

SGC ライブラリ-63

重力理論講義

相対性理論と時空物理学の進展

前田 恵一 著

サイエンス社

はじめに

「重力」は現代物理学でいま最もホットなトピックスといえるだろう。星の進化の最後に誕生するブラックホールや中性子星、さらには銀河中心に存在するといわれている巨大ブラックホール。これらは非常に重力の強い世界で、アインシュタインの一般相対性理論が予言する奇妙な曲がった空間を作り出している。また、一般相対性理論が予言する重力場による光の屈折や重力波といった物理学の新しい対象は、現在では宇宙観測の新しい手段を提供し、重力レンズ天文学や重力波天文学として天文学の重要な分野となりつつある。これらの相対論的天体物理学の大きな進展だけでなく、一般相対性理論では時空も物理学的実在となるため、宇宙全体を科学の対象とすることができ、科学的宇宙論の展開を可能にした。アインシュタイン自身はビッグバン膨張宇宙論にたどり着くことはできなかったが、科学的な宇宙をはじめて考えたという意味で彼の貢献は絶大であり、一般相対性理論の重要性は計り知れない。そしてその理論によって予言されたビッグバン宇宙論は大きな成功を収め、宇宙の標準モデルを提供している。自然界のほんの一部である人類が宇宙の真の姿を垣間見ることができたというのは驚くべきことかもしれない。しかしながら、やはり自然はそんなに簡単ではない。ダークエネルギーなどの新しい宇宙の謎をちゃんと次に用意してくれている。

一方、ミクロなスケールでも重力は興味深い研究対象となっている。重力は、同じ「力」でも他の力とは本質的に大きく異なり、重力の量子化はまだ完成していないが、ループ量子重力理論に代表されるように大きく進展しつつある。また重力を他の力と同じ立場におき、素粒子の統一理論から量子重力の問題を考えるアプローチも盛んに研究されている。超紐理論といった究極の理論の探求やそれに基づく宇宙初期のシナリオ構築など、現代物理学の最先端に「重力」が関わる課題や謎が数多く横たわっている。

本書では、この「重力」に関連した話を、一般相対性理論を中心に、その歴史的構成と宇宙物理学への応用、さらには一般相対性理論を超える新しい重力理論の試みについてわかりやすく解説しよう。

本書は「数理科学」誌で2006年2月から2008年3月までの18回にわたり連載してきた「重力理論入門 ―時空物理学の誕生とその進展―」を一冊にまとめたものである。第16回以降の原稿は、同じ時期に執筆した数理科学2007年12月号「時空の次元：高次元宇宙論の観点から」を含め、まとめなおした。一般相対性理論の研究やその宇宙物理学への応用、さらには新しい重力理論の試みというのは日進月歩で展開し、その研究には常に新たな「勉強」が必要となる。そこで調べたことを何らかの形で本にまとめたいとずっと思っていたが、なかなか執筆に至らなかった。それが「数理科学」の連載として取り上げて頂いたおかげで、ようやく日の目を見ることになった。毎回メチを守らなかったずばんな著者が何とか最後までたどり着き一冊にまとめることができたのは、ひとえに「数理科学」編集部、特に平勢さんと伊崎さんのおかげです。ここに感謝の意を表します。

平成20年2月6日 横浜の自宅にて

前田 恵一

目 次

第 1 章 序 — 重力理論の変遷	1
1.1 どうして「重力」か	1
第 2 章 ニュートン重力理論と特殊相対性理論	5
2.1 ニュートン重力理論	5
2.1.1 万有引力の法則	5
2.1.2 ガリレオの等価原理	6
2.1.3 遠隔作用と近接作用	7
コラム ガリレオの等価原理の実験的検証	8
2.2 古典物理学の矛盾	9
2.3 特殊相対性理論	11
コラム 特殊相対性理論の構成法	15
2.4 ニュートン重力理論 vs. 特殊相対性理論	15
第 3 章 重力と曲がった時空	18
3.1 アインシュタインの等価原理と重力	18
3.1.1 重力的赤方偏移	19
3.1.2 重力場中の時間の遅れと光の速さ	20
3.1.3 光の屈折	21
3.1.4 等価原理の実験的検証	22
3.2 時空は曲がっていた	22
3.2.1 一様回転系と空間の曲がり	22
コラム 重力的赤方偏移の実験的検証	23
3.2.2 重力場中の粒子の運動方程式	24
3.2.3 曲がった時空	24
3.3 時空物理学の誕生	25
第 4 章 リーマン幾何学と一般相対性理論	27
4.1 リーマン幾何学と物理量・物理法則	27
4.2 測地線方程式と運動方程式	32
4.3 アインシュタイン方程式とその 2 つの役割：一般相対性理論の誕生	33

第 5 章	アインシュタインは正しかった	36
5.1	実験的検証の必要性	36
5.2	シュヴァルツシルト解	37
5.3	シュヴァルツシルト時空中の粒子の軌道	38
5.4	水星の近日点移動	39
5.5	光の屈折	40
5.6	アインシュタインの方法	42
5.7	“第 4” の検証実験	43
	コラム アインシュタイン以外の試み	45
第 6 章	アインシュタインの予言：その 1 宇宙論	46
6.1	境界のない有限宇宙	46
6.2	宇宙原理	47
6.3	アインシュタインの静的宇宙モデル	48
6.4	フリードマンの膨張宇宙論	50
6.5	ハッブルの発見	52
6.6	アインシュタインの大失敗	53
第 7 章	アインシュタインの予言：その 2 重力波	55
7.1	重力波の予言：アインシュタイン方程式の線形化	55
7.2	空間のゆがみの伝播：測地線偏差方程式	57
7.3	重力波の放出機構	59
7.4	重力波の存在	61
	コラム 重力場のエネルギー	62
第 8 章	アインシュタインの予言：その 3 ブラックホール	64
8.1	「重力半径」の怪	64
	コラム ブラックホールの名付け親	65
8.2	アインシュタインの第二の失敗	65
8.3	重力半径の本当の意味：事象の地平線	67
8.4	ブラックホールとホワイトホール	69
	コラム 光の脱出できない暗黒の星	71
第 9 章	時空の対称性と一様宇宙のダイナミクス	73
9.1	時空の対称性とキリングベクトル	73
9.2	最大対称空間	75
9.3	一様空間とビアンキ分類	76
9.4	ビアンキ宇宙モデル	77

第 10 章 軸対称定常時空と逆散乱法	82
10.1 2つの対称性とエルンスト方程式	82
10.2 軸対称定常時空解	83
10.3 逆散乱法と軸対称定常解の生成	85
第 11 章 ブラックホールの時空構造：重力の最も強い世界	92
11.1 ペンローズ時空図	92
11.2 曲がった空間の埋め込みとワームホール構造	93
11.3 カーブラックホール	94
11.4 カー時空の特異点	96
11.5 カーブラックホールのペンローズ時空図	98
11.6 重力崩壊	99
第 12 章 相対論的重力と力学系	102
12.1 重力多体系と一般相対性理論	102
12.2 カーブラックホールの周りの粒子	103
コラム ペンローズ過程：ブラックホールからのエネルギー抽出	105
12.3 スピン粒子の軌道とカオス	105
12.4 いろいろな非可積分系と重力波観測	108
12.5 時空のカオス	109
第 13 章 時空のダイナミクス	111
13.1 アインシュタイン理論の正準形式：ADM 定式化	111
13.2 アインシュタイン理論の共変形式による記述	114
13.3 重力崩壊の臨界現象	117
第 14 章 ブラックホールの熱力学	121
14.1 ブラックホールの力学	121
コラム ブラックホール解の一意性	122
14.2 熱力学とブラックホールの蒸発	124
コラム ブラックホールの蒸発	125
14.3 熱力学のミクロな理解：ブラックホールエントロピーの起源	126
第 15 章 基本定数が変化する？	129
15.1 スカラー・テンソル重力理論	129
15.1.1 プランス・ディッケ重力理論	129
15.1.2 デイラックの巨大数仮説	131
15.1.3 スカラー・テンソル重力理論	132

15.2 PPN 形式	133
15.3 その他の重力理論	135
第 16 章 超ミクロな世界の重力	138
16.1 重力場の正準量子化	138
16.2 統一理論としての重力と量子化	142
第 17 章 一般化された重力理論	146
17.1 超紐理論と一般相対性理論	146
17.2 量子補正と重力理論	147
17.3 共形変換とアインシュタイン理論	149
17.3.1 $F(R, \phi)$ 理論	149
17.3.2 $F(R_{\mu\nu})$ 理論	150
17.3.3 パラティニ形式	151
17.4 アインシュタイン方程式の普遍性?	152
第 18 章 高次元宇宙論と時空の次元	154
18.1 高次元宇宙論の試み 1 —カルツァ・クライン宇宙論—	154
18.2 ブレインと高次元の世界	156
18.3 高次元宇宙論の試み 2 —ブレイン宇宙論—	157
18.4 何故 3 次元か?	159
コラム 時間は 1 次元	160
第 19 章 超マクロ世界の重力	162
19.1 ダークエネルギー	162
19.1.1 ダークエネルギーの存在	162
19.1.2 ダークエネルギーは奇妙な物質?	165
19.1.3 ダークエネルギーは重力の新しい効果?	166
19.1.4 ダークマターも修正重力理論で?	167
19.2 太陽系近傍の謎と重力理論	168
第 20 章 結 — アインシュタインを超えて	170
20.1 物理学を進化させる重力	170
20.2 超ミクロ重力の謎：時空は量子化すべきか?	171
20.3 超マクロ重力の謎：現代の「エーテル」と「水星の近日点移動」?	173
索引	175

第 1 章

序 — 重力理論の変遷

重力は非常に不思議な力である。自然界において、これまで数多くの謎が出されそして解き明かされてきたが、重力は人類史上最も古くから「謎」を提供してきたにも関わらず未だに全貌は解明されていない。重力についての考察は、人類文明誕生とともに始まったことであろう。それほど重力は身近な存在である。しかしその謎の解明は同時に、人類の科学の進歩でもあると言える。重力の正体を明かしていくとともに、人類の世界観は大きく変わってきた。この章では、まず重力に関わる物理学の変遷について概観しよう。

