

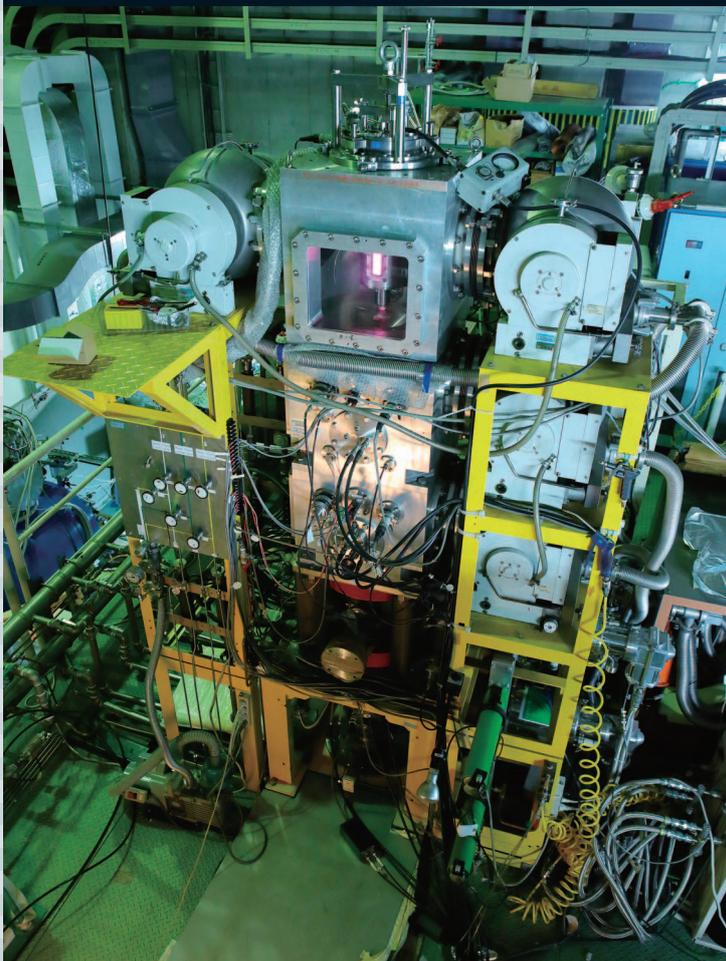
- 新しいハドロンの存在形態
- シリーズ「国際光年 IYL2015に寄せて」
- 核力はどこまで解っているか？

NO.

12

2015 | VOL. 70

B U T S U R I
日本物理学会誌



一 会計理事から見た日本物理学会

松井哲男 (会計理事)

第70期(2014年4月-2015年3月)と第71期(2015年4月-2016年3月)の日本物理学会理事会で会計理事を拝命しました。最初の1年間は、ただ慣れない仕事を勉強するだけで前任者の先生に頼っておりましたが、2年目に入ると前任者は新しい理事に交代され、いつの間にか「古参」として私もすっかり意見を言わないといけない立場になりました。その私から見た、物理学会の財政の現状と今後について少し書かせて頂きます。

先ず会計理事の仕事ですが、1年目は予算作成、2年目はその決算報告、というのが基本的な任務です。細かい事務作業は事務局が行いますが、会計理事の仕事はその全体を把握し、最終的には経営判断にまで繋げることにあります。ここ数年は物理学会の台所は赤字が続き、私が着任する前に「財政問題検討WG」で赤字の原因分析が行われ、それを受けて「財政問題対策WG」でその打開策が練られ、それをこれからの学会財政に反映させるのが私の仕事となりました。その結果が、皆さんご存知の30年ぶりの会費値上げと、大会参加費の値上げ、概要集の冊子版廃止と電子化等々です。昨年度は、予算案の策定と同時に、これらの重大な歴史的決定に立ち会うことになりました。

この決定の背景、特に現在の物理学会の財政事情については、既に何度もこの会誌で報告されていますので、ここでは詳細は繰り返しません。その大きな理由は会員減に伴う会費収入の減少、学会活動の多様化による出費増、そして刊行事業の負担にあります。今回の会費値上げやその他の方策は、このような現在の物理学会の抱える「構造的な赤字体質」を打開するために実施されますが、刊行センターの活動は科研費の補助や一部研究所の補助がどうしても必要な状態が続いています。

長期的に見たとき、物理学会の活動をさらに充実し発展させていくためには、より抜本的に財政基盤を充実させる施策が求められていると思います。

では、どのような可能性があるのでしょうか？ ここからは私論を述べさせていただきます。

刊行センターの事業を別にする、物理学会の主な収入源は会員からの会費収入で、それは基本的に会員の研究・教育活動に資するために使われるべきものですが、昨今の物理学会の活動は大変多様化してきており、海外の学会との交流や、次世代の会員獲得のための企画も含め、色々なアウトリーチ活動の費用も増加してきています。これを全て会員からの会費で賄おうとすると、これらの活動には自ずと限界が生じます。一方、会員の多くは大学・研究所等の教育・研究機関で働き収入を得ていますので、科研費による研究サポートも含め、その研究・教育活動は、結局は社会全体によって支えられています。多様化した物理学会の活動も、同様に社会からのサポートをもっと得るようにすべきではないでしょうか。

物理学は自然科学としての内的な学問的動機によって発展してきていますが、その中から生まれた技術はこの社会を変え、生産力の増大に寄与して、我々の生活の質の向上に役立っています。古くは電磁誘導の法則と発電、最近では量子力学と半導体技術(LEDも含む)、さらには一般相対性理論とGPSなど、我々の周りを見渡しても、基礎物理学の成果が社会に役立った例はたくさんあり、今日の文明社会は物理学なくして考えられません。我々は物理学の誤用にも目を光らす社会的責任がありますが、物理学の社会的効用をもっと誇りにし、社会からも我々の活動への理解をさらに得るように努力すべきだろうと思います。

そのような試みの例を海外に探すと、英国では、老舗 Physical Society (英国物理学会) は第1次大戦後の1920年にできた Institute of Physics (IOP) と1960年に合併していますが、今日のIOPは社会に向けても活発な広報活動をしており、その出版局 (IOP Publishing) は重要な収入源となっているようです。米国でも、世界恐慌の最中の1931年に物理学会の抱える経済危機を乗り越えるために American Institute of Physics (AIP) が設立されていますが、AIPはAPS (米国物理学会) を含む、物理学関係の様々な学会をその傘下に入れ、その活動の範囲はアウトリーチ活動や、それに関係した様々な出版物の刊行など広範囲にわたっています。要するに、どちらも純粋科学としての物理学の学会の域を出て、社会との広い接点を求め、それによって収入も増やしているように見うけられます。もちろん、これら海外の経験をそのまま我が国に持ち込むことはできないと思いますが、それらから学ぶことはたくさんあるように思います。

我が国では、日本物理学会 (JPS) の他に応用物理学会 (JSAP) が存在しますが、その会員数は我が日本物理学会の会員数を超え、物理学と工学や産業界とを結ぶ学会活動を積極的に展開されています。他にも、日本物理学会から派生した日本物理教育学会 (JESP) など、英国や米国と同様、物理学関係の多くの学会が存在します。戦前の日本数学物理学会から分離・独立して戦後再出発した日本物理学会は、応用物理学会とともに、来年、その設立70周年を迎えますが、我が国も関連学会とのより緊密な組織的連携の上に、より広い社会へのアウトリーチ活動を通して、その財政基盤をさらに強化すべき時かもしれません。

(2015年9月8日原稿受付)

巻頭言 Preface

一会計理事から見た日本物理学会
JPS in the Eyes of a Member of Its Treasury Board

松井哲男 897
Tetsuo Matsui

現代物理のキーワード Trends

新しいハドロンの存在形態：エキゾチックな多クォーク状態
New Form of Hadron: Exotic Multi-Quark State

瀧澤 誠 900
Makoto Takizawa

シリーズ「国際光年 IYL2015 に寄せて」 Special Series: To International Year of Light 2015

望遠鏡：宇宙認識の発展
Telescope: Developments of Universe Awareness

海部宣男 902
Norio Kaifu

解説 Reviews

核力はどこまで解っているか？—3体核力の実験的な現状—
New Facets of Nuclear Forces—Three-Nucleon Forces and Precise Measurements—

関口仁子 912
Kimiko Sekiguchi

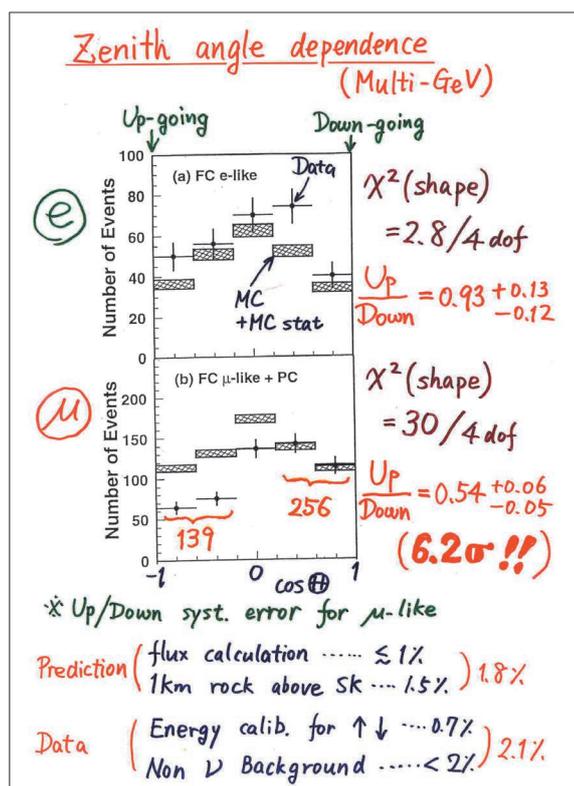
最近の研究から Researches

クォークから中性子星へ—格子QCD計算を用いた新たな挑戦—
Quarks to Neutron Stars using Lattice QCD Simulations

井上貴史 921
Takashi Inoue

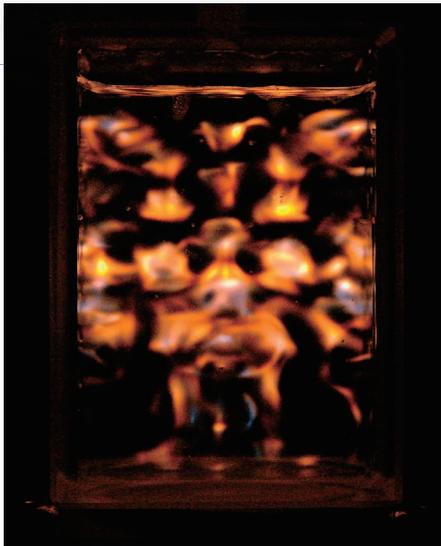
ハロゲン化鉛ペロブスカイト太陽電池
Organo-Lead Halide Perovskite Solar Cells

金光義彦, 山田泰裕 926
Yoshihiko Kanemitsu and Yasuhiro Yamada



学界ニュース (梶田隆章氏のノーベル賞受賞)

(提供：東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙線素粒子研究施設)
 「ニュートリノ振動」の発見が最初に報告された国際会議「Neutrino '98」での梶田隆章氏のスライドより。スーパーカミオカンデによって観測された、宇宙線によって大気上空で発生した電子型およびミュー型ニュートリノの到来方向(天頂角)依存性。縦軸は観測されたニュートリノイベント数、横軸はニュートリノ到来方向の天頂角の余弦で、+1が天頂から、0は水平方向から、-1は下から(地球の裏側から)の到来を表す。電子型ニュートリノのデータは予測とよく一致しているのに対し、ミュー型では下から来るものが少なく予測と大きく食い違っている。これは約地球直径分だけ長い距離を飛んで来ている下からのミュー型ニュートリノがニュートリノ振動によってタウ型に変わったためにスーパーカミオカンデで検出されなくなった、としてのみ説明が可能であった。ニュートリノが質量をもち、かつフレーバー間で互いに混合していることの決定的証拠である。素粒子の「標準理論」を超える物理を示す初めの実験結果ともなった。



話題—身近な現象の物理— (超音波洗浄とソノルミネセンス)

NaCl水溶液を入れた角柱容器中でのソノルミネセンス写真。周波数は約100 kHz。オレンジはNa原子(589 nm)からの発光。青白色はOHラジカル発光やプラズマの制動放射によるとされている。発光気泡は定在波の腹にトラップされるので、分布は角柱内3次元音波モードを反映している。

話題—身近な現象の物理—	超音波洗浄とソノルミネセンス	崔 博坤 ……	932
話題—企業の研究から—	ペタヘルツエンジニアリング創出に向けたアト秒光物性 ～NTT物性科学基礎研究所における超高速光物理研究～	小栗克弥 ……	936
JPSJの最近の注目論文から	12月号特集企画より	上田和夫 ……	941
ラ・トッカータ	夫婦で物理を？	森井政宏 ……	942
学界ニュース	梶田隆章氏のノーベル賞受賞	荒船次郎 ……	944
新著紹介			946
掲示板	■人事公募 ■学術的会合 ■その他		948
行事予定			953
会告	■2015年会費未納の方へお知らせ ■2016年分(2016年1月～12月)会費自動振替の実施について ■賞および研究助成の候補者の募集について ■OPEN SELECT論文およびJPS Conference Proceedings論文に対するCC BY適用のご案内 ■第71回年次大会(2016年)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) ■第12回Jr.セッションの開催 ■第71回年次大会(2016年)の参加登録・講演概要集の申込について ■第71回年次大会(2016年)講演概要集原稿の書き方および提出について ■2015年11月1日付新入会者		955
本会記事	■2015年秋季大会 ■2015年秋季大会の忘れ物 ■日本物理学会 第10回若手奨励賞受賞者47名(五十音順)		961
本会関係英文誌目次			965
第70巻(2015)総目次			i
	主題別索引・著者索引・新著紹介欄原著者索引		vii



表紙の説明

理化学研究所RIビームファクトリーで1992年の完成以降、現在まで稼働中の原子線通過型の偏極重陽子イオン源。重陽子スピンの偏極状態をベクトル、テンソルの自由な組み合わせで、かつ偏極度80%以上のビームを供給する。スピン軸はイオン源直下のウィーンフィルターによって標的上のあらゆる方向に制御することが可能。世界初の超伝導リングサイクロトロンにより核子あたりのエネルギー400 MeVまで減偏極することなく加速される。この偏極重陽子ビームを使って行われた重陽子・陽子弾性散乱の高精度実験から、核子が3つ集まって相互作用する三体核力(三体力)の明らかな証拠が見つかり、三体核力の定量的な議論が始まった。現在、原子核物理学では、三体核力を含めた原子核・核物質の研究が活発に行われている。詳細は本号に掲載されている関口仁子氏の「解説」記事を参照のこと。

新しいハドロンの存在形態：エキゾチックな多クォーク状態

Keyword: エキゾチックハドロンの

1. ハドロンの構造：クォーク模型から QCD へ

強い相互作用をする粒子のことをハドロンとよぶ。ハドロンはスピンが半整数のバリオン（重粒子）とスピンが整数のメソン（中間子）に分類される。現在観測されているバリオンはおよそ 140 種類、メソンはおよそ 180 種類ある。およそ半世紀前の 1964 年にゲルマンは次々に発見されるハドロンの構造を理解するためにフレーバー SU(3) 3 重項表現に属するスピン 1/2 の粒子であるクォーク (q) とその反粒子である反クォーク (\bar{q}) を導入し、バリオンとメソンの配位はそれぞれ (qqq) および (q \bar{q}) であるとした。¹⁾

その後、クォーク間の相互作用を記述する理論の研究が進められ、カラー SU(3) ゲージ理論である量子色力学 (QCD) が強い相互作用を記述する理論として確立した。²⁾

ハドロンのクォーク描像が確立してからすでに 50 年以上経つが、(qqq) および (q \bar{q}) 以外の構造を持つハドロンは殆ど発見されていなかった。最近になってチャームクォークやボトムクォークを含む 4 クォーク (q $\bar{q}q\bar{q}$) 状態が多数発見され始めたので、その現状を解説する。

2. ハドロンの QCD による描像

摂動論的な領域では数 MeV の質量を持つ u, d クォークは、低エネルギーでは、カイラル対称性の自発的破れにともなって、 $M_{ud} \sim m_\rho/2 \sim m_\rho/3 \sim 350\text{--}400$ MeV の質量を持つ準粒子として振る舞い、この準粒子を構成クォークとよぶ。ハドロンは構成クォークが残留相互作用によって結合した状態と考えられる。残留相互作用としては、閉じ込め力、カラークーロン力、スピン・スピン相互作用、軌道・スピン相互作用等が考えられる。

南部・ゴールドストーンボゾンである π 中間子のチャンネルには構成クォーク間に強い引力が働き、カイラル極限では質量が 0 のクォーク・反クォークの束縛状態となると考えられる。 π 中間子が実際に持っている小さな質量は u, d クォークがもともと持っている数 MeV の質量に起因する。

一方、重いクォークと重い反クォークの束縛系であるクォークonium は QCD の非相対論的有効場理論である NRQCD を用いて記述される。NRQCD に関しては学会誌の駒氏の解説記事³⁾ がわかりやすい。また、重い (反)クォークを 1 つ含む中間子系に関しても有効場理論である HQET⁴⁾ で解析されている。これらの系では、有効場の理論で、詳細に相互作用の分類等が議論されているが、本質

的には、軽い構成クォーク間に働く残留相互作用の形と大きな違いはない。基底状態や低い励起状態のハドロンの性質は、このような描像でよく理解されている。

3. エキゾチックハドロンとは

エキゾチックハドロンとは、クォーク・反クォーク構造を持つ中間子、3クォーク構造を持つ重粒子および、核子の多体系である原子核以外の構造を持つハドロンのことをいう。ここでいうクォークは構成クォークを意味する。具体的には、グルーオンだけを成分に持つグルーボール、クォークとグルーオン成分を陽に含むハイブリッド状態、マルチクォーク状態のテトラクォーク状態 (q $\bar{q}q\bar{q}$) とペンタクォーク状態 (qqq $\bar{q}q$) 等が考えられる。(q $\bar{q}q\bar{q}$) 状態に関しては、グルーオン交換による相互作用でコンパクトにまとまった状態をテトラクォーク状態、(q \bar{q}) でカラーシングレットの中間子をつくり、2つの中間子が π 中間子交換力等の相互作用で弱く結合した状態をハドロニック分子状態とよんでいるが、どちらもエキゾチックハドロンである。

準粒子である構成クォークは、多数の $u\bar{u}$ ペア、 $d\bar{d}$ ペアおよびグルーオン成分を含んだ状態であると考えられ、また、QCD においてはクォーク数は保存数ではないので、ハドロンがエキゾチックな構造をしているかどうかを決定することは簡単ではない。

同じような意味で、陽子は構成クォークの立場では、3つの構成クォークが軌道角運動量 0 の状態でスピン 1/2 の構成クォーク 3 個のスピンが 1/2 に合成されて、陽子のスピン 1/2 となっていると考えられるが、場の演算子として陽子のスピンを考えるとクォークのスピンからの寄与は約 1/3 であることが測定されている。⁵⁾

4. エキゾチックな粒子 X(3872) の発見

2003 年に Belle 実験で $X(3872)$ が $B^\pm \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-K^\pm$ 崩壊において $J/\psi\pi^+\pi^-$ の不変質量のピーク構造として発見された。⁶⁾ その後この状態は BABAR, CDF, D0, LHCb, BESIII 実験においても観測されている。LHCb により量子数も決定され $J^{PC} = 1^{++}$ である。 $X(3872)$ の $J/\psi\pi^+\pi^-$ 崩壊モードは $X(3872)$ が $J/\psi\rho$ の共鳴状態の成分を含むことを示し、 ρ 中間子はアイソベクトル状態なので、 $c\bar{c}$ 成分だけでなく $u\bar{u}$ および $d\bar{d}$ 成分も含まれていることが明白で、エキゾチックハドロンであると考えられる。崩壊モードとしては $J/\psi\omega$,

表1 $Z_c(4430)^+$ 以降に発見された電荷またはアイソスピンを持ったチャーモニウムおよびボトモニウム様状態.

名前	質量 [MeV]	幅 [MeV]	J^P	反応	崩壊モード	実験グループ (年)
$Z_c(4050)^+$	$4051 \pm 14^{+20}_{-41}$	82^{+21+47}_{-17-22}	$?$	$\bar{B}^0 \rightarrow \chi_{c1}(1P)K^- \pi^+$	$\chi_{c1}(1P)\pi^+$	Belle (2008)
$Z_c(4250)^+$	$4248^{+44+180}_{-29-35}$	$177^{+54+316}_{-39-61}$	$?$	$\bar{B}^0 \rightarrow \chi_{c1}(1P)K^- \pi^+$	$\chi_{c1}(1P)\pi^+$	Belle (2008)
$Z_b(10610)^\pm$	10607.2 ± 2.0	18.4 ± 2.4	1^+	$\Upsilon(5S) \rightarrow \pi^+ \pi^- \Upsilon(1, 2, 3S)$ $\Upsilon(5S) \rightarrow \pi^+ \pi^- h_b(1, 2P)$	$\Upsilon(1, 2, 3S)\pi^\pm$ $h_b(1, 2P)\pi^\pm$	Belle (2012)
$Z_b(10610)^0$	$10609 \pm 4 \pm 4$	18.4 (input)	1^+	$\Upsilon(5S) \rightarrow \pi^0 \pi^0 \Upsilon(2, 3S)$	$\Upsilon(2, 3S)\pi^0$	Belle (2013)
$Z_c(3900)^\pm$	3888.7 ± 3.4	35 ± 7	1^+	$\Upsilon(4260) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ $\psi(4160) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ $\Upsilon(4260) \rightarrow (D\bar{D}^*)^\pm \pi^\mp$	$J/\psi\pi^\pm$ $J/\psi\pi^\pm$ $(D\bar{D}^*)^\pm$	BESIII (2013) Belle (2013) CLEO-c (2013)
$Z_c(4020)^\pm$	$4022.9 \pm 0.8 \pm 2.7$	$7.9 \pm 2.7 \pm 2.6$	$?$	$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- h_c$	$h_c \pi^\pm$	BESIII (2013)
$Z_c(4025)^\pm$	$4026.3 \pm 2.6 \pm 3.7$	$24.8 \pm 2.6 \pm 7.7$	$?$	$\Upsilon(4260) \rightarrow (D^* \bar{D}^*)^\pm \pi^\mp$	$(D^* \bar{D}^*)^\pm$	BESIII (2014)
$Z_c(4200)^+$	4196^{+31+17}_{-29-13}	$370^{+70+70}_{-70-132}$	1^+	$\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K^- \pi^+$	$J/\psi\pi^+$	Belle (2014)

$D^0 \bar{D}^{*0}$ も観測されており、 $J/\psi\omega$ はアイソスカラー状態なので、 $X(3872)$ はアイソスピンが大きく混ざった状態と考えられ、とても珍しい状態である。観測された質量が 3871.69 ± 0.17 MeVと $D^0 \bar{D}^0$ の閾値 3729.68 MeVより142 MeVも高いのに $X(3872)$ 状態の幅は1.2 MeV未満と非常に細く、なぜこのように細い崩壊幅を持つのかも興味を持たれている。また、 $X(3872)$ の質量は $D^0 \bar{D}^{*0}$ の閾値 3871.8 MeVよりわずか0.11 MeV低いだけなので、 $X(3872)$ は $D^0 \bar{D}^{*0}$ のハドロニック分子状態ではないかという議論も盛んにされている。最近の $X(3872)$ の構造に関する理論的な研究については論文7,8やそこに引用されている論文を参照のこと。 $X(3872)$ の発見をきっかけとして、エキゾチックハドロン物理研究の時代に突入したと言ってもよいのではないと思う。

5. 次々と発見される4クォーク状態

電荷は保存量なので、例えば $+e$ の電荷を持つチャーモニウム様状態はその最小のクォーク成分が $c\bar{c}u\bar{d}$ となり、明らかなエキゾチックハドロンである。電荷を持ったチャーモニウム様状態 $Z_c(4430)^+$ が $\bar{B}^0 \rightarrow \psi(2S)K^- \pi^+$ 崩壊における $\psi(2S)\pi^+$ の不変質量のスペクトル観測で2008年にBelle実験によって発見され、⁹⁾2014年にLHCb実験でも確認された。¹⁰⁾LHCbで観測された質量は $4475 \pm 7^{+15}_{-25}$ MeV、幅は $172 \pm 13^{+37}_{-34}$ MeVである。

この後発見された電荷またはアイソスピンを持ったチャーモニウム及びボトモニウム様状態($q\bar{q}q\bar{q}$)を、発見された順に表1にまとめた。一つの実験グループでのみでしか発見されていない状態も多いので、そのような状態に

ついては、他の実験グループによる確認が望まれる。

現在、各状態についての構造の検討が理論的に繰り返られている。観測された $Z_b(10610)$ ($Z_b(10650)$)の質量は $B\bar{B}^*(B^* \bar{B}^*)$ の閾値の数MeV上であり、これらの状態は $B\bar{B}^*(B^* \bar{B}^*)$ のハドロニック分子状態ではないかと議論されている。同様に $Z_c(3900)$ ($Z_c(4025)$)の質量は $D\bar{D}^*(D^* \bar{D}^*)$ の閾値より約10 MeV上であり、これらの状態もハドロニック分子状態ではないかと議論されている。個々の状態を個別に理解するのではなく、すべての状態を統一的に理解することが重要である。そのためには、新たなエキゾチックハドロンの発見、個々の状態の種々の崩壊モード、スピンやパリティ、生成率等の測定が待たれる。エキゾチックハドロンの研究によりQCDの理解がさらに深まることが期待される。

参考文献

- 1) M. Gell-Mann: Phys. Lett. **8** (1964) 214.
- 2) H. Fritzsch, M. Gell-Mann and H. Leutwyler: Phys. Lett. **47B** (1973) 365.
- 3) 駒佳明, 駒美保: 日本物理学会誌 **67** (2012) 325.
- 4) N. Isgur and M. Wise: Phys. Lett. B **232** (1989) 113; *ibid.* B **237** (1990) 527.
- 5) 柴田利明: 日本物理学会誌 **67** (2012) 738.
- 6) S. K. Choi, *et al.* (Belle Collaboration): Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 262001.
- 7) N. Brambilla, *et al.*: Eur. Phys. J. C **71** (2011) 1534.
- 8) M. Takizawa and S. Takeuchi: Prog. Theor. Exp. Phys. (2013) 0903D01; S. Takeuchi, K. Shimizu and M. Takizawa: *ibid.* (2014) 123D01.
- 9) S. K. Choi, *et al.* (Belle Collaboration): Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 1462001.
- 10) R. Aaij, *et al.* (LHCb Collaboration): Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 222002.

瀧澤 誠 (昭和薬科大学)

(2015年7月22日原稿受付)

望遠鏡：宇宙認識の発展



海部 宣男

国立天文台

今年 2015 年は、欧州物理学会が提案しユネスコが主催する「国際光年 (IYL2015)」である。天文学は光＝各種の電磁波を用いた望遠鏡を最大的手段として宇宙を探ってきたから、国際天文学連合も共催団体としてプログラムの一つ “Cosmic Light” を受け持ち、活発な活動を展開している。本稿は、国際光年に関連する記事の一環として望遠鏡の歴史をという編集委員のご依頼により、まとめたものである。

私自身は、1960 年代半ば、まだ新しい分野だった宇宙電波の観測で宇宙の未知の領域を開いてみたいという希望を抱いて天文学の世界に入った。日本最初の宇宙電波望遠鏡となった三鷹の口径 6 m ミリ波望遠鏡からスタートし、野辺山の 45 m ミリ波望遠鏡、ハワイの 8.2 m 光学赤外線望遠鏡 “すばる” の建設に携わり、最近チリで稼働を開始したアルマ電波望遠鏡では、日・米・欧共同によるその実現に努力した。振り返れば、天文学者としての 40 年の大部分を、新しい宇宙を開く望遠鏡の開発と建設に費やしてきたことになる。ここ数年は、日本学術会議を中心とした学術の全分野にわたる大型計画推進の流れの確立に、微力を注いでいる。

望遠鏡の歴史については、たくさんのテキストや物語が書かれている。また、全電磁波にわたる多様な望遠鏡の構造や機能を解説することも、その方面の著作に譲りたい。ここでは国際光年にちなみ、「人類が世界を認識する手段の発展」という視点を中心に置いて、望遠鏡という科学の道具を振り返ってみようと思う。

そういう視点から見ると、ガリレオ・ガリレイにはじまる望遠鏡の進歩がいかに「宇宙で発見される驚き」にドライブされてきたかという感を、改めて深くする。光の研究については古くはプトレマイオス、また 11 世紀アラビアのイブン・アル・ハイサムなどの先駆的な仕事がある。だが 17 世紀初頭のヨーロッパにおける望遠鏡と顕微鏡の登場は、激しい勢いで光学研究を加速した。スネルやデカルトによる反射・屈折の法則の再発見、シルレの『光学宝典』、ホイヘンスの波動理論、ニュートンの色分散の研究と反射望遠鏡の発明、それにロバート・フックやレーウエンフックによる顕微鏡の開発など、17 世紀を通じた光学研究・光学機械の発展は、実に目覚ましい。その後も望遠鏡の進歩は絶え間なく続き、20 世紀に至っては当時の機械工学の極致でもあるパロマー山天文台の 5 m 望遠鏡の活躍、補償光学など波動光学を駆使した 8~10 m 望遠鏡の実現、電波望遠鏡の登場と電波干渉計の発明、そして電磁波の各波長における先端的スペース望遠鏡など。望遠鏡が切り開いてきた技術は、列挙すればきりがながい、そのような技術的冒険を冒して望遠鏡をここまで発展させてきたものは何かといえば、やはり宇宙に見出される驚き・期待であり、その努力は新たな発見によって報いられてきたのである。そのような宇宙の限りない奥深さを追求してきた人類の強力な認識手段、望遠鏡について私なりに振り返り、その未来についても触れてみよう。

—Keywords—

宇宙電波：

宇宙からやってくる電波。1931 年、無線通信の技術者カール・ジャンスキーによって偶然発見された。電波天文は、それまで可視光のみの観測で行われていた宇宙の研究に全く新たな対象をもたらした。その後の全波長天文学の先駆けとなった。

電磁波の大気吸収：

電磁波のうち、地球の大気による吸収をあまり受けずに地上から観測が可能なのは、電波と可視光、および赤外線と紫外線の一部である。赤外線と紫外線の大部分、それに X 線、ガンマ線を観測するには、大気圏外の宇宙空間 (スペース) に望遠鏡を持っていく必要がある。

干渉計と VLBI：

電波の観測では、波長が長く空間分解能が不足するため、電波干渉計が早くから開発された。複数の素子アンテナを離して設置し、同じ天体からの電波を同時受信してケーブルで結合し干渉させて、天体電波の詳しい空間情報を得る。その発展型が地球自転を利用した超合成干渉計、さらに長距離の基線を時間同期でつなぐのが、VLBI (超長基線干渉計) である。天文学の干渉計は、ミリ波、サブミリ波、赤外線と短波長へ進んでおり、将来は可視光でも可能になるだろう。

1. はじめに：光で世界を認識する

太陽光は重要なエネルギー源として、非常に多くの生物に利用されてきた。しかし、光を感覚の手段とする「眼」という器官を発明したのは、動き回って餌を探したり捕食者から逃げたりする「動物」である。特に、光の波長に比べて十分大きなレンズを備えた「眼」で像を結び、それを脳で一瞬にして分析するという離れ技は、その構造からも発達した脳の必要からも、ある程度のサイズを持つ動物においてのみ発達した。私たちは目から瞬時瞬時に莫大な情報を得、像を組み立て、その背後にある意味を理解し、なすべき行動を判断する。望遠鏡以前に、これほど立派な光学+解析装置である「カメラ眼」が私たちの体組織の一部として進化したことには、改めて驚かざるを得ない。だがそれは「結像」を目的とするものであって、望遠鏡や顕微鏡がもたらした「視野の一部に限定して像を拡大する」という機能を生物が直接に持つことは、基本的にはなかった。外界に反応し対応するためには、全方向にほぼ均等な視覚が要請されたからと、考えてよいだろう。望遠鏡も顕微鏡も、こうした人間の「カメラ眼」の機能に立脚し、それを補強する道具としてまずは登場したのである。

西暦1600年前後、ほぼ同時期に発明された望遠鏡と顕微鏡とによって、人類は外界の景色の中の限られた範囲を「拡大して見る」という機能をはじめて持つに至った。これによって、一方では広大な宇宙の巨大階層へ、他方では生物を中心とした微小な世界へと、人類の世界認識が限りなく広がってゆく扉が開いたのである。

何らかの装置を使い、目的を持って外界を見ることを、「観測」という。「観て」、「測る」。天文学だけでなく、気象や海洋、火山研究でも使われる言葉である。「(広く)見守ること」の意を基本とする observation の和訳として使われるが、よくできた日本語と思う。英語では同じ observation を用いても、日本語では顕微鏡は「観察」、望遠鏡は「観測」と使い分けるのも面白い。「観る」は、単に「見る」のではなく、特定の対象や目的をもって意識的に見る、また広く見る、という意が加わる。宮本武蔵は『五輪の書』の太刀打ちの心得に「かん観の目強く、けん見の目よはく」と書いているが、ここでは「観の目」とは心で見える目、「見の目」とは実際を見る目である。「観」の字のそもそもは、鳥が木のてっぺんから、獲物や危険な敵がいなか見回している図がそうなる。

一方唐の詩人白居易が“天もはか度るべく、地もまたはか度るべし”(「天可度」と詠ったように、天は古来、「測る」ものであった。暦のためもあるが、惑星の運行や天の異変を天の警告・神の予言として用いた占星術では、広い天域における惑星の位置や彗星・新星などさまざまな天の異変の位置を、なんらかの座標の中に定めることが求められたからでもある。暦のためだけなら、太陽や月・惑星が通る天の黄道付近だけを測っていればよいが、古代オリエントや中

国の全天の星座は、占星術に便利な空の座標であり、言ってみれば町名・番地の役割を果たすために整備されたものである。

こうしてすでに望遠鏡の発明以前、天体の天球上の位置を「測る」装置は大型のものが作られ、精密な観測が行われた。今も中国河南省に残る元代の巨大な観星台や、同じく中国漢代に作られた渾天儀、またケプラーに火星の公転軌道が楕円であるという大発見をもたらしたティコの壁面四分儀など(ティコには惑星の軌道を求めるという明確な目的があったが)が、思い浮かぶ。望遠鏡の発明後もしばらく、こうした装置は「測る」目的において、望遠鏡をしのご天文観測の重要な手段だった。望遠鏡は当初「観る」装置として大いに威力を発揮したが、「測る」機能を備えた装置として発展するには、時間を要したのである。

2. 望遠鏡のインパクト (1): 「観る」

そこでまず、発明された望遠鏡における「観る」という機能の発展を見よう。

ガリレオ・ガリレイの望遠鏡による初めての観測報告(1610年)が当時のイタリアやヨーロッパにもたらした影響は、甚大なものだった。ガリレオ以前にも望遠鏡を作った人はいたし(例えばハンス・リッペルスハイ、1608年のオランダ国会記録)、イギリスには月を観測した先駆的記録も残っているようだ。だがガリレオが偉大だったのは、天体の観察を目的として優れた望遠鏡を作り、物理学的な理解に基づいて宇宙の諸現象を系統的に観察し、そしてスケッチと的確な描写を添えた一般市民にわかりやすい報告書をただちに出版したことである。月に山や谷があること、天の川が無数の星の集合であること、金星が月のように満ち欠けすることなど、驚くべき大発見をいくつも詰め込んだ歴史的報告だ。ガリレオ・ガリレイ著『星界の報告』(岩波文庫)は、実に臨場感あふれる読み物である。望遠鏡を覗いた人々には、山や谷に覆われた月がローマ・カトリックの言う神聖な水晶の球体などではなく地球と同様の物質世界だということは、一目瞭然だった。「観る」ことの威力である。望遠鏡による宇宙の「観察」は瞬間にヨーロッパに広がり、望遠鏡で広大な宇宙を観、実感することで地動説の受容が急速に進み、人々が抱く宇宙の観念は激変した。17世紀以降、ケプラー、シラノ・ド・ベルジュラック、ウィリアム・ハーシェルらの「月人」や月・太陽文明国論が書かれて人気を博したのは、その端的な現れである。

何とんでも、これまで見えなかった新たな天体や現象が限りなく見えてきたのは、大変な驚きだった。当然、望遠鏡の「拡大して見る」という機能の強化が、まず追及された。すぐ行われた望遠鏡の改良は、正立像だが視野が狭く観測に不便なガリレオ式から、倒立像でも視野が広く明るいケプラー式への、レンズ系の転換である(ケプラー、シャイナー、1611年頃)。次いで起こったのが望遠鏡の大型化で、よく見るための大倍率の追求だ。倍率を大きくす

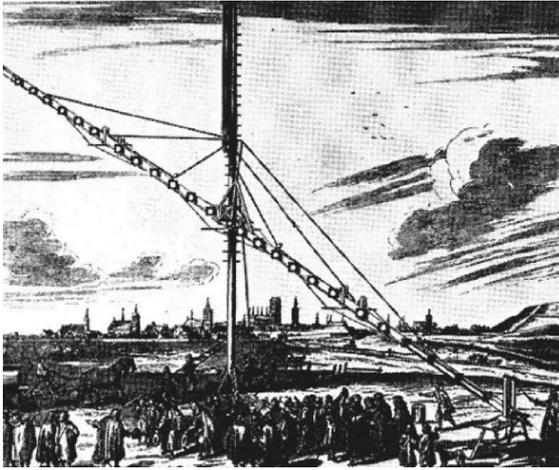


図1 ヘヴェリウスの46 m 空中望遠鏡。(海部宣男著『望遠鏡』より転載)

るには口径の大きさが重要であることも、だんだんと理解された。像の拡大を極度に追求したいいわゆる「空中望遠鏡」が、初期の達成である。当時は単レンズの時代で、必然的に生じる色収差による像のボケは、〈焦点距離/口径〉比を大きくとって軽減するしかなかった。そこで17世紀後半から18世紀前半にかけて、焦点距離十〜数十mという長大な望遠鏡が作られたのである。鏡筒を取り払って対物レンズ（光学レンズの直径は20 cmくらいが限界だった）と覗くための接眼レンズを長い棒の両端に取り付け、高い柱からひもで吊り下げて助手に操作させて観測した（図1）。

パリ天文台（1667年設立）やグリニッチ天文台（1676年設立）など17世紀後半に王室の支援で作られたヨーロッパ各国の天文台では、そびえ立つ長さ11 m, 18 mなどの空中望遠鏡が、その象徴となった。対物レンズを高い柱に取り付けて手元のワイヤで操作する、より簡便な形式も工夫された。当時の感覚からいえば、これら長大な空中望遠鏡はまさしく「巨大観測装置」だったといえる。水星の満ち欠け、土星の輪とその間隙、惑星の衛星、火星の極冠、ヘヴェリウスの詳細な月面地図や有名なフラムスチード『天球図譜』など初期の大きな観測成果が、この実に不便な望遠鏡を通して発見・達成されていったことには、驚くほかはない。望遠鏡で光を集め、像を拡大して観ることにより、人類にとっていかに新しい大きな世界が広がってきたかがわかる。

1672年に、ニュートンが反射望遠鏡を発明した。対物レンズの代わりに、凹面鏡で光を集める。色収差がない、画期的な望遠鏡だった。だが実際には金属で良好な反射鏡（放物面鏡）を作ることは困難で、精度は悪いし酸化して反射面が曇るから、公式天文台における空中望遠鏡の座は、なかなか明け渡されなかった。ただ手軽で比較的安価な反射望遠鏡は、その後登場してきたアマチュア観測家には魅力だった。自宅に工房を作って反射鏡素材の鋳込みや研磨を行い、優れた反射望遠鏡を何台も作ったウィリアム・ハーシェルが1781年に天王星を発見して大騒ぎになった



図2 ウィリアム・ハーシェルが天王星を発見した、自作の16 cm 反射望遠鏡。(複製, ウィリアム・ハーシェル博物館: 海部撮影)

ことは、よく知られている（図2）。昔から知られていた5惑星に、地動説で惑星になった地球を加えた6惑星。それ以外に惑星があるうとは、ハーシェルによる偶然の発見まで、誰も想像さえしていなかったからである。

口径を大きくすれば光をたくさん集められ、したがって高倍率が可能になる。「観る」ことを追求した反射望遠鏡は、当然大型化した。ハーシェルの口径1.2 m 反射望遠鏡（1789年）、ロス卿ウィリアムの1.8 m 反射望遠鏡（1845年）という巨大望遠鏡まで現れたが、依然としてアマチュアの望遠鏡で、天文台で専門家が使う主力装置にはならなかった。それが一変したのは、一つには色消しレンズの発明、もう一つには研磨したガラスの反射鏡に銀メッキ（後にはアルミニウムの真空蒸着）を施す技術の普及による。さらに産業革命で精密機械工学が発達し、望遠鏡は精密装置の時代に入る。

3. 望遠鏡のインパクト (2): 「測る」

1758年、イギリスのドロンダが、屈折率が違う2枚のレンズを組み合わせることで色収差を大幅に軽減した「色消しレンズ」を実用化した。これで、100年に及ぶ空中望遠鏡の時代は終焉に向かう。ヨーロッパ各国の天文台は、像の切れがよい色消し屈折望遠鏡による「測定」を重視した。筒を短くして軽快になった屈折望遠鏡は安定であるばかりか、十字線の挿入、マイクロメータの併用などによって恒星の位置や動き、惑星や衛星の運動といった精密測定を行うのに向いていたからだ。色消し屈折望遠鏡の登場で、望遠鏡が「測る」という機能を十分に発揮する時代に入ったのである。もちろん像を拡大した上で測るのだから、肉眼時代に比べて測定精度も桁違いに向上した。

そうした精密測定の成果で画期的なものに、ベッセルが1838年に成功した「年周視差」の検証がある。近傍の星である白鳥座61番星が天球上で1年間に描く、直径0.7秒角というわずかな円運動を確認したのである。これは地球が太陽の周りを公転しているために起きる現象で、地動説の

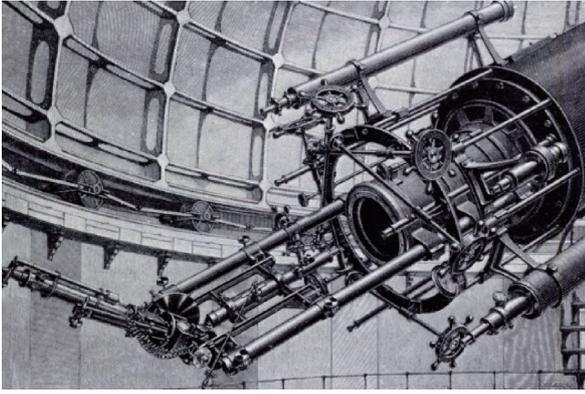


図3 大型屈折望遠鏡に取り付けられた分光器(リック天文台の91 cm 望遠鏡、中央から左下にかけての部分)。©リック天文台

初めての検証となった有名な観測だ。ベッセルの観測にはドイツの光学技術者フラウンホーファーが制作した口径16 cmの精密屈折望遠鏡が用いられたが、フラウンホーファー自身も望遠鏡に分光器を接続して太陽の暗線=フラウンホーファー線を発見した(1814年)ことで知られる。大型望遠鏡に取り付けた分光器は、その後、遠い恒星の大気組成や星雲の実体を明らかにするなど、天体物理学の花形となる分析装置である(図3)。

光学望遠鏡を用いた測定には、ベッセルが行ったような天球上の角距離の精密測定(アストロメトリ)、天体の光度やその変化を測る測光(フォトメトリ)、波長方向に詳しく分けて物理的・化学的な分析を行う分光(スペクトロメトリ)、また偏波の程度や方位を測る偏光測光(ポーラリメトリ)などがある。このうち、アストロメトリだけが望遠鏡以前の「天を測る」技の延長で、ほかはすべて望遠鏡および近代物理学の発達によって可能になったことに留意したい。

これらの新しい測定は、単に「観る」以上の新しい認識手段を人類にもたらした。まず分光は、各種天体(恒星の場合はその大気)の組成や物理状態、化学反応を知る重要な手段となったが、その上に、ドップラー効果により波長のわずかなずれから観測対象の「運動」を測る新しい手段となった。アストロメトリも空間的な動きから運動を測ることはできるが、遠くの天体では精度が落ち、観測に時間もかかる。分光によって対象とする天体やその各部分のガスの視線方向の運動速度(視線速度)を直ちに測ることは、変化の時間スケールが極めて長い天体の変化・進化を理解する上で、決定的だった。また偏光の観測は、天体や宇宙空間における「磁場」という、電磁気学の実験と理論がもたらした新しい概念を観測できる手段となった。望遠鏡は単に像を「観る」ことを超え、背景にある物理現象の認識に踏み込んだのである。

