

インフォメーション・パラドックスとはなにか ブラックホールと認識？

夏梅 誠

1. 問題のあらまし

Zee 先生の言葉を借りれば、「ジャングルにずっといたのでもなければ、ホーキングの予言、ブラックホールは蒸発し放射を起こすことは、聞いたことくらいはあるだろう」¹⁾。ブラックホールからは光さえも逃れることはできないので（光さえも逃れられないこの境界を**地平面**と言う）、ブラックホールは物質を吸い込む一方である。しかし、量子効果を考えると、ブラックホールはエネルギーを放出する。これが1974年、ホーキングによって予言された現象で、**ホーキング放射**と呼ばれる。

ホーキング放射で一つ肝心なことは、ブラックホールからどんな粒子も逃れられない、という考え自体が修正されたわけではないという点である。あとで説明するが、ブラックホールから実際に何か粒子が出ているわけではないからである。ブラックホールはエネルギーだけを熱放射の形で放出する。つまり、ブラックホールは温度をもち、あたかも熱力学的物体として振るまう。

一方で、ホーキングは放射を突きつめて考えると、困った問題が起きることも指摘した（1976年）。これは**インフォメーション・パラドックス**と呼ばれ、大雑把には次のような問題である。今、何か物体をたくさん集めてブラックホールを作ったとしよう。ブラックホールは放射でエネルギーを失い、しだいに蒸発していく。しかし、放射は熱放射であり、温度以外に特徴はない。ブラックホー

ルを作り出した物体がどんなものでも、放射は同じである。ブラックホールが放射以外何も残さずに完全に蒸発したとすると、物体の情報はどこに消えたのだろうか？

以来40年経つが、この問題は未解決のままである。1990年代に、この問題が精力的に調べられたこともあったが、解決には至らなかった。しかし、近年、**量子もつれ**（量子エンタングルメント）の知見を使って、この問題が再び盛んに議論されている。特に、インフォメーション・パラドックスを再構成した**AMPS パラドックス**^{*1)}、またこの問題を解決するために彼らが提案した**ファイアウォール仮説**の是非をめぐるものが多い。

本稿ですべての発展をカバーすることはできないが、特にインフォメーション・パラドックスの初歩についてはなるべく詳しく説明し、近年の発展にまで触れたい。また、本特集のテーマは「物理と認識」であるが、これに関連して**ブラックホール相補性**と呼ばれる考えにも触れることにする^{*2)}。

*1) AMPS は、このパラドックスを提案した著者4人の頭文字（Almheiri, Marolf, Sully, Polchinski）。

*2) なお、インフォメーション・パラドックスについて、より詳しく学びたい人向けとして、文献2,3)がある。これらの文献に原論文はあらかじめカバーされているので、本稿ではいちいち原論文は挙げない。また、AMPSパラドックスの著者自身による一般向けの解説もある⁴⁾。

2. 量子力学のおさらい

インフォメーション・パラドックスについて詳しく説明する前に、まず量子力学のおさらいをしておく。加えて、ホーキング放射を考える上で参考になる系を2つ考える。簡単のため、スピン1/2の系をしばしば引き合いに出すことにする。

量子力学は確率的予言をおこなうので、通常同一の系を多数想定する。同一の系とは、特定の波動関数であらわされる系のことで、たとえば上向き(下向き)スピン状態 $|\uparrow\rangle$ ($|\downarrow\rangle$)がそうである。このような場合を**純粋状態**と言う。

一方、状況によっては、初期状態としてスピンの向きがまちまちな系しか用意できない場合もある。たとえば、 $|\uparrow\rangle$ と $|\downarrow\rangle$ が50%ずつ混じっている場合などである。この場合、得られる結果は $|\uparrow\rangle$ と $|\downarrow\rangle$ についての平均だけである(アンサンブル平均)。たとえば上記の場合、スピン S_z の平均は0である。このような特定の波動関数ではあらわされない場合を、**混合状態**と言う。混合状態は特定の波動関数であらわされず、それぞれの純粋状態のまじり具合をあらわす**密度行列** ρ であらわされる。

