_j (c_j^\dagger c_{j+1} + c_{j+1}^\dagger c_j) - \sum_{j=1}^N \mu_j c_j^\dagger c_j \quad (1)$$

\$c_j^\dagger, c_j\$ は \$j\$ 番目の格子点のフェルミ粒子生成・消滅演算子 (図1(a) 参照)、\$N\$ は格子点の数です。飛び移り積分 \$t_j\$、化学ポテンシャル \$\mu_j\$ は、それぞれ位置 \$j\$ に依存してよいとします。

さて、この系に SSD を施します。具体的にはパラメータ \$t_j, \mu_j\$ を次のように空間変調させます (図1(b))。

$$t_j = t f\left(j + \frac{1}{2}\right), \quad \mu_j = \mu f(j), \quad f(x) = \sin^2\left[\frac{\pi}{N}\left(x - \frac{1}{2}\right)\right] \quad (2)$$

スケール関数 \$f(x)\$ は、系の中央 (\$x=(N+1)/2\$) から離れるにつれ連続的に減少し、\$x=1/2, (N+1)/2\$ でゼロになります。従って、SSD を施した系は、位置 \$j=1, N\$ に開放端をもつことになります。

この SSD の効果についてですが、ここでは研究の時系列に沿って見てみましょう。最初、SSD はスムーズ境界条件の一種として導入されました。¹⁾ スムーズ境界条件とは、開放端をもつ系で、端近傍のエネルギースケールを空間変調させることで端の効果を抑制する境界条件のことです。²⁾ 調べてみると、SSD を施した系では、系が開放端をもつにも関わらず、ホッピング強度などの物理量が位置によらず一定値をとり、通常の一様系の端で見られるフリーデル振動が完全に抑制されることがわかりました (図2(a))。

ただしこれだけでは、単に SSD が端の効果を抑制することを示したに過ぎません。実際我々もこの段階では、SSD は非常に有能なスムーズ境界条件だとしてしか考えていませんでした。エネルギー変調が十分ゆっくりであれば、系の本質的な性質は変わらないだろう、というわけです。しかしそれにしては、図2(a) の結果は完全過ぎます。これほどきれいなデータには、何かきれいな物理が潜んでいるはずで、そこで、相関関数など様々な物理量の基底状態期待値を周期境界条件下³⁾ の (つまり両端がつながった) 一様系での期待値と比較してみると、なんと完全に一致します (図2(b), (c))。これはなにかあります。そこで最後は、エイヤとばかりに両者の基底状態波動関数の重なり積分を計算してみると、完全に1となることがわかりました。^{4), *1} つまり、開放端をもつ SSD 系と、両端がつながった一様周期系では、基底状態が波動関数のレベルで完全に一致していたのです。波動関数が等しいので、当然、任意の物理量の基底状態期待値が一致します。このように、SSD は基底状態の「トポロジー」に本質的な変更を及ぼしていただけです。^{*2}

ここで、上記の結果は非自明であることを強調しておき

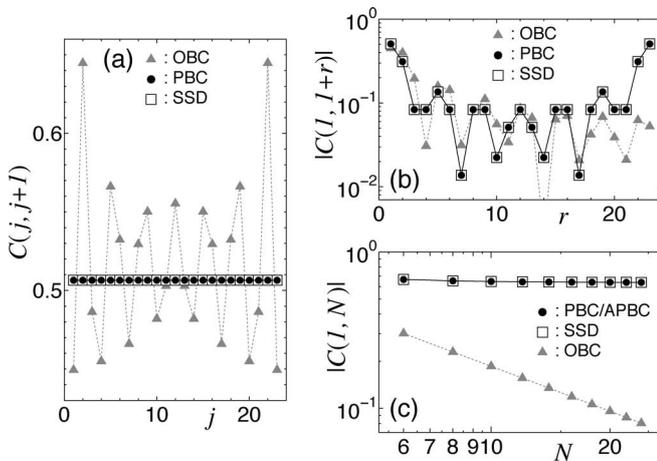


図2 次元自由フェルミ粒子系の基底状態相関関数 \$C(j, j') = \langle c_j^\dagger c_{j'} + c_{j'}^\dagger c_j \rangle\$; (a) サイト数 \$N=24\$、粒子数 \$N_f=17\$ での、最近接相関 \$C(j, j+1)\$、(b) 同じく \$N=24\$、\$N_f=17\$ での \$C(1, r+1)\$、(c) \$N\$ サイト系、\$N_f=N/2\$ での両端間相関 \$C(1, N)\$。SSD 系の結果は、開放端をもつ一様系 (OBC) と異なり、一様周期系 (PBC) と一致する。(c) で \$N_f\$ が偶数の場合は、反周期境界系 (APBC) と一致する。)

*1 正確には、粒子間に相互作用がある場合は、有限サイズ効果による微小なズレがあります。詳しくは3章で述べます。

*2 つまり、先の「十分ゆっくりなエネルギー変調では本質的な性質の変更はない」という考察は早計だったわけです。実際、ここで考えている量子臨界系では状態を特徴づける長スケールがないので、「十分ゆっくりな」変調などというものは存在しません。

ます。一様周期系の一体固有関数は、良く知られているように単純な平面波です。対してSSD系は、非一様かつ開放端をもつ系であり、固有関数も平面波とは全く異なります。しかし、そのように異なる基底に粒子をフェルミエネルギーまで詰めた状態（一体波動関数のスレーター行列式）は、両者で等価になるのです。

このようにSSDの効果は非自明なものですが、実は多粒子状態を考えると、以下のように簡潔な理論で理解することができます。⁵⁾ まず、式(1)に周期境界条件 ($c_{N+1}=c_1$)³⁾を課した一様系 ($t_j=t, \mu_j=\mu$) のハミルトニアンを \mathcal{H}_0 とすると、 \mathcal{H}_0 はフーリエ変換により対角化され、

$$\mathcal{H}_0 = \sum_k \epsilon(k) \tilde{c}_k^\dagger \tilde{c}_k, \quad \epsilon(k) = -2t \cos(k) - \mu \quad (3)$$

となります。 $\tilde{c}_k = 1/\sqrt{N} \sum_j e^{ikj} c_j$ は波数 k の平面波に対応する演算子です。エネルギー $\epsilon(k)$ が負の状態に粒子を詰めた、いわゆる Fermi sea がこの系の多粒子基底状態となります。

次に、SSD系のハミルトニアン \mathcal{H}_{SSD} を、半角の公式を使って以下のように書き直します。

$$\mathcal{H}_{\text{SSD}} = \frac{1}{2} \mathcal{H}_0 - \frac{1}{4} [\mathcal{H}^{(+)} + \mathcal{H}^{(-)}], \quad (4)$$

$$\mathcal{H}^{(\pm)} = -t \sum_{j=1}^N e^{\pm i\delta j} (c_j^\dagger c_{j+1} + \text{H.c.}) - \mu \sum_{j=1}^N e^{\pm i\delta(j-1/2)} c_j^\dagger c_j, \quad (\delta = 2\pi/N). \quad (5)$$

ここで $\mathcal{H}^{(\pm)}$ はカイラル・ハミルトニアンと呼ばれるもので、 \mathcal{H}_0 を対角化する演算子 \tilde{c}_k で表すと、

$$\mathcal{H}^{(\pm)} = \sum_k e^{\mp i(\delta/2)} \epsilon(k \mp \delta/2) \tilde{c}_k^\dagger \tilde{c}_{k \mp \delta}. \quad (6)$$

となります。つまり、カイラル・ハミルトニアンは、波数 k を $\pm\delta$ 、すなわち k 空間で1サイト分だけ遷移させる作用をもち、その遷移振幅は $\epsilon(k \mp \delta/2)$ に比例します。

さて、この \mathcal{H}_{SSD} (式(4)) を、一様周期系 \mathcal{H}_0 の基底状態 $|G\rangle$ に作用させてみましょう (図3)。まず $|G\rangle$ は \mathcal{H}_0 の固有状態ですので、 \mathcal{H}_0 を作用させても変化しません。次に $\mathcal{H}^{(\pm)}$ ですが、式(6)の各項が $|G\rangle$ に引き起こす遷移を考えると、その大半はパウリの排他律により禁止されます。許されるのはフェルミ面をまたぐ遷移のみですが、それらについて

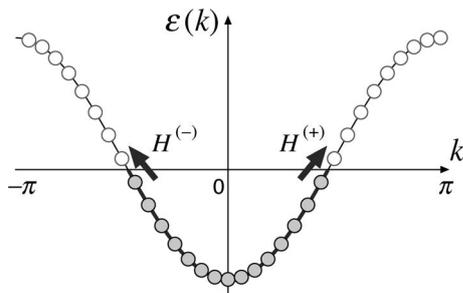


図3 一様周期系の基底状態 $|G\rangle$ (Fermi sea) と、その状態に対するカイラル・ハミルトニアン $\mathcal{H}^{(\pm)}$ の作用の概念図。 $\mathcal{H}^{(\pm)}$ に含まれる項のうち、パウリの排他律で許されるのは図中の矢印のプロセスのみであるが、これらの係数はゼロであるため、 $|G\rangle$ は $\mathcal{H}^{(\pm)}$ の固有状態 (固有値0) となる。

も、 $\epsilon(k \mp \delta/2) = 0$ となるよう化学ポテンシャルを調整することで遷移振幅をゼロにできます。結局、 $\mathcal{H}^{(\pm)}$ も $|G\rangle$ を乱さず、 $|G\rangle$ は \mathcal{H}_{SSD} の厳密な固有状態であることがわかります。さらに、詳細は省きますが、ペロン・フロベニウスの定理を用いることで、 $|G\rangle$ が \mathcal{H}_{SSD} の唯一の基底状態であることも示すことができます。^{6,7)} こうして \mathcal{H}_{SSD} と \mathcal{H}_0 が同じ基底状態 $|G\rangle$ をもつことが厳密に示されます。

3. 様々な分野への展開

前章では一次元自由フェルミ粒子系を例にとり、SSDの効果について述べました。ここでは他の系への拡張や、考えられる応用の可能性について議論します。

3.1 一般の一次元量子臨界系、高次元系への拡張

まず、一般の系への拡張についてまとめます。前章ではフェルミ粒子描像を用いてSSDによる基底状態のトポロジ変化を説明しましたが、同じ結果はボーズ粒子描像を用いた解析⁷⁾でも導くことができます。この結果は「多くの一次元量子臨界系 (基底状態と励起状態間に励起ギャップがない系) の低エネルギー有効理論であるガウシアン模型 (中心電荷 $c=1$ の自由ボーズ粒子系) でもSSDが厳密に機能する」という、大きな意味をもちます。つまり、低エネルギー状態がガウシアン模型にマップされる一次元量子系では、SSDの効果は漸近的に厳密になると考えられるわけです。実際、これまでに、spin-1/2 XXX 模型、磁場中スピ梯子模型などの量子スピン系⁴⁾から、(拡張) ハバード模型⁸⁾ 近藤格子模型⁹⁾などの強相関フェルミ粒子系まで、様々な系に対する数値解析から、これらの系でSSDが高精度で機能することが示されています。^{*3} このように、一次元量子臨界系であれば、SSDは精度よく (厳密に、もしくは“漸近的”厳密に) 機能することが期待されます。^{*4}

高次元系への拡張はどうでしょうか？ 図4にSSDを二次元自由フェルミ粒子系に適用した結果を示します。⁵⁾ 開放端をもつ一様系では、粒子密度に端からのフリーデル振

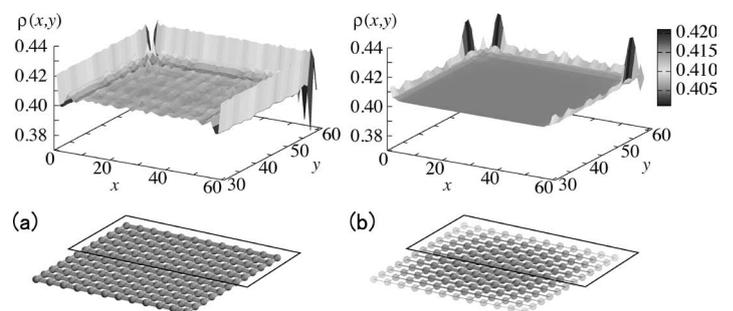


図4 (a) 開放端をもつ二次元正方格子自由フェルミ粒子系 ($\mu=t$) の基底状態における局所粒子密度 $\langle c_{x,y}^\dagger c_{x,y} \rangle$. (b) 同じ系で x, y 両方向にSSDを施した場合。両者とも、 60×60 格子点の系の上半分 (下パネルの囲われた部分) における結果を示しており、下半分は上半分を反転したものになる。

^{*3} 例えば文献4では、基底状態波動関数の重なり積分の1からのズレが、少数スピン系 ($N \leq 24$) で 10^{-3} 以下になることが報告されています。

^{*4} 励起ギャップのある系については、いくつかの特別な場合にSSDが機能することが示されますが、一般には機能しません。

動が顕著なのに対し、SSD系では粒子密度が平坦になり、並進対称性がほぼ回復するようになります。ここで次元の場合と異なる点は、二次元系では開放端の極近傍で粒子密度がバルクの値からずれることです。これは、SSDにより、開放端付近に大きな振幅をもつ一粒子状態が、基底状態の多体波動関数(スレーター行列式)に入り込むことに起因します。つまり、SSDを施した二次元系では、並進対称性をもつ状態に、端付近に振幅をもつ状態が重ねあわされた状態が実現していると言うことができます。このような意味で、SSDは二次元以上の系でも(系がギャップレス状態であれば)機能すると考えられます。

3.2 共形場理論との関係

これまでの研究から得られた結果は、一次元量子臨界系においては、SSD系と一様周期系の基底状態が非常に高精度で(場合によっては厳密に)等価になることを示しています。では、このような不思議な関係の背後には、どのようなからくりがあるのでしょうか。その答えは、実は時間1次元・空間1次元(1+1=2次元)の量子臨界系を記述する共形場理論の中に隠れています。⁷⁾ 1+1次元共形場理論の大きな特徴は、ビラソロ代数と呼ばれる対称性が理論を完全に統制している点です。この代数の生成子 L_n は

$$[L_m, L_n] = (m-n)L_{m+n} + \frac{c}{12} m(m^2-1)\delta_{m+n,0} \quad (7)$$

という交換関係を満たします。以前の誌記事¹⁰⁾に、教育的な導入がありますので詳細は省きますが、この代数を用いて理論の状態空間を調べることができます。 L_n (n は整数)は無数存在しますが、ここでは $L_0, L_{\pm 1}$ の3つだけが重要となります。 L_n がエネルギー密度のフーリエ成分(空間変調成分)と関係していることから、 L_0 は長さ ℓ の一様周期系のハミルトニアンと $\mathcal{H}_0 \propto L_0/\ell$ の関係にあり、¹¹⁾ 同様にカイラル・ハミルトニアン $\mathcal{H}^{(\pm)}$ は $L_{\pm 1}/\ell$ に比例します。¹²⁾ 一様周期的な量子臨界系の基底状態は「真空」と呼ばれ、 $|0\rangle$ と表されますが、この状態は特別に $L_0|0\rangle = L_{\pm 1}|0\rangle = 0$ ($SL(2, \mathbb{C})$ 不変性)を満たします。つまり $\mathcal{H}^{(\pm)}|0\rangle = 0$ が成り立ち、前章の自由フェルミ粒子系の例と同様、 $\mathcal{H}^{(\pm)}$ は基底状態を乱さないことがわかります。¹³⁾ 当初、発見法的に見つかったSSDのからくりは、実は一次元量子系を記述する由緒正しい共形場理論にあったのです。

3.3 量子ドット系・光格子冷却原子系での実現可能性

実在の系におけるSSDの実現も、興味深い展開の一つと言えるでしょう。特に量子ドット系や光格子冷却原子系は、強束縛模型でよく記述される上、クリーンで制御性も高いという、SSDの実現に理想的な条件を備えています。これらの系では、近年、環状量子ドット¹²⁾など様々な形状の系が実現されており、そこにSSDを加えればさらな

る多様性が導入できます。例えば量子ドットを一列に並べた系でドット間距離を調節し、飛び移り積分がSSD条件を満たすようにすれば、その系の基底状態は両端がつながった次元リング系の基底状態と同じになります。また、同様の操作を二次元、三次元系に適用すれば、現在では実現困難(または不可能)な二次元・三次元トーラスのトポロジーをもった基底状態が創出できるかも知れません。系の形状は保ったまま、基底状態のトポロジーだけ変えてしまうという、SSDの不思議さを実在の系で実現できれば、さらなる応用の可能性が広がると期待されます。

3.4 量子状態転送への応用

SSDのもたらす物理で最も目を引くのは、「棒状の系の両端に位置する自由度が、基底状態においては最近接にあるのと全く等価な振舞いをする」という点でしょう。これは、系の内部を飛び越えて、両端を直接つなぐパスができたと見ることもできます。このパスを通じて何らかの物理的実体を伝達できたら、と考えることは様々な応用を想像させます。残念ながら、SSD系の励起構造は一様周期系と異なるため、例えば波束のような励起状態が絡む実体の伝達は難しいようで、今のところ「波束を右端に突入させたら左端から出てきた」というような現象は観測されていません。¹⁴⁾ しかし、少なくとも基底状態に関しては、系がどれだけ大きくなって両端の量子自由度間には強い相関が残るため(図2(c)参照)、そのエンタングルメントを利用した量子状態転送などは、有望な応用と考えられます。

