

アインシュタイン外伝

—フリードマンとシュヴァルツシルド—

佐藤 文隆

〈甲南大学理工学部 〒658-8501 神戸市東灘区岡本〉

e-mail: satoh@konan-u.ac.jp

一般相対論は膨張宇宙とブラックホールという強い重力効果の現象に初めて本格的応用を見いだしたが、その発端を切り拓いたフリードマンとシュヴァルツシルドは早世したためその人間像があまり知られていない。世界物理年で語りきれなかったこの二人についてその実像を追ってみた。

1. アインシュタインの語り方

昨年の「世界物理年」は二十世紀の物理学を総括するよい機会となった。2005年のノーベル物理学賞が量子光学の業績に与えられたのは「世界物理年」がらみだという論評がなされるように、「アインシュタイン＝相対論」という公式からの脱却も必要なのである¹⁾。筆者は「アインシュタインの四つの顔」という視点の重要性を強調した。アインシュタインの業績は相対論と量子論に大別される。量子論開拓はプランク、アインシュタイン、ボーア、その他の多くの実験家たちとの共同作業である。それに対し相対論は、「特殊」から「一般」の完成まで一人仕事であり、かつ始めから完成品が登場した。ハイゼンベルグ、シュレーディンガーらによる量子力学の完成を下支えしたアインシュタインのどろくさい役割とは対照的である。

奇跡の年の三つの業績と量子論関係のその後の業績はいずれも当時の学界で提起されていた問題に応えたものであり、アインシュタインも時代の子であった。それに対して、一般相対論とその余勢をかった統一場理論の試みは「反時代的」なものであった。個人の独特の審美感を反映したものであり、学界も当惑した。彼のノーベル賞をめぐ

る謎もここに起因する^{2),3)}。こうした審美感過剰な科学の手法は普通は成功せず、彼の場合もその態度は量子力学不承認と原子核・素粒子物理無視の力の理論（統一場理論）として顕在化し、ナチ台頭の時代もからんで、「孤独になったアインシュタイン」⁴⁾を人生の後半で現出させた。しかし一般相対論だけは不思議と生き残った。それどころか、審美感に発する共変性、ゲージ不変性といった概念は、半世紀以上の空白期間を経て、素粒子の標準理論の中に再興した。現時点から見れば一般相対論は力の法則の普遍的構成原理であったことになる。

2. 一般相対論の実証と厳密解

こうした審美感を数学に導かれて完成した一般相対論については、アインシュタイン自身、これが物理理論であるのか不安であった。そこで弱い重力の近似での三つの観測的チェックを提起し、まず観測値が既知の水星の近日点移動を説明して自信をもち、二番目の重力での光経路の曲がり方は1919年の日食観測で実証された。もう一つの重力赤方偏移を星の分光でみるのは成功せず、1960年になって、ガンマ線のエネルギー測定精度向上を活かして、地上の重力で最初に測定された。その

後この固有時差効果は原子時計の向上で簡単に見られるようになり、現在ではGPS技術の時間校正にも組み込まれている。このほかの弱い重力近似効果としては固有長さ効果（レーダーエコーで検証）、重力レンズと重力波があるが、これらはいずれも現代の天文学の中にすでに組み込まれている。

他方、こうした弱い重力効果ではなく強い重力効果が卓越して定性的なものごとを変えるテーマが膨張宇宙とブラックホールである。一般相対論の積極的攻勢はここから始まる。宇宙モデルは1917年にアインシュタインが先鞭をつけ、ド・ジッター、フリードマン、ルメートルらがモデルを発展させ、1929年のハッブルによる膨張の観測的発見で天文学とつながる。しかし現在膨張しているという事実と1948年のガモフのビッグバン説には大きな開きがあった。