このような手段と用途に応じて、望遠鏡の焦点に取り付ける付属装置(天文学では、これを「観測装置」という)も工夫され、急速に重要性を増してきた。それら観測装置と望遠鏡に大きな革新をもたらしたのは、19世紀中葉の写

真術の登場である。

写真術は、そのごく初期から天文学への応用が試みられたが、その感度や手法の進歩とともに、写真撮影に必要な長時間露出に耐える、安定で精密な望遠鏡架台が制作されるようになった。眼視の記録・スケッチは個人差も大きく、再現性・客観性に問題があった。一瞬の光しか蓄積できない眼では、感度も悪かった。それに対して写真は乾板やフィルムの伸びや色感度など較正が厄介ではあるが、宇宙からの微かな光を長時間蓄積でき、「観ること」だけでなく「測ること」にも、劇的な進歩をもたらした。もちろん、客観的かつ保存できる資料としての価値は、はかり知れない。

一方、望遠鏡の光学系の発展にも、著しいものがあった。口径60 cm~1 mという大型屈折望遠鏡が、いくつも作られた(19世紀後半)。ただ、透明で均一でなければならないレンズには、重さも含め制作できる大きさに限界がある。やや遅れて、ガラスを磨いた大口径で精密な凹面鏡に銀の反射膜を付ける技術が進んだことで、1.5~2.5 mという大型の反射望遠鏡が登場する(19世紀末~20世紀初頭)。この状況の中で、望遠鏡用の大型写真儀、カメラ付き分光器などの観測装置も急速に発展した。写真記録により、観測後の専用測定装置を用いた精密分析、例えば天体間の角距離、天体の運動、光度変化、また原子・分子のスペクトルの波長や強度などの精密測定が可能になった。広大な宇宙のさまざまな天体に関する膨大な観測データの蓄積が、進みはじめた。

このように19世紀末をほぼ一つの区切りとして、望遠鏡の大型化における屈折と反射の競争は終わり、大型望遠鏡は完全に反射型の時代に入った。同時に、写真を含む技術発展の結果として、「観ること」と「測ること」の両者は区別がつかなくなってきた。さらにその後、1970年代以降にCCD(Charge Coupled Device)が登場すると、すべてのデータは即時にデジタル化されコンピュータ処理できるようになった。現在の研究用望遠鏡には、もはや「覗く」ところはどこにもない。望遠鏡は、「観る」と「測る」を全く同時に進める、電子の光学装置になった。いま新鋭の大型光学望遠鏡、例えば口径8.2 mのすばる望遠鏡は、肉眼の数万倍の光を集めている。電波観測やスペースからの光学観測は、肉眼では10秒角がせいぜいの空間の角度情報を、10マイクロ秒角(10^{-5} 秒角)以上の精度で読み取っている。

4. 望遠鏡のインパクト(3): 全く新しい認識手段の獲得

可視光を中心に望遠鏡の発達を述べてきたが、望遠鏡の発明以後で最重要の発展はいうまでもなく、可視光以外の電磁波領域、すなわち電波、赤外線、X線、ガンマ線への観測の拡大である。人類は、生物進化によって与えられた可視光での世界認識を大きく超えて、あらゆる電磁波を感

覚の手段として宇宙を認識できるようになった。これはすなわち、電磁波の各波長領域が関わる広大な温度領域=エネルギー領域にわたる宇宙現象とその変動を、観測・分析し理解する能力を得たということである。可視光による観測で恒星、つまり太陽に代表されるプラズマ天体が発する可視光を中心に組み立てられてきた人類の宇宙像は、超高温・高エネルギーの爆発現象（電波のシンクロトロン放射およびX線・ガンマ線）とその伝搬、逆に非常に低温の星間雲・星間物質とその化学進化・物理進化（電波、特にミリ波）、そして中間的波長の赤外線やサブミリ波による恒星形成・惑星形成の“暖かい”現場と、ダイナミックに進化する立体的・総合的宇宙像への転換を遂げる。

この点を、いま少し具体的に見よう。20世紀初頭から後半前期にかけて、「天体物理学」と呼ばれた研究領域が興隆した。可視光での観測で明らかになってきた恒星現象を、力学に加えて流体力学、熱統計力学、電磁気学、化学、分光学、原子物理学、原子核物理学、一般相対論など19世紀後半から20世紀初頭に勃興した近代物理学を中心とする学問領域を用いて読み解き、恒星の一生を理解する恒星進化論などの大きな発展を生み出したのである。さらに20世紀中葉の電波望遠鏡の登場で、認識の対象は「天体」から星間空間・星間物質に広がった。やがてX線、赤外線等も加わり、新しい概念の天体やその形成、さまざまな変遷と相互作用、終焉、物質循環と進化、そして宇宙論的現象へと拡張された。だからいまでは、「宇宙物理学」という呼び方が普通である。可視光のみの観測から全電磁波観測への発展は、恒星中心の「天体物理学」から、膨張宇宙におけるあらゆる現象を包括する「宇宙物理学」への発展をもたらしたともいえよう。

望遠鏡の発展史という面では、電波の登場が与えた衝撃が非常に大きかった。古代から三千年以上、眼に見える可視光を頼りに宇宙を認識してきた人類が、突然「眼に見えない」全く新しい宇宙の存在に気付いたのである。初期の宇宙電波の発見と観測がジャンスキー、リーバーという電波工学者によって担われた一方、専門の天文学者たちは無関心だったことから、宇宙からの電波がいかに予期されない、また理解しにくいものだったかがわかる。そして電波の宇宙が発見された以上、X線や赤外線など電磁波の各波長域へ観測が拡張するのは自然である。そこで、電波望遠鏡がいかに登場したかをまず述べておこう。

宇宙からの電波の発見は1931年、米国ベル研究所のカール・ジャンスキーが通信の障害になる雷の電波（空電）を研究するために作った、可動式大型ダイポールアンテナによるものである。偶然の発見だが、無線通信のための電波受信技術のレベルが宇宙からの微弱な電波を検出するまでに高まった結果という面では、必然だった。ジャンスキーは電波が天の川の中心域から来ていること、受信波長を短くすると強度が下がることなどをつかみ、その研究のため大型パラボラの建設をベル研究所に要請したが、あえなく



図4 世界最初の電波望遠鏡 リーバーの9.4 mパラボラ。(©アメリカ国立電波天文台)

拒否された。しかし若い電波工学者グロート・リーバーがこの発見に関心を持ち、自宅に口径9.4 mのパラボラアンテナを作って、1938年から観測を始めた。これが、世界初の電波望遠鏡といえる(図4)。

リーバーは1943年にかけて、天の川に沿って電波が出ていること、銀河中心が最も強く、はくちょう座とカシオペア座にも電波源が存在することなどを明らかにした。しかし、第2次世界大戦という時期もあるが、天文学者たちはこうした結果に興味を示さなかったのである。光に慣れた天文学者にとって、新しい分野である電波は理解しにくいものだった。だから戦後の電波天文学の発展は、主に物理学・電波工学の人々によって担われることになる。

この頃、電磁波の波長と物質の温度に関するプランクの法則(1900年)からは、可視光以外の電磁波で遠い恒星や銀河からの熱放射をとらえることは技術に困難と考えられていた。だが電波で実際に発見されたのは、熱放射ではなかった。天の川からの電波も1940年代に見つかった太陽バーストに伴う電波も、当時の物理学ではよく知られていなかったシンクロトロン放射による電波だったのである。高エネルギーの電子と磁場の相互作用でシンクロトロン放射が生まれることは、1950年頃ソ連のヨシフ・シクロフスキーが明らかにした。また1950年代にはオランダのヤン・オールドとファン・デ・フルストラが原子論から推定した、宇宙における中性水素原子の波長21 cmスペクトル線の探索が行われ、これは理論通りの成功を収めている。

5. 電波望遠鏡の発展の二つの道

電波望遠鏡は、リーバーのパラボラ、また通信用のアンテナや大戦中に開発されたレーダー用パラボラなどで、原型がすでに生まれていた。終戦後、新しい天文学への期待を担って急速に発展を始めた電波望遠鏡は、大きく二つの

道をたどった。

一つは、リーパーのパラボラの延長としての、大型単一パラボラ型電波望遠鏡である。初期には20 mクラス、1950年代から1970年代にかけてはイギリス・ジョドレルバンクの76 mを筆頭に、アメリカ、オーストラリア、カナダなどで40~60 mクラスのパラボラが作られて、活躍した。これらは波長がやや短いマイクロ波（波長数10~1 cm）が中心である。とりわけ前記の中性水素原子の波長21 cm波の観測は、スペクトル線であるために水素原子雲のドップラー速度の測定が可能で、初めてわが天の川銀河系の渦構造を描き出すなどの大きな成果を挙げた。

もう一つは、電波干渉計である。電波にせよ可視光にせよ、波を用いて観測する望遠鏡の空間分解能は〈観測波長/有効口径〉ラジアンだから、波長が長い電波は空間分解能が悪く、一方技術的には、電波は波のままでもコントロールすることができる。そこで、複数のアンテナを互いに離して設置し、同じ天体からの電波を同時にとらえて一か所に集め、それらを合成して高い空間分解能で像を作るという「電波干渉計」が非常に初期から工夫され、開発されたのである。

電波望遠鏡の二つの発展のうち、まず単一パラボラ型の電波望遠鏡について見よう。単一パラボラの大型化は、1980年頃までには口径100 mまで進んだが、さらなる大型化には限界がある。そこでパラボラは、短波長の電波が観測可能な高精度化への道をたどった。とりわけ1970年頃からのミリ波における星間分子スペクトルの発見が、これを著しく加速した。なぜならそれまで電波天文学では、水素原子の21 cmのほかわずかにOH分子の波長18 cmレーザーのみがスペクトル線として知られていたに過ぎない。ミリ波で発見された分子の回転スペクトル線は、星間分子雲（それまでは、可視光を通さない暗黒星雲としてのみ認識されていた）における化学反応で合成される、有機分子を含む多様な分子によるものである。その観測により、極低温の暗黒雲でおきる複雑な化学反応、暗黒星雲からの恒星や惑星の形成、遠い系外銀河の内部運動や星形成や過去の活動の履歴に至るまで、全く新しい観測の手段がもたらされた。そこで1970年代から、ミリ波用高精度パラボラが競って作られることになる。

我が国では星間分子の発見とほぼ同時の1968年から、ミリ波観測の開拓を目指した東京天文台（現・国立天文台）の赤羽賢司・森本雅樹らに私も加わり、口径6 mのミリ波望遠鏡を建設していた。6 mミリ波望遠鏡グループはいち早く星間分子観測にとりくんで先頭グループの一つとなり、世界最大のミリ波望遠鏡である野辺山45 m望遠鏡の建設（1982年完成）を成功させて、ミリ波天文学の開拓と日本の観測天文学の飛躍に道を拓いた。⁹⁾ さらに同じく野辺山の5素子ミリ波干渉計の建設が、チリのアンデス高原におけるアルマ（後述）の実現につながった。いま、ミリ波望遠鏡は有効径約60 mのものがグリーンバンク（米

国立電波天文台）で活動し、50 mミリ波望遠鏡もメキシコで建設中だが、野辺山の45 m望遠鏡は建設から30年後の今も新たな受信観測装置の開発を進め、世界をリードする第一線の観測能力を維持している。

電波望遠鏡のもう一方の発展である干渉計は、長波長から短波長へと進んできた電波技術の制約のためまず長波長の電波観測で発達し、1960年代には超新星残骸やクエーサーなどのシンクロトロン放射、宇宙論的な観測などで活躍した。そうした初期の電波干渉計の代表は、イギリスのマーチン・ライルが開発したケンブリッジの「1マイル望遠鏡」である。1マイルの基線長にわたって移動できる3つのパラボラと地球の自転を利用した「超合成観測法」を駆使し、宇宙の遠方ほどクエーサーが少なくなるという膨張宇宙の進化の発見により、ライルにノーベル賞（1974年）をもたらした。

電波干渉計の最新の代表は、もちろんアルマ（ALMA、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計）である。波長が短いミリ波での干渉計は初期には困難だったが、1980年代にはカリフォルニア工科大学、野辺山の5素子ミリ波干渉計、独・仏などヨーロッパのミリ波天文学協同機関IRAMによるフランス・ビュール高原のミリ波干渉計などが、つぎつぎと実現。これらが2000年代、日・米・欧が協同で建設し運用する「世界望遠鏡」アルマを実現するベースとなった。アルマは、2013年にチリのアンデス高地での建設を終えて活動を始めた、世界最大・最強の電波望遠鏡である。ミリ波より短波長のサブミリ波を観測できる超高精度のパラボラ66台を最大基線16 kmにわたって自在に配置し、光ファイバーで結んで、膨張初期の銀河形成や近傍宇宙における惑星の誕生などを観測する。いわば電波望遠鏡のミリ波への進出と干渉計の開発との統一であり、当面は地上に設置される短波長帯の電波望遠鏡の究極の姿でもあろう（図5）。

一方で電波干渉計の技術は、その極致ともいえるべきVLBI（Very Long Baseline Interferometer、超長基線電波干渉計）を生み出した。初期の電波干渉計ではケーブル、ア



図5 アルマ：アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計（チリ、アタカマ高地）。（©Clem & Adri Bacri-Normier (wingsforscience.com)/ESO）

ルマでは光ファイバーで結合される各アンテナの受信信号を、時間基準とともに磁気テープ等の記録媒体に書き込み、実際に持ち寄りたり伝送して、像に合成する。原理的には、これで干渉計の基線長に限界はなくなる。いま北アメリカ、ヨーロッパ、東アジア、オーストラリアをそれぞれに覆うVLBIネットワークが稼働している。東アジアのVLBIネットワーク(EAVN)は、日本のVERA、韓国のKVNの二つの短波長VLBIネットワーク、および中国のアンテナを結ぶもので、基線長は短い短波長での観測に特徴がある。またアフリカ諸国や南米、東南アジアなど、VLBIは新興諸国にも広がろうとしている。人工衛星と地上を結んだ宇宙空間VLBIも、日本、ロシアなどにより国際共同で実現している。

電波望遠鏡で発展した干渉計の技術は、波長が1 mm以下というサブミリ波においても、アルマで実用段階に入った。さらに干渉計技術は、赤外線や可視光での観測にも応用されはじめている。赤外線や可視光は電波より波長ははるかに短いため技術的に困難で、かつ大気の擾乱のため地上での観測は特に厳しい。だが、過去証明されているように、技術の進歩は著しい。干渉計技術は将来、電磁波望遠鏡全般、特に宇宙空間での観測において重要な役割を果たすことになるのは疑いない。

6. 望遠鏡のスペースへの進出：赤外線、X線、ガンマ線

赤外線天文学とX線天文学は、ともに1960年代に始まった。一方は、「試しに」とロケットで打ち上げたガイガーカウンターから、一方は、プラスチックを回転成形した安価な反射鏡から、ジャココーニが1960年に打ち上げたロケットに搭載されたシンプルなX線検出器は、さそり座に思いがけなく強いX線源と、X線の背景放射を発見した。このさそり座X線源Sco-X1は、のちに中性子星を含むX線連星であることが明らかになる。レイトンとノイゲバウアーの簡便な1.5 m赤外線望遠鏡は、酸化鉛の赤外線単一検出器を取り付けて全天を走査し、非常に多数の「赤外線星」を発見した(1960年代後半)。その多くは赤色巨星など晩期型星だったが、その頃知られていなかった生まれかけの恒星「原始星」も、数多く含まれていた。どちらも好奇心とシンプルな装置から生まれた、新たな観測領域の誕生である。

可視光でも電波でも、望遠鏡は最先端の技術を冒険的に応用し、あるいは望遠鏡のために新たな技術を開発してきた。赤外線望遠鏡の場合、その歴史は赤外線検出技術の歴史といってもよいだろう。半導体研究から赤外線の波長域に応じた新しい検出素材が開発されるごとに、赤外線望遠鏡は多能になり鋭敏になった。とりわけ1980年代以降の赤外線用2次元アレイ検出器の出現は、赤外線望遠鏡をほぼ可視光望遠鏡と合体させることになった。光を集める装置としての望遠鏡は可視光でも赤外線でもほとんど同じで、反射膜や光学系の材質を観測波長に適合させればよい。日

本では奥田治之、佐藤修二によって木曾・上松に設置された口径1 m赤外線望遠鏡が嚆矢で、マウナケア山頂の口径8.2 mすばる望遠鏡(2000年完成、国立天文台)はその成果を踏まえて「光赤外線望遠鏡」と銘打ち、可視光から近赤外線(波長2~3 μm)までの観測を行えるように設計された。⁷⁾ また、東京大学がアタカマ高地のさらに高いピークに建設中の6.5 m赤外線望遠鏡は、高高度を利用して中間赤外線(波長30 μm 帯)までの本格的な観測を行う予定で、そのため主鏡のコーティングは銀、周囲からの熱的赤外光の混入や散乱光などの低減を図っている。

サブミリ波と中間赤外線との遠赤外線(波長域数十~数百 μm)になると、大気の吸収が強く、地上からは観測できない。そのため、NASAがヨーロッパと協力して1983年に打ち上げ大きな成果を挙げた口径57 cm赤外線観測衛星IRASをはじめ、多くの赤外線望遠鏡が地球周回軌道に打ち上げられている。日本の宇宙科学研究所(JAXA)も、2006年に口径67 cmの赤外線観測衛星「あかり」を打ち上げ、IRASをはるかに上回る感度で掃天観測を行い、莫大な数の赤外線天体を検出した。2009年にESAが打ち上げた初の遠赤外線・サブミリ波観測専用望遠鏡ハーシェルは、星間物質の微細構造の発見や星間化学などで大きな進展をもたらしている。

スペースでの赤外線望遠鏡は感度で非常に優れるが、検出器を冷やす冷媒の量で観測期間が制限されることが問題である。これについては、日本がヨーロッパと共同で打ち上げを計画する口径2.5 m遠赤外線望遠鏡衛星「SPICA」が、機械冷凍と宇宙空間の低温(3度K)を利した自然冷却の併用で長期間の観測運用を目指し、期待が高い。

次にX線望遠鏡衛星は、1970年のアメリカのウフル衛星を皮切りに、2005年までに24機を数えた。日本では、ロッシのもとでジャココーニのロケット打ち上げに協力した小田稔が、理論の早川幸男と協力して日本のX線観測をいち早く立ち上げた。「はくちょう」(1979年)を嚆矢として小さいながら次々と開発を進めて6機を打ち上げ、アメリカの9機に次ぐ多さで存在感を示している。X線は大気で遮断されて地上からはまったく観測できないため、大気圏外からの観測に頼らざるを得ない。加えて、宇宙のX線放射が中性子星やブラックホール、超新星、クエーサーといった極限的物理現象と結びついていることから、物理学分野の研究者が多く参入して、コミュニティが広がった。

X線望遠鏡は、打ち上げを重ねるにつれ大型化が進んだ。日本最初のX線観測衛星「はくちょう」は重さ96 kgだったが、今年度打ち上げ予定のAstro-Hは2.4トン。X線望遠鏡の集光系は、もはや通常の反射が適用できないから、単純なパラボラではない。斜め入射による全反射を連ねて集光する特殊なコーン型ミラーをさらにいくつも重ねて集光力を稼ぐ多重ミラーと多素子のX線検出器で、像を得る。このため、X線望遠鏡は長大になる。NASAが1999年に打ち上げた「チャンドラ」は重さ4.8トン、多重ミラーの

直径は1.2 m, 焦点距離は10 mもあった。検出器は初期のガイガーカウンターや比例計数管から、撮像検出器であるマイクロチャンネルプレート, X線CCD, エネルギー分解能が高いX線マイクロカロリメータなど, めざましい開発が続いている。

X線よりさらに高エネルギーのガンマ線は, 1970年代から衛星による観測が進み始め, 10秒程度という短時間のガンマ線バースト現象も多数見つかった。高温プラズマの放射が主であるX線に対し, ガンマ線は非常に高エネルギーに加速された電子のシンクロトロン放射や, 原子核や素粒子の崩壊などに伴う。素粒子物理学とも結びつく超高エネルギー現象解明の観測手段として, 注目されている。特にガンマ線バーストは, 100億光年といった宇宙論的遠方からやってくるらしく, 宇宙初期の巨大超新星爆発現象ではないかと言われるがまだ謎に包まれており, ガンマ線の観測に一段と熱が入っている。ガンマ線の検出は, 衛星用にさまざまなシンチレーションカウンターが開発されているが, ガンマ線が大気に入射して生じる高速の空気シャワーが発するチェレンコフ光をとらえる望遠鏡は, 今後の発展が期待される。CTA (チェレンコフ望遠鏡アレイ) は, ドイツが中心となって国際共同で建設を目指す, 大型チェレンコフ望遠鏡計画である。

なおこれとは別に, 高エネルギー宇宙線が大気に入射して生じる空気シャワーが引き起こす大気の蛍光紫外線をとらえるTA (テレスコープアレイ) が, 米国ユタ州で稼働しており, さらに拡張を計画している。また国際宇宙ステーション搭載の広視野望遠鏡で反対に下の大気中で起きている高エネルギー宇宙線が引き起こす空気シャワーの蛍光紫外線をとらえて超高エネルギー宇宙線を広く観測しようというJEM-EUSO計画も, 日米欧で検討されている。CTAも含め, 地球大気全体を宇宙の超高エネルギー現象を探る検出装置にしようという壮大な発想で, 望遠鏡の発展もここまで来たかとの感がある。

7. おわりに—今後の望遠鏡

最後に, 望遠鏡の今後について述べる。まず現在進んでいる次世代の大型望遠鏡計画の主なものを, 挙げておこう。



図6 TMT: 米・日・印・中・加がハワイ・マウナケアに建設中の30 m望遠鏡 (CG)。©国立天文台

シリーズ「国際光年 IYL2015 に寄せて」 望遠鏡

1) 超大型望遠鏡 (ELT): 口径30 m級の光・赤外線地上望遠鏡が, 3つ同時並行で進んでいる。

GMT (Giant Magellan Telescope): 8.4 m 鏡×7, 有効径25.6 m相当, チリに設置。

参加国: アメリカのアリゾナ大学 (ほか大学多数), オーストラリア, 韓国。

TMT (Thirty Meter Telescope): 口径30 m, ハワイに設置。(図6)

参加国: アメリカのカリフォルニア大学連合, 日本, インド, 中国, カナダ。

E-ELT (European Extremely Large Telescope): 口径39 m, チリに設置。

参加国: ESO (ヨーロッパ南天文台) 加盟の16か国。

【コメント】 どれも建設を開始したが, 全建設コストの確保にはいま一歩である。GMT以外はセグメントミラー方式で, 目指す目標は宇宙初期の解明, 太陽系外惑星の観測と生命探査, ダークマターとダークエネルギーの解明, など。いずれも2020年代前半の完成を目指し, 2020年代後半にはそろい踏みが見られそうだ。

2) 1平方km電波干渉計 (SKA): 長波長電波版のアルマともいべき国際計画。

(a)



(b)



図7 SKA: 長波長電波の複数大陸規模の干渉計計画 (©SKA Home)。 (a) 南アフリカを中心にアフリカ大陸・マダガスカルに展開する高周波用SKAの一部 (CG)。 (b) オーストラリア全域とニュージーランドに展開する低周波SKAのステーションの配置計画。

参加国：ヨーロッパ諸国，カナダ，オーストラリア，インド，中国，南アフリカ。

【コメント】ヨーロッパとオーストラリアが中心となって推進する，長波長の電波望遠鏡の究極ともいべき装置．波長4 mから3 cmの電波での飛躍的な集光力と空間分解能による観測で，電波宇宙の一新を狙う．宇宙初期の水素ガスの振る舞い，初期銀河形成，銀河団とダークマター，星間化学，星間磁場，地球外文明探査 (SETI) など目標は多岐にわたる．長波長用の干渉計をオーストラリアに，やや短波長用の干渉計を南アフリカにそれぞれ設置することになり，第一フェーズの建設が2020年代の完成を目指して進み始めた．最終目標はオーストラリア大陸とニュージーランド，アフリカ大陸とマダガスカルに，それぞれ百万基および数千基の素子アンテナを設置し，複数大陸規模の電波干渉計とすることにある．ただしこの最終目標 (第二フェーズ) の建設資金は未定で，完成は2030年代以降にずれ込むだろう (図7)．今後，米国と日本の参加の可能性が注目される．

3) JWST (James Webb Telescope): 口径6.5 m, 可視光・近赤外線スペース望遠鏡.

【コメント】大活躍したNASAのHSTの後継機で，2018年の打ち上げを予定．

軌道投入後，7枚のセグメントミラーを開いて主反射鏡を形成する部分が未知の技術要素である．

以上はいずれも2020年代の運用が期待されており，アルマと併せてそれぞれに天文観測に新時代を画する望遠鏡である．では，さらに将来の望遠鏡についてはどうか．

何度も述べたように，望遠鏡発展の歴史は技術発展の歴史でもある．私たちは将来の大型望遠鏡の計画に際しては可能な限りの技術発展を念頭に置くが，ある程度見通せるのは10年先の技術がせいぜいだ．20年先に作られる望遠鏡の具体的技術予測となると非常に難しいのだが，一方現在進んでいる上記のような進行形の大型望遠鏡計画の目標や見通しから20年先 (2030年代) の天文学を予想することは，限定的ではあるが不可能でもない．たとえば太陽系外惑星の探査，その上における生命の存在証拠の観測などは，そうした見通しを立てながらさまざまに準備や研究が進められている．このように，意外な発見もある一方で息が長いというのは，天文学の一つの特徴といえるだろう．

いま宇宙の観測は，個別天体の研究でも「全電磁波観測」の時代に入っている．多様な物理状態を反映する多様な電磁波領域のデータを総合することなしには，それぞれの天体現象を貫く背後の本質論的からくりを議論することはできない．また逆に天文学は，そういう豊かな研究に各国の若い研究者が取りくむことができる，すばらしい時代に入ったともいえる．

全電磁波領域観測時代に入った望遠鏡の，次の発展・課

題は何だろうか．まず自明なのは，粒子望遠鏡や重力波望遠鏡への展開である．もはや光 (電磁波) ではないが，宇宙からの情報をとらえ，方向や強さなどの分析から現象を探るという意味では，望遠鏡と呼ばれる．期待されたニュートリノは残念ながらまだ天文学を構築するに至っていないが，建設中の日本のKAGURAを含む重力波望遠鏡への期待は大きいし，ガンマ線チェレンコフ光を観測するCTAや，TAなど宇宙線望遠鏡も，実績を積んでゆくだらう．

各電磁波領域における検出器の開発も，光量子科学，半導体科学などの進展とともに，まだまだ目覚ましく進む．むしろ当面の限界は，望遠鏡自体の大型化にある．技術的な限界というより，コスト面での限界である．粒子加速器ほどではないにしても，巨大化した望遠鏡の高コストは，すでに天文学の世界に極めて高度な国際共同体制を強いている．ALMA, JWST, ELT, SKAのあと，どのような国際共同体制が可能になるか．それはおそらく現在の開発途上地域をも巻き込んでゆく課題であり，すでにSKAでも顕著に現れているように政治的影響が強まるなど，技術開発の未来以上に見えにくい要素が増える．いずれはスペースでの大規模装置 (干渉計を含む) の展開が電磁波のどの波長領域でも要請されるようになるだろうことも考えると，なおさら見通しは複雑である．その面でELTやSKAよりもさらに将来の望遠鏡は，いまのところ手探りを続けてゆかざるを得ない状況にある．日本では中国・韓国・台湾と結んだ東アジア天文台が結成され，さらに共同体制の構築を進めようとしているが，東南アジア，オーストラリアとも結ぶ地域協同の構築が，さらに大きな国際共同に備えて重要になってくるかもしれない．

その一方，ELTなどの活動で太陽系外の無数の惑星に実際に生命の兆候が見えてくるかもしれない．あるいは，ダークマターやダークエネルギーの謎を解くカギが見えてくるかもしれない．現在は未確定なインフレーションについても，観測的な手掛かりが得られるかもしれない．そうした科学上の大きな発展は望遠鏡の技術や計画に新しい息吹きを吹き込み，新たな天文学の国際協力体制への展望も生まれてゆくと期待したい．

参考文献

- ・地上望遠鏡全般の歴史や機能の体系的記述については，
 - 1) 海部宣男：『望遠鏡』(岩波講座「物理の世界」，2005)．
 - 2) リチャード・ラーナー著，小尾信彌，森 暁雄，佐藤寿治訳：『図説天文学における望遠鏡の歴史』(朝倉書店，1984)．
- ・X線・ガンマ線望遠鏡の歴史と機能の体系的記述については，
 - 3) 榎野文明：『科学衛星と宇宙ステーション』(岩波講座「物理の世界」，2004)．
 - 4) 井上一ほか編：『宇宙の観測III 高エネルギー天文学』(シリーズ現代の天文学17，日本評論社，2008)．
- ・可視光および赤外線望遠鏡の歴史や機能，建設については，
 - 5) 家正則ほか編：『宇宙の観測I 光・赤外線天文学』(シリーズ現代の天文学15，日本評論社，2007)．
 - 6) 吉田正太郎：『望遠鏡発達史 (上・下)』(誠堂新光社，1994)．
 - 7) 海部宣男：『すばる望遠鏡の宇宙』(岩波新書カラー版，2007)．
- ・電波望遠鏡の構造や建設については，
 - 8) 中井直正ほか編：『宇宙の観測II 電波天文学』(シリーズ現代の天文

学 16, 日本評論社, 2009).

9) 海部宣男:『電波望遠鏡を作る』(科学全書 21, 大月書店, 1986).

著者紹介

海部宣男氏: 国立天文台名誉教授. 専門は天文学. 若い頃からのテーマは宇宙と生命, 人類と科学. 趣味は読書, 宇宙にまつわる詩歌の探索. 運動は夫妻そろっての下手ゴルフ.

(2015年7月19日原稿受付)

Telescope: Developments of Universe Awareness

Norio Kaifu

abstract: History of telescope is reviewed under the light of evolution of universe awareness by humankind. Starting from enlargement of images to "see and find" wonders of universe since Galileo Galilei, optical telescopes evolved to gigantic modern instruments to "measure and analyze" phenomena in the universe by using a variety of sophisticated attachments. Radio telescope had dramatically extended the observing area from stars to all kinds of matters in universe, and IR, X and γ -ray telescopes provided awareness of dynamically evolving universe. Perspectives on the future of telescopes are also discussed.

『大学の物理教育』誌定期購読のすすめ

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

また, 本誌ホームページのURLは次の通りですので, どうぞご覧下さい.

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

『大学の物理教育』編集委員会

Vol. 21-3 (11月15日発行) 目次

『大学の物理教育』誌に期待するもの……………須藤彰三
物理と社会シンポジウム報告
異分野から見た物理学への期待—「物理学」分野の参照基準
……………須藤彰三, 田中忠芳
はじめての講義
授業アンケートから見えてきたもの……………上野和紀
講義室
クリッカー顛末記……………井上 慎
有効数字のあいまいさについて……………森 貞雄
LC共振回路で光速を測る……………北野正雄
実験室
机の上で光速を測る……………小林弘和, 北野正雄
教育実践
はねかえり係数の測定—平面上のコイン衝突
……………植松祐輝, 真梶克彦

高等学校物理におけるレポート指導……………瀧本家康
海外の動向
北京で開催された物理教育国際会議2015
……………荻谷麻子, 谷口正明
連載 物理オリンピックと物理教育
国際物理オリンピック2015インド大会報告……………吉田周平
談話室
電磁波と電子波の対応……………梶川靖友
教育に関する一言……………高橋卓也/牧永綾乃/大澤智興
開催情報
『大学の物理教育』総目次 (Vol. 21)
編集後記

核力はどこまで解っているか？—3体核力の実験的な現状—



関口仁子

東北大学大学院理学研究科

2体力は2粒子の間に働く力であり、古典論、量子論問わず基本的な力である。また、それがわかれば2粒子(2体系)系の運動は完全に理解することができる。では多粒子系(多体系)の運動ははたしてその2体力の積み重ねだけで説明できるのであろうか？あるいは、3体力といった3粒子以上の系になって初めて効果が現れるような力が存在するのであるだろうか？

近年、原子核物理学ではこの「3体力」の存在が注視されている。原子核の中では数多くの陽子と中性子(これらを核子と呼ぶ)が一辺が1兆分の1 cm (10^{-14} m)程度の非常に狭い空間に閉じ込められている。その中で働く核力と呼ばれる力は、湯川秀樹の中間子交換理論に基づき、2つの核子の間に中間子という粒子を交換することで説明される「2体力」として考えられてきた。その一方、2体力の和で表せないような3体力(3体核力)の存在も長らく予想されてきた。

一般に3体力は2体力に比べて小さく、実験的な検証は難しい。1990年代、この事情が変わってくることになる。豊富な核子-核子散乱データを精度よく記述する2体の核力が確立し、コンピュータの高速化を背景にその2体力を厳密に用いた3核子系以上の原子核を記述するような第一原理計算が実現され始めた。原子核物理は模型を経ることなく核力から原子核・核物質を理解する道具を得たともいえる。その結果、原子核の構造や、中性子星に代表される核物質、また3核子系散乱において、2体力のみでは理論計算と実験・観測値との間に思いのほか大きな差が生じ、3体力を考慮

することによって初めてその差が説明できるということが明らかになってきた。これより3体力は原子核の性質を理解する上で欠かせない力である、という新たな視点が生まれることとなった。

3核子系散乱である核子-重陽子散乱は3体力の状態依存性(運動量、スピン、荷電スピン)を明らかにする上で有効なプローブである。この系における3体力の最初の明らかな証拠は、高精度実験と3核子系を厳密に記述するファデーエフ理論計算との比較から、核子あたりの入射エネルギーが100 MeV付近の散乱微分断面積に見つかった。これをきっかけに、核子-重陽子散乱の高精度測定が理化学研究所のRIBF、大阪大学RCNPのリングサイクロトロン施設をはじめ世界中の実験施設で積極的に実施され、理論との直接比較による3体力効果の定量的な議論が始まった。

その結果、現在理論計算で考慮されている3体力(藤田・宮沢型が主要成分)の大きさは基本的には正しいものの、スピン観測の実験結果から3体力のスピン依存部の記述が不十分であること、また、比較的高いエネルギーにおける後方角度散乱の実験値から、核子の運動量移行が大きい領域で更に新たに短距離型の3体力を考慮する必要がある、などの指摘がされるようになった。

核力によって原子核、核物質を統一的に理解しようという研究が進みつつある中、核子-重陽子弾性散乱から得られた結果は、今後、3体力をも含めた核力の解明により精度を高めた議論が必要であることを強く示唆している。

—Keywords—

3体力：

3粒子の間で働く力で2体力の繰り返しでは表されない力。3つの核子からなる量子系の束縛エネルギーは、2体力だけでは説明できず、その定量的な説明には3体力が重要になる。

中間子交換理論：

原子核を構成する核子の間に働く核力は中間子を交換することで説明されるとする理論。湯川秀樹は核力を2つの核子の間で π 中間子を交換することで説明した。

ファデーエフ理論：

L. D. ファデーエフによって1961年に提唱された理論。量子3体系の厳密な理論値を与えることができる。

藤田・宮沢型3体力：

藤田純一と宮沢弘成は、3核子が相互作用するとき、その中の1つの核子が励起状態である Δ (仮想粒子としての Δ)になる過程を考え、 2π 交換型の3体力を導出した。この力は藤田・宮沢型3体力と呼ばれ、3体力の主要成分と考えられている。

スピン観測量の測定：

スピン観測量は偏極したビームや標的などを用い、散乱の非対称度を測定することにより得られる。核力のスピン依存性を調べるため、長年にわたって核子-核子散乱のスピン観測量の測定が実施されてきた。最近では、3体力のスピン依存性を研究するため、理化学研究所のRIBFで偏極重陽子ビームによる重陽子-陽子弾性散乱のスピン観測量の精密測定が行われている。

1. はじめに

核力から出発して原子核という有限量子多体系を理解する、これは原子核物理学において長年にわたり重要な課題のひとつとされてきた。この課題への挑戦が、この10数年で大きく進んだ。なかでも「3体力(3体核力)」と呼ばれる核力が、原子核の様々な現象を理解するためには欠かせない力である、という視点が生まれたことは大きい。

原子核の中には、数多くの陽子と中性子(総称して核子と呼ぶ)が一辺が1兆分の1 cm (10^{-14} m) 程度の非常に狭い空間に閉じ込められている。その核子を束縛する力を核力と呼ぶ。核力研究の歴史は古く、金字塔的な理論は1935年に湯川秀樹によって打ち立てられた。¹⁾ その当時、核力の到達距離は約 2×10^{-15} m であることが原子核の結合エネルギーなどから予測されていた。湯川はこの到達距離を導くために100 MeV程度の質量をもつ「中間子」と呼ばれる未知の粒子を仮定し、核力を2つの核子の間を中間子を交換することで説明される「2体力(2体核力)」として記述した。この湯川の中間子交換理論は、核力の本性が自然界の4つの力の一つである強い相互作用にあることを初めて示すものであった。

その後、核力研究は湯川の中間子交換理論を継承する形で進む。1ボソン交換力(One Boson Exchange Potential; 通称OBEP)がその代表例である。²⁾ 湯川が提唱した後に実験的に確認された中間子(ボソン)は π 中間子であった。OBEPは、 π 中間子よりも更に質量の重い ρ , η , ω 中間子をも考慮し、種々の中間子1個の交換の寄与の和として核力を記述するものである。この2核子間を記述する核力は、湯川が提唱したような距離依存性ばかりでなく、スピン、荷電スピン状態に大きく依存するという特徴をもつ。このような核力の状態依存性を実験的に検証するために、核子-核子散乱(陽子-陽子散乱や陽子-中性子散乱)の微分断面積、およびスピン観測量の測定、また重陽子の性質を調べる測定が1960年代より世界中の加速器施設において精力的に実施されるようになった。以後、実験の蓄積と理論解析の積み重ねにより、より精度の高い核力の構築へと研究が進められたのである。

1990年代、核力研究に一つの転機が訪れる。「現実的な核力」の完成である。2つの核子間に働く力として記述される核力(ポテンシャル)が3,000~4,000ある入射核子エネルギー350 MeV以下の核子-核子散乱の実験値、そして重陽子の性質を $\chi^2/\text{degrees of freedom} \sim 1$ という精度で再現するまでに至ったのだ。アルゴンヌ v_{18} 型核力,³⁾ CD Bonn型核力,⁴⁾ ナイメヘンI, II型核力⁵⁾などがそれぞれである。本説では、これら「現実的な核力」に基づいて3体力(3体核力)の解説を進めるのだが、これらの核力は「強い相互作用の基本理論である量子色力学(QCD)とは直結してない」という弱点もある(格子QCD計算⁶⁾による核力やカイラル有効場理論の核力⁷⁾といったQCDに基づく核力については本説「まとめと今後の展望」の節で簡単に述べさせて

頂く)。しかし、中間子という様々なスピン、荷電スピン、質量をもつ“粒子”の交換によって記述される核力“モデル”は、核力のもつ多様な性質を定性的に理解する上で非常に有用であり、かつ二核子系の記述に揺るぎない精度をもつ、という意味において高く評価されるべき理論である。上記CD Bonn型の核力やカイラル有効場の核力など核力の理論研究を精力的に押し進めてきたマッハライトは「現実的な核力」を「noble and quantitative phenomenological theory」と称している。

1.1 原子核物理における3体力(3体核力)

“はたして原子核は2つの核子間に働く核力(2体力)だけで理解できるのであろうか?”

先に述べたように、原子核では多くの核子が非常に狭い空間に閉じ込められていることから、多体力の効果は必ず存在する、と考えられていた。実際、3体力(3体核力)の存在は1933年にウイグナーによって初めて示唆され、⁸⁾ プリマコフらによって中間子交換理論に基づく3体力が発表されるなど、⁹⁾ 湯川によって中間子交換理論が唱えられた1930年代から議論されている。ここでの3体力とは、3つの核子の座標あるいは運動量を使わなければ表現できない「ポテンシャル」として定義される。図1に3核子間の相関に関するファインマン図の例を示す。図は下から上に向かって時間経過と共に変化する核子の状態を表している。点線は π 中間子を表し、核子状態の太線部分は核子が励起状態にあることを示している。図1(a)では核子1と核子2の間に π 中間子が交換され、続いて核子2と核子3の間にも π 中間子が交換される過程を表している。この場合、中間状態において第2の核子は単に元の核子として存在しているので、このような3体相関は2体力の繰り返しとして組み立てることができる。一方、図1(b)では中間状態において第2の核子が瞬間的に励起状態となっており、2体力の繰り返しとして表すことはできない。このような3核子間の相互作用が3体力、または3核子間ポテンシャルとして定義されるものである。図1(b)において励起状態が Δ (仮想粒子としての Δ)となるような3体力は藤田・宮沢型の3体力¹⁰⁾と呼ばれ、3体力の主要成分と考えられている。

藤田・宮沢型の3体力の後、基本的にはこれに類似した 2π 交換型の3体力のモデルが構築された。ツーソン・メルボルン(カレント代数+PCAC)型¹¹⁾(以後TM型と記す)。

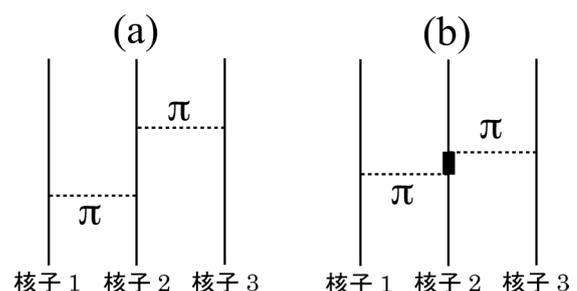


図1 (a) 3体相関 (b) 3体力の例。

表1 3重水素 (^3H) の束縛エネルギー. 2体力のみを考慮した場合とTM型の3体力も含めた場合のファデーエフ理論計算の結果. Λ は切断 (カットオフ) パラメータ.¹⁶⁾

実験値	8.481821 (4) [MeV]		
2体力	束縛エネルギー [MeV]		Λ/m_π
	2体力	2体力+3体力	
CD Bonn	7.953	8.483	4.856
アルゴンヌ v_{18}	7.576	8.479	5.215
ナイメヘン I	7.731	8.480	5.147
ナイメヘン II	7.709	8.477	4.990

アルバナ IX (藤田・宮沢型+現象論的短距離力) 型¹²⁾ (以後UR型と記す), ブラジル (カイラル対称性+current algebra) 型,¹³⁾ テキサス (カイラル対称性) 型,¹⁴⁾ ルール (非カイラル対称性) 型¹⁵⁾ などがそれぞれである. 後で述べるように, これらの3体力のモデルは, 2体力だけでは説明できなかった3重水素 (^3H) の束縛エネルギーを説明することに成功している. 但し, π 中間子・核子の構造因子についての切断パラメータ Λ を調整することで最終的に実験値に合わせていることに注意しなくてはならない (表1参照).

1.2 どのようなところに3体力が現れるのか?

さて, 3体力はどのようなところに現れてくるのだろうか?

一般に3体力は2体力に比べて小さいと考えられるため実験的な検証は難しい. 3体力にアプローチするためにはいくつかの条件がある. (i) 2体力が確立していること, (ii) (i) を直に用いて3核子系以上 (質量数 $A \geq 3$) の原子核を記述する第一原理計算 (*ab initio* 計算) があること, (iii) 3体力の効果を抽出できる精度の高い実験データが存在すること, である.

上記の条件が整うのは1990年代である. それ以前, 核力による高精度の数値解を得る手法は束縛系では3核子系まで, 散乱系では2核子系に限られていた. 束縛系では3重水素 (^3H) の束縛エネルギーの議論がなされ, 約1 MeV程度の束縛エネルギーが2体力では説明できないことが知られていた. またTM型3体力を取り入れた計算も行われ, 実験値を再現することから, 3体力の証拠ではないかと示唆されてもいた.¹⁷⁾ 既出の表1は, その後「現実的な核力」によって実行されたファデーエフ理論計算 (3核子系を厳密に記述する理論計算) の結果である. これまでの予測通り, ^3H の束縛エネルギー約8.5 MeVのうちの0.5-1 MeVは, 2体力ではどうしても説明ができず, 藤田・宮沢型を主成分とする3体力を考慮することで実験値が再現されることが示されたのである. ともあれここで強調しておきたいのは, 1990年代より前, 3体力の証拠として認識されていた事例は ^3H の束縛エネルギーのみに留まっていたということである.