1.1 どうして「重力」か

ニュートン (Isaac Newton) が万有引力の理論を提唱する少し前の頃、ケプラー (Johannes Kepler) たちは重力の正体について考えを巡らしていた。磁力というのは離れた 2 点の間に働く「摩訶不思議な力」と考えられており、遠く離れた 2 つの天体を結びつける力も初めは「磁力」と考えたのも無理はなかった¹⁾。当時は、普通の「力」は接触することにより働くと考えられていたからだ。しかし、ニュートンは磁力が次のような性質を持つことから、天体間に働く力ではないと考えた。まず、磁力は引かれる物体の重さに比例しない。また磁石から物体を遠ざけたとき、磁力は距離の逆二乗より速く弱くなる。そしてニュートンは天体間に働く力として全く新しいものを考えた。すなわち、すべての物体同士に引っぱり合う力が働くとする「万有引力」である。万有引力は物体の質量に比例し、距離の逆二乗に比例するとした。この万有引力は天体間に働く力の正体を明らかにしただけではなかった。

古代ギリシャのアリストテレス (Aristoteles) は物体の落下について考察し、重いものほど速く落下すると考えた。しかし、ガリレオ (Galileo Galilei) は「等価原理」により、物体はその重さによらず、全く同じように落下するとした。ニュートンはこの落下を引き起こす原因と 2 つの天体間に働く力が同一のもの

とし、地上での落下現象と天体の運行を一つの法則「万有引力の法則」によって統一的に説明した。初めの統一理論と言えるかもしれない。

このニュートンの万有引力の法則およびニュートン力学は自然科学に新しい世界観をもたらした。ニュートンの運動方程式は、初期に位置と速度を与えるとその後の運動が完全に決定される。これが古典物理学の決定論的世界観で、以後、物理学の主流となる基本的考え方である。

19世紀には、マックスウェル（James C. Maxwell）の電磁気学と合わせてニュートン力学は古典物理学の大きな柱となり、物理学は完成したかに見えた。しかし、自然はそんなに単純ではなかった。19世紀末には、ミクロな世界での法則が古典物理学と相容れないことがわかってきた。また、光を伝える媒質としてのエーテルの存在が危うくなってきた。それらを解決すべく現れたのが20世紀の二大理論「量子論」と「相対論」である。この相対論は特殊相対性理論のことである。量子論はミクロの世界の法則を大きく変え、特殊相対性理論は時間に対するこれまでの常識を覆した。この2つの理論の登場には残念ながら重力は関わっていない。しかし、特殊相対性理論は、時間と空間に関する概念を大きく変え、重力の正体を明らかにすることになる一般相対性理論登場のプロローグであった。

アインシュタインは、1905年に特殊相対性理論を完成し、すべての物体が光速を越えて運動できないことを明らかにした。当然、どのような情報も光速を超えて伝えることはできなくなる。すると、これまで重力現象を正確に説明し、何世紀もその正しさを誇っていたニュートンの重力理論（万有引力の法則）が大きな矛盾を抱えることになる。ニュートン重力理論では、万有引力は瞬時に伝わるからである。そこで、相対論と矛盾しない重力理論の探索が始まった。アインシュタイン（Albert Einstein）もその一人であったが、「等価原理」の重要性に気づいてからは、ニュートン重力理論の相対論版ではなく、彼独自の考え方で新しい重力理論、一般相対性理論を完成した。

この一般相対性理論は、相対論と矛盾しないように重力理論を拡張したという単純なものではない。アインシュタインは、等価原理を指導原理として思考実験を積み重ね、重力相互作用を時空のゆがみとして捉え、重力を幾何学的に記述するという全く新しい理論を完成したのである。それは、これまでの物理法則の記述法とは大きく異なるものであった。従来は、時間や空間を表す時空という「舞台」の上で物理量がどう変化するかを法則として記述していた。それがニュートン力学の運動方程式であり、電磁気学のマックスウェル方程式である。ところが、アインシュタインは、重力と時空を一体化し、重力場の方程式＝時空の方程式という法則を考え出した。これは、時空という「舞台」そのものが変化する物理量になったということを意味する。その結果、時空は物質場の存在により動的に変化する物理的実在となった。時空は、それまでの現象を記述するための単なる「道具」から、全く質的に新しい「もの」に進化した。

時空は物理学の対象となり、そのことは、時空の物理学という新しい研究分野を拓いたのである。

時空の物理学の典型例は「ビッグバン宇宙論」である。古代の宇宙論とえば、宗教や哲学などの世界観とも関係し、我々の宇宙がどのような構造をしているかを論じていた。近代科学および観測に基づいた宇宙論では、天体（星や銀河など）といった構成要素（「役者」）が何であるか、どのようにしてできたのか（カント（Immanuel Kant）・ラプラス（Pierre-Simon de Laplace）の星雲説など）といったことに興味の中心があった。しかし、アインシュタインの一般相対性理論は、時空という「舞台」まで含めた宇宙全体を考えることを可能にした。文字通り「すべて」を含んだ宇宙を考えることができるようになったのである。その結果、「舞台」である空間が膨張していることが観測的に明らかとなり、ビッグバン宇宙論という宇宙の標準的考え方が確立した。一般相対性理論は、膨張する宇宙というこれまで人類が想像だにできなかった世界観・宇宙観を導いたのである。

その一般相対性理論は、重力を時空のゆがみと捉えたことで、2つの新しい研究対象をもたらした。時空のゆがみが波のように伝わる重力波と、時空が極度にゆがみ、光をも閉じこめる不思議な天体ブラックホールである。その後の観測で、それらは実在することがほぼ確実となり、天文学としても非常に重要な物理学の対象となりつつある。重力場による光の屈折を宇宙空間で見事に見せてくれる重力レンズ効果と合わせて、それら一般相対性理論の寵児たちは、現代宇宙物理学では日常茶飯事のこのように論じられている。

このように、宇宙のスケールでは、一般相対性理論はゆるぎもない重要な理論として捉えられている。しかしながら、いったんミクロなスケールに話を移すと、一般相対性理論は完全な重力理論とは言えず、まだまだわかっていないことが多い。特に、重力場の量子化は、量子力学成立からすでに80年、量子電磁気学から考えても60年近くが経過しているにも関わらず、未だに満足のできる理論は完成していない。

一方では、ペンローズ（Roger Penrose）とホーキング（Stephen W. Hawking）による特異点定理の証明により、一般相対性理論においては特異点の出現は普遍的な現象であることがわかった。特異点は曲率や物質密度が無限に大きくなる時空点で、現実には存在しないと考えられる。そこでは、一般相対性理論は破綻しているはずである。一般相対性理論に変わる新しい理論が必要なことを、一般相対性理論自身が特異点定理をもって示しているのである。多くの実験や観測と矛盾せず、ブラックホールやビッグバン宇宙論など宇宙物理学の重要な分野で大いなる成功を収めている一般相対性理論も完全なものではなかったのである。

現在、その重力の量子化がどうしたら可能かについていろいろな観点から研究されている。一般相対性理論の延長上として、時空を量子化しようという「量

子重力理論」，重力以外の力（電磁氣的相互作用・弱い相互作用・強い相互作用）をも一緒に考えて，統一理論的立場から重力の量子化に迫ろうという「超紐理論」などがその代表格であろう．重力の量子論は未だに完成されていないが，その成功はさらに新しい時空概念をもたらし，自然科学の新しいページを拓くであろう．

このように重力研究の歴史は，自然科学の進化の歴史の中でも非常に重要な位置を占める．最近では，マクロな宇宙スケールでも「ダークエネルギー」という現代宇宙論最大の謎が現れ，その解決には「重力」の本質的な理解が必要と捉える向きもある．そこで，本書では，これまでの重力研究の歴史的経緯を振り返り，その完成された重力の理論である一般相対性理論にまつわる研究を個々の研究対象ごとにまとめよう．また，一般相対性理論が抱える問題点を整理し，重力の量子化を含めた新しい重力研究の現状についても簡単に触れることにする．

参考文献

- 1) 山本義隆『磁力と重力の発見 3』（みすず書房，2003）．

第 2 章

ニュートン重力理論と 特殊相対性理論

2.1 ニュートン重力理論

2.1.1 万有引力の法則

重力は、我々にもっともなじみのある力であるにも関わらず、現在でもその本質は完全には理解されていない。多くの物体は、重力により地球表面に拘束されている。地表から持ち上げた物体は、手を離すと地球の重力により落下する。この落下現象は人類が初めに重力の存在を認識したものと言えるであろう。アリストテレスは、物体が落下するのを見て、重い物体ほど速く落下すると考えた。我々の感覚に非常に合った落下現象の理解である。

そのことに異を唱えたのが、16 世紀のガリレオである。空気抵抗が無視できる場合には、物体はその重さによらず、全く同じように落下するとし、ピサの斜塔の実験を行ったのは有名な逸話である。

一方、同じ時期、ケプラーは惑星の運動を理解しようと、それを次の 3 つの法則にまとめた。

第 1 法則：惑星は太陽を一つの焦点とする楕円軌道を描く。

第 2 法則：惑星と太陽を結ぶ線分が単位時間に掃く面積は一定である。

第 3 法則：惑星の公転周期 T の 2 乗は楕円軌道の長半径 a の 3 乗に比例する。

彼自身はそれを説明するのに正多面体を使った幾何学的解釈に可能性を探ったが、成功していない。この天体の運動と地上での物体の落下の法則を統一したのが、ニュートンである。微積分学やニュートン力学などの現代科学の基礎を作り上げたことでも有名であるが、天体運動と落下現象を一つの力『万有引力』による現象として捉え、統一的な理解を与えたことは、自然科学における最初の統一理論といえることができる。