混合状態の一例が、熱放射である。つまり、スピン系の例のように、熱放射は本来初期状態についての平均を取ること得られる。

2.1 EPRの思考実験の場合

つぎに、一粒子系を離れて二粒子系を考える。**Einstein-Podolsky-Rosen (EPR)の思考実験**を考えてみる。EPRの思考実験では、たとえば二粒子のスピン一重項状態を考える(図1)：

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B - |\downarrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B) \quad (1)$$

ここでA, Bは各粒子をあらわす。

この系は、全系としては特定の波動関数(1)であらわされるので、純粋状態である。しかし、Bのスピンだけを観測すると、 \uparrow, \downarrow の結果が50%ずつランダムに得られる。つまり、部分系Bだけを取ると、混合状態である。

このような状態を量子もつれの状態にあると言

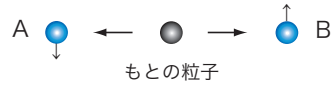


図1 EPRの思考実験。EPRペアA,Bは、たとえば何か他の粒子の崩壊によって作ることができる。A,Bは反対方向に飛び離れたとしても、もつれたままである。

う。量子もつれ状態では、Bという部分系だけ見ても情報は得られない。情報は、たとえばBが \uparrow (\downarrow)ならAは \downarrow (\uparrow)というふうな、AとBの相関にある。上の例では、Bの結果は完全にランダムなので、特に最大限の量子もつれ状態と言う。

2.2 太陽の場合

今度は太陽を考えてみよう。たとえば、純粋状態としてこの雑誌を太陽に落としたとする。すると、雑誌は燃えつき、熱放射が観測される。このため、ブラックホールと同じく雑誌の情報は失われてしまう。しかし、この過程が量子力学に矛盾するとは誰も思わない。なぜだろう？

第一に、雑誌が熱放射になったのは、太陽という「熱浴」に接したためである。EPRの実験同様、放射は系の一部でしかない。太陽の状態までみる必要がある。

第二に、実際の天文学的な太陽の発展は複雑であり、そのあたりここでは気にしていないが、最終的に太陽が燃えつき、放射だけが残ったとしよう。この場合は、全系が放射となるが、そうすると雑誌の情報は放射に含まれているはずである。放射の一部だけを取り出すとランダムにしかみえないが、放射には実は相関があり、全体としては純粋状態を保っているはずである。つまり、すべての放射を追跡できれば、雑誌の情報を再構成できるはずである。もちろん、現実的にはそんなことはできない。しかし、原理的にはそれを妨げるものはない。太陽が熱放射をおこなう、と言うのは混合状態としての意味で、初期状態についての平均を取った上でのことである。

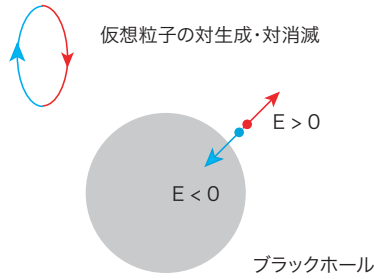


図2 ホーキング放射.

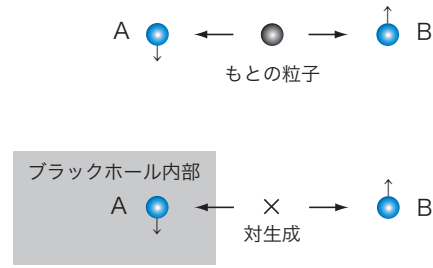


図3 EPR ペア (上) とホーキングペア (下). EPR ペアの状況はホーキングペアの状況と似ている.