さて1990年代, 条件 (i) に挙げた2体力の確立に加え, 条件 (ii) に挙げた多核子からなる系を核力によって記述する第一原理計算が理論の進展とコンピュータの高速化に

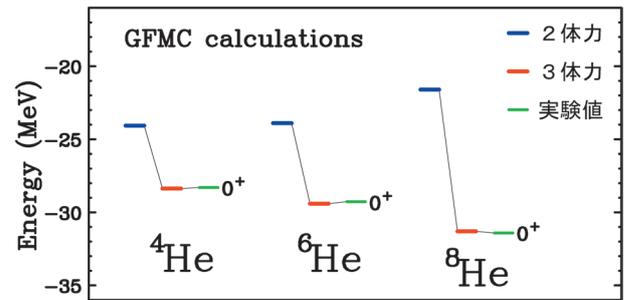


図2 ヘリウム4, 6, 8原子核の基底状態の束縛エネルギーに関するGFMC計算の結果と実験値との比較.

伴って実現され始めた. つまり, 原子核物理学は核力によって原子核を理解するツールを手に入れた訳だ. その結果, 原子核の様々な性質が2体力のみでは説明できないことが明らかになり, 3体力に焦点が向けられることとなった.

原子核の構造においては, グリーン関数モンテカルロ法 (Green Function Monte Carlo; GFMC) 計算¹⁸⁾ や芯無し殻模型 (Non-Core Shell Model; NCSM) 計算¹⁹⁾ 等が登場, 3核子系の枠を超え, ヘリウム4 (^4He) から炭素12 (^{12}C) までの比較的軽い原子核 (p 殻核) に対して現実的核力を用いた記述が可能となった. 図2は2002年に発表されたGFMC理論計算による原子核の束縛エネルギーと実験値との比較である. 図中の青線が2体力 (アルゴンヌ v_{18} 型) を用いた計算, 赤線が3体力 (イリノイ型*) を考慮した計算, 緑線が実験値である. 2体力は実験値より10-25%ほど弱い束縛エネルギーを与える. そしてこの差については, ^3H と同様に3体力を考慮することによって再現することが示された. このGFMCの結果では, 特に3体力の荷電スピン項 $T=3/2$ の寄与が顕著に現れることも示唆され, 核構造における3体力研究の特性を示すものとなった.

3体力の重要性については核物質の状態方程式²⁰⁾ においても議論されている. 核物質の記述は, アクマル, パンドハリパンデ, ラベンハールが1998年に発表したアルゴンヌ v_{18} 型2体力とUR型3体力を用いて行った理論計算が先駆的な研究として有名である.²¹⁾ 彼らの計算では, 対称核物質 (陽子数と中性子数が等しい核物質) や非対称核物質 (中性子数が陽子数を大きく上回る核物質であり, 中性子星が代表例) の記述には, 斥力として働く短距離型の3体力が高密度領域 (通常の原子核の数倍以上の核子数密度となる領域) で有効な役割を果たすことが示唆されている. 特記すべきは, 上記論文が当時未発見であった太陽の約2倍の質量をもつ中性子星の存在をも予言していたことである. 2010年, 連星系を成すミリ秒パルサー J1614-2230 の観測結果からこれまでに知られている中性子星の最高質量値を20%をも上回る太陽質量 1.97 ± 0.04 倍の中性子星が見つかった.²²⁾ 一方それまでに知られていた理論解析の結果

*1 アルバナ型 (UR型) 3体力に, Δ 励起を伴う 3π 交換型の3体力の項が加わった3体力と考えて良い.

は、2体力が与える中性子星の質量の上限値は多く見積もっても太陽の1.8倍程度、また高密度の環境下で必ず現れると予想されているハイペロン^{*2}の寄与を考慮するとその上限値はより小さくなる、というものであった。このような状況もあり、アクマルらの計算結果は、ことに2010年以降、中性子星の記述には斥力となる短距離型の3体力は欠かせない、という強い指針を与えることになったのである。助長気味かもしれないが彼らの論文の最後に興味深い一文があるので紹介しておきたい。

「Recently several authors have argued that there are indications of the existence of neutron stars with two-solar mass. If there are confirmed, then models without three-nucleon interactions will be ruled out.」

なお、彼らが発表した論文の時点では非対称核物質に敏感と予想される3体力の荷電スピン項は入っていない。最近では、荷電スピン依存性を考慮した3体力やハイペロンを含む3体力を考慮した中性子星核物質の研究が進みつつある。

原子核の構造では藤田・宮沢型に代表される比較的長距離型の3体力(低運動量領域)が、一方、中性子星など核物質の高密度状態においては短距離型の3体力(高運動量領域)が注目されるが、広い運動量領域にわたって3体力の状態依存性を調べるためには、核子-重陽子散乱のような3核子系散乱による検証が重要となってくる。

2. 3核子系散乱による3体力の検証

3核子系散乱における3体力の議論は約40年に及ぶ。

この系を厳密に記述する理論は、L. D. ファデーエフによって1961年に提唱された。²³⁾ ファデーエフ方程式では、シュレディンガー方程式に対して散乱の境界条件を近似することなく取り入れており、原理的には量子3体系の厳密理論値を与えることができる。しかしながら、実際にこの理論的な枠組みを用いて実験と比較できる精度の計算を得るまでには、前節で述べた他の数値解と同様、様々な工夫とともに、コンピュータの高速化が待たれた。

3体力の運動量依存性、スピン、荷電スピン依存性といったダイナミクス(状態依存性)を研究するためには、2体力だけでは説明が難しい観測量をできる限り完全な形で、且つファデーエフ理論計算の精度に匹敵する測定精度の実験が要請される。核子-重陽子弾性散乱は3核子系の非束縛状態であり、3体力の寄与を研究する上でとりわけ重要なプローブとして、1970年代より数多くの実験がなされてきている(ただし、この系における3体力の荷電スピンは $T=1/2$ 状態に絞られる)。なかでも低エネルギー領域(入射ビームのエネルギーが核子あたり20 MeV程度以下)においては超高精度の実験がなされ、²⁴⁾ ファデーエフ理論計算との比較が行われてきた。その結果、ほとんど全ての物理量が2体力だけで再現されることが示されたことか

ら、^{*3} 低エネルギーの散乱では3体力の効果が非常に小さく、実験的にその差異を見るのが難しいということが明らかにされている。

2.1 核子-重陽子弾性散乱と3体力

核子-重陽子散乱における3体力の検証は、これまでの議論と同じく、キーとなる1990年代の後半に大きく事情が変わってくることとなった。

1998年にヴィタラ、グリュックルらポッフム・クラクフの理論グループは、これまで議論されてこなかった中間エネルギー(入射ビームのエネルギーが核子あたり100 MeV程度を指す)においてTM型の3体力を取り込んだファデーエフ計算に成功した。その結果、核子-重陽子弾性散乱の微分断面積が最小値となる角度付近で、3体力の効果が明確に現れるのではないかと指摘した。²⁵⁾ なおこの論文がプレプリントサーバーに発表された時には「smoking gun of three nucleon force effect (3体力効果の決定的な証拠)」という印象的なサブタイトルがつけられていた。

何故、中間エネルギーなのか? 前節で述べたように、3体力の主要部分は中間状態で Δ 励起を引き起こしたものと考えられており、入射エネルギーが高くなるほど3体力の寄与が相対的に大きくなることが期待される。しかし実粒子として π 中間子生成が可能になるエネルギーにまで高くなると、3核子の他にもう1つの粒子が加わり、いわば4体系となってファデーエフ理論計算の厳密性が問題になる。このことから、入射エネルギーが核子あたり100-200 MeVでの散乱実験が3体力の研究には適していると考えられるようになった。

ヴィタラらの予言と同時期に根本らハノーバー・東京理科大グループも Δ 励起の効果^{*4}をチャンネル結合法を用いて直接取り込むファデーエフ理論計算を行い、同様な結論を得た。²⁶⁾ このように3体力の効果が中間エネルギー領域の核子-重陽子弾性散乱に明確に現れることが示唆され、このエネルギー領域における3体力の検証が現実的なものとなった。

一方実験の実情はというと、ファデーエフ理論計算の精度に匹敵する高精度のデータがほとんどなく、理論との詳細な比較をする段階に達していなかった。

2.2 核子-重陽子弾性散乱の高精度測定

ヴィタラ、根本らの理論計算を受け、3体力のダイナミクスに関する情報を得ることを目的として、入射エネルギー100-200 MeVを中心とする中間エネルギー核子-重陽子弾性散乱の微分断面積およびスピン観測量の測定が理化学研究所(理研)のサイクロトロン加速器施設(RARF, 現RIビームファクトリー(RIBF))、大阪大学核物理研究センター(RCNP)のリングサイクロトロン施設、オランダ・グローニンゲン大学の核物理研究所(KVI)、アメリカ・イ

^{*2} ストレンジクォークを含むバリオン。 Λ , Σ , Ξ , Ω など。

^{*3} 陽子-重陽子散乱のベクトル偏極分解能 A_1 は例外であり、理論計算で再現することができず、30年以上未解決の問題として残っている。

^{*4} 実効的には藤田・宮沢型の3体力を考慮したと考えて良い。

pd and nd Elastic Scattering at 65–400 MeV/nucleon

Observable	100	200	300	400
$\frac{d\sigma}{d\Omega}$	●	●	●	●
\vec{p}	●	●	●	●
\vec{n}	●	●	●	●
\vec{d}	●	●	●	●
$K_{yy}^{y'}$	●	●	●	●
$K_{xx}^{x'}$	●	●	●	●
$K_{zz}^{z'}$	●	●	●	●
$\vec{d} \rightarrow \vec{p}$	●	●	●	●
$\vec{p} \rightarrow \vec{d}$	●	●	●	●
$\vec{p} \vec{d}$	●	●	●	●

図3 1998年以降に行われた入射粒子のエネルギーが65 MeV から400 MeV までの陽子-重陽子(重陽子-陽子)弾性散乱および中性子-重陽子弾性散乱測定の状態。

ンディアナ大学サイクロトン加速器施設(IUCF)などの施設を中心に精力的に実施され始めた。

図3は、1998年から今日までに行われた入射粒子のエネルギーが65 MeV から400 MeV までの陽子-重陽子弾性散乱および中性子-重陽子弾性散乱のデータを示したものである。青い丸は陽子ビーム(あるいは重陽子ビーム)による陽子-重陽子弾性散乱(重陽子-陽子弾性散乱)の測定量、赤い丸は中性子ビームによる中性子-重陽子弾性散乱の測定量を指す。大きな丸は重心系で $\theta_{c.m.} = 10^\circ - 180^\circ$ とほぼ全角度を覆うデータが存在する観測量、小さな丸は限られた角度のみデータが存在する観測量であることを意味する。図3において A_{ij} , $K_{ij}^{k'}$, $C_{ij,k}$ で表記されているものはスピン観測量である。偏極分解能 A_y^p (A_y^d)は、偏極陽子 \vec{p} (偏極重陽子 \vec{d})ビームを重陽子(陽子)標的に入射し、散乱の左右非対称を測定することで得た観測量である。スピン相関係数 $C_{ij,k}$ は偏極陽子ビームと偏極重陽子標的との散乱によって得られた観測量である。スピン偏極移行量 $K_{ij}^{k'}$ は、入射ビームの偏極がどれだけ散乱粒子に移行したかを表す指標であるが、その測定には散乱粒子を再度散乱させ、その非対称から偏極度を求めるという実験手続きを行っている。このような実験を2回散乱実験と呼ぶ。 i, j, k はビーム、標的、あるいは散乱粒子の偏極軸の向きを示す(偏極軸の座標系の定義については脚注5に記した)。なお1998年以前は、図中の丸はほとんどなかったことに注意されたい。

これらの測定で肝心なことは精度である。ここでは我々

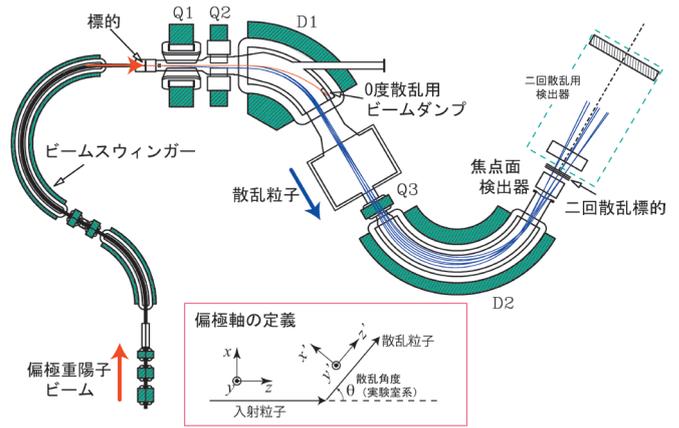


図4 高分解能磁気分析器SMARTの概念図。

が理研で行ってきた偏極重陽子ビームによる重陽子-陽子弾性散乱測定で、どのような工夫をしてきたかについて紹介する。我々は2005年まで高分解能磁気分析器SMART(図4)を用いて135 MeVの測定を中心にを行い、2009年からは、より高い運動量領域における3体力を調べることを目的としてRIBFにおいて実験研究を展開している。実験ではサイクロトロンで加速した重陽子ビームを陽子標的(ポリエチレン、あるいは液体水素を使用)に照射、散乱重陽子あるいは反跳陽子を検出する。以下では、最も手法が確立している磁気分析器SMARTを用いた測定について述べる。

微分断面積の場合、絶対値を押さえることが重要となってくる。通常、標的の厚さ、ビーム電荷量の不定性に起因する誤差のために、数%程度の系統誤差で実験を行うことは難しい。理研の実験では、ビーム以外の測定条件を変更することをせずに、レファレンスとして微分断面積が良く知られている陽子-陽子弾性散乱を測定する工夫をすることで系統誤差を最小限に抑えることに成功した。その仕組みは、(1)重陽子-陽子弾性散乱の測定直後に重陽子ビームから H_2^+ ビームに切り替える。これは重陽子と H_2^+ は電荷量が等しく、質量がほとんど同じであることから加速器を始め測定器系などを変更することなく、陽子ビームを準備できたことを意味する。(2)同ビームを重陽子-陽子弾性散乱で用いた水素標的に照射し、陽子-陽子弾性散乱の微分断面積を測定する。(3)最後に実験値とSAIDプログラム(豊富な核子-核子散乱のデータを部分波解析して作られた計算コード)を用いて得られた計算値と比較し系統誤差を見積もった。結果、統計誤差1.6%、系統誤差は約6%以下という値を得ている。²⁷⁻²⁹⁾

スピン観測量の測定では、ビーム偏極軸の制御とその偏極度の絶対値を押さえることが肝心である。重陽子の偏極分解能の場合、偏極微分断面積 σ は、

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 + \frac{3}{2} p_y A_y^d + \frac{2}{3} p_{xz} A_{xz} + \frac{1}{3} (p_{xx} A_{xx} + p_{yy} A_{yy} + p_{zz} A_{zz}) \right]$$

*5 座標系 (x, y, z) は、入射粒子に対して平行な向きを z 軸とし、 y 軸を散乱平面に対して鉛直な向きとする右手系で定義される。 (x', y', z') は散乱粒子の座標系で、例えば $K_{xx}^{x'}$ は、 x 軸方向のテンソル偏極重陽子ビームを照射し、反跳陽子の y' 方向の偏極度を測定することで求められる。

と記述される(但し, $A_{xx} + A_{yy} + A_{zz} = 1$). ここで σ_0 はビームが偏極していない時の微分断面積, p_{ij} ($i, j = x, y, z$) は重陽子の偏極度である. 実験では重陽子ビームのスピンの偏極軸を制御することによって各スピン観測を個別に測定するという方法をとった. 例えば A_y^d , A_{yy} の測定では y 軸方向に制御したベクトル偏極ビーム (p_y) とテンソル偏極ビーム (p_{yy}) を用意すれば偏極微分断面積は,

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 + \frac{3}{2} p_y A_y^d + \frac{1}{2} p_{yy} A_{yy} \right)$$

となる. 重陽子ビームのスピンの偏極軸の制御は偏極イオン源直下に設置しているウィーン・フィルターで行った.³⁰⁾ 加速前にスピンの軸を制御するため, サイクロトロン磁場と平行ではない偏極ビームを用いる測定では, スピン軸がラーモア歳差運動によって回転してしまい, 加速中での減偏極が懸念される. 理研では偏極重陽子ビーム加速に用いる全てのサイクロトロン (AVF, RRC, SRC) においてシングルターン取り出しが実現しており,^{*6} 加速中の減偏極はごく僅かに抑えることができる. このように, 重陽子ビームのスピンの軸を自由自在に制御できる施設は加速エネルギーの高低を問わず数少なく, 同技術は理研偏極重陽子ビームの最大の特徴となっている.

ビーム偏極度の絶対値較正に関しては新たな手法が開発された. 岡村, 須田らは原子核反応 $^{12}\text{C}(d, \alpha)^{10}\text{B}[2^+]$ の 0 度散乱は偏極分解能 A_{zz} が 1 となること, また中間エネルギー領域において妥当なエネルギー分解能, 収量で測定できることに注目し, 同反応による偏極重陽子ビームの偏極度絶対値較正の手法を確立した.³¹⁾ これにより, 偏極分解能の系統誤差は約 3% で押さえられている.

2.3 ファデーエフ理論計算と実験値との比較

1990 年代後半から中間エネルギー領域を中心として核子-重陽子弾性散乱の実験と理論の研究がお互いに刺激しあう形で進められてきたが, 得られた結果の中で, 特徴的な結果を示していきたい.

図 5, 6 に入射粒子のエネルギーが核子あたり 70-250 MeV の微分断面積および重陽子のベクトル偏極分解能 iT_{11} とテンソル偏極分解能 T_{22} ^{*7} の実験値^{27-29, 32-35)} とファデーエフ理論計算を示した. 図中, 白丸は重陽子-陽子 (陽子-重陽子) 弾性散乱の実験値, 黒丸は中性子-重陽子弾性散乱の実験値である. 理論計算はポッフム・クラクフグラー

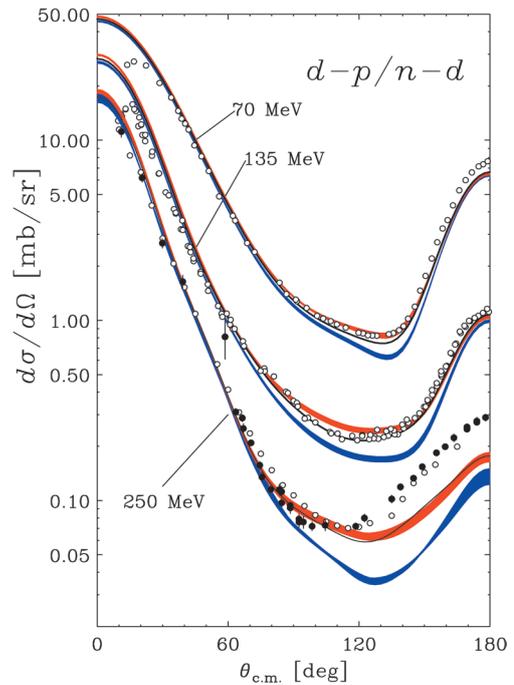


図5 入射エネルギーが核子あたり 70-250 MeV における核子-重陽子弾性散乱の微分断面積の実験結果とファデーエフ理論計算.

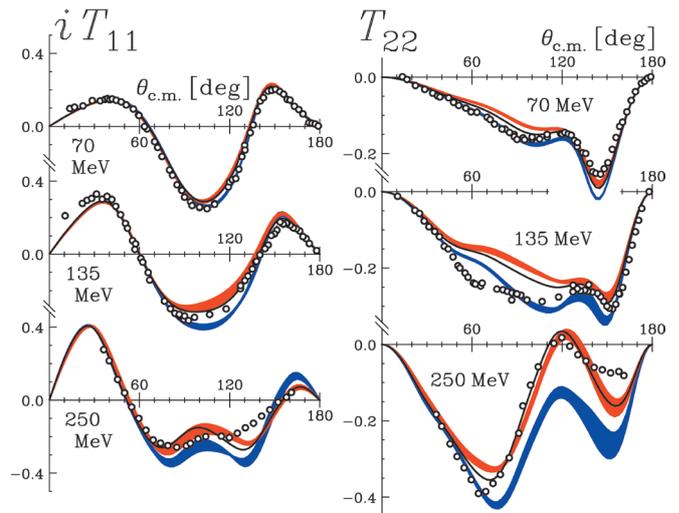


図6 入射エネルギーが核子あたり 70-250 MeV における核子-重陽子弾性散乱の重陽子のベクトル偏極分解能 iT_{11} [左図] と重陽子のテンソル偏極分解能 T_{22} [右図].

プによるもので 3 種類ある.

- (i) 2 体力のみを考慮したファデーエフ理論計算. 5 つ (CD Bonn, アルゴンヌ v_{18} , ナイメヘン I, II) の 2 体力が使用されている. 図中では, 5 つの計算結果をまとめて青い線束で示した.
- (ii) (i) の計算に TM 型の 3 体力を考慮した計算. 赤い線束で示した.
- (iii) アルゴンヌ v_{18} に UR 型 3 体力を考慮した計算. 実線束で示した.

これらの計算では, 切断パラメータ Λ は 3 重水素の束縛エネルギーを再現するように決めたものが使われている.

*6 シングルターン取り出しとは, サイクロトロンによるビーム加速において, ある一定の周回数のターンのみを引き出すことを言う. 偏極重陽子のスピンを横倒しにして加速する場合, このシングルターン取り出しが重要となる. 安定したシングルターン取り出しには, 加速高周波の電圧, サイクロトロン磁場の安定度が重要である. 大強度ビームを扱う理研のサイクロトロン群は, ビームサイズの大きい重イオンビームのシングルターン取り出しを実現する性能を有しており, 電荷質量比が重イオンに比べて大きい重陽子加速においては 99.9% のターン純度を安定に得ている.

*7 偏極分解能 (iT_{11} , T_{22}) は球面座標系の表現である. 直交座標系の表現との関係式は,

$$iT_{11} = \frac{\sqrt{3}}{2} A_y^d, \quad T_{22} = \frac{1}{2\sqrt{3}} (A_{xx} - A_{yy}),$$

で表される.

従って自由パラメータは一つも無い。その一方でクーロン相互作用は計算に取り込まれていない。

まず微分断面積を見てみよう。70-135 MeVの微分断面積では、最小値となる角度付近 ($\theta_{c.m.} \sim 120^\circ$) において、2体力のみを考慮したファデーエフ理論計算はその核力ポテンシャルの種類に依らず、実験値を大きく下回っていることがわかる。また、その差はエネルギーが高くなる程大きくなっている。この実験値と計算値の差 (最大30%の差) はTM型、UR型のモデルに依らず、3体力を導入することで見事に説明されている。この結果は、3体力が絶対に必要であることを強く示しているとともに、その大きさ (散乱振幅の二乗) がほぼ 2π 交換型のモデルで予言される程度であることも表している。

π 中間子の閾値付近のエネルギー領域ではどうなるだろうか？ 250 MeVの結果を見ると100 MeV付近の結果よりも実験値と2体力のみの計算結果の差は大きい。理論計算が示す3体力の効果も大きくなってきている。ところが、藤田・宮沢型の3体力を主要成分とする理論計算が実験値を説明できているのは、前方角度 $\theta_{c.m.} \leq 120^\circ$ までで、後方角度では3体力を導入しても理論計算は実験値を説明できていない。重心系角度 180° 近辺に至っては理論値は実験値の約半分の値しかもたない、という状況である。散乱における核子の運動量移行が大きくなるにつれて、藤田・宮沢型の3体力以外の要素が見え始めていることを示している。一つの要素として相対論効果の影響も考えられたが、弾性散乱ではその効果は小さいことが最近の理論解析からわかっている。この深刻な差異は、高運動量で効いてくる短距離型の3体力が理論計算に考慮されていないことが原因ではないかと考えられている。

次に図6のスピンの観測量を見てみよう。微分断面積と同じく、入射エネルギーが高くなるにつれて2体力を考慮した計算結果と実験値との差は顕著になってくる。その差については、ベクトル偏極分解能 iT_{11} は微分断面積と同じように3体力を理論計算に取り込むことで説明される。しかし、テンソル偏極分解能 T_{22} については、100 MeVの結果に注目すると、3体力を考慮しても実験値が必ずしも再現されているとは言えない。この結果は、100 MeV付近の微分断面積では3体力の大きさを評価できたとは言えるが、その中身 (スピン依存部分) を正しく理解できたとは言えない、ということの意味している。

3. まとめと今後の展望

核力から出発して原子核を記述する研究はこの10数年で大きく進展した。豊富な核子-核子散乱データを記述するような高精度な2体力 (2体核力) の確立、コンピュータの高速化を背景とする第一原理計算の登場を受け、原子核物理学は核力から原子核・核物質を理解するというツールを得た。実験との比較の結果、3体力 (3体核力) という核力の存在が注目されるようになった。

3核子系散乱は、3体力の運動量依存性、スピン、荷電スピン依存性といったダイナミクス (状態依存性) を調べる上で有効なプローブである。2体力の確立とほぼ同時期に、入射エネルギーが100-200 MeV程度の中間エネルギー核子-重陽子弾性散乱の厳密理論計算が可能となった。精力的に進められた高精度測定と理論計算との比較から、微分断面積の最小値付近に3体力の明らかな証拠があることを掴んだ。これは散乱系において初めて示された3体力の証拠であった。同時に3体力の議論は、理論の予想の段階から実験と理論の比較による定量的な議論の段階へと進むことになった。微分断面積によって藤田・宮沢型を主要成分とする3体力 (2π 交換型) の大きさがほぼ正しいことが示された一方で、スピン観測量の実験結果からは理論計算で考慮されている3体力のスピン依存部分の記述に問題があることが、また比較的高いエネルギーにおける後方角度散乱の実験値からは、更に短距離型の3体力を理論計算で考慮する必要も指摘されている。

核力によって統一的に原子核、核物質を記述し、理解しようという研究が展開されつつある中、3体力の発現性、そして3体力を含む核力の研究はより重要性を増していくであろう。3体力の取り扱い、これまで「現実的な2体力」に藤田・宮沢型の3体力を足すという形で行われてきたが、3核子系散乱における理論と実験との直接比較を経て、現在様々なアプローチが展開されている。従来の手法を拡張する形では Δ 励起を伴う 3π 交換型の3体力や π 中間子- ρ 中間子交換型、 ρ 中間子- ρ 中間子交換型など、より高次の3体力を考慮する理論研究が進められている。その一方で、QCDラグランジアンと同じ対称性をもつカイラル有効場理論 (χ EFT) の核力や、格子量子色力学 (格子QCD) 計算による核力など、QCDに基づく核力の研究が3体力の議論も含めて進められている。

χ EFTの核力に関する研究は特に2000年代に入ってから大きく進展を見せている。⁷⁾ 相互作用の運動量スケールは π 中間子の質量程度、高くても ρ 中間子の質量まで (3 fm^{-1}) であることから、原子核の殻構造や低密度核物質を反映する低運動量領域の核子間の相互作用 (核力) の記述に適している。この核力による原子核の記述は芯無し殻模型計算 (NCSM) による p 殻核の束縛エネルギー計算が先駆的な仕事であった。¹⁹⁾ 近年ではより重い原子核へ適用する計算手法が開発され、中性子過剰核の存在限界 (中性子ドリフライン) の決定には3体力が不可欠である、³⁶⁾ という興味深い結果が発表されている。中間エネルギー3核子系散乱における検証はこれから始まるところである。現在 χ EFT核力に基づく原子核・核物質の研究は目が離せない状況が続いている。³⁷⁾

真の意味での第一原理理論に基づく核力の記述は、格子QCD計算によって進められている。2007年には石井、青木、初田が世界で初めて2体力の核力ポテンシャルの結果を示し、斥力芯を含め、これまでに知られていた核力の性

質の説明に成功するなど、近年目覚ましく発展している核力研究である。^{6, 38)} 3体力についても理論体系は既に作られており、土井らによって最初の計算が行われている。³⁹⁾ 現在、スーパーコンピュータ「京」で物理的クォーク質量を用いた計算もスタートしている。今後、中間子交換「モデル」によって理解されている核力の描像が格子QCD計算によってどのように説明されるのか、あるいは、全く新しいパラダイムが生まれるのか、非常に興味深いところである。

一方、これらの理論を精査するのは実験である。核子-重陽子弾性散乱から「運動量」「スピン」という3体力について解明すべきキーワード(課題)が出た。詳細な議論を行うためには、より3体力に敏感な位相空間にアプローチできる陽子-重陽子分解反応($p+d \rightarrow p+p+n$)等の実験研究が必要である。中性子星や中性子数(陽子数)が過剰な原子核の理解には、加えて「荷電スピン」も重要なキーワードである。これらの系では3体力の荷電スピン $T=3/2$ 項が重要な役割を果たすと予測されており、その片鱗はGFMCによる原子核の束縛エネルギー記述に現れている。(筆者の気持ちとしては残念ながら)核子-重陽子散乱は3体力の荷電スピン $T=1/2$ 項のみに敏感であり、万能の役割を果たさない。荷電スピン $T=3/2$ 項を含めた3体力のダイナミクスの解明には更に別の系での研究が必須となってくる。最もシンプルな系として中性子-三重水素散乱、陽子-ヘリウム3散乱といった4核子散乱系が挙げられる。実は、この4核子散乱系の理論がこの数年で大きく進み、3体力が顕著に現れる中間エネルギー領域までの厳密理論計算が可能となってきた。⁴⁰⁾ 高精度実験との比較から3体力の議論を始めたところである。とは言え中性子-三重水素散乱は実現までのハードルが高い。併行して3中性子系のダイナミクスを解明する実験プロブの開発が求められる。

本説では深く触れなかったが、クォークのフレーバーを変えることによって生じる3体力も当然ある。中性子星など高密度核物質において、本説で紹介した3つの核子間に働く3体力と併せた議論が進むことが予想される。

「運動量」「スピン」「荷電スピン」、3体力のキーワードが、実験と理論の両輪によってどのような展開を経て、どのように理解されるのか、そして原子核・核物質のどこにどう現れてくるのか、3体力の今後に注目して頂きたい。

最後に老子の言葉を紹介する。「道生一、一生二、二生三、三生萬物」(老子、第42章)。数年前より知己を得ている哲学者の西山雄二氏(首都大学東京)によれば、3体力のイメージは、どちらかというドイツの哲学者ヘーゲルの考え方に近いのだそうだ。いずれにせよ、2で留まらず、3に進むことによって見えてくる描像は大きく変化していく、このことが原子核物理学において実証され始めた。

理研における実験研究は、理研SMARTグループ、特に東京大学・酒井英行研究室を中心とするグループが開始し、

現在は理研RIBF一次ビームグループによって行われています(紙面の都合上、共同実験者の方々の氏名を割愛させていただきます)。また3核子系散乱の厳密理論計算はH. ヴィタラ、鎌田裕之、故W. グリュックル氏を中心とするボトム・クラクフグループ、A. C. ホンセカ、A. デルトゥバ、P. U. ザウアー氏を中心とするリスボン・ハノーバーグループによって進められてきました。この場を借りまして、実験、理論双方の共同研究者の皆様へ厚くお礼申し上げます。

また本稿の執筆にあたりR. マツハラ、土井琢身両氏から貴重なコメントを頂きましたことを感謝します。

参考文献

- 1) H. Yukawa: Proc. Phys. Math. Soc. Jpn. **17** (1935) 48.
- 2) 例えば、S. Ogawa, S. Sawada, T. Ueda, W. Watari and M. Yonezawa: Prog. Theor. Phys. **39** (1967) 140; R. Machleidt: Adv. Nucl. Phys. **19** (1989) 189.
- 3) R. B. Wiringa, *et al.*: Phys. Rev. C **51** (1995) 38.
- 4) R. Machleidt: Phys. Rev. C **63** (2001) 024001.
- 5) V. G. J. Stoks, *et al.*: Phys. Rev. C **49** (1994) 2950.
- 6) 青木慎也, 初田哲男, 石井理修, 根村英克: 日本物理学会誌 **67** (2012) 745.
- 7) 鎌田裕之: 日本物理学会誌 **61** (2006) 641.
- 8) E. Wigner: Phys. Rev. **43** (1933) 252.
- 9) H. Primakoff and T. Holstein: Phys. Rev. **55** (1938) 218.
- 10) J. Fujita and H. Miyazawa: Prog. Theor. Phys. **17** (1957) 360.
- 11) S. A. Coon and M. T. Peña: Phys. Rev. C **48** (1993) 2559; S. A. Coon and H. K. Han: Few Body Syst. **30** (2001) 131.
- 12) B. S. Pudliner, *et al.*: Phys. Rev. C **56** (1997) 1720.
- 13) M. R. Robilotta and H. T. Coelho: Nucl. Phys. A **460** (1986) 645.
- 14) U. van Kolck: Phys. Rev. C **49** (1994) 2932.
- 15) J. A. Eden and M. F. Gari: Phys. Rev. C **53** (1996) 1510.
- 16) A. Nogga, *et al.*: Phys. Lett. B **409** (1997) 19.
- 17) C. R. Chen, *et al.*: Phys. Rev. C **33** (1986) 1740; T. Sasakawa and S. Ishikawa: Few Body Syst. **1** (1986) 3.
- 18) S. C. Pieper, V. R. Pandharipande, R. B. Wiringa and J. Carlson: Phys. Rev. C **64** (2001) 014001.
- 19) P. Navrátil and W. E. Ormand: Phys. Rev. C **68** (2003) 034305.
- 20) 民井 淳, 銭廣十三: 日本物理学会誌 **69** (2014) 6.
- 21) A. Akmal, V. R. Pandharipande and D. G. Ravenhall: Phys. Rev. C **58** (1998) 1804.
- 22) P. B. Demorest, *et al.*: Nature **467** (2010) 1081.
- 23) L. D. Faddeev: Sov. Phys. JETP **12** (1961) 1014.
- 24) K. Sagara, *et al.*: Phys. Rev. C **50** (1994) 576.
- 25) H. Witała, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 1183.
- 26) S. Nemoto, *et al.*: Phys. Rev. C **58** (1998) 2599.
- 27) H. Sakai, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 5288.
- 28) K. Sekiguchi, *et al.*: Phys. Rev. C **65** (2002) 034003.
- 29) K. Sekiguchi, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 0162301.
- 30) H. Okamura, *et al.*: AIP Conf. Proc. **343** (1995) 123.
- 31) K. Suda, H. Okamura, *et al.*: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **572** (2007) 745.
- 32) N. Sakamoto, *et al.*: Phys. Lett. B **367** (1996) 60.
- 33) K. Hatanaka, *et al.*: Phys. Rev. C **66** (2002) 044002.
- 34) Y. Maeda, *et al.*: Phys. Rev. C **76** (2007) 014004.
- 35) K. Sekiguchi, *et al.*: Phys. Rev. C **89** (2014) 064007.
- 36) T. Otsuka, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 032501.
- 37) 例えば H.-W. Hammer, A. Nogga and A. Schwenk: Rev. Mod. Phys. **85** (2013) 197.
- 38) N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda: Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 022001.
- 39) T. Doi, *et al.* (HAL QCD Coll.): Prog. Theor. Phys. **127** (2012) 723.
- 40) A. Deltuva and A. C. Fonseca: Phys. Rev. C **87** (2013) 054002; M. Viviani, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 172302.

著者紹介

関口仁子氏： 専門は原子核物理. 少数核子系散乱の実験から3体核力にアプローチする研究を行っている.

(2014年12月5日原稿受付)

New Facets of Nuclear Forces—Three-Nucleon Forces and Precise Measurements—

Kimiko Sekiguchi

abstract: One of the main interests in nuclear physics is understanding the forces acting among nuclear constituents. In the past decade substantial progress was made in descriptions of various phenomena of nuclei, by explicitly taking into account nucleon-nucleon (NN) forces. The results of comparison to the experimental data for binding energies of nuclei, equation of state of nuclear matter and three-nucleon scatter-

ing, strongly indicate the importance of 3NFs acting in systems with more than two nucleons. Nucleon-deuteron (Nd) scattering, for which a rigorous formulation in terms of Faddeev equations exists and exact solutions of these equations for any dynamical input can be obtained, offers a good opportunity to study the dynamical aspects of 3NFs, such as momentum, spin, and/or iso-spin dependences. Since the first indication of 3NF effects in Nd elastic scattering around 100 MeV/nucleon precise measurements of proton-deuteron/neutron-deuteron elastic scattering have been extensively performed at 65–400 MeV/nucleon. Direct comparison between the data and the Faddeev calculations draws the following conclusions, (1) the 3NF is definitely needed in Nd elastic scattering, (2) the spin dependent parts of the 3NF are deficient, (3) the short-range components of the 3NF are probably required for high momentum transfer region.

日本物理学会誌 第71巻 第1号 (2016年1月号) 予定目次

巻頭言

設立70周年(2016)・創立140周年(2017)……………藤井保彦
現代物理のキーワード

電子の多極子秩序……………倉本義夫
解説

AGT対応 予想から証明へ……………瀧 雅人
最近の研究から

人工非可換ゲージ場が引き起こす冷却原子気体ボーズ・アインシュタイン凝縮体の新奇な基底状態

……………川上拓人, 新田宗土, 町田一成
量子相転移近傍のまだらな電子状態

……………神戸振作, 酒井宏典, 徳永 陽
奇周波数超伝導—同時刻で消える奇妙なペア—

……………星野晋太郎, 楠瀬博明

実験技術

高強度THzパルス光源技術の新展開……………廣理英基
物理教育は今

研究領域としての物理教育……………新田英雄
JPSJの最近の注目論文から 9月の編集委員会より

……………上田和夫
ラ・トッカータ

フランス国立科学研究センターについて……………鈴木大介
学界ニュース

第34回宇宙線国際会議 O’Ceallaigh Medal: 西村 純氏
……………鳥居祥二

談話室

電磁気量の定義・記法・単位の統一について……………清水忠雄
新著紹介

クォークから中性子星へ —格子 QCD 計算を用いた新たな挑戦—

井上 貴史 (日本大学生物資源科学部)

中性子星は超新星爆発によって生じる小さな天体で、これまでに約 1,600 個が発見されている。太陽と同程度の質量を持ちながら半径は 10 km 程しかない。その内部は、大まかに「クラストと呼ばれる表面に近い部分は原子核と電子からなり、コアと呼ばれる中心に近い部分は原子核が融けた一様な物質からなる」と考えられているが、詳細は謎に包まれている。特に、コアは密度が 1 cm^3 あたり 1 兆 kg にも達する極限的な環境であるため、未知の物質が実現している可能性が高い。例えば、核子からなる核物質だけではなく、ハイペロンが混在した物質も存在すると予想されている。また、コアの最深部には、バリオンすらも融けたクォーク物質が存在している可能性も指摘されている。

2010 年には太陽質量の 2 倍に及ぶ重い中性子星が発見され、中性子星内部に対するこれまでの定説は塗り替えられようとしている。カシオペア座 A と呼ばれる比較的地球に近い超新星残骸の中性子星で観測された表面温度の経年変化も、中性子星の内部がこれまで考えられたよりも複雑な事を示唆している。日本の KAGRA を初め、世界中で建設中の重力波望遠鏡が数年後に稼働を始めると、2 つの中性子星の合体から放射される重力波を検出できる可能性があり、今後、中性子星内部の理解が大きく進むと期待されている。このように、中性子星は素粒子・原子核・宇宙物理学における最前線のテーマであり、その解明は現代物理学における最も重要な挑戦のひとつである。

中性子星の重要な性質である質量と半径は、内部にある物質(中性子星物質と呼ぶ)の状態方程式から決まる。これまでの中性子星の研究には、実験データを基に推測された核物質の状態方程式が用いられてきた。例えば、核子散乱の実験データを再現する核力を用いて計算した状態方程式である。

しかし、中性子星のコアは極限的な環境であるため、地上の実験で得られるデータでは不足する可能性がある。例えば、ハイペロンの間に働く力は、将来にわたって、実験から引き出す事は困難かもしれない。このような場合に期待されるのは、素粒子標準理論に基づいたアプローチである。

クォークを支配する力学は量子色力学(QCD)と呼ばれ、現代の素粒子標準理論の一部である。陽子や中性子の質量も、陽子や中性子の間に働く力(核力)も、原理的には QCD で説明される。しかし、QCD の非摂動性のため、これらを QCD から導く事は容易ではない。特に、核力を QCD から導く事は、絶望的に困難で現実的には不可能と考えられた。ところが、2007 年、格子上で実現した QCD の数値計算から核力を導き出す画期的な方法が開発された。

一方で、核力から原子核および核物質の性質を導き出す事も容易ではない。しかし、原子核物理学には長い歴史があり、専用の理論や手法が多く蓄積されている。従って、新しい画期的な方法と実績のある原子核理論を組み合わす事によって、QCD を基礎にクォークから原子核や核物質に、さらには中性子星に迫る事が可能になると期待できる。実際に組み合わせると核物質の状態方程式を計算したところ、飽和性など、定性的に望ましい結果が得られ、このアプローチの有望性が確認された。また、クォーク質量と中性子星最大質量の興味深い関係を引き出す事ができた。

本研究の結果は、計算機の速さの制約から、現実と定量的な比較ができるものではない。しかし、この点は京コンピュータを使う事で確実に克服される。また、本研究のアプローチでは、ハイペロンを取り入れる拡張に本質的な困難はなく、不定性なしに実行できるので、中性子星の理論研究が格段に進歩すると期待される。

—Keywords—

超新星爆発:

大質量の恒星が最期に起こす大爆発。その機構はまだよく解っていない。天空に突然、明るい星が誕生したように見えたので超新星と呼ばれた。

核子:

陽子と中性子の総称。

核物質:

核子からなる一様物質。星の内部などで実現されていると考えられている。

ストレンジネス:

素粒子が持つフレーバーの 1 つ。陽子と中性子は持たない。ストレンジ・クォークの数に -1 を掛けたもの。

ハイペロン:

Λ 粒子や Σ 粒子など。核子の仲間でストレンジネスを持つ。ハイペロンを含む核子の仲間をバリオンと呼ぶ。

クォーク:

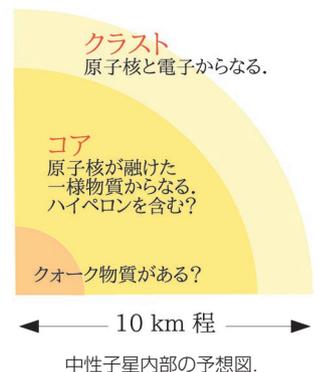
バリオンや中間子を構成する基本的な要素。

状態方程式:

物質の持つエネルギーと圧力の関係を与える方程式。

非摂動性:

摂動法が適用できない性質。クォーク間の力は、離すと強くなり、摂動法が適用できない。QCD の特徴。



1. はじめに

中性子星は初め理論的な考察から存在が予想された天体であった。超新星爆発のエネルギー源を研究していたバーデとツビッキーは、1933年、「重力エネルギーの開放以外にない」という結論を得て、落ち込んだ物質の行き着く先として、中性子だけからなる小さな天体の存在を予言した。約30年後の1967年、最初のパルサーがヒューイッシュとベルによって発見され、検討の結果、それが回転する中性子星であると判明した。その後もパルサーは続々と発見され、現在は約1,600個の中性子星が知られている。

既に述べたように、中性子星の可能な質量と半径は中性子星物質の状態方程式で決まる。それは、重力による星の収縮と物質の圧力が釣り合う必要があるからである。一般に、中性子星には安定して存在できる最大の質量が存在すると考えられている。その値が現実には幾らであるかは興味深い。なぜなら、最大値を超えた場合の行き着く先はブラックホールだからである。この宇宙に存在する中性子星とブラックホールの数はこの最大値に左右されている。

中性子星の解明は中性子星物質の解明と言い換える事ができる。中性子星の大部分が核物質であるのは間違いないので、まずは単純に全て核物質であると仮定しよう。この場合、核物質の状態方程式を解明する事が課題になる。そこで、地上の実験データが不足する可能性を念頭に置き、核力に関する実験データを一切使わずに、基礎理論であるQCDから核物質の状態方程式を導き出す事を考えよう。我々が提案するのは次のような2つの段階からなるアプローチである。第1段階：大型計算機上で数値計算を実行し、QCDから核力を導き出す。第2段階：導出した核力を核子多体理論に応用し、核物質の状態方程式を導き出す。第1段階はHAL QCDの方法と呼ばれ、格子QCDの数値計算とデータの解析からなる。この方法に関しては既に本誌の2012年11月号に解説記事がある。¹⁾ 従って、次節ではこの方法の本質的な特徴のみを説明する。

2. HAL QCDの方法

格子QCDは、4次元ユークリッド空間を離散化した格子の上にQCDを実現したものであり、ゲージ場の理論の無矛盾な定義を与え、かつ、数値計算に適している。最大の長所は、非摂動なQCDをそのまま解く事ができる点である。一方、時間や計算機や電力などのコストが高い点が短所である。格子QCDは、ハドロン単体の性質については、基底状態ハドロンの質量を高い精度で再現するなど、既に多くの成功を収めている。一方、ハドロン相互作用についての成果はまだあまり多くない。その理由は、第一に計算コストの高さである。相互作用を調べるときは、単体を調べるときよりも多くのクォークを格子上に置いて計算を行うため、どうしてもデータに含まれるノイズが大きくなり、シグナルを読み取るためには同じ計算を何度も繰り返さなければならない。相互作用の研究は単体の研究よりも格段

