

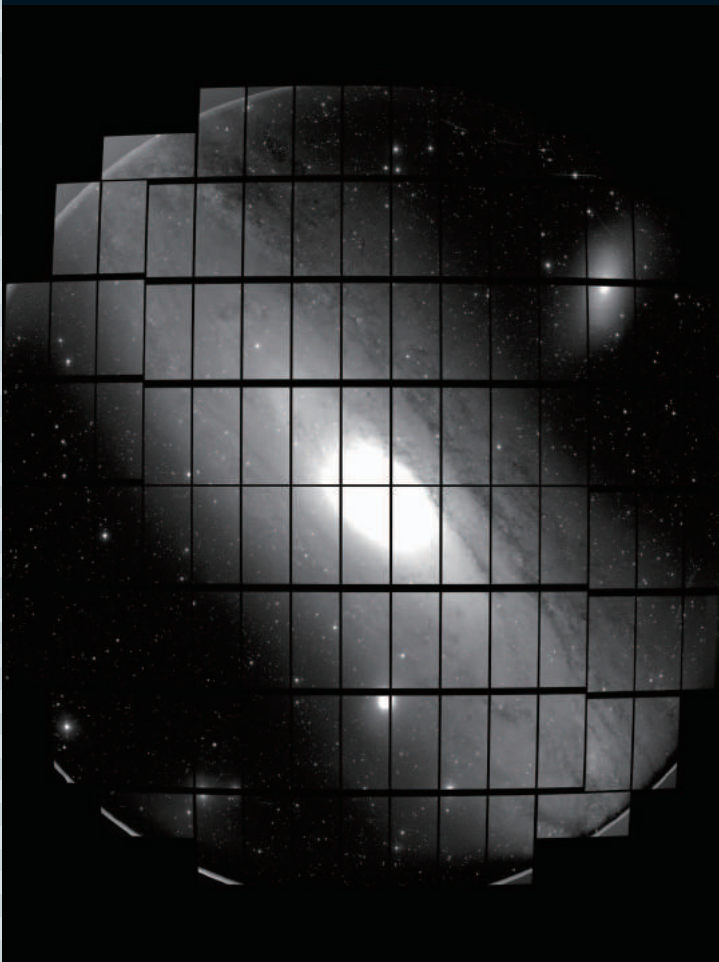
- 秩序なし+ギャップなしの
ドロドロ三つ巴液体状態を求めて
- 絶縁体中の磁気スキルミオン相が示す
電気磁気ダイナミクス
- 日本の観測的宇宙論の黎明期
- 宇宙加速膨張の謎に迫る

NO.

3

2014 | VOL. 69

B U T S U R I
日本物理学会誌



創造的失敗

江崎玲於奈 〈名誉会員〉

研究論文においてもっとも大事なことは理論、実験を問わず、報告される内容が論理的に正当かどうかということでしょう。創造性に富むと思われる論文には論理に飛躍が見られるものも少なくありません。何としても、推量で短絡的な結論は許されません。かなり古い話になりますが、ノーベル賞を巻き込んだ誤報事件二つと、その影響したところを紹介しましょう。

(1) まず、最初は発がんに関わる問題です。胃に宿るある種の寄生虫をがんの病原体と認定し、人工発がんの最初の成功例として、1926年、デンマークの病理学者 フィビガー博士 (J. A. G. Fibiger) にノーベル生理学・医学賞が授与されました。しかし、その後の研究で再現性が乏しく、ノーベル賞の歴史上、ちょっとした汚点かもしれませんが、授賞の対象になった研究が「誤報」と認定されました。もっともこの研究が様々な発がん物質 (カーシノゲン) 研究の糸口になったことは事実でしょう。また、最近、オーストラリアのマーシャル (B. J. Marshall) とワーレン (J. R. Warren) 両博士が胃炎や潰瘍を引き起こすピロリ菌の発見で2005年ノーベル生理学・医学賞を受賞し、これがフィビガー博士の昔の業績を思い浮かべさせたかもしれません。

(2) 次は、エサキダイオードに到るまでの数々の研究者たちの「誤報」の歴史です。まず、1934年、アメリカの理論物理学者 ツェナー (C. Zener) は固体の電氣的絶縁破壊の説明として、当時、最先端の量子力学的なトンネル電流の理論を提唱しました。[C. Zener: Proc. Roy. Soc. **145** (1934) 523—A Theory of the Electrical Breakdown of Solid Dielectrics] しかし、彼の理論そのものは満足すべきものであったのですが、その後の研究により、実際の絶縁破壊はまったく別のメカニズムであることがわかりました。すなわち、電

場で加速された電子のアバランシェ (なだれ) 効果に基づく電流増倍作用によるものであることが明らかになったのです。ついで、1951年、アメリカのベル研究所の錚々たる研究者たち、マッカフィー (K. B. McAfee) をはじめとし、トランジスターを発明したショックレー (W. Shockley) をも含めた4人がゲルマニウム pn 接合ダイオードのブレイクダウンにおいて、ツェナー理論によるトンネル電流を観測したと報告したのです。[K. B. McAfee, E. J. Ryder, W. Shockley and M. Sparks: Phys. Rev. **83** (1951) 650—Observations of Zener Current in Germanium p-n Junctions] ところが、これまた、あとの研究により否定されることになりました。30代はじめであった私はこれをチャンスと捉えました。かなりの努力を払った結果、1957年、ついにエサキダイオードを登場させることができました。[L. Esaki: Phys. Rev. **109** (1958) 603—New Phenomenon in Narrow Germanium p-n Junctions] ここでは、単にツェナー理論によるトンネル電流の確認に止まらず、負性抵抗という新現象発見のサプライズが伴いました。これが、1973年、ノーベル物理学賞受賞につながるようになります。

ここで後日談を述べることにしましょう。エサキダイオードの研究成果はアメリカの物理の学術誌フィジカル・レビューに投稿しましたが、1958年、私の英文の稚拙なところが修正し、異議なく速やかに掲載してくれました。査読が厳しいとされる学術誌だけに意外に思っていました。数年後になりますが、ある学会で、先に「誤報」したベル研究所の研究員、マッカフィーが笑みを浮かべて私に近づき、ささやきました。「実は、おれがお前の例の論文を査読したんだ。直ちに全部理解したよ。」と。また、この「誤報」に名を連ねたショックレー博士はその後ノ

ーベル物理学賞を受賞し、1958年6月ブリュッセルで開催された固体物理学国際会議では基調講演を行いました。その中で、「ツェナー効果のもっとも美しい実証が、東京のレオ・エサキによって、本会議において報告されます。」と私の仕事をたいへん賞賛してくれました。おかげで注目が集まり、私の講演会場は満席。多分、その頃、あまりよくわからない英語を使っただけに、皆がより一層傾聴してくれました。

私の論文が発表されて一番喜んだのは言うまでもなく自分の理論が実証されたツェナー博士本人です。当時、彼はピッツバーグにあったウェスチングハウス中央研究所の所長をしていたが、「わが研究所で働かないか。主任研究員として処遇しよう。」と声をかけてくれました。1958年の中頃です。彼が、私に渡米して研究することを勧めた最初の人ということになります。

ところで、「誤報」は審査を厳重にして防がねばなりません。しかし、科学の進歩は新しいフロンティアの開拓から始まります。そこは未知の領域だけにアイデアは創造的であっても結果が伴わないというリスク、「創造的失敗」を経験することも少なくありません。それはフロンティア開拓に刺激を与えるという意味で「必要悪」と言えるかもしれません。考えてみますと、われわれ研究する者は、「創造的失敗を避けるための慎重さ」はもちろん必要ですが、チャンスが訪れた時には「リスクを冒して成功に賭ける勇気」を持たねばならないのではないのでしょうか。

参考文献

- 1) 江崎玲於奈：『オプションを活かそう』(中央公論新社、2013)。
- 2) 江崎玲於奈：『限界への挑戦：私の履歴書』(日本経済新聞出版社、2007)。

(2013年10月11日原稿受付)

巻頭言 Preface

創造的失敗
Creative Failures

江崎玲於奈 …… 127
Leo Esaki

現代物理のキーワード Trends

秩序なし+ギャップなしのドロドロ三つ巴液体状態を求めて
Search for Frustrated Liquid States without Order and without Gap

小形正男 …… 130
Masao Ogata

解説 Reviews

絶縁体中の磁気スキルミオン相が示す電気磁気ダイナミクス
Dynamical Magnetolectric Phenomena and Gigantic Microwave Diode Effect of Multiferroic Skyrmion Phase

望月維人, 関 真一郎 …… 132
Masahito Mochizuki and Shinichiro Seki

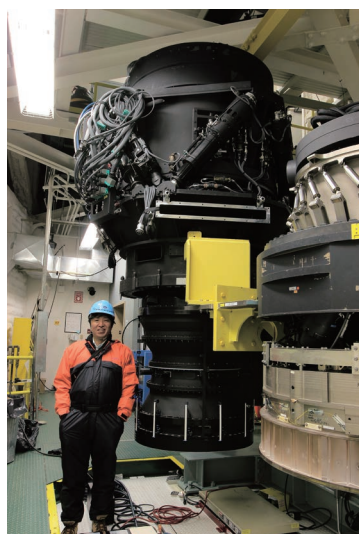
日本の観測的宇宙論の黎明期—すばる望遠鏡超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam 計画
A New Era in Observational Cosmology in Japan—The New Subaru Telescope Prime-Focus Camera, Hyper Suprime-Cam

高田昌広 …… 140
Masahiro Takada

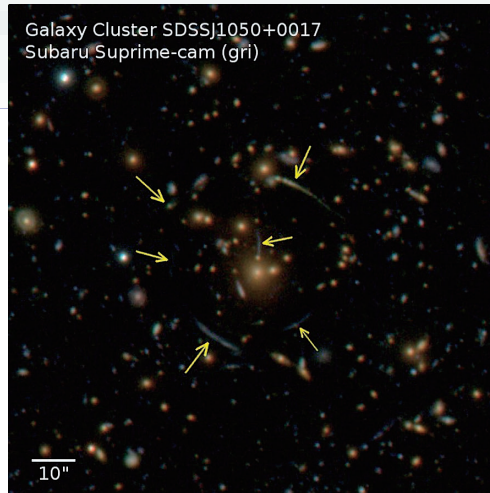
実験技術 Experimental Developments

宇宙加速膨張の謎に迫る—広視野銀河探索観測によるダークマター分布の計測—
Dark Matter Mapping via Wide Field Galaxy Survey

宮崎 聡 …… 149
Satoshi Miyazaki



実験技術 (宇宙加速膨張の謎に迫る—広視野銀河探索観測によるダークマター分布の計測—)
左: ドーム内にある待機室で調整中の Hyper Suprime-Cam. 右: 望遠鏡 (青) 上部の主焦点に搭載される。



解説 (日本の観測的宇宙論の黎明期—すばる望遠鏡超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam 計画)
すばる SDSSJ1050+0017 のすばる画像。矢印は強い重力レンズ効果をうけた銀河団背後の遠方銀河
(国立天文台/東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構, 大栗真宗氏提供)。

JPSJの最近の注目論文から 11月の編集委員会より

学会報告 2013年秋季大会 招待・企画・チュートリアル講演の報告

ラ・トッカータ シカゴ大学 KICP ポスドク滞在記

学界ニュース 第28回西宮湯川記念賞：高柳 匡氏, 笠 真生氏

平成25年度文化功労者：柳田敏雄氏

2013年度仁科記念賞：香取秀俊氏

高橋義朗氏

近藤敬比古氏, 小林富雄氏, 浅井祥仁氏

第8回凝縮系科学賞：内田健一氏, 伏屋雄紀氏

追悼 阿部龍蔵先生を偲んで

新著紹介

掲示板 ■人事公募 ■学術的会合 ■その他

行事予定

会告

■第13回代議員懇談会開催のお知らせ ■第94回定時総会開催のお知らせ ■第69回年次大会の参加登録・講演概要集のWed登録受付中(新しい受付方法です) ■日本物理学会年表(第二版)~歴史のなかの物理学会~ 刊行の案内 ■2014年秋季大会・講演募集掲載号 ■2014年秋季大会の企画募集 ■The Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of APS and JPS (2014年秋季大会核物理領域)の開催について ■Plasma Conference 2014 (2014年秋季大会領域2)の開催について ■2014年2月1日付新入会者

本会関係英文誌目次

安藤恒也 …… 157

領域委員会 …… 159

藤井俊博 …… 168

磯 暁 …… 170

原田慶恵 …… 170

井戸哲也 …… 171

熊倉光孝 …… 171

徳宿克夫 …… 172

北岡良雄 …… 173

氷上 忍 …… 174

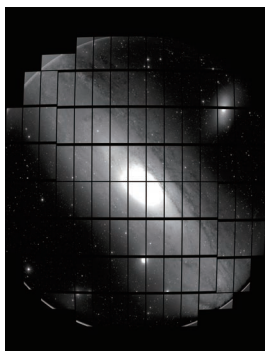
175

177

183

185

189



表紙の説明

エドウィンハッブルは、アンドロメダ銀河等近傍の銀河の距離を計測し、この距離と銀河の後退速度との間に比例関係があることを見つけ、宇宙が膨張していることを発見した。さらに、近年、この膨張速度が加速していることが観測され、その物理的な意味の解明に、興味が集まっている。しかしまだ観測データが十分でなく、宇宙を広く観測し、宇宙膨張率の時間変化を詳細に調べる必要がある。我々はすばる望遠鏡用に広視野・高解像度のカメラを新たに開発し(HSC)、2014年初頭より大規模な観測を開始しようとしている。表紙の画像は、試験観測中に撮影した、観測的宇宙論のスタート地点とも言えるアンドロメダ銀河である。1.5度角の視野を0.4秒角程度の解像度で撮像できるカメラは、口径が8mを超える大望遠鏡ではHSCしかない。焦点面の物理的大きさは約50cmで、長方形のCCDセンサー(3cm×6cm)を116個敷き詰めている。詳細は本号に掲載されている宮崎聡氏の「実験技術」記事を参照のこと。

秩序なし+ギャップなしのドロドロ三つ巴液体状態を求めて

Keyword: スピン液体

1. はじめに

スピン系とは、空間に電子などが固定されて、そのスピンだけの自由度を議論するモデルである。統計力学の講義でモデルとして扱われることからわかるように、スピン系の物理は相当理解されている。多くの場合、スピン間相互作用によって低温でなんらかの長距離秩序が発生する。長距離秩序が発生しない場合には、基底状態からの励起状態がエネルギーギャップを持つ「スピンギャップ」状態になると考えられている。1次元のHaldane gapが有名である。

このようにスピン系といえば、長距離秩序を持つか、スピンギャップを持つかという2つの状態で話が終わると思われてきた。図1(a)は一般的に信じられている相図である。長距離秩序もなくスピンギャップもない状態は、量子臨界点の1点でしか存在しない。スピンギャップ相からアプローチすると、スピン励起のギャップが0となったときに、スピン励起がボース凝縮して長距離秩序になると考えてもよい。

しかし最近、 κ -(BEDT-TTF)₂Cu₂(CN)₃ や EtMe₃Sb[Pd(dmit)₂]₂などの物質において、長距離秩序もなくスピンギャップもないようなスピン系が見つかった。¹⁾ これをスピン液体という。実際、NMRなどにより低温まで長距離秩序が生じていないことが確認されるとともに、比熱や熱伝導の実験によって励起状態にエネルギーギャップがない(またはあっても非常に小さい)ということがわかっている。ここではスピン液体の理論についてまとめてみる。

2. フラストレーション

まずどのような状況でスピン液体が生じるかを考える。長距離秩序をこわすには、図1(b)のように3番目のスピンがどちらを向いてもエネルギーが変わらないような状況を考えればよい。これをフラストレーションという。²⁾ (日本語では、三つ巴・三すくみ、などと言う。) 例えば反強磁性三角格子・カゴメ格子・パイロクロア格子などがこの性質を持つ(長距離相互作用によるものも可能)。図1(a)の横軸はこのようなフラストレーションの度合とみなされる。

ここで、相互作用が反強磁性であることが重要である。この場合、スピンの2つだけでも基底状態はスピン一重項 $1/\sqrt{2}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$ となり、この時点ですでに2つの状態の線形結合という量子力学的状態になっている。格子構造が幾何学的フラストレーションを持つ系に反強磁性相互作用があるというシンプルなハミルトニアンから、本質的に量子力学的な液体状態が生じるところがスピン液体の醍醐

味といえる。さらに電荷の自由度が付加されると、高温超伝導のようなエキゾチックな状態までも生じる可能性がある。

3. スピン液体の分類学

スピン系といえども、フラストレーションがあると量子モンテカルロ法などで負符号問題が生じ、低温の状態を調べるのが大変困難になる。そのため、スピン液体についての明確な理論は完成していない。図2の表は、スピン液体の分類をかなり大胆にまとめたものである。³⁾

表中一番上の欄は通常長距離秩序がある場合である。2番目のvalence bond solid (VBS)は、スピン液体の一種ということもあるが、むしろ「固体」と呼ぶべきものでありスピンギャップを持つ。valence bondというのは2つのスピンのスピン一重項を形成したもので、それが図3(a)のように格子上にきちんと並んだ状態がVBSである。

3.1 RVB状態

表の3番目以降がスピン液体。図3(b)では、valence bondが格子上に敷き詰められている状況はVBSと同じであるが、その位置は固定されておらず、いろいろな配置の状態が量子力学的な重ね合わせとなっている。この重ね合わせを共鳴と呼んでresonating valence bond略してRVBという。

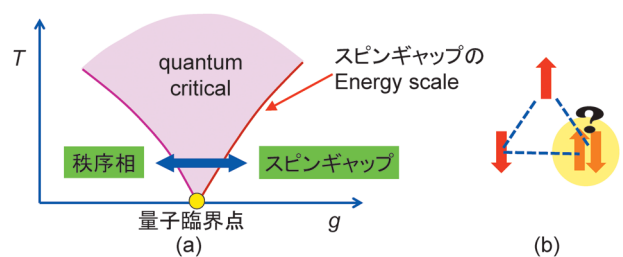


図1 (a) 一般的な相図。横軸は適当なパラメータ。(b) フラストレーション。

	秩序変数	ギャップの有無	励起
反強磁性AF	Staggered moment	gapless	magnon
valence bond solid (VBS)	S=0 dimer-dimer correlation	gapあり C activation-type	Confined spinon
RVB type I	なし	gapあり C activation-type	Deconfined spinon
RVB type II	なし	S=0 gapless, S=1 gap finite (independent of H) C activation-type	Deconfined spinon T=0 residual entropy
Spinon Fermi surface	なし	gapless C = γT (?) χ Finite	Deconfined (free) spinon + ゲージ場
Spinon Dirac Cone (Algebraic)	なし	gapless (Dirac point) C = γT^2 (?) $\chi \propto T$ (?)	Deconfined spinon + ゲージ場

図2 スピン液体の分類。

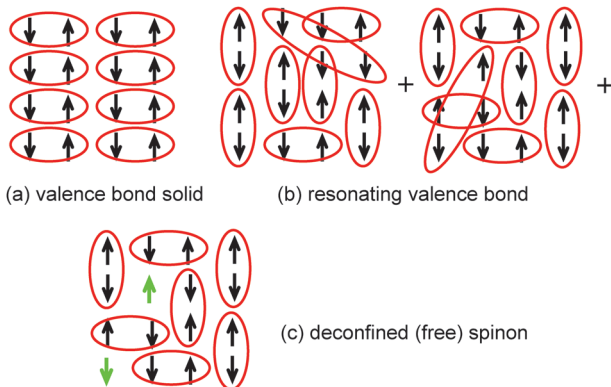


図3 各種のスピン状態。赤い○で囲まれた2つのスピンは、スピン一重項を形成しているとする。

1つのスピンのみに着目すると、その valence bond の相手は時々刻々変化していると考えてもよい。その意味で「液体的」な状態である。ただし重ね合わせの数は膨大であり、かつそれぞれの状態の係数がどのような値であるかは、はっきりとわかっているものではない。

ただし、そうは言っても記述することは可能である。P. W. Anderson は 1987 年に高温超伝導の候補として

$$P_G |\text{BCS 基底状態}\rangle = P_G \prod_k [u_k + v_k c_{k\uparrow}^\dagger c_{-k\downarrow}^\dagger] |0\rangle \quad (1)$$

という状態を考えた。⁴⁾ P_G は右側の波動関数から↑と↓の電子が同じ格子に上にある状態を排除するという演算子である。格子の数と電子数が同じ場合、この演算子のおかげで電子は格子に隙間なく敷き詰められて動くことができなくなる。実際 (1) 式を実空間で表すと、確かに図 3(b) のような RVB 状態になっていることがわかる。身動きできないクーパ対が valence bond となっていて、図 3(b) の様々な配置の係数は u_k と v_k によって決まる。つまり (1) 式は、明示的に書き下された RVB 状態の 1 つなのである。

実際、正方格子ではこの RVB 状態と反強磁性が共存したものが最もよい変分波動関数であることがわかっている。⁴⁾ さらにこれにホールが導入されれば、電子が動けるようになって、ただちに強相関の超伝導状態に移行できると考えられ、高温超伝導の候補の 1 つとなっている。⁴⁾

3.2 その他のスピン液体

RVB 状態の応用として、「超伝導」ギャップを 0 とすれば

$$P_G |\text{FS}\rangle = P_G \prod_{|k| < k_F} c_{k\uparrow}^\dagger c_{-k\downarrow}^\dagger |0\rangle \quad (2)$$

という状態になる。この状態は表の 5 番目の spinon Fermi surface である。フェルミ面が存在するような形に書かれているが、 P_G のために電子は動けず絶縁体であるのは変わらない。spinon とは、図 3(c) のように valence bond が 1

つ壊れて、2つの自由スピンの準粒子として振舞うと期待されたものである。この励起のために、温度 T に比例した電子比熱のようなものが得られると期待されている。

また (1) 式で「超伝導」ギャップが d 波超伝導のようなノードを持つ場合も考えられる。この場合、励起がちょうど Dirac 電子系と同じような分散関係を持つので、spinon Dirac cone と呼ばれる (表の最下段)。algebraic spin liquid と呼んでいる研究者もいるが、実は RVB 状態の 1 つである。これら 2 つのスピン液体状態では、spinon がゲージ場と結合するとして、場の理論的な議論もされている。

3.3 RVB type II

表の 4 番目の RVB type II は非常に特異な状態であり、理論的に未解明である。とくにカゴメ格子で実現しているのではないかと考えられている。³⁾ 少数系でのハミルトニアン の厳密対角化によると、この系には長距離秩序がなく、かつ $S=0$ の励起状態が基底状態のエネルギー近傍に異常に密集して多数存在していることがわかっている。このことは、実験的に低温比熱の異常として見られるはずである。さらに最近では cuboctahedron 型と呼ばれる非常に風変わりなスピン構造が実現しているのではないかと議論もあり、⁵⁾ カゴメ格子のスピン系はとて面白い。

4. 有機物でのスピン液体

最初に挙げた有機物でのスピン系は、異方的 2 次元三角格子上で実現されている。図 2 の表に従って考えると、ギャップや比熱の実験などから、超伝導ギャップの小さい RVB type I か spinon Fermi surface がスピン液体の候補と考えられる。ただし、後者は数値計算などでは安定解として見つからない。また、仮想的にはあるが spinon Fermi surface を仮定してゲージ場との結合を考慮すると、比熱が $C \propto 1/T^{1/3}$ などとなって、実験結果と合わないこともわかっている。筆者は spinon Fermi surface に限りなく近い RVB type I であって、ゲージ場との結合が無視できるものと考えているが、まだ理論的には決着がつかっていない。

参考文献

- 1) レビューとして、K. Kanoda and R. Kato: *Ann. Rev. Condens. Matter Phys.* **2** (2011) 167.
- 2) まとまった本として、*Introduction to Frustrated Magnetism*, ed. by C. Lacroix, *et al.* (Springer, 2010).
- 3) C. Lhuillier and G. Misguich: *cond-mat/0109146* 参考.
- 4) いろいろと詳しい事柄については、M. Ogata and H. Fukuyama: *Rep. Prog. Phys.* **71** (2008) 036501 を参照.
- 5) L. Messio, *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 207204.

小形正男 (東京大学大学院理学系研究科)

(2013 年 9 月 16 日原稿受付)

絶縁体中の磁気スキルミオン相が示す 電気磁気ダイナミクス



望月 維人*

青山学院大学理工学部



関 真一郎*

理化学研究所 CEMS

1960年代に素粒子物理学の分野で提唱された「スキルミオン」が、最近になってある種の磁性体中で実現していることが発見され注目を集めている。この磁性体中の磁気スキルミオンは、磁化の空間配置が立体角 4π を埋め尽くすようにあらゆる方向を向いた渦状かつ粒子的なナノスケールのスピントクスチャである。2009年にB20化合物と呼ばれる金属磁性体中で発見されたスキルミオンは、磁気テクスチャが作る有効磁場由来の伝導電子のホール効果（トポロジカルホール効果）や、スピン移行トルク機構を通じた電流による駆動現象など、その特異な「輸送現象」や磁気記憶デバイスなどへの「技術応用の可能性」に注目が集まった。それに対し、2012年に絶縁磁性体 Cu_2OSeO_3 でもスキルミオン相が発見され、さらにこの物質中で非共線的なスキルミオン磁気構造が強誘電分極を誘起していることが分かった。このような磁化と分極が結合したマルチフェロイック系では、興味深い電場と磁場の交差相関応答が期待される。最近の理論研究で、マイクロ波の振動磁場成分と振動電場成分の両方に活性なエレクトロマグノンと呼ばれる磁化と分極の固有振動モードの存在が明らかにされた。さらに、これらの複合自由度のモードが持つ磁場励起チャンネルと電場励起チャンネルの干渉効果を通じて、このマルチフェロイックスキルミオン相がこれまでに報告例がないほど巨大なマイクロ波の整流効果を示すことが明らかになった。具体的には、

スキルミオン相によるマイクロ波の吸収率がマイクロ波の照射方向によって最大20%も変化することが予言されている。この研究により、磁気スキルミオンが「記憶・論理デバイス」の素材としてのみならず、「マイクロ波デバイス」の素材としても有望であることが示され、スキルミオンをはじめとするトポロジカル磁気テクスチャの新しい研究の方向性が開拓された。

—Keywords—

磁気スキルミオン：

空間反転対称性の破れたカイラル磁性体に磁場を印加すると渦状かつ粒子状のスピントクスチャであるスキルミオンが実現する。磁化は、渦の外側に磁場に平行、中心で磁場に反平行になっており、その間でゆっくり捻られている。

トポロジカル磁気テクスチャ：

磁化の空間分布を連続的に捻っていてもスキルミオン構造を強磁性状態にすることはできないし、強磁性状態からスキルミオンを作ることもできない。このように強磁性状態とトポロジカルクラスが異なる磁気構造をトポロジカル磁気テクスチャと呼ぶ。

マルチフェロイックス：

従来は、複数の強制的秩序（強磁性、強誘電性、強弾性など）を同時に併せ持つ物質群を意味していたが、近年では「磁性」と「誘電性」が共存する物質群を指すことが多い。特に、スピン軌道相互作用や磁歪の効果を通じて、磁性と誘電性が強く結合している系では、様々な興味深い電気磁気交差相関現象が発現する。

エレクトロマグノン：

磁化と電気分極が結合したマルチフェロイックスでは、電磁波（光やマイクロ波）の交流電場成分で電気分極を揺らすことによって、それと連動した磁化の固有振動（マグノン）を励起できる。この電氣的に励起されたマグノンをエレクトロマグノンと呼ぶ。

* 科学技術振興機構さきがけ

1. はじめに

磁性体中の非共線な磁気構造はしばしば興味深い物性現象とデバイス機能を発現し、精力的な研究の対象となる。例えば、金属強磁性体中の「磁壁」や「磁気渦」は、スピン移行トルク機構を通じて電流により駆動することができ、それを利用したレーストラックメモリなどの磁気デバイス応用が期待されている。また、絶縁磁性体中の「スパイラル磁性」は、スピン軌道相互作用を通じて強誘電分極を誘起し、磁性と誘電性のカップリングによる多彩な電気磁気交差相関現象の宝庫となっている。

これらの磁気テクスチャに加え、1960年代にイギリスの素粒子物理学者 Tony Hilton Royle Skyrme によってバリオンのモデルとして提唱された「スキルミオン (Skyrmion)」が、¹⁾ 最近ある種のカイラル磁性体中で実現していることが発見され、再び脚光を浴びている。その理由は、磁気スキルミオンが示す特異な外場応答ダイナミクスが技術応用の面で有望な「スピントロニクス機能」を秘めていることが分かってきたからである。

Skyrme が提唱したオリジナルのスキルミオンは、図1(a)のように「スピンの球の立体角 4π を埋め尽くすようにあらゆる方向を向いた粒子」であった。2009年に小角中性子散乱実験によって、それを二次元面に射影した図1(b)のような磁気構造がB20型金属磁性体において発見された。^{2,3)} その後、MnSiのみならず $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ や FeGe などの一連のB20型化合物において、次々にスキルミオンが発見され、さらにローレンツ透過型電子顕微鏡により、スキルミオン磁気構造の実空間イメージが観察された。^{4,5)}

B20型化合物は、空間反転対称性の破れたキラルな結晶構造を持つため、強い Dzyaloshinskii-守谷 (DM) 相互作用

が実現している。螺旋的な磁化配置を好むこのDM相互作用と、共線的に磁化を揃えようとする強磁性交換相互作用が強く競合する結果、ゼロ磁場では図1(c)のように一定の回転角で磁化が巻くヘリカル磁性が実現する。そこに磁場を印加すると印加磁場と直交する面内に渦状かつ粒子的な性質を持ったトポロジカル磁気テクスチャ「スキルミオン」が出現する。^{6,7)} B20化合物では、スキルミオンはしばしば図1(d)のように「スキルミオン結晶」と呼ばれる三角格子を構成する。三次元方向には、磁化の向きは強磁性的に配列しており、図1(b)のような磁気構造がロッド状に積層している。また、磁化ベクトルの向きは、ゼーマン相互作用の利得を稼ぐために、スキルミオンの外周で印加磁場と平行、中心で反平行となっている。

ところで、このようなDM相互作用に由来するカイラル磁性体中のスキルミオンに加え、近年では空間反転対称性のある様々な磁性体の薄膜試料において、磁気双極子相互作用が重要な役割を果たしていると思われるスキルミオンに類似した磁気テクスチャが相次いで発見されている。⁸⁻¹⁰⁾ これらの磁気テクスチャの典型的な大きさは $3\text{-}100\ \mu\text{m}$ であるのに対し、カイラル磁性体中のスキルミオンの典型的なサイズは $3\text{-}100\ \text{nm}$ と桁違いに小さい。

金属磁性体であるB20化合物中のスキルミオンは、電流を印加すると特異な輸送現象やスピントロニクス機能を発現する。例えば、スキルミオンを構成する 4π の立体角を張る磁化は伝導電子に作用する仮想磁場として働き、その結果、電子のホール効果 (トポロジカルホール効果) が観測される。¹¹⁻¹⁶⁾ また、スキルミオンがスピン移行トルク機構を通じて、 10^5 から $10^6\ \text{A/m}^2$ という非常に小さい電流で駆動できることも発見された。¹⁷⁻¹⁹⁾ これは 10^{10} から $10^{12}\ \text{A/m}^2$ もある強磁性磁壁の閾電流密度に比べると、²⁰⁾ 10万分の1から100万分の1も小さい値になっている。これらの発見により、スキルミオンは記憶・論理デバイスへの応用を覗んだ「スピントロニクス」の観点から注目を集めることになった。¹⁹⁾

2012年になって、 Cu_2OSeO_3 という絶縁磁性体でもスキルミオンやそれが三角格子状に配列した「スキルミオン結晶」が実現していることが発見された。²¹⁻²³⁾ この物質は、B20化合物と同じ $P2_13$ という結晶群に属する空間反転対称性の破れたキラルな結晶構造を持ち (図2(a))、4つの Cu^{2+} イオン (スピン $1/2$) で構成された四面体ユニットのネットワークで構成されている (図2(b))。粉末中性子回折実験²⁴⁾ と核磁気共鳴実験²⁵⁾ の結果、 $T_c \sim 58\ \text{K}$ 以下で、四面体の頂点にある4つのスピンのうち、3つがアップスピンで1つがダウンスピンのフェリ磁性体となっていることが分かっている。バルク試料におけるスキルミオン相は、温度-磁場相図上の非常に狭い領域でのみ現れるが、薄膜試料では強い安定性を獲得し、図2(c)に掲げるように最低温を含む広い温度-磁場領域で現れる。

Cu_2OSeO_3 のような絶縁磁性体中のスキルミオン相で特

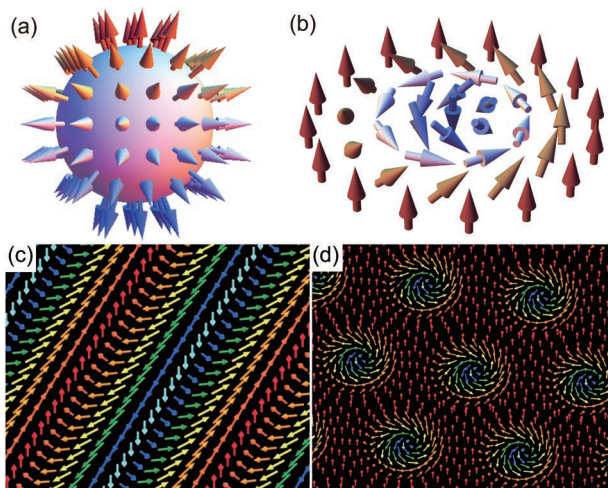


図1 (a) 1960年代に Tony Skyrme がバリオンのモデルとして提唱したヘッジホッグ型のスキルミオンの概念図。磁化が立体角 4π を埋め尽くすように全方位を向いている。(b) 最近になってカイラル磁性体で発見されたスキルミオンの概念図。ヘッジホッグ型のスキルミオンの二次元射影に対応する磁気構造をしており、磁化が立体角 4π を埋め尽くすように全方位を向いている。(c) カイラル磁性体中で Dzyaloshinskii-守谷相互作用と強磁性相互作用の競合の結果、ゼロ磁場で実現するヘリカル磁性の概念図。(d) カイラル磁性体に磁場を印加した時に実現するスキルミオン結晶の概念図。スキルミオンが三角格子を構成している。

筆すべきことは、マルチフェロイック特性が期待されることである。スパイラル磁性のような非共線的なスピン構造は、しばしば磁性由来の電気分極を発現するが、²⁶⁻³¹⁾ この Cu_2OSeO_3 中のスキルミオン相も強誘電分極を伴っていることが実験的に確認された。^{21, 23)} このような系では、スキルミオン特有の電気磁気交差相関応答が期待される。エレクトロマグノン励起はそのような現象の最たる例である。³²⁻³⁵⁾ 電気分極と結合した磁気テクスチャでは、マイクロ波や光の振動電場成分によって電気分極を揺らすことで、それと連動したスピンの固有振動(マグノン)を励起できる。この電氣的に励起された磁性の共鳴励起は、様々な現象や機能を生み出す。特に、このような複合自由度の励起が必然的に持つ複数の励起チャンネル、つまり振動磁場と振動電場による励起チャンネルの干渉効果によって、巨大なマイクロ波の非相反方向二色性が実現することが近年理論的に予言され、³⁶⁾ その直後に実験によって確かめられた。³⁷⁾ この現象は、 Cu_2OSeO_3 の試料に、ある方向からマイクロ波を照射すると良く透過するが、逆の方向から照射するとあまり透過しないというマイクロ波の「整流現象」あるいは「ダイオード効果」であり、磁場可変のマイクロ波アイソレータへの応用が期待される。このことは、磁気スキルミオンが「記憶・論理デバイス機能」のみならず、高い「マイクロ波デバイス機能」をも有していることを示しており、フェライト素子や回路、導波路を組み合わせた既存のマイ

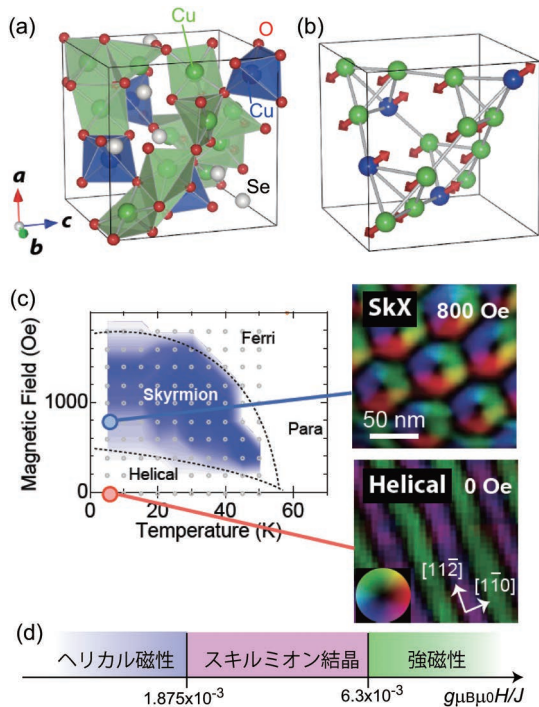


図2 (a) カイラル絶縁磁性体 Cu_2OSeO_3 の結晶構造。立方晶 $P2_13$ という結晶群に属し空間反転対称性が破れたキラルな結晶構造になっている。(b) Cu_2OSeO_3 の磁気構造。4つの Cu^{2+} イオン(スピン 1/2) で構成された四面体のネットワークで構成されており、1つの四面体を取り出すと3つのアップスピンと1つのダウンスピンで構成されたフェリ磁性体であることが分かる。(c) Cu_2OSeO_3 の薄膜試料(膜厚は ~ 100 nm)の温度-磁場相図。²¹⁾ 広い領域にスキルミオン相が広がっている。(d) カイラル磁性体薄膜の磁性を記述する古典ハイゼンベルグ模型(3)式の基底状態における磁場中相図。

クロ波デバイスを一つの物質で置き換えることで、飛躍的に小型化できる可能性を提供している。この研究により、スキルミオンを含むトポロジカル磁気テクスチャの新しい研究の方向性が拓かれたので、本稿で詳しく紹介する。

2. 磁気強誘電性

スキルミオン相で磁性由来の強誘電分極がどの方向に出現し得るかは、対称性の考察から議論できる。 Cu_2OSeO_3 の結晶構造は、空間反転対称性は破れていても、それ自体は極性を持っていないため、強誘電分極を伴わない。結晶の対称性に加え、磁気構造の対称性が加わることで、系が極性を持ち強誘電分極が発現する。そのことを見てみよう。図3(a)に示すように、結晶構造は4本の三回対称軸(3)と3本の二回螺旋軸(2_1)を持つ。それに対して、スキルミオン結晶は図3(b)に示すように、面直方向を向いた六回対称軸(6)の他に、面内に6本の時間反転を伴う二回対称軸($2'$)を持つ。スキルミオン結晶が磁場と垂直な面内に現れることを踏まえて、図3(d)-(f)のように、三種類の方向に磁場を印加した場合を考えよう。まず、図3(d) $H \parallel [110]$ の場合、結晶構造の対称性と $[110]$ 軸に垂直な面

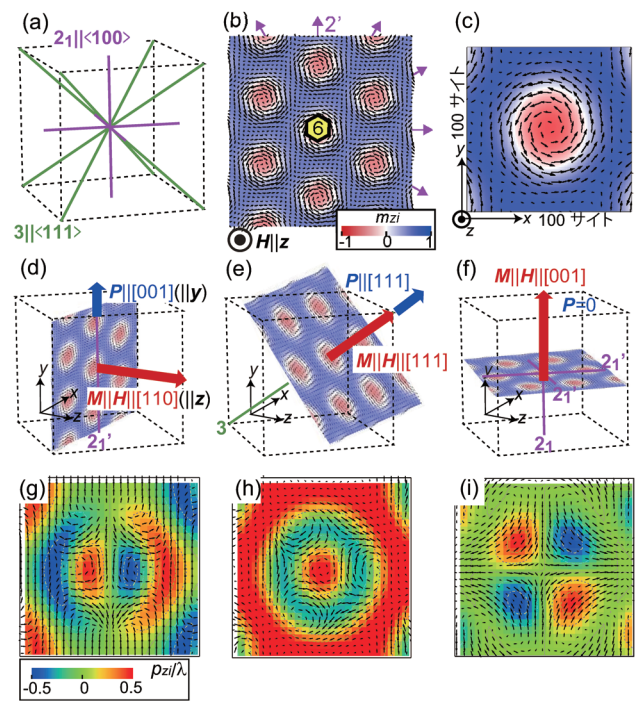


図3 (a) 立方晶 $P2_13$ に属する Cu_2OSeO_3 の結晶構造を持つ対称軸。4本の三回対称軸 $3 \parallel \langle 111 \rangle$ と3本の二回螺旋軸 $2_1 \parallel \langle 100 \rangle$ を持つ。(b) スキルミオン結晶が持つ対称軸。印加磁場と平行な六回対称軸(6)と、垂直な面内に6本の時間反転を伴う二回対称軸($2'$)を持つ。(c) 一つのスキルミオンの磁化配置。磁化の面内成分を矢印で、面直成分をカラープロットで表示している。(d) $[110]$ 方向に磁場 H を印加すると、 $[001]$ 方向に伸びる時間反転を伴う二回螺旋軸($2_1'$)のみが唯一の対称軸として残り、この方向に強誘電分極 $P \parallel [001]$ が発生し得る。(e) $[111]$ 方向に磁場 H を印加すると、 $[111]$ 方向に伸びる三回対称軸(3)のみが唯一の対称軸として残り、この方向に強誘電分極 $P \parallel [111]$ が発生し得る。(f) $[001]$ 方向に磁場 H を印加すると、1本の二回螺旋軸(2_1)と2本の時間反転を伴う二回螺旋軸($2_1'$)が対称軸として残るため、強誘電分極は発生し得ない。(g)-(i) それぞれ、 $[110]$ 方向、 $[111]$ 方向、そして $[001]$ 方向に印加された磁場下においてスキルミオン磁気構造が誘起する局所電気分極の空間分布。面内成分が矢印で、面直成分がカラープロットで表されている。

