

PRESS RELEASE (2024/09/13)

エネルギー透過には情報が必要

～境界面上の物理に迫る～

ポイント

- ① 2つの物質を接合させると、その間に「境界面」が生まれる。この境界面をエネルギーや情報がどの程度透過するのかを理解するのは重要な課題であるが、実際にこの透過率を計算するのは困難である。
- ② エネルギーと情報量の間、 $(\text{エネルギー透過率}) \leq (\text{情報量透過率})$ という驚くほどシンプルな関係が成り立つ事を発見した。
- ③ シンプルゆえに汎用性の高い不等式であるため、今後の境界面の研究に幅広く応用されたいと期待している。

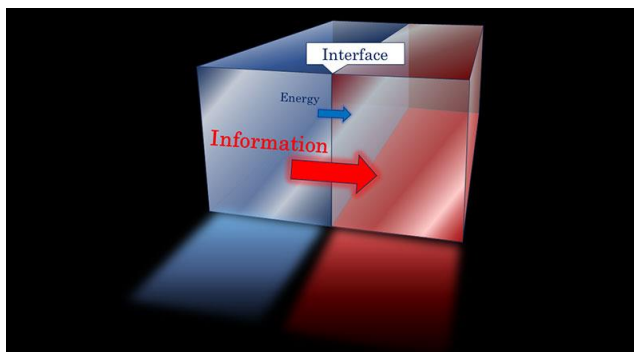
概要

異なる場の量子論をつなぐ境界面は、素粒子論や物性理論の様々な問題に登場する重要な概念です。境界面があると、エネルギーや情報量の透過率などが問題になりますが、これらを実際に計算するのは難しい問題でした。

九州大学高等研究院の楠亀裕哉准教授（理化学研究所数理創造プログラム客員研究員）、カリフォルニア工科大学教授を兼ねる東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構の大栗博司教授、テキサス大学の Andreas Karch 教授、Hao-Yu Sun 研究員、Mianqi Wang 大学院生らの研究グループは、2次元の共形場の量子論について、エネルギー透過率、情報量透過率、そして場の量子論のヒルベルト空間の大きさの指標（正確には、高エネルギーでの状態数の増加率）の3つの量の間、 $(\text{エネルギー透過率}) \leq (\text{情報量透過率}) \leq (\text{ヒルベルト空間の大きさの指標})$ という明解な不等式が成り立つことを示しました。この不等式は、「エネルギーを通すためには、情報を通す必要があります、そのいずれもが十分な状態数を必要とする」ということを表しています。また、この論文では、これより強い不等式はあり得ないことも示しました。

エネルギー透過率と情報量透過率は、いずれも重要なが計算することが困難な量であり、またその間に関係があることは知られていませんでした。本論文は、これらの量の間不等式を示すことで、この重要であるが困難な問題に新しい光を当てました。

本研究成果は米国の雑誌「Physics Review Letters」のオンライン版に、2024年8月30日（金）に掲載されました。



研究者からひとこと：

本研究には、素粒子論と物性理論の融合的アプローチを用いています。本研究結果は、この融合的アプローチの確かな有用性を示しています。今後も融合的アプローチによる新発見を目指したいと思います。

【研究の背景と経緯】

2つの量子多体系（場の量子論とも呼ぶ）を接合させた時、その間に「境界面」が生まれます。この境界面をエネルギーや情報がどの程度透過するのかを理解するのは重要な課題ですが、実際にこの透過率を計算することは困難です。本研究では、量子多体系のうち特に扱いやすいクラスである量子臨界系（共形場理論(※1)）に焦点を当てていますが、たとえ共形場理論に焦点を絞っても透過率の計算は依然として困難である事が知られています。この理由の一つは、物理の理論研究において強力なツールである対称性を、境界面が壊してしまうためです。

【研究の内容と成果】

本研究では、境界面の研究における潜在的な難しさを、以下の二つのトリックにより乗り越えました。

(1) 3次元量子重力理論と2次元共形場理論の間の対応関係（ホログラフィー原理）を境界面に応用

(2) エネルギーと情報量を個々に調べるのではなく、両者の「関係」に着目

結果として、エネルギー透過率、情報量透過率、そして場の量子論のヒルベルト空間の大きさの指標（正確には、高エネルギーでの状態数の増加率）の3つの量の間、

$(\text{エネルギー透過率}) \leq (\text{情報量透過率}) \leq (\text{ヒルベルト空間の大きさの指標})$

という驚くほどシンプルな不等式が成り立つことを示しました。この不等式は、「エネルギーを通すためには、情報を通す必要があり、そのいずれもが十分な状態数を必要とする」ということを表しています。また、本研究では、これより強い不等式はあり得ないことも示しています。

【今後の展開】

エネルギー透過率と情報量透過率は、いずれも重要なが計算することが困難な量であり、またその間に関係があることは知られていませんでした。本論文は、これらの量の間不等式を示すことで、この重要であるが困難な問題に新しい光を当てました。シンプルゆえに汎用性の高い不等式であるため、今後の境界面の研究に幅広く応用されていくと期待しています。具体例の一つとしては、情報量透過率が本質的な役割を果たす情報量（弱測定や擬エントロピーなど）などの研究に新しい方向性をもたらすと期待しています。また、近年「物理」と「情報」の融合領域が盛んに研究されていますが、この物理と情報の関係の理解を深めることに役立つと期待しています。

【用語解説】

(※1) 共形場理論

共形対称性と呼ばれる高い対称性を持つ場の理論を共形場理論と呼ぶ。臨界イジング模型などの量子臨界系が共形場理論の一例である。また、 d 次元共形場理論は $d+1$ 次元量子重力理論と等価であることが知られており、ホログラフィー原理と呼ばれる。本研究の結果を得る過程でも、このホログラフィー原理を用いている。

【謝辞】

AK、HS、およびMWは、U.S. Department of Energyの助成金（DE-SC0022021）、およびサイモンズ財団からの助成金（Grant 651440, AK）の一部による支援を受けています。HOとYKは、U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of High Energy Physicsからの助成金（DE-SC0011632）の一部による支援を受けています。さらに、YKはカリフォルニア工科大学のBrinson Prize Fellowshipおよび九州大学の稲盛フロンティアプログラムの支援を受けています。HOは、Simons Investigator Award (MP-SIP-00005259) Guessenheim Fellowship 文部科学省・日本学術振

境界面の概念図
本研究は「境界面にエネルギーを通すためには、情報を通す必要がある」事を示した

興会科学研究費助成事業（23K03379）、ならびに World Premier International Research Center Initiative の支援を一部受けています。本研究は、米国国立科学財団 (NSF) の助成金 (PHY-1607611) によって支援されているアスペン物理学センターおよび NSF の助成金 (PHY-2309135) によって支援されているカブリ理論物理学研究所 (KITP) において一部行われました。

【論文情報】

掲載誌：Physics Review Letters

タイトル：Universal bound on effective central charge and its saturation

著者名：Andreas Karch, Yuya Kusuki, Hiroshi Ooguri, Hao-Yu Sun, Mianqi Wang

D O I : 10.1103/PhysRevLett.133.091604

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学 高等研究院 准教授 楠亀 裕哉 (クスキ ユウヤ)

TEL : 092-802-4084

Mail : kusuki.yuya@phys.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL : 092-802-2130 FAX : 092-802-2139

Mail : koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 広報担当 小森 真里奈

TEL : 04-7136-5977, 080-4056-2930

Mail : press@ipmu.jp

理化学研究所 広報室 報道担当

TEL : 050-3495-0247

Mail : ex-press@ml.riken.jp