にコストが高いのである。この他に、より原理的な困難も存在する。従来の方法では、相互作用の情報を引き出すにはエネルギー固有状態(固有値)が必要であるが、その分離が困難な場合が多いのである。例えば、バリオン相互作用を調べる場合、離れた2つのバリオンが収まるように格子の一辺の長さ L を大きくとる必要がある。一方、有限体積の影響で離散化された連続エネルギーの間隔 ΔE は、 L を大きくすると急速に小さくなる事が知られている。^{*1} このため、エネルギー固有状態の分離は非常に困難に、あるいは現実的に不可能になってしまう。

HAL QCD Collaborationは独自の方法によって後者の原理的な困難を解決した。最大の特徴は、ハドロン2体系のNambu-Bethe-Salpeter (NBS) 波動関数を用い、そこに含まれる観測可能量を再現するように、シュレーディンガー型の方程式を経由して、相互作用の「ポテンシャル」を定義し、導出する点である。一旦、ポテンシャルが得られれば、それを応用することで様々な物理量を得る事ができる。実際の格子QCD計算でポテンシャルを導出するには次のようにする。まず、ハドロン4点関数と呼ばれる量を測定する。一般に、4点関数にはエネルギーが異なる状態のNBS波動関数が重なって含まれている。これを分離するのは、空間体積が小さい一部の場合を除いて、上述の理由で困難である。しかし、分離しなくても、方程式を工夫する事によって、エネルギー固有状態が混ざった4点関数から直接に、相互作用ポテンシャルを引き出す事ができるのである。具体的には、虚時間変数での微分が入った方程式を用いればよい。²⁾ この方法によって、励起状態の重なりを心配する事なく、逆に励起状態の情報も利用して、相互作用を引き出す事が可能になった。このHAL QCDの方法によって、格子QCDを用いたハドロン相互作用の研究は飛躍的に前進している。

HAL QCDの方法では、非局所かつエネルギー非依存なポテンシャルが定義され、非局所性は微分展開で扱われる。非局所性の弱さ、すなわち微分展開の有効性が核力の場合に確認されている。これは、我々が4点関数を測定するとき点状のバリオン演算子を採用している事と関係している。詳細は前述の解説記事にあるのでここでは割愛する。本稿の以下の計算では微分展開の初項のみを用いる。

3. HAL QCD法による核力ポテンシャル

格子QCDの数値計算にかかる時間は、クォーク質量と空間体積に強く依存し、クォークが軽いほど、体積が大きいくほど時間がかかる。これまでは、計算機の速さの制限から、クォーク質量と空間体積の間にはトレードオフがあった。ハドロン単体の研究では、空間体積を小さくする事で、クォークを軽く、現実的な質量にする事ができた。しかし、ハドロン相互作用の研究では、それなりに大きな空間体積

^{*1} 相互作用がない場合は L^{-2} で小さくなる。

表1 格子QCDのパラメーター：左から順に、格子のサイズ、QCD結合定数の逆数 β 、クローバー項の係数 c_{sw} 、格子の間隔 a 、格子一辺の長さ L 。格子間隔の誤差は本研究では使われていない。

size	β	c_{sw}	a [fm]	L [fm]
$32^3 \times 32$	1.83	1.761	0.121(2)	3.87

表2 クォーク質量を調節するパラメーター κ_{uds} と、そのクォーク質量で測定されたハドロンの質量。 M_{ps} は8重項擬スカラー中間子の質量を、 M_{vec} は8重項ベクター中間子の質量を、 M_{bar} は8重項バリオンの質量を示す。括弧内は統計誤差である。

κ_{uds}	M_{ps} [MeV]	M_{vec} [MeV]	M_{bar} [MeV]
0.13660	1,170.9(7)	1,510.4(0.9)	2,274(2)
0.13710	1,015.2(6)	1,360.6(1.1)	2,031(2)
0.13760	836.5(5)	1,188.9(0.9)	1,749(1)
0.13800	672.3(6)	1,027.6(1.0)	1,484(2)
0.13840	468.6(7)	829.2(1.5)	1,161(2)

が必要である。そのため、クォーク質量に関しては妥協して非物理的に大きな値を採らざるを得なかった。この制約は、京コンピュータの稼働によって、現在(2015年4月)まさに解消されつつある。すなわち、現実的なクォーク質量を採用した格子QCDによる相互作用の計算が進行している。その成果を見るにはもう少し時間が必要なので、別の機会の楽しみとしていただき、本稿では既にある非物理的なクォーク質量を用いた計算結果を紹介する。

格子QCDにはクォークの質量を調節するパラメータがあり、自由に設定できる。クォーク質量の異なる様々なQCD世界を調べる事により、その本質に迫る事ができるのは、格子QCDの大きなメリットの1つである。上述のように、これまでの相互作用の研究では、非物理的にクォークを重くしなければならなかった。そこで、アップ(u)、ダウン(d)、ストレンジ(s)の3種類のクォークに同じ質量を採る事にした。これはフレーバー対称極限と呼ばれ、バリオン相互作用の全体像を調べるのに大変便利である。一般に、格子QCDの数値計算にはゲージ配位のセットが必要である。我々は、クォーク質量の異なる5つのフレーバー対称点においてゲージ配位のセットを生成した。^{*2} 格子間隔などの格子QCD計算のセットアップを表1にまとめた。それぞれの配位セットで測定されたハドロンの質量を表2にまとめた。最もクォークが軽い場合(表2の最下段)、パイ中間子(8重項擬スカラー中間子)は現実世界のK中間子より少し軽く、核子(8重項バリオン)は現実世界の Σ ハイペロンより少し軽い。この研究で格子上に実現されたQCDの世界は、フレーバー対称極限ではあるが、現実のハドロン世界からさほど遠くない世界も含んでいる、と言っても良いかもしれない。

図1は、擬スカラー中間子質量が469 MeVの世界で得られた、部分波ごとの核力ポテンシャルを示している。例えば、 3S_1 は2核子のスピンの3重項、相対の角運動量がゼロ

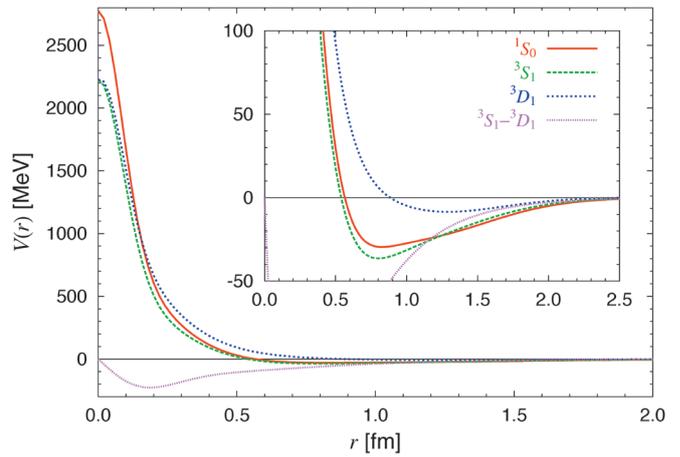


図1 HAL QCDの方法で得られた、擬スカラー中間子質量が469 MeVの世界における、部分波ごとの核力ポテンシャル。

(S波)、全角運動量が1の部分波を表す。解析の結果には統計誤差があるが、本稿では用いないので、結果にフィットした関数を描いてある。これらのポテンシャルは、実験データを用いて構成された現象論的ポテンシャルと定性的に一致している。^{*3} すなわち、短距離での強い斥力、中間距離と遠距離での引力、強いテンソル力(3S_1 と 3D_1 を結合させる力)を備えている。従って、このポテンシャルから得られる核子散乱の観測量も実験データと定性的に一致する。しかし定量的に見ると、斥力、引力、テンソル力ともに現象論的ポテンシャルと比べて弱い。その結果、特に、現実世界に存在する重陽子(陽子と中性子の束縛状態)が束縛しない。この弱さは非物理的に重いクォークを採用したためだと考えられ、物理的クォーク質量を使った京コンピュータにおける成果が待ち望まれる。

4. 核物質の状態方程式

核物質は無数の核子からなる一様な物質である。従って、その状態方程式を予言するには、核子無限系を解いて基底状態を求めなければならない。しかし、電子系の場合と同じく、相互作用のある核子無限系を厳密に解くのは不可能である。このような場合によく用いられるのが、平均場理論である。平均場理論とは、他の粒子との相互作用の結果、全ての粒子が1つ場の中を運動する、とする理論である。平均場中の粒子を準粒子と呼ぶことにすると、準粒子の状態(波動関数)は平均場から決まり、平均場は準粒子の波動関数から決まる。よって、互いに無矛盾な場と波動関数が近似解になる。代表的な平均場理論はハートリー・フォック(Hartree-Fock)理論と呼ばれ、この場合、準粒子間の相互作用(による励起)がなくなるように場(準粒子)が決められる。Hartree-Fock理論は、原子中の電子や原子核など、広く応用され、有効性が確かめられている。ただし、核子系の場合、図1のように自由空間の

^{*2} ゲージ配位生成にはPACS-CS Collaborationに協力をいただいた。

^{*3} 現代的なものとして、例えばArgonneポテンシャルがある。

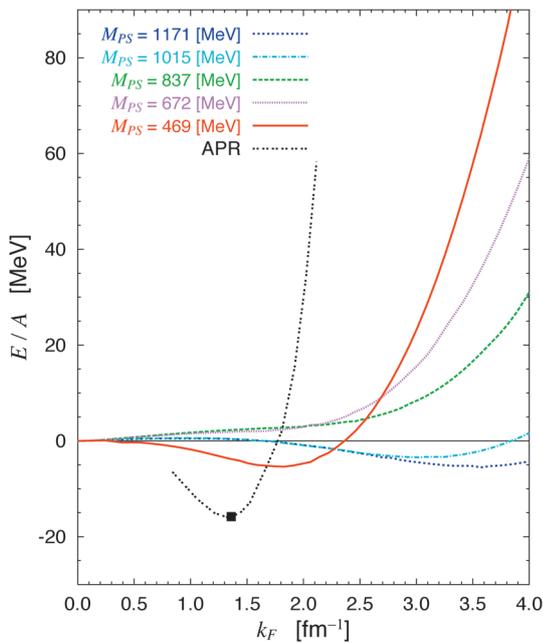


図2 対称核物質の状態方程式. 格子QCDにおける核子質量, HAL QCD核力ポテンシャル, 核子系のBrueckner-Hartree-Fock理論を用いた.

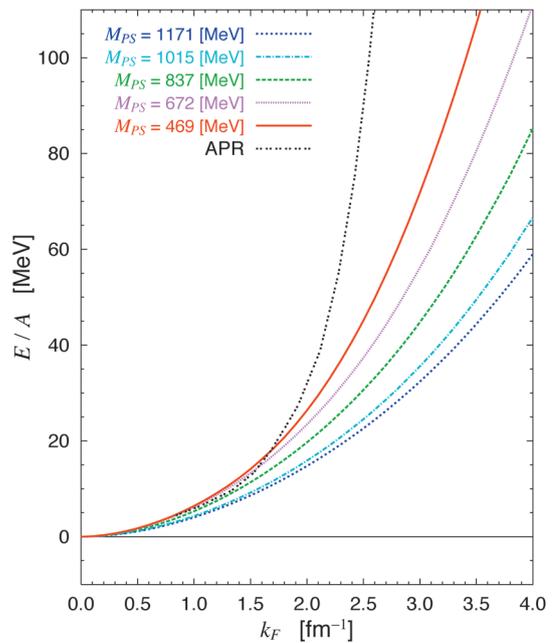


図3 中性子物質の状態方程式. 図2のキャプションを参照.

核力には強い短距離斥力があるため, そのままHartree-Fock計算を行っても上手く行かず, 核子系専用改良した理論が用いられる. それはブルックナー・ハートリー・フォック (Brueckner-Hartree-Fock) 理論と呼ばれる.³⁾

ブルックナー理論では, 準粒子間の散乱問題を解き, その散乱振幅でポテンシャルを置き換える. 強い短距離斥力は散乱問題の段階で適切に処理する. これによって, Hartree-Fock計算が可能になると同時に, Hartree-Fock理論では入らない高次の相互作用の一部が取り入れられる. Brueckner-Hartree-Fock理論は, 原子核の殻構造など, 核子系の定性的な説明に大きな成功を収めている. しかし, 定量的には不満足な部分もあり, 今日では, 結合クラスター法や自己整合グリーン関数法など, Brueckner-Hartree-Fock理論を超える理論が幾つか開発されている. 本稿では, 非現実的クォーク質量を使った予備計算ということもあり, 伝統的なBrueckner-Hartree-Fock理論を用いることにする.

図2と図3は, 格子QCD世界における核子質量 (表2の M_{bar}) と, HAL QCD法でQCDから得られた核力ポテンシャル (クォークが最も軽い場合は図1) を用い, Brueckner-Hartree-Fock計算によって得られた核物質の状態方程式である.⁴⁾ 図2は同数の陽子と中性子からなる対称核物質を, 図3は中性子のみからなる中性子物質を示す. これらの図は, 核子1個あたりの核物質のエネルギー E/A をフェルミ波数 k_F の関数として描いている. フェルミ波数の3乗は密度に比例するので横軸は密度に対応する. 同じ密度では各曲線の傾きが物質の圧力の大小を決めるので, これらの図は状態方程式と同等である. 図中にAPRとあるのは, 現象論的核力を用いて変分法で計算された, 現実世界における核物質の状態方程式の理論予想である.

対称核物質 (図2) で注目すべき点は, 極小点の存在である. 極小点の存在は, 密度と核子あたりのエネルギーが核子の数に依らずに一定値になる事を意味し, 飽和性と呼ばれる. HAL QCD核力を用いた結果にも, 例えばクォークが最も軽い場合 (赤線) に, 飽和性を見ることができる. 飽和性はクォークが少し重くなると消失し, 非常に重くなると再び現れている. この事から, 飽和性がとても微妙な性質である事が伺える. 図中の黒い四角は, 原子核の束縛エネルギーのデータから導かれた飽和密度と飽和エネルギーである. 今回の計算でQCDから得られた飽和点は, 現実世界とはだいぶ離れている. 最大の原因は, やはり, 非物理的に重いクォークだろう.

中性子物質 (図3) で注目すべき点は, 密度が大きいくところでの傾きである. 傾きが大きいほど物質の圧力が高い. 圧力が高い物質を「硬い」と言う. HAL QCD核力を用いた結果は, クォークが軽くなると中性子物質が硬くなる事を示している. 現実世界の理論予想と比較すると, これらのQCD世界の中性子物質はまだ「軟らか」である. 現実的なクォークでは, より硬い結果が得られると予想される.

5. 中性子星の質量

得られた状態方程式を用い, 重力と圧力のつり合いを課すTolman-Oppenheimer-Volkoff方程式を解くと, 中性子星の質量と半径が得られる. 結果を図4に示す. 中性子星は, 大部分が中性子で少量の陽子と電子とミュー粒子を含む, 電気的中性かつ化学平衡^{*4}な一様物質からなると仮定している.^{*5} クラストを含めていないので半径は正確ではな

*4 弱い相互作用によるベータ崩壊と逆ベータ崩壊の平衡.

*5 中性子星のコアに対する一昔前までの標準的な描像である.

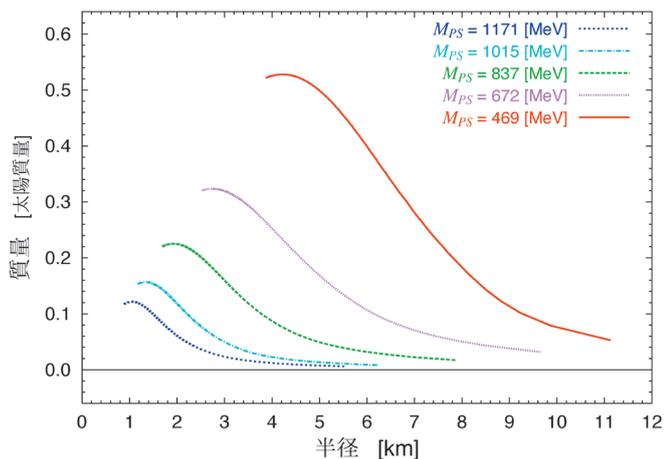


図4 中性子星の質量と半径. HAL QCD核力から得られた核物質の状態方程式を用いた. クラストを含まないので半径は参考程度.

いが、質量にはほとんど影響しない。

図4から、クォークが軽くなると中性子星の最大質量は急速に大きくなる事が判る。中性子物質が硬くなる事で、より重い中性子星が支えられている。今回は非物理的に重いクォークを用いた事もあり、得られた最大質量は観測されている中性子星の質量（約1.4倍から2倍の太陽質量）よりもだいぶ小さい。現実的なクォークでは、より大きな最大値が得られると予想され、観測と矛盾しない結果が得られると期待されるが、残念ながら、以下で述べるように中性子星はそれほど単純ではない。

6. まとめと展望

本稿では素粒子標準理論から中性子星に迫る一例を紹介した。ここで示したように、HAL QCDの方法を用いるとQCDからハドロン相互作用を引き出す事ができ、それを実績のある原子核理論と組み合わせる事で、標準理論から中性子星に迫る事ができる。ここまでの議論で明らかのように、本稿で紹介した計算の最大の弱点は非物理的に重いクォークである。しかし、既に述べたように、この格子QCDの弱点は近いうちに解消される。

中性子星の解明には、まだ幾つか解決しなければならない課題がある。今回は簡単のためにハイペロンは考えに入れなかった。しかし、エネルギーを考えると高密度物質にはハイペロンが出現する方が自然であり、中性子星のコアのある程度より内側にはハイペロンが混在していると予想される。しかし、どの密度から何が出現し、どの程度混在

するかは、ハイペロン力に強く依存するはずであり、その実験データが少ない現時点では不明である。HAL QCDの方法は、核力と同様に、ハイペロン力をQCDから引き出す事ができる。むしろ、重いストレンジ・クォークを含んでいるぶん、核力よりも精度良く引き出す事ができる。物理的なクォークを用いたHAL QCDハイペロン力によって、中性子星の研究は確実に一步前進するだろう。

一般に、ハイペロンの混在を許して計算すると、物質の状態方程式は軟らかくなる。一方で、近年に発見された重い中性子星は硬い状態方程式を示唆している。例えばハイペロン3体力など、なんらかの別の機構が重要なかもしれない。HAL QCD法を使ったバリオン3体力の研究も進行中である。特に、核子の3体力は比較的低い密度から寄与すると予想されるので、早急に取り入れたい。

確かな基礎に基づいた中性子星の理論計算が可能になれば、今後充実する観測データと突き合わせることで、様々な事が明らかになっていくだろう。例えば、コアの最深部にクォーク物質の存在が明らかになるかもしれない。理論、実験、観測、それぞれの進歩を合わせることで、人類は遠くない将来に中性子星を解明できると確信している。

参考文献

- 1) 青木慎也, 初田哲男, 石井理修, 根村英克: 日本物理学会誌 **67** (2012) 745.
- 2) N. Ishii, *et al.* [HAL QCD Collaboration]: Phys. Lett. B **712** (2012) 437.
- 3) P. Ring and P. Schuck: *The Nuclear Many-Body Problem* (Springer, Berlin, 1980).
- 4) T. Inoue, *et al.* [HAL QCD Collaboration]: Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 112503.

(2015年5月1日原稿受付)

Quarks to Neutron Stars using Lattice QCD Simulations

Takashi Inoue

abstract: We try to study neutron stars starting from quarks and gluons governed by QCD. For this purpose, first, we extract two-nucleon potentials in lattice QCD numerical simulations, at large quark masses for the moment, with the recent developed HAL QCD method. Then, we apply it to the Brueckner-Hartree-Fock theory and obtain an equation of state of nucleonic matters. By solving the Tolman-Oppenheimer-Volkoff equation with the EoS, we can finally obtain mass and radius of neutron stars. This approach is quite promising because one can include hyperons based on QCD without any fundamental difficulty.

ハロゲン化鉛ペロブスカイト太陽電池

金光義彦 〈京都大学化学研究所〉

山田泰裕 〈千葉大学大学院理学研究科〉

太陽からの恵みである膨大な光エネルギーを直接電気に変換し生活に利用できるようにする太陽電池は非常に魅力的なエネルギー変換デバイスである。光エネルギーを電気エネルギーに変えるには半導体の優れた特性を利用する必要があり、半導体材料を基盤とした太陽電池の研究は、非常に長い歴史がある。1954年に米国ベル研究所のChapin, Fuller, Pearsonによって結晶シリコンのpn接合を用いた太陽電池が発明され、実用化を目指した研究がスタートした。1948年の点接触型トランジスターおよび1951年の接合型トランジスターの発明とほぼ同時期であり、半導体がまさに新しい時代を切り開こうとした時期の研究の猛烈な意気込みを感じることができる。その後60年間、太陽電池の効率は非常にゆっくりではあるが着実に向上し、物理、化学、電子工学などの分野で研究対象となり実用化されてきた。また、東日本大震災以降、空き地や身近な場所で太陽電池施設を数多く見かけるようになっている。

太陽電池を半導体材料の立場から分類すると、バルク型と薄膜型に大別することができる。バルク型は、シリコンの結晶を利用したもので、我が国では多くの家の屋根に設置されている。一方、作製コストも低く、しかも軽量で、さらにエネルギー変換効率の高い新しい太陽電池材料としての薄膜が最近再び注目されるようになった。以前に期待されたアモルファスシリコンや有機色素ではなく、CIGS (CuInGaSe), CZTS (CuZnSnS), CdTeなどの無機化合物半導体

さらにはハロゲン化金属ペロブスカイトの有機-無機ハイブリッド半導体である。これらは20%以上の太陽電池効率を示すものも報告されており、新しい太陽電池材料として存在感を高めている。なかでも、ハロゲン化鉛ペロブスカイト $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ は、爆発的に変換効率が向上している期待のニューフェイスである。

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 薄膜は、数10ナノメートルからミクロンサイズの微結晶の集合体であるにも関わらず、室温で高効率のバンド端発光を示す。グレインからなる多結晶薄膜であるが、深い非発光中心やトラップ準位が少なく光学的に良質の半導体材料である。また、室温でのバンドギャップエネルギーは1.61 eVであり、直接遷移型半導体に由来する高い光吸収を示す。これらの特性は、理想的な太陽電池材料であるGaAsに匹敵する。この新材料を利用した太陽電池は、色素増感型太陽電池の有機色素を $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ で置き換えた構造をしており、励起子型太陽電池として特性が議論されたが、無機半導体と同じく自由な電子と正孔が高効率太陽電池動作を起こすことが分かった。現時点では、基礎物性が十分に解明されておらず、材料の安定性やデバイス寿命、さらには毒性のPbを含むなど実用に向けての課題も存在する。しかし将来的には、化学的な合成および物理的な精密測定により多くの問題が克服され、新しい実用太陽電池の開発へと結実できるものと期待される。

—Keywords—

直接遷移型半導体：

電子構造において、伝導帯の最下端と価電子帯最上端の運動量が一致するバンド構造を有する半導体。発光効率は一般に高いことが知られている。

色素増感型太陽電池：

シリコン半導体を使わずに、可視光を吸収する有機色素を含んだ多孔性半導体などを光電極として用いる電池。材料費や作製コストが安価ですむことなどから、低コスト太陽電池として期待される。

1. はじめに

最近、太陽電池の研究発表が世界的規模で爆発的に増加している。1954年の結晶シリコンを用いた変換効率約6%の太陽電池の発明以来、¹⁾ 太陽電池の効率は着実に向上し、実用化が進められてきた。特に2010年頃から、太陽電池変換効率は急激に向上し、すべてのタイプの太陽電池の効率の最高値が塗り替えられている。²⁾ 現在、最も高い太陽電池効率を示す半導体は、GaAsを中心としたIII-V族半導体である。単接合GaAsで28.5%が実現されており、InGaP/GaAs/InGaAsやInGaP/GaAs/Geなどの3接合太陽電池では、非集光で40%近い高変換効率となっている。^{2,3)} しかし、これらの高品質単結晶太陽電池は高価であるためにその用途は限られており、現在幅広く利用されている実用太陽電池には単結晶または多結晶シリコンが用いられている。シリコンは、コンピューターなどの電子・情報産業のみならず光エネルギー産業も支えている。現在、太陽電池は産業の基盤電力源ではないが、今後日常の電力源あるいは災害時など緊急時の代替電源として幅広く普及するには、太陽光の電力への変換効率の高効率化と太陽発電システムの低コスト化が必要不可欠である。近年の太陽電池の急速な普及とともにシリコン太陽電池の発電コストは大きく低減しているが、ナノ構造をはじめとした新しい材料系⁴⁾の開発や多接合太陽電池⁵⁾の改良などによりさらなる低コスト化や高付加価値を目指し、新型太陽電池の熾烈な研究開発競争が世界中で進められている。

このような状況のなかで、作製コストも低く、しかも軽量で、さらにエネルギー変換効率の高い新しい太陽電池材料として薄膜半導体が急速に存在感を高めつつあり、CIGS (CuInGaSe), CZTS (CuZnSnS), CdTeなどの無機化合物半導体およびハロゲン化鉛ペロブスカイトの有機無機ハイブリッド半導体が注目されている。特に、溶液から作製できる塗布型太陽電池は大変魅力的であるが、結晶粒界や結晶粒サイズなど多結晶固有の問題があり、高効率化を実現するためには精密計測による基礎光電変換過程の理解が必要不可欠である。本稿では、塗布型太陽電池材料の一つであり近年爆発的な研究が行われているハロゲン化鉛ペロブスカイト材料の基礎物性と太陽電池材料としての魅力と課題について述べる。

2. 古くて新しい材料：ハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体

ハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ [$\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$] は、現在もっとも注目されている太陽電池材料と言える。その結晶構造を図1に示す。 PbX_6 八面体が角を共有して並び、その隙間に CH_3NH_3^+ (MA^+) イオンが配置されている典型的な三次元ペロブスカイト構造である。ペロブスカイトと言え、読者のほとんどは酸化物を思い浮かべることだろう。ペロブスカイト酸化物では、超伝導や巨大磁気抵抗、強誘電性など非常に多くの研究が行われて

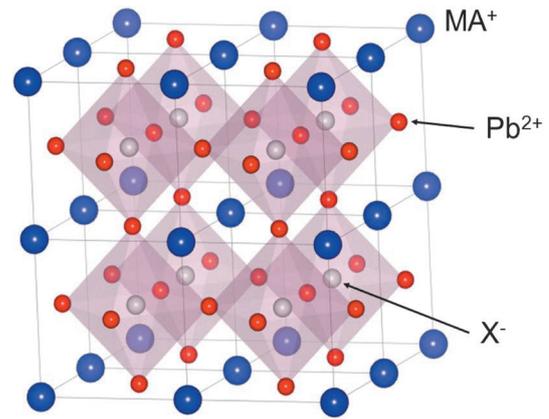


図1 ハロゲン化鉛ペロブスカイト $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ の構造。

いる。⁶⁾ 我々のグループでも、発光ダイオードや太陽電池などのフォトニクスデバイスの可能性を目指して、 SrTiO_3 , BiFeO_3 などのペロブスカイト酸化物の基礎光学特性や光キャリアダイナミクスの研究を行ってきたが、^{7,8)} 実用半導体であるSiやGaAsに比べそれらのエネルギー変換効率が極端に低い問題点があった。一方、ハロゲン化鉛ペロブスカイトは、有機物、ハロゲン、および鉛からなる有機無機ハイブリッド半導体であり、スピコートなどの塗布法により簡単に薄膜が作製できる。しかも驚くことにその太陽電池は20%以上の変換効率(2015年春現在)を示す。^{2,3)} このペロブスカイトを用いた湿式太陽電池が宮坂らのグループによって初めて報告された2009年には変換効率が3.8%に過ぎなかったことを考えると、⁹⁾ 変換効率の向上のスピードは驚くべきものである。現在世界中で猛烈に研究が行われているこの材料は、1980年代後半から1990年前半に、我が国の研究者を中心に作製方法やその構造特性の研究が精力的に行われた。まずは基礎特性を理解するためにも、初期の研究例を簡単に紹介することにしよう。

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ (MAPbX_3) に関する研究の最初期には、酸化物ペロブスカイト構造と同様に、その結晶構造と構造相転移が注目され研究が行われてきた。例えば、1978年にWeberらによって MAPbX_3 のX線結晶構造解析が行われ、結晶構造が決定された。¹⁰⁾ 1980年代半ばには、NMR測定やGHz帯の誘電関数の測定により、 MA^+ イオンの動的挙動と相転移の関係が議論された。^{11,12)} 菅らのグループは、赤外吸収分光・熱容量分光、低周波(MHz)誘電率測定、相図の作成を行うなど精力的な研究により、相転移温度の決定やそのメカニズムを議論している。¹³⁻¹⁵⁾

一方1990年ごろには、ハロゲン化物層状ペロブスカイトに注目が集まった。MitziらによるSnペロブスカイトの研究が広く知られている。^{16,17)} $(\text{C}_{10}\text{H}_{21}\text{NH}_3)_2\text{PbI}_4$ のような有機-無機層状物質は有機層がバリア層、無機層が井戸層となった量子井戸構造とみなすことができる。そのため、井戸層内に強く閉じ込められた励起子の物性研究で格好の舞台となり、光物性研究が盛んに行われた。¹⁸⁻²¹⁾ これらの研究において多くの日本人研究者が先駆的な貢献を行い、

電子構造をはじめとして様々な角度から基礎特性の理解が進んだ。ただし、層状ペロブスカイトの研究の一環として(層状物質ではない) MAPbX_3 の光学特性の研究が行われていたため、層状ペロブスカイトと比べて MAPbX_3 の研究例は非常に少ない。これまでの研究で、 MAPbI_3 は直接遷移型半導体で、低温では明確な励起子吸収ピークが観測され、低温 ($\sim 5 \text{ K}$) では励起子束縛エネルギーが $30\text{--}50 \text{ meV}$ と報告されている。^{20, 22, 23)} また、ハロゲン組成を変えて $\text{MAPb}(\text{Br}_{1-x}\text{Cl}_x)_3$ の光学特性などが報告されていた。²⁴⁾

このように低温での MAPbX_3 励起子特性や自己組織的な量子井戸構造としての層状ペロブスカイトは非常に注目されたが、Pb 元素を含むことや水溶性などの化学的な特性により、デバイス材料として注目されることはなかった。しかし、2012年にオックスフォード大学の研究グループなどがエネルギー変換が10%に近い全固体ペロブスカイト太陽電池を作製し、^{25, 26)} 一挙に注目が高まった。溶液のスピンコートや PbI_2 膜を MAI 溶液へ浸すなどの簡便な方法により作製できることから、²⁷⁾ ペロブスカイト太陽電池は世界中で大きなブームとなり、変換効率が驚異的なスピードで20%の大台に到達したのは前述したとおりである。

3. 光キャリアダイナミクスと太陽電池の特徴

半導体を太陽電池材料として利用する場合には、半導体が太陽光を十分に吸収できるかどうかを最初に考える。太陽光は幅広い波長領域にエネルギーが分布しているいわゆる白色光であるために、半導体のバンドギャップエネルギー E_g の選択が重要となる。 E_g 以上の光子エネルギーをもつ光のみが半導体に吸収され、一つの光子から一つの電子正孔ペアが生成される。しかし、入射光子のエネルギーが E_g より大きい場合には、余剰エネルギーが熱として失われる。いわゆる熱損失が生じる。また、 E_g 以下のエネルギーの光は半導体を透過し、吸収されず透過損失となる。この二つの損失により発電効率が決まるのであれば、 $E_g = 1.1 \text{ eV}$ のときに最大効率となることが予測される。しかし、半導体は発光し、エネルギーを放出する。発光による輻射損失を Shockley と Queisser は定式化し、最適バンドギャップエネルギー 1.3 eV で太陽電池の変換効率が最大31% (S-Q 限界) となることを示した。²⁸⁾ 実際には非輻射再結合も存在し、これが得られる電圧 (V_{oc}) の降下を引き起こすため、SQ 理論の最適値より若干大きいバン

ドギャップエネルギーの半導体でも高い発電効率が得られる。したがって、 $1.4\text{--}1.6 \text{ eV}$ 程度の半導体も実用太陽電池材料の候補となる。 MAPbI_3 の室温におけるバンド端近傍の拡散反射 (DR)、光電流 (PC)、発光 (PL)、発光励起 (PLE)、過渡吸収 (TA) スペクトルを図2にまとめた。²⁹⁾ 試料は、多孔質 TiO_2 上に成膜した多結晶 MAPbI_3 である。これらの光学スペクトルから我々は室温でのバンドギャップエネルギーを 1.61 eV と見積もった。 MAPbI_3 のバンド構造は GaAs の価電子帯と伝導帯を逆にした特徴を有する電子構造になっており、³⁰⁾ 直接遷移に由来する高い吸収係数は GaAs に匹敵し、 MAPbI_3 は太陽電池材料として非常に優れた性質をもっている。

光励起状態を詳しく知ることは、光エネルギーデバイスである太陽電池の構造の設計・最適化を行う上で不可欠である。当初、ペロブスカイト太陽電池は励起子型太陽電池としてその発電機構が議論されてきた。これには無機-有機ハイブリッドペロブスカイト半導体が励起子物性の舞台として研究されてきた経緯や、ペロブスカイト太陽電池が有機色素増感太陽電池 (励起子型太陽電池) の延長として

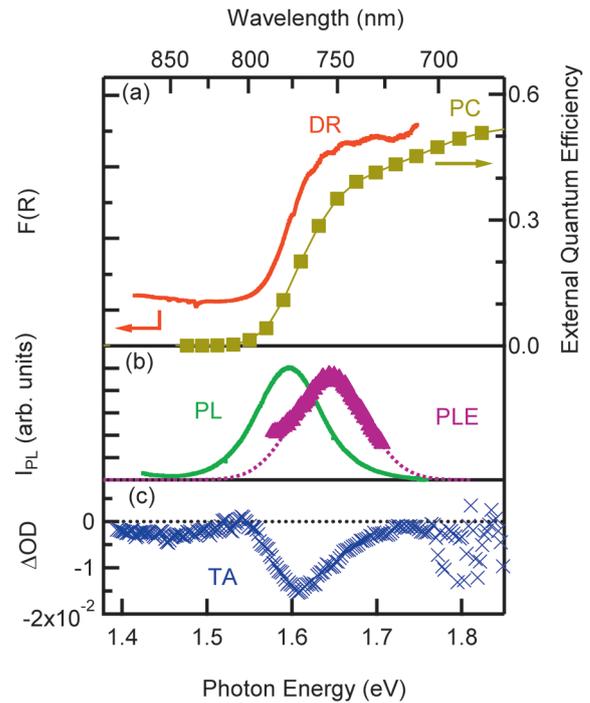


図2 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 薄膜太陽電池の基礎光学スペクトル (文献29より転載, Copyright 2014 The Japan Society of Applied Physics).

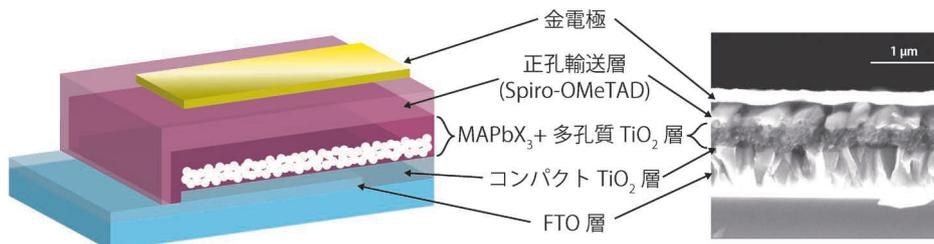


図3 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ 薄膜太陽電池の構造の一例とその断面SEM像。

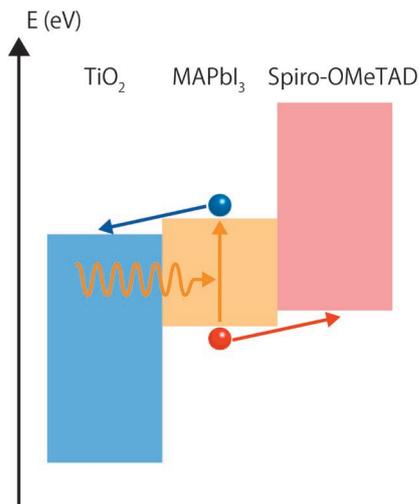


図4 ペロブスカイト MAPbI₃ をベースとしたヘテロ接合太陽電池 TiO₂/MAPbI₃/Spiro-OMeTAD のエネルギー図。

研究がスタートしたという事情が影響している。^{9, 31, 32} 実際、最も一般的な高効率ペロブスカイト太陽電池は図3に示したように色素増感型の構造であり、SiやGaAsのpn接合型と大きく異なる。太陽電池は色素増感型太陽電池の有機色素を MAPbX₃ で置き換えた構造をしており、固体正孔輸送層としては Spiro-OMeTAD が用いられることが多い。³³ 図4に示すように、MAPbX₃ 中に生成された光励起電子と正孔はそれぞれ拡散して TiO₂ と正孔輸送層へ移動することで電荷分離される。ペロブスカイト太陽電池の高発電効率の一つの理由としてキャリアの長距離拡散が指摘されてきたが、³⁴ 励起子拡散なのか自由キャリア拡散によるものか明確な記述を避けつつ議論が行われてきた。太陽電池の高効率化を図るためにも、励起子・キャリアを含めた励起状態を明確にする必要がある。我々は MAPbI₃ において発光・過渡吸収分光による光キャリア結合ダイナミクスの研究から、伝導帯の自由電子と価電子帯の自由正孔が高効率電池動作を引き起こすことを突き止めた。図5(a)に発光ダイナミクスの励起光強度依存性を示す。³⁵ 発光強度は励起光強度の二乗に比例しており [図5(b)], 発光寿命は励起されたキャリア数に依存する [図5(b)]. これは自由電子と正孔の輻射二体再結合で発光が決まっていることを意味している。また、発光および過渡吸収の緩和曲線は、輻射二体再結合と一電子トラッピング過程を考慮した単純なレート方程式で表すことができる。これらのことは、光励起電子・正孔は室温で励起子を形成しておらず、自由キャリアとして振舞っていることを示している。GaAs などと同じ無機バンド伝導型太陽電池との類似性を示しており、ペロブスカイト太陽電池の基礎特性が再び活発に議論される契機となった。

直接遷移型半導体である MAPbX₃ は高い発光効率を示し、³⁶ 非輻射再結合速度は小さく、良質の光電変換材料である。よく光る材料すなわち優れた発光ダイオード材料は、優れた太陽電池材料となるが、MAPbX₃ はその良い例の一

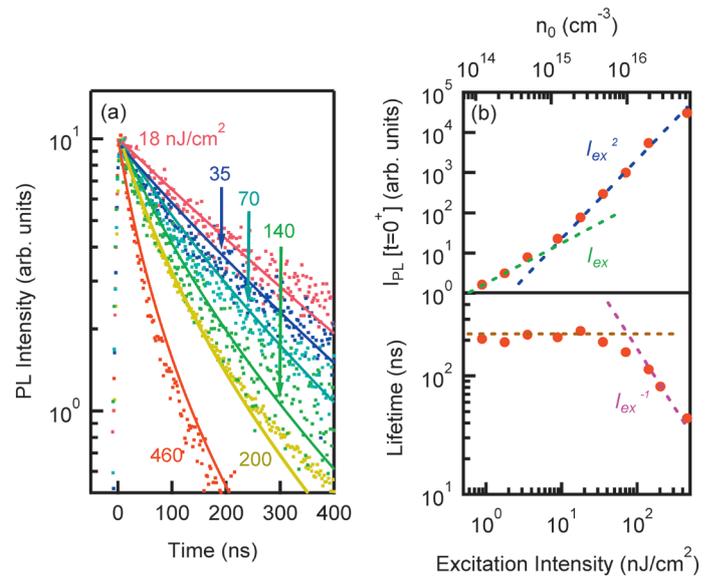


図5 CH₃NH₃PbI₃ 薄膜の室温における発光ダイナミクスの光励起強度依存性 (文献35より転載, Copyright 2014 American Chemical Society)。

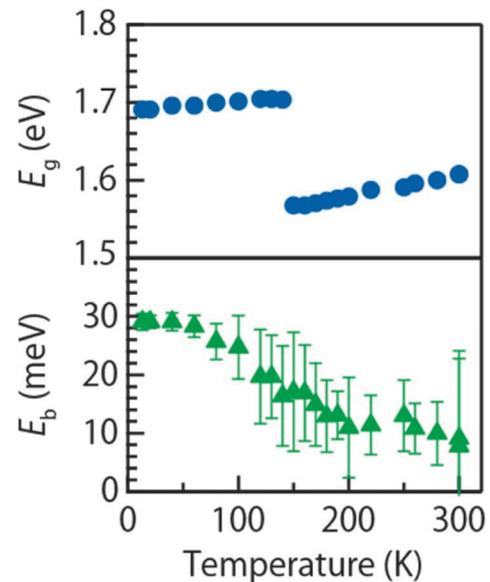


図6 CH₃NH₃PbI₃ 薄膜の励起子束縛エネルギー (E_b) とバンドギャップエネルギー (E_g) の温度依存性 (データ数値は文献37より引用)。

つである。また、変換効率低下の原因となる無輻射再結合速度が小さいこともデバイス応用上重要なポイントである。

発光や過渡吸収の動的挙動からの結論は、吸収スペクトルの温度依存性と矛盾しない。図6にバンド端近傍の光吸収スペクトルから見積もった励起子束縛エネルギーとバンドギャップエネルギーの温度依存性をまとめた。³⁷ 我々は、バンド端近傍の光吸収スペクトルの形状から室温での励起子束縛エネルギーを約6 meVと見積もった。これらの値は低温での励起子束縛エネルギー (30-50 meV) と比べてかなり小さい。また、160 Kの構造相転移温度を境にバンドギャップエネルギーと励起子束縛エネルギーが変化していることが分かる。160 Kの構造相転移より高温側では MA⁺ イオンの集団回転運動のために束縛エネルギーの大きな変

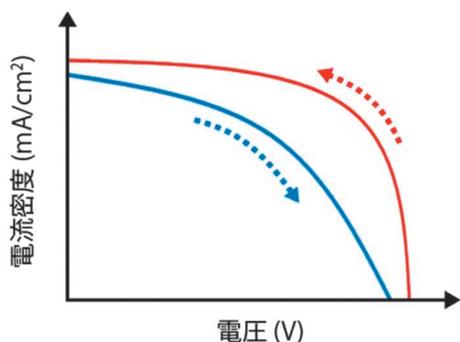


図7 CH₃NH₃PbI₃ 薄膜太陽電池の電流-電圧ヒステリシス。

化が生じると考えられている。³⁸⁾ 最近では、異なる実験手法によって室温での低い励起子束縛エネルギーの報告が相次いでおり、³⁹⁾ 薄膜の室温では自由キャリアが太陽電池特性を決定していることを示している。

微結晶からなる薄膜にもかかわらず高効率発光を示し非輻射再結合速度が小さい理由として、MAPbX₃では無輻射再結合の原因となるバンドギャップ内の深いトラップ準位が生成されにくいことが理論的に示されている。⁴⁰⁾ トラップや再結合中心として働く欠陥が少なく、結晶粒界にも欠陥が存在しないため、光キャリアは長寿命である。したがってキャリア拡散長は非常に長く、高い光電流が得られ、高効率電池の実現に結びついているものと考えられる。

これまでに述べたようにMAPbX₃は、その基礎特性ならびに作製方法も含めて太陽電池材料として非常に魅力的な材料である。しかし、実用化に向けて課題も多く残る。ペロブスカイト太陽電池では、図7に図示したように電流電圧特性にスキャン方向やスキャン速度に依存した大きなヒステリシスが現れることが知られており、⁴¹⁾ その克服が重要な課題である。特に、最大動作点およびその近傍で変換効率や電流電圧特性が大きく変化するのが問題である。電圧印加方向により特性が大きく変化するヒステリシスの起源として、強誘電性や光キャリアのトラッピングと再放出過程が検討されてきたが、最も有力な説はイオンの移動である。実際、光励起下での電場引加によってMA⁺イオンが移動していく様子が顕微鏡下で観察されている。⁴²⁾ このようなイオン移動を抑える工夫が、高効率デバイス作製に必要となるであろう。