すべての質量ある物体間には、その質量に比例する力が働く。つまり、2 つ

第 3 章

重力と曲がった時空

3.1 アインシュタインの等価原理と重力

ニュートン重力理論は、特殊相対性理論の「なにものも光速を超えることはできない」という事実と矛盾した。そこで重力理論の相対論化が試みられていたが、アインシュタインは、1907 年 11 月「生涯で最もすばらしいアイデア」を思いつく¹⁾。「等価原理」である。前に述べたように、等価原理という考え方はすでにあった。ガリレオの等価原理で、慣性質量と重力質量の等価性ということもできる（第 2 章 2.1.2 節）。このとき、ニュートン力学で重力のみ働く場合を考えると、運動方程式から質量が相殺し、すべての物体は同じ加速度を持つ。同じ重力場中の観測者も同じ加速度を持ち、その観測者から見ると、すべての物体は「等速直線運動をする」ことになり、重力場が消失したかのように見える。厄介者の「重力」が消せるのである。その代償としては、物体とともに落下する「自由落下系」という非慣性系（加速系）に乗り移らなければならない。

逆に、重力の存在しない宇宙空間などで、地球上の重力加速度と同じ加速度で動く宇宙船の中では、見かけ上「重力」が発生したかのように、すべての物体は宇宙船の運動方向と逆向きに「落下」していくであろう。加速系に移ることで、重力を作り出せるのである。そこで、ガリレオの等価原理は、「重力場中の物体の運動は、重力場が存在しない場合に重力加速度と同じ加速度で運動する観測者から見た物体の運動と同じである」と言うこともできる。アインシュタインが思いついた生涯で最も素晴らしい考え方は、この等価原理の拡張である。

アインシュタインは、この等価性が成り立つ対象を力学的運動からすべての物理現象に拡張した。より正確には、「一様重力場が存在する系」と「等加速度で運動する系」の間のすべての物理現象の等価性を主張したのである。これを「アインシュタインの等価原理」と呼ぶ。一見、これはガリレオの等価原理の単純な拡張に見えるが、物理学としてはそこに大きな違いがある。「ガリレオの等価原理」における力学的運動の等価性は、ニュートンの運動方程式を仮定

第 4 章

リーマン幾何学と一般相対性理論

4.1 リーマン幾何学と物理量・物理法則

アインシュタインが重力を記述するために考えた曲がった時空は、リーマン幾何学を用いて表すことができる。リーマン幾何学は、ガウスやロバチェフスキーが考えていた 2 次元曲面上の幾何学をリーマンが一般の任意次元空間に拡張したもので、多様体 $\mathcal{M}$ と計量 $g_{\mu\nu}$ によって規定される。 D 次元多様体は、各点が $\mathbf{R}^D$ と同相な開近傍を持つハウスドルフ空間で定義される。局所的に座標系を設定できる位相空間と考えてよい。物理的空間には通常、「長さ」という概念を導入することができるが、それを与える計量が定義された多様体をリーマン多様体、またはリーマン空間と呼ぶ。多様体 $\mathcal{M}$ 上の近くの 2 点 P, Q を結ぶ「線分」 PQ の「長さ」 ds を考えよう。今多様体の次元を D とし、 $\{x^A : A = 1, 2, \dots, D\}$ を 2 点 P, Q を含む開近傍の座標系とする。2 点 P, Q の座標を $(x^A), (x^A + dx^A)$ と表すと、「長さ」 ds は dx^A に比例し、一般に

$$ds^2 = g_{AB}(x) dx^A dx^B \quad (4.1)$$

で与えられる。この係数 $g_{AB}(x)$ を計量と呼ぶ。例えば、半径 1 の 2 次元球面 (S^2) を考えると、 $D = 2$ で、座標系 $\{(\theta, \phi) : 0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \phi < 2\pi\}$ に対し、球面上の長さは $ds^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2$ で与えられる。つまり、計量 $g_{AB}(x)$ は $g_{\theta\theta} = 1, g_{\phi\phi} = \sin^2 \theta, g_{\theta\phi} = g_{\phi\theta} = 0$ となる。

この多様体 $\mathcal{M}$ が時空を記述するわけである。そこで、時空に話を限る場合には座標系の添え字 $A, B, \dots$ を時空の座標の添え字 $\mu, \nu, \dots$ とし、時空の次元も 4 としよう。 x^0 は時間座標を表し、空間座標は (x^1, x^2, x^3) とする。また、以後は特に断らない限り光速 c を 1 とする。

この時空においていろいろな物理量が定義される。物理量は座標系の取り方に依存してはいけない。それは、観測者によって物理量の定義が変わると客観的な物理法則の記述ができないからである。その結果、物理量は一般座標変換に対して共変的に変化しなければならない。それは、物理量がテンソル（スカ

第 5 章

アインシュタインは正しかった

5.1 実験的検証の必要性

アインシュタインは見事な洞察力で、ほんのわずかの手がかりから重力場の方程式（アインシュタイン方程式）を導いた。特殊相対性理論と矛盾するとはいえ、ニュートン重力理論は実験や観測を非常に正確に記述していた。唯一説明できなかったものは水星の近日点移動であったが、それも重力が原因かどうかははっきりしていなかった。

通常の物理学は実験を繰り返すうちに理論にほころびが見え、それを改良する形で新しい理論が生まれる。量子力学がそのよい例である。しかしアインシュタインの一般相対性理論は完全に理論先行であった。アインシュタインが思考実験を繰り返し、最も簡単で最も美しい相対論的重力理論として創り上げたものである。

物理学としては当然それが本当に正しいかどうか確かめなければならない。ここでは、アインシュタインが考えた道をたどることにする。我々は空間が曲がっていると感じたことはない。それは重力源がそれほど強くなく、空間の曲がりもわからないぐらいに小さいからである。実際、第4章で示したように重力ポテンシャルと計量の間には $g_{00} = -(1+2\phi/c^2)$ の関係があるが、この計量の -1 からのずれ（曲がりの効果）は、太陽表面でも $-2\phi/c^2 = 2GM_{\odot}/R_{\odot}c^2 \approx 4.2 \times 10^{-6}$ 程度と非常に小さい。

そこでまず重力の弱い現実的な場合を考え、実際に理論を実験で確かめるためにはどうすればいいかを調べなければならない。これがアインシュタインの初めに考えたことである。そのためには、弱い重力場の近似であれ、アインシュタイン方程式を解く必要がある。アインシュタインは、独自の方法で解を求め、水星の近日点移動を正しく与え、太陽による光の屈折が検証可能であることを示した^{1,2)}。しかし、ここではまずシュヴァルツシルト（Karl Schwarzschild）が見つけたシュヴァルツシルト解を導くことから始めよう。

第 6 章

アインシュタインの予言：

その1 宇宙論

6.1 境界のない有限宇宙

「宇宙に果てはあるのか」という疑問は誰しもが思い浮かべることであるが、考えただけで答えの出るものでもない。ニュートン重力理論に基づく宇宙論では我々の住む宇宙（空間）は単なる「入れ物」で、平坦なユークリッド空間と考えられる。ユークリッド空間は無限に広い。では我々の住むこの宇宙はどこまで行っても存在する無限に広い世界なのか。もちろんこれを実際に確かめる術はないが、現実の世界では「無限」というものは存在しないとするのが常識的な考え方であろう。「無限」というのはあくまで非常に大きな「量」の数学的近似表現である。

ところが宇宙が有限なユークリッド空間だと考えると当然、境界が必要となる。つまり宇宙には「果て」があることになる。宇宙の「中心部」と「境界」付近では大きく様相が異なるであろう。宇宙はどこも同じではないことになる。しかしそれも考えにくい。次節でも述べるように宇宙はどこでも同じであると考えたい。そうすると、有限でかつ境界のない世界を考えなければならなくなる。ユークリッド空間では無理である。

曲がった空間の導入は、そのような困難を解決する。簡単な 2 次元の例を考えよう。2 次元ユークリッド空間（平面）は無限に広く、有限にするにはどこかで切り取って境界を作らなくてはならない。しかしながら 2 次元球面は、どこも同じで、かつ有限である。あるところから出発してまっすぐ行くとそのうちに元のところに戻ってくる。境界は存在しない。

3 次元空間で同じようなことを考えると、有限でかつ境界のない宇宙が実現可能なのである。そして重要なことは、アインシュタインの一般相対性理論はその時空の曲がり方がどうなるかを決定する理論なのである。アインシュタインの理論を用いると宇宙が「科学」として議論できるのである。

第 7 章

アインシュタインの予言：

その2 重力波

ニュートン重力理論では、物質の密度分布が与えられれば重力ポテンシャルは即時に決定される。それはポアソン方程式 $\Delta\phi = 4\pi G\rho$ が時間を含まない方程式であるからで、そのことが特殊相対性理論と矛盾し、一般相対性理論の登場となった。一般相対性理論では、重力を時空のゆがみと捉える。時空のゆがみを表す計量はアインシュタイン方程式に従うが、それは計量の 2 階微分方程式で、時間微分も含まれる。計量、つまり時空は時間変化することになる。前章の宇宙論の話はその典型である。この章では、時間変化する時空のもう一つの典型である時空のゆがみの伝播について述べる。アインシュタイン方程式を考えると、時空のゆがみはさざ波のように伝わっていくことがわかるが、それを重力波と呼ぶ。重力波はどのように表されるのであろうか？ここでは、時空のゆがみが非常に小さい場合を考えることにしよう。

7.1 重力波の予言：アインシュタイン方程式の線形化

時空のゆがみが非常に小さいということは、時空はミンコフスキー空間に近いということである。そこで計量を

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad (7.1)$$

と近似する。ここで $\eta_{\mu\nu}$ はミンコフスキー計量で、弱い重力場を表す計量 $h_{\mu\nu}$ は、その大きさが 1 に比べ十分小さいとする。 $h_{\mu\nu}$ を摂動量と考え、アインシュタイン方程式を書き下すと、

$$R_{\mu\nu}^{(1)}(h_{\alpha\beta}) - \frac{1}{2}R^{(1)}(h_{\alpha\beta})\eta_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu} \quad (7.2)$$

となる。ここで、 $R_{\mu\nu}^{(1)}(h_{\alpha\beta})$ 、 $R^{(1)}(h_{\alpha\beta})$ は、それぞれリッチテンソル、スカラー曲率の $h_{\alpha\beta}$ に関する摂動 1 次の項で、

