

日本物理学会誌

- 重イオン核融合反応と超重元素
- バリオン間相互作用モデルとバリオン多体系

BUTSURI

第68巻 第10号(通巻767号) ISSN 0029-0181
昭和30年6月13日 第3種郵便物認可
平成25年10月5日発行 毎月5日発行

2013 VOL. 68 NO.

10



口絵：今月号の記事から	649
巻頭言 「会誌が変わります」	宮下精二 651

最近のトピックス

AMS-02の初期成果：過剰な宇宙線陽電子 	灰野禎一 652
重イオン核融合反応と超重元素*	萩野浩一, 有友嘉浩 654
バリオン間相互作用模型とバリオン多体系	Thomas A. Rijken, 山本安夫 662
最近の研究から 超高エネルギー宇宙線観測の現在：テレスコープアレイ実験の結果 	常定芳基, 萩尾彰一, 佐川宏行 670

JPSJの最近の注目論文から 6月の編集委員会より	安藤恒也 675
PTEPの最近の招待・特集論文から 2013年3月号より	坂井典佑 679
学界ニュース 第54回藤原賞, 第53回東レ科学技術賞：香取秀俊氏	安田正美 681
2013年Yodh Prize：永野元彦氏	手嶋政廣 681
第3回IUPAP Young Scientist Prize in Statistical Physics： 沙川貴大氏, 竹内一将氏	田崎晴明 682
IUPAP C4 Commission Young Scientist Awards：石原安野氏	吉田 滋 682
ラ・トッカータ 中国の宇宙基礎科学を垣間見る	松岡 勝 683
歴史の小径 三村剛昂と広大理論物理学研究所	小長谷大介 685
新著紹介	687
会員の声	690
■『物理学会誌』68巻2号(2013年2月)の編集後記(pp.128-129)への疑問 ■物理学書の英語, 英語の物理学書 ■泉 雅子氏の解説「放射線の人体への影響」は放射線被曝を過小評価している ■泉 雅子氏からのコメント ■物理学会理事会への要望について ■理事会からのコメント	

掲示板 ■人事公募 ■学術的会合 ■その他	694
行事予定	698
日本物理学会誌投稿規定	701

会告 ■第69回年次大会・講演募集掲載号 ■第69回年次大会の企画募集 ■2013年8月1日付新入会者 ■資料等在庫表兼購入申込書	705
---	-----

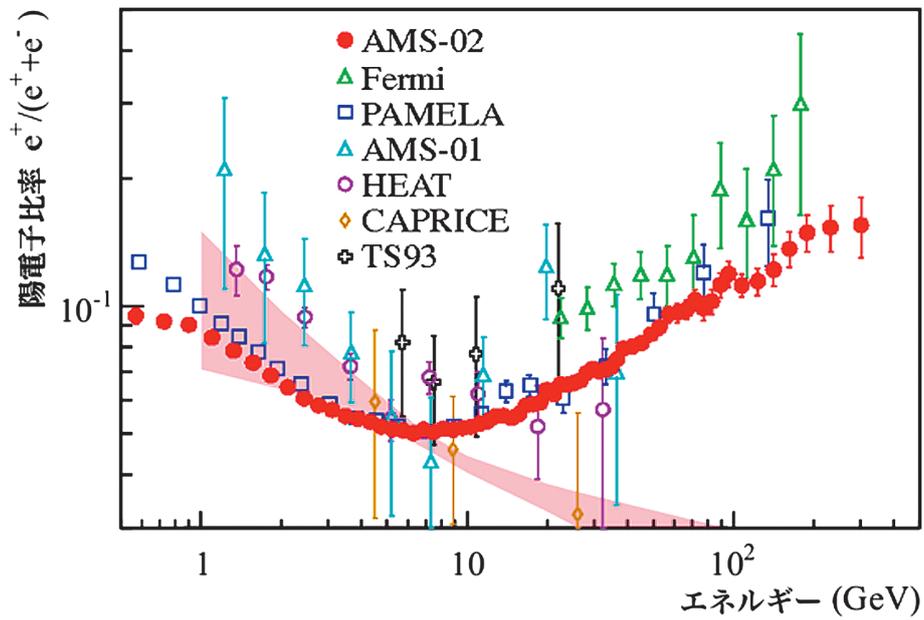
本会関係欧文誌目次	710
-----------	-----

表紙の説明 日本物理学会誌は来年1月号からリニューアルする。ここでは過去の物理学会誌の表紙の変遷をレイアウトした。上段左より1(1946), 5(1950)6号, 7(1952)1号, 11(1956)1号, 下段左より23(1968)1号, 43(1988)1号(山本美智代氏のデザイン), 67(2012)10号および来年1月号からの表紙デザイン案である。現在の表紙は1996年の日本物理学会50周年記念事業の一環として、写真あるいは図柄を変えて掲載し始めて以来、17年間の長きにわたり親しまれてきた。下段右端の新表紙内の写真は、68巻9号の「解説」記事を執筆された東北大学中村哲氏提供によるラムダハイパー核分光システムの写真。

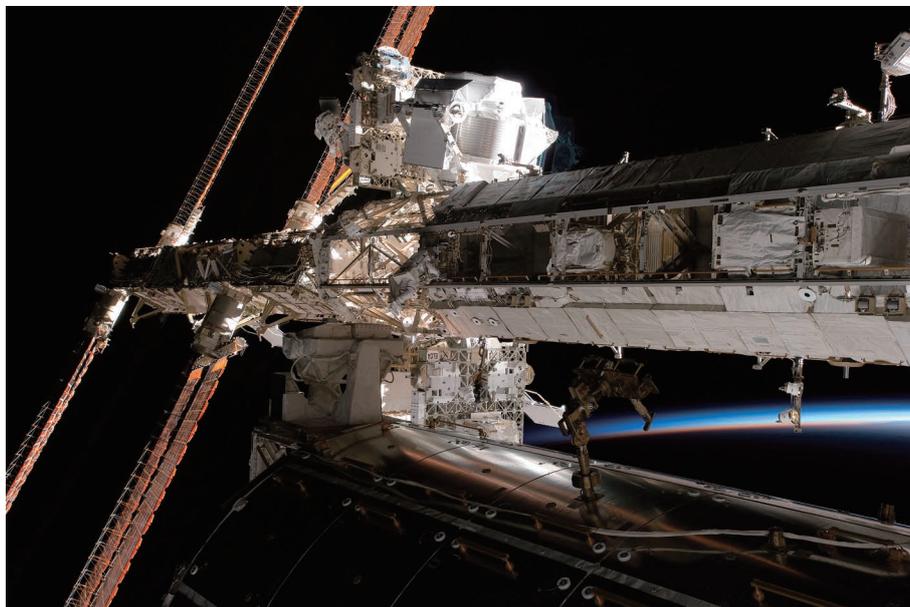
* 1月号からの新しい形式のテストパターン。

Graphic Page		649
Editorial		
<i>Attempts for "Butsuri"</i>	Seiji Miyashita	651
<hr/>		
Recent Topics		
<i>The First Results of AMS-02: The Excess of Cosmic Ray Positrons</i>	Sadakazu Haino	652
Reviews		
<i>Fusion of Massive Systems and Superheavy Elements</i>	Kouichi Hagino and Yoshihiro Aritomo	654
<i>Baryon-Baryon Interaction Models and Baryonic Many-Body Systems</i>	Thomas A. Rijken and Yasuo Yamamoto	662
Current Topics		
<i>Observation of Ultra-High Energy Cosmic Rays by Telescope Array</i>	Yoshiki Tsunesada, Shoichi Ogio and Hiroyuki Sagawa	670
<hr/>		
JPSJ Selected Papers in the Latest Issue	Tsuneya Ando	675
PTEP Invited Papers and Special Sections in the Recent Issue	Norisuke Sakai	679
Physics Community News		
<i>54th Fujiwara Award and 53rd Toray Science and Technology Award: Hidetoshi Katori</i>		681
<i>Yodh Prize: Motohiko Nagano</i>		681
<i>IUPAP Young Scientist Prize in Statistical Physics: Takahiro Sagawa and Kazumasa Takeuchi</i>		682
<i>IUPAP C4 Commission Young Scientist Awards 2013: Aya Ishihara</i>		682
La Toccata		
<i>A Recent Progress of Chinese High Energy Astrophysics</i>	Masaru Matsuoka	683
The Path to History		
<i>Yoshitaka Mimura and the Research Institute for Theoretical Physics of Hiroshima University</i>	Daisuke Konagaya	685
Book Reviews		687
Letters and Comments		690
<hr/>		
Notice Board		694
<hr/>		
JPS Announcements		705

最近のトピックス 「AMS-02 の初期成果：過剰な宇宙線陽電子」 p.652



AMS-02 と過去の観測（本文参照）による陽電子比率の測定結果。ハッチは二次宇宙線モデルによる予想値。



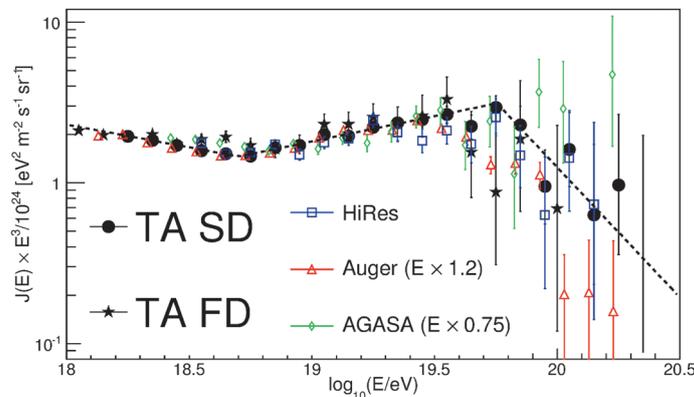
国際宇宙ステーションに設置された AMS-02 の測定器写真（中央上部、白く光っている所）。提供：NASA



(左図) TA の検出器配置。四角印は地表検出器 (SD) を、3 カ所の三角印は FD (大気蛍光望遠鏡) ステーションを表す。各 FD の視野は図中の方位角方向 108° (図中下の 2 ステーション) と 120° (図中上のステーションのみ) の扇形で表されている。図では FD から 25 km の範囲を見渡すとした視野で描いてあるが、実際に観測可能な範囲は宇宙線のエネルギーに依存する。

(中央図) 左図の右下のサイトに建設した FD ステーション。

(右図) TA サイトに設置した SD。



UHECRs のエネルギースペクトル。横軸はエネルギー、縦軸は宇宙線の強度 [宇宙線数/エネルギー/面積/時間/立体角] に E^3 をかけたもの。宇宙線のスペクトルはほぼ $J(E) \sim E^{-3}$ で表すことができるので、 $E^3 J(E)$ 形で表すとスペクトルの微細な構造や異なる実験結果の差異がわかりやすくなる。● (黒丸) は TA SD による結果, ★ (星印) は TA FD による結果。破線は SD のスペクトルを 2 か所の折れ曲がりを持つ 3 本の power-law でフィットしたものである。AGASA, HiRes, Auger 各グループによる結果は白抜きで表示してある。なお実験ごとにエネルギースケールの違いがあることを考慮し、AGASA は -25% 、Auger は $+20\%$ だけエネルギーをシフトしている。

「会誌が変わります」

宮下 精二 (会誌編集委員長)

来年1月号から旭耕一郎前委員長が立ち上げられた会誌をより読みやすくするためのワーキンググループの成果がスタートします。この10月号ではその解説記事に関して一部の試行を行っています。今回の改訂では、解説などの記事に拡大アブストラクトをつけることになりました。その部分は担当編集委員による注釈も含め、記事の概要をつかみやすくし、本文の全体構造や主張点などへの理解の役に立つことをめざしています。ご意見をお知らせいただければ幸いです。1月号からは、さらにその他、目次と口絵を合体させた新しい目次や、専門外の会員にも興味があると考えられる物理コンセプトなどに関する説明としての物理学キーワードなども準備されています。

このように会誌を読みやすくするという目標は、実に長年の懸案であり、多くの努力がされてきています。約30年前私が編集委員をしたときにも全く同じ議論があり、Physics Todayの編集長に会ったり、カラーページ導入を行ったりしました。しかし、なぜか会誌は読みにくいと思われています(?)。なぜそうなのでしょう。よく言われるのは、専門家を意識し突っ込まれないように構えて書くという理由です。確かに、「なにをいい加減なことを書いているのか」といわれるのを恐れ、専門家しか気にしない詳細に言及し歯切れが悪い説明になることは考えられます。

これは会誌の記事の位置づけの問題でもあると思います。会誌の記事(解説、実験技術、最近の研究からなど)は物理の解説書として初学者の手引きになるようなものであるべきという考え方や、テーマ紹介的な啓蒙的なものであるべきという考え方など、広い意見分布があります。たぶん、物理学関係者が物理の研究の動向を知るために役立つ平易な読み物的なものをめざすというあたりが共通点かと思いますが、

さて、どのレベルとするかが問題です。物理学科の学生さんへの挨拶などで、「多様な対象を扱っている物理学科の諸研究者が皆一緒にやっていけるのは、学部で習っている力学、電磁気学、量子力学、統計力学(熱力学を含む)、相対論を共通の基盤とし、それぞれの対象に対して物理を追究しているからだ」と話すことがあります。たぶん会誌でも、この線を共通基盤とするのが妥当ではないかと思っています。研究者にとっても専門以外の他の分野では学部生と同じレベル、あるいはそれ以下(?)と考えられるので、内容は学部4年生にわかる程度、場合によっては4年生の輪講に使え程度、にわかりやすく書くことをお願いしてはどうかと思っています。今、会員の裾野を広げるために、会誌をより広い範囲へ配布する可能性についても検討されているようですが、まず学部4年生までを対象としてはどうかなども考えています。

読みにくいもう一つの原因として、研究の成果を羅列的に並べるタイプの記事は比較的書きやすいが、初めての人に何が問題でどのように考えようとしているのかを説明するのは相当骨が折れ、つつい専門的記述の突き進むことになる側面もあるかと思えます。この点に関して、学部生に対して研究紹介をしているつもりになれば、説明の仕方も自ずから変わってくるのではないのでしょうか。また最近、若い人は学振の面接、年を取った人は研究費のプロポーザルと、必ずしも専門家でない対象にプレゼンテーションを行う重要性も増え、昔に比べると“わかりやすい説明”は身近なものになっているのではないのでしょうか。さらに、この最後の点に関しては、執筆依頼をお願いしている立場にもかかわらず、非礼にも、非専門読者や修士学生による閲覧などを行い、わかりやすさに対する編集段階でのチェックも厳しくな

っています。やさしくと言いながらも新聞などの科学欄とは異なり、物理学者が見るのに耐える内容でなくてはならないため専門読者も行われ、上述の非専門読者との両方から注文が付き、物理学会誌はうるさいとの苦言を耳にすることもあります。しかし、多くの執筆者の方々は、「うるさいなー」と思われながらも丁寧に対応して下さっています。皆様の献身的なご協力を今後ともよろしくお願いいたします。

わかりやすくなったとしても、問題は果たして会員の皆様に会誌を手にとってもらえるかどうかです。ちょっと前までは掲示板だけは見るという人が多くいましたが、インターネットが進んだ現在では、そちらの方の需要も減ってきています。昨今の忙しい中で、よっぽどためになる、あるいは楽しいということがなければ、食指は動かないと恐れます。せめてビニール袋から出してもらえるようにするため是非がんばりたいと思っています。いま、袋をあけてこの記事を見てくれている皆さんにはたいへん敬意を払います。是非、近くの人に「今月号の***はおもしろいね」と水を向けていただければ望外の幸せです。よろしくお願いいたします。

また、専門的物理の内容だけでなく、分野外からの興味深い話題の提供や、広く物理学会員の興味の対象となる話題をはじめ諸情報の伝達に関しても、会員の利益に供するよう努めております。会誌は、物理学会員に対する唯一の「物理的」提供物であるので、会員の皆様にとって是非有意義なものとするべく、多くの分野からの新進気鋭の編集委員が真剣に取り組んでいますが、目の届かないこともあると思います。お気づきの点は、是非お近くの編集委員、支部委員にお知らせ下さい。今後とも努力をしていきたいと思っています。すので是非よろしくお願いいたします。

(2013年7月1日原稿受付)

AMS-02 の初期成果：過剰な宇宙線陽電子

昨年(2012年)は宇宙線が発見されてから100年目にあたり、世界各地で記念の国際学会が開かれた。本誌でも特集記事が組まれたのが記憶に新しい。¹⁾ 宇宙線は20世紀前半の素粒子物理学の著しい発展の中で、大変重要な役割を担ってきた。そして、粒子加速器にその座を渡した後も、相補的な役割を果たし、重要な成果を上げている。

一例として、宇宙線中の反粒子の研究が挙げられる。宇宙線の組成は大部分を陽子、ヘリウムが占め、炭素・窒素・酸素・鉄などの重原子核、そして、電子からなる、反粒子は宇宙線中に反陽子と陽電子が観測されているが、極めてわずかであり、我々の周りが物質優勢で、物質と反物質の対称性の破れを示す一つの重要な証拠となっている。

この意味するところは、宇宙線中に観測される反粒子は銀河中で「新たに」生成されたということであり、宇宙での高エネルギー現象や、素粒子の標準理論を超えた新しい物理を探るプローブになり得るということである。

AMS-02 (Alpha Magnetic Spectrometer) は国際宇宙ステーションに搭載された素粒子検出装置である。2011年5月19日にインストールされた後、宇宙線データを収集し続けており、その最初の結果を2013年4月3日に公表した。²⁾ それは、図1に示すように、陽電子比率(電子と陽電子の総和に対する陽電子の割合)を0.5 GeVから350 GeVのエネルギーにわたって精密測定したものである。比率決定に用いられた陽電子の事象数は40万に及び、これまで直接観測された中で、最大の高エネルギー宇宙線反粒子数になる。

現在の宇宙線の標準モデルでは、 10^{15} eV程度以下の宇宙線は、超新星爆発に伴う残骸中の衝撃波により加速され、銀河系内を拡散的に伝搬しながら外へ漏れ出すと考えられている。源で直接加速されるため一次宇宙線と呼ばれ、その強度はべき関数で減少する。一方、反粒子の生成過程として主に考えられるのは、一次宇宙線と星間物質との衝突である。こうして生成された宇宙線を二次宇宙線と呼ぶ。

二次宇宙線として、反粒子の他に、リチウム、ベリリウム、ホウ素などのいわゆる二次核も知られている。二次核の存在比率は太陽系での組成に比べて何桁も多いため、非常に長い時間にわたり宇宙線が銀河系内に閉じ込められていることの傍証となっている。

二次宇宙線としての陽電子のエネルギースペクトルは、一次宇宙線の衝突によるパイ中間子の生成頻度を元に、崩壊して生じた電子と陽電子の銀河磁場による散乱と、シンクロトロン放射と逆コンプトン散乱によるエネルギー損失を考慮した拡散方程式を解くことによって予想することができる。^{3,4)} ホウ素/炭素比に代表される宇宙線の二次核/一次核比率から、拡散係数はエネルギーとともに増加する、すなわち、エネルギーの高い宇宙線ほど早く銀河系から漏れ出すことがわかっている。陽電子の親となる一次宇宙線の強度がべき関数で減少することも考慮すると、陽電子比率もエネルギーとともに減少するはずである。文献3,4を元にした予想スペクトルを図1にハッチで示す。

20年ほど前から、この考察を検証しようと、気球を用いた観測が盛んに行われてきた。代表的なものに、TS-93,⁵⁾ CAPRICE,⁶⁾ HEAT⁷⁾がある。また、スペースシャトルによるAMSの一週間のテストフライトAMS-01⁸⁾でも観測が行われた。結論を出すには精度は十分ではなかったが、初期の頃から、既に比率が予想通りに減少していないことが問題となっていた。そして、衛星を用いた実験、PAMELA⁹⁾とFermi¹⁰⁾の結果では10 GeV辺りから単調に増加していたため、多くの研究者を驚かせ、この問題が更に注目を集めることとなった。^{11,12)}

宇宙線中の陽電子同定を困難にしているバックグラウンドは二つある。一つは陽子で、 10^3 から 10^4 の割合で存在するが、PAMELAとFermiは、カロリメータで電磁シャワーとハドロンシャワーを区別することで除去している。もう一つは電子で、PAMELAは永久磁石とシリコン飛跡検出器からなる磁場スペクトロメータを用いて、磁場中での偏向から電荷符号を決定している。Fermiは磁石を搭載していないが、地磁気を用いることで電荷符号識別を試みている。

AMSは図2に示すように、永久磁石とシリコン飛跡検出器からなる磁場スペクトロメータで、上下に飛行時間測定器、その上に遷移放射検出器、下にはリングイメージングチェレンコフカウンター、そして、最下部に電磁カロリメータを配置している。飛跡検出器は磁石の内部に7層、最上部と電磁カロリメータの上に一層ずつ、計9層からなり、最大の飛跡長は3 mである。スペクトロメータの視野の広さを表す面積立体角はPAMELAに比べて約二桁大きい。また、陽子と陽電子の識別をそれぞれ独立に行える粒子検出器を二つ備えている。一つは遷移放射検出器で、最大で 10^4 の陽子除去能力を発揮する。同じ運動量では陽子

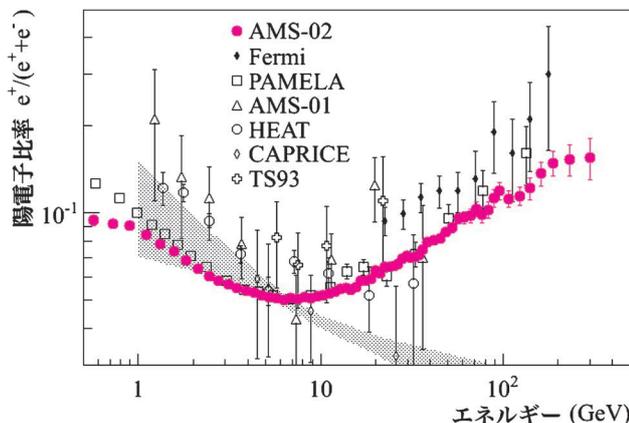


図1 AMS-02と過去の観測(本文参照)による陽電子比率の結果。ハッチは二次宇宙線モデルによる予想値。(フルカラー口絵参照。)

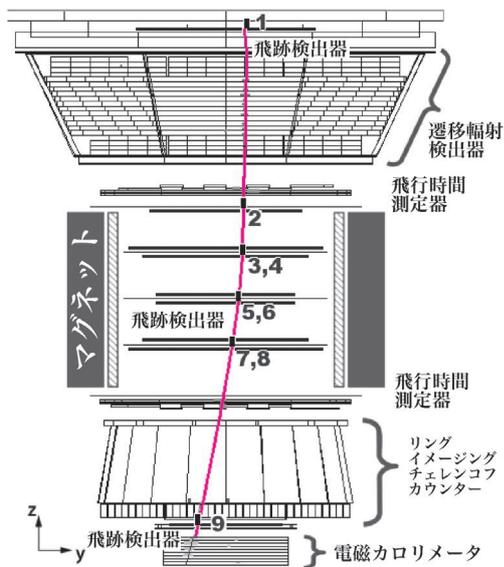


図2 AMS-02の測定器模式図と宇宙線事象の一例。

と陽電子のローレンツ因子が大きく異なるため、陽電子のみが遷移輻射を発生することを用いている。もう一つは、電磁カロリメータで、電磁シャワーとハドロンシャワーの識別と、磁場スペクトロメータで測定した運動量とシャワーエネルギーとの比較によって、 10^4 の陽子識別能力を發揮する。

AMSが測定した陽電子比率は、PAMELAやFermiと同じように10 GeV以上での単調増加を示していたが、それに加えて、少なくとも、三つの新たな特徴を示した。(1) スペクトルの傾きが20から200 GeVにかけて大きく減少している。(2) スペクトルには微細構造がなく滑らかな曲線をしているとみなせる。そして、(3) 陽電子を天球面上で統計誤差の範囲で一様に検出した。

AMSの結果は、陽電子が二次宇宙線に起源をもつという標準モデルでは説明することが困難であるため、未知の陽電子の生成起源が存在することを強く示唆している。可能性の一つとされているのが、暗黒物質の崩壊や対消滅による電子陽電子対の生成である。これは気球観測が行われていた20年以上前から既に提唱されていたが、¹³⁾ その後の観測精度の向上や加速器実験のデータにより、暗黒物質の質量や陽電子の生成率などへの条件が絞られてきている。¹⁴⁾ しかしながら、陽電子過剰問題と暗黒物質を結びつける必然的な理由はまだ見出せていない。また、反陽子・陽子比は陽電子比率と並んで重要なデータであるが、PAMELA¹⁵⁾ やBESS¹⁶⁾ の測定結果は二次宇宙線モデルと一致しているため、陽電子のみに過剰を与えるメカニズムの必要性が、この問題を更に複雑にしている。

もう一つの可能性は、パルサーで生じた電子陽電子対の

相対論的プラズマが、フェルミ統計加速によって高エネルギーまで加速されているというものである。¹⁷⁾ 電子と陽電子は伝播中のエネルギー損失が大きいため、生成起源は近傍になければならないが、候補となるパルサーの数は限られているため、陽電子の到来方向に異方性が生じる可能性が指摘されている。

AMSは国際宇宙ステーションと共に運用を続けていくので、最低でも10年の長期間観測が期待される。今回発表したデータは、そのほんの一部であり、最終的には、1 TeVまでの陽電子比率の精密測定と異方性探索を目指す。比率がこのまま上がり続けるのか、それとも、どこかでカットオフが見えるのか、その場合、どのような落ち方をするのか、といった点が今後注目されていくであろう。

AMSの結果に対するコメントの一つに“Back to baseline”の重要性を述べているものがあつた。ここでいう“baseline”とは、バックグラウンドとなる二次宇宙線としての陽電子のことである。AMSは反陽子・陽子比も精密測定が期待されている。また、電子、陽電子はもちろん、陽子、ヘリウム、重原子核などの絶対強度の精密測定も重要な目的に含まれる。これらのデータは全て、より詳細な宇宙線モデルの構築と二次宇宙線スペクトルの計算に貢献することになる。

2014年には日本のグループが主導するCALET実験が国際宇宙ステーションで開始される予定である。¹⁸⁾ 電荷符号の識別はできないが、TeV領域に及ぶ高エネルギー電子の高精度観測が期待される。AMSとCALETの結果によって、今後の宇宙線研究の新たな方向性が示されるであろう。

参考文献

- 1) 日本物理学会誌 **67** (2012) 816.
- 2) M. Aguilar, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 141102.
- 3) I. Moskalenko and A. Strong: Astrophys. J. **493** (1998) 693.
- 4) A. W. Strong, *et al.*: Ann. Rev. Nucl. Sci. **57** (2007) 285.
- 5) R. Golden, *et al.*: Astrophys. J. **457** (1996) L103.
- 6) M. Boezio, *et al.*: Adv. Space Res. **27** (2001) 669.
- 7) J. J. Beatty, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 241102.
- 8) M. Aguilar, *et al.*: Phys. Lett. B **646** (2007) 145.
- 9) O. Adriani, *et al.*: Nature **458** (2009) 607.
- 10) M. Ackermann, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 011103.
- 11) 鳥居祥二: 日本物理学会誌 **64** (2009) 239.
- 12) 高橋史宜: 日本物理学会誌 **65** (2010) 676.
- 13) M. Turner, *et al.*: Phys. Rev. D **42** (1990) 1001.
- 14) L. Bergstrom, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 031103.
- 15) O. Adriani, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 121101.
- 16) K. Abe, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 051102.
- 17) D. Hooper, *et al.*: J. Cosmol. Astropart. Phys. **01** (2009) 025.
- 18) S. Torii, *et al.*: Proc. of 32nd ICRC **5** (2011) 228.

灰野禎一 (台湾中央大学)

(2013年5月30日原稿受付)

重イオン核融合反応と超重元素



萩野 浩一

東北大学大学院理学研究科



有友 嘉浩

東京工業大学原子炉工学研究所

自然界に存在する元素で最も重いものはこれまで測定された範囲ではプルトニウム (Pu) である。この元素は原子番号 94 を持ち、ウラン鉱石の中にわずかに含まれる。これより大きい原子番号の元素、例えば、96 番元素のキュリウム (Cm) や 100 番元素のフェルミウム (Fm) は人工的には作れるが、自然界には存在しない。これは何故だろうか？ どのような機構で最も重い元素の原子番号が決まっているのだろうか？

これには原子核の性質が大きく関係する。原子核は正の電荷を持つ陽子と電荷を持たない中性子とから構成されるが、原子番号が大きくなると陽子間に働くクーロン斥力の効果が大きくなり、不安定となる。このことは、原理的にはウラン原子核などにも成り立つが、 ^{238}U 原子核は半減期 4.47×10^9 年と宇宙の年齢に匹敵する長寿命を持つ。一方で、 ^{244}Pu の半減期は 8.08×10^7 年、 ^{247}Cm は 1.56×10^7 年である。

このように、重い元素の寿命は原子番号が大きくなるにつれ急激に短くなっていく。しかし、原子核の殻構造のために寿命の変化は単調ではない。1960 年代には陽子数 $Z=114$ 、中性子数 $N=184$ を持つ原子核 (^{298}Fl) が周囲の原子核に比べて安定になるという理論的予言がなされた。¹⁾ 現在では $N=184$ であって $Z=114$ 、120、及び 126 の超重原子核も準安定に存在すると予想されており、²⁾ 原子核の地図である核図表上に浮かぶこれらの「安定の島」の検証に向けて超重元素の探索が 40 年以上にわたって続けられている。³⁾

超重元素の合成には重イオン核融合反応が主に用いられている。³⁻⁵⁾ 加速器を用いて加速された原子核 (重イオン) を別の原子核に衝突させ、その二つの原子核を融合

させて大きな原子核 (複合核) を作る反応である (右下図)。しかし、超重核領域では、この複合核が生成されること自体が稀である。この領域では、接触した二つの原子核が変形して融合核を形作る前に強いクーロン斥力により再び分離してしまうという準核分裂が起きやすいためである。更に、できた複合核は圧倒的な確率で核分裂により崩壊する。寿命がある程度長い元素ができたことを確認するには、中性子などの放出によってエネルギーが持ち去られ十分に「冷えた」状態の原子核を捉える必要があるが、通常はその前に核分裂が起きてしまうのである。これら二重の困難を乗り越えて超重元素合成に成功することがいかに大変かわかりいただけるかと思う。

2012 年 8 月、理化学研究所の森田浩介氏の実験グループは ^{70}Zn ビームを ^{209}Bi 標的に照射し、核融合をさせることによって 113 番元素 (原子番号 113、質量数 278) を合成し、更にその原子核が 6 回の α 崩壊を繰り返して、最終的に既知核 ^{254}Md に至った事象を観測した。⁶⁾ これは、よく性質の知られている核から α 崩壊のチェーンを逆に辿ることで、113 番元素が生成されたという確実な証拠を得たことを意味する。

このような超重核領域の核融合反応は、量子力学的結合チャンネル計算とブラウン運動理論のハイブリッド模型を用いて定量的にも良く理解されるようになってきた。重い原子核の融合分裂反応機構を解明する上で、今はまさに大きな一歩を踏み出したところであると言える。

—Keywords—

核融合・複合核：

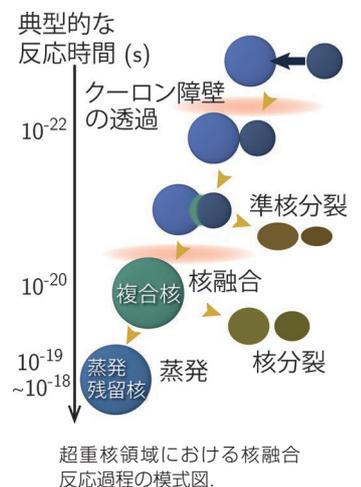
2つの原子核が融合して1つの原子核になることを核融合と呼び、融合してできた核を複合核と呼ぶ。

殻構造・安定の島：

原子の中で電子軌道が殻構造を持ち、最外殻が満たされる (閉殻) と化学的に安定な原子 (不活性ガス) になるのと同様に、原子核の中での陽子や中性子のエネルギー準位にも殻構造があり、それぞれ閉殻になると安定になる。「安定の島」は、陽子間のクーロン斥力により不安定になっている重い原子核の中で、陽子中性子ともに閉殻で寿命が長くなる原子核があることをいう。

クーロン障壁：

原子核の間には、強い相互作用から来る短距離の引力と電磁的相互作用である長距離のクーロン斥力が働き、その結果、原子核間ポテンシャルにはクーロン障壁と呼ばれる障壁が現れる (本文図 1、図 3 参照)。



1. 重イオン核融合反応

核融合反応は2つの原子核が融合して1つの大きな原子核(複合核)を作る反応である。この反応は融合する2つの散乱原子核(散乱核)の質量領域によって様々な様相を示す。この章では軽い核同士の核融合反応から超重核領域の核融合反応までどのように核融合反応の反応機構が変化していくか概説する。

反応機構を理解するうえで、原子核間にどのようなポテンシャルがはたらくか把握しておくことは有用である。図1は典型的な例として、 $^{16}\text{O} + ^{144}\text{Sm}$ 反応におけるポテンシャルを核間距離の関数として示したものである。原子核間には、長距離力で斥力のクーロン力と短距離力で引力の核力がはたらく、それらの打ち消しあいのためにポテンシャル障壁が形成される。このポテンシャル障壁はクーロン障壁と呼ばれる。本稿では、クーロン障壁近傍のエネルギー領域における核融合反応を議論する。核融合反応が起こるためには、まずクーロン障壁を乗り越えて2つの原子核が接触するまで近づく必要がある。図1の例であれば、接触点はクーロン障壁の内側、 $R_{\text{touch}} \sim 8.78 \text{ fm}$ の付近にある。入射エネルギーが十分高い場合には古典的に障壁を乗り越えるが、入射エネルギーが障壁より低い場合には、量子トンネル効果によって核融合反応が起こることになる。

1.1 軽い系の融合反応

$^7\text{Be} + p$ 反応や $^{12}\text{C} + \alpha$ 反応などの軽い原子核同士の融合反応は、天体中の元素合成などで重要な役割を果たす。これらの反応では、クーロン障壁を乗り越えても、大抵の場合その入射エネルギーと同じエネルギーに複合核の準位が存在しない。核融合反応が起きるためには、従って、ガンマ線を出して複合核の準位に電磁遷移をしなければならず、核融合反応は障壁の透過のダイナミクスと電磁遷移のダイナミクスの双方に依ることになる。電磁遷移の演算子が長距離ではたらくために、核融合反応がクーロン障壁の外側で起こる場合もある。また、これらの反応では、しばしば特定の共鳴状態に支配される。

1.2 比較的軽い系の重イオン核融合反応

核融合反応のできる複合核の原子番号が12程度またはそれより大きくなると、複合核の状態密度が大きくなり、複合核が準連続スペクトルを持つとみなせるようになる。これは強い相互作用でアクセスできる複合核の状態が入射エネルギーと同じエネルギーにおいて存在することを意味する。従って、ひとたび2つの原子核が接触すると、2つの原子核間の相対運動のエネルギーは様々なプロセスで散逸され、入射系(入射チャンネル)の情報はすぐに消失する。この場合、2つの原子核が接触すると自動的に複合核が形成されるという近似がよく成り立ち、核融合反応はクーロン障壁の透過によって支配される。比較的軽い系においては、2つの原子核の間にエネルギーに依らない局所ポテンシャルを仮定して核融合反応断面積を見積もるポテンシャル模型がよく成り立つ。図2(a)に $^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$ 系の核融

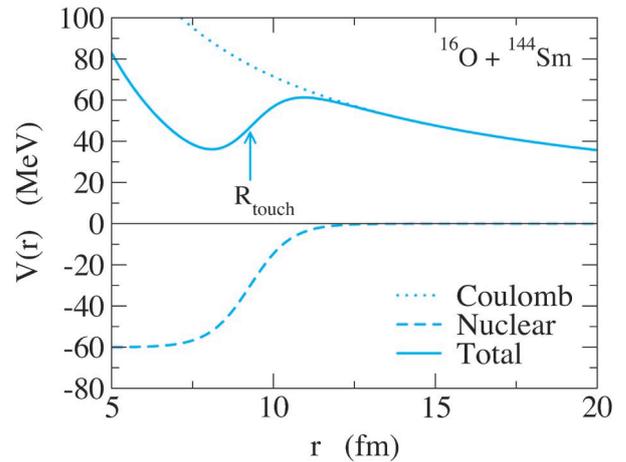


図1 ^{16}O と ^{144}Sm 核の間にはたらくポテンシャル。点線及び破線はそれぞれクーロン・ポテンシャル及び核力ポテンシャルを表す。実線は両者を足した全ポテンシャルを表す。 R_{touch} は2つの原子核の密度分布の重なりが十分大きくなる点(接触点)を示す。

