

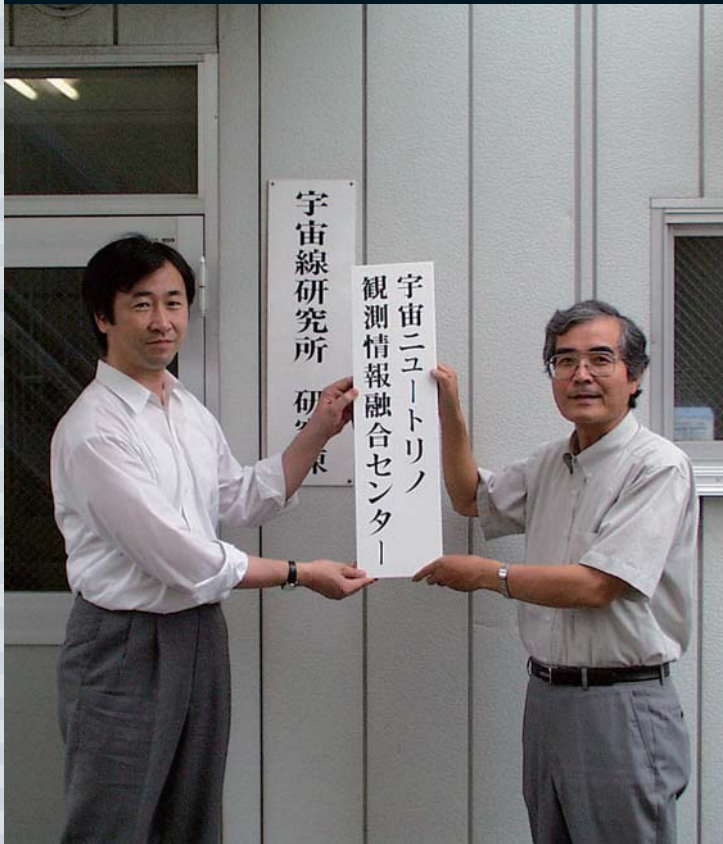
- 物理学70の不思議
- 重力波の初の直接検出とその意義
- 量子臨界現象
- 梶田隆章博士ノーベル物理学賞受賞記念

NO.

4

2016 | VOL. 71

B U T S U R I
日本物理学会誌



将来を見据えた男女共同参画推進

板倉 明子 〈男女共同参画推進委員長 itakura.akiko@nims.go.jp〉

日本物理学会では2002年に男女共同参画推進委員会が発足し、同年、男女共同参画学協会連絡会の発足学会の一つとなった。2002年当時の男女共同参画活動は「男女ともに望ましい研究環境を作る」という目標を掲げつつも、本来あってはならない「性による差別をどうやってなくしていくか」が課題だった。給与や昇進・昇格における性差別をなくし、同じ実力を持つ者は同等に扱うという考え方だ。差別発生の根底には「理系は男子が得意、文系は女子が得意」という社会全体の先入観や、親や教師たちから後天的に植えつけられた女性本人の思い込み、居心地の良い男性だけの社会に異物である女性が混じるのを嫌う風潮も残っていたと思う。それらを解消すること、そして女性が社会進出することで発生する産休や育児休暇中の問題を解決すること、働きやすい環境を整えることを目標とした活動が行われた。環境を整えるには集団効果が有効だから、女性研究者を増やそう、というのもその当時からの目標だった。現在は発足時の課題の多くが解消され、あるいは好転しつつあり、次はそれを徹底していく段階である。私は発足当時の男女共同参画推進委員会の委員をさせていただいて、私事になるが2003年の出産後には女性支援の恩恵を大いに受けてきた一人だ。「本業と育児で忙しいだろうし、一段落してから戻ってきてね」との当時の委員長のお気遣いで、しばらく委員会から離れさせてもらっていたが、71期の藤井会長は男女共同参画推進にもとても理解の深い方で、今年、安心して担当理事を引き受けさせていただいた。

担当になって初めの仕事としてAAPPS-WIP (Association of Asia Pacific Physics Society-Women in Physics) の

workshop と Gender Summit 6-Asia Pacific 2015に参加した。¹⁾ その席で、何のために男女共同参画を推進し、女性研究者の人数割合を増やしてジェンダーバランスを考慮しなければならないかという理由づけ等、今後の男女共同参画を考える上で参考となる意見を聞いたので、物理学会の方々と共有したい。

シートベルトの使用が道路交通法で決まっているが、妊婦は除外される。ベルトで胎児が圧迫され、危険にさらされるからだ。自動車の追突事故が起きた時、男性に比べて女性の方がむち打ち症になる確率が高いというデータがあるそうだ。事故実験に用いるダミー人形が成人男性体型であるため、身体が小さく首が細い女性に対応していないと結論づける研究者がいる。人種や性差で効果の異なる薬品があることは今や広く知られているが、動物実験に使われるマウスは(メスの生殖周期を嫌って)オスばかりだそうだ。²⁾ 研究現場にもっと女性がいたらどうだろう？ 自分の体型に合わないダミーばかりの実験に疑問を感じるのではないだろうか？ 女性に効く薬、男性に効く薬の違いにもっと早く気づいたのではないだろうか？ 被実験体の女性を観察することで回避できることもあるが、当事者として研究することが大きな違いをもたらしたのではないだろうか？ 妊婦が使えるシートベルトや体型にかかわらず安全な車があったら、男性も女性も使える薬や女性の痛みに効く薬があったら、その開発は大きく産業に影響を与える。つまり人間の性差を考慮した研究・産業が存在する。「男女共同参画の多様な視点がイノベーションを生む」という言葉を折に触れ聞いてきたが、このサミットではその具体例をいくつも教えられた。

これは女性に限ったことではなく、すべてのマイノリティに当てはまることである。研究分野におけるジェンダーバランスを正常化するのは、多様な研究者から多様な研究を生みださせるためである。しかしながら、日本の女性研究者割合は14%と世界最低レベルである。物理学会ではわずか5.8%で、とてもバランスが良いとは言えない。大学や職場で研究者を目指す女性を差別せずに引き上げるだけでは足りない。研究現場に女性が必要なだけなら、もっと研究者を目指す女性が増えてくれなくては困る。物理学会では「女子中高生夏の学校」や「関西科学塾」にも協力し次世代の育成に気を配っている。5年後10年後に期待したい。

駅構内の電車の時刻表は、特急が赤系、急行が緑系だが、日本人男性に5%ほどいる色弱者にも区別がつくよう、赤と青緑の組み合わせを使う会社が増えた。NHKや大手企業のポスターも、自由な色使いをしているように見えて、実は色弱者にも対応したユニバーサルデザイン(誰でも判別できる色使い)となっている。男女共同参画の推進によって、性差に考慮した製品が増えるのか、ユニバーサル化が進むのか私は答えを持っていないが、住みやすい世の中になることだけは確かだと信じている。

参考文献および注

- 1) 日物応物連絡会報告書 <http://danjo.jps.or.jp/post.html>
- 2) データの乱れは♀マウスの生殖周期のせいであると解釈され実験から排除されていたが、♀マウスのみを集めて実験を行うと、ピーク位置が異なる(性差がある)もの、♂マウスのみの時と同程度の分散で収束したとの報告があった。

(2015年11月7日原稿受付)

巻頭言 Preface

将来を見据えた男女共同参画推進
The Future of the Gender Equality Promotion

板倉明子 …… 203
Akiko Itakura

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

はじめに	206
ブラックホールにならない中性子星，分岐点は？	207
マヨラナ粒子の尻尾をつかめ！	207
究極の超重原子核—安定の島をめざして—	208
超高エネルギー宇宙線の起源は？	208
太陽コロナはなぜ熱い？	209
透明マントはできる？ メタマテリアル	209

最近のトピックス Topics

重力波の初の直接検出とその意義

First Direct Detection of Gravitational Waves and Its Importance

田越秀行，中村卓史 …… 210
Hideyuki Tagoshi and Takashi Nakamura

現代物理のキーワード Trends

量子臨界現象—秩序と無秩序の狭間に現れる面白い物理

Quantum Critical Phenomena: Interesting Physics Emerging between Ordered and Disordered Phases

堀田貴嗣 …… 212
Takashi Hotta

梶田隆章博士ノーベル物理学賞受賞記念
「ニュートリノ振動をめぐる素粒子物理の展開」

Special Articles Commemorating the Nobel Prize of Dr. Takaaki Kajita

カミオカンデからスーパーカミオカンデへ：歴史的経緯と研究成果の概要

From Kamiokande to Super-Kamiokande: Short Review of Their History and Achievements

中村健蔵 …… 214
Kenzo Nakamura

ニュートリノ振動の発見を振り返る

Introduction to the Discovery of Atmospheric Neutrino Oscillations

塩澤真人 …… 218
Masato Shiozawa

長基線原子炉ニュートリノ振動

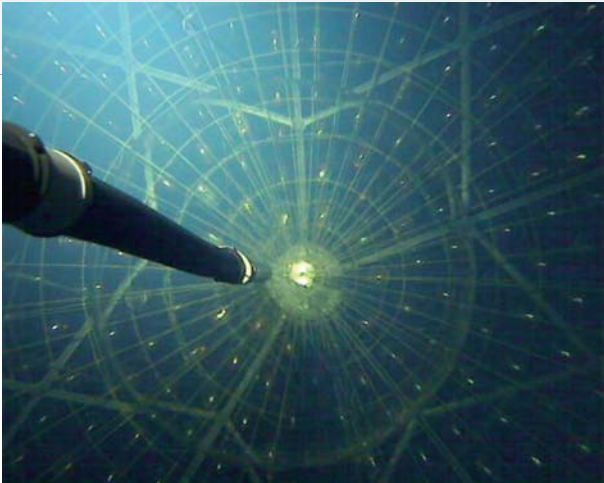
Long Baseline Reactor Neutrino Oscillation

井上邦雄 …… 222
Kunio Inoue

日本における加速器ニュートリノ振動実験：K2KからT2Kへ

Accelerator Neutrino Experiments in Japan: from K2K to T2K

中家 剛 …… 227
Tsuyoshi Nakaya



梶田隆章博士ノーベル物理学賞受賞記念(長基線原子炉ニュートリノ振動)

カムランド禅実験の心臓部であるカムランド中心に吊り下げられたミニバルーン。内部には同位体濃縮したキセノン136を溶かした液体シンチレータが導入され、ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊の探索を通してニュートリノのマヨラナ性(ニュートリノ・反ニュートリノの同一性)を検証します。当初は320kgのキセノンが導入され、後に380kgに増量されました。2016年夏には750kgに拡張される予定です。ミニバルーンの縁部分では周囲の液体シンチレータとの屈折率の違いから背景の蜘蛛の巣状のフレームが歪んで見えています。25ミクロンという薄さのナイロンフィルムで作成したミニバルーンは、黒いチューブを介して外部と接続され、液体シンチレータの入れ替えや純化も行えます。

話題	誰がカンニングを見たか	大関真之	231
話題—身近な現象の物理—	雷の物理とその観測技術	牛尾知雄	235
JPSJの最近の注目論文から	2月号の招待論文から	上田和夫	239
ラ・トッカータ	第45回天文・天体物理若手夏の学校開催報告	北川祐太郎	240
	第60回物性若手夏の学校開催報告	沼倉凌介	242
	2015年度原子核三者若手夏の学校活動報告	千葉陽平, 伊藤隼人, 谷内 稜, 矢島和希	244
	第55回生物物理若手の会夏の学校の報告	牟田寛弥	248
学界ニュース	第4回 Zimanyi Nuclear Theory Medal: 佐々木千尋氏	初田哲男	250
	第30回西宮湯川記念賞: 沙川貴大氏	上田正仁	250
新著紹介			251
掲示板	■人事公募 ■学術的会合 ■その他		253
行事予定			255
日本物理学会誌投稿規定			258
会告	■「マイページ」のご案内 ■会費納入のお願いと未納者への雑誌発送停止のお知らせ ■2017年度の会費減額申込手続き(大学院学生・学部学生)のお願い ■2017年度の論文誌等購読の変更手続きのお願い ■賞および研究助成の候補者の募集について ■2016年秋季大会・講演募集掲載号 ■2016年秋季大会の企画募集 ■2016年秋季大会講演募集要項 ■託児室設置について ■Webページによる講演申込の手順(参加登録を含む) ■講演概要集原稿の書き方 ■2016年3月1日付新入会者 ■日本物理学会入会案内		263
本会刊行英文誌目次			285



表紙の説明

当時の田無市(現在の西東京市)にあった移転前の東京大学宇宙線研究所研究棟前にあって、1999年4月に発足した宇宙ニュートリノ観測情報融合センターの看板を掲げる梶田隆章新センター長と戸塚洋二宇宙線研究所所長(当時)。

ノーベル賞受賞の対象となったニュートリノ振動について梶田氏が国際会議で発表したのは、1998年6月に高山で開催された「Neutrino98」と呼ばれる国際会議である。それから1年を経ずして、研究の重要性を認められてセンターが発足し、梶田氏ご本人のみならず、スーパーカミオカンデ建設に尽力された故戸塚氏にとっても、喜びもひとしおであったと思われる。この研究を先駆として花開いた数々のニュートリノ研究については、「梶田隆章博士ノーベル物理学賞受賞記念」記事をご参照いただきたい。(写真提供:東京大学宇宙線研究所)

00

はじめに

日本物理学会は1946年に設立され、2016年4月に70周年を迎えた。これを記念して「物理学70の不思議」シリーズを1年間にわたり掲載する。

現代物理学は先人の叡智の蓄積に支えられている。わが国のことに限ったとしても、物理学会の70年、前身の日本数学物理学会から数えて140年近くにわたる分厚い歴史は会員にとっての貴重な財産となっている。これらは今後の物理学研究においてかけがえのないものとして受け継がれていくだろう。

会誌編集委員会では、学会設立70年の節目にあたり、現段階で物理学からアプローチされている自然現象を整理し、今後数十年というある程度の長期的スパンで私たちに託された物理学の挑戦と、自然現象の不思議を紹介したい、と着想した。

広範な自然を対象とする物理学の地平の広げ方は様々だ。すでに広く受け入れられている枠組みであっても、実験・理論的な技術的挑戦による精度の追求から新概念に導く分野もあれば、自然の謎を探し出し、より正しく問題設定を行うことから理解を深める、ということに価値がおかれる分野もある。一挑戦と謎—一見直交ベクトルのように見える研究の方向性も、自然現象の中に「不思議」を見出す人々の単純な動機に導かれている。

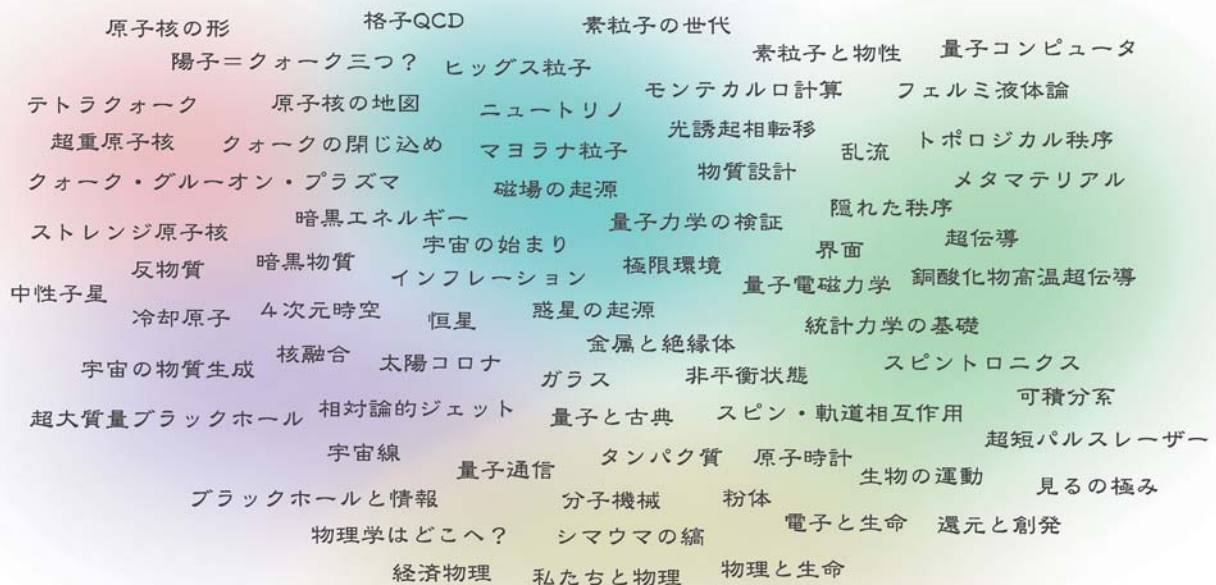
本シリーズは、想定する読者として、物理の基礎教育を受けた学部3~4年生以上とし、次世代の物理学の担い手

へのバトンとしたい。それぞれの記事は0.5ページと短く、先端研究の成果が凝縮されているが、興味をもった内容については本誌他欄などにより理解を深めてほしい。もちろん、各分野の専門家の方々におかれても、自らや異なる研究分野の問題意識を共有するきっかけとしていただきたいと考えている。

本シリーズではトピックとして70を選んだ。物理学の将来の姿を描き、次世代の物理学徒に未来の夢を託そうと考えるとき、分野間交流や横断的な切り口は一つの指針となるのではないだろうか。本シリーズでは、分野内での高いアチーブメントよりむしろ、広範な物理分野に共通する横串となるコンセプトの紹介を求めた。これは、通常の会誌記事の編集、執筆姿勢と趣を異にしており、私たちとしても新たな挑戦であった。

最後に、大学、高等学校等で教育にたずさわる会員にお願いしたいことがある。物理学会誌は会員に配布されているが、本会会員の大多数は大学院で研究室配属を決め自らの専攻を思い定めた後に入会している、という現状がある。本シリーズは、次世代へのバトンである。会員でなくとも、物理学に関心を寄せる若い世代にも「ちょっとした背伸び」感覚で楽しんでいただきたい、と考えている。できれば、学生がふと手に取れるような場所に会誌を置いていただき、バトンの伝達へのご協力を賜りたい。

会誌編集委員会





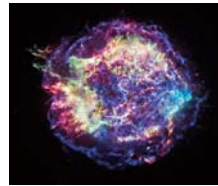
01

ブラックホールにならない中性子星，分岐点は？

中性子星は、超新星爆発後にできる半径10 km程度のコンパクトな超高密度天体であり、1932年に中性子が発見された直後にはその存在が予言され、1967年、パルサーとして見つかった。

中性子星は、重い恒星が超新星爆発したとき中心に残る、中性子物質でできた世の中で最も高密度な天体であるが、その中性子物質が支えられる質量には上限がある。その上限をこえるとブラックホールになる。巨視的なパラメータである質量上限は、一般相対論から導かれる球対称物質の重力平衡に関する方程式と、物質の圧力と密度の関係である状態方程式で決まる。この状態方程式は、核力を含むバリオン間の相互作用を反映している。そのバリオン間の相互作用は、クォークの力学である量子色力学(QCD)から決まる。このように中性子星の研究は、中性子物質の性質を通して、核子やクォークの微視的な世界と密接につながっている。

質量上限を、2つの核子の間の相互作用である2体力だけを考慮して求めると、太陽質量の1.8倍程度になる。しかし、超高密度である中性子星の中心部では、中性子がストレンジクォークを含むハドロンであるハイペロンに変わ



超新星爆発の残骸、カシオペア座A
NASA/CXC/SAO

るプロセスが起こりうる。ハイペロンと中性子の間にはパウリの排他原理が効かないので圧力が下がり、中性子物質は柔らかく、中性子星の質量上限は小さくなってしまう。一方、最近の連星系パルサーの観測から、太陽質量の2倍程度の中性子星が発見されているのだが、このような大きな質量上限は説明できない。

近年、3つの核子の間に働く3体力の研究が進展してきている。3体力は高密度領域において斥力として働くため、中性子星の質量上限を説明するうえで重要になると考えられている。また、格子QCD計算の進展により、クォークの自由度から第一原理的に核力を含むバリオン相互作用を研究することが可能になりつつある。これらの研究をもとに中性子星の質量上限を理解するという、新しい挑戦がはじまっている。

会誌編集委員会

02

マヨラナ粒子の尻尾をつかめ！

物質を構成しているフェルミ粒子(電子・陽子・中性子)には、その相方となる反粒子が別の粒子として存在する。たとえば、電子の反粒子として陽電子が存在し、電子と陽電子は異なる粒子である。しかし「粒子と反粒子の区別がつかない」変わり種のフェルミ粒子が、理論的に予言されている。イタリアの科学者マヨラナ(E. Majorana)が1937年に存在を予言したマヨラナ型フェルミ粒子(マヨラナ粒子)である。予言から80年近く経ったいまでも、マヨラナ粒子はいまだ発見されていない「幻の粒子」である。

マヨラナ粒子はもともと、ニュートリノを記述するために提案された。標準模型では、ニュートリノは質量ゼロの粒子と反粒子が区別できるフェルミ粒子として取り扱われている。しかし、発見されたニュートリノ質量(今年のノーベル賞!)の小ささから、ニュートリノがマヨラナ粒子である可能性は高い。もしそうなら、二重ベータ崩壊に際してニュートリノが放出されない現象が観測されるはずだが、まだ観測例はなく、現在も実験研究が盛んに行われている。

意外なことに超伝導体のなかにも、マヨラナ粒子と同じふるまいをする状態が存在する。超伝導体は2つの電子がクーパー対を組んで凝縮している状態にある。超伝導体の

励起状態として、「電子」を1つ加える励起だけでなく、その反粒子にあたる「正孔」(ホール)を1つ加える励起も可能である。「正孔」はまわりのクーパー対から電子を1つ奪って対消滅し、「電子」を1つ残すことができる。また、その逆過程も可能である。つまり超伝導体中では、「電子」と「正孔」は互いに交換しあうことができる。このとき、粒子(電子)と反粒子(正孔)が区別できない状態が出現してもよい。実際にはマヨラナ粒子の出現にはいくつかの条件が必要だが、トポロジカル超伝導体とよばれる特殊な超伝導体の表面や渦糸中であれば、マヨラナ粒子が出現してもよいことがわかっている。このマヨラナ粒子は、超伝導体がもつ非自明なトポロジーによって保護されているため、外部からの擾乱に対して安定であり、粒子を交換するとき非可換統計に従うというおもしろい性質をもつ。マヨラナ粒子が出現する物理系は複数提案されており、実際にマヨラナ粒子を観測したという実験結果もいくつか報告されているが、詳しい検証はこれからである。

マヨラナ粒子はどんな形で発見されるだろうか？ 素粒子・原子核・物性の各分野で、熱い探索競争が続いている。

会誌編集委員会

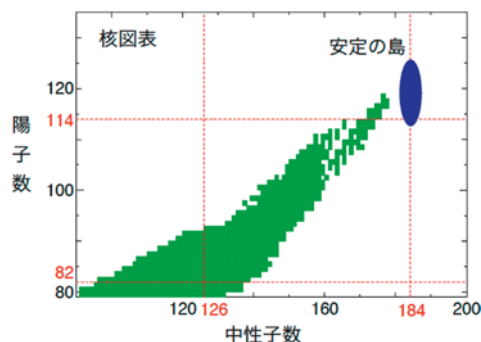
03

究極の超重原子核—安定の島をめざして—

天然に大量に存在する最大の原子番号の原子核は、92番のウランである。それよりも大きな原子番号をもつ原子核（超重原子核）は人工的につくり出すことができるが、いったいいくつかの原子番号の原子核までが存在するのだろうか？

原子核は陽子と中性子からなり、それらは核力で強く結合しているが、陽子数が増えていくと電気的な反発力が大きくなるため、原子核は崩壊しやすくなる。原子番号が大きくなるにつれ、原子核は不安定になっていき、ついには存在しなくなるはずである。現在、118番までの原子核が見つかっているが、119番以上の原子核は見つかるのだろうか？

鍵となるのは原子核の安定性であり、核力とクーロン力のバランスだけでなく、核力から導かれる陽子数や中性子数に現れる魔法数も重要になる。電子の魔法数のように、原子核も1粒子軌道が満杯になると安定になる。安定核における、これまでにわかっている陽子の魔法数は $Z=2, 8, \dots, 50, 82$ であり、中性子の魔法数は $N=2, 8, \dots, 82, 126$ である。とくに、両方とも魔法数（二重魔法数）になる原子核、たとえば質量数208の鉛（ $Z=82, N=126$ ）は非常に安定である。単純に考えると、次の魔法数は $Z=114, N=$



184と予言できるので、原子番号114で質量数298の二重魔法数の原子核は、相対的に安定で半減期が長い可能性がある。変形の効果を入れた詳しい計算によると、この近くにはいくつか安定な原子核の存在が予想されている。横軸を中性子数、縦軸を陽子数として原子核の存在を表す核図表でみると、これらの原子核は既知の核種が分布する領域から離れたところに飛び地のようにかたまっていて、「安定の島」とよばれている。この安定の島の発見をめざして、この領域にあるまだ見ぬ究極の超重原子核を人工的につくる挑戦が続いている。

誌編集委員会

04

超高エネルギー宇宙線の起源は？

この宇宙は静かな環境ではまったくなく、粒子加速のような激しい現象が当たり前のように起こっており、極めて高いエネルギーの粒子も広く存在している。とくに 10^9 電子ボルト（eV）をこえる相対論的な粒子は、宇宙線と総称される。宇宙の環境は粒子の密度が低く、エネルギーのやり取りをして熱的に緩和するには極めて長い時間がかかるため、これらは必然的に非熱的なエネルギー分布をもつ。

宇宙線のエネルギー範囲はじつに10桁以上におよび、 10^{20} eV（16ジュール！）をこえるものの報告例すらある。これは現在の人工の加速器でつくり出せるエネルギーの約1,000万倍であり、宇宙における最も激しい現象と関連していると考えられる。 10^{15} eVくらいまでの宇宙線は、超新星（大質量の星がその一生の最後に起こす爆発）の残骸で加速されているという説が有力である。実際いくつかの超新星残骸からは高エネルギーのガンマ線放射が観測されており、これらは超新星残骸で加速された宇宙線と周辺の物質、または宇宙電子と光子場との相互作用の結果生成されたと考えられており、この説を間接的に支持するものである。

しかしそれ以上のエネルギーへの加速は宇宙環境でも困難であり、そのような超高エネルギー宇宙線の起源は、理

論的にも観測的にも謎のままである。粒子を加速するには、ある領域に閉じ込めたうえで少しずつエネルギーを与えていく必要がある。大きな領域に強い磁場を備えた環境が必要条件であるが、我々の銀河系にはそれが可能な天体は見つかっていない。おそらく銀河系外の、活動的銀河核として知られる極めて活発な天体などが有力視されているが、観測例が多くないこともあり同定にはいたっていない。なお、このように低いエネルギーの粒子を高いエネルギーへと加速させるという考え方は、宇宙線起源の「ボトムアップ」モデルと総称される。他方、極めて大きな質量の未知の素粒子や暗黒物質が崩壊して超高エネルギー宇宙線として観測されるとする「トップダウン」モデルも議論されてきたが、最近の研究からは否定的である。

エネルギー 10^{20} eVの宇宙線の到来頻度は 100 km^2 あたり1年に1個程度と極めて小さく、観測には大きな検出面積と長い観測時間が必要である。 $1,000 \text{ km}^2$ 級の大きな有効検出面積をもった国際共同観測が推進されており、ニュートリノや重力波とともに、電磁波以外の観測手段による新たな宇宙現象の探索がはじまろうとしている。

誌編集委員会



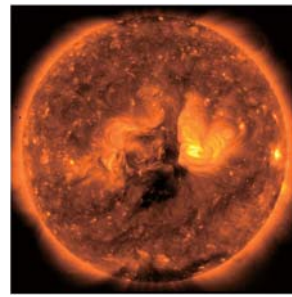
05

太陽コロナはなぜ熱い？

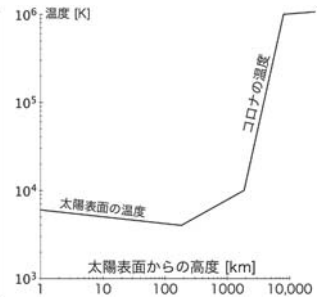
太陽はほぼ黒体放射のスペクトルをもっており、表面の有効温度は約6千Kである。ガスのかたまりである太陽の表面（光球）は、それより外側では散乱が起こらず、光が自由に外に出ていけるようになる面、つまり最終散乱面として定義される。その中心からの距離、すなわち太陽光球の半径は約70万kmである。

太陽の大気に相当するものとしては、光球の外側に厚さ数千kmの彩層があり、温度は光球よりは若干低く5千K程度である。さらにその外側には、希薄なガスであるコロナが高度数万kmにまで広がっていて、その温度は100万Kをこえることが知られている。 $E=k_B T$ から、コロナはX線(!)を発することがわかる(画像左)。星の形成や内部構造とその進化を説明する天体物理学が大成をおさめてきたのに対し、なぜ外層大気であるコロナが太陽の表面や内層大気に比べてここまで高温なのかは、大きな謎のままである。

何かを加熱するには、まずそこへのエネルギーの輸送が必要で、さらにそのエネルギーをそこにある物質(コロナ)の熱エネルギーに転化させる必要がある。エネルギー源は太陽そのもの以外には考えられないが、熱力学の直感に反



X線望遠鏡「ひので」で見た太陽とその大気(国立天文台/JAXA提供)



する形で、低い温度の表面から外側の高温領域へとエネルギーが運ばれているのである。これには電離したガス、すなわちプラズマと、そこに存在する磁場が深く関係していると考えられている。磁場をとまなうプラズマは、極めて興味深い種々の現象を引き起こす。「磁気流体波動効果」や「磁力線つなぎかえ」の際のエネルギー放出機構などが議論されており、磁場のエネルギーがそこでのプラズマ現象、爆発現象などを通じて、なんらかのメカニズムで熱に転化されると考えられている。星がコロナをもち、これが高温に加熱されるのは普遍的な現象であることが、太陽以外の星のX線観測から知られており、理論と観測の両面から研究が続けられている。

会誌編集委員会

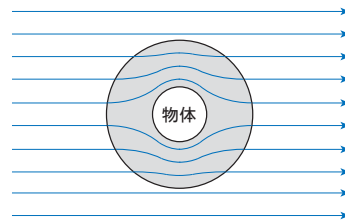
06

透明マントはできる？ メタマテリアル

物質の中を光はどう進むのか？ 物が見えるとはどういうことか？ 多くの人々が興味を引かれる話題であろう。光は一樣な物質の中では直進し、屈折率の異なる物質の間を通過するときは、スネルの法則にしたがって折れ曲がる。物質に屈折率の分布がある場合は、物質中のマクスウェル方程式にしたがい、屈折率の分布に応じた曲線を描くだろう。この分布を巧妙に調節できれば、光の進む方向を自在に操ることができそうだ。しかし、物質の種類と組み合わせは無数にあるとはいえ、それらを用いて思いどおりの屈折率分布をつくるのは至難の技である。

このような要求に応えてくれるかもしれない夢の物質が、メタマテリアルとよばれる人工物質だ。これはある特殊な形の微小金属片を配列したもので、金属片中の電子が自由に動けることを利用している。その形状と配列をうまく工夫してやると、構造物の大きさや配列の間隔よりも波長が長い電磁波に対する誘電率と透磁率を「設計」することができる。我々の目に見える光も電磁波の一種なので、原理的にはこのアイデアを応用できるというわけだ。

とくに透磁率を設計できるという点は、「メタマテリアルという考え方」のキーポイントとなっている。屈折率は



本誌70巻11号、現代物理のキーワード「屈折率って何？」(迫田和彰)より

比誘電率と比透磁率のそれぞれの平方根の掛け算(掛ける真空の光速)で与えられ、光の進行方向を決める。一方、これらの割り算で与えられるインピーダンスは、光の反射の具合を支配する。これらの分布を同時に、そして巧みに調整すれば、図のように光が障害物を避けて透過するように仕向けることも可能となる。これはまさに、『ドラえもん』の「透明マント」にほかならない。少なくとも、波長や見る角度に制限はあるもののマイクロ波領域では図と類似の状況が実証されている。文字通りの「透明マント」に向けてクリアすべき課題は多いが、じつに魅力的なアイデアだ。

ほかにも「負の屈折率」などのおもしろい特徴をもつメタマテリアルの開発が進んでいる。光を思いのままに操るための挑戦から目が離せない。

小野田勝(秋田大院)、会誌編集委員会

重力波の初の直接検出とその意義

1. aLIGOの発見

2016年2月12日午前0時30分(日本時間), アメリカのaLIGO (advanced Laser Interferometer Gravitational wave Observatory) は, 約3,000 km離れた2台の検出器により質量が $36^{+4}_{-4}M_{\odot}$, $29^{+4}_{-4}M_{\odot}$ (M_{\odot} は太陽質量)の連星ブラックホールからの重力波を2015年9月14日に検出したと高らかに発表した. 重力波とはアインシュタインの一般相対性理論で予言されていた, 時空のゆがみが光速で波動として伝搬する現象である. ハルスとテイラーにより発見されたPSR1913+16という連星中性子星の軌道周期が, 重力波放出によって減少する割合から間接的に既に存在は確認されていたが, 直接検出は初めてである.

aLIGOは, ルイジアナ州リビングストンと, ワシントン州ハンフォードに建設された, それぞれ腕の長さ ≈ 4 kmのレーザー干渉計(図1)である. aVirgoはイタリアにある腕の長さが3 kmのもので現在改良中, また日本のKAGRAは岐阜県飛騨市の神岡鉱山内で建設中の腕の長さが3 kmのレーザー干渉計である. 前身のLIGOとVirgoは2002年から2011年にかけて観測を行ったが, 重力波を検出することはなかった. その後, より高感度化を目指したアップグレードをLIGOは行った.

aLIGOが正式な観測期間に入る直前の, 2015年9月14日9時50分45秒(協定世界時), 2台のLIGO検出器はブラックホール連星の合体によって発生した重力波を観測し

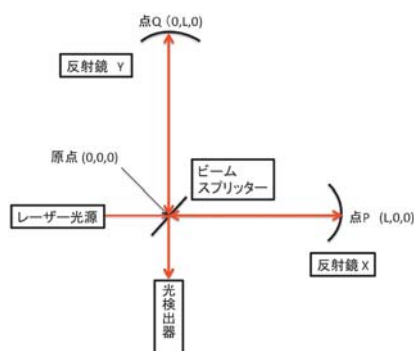


図1 レーザー干渉計の原理. 重力波がない時にはレーザー源からの光はビームスプリッターで右と左に2等分され, 端の鏡で反射されて同時にビームスプリッターに戻ってくる. しかし, 重力波がやって来ると時空のゆがみのために同時には戻って来ないので干渉パターンが発生する. これを光検出器で検出して重力波の存在を知ることができる装置である. レーザー干渉計の腕の長さを L , 重力波により生じる腕の長さとの差を ΔL とすると, それらと重力波の振幅 h との関係は $h = \Delta L/L$ と表される. 重力波は計量テンソルの揺らぎであるため重力波の振幅 h は無次元であることに慣れないかもしれないが, 注意して欲しい.

