

## まえがき

アルバート・アインシュタインが「一般相対性理論」を完成させてからほぼ100年後の2015年9月14日。アメリカ、ルイジアナ州とワシントン州にある2つの巨大な検出器は、重力波の検出を目的とした科学運用の最終準備中であった。突然、思いがけなく検出機器が奇妙なチャープ音を記録した。

その5ヵ月後、レーザー干渉計型重力波検出装置「LIGO」は、これらの検出器に記録されたデータを精査し、その結果を公表した。その「チャープ音」は、まさに彼らが期待した通りの信号で、2つのブラックホールが合体して、より大きな1つのブラックホールになる際の反響（エコー）だった。物理学界に衝撃が走った。それはまるで、赤という色を見たこともなく生きてきたところに、初めて真っ赤なバラを見た瞬間のようなものであった。

それはなんとというバラだったのでしょ！ LIGOの見解では、各々太陽の約30倍もの質量をもつ2つのブラックホールが、10億年以上も前に合体した際のわずかな信号を記録したものと推定されている。合体の際には太陽質量の3倍に相当するエネルギーが重力波として放射されたのだ。

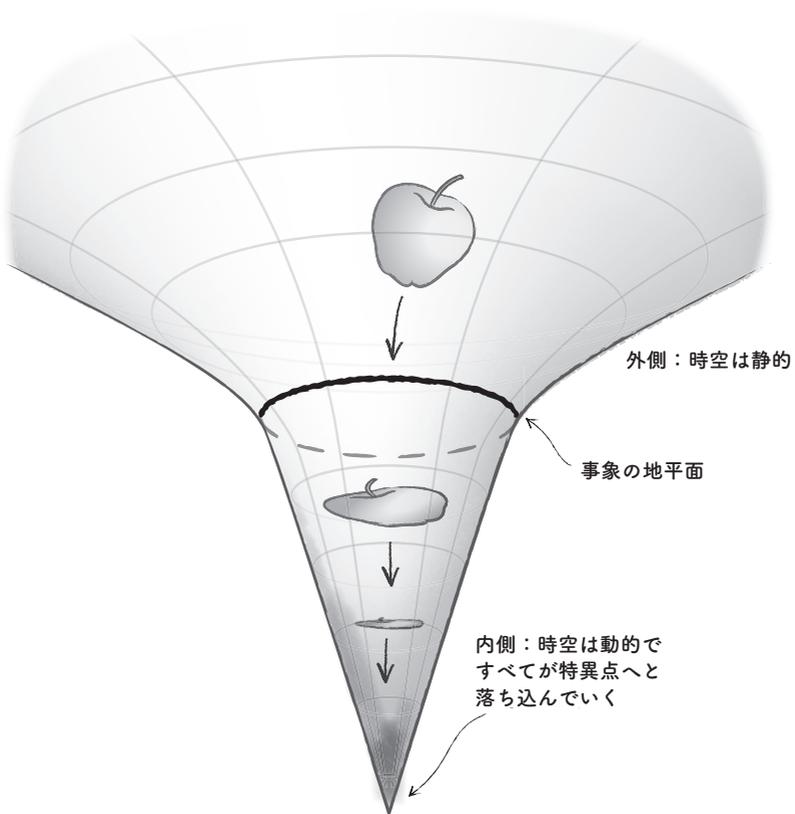
ブラックホールも重力波も、アインシュタインの一般相対性理論から導かれる。一般相対性理論では、ブラックホールが合体した場合、LIGO検出器でどのような重力波が観測されるかを予測しているが、9月14日に記録されたチャープ音は見事にその予想通りのものであった。

この史上初の検出は、長年棚上げになってきた理論的アイデアの正当性が証明されただけでなく、重力波天文学の時代の到来を告げるものであった。LIGO検出器は、私たちが何十年も夢見てきたような事象をついに検出したのだ。そして今、私たちは全く驚くべき重力波の世界を探検しようとしているのだ。

