

# 第1回 極限宇宙スクール ポスター発表リスト

## SpatialChatによる発表

S01. Juan Pablo Bayona Pena (東京工業大学) “Thermodynamics of a continuous quantum heat engine”

S02. 勝部瞭太 (東北大学大学院理学研究科) 「機械学習を用いた計量推定」

S03. 山鹿汐音 (中央大学大学院理工学研究科) 「光格子中のボース粒子系におけるエンタングルメントのダイナミクス」

## Zoomのブレイクアウトルームによる発表

Z01. 中井雄介 (京都大学) 「非エルミート表皮効果における乱れに関する研究」

Z02. 李 康載 (名古屋大学) “Refined inequalities for a loosely trapped surface and attractive gravity probe surface”

Z03. 鈴木優樹 (YITP) “One-loop Correction to the AdS/BCFT partition function in the Three-dimensional pure gravity”

# Thermodynamics of a continuous quantum heat engine

Pablo Bayona-Pena <sup>A</sup>, Kazutaka Takahashi<sup>B</sup>

<sup>A</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>B</sup> Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology

We present a detailed thermodynamic analysis of a three-level quantum heat engine coupled continuously to hot and cold reservoirs. The system is driven by an oscillating external field and is described by the Markovian quantum master equation. We use the general form of the dissipator which is consistent with thermodynamics. We calculate the heat, power, and efficiency of the system as a heat engine and examine the thermodynamic uncertainty relation. The efficiency of the system is strongly dependent on the structure of the dissipator and the correlations between different levels can be an obstacle to an ideal operation. In quantum systems, the heat flux is decomposed into the population and coherent parts. The coherent part is specific to quantum systems and, in contrast to the population part, the standard thermodynamic scenario cannot be applied even in the linear response regime. We discuss how the interplay between the population and coherent parts affects the performance of the heat engine.

## References:

1. Pablo Bayona-Pena and Kazutaka Takahashi, Thermodynamics of a continuous quantum heat engine: Interplay between population and coherence, *Phys. Rev. A* **104**, 042203 (2021).

# 機械学習を用いた計量推定

東北大理<sup>A</sup>, 名古屋大理<sup>B</sup>, ヘルシンキ大<sup>C</sup>  
勝部瞭太<sup>A</sup>, Wai-Hong Tam<sup>B,C</sup>, 堀田昌寛<sup>A</sup>, 南部保貞<sup>B</sup>

今回のポスター発表では機械学習モデルの一つである畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を用いた画像認識を使って、複数粒子の測地線の画像データから時空の計量を推定できることや、CNNを用いて時空に施された局所座標変換を推定できることを確かめたシミュレーション結果を中心に機械学習を用いた計量推定について発表する。

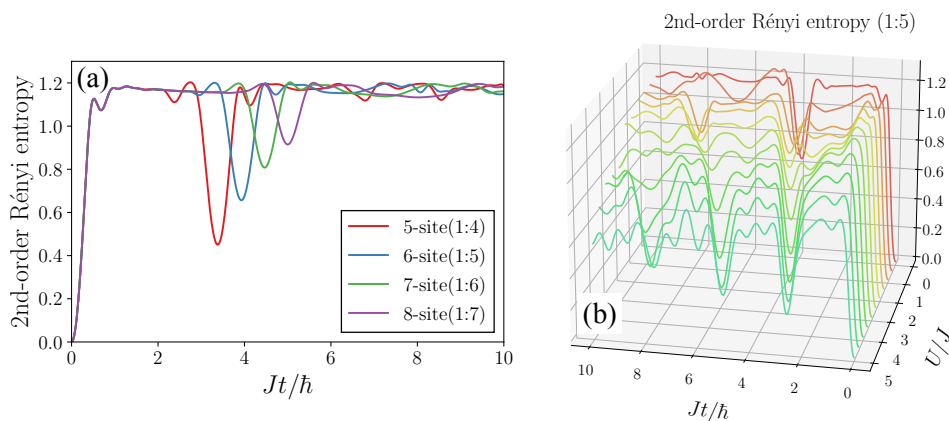
# 光格子中のボース粒子におけるエンタングルメントのダイナミクス

中大理工<sup>A</sup>, 山東理大<sup>B</sup>, 近大理工<sup>C</sup>

山鹿汐音<sup>A</sup>, 杉山康太<sup>A</sup>, 吉井涼輔<sup>B</sup>, 鏡原大地<sup>A,C</sup>, 土屋俊二<sup>A</sup>