た.¹⁾ 検出された重力波は35 Hzから250 Hzまで振動数が上昇し, 最大時の振幅は 1.0×10^{-21} となった. 元々のノイズ入りの振幅は $h \sim 10^{-18}$ もあり, どこに重力波があるか全く解らないnoisyなものである. しかし, 詳細な解析の結果, 得られた信号のSNR(信号雑音比)は24で, ノイズによって発生するのは, 20万年に1回以下, ノイズである確率は 2×10^{-7} 以下で有意さは 5.1σ 以上である. 一般相対性理論による理論波形と較べることにより, 合体前のブラックホールの質量はそれぞれ $36^{+4}_{-4}M_{\odot}$, $29^{+4}_{-4}M_{\odot}$ で終状態のブラックホールの質量は $62^{+4}_{-4}M_{\odot}$, 無次元化されたカーブラックホールの角運動量パラメーター a/M は $0.67^{+0.05}_{-0.07}$, 光度距離は 410^{+160}_{-180} Mpc, 赤方偏移は $0.09^{+0.03}_{-0.04}$ であった. 何故質量だけからブラックホールと言えるかということ, 普通の星ならこんな高振動数の重力波は放出できないし, 中性子星には約 $3.2M_{\odot}$ という上限質量が存在するからである. また, 2台しか稼働していなかったため, 位置の決定精度は600平方°程度の南天だということしかわからない. なお, イベントの名前はGW150914と名付けられた.

2. GW150914は我々に何を示したか?

次の5つの事項が少なくとも考えられる.

- 1) 重力波の初の直接観測
- 2) 連星ブラックホールの初めての存在確認
- 3) ブラックホールの準固有振動(ringing tail)の存在確認の可能性
- 4) 宇宙で最初にできた種族III星の存在確認の可能性
- 5) 継続時間の短いガンマ線バーストがブラックホール-ブラックホール連星の合体である可能性.

1)と2)は間違いのないもので, 直ちにノーベル物理学賞に値するだろう. 3)は, 図2の最後の方に何となく見えている減衰振動に関するもので, 裸の特異点がないという宇宙検閲官仮定のもとで唯一許されているカーブラックホールになっているかどうかという, アインシュタイン理論の強い重力場中での確認のために必須である. 中野らによる研究では 5σ レベルで確認するためには, 準固有振動だけで $SNR > 35$ が必要であるが,²⁾ 今回のイベントは全体で $SNR = 24$ なので足りない. しかし, aLIGOやKAGRAの最終感度では1年間に今回の100倍くらいのイベント数を期待できる. 準固有振動が確認されればノーベル物理学賞に値するだろう. 4)は今回のブラックホールの質量がブラックホール候補X線星CygX-1等の質量の2-3倍以上ある大きなものである理由と関係している. 太陽のような,

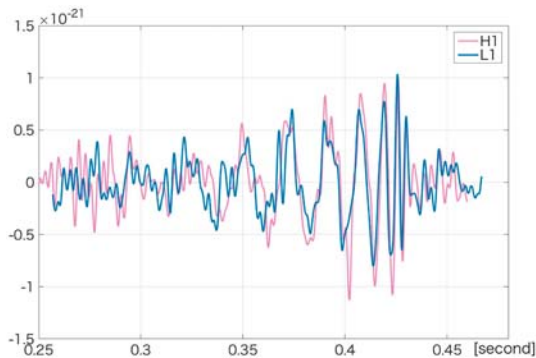


図2 2つのaLIGOで検出された重力波波形。両者への重力波の到着時間を考慮して、時間はずらしてある。細部では違うものの全体としては両者の一致が見て取れる。振幅は生データの $h \sim 10^{-18}$ より3桁も小さい。

質量にして2%程度の金属量の星では進化の後半段階で、炭素以上の金属の吸収線のために質量放出が起こる。GW150914のような大きな質量のブラックホールを作るには金属量の少ない星、例えば宇宙で最初にできた水素とヘリウムしか存在しない種族III星が候補である。種族III星は赤方偏移 $z=10$ くらいの過去にできるが、ブラックホール連星が重力波放出で合体するのに要する時間は連星形成時の公転半径の4乗に比例し、現在合体することが可能である。aLIGOが発表したこのブラックホール起源に関する文献³でも、種族III星起源が期待されており、衣川らの2年前の予言⁴を引用している。何故 $\sim 30M_{\odot}$ - $30M_{\odot}$ のブラックホール連星なのかを簡単に言うと $\sim 30M_{\odot}$ の種族III星は、小さい半径で一生涯を終わるのでそのままの質量でブラックホールになる。一方、もっと質量の大きな種族III星は大きな半径で一生涯を終わるので、相手の星が外層と相互作用して、外層の大半を失ってブラックホールになるので結局 $\sim 30M_{\odot}$ - $30M_{\odot}$ になる。あと10個くらい同様のイベントが見つかれば、種族III星起源が確定するだろう。種族III星が過去に存在したことは理論的には疑いようがないが、未だその確認がないので、これもノーベル物理学賞に値するだろう。5)はFermi衛星がGW150914の0.4秒後に50 keV-4.8 MeV領域でGW150914と無矛盾な方向からの継続時間約1秒のガンマ線イベントを発見した。⁵これが、同じものだとすると、継続時間の短いガンマ線バースト(SGRB)をジェットの少し横から見たのと無矛盾である。GW150914には大量の回転エネルギー($\sim 10^{55}$ erg)があり、SGRBのブラックホール連星説が中性子星連星説に替わって議論され始めている。

3. 日本グループの追観測

今回の重力波検出では、日本グループによる追観測も行

われている。日本では、重力波発生源天体からの電磁波やニュートリノ信号検出のための、Japanese Collaboration for Gravitational-Wave Electro-Magnetic Follow-up Observation (J-GEM)が組織され、このJ-GEMと国際宇宙ステーション搭載の全天X線監視装置MAXIは、LIGO-Virgoと追観測パートナーとしての協定(MOU)を結んで、追観測の準備を進めてきた。J-GEMに参加する、南天にある名古屋大学のB&C 61 cm望遠鏡において9月20日から26日に追観測が行われ、東京大学木曾観測所のシュミット望遠鏡の広視野カメラKWFCでも9月18日に限界等級が約18等級で24平方度の観測が行われた。いずれの観測でも有意なイベントは検出されていない。MAXIは全天を約90分で観測可能であるが、今回の到来方向の誤差領域の90%はイベント発生後30分で観測された。そして、 1×10^{-9} erg/s/cm²という 3σ の上限値を得た。

4. KAGRAの意義

aLIGOの記者会見での、日本人記者のKAGRAの今後の役割についての質問に対して、aLIGOの責任者が1) KAGRAは唯一地下にある装置である。2) KAGRAは唯一低温鏡を使う装置である。3) KAGRAが参加することで、どの方向から重力波が来ても、到来したかわかる体制ができる。と明確に答えていた。加速器の新粒子探しのよう、先に見つけられると終わりという話ではない。ET (Einstein Telescope)という将来計画では、地下に腕の長さ10 kmで低温鏡を使ったレーザー干渉計を作る計画である。この装置が動き出すと今回のaLIGOの10万倍の数の重力波源が見つかるだろう。ETの建設のためにもKAGRAの稼働は必須である。今回の発見はガリレオガリレイが自作の望遠鏡で初めて月を見たことに対応する。その後の電磁波によって我々が得た宇宙の知見は膨大である。つまり、我々は重力波によって解き明かされる全く新しい世界の扉を少しだけ開けた瞬間に在るのであり、その奥には膨大な智の宝庫が待っているのだ。

参考文献

- 1) B. P. Abbot, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **116** (2016) 061102.
- 2) H. Nakano, T. Tanaka and T. Nakamura: Phys. Rev. D **92** (2015) 064003.
- 3) B. P. Abbot, *et al.*: Astrophys. J. Lett. **818** (2016) L22.
- 4) T. Kinugawa, K. Inayoshi, K. Hotokezaka, D. Nakauchi and T. Nakamura: Mon. Not. R. Astron. Soc. **442** (2014) 2963.
- 5) V. Connaughton, *et al.*: arXiv: 1602.03920.

田越秀行<大阪市立大学大学院理学研究科 tagoshi@sci.osaka-cu.ac.jp>

中村卓史<京都大学大学院理学研究科 nakamura.takashi.4w@kyoto-u.ac.jp>

(2016年2月25日原稿受付)

*1 図1でビームスプリッターと鏡の間の距離を腕の長さと呼ぶ。

量子臨界現象—秩序と無秩序の狭間に現れる面白い物理

Keyword: 量子臨界現象

1. はじめに

一般に、温度を変化させると、物質は相転移を起こすことが知られている。身近な例として、氷が融けて水になったり、水が気化して水蒸気になったりする現象があげられる。また、磁石の温度を上げると磁性を失ってしまうことがあるが、これも相転移現象の一例である。マクロな物質を構成するミクロな構成要素が相互作用によって秩序化している状態が、その構成要素の熱揺らぎによって壊されてしまう、というのが相転移の簡単な理解である。

磁石を例にとって考えてみよう。この場合、ミクロな構成要素とは電子のスピンであり、スピンは上向きと下向きの自由度をもっている。図1にあるように、絶対零度付近では、スピン間の相互作用によってスピンの整列し、スピン秩序状態、たとえば反強磁性状態が生じる。縦軸に沿って温度を上げていくと、次第に、熱揺らぎによってスピンの向きが頻繁に入れ替わるようになり、ある温度でついに秩序が壊され、非磁性状態に転移してしまう。この温度が臨界温度であり、反強磁性状態から非磁性状態への転移の場合は、ネール温度と呼ばれる。

ところで、上記の議論だと、熱揺らぎの効果で秩序が破壊されることになるので、熱揺らぎのない絶対零度では、相転移は起こらないことになってしまう。しかし、実際には、図1に示すように、絶対零度近傍で磁性体に圧力を加えるとある臨界圧力で磁気秩序が壊され、相転移を起こすことがある。これは、通常の相転移とは区別して、量子相転移と呼ばれている。熱揺らぎは抑えられているのに、なぜ秩序が壊されるのだろうか。

2. 量子揺らぎ

大学で新しく学ぶ物理の一つとして、量子力学がある。これは、原子サイズのスケールにおける物体の運動を記述するものであり、電子の運動も、当然、量子力学によって理解されることになる。量子力学を学ぶと、いくつか不思議なことに会う。その代表例の一つが、不確定性原理である。電子のようなミクロなサイズの物体の運動量と位置は、同時に正確には決めることができない、というのである。この不確定性原理から、面白いことがわかる。絶対零度でも物体は静止しないのである。

古典的には、温度は系の構成要素の運動エネルギーの尺度であり、絶対零度は運動が停止することを意味するが、量子力学では、絶対零度でも運動が停止する（位置が確定する）ことはなく、いわゆる零点振動が残る。量子力学的

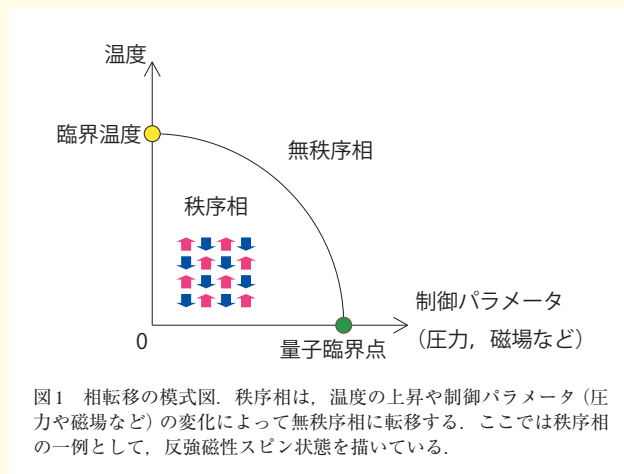


図1 相転移の模式図。秩序相は、温度の上昇や制御パラメータ（圧力や磁場など）の変化によって無秩序相に転移する。ここでは秩序相の一例として、反強磁性スピン状態を描いている。

な粒子は、波動（遍歴）と粒子（局在）の2つの「顔」（二重性）を持つ。遍歴性、すなわち運動エネルギーを得する効果と、局在性、すなわちポテンシャルエネルギーを得する効果のせめぎ合いの結果、両者の顔をほどほどに立てるところで折り合いをつけようとして、零点振動が生じることになる。これは、運動量の演算子と位置の演算子が非可換であることに起因する。零点振動があるために、絶対零度における揺らぎ、すなわち量子揺らぎが生じるのである。

絶対零度近傍において、磁場や圧力などの制御パラメータを変化させたとき、量子揺らぎによって秩序状態が壊されるパラメータの値を量子臨界点と呼ぶ。量子臨界点近傍において、強い量子揺らぎによって新奇な基底状態および低エネルギー励起状態が生じることが期待され、それらを量子臨界現象と総称している。量子臨界点近傍で新奇な物性を探索することが、現代の物性物理学における研究トレンドの一つになっている。

3. 量子スピン系

量子揺らぎの効果をもう少し具体的に見てみよう。簡単な例として、2つの原子に電子が1つずつ存在しているとす。電子は、量子力学的な効果により、時折、隣の原子に跳び移ることができる。跳び移りのエネルギー t は、電子の波動関数を用いて計算することができる。同じ原子サイト上に、上向きスピンと下向きスピンを持つ電子が存在するとき、 U という短距離クーロン斥力が発生するとしよう。この系を t についての2次摂動で解析すると、隣合う電子スピンに対するハイゼンベルグモデルが得られる。

$$H = JS_1 \cdot S_2 = JS_1^x S_2^x + J(S_1^+ S_2^- + S_1^- S_2^+)/2. \quad (1)$$

ここで、交換相互作用 $J=4U/t^2$, $\mathbf{S}_j=(S_j^x, S_j^y, S_j^z)$ は原子サイト j における電子スピン, $S_j^\pm=S_j^x \pm iS_j^y$ である。

式(1)の右辺第1項は、隣合うスピンを反対方向に整列させる、つまり反強磁性秩序を作る効果であるのに対し、第2項は、隣合うスピンの向きを反転させる、つまり秩序を壊す効果であり、これが量子揺らぎの源泉となる。第1項のみであれば、反強磁性状態が基底状態となるが、そこに第2項が加わると、反強磁性状態は量子揺らぎの影響を受ける。低次元では量子揺らぎの効果が強く効き、特に1次元では、第1項から生じる秩序は壊されてしまう。¹⁾

圧力を加えると、原子間距離は小さくなるので、一般に t は大きくなる。電子は局在するよりも遍歴して系のエネルギーを下げようとするため、圧力を加えることで絶縁体的な磁性状態(秩序相)から金属的な非磁性状態(無秩序相)に転移することがしばしば起こる。特に、反強磁性体に圧力を加えて金属化した場合、量子臨界点近傍で異方的超伝導が生じることが知られており、高温超伝導体とも関連して、活発に研究が行われている。

4. 重い電子系

量子揺らぎによって生じる面白い現象の典型例として、重い電子がある。²⁾ これは、新しい素粒子というわけではなく、希土類化合物やアクチノイド化合物において、電子の有効質量が、裸の電子質量の百倍から時には千倍にも大きくなるように見えるという現象である。実験的には、温度を T として、低温における電子比熱 $C=\gamma T$ や電気抵抗 $R=AT^2$ の係数 γ や A の増強として観測される。

重い電子の出現は、量子力学的には遍歴と局在のせめぎ合い、ということになるが、もう少し具体的に考えてみよう。まず、遍歴性については、近藤効果が重要なカギになる。近藤効果とは、もともと、極微量の磁性不純物を含む金属における電気抵抗極小現象に端を発する問題であったが、その本質は、局在磁気モーメントと伝導電子の混成による非磁性基底状態の形成であることがわかっている。近藤効果と名付けられていることからわかるように、その解明には日本人の研究者が大きく貢献し、その結果、現在では金属中の孤立磁性原子の振る舞い(いわゆる不純物近藤効果)は、ほぼ完全に理解されている。³⁾

一方、希土類やアクチノイド化合物における磁気モーメントの振る舞いは複雑である。伝導電子のスピン分極を介した Ruderman-Kittel-槽谷-芳田 (RKKY) 相互作用によって、磁気モーメントは秩序化しようとする。しかし、近藤効果による磁気モーメントと伝導電子の混成は、磁気モー

メントの消失をもたらす。セリウムやウランを含む金属間化合物では、伝導電子と局在 f 電子の間の混成強度 V の増大とともに近藤効果が優勢になって、基底状態は磁気秩序状態から非磁性のフェルミ液体状態へと移り変わる、すなわち、量子相転移することがある。セリウム化合物やウラン化合物では、 V は t と同様、圧力の印可とともに増加するので、ちょうど図1の横軸を左から右に動いていく変化となる。

局在性をもたらす RKKY 相互作用と遍歴性をもたらす近藤効果が拮抗する量子臨界点付近において、有効質量の大きいフェルミ液体状態が実現することが知られており、これが重い電子系である。重い電子系では、遍歴と局在の狭間で顕在化する量子臨界揺らぎが非フェルミ液体状態や異方的超伝導などの現象を生み出すと考えられており、現在盛んに研究されている。

5. 新しい量子臨界現象を目指して

秩序・無秩序状態の間の量子相転移点の近傍で面白い物理が生じることを簡単に紹介してきた。これまでは、磁気秩序状態、特に、反強磁性絶縁体状態の近傍の量子臨界現象がよく調べられてきたが、その秩序状態が強磁性である場合も興味深い。これは、強磁性ウラン化合物において、強磁性相の近くで超伝導状態が見つかったことで研究が活発化したという経緯がある。⁴⁾ また、イッテルビウム化合物においては、量子臨界点がゼロ磁場近傍に存在するという議論がなされるとともに、⁵⁾ 価数揺らぎによる重い電子状態とその性質が議論されている。⁶⁾

さらに、非磁性秩序相近傍の量子臨界現象にも研究の手が伸びている。特に、プラセオジウム化合物における四極子秩序状態近傍の超伝導に対して、四極子揺らぎの影響が議論されている。^{7,8)} 今後、八極子秩序相やさらに高次の多極子秩序相近傍の量子臨界現象に研究が展開され、風変りな超伝導や基底状態が発見されることを期待している。

参考文献

- 1) 川上則雄, 梁 成吉:『共形場理論と1次元量子系』(岩波書店, 1997年).
- 2) 上田和夫, 大貫惇睦:『重い電子系の物理』(裳華房, 1998年).
- 3) 近藤 淳:『金属電子論』(裳華房, 1983年).
- 4) 青木 大, J. Flouquet: 固体物理 **47** (2012) 115.
- 5) 中辻 知: 固体物理 **47** (2012) 13.
- 6) 渡辺真仁, 三宅和正: 固体物理 **47** (2012) 3.
- 7) 鬼丸孝博, 榊原俊郎: 固体物理 **47** (2012) 57.
- 8) K. Matsubayashi, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **109** (2012).

堀田貴嗣<首都大学東京理工学研究科 hotta@tmu.ac.jp>
(2015年9月14日原稿受付)

ニュートリノ振動をめぐる素粒子物理の展開

カミオカンデからスーパーカミオカンデへ：
歴史的経緯と研究成果の概要

中村 健蔵 〈東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 kenzo.nakamura@ipmu.jp〉

ニュートリノ振動の物理を簡単に解説した後、カミオカンデとスーパーカミオカンデの建設のいきさつと研究の歴史など、および主な研究成果の概要を紹介する。

1. はじめに

陽子崩壊の発見を目指して建設されたカミオカンデは、重力崩壊型超新星爆発により放出されるニュートリノを世界で初めて検出する大成果を挙げ、小柴昌俊氏がノーベル賞を受賞した。また、スーパーカミオカンデは大気ニュートリノ振動を発見し、梶田隆章氏が神岡実験で2つめのノーベル賞を受賞した。以下、ニュートリノ振動について簡単に触れた後、カミオカンデとスーパーカミオカンデについて歴史的経緯を述べ、またその成果についてこの小特集で別途取り上げられるテーマ以外のものを紹介する。

2. ニュートリノ振動

ニュートリノには3種類（あるいは3世代）のフレーバー、電子ニュートリノ (ν_e)、ミューニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_τ) があり、それぞれに反ニュートリノがあることが知られている。これらのニュートリノを「フレーバーの固有状態」あるいは「フレーバーニュートリノ」と呼ぶ。フレーバーニュートリノ ν_α ($\alpha=e, \mu, \tau$) は進行方向のスピンの向きが左巻きの状態では生成されることが実験的に知られており、右巻きのニュートリノは観測されていない。また、反ニュートリノは進行方向のスピンの向きが右巻きで、左巻きの反ニュートリノは観測されていない。場の理論では、ディラック粒子が質量を持つためには右巻きと左巻きの両方が必要である。このため、素粒子の標準モデルではニュートリノの質量は0とされた。実際、トリチウムのベータ崩壊などニュートリノの質量を測定する実験や宇宙マイクロ波背景放射の観測から、電子ニュートリノの質量は電子の質量の100万分の1程度の上限值しか知られていない。ニュートリノ振動の発見により、フレーバーニュートリノが時間の経過と共に混じり合うことと、ニュートリノが0でない有限の質量を持つことが分かった。これは、フレーバーニュートリノが3種類の「質量の固有状態」のニュートリノ (ν_1, ν_2, ν_3) のコヒーレントな重ね合わせであることを意味する。これを

$$\nu_\alpha = \sum_j U_{\alpha j} \nu_j, \quad \alpha = e, \mu, \tau$$

と書くと、 $U = (U_{\alpha j})$ は3行3列のユニタリ行列で、PMNS行列と呼ばれる。ニュートリノがディラック粒子の場合、PMNS行列は基本的なパラメータとして3個の混合角（回転角） $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ とCPを破るディラック位相 δ により特徴付けられ、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ として

$$U = \begin{bmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{bmatrix}$$

と表される。^{*1}

フレーバーの固有状態のニュートリノ ν_α が $t=0$ でエネルギー E ($E \gg m_j$, 従って相対論的) で生成され真空中を伝播すると、質量の固有状態の時間発展による位相変化が異なるため、その重ね合わせであるフレーバーニュートリノは量子力学的な干渉効果により E と t (あるいは飛行距離 $L = ct$, c は真空中の光速) およびPMNS行列のパラメータと Δm_{ij}^2 の関数としてある確率 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta; E, L = ct)$ で別のフレーバー β のニュートリノに変化する ($\alpha \neq \beta$, この場合は出現確率と言う)。 $\alpha = \beta$ の場合は元のフレーバーのニュートリノのままである確率で、生存確率と言う。ここで ν_i の質量を m_i , $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ とした。 Δm_{ij}^2 の逆数はニュートリノ振動確率の基本的な波長（振動長） $L_{ij} = 2.48 \text{ km } E [\text{GeV}] / |\Delta m_{ij}^2| [\text{eV}^2]$ を与える。 $\Delta m_{12}^2 + \Delta m_{23}^2 + \Delta m_{31}^2 = 0$ から、 Δm_{ij}^2 のうちの2つが独立で、通常、絶対値が最小のものを $\Delta m_{21}^2 > 0$, もう一つを Δm_{32}^2 と選ぶ。こうすると、 Δm_{21}^2 は太陽ニュートリノ振動、 Δm_{32}^2 は大気ニュートリノ振動に伴うものとなる。ニュートリノの質量の大きさの順は分かっていないが、 $m_1 < m_2 < m_3$ と $m_3 < m_1 < m_2$ の2つの可能性があり（前者を順質量階層、後者を逆質量階層と言う）、それを決めることは今後のニュートリノ振動実験の課題の一つである。

^{*1} ニュートリノは電氣的に中性のフェルミオンであるため、粒子と反粒子の区別が無い（粒子と反粒子が同じ）マヨラナ粒子の可能性がある。マヨラナニュートリノに対するPMNS行列には独立なパラメータとしてCPを破る2個のマヨラナ位相が加わるが、ニュートリノ振動の現象にはマヨラナ位相は現れない。

表1 Particle Data Groupが推奨する最新のニュートリノ振動のパラメータ。¹⁾

Parameter	Best-fit
Δm_{21}^2 [10^{-5} eV ²]	7.53 ± 0.18
$ \Delta m_{32}^2 $ (順階層) [10^{-3} eV ²]	2.42 ± 0.06
$ \Delta m_{32}^2 $ (逆階層) [10^{-3} eV ²]	2.49 ± 0.06
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.014}_{-0.013}$
$\sin^2 \theta_{23}$ (順階層)	$0.514^{+0.055}_{-0.056}$
$\sin^2 \theta_{23}$ (逆階層)	0.511 ± 0.055
$\sin^2 \theta_{13}$	0.0219 ± 0.0012

表1にこれまでの実験で定められたニュートリノ振動のパラメータの値を示す。¹⁾ 特徴的なことがいくつかあるが、まず第一に $\Delta m_{21}^2 / |\Delta m_{32}^2| \sim 1/30$ と大きな差があることで、 Δm_{21}^2 による振動が十分に成長しない距離では $|\Delta m_{32}^2|$ による振動のみを考えれば十分である。また、 θ_{13} が他の混合角に比べて小さい。これらのことからいくつかのニュートリノ振動チャンネルは、少なくとも初期の研究段階では2種類のニュートリノの振動に帰着できた。例えば、大気ニュートリノ振動は $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動として取り扱われた。2種類のフレーバーニュートリノの間のニュートリノ振動の確率は簡単な式で与えられる。³⁾ 他の混合角 θ_{12} と θ_{23} はいずれも大きく、特に大気ニュートリノ振動の混合角 θ_{23} は最大混合角 45° あるいはそれに非常に近い値である。これは、大気ニュートリノ振動が発見しやすかったことを意味する。

3種類のフレーバーのニュートリノ振動の確率については、例えば文献2に与えられている。なお、物質中のニュートリノ振動、MSW効果については述べる余地がないが、文献3に簡単な解説がある。

3. カミオカンデからスーパーカミオカンデへ

1974年のジョージヤイ (H. Georgi) とグラシヨー (S. L. Glashow) による大統一理論は陽子の崩壊を予言し、1978年～1979年頃には minimal $SU(5)$ による陽子の寿命が、例えば $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 崩壊で $\tau_B \sim 10^{31 \pm 1}$ 年 (B は崩壊の分岐比) と計算され、カミオカンデやIMBのような数千トン級の第一世代陽子崩壊実験が建設されて発見を競った。アメリカではカミオカンデのライバルとなった8,000トンの水チェレンコフ検出器のIMB実験が1982年7月に開始されている。日本でも1982年初頭にカミオカンデ地下実験室空洞の掘削が開始され、翌年の7月には完成してデータ収集が始まっている。

カミオカンデのデータ取得開始から2ヶ月程で、 $\mu \rightarrow e$ 崩壊からの電子のスペクトルが15 MeVくらいまできれいに見えていることから、検出限界を10 MeV以下に下げれば太陽ニュートリノが観測できるとの小柴氏の提案により、外来ノイズを遮蔽するため、検出器タンクの外部にも光電子増倍管を備えた水の層(アンタイカウンター)を持ち、また光電子増倍管の信号電荷のみを測定するそれまでの回

路からタイミングも測定する回路へアップグレードを図るカミオカンデ2が構想された。同時に、太陽ニュートリノ測定の実験精度を十分上げるためにはカミオカンデのサイズでは限界があり、スーパーカミオカンデの提案に至ったという。アメリカから研究者が加わり国際共同実験となったカミオカンデ2への改造は、さらに地下水や鉱山内の空気に含まれる放射性的ラドンガスからのバックグラウンドを低減するため純水の循環装置などの設置も伴ったが、これらの努力が実って超新星1987Aからのニュートリノ検出という大成果が得られ、また太陽ニュートリノの観測にも成功した。

大気ニュートリノ振動はカミオカンデの時代にその兆候が得られているが、スーパーカミオカンデの予算要求を開始した時点では、実は予算獲得の正当化を図るためにそれを主目的として特に強く主張するまでには至っていなかった。スーパーカミオカンデに予算が認められ、1991年度から5年の計画で建設が開始されてからも、カミオカンデの運転とデータ解析、水チェレンコフ検出器による電子と μ 粒子の識別精度をKEKの12 GeV陽子加速器からのビームを用いて検証する実験などが行われていた。こうして、1994年に発表されたカミオカンデによる大気ニュートリノ事象の μ/e 比の天頂角分布の測定結果は、それまで主張していた異常(予想より ν_μ が少ない)に比べ、かなり大気ニュートリノ振動の可能性を信じさせるものであった。実際、このデータを見て、KEKの菅原寛孝所長(当時)がこれを人工的に発生させたニュートリノで検証するため、KEKからスーパーカミオカンデへの長基線ニュートリノ振動実験(後にK2Kと名付けられた)を行うことを決断した。従って、スーパーカミオカンデの建設の最終段階から観測が開始された頃には十分に大気ニュートリノ振動の発見への期待が高まっていた。

スーパーカミオカンデの実験室空洞掘削は1991年12月から開始されたが、それに先立つ1991年3月にIMB実験が測定器の水漏れを補修できずに終了している。このためIMBグループの主力メンバーはスーパーカミオカンデに参加を打診し、アンタイカウンター部分などを担当することとなった。スーパーカミオカンデの建設は1995年12月に終了し、調整運転を経て1996年4月1日に正式に観測を開始した。純水3,000トンのカミオカンデに対し、5万トンのスーパーカミオカンデの威力は絶大で、実験開始後2年の1998年に大気ニュートリノ振動の発見を宣言した。その後、1999年には世界初の長基線ニュートリノ振動実験K2Kが始まり、6月19日にスーパーカミオカンデで記念すべき最初の事象が観測された。しかし、周知の通り2001年11月12日に測定器底部の1本の光電子増倍管の破損に伴い瞬時に約60%の光電子増倍管を失う事故が発生した。この危機を当時の実験責任者、故戸塚洋二氏の抜群

のリーダーシップで乗り切り、1年足らずで約半分の光電子増倍管数のスーパーカミオカンデ2として再建することができた。2006年には当初の光電子増倍管数に戻してスーパーカミオカンデ3、2008年には電子回路をアップグレードしてスーパーカミオカンデ4として現在に至っている。また、2010年からT2K実験が正式にデータ収集を開始した。

4. 神岡実験の主な成果

神岡実験の水チェレンコフ検出器では、チェレンコフ光として検出できる visible energy が数 MeV から数 10 MeV の領域で太陽ニュートリノの観測と超新星爆発からのニュートリノの観測、それ以上の領域で陽子崩壊の探索と大気ニュートリノの観測、長基線ニュートリノ振動実験が主な研究課題となる。ここでは陽子崩壊、太陽ニュートリノ、超新星ニュートリノについてカミオカンデとスーパーカミオカンデの主な成果を簡単に紹介する。

4.1 陽子崩壊の探索

当初のアンタйкаウンターを持たない測定器をカミオカンデ1と言う。カミオカンデ2と併せ、計 3.76 kton・yr の exposure (検出器の有効質量と観測時間の積) の観測からは核子の崩壊事象は発見されず、 $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 崩壊に対して $\tau/B > 2.6 \times 10^{32}$ 年の 90%CL (信頼水準) 下限が得られた他、多くの核子崩壊様式に対して τ/B の下限が得られた。この結果、minimal SU(5) 大統一理論は否定された。IMB 実験、その他の実験でも陽子崩壊事象は発見されず、これら第一世代の陽子崩壊実験の中でカミオカンデが $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 、 $p \rightarrow \nu K^+$ を初め、多くの主要な崩壊様式で IMB と同等か最も良い下限値を得ている。

もう少し長い陽子の寿命を予言する大統一理論として次に注目された超対称性を持つ大統一理論では、主要な崩壊様式 $p \rightarrow \nu K^+$ に対して実験的に到達可能な $\tau/B \sim 10^{34}$ 年を予言するモデルもあるが、実質的な探索は唯一の次世代の陽子崩壊実験であるスーパーカミオカンデに引き継がれた。水チェレンコフ検出器で最も探索しやすい $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 崩壊の τ/B の下限値は、ほぼ単純に exposure に比例する。国際会議ではスーパーカミオカンデからの最新の結果として、306.3 kton・yr の exposure で $\tau/B > 1.7 \times 10^{34}$ 年 (90%CL) を報告している。また、最も注目される $p \rightarrow \nu K^+$ については、同じ exposure で $\tau/B > 6.6 \times 10^{33}$ 年 (90%CL) を報告している。この他、スーパーカミオカンデでは終状態が3個のレプトンへの崩壊、 $p \rightarrow e^+ \nu \nu$ 、 $p \rightarrow \mu^+ \nu \nu$ 、2核子崩壊 $pp \rightarrow K^+ K^+$ 、 $n-n$ 振動など、バリオン数を保存しない多彩な反応を調べているが、現在まで陽子崩壊等のバリオン数非保存過程は見だされていない。

4.2 太陽ニュートリノの観測

ニュートリノ振動により、地球で観測される太陽ニュートリノのフラックスは ν_e とそれ以外のフレーバーのニュートリノ (ν_μ, ν_τ) のフラックスの和である。太陽ニュートリノのエネルギーでは μ 粒子や τ 粒子は作れないため、荷電

カレント反応で測定できるのは ν_e だけである。塩素やガリウムを標的とした太陽ニュートリノの捕獲反応は荷電カレント反応である。他方、中性カレント反応はフレーバーに依らないため、全ニュートリノフラックスが測定できる。普通の軽水を用いる水チェレンコフ検出器や液体シンチレーターを用いる検出器では電子との弾性散乱により太陽ニュートリノを捉える。 ν_e は電子と荷電カレント、中性カレントの両方の過程で弾性散乱を起こすが、 ν_μ と ν_τ も電子と中性カレントで弾性散乱を起こす。従って、ニュートリノと電子の弾性散乱は ν_μ と ν_τ にも感度を持つ。しかし、 $\sigma(\nu_{\mu\text{or}\tau}e) \approx 0.16\sigma(\nu_e e)$ と、 ν_e に対する感度の方が ν_μ と ν_τ に対する感度よりはるかに高い。2015年のノーベル物理学賞のもう一人の受賞者、マクドナルド (A. McDonald) 氏が責任者を務めたカナダの SNO 実験は水チェレンコフ検出器に重水を用いた。この場合、荷電カレント反応 $\nu_e d \rightarrow e^- pp$ 、中性カレント反応 $\nu d \rightarrow \nu pn$ および νe 弾性散乱の3種類の反応で太陽ニュートリノを測定できる特徴がある。

カミオカンデ2でのバックグラウンドを下げる努力が実り、ホームステイクの塩素実験に続いて2番目に太陽ニュートリノの観測に成功し、1989年に最初の論文が出版された。もちろん初めてのリアルタイムの観測であり、また νe 弾性散乱により軽い電子がニュートリノの進行方向に反跳を受けることから、確かに太陽方向からニュートリノが飛来することを証明した。カミオカンデでは当初(全エネルギー) 9.3 MeV 以上、その後 7.5 MeV 以上の電子を測定した。このように高い反跳エネルギーを電子に与えるのは、太陽ニュートリノとしてはエネルギーの高い ^8B の崩壊からのニュートリノである。検出した太陽ニュートリノが電子ニュートリノであるとしてフラックスを求めると、 $(2.80 \pm 0.19 \text{ (統計誤差)} \pm 0.33 \text{ (系統誤差)}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と標準太陽模型の予言値の約半分で確かに太陽ニュートリノの不足が確認された。また、塩素実験で太陽黒点数と太陽ニュートリノフラックスの反相関が見られると一時騒がれたが、カミオカンデのデータはこれを否定した。

スーパーカミオカンデにおける太陽ニュートリノ観測は、当然統計精度が圧倒的に改善されるため、これに見合って系統誤差を改善する必要があった。系統誤差の大部分は反跳電子のエネルギーと方向決定の精度からきており、これを較正するためにスーパーカミオカンデの現場に線形電子加速器を設置し、ビームパイプを測定器内に挿入してエネルギーと方向の分かった電子ビームを打ち込んだ。このようにして、例えばスーパーカミオカンデでの初期の 1,258 日分の観測データから ^8B の太陽ニュートリノフラックスとして $(2.32 \pm 0.03_{-0.07}^{+0.08}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を報告した。

ここで 1999 年から観測を開始していた SNO が 2001 年に出版した最初の論文で、彼らの荷電カレント反応による ^8B ニュートリノフラックスの測定値 (SNO もエネルギーの検出閾値が高く、 ^8B ニュートリノを測定する) と上記のスーパーカミオカンデの結果に 3.3σ の違いがあるとして、こ

のことから電子ニュートリノの一部がフレーバーの異なるニュートリノに変換していると結論した。後にSNOは中性カレント反応の結果も得て、自らのデータだけでこの結論を導くことができたわけであるが、この段階ではSNO自身の νe 弾性散乱によるフラックス測定値は非常に精度が悪く、スーパーカミオカンデの精密な測定結果を用いて初めてフレーバー変換を結論できたのである。この段階で、全ての太陽ニュートリノ実験の結果を用いた解析はニュートリノ振動パラメータ Δm_{21}^2 と θ_{12} が99%CLでMSW効果の大混合角(LMA)解の領域にあることを示していたが、2002年末に発表されたカムランドの最初の結果を併せて用いた解析により、 5σ に近いCLでLMA解が太陽ニュートリノ問題の解であることが結論された。

この激動期を過ぎ、当初の光電子増倍管数に回復した2006年以降、スーパーカミオカンデの太陽ニュートリノ観測の努力は、反跳電子エネルギー検出の閾値を下げ、LMA解で予想される低エネルギーでの特徴的なエネルギースペクトルの変化を測定することと、同じくLMA解で予想される地球の物質効果による昼と夜のフラックスの違いを検出することに向けられている。その成果の一つとして、2014年に初めて ^8B 太陽ニュートリノフラックスの昼夜非対称性について、 R_D と R_N を昼と夜の νe 弾性散乱頻度として $2(R_D - R_N)/(R_D + R_N) = -0.032 \pm 0.011 \pm 0.005$ と 2.7σ の徴候を得ている。

4.3 超新星爆発からのニュートリノの観測

重力崩壊による超新星爆発は、わずか10秒ほどの間に大量のニュートリノを放出する。この理論的予言を、カミオカンデ2によるSN1987Aからの11事象のニュートリノ観測が見事に証明した。太陽ニュートリノを観測するために低エネルギーでのバックグラウンドを減らす努力をしたカミオカンデ2では光電子増倍管のヒット数を時間の関数としてプロットしただけでニュートリノバーストの信号を見つけることができた。SN1987AからのニュートリノはIMB実験と旧ソ連のバクサン実験でも観測しているが、いずれもバックグラウンドの大きい実験であり、カミオカンデ2のニュートリノバースト検出時刻を知って初めて信号を検出できた。カミオカンデが天体ニュートリノ検出の先駆者としての名誉を得た理由である。

ニュートリノバーストの検出には、例えば20秒程度の時間幅の中で2個以上のニュートリノが検出されるという条件が必要で、スーパーカミオカンデでも検出可能範囲は数百kpcの近傍に限られる。一方、宇宙には過去からの超新星爆発ニュートリノが背景ニュートリノ放射として存在しているはずである。これを測定できれば、宇宙における星形成と超新星爆発の歴史に関して洞察が得られる。

超新星背景ニュートリノフラックスの測定はカミオカンデ2の時代から試みられ、スーパーカミオカンデではニュートリノのエネルギー17.3 MeV以上で90%CL上限値として $2.8 \sim 3.1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ が得られている。上限値に幅があるのは考慮した理論モデルの違いによるが、いずれのモデルをとっても、その予測値の10倍以内である。今後超新星背景ニュートリノの信号を実際に観測するには、より低いエネルギーまで検出限界を下げる必要があり、高エネルギー μ 粒子による核破砕や低エネルギー大気ニュートリノの反応からのバックグラウンドの混入を減らさなければならない。そのためには逆ベータ崩壊からの中性子が原子核に捕獲されて発生する γ 線をタグすることが有効で、既に水素原子核による中性子捕獲からの2.2 MeVの γ 線を約18%の効率でタグして信号の検出限界を13.3 MeVまで下げること成功している。今後スーパーカミオカンデの純水タンクにガドリニウムを溶解する計画が実現するとガドリニウム原子核による中性子捕獲からは計8 MeVの γ 線が放射されるため、タグングの効率も上がり、いよいよ超新星背景ニュートリノの観測成功に期待が高まる。

5. おわりに

スペースの関係で、参考文献については最小限にとどめざるを得なかったが、神岡実験については多くのレビューが出版されているので、それらを参照していただきたい。本稿の執筆に当たり、荒船次郎氏にカミオカンデおよびスーパーカミオカンデに関する貴重な資料をご提供いただいたことを感謝します。

参考文献

- 1) K. A. Olive, *et al.* [Particle Data Group]: *Chin. Phys. C* **38** (2014) 090001 and 2015 update.
- 2) M. Goodman: *Chin. Phys. C* **38** (2014) 090001, pp. 708-709.
- 3) 安田 修: *日本物理学会誌* **70** (2015) 242.