第 8 章

アインシュタインの予言： その3 ブラックホール

ここではアインシュタイン理論の寵児とも呼ぶべき奇妙な天体「ブラックホール」について述べる。この章のタイトルを見て「おやっ」と思われた方は多いと思う。アインシュタインは、宇宙論が科学的に議論できることを示し（第 6 章）、時空のさざ波である重力波の存在を予言している（第 7 章）。しかし「ブラックホール」に関しては全く言及していないのでは？ 全くそのとおりである。それにも関わらずこのタイトルにしたのは？ ブラックホールの特徴である「事象の地平線」（シュヴァルツシルト特異点）に関して、アインシュタインはいくつかの根拠から自然界に存在しないものと考えた。そのあたりの話も紹介するので、少々こじつけではあるが、「アインシュタインの予言：その 3」としてブラックホールの話題を取り上げる。

8.1 「重力半径」の怪

第 5 章でシュヴァルツシルト解について話をした。それは、球対称な重力源（例えば星）の外部の時空を記述するアインシュタイン方程式の厳密解である¹⁾。その計量は

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{r_g}{r}\right) dt^2 + \frac{1}{(1 - r_g/r)} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \quad (8.1)$$

で表される。ここで $r_g = 2GM/c^2$ は重力半径である。この解の表す時空は、第 5 章でも述べたように、重力場の弱いところ（例えば太陽系近傍）では観測的・実験的に正しいことがわかっている。

ところがこの計量 (8.1) には「特異点」が存在する。例えば、 g_{00} は $r = 0$ で発散し、 $r = r_g$ でゼロになる。 $r = 0$ は、重力源が「一点」に収縮した「質点」上における重力場を表していると考えられるので、計量が発散するのは理解で

第 9 章

時空の対称性と一様宇宙のダイナミクス

アインシュタインによって提唱された一般相対性理論は、宇宙物理学に新しい研究対象をもたらした。宇宙を科学として議論できる対象にし、重力波やブラックホールという全く新しい概念も宇宙の舞台に登場させた。宇宙の理解には一般相対性理論は不可欠な理論の一つになったのである。しかしながらその理論は複雑な非線形偏微分方程式で記述されている。そこで、その基礎方程式であるアインシュタイン方程式の解き方と解について語っていこう。

9.1 時空の対称性とキリングベクトル

一般に非線形方程式は、線形方程式と異なり、一般解を求めることがほとんど不可能である。そこで必要となるのは、物理学的に興味のある系をいかにしてうまく記述するかである。

その一つの方法として、対象とする系に対し対称性を課し、方程式をできるだけ簡単にすることが考えられる。例えば静的球対称を仮定すると基礎方程式は動径座標 r のみの常微分方程式になる。もちろん非線形で、いくつかの変数が絡み合うので、解析的に解けるかどうかはわからないが、それでも扱いは一段と簡単になる。

そこでこの章ではまず対称性のある時空を考えることにしよう。ところがいきなり困難に出くわす。「対称性」を課すにはどのようにしたらいいかという問題である。時間的に変化しない静的な時空なら、単純に計量が時間に依存しないとすればよいではないかと考えるかもしれない。しかし、一般相対性理論は一般座標変換に関して不変で、座標系を好きなように選択できる。そのことは時空に対称性があっても、勝手な座標系を選ぶと、計量にはその対称性が陽には見えないことを意味している。例えば、前章のブラックホールの議論でも出てきたが、静的シュヴァルツシルト解も、ブラックホールの性質、特に地平線付近での性質を明らかにするクルスカル・セケレス座標を用いると計量は時

第 10 章

軸対称定常時空と逆散乱法

アインシュタイン方程式は非線形偏微分方程式で、一般的に非自明な解を見つけることは非常に難しい。しかしながら 2 つの可換なキリングベクトルを持つ時空に対してはソリトン物理学で現れるベックルンド変換や逆散乱法を用いて新しい解の構成が可能になる。この章では軸対称時空を中心に解の構成法について述べよう。

10.1 2 つの対称性とエルンスト方程式

時空の対称性を課しないと非線形偏微分方程式を解くのは難しいと述べた (第 9 章)。球対称真空解は、漸近的平坦性を仮定すると解析的に解け、一意的にシュヴァルツシルト解になる。しかし自然界に存在する天体を記述するには「球対称性」は条件として強すぎるであろう。実際、多くの天体は回転している。回転を伴う天体の周りの時空で最も対称性の高いものは、軸対称定常時空であろう。ここではそれについて考察しよう¹⁾。

時間的に変化しない「定常性」と回転軸の周りの「軸対称性」の 2 つの対称性を仮定すると、時空には 2 つのキリングベクトルが存在する。その計量は

$$ds^2 = -f(dt - \omega d\varphi)^2 + f^{-1} [e^{2\gamma} (d\rho^2 + dz^2) + \rho^2 d\varphi^2] \quad (10.1)$$

で与えられる。ここで f, γ, ω は ρ, z の関数である。このときアインシュタイン方程式の一部は

$$(f^2 \rho^{-1} \omega_{,\rho})_{,\rho} + (f^2 \rho^{-1} \omega_{,z})_{,z} = 0 \quad (10.2)$$

と表される。ここでコンマ (,) は偏微分を表す。この式は

$$\psi_{,\rho} = f^2 \rho^{-1} \omega_{,z}, \quad \psi_{,z} = -f^2 \rho^{-1} \omega_{,\rho} \quad (10.3)$$

を満たす関数 ψ (ツイストポテンシャル) が存在することを保証する。この ψ

第 11 章

ブラックホールの時空構造： 重力の最も強い世界

一般相対性理論の寵児とも言えるブラックホール。それが事象の地平線という一方通行の境界を持つ強重力の世界であることは第 8 章で述べたが、ここではその時空構造に焦点を当てて解説する。

11.1 ペンローズ時空図

ブラックホールの時空構造を見るのには、前に導入したような事象の地平線で特異にならない座標系を用いるのが都合が良い。また、遠方での構造も同時に表すために無限遠が有限の座標値になるような変換を用いると時空構造全体が見渡せ、その因果構造を調べるのに便利である。例えば、ミンコフスキー時空 $[ds^2 = -dt^2 + dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)]$ は、

$$t \pm r = \tan \frac{\psi \pm \xi}{2} \quad (11.1)$$

$(-\pi \leq \psi \pm \xi \leq \pi, \xi \geq 0)$ という変換で、図 11.1 のような三角形の有限領域に写像される。空間的な無限遠は I^0 、時間的な無限遠、つまり無限の未来は I^+ 、無限の過去は I^- 、そして光が伝播して行く無限遠（未来のヌル無限遠）は $\mathcal{I}^+$ 、光が伝播して来る無限遠（過去のヌル無限遠）は $\mathcal{I}^-$ で表されている。このような図をペンローズ時空図と呼ぶ¹⁾。この場合、動径方向に進む光の軌道はクルスカル図と同様に $\pm 45^\circ$ の方向になる。

シュヴァルツシルト時空でも、クルスカル・セケレス座標 (v, u) から同様の

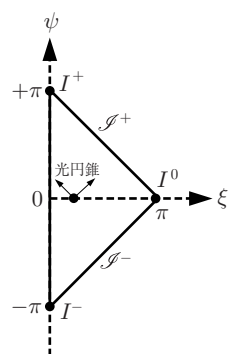


図 11.1 ミンコフスキー時空のペンローズ図。第 8 章のミンコフスキー時空図（図 8.1）を有限領域に縮めたものになっている。

第 12 章

相対論的重力と力学系

19 世紀末のポアンカレによる三体問題研究¹⁾以後、自然界には系の非線形性によりカオスと呼ばれる複雑な現象が普遍的に現れることがわかってきた。20 世紀のコンピュータの発達とともに、その複雑な現象は、単に「乱雑」というのではなく、非線形現象の本質的な性質を表していることがわかってきている。

一般相対性理論は非常に複雑な非線形偏微分方程式（アインシュタイン方程式）で記述されるため、新しいタイプの非線形現象が現れる可能性も存在するであろう。ここでは一般相対性理論における力学系について軽く触れたあと、強重力場中の粒子運動に現れるカオス現象について紹介しよう。

12.1 重力多体系と一般相対性理論

初めにニュートン力学における重力多体系について少し述べる。重力相互作用のみ働く N 個の質点からなる力学系を重力多体系と呼ぶ。三体問題や惑星系などの N が小さい系を議論する場合は特に天体力学と呼ばれる。当然、系は非可積分で強いカオスが発生する。それに対し N が非常に大きい系（球状星団や銀河系などの天体集団）では天体の個々の運動ではなく、系全体の統計的な性質が重要となる。

これらの系を解析するには、通常 N 個の質点に対するニュートンの運動方程式を数値的に解き、その解を系統的に調べる。重力多体系と他の多体系の大きな違いは、重力多体系には熱平衡状態が存在しないという点にある。これは重力が距離の逆二乗に比例する長距離力で、お互いに近づけば近づくほど系はエネルギーを得し、重力熱力学のカタストロフィーを起こすからである²⁾。

この重力多体系に関してはまだすべてが完全にわかっておらず、多くの興味深いトピックス（負の比熱や構造相転移など）があるが、ここでは一般相対性理論を基礎にした重力系について考えることにしよう。

第 13 章

時空のダイナミクス

アインシュタインの一般相対性理論は、重力を時空のゆがみと同一視することで、時空そのものを物理学の対象にし、時空物理学という新しい分野を創り出した（第 3 章）。宇宙論がまさにその対象となったわけであるが、この章では、一般的な時空の動的振舞いを解析する 2 つの標準的な手法について述べた後、時空のダイナミクスにまつわる重要なトピックスを一つ取り上げよう。