4. おわりに

本稿では、サイン二乗変形が量子臨界系で実現するトポロジー変化について紹介しました。ハミルトニアン中のエネルギー定数をサイン二乗関数に従ってスケール変換することで、ハミルトニアンは開放端のある棒状のトポロジーをもつにも関わらず、その基底状態は周期境界条件を満たすリング状のトポロジーを示します。さらに、サイン二乗変形の機構は、フーリエ変換などを用いた非常にシンプルな理論により理解されます。機構のシンプルさは物理の普遍性に直結するものであり、厳密解・場の理論などの理論研究から量子ドット系・光格子冷却原子系などでの実験研究、量子情報への応用まで、広い分野への展開が考えられます。また、本稿では触れられませんでした。サイン二乗関数の他にも、双曲関数、¹⁵⁾ 指数関数¹⁶⁾などを用いたエネルギー変調についても研究がなされており、例えば双曲関数による変調は、励起ギャップの精密計算に威力を発揮することが示されています。本稿がきっかけとなり、我々が思いもよらない分野への進展があることを期待しています。

¹²⁾ 正確には反正則部分 $\bar{L}_0, \bar{L}_{\pm 1}$ を含める必要があります。

¹³⁾ ガウシアンを含むある種のクラスの共形場理論については、 $|0\rangle$ が基底状態であることを示すことができます。ただし、「無限自由度」を取り扱う場の理論の難しさから、唯一の基底状態であるかどうかは微妙な問題として残っています。

¹⁴⁾ ただし何かうまい波束を作ればそのような現象を起こす可能性はあるかもしれません。

参考文献

- 1) A. Gendiar, R. Krcmar and T. Nishino: Prog. Theor. Phys. **122** (2009) 953; *ibid.* **123** (2010) 393.
- 2) M. Vekić and S. R. White: Phys. Rev. Lett. **71** (1993) 4283; Phys. Rev. B **53** (1996) 14552.
- 3) 正確には、フェルミ粒子数の奇数・偶数により、周期・反周期境界条件を課します。
- 4) T. Hikihara and T. Nishino: Phys. Rev. B **83** (2011) 060414.
- 5) I. Maruyama, H. Katsura and T. Hikihara: Phys. Rev. B **84** (2011) 165132.
- 6) H. Katsura: J. Phys. A: Math. Theor. **44** (2011) 252001.
- 7) H. Katsura: J. Phys. A: Math. Theor. **45** (2012) 115003.
- 8) A. Gendiar, M. Daniška, Y. Lee and T. Nishino: Phys. Rev. A **83** (2011) 052118.
- 9) N. Shibata and C. Hotta: Phys. Rev. B **84** (2011) 115116.
- 10) 立川裕二: 日本物理学会誌 **65** (2010) 703.
- 11) 川上則雄, 梁 成吉: 『一次元量子系の物理』(岩波書店, 1997).
- 12) Q. Cai, *et al.*: Semicond. Sci. Technol. **24** (2009) 095005.
- 13) H. Ueda, H. Nakano, K. Kusakabe and T. Nishino: Prog. Theor. Phys. **124** (2010) 389.

14) K. Okunishi and T. Nishino: Phys. Rev. B **82** (2010) 144409.

(2012年1月5日原稿受付)

Boundary Condition, Topology, and Energy-Scale Deformation in Quantum Systems

Toshiya Hikihara, Hoshio Katsura, Isao Maruyama and Tomotoshi Nishino

abstract: Boundary condition and topology play a crucial role in determining the properties of quantum system. We report our recent finding that one can change the topology of the ground states of quantum critical systems by applying "sine-square deformation" which introduces a gradual modulation in local energy scale of the system but does not change the topology of the Hamiltonian. Implications of the result to several topics are also discussed.

最近の研究から

一般化されたハイゼンベルグの不確定性関係の実験的検証

長谷川祐司 〈ウィーン工科大学原子核研究所 Stadionallee2, A-1020 Wien, Austria〉

不確定性原理は1927年にハイゼンベルグによって提唱された。ハイゼンベルグによる定式化は直感的な考察に基づいており定量的には改善の余地があることが知られていた。2003年に名古屋大学・小澤によって具体的な操作の定義などを数学的に与えた不確定性関係が提示された。そこではハイゼンベルグが与えた表式が成立しない可能性が示された。我々は、この小澤の不確定性関係の表式を中性子のスピンの測定で初めて検証した。その結果、従来のハイゼンベルグの不確定性関係は成立せず、小澤によって導かれた不確定性関係が有効であることが実証された。

1. はじめに

20世紀初頭の出現以来、量子力学の予測が正しいことは様々な系を用いた実験で高精度に確認されてきた。量子力学は相対性理論と並んで「現代」物理学で大きな役割を果たしており、その適用範囲は物理学のみならず、化学や生物学の領域にもわたっている。さらに、この理論は物性物理学の発展に大いに寄与し、現代の科学技術の開発基盤になっている。最近では、量子暗号通信、量子計算、量子計測技術といった新たな応用分野¹⁾の開拓も話題になっている。このような「成功」の裏で、量子系で何が起きているのかといった、量子力学の解釈に関しては統一的な見解があるとは言えない。量子力学発展の初期段階から多くの論争があり、²⁾とくに、決定論的ではない確率論的な側面、シュレディンガーの猫として知られているミクロ系の逆説的な現象、あるいは、EPR (アインシュタイン・ポドルスキー・ローゼン)の実験、測定理論、といったものは予想結果の当否はよいとしても、その意味することに関してはいまだに統一的な見解が見出されていない。総じて、量子力学を理解しようとすればするほど、実在、因果律、

局所性などの我々の慣れ親しんでいる世界から離れることを余儀なくされる。すなわち、量子力学はいまだにミステリーに満ちあふれている。

今回の研究はハイゼンベルグが提唱した不確定原理³⁾を実験的に扱った初めての研究といえる。この不確定性原理はいわゆる量子力学の草創期に示された確立解釈、粒子と波動の2重性、相補性等とともに新しい量子力学の特異性を示す事象の一つである。この原理によると、量子力学に従う「粒子」のいくつかの性質を同時に任意の正確さで決定することは不可能であり、ハイゼンベルグ自身によって示されたガンマ線顕微鏡の例のように、従来、以下のように根拠づけられてきた。すなわち、或る一つの測定はいつでも必然的に測定対象の「粒子」に変化をもたらす、これによって別の性質の測定に誤差を生じさせる、という。しかし、その定量的定式化はそれほど単純ではなく、正確な不確定性関係の記述には測定の誤差や擾乱といった物理量を定義することから始める必要があった。厳密な測定理論の取り扱いをへて、小澤は2003年に一般化した不確定性関係を導出した。⁴⁾



図1 Atominstitutの研究用原子炉の炉室。(フルカラー口絵参照。)

量子力学の検証実験は、多くの場合、電子や中性子の物質波を用いたり、あるいは、可視光領域の光子あるいはその光子と物質との相互作用を利用して、光学実験として行われてきた。量子効果を研究するための、重ね合わせやエンタングルメントと正面から取り組む研究には干渉、相関実験が不可欠である。このような実験は、レーザーを使った可視光領域のみならず、物質波を用いた実験も歴史的に重要な段階で多く行われてきた。電子の物質波の実験としてはアハラノフ・ボーム (AB) 効果を検証した外村らの電子線ホログラフィーの実験⁵⁾は特筆すべきである。我々は、実験手段として中性子光学的な手法を用いている。この分野は筆者が働いているウィーンの Atominstitut でラオッホらが初めて完全結晶を用いた中性子干渉計の実験に成功したことで幕が切られた。その後、中性子干渉実験の成果は文献6にまとめられている。今回の実験は、中性子干渉実験と並行して筆者が開発を行ってきたスピンの固有状態の「干渉」が直接観測でき、99%にも及ぶ量子操作効率を誇る中性子偏向解析装置 (ポラリメータ) を用いて行った。図1に中性子干渉計からの干渉を初めて観測し、そして、筆者らが今回の実験を行ったこの Atominstitut の研究用原子炉の炉室の写真を示す。

2. 中性子光学実験

物質波による量子力学的效果の観測には、ヤングの二重スリットのように二つの光線が合わさったときにみられる干渉縞を観測するのが一般的である。このような、干渉効果の観測のための機器は干渉計と呼ばれ、中性子の物質波による干渉計は約2 Å程度の波長を持った原子炉からの熱中性子線用が70年代に開発された。この干渉計はマッハ・ツェンダー干渉計と同様の光学要素を持つ。この種の中性子干渉計の概要と様々な干渉計の写真を図2に示す。この干渉計はビームの分割や反射にシリコンの完全結晶に

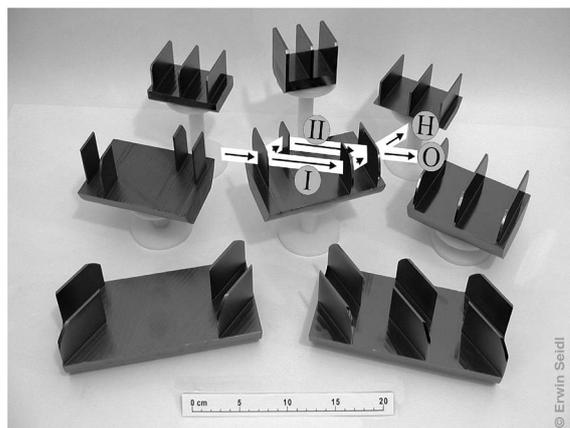


図2 様々な熱中性子用の干渉計。

おけるブラック反射を用いている。また、使用しているビームの波長が2 Å程度と非常に短いため、各光学要素の調整が不要になるように、シリコン完全結晶から切り出したモノリシック構造をしている。入射した中性子線は第一枚目の板で二つに分けられる。これらのビームは巨視的に(一般的に数cm)離れるが、コヒーレントな重ね合わせ状態を保ったまま、第二(と第三)の板で反射され、最後の板で再び合わせられる。これらのビームは分かれたビームの片一方に位相板を挿入し、光学的な光路差を与えると、干渉計から離れていく二つのビームの強度が干渉効果により変化する。中性子を用いた実験では収量がそれほど多くなく、一つの中性子を検出したときには、次の中性子はまだ燃料棒の中にあり、まさにポツリポツリとやってくる「自分自身と干渉する」中性子の干渉を観測する実験である。

こうした中性子干渉計の出現以来、中性子干渉実験がたくさん行われてきた。⁶⁾たとえば、1/2スピンの 4π 周期性、中性子の質量を利用した重力ポテンシャルの影響、フィゾー効果、サニャック効果の観測の実験は、物質波を用いた干渉実験の先駆的なものである。さらに、共鳴磁場による異なったエネルギーを持つビームの量子干渉効果、トポロジカルな量子力学的位相(あるいはベリー位相、幾何学的位相とも呼ばれている)等を観測する実験はこの分野の「古典」として知られている。また、スピンの重ね合わせの実験などはまさに最近のキュービットの実験の先駆けともいえる。あるいは、確率論的ではなく決定論的な予測を量子力学に与えるべき理論の一つとしての隠れた変数理論に関する実験も行われている。たとえば、「状況依存性を持たない(non-contextual)理論」と呼ばれる理論から導出したベルの不等式の破れを示す実験も中性子干渉計を用いて行われた。⁸⁾この理論では、物理量Aと同時測定が可能な(可換な)物理量BとCがあるとき、測定の組み合わせ(測定の状況)に依存しないで、すなわちA&Bの測定とA&Cの測定共通の、実在的な値を物理量Aに持たせることの可能性を問うている。この実験は後にエンタングルメントした状態のトムグラフィ測定、⁹⁾エネルギー自由度を加えた3体系でのいわゆるグリーンベルガー・ホルン・

ザイリンガー (GHZ) 状態での実験¹⁰⁾へ発展した。さらに、ベルの不等式では測定結果からの統計的な破れのみが示されるのに対し、量子論の予言と状況依存性の仮説との間の矛盾を示す実験¹¹⁾も様々な系で行われるようになってきた。

上記のような干渉計を用いた光学実験以外にも、中性子のスピンの干渉を利用した中性子偏向解析装置 (ポラリメータ) を使っても量子光学実験が可能である。この装置は、偏向した入射ビームを試料に照射したあとの出射ビームの偏向を解析する機能を持ち、元来、試料による消偏極 (depolarization) を測定するのに使われてきた。先の干渉計実験では2つの経路の状態が基底状態になっているのに対し、この偏向解析装置ではアップとダウンの2つのスピン固有状態が基底状態になる。スピンの重ね合わせ実験で示されたように、スピンの基底状態の相対位相は出射ビームの偏向解析をすることにより測定できる。この中性子偏向解析装置を用いて、中性子でのアハラノフ・ボーム (AB) 効果の検証や、¹²⁾ 量子力学の基本である非可換なオブザーバブルに関する実験¹³⁾が行われた。後者の実験で筆者はスピンとパウリ行列に関しての物理的な性質を体现し、これが今回の不確定性の実験につながったと感じている。さらに、干渉計を用いた実験では装置全体の安定性に、多少、難があったが、この偏極解析装置では安定した環境での実験が可能である。その上、スピンの操作の効率は非常に高く、そのため最終的に理論値に近い上質の実験結果を得ることができるのも、この装置の利点である。このような利点を活用して、物理量の実在性をも疑問視するレゲットによって提唱された量子力学のモデルを物質波を使って初めて実験的に検証した。¹⁴⁾

3. 様々な不確定性関係

不確定性原理は、量子測定において反跳が避けられないことから、最初にハイゼンベルグが提唱した。彼によると、電子の位置の測定の精度 $\varepsilon(Q)$ あるいは「平均的な誤差」とその測定によって引き起こされた運動量における擾乱 $\eta(P)$ あるいは「連続的な変化」との間には (現代の取り扱いとコンシステントに)

$$\varepsilon(Q) \cdot \eta(P) > \sim \hbar \quad (1)$$

の関係が成り立っている。後に、ケンナードやロバートソンによって、¹⁵⁾ 標準偏差 σ を用いた非可換なオブザーバブル A と B に関しての不確定性関係

$$\sigma(A) \cdot \sigma(B) \geq \frac{1}{2} |\langle \psi | [A, B] | \psi \rangle| \quad (2)$$

が交換関係 $[A, B] = AB - BA$ を用いて示された。この関係式(2)は数学的に証明され、シングルスリットでの回折実験などを用いて説明できるが、量子状態の性質に関するもので量子測定の限界とは直接関係ない。そして、関係式(1)を発展させた関係式

$$\varepsilon(A) \cdot \eta(B) \geq \frac{1}{2} |\langle \psi | [A, B] | \psi \rangle| \quad (3)$$

に関してはハイゼンベルグが示した証明は不十分であり、証明のないまま長年信じられてきた。

2003年になってようやく厳密な量子測定の取り扱いにより、新たな関係式

$$\varepsilon(A) \cdot \eta(B) + \sigma(A) \cdot \eta(B) + \varepsilon(A) \cdot \sigma(B) \geq \frac{1}{2} |\langle [A, B] \rangle| \quad (4)$$

が小澤によって示された。⁴⁾ ここでの測定の誤差は、真の (あるべき) オブザーバブルと実際に測定に使われたオブザーバブルの違いの二乗平均平方根で定義され、測定による擾乱は他の測定を表すオブザーバブルの変化の二乗平均平方根で定義している。第2項と第3項が加わったため、測定の誤差と擾乱の積は必ずしも下限を持つとは限らないことがこの関係式から予想される。実際の実験では測定の誤差 $\varepsilon(A)$ は

$$\begin{aligned} \varepsilon(A)^2 &= \langle \psi | A^2 | \psi \rangle + \langle \psi | O_A^2 | \psi \rangle + \langle \psi | O_A | \psi \rangle \\ &\quad + \langle \psi | A O_A A | \psi \rangle - \langle \psi | (A+I) O_A (A+I) | \psi \rangle \\ &= \langle \psi | A^2 | \psi \rangle + \langle \psi | O_A^2 | \psi \rangle + \langle \psi | O_A | \psi \rangle \\ &\quad + \langle A \psi | O_A | A \psi \rangle - \langle (A+I) \psi | O_A | (A+I) \psi \rangle \end{aligned} \quad (5)$$

で与えられる。ここで、 A は前段でなされるべき測定を与えるオブザーバブルで、 O_A は実際に測定に使われたオブザーバブルである。測定の擾乱 $\eta(B)$ も同様に与えられることが分かっている。また、標準偏差 $\sigma(A)$ と $\sigma(B)$ は2出力測定装置からの結果として容易に与えられる。小澤の不等式に関しては詳細の出版物¹⁶⁾ や先に物理学会誌の解説¹⁷⁾があり、詳細の説明はそちらに譲る。

4. 検証実験

実験のコンセプトを図3に示す。この実験では、基本的に、ある状態に準備された量子系に対して A と B のインコンパチブルな連続測定を想定している。このとき、前段の測定はオブザーバブル A で表される測定であるべきだが、実際に測定で使用されたのはオブザーバブル O_A で表される測定である。このズレが直接的に測定の誤差に寄与する。実際の実験では、中性子の1/2スピンの x と y 成分の測定、すなわち非可換なパウリ行列 σ_x と σ_y で表される測定における測定誤差と擾乱に関する不確定性の関係を調べた。このスピンの各成分の測定は固有値が ± 1 になる結果が2つある測定であり、それぞれの結果を $+/-$ で表す。 A に続く後段の B の測定は前段の測定により量子系に変化が引き起こされ、それを擾乱として測定した。この擾乱はオブザーバブル O_A に依存して変化する。実験では、ある入射状態 $|\psi\rangle$ に関しての測定の誤差と擾乱を決定するには、 $|A\psi\rangle$, $|B\psi\rangle$, $|(A+I)\psi\rangle$, $|(B+I)\psi\rangle$ といった補助的な状態を測定装置に入射する必要があった。¹⁶⁾ これはちょうど量子情報での量子プロセストモグラフィと同様の手法である。

測定はウィーン工科大学 Atominstitut の 250 kW トリガ型

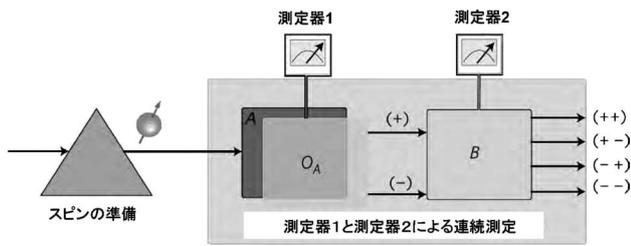


図3 実験的検証のコンセプト。

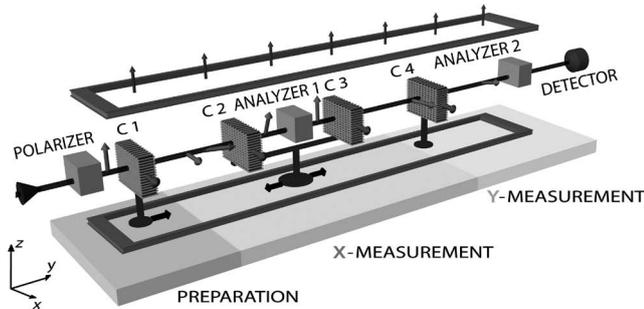


図4 実験配置. 実験は三段階に分かれる: 第一段は状態の生成, 第二段は前段の x 成分の測定, 第三段は後段の y 成分の測定. (フルカラー口絵参照.)