また、材料の安定性も課題である。上述したようなMA⁺イオンの可動性のために、MAPbI₃の性質は経時変化が起こりやすい。我々は、MAPbI₃薄膜において、成膜直後から発光ダイナミクスおよび光吸収が徐々に変化する現象を観測している。⁴³⁾ 図8に発光および吸収強度の成膜後の時間変化を示す。PbI₂の吸収強度の時間変化とMAPbI₃のバンド端発光強度の時間変化には相関が見られ、MAIが未反応のPbI₂とゆっくり反応していることを見出した。また、光励起や大気暴露によってMAPbI₃はMAIとPbI₂に分離するために劣化が容易に起こる。実験室レベルでは数ヶ月に亘って変換効率が低下しないセルの作製も報告されて

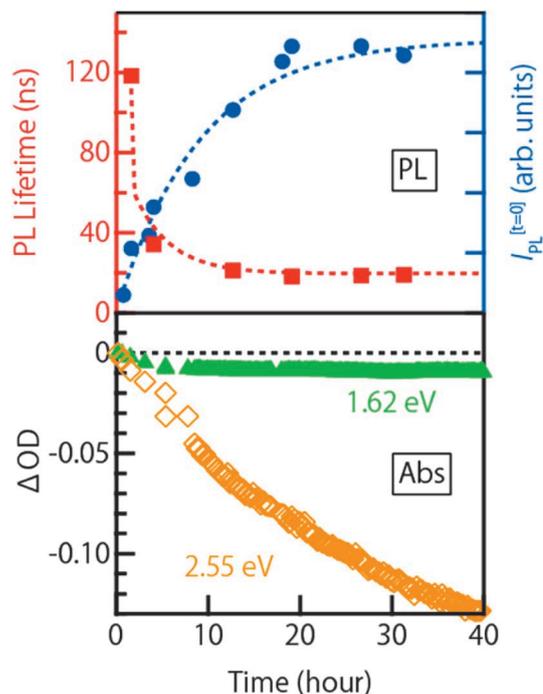


図8 発光と吸収スペクトルの試料作製後からの時間変化 (文献43から一部転載, Copyright 2015 American Chemical Society)。

いるが、実用化レベルには程遠いのが現状である。Aサイトカチオンとして、MA⁺よりイオン半径の大きいFA⁺ (formamidinium: CH(NH₂)₂⁺)を用いることで劣化が著しく改善するとの報告がなされるなど、⁴⁴⁾ 材料の安定性を高める研究が活発に行われている。

また、MAPbI₃以外のペロブスカイト太陽電池材料の探索も進められている。特に、クリーンなイメージがある太陽光発電に、安全性で問題となる元素を利用することは避けるべきであり、鉛フリーな新しいペロブスカイト半導体が望まれている。Pb²⁺をSn²⁺に置換したMASnI₃やこれを用いた太陽電池の報告はあるが、この物質は大気中で著しく不安定である。⁴⁵⁾ ハロゲン置換の研究も盛んに行われており、その組成比によってバンドギャップエネルギーのチューニングが可能である。⁴⁶⁾ また、3次元ペロブスカイト構造に限らず、層状ペロブスカイト構造物質の太陽電池材料としての研究も行われており、⁴⁷⁾ 化学・材料の立場から様々なトライがある。物理サイドからの貢献が今後非常に重要となっており、専門の異なる研究者の協同作業により、研究が大きく進展すると期待され、その成果が非常に楽しみである。

4. まとめ

SiやGaAsの単結晶太陽電池にはない、低コストで軽量、さらにエネルギー変換効率の高い太陽電池材料の研究が活発になっており、その一つにハロゲン化金属ペロブスカイトがあることを紹介した。この材料の基礎特性は太陽電池材料として優れたものであり魅力的であるが、現時点では実用化への問題点も多いことを指摘した。ハロゲン化金属

ペロブスカイトを固体太陽電池へ応用する研究はスタートしたばかりであり、解決しなくてはならない課題も多く、さらに実用化に向けても新たな課題も出てくるものと思われる。シリコン太陽電池の高効率化や発電コストの低減化が進んでいるなか、この材料も含め新しい太陽電池に要求される条件は厳しさを増してくるであろう。薄膜やナノ構造を利用した新しい太陽電池を実現するには、従来の延長にない新しいアプローチが必要であり、基礎物理学からの貢献が必要となる。ハロゲン化金属ペロブスカイトをはじめとして、低コスト高効率太陽電池の開発研究はその将来性を考えると非常に楽しみな分野であり、多くの物理研究者がこの分野の研究に参加されることを期待したい。

ここで述べた成果は、多くの方々との共同研究にもとづくものである。特に、若宮淳志准教授、遠藤克博士研究員、岡野真人特定助教、院生の山田琢允氏に感謝します。また、JST-CREST、住友電工グループ社会貢献基金および科研費の支援に感謝します。

参考文献

- D. M. Chapin, C. S. Fuller and G. L. Pearson: *J. Appl. Phys.* **25** (1954) 676.
- 米国 National Renewable Energy Laboratory のチャート: http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg.
- M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta and E. D. Dunlop: *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **23** (2015) 1.
- 金光義彦: *応用物理* **83** (2014) 986.
- 秋山英文: *応用物理* **84** (2015) 319.
- 例えば、十倉好紀:『強相関電子と酸化物』(岩波書店, 2002): M. Imada, A. Fujimori and Y. Tokura: *Rev. Mod. Phys.* **70** (1998) 1039.
- H. Yasuda and Y. Kanemitsu: *Phys. Rev. B* **77** (2008) 193202; Y. Yamada, H. Yasuda, T. Tayagaki and Y. Kanemitsu: *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 247401.
- Y. Yamada, T. Nakamura, S. Yasui, H. Funakubo and Y. Kanemitsu: *Phys. Rev. B* **89** (2014) 035133.
- A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai and T. Miyasaka: *J. Am. Chem. Soc.* **131** (2009) 6050.
- D. Weber: *Zeitschrift für Naturforschung B* **33** (1978) 1443.
- R. E. Wasylshen, O. Knop and J. B. Macdonald: *Solid State Commun.* **56** (1985) 581.
- A. Poglitsch and D. Weber: *J. Chem. Phys.* **87** (1987) 6373.
- N. Onoda-Yamamuro, T. Matsuo and H. Suga: *J. Phys. Chem. Sol.* **51** (1990) 1383.
- N. Onoda-Yamamuro, O. Yamamuro, T. Matsuo and H. Suga: *J. Phys. Chem. Sol.* **53** (1992) 277.
- N. Onoda-Yamamuro, T. Matsuo and H. Suga: *J. Phys. Chem. Sol.* **53** (1992) 935.
- D. B. Mitzi, C. A. Feild, W. T. A. Harrison and A. M. Guloy: *Nature* **369** (1994) 467.
- D. B. Mitzi, S. Wang, C. A. Feild, C. A. Chess and A. M. Guloy: *Science* **267** (1995) 1473.
- T. Ishihara, J. Takahashi and T. Goto: *Solid State Commun.* **69** (1989) 933.
- T. Ishihara, J. Takahashi and T. Goto: *Phys. Rev. B* **42** (1990) 11099.
- T. Ishihara: *Optical Properties of Low-Dimensional Materials*, ed. by T. Ogawa and Y. Kanemitsu (World Scientific, Singapore, 1995) Chap. 6.
- T. Umebayashi, K. Asai, T. Kondo and A. Nakao: *Phys. Rev. B* **67** (2003) 155405.
- M. Hirasawa, T. Ishihara and T. Goto: *J. Phys. Soc. Jpn.* **63** (1994) 3870.
- K. Tanaka, *et al.*: *Solid State Commun.* **127** (2003) 619.
- N. Kitazawa, Y. Watanabe and Y. Nakamura: *J. Mater. Sci.* **37** (2002) 3585.
- M. M. Lee, J. Teuscher, T. Miyasaka, T. N. Murakami and H. J. Snaith: *Science* **338** (2012) 643.
- H.-S. Kim, *et al.*: *Sci. Rep.* **2** (2012) 591.
- J. Burschka, *et al.*: *Nature* **499** (2013) 316.
- W. Shockley and H. J. Queisser: *J. Appl. Phys.* **32** (1961) 510.
- Y. Yamada, T. Nakamura, M. Endo, A. Wakamiya and Y. Kanemitsu: *Appl. Phys. Exp.* **7** (2014) 032302.
- J. Even, L. Pedesseau, J. M. Jaucu and C. Katan: *J. Phys. Chem. Lett.* **4** (2013) 2999.
- B. O'Regan and M. Grätzel: *Nature* **353** (1991) 737.
- N.-G. Park: *J. Phys. Chem. Lett.* **4** (2013) 2423.
- Spiro-OMeTAD [2,20,7,70-tetrakis-(N,N-di-p-methoxyphenylamine)9,90-Spirofluorene] は高効率な固体色素増感太陽電池を実現するために開発された正孔輸送材料である [J. Krüger, R. Plass, M. Grätzel and H.-J. Matthieu: *Appl. Phys. Lett.* **81** (2002) 367]. 正孔の移動度を上げるために Co 錯体を添加して用いられる.
- S. D. Stranks, *et al.*: *Science* **342** (2013) 341; G. Xing, *et al.*: *Science* **342** (2013) 344; Q. Dong, *et al.*: *Science* **347** (2015) 967.
- Y. Yamada, T. Nakamura, M. Endo, A. Wakamiya and Y. Kanemitsu: *J. Am. Chem. Soc.* **136** (2014) 11610.
- F. Deschler, *et al.*: *J. Phys. Chem. Lett.* **5** (2014) 1421.
- Y. Yamada, T. Nakamura, M. Endo, A. Wakamiya and Y. Kanemitsu: *IEEE J. Photovoltaics* **5** (2015) 401.
- J. Even, L. Pedesseau and C. Katan: *J. Phys. Chem. C* **118** (2014) 11566.
- Q. Lin, A. Armin, R. C. R. Nagiri, P. L. Burn and P. Meredith: *Nat. Photon.* **9** (2015) 106; A. Miyata, *et al.*: *Nat. Phys.* **11** (2015) 582.
- W.-J. Yin, T. Shi and Y. Yan: *Appl. Phys. Lett.* **104** (2014) 063903.
- H. J. Snaith, *et al.*: *J. Phys. Chem. Lett.* **5** (2014) 1511.
- Z. Xiao, *et al.*: *Nat. Mater.* **14** (2015) 193.
- Y. Yamada, M. Endo, A. Wakamiya and Y. Kanemitsu: *J. Phys. Chem. Lett.* **6** (2015) 482.
- G. E. Eperon, *et al.*: *Energy Environ. Sci.* **7** (2014) 982.
- Y. Ogomi, *et al.*: *J. Phys. Chem. Lett.* **5** (2014) 1004.
- J. H. Noh, S. H. Im, J. H. Heo, T. N. Mandal and S. I. Seok: *Nano Lett.* **13** (2013) 1764.
- A. Mei, *et al.*: *Science* **345** (2014) 295; B. Lee, *et al.*: *J. Am. Chem. Soc.* **136** (2014) 15379.

(2015年5月19日原稿受付)

Organo-Lead Halide Perovskite Solar Cells

Yoshihiko Kanemitsu and Yasuhiro Yamada

abstract: Lead-halide perovskite semiconductors $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ ($\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{and I}$) have currently come into the limelight because of their promising features for solar cell applications. The maximum efficiency of perovskite-based solar cells has already reached above 20%. Studies on three-dimensional halide perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ started from the early 1970s, however, their optical and electrical properties have not been clarified compared with the associated two- and one-dimensional perovskites. We studied the optical properties and photocarrier recombination dynamics in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ using time-resolved laser spectroscopy and revealed that electron-hole radiative recombination dominates the photocarrier dynamics at room temperature. Our findings demonstrate that the photoexcited electrons and holes behave as free carriers in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ because of its small exciton binding energy. This feature is closely related to the high energy-conversion efficiencies of perovskite solar cells. We discuss future perspectives on perovskite semiconductor physics and perovskite solar cells.

超音波洗浄とソノルミネセンス

崔 博 坤 (明治大学理工学部)

皆さんの実験室には、必ずと言ってよいほど超音波洗浄器が置いてあると思う。試料や部品などを洗浄するのに超音波洗浄器は欠かせないものになっている。日常的にも、メガネ、アクセサリ、指輪、義歯などの洗浄に使われている。産業用にも頻繁に使用され、特に半導体産業で果たす役割は非常に大きい。ところで、超音波洗浄器からピーピーといううるさい騒音が出ているのにお気づきだろうか。超音波は聴こえないほど高い音なのに騒音が聞こえるのは何故だろうか。可聴音の周波数上限は20 kHzと言われているが、熟年になると高い音が聴こえにくくなる。筆者の場合は上限が13 kHzにも下がってしまった。そんな私でも耳に障るのだから若い人はどれほどうるさく感じているだろうか。市販の超音波洗浄器で使われている周波数は24 kHz、40 kHzなどである。もし、これらの超音波が空中に漏れだとしても、人には聴こえないはずである。筆者は長年超音波の研究を行ってきたが、当初この騒音は容器の共振のせいではないかと思っていた。昔はMHzからGHz域の超音波ばかり扱っており、超音波が聞こえるはずはない、と信じ切っていたせいかもしれない。実は超音波洗浄器でものがきれいになるということと、騒音の発生は深いつながりがある。音ばかりでなく、ソノルミネセンスと呼ばれる光も放出しているのである。このような話題を皆さんに提供したい。

1. 音響キャビテーションによる気泡生成

超音波洗浄器を使っていると、水中に気泡が出ていることに気づく。炭酸飲料やビールの栓を開けるときの泡ができるが、これはビン内の圧力が急に減少したからである。

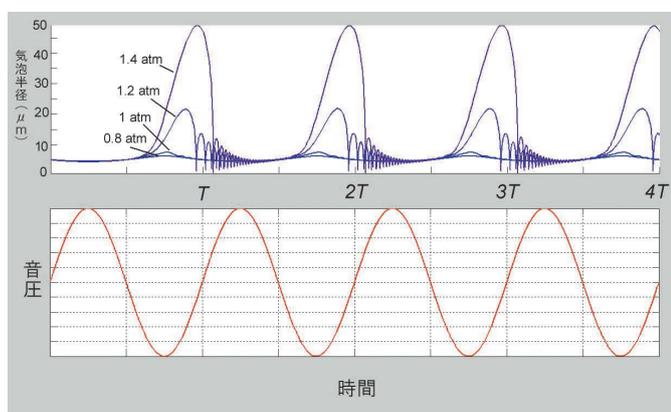


図1 気泡の膨張収縮振動の計算結果。上図は周波数24 kHz、初期半径5 μm 、音圧0.8~1.4気圧での気泡半径の時間変化。下図は音圧の時間変化を表す。Tは音波周期である。

洗浄容器の水中にはゴミや壁についた気泡核があり、音圧のマイナス位相時に圧力が下がると表面張力に打ち勝って気泡が生まれ、さらに膨張する。音圧のプラス位相時には圧力が増加するので、今度は気泡が収縮することになる。気泡はこのように音圧と同期して膨張収縮をくり返す。その間、気泡界面を通して液体に溶けている空気が入り出し、1周期で平均すると気泡内に入る量が多い。そのため気泡は徐々に大きくなり、ついには浮力で上昇し液表面から排出される。音波で作られ膨張収縮振動する気泡を音響バブル (Acoustic bubble) と呼んでいる。水に溶存している空気量を調節してやると、適当なサイズで膨張収縮を長時間くり返すことができる。これは後で述べるシングルバブルソノルミネセンスの条件となる。

気泡振動のエネルギー変換を考えてみよう。音波のエネルギーは、気泡周囲の液体の振動エネルギーとして存在する。そのエネルギーは、気泡界面にかかる圧力と気泡の体積変化の積である仕事に変換される。気泡は1 μm 以下の大きさにまで収縮される(体積でいうと1/1,000以下)ので、ミクロな領域に音波エネルギーが集中されることになる。その過程は断熱圧縮なので気泡内部は瞬間的に数千度、数百気圧の高温高压状態となる。これが気泡振動を通してのエネルギー変換機構である。圧力変化に伴って気泡径がどのように時間変化するかを計算した例を示そう。図1は、超音波による4周期分の音圧変化(図1下側)と気泡半径の時間変化(図1上側)である。計算は、気泡の表面張力や液体の粘性・圧縮率などを考慮している。超音波周波数は24 kHz、気泡初期半径(音波がないときの気泡半径)は5 μm で、音圧は0.8~1.4気圧の範囲である。音圧が小さいときは気泡半径もsin関数的に変化するが、音圧が大きくなると様相が変わる。膨張時は液体を押しやる方向なので比較的ゆっくり最大50 μm (音圧1.4気圧のとき)まで膨らみ、収縮時は気体を圧縮する方向なので急激に最小0.6 μm 程度まで小さくなる。そして最小径を過ぎた後、何回かリバウンドする。外力である音圧と半径変化の間には位相ずれが生じている。気泡振動は、ある液体質量と気体圧縮率(ばね定数に相当)からなる振動系を超音波で強制振動させているということである。

2. シングルバブルソノルミネセンス

上のような膨張収縮振動を観測するには、1個の気泡を静止させることが必要である。超音波振動子を接着した円筒または球形フラスコに、真空ポンプを使って脱気した純

水を入れておく。汲置きの水は空気がほぼ飽和しているので飽和量の20-40%に調整する。水中に微小なニクロム線を入れておき、それを加熱して気泡を発生させる。音圧約1.5気圧の超音波を印可しておく、気泡はフラスコ中にできた定在音波の腹の位置にトラップされる。こうすると、単一気泡が同じ位置で数分以上膨張収縮をくり返し、最小半径になったとき発光も見られるようになる。音波周波数や音圧、脱気度の条件を合わせれば1時間以上も安定に発光する。これがシングルバブルソノルミネセンス (SBSL) とされる現象である。この気泡振動は非常に規則的に起こるのでストロボ技術を使って簡単に影絵を撮ることができる。その気泡の膨張収縮振動の様子を図2に示す。気泡が徐々に大きくなって急激に収縮する様子が写真からわかる。このときの気泡半径の変化は、図1の計算結果と非常に良く合う。ちなみにこの発光現象は、はじめ1962年に吉岡らが日本音響学会で発表した。1990年になってGaitanらが発光に最適な周波数、音圧、脱気度を詳細に研究し、“Star in a jar”と言われて一躍世界の注目を浴びることになった。余談であるが、“Chain Reaction”という映画(20世紀Fox社、キアヌ・リーブス出演)が1996年に作られている。ある大学院生がエネルギー革命の可能性を秘めたソノルミネセンス装置を作り、それを狙ったFBIの陰謀に巻き込まれる、というサスペンス映画である。ソノルミネセンスに際して気泡内高温のため水がOHとHラジカルに分解され、H同士が反応して水素が発生する。その水素ガスが新エネルギー源として注目されたのであろう。映画としての評価はもう一つであったが、このような新技術ネタを直ぐさま映画化するのはアメリカならではである。残念なことに、水素発生量はごくわずかなのでエネルギー源としては役に立たない。

さて、発光の原因を考えてみよう。気泡内温度・圧力が上がる機構として、二つの説がある。一つは気泡収縮の最終段階で断熱圧縮が起こると考えたモデルで、最大温度が約20,000 Kになる。実際には気泡内に水蒸気があるので、水分子分解などの吸熱化学反応によって温度はもっと下がる。しかし、10,000 K近くの高温になることは発光スペクトルの実験結果から見て間違いない。そのような高温環境

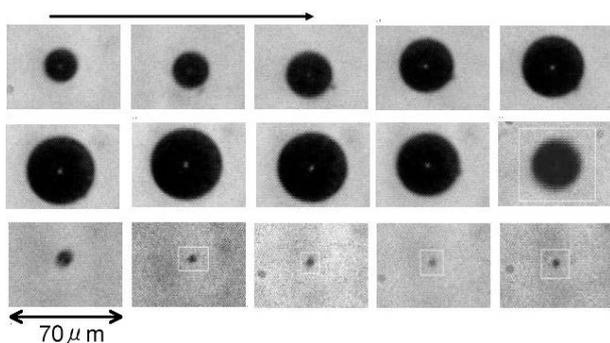


図2 徐々に膨張し、急激に収縮する気泡のストロボ写真。気泡は超音波周波数40 kHzでこの振動をくり返す。フレーム間隔は1 μs。

下では気泡内の酸素、窒素は反応して硝酸、亜硝酸、過酸化水素などになり液体中に溶け出してしまう。しかし、空气中に1%弱存在するアルゴンは気泡内に残り、高温のため一部プラズマ化する。アルゴンのイオン化エネルギーは約16 eVと大きいのでイオン化するのはごく一部である。Ar⁺と電子が生成し、電子が減速してエネルギーを放出する際、紫外から赤外まで連続したスペクトルをもつ制動放射光を出す。これが、気泡内が一様に高温になるホットスポット説である。¹⁾

もう一つの有力な説が衝撃波説である。気泡界面が収縮する際の速度が非常に大きいと、気泡内高温ガスの音速を超え衝撃波が発生する。このモデルによると100万K近い温度が予想される。発光はやはり電子の制動放射による。この説に基づいて、キャビテーション気泡内で核融合(D-D反応)が観測されたという報告が2002年に出た。しかし、その後の追実験では確認されなかった。最近東北大学のグループは、音響キャビテーション下の液体Liに重陽子を照射しD-T反応が加速された、と報告している。²⁾ 水からのソノルミネセンスは暗い環境でようやく見える微弱な光であるが、濃硫酸やリン酸中では非常に明るい発光が観察されている。また、硫酸中でアルゴンイオンなど高エネルギーの線スペクトルが発見されたことから、ホットスポット説では説明できないとされ、衝撃波説が見直されている。³⁾ 気泡内がどれほどの極限状態に達するのか、いまだに議論が続いており、興味が尽きない。

3. マルチバブルソノルミネセンス (MBSL)

超音波洗浄器の中では、多くの音響バブルが存在している。気泡が膨張収縮振動していると周囲に音波を放出するので、まわりの気泡からの影響によって気泡運動のダイナミクスが大きく異なってくる。つまり、気泡同士の合体や分裂、集団運動などが生じ、非常に複雑になる。これが上述のシングルバブルと異なるところである。⁴⁾

図3を参照しながら音響バブルの一生を考えてみる。気泡核に溶解ガスが入り込み、小さい気泡が成長する。(整流拡散)これを図では「成長気泡」と記してある。その一部

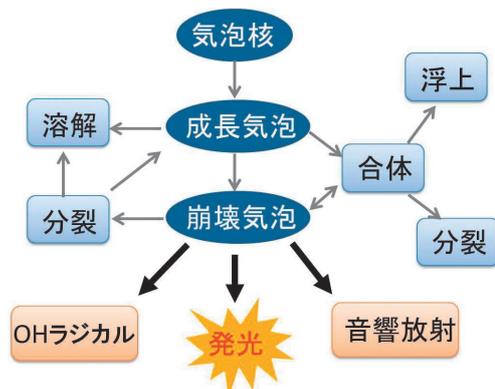


図3 音響バブルの一生。

はさらに成長して、激しく膨張収縮振動する「崩壊気泡（崩壊と言っても潰れて消えるわけではない）」になる。また「成長気泡」の一部は液体に溶解して消滅し、一部は気泡同士で合体して「崩壊気泡」になる。「崩壊気泡」になっても振動が激しいため非球形の振動を引き起こしやすく、分裂して小さい気泡になるものもある。また、気泡同士で引力が働キクラスターを作ることもある。「崩壊気泡」の内部は高温高圧になるので、水分子が分解されてOHラジカルができたり、発光したりする。活性酸素の一種であるOHラジカルは気泡内から液体側に溶けだし、気泡周囲にある物質に化学作用を及ぼす。また、気泡振動により周囲液体に圧力波を放射する。気泡の運動エネルギーの大部分はこの音響放射（Acoustic emission）として消費される。OHラジカルの放出や音響放射は、超音波洗浄に重要な役割を果たしている。「ソノケミストリー」と呼ばれる分野では、OHラジカルの化学作用や気泡内の極限反応場を利用して、有機・無機合成、有害化学物質の分解、殺菌などが盛んに研究されている。⁴⁾

マルチバブルソノルミネセンス（MBSL）写真の例を紹介しよう。発光実験には溶存ガスが重要である。空気よりアルゴンなどを飽和した方が発光しやすい。断熱圧縮説によれば気体の比熱比のべき乗で温度が決まるので、比熱比の大きい希ガスの方が発光に有利である。図4に、純水からのMBSL(a)と界面活性剤であるSDS（ドデシル硫酸ナトリウム）水溶液からのMBSL(b)を示す。円筒形フラスコの底に振動子を接着し、周波数150 kHz、音響パワー20 Wの超音波を水面に向けて照射している。超音波洗浄器と比べると周波数は高いが、パワーは同程度である。水では(a)のように青白く発光する。スペクトルを測ると、300–350 nmを最大として赤外域まで広がる広帯域成分、そして310 nmにピークをもつOHラジカル線が観測される。(b)のSDS水溶液では、水で見られる青白い発光に加えてNaによるオレンジ発光が見られる。

図5は、角型の容器にNaCl水溶液（濃度2 M）を入れ、同様に発光写真を撮ったものである。この場合はほとんどオレンジのNa原子発光であるが、青白い連続成分もわずかに見られる。図4と5では発光分布が異なっている。これは、円筒容器と角容器での3次元定在波モードの差を反映している。発光気泡は定在音波の音圧腹にトラップされやすい性質があり、図4のように筋状に発光が見える。容器上部から観察すると、円筒モードを反映して同心円状に見える。図5の角容器では音圧腹がメッシュ状に形成されていることを反映している。ただし、音圧を大きくしていくと発光気泡が徐々に音圧節方向に移動していくので、図5(b), (c)に見られるように分布がぼやけてくる。なお、これらの写真は一眼レフカメラを使い露光時間3–5分で撮影したものである。その間、気泡は激しく動き回っているので、短い露光時間でとれば別の様相が見える。発光のビデオ映像を<http://youtu.be/gEqSaS1B1hE>に載せたので興味

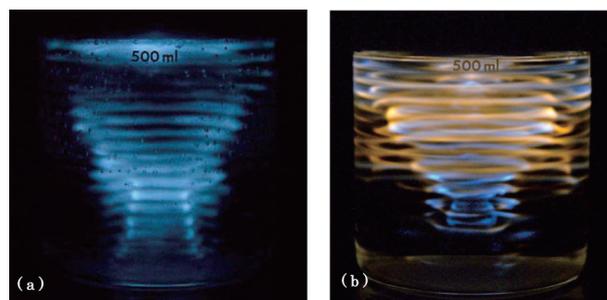


図4 円筒フラスコ内でのソノルミネセンス写真。試料は(a)水、(b)濃度10 mMのSDS水溶液である。フラスコ底から水面に向かって150 kHzの超音波を照射。発光する気泡が定在波の腹にトラップされるため、筋状に光って見える。(b)はY. Hayashi and P.-K. Choi: Ultrason. Sonochem. **23** (2015) 333より引用。Copyright (2015), Elsevier Publishing.

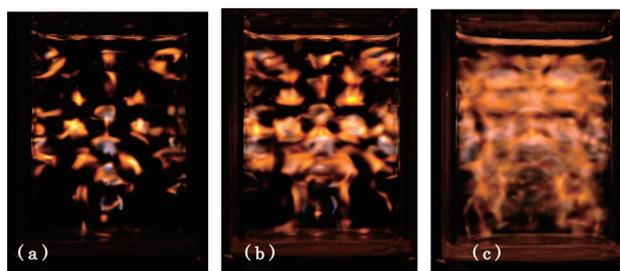


図5 NaCl水溶液を入れた角柱容器中でのソノルミネセンス写真。周波数は約100 kHz。オレンジはNa原子(589 nm)からの発光。写真(a)は超音波強度が弱い場合で、3次元定在波の腹に気泡がトラップされている。(b)から(c)と徐々に超音波が強くなるにつれてトラップ位置が節方向にずれるため分布がぼやけている。

のある方はご覧いただきたい。

オレンジはNa原子からの発光(589 nm)である。水中に存在するNa⁺イオンがどのように還元されどこで光るのか、長い間論争があったが、Na発光は気泡内ガス相で起こることが明らかになっている。図2で見た気泡振動は球形であるが、マルチバブルの場合は非球形にも振動し、周囲液体がナノサイズの液滴となって気泡内に入り込む。気泡合体や分裂のように気泡形状が複雑になるときに液滴が同様に入り込む。すると、液滴は気泡崩壊時の高温により蒸発し、Na⁺イオンが還元されて励起状態にまで至る。発光スペクトルの幅やシフトから気泡内密度が得られている(標準状態の数倍以上)。

SDS溶液の場合は、水中でドデシル硫酸イオンとNa⁺イオンに分かれるが、前者は疎水性のため気泡界面に吸着し負に帯電する。するとNa⁺は帯電した気泡周囲に引き寄せられ、気泡周囲では濃度が大きくなる。そのため、NaCl溶液に比べて1/100以下の濃度で同等の発光量を示す。

4. 気泡動力学と超音波洗浄

話を気泡運動の方に戻そう。気泡が多数存在するとき、気泡間相互作用のため運動が複雑になり、いろいろなパターンを作ることが知られている。⁵⁾ 20–30 kHzの周波数で典型的に現れるのが図6に示す「クラゲ」と呼ばれる気泡群である。図の中心部から気泡が発生し、上下方向に分

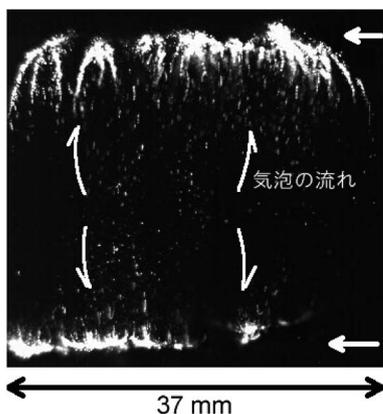


図6 26 kHz, 13 W のとき, レーザー散乱で観測されたクラゲ状気泡群.

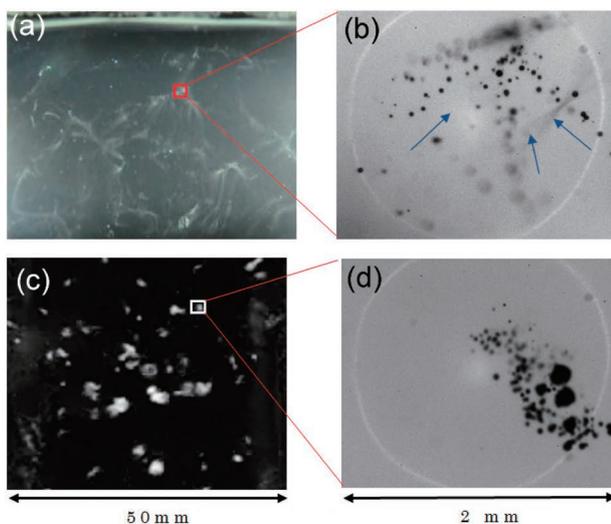


図7 82 kHzでの気泡運動. 音響パワーが小さい場合 (11 W) は, (a) のように気泡が音圧腹に沿って高速で動き回っている. パワーを19 Wに上げると (c) のように気泡がクラスターを形成する. (b), (d) は (a), (c) の微小域を高速度 (1 M fps) で撮影.

かれてそれぞれ水平矢印で示した線上に収束するように運動する. 音圧をさらに上げると気泡群は小さい塊にまとまってクラスターを形成する. 図7は, 周波数82 kHzでの気泡写真 (a), (c) と, それぞれに対応する拡大して高速度撮影した影絵写真 (b), (d) である. (a) では, 音圧の腹部を気泡が高速に周回している. それを100万コマ/sで微細に観察すると, (b) のように最大径40 μm ほどの気泡群が蜘蛛の巣状に運動していることがわかる. これをストリーマと呼んでいる. この状態から音圧を大きくすると, 気泡が (c) のように球状の塊に変化する. これを高速度撮影すると (d) のような数十の小さい気泡からなるクラスターが見られ, それが高速で回転しながら移動している. (c), (d) のような運動は市販洗浄器のパワーでは実現できないが, 大きな可聴音を出す.

気泡が膨張収縮振動することによって周囲に音波を放出することはすでに述べた. 振動が急速に起こると, 液体中に衝撃波も発生する. (ソノルミネセンスの項で述べた衝撃波説は気泡内部の話であり, ここでの衝撃波とは異なるこ

話題 超音波洗浄とソノルミネセンス

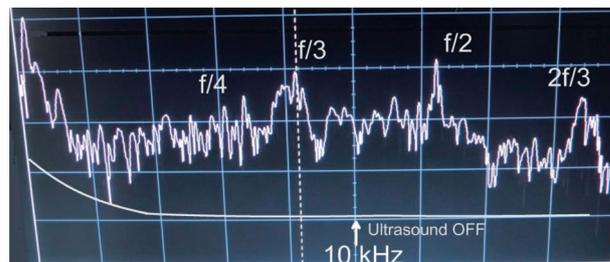


図8 市販超音波洗浄器 ($f = 24 \text{ kHz}$) からの音響ノイズスペクトル. 横軸は2 kHz/div, 縦軸は20 dB/div. 下側の線は超音波オフのときのレベルを示す.

とに注意) また, 気泡近くに洗浄物のような固体壁があると, 気泡振動の対称性がくずれるため壁に向けて激しいジェット流が生じる. 気泡から生成したOHラジカルは汚れのもととなる有機物を分解する. これらが要因となって超音波洗浄が行われるのである.

市販洗浄器から聞こえる騒音をマイクで測り, そのスペクトルをとった結果を図8に示す. 基本周波数成分 ($f = 24 \text{ kHz}$) は図では表示されていないが, 17 kHz ($2f/3$), 12 kHz ($f/2$), 8.3 kHz ($f/3$), 6.1 kHz ($f/4$), それに1.2 kHz ($f/20?$) などのピークが観察される. さらに特徴的なのは, 超音波オフ時と比べて20 dB以上大きい白色ノイズ成分が存在することである. このように種々の可聴周波数成分が現れていることがわかる. f/n 等の分調波成分は, 気泡運動が大きな非線形性をもち, しかも種々の周期の膨張収縮振動していることを示している. 白色ノイズは, 気泡のカオス振動から生ずるという理論もあるが, 気泡の合体・分裂などからも生じ得る.

多数気泡の動力学では同期現象も予想されていて現象的に大変面白いが, 複雑なため理論的解析はあまり進んでいない. 関係者の皆さんに興味をもってもらえることを期待している. 以上のように, 超音波洗浄器からの騒音は音響バブルから発するものであることが理解いただけたいと思う. 洗浄効果を望むならば, ある程度の騒音は我慢してもらうほか仕方がないかもしれない.

なお, 掲載写真は林悠一, 阿部将吾, 八戸速夫, 李香福の諸君が撮影したものである.

参考文献

- 1) ソノルミネセンスのReviewとして, M. P. Brenner, S. Hilgenfeldt and D. Lohse: Rev. Mod. Phys. **74** (2002) 425.
- 2) Y. Toriyabe, et al.: Phys. Rev. C **85** (2012) 054620.
- 3) D. L. Flannigan and K. S. Suslick: Nature **434** (2005) 52.
- 4) 崔, 他編著: 『音響バブルとソノケミストリー』(コロナ社, 2012).
- 5) 気泡運動全般に関して, W. Lauterborn and T. Kurz: Rep. Prog. Phys. **73** (2010) 106501.

非会員著者の紹介

崔 博坤氏: 明治大学理工学部物理学科教授. 専門は超音波物理学. 音響キャビテーション, 音波によるソフト物質の硬さ測定に興味あり.

(2015年3月3日原稿受付)

ペタヘルツエンジニアリング創出に向けたアト秒光物性 ～NTT物性科学基礎研究所における超高速光物理研究～

小栗 克弥 (日本電信電話会社NTT物性科学基礎研究所)

1. はじめに

筆者は現在、日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所において「超高速光物理」の研究を行っている。当研究所は日本電信電話株式会社の基盤的研究開発を担う11研究所・2センタの研究開発組織の一つであり、10～20年後の世界を見据え、速度・容量・サイズ・エネルギーなどの点で従来の通信ネットワーク技術の壁を越える新原理・新概念を創出することをミッションとしている。神奈川県ほぼ中央の厚木市森の里地区に位置し、自然豊かな環境の中で研究員約100名、海外・国内実習生30～50名程度の人員が日々研究を行っている。¹⁾

筆者は、大学・大学院時代においては、地球惑星物理学を専攻し、特に、地球内部に匹敵する超高圧・超高温の極限環境下における物質のX線構造解析の研究を行ってきた。1998年に当研究所に配属された当初は、その経験を活かして、X線・軟X線領域における超短パルス発生並びに時間分解X線分光の研究を始め、X線物質科学に時間分解計測技術の概念を導入した「超高速X線物質科学」の勃興期に研究を推し進めた。さらに、X線発生に用いる超短パルスレーザー技術という観点から、超短パルスのキャリアエンベロープ位相安定化技術やそれを用いたアト秒(1 as = 10⁻¹⁸ s)高次高調波パルス発生並びにアト秒光物性へと研究の方向性を拡げ、現在の「超高速光物理」研究のコンセプトを創り上げてきた。このように、筆者の学生時

代の研究分野と、現在の研究分野とは大きく異なっているわけであるが、「超高圧」と「超高速」という極限物性を探索するために、新たな研究装置を開発し、計測するという研究の基本スタイルは一貫している。企業の研究所という性格上、研究成果と社会とのつながりを常に意識できる環境を最大限活用し、他の研究機関との差別化を図るべく戦略を練っている。

本稿では、筆者らが進めているNTT物性科学基礎研究所の「超高速光物理」研究の概要について紹介する。特に、筆者自らがプレーヤーとして取り組んでいるアト秒光物理の研究を中心に紹介したい。

2. 「超高速光物理」研究の概要

21世紀に入り、光科学は、超高速光技術を母体として、新たに大きな二つの研究領域を開花させた。一つは、周波数領域における光の極限的制御を指向する光周波数コムの研究である。²⁾ もう一つは、極限的に短い時間領域における光の制御を追求するアト秒光物理の研究である。³⁾ この二つの最先端光科学分野は、どちらも超短パルス光の包絡線に対する光電場の振動のタイミング(キャリアエンベロープ位相: CEP)を正確に制御する技術がブレークスルーとなり、⁴⁾ ここ10年あまりで急速に発展した。その結果、可視光から近赤外光にかけての「光」の周波数、振動周期、そしてその位相は直接的に計測かつ制御可能な量と

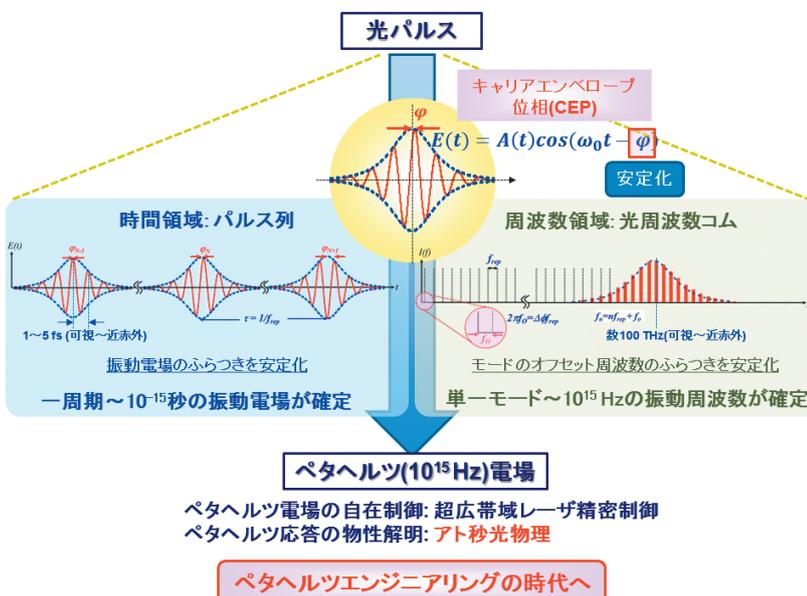


図1 NTT物性科学基礎研究所「超高速光物理」研究のコンセプト。

なり、従来、あまりに高い振動数・短い振動周期のため無視されてきた光の「電磁波」としての性質を活用できる可能性が切り拓かれることとなった。

筆者らは、この「光」に関する大きなパラダイム変換をより積極的に推進すべく、光周波数コム光源とアト秒高次高調波光源という2つの最先端光源を中核技術として、数百テラヘルツ (1 THz = 10^{12} Hz) の周波数を持つ光電場を自在に計測・制御し、数フェムト秒 (1 fs = 10^{-15} s) の周期を持つ光電場の時間スケールにおける光物性を探索する「ペタヘルツ (1 PHz = 10^{15} Hz) 領域の光技術 = ペタヘルツエンジニアリング」創出を目指している (図1)。

光周波数コム光源研究における特徴は、位相変調レーザーをベースにして、小型・高繰り返し・波長可変光周波数コム光源を目指している点である。^{5,6)} この方式は、狭線幅CW半導体レーザーを種光とし、マイクロ波により駆動することで25 GHzとといった極めて広いモード間隔と狭モード線幅を容易に実現できるため、モード同期レーザーをベースとした光周波数コムとは異なる応用が期待できる。一方、アト秒高次高調波光源研究における特徴は、単一アト秒パルス発生と極端紫外・軟X線) 領域の超高速時間分解分光技術を組み合わせることで、原子から分子、そして固体まで様々な試料におけるアト秒光物性研究を展開できる点にある。このようなアト秒時間領域の計測手法は、世界トップクラスの数研究室しか実現していない難易度の極めて高い技術であり、筆者らの研究の差別化技術である。さらに、本研究では、サブ10 fs時間分解能を有する高感度過渡反射率計測技術を組み合わせることで、アト秒からフェムト秒にかけての固体電子・格子系ダイナミクスの研究を包括的に進めている。^{7,8)}

3. 単一アト秒パルス光源の開発

単一アト秒パルスは、近赤外域の高強度超短パルス光を

希ガス原子中に集光することで発生する、極端紫外から軟X線の高次高調波の一形態である (図2)。この高次高調波は、入射 (基本波) 光パルスの光電場によって一旦トンネリオン化した電子が、電場の向きが反転することでイオン化した元の原子と再結合した際に放射される。³⁾ 3ステップモデルと呼ばれるこの一連の過程は、基本波の半周期毎に正確に繰り返されるため、高次高調波は基本波周波数 (ω) の2倍の間隔 (2ω) で次数が増加し、奇数次数 ($(2n+1)\omega$) のみの櫛状のスペクトルを持つことになる。基本波として良く用いられる波長 800 nm 付近の近赤外光の半周期は 1 fs 程度であるため、高次高調波はアト秒オーダーのパルス幅を有する。すなわち、高次高調波は、アト秒パルスが基本波の半周期毎に放射されるパルス列となる。

図3は、我々が構築したアト秒光物理実験ステーション (NTT AttoSecond Station: NASS) における装置写真である。

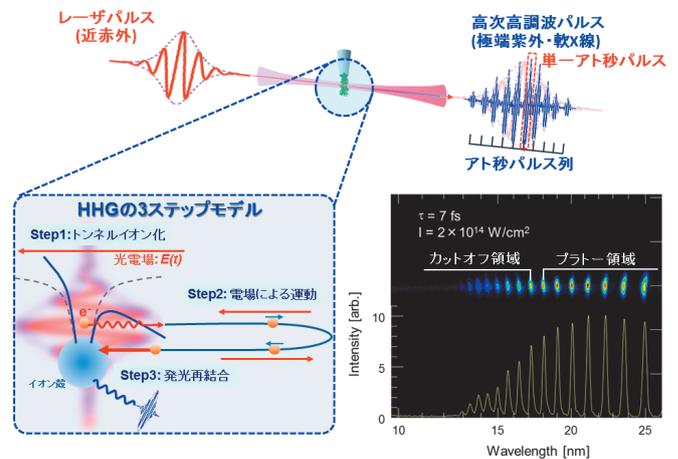


図2 高次高調波発生 (HHG) の模式図 (上) と典型的な高次高調波スペクトル (下右)。近赤外光の基本波と希ガス原子の相互作用により発生する高次高調波は、3ステップモデルにより説明される (下左)。スペクトル強度が次数にあまり依存しないエネルギー領域をプラトー領域、高調波の最大発生次数の領域で急速にスペクトル強度が減少するエネルギー領域をカットオフ領域と呼ぶ。

