

## 【重力の再発見—アインシュタインの相対論を超えて】

### 光より速く Faster than light

筑波大学 数学類 西村 泰一

1905年にEinsteinが発表した特殊相対性理論の根幹をなすのは、ある慣性系から別の慣性系へ移ってもMaxwellの電磁場の方程式が変わらないような変換法則と、光速度不変の原理である。1907年頃からEinsteinは上記の相対論に重力を組み込むことを考えるようになる。Einsteinが特殊相対性理論で気になっていたのは、加速する座標系では物理法則はどのように記述されるかという点と、Newtonの重力理論は遠隔作用に基づいているので、重力に

быстрее, чем свет  
比光快  
schneller als das Licht  
по-бързо от светлината  
Plus rapide que la lumière  
أسرع من الضوء  
빛보다 빠른  
Rápido que la luz  
Rychlejší než světlo  
По бързо од светлината  
Ταχύτερα από το φως  
מהר יותר ממהירות האור  
Faster than light  
سریعترو از نور  
Lebih cepat dari cahaya  
Ātrāks par gaismu  
Kiiremini kui valgus

関する情報は空間を無限の速さで伝わらなければならない（物体や情報が光速より速く伝わることはないという相対論の原理に矛盾する）、そのままでは相対論に組み込むことは不可能という点だった。この試みのためにEinsteinが土台に据えたのは、等価原理だった。等価原理というのは、もともとGalileoが見出したもので、すべての物体は重力場の中では同じ速度で落下するという言明を指したが、Einsteinはこれを拡張し、重力と加速度は等価であるという意味に用いている。1912年から1914年にかけて、Einsteinは、加速しているかどうかに関係なく、どのような座標系を用いても、物理法則は同じであるはずだという認識に達している。Einsteinはこれを一般共変原理と名づけている。1912年夏には、Einsteinは、求めている新しい重力理論では非Euclid幾何学が大きな役割を果たすことに気づくが、自身の持っている数学的素養がそれに充分ではないことに、かなりのFrustrationを覚えていた。ここで救いの手を差し伸べたのが、学生時代の友人で、当時スイスのZurichにあるETHで数学部長になっていたMarcel Grossmanだった。彼は19世紀半ばにRiemannによって作られたいわゆるRiemann幾何学を用い

てはどうかと提案した。こうして1913年に二人は共著で論文を発表する。論文は2部構成で、Grossmanは自分の担当部分で粒子は測地線（Euclid幾何学における直線に相当する）に沿って動くことを提唱している。片やEinsteinは自分の担当部分で、重い物体が存在する場合の場の方程式を導くことを求められた。しかし、この部分の出来栄はお世辞にも御立派とは言えず、3つの問題に苛まされていた。ひとつは因果律の破れ、二つ目がEnergy保存則の破れ、そして三つ目が重力場が弱く物体の運動が遅い場合、期待されるようにはNewtonの重力理論の根幹をなすPoisson方程式に還元されなかったことである。ここで当代随一の数学者のDavid Hilbertが救いの手を差し伸べる。Hilbertといえば、1912年頃までは、ほぼ完全に純粋数学者であったと言えるが、この頃から急速に物理づいてくる（数年前に仲のよかった数学者Hermann Minkowskiが急逝したこともだいぶ影を落としているようだ）。ヨーロッパは、1914年6月に勃発したSarajevo事件に端を発して、第1次世界大戦に突入するが、そんなことはお構いなしに1915年にHilbertは、EinsteinをGöttingenへ招待し、一週間で7時間の連続講演をしてもらっている。なかなか盛況だったようだ。EinsteinがGöttingenを発つと、Hilbertは変分法を用いて、Einsteinの重力理論の正しい場の方程式を導き出している。Hilbertは結果を雑誌Göttingen Naturforschに投稿し、Einsteinにも、結果を丁寧に説明する葉書きを出している。Einsteinは数学では、とてもではないが、Hilbertに及ぶところではなかったが、悪戦苦闘の末、なんとか独力で同じ場の方程式に辿り着くことに成功している。なんとも、独立独歩が売りのEinsteinらしい話である。こうしてEinsteinは、1916年に、Annalen der Physikに“The Foundations of the General Theory of Relativity”という論文を発表している。そこでは、水星の近日点移動の正しい取り扱い、重力の赤方偏移に関する予測、そして光が太陽の縁をかすめる折の湾曲についても述べられている。