他方、ブラックホール問題の嚆矢は1917年のシュヴァルツシルド解であるが、これが地平線をもつ認識に至るには紆余曲折があった。量子統計と中性子の発見という量子物理と核物理に刺激されて重力崩壊が現実と考えられオッペンハイマーらがシュヴァルツシルド解を引っ張り出したのは1939年であるが、彼自身も含めて多くの科学者は戦争に巻き込まれて中断した。理論的にこの解の時空構造が理解されたのは1950年頃とされるが、その頃、物理学は核物理全盛の時代であり、一般相対論の理論研究は一握りの好事家に限られていた。観測技術の進展でこれが天文学の問題になるのは1960年後半であった。現在は大、中、小、さまざまなブラックホールが天文学では当たり前の天体になりつつある。素粒子の標準理論完成後の1980年代後期から、ブラックホールは量子重力や量子情報理論との関係でもう一度新しい方面に展開しつつある。

これらの厳密解はいずれも物理学にとって鬼の子であった。時空の始まり（終わり）、時空の端といった特異点を導入し、時間的に空間が永遠でな

いことを導くのである。またブラックホール時空の領域が必ずしも因果的に結びついていないことを導く。簡潔な仮定で解かれた厳密解は必ずしも現実を記述しない場合も多いので注意を要するが、簡潔な仮定を外しても一般的に導かれることが、ペンローズとホーキングにより1960年代の中頃に証明された。

3. 天文学に「応用」を見いだす

「1919年の一件」による世間での相対論ブームやアインシュタインブームをよそに、1920年代以降の物理学は、量子物理、原子・原子核・素粒子物理に進入した。欧米でも日本でもあの熱狂的な相対論ブームは物理学のこの流れにほとんど影響しなかった。ハイゼンベルグの自伝「部分と全体」⁵⁾を見ると当時のこうした状況がよくわかる。物理学は量子力学と原子・原子核物理に向かって実験と理論がかみ合って急テンポで進歩していく。一般相対論はその美しさによって多くの俊英たちを魅惑したが他面では危険なしろものだった。まずそれはすでに理論としては完成品であり、「鑑賞」には良いが、「仕事」を提供しない。完成品が威力を発揮するには、それを「応用」する分野が必要である。当時の科学にはそれが欠けていた。第二次大戦後、原子・原子核物理の影響が多くの科学と技術の分野に拡大していく中で、一般相対論は1960年代後半までは「危険な」（それでは食っていけない）学問とみなされていた。ただその高度の完成度のゆえに研究は細々と数学として生きながらえていた。

1960年当時、星の進化と元素の起源の両面で天体核物理が隆盛を極めていた。ニュートリノの新プロセスの仮定に基づく天体への効果の研究も始まった。こうした天文学の物理学が原子核素粒子一色の時期にHFB²論文⁶⁾でオッペンハイマーの1939年の重力崩壊論文が登場したときの衝撃は大きかった。1960年代、このクエーサーのエネルギー問題、3K放射の発見と続き、一般相対論が

科学の前面に姿を現し、1970年代始めには流行の学問分野に急変した。一般相対論を「応用」する対象が登場したのであった。私はこの「こわごわ手を出す」段階から、「流行」になった段階にかけての転換期に一仕事できるチャンスに恵まれたのは幸せであった。

このようにシュヴァルツシルド解とフリードマン解の発見が1960年代以降のような一般相対論ブームにすんなりと接続したのではない。このことを認識することは学問のダイナミズムを理解するうえで大事である。特に相対論的宇宙物理が流行りになってから天文学に関心をもった世代が多い現代ではとりわけ重要である。若い人にとっては過去のことはどうでもいいようだが、自分の未来の構想は過去から現在への延長として描かれるのであることは自覚すべきである。その意味では歴史は未来を見る目を養ううえで大事なのである。君たちが熱中しているこの現在もまもなく陳腐な過去に埋もれていくのである。

シュヴァルツシルドもフリードマンもともに社会の激動期に早世したこともあり、二人はこの業績では何の評価も受けることなく人生を終えた。現在、専門用語として彼らの名前を使っていると、彼らを自分に引き寄せて勝手に誤った人間像を描いてしまう。いったい彼らはどのような科学者であったのか？以下ではこの二人に焦点をあてて実像に少し迫ってみたい。事実在即して考えるのが科学であるから彼らを事実在即さないで勝手に描くのはよくないからである。