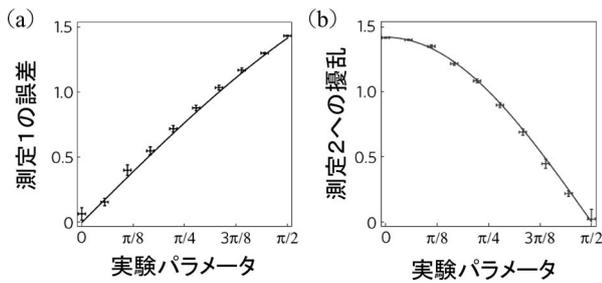


図5 測定の誤差 (a) と擾乱 (b) のトレードオフ関係. 実験パラメータを変化させると誤差が小さいと擾乱が大きくなるかその逆が観測された.

研究用原子炉を用いて行った.¹⁸⁾ 実験配置を図4に示す. 第一段階で中性子のスピンの状態を, いくつかの補助的な状態を含めて, 必要な方向に準備する. その後, x 成分の測定と y 成分の測定を行う. 個々の量子操作の効率と装置全体の操作効率がそれぞれ98%と96%以上になるように装置全体を調整した. 前段のオブザーバブルの故意なズレは, この実験では, x 方向から y 方向にかけての方位角として調整した. それぞれの実験パラメータである方位角で入射スピン状態を $|+z\rangle, |-z\rangle, |+x\rangle, |+y\rangle$ に調整して前段と後段の測定器からのそれぞれ2つの出力の取量を測定した. このようにして得られたデータから, 式(5)を用いて測定誤差 $\varepsilon(A)$, さらに, 擾乱 $\eta(B)$, 標準偏差 $\sigma(A)$ & $\sigma(B)$ を決定した. こうして決定した誤差と擾乱をプロットしたものを図5に示す. ここでは, 測定の誤差 (a) と擾乱 (b) のトレードオフ関係が明確に見て取れる. すなわち, 実験パラメータ (実際には前段の測定器が測る方位角) を変化させるときに, 誤差が小さくなると擾乱が大きくなるかその逆が観測された. ここで特筆すべきは, 式(5)に見られるように, 誤差の二乗が数項の期待値の和として与えられ

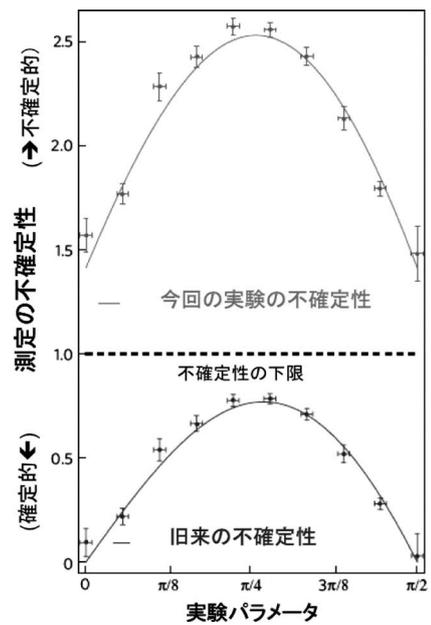


図6 今回の実験における新旧の不確定性関係. ハイゼンベルグの不確定関係は左右の端で0に近づき, 下限よりも小さい. その一方, 小澤の不確定関係は常に下限よりも大きい.

るため, 測定の統計誤差の寄与が誤差の値が小さくなればなるほど大きくなる. このため, 我々は測定誤差と擾乱が小さくなればなるほど, 測定を繰り返して, 測定の統計誤差が小さくなるように対処した. これによって, はじめて, 誤差と擾乱がゼロに近づく様子を捉えることができた.

今回の実験の目的は, 実験結果がハイゼンベルグの不確定関係 (3) か小澤の不確定関係 (4) どちらの関係を示すかをみることである. 得られたデータから計算した, 旧来の不確定性に現れるハイゼンベルグの積 $\varepsilon(A) \cdot \eta(B)$ と小澤の不等式の左項の和 $\varepsilon(A) \cdot \eta(B) + \sigma(A) \cdot \eta(B) + \varepsilon(A) \cdot \sigma(B)$ を図6にプロットした. まず, 小澤の不確定関係は常に下限よりも大きいことが見て取れる. 次に, ハイゼンベルグの積は左右の端で0に近づき, 今回の実験の範囲では, 常に下限よりも小さいことが分かった. つまりこの実験で, ハイゼンベルグの不確定関係 (3) が成立せず, 小澤の不確定関係 (4) が成立することが検証できた.

上記の実験では入射スピンの方向を $+z$ とし測定器のオブザーバブルをそれぞれ $A = \sigma_x$ と $B = \sigma_y$ とした. これは関係式 (3) と (4) の違いを最も顕著に見せるための判断からである. これ以外にも, 我々はすでに入射スピン状態, オブザーバブル A と B の選択を様々に変えたセッティングでの測定も行った. そこでは, たとえば, 下限が小さくなり大部分の領域において関係式 (3) も (4) も成立する場合, 図6のそれぞれのプロットが非対称になる場合, さらに関係式 (4) の左項が下限に接する場合, 等の測定も終えている.

5. おわりに

ここで紹介した中性子や電子, 原子, 分子などの物質波

を用いた光学実験は量子力学の基礎の研究に最適である。特に、中性子を用いた実験は検出効率や量子操作効率が非常に高く、また、コヒーレントな状態を長時間保持することが可能である。その結果、数十年前までは単なる思考実験レベルでしかなかった量子力学の予言する多くの現象が、現在では実際に実験として具体化された。¹⁹⁾ その過程で、量子力学特有のスピン、位相、重ね合わせ、エンタングルメントなどに関する認識が深まった。さらには量子力学草創期に提示された不確定性を破る実験まで行われるようになった。最近の実験技術の発達により中性子を十分冷却して「ボトル」に保持することも可能になり、この技術を使った実験も行われている。²⁰⁾ さらには、70年代に中性子を用いて行われた重力効果を観測する実験²¹⁾は、最近、新たな議論を生み出し、^{22,23)} 再注目をあびている。この問題に関して、物性研究で頻繁に用いられている最新のスピンエコー分光器²⁴⁾を用いて、より精度の高い測定を我々は試みている。以上みてきたように、中性子を用いた光学実験は多くの思考実験を実現化し、量子物理学の発展に寄与している。中性子光学実験の有用性はいくら強調してもしすぎることはない。そのなかで、今回の不確定性関係の研究に見られるように、「思い込み」とらわれず、物理的な意味合いを柔軟にそして正確に考慮していく態度が重要だと筆者は感じている。

ここで紹介した研究の多くは、著者がウィーン工科大学において、Rauch教授、Badurek教授、そして日頃議論をし共に実験に携わった当地の多くの学生との研究成果に基づいています。また、本研究は著者が日本科学技術振興機構(JST)の「量子と情報」領域のさきがけ研究で名古屋大学小澤正直教授と出会ったことに端を発した共同研究です。この機会に恵まれたことをすべての関係者に感謝いたします。最後に、いままで著者が中性子光学実験を続けるにあたりご助言・ご激励をいただいた多くの先生に感謝します。

参考文献

- 1) M. A. Nielsen and I. L. Chung: *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge Univ. Press, 2000).
- 2) *Quantum Theory and Measurement*, ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek

- (Princeton Univ. Press, 1983).
- 3) W. Heisenberg: *Z. Phys.* **43** (1927) 172.
- 4) M. Ozawa: *Phys. Rev. A* **67** (2003) 042105.
- 5) 外村 彰:『量子力学を見る:電子線ホログラフィーの挑戦』(岩波書店, 1995).
- 6) H. Rauch and S. A. Werner: *Neutron Interferometry* (Clarendon Press, 2000).
- 7) J. Summhammer, *et al.*: *Phys. Rev. A* **27** (1983) 2532.
- 8) Y. Hasegawa, *et al.*: *Nature* **425** (2003) 45.
- 9) Y. Hasegawa, *et al.*: *Phys. Rev. A* **76** (2007) 052108.
- 10) Y. Hasegawa, *et al.*: *Phys. Rev. A* **81** (2010) 032121.
- 11) G. Kirchmair, *et al.*: *Nature* **460** (2009) 494; H. Bartosik, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **103** (2009) 040403; E. Amselem, *et al.*: *ibid.* **103** (2009) 160405.
- 12) G. Badurek, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **71** (1993) 302.
- 13) Y. Hasegawa and G. Badurek: *Phys. Rev. A* **59** (1999) 4614.
- 14) Y. Hasegawa, *et al.*: *New J. Phys.* **14** (2012) 023039.
- 15) E. H. Kennard: *Z. Phys.* **44** (1927) 326; H. P. Robertson: *Phys. Rev.* **34** (1929) 163.
- 16) M. Ozawa: *Ann. Phys.* **311** (2004) 350.
- 17) 小澤正直: 日本物理学会誌 **59** (2004) 158.
- 18) J. Erhart, *et al.*: *Nature Phys.* **8** (2012) 185.
- 19) Y. Hasegawa and H. Rauch: *New J. Phys.* **13** (2011) 115010.
- 20) S. Phillip, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 030404.
- 21) R. Collella, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **34** (1975) 1472.
- 22) H. Müller, *et al.*: *Nature* **463** (2010) 926.
- 23) P. Wolf, *et al.*: *Class. Quantum Grav.* **28** (2011) 145017.
- 24) たとえば, J. Plomp: *Spin-Echo Development for a Time-of-Flight Neutron Reflectometer* (Universal Press, Veenendaal, Holland, 2009).

非会員著者の紹介

長谷川祐司氏: 専門は主に実験物理学、量子物理学、中性子光学、他に物性研究用分光器の開発。趣味として音楽、サイクリング、山歩きなど。

(2012年2月11日原稿受付)

Experimental Demonstration of Generalized Uncertainty Relation

Yuji Hasegawa

abstract: Uncertainty principle is introduced by Heisenberg in 1927. Heisenberg's original relation is known to be valid only under specific circumstances, and Ozawa has derived an error-disturbance relation by using the theory of general quantum measurements. There, it is suggested that there are cases where the Heisenberg's original relation is not always valid. We tested the relation derived by Ozawa in neutron's spin measurements. The results confirm the validity of the relation by Ozawa.

川畑有郷 (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2012年1月と2012年2月の編集委員会に間に掲載可となったものの中から編集委員会が選んだ "Papers of Editors' Choice" (JPSJ注目論文) 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、科学雑誌の編集部に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」を中心に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「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。

もっと詳しく知りたいと思う読者は、末尾に挙げる論文掲載誌と電子版のURL、または、JPSJのホームページの「Editors' Choice」の欄から掲載論文を見ることができます(2010年8月号以降に掲載されたものは、掲載から約1年間は無料公開)。

JPSJ編集委員会では物理学のあらゆる分野の興味ある優れた論文を「注目論文」としてこの欄で紹介したいと思います。物理学会会員からのJPSJへの自信作の投稿を期待します。

磁化の歳差運動により現れる磁気モノポールの理論的発見

磁石をどれほど小さくしていってもN極とS極を引き離す事はできない。このN極もしくはS極単体を構成する素粒子である磁気モノポールは、1931年にディラックによって存在の可能性が示された。大統一理論では、電磁気学の裏に潜む代数的対称性であるゲージ対称性の破れによって磁気モノポールが出現する事が予言されているが、その生成には宇宙誕生初期に相当する巨大なエネルギーが必要となる。これまで様々な実験が行われてきたが、残念な事に今日に至るまで自然界にその存在は確認されていない。

真空中とは異なり、物質中では低エネルギーでも磁気モノポールが見られる可能性が秘められている。実際、磁気構造がヘッジホッグ(はりねずみ)のような特異性を持つ磁性物質中において、電子スピンの従うSU(2)のゲージ対称性が壊れる事で磁気モノポールが現れる事が理論的に明らかにされている。しかしながら実際にこのような特殊な磁化配置の物質を作成する事は非常に困難である。

最近、首都大学東京大学院理工学研究科物理学専攻の研究グループは、磁性体中にスピン軌道相互作用が働く事で、磁気モノポールが現れる新しい機構を発見した。磁性体中の磁化の歳差運動によって誘起される電子の輸送現象を、量子多体理論に基づいて解析する事で、電磁気学の基本方程式であるマクスウェル方程式を導き、それにより新奇な磁気モノポールの存在可能性を理論的に示した。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の2012年3月号に掲載された。

この磁気モノポールの生成では、スピン軌道相互作用が鍵を握っている。物質中に見られる相対論的效果であるスピン軌道相互作用は、電子スピンの住む磁気的な世界と電

子の電荷が住む電気的な世界とを互いに結び付ける働きをする。それにより、歳差運動する磁化によって駆動された電子スピンの運動は、電子自身の軌道運動へと変換される。その過程で磁気モノポールが生成されるのである(図1)。この磁気モノポールは磁化の歳差運動の緩和(スピンドamping)により失われた角運動量が元になって現れるため、スピンドampingモノポールと名付けられた。

ここで、スピン軌道相互作用は磁化と電子スピンとの交換相互作用を組み合わせる事により、スピンの空間の対称性を破る役割を担っている。つまり、ヘッジホッグのよう

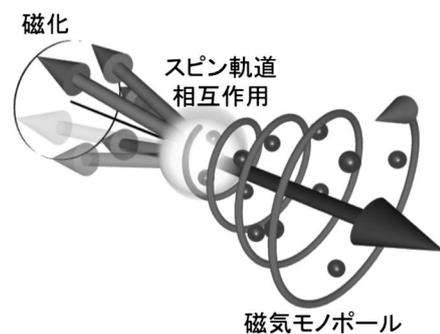


図1 磁化の歳差運動とスピン軌道相互作用により生成される磁気モノポールの概念図。

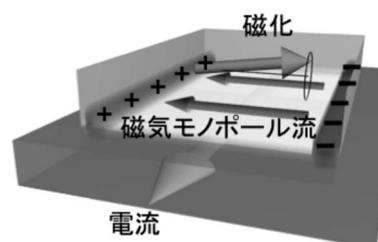


図2 強磁性体/非磁性体接合系で生成される磁気モノポール流と電流。

な特別な構造がなくとも、非常に一般的な磁性試料で磁気モノポールは生まれるのである。実際、この磁気モノポールは磁石(強磁性体)と白金のような強いスピン軌道相互作用を有する非磁性体とを接合した簡単な試料で実現され得る(図2)。

強磁性体/非磁性体接合という試料を用いて、磁気モノポールの観測は電気的に行う事が可能である。アンペールの法則により電流がその周りに磁場を作り出すように、磁気モノポールの流れの周りには電場が誘起される。その結果、接合界面に駆動される電流として磁気モノポールの存在を確認する事ができるのである(図2)。実は2006年に、パーマロイ(鉄とニッケルの合金)と白金との接合系において磁化の歳差運動を誘起する事で現れる電圧の測定が行われている。この実験は、電子スピンの流れであるスピンの電流への変換を実現するために行われたものであったが、この結果に磁気モノポールの効果が含まれていた可能性は高い。