3. インフォメーション・パラドックス

インフォメーション・パラドックスをより理解するため、まずホーキング放射のメカニズムについて考える。ホーキング放射は物質の量子効果によってもたらされる。

物質の量子効果を考えると、真空でもマイクロなスケールでは仮想粒子の対生成が起こることになる。この対生成が地平面の外で起きたとしよう (図 2)。この粒子対 (以下、ホーキングペアと呼ぶ) は、正エネルギーと負エネルギーの粒子からなる。正エネルギーの粒子は、ブラックホールから逃れることができる。一方、負エネルギーの粒子はブラックホールに吸い込まれる。負エネルギー粒子が吸い込まれるため、結果的にはブラックホールのエネルギーは減り、ブラックホールは次第に小さくなっていく。遠方の観測者には、正エネルギーの粒子が届くので、あたかもブラックホールから粒子が届いたように見える。これがホーキング放射である。

この状況は、EPR の思考実験の状況と似ている (図 3)。真空から対生成で生まれたので、ホーキングペアも量子もつれの状態にある。しかし、観測されるのは粒子対の一方だけなので、ランダムな熱放射、混合状態に見えるのである。ただし、このこと自体には何の問題もない。EPR の思考実験同様、地平面の外は考えている量子系の一部でしかないからである*3)。

*3) ここで書いたホーキング放射の初等的説明はよくみかけるもので、いろいろ語弊な点もあるが、量子もつれにあるからランダムに見えるという点は大切なポイントである。

さて、話をインフォメーション・パラドックスに戻すと、今ブラックホールを純粋状態の物体から作ったとしよう。ホーキング放射は系の一部でしかないので混合状態だが、ブラックホールとホーキング放射の全系は純粋状態のままである。しかし、ブラックホールが何も残さずに蒸発したとすると、全系が熱放射になってしまう。この場合、当初の純粋状態が、混合状態に遷移したことになる。しかし、量子力学では時間発展がユニタリである限り、純粋状態は混合状態に遷移することはない*4)。つまり、**ブラックホールの蒸発は量子力学のユニタリ性と矛盾する**。この点が問題である。

また、前節では太陽も引き合いに出したが、ブラックホールの中からは情報を外に送ることができない。したがって、太陽とは違い、もともとブラックホールを作り出した物体の情報を、放射全体の相関に帰するわけにはいかない。実際、ホーキング放射は厳密に熱放射であり、初期状態について何か平均を取って得られたものではない*5)。

*4) $|\uparrow\rangle$ の純粋状態に対し、密度行列は $\rho = |\uparrow\rangle\langle\uparrow|$ となる。 $\rho^2 = \rho$ に注意、 ρ の時間発展は、時間発展のユニタリ演算子 $U(t, t_0)$ を使うと、 $\rho(t) = U(t, t_0)\rho(t_0)U^\dagger(t, t_0)$ となる。したがって、 $\rho(t_0)^2 = \rho(t_0)$ ならば、 $\rho(t)^2 = \rho(t)$ のままである。

*5) そもそも、ブラックホールの外部時空は質量だけでユニークに定まり (シュワルツシルド・ブラックホールの場合)、ブラックホールを作り出した物質の性質にはよらない (ノー・ヘア定理)。何らかの意味で、ブラックホールの存在そのものが、初期状態についてのアンサンブル平均を取ったことに対応するようにも思える。

4. パラドックスをどう解くか？

4.1 パラドックスの解決策

このパラドックスをどう考えるかについては、これまでに様々な提案がなされてきたが、主なものとして3種類ある：

- 案1 ユニタリ性は破綻し、情報は失われる。
- 案2 ユニタリ性は保たれ、情報は失われない。
- 案3 ブラックホールは蒸発しきらず、情報を蓄えた微視的物体 (“remnant”) が残る。

これらの可能性の説明の詳細は他文献に譲るが³⁾、どのシナリオにも難がある。

案1はホーキングのもととの立場で、彼は量子力学の修正を提案した。一方、素粒子論のコミュニティでは、主に案2が支持されてきた。なお、案3を支持する者は現在ほとんどいない。

4.2 いくつか確からしいこと

おいおい説明していくが、インフォメーション・パラドックスは、我々が土台としている理論の基本的な概念に修正を迫っている。こういう問題を突き詰めて考えていくと、当然のように考えている前提のどれにも自信がもてなくなり、何を前提として考えるべきかわからなくなってしまう。そこで、話を絞るために、現時点でいくつか確からしいことを、手がかりとして挙げておこう：