著者紹介



中村健蔵氏: 東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構特任教授、高エネルギー加速器研究機構および総合研究大学院大学名誉教授。専門は高エネルギー物理学、特にニュートリノ物理学。

(2015年12月6日原稿受付)

From Kamiokande to Super-Kamiokande: Short Review of Their History and Achievements

Kenzo Nakamura

abstract: After introductory explanation of neutrino oscillation physics, history of Kamiokande and Super-Kamiokande experiments and their main achievements are surveyed.

ニュートリノ振動の発見を振り返る

塩澤 真人 (東京大学宇宙線研究所 masato@suketto.icrr.u-tokyo.ac.jp)

ニュートリノ振動の発見を導いたスーパーカミオカンデ初期の大気ニュートリノ観測結果を紹介する。

1. はじめに

宇宙からは陽子(水素の原子核)やより重いヘリウムなどの原子核が、地球に雨のように常時降り注いでいる。これら一次宇宙線が大気中の原子核と衝突した時に発生するパイ中間子のうち電荷を持つもの(π^\pm)の多くは、大気中に飛行中に連鎖的な崩壊反応



または、



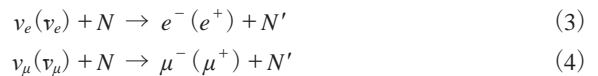
を起こす。この大気中でのパイ中間子からミューオン(μ^\pm)、電子(e^\pm)への崩壊連鎖の中で作られるニュートリノを大気ニュートリノと呼び、ミュー型ニュートリノ($\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$)と電子型ニュートリノ($\nu_e, \bar{\nu}_e$)の二種類が含まれる。ここでバー付きはニュートリノの反粒子である反ニュートリノを表す。ニュートリノにはもう一種類、大気中ではほとんど作られないタウ型ニュートリノ($\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$)があり、全部で三種類(三世代)ある。

ニュートリノは電荷を持たない中性粒子で「弱い力」しか感じないため、物質との反応確率が極めて小さく、そのほとんどは地球をも通り抜けてしまう。地面に到達した大気ニュートリノは地球の中をまっすぐ突き抜けて地球の裏側から出て行くことになるため、地球に入るニュートリノと出て行くニュートリノは同じ数になる。従って球対称性の近似のもとで、実験装置の上から降り注ぐ大気ニュートリノと下から上に吹き上がるニュートリノの数は等しくなるはずである。ただし下から来るニュートリノは最長で地球直径に相当する13,000 kmの距離を走ってきていることになるのに対し、上から来るニュートリノは典型的な生成高度10 kmに相当する距離程度しか走っていないことになる。

もう一つ大事な特徴は、式(1)(2)で分かるように、ミュー型ニュートリノ2つに対して電子型ニュートリノが1つと、数の比がパイオンの崩壊形式から正確に決まっていることである。^{*1}

^{*1} 宇宙線のエネルギーが高くなると、ミューオンが崩壊する前に地面に到達し止められるので、この比は2より小さくなる。

ニュートリノと物質との反応確率は極めて小さいが、ゼロではない。大気ニュートリノ観測では、検出器内または検出器近傍でニュートリノが物質と運良く衝突した際に発生する粒子を検出する。



ここでNは標的となる物質中の核子(陽子や中性子)であり、N'は反応後の核子である。^{*2} 式(3)や(4)で生成された電子とミューオンを実験装置で捉えることにより、電子型ニュートリノとミュー型ニュートリノを各々観測することが可能になる。またこの電子やミューオンの方向やエネルギーから、元のニュートリノの飛来方向やエネルギーも推定できることになる。スーパーカミオカンデでは、その巨大な質量のおかげで一日10個ほどの大気ニュートリノ反応事象を観測できる。

スーパーカミオカンデが実験を開始する以前には、カミオカンデなど複数の実験がこのミューオンと電子の数の比を報告していた(表1)。カミオカンデやIMB, SOUDAN2実験は μ/e 比の観測と予言値との比が0.6程度と1(予言値)より有意に小さい観測結果を発表しており「大気ニュートリノ異常」と呼ばれたが、予想値と一致する実験結果もあり、未解決の問題となっていた。スーパーカミオカンデでの高統計かつ高精度な測定により決着がつけられることが期待されていた。

小さな μ/e 比を説明する有力な候補としてニュートリノ振動現象があった。ニュートリノ振動とは、飛行距離(L)とエネルギー(E)の関数でその種類(世代)を変える(振

表1 スーパーカミオカンデより前の実験による、大気ニュートリノのミューオンと電子の観測数の比を予言値で割ったもの。誤差が2つに分けてある場合は、最初の数字が統計誤差であり、2つ目が系統誤差を表す。

実験名	$(\mu/e)_{\text{data}}/(\mu/e)_{\text{MC}}$
カミオカンデ (sub-GeV)	$0.62 \pm 0.06 \pm 0.06$
カミオカンデ (multi-GeV)	$0.57^{+0.08}_{-0.07} \pm 0.07$
IMB	$0.54 \pm 0.05 \pm 0.12$
Frejus	$1.00 \pm 0.15 \pm 0.08$
NUSEX	$0.99^{+0.35}_{-0.25}$
SOUDAN2	$0.61 \pm 0.14^{+0.05}_{-0.07}$

^{*2} 反応後にパイ中間子やその仲間も生成される場合があるがここでは割愛する。

動する) ことであり, 例えばミュー型ニュートリノがミュー型のまま観測される確率は以下のように表される.

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \times \sin^2 \left(\frac{1.267 \Delta m^2 [eV^2/c^4] L [km]}{E [GeV]} \right) \quad (5)$$

ここでは簡単のために二世代間のニュートリノ振動による近似式を表しており, θ は世代間の混合を表す角度パラメータ, Δm^2 は2つのニュートリノ質量の二乗の差である. もし $\Delta m^2 \neq 0$ かつ $\sin^2 2\theta \neq 0$ であれば, 十分長い飛行距離でミュー型ニュートリノが減少することが説明できる. 減少効果が出るまでに至らない短い飛行距離では, 予想通りの量のミュー型ニュートリノが観測されることになる. ただしこのシナリオが正しい場合は, 素粒子標準理論に反して少なくとも一種類のニュートリノがゼロでない質量を持ち, さらに世代間で混合をしていることになり, ^{*3} 素粒子標準理論に大きな変更をせまることになる. これを実験的に証明するための要請は (1) 大気ニュートリノの高効率かつ低バックグラウンド観測データ, (2) 正確な $\mu-e$ の識別すなわちニュートリノ種類の識別, (3) ニュートリノの数の飛行距離 L への依存性の観測, の主に3つあったと考えられる.

2. スーパーカミオカンデ建設

スーパーカミオカンデは, 岐阜県飛騨市神岡町にある池の山の山頂真下の地下1,000 mの場所に建設された.¹⁾ 図1に検出器のイラストを示す. 検出器は直径39.3 m, 高さ42 mの円柱形の水槽であり, 5万トンの純水で満たされる. 水槽は2重構造を持っており, 内側の直径33.8 m, 高さ36.2 mの円柱の外側を2~2.2 mの厚さの外水槽が囲う.

水中を走る電荷を持った素粒子が水中の光の速度 c/n (c は真空中の光速, $n \sim 1.33$ は水の屈折率) より速く進む場合には, 進行方向に対して角度 $\cos \theta_c = 1/(n\beta)$ の方向に円錐状のチェレンコフ光を放射する. ここで $\beta = v/c$ は荷電粒子の速度と光速の比であり, $v \sim c$ ($\beta \sim 1$) の時に $\theta_c \sim 42^\circ$ となる. この光が検出器内の水中を伝搬して, 内水槽壁に格子状に並べられた光電子増倍管 (PMT) によりチェレンコフリングとして検出される. フロントエンド回路は光子を一個から高効率で検出できるもので, 各PMTで検出された光量と光の到達時間が記録される.

内水槽と外水槽の間は遮光シートにより光が行き来しないようになっており, 内水槽で放射されたチェレンコフ光と外水槽のそれは別々のPMTで検出される. 外から侵入する宇宙線ミューオンバックグラウンドは, 外水槽でも光を出す一方で, ニュートリノは外水槽では光を出さずに内

水槽に侵入して水と反応し, 生成された電子やミューオンが内水槽で光を出す. この水槽の二重構造により, ニュートリノ信号と外来バックグラウンドの分別を行う.

地下空洞掘削が1991年に開始され, 1995年には直径50 cmの世界最大のPMT11,146本(内水槽用)と直径20 cmのPMT1,885本(外水槽用)の取り付け作業が行われた. 取り付けられたPMTのケーブルは水槽上面まで敷設され, フロントエンド電子回路に一つ一つハンダ付けにより接続されていた. 建設のための業者や研究者がいなくなった夜には, 水槽の中を暗闇にし, PMT一本一本の電源を入れて動作確認を行っていった. これらの作業に並行して, データ収集システムの導入と立ち上げを行っていった. 日

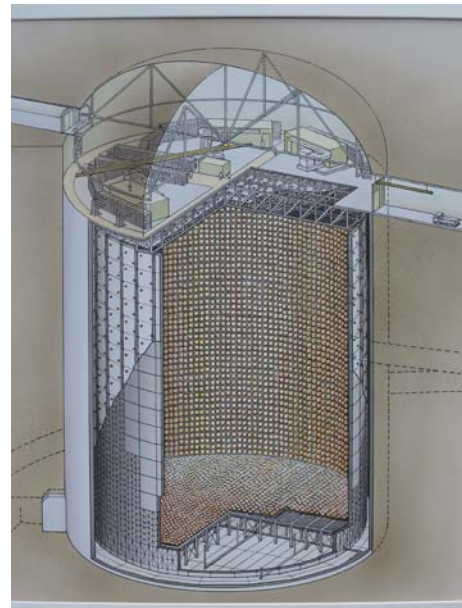


図1 スーパーカミオカンデ実験装置.

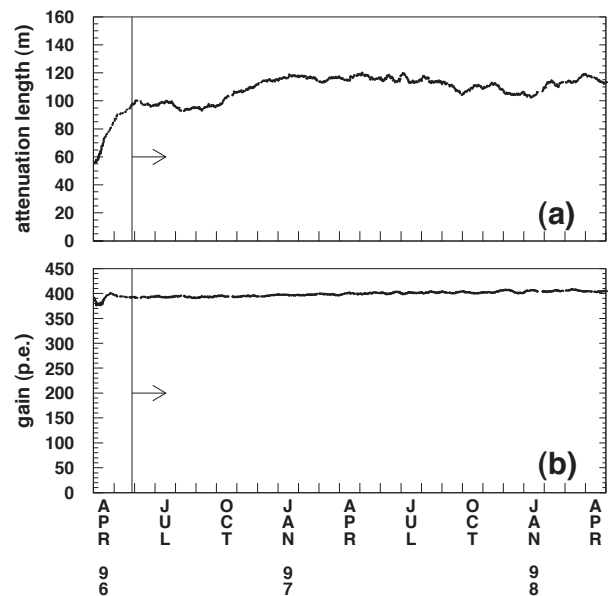


図2 宇宙線ミューオンのチェレンコフ光を用いて測定した, (a) 純水中の光の透過長と (b) PMTの信号増幅率. 1996年4月1日の実験稼働開始からの時間変化. 図中の矢印は物理解析に用いたデータの観測期間を示す.

^{*3} 素粒子標準理論では電子数 (電子と電子型ニュートリノを+1とし, それらの反粒子を-1とした粒子数の和) やミューオン数, タウ数は各々不変 (保存する) とされていたが, 世代間で混合するということはこの保存法則を否定することを意味する.

本グループ担当の内水槽 PMT 用のデータ収集システムに、外水槽用のシステムを組み合わせる必要があったが、違うシステムを合わせることは予想以上に苦勞し時間がかかった思い出がある。スーパーカミオカンデの代表者である戸塚洋二先生からの工期を厳守する強いプレッシャーもあり、何とか予定通りに 1996 年 4 月 1 日の 0 時の実験開始に間に合わせた。

水の透明度は装置の性能を決める非常に重要な要因であるが、図 2(a) に示すように観測開始当初は 50 m 以下と芳しくなく、純水製造装置が疑われたりした。日々透過率データを調べながらやきもきした思い出があるが、水槽内の純水の循環が進むにつれて透過長が上昇し始めたのが 3 月末から見え始め、5 月 27 日には 100 m 程度に達し、無事物理解析に使える運びとなった。

3. ニュートリノ信号の選択

ニュートリノ信号はその形態により 3 つに分類される。

- Fully Contained events (FC 事象): 全てのチェレンコフ光が内水槽で観測されたもの
- Partially Contained events (PC 事象): 内水槽で生成されたミュオンが外水槽に出たもの
- Upward-going Muon events (UPMU 事象): 水槽周辺の岩盤で起きたニュートリノ反応により生成されたミュオンが検出器に侵入したもの

興味のある FC 事象の選択効率をほぼ 100% に保ちつつ、混入するバックグラウンドが 1% 以下の高品質なニュートリノサンプルが作られた。PC 事象の選択アルゴリズムの開発中にはその必要性を疑問視する意見もあったが、梶田隆章先生のリーダーシップにより開発が続けられた記憶がある。この PC 事象は以下で述べるように、ニュートリノ振動を強くサポートする証拠の一つになった。観測データを無駄にせずを使い尽くす、という態度が重要だと感じた。また最終的には、FC/PC/UPMU 全ての信号データがニュートリノ振動を支持することが確認され、²⁻⁴⁾ ニュートリノ振動の発見を強固なものにした。

4. ニュートリノ事象再構成

4.1 ニュートリノ反応点の決定

観測された各 PMT ごとの光量と時間情報から、チェレンコフリングの物理量を決定することを事象再構成とよぶ。事象再構成アルゴリズムではまず、ニュートリノ反応点の決定を行う。反応点を定める原理は、仮定した反応点 x から i 番目の PMT までに光が伝搬する時間 $TOF_i(x)$ と、各 PMT の検出時間 T_i を用いて、 $(T_i - TOF_i(x))$ の分布が 0 付近により高いピーク分布を持つような反応点 x を探すことである。

4.2 ニュートリノ世代 (粒子種類) 決定

大気ニュートリノ反応により生成されるミュオンは比較的直線的に水中を進むため、輪郭のはっきりしたチェレ

ンコフリングとして観測される。一方で電子の場合には、ガンマ線や電子、陽電子が雪崩的に生成され、水中で電磁シャワーを作る。電磁シャワーを形成する方向の異なる多数の電子陽電子が各々チェレンコフ光を放射するため、重ね合わせた光のリングは比較的ぼやけたものになる。この光のリングの空間分布を期待値と比べた尤度 (ライクリフッド) をミュオン仮定と電子仮定で比較し、最もらしい粒子仮定を採用する。宇宙線ミュオンやその崩壊から生じる電子からのチェレンコフリングを用いて、粒子種類決定アルゴリズムが正答率 99% 以上と高い性能を持っていることが確認された。なお PC と UPMU 事象は 98% 以上がミュオンであるため、FC 事象のような粒子識別アルゴリズムを用いず、全事象をミュオン事象として物理解析を行う。

4.3 方向とエネルギー決定

荷電粒子の走る方向は、チェレンコフリングの空間分布から 1° 程度の精度で決定される。さらにチェレンコフリングの光の量から荷電粒子のエネルギーが求められるが、その際に光の透過長 (図 2(a)) と PMT の信号増幅率 (図 2(b)) の時間変化を考慮する必要がある。エネルギー決定の系統誤差は宇宙線ミュオンなどから 2% 程度と確認された。

5. 大気ニュートリノ観測結果

スーパーカミオカンデの最初の 1 年強の FC、PC 事象データにより得られた μ/e 比は、予言値との比として、

$$\frac{(\mu/e)_{\text{data}}}{(\mu/e)_{\text{MC}}} = 0.66 \pm 0.06 (\text{統計誤差}) \pm 0.08 (\text{系統誤差}) \quad (6)$$

と求まった。予言値の 0.6 程度の観測結果となり、カミオカンデなどの観測結果を追認した。 $(\mu/e)_{\text{data}}/(\mu/e)_{\text{MC}}$ の内水槽壁からの距離への依存性を図 3 に示す。³⁾ 着目すべきは、壁からの距離によらず比が 1 より小さいことであり、

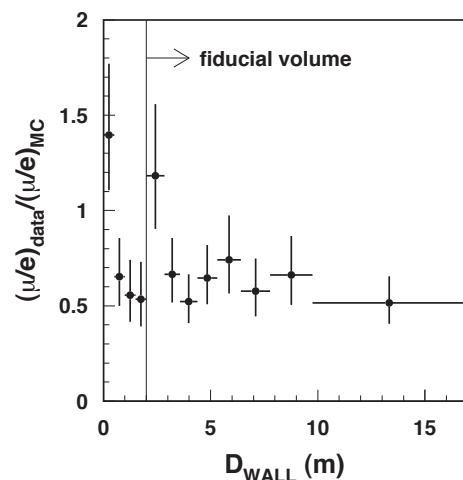


図 3 スーパーカミオカンデの最初の 1 年強の観測データによる $(\mu/e)_{\text{data}}/(\mu/e)_{\text{MC}}$ の、内水槽壁からの距離への依存性。³⁾ ニュートリノ反応点から最も近い壁までの距離 D_{wall} を横軸にとっている。 $D_{\text{wall}} > 2$ m が本解析に用いる領域であり、有効体積と呼ぶ。

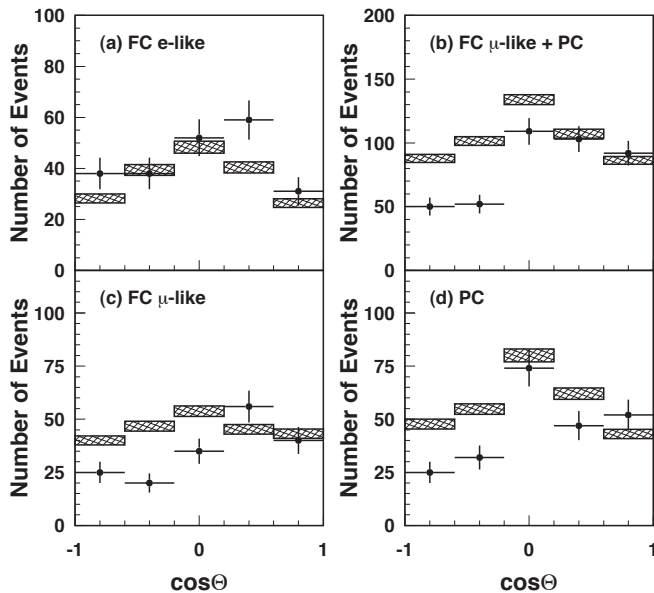


図4 大気ニュートリノ反応で生成された電子事象 (a) とミューオン事象 (b)-(d) の天頂角分布。³⁾ 横軸は鉛直下向き方向と荷電粒子の進行方向とのなす角度であり、 $\cos \Theta = -1$ が鉛直上向き、 $\cos \Theta = 1$ が鉛直下向きの荷電粒子を表す。(b) は (c) と (d) の和である。編目の四角はニュートリノ振動がない場合の予言値とその統計誤差を表している。

宇宙線ミューオンや高速中性子など外来のバックグラウンドが原因ではないことが確認できる。さらにスーパーカミオカンデの開始時には、KEKにおける1,000トンの水槽に電子・ミューオンビームを打ち込むテスト実験により、粒子識別の原理の実証も得られていた。⁵⁾ それ以外の系統誤差の要因として、大気ニュートリノ予言計算の誤差、ニュートリノ相互作用モデルの誤差、検出器の誤差なども検証され、いずれの系統誤差でも1からのずれを説明できないことが確認された。

加えてニュートリノ振動の決定的な証拠が方向分布から得られた。図4に観測された電子とミューオンの方向の天頂角 ($\cos \Theta$) 分布を、(a) FC電子、(b) FCミューオンとPC、(c) FCミューオン、(d) PC、について示す。ここで $\cos \Theta = -1(+1)$ は鉛直上向き(下向き)に対応する。(b) FCミューオンとPCでは、上向きの2ピンは予言値の半分しか観測されず、下向き2ピンでは予言通りのミューオンが観測されたことが分かる。したがって、ミュー型ニュートリノの数の減少は、ニュートリノの方向すなわち飛行距離に依存している証拠が得られた。一方で電子の分布は予言値と矛盾しない。詳しい解析により、ミュー型からタウ型ニュートリノへのニュートリノ振動により、観測結果が説明されることが示された。⁶⁾

6. おわりに

ニュートリノ振動の発見の宣言の後、ミュー型ニュートリノが (L/E) の関数で減少した後に増加していることも示され、確かに「振動」していることも確認された。⁷⁾ またニュートリノ振動の行き先であるタウ型ニュートリノの発現も確認され、⁸⁾ 「大気ニュートリノ異常」は「ニュートリノ振動」による説明により完全決着したと言える。ニュートリノ振動の発見は、素粒子標準理論にニュートリノ質量と大きな世代間混合を導入することとなった。しかし、示唆されるニュートリノ質量は、他の素粒子の中で最も軽い電子の質量に比べても100万分の1以下と桁違いに小さい。また測定されたニュートリノの大きな混合角は、クォークの小さな混合と対照的である。背後に隠された物理法則の解明が今後のニュートリノ研究の大きな課題となる。

参考文献

- 1) Y. Fukuda, *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration]: Nucl. Instrum. Meth. A **501** (2003) 418.
- 2) Y. Fukuda, *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration]: Phys. Lett. B **433** (1998) 9.
- 3) Y. Fukuda, *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration]: Phys. Lett. B **436** (1998) 33.
- 4) Y. Fukuda, *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration]: Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 2644.
- 5) S. Kasuga, *et al.*: Phys. Lett. B **374** (1996) 238.
- 6) Y. Fukuda, *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration]: Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 1562.
- 7) Y. Ashie, *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration]: Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 101801.
- 8) K. Abe, *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration]: Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 181802.

著者紹介



塩澤眞人氏：東京大学宇宙線研究所教授。専門は素粒子実験、宇宙線実験。1992年の建設時期から現在までスーパーカミオカンデ実験メンバー。またハイパーカミオカンデ実験のプロジェクトリーダーを務める。

(2016年1月18日原稿受付)

Introduction to the Discovery of Atmospheric Neutrino Oscillations

Masato Shiozawa

abstract: Introduction to the discovery of neutrino oscillations by using the atmospheric neutrino data in the early period of Super-Kamiokande is presented.

長基線原子炉ニュートリノ振動

井上 邦雄 (東北大学ニュートリノ科学研究センター inoue@awa.tohoku.ac.jp)

20世紀後半の長きにわたって存在した太陽ニュートリノ問題は21世紀に入って一気に解決を見た。その解の特定に中心的な役割を果たした長基線原子炉ニュートリノ振動研究では、巨大で低放射能の液体シンチレータ観測装置が必要となった。ニュートリノに質量があるとわかってからはその質量機構が重要な関心事になっており、極低放射能の液体シンチレータ装置はその解明においても大きな役割を担っている。本稿では、長基線原子炉ニュートリノ振動研究における太陽ニュートリノ問題の解の特定とその後の研究展開について解説する。

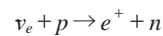
1. 太陽ニュートリノ問題

太陽は核融合反応をエネルギー源として輝いている。核融合反応系列の中には電子ニュートリノを放出するものがある。いくつかあり、透過性の高いニュートリノを観測することで太陽内部の直接的な研究を行うのが太陽ニュートリノ実験である。1960年代から実施された塩素37を使った放射化学的手法による観測では、観測された太陽ニュートリノ量は太陽の明るさからの推定と比べて4分の1程度しかなく、「太陽ニュートリノ問題」と呼ばれた。当初は実験の困難さもあり、太陽モデルの問題、ニュートリノの性質、実験の間違いという3つの可能性が考えられた。ニュートリノの性質に解決を委ねるにしても、ニュートリノ振動が有力ではあったが、塩素実験が11年周期と言われるニュートリノ観測数と太陽黒点数の反相関を示唆していたこともあり、ニュートリノの磁気モーメントも有効な仮説であった。1980年代終盤には、カミオカンデが太陽ニュートリノ量の欠損を確認し、1990年代に入ってからガリウム71を使った放射化学測定が低エネルギー成分も含めて欠損を確認しており、ニュートリノの未知の性質を導入しない限りは太陽モデルとニュートリノ観測の中から少なくとも2つ以上が間違いでなければならないという状況であった。高統計のスーパーカミオカンデの登場によって、エネルギースペクトルの歪みや日夜変動・季節変動などのニュートリノ振動の直接的な証拠が精力的に調べられたが、なかなか決定打は得られなかった。その頃に建設を開始したのが素性の知れた原子炉反ニュートリノを観測するカムランド実験である。

2. カムランドでの長基線原子炉ニュートリノ振動

カムランド (KamLAND) の名前は神岡液体シンチレータ反ニュートリノ観測装置 (Kamioka Liquid-scintillator Anti-Neutrino Detector) に由来する。スーパーカミオカンデの完成により役割を終えたカミオカンデは東北大学に移管され、世界最大量1,000トンの液体シンチレータを使った反ニュートリノ観測装置(図1)に作り変えられた。液体シンチレータは、純化によってウランなどの放射性不純

物を 10^{-18} g/gといった極低レベルに低減できるため、ニュートリノ観測のような稀な反応の測定に適している。反ニュートリノ観測に利用する反応は液体シンチレータ中に大量に含まれる水素原子核の逆ベータ崩壊反応である。



この反応はニュートリノの最初の発見にも用いられたものであり、反電子ニュートリノに感度を持つ。この反応によって陽電子と中性子が生成され、陽電子に加えて中性子が周囲の原子核に捕獲される際に放出する γ 線との遅延同時計測をなすことで、バックグラウンドに対して高い識別能力を有する。カムランドの場合は、中性子が約200 μ 秒の寿命で水素原子に捕獲され2.2 MeVの γ 線として観測される。太陽が生成する電子ニュートリノと同じフレーバーである反電子ニュートリノの研究は、粒子・反粒子の対称性から太陽ニュートリノ問題の解明に有効である。また、中性子崩壊の逆反応である逆ベータ崩壊反応は、中性子の

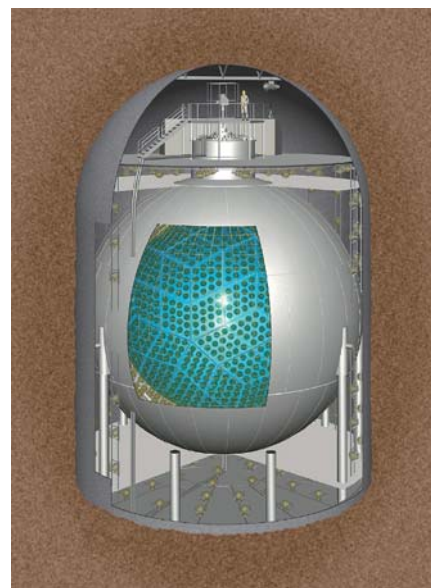


図1 カムランド実験装置。1,000トンの極低放射能液体シンチレータを、直径18mのステンレスタンク内面に取り付けた約2,000本の光電子増倍管で観察する。

寿命の測定精度がほぼそのまま反電子ニュートリノの反応断面積の精度に反映することから、0.2%の誤差というニュートリノ反応としては例外的に小さな誤差を実現している。

カムランドのある神岡は若狭湾や柏崎、浜岡などにある多数の商用原子炉に囲まれており、特にカムランドからの有効距離180 km近辺に原子炉が集中している。原子炉内ではウランやプルトニウムが核分裂を起こし中性子過剰核を生成するため、中性子が陽子に変換されるベータ崩壊により反電子ニュートリノが大量に生成される。強力な商用原子炉を反電子ニュートリノ源とすることで逆ベータ崩壊反応を観測に利用でき、さらに原子炉の運転状況からニュートリノの生成量も2%程度の精度で知ることができるため、飛行中にニュートリノが起こす変化がそれより十分大きければ、確実にその変化をとらえることができる。原子炉からカムランドまでの物質密度は大きくなくニュートリノ振動に対する物質効果は無視できるので、2世代のニュートリノ振動における真空中での反電子ニュートリノの生存確率の式から、カムランドが感度を持つニュートリノのパラメータを知ることができる。

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(1.27 \times \frac{\Delta m_{21}^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E [\text{MeV}]} \right)$$

反応断面積を考慮した原子炉ニュートリノの平均的なエネルギーが4 MeV程度、原子炉までの距離が180 km程度なので、 $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2 \geq 10^{-5} \text{ eV}^2$ 、ニュートリノ混合角 θ_{12} が小さくない場合に感度がある。

3. 太陽ニュートリノ問題の解の特定

カムランドの感度領域は設計当時はかなり限定的と感じられた。ニュートリノ振動の枠組みで太陽ニュートリノ観測の統合解析を行うと、図2に示された4つの解(LMA, LOW, VAC, SMA)が生き残り、ニュートリノ振動以外にもニュートリノの磁気モーメント(RSFP)やフレーバーを変える中性カレント反応(FCNC)、ニュートリノ崩壊など多くの理論仮説が存在しており、カムランドはニュートリノ振動の大混合角解(LMA)にのみ感度があったからである。太陽ニュートリノの観測が進むにつれ、太陽ニュートリノのスペクトル歪みや日夜・季節変動の小ささからLMAが好まれるようになってきたとはいえ決定的ではなく、ニュートリノ振動以外の解も変わらず生き残っていた。この状況は、2002年のSNO実験による中性カレント反応の測定ですべてのフレーバーを合わせると太陽ニュートリノは期待通りの量がやってきているという観測結果¹⁾でも変わることはなかった。SNO実験の結果はニュートリノフレーバーの変化は証明したが、ニュートリノ振動と特定したわけではないのである。そんな中2002年に観測開始したカムランドは、すぐさま原子炉ニュートリノ欠損の証拠²⁾を発見した。太陽と全く異なる環境でのニュートリノ欠損によりニュートリノ振動以外の仮説はことごとく排除

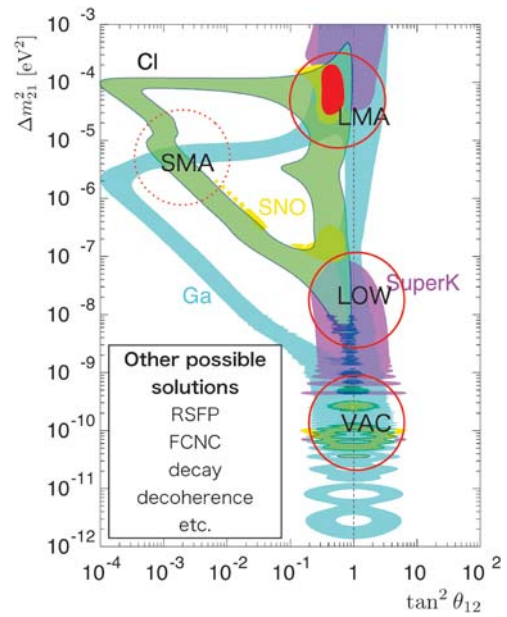


図2 太陽ニュートリノ問題の解。横軸はニュートリノ振動の式に現れる混合角、縦軸は質量の2乗差である。原子炉ニュートリノ欠損が見つかるまでは、複数のニュートリノ振動解やその他の仮説が生き残っていた。