科学が数学的に厳密であることはめったにないので、LIGOがこの小さなチャープ音を10億年前のブラックホール合体のエコーだと解釈したことに、どれだけの確信があるのかを問わねばなりません。手短かに答えれば、「かなり確か」であり、すべてが合致しているように見える。同一の信号が両方の検出器に見られ、この信号を説明できるようなことが、近所で起こっているとは考え難いのだ。信号は、現在の装置では十分な強度だったが、以前の技術では観測できないほど弱いものだった。10億年前のブラックホール同士の合体の仮説は、私たちが一般的に理解している宇宙物理学や宇宙論と矛盾するものではありません。重要なのは、このような現象がもっと起こると、期待出来ることだ。実際LIGOは、2番目の事象を2015年のクリスマスに、3番目の事象を2017年1月4日に確認したと発表している。これらの事象は、大ざっぱに言えば最初の発見と同質であり、LIGOが本当にブラックホール合体を観測していることをより確信させてくれる。このように、私たちは、ブラックホールが重要な役割を果たす観測的な宇宙物理学の幕開けに立ち会っているようなのだ。

この本では、ブラックホールを、今やその存在を疑うことのない宇宙物理学の対象として、さらに重力だけでなく量子力学や熱物理学の理解を深めるための理論的な実験場として扱っていく。第1章と第2章では、特殊相対性理論と一般相対性理論について説明する。その後続く章では、シュバルツシルト・ブラックホール、回転するブラックホール、ブラックホール同士の合体、重力波、ホーキング放射、情報損失などについて解説する。

では、ブラックホールとは何だろうか？ 基本的には、物質が引き寄せられ、そこから脱出することが出来ない時空の領域である。ここでは、最も単純なブラックホールであるシュバルツシルト・ブラックホール（発見者のカール・シュバルツシルトにちなむ）に焦点をあてて話を進めよう。「上がったものは必ず下がる」という古い言葉がある。しかし、シュバルツシルト・ブラックホールの内部では、「何も上らない。下がるだけだ。」という表現が真実になる。しかし「下る」ということが、最終的にどこにつながるのかは確信が持てない。最も単純には、シュバルツシルト・ブラックホールの数学的背景を考えると、恐ろしいほど無限に圧縮された物質のかたまりが、その核に潜んでいるという仮説が考えられる。その核との衝突は、すべての終わりである、時間さえも。しかし、ブラックホールに入った観測者は、見たことを報告することができないので、この仮説の検証



**図 0.1** ブラックホールの模式的な断面図。地平面から遠く離れた外側では、時空は平坦である。地平面に向かうにつれて、時空はより曲がっていくが、時間には依存しないので静的な状態である。しかし、地平面を越えると、時空は動的なものになる。時間が流れるにつれて、空間の3次元のうち2次元（幾何学的形状は球体）は圧縮され、3つ目の空間次元（図示していない）は引き伸ばされ、すべての空間が特異点へと引き伸ばされつつ、つぶされていく。

は難しい。

シュバルツシルト・ブラックホールについてより詳しく見ていく前に、ちょっと後戻りして、よりマイルドな重力について考えてみよう。地表においてある物体に十分大きな上昇速度を与えると、その物体は永遠に上昇し続けることになる。その最小の速度が脱出速度である。空気抵抗を無視した脱出速度は、およそ秒速 11.2km。ちなみに、人にとっては脱出速度の 0.5% 以下の秒速約 45m でボ

ールを投げることすら難しい。高性能ライフルの初速度でさえ秒速約1.2kmで、脱出速度の10%強にしかならない。つまり、「上がるものは下がる」というのは、地球の重力が強く、通常的手段では物体を上昇させ続けることができないことを意味している。

