

# 「熱場の量子論とその応用」研究会の歩み

稲垣知宏<sup>1</sup>

広島大学情報メディア教育研究センター

本研究会は、「有限温度・有限密度の場の量子論とその応用」という名称のモレキュール型研究会として1994年8月にスタートした。その後、1996年度に公募型研究会となり、1997年度から「熱場の量子論とその応用」という現在の名称の研究会となり、2013年度の研究会で19回目を迎える。本報告では「熱場の量子論とその応用」研究会設立当初の様子について簡単にレビューする。本研究の設立とその後の運営に最も貢献された一人が中川寿夫氏である。本報告の最後に、研究会開催を前に訃報の届いた中川寿夫氏のグループで進められた研究について紹介する。

## 1 本研究会の歩み

「熱場の量子論とその応用」研究会は、1994年8月に開催されたモレキュール型研究会「有限温度・有限密度の場の量子論とその応用」を前身とする。当時、RHIC及びLHCでの重イオン衝突実験が計画される中、牲川章氏を代表世話人として、関連する研究者が集まった研究会は、クォーク・グルオンプラズマ相の熱場の理論に基づく組織的且つ系統的な研究に向けた土壌作りを目指していた。著者は大学院生であったが、有限温度・密度相構造の有効模型を用いた取り扱いについて報告させていただいた。

翌年1995年は、二回目のモレキュール型の研究会が中川寿夫氏、横田浩氏を代表世話人として開催された。残念ながら著者は二回目の研究会には参加していないが、当時のプログラムを確認すると、松本秀樹氏が、直前に大連で開催された第4回国際会議「Thermal Field Theory and Their Application」について報告している。「熱場の量子論とその応用」研究会のタイトルは、この国際会議のタイトルを参考に決められた様に思う。

2年間に渡ったモレキュール型研究会での成果を踏まえ、また、研究組織の幅を広げていくため、1996年、「有限温度・有限密度の場の量子論とその応用」研究会を公募型研究会として開催している。森川雅博氏、山中由也氏を代表世話人として、前年までの素粒子論、原子核理論に加え、宇宙論まで対象を広げて参加を呼びかけ、参加者数は40名以上になっている。15件の講演の内、2件の講演が宇宙論分野から行われている [1]。

研究の主たるテーマが非平衡系に移りつつある状況を踏まえ、1997年度の研究会は「熱場の量子論とその応用」と名称を変更し、1998年1月に開催されている。非平衡系を取り扱う熱場の量子論の基礎的な部分が研究対象となっていること、また非常に幅広い応用分野があることから、多数の分野から参加があった。また、半数以上の講演者がこの研究会が初めての口頭発表という若手であった。若手研究者による斬新なアイデアの提案は関連分野に新たな風を吹き込み、大きな寄与であった。

1999年の研究会では参加者が倍増して70名を越え、講演数も40近くとなった。時間的な制約から、発展途上にある熱場の量子論の基礎的な部分に立ち入った議論が難しくなり、翌2000年からは一般講演の詳細はパネル展示するという、ほぼ現在の形での発表方法をとる事になる。

その後、参加者、世話人は入れ替わっていったが、熱場の量子論をキーワードに100名の研究者が集まる公募型研究会として、2013年度には第19回目の研究会を開催することができた。特筆すべきは、研究会の初期に、大学院生、ポスドクとして講演を行った参加者の多くが、現在は大学、研究機

<sup>1</sup>e-mail address: inagaki@hiroshima-u.ac.jp

関のスタッフとなり、まさに基礎物理学に関連する分野の発展に寄与していることであり、京都大学基礎物理学研究所で開催された研究会の大きな成果と考えている [2, 3]。

## 2 中川寿夫氏のグループで進められた研究

2013年7月3日、本研究会の設立時から寄与いただいていた中川寿夫氏の訃報が届いた。著者は6月初旬まで本研究会での企画内容についてメールで相談しており、突然の訃報にただただ驚かされた。以下、中川寿夫氏の進められた研究について、著者の視点から紹介したい。

### 2.1 有限温度でのスカラー場の理論

有限温度の場の量子論に特有な問題として、高温状態でのボーズ場に関する摂動展開の破綻がある。例えば、ボーズ場が4点相互作用する $\lambda\phi^4$ 理論で、ボーズ場の伝搬関数に対する1ループの輻射補正は結合定数と温度の2乗の積、 $\lambda T^2$ 、に比例する。このため、結合定数が十分に小さかったとしても温度が高くなるにつれて輻射補正が大きくなり、摂動展開が破綻する。 $\lambda\phi^4$ 理論については、ボーズ場の質量を $m$ として、 $\lambda T^2/m^2$ に比例する項を系統的に足し上げることで摂動展開の正当性を保つリングダイアグラム再加算法が知られている。次に高温状態で大きくなる項は、 $\lambda T/m$ に比例する項である。十分に温度が高くなると摂動展開が破綻することになるが、 $\lambda T/m$ に比例する項を足し上げる簡単な処方は知られていない。

素粒子標準模型はゲージ対称性とその自発的破れに基づいて構成されている。電弱対称性の自発的対称性の破れを引き起こすのがヒグス粒子である。宇宙初期に電弱対称性のある状態から破れた状態への相転移が起きたと考えられており、相転移の次数は臨界現象を議論する上で本質的である。理論の有効ポテンシャルを計算する事で、この相転移の次数を明らかにできる。ここで、ヒグス粒子に対して単純に $\lambda\phi^4$ 理論を適用すると相転移温度付近で $\lambda T/m \sim O(1)$ となり、摂動展開の正当性が保証できず、摂動展開を越えた解析が必要になる。