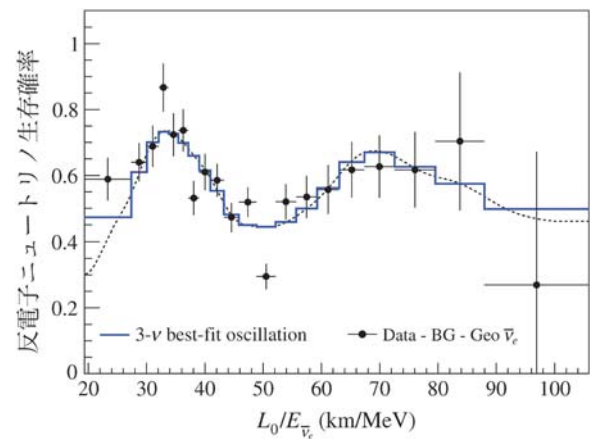


図3 原子炉反電子ニュートリノの生存確率。横軸は有効距離180 kmをニュートリノエネルギーで割ったもので、ニュートリノ振動の2周期をカバーしている。

され、消去法によってニュートリノ振動の大混合角解が真に太陽ニュートリノ問題の解であると特定したのである。

多くの可能性がある中で、感度があるたったひとつの可能性が真の解であったことは幸運と思えるが、さらに幸運は続いた。ニュートリノの質量2乗差は、180 kmという距離での測定で原子炉ニュートリノのスペクトル内に2周期の振動を内包できる値だったのである。最新の観測結果³⁾では、距離÷エネルギーをパラメータとして図3のように生存確率の2周期の振動パターンの観測に成功しており、そのためニュートリノの質量2乗差を2.4%という世界最高精度で決定($\Delta m_{21}^2 = 7.53^{+0.18}_{-0.18} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$)することができた。明確な反電子ニュートリノ生存確率の増減はニュートリノ振動そのものを直接的に示している。

少し話がそれるが、測定精度の向上には特別な事情も含まれている。東日本大震災をきっかけに国内の全原子炉が

一旦停止したことである。本来原子炉が稼働していなければニュートリノ振動研究はできないが、この停止によってバックグラウンドの理解を確実にすることができた。また、原子炉反ニュートリノと競合する地球内部起源の反ニュートリノ観測においても観測精度が高まり、ニュートリノ地球物理も一段と強力に推進できている。

4. ニュートリノ質量とこれからの展開

太陽ニュートリノ問題、大気ニュートリノ異常をきっかけとしたニュートリノ振動の研究によりニュートリノが有限の質量を持つことが証明された。素粒子の標準理論ではニュートリノ質量を0と仮定していたので、その点は変更を余儀なくされる。しかし、ニュートリノ質量はより大きな意味を持っている。スピン1/2のフェルミ粒子が従う相対論的運動方程式であるディラック方程式を導出する際、フェルミ粒子は自動的に4つ以上の自由度を持つ。例えば電子の場合、4つの自由度とは右巻き電子、左巻き電子、右巻き陽電子、左巻き陽電子のことで、ヘリシティと呼ぶ進行方向に対する回転方向と粒子・反粒子の4つの組み合わせである。電子と陽電子は電荷が逆符号なので明らかに異なる粒子であり、また粒子・反粒子は同じ質量を持つので、4つの自由度は全て同質量である。さて、ニュートリノもスピン1/2のフェルミ粒子である。しかし、これまで知られているニュートリノは左巻きニュートリノと右巻き反ニュートリノの2つの状態(自由度)のみである。弱い相互作用は左巻きに対して作用するとして標準理論が構築されているため、ニュートリノ質量を0とする限りにおいては残り2つの自由度は問題ではなかった。

有限質量のニュートリノは光速より遅いはずで、系によってヘリシティが変わってしまう。左巻きニュートリノを追い越す系では、そのニュートリノは右巻きの何かである。2つの選択肢があり、単にニュートリノが右巻きになっただけで弱い相互作用をせず観測できないという立場を取る場合、このニュートリノはディラックニュートリノと呼ばれる。一方で電荷を持たないニュートリノは粒子・反粒子の区別がない可能性があり、左巻きニュートリノを追い越すと右巻きの反ニュートリノに見えるとする立場を取る場合、マヨラナニュートリノと呼ばれる。マヨラナニュートリノではニュートリノと反ニュートリノが同一の粒子であり、単に回転方向で区別されているだけである。この場合は、残りの自由度に対して任意に質量を与えることができ、重いニュートリノを自然に導入することができる。ここで登場した重いニュートリノはあまりにも重く生成できないため現在は観測できていないと考える。

重いニュートリノはヒッグス粒子との衝突を通じて軽いニュートリノと結びつけられるが、そのため、重いニュートリノが重ければ重いほど既知のニュートリノはより軽くなるというシーソー機構が提唱されている。これは、宇宙・素粒子の大問題の1つに挙げられる「軽いニュートリノ

ノ質量の謎」を説明する。さらに、宇宙初期に作られた重いニュートリノの崩壊が物質・反物質の非対称を生み現在の物質優勢宇宙を形成したとするレプトジェネシス理論によって、同じく大問題の1つである「宇宙物質優勢の謎」も説明する。宇宙初期に起きたと考えられる粒子・反粒子の対消滅は非常に大規模であり生き残った粒子は100億分の1程度と言われている。暗黒物質は宇宙のエネルギー構成において通常の物質の5倍程度あるが、100億分の1ものの対消滅を考えるとほとんど同じ量とも考えられ、暗黒物質の起源を重いニュートリノに求める理論も提唱されている。

つまり、ニュートリノの質量はニュートリノがディラックであるのかマヨラナであるのかという課題を突きつけており、マヨラナであるということが実証できると、宇宙・素粒子の大問題のうちの2つないしは3つを解明できる可能性がある。このような大きな進展の可能性への道筋を作ったということで、ニュートリノ振動の発見はニュートリノの有限質量の存在を示したということ以上に重要な成果だったのである。

5. ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊

ニュートリノのマヨラナ性を検証する手法は、いくつかのアイデアが示されているとはいえ、現実的なものは現在のところニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索しかない。二重ベータ崩壊とは1つの原子核内で2つのベータ崩壊が同時に発生するもので、原子核のエネルギー準位として単純なベータ崩壊が禁止されているような場合に起こりうる非常に稀な崩壊である。ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊($0\nu 2\beta$)は、そこで本来発生するはずの2つの反電子ニュートリノが対消滅して放出されない現象であり、ニュートリノがマヨラナニュートリノである場合にのみ起こりうる。すなわち、 $0\nu 2\beta$ の発見はニュートリノのマヨラナ性を証明することになる。

$0\nu 2\beta$ の半減期は、ニュートリノのマヨラナ有効質量の2乗に逆比例する。

$$T_{1/2}^{-1} = G_{0\nu} |M_{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

ここで、 $G_{0\nu}$ は位相空間積分に由来する係数で精度よく計算できる。一方、核行列要素 $M_{0\nu}$ は理論計算に頼っており、現在のところ不定性が大きい。マヨラナ有効質量 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ は、ニュートリノの3種類の質量 m_i と電子ニュートリノへの混合角 U_{ei} 、マヨラナCP位相 ϵ_i を使って以下のように表せる。

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum m_i |U_{ei}|^2 \epsilon_i \right|$$

ニュートリノの質量構造が逆階層構造と言われる場合には20 meV以上のマヨラナ有効質量となり、60 meV程度以上は縮退構造と呼んでいる(図4参照)。また、複素位相であるマヨラナCP位相のため、標準階層構造の場合は質量が相殺する0 meVすら許される。一方、トリチウムのベ-

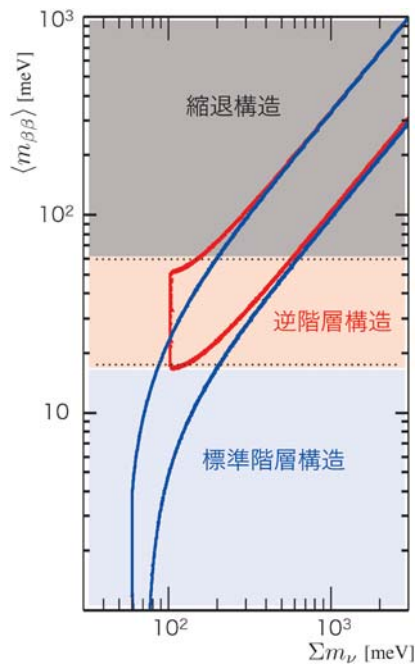


図4 ニュートリノ振動から許されるマヨラナ有効質量(縦軸)と3種類のニュートリノの合計質量(横軸)。実線で囲まれた部分が許される。3種類のニュートリノが全て近接した質量の場合(縮退構造)、2種類が相対的に重い場合(逆階層構造)、1種類のみが重い場合(標準階層構造)でマヨラナ有効質量の取りうる範囲が異なる。

タ崩壊を使った電子ニュートリノの有効質量に対する直接的な制限や、宇宙論的観測による制限も組み合わせるとeV程度あるいはさらに小さな値のマヨラナ有効質量の上限が得られる。

$0\nu 2\beta$ 探索の歴史は古いが、ニュートリノ振動の研究によってニュートリノの質量2乗差が測定されるまではニュートリノ質量に対する制限が緩く、どの程度の二重ベータ崩壊核を準備すれば良いのかは明確でなかった。例えば100 meV程度のマヨラナ有効質量を探るには 10^{26} 年程度の半減期まで感度を持つ必要があり、自ずと100 kgから1,000 kg程度の二重ベータ崩壊核が必要となるのであるが、指針がない状況では10 kg程度以下での探索が行われるにすぎなかった。

ニュートリノ振動研究の進展によってより大量の二重ベータ崩壊核が必要と判明し、同時により低放射能の環境が必要となっている。これらの要求は液体シンチレータを使ったニュートリノ観測装置が本質的に備えているものであり、ニュートリノ観測装置を二重ベータ崩壊研究に適用することで桁違いの量の二重ベータ崩壊核を短期間・低コストで導入できるようになった。それがカムランド禅実験⁴⁾である。禅(Zen)は(Zero neutrino double beta decay search)に由来する。ニュートリノ観測装置をほぼ無改造のまま、図5のように、カムランド中心に二重ベータ崩壊核を溶かした液体シンチレータをミニバルーンに内包する形で導入した。使用した二重ベータ崩壊核はキセノン136であり、液体シンチレータ中に重量比で3%まで溶かすことができる。ミニバルーンを大きくすることでスケーラビ

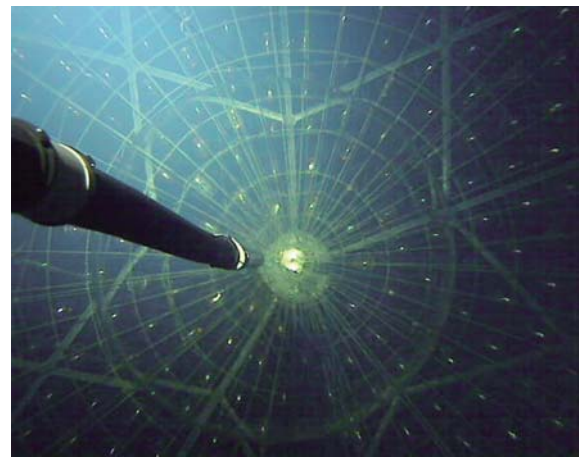


図5 カムランドの中央に配置したキセノン136含有液体シンチレータ。黒いチューブの先に直径3mのミニバルーンが接続されており、その境界で背景の星型のフレームが屈折して不連続に見える。

リティが確保できるほか、同位体濃縮や蒸留純化技術などが確立しており、導入後のさらなる純化や、キセノン136を脱気することでオン・オフ実験もできるなど優れた特徴を持っている。キセノン136の導入量は当初の320 kgから380 kgにまで増量され、現在世界最高感度を有している。同核種を使ったライバル実験と組み合わせた結果⁵⁾は、 $T_{1/2} > 3.4 \times 10^{25}$ yr (90% C.L.)であり、マヨラナ有効質量に換算すると $\langle m_{\beta\beta} \rangle < (120-250)$ meVとなる。上限に幅があるのは核行列要素の不定性による。

$0\nu 2\beta$ は未だ発見されていないわけであるが、未発見であっても重要な知見を得るには是非とも逆階層構造をカバーする感度、すなわち20 meVに届く感度を実現したい。これが実現すれば、もし未発見であっても、マヨラナ性を信じるなら標準階層構造であると結論できるし、ニュートリノ振動実験など他の実験が逆階層構造であるという結論を得ていれば、マヨラナ性はなくディラックニュートリノであるという結論に達するからである。

カムランド禅はさらなる高感度化に向けて、より清浄な環境でミニバルーンを再作成し現在のミニバルーンからキセノンを回収している。2016年夏には約750 kgを導入して縮退構造をカバーできる高感度で探索を再開する予定である。逆階層構造をカバーする感度を目指した開発も順調である。今後の進展にご期待ください。

参考文献

- 1) Q. R. Ahmad, *et al.* [SNO Collaboration]: Phys. Rev. Lett **89** (2002) 011301.
- 2) K. Eguchi, *et al.* [KamLAND Collaboration]: Phys. Rev. Lett **90** (2003) 021802.
- 3) A. Gando, *et al.* [KamLAND Collaboration]: Phys. Rev. D **88** (2013) 033001.
- 4) A. Gando, *et al.* [KamLAND-Zen Collaboration]: Phys. Rev. C **85** (2012) 045504.
- 5) A. Gando, *et al.* [KamLAND-Zen Collaboration]: Phys. Rev. Lett **110** (2013) 062502.

著者紹介



井上邦雄氏：ニュートリノ研究を中心に幅広く宇宙・素粒子の研究に興味を持ち、極低放射能環境での素粒子原子核研究を展開している。

(2015年12月3日原稿受付)

Long Baseline Reactor Neutrino Oscillation

Kunio Inoue

abstract: The solar neutrino problem that lasted very long period in the latter half of the 20th century, has been solved rather quickly after

entering the 21st century. Research of long baseline reactor neutrino oscillation has played a major role in the determination of the solution. The inverse beta decay reaction of hydrogen atom is essential in such research and consequently large and ultra-low radioactive liquid scintillator became indispensable for the experimental apparatus. Now the existence of the neutrino mass is established and a mechanism giving mass to neutrino is the next important issue. Ultra-low radioactive liquid scintillator apparatus is also playing an important role to investigate the mechanism. This note describes how research of long baseline reactor neutrino oscillation got to the solution of the solar neutrino problem and developing research there afterward.

日本物理学会誌 第71巻 第5号 (2016年5月号) 予定目次

巻頭言

物理学会のイメージ—過去・現在・未来……………高岩義信

物理学70の不思議

ブラックホールに吸い込まれた情報を取り出せるか？

クォークの閉じ込め：なぜクォークは発見されないのか？

ガラスは固体？ 液体？

時空はなぜ4次元か？

恒星の誕生と死

惑星・衛星の起源—多様な惑星系はどのようにできたのか

宇宙のあらゆる階層に広がる磁場の起源

原子核の形とダイナミクス

現代物理のキーワード

Through the Looking-Glass：物質科学とChirality……………岸根順一郎

交流

微生物の発電……………高妻篤史

解説

高次元ブラックホールの不思議……………石橋明浩

超弦理論のコンパクト化 After Thirty Years ………………渡利泰山

最近の研究から

励起光波長の選択によってモット絶縁体を金属と電荷密度波に
転換する～相関電子系の新しい光相制御～

……………松崎弘幸, 岩野 薫, 岡本 博

話題—身近な現象の物理—

テープをはがして、考える—「粘着の物理」に向けて—

……………山崎義弘

JPSJの最近の注目論文から 1月の編集委員会より

……………上田和夫

ラ・トッカータ

海外客員研究員4回目……………奥村 暁

学界ニュース

いかにして森田浩介らは113番元素の命名権を獲得したか

……………矢野安重

談話室

ドイツ(独)留学体験座談会……………菅 滋正

新著紹介

日本における加速器ニュートリノ振動実験： K2KからT2Kへ

中家 剛 (京都大学大学院理学研究科 t.nakaya@scphys.kyoto-u.ac.jp)

大気ニュートリノで発見されたニュートリノ振動の研究には、加速器によるニュートリノビームを数百 km 先で測定する長基線ニュートリノ振動実験が適している。日本で行われた K2K 実験は、長基線加速器ニュートリノ振動実験のパイオニアであり、大気ニュートリノ振動を世界で初めて人工ニュートリノで追証した。T2K 実験は、ミューオンニュートリノビームの強度と品質を格段に向上させ、第3のニュートリノ振動「電子ニュートリノ出現」を世界で最初にとらえた。日本での加速器ニュートリノ実験の歴史と現状、そして将来への展望を紹介する。

1. はじめに

素粒子物理学の発展期において、宇宙線中に特異な現象を発見し、その後加速器で人工的に生成した粒子でその本質を研究するという手法が大きな成功をおさめてきた。ミューオン、パイ中間子、ストレンジネスをもった粒子等が宇宙線中で発見され、その後の高エネルギー加速器を使った実験による研究から素粒子標準模型の確立へとつながっていく。本稿の主題である「ニュートリノ振動の研究」も似た歴史をたどっている。1980年後半、カミオカンデ実験が大気ニュートリノが反応した事象において、ミューオンと電子の計数比が予想と一致しないことを見つけた。¹⁾ その解明のためにスーパーカミオカンデが建設され、1998年に「ニュートリノ振動」が発見され、²⁾ 2015年のノーベル物理学賞へとつながる。カミオカンデ実験、スーパーカミオカンデ実験が大気ニュートリノで観測したのは、ニュートリノ混合角を θ 、その質量2乗の差を $\Delta m^2 \equiv m_3^2 - m_2^2$ として

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left[1.27 \times \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right] \quad (1)$$

であった。ここで、簡単のために2世代振動を仮定している。大気ニュートリノのエネルギーはピークが1 GeV程度であり、タウニュートリノが反応してタウを生成するにはエネルギーが足らず、ミューオンニュートリノの欠損として観測されていた。このニュートリノ振動をより詳細に研

究するために、加速器で生成したニュートリノビームを利用する日本での長基線ニュートリノ振動実験 K2K と T2K (図1参照) が西川公一郎氏によって提案された。

加速器ニュートリノ実験の特徴を以下にまとめる。

1. パイ中間子を親粒子として集め、 $\pi \rightarrow \mu \nu_\mu$ 崩壊からのミューオンニュートリノを使ってビームを生成する。 π^+ 中間子を集めるか、 π^- 中間子を集めるかで、ミューオンニュートリノビームか反ミューオンニュートリノビームかを選択できる。参考として、大気ニュートリノでは $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_e, \bar{\nu}_e$ が混在している。
2. ビームを生成する加速器とニュートリノを検出する測定器の距離が決まっている。また、ビーム生成の親粒子であるパイ中間子の運動量分布から、ニュートリノビームのエネルギーがよく分かっている。結果として、式(1)中の L/E が一意的に決まり、ニュートリノ振動パラメータ $\sin^2 2\theta$ と Δm^2 の決定精度が上がる。
3. ニュートリノビームを振動前と振動後に測定するように実験をデザインできる。加速器のある実験所に設置された前置ニュートリノ測定器での測定と振動後の測定を比較することで、ニュートリノ反応断面積に起因する系統誤差を抑制し、ニュートリノビームフラックスの規格化ができる。
4. 高いエネルギーのニュートリノビームを使えば、式(1)のニュートリノ振動でできたタウニュートリノ反応でのタウ生成を直接確認できる (OPERA 実験)。
5. ニュートリノビーム中に電子ニュートリノの混入が少なく (約~1%)、主振動モード ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) 以外にもサブモード ($\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$) の測定が可能である (T2K 実験)。3世代間のニュートリノ振動を総合的に研究するには、この両方のモードを測定することが重要である。
6. ニュートリノの振動と反ニュートリノの振動を独立に測定でき、ニュートリノ振動における粒子反粒子対称性 (CP 対称性) の研究ができる。

本稿で紹介する3つの加速器ニュートリノ振動実験 K2K, OPERA, T2K の特徴を表1にまとめる。

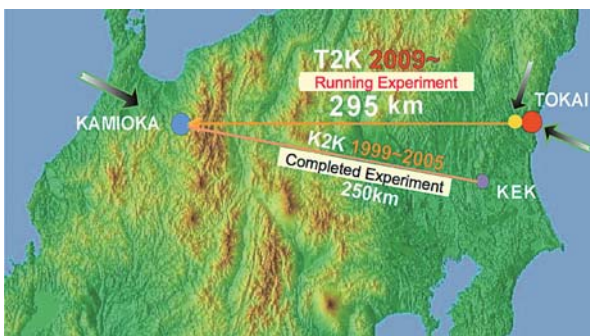


図1 K2K 実験と T2K 実験の基線長。

表1 K2K, OPERA, T2K 実験の特徴. SKはスーパーカミオカンデの略. ビームはニュートリノビームの平均, もしくはピークエネルギー.

	K2K	OPERA	T2K
加速器	KEK PS	CERN SPS	J-PARC
ビーム [GeV]	1.4	17	0.6
基線長 [km]	250	732	295
測定器	SK	原子核乾板	SK
稼働時期	1999-2004	2008-2012	2009-
成果の一例	ν_μ 消失	ν_τ 出現	ν_e 出現

2. K2K 実験

K2K 実験 (KEK-to(2)-Kamioka 実験) は世界で最初にニュートリノビームを数百キロという長距離飛ばしたパイオニア実験で, 大気ニュートリノで観測されたニュートリノ振動を人工ニュートリノビームを使って測定した. 茨城県つくば市の KEK にある 12 GeV-PS で 2.2 秒毎に 6×10^{12} 個の陽子を取り出し, ニュートリノビームを生成する. ニュートリノビームは生成後 0.001 秒で 250 km 離れたスーパーカミオカンデに到着する. ニュートリノビームの平均エネルギーは 1.4 GeV, このエネルギーでのニュートリノ反応断面積は核子当り $O(10^{-38}) \text{ cm}^2$ で, 2 日間でたった 1 個程度のニュートリノが 5 万トンのスーパーカミオカンデで観測される. ニュートリノエネルギーはタウを生成するには低いため荷電カレント・タウ生成反応は起こらず, 式 (1) のニュートリノ振動はミューオンニュートリノの消失として観測される. K2K 実験は 1999 年 6 月から 2004 年 11 月までビームを出し, 合計 112 事象のビームニュートリノを観測した. ニュートリノが振動しない場合の予想は $158.1^{+9.2}_{-8.6}$ 事象で, 観測数は有意に少なくニュートリノ振動が起こっていることが確認できた.³⁾ 式(1) から, ニュートリノ振動が起こる確率はニュートリノのエネルギーに依存していることが分かる. K2K 実験のエネルギー ($\sim 1 \text{ GeV}$) では, 荷電カレント準弾性散乱 ($\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$) が支配的であり, その場合ニュートリノエネルギーは

$$E_\nu = \frac{m_n E_\mu - m_\mu^2/2}{m_n - E_\mu + p_\mu \cos \theta_\mu} \quad (2)$$

として再構成できる (m_n と m_μ は中性子とミューオンの質量, E_μ と p_μ はミューオンのエネルギーと運動量, θ_μ はビーム軸に対するミューオンの散乱角). 観測された 112 事象中から, ミューオン 1 つの 58 事象を選択しエネルギーを再構成し, ニュートリノ振動の予想とよく一致していることを確認した.

ミューオンニュートリノの減少と観測されたエネルギー分布から, ニュートリノ振動が起こっていない確率は 0.0015% (4.3σ) と計算され, ニュートリノ振動が起こっていることが実証された. ニュートリノ振動パラメータを式 (1) の 2 世代モデルを基に測定し,

$$\Delta m^2 \sim 2.8 \times 10^{-3} \text{ eV}^2, \quad \sin^2 2\theta_{23} = 1.0$$

と決定した. K2K 実験の結果は, スーパーカミオカンデの大気ニュートリノ振動の測定値とよく一致しており, 大

気ニュートリノで起こっているニュートリノ振動が, 人工の加速器ニュートリノビームで確認された.

3. OPERA 実験

大気ニュートリノでニュートリノ振動の可能性が議論されていた 1990 年代, 加速器ニュートリノビームを使って $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動のタウ粒子を観測することが, ニュートリノ振動の確立において重要であると考えられていた. このために, 名古屋大学を中心とするグループが, 原子核乾板を使ってタウの生成を直接観測できる OPERA 実験を提案した. OPERA 実験は CERN の SPS からの 400 GeV の高エネルギー陽子ビームを使って平均エネルギー 17 GeV のミューオンニュートリノビームを生成し, 730 km 離れた Gran Sasso 研究所に設置した OPERA 測定器で測定する. 2008 年から 2012 年までの 5 年間ビームを照射し, 合計で約 20,000 事象のミューオンニュートリノ反応が観測できる. タウニュートリノに対するバックグラウンド事象は 0.25 ± 0.05 と少なく, タウニュートリノの信号数は 2.64 ± 0.53 事象と予想していた. データ解析の結果, タウ生成を 5 事象観測し, 5.1σ の信頼度で $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動を確認することに成功した.⁴⁾

4. T2K 実験

T2K 実験 (Tokai-to(2)-Kamioka 実験) は, K2K 実験の後継として提案され, 大気ニュートリノ振動で観測された $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動を超えて, より精密にニュートリノ振動を研究することが主題である. 特に, 3 世代間でのニュートリノ振動で起こると予想される $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の発見を含め, ニュートリノ振動パラメータの精密測定, さらにニュートリノにおける CP 対称性の研究が視野に入っている.⁵⁾ T2K では, 世界最大強度となる陽子加速器 J-PARC を使って, 大強度・高品質ニュートリノビームを生成し, 295 km 離れたスーパーカミオカンデでニュートリノ振動を観測する. T2K 実験の草案期, ニュートリノ振動パラメータは $\Delta m^2 \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta \sim 1$ と分かってきた. $\Delta m^2 \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ の場合, ニュートリノ振動は距離 $L = 295 \text{ km}$ でエネルギー約 600 MeV で振動確率が最大となる. T2K では, オフアキス法を使って, ニュートリノビームエネルギーが 600 MeV になるように最適化している. T2K で測定するニュートリノ振動の確率は, 3 世代振動を仮定すると,

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - 4 \cos^2 \theta_{13} \sin^2 \theta_{23} [1 - \cos^2 \theta_{13} \sin^2 \theta_{23}] \times \sin^2(1.27 \Delta m_{31}^2 L/E) \quad (3)$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(1.27 \Delta m_{31}^2 L/E) - \frac{\sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{32}}{2 \sin \theta_{13}} \sin(1.27 \Delta m_{21}^2 L/E) \times \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(1.27 \Delta m_{31}^2 L/E) \sin \delta_{\text{CP}} + (\text{CP even, solar, matter effect}) \quad (4)$$

と記述できる. 式 (3) と (4) は一見複雑であるが, 3 世代

の混合角 ($\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$) と2つの質量2乗差 ($\Delta m_{21}^2, \Delta m_{31}^2$) が含まれている。クォークの3世代構造を予言した小林・益川理論と同じ原理で、3世代間のニュートリノ振動にもCPを破る効果が現れる(式(4)の第2項)。大気ニュートリノ、K2KやOPERA実験では θ_{23} による効果を、太陽ニュートリノとKamLAND実験等の原子炉反ニュートリノでは θ_{12} による効果を見ていた。T2K実験では、第3番目のニュートリノ振動、 θ_{13} による効果を発見した。⁶⁾ その結果、ニュートリノでのCPの破れ(δ_{CP} の効果)やmatter effectと呼ばれる物質効果の研究が可能となった。

T2K実験は2009年からビーム照射を開始し、2011年に $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の証拠を最初に捕らえた。図2にスーパーカミオカンデで観測された電子ニュートリノ事象の例を紹介する。2011年3月までに取った全データ(1.43×10^{20} 個の陽子数)を解析すると、6電子ニュートリノ事象が見つかった。T2Kが発見した電子ニュートリノ事象のエネルギー分布を図3に示す。電子ニュートリノのエネルギー分布は

ニュートリノ振動の予想とよく一致していた。

電子ニュートリノ探索におけるバックグラウンド予想数($\theta_{13}=0$ の場合の予想値)は 1.5 ± 0.3 で、観測された6事象より有意に少なく、電子ニュートリノ出現が確認された。ニュートリノ振動でない確率は0.7% (2.5σ)と計算され、T2K実験が世界で最初に第3のニュートリノ振動の証拠、つまり θ_{13} がゼロでないことを捕らえた。^{*1} T2Kが測定した θ_{13} の値の範囲は $\delta_{CP}=0$ を仮定して

$$0.03(0.04) < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28(0.34)$$

で(括弧内の値は質量2乗差 Δm_{32}^2 が負の場合)、当初考えられていた値よりもかなり大きかった。その後、Daya Bayなどの原子炉反ニュートリノ実験で2012年に $\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016(\text{stat.}) \pm 0.005(\text{sys.})$ とより精密に決定された。

T2Kの結果から θ_{13} がゼロでないことが分かったが、ニュートリノ振動の確率 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ の測定は θ_{13} の精密測定には適していない。式(4)から明らかなように、 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ には θ_{13} 以外にも、他の混合角(特に θ_{23})や、CPの破れの効果 δ_{CP} 、物質効果等が効いてくる。このために、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の測定は、総合的に3世代ニュートリノ振動を研究するのに適している。特に、原子炉反ニュートリノ実験で測定された θ_{13} の値をインプットにすることで、 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ の測定を通してニュートリノCPの破れ δ_{CP} や物質効果を探ることが可能である。

震災復旧後の2012年からビームを再開し、2013年夏までに 6.57×10^{20} 陽子のデータを取り、電子ニュートリノ出現候補を28事象観測した。⁷⁾ バックグラウンド事象数($\theta_{13}=0$ の場合)は 4.92 ± 0.55 と予想され、^{*2} 7.3σ の信頼度で $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を確立した。原子炉反ニュートリノ実験で測定された θ_{13} をインプットとすると $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の信号数は21.6と予想され、観測数より少ない。この差を、CPの破れの効果と考え、 $0.09\pi < \delta_{CP} < 0.90\pi$ の領域を90%の信頼度で排除し、最適値は $\delta_{CP} = -\pi/2$ となった。観測数が多い原因は、CPの破れの効果に加えて、式(4)より $\sin^2 \theta_{23}$ が測定の中心値より大きいこと(~ 0.6 の可能性)や物質効果が大きいことによるかもしれない。 $\sin^2 \theta_{23}$ の精度を向上させるために、T2Kでは $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ 振動の精密測定⁸⁾や、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ の同時解析⁹⁾を行っている。また、米国フェルミ国立加速器研究所のNOvA実験は、T2Kより基線長が810 kmと長く、物質効果に対してより高い感度を有している。今後、T2KとNOvAの結果を組み合わせることで、物質効果とCPの破れの効果を区別できる可能性がある。

CPの破れを直接的に測定するには、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と反ニュートリノ振動 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ を比較することが重要である。このため、2014年5月から反ニュートリノビームで実験を進め、2015

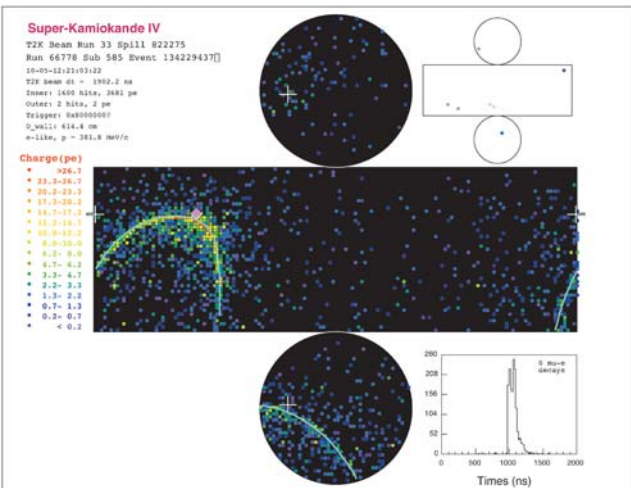


図2 T2K実験の電子ニュートリノ事象例。

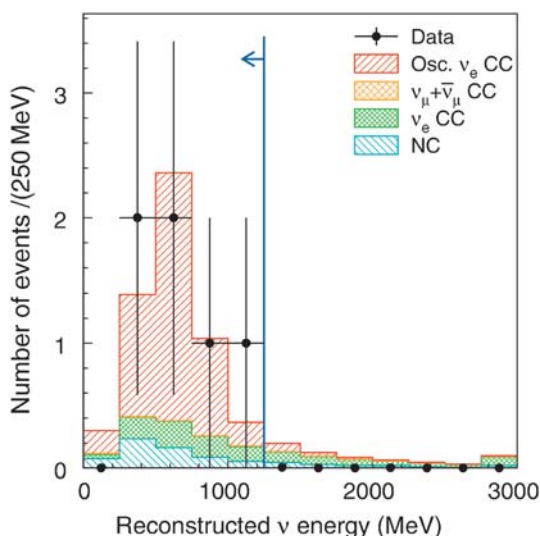


図3 T2K実験で観測した電子ニュートリノのエネルギー分布(文献6より引用)。

^{*1} 余談となるが、2011年3月11日に起こった東日本大震災のためにT2Kは実験が中断され、それまでの全データを解析した結果が文献6である。

^{*2} 強力なバックグラウンド除去プログラムを開発し、2011年の解析時よりバックグラウンド数が減っている。

年夏に最初の反ニュートリノ振動の結果を発表した。観測された反電子ニュートリノ候補は3事象で、さらなるデータが望まれる。^{*3} 2015年、J-PARC加速器はビーム強度360 kWでの運転に成功し、さらなる大強度の反ニュートリノビームが期待できる。

5. 将来

現在T2Kは、反ニュートリノビームで実験を行っており、約10ヶ月のビーム時間で $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を発見できると期待している。そして、ニュートリノ振動と反ニュートリノ振動が直接比較でき、ニュートリノでのCPの破れの研究が始まる。CPの研究にはさらなるビーム強度が必要で、J-PARCは530 kW相当のビーム加速に成功した。計画中の加速器の電源増強が実現すれば、1 MW以上のニュートリノビームが可能となり、将来に期待できる。この世界最高強度のビームがあれば、T2KでニュートリノにおけるCPの破れを 3σ で発見できる可能性がある。「ニュートリノは日本のお家芸」と言われており、今回のノーベル賞の「ニュートリノ振動の発見」に続き、「ニュートリノにおけるCPの破れの発見」も、ぜひ日本の研究施設で達成したい。

スーパーカミオカンデは1996年の運転からほぼ20年、世界の最先端を走ってきた。「ニュートリノ研究」の次の飛躍には、スーパーカミオカンデを質・量共に凌駕する次世代ニュートリノ測定器「ハイパーカミオカンデ」の実現が必要である。ハイパーカミオカンデとJ-PARCのニュートリノビームが合わされば、ニュートリノCPの研究の感度が飛躍的に向上し、 δ_{CP} の取りうる全パラメータ領域の76% (58%) の範囲で $3(5)\sigma$ でCPの発見が可能となる。また、軽いニュートリノ質量は大統一のエネルギースケールの物理を示唆し、大統一理論の証拠となる陽子崩壊の発見に「ハイパーカミオカンデ」は最強の実験になる。

「ニュートリノ振動」で発見された軽いニュートリノ質量の起源がシーソー機構だとすると、重たい右巻きニュートリノが大統一のエネルギースケール辺りに存在し、我々の住む物質優勢宇宙の起源がレプトジェネシスで説明できる可能性がある。これらの理論を実験・観測的に調査していくには、「ニュートリノはマヨラナ粒子か」、「ニュートリノでCPは破れているか」という課題が重要で、今後の理論・実験両方の展開が楽しみである。

^{*3} 反ニュートリノでは、その反応断面積が約1/3になる上に、ビーム中にニュートリノの混入が増え $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ がバックグラウンドとなるため、測定がより難しくなる。

6. おわりに

加速器を使ったニュートリノ実験では、加速器の性能が実験の成否を決定する。K2K実験の12 GeV PSの大強度化を達成したKEKの加速器チーム、そしてT2K実験のJ-PARC加速器を建設し運転しているJ-PARCの加速器チームに最大限の敬意を表したい。K2K実験、T2K実験共に国際共同研究であり、コラボレータの力を集結することで、今回の物理結果につながっている。一緒に研究してきたK2K実験とT2K実験の全コラボレータに感謝している。特に、特筆すべきはK2KおよびT2K実験の代表者であった西川公一郎氏のリーダーシップである。最後に、K2K実験、T2K実験、J-PARCを支え、スーパーカミオカンデの重大事故からの復旧を指揮した故戸塚洋二先生に感謝致します。

参考文献

- 1) K. S. Hirata, *et al.*: Phys. Lett. B **205** (1988) 416.
- 2) Y. Fukuda, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 1562.
- 3) M. H. Ahn, *et al.*: Phys. Rev. D **74** (2006) 072003.
- 4) N. Agafonova, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **115** (2015) 121802.
- 5) Y. Itow, *et al.*: hep-ex/0106019.
- 6) K. Abe, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 041801.
- 7) K. Abe, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 061802.
- 8) K. Abe, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 181801.
- 9) K. Abe, *et al.*: Phys. Rev. D **91** (2015) 072010.