近年, 量子系のエンタングルメント構造が様々な分野で注目を集めている. 例えば, エンタングルメント構造は, 孤立量子系の熱化や量子多体系の量子計算への応用, 更にブラックホールにおけるホーキング輻射の研究において鍵となると考えられている. 最近, 冷却原子系ではエンタングルメントの測定に成功し, 量子多体系のエンタングルメント構造を実験, 理論の両面から調べることのできる環境が整いつつある [1].

本研究では, 光格子中のボース粒子系において, 超流動相からモット絶縁体相までの様々な相互作用パラメタ ( $U/J$ ) におけるエンタングルメント構造の時間変化を調べた. 特に, 実験で測定可能な Rényi エントロピー (RE) を数值的に計算し, そのダイナミクスについて調べた. 理想ボース気体では, 系が大きくなるにつれ RE は時間の経過と共に一定値に収束し, 熱化する傾向が見られる [図 (a)]. 相互作用を加えると, 超流動相ではやはり RE は理想気体と同じ一定値に収束し, 収束値は volume law に従う. しかし, 更に相互作用を増加させてモット絶縁体相になると, RE は一定の時間間隔で再帰し, 熱化しないことを見出した [図 (b)].



(a) 理想ボース気体の Rényi エントロピーの時間発展 (filling=1). (b) 超流動相 ( $U/J < 3.4$ ) およびモット絶縁体相 ( $U/J > 3.4$ ) における Rényi エントロピーの時間発展.

[1] R. Islam, *et. al.*, Nature **528**, 77 (2015).

# 非エルミート表皮効果における乱れに関する研究

京大基研

中井雄介, 大熊信之, 佐藤昌利

非エルミート系とは系の有効ハミルトニアンが非エルミートな行列で記述される系のことを指す。例えば、ある種の開放量子系の有効ハミルトニアンは非エルミートになる。非エルミート系は、そのエネルギーが複素数を取り得るなど、エルミート系には無い数学的性質を持ち、そのためエルミート系にはない現象が生じる。とりわけ、近年、非エルミート系特有の現象として、非エルミート表皮効果（以下、表皮効果）と呼ばれる現象[1]が注目を集めている。

表皮効果とは、開放端境界条件（Open Boundary Condition, OBC）下の固有状態が端に局在（端に局在している固有状態=Skin mode）することで、OBC 下のエネルギースペクトルと周期境界条件（Periodic Boundary Condition, PBC）下のエネルギースペクトルが大きく異なるようになる現象のことであり、古典系ではある種の電気回路[2]、量子系では量子ウォーク[3]などにおいて観測可能である。更に、表皮効果は点ギャップトポロジと呼ばれる非エルミート系特有のギャップ構造に起因しているトポロジカル現象である[4]。

一般にエルミート系におけるトポロジカル現象は不純物などの乱れによる摂動に対して安定であると言われている。例えば、量子ホール絶縁体の端状態は乱れに対して安定である[5]。同様に非エルミート系におけるトポロジカル現象も乱れに対して安定であるかは非自明な問題である。このことから、非エルミート系におけるトポロジカル現象の一つである表皮効果も、乱れに対して安定であるかは明らかではない。従って乱れに対して表皮効果がどのような振る舞いを示すかを調べることは重要な課題である。