4. フリードマン (1888–1925. 9)^{7), 8)}

フリードマンの肖像写真はほとんど一つに限られていて、頭髪が後退している。しかし、彼は37歳で没しているからあれはそれ以前のものである。1925年9月に死亡するたった3カ月前の6月には気象観測隊を指揮して、自ら気球にのり7,400 mまで昇っている。一方、本稿で彼を取り上げているのは「空間の曲率について」(1922年)

と「負定曲率をもつ宇宙の可能性について」(1924年)という一般相対論での膨張宇宙の論文を書いているからである。この二つの事実を突きつけられると「いったい彼は何者なのか？」と不思議になる。気象学者なのか？宇宙論学者なのか？彼の人生はこういう現在の常識で分類するのは不可能である。

彼はサンクトペテルブルグ(この呼称はドイツ風なので一次大戦後からロシア風にペトログラードとなり、1924年からは、22年に死んだレーニンにちなんで、レニングラードとなり、70年してまた元に戻った)生まれでそこで数学を修めた。ロシアの数学といえばステコロフ研究所というのが有名であるが、このステコロフが彼の教師であった。また筆者の世代にはスミルノフの数学教科書というのが流行ったが、このスミルノフはフリードマンと同級生だった。数学者なら、あの論文を書いたことも納得もいき、1920年の学位論文が「圧縮流体の流体力学」だから気象とも結びつくが、「気象観測」が解せない。1920–25年に地球物理測候所の所員で、1925年には所長になっている。しかし自ら気球に乗ったりするのを理解するには若い時期に経験した第一次大戦とボルシェヴィキ革命を無視できない。サンクトペテルブルグはレーニンが死ぬまでは首都で政治都市だった。

フリードマンはアクティブな革命派ではなかったが、革命後、大学や専門学校、測候所や研究所に広がるサボタージュの空気に対抗してそれらを再興するために、さまざまな学校で講義をしたり、多忙な生活を送った。またこの時期に地磁気の女性研究者と職場大恋愛をして、専業主婦の妻と離婚するという慌しい人生であった。宇宙論の論文はこのこうした最中のものである。

一般相対論を知ったのは1920年に首都に帰って大学の物理の研究室に出入りしてらしい。このグループはフレンケルが指導者でエーレンフェスト、ガモフ、ランダウ、ホックなどもいた。第一

論文をドイツの物理の雑誌に投稿したのは1922年5月だが9月18日には「この論文は誤りで計算間違いを正せば静的になる」という断定的なコメントをアインシュタインがだす。12月初めに反論をアインシュタイン宛の手紙で送った。しかしアインシュタインは10月8日にはマルセーユから日本に向けた旅に出ており、この頃はその最中である。12月29日には博多から出航するが、エルサレムに向かい、帰りにスペインによってベルリンに着いたのは1923年の3月だった。5月にローレンツの退官の会に出席のためライデンを訪れた。そこに留学していた（ローレンツの後任はサントペテルブルグにいたエーレンフェスト）フリードマンの同僚のクロトコフ (Kurtkov) がアインシュタインをつかまえて「間違っていない」ことを説得した。アインシュタインは自分の誤りを認め、5月20日付で「重要な結果」とするコメントを雑誌に送った。この年の夏に彼はドイツに気象業務で出張しベルリンも通過したがアインシュタインに会う努力をした形跡はない。この軽率な「誤り」コメントの背景にはこの頃のアインシュタインの身の慌しさがある。有名人化と反ユダヤの高まりである。この年の6月にはユダヤ人財界人で外務大臣であったラテウがナチにより暗殺された。アインシュタインと親交のあった人であり、彼も講演を一部控えるほど警戒するようになった。日本行きを「暗殺逃れ」と新聞が報道したほどである。こういう中でもフリードマンの論文の結果が「許せない」と感じ、十分な計算でのチェックの暇もなく日本行きの前に言っておこうと9月のコメントを書いたと思われる。

アインシュタインの過剰な拒否反応を引き出すほどの内容にもかかわらず、この論文は全く学界では話題にならなかった。彼はロシア語の「空間と時間としての宇宙」という小さな解説本を書いたが、注目されたのは1960年代に入ってからで、これは日本語訳もあるが実に現代的である。