1. **量子力学は確からしい。** 量子重力も含めた統一理論の最有力候補である超弦理論によると、一般相対論は基本的な理論ではなく、十分ミクロなスケールでは修正される。ただし、マクロなスケールでは、一般相対論は十分よい近似である。一方、超弦理論は量子力学に基づいており、現在のところ量子力学を積極的に修正すべき兆候はみられない。
2. **ホーキング放射は統計力学的に導出可能である。** 超弦理論はホーキング放射の微視的導出に成功している。その際、熱放射が得られるのは、初期状態についての統計平均を取った上でのことである。その意味で、ブラックホールも太陽と同じである。

3. **他にもブラックホール蒸発の過程がユニタリだと考える根拠がある。** 超弦理論の考えである AdS/CFT 双対性 (ホログラフィー理論) によると、重力理論がゲージ理論と等価だとされる。ここでは、AdS/CFT 双対性についてもゲージ理論についても説明できないが⁵⁾、詳細は気にしなくていい。肝心なことは、ゲージ理論は通常の場の量子論であり、ユニタリ性を保つという点である。したがって、重力理論もユニタリ性を保つと考えられる。

4.1 節ではパラドックスの解決策を3つ紹介したが、案2が主に支持されているのは、これらの手がかりからだろう。そこで本稿では、今後この立場を検討するが (ホーキングも、近年ではこの立場で考えているようである)、以下みるように、この立場にも深刻な問題がある。

5. 情報のクローン問題

以上、述べたことを踏まえ、以下**情報は失われないという立場を取ることにする**。しかし、この立場を守るのも至難の業である。なぜなら、ホーキングの計算によると、放射は熱放射であるべきだし⁶⁾、これまでみてきたように、これは物理的にも自然だからである。とりわけ問題になるのは、以下説明する「情報のクローン問題」である。

ブラックホールに物体を落としたとする。情報が失われないのなら、物体の情報はホーキング放射に何らかの形で反映されているはずである。しかし、ブラックホール内部から外へは情報を送れない。したがって、物体が地平面を通過する前に、物体の情報が反映されなければいけない。

しかし、十分大きなブラックホールの場合、地平面での重力は大きくはない。落下した物体にとっては、地平面近傍で重力の影響は無視できて、通常の物理法則が成立するはずである (一般相対論

*6) 唯一怪しいとしたら、ブラックホールが蒸発しきるほど小さくなった場合のことがよくわかっていない。このような場合には、量子重力効果が強く効くと期待されるからである。しかし、情報をブラックホールから取り出すのにそこまで小さくなってからでは手遅れだと考える根拠がいくつかある³⁾。

の等価原理)。つまり、地平面で変わったことは何も起きず、地平面を通過したことさえ意識しないはずである。そうすると、物体の情報がホーキング放射に反映されると言っても、物体の情報が地平面で破壊されてホーキング放射に移る、ということとはなさそうだ。

しかし、そうすると、物体の情報はホーキング放射にコピーされていると考える必要がある。ところが、量子力学にはクローン不可能定理と呼ばれる定理がある。この定理は量子情報理論で要となる役割を果たしており、たとえば量子暗号の安全性を担保している。この定理によると、任意の量子状態をコピーできるユニタリ演算子は存在しない。量子力学の線形性と矛盾するからである*7)。こうして、物体の情報をホーキング放射にコピーすることもできそうにない。

6. ブラックホールと認識?ブラックホール相補性

こうして、量子力学を救うつもりでいたが、クローン問題によって再び量子力学は窮地に立たされたように思える。この点を動機として生まれたのが、ブラックホール相補性という考えである。平たく言えば、**情報はコピーされても構わない。なぜならオリジナルとコピー、両方を観測できる観測者はいないから**、という考えである。

これまでブラックホールに物体を落としてきたが、ここではホーキング放射の観測者とは別の観測者が落ちていくものとしよう。ブラックホールに落ちた観測者の情報はコピーされて、ホーキング放射に反映されるとする。これは、もちろんクローン不可能定理に反する。しかし、