内に現れるスキルミオン結晶の対称性を併せると，[001]方向に伸びる時間反転を伴う二回螺旋軸 ($2_1'$) のみが唯一の対称軸として生き残るため，この方向に強誘電分極 $\mathbf{P} \parallel [001]$ が発現し得る．次に，図3(e) $\mathbf{H} \parallel [111]$ の場合，[111] に垂直な面内に現れるスキルミオン結晶の対称性から，[111] 方向に伸びる三回対称軸 (3) のみが唯一の対称軸として生き残り，強誘電分極 $\mathbf{P} \parallel [111]$ が発現し得る．それに対して，図3(f) $\mathbf{H} \parallel [001]$ の場合，1本の 2_1 軸と2本の $2_1'$ 軸が対称軸として生き残ってしまうため，強誘電分極の発現は禁止される．実は，ここでの議論はスキルミオン結晶相のみならずヘリカル磁性相や強磁性相 (フェリ磁性相) でも成り立つ．

この物質中の電気分極の微視的な発現機構は「スピン依存軌道混成機構」，いわゆる「有馬モデル」で良く説明でき，次の関係式で記述できる.³⁸⁾

$$\mathbf{p}_{ij} \propto (\mathbf{e}_{ij} \cdot \mathbf{m}_i)^2 \mathbf{e}_{ij} \quad (1)$$

ここで， i と j はそれぞれ磁性イオン Cu^{2+} と配位子の酸素イオンを表すインデックスであり， \mathbf{e}_{ij} はそれらを結ぶ単位方向ベクトルである．さらに，Ginzburg-Landau 展開による対称性の議論からは，局所電気分極 $\mathbf{p}_i = (p_{ia}, p_{ib}, p_{ic})$ が次のようにも書けることが分かる．

$$\mathbf{p}_i = (p_{ia}, p_{ib}, p_{ic}) = \lambda (m_{ib}m_{ic}, m_{ic}m_{ia}, m_{ia}m_{ib}) \quad (2)$$

ここで， a, b, c は立方晶 (P2₁3) の直交座標軸である．電気磁気結合定数 λ の値は，誘電測定の結果から $\lambda = 5.64 \times 10^{-27} \mu\text{Cm}$ と見積もられる．式(1)と式(2)は，一見異なる結果を与えそうに見えるが，実際の物質の結晶構造を考え， Cu^{2+} イオンと酸素イオンの座標を使って式(1)に基づいて局所電気分極の空間分布を計算すると，式(2)で計算したものと同一結果が得られる．それぞれの磁場方向について計算で得られた局所電気分極 \mathbf{p}_i の空間分布を，図3(g)-(i)に示しておく．

3. モデルと相図

Cu_2OSeO_3 のようなカイラル磁性体の薄膜試料の磁性は，次の正方格子上的古典ハイゼンベルグ模型で良く記述される.³⁹⁻⁴¹⁾

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_0 = & -J \sum_{\langle i, j \rangle} \mathbf{m}_i \cdot \mathbf{m}_j - D \sum_{i, \hat{j} = \hat{x}, \hat{y}} \mathbf{m}_i \times \mathbf{m}_{i+\hat{j}} \cdot \hat{j} \\ & - g\mu_B\mu_0 H_z \sum_i m_{iz}, \end{aligned} \quad (3)$$

ここで，3-up, 1-down の共線的な4つのスピン 1/2 で構成される四面体を磁気的なユニットと考え，これを長さ1の粗視化した磁化 \mathbf{m}_i と置いている．ただし， \mathbf{m}_i の定義は $\mathbf{m}_i = -\mathbf{S}_i/\hbar$ である．第一項は強磁性交換相互作用，第二項がDM相互作用で，第三項がゼーマン相互作用を表す．ただし $g=2$ である．本稿で議論するスキルミオンやヘリカル磁性は，非常に長周期の磁化の空間構造を持つため，背後にある結晶構造をほとんど感じることはない．そのことが，現

実の物質の複雑な結晶構造を忘れて，単純な正方格子上のスピン模型での取り扱いを正当化している．このモデルの基底状態の相図は，磁場の関数として図2(d)のようになる.^{19, 42)} 低磁場側のヘリカル相と高磁場側の強磁性相に挟まれる形で，中間磁場領域でスキルミオン結晶相が実現している．これを実験で得られた Cu_2OSeO_3 薄膜の磁場中相図 (図2(c)) の最低温での振る舞いと比較すると，非常に良く一致していることが分かる．

ヘリカル磁性やスキルミオン結晶の周期は，強磁性相互作用とDM相互作用の強度比 D/J で決まる．ヘリカル相の螺旋角を θ とおいて， θ の関数として書いたエネルギーの変分を取ると， $\tan \theta = D/(\sqrt{2}J)$ という関係式を得る．また，スキルミオン結晶の周期は，ヘリカル相の周期のおよそ $2/\sqrt{3}$ 倍になる．具体的には， $|D/J| = 0.09$ に取るとヘリカル磁性の周期は約100サイト ($\sim 50 \text{ nm}$) となり，実験で観測されている Cu_2OSeO_3 のヘリカル磁性の周期を再現する．また，強磁性相互作用の大きさを $J = 1 \text{ meV}$ とおくと，実験で得られている相転移の臨界磁場が再現される．

このモデルで記述される系の磁化のダイナミクスを Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式を Runge-Kutta 法で数値シミュレーションすることで解析する．LLG 方程式は次のように与えられる．

$$\frac{d\mathbf{m}_i}{dt} = -\mathbf{m}_i \times \mathbf{H}_i^{\text{eff}} + \frac{\alpha_G}{m} \mathbf{m}_i \times \frac{d\mathbf{m}_i}{dt} \quad (4)$$

方程式中に現れる局所有効磁場 $\mathbf{H}_i^{\text{eff}}$ は系のハミルトニアン $\mathcal{H} = \mathcal{H}_0 + \mathcal{H}'(t)$ から

$$\mathbf{H}_i^{\text{eff}} = -\partial \mathcal{H} / \partial \mathbf{m}_i \quad (5)$$

を使って計算される．ここで， \mathcal{H}_0 は式(3)で示したモデルハミルトニアンであり， $\mathcal{H}'(t)$ は外部から摂動で与える電場や磁場である．計算には 288×288 サイトの系を使用し，Gilbert 緩和係数は $\alpha_G = 0.04$ とした．

4. 電気磁気共鳴とマイクロ波の巨大非相反方向二色性現象

マルチフェロイック特性を持つスキルミオン結晶相では，強い電気磁気結合のために，固有振動モードが交流磁場 \mathbf{H}^ω と交流電場 \mathbf{E}^ω の両方に活性になる．特に，図3(d)に示した $\mathbf{H} \parallel [110]$ の場合のように，強誘電分極 \mathbf{P} と磁化 \mathbf{M} が直交する配置になる場合， $\mathbf{P} \times \mathbf{M}$ と平行あるいは反平行に照射したマイクロ波や光の \mathbf{H}^ω 成分と \mathbf{E}^ω 成分は，同一の振動モードを励起し得る．

このことを見るために，磁場 $\mathbf{H} \parallel [110]$ 下でのスキルミオン結晶相の動的磁気感受率 $\chi_{\alpha\beta}^{\text{mm}}(\omega)$ と動的誘電感受率 $\chi_{\alpha\beta}^{\text{ee}}(\omega)$ を計算した．それぞれ，次のような表式で与えられる．

$$\chi_{\alpha\beta}^{\text{mm}}(\omega) = \frac{\Delta M_\alpha^\omega}{\mu_0 H_\beta^\omega}, \quad \chi_{\alpha\beta}^{\text{ee}}(\omega) = \frac{\Delta P_\alpha^\omega}{\epsilon_0 E_\beta^\omega} \quad (6)$$

ただし α, β は印加磁場方向 [110] を z 軸に取った直交座標

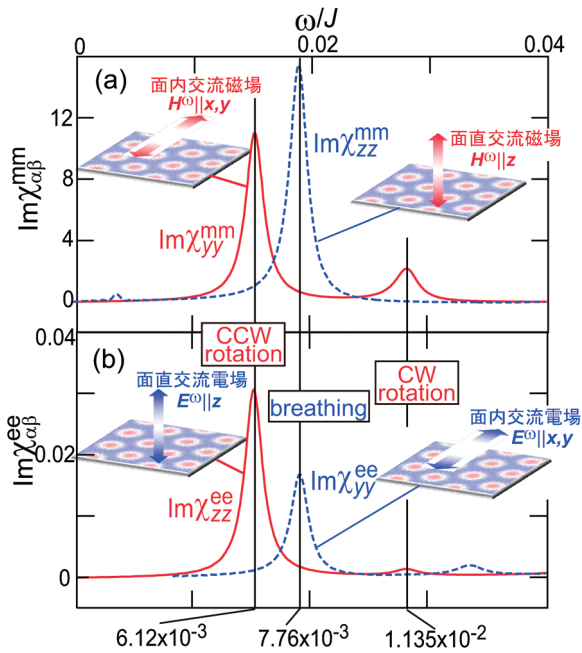


図4 理論計算から得られた磁場 $H^{\parallel}||[110]$ 下で発現するスキルミオン結晶相の (a) 動的磁気感受率の虚部 $\text{Im}\chi_{ab}^{mm}(\omega)$ と、(b) 動的誘電感受率の虚部 $\chi_{ab}^{ee}(\omega)$ のスペクトル。磁場強度 $g\mu_B\mu_0 H_z/J = 3.75 \times 10^{-3}$ で計算している。(a) の $\text{Im}\chi_{yy}^{mm}$ で見られる二つの共鳴ピークと同じ周波数に (b) の $\text{Im}\chi_{zz}^{ee}$ も共鳴ピークを持つことから、面内振動磁場 $H^{\parallel}||y$ と面直振動電場 $E^{\parallel}||z$ が同一の固有振動モードを励起することが分かる。また、(a) の $\text{Im}\chi_{zz}^{mm}$ と (b) の $\text{Im}\chi_{yy}^{ee}$ も同じ周波数に共鳴ピークを持つことから、面直振動磁場 $H^{\parallel}||z$ と面内振動電場 $E^{\parallel}||y$ が同一の固有振動モードを励起することが分かる。直交座標 x, y, z の定義は図3(d)を参照。

軸 x, y, z を表す。時刻 $t=0$ に摂動 $\mathcal{H}(t)$ として電場や磁場の矩形短パルス照射した後、磁化 $\mathbf{M}(t) = (1/N)\sum_i \mathbf{m}_i(t)$ と強誘電分極 $\mathbf{P}(t) = (1/N)\sum_i \mathbf{p}_i(t)$ の時間発展を LLG 方程式の数値シミュレーションで追いかけて、これをフーリエ変換することで式(6)に現れる ΔM_a^{ω} と ΔP_a^{ω} を計算する。このようにして得られた $\chi_{ab}^{mm}(\omega)$ と $\chi_{ab}^{ee}(\omega)$ の虚部の周波数依存性を図4に示す。

まず、図4(a)の $\text{Im}\chi_{yy}^{mm}$ を見ると二つの共鳴ピークが見取れる。そして図4(b)の $\text{Im}\chi_{zz}^{ee}$ に目を移すと、これらの共鳴ピークと同じ周波数に共鳴ピークを持っていることが分かる。これは、面内振動磁場 $H^{\parallel}||y$ と面直振動電場 $E^{\parallel}||z$ が同一の固有振動モードを励起していることを示唆している。次に、図4(a)の $\text{Im}\chi_{zz}^{mm}$ を見ると共鳴ピークが一つあるが、これと同じ周波数に $\text{Im}\chi_{yy}^{ee}$ も共鳴ピークを持っている。これは、面直振動磁場 $H^{\parallel}||z$ と面内振動電場 $E^{\parallel}||y$ が同一の固有振動モードを励起していることを示唆している。つまり、 $H^{\parallel}||[110]$ の場合に実現する \mathbf{P} と \mathbf{M} が直交するような状況では、マイクロ波の互いに直交する振動電場成分と振動磁場成分が同じ固有モードを励起できることを意味している。

ここで現れる共鳴ピークに対応するスキルミオン結晶の一風変わった固有モードを図5に示す。^{42,43)} 面内振動磁場 $H^{\parallel}||y$ や面直振動電場 $E^{\parallel}||z$ により励起される二つのモードはともに回転モードで、スキルミオンのコアが一様に回転する。回転の向きは低エネルギーモードで反時計回り、高エネルギーモードで時計回りとなっている。図5(a)には、

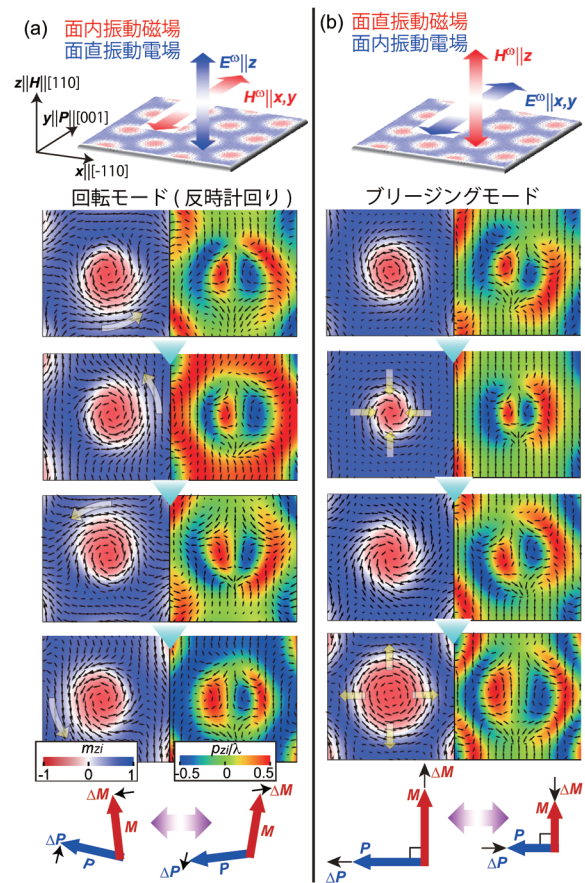


図5 スキルミオン結晶相の電磁マグノン励起における磁化 \mathbf{m}_i と電気分極 \mathbf{p}_i の時空間ダイナミクス。ただし磁場 \mathbf{H} は $[110]$ 方向に印加されている。(a) 面内振動磁場 $H^{\parallel}||y$ あるいは面直振動電場 $E^{\parallel}||z$ によって励起される二つの回転モードのうち、低エネルギー側の反時計回りのモードにおける磁化(左パネル)と電気分極(右パネル)の実空間スナップショット。(b) 面直振動磁場 $H^{\parallel}||z$ あるいは面内振動電場 $E^{\parallel}||y$ によって励起されるプリージングモードにおける磁化(左パネル)と電気分極(右パネル)の実空間スナップショット。磁化 \mathbf{m}_i と電気分極 \mathbf{p}_i の面内成分を矢印で、面直成分をカラープロットで表示している。最下段には、それぞれのモードにおけるネットの磁化 \mathbf{M} と強誘電分極 \mathbf{P} の振る舞いを示してある。回転モードでは両者が作る角度が90度から閉じたり開いたりするのに対し、プリージングモードでは90度の角度を保ったまま、長さが同期的に伸縮する。

低エネルギーの反時計回りの回転モードにおける磁化(左)と電気分極(右)の実空間マップの時間発展を示している。直線偏光の交流電磁場に対してこのような回転モードが生じるのはちょっと面白い。この回転モードは比較的小さい強度のマイクロ波で強励起できる。特に、低エネルギーピークに対応する周波数を持つ左円偏光のマイクロ波により、この回転モードを回転半径がスキルミオン結晶の格子間隔を大きく超えるほど強励起すると、スキルミオン結晶の融解現象が起こることが理論的に予言されている。^{42,43)} 一方、面直振動磁場 $H^{\parallel}||z$ や面内振動電場 $E^{\parallel}||y$ により励起されるモードは、いわゆるプリージングモードで、図5(b)のようにスキルミオン結晶中のすべてのスキルミオンが一様かつ周期的に大きくなったり小さくなったりする。それぞれのモードでネットの磁化 \mathbf{M} と強誘電分極 \mathbf{P} の振る舞いを見てみると、図5の最下段に示したように、回転モードでは両者が作る角度が90度の周りで閉じたり開いたりするのに対し、プリージングモードでは90

度の角度を保ったまま、それらの長さが同期的に伸縮する。

これらの電場と磁場の両方に活性なモードの存在こそ、マイクロ波の整流効果を生み出す原因である。マクスウェル方程式から、電磁波に関して $H^{\omega} \parallel K^{\omega} \times E^{\omega}$ という関係式が導出できる。これは、振動磁場 H^{ω} と振動電場 E^{ω} の方向の相対関係が電磁波の伝播ベクトル K^{ω} によって決まり、 K^{ω} の符号が逆転すると、この相対関係も逆転することを

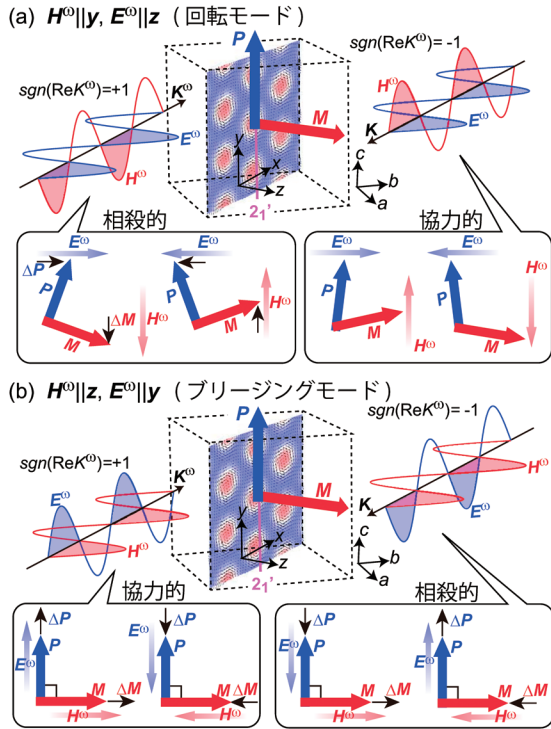


図6 強誘電極 $P \parallel y \parallel [001]$ と磁化 $M \parallel z \parallel [110]$ を持つスキルミオン結晶相に、 $P \times M (\parallel x)$ と平行あるいは反平行にマイクロ波を入射した際に、非相反方向二色性(整流効果)が期待できる偏光配置。(a) $H^{\omega} \parallel y$ かつ $E^{\omega} \parallel z$ の場合、図面奥から入射したマイクロ波では、その H^{ω} 成分と E^{ω} 成分が協力的に回転モードを励起し強く吸収されるのに対し、図面手前から入射したマイクロ波では、両者の寄与が相殺する結果、弱い励起しか起こらず、あまり吸収されない。(b) $H^{\omega} \parallel z$ かつ $E^{\omega} \parallel y$ の場合、図面手前から入射したマイクロ波は、 H^{ω} 成分と E^{ω} 成分が協力的にブリージングモードを励起し、強く吸収されるが、逆方向から入射したマイクロ波はあまり吸収されない。

意味している。この時、図6(a)の奥から照射したマイクロ波では、 $H^{\omega} \parallel y$ と $E^{\omega} \parallel z$ が磁化 M と分極 P の角度を閉じたり開いたりするモード(回転モード)を協力的に強く励起するのに対し、図の手前から照射したマイクロ波では互いに打ち消すように相殺的に働き、弱い励起しか起こらない。その結果、図の奥から照射したマイクロ波は、この磁性強誘電体に強く吸収されほとんど透過しないのに対し、図の手前から照射したマイクロ波はほとんど吸収されずに良く透過することになる。このようにして、マイクロ波の吸収強度に強い入射方向依存性が現れる。

図6(a)の偏光配置では、スキルミオン結晶の固有モードのうち、回転モードの励起チャンネルの干渉効果を考えたが、それ以外にもう一つ、図6(b)のような偏光配置でブリージングモード励起の干渉効果を考えることもできる。つまり、 $H^{\omega} \parallel z$ と $E^{\omega} \parallel y$ を持つマイクロ波を照射することを考える。図の手前から照射したマイクロ波は、その振動磁場成分 H^{ω} と振動電場成分 E^{ω} が協力的に P と M の振動を強く励起するが、図の奥から照射したマイクロ波は相殺的に働き、弱い励起しか起こせない。その結果、図の手前から照射したマイクロ波はスキルミオン相に強く吸収されてしまうのに対し、奥から照射したマイクロ波はあまり吸収されることがなく透過できる。

このような電磁波の整流現象(図7(a)の概念図も参照)は、次の磁性強誘電体におけるマクスウェル方程式から出発して定式化できる。

$$\text{rot } E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad \text{rot } B = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (7)$$

ただし、

$$B = \mu_0 (\hat{\mu}^{\infty} H + M), \quad D = \epsilon_0 \hat{\epsilon}^{\infty} E + P \quad (8)$$

$$P = \epsilon_0 \hat{\chi}^{ee} E + \hat{\chi}^{em} \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} H \quad (9)$$

$$M = \mu_0 \hat{\chi}^{mm} H + \hat{\chi}^{me} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E \quad (10)$$

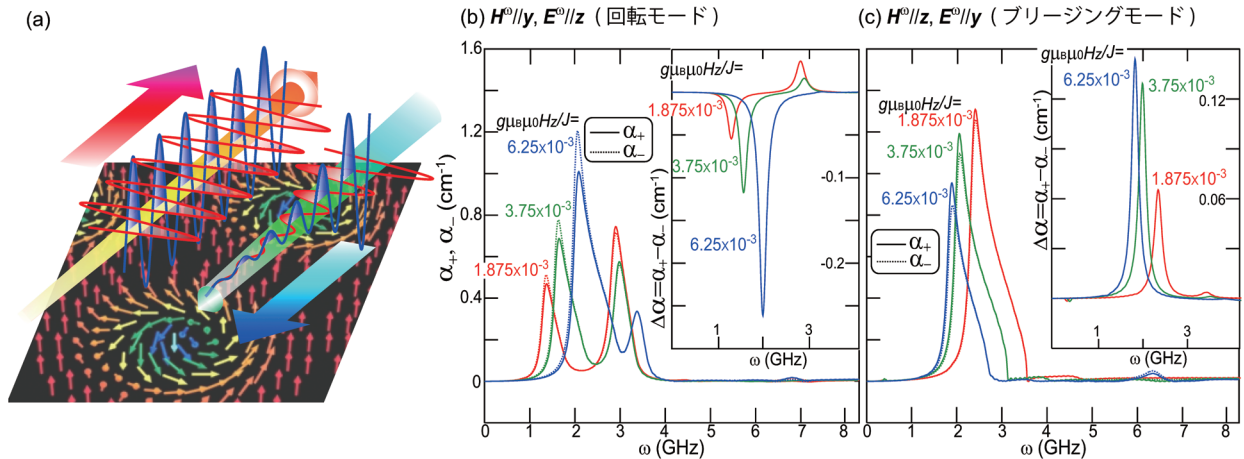


図7 (a) スキルミオン結晶におけるマイクロ波整流効果の概念図。(b)、(c) 理論計算から得られた Cu_2OSeO_3 の二次元薄膜に磁場 $H \parallel [110]$ を印加した時に発現するスキルミオン結晶相のマイクロ波吸収係数スペクトル。様々な印加磁場の大きさについて計算している。ただし、 α_+ は x 軸 ($\parallel [110]$) 正の方向に入射した場合の吸収係数、 α_- は負の方向に入射した場合の吸収係数。 $\Delta\alpha$ は両者の差で、非相反方向二色性(整流効果)の強さを表している。(b) は $H^{\omega} \parallel y$ かつ $E^{\omega} \parallel z$ の回転モードを励起する偏光配置、(c) は $H^{\omega} \parallel z$ かつ $E^{\omega} \parallel y$ のブリージングモードを励起する偏光配置に対応している。

である。ここで大事なことは、マルチフェロイック特性を反映して交差相関の感受率 $\hat{\chi}^{\text{em}}$ と $\hat{\chi}^{\text{mc}}$ が有限になり、電気分極 \mathbf{P} の表式(9)に磁場 \mathbf{H} に比例する項が、磁化 \mathbf{M} の表式(10)に電場 \mathbf{E} に比例する項が現れることである。さらに、

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^\omega \exp[i(\mathbf{K}^\omega \cdot \mathbf{r} - \omega t)] \quad (11)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}^\omega \exp[i(\mathbf{K}^\omega \cdot \mathbf{r} - \omega t)] \quad (12)$$

と置いて式(8)に代入すると、フーリエ成分に関して次の連立方程式が得られる。

$$\omega \mathbf{B}^\omega = \mathbf{K}^\omega \times \mathbf{E}^\omega, \quad -\omega \mathbf{D}^\omega = \mathbf{K}^\omega \times \mathbf{H}^\omega \quad (13)$$

ただし、

$$\mathbf{B}^\omega = [\hat{\mu}^{\infty} + \hat{\chi}^{\text{mm}}(\omega)] \mu_0 \mathbf{H}^\omega + \hat{\chi}^{\text{mc}}(\omega) \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \mathbf{E}^\omega \quad (14)$$

$$\mathbf{D}^\omega = [\hat{\epsilon}^{\infty} + \hat{\chi}^{\text{ee}}(\omega)] \epsilon_0 \mathbf{E}^\omega + \hat{\chi}^{\text{em}}(\omega) \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \mathbf{H}^\omega \quad (15)$$

である。この連立方程式を $\mathbf{K}^\omega(\|\mathbf{x})$ について解き、複素屈折率 $N(\omega) = n(\omega) + i\kappa(\omega)$ と \mathbf{K}^ω の関係式 $K^\omega = \omega N(\omega)/c$ を考慮すると、 $N(\omega)$ の表式がそれぞれの偏光配置について次のように求められる。

(i) $\mathbf{H}^\omega \parallel \mathbf{y}$ かつ $\mathbf{E}^\omega \parallel \mathbf{z}$ の場合

$$N(\omega) \sim \sqrt{[\hat{\epsilon}_{zz}^{\infty} + \hat{\chi}_{zz}^{\text{ee}}(\omega)][\hat{\mu}_{yy}^{\infty} + \hat{\chi}_{yy}^{\text{mm}}(\omega)]} \\ - \text{sgn}(K^\omega) [\hat{\chi}_{yz}^{\text{mc}}(\omega) + \hat{\chi}_{zy}^{\text{em}}(\omega)]/2 \quad (16)$$

(ii) $\mathbf{H}^\omega \parallel \mathbf{z}$ かつ $\mathbf{E}^\omega \parallel \mathbf{y}$ の場合

$$N(\omega) \sim \sqrt{[\hat{\epsilon}_{yy}^{\infty} + \hat{\chi}_{yy}^{\text{ee}}(\omega)][\hat{\mu}_{zz}^{\infty} + \hat{\chi}_{zz}^{\text{mm}}(\omega)]} \\ + \text{sgn}(K^\omega) [\hat{\chi}_{zy}^{\text{mc}}(\omega) + \hat{\chi}_{yz}^{\text{em}}(\omega)]/2 \quad (17)$$

重要なことは、 $N(\omega)$ の表式に K^ω の符号に依存する項が現れることである。電磁波の吸収係数は、消衰係数 $\kappa(\omega)$ を使って

$$\alpha(\omega) = \frac{2\omega\kappa}{c} = \frac{2\omega}{c} \text{Im} N(\omega) \quad (18)$$

と表されるので、 $N(\omega)$ を通じて吸収係数 $\alpha(\omega)$ にも K^ω の符号依存性、つまり電磁波の入射方向依存性が現れることになる。そして、非相反方向二色性(整流効果)の強さは

(i) の場合

$$\Delta\alpha(\omega) = \alpha_-(\omega) - \alpha_+(\omega) = \text{Im}[\hat{\chi}_{yz}^{\text{mc}}(\omega) + \hat{\chi}_{zy}^{\text{em}}(\omega)] \quad (19)$$

(ii) の場合

$$\Delta\alpha(\omega) = \alpha_+(\omega) - \alpha_-(\omega) = \text{Im}[\hat{\chi}_{zy}^{\text{mc}}(\omega) + \hat{\chi}_{yz}^{\text{em}}(\omega)] \quad (20)$$

で与えられることになる。ただし、 $\alpha_+(\omega)$ と $\alpha_-(\omega)$ はそれぞれ \mathbf{x} 軸の正の方向と負の方向に伝播する電磁波の吸収係数である。ちなみに、電磁波の吸収強度は試料の厚さ d を用いて $I(\omega) = I_0 \exp[-\alpha(\omega)d]$ で与えられる。

以上の議論から、複素屈折率 $N(\omega)$ や吸収係数 $\alpha_{\pm}(\omega)$ を定量的に調べるには、先ほど計算した動的磁気感受率 $\hat{\chi}^{\text{mm}}$ や動的誘電感受率 $\hat{\chi}^{\text{ee}}$ だけでなく、次の動的電気磁気感受率を計算する必要があることが分かる。

$$\chi_{\alpha\beta}^{\text{em}}(\omega) = \frac{\Delta P_{\alpha}^{\omega}}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} H_{\beta}^{\omega}}, \quad \chi_{\alpha\beta}^{\text{mc}}(\omega) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\Delta M_{\alpha}^{\omega}}{E_{\beta}^{\omega}}. \quad (21)$$

これらはそれぞれ、交流磁場 \mathbf{H}^ω に対する分極 \mathbf{P} の応答と、交流電場 \mathbf{E}^ω に対する磁化 \mathbf{M} の応答に対応する。

図7(b)と(c)に様々な印加磁場 H_z の値で計算したマイクロ波の吸収係数 $\alpha_+(\omega)$ と $\alpha_-(\omega)$ 、その差 $\Delta\alpha(\omega)$ のスペクトルを示す。計算では、等方的な誘電テンソル $\hat{\epsilon}_{zz}^{\infty} = \hat{\epsilon}_{yy}^{\infty} = \epsilon^{\infty}$ を仮定し、誘電測定の実験値である $\epsilon^{\infty} = 8$ を使った。^{44,45)}一方、透磁率は $\hat{\mu}_{zz}^{\infty} = \hat{\mu}_{yy}^{\infty} = 1$ としている。

図7(b)で示すように、 $\mathbf{H}^\omega \parallel \mathbf{y}$ かつ $\mathbf{E}^\omega \parallel \mathbf{z}$ の回転モードを励起する偏光配置では、低エネルギーの反時計回りモードと高エネルギーの時計回りモードに対応して二つのピークが現れる。吸収係数の差 $\Delta\alpha(\omega)$ は、磁場 H_z が大きくなるほど増大し、最大で 0.25 cm^{-1} となる。これは、相対変化 $\Delta\alpha/\alpha_{\text{ave}} = 2(\alpha_+ - \alpha_-)/(\alpha_+ + \alpha_-)$ で見ると $\sim 20\%$ にも達する値である。一方、図7(c)で示すように $\mathbf{H}^\omega \parallel \mathbf{z}$ かつ $\mathbf{E}^\omega \parallel \mathbf{y}$ のブリージングモードを励起する偏光配置では、同じく吸収係数の差 $\Delta\alpha(\omega)$ が磁場 H_z の増加と共に大きくなり、最大で $\sim 10\%$ の相対変化に対応する 0.14 cm^{-1} となる。このように大きな非相反方向二色性の発現は、あらゆる周波数帯で稀であり、⁴⁶⁻⁵⁴⁾特にGHz帯では報告例がない。これは、周期の短い単純な磁気構造に由来する通常マルチフェロイック物質は、大きなスピンギャップに起因して高い共鳴周波数(THz帯)を持つ傾向があるからである。ひるがえって、非常に長周期の非自明な磁化配置を持つスキルミオンやその他のトポロジカル磁気テクスチャは、小さなスピンギャップと特異な共鳴モードを持ち、興味深いマイクロ波現象を実現する可能性を提供してくれる。

ところで、このようなマイクロ波の方向二色性を実際のマイクロ波アイソレータとして実用化するためには、より大きな吸収係数の差を実現する必要がある。そのためには、大きな交差相関応答の感受率、ひいては大きな電気分極を持つ物質の探索が不可欠となってくる。今のところ、スキルミオンを発現する絶縁磁性体は Cu_2OSeO_3 しか報告例がないが、Cuイオンではなく、よりスピン軌道相互作用の強い金属イオンを含む新しい化合物で、大きな磁性由来の電気分極と強い電気磁気相互作用の達成が期待できる。また、本稿で紹介した「スピン依存軌道混成機構」³⁸⁾だけでなく、桂・永長・Balatzkyが提唱したいわゆる「反対称交換歪機構(逆DM機構)」²⁷⁾を通じて大きな電気分極を発現するスキルミオン相の探索も有望な研究の方向性である。

5. まとめ

以上本稿では、カイラル絶縁磁性体 Cu_2OSeO_3 中のスキルミオン磁気構造が示す動的交差相関現象としてのエレクトロマグノン励起と、この複合自由度の共鳴励起が持つ磁気的および電氣的励起チャネルの干渉効果によって、これまでに報告例がないほど巨大なマイクロ波の整流効果が発現することを見てきた。これは基礎科学の観点からも技術

応用の観点からも注目すべき現象である。このようなマイクロ波デバイス機能に加え、本稿では紙数の制限から議論できなかったが、電気分極と結合したマルチフェロイックスキルミオンは電場勾配によって駆動できることが期待される。これは何が有り難いかと言うと、絶縁体中の電場はジュール熱を発生せず、それによるエネルギー損失がないため、省電力のスピントロニクスデバイスを実現できる可能性がある。本稿の読者が、様々な観点からスキルミオンや、それ以外のトポロジカル磁気テクスチャに興味を持っていただき、この分野の研究が大きく発展することを願う。

本稿で紹介した研究結果は、多くの実験・理論研究者との共同研究や有益な議論に依っている。特に十倉好紀、永長直人、古川信夫、Achim Rosch、賀川史敬、于秀珍、岡村嘉大との有益な議論に深く感謝する。

参考文献

- 1) T. H. R. Skyrme: Nucl. Phys. **31** (1962) 556.
- 2) S. Mühlbauer, *et al.*: Science **323** (2009) 915.
- 3) C. Pfleiderer, *et al.*: J. Phys. Condens. Matter **22** (2010) 164207.
- 4) X. Z. Yu, *et al.*: Nature (London) **465** (2010) 901.
- 5) X. Z. Yu, *et al.*: Nature Mater. **10** (2010) 106.
- 6) A. N. Bogdanov and D. A. Yablonskii: Sov. Phys. JETP **68** (1989) 101.
- 7) U. K. Rößler, A. N. Bogdanov and C. Pfleiderer: Nature **442** (2006) 797.
- 8) I. Raičević, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 227206.
- 9) X. Z. Yu, *et al.*: PNAS **109** (2012) 8856.
- 10) M. Nagao, *et al.*: Nature Nanotech. **8** (2013) 325.
- 11) B. Binz and A. Vishwanath: Physica B **403** (2008) 1336.
- 12) A. Neubauer, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 186602.
- 13) N. Kanazawa, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 156603.
- 14) C. Pfleiderer and A. Rosch: Nature **465** (2010) 880.
- 15) T. Schulz, *et al.*: Nature Phys. **8** (2012) 301.
- 16) S. X. Huang and C. L. Chien: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 267201.
- 17) F. Jonietz, *et al.*: Science **330** (2010) 1648.
- 18) X. Z. Yu, *et al.*: Nature Commun. **3** (2012) 988.
- 19) J. Iwasaki, M. Mochizuki and N. Nagaosa: Nature Commun. **4** (2013) 1463.
- 20) S. S. P. Parkin, M. Hayashi and L. Thomas: Science **320** (2008) 190.
- 21) S. Seki, *et al.*: Science **336** (2012) 198.
- 22) S. Seki, *et al.*: Phys. Rev. B **85** (2012) 220406.
- 23) S. Seki, S. Ishiwata and Y. Tokura: Phys. Rev. B **86** (2012) 060403.
- 24) J.-W. G. Bos, C. V. Colin and T. T. M. Palstra: Phys. Rev. B **78** (2008) 094416.
- 25) M. Belesi, *et al.*: Phys. Rev. B **82** (2010) 094422.
- 26) T. Kimura, *et al.*: Nature **426** (2003) 55.
- 27) H. Katsura, N. Nagaosa and A. V. Balatsky: Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 057205.
- 28) 永長直人, 十倉好紀: 日本物理学会誌 **64** (2009) 413.
- 29) Y. Tokura: J. Magn. Magn. Mater. **310** (2007) 1145.
- 30) T. Kimura: Annu. Rev. Mater. Res. **37** (2007) 387.
- 31) Y. Tokura and S. Seki: Adv. Mater. **22** (2010) 1554.
- 32) G. A. Smolenski and I. E. Chupis: Sov. Phys. Usp. **25** (1982) 475.
- 33) H. Katsura, A. V. Balatsky and N. Nagaosa: Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 027203.

- 34) A. Pimenov, *et al.*: Nature Phys. **2** (2006) 97.
- 35) N. Kida, *et al.*: J. Opt. Soc. Am. B **26** (2009) A35.
- 36) M. Mochizuki and S. Seki: Phys. Rev. B **87** (2013) 134403.
- 37) Y. Okamura, *et al.*: Nature Commun. **4** (2013) 2391.
- 38) T. Arima: J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 023602.
- 39) P. Bak and M. H. Jensen: J. Phys. C **13** (1980) L881.
- 40) S. D. Yi, *et al.*: Phys. Rev. B **80** (2009) 054416.
- 41) J. H. Han, *et al.*: Phys. Rev. B **82** (2010) 094429.
- 42) M. Mochizuki: Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 017601.
- 43) O. Petrova and O. Tchernyshyov: Phys. Rev. B **84** (2012) 214433.
- 44) M. Belesi, *et al.*: Phys. Rev. B **85** (2012) 224413.
- 45) K. H. Müller, *et al.*: Phys. Rev. B **82** (2010) 144107.
- 46) J. H. Jung, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 037403.
- 47) M. Kubota, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 137401.
- 48) T. Arima, *et al.*: Phys. Rev. B **70** (2004) 064426.
- 49) M. Saito, K. Taniguchi and T. Arima: J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 013705.
- 50) M. Saito, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 117402.
- 51) I. Kézsmárki, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 057403.
- 52) Y. Takahashi, *et al.*: Nature Phys. **8** (2012) 121.
- 53) S. Bordács, *et al.*: Nature Phys. **8** (2012) 734.
- 54) S. Miyahara and N. Furukawa: J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 073708.

著者紹介

望月 雅人氏: 専門は物性理論。特に電子間の強い相関が生み出す多自由度の競合・協奏に由来する相転移現象、非平衡現象、デバイス機能に興味がある。強相関電子系とスピントロニクスを現在の中心テーマとしている。
関真一郎氏: 専門は物性実験。スピントロニクスと強相関電子系を主な研究テーマとしている。系の対称性やトポロジーに着目した物質開拓と、その中で生じる秩序構造の外場制御を通じた機能設計に興味がある。

(2013年10月30日原稿受付)

Dynamical Magnetolectric Phenomena and Gigantic Microwave Diode Effect of Multiferroic Skyrmion Phase Masahito Mochizuki and Shinichiro Seki

abstract: Magnetic skyrmions, vortex-like swirling spin textures characterized by a quantized topological invariant in chiral-lattice magnets, are currently attracting intensive research interest. In particular, their dynamics under external fields is an issue of vital importance because its understanding is crucial both for fundamental science and for technical applications. It has turned out that the skyrmions in an insulating magnet Cu_2OSeO_3 exhibit a multiferroic nature with magnetism-induced ferroelectricity. In this article, we discuss that this multiferroic skyrmion phase shows unique coupled oscillation modes of magnetizations and polarizations, which are both magnetically and electrically active, and the intense interference between their electric and magnetic activation processes leads to an unprecedentedly large diode effect on microwaves. The microwave absorption by this skyrmion phase changes up to $\sim 20\%$ when the incident direction is reversed. Our results demonstrate that the multiferroic skyrmions can be a promising building block for microwave devices.