ロケットは、地球の重力を完全に克服し、物体を宇宙へ送り出す現代的な手段である。地球の重力から逃れるために、ロケットが秒速11.2kmより速く飛ぶ必要はない（実際に、秒速11.2kmのロケットもあるが）。ロケットの速度が遅くても、地球の重力が弱くなる高度まで燃料があれば、ロケットは上昇し続けることができる。このような高度では、脱出速度も小さくなる。つまり、探査機を地球の重力圏から完全に脱出させるためのロケットは、噴射が停止する地点で脱出速度より速ければ良いことになる。

では、地球がもっと密度が高かったらどうだろう。重力場がより強くなるため、地表からの脱出速度はより大きくなる。宇宙で最も密度が高い安定した物質は、中性子星である。たった半径12kmの球体に、太陽の約1.5倍もの質量が詰め込まれている。地球の重力場の1000億倍ともいわれる巨大な重力によって、通常物質は完全に押し潰されてしまう。半径12kmの場所では、脱出速度は光速の約60%にもなる。

しかし、ここで止まる必要があるだろうか？ 思考実験として、中性子星をさらに圧縮してみよう。中性子星を半径4.5kmくらいまで圧縮すると、脱出速度が光速に達する。これを超えると、重力の性質がまったく変わってしまう。もはや、どのような形の物質であれ、重力に逆らって自らを保つことは不可能なのだ。時間に沿って進むということは、常に半径の内側方向に移動することになる。脱出は不可能となり、これがブラックホールである。

本書の最初の数章の中心的な目的は、ブラックホールという概念をより正確に記すことである。ブラックホールの「表面」である「事象の地平面」という重要な概念を探求しよう。事象の地平面とは、3次元空間における2次元の軌跡という、幾何学的な意味での表面である。例えば、最も単純なシュバルツシルト・ブラックホールでは、地平面は完全な球体で、その半径はシュバルツシルト半径と呼ばれる。ブラックホールの地平面の奇妙なところは、(少なくとも従来の理解では)地平面が特定の何かの表面ではないことだ。ブラックホールを通過する瞬間は、特に何も感じない。ただ問題なのは、そこから引き返そうとしたときだ。ロ

ケットやレーザー光線などを使ってどんなに頑張っても、外から助けられても、地平面の外に戻ることはできないし、閉じ込められたというSOS信号を出すこともできない。ブラックホールの地平面は、滝の縁のようなものだ。滝の縁を越えると、時空はあらゆるものを破壊する特異点に、否応なく落ち込んでいく。

ブラックホールは単なる思考実験の産物ではない。それは、宇宙では少なくとも2つの状況下で誕生すると考えられている。一つは、先ほどの中性子星と同じような状況である。大きな星が核燃料を使い果たしたとき、その星は自ら崩壊する。この崩壊が超新星爆発で、大量の物質を周囲の宇宙に吹き飛ばし、撒き散らす。(実際に超新星は、金属などの重元素を宇宙に供給する重要な役割を担っていると考えられている。)あとに十分な質量が残るので、中性子星を形成し、かつ安定した状態を保つことは不可能である。その代わりに、この残った質量が潰れて、少なくとも太陽の数倍の質量を持つブラックホールが形成されるのだ。LIGOが観測したブラックホールはもっと質量が大きいですが、それでも恒星の崩壊によって生成されたと考えるのが妥当だろう。

銀河の中心には、もっと大きなブラックホールが存在すると考えられている。これらのブラックホールがどのように形成されたのかについては、より謎が多く、ダークマターや宇宙初期の物理、あるいはその両方が関係している可能性がある。銀河の中心にあるブラックホールは、太陽の数千倍から数十億倍というとても重い質量を持っている。天の川銀河の中心には、約400万太陽質量のブラックホールが存在すると考えられている。ブラックホールの地平面から信号が届かないのに、どうしてブラックホールがあると言えるのだろうか？ その答えは、近くの天体がブラックホールの重力の影響を受けているからだ。天の川銀河の中心付近の星の動きを追跡することで、非常に質量が大きく、密度の高い天体がそこに存在することがわかる。この方法では、それがブラックホールであることを証明することはできない。しかし、もしブラックホールでないなら、もっと奇妙な天体ということになる。つまり、ブラックホールは最も単純な可能性であり、ほとんどの銀河の中心に存在すると、現在では考えられている。

