

量子論とブラックホールとレーザープラズマ(と機械学習)



技術解説

綿 村 尚 毅*

Quantum theory, black hole, laser plasma (and machine learning)

Key Words: Black hole, moving mirror, laser plasma

はじめに

筆者はもともと、素粒子理論物理学、とりわけブラックホールに関わる諸問題を研究していた。その後、いくつかの転機を経て情報科学研究科に身を置き、現在では機械学習手法に関する研究に携わっている。さらに現在の所属は国際公共政策研究科であるから、その経歴はいっそう奇妙に映るかもしれない。

「六人の知人を介せば、世界中の任意の人物へとたどり着くことができる」という話がある。学問分野についても、幾人かの研究者やいくつかの研究課題を介していけば、一見隔たった領域が思いがけない仕方で結びつくことがある。筆者自身、振り返ってみれば、いささか風変わりな道筋を歩んできたように思う。

所属に至った経緯についてはひとまず措くとして、本稿では、ブラックホールの理論研究がどのようにプラズマ物理へと接続し、さらに機械学習へと結びついていくのか、その道筋を説明したい。

量子と重力

近年、「量子」という言葉を、量子コンピュータの文脈で耳にする機会が増えたのではないだろうか。電子や光子をはじめ、現時点で内部構造を持たないと考えられている粒子、つまり素粒子は、基本的に量子的な振る舞いをする。

もっとも、その量子性は日常的な直観とは必ずしも相容れない。それも当然であって、量子力学に特有の振る舞いは、極低温、微小な空間スケール、あるいは外界から精密に隔離された環境など、通常の生活ではほとんど経験しない条件のもとで、より顕著に現れるからである。そのような条件下では、超伝導、超流動、カシミール効果をはじめとして、古典物理学の枠内では理解し難い多様な現象が生じることが知られている。

これらの現象は、電子や陽子などの物質、あるいは光を量子的に記述する量子力学や場の量子論という理論体系のもとで説明される。

しかしながら、重力については事情が異なる。現在、重力は一般相対性理論によって極めて精密に記述されているが、この理論を量子力学と完全に整合する形で統合することには、なお成功していない。すなわち、物質を記述する量子論と矛盾なく共存する「量子化された重力」の理論は、いまだ完成していないのである。

工学的な立場から考えるならば、「重力を量子化した理論を得たところで、何に用いることができるのか」「そもそも、それは何の役に立つのか」という疑問を抱かれるかもしれない。

確かに、現時点で明快な実用的な応用例を示すことは難しい。しかしながら量子力学もまた、その黎明期において、今日の半導体技術や新たな計算技術を支える原理になることまで予見されていたわけではない。重力の理論である一般相対性理論についても、それが後にGPSに搭載された原子時計の時刻補正に不可欠となることを、理論成立当初に見通すことは困難であっただろう。

恐縮ではあるが、理論の詳細が明らかになれば、その先に予想もしなかった応用が開ける可能性を期待し、ここではひとまずこの疑問を脇に置いて読み



* Naoki WATAMURA

1989年6月生まれ
名古屋大学大学院 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻博士後期課程(2018年)
現在、大阪大学大学院 国際公共政策研究科 助教、大阪大学大学院 情報科学研究科 助教(兼任) 博士(理学)
TEL: 06-6850-5994
E-mail: watamura@osipp.osaka-u.ac.jp

進めていただきたい。

ブラックホールと事象の地平面

重力の量子論を研究するにあたっては、物質の量子効果と重力の双方が同時に重要となる現象を考えることが望ましい。しかし、そのような現象は、現在知られている範囲では決して多くない。

代表的な対象の多くは宇宙に関わるものであり、宇宙の起源もその一例である。そして、天体として実在するブラックホールもまた、量子力学と重力とが交錯する数少ない舞台の一つである。

ブラックホールとは、十分に大きな質量が狭い領域へと集中した結果として形成される、極めて深い重力の「落とし穴」である。より物理学的には「重力井戸」と表現されることもある。

この比喻だけでは現実感を抱きにくいかもしれない。しかし足元を顧みれば、我々自身もまた、地球がつくり出す重力井戸の内部に存在している。地球の重力圏から脱出するためには、第二宇宙速度に相当する十分な初速度を与えるか、あるいはそれに相当する加速を継続的行わなければならない。

天体の質量が増し、その重力が強くなるほど、そこから脱出するために必要な速度も大きくなる。そして、十分な質量が限られた領域へ集中すると、ついには宇宙における速度の上限である光速をもってしても、その重力井戸から脱出できない状態が生じる。