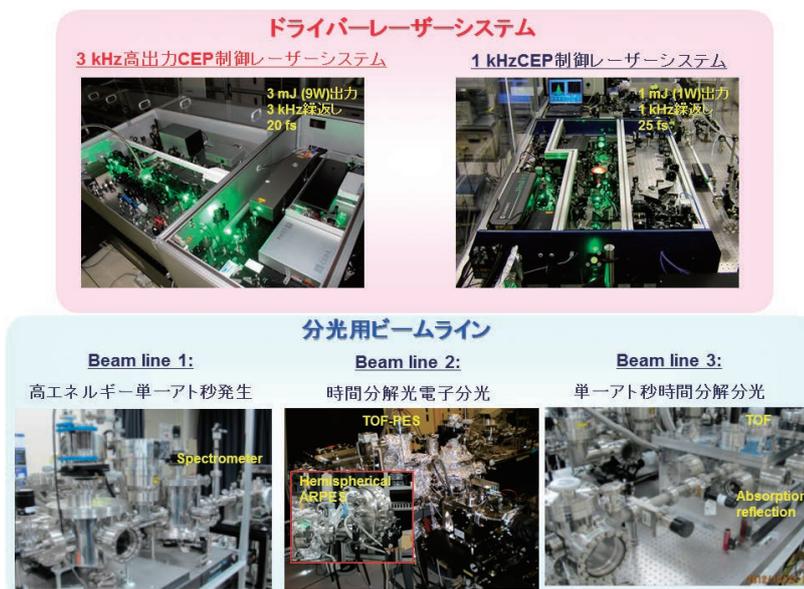


図3 NTT AttoSecond Station (NASS) の装置外観。単一アト秒パルス発生に用いるの高強度数サイクル近赤外光パルスを発生するための CEP 制御高強度フェムト秒レーザーシステムを2台備えている (上)。ビームラインは、高エネルギー単一アト秒パルス発生・評価実験系 (下左)、フェムト秒時間分解光電子分光実験系 (下中央)、単一アト秒時間分解計測実験系 (下右) の3ラインを備えている。

上の2つは、高次高調波の基本波発生ドライバー用の高強度フェムト秒レーザーシステムである。中心波長 790 nm, パルスエネルギー 1~3 mJ, パルス幅 20~25 fs, キロヘルツ繰り返しの高強度フェムト秒レーザーマルチパス増幅器を2台配備している。各レーザーシステムには、CEP 安定化機構を組み込み、中空ファイバ圧縮器により、6~7 fs の数サイクルパルスが発生させる。また、下の3つは、単一アト秒パルスの発生ビームラインおよび高次高調波・単一アト秒パルスを利用した超高速時間分解分光法ビームラインである。このビームラインは、単一アト秒パルス波形の計測や、時間分解吸収・反射・光電子分光実験などを実施できる。

単一アト秒パルスの発生は、基本波(近赤外光)の半サイクル周期繰り返しで発生する高次高調波アト秒パルス列から一本を切り出すことにより実現される。⁹⁾ 切り出す方法は、大きく分けて3種ある。一つは、パルス内で1~2周期程度の電場しか含まない極限的に短いパルスが発生させ、それを基本波として高次高調波が発生させる手法である。高次高調波発生は強い非線形現象であるため、1~2周期程度の幅を持つ光パルスの場合、最も強度の高い電場ピークでのみ実質的に単一のアト秒パルスが発生する(振幅ゲート法)。もう一つは、高次高調波が原理的に直線偏光の基本波で最も効率良く発生することを利用する方法である。互いに逆回転する円偏光を基本波とし、重ね合わせることによって、半周期程度の時間領域にだけ直線偏光の部分を作り出すことにより、アト秒パルスの発生を基本波の半サイクルのみに限定することができる(偏光ゲート法)。3つ目は、光電場イオン化の高い非線形性を利用して、サブサイクルの立ち上がりでイオン化させることによってアト秒パルス列発生を強制的に遮断する方法(イオン化ゲート法)である。我々は、振幅ゲート法による単一アト秒パルス発生と、偏光ゲート法をさらに改良した二重光学ゲート(Double Optical Gate: DOG)法¹⁰⁾による単一アト秒パルス発生の二種類の方法を実現している。

図4は、CEP制御したパルス幅6 fs(2周期程度)の基本波より発生させた単一アト秒パルスのスペクトルである。¹¹⁾ 振幅ゲート法の特徴は、基本波のCEPによって、切り出されるアト秒パルスの本数が変わり、その結果スペクトルの形が変化することである。ここでは、高次高調波の最大エネルギー領域(カットオフ領域)に対応する100 eV近傍で、CEP依存にしたスペクトル変化が明瞭に見られる。パルスの包絡線ピークと光電場ピークが一致し、パルス内に最も強い電場ピークが一つのみのコサイン型のパルスの場合、単一アト秒パルスに特徴的な連続状のスペクトルを示している(図4上)。一方、コサイン型から位相が $\pi/4$ ずれたパルスの場合、パルス内に最も強い電場ピークが2つ存在するため、発生時間が半周期分ずれた2つのアト秒パルスが発生する。それが干渉した結果、櫛状のスペクトルが現れることになる(図4下)。このように、

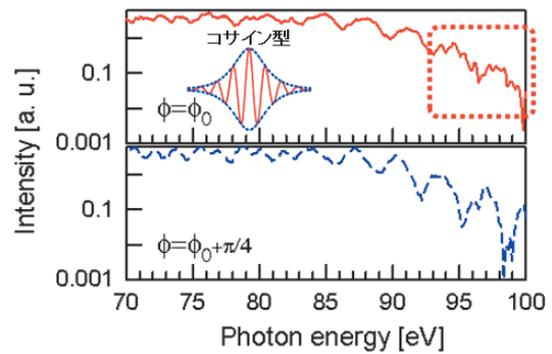


図4 振幅ゲート法により発生させた単一アト秒パルスの連続状スペクトル。コサイン型のCEP(ϕ)に安定化させた6 fsの基本波パルスをNeガスに集光すると、100 eV近傍のカットオフ領域で単一アト秒パルス発生を示す連続状スペクトルが発生する(上図点線枠内)。CEPをずらすと、2つ以上のアト秒パルスが発生することから、干渉効果により櫛状のスペクトルとなる(下)。

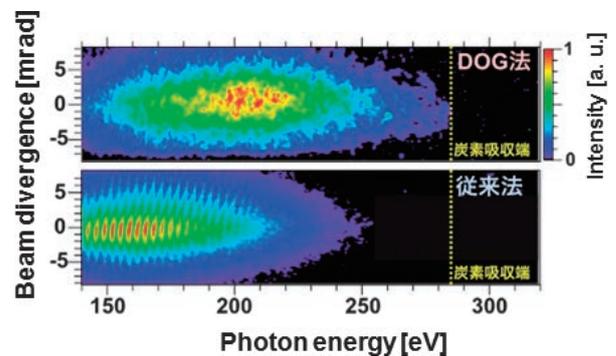


図5 二重光学ゲート(DOG)法により発生させた「水の窓」領域単一アト秒パルスの連続状スペクトル(上)。高次高調波のカットオフエネルギーが290 eVに位置する炭素のK吸収端(黄点線)に到達している。DOG法を用いない場合(従来法)、櫛状のスペクトル部分が残るとともに、カットオフエネルギーも相対的に伸びない(下)。

CEP安定化技術は、単一アト秒パルス発生に不可欠な技術である。

一方、図5は、DOG法で発生した「水の窓」領域の単一アト秒パルスのスペクトル画像である。¹⁰⁾ 「水の窓」領域とは、生体細胞の主成分である水には透明である一方炭素に対しては不透明な、波長2.3~4.4 nmの軟X線を指す。従って、この波長領域の光源は、生体細胞を高いコントラストで計測可能な軟X線顕微鏡用の光源として期待されている。DOG法は、偏光ゲート法と、基本波とその倍波を重ね合わせることによって、最も強い電場ピークとその隣り合う電場ピークの強度コントラストを高める一種の振幅ゲート法を組み合わせた、単一アト秒パルス発生手法である。我々は、波長790 nmの基本波を短焦点レンズで高密度に集光することで、290 eVの炭素のK吸収端にまで達する、明瞭な単一アト秒パルスの超広帯域スペクトルの発生に成功した。このときの基本波のパルスエネルギーは、わずか250 μ J/pulseであり、「水の窓」領域の高次高調波発生としては世界最小である。フーリエ限界パルスを仮定すると、本スペクトルの帯域幅からそのパルス幅は、時間の原子単位である24 asよりも短い約20 asと見積もられ、極限的に短い単一アト秒パルス発生を示唆している。

以上のようにアト秒パルスのエネルギー領域を拡大することにより、これを光源とするアト秒時間分解分光において、様々な材料が計測可能となる。特に、炭素のK吸収端をカバーする「水の窓領域」の単一アト秒パルスは、近年注目が集まっているナノカーボン材料だけでなく、将来、生体材料への適用も期待できる。

4. アト秒高次高調波光源を用いた新規超高速分光法の開発

これまでの超高速光物性研究では、主に可視から近赤外領域の光パルスを、物質系に瞬間的にエネルギーを注入する励起源として用い、励起された物質が元の状態に戻るまでの時間変化を計測して、素過程である電子や格子の散乱過程を理解することが主なターゲットであった。また、このような物理過程を利用して、物質状態を制御する光スイッチングといった応用技術も発展してきた。一方、励起光の電場の一周期よりも短いアト秒時間スケールでは、光を数100 THzという超高周波数の電場として取り扱う方が適切となる。このような光電場と物質系、特に電子系とのコヒーレントな相互作用が引き起こすダイナミクスを探求することは、従来の包絡線近似や回転波近似の枠組みを超えた光物性を切り拓くことにつながる。単一アト秒パルスをプローブとして用いたアト秒時間分解分光法は、このようなアト秒時間スケールの光物性を探索するための強力な実験手法である。この目標のために、我々は、まず高次高調波アト秒パルス列を光源とした超高速時間分解分光法の開発に取り組み¹³⁾ これをさらに単一アト秒パルス光源に置き換えることを目指した。最近では、単一アト秒パルスによる希ガス原子の過渡吸収分光法にも成功した¹⁴⁾

図6は、Ne原子の内殻励起のリユードベリ状態における緩和過程をアト秒時間分解過渡吸収分光法で観測した例である。本研究では、パルス幅約7 fsの近赤外パルスをポンプ光とし、パルス幅約200 asの単一アト秒パルスをプローブ光とした時間分解ポンプ・プローブ分光装置を構築し、単一アト秒パルスによるNeの吸収スペクトルを遅延時間の関数として計測している。図6(a)は、本装置で計測したNeの2s-3pリユードベリ準位の吸収スペクトルである。この準位は、自動イオン化を伴うことから、いわゆるファノ型の非対称な吸収スペクトル形状を示す。そこに近赤外パルスを照射すると、近赤外光とアト秒パルスが時間的に重なる前(-16 fs)では、吸収スペクトルに変化は見られないが、両者が重なると(+5 fs)、吸収ピークがほぼ消失する。その後、近赤外光がアト秒パルスよりも遅れてNeガスに到着すると(+24 fs)、吸収ピークは再び回復する。吸収ピークの消失は、アト秒パルスにより2s-3pリユードベリ状態に励起された電子が、近赤外パルスによってさらに高いエネルギー状態まで励起される二重共鳴吸収過程と理解できる(図6(b)点線内)。吸収ピークを遅延時間の関数として計測することにより、2s-3pリユード

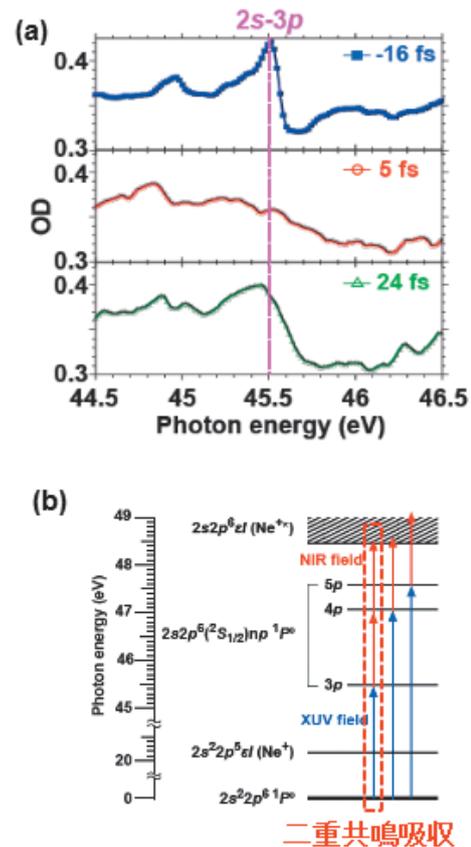


図6 Ne原子におけるアト秒時間分解吸収分光実験。(a) 2s-3p内殻励起リユードベリ状態の吸収スペクトルをアト秒パルスと近赤外パルスの遅延時間の関数として測定。(b) 本実験におけるNeのエネルギーダイアグラム。単一アト秒パルス(XUV field)により2s-3p内殻準位を励起し、それに続く近赤外パルス(NIR field)でイオン化連続状態まで二重共鳴励起を起こす。その結果、2s-3pのNeの吸収スペクトルは弱まる。

ベリ状態の寿命が約50 fsであることも計測できた。このように、アト秒時間分解吸収分光は、従来、高いエネルギーかつ高速緩和のため計測できなかった内殻励起状態の計測に強力な手法であることを示している。さらに我々は、2s-3pの共鳴準位とイオン化の連続準位が干渉している点に着目し、スペクトル干渉法(SPIDER法)による位相再構築の原理を応用することによって、2s-3pリユードベリ状態における双極子放射の電場位相を再構築することに成功した¹⁴⁾

以上の研究では、最も単純な希ガス原子が計測対象であったが、ベタヘルツエンジニアリングの要素技術としては、固体材料におけるアト秒電子系ダイナミクス計測への応用が必須となる。我々は、その第一歩として、高次高調波を用いたフェムト秒時間分解光電子分光法を実現し、半絶縁半導体GaAsにおける光励起キャリアの輸送ダイナミクス計測に応用した^{15,16)} 本計測法の特徴は、92.5 eVのエネルギーを持つ59次高調波をプローブ光として用いることにより、原子1~2層レベルの高い表面敏感性ととともに、内殻準位の光電子分光を実現している点にある。表面における内殻光電子ピークのシフトは、固体の表面ポテンシャルを反映することが知られており、光励起の結果生ずる半導体の表面ポテンシャルの時間変化を、光電子エネルギー

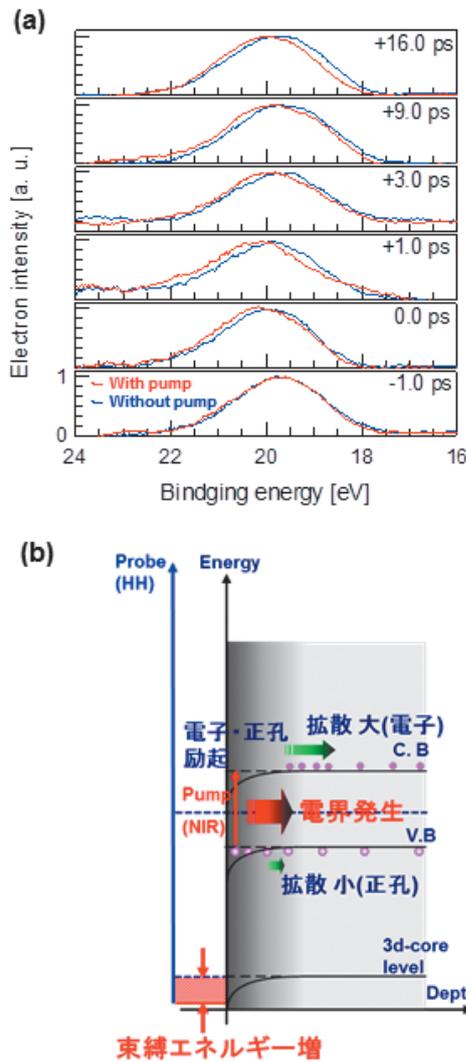


図7 半絶縁GaAsにおけるフェムト秒高次高調波を用いた時間分解内殻光電子分光実験。(a) 100 fsの近赤外パルス照射によるGa-3d内殻光電子エネルギースペクトルの時間変化。近赤外パルスの無照射時(青)と比べて、照射時(赤)の3d内殻ピークが高エネルギー側へシフトしている。(b) 本実験における半絶縁GaAsのバンド模式図。近赤外光照射により励起された電子・正孔は、表面から内部へと拡散するが、拡散係数が相対的に大きい電子が正孔より速く拡散するため(光デンプー効果)、電子と正孔が空間分離する。その結果生じる電場が表面ポテンシャルを変化させる。

のシフトとして直接計測できる。半導体における表面・界面近傍のポテンシャルによるキャリア輸送ダイナミクスは、光検出や光起電力(太陽電池)などを支配する光電変換機能のスピードや効率を決める重要なパラメータであり本計測手法はその計測に極めて有望である。

図7(a)は、本装置で計測した半絶縁GaAs(001)のGa-3d内殻光電子ピークに対応する光電子スペクトルである。100 fsの近赤外パルス光照射から1~2 psの間に、Ga-3dピークが高い束縛エネルギーへシフトしていることがわかる。これは生成した電子-正孔対が、拡散係数の大きな違いによって空間分離し、その結果新たに生じる電場が表面ポテンシャルを変化させることに対応する(図7(b))。このよ

うな現象は光デンプー効果として知られており、ピークシフトが起こる時間スケールは拡散による表面キャリア輸送に要する時間と考えられる。本研究は、光デンプー効果によるキャリア輸送ダイナミクスを時間領域で初めて計測した例である。以上のように、高次高調波を用いた光電子分光法は、フェムト秒時間分解能で電子状態を直接的に計測できる。本手法と単一アト秒パルスを組み合わせると、アト秒時間分解計測へと拡張することにより、固体電子系におけるアト秒ダイナミクス計測に利用することが可能である。

5. おわりに

ここで紹介した、アト秒パルス発生技術や光周波数コム技術といった光源技術は、アト秒光物性研究へと展開することによって、将来的には、ペタヘルツ周波数の電場を自在に操り、電場によって引き起こされる電子系応答を巧みに利用した「ペタヘルツエンジニアリング」分野を切り拓いていこう。現在のところ、筆者の研究チームは、5名の専任の研究員と4名の学生からなるこじんまりとしたものであるが、企業における基礎研究を担う研究チームとして、最先端の基礎的な光物理を、革新的な光技術へと発展させるべく日々研究を進めている。本稿により、我々とともに「超高速光物理」研究に参加したいなどの興味を持って頂ければ、筆者の望外の喜びである。

本稿で紹介した研究とともに推進しているNTT物性科学基礎研究所「超高速光物理」研究チームの増子拓紀博士、石澤淳博士、加藤景子博士、日達研一博士および実習生の角井貴信氏(横浜国立大学)、山口量彦氏(東京理科大学)に感謝する。また、4節で紹介した単一アト秒光物性に関する研究は東京理科大学須田亮教授との共同研究であり、ここに感謝を表したい。

参考文献

- 1) NTT物性科学基礎研究所のホームページ <http://www.brl.nitt.co.jp/J/>
- 2) T. Udem, R. Holzwarth and T. W. Hänsch: Nature **416** (2002) 233.
- 3) P. B. Corkum and F. Krausz: Nat. Phys. **3** (2007) 381.
- 4) D. J. Jones, *et al.*: Science **288** (2000) 635.
- 5) A. Ishizawa, *et al.*: Electron. Lett. **46** (2010) 1343.
- 6) A. Ishizawa, *et al.*: Opt. Express **21** (2013) 29186.
- 7) K. Kato, *et al.*: Appl. Phys. Lett. **97** (2010) 121910.
- 8) K. Kato, *et al.*: J. Appl. Phys. **111** (2012) 113520.
- 9) M. Chini, K. Zhao and Z. Chang: Nat. Photon. **8** (2014) 178.
- 10) H. Mashiko, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 103906.
- 11) H. Nakano, K. Oguri and A. Ishizawa: The 22nd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, MN3 (2009).
- 12) H. Mashiko, K. Oguri and T. Sogawa: Appl. Phys. Lett. **102** (2013) 171111.
- 13) K. Oguri, T. Nishikawa, T. Ozaki and H. Nakano: Opt. Lett. **29** (2004) 1279.
- 14) H. Mashiko, *et al.*: Nat. Commun. **5** (2014) 5599.
- 15) K. Oguri, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 072401.
- 16) K. Oguri, *et al.*: Appl. Phys. Express **8** (2015) 022401.

(2015年1月9日原稿受付)

上田和夫 〈JPSJ編集委員長〉

8月の編集委員会では注目論文の選出を見送ることになった。JPSJの12月号では特集記事が出版されているので、その内容について簡単に紹介する。

JPSJ 特集 “Recent Progress in Science of Atomic Layers” (<http://journals.jps.jp/toc/jpsj/2015/84/12>)

A. Geim と K. Novoselov らによりグラフェンの単層分離と伝導測定が報告されて以来、10年程の間に原子層物質の研究は急速に進展し、1つの大きな学問の潮流を形成しつつある。グラフェンにおける質量ゼロのディラック電子系が示す特異な量子現象は基礎物理学的な興味を集める一方、高い電子移動度や大きな可視光吸収率などの優れた物性は応用上も注目され、物性物理、原子層合成、デバイス応用など様々な角度から膨大な研究が行われてきた。さらに近年では、遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) やフォスフォレンなど、グラフェンに続く新規原子層物質 (2次元結晶) や、それらの複合原子層へと分野の拡大が続いている。

こうした状況に応じて、わが国では2013年度に科学研究費新学術領域研究「原子層科学」が発足し、物理、化学、応用物理にわたる学際的な研究者コミュニティが形成された。この機会を捉えて、原子層科学に関する世界の研究の

現状をレビューすると共に、わが国の最新のアクティビティを網羅しておくことは大いに意義があると考えられる。そこで今回 JPSJ では、原子層科学に関する特集 (Special Topics) “Recent Progress in Science of Atomic Layers” を企画した。本特集は JPSJ 誌第 84 巻 12 月号 (2015 年) に掲載される。分野の学際性に鑑み、物性実験や理論に加え、化学や応用物理にまたがる幅広いトピックスの論文を集めている。

グラフェンの物性に関しては、六方晶窒化ホウ素 (h-BN) 薄膜上にグラフェン素子を形成する高品質化の手法が普及したことにより、顕著な量子伝導現象の観測が可能となった。本特集でも、量子 Hall エッジ状態間の量子干渉 (T. Machida, *et al.*), アンチドット格子や周期変調系の伝導特性 (R. Yagi and A. Endo), グラフェン系におけるバレーホール効果 (M. Yamamoto, *et al.*) などが紹介されている。グラフェンや TMD の物性に関する他の話題としては、原子レベル高分解能透過型電子顕微鏡による原子層のその場観察 (Z. Liu, *et al.*), TMD 単原子層の特異な光学物性 (K. Matsuda), グラフェン・ナノチューブのテラヘルツ光学応答 (Y. Kawano), グラフェン積層系で生ずる Moire 超格子の量子効果の理論 (M. Koshino and P. Moon), グラフェン・h-BN 積層系の第一原理計算 (Y. Sakai, *et al.*) などが取り上げられている。またグラフェンや TMD に続く新規原子層物質として、酸化グラフェン (S. Obata, *et al.*), 原子層トポロジカル絶縁体であるシリセンやゲルマネン (M. Ezawa), 応用上有望な原子層半導体フォスフォレン (S. Fukuoka, *et al.*) が紹介されている。

原子層の作製については、劈開法の出発点となる良質 TMD 単結晶の合成 (K. Ueno), SiC 熱処理によるエピタキシャルグラフェンの作製 (M. Kusunoki, *et al.*), CVD 法によるグラフェン・TMD 原子層の成長 (R. Kitaura, *et al.*), 分子連結による原子層の化学合成 (H. Yorimitsu and M. Bhanuchandra) の話題が取り上げられている。またデバイス応用について、多層 TMD トランジスタの性能向上要因が論じられている (S.-L. Li and K. Tsukagoshi)。

以上のように、本特集で2015年夏の時点における原子層科学研究の概要を把握することができる。読者の原子層科学に関する現状把握と将来展望に役立てば幸いである。

〈情報提供：長田俊人 (東京大学物性研究所)
齋藤理一郎 (東北大学理学研究科物理学専攻)〉

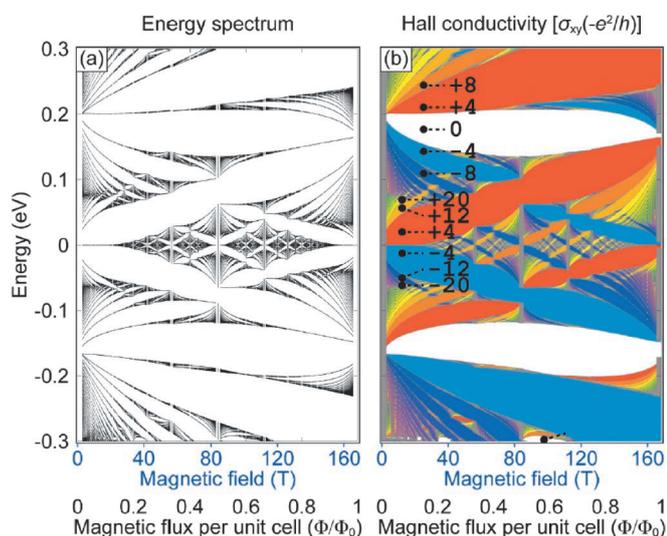


図1 2枚のグラフェンを僅かに回転して積層した “twisted bilayer graphene” の磁場中エネルギー準位 (Hofstadter の蝶) と各ギャップ内の量子 Hall 指数 (TKNN 数). ナノスケールの長周期を持つ Moire 超格子により、通常の結晶では超強磁場でのみ期待できる量子効果の観測が実験室磁場で可能になる。[M. Koshino and P. Moon: “Electronic properties of incommensurate atomic layers” より]

夫婦で物理を？

森井政宏 〈ハーバード大学〉

夫婦そろって物理学者というのは本当に珍しいのでしょうか。この稿の執筆を依頼してこられた岩崎昌子氏とご主人はどちらも素粒子実験をしておられます。私の研究グループのポストクのうち既婚の二人の配偶者はどちらも物理学者です。物理に女性研究者が少ないという残念な現実を計算に入れれば、物理屋夫婦は意外に多いとさえ思えます。いやさほど意外でもないのかもしれませんが。物理屋の仕事というのは正直言って普通の人あまり気にしないことにこだわることです。自分がこだわらずにはられないことを理解できる人とできない人と、あなたならどちらを結婚相手に選びますか？

とはいえ物理屋夫婦の現実はいささか甘くありません。米国の素粒子実験を例にとると大学助教授 (assistant professor) の公募は1年に20件程度。私のように同分野のポストク同士で結婚するとたちまち夫婦が競争相手になってしまいます。夫婦そろって助教授になったらなつたで、二人ともテニユア (終身雇用権) がとれるかどうかという大問題が待っています。(北米の大学では、一般に assistant professor は任期付きの職です。) いわゆる「二体問題 (two-body problem)」, すなわちどうやって同じ場所に職を見つけて生き残るか、は物理屋夫婦の最大の頭痛の種です。

ハーバードの物理学科は学部生、大学院生からポストクまでの約1/4が女性で占められます。教授と助教授は約40人のうち5人が女性で、米国の大学としては多い方だという話です。2007年のAPSの統計によれば米国のトップ50大学の物理学科の教授、助教授の9.5%が女性でした。なぜポストクと助教授の境界で女性が激減するのかについては様々な理由が挙げられますが、二体問題が重要な要素であることは間違いのないでしょう。米国の女性物理学者の7割は科学者と結婚していますが、男性物理学者の場合は2割以下です。物理屋夫婦の生き残りが困難であればあるほど、女性物理学者が少なくなることは必然的です。

教授職を持っている物理屋夫婦の実数の統計は聞いたことがありません。私が個人的に知っているのは、二人とも教授なのが6組と女性のみ教授なのが4組。夫婦が同じ大学に勤めている例は比較的若いカップルに多く、大学側が二体問題に特別な配慮をするケースが増えていることを物語っています。実際にどのような配慮がなされるのかはデリケートな問題で公に議論されることはまずありません。夫婦を採用するために大学が物理学科に助教授のポストを一つ追加したという話は時々聞きます。また、女性だけが教授で男性がポストクなどの研究職を持っている例はこの10年で増えました。しかしこの状況から夫が教授職をつ

かんだケースは夫婦ともに他大学に移った一例しか見たことがなく、将来彼らがどうなるのかやや心配です。

私と妻は1999年、スタンフォード線形加速器センターでの素粒子実験、BABAR実験がデータ収集を始めた直後に結婚しました。当時二人ともポストク3年目だった我々の計画は、年上の私が先に助教授職を探して、成功したら妻が同じ街にポストクを探す、というはなはだ楽天的なものでした。2000年にハーバードから助教授のオファーを受けたときにまさきに考えたことは、ボストンならばハーバード以外にもMITをはじめ物理の強い大学がたくさんあるので有利ではないかということでした。幸いMITにはBABAR実験に参加しているヤマモト教授 (Richard Yamamoto) がおられたので、電子メールで問い合わせると「ガブリエラ (妻の名) なら喜んで研究員 (Research Scientist) に雇う」という心強い返事が返ってきました。同じ街にある2つの大学に夫婦で就職できるチャンスはそう多くありません。ハーバードでテニユアがとれるのかとか、MITで研究員から昇進の道はあるのかといった心配はありましたが、一家三人 (長男が生まれたばかりだった) でボストンに移住することで意見が一致しました。

妻はMITで機会に恵まれ、2002年にパッパラルド・フェロー (Pappalardo Fellow) に選ばれた後、2003年には助教授に採用されました。とはいえ正念場はテニユア審査です。私は2007年にテニユアを取得しましたが、その前の一年間はストレスで集中力が低下して研究の効率が上がらず鬱々とした日々が続きました。テニユア取得の難しい大学は助教授の離婚率が高いと聞きますが無理もない話です。妻は私がどういう苦勞をして何を考えているのか知ってあまり (全然ではなく) 文句を言わずにサポートしてくれました。物理屋夫婦の強みだと思います。

妻のMITでのテニユア審査は2009年。前評判はなかなか良くて「まずは大丈夫」と聞いていたのですが、落とされてしまいました。2009年は不動産バブルに始まった不景気が米国の大学を直撃した年で、どこの大学も経費削減に必死でした。本当のところは永遠にわかりません。

予想外の展開に啞然とした後は再び作戦会議です。テニユアが取れなかった場合、一年以内に他所に職を見つけないといけないので、落ち込んでいる暇はありません。ボストン近郊の大学で教授職を一つ見つけるか、ボストンを離れて職を二つ見つけるか、両方の可能性を同時進行で探します。9カ月かけてオファーを2件もらい、最終的にはボストン近郊にあるブランダイス大学を選びました。

我が家の子供たち (一男一女) はどちらも妻が助教授に

なる前に産まれました。私の知っている物理屋夫婦には子供のいる例があまりありません。助教授が子供を出産する場合半年の育児休暇が与えられ、その分だけテニユア審査が延期されるのが普通です。しかし、残念ながら研究は育児を待ってくれません。出産で研究を半年中断すると他の大学のグループに追い抜かれてしまい、追いつくのに二年かかってしまいます。(ちなみに育児休暇は男性側が取得することも可能なので、出産を理由に講義を半年休んで研究に専念するという輩も後を絶ちません。)これには本当に良い解決法が見当たりません。

テニユアの審査は物理学科の教授会、つまりは年配の男性が大多数の組織の秘密会議で行われます。審査基準は大学ごとに多少異なりますが、「ハーバード大学の教授にふさわしい業績」なんてものを客観的に定義できるわけがありませんから、最終的には教授たちの主観に頼ることは避けられません。自分の子供のオムツを替えたことがないこ

とを誇らしげに語る老教授(実話)が、育児と研究の両立に苦しむ若い助教授の将来を決める一端を担っている限り二体問題の解決は困難です。

米国の大学は二体問題に非公式かつケースバイケースに対処することによっていくらかの成果を上げています。それでも物理屋夫婦のサバイバルには当事者の意志力と周囲の人たちの熱意が必須です。物理屋夫婦を取り巻く環境は私が体験した過去15年間だけでも著しく変化しています。新しく雇われた助教授夫婦たちがどうやって生き延びるのか、出産、育児と研究の両立は可能か、疑問の種は尽きません。

非会員著者の紹介

森井政宏氏：ハーバード大学教授。専門は素粒子実験物理学。現在はLHCのATLAS実験に取り組んでいる。

(2015年6月6日原稿受付)

応用物理 第84巻 第12号(2015年12月号) 予定目次

総合報告：グラフェンおよび2次元層状物質の成長とその物性
.....日比野浩樹
解説：面発光レーザーの進展.....小山二三夫
最近の展望
シリコン神経ネットワークプラットフォームの構築へ向けて
.....河野 崇
トポロジカル絶縁体を利用した
低消費電力型超格子相変化メモリ.....富永淳二
研究紹介
磁性カーボンナノチューブに関する第一原理計算.....岡田 晋

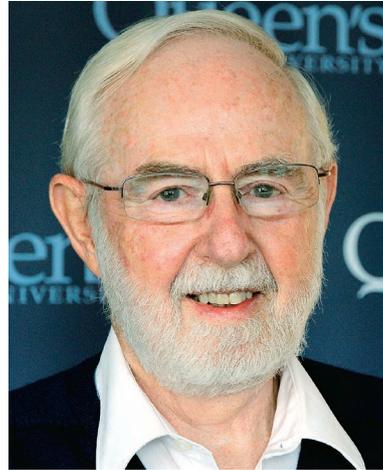
テラヘルツ放射顕微鏡開発の最近の進展と産業応用の可能性
.....斗内政吉
基礎講座：制御技術(パソコン)のコツ.....三田吉郎
焦点：研究データベースの進化と威力.....関 行宏
Student Chapter だより：広島大学SCの活動内容と
今後の取り組み.....Milantha De Silva
連載：科学を詠む⑫ 科学技術と人間.....松村由利子
Science As Art：MoS₂/WS₂のXmas飾り.....羽山和美, 他

梶田隆章氏のノーベル賞受賞

荒船次郎* ◇



梶田隆章氏 (東京大学提供)



Arthur B. McDonald 氏 (Queen's University 提供)

今年のノーベル物理学賞は10月6日発表され、梶田隆章さん(東京大学宇宙線研究所長)に決まった。おめでとうございます!

「ニュートリノ振動の発見、したがって、ニュートリノの質量の存在の発見」に対する授賞で、素晴らしいニュースであり、新聞やテレビを見ると日本中が喜びを共にしているようだ。

このニュートリノ振動の発見は1998年に高山で開かれた国際会議で、梶田さんにより発表された。観測は岐阜県の神岡にある「スーパーカミオカンデ」と呼ばれる5万トンの水タンクと11,000本の光センサー(光電子増倍管)を備えた地下1,000mの観測装置により行われ、発表はその完成後間もない2年目のことだった。Pauliによる素粒子ニュートリノの提案以来70年近くも謎だった「ニュートリノに質量はあるのか?」という問題に、初めて答を出した講演だった。梶田さんの発表が終わると、まるで魅力ある音楽会の演奏終了時のように大きな拍手が会場に長く続いてなかなか鳴り止まなかった。この発表の翌日、米国の大統領クリントンがMITの卒業式のゲスト講演で

このニュートリノの質量の発見に言及したことも話題になった。素粒子物理学は当時、「標準理論」がほぼ完成し、理論家も実験家もそれを超える現象の発見を渴望していた。ニュートリノの非常に小さな質量の存在の発見は、標準模型を超えて未知だがより深い理論への重要な手掛かりの発見であって、その重要な発見に立ち会った感激が、あの熱烈な拍手となったのだろう。

梶田さんを中心とする解析で発見された「ニュートリノ振動」の現象は宇宙線が大気と衝突して生成するニュートリノ(大気ニュートリノと呼ばれる)の振動である。ニュートリノには3種類あって、電子ニュートリノ ν_e 、ミューニュートリノ ν_μ 、タウニュートリノ ν_τ と呼ばれることはよく知られている。ニュートリノは、作られた直後は、この3つのうちのどれか1つに決まっている。宇宙線が大気と衝突すると、パイ中間子が作られ、中間子が2段階で崩壊するときは、2つのミューニュートリノ(ν_μ)と1つの電子ニュートリノ(ν_e)を放出する。したがって、大気ニュートリノを観測すると、 ν_μ/ν_e の比が2として検出されるはずである。ところが観測すると、上から降って来るニュートリノは予想通り ν_μ/ν_e 比が2

で、それぞれの絶対量も予想通りだが、地球を下から貫いて来るニュートリノの ν_μ/ν_e 比はほぼ1で、 ν_μ の量が予想より異常に少ない、ということが発見されたのである。これは ν_μ が飛ぶとき、飛距離が短ければ変わらないが、飛距離が地球半径くらい長いと ν_μ は途中で別のニュートリノ、恐らく、主にタウニュートリノ(ν_τ)に名前を変える「ニュートリノ振動」の現象が起きたことを意味している。上記の3種のニュートリノは実は質量の固有状態にはないことからこれが起きる。質量の固有状態も3種類あって ν_1, ν_2, ν_3 と呼ぶとき、 ν_e, ν_μ, ν_τ はそれらの線形結合で $\nu_a = \sum_{i=1}^3 U_{ai} \nu_i$ ($a=e, \mu, \tau$)で表される(行列 U_{ai} はMNS行列と呼ばれ、クォークに関する小林・益川行列と同様な意味を持つ)。ニュートリノの質量固有値が異なると線形結合係数が時間的に異なる振動をするため ν_e, ν_μ, ν_τ は初めと異なり互いに混合し名前が振動する。それがニュートリノ振動である。ニュートリノ振動はニュートリノが異なる質量を持ち、MNS行列が非対角要素を持つとき起きるので、ニュートリノ振動の発見は、質量の存在の発見を意味したのである。

大気ニュートリノ振動は旧カミオカ

* 東京大学名誉教授

ンデの時代にも、既に兆候はとらえられていたが、欧州のFrejusトンネルの実験などでは観測されず、国際的に未だ認知はされていなかった。非常に興味深かったので、細部の分からないところを質問すると、実験グループの誰もが、詳しいことは梶田さんに聞いて下さい、と言ひ、発見の中心にいた未だ若い梶田さんに、私は何度も質問した。どんな質問にも、嫌がらずに親切に明快に答えていただき、私は、旧カミオカンデの時代から振動の存在を信じるに至ったが、旧カミオカンデからスーパーカミオカンデになって、データ量も精度も格段に向上し、1998年に梶田さんは誰にも疑いようの無い明瞭な解析結果としてニュートリノ振動を示し、国際的にも認知させた。その発表は歴史的と言ってもよいほどの快挙であった。

一方、太陽から来る電子ニュートリノ(太陽ニュートリノと呼ばれる)も振動する。太陽からのニュートリノが理論的予想より少ないことに現れていた。それは長い時間をかけて複数の観測装置の結果の総合として理解され、確立したが、その後カナダの重水を使った太陽ニュートリノ観測装置SNOが装置を改良し、SNO単独でも振動を証拠づけることができた。今回はSNOの責任者のマクドナルドさんがノーベル賞の共同受賞者に選ばれた。重水はニュートリノの衝突断面積が軽水より大きいのと複数の異なる反応を区別できる点で有利だが非常に高価である。カナダには重水型原子炉用の重水が大量にあるので、それを借用したユニークな実験だった。マクドナルドさんは日本にも何度も来てよく知られた温厚な人で、祝福すべき同時受賞であった。

なお、太陽ニュートリノの振動には、SNOに先行してスーパーカミオカンデによって中畑雅行さんや鈴木洋一郎さん等が行った精密な振動観測があり、神岡の地下装置Kamlandでは鈴木厚人さん等が行った原子炉ニュートリノの振動の観測があつて、これらの功績もSNOに劣らず重要なものであつたことは書いておきたい。

今回のノーベル賞の対象となった研究のその後の発展としては、ニュートリノのMNS行列の最後の振動パラメータ U_{e3} がT2K実験として東海村の加速器ニュートリノを神岡に照射する実験や中国のDaya Bayの原子炉の実験等で決められ、MNS行列が1つの複素数の位相の不定性を除いて全て決まった。この位相(CP対称性の破れの位相)の決定と、また、ニュートリノ質量の絶対値の決定(振動観測では質量の2乗の差しか決定できない)やニュートリノは本質的に粒子と反粒子は同じなのか否か(Majorana型か否か)の決着などは依然として重要な実験課題である。

ニュートリノ研究を振り返ってみると、上記のような意味でのニュートリノ振動は1962年に米国におけるニュートリノに2種類(ν_e と ν_μ)あることの発見を受けて、同年、牧二郎、中川昌美、坂田昌一等がニュートリノ振動を予言したのが最初であった(それより早いPontecorvoによる別種のニュートリノ振動の予言があるが)。また、大気ニュートリノの観測を振り返ってみると、世界で初めてそれが観測されたのは、1965年に三宅三郎等によるインドのKGF鉱山の日印英共同地下実験であった。また、ニュートリノに質量があるとすれば、それは非常に小さなものであることから、1979

年に柳田勉は、質量の無いニュートリノが非常に重いニュートリノと混合することで、重いニュートリノの質量に反比例した非常に小さいニュートリノ質量が生じるsee-saw機構を提唱し、小さなニュートリノ質量が逆説的だが標準模型を超えた超高エネルギーの物理を反映していることを示唆した。カミオカンデでは、1987年の小柴昌俊さん等による超新星からのニュートリノバーストの観測はまだ記憶に新しい。小柴さんの考案したカミオカンデのアイデアは、その後、世界中にニュートリノ観測装置がたくさん作られた際の標準的なモデルまたは出発点となっている。また、スーパーカミオカンデとKamlandの太陽と原子炉のニュートリノ振動に関する成果など、梶田さんへのノーベル賞を機会に振り返ると、日本のニュートリノ研究の活発な背景も実感される。今回のニュースは、旧カミオカンデを支えた故須田英博さんも、スーパーカミオカンデを率いた故戸塚洋二さんも、天国で待ちかねていたことだろう。

梶田さんのニュートリノ質量の発見という快挙に対するノーベル賞受賞はきっと若い人たちの大きな励みになるに違いない。カミオカンデ、スーパーカミオカンデに微力ながらも理論家としてお手伝いしたこともあつて、一層、梶田さんを中心にこのような素晴らしい成果が上がり、それがノーベル賞という形で評価されたことが本当に喜ばしい。梶田さん、そしてカミオカンデグループ、そしてそれを支えた物理の先生方、ノーベル賞おめでとうございませう。梶田さんの、ますますのご活躍を祈念しています。

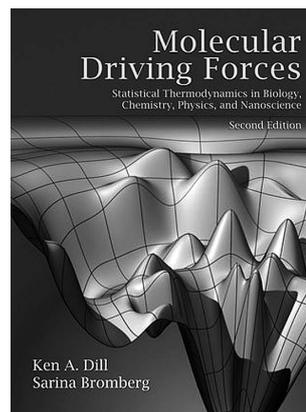
(2015年10月21日原稿受付)

K. A. Dill and S. Bromberg

Molecular Driving Forces; Statistical Thermodynamics in Biology, Chemistry, Physics, and Nanoscience

Garland Science, New York, 2010, XX + 756p, 27×21 cm, \$ 162 [大学院・学部向]
ISBN 978-0-815-34430-8

石崎 章仁 (分子研)



Copyright 2010 from *Molecular Driving Forces: Statistical Thermodynamics in Biology, Chemistry, Physics, and Nanoscience* by Dill & Bromberg. Reproduced by permission of Garland Science/Taylor & Francis LLC.