著者紹介



中家 剛氏：専門は素粒子物理学：最近ニュートリノの研究に重点を置いている。粒子と反粒子の対称性を解明し、物質優勢宇宙の起源を見つけることが目標。

(2015年11月30日原稿受付)

Accelerator Neutrino Experiments in Japan: from K2K to T2K

Tsuyoshi Nakaya

abstract: An accelerator-based neutrino beam experiment with a baseline of several hundred kilometers is design to study neutrino oscillations discovered in atmospheric neutrinos. The K2K experiment in Japan is the first accelerator based long-baseline experiment and successfully confirmed atmospheric neutrino oscillations with an artificial neutrino beam. The T2K experiment has the higher power and higher quality of the muon neutrino beam, and finds the evidence of the third neutrino oscillation, appearance of electron neutrinos first in the world. We report the history, status and the future prospect of the accelerator neutrino oscillation experiments.

誰がカンニングを見たか

大関 真之 (京都大学大学院情報学研究所 mohzeki@i.kyoto-u.ac.jp)

1. カンニング騒動

「大関さん、カンニングで新聞に載っていましたよ。」
まるで犯人扱いである。
「ベトナムのカンニング事情についてお聞かせください。」私はカンニングの専門家でもなんでもない。即座にお断りせざるを得なかった。海外出張から帰ると、研究室の秘書から、「大関先生、テレビの取材依頼が来ています！」なんのことだろうか？と戸惑うばかりであった。

京都大学がカンニングの検出技術を開発した、というニュースを目にした読者の方々もいるだろう。Journal of Physical Society of Japan (JPSJ) 誌に掲載された論文¹⁾に関するニュースである。この論文は、山中祥五くん(掲載当時、京都大学工学部4年生)と Aurélien Decelle 氏との共同研究の成果である。論文掲載の時期が近づいたときに、私は京都大学の広報に論文内容をまとめた1枚の書類を送付した。Nature や Science, Cell 誌でもなく、それに類する雑誌でもない論文についてのプレスリリース用記事である。通例であれば気が引ける場面であろう。しかし本研究成果は、実施当時学部3年生のものであり、特筆すべきことを含む。また後で紹介するように、「カンニング」は「スパース性」と呼ばれる専門的な概念を専門外の人々に伝える良い表現であると考えて、広く社会に知ってもらいたいチャンスであるという判断から、私はプレスリリースに踏み切った。

2. ことのはじまり

京都大学工学部情報学科3年生向けの授業に「数値計算演習」という、実際に研究の舞台で利用する計算アルゴリズムの基本を学ぶ授業がある。例えば数値積分、行列の対角化、モンテカルロ法などである。私が担当するにあたり、適度な難易度と達成感があり、将来にわたり通用する題材には何があるだろうか、私はそれをぼんやりと考えていた。この機会に自分も勉強してみようと考えて挙げたのが、「ボルツマン機械学習」である。履修者名簿を眺めると、例のカンニング事件のあった年度に入学した学生がほとんどであった。少しだけ悪戯心をもち、学習に夢中になってもらえるような話題として「カンニング」を検出できないかと考え、手を動かした。実際に取り組んでみると奥が深いなと感じた頃に授業開始である。

授業初日に成績評価方法を明示する際に、思い切って「カンニング」についての言及を行った。「最終課題は、カンニング検出のプログラム作成にする。ということは君た

ちがこの課題を完遂できたら、カンニングできなくなるので、カンニングはしないでください。」そう説明した。これが一番のカンニング防止法であった。実際に最終課題にカンニング検出技術の原型となる問題を提示したところ、山中くんが見事それを満足のいく形に仕上げてきたのだ。その後、私の研究室で度々の議論を通して、更に専門的な内容に踏み込むことで学術的成果として価値のあるものと磨きをかけていった。

3. ボルツマン機械学習

最近何かと世間を賑わせている機械学習に興味をもつ読者も多いことだろう。せっかくなので研究そのものについて踏み込んでみよう。計測技術や信号処理技術、そして情報処理そのものの質の向上により、我々は大量のデータを容易に取得することが可能となった。高次元のベクトル $\mathbf{x}^{(d)}$ で表される大量のデータ ($d=1, 2, \dots, D$) が与えられたときに、そのデータの構造を少数の説明変数で表した生成モデルを解明する処方箋のひとつがボルツマン機械学習である。ここで大前提として、データは確率的に出力されて得られているものと考えよう。

ボルツマン機械学習では、統計力学で基本となるカノニカル分布に従ってデータ \mathbf{x} が出力されると考える。

$$P(\mathbf{x}|\mathbf{u}) = \frac{1}{Z(\mathbf{u})} \exp\{-E(\mathbf{x}|\mathbf{u})\}. \quad (1)$$

ここで $Z(\mathbf{u})$ は分配関数、 \mathbf{u} はデータの構造を表すエネルギー関数 $E(\mathbf{x}|\mathbf{u})$ を形作るパラメータである。例えば N 次元の2値データがイジング模型の(温度を1とした)カノニカル分布から生成されたと仮定する場合には、

$$E(\mathbf{x}|\mathbf{u}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in \partial i} J_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^N h_i x_i \quad (2)$$

とする。 $x_i = \pm 1$ であり、パラメータ $\mathbf{u} = (J, \mathbf{h})$ によりエネルギー関数が特徴づけられている。 $j \in \partial i$ は、 $J_{ij} \neq 0$ で繋がっている成分 i に関与する j についての和である。連続変数をもつ模型を仮定してもよい。

上記の仮定のもと、与えられたデータの経験分布

$$P_D(\mathbf{x}) = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(d)}) \quad (3)$$

に最も近いカノニカル分布を探してることがボルツマン機械学習の目標である。その結果、パラメータ \mathbf{u} によりデータの経験分布を「もってもらしく」再現する確率分布を得ることができる。パラメータそのものからデータの特徴を調べることも可能である。

さてそうすると2つの異なる確率分布をもってきたときに、それらが近いか遠いかを調べるための計量が必要だ。最も一般的に用いられるのがカルバック・ライブラー (KL) 情報量である。このKL情報量の意味で、データの経験分布に最も近い確率分布を与えるパラメータ \mathbf{u} を求める。パラメータ \mathbf{u} が関与する部分に注目すると、以下の最大化問題と等価であることが分かる。

$$\max_{\mathbf{u}} L(\mathbf{u}). \quad (4)$$

ここで $L(\mathbf{u})$ は対数尤度関数 (の経験平均) と呼び、以下のように定義される。

$$L(\mathbf{u}) = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D \log P(\mathbf{x} = \mathbf{x}^{(d)} | \mathbf{u}). \quad (5)$$

対数尤度関数は、仮定した確率分布とデータの経験分布の形が近ければ近いほど大きな値を取る。そこでこの対数尤度関数の最大化 (最尤法) を行うことで、得られたデータに適合する「もっともらしい」パラメータの推定を行う。少し計算してみると明らかとなるが、対数尤度関数は、

$$L(\mathbf{u}) = -\frac{1}{D} \sum_{d=1}^D E(\mathbf{x} = \mathbf{x}^{(d)} | \mathbf{u}) - \log Z(\mathbf{u}) \quad (6)$$

という形をもつ。第一項がエネルギー関数 (の経験平均) の符号を変えたものであり、第二項が分配関数の対数であるから、自由エネルギーである。統計力学の言葉でいえば、自由エネルギーとエネルギーの差であるエントロピーが最大となるようなエネルギー関数の形を求めることがボルツマン機械学習の中心的問題であることが分かる。しかしいざ最尤法の実行のために、パラメータ \mathbf{u} について対数尤度関数の微分を取ってみると、ボルツマン機械学習の難しさが顔を出す。

$$\frac{\partial L(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} = -\frac{1}{D} \sum_{d=1}^D \frac{\partial E(\mathbf{x} = \mathbf{x}^{(d)} | \mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} + \left\langle \frac{\partial E(\mathbf{x} | \mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right\rangle_{\mathbf{u}}. \quad (7)$$

第1項はエネルギー関数の形を知っていれば評価は容易である。データに関する経験平均をとるだけだ。一方第2項は熱平均の計算 $\langle \dots \rangle_{\mathbf{u}} = \sum_{\mathbf{x}} \dots \times P(\mathbf{x} | \mathbf{u})$ が必要となる。ただ一度きりの計算であれば、やる気にもなるだろう。しかし勾配法の手続きは、適当な初期条件 $\mathbf{u}[0]$ のもと、以下の反復計算を行うため何度も何度も勾配の計算、熱平均の計算が必要であることが分かる (図1)。

$$\mathbf{u}[t+1] = \mathbf{u}[t] + \eta \left. \frac{\partial L(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}[t]}. \quad (8)$$

ここで η は学習係数と呼ばれる量で、小さければ小さいほど正確であるが計算時間の長大化に繋がるのでほどよい値をとることが要求される。この熱平均の存在がボルツマン機械学習の運命を決めた。正確な実行のために必要な計算量が非常に膨大となり、現実的な学習法ではないと、かつてその黎明期では判断された。しかしながら2000年代に入ってから、データ数の大規模化とそれに応じて更に発展した新しい計算手法の提案を契機に現実的な計算手法であると受け入れられて今日に至り、ひとつの完成形として、

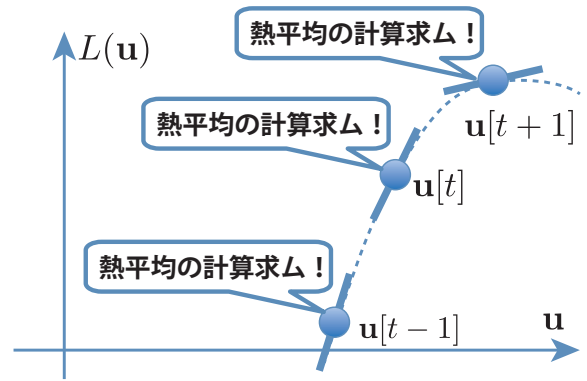


図1 最尤法の様子。

読者の多くが耳学問的に興味をもつ深層学習を創出した。さて計算量の増加を防ぐ代表的なものを紹介しておこう。

擬似最尤法

エネルギー関数が変数毎の和に分解できる ($E(\mathbf{x} | \mathbf{u}) = \sum_{i=1}^N E_i(x_i | \mathbf{u}, \mathbf{x}_i)$) 場合に、「得られたデータ」を利用した近似を分配関数について行う。

$$Z(\mathbf{u}) \approx \prod_{i=1}^N \sum_{x_i} \exp\{-E_i(x_i | \mathbf{u}, \mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i^{(d)})\}. \quad (9)$$

ここで i は添字 i 以外のものを表している。例えば先ほどの Ising 模型とした場合には、

$$E_i(x_i | \mathbf{u}, \mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i^{(d)}) = \left(\sum_{j \in \partial i} J_{ij} x_j^{(d)} + h_i \right) x_i \quad (10)$$

とする。このとき分配関数の計算は単一の変数 x_i についての和であるため容易に実行できる。同様に確率分布を独立なもの積として近似する手法に平均場近似が挙げられるが、擬似最尤法は「得られたデータ」を利用しているところが大きく異なり、データ数 D が無限大の極限で、最尤法の結果と一致することが保証されている点も異なる。そのため非常に多くのデータが手に入る場合に有効である。

コントラスト・ダイバージェンス法 (CD法)

統計力学を知る読者は、熱平均の計算にマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC法) を採用したらよいのではないかと考えたかもしれない。しかしながら平衡分布への緩和に時間がかかるため計算量が膨大なものとなる。CD法では、MCMC法を「得られたデータ」の経験分布から始める。その心は、データの経験分布はあるパラメータの平衡分布から生成されていると考えることにある。データの経験分布に最も近いパラメータに対して、今我々が計算している途中の $\mathbf{u}[t]$ が近いときには、緩和は非常に速いと考えられる。近年話題の深層学習では、CD法が多く利用されている。そこでは更に簡単に緩和する模型 (制限ボルツマン機械) を扱い計算量の長大化を防ぐなど更なる工夫が施されている。

このように統計力学の手法そのものを利用するだけでなく、データそのものを利用した手法が成功を収めていることに注目したい。授業内では比較的容易に実装可能な擬

似最尤法を採用した。さてどうやって、カンニングを検出できるようにしようか。

4. 項目応答理論

読者の中には教員も多くいるだろう。答案を眺めて、類似した回答があるときや、解けそうもないのにいきなり正解になっていたりするときカンニングを疑うだろう。もちろん適当にやって正解したのかもしれない。そこで答案の正解、不正解は確率的なモデルで記述することは一定の説得力をもつだろう。答案の生成過程が、被験者、問題毎に独立であるとして、問題の難易度、被験者の能力を推定する枠組みが既にある。項目応答理論と呼ばれるものである。一部の資格試験において、得られた答案データから試験内容の難易度や被験者の理解度を推定するために、この項目応答理論が実際に使われている。

最も素朴な項目応答理論のモデルでは、答案の正解、不正解が以下の確率分布に従うと仮定する。

$$P(x_{ij}|\mathbf{u}) = \frac{1}{z_{ij}} \exp\{(c_i - d_j)x_{ij}\} \quad (11)$$

ここで x_{ij} は正解のとき +1, 不正解のとき -1 をとる 2 値の量であり, c_i は被験者 i ($i=1, 2, \dots, I$) の能力を表す, d_j は問題 j ($j=1, 2, \dots, J$) の難易度を示すものとする。 z_{ij} は規格化定数である。素朴に考えて、問題間、被験者間の独立性は、ある程度リーズナブルな仮定であろう。問題の構造によっては、問題間に相関がある場合（いくつかの小問の後、難解な問題が出てくるアレだ）も考えられる。²⁾ 一方、被験者間に相関がある場合はどうだろうか？ それはカンニングだ。そう考えて確率モデルを以下のように変更してみよう。

$$P(\mathbf{x}|\mathbf{u}) = \prod_{j=1}^J \frac{1}{Z_j} \prod_{i=1}^I \exp\left\{\sum_{k \in O_i} w_{ik} x_{ij} x_{kj} + (c_i - d_j)x_{ij}\right\} \quad (12)$$

ここで w_{ik} は被験者間の協同を表すカンニング係数である。 $x_{ij}x_{kj}$ の積はある問題 j について同一の結果（両者正解、不正解）であったときに正の値をもつ。そのため $w_{ik} > 0$ のとき、その傾向が高い答案の確率が増えるというモデルになっている。つまりカンニングが存在するという格好だ。もちろん問題毎にカンニングの有無を考慮したモデルも構築できる。ここでは簡単のため、どの問題もカンニングの有無の程度は同様とした。このモデルを利用した最尤法で、パラメータ $\mathbf{u} = \{W, \mathbf{c}, \mathbf{d}\}$ を推定する。ここで $W = (w_{12}, w_{13}, \dots, w_{I-1, I})$, $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_I)$, $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_J)$ とした。その結果からカンニングの有無を推定しようというわけだ。

数値計算演習の課題内ではここまでとしたが、データの数が少ないことによる経験分布の歪みにより、カンニングをしたペアをはっきりと示すことは残念ながら困難であった。そこで更なる考察を経て、カンニング係数をもつ本質である「スパース性」に注目した。

5. スパース性のあるパラメータ推定

スパース性とは、知りたいものの本質的に効いてくる要素が実はほとんどない（零である）という性質である。この性質を利用すると、非常に少ない情報からも確実な推定が可能となり、高次元の大量のデータから本質的な要素を抜き出すことも可能となる。

この様子を分かりやすく説明するには、「カンニング」は格好の材料である。答案という高次元データから、「ごく少数の重大な影響を与えている非零のカンニング係数を探す」ことは、まさにスパース性をもつパラメータの推定に相当する。そこで Aurélien 氏との議論により、スパース性をもつパラメータの推定に有効なデシメーションアルゴリズムの採用を検討した。

デシメーションアルゴリズム

基本是最尤法（ないしは擬似最尤法）を行う。その結果、非常に小さい絶対値をもつ推定値が得られたときに、強制的に零に落とし込む（デシメーション）。その零としたところは除外して、残りのパラメータについて最尤法を繰り返す。つまりカンニングの可能性が低いペアについては無罪放免にしていき、何度見てもカンニングを疑わざるを得ないペアについては……、ということだ。しかしこれだけでは、次々に推定結果を零にするだけだ。零であるべきパラメータだけを正しく零とするにはどうしたら良いだろう。そこで最尤法の心を思い出そう。データの経験分布にうまく適合する、もっともらしいパラメータを探すということである。最尤法の結果からパラメータを人工的に操作すれば、もっともらしさは低減する。しかしデータを説明するのに不必要で零にするべきパラメータを零にした場合、その変化は非常に小さいものであると考えられる。なぜならその操作は「もっともらしい」から、これは「カンニングしていないだろうと断定しても不自然ではない」という判断と同様である。しかしこれを繰り返していくなかで、どうしてもあるペアについてはカンニングを疑わざるを得なくなるだろう。それを反映して、零にするべきではないパラメータを零にした場合、急激にもっともらしさが低減することが期待される。この急な変化を検知して、デシメーションアルゴリズムの終了とする。実際には対数尤度関数を以下のように変形して急激な変化を検知しやすくする。

$$L_{\text{tilted}}(\alpha) = L(\mathbf{u}_\alpha^*) - (1-\alpha)L(\mathbf{u}_0^*) - \alpha L(\mathbf{u}_1^*) \quad (13)$$

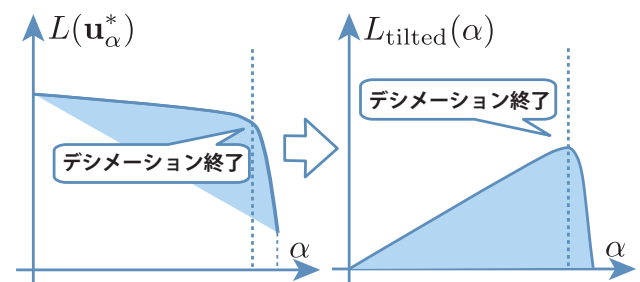


図2 デシメーションアルゴリズム利用時の対数尤度関数の様子。

ここで α は、スパース性の期待できるパラメータのうち零にした割合を表す。 \mathbf{u}_α^* は α の割合で零にしたときの最尤法の結果である。 $L_{\text{tilted}}(\alpha)$ が最大値を迎えたときに、もっともらしさである対数尤度関数の値が、デシメーションの影響で急激に変化していることが検知できる(図2)。

6. 結果と反響

実際の答案データでカンニングの検出を行うと色々問題があるので、同じ確率モデルでいくつかのペアのカンニング係数を1として、残りを0としたときに複数の問題について答案データをマルコフ連鎖モンテカルロ法で生成させたものを利用した。ここで $I=30$ 人のクラスで、 $J=1,000$ に及ぶ問題を一度だけ($D=1$)解いてもらったという状況を想定した。カンニング係数は対称($w_{ij}=w_{ji}$)であるとして、お互い見せ合いをするタイプのカンニングを想定した。その疑似答案データのもと、数値実験でデシメーションアルゴリズムの性能評価を行うという形で論文にまとめた。カンニング係数の推定誤差は、確かに $L_{\text{tilted}}(\alpha)$ が最大値を向かえるところで最小値をとることが分かった(図3)。更にカンニング検出の側面を重視して、零か非零かについて精度良く識別できていることを確認した。¹⁾ 残念ながら実際の現場で使うとしたら、生成モデルがカノニカル分布とは異なる可能性があり、それほど精度は期待できないだろう。こればかりはやってみないと分からない。

いずれにせよ、これがカンニング騒動の学術的内容である。山中くんは更に自身の目指す方向で研究活動に邁進してくれている。我々の研究成果は、これまで紹介したように、現代のキーワードである機械学習やスパース性を、なじみのある言葉で表現した研究内容であり、伝わる成果と判断して、京大の広報を通じてプレスリリースを行った。その結果、ちょうどセンター試験の前日だったからか、朝日新聞からの取材を経て翌日朝刊を飾ることとなった。センター試験終了後にはTBSテレビ「あさチャン」に取り上げられる。科学雑誌で著名なニュートンプレス発行の

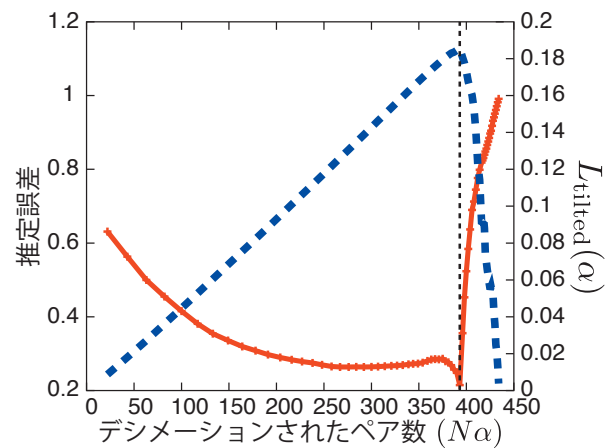


図3 全ペアのうち1割のペアがカンニングしている場合の結果。赤線(実線)がカンニング係数の推定精度、青線(破線)は $L_{\text{tilted}}(\alpha)$ の変化を示したものの。

Newton 誌に掲載され、果ては一般文化誌である太田出版ケトル誌からの取材が舞い込み、NHK 総合「おはよう日本」の取材が来るまでに至った。意外なところでは中国の人民日報にも掲載された。やはり国民的関心事なのだろうか。一番嬉しかったのは、関西ローカル番組「あほやねん! すきやねん!」の中で、京都大学のユニークな学生、研究を特集するものがあり、山中くんを中心に本研究成果を特集したいという依頼がきたことだ。この騒動以来、これまでとは違った場所での講演の機会や共同研究の打ち合わせの機会が増えた。大きな反響に大変感謝をしており、勉強になることばかりであった。そして何より自分自身の幅が広がっていくのを感じる。そんな活動を学部生と一緒に授業の延長線上で実施することができた幸運に感謝する。

参考文献

- 1) S. Yamanaka, M. Ohzeki and A. Decelle: J. Phys. Soc. Jpn. **84** (2015) 024801.
- 2) 安田宗樹, 田中和之: 電子情報通信学会技術研究報告, ニューロコンピューティング **III** (2012) 387.

(2015年8月25日原稿受付)

雷の物理とその観測技術

牛尾 知雄 (大阪大学大学院工学研究科 ushio@comm.eng.osaka-u.ac.jp)

1. はじめに

対流圏の大气が地表からの加熱により不安定な成層を成すとき、その不安定を解消するため積乱雲あるいは雷雨が発達する。一般的に積乱雲は対流セルあるいは降水セルと呼ばれる秒速十数メートル程度の激しい上昇気流、下降気流を含む対流の単位の集合体で構成されており、各々の対流セルは発達期、成熟期、消滅期という特有のライフサイクルを持つ。このライフサイクル中で、発達期の霰(あられ、直径5 mm未満の氷の粒)を主成分とする降水の形成に伴い雲内で電荷分離が進行し電荷が蓄積される。そして、大気の絶縁破壊強度を超えたとき放電という形態をとって、雲内の電荷が中和される。これを雷放電と呼び、以上を総称して雷放電現象と呼んでいる。このような雷放電現象は、我々に極めて身近な現象であるにも関わらず、その発生機構から特徴に至るまで基本的な点について未解明な問題が多数ある。そこで本稿では、雷放電現象に関して、その構造や物理と観測する技術を概観し、筆者なりの意見を交えて紹介したい。

2. 雷放電の物理

2.1 積乱雲の電荷構造

上述のように積乱雲は霰を主成分とする降水粒子の形成に伴い帯電する。しかし、その帯電機構に関しては、種々の諸説が現在でも提案されており、完全な解決には至っていない。現在のところ最も有力な説は、高橋劭博士による着氷電荷分離機構⁸⁾である。これは、氷晶(ひょうしょう、氷の結晶のこと)と霰の接触による電荷分離仮説であり、帯電の量と符号は周囲の雲水量と温度によって決まるといえるものである。実際の積乱雲では、マイナス10度より低

温度の上方では、霰は負に帯電し負電荷領域を形成し、一方氷晶は積乱雲の上部で正電荷領域を広く形成する。そして、0度からマイナス10度までの層では霰は正に帯電しポケット正電荷層(Positive Pocket Charge)とよばれる比較的小さな正電荷領域を形成する。このようにして、積乱雲の電荷構造は、プラス、マイナス、プラスの3重極構造を基本形としてとる(図1)。しかし一方で、近年のバルーンによる積乱雲内の電荷の直接測定から積乱雲の種類や発達の度合いによって、より複雑な分布と変化を示すことが次第に明らかになりつつある。¹⁵⁾このような実際には複雑な電荷分布と変化を示す積乱雲の電荷構造を十分説明できる、緻密な物性論に基づいた学説は提案可能であろうか?

2.2 雷放電の種類

以上のようにして蓄積された電荷は大気中の絶縁破壊強度を超えたとき、放電する。その形態は、雲から大地に放電する対地放電(いわゆる落雷、Ground Flash)と雲の中で放電が完結する雲放電(Cloud Flash)の2種に大別することができる。そしてさらに、落雷は雲内の正電荷が中和される正極性落雷と負電荷が中和される負極性落雷の2種に分けられる。これらの各種放電の比率は、季節や積乱雲のタイプなどによって大きく変化するが、例えば、夏季の北米において、雲放電の割合は平均75%程度という報告がある。³⁾また正極性の落雷は、冬季に大きく比率が増加するが、夏季においては10%以下である。¹⁰⁾一方、雲内から放電が開始せず、地上から開始し積乱雲に向けて進展する上向き放電(Upward Lightning)も存在する。これは、雷雲の電荷によって局所的に高電界が形成されるタワーなど高構造物において良く見られるのが特徴であり、¹⁾特に冬季日本海側においては、頻繁に観測される。⁹⁾さらに、このような冬季における雷放電性状は夏季とは様々な面において大きく異なり、例えば、日本海側における冬季雷では、1,000クーロン以上の中和電荷量となることがある。一方で夏季では数十クーロン程度である。何故だろうか?これも未だに定説のない未解明な問題である。

ところで、雷雲上空で発生する過渡的な発光現象の存在が、1989年に米国のR. Franzらによって初めて確認された。⁶⁾この発見により、1990年代初頭には、米国において精力的な地上光学・電波観測が行われ、この過渡的な発光現象は大きな中和電荷量を有する正極性の対地放電に伴って雷雲上空で発生すること等が明らかにされた。²⁾この成層圏・中間圏・下部熱圏における高高度放電発光現象は、図2に示すように、その発生形態の違いによってスプラ

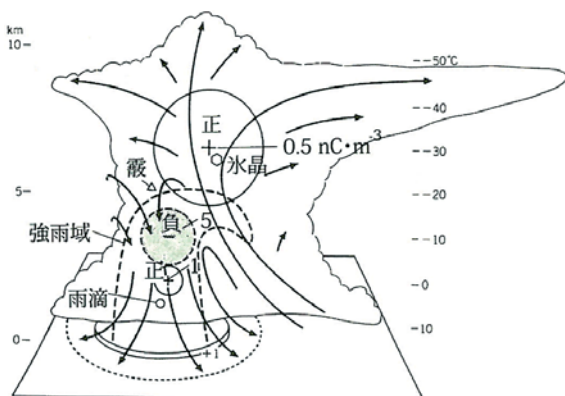


図1 積乱雲の電荷構造の基本モデル。¹⁶⁾

ト、エルプス、ブルージェット等と呼ばれている。

このような新形態の高高度放電発光の発見に伴って、メカニズムの理解も急速に進んでいる。特に、スプライトの発生メカニズムとしてこれまでに提唱されているのは、雷雲上空の準静電場による絶縁破壊メカニズム(準静電場モデル)¹¹⁾がある。準静電場モデルでは、電荷モーメント(放電電荷量と放電距離の積)が数 $1,000\text{ C}\cdot\text{km}$ を超えるような、放電エネルギーの大きい正極性のCG(Cloud-to-Ground discharge, 雷雲地上間放電)によって、雷雲上空に準静電場が形成される。この準静電場によってスプライト発光高度の電子が加速され絶縁破壊を引き起こし発光に至るといふメカニズムである。このモデルによると、スプライトの発光強度や発光の時間・空間発展を合理的に説明できるとして、現在最も信頼されているメカニズムとなっている。しかし、このモデルでは説明困難な点が複数指摘されており、こうした発生形態はどのような要素によって決まるのかこれも未だ分かっていない、これからの課題である。

2.3 放電過程

雷放電は自然界に存在する km にも及ぶ超長ギャップ放電であり、その形態は、数センチ程度のギャップ長の放電とは大きく異なる。従って、短ギャップ放電の機構をそのままスケール則で長ギャップ放電の機構として類推するこ

とは困難となる。このような非線形性が雷放電に関する研究を難しくしていると言っても過言ではない。帯電した積乱雲から開始する雷放電は、放電開始(Initiation)、リーダ(Leader)、帰還雷撃(Return Stroke)、ダートリーダ(Dart Leader)、後続雷撃(Subsequent Return Stroke)などの各過程から構成されている。これらはどれも短ギャップ放電には見られない形態である。放電の開始は、雲内の現象であり、直接光学観測によって見ることはできない。そのため、放電開始に関する研究は電磁界観測によってその多くは得られている。図2の典型的なその電磁界観測によれば、放電の開始には特徴的な比較的振幅の大きい両極性のパルス列が観測される。その後、ステップを踏みながら、約 10^5 m/s 程度で大地に向けて放電は進展する。これをステップリーダ(Stepped Leader)と呼ぶ。地表面に達すると、強い発光を伴って、同じ経路を光速の3分の1程度の速度で地表から上空に放電が進展する。これを第一帰還雷撃(First Return Stroke)と呼ぶ。その時、平均 30 kA 程度の電流が流れる。その後、再び、同様な経路を、積乱雲からリーダに似た、しかし、速度が一桁ほど速い(10^7 m/s 程度)ダートリーダと呼ばれる放電が下降し、地表面付近に達すると再び帰還雷撃に似た大電流が流れる。これを先ほどの第一帰還雷撃に対して、後続雷撃(Subsequent Return Stroke)と呼んでいる。こうした過程が何度も繰り返され、一つの雷放電が完結する。何回繰り返されるのか、その回数を多重度と呼ぶが、夏季の負極性落雷の場合、多重度4程度が平均値である。この間、雲内でも同時に放電が進展する場合があります。そのような帰還雷撃間における放電過程は、J過程、K過程、Mコンポーネントなどの様々な名前がつけられている。

ところで、地球起源のガンマ線放射が存在するという事実が、ガンマ線天文台(CGRO)衛星に搭載されているBATSE(Burst and Transient Source Experiment)によって1994年に初めてもたらされた。⁵⁾ 太陽や銀河起源のガンマ線バーストの継続時間は数 msec から $1,000\text{ sec}$ 以上のものまで様々であるが、BATSEの観測によると、地球ガンマ線については数 msec 以下という非常に短時間の現象であり、

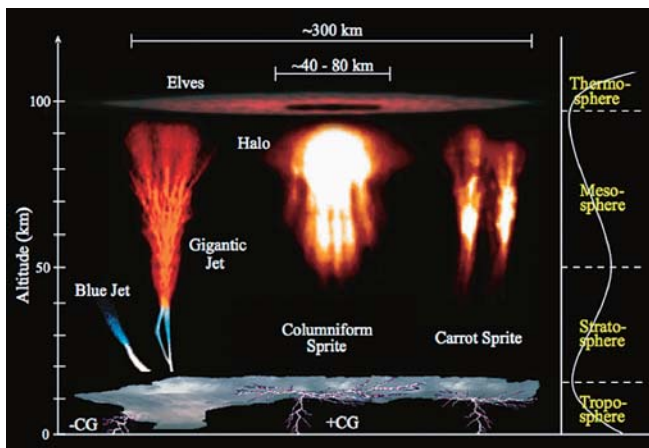


図2 高高度発光現象と雷放電の模式図.¹²⁾

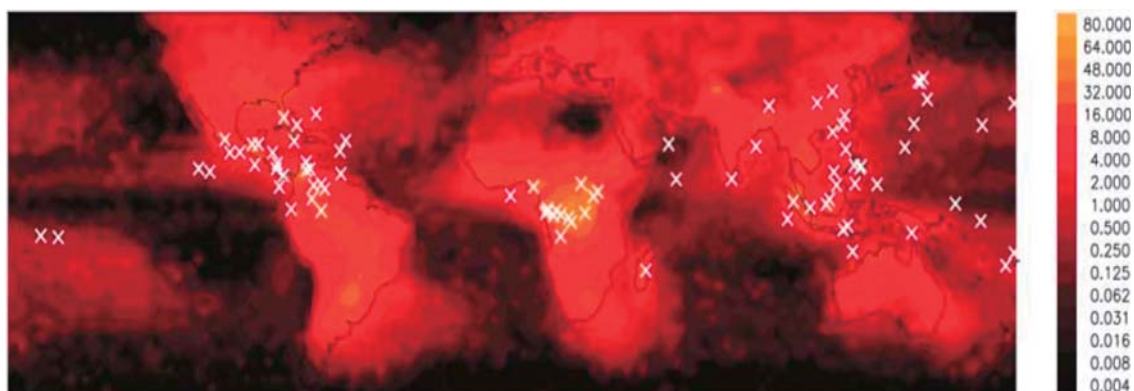


図3 地球ガンマ線の発生分布(x印)と、雷放電の発生頻度分布(赤色のコンターマップ).¹³⁾

ほとんどがシングルパルスであった。その後、RHESSI衛星 (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) の観測によって500例以上の地球ガンマ線が検出され、平均すると2日に1事例という高い頻度で発生していることが分かった。¹³⁾ 図3は、白色×印で示されるRHESSIで観測された地球ガンマ線発生分布と、赤色コンターで示される雷放電の発生頻度分布を表している。これらを比較する

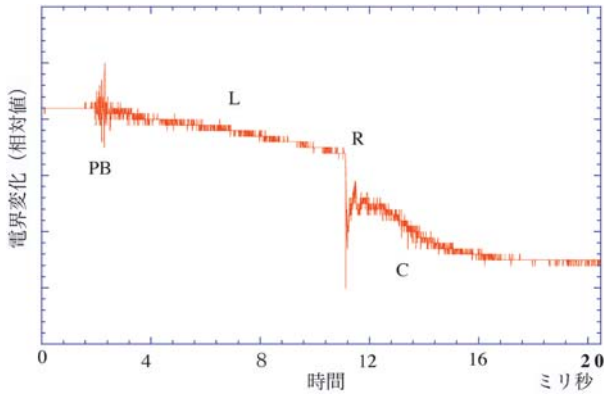


図4 対地放電に伴う電界変化の一例.