そこから発せられた光は外部へ到達しないため、外界の観測者はその天体の内部を直接見ることができない。それゆえ、その領域は宇宙空間に穿たれた「黒い穴」のように見える。これが「ブラックホール」という名称の由来である。

さて、「光さえ脱出できない」という事実は、単に重力が強いという以上の、原理的な意味を持っている。

光速は、物質や情報が伝達され得る速度の上限である。したがって、光が脱出できない領域からは、いかなる物体も信号も外部へ到達することができない。外部の観測者は、その境界を越えた内部の出来事について、直接的な情報を得ることができないのである。

また、内部で生じた出来事が外部へ影響を及ぼすこともない。この意味において、ブラックホールの

内部は、外部と因果的に隔てられている。

この因果的な境界、すなわちブラックホールから外部へ向かう経路が閉ざされる境界は、「事象の地平面」と呼ばれる。事象の地平面は、物質的な膜や固体表面ではない。それは時空の因果構造によって定められる境界であり、重力の量子論を考える際にも避けて通ることのできない概念である。

ブラックホールの蒸発と情報

この事象の地平面が存在する時空において量子論を考えると、極めて興味深い現象が現れる。その代表が、ブラックホールから放出される熱的な輻射、すなわちホーキング輻射 (Hawking radiation) である¹⁾。

事象の地平面近傍における物質場の量子効果を考察したスティーヴン・ホーキングは、外部の観測者から見ると、ブラックホールが粒子を放出しているかのように振る舞うことを示した。

これは、ブラックホールから外向きのエネルギー流が存在することを意味する。エネルギー保存を考えれば、そのエネルギーはブラックホール自身の質量から供給されなければならない。したがって、ブラックホールは途方もなく長い時間をかけて徐々に質量を失い、最終的には消滅すると考えられる。

この過程は「ブラックホールの蒸発」と呼ばれる。ホーキングの計算によれば、放出される輻射は、ブラックホールを形成した物質の細部にはほとんど依存せず、主としてブラックホールの質量など、少数の巨視的な量によって定まる熱的な性質を持つ。

この事実は、「ブラックホール情報喪失問題」と呼ばれる深刻な疑問を生じさせる²⁾。ブラックホールが形成される以前には、どのような物質が崩壊したのか、どのような量子的状態にあったのかといった、膨大な情報が存在していたはずである。ところが、最終的に放出されるものが形成過程の詳細によらない一様な熱的輻射であるならば、元の状態を区別するための情報は失われてしまうように見える。

薪を燃やせば、木の種類にかかわらず最後には灰になる。天体も蒸発によって消滅するのであれば、それと同様ではないかと思われるかもしれない。

しかし、両者は本質的に異なる。薪が燃えた場合、元の情報を現実に復元することはほとんど不可能であるとしても、原理的には、煙や灰、周囲へ放出された熱や光の微細な状態に情報が残されていると考

えられる。これに対し、ブラックホールの蒸発においては情報が根本的に消失するかのように見え、量子力学の基本原理解であるユニタリ性と矛盾することになる。

情報喪失問題に対しては、近年、一定の理解が得られつつある。ブラックホール内部とホーキング輻射との間に成立する量子もつれや、時空そのものの量子的自由度をどのように扱うべきかが、問題を解く上で重要であると考えられている。

模擬ブラックホールとMoving Mirror模型

このように、ブラックホール近傍で生じる量子現象、とりわけホーキング輻射は、重力と量子力学との関係を理解する上で極めて重要な研究対象である。

ただし、ここには一つの大きな困難がある。ホーキング輻射は、現実の天体ブラックホールからは、いまだ直接観測されていない。

天体ブラックホールは地球から遠く離れているだけでなく、通常、天体質量を持つブラックホールが放出するホーキング輻射の温度は極めて低い。その信号は周囲の宇宙背景放射や天体現象に埋もれてしまうため、直接検出することはきわめて困難である。

そこで、現実のブラックホールを直接用いることができないのであれば、その本質的な構造を別の物理系によって再現し、ホーキング輻射と同様の粒子生成を実験的に検証できないかという発想が生まれた。これが、いわゆる模擬ブラックホール、あるいはアナログ重力と呼ばれる研究である³⁾。

その一例が、加速する「鏡」を用いるMoving mirrorと呼ばれる模型である⁴⁾。

ホーキング輻射の成立において重要なのは、単に極めて強い重力が存在することだけではない。事象の地平面によって時空が因果的に分割され、量子場の真空状態の見え方が観測者によって異なることが、その本質にある。