従来、磁気モノポールはゲージ理論を用いて導出されてきたが、この研究では電子の輸送現象を解析する事で磁気モノポールを導出するという今までにない方法がとられた。まだここで示された磁気モノポールとゲージ理論との関係は明らかにされていないが、この手法は今後の基礎物理学に対して新たな切り口を与えるのではないだろうか。また、この研究は電子スピンを利用する事を目的としたスピントロニクス研究において、電子スピンや磁化の効果を既存の電磁気学と結びつけた初めての研究である。この磁気モノポールがもたらす新たな電気と磁気の変換機構は、記録メディアの高密度集積化や省エネルギー化にも応用可能な技術である。基礎的な意義に留まらず応用的な側面をも兼ね備えた磁気モノポール研究の今後の発展が期待される。

論文掲載誌: J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) No. 3, p. 033705.
 電子版: <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/81/033705> (2月27日公開済)

〈情報提供: 竹内祥人(首都大学東京大学院理工学研究科)
 多々良源(首都大学東京大学院理工学研究科)〉

典型的な重い電子系物質で初めて明らかになったメタ磁性と反強磁性の分離～ミステリー・プラトーを巡って～

水は100度で沸騰して水蒸気になる。これは大きな体積の変化を伴う一次の相転移である。しかし、圧力を上げていくと沸点はどんどん上がっていき、あるところで液体と気体の区別がつかなくなってしまう。これを臨界点と呼ぶ。臨界点を越えた状態の水は超臨界水と呼ばれ、さまざまな工業的な応用が検討されている。

同様に、物質の磁気的性質においても、一次相転移から二次相転移へと切り替わる点が物性物理研究者の注目を集めている。低温で起きるこの磁気量子臨界終点の物理は、メタ磁性という物理現象によって特徴づけられる。メタ磁

性とは物質の磁化が急激に増大する現象のことである。一次相転移では段階的な磁化の増大を示すが、二次相転移(あるいは連続的な変化であるクロスオーバー)のときには、磁化はなだらかな増大となる。希土類化合物・アクチノイド化合物などの重い電子系化合物において、メタ磁性はf電子の遍歴・局在、「大きなフェルミ面」と「小さなフェルミ面」、磁気不安定性、スピンと軌道の自由度などの重要な固体物理の根本的課題を含むために、古くから研究されてきた。

最近、CEA-Grenoble(フランス原子力庁)の研究グループは、典型的な重い電子系物質CeRu₂Si₂にわずかにRhをドーピングした物質(CeRu₂Si₂-Rh)の単結晶を育成し、そのメタ磁性と反強磁性不安定点の分離を初めて明らかにした。分離した領域では、奇妙な重い電子状態が持続していることが分かった。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌Journal of the Physical Society of Japan(JPSJ)の2012年3月号に掲載された。

純粋なCeRu₂Si₂は常磁性体であり、これに磁場を加えると、ある磁場(H_m)で常磁性状態からスピン分極した状態へとメタ磁性が起きる。負の圧力がかかったCeRu₂Si₂は反強磁性体であり、磁場を加えると、ある磁場(H_c)で反強磁性状態からスピン分極した状態へと変化する。通常、H_mとH_cは反強磁性磁気不安定性という同じ起源を持つために、CeRu₂Si₂を負の圧力から正の圧力へと変化させると、H_mとH_cは一致している。

驚くべきことに、本研究で対象としたCeRu₂Si₂-RhはH_mとH_cが分離している。つまり、磁場を加えていくと反強磁性状態、常磁性状態、スピン分極した状態へと次々に切り替わっていく。とくに中間状態の常磁性状態では、電子比熱係数が大きな値を保ったままプラトーを形成しており、重い電子状態が持続している。この特殊な中間状態「ミステリー・プラトー」は、縦と横の反強磁性ゆらぎ、および磁場によって誘起された強磁性ゆらぎが複雑に絡み合って実現した状態である。Rhドーピングによって、結晶構造の格子定数が通常とは違った形で微妙にチューニングされており、これによって複雑な磁気ゆらぎが実現している。

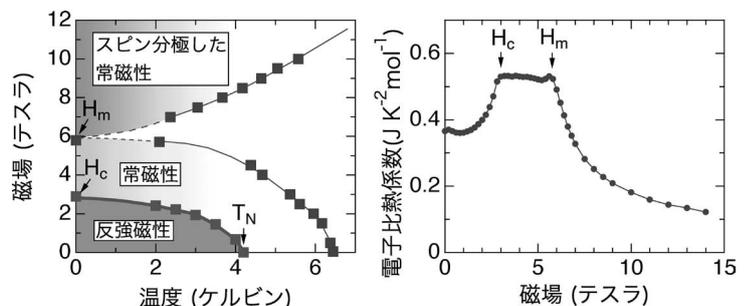


図1 左図: CeRu₂Si₂-Rhの磁場・温度相図。磁場を上げていくと反強磁性、常磁性、スピン分極した常磁性と移り変わり、メタ磁性の磁場H_mと反強磁性の臨界磁場H_cが分離している。右図: CeRu₂Si₂-Rhの電子比熱係数の磁場依存性。H_mとH_cの間は重い電子状態が持続して、「ミステリー・プラトー」が現れる。

メタ磁性は、古くから固体物性の研究者を魅了してきたよく知られた物理現象である。しかし、その起源については、未だによく分かっていないことが多い。本研究の成果によって、メタ磁性の理解が一步大きく進むとともに、今後はさらに非弾性中性子散乱やフェルミ面の観測など、微視的な実験手段による解明が待たれる。メタ磁性は磁化の増大とともに大きな磁歪も伴う現象なので、今後、メタ磁性体を使った新物質開発の指針としても、本研究の成果は

有用かもしれない。

論文掲載誌：J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) No. 3, p. 034711.
電子版：<http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/81/034711> (2月23日公開済)

〈情報提供：青木 大 (CEA-Grenoble (フランス原子力庁))
Jacques Flouquet (CEA-Grenoble (フランス原子力庁))〉

訂正とお詫び

当学会誌 67 巻 (2012) 4 月号の表紙に誤りがありましたので、以下の通り訂正してお詫びいたします。

(誤) 強相関係の非平衡物理

(正) 強相関係の非平衡物理

日本物理学会誌 第 67 巻 第 7 号 (2012 年 7 月号) 予定目次

口絵：今月号の記事から

巻頭言

男女共同参画推進委員長として思うこと……………嘉規香織

解説

アボガドロ数への挑戦……………伊藤伸泰

小特集：スタートした新英文誌 PTEP

はじめに……………瀧川 仁

PTEP の発刊にあたって……………長島順清

新英文誌 PTEP の目指すもの……………坂井典佑

PTEP への期待……………野崎光昭

Progress of Theoretical Physics を振り返る

……………九後太一, 川上則雄, 早川尚男

最近の研究から

フラストレート磁性体における多重 Q 秩序とスカーミオン

格子状態……………大久保 毅, 川村 光

強相関電子系分子性導体のモットーアンダーソン転移

……………佐々木孝彦

JPSJ の最近の注目論文から 3 月の編集委員会より

……………川畑有郷

学会報告

第 67 回年次大会シンポジウムの報告……………領域委員会

新著紹介

会員の声

日本物理学会第7回 Jr. セッション報告

北本俊二[†] 〈立教大学理学部 171-8501 東京都豊島区西池袋3-34-1〉

松尾正之^{††} 〈新潟大学理学部 950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050〉

1. はじめに

Jr.セッションは、高校生や中学生が、科学部、物理部などのクラブ活動やスーパーサイエンスハイスクール(SSH)の課題研究授業などで得た研究成果を発表し併せて交流を深める機会として、本会が年次大会と同時に開催しているものである。¹⁾第7回 Jr.セッションは、新潟大学で開催予定であった第66回年次大会(2011年3月25~28日)にあわせ同月26日に実施するものとして準備が進められた。しかし、大会直前の3月11日に発生した東日本大震災のため、第66回年次大会は、会長、副会長、理事の判断で中止が決定され、市民科学講演会などの関連行事も中止となった。²⁾唯一の例外が Jr.セッションであった。Jr.セッションは、高校生たちの努力や夢を大切にしたいとの見地から、中止ではなく延期するという決定がなされた。

かくして延期された第7回 Jr.セッションは、当初予定の4ヶ月後にあたる2011年7月24日(日曜日)に、同じ新潟大学五十嵐キャンパス内の大学会館で開催された。延期開催という特別な事情にも関わらず、当初予定の約3/4の研究発表が行われて、参加者の間で活発な交流があった。開催までには紆余曲折があったが、参加した高校生たちのいきいきとした表情を見ると、中止でなくてよかったと改めて思われた。以下、この Jr.セッションの報告を行う。

2. 募集

発表希望の募集案内は、これまでと同様、日本物理学会の Jr.セッションのホームページ³⁾や、前回までの Jr.セッションに発表申し込みがあった学校にメールで連絡した。また、新潟地域からできるだけ多くの参加があることを期待して、新潟県教育委員会と新潟市教育委員会には後援をお願い

した。新潟県教育庁には、県内全高校に募集案内や開催案内を送るなど多大な協力をいただいた。このほか、SSHの実績がある新潟県内の高校には個別に広報活動を行った。

募集期間は、例年とほぼ同時期であり、2010年12月14日から2011年1月12日であった。応募総数は31件であった。前回の28件とほぼ同数である。うち、新潟県内からの応募は6件で、いずれも SSH の経験のある高校3校からであった。これまで新潟県内からの参加はほとんど無かったが、今回は、地元開催ということで各高校では意欲的に取り組まれたのではないかと推察する。この場を借りて、関係された県内の高等学校関係者の方々へお礼を申し上げたい。

3. 第1次審査と第2次審査

応募の31件の研究報告の内容は多岐に渡っている。これらを審査するために、すべての物理学の領域を網羅できるよう、物理学会にある19の領域の代表と、Jr.セッション委員、合計22名による書面審査が行われた。その結果を集計し、2月1日に学会事務局に集まり、口頭発表、ポスター発表の分類、そしてプログラムの編成を行った。Jr.セッションを1日で終わらせるためには、どうしても、口頭発表は限られたグループだけに絞り込まざるをえないことは残念である。プログラム編成では、ここ数年にわたり、類似したテーマを連続させるようにしてきた。直接の比較は刺激が強すぎるという考え方もあったが、実際には、発表者同士が、議論を戦わせるような場面も生まれ、発表がより活発になるということが分かってきた。今回も、波・振動に関する複数の研究、電磁現象に関する複数の研究は、同じセッションにまとめることにした。こうして、口頭発表、ポスター発表のプログラムを決定し、当日に向けての準備や当日の流れもほぼ決定した。

4. 延期開催

3月上旬までに開催準備はほぼ完了し、残るは会場設営のみとなっていたが、東日本大震災の発生で、状況は一変してしまった。第66回年会の中止と、第7回 Jr.セッションの延期が決定されると、その直後には、本会事務局から参加予定校あてに延期となった旨を連絡するメールが送られた。後援をいただいていた新潟県教育委員会、新潟市教育委員会、会場を借用する新潟大学にも連絡し、延期開催となったことを了解していただいた。

延期はしたものの、いつ開催するのかわきりだけ早めに決めなければいけなかった。場所を新潟大学とする方針はすぐ決まったが、開催日についてはいくつか懸念されることもあった。4月以後は学校の授業期間であり期末試験や各種行事などが重なる可能性もある。そこで、参加高校に日程についてのアンケートを行い、できるだけ多くの高校が参加できそうな日程を選ぶことにした。一方、東京電力および東北電力管内では電力供給が逼迫し(新潟は東北電力管内である)、検討していた3月末の段階では、夏には再び計画停電となるのではないかなど不安要因があったが、4月初旬ごろになると夏の計画停電の可能性が低くなる気配が見えた。いろいろな事情を勘案して、最終的に7月24日(日曜日)に、当初予定と同じ新潟大学の大学会館で開催することが4月中旬に決定された。万一の停電のために、発電機のレンタルの手配も行った。停電でも、発表だけは続けられるようにしようという意気込みである。

延期実施であるから口頭発表、ポスター発表の変更はしないこととしたが、参加できない発表者でもポスターを送付しての展示発表はできる、卒業した高校生も参加・発表できる、などの特例を措置した。結局、新プログラムでは、口頭発表9件、ポスター発表12件、ポスター展示3件の全24件の発表と

[†] Jr.セッション委員長

^{††} Jr.セッション委員

なり、残念ながら、延期により出席できなくなった講演7件となった。開催当日は、例年とは違い学会参加者が立ち寄ることは不可能であったが、参加高校生たちと引率教員、本会の永宮正治会長、倉本義夫副会長、理事、Jr.セッション委員と委嘱した審査員、加えて、新潟大学の物理教員や学生、さらには、県内の高校関係者も何人か参加し、全体で約130人の参加者となった。開始前にほぼ満席となった会場は、高校生たちのざわめきで熱気あふれるものとなった。レンタルしていた発電機は使うこと無く、滞りなく行われた。

5. 発表

プログラムは、午前中に口頭発表（講演10分質疑5分）が4件と5件の二つのセッション、午後はポスター発表12件（1時間15分）、高校生向け講演、講評、表彰そして写真撮影からなる。9時20分開始で16時終了である。

口頭発表、ポスター発表をはじめ表彰式まですべてを大会会館の大集会室を会場とした。大集会室はフローリング床の広間にステージがついた構造をしている。ステージとパイプいすを並べた広間の前部を講演会場とし、広間後部をポスターセッション会場とした。全体を1会場に納めたため、開始前の短い時間や昼食時間にポスターを閲覧するなどに便利であり、参加高校生の間で交流を促すには役立ったのではと思う。今回は年次大会とは切り離しての実施であったから、年次大会参加者に参加してもらう（ように誘導する）ということには必要なかったのだ、これはこれでよかったのであるが、もし年次大会中の開催であったらJr.セッションが孤立してしまわないような会場配置を考えたほうがよいかもしれない。

口頭発表は、1人での発表の他、2～3人が登壇して発表するケースもあった。個人研究よりもグループでの研究が多いのは自然であるが、スライド係と口述係などに分担して発表するのもグループ研究らしくて、悪くないと感じた。全員がパソコンを使ってのプレゼンで、パソコンの扱いにはかなり手慣れている様子であった。10分の講演



図1 発表風景。緊張しながらの練習の成果である。前列の席には、審査員も見える。

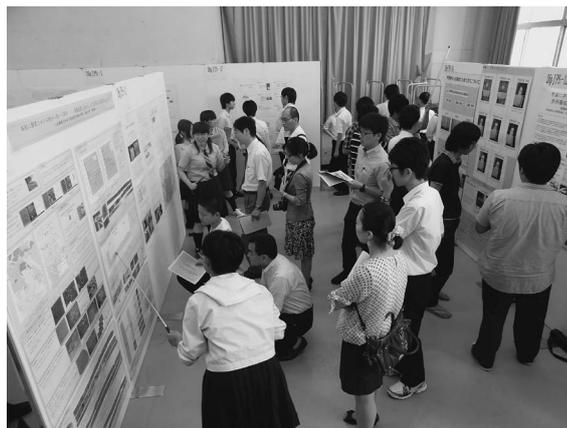


図2 ポスター発表の風景。一人でも多くの人に自分たちの研究を聞いてもらおうと発表時間中は休み無しである。

時間からはみ出したり短くなったりすることは少なく、スライドも、整理され読みやすいものが多い。プレゼンの準備や練習に時間をかけて取り組んでいることがよくわかった。スライド枚数が多い（かなり早口な）講演もあったが、それもまた熱い意気込みの反映であろう。高校生の段階では、下手に型にはめてしまうより、よいのではと思う。質疑応答では、審査員からの質問だけでなく高校生からの質問が注意を引いた。特に、2番目のセッションになると、慣れてきたのか、1講演につき高校生から複数の質問がされるようになった。この積極性は非常に頼もしく感じた。発表の様子を図1に示す。

ポスター発表の様子は図2に示した。ポスター発表も、説明に力が入っていたものが多かった。ポスターの作成だけでなく、（まるで口頭発表の準備のように）発表手順まで十分に練ってきているものもあった。また、ポスターのみならず、ノートパソコンを手にして質問者を待ち構え、それを使って説

明する非常にアグレッシブな発表もあった。大学院生にも見習ってほしいぐらいであった。

発表された研究内容は、ケンダマの玉の動きのような身近な素材を研究課題に選んだものから、電子顕微鏡など大学の研究設備を利用した本格的な研究まで、多岐にわたっている。第6回Jr.セッションの報告⁴⁾で指摘されているように、高校で何年も継続して取り組んでいる研究課題の報告も多いが、新たな研究課題への取り組みや初参加も少なくない。どちらがよいというわけではなく、審査は、論理性や創意工夫、表現力などの観点から総合的に評価している。

発表がすべて終了した直後から、審査委員会を開き、審査結果を整理したり受賞を決定するための審議を行った。この約一時間の間に、参加高校生を対象とした講演を行うのが習わしである。今回は、新潟大学理学部の谷本盛光教授にお願いし、「宇宙の謎を解く」というお話をしていただいた。



図3 永宮会長を中央に、参加者みんなで撮った写真。

6. 審査結果

今回の研究発表全体に対して Jr. セッション委員会委員長が講評を行ったのち、各賞の発表と表彰が行われた。表彰状は永宮会長から、各研究発表グループに直接手渡されたが、受賞した高校生たちが喜ぶ姿は、とてもすがすがしいものであった。