日本の観測的宇宙論の黎明期 —すばる望遠鏡超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam 計画



高田 昌広

東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構

「宇宙は膨張している」という宇宙の観測結果は、今では小学生の理科辞典にも当たり前のように載っており、すでに広く認識されている。「膨張する宇宙」の宇宙論の歴史は、1920年代後半にエドウィン・ハッブルら天文学者が、遠方の銀河が我々から遠ざかっているというハッブルの法則を発見したことから始まった。これは、宇宙は不変で定常的であると考えられていた当時の宇宙観・宇宙像を覆す大発見であった。

実は、ハッブルらの発見以前に、宇宙膨張を予言する理論的研究があった。アルバート・アインシュタインは1915年に重力の理論である一般相対性理論を提唱したが、他の研究者らが一般相対性理論を宇宙に適用したところ、膨張する宇宙の解が存在することを見つけたのである。あのアインシュタインでさえも、動的な宇宙像を受け入れることができず、重力を打ち消し合う、実質的に万有斥力を引き起こす「宇宙定数」を方程式に導入し、静的な宇宙解を得ようとしていた。後に、ハッブルらの宇宙膨張の発見を受け、アインシュタインはこの宇宙定数の導入を生涯で「最大の過ち」として後悔したエピソードは有名だろう。

しかし、宇宙膨張の研究史はこれで決着ではなかった。1998年のほぼ同時期に2つの独立な研究グループが、多数の遠方銀河で起きたIa型超新星の測定から宇宙膨張を調べたところ、約70億年前から宇宙が加速膨張に転じた、つまり宇宙の膨張がどんどん速くなっているという驚きの観測結果を報告したのである。この宇宙の加速膨張の発見を受け、ソール・パールマッター、ブライアン・シュミット、アダム・リース

の3氏が2011年のノーベル物理学賞の受賞という銀河天文学史上初の快挙を成し遂げた。アインシュタインの一般相対性理論によれば、宇宙の膨張の歴史を測定することは宇宙に存在する全エネルギーおよび物質を測定することと等価である。宇宙の加速膨張は、物質の重力を凌駕する、万有斥力を引き起こす謎のエネルギー、「ダークエネルギー」で現在の宇宙が満たされていることを意味する。正体不明という意味で「ダーク」と呼ばれているが、皮肉にも80年の年月を経て、現代の宇宙論ではアインシュタインの宇宙定数が復活したのである。

ダークエネルギーの正体は何か？ 宇宙の膨張とともに無尽蔵に増え続けるダークエネルギーに宇宙は支配され、宇宙はこのまま加速膨張を続けるのか、あるいは宇宙は終焉を迎えるのか？ これらの疑問は、21世紀の宇宙論が解決すべき難問である。ダークエネルギーの性質の探求には宇宙観測だけが唯一の手段であるので、これを目的とした宇宙探査計画が世界中で計画されている。この宇宙探査には、できるだけ夜空の広い領域にわたり、より遠方にある暗い銀河までくまなく観測するという、言わば宇宙の「国勢調査」が必要になる。この世界の潮流に先駆けて、日本が誇る口径8.2mのすばる望遠鏡に超広視野主焦点カメラHyper Suprime-Cam (HSC)が本格始動した。今年2014年から5年間の計画で、すばる史上最大の宇宙探査を行うことになっている。ハッブル宇宙望遠鏡では1000年以上もかかる壮大な計画である。

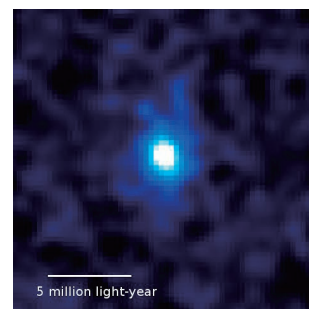
—Keywords—

Ia型超新星：

現在の有力なシナリオでは、白色矮星と恒星からなる連星系において、恒星から降り積もったガスにより白色矮星の質量がチャンドラセカール限界までに達し、自らの重力による収縮を支えきれなくなり、核融合が暴走し、大爆発を起こす現象。発生機構が白色矮星のチャンドラセカール限界に定められた一定の質量で起こるため、ピーク時の固有の絶対光度がほぼ一定となり、見かけ上の明るさを測定することで超新星までの距離を求めることができる。

Hyper Suprime-Cam (HSC)：

米国ハワイ島のマウナケア山山頂(標高4,205 m)にある口径8.2 mすばる望遠鏡の新超広視野主焦点デジタルカメラ。視野(一度に観測できる天域の広さ)は直径約1.5度で、高さ約3 m、重さ約3トン、約8億7,000万画素を有す。2012年9月から試験観測を開始し、デザイン通りの高性能が確認されており、2013年7月にはアンドロメダ銀河のカラー画像が公開された。



強弱重力レンズ解析から得られた、銀河団内の平均的なダークマターの分布。球状ではなく上下にゆがんでいるのが見て取れる。(国立天文台/カブリ数物連携宇宙研究機構、東京大学 大栗真宗氏提供。)

1. はじめに

ダークマターとダークエネルギーの「発見」は、20世紀の宇宙論が基礎物理学に与えた最大の貢献だろう。また、これら宇宙のダーク成分の解明は、21世紀の宇宙論、物理学に残された最重要課題である。ダークマターに関しては、高エネルギーの加速器実験、地上での直接検出実験、さらに宇宙からのガンマ線などを用いる間接探査が有望な方法である。しかし、宇宙の加速膨張の説明のために導入されたダークエネルギーについては、天文学的アプローチ以外に現実的な研究手法が存在しない。これを目的として、世界中でダークエネルギー探査を目的とした、大規模な銀河の撮像（イメージング）あるいは分光サーベイが計画されている。

この世界の潮流に先駆けて、標高4,200 mのハワイ島マウナケア山頂にある、口径8.2 mのすばる望遠鏡の新超広視野主焦点カメラ、Hyper Suprime-Cam (HSC) が本格始動した^{*1} (HSCプロジェクトのPIである宮崎聡氏の本誌記事を参照)。すばる望遠鏡は、世界の8 m級の望遠鏡のなかでも、唯一視野の非常に広い主焦点を有する望遠鏡である。HSCは、現主焦点カメラ Suprime-Cam の視野をさらに約7倍大きくした、満月9個分の広さの天域を一度にイメージングできるカメラである。宇宙膨張の影響を調べるには、天域の広い領域にわたり、また遠方（過去）の宇宙に存在する暗い銀河まで見渡す宇宙探査（以後、銀河サーベイ）が必要になる。これを可能にするのがHSCであり、2014年初頭から5ヶ年計画で大規模な銀河のイメージングサーベイを行い、ダークエネルギーの性質の究明を目指す。現すばるカメラでは約35年、ハッブル宇宙望遠鏡では1000年以上もかかる銀河サーベイがHSCでは5年間（より正確には、合計すばる300晩）で行うことができる。

本稿では、このHSC銀河イメージングサーベイについて紹介し、期待される宇宙論の成果、また将来の展望について議論したい。

2. 宇宙の加速膨張問題

WMAPやPlanckなどの宇宙背景放射(CMB)の精密測定に代表されるように、様々な宇宙論観測により、宇宙論パラメータが高精度で決定されている。例えば、最新のPlanck衛星の結果¹⁾によれば、宇宙のエネルギー内訳のうち、ダークマターが26.8%、ダークエネルギーが68.6%、残りのわずか4.9%が通常の物質というのが、現在の宇宙の姿である。この（冷たい）ダークマター、ダークエネルギーが支配する宇宙モデルは Λ CDMと呼ばれ、宇宙の標準モデルになっている。宇宙のダーク成分のうちダークマターについては、銀河まわり、あるいは銀河団などの銀河が密集する領域にダークマターの量が平均より多いことが観測的に確認されている。またダークマターの候補として未

発見の素粒子モデルが提案されているなど、いずれ素粒子の地上実験がダークマターの正体を解明する可能性がある。

一方、ダークエネルギーは観測事実の「宇宙の加速膨張」を説明するために導入したパラメータであり、その物理的性質は全くの謎である。ダークエネルギー問題に関する歴史的な発端は、アインシュタインの時代まで遡る。アインシュタインは、自身が編み出した重力理論の一般相対性理論に宇宙を適用したところ、重力の性質により宇宙が動的になることを見つけた。そこで、重力と拮抗する万有斥力を引き起こす「宇宙定数」を方程式に手で加え、静的な宇宙を得ようとした。つまり、方程式を以下のように「修正」したのである。

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}. \quad (1)$$

ここで左辺の $G_{\mu\nu}$ はアインシュタインテンソルと呼ばれ、時空の幾何を記述する量であり、宇宙の場合には宇宙の膨張則を記述する。右辺の G はニュートンの重力定数、 $T_{\mu\nu}$ はエネルギー・運動量テンソルであり、宇宙が内包する全エネルギー・物質の分布を表す（光速 $c=1$ の単位系を採用している）。「 Λ 」が宇宙定数である。しかし、後に天文学者エドウィン・ハッブルらが観測により宇宙が膨張していることを発見したことを受け、アインシュタインはこの宇宙定数の導入を生涯で「最大の過ち」と後悔したエピソードは有名であろう。皮肉にも、アインシュタインが他界し、90年代以降の近代宇宙論の進展により宇宙の加速膨張が発見され、宇宙定数が復活したのである。これが現在の宇宙標準モデル Λ CDMに「 Λ 」の頭文字がついている理由である。結果論としては、本人は知る由もないが、アインシュタインの宇宙項が最新宇宙論データを無矛盾に説明することに成功している。

宇宙定数とは何なのか？ 138億年前の宇宙の誕生とともに既に決められていた物理定数の一つなのだろうか？ しかし、宇宙定数を示唆する物理現象は宇宙膨張以外にはない。また、約138億年の長い歴史の中でなぜ「今」になって宇宙定数が支配的になっているのか？という素朴な疑問への明確な答えはない。

式(1)は、左辺の宇宙定数を右辺に移動し、次のように書き直すこともできる。

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G (T_{\mu\nu} - \bar{\rho}_{\text{DE}} g_{\mu\nu}). \quad (2)$$

ここで、便宜上 $\bar{\rho}_{\text{DE}} \equiv \Lambda/8\pi G$ なる量を再定義した。宇宙定数を右辺に移動すると、その項はエネルギー密度とみなすことができる。この項を現象論的に時間進化する場合に一般化したのが、ダークエネルギーである。

ダークエネルギーの正体の有力候補は、真空のエネルギーである。真空からエネルギーを取り出せないという熱力学第一法則から、エネルギー密度と圧力が反対符号であり、宇宙定数のように振る舞うことを示せる。しかし、場の理論に基づき、ナイーブに真空場の自由調和振動子のエネルギー

^{*1} <http://www.nao.ac.jp/news/topics/2013/20130731-subaru-hsc.html>

ギーを重力が量子化されるエネルギースケール（プランクスケール）まで足し合わせることで評価した真空のエネルギーは、観測されている宇宙定数の大きさよりも120桁も大きく、まるで説明にならない。この問題は宇宙定数問題^{2,3)}と呼ばれ、素粒子論の最難問となっている。

式(1)（あるいは式(2)）は加速膨張を引き起こすという点では同等であるが、その物理的意義は大きく異なる。式(1)では、時空の幾何学を記述する左辺に新たな項を加えたことに相当し、言わば重力を修正したと見なすことができる。^{*2} 一方、式(2)では、宇宙が未発見のエネルギー成分、ダークエネルギーで満たされていることに対応する。つまり、宇宙の加速膨張に物理的意味を求めるならば、「修正重力」あるいは「ダークエネルギー」の可能性があることになる。

より具体的な加速宇宙膨張のイメージを得るために、アインシュタイン方程式（式(1)あるいは(2)）を膨張する宇宙に適用してみよう。宇宙は平均的な意味で一様かつ等方であるとみなせ、宇宙が平均質量密度が $\bar{\rho}_m(t)$ の（圧力が無視できる非相対論的）物質（すなわちダークマターとバリオン）で占められている場合、アインシュタイン方程式から宇宙の運動方程式（フリードマン方程式と呼ばれる）が得られる。

$$\frac{1}{a} \frac{d^2 a(t)}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} [\bar{\rho}_m(t) - 2\bar{\rho}_{DE}]. \quad (3)$$

ここで $a(t)$ は、現在の宇宙に比較して、宇宙年齢 t における宇宙の大きさを表す尺度であり、宇宙のスケール因子と呼ばれる。質量保存から、物質のエネルギー密度は宇宙膨張と共に $\bar{\rho}_m(t) \propto a^{-3}$ で減少する（あるいは体積積分した全エネルギーは $\bar{\rho}_m a^3 \propto a^0$ で一定である）。一方、宇宙定数のダークエネルギーは、 $\bar{\rho}_{DE} \propto a^0$ であり、全エネルギーは膨張する空間と共に増大する（ $\bar{\rho}_{DE} a^3 \propto a^3$ ）。上式は、 $2\bar{\rho}_{DE} > \bar{\rho}_m(t)$ の場合には、 $d^2 a/dt^2 > 0$ 、つまり宇宙が加速膨張期にあることを意味する。現在の宇宙では $\bar{\rho}_m(t_0) : \bar{\rho}_{DE} \sim 3 : 7$ であるが、これは約138億年の宇宙史のなかで宇宙膨張が約70億年前に減速膨張から加速膨張に転じたということを示唆している。

宇宙定数に取って代わるような、ダークエネルギー（あるいは修正重力）の有力な理論モデルがない現状では、観測的に「宇宙の加速膨張の起源」を探るのが最善の策と言える。観測的に取り組むべきトップレベルの疑問は以下の2点であろう。

- ・ダークエネルギーの密度は果たして定数（つまり宇宙定数）か、あるいは時間進化するのか？
- ・膨張宇宙の動力学を記述する理論として、アインシュタインの重力理論は本当に正しいのか？（宇宙論的距離ス

ケール^{*3}におけるアインシュタイン重力理論の正当性は？)

宇宙定数を否定する結果が得られれば、現在の宇宙観を覆す大発見であることは間違いなく、標準モデルを超える新しい物理が必要となる。ダークエネルギーの性質を銀河サーベイから探るには幾つかの方法があるが、詳細については文献4,5を参照されたい。1番目の問題を調べるために、便宜上ダークエネルギーの状態方程式パラメータ w_{DE} （定数）を導入しよう。^{*4} エネルギー・運動量保存則からダークエネルギーの密度の時間進化が

$$\rho_{DE}(t) \propto a(t)^{-3(1+w_{DE})}, \quad (4)$$

で与えられる（ a は宇宙のスケール因子）。 $w_{DE} = -1$ が宇宙定数に対応し、 $w \neq -1$ が時間進化する場合に対応する。つまり、1番目の問題は観測的に $w_{DE} = -1$ か否かを調べることに対応する。

2番目の問題を調べるには、宇宙の大規模構造の進化史を調べるのが有効になる。宇宙の大規模構造とは、一様等方宇宙からのずれ、すなわち物質分布の非一様性を調べることであるが、その進化史はアインシュタイン方程式の摂動成分によって記述される。

$$\delta G_{\mu\nu}[\Phi(\mathbf{x}, t)] = \delta T_{\mu\nu}[\delta \rho_m(\mathbf{x}, t)]. \quad (5)$$

$\delta \rho_m(\mathbf{x}, t)$ は物質分布のゆらぎ場であり、 $\Phi(\mathbf{x}, t)$ は計量のゆらぎ成分（曲率ゆらぎ、この場合重力ポテンシャルとも等価）である。ここではダークエネルギーの非一様性については、その斥力の特性から無視できると仮定した。ゆらぎの初期条件は、宇宙背景放射の精密観測によって厳しく制限されている。宇宙の構造形成史は、物質（主にダークマター）の重力による非一様性を増幅する効果と、宇宙膨張による二体間を遠ざけようとする効果のあいだの競争で決まる。例えば、加速膨張が速い宇宙では、宇宙構造の成長は抑制される。すなわち、ゆらぎの進化史を調べることで宇宙膨張の影響を間接的に調べることが可能になる。さらに、ゆらぎの進化史は「重力」の強さ・性質によって決まるので、超新星探査など宇宙膨張則の観測と組み合わせることで、宇宙論的距離スケールにおける重力理論の検証も可能になる。しかし、この方法を実行するには、物質の主成分であるダークマターの分布を観測的に調べる（あるいは推定する）が必要になる。これが、後述する重力レンズが威力を発揮する理由であり、また世界中で計画されている銀河サーベイが重力レンズの精密測定を目指している理由である。

^{*2} 太陽系など他の重力現象で宇宙定数を必要とする観測事実はないが、その場合は宇宙定数の大きさは他の項と比べ非常に小さく、無視できる状況にあると考えられる。

^{*3} ここで宇宙論的スケールとは、銀河の固有運動に対して、宇宙膨張による後退速度が支配的になる距離スケール、例えば10 Mpc（約330万光年）以上のスケールである。

^{*4} ダークエネルギーの圧力とエネルギー密度の関係が $p_{DE}(t) = w_{DE} \rho_{DE}(t)$ で与えられる。

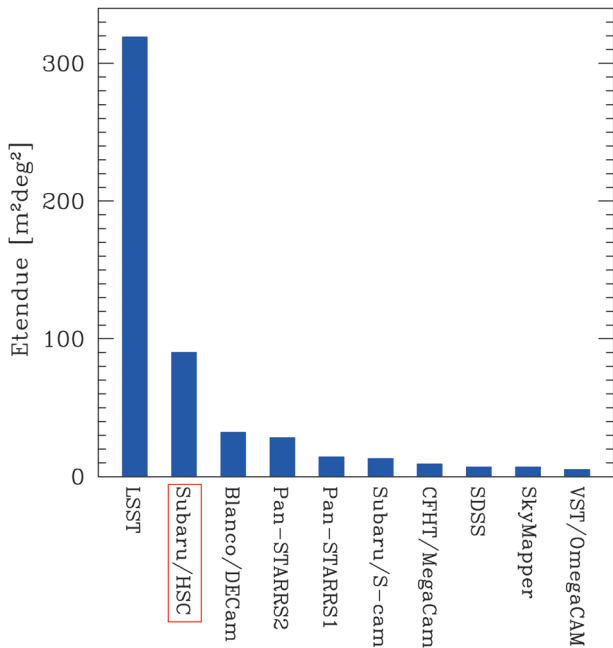


図1 すばる・HSCと他の望遠鏡の「Etendue」(式(6))の比較。Etendueが大きいほど、広視野かつ深宇宙の銀河サーベイをより効率的に実行できる。LSSTは米国の2020年代の銀河サーベイ専用の望遠鏡計画である。現時点ではHSCが他の望遠鏡を圧倒する、世界最高のサーベイカメラであることが分かる。

3. HSC 銀河サーベイ

3.1 HSCの国際競争力

本題のHSC銀河サーベイの話題に戻ろう。宇宙論に必要な銀河サーベイは、できるだけ天域の広い領域にわたり、またできるだけ暗い(遠方の)銀河まで見渡す銀河サーベイである。前述したように、標準 Λ CDMモデルが予言するのは、約138億年の宇宙史のなかで、約70億年前(赤方偏移で $z \sim 1$)からダークエネルギーが卓越し、宇宙膨張が減速から加速に転じたという膨張史である。この理由で、ダークエネルギー探査を目的とする銀河サーベイは $z \sim 1$ より高赤方偏移の銀河まで探査し、宇宙の膨張史の転換期を調べることが理想的である。それぞれの望遠鏡・広視野カメラで、如何に効率的に銀河サーベイを行うことができるかを測る指標として、Etendueと呼ばれる量を定義できる。

$$\text{Etendue} \equiv (\text{望遠鏡の口径}) \times (\text{カメラの視野}) \quad (6)$$

つまり、望遠鏡の口径が大きければ、より遠方の銀河を捉えることが可能であり、またカメラの視野が広がれば、空の広い領域をより効率的にイメージングすることができる。

図1では、すばる/HSCと他の望遠鏡・広視野カメラのEtendueを比較した結果である。図中のLarge Synoptic Survey Telescope (LSST)⁶⁾は、米国の2020年代の宇宙論銀河サーベイ専用の望遠鏡計画であり、運用費を含め約1,000億円級の大型プロジェクトであるが、まだ計画(建設・運用)の予算は獲得できていない。LSSTが実現するとしても、今後10年間はHSCが銀河サーベイを実行するには世界最高の性能を有す望遠鏡・装置であることが分かる。

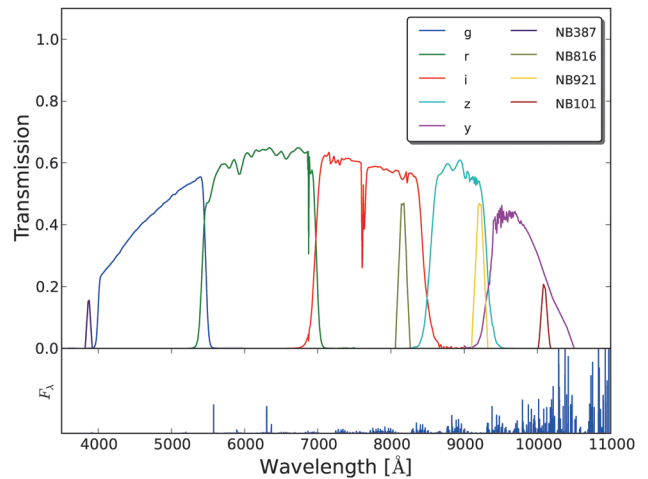


図2 HSCの広帯域・狭帯域フィルター。狭帯域フィルターの中心波長は、それぞれ赤方偏移 $z=2.2, 5.7, 6.6, 7.3$ のライマンアルファ輝線銀河を調べるのに用いる。下パネルはOH夜光の輝線を示し、狭帯域フィルターは夜光が暗い波長帯に合わせて製作されている。

3.2 HSCサーベイと科学目標

天文観測の王道は宇宙の撮像(イメージング)、いわゆる宇宙のデジタルカメラ写真を撮ることである。得られた画像から、適切な較正処理の後、天体を検出し、各々の天体の位置、フラックス、形状という基本物理量を測定するのである。言うまでもないが、光は秒速30万kmという有限の速さで伝播するので、より遠くの銀河、つまり相対的により暗い銀河を観測することは、過去の宇宙にある銀河の姿を観測することになる。このように宇宙のイメージングは、天域方向の2次元、奥行き方向は時間を回顧する軸として、3次元の情報を持つ。口径8.2mのすばる望遠鏡の集光力の威力により、例えば30分の露出データでは、HSC視野内には近傍から赤方偏移 $z \sim 2$ (約100億年前)の遠方銀河まで、一度に約数10万個の銀河の画像を撮ることができる。あるいは、ある決まった領域を多数回にわたり計10時間以上などの長時間露出すれば、稀少な、誕生して間もない生まれたての暗い銀河を見つけることも可能になる。

しかし、イメージングデータそのままでは2次元情報でしかないのが、各々の銀河がどの距離(赤方偏移)にあるかは分からない。この状況を打破するのが、より遠方の銀河はより赤く見えるという波長の赤方偏移の事実を用いる方法である。限られた波長帯の光しか透過しないフィルターを用い、同じ天域を異なるフィルターでイメージングすることにより、各々の銀河の「色」を測定するのである。この銀河の色と、赤方偏移の影響も含めた星の集団としての銀河光の色の理論モデルを比較することで、銀河の赤方偏移を推定できる。この方法は測光的赤方偏移と呼ばれる。図2に示すように、HSC銀河サーベイでは5広帯域フィルター(*grizy*)および4狭帯域フィルターを用いる予定である。狭帯域フィルターは、 $z=7$ までの特定の赤方偏移にある銀河の水素ガスからのライマンアルファ輝線を検出す

表1 すばるHSC銀河サーベイでは、合計すばる望遠鏡の300晩を費やし、サーベイ領域、深さで異なる3つの銀河サーベイ、HSC-Wide、-Deep、-Ultradeep、を行う予定である。表の「視野数」は観測領域がHSCの視野の何倍に相当するかを示す。フィルターについては図2を参照。深さについては、点光源まわりの2秒角アパーチャー内のフラックスの 5σ 検出限界の天文等級(AB mag)を示す。等級は深さを表す天文学単位で、大きい数値ほど深い(より暗い天体まで検出可能になる)。露出時間は各フィルター、各領域の典型的な積分時間。

サーベイ	観測領域 [deg ²]	視野数	フィルター & 深さ	露出時間	主要サイエンス
Wide	1,400	916	<i>grizy</i> ($r=26$)	10-20 min	重力レンズ, $z \leq 1$ 銀河, 銀河団
Deep	27	15	<i>grizy</i> +3NBs ($r=27$)	~2- 4 hrs	$z \leq 2$ 銀河, 宇宙の再イオン化
Ultradeep	3.5	2	<i>grizy</i> +3NBs ($r=28$)	~7-17 hrs	$z \geq 2$ 銀河, 宇宙の再イオン化, Ia型超新星

ることを目的とする。^{*5}

HSC銀河サーベイの目指す主要な科学目標は、宇宙論および銀河形成に関する以下の3つの柱からなる。

- ・宇宙論：大規模HSCデータから重力レンズ効果を高精度で測定し、ダークマターの分布を復元する。ダークマター分布のクラスタリング(空間集積度)の時間進化を調べ、ダークエネルギーの性質を制限する。また、宇宙論的距離スケールにおけるアインシュタインの重力理論を検証する。
- ・銀河進化：得られる大量の銀河カタログの大統計研究に基づき、宇宙の星形成がピークを迎える $z \sim 2$ (約100億年前)から現在までの銀河進化を調べる。
- ・宇宙の再イオン化の物理過程：多色広帯域・狭帯域フィルターのデータで選択した、 $z=7$ (約130億年前)までの高赤方偏移のQSOあるいはライマンアルファ輝線銀河のサンプルを用い、宇宙の再イオン化過程^{*6}および紫外線背景放射の物理を制限する。

これらの研究テーマは、米国の研究評議会(National Research Council)が2010年代の天文学を展望した「New Worlds, New Horizons in Astronomy and Astrophysics, 2010」^{*7}でも最重要課題として取り上げられたテーマである。HSCプロジェクトでは、表1に示すように、これらの科学目標を達成するために、深さ、観測領域で異なる3つのサーベイレイヤーを計画している。このHSC銀河サーベイは、合計すばる300晩をかけて、2014年初めから5年間の計画で行う予定である。

宇宙論に直接関係するのはHSC-Wideである。全天の約3.5%である1,400平方度の領域にわたり、合計約数億個の銀河をイメージングする。宇宙には少なくとも1,000億個の銀河が存在することが分かっているが、HSCサーベイはそのうちの約数億個の銀河をサーベイし、宇宙の平均的

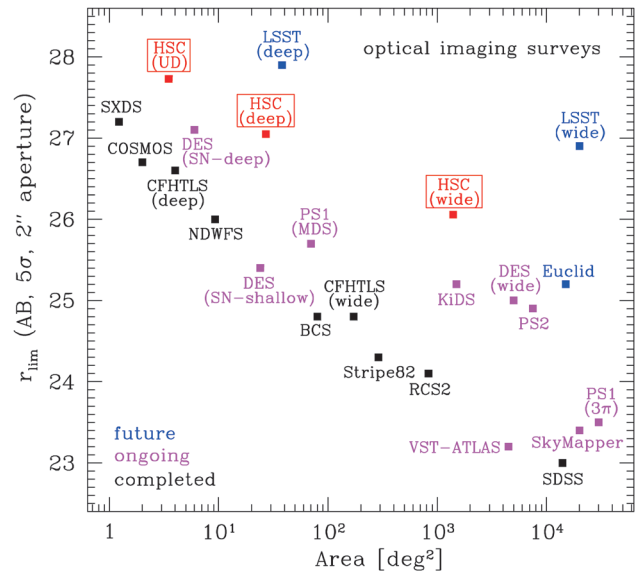


図3 銀河サーベイパラメータ、深さと天域の面積、における様々な銀河サーベイの比較。黒色の銀河サーベイは、既存の代表的な銀河サーベイ。赤、紫色は、進行中、あるいは今後5年のタイムスケールで行われる銀河サーベイ。青色は2020年代の銀河サーベイ。HSC-Wide、-Deep、-Ultradeepは計画しているHSC銀河サーベイの3つのレイヤー(表1参照)。

な姿を無バイアスに調べることを可能にする。

図3では、既存、今後5年のタイムスケールで実現する、あるいは2020年代に計画されている銀河サーベイの特徴(領域の広さ、深さ)を比較している。図から明らかのように、今後5年間の競合する銀河サーベイ、例えば口径4mの望遠鏡のDark Energy Survey(DES)⁷⁾と比較して、HSC-Wideは、口径8.2mのすばる望遠鏡の特性を活かし、1等以上深い、ユニークな銀河サーベイを実現する。また、2020年代に計画されている究極的な銀河サーベイ、LSSTや欧州の衛星計画Euclid⁸⁾と比較しても、HSCサーベイはパースペクティブ的な役割を担うと期待できる。

4. HSCから期待される宇宙論

上述したようにHSC-Wideサーベイで目指すのは、重力レンズの測定で可能になる宇宙論である。重力レンズとは、アインシュタインの一般相対性理論(重力理論)が予想する効果であり、文字通り重力によって引き起こされるため、レンズ天体の物質が光(電磁波)で見えるか、見えないかに関係なく、ダークマターを含む全物質によって引き起こされる。特に近年注目されているのが、宇宙論的重力レンズと呼ばれる効果である。(宇宙論的距離にある)遠方銀河

^{*5} ライマンアルファ輝線は静止系では1,216 Åの波長にあるが、狭帯域フィルターを中心波長に対応する赤方偏移にある銀河からのライマンアルファ輝線は、赤方偏移の結果、その狭帯域フィルターで明るく観測される。

^{*6} 宇宙の再イオン化過程とは、ビッグバンから約38万年($z \approx 1,100$)の宇宙の晴れ上がり時に電子と陽子が結合した以降、宇宙の水素ガスが中性化した時代があったが、第一世代星および銀河からの紫外線電離光子により水素が再び電離(イオン化)する物理過程のこと。再イオン化の実際の時期、またその物理過程の詳細はまだ良く理解されていない。

^{*7} http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12951. 米国の素粒子物理、高エネルギー物理分野のParticle Physics Project Prioritization Panel (P5)あるいはSnowmass Processに対応。

から発せられた光の経路は、程度の問題は別として、必ず手前の宇宙構造による重力場により曲げられるというのである。結果として、重力レンズ効果は銀河像に「歪み」成分を生じさせる。つまり、銀河像が完全な円形だったとしても、観測者は楕円形にひしゃげた銀河像を観測することになり、この楕円率の程度が重力レンズの強さに比例する。宇宙空間の物質分布には様々なスケールのゆらぎ（非一様性）が存在するので、この重力レンズ効果により、天球上で離れた異なる銀河間の像に相関する、系統的な歪み成分が生じることになる。逆に、この系統的な歪み効果を測定することにより、宇宙の物質（ダークマター）分布を復元できることになる。さらに、式(5)あたりで議論したように、物質の非一様性の赤方偏移進化が測定できれば、ダークエネルギーの性質、また重力理論の検証が可能になる。

より具体的には、赤方偏移 z_s 、天球位置 θ にある光源銀河に対する重力レンズ歪み楕円率 γ は、

$$\gamma(\theta; z_s) \sim 4\pi G \int_0^{\chi_s} d\chi a^{-1} \chi \left(1 - \frac{\chi}{\chi_s}\right) \delta\rho_m(\mathbf{x}; z), \quad (7)$$

で与えられる。 γ のベクトル表現は楕円率の2成分を表す。 χ_s は光源銀河までの（共動角径）距離、 χ はレンズ天体までの距離、また $\delta\rho_m$ は光の経路に沿った物質分布のゆらぎ場である（アインシュタイン方程式の摂動成分である式(5)に現れた物質分布のゆらぎ場である）。観測的には、実際の銀河は固有の形状を持ち、円形像ではないので、多数の銀河像を統計解析することによって重力レンズ効果を検出する必要がある（詳しくは文献4, 9を参照）。繰り返しになるが、 $\delta\rho_m$ が物質（ダークマター）の分布であり、ダークエネルギーは距離 χ とダークマターの分布の非一様性の成長に影響を与える。ただし、興味ある重力レンズが引き起こす楕円率は非常に微弱なので、*⁸ 銀河の形状を正確に計測することも重要であり、すばるHSCの高分解能が威力を発揮する。

式(7)は、重力レンズ効果が視線方向に積分した質量分布によって生じることを示している。これに対して、多色データから得られる測光的赤方偏移情報を用い、光源銀河の赤方偏移の関数として重力レンズ測定することにより、質量分布の視線方向の情報ある程度復元できる。これが、いわゆるレンジングトモグラフィ（Lensing Tomography）と呼ばれる方法であり、宇宙論パラメータを推定する有効な手法になると期待されている。¹⁰⁾ ただし、このレンジングトモグラフィから精密宇宙論を行うには、正確な測光的赤方偏移が必要になるなど、実用上の要求（requirements）が厳しいという課題がある。

本稿では、著者ら¹¹⁾が提案している、新しい重力レンズ宇宙論の方法を紹介したい。まず、HSCサーベイ領域はスローン・デジタル・スカイ・サーベイ（SDSS）のサ

ーベイ領域に含まれており、SDSSの分光銀河カタログが存在する。特に、進行中の第3期SDSSの分光銀河サーベイ、Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS)¹²⁾により、 $z=0.7$ までの明るい、早期型銀河の分光カタログが存在する。つまり、HSCサーベイ領域には、赤方偏移が既知の銀河の分布が存在し、また深いHSCイメージングデータから各SDSS分光銀河の背景にある $z>0.7$ の撮像銀河も得られる。あるいは、HSC多色データ（*grizy*）から、ほぼ同じ色（赤方偏移）の多数の銀河が空の小さな領域に密集する銀河団を同定することが可能であり、銀河団の赤方偏移は、メンバー銀河の測光的赤方偏移の統計平均から得られるので、不定性が小さい。波長で $1\mu\text{m}$ までカバーするHSC5色データにより、 $z\approx 1.4$ までの銀河団カタログを構築できる。

このように、広い天域にわたり赤方偏移が既知の前景天体と背景銀河のカタログがある状況を想像してほしい。構造形成の標準シナリオでは、銀河あるいは銀河団のまわりにはダークマターが平均より密集していると予想され、すなわち天域で重力レンズが選択的に強い領域になっているはずである。つまり、ある赤方偏移 z_l にある多数のレンズ天体の背景にある銀河像を「スタッキング」（統計平均：stacking）すれば、より効率良く重力レンズ効果を測定することができる。¹¹⁾ 式(7)から分かるように、このスタッキング法により、レンズ天体まわりの平均的な質量分布 $\langle\Delta\Sigma_m\rangle(R; z_l)$ を調べることができる。

$$\langle\Delta\Sigma_m\rangle(R; z_l) \equiv \frac{1}{N_{\text{pair}}(R)} \sum_{i_l, i_s} \Sigma_{\text{cr}}(z_{i_l}, z_{i_s}) \gamma_{T(i_s)}(R; z_{i_l}, z_{i_s}), \quad (8)$$

下添字 i_l, i_s は、各レンズ天体、各光源銀河のラベルである。スタッキング平均は全てのレンズ天体と光源銀河のペアについてなされ、上式では各レンズ天体の赤方偏移 $z_{l(i_l)}$ が既知であることを利用し、各レンズ天体から同じ投影半径 R （ $=\chi_l\theta$ ； θ はレンズ天体と背景銀河の離散角）にある光源（背景）銀河像の平均を取ることにしている。 $N_{\text{pair}}(R)$ は平均に用いる、離散距離 R のレンズ天体と光源のペアの総数を表す（ここでは簡単化のため重み平均は用いていない）。 $\Sigma_{\text{cr}}(z_{i_l}, z_{i_s})$ は宇宙論パラメータで決まる重力レンズ効率係数であり、各レンズと光源のペアについて $\Sigma_{\text{cr}}^{-1} = 4\pi G\chi_{i_l}(1-\chi_{i_l}/\chi_{i_s})$ で与えられる。式(7)から、 $\langle\Delta\Sigma_m\rangle$ が視線方向の質量分布の積分、 $\langle\Delta\Sigma_m\rangle \sim \langle\int d\chi \delta\rho_m\rangle$ 、で与えられることが分かるが、レンズ天体の位置と他の赤方偏移の質量分布には物理的な相関がないので、他の赤方偏移の寄与は平均後はキャンセルすることが期待される。つまり、このスタッキング法により、レンズ天体の赤方偏移 z_l の質量分布だけを復元できる。

図4は、この重力レンズスタッキング法を実際のすばるデータに適用した例を示す。¹³⁾ レンズ天体のサンプルとして、X線衛星ROSATの全天サーベイで発見された銀河団のうち、赤方偏移 $z=0.15-0.3$ の範囲にあり、すばる望遠鏡から観測可能かつ最大質量級の50個「すべて」の銀河団を

*⁸ 宇宙論重力レンズが引き起こす楕円率を $(a-b)/(a+b)$ (a, b は楕円の長軸、短軸)とすれば、興味ある重力レンズの大きさは0.001-0.1と非常に小さい。これが大量の銀河データの大統計が必要な理由である。

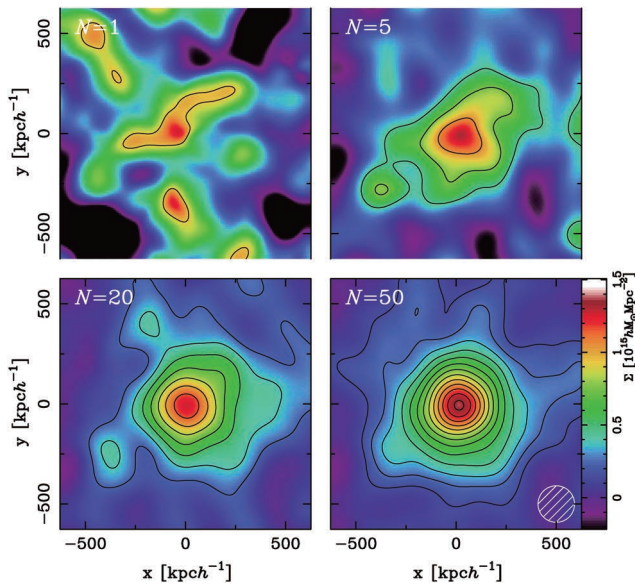


図4 既知のX線銀河団のうち、赤方偏移 $z=0.15-0.3$ にあり、最大質量級かつすばる望遠鏡から観測可能な全ての50銀河団に対して、現主焦点カメラのデータの重力レンズ測定を行い、質量分布を復元した結果。¹³⁾ カラーが青から赤に変わるにつれて、視線方向に積分したダークマターの質量密度が高いことを示す。画像中心が、銀河団中心、より正確には最も明るいメンバー銀河の位置に対応する。各パネルは、銀河団中心を合わせ、5、20、50個の銀河団の背景銀河像を組み合わせて（スタッキング）、質量分布を復元した結果。より多くの銀河団データを組み合わせることで、実質的により多くの背景銀河像を解析に用いることができ、質量分布復元の統計的有意度(S/N)を向上できる。また、銀河団と異なる赤方偏移にある視線方向の質量分布からの重力レンズ効果がキャンセルし、銀河団領域の質量分布のみが顕在化している。特に、50銀河団の結果では質量分布が円対称的になっていることが分かる。1銀河団については典型的に $S/N\sim 5$ 程度であるのに対して、50銀河団の場合には $S/N=28$ まで向上している。

用いている。この結果については、現すばる主焦点カメラ Suprime-Cam のデータを用いており、合計で約10晩ほどのデータ量に対応する（それでも観測時間の獲得は競争率が高いので、データ取得には約5年間を要した）。重力レンズ平均の際には、各銀河団の最も明るいメンバー銀河を銀河団ダークマターハロー^{*9)}の中心と仮定し、異なる銀河団の中心位置を天球上で合わせ、全銀河団の背景銀河の像の測定を組み合わせることで、ダークマターの分布を復元している。異なる銀河団のデータを組み合わせることで、実質的に重力レンズ測定に用いる背景銀河の数を増やしていることになる。この研究では、合計で約20万個の背景銀河を用いている。