唯一個の粒子が中心にある完全に球対称な場合のEinsteinの場の方程式の厳密解を見出したのは、ドイツの天体物理学者Karl Schwarzschildである。この仕事は第1次世界大戦の最中、東部戦線で従軍しながら、寸暇を惜しんでなされたものである。彼はこの従軍中に患った自己免疫疾患で、1916年5月に夭折している。わずか42歳であった。彼が見つけた特殊解は、Black Hole（中心に特異点を持つ）を表すもっとも単純な解であり、1923年に数学者のGeorge David Birkhoff（東論で有名なGarrett Birkhoffは彼の息子である）が球対称なEinstein方程式の解はこれに限ることを証明している。Einsteinは自分の場の方程式からBlack Hole解が導かれたことに大変不満で、いずれ真の統一場理論が完成した暁には、重力理論から特異点を完全に追放できると信じていたようである。Black Holeという命名は物理学者John Wheelerによるもので、1960年代後半の話である。なお、1970年代にStephan Hawkingが一般相対性理論では特

異点はむしろ普通であることを示したMany Singularities Theoremsを樹立している。最後に、余談であるが、Karl Schwarzschildの息子のMartin Schwarzschildは、殊勝にも父と同じく天体物理学の分野に進んで、恒星進化論の分野で功績を残している。

一般相対性理論の成立によって、宇宙論はFantasyの世界から科学の世界に足を踏み入れる。Einsteinは、1917年には、早くも“Cosmological Considerations on the General Theory of Relativity”なる論文を発表し、一般相対性理論から宇宙の大規模構造をどうして導き出すか考察している。ここで、自らの場の方程式を、古代ギリシャ以来の静的な宇宙観と調和させるため、後に“Biggest Blunder（最大の失敗）”と悔やむことになる宇宙乗数を導入している。このEinsteinの宇宙定数は、他にも色々な名前を持ち、真空（Vacuum）Energy、Dark Energyなどとも呼ばれるが、いずれにしても、負の圧力と密度を持つ新種の場のEnergyと考えるべきである。ラテン語で、古代に4大元素と信じられていた火、土、水、空気続く、5番目の元素を意味するQuinta Essentia（この概念は古代ギリシャの哲学者Aristotleに由来し、公転する太陽や惑星はこれに支えられていると看做された）に由来する、Quintessenceという呼び名が用いられることもある。19世紀に一世を風靡したEtherの現代版とでも言うべきもので、Lorentz不変性や一般共変性といった一般相対論の対称性を破ることはない。

宇宙定数を含まないEinsteinの場の方程式の膨張宇宙解を見出したのは、ヨーロッパから見ると、明らかに辺境に位置し、1917年の社会主義革命後のロシアにいた、Alexander Friedmannである。彼はSaint Petersburg State Universityで数学を学んでいる。Friedmannは、1922年と1924年の論文で、Einsteinの場の方程式には、時空の曲率に応じて、3種類の解があることを示している。曲率が正もしくは負であると、宇宙は風船のように閉じているか、もしくは（乗馬の際に用いられる）Saddleのように開いていることになる。曲率がちょうど0であると、宇宙は平坦で無限である。いずれにしても、Friedmannの解に従う宇宙は静的ではなく、動的に膨張もしくは収縮する。Einsteinは非常に保守的な面を持つ人物で、宇宙は静的であると堅く信じ、このFriedmannの結果に激しく反発して、彼は間違っていると断罪している。Friedmannは、これほどの発見にもかかわらず、世に認められることもなく、1925年に腸チフスで他界している。なお、FriedmannがLeningrad大学で教鞭をとった折の学生のひとりが、有名なGeorge Gamovである。

古くから知られていた惑星というのは、地球を別にすると、水星、金星、火星、木星、そして土星の五つである。これらが肉眼で容易に観測可能だからである。これに対して、天王星の発見はかなり遅

く、18世紀後半の話となり、その功はイギリスの天文学者William Herschelに帰される。天王星の発見後、これの具な観測から、摂動が観測されたが、これをもとに後に海王星と名づけられることになる惑星の予想軌道を理論的に弾き出したのは、フランスの数学者Urbain Le Verrierであり、これがこの人の最大の学問的業績となる。これを受ける形で、ドイツの天文学者Johann Gottfried Galleが実際に海王星を確認している。19世紀半ばの話である。これに気をよくしたUrbain Le Verrierは、Newtonの重力理論に基づく水星の軌道の予測と実際のDataが微妙に食い違うことから、水星の軌道のさらに内側にVulkan（ローマ神話に登場する火の神の名に因む）なる惑星の存在を予測した。この未知の惑星Vulkan探しの詳細は、現在のDark Matter探しの話に似て、大変興味深いのだが、ここではこれ以上立ち入らない。いずれにしても、それから半世紀以上経って、Einsteinが一般相対性理論という新しい重力理論を構築すると、理論上と実際の水星の軌道になんら食い違いはないという話しになって、Dark PlanetであったVulkan探しは完全に止めを刺されてしまった。1914年の話で、Einsteinは、まだ一般相対性理論の最終的な場の方程式に辿り着いていなかったが、彼に正しい道を歩んでいることを確信させるに充分だった。