最優秀賞は、高知工業高等専門学校の「分粒現象に関する研究—長時間観測システムの製作と観察—」に与えられた。この研究は、円筒に詰めた2種類の粒が、円筒に運動をあたえる(回転させる)ことで、異なる種類の粒がいろいろなパターンで分離する現象(分粒現象)の研究である。そこでは長時間にわたりモニターできるように、WebカメラとPCを使った装置の開発に創意工夫があり、また、実験の方法や解釈にも論理的な展開が見られ高い評価であった。

優秀賞は3件である。北海道立北海道札幌北高等学校の「ガラスハープにおける音階決定の法則性の研究 第4報」は、オシロスコープから波形を取り込みFFTによる解析まで行う高度な研究である。私立市川学園市川高等学校の「単極誘導の発生起電力に関する検証と考察」は、実験で測定した起電力をいろいろな考察で、理論的な解明しようとする研究である。北海道立北海道札幌西高等学校の「クントの実験における粒子のたまり方(第五報)」は、ポスター発表からの受賞である。

ポスター発表時、PCを使って熱のこもった説明をしてくれた。

奨励賞は6件であった。うち2件はポスター発表から、また1件はポスター展示からとなった。静岡県立清水東高等学校の「屈折率勾配を持つ溶液における光学的性質の研究」、私立本郷中学校・高等学校の「水の冷却—ニュートンの冷却の法則の拡張」、岐阜県立岐山高等学校の「 α 線の飛跡の曲折—なぜ曲がるのか—」、私立本郷中学校・高等学校の「渦電流の行路の特定に関する考察」、兵庫県立加古川東高等学校の「地学Iの教科書にある曖昧な鉱物同定法「条痕色」を明確に定義する」、北海道立北海道札幌北高等学校は「シャボン膜に現れる液体の流動第4報」である。それぞれ、実験や実習で一朝一夕には行えない研究で高校生たちの努力のあとが伝わってくるものであった。

7. おわりに

表彰式において永宮会長は、受賞した研究発表はどれも素晴らしいものであるが、受賞を逃したのものにもとてもいい研究はあり、会長がよいと考えた発表が受賞しなかった旨のコメントをされ、参加者全員の努力を称えた。実際、よく考えて分析を丁寧に行った研究、創意工夫がなされている研究、大学生顔負けの理論的分析を行った研究など感心させられるものが数多くあった。また、東日本大震災で延期開催と

なり参加には様々な困難があったと推察される中、多数のグループから参加があり盛会となったこと自身、発表した高校生と指導教員の方々の熱意と努力の賜物である。運営に携わったものの一人として、参加者全員に敬意を表したい。図3には、全員でとった集合写真を掲載する。

参加高校生たちの発表の様子や表彰式での表情をみると、Jr.セッションが、普段から物理学研究・科学研究に取り組む高校生たちの励みになっていることが実感できた。今回新潟で開催したことにより、従来、参加が殆どなかった当地域からも多数の参加があった。今後も年次大会にあわせて異なる地域で開催することで、物理学を志す若い芽が全国各地で続々と育ってほしいと切に願うところである。会員の皆さんには、毎回年次大会で開催されたいいただき、できれば発表者に声をかけて励ますなどお願いしたいと思う。

最後に、今回の Jr. セッションの審査と運営に携われた関係者の皆様に、深く感謝いたします。

参考文献および注

- 1) 並木雅俊：日本物理学会誌 **60** (2005) 415.
- 2) 永宮正治：日本物理学会誌 **66** (2011) 337.
- 3) <http://www.gakkai-web.net/butsuri-jrsession/>
- 4) 味野道信、並木雅俊：日本物理学会誌 **66** (2011) 936.

(2012年3月6日原稿受付)

教養としての物理教育：過去・現在と将来

国府田隆夫 ◇

まず「過去」の例として、朝永振一郎編『物理学読本』¹⁾のことから始めたいと思います。1949年発行の第1版のあと1969年に第2版が出版されました。手許にあるのはその第28刷(1994年5月発行)で、当時は広く教養課程の教科書に使われていたことがわかります。私が国立大学から私立大学に移り初年級の物理学概論を担当したときにも、副読本に使いました。²⁾今から見て古いところもありますが、物理学者を志向するとは限らない大部分の学生たち(文系学生も含めて)の基礎教育にとって、他書にはないユニークな特徴があります。いまなおその意義は失われていないでしょう。

まず目次を見てみると、第1章「月はなぜ地上に落ちてこないか、地球の重さはどうしてはかるか」で始まり、第2章「光が波であるとはどういう意味か」、第3章「エネルギーの旅」、第4章「電気振動」まで古典物理学の諸分野が扱われています。各章の表題から明らかなように、そこには“通常の科目分類に拘泥せず、物理学の学的方法の特徴を最も明らかに浮かびあがらせるのに適したいくつかの題目を選び…”(冒頭の「編者の言葉」から)という編者とそのお弟子筋の執筆者の方々のなみなならぬ意欲が表れています。“帰納、演繹、法則の発見と一般化、仮説の導入、間接的実験からの推理、直接実験からの検証”という物理学の王道を説くと同時に、“学生が物理学をいたずらに高踏的な近寄りがないものという印象を受けないよう、日常親しまれている現象から入って、次第に物理学特有の概念に進むよう、またできるだけ物理学と日常生活との関連を強調して、学生に敬遠されないように”という本書の趣意が、「編者の言葉」の最後に記されています。上記の古典論を終えて、第5章「原子論の発展」に進みますが、それに続く第6章「原子内部の構造」では、その後半で原子核エネルギーとその利用

がかなり具体的に解説されています。通常は核物理に先立って、あるいはそれを省略して量子論が説かれるでしょう。しかし本書では、それを最終章の第7章「量子の概念と物理学の将来」で概説するにとどめています。基礎教育として「相補性」などの哲学的内容を含む内容をまともに扱うには無理があるという判断もあったでしょうが、それよりも、核物理学の基礎知識が現代の市民生活では不可欠であり、それを優先すべきだという考えに基づいた構成だったのではないのでしょうか。結果的には先見の明だったというべきでしょう。§6「原子核の変換」から§9「連鎖反応の実現」まで、核分裂と連鎖反応の歴史を辿ったあと、原爆と原子炉発電の開発に至る経過が巧みな図解と付表によって詳しく解説されています。その付表のひとつ、「世界のおもな原子力発電所」には1965年当時の諸国の原発の出力、形式や運転開始期がリストアップされています。その中で日本の原発は東海村の原研1号機(JAPICO-1: 1965年)の1基だけでした。その後すぐに次々と国内各地に原発が設置され、現在は54基もの原発が日本列島の隅々にわたって存在していることはご存じのとおりです。

この付表に関して本文には次のような説明が書かれています。“UやCの融点の高いことは、熱機関としても効率が高くなる。すでに艦船用の動力として利用されているが、将来も、航空機動力、地震と同程度の大きな土木工事などに利用されるであろう。山をひとつこわすことぐらいは楽にできよう” 嘩然とする言葉ですが、原子力ロケットで飛翔する鉄腕アトムが戦後復興期の日本人の夢だった時代でした。物理学者たちの多くもその影響外ではなかったのです。しかし最終章の第7章「量子の概念と物理学の将来」で将来の物理学の発展の可能性が述べられたあと、編者自身によると思われる次の言葉が記されていることを付言すべ

きでしょう。“だが、そのような無限ともいえるような物理学の発展のどの時点にも、われわれが言及してきたように、その結果の悪用による怖ろしい可能性が必ずや存在することを忘れてはならない”それは誰よりも先に、科学者たち、とりわけて物理学者たちへの戒めの言葉だったでしょう。“われわれが一市民として一人間として正しい判断をもって決定に参加するためには、われわれが本書で学んできた程度の物理学への理解と関心は、いつも必要とされるであろう”という言葉で全巻が閉じられています。

ここまでが「教養としての物理教育」の「過去」に関することです。なお付言すれば、この4月から全国の公立小中高校で放射線教育が正式に取り上げられることになりました。文部科学省発行の副読本(生徒用、教師用)がすでに各校に配付されています。ここでその問題点を指摘したいと考えていたのですが、本欄の規定字数内では無理なので、追っての別稿に譲ることにします。

以上の「過去」を踏まえた上で、次に基礎物理教育の「現在」のことに話を移します。ご存じのことと思いますが、その状況はきわめて深刻です。多くの現役教員(とりわけて私立大学に所属される)の方々から聞き及ぶ「教養としての基礎物理教育」崩壊の現状は、想像以上です。たとえば今年の『大学の物理教育』に次のような報告が掲載されました。³⁾ 著者の了承を得て原文を多少変更してその大意を引用します。“物理初年次教育でいえば、微分方程式が解けないなどというのは基礎学力がないという程度のことです。そこにはまだ学びの姿勢や学ぶ楽しさへの憧憬が垣間見られる。しかし、それは限られた「ブランド」大学でのことである。受験生全入大学では、分数ができない、四則演算ができない、文章が読めない書けない、レポートは丸写しなど、基礎学力がないと言っても、その内容が大違いである。” 大学や学部、学科によっても多少の差はあるでしょうが、“古き良き時代に教育を受けた多くの教員が新入生の基礎学力のなさに驚き、講義のたびにパニック状態に

なっている,”という状況は変わらないでしょう。「過去」の古き良き「物理学読本」の時代からは想像外のことでしょうが、現実には正視しなければなりません。市民的教養としての物理学の理解が今ほど求められている時代はないからです。それではどうしたらよいのかという問題提起と、いくつかの提言を以下に述べたいと思います。

まず気付くのは、このような窮状がごく最近になって急激に顕在化してきたことです。その原因はかなり錯綜していて「全入制」だけに責任を負わせることは適当でないでしょう。たとえばその遠因のひとつに、物理学がすでに全盛期を過ぎ、若い世代が物理学に対する興味や憧憬を抱かなくなったことがあると思います。ボーアの弟子だった若き物理学者デルブリュックが、生物学に転じて、『読本』第2版が出版された1969年にノーベル生理学医学賞を受賞しました。ボーア自身を含め物理学から生物学など他領域への展開を試みた人々は、その例に事欠きません。⁴⁾ それと同時に、物理学自体が細分化と技術化のもとで大きく変貌し、全体として専門分野内だけに閉じた閉塞状況にあることも否めない事実でしょう。自分自身の「将来」の夢をこめて基礎物理の教育にあたるような教員の影響力が低下していることも問題の一因ではないでしょうか？ しかしその根源には、初等、中等教育から始まる一方通行的な教育に問題があるというのが私の見解です。教師と生徒や学生との間の双方向的な「対話」が基礎物理教育で有効だという経験を昨年の本誌の「談話室」欄で報告しました。²⁾ 「対話」方式は、物理系の初年次クラスだけでなく、文理混合的な学生たちのための総合科目授業でもきわめて効

果的でした。⁵⁾ その授業の終わりに学生のひとり(心理学科)が次のような感想を書いてきました。“最近授業内容よりもミニテストとそれに対する皆さんの答えに興味をそそられるようになりました。科学の倫理問題を真剣に考える機会は、あるようであるが実際にはまったくないのです。このクラスと同じ世代の人たちがどんな意見を持っているのか聞けるのはとても参考になりました。もっと対話ができたらいいと思います。”全体に理系学生よりも文系学生の方が豊かなりテラシイ能力を持っている傾向があります。これまでの物理教育には何かが欠けていたのだらうと思います。真剣な検討が必要でしょう。

「対話」の他に重要と思われるのは、教員間の縦横の連携と連帯の構築です。カリキュラム全体の見直しや授業や実験の相互交流については学科全体の教員たちとの間の緊密な連携が欠かせません。それがなかなか難しいのです。“古き良き時代に教育を受けた教員たち”にとっては自分自身の理念に従って教育をすることがまず大事で、他の教員たちとの交流や連携には消極的な雰囲気は支配的でした。それは私自身のかつての姿でもありました。そのような伝統的流儀を取って破って、新しい基礎物理教育の実現を目指したのが『物理学読本』だったのでしょう。朝永先生の情熱的なリーダーシップで、はじめて可能だったことです。その理念を「現在」に継承することは容易ではないと思いますが、現状を放置することはできません。国際的な知的交流(とくにアジア諸国との)が急速に進む現状で、それに遅れをとるような若者たちを社会に送り出せば、大学の責任を問われるでしょう。大学や学科内

での横の連携だけでなく、基礎物理教育に携わる大学教員と小中高校の教員たちとの縦型の連帯も重要です。大部分が文系出身で物理学に疎遠な小中学校の教員たちにとって、原子核構造とか同位元素などの基本的知識を理解するには、かなりの困難を伴うでしょう。大学の物理学関係者の適切な助力が必要です。小中学校間の理数教育の地域連携支援事業(科学技術事業団)に携わった経験によると、縦型の連携や連帯ではまず現場教員の自発性を重んじるボトムアップ型の態勢が重視されねばなりません。関係者同士の建設的で平等な「対話」の場を構築することがまず求められるのです。

以上が、基礎物理教育の「将来」についての私見を交えた問題提起と提言です。意余って言葉たらずの内容になりました。微意を汲み取って頂ければ幸いです。幅広い専門分野にわたる物理学学会会員の方々が、市民教養としての基礎物理教育の「過去」と「現在」を知り、その「将来」について積極的な関心をもち、それぞれの立場で現在の危機を克服するための実践に参画されることを期待します。様々な意見の交換や対話の場として、本誌の役割もきわめて重要です。これからの意欲的な取り組みを望みます。

参考文献

- 1) 朝永振一郎編：『物理学読本』(第2版)(みすず書房、1969)。
- 2) 国府田隆夫：日本物理学会誌 **66** (2011) 454。
- 3) 巨海玄道、野田常雄：大学の物理教育 **17** (2011) 133。
- 4) A. パイス著、西尾成子、今野宏之、山口雄仁訳：『ニールス・ボーアの時代2』(みすず書房、2012) pp. 214-218。
- 5) その記録が次のホームページで紹介されています。ご参照下さい。 <http://homepage2.nifty.com/delphica/archives/index.html>

(2012年3月9日原稿受付)

ガリレオの知財戦略

田中一郎* ◇

最近の多くの大学では教員に対して特許出願を奨励しており、特許取得あるいは出願数を教員評価の項目に含めることも珍しくない。特許出願数を大学の格付けに反映させることさえ行なわれている。もっとも、大学教員を含む科学者が特許を出願した事例は古くからあり、最近になってからというわけではない。

最初に特許を取得した科学者はガリレオ・ガリレイだったと思われる。法律に基づかない特許の認可は古くからあったが、ヴェネツィア共和国では1474年に世界で最初の特許法を制定して新規な発明を奨励しており、ガリレオは1592年から1610年まで共和国内のパドヴァ大学で教鞭を執っていたからである。彼が1593年に出願したのは揚水機の特許である。ヴェネツィア共和国の統領（ドージェ）に宛てた申請書には次のように書かれている。

私、ガリレオ・ガリレイは、安価で大きな利便性を持った水を汲み上げる装置を発明しました。これは、1頭の馬の動力で取り付けられた20の吐水口から連続的に水を排出します。目下のところ私が望んでいるのはそれを実現することですが、私自身のものであり、すべての人びとの共有財産となるべきこの発明を、私の労苦によって、私の費用で実現させるのは適切ではありませんから、同種の事例においてあらゆる専門的職業における熟練者にすみやかに認可されたものを私に提供することを取りはからってくださるよう閣下にお願いいたします。

さらにガリレオは40年間の特許期間と発明者の権利の保護のための侵害者に対する罰金を求めている。

私もしくは私の相続人から権利を得たもの以外には誰も前述の私の新

装置を作ることも作らせることも、たとえ作ったとしても、使用することも、変形させて水その他のものに用いることを40年間、もしくは閣下の望まれる期間内は許されないよう、侵害があった場合には閣下が適切と思われる罰金を科し、私にもその一部を下さるようお願いいたします。そうしてくだされば、私は人びとの利益のためにさらに熱心に新発明に励むであります。

ヴェネツィア議会は同年の12月28日に市監督局に諮問を行なっている。

前述の請願に対する市監督局の回答はいかなるものか。その内容について十分な知識を獲得し、必要とされるだけ調査し、評価し、検討して、その意見を適切な署名のある宣誓書として提出すること。

この諮問を受けて、翌年の2月18日に市監督局は次のような答申を行なっている。

閣下の御命令により、市監督局はガリレオ・ガリレイより提出された請願を調査しました。彼の請願に書かれているように、彼は、彼によって発明された揚水し灌漑する新機械を、彼または彼から権利を得たもの以外には誰も、40年間は作ることも、作らせることもできず、作ったとしても使用することができないようにする特権を求めています。去る12月28日にわれわれに下された命令に従い、宣誓の上、謹んで以下のように申し上げます。われわれは彼の装置を原寸においても模型においても見たことはありませんが、それは、彼が請願に述べている通りのものであると思われまして、これまで他のものによって考えつかれなかった新発明であり、これまで他のものに特権が認められたこともありませんから、われわれは、彼がすべてを閣下の御判断の慎重さと賢明さに委