ここで、一定の仕方で加速を続ける鏡を考える。物体の速度は光速を超えることができないため、この鏡の軌道は、時間の経過とともに光速で進む直線へと漸近していく。

図1は、加速する鏡を用いたMoving mirror模型を、縦軸を時間 t 、横軸を鏡の進行方向を正とした空間座標 x として図示したものである。緑色の実線は鏡の軌道を示しており、鏡は一樣な加速運動を続け、

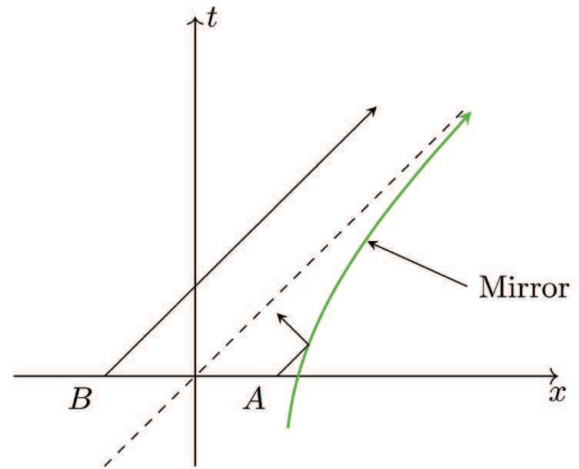


図1 相対論的に等加速運動する鏡と模擬的な事象の地平面

その速度は次第に光速へと漸近していく。破線は、鏡の軌道が漸近する直線である。この図では、光の軌跡は斜めの直線として描かれる。破線の右側に位置する点Aから鏡に向けて放たれた光は、鏡に追いついて反射され、再び点Aの側へと戻ってくる。これに対して、破線の左側に位置する点Bから同じ方向へ放たれた光は、加速を続ける鏡に追いつくことができず、そのまま x 軸の正方向へ進み続ける。

したがって、この破線を境として、鏡から反射された光を受け取ることのできる領域と、もはや受け取ることのできない領域とが分けられる。このため、この漸近線はMoving mirror模型における模擬的な事象の地平面として機能するのである。

Moving mirror模型では、加速する鏡によって量子場のモード構造が変化し、外部の観測者には粒子が生成されたかのように見える。適切な軌道を選べば、その粒子分布はブラックホールからのホーキング輻射と類似した熱的性質を示す。

したがって、この種の模擬ブラックホール実験は、天体ブラックホールから放出されるホーキング輻射そのものを直接検出するものではないものの、その背後にある量子場の粒子生成機構が物理的に整合したものであることを、別の実験系において検証する試みと位置づけられる。

レーザープラズマ実験と機械学習

もちろん、「無限に加速し続ける鏡」を現実構成することはできない。しかし、有限の時間にわたって適切な加速運動を行う鏡を実現することができ

ば、ホーキング輻射に対応する現象を一時的に再現できる可能性がある。

このMoving mirror模型を実験的に実装する方法の一つとして提案されているのが、高強度レーザーを用いてプラズマを加速する手法である⁵。

プラズマへ強力なレーザーを照射すると、プラズマ中の電子集団はレーザー場によって急激に加速される。その条件を適切に制御すれば、高密度の電子層が形成され、入射する電磁波を反射する移動鏡として振る舞う。^{6,7}

すなわち、実体を持つ機械的な鏡を光速近くまで加速する代わりに、プラズマ中に形成された電子密度の構造を「鏡」として利用するのである。

この「プラズマの鏡」の形成は、時間的にも空間的にも局在した高強度のレーザーパルスを用いてヘリウムガスに照射することで、その後方に発生するプラズマ航跡場(plasma wakefield)に起因する。

「航跡」という名称が示すとおり、この現象は、船が水面を進んだ後に残す波になぞらえることができる。レーザーパルスに、プラズマの電子密度を水面に見立てれば、レーザーの通過によってプラズマ中に大規模な密度変動が励起され、その後方を波として伝播していくのである。

高強度レーザーがヘリウムガス中を通過すると、その強い電場によってヘリウム原子が電離される。電離によって生じた電子は、質量の大きなイオンに比べてレーザー場の影響を受けやすく、レーザーの進行方向から押し退けられる。その結果、レーザーの直後には電子密度の低い領域が形成される。

しかし、押し退けられた電子はそのまま散逸するわけではない。正に帯電したイオンがつくる電場によって引き戻され、レーザーの後方において再び集中する。多数の電子がほぼ同位相で運動することにより、局所的に電子密度が著しく高い領域が形成され、「鏡」として振る舞うのである。