本研究では対称性を持たない空間一次元系と、非エルミート系特有の対称性である転置型時間反転対称性を持つ空間 1 次元系において、行列の数値対角化による数値計算とグリーン関数を用いた厳密計算の両面から乱れに対する表皮効果の安定性を調べた。その結果、両方の系において以下の結果を得た。1 つ目は、点ギャップが閉じる程度の大きさの乱れを加えない限り Skin mode は存在し続けること（Fig. 1）。2 つ目は、Skin mode は PBC スペクトルの内部においてのみ存在し、PBC スペクトルの外部では存在しないことである（Fig. 2）。これらの結果は非エルミート系のトポロジカル現象である表皮効果は、乱れに対してエルミート系のトポロジカル現象と同等の安定性を持つことを示している。更に以上を踏まえた上で、これらの特徴づけるトポロジカル数の計算方法を 2 通りの方法で示した。1 つ目はひねり位相と呼ばれるパラメータを導入することで新たなトポロジカル数の構築を行い、これを用いることで特徴づけを行う方法である。2 つ目の方法は厳密計算により導出される有効ハミルトニアンを用いて特徴づけを行う方法である。

## References

- [1] S. Yao and Z. Wang, Phys. Rev. Lett., **121**, 086803 (2018).
- [2] T. Hofmann, *et al.*, Phys. Rev. Research, **2**, 023265 (2020).
- [3] L. Xiao, *et al.*, Nature Physics, **16**, 761 (2020).
- [4] N. Okuma, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 086801 (2020).
- [5] C. L. Kane and E. J. Mele, Phys. Rev. Lett., **95**, 146802 (2005)

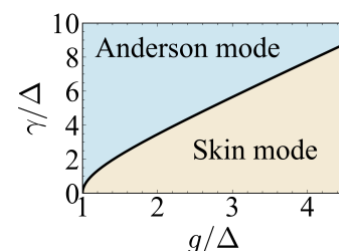


Fig. 1. Phase diagram for skin effect against disorder in transposed time-reversal symmetry systems.

$g$  represents the strength of non-hermicity and  $\gamma$  represents the strength of disorder with Cauchy distribution.

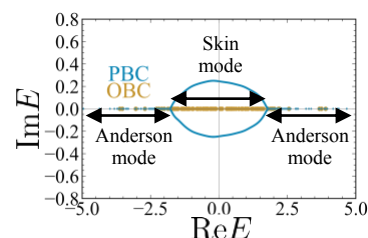


Fig. 2. Skin mode exists only in the energy region where PBC spectra have winding and not in the energy region where PBC spectra do not have winding.

# Refined inequalities for a loosely trapped surface and attractive gravity probe surface

名古屋大学多元数理科学研究科<sup>A</sup>, 名古屋大学素粒子宇宙起源研究所<sup>B</sup>  
李 康載<sup>A</sup>, 白水 徹也<sup>A,B</sup>, 泉 圭介<sup>B,A</sup>

光の束に関してその振る舞いをもとに、強重力領域を特徴づけるものとして捕捉面が定義され、その最外捕捉面を用いてブラックホールの大きさに上限を与える Penrose 不等式 [1]が提案されている。しかし、ブラックホールが形成された場合、捕捉面はその内部に隠れているため直接見ることが不可能である。

そこで捕捉面の代替として、光子球面の一般化である loosely trapped surface (LTS)[2]と LTS をもとに弱い重力まで拡張した概念の attractive gravity probe surface (AGPS)[3]が提案され、各々に対して面積不等式が得られている。今回は LTS, AGPS に関して角運動量、重力波及び物質の効果を考慮することで、その面積不等式の精査を行ったことを紹介する[4].

[1] R. Penrose, Ann. N.Y. Acad. Sci. 224, 125 (1973).

[2] T. Shiromizu, Y. Tomikawa, K. Izumi, and H. Yoshino, Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 033E01 (2017).

[3] K. Izumi, Y. Tomikawa, T. Shiromizu, and H. Yoshino, Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, 083E02 (2021).

[4] K. Lee, T. Shiromizu and K. Izumi, Phys. Rev. D 105, no.4, 044037 (2022).