ねるという条件で、彼に20年間の認可を与えるに値すると判断します。昔も今も発明品が実際に稼働するかどうか問われるはずであるが、ガリレオは文書を提出しただけで模型すら提出していなかったことは驚くべきである。それにも関わらず市監督局が特許を認める答申を行なったことはもっと驚くべきかもしれない。実際にガリレオの請願は認められた。特許期間は20年で、侵害者には300ドゥカート（純度や金相場によって貨幣価値は変動するが、四百数十万円程度である）の罰金が科せられることになった。

この揚水機の発明をガリレオの余技であったとか、自己顕示欲の表われだったと解すべきではない。今日では人名辞典などで「イタリアの物理学者、天文学者」と説明されるガリレオではあるが、当時の学問的状况からすれば、彼は知の空白地帯である自然の観察から出発する新しい研究分野に果敢に乗りだそうとしていたのである。いつの時代であれ、新しいディシプリン、研究方法が有意義であるということを示すのは困難である。揚水機の場合、それを「自己宣伝」のためだったという評価もあるが、ピサ時代からパドヴァ大学時代にかけてのガリレオの研究は首尾一貫している。アルキメデス研究の成果である『流体静力学的天秤』と『固体の重心についての定理』から出発し、『機械学』を執筆し、運動の研究に取りかかっていた。当時であれば職人の手仕事に属すると考えられていた分野と学問に属すると考えられていた分野の狭間で研究が進められていたのである。だから、彼が揚水機に対する特許を統領に請願したのは、自らの研究がヴェネツィア共和国にとって有益であることを示し、そのことで伝統的な大学人からすると例外的な自らの研究を認知させようとしたのだと考えることができる。自分の研究が意味を持ち、社会にとっても有益であると機会を捉えて訴えたとしても非難されるべきではないだろう。

彼は17世紀の初頭に落体の法則を発見し、現代のわれわれはその発見の

* 金沢大学名誉教授

ゆえに彼を高く評価しているのだが、彼自身はその発見を直ちに公表することも満足して研究を終えることもなかった。1609年の望遠鏡の製作とそれによる天文学的発見があって研究の重心を力学から天文学へと移したが、天文学に転じる以前に放物体の軌跡と到達距離を確かめるところまで研究を進めていたのである。これに関連して、1597年頃に彼が製作した一種の関数尺である「幾何学的・軍事的コンパス」には装填量決定問題のための目盛が新たに加えられたということの思い出すべきだろう。大砲の仰角と装填される火薬の量さえ決めれば、砲弾の到達距離が割り出せる目盛である。この目盛は17世紀に入って通貨の換算のための目盛に取って代わられるが、試し打ちをする必要をなくしたことは当時の技術的課題に答えようとするものだった。彼の関心は、われわれが物理学という言葉から思い浮かべる範囲をはるかに超えていたのである。

特許を出願した科学者はガリレオだけではない。ブレーズ・パスカルは1649年に計算機の特許をルイ14世から与えられている。クリスチャン・ホ

イヘンスも1675年にオランダで振り時計の特許を取得している。ガリレオの特許出願動機とは異なっているとはいえ、彼らもまた何の配慮もすることなく、あるいは名譽欲に駆られて、発明後に特許を出願するのが当然と考えていたのではない。時計や計算機に限らず小型の器具の場合、それを持ち運びすることは容易であるし、分解することで模造品を製作することも可能である。パスカルにとってもホイヘンスにとっても、特許を取得することには剽窃を防ぐことは困難だっただろう。ただし、パスカルは特許を出願したものの、その申請書に図面を添付することを拒否し、有力宮廷人や官僚に模型を見せただけだった。

ガリレオにしても、1609年の年末に製作したオランダのものよりはるかに高倍率の望遠鏡は特許の条件を満たしていたと思われる。当時の特許法は、出願者が真正の発明者かどうかを問題としていなかったし、その国においてだけ新規性を持てば十分だったからである。しかし、彼は特許を取得する道を選ばず、望遠鏡をまずはヴェネツィア共和国への献上品とし、後にはヨー

ロッパ各地の貴顕への贈り物とした。揚水機は王侯貴族への献上品としてはふさわしくないし、潟の中にあるヴェネツィアという環境で威力を発揮した。望遠鏡のほうは特許を取ったところで剽窃を防ぐのはほぼ不可能だっただけでなく、それを通して天を眺めることで自分の天文学的発見を確認させることにもなったから、贈り物として二重の意味でふさわしかった。

おそらく、意図は様ざまではあろうが、発明をしたものの特許を出願しなかった科学者は膨大な数に上るだろう。特許を出願するにしても、出願しなかったにしてもそれなりの理由があり、戦略的な配慮が働いていたと考えてもよいだろう。いたずらに数のみを競っている感のある現代の大学の特許取得奨励策がこのようなたたかな戦略を持ち合わせているかどうか、不安にならざるを得ないのである。

参考文献

- 1) *Le Opere di Galileo Galilei*, ed. A. Favaro (Firenze: Barbera, 1890-1909) Vol. 19.
- 2) *Pascal; Oeuvres complètes*, ed. M. L. Guern (Paris: Gallimard, 2000) Vol. 2.

(2012年2月26日原稿受付)

応用物理 第81巻 第6号(2012年6月号) 予定目次

特集：テラヘルツ

巻頭言：21世紀の課題と窒化物ワイドギャップ半導体への期待……………名西徳之

総合報告：窒化物ワイドギャップ半導体の現状と展望；バルク GaN 単結晶成長技術開発の観点から……………天野 浩

解説
GaN系高効率電子デバイスの開発動向……………葛原正明
窒化物半導体のハイドライド気相成長技術の現状と課題……………額綱明伯

最近の展望
GaN電子デバイスにおける絶縁膜界面制御……………橋詰 保
Si基板上へのGaN単結晶の成長とデバイス応用……………江川孝志
ワイドギャップ半導体パワーデバイスの自動車応用……………加地 徹

LED照明の現状と将来：LED照明技術と標準化の進展……………太田光一、小紫正樹
半極性 $\{20\bar{2}1\}$ 面窒化ガリウム基板上純緑色半導体レーザーの開発……………上野昌紀、他

研究紹介
酸性鉍化剤の気相合成によるアモノサーマル法成長 GaN 単結晶の高純度化……………秩父重英
テラヘルツ波検出 GaN トランジスタの開発……………大西俊一、他
基礎講座：走査電子顕微鏡の最先端応用例；FIB-SEM 複合装置を用いた3次元構造分析……………森川晃成

橋本 治先生を偲んで

田村 裕和 〈東北大理〉

東北大学理学研究科教授、橋本 治先生は、退職を目前にひかえた平成24年2月3日、すい臓がんのためご逝去されました。ストレンジネス核物理の世界的リーダーとして当分野を牽引してきた先生の業績を振り返りたいと思います。

橋本先生は東京大学理学部物理学科を卒業し、昭和50年に東京大学大学院理学系研究科博士課程を修了して理学博士の学位を取得しました。博士論文の研究は、米国Lawrence Berkeley国立研究所(LBL)の184インチサイクロトロンからのミュオンビームを用いて行ったミュオンスピン回転(μ SR)とアクチナイド核の負ミュオン捕獲率に関する開拓的なものでした。

先生は、学位取得後ただちに東京大学原子核研究所(核研)の助手に採用され、LBLのBevalacにおいて重イオン衝突実験を行い、 π 中間子生成の研究や ${}^7\text{Li}$ 中性子ハロー核の発見に貢献されました。

昭和61年に助教授に昇任し、それまで主に欧米で行われていたハイパー核の実験研究をビーム強度の弱い高エネルギー物理学研究所(KEK)陽子シンクロトロンで推進するため、核研チームを率いて大立体角・高分解能の超伝導 K 中間子スペクトロメータSKSを建設しました。そしてこれを用いて、 π 中間子ビームによる Λ ハイパー核生成反応によって軽核から重核までの広い質量数領域にわたるハイパー核分光を成功させました。重い核内の Λ 粒子の単一粒子軌道の存在を明確に示したデータは殻模型の実験的証拠として高く評価されています。先生が確立した

π 中間子によるハイパー核分光法は、SKSとともに様々なハイパー核実験に利用され、日本をハイパー核研究の世界の第一線へ押し上げました。SKSは後にJ-PARCに移設され、現在も当分野の基幹施設として利用されています。

平成7年に東北大学理学研究科教授に就任された先生は、ハイパー核分光の一層の高分解能化を目指して東北大を中心とする国際共同研究グループを組織し、米国Jefferson国立研究所(Jlab)において電子ビームを用いた Λ ハイパー核分光研究を開始しました。多量のバックグラウンドのため極めて困難といわれていたこの実験を成功させたのち、専用の2組の高分解能スペクトロメータ(HKS, HES)を大型科研費により日本で製作してJlabに設置、素過程から中重核領域までの高分解能ハイパー核分光実験を遂行しました。このときハイパー核反応分光として史上最高の分解能500 keV(FWHM)を達成しました。最近では、この電子線によるハイパー核分光をMainz大学MAMI-C加速器でも展開すべく新たな共同研究を始めました。

こうした海外での研究と平行して、先生は東北大学原子核理学研究施設(現電子光理学研究センター)においても、中性 K 中間子スペクトロメータ(NKS, NKS2)を製作して、閾値領域における $\gamma n \rightarrow K^0 \Lambda$ 反応の研究を行いました。荷電粒子を含まず測定の難しいこの反応の断面積を世界で初めて測り、ストレンジネス電磁生成機構の研究に重要な役割を果たしました。

先生は5つの巨大な電磁スペクトロメータ(SKs, HKS, HES, NKS, NKS2)



を建設してハイパー核などのストレンジネス核物理を強力に推進する一方、大学運営にも大きな貢献をされました。平成17~21年には東北大学の理学研究科長・副学長となり、特に国際交流や大学教育の国際化に尽力しました。また、人と人のつながりを大切にし、国際共同研究グループを次々と作った先生は、理論家を含む研究者の国際的連携によってこの分野を一層発展させることを目指し、国内外で多数の国際会議を主催するとともに、JSPS先端研究拠点事業として世界のストレンジネス核物理ネットワークの構築に精力を注ぎました。その一環として、平成24年2月12~18日には先生自身が組織委員長となって第一回ストレンジネス核物理国際スクール(SNP school 2012)が東海、仙台において成功裏に開催されました。若手育成を願って病の中でスクールの準備を進めていた先生が開催目前にこの世を去られたことは残念でなりません。

研究・教育のために文字通り身を捧げられた橋本先生に心より感謝を申し上げるとともに、ご冥福をお祈りいたします。

(2012年3月5日原稿受付)

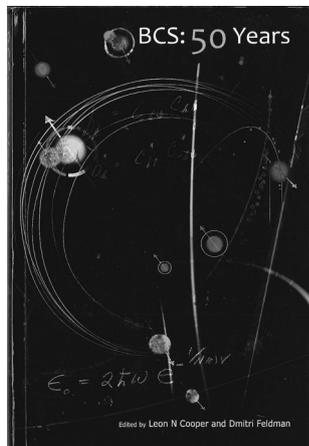
L. N. Cooper and D. Feldman

BCS: 50 Years

World Scientific, Singapore, 2011, ix + 575p, 25 × 17 cm, \$135/£84 [専門～学部向]

ISBN 978-981-4304-65-8

青木秀夫 (東大理)



超伝導は、物性物理学だけでなく、物理の多くの分野に関わる特段の面白さをもっているといえるが、1911年にKamerlingh Onnesによって超伝導が発見された百周年に当たる昨2011年にはこれを記念した様々な国際会議が行われた。一方、1957年にBardeen, Cooper, Schriefferにより提出された超伝導のBCS理論は基本中の基本だが、これも数年前に50周年記念を迎えた。本書はこれを記念した論文集で、23の章から成り、編集にはBCSの一人であるCooperとBrown大学での同僚Feldmanが当たっている。

BCSは、二つの点で興味深い。一つは、20世紀前半には超伝導を理論化しようと多くの物理の巨人(Heisenberg, Landauや実はEinsteinも)が挑戦したが、半導体を専門とするBardeen(Shockley, Brattainとともにトランジスターを発明)のグループが成功した。実際、Cooperは自らの章で、「自分が1955年にBardeenのpostdocになった時点では、超伝導の素人どころか、超伝導という概念すら知らなかった」といっている。もう一つは、半世紀の間に、BCSをはじめとする様々な概念が、ハドロン物理などへのスピノフを見せた一方、MRIなどデバイスへの影響も与えた。そのため、本書も内容は非常に多岐に亘っている。

本書の構成は、先ず「歴史的概観」から始まる。Cooperの「超伝導の懐古」で彼はBCSの事始めを語り、先ずはエネルギー・ギャップを説明しようという方針をたて、当時最新のファインマン・ダイアグラムや繰りこみの手法を駆使しようとしたが、出発点のエネルギー・スケールに比べ、超伝導状態になったためのエネルギー利得が桁違いに小さい、という壁に先ず突き当たった由(このあたりは、電子相関の関与する高温超伝導酸化物で、同じ問題が別の物理で生じたことを思い出させる)。フォノン交換が電子間引力を生むことはFröhlichなどにより示唆されていたが、Cooperはこれがフェルミ面上の電子に働いたときの問題(Cooper不安定性)となることに気付いた(1956年)。しかし、Cooperペアは重なりあっているので単純なボース・アインシュタイン凝縮(BEC)はしないのでは、というのがCooperの勘だった。ただ、現在の目で見れば、BCS-BEC間のクロスオーバーは冷却原子系で実現している。いずれにせよ、当時のアメリカ物理学会で、Feynman(超伝導理論をやるうとしていた)とOnsagerが居るところに、目に唯ならぬ光をたたえた(wild-eyed)Cooperがやってきて、「僕は超伝導を解いた」と説明したが、Feynmanは理解できずこの若者はおかしいのでは、と思ったのに対し、Onsagerはしばし黙考したのち、彼は正しいと思う、といった。しかし、Cooper不安定性から多体系全体の状態への道程は一筋縄ではなく、丁度1956年に半導体関連でノーベル賞を受けたBardeenがストックホルムに行くときに、Schriefferが絶望してテーマを変えたい、というとBardeenは「やり続けてごらん、何か(something)は出てくるかも」といった。そのsomethingがBCS波動関数形であった。マイスナー効果の計算ではゲージ不変性が気に

なつたが、Bardeenは、ゲージ不変性は有るはずだから特定のゲージでやれ、といった。後に、Weinbergが、(本書の彼の章を含め)「超伝導とはゲージ対称性の自発的破れに他ならず、マイスナー効果等の物性はこれの帰結だから超伝導機構を探索する必要はない」と主張するが、Cooperはその見解には反対している。これはほんの粗筋の一部であるが、小説を読むように興奮させられるとともに、現代でも色々な意味で示唆的なことを考えさせられる。

Schriefferの「BCSへの道程」は、インタビュー形式(AIP websiteにも貼ってある)を活字にしたものである。日本の読者に特に興味深いのは、Schrieffer(BCS理論当時25歳の院生)がBCS波動関数の形を思いついたのは、元々、朝永振一郎が原子核の中の π 中間子の問題において変分法の試行関数を作っていた(1947年)のに触発されたことである(これはAPS百周年記念のRev. Mod. Phys. 71(1999)の中でもSchriefferが述べている)。

Bardeenの「超伝導概念の開発」では、彼は1991年に没した故、ここでは1962年にロンドンでの低温物理学国際会議でFritz London賞受賞記念に行った講演が収録されている。BCS状態を特徴付ける重要な性質は波動関数のコヒーレンスだが、一つ注目すべきは、Bardeenのイリノイでの同僚にHebelとSlichterがおり、現在では彼等の名を冠したNMRの現象を1957年に実験で見つけ、それがコヒーレンスと関係していることにBardeenはすぐ気付いた、ということである。後の「NMRとBCS理論」の章でSlichter自身も詳しく語っているが、彼が超伝導に興味をもったのは偶然ではなく、Bardeenが超伝導の講演で多体効果によりギャップが開く、といったので、NMRに影響しないはずはなかろう、と実験をした由である。また、BCS理論は発表当時は意外と強い批判もひきおこした。一つの批判はこの理論はゲージ不変性を破っているという点であり、理論を全てゲージ不変に定式化できるということは、この数年後(1960年)の南部やGor'kovの理論を待つ必要があった訳である。これは南部

自身が「エネルギー・ギャップ、質量ギャップと対称性の自発的破れ」の章で述べている。

さて、この調子で紹介しているのは紙幅を大幅に超えてしまうので、あとの目次は <http://www.worldscibooks.com/physics/7728.html> で見ていただくことにして、特徴ある章に一言ずつコメントすると、Gor'kov (Landau 学派) は、BCS 理論を Bogoliubov が場の理論で分かり易くしたので「西側と違って」ソ連では BCS はすんなりと受け入れられた、と強調し、Anderson はゲージ不変性について南部理論を経て Anderson-Higgs 機構に至ることに触れている。また、超伝導の電子機構の提唱者の一人として、関連する ^3He の超流動や有機超伝導体、最近の鉄系超伝