ブラックホールは、天体物理学で扱う他の天体に比べて数学的に単純であるため、非常に有用な理論的研究対象である。恒星は実に複雑だ。恒星の中心での核反応がエネルギーの源だが、恒星内の物質は圧力を受け、流体力学的な運動をし

しており、数値的なシミュレーションは出来ているが、完全に理解されているわけではない。そして、恒星表面での力学も、おそらく地球の気象パターンと同じくらい複雑だろう。それに比べて、ブラックホールは不思議なほど単純だ。他の物質がない場合、ブラックホールはいくつかの決まった形のうちの1つに落ち着くしかない。そのすべては、アインシュタインの一般相対性理論を解く曲がった空間での幾何学として明確に理解されている。確かに、落下する物質によっては描像が複雑になるが、通常物質がブラックホールに落下したときにどのように振る舞うかについては、それなりに理解されている。最近では、あるブラックホールが別のブラックホールと衝突したときに何が起るのか、数値的な理解も進んでいる。本書の第6章では、どのようにしてこうした成果が得られ、LIGOなどの実験がどのような意味を持つのかを説明する。

さらに奇妙なことに、ブラックホールは本当の黒ではない。スティーブン・ホーキングは、量子力学を用いて、ブラックホールの表面には、重力に関する温度が確かにあることを示した。実際、ブラックホール熱力学という研究分野があり、ブラックホール解の幾何学的性質が、熱の研究でおなじみの性質である温度、エネルギー、エントロピーと関連しているのである。また、宇宙の遠方にあるブラックホールは内部が重なり合っている可能性があり、その重なり合った内部が「量子もつれ」として知られる量子効果の発現に役立っているという提案さえある。これらのテーマについては第7章で紹介する。

ブラックホールは、今日に至るまで科学者の想像力をかき立てている。天文学者は、回転するブラックホールの特徴を示すより明確な証拠を求めており、現在では、ブラックホール合体時の激しい現象を理解するために、重力波観測所との共同研究を望んでいる。アメリカ（ワシントン州ハンフォードとルイジアナ州リビングストンにある2つのLIGO検出器）、ヨーロッパ（VirgoとGEO600）、日本（KAGRA）、インド（LIGOIndia）に検出器ネットワークを構築する世界的な取り組みが進行中であり、これは重力波天文学の始まりに過ぎないのだ。一方、弦理論家は、ブラックホールを重力における量子効果を探る手段としてだけでなく、重イオン衝突、粘性流体、超伝導体など多様な物理の類似の現象として、より高い次元で研究している。そしてブラックホールは、私たちに奇妙な疑問を抱かせる。ブラックホールは私たちの役に立つのだろうか？ その内部はどうなっているのだろうか？ ブラックホールに落ちたらどうなるのだろうか。あるいは、私

私たちはすでにブラックホールに落ちていて、まだそれに気づいていないだけなのだろうか？

# 目次

まえがき	i
------	---

## 第1章 特殊相対性理論

1-1 ミンコフスキー時空	1
1-2 ローレンツ変換と時間の遅れ	4
1-3 長さの収縮	7
1-4 $E=mc^2$	8
1-5 マクスウェルの電磁気学	10

## 第2章 一般相対性理論

2-1 重力場	15
2-2 重力赤方偏移	18
2-3 最適化問題	20
2-4 ラプス関数	24
2-5 曲率と計量	25
2-6 測地線	28
2-7 重力波	30

## 第3章 シュヴァルツシルト・ブラックホール

3-1 シュバルツシルト計量と座標系	32
3-2 楕円の歳差運動とズーム・ワール軌道	38
3-3 ドップラー偏移と重力赤方偏移	42
3-4 地平面を越えて	44
3-5 ホワイトホール	48
3-6 ワームホール	51

