

「物性物理学と素粒子物理学の対話」 IPMU フォーカス・ウィークの報告

青木秀夫： 東京大学大学院理学系研究科

113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1 (e-mail: aoki@phys.s.u-tokyo.ac.jp)

大栗博司： カリフォルニア工科大学* (脚注*：東京大学数物連携宇宙研究機構兼任)

Pasadena, CA 91125, USA (email: ooguri@theory.caltech.edu)

二つの世界が会うことで、新しい展望が開けることがある。物理学は素粒子や物性などの分野に分けられ、その各々で特有なアイデアや技法が育まれているが、そうした成果が他の分野に思いがけなく応用され、新たに花開くことも多い。素粒子論と物性理論には場の量子論という共通の言語があり、その連携の歴史は長く豊富である。特に、対称性とその破れ、トポロジー、可積分性の概念、くりこみ群などは、両分野で重要な役割を果たしてきた。最近では、素粒子の究極の統一理論を目指す超弦理論の成果である AdS/CFT 対応（後述）を、物性物理学に適用するという試みもなされている。

素粒子論を専攻とする大栗は、21 世紀 COE プログラム「極限量子系とその対称性」の客員教授として 2007 年春に東京大学に滞在した折に、物性理論を専攻とする青木と『固体物理』誌上で対談をした¹⁾。そこでは、物性物理学の多様な世界と素粒子物理学の統一への志向との交流を通してどのような物理学的世界像が構築されるか、また将来どのような発展が期待されるかが語り合われた。

この対談とその後の交流を背景として、青木と大栗は、物性理論と素粒子論のコミュニティーを結ぶシンポジウム「物性物理学と素粒子物理学の対話 (Condensed Matter Physics Meets High Energy Physics)」を企画した。大栗が主任研究員である東京大学の数物連携宇宙研究機構 (Institute for the Physics and Mathematics of the Universe; 略称 IPMU)²⁾では、村山斉機構長の発案によるフォーカス・ウィークと呼ばれる国際研究集会のシリーズがあり、その一環として開催されることになった。青木と大栗を組織委員長とし、押川正毅（物性；東京大学物性研究所）、高柳匡（素粒子；IPMU）と笠真生（物性；カリフォルニア大学バークレー校）の各氏が組織委員会に加わり、柏キャンパスで IPMU に隣接する物性研究所にも協賛を頂くことができた。会議の目的は、物性理論におけるトポロジカルな秩序、量子臨界性、グラフェンなどの最先端の話題と、超弦理論とともに発展してきた共形場の理論や AdS/CFT 対応を中心に、共通の問題を探り最新の技法を共有することで、物性と素粒子の境界領域における新たな連携や発展を促進することであった。会議のホームページは

<http://www.theory.caltech.edu/~ooguri/CMP-HEP/CMP-HEP.htm> に置かれている。

会議は組織委員会が期待した以上の盛況となり、参加者は約 200 名、そのうち約 40 名は海外 12 カ国からの出席であった。招待講演者は、物性理論からは Eduardo Fradkin, 藤本聡, Alexei Kitaev, Nicholas Read, Xiao-Gang Wen, Shoucheng Zhang, 素粒子論からは Sean Hartnoll, Shamit Kachru, Hong Liu, Shiraz Minwalla, Volker Schomerus, Dam Son の皆さんである。このように錚々たる招待講演者が短期間で招聘できたことと、参加者多数で活発な議論が交わされたことは、この学際領域の成果と将来の発展への期待の現われであろう。一般参加者による公募講演やポスターによる発表も盛況であった。

今回の会議で大きな比重を占めたテーマの一つである AdS/CFT 対応とは、 $(n+1)$ 次元の反ドジッター (AdS) と呼ばれる空間上の量子重力理論が、1次元の低い n 次元の共形不変な場の量子論 (CFT) と等価であるとの主張である³⁾。量子重力のすべての現象は、空間の果てにおいたスクリーンに投影することができ、その上の重力を含まない場の理論によって記述できるという考え方は、ホログラフィー原理と呼ばれ、AdS/CFT 対応はその具体的な例となっている。ホログラフィーというのは光学の用語で、3次元の立体像を2次元面上の干渉縞に記録し再現する方法のことであるが、超弦理論ではこれを借用して、異なる次元の理論の結びつきを表しているのである。CFT 側は重力を含まないのに、AdS 側は重力理論であり、しかも異なる次元の理論を等価とするこの奇妙な対応関係は、超弦理論の枠内では精密な理論的検証がなされている。