導体にも触れている。第二部は「揺らぎ、トンネリング、不規則性」、第三部は「新超伝導体」、最後は「超伝導以外での BCS」の部となる。

このように、多彩で錚々たる著者により広い範囲が論じられているのが本書の迫力である。銅酸化物高温超伝導をはじめ、ヘリウム (Leggett) や冷却原子系 (Ketterle らや Baym)、ハドロン物理・QCD (Baym や Wilczek) がカバーされる。関連書としては、Bardeen の伝記 (V. Daitch: *True Genius* (Joseph Henry Press, 2002)) や、いまだに価値を失わない J. R. Schrieffer: *Theory of Superconductivity* (Benjamin, 1964; Perseus Books から 1999 に再刊) がある。今は arXiv の目まぐるしい時代ではあるが、それだからこそ、ものごとを

50年、100年単位で見直すことはますます大事と思われる。というわけで、本書のような集成は、読者は歴史に浸るのもよし、実験的・理論的にブレークスルーを狙うスタートラインに使うのもよく、超伝導専門外の方も含め、研究者、学生ともに強く薦められる本である。

(2012年2月20日原稿受付)

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

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

掲示板

毎月1日締切(17:00必着)、翌月号掲載。但し1月号、2月号は前々月の20日締切。修正等をお願いする場合があります。締切日よりなるべくお早目にお申込み下さい。書式は <http://www.jps.or.jp/book/keijiban.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: keijiban@jps.or.jp へお送り下さい。必ず Fax 03-3432-0997 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)

■新潟大学自然科学系准教授

1. 准教授1名
2. 工学部機能材料工学科
3. 応用物性、特に磁性や超伝導
4. 2012年10月1日以降早期
5. なし
6. 博士号取得者
7. ○履歴書(書式任意、写真貼付) ○研究業績リスト(発表論文、国際会議発表) ○主要論文10編以内の別刷又はコピー ○大学院教育及び指導実績 ○今迄の教育研究概要と今後の教育研究に関する抱負(約2,000字) ○科学研究費補助金等の外部資金獲得状況 ○学会活動、地域連携等の実績 ○照会可能者2名の氏名、所属、連絡先
8. 2012年6月12日(火)必着
9. ①950-2181 新潟市西区五十嵐二の町8050 新潟大学自然科学系総務課学系庶務係
②工学部機能材料工学科 坪井 望
電話025-262-7261 tsuboi_eng.niigata-u.ac.jp
10. 封筒に「応用物性・結晶工学分野(准教授)・教員応募書類在中」と朱書し

書留又は宅配便で送付。詳細は <http://www.niigata-u.ac.jp/top/personnel.html> 参照。

■広島工業大学工学部教員

1. 教授又は准教授1名
2. 建築工学科
3. 物性物理学。担当科目は基礎物理学、基礎物理演習、物理学実験(所属学科以外の授業も担当)。
4. 2012年9月1日
6. 本学の教育方針を理解し基礎教育及び研究に熱意のある方。博士号取得者。大学又は同等以上の教育研究機関において教育経験の他、上記分野における研究業績があり学協会でも活動する方。大学院(博士前期課程)の授業及び研究指導を担当可能な方。
7. ○履歴書(写真貼付、携帯電話番号、e-mail明記) ○健康診断書 ○推薦書1通及び照会可能者2名の氏名、所属、連絡先(e-mail含) ○教育研究業績一覧表(今迄の教育の内容、原著論文、著書、総説・解説、国際会議プロシーディングス、報告書、特許、学会活動、科研費等外部資金獲得状況) ○主要論文別刷5編(コピー可)と研究業績概要(約1,500字) ○着任後の教育研究に関する抱負(約1,500字)
8. 2012年6月15日(金)必着
9. 731-5193 広島市佐伯区三宅2-1-1 広

島工業大学事務局総務部 中畑佳二
電話 082-921-3123 Fax 082-921-8934
y.nakahata.pg it-hiroshima.ac.jp

10. 封書に「工学部(物性物理学)応募書類在中」と朱書き簡易書留又は宅配便等授受確認できる方法で送付。選考内容は第一次(書類審査)、第二次(面接、交通費自己負担)、第三次(ミニ講演及び役員等の面接、交通費大学負担)。提出書類原則不返却。返却希望者は住所・氏名を記載した宅配便の伝票(着払用)を同封のこと。応募書類の個人情報は選考目的以外不使用。

■理化学研究所基幹研究所研究室主宰者

1. 研究室主宰者5名(適任者が少ない場合は5名未満)
2. 物質機能創成研究領域創発機能物性研究グループ(グループディレクター十倉好紀)
3. (1) 強相関量子物性, (2) 機能・物性化学, (3) 電子機能材料科学, (4) 量子ナノエレクトロニクス
4. 2012年10月1日以降, 2012年度中早期
5. 問合せ先に照会。
6. 上記の研究分野において十分な実力と研究業績を有する方, 又は今後十分な業績の見込まれる自律的研究者で, 研究室を主宰するに十分な能力を有する方。国籍不問。
7. ○全てpdfで提出 ○履歴書(写真付, e-mail明記) ○研究業績リスト(主要論文5編に○印) ○上記主要論文別刷5編 ○今迄の研究概要及び今後の研究計画(A4, 計5枚以内) ○照会可能者3名の氏名, 連絡先
8. 2012年6月29日(金)17時必着
9. 理化学研究所基幹研究所物質機能創成研究領域 田口康二郎 y-taguchi@riken.jp
10. 必ず問合せ先に照会の上, 書類作成のこと。問合せ, 書類提出はe-mailのみで受付。

■国立天文台教授

1. 教授1名
2. 重力波プロジェクト推進室
3. 国立天文台は重力波検出の実現と重力波による新しい天文学を目指して, 関係機関と協力してKAGRAの建設を進めている。KAGRA計画の推進に必要な技術開発研究で中心的な役割を果たすと共に, 重力波による天文学研究の推進にも指導力を発揮できる研究者を

求む。

4. 決定後早期
5. なし
6. 天文学や物理学における開発的研究に実績がある方であれば, 従来の研究分野は不問。
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究歴 ○研究論文リスト(査読論文とその他を区別し, 共著の主要論文には役割分担を明記) ○主要論文コピー ○研究計画書 ○照会可能者2名の氏名, 連絡先
8. 2012年6月29日(金)
9. 181-8588 三鷹市大沢2-21-1 国立天文台 林 正彦 電話0422-34-3650 daicho nao.ac.jp
10. 封筒に「重力波プロジェクト教授応募書類」と朱書き簡易書留で送付。応募書類不返却。

■東北大学金属材料研究所准教授

1. 准教授1名
2. 放射線金属化学研究部門
3. アクチノイドを含む強相関電子系の物質開発, 試料育成, 極限環境下における物性実験を行う。研究・教育に意欲的に取り組んで頂ける方。金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センター(大洗)を主な本務地とする。
4. 決定後早期
5. 10年(審査により再任1回5年可)
6. 博士号取得者
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究業績リスト(原著論文, プロシーディングス, 著書・解説, 招待講演, その他に分類) ○主要論文別刷5編(コピー可) ○今迄の研究業績概要(約2,000字) ○今後の研究展望(約2,000字) ○推薦書又は照会可能者2名の氏名, 連絡先
8. 2012年7月2日(月)必着
9. ①311-1313 茨城県東茨城郡大洗町成田 東北大学金属材料研究所 青木大
②同上 電話029-267-3181 Fax 029-267-4947 aoki imr.tohoku.ac.jp
10. 封筒に「放射線金属化学研究部門准教授応募書類」と朱書き書留で送付。応募書類不返却。

■東京大学大学院総合文化研究科准教授

1. 准教授1名
2. 広域科学専攻相関基礎科学系
3. 非平衡, 情報, 生命等の領域へ理論物理学を広げていく意欲と能力を持った, 新進気鋭の研究者。教養学部統合自然

科学科の教育に中心となって取り組める方。大学院(相関基礎科学系)の研究指導・教育, 教養学部前期課程の講義(物理学)も担当。

4. 決定後早期
5. なし
6. 博士号取得者
7. ○以下を各2部 ○履歴書 ○研究業績リスト ○主要論文5編(コピー可) ○研究業績概要(3,000字以内) ○着任後の研究計画及び教育に対する考え方(2,000字以内) ○照会可能者2名の氏名, 所属, 連絡先
8. 2012年7月9日(月)必着
9. ①153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1 東京大学教養学部統合自然科学科 金子邦彦
②同上 電話03-5454-6746 kaneko@complex.c.u-tokyo.ac.jp
10. 封筒に「相関基礎科学系准教授応募書類在中」と朱書き簡易書留又は書留にて送付。応募書類原則不返却。応募書類の個人情報は選考の目的以外では利用しない。

■宮崎大学工学部教授

1. 教授1名
2. 工学教育研究部電子物理工学科
3. 放射線の測定を含む物理計測工学分野, 教養教育・工学部基礎教育科目, データ処理工学, 放射線計測工学, 環境計測工学等の担当。大学院修士課程・博士後期課程の担当。全学・学部・学科の運営, 地域連携等。
4. 2012年10月1日
5. 特になし
6. 上記専門分野に業績があり, 物理学の講義・実験等の教育ができる博士号取得者。大学院の教育・研究指導ができること。
7. ○履歴書 ○研究業績リスト ○教育経験一覧 ○大学等運営の活動状況 ○学会・社会における活動状況 ○主要論文別刷 ○外部資金の獲得状況 ○研究分野及び今迄の研究内容 ○今後の教育と研究の抱負 ○照会可能者2名の所属, 職, 電話, e-mail等
8. 2012年7月10日(火)
9. ①889-2192 宮崎市学園木花台西1-1 宮崎大学工学部 今井富士夫
②電子物理工学科 大崎明彦 電話/Fax 0985-58-7363 ohsaki@phys.miyazaki-u.ac.jp
10. 詳細は <http://www.miyazaki-u.ac.jp/tech/events/teacher-recruit.html> 参照。

■名古屋大学大学院教員

[I]

1. 准教授又は助教1名
2. 理学研究科物質理学専攻(物理系)機能性物質物性研究室(V研)
3. 新規機能性物質の実験的研究. 現スタッフの寺崎一郎教授と岡崎竜二助教と相補的な研究経験を持ち, 且つ2人と協力して研究教育を行える方.
4. 決定後早期
5. なし
6. 博士号取得者(取得見込)
7. ○履歴書(1通) ○業績リスト(1通)
○今迄の研究概要, 着任後の研究計画, 教育に対する抱負(各1通) ○主要論文別刷5編以内(各3部) ○照会可能者2名の氏名, 所属, 連絡先 ○希望職位
8. 2012年7月13日(金)必着
9. ①464-8602名古屋市中千種区不老町名古屋大学大学院理学研究科物理学教室 神山 勉
(2)同 物理学教室 寺崎一郎 電話 052-789-5255 terra cc.nagoya-u.ac.jp
10. 封筒に「機能性物質物性研究室教員応募書類在中」と朱書き書留で送付. 応募書類不返却. 物理学教室の選考基準は <http://www.phys.nagoya-u.ac.jp/scholar/pub.html> 参照.

[II]

1. 教授1名
2. 工学研究科エネルギー理工学専攻エネルギー材料デバイス工学講座
3. 核融合炉の核燃焼解析, 環状磁場閉じ込めプラズマ実験, 及び核融合炉システム設計全般に関わる工学分野において, 研究・教育を推進する. 大学院・学部での専門教育と全学教育を担当し, この分野の人材育成に努める.
4. 2013年4月1日以降早期
5. なし
6. 博士号取得者
7. ○印刷物1部及び電子ファイル ○履歴書(写真貼付) ○業績リスト ○主要論文別刷5編以内 ○今迄の研究概要(約2,000字) ○研究計画と教育の抱負(約2,000字) ○照会可能者2名の連絡先 ○外部資金獲得状況, 学会及び社会活動, 教育経験等
8. 2012年9月25日(火)必着
9. 464-8603名古屋市中千種区不老町名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻 山澤弘実 yamazawa nucl.nagoya-u.ac.jp
10. 封筒に「教授応募書類在中」と朱書き

送付. 業績(研究業績, 教育業績, 社会的貢献, 人物を含む)の評価において同等と認められた場合には, 女性を積極的に採用.

■核融合科学研究所准教授

1. 准教授1名
2. ヘリカル研究部核融合システム研究系原子分子過程研究部門
3. 原子分子過程に基づいた原型炉プラズマ・壁相互作用の研究. プラズマ粒子の壁への入射過程, 壁からの粒子の放出過程, 放出粒子のプラズマへの侵入過程等に関する理論・モデリング研究及び実験研究. 原子分子データの評価及びデータベースの作成・公開の推進.
4. 採用決定後早期
5. 5年, 再任可
6. 博士号取得者等
7. ○履歴書 ○研究歴 ○就任後の抱負 ○推薦書 ○研究業績リスト ○主要論文別刷約5編各6部
8. 2012年7月18日(水)17時必着
9. ①509-5292土岐市下石町322-6 核融合科学研究所 小森彰夫
②管理部総務企画課人事・給与係 電話0572-58-2012
10. 封筒に「ヘリカル研究部核融合システム研究系原子分子過程研究部門准教授公募関係書類」と朱書き書留で送付. 詳細は <http://www.nifs.ac.jp/index-j.html> 参照.

■京都大学エネルギー理工学研究所准教授

1. 准教授1名
2. エネルギー機能変換研究部門・複合系プラズマ研究分野
3. 電磁場・プラズマ複合系の制御及びプラズマエネルギーの生成・輸送・変換の高性能化の研究. ヘリオトロンJ装置のプラズマ閉じ込め最適化とその実証に向けた実験的・理論的研究を推進し, 研究所内外との共同研究においても, 主体性・指導性を発揮して取り組める研究者.
4. 決定後早期
5. 8年, 再任7年1回可
6. 博士号取得者
7. ○履歴書 ○業績リスト(主要論文別刷等10編以内) ○研究業績概要(約2,000字) ○着任後の研究計画書(約2,000字) ○推薦書(自薦の場合は照会可能者2名を記載)
8. 2012年7月20日(金)必着
9. ①611-0011宇治市五ヶ庄 京都大学

エネルギー理工学研究所 尾形幸生
②複合系プラズマ研究分野 佐野史道
電話0774-38-3484 sano iae.kyoto-u.ac.jp <http://www.iae.kyoto-u.ac.jp>

10. 封筒に「教員応募書類在中」と朱書き書留郵便や宅配便等, 確認ができる方法で送付.

■神奈川工科大学任期制准教授

1. 准教授1名
2. 基礎・教養教育センター物理系列
3. 力学, 電磁気学, 物理学実験等の物理系科目を担当
4. 2013年4月1日以降早期
5. 5年. 但し, 更新又は任期の定めのない教員への変更もあり得る
6. 博士号取得者(取得見込)
7. ○履歴書 ○研究業績リスト ○所属学会及び社会における活動等 ○教育歴 ○教育に対する抱負 ○研究に対する抱負 ○推薦書 ○連絡先 ○主要論文別刷
8. 2012年8月31日(金)必着
9. ①243-0292厚木市下荻野1030 神奈川工科大学庶務担当部長気付(物理系列) 教員選考委員会
②万代敏夫 電話/Fax 046-291-3076 bandai gen.kanagawa-it.ac.jp
10. 詳細は <http://www.kait.jp/recruit/> 参照.