膨張宇宙モデルをめぐる学界での展開はアイン

シュタインの静的モデルから出発したので錯綜したものだ。1917年、アインシュタインは正曲率の閉じた一様な三次元空間を物質があっても静的に保つために例の宇宙項を導入した。オランダの天文学者のド・ジッターが直ちに物質ゼロで宇宙項だけの解をだした。しかし、採用した座標系のゆえに静的に見えたが、1923年、ワイルがこの時空で離れたテスト粒子間の運動を調べて互いに後退することに気づく。しかし膨張宇宙の生みの親として学界で有名になるのはルメートルだった。エディントンは1922年ごろから高赤方変移の天体に注目し、また理論モデルではアインシュタインの静的モデルが不安定な平衡であることを示した。エディントンの学生だったルメートルは1927年にその辺りから始めて、フリードマンと同じことをやった。

ハッブルは有名な天文学者だったド・ジッターの論文から膨張宇宙モデルを知った。またエディントンもハッブルの観測とモデルの関係に注意し、エディントンとド・ジッターはともにルメートルの計算を大いにもてはやした。この流れでフリードマンは完全に無視された。実はフリードマンの論文はダストと宇宙項入りで、曲率も正と負両方のモデルを論じている。時々、フリードマンはダストで、ルメートルがダストと宇宙項入りを初めてやったような解説があるが誤りである。例の有効ポテンシャルの図も描いて静的モデルの位置づけも完璧であり、年齢の式もすっきりしている。ただ天文学との関係が一切書いてなく、あたかも現在の一般相対論の試験問題の答案のような簡潔さだ。

ハッブルたちの発見で膨張宇宙が明確になった1932年にアインシュタインとド・ジッターは曲率ゼロのモデルを導き、宇宙項は「誤り」であったと述べた。その後、ロバートソンとウォーカーは曲率が正・ゼロ・負の一樣等方三次元空間を仮定してそのダイナミクスをアインシュタイン方程式で解くという現代の教科書の流儀に整理した。

5. カール・シュヴァルツシルド (1873–1916. 5)⁹⁾

シュヴァルツシルドはフランクフルトの裕福な実業家の家庭で育ち、母親の活発さがカールの明るい活動性に受け継がれているという。ユダヤ家族だからカールも初等学校はユダヤ社会の学校にいったが、数学の才能を見せ始めたので上級学校に進むためギムナジウムに進んだ。父親の音楽趣味の友人にエプシュタインという人がおり、その息子のポールとカールは大の友だちになり、天文観測や数学に没頭した。ポールはカールのちょっと先輩だった。ポール・エプシュタインは後に整数論の教授になったが、ナチス台頭後自殺に追い込まれた。

シュヴァルツシルドは高校時代に当たる17歳ですでに天体力学の2編の論文を専門誌に載せるような天才少年だった。ストラスブルグ大学とミュンヘン大学で観測の経験を積み天文学者になった。博士論文はこの頃流行の回転流体の形状問題であった。ミュンヘンのゼーリガーを彼は師と仰いでいた。

23歳ですでにウィーン郊外の天文台長に発令され、26歳でミュンヘンに戻り、教授資格試験を終えて、1901–09年はゲッチンゲン大学の天文台長と教授を務めた。当時、ここは数学のメッカで、クライン、ヒルベルト、ミンコフスキーらと親しく交流した。そして36歳でプロシア帝国で一番権威のあったポツダム天文台の台長におさまった。この頃に結婚し、1912年に生れた二番目の息子マーチンが後にプリンストン大学の教授として星の進化理論などで有名になる。

カール・シュヴァルツシルドは数学の才能も群を抜いていたが、観測の方面でも大きな功績があった。一貫して行ったことは写真乾板でのみかけ光度の推定に関することで、波長による異動などの詳細な調査をした。しかし後世に名を残した功績は放射輸送理論と相対論であろう。放射輸送