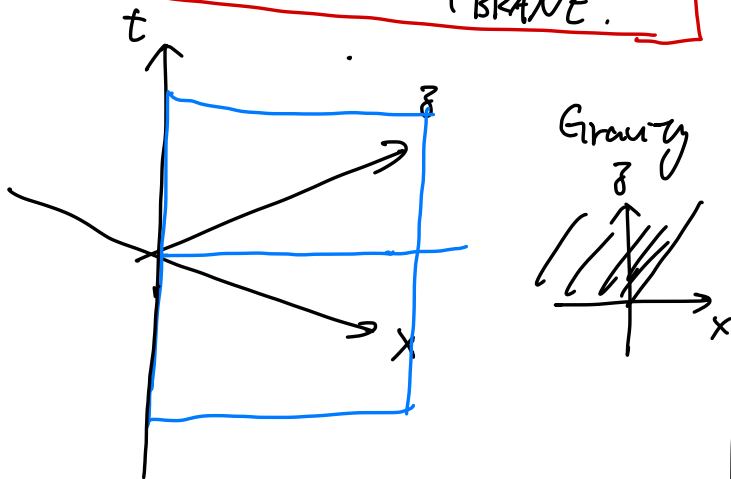
# One-loop Connection to the AdS/CFT partition function in the three-dimensional pure gravity (Published in PRD)

Yu-ki Suzuki (Yukawa Institute)

## Motivation

What kind of boundary conditions respect the diffeomorphism at one-loop level?

↳ We examine this in  $AdS_3/CFT_2 + \text{BRANE}$ .



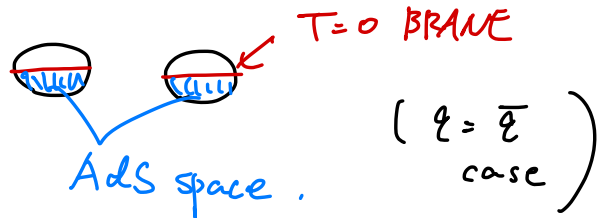
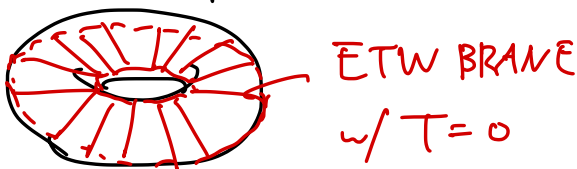
Vacuum  $AdS_3/CFT_2 + \text{brane}$ .

• Original result without branes

$$Z_{1-loop} = \prod_{m=2}^{\infty} \frac{1}{|1 - q^m|^2} \quad (\text{Giombi et al.})$$

$$(q = e^{2\pi i T})$$

• Our set up and result. finite temperature (thermal  $AdS_3$ )



Neumann B.C.  $\downarrow$  half of original result.

$$\rightarrow Z_{1-loop} = \left( \prod_{m=2}^{\infty} \frac{1}{|1 - q^m|} \right)$$

$$\left( \prod_{l=0}^{\infty} \frac{\sqrt{(1 - q^{l+2} \bar{q}^{l+1})(1 - q^{l+1} \bar{q}^{l+2})}}{\sqrt{(1 - q^l \bar{q}^{l+2})(1 - q^{l+2} \bar{q}^l)}} \right)$$

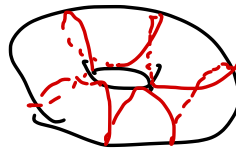
$\downarrow$  novel one

ghost like mode?  $\rightarrow$  No.

$q$ : general

physically

$\Rightarrow$  we set  $q = \bar{q}$



$\rightarrow$  Bdy is not surrounded

$$Z_{1-loop} = \prod_{l=0}^{\infty} \frac{1}{1 - q^{2l+2}}$$

$$= \sum_{\Delta} d(\Delta) q^{\Delta}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} d(\Delta) \geq 0 \\ \text{physical} \\ \# \text{ of states} \end{cases}$$