- ブラックホールに落ちた観測者は、ホーキング放射を観測できない。したがって、自分の情報がコピーされたことはわからない。

- 一方、ホーキング放射の観測者は、ブラックホールに落ちた観測者を追跡できない。したがって、コピーは観測できても、オリジナルは観測できない。より詳しく考えると、ホーキング放射は一見ランダムなので、コピーの情報を取り出すためには、ブラックホールがある程度蒸発するのを待つ必要がある*8)。これは控えめに言っても、かなりの長期間である。その後、オリジナルの情報と比べるために、ブラックホールに飛び込んでも、もう手遅れである。ブラックホールに落ちた観測者の情報は、特異点で破壊されるからである。

したがって、双方の観測者の観測をまとめると、以下の通りである。ブラックホールに落ちた観測者にとって、自分の情報は地平面を横切り、特異点で破壊される*9)。一方、外部の観測者には、ブラックホールに落ちた観測者の情報がホーキング放射に漏れ出している。全体としての観測が矛盾しているように思えても、それぞれの観測者にとってコンシステントな記述があれば良いという考えである。外部の観測者の記述が、内部の観測者のものと一致しなくて良い。どちらが、より正しいということはない。その意味で、外部と内部の記述は「相補的」なのである。

6.1 観測可能性についてのコメント

ブラックホール相補性をはじめて聞いたのは、私の学生時代に遡るが、正直に打ち明けると、私にはいつもわかった気がしない(私が真剣に考えていないせいもあるだろうが)。ブラックホール相

*7) 今、 $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$ に対し、クローン可能なユニタリ演算子 U が存在したとする：

$$U|\uparrow\rangle = |\uparrow\uparrow\rangle, \quad (2)$$

$$U|\downarrow\rangle = |\downarrow\downarrow\rangle. \quad (3)$$

ここで $|\psi\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$ という状態を考えよう。量子力学の線形性から、 $U|\psi\rangle = a|\uparrow\uparrow\rangle + b|\downarrow\downarrow\rangle$ である。しかし、ほしいクローン状態は、 $|\psi\psi\rangle = (a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle)(a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle)$ であり、これは $U|\psi\rangle$ とは異なる。

*8) 情報が失われないのなら、太陽の場合と同様、ホーキング放射は完全にランダムではないはずで、放射全体は相関しているはずである。具体的には、たとえ放射の前半がランダムであっても、放射の後半はランダムにはなり得ない。前半と後半は、相関しているはずである。ということは、ホーキング放射から情報を取り出すためには、ブラックホールが半分は蒸発するのを待たなければいけない。

*9) ここで、情報が何の困難もなく、地平面を横切ることは、等価原理によって保証されていることに注意。この点が次節でやり玉に挙がる。

補性は、相対論や量子力学でもカギとなる観測可能性という考えに影響を受けたと思われ、その考えを拡張したのもであらう。筆者は認識論についても科学史についても素人であるが、本特集のテーマは「物理と認識」でもあるので、このような考えについて簡単にコメントしておく。

このような考えは、たしかに相対論や量子力学では成功を取めた。他方、このような考えについては、ハイゼンベルクに問われて、誰であろうアインシュタイン自身が注意を喚起したことがあったようである⁹⁾。実際、観測可能性の考えが裏目に出たこともある。たとえば、

1. 原子の実在性についてのマッハらの批判。
2. クォークの実在性についての疑義。クォークは、**通常状況下では陽子や中性子内部に「閉じこめられて」おり単体では観測できない。**原子の場合では、当時技術的に観測可能ではなかったというだけであつたし、クォークの場合も同様である。要するに、観測可能性という考えは、注意して扱う必要がある。

不確定性原理や量子力学の相補性の場合、観測可能性の是非は、結局のところ、量子力学そのものによって裏づけされている。だとすると、現時点でブラックホール相補性に欠けているのは、その考えを具体化する理論であらう。