■東京大学物性研究所准教授

1. 准教授1名
2. 極限環境物性研究部門
3. 超低温領域において新規な量子物性の発見を迫る意欲ある研究者. 特に物性研究所内外における様々な研究との連携も視野に入れ, 市販の装置だけでは容易に実現できない超低温環境や実験技術を用いて, 独創的な実験を行う研究者を希望.
4. 決定後早期
5. なし, 但し着任後満55歳に達した年度の翌年度初めから任期制(詳細は書類提出先まで)
7. ○履歴書(略歴可) ○業績リスト(重要論文に○印) ○主要論文別刷5編以内(コピー可) ○研究業績の概要(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(健康に関する所見含む, 作成者から直送)
8. 2012年8月31日(金)
9. 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

②新物質科学研究部門 榎原俊郎 電話 04-7136-3245 sakaki_issp.u-tokyo.ac.jp

- 封筒に「極限環境物性研究部門准教授応募書類在中」又は「意見書在中」と朱書きし郵送の場合は書留で送付。応募書類等不返却。履歴書は本応募の用途に限り使用し、個人情報とは正当な理由なく第三者への開示、譲渡及び貸与は一切しない。

■大阪大学基礎工学研究科博士研究員

- 博士研究員1名
- 物質創成専攻鈴木義茂研究室量子スピントロニクスグループ
- ダイヤモンド中の単一NV中心を用いた量子暗号通信、量子計測、量子計算に関する研究
- 決定後早期
- 毎年度契約、更新可能性有
- 博士号取得者、又は取得見込者。光学分野或いは磁気共鳴分野での研究経験を有すること、又、計測器のプログラミングが出来ることが望ましい。
- 履歴書(写真貼付)、研究歴、研究リスト(査読付とそれ以外を区別) ○照会者の氏名、連絡先 ○主要論文別刷(コピー可、主な学会発表の予稿を加えてよい)
- 2012年9月30日(日)、採用者決定次第募集終了
- 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水落憲和 電話06-6850-6426 mizuochi mp.es.osaka-u.ac.jp http://www.suzukiylab.mp.es.osaka-u.ac.jp/web_mizuochi/indexMizu.html
- 応募書類不返却。

学術的会合

学術的会合の標準様式(1件500字以内)

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

■第44回化合物新磁性材料研究会「スピントロニクス材料の新展開」

主催 日本磁気学会化合物新磁性材料専門研究会

日時 2012年6月21日(木)

場所 東京大学本郷キャンパス化学本館3階講義室(113-0033 東京都文京区本郷7-3-1 電話03-5841-4321)

内容 電子の電荷自由度に加えてスピン自由度を利用するスピントロニクス技術は、トンネル磁気抵抗素子として既に実用化されているだけでなく、次世代の高速・低消費電力デバイスとして大きな期待がなされている。スピントロニクスに用いられる材料は、合金・酸化物・半導体・有機物等多岐にわたる。材料の形態・デバイス構造も多様で、そこに現れる表面・界面のスピン特性もとても興味深い。様々なスピントロニクス分野の研究者が最新の話題について紹介する。講演者(敬称略)：辻幸英治(阪大)、家田淳一(原研)、上野和紀(東大)、長田実(物材機構)、大久保勇男(物材機構)

定員 なし

参加費 無料

申込 当日受付

連絡先 113-0033 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学大学院理学系研究科化学専攻近松 彰 電話/Fax 03-5841-4603 chikamatsu chem.s.u-tokyo.ac.jp

■日本磁気学会第185回研究会「日本磁気学会と元素戦略」

主催 日本磁気学会

日時 2012年7月19日(木)12:30~16:45

場所 中央大学駿河台記念館670号室(東京都千代田区神田駿河台3-11-5 電話03-3292-3111)

内容 近年、世界的な希少元素の需要増加と資源国の輸出管理政策の影響により、深刻な希少元素の供給不足に直面しつつあり、希少元素の使用量を削減、代替元素を含む材料の研究・開発を行うプロジェクトが多く提案・推進されている。このような状況下において、文部科学省では、各学会、産業界の有識者による元素戦略検討会を中心とした検討を行い、新・元素戦略プロジェクトを企画・推進している。日本磁気学会は、磁性材料研究に係る学会として、文部科学省及び各学会と連携し、日本における元素戦略に寄与していく為、研究会を企画した。

定員 100名

参加費 3,000円(資料代込)、学生無料、

資料代のみ1,000円

申込 当日受付

連絡先 101-0052 東京都千代田区神田小川町2-8 日本磁気学会事務局 杉村 電話03-5281-0106 Fax 03-5281-0107 msj_bj.wakwak.com http://www.magnetics.jp/msj/seminar/topical/185.html

■非平衡系の物理—その普遍的理解を目指して—

日時 2012年8月1日(水)~4日(土)

場所 京都大学基礎物理学研究所湯川記念館 Panasonic 国際交流ホール(606-8502 京都市左京区北白川追分町)

内容 近年の非平衡物理研究の最前線を見渡し、それぞれの分野に見出される普遍的な側面を議論し、非平衡研究の今後のあるべき方向性を探る。参加者全員が発表できる場を提供し、活発な情報交換の場としての研究会を目指したい。非平衡系の実験物理、生物物理、計算物理、理論物理、そして数理論理に及ぶ幅広い分野の研究者に参加してもらい、活発な議論が行われることを期待する。

定員 先着150名

参加費 無料

発表申込締切 2012年6月10日(日)

連絡先 263-8522 千葉県稲毛区弥生町1-33 千葉大学理学研究科 笹本智弘 電話043-290-2734 noneq12 yukawa.kyoto-u.ac.jp http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~noneq12/v

■第18回(2012年)結晶工学スクール

主催 応用物理学会結晶工学分科会

日時 2012年8月6日(月)~8日(水)

場所 産総研臨海副都心センター(135-0064 東京都江東区青海2-3-26 電話03-3599-8001)

内容 結晶成長、構造解析、電子・光物性に関わる基礎的内容を厳選し、講義内容のレベルは大学院生、企業の研究・開発に新たに参画する方等を対象に設定。既に研究者として活躍されている方もバックグラウンドの補強として十分利用できる。

定員 130名

参加費 40,000円(1日のみ20,000円)、学生15,000円(1日のみ10,000円)

参加申込締切 2012年7月16日(月)

連絡先 113-0034 東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル7階 応用物理学会事務局分科会担当 上村さつき

■第21回コンピュータショナル・マテリアルズ・デザイン (CMD) ワークショップ

主催 阪大ナノデザインセンター, 阪大院物理, 東理大, 東京大学物性研究所, 計算物質科学イニシアティブ (CMSI), 阪大 QEDRI

日時 2012年9月3日(月)~7日(金)

場所 大阪大学基礎工学研究科G棟 (560-8531 豊中市待兼山町1-3 電話06-6850-6111)

内容 効率性, 環境調査性が要求される21世紀の研究開発で重要な役割を果たす第一原理計算に基づいた新物質の理論設計手法に関するチュートリアルを含むワークショップ. 密度汎関数理論に基づいた第一原理計算手法の理論の講義, 応用例の紹介とプログラムの実習を行う.

定員 約40名

参加費 無料(宿泊費, 食事代, 懇親会費, 旅費等は受講生負担)

参加申込締切 2012年7月29日(日)

連絡先 560-8531 豊中市待兼山町1-3 阪大ナノデザインセンター CMD ワークショップ実行委員事務局 下司雅章 電話06-6850-6342 Fax 06-6850-6342 cmd insd.osaka-u.ac.jp

その他 詳細は <http://ann.phys.sci.osaka-u.ac.jp/CMD/> 参照.

■第28回分析電子顕微鏡討論会

主催 日本顕微鏡学会分析電子顕微鏡分科会

日時 2012年9月4日(火)~5日(水)

場所 幕張メッセ (261-0023 千葉市美浜区中瀬2-1)

内容 EDS, EELS 及び STEM 観察やトモグラフィに関する基礎と共に, 環境電子顕微鏡による観察や歪み解析の最前線, 試料作製法に関する最新情報を紹介する予定. 一般からの口頭発表も募集.

定員 200名

参加費 6,000円, 学生無料

一般講演申込締切 2012年7月13日(金)

予稿提出締切 2012年7月20日(金)

参加登録締切 2012年8月10日(金)

連絡先 611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学化学研究所複合ナノ解析化学 根本隆 電話0774-38-3054 Fax 0774-38-3055 bunseki28 eels.kuicr.kyoto-u.ac.jp

<http://eels.kuicr.kyoto-u.ac.jp/bunseki2012/>

■Principles and Application of Control for Quantum Systems

日時 2012年9月10日(月)~13日(木)

場所 東京大学理学部1号館中央棟2階小柴ホール (113-8654 東京都文京区本郷7-3-1 電話03-3812-2111)

内容 量子力学と制御に関わる幅広い研究課題を対象とする.

定員 約170名

参加登録締切 2012年8月10日(金)

連絡先 慶應義塾大学理工学部物理情報工学科 山本直樹 電話045-566-1830 Fax 045-566-1587 yamamoto appi.keio.ac.jp <http://pracqsys2012.com/>

■第25回国際超電導シンポジウム (ISS2012)

主催 国際超電導産業技術研究センター

日時 2012年12月3日(月)~5日(水)

場所 タワーホール船堀 (134-0091 東京都江戸川区船堀4-1-1 電話03-5676-2211)

内容 (1)超電導に関する国内外の著名研究者による特別基調講演, 第一線の研究者により招待講演, 一般講演等, 約150件の口頭発表と約350件のポスター発表. (2)研究成果について, エルゼビアBV社から Physica-C 及び Physics Procedia 特別号として論文誌を発行. (3)新たなビジネスチャンスや技術移転を推進する為, 超電導の材料や技術, 応用した機器, システム等の展示.

定員 700名

参加費 有料(ファーストサーキュラーにて発表, 早期登録割引有)

申込 HPより

申込締切 HP参照

連絡先 135-0062 東京都江東区東雲1-10-13 国際超電導産業技術研究センター ISS事務局 電話03-3536-7283 Fax 03-3536-5717 iss istec.or.jp <http://www.istec.or.jp/ISS/>

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

■平成24年度日本ガス協会大学等研究助成

対象 日本に居住し, 「都市ガス業界の発展を先導する可能性がある革新的技術」を研究している大学・機関に所属する常勤雇用者. 営利企業等関係者は対象外.

応募締切 2012年6月15日(金)

問合せ先 105-0003 東京都港区西新橋1-1-3 一般社団法人日本ガス協会技術開発部 藤田, 丸山 電話03-3502-0113 Fax 03-3502-3676 josei gas.or.jp

その他 40歳以下の若手研究者の応募を原則優先. 詳細は日本ガス協会HPの募集要項参照.

■第11回積水化学自然に学ぶものづくり研究助成

対象 自然に学んだ基礎サイエンスの知見を活かし, 自然の機能をものづくりに活用する研究. 原則として1つのテーマとして独立した個人研究.

助成内容 最高300万円/件, 総額2,500万円.

応募方法 <http://www.sekisui.co.jp> 参照.

応募締切 2012年6月29日(金)

問合せ先 601-8105 京都市南区上鳥羽上調子町2-2 (株)積水インテグレートドリサーチ 佐野, 井元 電話075-662-8604 Fax 075-662-8605 shizen12 sirnet.jp

その他 助成研究期間は2012年10月~2013年9月.

■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.)

6月 ユーザ名 : 12Jun

パスワード: Tomonaga708

7月 ユーザ名 : 12Jul

パスワード: Wilson826

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
2012年			
6/3~7	第5回光学, 光電, フォトニック材料およびその応用に関する国際会議	奈良市	66-12
6/8	「融合マテリアル」第5回公開シンポジウム	横浜市	67-5
6/21	第44回化合物新磁性材料研究会「スピントロニクス材料の新展開」	東京	67-6
6/25~7/13	ISSP-CMSI int. workshop/symp. on MAterial Science Petaflops era	柏市(千葉)	67-5
6/27~29	Int. Workshop: Physics of information, information in physics, and the demon	岡崎市(愛知)	67-5
7/4~6	The 4th Int. Workshop on the Dual Nature of f-electrons	姫路市(兵庫)	67-3
7/6	日本真空学会関西支部&日本表面科学会関西支部合同セミナー2012 生物に学ぶさまざまな機能—環境に調和した自然界の知恵—	神戸市	67-5
7/10~12	第53回表面科学基礎講座	東京	67-5
7/19	日本磁気学会第185回研究会「日本磁気学会と元素戦略」	東京	67-6
7/21~23	第10回ESR夏の学校	仙台市	67-5
8/1~4	非平衡系の物理—その普遍的理解を目指して—	京都市	67-6
8/3	第40回薄膜・表面物理セミナー(2012)半導体SiCの基礎と応用(省エネ・低炭素社会を目指したパワーデバイス開発の将来)	東京	67-5
8/6~8	第18回(2012年)結晶工学スクール	東京	67-6
8/6~10	第57回物性若手夏の学校	岐阜市	67-5
8/20~25	The 20th Int. IUPAP Conf. on Few-Body Problems in Physics	福岡市	67-3
8/26~31	第21回ヤーン・テラー効果に関する国際会議	つくば市(茨城)	67-3
9/3~7	19th WIEN2k WORKSHOP	東京	67-3
9/3~7	第21回コンピューターショナル・マテリアルズ・デザイン(CMD)ワークショップ	豊中市(大阪)	67-6
9/4~5	第28回分析電子顕微鏡討論会	千葉市	67-6
9/5~8	フレキシブル・プリンテッド・エレクトロニクス国際会議2012(ICFPE2012)	東京	67-2
9/7~9	Summer School 数理物理2012「結び目の数理と物理」	東京	67-5
9/10~13	Principles and Application of Control for Quantum Systems	東京	67-6
9/11~14	日本物理学会2012年秋季大会(京産大)(素粒子, 核物理, 宇宙線, 宇宙物理)	京都市	日本物理学会
9/18~21	日本物理学会2012年秋季大会(横浜国大)(主として物性)	横浜市	日本物理学会
9/23~28	IUMRS-ICEM2012シンポジウムD-5「先進計算材料科学・工学 Advanced Computational Materials Science and Engineering」	横浜市	67-3
9/24~28	14th Int. Conf. on Vibrations at Surfaces	神戸市	67-3
10/21~25	第25回固体内原子衝突に関する国際会議	京都市	66-10
12/3~5	第25回国際超電導シンポジウム(ISS2012)	東京	67-6
12/3~8	The 4th Int. Symp. on Slow Dynamics in Complex Systems—頑張ろう東北—	仙台市	67-5
2013年			
3/26~29	日本物理学会第68回年次大会(広島大)	東広島市(広島)	日本物理学会
9/20~23	日本物理学会2013年秋季大会(高知大)(素粒子, 核物理, 宇宙線, 宇宙物理)	高知市	日本物理学会
9/25~28	日本物理学会2013年秋季大会(徳島大)(主として物性)	徳島市	日本物理学会

編集後記

昨年10月より会誌の編集委員としてお世話になっております。はじめは右も左もわからない状態でしたが、ようやく少し仕事の流れがわかるようになってきました。私の専門分野で興味をもたれている話題が中心にはなっていますが、できるだけ他分野の方々にも興味をもってもらえるような記事を企画することで、会誌を通じて学会を盛り上げたいと考えております。

話は全く変わりますが、我が子も含め子供達を見ていて常々思うことがあります。

子供が物事を学んでいく仕組みってどうなっているんでしょう？ 歩いたり話したりすることは、系統立てて知識や技術を授けられるわけではなく、まさに習うより慣れろで学んでいくわけです。例えば言葉などは、周囲の人が話していることがかなりわかるようになってくると、少しでも聞き逃すと一生懸命確認しようとしみます。おそらく好奇心をものすごく刺激されているんでしょう。少なくとも自身の専門分野のことは全て把握している専門家の姿勢に通じるものを感じなくもなく、大変興味深く感じます。

上記は記憶ですが、予測能力も不思議です。子供がキャッチボールできるようになるのは、ボールの動きに関する法則を経験的に体得し、ボールの軌道を予測できるようになるからでしょう。私の専門はプラズマ物理なのですが、磁場閉じ込め核融合プラズマでは、プラズマの閉じ込め状態が突然失われるディスラプションと呼ばれる現象があり、これを予測し回避する、回避が無理ならソフト化させることが重要な研究開発課題の1つになっています。プラズマ閉じ込め実験中に得られる計測データから、ディスラプションが起こる予兆を見つけ、

適切に対処しなければならぬわけですが、これが一筋縄ではいかないのです。この場合に、ディスラプションが起こる経験則を体得するということは、多数の実験データを機械学習することに相当すると思われるのですが、大型実験装置でディスラプションをバンバン起こすわけにもいきません。すると、物理の理解による論理的推論も用いて経験則を得ることが不可欠ということになります。現状は十分ではありません。

もっと不思議に感じるのは、パターン認識能力です。例えば、相当変な犬と猫らしきものの絵を描いて子供に見せても、それらを犬と猫と区別して認識します。ルールに基づいた予測というか、外挿の発展版に相当するのかわかれますが、この場合の「ルール」ってすごく漠然としていると思うのです。何をどのように学習すればこの

手の外挿ができるようになるのかわかれば、ディスラプションの予測も可能になるのでは？なんて思ったりします。ご専門の方にぜひ教えていただきたいと思います。

さて、この編集後記を書いているのは、新入生の入学直後です。新しい一歩を踏み出した若者達が、知的好奇心を刺激し続けられ、大いに学び、自身の可能性を広げることができるように、いろいろな形でお手伝いできればと思っています。

古川 勝 <

編集委員

旭 耕一郎 (委員長), 宮下 精二,
有田亮太郎, 板橋 健太, 伊藤 克司,
遠藤 仁, 小川 了, 北島 昌史,
小島智恵子, 佐藤 丈, 佐藤 実,
島野 亮, 鈴木 陽子, 竹内 幸子,

田中 秋広, 谷本 久典, 田村 忠久,
樽家 篤史, 西野 晃徳, 長谷川太郎,
平山 博之, 藤谷 洋平, 藤山 茂樹,
古川はづき, 古川 勝, 宮本 良之,
加藤 岳生

(支部委員)

朝日 孝尚, 石井 史之, 奥西 巧一,
岸田 英夫, 久保木一浩, 酒井 彰,
仲野 英司, 野村 清英, 松井 広志,
水野 義之

新著紹介小委員会委員

加藤 岳生 (委員長), 雨宮 高久,
木村 元, 榊田 創, 柴田 絢也,
竹延 大志, 多田 司, 多田 朋史,
中川 賢一, 村山 能宏, 森川 雅博,
矢向謙太郎, 吉越 貴紀, 渡邊 紳一

第 68 期 (2012 年 3 月 24 日~2013 年 3 月 31 日) 理事・監事

会 長	家 泰弘	副会長 (次期会長)	斯波 弘行
庶 務 理 事	伊藤好孝・嘉規香織・高野 宏・田村裕和・千葉順成・松川 宏・三沢和彦 本林 透		
会 計 理 事	千葉順成 (兼任)・野崎光昭・播磨尚朝・松川 宏 (兼任)		
会誌編集委員長	旭 耕一郎	JPSJ 編集委員長	安藤恒也
監 事	鹿兒島誠一・渡邊靖志		刊行委員長 瀧川 仁

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 67 巻 第 6 号 (平成 24 年 6 月 5 日発行) 通巻 748 号
Butsuri

©日本物理学会 2012

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
印刷所 〒169-0075 東京都新宿区高田馬場 3-8-8
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

白 勢 祐 次 郎
株式会社 国際文献印刷社

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。