中川寿夫氏は横田浩氏と、 $\lambda\phi^4$ 理論の有効ポテンシャルの解析に対し、繰り込み群による改良の研究を進められた [4, 5]。関連する取り組みとして、当時大学院生であった小暮兼三氏が佐藤丈氏、著者と補助質量の方法を提案し、1998年の研究会で発表している。補助質量の方法では、スカラー場の質量を十分に重くとると摂動展開が破綻しないことに注目し、重いスカラー場理論と軽いスカラー場理論を微分方程式でつなく、閉じた組の方程式を得るための近似が必要であるが、数値計算によりスカラー場の相構造を議論できる [6]。

### 2.2 有限温度でのゲージ場の理論

ゲージ場においてはゲージ対称性を保持しながら足し上げを行う必要がある。これを系統的に実施するのが硬熱ループ再加算法である。研究会の立ち上げを前に、中川寿夫氏も牲川章氏と硬熱ループ再加算を用いた研究を進められていた。

非可換ゲージ場の理論においては、リンデダイアグラムとして知られる量子補正における赤外発散の問題がある。ゲージ場が遮蔽質量を持つ事で赤外発散の問題は無くなるが、摂動論だと非可換ゲージ場の横波成分に対する補正はゲージに依存しうまく計算できない。この問題に対しては、斎藤卓也氏が、中村純氏、酒井淳氏と共同で、グルオンの磁気質量を格子QCDシミュレーションで計算し、2003年の研究会で発表している [7]。

非可換ゲージ理論におけるカイラル対称性の動的破れは、有限温度・密度クォーク・グルオン物質についての議論の基礎になる概念の一つである。対称性の動的破れはクォークと反クォークの複合演算子が持つ期待値により引き起こされるが、ゲージ理論の摂動展開からは計算できない非摂動現象である。これについても格子 QCD は有力な計算処方であり多くの成果が報告されているが、有限密度系では符号問題による困難を抱えている。他の取り組みとしては、Schwinger-Dyson 方程式を用いた解析がある。著者も、牟田泰三氏、向川政治氏、深澤謙次氏と共同で、ゲージ場に有限温度遮蔽質量の効果を入れた解析を実施している [8]。

中川寿夫氏は、横田浩氏、笛木祐子氏、吉田光次氏と硬熱ループ再加算法に基づいた Schwinger-Dyson 方程式の定式化を行い、遮蔽質量の効果のみを取り入れた解析では正しく臨界現象を理解できないことを指摘された [9]。その後、中川寿夫氏のグループは、Schwinger-Dyson 方程式の近似解が持つゲージ依存性の問題に対し、ウォード・高橋恒等式と矛盾しないゲージの選び方について研究を進められ、2007 年の研究会で横田浩氏が報告している [10]。

中川氏のグループの研究は、筆者が研究を進めて行く上で大いに刺激となってきた。中川氏の研究は共同研究者により引き継がれていく事と思うが、筆者もその影響を受けた一人として、摂動論的熱場の量子論のさらなる発展に寄与していきたい。

### 3 謝辞

基研研究会「熱場の量子論とその応用」は、京都大学基礎物理学研究所の方々のご理解と大きな支援無しには成立しなかった。また、これまでの研究会を企画運営された世話人の方々、研究会でさまざまな研究成果を報告いただいた講演者の方々、そして全ての研究会参加者に感謝する。

### 参考文献

- [1] 「有限温度・有限密度の場の量子論とその応用」研究会報告, 素粒子論研究 90-2 (1994), B1; 92-4 (1996), D1; 94-4 (1997), D1.
- [2] 「熱場の量子論とその応用」研究会報告, 素粒子論研究 98-1 (1998), A1; 99-4 (1999), D120; 100-5 (2000), E1; 103-1 (2001), A1; 105-1 (2002), A1; 106-5 (2003), E1; 108-5 (2004), E1; 110-5 (2005), E1; 112-3 (2005), C1; 114-3 (2006), C1; 116-2 (2008), B1; 116-6 (2009), F1; 118-1 (2010), A1; 118-4 (2011), D1; 119-4 (2012), F1; 素粒子論研究・電子版 13 (2012), 4.
- [3] <http://www.riise.hiroshima-u.ac.jp/TQFT/> : 2001 年度以降の発表資料はここから参照可能。
- [4] H. Nakkagawa and H. Yokota, Mod. Phys. Lett. A **11**, 2259 (1996).
- [5] H. Nakkagawa and H. Yokota, Prog. Theor. Phys. Suppl. **129**, 209 (1997).
- [6] T. Inagaki, K. Ogure and J. Sato, Prog. Theor. Phys. **99**, 1069 (1998).
- [7] A. Nakamura, T. Saito and S. Sakai, Phys. Rev. D **69**, 014506 (2004).
- [8] K. Fukazawa, T. Inagaki, S. Mukaigawa and T. Muta, Prog. Theor. Phys. **105**, 979 (2001).
- [9] Y. Fueki, H. Nakkagawa, H. Yokota and K. Yoshida, Prog. Theor. Phys. **110**, 777 (2003).
- [10] H. Nakkagawa, H. Yokota and K. Yoshida, arXiv:0709.0323 [hep-ph] (2007).