## 第4章 回転するブラックホール

4-1 軸対称ブラックホール	55
4-2 慣性系の引きずり	58
4-3 ペンローズ過程	62
4-4 内部地平面へ	65
4-5 タイムマシンは可能か?	68
4-6 帯電ブラックホール	70

## 第5章 宇宙におけるブラックホール

5-1 星の一生とブラックホール	72
5-2 見えない伴星	76
5-3 銀河中心の超巨大ブラックホール	79
5-4 イベントホライズン・テレスコープ	83

## 第6章 ブラックホール合体

6-1 真空場の方程式	84
6-2 重力波の伝播	86
6-3 LIGO 検出器	89
6-4 チャープ波形	91
6-5 テンプレートを用いた解析手法	96
6-6 数値シミュレーション	98

## 第7章 ブラックホールの熱力学

7-1 量子の不確定性	104
7-2 量子のもつれ	106
7-3 巨視的な性質と熱力学	108
7-4 ブラックホールの温度	110
7-5 ホーキング放射	114
7-6 ブラックホールのエントロピー	116

エピソード	123
-------	-----

訳者あとがき	127
--------	-----

索引	129
----	-----

## エピローグ

私たちはタイムトラベルを信じないし、神秘主義にも興味がありません。しかし、もし私たちがアルバート・アインシュタインに手紙を書き、重力とブラックホールについて短い文章で伝えることができたとしたら、きっとこんな手紙を書くことだろう。



2017年2月

親愛なるアルバート、

あなたはやっぱり偉大です。 $E = mc^2$ は誰もが知っている物理の方程式になっています。タイム誌はあなたを「時代を代表する人物」に選びました。オチが有名になりすぎて、アインシュタインのジョークはもうあまり使われなくなりました。核兵器は途方もない数になっていますが、まだ人類に使われてはいません。実際、第二次世界大戦の終わりに投下された原子爆弾が、人を殺すために意図的に使われた唯一のものです。

LIGOという大きな装置が、10億年以上前に起きたブラックホール同士の合体から重力波を検出したので、最近人々は一般相対性理論とブラックホールにとても興味を持っています。私たちはブラックホールについての本を書きました。あなたがシュバルツシルトの解に深い関心を抱いていたこと、そしてその物理的な重要性について確信が持てなかったこともあったでしょうから、あなたがこの世を去ってから60年あまりの間に何が起きていたのかをお伝えしようと思ったのです。

まず、シュバルツシルトの解には「事象の地平面」というものがあります。その奥に行くと、光速を超えない限り二度と出てこられません。シュバルツシルトの解の形を思い出すと、半径が重力定数 $G$ と質量との積程度になってくると、奇妙な特徴があらわれます。特に、計量の時間-時間成分が消えてしまうのです（現在ではラプス関数と呼んでいます）。そこが事象の地平面です。シュバルツシルトの解は、半径がゼロになると奇妙な特徴を持つようになりますが、この奇妙な特徴は、時空の幾何学そのものが壊れてしまう特異点を示すというのが、私たちの最善の理解です。シュバルツシルト・ブラックホールに入れば、必ず特異点に遭遇しますが、その先がどうなるのか、「先」という言葉が適切なのかどうか、まったくわかりません。

あなたが亡くなってから20数年の間になされた一般相対性理論に関する仕事をあなたに見てもらいたかった。ジョン・ホイーラーは、その中心にいた人です。（私たちは彼をよく知っており、プリンストン大学で私たち二人と2008年まで一緒に過ごしました。）彼は、シュバルツシルトの解と関連する計量を表す「ブラックホール」という言葉を普及させました。ニュージーランド人のロイ・カーは、回転するブラックホールを記述するシュバルツシルト計量の一般解を発見しました。これは非常に複雑な解ですが、角運動量がゼロではない崩壊する星の最終状態を記述するもので、大変重要です。