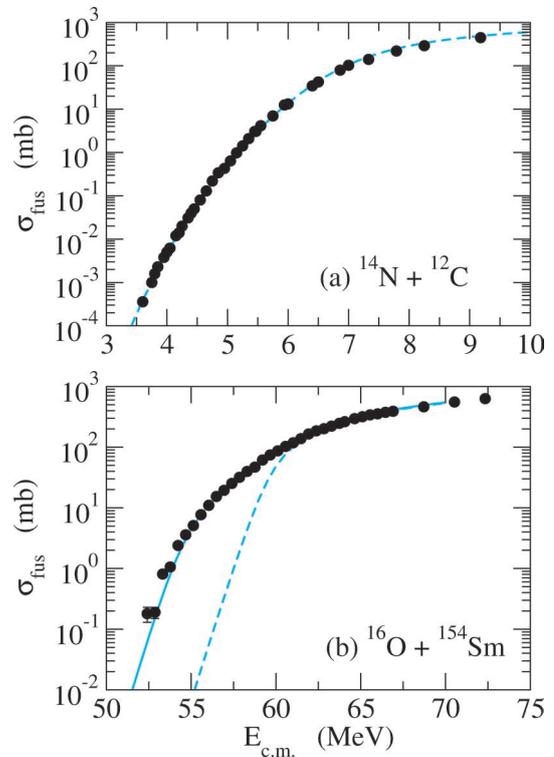


図2 核融合反応断面積 σ_{fus} の実験データ(黒丸)とポテンシャル模型による計算値(破線)の比較。上図(図2(a))は $^{14}\text{N} + ^{12}\text{C}$ 系、下図(図2(b))は $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$ 系の結果。下図の実線は、 ^{154}Sm 核の変形の効果を考慮して得られた計算値である。 $E_{\text{c.m.}}$ は重心系における入射エネルギーを表す。

合反応断面積の実験データとポテンシャル模型による解析を示す。

生成された複合核は高い励起状態にあり、比較的軽い系の場合、主に中性子、陽子、 α 粒子、などを放出することにより脱励起する。これは蒸発過程と呼ばれる。核融合反応断面積の実験データはこのような蒸発過程で残った原子核(蒸発残留核)を測定することにより決定される。

1.3 中重核領域における重イオン核融合反応

系がより重くなって入射核または標的核、あるいはその

両方が中重核領域になると、原子核の内部構造を考えないポテンシャル模型の計算では実験データが再現できなくなる。図2(b)にその典型的な例である $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$ 系の核融合反応断面積の実験データとポテンシャル模型による解析(破線)を示す。この系のクーロン障壁の高さは約59 MeVである。ポテンシャル模型は障壁より高いエネルギーにおける核融合断面積をよく再現しているものの、障壁より低いエネルギー領域では断面積を著しく過小評価していることがわかる。これは、核融合の過程で原子核の内部励起が起き、それによってトンネル効果の確率が大きく増大した結果と解釈されている。⁷⁻⁹⁾ 実際には、 $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$ 系においては、図2(b)の実線で示されるように、標的核 ^{154}Sm の変形及びそれに伴う回転励起を考慮することによって核融合反応断面積の大きな増幅を説明できることがわかる。この際、標準的に用いられる方法が結合チャンネル法である。⁹⁾ これは散乱核の内部励起を考慮した量子力学的な散乱理論であり、同様のアプローチは原子・分子物理や表面物理においても用いられている。^{9, 10)}

この質量領域においては、核融合反応でできた複合核は、脱励起プロセスとして蒸発過程と核分裂が競合する。実験データは蒸発残留核と核分裂片の両方を測定することによって得られる。

1.4 重核及び超重核領域における重イオン核融合反応

系が更に重くなると、生成された複合核の脱励起プロセスとして核分裂が徐々に支配的になる。特に重核や超重核領域では、複合核はほとんどすべて核分裂を起こして崩壊し、蒸発過程を経て生き残る確率は極めて小さくなる。例えば、 $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$ 反応では、生成された ^{266}Hs (陽子数 $Z=108$ 、中性子数 $N=158$)が中性子を1個放出してある程度寿命の長い ^{265}Hs ができる確率は $P_{\text{surv}} = 10^{-6}$ 程度かそれ以下、残りの圧倒的に大きな確率 $1 - P_{\text{surv}} \sim 1 - 10^{-6} \sim 1$ で核分裂を起こすことが実験的に知られている。¹¹⁾

2つの散乱核の電荷の積 Z_1Z_2 が1,800程度より大きくなると、複合核を生成する確率そのものが抑制され、核融合の確率が更に小さくなることが知られている。1次元ポテンシャルのトンネル確率は重イオン反応のような半古典近似がよい系であれば、入射エネルギーと障壁の高さが一致した時に0.5となる。実際に $^{40}\text{Ar} + ^{180}\text{Hf}$ 系($Z_1Z_2=1,296$)では実験的に求められた核融合反応の確率が障壁近傍で0.5になっている。¹²⁾ ところが、この系と同じ複合核 ^{220}Th を生成する $^{96}\text{Zr} + ^{124}\text{Sn}$ 系($Z_1Z_2=2,000$)では核融合確率は障壁近傍で 10^{-3} と0.5に比べてはるかに小さく、0.5の確率を得るためには更に26 MeVほど入射エネルギーを大きくしなければならない(この余分なエネルギーはエクストラ・プッシュ・エネルギーと呼ばれる)。¹²⁾ 本稿では Z_1Z_2 が1,800程度かそれより大きい反応を超重核領域の反応と呼ぶことにする。

超重核領域における核融合反応確率の抑制現象の原因として様々な要因が考えられるが、最も重要であると考えら

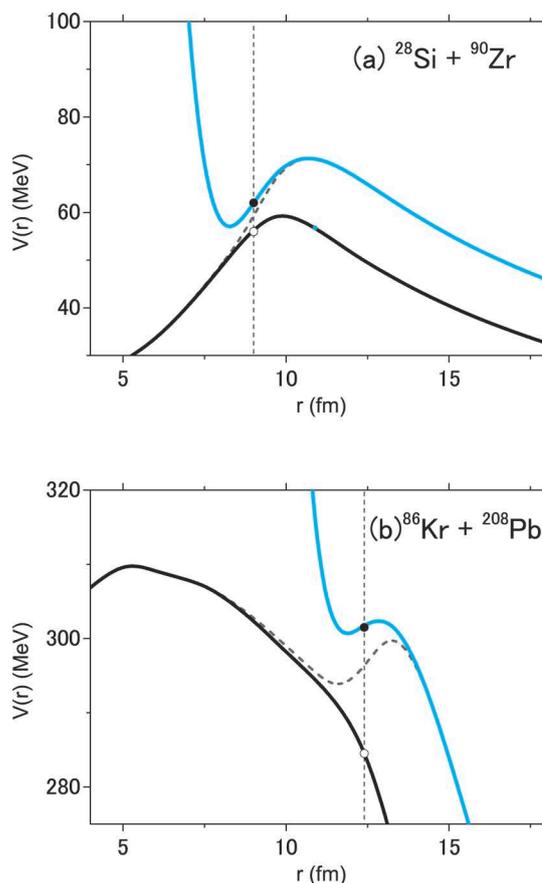


図3 複合核に至るまでの重イオン間ポテンシャル。青色の線と黒色の線はそれぞれ2つの原子核が離れている場合の2体ポテンシャル(透熱ポテンシャル)及び接触後の1体ポテンシャル(断熱ポテンシャル)を示す。灰色の破線は両者を適当な関数で接続したものである。図3(a)が中重核領域の典型的な例として $^{28}\text{Si} + ^{90}\text{Zr}$ 系、図3(b)が超重核領域の典型的な例として $^{86}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$ 系のポテンシャルを表す。丸印は接触点を示している。

れているのは、入口のポテンシャル障壁(クーロン障壁)を乗り越えたとしても強いクーロン斥力のために再び2つの原子核が分離してしまう準核分裂(Quasi-Fission; QF)と呼ばれる過程である。^{4, 5, 13)} この過程はいわゆる深部非弾性散乱(Deep Inelastic Collision; DIC)^{14, 15)}に比べてより多くの質量移行を伴う過程であり、後者は反応生成核の質量分布において入射チャンネルの質量近傍に分布する成分として区別される。ただし、両者の間に明確な境界があるわけではない。

核融合反応で複合核が形成されるためには、2つの原子核が接触した後に更にクーロン斥力に打ち勝ってコンパクトな形状を作り、短距離引力である核力の効果を十分に得る必要がある。図3は2つの原子核が十分離れた距離からコンパクトな複合核を形成するまでのポテンシャルを2原子核の相対距離の関数として示してある。青い線が2つの原子核が離れている時のポテンシャル(透熱ポテンシャル)、黒い線が2つの原子核が接触して一つの塊となっているときのポテンシャル(断熱ポテンシャル)であり、接触点を丸印で示してある。また、両者を適当な関数でなめらかに接続したものが灰色の破線である。図3(a)に示すように、中重核領域の融合反応の場合、青い線のクーロン障

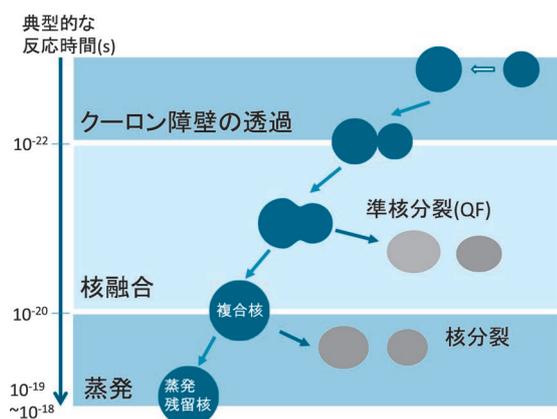


図4 超重核領域における核融合反応過程の模式図。

壁を超えた後は黒い線の一体ポテンシャルの坂を転げ落ちるだけでほぼ自動的に複合核に至る。一方、図3(b)に示す超重核領域では、クーロン障壁を越えても接触点から複合核に至るまでにはもう一つ別の障壁を越えなければならない。この2番目の障壁を越える確率は、例えば $^{58}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$ 反応では 10^{-5} 程度と評価されており、¹⁶⁾ほとんど全ての確率が準核分裂に至り複合核を生成する確率は無視できるほど小さい。

ここまで説明した超重核領域における核融合反応の様子を図4に模式的に示した。反応は概念的に3つのステージに分けて考えることができる。まず第一ステージでは2つの原子核がクーロン障壁を乗り越え接触点に至る。次に、第二ステージとして、接触して一体となった2つの原子核が準核分裂との競争に打ち勝ってコンパクトな複合核を形成する。更に、第三ステージでは、熱い複合核が核分裂から生き残り、蒸発残留核を生成する。

この質量領域では、準核分裂の存在のため、核分裂片の測定だけでは複合核生成の証拠とならず、通常、蒸発残留核の測定をもって超重元素の合成と判断される。蒸発残留核の形成は、図4の第二ステージ、第三ステージで圧倒的に大きな確率で起きる分裂過程の陰に隠れる非常に稀な現象であり、実験的に超重元素の合成を達成するためには多大な努力と時間を必要とする。

1.5 「冷たい」核融合反応と「熱い」核融合反応

このように、超重核領域の核融合反応は極めて稀な現象であるので、何らかの工夫をして実験をする必要がある。これまでに主に2つのアプローチがとられてきた。一つはいわゆる「熱い」核融合反応 (hot fusion) を用いる方法で、例えばDubna (ロシア)にあるフレロフ原子核反応研究所 (FLNR) で114番元素から118番元素までの超重元素の合成の際に用いられた方法である。¹⁷⁾この方法では ^{48}Ca 核を入射核とし、それをアクチノイド原子核と融合させることによって超重核を生成する。入射核に中性子数と陽子数の比 (N/Z 比) の大きい ^{48}Ca 原子核を使うことによって、比較的中性子数の多い超重核を生成することや、複合核に至る確率が比較的大きくなる、という特徴を持つ。ただし、

生成される複合核は比較的高い励起エネルギーを持ち、数個の中性子を放出しないと冷えた蒸発残留核に至らない。中性子が放出されるたびに核分裂との競争が起こり、最後まで核分裂が起きない確率は極端に小さくなる (中性子放出による崩壊幅と核分裂による崩壊幅をそれぞれ Γ_n , Γ_f とすると、 x 個の中性子放出が起きる確率は $(\Gamma_n/(\Gamma_f + \Gamma_n))^x \sim (\Gamma_n/\Gamma_f)^x$ となる。超重核領域では $\Gamma_n \ll \Gamma_f$ であり、放出する中性子の数 x が大きくなればなるほど、生き残り確率は小さくなる)。

もう一方のアプローチが「冷たい」核融合反応 (cold fusion) と呼ばれるものである (ちなみに、同じ用語であるがこれは「常温核融合」とは全く関係はない)。このアプローチでは、標的核として束縛エネルギーが大きい二重閉殻核 ^{208}Pb やそれに陽子が1つ加わった ^{209}Bi を用いる。そのようにすることによって、生成される複合核の励起エネルギーを小さく抑えることができ、複合核は1個程度の中性子を放出することによって冷たい蒸発残留核になる。従って、このアプローチでは複合核の生き残り確率が大きくなるという利点を持つ。ただし、このアプローチでは複合核を生成する過程の確率が犠牲となり、複合核の原子番号が大きくなるにつれ核融合反応断面積は指数関数的に減少する。ドイツの重イオン研究所 (GSI) で伝統的に用いられてきたアプローチであり、¹¹⁾理化学研究所 (理研) で113番元素の合成でも採用されている方法である。^{3,6)}

冷たい核融合反応の最大の利点は、蒸発によって冷えた超重元素が α 崩壊や核分裂をして崩壊する際、崩壊の終状態が既によく性質の知られた原子核になるような入射核と標的核の組み合わせが用いられることである。例えば、2012年8月に理研で生成された113番元素の場合、冷たい核融合反応でできた113番元素は6回の α 崩壊を繰り返し、最終的には既知核の ^{254}Md に至った。^{3,6)}これは、よく性質がわかっている既知核 ^{254}Md を押さえた上で、 α 崩壊のチェーンを逆にたどっていくことによって113番元素が実際に生成されたという確実な証拠が得られることを意味する。これが今回の理研における実験結果の大きな意義の一つである。一方で、熱い核融合反応の場合は、蒸発残留核は崩壊によって性質のよくわかっていない未知核に至るため、超重元素の同定にはあいまいさが常に伴うことになる。

2. 超重核領域の重イオン核融合反応における核構造効果

1.3節で述べたように、中重核領域の核融合反応では、変形に代表される散乱原子核の内部構造が核融合反応断面積に大きな影響を及ぼす。前章で述べた熱い核融合反応で用いられるアクチノイド原子核は基底状態で変形していることが知られているが、同様の効果は超重核領域の核融合反応でも期待できる。それでは、この領域に特徴的である準核分裂と複合核生成過程の競合 (図4参照) のもとで、変形等の核構造効果はどのように現れるのであろう

か? ^{13, 18)}

このことは、例えば、日本原子力研究開発機構 (JAEA) タンデム加速器と反跳生成核分離装置を使った実験によって報告されている。¹³⁾ この実験では、大きく変形した原子核 ^{154}Sm に球形核である ^{64}Ni を衝突させ、融合反応で作られる原子核の生成断面積の測定が行われた。変形核を標的にする場合、次章で述べるように、標的核に対する入射核の入射方向を定義することができる。実験結果は、入射核が標的変形核の長軸方向から衝突したときは複合核の生成確率は小さいが、短軸方向で衝突したときは生成確率が高くなることを示すものであった。短軸方向から衝突した場合は、より近づかないと引力の核力がはたらかないためクーロン障壁は高いが、接触時の原子核間距離は最も短い。複合核は、2つの原子核がクーロン障壁を越えて接触した後、図3の黒線で示した融合障壁を乗り越えて生成される。従って、接触点がサドル (融合障壁の位置) に近い方が複合核の生成に有利となり、実験結果は正にこのことを示している。また変形核である ^{150}Nd に球形核である ^{76}Ge を衝突させた実験においても同様の結果が得られている。¹³⁾

さらに標的核に閉殻構造を持つ原子核を使った場合も、融合確率が上昇する場合が知られている。例えば原子力研究開発機構の実験では、 $^{82}\text{Se} + ^{138}\text{Ba}$ と $^{82}\text{Se} + ^{134}\text{Ba}$ の融合断面積を比較したところ、閉殻構造を持つ ^{138}Ba を用いた前者の系の方が2ケタ程度大きいという結果が得られた。閉殻構造を持つ原子核の衝突では、形状を維持したまま融合障壁のサドル点に向かって内部に侵入できると考えられており、融合確率が大きくなる理由は基本的に変形効果と同じ考え方で説明できる。¹³⁾

3. 理論的な取り扱い

これらの一連の実験は、超重核領域の核融合反応における標的核の変形の効果の重要性を明確に示すものであるが、これらはどのように理論的に解析できるであろうか? この章では、我々が最近開発した量子力学的結合チャンネル計算とブラウン運動理論のハイブリッド模型を紹介する。¹⁹⁾

3.1 クーロン障壁を越えて2つの原子核が接触するまで

超重核領域の核融合反応では、図4に示したように各ステージで段階的に確率の計算を行うことができる。まず、第1ステージで2つの原子核がクーロン障壁を乗り越えて接触するまでは、1.3節で述べたような量子力学的な結合チャンネル法が使える。変形した重い原子核の場合、結合チャンネル方程式の解は十分良い精度で

$$P_l(E) = \int_0^1 d(\cos \theta) P_l(E; \theta). \quad (1)$$

と近似することができる。⁷⁻⁹⁾ ここで、 θ は入射ビームに対する変形した標的核の角度、 $P_l(E; \theta)$ は角度 θ を固定した時の相対角運動量 l に対する障壁の透過確率、 $P_l(E)$ は角運動量 l に対する全透過確率である。この式は、まず変形

核の向きを固定して透過確率を計算し、それを全ての角度の向きにわたって平均をとることに相当する。図2(b)の実線で示した $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$ 反応の核融合反応断面積はこのようにして計算されたものである (計算の詳細は文献9を参照のこと)。

超重元素領域の核融合反応では、クーロン障壁を乗り越えた断面積を捕獲断面積と呼び、それは

$$\sigma_{\text{cap}}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) P_l(E) \quad (2)$$

で与えられる。ここで k は入射フラックスの波数を表す。

3.2 接触した2つの原子核が準核分裂との競合に打ち勝って複合核を形成するまで

複合核生成確率は、前節で求めた障壁透過の確率に接触後準核分裂が起きない確率 P_{CN} をかけることで求めることができる。確率 P_{CN} が標的核の向きに依存するとすると、それは

$$P_{\text{fus}}(E, l) = \int_0^1 d(\cos \theta) P_l(E; \theta) P_{\text{CN}}(E, l, \theta). \quad (3)$$

で与えられる。

中重核領域では $P_{\text{CN}} \sim 1$ とみなしてよいが、1.4節で述べたように超重核領域では P_{CN} は非常に小さな値になる。この量を見積もるための有力なアプローチがブラウン運動理論 (揺動散逸理論) である。^{4, 5)} これは、核融合に関わる2つの原子核の間の相対運動、質量非対称度、原子核の変形度、などの集団自由度をブラウン粒子に見たて、それらに結合する核子の内部運動を熱浴として取り扱うアプローチである。集団自由度の運動は、一次元座標 q に対するランジュバン方程式

$$m \frac{d^2 q}{dt^2} = - \frac{\partial V}{\partial q} - \gamma \frac{dq}{dt} + R(t) \quad (4)$$

を多次元に拡張したものをを用いて記述する。¹⁹⁾ ここで、 m は座標 q に対する慣性質量、 γ は摩擦係数、 $R(t)$ はガウス型白色乱雑力である。 V は例えば図3に示すようなポテンシャルである。

このランジュバン方程式を接触点の座標から多数の軌道について解くと、大多数の軌道はポテンシャルの坂をそのまま降りて準核分裂に至る。しかしながら、ごくわずかの軌道は、乱雑力による揺らぎによってポテンシャル障壁を乗り越えて複合核領域に至る。準核分裂を起こさない確率 P_{CN} は、ランジュバン方程式を多数回解いて全軌道の何パーセントが複合核領域に到達するかを計算することによって見積もることができる。 P_{CN} の角度 θ 依存性はランジュバン方程式を解く際の初期条件を与える接触点に θ 依存性を持たせることによって考慮することができる。¹⁹⁾

複合核生成確率 P_{fus} を用いて、複合核生成断面積は

$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) P_{\text{fus}}(E, l) \quad (5)$$

で与えられる。

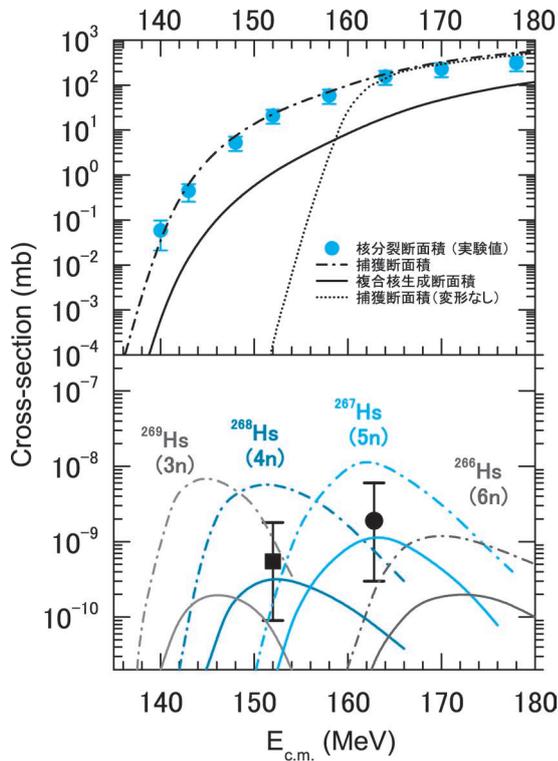


図5 $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 系における捕獲断面積、核融合断面積(上図)及び蒸発残留核断面積(下図)。それぞれ実験データと理論計算の結果を示している。一点鎖線は2つの原子核が接触したら必ず核融合するとした時の計算結果、実線は準核分裂の効果により核融合断面積が阻害された場合の計算結果を表す。上図の点線は ^{238}U の変形を考慮しない時の捕獲断面積を表す。

3.3 複合核が核分裂せず蒸発残留核として生き残るまで

生成された複合核が核分裂をせずに生き残る確率 P_{surv} は統計模型を用いて見積もることができる。蒸発残留核断面積は

$$\sigma_{\text{ER}}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) P_{\text{fus}}(E, l) P_{\text{surv}}(E; l) \quad (6)$$

と表される。準核分裂過程と複合核からの核分裂過程を実験的に区別することが困難であるために複合核生成断面積 σ_{fus} が直接実験で測定できない量であるのに対し、蒸発残留核断面積 σ_{ER} は直接実験で測定できる量である。

3.4 実験との比較

このような手法を用いて計算した結果について紹介する。これまで様々な模型を用いて超重元素領域の理論計算が行われてきたが、それらは全て、直接実験で得られた「蒸発残留核断面積」と計算値を比較するというものであった。数 pb という非常に小さな蒸発残留核断面積を得るには高精度の計算が求められる。

超重元素領域の融合分裂過程で最も重要でまた最も取り扱いが難しいのは、図4に示される第二ステージにおける融合と準核分裂過程の競合を正しく記述することである。このような融合と準核分裂過程の競合の結果は、核分裂に対する実験データとして豊富に存在している(分裂片の質量分布、運動エネルギー分布、電荷分布、スピン分布、放出中性子数等)。そこで我々はこれらの豊富な実験データを用いて、実験値と理論値を比較することで、まず第二

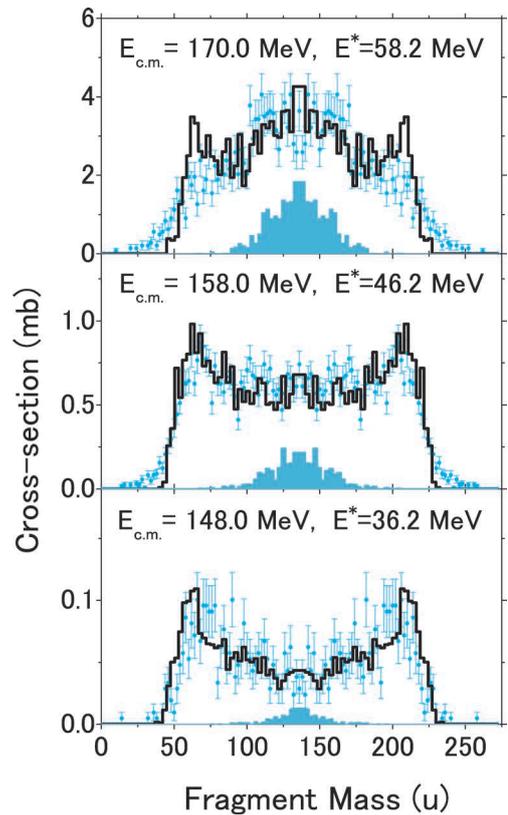


図6 $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 系における核分裂片の質量分布に対するエネルギー依存性。横軸の核分裂片は原子質量単位 (u) で表されている。青丸で示される実験値及び黒いヒストグラムで示される計算値は反応で複合核が生成されたかどうかによらず全ての核分裂片を足したものである。影で示されている部分は、軌道計算によって複合核を経由したと判定された分裂片。 $E_{\text{c.m.}}$ は重心系における反応の入射エネルギー、 E^* は生成された複合核の励起エネルギーを表す。

ステージにおける複合核生成断面積の不定性を排除する方針で研究を進めていった。

日本原子力研究開発機構において西尾勝久氏らにより、変形核である ^{238}U を標的核とする一連の融合分裂実験が行われたが、ここではその一つである $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ について取り上げる。¹⁸⁾ 図5の上図に捕獲断面積(式(2))の実験データを青丸で、計算結果を一点鎖線で示す。実験では、捕獲断面積は測定された分裂片の全イベントを数え上げることで求められる(実際は、核子移行のような直接反応の後に核分裂したイベントを除いたもの)。従って、この実験データは融合過程からの核分裂に起因する分裂片と準核分裂に起因するものを足したものである。従来のランジュバン方程式のみを用いた計算(ランジュバン計算)は、いわば古典力学的な計算であり、クーロン障壁(約 162 MeV)以下のエネルギー領域を取り扱うことはできなかったが、3.1節~3.3節で説明したように結合チャネル計算と組み合わせることで、障壁より低いエネルギーを取り扱うことが可能となった。図6は、各入射エネルギーに対する分裂片の質量分布を示している。ランジュバン計算でも、各々の軌道の終点をプロットすることで質量分布を得ることができ、実験データと直接比較が可能である。計算で得られた捕獲断面積、及び各入射エネルギーにおける分裂片の質量

分布(黒いヒストグラムで表示)は実験値を比較的よく再現している。

また融合分裂過程における標的核の変形効果は、図6においても顕著に表れている。図6では、入射エネルギーが高い場合は核分裂片が全質量($34+238=272$ u)の半分($272/2=136$ u)となる質量対称分裂及びその近傍が支配的であるが、入射エネルギーが低い場合は2つの核分裂片の質量が著しく異なる質量非対称分裂が支配的となっている。これは高い入射エネルギーでは、前章で述べた短軸衝突が可能になり、複合核を形成し質量対称分裂が起きる確率が大きくなるためである。一方、低い入射エネルギーの場合は、クーロン障壁の低い長軸衝突のみが起こる。この配位では、接触している原子核間の重心間距離が大きいため、すぐに準核分裂が起こり、質量非対称分裂が支配的となる。

理論シミュレーションで得られたイベントの大部分は ^{34}S と ^{238}U が接触した後様々な形状を経ながら核分裂に至るが、ごく一部、球形領域に入りそこでしばらく停留した後核分裂するイベントがある。このようなランジュバン軌道は「融合分裂軌道」として同定される。このような軌道(あるいはイベント)による分裂片の質量分布を、図6において影で塗られた部分で示す。黒いヒストグラムと影領域の差が準核分裂過程に相当することになる。高い入射エネルギーにおいては質量対称分裂が支配的となるが、対称分裂片の中には複合核を経由してきたものの他に、準核分裂過程を経由してきたものが比較的多く含まれることがわかる(この準核分裂過程を「深部準核分裂過程」と呼んでいる²⁰⁾)。また、低い入射エネルギーでは、質量非対称分裂片はほとんどが準核分裂過程によるものであることが計算によっても示されている。

図6で表されている質量分布の影の部分積分して得られた複合核生成断面積 σ_{fus} を図5上図の実線で示す。この系の場合、複合核生成断面積は捕獲断面積 σ_{cap} よりもほぼ一桁低いことがわかる。この複合核断面積に、統計模型によって得られた生き残り確率をかけて蒸発残留核断面積 σ_{ER} を計算した結果を、図5下図の実線で示す。ここで統計模型コードHIVAPを用いた。¹⁸⁾ この結果は実験値(■及び●)と良い一致を示している。ちなみに融合阻害がないと仮定し、捕獲断面積に生き残り確率をかけて蒸発残留核断面積を求めた結果を図5下図の一点鎖線で示す。この場合、明らかに断面積を過大評価していることがわかる。

この理論模型は、接触点からの反応の発展を追うため、融合核分裂と準核分裂を統一的に取り扱えるのが特徴である。図6に示した実験データは、入射エネルギーに対する質量分布の大きな変化を示し、このエネルギー依存性を再現できるかどうかで理論計算の信頼性を確かめることができる。我々のモデルは質量スペクトルのエネルギー依存性をよく再現しており、実際の描像を本質的にとらえていると言うことができるであろう。従って、この模型に基づき計算される融合確率も信頼性の高いものとなる(図5の下

図参照)。

詳細な軌道解析によると、超重元素領域の融合過程では非常に強いクーロン斥力のため、多くの軌道はフラグメントの変形度が增大する方向に向かう(このことは衝突した原子核の形状に対し、接触した2つの原子核をつなぐ「くびれ(ネック)」が急激に成長することと関連している²¹⁾)。2つの原子核が接触した後の動的過程における変形度の急激な増大は、準核分裂過程、従って、超重元素領域の融合阻害の最大の原因であると考えられる。

西尾氏らの実験では、別の系として $^{36}\text{S}+^{238}\text{U}$ 系と $^{30}\text{Si}+^{238}\text{U}$ 系の比較も行われている。合成される複合核の原子番号は $Z=108$ と 106 の違いに過ぎないが、低入射エネルギーにおける質量分布の実験データは、前者の系では2山構造、後者の系では3山構造を表し、非常に顕著な違いを見せている。¹⁸⁾ 我々の計算でも、この構造の違いは再現されているが、質量分布におけるそれぞれのピークがどのような構造を持った原子核に対応するのかという問題は、融合分裂機構を解明する上で重要である。²²⁾ 我々が最近新たに開発した確率密度分布の時間発展を解析する方法で、それぞれのピークの起源や生成時間等、そのピークの持つ特徴が明らかにされている。¹⁹⁾ 今後さらにこのような研究を進めることで融合分裂反応機構の全容を解明したいと考えている。

4. おわりに

超重核の生成反応として用いられる重イオン核融合反応は、有限量子多体系としての原子核の様々な性質が関与する複雑な現象である。この複雑な反応機構を解明することが、超重核領域の核反応分野に課された最大の課題の1つである。絶え間ない理論的及び実験的な努力によりこれまでにわかってきたことも多いが、これからの研究で解明しなければならない課題も多い。例えば、2つの原子核が離れているときの2体のダイナミクスから接触した1体のダイナミクスへどのように接続すればよいのか、まだほとんどわかっていない。現象論的には、接触点近傍で相対運動のエネルギーが瞬時に内部エネルギーに転換するというような近似が用いられてきたが、その転換のメカニズムは理解されていない。これまで、2体のダイナミクスとして量子力学的な結合チャンネル法、1体のダイナミクスとして古典的な揺動散逸理論が用いられてきたが、両者の接続には量子デコヒーレンスなどの量子-古典転移の問題も関係するかもしれない。このことが中重核の重イオン核融合反応における量子トンネル効果にどのような影響を与えるのか、興味深い課題である。また、ランジュバン方程式に用いられる摩擦現象の微視的理解²³⁾や揺動散逸過程における量子効果の解明なども今後の課題である。

特に、113番元素合成実験の際に理化学研究所で用いられた冷たい核融合反応を動力学模型で詳しく解析するためには、標的核の持つ強い殻構造の効果を正確に取り入れな

くてはいけない。現行の計算では、摩擦係数や慣性質量などの輸送係数を導出する際、原子核を液滴とみなす流体力学的な巨視的模型を用いているが、このような計算では冷たい核融合の断面積が実験データに比べて著しく小さくなってしまふ。今後、核構造を反映した微視的模型から導出される輸送係数を採用し、動的変形や運動エネルギーの散逸等を高精度で扱うことが重要となる。これにより、冷たい核融合反応の計算、さらには原子力で問題となる低励起状態からの核分裂の計算も可能となる。このためには、非常に微小な確率を計算する必要があるが、そこには数値計算処理を高速化するためのコード整備及び計算機のアップデートや並列化なども必要である。

更に、近年発展の目覚ましい中性子過剰核のビームを用いて超重核にアプローチすることも、今後の重要な課題である。これまでに実験的に生成された超重核は、最大の中性子数を持つものでも理論的に予言されている安定の島にある原子核 ($N=184$) に比べて中性子数が6~8個ほど少ない。中性子過剰核ビームを用いていかに安定の島にアプローチするのか、⁵⁾ 今後の研究に期待されている。重い中性子過剰核の核融合反応では、2つの原子核間で多数の中性子のやりとりが行われる多核子移行過程が重要な役割を果たすことが予想され、このメカニズムの解明が急務となる。中性子過剰核の核融合反応は中性子星の比較的深部でも起こると考えられており、^{24,25)} 超重核の物理を推進することにより、中性子星の物理に関する知見が得られる可能性もある。今後の発展が大いに期待される方向性である。

4章で述べた超重核生成反応に対するハイブリッド模型は西尾勝久氏、千葉敏氏との共同研究に基づくものです。また、阿部恭久氏、市川隆敏氏、岩本昭氏、池添博氏、太田雅久氏、篠塚勉氏、滝川昇氏、森田浩介氏、和田隆宏氏、V. I. Zagrebaev氏、Yu. Ts. Oganessian氏にはこれまでの様々な助言や議論を感謝します。

参考文献

- 1) W. D. Myers and W. J. Swiatecki: Nucl. Phys. **81** (1966) 1; A. Sobiczewski, F. A. Gareev and B. N. Kalonkin: Phys. Lett. **22** (1966) 500.
- 2) 小浦寛之, 橘 孝博: 日本物理学会誌 **60** (2005) 717.
- 3) 森田浩介: 日本物理学会誌 **60** (2005) 698.
- 4) 和田隆宏, 阿部恭久: 日本物理学会誌 **57** (2002) 383.
- 5) 野村 亨, 阿部恭久: 日本物理学会誌 **60** (2005) 725.
- 6) K. Morita, *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 103201; T. Shinozuka and N. Takigawa: JPSJ Online-News and Comments [Dec. 3, 2012].
- 7) 萩野浩一, 滝川 昇: 日本物理学会誌 **57** (2002) 588.
- 8) 萩野浩一: 原子核研究 **55** (2010) 11.
- 9) K. Hagino and N. Takigawa: Prog. Theor. Phys. **128** (2012) 1061.
- 10) 笠井秀明, Wilson A. Diño, 興地斐男: 日本物理学会誌 **52** (1997) 824.