7. 新たなパラドックスとファイアウォール仮説

近年、インフォメーション・パラドックスが再び盛んに議論されるようになってきている。最近の特徴は、特に量子もつれの知見を活用している点である。

ブラックホール相補性の考えは、ユニタリ性を前提としているが、等価原理も前提として手つかずとしている。しかし、**AMPSパラドックスは、この2つの前提が相いれないと指摘した**^{*10)}。

*10) AMPSパラドックスはブラックホール相補性の考えに問題があると主張したが、正確にはブラックホール相補性の前提のどれかが誤っているというものであり、ブラックホール相補性の考え自体が誤っているかどうかは、議論の余地がある。

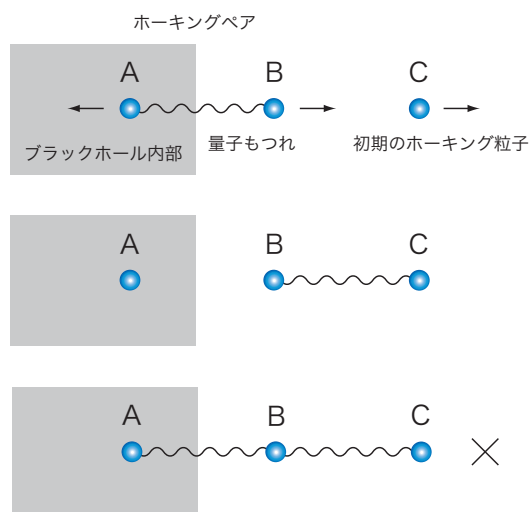


図4 AMPSパラドックス。(上)ホーキングペアA,Bはもつれている。(中)ホーキング放射が情報をもつとすると、B,Cはもつれている。(下)量子力学によると、BはAまたはCと最大限にもつれていてもよいが、A,C両方と同時に最大限にもつれることはできない。

ブラックホールが少なくとも半分蒸発した時点で、対生成されたホーキングペアを考えよう。地平面内部の粒子をA、ホーキング放射の粒子をBとする。これまでみてきたように、AとBは量子もつれの状態にある(図4上)。一方、情報が失われぬのなら、太陽の場合と同様、放射全体は関連しているはずである。つまり、初期に放出されたホーキング粒子CとBももつれていなければいけない(図4中、脚注8を参照)。しかし、最大限の量子もつれ状態になるのは、2つの系の間だけで、3つの系が同時に最大限にもつれることはあり得ないことが知られている^{*11)}。BはAとC両方とももつれているという議論は、この性質と矛盾する(図4下)。これがAMPSパラドックス

*11) 少し違った言い方をすると、ABという複合系がもつれていて純粋状態であり、かつBCも純粋状態ということはありません。専門的には、量子もつれの度合いを測る尺度として、「エンタングルメント・エントロピー」と呼ばれる量がある。3つの部分系からなる系では、エンタングルメント・エントロピーについて「強劣加法性」と呼ばれる性質がある。AMPSパラドックスは、今考えている系ABCがこの性質と矛盾するという主張である。

蒸発は非ユニタリ？ → 超弦理論による手がかり：ユニタリ？

✓

情報のクローン問題 → ブラックホール相補性？(等価原理を仮定)

✓

AMPS パラドックス → ファイアウォール？(等価原理 ×)

図 5 本稿での議論の流れ。

である。

AMPS パラドックスを回避する1つの解決策は、AB, BC のもつれの一方を断ち切ってしまうことである。ユニタリ性を保持するには、BC のもつれは断ち切れない。そうすると、AB のもつれを断ち切るしかないが、このためファイアウォールと呼ばれる仮説が提案された。地平面で高温の壁、ファイアウォールが存在すれば、AB のもつれが断ち切れるというのだ。

等価原理によると、地平面では何も特殊なことは起こらないはずだが、ファイアウォールの存在はこれと対立する。つまり、**ファイアウォールは量子力学を救うかわりに、等価原理をあきらめるという主張である**。4.2 節でも触れたように、超弦理論によれば、一般相対論は基本的な理論ではなさそうなので、一般相対論をあきらめるということ自体は十分ありえる話だが、マクロなスケールでは一般相対論で十分良い近似のはずである。にもかかわらず、ファイアウォール仮説が正しければ、マクロなスケールでも等価原理をあきらめなければいけない。