このような電子密度の構造は、レーザーの後方を光速に近い速度で移動するため、相対論的飛翔鏡(relativistic flying mirror)と呼ばれる。

相対論的飛翔鏡は速度の制御も理論上可能である。水面を伝わる波の速度が水深などの媒質の性質に依存するように、プラズマ航跡場の伝播速度もまた、周囲のプラズマ密度とその空間分布に依存する。したがって、あらかじめ適切な密度勾配を持つガス標

的を用意し、その中へレーザーパルスを入射すれば、プラズマ鏡の速度を時間とともに変化させることができる。

とりわけ、レーザーの進行方向に沿ってプラズマ密度が減少するような分布を設計すれば、プラズマ鏡を加速させることが可能になる。こうして、機械的な鏡では到底実現できない、微小でありながら光速近くまで加速する「鏡」を構成することができる。これが、Moving mirror模型をレーザープラズマ中で実現するための基本的な構想である。

問題は、そこから放出されると予想される擬似ホーキング輻射を、実際にどのように検出するかという点にある。

擬似ホーキング輻射の生成は量子的な過程であり、レーザーとプラズマが行う電磁気相互作用由来の輻射に紛れた中から、そのシグナルを検出しなければならない。しかしながら、擬似ホーキング輻射の持つエネルギーはレーザープラズマ系全体が持つエネルギーと比較して極めて微弱である。レーザーによって激しく運動するプラズマ中の電子は、それ自体がさまざまな電磁波を放射し、この背景放射の一部は、擬似ホーキング輻射が期待される低エネルギー領域と重なる。

したがって、擬似ホーキング輻射の存在を論じるためには、単に低エネルギーの光子を検出するだけでは不十分である。その信号が通常のプラズマ運動から生じる背景放射では説明できないことを示さなければならない。そのためには、とりわけ低エネルギー帯における背景放射を、可能な限り正確に評価する必要がある。

本来であれば、レーザーとプラズマの相互作用を精密に数値計算し、そこから生じる放射を直接求めることが望ましい。しかし、この計算には特有の困難が伴う。

この実験で必要とされるのは、極めて高いエネルギー密度を持つレーザープラズマ現象の中から、何桁も小さなエネルギーを持つ微弱な放射を取り出すことである。時間的・空間的スケールが大きく隔たった現象を、一つの数値計算の中で同時に高い精度で扱うことは、一般に容易ではない。

レーザープラズマ相互作用のシミュレーションには、Particle-in-Cell法(PIC法)と呼ばれる計算手法が広く用いられる。

PIC法では、まず計算対象となる空間を格子状に分割し、電場や磁場をその格子上に配置する。一方、プラズマを構成する膨大な数の電子やイオンを一つずつ計算することは現実的ではないため、多数の実粒子を代表する超粒子(superparticle、macroparticle)を導入する。

格子によって分割された各領域はセル(cell)と呼ばれ、その内部に複数の超粒子が配置される。超粒子の電荷と電流から格子上の電磁場を計算し、その電磁場から超粒子に働く力を求め、粒子の位置と速度を更新する。PIC法では、この二つの過程を交互に繰り返すことによって、プラズマと電磁場の時間発展を自己無撞着に追跡する。

PIC法は、プラズマ中の粒子的な運動と電磁場の双方を扱うことができるため、レーザーによる電子の加速やプラズマ航跡場の形成を解析する上で、極めて有力な手法である。

しかし、PIC法における超粒子は、あくまで多数の実粒子を代表する数値的な粒子である。その数は有限であり、格子にも有限の大きさがあるため、計算結果には粒子数や空間離散化に由来する数値的な揺らぎが含まれる。

擬似ホーキング輻射と同じ低エネルギー帯に現れる背景放射を評価する場合、この問題はとりわけ深刻となる。対象となる放射は、個々の電子からの強い放射によって生じるとは限らない。広い空間領域を運動する多数の電子がそれぞれ放出する、極めて弱い電磁波を積み重ねることによって形成される可能性がある。

このような微弱な寄与を大量に足し合わせる計算では、本来求めたい物理的な信号が、超粒子や格子に由来する数値誤差の中へ埋没しやすい。すなわち、レーザープラズマの主要な運動を再現するには十分な精度を持つシミュレーションであっても、そのはるか下に存在する微弱な放射まで、同じ計算から直接かつ安定に取り出せるとは限らないのである。

そこで、計算された放射そのものではなく、PICシミュレーションによって得られる電子の軌道情報に着目する。

遠方に到達する放射の計算には大きな数値誤差が含まれるとしても、シミュレーション中には、広い空間領域にわたる多数の電子について、その位置、速度、加速度などの時間発展が記録されている。こ

れらの軌道データを適切に解析し、どのような運動をする電子が、どのエネルギー帯の放射に寄与するのかを推定できれば、放射場をシミュレーションから直接抽出する際の困難を回避できる可能性がある。