- 11) S. Hofmann and G. Munzenberg: Rev. Mod. Phys. **72** (2000) 733.
- 12) C.-C. Sahn, *et al.*: Z. Phys. A **319** (1984) 113.
- 13) 池添 博, 光岡真一, 西尾勝久: 日本物理学会誌 **60** (2005) 123.
- 14) 上坪宏道: 日本物理学会誌 **35** (1980) 981.
- 15) 滝川 昇: 日本物理学会誌 **35** (1980) 970.
- 16) G. Greiner, V. I. Zagrebaev: Russian Chem. Rev. **78** (2009) 1089.
- 17) Yu. Ts. Oganessian, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 162501.
- 18) K. Nishio, *et al.*: Phys. Rev. C **77** (2008) 064607; *ibid.* **82** (2010) 024611; *ibid.* **82** (2010) 044604; *ibid.* **86** (2012) 034608.
- 19) Y. Aritomo, K. Hagino, K. Nishio and S. Chiba: Phys. Rev. C **85** (2012) 044614.
- 20) Y. Aritomo and M. Ohta: Nucl. Phys. A **744** (2004) 3.
- 21) D. Boilley, H. Lu, C. Shen, Y. Abe and B. G. Giraud: Phys. Rev. C **84** (2011) 054608.
- 22) Y. Aritomo: Phys. Rev. C **80** (2009) 064604.
- 23) 吉田思郎: 日本物理学会誌 **31** (1976) 607.
- 24) K. Sato: Prog. Theor. Phys. **62** (1979) 957.
- 25) A. W. Steiner: Phys. Rev. C **85** (2012) 055804.

著者紹介

萩野浩一氏: 専門は原子核理論, 特にクーロン障壁近傍のエネルギーにおける重イオン反応, 及び不安定原子核の構造, 反応, 崩壊. 最近ハイパー核の集団励起にも興味がある.

有友嘉浩氏: 専門は原子核理論, 特に超重元素合成及び超重元素領域における融合分裂過程の動力学的解析を行っている. さらに現在は, 低励起核分裂を動力学模型で扱えるよう開発を進めている.

(2013年2月2日原稿受付)

Fusion of Massive Systems and Superheavy Elements

Kouichi Hagino and Yoshihiro Aritomo

abstract: On August 12, 2012, the anticipated event for the element 113 (with the atomic number 113 and the mass number 278) was detected in the fusion reaction between ^{70}Zn and ^{209}Bi by the experimental group led by Dr. Kosuke Morita at RIKEN. The potential energy between two colliding nuclei consists of a short range nuclear attraction and the long range Coulomb repulsion, and the potential barrier, which is referred to as the Coulomb barrier, appears due to the strong cancellation between the two interactions. For relatively light systems, such as $^{16}\text{O} + ^{209}\text{Bi}$, fusion takes place once the Coulomb barrier is overcome. In contrast, for massive systems, such as $^{70}\text{Zn} + ^{209}\text{Bi}$ used in the experiment by Morita, *et al.*, the quasi-fission process, in which the two nuclei re-separate after the Coulomb barrier is overcome, becomes increasingly dominant, and the fusion cross sections are hindered accordingly. Moreover, even if the fusion is succeeded, the compound nucleus quickly decays by the (ordinary) fission. In this article, we first discuss how it is rare to synthesize a new element by heavy-ion fusion reactions and discuss a significance of the experimental result of Dr. Morita, *et al.* We also discuss a comparison between the so called hot fusion and cold fusion reactions, a transition of fusion dynamics from light systems to heavy systems, and the role of nuclear structure such as nuclear deformation on fusion of massive systems.

バリオン間相互作用模型とバリオン多体系

Thomas A. Rijken (IMAPP University of Nijmegen the Netherlands)

山本 安夫 (理化学研究所仁科加速器センター 351-0198 和光市広沢2-1)

ハイパー核物理 (バリオン多体系) と核子-核子 (NN) およびハイペロン (Y)-核子間相互作用 (バリオン間相互作用) の研究の進展について、核物理、素粒子物理および天体物理にわたる展望のもとで述べられる。核力の一般化であるバリオン間相互作用の模型的研究は、1934年の湯川理論を起点とし、ハイパー核の実験的・理論的研究の成果を踏まえて進展した。NN, YN, YY 相互作用と原子核・ハイパー核の研究が相互に関連しあうことによって発展してきたことが述べられる。

1. 序

核子 ($N=p, n$) とハイペロン ($Y=\Lambda, \Sigma, \Xi$) はスピン 1/2 のバリオン (B) の家族すなわち 8 重項を構成する。原子核・ハイパー核の研究 (u, d, s クォーク) における中心課題はバリオン間相互作用 (NN, YN, YY) の模型構築である。その延長上には c, b, t クォークを含むバリオンがおりなすフレーバー核物理がある。相互作用模型の役割は、図 1 に示されるようにクォーク・グルーオンの QCD における基本概念と実験データを媒介することにある。図はまた実験と理論の緊密な協力の重要性をも示している。

2. 素粒子, 原子核, ハイパー核

高エネルギー素粒子物理学の始まりは気球実験による宇宙線の発見 (ヘス, 1912 年) であろう。放射性原子核に加え、宇宙線は原子核変換の研究に対する新しい入射線源 (主として陽子) を与えた。1947 年、湯川粒子 (π) が宇宙線による大気中の多重発生で発見された。1950 年頃には、高空でエマルジョンを宇宙線にさらすことによって、ハイペロン Λ (1115) や $\Sigma^{\pm 0}$ (1990) の発見が引き続いた。また、これらのハイペロンの発生は常に K メソンの生成と結びついていることから、ストレンジネスと呼ばれる新しい量子数の存在が導かれた。

ハイペロン質量と p (938) や n (939) の質量の相対的な

近さは 1960 年代初めのフレーバー対称性 $SU_f(3)$ の発見に結びついた。図 2 にバリオン (B) と pseudo-scalar (ps) メソン (M) に対する $SU_f(3)$ 8 重項表現が示されている。この対称性は 20 世紀後半における素粒子・原子核物理学の持続的発展の鍵となり今日の標準模型に結実した。

1911 年のラザフォードの実験および 1932 年のチャドウィックによる中性子の発見以降、20 世紀の前半世紀における核物理学が主に現象論的な道筋で成立した。湯川理論と π (140) の実験的同一と共に、核物理学は実験的にも理論的にも非常に豊かな研究分野になった。引き続き 20~30 年、原子核に対する殻模型やクラスター模型等の微視的模型に基づく研究が成功を収めた。

1952 年にハイパー核が最初に発見されたのは、気球で打ち上げられたエマルジョン中での「ハイパーフラグメント」の観測によってであった。この宇宙線観測による最初の観測に引き続き、エマルジョンや ${}^4\text{He}$ バブルチェンバーへの π や p のビーム照射によって質量数 $A=15$ に至る Λ ハイパー核が発見された。それらの結合エネルギー、スピン、寿命を同定するために $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ 弱崩壊が使われた。ダブル Λ ハイパー核 ${}_{\Lambda\Lambda}^{10}\text{Be}$ (1963 年) および ${}_{\Lambda\Lambda}^6\text{He}$ (1966 年) が発見されたのは再びエマルジョン実験によってであった。ダブル Λ ハイパー核の存在は、その後の近代的なエマルジョン実験で幅広く確定された。

ビームエネルギー可変の陽子シンクロトロン (PS) の発展によってハイパー核の系統的な研究への道が拓かれた。 K^- の二次ビームを用いることによって、エマルジョンやバブルチェンバーを用いた実験よりもはるかに高統計での

Particle and Flavor Nuclear Physics

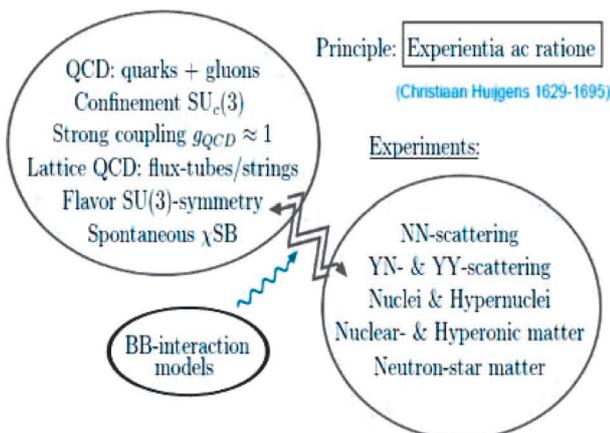


図 1 バリオン間相互作用模型とバリオン多体系の位置付け。

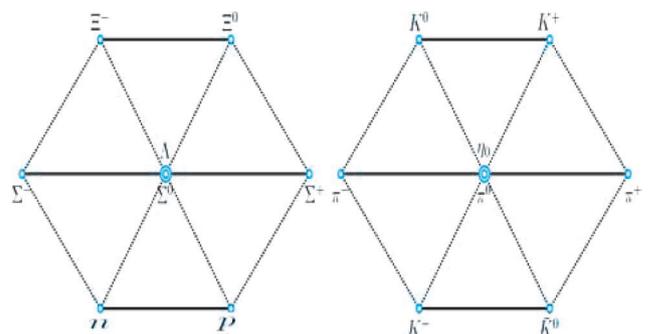


図 2 $SU_f(3)$ 8 重項。

カウンター実験が可能になった。CERNで行われた700–800 MeV/cの(K^- , π^-)反応では、低いビーム強度(10^4 – $10^5 K^-/s$)で悪い分解能ではあったが反跳なしのストレンジネス交換反応が実現した。そして入射 K^- の強い歪曲のために限界はあったが貴重な情報が得られた。 (K, π) 反応を用いて Σ ハイパー核を研究する最初の企てもなされた。

1983年には(π^+ , K^+)反応によるハイパー核生成の研究がBNL-AGS (USA), 引き続きKEK (日本)で開始された。これらの実験は質量数 A のレンジとしては ^{208}Pb までカバーし、 s -軌道から f -軌道に至る Λ 状態の発見となった。1950–80年の先行期間の後、 Λ ハイパー核のスペクトロスコピーはストレンジネス核物理の実験的研究に対する最も有効なツールになった。1990年代には、KEK 12 GeV PSで超伝導ケイオンスペクトロメータ (SKS) による(π^+ , K^+)励起スペクトルが数多くの Λ ハイパー核に対して測定された。Jefferson Lab (USA)では、連続的電子ビームを用いた($e, e'K^+$)反応によって陽子の転換による Λ ハイパー核が生成された。高精度実験の最高点はKEKおよびBNL-AGSで行われたゲルマニウムディテクター (Hyperball) による p 殻 Λ ハイパー核の γ 線スペクトロスコピーである。

実験の進展を踏まえたハイパー核の理論的研究の到達点は文献1に与えられている。

3. 核力からバリオン間力へ

核力の中間子論的研究は湯川理論により切り開かれた。²⁾ 1950年代初頭、武谷は中間子論に基づいて核力を定量的に確立するストラテジーを提案した。³⁾ ここで核力のレンジ r は三つの領域に分けられた：領域I ($r > 2$ fm, 1π 交換で与えられる), 領域II ($1 < r < 2$ fm, 2π 交換や重いメソンの交換からの寄与), 領域III ($r < 1$ fm, 近距離部分)。その際、それぞれの領域に最も相応しいアプローチが採用された。領域Iにおける 1π 交換ポテンシャル (OPEP) の確立の後、多重 π 交換と1 boson交換 (OBE) のモデルが領域IIを定量的に記述することに成功した。領域IIIにおける近距離斥力の起源としては、(i) クォーク間のパウリ禁止状態の影響, (ii) vectorメソン交換, (iii) ポメロン交換, 等が提案された。50年代には、核力のパイオン理論によって、OPEP, 2π 交換 (TPEP), pion-pair相互作用, 3体力等の研究が進化した(領域I, II)。60年代にはvectorメソン ρ と ω が視野に入る(領域II, III)。そしてクォーク・パウリ原理に起因する近距離斥力が提案された。⁴⁾ 実験サイドでは、NNデータは $L \sim 5$ まで、そして $T_{\text{lab}} < 400$ MeVに対する位相差を与える部分波解析を可能ならしめるに至った。このことは異なる領域I, II, IIIに關与する物理が決められることを意味する：遠方領域Iをカバーする高部分波 ($L \geq 3$), 中間領域IIをカバーする部分波 ($L \geq 1$), そして近距離領域IIIに關する情報を与える低部分波 ($L = 0, 1$)。今日、核力は中間子論的アプローチに加え、カイラル摂動論や格子

QCDに基づいて研究されている。

60年代初め⁵⁾ バリオンおよびメソンが $SU_f(3)$ 8重項を作ることが明らかになるに連れて、領域I, IIにおける中間子論的ポテンシャル構築にフレーバー対称性を適用することによって、より統一的なバリオン間相互作用モデルを目指す動きが現れた。YN相互作用に関する実験的情報はごく限られていたため、信頼できる理論的インプットが必要とされた。Nijmegen groupのストラテジーは、NNデータを十分正しく記述するモデルから出発し、 $SU_f(3)$ 対称性をフルに活用してYN系に展開する道筋であった。⁶⁾ その後現れたBonn-Jülich group⁹⁾やKyoto-Niigata group¹⁰⁾によるモデル構築も同様の道筋を辿った。

4. YN・YY相互作用とハイパー核

ハイパー核現象の解析を通じてYN・YY相互作用の性質を調べ、理論的相互作用モデルをテストすることはハイパー核物理の基本的課題であり、YN散乱実験の貧困さを補うものである。斥力芯などの核力の特異な性質の故に、そのままでは核構造計算には使えず核内での有効相互作用を導出する必要がある。G行列理論はそのための有力な方法である。YN・YY相互作用モデルからG行列理論を用いて有効相互作用を導出しハイパー核現象の解析に用いる。実験データとの比較結果を相互作用モデル構築にフィードバックさせる。これが筆者達の共同研究における方法論である。

Λ ハイパー核の基本量である Λ 粒子の結合エネルギー B_Λ から核物質内での Λ の一体ポテンシャルの深さ U_Λ が推定される。1950年代にエマルジョンで観測された $A < 16$ のハイパー核データから $U_\Lambda \sim -30$ MeVが知られていた。簡単な ΛN 相互作用を用いて標準密度での核物質中での U_Λ を計算すると $-(50 \sim 60)$ MeVになる (overbinding problem)。この問題を基本的に解決したのは、Nijmegen groupによる中間子論的相互作用の初期バージョンNijmegen Hard-Core (NHC)モデルであり、そこで最も重要な役割を果たしたのは ΛN - ΣN 結合項であった。⁷⁾

1990年頃になって、いくつかのソフトコアモデルが提案された。Nijmegen Soft-Coreモデル (NSC89)⁸⁾やJülichモデル (JA/JB)⁹⁾である。この頃から Λ ハイパー核のスペクトロスコピー実験を踏まえて、 ΛN 相互作用のスピン依存項が焦点になり始めた。最初に注目されたのは ^4H と ^4He そして ^7Li 等に現れるスピン2重項(ΛN 相互作用のスピン-スピン成分による)であった。当時存在した中間子論的相互作用モデル (NHC, NSC89, JA/JB)で ^4H (^4He)の($0^+ - 1^+$)2重項のエネルギーを計算すると、これらのモデルのスピン-スピン成分は互いに非常に異なっており、かついずれも実験値とは合わないことが示された。¹¹⁾ このような状況の下で、1995年頃から始まった筆者達の共同研究に基づくNSC97モデルが提案された。¹²⁾ スピン-スピン成分の強さの異なる6バージョン (a, b, c, d, e, f)の中で、実験値と見合うのはeおよびfであることがG行列計算に基づいて示された。

また NSC97e/f の妥当性は ${}^3\Lambda\text{H}^{12,13}$ および ${}^4\Lambda\text{H}({}^4\Lambda\text{He})^{14,15}$ に対する少数体計算によっても示された。

相互作用モデルを選別する上で ΛN スピン-軌道成分も重要である。核内 Λ のスピン-軌道分離は、主に ΛN の対称 LS 項 (SLS) と反対称 LS 項 (ALS) の間の打ち消し合いのために、核子の場合よりもはるかに小さい。画期的な γ 線分光実験によって ${}^8\Lambda\text{Be}$ における $(5/2^+ - 3/2^+)$ 2重項および ${}^{13}\text{C}$ における $(3/2^+ - 1/2^+)$ 2重項が精密に測定された。これらの状態については既に肥山等のクラスターモデル計算¹⁶⁾によって計算済であり、実験値は NSC97e/f を用いて得られた予言値の数分の1であった。この不一致は次節で述べられる ESC 模型で解決すべき問題として残された。

さて、バリオン8重項粒子間相互作用である NSC97 およびその後の ESC 模型では、近距離部分 (領域 III) も含めて全ての BB 間チャンネルで定義されており、 $S = -2, -3, -4$ 状態における相互作用は $S = 0, -1$ 状態の物理量をフィットする条件のもとで自動的に与えられる。これは NHC 模型の近距離部分 (ハードコア半径) が $S = 0, -1$ 状態で完全に現象論的に決められ、 $S < -1$ チャンネルでの取り方に何ら制約を与えないことと対照的である。エマルジョン中で初めてユニークに同定されるイベントとして ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ (長良イベント) が発見された。ここから得られる $\Lambda\Lambda$ 結合エネルギーの実験値 $\Delta B_{\Lambda\Lambda}({}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}) \sim 1.0 \text{ MeV}$ に対して、NSC97 における $\Lambda\Lambda$ 相互作用はほぼ良い値を与えている。この特徴はその後の ESC 模型の開発においても保たれた。

ΣN および ΞN チャンネルの相互作用に関しては重大な問題が残された。それらの特徴は核物質中での Σ や Ξ の深さ U_Σ および U_Ξ に現れる。 U_Σ は斥力的であることが実験的に知られているが、理論サイドからは次のように考えられている: $U_\Sigma > 0$ の原因はクォークレベルでのパウリ禁止状態が存在する $T = 3/2, {}^3S_1$ ΣN 状態における強い斥力的寄与にあり、その状態が効かない ${}^4\text{H}$ の場合にのみ Σ ハイパー核として存在できる。そのような効果の入っていない NSC97 等の相互作用模型の場合には U_Σ は引力的となる。他方、 U_Ξ は実験的には引力的であることが示唆されているが、NSC97 模型による U_Ξ は強い斥力となってしまう。このように NSC97 模型は成功した反面で深刻な問題点も残っていたのである。以下で述べられる ESC 模型において、基本的には全ての問題点が解決された。

5. バリオン間力に対する Nijmegen ESC 模型

8重項バリオン間相互作用を与えるベースとなるバリオン-バリオン (BB) チャンネルとそれらのしきい値が図3に示されている。破線は $\{10^*\}$ 表現に対するゲルマン-大久保の質量公式を表す。

1990年代に、バリオン間相互作用 (NN, YN, YY) を统一的に記述する Nijmegen Extended Soft-Core (ESC) ポテンシャルの構築が始められた。ESC 模型¹⁷⁾においては、メソン交換のダイナミクスは1メソン交換、2メソン交換 (図4)、

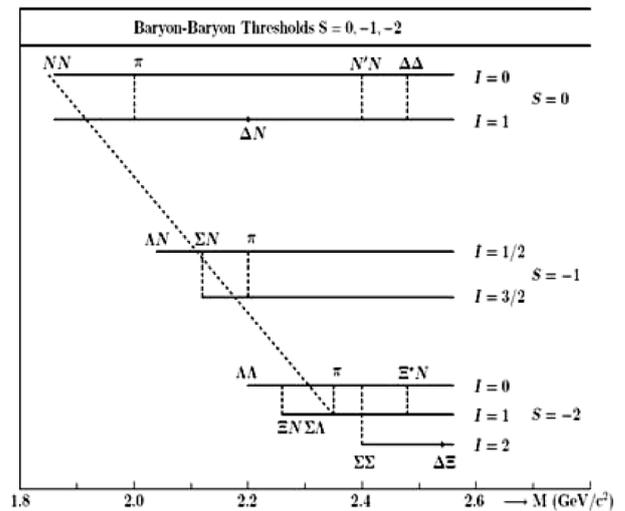


図3 BBチャンネルとしきい値。

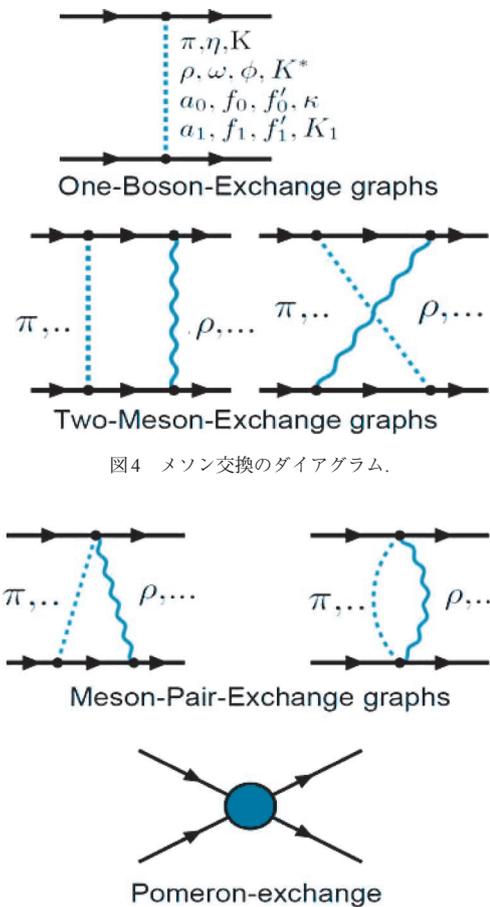


図4 メソン交換のダイアグラム。

図5 メソン対交換, ポメロン交換のダイアグラム。

メソン対交換 (図5) によって与えられる。含まれる $SU(3)$ 9重項タイプのメソンは (i) pseudo-scalar ($J^{PC} = 0^{-+}$), (ii) vector ($J^{PC} = 0^{-}$), (iii) scalar ($J^{PC} = 0^{++}$), および axial-vector ($J^{PC} = 1^{++}, 1^{+-}$) である。バリオン-バリオン-メソン (BBM) パーテックスにガウス型形状因子が使われ、ガウス-湯川型ポテンシャル関数が与えられる。この関数は $r=0$ で有限で、 $r \rightarrow \infty$ で湯川型になる。近距離斥力への寄与はポメロン交換によって与えられる。これは多重グルー

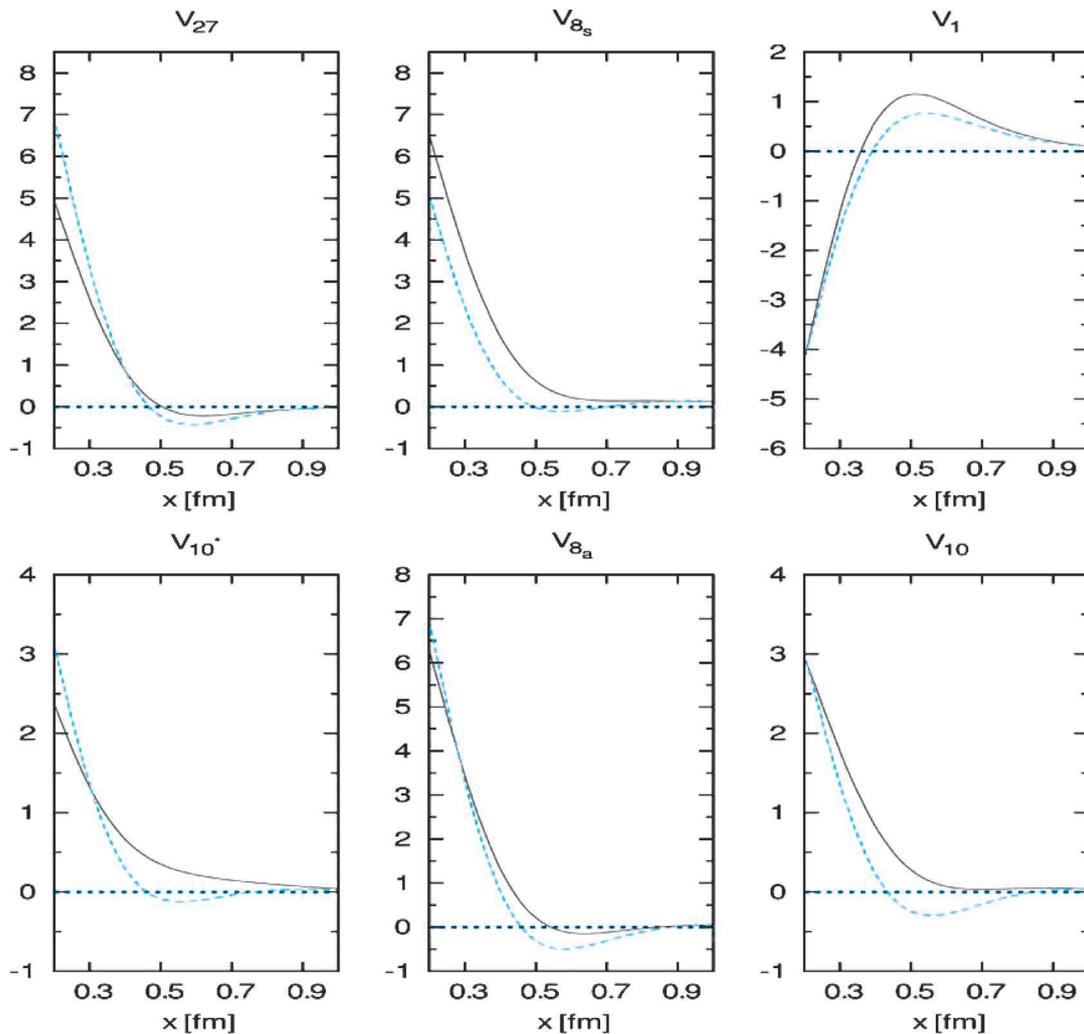


図6 SU(3) 規約表現ベースでのポテンシャル. 実線はSU(3) 対称性の破れを含む. 青破線は $m_\pi = m_K = m_\eta = 450$ MeV の場合.

オン交換に対応することがわかっている. メソン交換力に加えて, パウリ原理による6クォークのSU(6)禁止状態^{4, 19, 10)}に起因するクォークコア効果が, 現象論的にESC模型に取り入れられた. この効果によって $\Sigma^+ p$ ($I=3/2, {}^3S_1$) や ΣN ($I=1/2, {}^1S_0$) 等の特定のBBチャンネルで余分の斥力が与えられる.

SU(3) 対称性によってNNチャンネルとYNチャンネルが関係づけられるので, NNフィッティングの後で残されるYN相互作用のフリーパラメータは少数のみである. バリオン-バリオン-メソン (BBM) 結合定数は, SU(3) 関係式にNNの解析による結合定数をインプットして計算される. ESC模型においては, BBMバーテックスにおける結合定数をクォーク・反クォーク対生成模型 (QPC)^{21, 22)} で得られる「クォーク模型 (QM) 予言値」の近くに制限することによってそれらの値の物理的意味をはっきりさせる. 全ての $F/(F+D)$ 比はBBMおよびBB-Pair結合定数に対するQPC模型の予言値に近く取られる.

SU(3) の破れには次のように異なる起源がある: (i) ポテンシャルおよびシュレディンガー方程式におけるメソンやバリオンの実際の物理的質量の使用, (ii) 9重項内での

メソン混合 ($\eta-\eta', \omega-\phi, \epsilon-f_0$), (iii) $\Lambda\Sigma$ 混合による荷電対称性の破れ (CSB), (iv) クーロン相互作用.

ESC模型の最新バージョンはESC08cと名付けられている. ESC08cにおけるNN, YN, YYの同時フィッティングでのパラメータ値の確定で成し遂げられたことは以下の通りである: (i) 選ばれた4,233個のppとnpデータ ($0 < T_{\text{lab}} < 350$ MeV) に対する $\chi^2/N_{\text{data}} = 1.084$ のフィット, (ii) 重陽子と全てのNN散乱長の正確な再現, (iii) YNデータに対する $\chi^2/N_{\text{data}} = 1.09$ の非常に良いフィットと核内でのハイペロン (Λ, Σ, Ξ) の一体ポテンシャルの深さの再現. この模型は $S=-2$ チャンネルにおいて, $\Xi N({}^3S_1, T=1)$ 結合状態と $\Xi N({}^3S_1, T=0)$ (ほぼ) 結合状態を予言している. このようにして得られたパラメータの値が物理的な意味を有していることが次節で述べられる.

図6に, BBチャンネルに対するSU(3)規約表現 ($\{27\}, \{8_s\}, \{1\}, \{10^*\}, \{8_a\}, \{10\}$) に対応するポテンシャル $V_{|\mu|}$ [GeV] が示されている. 実線はSU(3)の破れを含む. 一方, 青破線の場合には, SU(3)対称すなわちSU(3)9重項に対して平均質量が使われた. これらのカーブ (特に青破線) は, $\{1\}$ 以外は, 格子QCDで得られたものと非常に良く似て

いる.²⁰⁾ $SU_f(3)$ 対称性と QM に基づく我々の模型的アプローチが、より本質論的な格子 QCD に基づくアプローチと類似した結果に到達していることは極めて興味深い。

6. ESC 結合定数と QPC 模型

バリオン-バリオンに対する ESC 模型において、BBM 結合は原理的には相対論的共変性や時間反転とパリティの不変性の必要性によって運動学的に制限されるだけである。しかしながら、NN, YN, YY 系を関連付けるためには、QCD, QM, カイラル対称性、 $SU_f(3)$ 対称性等に基づく力学的インプットが不可欠である。ESC 模型のフィッティングにおいて、BBM 結合はクォーク-反クォーク対生成機構に支配されていると考えられる。クォーク対生成 (QPC) 模型 (3P_0 バージョン)^{21,22)} に従うと、BBM 結合はクォーク対生成定数 γ_M とガウス型クォーク波動関数の拡がり半径で次のように与えられる。

$$g_{BBM}(\pm) = \gamma_{q\bar{q}} X_M(I_M, L_M, S_M, J_M) F_M^{(\pm)}.$$

ここで $\pm = -(-)^{L_f}$, L_f は BM 終状態の軌道角運動量である。 $X_M(I_M, L_M, S_M, J_M)$ はスピン、アイソスピン等を含むリカップリング係数、 $F^{(\pm)}$ は重なり積分 (バリオン半径 r_B とメソン半径 r_M の関数) を表す。上付きの \mp はメソン M のパリティを示す: $J^{PC} = 0^{++}, 1^{++}$ に対して (+), $J^{PC} = 0^{+-}, 1^{-}$ に対して (-)。

ESC 模型の結合定数とリアリストックに比較するため三つの精緻化がなされる¹⁷⁾: (i) 3P_0 機構に続く 3S_1 機構、(ii) $\gamma_{q\bar{q}}$ に対する標準的 QCD パラメータとしての取扱い、(iii) $SU(6)$ 対称性の破れ ((56) と (70) の混合²³⁾) および近距離でのクォーク-グルーオン形状因子)。表 1 に 3P_0 - 3S_1 模型による結果と最新の ESC08c のフィッティングで得られた値が示されている。(56) と (70) の混合は角度 $\varphi = -22^\circ$ で与えられる。括弧内の数値は $\varphi = 0^\circ$ に対する結果である。ここで、vector および scalar メソンに対してはイデアル混合、pseudo-scalar および axial メソンに対しては混合角 -13° と $+50.0^\circ$ がそれぞれ仮定されている。また表 1 にはメソン半径 r_M に対する調整された結果の値が示されている。 3P_0 と 3S_1 に対する重みはそれぞれ 0.682 および 0.318 であり 3P_0 -dominance²⁴⁾ であることがわかる。

以上より ESC 模型における BBM 結合は QPC 機構に基づいて理解できる。こうして核力から出発し $SU_f(3)$ 対称性と QM を使ってバリオン間力への一般化を成し遂げる筋道が付けられた。

7. バリオン物質と中性子星

核力に基づく核物質の研究と同様に、バリオン間力に基づくバリオン多体系の研究には強い近距離斥力、テンソル相関、そして異種バリオン間混合 (ΛN - ΣN 等) を取り扱える多体理論を必要とする。数あるアプローチの中で、G 行列理論はその簡便さにおいて大変優れている。一般に核物

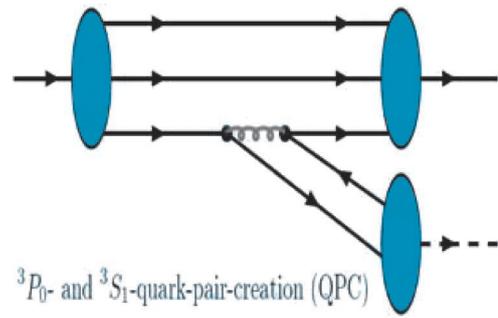


図7 クォーク・反クォーク対生成 (QPC) ダイアグラム。

表1 NNM 結合定数 g_{NNM} に対する QPC 模型と ESC fitting.

Meson	r_M [fm]	3S_1	3P_0	QPC	ESC
π (140)	0.23	-3.46	+7.43	3.97 (4.18)	3.63
η' (957)	1.10	-1.45	+3.10	1.66 (1.98)	1.66
ρ (770)	0.71	-0.23	+0.99	0.76 (0.93)	0.73
ω (783)	0.71	-1.08	+4.62	3.54 (3.49)	3.55
a_0 (962)	0.81	+0.27	+0.59	0.86 (0.89)	0.81
ϵ (760)	0.71	+1.39	+2.97	4.36 (4.35)	4.34
a_1 (1270)	0.61	-0.20	-0.85	-1.05 (-1.06)	-1.18
f_1 (1420)	1.10	-0.16	-0.70	-0.86 (-0.87)	-0.81

質における粒子あたりのエネルギー E は G 行列に関する摂動展開で与えられるが、G 行列方程式における中間状態のプロパゲーターにポテンシャルの効果を取り入れて計算すれば、標準密度 (ρ_0) の 4 倍程度まで最低次の結果が高次項まで含む結果をよく再現することが示されている。²⁵⁾ すなわち、我々は 2 体相関のみ扱う G 行列理論によって高密度核物質の性質を調べることができる。

核物質の性質を示す基本量は E を密度 ρ の関数として与えたものである。良く知られているように p と n が同数の対称核物質における $E(\rho)$ 曲線は $\rho = \rho_0$ で ~ -16 MeV の最低値を与えねばならない (核物質の飽和性)。2 体核力のみを用いた計算でこの振舞いを再現することはできず、3 体核力の寄与が不可欠である。3 体核力は密度にあまり依らずに寄与する 3 体引力 (TNA) と、高密度で急激に寄与が増大する 3 体斥力 (TNR) からなることが知られている。TNR の寄与は核物質の非圧縮率を大きくする。同様の効果が中性子星核物質の状態方程式 (EoS) を固くし、中性子星の最大質量を大きくする役割を果たす。最近の観測で $(1.97 \pm 0.04) M_{\text{solar}}$ の質量の中性子星が発見された。²⁷⁾ これは EoS に強い制約を与える。

しかし中性子星核物質にハイペロン混合がある場合には、EoS が著しく軟化し TNR による効果が打ち消されることが指摘された。そして、このハイペロン混合による EoS の軟化を避けるためには、3 体斥力が 3 核子のみならずあら

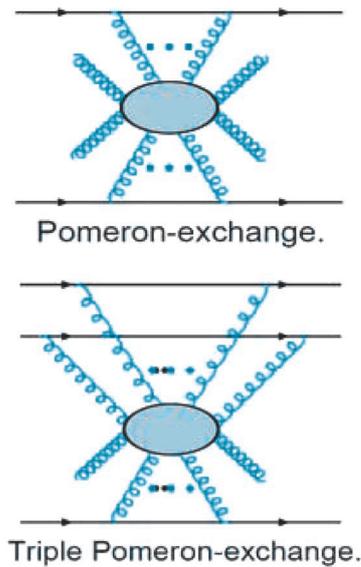


図8 多重ポメロン交換.