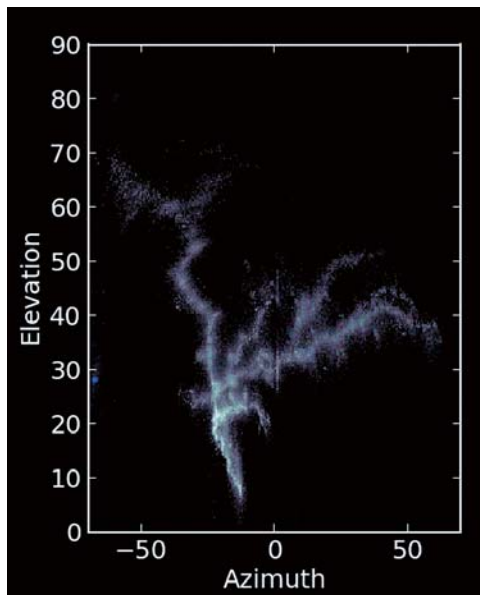


図5 VHF帯広帯域干渉計によって可視化された対地放電の再現像。¹⁴⁾

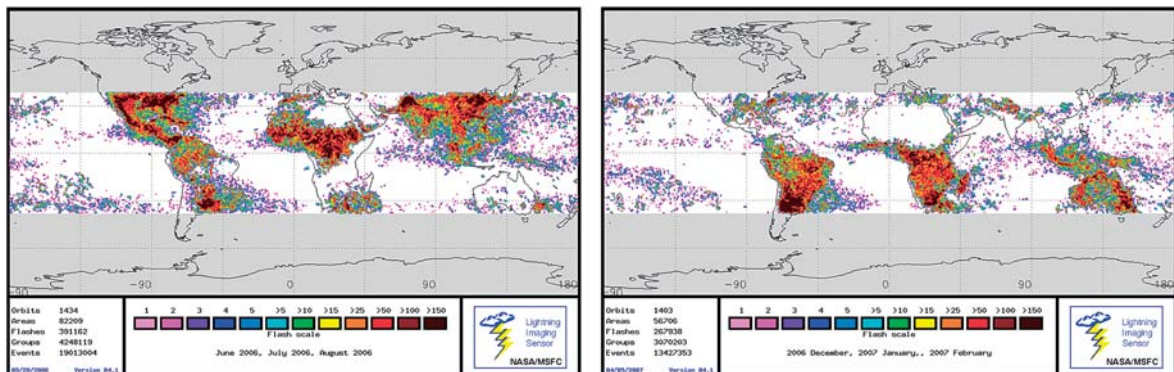


図6 TRMM衛星搭載のLISによって観測された、雷放電全球発生頻度分布。(左)2006年6-8月の期間、(右)2006年12月-2007年2月の期間の分布図。⁴⁾

と、地球ガンマ線の発生は雷多発域上空に集中していることが明らかである。雷放電からガンマ線が放射されているのだろうか？あるいはそうだとしたら、上述のどのプロセスから放射されているのだろうか？これも未解明の課題である。

3. 雷放電の観測

3.1 電磁界観測

雷放電からはDC(直流)付近からX線に至るまでの電磁波が放射される。これまで、様々な波長にわたって観測が行われ、その強度、時間変化等を詳細に解析することによって、雷放電の物理過程が解明されてきた。一例として、図4に、0.2 Hzから1 MHzまでの帯域における、対地放電に伴う電界変化の波形を示す。この放電が特徴的なパルス列から開始し(PB: Preliminary Breakdown)、その後、緩やかなリーダ過程に相当する変化(L: Leader)を示しながら地面に到達して、大きな振幅変化を伴う帰還雷撃過程(R: Return Stroke)に至っていることがこうした電界変化波形から読み取ることができる。このような電界変化波形の形状から雲内の電流強度や帰還雷撃の電流強度、中和電荷量、極性などの種々の雷放電パラメータの統計量が明らかになっている。さらに、VHF帯において記録されるインパルス状の電磁波は、放電の進展に伴うリーダの先端から放射されているとされ、多地点に配置されたアンテナ間の位相差もしくは時間差を用いることによって、雲内の放電進展様相も含めた放電路の可視化が可能である。図5に、電波干渉法を用いて可視化した対地放電の例を示す。紙面の都合上、その時間進展を示すことはできないが、光学観測では捉えることのできない雲内の放電進展様相(厳密には、電波放射源の進展様相)を高時間分解能で再現することができている。こうした情報を詳細に解析することによって、雷放電の物理過程を明らかにすることが可能である。

3.2 衛星観測

雷放電による発光強度は非常に強く、宇宙空間から観測が可能である。雷放電を観測することに特化した最初の衛星は、NASA・マーシャル宇宙飛行センターによるMicro Lab-1衛星に搭載されたOTD(Optical Transient Detector)や、

熱帯降雨観測衛星 (TRMM) に搭載された LIS (Lightning Imaging Sensor) である。これらの衛星観測によって得られた観測データから、雷放電は主に夏半球の陸上で発生し、その頻度は約 50 flashes/s という結果が得られている (図 6).⁴⁾ これらの衛星による光学観測は、検出効率を 90% 近くにまで高めることに成功しており、雷放電の全球分布・時間変動のみならず、気象予測モデルに雷放電データを同化させることで、激しい気象現象の予測精度を大幅に向上させること等が明らかになりつつある。

4. おわりに

本稿では雷放電の物理過程と観測技術について概観した。雷放電の研究の歴史は 100 年以上あり、その間に明らかになっていることは膨大である。ここではそのほんのごく一部しか記述できていないことをまず記したい。しかしながらできるだけ、まだ明らかになっていないことを含めて最先端の取り組みなどを交えつつ記述したつもりである。もし本稿を読まれた方が、こうした未解明の問題について考えてみようと思われたら望外の喜びである。

参考文献

- 1) K. Berger: The earth flash. In *Lightning, Vol. 1: Physics of Lightning*, R. H. Golde, ed. (Academic Press, San Diego, 119-90, 1977).
- 2) D. J. Boccippio, *et al.*: *Science* **269** (1995) 1088.
- 3) D. J. Boccippio, *et al.*: *Mon. Wea. Rev.* **129** (2001) 108.
- 4) H. J. Christian, *et al.*: *J. Geophys. Res.* **108** (2003) 4005; doi: 10.1029/2002JD002347.
- 5) G. J. Fishman, *et al.*: *Science* **264** (1994) 1313.
- 6) R. C. Franz, *et al.*: *Science* **249** (1990) 48.
- 7) D. MacGorman and D. Rust: *The Electrical Nature of Storms* (Oxford Univ. Press, 1998).
- 8) T. Takahashi: *J. Atmos. Sci.* **35** (1978) 1536.
- 9) K. Miyake, *et al.*: *IEEE Trans., Pow. Del.* **5** (1990) 1370.
- 10) R. E. Orville: *J. Geophys. Res.* **99** (1994) 10833.
- 11) V. P. Pasko, *et al.*: *J. Geophys. Lett.* **102** (1997) 4529.
- 12) M. Sato: Doctor thesis (Tohoku University, 2004).
- 13) D. M. Smith, *et al.*: *Science* **307** (2005) 1085.
- 14) M. Stock: personal communication (2015).
- 15) M. Stolzenburg and T. C. Marshall: *Space Sci. Rev.* **137** (2008); doi: 10.1007/s11214-008-9338-z.
- 16) 高橋 勲: 『雷の科学』(東京大学出版会, 2009).

非会員著者の紹介

牛尾知雄氏: 大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻准教授。博士(工学)。電波リモートセンシング, 地球観測, 雷放電, 環境電磁工学などの研究に従事。

(2015年11月11日原稿受付)

上田和夫 (JPSJ編集委員長 ueda@jps.or.jp)

昨年12月の編集委員会では注目論文の選出を見送ることになった。JPSJの2月号では招待論文が出版されているので、その内容について簡単に紹介する。

招待論文「対称性によって守られたトポロジカル超伝導・超流動—基礎から³Heへ」

Symmetry Protected Topological Superfluids and Superconductors —From the Basics to ³He—

T. Mizushima, Y. Tsutsumi, T. Kawakami, M. Sato, M. Ichioka and K. Machida: J. Phys. Soc. Jpn. **85** (2016) 022001.

自然界に存在する物質は、様々な対称性を有している。極限環境下に物質をおくと、構成要素間の相互作用などにより対称性は自発的に破られ、超伝導・超流動や磁性などの巨視的量子状態が発現する。対称性とその破れという概念は、このような量子現象に対する俯瞰的視野を与えてくれる。一方で、量子ホール状態に代表されるような、対称性の破れを伴わない量子状態を分類し理解するためにトポロジカル不変量という概念が1980年代に物性分野へ導入された。近年では、2つの概念を併せた新たな物質観が急

速に広まりつつある。このような背景から、本総説では、対称性とトポロジーの宝庫である超流動³Heの物理を軸に、それらの協奏が織りなす様々なトポロジカル量子現象について解説する。まずミニマム模型を基にトポロジーと対称性の密接な関係を解説し、対称性によって守られたトポロジカル超伝導・超流動に現れるマヨラナ粒子が非可換統計性やイジング磁気異方性などの奇妙な性質を持つことを紹介する。本総説の主要部分は、スピン三重項超流動³Heの物理をトポロジーと対称性の観点から再整理し、そこに発現する様々なトポロジカル量子現象を紹介することにある。対称性の自発的破れとトポロジカル量子相転移が同時に起こる新奇量子臨界点の存在、ワイル超流動、表面やトポロジカル欠陥に束縛されたマヨラナ粒子の存在など、³Heの持つ多彩な表情を切り出していく。また、³Heのカウンターパートとして、UPt₃など異方的超伝導の結晶対称性とトポロジカルな側面の緊密な関わりを解説する。さらに、トポロジカルなエッジ状態が媒介する質量流という観点から、異方的超伝導体の持つ固有角運動量に関する古典的問題を再検討した近年の研究の動向と成果を概観する。

〈情報提供：水島 健 (大阪大学大学院基礎工学研究科)〉

物理教育 第64巻 第1号 (2016) 目次

巻頭言：「アクティブラーニング」雑感 ……村田隆紀
 査読論文
 研究報告
 中学校電磁誘導における交流の理解を図る教材及び
 学習プログラムの開発 ……青木悠樹, 栗原淳一
 研究短報
 探究型生徒実験の実践例 ……小河原康夫
 電気信号の伝播速度の簡便な測定実験 ……出口幹雄, 他
 回転する鎖の節点とベッセル関数零点の実験 ……伊東正人
 私の工夫・私の実践
 アルコール爆発演示実験—爆発実験をきっかけに燃焼と呼吸に
 ついて学ぶ— ……大野宏毅, 門野敏彦
 白色LEDライトを利用した夕焼け色再現実験における
 スペクトル分析 ……長谷川 誠, 徳光聖祐
 静電気分野の学習指導の改善 ……平野弘之
 企画
 若手教師の声
 工業高校で気付かされたこと ……小野佑介
 生徒の学習観とアクティブ・ラーニング ……西村壘太

物理教育研究の現代の潮流
 物理教育研究の誕生とその背景 ……覧具博義
 《九州支部特集》
 生徒・学生の理解を見ながら進める物理教育 ……副島雄児
 確認テストや定期考査を活用した、生徒の学習法の評価に
 ついて ……井上哲秀
 受講者の学習状況を把握しながら行う講義の試み ……寺田 貢
 高校における慣性モーメントを使わない回転運動の取り扱い
 ……中村 聡
 力学基礎での受講生の理解度の進展 ……副島雄児, 他
 談話室：ニュートンが言う「振り子の最低点における速度が、
 落下のさいに描く弧の弦に比例する」ことの指導例
 ……萩原直樹
 製品紹介：データロガー PicoLog1012 ……大野宏毅
 ワンポイント：乾電池を切断したら起電力はどうなるか？
 ……櫻井勇良

Information

物理教育 Vol. 63, NO. 1~NO. 4 分野別総目次

第45回天文・天体物理若手夏の学校開催報告

北川祐太郎 (東京大学理学系研究科 y_kitagawa@ioa.s.u-tokyo.ac.jp)

本記事では物理学会会員の皆様に「天文・天体物理若手夏の学校」について知っていただくことを目的とし、2015年7月末におこなわれた第45回開催分の報告をいたします。この記事を通して、より広範な分野の研究者に興味をもっていただき、天文分野の若手研究者との交流の裾野が広がる一助になることを期待します。

1. 天文・天体物理若手夏の学校とは

まずは、天文・天体物理若手夏の学校(以下、「天文夏の学校」と略)についてその趣旨と開催形態を簡単に説明します。天文夏の学校とは、天文分野に身をおく若手研究者(主に大学院生)が全国から集い、各々の研究発表を通じて議論・交流を深め、自身の研究の発展に活かしていく場である、ということが出来ます。以下にその特徴をあげました。

- (1) 合宿形式により密な議論と交流ができる場を提供。
 - (2) 参加者のほぼ全員が研究発表をおこなう。
 - (3) 電磁波(電波→線)から宇宙線、重力波にいたる広範なブロープの、観測、装置、理論分野をカバー。
- (1)については、さまざまな分野で開催されている若手夏の学校と共通な事項といえます。これが夏の学校の醍醐味という人もいるでしょう。その一方で、(2)については他分野と少し趣が異なるかもしれません。夏の学校というと招待講師による講義が主である場合が多いですが、天文夏の学校では大部分の時間を参加者の研究発表とその議論に費やします。形式だけみると学会主催の年次大会に近いですが、さまざまな背景をもつ参加者どうしの議論と交流に重きを置くことで、自身の研究に分野横断的な視点を加えることが可能になります。実際に夏の学校で得たつながりがその後の共同研究に発展した場合もみられますし、後述する全体企画からそのままプロジェクトに発展した例も存在します。(3)は天文夏の学校が専門に縛られない分野横断的な議論の場を提供することを表しています。研究生活の早い段階でさまざまな背景をもつ仲間達と知り合い、忌憚なく議論できる機会を与えられるのは天文夏の学校の大きな強みです。これらの特徴こそが、天文夏の学校を若手研究者育成の場たらしめてきた所以といえるでしょう。

次に分科会について紹介します。分科会とは、参加登録時に選択する研究分野のことであり、参加者は講演形式として口頭発表(a講演)、口頭+ポスター発表(b講演)、ポスター発表(c講演)から選ぶことができます。分科会の区分は時代とともに変遷していきますが、近年は重力・宇宙論、宇宙素粒子、コンパクトオブジェクト、銀河・銀河

団、太陽・恒星、星形成・惑星系、星間現象、観測機器の8つに落ち着いています。分科会は参加者の専門を表すタグのようなものであり、その分科会に参加者を縛るものではありません。実際には会期中に自分の興味のある分科会に積極的に参加することで、他分野の知識を集中的に身につけることもできます。また各分科会には招待講師による講演枠も設けています。8つの分科会でそれぞれ2人ずつ、計16名の講師に来ていただき、その分野のレビューと最先端の研究紹介をしていただいています。その他に、全体企画(公募企画)という全参加者が一堂に会し、あるテーマに沿って議論する機会ももたれます。

なお、天文夏の学校の運営は事務局と呼ばれる大学・研究機関の集合によってなされています。事務局の編成は開催年ごとに変わっていき、現在は日本全国の大学を5ブロックに分けて交代していく持ち回り制を採用しています。

2. 2015年度開催報告

2.1 概要

ここからは第45回天文夏の学校について紹介します。2015年度は7月27日から30日までの4日間にわたり、長野県内のホテルを借り切って開催されました。事務局は国立天文台三鷹キャンパスを拠点にしている総合研究大学院大学、東京大学の大学院生が主軸となり、さらに関東近隣の大学・研究機関で構成されました。^{*1} 今回の参加者総数は360名(うち招待講師17名)に達し、国内でも年次大会に次ぐ大規模な研究会となっています。この天文夏の学校を安全かつ円滑に運営するのもまた大学院生であり、さまざまな準備を約1年前からおこなうのが事務局の役目です。

参加者(招待講師除く)の学年と分科会ごとの内訳を図1に載せました。図から見てとれるとおり、参加者の大部

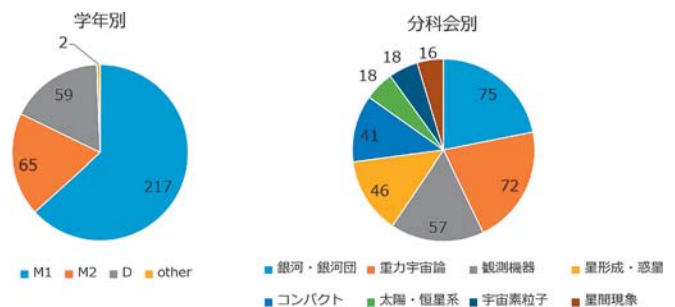


図1 招待講師を除いた参加者の学年別(左)と分科会別(右)の内訳。

*1 本文中の2大学に加え、埼玉大学、東京大学宇宙線研究所、JAXA/ISAS、東京理科大学、首都大学東京、千葉大学、東海大学、工学院大学。

分を修士課程、特にM1の学生が占めているのがわかります。また分科会別でみると、分野ごとの研究人口（現在の流行？）のようなものもみえてきて興味深いところです。これらの統計データは次年度運営の参考資料となります。

2.2 分科会

分科会で議論されたすべてをここで紹介することはできませんが、いくつか目立った点について述べていきたいと思います。観測関連では近年運用が始まったアルマ望遠鏡やすばる望遠鏡の超広視野カメラを用いたデータの解析結果が盛んに発表されていました。データ解析のみならず、みずから観測提案をおこなうなど積極的な議論はまさに天文夏の学校にふさわしいものでありました。理論関連では従来の電磁波をプローブとする天文学から大きく飛躍し、重力波に関するトピックが増えてきました。重力波の放射機構や信号の大きさの計算と検出可能性の議論など大型低温重力波望遠鏡の始動を目前とした緊張感と熱意が感じられました。また、装置関連では打ち上げが間近に迫ったASTRO-Hや、着工が始まったガンマ線天文台(CTA)を背景とした、高エネルギー領域(X線- γ 線)の話題が目立ちました。ここでは国際プロジェクトの装置開発において日本の大学院生が多く関わっていることを印象づけました。

観測、理論、装置のいずれの分野でも国際プロジェクトが背景にある研究が増えてきた印象を受けます。その流れの中で大学院生が自らの専門を武器にどのように存在感を出していくのか、今後の議論の対象として面白いかもしれません。

そのような背景も考慮して今回の全体企画は「海外での研究生活」としました。これは国外で研究活動をおこなっている(いた)講師を迎えて講演と質疑応答をしてもらうという企画になります。海外に研究拠点を置いている大学院生にも講師として壇上にあがってもらうなど工夫を施し、さまざまな視点から海外での研究というキャリアパスを見つめなおす機会を得ました。天文学では国際的な協力のもとで運用される望遠鏡が増えてきており、今後のキャリアを選択するうえで海外に身を置くことは当然視野に入ります。このような状況において、国外での研究経験豊かな講師と、その良し悪しについてざっくばらんに話し合う場をもつことができたのは、研究を始めたばかりの大学院生も多い夏の学校において、機を捉えた有意義な企画であったと思われます。

分科会では投票でオーラルアワードとポスターアワードの受賞者を選出しています。参加者には話す側としてだけでなく、聴く側としても優秀なプレゼンテーションとは？を考える機会が与えられます。これにより天文夏の学校を、自身の研究内容をわかりやすく伝えるプレゼン



図2 会期中に開かれる全体集会での参加者集合写真。

テーション能力を磨く場としても活用することができます。なお発表者の講演集録はホームページから閲覧可能となっていますので、興味をもたれましたらアクセスしてみてください。^{*2}

3. 最後に

1971年に参加者83名から始まった天文夏の学校ですが、^{*3}45回目の開催を無事に迎えることができました。その間に参加者は360名という国内でも有数の大規模な研究会にまで成長しました。もちろん改善すべき点もあり、たとえば近年では参加者の増大に伴う事務局の負担増や、修士課程と博士課程の参加者比のバランスなどが挙げられます。すでに解決への試みがいくつかなされており、事務局も少しでも良い形で次年度にバトンを渡すよう心がけています。

この45年間、天文夏の学校は第一線で活躍する研究者を多数輩出し、若手研究者育成の場として重要な役割を担ってきました。招待講師の中には学生時代に事務局として汗を流した人も多く、今度は講師として再び参加することを感概深く思われる方もいます。このように天文夏の学校は世代を超えた「若手」が出会う場としても機能しています。今後も10年、20年と続けていけますよう物理学会の皆様にも暖かいご支援をいただけましたら幸いです。最後になりましたが、基礎物理学研究所(研究会番号:YITP-W-15-04)と国立天文台、各研究団体、および寄付をいただきました企業、個人の皆様の厚いご支援に深く感謝いたします。

非会員著者の紹介

北川祐太郎氏：近赤外線による銀河形成進化の観測的研究、および天文用観測装置の開発を専門としている。

(2016年1月3日原稿受付)

^{*2} ホームページURL: <http://www.astro-wakate.org/ss2015/web/>

^{*3} 実際には、1971年以前から原子核三者若手夏の学校に混ざって活動していたようです。その後独立して開催するようになり、途切れず現在に至ります。

第60回物性若手夏の学校開催報告

沼倉 凌介 (埼玉大学大学院理工学研究科 s14mp113@mail.saitama-u.ac.jp)

「物性若手夏の学校」とは、物性物理の分野を中心としたサマースクールであり、全国の大学院生を対象としている。物性物理に関する基礎的な考え方の習得や発表技術の向上を目的とした企画を通して、参加者に研究の楽しさを知ってもらうことを主な目的としている。本夏の学校の企画は物性分野の大学院生を基準として考えているが、毎年、化学や生物の分野や学部生からの参加者も少なくない。若手研究者の分野の垣根を取り除き、多くの分野間でネットワークを形成できることも本夏の学校の魅力の一つである。

1. 開催当日の様子

2015年7月27日から31日の5日間にわたり、第60回物性若手夏の学校が、岐阜県岐阜市、長良川のほとりに建つ、ぎふ長良川温泉ホテルパークにて開催された。60回目の節目を迎える今回の物性若手夏の学校に向けて、“Toward the Next Round!—The 60th Natsugaku—”のテーマのもと、新しい一歩を踏み出すという意気込みで我々スタッフは準備を進めてきた。全国各地から総勢177名(男性:159名,女性:18名)の参加者が一堂に会した。

物性若手夏の学校のプログラムは、学習・発表・交流の三つのパートに分かれている。学習の部となる講義と集中ゼミでは各分野の最前線で活躍しておられる研究者の方々に招聘講師として講演をしていただいた(表1)。講義は1日3時間を3日間にわたって行い、集中ゼミは4日目に3時間で行った。講義は基礎的な内容から始まり、最終日にはその分野の最先端の内容を丁寧に教えていただいた。集中ゼミでは3時間という限られた時間に、その分野の最

新のトピックをコンパクトに講演していただいた。どちらの企画も参加者にとって得るものが多く、参加者からは「研究の最先端の話聞いて自身の研究へのモチベーションが高まった。」「新しい挑戦への足掛かりとなりそう。」などの声が聞こえ非常に好評であった。

発表の部であるポスター発表・分科会では、日本物理学会と同様の形式で行った。夏の学校参加者の多くは発表経験の少ない学生であるため、自分の研究成果を多くの人へ分かりやすく発表する練習の場として、また同分野の人と情報交換をする場を提供するための企画である。ポスター発表は希望者は漏れなく発表できる企画であり、各々にA0の大きさのスペースが与えられる。発表者は持参のポスターを前に意気揚々と発表に赴いていた。また、ポスター発表では事前に希望した人とは別に飛び入りでの発表も認めている。今回も多く飛び入り発表者を見受けることができた。分科会は一人あたり発表時間10分、質疑応答5分の時間が与えられる。参加者には自身の研究をコンパクトに発表する技術を身につける機会を提供する企画である。時間の関係から希望者全員が発表できるわけではなく、応募の時点で早い者勝ちとなるため、もし次回の夏の学校での発表を考えている方は募集開始後に早めの応募をお勧めする。また招待講演の枠も設けており、今回は表1にある6人の招聘講師に講演していただいた。

ポスター発表、分科会とは別に発表の部にはグループセミナーという企画も存在する。グループセミナーは5~7人の班に分かれ、自身の研究をセミナー形式で発表し、ディスカッションを行う企画である。グループセミナーで

表1 講義・集中ゼミ・分科会の招聘講師・演題一覧。

企画	講師(敬称略)	演題
講義 (3時間×3日間)	石原照也 加藤雄介 古崎 昭 松井 卓 松田祐司 宮崎州正	メタマテリアルの世界 超流動とボーズ・アインシュタイン凝縮:長年の未解決な関係 低次元の強相関電子系:朝永ラッティンジャー液体とその周辺の話 量子スピン系における Lieb-Robinson bounds ~厳密統計力学入門~ 非従来型超伝導 ガラス転移の統計物理学
集中ゼミ (3時間×1日)	石原 一 大串研也 笹本智弘 樽茶清悟 山本浩史 和田浩史	光で操るナノ物質のミクロとマクロ 遷移金属化合物の強相関電子物性 KPZユニバーサリティクラス 固体中の電子の量子操作と計測 有機相転移トランジスタと強相関物性物理 かたち・動き・成長の生物物理学
分科会招待講演 (講演30分+質疑10分)	岡田佳憲 酒井志朗 辰巳創一 新見康洋 星野晋太郎 渡辺宙志	走査トンネル顕微鏡による遷移金属酸化物薄膜の電子状態イメージング 銅酸化物高温超伝導体の動的電子構造の数値計算 単純ガラスの熱容量から見るガラス転移の向こう側 スピン流で観る物理現象 多軌道強相関電子系におけるエキゾチック超伝導 大規模計算による非平衡研究の可能性



図1 講義中は質問が飛び交い、活発に議論が行われていた。



図3 異分野感でのディスカッションは、自身の今後の研究の新たな着想を得る。



図2 各々が興味のあるポスターの前で発表者と意見を交換する。



図4 普段は聞くことのできない講師陣の体験談なども聞くことができ、参加者も身を乗りだして聞いていた。

の班員の構成は主に異分野どうしであるため、参加者は自分の分野から離れて新しい知見を得ることができる。

交流の部には懇親会と座談会が設けられている。特に座談会は第59回から始まった新しい企画であり、事前に参加者から募った質問を招聘講師の方々にお酒を交えつつ、ぶつけるという内容である。質問の内容は「研究者になろうと思った時期ときっかけ」や「研究へのモチベーションの維持の仕方」、「研究に行き詰まったときのリフレッシュの仕方」など研究に対する心構えのようなものから、人生の選択や研究者の恋愛に関して等さまざな質問が飛び交った。講師の方々と参加者の距離も質問と回答とお酒が進むにつれて縮まっていき、非常に盛り上がる企画となった。

第60回を通して、参加者から「研究に対するモチベーションを高めることができた」「最高の夏をありがとう！」などの言葉をいただきスタッフ冥利に尽きる回となった。ご講演いただいた講師の方々、会場を提供していただいたぎふ長川温泉ホテルパークの職員の方、そして第60回を作り上げてくださった参加者の方々には、心から感謝申し上げます。

2. 物性若手夏の学校の魅力

冒頭にも述べたが、物性若手夏の学校には日本物理学会で数多くの領域を有する物性物理の分野の他に化学や生物の分野の学生も参加しており、参加者の分野は多岐にわた

る。加えて、異分野間で発表や交流する企画では普通の議論では得ることのできない新鮮な見解を得ることで、参加者自身の研究へのモチベーションを高めたり、今後の研究活動の糧を得たりすることができる。また18名もの招聘講師に講演を依頼しており、参加者は自分の興味に応じて聴講を自由に選択することができる。特に講義プレビューで他分野の講演に惹かれる学生も少なくなく、実際に今回の夏の学校においても事前にとったアンケートとは異なる講義に参加した学生も多かった。

現在、準備局員も新体制となり企画の内容も多少変更を加え、さらに参加者にとってより一層有意義な夏の学校になるように尽力している。また59回から始まった座談会も、一つの企画として61回以降も続けていくことに決定した。61回の詳細に関してはまだ公にすることはできないが、期待を持って情報の公開をお待ちいただきたい。興味を持たれた方は是非自らの分野の枠にとらわれることなく第61回物性若手夏の学校に参加していただきたいと考えている。

本会開催において、京都大学基礎物理学研究所・東京大学物性研究所・東北大学金属材料研究所・材料科学技術振興財団からの援助、日本物理学会・応用物理学会・日本化学会からの後援、各協賛企業・個人からの支援を受けた。準備局員一同、心から感謝申し上げます。

(2015年10月31日稿受付)

2015年度原子核三者若手夏の学校活動報告

千葉陽平 〈北海道大学大学院理学院 miyamoto@het.ph.tsukuba.ac.jp〉

伊藤隼人 〈東京大学大学院理学系研究科 ito@hep-th.phys.s.u-tokyo.ac.jp〉

谷内稜 〈東京大学大学院理学系研究科 taniuchi@nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp〉

矢島和希 〈大阪大学大学院理学研究科 yajima@champ.hep.sci.osaka-u.ac.jp〉

1. 原子核三者若手夏の学校

原子核三者若手夏の学校は素粒子・原子核・高エネルギー分野を専攻する大学院生を対象とする研究会です。本研究会の歴史は長く、1955年に第1回が開催され、2015年度では61回目の開催となります。本研究会の目的は、研究者を志す大学院生が普段の研究生活で得られないような価値観と研究概念を共有することです。特に三者合同の研究会であるため、自身の分野以外の研究に触れ、より広い視点で物理学を捉えることができるようになることは本研究会の特色です。

本研究会には毎年200から300人の大学院生が参加し、およそ1週間にわたる開催期間中、物理の最前線で活躍されている研究者の方による講義やパートごとの研究発表会、三者合同のポスター発表を通じて研究交流を行います。また講義の後には学生と講師の交流を深めるために、お招きした講師の方を囲む会も行っています。

以下では、2015年度原子核三者若手夏の学校の活動について報告いたします。この報告を通じ、日本物理学会員の皆様や全国の大学院生に夏の学校への関心を強めていただけたらと思います。

2. 2015年度活動報告

2015年度原子核三者若手夏の学校は、8月17日から22日までの6日間、愛知県のホテルたつきにて開催され、214名が参加しました。ホテルたつきは三河湾に面し、朝夕には海と空が茜色に染まった美しい風景が部屋から望める素晴らしい場所です。

夏の学校は毎年、全国の大学院生の手で企画・運営を行っており、2015年度は夏の学校全体の運営を北海道大学・東北大学・神戸大学が担当しました。また、各パートの役職校として、素粒子パート・原子核パートは東京大学、高エネルギーパートは大阪大学が担当となりました。

以下では、三者共通の活動、各パートの活動に分けてそれぞれ報告を行います。三者共通の活動を北海道大学の千葉陽平が、各パートの活動を東京大学の伊藤、谷内、大阪大学の矢島がそれぞれ執筆を行います。

2.1 三者共通の活動

三者共通の活動として、初日に三者共通講義、2日目に

三者総会・三者合同ポスター発表が行われました。

三者共通講義では京都大学基礎物理学研究所の大西明氏をお招きし、中性子星物理学入門 (Introduction to Physics of Neutron Stars) というタイトルで3時間の講義いただきました。講義の前半では最初に中性子星の性質を説明した後、重い中性子星パズル・コンパクトな中性子パズルなど、中性子星物理における問題について解説されました。後半では中性子物質の状態方程式を理解する上で必要となる理論的枠組みや理論・実験・観測による最近の取り組みについても紹介いただきました。講義内容は中性子星を中心として多岐にわたり、多くの学生の興味・関心を惹いたことと思います。中性子星物理の第一人者である大西氏にその最前線のトピックを紹介していただいたことは、学生にとって非常に有意義な経験になりました。また、講義中には多くの学生から質問があり、知識をより深めている場面も見られました。三者共通講義の後には大西氏を囲む会が行われ、100人を超える学生が大西氏と交流を深めました。講義や研究に関する質問だけでなく、普段聞けないような少し踏み込んだ話題などで盛り上がりを見せていました。

2日目に行われた三者総会では、三者若手の運営改善を目指した提案が多く出されました。その結果として、運営の担当大学のローテーション法の見直しや三者若手全体の活動の監督者の設置などが決定しました。これまで夏の学校では、運営担当者が毎年変わるという性質や情報引継ぎの不十分さにより、望ましい研究会の在り方を十分に検討できていたとは言い難い状況でしたが、これらの採決により、今後は夏の学校がより魅力的な研究会へと発展していく方法をより具体的に検討・実施できるようになるでしょう。

その一方で、近年参加者が少ない高エネルギーパートの休止が提案されました。議論の結果、残念ながら休止が採決されました。そのため、高エネルギーパートの研究会・講義はしばらくの間、開催が休止されることとなります。休止の経緯については高エネルギーパートの活動報告をご覧ください。原子核三者若手夏の学校は、素粒子論・原子核・高エネルギーの3分野の学生が一堂に会する唯一の研究会であり、他分野の研究に触れ、学生と交流して、自分の見識を広める恰好の場です。しかしながら、現状として

三者合同であることを活かした企画が少なく、他の学生向けの研究会との差異を打ち出せていません。そのため、三者若手としては今後、素粒子・原子核・高エネルギーの3分野の院生が集うことの意義を再確認し、高エネルギー分野の学生にとっても魅力的な研究会になるような新たな企画をしていきたいと考えています。

三者総会の後には学生同士による三者合同のポスター発表が行われました。ポスター発表を三者合同で行うことは2012年度の夏の学校から実施されたことであり、各個人の研究分野だけにとどまらず普段関わりの少ない研究分野の発表も聞くことで、より広く理解を深めることを目指したものです。しかしながら、2015年度ではポスター発表の多くは素粒子パートの参加者によるもので、原子核パート・高エネルギーパートからの発表者はほぼないという状況でした。幸いにして学生間の議論は盛んに行われましたが、相互の研究交流という点では課題が残る結果となりました。異なる分野を専攻する学生間の研究交流を図るためにも、2016年度では各分野の学生にポスター発表へより多く挑戦して貰い、三者合同ポスターセッションを盛り上げていきたいと思えます。

以上のように、初めの2日間を通して、3分野の枠を超えた交流を行いました。始めは同じ大学の学生同士で固まって行動している人が多いようでしたが、三者共通の交流を通じてすぐに他の大学の学生と打ち解け、交友関係の輪を広げることができていたようです。囲む会や休憩時間中など、様々な大学の学生と一緒に行動し、談笑している姿が多く見られました。しかし、学生間の交流が順調に行われた一方で、他分野との研究交流という点では課題が残る形となりました。2016年度以降はこれまでの企画を改善することに加え、三者合同開催である利点を活かした新たな企画を行う必要があると考えています。

