

研究会番号:YITP-W-11-23

「量子多体系のエンタングルメントとくりこみ群」

開催日時：2011年12月14日～2011年12月16日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所 K206室

参加者数：49名

[研究会の目的・趣旨]

低次元量子多体系の数値くりこみ群は、密度行列くりこみ群、テンソルネットワーク形式の変分などを経て大きな広がりを見せてきた。一方、AdS/CFT対応やホログラフィーのように、場の理論のエンタングルメントと拡張された時空での重力理論との対応関係が注目されてきたが、最近では物性でも盛んに議論されるようになってきている。また、格子模型の相互作用定数を曲がった空間に見立てて空間変調し、数値計算のエネルギースケールをコントロールしようという試みも始まっている。日本国内でもそれぞれの分野において独創的な発展を遂げてきてはいるが、一方で、お互いの研究テーマの類似性に興味はあっても分野の背景の違いから、なかなか相互の理解が深まらないという現状もある。拡張時空でのスケール性とエンタングルメント、そしてくりこみ群は、量子多体系の数値計算や場の理論に共通の基本である。これらのキーワードを軸に国内の研究者が集まることができる研究会を開き、それぞれの分野での現状と問題点を共有し、相互の関係性を整理して議論することは今後の基礎、応用の両面の展開にとって大いに意義のあることだと考えられる。物性、素粒子、量子情報などの分野が相互に刺激しあい、日本発のオリジナルな研究展開の方向性をうち出していくことがこの研究会の目的である。

[研究会の内容]

研究会一日目は、素粒子、物性、量子情報などの異なる分野の参加者への橋渡しを目的として、レビュー講演が重点的であった。量子系のエンタングルメントと相互作用の空間構造についての話があり、そのあと AdS/CFT 対応の入門的レビューと統計力学側から見た時空の構造と重力理論の関係性についてのアウトラインが紹介された。これに加えて、熱場理論におけるエンタングルメントエントロピー生成、および Casimir 効果のくりこみ群的解釈の発表があった。具体的な内容としては、量子スピン系でのエンタングルメントの制御に相互作用の変調を用いるというアイデアと、その源泉に時空の幾何学的構造があるというウラ話まで含めた紹介があった。引き続いて行われた非専門家向けの AdS/CFT 対応の講演では、通常、物性理論研究者には馴染みがないために敷居が高く全体像が描きにくい String や重力理論についての大変わかりやすいレビューがあり、非専門家からも活発な質疑応答があった。また、会場は飛び入りの参加者も含めて立ち見ができるほどで、この分野への関心の高さが窺えた。マルチスケールエンタングルメントくりこ

み仮説 (MERA) と時空の幾何学的構造とのレビューは物性理論の研究者側から見た AdS/CFT 対応の認識であり、これに、素粒子論や統計力学の専門家からの議論がうまく絡みあい、共通認識の構築に大きな役割を果たした。熱場理論におけるエンタングルメントの生成や、Casimir 効果を有限サイズ効果とせずにくりこみ群的に導出についての講演は、最近の話題でありながらくりこみ群とスケール性の長い歴史的背景も含むものであった。くりこみ群的考察の奥の深さを再認識させる、古くて新しいトピックスがあることが参加者の興味を引いた。

二日目は AdS/CFT 対応におけるエンタングルメントエントロピーの解説とフェルミ流体のエンタングルメントエントロピーの重力的解釈についての最新の結果に至る過程が紹介され、引き続いて相互情報量についての講演があった。古典重力モデルの範囲で導かれるフェルミ液体の指数に上限があり、物性では標準的なフェルミ流体とはギャップがあることや、量子補正の必要性などが議論された。また、MERA の統計力学モデルは量子重力の離散化と見なせることが指摘され、今後の相互の発展が注目される。次に Sine-square 変形など 1 次元量子多体系の相互作用変形問題についての厳密な理論と場の理論についての最新の結果のレビューがあり、エネルギースケールの変調と境界条件、CFT との関係について議論がなされた。行列積状態における境界行列の一般論と境界のもたらす重要性が指摘された他、並進対称性を強制した行列積状態の構成法や、その状態を用いた変分計算の精度との関係など、具体的な数値計算への応用が議論され、欲しい状態に対して工夫を加えることにより、これまでは計算しづらい系に対しても応用の可能性が広がることが示された。テンソル積による量子状態の表現を観測に基づく量子計算に応用する話題は、伝統的な分野から見ると新鮮であり、基本的な概念から最先端の話題に至るまで幅広い議論が集中した。