ゆる3バリオンにユニバーサルに働けばよいことが示され、3体バリオン間斥力(TBR)と名付けられた。²⁶⁾

我々はESCにおけるTBRの模型として多ポメロン交換ポテンシャル(MPP)を導入する。MPPは図8のように3バリオン(NNN, YNN, YYN, YYY)のポメロン(2グルーオン)交換によってTBRを生み出す(結合定数G3P)。更に4バリオンとの交換で生ずる4バリオン斥力(結合定数G4P)をも想定する。TNA部分については現象論的に導入し、MPPの強さに応じて $E(\rho_0) \sim -16$ MeVを満たすように強さを調節する。MPPおよびTNAはG行列計算で用いる場合には密度依存2体ポテンシャルの形に直される。

MPPの強さ(G3P, G4P)をどのように決めたらよいであろうか? TNRは $E(\rho)$ の特に高密度サイドに決定的影響を与え非圧縮率 K の値を大きく変える。高エネルギー重イオン衝突の研究から高密度での K 値の情報が得られると言われているが、現時点ではTNRを定量的に決めるには不十分である。

一方、古本らはG行列から導かれる核-核間ポテンシャルを用いて、 $2\rho_0$ に至るTNRの影響が、 $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ 弾性散乱($E/A=70$ MeV)等における角度分布に発現することを示した。²⁸⁾ この程度の入射エネルギーになると凍結密度近似が成立するために、核同士が重なった部分の密度が $2\rho_0$ 程度まで達することがその理由である。我々はこの解析を用いてMPPの強さを決める。図9にESC08cから求めたG行列相互作用によって得られた角度分布が実験データと比較されている。点線は2体力のみを用いて得られた。青実線はデータと合うようにMPP+TBAを調節したものである。点線と青実線の差をもたらしているのは主にMPPで、TBAの寄与はマイナーである。

同じ相互作用から得られる $E(\rho)$ 曲線が図10に示されている。点線と青実線は図9と同じ対応関係である。4角形は実験値の領域であり、青実線が通過していることがわかる。

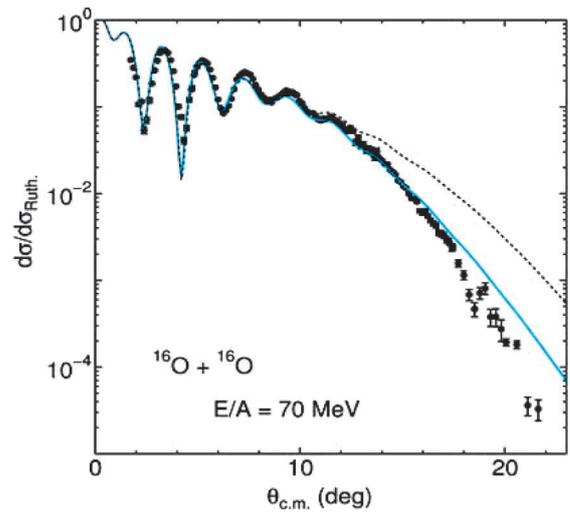


図9 G行列相互作用を用いた $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ 弾性散乱($E/A=70$ MeV)の角度分布。青実線は3体力(MPP+TNA)を含み点線は含まない。

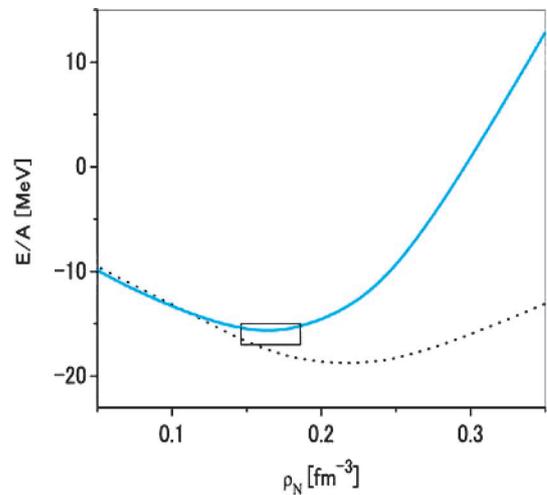


図10 対称核物質のエネルギー曲線。青実線は3体力(MPP+TNA)を含み点線は含まない。

同じ相互作用を用いたG行列計算から得られる中性子物質のEoSを使ってTolmann-Oppenheimer-Volkoff方程式を解き、中性子星の質量-半径関係を求めよう。²⁹⁾ 結果は、図11に示される。MPPを含まない場合が点線で、含む場合が青実線である。明らかにMPPを含む場合には最大質量が2倍の太陽質量を超えることがわかる。我々の(MPP+TBA)に対する基本的インプットは地上実験の結果($^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ 散乱の角度分布と $E(\rho_0) \sim -16$ MeV)のみであり、最大質量を調節するためのパラメータは含まれていない。

ハイペロン混合中性子星核物質のEoSを用いる場合にも2倍の太陽質量を超える最大質量は実現するだろうか? 我々の戦略は、地上実験での裏付けを有する相互作用を用いて中性子星核物質のEoSを求めることである。我々のMPPはハイペロンにも寄与する。しかも標準密度でもその寄与は小さくないので、その使用がハイパー核のデータと矛盾しないことの検証が必要である。MPP部分は定義によってすべてのBBB状態と同じ(ユニバーサル)であるが、NNN系で導入されたTNA部分はその限りでは

- 13) K. Miyagawa, H. Kamada, W. Glöckle and V. Stoks: Phys. Rev. C **51** (1995) 2905.
- 14) E. Hiyama, M. Kamimura, T. Motoba, T. Yamada and Y. Yamamoto: Phys. Rev. C **65** (2001) 011301.
- 15) A. Nogga, H. Kamada and W. Glöckle: Phys. Rev. Lett. **88** (2002) 172501.
- 16) E. Hiyama, M. Kamimura, T. Motoba, T. Yamada and Y. Yamamoto: Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 270.
- 17) Th. A. Rijken, M. M. Nagels and Y. Yamamoto: Prog. Theor. Phys. Suppl. **185** (2010) 14.
- 18) Th. A. Rijken and V. G. J. Stoks: Phys. Rev. C **54** (1996) 2869.
- 19) M. Oka, K. Shimizu and K. Yazaki: Prog. Theor. Phys., Suppl. **137** (2000) 1.
- 20) T. Inoue, *et al.* [HAL QCD Collaboration]: Nucl. Phys. A **881** (2012) 28.
- 21) L. Micu: Nucl. Phys. B **10** (1969) 521; R. Carlitz and M. Kislinger: Phys. Rev. D **2** (1970) 336.
- 22) A. Le Yaouanc, L. Oliver, O. Pène and J.-C. Raynal: Phys. Rev. D **8** (1973) 2223.
- 23) A. Le Yaouanc, L. Oliver, O. Pène and J.-C. Raynal: Phys. Rev. D **11** (1975) 1272.
- 24) N. Isgur and J. Paton: Phys. Rev. D **31** (1985) 2910; R. Kokoski and N. Isgur: *ibid.* D **35** (1987) 907.
- 25) M. Baldo, A. Fiasconaro, H. Q. Song, G. Giansiracusa and U. Lombardo: Phys. Rev. C **65** (2002) 017303.
- 26) S. Nishizaki, Y. Yamamoto and T. Takatsuka: Prog. Theor. Phys. **105** (2001) 607; *ibid.* **108** (2002) 703.
- 27) P. B. Cemorest, T. Pennucci, S. M. Ransom, M. S. E. Roberts and J. W. Hessel: Nature (London) **467** (2010) 1081.
- 28) T. Furumoto, Y. Sakuragi and Y. Yamamoto: Phys. Rev. C **79** (2009) 011601; *ibid.* C **80** (2009) 044614.
- 29) Y. Yamamoto, T. Furumoto, N. Yasutake and Th. A. Rijken: Phys. Rev. C **88** (2013) 022801(R).

著者紹介



Thomas A. Rijken 氏： 専門は素粒子・原子核論。長年にわたりYN・YY相互作用模型の構築に取り組んでいる。



山本安夫氏： 専門は原子核論。「核力と核構造」の観点でハイパー核に取り組む。

(2013年4月8日原稿受付)

Baryon-Baryon Interaction Models and Baryonic Many-Body Systems

Thomas A. Rijken and Yasuo Yamamoto

abstract: Hyper-nuclear physics activities, relevance, and scope in particle-, nuclear- and astro-physics are reviewed. The topic is the development of the nuclear and its generalization the baryonic force starting from the Yukawa-theory since 1934. It is stated that the development could be achieved by mutual relation between studies of baryon-baryon interactions and nuclear/hypernuclear structures.

『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、お電話(03-3816-6201)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. 19-2 (7月15日発行) 目次

日本物理学会における物理教育への取り組みについて	……………	斯波弘行
講義室		
生命科学部における物理学の授業	……………	高須昌子
日本各地で見られる「理科の時代」の物理授業筆記		
—「実験で自然に問うた」欧米の物理授業の影響—	……………	小林昭三
大学生にみられる仕事の概念に対する誤解の現状とその解決法	……………	細田宏樹
キュリー夫人の幻の実験授業—温度計実験の推理—	……………	吉祥瑞枝
教育実践		
出前授業を通じた大学院生の科学コミュニケーション能力養成		
—理学系大学院生の特徴と傾向—	……………	中野享香

教育報告	
物理学教育法の研究に基づいた教育効果改良—マクダーモット、	
シェーファー両教授を招いて—	……………
……………	古澤彰浩, フォン シー キト, 正島宏祐
領域13シンポジウム「物理オリンピックと日本の物理教育」	
報告	……………
……………	田中忠芳
図書室	
『自然は方程式で語る 力学読本』	……………
……………	大野栄三
教育に関する一言	……………
……………	岸本 功
開催情報	
編集後記	

超高エネルギー宇宙線観測の現在：テレスコープアレイ実験の結果

常定芳基* (東京工業大学大学院理工学研究科 152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

荻尾彰一 (大阪市立大学大学院理学研究科 558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

佐川宏行 (東京大学宇宙線研究所 277-8582 柏市柏の葉5-1-5)

宇宙の物質はどこまで高エネルギーになれるのか？ 10^{20} eV ものエネルギーにまで宇宙線を加速しうる宇宙現象・天体現象とは何か？ この宇宙はそのような宇宙線に対して透明で、本当に地球で観測が可能なのか？ 荷電粒子観測による天文学は実現するか？ 超高エネルギー宇宙線の謎と起源に迫る国際共同観測プロジェクト・テレスコープアレイ (TA) 実験が2008年より本格稼働している。本稿では観測開始から5年を経たTAの結果と現状、将来の展望を概観する。

1. 超高エネルギー宇宙線

宇宙線は宇宙空間を飛び交う高エネルギーの粒子であり、その主成分は陽子および原子核である。一般に宇宙線という場合はエネルギーが1 GeV以上のものを指すが、*1 その範囲は実に10桁以上におよんでいる。エネルギーが 10^{18} eV (1 EeV) を超える宇宙線は特に超高エネルギー宇宙線 (UltraHigh Energy Cosmic Rays; UHECRs) と呼ばれ、これまでは 10^{20} eV を超えるような信じがたいほどの高エネルギーのもの¹⁾ までもが発見されている。^{*2} そのような高いエネルギーにまで粒子を加速できるメカニズムはこれまでに知られておらず、UHECRsの起源は未だ説明されていないが、活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) やガンマ線バーストなど、宇宙における最も激烈な天体現象と関連しているであろうと考えられている。

ただしここで1つ問題がある。宇宙はあまりにもエネルギーの高い宇宙線に対しては透明ではなく、地球でそのようなものが観測されることは実は考えにくいのである。1965年の宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background radiation; CMB放射) の発見からほどなくして、地球で観測される宇宙線のエネルギーには上限があるはずだという予言がなされた。²⁾ CMB放射は実験室で見れば 10^{-3} eV 程度のごく低いエネルギーの光子であるが、高いエネルギーの宇宙線からは高エネルギーのガンマ線に見える。詳細な

計算によると、宇宙線のエネルギーが $E=4\sim6\times 10^{19}$ eV を超えるとCMB光子との相互作用で π 粒子生成によるエネルギー損失が起こるようになり、宇宙線は自由に宇宙を走り回ることができなくなる^{*3} (図1)。もし上記のシナリオが正しければ、観測される宇宙線では $E=4\sim6\times 10^{19}$ eV 付近で急激な強度の減少が現れると期待される。これが有名なGZK限界またはGZKカットオフ (Greisen-Zatsepin-Kuzmin cut-off) の予言である。

2. これまでの観測結果

UHECRsの起源を解明すること、GZKカットオフが存在することを観測的に証明することは難しい。 10^{20} eVの宇宙線の到来頻度は、カットオフがなかったとしても面積 100 km^2 に年間1個程度である。したがってUHECRsを観測するには、大有効検出面積を有する施設で長時間の観測を行う必要がある。

このエネルギー領域において初めて統計的にまとまった量の観測データを集めたのは日本のAGASA実験 (Akeno Giant Air Shower Array, 1991-2004) であった。AGASAは面積約 100 km^2 の領域 (山手線を覆うくらいの面積に相当) に111台のシンチレーション検出器を配置した「地表検出

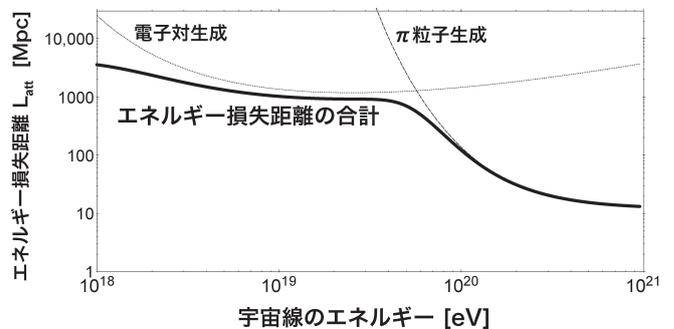


図1 宇宙線 (陽子) のエネルギー損失距離 $L_{\text{att}} = cE\dot{E}$ 。ここで \dot{E} は宇宙線の単位時間あたりのエネルギー損失量で、エネルギー損失過程 (電子対生成、 π 粒子生成) ごとに理論的に計算できる。³⁾ エネルギーが $E=4\sim6\times 10^{19}$ eV を超える宇宙線の場合はエネルギー損失量の大きい π 粒子生成が起こって L_{att} が急激に小さくなり、宇宙線は長い距離を自由に走り回ることができなくなる。なお低エネルギー側で L_{att} が ∞ ではなく一定値に近づくのは宇宙膨張による断熱損失のためである。

* 編集委員が著者に含まれておりますが、このような場合、誌編集委員会では別の委員を担当編集委員に選び、記事の審査の公正さを保つという内規に従っております。

*1 1 GeV: 10^9 電子ボルト。1電子ボルトは 1.6×10^{-19} Jである。

*2 現在人工の加速器で作りに出せる最高のエネルギーは、CERNのLHCによる 7×10^{12} eV (2015年に到達予定)。なおこれまでに発見された宇宙線でもエネルギーの高いものはアメリカのFly's Eye実験による 3.2×10^{20} eVである。

*3 $p+\gamma\rightarrow p+\pi^0$ という反応を考えよう。実験室での宇宙線の4元運動量を (E, P) 、これと正面衝突するCMB光子の4元運動量を $(\epsilon, -\epsilon)$ とすると、左辺の4元運動量の大きさは $(E+\epsilon)^2 - (P-\epsilon)^2 \sim m_p^2 + 4E\epsilon$ である。4元運動量の大きさはスカラーであってどの座標系で見ても同じ値を取るから、重心系を考えればその値が $(m_p+m_\pi)^2$ であることはただちにわかる。 $m_p=938\text{ MeV}$, $m_\pi=135\text{ MeV}$, $\epsilon=10^{-3}\text{ eV}$ を代入すると、 $E\sim 6.8\times 10^{19}\text{ eV}$ あたりからパイオン生成が起こることがわかる。宇宙線とCMB光子の遭遇する角度を適切に扱い、またCMB放射のプランク分布 (特に高エネルギーテール側の光子の寄与) なども考慮すると、もう少し低いエネルギーからパイオン生成は起こる。

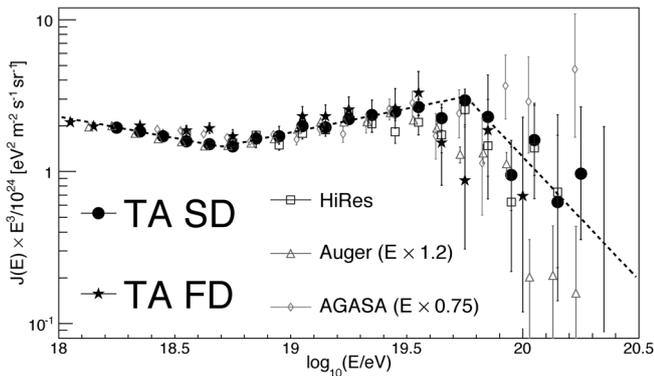


図2 UHECRsのエネルギースペクトル。横軸はエネルギー、縦軸は宇宙線の強度 [宇宙線数/エネルギー/面積/時間/立体角] に E^3 をかけたもの。宇宙線のスペクトルはほぼ $J(E) \sim E^{-3}$ で表すことができるので、 $E^3 J(E)$ 形で表すとスペクトルの微細な構造や異なる実験結果の差異がわかりやすくなる。●(黒丸)はTA地表検出器アレイ(SD)による結果、¹¹⁾ ★(星印)はTA大気蛍光望遠鏡(FD)による結果。¹²⁾ 破線はSDのスペクトルを2か所の折れ曲がりを持つ3本のpower-lawでフィットしたものである。AGASA、⁴⁾ HiRes、⁵⁾ Auger¹³⁾ 各グループによる結果は白抜ききのマーカーで表示してある。なお実験ごとにエネルギースケールの違いがあることを考慮し、AGASAは-25%、Augerは+20%だけエネルギーをシフトしている。(フルカラー口絵参照)

器アレイ」による実験で、宇宙線によって大気中で発生する空気シャワー^{*4}に含まれる電子やミューオンなどの荷電粒子を直接地表レベルで捕らえることによって宇宙線を検出している。宇宙線のエネルギーは、地表に到達する空気シャワー粒子の数を調べることによって決定できる。13年間におよんだAGASAによる観測では、予想に反して 10^{20} eV を超えるイベントが11例発見された。⁴⁾

AGASAに匹敵する検出面積を持った宇宙線観測実験として、少し遅れてアメリカで始まったのがHigh-Resolution Fly's Eye (HiRes, 1997-2006)である。HiResグループが用いたのは、空気シャワーが大気中を通過したときに発せられる蛍光を捕らえる「大気蛍光検出器」である。この方法では、大気蛍光の発生量はシャワー中の荷電粒子のエネルギー損失量に比例することを利用して宇宙線のエネルギーを決定することができる。HiResグループは、GZK境界の予想通りのエネルギーにカットオフがありそうだという結果を2001年ごろから発表しはじめ、2008年にはついにGZKカットオフを発見したという最終結果を発表した。⁵⁾ 両グループによるエネルギースペクトル測定結果を図2に示す。^{*5} 両者は $10^{19.7}$ eV 以下においてはその形状が一致し

^{*4} 高エネルギーの宇宙線が大気中の原子核と相互作用し、大量の粒子群となって降り注ぐ現象。

^{*5} AGASAとHiResには「エネルギースケール」の違いがあり、AGASAはHiResに比較してエネルギーを高めに測定している傾向が見られるため、ここではAGASAのエネルギーを25%下げてプロットしている。これは2つの実験の手法の違いからくるエネルギーの系統誤差によるものと解釈されている。AGASAのような地表検出器アレイによる観測では、地表レベルに到達するシャワー粒子の数は超高エネルギーの宇宙線と大気中の原子核との相互作用という、我々には未知のエネルギー領域での物理が関係しているため、エネルギー決定の誤差は大きいと考えられる。これに対しHiResのような大気蛍光法による宇宙線のエネルギー決定は、大気蛍光の発生量がシャワー中の荷電粒子のエネルギー損失量だけで決まるというカロリメトリ(熱量計の原理)であるため、原子核相互作用やシャワー現象の詳細にはあまり左右されないという利点がある。

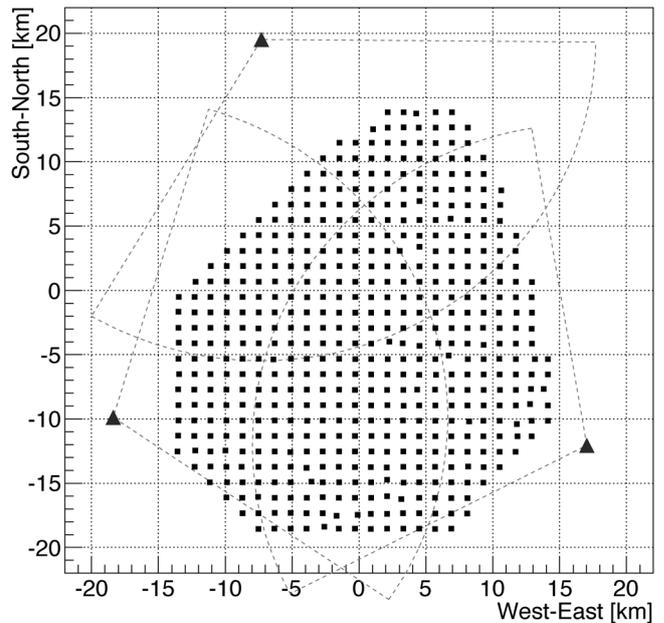


図3 TAの検出器配置。四角印は地表検出器(SD)を、3カ所の三角印はFD(大気蛍光望遠鏡)ステーションを表す。各FDの視野は図中の方位角方向108°(図中下の2ステーション)と120°(図中上のステーションのみ)の扇形で表されている。図ではFDから25kmの範囲を見渡すとした視野で描いてあるが、実際に観測可能な範囲は宇宙線のエネルギーに依存する。(フルカラー口絵参照)

ているものの、それ以上のエネルギーではあきらかな違いがあり、大きな論争をもたらした。GZKカットオフはあるのかなのか?

3. テレスコプアレイ：ハイブリッド実験

HiResの結果は理論予測通りのものであるが、AGASAという別の観測結果がある以上、どちらが正しいかはさらに別の実験による検証を待たざるを得ない。そこで始められた大型宇宙線観測プロジェクトが、米欧中心のPierre Auger実験(Auger, 2004-)と、⁶⁾ 日米韓露によるテレスコプアレイ実験(Telescope Array; TA, 2008-)⁷⁾である。

どちらの実験も、AGASA型の地表検出器アレイ(Surface Detector; SD)、HiRes型の大気蛍光検出器(Fluorescence Detector; FD)の両方を備えた「ハイブリッド実験」であることが特徴である。Augerではアルゼンチンの平原地帯にSDとして1,600台の水チェレンコフ検出器を面積3,000 km²の領域に並べ、24台のFDをその周りに展開する。TAでは米国ユタ州の砂漠の面積約700 km²にSDとして507台のシンチレーション検出器を並べ、⁸⁾ その周りに3カ所のFDステーションを建設してそれぞれ12台、12台、14台の大気蛍光望遠鏡を設置した⁹⁾(図3)。カバーするのは琵琶湖に匹敵する面積である。2カ所のステーションと各12台の望遠鏡はTAのために新規に建設されたものであるが、残り1カ所の14台のFDはHiRes実験の検出器の移設再利用であり、TAはAGASAとHiResの文字通りの後継であると言ってよい。またFD観測においては大気蛍光の発光効率や大気補正が重要であるが、TAにはElectron Light

Source (ELS) というとおきの武器がある。¹⁰⁾ これはステーションの前方約 100 m の位置から上空に向かって 10^9 個の電子ビーム (40 MeV) を射出するもので、エネルギーのわかったシャワーを自分で作り出すような装置と考えればよい。ELS 射出にともなう大気蛍光を測定することで、荷電粒子の大気中の通過、大気の発光、減衰、そして検出器による測定と記録までを制御下で行うことができ、End-To-End の較正が可能となる。以下は主に TA の結果について述べよう。

4. TA の結果：エネルギースペクトル

TA の SD, FD によるエネルギースペクトルの測定結果を図 2 に示す。^{11, 12)} FD と SD によるスペクトルはよい一致を示し、¹⁶⁾ かつ HiRes の結果とはエネルギースケール、形状とも一致していることがわかる。結果からは次のことが言える。

第 1 に、宇宙線のエネルギースペクトルは $10^{18.6\sim 19.0}$ eV あたりでいったん傾きがゆるやかになる。歴史的にこのスペクトルの構造を ankle と呼び、¹⁷⁾ これまでの全ての実験結果にこの構造が見られることから、その存在は観測的に確立した。ただしその起源は不明であり、1) ankle を境に、低エネルギーでは銀河内を起源とする宇宙線が優勢であるが、ankle 以上の宇宙線は銀河外から到来している、結果として必然的にスペクトルの形状が異なる、2) 銀河外を起源とする宇宙線が CMB 光子と相互作用して電子対生成を起こしエネルギーを失った結果としてへこみ (dip) が見えている、という 2 説が有力視されている。¹⁸⁾

第 2 は、TA の結果はエネルギー $E_s = 5.7 \times 10^{19}$ eV でエネルギースペクトルの傾きが急になっており、AGASA より HiRes のカットオフのあるスペクトルに近いということである。折れ曲がり位置以上のエネルギーの観測イベント数は 26 で、スペクトルが折れ曲がることなくそのまま高エネルギー側にも伸びていると仮定した場合の期待値は 68 である。¹⁹⁾ 統計的ゆらぎによって偶然このようなことが起こる確率をポアソン統計で計算すると 4.8×10^{-9} であり、ガウス統計に直せば有意度 (significance) 5.7σ という高水準である。²⁰⁾ 図 2 には Auger による最新の結果も示してあるが、¹³⁾ こちらもあきらかにスペクトルは急になるという

結果となっている。したがって、AGASA 以後の HiRes, Auger, TA の 3 つの実験によって、UHECRs のエネルギースペクトルには急激な強度減少を示す折れ曲がりが存在することが観測的に確立したと言ってよい。

ただしエネルギースペクトルに折れ曲がりがあるからといって、ただちに GZK カットオフ、つまり宇宙線が宇宙空間を伝播する途中で π 粒子生成によりエネルギーを失った結果であると結論することはできない。GZK カットオフであることを確認するためには、少なくとも条件 1) 宇宙線の組成 (陽子・原子核混合比) を観測的に決定する、条件 2) カットオフの位置の観測値と、宇宙線の組成から予測される位置が無矛盾である、条件 3) カットオフ以上のエネルギーの宇宙線の到来方向分布に、とりわけ大きな異方性が見られる、などの検証が必要である。

条件 1 の宇宙線の原子核種が何であるかという組成の問題は、宇宙線の起源解明に本質的に重要である。従来、UHECRs は銀河外起源であり、その主成分は陽子であると考えられてきたが、²¹⁾ 実験的検証が得られているわけではない。宇宙線が本当に陽子であるならばカットオフの位置は $(4\sim 6) \times 10^{19}$ eV でなければならないが、もっと重い原子核であればカットオフの位置は質量数の分だけ変わってくるし、²²⁾ そのエネルギー以下でも、CMB 光子や赤外光子との光破砕相互作用によって壊れてしまう影響が現れるであろう。TA におけるこれまでの観測では、空気シャワーの大気中での発達の様相を調べることにより、エネルギー 10^{19} eV 付近では宇宙線の主成分は陽子であるという結果が得られている。²³⁾ ただし Auger グループは重い原子核成分が含まれている可能性を指摘しており、これについては Auger-TA の間でワーキンググループを結成して解決に取り組んでいる。²⁴⁾

また宇宙線の加速には何らかの上限があり、UHECR は生成されたときには既に折れ曲がりを持ったスペクトルになっているということも考えられ、その場合の折れ曲がりの位置は GZK カットオフの場合の予測値に近い必要は全くない。これらを検証するのが条件 2 である。

条件 3 は、GZK カットオフであるならば、それを超えるエネルギーの宇宙線の起源天体は地球の比較的近傍 (といっても数 10~100 Mpc のスケールであるが!) になければならない、それ以遠からは到達することはできないとい

¹⁶⁾ TA においても、SD は FD に比べてエネルギーを高く評価してしまう (+27%) という、AGASA と HiRes において見られたのと同様の傾向が再現された。これは克服すべき課題である。なおここでは SD のスペクトルは FD によるカロリメトリを信用して 1/1.27 だけエネルギーをスケールしている。

¹⁷⁾ 足首の意味で、人の足に例えている。これよりエネルギーの低い $10^{15.5}$ eV あたりにも折れ曲がりがあることが知られており、こちらは knee (ひざ) と呼ばれる。

¹⁸⁾ 電子対生成は 10^{18} eV くらいから起こり始めるが、電子の質量が軽いために宇宙線のエネルギー損失は小さく、 π 粒子生成の場合のような急激な強度減少にまでは至らない。

¹⁹⁾ 正確には $\log_{10} E \geq 19.8$ ($E \geq 6.3 \times 10^{19}$ eV) のイベント数。エネルギースペクトルは $\Delta \log_{10} E = 0.1$ の幅のエネルギービンに分けたヒストグラムから決定しており、これをフィットして得たスペクトルの折れ曲がり位置 $\log_{10} E_s = 19.74$ は $\log_{10} E = 19.7\sim 19.8$ ($E = (5\sim 6.3) \times 10^{19}$ eV) のビンに含まれる。

²⁰⁾ 実験において何か「新しい」現象を見いだしたとき、まず問われるのはそのデータの統計的有意性である。素粒子物理学や宇宙物理学においては、データが偶然の産物である統計的確率が 0.3% 以下 (有意度にして 3σ 以上) でないと、まず話として聞いてもらえない。さらに「発見」とみなしてもらえるのは確率 1,000 万分の 1 以下、有意度にして 5σ 以上の統計的信頼性が必要とされる。実験物理学の歴史において、実験当初は「発見か」と色めき立ったものの、データの蓄積とともに消えて行ったという例は枚挙にいとまがない。

²¹⁾ 宇宙線を加速するためには、宇宙線を閉じ込めておくための大きな領域と強い磁場の存在が必要条件である (十分条件ではない)。また UHECRs がもし原子核であったとしても、銀河間空間を伝播する間に CMB 光子や赤外光子との相互作用によって壊れ、地球では結局陽子として観測されるのではないかという予測がなされてきた。

²²⁾ 脚注 3 において $m_p \rightarrow Am_p$ としてみよ。

う距離的制限から導かれる。この宇宙は 100 Mpc 以下のスケールでは一様等方ではないから、カットオフ以上のエネルギーを持つ宇宙線の到来方向分布は、近傍宇宙の天体・質量分布を反映した異方性を示すと考えられるのである。次の節では TA による異方性の解析結果について述べよう。

5. TA の結果：宇宙線の異方性

宇宙線の起源解明が難しい最も大きな理由は、宇宙線が荷電粒子であり、銀河内および銀河外の磁場によってその方向を曲げられてしまうということにある。それでも宇宙線のエネルギーが十分高ければ直進性が高いので、起源天体の方向の情報をまだ保ったまま地球に到来していると考えられる。2007年に Auger グループは、それまでに観測されていたエネルギー 5.7×10^{19} eV 以上の宇宙線イベントのうちの 68% について、その到来方向から 3.1° の円内に AGN を見つけることができたことと発表し、「宇宙線の起源解明か」と一大センセーションとなった。¹⁶⁾ ここでは TA の 5 年間で観測されたデータを用い、宇宙線の起源天体として有力視されている活動銀河核 (AGN) の方向との相関を調べた結果について述べる。

図4に TA でこれまでに観測されているエネルギー 5.7×10^{19} eV 以上のイベントの到来方向を、AGN の位置とともに示す。これを見ればわかるように AGN の分布は等方的ではないから、もし AGN が UHECRs の起源として寄与しているなら、両者の方向分布には相関が見られるはずである。TA のイベントについて Auger と同じ天体カタログを用いて解析した結果が図5である。¹⁷⁾ これを見ると、これまでに観測された 42 イベントのうち、AGN と相関しているように見えるものは 17 イベント (40%) である。いっぽう宇宙線の到来方向分布が等方的で、偶然に AGN の方向と一致して見える期待値は 10 (24%) であり、観測データは等方的な場合の期待値よりは多いが、現時点では著しく等方分布から外れて AGN と相関しているとまでは言えない。^{*13} なお Auger グループのその後の観測データの蓄積とともに 2007 年のときに比べて AGN との相関の見える確率は下がっており、現在では TA と同程度の相関になっている。¹⁸⁾ また TA イベントのクラスタリング (イベントどうしが角度的に近いかどうか) を見ても、等方的な場合に偶然起こる以上の確率では発生していない。¹⁷⁾

UHECRs の到来方向分布に有意な異方性がなかなか現れないのはなぜであろうか？ 1つの理由は、宇宙空間の磁場が我々が想定している値 (ナノガウス) よりも大きいという可能性である。UHECRs が陽子ではなくヘリウムまたはより重い原子核であり、磁場中での曲がり方が大きいいため宇宙線の到来方向と起源天体の方向との相関を失っている可能性もなくはない。またやや逆説的ながら、UHECRs の

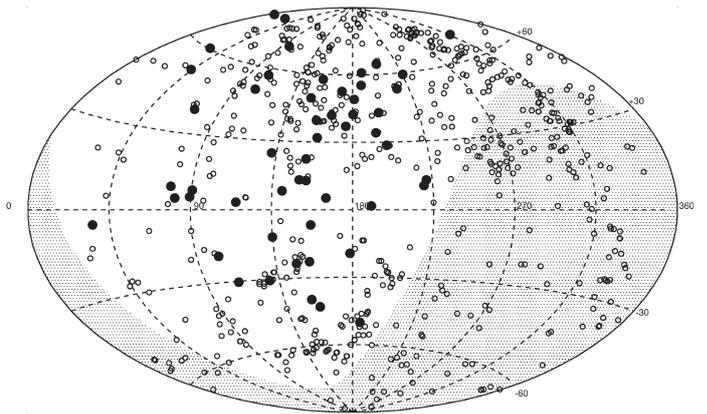


図4 TA で観測されたエネルギー 5.7×10^{19} eV 以上の宇宙線の到来方向分布 (●) と AGN の方向の分布 (○)。銀河座標で表されている。銀河は薄い円盤状をなしているが、銀河座標とは銀河円盤に定義した「銀河面」内での経度に相当する「銀経」と、銀河面から測った緯度である「銀緯」によって宇宙の方向を表す図法である。この図において中心を貫く水平方向の線は銀河面、つまり銀緯=0を、この線から上方向または下方向に離れるほど銀河円盤から離れた高い銀緯の方向を表す。銀河面に沿って表示された 0, 90 などの数字は銀経を表し、図の右端および左端の銀経 $l=0^\circ, 360^\circ$ は銀河中心の向きである。もし宇宙線の起源が銀河内にあれば、そのような起源天体は銀河円盤内、つまり低銀緯領域に集中するはずであるが、観測結果はそのようにはなっていない。すなわち銀河外に無数に存在する天体から到来していると考えられる。影の部分は TA の立地条件 (地理緯度で北緯 39°) のために観測視野に入ることがない宇宙領域である。

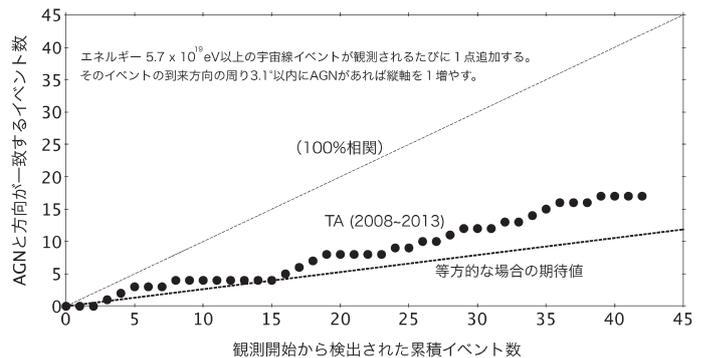


図5 宇宙線到来方向と AGN との相関。横軸はこれまでに TA で観測されたエネルギー 5.7×10^{19} eV 以上の宇宙線イベント数。TA のイベントの方向と AGN の方向が一致する確率は現在のところ 40% (42 イベント中 17 イベント) である。宇宙線の到来方向分布が等方的で、偶然に AGN の方向と一致しているだけの場合の期待値は 24% である。

起源天体の分布密度が高過ぎるということも考えられる。もし UHECRs の起源天体が少数しかなければ、それこそ異方性が現れるはずだからである。あるいは、単にこれまでの TA や Auger の観測データでは統計量が足りないだけかもしれない。その後さまざまな手法によるデータの解析が行われ、宇宙線の異方性の兆候が見えつつあるのではないかという議論が活発に行われている。UHECRs の異方性を見出し宇宙線の起源を解明した上で、荷電粒子観測による天文学を切り拓くには、TA/Auger のさらに 10 倍程度の規模の実験を行う必要がある。

6. 終わりに

本格稼働から 5 年を経過した TA の解析結果について見えてきた。UHECRs のスペクトルには 5.7×10^{19} eV に折れ曲

*13 期待値 10 の事象が統計的ゆらぎによって偶然に 17 例観測される確率は 1.5% であり、これは一見小さいがまだ 3σ にも届かず、統計的に有意とは言えない。

があり、これ以上のエネルギーでは強度が急激に減少していることが確認された。これはスペクトルの折れ曲がりGZKカットオフであることを示唆するものではあるが、期待に反して到来方向には有意な異方性が観測されていない。結論を得るにはやはり統計量がまだ足りないようだ。

V. Hessによる宇宙線の発見から、2012年で100年が経過した。¹⁹⁾ 100年経ってもまだ起源解明できていないのか、とHess先生からは怒られるかもしれないが、ことUHECRsに関しては、その到来頻度の低さと必要とされる実験の規模に免じて今しばらくの猶予はもらえよう。我々はやっとなんとか、ついに、UHECRsを観測して精密なエネルギーや組成を決定し、異方性を議論して起源を解明する技術と手段を確立したわけであり、勝負はむしろこれからである。2012年2月にジュネーブのCERNで行われたUHECR2012国際シンポジウムでは、この分野で初めてTA, Augerという枠を超えて実験間にまたがる国際ワーキンググループが組織され、データ解析の手法や結果の比較、この分野の今後の将来性について深く突っ込んだ議論がなされた。²⁰⁾ 荷電粒子による天文学を切り拓く次世代の大規模国際共同実験を行うための議論も既に始まっている。今後のTAの成果、そしてこの分野の展開に注目していただきたい。

参考文献

- 1) J. Linsley: Phys. Rev. Lett. **10** (1963) 146; D. J. Bird, *et al.*: Astrophys. J. **441** (1995) 144.
- 2) K. Greisen: Phys. Rev. Lett. **16** (1966) 748; T. Zatsepin and V. A. Kuzmin: JETP Lett. **4** (1966) 178.
- 3) F. W. Stecker: Phys. Rev. Lett. **21** (1966) 1016; M. J. Chodorowski, *et al.*: Astrophys. J. **400** (1992) 181.
- 4) M. Takeda, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 1163.
- 5) R. Abbasi, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 101101.
- 6) J. Abraham, *et al.*: Nucl. Instr. Meth. A **523** (2004) 50.
- 7) 福島正己: 日本物理学会誌 **60** (2005) 20.
- 8) T. Abu-Zayyad, *et al.*: Nucl. Instr. Meth. A **689** (2012) 87.
- 9) T. Abu-Zayyad, *et al.*: Nucl. Instr. Meth. A **676** (2012) 54.
- 10) T. Shibata, *et al.*: Nucl. Instr. Meth. A **597** (2008) 61.