米国でポストドクの頃、助教授採用が決まったばかりのオフィスメイトが「化学の学生に統計熱力学を教えることになった」と嬉しそうに見せた大判の書籍——エネルギーランドスケープが描かれた美しい表紙とその印象的なタイトル *Molecular Driving Forces* に魅せられたことを思い出す。本書は、物理化学・生化学・医薬品化学・生物物理学・物質科学・環境科学など分子および分子集団の振る舞いを理解することがキーとなる広い分野の学部上級生および大学院生のために書かれた統計熱力学の教科書である。

国内外において統計熱力学の名著は枚挙に遑がないが、本書の出色は著者らの言葉 “making models, even very simple ones, is a rout to insight and to understand how molecules work” そして “Models are mental toys to guide our thinking” に現れている。例えば、理想溶液など抽象的で難解な議論になりがちな溶液を、大胆に格子モデルとして取り扱い組合せ論を用いた見通し良い計算を示すことで理論の本質を鮮やかに浮かび上がらせている。もちろん、後に液体を格子モデルとして扱うことの妥当性を振り返るなど教育的配慮にも抜かりがない。その後も表面張力・

リガンド結合・吸着などで繰り返し格子モデルがその威力を発揮する。

また、巨視的に得られた Fick 則や Fourier 則の微視的な意味を所謂 dog-flea model を用いて議論しながら、いつのまにか読者は揺らぎの定理という高みに辿り着いてしまう。関連して、分子集団の平均的な振る舞いと個々の分子の振る舞いの違いを強調する中で単一分子分光実験において重要となる待ち時間分布が議論される。これらは非平衡統計物理学などを専門としない学生・研究者には馴染みの薄いトピックスであるが、最近の単一分子分光法や一分子生物学の進展を鑑みると非常に教育的であると思う。

さらに、通常の統計熱力学のコースで協同性が重要となる例といえば相転移やヘリックス・コイル転移であるが、本書では転移現象に加えてヘモグロビンなど一つの受容体タンパク質が複数のリガンド分子と結合する際のアロステリック効果が取り上げられる。協同的な受容体リガンド結合を記述する理論手法として binding polynomials が導入され、分子システムにおける協同性がどのようにバイオナノマシンを駆動しているのかが概説されていて非常に興味深い。現在の分子科学・生物物理

学の前線のひとつは「分子それぞれの性質が生体系など高次構造を持つ分子システムの機能発現にどう結びつくのか？」という根源的な問に対して分野横断的に取り組むことにあるが、この意味で本書は示唆に富んだ良書である。

著者らは、本書を通して生物物理学の教育に多大な貢献をしているとして米国生物物理学会より 2012 年 Emily M. Gray Award を授与されている。物理学を専門とする方々には分子科学・生物物理学の面白さが垣間見える読み物としてぜひ手に取って頂きたい良書であるし、また、化学・生物学・薬学など物理学を専攻しない学生の方々が統計熱力学を中心とする物理化学を学ぶ際の教科書・参考書として強くお勧めできると思う。

(2015 年 6 月 1 日原稿受付)

青木晴善, 小野寺秀也

強相関電子物理学

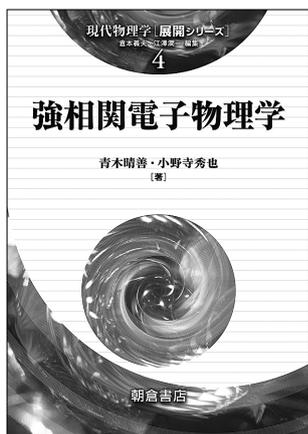
朝倉書店, 東京, 2013, v + 246p, 21×15 cm, 本体 3,900 円 (現代物理学 [展開シリーズ] 第 4 巻) [専門・大学院向]
ISBN 978-4-254-13784-2

世良 正文 (広島大)

本書は希土類化合物を主たるテーマとしている。希土類化合物では、一番大きな相互作用としてまず希土類元素のスピンの軌道相互作用があり、その

次に、結晶場、4f 電子間相互作用の順で続く。スピン-軌道相互作用が希土類化合物に特徴的な様々な興味ある現象を引き起こす源としてあり、往々に

して実験結果の解釈を難しくしている。ここに、4f 電子の局在と遍歴という大きな問題が絡み、重い電子系の物理という分野が大きく発展し始めたのは 1970 年代後半のことである。このような希土類化合物をテーマとして書かれた学部・大学院生向けの教科書あるいは専門書は少ない。本書は、内容が希土類化合物の物性の中でも磁性と重い電子状態に絞られているとはいえ、希土類の物性を学ぶ上で、格好の教科



書・参考書になるであろう。本書は第1~4章からなっている。各章は独立しているので読みたい章から読めばよいように構成されている。第1,3章は希土類化合物関連の基本的なことから、第2,4章は希土類化合物で発生する興味ある現象の具体例となっており、それぞれ過去30年程の間に発見・蓄積された結果と解釈が簡潔に述べられている。

本書で取り上げられている多極子秩序を歴史的に見ると、強四極子秩序を

示すTmZnなどの研究例はあったものの、大きくクローズアップされ始めたのは、本書でも詳しく触れられているCeB₆が反強四極子秩序という奇妙な秩序を示すことが明らかにされつつあった1980年代前半のことである。しばらく間をおいて2000年頃から様々なタイプの多極子秩序がスクッテルライト化合物を中心とした物質群で次々と発見されていった。CeB₆は磁場により反強磁性成分が誘起されるという奇妙な現象が中性子散乱実験で観測された1984年、ケルンでの価数揺動の国際会議でsummary talkを行ったBuyersが反強四極子秩序として解決したと淡々と話したのを覚えている。しかし、核磁気共鳴の実験結果の解釈との不一致という大きな問題は残されたままであった。実際その後CeB₆の実験的研究は遅々として進まなかったが、根本的な解決に至ったのは理論の立場からであり1997年のことである。中途半端なところで終わるとその背後に大きな未知の物理が潜んでいることを見落とすという良い例であったと思う

し、また、逆にそこが多様な多極子の物理の面白いところではないかと思う。

本書の第2章は、いろいろな顔を持つ種々の多極子秩序について具体的な結果とその解釈が簡潔に述べられており、読み応えがある。第4章では、4f電子の局在と遍歴の問題が絡む具体例が述べられている。この問題は古くからあった問題で未だにそのミクロな機構が解決されているとは言えないが、量子臨界点近傍で起こるメタ磁性転移や超伝導について最新の結果を基に簡潔に述べられている。希土類化合物の初学者はまず第1,3章を読むことで全体像を把握し、その後で、多極子、量子臨界点等についてより深く最新の研究を把握していけばよいであろう。その意味でも、本書は希土類の教科書と専門書の両方を兼ね備えた良書であり、本書をきっかけに希土類化合物に興味を抱く若手研究者が増えることを期待したい。

(2015年6月4日原稿受付)

江馬一弘

光とは何か；虹のメカニズムから「透明マント」まで

宝島社、東京、2014、238p、18×11 cm、本体900円 [学部・一般向]

ISBN 978-4-8002-1536-9

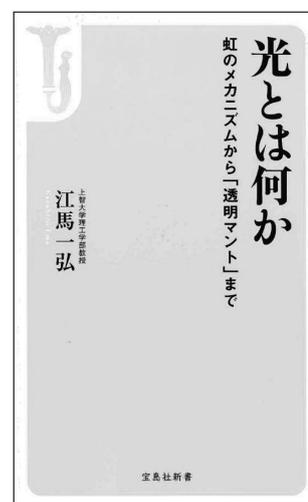
小芦雅斗 (東大院工)

本書は、光にまつわる様々なトピックを紹介していく縦書きの啓蒙書である。電磁波としての光の物理的な性質や、物質との相互作用について、身近な現象をいろいろと取り上げながら、数式を使わないわかりやすい解説が展開されていく。カラーの挿絵も効果的である。光は目に見えるので、その説明も「一目瞭然」、といきたいところだが、簡単な現象であってもその原理をわかりやすく説明するのはとても難しい。その点、本書は実にさりりと読めてしまう。それこそが本書が良書であることの証左であり、物理の面白さを人に伝えることを長年意識してきた著者による様々な工夫の賜物であろう。

また、物理の枠だけに留まらず、人や動物は色をどう認識するのか、とい

う話や、虹は七色ある理由など、心理学、生理学から文学歴史に至るまで、様々な蘊蓄が散りばめられていることも本書のもう一つの魅力である。筆者は一応光の専門家を自認しているが、それでも「へえ〜」と感心させられる場面が多々あった。最新の光技術についても、分量は少ないものの、光通信、光触媒、メタマテリアルなど、興味深い側面に絞って紹介されている。

本書を通読しながら、ふと、現代における啓蒙書の役割について考えさせられた。今は、いつでもどこでもネットに接続し、好きな情報を拾ってることができる。本書で取り上げている様々な疑問も、その一つ一つは、その気になってネットを検索すれば、どこかに答えが見つかるものである。では、



誰がその気にさせてくれるのか？ 本書では、新書サイズの中に光に関する疑問の数々が凝縮され、著者の軽妙な語り口に乗って、次々に登場する。読んでいて実に楽しいのである。トピックによってはもっと紙面を割いて詳しい説明をしてほしいと感じるものもあったが、そのくらいが現代の啓蒙書に求められるバランス感覚なのかもしれ

れない。

光についてそれほど詳しくない会員諸氏は、本書を読めば、短時間で光の正体のイメージを掴むことができるだろうし、いろいろなことをもっと知りたくなるに違いない。光に近い研究に携わっている方なら、身近な人に光の面白さをどんどん話したい、そんな気

分にさせられることだろう。光について教える立場の方なら、ちょっと悔しい思いを感じつつも、うまい教え方のヒントをいろいろと手に入れることができるだろう。「光と光技術の国際年」の締めくくりに、万人にお薦めできる一冊である。

(2015年9月12日原稿受付)

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

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



掲示板

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

人事公募

人事公募の標準書式(1件500字以内)

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

■分子科学研究所助教

[I]

1. 助教1名
2. 生命・錯体分子科学研究領域生体分子機能研究部門

3. 金属タンパク質の構造機能相関の解明に意欲的に取り組む実験研究者。主として当該研究領域の青野重利教授と協力して研究を行う。
4. できる限り早期
5. 6年を目途に転出を推奨
6. 修士課程修了者又は同等以上の学力者。
7. ○推薦書(自薦は不要) ○履歴書(所定様式、HP参照) ○研究業績概要(A4, 3頁以内。今後の抱負を含めてもよい) ○業績リスト(所定様式、HP参照) ○主要論文5編以内の論文別刷又はプレプリント各2部
8. 2015年12月10日(木) 消印有効
9. 444-8585 岡崎市明大寺町字西郷中38番地 自然科学研究機構岡崎統合事務センター総務課人事係 電話0564-55-7113
10. 詳細は<http://www.ims.ac.jp/recruit/2015/>参照。本研究所は男女雇用機会均等法を遵守し男女共同参画に取り組んでいる。

[II]

1. 助教1名
2. 物質分子科学研究領域分子機能研究部門
3. 有機半導体エレクトロニクスデバイスの発展に寄与する為の実験研究に意欲のある研究者。当該研究部門の平本昌宏教授と協力して研究を行う。
- 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10は[I]に同じ。

■京都大学研究員

1. 非常勤研究員若干名
2. 基礎物理学研究所
3. 理論物理学の研究
4. 2016年4月1日
5. 特に問題がなければ2018年3月末迄の2年間、評価の上更に1年延長
6. 2016年4月1日時点で博士号取得者又は取得確実な者
7. ○応募票 (<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~yitpsec.oj/H28ptr-form.doc> よりダ

- ウンロード) ○履歴書 ○発表論文リスト(共著の場合は共著者名明記、主要論文3点以内の番号に印) ○研究歴 ○研究計画 ○以上は1つのpdfに纏める ○主要論文(発表論文リストに印、論文毎のpdf又はアーカイブ番号を指定) ○意見書(1~2通)
8. 2015年12月14日(月) 日本時間午前9時
 9. ① posdoc16_yukawa.kyoto-u.ac.jp (意見書のみ郵送可: 606-8502 京都市左京区北白川追分町 京都大学基礎物理学研究所 佐々木節)
 - ② 同研究所 藤田 電話 075-753-7009
 10. e-mail件名は「非常勤研究員応募」と記載。意見書は「非常勤研究員意見書」と朱書き郵送可。詳細は<http://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp/contents/info/detail.php?NID=229>参照。

■高エネルギー加速器研究機構教員

[I]

1. 教授1名(公募番号: 素核研15-7)
2. 素粒子原子核研究所
3. 素粒子原子核研究所ILCグループに所属し、国際リニアコライダ計画(ILC)の為の開発研究を国際協力により推進すると共に、プロジェクトによる物理の可能性の精査を主導する。
4. 決定後早期
5. なし
6. 特になし
7. ○履歴書 ○研究歴 ○発表論文リスト ○着任後の抱負 ○推薦書又は参考意見書
8. 2015年12月17日(木) 17時必着
9. ① 305-0801 つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究機構総務部人事事務課人事第一係 電話 029-864-5118 jinji1_ml.post.kek.jp
- ② 素粒子原子核研究所 小林 隆 電話 029-284-4669/029-864-5414 takashi.kobayashi_mail.kek.jp

ミュレーション研究系プラズマ粒子シミュレーション研究部門(助教)公募関係書類」と朱書し、郵送の場合は書留。詳細は<http://www.nifs.ac.jp/jinji/>参照。

[II]

1. 教授1名
2. 高温プラズマ物理研究系粒子輸送研究部門
3. 熱・粒子輸送研究に必要な計測機器や解析コードの開発を行いつつ、重水素プラズマにおける同位体効果の解明を進め、環状プラズマにおける輸送現象の総合的理解を目指した研究を進める。強いリーダーシップを求める。若手研究者等の人材育成を行い、重水素実験の安全管理についても積極的に取り組む大型ヘリカル装置計画プロジェクトの教授を求む。
- 4, 5, 6, 7, 9は[I]と同じ。
8. 2016年2月12日(金)17時必着
10. 封筒に「高温プラズマ物理研究系粒子輸送研究部門(教授)公募関係書類」と朱書し、郵送の場合は書留。詳細は<http://www.nifs.ac.jp/jinji/>参照。

[III]

1. 教授1名
2. 核融合システム研究系炉システム設計研究部門
3. ヘリカル型核融合炉設計の高度化に向け、炉心プラズマを中心とした課題に実験・解析両面から取り組み、炉への適用性・外挿性を明らかにすると共に、工学課題も含めた炉の設計統合と開発課題の数値目標化、研究戦略の策定を第三期中期計画期間において主導的に進めると共に、これらに係わる共同研究を熱意を持って推進し、核融合炉の実現に向けた学術的牽引役を務める。
- 4, 5, 6, 7, 9は[I]と同じ。
- 8は[II]と同じ。
10. 封筒に「ヘリカル研究部核融合システム研究系炉システム設計研究部門(教授)公募関係書類」と朱書し、郵送の場合は書留。詳細は<http://www.nifs.ac.jp/jinji/>参照。

■福井大学大学院工学研究科助教

1. 助教1名
2. 物理学専攻物性・電磁物理講座
3. レーザー冷却及び光による原子・分子の運動操作等の量子エレクトロニクス実験。物理学専攻および応用物理学科の授業、研究指導の他、他学科の基礎教育科目や共通教育科目を担当する

こともある。

4. 決定後早期
5. 5年、年俸制(助教としての再任なし。業績により引き続き任期の定めのない講師又は准教授として雇用される場合あり。)
6. 博士号取得者又は取得見込者
7. ○履歴書 ○研究業績リスト ○主要論文別刷3編以内各1部(コピー可) ○今迄の研究内容と今後の研究計画(約1,500字) ○教育に関する抱負(約1,000字) ○推薦書1通又は照会可能者2名の氏名、連絡先
8. 2016年1月29日(金)消印有効
9. ①910-8507福井市文京3-9-1 福井大学大学院工学研究科物理学専攻 吉田拓生
②同専攻 熊倉光孝 m_kuma@u-fukui.ac.jp
10. 封筒に「応募書類在中」と明記し簡易書留にて送付。本学は男女共同参画を推進しており、業績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する。

■北海道大学大学院工学研究院准教授

1. 准教授1名
2. 応用物理学部門凝縮系物理学分野(ソフトマター工学研究室)
3. ソフトマターの実験的研究。特に非平衡物理およびレオロジーに基づいた液晶、コロイド、生体高分子等の研究。応用物理学専攻及び応用理工学学科に関する講義等を担当。
4. 2016年7月1日以降早期
5. なし
6. 着任時に博士号又はPh.D.を有する方。十分な研究実績と指導能力があり、独創的な研究を推進できると共に、教育に熱心な方。
7. ○履歴書(写真貼付) ○研究業績 ○教育実績 ○最近5年間の主要論文5編 ○現在迄の研究内容・成果及び採用後の研究計画(約2,000字) ○教育に対する抱負(約1,000字) ○照会可能者2名の連絡先 ○書式はHP参照
8. 2016年2月16日(火)必着
9. ①060-8628札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学工学系事務部総務課人事担当 電話 011-706-6156, 6117, 6118
②戸田泰則 電話 011-706-6627 toda_eng.hokudai.ac.jp
10. 封筒に「応用物理学部門教員公募27-33」と朱記し書留で送付。応募書類原則不

返却。詳細は<http://www.eng.hokudai.ac.jp/graduate/research/recruit/>参照。

学術的会合

学術的会合の標準様式(1件500字以内)

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

■YITP Workshop on Quantum Information Physics

日時 2016年1月5日(火)~8日(金)
場所 京都大学基礎物理学研究所パナソニックホール(606-8317京都市左京区北白川追分町)

内容 量子情報をキーワードとしながら、物性物理・統計力学・量子基礎論等の幅広い物理学分野の研究者による講演を行い、活発な議論、交流を誘発して新しい量子情報物理学の潮流を生み出す事を意図した国際研究会。招待講演者: Guifre Vidal (ペリメータ研究所), Bei-Lok Hu (メリーランド大), 押川正毅 (東大物性研), 木村元 (芝浦工大), 田崎晴明 (学習院大), 西森秀稔 (東工大)

参加費 無料

連絡先 980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3 東北大学理学部 堀田昌寛
hotta_tu@hep.phys.tohoku.ac.jp <http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/ws/2016/yitpqip2016/>

■第12回ナノ材料科学環境拠点シンポジウム~次世代蓄電池の開発に向けた材料-計算-計測の融合研究~

主催 物質・材料研究機構ナノ材料科学環境拠点

日時 2016年1月14日(木)

場所 一橋講堂学術総合センター2階(東京都千代田区一ツ橋2-1-2)

内容 NIMSナノ材料科学環境拠点(GREEN)が「次世代蓄電池の開発に向けた材料-計算-計測の融合研究」をテーマにシンポジウムを開催。材料・計算・計測の融合研究による新材料開発の加速が注目されている。次世代蓄電池開発に向けた融合

研究の新潮流に関する特別講演を頂くと共に、材料・計算・計測の研究者で構成されているGREEN全固体電池及びリチウム空気電池特別推進チームにおける融合研究を紹介する。招待講演者：射場英紀（トヨタ自動車株式会社電池技術部）次世代電池の共通課題解決のため基盤技術に期待すること、山田淳夫（東大工）新材料開発を基軸とするナトリウムイオン電池システムの構築、中山将伸（名工大工）リチウムイオン電池セラミックス材料の探索とマテリアルズ・インフォマティクス

参加費 無料

申込 <http://www.nims.go.jp/GREEN/event/2016/20151007.html> より

連絡先 第12回ナノ材料科学環境拠点シンポジウム事務局 12thgreensympo outreach.jp

■第21回電子デバイス界面テクノロジー研究会—材料・プロセス・デバイス特性の物理—

主催 応用物理学会薄膜・表面物理分科会、シリコンテクノロジー分科会

日時 2016年1月22日(金)～23日(土)

場所 東レ総合研修センター (411-0032 三島市末広町21-9 電話055-980-0333)

内容 産官学の第一線の研究者がデバイス界面に関する様々なテーマについて基礎から応用迄を理論と実験の両面から議論し、本分野の発展に貢献する事を目的としている。1996年から2015年迄20回にわたり開催されてきた「ゲートスタック研究会」の歴史を継承し、本年度からより一層スコープを広げ、新たな名称のもとスタート。国内外からの招待講演者の他に、一般の口頭発表とポスター発表を広く募集して開催。研究会前日にはチュートリアルを開催。

定員 200名

参加費 15,000円、学生6,000円

参加申込締切 2015年12月12日(土)

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 応用物理学会分科会担当 小田康代 電話 03-5802-0863 Fax 03-5802-6250 oda jsap.or.jp <http://home.hiroshima-u.ac.jp/oxide/>

■第24回放射線利用総合シンポジウム

主催 大阪ニュークリアサイエンス協会、大阪府立大学地域連携研究機構

協賛 日本物理学会、他

日時 2016年1月25日(月)9:50～17:00

場所 大阪大学中之島センター (530-0005

掲示板

大阪市北区中之島4-3-53 電話06-6444-2100)

内容 坂東昌子(NPO法人あいんしゅたいん)湯川博士と原子力、工藤博幸(奈良学園)放射線計測と聞き取りを通して生徒達と学んだ広島・福島、高橋信幸(桃山高校)放射線教育の現状と課題—放射線は魅力的な探究活動のテーマ—、松浦寛人(大阪府大)核融合プラズマおよび大気圧プラズマの熱流束計測、齋藤茂芳(阪大)小動物用マイクロCTを用いた生体微細構造評価と病態モデルへの応用、島田斉(放医研)認知症の分子イメージング研究、河村弘(JAEA)東電福島第1原発の廃炉のための研究基盤創生、兵頭俊夫(KEK)陽電子：身近で役に立つ反粒子

定員 100名

参加費 3,000円、学生無料

参加申込締切 定員になり次第

連絡先 542-0081大阪市中央区南船場3-3-27 大阪ニュークリアサイエンス協会 電話 06-6282-3350 Fax 06-6282-3351 <http://onsa.g.dgdg.jp/>

■第50回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム

主催 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会

日時 2016年2月20日(土)～22日(月)

場所 東京大学伊藤国際学術研究センター 伊藤謝恩ホール (113-8656東京都文京区本郷7-3-1)

内容 フラーレン、カーボンナノチューブ、ナノパーティクル、グラフェン等の化学、物理、材料、工学、応用、実用等の研究発表。

定員 400名

参加費 10,000円、学生5,000円(何れも要旨集付)

申込 当日受付

発表申込・原稿提出締切 2015年12月23日(水)

連絡先 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻丸山研究室内 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会事務局 電話/Fax 03-3830-4848 fntg_photon.tu-tokyo.ac.jp <http://fullerene-jp.org>

■第28回コンピューショナル・マテリアルズ・デザイン(CMD)ワークショップ

主催 阪大ナノデザインセンター、阪大産研、阪大基礎工、阪大工、阪大理、東理大、CMSI、阪大QEDRI

日時 2016年2月29日(月)～3月4日(金)
場所 阪大産研 (567-0047茨木市美穂ヶ丘8-1 電話06-6877-5111)

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 40名

参加費 無料(宿泊費、食事代、旅費等は受講生負担)

参加申込締切 2016年1月24日(日)

連絡先 560-8531豊中市待兼山町1-3 阪大ナノセンターCMD担当 電話/Fax 06-6850-6342 cmd_insd.osaka-u.ac.jp

その他 CMDワークショップ実行委員長：小口多美夫(阪大)。実行委員事務局：下司雅章(東大物性研・阪大ナノセンター招聘准教授)。詳細は<http://phoenix.mp.es.osaka-u.ac.jp/CMD/>参照。

■Compound Semiconductor Week 2016 (第28回インジウム燐および関連材料に関する国際会議および第43回化合物半導体に関する国際シンポジウム)

主催 応用物理学会

協賛 日本物理学会、他

日時 2016年6月26日(日)～30日(木)

場所 富山国際会議場 (930-0084富山市大手町1-2 電話076-424-5931)

内容 化合物半導体及び新規材料(ナノカーボン、2次元材料)等の結晶成長から物理、特性評価、電子及び光デバイス応用まで対象。

講演申込締切 2016年2月8日(月)

連絡先 243-0198厚木市森の里若宮3-1 日本電信電話株式会社 NTT物性科学基礎研究所 後藤秀樹 電話 046-240-3468 Fax 046-270-2342 secretary2016-csw-jpn.org

その他 詳細は<http://www.csw-jpn.org/>参照。

その他

助成公募の標準様式 (1件500字以内)

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

その他 ○標題 ○内容 ○連絡先

■第15回グリーン・サステナブルケミ ストーリー賞 (GSC賞) 業績募集

内容 グリーン・サステナブルケミ
ストーリー (略称: GSC) 分野の推進に貢献する優れた業績を挙げた個人, 団体に贈呈。経済産業大臣賞: 産業技術の発展に貢献した業績。文部科学大臣賞: 学術の発展・普及に貢献した業績。環境大臣賞: 総合的な環境負荷低減に貢献した業績。スモールビジネス賞: 中小規模の事業体を対象として産業技術の発展に貢献した業績 (新設)。奨励賞: 将来の展開が期待できる業績。

募集要領 http://www.jaci.or.jp/gscn/page_03.html 参照。

応募締切 申請書: 2015年12月8日(火) 17時必着。業績説明書・論文・特許の写し: 2015年12月17日(木)17時必着

問合せ先 102-0075 東京都千代田区三番町2 三番町KSビル2階 新化学技術推進協会 (JACI) GSC賞事務局 電話 03-6272-6880 [gscn1.jaci.or.jp](http://www.gscn1.jaci.or.jp)

■第5回新化学技術研究奨励賞 研究テーマ募集

内容 新化学技術推進協会 (JACI) では、産学官交流連携活動の一環として、化学産業界が必要とする研究課題を設定し、その実現に貢献する事ができる若手研究者の独創的な萌芽的研究テーマを発掘・奨励する為に、新化学技術研究奨励賞を設けている。全11課題。

応募資格 国内の大学又はこれに準ずる研究機関において研究活動に従事する方で2015年4月1日時点で満40歳未満。但し、特別課題については年齢制限なし。

選考件数 各研究課題につき原則1件、特別課題のみ最大3件

助成内容 1件につき100万円

応募方法 http://www.jaci.or.jp/recruit/page_02_05_2016.html 参照。

応募締切 2016年1月8日(金)17時

問合せ先 102-0075 東京都千代田区三番町2 三番町KSビル2階 新化学技術推進協会 (JACI) 研究奨励賞事務局
電話 03-6272-6880 Fax 03-5211-5920
[jaciaward5.jaci.or.jp](http://www.jaciaward5.jaci.or.jp)

■ドイツ・イノベーション・アワード 「ゴットフリート・ワグネル賞2016」募集

対象 マテリアル、輸送システムと自動車、エネルギーとインダストリー、ライフサイエンスとヘルスケアの何れかの分野における応用志向型の研究で、現在進行中の研究、又は過去2年以内に完了した研究成果。応募資格: 日本の大学・研究機関に所属する45歳以下(締切日時)の若手研究者。

賞金 250万円(原則各分野1件、計4件)。副賞: 希望するドイツの大学・研究機関に最長2カ月間研究滞在する為の助成金。応募方法 電子申請システムで受付(詳細はHP参照)

応募締切 2016年1月12日(火)必着

問合せ先 ドイツ・イノベーション・アワード事務局 電話 03-5276-8827
info_german-innovation-award.jp <http://www.german-innovation-award.jp>

その他 主催: ドイツ科学・イノベーションフォーラム東京、在日ドイツ商工会議所。審査方法: 共催企業の技術専門家による予備審査後、常任委員と専門委員で構成される選考委員会において受賞者を決定。

■海洋研究開発機構平成28年度地球シミュ レータ公募課題募集

内容 <http://www.jamstec.go.jp/es/jp/project/general.html> 参照。

応募締切 2016年1月上旬

連絡先 236-0001 横浜市金沢区昭和町3173-25 海洋研究開発機構横浜研究所地球情報基盤センター情報システム部基盤システムグループES公募係 電話 045-778-

5770 es_oubo_jamstec.go.jp

■大阪ニュークリアサイエンス協会 (ONSA) 賞募集

対象 関西・北陸地区の企業、学校、研究機関において、放射線及びRIの総合的研究及び利用の促進又は普及を図り、学術の振興と産業・医療の発展及び教育に寄与する研究・開発を行った者(個人)又は団体(構成人数5名以下)。ONSA賞: 特に顕著な業績をあげた者又は団体。年齢不問。ONSA奨励賞: 優れた業績をあげた40歳未満の者(個人)。審査対象は過去5年間の成果・実績。

応募方法 <http://onsa.g.dg.dg/> より申請書類をダウンロードして郵送

応募締切 2016年1月31日(日)消印有効
問合せ先 542-0081 大阪市中央区南船場3-3-27 大阪ニュークリアサイエンス協会事務局 電話 06-6282-3350 onsa-ofc.nifty.com

その他 協会賞選考委員会で授賞候補者の選定を行い、理事会の承認を経て決定する。本年度より基礎研究部門、応用研究・開発部門、医療・教育部門の枠を外したが、参考のため選定対象が主の部門に相当するか推薦部門名に記入のこと。

■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。)

12月ユーザ名 : 15Dec

パスワード: Hideki431

1月ユーザ名 : 16Jan

パスワード: Michael574

ユーザ名とパスワードは巻頭言の前の広告ページにもあります。

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
2015年 9月(～16年 3月)	一般相対性理論誕生100年記念市民講演会	弘前(青森), 仙台, 新潟, 神岡(岐阜), 長岡(新潟), つくば(茨城), 東京, 名古屋, 京都, 大阪, 広島	70-9
12/5～6	第16回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会	奈良市	70-9
12/6	市民講座「物理と宇宙」第3回	京都市	70-10
12/9	第34回法政大学イオンビーム工学研究所シンポジウム	小金井市(東京)	70-9
12/10～12	薄膜・表面物理分科会特別研究会「走査型プローブ顕微鏡(29) & ICSPM23」	ニセコ町(北海道)	70-11
12/12～13	幾何誘起新電子系物質科学に関する国際ワークショップ	名古屋市	70-11
12/18～20	量子エレクトロニクス研究会「極限計測の科学と技術」	山中湖村(山梨)	70-10
2016年			
1/5～8	YITP Workshop on Quantum Information Physics	京都市	70-12
1/11～14	The 75th Okazaki Conf. Tensor Network States: Algorithms and Applications 2016	岡崎市(愛知)	70-11
1/12～14	CEMS Int. Symp. on Dynamics in Artificial Quantum Systems	東京	70-11
1/13～17	表面・ナノ科学シンポジウム2016(SSNS'16)	富良野市(北海道)	70-9
1/14	第12回ナノ材料科学環境拠点シンポジウム～次世代蓄電池の開発に向けた材料-計算-計測の融合研究～	東京	70-12
1/22～23	第21回電子デバイス界面テクノロジー研究会-材料・プロセス・デバイス特性の物理-	三島市(静岡)	70-12
1/25	第24回放射線利用総合シンポジウム	大阪市	70-12
2/15	KAST教育講座「走査型プローブ顕微鏡の最新活用術」	川崎市(神奈川)	70-11
2/20～22	第50回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム	東京	70-12
2/28～3/2	10th Int. Conf. on Optics-photonics Design & Fabrication	Ravensburg-Weingarten(ドイツ)	70-10
2/29～3/4	第28回コンピューテーショナル・マテリアルズ・デザイン(CMD)ワークショップ	茨木市(大阪)	70-12
3/19～22	日本物理学会第71回年次大会(東北学院大学)	仙台市	日本物理学会
6/5～10	Rare Earths 2016 in Sapporo, JAPAN	札幌市	70-11
6/12～16	The 11th Int. Conf. on Coatings on Glass and Plastics	Braunschweig(ドイツ)	70-8
6/19～23	Joint RCBJSF-IWRF Conf.	松江市	70-11
6/19～24	The 14th Int. Symp. on Nuclei in the Cosmos	新潟市	70-8
6/26～30	Compound Semiconductor Week 2016(第28回インジウム燐および関連材料に関する国際会議および第43回化合物半導体に関する国際シンポジウム)	富山市	70-12
9/13～16	日本物理学会2016年秋季大会(金沢大学)(物性)	金沢市	日本物理学会
9/21～24	日本物理学会2016年秋季大会(宮崎大学)(素核宇)	宮崎市	日本物理学会

編集後記

ランダウは余興として、物理学者を等級づけして楽しんでたという。最高ランクの0等級はニュートンただ一人。アインシュタインは0.5等級、量子力学建設の父たちが1等級。ランダウ自身ははじめ2.5等級、その後2等級に上方修正したとか。なんたるご謙遜、凡人にはいたたまれなくなるような話である。『ランダウ-リフシッツ理論物理学教程』の全巻読破などもろんしてはいない私に等級を与えようとする

ならば、すばる望遠鏡の利用申請が必要となろう。しかし違う座標軸はあってもよいはずだ。2年ほど前、ある人気の正月番組を見ていたときに私はそのための画期的な着想、すなわち「一流」の物理学者ならば必ず違いがわかるはずのいろいろな「見立て」をやってもらうことにより、不敵にも物理学者の「格付け」を行うという手法を思いついたのである。果たしてその恐怖の見立てとは、果たして物理学者にGackt様はいるのであろうか...!? 前回の編集後記の宿題を果たすときがきた。その素晴らし

いアイデアの数々をついにここに披露しよう。

ところで、私は今年10月に東京から大阪の大学に移った。四国で生まれ育ち、大学以降はずっと関東で過ごしてきた私にとって初めての大阪暮らしは、今のところおおむねハッピーである。言葉の違いでいじめられることもなく、早口でまくしたてられて怖い思いをすることもない。むしろ人は関東よりもやわらかく、接しやすい気がする。誰と話をしても気持ちがいい。街ゆく人から飴ちゃんをもらったことはまだ

なく目にしたことすらないが、これは先の楽しみとしておこう。ともあれ大阪人万歳である。話が逸れた。

ところで、駅やデパートでエスカレーターに乗るとき、関東と大阪では先を急いで歩く人のためにあけておく側の左右が違うということは多くの方がご存知であろう。関東では左側に立ち右側を人が歩くのに対し、大阪では左側を歩くのである。エスカレーターは歩くものではないというのが正解のようではあるが、私はこのエスカレーターにおける大阪の法則には、粘り強い繰り返し修行の結果、ついにこれに適応した。大阪人はエスカレーターの左側を歩く、エスカレーターの左側を歩くのは大阪人である、ゆえに私は大阪人である。なんとも誇らしい。

ところで、私は阪神タイガースのファンである。バックスクリーン3連発に涙した私にとって、その後の長い雌伏の時には高校英語“I wish”の用法を「パスがおつらなあ」で覚えた私にとって、大阪は憧れてやまぬ聖なる地であった。大阪に移ってすぐ、私は裏地に六甲おろしをあしらったジャケットをオーダーし、それに身を包ん

でこの編集後記を書いているのである。ここに住まう僥倖、感謝せざるべからず。基本的に関東在住の研究者で構成されている日本物理学会誌編集委員会において、あと半年足らずの任期ながらも「大阪の委員」として働けることは、私にとって無上の喜びと言ってよいのである。またも話が逸れた。

ところで、その私があえて口にせざるを得ないことには、この素晴らしい大阪人たちの、あの実になつらん電車のマナー、これはどうであろう。降りる人が先、出口に近い方が先、乗るのは前の方に並んでいる人が先という、宇宙開闢以来の大法則は最大限に破れており、乗車口付近では決まって衝撃波が発生している。そして座席に座れる人の数を注意深く観察した私は、関東人と大阪人は異なるスピンを持つとの結論に達した。おかしい、物理法則が違っている。てゆーか不都合である。愛しき大阪人よ、なぜなのだ。会員諸兄には詫びねばならない。アイデア披露のために話を元に戻そうと努力はしたのだが、私はあらたな問題に直面するとともに、ここでスペースが尽きてしまった。残念の至りというほ

かない。

常定芳基〈〉

編集委員

森川 雅博(委員長), 長谷川修司,
石岡 邦江, 今村 卓史, 沖本 洋一,
加藤 岳生, 岸根順一郎, 栗田 玲,
桑本 剛, 鈴木 康夫, 須山 輝明,
高須 昌子, 田島 俊之, 田中 良巳,
田沼 肇, 常定 芳基, 藤井 芳昭,
松尾 泰, 松本 重貴, 水崎 高浩,
南 龍太郎, 目良 裕, 望月 維人,
李 哲虎, 渡邊 康, 片山 郁文,
板橋 健太, 藤山 茂樹

(支部委員)

飯塚 剛, 石井 史之, 奥西 巧一,
黒岩 芳弘, 酒井 彰, 中村 光廣,
野村 清英, 松井 広志, 水野 義之,
溝口 幸司

新著紹介小委員会委員

片山 郁文(委員長), 浅野 勝晃,
安藤 康伸, 宇田川将文, 大西 宏明,
郡 宏, 越野 和樹, 小山 知弘,
西浦 正樹, 長谷川秀一, 廣政 直彦,
間瀬 圭一, 三輪 光嗣, 山本 貴博

本誌の複写をご希望の方へ

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

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、学著協より許諾を受けて下さい。

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

※複写以外の許諾(著作物の転載等)に関しては、学著協に委託しておりません。

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

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

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F

Fax: 03-3475-5619 e-mail: info_jaacc.jp

日本物理学会誌 第70巻 第12号 (平成27年12月5日発行) 通巻798号

©日本物理学会 2015

Butsuri

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

白 勢 祐 次 郎

印刷所 〒169-0075 東京都新宿区高田馬場3-8-8

株式会社 国 際 文 献 社

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

一般社団法人 日 本 物 理 学 会

電話 03-3816-6201 Fax 03-3816-6208

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

本誌に掲載された寄稿等の著作権は一般社団法人日本物理学会が所有しています。

日 本 物 理 学 会 誌

第 70 卷

2015

総 目 次

一般社団法人 日 本 物 理 学 会

日本物理学会誌 第70巻 総目次

巻頭言

物理学会の2014年	兵 頭 俊 夫	1— 1
ゲストとホスト	藤 井 保 彦	2— 77
物理学史資料委員会の活動と資料の行く末	高 岩 義 信	3— 165
学会会議と物理学会	岡 真 真	4— 239
新たなステージに向かう男女共同参画活動	森 初 果	5— 335
バルチモアより学会を思う	櫻 井 博 儀	6— 403
オンライン、オンライン	大 槻 東 巳	7— 505
日本物理学会Jr.セッションは楽しい!	松 川 宏	8— 585
優雅なる夢の彼方に	森 川 雅 博	9— 669
JPSJ編集委員長への就任に当たって	上 田 和 夫	10— 737
物理教育委員長として：物理学分野の参照基準(案)と委員会の活動	須 藤 彰 三	11— 809
一会計理事から見た日本物理学会	松 井 哲 男	12— 897

現代物理のキーワード

美しく複雑な秩序	下 田 正 彦	1— 4
共鳴過程を制御する：極低温量子気体を操る原子衝突	島 村 勲	3— 168
ニュートリノ振動—量子力学的干渉効果の一例—	安 田 修	4— 242
見えないクォーク・グルーオンを見る	福 嶋 健 二	5— 338
スピントロニクスとスピンポンピング	水 上 成 美	6— 406
ホログラフィー原理—ブラックホールが指し示す量子重力への道筋—	関 野 恭 弘	7— 508
ラシュバ効果—2次元電子系のスピン軌道相互作用—	有 賀 哲 也	8— 588
系外惑星の多様性と遍在性	井 田 茂 智	9— 672
荷電レプトンで探る新物理	三 原 智	10— 740
屈折率って何?—現代の“巨視的電磁場”問題—	迫 田 和 彰	11— 812
新しいハドロンの存在形態：エキゾチックな多クォーク状態	瀧 澤 誠	12— 900

交流

ペロブスカイト型Co酸化物のスピントロニクス現象：その歴史と現状	浅井吉蔵, 小林義彦, 佐藤桂輔	1— 6
ボイジャー1号探査機, 太陽圏境界を越え星間空間に入る	鷺 見 治 一	4— 244
宇宙環境と地球の気候—太陽圏システムの物理学—	宮 原 ひ ろ 子	5— 340
ゲージ・重力対応で探る強相関系の非平衡物理学	中 村 真	7— 510
心筋収縮系にみる自励振動現象SPOC	石渡信一, 佐藤勝彦	7— 519

特集

特集「発展し続ける一般相対論—時空論の起承転“望”—」

はじめに	会誌編集委員会	2— 80
一般相対論の成立	岡 村 浩	2— 81
一般相対論ミニマム	須 藤 靖	2— 87
一般相対性理論の数理	小 玉 英 雄	2— 95
中性子星とブラックホール—相対論的天体物理学入門—	中 村 卓 史	2— 103
一般相対論的宇宙論	杉 山 直 浩	2— 111
一般相対論の実験的検証と重力理論の拡張	川 中 貴 浩	2— 119
アインシュタインからの宿題：重力波の検出	田 村 静 児	2— 125
一般相対論と量子力学の統合に向けて	大 栗 博 司	2— 130
数値相対論の展開	柴 田 大	2— 134

小特集

小特集「X線・粒子線構造解析」

はじめに	会誌編集委員会	9— 674
寺田寅彦の「X線と結晶」からX線自由電子レーザーへ	石 川 哲 也	9— 675
我が国における反射高速電子回折の発展と全反射陽電子回折への展開	一 宮 彪 彦	9— 683
JRR2からJ-PARCへの50年の歩み(日本の中性子散乱研究の歴史)	遠 藤 康 夫	9— 694
我が国における生体分子・粒子の構造解析—過去・現在そして未来の展望—	中迫雅由, 山本雅貴	9— 702

シリーズ「国際光年IYL2015に寄せて」

序言	会誌編集委員会	8— 590
光学を革新したレーザーの創造性とその発展	霜 田 光 一	8— 591
光合成による水分解：生命の巧みな光エネルギー変換のしくみ	野 口 巧	10— 742
なぜ光電子増倍管(真空管)か?—極限計測の為に—	大村孝幸, 下井英樹, 河合克彦, 小玉剛史	11— 845
望遠鏡：宇宙認識の発展	海 部 宣 男	12— 902

解説

アンダーソン局在の臨界現象—最近の実験・理論の新展開—	小 布 施 秀 明	1— 14
重力崩壊型超新星の爆発メカニズム	滝 脇 知 也, 固 武 慶	3— 170
ペーストの記憶効果と破壊の制御への応用	中原明生, 松尾洋介, 大信田丈志	3— 179

形状可変な境界としてのシワ (リンクル) 構造の展開	大園拓哉	4— 253
感熱性高分子水溶液の相分離・ゲル化・レオロジー	田中文彦	4— 260
アクティブマターの非線形ダイナミクス	太田隆夫	5— 347
ヒッグス粒子「発見」の意味と、本当の発見に向けて	兼村晋哉	6— 408
可積分量子多体系の非平衡ダイナミクスと統計力学の基礎	出口哲生, 佐藤純, 上西慧理子	6— 419
大統一理論の間接的な証拠としてのニュートリノ質量と大混合角	前川展祐	6— 427
To be, or not to be —吸収状態をめぐる非平衡臨界現象の物理学	竹内一将	8— 599
宇宙を満たすガンマ線背景放射の起源と残された謎	井上芳幸	10— 752
RRAMの原理はどこまで理解できたのか?	井上公	11— 814
核力はどこまで解っているか?—3体核力の実験的な現状—	関口仁子	12— 912

最近の研究から

反応-拡散-駆動系として理解する細胞の形態変化	石原秀至, 澤井哲	1— 25
5d電子系イリジウム酸化物における新奇な絶縁体と超伝導	渡部洋, 白川知功, 柚木清司	1— 31
量子測定における誤差・擾乱の計測と不確定性関係	枝松圭一, 金田文寛, So-Young Baek, 小澤正直	3— 188
生体系のシミュレーションのサンプリング手法及び解析方法の開発	光武重代理	3— 194
波長分解ポンプ・プローブ法によるコヒーレントフォノンの研究	溝口幸司, 大島悟郎	3— 200
微粒子の熱放射における共振器量子電磁気学的効果	立川真樹, 小田島仁司	4— 269
ドーピングしたトポロジカル絶縁体における超伝導とマヨラナ粒子	山影相, 矢田圭司, 佐藤昌利, 田仲由喜夫	5— 356
超流動, ボース・アインシュタイン凝縮, 密度ゆらぎ	加藤雄介, 渡部昌平	5— 362
熱的な量子純粋状態を用いた統計力学の定式化	杉浦祥, 清水明	5— 368
ブラックホールに対するホログラフィック原理の数値的検証	伊敷吾郎, 西村淳, 花田政範, 百武慶文	6— 436
強いスピン軌道相互作用を持つモット転移系で見られる磁壁の金属性	藤岡淳, 上田健太郎, 十倉好紀	6— 441
スピン偏極は移るよ, どこまでも: 原子気体の光ポンピングによる金属塩の核スピン偏極	石川潔	7— 530
インビーム線核分光による新魔法数の発見	武内聡, デービッド・ステッペンベック, 宇都野穰	7— 535
銀河系内で初めての極超新星の痕跡を発見か?	木村公, 常深博, 富田洋	7— 540
高圧ねじり加工による金属ガラスの構造若返り	土谷浩一, 孟凡強, 横山嘉彦	7— 544
低温アモルファス氷表面における水素原子の拡散—宇宙における分子進化の鍵—	羽馬哲也, 香内晃, 渡部直樹	8— 608
微弱な磁気双極子相互作用によるボース・アインシュタイン凝縮体スピンの空間構造形成: 磁性気体としての冷却Rb原子	衛藤雄二郎, 斎藤弘樹, 平野琢也	8— 614
近接する2つの物体間の「力」と「電流」の関係	杉本宜昭	8— 620
3Dプリンターが拓く新しい物理学の可能性	古川英光, 川上勝, 牧野真人, 齊藤梓	8— 625
トポロジカル絶縁体薄膜の構造物性	白澤徹郎, 高橋敏男	9— 713
固体中のスピン軌道相互作用が引き起こす特異な電子スピン構造	宮本幸治, 木村昭夫, 奥田太一	10— 760
ランドスケープ描像で見る細胞分化の物理	寺田智樹	10— 765
ナノカーボンのディラック電子=フォノン間相互作用ダイナミクス	片山郁文, 武田淳, 北島正弘	10— 770
キタエフ量子スピン液体の“気液”相転移	那須讓治, 宇田川将文, 求幸年	10— 776
太陽系を作った超新星爆発はいつ起きたのか?—宇宙核時計ニオプ92—	早川岳人, 梶野敏貴, 千葉敏	11— 824
磁気スキルミオンとモノポールの織りなす創発的電磁現象	高嶋梨菜, 藤本聡	11— 830
多次元自由エネルギー面で捉える生体分子の力学応答	鈴木洋一	11— 835
逆磁気光学効果を用いた偏光-磁化振動の3次元転写	佐藤琢哉	11— 840
クォークから中性子星へ—格子QCD計算を用いた新たな挑戦—	井上貴史	12— 921
ハロゲン化鉛ペロブスカイト太陽電池	金光義彦, 山田泰裕	12— 926