三日目は、量子多体系におけるトポロジカル秩序とエンタングルメントスペクトルやエッジ状態についてのレビューでは、物性におけるトポロジカル秩序の定義から始まり、その様子がエンタングルメントスペクトルと対応がつくことが分かりやすく解説された。1 次元系では本質的なトポロジカル秩序は存在せず、対称性と対で考えなければならないことが述べられ、また、2 次元量子系での最新の結果が示された。さらに、二日目にひきつづいてテンソルネットワーク状態と量子計算についての講演があり、活発な議論がなされた。最後に、三角格子量子スピン系での MERA 数値計算例が示され、概念的な側面と具体的な数値計算がいかに融合するのが紹介された。研究会全般を通して質疑応答は大変に活発で、時間が足りないほどであった。基本概念や物理的な意味の確認から、技術的な側面や深く突っ込んだものに至るまで様々な議論がなされたので、他分野の研究進展の現状を互いに認識するという研究会の目的は十分に達成されたと考えられる。学際的な側面がうまく発揮されたユニークな結果であるといえよう。

当初は、30 - 40 名程度の比較的小規模な研究会を想定したが、実際の総参加者は 49 名となった。また、部屋が満員で引き返していった方々も多くいたので、実質的に 60 名以上の方々が講演を聞きに来られたと推定される。日本におけるこの研究分野の大きな拠点がなかったために全体像を把握しづらかったが、興味を持っている研究者はかなり多いことが認識できた。研究者間の現状の共有、および情報交換の場として大いに役に立ったと同時に、これをきっかけに、その後の新

たな交流も生じていることから、当初の目的以上の収穫があったといえよう。今後も引き続いてこのような研究会を継続して設けていく必要性の認識で一致した。

[世話人]

- 奥西 巧一 (新潟大学理学部) (代表)
- 遠山 貴巳 (京都大学基礎物理学研究所)
- 戸塚 圭介 (京都大学基礎物理学研究所)
- 西野 友年 (神戸大学大学院理学研究科)
- 原田 健自 (京都大学大学院情報学研究科)
- 引原 俊哉 (群馬大学大学院工学研究科)
- 松枝 宏明 (仙台高専)

研究会プログラムを次ページ以降に掲載する。なお、個々の講演のアブストラクトは、
<http://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp/contents/seminar/archive/2011/yitp-w-11-23/>
もしくは、
http://quattro.phys.sci.kobe-u.ac.jp/dmrg/Kyoto2011/entangRG_j.html
に掲載してあるので、そちらを参照されたい。

12月14日

12:35 ~ 12:45 : はじめに

12:45 ~ 14:00 : 西野 友年 (神戸大)

「エンタングルメントで解決できるもの、できないもの」

14:00 ~ 15:15 : 中村 真 (京都大)

「非専門家のための AdS/CFT 対応入門」

(休憩)

15:35 ~ 16:15 : 鈴木 増雄 (東京理科大)

「TFD による RVB とエンタングルメントの取り扱い」

16:15 ~ 17:30 : 松枝 宏明 (仙台高専)

「エンタングルメント・エントロピーのスケール性と時空の幾何学構造」

17:30 ~ 18:10 : 一ノ瀬 祥一 (静岡県立大)

「Renormalization Group Approach to Casimir Force in Substance」

12月15日

9:00 ~ 10:15 : 高柳 匡 (IPMU)

「AdS/CFT 対応とエンタングルメントエントロピー」

10:15 ~ 10:55 : 芝 暢郎 (大阪大)

「Entanglement entropy of two spheres」

(休憩)

11:15 ~ 12:30 : 桂 法称 (学習院大)

「Inhomogeneous but solvable/integrable models」

(昼休)

14:00 ~ 15:15 : 丸山 勲 (大阪大学)

「一様行列積状態における境界行列」

15:15 ~ 15:55 : 上田 宏 (大阪大学)

「低次元量子スピン系に対する非整合周期行列積状態」

(休憩)

16:15 ~ 16:55 : 藤井 啓祐 (大阪大学)

「Computational power and correlation in quantum computational tensor network」

16:55 ~ 17:35 : 奥西 巧一 (新潟大学)

「Wilson の数値くりこみ群とホログラフィック RG」

17:35 ~ 18:05 : 折井 仁嗣 (大阪大学)

「少数スピン系におけるテンソルネットワークと射影の効果」

(懇親会)

12月16日

9:00 ~ 10:15 : 押川 正毅 (物性研)

「トポロジカル相とエンタングルメントスペクトル」

10:15 ~ 10:55 : 佐藤 正寛 (青山学院大)

「Gapless edge modes and their stability in two-dimensional antiferromagnets」

(休憩)

11:15 ~ 11:55 : 森前 智行 (パリ東大)

「テンソルネットワーク上での量子計算-String net condensate での例を通して」

11:55 ~ 12:35 : 原田 健自 (京都大学)

「三角格子上の格子モデルのためのエンタングルメント繰り込み」

12:35 : まとめ