- 11) T. Abu-Zayyad, *et al.*: Astrophys. J. Lett. **768** (2013) L1; D. R. Bergman: Intl. Cosmic Ray Conf. (2013) CR-EX06, 0221.
- 12) T. Abu-Zayyad, *et al.*: Astropart. Phys. **39-40** (2012) 109.
- 13) J. Abraham, *et al.*: Phys. Lett. B **685** (2010) 239.
- 14) Y. Tameda: UHECR2012, EPJ Web of Conf. **53** (2013) 04005; Y. Tsunesada: Intl. Cosmic Ray Conf. (2013) CR-EX08, 0132.
- 15) J. Bellido and Y. Tsunesada, *et al.*: UHECR2012, EPJ Web of Conf. **53** (2013) 01006.
- 16) J. Abraham, *et al.*: Science **318** (2007) 938.
- 17) T. Abu-Zayyad, *et al.*: Astrophys. J. **757** (2012) 26; P. Tinyakov Intl. Cosmic Ray Conf. (2013) CR-EX10, 1033.
- 18) P. Abreu, *et al.*: Astropart. Phys. **34** (2010) 314.
- 19) 日本物理学会誌 **67** (2012) 一特集「宇宙線100周年」.
- 20) K. H. Kampert and M. Fukushima: CERN Courier (2012) <http://cerncourier.com/cws/article/cern/50218>.

(2013年6月7日原稿受付)

Observation of Ultra-High Energy Cosmic Rays by Telescope Array

Yoshiki Tsunesada, Shoichi Ogio and Hiroyuki Sagawa

abstract: The results from the Telescope Array experiment after the first five year observation are reviewed. We measured the energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays (UHECRs) by two different types of detectors, the surface detector array (SD) and the fluorescence detectors (FDs). The energy spectrum by TA is fully consistent with the result from the HiRes experiment in the energy scale and the shape. We found a steepening in the energy spectrum at 5.4×10^{19} eV, which is also consistent with the claim firstly reported by HiRes, and later by Auger. The analysis of longitudinal development of air showers in the atmosphere shows that the UHECR mass composition is dominated by protons around the steepening. This is a supporting evidence of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin cutoff, which may be formed as a result of UHECR energy losses via interaction with the cosmic microwave background photons in the inter-galactic space. However, we found no statistically significant anisotropy in the arrival directions of the current TA data, which is expected if UHECRs from nearby sources are preferably observed in the energy region beyond the steepening. The interpretation of the results and the future prospects are discussed.

日本物理学会誌 第68巻 第11号 (2013年11月号) 予定目次

口絵: 今月号の記事から

巻頭言

専門研究を活かす基礎教育の勧め……………三沢和彦

解説

生体膜における不均一構造の物理……………好村滋行, 今井正幸
レプトンフレーバー混合とニュートリノ質量: 到達点と近未来
……………南方久和

最近の研究から

物体の運動で発現する量子乱流……………矢野英雄, 坪田 誠
IceCube実験による超高エネルギーニュートリノ事象の初検出
……………石原安野, 吉田 滋

JPSJの最近の注目論文から 7月の編集委員会より

……………安藤恒也

科学研究費

平成25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……………迫田和彰, 鹿野田 一司

談話室

基礎教育としての「科学と倫理」……………池内 了
ケンブリッジ大学とウールズソープ村におけるニュートン同時
代体験その他……………八木浩輔

歴史の小径

伏見康治による海外のプラズマ・核融合研究機関視察
……………雨宮高久

追悼

針谷喜久雄博士を悼む……………阿部修治
新著紹介

日本物理学会が発行している Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の論文で2013年5月に掲載可となった中から2013年6月の編集委員会を選んだ“Papers of Editors' Choice”(JPSJ注目論文)を以下に紹介します。図に関しては、原図はカラーのものでもモノクロで印刷しているのが不鮮明になる場合がありますが、その場合は、物理学会のホームページの「JPSJ注目論文」にカラー版を載せていますので、そちらをご覧ください。論文は掲載から約1年間は無料公開しています。また、関連した話題についての解説やコメントがJPSJホームページの「News and Comments」覧に掲載される場合もありますので、合わせてご覧ください。JPSJ編集委員会では物理学のあらゆる分野の興味深い論文を「注目論文」としてこの欄で紹介したいと思っています。物理学会会員からのJPSJへの自信作の投稿を期待します。

電子キャリア注入型 (T' 構造) 銅酸化物超伝導体の還元処理による電子・スピン状態の変化—ノンドープ超伝導の発現メカニズムを提案—

銅酸化物高温超伝導体の超伝導のメカニズムを理解するためには、物性相図を明らかにすることが重要である。T' 構造を有する電子キャリア注入型銅酸化物の薄膜試料において、過剰な酸素を効果的に取り除くことで、電子キャリアを注入しなくても超伝導が発現する、所謂ノンドープ超伝導が報告された。これが真実であれば、所謂T構造をもつホールキャリア注入型銅酸化物で見られるような、モット絶縁体にキャリアを注入して超伝導が発現するという物性相図とは異なるため、電子型の電子対形成のメカニズムがホール型とは異なるかもしれない。しかし、薄膜試料であるため、酸素量の同定や磁気特性など、不明な点が多く、詳細は明らかではない。したがって、単結晶を用いた詳細な物性測定が望まれていた。

最近、東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻のメンバーを中心とする研究グループは、T'構造をもつ電子型銅酸化物における過剰酸素の新しい除去手法(還元手法)を開発し、今までは絶縁体とされていた電子型 $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ の $x=0.10$ の単結晶試料で超伝導を発現させることに成功した。また、磁場中での電気抵抗率の測定結果に基づいて、ノンドープ超伝導が強い電子相関に基づく電子エネルギーバンド構造(図1)で理解できることを提案した。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の2013年6月号に掲載された。

T構造をもつホール型銅酸化物は、強い電子相関に基づく反強磁性モット絶縁体にホールを注入することで反強磁性長距離秩序が壊れて超伝導が発現することから、反強磁性的なスピンのゆらぎが電子対の形成に効いていると考えられている。一方、T'構造をもつ電子型銅酸化物においてノンドープ超伝導が観測されたことから、電子型では電子相関が弱く、基底状態は金属的であると提案された。しかし、ホール型と電子型で異なる基底状態を示す理由は明らかではなかった。

一方、本研究において、磁場中で電気抵抗率を測定した結果、還元とともにキャリアが強局在状態から近藤効果を示す金属状態へと移り変わり、また、反強磁性のゆらぎに起因する擬ギャップが還元とともに消失することがわかった。これらの結果とノンドープ超伝導を同時に説明するものとして、本研究では、図1に示す強い電子相関に基づくバンド構造が提案された。これによると、T'構造特有のCuの平面4配位構造のため、Cuの3d軌道のエネルギーが低下し、 $3d_{x^2-y^2}$ の上部ハバードバンド(UHB)と酸素の2pバンドが混成することで、フェルミ面に有限の状態密度が現れ、ノンドープでも超伝導が発現してもよいことがわか

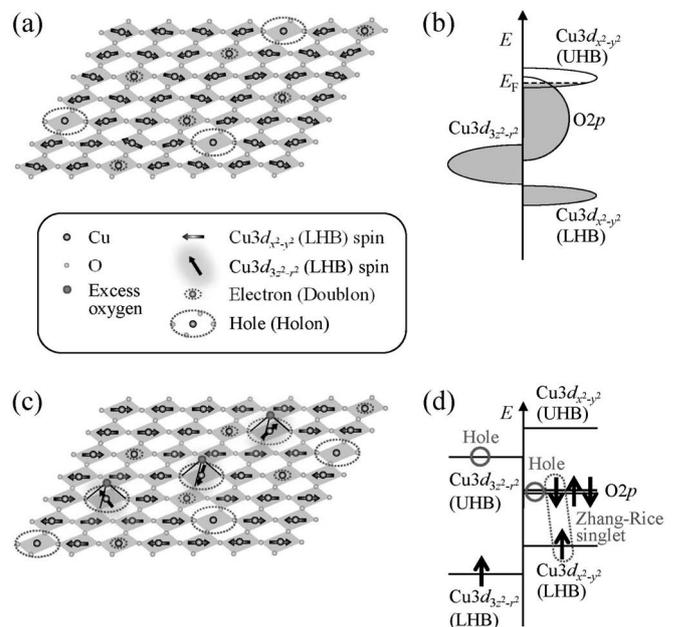


図1 T'構造をもつ電子キャリア注入型銅酸化物超伝導体の母物質における (a) CuO_2 面内の電子・スピン状態と (b) 電子エネルギーバンド構造。Cuの平面4配位構造に由来するCuの3dバンドのエネルギーの低下により、Cuの $3d_{x^2-y^2}$ の上部ハバードバンド(UHB)とOの2pバンドが混成してフェルミ面に有限の状態密度が現れ、 CuO_2 面内に電子キャリアとホールキャリアが生成されている。(c) Cuの直上に過剰酸素が取り込まれた場合の CuO_2 面内の電子・スピン状態と(d) 過剰酸素の直下のCuとOの電子エネルギーレベル。過剰酸素が直下のCuとOにホールを2個供給する。1つはOの2pバンドに入り、Cuの $3d_{x^2-y^2}$ の下部ハバードバンド(LHB)のスピンとZhang-Rice一重項を形成する。もう1つは $3d_{3z^2-r^2}$ のUHBに入り、 $3d_{3z^2-r^2}$ の下部ハバードバンド(LHB)のフリースピンのCuO₂面上に誘起される。

る。一方、過剰な酸素が取り込まれると、過剰酸素の直下のCuに $3d_{3z^2-r^2}$ の下部ハバードバンド(LHB)に起因する局在スピンの現れ、近藤効果が観測される。過剰な酸素がさらに増えると、静電ポテンシャルの乱れのためにキャリアが強く局在するというものである。本研究成果は、ノンドープ超伝導と還元による電子・スピン状態の変化を同時に説明するバンド構造を提案したことで、多くの研究者の注目を集めている。今後は、 $x=0$ の単結晶でノンドープ超伝導を発現させ、詳細な物性を調べていくことで、電子型の超伝導の発現メカニズムが解明されることが期待される。

原論文

Evolution of the Electronic State through the Reduction Annealing in Electron-Doped $\text{Pr}_{1.3-x}\text{La}_{0.7}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ ($x=0.10$) Single Crystals: Antiferromagnetism, Kondo Effect and Superconductivity

T. Adachi, Y. Mori, A. Takahashi, M. Kato, T. Nishizaki, T. Sasaki, N. Kobayashi and Y. Koike: J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 063713.

〈情報提供：足立 匡(上智大学理工学部
機能創造理工学科)

小池洋二(東北大学大学院工学研究科)〉

基板上Si単原子層膜(シリセン)でのディラック電子の消失と出現

グラフェンは、平面上に隙間なく並べられた正六角形の各頂点に炭素原子が位置した単原子層物質であり、太古の昔から地球上に存在するグラファイト(黒鉛)を実験室で剥離することにより、その存在が初めて確認された(Geim, Novoselov: 2010年ノーベル物理学賞)。このグラフェンは、蜂の巣のような特異な構造における高い対称性に起因して、物性を担うフェルミ準位付近の電子が、質量0の相対論的フェルミオンに対するディラック方程式(ワイル方程式)に従うことが示されている。これをディラック電子と呼んでいる。このディラック電子による異常量子ホール効果などの興味深い物性に加え、グラファイトに起源を有する高い電子移動度、構造の頑健さにより、現在のテクノロジーの限界を打ち破る材料とも期待されている。

しかし、既存のテクノロジーを支えてきたSi材料に対する、人類の微細加工技術の極限までの発展を活用するには、炭素原子と同じIV族であるSi原子による蜂の巣構造単層膜[名付けてシリセン(silicene)]の生成が重要であり、それが実現されれば計り知れないインパクトが生まれる。しかしながらひとつの問題は、Si原子に対しては、グラファイトに対応するような、蜂の巣構造の原子層が重なったバルク物質は、自然界に存在しないことである。従ってシリセンは、基板として他物質を用い、その上に生成することになる。つまり異なる物質との界面の制御と、その界面が電子物性とくにディラック電子に及ぼす影響の解明が重要な研究課題となる。実験的には、銀の(111)面を基板と

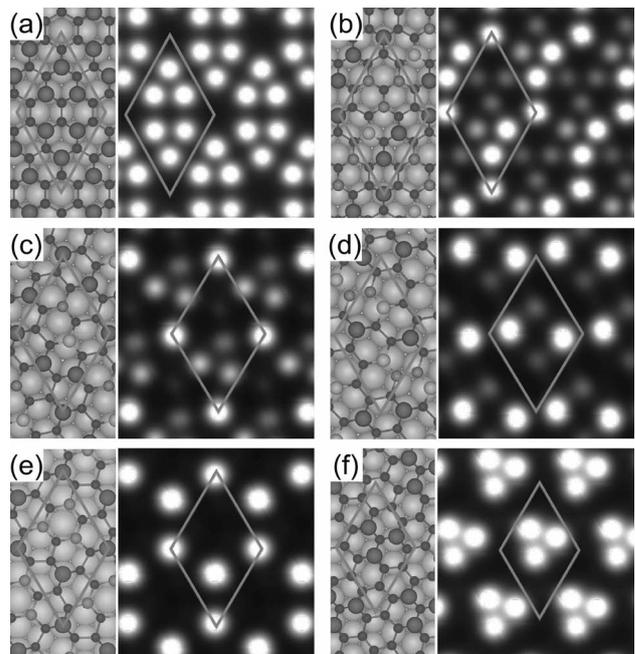


図1 計算されたSTMイメージ(右側)と対応する原子構造の平面図。銀(111)面の周期性に対して、 4×4 ((a), (b)), $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ ((c), (d)), $2\sqrt{3}\times 2\sqrt{3}$ ((e), (f))の長周期構造が存在し、それぞれ最安定構造((a), (c), (e))と準安定構造((b), (d), (f))が見出された。平面図におけるシリセンを表すボールの大小は、シリセン膜の原子スケールでの凹凸を示している。大きな灰色のボールは基板の銀原子の位置である。平面内での単位胞は直線で示してある。

して用いたシリセンの生成がすでに行われ、生成されたシリセンの原子構造は走査型トンネル顕微鏡(STM)実験で明らかにされている。しかし、ディラック電子がこの基板上のシリセンでも存在するのか、するとしてもどのような変調を受けるかについてのコンセンサスは得られていなかった。

今回、東京大学工学系研究科物理工学専攻の研究グループは、量子論に立脚した第一原理計算^{*1}により、銀(111)面上の様々な安定構造を探索し、走査型トンネル顕微鏡実験で得られている原子構造を見事に再現すると同時に、未だ実験的に見つかっていないシリセン構造をも見いだした(図1)。さらにいずれのシリセン構造においても、物性を担うフェルミ準位付近には、ディラック電子は存在しないことを発見した。これは、シリセン中のSi原子と基板のAg原子が強く結合し、そのために両者の軌道の混成が生じるためである。この知見から、シリセンと強からず弱からずの結合を形成する基板を用いれば、ディラック電子がフェルミ準位付近に発現する、安定なシリセン膜が生成されることが予想される。実際、第一原理計算により、水素終端Si(111)表面およびヘキサゴナルBN膜がその条件を満たす、格好の基板となることを見出された(図2)。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌Journal of the

^{*1} 多電子系を扱うひとつの手法である密度汎関数理論に基づく全エネルギー電子構造計算。多体の交換相関エネルギーに対するいくつかの近似が用いられている。大規模計算を、京コンピュータに代表される超並列アーキテクチャで行うための、実空間アプローチ(RSDFTコード)が採用されている。

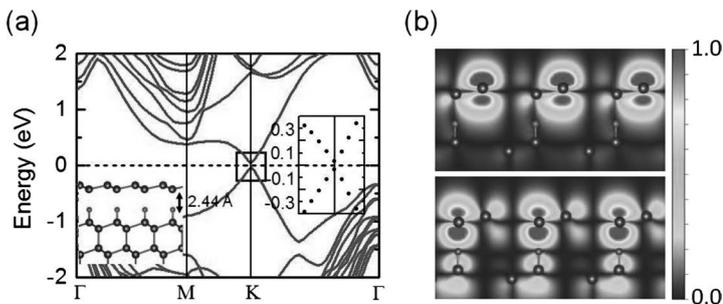


図2 水素終端Si(111)面上のシリセンのバンド構造 (a) とフェルミ準位付近の電子状態の波動関数 (b). 計算で求めた安定構造の側面図が (a) に示してあり、大きい丸がSi原子、小さい丸が水素原子である。フェルミ準位 ((a)の縦軸の原点に取ってある) 付近ではバンドは線形分散を示し、ディラック電子の特徴を示している。その波動関数を表示すると、(b)のようにSiのp軌道から成っている。シリセン膜にはわずかな凹凸があるため、Siのs軌道の寄与もあるが、その効果は小さい。

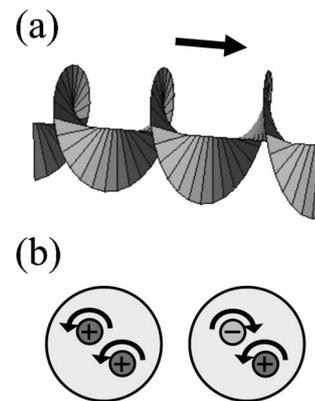


図1 (a) 渦波の波面の模式図. (b) 本研究で生成する2つの渦を含む電子ビームの模式図.

Physical Society of Japan (JPSJ) の2013年6月号に掲載された.

原論文

Absence of Dirac Electrons in Silicene on Ag(111) Surfaces
Z.-X. Guo, S. Furuya, J. Iwata and A. Oshiyama: J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 063714.

(情報提供: 押山 淳(東京大学大学院工学系研究科))

電子ビーム中に生成した2つの渦の伝播ダイナミクス

コーヒーをかき回して、クリームを入れるとききれいなうずまき模様がみられる。何度か試すと、偶然、複数のうずまき模様が現れるときがある。流体の場合、渦どうしは相互作用し合い、たとえば台風における「藤原の効果」のように、互いの渦の運動に影響を及ぼし合う。量子力学にしたがう電子や原子も渦を作ることが知られており、たとえば超伝導や超流動にみられる量子化された磁束や渦運動は量子渦と呼ばれる。電子の渦は、その波動関数中に位相特異点が形成されるなど、波動関数のトポロジーの観点からも大変興味深い。2010年、自由空間を伝播する電子波による渦、すなわち電子渦ビームが実験的に実現された。¹⁾ 平面波のようなトポロジカル欠陥を含まない進行波以外の伝播モードが、電子でも確かめられたことになる。このビームは渦の回転軸が伝播方向に平行であり、波面(等位相面)がらせん状であること(図1(a))、渦の中心が位相特異点であること、軌道角運動量をもつことなど通常の平面波にはない特徴を有する。これらの特徴から、磁場・磁性体との相互作用や物質へのトルク移送などが期待され、世界的に大きな注目を集めている。²⁻⁵⁾

複数の電子渦が近接した場合、渦どうしはどのような相互作用を示すであろうか? 名古屋大学エコトピア科学研究所および埼玉工業大学先端科学研究所のグループは、電子ビーム中に2つの渦を生成し、ビームの伝播過程における2つの渦の運動の様子を観察した(図1(b))結果、伝播にともない2つの渦がビームの中心のまわりを公転運動す

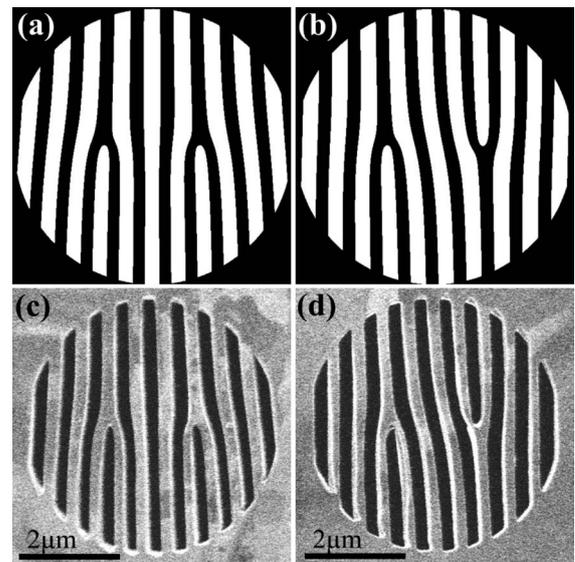


図2 2つの渦を含む電子ビームを生成するフォーク型回折格子. (a), (b) (+1, +1) および (+1, -1) の渦を含む波動場をもちいて計算したホログラムを2値化したもの. (c), (d) FIBをもちいて作製したマスク (+1, +1) および (+1, -1) のSIM像.

ることを実験的に明らかにした。さらに2つの渦の回転の向きが同じ場合および異なる場合で、その公転運動の向きが異なることを見出した。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の2013年7月号に掲載された。

研究グループは、図2に示すようなフォーク型回折格子を作製し、回折ビームに2つの渦を含む電子ビームを生成するようにした。図2(a)の回折格子では回転の向きが同じ2つの渦(+1, +1)が生成され、図2(b)の回折格子では回転の向きが異なる2つの渦(+1, -1)が生成される。収束イオンビーム装置(FIB)をもちいて厚さ2μmの白金箔に切削加工を行い、電子線用の回折格子マスクとした。マスク径は5μmであり、Y型に分岐した部分の間隔は1.7μmとした。電子渦ペアの伝播時の振る舞いを調べるため、これらのマスクを電界放出型電子銃を搭載した透過型電子顕微鏡装置に導入した。電子線の加速電圧を120kVとし、電子顕微鏡の結像レンズ系のフォーカス条件を変化させる

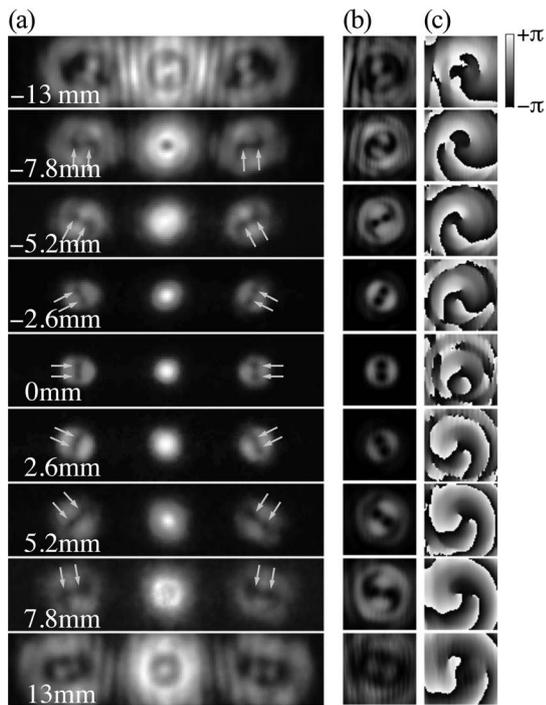


図3 2つの渦を含む電子ビームの伝播過程の実験結果 (a) および Fresnel 伝播シミュレーションの振幅 (b) および位相 (c). (a) の左下の数字は回折面からのデフォーカス量を表す.

ことにより、マスクを通過した電子が遠方場で形成する強度分布の変化を観察した。

図3(a)は、回転の向きが等しい電子渦(+1, +1)のペアが自由空間を伝播する際のビーム断面の強度分布の変化である。各図の左下の値はマスクの回折面からのデフォーカス量 df を表す。マスクの回折面に対応する $df=0$ mm の位置の近傍において、一次の回折ビームの中に矢印で示す2つの暗点がみられる。この暗点は2つの電子渦の各中心にある位相特異点である。注目すべきは、伝播する過程で電子渦のペアがその中点のまわりを同じ回転の向きで公転運動している点である。 $df=0$ mm の位置を回転角の原点とすると、 -90° から $+90^\circ$ まで回転する様子が観察されている。

一方、互いに逆符号のトポロジカル数(+1, -1)の渦

を含む場合、同符号の場合と全く異なる振る舞いを示した。回折格子マスクを通過後に回折ビーム中に形成された電子渦のペアは、回折面近傍で明瞭にみられなくなり、焦点を過ぎたところで再び現れた。この振る舞いは、トポロジカル数が互いに逆符号の電子渦が、ビーム中心の周りを逆向きに公転し、重なり合ったところで打ち消し合い、さらに伝播とともにさらに公転し、再び出現したものと考えられる。

電子渦のペアの回転は、回折格子マスクから生成されるすべての回折ビームにおいてみられた。回転の様子は Fresnel 伝播シミュレーション(図3(b)および3(c))で非常によく再現され、その回転角は Gouy 位相から予想されるものとよい一致を示した。すなわち、電子ビーム中の渦は隣接する渦からの影響を受けず、通常の電子波と同様に伝播することが判明した。今回の実験は、ナノアンペアオーダーの電流量で行ったが、そのような条件では電子間の相互作用(Boersch効果)は無視できる。電流量を上昇させてビーム中の電子間の反発等の相互作用が顕著になるような条件にした場合に電子渦どうしの相互作用がどのように現れるか、興味をもたれる。本研究により、渦の回転運動をとおして電子波の位相を観察できることが分かった。この現象は、物質を通過した電子の位相変化の検出に応用できる可能性を示唆している。

参考文献

- 1) M. Uchida and A. Tonomura: Nature **464** (2010) 737.
- 2) J. Verbeeck, H. Tian and P. Schattschneider: Nature **467** (2010) 301.
- 3) C. Greenshields, R. L. Stamps and S. Franke-Arnold: New J. Phys. **14** (2012) 103040.
- 4) K. Y. Bliokh, P. Schattschneider, J. Verbeeck and F. Nori: Phys. Rev. X **2** (2012) 041011.
- 5) J. Verbeeck, H. Tian and G. Van Tendeloo: Adv. Mater. **25** (2013) 1114.

原論文

Propagation Dynamics of Electron Vortex Pairs

Y. Hasegawa, K. Saitoh, N. Tanaka and M. Uchida: J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 073402.

〈情報提供：齋藤 晃(名古屋大学エコトピア科学研究所)
内田正哉(埼玉工業大学先端科学研究所)〉

坂井典佑 (PTEP編集委員長)

日本物理学会が発行している Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP) の Invited Papers で 2013 年 3 月号に掲載されたものを以下に紹介します。この紹介記事は国内の新聞社の科学部、科学雑誌の編集部にて電子メールで送っている「紹介文」をこの欄のために少し書き直したものです。専門外の読者を想定し、「何が問題で、何が明らかになったのか」を中心とした読み物であるので、参考文献などはなるべく省いています。

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

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

特集：KEKB 加速器

KEKB 加速器は 1998 年 12 月初めから 2010 年 6 月末まで稼働した。現在は、SuperKEKB へのアップグレード工事のために運転を休止している。KEKB は電子-陽電子の衝突型の加速器であり、その使命は大量の B 中間子を生成し、Belle と呼ばれる検出器を用いてその崩壊を調べることによりフレーバー物理の実験的研究を行うことである。

本特集は KEBK 加速器に関する全部で 11 編の論文から成り、KEKB の加速器としての到達点と成果を記述するとともに、11 年半の長きにわたるビーム運転の経験を総括している。本稿では、個々の論文について詳述する代わりに、KEKB 加速器の到達点を簡単にまとめてみたい。

まず、KEKB のもつ記録について述べる。KEKB はルミノシティマシンとしては、世界最高性能を誇っている。ピークルミノシティの $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と Belle 検出器が蓄積した全積分ルミノシティ 1041 fb^{-1} は、ともに現在に至るまで世界記録である。KEKB は SLAC の PEP-II と熾烈な競争を繰り広げたが、最終的には KEBK が競争に打ち勝った。PEP-II のピークルミノシティの記録は、 $1.21 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であり、また全積分ルミノシティ (BaBar 検出器に deliver された値) は 557 fb^{-1} であった (PEP-II は KEBK とほぼ同じ時期に運転を開始し、2008 年 4 月まで運転された)。

次に、KEKB の設計値の比較という観点から KEBK の到達点について述べる。設計値でまず重要なのは、ルミノシティと直接関係する 3 つのパラメータ、1) 衝突点での垂直方向のベータ関数 (β_y^*)、2) 垂直方向のビーム・ビーム・パラメータ (ξ_y)、3) 全ビーム電流 (I_b)、である。ルミノシティは β_y^* に反比例し、 ξ_y と I_b に比例する。 β_y^* は衝突点でのビームの絞り込みに関するパラメータで、小さいほど衝突点でのビームサイズが小さくなり、ルミノシティが高くなる。KEKB の設計値は 10 mm であったが、5.9 mm を達成した。 β_y^* の限界は一つにはビームを構成するバンチ (粒子の塊) の長さ起因する。これは、ビームの衝突

が点ではなくバンチ長で決まる長さにならなくて起こり、(β_y^* が限界を超えて小さいと) その長さの範囲で、ビームサイズが大きくなってしまおうという現象が起きるからである。KEKB ではこの限界に達していた。PEP-II より KEBK のルミノシティが高い理由の一つは、 β_y^* の値が KEBK の方が小さいことによる。これは、ビーム光学の設計上、KEKB の方がバンチ長を短くできたことによる。SuperKEKB では、nano-beam 方式と呼ばれる方法を用いて、この限界を回避して、KEKB の 1/20 の β_y^* を達成することを目指す。 ξ_y はビーム・ビーム性能 (衝突性能) を表す指標である。この値が高いほど、衝突するバンチの粒子数の高い値まで、ビーム衝突によるビームサイズの増大が抑制されることになり、ルミノシティが上がる。 ξ_y の設計値は、0.052 であったが、0.09 が達成された。設計値より高い ξ_y が達成できた主な理由は、クラブ空洞の導入にある。クラブ空洞は水平交差角衝突を実質的に交差角なしの衝突 (正面衝突) に変える装置である。クラブ空洞は、世界に先駆けて KEBK で開発されたが、LHC のアップグレードをはじめ、将来の加速器において有望な技術として注目されている。全ビーム電流 (I_b) に関しては、設計値 2.6 A (陽電子)、1.1 A (電子) に対して、達成値は 1.64 A (陽電子)、1.19 A (電子) であった (最高ルミノシティ達成時)。陽電子の電流が設計値より低い理由は、機器の性能の問題ではなく、これより高い電流を蓄積してもルミノシティが上がらなかったことによる。その理由は、陽電子リングで光電子等に由来する「電子雲」が陽電子のビームサイズを増大させる現象による。この問題は、KEKB でも手巻きソレノイド磁石の設置によりかなり改善はしたが、完全には解決できなかった。

KEKB では、多くの困難を乗り越えてルミノシティを上げてきた。一つの問題は、大電流ビームに伴う様々な問題であった。KEKB の電流値は放射光マシンの電流と比べても高く、これまでの加速器が未経験の領域であった。上述の電子雲の問題に加えて、この大電流のビームが作る電磁

場による真空機器が壊れるというトラブルが相次ぎ、試行錯誤で少しずつ電流を増やしてきた。特に問題になったのは、ビームハローを除去するためのコリメータとベローズのRFフィンガーと呼ばれる部分であった。また、大電流蓄積時に加速空洞のインピーダンスが原因で生じるビーム不安定性の問題を解決するために、KEKBではARESと呼ばれる特殊な常伝導空洞と大電流仕様の超伝導空洞を開発し、この問題を解決した。これらの加速空洞はビーム電流がKEKBの約2倍のSuperKEKBでも小さな改造で用いることが計画されている。特に、KEKB仕様の超伝導空洞はBEPC-IIや台湾放射光など中規模加速器の高度化にも必須のRF加速技術としてその応用が広がりつつある。また、空洞以外の原因によるビーム不安定性を抑制するためのフィードバック装置が開発され、大電流ビーム運転には不可欠の機器として活躍した。KEKBの入射器は歴史的な理由で、PEP-IIと比べて非力であったが、その弱点を補うために、陽電子の2バンチ入射、連続入射(物理実験を行いながら少しずつ入射する)、3リング(二つのKEKBリングとPFリング)の同時入射、などの手法が開発され、入射器、ビーム輸送路、Belle検出器においてそれぞれ必要な改造がなされた。特に、連続入射は積分ルミノシティ向上に非常に有効で、将来のコライダーでも必須の技術となった。また、ルミノシティを向上させるためには、ビーム光学上の補正やビーム衝突によるビームサイズの増大を抑制するためのビーム軌道などの微妙な調整、またビーム位置モニターなどのビームの状態をモニターする機器の安定性などが非常に重要であることが経験的に分かった。これらの経験は、SuperKEKBをはじめ将来のマシンに生かされるはずである。

原論文 (2013年3月26日公開済み)

Achievements of KEBK

T. Abe, *et al.*: Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A001 (2013).

The KEBK injector linac

M. Akemoto, *et al.*: Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A002 (2013).

Upgrade of the beam transport lines and the beam-abort system and development of a tune compensator in KEBK