図4から明らかなように、個々の銀河団の質量分布については、銀河団中心（画像中心）に確かに質量分布の集中があるが、最大級質量の銀河団であってもその統計的有意度(S/N)はそれほど高くない。この低 S/N は重力レンズの限界に起因する。まず、すばるのデータであっても、個々の銀河団領域の背景銀河の数は少なく、統計誤差が大きい。さらに、上述したように背景銀河と我々のあいだの質量分

*9) ダークマターハローとは、宇宙の構造形成の結果、ダークマターが特に密集した領域が形成され、ダークマター粒子の全運動エネルギーと重力エネルギーが同程度になる、つまりビリアル定理が成り立つ自己重力系のこと。銀河、銀河団などの天体はこのダークマターハロー中に選択的に形成すると考えられている。

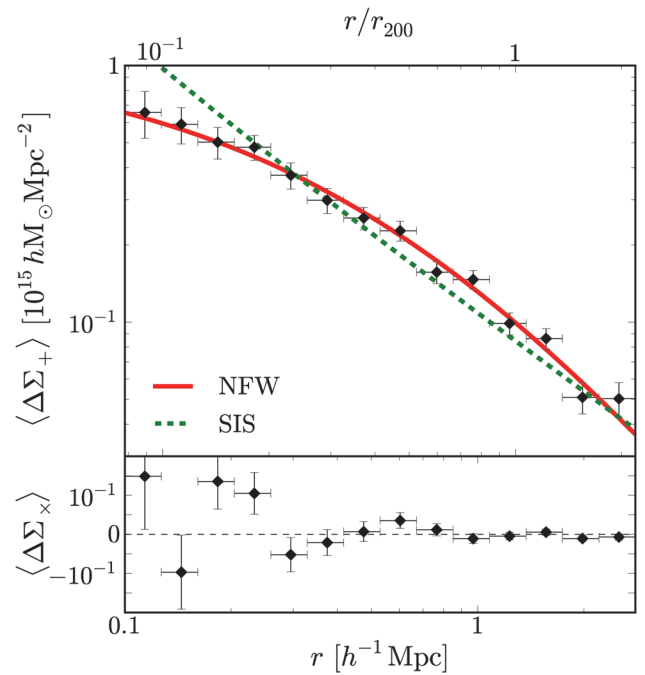


図5 前図と同様であるが、50銀河団の重力レンズ解析を組み合わせ、銀河団領域の質量密度の動径プロファイルを測定した結果。横軸は、銀河団中心からの半径、縦軸は質量柱密度。実線は、 Λ CDMモデルに基づくN体シミュレーションの結果。観測と理論が極めて良い一致を示している。比較として、破線は3次元質量プロファイルが $\rho_{\text{SIS}}(r) \propto r^{-2}$ に従う場合を示す（銀河の平坦な回転曲線を再現するような等温球質量モデル）。下パネルは、背景銀河の楕円率の重力レンズ以外の成分の測定結果。測定結果は統計誤差の範囲内で有意な系統誤差の影響がないことを示している。

布すべてが重力レンズに寄与するので、銀河団中心から離れた位置の質量ピークも異なる赤方偏移の質量集中から生じている可能性を否定できない。一方、異なる銀河団データを組み合わせる場合は、復元した質量分布の S/N が向上し、また異なる赤方偏移からの重力レンズがキャンセルしていることが分かる。この研究では、50個の銀河団データを組み合わせることで、銀河団まわりの質量分布を復元することに成功している。50銀河団の平均質量分布は円対称に近く、平均的な意味での宇宙の等方性を反映している（また顕著な系統誤差の影響は見られない）。

図5が示すのは、これら50銀河団の質量分布から求めた質量密度の動径プロファイルである。上述したように平均質量分布は円対称に近く、1次元プロファイル解析が正当化されることを注意しておきたい。実線は、 Λ CDMモデルに基づくN体数値シミュレーションから得られた銀河団領域のダークマター分布の予言であり、観測結果と極めて良い一致を示している。今回の結果では、銀河団の平均質量が $M_{\text{vir}} = 7.19^{+0.53}_{-0.50} \times 10^{14} M_\odot/h$ という約7%の精度で求めることができた。プロットに示される半径の上限は、現すばるカメラの視野から得られる最大半径に対応する。

このように赤方偏移の分かっているレンズ天体の位置と背景銀河の「像」の相関を調べることにより、レンズ天体まわりの平均質量分布だけを取り出せる。言わば、本来の重力レンズの2次元の情報から、レンズ天体の赤方偏移の関数として質量分布をトモグラフィ的（3次的）に復元

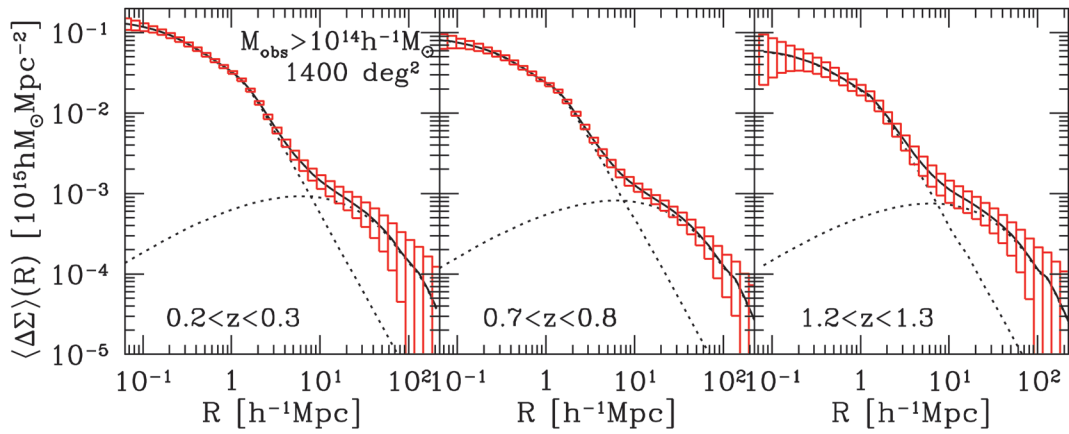


図6 1,400平方度のHSC銀河サーベイから期待される、銀河団の重力レンズスタッキング法(銀河団と背景銀河像の相関)による重力レンズの測定結果の予想図。ここでは、各赤方偏移ビン $0.2 < z < 0.3$, $0.7 < z < 0.8$, $1.2 < z < 1.3$ にある、質量が $10^{14} M_{\odot}/h$ 以上の銀河団サンプルを用いた場合を想定している(単位 M_{\odot} は太陽質量)。各パネルの実線は銀河団まわりの質量分布の密度プロファイル、各半径ビンの実線まわりの四角は $\pm 1\sigma$ 統計誤差の予想値。高赤方偏移の銀河団に対しても、高 S/N で重力レンズを検出できる。半径で数Mpc以内の重力レンズ信号は銀河団ダークマターハロー内の質量分布から生じ、一方数Mpcより外側の信号は銀河団に質量膠着するフィラメント領域に存在する質量分布から生じる(点線のカーブがその2成分を示す)。

している。¹¹⁾ この重力レンズ信号の S/N を高めるには、できるだけ多くのレンズ天体と背景銀河のペアが必要になり、これは広い視野かつ深いデータが必要なことと等価であり、HSC-Wideサーベイが最適であることが予想できるだろう。

図6は、HSC-Wideサーベイの重力レンズ測定から得られる銀河団サンプルを用い、各赤方偏移ビンにある銀河団まわりの質量密度の動径プロファイルを復元した予想図である。 $z \approx 1.3$ という高赤方偏移の銀河団まで、また半径で100 Mpcに及ぶスケールまで質量プロファイルが測定できると期待される。また、半径で数Mpcより内側か、外側に依存して、質量プロファイルに顕著な違いがあることが分かるだろう。これは、数Mpcより小さい領域の質量分布はダークマターハロー内の質量分布から生じており、一方、数Mpcより大きいスケールの質量プロファイルは、銀河団のまわり、特に銀河団に質量膠着を起こしているフィラメント構造中の質量分布に起因していることを示している。特に、後者は重力の非線形成長の影響が小さいので、N体シミュレーションなどを用いることで正確にモデル化でき、宇宙論的に不定性の少ない信号である。

HSCサーベイの主たる科学目標の一つがダークエネルギー探査であるが、式(5)あたりで述べたように、この目的にはレンズ天体まわりの質量分布の時間進化(赤方偏移依存性)が鍵になる。図6から分かるように、高赤方偏移のレンズ天体の質量分布ほど、質量密度の振幅、つまりダークマターのクラスタリングの度合いが小さいことが分かる。この図では宇宙定数をモデル計算に仮定しているが、実際の観測でこの仮説が正しいかが検証できる。さらに、宇宙膨張史の測定、超新星探査やバリオン音響振動実験⁴⁾と比較することにより、宇宙論スケールにおけるアインシュタイン重力理論の検証も可能になる。

図7は、HSC-Wideサーベイで期待される、ダークエネルギーの密度パラメータ Ω_{DE} と状態方程式パラメータ w_{DE} (式(4)参照)の68% C.L.制限の予想図である。他の宇宙論

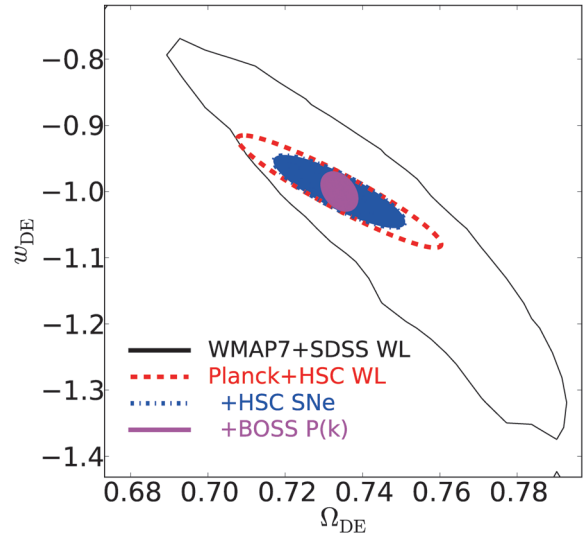


図7 HSC重力レンズサーベイから得られる宇宙論パラメータ、 Ω_{DE} とダークエネルギーの状態方程式パラメータ w_{DE} の68% C.L.制限の予想図。インプットモデルとして、宇宙定数モデル($\Omega_{DE} = 0.73$, $w_{DE} = -1$)を仮定している(Ω_{DE} は現宇宙の密度パラメータで、 $\Omega_{DE} = 0.73$ は宇宙の全エネルギーのうち73%がダークエネルギーが占めることを示す)。外側の実線はSDSSサーベイの重力レンズ測定から得られた現状を示す。破線は、HSC重力レンズ効果の測定とPlanck宇宙背景放射を組み合わせたときに得られる制限。最も内側の領域は、SDSSの銀河クラスタリング統計量とHSC重力レンズを組み合わせた場合の制限の予想。

パラメータの不定性、また重力レンズ測定に付随する系統誤差をモデル化したパラメータの不定性の影響も考慮している。SDSSの現制限と比較して、ダークエネルギーの制限を大きく改善できるのが分かる。さらに、SDSS分光銀河のクラスタリング統計量と組み合わせることで、より詳しいダークエネルギーの知見が得られると期待される。

5. 観測的宇宙論の展望

以上述べてきたように、世界最高性能を持つHSCを用いた銀河サーベイは、重力レンズの精密測定からダークマターの分布の復元を可能にする。数億個の銀河をイメージングすることにより、銀河、ダークマターの分布による宇

宙の地図, 言ってみれば「宇宙の国勢調査」を作製するという壮大な計画である. 紙面の関係で触れることはできなかったが, その他の宇宙論パラメータ, 例えばニュートリノの質量や原始パワースペクトルのパラメータ(スペクトルの形状, 原始非ガウス性)も制限することができる. イメージングサーベイは天文学の王道であり, 様々なサイエンスを可能にし, 天文学史における歴史的なデータを提供することは間違いない.

さらに, すばる望遠鏡の主焦点の次世代装置計画として, カブリ IPMU が中心に進めている超広視野多天体分光装置(Prime Focus Spectrograph; PFS)の計画がある. PFSを用い, HSCサーベイから選択した, 赤方偏移 $0.8 < z < 2.4$ にある約400万個の銀河を分光サーベイする予定である(2018年頃開始予定).¹⁶⁾ 分光サーベイにより, 個々の銀河の距離が測定できるだけでなく, 宇宙の大規模構造中の銀河の固有速度を調べることが可能になる. SDSSの例から自明なように, イメージングサーベイと分光サーベイは極めて相補的であり, 宇宙論の制限を改善できるだけでなく, 様々なサイエンスも可能にする. 予想できなかったような発見も大いに期待できる. 言わば, すばるHSCとPFS銀河サーベイは, SDSSを $z > 1$ に拡張した計画である. このプロジェクトは, 最先端研究事業プログラム(宇宙の起源と未来を解き明かす—超広視野イメージングと分光によるダークマター・ダークエネルギーの正体の究明—: 中心研究者村山斉)の支援も受けている.^{*10}

超広視野銀河イメージング, 分光サーベイは今後の宇宙論実験の世界的な潮流であり, 素粒子物理と天文学の研究者によって共同で進められている. 例えば, 米国のDark Energy Surveyはフェルミ研究所が中心となり, また米国の将来計画LSSTもスタンフォード大学が中心となり進めている. このように宇宙のダーク成分の解明を目指し, また大量データのデータ解析・処理, 大統計による研究が必要な超広視野銀河サーベイは, 天文学, 素粒子物理学の垣根を越えた融合分野を開拓する機会となり得る. 丁度, 現在米国では今後の基礎物理学に関連するプロジェクトの優先度をコミュニティーで議論する作業, Snowmass 2013^{*11}が進められている. そこでも銀河サーベイによる物理学, 宇宙論の重要性が大きく取り上げられている.

以上述べてきたように, 現在の日本は観測的宇宙論の黎明期にあり, 今後すばるHSC銀河サーベイを契機に日本の観測的宇宙論が大きく発展し, 世界の研究をリードできる可能性が十分にある. 今回はHSCサーベイの科学成果を発表できるよう研究に専念することをお約束して, 今回

の記事は結びとさせていただきます.

本稿にコメントを頂いた宮崎聡氏に感謝する. また, 本稿で用いた図の幾つかはHSC共同研究チームで作製した図であり, チームメンバーに感謝する. 最後に, 本記事の執筆の機会を与えて下さった樽家篤史氏, 井岡邦仁氏にこの場を借りて感謝の意を表したい.

参考文献

- 1) The Planck Collaboration: arXiv: 1303.5076 (2013).
- 2) S. Weinberg: Rev. Mod. Phys. **61** (1989) 1.
- 3) J. Martin: arXiv: 1205.3365 (2012).
- 4) 須藤 靖, 高田昌広, 相原博昭: 日本物理学会誌 **62** (2007) 83.
- 5) D. Weinberg, M. J. Mortonson, D. Eisenstein, C. Hirata, A. G. Riess and E. Rozo: Phys. Rep. in press, arXiv: 1201.2434 (2012).
- 6) <https://www.lsstcorp.org>
- 7) <http://www.darkenergysurvey.org>
- 8) <http://sci.esa.int/euclid>
- 9) 宮崎 聡: 日本物理学会誌 **63** (2008) 112.
- 10) M. Takada and B. Jain: Mon. Not. R. Astron. Soc. **348** (2004) 897.
- 11) M. Oguri and M. Takada: Phys. Rev. D **83** (2011) 023008.
- 12) <http://www.sdss3.org/surveys/boss.php>
- 13) N. Okabe, G. P. Smith, K. Umetsu, M. Takada and T. Futamase: Astrophys. J. Lett. **769** (2013) 35.
- 14) C. Hikage, M. Takada and D. N. Spergel: Mon. Not. R. Astron. Soc. **419** (2012) 3457.
- 15) C. Hikage, R. Mandelbaum, M. Takada and D. N. Spergel: Mon. Not. R. Astron. Soc. in press, arXiv: 1211.1009 (2012).
- 16) M. Takada, R. Ellis, M. Chiba, J. Greene, et al.: arXiv: 1206.0737 (2012).

著者紹介

高田昌広氏: 専門は観測的宇宙論. 特に重力レンズおよび銀河のクラスター統計量から可能になる精密宇宙論に興味がある.

(2013年8月15日原稿受付)

A New Era in Observational Cosmology in Japan

—The New Subaru Telescope Prime-Focus Camera, Hyper Suprime-Cam

Masahiro Takada

abstract: The cosmic acceleration problem or dark energy problem is one of the most important and tantalizing problems in astronomy, cosmology as well as particle physics. There are various wide-field, imaging galaxy survey being planned across the world, aimed at exploring the nature of dark energy. Ahead of these projects, the next-generation wide-field prime-focus camera of the 8.2 m Subaru Telescope, the Hyper Suprime-Cam, just had the first image of real sky (see the article by Prof. Miyazaki in this journal for details). The combination of wide field-of-view and large mirror aperture makes HSC/Subaru the most powerful instrument for a wide-field galaxy survey. Starting from next year, for 5 years duration, we are planning to carry out an ever largest galaxy survey with HSC. In this article, I briefly describe the HSC project and the science cases we can carry out with the HSC survey, and will also discuss prospects for observational cosmology in coming decades.

^{*10} SuMIRe (Subaru Measurements of Images and Redshifts) 計画とも呼んでいる.

^{*11} <http://www.snowmass2013.org/tiki-index.php>

宇宙加速膨張の謎に迫る — 広視野銀河探査観測によるダークマター分布の計測 —



宮崎 聡

国立天文台 HSC プロジェクト

宇宙膨張が発見されたのは 1930 年代である。その膨張の速度は次第に減速するだろうと、長い間素朴に考えられていた。宇宙膨張の様子を決めるのは重力であるが、重力には引力しかないからである。ところが 1990 年代後半の Ia 型超新星の観測から、現在の宇宙膨張は加速しているらしいことが明らかになってきた。加速を実現するには、斥力を持つようなエネルギー（ダークエネルギーと名付けられた）が存在するか、重力法則を変更するかしなければならないが、いずれにせよ大発見であった。実際、この発見をしたチームには 2011 年にノーベル物理学賞が授与された。

この問題を解決するには、宇宙膨張の時間変化を、これまでより詳細に調べる必要がある。いくつかの方法が提案されているが、なかでも、弱重力レンズ効果を用いた方法が最も有望であると考えられている。宇宙膨張と天体の形成の進行度の間には強い関係がある。宇宙膨張が速ければ、物質（そのほとんどがダークマター）が集まる時間がなく天体の形成は遅れる。一方、宇宙膨張が遅ければ、天体は速く形成される。このように、天体の形成の進行を計測すると、これを宇宙膨張の歴史に焼き直すことができる。ただし、天体のほとんどが、光を発しないダークマターで構成されているため、普通の観測方法では全貌は捉えられない。

そこで、弱重力レンズ効果を用いる。ダークマターの集まり（つまり天体）があると、それより遠方にある銀河の像は、重力レンズ効果により変形を受ける。逆にこの変形量を調べることで、ダークマター

がどのように分布しているかを調べることができる。天空の広い領域で銀河を観測し、形状を計測、系統的な歪み情報を抽出して、前景にある天体の形成の進行度を調べ、宇宙膨張史を求める。これから「ダークエネルギーの強さと性質（どのように時間変化するか）」を推定することができる。この観測を実現するためには、数 10 億光年より遠方の暗い銀河を、広い天域で探索し、その形状を精密に計測する必要がある。つまり、「大望遠鏡に搭載した高い結像性能を持つ広視野カメラ」が計測装置として必要で、すばる望遠鏡の主焦点カメラ（Suprime-Cam）はこの目的に最適であった。しかしながら、観測すべき天域の広さは 1,000 平方度以上、と見積もられており、視野が 0.2 平方度以下の Suprime-Cam で掃天するのは、困難であった。そこで、高い結像性能は維持したまま、有効視野を 7 倍以上に拡大する Hyper Suprime-Cam (HSC) を企画・設計し、開発を行ってきた。

この観測は 2014 年 2 月より 5 年かけて行われる予定である。まず、ダークエネルギーの強さの時間変化があるかどうかを調べることが、この観測の目標である。変化するということは、その背景に新たな物理的な実体があることを意味し、現代物理学の体系を拡張する必要があるだろう。ダークエネルギーの性質をより詳細に調べるためには、さらに大規模な観測が必要となろう。理論的に強い指導原理がまだ確立されていない分野であるため、いろいろ手探りで進まざるを得ないが、逆にそこが新鮮でおもしろい。

— Keywords —

弱重力レンズ効果：
強い重力場がある空間を光が通ると、重力場の強い方向に向かって屈折する。日食時に太陽の外縁部の星の位置を記録し、半年後の夜に同じ星の位置を計測し、比較することにより、太陽重力場による光の屈折が実際に観測され、一般相対論の予想と一致することが確認された。これを重力レンズ効果と呼ぶ。一般の天体では太陽のようにレンズ側を移動させることができないため、その屈折の効果を直接調べることは不可能である。しかしながら、前景に大きい質量を持つ天体があると、背景にある天体（そのほとんどは遠方の銀河）は、重力ポテンシャルの傾きの方向に移動し、ポテンシャルの向きと直交する方向に引き延ばされる。背景の銀河の固有の形はランダムであるとする、多くの銀河の形状を観測して、その平均をとると、この引き延ばされる成分を検出することができる。この系統的な形状変形を弱重力レンズ効果と呼ぶ。これを用いると、前景にあるレンズ効果を引き起こす天体の質量分布を（前景にある天体の状態によらず、つまり明るくても、暗くても）求めることができる。このため、宇宙におけるダークマター分布の計測に用いられる。



望遠鏡に取り付けられた Hyper Suprime-Cam。

1. はじめに Suprime-Cam から Hyper Suprime-Cam へ

可視光による天体観測は、最も長い歴史を持つ科学計測である。望遠鏡の大型化と、検出器の量子効率の向上により、観測される宇宙は広がってきた。特に、検出器が写真乾板から CCD に置き換わった時のインパクトは大きかった。感度が、波長にもよるが 30~100 倍となり、これは望遠鏡の口径が 5~10 倍に一気に拡大したことに相当する。大型望遠鏡建設の困難さを考えると、これがたった数グラムのシリコンチップで実現されたことは天体観測技術史の上で革命的であった。

初期の CCD は、感度の非一様性が大きく暗電流も多かったが、これを観測方法の工夫で克服し、深宇宙銀河探索のバイオニアの仕事を行ったのが、ベル研のトニー・タイソン (Tony Tyson) である。¹⁾ 当時最大だった口径 4 m 級の望遠鏡に取り付け、2 時間以上の長時間露光を行い、多数の系外銀河で埋め尽くされる夜空 (宇宙) の姿を明らかにした。このデータは、暗い (遠方にあると推定される) 銀河の計数に用いられ、宇宙の幾何学の推定に利用された。実際には、銀河進化 (固有の明るさの時間変化) の定量化が困難だったため、確定的な結論を得ることはできなかった。しかしながら、新しい観測装置と観測データが天文研究の地平を広げることを、鮮やかに示した。

さらに、タイソンは銀河団^{*1}の背景にある銀河の重力レンズ効果によるアライメントを検出し、これから銀河団中のダークマター分布を再構築することに成功した。²⁾ Tyson らが切り拓いてきた、これら深宇宙銀河撮像探索と (弱) 重力レンズ効果を利用したダークマターマッピングは、その後の観測的宇宙論の基本的なツールとなった。

1990 年代に入ると CCD はビデオカメラ等の一般向け家電でも、広く使用されるようになる。ただ、これらの素子は 1 cm 角よりも小さく、大型望遠鏡で使用すると視野が非常に狭く (写真乾板は 10 cm 角以上あった)、銀河団など、広視野にわたる観測を行うには長時間かかった。そこで、独自の大型素子を開発するか、非常に多くの小型素子をモザイク状に配置するかして、広視野をカバーする努力が行われた。日本では後者のアプローチを取り、国立天文台の関口らが 1 cm 角の CCD 40 個を、東京大学木曾観測所の広視野シュミット望遠鏡の焦点面に並べ、当時としては世界最大の受光面積を持つモザイク CCD カメラの開発に成功した。^{3,4)} このようにして日本のグループは、多数の CCD 受光面を 10 μ m 程度の誤差で焦点深度内に配置する技術とこれらの CCD を駆動・読み出す回路技術を蓄積していった。これは一方では日米共同で開発された SDSS Photometric Camera⁵⁾ に活かされ、もう一方ではすばるの主焦点カメラ (Suprime-Cam) につながった。

Suprime-Cam は東大の岡村・国立天文台の関口により、

^{*1} 1,000 個程度以上の銀河が重力的に束縛されている系。

すばる望遠鏡の第一期装置として企画・提案された。「口径が 8~10 m 級の望遠鏡の役割は、既知天体の分光観測と大口径を活かした補償光学^{*2}による高解像度赤外線撮像の二つである」というのが欧米の標準的な考え方であった。古典的な「可視光による撮像観測」の優先順位は低く、欧米では採用されなかった。そんな中、日本では、その時々々の合理性より、調和を重んじ、長い目で物事をとらえる気風のおかげか、主焦点カメラの企画は最後まで残り、実現することになった。

タイソンらの仕事に刺激を受けていた私は、Suprime-Cam の開発グループに参加させていただき、2001 年 4 月に完成したカメラを用いて観測を開始した。当時、WMAP の最初の結果が出ていて (WMAP1)、 σ_8 ^{*3}の値が X 線銀河団の個数から推定されていた値より、かなり高かった。これは X 線を発しなくても、質量の大きい銀河団が存在する可能性を示していた。私たちは Suprime-Cam を用いれば、重力レンズ信号を頼りに銀河団探索が可能ならばと考へ、これを主要な研究テーマとして取り組んだ。銀河団検出と分光によるカタログの信頼性の確認等一定の成果を挙げたが、⁶⁾ 肝心の WMAP1 の σ_8 の結果はその後下方修正されてしまった。

ただ、Suprime-Cam は重力レンズ効果を利用したダークマターマッピングの観測に非常に有効であることを示すことはできた。カメラには、高精度な形状測定を可能にする「高い解像度」と、広い天域を効率的に観測するための「広い視野」が要求され、この二つはそれまでのカメラにも備わっていた。Suprime-Cam はこれを「大口径」の望遠鏡で実現した点が新しかった。大口径のビームを圧縮して狭い領域に結像させると、視野端から焦点面に到達する光の入射角がビームの圧縮率倍となり、高解像度な光学系を設計することが困難になる。このため、大口径望遠鏡の広視野カメラは必然的に大型化してしまうので、開発は容易ではなかった。

一方その頃、宇宙膨張が加速しているという証拠が、Ia 型超新星の観測から固まりつつあった。重力は引力だけであるので、宇宙膨張は徐々に減速するだろうと従来は素朴に考えられていたが、加速膨張の発見により、重力の引力に逆らう斥力を生み出す何らかのメカニズムを考へる必要が出てきた。候補としてあがったのが、宇宙項^{*4}あるいはその時間変化を許し一般化されたダークエネルギーである。弱重力レンズ効果の観測を通じて、宇宙の大規模構造 (ダークマターが主成分) の進化の様子をより直接的に計

^{*2} 大気揺らぎにより乱れた波面を計測し、これを可変形鏡で補正することにより、解像度を向上させる技術。揺らぎの時間変化が小さい赤外線領域で実用化されている。

^{*3} 現在の宇宙の大規模構造の成長の度合い (凸凹の程度) を記述するパラメータ σ_8 の値が大きいほど、大規模構造の成長度合いが大きくなり、例えば、宇宙における銀河団などの非線形天体の個数が多くなる。

^{*4} 元々アインシュタインが当時信じられていた定常宇宙 (未来永劫変化しない) を説明するために斥力項として導入したが、その後宇宙膨張が発見されたため、捨てられていたアイデア。

測できれば、これは宇宙膨張の歴史、ひいてはダークエネルギーの有効なプローブとなり得る。⁷⁾

そこで、ダークエネルギーを研究テーマに定め、Suprime-Camを用いた銀河探査を行いたいと考えたが、その当時典型的であった10晩とか20晩という観測夜数の割り当てでは、意義のある結果が出せる見通しは全く立たなかった。これが次世代カメラHyper Suprime-Cam⁸⁾ (HSC) 開発の動機となった。コンセプトは明快。観測効率向上のために、より広視野を実現する。ただし、Suprime-Camの高い結像性能はそのまま保持する。このためには、より大型の光学系が必要で、大きくなった焦点面にはより多くのCCDが必要になる。大型光学系とCCDが開発の2本柱であった。Suprime-Camの視野角は直径30分角、HSCは90分角、一度にカバーできる天域の広さでいうと9倍の改善を設計目標にした。

本解説では、HSCの全体構成、カメラユニット部の詳細、観測データからどのように物理情報を引き出すかについて、実験家に役立つような情報をまとめたい。

2. Hyper Suprime-Cam

2.1 全体構成

口径1 mを超す望遠鏡は、レンズを使った屈折式ではなく、反射式望遠鏡である。大口径の凹面鏡(主鏡)で集光し、主鏡の焦点(第一焦点または主焦点)の少し前においた副鏡で反射、拡大し、主鏡の中央に空いた穴を通して、主鏡の裏側に焦点を作る。この焦点はカセグレン焦点と呼ばれ、比較的大型の観測装置を取り付けやすいなどの利点があるため、よく使われる。^{*5} より広い視野を実現するには、焦点距離の短い主焦点の方が適している。ただ、主焦点は望遠鏡の筒先にあるため、大型の装置の搭載・脱着の自由度を確保するためには、望遠鏡本体をその荷重に耐えられるように設計する必要があり、コストがかかる。20世紀の終わりに出そろった口径8~10 m級の望遠鏡の中で、主焦点を設置する決断をしたのは、すばるだけであった。

主焦点で観測するためには、主鏡で集光した光を透過型の光学系(補正光学系と呼ぶ)に通し、諸収差を補正してから光センサーに導く。図1にHSCの全体構成を示した。HSCは直径8.2 mの主鏡直上約15 mの主焦点に設置され、主鏡からの収束ビームは図中下方より入射する。最大直径82 cmのレンズを持つ透過型補正光学系・シャッター・フィルターを通りCCD上で結像する。フィルターは直径約60 cmと大型のため、カメラ筐体(青色で表示)構造の外側に保持されている。望遠鏡に搭載される全重量は約3.2トンであり、望遠鏡指向の変化による光軸ズレの補償は、筐体内部に設置された6本の高精度駆動機構で行っている。

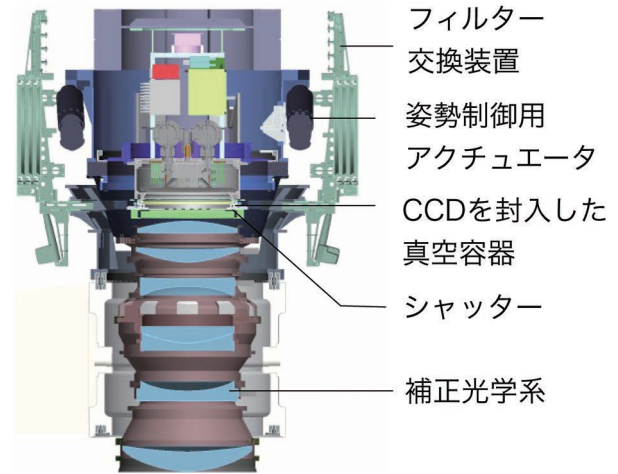


図1 HSCの構成。望遠鏡の主鏡から15 m上方に位置する主焦点に設置される。

2.2 CCD

フォーマット

ドームをできるだけ小さく作るために、大口径望遠鏡ではそれまでの望遠鏡より焦点距離の短い主鏡を採用している。すばるでは焦点距離が約15 mに設定されており、主焦点面1 mmのスケールは約12秒角程度に対応する。直径1.5度角は直径45 cm程度の像になる。マウナケアで期待される星像は可視光の場合最も良いときで0.4秒角(FWHM)であるので、その半分の大きさでサンプルするためにCCDの画素の大きさは0.2秒角程度(15 μm)に設定すればよい。すなわち、HSCでは直径45 cm、1画素が15 μm角のCCDが必要である。しかしながら、単一素子でこの大きさのものは存在しないため、小型の素子をギャップを許して複数並べることになる。

1994年にハワイ大学等と米国のSilicon Foundry (Loral社)の共同で、2,048×4,096画素(2k4k, 15 μm角画素)のCCDが開発された。⁹⁾ 素子上の一辺にパッドが集められ、三辺はデッドエリアが最小になるようにレイアウトされている(three side buttable)。垂直・水平とも3相のクロックで電荷を転送し、底辺にある水平転送用の電極列の両端に出力アンプ(floating diffusion)が配置されている。CCDは、シリコンと線膨張率の近いモリブデンの削りだしブロックにシートエポキシで接着され、これが冷却のため、コールドプレートの上に置かれる。この2k4kフォーマットは天体観測用CCDの標準となり、後にSITe社、MIT/LL、e2Vなど複数のベンダーより供給されるようになった。すばるでも、Suprime-Camで2k4kフォーマットを採用し、HSCもこれに合わせている。

現在市場にあり、単一で最大のCCDは、米Semiconductor Technology Associates社のSTA1600Aである。¹⁰⁾ フォーマットは10,600×10,600(9 μm角)画素であり6インチのシリコン基板で製造できる最大の大きさである。素子全体を16のセクション(1セクションは5,208×1,320)に分けて、それぞれのアンプで読み出される。大型素子では電荷転送

*5 その他に、副鏡で折り返したビームを光軸に対して45度に設置した平面鏡(第3鏡)で望遠鏡高度軸方向に曲げて結像させるナスミス焦点があるが、光学的にはカセグレン焦点と等価である。

効率が重要であるが、デモ用素子の評価結果によると0.999999レベルを達成しているようで、問題ない。なお、STAはかつてLoralでCCD開発を引き受けていた技術者が設立した会社で、CCDの設計を行い、製造はカナダのDALSA等に委託している。ただし、STA素子は空乏層の厚さが十分でなく、次節で述べるように赤外線感度が低い。幅広い波長領域で、高感度を目指したHSCでは採用せず、独自開発を目指した。

高量子効率

大型望遠鏡を建設する最大の目的は、微弱な天体の光をより多く集めることにある。望遠鏡建設にかかる膨大なコストを考えると、イメージセンサーの量子効率に要求されるレベルは極めて高い。また、表面照射型素子^{*6}では、波長が450 nm以下の短波長域ではポリシリコン電極による光の吸収が大きく、量子効率はほぼゼロになる。一方それまでの写真乾板はこの波長域まで観測でき、多くの天体データが蓄積されており、これらとの比較は研究上重要であった。これらの理由により、CCD導入後の比較的初期から天体観測においては裏面照射型CCDが必須であった。

シリコン内での光の吸収長は、長波長側で急速に長くなる。このため長波長における量子効率は、光が空乏層で吸収されずに透過してしまうことにより低下する。量子効率を改善するためには、空乏層を厚くする必要がある。近年素材技術の向上により欠陥が非常に少ない高抵抗(10 kΩcm以上)のN型シリコン基板が得られるようになってきた。これを用いてシリコン全体を完全に空乏層とする、200 μm厚の完全空乏型CCDが国立天文台と浜松ホトニクスで共同で開発された。^{12,13)} N型シリコン基板にP型の埋め込みチャンネルを形成し、CCDを作る。このため信号キャリアが通常の電子ではなく正孔になる。電子に比べて移動度に難があるが、読み出し速度が限定される天体観測用であるので、問題はない。

完全空乏化を達成するには、逆バイアスをかける必要がある。また、光正孔(photo hole)がCCDのゲート下に集まるまでに長い距離移動するため、シリコン内における横方向の拡散が問題になる。電荷に速度を与えて、拡散を最小にするためにも、十分なバイアス電圧を要する。素子最外周に配置された電極に+バイアス電圧をかけることで、光入射面からCCD側に向けて電場を形成する。200 μm厚の素子で+50 V程度かけると、電荷の拡散が15 μmピクセルの半分以下にでき、かつ、完全に空乏化することができた。

なお、技術的にはより厚いCCDも製作可能であるが(～500 μm厚程度まで)、厚すぎると光の場合、焦点位置が定まらなくなり結像性能に影響がでる。口径比(F値)が2と小さい(焦点深度が浅い)すばる主焦点の場合は、これを考慮して200 μm厚として設定したが、口径比が大きい場合は、それに比例して厚く設定できる。

^{*6} シリコンウエハー上に回路を作成した面を表面とし、その側から光を入射させる方式。裏側から入射させるのが裏面照射。

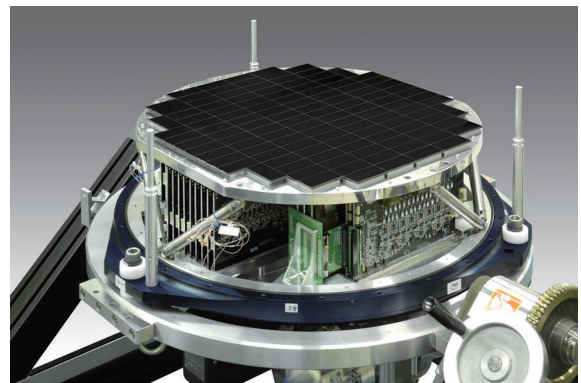


図2 HSCの焦点面。完全空乏型CCDが116個配置されている。

2.3 CCDモザイクと冷却デューワー

図2にHSC焦点面の様子を示した。浜松ホトニクスの完全空乏型CCD(2k4k)が撮像用104個・ガイド用4個・フォーカスズレ計測用8個の計116個並べてある。総画素数はおよそ9億である。このCCDは、素子間ギャップを最小にして並べられるように、パッケージに工夫がされている。素子の電極は短辺の一つに集められており、他の3辺の不感領域の幅を最小にしている。裏面照射素子なので電極は受光面と反対側にあるが、相対するパッケージ側に小穴が空いていて、ボンディングワイヤーを通す。接合される電極は窒化アルミパッケージ内部に設けられている。これらの信号線は、パッケージ底部のPGA(Pin Grid Array)に導かれている。これにより、不感領域の幅は、電極が並ぶ短辺で5 mm、その他の3辺では0.4 mmとなっている。このように実質的に4-side buttableを実現し、広い焦点面に敷き詰めることが可能になった。

すばる焦点深度はおよそ±30 μmである。図2に示した116個の素子全面にわたりこの程度の平面度を達成している必要がある。部材を接着する際に、厚さに精度がある薄い金属箔を挟み込むことにより、高さの精度を高めている。¹⁴⁾ この光軸方向の許容値に比べ、焦点面内の素子の配置精度はそれほど厳しくない。光学系の歪み(distortion)を補正するために、ピクセルを再サンプルして計算機上で画像を再構成するのだが、その際、素子の焦点面内での位置ズレは星の位置を用いて精度良く計測して補正できるからである。

CCDを載せる基板(コールドプレート)は、CCDのパッケージと同じ窒化アルミ(AIN)を当初考えたが、製造できる大きさに限界があることが分かり、線膨張率が近いSiC(京セラ製)を採用した。直径約600 mm、厚み17.5 mmの基板を平行度5 μmの精度で製作してもらった。これにCCD固定用の孔とフレックスケーブルを通すスリットが加工されている。CCDパッケージ下に高さ調整用の窒化アルミ製ブロックが接着されている。そのブロックには、CCD固定用のチタンピンが3本立ててあり、そのピンにねじ山が切ってある。これをボルト締めすることで、CCDをコールドプレートに固定する。チタンピン3本のうち2

本は位置決め (40 μm 程度の寸法差) にも使われている。

厚くかつピクセルが大きい CCD は、シリコンの体積が大きいので、暗電流が高くなる。室温では、読み出し時間中に飽和してしまい、全く使えない。そこで、真空容器に CCD を封入し、機械式冷凍機 (パルスチューブ冷凍機) を用いて、 -100°C 程度まで冷却して使用する。この時、暗電流は、12 電子/画素/時と、ほとんど無視できるようになる。CCD は -130°C 程度以下に冷却すると電荷転送効率が極端に悪化するが、電荷転送効率 (CTE) は温度の単純な関数ではないことも知られていて、例えば -100°C より -60°C の方が CTE が悪い場合もある。CCD を低温で動作させる時には注意を要する。真空容器への熱流入は約 60 W で、その 6 割は常温の入射窓と低温の CCD との熱交換で流入する。採用した機械式冷凍機 (富士電機製) は -100°C で 50 W 程度の排熱能力を持つので、これを 2 台搭載し、余裕を持たせてある。¹⁶⁾