今回の会議では、物性理論に現れる量子臨界現象や量子流体の強結合問題を、AdS/CFT 対応を使って重力の問題に翻訳して解決しようと言うアプローチが焦点の一つとなった。通常の相転移が有限温度での熱揺らぎに支配されるのに対して、量子臨界現象は絶対零度で起きる量子揺らぎが支配するような相転移に関わる。このような相転移現象は、従来のランダウのパラダイムでは捕らえられず、AdS/CFT 対応によってその理解が進むのではないかと期待されている。この方面の開拓者である Son をはじめ、Hartnoll, Kachru, Liu, Minwalla などの気鋭の研究者が招待講演を行った。

物性理論からの話題としては、トポロジカルな絶縁体や超伝導体の理論などが中心であった。トポロジカルな絶縁体とは、トポロジカルな性質を持つ秩序変数や量子数で特徴付けられる状態で、バルクでは励起スペクトルにギャップがあるために絶縁状態、系の端では伝導状態になっている。量子ホール系が典型であるが、最近では無磁場中での量子スピン・ホール系などが加わっている。このような物質相の理解には共形場の理論が活用でき、素粒子論との関連も深い。この方面では、藤本、Kitaev, Read, Wen, Zhang といった世界的権威が集結した。会議の初日には青木が場の量子論が活躍する様々な物性現象を展望する講演を行った。超弦理論の研究者である Schomerus による共形場理論の厳密解の講演は、物性物理学者にも刺激を与えた。会議の最後に Fradkin が講演を

したエンタングルメント・エントロピーも、物性と素粒子双方で興味をもたれている話題であり、高柳の講演でも AdS/CFT 対応による解析が議論された。

このようなユニークな学際的会合なので、交流を促進する企画として、招待講演者のうちの4名には、通常の講演のほかに素粒子と物性の両方が聞いて面白い入門講演をお願いし、これも好評であった。また、参加者のインフォーマルな議論を促すために、2時間の昼休みのほかに、1日3回のお茶の時間を設けた。IPMU の研究棟は本年の1月に竣工されたばかりで、今回のフォーカス・ウィークはそのお披露目ともなった。研究者の交流を第一に考えた建物は好評で、3階の大部分を使った藤原交流広場では参加者が夜更けまで熱心に議論をする様子が見られた。

未解決問題集—ヒルベルトに倣って

両分野が出会う折角の機会なので、共通する問題、あるいは素粒子と物性が相互に提示したい問題を議論するためのパネル討論会を行った。数学の会議ではこのような問題集の作成はよく行われており、1900年にパリで開かれた第2回国際数学者会議でヒルベルトが発表した数学の未解決問題集は特に有名である。今回は、問題を提起するほかに、問題の意義や解決の方向を議論することで、2つの分野の交流をさらに深めようというのも目的であった。このパネル討論会も予想以上に盛り上がった。以下は、取り上げられた問題のうちの5つを整理したものである。



1. 物性物理学のトポロジカルな相を分類できるか？

トポロジカルな相は、量子ホール効果やスピン・ホール効果など(2+1)次元の理論で重要である。状態が系の局所的性質によらずトポロジーのみに依存し、境界では端状態という局所的な励起を持つことが、「トポロジカルな」と呼ばれる所以である。このような相は、場の理論の赤外極限といった定番の方法で記述できるとは限らない。これらを分類し、全貌を俯瞰する方法はあるか。トポロジカルな性質を反映した一般座標不変性を持つ場の理論を使った分類は考えられるか。

非可換（ノン・アーベリアン）統計に従う粒子の発現も(2+1)次元に特有な現象である。分数量子ホール効果のほかに、このような粒子が現れる物性現象はあるか。

複数のペアリング(例えば ρ_x, ρ_y)を持ちうる超伝導状態に対して、時間反転対称性が自発的に破れるような組み合わせ(例えば $\rho_x + i\rho_y$)を考えることができる。実際に Sr_2RuO_4 超伝導体、分数量子ホール状態、超流動³He の相などで実現していると考えられている。このような時間反転を破ったペアリングをもつ超伝導を記述するトポロジカルな場の量子論は存在するか。