N. Iida, *et al.*: Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A003 (2013).

The KEBK filling-pattern generating system

E. Kikutani, *et al.*: Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A004 (2013).

Experiences at the KEK B-factory vacuum system

K. Kanazawa, *et al.*: Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A005 (2013).

Performance and operation results of the RF systems at the KEK B-Factory

T. Abe, *et al.*: Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A006 (2013).

Progress in KEBK beam instrumentation systems

M. Arinaga, *et al.*: Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A007 (2013).

Accelerator control system at KEBK and the linac

A. Akiyama, *et al.*: Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A008 (2013).

Lattice of the KEBK colliding rings

H. Koiso, *et al.*: Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A009 (2013).

Commissioning of KEBK

T. Abe, *et al.*: Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A0010 (2013).

Accelerator design at SuperKEKB

Y. Ohnishi, *et al.*: Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A0011 (2013).

〈情報提供：船越義裕 (KEK)〉

応用物理 第82巻 第10号 (2013年10月号) 予定目次

特集：ワイドバンドギャップ材料

巻頭言：環境確保条例……………奥村次徳

総合報告：ワイドギャップ半導体材料；花満開に向けて……………藤田静雄

解説

SiC単結晶エピタキシャルウェーハの高品質化……………大谷 昇

p型ZnO成長……………八百隆文

最近の展望：InGaN LED用MOCVDの課題：基板材料とコストダウン戦略……………松本 功

研究紹介

GaN中の点欠陥評価……………徳田 豊

InGaZnO-TFTの無線タグ(RFID)応用……………河村哲史, 他

アモルファス酸化半導体薄膜の分析・評価技術

……………林 和志, 他

基礎講座：タッチパネルのいろは……………中谷健司

ホットとひといき, ほか

物理研究者が起業する? 当たり前だ……………イーヴ ラクロワ

母なるチャンパー, 父なるシリコン……………吉本昌広

心理学的アプローチによるプロジェクト活性化; 異分野連携・ベンチャー起業がうまくいく, とっておきの方法…森 勇介

日本で唯一生き残ったスキー板メーカー「オガサカスキー」の技術……………取材: 塩島謙次

座談会「パワー半導体; その歴史と将来展望」…松波弘之, 他

第54回藤原賞、第53回東レ 科学技術賞：香取秀俊氏

安田正美（産総研）

香取秀俊氏（東京大学大学院工学系研究科教授、理化学研究所主任研究員）が、「光格子時計の発明と実現による高精度原子時計技術の開発」で第54回藤原賞、および、「光格子時計の発明と原子時計の超高精度化」で第53回東レ科学技術賞を受賞した。

天体運動に基づく時計に対して、ガリレオやホイヘンスに始まる近代以降の地上の時計の開発においては、環境外乱への対策が重要であった。振り子を真空容器中に入れて空気抵抗を減らし、温度や気圧の変化からの隔離を図るショート時計等にその思想が読み取れる。現在、1秒はマイクロ波領域で動作するセシウム原子時計により定義されているが、近い将来これに置き換わると目される光原子時計についてもこの要請は同様であり、その究極の形が、単一イオン光時計であった。ただし、これは只一つのイオンからの微弱信号を長時間積算する必要があった。これに対して、自由空間中の多数の中性原子集団を用いる光原子時計も長らく研究されてきたが、信号強度は大きいものの、原子運動に伴うドップラーシフトが大きな問題だった。このような状況下、香取氏は、原子を強く束縛しつつも時計遷移周波数には全く影響しない、魔法波長の光格子という概念を提唱し、従来型の光原子時計を止揚する形で、光格子時計を発明した。これは外部摂動の徹底的な排除という、精密計測における伝統的思考に変革を迫るものである。世界初のストロンチウム光格子時計の絶対周波数測定に成功した後、米仏の研究所での追試結果が良好な一致を示したことからその有用性が実証されると、光格子時計は国内外の標準研究所へ急速に普及していき、今や秒の再定義候補の最本命と目されている。香取氏は、魔法波長以外にも光格子時計に必要なほとんど全ての要素技術・キーコンセプトを提案・実証し続けてきた。例えば、スピン禁制遷移を用いるレーザー冷却法、光格

子への原子の最適充填、光格子中のラム・ディッケ束縛によるドップラーフリー分光、スピン偏極フェルミ粒子におけるパウリの排他律による原子間衝突の抑制、2台の光格子時計の同期比較による量子限界安定度達成、黒体放射シフト抑制の為に水銀光格子時計・低温動作光格子時計等である。このように香取氏は光格子時計を産み出しただけでなく、その進化に努め、一貫して世界をリードし続けている。長らくスパコン（スーパーコンピューター）が国の科学力比較の為に指標となってきたが、香取氏が新たに提唱するように、スパクロ（スーパークロック）も重要な指標となるだろう。ここでも我が国のプレゼンスを示し続けることが肝要である。科学技術の共通言語としての計測標準、その中でも一丁目一番地とされる時間周波数標準の高度化は人類文明全体への貢献にもつながる。光格子時計の目指す18桁の精度とは、宇宙の年齢138億年に1秒も狂わない時計を意味する。この精度になると、地上での高さ1cmの違いが影響を及ぼす。相対論的補正を入れない時間の共有は不可能となり、逆に、光格子時計は新しい計測ツールとして立ち上がってくる。その応用や実用化を視野に入れて、さらなる進化を遂げつつある光格子時計は、物理学の全く新しいブローブとして働くとともに、GPSに匹敵する、またはそれ以上の、新たな産業・市場を創出するものと期待される。

（2013年6月18日原稿受付）

2013年Yodh Prize: 永野元彦氏

手嶋政廣（東大宇宙線研）

2013年宇宙線国際会議（リオデジャネイロ）にて、永野元彦東京大学名誉教授が日本人では初めてYodh Prizeを受賞されました。長年にわたる最高エネルギー宇宙線の先駆的な実験的研究、またそのリーダーシップが評価され、受賞されることになりました。大変喜ばしい限りです。

永野先生は、最高エネルギー宇宙線

研究を飛躍的に発展させるために、1980年代後半に、世界に先駆けて甲府盆地に100平方キロを超える巨大空気シャワーアレイAGASAを建設し、従来の統計をはるかに凌ぐ高い統計で数々の興味深い実験結果を出してきました。特に、AGASAで観測された 2×10^{20} eV宇宙線は、ほぼ同時期にFly's Eyeで観測された 3×10^{20} eV宇宙線とともに大きなセンセーションで世界中の研究者に受けとめられ、現在のTelescope Array (TA)、Pierre Auger Observatory (PAO)の建設へと世界は動いたといえます。

永野先生は1963年より東京大学原子核研究所宇宙線部に所属し、小田稔先生等が建設した空気シャワーアレイ中心部に20 m²スパークチェンバーを建設し、水平方向から来るシャワー(HAS)による超高エネルギーミューオンの研究を行いました。その後、X線の大御所となるTruemper先生のキール大学に赴き、旧大防空壕の壁面に検出器を取付けHASの研究を継続したと聞いています。

その後、永野先生は明野空気シャワー観測装置を鎌田甲一先生とともに主導して建設され、1980年より定常運転を開始します。電子成分を観測するための多数のシンチレーション検出器、大面積ミューオン検出器を1 km²の領域に設置した、当時としては世界最高水準・最高精度の空気シャワー観測装置だったといえます。10¹⁵ eVから10¹⁹ eVまでの宇宙線エネルギースペクトルの導出、10¹⁷-10¹⁸ eV領域でのP-Air、P-P反応断面積を求める等の画期的な研究成果をあげています。

明野空気シャワー観測装置の定常運転開始とともに、10²⁰ eVまで延びる最高エネルギー宇宙線を、今まで世界中で観測された総事象数を1年間で観測できる巨大な装置を建設すべしという大目標のもとに、多くの研究会、空気シャワー談話会などがもたれ、AGASAのデザインが練られました。1980年代当時、市場に出始めた光ファイバー、マイクロプロセッサを使った遠隔ネットワークシステムにより検出器をつなぐデータ収集システムがデザインされました。1987年より概

算要求により AGASA が建設され、世界をリードする興味深い結果がもたらされ、TA、PAOへとつながっていきましました。

1998年に東京大学を定年退官され、半年間ドイツ Karlsruhe に行かれますが、精力的に空気シャワーシミュレーションを行い、AGASAでのエネルギー決定に関わる研究を行い、また福井工業大学においても空気シャワーからの大気蛍光の発光効率に関する測定実験を継続されました。

永野先生は、日本そして世界の空気シャワー研究、宇宙線研究をリードしてこれ、長年のひたむきな努力が認められたのだと思います。永野先生、Yodh Prize 受賞おめでとうございます。

(2013年6月30日原稿受付)

第3回 IUPAP Young Scientist Prize in Statistical Physics: 沙川貴大氏、竹内一将氏

田崎清明 (学習院大理)

今年の7月、韓国で第25回統計物理学国際会議 (STATPHYS) が開かれた。STATPHYSは3年ごとに開催される統計力学の最大の会議で、会期中には分野の最高権威であるボルツマン賞の授賞式もある。2007年の会議からは、ボルツマン賞に加え、学位取得から8年以内の若手研究者を対象とした Young Scientist Prize in Statistical Physics も授与されるようになった。^{*1}

第3回目となる今回の受賞者として、沙川貴大氏 (東大総合文化) と竹内一将氏 (東大理) が選ばれた。¹⁾ 第1回の受賞者の笹本智弘氏²⁾ とあわせて、歴代の受賞者5名の内の3名が日本人ということになった。これは驚くべき比率だが、三人それぞれの業績と活躍ぶりを見れば必然的な人選だと誰しも納得するだろう。実は、私は物理学会誌「最近のトピックス」の欄に、竹内氏らの業績³⁾、沙川氏らの業績⁴⁾を紹介する記事を書いている。まるで今回のダブル受賞を見越したかのようなだが、

^{*1} 賞は IUPAP の C3 委員会 (統計物理) から授与される。

当時の編集委員がかれらの卓越した業績をしっかりと見抜き私に執筆を依頼したことの現れである。未読の方はこの機会に是非ご一読いただければありがたい。

沙川氏は、観測とフィードバックを伴う物理系のふるまいを、統計力学、熱力学、(量子)情報理論などの視点から研究している。有名な「マクスウェルの悪魔」も重要な研究対象だが、より広く、観測によって得た「情報」を観測者が「利用」することが本質的な物理系において、種々の概念の相互の関連を明晰に位置付ける厳密な関係式を発見している。これから先も、量子情報から生物物理学までの広範囲を視野に入れ、科学における新しい視点、思考の枠組みを生み出す研究を進めてくれると期待している。

竹内氏は、平面内で成長する領域の「界面のゆらぎ」の普遍的な性質を研究している。国内の非平衡物理の先達が開拓した液晶対流系の長所を最大限に活かした精度の高い実験だ。界面成長に関する難解な数理解物理の研究結果を深く理解している竹内氏は、理論で示された挙動を実験的に再現するだけでなく、未だ理論が踏み込んでいない領域でも見事な結果を得て数理解物理学者たちをも刺激する。今後も、実験、数値実験、理論といった狭い枠組みを越えて生き生きとした科学を切り拓いてくれると期待している。

参考文献

- 1) STATPHYS 25 公式ページ: http://statphys25.org/sub06_1.htm
- 2) 中原明生: 日本物理学会誌 **62** (2007) 630.
- 3) 田崎清明: 日本物理学会誌 **65** (2010) 760.
- 4) 田崎清明: 日本物理学会誌 **66** (2011) 172.

(2013年6月24日原稿受付)

IUPAP C4 Commission Young Scientist Awards: 石原安野氏

吉田 滋 (千葉大)

石原安野 (いしはらあや) 氏 (現在、千葉大学大学院理学研究科特任助教) が IUPAP (国際純粋・応用物理学連合) の Young Scientist Awards を受賞しまし

た。最近では“Particle Astrophysics”と称される宇宙線分野を統括する C4 commission では初めての日本人の受賞です。

賞の対象となった業績は、PeV (= 10^{15} eV) のエネルギーを持つ超高エネルギーニュートリノの初検出です。陽子と原子核が主成分である宇宙線の起源は最も重要な疑問の一つです。宇宙線のエネルギーは最高で 10^{20} eV にも達しますが、その莫大なエネルギーへの加速機構も含めその起源については分かっていません。期待を集めてきたのがニュートリノの検出でした。高エネルギーニュートリノは、宇宙線陽子・中性子の衝突過程でのみ現実的に生成され、しかもこの素粒子は電荷を持たないため宇宙磁場中を直進します。ニュートリノの検出は宇宙線が加速・生成された現場を捉える決め手と期待されてきました。そして石原氏は、高エネルギー宇宙ニュートリノの実在を示唆する世界で初めての観測結果を示したのです。

石原氏らは、南極点直下の深氷河に 2011 年に完成したアイスキューブ (IceCube) 実験施設を用いて、エネルギーが極めて高いニュートリノを探索しました。探索において雑音となるのは、宇宙線が地球大気と衝突するとき発生する「大気ミュオン」と「大気ニュートリノ」です。この雑音は、予想される宇宙ニュートリノの量に比べ 10^6 倍以上も卓越しています。しかし大気ミュオンは上空から下向きに深氷河内の検出器に入射する頻度が圧倒的に多いこと、大気ニュートリノ・ミュオンともにエネルギースペクトルは急勾配でありエネルギーしきい値をあげれば量が減る、という二つの要素を巧みに利用し、石原氏らは飛来するニュートリノが PeV を超えるならば、どのような型のニュートリノ^{*1} であれ捉えられる探索アルゴリズムを開発して、データを解析しました。その結果、エネルギーが 1 PeV のニュートリノ 2 事象が発見されたのです。この検出における雑音事象の期待値は 0.08 事象で、系統誤差を考慮しても雑

^{*1} 電子型、ミュオン型、タウ型の3種類がある。

音がこの2事象の起因である確率は0.0029 (2.8 σ 相当) にしかありません。宇宙ニュートリノである可能性を強く示唆したのです。

この解析で中心的な役割を果たした石原氏は、2012年6月に開催されたニュートリノ物理・宇宙物理国際会議でこの発見を初めて発表しました。この

ニュースは瞬く間に世界を駆け抜け、バート、アーニーと名づけられた2事象の名前とともに石原氏の名前は業界関係者の誰もが知るところとなりました。今回の受賞はまことに喜ばしい限りです。アイスキューブ実験グループでは、バートをプリントしたTシャツを作り(サイトで売っています!),

このほど石原氏に贈呈しました。たかがTシャツですが、そこには大きな想いが込められています。

アイスキューブ物理ワーキンググループの長に就任した石原氏の今後の更なる活躍を期待します。

(2013年6月24日原稿受付)

中国の宇宙基礎科学を垣間見る

松岡 勝 (理研)

1. はじめに

5月の中旬、宇宙・天文学分野の6つの中国の研究機関を訪問した。訪問のきっかけは、90年代に7名の宇宙物理関係の中国の若手研究者を理化学研究所に招待したことにはじまる。この人達が今、一人が金融関係の仕事に転職した以外、宇宙物理の研究を責任ある立場で進めていて、筆者を招待してくれたからである。そこで、この中国訪問の目的を旧知に会って筆者らがやっているMAXI(国際宇宙ステーションに取り付けた全天X線監視装置)¹⁾の成果を携えて研究交流をすることと、発展した中国の宇宙基礎科学分野の研究者と今後日本はどのように付き合ったらよいかを考える機会にした。

中国は1980年代半ばから数回訪問しているが、5年あけた訪問になった。訪問したのは北京の国立天文台、高エネルギー物理研究所、南京の紫金山天文台、合肥の中国科学技術大学の宇宙物理学科、上海天文台の5つの研究機関である。これに、北京大学のカブリ天文・宇宙物理研究所で開催された多波長のメッセンジャーのトランジェント天体に関するワークショップにも参加し、この分野の中国人研究者にも会った。まず、印象に残ったのは、研究室の責任者には、欧米や日本で先進的研究を行った経験者が大変に増えたことである。この変化は、2000年代か

ら中国政府も力を入れて、欧米に留学していた優秀な研究者を呼び戻すようになったからだ。多くは新しい高層ビルでスペースも予算や研究の自由度もかなり与えられ、世界トップの研究を目指す雰囲気が出ていた。米国帰りの若い教授はチャイニーズドリームという言葉を使って、これまで遅れている宇宙基礎科学を発展させたいと意気込んでいた。ここでは高エネルギー天文学分野の現場からみた中国の宇宙基礎科学の研究の現状の一端を報告する。

2. 中国でみた2つの研究方式

経済発展に直接結びつくことが少ない宇宙物理学の研究にも中国政府は予算と人材を投入しているようだ。ただ、その背景は国威発揚の宇宙開発の推進と関連があるのかも知れない。現場の欧米や日本帰りの研究者は次の2つの考え方で世界のトップを目指していると理解した。

一つは、公開されている欧米、日本の天文台や天文衛星の観測に応募して研究をすること、公開された観測データを使って最先端の研究を行うことを目指す考え方である。天文・宇宙分野の大型装置による観測はプロポーザル制があり、世界の研究者が等しく応募できる。また、得られた観測データのほとんどは一定期間経つとアーカイブデータとして公開され、誰でも使う

ラ・トッカータ

ことができる。リアルタイムで公開している衛星もある。我々のMAXIもほぼリアルタイムで公開している。このため、衛星の担当チームの発表よりも早く天体の変動を天文電報で伝えることもできる。この方法で研究している上海天文台のグループは、MAXIのデータを絶えずチェックして独立に速報を出していた。こうした先進的な研究をするため、外国から優秀な研究者を招聘教授やポスドクとして招待もしている。最近では外国人向けの特別な給与体系もあると言う。このような外国人はまだ少ないが、今後増えることは間違いない。日本で活躍する研究者の招聘教授の打診も受けたが、優秀な研究者を国籍も問わず外国から受け入れる意欲も予算も相当な勢いを感じた。

もう一つの考え方は、新しい装置を独自に作り上げトップの観測を目指すというものである。北京の高エネルギー物理研究所は、80年代から独自で検出器などの技術開発をして気球を使って高エネルギー天文学を始めた。技術開発を継続してようやく、1トンを超えるX線天文衛星(HXMT)²⁾のプロジェクトが2005年に認められた。打ち上げ年度は当初からは延期されているが、2015年には完成すると言う。打ち上げが伸びた理由は予算だけではなさそうだ。独自開発に時間がかかり、欧米・日本並みのレベルが必要だと理解する指導者が、不完全な状態で打ち上げることを恐れている理由もある。科学衛星を作り上げる人材が十分には育っていない様子だった。この点、有人衛星技術をもつ中国の宇宙開発の技

術とのアンバランスをみた。後で述べる小型衛星の準備も、基礎開発をする実験室の立ち上げから着実に進めていたが、設計や準備段階で独自性はあるものの、外国の経験者も仲間に入れて進める方法をとっていた。

3. 中国での宇宙科学観測

中国は、月の大型プロジェクトや中国版宇宙ステーションを国の威信をかけて推進している。これらに載せる宇宙科学観測装置は、中国の天文・宇宙の研究室をもつ研究機関に応募させ、審査して決めている。このうち月の科学観測では近未来まで含めると日本を追い越す勢いとみた。既に実現されたガンマ線観測装置とそのデータ等の取り扱いには今現在、多少の問題は残る。しかし、北京の国立天文台の隣に月の科学研究センターを設け、人や予算をつぎ込んでいっている。また、観測装置は北京と南京の天文台の研究者が共同して横のつながりもよく、国際感覚をもって建設しているようだ。衛星の設計や試験をするいわゆる宇宙工学の研究所は別にあつて、観測器以外のバス機器や構造設計、熱設計は協力する体制があるという。一方、中国版宇宙ステーションは2020年に実現するプロジェクトで、大きさは現在飛翔している国際宇宙ステーションの半分ほどもある。現在、これに搭載するための観測や実験課題の選定が進んでいて、今年中には第一次観測機器が決まるようである。北京の国立天文台から提案された全天X線監視装置も選考に残っている。宇宙線観測装置のような質量が必要なものも候補となっている。これらも若い優秀な科学者が競って提案しているようである。

大型の衛星計画のほか、最近、400 kg程度の彼らの言う小型科学衛星シリーズを5年から7年後には軌道に載せる計画が進んでいた。選定方法も公募や審査委員会を立ち上げ、いくつかのプロポーザルから何段階にも分けて選定する欧米と似た方式がとられているようだ。この審査には現役の研究者も長老格の研究者も関わっているという。この提案者は衛星に載せる観測装置の基礎開発をしたり、試験したりす

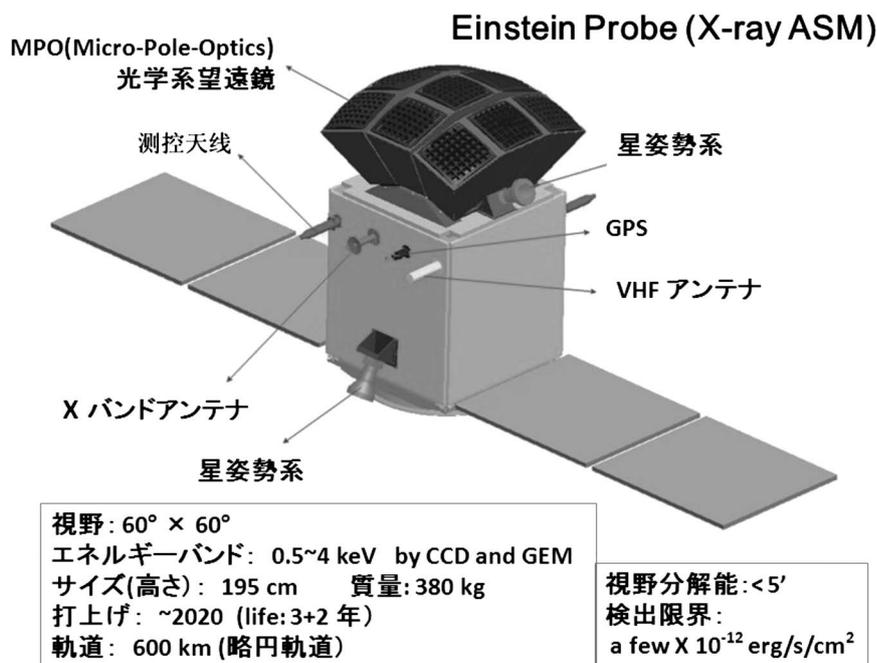


図1 北京の国立天文台が中心になって中国の小型衛星に提案している全天X線監視装置 (Einstein Probe と呼ぶ) の概念図とその簡単な諸元 (Weimin Yuan 氏提供)。

る実験室をもっている。そのような実験室で衛星搭載装置の試験も見たが、この20年ほどですっかり日本や欧米のものと同色ないコンパクトで綺麗な装置に進化していた。

具体例として、筆者の専門のX線観測衛星の準備では、日本や欧米が経験したような実験室の建設から始めて衛星機器を試験する準備をしていた。実験室の装置は研究室レベルでは1~2億円ほどの装置を建設中だった。このほか上海の宇宙工学関係の研究所には搭載機器を試験する大型の実験施設を建設中という。我々が建設してきた予算規模と変わらないし、機能も同じようなもので外見も綺麗に見えた。ちなみに、380 kgの小型衛星(例: 図1)の予算は50~100億円ほどで、今や日本と変わらないコストに驚いた。

紫金山天文台には暗黒物質研究室があつて、将来大型の衛星に載せるプロトタイプを見た。原理は日本が国際宇宙ステーションに載せるCALET³⁾と同じ原理だと断って説明を受けたが、結構綺麗にまとまっていた。中国では米国帰りの研究者が昨今話題性のある研究も取り上げ将来に備えていた。これも北京の国立天文台や高エネルギー物理研究所の研究者と共同研究をしているという。

4. 中国での外国人とのかかわり

先にも述べたように、中国の宇宙関係の基礎研究は欧米や日本帰りの若い指導者が増え、着実に進んでいる。彼らは、優れた外国人も招待してトップレベルの研究の取り込みを目指している。外国人招待者として欧州からの研究者を見かけたが、日本人の招聘教授やポスドクもわずかながらいる。現在は、欧州との共同研究も盛んになっているため、中国人研究者が気軽に欧州に出かけている。中国人が外国に出る予算はこの10年ほどで様変わりをしたようだ。

中国は政治体制が急変して社会が不安定にならない限り、基礎科学の分野でも発展することは十分に考えられる。現場では世界トップや世界一の装置を作る気概を感じた。ただ、外国帰りの研究者が増えているとは言え、まだ層は薄い。このため、優秀な研究者なら国籍は問わず招聘して自分のチームに組み入れたり、外国に出かけて行って自分の研究に取り込んだりする中国人研究者が増えている。目指す研究も欧米や日本と同じトップレベルを狙い、研究費や人材が投入されつつある。このような研究手法はともすると欧米や日本と同じ装置の観測器となって現れ

ることもある。

この状況の下で、我が国の若者も中国に行ってトップレベルの研究をすることは可能であるかも知れない。ただし、基礎研究は経済発展のためにもものを大量に作ったり、改良したりする以上に時間がかかるため、世界一の装置とかトップの研究プロジェクトを掲げているが、現段階では遅れている分野も多い。しかし、5年とか10年の時間スケールで世界のレベルに追い付き追い越す努力をしている研究者がいることは間違いない。そこにはアンバランスも見られた。箱モノは立派であるが成果を出すための中間層の人材不足や経験不足のため、信頼性のある成果にはまだ少し時間がかかる気もした。先端技術で日本が関与している一例として、電波天文学のフロンティアの一つであるテラヘルツバンドの超伝導センサーの開発は紫金山天文台と理化学研

究所が覚書を取り交わし共同研究をしている。この成果の行方を注目したい。

5. 最後に

中国は、経済発展と同様に科学の基礎研究分野でも急成長するとの見方を述べた。科学技術の急成長にも拘わらず、経済成長のマイナスの面の大気汚染はすさまじい。今回訪問した北京、南京、合肥、上海の大都市のスモッグは、高度成長期の東京よりも深刻な状態ではないかと心配した。その日の天候にもよるが1~2キロ先が見えにくい日もあった。大気汚染による健康への影響がでるのではないかと恐れている。中国はこの大気汚染を克服しないと、科学技術大国になれないのではないかと危惧した。もう一つ気になることは、科学技術を急成長させるため、世界トップの箱モノは作るが中身が伴わないこともある。また、急激な成長

のため地道な積み重ねの経験が少ないうちに大きなものや最先端の困難なものを作っても、十分な成果に結びつかないかも知れない。これを補うため外国の研究者を招待する方法をとりとうしている。しかし、地道な積み重ねの技術には時間をかけた教育が必要である。このため、お金をかけて立派なものを作り上げる技術と、地道に開発が必要な技術の遅れにアンバランスが生ずる。両者の調和がとれるまでの時間がしばらく必要ではないかとも感じた。

参考文献

- 1) M. Matsuoka, *et al.*: Publ. Astron. Soc. Jpn. **61** (2009) 999.
- 2) T. P. Li, *et al.*: Proc. ICRC No. 5 (2003) 2775.
- 3) T. Tamura and S. Torii: Nucl. Instrum. Method. Phys. Res. A **1126** (2010) 428.

(2013年6月14日原稿受付)

歴史の小径

三村剛昂と広大理論物理学研究所

小長谷大介 〈龍谷大経営〉

日本物理学会第68回年次大会(広島大学)において、物理学史資料委員会による「三村剛昂と広大理論物理学研究所」展が行われた。¹⁾ 展示では、戦時に設置され、原爆被災し、戦後復活した歴史をもつ理論物理学研究所(以下、理論研)とその中心人物の三村を取り上げた。以下では、展示に際して触れた三村と理論研を改めて紹介し、関連する科学史的課題を示したい。

1. 広島文理科大学における波動幾何学研究

1921年に東京帝大を卒業した三村剛よしただ昂(1898.3.1-1965.10.26)は、同年5月に広島高等師範学校(以下、広島高師)に物理学講師として着任し、広島高師教授を経て、1929年5月、広島文理科大学(以下、文理科大)の助教授

となった。²⁾ 1929年に広島県初の大学となった文理科大のもと、三村と数学者の岩付寅之助(1894-1945)が中心となり、数学者と物理学者の活発な研究集団を形成した。当時の彼らの熱気は、ワイルの『群論と量子力学』(1928年)の輪講の様子から見て取れる。旧理論研図書として京大基礎物理学研究所(以下、基研)図書室に収められている『群論と量子力学』には、³⁾「1929.9.20輪講始メ」、「1930.7.10輪講終了」と記され、各頁には熱心な議論のあとを示す書き込みやメモ用紙の添付が見られる。

ワイルの著作等を通じた議論や統一場理論の当時の研究から刺激を受けて、三村らは「波動幾何学」を研究課題として掲げた。「波動幾何学」の研究とは、一般相対性理論と量子力学の「二

つの理論の根本思想を、物理現象の幾何学化と云う立場から洞察して、最も自然と思われる形に融合しよう」とするものである。⁴⁾ 1930年代、三村たちの波動幾何学研究はその挑戦的な目的から海外でも注目されていた。1935年12月の*Nature*誌のResearch Items欄で、三村、岩付たちの研究は、「量子論を置き去りにしている通例の統一場の諸理論を乗り越えていくことを試み、あらゆる物理学の諸理論を包含するような普遍的な体系を打ち立てることを試みている。まだ十分に解決されていない点がいくつかあり、この試みが成功しているかどうかについて述べるのはまだ早すぎるが、きわめて前途有望な研究方針であるように思える」と紹介されている。⁵⁾ 一般相対性理論から統一ゲージ理論への展開を物理法則の幾何学化の流れと考えると、⁶⁾ 波動幾何学研究からの貢献はほとんど無く終わるのだが、1930年代の時点では波動幾何学の研究は国内外で注目される科学活動であった。

2. 戦時のなかの理論研設置

1939年の『日本数学物理学会誌』では波動幾何学研究の概要が報告された。⁷⁾ その時点で波動幾何学グループによる発表論文数は36にのぼっていた。これらの活動実績が背景の一つとなり、三村は1940年2月に作られた学術研究会議物理学部物理学研究委員会の基礎理論班の中心となった。⁸⁾ この委員会内の研究講演の記録によれば、⁹⁾ 基礎理論班における波動幾何学研究の存在感は、素粒子や相対論的量子力学の問題を扱う湯川や朝永らの研究を凌ぐものだった。こうしたなか、波動幾何学の「研究を主体とする研究所を設置して、文理大付置のものにしようという計画」が構想された。¹⁰⁾

1940年代半ば、日本の戦局悪化のなかで、三村は戦時研究の委嘱を受けるようになる。1944年3月、海軍航空技術廠の研究業務を嘱託され、同年8月には、航空兵器研究委員会委員に命じられた。戦時研究の内容は三村の弟子の回想から多少うかがい知ることができる。¹¹⁾ そこからは三村が軍関係者から信頼されていたこともうかがわれる。そして、1944年8月23日に、広島文理科大学附属の理論研設置の勅令改正が公布され、三村は理論研所長に任ぜられるのである。¹²⁾ 一般的に、1944年8月という時期に理論研が設置されたことは「現在の常識では理解できないような事実」とされる。¹³⁾ だが、海軍航空技術廠や航空兵器研究委員会での三村の働きを勘案して、理論研設置、三村の理論研所長任命への展開をとらえるならば、理論研の存在も日本の戦況に応じた結果として現れたと考えてよいのかもしれない。理論研設置をめぐっては、今後のさらなる分析を待つ必要があるだろう。

3. 原爆被災した理論研とその後

1944年8月に設けられた理論研だが、その研究活動は広島空襲に備える文献の疎開などのために小規模に留まっていた。そして、1945年8月6日、原爆の被災を受けたのである。主要な理論研メンバーの3名(岩付、細川藤右衛門、藤原力)が亡くなり、所長の三村

自身も頭部を負傷した。このため、戦後になっても理論研の活動の本格的再開には時間が必要であった。戦後直後の理論研は向島にある臨海実験所を間借りして研究活動が続けられた。こうしたなか、三村の故郷・竹原町から研究所誘致の申し出があり、それを受けて1948年に竹原に理論研が再建された。¹⁴⁾ 1949年5月には新制広島大学(以下、広大)設立にともない、理論研は広大附属となった。

1950年以降の理論研は、その人員を少しずつ増やし、1960年に「重力・時間空間理論」「場の理論・時間空間構造」の2部門編成となった。¹⁵⁾ さらに1965年に「重力理論」「場の理論」「時間空間理論」の3部門となり、1973年には「宇宙論」が加わり4部門編成となった。1960年代を通して、理論研は一般相対論を宇宙論に取り入れた研究分野で日本の中心の一つとなり、「わが国における重力理論の一つの盛り上がりが生じた」ことに寄与した。¹⁶⁾

だが、戦後の理論研には常に合併話がついてまわった。1953年に設置された京大附置の基研が「素粒子論その他の基礎物理学に関する研究」を目的としたことや、大学設置の研究所における部門の最小数が規定されたことにより、基研との合併話が何度も浮上り、理論研の運営や独立した存続には不安材料が絶えなかった。このような不安定な状況には、研究者の集中する関東・関西以外の地方都市の国立大学で理論物理学という抽象度の高い研究活動を続けることの難しさや、戦後になって日本の理論物理学の中心が湯川世代へ移行したことなど様々な背景が存在していたと考えられる。

1961年まで三村が所長を務めた戦後の理論研は彼の社会的活動とともに歩んだ面をもっていた。三村は数少ない原爆の惨状を知る物理学者として、日本学術会議で積極的に発言し、¹⁷⁾ 政治的に危険な状況下での原子力研究に対する慎重な姿勢を求めた。こうした三村の行動が第2回科学者京都会議の舞台を竹原としたのである。1962年に第1回会議が京都で、第2回が1963年5月に理論研で行われた。第2回議長は三村であった。この会議では、「平

和の創造のための全分野の科学者の相互協力」、「科学により発見された真理を人類の幸福と世界の平和のために利用すること」などが宣言された。

戦前の波動幾何学グループを起源として、戦時に設置され、原爆被災に遭いながらも1990年まで広島で存続した理論研にはいくつかの顔が見られた。その顔として浮かぶであろう波動幾何学、共同研究、一般相対論、重力理論、戦時研究、原爆、平和運動は、理論研の所長を長年務め、戦後理論研の再建全般に携わった三村に直接かかわるものばかりである。これらは広島という限定された文脈だけではなく、日本全体の科学の発展に照らして考えられるべきである。例えば、三村らの共同研究を、戦後日本の研究制度と関連づけて考えることも必要であろう。一般的には、仁科・朝永・湯川らの流れをくむ素粒子論グループの共同研究が戦後日本の共同利用研究に行き着くとされるが、小林稔らが述べているように、¹⁸⁾ その源泉には三村らの波動幾何学グループも含まれると思われる。3.11以後、原子力に関する諸課題が次々と現れるなかで、原子力研究に慎重な発言をした三村の一側面に注目がいきがちだが、今回の展示を契機に、原子力関連にとどまらない総合的な視点によって、彼らの存在や研究活動の科学史的意味を改めて考えていくことが望まれる。

参考文献および注

- 1) 本展示は広島大学と竹原市の諸機関から多大な協力を得て行われた。
- 2) 三村の履歴は、竹原市歴史民俗資料館所蔵の三村資料にある「履歴書」に依っている。竹原市教育委員会、竹原市の三輪宜生氏にお世話になった。三村は1936年に文理科大教授となる。
- 3) H. Weyl: *Gruppentheorie und Quantenmechanik* (Verlag von S. Hirzel, 1928). この書籍が「旧理論研図書」として京大基研図書室に収められている。基研教授の早川尚男氏、基礎研図書室の山本雅子氏にお世話になった。
- 4) 三村剛昂:「波動幾何学の概要」日本数学物理学会誌 第十三巻(1939) pp. 191-207. 引用はp. 193. 「波動幾何学」の解説については、上野義夫:「波動幾何学」の思い出」柳瀬睦男・江沢 洋編『アインシュタインと現代の物理』(ダイヤモンド社, 1979) pp. 211-234; 藤川和男:「物理法則の幾何学化」科学61(1991) pp. 315-323; 里見志朗:「三村剛昂の研究と教育—広島県竹原に生まれた理論物理学研究所の創立者—」大学の物理教育

2001-1 (2001) pp. 12-16.

5) *Quantum Theory, Geometry and Relativity*, Nature, December 21 (1935) 994.

6) 藤川和男:「物理法則の幾何学化」(注4).

7) 三村剛昂:「波動幾何学の概要」日本数学物理学会誌 第十三巻 (1939) pp. 191-207.

8) 長岡洋介, 登谷美穂子:「基礎物理学研究所の歴史」素粒子論研究 93(6) (1996) p. 372; 日本物理学会編:「日本の物理学史(上)」(東海大学出版会, 1978) p. 315.

9) 学術研究会議編:「物理学講演集(1)~(5)」(丸善, (1) 1941, (2) 1942, (3) 1943, (4) 1944, (5) 1947).

10) 広島文理科大学創立五十周年記念事業会:「広島文理科大学創立五十周年」(1980) p. 195.

11) 前川 力:「三村剛昂先生の思い出」燧 第9号 (1988) pp. 51-62. 愛媛大学名誉教授の矢野忠氏からご教示いただいた.

12) 「昭和十九年「公文類集」第六八編巻一」(国立公文書館所蔵)には「理論物理学研究所並二職員設置ノ理由」, 「理論物理学研究所二於ケル研究事項ノ解説」が収められている(東大准教授の岡本拓司氏からのご教示).