2.4 データ収集システム

図 2 の焦点面下部に CCD 面と垂直に取り付けられているのが、フロントエンド・エレクトロニクス (FEE) と呼ばれる駆動・読み出し回路群である。1 枚のボードが 4 個 (一部 6 個) の CCD を担当する。CCD の駆動用の波形は、アナログスイッチ (DG403 等) で High Level と Low Level を選択する単純な方式で生成する。CCD 出力はカップリングコンデンサーを通して、入力段にインピーダンスが高い FET を採用した OP アンプ (OPA627 等) で受ける。それを積分型の相関 2 重サンプル (CDS) 回路で信号レベルからバイアスレベルを差し引き、この差信号をアナログデジタル変換器 (AD7686 等) でサンプルする。これは天体観測用機器では典型的な構成で、200k pixel/s 程度の読み出し速度においては、CCD そのものの雑音 (~ 4 電子 rms) に比べて十分に低雑音 (≤ 1 電子 rms) を実現する。¹¹⁾

ピクセルレートは現在 150 kpix/s に設定されていて、2k4k の素子を 4 出力で読むのにおよそ 15 秒かかる。複数チャンネルのアナログデジタル変換器の出力は多重化されてデューワー外に取り出される。ややオーバーヘッドが加わり約 100 個の CCD を読み出すのにおよそ 20 秒要している。

エレクトロニクスは冷却デューワー内に配置されているが、コールドプレートとは薄いアルミ板で作った放射シールドで仕切られているため、ほぼ常温で動作する。CCD とエレクトロニクスの配線材を十分細くすることで、断熱を実現している。また、エレクトロニクスの排熱効率を高めるために、基板のコアにアルミ板を入れ、それをデューワー筐体に接触させている。エレクトロニクスの消費電力は 1 CCD あたりおよそ 1 W で、また、部品点数が多くアウトガスも増大したが、20 リットル/s 程度の排気量を持つイオンポンプを採用することで、 10^{-5} Torr 程度を実現できている。エレクトロニクスは通常時 50 W 程度の発熱をしているが、これは全て伝導で真空容器外壁に排熱されている。

デューワー内に配置される FEE を駆動するのが、外部に

設置されるバックエンド・エレクトロニクス (BEE) である。CCD 駆動クロック生成、画像フレームグラバ、ホスト PC とのデータ通信処理を行う SiTCP からなる。¹⁵⁾ これは KEK と東大・理で開発された。SiTCP の採用によりデータ収集用ホスト PC からは TCP socket 通信で command 送信、データ受信が容易に記述でき、かつ GBit Ethernet のバンド幅がほぼフルに実現されている。このため、カメラ本体 (重力方向が変わる) に OS が走るデータ収集用計算機を設置する必要がなく、安定したシステムを構築できた。

2.5 大型フィルター

フィルターは観測目的に応じて各種 (中心波長・幅) 用意し、これを光路内に外付けとする。フィルターシステムの定義は長い歴史を反映して数多くあるが、HSC は SDSS (スローンデジタルスカイサーベイ) が定義したシステムに準拠するように製作した。透過波長幅はおよそ 100 nm 程度である。Suprime-Cam のフィルターは、短波長側は色ガラスで、長波長側は干渉膜で落として、透過波長を規定していた。しかしながら、HSC で必要な直径 60 cm の色ガラスを調達できる見通しが立たなかったため、両側を干渉膜でカットすることとした。カットオフ波長の面内でのばらつきは、Suprime-Cam で設定していた該当波長の $\pm 1\%$ 以内と設定した。当初この一様性の実現を心配したが、日本真空工学 (イオンプレーティング法)、朝日分光 (基板の遊星回転を伴うスパッタ法) の国内 2 社、米国の Barr Associate 社 (基板の自転のみを行うスパッタ法) が、ほぼ仕様を満たすフィルターを開発してくれた。フィルターにもよるが片面 50~100 層の SiO_2 (低屈折率) と Ti_2O_3 (高屈折率) 膜が積層されている。

これら、標準の広帯域フィルターに加え、波長幅がおよそ 10 nm 程度の狭帯域フィルターが、特定の研究分野に興味を持つ研究者等により用意されつつある。カットオフ波長の場所による非一様性は 1 nm 以内とするため、広帯域フィルターより製作が難しく、製造できるベンダーは限られる。

基板硝材は Suprime-Cam では合成石英を用いていたが、広帯域フィルターの一部では、性能を評価した上で白板硝子 (B270) を採用した。基板価格は 20 分の 1 に抑えられる。

2.6 補正光学系

大口径望遠鏡は、主鏡に、放物面に極めて近い双曲面を採用している。このため、主焦点には、球面収差、コマ収差、非点収差、像面湾曲の、全ての収差が生じている。広視野にわたって良好な結像性能を得るためには、補正光学系 (Corrector) が必要になる。1960 年代後半に、Wynne が米キットピーク天文台の 150 インチ望遠鏡 (口径比 F/2.8) 用に 3 群 3 枚の補正光学系を考案した。波長 400 nm から 500 nm の比較的狭い波長範囲内ではあるが、視野直径 30 分角以内で 0.5 秒角以下、直径 1 度まで見ても、1 秒角以下という結像性能を有している。非球面を使わず、硝材は UBK7 のみ、という単純構成で、当時としては十分な結像

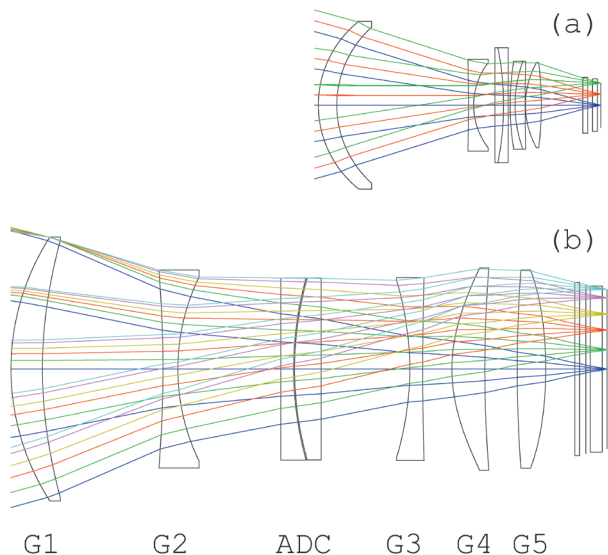


図3 補正光学系 (a) Suprime-Cam, (b) HSC.

性能を達成しており、この Wynne triplet は以降の補正光学系の基礎となった。

すばるが設置されているハワイ島マウナケア山頂は、大気揺らぎによる像の広がりが比較的小さく、可視光でも良いときには0.4秒角以下になる。このよいシーングを活かすためには、光学系にWynneの時代よりもはるかに高い結像性能が要求される。また、大型望遠鏡では口径比(F値)が小さく、さらに設計が難しくなる。すばるの主焦点補正光学系は、成相氏ら、東京天文台(現国立天文台)の天文学者が設計を始め、後に武士(たけし)氏らキヤノンの技術者が加わった。その結果開発された補正光学系を図3(a)に示した。^{18,19)} 基本はWynne型であるが、第2レンズ後面に非球面を使っている。また、FPL51という低分散ガラスを第5レンズに使い、色収差の補正性能を向上させている。第3,4の光学素子はそれぞれは平凸、平凹レンズで、一对でほぼ平板を構成する。これが光軸と垂直方向に動くことで、大気分散補正系(ADC)として機能する。^{*7} ADCは通常プリズムの組み合わせで実現されるが、この新しいデザインでは補正光学系の一部としても働いており、主に色収差を打ち消すために役割を負っている。この工夫により、直径30分角内の視野内において、400 nm から1,000 nm という幅広い波長域で、0.2秒角以下という高い結像性能を達成し、同時に小型化も実現した。

HSC用の補正光学系も武士氏、成相氏に相談しながら検討を始めた。機械的安定性を重視し、合成石英を主に使う硝材として採用したが、それでも製造可能な最大直径は1.2 m程度が限界であった。すばるのF/2光束が直径1.2 mになる位置に補正光学系の第一レンズを置くことができれば、主鏡が集めた光を全て利用することができるが、設計上それより少し主鏡側に置かざるを得ないことが分かって

きた。このため、視野中心から外縁に行くにしたがって発生する「ケラレ」は許容することとした。大胆に非球面を採用し、第2レンズに負のパワーを与えて、光束を絞らないという工夫により、直径2.0度角の視野にわたって、波長600 nm以上で0.26秒角以下の結像性能が達成できることが示せた。²⁰⁾

望遠鏡の搭載方法の詳細な検討が進むと、直径1.2 mの光学系を搭載するのは現実的ではないことが分かってきた。そのため、目標視野直径は2度から1.5度に縮小せざるを得なかった。それでもSuprime-Camの直径0.5度角(最良像が得られる視野)に比べれば、広さでおよそ9倍の拡大である。武士氏は2005年に惜しくも急逝されたが、その光学系基礎設計は、キヤノンの現役技術陣に引き継がれ、より改良が進んだ。図3に最終設計の光路図を示した。武士氏が考案したシフト式のADCが追加され、さらに非球面の使い方がより大胆になっている。光学的な検査が難しい凸の非球面は通常使用しないのだが、この設計では2面で採用されている。キヤノンの接触式検査装置の技術が活かされている。この結果、1.5度角全面にわたり、Suprime-Camと同等の、波長によってはそれを上回る設計性能を達成した。

2.7 筐体と姿勢制御装置

望遠鏡が仰角を変えると、カメラをささえる構造が変形し、光軸ズレが生じる。それを補償するために、主焦点カメラ側に能動的な光軸調整機構が必要となる。目標総合結像性能は0.3秒角程度(シーングを除く)であるので、設置誤差は0.1秒角(10 μm)以下としたい。自重3トンのカメラを数μmの位置決め精度で制御する必要があることが分かる。6本の駆動機構を組み合わせる6自由度を制御するヘキサポッドを用いて、カメラの光軸へのアライメントを行っている(図1)。駆動機構はラックピニオン方式^{*8}のリニアアクチュエータで、ハイデンハイン社製の高精度光学式リニアエンコーダを内部に持つ。このアクチュエータはすばるの副鏡(主焦点用も含む)に開発されたが、HSCではストロークを延長し、かつより軽量化を進めたものを使用している。

主鏡と補正光学系の光軸にズレがあるとコマ収差を生じる。視野中心の星を用いて、これを計測してズレ量を算出する。実際には、主鏡面検査(シャック・ハルトマンテスト; SH)のひとつのパラメータとして組み込まれている。SHは仰角を変えながら複数回行い、各仰角でのズレ量を算出し、補正テーブルを作成する。実際に観測する際にはこの補正テーブルを引きながら、指令値を出す。望遠鏡構造に再現性のない誤差が大きいとこの計測と補正を観測中に行う必要がある。実際、そのような望遠鏡は数多く存在する。補正テーブルを引けばよいすばる望遠鏡は、極めて安定したシステムであると言えるだろう。

*7 大気による光屈折で、波長により天空上の像位置がずれることを大気分散という。

*8 歯車と歯竿の組み合わせ。

光軸の傾きは非点収差を生じるが、この量は、視野中心だけでは計測できない。視野全面で星像を評価し、非点収差に特徴的なパターンを求め、傾き方向と量を求める。これについても、各仰角で調査したが、傾き量の仰角依存性は認められなかった。2013年1月から、本格的な試験観測が始まった。上記の試験・調整を行った結果、直径視野全面で0.5秒角を切る結像性能を達成した。これはほぼシーングリットであると言え、当初の設計通り、全システムが完成したことが示された。口径8.2 mで直径1.5度角にわたりこれほどの結像性能を示すカメラは他にない。例えばライバル計画である、Dark Energy Cameraでは0.9~1.0秒角の結像性能である。

3. ダークマター分布を計測する

3.1 観測

図4に中心波長660 nm (幅100 nm)の赤色の光を通すフィルターで7.5分間積分した撮像例を示した(視野1.7分角×1.1分角)。白い斑点のように写っているのが、銀河(1~100億個以上の星の集団)である。中心にある大きな銀河は約47億光年の距離にあり、その他の暗い天体はさらに遠方にあると考えられている。天体が写っていない部分は無信号ではなく、空の発する光(大部分が地球大気が発する光)が載っている。むしろこの前景光のほうが、ここでぎりぎり撮影できている暗い天体よりも、100倍以上も明るい。^{*9}

より暗い天体を検出するために、露出を複数回重ねて前景光のショットノイズを下げる。このような観測においては、主なノイズ源は前景光のショットノイズであり、イメージセンサーの雑音はほとんど効かない。露出時間は、前景光が、画素の飽和電荷量より小さくなるように設定される。典型的には数分から10分程度であるので、センサーはそれほど高速で読み出す必要はない。

図4には、センサー上に残されたゴミの影や環境ガンマ線や宇宙線(ミュオン)の残す軌跡も記録されている。複数積分を望遠鏡の指向をややずらして行い、それらを合成する際に平均値から大きく外れたピクセル値を無視することにより、これらの影や軌跡は取り除くことができる。

3.2 データ解析

CCD上に写る天体は、我々の銀河系に属する星とさらに遠方の銀河に分けられる。星は大きさを持たない点源と見なせるので、明るさが異なっても同じ特徴的な大きさに写り、様々な大きさを持つ銀河と区別できる。星像の形状は撮像系のPoint Spread Function (PSF)を与える。HSCの場合、大気揺らぎの大きさに決まりメディアン値(中央値)は赤い波長で0.6秒角ほどである。これに対し、銀河は固

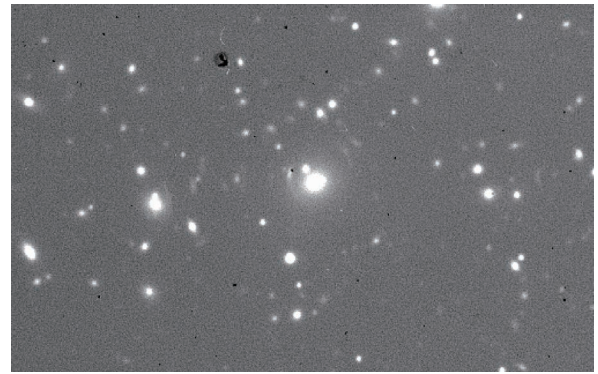


図4 すばるで主焦点で取得した画像の例。

有の広がりを持っており、みかけの大きさは典型的には1秒角よりも大きい。なお、我々が興味を持つ22等級よりも暗い天体は、ほとんどが銀河である(星と銀河の比は1:50程度)。

ある銀河までの距離を精密に求める場合、分光観測を行い、輝線や吸収線の赤方偏移を計測する。一方、銀河を複数のフィルターで観測することにより、そのスペクトルのおおよその形を求め、これから銀河の赤方偏移を推定する手法が発達してきた(測光的赤方偏移推定法: Photo-z)。ほとんどの場合、およそ10%程度の誤差で推定できる。分光観測は非常に時間がかかるため、通常はPhoto-zを使い、距離を推定する。

遠方にある銀河のみかけの形状は、その前景にあるダークマターの質量により、重力レンズ効果により変形を受けている。これを用いてダークマターの分布を推定することができる。^{21,6)} 銀河サンプルのうち、ある距離よりも遠い銀河を選ぶ。天球面上でグリッドを作り、その中に入る銀河の平均的な形状を算出すると、これはその場での重力レンズ効果の大きさの推定値となる。例えば手前に銀河団程度の質量集中があれば、背景銀河はその中心に対して、接線方向に重力レンズ効果で引き延ばされる。質量が大きい場合($\sim 10^{15}$ 太陽質量)に、広い範囲にわたって数%から10%程度の大きな変形が引き起こされるため、比較的容易に検出できる。

背景銀河間の形状の相関を取ると、天球上の離角が近い銀河対では相関が大きく、遠い銀河対では小さくなる。離角が近い銀河から出た光は、観測者に達するまでに、途中にある質量構造から、似たような散乱を受けるため、形状に相関が出る(Cosmic Shear)。この相関関数から、宇宙の大規模構造を構成するダークマター密度揺らぎ δ を計測することができる。背景銀河を赤方偏移 z ごとに分けて相関を取得すると、密度揺らぎの進化($\delta(z)$)を計測できる。 $\delta(z)$ は宇宙の膨張史 $H(z)$ で決まるので、こうして、Cosmic shearの観測から $H(z)$ を間接的に推定でき、これにより加速膨張を引き起こすダークエネルギーの計測を行うことができる。歴史的には、Ia型超新星の光度距離を計測することで、 $H(z)$ を計測し、宇宙の加速膨張を観測的に初めて

^{*9} 微光銀河の大きさは典型的には1秒角程度の大きさであるが、それが乗る空の明るさからの光子数が銀河から来る光子の100倍以上あるということ。積分時間を十分長くし、前景光のショットノイズ($\sqrt{N_{bg}}$)を十分下げれば見えてくる。

検証したが、HSCの cosmic shearの観測は、これとは独立の方法で、より高精度な計測を目指している。⁷⁾

Cosmic shearは銀河団が引き起こす重力レンズ効果より一桁程度小さな信号であり、データの取り扱いに注意が必要である。大気揺らぎと観測システム(望遠鏡+カメラ)の光学系・機械系により、元々の銀河形状は歪む。この歪み量は、観測システムによるが、HSCの場合でもCosmic shearによる歪みより数倍以上大きい。この歪みは、同一視野に写っている星の形状(PSF)から、焦点面上でのPSFの分布を調べることによって補正する。しかし前述したように、星の数密度は銀河の数密度よりも少なく、空間周波数の高い歪み成分があると、これは補正できない。大気揺らぎも含めた、計測システムのモデル化を行い、この系統誤差の大きさを見積もる必要がある。また、銀河面に近い星の混んだ領域を様々な条件で撮像し、モデルの妥当性を十分に検討する必要がある。

画像解析にも工夫が必要となる。光学系は歪曲収差(Distortion)があるため、像面を天球面に戻す際に画像ピクセル値の再マッピングが必要となる。ピクセルの大きさがPSFの1/2程度と粗いため、この工程でも歪みを生ずる。²³⁾これを防ぐために、銀河形状測定を再マッピングを行う前の元画像に遡って行う手法が一般的になりつつある。PSFを各点で求めて、モデル銀河をPSFでconvolveして、適切なノイズを加えた銀河像と元画像に写っている銀河像を比較しながら、モデルパラメーターを決定していく。

レンズ信号から再構築したダークマター質量分布図も、系統誤差の推定に用いることができる。質量集中の信号を示す場所での銀河集中の度合いを詳細に見ることで、質量信号を頼りにした銀河団カタログを作ることができる。銀河集中を伴わない質量ピークの数、そのピークが誤検出だとした場合に、系統誤差の大きさの程度を与える。²²⁾また、そもそも、質量分布図を元にする銀河団カタログは、広い領域にわたってはこれまでに作られたことがなく、完成すれば、ダークマター密度揺らぎの進化の別の指標として使え、Cosmic shearによる推定と相補的な役割を果たす。銀河団スケールのダークマターの集中を捉えるには、大望遠鏡で深く観測して、観測される背景銀河の数密度を増やし、質量分布図の角度分解能を充分上げる必要がある。すばる以外の4m級の望遠鏡では、観測に時間がかかりすぎ、難しい。HSCが宇宙論分野でできる、オリジナルな貢献

の一つになるだろう。

HSCは2013年1月より本格的に試験観測を開始した。基本的な調整はほぼ終了し、現在は上述のような系統誤差を調べる試験等を行いながら、2014年2月からの本格観測に備えている。計測したいCosmic shearの信号は、補正量よりはるかに小さいため、補正方法の妥当性をどのように人々に納得してもらうかが、プロジェクト成功の鍵である。しかしながら、結像性能が最も高いHSCは他プロジェクトより補正量が小さくてすむため、世界的な競争の中でリーダーシップを取れるものと期待している。

参考文献

- 1) J. A. Tyson: *Astron. J.* **96** (1988) 1.
- 2) J. A. Tyson, F. Valdes and R. A. Wenk: *Astrophys. J.* **349** (1990) L1.
- 3) 関口真木, 岡村定矩: *日本物理学会誌* **47** (1992) 376.
- 4) M. Sekiguchi, *et al.*: *PASP* **104** (1992) 744.
- 5) J. E. Gunn, *et al.*: *Astron. J.* **116** (1998) 3040.
- 6) S. Miyazaki, *et al.*: *Astrophys. J.* **580** (2002) L97.
- 7) 高田昌広: *日本物理学会誌* **69** (2014) 140本号.
- 8) S. Miyazaki, *et al.*: *Proc. SPIE* **8446** (2012) 0.
- 9) G. A. Luppino, M. R. Mezger and S. Miyazaki: *IAUS* **167** (1995) 297.
- 10) K. Boggs, R. Bredthauer and G. Bredthauer: *Proc. SPIE* **6501** (2007) 650102.
- 11) H. Nakaya, *et al.*: *Proc. SPIE* **8453** (2012) 2.
- 12) H. Suzuki, M. Muramatsu, K. Yamamoto, S. Miyazaki and Y. Kamata: *Proc. IEEE* (2007) 4581.
- 13) Y. Kamata, *et al.*: *Proc. SPIE* **7021** (2008) 52.
- 14) F. Nakata, *et al.*: *ASSL* **252** (2000) 133.
- 15) T. Uchida: *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** (2008) 1631.
- 16) Y. Komiyama, *et al.*: *Proc. SPIE* **7735** (2010) 116.
- 17) C. G. Wynne: *Astrophys. J.* **152** (1968) 675.
- 18) K. Takeshi: PhD thesis, the Graduate University for Advanced Study (2000).
- 19) K. Nariai and K. Takeshi: *Proc. SPIE* **2199** (1994) 532.
- 20) Y. Komiyama, *et al.*: *Proc. SPIE* **5492** (2004) 525.
- 21) 宮崎 聡: *日本物理学会誌* **63** (2008) 113.
- 22) Y. Utsumi, *et al.*: *arXiv* **1304** (2013) 4656.
- 23) T. Hamana and S. Miyazaki: *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **60** (2008) 1363.

非会員著者の紹介

宮崎 聡氏: 観測的宇宙論・観測装置開発. 自らが開発した装置を、性能限界まで使いこなし、観測の地平を広げることに興味がある。

(2013年9月3日原稿受付)

Dark Matter Mapping via Wide Field Galaxy Survey

Satoshi Miyazaki

abstract: New wide field camera of 1.5 degree FOV is being built for 8.2 m Subaru Telescope. The primary science case is to probe dark energy through weak gravitational lensing.

安藤恒也 (JPSJ編集委員長)

日本物理学会が発行している Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の論文で2013年10月に掲載可となった中から2013年11月の編集委員会を選んだ“Papers of Editors' Choice” (JPSJ注目論文) を以下に紹介します。図に関しては、原図はカラーのものでもモノクロで印刷しているので不鮮明になる場合がありますが、その場合は、物理学会のホームページの「JPSJ注目論文」にカラー版を載せていますので、そちらをご覧ください。論文は掲載から約1年間は無料公開しています。また、関連した話題についての解説やコメントがJPSJホームページの「News and Comments」覧に掲載される場合もありますので、合わせてご覧ください。JPSJ編集委員会では物理学のあらゆる分野の興味深い論文を「注目論文」としてこの欄で紹介したいと思っています。物理学会会員からのJPSJへの自信作の投稿を期待します。

光格子中のイッテルビウム原子の高感度その場発光イメージング

レーザー冷却によって実現された極低温中性原子気体研究において、いかに原子を観測するかは重要な課題である。特に、極低温原子の高感度観測は、少数個もしくは単一の原子からなる基礎的な量子系の研究に、大きな役割を果たしてきた。

しかし、冷却原子の高感度観測は、容易には実現しない。冷却原子の観測においては、原子をプローブするために用いる光が原子に対して加熱を引き起こしてしまい、観測中に原子が移動する、あるいは、トラップポテンシャルから逃げてしまう、という難点があるからである。これまで、単一中性原子が観測可能な高感度イメージングは、対向するレーザーによるレーザー冷却(光モラセス(糖蜜)と呼ばれる)を利用した発光イメージングと、深いトラップポテンシャルとの組み合わせによって、アルカリ原子についてのみ実現されてきた。

一方で、冷却原子研究において、アルカリ原子以外の原子についての興味も最近高まっている。その1つにアルカリ土類様原子であるイッテルビウム(Yb)原子があげられる。Ybは、5種のボソン安定同位体と2種のフェルミオン安定同位体を持ち、多様な興味深い異種粒子混合系(ボソン-フェルミ混合系、フェルミ-フェルミ混合系)を作り出すことができる。また、基底状態である 1S_0 状態と 3P_0 状態もしくは 3P_2 状態との間に超狭線幅光学遷移(自然幅約10 mHz)を持ち、この光学遷移を用いて原子のエネルギー状態の高精度測定が可能であるという点も魅力的である。

最近、京都大学大学院理学研究科の研究グループは、Yb原子の波長556 nmの狭線幅光学遷移(自然幅180 kHz)による冷却用の光モラセスと波長399 nmの強い光学遷移による高空間分解プローブ用の光モラセスとを同時に適用する“2重光モラセス”によって、格子間隔266 nmの2次元光格子中(光により作られた空間的に周期的なポテンシャル)の ^{174}Yb を、単一原子観測可能な感度でその場イメージングすることに成功した。この成果は、日本物理学会

が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の2014年1月号に掲載された。

研究グループは、Yb原子のボソン同位体である ^{174}Yb の量子気体を生成し、2次元光格子内に導入した(図1)。そして、これに対し、2重光モラセスビームを照射することで、光格子中の原子のその場発光イメージングを行った。1つの重要な結果として、周期約6 μm を持つ発光パターンが観測された(図2)。これは、波長556 nmのモラセス光が作る定在波のピッチ278 nmが原子同士の間隔(266 nm)と異なるために生じる、各格子点でのモラセス光強度の空間変調パターン(いわゆるモアレパターン)であった。モアレパターンの出現は、波長556 nmの狭線幅光学遷移によるドップラー冷却(ドップラー限界温度4.4 μK)によ

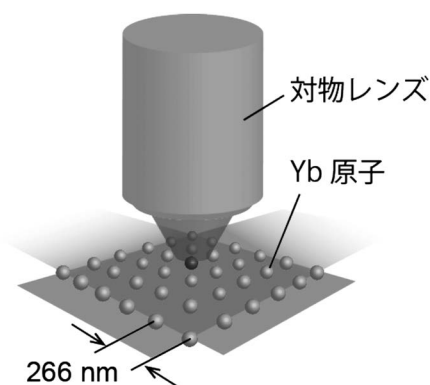


図1 光格子中のYb原子の高感度その場イメージングの原理図。

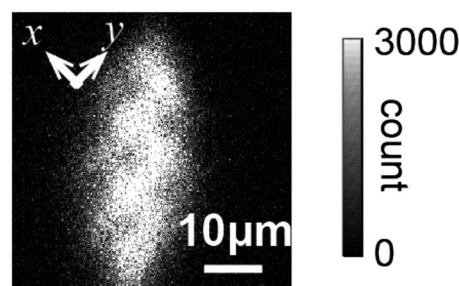


図2 2次元光格子中の ^{174}Yb 原子からの蛍光(波長556 nm)のモアレパターン。

て、原子温度が光格子深さ（各軸あたり $\sim k_B \times 100 \mu\text{K}$, k_B : ボルツマン定数）に比べ低く保たれていた結果、イメージングの間、原子が各格子点付近に局在していたことを示唆している。さらに、適切に調整された2重光モラセスを用いることで、高感度その場発光イメージングが実現された。2重光モラセス中の原子の寿命460 msに比べて十分短い（したがって、イメージング中の原子の移動およびロスが実質的に無視できる）露光時間50 msの間に観測された波長399 nmの蛍光量（1原子あたり40光子）は、単一原子検出に十分なものであった。

以上の成果は、上述のような特長を持つイッテルビウム量子気体系、特に、光格子中の強相関量子気体研究に新たな可能性を開くものである。また、この結果は、固体との対応性の観点から注目を集めているフェルミオン光格子系研究での個別フェルミオン原子の観測、さらには多様な量子気体混合系のこれまでにない観点からの研究にもつながるものであり、研究の今後のさらなる進展が期待される。

原論文

High-Sensitivity *in situ* Fluorescence Imaging of Ytterbium Atoms in a Two-Dimensional Optical Lattice with Dual Optical Molasses
K. Shibata, R. Yamamoto and Y. Takahashi: J. Phys. Soc. Jpn. **83** (2014) 014301.

〈情報提供：柴田康介（京都大学大学院理学研究科）
高橋義朗（京都大学大学院理学研究科）〉

講演会：JPSJ 注目論文から—JPSJ フレンドシップミーティング

2014年3月28日(金) 第69回年次大会のAU会場で、2013年の注目論文2件の講演を企画しましたので、ふるってご参加をお願いします。

- [1] 12:40-13:00 2つの渦を含む電子ビームの伝播ダイナミクス
名大エコトピア^A, 名大工^B, 埼玉大先端研^C ◦ 齋藤晃^A, 長谷川裕也^B, 田中信夫^A, 内田正哉^C
Propagation Dynamics of Electron Vortex Pairs
Y. Hasegawa, K. Saitoh, N. Tanaka and M. Uchida: J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 073402.
- [2] 13:00-13:20 153 K の超伝導
産総研^A, 理研 CEMS^B ◦ 竹下直^A, 山本文子^B, 伊豫彰^A, 永崎洋^A
Zero Resistivity above 150 K in $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ at High Pressure
N. Takeshita, A. Yamamoto, A. Iyo and H. Eisaki: J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 023711.

応用物理 第83巻 第3号(2014年3月号) 予定目次

小特集：これからのスピントロニクス

今月のトピックス：2014年応用物理学会春季学術講演会注目講演……………益一哉
巻頭言：スピントロニクスへの期待……………佐藤勝昭
総合報告：スピントロニクス技術とデバイス開発……………安藤康夫
解説：ハーフメタルスピン源を用いた半導体への高効率スピン注入……………植村哲也
最近の展望
半導体におけるスピン軌道相互作用の新展開……………好田誠, 眞田治樹
遷移金属強磁性体における磁気特性の電界制御……………千葉大地
研究紹介
スピン波ドップラー効果とマグノン制御；マグノンスピントロニクスの展開……………関口康爾

金属ナノ構造における純スピン流の高効率制御……………木村崇
30 T 強磁場を用いたスピンドイナミクス測定とナノ反応場解析……………若狭雅信, 矢後友暁
千里の道も一歩から：ベリー位相入門；ディラックモノポール様特異点の出現から、スピン渦誘起ループ電流の生成まで……………小泉裕康
ホットひととき：独自差異化技術を実用化につなげるための三種の神器：GMRヘッド, MRAMの研究開発を通して……………興田博明
研究の現場から：活断層とは何か？……………竹村恵二

2013年秋季大会 招待・企画・チュートリアル講演の報告

領域委員会

【招待講演】

素粒子実験領域「T2Kの最新結果」

田島 治 (KEK 素核研)

[A] 山田善一 (KEK 素核研)

[B] J-PARCで生成された大強度ミューオンニュートリノをスーパーカミオカンデに向けて射出し、ミューオンニュートリノ・電子ニュートリノ転換現象を探索するT2K実験の最新結果が報告された。J-PARCの加速器及びニュートリノビーム生成施設は安定に稼働し、ニュートリノ前置検出器と主検出器も順調にデータを蓄積した結果、2013年5月8日までに、加速器からの陽子ビーム 6.63×10^{20} 相当のデータが蓄積され、解析に使用された。ハドロンプログダクションの実験データ及び、前置検出器のデータを総合的に活用することにより、T2K実験のニュートリノ事象予想数の系統誤差を約2割低減することが可能となり、また、最大の背景事象であったミューオンニュートリノによる π^0 生成事象を除去するためのアルゴリズムの改良により、実験感度の格段の向上が達成された。ミューオンニュートリノ・電子ニュートリノ転換現象が存在しない場合の事象期待値は4.64事象であるのに対して、実験データから、電子ニュートリノ出現事象の候補が28イベント確認されたことから、統計的有意性 7.5σ で世界に先駆けて電子ニュートリノ出現現象の存在が確認されたことが報告された。(報告：長谷川拓哉 (KEK 素核研))

素粒子実験領域「フレーバー物理の進展と SuperKEKB/Belle II への期待」

田島 治 (KEK 素核研)

[A] 進藤哲央 (工学院大学)

[B] フレーバー物理が新物理の探索に果たす役割と、フレーバー実験である SuperKEKB/Belle II 実験で期待される結果について、進藤氏に講演をしていただいた。

フレーバー物理は、エネルギーフロンティア実験に直接検出よりも、はるかに高いスケールまで感度がある。過去を振り返っても、フレーバー物理で発見された(その当時の)標準模型からのずれが重い新粒子の予言となり、それを目指してエネルギーフロンティア実験が行われてきた。ただし、今現在はまだフレーバー物理において明確な新物理の兆候は見えず、エネルギーフロンティア実験である LHC でも標準模型を超える新粒子は発見されていない。この点ではこれまでの歴史とは異なるが、だからといってフレーバー物理が無力なわけではない。現状がフレーバー物理で標準模型からのずれがないことは、新物理のエネルギースケールがとても高いか、新物理が標準模型と同じフ

レーバー構造を保っているからであると考えられる。前者であれば、新物理の兆候がフレーバー実験で初めて発見される可能性があり、後者であれば、新物理が LHC や ILC で発見され、フレーバー理論への協力的なヒントになる可能性がある。

講演では、SuperKEKB で最も期待されているのは標準模型の予言からの明確なズレであることをした上で、その例として、現在のデータでズレが示唆されている D^*_{s1} 崩壊、および τ の Lepton Flavor Violation 崩壊について、現状と意義についての解説があった。120名ほどの聴衆が集まり、非常に盛況であった。(報告：西田昌平 (KEK 素核研))

理論核物理領域、素粒子論領域、実験核物理領域「核力研究の歴史と意義」「QCDにおける核力ポテンシャルとその拡張」「時間相関と空間相関」

緒方一介 (阪大 RCNP)

[A] 初田哲男 (理研仁科センター)、青木慎也 (京大基研)、石井理修 (筑波大数理)

[B] 2012年に仁科記念賞を受賞された初田哲男、青木慎也、石井理修の三氏に、受賞対象となった研究「格子量子色力学に基づく核力の導出」の背景・現状・展望を俯瞰していただいた。

まず初田氏により核力研究の歴史が概観された。研究の黎明期には、短距離成分の解明に向けた試みがなされたが、1990年代以降は、核子系カイラル有効理論や高精度核力を現象論的に決定する試みが主流となった。ただしこれらの方法には多くのパラメータが含まれるという問題がある。その主因は、核力の短距離成分が未解明なためである。他方、QCDに基づく核力研究は、u, d, sクォークの質量と running coupling constant の4つしかパラメータを含まず、しかもそれらの現実的な値はよくわかっている。従って原理的には、実験データが限られる3核子力やハイペロンを含む系の相互作用も、2核子間力と同等の精度で求めることが可能である。このように、QCDによる核力研究は、思想も汎用性も、カイラル有効理論や現象論的核力研究とは一線を画するものであることが強調された。

青木氏の講演では、QCDで得られる南部-ベレーサルベータ (NBS) 波動関数に基づいてポテンシャルを導出する方法が解説された。NBS波動関数は、場の理論のリップマン-シュウィンガー方程式を通じて遷移行列・散乱行列と結びつけられ、散乱行列のユニタリ性から位相差が現れる。すなわち NBS波動関数の漸近形は量子力学的波動関数のそれと同じであること、NBS波動関数は QCD の位

相差という情報を有していることが示される。

次に、エネルギーに依存しない非局所型のポテンシャルを、このポテンシャルを含むシュレディンガー方程式の解がNBS波動関数となるように定義する。このポテンシャルは微分展開され、オペレータを伴う局所型のポテンシャルとして表現される。これが通常核力ポテンシャルと呼ばれるものである。こうして導入されるポテンシャルは物理量ではなく、また一意でもないが、算出される位相差は物理量であり、原理的には一意である。青木氏らの提案は、ポテンシャルを経由して、QCDから物理量を引き出す1つの方法と言える。

最後に石井氏により、当該研究に纏わる時間相関・空間相関との“格闘”の歴史が述べられた。当初、様々な観点から時間相関よりも魅力的であった空間相関を利用した核力研究がなされていたが、計算精度が向上するにつれ、色々な問題が顕在化することとなった。問題の本質は、基底状態のsaturationを得るのが極めて困難なことである。そこで石井氏らは、空間相関の時間相関を用いる巧妙な「時間依存法」を考案し、この困難を回避することに成功した。この方法の基本的な思想は青木氏の講演に述べられている通りであるが、重要な点は、ポテンシャルを定義する際にはNBS波動関数を用いるが、計算の際にはその定義(だけ)を用い、NBS波動関数を経由せずにポテンシャルを求めるということである。このアイデアにより種々の問題が一気に解決し、位相差の結果が劇的に改善した。まさに研究のブレークスルーと言えよう。

本招待講演セッションでは、理論物理学の歴史に残る重要な研究について、三者三様の講演をしていただくことができた。何を基本思想とし、種々の問題をどう克服していったかが生き生きと語られ、また、3体力やハイペロン間力などを中心とする近年の著しい進展についても報告がなされた。あらためて三氏の受賞を心より祝し、今後一層の研究の発展を祈念したい。

宇宙線・宇宙物理領域「Planck後の宇宙論：宇宙論は終わったのか？」

谷口敬介(東大総合文化)

[A] 須山輝明(東大ビッグバン)

[B] 2013年3月下旬に、観測衛星Planckの最初の結果がリリースされた。この衛星による宇宙背景輻射の精密な観測により、宇宙パラメータが今までよりも精度良く決定された。この結果を受け、本講演では宇宙論の今後の展望について講演していただいた。今までは宇宙が何でできているか中身を知る段階であったが、今後は宇宙がなぜそうなっているかを考える段階へ移行するという立場に立ち、まず現在の宇宙論の標準モデルについて解説が行われた。それに引き続き、未解明の問題(インフレーションの起源、原始ゆらぎの起源、ダークマターの正体、ダークエネルギーの正体など)が紹介された。最後に、宇宙論の標準モデルからのずれを探るための手段(宇宙背景輻射のBモード

偏光と黒体輻射からのずれ、中性水素からの21 cm線、銀河サーベイ、背景重力波)とそれに向けての様々な観測計画が報告され、質疑応答でも活発に議論された。講演は大盛況で、会場には100名を超える聴衆が集まり、立ち見が出るほどであった。

領域2「磁気流体力学方程式に対する衝撃波捕獲法の研究」

安藤 晃(東北大院工)

[A] 三好隆博(広島大院理)

[B] 磁気流体力学(MHD)方程式はプラズマのマクロな挙動をよく記述する基礎方程式として広く用いられている。特に宇宙・天体プラズマでは高マッハ数の流れによる強い衝撃波など様々な不連続な構造が普遍的に存在するため、不連続を数値的に正しく取り扱うことができる数値解法、いわゆる衝撃波捕獲法の研究開発が極めて重要な課題になっている。そこで本招待講演では、MHD方程式に対する数値解法研究の第一人者である三好隆博氏(広島大院理)に、同氏らが提案するHLLD近似リーマン解法に関する成果を中心に、MHD衝撃波捕獲法の研究開発の現状と展望に関する解説を依頼した。講演では、衝撃波捕獲法研究の概念と研究開発史が概説されたのち、HLLD近似リーマン解法のコンセプトと特性について解説があった。HLLD近似リーマン解法は、従来までの解法に比べ高解像度、高計算効率、かつロバストであるため、現在では世界の多くのMHDコードで標準解法として導入されていることが紹介された。また、物理的な応用に関する紹介もあり、衝撃波捕獲法によって得られる恩恵が明示された。本講演は広く興味・関心を集め、早朝の講演であったにも関わらず多くの聴講があり、休憩時間も含め活発な質疑応答が行われた。

領域2「L-H遷移の時空間構造研究の新展開」

宮戸直亮(原子力機構・核融合研究開発部門)

[A] 三木一弘(韓国NFRI/原子力機構・システム計算科学センター)

[B] 磁場閉じ込めプラズマに外部加熱を行うと、プラズマ端でL-H遷移と呼ばれる低閉じ込め状態(Lモード)から高閉じ込め状態(Hモード)への遷移が起こり、急峻な圧力勾配(輸送障壁)が形成される。L-H遷移はプラズマの対流的な輸送を引き起こしている乱流が、径電場と背景磁場による $E \times B$ シア流により抑制されることで起きると考えられているが、L-H遷移における乱流とシア流、圧力分布との相互作用や、遷移に必要な加熱パワーのしきい値を決定するメカニズムなどについて、現在も精力的な研究が行われており、近年は遷移の時空間構造についての詳細な実験計測の報告が相次いでいる。