13.1 アインシュタイン理論の正準形式：ADM 定式化

量子論では通常、量子化条件（例えば位置と運動量の交換関係 $[p, x] = -i\hbar$ ）は時間一定の超曲面で課される。つまり時間座標を空間座標と区別しなければならない。そして正準運動量を用いたハミルトン形式が都合がよい。1950 年代に入ると、一般相対性理論を量子化するために、ベルグマン (P.G. Bergmann) たち¹⁾、ディラック (Dirac)²⁾、そしてアーノウィット (Arnowitt)、デサー (Deser)、ミズナー (Misner) たち³⁾は、一般相対性理論にハミルトン形式を適用し、正準量子化の方法を調べた。アーノウィットらの方法は非常に整備されたものではあったが、残念ながら量子重力理論の完成には至らなかった。しかしながらこのアインシュタイン方程式をハミルトン形式で記述する方法は、時空のダイナミクスを考察するのに非常に適しており、数値相対論などの研究に大いに役立っている。この形式を、著者の頭文字を取って ADM 形式と呼ぶ。ここでは数値相対論でよく用いられる外部曲率を使った定式化をまとめる^{3,4)}。

ハミルトン形式でアインシュタイン方程式を記述するため、時空を時間と空間に分けて表す。それで ADM 形式は、時間と空間の次元数から、 $(3+1)$ 形式とも呼ばれる。まず、時刻 (t) 一定の 3 次元超曲面 $\Sigma[t]$ を考え、時空全体をこの 1 パラメータの超曲面族で張る。3 次元超曲面 $\Sigma[t]$ の計量を γ_{ij} で記述する（図 13.1）。いま少し離れた 2 つの超曲面 $(\Sigma[t], \Sigma[t+dt])$ を考えよう。このとき $\Sigma[t]$ 上の点 $P(x^i)$ と真上の（つまり P から垂直に伸ばした） $\Sigma[t+dt]$

第 14 章

ブラックホールの熱力学

ブラックホールは、すべてを吸い込み、時間とともに成長する。衝突によってブラックホールは大きくなっていく。そのようなブラックホールの力学法則は熱力学の法則に似ていると言う。それが単なる類似でないことは、ブラックホールにミクロな世界で成り立つ量子論を適用することではっきりする。非常に小さなブラックホールの研究は、未だに完成されていない量子重力理論や素粒子統一理論の重要な手がかりを与えるかもしれない。

14.1 ブラックホールの力学

ブラックホールは、あらゆるものを吸い込み、またそこからは何も放出しない天体である。その一方通行の世界から予想できることは、「ブラックホールはものを吸い込みながらだんだん大きくなっていくだろう」ということである。このことをブラックホールの表面積増大則という法則として数学的に厳密に証明したのがホーキングである¹⁾。ブラックホールがどのように周りのものを取り込み、またブラックホールどうしの衝突によってどう成長するのかといったブラックホールの力学に関しては、他にもいくつか普遍的な法則が知られている。

ブラックホールはアインシュタイン方程式の真空解の一つであるので、意外にその性質は単純である^{*1)}。表面の重力加速度を考えてみよう。星の表面重力加速度はどこも同じではない。例えば地球表面上の重力加速度 g はおよそ 980 cm/sec^2 であるが、正確な値は場所によって異なる。それは地球の形やその下にどのような物質が埋まっているかなどによって変わるのである。ところが、ブラックホールに関しては、地平線上の重力加速度 κ は、 M, a, Q をそれぞれブラックホールの質量、単位質量あたりの角運動量、および電荷とすると、

*1) ここではブラックホール解の一意性からカー・ニューマンブラックホールのみを考える。

第 15 章

基本定数が変化する？

アインシュタインの一般相対性理論は、90 年間以上にもわたって、すべての検証実験をパスしている。では一般相対性理論以外にこれまでの観測や実験と矛盾しない重力理論はないのであろうか？ この章では一般相対性理論の「代替理論」とも呼ばれるいくつかの重力理論を紹介し、それが予言する基本定数の時間変化の可能性および観測や実験からの制限について述べよう。

15.1 スカラー・テンソル重力理論

現代の理論では基本的な力は基本粒子のやりとりによって働くと考えられている。巨視的な基本相互作用（長距離力）である重力はスピン 2 の重力子が、電磁気的な力はスピン 1 の光子が媒介することにより働くことがわかっている。ではスピン 0 のスカラー粒子が媒介する力は存在しないのであろうか？ 一般相対性理論が提唱される前は、重力を記述するのはスカラー場（重力ポテンシャル）と考えられていたし、ニュートン重力の相対論化を考える際にも実際にスカラー重力理論が検討されたこともあったが（第 2 章）、スカラー場のみでは重力は記述できないことがわかっている。しかし、計量とスカラー場が共存する重力理論は一般相対性理論を拡張する理論として考えることができる。そのような理論をスカラー・テンソル重力理論と称し、その代表格がブランズ・ディッケ重力理論である。

15.1.1 ブランズ・ディッケ重力理論¹⁾

一般相対性理論をつくるときにアインシュタインの頭に常にあったのが「マッハの原理」である。マッハ（E. Mach）はニュートン力学を再解析し、慣性は物体固有のものではなく、宇宙全体の物質分布が影響すると考えた。一般相対性理論は、宇宙の物質分布が局所的な時空構造を決めるという意味では、このマッハの原理の思想を受け継いでいると考えられる。しかしながら物体そのものの慣性を決めるわけではないからマッハの原理を実現する理論ではない。

第 16 章

超ミクロな世界の重力

これまで見てきたようにアインシュタインの一般相対性理論は様々な強い重力現象を極めて正確に記述している。理論としてはこれほど美しく興味深いものはない。しかしながら、重力の量子効果も重要となる超ミクロなスケールでは一般相対性理論を超える新しい重力理論を構成する必要があるだろう。

16.1 重力場の正準量子化

近年の自然科学における大きな進展はなんといっても 20 世紀の量子論と相対論であろう。そのうちでも量子論は、古典物理学における決定論的世界観がミクロスケールにおいては適用できないことを明らかにし、人類の自然に対する認識を根本的に変えた。

量子力学の進展は相対論的効果が重要となる領域にまで拡張され、粒子の生成・消滅を取り扱うことのできる場の量子論となった。それはまた、素粒子物理学として発展していった。重力も物理学的観点からは「場」と考えることができるので、当然、その量子論をつくる試みが行われた。実際 1930 年以降、重力場を量子化しようと非常に多くの試みが行われている¹⁾。

その際に考えられる最も簡単な状況は、重力場が非常に弱く線形近似のできる場合である。計量をミンコフスキー計量 $\eta_{\mu\nu}$ から少しゆらいでいるとして

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad (16.1)$$

とおく。 $h_{\mu\nu}$ の 1 次までの近似でアインシュタイン方程式を考えると、時空のゆらぎを表す重力波の線形方程式が得られる (第 7 章)。この線形化された理論は従来の場の量子論の方法で容易に量子化可能で、電磁場で光子が現れるように、線形重力場を量子化をすると重力子が得られる。問題は相互作用を考えたときに生ずる。重力理論を記述するアインシュタイン・ヒルベルト重力作用

第 17 章

一般化された重力理論

超紐理論は一般相対性理論を内在していた。その形はスカラー・テンソル重力理論で記述される。また紐の量子効果を考えると曲率高次項などが現れる。ここでは、そのような一般化された重力理論の統一的アプローチについて述べよう。

17.1 超紐理論と一般相対性理論

重力を含む統一理論として期待される超紐理論をそのまま解析するのは非常に難しい。では、場の理論が有効となる紐の構造が見えない低エネルギー極限ではどのような重力理論が得られるのであろうか？

紐理論の特徴は、紐のつくる 2 次元世界面における共形不変性である。いま D 次元時空を伝播する共形不変な紐の作用を考える¹⁾ (図 17.1 参照)。

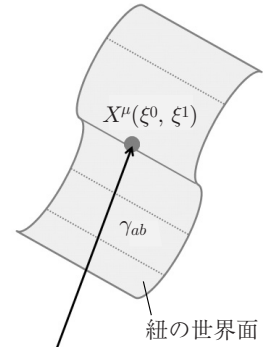


図 17.1 D 次元時空を伝播する紐のつくる世界面。

$$S = \frac{1}{2\pi\alpha'} \int d^2\xi \left[\frac{1}{2} \sqrt{-\gamma} \gamma^{ab} g_{\mu\nu}(X) \partial_a X^\mu \partial_b X^\nu + \frac{1}{2} \epsilon^{ab} B_{\mu\nu}(X) \partial_a X^\mu \partial_b X^\nu \right]. \quad (17.1)$$

ここで、 α' は紐張力の逆数、 $X^\mu(\xi)$ 、 $g_{\mu\nu}(X)$ 、 $B_{\mu\nu}(X)$ はそれぞれ D 次元時空の紐の座標、計量、反対称テンソル場、 ξ^a および $\gamma_{ab}(\xi)$ は 2 次元世界面の座標と計量である。これにスケール不変性を破るディラトン場 Φ の作用項

$$S_\Phi = \frac{1}{4\pi} \int d^2\xi \sqrt{-\gamma} R(\gamma) \Phi(X) \quad (17.2)$$

を付け加え、場の理論として量子効果を計算しエネルギー・運動量テンソルの

第 18 章

高次元宇宙論と時空の次元

我々は 3 次元の宇宙に住んでいることは間違いない。それを前提とした一般相対性理論、およびビッグバン膨張宇宙論は大いなる成功を収めている。では、素粒子統一理論が予言する高次元時空からどのようにして我々の世界が誕生したのであろうか？ 我々の宇宙は何故 3 次元なのであろうか？ これに対する答えはまだわかっていない。しかし高次元時空を基礎に考える宇宙論では我々の住む 3 次元空間のみが大きくなると予想されている。

18.1 高次元宇宙論の試み 1 —カルツァ・クライン宇宙論—

アインシュタインは重力を幾何学的な対象とし、一般相対性理論を完成した。当時の基本的な相互作用は重力と電磁気力であるから、電磁気力も同じように理解できないかということは誰しもが考えることであろう。そしてその 2 つの力を幾何学的に統一しようという試みはカルツァとクラインによって考えられた¹⁾。彼らの考えは、弱い相互作用や強い相互作用が発見された後も超対称性理論や超重力理論に受け継がれ、より高い次元で素粒子統一理論が考えられるようになった (第 16 章)。そして 11 次元の超重力理論は、究極の理論として期待された。