もっとも、ここで扱う軌道データは膨大である。すべての電子軌道の一つずつ調べることは現実的ではなく、外見上は類似している軌道であっても、放射への寄与が同一であるとは限らない。したがって、大量の軌道から重要な特徴を抽出し、運動の性質に応じて電子を分類する方法が必要となる。

筆者はこの問題に対し、PCAやクラスタリングなどの手法を用いて電子軌道の分類を行った。軌道の特徴づける多数の変数の中から主要な構造を抽出し、類似した運動を示す電子を集団として整理することで、背景放射に寄与する電子群を効率的に同定した⁵。

結び

こうして、重力の量子化という基礎理論上の問題から出発した研究は、ブラックホール、ホーキング輻射、Moving mirror模型、レーザープラズマ、数値シミュレーションへと連なり、最終的には機械学習による大規模データ解析を必要とする事態となった。

一見したところ、ブラックホールと機械学習との間には、ほとんど何の関係もないように思われる。しかし、その間には、解くべき物理的問題と、それを実験および計算によって検証しようとする過程が存在する。研究対象を現実の実験へ近づけるほど、扱うべき系は複雑となり、得られるデータもまた膨大になる。その複雑さと向き合う中で、機械学習は自然に必要とされる道具の一つとなったのである。

プラズマ実験のシミュレーション解析、とりわけ膨大なデータを処理するにあたり、機械学習の手法を用いることは非常に有用であり、避けては通れないということを実感した一方で、データを処理する手続きに対して物理的な理由づけが困難な場合があることもわかった。

近年のニューラルネットワーク(neural network, NN)を用いた機械学習モデルは、学習に用いられていない未知のデータに対しても、妥当な予測を行うことが期待されている。

プラズマ実験での経験から、筆者は現在、NNに

よる予測の精度をどのように理論的に保証し得るのかという問題に関心を持っている。模擬ホーキング輻射の実験のように、膨大なノイズの中から目的のデータを取り出すには、見積もりの誤差範囲が非常に重要となるためである。

特に関心を寄せているのが、Physics-Informed Neural Networks (PINNs) に代表される、物理法則を学習へ組み込む手法である⁸⁾。

我々が積み重ねてきた物理の知識を予測に組み込むことでどこまで精度を向上させることができるのか。またどのような条件のもとで、どの程度の精度の向上が見こまれるのか。物理的制約を与えられたニューラルネットワークの予測を、我々はどこまで信頼することができるのか。

AIの目覚ましい発展のなか、この新たな研究の潮流において筆者も物理の立場から考えるべきことの多い毎日である。

参考文献

- 1) S. W. Hawking, "Black hole explosions?". *Nature* 248, 30-31 (1974)
- 2) S. W. Hawking, "Breakdown of predictability in gravitational collapse". *Phys. Rev. D* 14, 2460 (1976)
- 3) W. G. Unruh, "Experimental Black-Hole Evaporation?", *Phys. Rev. Lett.* 46, 1351 (1981).
- 4) P. C. W. Davies, and S. A. Fulling, "Radiation from a moving mirror in two-dimensional space-

time conformal anomaly". *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 348, 393-414 (1976)

- 5) P. Chen, G. Mourou, M. Besancon, Y. Fukuda, J.-F. Glicenstein, J. Nam, C.-E. Lin, K.-N. Lin, S.-X. Liu, Y.-K. Liu, M. Kando, K. Kondo, S. Paganis, A. Pirozhkov, H. Takabe, B. Tuchming, W.-P. Wang, N. Watamura, J. Wheeler, and H.-Y. Wu, on behalf of the AnaBHEL Collaboration. "AnaBHEL (Analog Black Hole Evaporation via Lasers) Experiment: Concept, Design, and Status". *Photonics*, 9(12), 1003. (2022).
- 6) S. V. Bulanov, T. Esirkepov, and T. Tajima, "Light Intensification towards the Schwinger Limit," *Phys. Rev. Lett.* 91, 085001 (2003); S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, M. Kando, A. S. Pirozhkov, and N. N. Rosanov, "Relativistic mirrors in plasmas — novel results and perspectives". *Physics Uspekhi* 56, 429 (2013).
- 7) F. Quere and H. Vincenti, "Reflecting petawatt lasers off relativistic plasma mirrors: a realistic path to the Schwinger limit". *High Power Laser Sci. Eng.* 9, e6 (2021).
- 8) M. Raissi, P. Perdikaris, G.E. Karniadakis, "Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations". *Journal of Computational Physics*. 378, (2019)