13) 「広島文理科大学創立五十周年」(注10) p. 196.

14) 竹原町の理論研の再建にかかる竹原市立書院図書館所蔵史料に関して, 京大名誉教授の富田憲二氏, 広大文書館の石田雅春氏にお世話になった.

15) 理論研の部門数や研究活動の変遷については, 広島大学理論物理学研究所『広島大学理論物理学研究所史』(1990) pp. 4-14.

16) 藤川和男:「広島大学理論物理学研究所の46年」日本物理学会誌 45 (1990) p. 833.

17) 「原子力問題に関する討論—学術会議第13回総会における—」自然 1月号 (1953) pp. 28-38; 日本学術会議:「日本学術会議25年史」(1974) p. 36.

18) 小林 稔:「大阪時代を中心に」科学 35 (1965) p. 191; 基礎物理学研究所:「基研案内」(1958) p. 16.

(2013年6月9日原稿受付)

新著紹介

A. Altland and B. Simons 著, 新井正男, 井上純一, 鈴浦秀勝, 田中秋広, 谷口伸彦訳

凝縮系物理における場の理論(上) 第2版

吉岡書店, 京都, 2012, x+539p, 21×15 cm, 本体8,000円 [専門・大学院向]

ISBN 978-4-8427-0360-2

A. Altland and B. Simons 著, 新井正男, 井上純一, 鈴浦秀勝, 田中秋広, 谷口伸彦訳

凝縮系物理における場の理論(下) 第2版

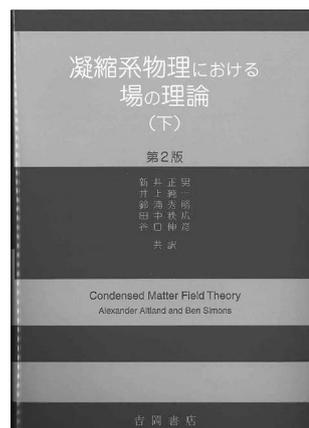
吉岡書店, 京都, 2012, 485p, 21×15 cm, 本体8,000円 [専門・大学院向]

ISBN 978-4-8427-0361-9

野村健太郎 (東北大金研)

本書はA. AltlandとB. Simonsによって書かれた *Condensed Matter Field Theory* 第2版の邦訳である。対象は量子力学および統計力学を一通り学んだ大学院生である。第2量子化などの初等的な場の量子論から、今日研究で用いられている最先端の場の理論習得までの道のりは長く険しくまた楽しくもある。上下巻合わせて約千ページからなる本書は基礎から研究の最前線までの道しるべを提供する。凝縮系への応用を視野に入れた場の理論の書籍はこれまでも多数出版されているが、本書の特徴は汎関数積分形式などの現代的なアプローチを積極的に取り入れ、低エネルギーの有効理論を構成することで様々な物理現象の統一的記述に成功した点である。また、これまでは原論文をあたるしかなかった新しい話題が練習問題として紹介されている点も有難い。初めの数章では第2量子化法、

経路積分および汎関数積分による量子化法が解説され、本書の骨格をなす。自発的対称性の破れの章では読者は電子気体プラズマ、ボーズ・アインシュタイン凝縮、超流動・超伝導、乱れた電子系など多様な物理系の諸現象が統一的枠組みで理解できることを見ることがあろう。4つの章からなる下巻では発展的な話題が紹介されておりそれぞれ独立に読めるようになっている。繰り返し込み群の章ではイジング模型などの具体例から出発し、その様相をつかんでから一般論を展開するという配慮がなされている。説明は論理的飛躍が無く丁寧で、図を用いた解説は直感的にも分かり易い。場の理論のトポロジ的側面についての章も類書には見られないほど詳しく書かれてある。前半は作用積分のトポロジカル項の導入とそれを理解するための数学としてホモトピー群と微分幾何学が速習講座としてま



とめられている。章の後半でスピンドル、量子ホール系、局所磁気モーメントと結合する電子系で現れる物理が、トポロジカル項(θ 項, WZ項, Chern-Simons項)によってエレガントに理解される様子は圧巻である。ただし折角トポロジカル不変量や θ 項が解説されている

のにトポロジカル絶縁体・超伝導体の話題が紹介されていないのは残念な気がする。原著の2版で新たに加筆された最終2章では、非平衡系へのアプローチとしてLangevin理論やKeldysh理論、ナノ系・量子ドット系における輸送現象、完全計数統計が詳しく解説されている。どの章も初めに目的が明瞭

に示されテンポよく読み進めることができる。ややアドバンスな話題はINFOの欄に書かれており、初読の際には無理せず飛ばせるように配慮されている。Exerciseでは実際に手を動かすことで理解を深めることができる。章の最後では演習問題として具体的なテーマを題材に選び研究に取り掛かれ

るように工夫を凝らしてある。また翻訳も分かり易く原著の雰囲気がよく伝わっている。本書は凝縮系理論の分野での研究を志す大学院生には勿論、既に第一線におられる研究者にとっても多くの有益な内容が含まれている。何度も読み返したくなる良書である。

(2013年4月1日原稿受付)

市川行和, 大谷俊介編

原子分子物理学ハンドブック

朝倉書店, 東京, 2012, ix + 518p, 22 × 16 cm, 本体 16,000 円 [専門・大学院向]

ISBN 978-4-254-13105-5

田 沼 肇 (首都大)

原子および分子に関する物理学は、レーザーや放射光の技術的發展により、光との相互作用も含めて Atomic, Molecular, and Optical (AMO) Physics と呼ばれるようになった。光子を電子・原子・分子と同様に入射粒子と見なすと、原子分子レベルでのダイナミクスの大部分を衝突現象として捉えることができる。本書は第1章が原子・分子の構造に関する理論、第2章は光子衝突、第3章は電子・陽電子および重粒子衝突、第4章はこの30年ほどの間に研究対象として確立した多価イオン、クラスター、エキゾチック粒子、最後の第5章では応用先であるプラズマ、宇宙、放射線、環境、そして時間標準にまで触れている。「まえがき」にもあるように広範な原子分子物理学の全ての分野を網羅しているとは言えないが、meV以下とMeV以上を除けばほとんどの衝突エネルギー領域とほぼ全ての研究対象をカバーしており、まさに「原子分子物理学ハンドブック」という書名に相応しい内容である。

この記事を書くため、まずは短期間

で一氣に通読した。しかし、ハンドブックというものは通読するには向かないようである。私は25名の著者のほとんどと親しくさせて頂いているので、読みながら著者の顔と声を思い浮かべ、その語り口を大いに楽しませて頂いたが、それぞれの個性がはっきりと現れていて、悪く言えば統一感に乏しい。これが一人の著者によって書かれる一般の書籍との大きな違いである。勿論、この統一感の欠如は欠点ではなく、全ての分野についてかなり高度な最先端の内容にまで踏み込んでいることの証であり、得がたい貴重な解説・参考文献として評価すべきであろう。それゆえ、本書を読みこなすには大学院レベルの原子物理学の知識が必要であり、学部学生が最初に手を出すことは勧められない。他の入門的な教科書で一通りの勉強をしてから、専門家としてステップアップするために読むのが適当であろう。ただし、研究を始めたばかりの学生が、該当する分野について読むことは、分野の概要を掴むためにも大いに推奨できる。一方で、視野を広



めつつ知識を整理するために、全編を読破することを博士課程以上の若手研究者に勧めたい。

AMO物理のハンドブックとしてはSpringer社から2006年に出版されたものが有名であるが、これは1,500頁もの超大作でレベルも非常に高い。一方、本書は500頁足らずではあるが、このようなハンドブックが自国語で出版できるのは日本のAMO研究レベルの高さの証に思える。最近、ドイツには少し水を開けられているように思うことがあるが、それに次ぐAMO大国として発展していくため、本書が役立ってくれることを大いに期待したい。

(2013年3月15日原稿受付)

廣重 徹著, 吉岡 斉編

戦後日本の科学運動

こぶし書房, 東京, 2012, 318p, 19×14 cm, 本体3,200円 (こぶし文庫—戦後日本思想の原点) [一般向]

ISBN 978-4-875-59267-9

岡本拓司 (東大総合文化)

廣重 徹 (1928-1975) は日本を代表する科学史家であり、『戦後日本の科学運動』は、彼の研究のうち、科学と社会の関わりを扱ったものの最初期の成果である。雑誌『自然』の1959年5月号から翌年6月号まで、10回にわたって連載されたものに若干の修正が加えられ、1960年に初版が刊行された。再刊は1969年に1度あったが、昨年、出版社を変えて再度の刊行が実現した。

半世紀以上を隔てた再刊が実現したのは、本書が扱う「科学運動」(科学者が行う科学と社会とのつながりを問題とする運動と定義されている)の中に、日本における原子力開発の開始をめぐるものが含まれているためであろう。廣重自身は、物理学者たちが、政府主体の原子力開発を「民主・自主・公開」の三原則に沿っていないと非難するのみで、巨額の予算の下に着々と進行する事態には実質的な関与ができなかった様子を、現実の十分な分析に基づく活動ではなかったことの帰結であると評している。

なお、1954年に第五福竜丸事件などで問題となった水爆実験に伴う死の灰を含む雨について、阪大教授の浅田常三郎が、「ラジウムで有名な三朝温泉が降ってきたようなもの」と語った

ことも紹介されており(108ページ)、2011年3月の原子炉の事故の際の諸専門家の発言を思い起こさせる。

本書は、学生時代の廣重自身も関わった科学者による運動を、当事者としての意識も交えながら描いたもので、後に『科学の社会史』(1973年)に結実する、より客観的な分析とは性格を異にする。廣重が提示した著名な「科学の体制化」(いまだきの「態勢」ではない)の語も現れない(廣重編『日本資本主義と科学技術』(1962年)に至って、「科学の体制の近代化」や「科学の制度化」(J. D. バナールのもの)の語が現れるが、廣重旧蔵の同書(国際日本文化研究センター蔵)の「まえがき」には、「体制化」の鉛筆による書き込みが見られる)。一方で、直接的な記述はないものの、本書からは、かつては科学が民主的な社会の実現をもたらすとして科学運動に勤しんだ廣重が、こうした理想に疑念を抱くようになり、しかしそれでも科学の可能性に期待を抱きながら科学史へと関心を移して行った経緯を窺うことができるように思われる。

適性や関心からは、廣重は学説の歴史をより強く好んだのではないかと思われるが、その彼が、半ば義務のよう



にして社会史を書き続けた理由も、かつて啓蒙主義の下でそうであったように、科学(者)が社会変革の担い手となる可能性を、僅かながらも見込んでいたためではなかったか。実際には、「科学の体制化」の進展を精緻に描写すればするほど、体制化以外の結末は見えなくなるのではあるが。

廣重にとって社会史を書くのは楽しい作業ではなかったようにも思われるが、それでも、本書から読み取ることのできる一種の義務感から、彼は日本における科学の社会史の通史を書き上げるに至った。解説で指摘されるとおり、『科学の社会史』のあと、単一の著者による同様の通史は発表されていない。廣重が抱いたような義務感がなければ、これは容易には成しえない作業なのかもしれない。

(2013年3月16日原稿受付)

B. V. Somov

Plasma Astrophysics, Part I; Fundamentals and Practice 2nd edition

Springer, New York, 2012, xxvi+498p, 24×16 cm, 181.85€ [専門・大学院向]

ISBN 978-1-4614-4282-0

B. V. Somov

Plasma Astrophysics, Part II; Reconnection and Flares 2nd edition

Springer, New York, 2012, xxi+504p, 24×16 cm, 181.85€ [専門・大学院向]

ISBN 978-1-4614-4294-3

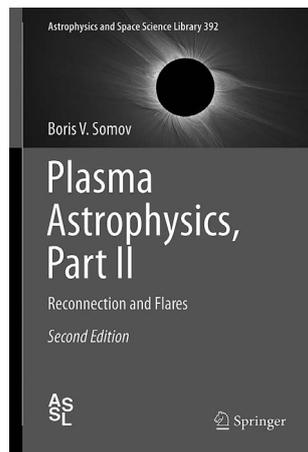
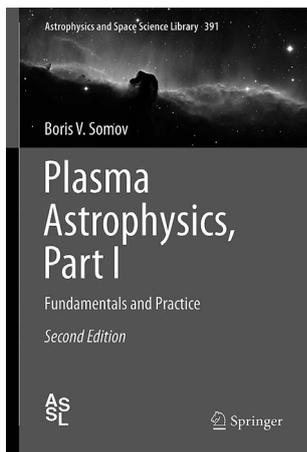
天野孝伸 (東大院理)

天体物理学の様々な場面において磁場が重要な役割を果たすことは現在では誰もが認めることである。それは

宇宙の希薄で高温な環境においてはガスが電離したプラズマ状態にあり、荷電粒子の運動が磁場によって束縛され

るからに他ならない。本書はそのような天体物理学の理解に不可欠なプラズマの諸過程 (Plasma Astrophysics) を取り扱った教科書である。本書は2冊から成り、第1巻 (Part I) でプラズマ物理の基礎が、第2巻 (Part II) で磁気リコネクションや太陽フレアなどが議論される。

まず始めに本書の特徴として標準的なプラズマ物理や天体物理の教科書とは異なったものになっていると言えよう。それは随所に著者の専門である太陽物理学への具体的な応用例が埋め込



まれている点にある。また特に第1巻では単なる式の羅列に終わらず、直感的な理解の助けになるような記述が多く見られる。これらからは読者が実際の研究において必要になるであろう、より実践的な知識の習得を目指す著者の意図を見て取ることができ、好感が持てる。また軽快なスタイルの記述になっており比較的読みやすく感じられる。

ただしその反面、本書を読み進めるにあたってある程度の前提知識は必要になると思われる。確かに物理や数学のテクニクに関しては著者の言うように学部卒業レベルの一般的な知識で十分であるように思われるが、太陽物理への応用例を具体的にイメージし、理解するには現象論的な知識がないことには少々難しいかもしれない。また

基礎編である第1巻で扱う内容も独特である。例えば電磁流体衝撃波の発展性条件など通常の教科書では扱われない内容を取り上げる一方で、プラズマの多流体および運動論的取り扱いなどは中途半端な解説に終わってしまっている。これらは主に第2巻で取り上げられる太陽物理への応用例を念頭において選択されているように推測されるが、もう少し一般的な読者を対象とした構成にしても良かったのではないかとと思われる。第2巻では主に太陽フレアの観測例を引き合いに出し、磁気リコネクションや高エネルギー粒子の加速が議論される。ただし、これらは著者のグループが行ってきた研究のレビュー的な意味合いが非常に強く、また観測結果の議論も(少なくとも太陽物理の専門家でない私には)細か過ぎ

る感が否めない。著者の主張するように太陽物理は天体プラズマ物理の実験室として重要なことは確かであるが、より一般的な基礎知識を身につけようとする読者を対象とするのであれば、太陽物理に特有の現象論の理解を求めるのは少々酷であると思われる。また Sweet-Parker, Petschek という代表的な2つの磁気リコネクションモデルの理解がほぼ前提とされているように見受けられる点はこの手の教科書としては残念である。

まとめると本書は初学者向けの一般的な教科書としては少々癖が強すぎるように思われるが、その一方で、プラズマ物理や天体物理についてある程度の知識を身につけた大学院博士課程の学生や研究者レベルの読者がこの分野についてより深いレベルの知識を得たり、太陽物理(特に太陽フレア)の基礎を身に付けるには一読の価値があるものと思われる。全体として良くも悪くも随所に著者の意図が色濃く出ている本に仕上がっていると言えるだろう。(2013年3月14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。



『日本物理学会誌』68巻2号(2013年2月)の編集後記(pp.128-129)への疑問

勝木 渥◇

私は上記『会誌2月号』の「編集後記」に非常に大きな違和感を覚えました。会員の大多数は、母語を日本語とする人たちであり、『会誌』の公用語も日本語ですが、日本語を母語とするある人が日本語で書いたり語ったりするとき、「丁寧体(=です・

ます体)」を用いるか、「普通体(=だ・である体)」を用いるかは、その人なりに、書こうとする事柄や自分の意見をどちらの文体で表現するのが適当かを考えた上で、「普通体」で書くか「丁寧体」で書くかを決めているのだと思います。(私はこのような具合にして、私の文体を選んでいました。)したがって、私が書く文体と、私より前に書いた人の文体とは、本来相関関係を持たない独立事象であり、長谷川太郎さんが、独立事象間の時間的な相関係数を、新たに展開されている「歴史的事象の統計的考察と画期的な推測法の進展」という新しい学問的な方法論に基づいて考察していることに、このような考察は的外れではないかと

感じたのです。

長谷川さんの考察は、編集後記の執筆は毎月毎月1ヶ月の時間間隔を置いてなされているから、それは「歴史的事象であり、したがって統計的考察と画期的な推測法」適用対象でありうると想定して、最近2年間の編集後記の文体の時間を隔てての相関性を、上記の「画期的な」方法論に基づいて発見して、2月号の編集後記を書いたのでしょう。

しかし、『会誌』に文章を書く際、何ヶ月か前の記事の文体と反対の文体を用いるとか、同じ文体を用いるとかを意識しながら編集後記を書くことにしている編集委員会委員など、長谷川さん以外におられた

ことがあったのでしょうか。また、おられることがあるのでしょうか。ともかく長谷川さんが、日本語での文章の書き手に対する、このような認識をもっておられることに対して、私は「物理学会」の中に、私の日本語に対する感覚からは理解しがたい「文化」が育ちつつあるのではないかと感じて、私のこのような感想が外れの思い過ごしであって欲しいと願いながら、あえて「声」欄に投稿することにしました。

なお、私は目下数え年で、昔流の「傘寿」と「米寿」とのちょうど真ん中になる年です。私の日本語感覚が、今の若い人たちとはかけ離れてしまっているのかも知れません。

私は私の日本語感覚を、尋常小学校・国民学校初等科時代の6年間に学んだ、「サイタ/サイタ/サクラガ/サイタ」に始まる『尋常小学校国語読本』（いわゆるサクラ読本＝第4期『小学国語読本（尋常科用）』）と中学校に進学してから習った国語や漢文の教科書、および中学校で習った国語の文法（橋本進吉の「学校文法」）で、身につけました。

私が、この『声』の投稿に「丁寧体」を用いたのは、「普通体」を用いると表現が硬くなりすぎて、長谷川さんの「編集後記」への批判の調子が強く出過ぎて、折角の長谷川さんのやる気を失わせてしまうかも知れないことは避けたいと思い、「違和感」というような婉曲な表現に止めておく方がよい、それには丁寧体の方が適していると思ったからです。私には、この「声」欄への投稿に際し、何ヶ月か前の誰かの「声」欄の文体と同じにするか反対にするかなどということに時間を使う気は、全然起こりませんでした。

長谷川さんの意欲に満ちた分析によって、独立事象相互間にある時間的な相関関係が見出されたとしても、それは単なる偶然でしかないでしょう。

長谷川さんと同期の編集委員会の委員の皆さん、および今期の編集委員会委員の皆さんが、2月号の編集後記に対してどのようにお考えか、ご意見をお聞かせ頂ければ幸いです。

(2013年4月30日原稿受付)

会誌記事に関連させ書かれた編集後記で、内容も著者裁量の範囲であり、特に問題があるとは考えておりません。(会誌編集委員会)

物理学書の英語、英語の物理学書

多幡達夫 〵

1. はじめに

八木浩輔氏の本誌への投稿¹⁾を読んで感じた二つのことを述べたい。一つは、八木氏らが著書²⁾を Cambridge University Press (CUP) から出版した長所とされる中の一点についてであり、もう一つは、八木氏に対して「なぜ日本語で出版しないのですか」との質問を寄せた学生や同様の考えを持った学生たち、そして、それらの学生を教える先生方に伝えたいことである。

2. 物理学書にふさわしい英語表現

八木氏は、CUP から出版した長所を三つ述べている。問題にしたいのは3番目の「物理科学書にふさわしく、くだけた表現を避け正式な英語表現が使用」出来たということである。氏は「出来た」とはいい切らないで、「使用されているか否かに関してです。これは大変微妙な英語表現の問題であり…」と説明を続けているが、要するに、CUP 編集者の助言によって可能になったということである。そして、編集者の微妙かつ適正なアドバイスがあったお陰で、著者たちは物理内容の記述に専心出来たことも述べている。これは確かに長所といえそうである。

しかし、八木氏が例示しているアドバイスに、私は首を傾げる。左側が著者たちのもとの表現、右側がCUP 編集者のアドバイスに基づく修正表現である。(a) include→comprise, (b) keep→retain, (c) stick to→adhere to, (d) suggest→allude to. 氏は、「左側英語は極めて基礎的英語のA及びBランク4,500語に属し、右側英語は次のCランク5,100語」に属する旨を、辞書³⁾に照らして述べている。私は、くだけ過ぎた表現はよくないと思うが、やさしい単語を使った表現より、難度の高い単語を使った表現の方が、必ずしも「物理科学書にふさわしい」あるいは「正式な」表現であるとは思わない。

(b)や(c)の右側の表現は、私自身使うこともあり、確かに、場合によってはこちらの方が適切かと思う。他方、(a)と(d)の右側は、英語の読み書きをかなり好む私でも、自らは使うことがなく、前後関係もなく示されると何と訳せばよいか分からない語句であり、左側の表現で十分だと思う。少数例から推定することは危険だが、逆にいえば、これらの少数例を見るだけでも、CUP 編集者のアドバイスには、英語を日

常語としていて、かつそれに堪能な人たちの陥りがちな、多少の行き過ぎがあるように思われる。もしそうだとすれば、それをありがたがるのもどうかと思われる。

オーストリア生まれのアメリカ人理論物理学者 Victor Weisskopf は、著書にやさしい英語を使ったことでも知られているが、彼の表現が物理科学書にふさわしくないと誰も思わないであろう。むしろ、そのやさしさゆえに歓迎され、広く読まれていると思う。彼の著書の一つ⁴⁾の裏表紙には、“Weisskopf’s vocabulary is direct and unpretentious. Every word is bare and robustly unqualified. Each sentence is a precise logical statement carrying the argument one firm step forward.”という Science 誌の評が引用されている。Unpretentious や bare という言葉は、彼の使う単語が飾り気のないものであることを述べており、他方、direct や unqualified は、適切さに言及しているだろう (unqualified は、「修飾されていない」という意味にも取れそうだが、それでは bare と重なることになる。ここでは、“unqualified praise”が「文句なしの賞賛」という意味であることに留意し、それと同様の意味に取りたい)。重要なのは、飾り気のない、すなわち、やさしい単語を使っても、それが適切であればよいということ、そしてまた、上記の引用の最後にあるように、そういう単語で織りなす文の論理性がしっかりしているということであろう。

3. 英語で物理学書を読む勧め

「なぜ日本語で出版しないのですか」という疑問を持った学生さんたちは、いわゆる「食わず嫌い」で、あまり読みもしないで、英語の物理学書は読みづらいと思込んでいるのではないだろうか。物理学書の英語はおおむね、英語の小説や随筆を読むほどには難しくなく、英語の授業で苦労した人たちでも、ほんの少し慣れさえすれば、問題なく読めるはずである。英語で読む場合、注意しなければならないのは、英文をいちいち日本語に直してはいけないということである。そういう読み方では時間がかかり過ぎるし、また、英語で読むよさが失われてしまう。英語のまま理解することが重要であり、それにはある程度の慣れが不可欠である。いまは英語で書かれた科学関係のニュースやブログ記事などをインターネットで容易に読むことの出来る時代であり、それらが、そうした慣れの獲得に役立つだろう。なお、物理学関係の参考書は、本論へ入れば、式が多く出て来て、

ほとんどの文はそれらをつなぐ役割をして
いるだけであり、日本語で読む場合との速
さの相違は無視出来ることになる。

文献2に興味があるような人たちの多く
は、いずれ英語の論文を読み書きすること
が必要になろう。そういう人たちにはもち
ろん、そうでない人たちにも、専門分野の
参考書としては、早くから英語のものを使
うことを勧めたい。大学・大学院の先生方
も、これを勧めるべきである。そうすれば、
学生・研究者たちの、英語論文の読み書き
に対する戸惑いがなくなることに請け合い
である。いったん英語の物理学書に慣れば、
数式との自然な融合性から、その美しさに
惹かれ、むしろ英語で読まなければ気が済
まなくさえる。先生方が専門書の和訳に
時間をかけるのは無駄と思われるような状
況が作り出されることが大切である。
——科学を母国語で語ることの重要性を否
定するものではないが、それはまた別の問
題である。

参考文献

- 1) 八木浩輔：日本物理学会誌 68 (2013) 326.
- 2) K. Yagi, T. Hatsuda and Y. Miyake: *Quark-Gluon Plasma: From Big Bang to Little Bang* (Cambridge Univ. Press, 2005; paperback ed. 2008).
- 3) *GENIUS English-Japanese Dictionary* (Taishukan, 2002) 3rd ed.
- 4) V. F. Weisskopf: *Physics in the Twentieth Century* (MIT Press, 1972).

(2013年6月5日原稿受付)

泉 雅子氏の解説「放射線の人体への影響」は放射線被曝を過小評価している

山田耕作 ◇

会誌2013年3月号泉氏の解説は放射線の影響を本誌が議論しようとするものであり、歓迎し著者に感謝したい。¹⁾しかし残念なことに解説は修復機構の知見を除いて、基本的に古いICRPの見解をそのまま述べたもので、引用文献も古く最近の進展を反映していない。

1. 古い広島・長崎のデータによるICRP勧告の絶対視

最近、閾値とも関連して広島・長崎のデータからも100 mSvより低線量まで被曝の影響があることを示していることが指摘されてきた。これは被爆者の高齢化によるがんの発生の増加という被爆者の犠牲の結果でもある。「被曝生存者の固形がん罹患率

の1958年から1998年にわたる調査」で0から2 Gyで罹患率と被曝量は直線関係を示すというD. L. Preston達の2007年の論文である。²⁾小笹氏達の2012年の論文はがんの罹患率だけでなく、死亡率のリスクも、被曝線量とがんとの関係は「全線量域で直線関係が最もふさわしい」との結果を得ている。³⁾そして「閾値なしが最もふさわしい」との結論である。また泉氏が10人Sv当たり0.5人としたがん死亡率も議論は残るとしつつも倍に近い1人としている。泉氏はPreston達の古い2003年の論文を引用しつつ、「100 mSv未満の線量では発がん率の上昇は確認されておらず」と日本語訳のICRPの見解をそのまま述べている。低線量域で統計的に有意でないことをもって、確認されておらずというのであろうが、2007年の論文では100 mSv以下の低線量でも線形かそれ以上の増加を示している。小笹氏達の論文を引用していないことやPreston達の新しい2007年の論文を引用していないことなど疑問が残る解説である。

2. 原発・核施設労働者の被曝調査

また、WHOのIARC(国際がん研究機関)も15カ国の原発核施設労働者60万人から1年未満の労働者など特殊な人を除いた40万人に対して調査した。1人当たりの累積被曝線量の平均は19.4 mSvであった。結論はがん死者と被曝線量の直線関係は統計的に有意であり、白血病を除くがん死の過剰相対リスクは1 Sv当たり0.97であった。この総がん死に対する過剰相対リスクから、生涯にわたる過剰絶対リスクを計算すると10 Sv当たり、0.82人となった。ICRP1990年勧告および2007年勧告のリスク値の約2倍になっていたのである。⁴⁾

3. 原発の定常運転による被曝被害の証明は多くある

より明確には、J. M. Gould達は定常運転時での放射線被曝で乳がん死の増加を疫学的に証明している。⁵⁾彼らの研究によるとヨウ素131放出量の対数に対して乳がん死亡率が比例して増加することが危険率 $p < 0.001$ で成り立つことが示されている。この対数依存性は低線量の方が線量あたりのリスクが高く、被害が大きいことを示している。いわゆるベトカウ効果である。泉氏はGouldの研究や最近のドイツでの原発周辺の小児がんや乳がんの増加を示した疫学調査を考慮していない。

また、次のような報告もある。全米の母親達は、生え変わりで抜けた子どもの乳歯

を大量に集め、それから原発の定常運転で放出されたストロンチウム90の放射線濃度を推定し、小児がんの発生率との関係を調べたのである。ストロンチウム90の濃度が上昇すると数年後に小児がん発生率が上昇し、ストロンチウム90の濃度が減少すると小児がんも減少することが示されている。⁶⁾このように低線量の被曝調査は被曝を心配する母親や科学者によって行われてきた。ICRPによって無視されてきただけである。(参考文献9は典型的)。

4. 最後に泉氏の解説に2, 3コメントする。

1) 線量率効果 興味ある修復機構の解説であるが、泉氏の引用している文献は線量が高い。例えば図4では3 GyのX線を照射している。現実に福島で問題となるのはもっと低線量でその1,000分の1である。低線量ではむしろベトカウ効果で線量あたりの効果が増大することが示されている。にもかかわらず、泉氏はICRP1977年勧告や2007年勧告を支持して「低線量率での被曝や微量放射線のリスクを、しきい値無し直線モデルに従って発癌のリスクを評価するよう勧告はしているが、不確実性が大きく、必ずしも適切でないことも指摘している」という。これは集団被曝線量の放棄につながり、多数の人の低線量被曝を無視しようとするものである。ところが上述のように米国やドイツで原発周辺の低線量被曝や原発労働者の低線量で長期にわたる被曝の疫学調査がなされ、小児がん、乳がん、遺伝的影響などの危険性が示されている。泉氏の主張は現に被曝し続けている人たちに、危険性は証明されていないといった誤った情報で被曝を継続させることにつながるであろう。泉氏は善意で安心を与えようとしているというのだから予防原則にも反する行為ではないか。

2) 内部被曝と外部被曝 本解説では内部被曝としてチェルノブイリ事故以後ウクライナやベラルーシで注目されているセシウム137などの「長寿命放射性核種取り込み症候群」が一切無視されている。臓器に取り込まれ蓄積するかどうか人工の放射性物質セシウム137と天然に存在するカリウム40との違いである。臓器に取り込まれ蓄積するセシウム137などはカリウム40に比べて極めて危険性が高く、心臓疾患、免疫低下、老化などを引き起こす。⁷⁾

3) 活性酸素を語りながら、放射線により発生した活性酸素の危険性が十分説明されていない。この活性酸素による細胞膜の破壊に関連したベトカウ効果は重要であ

る。⁸⁾

4) ICRPの内部被曝は臓器全体で平均した等価線量を用いてmSvで規制しているが、局所的な被曝や取り込み効果が正しく評価されていない。リスクの過小評価である。

参考文献

- 1) 泉 雅子：日本物理学会誌 **68** (2013) 141.
- 2) D. L. Preston, *et al.*: *Radia. Res.* **168** (2007) 1—Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors 1958–1998.
- 3) K. Ozasa, *et al.*: *Radia. Res.* **177** (2012) 229—Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950–2003.
- 4) E. Cardis, *et al.*: *Radia. Res.* **167** (2007) 396—The 15 Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry.
- 5) J. M. Gould 著, 肥田他訳：『低線量内部被曝の脅威 (The Enemy Within 1996)』(緑風出版, 2011)。
- 6) J. J. Mangano 著, 戸田他訳：『原発閉鎖が子どもを救う (Radioactive Baby Teeth: 2008)』(緑風出版, 2012)。
- 7) ユーリ・バンダジェフスキー著, 久保田訳：『放射性セシウムが人体に与える医学的生物学的影響』(合同出版, 2011)。
- 8) R. Graeb and E. J. Sternglass 著, 肥田他訳『人間と環境への低レベル放射能の脅威 (The Petkau Effect)』(あけび書房, 2011)。
- 9) W. Hoffman, *et al.*: *J. Radiol. Prot.* **16** (1996) 213—Leukaemia and Lymphoma Mortality in the Vicinity of Nuclear Power Station in Japan 1973–1987. 白血病とリンパ腫の増加は認められないとしたデータを用いて、各原発サイトのデータの和を取ることによって信頼度を高め、過剰死が約20%増という有意な結果を導いている。

(2013年4月6日原稿受付)

泉 雅子氏からのコメント

泉 雅子 (理研仁科センター)

まず始めに、拙稿に対し貴重なご意見をお寄せ頂いたことに感謝したい。

低線量被曝のリスクについては相反する様々な意見が世間にあるが、本総説では国際放射線防護委員会 (ICRP) の見解に沿って解説した。社会的影響の大きい放射線防護の基準の作成にあたっては、学界における科学的合意を元に、まず国連科学委員会 (UNSCEAR) が国際的な合意を作成し、その合意を元にICRPが放射線防護の基準を作成している。すなわちUNSCEARやICRPの見解は、多くの科学者による検証 (実験の追試、研究成果の比較検討) を経て到達した学界の科学的合意に基づくものであり、限られた字数の中で解説する都合上、これらを見解を中心に解説したことにご理解を賜りたい。

なお被爆者の疫学調査に関する Preston 氏、小笹氏の論文の主旨は「がん死亡リスクは被曝線量に対して直線関係を示し、その直線の閾値はゼロであるが、リスクが有意となる線量域は0.15–0.2 Gy以上である」ということであり、本総説の図6と矛盾するものではない。

物理学会理事会への要望について

樋田 敦* (◇)

本年3月、広島大学で開催された春の大会において、「物理学者集団の社会的責任を問う」というインフォーマルミーティング (IM) を開催しました。

10%濃縮ウランを用い、水を減速材とする理化学研究所の原爆計画に始まり、茅・伏見による原子力の平和利用三原則の提案があり、原子力基本法に「安全の確保を旨として」という文言が書き加えられた経過が議論されました。

物理学者は、安全は科学技術で解決できると考えていたのです。しかし、その期待は外れました。福島原発事故のそもそもの原因は物理学者集団のこの平和利用の提案にあります。

そこで、このIMでは次の2項目の要望をまとめ、3月29日付で理事会に提出しました。

要望書

福島原発事故から2年を経過した。この深刻な災害のそもそもの原因は物理学者にある。戦後、一部の日本の物理学者は、安全は科学技術で確保できるとして原子力の平和利用を提起した。そして、多くの物理学者は、自主・民主・公開を条件にこの原子力の研究開発を容認した。しかし、安全の確保に失敗してしまった。

そこで、次の事項について、物理学会理事会に要望する。

- ①福島原発事故の詳細を研究するグループを結成し、その研究結果を発表する。
- ②物理学会誌を、福島原発事故に関する会員の意見交換の場としても活用し、上記研究グループの研究に寄与する。

14名連署

なお、物理学者集団として、被災した福島県民をはじめ日本国民に謝罪すべきとの意見もありましたが、開発の経過や事故の

* 福島原発事故研究グループ (準備会) 世話人

調査をしてからということになりました。

また、福島事故の研究活動を直ちに始めるため、物理学会会員有志による福島事故研究グループ (準備会) を結成することにしました。これはさらに参加者を募り、上記研究グループが正式に設立される時の核になる所存です。

IM 世話人 樋田 敦

上記要望①に対して、5月11日、日本物理学会ス波弘行会長より「研究グループを作る仕事は会員の自発的な活動にまかせる」との回答がありました。そこで今後は「福島原発事故 (事実, 考察, 教訓) 研究グループ」として自主的に研究活動をする外、物理学会大会においてIMを開催することになります。

要望②については返事をいただけませんが、要望が尊重されるよう期待します。

(2013年5月29日原稿受付)

理事会からのコメント

樋田氏の「会員の声」の記事の中で5月11日付けの会長名の回答に触れられていますので、その全文を以下に示します。

2013年5月11日

樋田 敦様

3月29日付けの「物理学会理事会への要望書」について、理事会において慎重に検討いたしました。

頂いた「要望書」では、理事会が主導して「(1) 福島原発事故の詳細を研究するグループを結成し、その研究結果を発表する。(2) 物理学会誌を、福島原発事故に関する会員の意見交換の場としても活用し、上記研究グループの研究に寄与する。」ことを求めておられます。しかし、個別の問題に関して理事会が主導して研究グループを作るということはせず、研究グループを作る仕事は会員の自発的な活動にまかせるというのが物理学会のスタンスです。したがって、ご要望に応ずるのは難しいと考えます。

日本物理学会会長 ス波弘行

- 1) 広く会員にとって関心があると思われる話題についての個人的な意見や感想を述べた投書を掲載します。
- 2) その内容に関する責任は投稿者が負います。

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.html>にありますので、それに従ってお申込み下さい。webからのお申込みができない場合は、e-mail: keijiban@jps.or.jpへお送り下さい。必ず Fax 03-3816-6208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)