宇宙には多くのブラックホールがあることが、今やはっきりと分かっています。30年代にチャンドラセカール、トールマン、オッペンハイマー、ボルコフが言っていたように、あまりに大きな質量を一緒にすると、何もかも持ちこたえられないのです。正確な数字を把握するのは難しいのですが、星が核燃料を使い切った後に3太陽質量程度が残ると、ブラックホールに崩壊してしまうのです。さらに驚くべきことに、銀河の中心にはもっと大きなブラックホールがあります。天の川銀河の中心には、太陽の約400万倍の質量のブラックホールがあるのです。これは嘘ではありません！ 現代のコンセンサスでは、多くの銀河の中心にはもっと大きなブラックホールがあり、おそらく数十億太陽質量のブラックホールを含んでいるものもあると考えられています。これらのブラックホールがどのように出来たかは定かではありません。しかし、天の川銀河の場合では、個々の星の軌道を追跡し、ブラックホールの重力の影響を見ることで、ブラックホールの存在を確認することができるのです。

LIGOによる重力波の検出は、圧巻でした。LIGOとは、Laser Interferometry Gravitational-Wave Observatoryの略で、1辺が4キロメートルもある大きなマイケルソン干渉計です。レーザーは、金属の溶接にも使えるほど焦点が絞れる強力な単色光源ですが、針の代わりに現代のレコードプレーヤーに組み込まれているほど安価なものになっています。まだ空飛ぶ車は実現されていませんが、レーザーはとても便利なものです。LIGOは本格的な科学実験の準備を進めていたところ、偶然にも完璧な重力波が現れ、それぞれが30太陽質量程度の2つのブラックホールの合体のテンプレートとピタリと一致する観測ができました。時空がズタズタに引き裂かれるようなブラックホール近傍の重力の強い領域や、重力波が時空をかすかに伝わる場のはるかに弱い領域の記述にも成功しているので、誰もが一般相対性理論に改めて感銘を受けています。

あなたのもうひとつのアイデアの宇宙定数という考え方も、ずいぶん進歩しました。あなたは「最大の失敗」と言いましたが、現在では、宇宙定数は場の方程式に対する小さな補正として存在していると考えられています。しかし、大きなスケールの宇宙では、宇宙定数は非常に重要です。宇宙の全エネルギーの何と70%が宇宙定数、あるいは少なくとも「ダークエネルギー」と呼ばれる、宇宙定数に非常によく似た振る舞いをするものに由来していなければ、膨張する宇宙の最近の進化を説明することができないのです。宇宙定数を導入した際に、あなたが期待したように宇宙が静止するのではなく（驚かないでくださいね）、ダークエネルギーが宇宙を指数関数的に加速膨張させているのです。別の方面では、統一理論を求めるあまり、宇宙定数がマイナスの時空間の研究も熱心に行われています。負の宇宙定数を持つ5次元の一般相対性理論は、4次元時空の量子論と無理なく接続するのです。それはまるで、量子論が一般相対性理論の投影であるかのようです！

量子論が正しいということは、今や私たちは確信しています。（すみません。）スティーブン・ホーキングというイギリスの物理学者が、ブラックホールは非常に低い温度ではあるけれども放射をすることを量子論で示しました。ブラックホールは、場の方程式の解としてはほとんど一意的であるにもかかわらず、とてつもなく大きなエントロピーも持っています。あなたがポドルスキーとローゼンと一緒に書いた論文が、非常に重要であることがわかったことで、少しは気が晴れるのでしょうか。その論文に関連したアイデアを使って、現在では量子力学的なコ

ンピュータを作ろうとしている人さえいるのです。

プリンストン大学の教授の多くは、もうネクタイをしないで仕事をしています  
が、靴下はほとんどの人が履いています。カーネギー湖は相変わらず美しいまま  
です。ヨットに乗る人はあまり見かけなくなりましたが、湖のほとりにワシが巢  
を作ったことがあります。私たちはまだ統一場理論を解明していませんが、これ  
からも挑戦していくでしょう。最高の瞬間は、まだ到来していません。

敬具

スティーブン、フランス