2.2 素粒子パートの活動

素粒子パートは夏の学校の3パートの中で、最大の参加人数を誇り、2015年度はおおよそ150名の方が参加されました。素粒子パートでは、3分野の講義(場の理論、現象論、弦理論)と研究会(口頭発表、ポスター発表)に加えて、懇親会(囲む会)を実施しました。

2015年度は、理研の日高義将氏(場の理論)、KEKの萩原薫氏(現象論)、台湾大学の細道和夫氏(弦理論)の3名の研究者の方々に講師を引き受けていただきました。以下に、各講義の概要を記したいと思います。なお、現象論と弦理論の講義の概要は、講義録作成校代表の森裕紀氏(大阪大)と川井大輔氏(京都大)にそれぞれ執筆をお願いし、筆者(伊藤)の責任で一部加筆修正を行っています。

日高氏には、「有限温度・有限密度の場の量子論：基礎から応用まで」というタイトルで講義を行っていただきました。講義では、導入として、最近の重イオン衝突実験によって示唆されている非常に強く相関しているQGPなどのトピックを紹介していただきました。その後、素粒子論

でなじみ深い真空の場の理論と比較しつつ、虚時間方向にコンパクトな場の理論として有限温度の場の理論の基礎が導入されました。さらに、非平衡状態の記述の初歩として、線形応答理論が議論され、場の理論の相関関数と輸送係数を関係付ける久保公式などが紹介されました。最後に、発展的な内容として、量子異常と輸送現象の関係、有限温度有限密度系における自発的対称性の破れとNGモード、の2点についてお話しをしていただきました。今回の講義は素粒子論を専攻している学生にはあまりなじみの無い、ハドロン物理の話題を踏まえたものであり、多くの参加者にとって、新鮮であり、かつ貴重な経験になったのではないかと考えています。

現象論の萩原氏には「素粒子物理学の現状と将来 (Particle Physics, its present and future)」というタイトルで、標準模型の基礎から、提唱されている大統一模型や超対称模型の抱える問題、LHCでの標準模型を超えた物理の探索などを萩原氏の最近の研究成果も交えながらお話ししていただきました。その中で、実験データと向き合う際、新物理発見のヒントを得るためにはどのような視点を持って標準模型のデータを眺めるべきかという点についても、標準模型が辿ってきた発展過程といった歴史的背景とともに、お話ししていただきました。また、最近の実験データも引用され、宇宙膨張や暗黒物質といった話題とも絡めつつ、標準模型の枠内にも依然、面白い物理が隠されていることが紹介されました。そして、現在の実験状況に対する現象論的模型の構築において、標準模型に立脚して納得のいくまで追求を続けることの重要性も説かれ、これから研究に向かう学生にとって非常に良い教訓を与える講義となりました。

弦理論分野では「超弦理論と超対称ゲージ理論」というタイトルで細道氏に講演をしていただきました。講演では超対称ゲージ理論の基礎から、Nekrasov分配関数など最新の研究内容に至るまで、広範な領域を紹介していただきながらも、全体を通して板書を中心としたスタイルで一つ一つの式を丁寧に説明していただきました。そのため、時折難解な数学的諸性質を紹介しながらの講演となりましたが、院生からは非常にためになる講義であったと好評を博しました。Localizationなどで大きな功績を残されており、新進気鋭の研究者である細道氏の講演を聞くことができたのは非常に有意義な経験でした。

つぎに、研究会について記したいと思います。素粒子パートからは、口頭発表では34名、他パートと合同で行ったポスター発表では16名の方が発表を行いました。聴衆からの質問も活発に行われ、充実した研究会であったと考えています。

以上の活動に加えて、連日、講義の終了後に行われた懇親会(囲む会)を通して、多くの参加者の方々が、大学や研究室の枠を超え、同じ素粒子論を修める同志として親交を深めていました。

2.3 原子核パートの活動

夏の学校原子核パートは、QCD, ハドロン物理, 原子核構造, 原子核反応などの様々な分野の学生で構成されます。期間中は原子核に関連した幅広い分野に触れることができ視野を広げるきっかけとなります。2015年度は前年度同様に原子核パートとして3名の講師による講義, 2名の若手研究者によるレビュートーク, また大学院生による研究会が行われました。講義や研究会後の夜には講師の先生やレビュートーカーを交えて懇親会が行われました。普段は話さないような分野の講師や学生と交流する機会となり, 参加者にとって有意義な時間になったことと思います。

講義は1人あたり3時間×2コマで, 基礎的な話題から詳細な内容まで取り扱っていただきました。講義のタイトルは中村隆司氏(東京工業大学)「中性子ドリップラインの物理」, 平野哲文氏(上智大学)「クォークグルーオンプラズマと相対論的流体力学」, 堀内渉氏(北海道大学)「量子力学的少数体手法による核子多体問題」です。中村氏の講義ではきわめて中性子過剰なドリップライン近傍の不安定原子核について, 主に実験の側面からの講義をしていただきました。理化学研究所RIBFでの最新の研究成果はもちろんのこと, 過去の実験について論文に書かれなかったような内容についてまで解説していただきました。平野氏の講義前半では高エネルギー重イオン衝突の話題からQGP流体のトピックについての概観をスライドを用いて解説していただきました。後半の講義では, 板書を用いて相対論的な要請を踏まえた相対論的流体方程式の定式化を行い, それを基にした最新の研究成果を紹介していただきました。堀内氏の講義では量子多体系のシュレーディンガー方程式を精密に解く手法を用いた核子多体系である原子核の構造へのアプローチについて講義をしていただきました。第一原理的なアプローチから導かれる原子核の多体系としての性質を具体例を含めつつ解説をしていただきました。

若手研究者の方々からご自身の研究に関連した最新のトピックについて解説していただけるレビュートークも原子核パートの特徴です。上門和彦氏(理研仁科センター)による「First and second order phase transitions in the $U(2) \times U(2)$ chiral model」では有限温度有限密度のQCD物質における相転移を理論的に記述する試みについて, 基本的な概念から出発して解説していただきました。蓑茂工将氏(阪大RCNP)による「微視的核反応論の最前線」では原子核反応を核子間相互作用から理解し, 予言力のある理論の構築の試みについて具体的な例を挙げつつ解説していただきました。それぞれ1時間ずつ解説していただきました。

学生による発表として本年度は12名の大学院生参加者による口頭発表と1件のポスター発表が行われました。発表者の中には本年度の夏の学校が初めての研究発表になる人もいましたが, 聴衆は熱心に聴き, 質問もいくつも出て活気がありました。

原子核パートはハドロン・原子核分野, また理論・実験

分野双方の参加者や講義・発表があり, 幅広い経験を得られることが特徴です。研究を志す大学院生にとって有意義な経験になったことと思います。ただ, 残念であったこととして理論分野に比べて実験分野の参加者があまり多くなかったことが挙げられます。現に高エネルギーパートの参加者が年々減少していることは対岸の火事ではありません。歴史的に見ても原子核という分野は実験と理論がこれまでいわば車の両輪のような関係で発展してきたはずです。夏の学校での実験分野の参加者を増やし活性化を図っていくことが今後の研究分野の発展のためにも必要であると, 原子核パートの主催者として, そして一人の原子核実験分野の学生として強く願っており, 次回以降に生かせれば, と考えております。

最後に, ご多忙の中講義・レビュートークを引き受けてくださった研究者の方々, ならびに夏の学校の後援・協賛をしてくださった各機関の関係者にこの場を借りて感謝の意を表したいと思います。大学のスタッフ等の皆様におかれましては, 次回以降もぜひ学生に三者若手夏の学校に参加するように促していただければと思います。学生の皆様は, 2016年度の夏の学校に参加し若手コミュニティを盛り上げていきましょう!!

2.4 高エネルギーパートの活動

原子核三者若手夏の学校高エネルギーパートは例年同様, 他パートより2日短い, 8月17日から20日の4日間の開催で, 2名の講師による講義, 参加者による研究会, ポスターセッション, 講師を囲む会や懇親会などを行いました。これより, 各活動について報告いたします。

8月18日は名古屋大学の中野敏行氏をお招きし, 「3次元素粒子飛跡検出器としての原子核乾板技術とその応用」という題でご講義いただきました。中野氏は, 日本の原子核乾板研究の中心地である名古屋大学において, 乾板に記録された飛跡の自動高速読取装置の開発に携わってこられた第一人者です。講義では, 原子核乾板の歴史, 高エネルギー物理学からラジオグラフィーに至るまで, 多岐にわたる応用, そして, その応用を可能にするための高速飛跡読取装置の技術的な話題まで, 広範な内容をカバーしていただきました。挑戦的な技術が多く取り入れられている高速飛跡読取装置や, サブミクロン飛跡検出器としての原子核乾板の強みについて, 動画なども交えてお話しいたいただき, 非常にわかりやすい講義でした。

8月19日は高エネルギー加速器研究機構の田島治氏をお招きし, 「宇宙マイクロ波背景放射で迫る宇宙創生の物理」についてお話していただきました。宇宙マイクロ波背景放射観測(CMB)は, 宇宙論を精密科学へ発展させた原動力ということもあり, 素粒子論パートからの聴講者も見られ, 関心の高さが伺えました。講義では, CMBの観測から得られる初期宇宙の情報について, 特にCMB中のBモード偏光には, インフレーションの痕跡である原始重力波の情報がプリントされているということなどをお話しさ

れ、そして、Bモード観測を主目的とした世界の主要実験における最新の動向からその展望までを俯瞰的に解説していただきました。加えて、田島氏が参加しているCMB観測実験、POLARBEARの実験場であるチリ・アタカマ砂漠での生活事情や、研究生生活の心得についてもお話しされていたことが、強く印象に残っています。

また、講師の方には講師を囲む会、懇親会にもご参加いただきました。囲む会は講義後に行われ、時間内に収まらなかった議論の続きをしたり、参加者同士の交流を深める場にもなりました。懇親会は三者合同開催であったため、他パートの講師ともお話しできる良い機会でした。どちらも、講義と比べリラックスした雰囲気の中で、講師の方と議論を交わしたり、立ち入った質問をぶつけたりといった風景が見られました。夏の学校ならではの体験ができたのではないのでしょうか。

次に、8月18、20両日に行われた、参加者による研究会、ポスターセッションについて報告いたします。後でも触れますが、2015年度の高エネルギーパート参加者は14名と少なく、いかに研究会を盛り上げるかといった課題がありました。そこで、少人数であることを活かして深い議論を行えるよう、思い切った試みとして口頭発表の持ち時間を無制限としました。決められた研究会の時間の中に収めるための各発表時間の微調整や、論点が発散しがちになるといった難点はあったものの、制限時間を意識せずに議論に集中できたため、全員が主体的に議論に参加でき、結果的にこの試みは成功であったと思います。私個人としても、修士課程の間では通常経験できないような長時間の口頭発表を行って、非常に良い経験になったと感じています。ポスターセッションは例年と同じく、三者合同で行いました。他パートの研究に触れられる機会として、どのポスターの前でも濃く有意義な議論がなされていました。

最後になりますが、2016年度以降の高エネルギーパートについてお知らせがあります。高エネルギーパートの参加者は、近年減少傾向にありました。そして2014年度は参加者が8名、2015年は若干増加しましたが14名となり、次代への引継ぎに支障を来す状況が続いてきました。参加者数減少の原因としては、近年の参加者減少によりスケールメリットが失われ、更なる減少を招いたこと、他パートとの合同セッションといった、三者合同での運営を活かした企画が行われていないことなどが挙げられます。この現状を鑑み、夏の学校中に開会された三者総会において、これら問題点を三者全体で改善することを要求するとともに、改善の見通しが立つまでの間、高エネルギーパートを休止することを提案いたしました。結果、休止案は可決され、2016年度の高エネルギーパート開催は見送られる予定で

す。このような事態になり、申し訳ございません。これからは再開に向けての準備を進めていくことになります。そのために、意欲あふれる人材を必要としています。本記事をお読みに興味を持った方がいらっしゃれば、是非ご連絡ください。そして、お越しいただいた講師のお二方、参加していただいた学生の皆様、そして高エネルギーパートの運営にご協力いただいた皆様へ、この場を借りてお礼を述べさせていただきます。ありがとうございました。

3. 最後に

今回で61回目を迎える原子核三者若手夏の学校は様々な課題を抱えつつも、研究者を志す若手にとって有意義な研究会となりました。招待に応じていただいた講師の方々、参加した学生の皆様、ありがとうございました。

2015年度に休止が決定した高エネルギーパートについて、三者若手としての方針を説明させていただきます。2016年度以降、高エネルギーパートはしばらくの間休止しますが、その間も三者若手は「三者」として活動を続けて参ります。高エネルギーパートの講義・研究会は開催されませんが、高エネルギー分野の学生の参加をこれまで通り募集いたします。2016年度以降も、三者合同のポスター発表への参加や他のパートの講義の聴講は高エネルギー分野の学生でも可能です。他分野の研究や学生との交流に興味がある方は是非参加していただきたいと思います。また、今後は三者合同で行う研究会としての価値を高め、高エネルギーパートの早期再開に向けて準備を進めていく所存です。

また、近年高エネルギーパートに限らず、原子核三者若手夏の学校全体で参加者数・発表者数が減少傾向にあります。夏の学校を盛り上げるためにも、一人でも多くの方に参加・発表していただきたいと思います。皆様のまわりに参加するか悩んでいる学生の方がいたら、参加・発表をするよう促していただけたら幸いです。より魅力的な研究会を目指し、活動して参りますので皆様のご協力・ご声援のほどお願いいたします。

2015年度原子核三者若手夏の学校は京都大学基礎物理学研究所研究会の一つとして位置付けられており、基礎物理学研究所・素粒子論グループ・高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所・原子核談話会のご後援のもとに運営され、無事に終えることができました。ありがとうございました。

非会員著者の紹介

伊藤隼人氏： 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程1年。専攻は素粒子論（現象論）。

(2015年9月29日原稿受付)

第55回生物物理若手の会夏の学校の報告

牟田 寛 弥 (大阪大学蛋白質研究所 h-muta@protein.osaka-u.ac.jp)

「第55回生物物理若手の会夏の学校」(以下、夏学)の校長を務めました生物物理若手の会関西支部所属の牟田寛弥と申します。夏学は全国の生物物理を専攻している大学院生、学部生を主とした若手研究者の方々を対象とした、合宿形式の研究交流会です。今回の夏学は8月21日(金)から24日までの3泊4日の行程で、滋賀県高島市の白浜荘にて開催されました。参加人数はスタッフおよび講師15名を含めて、64名となりました。

1. 生物物理, アカデミックの枠にとらわれない, 幅広い講師陣

夏学では、毎回特徴的な開催テーマを設けていますが、今回は「多分化の進む研究者世界の中でどのように研究人生を歩んでいくか」という若手研究者たちが漠然と抱える悩みをともに考えていこうという思いを込め、「生物物理の歩き方」としました。

多分化を象徴するように、分野の垣根を問わず、アカデミックだけでなく企業の方からも講師陣の方々をお招きしました。また、講演企画だけではなく、ディスカッション企画に力を入れました。「留学体験記パネルディスカッション(2日目)」では留学をテーマに、参加者の方々に海外での研究について、講師の方々の実体験を交えて議論していただきました。

さらに、「企業(起業)セミナー～バイオベンチャー討論会～(4日目)」では企業研究者の方々、特にバイオベンチャー企業の設立当初に携わった代表取締役の方、および研究開発の方にお話し、55回の夏学でも初めての起業をテーマにしたセッションを設けることに成功しました。後半のパネルディスカッションではキャリアアップについて議論し、私たちスタッフともども大変貴重な機会となりました。

また、「若手セッション(2日目)」では、参加者の方々



図1 会期中に撮影した集合写真。

と年齢層の近い若手研究者の方々を講師としてお招きし、通常の講演よりもさらに親密な議論を重ね、これからどう研究を進めていくかを考える良い機会となりました。

第55回生物物理夏学の講師の方々(プログラム順, 敬称略)

川上浩一(国立遺伝研), 江崎剛史(理研, QBiC), 伊藤奨太(名工大), 田宮裕治(北大), 木下慶美(東大), 寺嶋正秀(京大), 加納ふみ(東大), 坂内博子(名大), 岡崎進(名大), 瀧ノ上正浩(東工大), 前島一博(国立遺伝研), 平田文男(立命館大), 船山典子(京大), 伊藤俊樹(神大), 茶谷絵里(神大), 須藤雄気(岡大), 宮本浩邦(株式会社サーマス), 菅原潤一(Spiber株式会社)

第55回生物物理夏学の講師のプログラム

8月21日(金) オープニングセッション

8月22日(土)

メインシンポジウム①

メインシンポジウム②

分科会A: 細胞機能の理解に向けたアプローチとその応用

分科会B: 物理学的視点から生物を見る

8月23日(日)

メインシンポジウム③

分科会C: 生体内構造の構築メカニズム

分科会D: タンパク質から生体の理解に向けて

8月24日(月) クロージングセッション

2. レクリエーション企画も豊富

夏学は講師の方々も含めて参加者との交流を深める大きな目的もありますので、レクリエーション企画も充実させました。会場である白浜荘様のご協力をいただきまして、3日目の晩に懇親会として講師の方々も含めて参加者全員でバーベキューを行いました。その後は琵琶湖の砂浜にて花火大会も開催され、参加者の方々には親密な関係が生まれたことでしょう。

また、会期中夜通し行われたポスターセッションでは、活発な議論が行われました。学術的な議論だけでなく、研究を進める中での裏事情や、普段の研究室の様子などの話題も弾みました。さらに、3日目に行われましたグループディスカッションでは、参加者の方々を3人ずつのグループに分割し、それぞれの出身分野または興味のある分野を生かして共同研究を企画しました。自由な発想が生かされ、大胆かつ斬新な共同研究の数々が飛び出しました。

ポスターセッションおよびグループディスカッションでは、ポスター賞および最優秀グループ賞が投票によって決定され、懇親会中に表彰式が行われました。



図2 グループディスカッションで行われた共同研究発表会の様子。

3. 第56回生物物理若手の会夏の学校は北海道で開催

次回の第56回の夏学についてお知らせいたします。生物物理若手の会では、夏学を北海道、関東、中部、関西の4つの支部で交代で担当しておりますが、関西支部が担当しました今回の次は、北海道支部が担当になります。また、運営にあたり、この度東北支部を発足し、次回の夏学は北海道支部と東北支部の合同開催となる予定です。

生物物理若手の会にご興味のある方は是非とも当会のホームページ^{*1}をお訪ねください。夏学の他にも、支部ごとに勉強会や学振セミナー、講演会など数々のイベントを行っております。皆様のご参加をお待ちしております。

4. おわりに

第55回夏学は、下記のメンバーを中心にして企画・運営されました。牟田寛弥(阪大・D1[実験]/校長), 小野晃司(京大・D2[計算]/会計web), 小島慧一(京大・D3[実験]/講演), 足立誠幸(阪大・D1[実験]/広告), 飯田慎仁(阪大・D1[計算]/予稿集), 西上博士(阪大・M2[計算]/予稿集), 今田康博(阪大・M2[計算]/会場), 飯田禎弘(神大・研究員[実験]/会場), 竹中武藏(神大・D2[実験]/ポスター), 草鹿あゆみ(阪大・M1[計算]/ポスター), 寺川まゆ(阪大・D3[実験]/アドバイザー)。

第55回夏学は、多くの方々のご協力によって開催することができました。また、下記の機関から後援・協賛をいただきました。お礼申し上げます。日本生物物理学会、京都大学基礎物理学研究所、株式会社セルフリーサイエンス、株式会社ペプチド研究所、株式会社池田理化、マイサイエンス株式会社、テンプスタッフ株式会社、ゼロメガ株式会社、バイオリサーチセンター株式会社。

非会員著者の紹介

牟田寛弥氏：大阪大学大学院理学研究科博士1年学生、タンパク質の異常凝集を生体分子の物理化学的性質として扱う傍ら、凝集性を利用した生体材料の開発にも非常に興味を抱いている。

(2015年9月20日原稿受付)

*1 生物物理若手の会HP：<http://bpwakate.net>.

『大学の物理教育』誌定期購読のすすめ

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

また、本誌ホームページのURLは次の通りですので、どうぞご覧下さい。

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

『大学の物理教育』編集委員会

Vol. 22-1 (3月15日発行) 目次

国際物理教育委員会 ICPE	新田英雄
はじめての講義	
工学部初年度学生の力学	右近修治
講義室	
小学校教員志望学生の物理分野の弱点—全国学力・	
学習状況調査を用いた学力調査	寺島幸生
高等学校物理基礎における有効数字学習についての教科書分析	瀧本家康
実験室	
元素単体の常磁性と反磁性の簡易実験	沢田 功
教育実践	
弦の振動と音楽—科学の普遍性と適用限界を伝える実験教育	本堂 毅, 須藤彰三, 関根 勉
講義演習授業における Active Learning-Passive Teaching	中村統太

物理学実験における Active Learning-Passive Teaching	中村統太, 富田裕介
グループ討論を取り入れた量子力学の授業	太田寛人, 畠山 温
海外の動向	
ミャンマーにおける物理学実験教育ワークショップ	中村 琢, 伊藤宏紀, 仲澤和馬
連載 物理オリンピックと物理教育	
物理第2チャレンジ参加者のその後—2011年から2014年の参加者について	近藤泰洋
教育に関する一言	安藤俊一
開催情報	
編集後記	

第4回 Zimanyi Nuclear Theory Medal: 佐々木千尋氏

初田哲男 (理研仁科センター thatsuda@riken.jp)
 佐々木千尋氏が標記の受賞をされ、国際会議 Quark Matter 2015の会期中に開かれた受賞式(2015年10月3日)においてメダルが授与されました。この国際賞はハンガリーの著名な高エネルギー原子核物理学者である故 Zimanyi 博士の名を冠したもので、高エネルギー原子核物理の発展に多大な寄与をした世界中の若手理論物理学者(40歳以下)の中から選ばれた1名に対して、ハンガリー科学アカデミーの Wigner Research Center for Physics が授与するものです (<http://wigner.mta.hu/node/855>)。佐々木氏の授賞理由は以下の通りです：“For her outstanding original contributions to theoretical understanding of chiral dynamics and phase structure of hot and dense, strongly interacting matter under experimental study using high energy nuclear collisions.”
 佐々木氏のますますのご活躍を期待

します。
 (2015年12月23日原稿受付)

第30回西宮湯川記念賞: 沙川貴大氏

上田正仁 (東大院理 ueda@phys.s.u-tokyo.ac.jp)
 沙川貴大氏が「情報熱力学の構築」の業績により第30回西宮湯川記念賞を受賞されました。この賞は、理論物理学分野の若手研究者の顕著な研究業績に対して与えられるものである。熱力学第二法則に関して、「マクスウェルの悪魔」として知られるパラドックスが存在する。これは、分子を熱揺らぎのレベルで観測・制御できる「悪魔」が存在すれば、系のエントロピーを下げることができるという逆説である。この問題は、プリラン、シラード、ランダウアー、ベネットなど多くの研究者が取り組んできた歴史的な問題であるが、これがパラドックスであり続けたのは、観測行為を一般的な状況下で定量的に取り扱う方法が以前は確立していなかったことによる。しかし、ナノ

マシンなどナノスケールの自由度を制御できる高度な技術が進展する中で、測定によって得られた情報を利用して熱揺らぎを制御するというニーズは様々な分野で高まりつつある。沙川氏は量子情報の分野で確立された測定理論をジャルジンスキー等式などの非平衡統計力学の最新の知見と組み合わせることにより、観測行為により得られた情報に基づくフィードバック制御により系のエントロピーを減少できることを示し、今日「情報熱力学」と呼ばれる新しい分野を開拓した。熱力学の第二法則が、マクロな操作によってできることとできないことを峻別するのに対して、情報熱力学の第二法則は、観測者がアクセスできる情報に比例して系から取り出せる仕事量の上限が通常の第二法則の上限を上回れることを主張する。このように、沙川氏の仕事によって、情報論的エントロピーと熱力学的エントロピーが同じ理論的枠組みの中で定量的に取り扱えることが可能になった。沙川氏のますますのご活躍を期待したい。
 (2015年12月4日原稿受付)

応用物理 第85巻 第4号(2016年4月号) 予定目次

高温超伝導30周年記念企画

広がりつつある超伝導直流送電応用……筑本知子, 山口作太郎
 解説

銅酸化物高温超伝導材料のエレクトロニクス応用……田辺圭一
 最近の展望

ランダム分散構造メタサーフェス……納谷昌之
 研究紹介

ハイパーレンズアレイによる光学超解像……岩長祐伸
 農業情報センシングの低コスト化……川原圭博

超低消費電力貼り付け型心電・心拍センサ SoC
 ……和泉慎太郎, 他

イオンビームアシスト MBE 法による立方晶 BN (c-BN) 薄膜の
 ヘテロエピタキシャル成長……平間一行, 他

ダイヤモンドの魅力: ダイヤモンド半導体の
 先進パワーデバイスと高機能センサへの応用の可能性
 ……波多野睦子, 他

基礎講座
 元素分析のコツ……篠原秀明

連載
 科学を詠む⑩ 機械のある風景……松村由利子

Science As Art
 逆空間に舞う花火……小金澤智之, 安野 聡

日本物理学会編

宇宙の物質はどのようにできたのか；素粒子から生命へ

日本評論社，東京，2015，vi+195p，21×15 cm，本体2,400円 [学部・一般向]

ISBN 978-4-535-78743-8

吉田直紀 (東大理)

起源の問題ほど人間の興味をそそるものはない。地球上で生命はどのように誕生したのか。元素はいつ、どこで生成されたのか。そして宇宙そのものはどのように誕生したのか。最も素朴な疑問とも言える起源の問題について、物理学、生物学、宇宙論の研究として取り組む研究者らが宇宙の進化と重ねあわせて語っていく。

本書は「物質」をテーマとして、初期宇宙の進化や元素合成、惑星の形成、さらには生体物質の探索に至るまでについて分かりやすく解説している。最近の大規模実験や宇宙観測、スーパーコンピュータシミュレーションの成果も含まれており、専門的な内容に興味がある読者も満足するだろう。

およそ138億年前のビッグバンによって宇宙は生まれ、やがて物質のもととなる素粒子が生成された(1,2章)。現代の巨大実験物理学はそのような初期宇宙の出来事を部分的に再現しつつある(3,4章)。宇宙では、分子を含む星間ガスから星が生まれ、星の中で生成された元素がまた宇宙空間へとばらまかれていく(5,6章)。このようなサイクルを繰り返すうちにやがて惑星系

をもつ星が誕生し(7章)、生命を育む環境が整っていく。有機物やアミノ酸のような生体分子がどのように生成されたかは大きな謎であり、生命の起源は「宇宙」と「生命」をつなぐ重要な鍵として捉えられるようになった(8章)。

章ごとのテーマについては、歴史的な経緯だけではなく現在進行中の研究が臨場感をもって描かれており、各章の最後には未解明の謎も提示されるなど、さらなる研究への興味がわく構成になっている。

生命の誕生や宇宙創生など、根源的な謎に物理学の手法によって迫ることができることは感動的ださえあり、また、そのための各種実験や観測の規模の大きさにはひたすら圧倒される。本書の後半では中性子星や宇宙のダークマターについての研究が紹介されており、そこでは、宇宙観測から地下実験まで、実に様々なアイデアに基づいた研究が世界中で行われていることに読者は驚くだろう。

科学に興味ある一般の人はもちろん、高校生大学生には是非読んでもらいたい。具体的な研究テーマに関心のある大学生らにとっては、宇宙、物質、生



命に関する研究のホットトピックを知る機会になるだろう。本書に触発されてさらに勉強を深める読者も多いのではないだろうか。各章末には参考文献もリストされており、そのような読者の欲求にもある程度応えるが、やや残念なことに、参考文献の多くが専門誌に掲載された原著論文になっている。それらは私のような専門の研究者でさえ敷居が高く、興味のままに手にとるのは難しい。しかし全般に、複雑な物理過程も平易な言葉で解説されており、補足や比喩を脚注に盛り込むなど、知的読み物として十分に楽しめる。興味のある章から読み進めてもよいし、宇宙進化の歴史とあわせて1章から順に読むのも楽しいだろう。

(2015年8月24日原稿受付)

米谷民明，岸根順一郎

場と時間空間の物理—電気，磁気，重力と相対性理論

放送大学教育振興会，東京，2014，290p，25×15 cm，本体3,200円 [専門～学部向]

ISBN 978-4-595-31511-4

川合光 (京大院理)

電磁気学から特殊相対論、一般相対論にいたるまでの道筋をバランスよく明快に示した名著である。前半は、高校で学ぶ電磁気学からはじめて、マクスウェル方程式が自然に理解できるように議論が展開されている。実際、最初に電磁場の定義とベクトル解析を簡潔にまとめた後、マクスウェル方程式

の積分形から微分形を導き、静電場、静磁場、時間変化とエネルギー・運動量の保存則、電磁波と順を追ってきわめてオーソドックスに議論を展開している。その後、物質中のマクスウェル方程式をミクロな視点から導出し、物質中の電磁場について議論している。ここまでの議論は、いわば電磁気学の

現象論ともいえるべき部分であり、マクスウェル方程式をいったん認めたうえで、その帰結について詳しく議論するというスタンスで展開されている。高校物理の知識を前提としたうえで、読者を電磁気学の高度な内容に導いており、大学初年級の学生にとっても親切内容となっている。

後半は、いわば電磁気学の本質論ともいえるべき部分であり、マクスウェル方程式がどのような原理で導かれるかを示している。実際、特殊相対性理論について詳しく解説した後、粒子の運動方程式とマクスウェル方程式を



ローレンツ不変な形に書き直し、それらが最小作用の原理から自然に導かれることを示している。また、電磁気学の締めくくりとして、運動する荷電粒子のつくる電磁場を求め、古典電磁気学の限界について議論している。ローレンツ不変性の起源は、特殊相対論に

関して自然に生じる疑問であるが、本書の最後の部分はそれに対する答えである。一般相対論の展開にあてられている。等価原理を導入した後、リーマン幾何学について議論し、重力の作用を書き、それからアインシュタイン方程式が導かれる道筋をわかりやすく示している。また、一般相対論の帰結に関しても、少ないページ数ながら、重力波からブラックホールにいたるまで、豊富な内容が盛り込まれている。

私見になるが、学生、研究者を問わず、特殊相対論にいたる論理が大変自然だったのに対して、一般相対論にいたる議論のあいまいさに当惑している人が多いのではないだろうか。本書では、最小作用の原理にもとづいた議論が、電磁場と重力場の場合に統一的に明快に展開されており、一般相対論の知識を整頓したいと感じている人にも

ぜひお勧めしたい。

本書は300ページに満たない教科書であるが、論理展開が明確であり、内容も大変豊富であり、随所に、より高度な視点からの展望が書かれている。また、例題、問題も豊富に配置されており、講義に使う教科書として以外にも、自習のための便宜も図られている。初学者のみならず、専門家にとっても知識の確認に役立つ信頼できる名著である。

(2015年9月7日原稿受付)

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

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

掲示板

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

人事公募

人事公募の標準書式(1件500字以内)

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

■東京大学物性研究所特任研究員

1. 特任研究員若干名
2. 物性研究所各研究部門
3. 物性科学における実験的又は理論的研究。
4. 2016年9月1日~2017年2月末日
5. 原則2年間(年度更新)、再応募可(但し1年間)
6. 博士号取得後約10年迄の者(着任時迄に博士号取得が確実に見込まれる者含)。着任予定時に主たる職又は大学院生及び研究生等の身分を有しないこと。
7. ○履歴書 ○発表論文リスト ○主要論文別刷3編以内 ○今迄の主な業績のまとめ(2,000字以内) ○研究計画(2,000字以内) ○指導教員又は推薦

者による意見書

- 2016年4月15日(金)必着
- 277-8581 柏市柏の葉5-1-5 東京大学物性研究所総務係
電話 04-7136-3501 issp-jinji@issp.u-tokyo.ac.jp
- 応募に際しては関連する物性研究所所員と連絡をとって研究計画等の調整を行うこと。複数の研究室に跨る研究テーマに取り組む方も歓迎。封筒に「物性研究所研究員(○)所員(連絡をとった所員名)応募書類在中」と朱書き書留送付。週5日、裁量労働制(週38時間45分相当)。雇用保険有。文部科学省共済組合に加入。通勤手当有。給与は年額約430万円。応募書類不返却。

■高エネルギー加速器研究機構教授

[I]

- 教授1名
- 加速器研究施設
- J-PARC加速器の主リング(MR)でのビーム・コミッションングにおいて中心的役割を担う。ビーム強度増強に必要な電磁石開発を主導する。高エネルギー加速器研究機構が進める将来計画に必要な加速器技術の開拓的研究を行う。
- 2017年4月1日以降早期
- なし
- 履歴書(e-mail記入) ○研究歴 ○発表論文リスト(和、英文別葉、提出論文別刷に○印) ○着任後の抱負 ○主要論文別刷5編以内 ○推薦書又は意見書
- 2016年4月22日(金)必着
- ①305-0801つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究機構人事労務課人事第一係
②加速器研究施設 山口誠哉 電話 029-864-5689 Fax 029-864-3182 seiya.yamaguchi@kek.jp

[II]

- 教授1名
- 2, 4, 5, 7, 8, 9は[I]に同じ。
- 電子陽電子入射器、超伝導RF試験施設(STF)、及びエネルギー回収型リニアック(ERL)における大電力クライストロンと高周波伝送系の開発研究において中心的な役割を担う。高エネルギー加速器研究機構が進める将来計画に必要な加速器技術の開拓的研究を行う。

■名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻准教授

- 准教授1名
- 理論宇宙物理学研究室(Ta研)
- 理論宇宙物理学。現スタッフと協力して、宇宙物理学・天文学の理論的研究、学生の指導、及び大学運営に積極的に取り組める方を望む。
- 決定後早期
- なし
- 博士号取得者
- 履歴書 ○今迄の研究内容の概要 ○業績リスト(原著論文の査読有無、研究会収録、国際会議招待講演等に分類) ○主要論文別刷5編以内 ○着任後の研究計画と教育に対する抱負 ○照会可能者2名の氏名、連絡先
- 2016年4月25日(月)必着
- ①464-8602名古屋千種区不老町 名古屋大学大学院理学研究科・物理学教室 佐藤憲昭
② 同 犬塚修一郎 電話 052-789-2811 inutsuka@nagoya-u.jp
- 封書に「理論宇宙物理学人事応募書類在中」と朱書き書留で送付。応募書類不返却。物理学教室の選考基準については<http://www.phys.nagoya-u.ac.jp/scholar/pub.html>参照。

■奈良先端科学技術大学院大学准教授

- 准教授1名
- 物質創成科学研究科・有機固体素子科学研究室
- 有機半導体デバイスについて研究実績のある方。関連分野において実績があり、当該分野の研究に意欲のある方も含む。
- 2016年7月1日以降早期
- なし(定年制)
- 博士号取得者(海外で取得した方、又は海外での教育研究経験のある方を優先)
- 履歴書(本学所定様式) ○教育研究等業績一覧(本学所定様式) ○推薦状(2名) ○様式はhttp://www.naist.jp/job/index_j.htmlのリンク先からダウンロード
- 2016年5月9日(月)必着
- ①630-0192生駒市高山町8916-5 奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科 垣内喜代三
②同研究科 中村雅一 電話 0743-72-6031 mnakamura@ms.naist.jp
- 封筒に「教員応募関係」と朱書き簡易

書留で送付。書類不返却。詳細は
http://www.naist.jp/job/index_j.html 参照。

■核融合科学研究所助教

1. 助教1名
2. ヘリカル研究部核融合理論シミュレーション研究系統合シミュレーション研究部門
3. プラズマ輸送・加熱過程に関する統合シミュレーションコードの研究開発を行うと共に、大型ヘリカル装置(LHD)プラズマやヘリカル炉核燃焼プラズマの統合シミュレーションを通じて、観測結果の物理的理解・定量的予測、プラズマの高性能化や炉設計に貢献する。
4. 決定後早期
5. 5年(年俸制)、在任中の業績評価により再任可
6. 博士号取得者、又は取得見込者
7. ○履歴書 ○研究歴 ○就任後の抱負 ○推薦書 ○研究業績リスト ○主要論文別刷約3編各4部
8. 2016年6月3日(金)17時必着
9. 核融合科学研究所管理部総務企画課人事・給与係 電話 0572-58-2012
10. 封筒に「核融合理論シミュレーション研究系統合シミュレーション研究部門(助教)公募関係書類」と朱書き郵送の場合は簡易書留で送付。詳細は<http://www.nifs.ac.jp/jinji/>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)

■食品ハイドロコロイドセミナー2016

主催 食品ハイドロコロイド研究会
日時 2016年5月12日(木)
場所 東京海洋大学白鷹館多目的スペース
(108-8477東京都港区港南4-5-7 電話
03-5463-0581)
内容 NIR(近赤外分光)の基礎から食品
及び摂食の研究への応用についてと電子
顕微鏡の基礎と最近の話題を用意し、初

学者にも分かり易いように噛み砕いた内容での講演。

連絡先 108-8477東京都港区港南4-5-7
東京海洋大学海洋科学系食品生産科学部
門 松川真吾 電話 03-5463-0581 Fax
03-5463-0581 sympo@food.hydrocolloids.
org <http://food.hydrocolloids.org/sympo>

■食品ハイドロコロイドシンポジウム

主催 食品ハイドロコロイド研究会
日時 2016年5月13日(金)
場所 東京海洋大学楽水会館鈴木ホール
(108-8477東京都港区港南4-5-7 電話
03-5463-0581)
内容 「食品ハイドロコロイド研究における
グローバル化」「食品オーラル
プロセッシング」の2つのテーマにつ
いて、各分野で活躍の講師による講演。
特に、食品オーラルプロセッシングに関
しては、基礎的食品物性から医療現場ま
で7件の講演を用意。
連絡先 108-8477 東京都港区港南4-5-7
東京海洋大学海洋科学系食品生産科学部
門 松川真吾 電話03-5463-0581 Fax
03-5463-0581 sympo@food.hydrocolloids.
org <http://food.hydrocolloids.org/sympo>

■第12回ESR入門セミナー

主催 電子スピンスイェンス学会
協賛 日本物理学会
日時 2016年5月20日(金)~22日(日)
場所 大学セミナーハウス(192-0372八王
子市下柚木1987-1 電話042-676-8511)
内容 電子スピン共鳴(ESR)の測定や電
子スピンスイェンスの入門を目指す学部
学生・大学院生及びこれからESRを用
いた分析を開始しようとしている企業研
究者や技術者等を対象にした合宿形式の
入門セミナー。
定員 50名
参加費 20,000円
申込 「(1)氏名(フリガナも記載)、(2)所
属(学生・大学院生は研究室名と学年も
記載)、(3)連絡先(電話・Fax・e-mail)、
(4)性別、(5)会員・非会員の別」を明記
しe-mailにて。

連絡先 950-2181新潟市西区五十嵐2の町
8050 新潟大学理学部化学科 生駒忠昭
電話/Fax 025-262-7390 sest@chem.sc.
niigata-u.ac.jp

■第15回X線レーザー国際会議(ICXRL 2016)

主催 量子科学技術研究開発機構関西光科
学研究所、光産業創成大学院大学

日時 2016年5月22日(日)~27日(金)
場所 奈良春日野国際フォーラム 薨(630-
8212奈良市春日野町101 電話0742-27-
2630)

内容 高強度レーザーを用いたプラズマ軟
X線レーザーや高次高調波並びに加速器
をベースとしたX線自由電子レーザー等
の最先端技術であるX線領域のレーザー
開発とその応用に関する議論・意見
交換を通じ、レーザーを始めとする光技
術の産業応用、医療応用、学術振興等へ
の貢献を目指す。

定員 150名
参加費 66,000円(550US\$)、学生30,000
円(250US\$)。会議開催期間中、会議場
での支払可(VISAカード)

講演申込締切予定 2016年3月13日(日)
早期割引参加登録締切 2016年3月31日
(木)

連絡先 619-0215木津川市梅美台8-1-7
関西光科学研究所研究推進室 織茂聡
電話 0774-71-3000(内線3474) kansai-
hikari-sympo@ml.qst.go.jp <http://www.kansai.qst.go.jp/icxrl2016/>

■12th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs

主催 Institute for Basic Science of South
Korea

日時 2016年6月20日(月)~24日(金)

場所 Suites Hotel(韓国済州島)

内容 This workshop continues a rich and
successful series, reviewing recent theo-
retical advances, laboratory experiments, as
well as astrophysical and cosmological
results in the fields of axions, WIMPs and
WISPs.