1980 年代は、この高次元統一理論を基礎に高次元宇宙論が注目された第一期である。この高次元時空が現実存在すると考えると、現在の宇宙を説明するには 3 次元空間の部分が巨視的に大きく、それ以外の余剰次元空間は見えないほど小さくなっていないといけな。どうしてそのような時空が実現されるのかという疑問に関して、宇宙論的に興味深いアプローチがある¹⁾。「動的次元縮小」(dynamical dimensional reduction) と呼ばれるもので、巨視的な空間の次元は宇宙の進化過程で 3 に減少したとする考え方である。言い換えると、全空間の 3 次元部分だけが宇宙論的に膨張し、巨視的になったとするのである。簡単のため 5 次元時空で考えよう。アインシュタイン方程式にはカスナー解と

第 19 章

超マクロ世界の重力

ミクروسケールでは重力の量子化という未完成問題とも関係して、アインシュタインの一般相対性理論は何らかの形で修正されなければならないのは明らかだ。一方、太陽系など巨視的なスケールでは一般相対性理論は非常によい精度で正しいことがわかっている。しかし、もっと大きなスケールでもまた一般相対性理論を超える重力理論が必要となるかもしれない。宇宙論最大の謎「ダークエネルギー」がその鍵である。

19.1 ダークエネルギー

1998 年、2 つの観測グループが衝撃的な観測事実を発表した^{1,2)}。宇宙が加速的に膨張しているというのである。重力は「万有引力」であるので、すべての物体同士はお互いに引き合う。ビッグバンで膨張を始めた宇宙は、宇宙の物質同士の引力によりその膨張速度を次第に減らしていく。丁度、放り投げた物体が、地球の引力に引かれるためその上昇速度を落としていくようにである。宇宙がずっと膨張し続けるか、どこかで U ターンして収縮に転ずるかに関係なく、宇宙の膨張は減速していくはずであった。しかし、現実の宇宙は現在加速されながら膨張しているというのである。

19.1.1 ダークエネルギーの存在

どうして宇宙が加速していることがわかるのであろうか？ ビッグバン宇宙論の成功により、我々は宇宙がアインシュタインの一般相対性理論で正しく表されていることを知っている（第 6 章）。その宇宙の膨張はフリードマン方程式

$$H^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{\Lambda}{3} + \frac{8\pi G}{3}\rho \quad (19.1)$$

で記述される。ここで a は宇宙の大きさを表すスケールファクターで、 $H = \dot{a}/a$ は宇宙膨張率を表すハッブル膨張率である。また $k = 0, \pm 1$ は宇宙の曲率の符

第 20 章

結 — アインシュタインを超えて

20.1 物理学を進化させる重力

これまで見てきたように、重力というものは非常に不思議な力である。そしてその身近な存在にも関わらず、人類はまだ完全にその正体を掴んでいない。しかし、はじめに言ったように、謎を考え、解こうとすることによって、科学は進歩する。もちろん、数十万年前に地球上に誕生したばかりの人類が 150 億年の宇宙の神秘を完全に解明できるとは思えないが、着実に進歩するのである。謎の解明は自然のより正しい認識や理解をもたらすと共に新しい謎を生み出す。そしてまたその謎の解明に取り組む。そのプロセスを繰り返すことによって科学は進歩していくのである。

ニュートンは、リンゴの落下するのを見て月も地球に向かって落下していることに気がついたかどうかかわからないが、とにかく、地球上の物体の落下現象と天体の運動を統一する万有引力を発見した。それは重力現象をことごとく説明していった。ただ水星の近日点移動の謎が残された。数世紀後に、アインシュタインは、まったく新しい重力理論を提案した。時空の幾何学として重力というものを捉えることで、これまでの人類の「時間」や「空間」に対する認識を大きく変えてしまった。そしてそれは人類の宇宙に関する理解を飛躍的に広げていった。このように、重力の謎はことあるごとに物理学を進化させてきたといえる。

そしていま、力の統一や量子論においても重力は他のものとは異なった振る舞いを見せ、宇宙論スケールでもいろいろと謎を提供している。その謎の解決がまた、人類に科学の新しい進化をもたらすことであろう。現代の「重力」に関する「謎」は、不思議なことに両極端のスケールで現れている。超ミクロなスケールでは量子重力理論や超紐理論などいろいろなアプローチで研究されているにもかかわらず未だに基礎理論が何か解明できていない。一方、「重力」の問題であるかどうかは不明であるが、宇宙論的超マクロなスケールではダーク

索引

欧数字

+ モード 59
× モード 59
Ia 型超新星 54, 163
1 ループ 147
II 型超紐理論 148
2 次元球面 27, 30
2 次元世界面 146
2 次元超曲面 160
3 階反对称テンソル場 147
3 次元擬球面 48
3 次元球面 48
3 次元スカラー曲率 78
3 次元超曲面 111
3 次元超曲面族 140
3 次元ユークリッド空間 48
(3 + 1) 形式 111
4 元運動量 14
4 元速度 14, 95, 114
4 元力 14
4 次元共形場の理論 144
4 次元時空 12
4 重極モーメント 61, 84, 85
5 次元時空 154
5 次元重力定数 158
5 次元重力理論 144
5 次元バルク時空 157
5 次元反ドジッター・シュヴァルツ
シルト解 158
6 次元カラビ・ヤウ空間 159
10 次元超重力理論 143, 156
11 次元超重力理論 143, 154, 156

ADD モデル 157
ADM 形式 111, 140
ADM 質量 62
AdS (anti de Sitter) 時空 144,
157
AdS/CFT 対応 144

 β 関数 147

CFT (conformal field theory)
144

D プレイン解 143, 156

DGP モデル 167

γ 線バースト 125

k インフレーション 149

KdV 方程式 86

Λ CDM モデル 164

M 理論 144

MOND 167

π 粒子 131

PPN 形式 133, 136

PPN パラメータ 134, 136

RS モデル 157

TeV $\bar{S}$ 重力理論 168

TT ゲージ 58

VLBI 135

WMAP 54, 164

ア

アインシュタイン・エーテル理論
135

アインシュタイン系 147

アインシュタインテンソル 34

アインシュタイン・ドジッター宇宙
モデル 53

アインシュタインの規約 24

アインシュタインの等価原理 7,
8, 11, 18

アインシュタイン・ヒルベルト重力
作用 35, 138, 140, 147

アインシュタイン方程式 33, 34,
36, 73, 102

アキシオン 167

アシュテカ変数 141

アフィン接続係数 29, 32

暗黒の星 71

暗黒輻射 158

位相空間 27, 106

一様回転系 22

一様空間 76

一様空間の分類 76

一様重力場 6, 18, 20

一様性 47

一様・非等方宇宙モデル 77, 80,
109

一定加速度系 6

一般化された重力理論 146

一般化された第 2 法則 126

一般共変性 25, 33, 49

一般座標変換 25, 27, 28, 73

一般相対性原理 33

一般相対性理論 2, 7, 22, 27, 33,
34, 36, 73, 149, 172

イミルジパラメータ 141

因果構造 92

因果的地平線 98

因果的領域 68, 70, 98

因果律 160

インフラトン場 159

インフレーション理論 53, 80,
158

渦度 116

渦度テンソル 114

宇宙 46, 73

宇宙検閲官仮説 122, 123

宇宙原理 47, 50, 76

宇宙項 49, 53

宇宙項問題 165

宇宙時間 51

宇宙静止系 134

宇宙定数 49, 147, 163, 165

宇宙年齢 125, 164

宇宙の加速膨張 53

宇宙の偶然性問題 166

宇宙の特異点 79

宇宙背景輻射 54, 164
宇宙パラメータ 164
宇宙膨張率 52, 162
宇宙論 46, 53, 64
埋め込み 93
運動量拘束条件 113, 141
運動量密度 113
エーテル 2, 9, 173
エーラーズ変換 85
エキピロティック宇宙論 159
エディントン・フィンケルシュタイン座標系 68, 69
エネルギー・運動量擬テンソル 62
エネルギー・運動量(テンソル) 34, 57, 60–62, 114, 130
エネルギー・運動量保存則 33, 34, 49, 61, 113, 114
エネルギー・運動量密度 34
エネルギーと質量の等価性 16, 34
エネルギー方程式 114
エネルギー密度 113, 114
エルゴ領域 94–96, 105
エルンスト方程式 83
エルンストポテンシャル 83
遠隔作用 7
エントロピー 115, 124
エントロピー増大則 123
エントロピーの公式 126
エントロピー方程式 115
オイラー方程式 114
オクロ天然原子炉 132

カ

カー解 83, 84, 90, 97, 122
カー解の唯一性定理 122
カー時空 94, 96, 98, 103
カー・シルド型 97
カーゾン時空解 108
カーター定数 103, 104
カー・ナット解 90
カー・ニューマン解 83, 122
カーブラックホール 94–96, 98, 100, 103
開近傍 27
回転エネルギー 105
回転角速度 95
回転対称性 75
外部曲率 111, 112, 140
カイラリティ 156
カイラル粒子 143
ガウス記号 148
ガウス・ボンネ項 148
カオス 102, 105–108
確率論的重力理論 173
過去の光円錐 68, 71
過去の事象の地平線 72, 100
カシミアエネルギー 155, 165
カスナー解 154
可積分 103
可積分系 87
可積分条件 88
加速膨張 165
カッシーニ衛星 135
ガリレオの相対性原理 11
ガリレオの等価原理 6, 18
カルツァ・クライン宇宙論 154
カルツァ・クライン理論 132, 142, 145, 161
関数族 172
慣性 129
慣性系 9
慣性系の引きずり 96
慣性質量 6, 8, 33
慣性の法則 25
基底ベクトル 28
基本相互作用 129, 142
基本定数 131, 132
逆散乱法 82, 86, 88
逆問題 86
球対称星 37
球対称静的解 66
共形場の理論 144
共形不変性 146
共形変換 149, 151
強結合領域 144
共変形式 114
共変成分 28
共変的 27
共変微分 29, 112
共変ベクトル 28
共役運動量 78, 140
極限カー時空 105
極限カー・ニューマンブラックホール 104
極限ブラックホール 104, 123, 127