ファイアウォール仮説について、これ以上詳しく議論できないが、2つコメントしておく。まず、この仮説の最大の問題は、ファイアウォールがどのように生じるか、その物理的過程が明らかでない点である。ブラックホールは重力崩壊で生まれるが、その歴史のなかで、ファイアウォールがどのように生じるのか明らかでない。また、インフォメーション・パラドックスの解決策の1つとして、**厳密な意味でのブラックホール^{*12)}は存在しないと**

いう考えがある。ファイアウォールも、そういった考えの一種とも考えられる(ファイアウォールが時空の終端となり、ブラックホール内部の時空が存在しない可能性がある。)

8. まとめ

本稿では、情報は失われないという立場で議論を進めてきたが、ユニタリ性を救おうとして、どんどん深みにはまっているように読者には思えたかもしれない(図5)。いさぎよくユニタリ性をあきらめた方が手っとり早いのではないか？という疑問もあるかもしれない。ただ、4.1 節で述べた他の可能性にも、様々な困難があり、深みにはまるという点では似たり寄ったりである。また、4.2 節で述べた我々が手にしている少数の手がかりが、いずれも情報は失われない、という方向を指し示していることも忘れてはいけない。

ユニタリ性をあきらめるのか、それともファイアウォールのように等価原理をあきらめるのか、はたまたブラックホール相補性のように観測可能性に注意すべきか、決着はついていない。しかし、いずれにせよ、インフォメーション・パラドックスは我々が抱えている基礎的概念に大きな変更を強いているように思える。パラドックスの早い解決を望むとともに、解決の果てにどのような地平が開けるのか、楽しみである。

草稿を読んで有益なコメントを寄せていただいた阿部純義さん、岡村隆さん、細谷暁夫さんに感謝

^{*}12) でのブラックホールとは「事象の地平面」をもつという意味である。

^{*}12) 実は、地平面と言ってもいくつか種類があり、厳密な意味

します。

参考文献

- 1) A. Zee, “Einstein Gravity in a Nutshell” (Princeton Univ. Press, 2013).
- 2) D. Harlow, “Jerusalem Lectures on Black Holes and Quantum Information,” arXiv:1409.1231 [hep-th].
- 3) 夏梅誠, 「ブラックホールと時空」, 『現代物理最前線 7』 (共立出版, 2002).
- 4) J. ボルチンスキー, 「時空の終端ファイアウォール」, 日経サイエンス 2015 年 7 月号.
- 5) 夏梅誠, 『超弦理論の応用—物理諸分野での AdS/CFT 双対性の使い方—』 (サイエンス社 SGC ライブラリ 93, 2012).
M. Natsuume, “AdS/CFT Duality User Guide” (Lect. Notes Phys. **903**, Springer, 2015).
- 6) W. ハイゼンベルク, 『部分と全体』 (みすず書房, 1974). 長くなるが引用しておく. 『アインシュタインは反論した. 「しかしあなたは, 物理学の理論では観測可能な量だけしかとりあげ得ないということを, 本気で信じてはいけません。」私は驚いて聞き返した. 「まさにあなたこそ, この考えをあなたの相対性理論の基礎にされたのではなかったのでしょうか? (中略)」 「おそらく私はその種の哲学を使ったでしょう。」アインシュタインは答えた. 「しかし, それでも, やはりそれは無意味です. あるいは, もう少し控えめな意味で, われわれが実際に観測するものを思い出すことは発見の手順としては価値のあることと言えるかも知れません. しかし原理的な観点からは, 観測可能な量だけをもとにしてある理論を作ろうというのは, 完全に間違っています. なぜなら実際はまさにその逆だからです. 理論があつてはじめて, 何を人が観測できるかということが決まります. (以下略)』

(なつうめ・まこと, 高エネルギー加速器研究機構)