三木氏はメソスケール1次元輸送モデルを開発しL-H遷移の時空間構造の研究を進めている。実験結果とこれまでの理論モデル研究の概説から始まった講演は、1次元輸送

モデルの紹介へと進み、基礎方程式に基づく第一原理的なL-H遷移のシミュレーションが実現していない現状におけるモデル研究の重要性が強調された。加熱による自発的な遷移と粒子入射による誘起遷移について詳しい説明があり、前者では乱流から生成される帯状流が遷移のトリガーである一方、後者では密度勾配から駆動される径電場で遷移が引き起こされるなど遷移には様々なルートがあることが示された。最新の研究結果に対して活発な議論が展開され、この研究課題に対する関心の高さが示された。また、モデル的アプローチを始め、様々な方向から研究を進めることの重要性が指摘された。

領域3, 領域8, 領域11「スピナノチューブの物理」

利根川孝(神戸大理)

[A] 坂井 徹(原子力機構SPRing-8)

[B] 密度行列繰り込み群やボゾン化法などにより、理論的研究が盛んに行われているスピナノチューブについて、坂井氏のグループの成果を中心に、最近の進展について紹介する講演をお願いした。大会の最終日であった割には、100人余りの聴衆を集める盛況であった。30分という時間の制約もあって、最もフラストレーションと量子効果の強い $S=1/2$ 三本鎖スピントチューブに話は絞られた。この系が注目される要因として、三本鎖スピラダーがギャップレスであるのに対し、三本鎖スピントチューブが非常に大きなスピングャップを持つことが紹介され、その二つのモデルを連続的につなぐ二等辺三角スピントチューブにおける、ギャップ・ギャップレス量子相転移をさまざまな数値解析によって立証されたことが報告された。この量子相転移においては、正三角形スピントチューブから二等辺三角に歪ませると、非常に急激にスピングャップが消失するため、実験的な発見に期待がかかる。また、この系は磁場中でカイラリティが秩序化したり、液体化したりする興味深い磁場誘起相転移が起きること、さらにキャリア・ドープしたスピントチューブではカイラリティ起源の新しい超伝導の可能性も紹介された。一方、残念ながら、現実のスピントチューブ候補物質で、スピングャップが観測された例がないようである。この講演を契機に、スピントチューブ新物質合成に成功すれば、この分野のブレークスルーが期待される。

領域4「対称性によって守られたトポロジカル相に関する最近の話題」

横山毅人(東工大)

[A] 佐藤昌利(名大)

[B] 量子ホール効果の研究に端を発するトポロジカル相の研究は、量子スピンホール効果・トポロジカル絶縁体の発見を経て、超伝導体に拡張されるに至り、多くの系に現れうる普遍的な概念であることが明らかになりつつある。本講演では、対称性によって守られたトポロジカル相の最近の発展についてこの分野の第一人者である佐藤氏に解説して頂いた。

本招待講演で佐藤氏は、まず従来のトポロジカル絶縁体・超伝導体の解説を行い、さらに付加的な対称性を課すことで初めて可能となるトポロジカル相について説明された。空間反転対称性がある系では従来のトポロジカル不変量の計算が容易になること、並進対称性や鏡映対称性により新しいトポロジカル不変量が現れることを示された。さらにこれを超伝導体に適用し、付加的な対称性に守られたマヨラナフェルミオンの理論を展開された。鏡映対称性のある現実の物質に対して、この対称性に守られたマヨラナフェルミオンの存在を議論された。時間反転対称性がない系においても、鏡映対称性と時間反転対称性を組み合わせることで“隠れた時間反転対称性”を導入し、新しいトポロジカル不変量およびそれに付随するマヨラナフェルミオンの存在を指摘された。また、このマヨラナフェルミオンの性質としてマヨラナイジング性を議論された。最後に今後の展望として、付加的な対称性を考えることでより一般的で多彩な物質のトポロジカルな分類が可能になるだろうという話をされ、この分野の今後の発展性を感じることができた。

佐藤氏の講演は非常にわかりやすく、本講演には非常に多くの聴衆が集まり、活発な議論が行われた。

領域6, ビーム物理領域「準周期アンジュレータの設計思想と最近の進展」

竹内恒博(名大エコトピア)

[A] 佐々木茂美(広大放射光)

[B] 放射光の挿入光源として広く利用されているアンジュレータの磁石配列に準周期を用いると、アンジュレータから発生する高調波が整数次からずれ、光学系(回折格子や回折結晶)の併用により、高次光をほぼ完全に除去することが可能になる。準周期アンジュレータは放射光における革新的な技術であるとともに、準周期を利用した数少ない応用例として、注目を集めている。本招待講演では、準周期アンジュレータの開発者である佐々木茂美氏に、その設計思想と装置開発における最近の進展についてご講演頂いた。

講演では、アンジュレータに準周期を導入する発想に至った経緯として、X線回折における回折条件や構造因子を表す数式とアンジュレータにおける発光スペクトルを表記する数式の類似性に気がついたこと、および、準結晶が電子線回折やX線回折実験において鋭い回折スポットを準周期的に示すことに着目したことが紹介された。また、1次元準周期列として最も良く知られるフィボナッチ列に配置した磁石配列がアンジュレータに適していないことや、アンジュレータとして最適な準周期磁石配列の設計について分かり易くご説明頂いた。さらに、精密に磁場分布を測定しながら精密に調整した準周期磁石列を用いて計算により得られる結果を実証したことや、数多くの放射光施設に準周期アンジュレータが導入されつつある現状について紹介された。革新的な挿入光源である準周期アンジュレータが、放射光利用における基盤技術となりつつあることが良く理解できる講演であった。

領域6, 領域8「磁束系から見た重い電子系超伝導体 UPt₃の最近の発展」

町田昌彦 (原子力機構・システム計算科学セ)

[A] 町田一成 (岡山大院自然科学)

[B] 講演者は、これまで、UPt₃を始めとして多様な異方的超伝導状態を理論的に理解するためのフレームワークを構築し、その後の理論や実験研究を先導しただけでなく、超伝導そして凝縮系物理学全体の発展に大きく寄与してきた。本招待講演は、講演者のこれまでの豊かな研究の足跡を辿るだけでなく、多様な異方的超伝導状態に対し、どのような考え方や姿勢を基に取り組み、その理論を発展させてきたかについて、特に今後、超伝導研究を志す学生や研究を推進している若手研究者に対して、系統的研究の在り方について教示していただくことを目的として企画した。講演では、UPt₃を中心にアクチナイド元素や重元素を含む化合物超伝導体が示す異方的超伝導について、その多様な超伝導状態が群論で分類可能なこと、そして、それを記述する理論が満たすべき条件と実際に導出した理論により実験を矛盾なく説明できること等、示唆に富んだ講演をいただいた他、最近の話題であるトポロジカル超伝導との関連についても言及される等、興味は尽きない内容であった。会場は、一部立ち見が出るほど満席で、若手から中堅の研究者まで数多くの関連研究者が出席し、講演後は質問からコメントまで活発な議論が行われた。

領域6「走査SQUID顕微鏡で見たアモルファス微小超伝導体の磁束状態」

大熊 哲 (東工大院理工)

[A] 小久保伸人 (電通大情報理工)

[B] 微小超伝導体では、サイズや形状を反映した特異な量子渦状態が現れることが予想され、これまで多くの理論家の興味を惹いてきた。しかし、磁場侵入長程度の微小領域における現象と考えられていたため、実験的に直接観測する有効な測定手段がなく、長年理論的な議論にとどまっていた。小久保氏は、アモルファス膜のもつ均質性と薄膜化により引き伸ばされた渦間相互作用を巧みに利用することにより、既存の顕微鏡技術が適用できる比較的大きな試料サイズにおいて、メゾスコピック系特有の量子渦状態を直接観測できることを実証した。講演では、他分野における関連研究を含む丁寧なレビューに続き、渦密度の増大に伴い正多角形からシェル構造へと移行するさまや魔法数の存在といった、理論と比較できる信頼性の高い興味深い実験結果が次々に示された。さらに、これまでの理論や実験の問題点を整理しつつ、様々な幾何学形状をもつ微小超伝導体の研究結果やピン留めによる渦状態の制御の可能性についても示され、当該研究の意義や波及効果、今後の展望を専門外の研究者でもわかるように紹介された。本報告を書くにあたって、座長を務めた金子真一氏との有益な議論に感謝する。

領域7, 領域4, 領域8「 α -(BEDT-TTF)₂I₃におけるディラック電子系の熱物性測定」

妹尾仁嗣 (理研)

[A] 鴻池貴子 (東大物性研)

[B] ディラック電子系はグラフェンをはじめとして有機導体や鉄系超伝導体、トポロジカル絶縁体などさまざまな固体中で実現されていることが分かり、それぞれの物質を舞台に活発に研究が進んでいる。なかでも有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃はバルク結晶として初めてディラック電子系の存在が確認された系として注目されている。最近、鴻池らはこのバルク結晶としての性質を活かし、比熱および熱起電力測定に成功し、ディラック電子系特有の熱物性を初めて観測できた。特に、磁場中で巨大なネルンスト効果が観測され、有機導体のクリーンな電子系を反映してディラック電子の振舞いが顕著に現れることを示した。鴻池氏は講演において、これらのデータを丁寧に実験手法も含めて紹介し、ディラック電子系特有の現象の観測例としての証拠を分かりやすく解説した。これらの成果は他のディラック電子系と共通の物理を含んでおり、今回関連の領域を共同にして有機導体以外の系を専門とする研究者にも本研究成果を広く認識して頂けたのは大変有意義であった。今後のディラック電子系研究の進展に繋がることを期待する。なお、会場は満員であり立ち見がでるほどであった。

領域8, 領域3「金属絶縁体転移あれこれ—電子は如何にして局在するか—」

大串研也 (東大物性研)

[A] 上田 寛 (元東大物性研)

[B] 本招待講演は、多彩な金属絶縁体転移を示す遷移金属化合物の開発とその微視的機構解明において長年にわたり分野を先導する成果を挙げてきた上田寛氏をお招きすることで、包括的な観点から強相関電子系における金属絶縁体転移を理解する目的で企画された。講演においては、V₂O₃, V₄O₇, VO₂, MgTi₂O₄, LaBaMn₂O₆, Na_{0.33}V₂O₅, K₂V₈O₁₆, K₂Cr₈O₁₆など様々な物質における金属絶縁体転移が具体的に紹介されるとともに、電子相関、低次元電子構造固有のフェルミ面の不安定性、反強磁性秩序などその起源について検討され、電子が温度低下に従いスピン・電荷・軌道・格子などの自由度と結合し局在性を獲得する様子が鮮やかに示された。さらに金属絶縁体転移を外場により抑制することで、巨大磁気抵抗効果や圧力誘起超伝導など強相関効果に起因する新奇量子物性が劇的な形で発現することが示された。講演が行われた約300名収容の大会場は聴衆で埋め尽くされ、強相関電子系分野の後進研究者ならびに今後分野に参入する学生にとって大変有意義な機会になった。

領域8「トンネル分光顕微鏡で見た超伝導」

髭本 亘 (原子力機構・先端基礎研究セ)

[A] 西田信彦 (豊田理研)

[B] 超伝導の渦糸芯における電子状態は、そこに閉じ込められた電子対の性質が色濃く反映された部分であり、特

に非通常型超伝導体の異方的な電子状態を解明する上で格好の舞台といえる。走査型トンネル顕微鏡法 (STM/STS) は、実空間での電子状態の分布を見ることができ、渦糸芯の電子状態の分布を直接観測できる極めて有効なツールである。西田氏らの開発した極低温、高磁場 STM は、空間分解能 50 pm という高い性能を有し、安定性にも優れている。西田氏らはこれを駆使した超伝導・渦糸状態に関する研究を行っており、講演では $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ と $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ の2つの超伝導体での研究成果が報告された。

まず $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ はクリーンリミットの超伝導体であり、異方的 s 波の電子対であるものと考えられている。STM/STS からは渦糸芯における状態密度の異方性が観測され、 $\langle 100 \rangle$ 方向にポイントノード的な状態があるとすると実験結果を再現することができる。また、渦糸芯内での電子、ホール非対称性や離散的な準位の観測などが報告された。

一方 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ は微視的には様々な長さスケールの乱れの中に渦糸芯がある状態であることが報告された。超伝導ギャップは nm オーダーで不均一な状態にあり、また渦糸格子も四角格子の部分とそうでない部分があり、ギャップとは異なるスケールでの不均一な状態にある。さらに渦糸芯においては Cu-O 結合方向に延びる幅 $4a_0$ のストライプ構造も見られている。これらの不均一性は銅酸化物超伝導体の新たな側面を示して、聴衆の強い興味を引くものであった。

領域9「少数分子/ナノカーボン複合体の電気特性と新機能発現」 柚原淳司 (名大工)

[A] 田中啓文 (阪大理)

[B] いわゆるムーアの法則に言われるように、電子回路のダウンサイジングによって配線やデバイスはすでに加工限界にまで微小化されている。本招待講演では、ナノ物質の電気伝導特性の分野で多くの成果をあげ、世界をリードする気鋭の研究者である田中啓文氏により以下の3つのトピックスについて講演いただいた。講演では、まず始めに、孤立単層カーボンナノチューブ (SWNT) への π 系有機分子吸着時の電気伝導への影響について詳しく紹介された。具体的には、直径 10 nm 程度の有機分子 (ポルフィリン、ナフタレンジイミドなど) ナノ粒子が SWNT 上ただ1つでダイオード性を示すことなどが紹介された。また、バンドル SWNT に金微粒子を吸着させると SWNT を半導体性に変化させること、それに水素ガスを暴露すると金属性伝導に戻ることからこの系が水素センサーとして利用できることも紹介された。次に、単分子ダイオードの回路化をめざしダイオード分子を市販の COOH 末端付 SWNT に合成的手法で共有結合させ、その伝導特性の測定結果が紹介された。独自に作製したメカニカルコントラブルブレイクジャンクション法で得られた結果との比較から SWNT-分子-SWNT 接合が単分子素子回路を確実に作製できる方法であることが紹介された。最後に、孤立分散された SWNT

にポリ酸 (POM) を吸着すると必ず負性抵抗が観測されることに注目した最新の研究成果が紹介された。SWNT-POM ネットワークは、印加電圧の増加にともないノイズが増幅されること、ある印加電圧を超えるとパルス信号を発生することが明らかにされた。このパルス信号は生体内のニューロンが発生する信号と類似点が多く、分子系で初めてニューロン発火素子の実現となったことが紹介された。以上、今後の講演者の研究進展を聞くことが大いに楽しみとなる講演であったことを報告する。

領域10「シリコン単結晶で微細な機械構造を作る：結晶のエッチングと機械的特性評価」 水野正隆 (阪大工)

[A] 佐藤一雄 (愛工大工)

[B] シリコン単結晶は半導体プロセス技術をベースとして、 μm サイズの3次元機械的構造を持つ MEMS (Micro Electro Mechanical System) の機械構造材料として、近年では通信分野や化学分析機器などの応用分野で広く使われるようになってきている。従来プロセスのエッチング形状はきわめてエッチ速度が小さい Si(111) を組み合わせた多面体形状に限定されていたが、佐藤氏はシリコンインゴットを半球状に加工し、エッチング前後の形状変化を精密に測定・評価することで、KOH 水溶液、TMAH 水溶液によるシリコンの結晶異方性エッチングの特性を全方位にわたって明らかにし、詳細にデータベース化するとともに、エッチング液中成分が特定の結晶方位に選択的に吸着して異方性エッチング特性を大きく変化させる現象とそのメカニズムを解明した研究成果について分かりやすく説明された。佐藤氏の研究成果により、エッチング速度の大きい方位も3次元表面に利用可能となり、従来の結晶異方性エッチングの適用範囲を超えた様々な3次元形状の製作が可能になった具体例も紹介された。大変明快で興味深い内容であったため、講演後の質疑応答も活発な議論が行われた。

【企画講演】

素粒子論領域、素粒子実験領域「重い超対称粒子の模型とその検証」 山田洋一 (東北大理)

[A] 伊部昌宏 (東大宇宙線研, Kavli IPMU)

[B] 素粒子の標準模型を超対称性を持つように拡張した模型は、ヒッグスセクターの持つパラメーターの微調整の問題を解決するための最も有力な候補として、この数十年間精力的に研究されてきた。この模型では、標準模型の粒子それぞれに対してパートナー (超対称粒子) が存在する。しかし、これまでの LHC 実験の結果から、超対称粒子はたとえ存在しても従来の期待 (1 TeV 程度) よりずっと重い可能性が高い。また、同実験で最近発見されたヒッグス粒子の質量は 126 GeV 程度であり、最小超対称標準模型の枠内では、この結果はスクォークの質量が 10-100 TeV 程度であることを示唆している。

本講演では、超対称模型の現象論に関して多くの重要な

研究を行ってきた伊部氏により、超対称粒子のうちスカラー等が $O(10-100)$ TeV の質量を持つ一方、ゲージノは $O(1)$ TeV となるような模型についての解説が行われた。このような超対称性の破れのパターンは、非常に簡単な模型で実現でき、また、通常の超対称模型で問題となる、現象論や宇宙論からくる強い制限も回避できることが示された。そして、この模型の検証方法として、LHC でのゲージノ探索や、宇宙の暗黒物質となるウィーノの検出が論じられた。本講演は、LHC 等での近年の観測結果をふまえた超対称模型の今後の研究方向のあり方の提案として、多くの聴衆の関心を集め、大変有意義なものとなった。

素粒子論領域「超対称理論の分配関数に関する最近の進展」

寺嶋靖治 (京大基研)

[A] 今村洋介 (東工大理工)

[B] ここ数年の間、様々な次元における超対称をもつ場の理論の分配関数が厳密に計算された。相互作用のある場の理論においては、厳密な計算ができることは通常ほとんど不可能であり、この進展は非常に興味深い。実際、これらを用いることで、様々な次元でのゲージ理論のダイナミクスについての理解が進んだ。また、これらの分配関数は、いまだに謎の多い M 理論のブレーン (M2 ブレーンと M5 ブレーン) の解析手段としても利用され、新たな進展をもたらしている。本講演では、この分野の第一人者である今村氏により、この分野の現状に関するレビューが行われた。特に、今村氏が精力的に行っている理論を定義する多様体を変えた場合についての詳しい解説をして頂いた。これは、様々な多様体を考えることにより詳細なダイナミクスの情報が得られるので、重要な問題である。本講演は、非常に多くの聴衆が集まり、講演後も活発な議論が行われ、非常に有意義な講演となった。

素粒子論領域、理論核物理領域「有限密度格子 QCD の数値的研究における技術的な困難とその解決に向けた試み」

金児隆志 (KEK)

[A] 江尻信司 (新潟大自然)

[B] 高温高密度におけるクォーク物質の諸性質の理解は、中性子星の物理とも関係する興味深い研究テーマであり、RHIC や LHC では重イオン衝突による実験研究が進められている。格子 QCD の数値シミュレーションは、第一原理に基づいた高温クォーク物質の理論研究を可能にする強力な手法であるが、高密度下では統計精度を著しく損なう「符号問題」が生じる。これを克服するために、化学ポテンシャルについてのテイラー展開など、様々なシミュレーション手法が提案されたが、根本的な解決には至っていない。そこで、特に手法の有効性に重点をおいて、これまでの研究を俯瞰し、将来の展望を議論する講演を、この分野の研究の第一人者である江尻信司氏にお願いした。講演では、必要に応じて技術的な詳細にも触れながら、これまで

の手法の長所と短所を議論し、また、有望と思われる再重みづけ法の詳細を丁寧に解説して頂いた。既に研究を行っている専門家だけでなく、これから研究を始めたいと考えている研究者にとっても、格子 QCD 研究の現状と問題点を把握できる有益な講演となった。

素粒子実験領域「Belle における最新の物理結果」

田島 治 (KEK 素核研)

[A] 佐藤優太郎 (名大理)

[B] Belle 実験は 1999 年から 2010 年までの約 10 年間の運転で 1 ab^{-1} を超える世界最大のデータを収集した。現在、Belle 実験の全データを用いた解析が精力的に行われており、“Belle 実験の最終結果”が続々と出されている。

本講演では、Belle 実験で出された最新結果のうち、 $B \rightarrow s\bar{q}q$ 崩壊である $B \rightarrow \eta' K^0$ 、 $B \rightarrow \omega K_S^0$ 、 $B \rightarrow \phi K^*$ における CP 対称性の破れの測定、電弱ペンギン崩壊 $B \rightarrow X_s l^+ l^-$ におけるレプトン前後非対称度の測定、電荷を持つ新しいエキゾチックハドロン $Z(3895)^+$ の発見について報告された。 $B \rightarrow s\bar{q}q$ 崩壊の CP 対称性の破れの測定結果は世界最高精度の結果であり、標準理論を超える物理に対して、強い制限を与える。レプトン前後非対称度は世界初の測定結果であり、将来の Wilson 係数の精密測定においてさらに重要性が増してくると期待される。 $Z(3895)^+$ は Belle 実験だけでなく他の実験 (BESIII, CLEOc) でも発見されており、電荷を持ったエキゾチックハドロンが複数の実験で初めて観測された。今後も標準理論を超えた新物理の探索やエキゾチックハドロン探索など、Belle 実験の全データを用いたさまざまなトピックの“Belle の最終結果”が期待される。

素粒子実験領域「SuperKEKB 建設状況」

田島 治 (KEK 素核研)

[A] 森田昭夫 (KEK 加速器)

[B] この講演では、KEK の加速器グループの森田氏に、SuperKEKB の建設状況について報告していただいた。SuperKEKB は 2010 年に運転を終了した KEKB 加速器を高度化する加速器で、世界最高だったルミノシティをさらに 40 倍に増強することをめざしている。SuperKEKB の建設はすでに開始されており、2014 年までに建設を完了し、2015 年からコミッションを行うというスケジュールである。

トンネル内は、大量の電磁石の設置やアライメントが進行中であり、大半の設置を 2013 年中に完了するために全力で進められている。また、電磁石内に設置する 1,000 本を超えるビームパイプは、表面処理工程が終わりつつあり、2014 年度までに設置される。一方で、Belle II 検出器の近辺に設置される QCS と呼ばれる電磁石は、コイルの損傷や部材の輸入手続きの問題などで、製作が大幅に遅れており、一部の単体試験を省略して製作期限に間に合わせる予

定であることなどが報告された。その他、SuperKEKB 加速器で新設されるダンピングリングの建設状況や、建屋や電力設備などについても触れられた。

報告では専門的な内容も多く、もう少し SuperKEKB の概説などもあればよかったと思うが、写真なども交えた紹介で、建設の状況を知ることができた。(報告：西田昌平 (KEK 素核研))

素粒子実験領域「Belle II 建設の状況と実験開始に向けた準備状況」

田島 治 (KEK 素核研)

[A] 中村 勇 (KEK 素核研)

[B] この講演は Belle II 検出器の建設状況と各測定器の準備状況の報告である。講演者の中村氏は現場での Belle II 建設作業を指揮されており、建設状況を報告するには適任である。Belle II 実験には、最近計画がとりやめになった SuperB 実験に従事していた研究者が新たに加わり、総勢 500 人を超えるコラボレーションになったことが報告された。その後、40 倍に増強されたルミノシティ下で動作するように Belle II が改造されていることを述べたあと、実際の建設の状況が紹介された。

2013 年のはじめには、重さ 1,400 t の Belle 検出器を 25.9 mrad 回転させるという難作業が無事完了し、Belle 検出器はその後ビームラインからロールアウトされた。再度のロールインは 2015 年夏に計画されており、それまでに検出器の建設はおおむね完了している必要がある。それに向けた状況を、各サブ検出器ごとに紹介された。中でも、まもなくインストール予定の KLM 検出器が、アメリカからの輸送中のトラブルで再検査が必要になったことや、Belle II で用いる新型粒子識別装置 TOP のテスト状況などについて詳しく述べられた。

講演を通じて、Belle II 建設が、スケジュール的に厳しい点や新しい試みで困難な点があるものの、着実に進んでいることが伝わった。Belle 検出器の回転の様子や動画が紹介されるなど興味深い講演で、活発な質疑応答が交わられるなど非常に有意義であった。(報告：西田昌平 (KEK 素核研))

素粒子実験領域、実験核物理領域、宇宙線・宇宙物理領域

「測定器開発優秀修士論文賞受賞講演「測定器開発優秀修士論文賞 趣旨および選考結果説明」(幅)」、「ASTRO-H 衛星搭載軟ガンマ線検出器におけるコンプトン再構成アルゴリズムの開発」(一戸)、「超小型衛星 Tsubame 搭載用 γ 線バースト検出器フライトモデルの開発」(常世田) 角野秀一 (首都大理工)

[A] 幅 淳二 (KEK)、一戸 悠人 (ISAS/JAXA)、常世田 和樹 (リコー)

[B] 本企画講演は、2013 年「測定器開発優秀修士論文賞」に選考された受賞者に受賞論文についての講演を行ってもらうために企画提案されたものです。会場には幅広い分野

から数多くの聴衆が集まって若い受賞者を見守る中、選考委員長である幅氏により賞の趣旨および選考結果の説明および表彰の後、受賞講演が行われました。いずれも、厳しい選考を勝ち抜いた優秀な論文内容を明快に伝えるとともに、受賞者の測定器開発へ取り組み、熱意が感じられる、澁刺とした講演で、受賞者の将来の活躍を確信させる大変素晴らしいもので、会場からも惜しめない拍手を受けていました。本企画講演は、まさに「測定器開発に携わる学生の奨励、測定器開発分野の充実と裾野の拡大」という賞の趣旨に添う内容であり、今後とも論文賞とともに続けていきたいと思わせるものでした。

実験核物理領域「Search for Θ^+ pentaquark using a hadron beam at J-PARC」

宮地義之 (山形大理)

[A] 白鳥昂太郎 (RCNP)

[B] 企画講演として、第 19 回原子核談話会新人賞受賞記念講演を行った。講演内容は博士論文の主題であるペンタクォークバリオン (Θ^+) の探索実験についてである。 Θ^+ の探索実験は世界各地で行われているが、肯定的な結果と否定的な結果双方が報告されており、未だに Θ^+ の存在は確定していない。ハドロンビーム (π^- や K^+) を用いた生成実験のデータは数が少ないが、生成理論に不定性が少なく生成機構を詳しく調べる上で非常に重要である。一方で過去に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) において π^- ビームを用いて行われた実験で 2.6σ のバンプ構造が質量スペクトルに確認された。KEK での実験では測定感度が十分ではなく、よって Θ^+ の発見を目指す高い感度での実験が必須であった。 Θ^+ 探索実験 (J-PARC E19) は J-PARC K1.8 ビームラインで行われ、高い分解能を持つ SKS 磁気スペクトロメータシステムを用いた。ミッシングマスとして Θ^+ の質量を測定し、過去実験の 10 倍以上の感度を達成したが、明瞭なピーク構造は観測されなかった。実験によって与えられる Θ^+ の生成断面積の上限値は $0.26 \mu\text{b}/\text{sr}$ 以下となり、最新の理論計算との比較から $J^P = 1/2^+$ で 0.72 MeV という非常に狭い幅を持つことを明らかにした。したがって、実験によって Θ^+ の存在に強い制限を与えた。これら Θ^+ 探索実験について実験装置の建設や関連する実験の話題にも触れ講演を行った。

宇宙線・宇宙物理領域「銀河中心ブラックホールまわりのガス雲の増光」

谷口敬介 (東大総合文化)

[A] 斎藤貴之 (東工大地球生命研)

[B] 2014 年 3 月頃、我々の銀河系の中心にあるブラックホール Sgr A* にガス雲「G2」が最も接近すると予想されている。このガス雲の最接近は、「天文学としてはまれな、答え合せのできる研究」として注目されている。本講演では、このガス雲についての観測の現状と、シミュレーションによる理論研究についての解説を行っていただいた。観測によって明らかになったのは、このガス雲が地球の 3 倍

程度の質量を持ち、半径は地球-太陽間の距離の約125倍であること、また、現在太陽の0.2~0.3パーセントの光度で輝いていることなどである。観測された軌道からの予測として、最接近時のブラックホールからの距離は、地球-太陽間の距離の100~200倍になりそうであることも分かっている。講演者が専門とする3次元N体シミュレーションを使った理論研究では、ブラックホールからの潮汐力でガス雲が強く圧縮され大きく変形する様子が示された。その結果としてピーク時にはガス雲の光度が太陽の数10~100倍にも達することや、ガス雲が通過する際のブラックホールへのガスの降着については、ガス雲からよりも周辺の銀河ハロー起源のガスがメインとなることなどが報告された。本講演には60名を超える聴衆が集まり、活発な議論が行われた。

領域4「薄膜・超格子でのトポロジカル絶縁体表面状態の混成」

加藤岳生 (東大物性研)

[A] 村上修一 (東工大理)

[B] トポロジカル絶縁体の界面には、ディラックコーン状の分散関係をもつ表面状態が安定して存在することが知られている。最近になって、この特異な表面状態を利用した薄膜・界面・超格子などの輸送特性の研究が盛んに行われている。村上修一氏は、常にトポロジカル絶縁体分野の理論研究の第一線に立って活躍されている理論研究者であり、最近では界面・超格子に関する理論研究を活発に行って多くの特異な物性を明らかにしてきている。本企画講演では、トポロジカル絶縁体研究の最先端の話題である界面・超格子に関する理論研究について、村上氏自身の研究と背景となる理論研究の両方を交えながら、ご講演いただいた。

講演では、トポロジカル絶縁体のレビューから始められ、2種のディラックコーンのカイラリティの区別とその差から期待される新しい界面状態の議論、さらにそこから派生する種々の特異な輸送特性が議論された。また講演の後半では、トポロジカル絶縁体と通常の絶縁体の超格子構造に備わる物理について、その物理的な本質が簡潔に要約された。講演で取り上げられた話題は多岐にわたったが、短い時間内で盛りだくさんのテーマが要領よくまとめられた。会場には、急遽、部屋後方の仕切りがとりはずされるほど多くの聴衆が集まり、その数はおよそ300人であった。

領域4「GeTe/Sb₂Te₃超格子相変化メモリに現れるトポロジカル絶縁性とスピントロニクスへの展開」

加藤岳生 (東大物性研)

[A] 富永淳二 (産総研)

[B] GeSbTe系は相変化型不揮発性固体メモリの材料として、長年研究が行われてきた。この系の特徴は、Ge原子の位置移動が低エントロピー動作によって実現できることであり、低電力動作メモリの有力な候補となっている。しかし最近になって、この系の2,000%以上に及ぶ巨大な

室温での磁気抵抗効果が、系のトポロジカルな性質と深く関係する可能性が富永淳二氏らによって指摘された。GeSbTe系の結晶構造はトポロジカル絶縁体と通常の絶縁体の積層構造とみなせることができることが重要であると考えられている。

村上修一氏の企画講演に続けて行われた本講演では、まずGeSbTe系のこれまでの研究について、研究の経緯などを踏まえながら平易な解説がなされた。次にバンド計算の結果を議論し、この系がトポロジカル絶縁体としての特性をもつことが説明された。さらにGeSbTe系の電場による相変化(Ge原子の移動)が系のトポロジカルな性質に大きな影響を与えることが、多くの実験結果とともに議論された。本研究内容はトポロジカル物質の応用研究として価値が高く、講演終了後、多くの参加者が講演に強い関心をもったようである。聴衆の数はおよそ300人であった。普段は富永淳二氏は応用物理学会において活動されているが、このような学会間の垣根を越えた研究交流が、研究分野の発展に重要であることを改めて感じた。

領域12「Shape, elasticity, and packing of nanocolloidal particles」

芝 隼人 (東大物性研)

[A] Primoz Zihrl (Univ. of Ljubljana and Josef Stefan Institute)

[B] 本企画講演においては、50分間の講演に続いて、10分間の質疑応答が行われた。講演は dendritic liquid の構造とエキゾチックな anisotropic phase の形成、拘束空間中の球上ブラッシュポリマー系のインデンテーションの問題、並びに大きなポアソン比を持つナノコロイド異方構造の形成などに及んだ。これらは、ソフトマター複合系でも構成分子自体の変形が顕著に現れる系であることが大きな特徴である。質疑応答においては、ソフトコロイドガラスやコロイドを研究対象としている研究者から、積極的な反応があった他、複数名の会員と講演後の議論も行われた。本講演は日本にいる会員とゆかりの深い講演者が、先方のコミュニティ内でのアクティビティを紹介するというスタイルを取っていた。近年の領域12のアクティビティとの遠すぎず近すぎずの関係を持った話題を展開していたことから、物理学会領域12の企画講演として意義深いものであったと提案者は考えている。

【チュートリアル講演】

領域2「プラズマ波動とモード変換の物理」

出射 浩 (九州大)

[A] 前川 孝 (京大)

[B] 磁化プラズマ中に入射された電磁波が共鳴条件をみたく層に到達すると有限温度下で伝播する短波長の静電波モードに変換される。電子サイクロトロン(EC)周波数帯では高域混成共鳴(UHR)層で電子バーンスタイン(EB)波にモード変換され、EB波は密度制限無く高密度側に伝

播する。最近の高電力ミリ波源（ジャイロトロン）の発展により、電磁波モードに対する遮断密度を大幅に超える高密度プラズマのEB波によるEC加熱が大型の磁場閉じ込め核融合実験装置においても可能になり、モード変換に関する興味が高まっている。

講演では、スラブプラズマを用いてEB波へのモード変換の解析法が具体的に示された。冷たいプラズマ近似による波動解析に加え、電子の有限ラーマー効果を取り入れた波動解析により、一旦、UHR層に至った電磁波は反射することなく、すべてEB波に変換されることが示された。従って入射電磁波を高効率でUHR層に導くことが決め手になる。磁場に最適角度でO波を斜め入射するOXB法は、

密度勾配が急峻になると効率が下がるが、X波の入射と適切に組み合わせると干渉効果により効率が回復することが示された。最後に1958年のバーンスタイン博士によるEB波の理論的発見以来の研究の進展が紹介された。

本講演では、プラズマ波動の基礎、モード変換物理、さらにプラズマ計測・加熱への適用といった広範なプラズマ物理を網羅し、プラズマ波動相互作用といったプラズマ物理の課題として、興味深い講演であった。そのため、広く興味・関心を集め、質疑も活発に行われた。（報告：安藤晃（東北大））

(2013年10月30日原稿受付)

『大学の物理教育』誌定期購読のすすめ

『大学の物理教育』は、年3回（3月、7月、11月）発行で年間購読料（個人）は1,000円です。購読ご希望の方は、お電話（03-3816-6201）またはFax（03-3816-6208）でご連絡下さい。

また、本誌ホームページのURLは次の通りですので、どうぞご覧下さい。

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

『大学の物理教育』編集委員会

Vol. 19-3 (11月15日発行) 目次

「美しい」実験を求めて	種村雅子
講義室	
「発達の最近接領域」から見たピア・インストラクション	新田英雄, 森口真靖
「再生可能エネルギー」の学習に活かしたい数値的データについて	寺内 衛, 寺内かえで
合成抵抗—平衡移動の法則を直流回路に適用する—	青野 修
実験室	
電気通信大学の物理学実験	高田 亨, 中村 仁, 鈴木 勝
医学部における物理学実験	高須雄一
教育実践	
高大連携による高校生の探究活動—高校生への放射線課題研究指導の実践—	中村 琢
「基礎物理」の授業へのグループ学習の効果—金沢工業大学での教育実践—	三嶋昭臣

教育報告	
宮崎県における高等学校と大学との物理教育に関する連絡会—高大連携・地域連携で考える物理教育—	森 浩二, 木村英二
第4回物理教育シンポジウム「理工系学部における人材養成—輩出の現状と展望」報告	三沢和彦, 田中忠芳
海外の動向	
第44回国際物理オリンピックの報告と物理教育	中屋敷 勉
教育に関する一言	鈴木増雄/松尾由賀利/長谷川修司
開催情報	
寄贈書リスト	
総目次	
編集後記	

シカゴ大学 KICP ポスドク滞在記

藤井俊博* (シカゴ大学カブリ宇宙物理学研究所)

1. 風の街シカゴ

私は2012年に大阪市立大学にて博士号を取得し、東京大学宇宙線研究所を経て、2013年4月からシカゴ大学のカブリ宇宙物理学研究所 (Kavli Institute for Cosmological Physics; KICP) で研究を続けている。専門は、宇宙空間に存在する最も高いエネルギーを持つ粒子「極高エネルギー宇宙線」の観測である。本稿では、私のここまでのKICPでの経験を紹介したい。

私が今住んでいるシカゴは、ニューヨーク、ロサンゼルスに次ぐアメリカ第3の大都市ではあるが、日本では少し馴染みの薄い街かもしれない。街の東側にはアメリカ五大湖のひとつであるミシガン湖が広がり、そこから強い風が年中吹きつけるため「風の街」と呼ばれている。緯度は日本の函館とほぼ同じであって冬は寒く、加えてこの風の影響によって体感温度はさらに低くなる。凍てついた風によって肺を痛めてしまうため、外で大きく息を吸わないようにと言われるほどである。また買い物や外食での税金が高く、チップも必要とするため、お財布にも冷たい風が吹く。

観光スポットの充実は素晴らしく、シカゴ美術館、産業科学博物館、アドラー天文台、シェッド水族館、フィールド博物館をはじめとする有名な観光施設が多く存在する。気鋭の建築家の手がけた圧巻の摩天楼、街中に存在する近代芸術家による巨大アートの数々、そして大食漢のシカゴ市民も大満足の厚さ5センチのディーブ・ディッシュ・ピザも有名である。またシカゴはスポーツがとても盛んで、合計6つのプロスポーツチームが存在する。2013年はアイスホッケーチームであるシカゴブラックホークスが全米1位になり、優勝パレードがダウンタウン(中心街)で開催された。ミーハーな私は優勝記念グッズを買ってしまった。

夏には、毎週末ダウンタウンでミュージックフェスティバルや食の祭典といったイベントが開催され、あちこちで花火が打ち上げられる。このときばかりはミシガン湖からの風も心地よく、お酒と音楽と美味しい食べ物とともにゆったりとした週末を過ごすことができる。ぜひ夏のシカゴを皆様にお勧めしたい。

2. シカゴ大学(ハイドパーク周辺)

ハイドパークはダウンタウンから南へ約10キロメートルのところの位置し、閑静な住宅街が広がる。このハイドパーク内にシカゴ大学がある。この辺りの建物は築100年以上の外観を残しつつ、中を改装した建物が多いため、歴

史を感じさせる美しい街並みが続く。一般にダウンタウンの南は治安が悪いと言われているが、ハイドパーク内は大学があるため警備が充実し、さらにはあちこちにEmergencyとかかれた緊急非常ボタンが存在し、例外的に治安がいい。私自身も特にトラブルに巻き込まれたことはなく、みんな親切だと感じているのだが、この原稿の執筆中に、大学のすぐ南で銃を突きつけられて携帯電話を奪われたという内容のセキュリティアラートが届いた。油断は禁物である。

シカゴ大学はアメリカの大学の中でも特に真面目な学生が多いと有名で、「シカゴ大学の学生は図書館に住んでいる」と揶揄されるほどである。大学の運営する通学用のバスは、ほぼ24時間動いており驚いた。

物理分野ではノーベル賞受賞者である南部陽一郎氏、ジェイムズ・クロニン (James Cronin) 氏をはじめ、著名な物理学者が数多く在籍する。2013年度秋のKICPの集合写真を図1に載せた。みんなナイススマイルだ。

3. 研究室の様子

私の所属する研究室の教授であるパオロ・プリビテラ (Paolo Privitera) 氏は、世界最大の検出面積を有する極高エネルギー宇宙線観測実験、ピエール・オージェ観測所 (Pierre Auger Observatory) の中心人物の一人である。イタリアのシチリア島出身で、常に笑顔で研究室の雰囲気も明るく、女子学生の誕生日にはサプライズでケーキを買ってくるというキザな一面も持つ。お互いファーストネームで気軽に呼び合い、「Ciao Toshihiro!」と頻りに声をかけてくれる。

これまではむしろオージェ観測所とはライバル的な関係にあるグループに所属していたのだが、シカゴ大学に来るにあたり、パオロ氏があらかじめ私のことを随所で紹介してくれていたこともあり、非常にスムーズに研究を始めることができた。現在、極高エネルギー宇宙線観測の分野は、現状稼働している実験の観測運営、解析に加えて次世代の観測実験へ向けた開発が精力的に行われている。オージェ観測所に所属する日本人研究者は少ないため、私が日本とのパイプ役を果たしつつ、極高エネルギー宇宙線の起源解明に貢献したいと考えている。