局所慣性系 32
局所時間 11
局所無回転観測者 96
曲線座標 30
曲率 30, 34, 57
曲率高次項 146, 147, 149, 167
曲率テンソル 115
巨大数 131
巨大数仮説 131
巨大ブラックホール 108
キリングベクトル 73, 75, 76, 82, 86, 88, 95, 103, 106
キリング方程式 75
銀河の後退速度 52
近日点 40
近日点移動 40, 135
近接作用 7
クインテッセンス場 166
クイントム場 166
空間的超曲面 94
空間的な無限遠 92
キューサー 42, 132
屈折角 41
クライン・ゴルドン方程式 16
くりこみ 139, 147
くりこみ不可能 139, 171
クリストッフェル記号 29, 151
クルスカール図 70, 71, 93
クルスカール・セクレス座標 70, 92
計量 24, 25, 27, 33, 151
経路積分法 141
ゲージ拘束条件 141
ゲージ自由度 140
ゲージ場 143
ゲージ変数 113
ゲージ理論 142
決定論的世界観 138
ケプラーの法則 5
原子時計 20, 132
原始ブラックホール 124
元素合成 132, 158
厳密解 64, 85, 87, 99
光円錐 68, 96
光子 15, 129
高次元宇宙論 154, 157
高次元時空 154, 157
構造定数 76, 77
光速 9, 12, 131

拘束条件 116, 140
光速度不変の原理 12, 13, 15, 173
降着円盤 104, 109
コーシー地平線 98
コーシー面 98
ゴースト (場) 166, 167
固有時間 13, 32, 65, 95
固有速度 52
コンパクト化 142, 155, 157
コンプトン波長 125, 172

サ

最終時空構造 123
最終時空間題 122
最小作用の原理 13
最大対称空間 75
最大リヤプノフ指数 107
三体問題 102
散乱データ 86
時間の遅れ 43, 135
時空 2, 13, 25, 35
時空構造 92, 96, 98
時空特異点 94
時空のカオス 109
時空の対称性 73–75, 82
時空のダイナミクス 57, 111, 114, 142
時空の特異点 67
時空のゆがみ 55, 57, 111
時空の量子化 171
時空物理学 3, 26, 33, 35, 51, 111
軸対称定常時空 82, 83, 86, 88, 95
次元 154
自己相似 118
自己相似解 118, 119
事象の地平線 64, 67, 69–71, 92, 94–96, 98, 99, 122
質量公式 122, 123
質量とエネルギーの等価性 14
シフトベクトル 112, 140
射影演算子 112
シャピロ遅延 43, 134
シュヴァルツシルト (外部) 解 36, 38, 64, 84, 122
シュヴァルツシルト座標系 68
シュヴァルツシルト時空 38, 68, 70, 71, 92, 105

シュヴァルツシルト特異点 64–67
シュヴァルツシルトの内部解 66
周期宇宙論 159
修正重力理論 167
自由落下系 18
重力 142
重力加速度 6, 33
重力源 59, 60
重力子 129, 138, 139, 143, 157
重力質量 6, 8, 33
重力多体系 102
重力定数 6, 131
重力的赤方偏移 19, 20
重力熱力学的カストロフイー 102
重力場 25, 33
重力波 3, 55, 57, 58, 61, 64, 100, 103, 108
重力波観測 108
重力波源 108
重力場中の時間の遅れ 19, 20, 65
重力場のエネルギー 62
重力波のエネルギー 61
重力場の発展方程式 113, 117
重力場の量子化 3, 144, 173
重力半径 38, 64, 66, 69
重力崩壊 67, 99, 117, 122
重力方程式 25
重力ポテンシャル 33, 167
重力理論 45
重力レンズ 3
縮約されたビアンキ恒等式 31
主ヌルベクトル 103
シュレディンガー方程式 172
準大域的ローレンツ座標系 133
順問題 86
状態方程式 116
状態和 126
衝突係数 39
ジョルダン系 147
ジョルダン・プランクス・ディッケ理論 132
真空のエネルギー 53, 165
水星の近日点移動 15, 36, 39, 173
数値相対論 111, 114
スカラー曲率 31, 34, 55, 115, 140, 149
スカラー重力理論 129

スカラー・テンソル重力理論 45, 129, 132, 134, 146, 147, 149, 167
スカラー場 27, 117, 119, 129, 130, 149
スカラー・ベクトル・テンソル理論 168
スカラー粒子 129
スケールファクター 50, 78, 162
スケール不変性 117, 119
ストリング系 147
ストレステンソル 113
スピノル 28
スピン 105
スピン軌道相互作用 106, 108
スピントテンソル 106
スピンネットワーク 141
スピン粒子 105
スペクトル線のずれ 22
スペクトルパラメータ 87
静止質量エネルギー 14
静止質量密度 134
正準運動量 111
正準形式 111, 141
正準変数 113
正準量子化 111, 127, 138, 140
生成・消滅 138
正則化 147
静的宇宙モデル 48, 50
世界間隔 12, 13, 24, 25, 28
赤方偏移 163
絶対光度 163
絶対時間 12, 173
漸近的平坦 83, 90, 93, 98, 122
線形化されたアインシュタイン方程式 56
線形重力場 139
全保存重力理論 134
双曲線軌道 39
相空間 119
相対性原理 11, 15, 25, 33
相対論的效果 133
相対論的重力理論 16, 35, 36
相対論的二体問題 103
相対論的星 66
相対論的力学 13
相対論的流体 115
双対性 127

相転移 118
測地線 25, 33
測地線運動 103
測地線偏差 57
測地線偏差方程式 57
測地線方程式 32, 38, 57
速度シア 116
速度シアテンソル 114
速度の合成則 12, 15
束縛エネルギー 104, 105
束縛方程式 113, 116
ソリトン 82, 86, 87, 89
素粒子統一理論 121, 142, 154
素粒子物理学 138, 142

タ

ダークエネルギー 4, 53, 162, 165, 166, 170, 173
ダークマター 167
大円コース 32
体積膨張率 114, 116
代替理論 129
大統一理論 143
第二基本形式 112
大余剰次元モデル 157
タウ・ナット解 90
楕円軌道 39
楕円体座標 83, 84
ダスト重力崩壊 122
脱出速度 71
多様体 27
単極子-双極子近似 106
地平線半径 123
地平線問題 158
チャブリギングガス 166
中性子星 67
超重力理論 143, 154, 155
潮汐力 57
超対称性 143, 165
超対称性粒子 167
超対称性理論 143, 154
超紐理論 4, 127, 142-144, 146, 156, 170
超放射現象 124
対消滅 160
ツイストポテンシャル 82
強い相互作用 4, 142
低エネルギー極限 146
定常限界面 96
定常時空解 83
定常シュレディンガー方程式 86
定常真空解 122
定常性 82
ディラトン場 146
ディリクレ境界条件 143
電磁気力 142
電弱理論 142
テンソル 27
テンソル方程式 32
天体力学 102
テンプレート 108
天文単位 50, 169
等価原理 1, 18, 32
等加速度運動 19
等曲率空間 47, 76
統計力学 126, 127
同相 27
等長変換 75
等長変換群 76
動的宇宙論 51
動的次元縮小 154
等方座標 42
等方性 47
トーション 30
トーラス 155, 159
トーラス構造 106, 107
特異点 3, 71, 79, 94, 96, 98, 99, 155
特異点定理 3
特異点問題 143
特殊相対性理論 2, 11, 16, 173
閉じた宇宙 76
ドジッター解 50, 51
ドップラー効果 19
ドップラー追跡法 135, 168
ドップラー偏移 168
トポロジー 122
富松・佐藤解 83, 85

ナ

内部エネルギー密度 134
内部地平線 94, 95, 98, 100
ナットパラメータ 90
ナビエ・ストークス方程式 172
二体問題 103
ニュートラリーノ 167

ニュートン極限 16
ニュートン近似 60
ニュートン重力 49
ニュートン重力理論 2, 7, 15, 25, 33, 36
ニュートンの運動方程式 6, 13, 16
ヌル超曲面 95
ヌル無限遠 92
熱伝導率 116
熱平衡 123
熱力学 121, 123, 126
熱力学第 0 法則 123
熱力学第 1 法則 115, 123
熱力学第 2 法則 123
熱力学第 3 法則 123
熱力学的状態 126
熱流ベクトル 114
ネルンストの定理 123
粘性係数 116
ノイゲパウアー・クレーマー変換 85
ノルトヴェート効果 135

ハ

バーコフの定理 122
バイオニア異常 168, 173
バイキング 43
ハウズドルフ空間 27
白色矮星 22
裸の特異点 84, 85, 91, 122
発散積分 139
ハッブル定数 52, 131, 163, 164
ハッブルの法則 52
ハッブル膨張率 131, 163
波動性 125
波動方程式 57
場の量子論 124, 138
場の理論 7
ハミルトニアン宇宙論 79
ハミルトニアン拘束条件 113, 117, 141
ハミルトン形式 111
パラティニ形式 151
バリオン物質 164
半古典重力理論 171
半古典的アプローチ 125
反対称テンソル場 146
反ドジッター時空 144

反ブレイン 159
反変成分 28
反変ベクトル 28
半保存重力理論 134
万有引力 1, 5, 162
万有引力定数 131
万有引力の法則 2
ビアンキ宇宙 77
ビアンキ宇宙モデル 79, 109
ビアンキ宇宙論 79
ビアンキ恒等式 31, 34, 115
ビアンキタイプ 78, 79
ビアンキタイプ IX 時空 109
ビアンキ分類 76, 77
非一様ダスト時空 117
非可換幾何学 171
非可換群 172
非可積分 102, 106, 108
光の軌道方程式 39
光の屈折 3, 19, 21, 36, 40, 41, 134, 135
光の電磁波説 9
光の速さ 21
光の粒子説 21
非慣性系 18, 23
微細構造定数 132
非摂動論的手法 141
ビッグバン宇宙論 3, 76
非等方ストレステンソル 114
紐 142, 143, 159
紐理論 143
秒 20
標準 PPN ゲージ 133
表面重力加速度 121, 123
表面積増大則 121–123
開いた宇宙 76
ファントム場 166
フィッツジェラルド・ローレンツ収縮 11
フェルミ粒子 143
フォノン 172
不確定性原理 126
輻射優勢宇宙 158
輻射流体 118
物質優勢 53
負の宇宙定数 157
負のエネルギー 105
負の比熱 102