定員 100名
参加費 500,000KRW, 学生 250,000KRW
(Early registration)

連絡先 Institute for Basic Science Dominika
Konikowska capp@ibs.re.kr <https://axion-wimp2016.desy.de>

■第61回表面科学基礎講座

主催 日本表面科学会

協賛 日本物理学会

日時 2016年7月5日(火)~7日(木)

場所 東京理科大学森戸記念館第一会議室
(162-8601東京都新宿区神楽坂4-2-2
電話 03-5228-8110)

内容 「表面・界面分析の基礎と応用」に
ついて、初心者、若手研究者、技術者を
対象として、入門的且つ具体例を解説
する事を目的とする。

定員 100名
 参加費 40,000円, 学生10,000円(テキスト代, 消費税込)
 参加申込締切 2016年6月29日(水)
 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@sss.jp.org http://www.sss.jp.org
 その他 詳細はHP参照.

■第44回 薄膜・表面物理セミナー (2016)
「最先端バイオイメージング技術の基礎と応用」

主催 応用物理学会薄膜・表面物理分科会
 日時 2016年7月29日(金)10:00~17:30
 場所 早稲田大学西早稲田キャンパス55N号館 (169-8555東京都新宿区大久保3-4-1)
 内容 バイオイメージングの分野と薄膜・表面物理の分野との間での交流や研究接点の模索と、これに伴う両分野の発展に繋がる事を目指す研究会として企画。最先端のバイオイメージング技術について、基礎から応用迄、第一線で活躍されている講師の方々に最新の研究成果を含めて講演頂く。

定員 100名
 参加費 15,000円, 学生3,000円
 参加申込締切 2016年7月7日(木)
 連絡先 113-0034東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル7階 応用物理学会分科会担当 小田康代 電話 03-5802-

0863 Fax 03-5802-6250 oda@jsap.or.jp
 http://annex.jsap.or.jp/tfspd/

■日本流体力学会年会2016

主催 日本流体力学会
 日時 2016年9月26日(月)~28日(水)
 場所 名古屋工業大学(466-8555名古屋市昭和区御器所町)
 内容 物理, 気象, 機械, 航空, 建築, 土木, 等様々な分野の流体力学研究者が一堂に会する講演会で, 分野横断的な交流に重点を置いている。
 参加費 10,000円, 学生4,000円
 連絡先 日本流体力学会年会2016実行委員会 nenkai16@lab-ml.web.nitech.ac.jp

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

■科学技術ソフトウェア研究者等の国際会議への参加支援(平成28年度)

対象 原則として国外で開催される科学技術ソフトウェア, 計算科学, 計算機科学, シミュレーション技術等の分野の国際会

議発表者に対して参加費・旅費等を支援する。

公募人員 若干名
 助成費用 1件につき10万円を限度
 応募資格 大学又は大学院に在籍する学生
 応募締切 第1回:2016年6月15日(水), 第2回:2016年10月7日(金)
 問合せ先 319-1106茨城県那珂郡東海村白方白根2-4 高度情報科学技術研究機構総務部 鈴木 電話 029-282-8352 Fax 029-282-0625
 その他 詳細はhttp://www.rist.or.jpお知らせコーナーを参照.

■会員専用コンテンツ

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

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

4月ユーザ名 : 16Apr
 パスワード: Enrico486
 5月ユーザ名 : 16May
 パスワード: Stephen295

行事予定

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

開催月日	名 称	開催地	会誌巻号または世話人
2016年			
5/11~13	第5回最先端の顕微鏡と理論計算に関する国際シンポジウム (AMTC 5)	名古屋市	71-1
5/12	食品ハイドロコロイドセミナー2016	東京	71-4
5/13	食品ハイドロコロイドシンポジウム	東京	71-4
5/20~22	第12回ESR入門セミナー	八王子市(東京)	71-4
5/22~27	第15回X線レーザー国際会議(ICXRL2016)	奈良市	71-4
5/30~31	第34回量子情報技術研究会	高知市	71-3
6/5~10	Rare Earths 2016 in Sapporo, JAPAN	札幌市	70-11
6/6~7	2016年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム	仙台市	71-2
6/12~16	The 11th Int. Conf. on Coatings on Glass and Plastics	Braunschweig (ドイツ)	70-8
6/19~23	Joint RCBJSF-IWRF Conf.	松江市	70-11
6/19~24	The 14th Int. Symp. on Nuclei in the Cosmos	新潟市	70-8
6/20~24	12th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs	済州島(韓国)	71-4

開催月日	名 称	開催地	会誌巻号または世話人
2016年			
6/23~24	第41回光学シンポジウム	東京	71-2
6/26~30	Compound Semiconductor Week 2016 (第28回インジウム燐および関連材料に関する国際会議および第43回化合物半導体に関する国際シンポジウム)	富山市	70-12
6/27~7/15	Int. Workshop on Tensor Networks and Quantum Many-Body Problems	柏市(千葉)	71-3
7/5~7	第61回表面科学基礎講座	東京	71-4
7/29	第44回薄膜・表面物理セミナー(2016)「最先端バイオイメージング技術の基礎と応用」	東京	71-4
8/8~11	第9回固体におけるスピン関連現象の物理と応用に関する国際会議(PASPS 9)	神戸市	71-3
8/25	第6回講習会「X線反射率法による薄膜・多層膜の解析」	つくば市(茨城)	71-3
9/13~16	日本物理学会2016年秋季大会(金沢大学)(物性)	金沢市	日本物理学会
9/21~24	日本物理学会2016年秋季大会(宮崎大学)(素核宇)	宮崎市	日本物理学会
9/26~28	日本流体力学会年会2016	名古屋市	71-4
2017年			
3/17~20	日本物理学会第72回年次大会(大阪大学)	豊中市(大阪)	日本物理学会
9/12~15	日本物理学会2017年秋季大会(宇都宮大学)(素核宇)	宇都宮市(栃木)	日本物理学会
9/21~24	日本物理学会2017年秋季大会(岩手大学)(物性)	盛岡市(岩手)	日本物理学会
2018年			
3/22~25	日本物理学会第73回年次大会(東京理科大学)	野田市(千葉)	日本物理学会
9/14~17	日本物理学会2018年秋季大会(信州大学)(素宇)	松本市(長野)	日本物理学会

編集後記

今月号から70周年記念企画「物理学70の不思議」シリーズがはじまります。このシリーズを組むにあたって、企画段階では、様々な意見やアイデアが出されました。まずシリーズの方針については、各分野の特徴的な研究を網羅して学生が研究分野を選ぶ指針となるものにする、物理学の魅力を前面に押し出す、不思議さをアピールする、などの意見が出ました。また、それぞれのテーマについても、なぜ物理は女性に嫌われるのか、物理学は全ての謎を解き明かせるのか、といった興味深いアイデアも提案されました。さらに、プレゼンテーションの仕方について、タイトルが重要、ふだん問題意識を持っている人が惹きつけられれば十分、問題の内容や論点がはっきり示されることが大切、等が議論されました。そして最終的に70周年にちなんで70の題材が選ばれ、今月から掲載されます。お楽しみください。

テーマ選択の議論の中で、各分野の研究を網羅することはできないが、物理教育についての面白いテーマがあるなら、この場で披露せよ言われました。「ここがロドスだ、ここで跳べ」が座右の銘ですが、その場では作成できず、70のテーマからは外れてしまいましたが、その後友人の助けを

借りて結構気に入ったものができましたので、ここで紹介させていただきます。

私たち物理学者にとって、物理学は成功した学問分野であり、物理学の理論は自然界に起きる現象を精度よく記述し、役に立つ予測をしてくれる。ところが、世間の人には必ずしもそう考えていないふしがある。相対性理論や量子力学を理解することの難しさやそれらの帰結の不思議さのことを言っているのではない。小学校から大学初年度で学習する物理の内容に関することである。

生徒や巷の人の中には(時には大学の先生の中にも)学校で学んでいる内容はクラスや試験でのルールであり、そこではそう答えないと怒られるが、自然界ではそれとは異なったことが起きていると思っている人がいるようである。例えば「先生は学校で慣性の法則を教えるが、実際には摩擦力や空気抵抗があるために、慣性の法則は成り立っていない」と言われたことがある。試験でよい成績をあげる生徒の中にも、よくよく聞いてみると「投げ上げられたボールに働いているのは重力だけであると教えられるが、もしも本当のことを答えると言われれば、ボールが上へ上がっていくのは自分の手が投げた力がずっとその間続いているからだ」と答える。」と白状する生徒もいる。

私たち物理の専門家にとっては、このような誤解はとても不思議である。授業で教わった内容をすなおに受け取ってれば起こりようがない、かん違いである。日常生活で体得した概念と学習した内容のすり合わせがうまくいかない場合に生じる誤解と考えられ、誤概念もしくは素朴概念と呼ばれている。授業での先生のちょっとした言い間違いや、解答や公式を丸暗記することにより助長されるのかもしれない。何れにしてもこのような齟齬は他の分野の学習では起こりにくい物理に特有な現象と思われる。

このような誤解を取り除き、多くの市民に科学的な考え方を身につけてもらい物理学の知識を日常生活に役立ててもらうためには、どのような教え方をすれば効果的なのか、認知科学や統計学の助けを借りて科学的に研究するのが物理教育の研究である。素朴概念を中心に教育効果を測る概念調査テストが開発され、各国語に翻訳されて広く使われている。教育を受けた前後の得点の増加で教育効果を測ったデータをまとめると、教育効果は、教育方法(伝統的な板書による講義、アクティブラーニング)により特定のユニバーサルラインに乗るなどという面白い研究も出てきている。

鈴木康夫 <y-suzuki@la.takushoku-u.ac.jp>

編集委員

森川 雅博 (委員長), 長谷川修司,
浅井 朋彦, 井澤 公一, 井上 貴史,
今村 卓史, 枝川 圭一, 江藤 幹雄,
片山 郁文, 岸根順一郎, 栗田 玲,
桑本 剛, 小林 由佳, 鈴木 康夫,
須山 輝明, 田島 俊之, 田中 良巳,
田沼 肇, 初田真知子, 藤井 芳昭,

藤崎 弘士, 間瀬 圭一, 松本 重貴,
望月 維人, 矢向謙太郎, 浅野 勝見,
板橋 健太, 藤山 茂樹, 李 哲虎
(支部委員)
飯塚 剛, 石井 史之, 奥西 巧一,
黒岩 芳弘, 酒井 彰, 中村 光廣,
野村 清英, 松井 広志, 水野 義之,
溝口 幸司

新著紹介小委員会委員

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

第 72 期 (2016 年 3 月 31 日~2017 年 3 月 31 日) 理事・監事

会 長	藤井保彦	副 会 長	川村 光
庶 務 理 事	板倉明子・小形正男・香取浩子・小林研介・高須昌子・永江知文・肥山詠美子 村上修一		
会 計 理 事	井上邦雄・小林研介(兼任)・澤 博・永江知文(兼任)		
会誌編集委員長	森川雅博	JPSJ 編集委員長	上田和夫
刊 行 委 員 長	大槻東巳	監 事	三宅康博・林 青司
			PTEP 編集委員長 坂井典佑

本誌の複写をご希望の方へ

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

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、学著協より許諾を受けて下さい。

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

※複写以外の許諾(著作物の転載等)に関しては、学著協に委託しておりません。

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

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

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル 3F
Fax: 03-3475-5619 e-mail: info@jaacc.jp

日 本 物 理 学 会 誌 第 71 卷 第 4 号 (平成 28 年 4 月 5 日発行) 通巻 803 号

©日本物理学会 2016

Butsuri

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

白 勢 祐 次 郎

印 刷 所 〒169-0075 東京都新宿区高田馬場 3-8-8

株式会社 国 際 文 献 社

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

一般社団法人 日 本 物 理 学 会

電話 03-3816-6201 Fax 03-3816-6208

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

本誌に掲載された寄稿等の著作権は一般社団法人日本物理学会が所有しています。

日本物理学会誌は会誌編集委員会の依頼による寄稿と、会員からの投稿とからなる。その採否は会誌編集委員会で決定する。また、内容、表現などについて会誌編集委員会が修正を依頼することがある。原稿は原則として電子データとする。

1. 各欄の主な内容と執筆要領

以下の刷上りページ数には本文のほか、図表およびリードページ(1ページ)を含める。1d, 1fには著者紹介を、また1a, 1d~1oの著者が非会員の場合は非会員著者の紹介をつける。

1a. 巻頭言(3段組:刷上り1頁)

日本物理学会長等、日本物理学会の運営に対して責任ある立場の人が物理学会の現状、方針等についてその所信を述べる。原則、依頼原稿とし毎月掲載する。

1b. 最近のトピックス(2段組:刷上り2頁)

国内外の物理学の最近の大きな発見や発展を速報として紹介する。著者自身の成果の発表の場ではない。著者名と所属は末尾に掲載する。

1c. 現代物理のキーワード(2段組:刷上り2頁)

物理学の現状を読み解くため、あるキーワードを中心として、周辺も含めた研究の動向を紹介する。他領域研究者や学部学生にも分かるよう平易な筆致で紹介する。国外の研究動向を紹介してもよい。著者自身の成果の発表の場ではない。著者名と所属は末尾に掲載する。原則として毎月掲載する。

1d. 交流(2段組:刷上り5~9頁, リードページ・英文抄録・著者写真・著者紹介有)

細分化の進んだ各分野間の理解を深めるため、また初学者の啓蒙のため、厳密さを多少犠牲にしても各分野の現状、特に興味のある点、近い将来の問題点を平易に説明する。

1e. 特別企画

編集委員会の企画により、特集、講座、座談会等を取り上げる。執筆要領はその都度定める。

1f. 解説(2段組:刷上り5~9頁, リードページ・英文抄録・著者写真・著者紹介有)

1つの主題について、専門外の会員に対する入門的な説明から説き起こし、専門的な最近の成果まで解説する。原著論文発表の場ではない。

1g. 最近の研究から(2段組:刷上り3~5頁, リードページ・英文抄録有)

最近の重要な研究の中から、なるべく広い範囲の会員が興味を持つ話題を取り上げて紹介する。特に専門外の会員にも研究の要点が分かるように書くことが望ましい。

1h. 実験技術(2段組:刷上り2~8頁, 4頁を超える場合はリードページ・英文抄録・著者写真有)

広い範囲の人々にとって興味のある実験法について、その原理と技術上の問題点、それが貢献できる物理の分野などを明らかにする。

1i. 話題(2段組:刷上り2~4頁)

広く会員の関心をひくニュースや話題、大型実験装置の立ち上げ報告、多くの会員が興味を持つ国際会議やイベントの報告、物理で説明できる身近な現象、珍しい実験結果や計算結果などを紹介する。原著論文を発表する場ではない。

1j. 物理教育は今(2段組:刷上り1~4頁)

物理教育の改革に役立つよう、会員に教育の現状と問題点、海外事情、改善に向けた取り組みなどを紹介する。新しい教育方法の実践、物理学の授業で使用している演示用実験器具、ビデオなどの教材も紹介する。

1k. JPSJの最近の注目論文から(2段組:1つの論文につき刷上り1頁)

毎月のJPSJ掲載論文(レター論文、本論文および招待論文)の中からJPSJ編集委員会が選んだ注目論文を取り上げる。研究の背景と意義、その内容の簡単な説明をする。原稿は、論文の著者の原案をもとにJPSJ編集委員長が書く。

1l. PTEPの最近の招待・特集論文から(2段組:1つの論文につき刷上り1頁)

毎月のPTEP招待・特集掲載論文を紹介する。研究の背景と意義、その内容の簡単な説明をする。原稿は、論文の著者の原案をもとにPTEP編集委員長が書く。

1m. 歴史の小径(2段組:刷上り1~2頁)

物理学史上の様々な話題をあまり専門的でない読み物として掲載する。

1n. ラ・トッカータ(2段組:刷上り1~2頁)

今までの欄に収まらない人間的な事柄や、普通の解説書には見られない研究上のテクニックなどを紹介する。若手研究者の海外滞在体験記、大学訪問記、夏の学校報告などを紹介する。原則として依頼原稿とする。(欄名の由来は「触れ合い」を意味するイタリア語。)

1o. 談話室 (3段組：刷上り1~2頁)

会員にとって興味ある話題，研究・教育に関するちょっとした事柄，随筆，シニアな先生から若手へのアドバイス，会員の動静などを掲載する。

1p. 新著紹介 (3段組：1つの書籍につき刷上り1/4~1/2頁)

- 1) 内外の新しい出版物の中で，特に会員の興味をひくと思われるものを紹介し批評する。
- 2) 書き方は最初に著者名，題名，出版社，出版地，出版年，頁数，サイズ，価格，叢書名などを記載する。

例：F. Scheck

Mechanics

Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 1990, xiv + 431p, 24 × 16 cm, 本体9,520円

- 3) 批評に対する原著者の反論は，原則として1回掲載することができる。ただし，刷上り1/2頁以内とする。

1q. 学界ニュース (3段組：刷上り1/4~2頁)

物理学コミュニティにおける主なニュースを取り上げる。会員の受賞なども含める。受賞記事の掲載基準については別に決めるガイドラインによる。

1r. 追悼 (3段組：刷上り1/2~1頁)

- 1) 物理学の各分野への貢献の大きかった会員，名誉会員。
- 2) 日本物理学会の運営に貢献の大きかった会員，名誉会員。
- 3) 日本の物理学界に貢献の大きかった内外の物理学者および関連分野の学者。

1s. 会員の声 (1,500字以内)

- 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する。
- 2) 採否は編集委員会での議論を踏まえ，委員長が判断する。その内容に関する責任は投稿者が負う。

1t. 掲示板 (500字以内)

- 1) 人事公募，学術的会合の予定，助成金の公募，その他の通知などを掲載する。その配列は所定の様式による。
- 2) 掲載希望の原稿は毎月1日締切とし，原則として翌月号に掲載する。ただし，1月号，2月号は前々月の20日締切とする。また，掲載にあたり字句の修正を行うことがある。
- 3) 原則として投稿はWebフォームおよびFAXによる。
- 4) 内容に関する責任は投稿者が負う。

2. 原稿作成上の注意

2a. **用紙と字詰め**：A4判用紙に横書きとする。原稿は各欄に応じて3段組または2段組で掲載され，刷上り1頁あたりの目安は図表がない場合，3段組が17字×49行×3列，2段組が26字×49行×2列である。

2b. **長さについて**：指定枚数を超過した場合には原則として短縮を求める。ただし，図・表等は指定枚数に含める。

2c. **書き方**：電子データを原則とする。黒色，横書きとし，専門用語以外は原則として常用漢字・新仮名づかいを用いる。不必要な外国語の使用は避ける。外国語の固有名詞のうち『文部省学術用語集 物理学編』に掲載されているものは原則として片仮名を用いる。

2d. **術語について**：日本語として十分定着している術語はそれに従う。そうでないと思われるものはカッコ内に原語を付記する。専門分野にしか通用しない略語には説明をつける。また，単位については原則としてSI単位を用いる。

2e. 字体の指定

- 1) 印刷すべき本文以外の指定や注意書きはすべて赤で書く。
- 2) 指定がない場合は原則として本文は立体，数式はイタリックで印刷する。本文中でイタリックにすべきもの(物理量を表す記号・変数・物理量や番号を表す添字など)は，例えばRは \mathbf{R} のように，文字の下に $\underline{\quad}$ と赤で指定する。数式中の立体にすべきもの(演算記号 $[\log, \ln, \sin, \exp(e), \lim, d$ (微分), $\text{Re, Im, Tr}]$ ・虚数単位 $[i, j]$ ・元素記号・単位・言葉の意味を表す添字など)は，例えばlogは $\overline{\log}$ のように， $\overline{\quad}$ と赤で指定する。
- 3) 文中ボールドとすべき文字(表題・セクション名・文献などの見出し，特別な文字など)は文字の下に $\underline{\underline{\quad}}$ と赤で指定する。ボールド・イタリックとすべき文字(ベクトルなど)は $\underline{\underline{\quad}}$ と赤で指定する。
- 4) ギリシア文字は明瞭に書き，ギ(赤)の記号で指定する。花文字は花(赤)，テンソルはサンセリフ(赤)と指定する。
- 5) 数式は印刷に便利のように注意し，特に文中に式を挿入する場合には a/b , $\exp(t/r)$ のような表記法を用いる。二重添字，eの肩にのる字の添字などは避ける。
- 6) 添字・本文中の文献番号などは赤で \vee , \wedge と上ツキ，下ツキを指定する。
- 7) 0(ゼロ)とO(オー)，1(イチ)とI(エル)， \times (カケル)と \times (エックス)， ϕ (ファイ)と ϕ (プサイ)など紛らわしいものははっきり書き，特に誤りやすい場合には片仮名をつける。C, K, O, P, S, W, X, Y, Zなどのように大文字と小文字の区別が困難なものについては，必要に応じ赤で $\text{\textcircled{C}}$ または $\text{\textcircled{D}}$ と指定する。

2f. 参考文献

- 1) 文献引用の範囲は，それが必要かつ十分であるように留意する。私信のような一般の人が入手しにくい文献は引用

することをできるだけ避け、その代わりに、それらの出所と具体的内容を本文中または脚注に簡潔に記すことが望ましい。

- 2) 文献の引用はAbraham,¹⁾ Brubaker,^{2,3)} Cahn⁴⁻⁶⁾などのように通し番号をつけ、論文の末尾に一括して示す。1つの番号には1つの論文が引用されることが望ましい。
- 3) 参考文献の書き方は著者名、誌名、巻、年、頁の順とする。毎号頁の改まる雑誌については号数を入れ、巻数はボールドの指定をする。雑誌名の省略及び欧文の書き方はJournal of the Physical Society of Japanのスタイルを踏襲する。単行本の書名のうち日本語のものは『 』でくくり、欧文のものはイタリックの指定をする。日本語の場合は人名、書名とも省略しない。次の例の形式にならう。

吉田善章：日本物理学会誌 **48** (1993) 73.

T. Saito, *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn. **54** (1985) 231.

C. N. Yang and T. T. Chou: *Proc. 6th Int. Symp. Polarization Phenomena in Nuclear Physics, Osaka, 1985*, J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. **55** (1986) 53.

森 正武：『数値解析』（共立出版，1973）p. 83.

G. F. Smoot: *Primordial Nucleosynthesis and Evolution of Early Universe* (Kluwer Academic, 1991) p. 281.

- 4) 参考文献に文献のタイトルを入れる場合には、出典の書誌的事項の後にダッシュ(—)を入れ、そのあとにタイトルを記載する。

2g. **脚注**：脚注は*¹、*²、*³などの記号で記し、脚注と赤で書く。

2h. **表**：表は表1、表2のように通し番号をつけ、説明文を続ける。また、他の文献から引用する場合には引用文献を記載する。

2i. **図、写真**：図および写真には図1、図2と通し番号をつけ、説明文を続ける。図を他の文献から転載または修正して転載する場合には必ず出典を明記し、著者および発行者に転載許可を得ること。

2j. **校正**：掲示板以外のものは著者校正を原則とするが、場合により省略することもある。

2k. **別刷**：1a～1j、1m～1oおよび1rの記事の別刷は50部を希望する著者に寄贈する。50部を超える部数を希望する著者に対しては、50部単位で別刷を作成し、50部を超える分については $(1,100+8x)p$ 円を著者負担とする。ただし、 p は頁数($p \leq 3$ の場合は $p=3$)、 x は50部を超える50部単位の希望部数、カラー印刷の場合は20%割増とする。その他の記事は原則として別刷を作らない。なお別刷には表紙をつけない。

2l. **他の文献からの転載**：他の文献から文章、図、表をそのまま転載する場合は、著作権の問題があるので、必ず著者および発行者の書面による許可（自著の場合にも必要）を求めなければならない。手続きに関しては、著者が責任を負うものとする。

2m. **謝辞**：必要な場合は原稿作成に関わるものに限定し、小見出しをつけずに簡潔に記載する。1g（最近の研究から）、1h（実験技術）以外は、研究資金の出所は原則書かない。

3. 著作権

3a. 会誌に掲載された寄稿等の著作権

会誌に掲載された寄稿・投稿等（以下寄稿等という）の著作権は日本物理学会に帰属する。著者は、当学会および当学会が会誌の利用を許諾した第三者に対し、本著者人格権を行使しない。著者は、寄稿等が、①第三者の権利を侵害していないこと、②二重投稿ではないこと、および③共同著作物である場合には、会誌への投稿を行うにあたり、当該共同著作物の他の著者全員の同意を取得していることを保証する。

3b. 会誌に掲載された寄稿等の利用

1) 会誌に掲載された寄稿等の全部または一部を他の出版物に転載し、翻訳し、あるいはその他の利用をしようとする者は、別表の基準に従って日本物理学会の承認を得、またその寄稿等が会誌に掲載されたものであることを明記（出所明示）し、著者の了解を得なければならない。

2) 著者は、会誌に掲載された自分の寄稿等の全部または一部を学術情報として著者自身で利用する場合には、別表の基準に従うものとする。

3) 日本物理学会は、いかなる媒体や手段においても、著作物の全部または一部を公開する権利を有するものとする。

4. 原稿提出先

113-0034 東京都文京区湯島2-31-22 湯島アーバンビル8F

butsurei-toukou@jps.or.jp

日本物理学会誌編集委員長

問合せ先電話番号 03-3816-6201

(別表)

会誌・大会概要集・大学の物理教育掲載論文 利用許諾基準

2015年11月改訂, 2014年4月改訂, 2011年8月改訂, 2006年10月改訂, 2005年10月施行, 2005年7月22日制定								
	許諾申込主体	利用対象	形式	媒体等	学会への申請	条件	学会への報告義務	注
1	著者	自己の論文の全部または一部	閲読が完了した「著者最終稿」の電子ファイル	個人のサーバ	不要	A, D, F	不要	個人のサーバとは、搭載された全内容について著者がアップロードや削除を他人の同意なしに行えるサーバを指す。
2	同上	同上	掲載物(電子ファイル)	研究者仲間へ電子的手段で配布	不要	B	不要	
3	同上	同上	掲載物(紙版, 電子ファイル)	研究報告書(不特定多数に配布しないもの)	不要	A	不要	
4	同上	自己の論文の図および表	無修正のまま	Review article	不要	A	不要	Review article 以外は、書面による申請が必要。
5	著者または雇用機関	自己の論文の全部または一部	閲読が完了した「著者最終稿」の電子ファイル	雇用機関のサーバ(機関リポジトリ)	必要[#1]	A, D, E, F	要(サーバ搭載のURLを連絡)	・雇用機関サーバとは、アップロードや削除を著者個人が直接コントロールできないものを言う ・営利目的の広告の場合は許可が必要
6	同上	同上	掲載物(紙版)	雇用機関の被雇用者の論文のみからなる論文集、紀要、本など：雇用機関内部で使用または広報用だが非営利で無料配布のもの	不要	A	不要	・雇用機関外部への販売の場合には許可が必要
7	「著者または雇用機関」以外の第三者	掲載論文の全部または一部	掲載物(紙版, 電子ファイル)	本や論文、論文選集(電子媒体を含む)	要	A, C	サーバ搭載の際はURLを連絡	・営利目的と判断された場合は、課金することもある
8	2次情報出版者	書誌情報など			要			条件(有料/無料など)は個別交渉

「条件A」：コピー権表示を含み一切変更しないこと。部分引用の場合は、完全な引用情報を付すこと。

「条件B」：研究者個人宛の1対1の発送のみ。メーリングリスト、その他の複数宛先への一斉送信は禁止。

「条件C」：原則として著者の承諾も必要。

「条件D」：掲載物(電子ファイル、紙面のスキャンデータ等)のサーバ搭載は認めない。「著者最終稿」の搭載にあたっては、共著者の承諾を得ること。

「条件E」：著者最終稿の場合も公開サーバへの搭載は電子版ないしは紙版の刊行1ヵ月後とすること。

「条件F」：機関リポジトリ搭載の著作権は「一般社団法人日本物理学会(The Physical Society of Japan)が保有していること、完全な引用情報を表記すること。

注記

#1：複数の機関にまたがる研究プロジェクト(チーム)は雇用機関に準ずる。

#2：マイクロフィルム、CD-ROM等の電子媒体などは紙版に準じて扱う。

#3：引用および引用情報を含む図や表などの論文の一部を転載する場合には、完全な引用情報を含んで転載すること。

#4：利用許諾された論文等は、(共)著者および日本物理学会へ帰属する著作権を尊重して利用すること、また、サーバ搭載の論文を管理すること。

#5：本基準は2015年11月1日以降の申請に適用する。

#6：本基準について問い合わせや許可願いは右記までお願いします：pubpub@jps.or.jp

会誌サプレンタルマテリアル掲載規定

[2014年11月 会誌編集委員会]

1. 会誌記事の科学的内容に関連して、読者の理解を助け、読者の便益を図るために、会誌記事の著者がウェブ上においてサプレンタルマテリアルを公開することを認める。
2. サプレンタルマテリアルは会誌記事の付録として位置づけられ、関連する記事の物理的内容の本質的部分については記事本体で無矛盾に書かれているべきである。このため、単に制限ページ数を超過した原稿の一部をサプレンタルマテリアルとするような運用は行わないこととする。
3. サプレンタルマテリアルには記事と関連した画像・動画、数式の詳細な導出などを掲載することができる。ソースコード、実行ファイルは認めない。但し、これらを配置した外部サイトへの誘導は記事本体の参考文献として行うことができる。サプレンタルマテリアルのフォーマット、受付方法等については細則に定める。
4. サプレンタルマテリアルを掲載できる会誌記事の欄名は以下の通りである。最近のトピックス、現代物理のキーワード、交流、解説、最近の研究から、実験技術、話題、物理教育は今、歴史の小径、特集等、特別企画については、会誌編集委員会で都度定める。
5. サプレンタルマテリアル掲載の採否は、前記1. から4. までの基準に照らして会誌編集委員会で決定する。また、内容、表現などについて会誌編集委員会が修正を依頼することがある。
6. サプレンタルマテリアルの掲載は会誌の発行と同時にを行うこととし、公開後の変更は原則認めない。公開期間は細則に定める。
7. サプレンタルマテリアルの著作権および利用については、日本物理学会誌投稿規定3. に従うものとする。また、著者は、サプレンタルマテリアルに付随した個人情報を含む自身の情報について、日本物理学会がウェブ公開を目的として利用、提供することに同意する。
8. サプレンタルマテリアルの公開は著者に通知することなく停止する場合がある。サプレンタルマテリアルの提供遅滞、中断、停止又は公開により著者に発生する紛争・損害等について、日本物理学会はいかなる責任も負わないものとする。