さらに、(3+1)次元のトポロジカルな相は、低次元のような豊富な構造を持つか。

2. 物性現象を使って AdS/CFT 対応を検証できるか？

AdS/CFT 対応を定量的に検証できる物性現象の例はあるか。物性現象への応用のためには、この対応がどこまで一般的に成り立つかを把握することが重要である。現在知られている AdS/CFT 対応の例では、AdS の側の量子効果が無視できる極限（古典極限）は、CFT の側のゲージ群の次元が大きくなる「ラージ N 」の極限に対応する。重力理論によるホログラフィックな記述が存在するための一般的な条件は何か。

ホーキングの指摘したブラックホールの情報問題を、物性の問題に焼きなおして解決することはできるか。

3. モット絶縁体を場の理論を使って記述できるか？

モット絶縁体を格子模型でなく場の理論で記述できるか。AdS/CFT 対応のようなホログラフィックな記述でモット絶縁体を特徴付けることができるか。また、不規則性のあるときのモット転移や量子ホール転移をどう記述するか。

4. 「負符号問題」が示唆する物理は何か？

負符号問題とは、量子モンテカルロ法による経路積分の計算において、フェルミオ

ンの統計性による負の項の寄与によって計算精度が悪化する現象を指す。超伝導など物理的に面白い相に近づくと、これが深刻になることが多い。これは計算技術上の問題なのか、それとも一般に量子揺らぎの増大と関連する物理的な効果か。エンタングルメント・エントロピーとは関連するか。

負符号問題は NP 困難であることが知られているので、量子コンピュータをもってしても解決できないかもしれない⁴⁾。負符号問題を持つ量子系の基底状態を定めるという限定された問題は、量子コンピュータで解くことができるか。

5. 超弦理論ではラグランジアンが存在しない場の理論の例が知られている。このようなモデルは物性には現れるか？

超弦理論の6つの化身の1つである M 理論には、基本的な自由度として、空間2次元に広がった M2 ブレーンと空間5次元に広がった M5 ブレーンがある。M2 ブレーンの集団座標は(2+1)次元の場の理論であり、これについては多くの場合にラグランジアンによる記述が存在することが最近の研究によって明らかになった。しかし、M5 ブレーンの集団座標のなす(5+1)次元の場の理論は、本質的に非局所場の理論であり、通常場の理論の意味でのラグランジアンは存在しないと考えられている。さらに、M5 ブレーン上の非局所場の理論を、2次元のリーマン面を使ってコンパクト化すると、(3+1)次元のミンコフスキー空間における様々な共形場の理論が構成できる。その多くはラグランジアンからは説明できない不思議な性質を持ち、活発な研究の対象と成っている。

一方、物性モデルのトポロジカルな相のなかには、「ひも」のように空間1次元に拡がりを持つ励起が現れる場合があり、このひもの網目 (string net) の凝縮によってトポロジカルな相を分類するという試みが Wen らによって提唱されている。このようなモデルは、ラグランジアンを使った場の理論で有効に記述できるか。

参加者からは、普段交わることのないコミュニティーの人々と語りあえ、これまで知らなかったことをたくさん学べた、という感想を多くいただいた。我々組織委員にとっても、新しい分野を学ぶ場となり、物理の深さや多様性ととも、基礎的な問題の共通性を実感する機会でもあった。このような出会いが今後も様々な形で行われ、物性理論と素粒子論の交流から多彩な共同研究の成果があがることを期待して筆をおきたい。



図 2 : IPMU の藤原交流広場における集合写真

非会員著者の紹介： 著者の一人である大栗博司氏は1962年生まれ。1984年京都大学理学部卒。同大学院修士課程終了後、東京大学理学部助手。1989年東京大学理学博士。プリンストン高等研究所研究員、シカゴ大学助教授、京都大学助教授、カリフォルニア大学バークレイ校教授を経て、現在カリフォルニア工科大学フレッド・カブリ冠教授。東京大学数物連携宇宙研究機構主任研究員兼任。専門は素粒子論。アメリカ数学会アイゼンバッド賞（2008年）、フンボルト賞（2009年）、仁科記念賞（2009年）を受賞。

- 1) 青木秀夫、大栗博司：「物性と素粒子 - 多様性と統一の物理的世界像の対話」、固体物理 **42**, 505 (2007).
- 2) 村山斉：「数物連携宇宙研究機構(IPMU)」日本物理学会誌 **63**, 867 (2008).
- 3) 標準的な解説論文としては、O. Aharony, J. Maldacena, S. S. Gubser, H. Ooguri and Y. Oz, Phys. Rep. **323**, 183 (2000).
- 4) 素因数分解が NP 困難であるかどうかは知られていない。