実験技術

単一原子/光子を操作するナノ光ファイバー	白田耕藏	1— 36
“実験技術”としての量子多体系シミュレーションソフトウェア ALPS	藤堂眞治	4— 275

話題

鉱物といふもの	浜根大輔	6— 446
電子ジャーナルの平等アクセス実現のための3つの提言	石田武和	6— 450
青色発光ダイオード開発には何が必要だったか?	平松和政	11— 851

話題—身近な現象の物理—

マガンの群れの集団動力学	早川美德	9— 718
「かえるのうた」に耳をすませば—身近な生物の同期現象—	合原一究	10— 782
天体・日常・微小スケールをつなぐクレーターの物理	桂木洋光	11— 855
超音波洗浄とソノルミネセンス	崔博坤	12— 932

話題—企業の研究から—

酸化チタン薄膜に対するLi ⁺ イオンのインターカレーション挙動	上田未紀	10— 785
ベタヘルツエンジニアリング創出に向けたアト秒光物性		
~NTT物性科学基礎研究所における超高速光物理研究~	小栗克弥	12— 936

JPSJの最近の注目論文から	安藤恒也	1—45, 2—140, 3—206, 4—283, 5—374, 7—549
	上田和夫	8—631, 9—722, 10—789, 11—859, 12—941

PTEPの最近の招待・特集論文から	坂井典佑	6— 454
-------------------	------	--------

歴史の小径

アルバート・クルーと走査型透過電子顕微鏡の開発: 単原子の観察	山口まり	1— 51
---------------------------------	------	-------

ラ・トッカータ

ドイツ・ハレ ポスドク滞在記	篠原 康	1— 54
ウズベキスタンからの便り	中村 勝弘	3— 208
オーストリア科研費事情	鈴木 謙	3— 210
アメリカでの就職活動記	堀内 俊作	4— 285
アメリカさすらい滞在記	村瀬 孔大樹	4— 287
ユーリッヒ滞在記	小林 秀元	5— 376
第44回天文・天体物理若手夏の学校開催報告	千 秋 元	5— 378
第59回物性若手夏の学校開催報告	吉田賢典, 西口大貴	5— 380
2014年度原子核三者若手夏の学校活動報告	宮本貴也, 加藤洋崇, 小林良彦, 臼井純哉	5— 382
第54回生物物理若手の会夏の学校報告	山田 大智	5— 386
平らな国の研究生活	御手洗菜美子	6— 456
Recollections of the Matsubara-ken, 1965-6	Anthony J. Leggett	8— 641
夫婦で物理を?	森井 政宏	12— 942

学会報告

2014年秋季大会 シンポジウムの報告	領域委員会	2— 144
2014年秋季大会 招待・企画講演の報告	領域委員会	3— 213
第70回年次大会(2015年) シンポジウムの報告	領域委員会	7— 552
第70回年次大会 招待・企画・チュートリアル講演の報告	領域委員会	8— 634

学界ニュース

2014年度ノーベル化学賞: E. Betzig氏, S. W. Hell氏, W. E. Moerner氏—超解像蛍光顕微鏡に授賞	河田 聡	3— 218
第9回凝縮系科学賞: 松石 聡氏, 水島 健氏	北岡 良雄	3— 219
2014年度仁科記念賞: 松田祐司氏	岩佐 義宏	3— 219
2014年度仁科記念賞: 小林 隆氏, 中家 剛氏	中村 健蔵	3— 220
第2回湯浅年子賞「金賞」: 坂東昌子氏	東島 清, 森 初哉	4— 290
第2回湯浅年子賞「銀賞」: 関口仁子氏	酒井 英行	4— 290
2014年度文化功労者: 佐藤勝彦氏	横山 順一	4— 291
第105回恩賜賞・日本学士院賞: 細野秀雄氏	伊藤 満	8— 643
第105回日本学士院賞: 香取秀俊氏	洪 鋒雷	8— 643
第105回日本学士院賞: 牧島一夫氏	河合 誠之	8— 644
科学技術分野の文部科学大臣表彰	会誌編集委員会	8— 644
梶田隆章氏のノーベル賞受賞	荒船 次郎	12— 944

追悼

Manuel Cardona 教授を悼んで	菅 滋正	1— 56
北澤宏一先生を偲んで	高木 英典	3— 222
大河千弘博士を偲ぶ	玉野輝男, 浅見 明, 西川正名	3— 223
松原武生先生を偲んで	米沢 富美子	4— 292
追悼: 永野元彦氏	手嶋 政廣	5— 388
玉垣先生を偲んで	高塚龍之, 巽 敏隆	6— 458
広田良吾先生を偲んで	薩摩 順吉	6— 459
鈴木敬愛先生を偲んで	小泉 大一	8— 645
南部陽一郎先生をしのんで	江口 徹	10— 792
Samuel Frederick Edwards 教授を偲んで	土井 正男	11— 861

科学研究費

平成26年度科学研究費助成事業(科研費, 基盤研究等) 審査結果報告	岩田高広, 石橋延幸	1— 48
------------------------------------	------------	-------

新著紹介

齊藤英治, 村上修一: スピン流とトポロジカル絶縁体: 量子物性とスピントロニクスの発展	佐藤 勝昭	1— 57
伏見康治著, 江沢 洋解説: 伏見康治コレクション3: 物理学者の描く世界像		
伏見康治著, 江沢 洋解説: 伏見康治コレクション4: 物理つみくさ集	並木 雅俊	1— 57
上出洋介: 国際誌エディターが教えるアクセプトされる論文の書きかた	塔 隆志	2— 150
秋葉康之: クォーク・グルーオン・プラズマの物理: 実験室で再現する宇宙の始まり	平野 哲文	2— 150
C. A. Fuchs: Coming of Age with Quantum Information; Notes on a Paulian Idea	森越 文明	3— 224
上村 洸, 山本貴博: 基礎からの量子力学	中村 泰信	3— 224
山本義隆: 世界の見方の転換1: 天文学の復興と天文学の提唱		
山本義隆: 世界の見方の転換2: 地動説の提唱と宇宙論の相克		
山本義隆: 世界の見方の転換3: 世界の一元化と天文学の改革	横山 雅彦	4— 293
阿原一志: 計算で身につくトポロジー	鈴木 淳史	4— 295
国広悌二: クォーク・ハドロン物理学入門: 真空の南部理論を基礎として	保坂 淳	5— 389
J. M. D. Coey: Magnetism and Magnetic Materials	合田 義弘	5— 389
秦泉寺雅夫: 数物系のためのミラー対称性入門: 古典的ミラー対称性の幾何学的理解に向けて	立川 裕二	6— 460
蔵本由紀: 非線形科学: 同期する世界	竹内 一将	6— 461
J. Casalderrey-Solana, H. Liu, D. Mateos, K. Rajagopal and U. A. Wiedemann: Gauge/String Duality, Hot QCD and Heavy Ion Collisions	菅本 晶夫	7— 563

福岡将文, 酒谷雄峰: 重力とエントロピー; 重力の熱力学的性質を理解するために	磯 暁	7— 563
北川米喜: 光ってなに? ; 光の場と光子との物理	田 口 俊 弘	8— 646
有馬孝尚: マルチフェロイクス; 物質流の電磁気学の新展開	桂 法 称	8— 646
高エネルギー加速器研究機構監修, 小玉英雄, 井岡邦仁, 郡 和範著: 宇宙物理学	間 瀬 圭 一	9— 724
田中宏幸, 竹内 薫: 素粒子で地球を視る; 高エネルギー地球科学入門	宮 原 ひ ろ 子	9— 725
M. Longair: Quantum Concepts in Physics; An Alternative Approach to the Understanding of Quantum Mechanics	石 橋 延 幸	10— 793
宮原ひろ子: 地球の変動はどこまで宇宙で解明できるか; 太陽活動から読み解く地球の過去・現在・未来	桑 原 孝 夫	10— 793
中山正昭: 半導体の光物性	片 山 郁 文	11— 862
Y. V. Kovchegov and E. Levin: Quantum Chromodynamics at High Energy	板 倉 数 記	11— 862
K. A. Dill and S. Bromberg: Molecular Driving Forces; Statistical Thermodynamics in Biology, Chemistry, Physics, and Nanoscience	石 崎 章 仁	12— 946
青木晴善, 小野寺秀也: 強相関電子物理学	世 良 正 文	12— 946
江馬一弘: 光とは何か; 虹のメカニズムから「透明マント」まで	小 芦 雅 斗	12— 947
図書リスト		1—58, 3—225, 5—390, 7—564, 9—725, 11—863
学術会議だより		
第22期日本学術会議物理学委員会の活動	伊 藤 早 苗	3— 226
男女共同参画推進委員会だより		
日米における男女共同参画の発展	永 宮 正 治	1— 59
研究費配分に関する教育研究環境検討委員会だより		
科研費(基盤研究S, A, B, C)配分状況調査報告	研究費配分に関する教育研究環境検討委員会	7— 567
AAPPSだより		
AAPPS-DPP設立とその活動報告	菊 池 満	7— 565
会員の声		
放射線被曝による発がんは線量に比例するか?	宮 沢 弘 成	4— 296
会誌編集委員会より		
「会員の声」運用方針について	会誌編集委員会	4— 296
掲示板		1—60, 2—151, 3—228, 4—297, 5—391, 6—461, 7—570, 8—647, 9—726, 10—794, 11—864, 12—948
行事予定		1—62, 2—154, 3—231, 4—302, 5—394, 6—465, 7—573, 8—653, 9—731, 10—799, 11—867, 12—953
編集後記		1—62, 2—156, 3—232, 4—303, 5—395, 6—467, 7—574, 8—654, 9—732, 10—800, 11—868, 12—953
会告		
■第33回臨時総会の決議3について ■第70回年次大会の宿泊・交通等の案内(今回は旅行者による取扱いはありません) ■第70回年次大会の参加登録・講演概要集(Webアクセス権および記録用DVD版)購入のご案内(講演申込者以外の方への案内です)		
■第70回年次大会講演概要集原稿の書き方および提出について ■訂正 ■2014年12月1日付新入会者 ■賞・助成等の募集予定一覧		1— 64
■第70回年次大会の宿泊・交通等の案内(今回は旅行者による取扱いはありません) ■第14回代議員懇談会開催のお知らせ ■第95回定時総会開催のお知らせ ■2015年1月1日付新入会者 ■第71~72期代議員選挙(信任投票)のお願い		2— 157
■第14回代議員懇談会開催のお知らせ ■第95回定時総会開催のお知らせ ■第70回年次大会の参加登録・講演概要集のWeb登録受付中(昨年からの新しい受付方法です) ■2015年秋季大会・講演募集掲載号 ■2015年秋季大会の企画募集 ■2015年2月1日付新入会者		3— 233
■会費納入のお願いと未納者への雑誌発送停止のお知らせ ■2016年度会費について手続きのお願い: 正会員のうち大学院学生の会費減額および学生会員(学部学生)の資格継続 ■2016年度の論文誌等購読の変更手続きのお願い ■賞および研究助成の候補者の募集について ■2015年秋季大会・講演募集掲載号 ■2015年秋季大会の企画募集 ■2015年秋季大会講演募集要項 ■託児室設置について ■Webページによる講演申込の手順(参加登録を含む) ■講演概要集原稿の書き方 ■2015年3月1日付新入会者 ■日本物理学会入会案内 ■日本物理学会入会申込書		4— 309
■会費納入のお願いと未納者への雑誌発送停止のお知らせ ■2015年秋季大会講演募集について ■平成27年度東レ科学技術賞および東レ科学技術研究助成の候補者推薦について ■賞および研究助成の候補者の募集について ■変更 ■訂正 ■2015年4月1日付新入会者		5— 396
■2015年秋季大会の宿泊・交通等の案内(今回は旅行者による取扱いはありません) ■2015年秋季大会会場における託児室の設置について ■2015年秋季大会の参加登録・講演概要集(Webアクセス権および記録保存用DVD版)購入のご案内(講演申込者以外の方への案内です) ■2015年秋季大会講演概要集原稿の書き方および提出について ■第10回日本物理学会若手奨励賞について ■2015年度科学セミナー ■賞および研究助成の候補者の募集について ■2016年~2017年開催 藤原セミナー募集のお知らせ ■2015年5月1日付新入会者		6— 468
■2015年秋季大会の宿泊・交通等の案内(今回は旅行者による取扱いはありません) ■2015年秋季大会会場における託児室の設置について ■2015年秋季大会の参加登録・講演概要集(Webアクセス権および記録保存用DVD版)購入のご案内(講演申込者以外の方への案内です) ■2015年秋季大会講演概要集原稿の書き方および提出について ■2015年度科学セミナー ■賞および研究助成の候補者の募集について ■2015年6月1日付新入会者		7— 576
■2016年からの会費年額の改定について ■2016年度会費について手続きのお願い: 正会員のうち大学院生の会費減額および学生会員(学部学生)の資格継続 ■2016年度の論文誌等購読の変更手続きのお願い ■2015年度科学セミナー ■2015年7月1日付新入会者		8— 655
■2016年の論文誌等購読の変更手続きのお願い ■2016年会費について手続きのお願い: 正会員のうち大学院学生の会費減額および学生会員(学部学生)の資格継続 ■2015年8月1日付新入会者		9— 734
■2016年からの会費年額の改定について ■第71回年次大会・講演募集掲載号 ■第71回年次大会の企画募集 ■2015年度公開講		

座	■2015年9月1日付新入会者	■会費年額改定と物理学会の財政状況について	10— 802												
■2016年分(2016年1月~12月)会費自動振替の実施と会費納入のお願い	■2016年度雑誌の国外配布送料について	■賞および研究助成の候補者の募集について	■第71回年次大会(2016年)宿泊について(ご注意)	■第12回Jr.セッションの開催	■第71回年次大会(2016年)会場における託児室の設置について	■第71回年次大会(2016年)の事前参加登録・事前講演概要集(Webアクセス権および記録保存用DVD版)の申込について	■第71回年次大会(2016年)講演募集要項	■Webページによる講演申込の手順(参加登録を含む)	■講演概要集原稿の書き方	■2015年10月1日付新入会者	■日本物理学会入会案内	■日本物理学会入会申込書	■2016年度 定期刊行物の購読案内	■2016年度JPSJの購読案内(機関会員向け)	11— 870
■2015年会費未納の方へお知らせ	■2016年分(2016年1月~12月)会費自動振替の実施について	■賞および研究助成の候補者の募集について	■OPEN SELECT論文およびJPS Conference Proceedings論文に対するCC BY適用のご案内	■第71回年次大会(2016年)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)	■第12回Jr.セッションの開催	■第71回年次大会(2016年)の参加登録・講演概要集の申込について	■第71回年次大会(2016年)講演概要集原稿の書き方および提出について	■2015年11月1日付新入会者	12— 955					

本会記事

■Plasma Conference 2014開催報告	2— 162				
■日本物理学会第20回(2015年)論文賞授賞論文	5— 398				
■一般社団法人 日本物理学会 第14回代議員懇談会報告	■一般社団法人 日本物理学会 第95回定時総会	■第70回年次大会	■第70回年次大会の忘れ物	■第11回Jr.セッション	6— 474
■日本物理学会理事・監事・代議員, 委員会委員	キャリア支援センター, 物理系学術誌刊行センター, 等氏名表	8— 659			
■2015年秋季大会	■2015年秋季大会の忘れ物	■日本物理学会 第10回若手奨励賞受賞者47名(五十音順)	12— 961		

その他

日本物理学会誌投稿規定	4— 304
本会関係欧文誌目次	1—75, 2—163, 3—237, 4—333, 5—400, 6—502, 7—583, 8—667, 9—736, 10—807, 11—896, 12—965
賛助会員	1—76, 2—164, 6—504

増刊号

第70回年次大会(2015年)プログラム(早稲田大学早稲田キャンパス)2015年3月21日~24日	3—増刊号
2015年秋季大会プログラム(大阪市立大学杉本キャンパス, 関西大学千里山キャンパス)2015年9月25日~28日, 9月16日~19日	8—増刊号

綴込み

Tsai型クラスター組立模型	1—綴込み
正会員の皆様へ 第71~72期代議員選挙(信任投票)のお願い	2—綴込み
第71~72期代議員選挙投票用紙	2—綴込み

日 本 物 理 学 会 誌

第 70 卷

2015

主 題 別 索 引
著 者 索 引
新著紹介欄原著者索引

一般社団法人 日 本 物 理 学 会

日本物理学会誌 第70巻 主題別索引

素粒子 (理論/実験)

特集「発展し続ける一般相対論—時空論の起承転“望”—」

一般相対論と量子力学の統合に向けて	大栗博司	2—130
ニュートリノ振動—量子力学的干渉効果の一例—	安田修	4—242
2014年度原子核三者若手夏の学校活動報告	宮本貴也, 加藤洋崇, 小林良彦, 白井純哉	5—382
ヒッグス粒子「発見」の意味と, 本当の発見に向けて	兼村晋哉	6—408
大統一理論の間接的な証拠としてのニュートリノ質量と大混合角	前川展祐	6—427
ブラックホールに対するホログラフィック原理の数値的検証	伊敷吾郎, 西村淳, 花田政範, 百武慶文	6—436
ホログラフィー原理—ブラックホールが指し示す量子重力への道筋—	関野恭弘	7—508
荷電レプトンで探る新物理	三原智	10—740

原子核 (理論/実験)

見えないクォーク・グルーオンを見る	福嶋健二	5—338
2014年度原子核三者若手夏の学校活動報告	宮本貴也, 加藤洋崇, 小林良彦, 白井純哉	5—382
インビーム γ 線核分光による新魔法数の発見	武内聡, デービッド・ステッペンベック, 宇都野穰	7—535
太陽系を作った超新星爆発はいつ起きたのか?—宇宙核時計ニオプ92—	早川岳人, 梶野敏貴, 千葉敏	11—824
新しいハドロンの存在形態: エキゾチックな多クォーク状態	瀧澤誠	12—900
核力はどこまで解っているか?—3体核力の実験的な現状—	関口仁子	12—912
クォークから中性子星へ—格子QCD計算を用いた新たな挑戦—	井上貴史	12—921

宇宙線・宇宙物理, 天文学, 地球惑星科学

特集「発展し続ける一般相対論—時空論の起承転“望”—」

はじめに	常定芳基	2—80
一般相対論の成立	岡村浩	2—81
一般相対論ミニマム	須藤靖	2—87
一般相対性理論の数理	小玉英雄	2—95
中性子星とブラックホール—相対論的天体物理学入門—	中村卓史	2—103
一般相対論的宇宙論	杉山直	2—111
一般相対論の実験的検証と重力理論の拡張	田中貴浩	2—119
アインシュタインからの宿題: 重力波の検出	川村静児	2—125
一般相対論と量子力学の統合に向けて	大栗博司	2—130
数値相対論の展開	柴田大	2—134
重力崩壊型超新星の爆発メカニズム	滝脇知也, 固武慶	3—170
ボイジャー1号探査機, 太陽圏境界を越え星間空間に入る	鷺見治一	4—244
宇宙環境と地球の気候—太陽圏システムの物理学—	宮原ひろ子	5—340
第44回天文・天体物理若手夏の学校開催報告	千秋元	5—378
鉱物といふもの	浜根大輔	6—446
銀河系内で初めての極超新星の痕跡を発見か?	木村公, 常深博, 富田洋	7—540
低温アモルファス氷表面における水素原子の拡散—宇宙における分子進化の鍵—	羽馬哲也, 香内晃, 渡部直樹	8—608
系外惑星の多様性と遍在性	井田茂	9—672
宇宙を満たすガンマ線背景放射の起源と残された謎	井上芳幸	10—752
天体・日常・微小スケールをつなぐクレーター物理学	桂木洋光	11—855
望遠鏡: 宇宙認識の発展 (シリーズ「国際光年 IYL2015に寄せて」)	海部宣男	12—902

物性 I (領域 4, 5, 9, 10)

波長分解ポンプ・プローブ法によるコヒーレントフォノンの研究	溝口幸司, 大島悟郎	3—200
ドーピングしたトポロジカル絶縁体における超伝導とマヨラナ粒子	山影相, 矢田圭司, 佐藤昌利, 田仲由喜夫	5—356
第59回物性若手夏の学校開催報告	吉田賢典, 西口大貴	5—380
高圧ねじり加工による金属ガラスの構造若返り	土谷浩一, 孟凡強, 横山嘉彦	7—544
ラッシュバ効果—2次元電子系のスピン軌道相互作用	有賀哲也	8—588
近接する2つの物体間の「力」と「電流」の関係	杉本宜昭	8—620
小特集「X線・粒子線構造解析」		
はじめに	会誌編集委員会	9—674
寺田寅彦の「X線と結晶」からX線自由電子レーザーへ	石川哲也	9—675
我が国における反射高速電子回折の発展と全反射陽電子回折への展開	一宮彪彦	9—683
JRR2からJ-PARCへの50年の歩み (日本の中性子散乱研究の歴史)	遠藤康夫	9—694
トポロジカル絶縁体薄膜の構造物性	白澤徹郎, 高橋敏男	9—713
固体中のスピン軌道相互作用が引き起こす特異な電子スピン構造	宮本幸治, 木村昭夫, 奥田太一	10—760
ナノカーボンのディラック電子=フォノン間相互作用ダイナミクス	片山郁文, 武田淳, 北島正弘	10—770
屈折率って何?—現代の“巨視的電磁場”問題—	追田和彰	11—812
逆磁気光学効果を用いた偏光—磁化振動の3次元転写	佐藤琢哉	11—840
青色発光ダイオード開発には何が必要だったか?	平松和政	11—851
ハロゲン化鉛ペロブスカイト太陽電池	金光義彦, 山田泰裕	12—926

ベタヘルツエンジニアリング創出に向けたアト秒光物性 ～NTT物性科学基礎研究所における超高速光物理研究～	小栗克弥	12— 936
物性Ⅱ (領域 3, 6, 7, 8)		
Tsai型クラスター組立模型		1— 綴込み
美しく複雑な秩序	下田正彦	1— 4
ペロブスカイト型Co酸化物のスピンクロスオーバー現象：その歴史と現状	浅井吉蔵, 小林義彦, 佐藤桂輔	1— 6
5d電子系イリジウム酸化物における新奇な絶縁体と超伝導	渡部 洋, 白川知功, 柚木清司	1— 31
第59回物性若手夏の学校開催報告	吉田賢典, 西口大貴	5— 380
スピントロニクスとスピンポンピング	水上成美	6— 406
強いスピン軌道相互作用を持つモット転移系で見られる磁壁の金属性	藤岡 淳, 上田健太郎, 十倉好紀	6— 441
酸化チタン薄膜に対するLi ⁺ イオンのインターカレーション挙動	上田未紀	10— 785
RRAMの原理はどこまで理解できたのか?	井上 公	11— 814
磁気スキルミオンとモノポールの織りなす創発的電磁現象	高嶋梨菜, 藤本 聡	11— 830
物性基礎, 統計物理, 数理物理 (領域 11)		
アンダーソン局在の臨界現象—最近の実験・理論の新展開—	小布施秀明	1— 14
量子測定における誤差・擾乱の計測と不確定性関係	枝松圭一, 金田文寛, So-Young Baek, 小澤正直	3— 188
“実験技術”としての量子多体系シミュレーションソフトウェアALPS	藤堂 眞 治	4— 275
超流動, ボース・アインシュタイン凝縮, 密度ゆらぎ	加藤雄介, 渡部昌平	5— 362
熱的な量子純粋状態を用いた統計力学の定式化	杉浦 祥, 清水 明	5— 368
第59回物性若手夏の学校開催報告	吉田賢典, 西口大貴	5— 380
可積分量子多体系の非平衡ダイナミクスと統計力学の基礎	出口哲生, 佐藤 純, 上西慧理子	6— 419
To be, or not to be—吸収状態をめぐる非平衡臨界現象の物理学	竹内 一 将	8— 599
マギンの群れの集団動力学	早川 美 徳	9— 718
カタエフ量子スピン液体の“気液”相転移	那須謙治, 宇田川将文, 求 幸年	10— 776
「かえるのうた」に耳をすませば～身近な生物の同期現象～	合原 一 究	10— 782
超音波洗浄とソノルミネセンス	崔 博 坤	12— 932
原子・分子・量子エレクトロニクス, 放射線 (領域 1)		
単一原子/光子を操作するナノ光ファイバー	白田 耕 藏	1— 36
共鳴過程を制御する：極低温量子気体を操る原子衝突	島村 勲	3— 168
微粒子の熱放射における共振器量子電磁気学的効果	立川真樹, 小田島仁司	4— 269
スピン偏極は移るよ, どこまでも：原子気体の光ポンピングによる金属塩の核スピン偏極	石川 潔	7— 530
光学を革新したレーザーの創造性とその発展 (シリーズ「国際光年 IYL2015に寄せて」)	霜田 光 一	8— 591
微弱な磁気双極子相互作用によるボース・アインシュタイン凝縮体スピンの空間構造形成：磁性気体としての冷却Rb原子	衛藤雄二郎, 斎藤弘樹, 平野琢也	8— 614
生物物理, 化学物理, ソフトマター (領域 12)		
反応-拡散-駆動系として理解する細胞の形態変化	石原秀至, 澤井 哲	1— 25
ベーストの記憶効果と破壊の制御への応用	中原明生, 松尾洋介, 大信田文志	3— 179
生体系のシミュレーションのサンプリング手法及び解析方法の開発	光武重代理	3— 194
形状可変な境界としてのシワ (リンクル) 構造の展開	大園 拓 哉	4— 253
感熱性高分子水溶液の相分離・ゲル化・レオロジー	田中 文 彦	4— 260
アクティブマターの非線形ダイナミクス	太田 隆 夫	5— 347
第54回生物物理若手夏の会夏の学校報告	山田大智	5— 386
心筋収縮系にみる自励振動現象SPOC	石渡信一, 佐藤勝彦	7— 519
3Dプリンターが拓く新しい物理学の可能性	古川英光, 川上 勝, 牧野真人, 齊藤 梓	8— 625
小特集「X線・粒子線構造解析」 我が国における生体分子・粒子の構造解析—過去・現在そして未来の展望—	中迫雅由, 山本雅貴	9— 702
光合成による水分解：生命の巧みな光エネルギー変換のしくみ (シリーズ「国際光年 IYL2015に寄せて」)	野口 巧	10— 742
ランドスケープ描像で見る細胞分化の物理	寺田 智 樹	10— 765
多次元自由エネルギー面で捉える生体分子の力学応答	鈴木 洋 一	11— 835
物理教育 (領域 13)		
物理教育委員長として：物理学分野の参照基準 (案) と委員会の活動	須藤 彰 三	11— 809
物理社会学・物理学史, 環境物理 (領域 13)		
アルバート・クルーと走査型透過電子顕微鏡の開発：単原子の観察	山口 まり	1— 51
特集「発展し続ける一般相対論—時空論の起承転“望”—」 一般相対論の成立	岡村 浩	2— 81
実験技術・計測標準		
なぜ光電子増倍管 (真空管) か? ～～～極限計測の為に～～～ (シリーズ「国際光年 IYL2015に寄せて」)	大村孝幸, 下井英樹, 河合克彦, 小玉剛史	11— 845
境界領域・その他		
ゲージ・重力対応で探る強相関系の非平衡物理学	中村 真	7— 510
シリーズ「国際光年 IYL2015に寄せて」 序言	誌編集委員会	8— 590
追悼		
Manuel Cardona教授を悼んで	菅 滋 正	1— 56

北澤宏一先生を偲んで	高木英典	3—222
大河千弘博士を偲ぶ	玉野輝男, 浅見明, 西川正名	3—223
松原武生先生を偲んで	米沢富美子	4—292
追悼: 永野元彦氏	手嶋政廣	5—388
玉垣先生を偲んで	高塚龍之, 巽敏隆	6—458
広田良吾先生を偲んで	薩摩順吉	6—459
Recollections of the Matsubara-ken, 1965-6	Anthony J. Leggett	8—641
鈴木敬愛先生を偲んで	小泉大一	8—645
南部陽一郎先生をしのんで	江口徹	10—792
Samuel Frederick Edwards 教授を偲んで	土井正男	11—861
会誌		
放射線被曝による発がんは線量に比例するか?	宮沢弘成	4—296
「会員の声」運用指針について	会誌編集委員会	4—296
日本物理学会誌投稿規定		4—304
優雅なる夢の彼方に	森川雅博	9—669
編集後記		1—62, 2—156, 3—232, 4—303, 5—395, 6—467, 7—574, 8—654, 9—732, 10—800, 11—868, 12—953
学術情報・学術雑誌		
電子ジャーナルの平等アクセス実現のための3つの提言	石田武和	6—450
オンライン, オンライン	大槻東巳	7—505
JPSJ 編集委員長への就任に当たって	上田和夫	10—737
JPSJ の最近の注目論文から	安藤恒也	1—45, 2—140, 3—206, 4—283, 5—374, 7—549
	上田和夫	8—631, 9—722, 10—789, 11—859, 12—941
PTEP の最近の招待・特集論文から	坂井典佑	6—454
新著紹介		1—57, 2—150, 3—224, 4—293, 5—389, 6—460, 7—563, 8—646, 9—724, 10—793, 11—862, 12—946
図書リスト		1—58, 3—225, 5—390, 7—564, 9—725, 11—863
本会関係欧文誌目次		1—75, 2—163, 3—237, 4—333, 5—400, 6—502, 7—583, 8—667, 9—736, 10—807, 11—896, 12—965
国際協力・国際交流		
オンライン, オンライン	大槻東巳	7—505
AAPPS-DPP 設立とその活動報告	菊池満	7—565
日本物理学会		
物理学会の2014年	兵頭俊夫	1—1
ゲストとホスト	藤井保彦	2—77
2014年秋季大会 シンポジウムの報告	領域委員会	2—144
物理学史資料委員会の活動と資料の行く末	高岩義信	3—165
2014年秋季大会 招待・企画講演の報告	領域委員会	3—213
学術会議と物理学会	岡真	4—239
新たなステージに向かう男女共同参画活動	森初果	5—335
バルチモアより学会を思う	櫻井博儀	6—403
第70回年次大会(2015年) シンポジウムの報告	領域委員会	7—552
日本物理学会 Jr. セッションは楽しい!	松川宏	8—585
第70回年次大会(2015年) 招待・企画・チュートリアル講演の報告	領域委員会	8—634
JPSJ 編集委員長への就任に当たって	上田和夫	10—737
一会計理事から見た日本物理学会	松井哲男	12—897
会告		1—64, 2—157, 3—233, 4—309, 5—396, 6—468, 7—576, 8—655, 9—734, 10—802, 11—870, 12—955
本会記事		2—162, 5—398, 6—474, 8—659, 12—961
正会員の皆様へ 第71~72期代議員選挙(信任投票)のお願い		2—綴込み
第71~72期代議員選挙投票用紙請求		2—綴込み
日本学術会議		
第22期日本学術会議物理学委員会の活動	伊藤早苗	3—226
学術会議と物理学会	岡真	4—239
受賞等		
2014年度ノーベル化学賞: E. Betzig氏, S. W. Hell氏, W. E. Moerner氏—超解像蛍光顕微鏡に授賞	河田聡	3—218
第9回凝縮系科学賞: 松石聡氏, 水島健氏	北岡良雄	3—219
2014年度仁科記念賞: 松田祐司氏	岩佐義宏	3—219
2014年度仁科記念賞: 小林隆氏, 中家剛氏	中村健蔵	3—220
第2回湯浅年子賞「金賞」: 坂東昌子氏	東島清, 森初果	4—290
第2回湯浅年子賞「銀賞」: 関口仁子氏	酒井英行	4—290
2014年度文化功労者: 佐藤勝彦氏	横山順一	4—291
第105回恩賜賞・日本学士院賞: 細野秀雄氏	伊藤満	8—643
第105回日本学士院賞: 香取秀俊氏	洪鋒雷	8—643
第105回日本学士院賞: 牧島一夫氏	河合誠之	8—644
科学技術分野の文部科学大臣表彰	会誌編集委員会	8—644
梶田隆章氏のノーベル賞受賞	荒船次郎	12—944

研究体制・研究費

平成26年度科学研究費助成事業(科研費, 基盤研究等) 審査結果報告	岩田高広, 石橋延幸	1— 48
科研費(基盤研究S, A, B, C) 配分状況調査報告	研究費配分に関する教育研究環境検討委員会	7— 567

物理と社会

日米における男女共同参画の発展	永 宮 正 治	1— 59
新たなステージに向かう男女共同参画活動	森 初 果	5— 335
オンライン, オンライン	大 槻 東 巳	7— 505
物理教育委員長として: 物理学分野の参照基準(案)と委員会の活動	須 藤 彰 三	11— 809

随筆

ドイツ・ハレ ポスドク滞在記	篠 原 康	1— 56
ウズベキスタンからの便り	中 村 勝 弘	3— 208
オーストリア科研費事情	鈴 木 謙	3— 210
アメリカでの就職活動記	堀 内 俊 作	4— 285
アメリカさすらい滞在記	村 瀬 孔 大	4— 287
ユーリッヒ滞在記	小 林 秀 樹	5— 376
平らな国の研究生活	御 手 洗 菜 美 子	6— 456
夫婦で物理を?	森 井 政 宏	12— 942

その他

掲示板	1—60, 2—151, 3—228, 4—297, 5—391, 6—461, 7—570, 8—647, 9—726, 10—794, 11—864, 12—948
行事予定	1—62, 2—154, 3—231, 4—302, 5—394, 6—465, 7—573, 8—653, 9—731, 10—799, 11—867, 12—953
賛助会員	1—76, 2—164, 6—504

増刊号

第70回年次大会(2015年) プログラム(早稲田大学早稲田キャンパス) 2015年3月21日~24日	3—増刊号
2015年秋季大会プログラム(大阪市立大学杉本キャンパス, 関西大学千里山キャンパス) 2015年9月25日~28日, 9月16日~19日	8—増刊号

日本物理学会誌 第70巻 著者索引

- あ
 合原一究……………10— 782
 浅井吉蔵……………1— 6
 浅見明……………3— 223
 荒船次郎……………12— 944
 有賀哲也……………8— 588
 安藤恒也……………1—45, 2—140, 3—206,
 4—283, 5—374, 7—549
- い
 石岡邦江……………10— 800
 石川潔……………7— 530
 石川哲也……………9— 675
 石敷敷吾郎……………6— 436
 石崎章郎……………12— 946
 石田武和……………6— 450
 石橋延幸……………1—48, 10—793
 石原秀至……………1— 25
 石渡信一……………7— 519
 磯 暁……………7— 563
 板倉数記……………11— 862
 井田茂……………9— 672
 板橋健太……………7— 574
 一宮彪彦……………9— 683
 伊藤早苗……………3— 226
 伊藤満……………8— 643
 井上公……………11— 814
 井上貴史……………12— 921
 井上芳幸……………10— 752
 岩佐義宏……………3— 219
 岩田高広……………1— 48
- う
 上田和夫……………8—631, 9—722,
 10—737, 10—789, 11—859, 12— 941
 上田健太郎……………6— 441
 上田未紀……………10— 785
 白井純哉……………5— 382
 宇田川将文……………10— 776
 宇都野穰……………7— 535
- え
 江口徹……………10— 792
 枝松圭一……………3— 188
 衛藤雄二郎……………8— 614
 遠藤康夫……………9— 694
- お
 大栗博司……………2— 130
 大信田丈志……………3— 179
 大園拓哉……………4— 253
 太田隆夫……………5— 347
 大槻東巳……………7— 505
 大島悟郎……………3— 200
 大村孝幸……………11— 845
 岡真……………4— 239
 岡村浩……………2— 81
 沖本洋一……………11— 868
 奥田太一……………10— 760
 小栗克弥……………12— 936
 小澤正直……………3— 188
 小田島仁司……………4— 269
 小布施秀明……………1— 14
- か
 会誌編集委員会……………2—80, 4—296,
 8—590, 644, 9—674
 海部宣男……………12— 902
 梶野敏貴……………11— 824
 片山郁文……………10—770, 11—862
 桂木洋光……………11— 855
 桂法称……………8— 646
 加藤岳生……………9— 732
 加藤洋崇……………5— 382
 加藤雄介……………5— 362
 金田文寛……………3— 188
 金光彦彦……………12— 926
 兼村晋哉……………6— 408
 上西慧理子……………6— 419
 河合誠之……………8— 644
 河合克彦……………11— 845
 川上勝……………8— 625
 河田聡……………3— 218
 川村静児……………2— 125
- き
 菊池満……………7— 565
 北岡良雄……………3— 219
 北島正弘……………10— 770
 木村昭夫……………10— 760
 木村公……………7— 540
- く
 桑原孝夫……………10— 793
- け
 研究費配分に関する
 教育研究環境検討委員会……………7— 567
- こ
 小芦雅斗……………12— 947
 小泉大一……………8— 645
 香内晃……………8— 608
 合田義弘……………5— 389
 固武慶……………3— 170
 小玉剛史……………11— 845
 小玉英雄……………2— 95
 小林秀樹……………5— 376
 小林義彦……………1— 6
 小林良彦……………5— 382
- さ
 齊藤梓……………8— 625
 斎藤弘樹……………8— 614
 坂井典佑……………6— 454
 酒井英行……………4— 290
 櫻井博儀……………6— 403
 塔隆志……………2— 150
 迫田和彰……………11— 812
 薩摩順吉……………6— 459
 佐藤勝昭……………1— 57
 出藤勝彦……………7— 519
 佐藤桂輔……………1— 6
 佐藤純……………6— 419
 佐藤琢哉……………11— 840
 佐藤昌利……………5— 356
 澤井哲……………1— 25
- し
 篠原康……………1— 56
 柴田大……………2— 134
 島村勲……………3— 168
 清水明……………5— 368
 下井英樹……………11— 845
 霜田光一……………8— 591
 下田正彦……………1— 4
 白川知功……………1— 31
 白澤徹郎……………9— 713
- す
 菅本晶夫……………7— 563
 杉浦祥……………5— 368
 杉本宜昭……………8— 620
 杉山直……………2— 111
 鈴木謙……………3— 210
 鈴木淳史……………4— 295
 鈴木洋一……………11— 835
 須藤彰三……………11— 809
 須藤靖……………2— 87
- せ
 関口仁子……………12— 912
 関野恭弘……………7— 508
 世良正文……………12— 946
- た
 高岩義信……………3— 165
 高木英典……………3— 222
 高嶋梨菜……………11— 830
 高塚龍之……………6— 458
 高橋敏男……………9— 713
 瀧澤誠……………12— 900
 滝脇知也……………3— 170
 田口俊弘……………8— 646
 竹内一将……………6—461, 8—599
 武内聡……………7— 535
 武田淳……………10— 770
 立川真樹……………4— 269
 立川裕二……………6— 460
 巽敏隆……………6— 458
 田中貴浩……………2— 119
 田中文彦……………4— 260
 田仲由喜夫……………5— 356
 玉野輝男……………3— 223
- ち
 千秋元……………5— 378
 千葉敏……………11— 824
- つ
 土谷浩一……………7— 544
 常定芳基……………12— 953
 常深博……………7— 540
- て
 出口哲生……………6— 419
 手嶋政廣……………5— 388
 寺田智樹……………10— 765
- と
 土井正男……………11— 861
 藤堂眞治……………4— 275
 十倉好紀……………6— 441

富田 洋	7— 540	藤山 茂樹	8— 654	山影 相	5— 356
な		古川 英光	8— 625	山口 まり	1— 51
中 追 雅 由	9— 702	ほ		山田 大智	5— 386
中 原 明 生	3— 179	保 坂 淳	5— 389	山田 泰裕	12— 926
永 宮 正 治	1— 59	堀 内 俊 作	4— 285	山本 雅貴	9— 702
中 村 勝 弘	3— 208	ま		ゆ	
中 村 村 健 藏	3— 220	前 川 展 祐	6— 427	柚 木 清 司	1— 31
中 村 村 真 史	7— 510	牧 野 真 人	8— 625	よ	
中 村 卓 史	2— 103	間 瀬 圭 一	9— 724	横 山 順 一	4— 291
中 村 泰 信	3— 224	松 井 哲 男	12— 897	横 山 雅 彦	4— 293
那 須 治	10— 776	松 尾 洋 介	3— 179	横 山 嘉 彦	7— 544
並 木 雅 俊	1— 57	松 川 宏	8— 585	吉 田 賢 典	5— 380
に		松 本 重 貴	1— 62	米 沢 富 美 子	4— 292
西 川 正 名	3— 223	み		り	
西 口 大 貴	5— 380	水 上 成 美	6— 406	領 域 委 員 会	2—144, 3—213, 7—552, 8—634
西 村 淳	6— 436	水 崎 高 浩	2— 156	わ	
の		溝 口 幸 司	3— 200	鷺 見 治 一	4— 244
野 口 巧	10— 742	御 手 洗 菜 美 子	6— 456	渡 部 直 樹	8— 608
は		光 武 亜 代 理	3— 194	渡 部 洋	1— 31
白 田 耕 藏	1— 36	南 龍 太 郎	3— 232	渡 邊 康	6— 467
花 田 政 範	6— 436	三 原 智	10— 740	渡 部 昌 平	5— 362
羽 馬 哲 也	8— 608	宮 沢 弘 成	4— 296	B	
浜 根 大 輔	6— 446	宮 原 ひろ子	5—340, 9—725	So-Young Baek	3— 188
早 川 岳 人	11— 824	宮 本 幸 治	10— 760	C	
早 川 美 德	9— 718	宮 本 貴 也	5— 382	崔 博 坤	12— 932
ひ		む		H	
東 島 清	4— 290	村 瀬 孔 大	4— 287	洪 鋒 雷	8— 643
百 武 慶 文	6— 436	も		L	
兵 頭 俊 夫	1— 1	望 月 維 人	4— 303	李 哲 虎	5— 395
平 野 琢 也	8— 614	求 幸 年	10— 776	Anthony J. Leggett	8— 641
平 野 哲 文	2— 150	森 井 政 宏	12— 942	M	
平 松 和 政	11— 851	森 川 雅 博	9— 669	孟 凡 強	7— 544
ふ		森 越 文 明	3— 224	S	
福 嶋 健 二	5— 338	森 初 果	4—290, 5—335	デービッド・ステッペンベック	7— 535
藤 井 保 彦	2— 77	や			
藤 岡 淳	6— 441	安 田 修	4— 242		
藤 本 聡	11— 830	矢 田 圭 司	5— 356		

日本物理学会誌 第70巻 新著紹介欄 原著者索引

あ	青木 晴 善……………12— 946	郡 和 範……………9— 724	B	S. Bromberg……………12— 946
秋 葉 康 之……………2— 150	小 玉 英 雄……………9— 724	さ	C	J. Casalderrey-Solana……………7— 563
阿 原 一 志……………4— 295	齊 藤 英 治……………1— 57	酒 谷 雄 峰……………7— 563	J. M. D. Coey……………5— 389	
有 馬 孝 尚……………8— 646	し	し	D	K. A. Dill……………12— 946
い	井 岡 邦 仁……………9— 724	秦 泉 寺 雅 夫……………6— 460	F	C. A. Fuchs……………3— 224
え	江 沢 洋……………1— 57	た	K	Y. V. Kovchegov……………11— 862
江 馬 一 弘……………12— 947	竹 内 薫……………9— 725	た	L	E. Levin……………11— 862
お	江 田 中 宏 幸……………9— 725	な	H. Liu……………7— 563	M. Longair……………10— 793
小 野 寺 秀 也……………12— 946	中 山 正 昭……………11— 862	ふ	M	D. Mateos……………7— 563
か	福 間 将 文……………7— 563	福	R	K. Rajagopal……………7— 563
上 出 洋 介……………2— 150	伏 見 康 治……………1— 57	伏	W	U. A. Wiedemann……………7— 563
上 村 洸……………3— 224	み	み		
き	北 川 米 喜……………8— 646	宮		
く	国 広 悌 二……………5— 389	原 ひろ子……………10— 793		
蔵 本 由 紀……………6— 461	村 上 修 一……………1— 57	む		
こ	や	や		
高エネルギー加速器研究機構……………9— 724	山 本 貴 博……………3— 224	山		
	山 本 義 隆……………4— 293	本		