研究を進める中で、所属している学部生と一緒に実験することもあるのだが、パオロ氏の研究室では学部4年生だけでなく2年生や3年生の学生も研究室に所属している。聞いたところによると、意欲的で成績優秀な学生は本人が希望すれば学部2年生から研究室に所属でき、4年生から

* 日本学術振興会海外特別研究員、東京大学宇宙線研究所協力研究員



図1 2013年秋のKICPの集合写真。

始めるような研究を早くから始めることができるようだ。研究室に所属すると最先端の物理をいち早く学べるだけでなく、研究した時間に応じて給料が支払われるため、彼らにとっても魅力的なのだ。さらには大学院の入試でも、学部での成績と同様に研究室での経験が考慮され、早くから研究室に所属している学部生は大学院での学費免除や返還義務のない奨学金を受けやすくなるようである。この制度は、早い時期からの実践的な研究のための知識とスキルを身につけられる機会を提供するほか、学部生のモチベーションの向上にもつながるため、研究を効果的に進める上で重要であると感じた。

4. 活発な議論

KICPで研究を続けていくうちに感じたことは、教授らがポストドクや学生らと議論する時間が長いことである。もちろん教授は授業を担当しているが、その数は日本に比べると少ない。加えて、日本の教授らの大きな負担となっている入試関連の業務がほとんどないことも大きな理由だと考えられる。日本では教授らが入試の問題作成、採点、そして試験監督もしていると話すとても驚かれた。大学院入試では、学部生の時の成績と小論文、そして面接のみで合否が判定されるため、教授らの負担は日本に比べて小さい。その分の時間を研究や議論に使うことができるようだ。

大学も議論を活発化させるために、セミナーがある時には大量のワインと軽食を用意してくれる。またポストドク同士で集まる機会が多く、大学もこれをおおいに推奨しているようだ。例えば、毎週水曜日のセミナーの前に招待したゲストと一緒にランチに行く「ポストドクランチ」や、お酒を飲みながら物理について議論し、お互いに交流を深める「ポストドクビール」も時々開催される。驚くことに、これらにかかる費用は全て大学から支払われる。アメリカでは研究者同士で話すことが、非常に有益であると認識しているようである。

またポストドクを対象としたキャリアアップセミナーも開催される。ここでは、次のポストの探し方、新たに着任した教授の経験談や、一般の人に研究内容をわかりやすく伝えるにはどうすればいいかなどを議論する。ここでもビールやワイン、軽食がでてお互い気軽に話せる機会となっている。ちなみにシカゴではグースアイランドという地ビールが美味しいのだが、この最も重要な情報はここで教えてもらった。

5. 充実した支援体制

KICPでは会議やワークショップを主催する時の支援体制が充実している。会議を開催するための準備や運営を専門に行うスタッフがあり、会場の確保、ホームページの管理、当日の受付や準備物などをすべて用意してもらえるため、研究者はテーマと開催日を決めるだけでよい。

出張旅費請求や物品購入の手続きが全てWEB上ででき、便利である。出張時の旅費請求は、レシートや飛行機の半券を写真に撮り、WEB経由でアップロードし、金額を入力するだけで手続きが完了する。物品の購入も同様である。日本の大学のように見積書、納品書、請求書や各種手続き書類などは必要はなく、すべての手続きがWEB、必要であればメールのみで完結するようになっている。研究が円滑に進むことを一番に考えた充実した支援体制のもと、快適な研究生活を送ることができている。

まだまだ始まったばかりのKICPポストドク生活であるが、日本との違いで私が驚いたことを中心に執筆した。アメリカでの研究生活に興味がある人にとって、少しでも参考になれば幸いである。日本の居酒屋が恋しくなることはたびたびあるが、幅広い分野の研究者との活発な議論を通じて私自身これからも成長できればと考えている。

(2013年11月28日原稿受付)

第28回西宮湯川記念賞： 高柳 匡氏，笠 真生氏

磯 暁 (KEK)

西宮湯川記念賞は、湯川秀樹博士が西宮市の苦楽園に居住した時期に中間子論を構想したことになみ、昭和61年に西宮市により創設された。毎年、理論物理学を研究する40歳未満の若手研究者に贈られる。平成25年度は、第28回西宮湯川記念賞が、京都大学基礎物理学研究所教授の高柳 匡氏とイリノイ大学アーバナ・シャンペーン校准教授の笠 真生氏に授与された。受賞理由は「ホログラフィック原理を用いた量子もつれの研究」である。

“量子もつれ量” (entanglement entropy) は、場の量子論の状態の複雑さを表す指標であり、強相関物性系が示す量子相転移の秩序変数を与える。一方で、ブラックホールのエントロピーは、地平面の表面積に比例することが知られており、時空の背後にひそむ“量子もつれ”ではないかと予想されてきた。高柳氏と笠氏は、超弦理論で発見されたホログラフィック原理 (holographic principle) を用いて、両者の間にある明快で一般的な関係を明らかにした。ホログラフィック原理とは、重力の無い時空中の場の量子論が、1つ次元の高い重力理論の「影」である、という驚くべき仮説である。受賞者たちは、このホログラフィック原理を用いることで、場の量子論の“量子もつれ量”が、重力理論の面積という単純な幾何学量と等価だという提案を行った。これにより、表面積で与えられるブラックホールのエントロピーは“量子もつれ量”と解釈でき、重力理論の本質の一面が明らかになった。逆に、場の量子論の量子もつれ量を幾何学的に表現することで、強相関量子系の研究にも新しい方向性を与えた。

この研究は、超弦理論の研究者である高柳氏と、物性理論の研究者である笠氏が、カリフォルニアのサンタバーバラ研究所でともにポスドク研究員をしている時に始まった。異分野の交流がもたらした素晴らしい研究成果であ

る。狭い分野の中ですら、垣根をつかって自分の分野を守ろうとするシニアな研究者が多いなかで、このように垣根を乗り越え、自由奔放に新しい世界を切り開いて行く若手研究者がでてくることは、見ていて壮快である。

(2013年12月14日原稿受付)

平成25年度文化功労者： 柳田敏雄氏

原田慶恵 (京大 iCeMS)

大阪大学基礎工学部電気工学科を卒業し、修士課程では半導体中の不純物の研究をしていた柳田敏雄氏は1年の会社勤務を経て、生物工学科の博士課程に進学し、大沢文夫先生の研究室で筋収縮の研究を始めた。柳田氏はノーベル賞学者であるアンドリュー・ハックスレー (Andrew F. Huxley) 氏が提案した筋収縮の「首振り説」に疑問をもち、手作りの測定装置を使って筋収縮時に首振り運動をすると言われていた筋タンパク質であるミオシン分子の動きを測定した結果、言われているような動きをしていないということを見いだした。別の方法でアメリカ人研究者が、ミオシン分子の首が動かないことを確認したことで、柳田氏の実験結果が認められ、世界で注目されるようになった。1984年、柳田氏はもう1つの筋肉タンパク質であるアクチンフィラメント1本 (太さ7nm) を蛍光色素で標識し、レーザーを光源とした光学顕微鏡と高感度カメラを使って可視化することに成功した。さらに、筋収縮の分子メカニズムを明らかにするために光学顕微鏡を用いた様々な技術開発を行い、成果を挙げていった。まず、1本のアクチンフィラメントをガラス針で捕捉し、破断力の測定を行った。また、ガラス針のナノメートルの動きを検出するナノ計測法を使って、ミオシン分子1個が1分子のATPを分解する際に発生する力や変位の計測に成功し、筋収縮を分子レベルで直接捉える技術を開発した。1995年には、新しい照

明法であるエバネッセント照明を組み込んだ光学顕微鏡を使って、水溶液中の蛍光色素1分子を可視化することに成功し、1分子の酵素反応、1分子のモータータンパク質分子の運動の観察、さらに細胞内シグナル伝達の実時間観察を行った。この技術によって蛍光色素で標識したあらゆる分子の1分子イメージングが可能になった。現在この技術は、タンパク質科学、次世代超高速1分子DNAシーケンサー、そして細胞情報伝達処理の1分子観察に応用されるなど生命科学全般に大きく貢献している。柳田グループはその後、自身で開発した1分子イメージング、1分子操作、1分子ナノ計測技術を駆使して、モータータンパク質の運動について詳細に解析した結果、生物分子モーターがブラウン運動 (“ゆらぎ”) を巧みに使って運動するというユニークなメカニズムで働いていることを示した。さらに細胞や、脳の研究からそれらが機能する際にも、“ゆらぎ”が使われていることを実験的に示している。“ゆらぎ”は生命現象の様々な階層において、重要な役割をしているというのが柳田氏の主張である。最近はこの“ゆらぎ”を使う生命原理を膨大な自由度を持つロボットや通信ネットワークの制御に応用し、桁違いに省エネでロバストに制御できることを示している。

今回、文化功労者に選出された理由はこれらの業績が認められたものである。柳田氏は現在、大阪大学大学院生命機能研究科の特任教授、理研生命システム研究センター長、理研HPCI (High Performance Computer Infra.) プログラムディレクター、情報通信研究機構/大阪大学脳情報通信融合研究センター長として分子から脳、個体まで広く生命現象に関わる原理を追求し、基礎研究と科学技術の発展に尽力している。

(2013年12月6日原稿受付)

2013年度仁科記念賞： 香取秀俊氏

井戸哲也 (NICT)

香取秀俊氏(東京大学大学院工学系研究科教授兼理化学研究所主任研究員)が、授賞理由「光格子時計の発明」で2013年度仁科記念賞を受賞された。

光格子時計とは、レーザー光の干渉縞による波長オーダーのトラップポテンシャルに中性原子を多数個束縛することによってイオントラップ同等の先鋭なドップラーシフトフリーのスペクトルを一挙に強い信号強度で得る、という原子時計の方式である。光格子時計の提案以前は、中性原子による光原子時計は原子が自由空間中に存在するために残留ドップラーシフトの影響を避けるのが難しく、そのため当時主流の単一イオン時計には敵わないと見られていた。これに対して2001年の香取氏の光格子時計の提案は、クロック遷移の上下状態のACシュタルクシフトを魔法波長によって揃えた形で光トラップによるラムディック閉じ込めを実現し、なおかつ極低温フェルミ原子の偏極による衝突レートの抑制を利用して原子間相互作用による遷移周波数の変動をも避けるというものであり、「光原子時計は単一イオン方式で決まり」という当時の定説を覆すものであった。

香取氏はその後研究の重点を精密分光に置き、授賞理由にあるように、光格子時計について原理実証(2003年)、国際度量衡委員会における秒の二次表現への採用(2006年)、クロック光源の雑音を避ける高安定動作(2011年)、一般相対論的な時間遅れの検出(2011年)等、10年以上の長きにわたり当該技術を発展させて日本の周波数標準技術のプレゼンスをかつて無く高いものとした。この功績はまさに仁科記念賞の榮譽にふさわしいものである。そして光格子時計はまだまだ発展途上にあり、18乗台の不確かさの光格子時計が実現してついにイオン時計に追いつく、その蓋然性は極めて高いと言われている。また光格子時計は既に日米仏独韓英中で精力的に開発され、ストロンチウム光格子時計については既に国内外の6機関で15桁の周波数一致が確認さ

れている。従って今後はさらなる性能向上によって宇宙スケールに特定されていた相対論の世界が身近なものとなり、基礎科学においては超微細構造定数の時間変化や重力場と電磁気力の結合を検出する超精密なプローブとしての利用が期待されている。また実社会のインフラである国際原子時の較正に利用されることも予測され、それらの実績も相まって、光格子時計による秒の再定義が実現する可能性は十分ある。もしそうなれば仁科先生も草葉の陰で一段の賞賛をしてくださることと思う。

また、今回香取秀俊氏が高橋義朗氏と同時に受賞したことについて筆者は感慨の念を禁じ得ない。仁科記念賞は、「原子物理学とその応用に関し、優れた研究業績をあげた研究者を表彰する」、そして「あらゆる分野において原子物理学に深い関連のある研究を含むもの」となっており、国内において著しく進展した分野の物理学で世界的に高評価を得ているものに授賞されることが多い。両氏はレーザー冷却された中性二電子原子(極低温グループII原子)という共通したステージで量子エレクトロニクスにおける新分野を世界に先駆けて切り拓き、超精密分光と二電子系の量子縮退系物理という2つの大きな流れを作りだして世界を牽引してきた。前世紀末にアルカリ金属原子による量子縮退系が次々に新しい成果を見せる中、短期的な成果を追わず、地道に、しかししっかり大志を抱いてオリジナルな成果を求めて新しい実験系の開拓を進めてきたからこそその結果と思われる。そしてその貢献は2000年より3年に1回開催され、両研究室と共に発展してきたともいえる極低温グループII原子国際会議に見ることができる。当該分野の研究グループ数は2000年代半ば以降拡大の一途をたどっているため、招待講演者の選択は回を追うごとに困難を極めつつある。しかし両研究室の成果は初期の頃より会議に不可欠なピースとして常に認識され、定常的に招待講演がなされていることを申し添えておきたい。

(2013年12月3日原稿受付)

2013年度仁科記念賞： 高橋義朗氏

熊倉光孝(福井大理工)

「イッテルビウム超低温量子系の創出」の業績により、2013年度仁科記念賞が高橋義朗氏(京都大学)に授与されました。

1990年代に開発されたレーザー冷却技術は、中性原子気体を μK 以下の超低温にまで冷却することを可能とし、気相原子集団におけるボース・アインシュタイン凝縮やフェルミ縮退などの実現に道を拓きました。これらの成果は、広く知られているように、1997年および2001年のノーベル物理学賞授賞対象ともなりました。この研究では、従来から原子分光分野でよく利用されていたアルカリ原子が主な実験対象に用いられてきましたが、高橋氏は世界に先駆けてイッテルビウム原子に着目し、この分野で世界的にも独自の研究を推進してきました。

アルカリ原子は、最外殻に一つの価電子を持ち、強い光学遷移が存在することや、試料となる原子蒸気を準備し易いことなどから、従来から分光実験で広く利用されてきた原子種です。そのため、孤立原子の光学的性質はもちろん、原子間相互作用やダイマー分子の性質など、基本的な特性がこれまでの長い研究によって詳細に知られています。一方、イッテルビウム原子は2電子原子(アルカリ土類様原子)の一つで、高橋氏が研究に着手した段階では、原子間相互作用などの基礎的性質も全く知られていない状態でした。しかし、この原子にはアルカリ原子に比べて周波数線幅の狭い光学遷移が存在し、ドップラー冷却と呼ばれるレーザー冷却手法によって、より低い温度にまで冷却できるという利点があります。また、核スピンや量子統計性の異なる安定な同位体が複数存在し、その混合状態を比較的容易に準備することも可能です。

高橋氏はこれらの特徴に着目し、1990年代中頃からイッテルビウム原子に対するレーザー冷却技術の開発に着手しました。この原子は基底状態で

は電子スピンを持たないため、アルカリ原子で広く用いられてきた磁気トラップを利用することはできません。そこで、レーザービームを用いた光学的トラップを独自に開発することによって、超低温にまでイッテルビウム原子気体を冷却し、トラップすることに成功しました。

この全光学的なレーザー冷却技術によって、2003年、高橋氏はイッテルビウム原子気体において初めてボース・アインシュタイン凝縮を、そして2007年には同じくフェルミ縮退を実現し、電子スピンを持たない原子としては最初の量子気体を世界に先駆けて創出することに成功しました。また、高橋氏はこれらの研究を通して、それまで全く情報の無かった超低温イッテルビウム原子間の相互作用についても、光会合分光実験などから独自に詳細な測定を行い、超低温での衝突相互作用を記述するs波散乱長を全ての同位体間について決定しています。この成果は、その後、この系の理論研究や実験計画の指針となっており、特筆すべき成果の一つともいえます。

高橋氏は、このイッテルビウム原子の量子気体を様々な同位体において実現し、多様なボース・フェルミ混合量子気体の生成に成功しています。そして、それらを光格子に導入することにより、2011年にはボース・フェルミ混合モット状態と呼ばれる強相関量子系を、また2012年にはSU(6)モット絶縁体状態を実現するなど、超低温原子集団を利用して様々な未知の量子系を新たに創出してきました。これらの研究成果は、1980年代にファインマン(R. P. Feynman)が提案した量子シミュレーターをイッテルビウム原子で実現したといえるもので、世界的に注目を集めました。そしてこれを契機に、イッテルビウム原子および他の2電子原子を用いた新奇量子系のデザインや、その量子物性に関する研究が、世界各地で活発に行われるようになりました。

高橋氏のこれら一連の成果は、原子物理学・量子エレクトロニクスにおいて新しい研究領域を切り開いた傑出した業績であるばかりでなく、凝縮系物理学や低温物理学など、量子物理学の

幅広い分野にも大きな影響を与えるものです。他に先駆けて世界的にも独自の研究に挑戦し、その成果が新しい研究領域の開拓に結実した高橋氏の主導力に敬服するとともに、今回の仁科記念賞の受賞を心よりお祝いしたいと思います。更なる研究の推進により、今後も魅力的な新奇量子系の創出や、それらを舞台とした豊かな量子物理現象の発見がもたらされるものと期待されます。

(2013年12月2日原稿受付)

2013年度仁科記念賞： 近藤敬比古氏、小林富雄氏、 浅井祥仁氏

徳宿克夫 (KEK)

2013年のノーベル物理学賞は、素粒子の質量の起源に関する理論的発見として1964年の論文をもとにF. Englert氏とP. W. Higgs氏が受賞したが、その契機となったのは2012年のLHC加速器でのATLAS及びCMS実験でのヒッグス粒子の発見であった。

このような大型で長期のプロジェクトでは各段階で様々なタイプの研究と開発が必要である。ATLAS実験の中でも、測定器建設・その運転・トリガーデータ収集・オフラインでのデータ処理そして物理解析と、多くの日本の大学院生・研究者が、各国の研究者と一体となって様々な核となる仕事をしている。これらの多く(ATLAS全体で約3,000人!)の研究者と、そして、それをさらに上回るLHC加速器グループの長期にわたる活躍なしには、ヒッグス粒子の発見は成し得なかった。この中で、今回受賞の3氏は様々なフェーズでATLAS実験の鍵となる貢献をしてきた。

LHCを宣伝するときに「標準理論のヒッグス粒子が存在するならば必ず見つけることができ、もし見つけれないとすれば、それは全く新しい考え方を必要とする」といって、成功が約束された加速器のように言ってきた。しかし本当に陽子・陽子衝突からヒッグス粒子の発生事象を捉えられるかどうかは必ずしも自明ではなかった。陽子・

陽子衝突の衝突全断面積約100 mbに対して、ヒッグスの生成断面積は約20 pbしかなく、その10桁近い差を見極めるためには精度良い検出器と複雑な解析手法が必要となる。

ヒッグス粒子は様々な崩壊モードがあり、その質量によって、探索のストラテジーが大きく変わってくる。今回の発見では、 $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow WW$, $H \rightarrow \tau\tau$ 等の崩壊過程の探索で、日本グループの大きな貢献があった。浅井祥仁氏は日本グループの物理解析責任者であり、彼の広い見識のもとヒッグス探索の戦略を立て、大人数のATLAS Higgs探索物理グループの中で適切な助言を与え、指導的役割を果たしてきた。

一方、近藤敬比古氏と小林富雄氏は、長くアトラス日本グループの代表としてグループを率いるとともに、実験の初期からの大きな貢献があった。

陽子・陽子衝突からの膨大な発生粒子は、検出器の放射線損傷の問題も引き起こす。LHC計画が議論され始めた時期、 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ という高ルミノシティ環境下で長期間ともに動く検出器を衝突点近傍に置けるかどうかは定かではなかった。近くに測定器工場をつくり次々と入れ替えるとかいうオプションも考えられていたと記憶する。

このような状況で、二つのアプローチが考えられる。一つは、できるだけ放射線の少ない外側で勝負することで、つまり「ミューオンが出る物理なら必ず逃さないようにする」という方針である。ATLAS検出器の特徴は大きな空芯トロイド超伝導磁石を持ち、ほかの粒子が見えなくてもミューオンに関しては外側のスペクトロメータだけでも良い測定ができるように設計された。小林氏はATLASの当初からのメンバーとして、日本グループの柱となるプロジェクトとしてミューオン検出を選択し、Endcap部のトリガー用チェンバーの開発を進めた。時間分解能の良い検出器で大面積を覆う必要があり、放射線損傷とは別な意味での難しさがあった。Endcapのトリガーチェンバーは結局日本・イスラエル・中国の共同プロジェクトとなり、日本はチェンバー約3,600台のうちの約3分の1を製作し、トリガーのエレクトロニクスはほ

ほぼ100%の責任を持ってプロジェクトを進めてきた。

もう一つのアプローチは、放射線に強い検出器の開発である。近藤氏は、広島大学の杉節氏らとともに、LHCの環境下でも十分寿命のあるシリコン検出器を浜松ホトニクスとの綿密な連携により開発した。このタイプの検出器が現在非常に多く用いられることになった背景には両氏らの功績がある。

その他にもATLAS測定器は新しいものを大胆に取り入れて行く必要があった。 $H \rightarrow \gamma\gamma$ の崩壊を精度よく測定するには、電磁シャワーカロリメータのエネルギー分解能が必要であり、そのためにはカロリメータの前にあるソレノイド磁石の物質量はできるだけ薄くする必要があった。KEKの山本明氏らの開発したアルミを安定化材とした超伝導ソレノイドと、液体アルゴンカロリメータとで共通のクライオスタットを使うなど、斬新なアイデアには日本グループが大きく貢献した。近藤氏は、液体アルゴンカロリメータなど他国の担当した検出器でも、製造過程で困難が生じた際にそれを克服するテクノロジーを持った日本企業を紹介するなど、よい検出器を作る上で汎ATLAS的な貢献をしてきた。

また、小林氏は物理解析の核となる、ATLASデータ解析センター(Tier2)を東京大学に立ち上げた。このセンターの貢献はATLAS全体の解析計算機リソースとして重要な資源となったとともに、日本グループの独自の解析の進行を容易にし、浅井氏の主導する解析

チームが力を発揮する一助となった。

本来、仁科記念賞は比較的「若手」を対象としているわけであるが、このような巨大で建設に長期間を要する実験プロジェクトでは、近藤・小林両氏の萌芽期から完成までの絶え間ない貢献が必要であり、物理を主導した浅井氏とともに3氏が受賞したのは喜ばしいことである。

(2013年12月26日原稿受付)

第8回凝縮系科学賞： 内田健一氏、伏屋雄紀氏

北岡良雄(大阪大院基礎工)

凝縮系科学研究分野の若手研究者を奨励することを目的として秋光純氏と福山秀敏氏により創設された凝縮系科学賞の第8回受賞者に、実験部門で内田健一氏(東北大学金属材料研究所)、理論部門で伏屋雄紀氏(電気通信大学情報理工学研究所)が選ばれた。

内田健一氏の受賞業績は「スピンゼーベック効果の発見とスピン熱流物理の展開」。同氏は、温度勾配を持つ強磁性金属に常磁性金属を接触させ、常磁性金属中の逆スピンホール効果を用いて、熱流がスピン流を生成する「スピンゼーベック効果」を発見した。次いで、この熱スピントロニクス効果とも呼ぶべき現象を電荷移動のない強磁性絶縁体/常磁性金属接合においても実証し、さらに、音波によるスピン流生成にも成功した。これらの発見は、

これまでに全く前例が無く、その独創性は高く評価でき、科学への貢献にとどまらず、スピンゼーベック効果を利用した電荷の自由度を全く用いない革新的な熱スピントロニクスデバイスの開発を通して社会へ計り知れない波及効果を持ち得る可能性がある。

伏屋雄紀氏の受賞業績は「固体中ディラック電子系の量子輸送現象の理論的研究」。同氏は、ディラック粒子として記述できるビスマスの電子系を対象に、バンド間効果の役割を、ホール効果、スピンホール効果、光誘起スピン偏極電流効果、の3つの現象に即して明らかにすることで、この基本的な問題に対して重要な寄与をした。従来バンド内効果の解析のみが行われてきた輸送現象の理論に対して、バンド間の行列要素を注意深く扱った精密な計算によってバンド間効果を解析し、特に、スピンホール伝導度と軌道反磁性の関係を追求してフェルミエネルギーがギャップ内にあるときには両者は基本定数によって厳密に関係づけられることを示した。これらの結果は、バンド間効果の輸送現象における役割を明らかにしただけでなく、軌道反磁性電流と輸送電流の間の深い関係を示唆するものであり、基礎物理学へ大きなインパクトを持つばかりでなく、スピントロニクス等への応用という観点からも高く評価される。

今後の凝縮系科学分野における若手の更なる活躍を期待したい。

(2013年12月2日原稿受付)

阿部龍蔵先生を偲んで

氷上 忍 (沖縄科技大)

阿部龍蔵先生が11月1日にご逝去されました。

阿部先生は、1930年のお生まれで、東京大学理学部物理学科を卒業後、東工大で助手をされた後、氷川丸での渡米にて1959年から2年間米国ノースウエスタン大で研究員をされました。帰国後すぐに1961年から物性研助教教授を勤められ、1966年に東京大学教養学部教授に着任されました。

日本の高度成長期に東京大学教養学部後期課程の基礎科学科が創設され、36歳の若さでその教授にられました。当時、基礎科学科の学生になった私は阿部先生の統計熱力学の授業を聞いたときにその筋道立った説明に感銘を受けました。言い間違えることがなくノート無しに分かり易いテンポで話され、学生に全部理解できた気にさせる授業でした。磁性理論を学生数人で阿部先生の居室で論文講読を行い、スピン系での相転移理論に興味を持つようになり、修士課程、博士課程とも阿部研のお世話になりました。今のように指導教官が修士の学生にテーマを与えて学会発表を目標にするのとは反対に自由に勉強できる研究室で、博士号をとるまでは鳴かず飛ばずで良いとの風潮でした。また指導教官のテーマを学生に押し付けるようなことはしないとされていました。これが幸いして、K. Wilsonの論文やF. Dysonの論文などを自由に見つけて来て当時読むことができました。

阿部先生は統計力学、物性論が専門ですが、若い頃の東工大、物性研でのお仕事として、著名なProg. Theor. Phys.に1959年に出された「Giant cluster expansion theory and its application to high temperature plasma」があります。スイカ型図形でのキュミラント展開法です。名著『統計力学』に納められています。この教科書により、グリーン関数を始めとする統計力学の手法を学

んだ学部大学院生は数多くいると思います。この教科書は恐ろしい本で、難しいところをいとも簡単に記述しています。ポーラロンをFeynmanの経路積分で扱う研究もなされました。

東大駒場に移られてから、研究テーマを当時最大の謎であった臨界現象に移され、スケーリング則や臨界点近傍での分配関数の零点の振る舞いについての仕事をなされました。臨界指数を理論的に導出することは当時理論物理学の夢でしたが、1972年にK. Wilsonとは独立に臨界指数を $1/n$ 展開により求める方法を発見され「Expansion of a critical exponent in inverse powers of spin dimensionality」(Prog. Theor. Phys.)の論文を出されました。Wilsonによる4次元からの展開と相まって、この $1/n$ 展開により臨界指数の謎がとけることになりました。臨界指数が量子電磁気学のように摂動展開(漸近展開)で求まることが分かったのです。ファイマン図形を使うFeynmanの経路積分理論を統計力学に応用した仕事です。いまでは統計力学と場の理論は密接な関係があることが分かっていますが、当時はそれほど自明ではなかったと思います。阿部先生の $1/n$ 展開は名だたる朝永先生の量子電磁気学理論と同様、純粋な国産理論でした。

阿部先生は一中、一高の出身でその時の学生時代の経験からか、特に学部1,2年生の時の教育が重要だと思われていたようで、楽しんですすんで学部の授業を行われていました。定年近くに、いままで電磁気学の講義をしたことがないので、ぜひやらせてほしいと言って、1年生の講義を引き受けられていたのを思い出します。

阿部先生は東大定年後、放送大学に10年間勤められ物理学を一般の人にも分かり易く講義もしくは説明することに熱心で、多大な努力を尽くされてきました。テレビで放送大学の先生の

講義を拝見しましたが、学部生の時に聞いた講義とまったく同じスタイルだったのに驚きました。授業が完璧に完成されていて変えようがないということでしょうか。そういえば、大学での勤務時間も正確に決まっていたし、生活リズムも変えようが無いほど完成していたように見受けられます。

名著『統計力学』のほかにも『量子力学入門』、『電気伝導』をはじめとする多数の約50冊の著書があります。特に『物理のトピラをたたこう』や『物理を楽しもう』(岩波書店)などはずっと書き続けた日記にもとづく記載があったりして、初心者のみならず専門家でも納得する記述があり、楽しい読み物です。著作のなかには、『はじめて学ぶ物理学』シリーズ5巻(他に力学、電磁気学、熱・波動・光、量子力学)があり、永年の経験を生かした要領の良い、理工系大学初学年の学生を対象とした記述になっています。阿部先生の本は朝永先生の著作にも相通じるものがあり、物理学者としての興味深い著作になっています。朝永先生も後半は論文の執筆よりは、物理学者の社会的責任を重視する著作や活動をされましたが、阿部先生も完成された物理屋として物理学を分かり易く講義ないし著作することに力をそそがれました。阿部先生は常々若い頃は研究をし、年齢がある程度いったら教育に力をそそいだ方が良いと言われていました。地元の世田谷区立小中学生を集めた物理講演会を数年にわたって毎土曜日に阿部先生がやっていて、それにお手伝いで参加させて頂く機会がありました。物理学会の仕事も副会長をはじめ、すすんで多く引き受けられ、周りの人から信頼されていました。阿部先生は『数理科学』の編集にも携わり、ご自分でも面白い読み物をいくつか書かれています。最近お体の調子が良くないとの話が伝わって来ていたところでした。阿部先生のご冥福をお祈りいたします。

(2013年12月17日原稿受付)

L. Susskind, G. Hrabovsky

The Theoretical Minimum; What You Need to Know to Start Doing Physics

Basic Books, New York, 2013, xi+238p, 22×15 cm, \$26.99 [学部・一般向]
ISBN 978-0-465-02811-5

米谷民明 (放送大学)

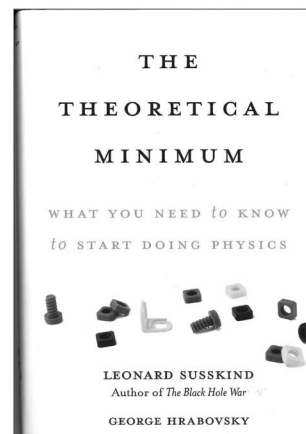
“Theoretical Minimum”はランダウスクールの教育方針として有名な標語だが、本書での意味は違う。Scientific American式解説のレベルではなく、数式も使って本当の物理を学びたいという一般人のためのミニマムだ。Susskind氏(1940年生、以下S氏と略)は弦理論、QCD、ブラックホールの量子物理における独創的業績で高名な理論物理学者である。彼はスタンフォード大学でContinuing Studies programの講義を担当して、前述のような希望を持つ社会人が多いことを認識し、本書のもとになるコースを企画した。共著者Hrabovsky氏は、それをインターネットを通じて知り本にすることを提案し、実を結んだのが本書である。

評者は学生時代からS氏の仕事の独特なスタイルに惹かれてきた。序文冒頭の「説明のために一番よい方法を考えることが、自分にとって理解を深める最良の方法だ」は、いかにも彼らしい。15年ほど前、彼の研究室に1ヶ月ほど滞在したときも、彼から私への最

初の問いかけは「弦理論から重力が出るのを式なしで説明するにはどうやればよいか」であったと記憶している。

Lecture 1は、古典力学の決定論的構造や状態の考え方を離散時間と有限自由度の例で説明する。二つのInterludeとLecture 2までは、主にベクトル空間、微分積分等の数学的準備の説明に充てられる。Lecture 3から力学の本論に入り、さらに数学の準備を交えながら、最小作用の原理、対称性と保存則、ハミルトン形式、相空間、ポアソン括弧等、標準の力学コースの解析力学に相当する内容が、ウイットに富む前置き付きで、生き生きとした口調で語られる。最後は、電磁気力を扱い、ゲージ変換の重要性を強調した後、「ここまで付き合ってきた読者はTheoretical Minimumを知ったわけです。では、量子力学で会いましょう。」で結ばれる。

評者のような理論家にとっては、本書の内容・題材はごく自然で違和感を感じない。たまたま評者自身も東大定年後、放送大学で社会人学生に教える



立場になり、2013年春に出版した力学テキストの解析力学に関する内容は、結果的に本書のミニマムとはほぼ重なり、より凝縮してはいるが、もう少し肉付けを与え、現在執筆中の量子力学に向けてHamilton-Jacobiなど、二三のテーマを加えた恰好になっている。勿論、本書の「ミニマム」は、解析力学を深く会得するには足りないが、出発点としてはまことに適切であるとともに、S氏の個性がにじみ出た魅力的な本と言える。様々な環境で物理を教える読者諸氏に参考になるだろう。なお、本書を補う題材や問の答、等がwww.madscitech.org/tmで公開されている。

(2013年8月4日原稿受付)

押山 淳, 天能精一郎, 杉野 修, 大野かおる, 今田正俊, 高田康民

計算科学3; 計算と物質

岩波書店, 東京, 2012, vii+292p, 22×16 cm, 本体3,800円(岩波講座) [専門・大学院向]
ISBN 978-4-00-011303-8

有田亮太郎 (東大院工)

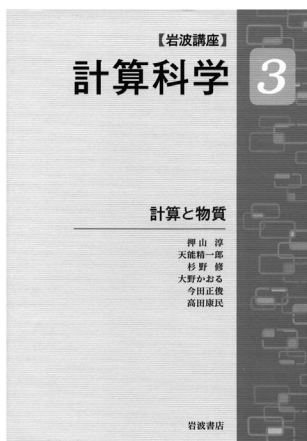
今日、計算機を用いて物質内部の原子核や電子の振る舞いを記述するアプローチは「京」コンピュータに代表される計算機自身の能力の発達と、計算科学の発展に伴ってその重要性が急速に増している。前世紀においては到底実行不可能であった高度の近似を用いた精度の高い計算、多数の原子群からなる物質に対する計算、電子遷移から

原子構造変化までの長時間シミュレーションなどが活発に行われ、精度、空間、時間の軸における目覚ましい進展によって、物質科学における新しい潮流が作りあげられている。

本書は、この計算機を活用した物質科学の最前線を解説した専門書である。方法論の背後にある基礎理論から、最近の研究例、次世代スパコンを活用す

る上での将来課題を幅広く取り扱っている。

まず、第1章において本書の目的とその構成の概要がまとめられ、第2章において電子系、格子系のハミルトニアンやグリーン関数法や経路積分法といった理論手法など、第3章以下で共通に用いられる基礎事項がまとめられている。第3章では量子化学で用いられる様々な方法論の理論的背景、計算コストと精度についてコンパクトな解説が与えられている。第4章は密度汎関数理論、時間依存密度汎関数理論が解説されている。同じ岩波講座の現代物理学叢書『固体—構造と物性』金森



順次郎ほか著に比べるとハイブリッド汎関数やフォノンを取り扱う密度汎関数摂動理論についてなど、より新しい内容が盛り込まれている。第5章は物質の動的性質を調べる計算手法が取り扱われている。カー・パリネロ法から

核の量子効果、非ボルン・オープンハイマードダイナミクスなどの最近の研究成果までがわかりやすく解説されている。第6章では、物質のより正確な電子励起スペクトルを計算するためのアプローチとしてグリーン関数の方法とその応用が詳述されている。GW近似および関連する手法についての和書は珍しく、摂動論に基づく第一原理手法の現状を整理、理解するのに役立つと考えられる。第7章では、強相関電子系を取り扱う手法として、様々な波動関数法の解説が行われている。その後、密度汎関数理論の方法と波動関数法の一つの融合のあり方として、階層的強相関第一原理手法の考え方が議論されている。この分野については英文による優れたreviewが出版されているが、和書としてはおそらく最初のもので、大

学院生の入門書としても適している。第8章では超伝導転移温度の第一原理計算が取り扱われている。3節で解説される超伝導密度汎関数理論は、和書のみならず洋書でも教科書がまだ出版されていないと思われるが、今後の超伝導研究にとって重要な役割を果たす上でも貴重な書籍になると期待される。

以上のように、本書では約300ページという限られた紙幅に、計算機を使った物質科学の最前線が数多く盛り込まれている。巻末には興味をもった読者がさらに詳しく勉強するための参考文献も適切な分量で選ばれており、大学院生から専門家まで、幅広い読者層に有益な専門書であると言える。

(2013年8月26日原稿受付)

滝川 昇

原子核物理学

朝倉書店, 東京, 2013, vii + 243p, 21 × 15 cm, 本体3,800円 (現代物理学 [基礎シリーズ] 第8巻) [大学院・学部向]

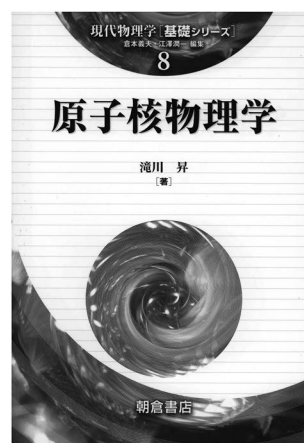
ISBN 978-4-254-13778-1

松柳 研一 (理研仁科セ)

著者は長年にわたり原子核論のフロンティアで活躍されてきた。大学・高校の物理教育にも熱心に取り組まれてきた。これらの経験が随所に活かされており、広い分野の研究者にも原子核物理学の基礎知識を更新するのに役立つだろう。前半で核力と原子核構造に関する基本的な知識を概観し、後半で非相対論的および相対論的平均場モデルを微視的に導出する道筋を丁寧に説明している。ここでは量子多体系における密度依存有効相互作用や原子核に超流動性をもたらす対相関についても書かれている。「平均場のシェル構造」と「原子核の形の変形」の関係についても平易な解説を与えている。近年、原子核と核物質に対する微視的平均場理論は密度汎関数法の観点から見直され著しい進展をみせている。このような進展を反映した入門的教科書の出版が望まれていた。本書はその期待に応えている。また、量子力学の半古典近

似を用いて原子核現象への物理的理解を深めていることも本書の魅力となっている。半古典論の基礎的事項を要約した付録もついている。核反応論は系統的には取り扱われていないが、核構造論と関係する箇所でも部分的に説明されている。

現代の原子核物理学はきわめて広範な現象を対象としているため、200ページ余りの教科書でその魅力を伝えるのは容易なことではない。学生にしっかりした基礎知識を身につけてもらうことを目的に、量子力学の初歩的な知識から出発し、議論の筋道を失わず徐々に高度な理論に進む道案内をして、その過程で現在の研究のフロンティアにも触れようと、著者はさまざまな工夫を凝らしている。豊富な演習・課題に加えて、随所に話題・余談をうまく織り込み、沢山の脚注で補足説明を与えている。更に、tea timeのコラムで核物質の相図、超重元素、超変形状態、



元素合成といった現代的なトピックスにも触れている。このような立体的な構成が本書の特長となっており、著者の講義やゼミの雰囲気伝わってくる。演習・課題にはかなり骨の折れるものも多いが、学生が数式を段階的に導けるように配慮されている。これらはゼミなどで取り組むとよい。学生は本書によって原子核の世界の基本的な現象だけでなく、量子力学や統計物理学などが原子核という有限量子多体系の記述や理解にいかんにか用いられているかを学べるだろう。

巨大共鳴、高スピン状態、ソフトモードなど集団現象のダイナミクスについて記述が少ないのは残念であるが、

200ページ余りの教科書では割愛せざるを得なかったであろう。しかし、この教科書で学んだことはより進んだ核構造・核反応論に進むためのしっかりした土台となる。最近活発に研究されている中性子過剰不安定核とハイパー

核については、[展開シリーズ]の一冊として(他の著者による)新しい教科書が準備されているようである。

(2013年8月30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。

図書リスト

最近の寄贈書

Y. V. Kovchegov, E. Levin: Quantum Chromodynamics at High Energy

Cambridge Univ. Press, New York, 2012, x+339p, 25×18 cm, \$133.00

ISBN 978-0-521-11257-4

M. Longair: Quantum Concepts in Physics; An Alternative Approach to the Understanding of Quantum Mechanics

Cambridge Univ. Press, New York, 2013, xviii+443p, 25×18 cm, \$70.00

ISBN 978-1-107-01709-2

M. Shifman: Under the Spell of Landau: When Theoretical Physics Was Shaping Destinies

World Scientific, Singapore, 2013, xxii+537p, 23×15 cm, \$68.00

ISBN 978-981-4436-56-4

G. F. Knoll 著, 神野郁夫, 木村逸郎, 阪井英次訳: 放射線計測ハンドブック(第4版)

オーム社, 東京, 2013, x+868p, 26×20 cm, 本体28,000円

ISBN 978-4-274-21449-3

マシュー・メイト著, 三矢保永, 小野右京訳: マイクロ・ナノスケールのトライボロジー; 摩擦, 潤滑, 摩耗へのボトムアップ的探究

吉岡書店, 京都, 2013, xv+375p, 21×15 cm, 本体5,800円

ISBN 978-4-8427-0362-6

リサ・ランドール著, 向山信治監訳, 塩原通緒訳: 宇宙の扉をノックする

NHK出版, 東京, 2013, 585+26p, 21×15 cm, 本体3,200円

ISBN 978-4-14-081621-9

江馬一弘: 光物理学の基礎: 物質中の光の振る舞い

朝倉書店, 東京, 2010, ix+196p, 21×15

cm, 本体3,600円(光学ライブラリー2)
ISBN 978-4-254-13732-3

小林富雄: 神の素粒子ヒッグス; 究極の方程式はどう創られたか?