現在の宇宙に関する標準理論によると、我々の宇宙はBig Bangで始まったことになる。約137億年前の話である。このBig Bangの話をもっと最初に提唱したのはベルギー出身のCatholic司祭兼宇宙物理学者のGeorges-Henri Lemaitreである。1927年の話である。この頃は、宇宙は定常、つまり昔も今も同じで変化していないという考え方が支配的で、重力場の方程式を導いたEinsteinなんかも、これでは宇宙は膨張していることになると思って、大慌てで後に"人生最大の失敗"と後悔することになる宇宙定数を加えている。因みに今では人口に膾炙しているBig Bangという用語もLemaitre自身によるものではなく、定常宇宙論の大御所ともいえるべきSir Fred Hoyleによるもので、彼が、1949年3月28日にBBCのラジオ番組で、どちらかというとなら侮蔑的に呼んだその用語を（大きなバーン）、Big Bang理論の擁護者であるGeorge Gamovが面白がって広めたものである。Lemaitre自身はCosmic Egg(宇宙の卵)というきわめて控えめな表現を用いている。なお余談であるが、ローマ教皇Pius XIIが、1951年に、Catholic ChurchはBig Bang理論を認めるという声明を、唐突に発表する。Darwinが19世紀半ばに発表した進化論を、Catholic Churchが認めるのに、20世紀末までかかったのとは、鋭い対照をなす。これはBig Bangが宇宙の創造という聖書の記述と相性が良いためである。もっともLemaitre自身は、Catholicの司祭であるにもかかわらず、こういう話に教皇が口を出すことを控えてほしいと、直々に進言している。なんとも控えめなLemaitreらしい話である。

宇宙マイクロ波背景放射（Cosmic Microwave Background radiation略してCMB）はGamovやRalph Asher Alpherらによって1940年代に既に予言されていたが、そんなことは露ほども知らない全くの畑違いのアメリカ合衆国のBell研究所の二人の研究者、Arno Allan PenziasとRobert Woodrow Wilsonによって、1964年、超感度アンテナの雑音を減らす研究中に、偶然発見された。これはBig Bangから約40万年後に、電子と陽子が結合して水素原子を生成して光が解放された時期、いわゆるTransparent to Radiation（宇宙の晴れ上がり）のSnapshotであると考えられている。宇宙の晴れ上がり以前は、高温の自由陽子と自由電子のPlasmaによって光は散乱され、不透明な宇宙の霧をなしていた。このCMBは、光の化石とでも呼ぶべき代物で、宇宙の膨張によって波長が著しく引き伸ばされたために、もはや可視光として見ることはできないが、マイクロ波放射として当時の面影を今に伝えている。これを悉に見ることで当時の宇宙の温度がわかるが、この若い宇宙の温度は、天空全体にわたって驚くほど均一で、約3000Kだったと推定される。またこれらと他の宇宙論的Dataを総合することで、奇抜なことを期待する向きにはあまり面白くない話かもしれないが、宇宙は平坦、つまりその曲率は0であることがわかっている。