の理論は星の構造論と並んで地球や惑星の大気の問題を視野に置いたもので、大気温度勾配問題は同時期にフリードマンも取り組んだ。ゲッチンゲン時代のものである。

数学的素養のあった彼は曲がった宇宙空間という考えを一般相対論より前に提唱している。1905年、「空間曲率の測定可能性について」という論文で、「現在の現象と矛盾することなく、宇宙は曲率半径が地球軌道の4,000,000倍以上の双曲型空間か、曲率半径が地球軌道の100,000,000倍以上の楕円型空間であると考えられることができる。後者の場合には、この空間を一周するのに40等級以上の吸収があると仮定しなければならない」と論じている。当時は星雲が雲か銀河かも確定していない時代であり、何とも小さな宇宙である。もちろんこれらの数字はこれ以下なら矛盾するの意であり、正解であったわけである。

ポツダム天文台台長に出世し、結婚して順風満帆な人生がスタートして間もない1914年、第一次大戦が勃発した。すでに40歳を過ぎており、また帝国でも名誉ある地位についている彼のような人物に徴兵はなかった。ところが彼は軍隊に志願して従軍する。そして前線の塹壕暮らしのような非衛生的環境に置かれたようである。彼の任務は専門を活かして高射砲部隊付で弾道計算などに従事したようだ。西部戦線からロシアの東部戦線に転戦したのは1915年であった。しかし晩秋には身体をこわして除隊し、病院に入ったまま1916年5月に死亡した。天庖そうという免疫不全の皮膚病である。42歳の早世であった。入院中に彼は一般相対論の二つの論文とシュタルク効果に関する論文を書いた。相対論のがシュヴァルツシルドの外部解と内部解である。これをアインシュタインに送って、雑誌に掲載された。アインシュタインは彼に宛てた手紙で「こんなに簡単に厳密解が得られるとは思わなかった」と感想を漏らしている。それまで彼はすべて弱い近似で一般相対論効果を扱っていた。厳密解に目を向けるのはこの翌

年の宇宙モデルが最初である。シュヴァルツシルドの内部解がヒントになったと推測する。

いわゆるシュヴァルツシルド面が地平線であることを彼は認識しなかった。密度一様の平行内部解の半径に最小値があって、シュヴァルツシルド半径より大きいので彼は安心したようである。この面の一方通行性、ブラックホール、に理解が進むのは後のことである。1924年ごろのエディントンのコメントから始まり、オッペンハイマー・スナイダーの論文で重力崩壊が認識されたのが1939年である。しかし「どうやっても出られない」というブラックホール性の認識はシンジ(1950年)を経て1960年のクルスカール-セケレ座標の導入によってであった。

それにしてもシュヴァルツシルドはなぜ戦争に志願したのであろうか？ この理解には当時のユダヤ人の置かれていたドイツ社会の状況を理解しなければならない。ドイツに対する愛国心を見せるために無理して軍隊に志願したのである。

参考文献

- 1) 佐藤文隆, 2005, 大学の物理教育 (日本物理学会) 11, 56
- 2) 佐藤文隆, 2005, レーザー研究 (レーザー学会) 33, 780
- 3) 佐藤文隆, 2005, 光学 (日本光学会) 34, 628
- 4) 佐藤文隆, 2004, 孤独になったアインシュタイン, 岩波書店
- 5) ハイゼンベルグ W.; 山崎和夫訳, 1974, 部分と全体, みすず書房
- 6) Hoyle F., Fowler W., Burbidge G., Burbidge M., 1964, *ApJ* 139, 909
- 7) Tropp E. A., Frenkel V. Ya., Chernin A. D., 1993, Alexander A. Friedmann: the man who made the universe expand (Cambridge UP, Cambridge, UK)
- 8) Sharov A. S., Novikov I. D., 1993, Edwin Hubble, the discoverer of the big bang universe (Cambridge UP, Cambridge, UK)
- 9) <http://www-history.mcs.st-and.ac.uk>

Side history of Einstein: Friedmann and Schwarzschild

Humitaka SATO

Physics Department, Konan University, Okamoto, Higashi-Nada-ku, Kobe 658-8501, Japan