■産業技術総合研究所計測標準研究部門研究員

1. 博士型任期付研究員・若干名(公募番号【計測標準-6】及び【計測標準-11】は中堅型研究員も募集)
2. 公募番号と配属予定部門は以下の通り。
【計測標準-1】力学計測科質量力標準研究室、【計測標準-2】力学計測科圧力真空標準研究室、【計測標準-3】ナノ材料計測科粒子計測研究室、【計測標準-4】電磁気計測科量子電気標準研究室、【計測標準-5】時間周波数教科波長標準研究室、【計測標準-6A/B】温度湿度科湿度標準研究室、【計測標準-7】電磁波計測科電磁界標準研究室、【計測標準-8】無機分析科無機標準研究室、【計測標準-9】有機分析科ガス標準研究室、【計測標準-10】ナノ材料計測科

ナノ構造化材料評価研究室、【計測標準-11A/B】量子放射科

3. 各公募番号に対応する公募課題、専門分野の概要は以下の通り。
【計測標準-1】キロプログラムの新しい定義を実現する為の計測技術の開発(精密工学、機械工学、電子工学等の知識及び能力を有することが望ましい)。
【計測標準-2】真空標準を応用した表面評価技術の開発に関する研究(精密工学、機械工学、材料科学、流体力学、真空物理学、工学基礎等の複数分野における知識及び実験能力を有することが望ましい)。
【計測標準-3】ナノ粒子の計測・分級技術の開発(ナノ粒子計測・分級技術の研究開発に関する基礎知識を有することが望ましい)。
【計測標準-4】量子抵抗標準とその高度化(物性物理、高精度電気測定、ナノテクノロジー等に関する基礎知識を有していることが望ましい)。
【計測標準-5】光格子時計の高精度化に関する研究開発(量子エレクトロニクス、応用物理、電気工学等の知識と技術を持ち、特にレーザー冷却等の技術を有することが望ましい)。
【計測標準-6A/B】高湿度発生装置の開発(応用物理学、熱工学、計測工学に関する知識と技術を有する研究者、又は中核となって推進する研究者であることが望ましい)。
【計測標準-7】利得・偏波分離度標準の開発・供給(電気電子工学、応用物理学、工学基礎に関する知識と技術を有することが望ましい)。
【計測標準-8】環境・食品の安全に資する組成標準物質の研究と開発(化学に関する基礎知識を有することが望ましい)。
【計測標準-9】高精度標準ガスの開発・維持・供給(計測工学や分析化学に関する基礎知識を有し、高い意欲を有することが望ましい)。
【計測標準-10】ナノ機能物質(多孔質薄膜)の計測・評価技術(高感度吸着法、陽電子消滅法、X線散乱法等を応用したナノ空孔計測技術の研究開発に関する基礎知識を有し、高い意欲を有することが望ましい)。
【計測標準-11A/B】量子放射標準に関する研究開発(応用物理、電気工学等の知識と技術を持ち、特に放射線、放射能、中性子に関する研究開発に意欲的に取り組む若手研究者、又は十分な実績を有する研究者であることが望ましい)。
4. 2014年4月1日
5. 博士型任期付研究員は5年、中堅型研究員は任期の定めなし(定年制)

6. 2006年4月2日以降の博士号取得者(採用予定日における取得見込者含)、又は博士号取得と同等の能力を有する者(但し、成年被後見人・被保佐人及び被補助人・禁錮以上の刑に処せられ、その執行を終わる迄又はその刑の執行を受けることがなくなる迄の者を除く)
7. ○HPで事前登録を行った上、以下の書類を原本1部、コピー1部提出(一部の書類は指定の様式をHPで入手)
○提出書類チェック表(指定様式)
○履歴票(指定様式) ○研究業績リスト(指定様式) ○修士論文要約及び博士論文要約(各A4、約1頁、図入り可) ○研究業績2~3点 ○前項の研究業績2~3点の要約(1点あたりA4、約1頁、図入り可) ○今後の抱負(A4、約1頁、図入り可) ○産総研関係者以外の者(大学の指導教官等、英文可)からの推薦状1通以上
8. 一次締切(複数の公募課題へ応募する場合): 2013年10月11日(金)、二次締切(一つの公募課題へ応募する場合): 2013年10月25日(金)
9. ①305-8568 つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2事業所 つくば本部・情報棟7F 産業技術総合研究所研究職員採用委員会事務局
②産総研研究職員採用に関すること: [aist-koubou13-ml aist.go.jp](http://aist-koubou13-ml.aist.go.jp) 計測標準研究部門研究職員採用に関すること: [nmij2013saiyo-ml aist.go.jp](http://nmij2013saiyo-ml.aist.go.jp)
10. 封筒に「公募選考採用応募書類在中」及び「公募番号(各研究分野の募集概要に記載されている番号)」を朱書き郵送又は宅配等により送付(直接持参も可)。応募の際は、http://www.aist.go.jp/aist_j/humanres/02kenkyu/task/6_standards.htmlを必ず確認のこと。詳細は http://www.aist.go.jp/aist_j/humanres/02kenkyu/index.html 参照。

■筑波大学数理工学系物理学域教授

1. 教授1名
2. 理工学群物理学類数理工学系科学研究科物理学専攻(前期課程)、数理工学系科学研究科ナノサイエンス・ナノテクノロジー専攻(後期課程)
3. 物性実験分野:新しい研究室を立ち上げる。学部及び大学院教育の他、系及び域の運営に携わる。
4. できるだけ早期
5. なし

- 履歴書 ○業績リスト(論文, 著書, 外部資金) ○主要論文5編のコピー ○今迄の研究概要(A4, 約2枚) ○研究計画及び抱負(A4, 約2枚) ○推薦書2通
- 2013年10月15日(火)
- ①305-8571 つくば市天王台1-1-1 筑波大学数理物質系物理学域 大塚洋一
②同上 ootuka lt.px.tsukuba.ac.jp
電話029-853-4217, 又は守友 浩 moritomo.yutaka.gf u.tsukuba.ac.jp
電話029-853-4337
- 封筒に「物性実験教授応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付。応募書類不返却。

■理化学研究所仁科加速器研究センター研究員

- 定年制研究員1名
- 上坂スピン・アイソスピン研究室(主任研究員:上坂友洋)
- 原子核物理学の実験研究, RI ビームファクトリーにおける原子核物理学研究, 元素合成過程研究において主導的役割を担う。
- 2014年4月1日以降早期
- なし
- 物理学分野の博士号取得者, 1年以上の海外研究歴を有することが望ましい。
- 履歴書(写真貼付) ○研究業績一覧 ○主要論文別刷5編以内 ○現職の所属長を含む推薦書2通(内, 最低1通は日本以外に籍を置く研究者からのもの。現職の所属長から推薦書もらうのが困難な場合は第三者による推薦書。様式自由, 別送可, e-mail送付可。) ○獲得外部資金リスト(様式自由) ○今迄の研究概要と今後の抱負 ○書類は片面印刷, ホチキス止めなしで提出
- 2013年10月31日(木)17時必着
- ①351-0198 和光市広沢2-1 理化学研究所情報基盤棟3階 外務・研究調整部研究調整課 rps-saiyo25 riken.jp
②応募に関するもの: 同上。研究内容に関するもの: 上坂友洋 uesaka riken.jp
- 封筒に「上坂スピン・アイソスピン研究室研究員応募書類在中」と朱書き簡易書留又は書留で送付(e-mailでの申請や電話での問合せは受け付けない)。推薦書の件名は「上坂スピン・アイソスピン研究室研究員公募 氏名(所属)の推薦書」とし, 内容は応募者氏名と推薦者氏名・連絡先を明記し, 宛先は

理化学研究所理事長とする(別送の場合には, 封筒に申請者の氏名を記入の上, 2013年10月31日(木)17時(日本時間)迄に書類提出先と同じ宛先に送付。

■大阪大学大学院基礎工学研究科教授

- 教授1名
- システム創成専攻電子光科学領域固体電子工学講座
- 電子, 光, 量子の制御に基礎をおく先端的機能デバイス
- 2014年4月1日
- 博士号取得者で大学院生及び学部生(電子物理科学科及びエレクトロニクスコース)の教育・研究指導を担当できる方
- 履歴書(写真貼付, 現住所, 連絡先(電話, e-mail), 学歴, 職歴, 賞罰等) ○研究業績リスト(査読付論文(できれば代表的な論文のインパクトファクタ, 被引用件数を付記), 国際会議論文, 著書, 解説, 特許等) ○主要論文約5編の要旨と別刷(コピー可) ○競争的資金獲得状況リスト ○受賞等のリスト ○今迄の研究概要(約1,000字) ○着任後の研究及び教育活動の抱負(各々約1,000字) ○照会可能者2名の氏名, 所属, 連絡先 ○その他, 特記事項
- 2013年10月31日(木)必着
- 560-8531 豊中市待兼山町1-3 システム創成専攻電子光科学領域 酒井 朗 電話06-6850-6300 sakai ee.es.osaka-u.ac.jp <http://www.ee.es.osaka-u.ac.jp/>
- 封筒に「電子光科学領域教員応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付。提出書類不返却。

■新潟大学大学院自然科学研究科助教

- 助教1名
- 教育研究院自然科学系数理物質科学系列物理学コース
- 原子核実験, 原子核実験グループの一員として, RI ビームを用いた不安定原子核の実験研究を活発に進める。大学院及び理学部物理学科での教育担当。
- 2014年1月1日以降早期
- 5年, 再任無し
- 博士号取得者か着任時迄に取得のこと
- 履歴書 ○研究業績リスト ○主要論文別刷3編以内 ○研究概要 ○着任後の研究計画と教育に関する抱負 ○特記事項(科研費等獲得状況, 招待講演, 受賞歴, 院生指導実績等) ○照会可能者2名の氏名, 連絡先

- 2013年10月31日(木)必着
- ①950-2181 新潟市西区五十嵐二の町8050 新潟大学自然科学系総務課学系庶務係
②同理学部物理学科 大坪 隆 電話025-262-6351
tohtsubo np.gs.niigata-u.ac.jp
- 封筒に「数理物質科学専攻物理学コース助教応募書類在中」と朱書き簡易書留で送付。本学では男女共同参画推進室を設置し女性研究者支援を推進している。公募詳細は<http://www.niigata-u.ac.jp/top/personnel.html>参照。

■東北工業大学共通教育センター教員

- 准教授又は講師又は教授1名
- 学習支援部(理数教育部兼務)
- 物理学一般, 本学の学生に対する基礎物理学の講義, 及び物理学・数学に関する学習支援。
- 2014年4月1日
- なし
- 博士号取得者, 教育・研究双方に熱意があり, その他の業務にも意欲的に従事して頂ける方。
- 履歴書(写真貼付) ○業績リスト ○主要論文別刷3~5編(コピー可) ○研究概要と今迄の主要業績のまとめ(約2,000字) ○教育経験の概略と今後の教育・研究に関する抱負(約2,000字) ○照会可能者2名の氏名, 連絡先
- 2013年11月10日(日)必着
- 982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1 東北工業大学共通教育センター学習支援部 梅田健太郎 電話022-305-3260 kumeda tohtech.ac.jp

■京都大学大学院工学研究科准教授

- 准教授1名
- 原子核工学専攻量子ビーム科学講座
- 専門分野: 重イオンを用いた原子分子物理学とその工学的応用, 原子核工学専攻の放射実験室(宇治キャンパス)加速器施設を活用し, 斬新な原子衝突技術による実験研究を展開する。
- 決定後早期
- 特になし
- 博士号取得者, 第一種放射線取扱主任者免状を有するか, 着任後に取得する意思があること。
- 履歴書 ○研究業績リスト(査読付原著論文, 国際会議論文, 著書, 解説, 特許等に区分) ○主要論文5編の別刷又はコピー ○教育に関する実績と今後の抱負 ○研究に関する実績と今

後の抱負 ○その他参考となる実績リスト(外部資金, 学会活動等) ○照会可能者1~2名の氏名, 連絡先 ○履歴書以外の書類については正1部, 副5部を提出

- 2013年11月29日(金)
- 615-8540京都市西京区京都大学桂C3棟 京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻 伊藤秋男 電話075-383-3903 head nucleng.kyoto-u.ac.jp
- 封筒に「准教授応募書類在中」と朱記し, 書留で送付。本学は男女共同参画を推進しており, 多数の女性研究者の積極的な応募を期待する。提出書類は採用審査にのみ使用し, 正当な理由なく第三者への開示, 譲渡及び貸与することは一切ない。応募書類不返却。本専攻の概要については<http://www.ne.t.kyoto-u.ac.jp>参照。

■北海道大学電子科学研究所助教

- 助教1名
- 光科学研究部門コヒーレント光研究分野
- 放射光や自由電子レーザー等先端のコヒーレント光を利用した顕微鏡・イメージングに関し, 意欲的に取り組んで頂ける方。今迄の研究分野は不問。大学院情報科学研究科生命人間情報科学専攻の大学院教育を担当予定。
- 決定後早期
- なし
- 博士号取得者か取得見込者
- 履歴書 ○業績リスト ○主要論文別刷5編以内 ○今迄の研究概要 ○研究計画 ○研究助成金取得状況 ○照会可能者2名の氏名, 連絡先
- 2013年12月10日(火)必着
- 001-0021札幌市北区北21条西10丁目北海道大学電子科学研究所 西野吉則 電話011-706-9354 yoshinori.nishino es.hokudai.ac.jp
- 封筒に「応募書類在中」と朱記し書留で送付。詳細は<http://www.es.hokudai.ac.jp/organization/recruit.html#ID-2013-08-16>参照。

学術的会合

学術的会合の標準様式(1件500字以内)

掲載されている例を参考にして, 次の項目中, 必要なものを簡潔に作成して下さい:
○会合名 ○主催 ○日時(西暦年月日, 曜日) ○場所(会場名の後に括弧して郵便

番号, 住所, 電話) ○内容(1行18字で12行以内) ○定員 ○参加費(物理学会員, 学生の参加費) ○申込締切(講演, 参加, 抄録, 原稿提出の別を明記) ○連絡先(郵便番号, 住所, 所属, 担当者名, 電話, Fax, e-mail等) ○その他(1行18字で5行以内)

■第78回表面科学研究会「ナノスケールの振動分光の最前線」

主催 日本表面科学会
協賛 日本物理学会
日時 2013年10月18日(金)
場所 東京工業大学西8号館10階大会議室(152-8551東京都目黒区大岡山2-12-1 電話03-5734-2071)
内容 ナノスケール物質に携わる研究者・技術者の方を対象に, 最先端の研究を展開しておられる講師の方々のお話を伺い, ナノスケールの振動分光の最前線と今後の展望を議論する。

定員 60名
参加費 2,000円, 学生1,000円(テキスト代, 消費税込)
参加申込締切 2013年10月11日(金)
連絡先 113-0033東京都文京区本郷2-40-13 本郷コーポレーション402 日本表面科学会事務局 電話03-3812-0266 Fax 03-3812-2897 shomu sssj.org <http://www.sssj.org>
問合せ先 東京工業大学理工学研究科 木口学 電話/Fax 03-5734-2071 kiguti chem.titech.ac.jp

■市民講座「物理と宇宙(第1回)」

主催 京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻, 京都大学基礎物理学研究所
日時 2013年11月9日(土)13:00~17:30
場所 京都大学百周年時計台記念館(606-8501京都市左京区吉田本町 電話075-753-2285)
内容 市民の人々に物理学や宇宙物理学の最新の研究成果を発信し, その最先端を分かりやすく説明する。双方向の議論も行う。京都大学の石田憲二教授, 石野雅也准教授, 柴田大教授が講演等を行う。

定員 500名
参加費 無料
参加申込締切 2013年11月6日(水)
連絡先 606-8502京都市左京区北白川追分町 京都大学大学院理学研究科物理学教室内 市民講座係 shimin scphys.kyoto-u.ac.jp http://www.scphys.kyoto-u.ac.jp/Public_Lecture/index.html

■第12回X線結像光学シンポジウム

主催 X線結像光学研究会
共催 日本天文学会, 日本物理学会, 放射光学会, 応用物理学会
日時 2013年11月18日(月)~20日(水)
場所 大阪大学中之島センター(530-0005大阪府北区中之島4-3-53 電話06-6444-2100)
内容 X線結像光学は広く理学と工学に跨り, その利用領域の多様性から科学と技術の要に位置し, 宇宙科学, 生命科学, 物質・材料科学, 放射光科学, プラズマ・核融合科学, 医療技術, 精密工学の広範な分野における研究進展に大きな役割を果たしている。エネルギー領域100 eV~200 keVにおける光学・計測技術, それらによる科学研究及びX線結像光学の基盤技術に関する最新の研究成果を発表し, 将来の展望を議論する。

定員 150名
参加費 6,000円, 学生3,000円
参加登録・原稿提出締切 2013年10月11日(金)
連絡先 560-0043豊中市待兼山町1-1 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻 常深博 tsunemi ess.sci.osaka-u.ac.jp http://www-up.prec.eng.osaka-u.ac.jp/xio/12thXIO_Sympo/index_final.htm
その他 招待講演+ポスター発表+企業展示からなるシンポジウムで, ポスター発表と企業展示での参加募集。詳細はHP参照。

■日本物理学会北陸支部定例学術講演会

主催 日本物理学会北陸支部
日時 2013年11月23日(土)
場所 富山大学五福キャンパス(930-8555富山市五福3190 電話076-445-6011)
内容 物理一般
参加費 1,000円, 学生無料
連絡先 930-8555富山市五福3190 富山大学大学院理工学研究部(理学) 桑井智彦 電話076-445-6586 Fax 076-445-6549 kuwai sci.u-toyama.ac.jp
その他 講演申込方法等詳細は<http://www.sci.u-toyama.ac.jp/phys/hoku2013/>参照。

■第7回物性科学領域横断研究会

主催 科研費6新学術領域
日時 2013年12月1日(日)~2日(月)
場所 東京大学武田先端ビル5階武田ホール(113-8656東京都文京区弥生2-11-16)
内容 物性科学に関連した6つの新学術領

域研究が合同で開催する研究会。各領域の研究内容を専門外の研究者や大学院学生に対し解説し、領域間のシナジー効果を高めると共に、物性科学のホットな話題を2日間で概観する事を目的とする。一般からの発表としてポスターセッションを設ける。凝縮系科学賞の授賞式と記念公演も行う。

定員 200名

参加費 無料

参加申込締切 発表を行う場合：2013年11月1日(金)正午、発表を行わない場合：2013年11月22日(金)正午(定員に空きがあれば、当日参加登録も可)

連絡先 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 押山 淳

oshiyama ap.t.u-tokyo.ac.jp

その他 詳細は<http://www.topological-qp.jp/ryoikioudan2013/index.html> 参照。

■物理学、宇宙・地球惑星科学における国際研究フロンティアの動向

主催 日本学術振興会・学術システム研究センター

日時 2013年12月17日(火)～18日(水)

場所 大阪大学豊中キャンパスシグマホール(560-0043 豊中市待兼山町1-1 電話06-6850-6131)

内容 素粒子・原子核物理学、物性物理学、宇宙科学、地球惑星科学等の幅広い分野における研究の最前線を俯瞰し、学術的な視点から今後の展望を探る。国内外からの招待講演者10名による口頭講演と、一般参加者の内の希望者によるポスター発表を予定。

定員 200名

参加費 無料

ポスター発表申込締切 2013年11月8日(金)
ポスター発表アブストラクト提出締切 2013年11月29日(金)

連絡先 560-0043 豊中市待兼山町1-1 大阪大学大学院・理学研究科・宇宙地球科学専攻 川村 光(秘書：森田登紀子) 電話06-6850-5543(秘書：電話/Fax 06-6850-5494) ISRF2013 spin.ess.sci.osaka-u.ac.jp

その他 2013年10月1日(火)よりHPで参加登録開始。詳細は<http://thmat8.ess.sci.osaka-u.ac.jp/Meeting2013/Contact.html> 参照。

■ウインター・サイエンスキャンプ '13-'14

主催 科学技術振興機構

日時 2013年12月21日(土)～2014年1月

8日(水)の内、2泊3日～3泊4日

場所 大学、公的研究機関等11会場。詳細はHP参照。

内容 先進的な研究テーマに取り組んでいる日本各地の大学、公的研究機関等で、第一線の研究者・技術者から本格的な講義・実験・実習を受けられる、高校生の為の科学技術体験合宿プログラム。

定員 会場毎12～20名(計184名)

参加費 2,000円(食費の一部に充当。交通費自己負担)

申込 <http://www.jst.go.jp/cpse/sciencecamp/camp/> より募集要項・参加申込書を入力、必要事項を記入の上、事務局宛郵送。

参加応募締切 2013年11月8日(金)必着

連絡先 102-0091 東京都千代田区北の丸公園2-1 日本科学技術振興財団法人財育成部内 サイエンスキャンプ本部事務局 電話03-3212-2454 Fax 03-3212-0014 camp-boshu25 jsf.or.jp

その他 応募資格は高等学校、中等教育学校後期課程(4～6学年)又は高等専門学校(1～3学年)等に在籍する生徒。

■第40回冬期講習会～光ファイバ技術の最前線～

主催 日本光学会(応用物理学会)

協賛 日本物理学会

日時 2014年1月16日(木)～17日(金)

場所 東京大学本郷キャンパス山上会館大会議室(113-8654 東京都文京区本郷7-3-1)

内容 光ファイバは古くから通信用媒体として研究・利用されてきたが、設計・製造技術の進歩に伴い、様々な高機能光ファイバが開発され、近年、その利用範囲が拡大すると共に応用技術の研究も活発になっている。関連分野の著名な講師を招き、光ファイバの基礎から光ファイバを利用した最新の応用技術までを分かりやすく解説する。この分野に興味を持つ研究者、技術者、学生にとって、充実した講習になると考えている。皆様の参加を心よりお待ち申し上げる。一日目プログラム：山内良三(フジクラ)光ファイバの製造技術関連、伊藤文彦(NTT)光ファイバ評価技術関連、平野正晃(住友電工)低損失石英ファイバ関連、淡路祥成(NICT)マルチコアファイバ関連、山下真司(東大)光増幅ファイバ関連。二日目プログラム：小池康博(慶應大)プラスチック光ファイバ関連、須崎嘉文(香川大)FBG関連、久保田寛和(大阪府大)フォトニック結晶ファイバ関連、中島和秀(NTT)低曲げ損失ファイバ関

連。

定員 85名(先着順)

参加費 20,000円、学生4,000円

申込 日本光学会HP内の登録フォーム(10月初旬公開予定)より。

参加申込締切 2014年1月10日(金)16:00

連絡先 企画に関する問合せ先：防衛大学校通信工学科 辻 健一郎 電話046-841-3810(ex. 3383) Fax 046-844-5911 ml-win40th_nda.ac.jp、参加登録に関する問合せ先：応用物理学会事務局分科会担当 上村さつき 電話03-5802-0863

Fax 03-5802-6250 kamimura jsap.or.jp

その他 参加費はクレジットカード払いのみ(申込時にHP上から手続き)。参加費の払戻し、請求書発行は原則しない(領収書は当日会場にてお渡し)。

その他

助成公募の標準様式(1件500字以内)

○名称 ○対象(1行18字で7行以内)

○助成内容 ○応募方法(1行18字で4行以内) ○応募締切(西暦年月日、曜日)

○詳細問合せ先(郵便番号、住所、所属、担当者名、電話、Fax、e-mail等)

その他 ○標題 ○内容 ○連絡先

■高エネルギー加速器科学研究奨励会 西川賞・小柴賞・諏訪賞・熊谷賞候補者推薦依頼

対象 高エネルギー加速器及び加速器利用に関する実験装置の研究において、特に優れた業績を修めた研究者・技術者に授与し、もって加速器科学の発展に資することを目的とする。西川賞：高エネルギー加速器及び加速器利用に関する実験装置の研究において、独創性に優れ、且つ論文発表され、国際的にも評価の高い業績を上げた、原則として50歳以下(応募締切時)の単数又は複数の研究者・技術者。小柴賞：素粒子研究の為の粒子検出装置の開発研究において、独創性に優れ、国際的にも評価の高い業績を上げた、原則として50歳以下(応募締切時)の単数又は複数の研究者・技術者。諏訪賞：高エネルギー加速器科学の発展上、長期にわたる貢献等特に顕著な業績があったと認められる研究者・技術者・研究グループ。熊谷賞：研究開発、施設建設等長年の活動を通じて、高エネルギー加速器や加速器装置への顕著な貢献が認められる企業の加速器関係者。

内容 年間表彰件数は各賞合計5件以内。
賞金は各賞30万円。表彰盾は課題毎に授与。

推薦締切 2013年10月10日(木)

問合せ先・書類提出先 305-0801つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究機構内 高エネルギー加速器科学研究奨励会
電話/Fax 029-879-0471 info heas.jp
http://www.heas.jp/

その他 2013年11月上旬に推薦のあった者について高エネルギー加速器科学研究奨励会選考委員会で選考し、理事会において決定する。提出書類は「推薦書 (HP掲載の様式)」「選考資料 (研究業績に関する発表論文3編以内のコピー各2部)」。

■「宇宙科学奨励賞」候補者推薦依頼

対象 宇宙科学分野で優れた研究業績を上げ、宇宙科学の発展に寄与した若手研究者を顕彰し、宇宙科学奨励賞を授与すべく、2013年度の第6回宇宙科学奨励賞候補者の推薦を募集。宇宙理学(地上観測を除く)分野及び宇宙工学分野で独創的な研究を行い、宇宙科学の進展に寄与する優れた研究業績を上げた当該年度の4月1日現在37歳以下の若手研究者個人。候補者の推薦は他薦に限る。

内容 授賞は原則として毎年宇宙理学関係1名、宇宙工学関係1名(但し適格者のない場合は受賞者なしとする場合有)。本賞(賞状と表彰盾)及び副賞(賞金30万円)を授与。

推薦締切 2013年10月31日(木)必着

問合せ先・推薦書送付先 252-5210相模原市中央区由野台3-1-1 公益財団法人宇宙科学振興会事務局 電話 042-751-1126 Fax 042-751-2165 admin spss.or.jp

その他 推薦手続き等詳細は<http://www.spss.or.jp>参照。推薦書式をダウンロード、必要事項を記載し、①候補者略歴、②論文リスト、③推薦対象となる論文別刷等必要書類を添付の上、e-mailにて投稿。業績審査は推薦理由となる研究業績に関連して発表された論文に基づき、当財団設置の選考委員会で行う。選考結果は2014年1月に推薦者と受賞者に通知すると共に、当財団HPで発表。同3月に表彰式を行い、受賞者には受賞対象となった研究に関する講演をして頂く。

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

対象 当施設の放射光及び低速陽電子を利用する実験。主に大学等の研究者を対象とするが、科学研究費補助金の申請資格を有する企業等の基礎研究も対象。

応募要領 実験課題申請システム<https://pmsweb.kek.jp/k-pas/>を利用した電子申請。申請受付は2013年10月上旬からの予定。具体的な申請書作成等に関する詳細は<http://uskek.kek.jp/apply/pf.html>参照。

応募締切 2013年11月中旬予定

問合せ先 305-0801つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究機構研究協力部研究協力課共同利用支援室共同利用係
電話029-864-5126 Fax 029-879-6137 kyodo1 mail.kek.jp

その他 研究成果は公表して頂く。PFを高度に活用した優れた研究を主体的に推進する大学院生を、大学とPFが共同して指導、支援を行い、放射光科学の将来を担う人材の育成を行うことを目的とした課題区分が新設された。詳細は、HP

等参照。

■第16回大学女性協会守田科学研究奨励賞候補者募集

趣旨 化学教育者・故守田純子氏から遺贈された資金を基にして、自然科学を専門とする女性科学者の研究を奨励し、科学の発展に貢献する人材を育成することを目的として、1998年に創設。

対象 自然科学分野において、優れた研究成果を上げており、科学の発展に貢献することが期待される40歳未満(2014年4月1日現在)の女性科学者。

授賞内容 年2件以内。賞状及び副賞50万円。

応募締切 2013年11月22日(金)必着

書類送付・連絡先 160-0017東京都新宿区左門町11番地6-101 大学女性協会
電話03-3358-2882 Fax 03-3358-2889
<http://www.jauw.org> jauw jauw.org

その他 提出書類等詳細はhttp://www.jauw.org/shougaku/boshu_youkou_morita.pdf参照。

■会員専用ページ：ユーザ名とパスワード

本会 web site (<http://www.jps.or.jp/>) の会員専用ページには、各種変更届、刊行委員会報告、過去の大会プログラム等の情報を掲載しています。アクセスするためのユーザ名とパスワード(今月と来月分)は次の通りです。(英数字は半角入力、大文字小文字は区別されます。)

10月ユーザ名 : 13Oct

パスワード: Philipp566

11月ユーザ名 : 13Nov

パスワード: Maria873

行事予定

[詳しくは表中の右欄記載の会誌各巻号の揭示板欄(*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
2013年			
10/10~11	第8回高崎量子応用研究シンポジウム	高崎市(群馬)	68-9
10/16~17	第56回表面科学基礎講座	吹田市(大阪)	68-7
10/18	第78回表面科学研究会「ナノスケールの振動分光の最前線」	東京	68-10
10/23~26	第34回Tex Users Group年次大会	東京	68-6
11/9	市民講座「物理と宇宙(第1回)」	京都市	68-10
11/15	日本希土類学会第31回講演会	名古屋市	68-9
11/18~19	第29回量子情報技術研究会(QIT29)	東京	68-9
11/18~20	第3回分子シミュレーション国際会議(ICMS2013)	神戸市	68-9

開催月日	名 称	開 催 地	会誌巻号または世話人
2013年			
11/18~20	第12回X線結像光学シンポジウム	大阪市	68-10
11/18~21	第12回国際シンポジウム「物質の起源と銀河の進化」(OMEG12)	つくば市(茨城)	68-6
11/20~22	第39回固体イオニクス討論会	熊本市	68-8
11/21~22	Int. Symp. on Single Biomolecule Analysis 2013	京都市	68-6
11/21~22	Int. Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2013 by FIRST Program	東京	68-9
11/23	日本物理学会北陸支部定例学術講演会	富山市	68-10
11/26~28	2013年真空・表面科学合同講演会 第33回表面科学学術講演会・第54回真空に関する連合講演会	つくば市(茨城)	68-7
12/1~2	第7回物性科学領域横断研究会	東京	68-10
12/2~5	光と磁気の融合研究に関する国際会議(MORIS2013)	さいたま市	68-9
12/4	第32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)	68-9
12/17~18	物理学、宇宙・地球惑星科学における学際研究フロンティアの動向	豊中市(大阪)	68-10
12/17~19	第27回数値流体力学シンポジウム	名古屋市	68-8
12/21~1/8	ウインター・サイエンスキャンプ'13-'14	日本各地	68-10
12/20~22	研究会「バイオ・メディカルフォトニクス：基礎と応用の最前線」	軽井沢町(長野)	68-9
2014年			
1/16~17	第40回冬期講習会~光ファイバ技術の最前線~	東京	68-10
3/27~30	日本物理学会第69回年次大会(東海大学)	平塚市(神奈川)	日本物理学会
9/7~10	日本物理学会2014年秋季大会(中部大学)(物性)	春日井市(愛知)	日本物理学会
9/18~21	日本物理学会2014年秋季大会(佐賀大学)(素粒子, 宇宙線, 宇宙物理)	佐賀市	日本物理学会
10/14~18	日本物理学会2014年秋季大会(ハワイ)(核物理)	ハワイ島	日本物理学会 ・アメリカ物理学会合同
11/2~6	The 7th Int. Symp. on Surface Science	松江市	68-4
2015年			
9/16~19	日本物理学会2015年秋季大会(関西大学)(物性)	吹田市(大阪)	日本物理学会
9/25~28	日本物理学会2015年秋季大会(大阪市立大学)(素粒子, 核物理, 宇宙線, 宇宙物理)	大阪市	日本物理学会

編集後記

本会誌の編集後記を書く順番は慣例として、同期編集委員のうちで苗字の五十音順に割り当てられます。今年4月に編集委員に就任したわたしは、数ヶ月先に掲載されるであろう企画に着手したばかりですが、早くも10月号の編集後記を担当することになりました。日頃の行いが良いせいかわたまたまた悪いせいかわたまたまた悪く、原稿締め切りは8月上旬、前々から予定していた夏期休暇のど真ん中、普段からエッセイもブログも書いていないわたしは出発前に終えることができず、荷造りをしている間も休暇先に向かう飛行機の中でも、編集後記の内容をあれこれ考える羽目になりました。

休暇の初日に、山の上で星を観測するガイド付ツアーに参加しました。幸い天気恵まれて満天の星空と荒涼とした山の風景を満喫することができましたが、そのガイドが実に博識で、地質学、天文学、生物学から歴史や民俗学に至るまで、観光客向けに過不足なく分かりやすく説明してくれる。拝聴するこちらは、学生時代に一般書で読

んだ断片的な知識が頭の片隅に残っている程度でしたが、説明を聞きながらそれらの知識相互の関連を発見し、パズルの断片が一つに組み上げられるような「目から鱗」な体験をしました。

そのような“Eureka”な瞬間は、商業的な科学雑誌の解説記事を読んでも時折あります。翻って、研究者が「手弁当」で(正確には、月一回の編集会議毎に弁当が支給されます)企画している本会誌がそのレベルに達するのは相当困難です。また学会誌として商業誌とは違う、より専門家向けの路線を追求するのは当然とも思われます。

とはいえ物理学会のカバーする専門領域は広く、本会誌掲載の科学記事のすべてを専門家の視点で読むことができる読者はどちらかといえば少数でしょう。かく言うわたしは、会誌を毎月パラパラめくっては見るものの、2ページ目以降も読むのは結局自分の専門(物性実験)にごく近い記事だけという、あまり模範的とはいえない読者です。専門外の記事も読みたい興味はあるのですが、記事内で周知のものとして扱わ

れている(が、わたしには未知の)概念を「ググって」まで読むより、むしろ専門領域の学術論文を読むことを優先してしまいます。

そんな不熱心な読者がなぜ編集委員になったのかとお叱りを受けそうですが、わたしとしては超白色光のように広い読者スペクトルの一端を代表して、本会誌に「忙しい門外漢でも最後まで読める」記事の一つでも増やすべく寄与していきたいと思っております。

石岡邦江 <

編集委員

宮下 精二(委員長), 森川 雅博,
有田亮太郎, 井岡 邦仁, 石岡 邦江,
板橋 健太, 伊藤 克司, 岡田 邦宏,
沖本 洋一, 角野 秀一, 片沼伊佐夫,
加藤 岳生, 小島智恵子, 佐藤 丈,
鈴木 陽子, 関 和彦, 竹内 幸子,
常定 芳基, 西野 晃徳, 野口 博司,
長谷川太郎, 平山 博之, 藤山 茂樹,
古川はづき, 目良 裕, 山本 隆夫,
多田 司

(支部委員)

石井 史之, 奥西 巧一, 岸田 英夫,
小山 晋之, 酒井 彰, 杉立 徹,
野村 清英, 松井 広志, 水野 義之,

山崎 祐司
新著紹介小委員会委員
多田 司(委員長), 雨宮 高久,
大江純一郎, 桂 法称, 加藤 進,

小芦 雅斗, 合田 義弘, 竹延 大志,
中川 賢一, 平野 哲文, 宮原ひろ子,
村山 能宏, 吉越 貴紀, 渡邊 紳一

第 69 期 (2013 年 3 月 31 日~2014 年 3 月 31 日) 理事・監事

会 長	斯波 弘行	副会長(次期会長)	兵頭 俊夫
庶務理事	石田 憲二・伊藤 好孝・柴田 利明・田村 裕和・松川 宏・三沢 和彦・本林 透 森 初果		
会計理事	川村 光・柴田 利明(兼任)・野崎 光昭・松川 宏(兼任)		
会誌編集委員長	宮下 精二	JPSJ 編集委員長	安藤 恒也
		PTEP 編集委員長	坂井 典佑
刊行委員長	高野 宏	監 事	藤井 保彦・渡邊 靖志

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

(参照: 本誌 47 (1992) 4 号会告)

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

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

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

アメリカ合衆国における複製については, 下記 CCC に連絡して下さい.

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

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

日本物理学会誌 第 68 巻 第 10 号 (平成 25 年 10 月 5 日発行) 通巻 767 号

©日本物理学会 2013

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.