不変基底 76
不変双対基底 77
不変超曲面 76
ブラックホール 3, 64, 69, 71, 72, 92, 99, 105, 117, 121
ブラックホールエントロピー 124, 126, 127
ブラックホール解 90
ブラックホール解の一意性 122
ブラックホール形成 100
ブラックホールの温度 123, 124, 127
ブラックホールの回転角速度 123
ブラックホールの蒸発 124, 125, 143, 171
ブラックホールの熱力学 124, 127
ブラックホールの力学 121, 123
ブラックリング解 122
プランク時間 171
プランク質量 125, 157, 171
プランクスケール 165
プランク長 125, 171, 172
プランク定数 131
プランク分布 124
プランク密度 171
プランク・ディッケ重力理論 129–132
プランク・ディッケパラメータ 130
フリードマン宇宙 76
フリードマン方程式 51, 158, 162
ブレイン 143, 156, 157, 159
ブレインインフレーション 159
ブレイン宇宙 167
ブレイン宇宙モデル 157
ブレイン宇宙論 161
平行移動 28–30
並進対称性 75
平坦性問題 158
平坦な宇宙 76, 164
平面重力波 59, 108
ベクトル 28
ベクトル・テンソル理論 45, 135
ベクトルポテンシャル 56
ベケンシュタイン・ホーキング則 141
ベックルンド変換 82, 85
ヘテロティック紐理論 148

ベトロフ分類 103
偏極 58, 59
扁長楕円体 84
変分原理 35
扁平楕円体 84
ペンローズ過程 105, 122, 124
ペンローズ時空図 92, 98
ペンローズ図 93, 100
ポアソン方程式 34
ポアンカレ写像 106, 107
ホイヘンスの原理 21, 43
ポイヤール・リンドクイスト座標 85, 98
ホイラー・ドウィット 140
膨張宇宙論 50, 53
放物線軌道 39
ボーアの対応原理 144
ホーキング輻射 125
ボーズ粒子 143
ポストニュートン近似 133
ボソン紐理論 148
ボルツマン定数 126
ホロノミー変数 141
ホワイトヘッド効果 134
ホワイトホール 69, 71, 72
ボンディ質量 62

マ

マイケルソン干渉計 10
マイケルソン・モーリーの実験 10
曲がった空間 22, 24, 46
曲がった時空 24, 30, 33
マジック・サークル 65
マックスウェル方程式 56, 116
マックスウェル理論 9
マッハの原理 129
ミー理論 35
ミックスマスター宇宙論 80
密度パラメータ 163
ミニ超空間 80
未来の光円錐 68, 70
未来の事象の地平線 72
ミンコフスキー空間 12, 23, 55
ミンコフスキー時空 24, 37, 68, 90, 92
無からの宇宙創生 141
無境界境界条件 140
無限赤方偏移面 95, 96

無限の過去 92
無限の未来 92
虫食い穴 94
メスバウアー効果 23
モジュライ場 155
モジュライ問題 155, 159

ヤ

ヤコビ恒等式 77
ユークリッド空間 24, 46
有効結合定数 155
有効重力定数 155
有効ポテンシャル 38, 104
横波 58
横波・トレースゼロ条件 58
余剰次元 142, 156, 157
余剰次元空間 154, 155, 159
弱い重力場の近似 42
弱い相互作用 4, 132, 142
弱い等価原理 8, 130

ラ

ライスナー・ノルドシュトルム解 83, 122
ラグランジュ的記述法 114
ラグランジュの未定定数 136
ラックスペア 86, 87
ラプス関数 112, 140
ラブロック重力作用 148
ランドール・サンドラムモデル 157, 158
リー代数 76
リー微分 74
リーマン幾何学 25, 27, 171, 173
リーマン曲率テンソル 25, 30, 31, 34, 67
リーマン空間 27, 32
リーマン・クリストッフエル曲率 30
リーマン多様体 27
リーマンテンソル 31, 115
リーマン面 98
離心率 39
リッチ曲率テンソル 31, 34, 37, 55, 115, 150
リミットサイクル 119
リヤブノフ指数 107
粒子数保存の法則 114

粒子数密度 114
粒子性 125
粒子生成 171
粒子の軌道方程式 39
量子色力学 144
量子宇宙論 140
量子重力 139, 141
量子重力理論 3, 121, 125, 170
量子電磁気学 139
量子統計力学 126
量子補正 147, 149
量子揺らぎ 158
臨界現象 117, 118
臨界指数 118, 119
臨界質量 130
臨界点 119
リング特異性 95, 96, 98
ループ量子宇宙論 141
ループ量子重力理論 127, 141
レーダー・エコー 43
レビ・チビタ接続 151
連星中性子星 108
連星パルサー 62
連星ブラックホール 108
ローレンツゲージ 56, 60
ローレンツ収縮 11, 23
ローレンツ不変性 13
ローレンツ変換 11, 13, 23

ワ

ワームホール 93, 94, 100
ワイル解 83
ワイル曲率 103
ワイル曲率テンソル 115
ワイルテンソル 115, 151

人名

アーノウィット 111, 139
アインシュタイン 2, 11, 18, 22, 48, 57, 65, 170
アシュテカ 141
アリストテレス 1, 5
イスラエル 122
ウィル 45
ウェブ 132
エディントン 22, 41, 65, 67, 131
エルンスト 83

オッペンハイマー 67
カー 83
カーター 122
ガウス 25, 27
ガリレオ 1, 5
カルツァ 142, 154
カント 3
ゲース 54
クライン 142, 154
クルスカ 69
グロスマン 25
ケプラー 1, 5
ゴールドベルグ 62
佐藤 (勝) 54
佐藤 (文) 85
サハロフ 86, 87
サラム 142
サンドラム 157
シャピロ 43
シュヴァルツシルト 36
シュナイダー 67
シュレディンガー 171
ジョルダン 132
シング 67
スタロビンスキー 54
セケレス 69
ゾルドナー 21
チョップティック 117
ディッケ 8, 130
テイラー 62
ディラック 111, 131, 139, 140
デサー 111, 139
ドジッター 50
富松 85
ニュートン 1, 5, 170
ニューマン 83
ノイゲバウアー 85
ノルドシュトルム 83
パーカー 171
ハートル 140
ハイゼンベルク 139
パウリ 139
バウンド 22
ハッブル 52
バラティニ 151
ハリソン 85
ハルス 62
ビアンキ 76

ヒルベルト 35
ビレンキン 140
ファインマン 141
フィッツジェラルド 11
フィンケルシュタイン 67
ブラジンスキー 8
ブランズ 130
フリードマン 50
ブロンシュタイン 139
フロンズダール 67
ベケンシュタイン 168
ペトロフ 103
ペリンスキー 86, 87
ベルグマン 111, 139
ヘルツ 9
ペンローズ 3, 122, 123

ボアンカレ 11, 102
ホイラー 65, 94
ホーキング 3, 121, 122, 124, 125, 140, 143
ボルコフ 67
ボルチンスキー 143, 156
ボルツマン 126
マイケルソン 10
マイヤー 126
マックスウェル 2, 57
マッハ 129
ミズナー 111, 139
ミッチェル 71
ミルグロム 167
ミンコフスキー 12
モーリー 10

ライスナー 83
ラプラス 3, 71
ラブロック 148
ランダウ 62
ランドール 157
リーマン 25, 27
リフシッツ 62
ルメートル 51, 67
レブカ 22
ローゼンフェルト 139
ローレンツ 10
ロバチェフスキー 25, 27
ロビンソン 122
ワイル 83
ワインバーグ 142

著者略歴

前田 恵一

まえ だ けい いち

1950 年 大阪市生まれ
1974 年 京都大学理学部物理学科卒業（主として物理学専攻）
1979 年 京都大学大学院理学研究科物理学専攻博士課程修了
1979 年 京都大学基礎物理学研究所 学振特別研究員
1980 年 理学博士（京都大学）
1983 年 イタリア・トリエステ SISSA 研究員，1985 年 イタリア・トリエステ ICTP 研究員，
1986 年 パリ・ムードン天文台 客員研究員，
1987 年 東京大学理学部物理学科助手
1989 年 早稲田大学理工学部物理学科教授
2006 年 イギリス・ケンブリッジ大学 トリニティ校 客員教授
2012 年 イギリス・ケンブリッジ大学 クレアホール 客員教授
2013 年 ニュージーランド・カンタベリー大学 客員教授
現在 早稲田大学理工学術院先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻教授

専門 理論宇宙物理学・宇宙論・重力理論

主要著書・監修・訳書

『宇宙のトポロジー』（岩波書店，1991 年）
『カオスとの遭遇』（産業図書，1995 年）（共訳）
『アインシュタインの時間』（ニュートンプレス，1998 年）
『図解雑学 ビッグバン』（ナツメ社，1999 年）（監修）
『アインシュタインとボーア』（裳華房，1999 年）（共編・共著）
『図解雑学 ブラックホール』（ナツメ社，2001 年）（監修）
『The Scalar-Tensor Theory of Gravitation』（Cambridge University Press，2003）（共著）
『複雑系叢書 5 複雑さと法則』（共立出版，2006 年）（編集・共著）

臨時別冊・数理学 SGC ライブラリ-63

『重力理論講義 相対性理論と時空物理学の進展』（電子版）

著 者 前田 恵一

2016 年 5 月 25 日 初版発行 ISBN 978-4-7819-9910-4

この電子書籍は 2008 年 5 月 25 日初版発行の同タイトルを底本としています。

数 理 科 学 編 集 部

発行人 森 平 敏 孝

TEL.(03)5474-8816

FAX.(03)5474-8817

ホームページ <http://www.saiensu.co.jp>

ご意見・ご要望は sk@saiensu.co.jp まで。

発行所 © 株式会社 サイエンス社

TEL.(03)5474-8500 (代表)

〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷 1-3-25

本誌の内容を無断で複写複製・転載することは、著作者および出版者の権利を侵害することがありますので、その場合にはあらかじめサイエンス社著作権担当者まで許諾をお求めください。

組版 三美印刷