日本評論社, 東京, 2013, iv+182p, 19×13 cm, 本体1,600円

ISBN 978-4-535-78725-4

佐藤文隆: 量子力学ノート: 数理と量子技術

サイエンス社, 東京, 2013, viii+156p, 26×18 cm, 本体2,238円(SGCライブラリー-102)

ISSN 4910054701234

竹内秀夫: しっかり身につく基礎から学ぶ力学

現代数学社, 京都, 2013, v+253p, 21×15 cm, 本体2,700円

ISBN 978-4-7687-0428-8

掲示板

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

は関与致しかねますのでご了解下さい。

人事公募

人事公募の標準書式(1件500字以内)

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

■横浜国立大学大学院工学研究院准教授

1. テニユアトラック准教授1名
2. 知的構造の創生部門/物理工学コース
3. 固体中スピンと光子の相互作用等を利用した量子情報の実験研究を行い, 理工学部数物・電子情報系学科物理工学EPと大学院工学府物理情報工学専攻物理工学コースの教育を行う。
4. 2014年9月1日
5. 5年, 5年以内に研究業績や教育能力等の評価によりテニユアの資格を獲得することが可能。
6. 博士号取得者
7. ○履歴書 ○業績リスト ○主要論文5編以内 ○研究業績概要(A4, 2枚以内) ○研究計画(A4, 2枚以内) ○教育に関する抱負(A4, 1枚以内) ○照会可能者2名の氏名, 連絡先 ○以

上の文書を印刷した書類1部と、一つのpdfとして記録したCD又はDVD一枚。

- 2014年3月17日(月)必着
- 240-8501横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5 横浜国立大学大学院工学府物理情報工学専攻物理学コース 梅原 出
電話 045-339-4184 izuru ynu.ac.jp
- 封筒に「テニユアトラック准教授応募書類在中」と朱書し簡易書留で送付。応募書類不返却。

■京都大学大学院理学研究科凝縮系理論准教授

- 准教授1名
- 物理学第一分野凝縮系理論グループ(川上則雄教授, 池田隆介准教授, 手塚真樹助教が在任)
- 凝縮系理論
- 決定後早期
- なし
- 博士号取得者
- 履歴書 ○業績リスト ○今迄の研究内容(A4, 2枚以内)と今後の研究・教育の抱負(A4, 2枚以内) ○主要論文別刷5編以内(コピー可) ○照会可能者2名の氏名, 連絡先
- 2014年3月17日(月)必着
- ①606-8502京都市左京区北白川追分町 京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 松田祐司
②川上則雄 電話 075-753-3768
Fax 075-753-3819
norio scphys.kyoto-u.ac.jp
- 封筒に「凝縮系理論准教授応募書類在中」と朱書し簡易書留で送付。応募書類原則不返却。

■九州大学応用力学研究所教授

- 教授1名
- 核融合力学部門
- 核融合力学に関する実験研究等に意欲と実績があり, 全国共同利用・研究, 国際共同研究にも積極的に取り組み, 先進的学術研究分野の開拓に寄与できる方。総合理工学府先端エネルギー理工学専攻の協力講座も担当。
- 決定後早期
- 5年, 再任可
- 博士号取得者
- 略歴書 ○業績書(論文(査読の有無を分類), 総説・著書等, その他(印刷中, 投稿中に分類)) ○主要論文別刷5編以内(コピー可)と引用回数等 ○外部資金(科研費等)取得状況 ○共同研究(国内と国際)実績 ○業績

説明 ○着任後の研究抱負と展望(約2,000字) ○照会可能者2名の氏名, 連絡先

- 2014年3月31日(月)正午
- 816-8580 春日市春日公園6-1 九州大学応用力学研究所 伊藤早苗
電話 092-583-7721 Fax 092-583-7723 s-iitoh riam.kyushu-u.ac.jp
- 詳細は<http://www.riam.kyushu-u.ac.jp>を必ず参照。

■筑波大学計算科学研究センター准教授

- 准教授1名
- 量子物性部門
- 計算科学の手法を用いた物性理論. 計算科学研究センターにおける, 他分野との連携を含む学際的な計算科学の推進に意欲のある方. 理工学群物理学類, 数理解析科学研究所物理学専攻における教育・研究指導を担当。
- 決定後早期
- なし(定年は筑波大学規則に従う)
- 博士号取得者
- 履歴書(写真貼付) ○業績リスト(査読論文とその他を区別) ○主要論文別刷5編(内, 4編以上は最近5年以内) ○今迄の研究概要 ○着任後の研究計画と教育に関する抱負 ○外部資金獲得状況 ○意見書2通以上, 又は照会可能者2名以上の氏名, 連絡先
- 2014年3月31日(月)必着
- ①305-8577つくば市天王台1-1-1 筑波大学計算科学研究センター 梅村雅之 umemura ccs.tsukuba.ac.jp
②矢花一浩 電話 029-853-4202 yabana nucl.ph.tsukuba.ac.jp
都倉康弘 電話 029-853-6147 tokura.yasuhiro.ft u.tsukuba.ac.jp
- 封筒に「計算科学研究センター量子物性研究部門准教授応募書類在中」と朱書し簡易書留で送付。応募書類不返却。

■京都大学基礎物理学研究所教授

- 教授1名
- 京都大学基礎物理学研究所
- 宇宙物理学(理論)
- 決定後早期
- 特に設けない(少なくとも約5年は本研究所に在職し, 約15年経過後の異動を推奨)
- 履歴書 ○発表論文リスト(主要論文5点以内に印) ○研究歴(研究成果の説明) ○就任した場合の研究計画 ○着任可能時期 ○主要論文(発表論文リストで印を付けた論文のpdf又は

アーカイブ番号を指定) ○他薦の場合は推薦書

- 2014年3月31日(月)必着
- ①ap.jinji yukawa.kyoto-u.ac.jp 推薦書のみ郵送可: 606-8502京都市左京区北白川追分町 京都大学基礎物理学研究所 佐々木 節
②同研究所 藤田裕子 電話 075-753-7009 fujita yukawa.kyoto-u.ac.jp
- e-mail件名は「宇宙物理学教授応募」と記載。詳細は<http://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp/contents/info/detail.php?NID=195>参照。

■東北大学WPI-AIMR研究員

- 准教授, 助教, ポスドク若干名
- AIMR Prassides研, ERATO 磯部縮退 π 集積プロジェクト Prassides 国際協力研
- 新規軽元素超伝導体の合成, 化学組成-結晶構造-電子特性の相関を明らかにする為の構造解析と物性評価, 及び高い T_c を持つ分子性超伝導や新規磁気応答をもたらす物質の開発に向けた構造及び組成の特定。
- 2014年4月1日以降早期
- 履歴書(写真貼付) ○業績リスト ○主要論文別刷5編 ○今迄の研究概要 ○研究に関する将来計画と抱負 ○照会可能者3名の氏名, 連絡先 ○上記書類は全て英語で作成, e-mailにて提出
- 2014年3月31日(月)(適任者決定次第募集締切)
- 980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 東北大学原子分子材料科学高等研究機構 Kosmas Prassides k.prassides wpi-aimr.tohoku.ac.jp
- 詳細は必ずhttp://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/jp/about/staff/20140116_000440.html参照。

■アイズファクトリー正社員

- データサイエンティスト2~3名
- bodais 自動進化研究所
- 数理学, 情報処理等の分野・領域で, データ解析に係る知識又は経験があり, ビジネスへの応用に関心のある方を求めている。仕事の内容: データ解析業務(顧客企業の課題解決・ビジネス施策提案を支援する為のデータ解析又はモデル構築), 研究開発業務(自社開発の解析エンジン「bodais」の新機能・精度改善に係る設計・開発・検証)の何れか。
- 要相談

5. なし(常勤)
6. 修士課程修了又は同等以上
7. ○履歴書(写真貼付) ○職務経歴書(職歴がない方は、アルバイト経験や研究内容等の資料を提示) ○外国籍の方のみ在留資格のコピー(郵送、又はe-mail添付)
8. 2014年3月31日(月)
9. 101-0054東京都千代田区神田錦町1-23 宗保第2ビル4F (株)アイズファクトリー人事担当者 電話 03-5259-9004 bs isfactory.co.jp <http://bodais.jp/company/>

■東京大学物性研究所助教

[I]

1. 助教1名
2. 物質設計評価施設(廣井研究室)
3. 新しい強相関電子系物質の開発を行う。固体化学的手法を用い、固体物理の視点を持って、物質合成、評価、物性測定を積極的に行う意欲のある若手研究者。
4. 2014年8月1日以降早期
5. 5年、再任1回可(審査有)
6. 修士課程修了、又は同等以上の能力者
7. ○推薦書 ○履歴書(略歴可) ○業績論文リスト(特に重要な論文に○印) ○主要論文別刷約3編 ○研究業績概要(約2,000字) ○研究計画及び自己アピール(約2,000字)
8. 2014年4月4日(金)
9. ①277-8581柏市柏の葉5-1-5 東京大学物性研究所総務係 電話 04-7136-3207 issp-somu.kj.u-tokyo.ac.jp
②廣井善二 電話 04-7136-3445 hiroi.issp.u-tokyo.ac.jp
10. 封筒に「物質設計評価施設(廣井研)助教応募書類在中」と朱書きし郵送、又は持参。 <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/>人事公募頁を必ず確認。

[II]

1. 助教1名
2. 附属極限コヒーレント光科学研究センター(小林研究室)
3. 本研究室では新型レーザーの研究開発及びそれによる新しい分光法の研究を行っており、光科学と物質科学の融合領域を含む幅広い研究対象を扱っている。本研究分野の経験は不問だが、小林所員と協力して新しい光科学の開拓をすることに意欲のある若手研究者を希望。
4. 決定後早期
5. 9①は[I]に同じ。
6. 博士号取得者又は同等以上の者(着任時迄の取得見込者含)

時迄の取得見込者含)

7. ○推薦書又は意見書(作成者から直送) ○履歴書(略歴可) ○業績リスト(特に重要な論文に○印) ○主要論文別刷約3編(コピー可) ○研究業績概要(約2,000字) ○研究計画書(約2,000字)
8. 2014年5月2日(金)
9. ②小林洋平 電話 04-7136-3365 yohei.issp.u-tokyo.ac.jp
10. 封筒に「極限コヒーレント光科学研究センター小林研助教応募書類在中」と朱書きし郵送の場合は書留送付。 <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/jobs/index.html/>人事公募頁を必ず確認。

[III]

1. 助教1名
2. 附属極限コヒーレント光科学研究センター軌道放射物性研究施設播磨分室(和達研)
3. 放射光施設SPring-8ビームライン(BL07LSU)において放射光軟X線を用い、強相関物質や固体表面の電子構造や磁性の研究を行う。放射光実験の経験のある方が望ましいが、これまでの専門分野は不問。
4. 7は[II]に同じ。
5. 6, 9①は[I]に同じ。
8. 2014年5月30日(金)
9. ②和達大樹 電話04-7136-3400 wadati.issp.u-tokyo.ac.jp
10. 封筒に「極限コヒーレント光科学研究センター播磨分室助教応募書類在中」又は「意見書在中」と朱書きし郵送の場合は書留送付。 <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/>人事公募頁を必ず確認。

[IV]

1. 助教1名
2. 極限環境物性研究部門(長田研究室)
3. グラフェン等の原子層物質やトポロジカル物質、有機導体等の低次元物質を対象に、強磁場・低温・高圧環境や電氣的・磁氣的・熱的手法を用いた量子物性の実験的研究を行う。大学院生の教育、実験室の維持と安全管理も分担。今迄の専門分野は不問だが、上記を積極的に行う意欲ある若手研究者を希望。
4. 7は[II]に同じ。
5. 9①は[I]に同じ。
6. 修士課程修了、又は同等以上(着任時迄の取得見込者含)
8. 2014年5月30日(金)
9. ②長田俊人 電話04-7135-1221 osada.issp.u-tokyo.ac.jp
10. 封筒に「長田研究室助教応募書類在中」と朱書きし郵送の場合は書留送付。

中」と朱書きし郵送の場合は書留送付。 <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/jobs/index.html>人事公募頁を必ず確認。

■産業技術総合研究所研究職員

[I]

1. 博士型任期付研究員、中堅型研究員
2. 情報通信・エレクトロニクス分野、当所HP参照
- 3, 5, 6, 7は当所HP参照。
4. 原則2015年4月1日
8. 2014年4月16日(水)17時必着
9. 305-8568つくば市梅園1-1-1 中央第2本部・情報棟7F(独)産業技術総合研究所 研究職員採用委員会事務局 電話 029-862-6282 Fax 029-862-6049 aist-koubo14-ml.aist.go.jp
10. 詳細は http://www.aist.go.jp/aist_j/humanres/02kenkyu/index.html 参照。特に、情報通信・エレクトロニクス分野に関する公募要領は http://www.aist.go.jp/aist_j/humanres/02kenkyu/task/2_info.html 参照。

[II]

1. 博士型任期付研究員又は中堅型研究員1名
2. 計測フロンティア研究部門マルチスケール統合解析グループ
3. 高能率の洗浄機能等多様な機能を有する微細気泡(ファインバブル)の計測、物理・化学的挙動の解明。
4. 2015年4月1日
5. 5年(任期中に定年制職員への再任用審査あり)
6. 応用物理、材料科学、プロセス工学等に関する基礎知識を有すること
7. http://www.aist.go.jp/aist_j/humanres/02kenkyu/doctor_aplly.html 参照。
- 8は[I]に同じ。
9. ①305-8568つくば市梅園1-1-1 中央第2本部・情報棟7F 産業技術総合研究所 研究職員採用委員会事務局
②463-8560名古屋守山区下志段味穴ヶ洞2266-98 産業技術総合研究所計測フロンティア研究部門マルチスケール統合解析グループ 兼松 渉 w.kanematsu.aist.go.jp
10. 封筒に「公募選考採用応募書類在中」及び「公募番号」を朱書きし送付、又は持参。

[III]

1. 研究職員 分野1~4各1名
2. ナノシステム研究部門
3. 分野1: 自己組織化能を有する機能性有機材料の開発。分野2: 柔軟性のあ

るナノ多孔性材料の開発。分野3：ソフトナノマテリアルの機能設計手法の開発。分野4：計算シミュレーションによる未利用熱活用材料の探索

- 2015年4月1日(分野4は2014年10月1日以降早期の可能性あり)
- 5年(審査を経てパーマネント化可。分野4は任期の定めのない枠も選択可)
- 博士号取得者(取得見込者含)
- http://www.aist.go.jp/aist_j/humanres/02kenkyu/doctor_aplly.html参照。
- 2014年4月16日(水)必着
- ①は[II]に同じ。
②分野1：木原秀元 電話 029-861-4442 h-kihara aist.go.jp, 分野2：依田智 電話 029-861-9425 s-yoda aist.go.jp, 分野3：長嶋雲兵 電話 029-861-3044 u.nagashima aist.go.jp, 分野4：浅井美博 電話 029-861-5373 yo-sai aist.go.jp
- 詳細はhttp://www.aist.go.jp/aist_j/humanres/02kenkyu/task/3_nanotech.html参照。

■名古屋大学大学院工学研究科教員

- 准教授又は講師1名
- エネルギー理工学専攻エネルギー材料デバイス工学講座
- 環状磁場閉じ込めプラズマ実験・解析、核融合プラズマの計算機シミュレーション、核融合炉の概念設計検討等、核融合プラズマに関わる研究を推進する。大学院及び学部での専門教育・全学教育を担当する。
- 2014年10月1日以降早期
- 特に定めない
- 博士号取得者。磁場閉じ込めプラズマ実験又はプラズマ計測の経験を有し、大学研究室での実験研究に意欲的に取り組める方を希望。
- HP参照
- 2014年4月25日(金)必着
- ①464-8603名古屋千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻 辻 義之 電話 052-789-4693 c42406a nucc.cc.nagoya-u.ac.jp
②エネルギー理工学専攻 藤田隆明 電話 052-789-4593 fujita ees.nagoya-u.ac.jp
- 詳細は<http://www.nagoya-u.ac.jp/employment/index.html>参照。

■神戸大学大学院理学研究科物理学専攻教授

- 教授1名

- 粒子物理学講座
- 最先端加速器を用いた素粒子実験物理学。アトラス実験において指導的立場で研究を推進。大学院と学部の教育と研究指導及び全学共通教育の担当。専攻運営に関する業務。
- 2015年10月1日
- なし
- 博士号取得者
- 履歴書 ○業績リスト(査読誌、総説・解説、著書、プロシーディング、その他に分類。過去5年間の各種研究費の獲得状況・招待講演等、今迄の学界における各種委員等の活動状況等) ○主要論文別刷又はコピー5編以内 ○今迄の研究業績概要(約2,000字) ○研究・教育に関する着任後の計画と抱負(約2,000字) ○推薦書2通、又は照会可能者2名の氏名、連絡先(e-mail)
- 2014年4月30日(水)
- ①657-8501神戸市灘区六高台町1-1 神戸大学大学院理学研究科物理学専攻 藤 秀樹
②同専攻 蔵重久弥 電話 078-803-5638 kurasige kobe-u.ac.jp
- 封筒に「人事公募関係書類在中」と朱書し簡易書留で送付。応募書類原則不返却。男女共同参画基本法の趣旨に則り、女性の積極的応募を歓迎。

■東北大学大学院工学研究科教員

[I]

- 教授1名
- 電子工学専攻物性工学講座電子物理学分野
- 専門分野：磁性薄膜、原子レベルでの材料制御、磁性デバイス。担当教科：電磁気学、電子物性、電気電子材料、ナノエレクトロニクス等。
- 2015年4月1日(予定)
- なし
- 応募時点での博士号取得者。専門分野に関する優れた研究業績を有すること。国籍不問だが日本語及び英語で的確に意思疎通ができ、且つ日本語で学生を指導できる能力を有すること。
- 履歴書(写真貼付) ○今迄の研究歴及びその概要 ○研究業績リスト ○主要原著論文5編の別刷又はコピー、及びそれらの概要 ○教育実績 ○今後の教育・研究に対する抱負(約1,000字) ○照会可能者2名の氏名、所属、職名、連絡先、住所、電話、Fax、e-mail

- 2014年5月9日(金)必着
- 980-8579仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-05 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻 金子俊郎 kaneko ecei.tohoku.ac.jp
- 詳細は<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/public/Electronic20140123.html>参照。

[II]

- 助教1名
- 応用物理学専攻応用物性物理学講座(数理物理学分野)
- 広い意味での統計物理学。学部教育における演習、研究室に配属された学生(学部学生、大学院生)の研究指導。専攻の運営に関する仕事。
- 決定後早期
- 7年(3年の再任可)
- 博士号取得者又は取得見込者。生体高分子等に関する数値シミュレーションの経験があり、計算機の管理ができる方が望ましい。
- 履歴書(写真貼付) ○業績リスト(研究論文、解説、特許、受賞、学会講演等) ○主要論文別刷3編以内(約500字の概要) ○今迄の研究概要(2,000字以内) ○着任後の研究・教育に対する抱負(約1,000字) ○照会可能者1名の氏名、連絡先
- 2014年5月30日(金)必着
- ①980-8579仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-05 東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻 小池洋二
②同専攻数理物理学分野 佐々木一夫 電話/Fax 022-795-7952 sasaki camp.apph.tohoku.ac.jp
- 封筒に「助教応募書類」と朱書し簡易書留で送付。

■兵庫県立大学大学院物質理学研究科助教

- 助教1名
- 物質科学専攻物質機能解析学部門電子物性学分野
- 広い意味での超伝導・磁性を中心とした物性実験。低温下での様々な物性測定に意欲のある方。学部学生実験及び学部生、大学院生の研究指導。
- 2014年10月1日
- 5年(再任は原則1回、再任後の任期も5年)
- 博士号取得者
- 履歴書 ○研究業績リスト ○主要論文(約3編) ○今迄の研究概要と今後の研究に対する抱負(約2,000字) ○科研費等、競争的研究費の取得状況 ○推薦書又は照会者2名の氏名、連絡

先

- 2014年5月12日(月)
- ①678-1297兵庫県赤穂郡上郡町光都3-2-1 兵庫県立大学大学院物質理学研究科長 高橋慶紀 経営部総務課気付 電話0791-58-0101
- ②同研究科電子物性学分野 住山昭彦 電話0791-58-0143 sumiyama sci.u-hyogo.ac.jp
- 封筒に「電子物性学分野助教応募書類 在中」と朱書き簡易書留で送付。応募書類不返却。詳細は<http://www.sci.u-hyogo.ac.jp/staff/img/koubo20140129.pdf> 参照。

■早稲田大学先進理工学部教員

- 教授、准教授又は専任講師計2名
- 応用物理学科
- 広い意味での物質に関する実験研究分野。計測手法の開拓含む。大学院(凝縮系物理学部門)も兼任。当学科は講座制ではなく、各自独立して研究室を運営。教育・研究両面で物理学科と密接に協力しており、先進理工学研究科の専攻は合同で構成。
- 2015年4月1日
- なし
- 博士号取得者
- 履歴書(写真貼付) ○研究業績リスト ○主要論文別刷5編以内 ○外部資金獲得実績 ○研究歴と研究概要 ○着任後の研究計画と教育への抱負 ○照会可能者2名の氏名、連絡先 ○書類は全て2部ずつ(コピー可)
- 2014年5月16日(金) 必着
- ①169-8555東京都新宿区大久保3-4-1 早稲田大学先進理工学部応用物理学科 小松進一
- ②同上又は同学科 多辺由佳 koubo list.waseda.jp <http://www.phys.waseda.ac.jp/cat/recruitment>
- 封筒に「公募書類在中」と朱書き簡易書留で送付。応募書類不返却。

■大分大学工学部教員

- 教授又は准教授1名
- 電気電子工学科電磁ダイナミクス講座 電気電子工学科電気コース
- 広い意味での物理学もしくは応用物理学(実験、理論のどちらでも可)。工学部共通物理系専門基礎科目(力学、基礎電磁気学、物理学基礎、物理学実験等)を担当することが主な教育任務。教養教育科目(物理学への招待)も担当。
- 2014年10月1日以降早期

- 特になし
- 博士号取得者、工学部の物理系専門基礎教育に主体的に取り組める方、物理分野を専門として幅広い研究活動を実施できる方。教授の場合は博士後期課程の担当できる方、教育及び研究に対し熱意のある方
- <http://www2.cc.oita-u.ac.jp/eng/koubo.html> 参照。
- 2014年5月30日(金)必着
- 870-1192大分市旦那原700番地 大分大学工学部総務係 酒井智子

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)

■No. 20-13 講習会「粒子法・格子ボルツマン法の基礎と応用」

主催 自動車技術会
日時 2014年3月13日(木) 9:55~17:25
場所 工学院大学アーバンテックホール (163-8677東京都新宿区西新宿1-24-2)
内容 テーマ:粒子法・格子ボルツマン法の基礎と応用。自動車開発における複雑な流体現象へのCFDの適用を有効活用する為の基礎理論と最新の適用事例について講習を行う。プログラム:http://www.jsae.or.jp/sympo/2013/20_13.pdf参照。
定員 200名
参加費 22,050円
申込 <https://tech.jsae.or.jp/evententry/index.aspx?id=20-13>より
参加申込締切 2014年3月6日(木)(定員に満たない場合は申込締切日以降もオンライン参加登録可能だが、キャンセルされる場合はキャンセル料が発生)
連絡先 公益社団法人自動車技術会 育成・イベントグループ 福田
電話 03-3262-8214 Fax 03-3261-2204
[sympo jsae.or.jp http://www.jsae.or.jp/sympo/2013/scdl.php](http://www.jsae.or.jp/sympo/2013/scdl.php)

■2013年度 高専女子フォーラム in 四国

主催 国立高等専門学校機構
後援 日本物理学会
日時 2014年3月21日(金) 13:45~16:45
場所 アルファあなぶきホール小ホール棟 (760-0030高松市玉藻町9-10 電話087-823-3131)
内容 企業関係者を対象にしたセッション。13:45~15:15[企業発表]発表希望企業の高専女子学生・高専教員に対するポスタープレゼンテーション。15:15~16:30[学生発表]企業関係者を対象とした高専女子学生によるポスタープレゼンテーション。16:30~16:45[名刺交換会・交流会]参加企業者と高専教員の名刺交換会
定員 なし
参加費 無料
連絡先 769-1192三豊市詫間町香田551 香川高等専門学校総務課庶務係 畑 典子 電話 0875-83-8506 syomu_da.kagawa-nct.ac.jp <http://www.kosen-k.go.jp/kosengirl/jyoshi-forum/>
その他 企業関係者の入場は自由。

■日本磁気学会第196回研究会「有機/分子磁性材料の現状と今後の展開」

主催 日本磁気学会
日時 2014年5月16日(金) 13:00~16:40
場所 中央大学駿河台記念館320号室(東京都千代田区神田駿河台3-11-5)
内容 有機/分子磁性材料は分子レベルで材料設計が可能で、磁性体の設計自由度が高く、様々な機能を付与した磁性体について国内外で精力的に研究が行われている。現状では有機/分子磁性材料は有機エレクトロニクスやスピニエレクトロニクスへの展開を模索している段階。背景には、有機/分子磁性材料に関する研究成果が他分野の研究者に未だ浸透しておらず、シーズとニーズが融合できていないことが一因と考えられる。有機/分子磁性材料の基礎から応用に至る幅広い研究内容を第一線で活躍する5人の講演者の発表、及び今後の有機磁性材料の展望を議論する機会となることを企図。
定員 60名
参加費 3,000円(資料代込)、学生無料、資料代のみ1,000円
申込 当日受付
連絡先 東京都千代田区神田小川町2-8 日本磁気学会事務局 杉村
電話 03-5281-0106 msj bj.wakwak.com <http://www.magnetics.jp/msj/seminar/>

topical/196.html

■量子スピン系の物理

日時 2014年5月17日(土) 13:00~17:00
場所 中央大学理工学部3号館3階3300号
室(112-8551東京都文京区春日1-13-27
電話03-3817-1711)

内容 量子スピン系の最近の話題について
講演, 及び今迄を振り返るとともに今後の
展望を議論する. 講演者: 佐藤正寛
(青山学院大理工), 田中秀数(東工大理
工), 押川正毅(東大物性研), 菊池彦光
(福井大工), 岡本清美(東工大理工)

申込 不要(聴講歓迎)

連絡先 東京都文京区春日1-13-27 中央
大学理工学部物理学科 田口善弘
電話 03-3817-1791 Fax 03-3817-1792
tag granular.com

その他 詳細は [http://cmt.spring8.or.jp/
workshop/workshop-20140517.shtml](http://cmt.spring8.or.jp/workshop/workshop-20140517.shtml) 参照.

■食品ハイドロコロイドセミナー2014~初 心者のためのハイドロコロイド研究法の 解説~

主催 食品ハイドロコロイド研究会
協賛 日本物理学会, 他

日時 2014年5月22日(木)13:00~17:00
(受付12:15~)

場所 東京海洋大学楽水会館鈴木ホール
(<http://www.kaiyodai.ac.jp/info/37/38.html>)

内容 四方俊幸<東京農工大院農>やさし
いレオロジー入門, 杉本清二<サーモフ
ィッシャーサイエンス>新基準に対応す
るとろみの粘度測定, 熊谷仁<共立女子
大家政>やさしい熱分析入門, 西成勝好
<中国湖北工業大>食品分野における熱
分析の応用, 総合討論.

定員 先着60名

参加費 8,000円, 学生3,000円(「第25回
食品ハイドロコロイドシンポジウム」参
加者は割引有)

申込 <http://food.hydrocolloids.org/sympo/>
で必要事項を記入

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部食品生産科学科
食品ハイドロコロイド研究会世話人 松
川真吾 sympo food.hydrocolloids.org
<http://food.hydrocolloids.org/>

■第25回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
協賛 日本物理学会, 他

日時 2014年5月23日(金)9:30~17:10
(受付8:30~)

場所 東京海洋大学楽水会館鈴木ホール
(<http://www.kaiyodai.ac.jp/info/37/38.html>)

内容 「高分子物質の粘性, 弾性, 粘弾性」,
「「コク味」ペプチド, γ -Glu-Val-Glyの呈
味特性」, 「「コク」, 「コク味」について」,
「異種筋肉タンパク混合ゲル」, 「オキア
ミからカニ風味かまぼこ」, 「おいしいか
まぼこを作るための科学」, 「流体力学の
立場から嚙下のシミュレーション」, 「医
療現場から見た介護食」, 他

定員 先着95名

参加費 8,000円, 学生3,000円(懇親会費
5,000円)

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部食品生産科学科
食品ハイドロコロイド研究会世話人
松川真吾 sympo food.hydrocolloids.org
<http://food.hydrocolloids.org/>

■第31回強誘電体応用会議

主催 強誘電体応用会議実行委員会

協賛 日本物理学会

日時 2014年5月28日(水)~31日(土)

場所 コーピン京都(604-8113京都市中
京区柳馬場蛸薬師上ル井筒町411)

内容 強誘電体応用に関する総合的討議の
場として第31回会議を開催。「新しい現
象及び測定法」「材料の製法, 特性及び
評価(単結晶, セラミックス, アモルフ
ァス, 薄膜, 液晶, コンポジット等)」「応
用とデバイス(キャパシタ, 高周波誘電
体, センサ, PTCサーミスタ, 圧電応用
[表面波デバイス, フィルタ, アクチュ
エータ, 超音波モータ等], 光学応用,
焦電応用, 記憶・記録デバイス, 表示デ
バイス等)」

参加費 事前(4月30日迄に送金): 15,000
円, 学生5,000円. 当日: 18,000円, 学
生5,000円

申込 <http://fma.ceram.titech.ac.jp> より参加
申込用紙をダウンロードしe-mailにて

参加申込締切 2014年5月9日(金)

連絡先 152-8552東京都目黒区大岡山2-
12-1 東京工業大学大学院理工学研究科
強誘電体応用会議事務局 鶴見敬章
fma ceram.titech.ac.jp

■The 19th International Conference on Ultrafast Phenomena

主催 強光子場科学研究懇談会, 東京大学
大学院理学系研究科附属超高速強光子場
科学研究センター

協賛 日本物理学会

日時 2014年7月7日(月)~11日(金)

場所 沖縄コンベンションセンター(901-

2224宜野湾市真志喜4-3-1

電話 098-898-3000)

内容 ピコ秒, フェムト秒, アト秒領域の
超高速現象に関する先端研究をテーマと
する国際会議シリーズの第19回目. 物
理学, 化学, 生物学, 物質科学, 電子工
学, 医学の分野の学際的国際会議.

定員 なし

参加費 50,000円(事前40,000円), 学生
30,000円(事前25,000円)

事前参加申込締切 2014年5月31日(土)(予
定)

連絡先 113-0033東京都文京区本郷7-3-1
東京大学大学院理学系研究科化学専攻
山内 薫 電話 03-5841-4334 Fax 03-
5689-7347 up2014 chem.s.u-tokyo.ac.jp
<http://up2014.org/>

その他

助成公募の標準様式 (1件500字以内)

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

その他 ○標題 ○内容 ○連絡先

■物性グループ会員資格の更新と新規加入 のお願い

内容 物性グループの会員資格の更新
(2014年4月~2017年3月)のお願い. 新
規登録も受付開始(詳細は物性グループ
HP参照). 物性グループはコミュニティー
の意見を反映する為に大きな役割を担
い, 日本学術会議や関係学会との連携も
強めている. 約300を超える研究グル
ープが参加. 登録後, 研究グループ単位で
選出される物性委員は, 共同利用研究所
の各種委員や物性委員会幹事の選挙等,
重要な事柄に参画頂く. 物性グループの
拡大物性委員会は年2回開催. 2014年春
の拡大物性委員会は, 日本物理学会第
69回年次大会2日目(3月28日)にAC会
場(18:00~20:00)で開催.

問合せ先 599-8531堺市中区学園町1-1
大阪府立大学工学研究科電子物理工学分
野内物性グループ事務局 Bussei_Gr_
Office pe.osakafu-u.ac.jp [http://www.
pe.osakafu-u.ac.jp/busseiG/](http://www.pe.osakafu-u.ac.jp/busseiG/)

■会員専用ページ：ユーザ名とパスワード

本会 web site (http://www.jps.or.jp/) の会員専用ページには、各種変更届、刊行委員会報告、過去の大会プログラム等の情報を掲載しています。アクセスするためのユーザ名とパスワード(今月と来月

分)は次の通りです。(英数字は半角入力, 大文字小文字は区別されます。)

3月ユーザ名 : 14Mar

パスワード: Charles482

4月ユーザ名 : 14Apr

パスワード: Gustav837

行事予定

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

開催月日	名 称	開催地	会誌巻号または世話人
2014年			
3/5~7	MANA Int. Symp. 2014	つくば市(茨城)	68-11
3/13	No. 20-13 講習会「粒子法・格子ボルツマン法の基礎と応用」	東京	69-3
3/14	共用・計測合同シンポジウム2014~先端計測の共用化によるイノベーション~	つくば市(茨城)	69-2
3/14	13-6 ポリマーフロンティア21	東京	69-2
3/17	日本磁気学会第195回研究会/第29回強磁場応用専門研究会「磁場が明らかにする科学現象と材料創製」	東京	69-2
3/21	2013年度 高専女子フォーラム in 四国	高松市	69-3
3/21~29	スプリング・サイエンスキャンプ2014	日本各地	69-1
3/27~30	日本物理学会第69回年次大会(東海大学)	平塚市(神奈川)	日本物理学会
4/4~7	The 10th Int. Conf. of Computational Methods in Sciences and Engineering 2014	Athens (Greece)	68-11
5/12~13	第30回量子情報技術研究会(QIT30)	名古屋市	69-2
5/14~17	OIST国際ワークショップ「新規な量子物質と量子相」(NQMP2014)	恩納村(沖縄)	69-2
5/16	日本磁気学会第196回研究会「有機/分子磁性材料の現状と今後の展開」	東京	69-3
5/17	量子スピン系の物理	東京	69-3
5/22	食品ハイドロコロイドセミナー2014~初心者のためのハイドロコロイド研究法の解説~	東京	69-3
5/22~23	第31回希土類討論会	東京	68-12
5/23	第25回食品ハイドロコロイドシンポジウム	東京	69-3
5/28~31	第31回強誘電体応用会議	京都市	69-3
7/7~11	The 19th Int. Conf. on Ultrafast Phenomena	宜野湾市(沖縄)	69-3
9/7~10	日本物理学会2014年秋季大会(中部大学)(物性)	春日井市(愛知)	日本物理学会
9/18~21	日本物理学会2014年秋季大会(佐賀大学)(素粒子, 宇宙線, 宇宙物理)	佐賀市	日本物理学会
10/8~11	日本物理学会2014年秋季大会(ハワイ)(核物理)	ハワイ島	日本物理学会 ・アメリカ物理学会合同
11/2~6	The 7th Int. Symp. on Surface Science	松江市	68-4
2015年			
3/21~24	日本物理学会第70回年次大会(早稲田大学)	東京	日本物理学会
9/16~19	日本物理学会2015年秋季大会(関西大学)(物性)	吹田市(大阪)	日本物理学会
9/25~28	日本物理学会2015年秋季大会(大阪市立大学)(素粒子, 核物理, 宇宙線, 宇宙物理)	大阪市	日本物理学会

編集後記

~高校の恩師はおっしゃった。「間違えるのはしゃーない、じゃけん次元だけは合わせといてんよ」そして私は院生相手のゼミで問う。「その式の次元はなに？」やれやれ、毎回同じ質問されてるのに、そんな鳩が豆鉄砲をくったような顔して黙り込

むなよ。大学の恩師はおっしゃった。「全ての質問に即答せよ。けっして相手を待たせてはいけない。わかりませんが立派な回答だ」そして私は回答をうながす、彼らは沈黙を選ぶ。やれやれ、最近の連中は一恩師たちは毎年同じ言葉を粘り強く繰り返しておられたのを、単に自分はある年にだけ聞いたにすぎないという当然のことに気づ

くのに、どれだけの時間がかかったことだろう。粘り強い繰り返しが教育なのであり、やれやれとはなんたる勘違い。実際一緒に研究を進めていくと、修士課程を終えるころにはみな見違えるようになり、就職後に久しぶりに忘年会で顔をあわせたときなどには、どう見ても自分よりも立派な彼らの姿に驚き、感動する。そしてビール

をあおりながら、プレゼン練習で蜂の巣にされたのは今から思えば本当によかったです、と言われて肝を冷やしつつ、この世の中がどのように動いているのかについて、今度は彼らからこんこんと教えていただくのである。粘り強い繰り返し—

2013年のクリスマスの余韻は、舞い込んできた編集後記の執筆命令によって粉碎された(事務局注:前々からわかってたこと)。何を書けばよいのか何を書いてはいけないのか、悩めども祈れどもちっとも筆は進まない。ふだん人には厚かましくも記事を催促しておきながら、現金なものである。巻頭言はどなた…ゴクリ。帰省して正月を迎えても不安でおせちがのどを通らない(妻注:好き嫌い多すぎ)。母は「痩せたねえ、仕事たいへんなんじゃろねえ」とひとり勝手に涙ぐみ(執筆者注: $\dot{M} = +2.1 \text{ kg/yr}$ in 2013~2014), ますます私をげんなりさせる。4歳のやんちゃな姪はパワー全開で9歳の内気な娘にからみ続け(娘注:すごく疲れちゃった)。実家はカオス状態でもとて落ち着いてはいられない。し、締め切りが—

窮地の私を救ってくれたのは、生後6ヶ月のもう一人の姪であった。その純真な寝顔を眺めているうちにやおら反省モードに

入った私は、まず口先だけの反省を文章にしてみた。「高校の恩師は…」よしよし最初の1/3くらいにはなりそう。そして目を覚ました姪のかわいい笑い声で私は完全に生気を取り戻し、こたつでテレビを見ることにした。「一流芸能人」がワインの味ききや銘品の見立てをしている。間違えると「二流、三流」と次々に格付けを下げられていく仕組みで、人気の正月番組らしく毎年同じようなことをやっている。そうそう繰り返しのだよ明智君、などと意味不明なことをつぶやきながら、これを「一流物理学者」で企画するならどういう見立てをさせるのがいいか、という恐ろしすぎることを考え始めたらもう止まらない。よしこれだ、優ちゃんありがとう、おかげでおじさんエンジンかかったよ!…しかしこの後にあふれ出た素晴らしいアイデアの数々を披露するスペースがなんとここでなくなってしまおうとは、残念の至りと言うほかない。

リニューアルされた2014年デザインの会誌が手元に届いた。編集委員というのは大変ながらやりがいのあるもので、月例の編集委員会への参加は仕事にいいリズムを与えてくれている。この駄文は本当に載せてもらえるなら3月号か。第一線で活躍しておられるお忙しい先生方でも、記事を依

頼すると快く(?)引き受けてくださる。会誌への信頼と期待の大きさを思いつつ、来年度も頑張ろう。

常定芳基 (<)

編集委員

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

(支部委員)

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

新著紹介小委員会委員

多田 司(委員長), 雨宮 高久,
大江純一郎, 桂 法称, 加藤 進,
小芦 雅斗, 合田 義弘, 竹延 大志,
中川 賢一, 平野 哲文, 宮原ひろ子,
村山 能宏, 吉越 貴紀, 渡邊 紳一

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

(参照: 本誌 47 (1992) 4 号会告)

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

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

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

アメリカ合衆国における複製については、下記 CCC
に連絡して下さい。

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

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

日本物理学会誌 第69巻 第3号 (平成26年3月5日発行) 通巻772号

©日本物理学会 2014

Butsuri

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

白 勢 祐 次 郎

印刷所 〒169-0075 東京都新宿区高田馬場 3-8-8

株式会社 国 際 文 献 社

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

一般社団法人 日 本 物 理 学 会

電話 03-3816-6201 Fax 03-3816-6208

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

本誌に掲載された寄稿等の著作権は一般社団法人日本物理学会が所有しています。