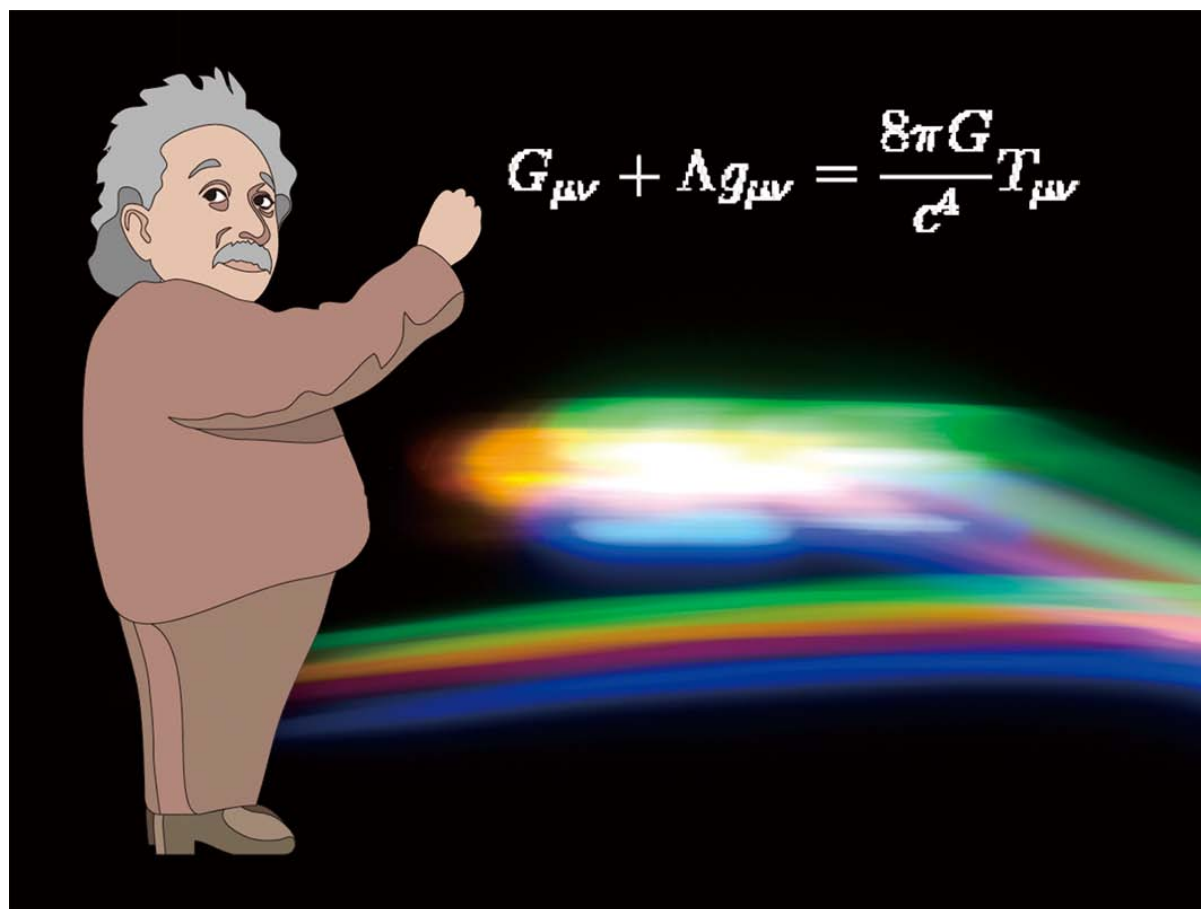


[John W. Moffat](#)(1932-)

こうして地平線問題とか平坦性問題が頭をもたげてくる。地平線問題というのは、すべての情報は光より速くは伝わらないのに、どういう Mechanism で、かくも広大な宇宙の温度が均一になったのかという問題である。平坦性問題というのは、曲率が正か負か0かという話は、全 Energy 密度が臨界密度を上回るか、下回るか、あるいは臨界密度にちょうど一致するかに依るが、どうして全 Energy 密度が臨界密度にちょうど等しくなるように、ものの見事に調節されたのかという問題である。標準的な宇宙論では、これらの問題は Inflation 理論を用いて解決される。Inflation 理論はアメリカの Alan Guth と日本の佐藤勝彦によって1980年頃にほぼ同時に見出された理論であるが、経済学からの用語の借用による Inflation 理論というかなり奇抜な Naming は Guth によるものである。Inflation というのは、宇宙の誕生間もない頃に宇宙が指数関数的な急激な膨張をしたという話で、確かにこれで地平線問題とか平坦性問題は片付くのだが、問題はこの Inflation を引き起こした Mechanism である。単一の Inflation 理論があるわけではなく、次から次へと色々な Inflation 理論が作られ、それなりに精緻になってきていることは間違いないが、これらすべてについて基本的な問題をかかえている。まず Inflation 理論というのは、物質の根源を探求する素粒子論の理論でもなければ、それから必然的に導かれる理論でもない。唯唯、Inflation がないと、とにかく困るので、それを正当化するために作られた理論である。Inflation を引き起こすのは、Inflaton と呼ばれる仮想上の粒子であるが、これはこれまでに観測されたことはない。いずれにしても、この粒子の質量はきわめて小さいので、観測の仕様がな。次に、Inflation のために Einstein が人生最大の失敗といった宇宙定数による斥力が必要になるのだが、現在の宇宙定数は、平坦な Euclidean な宇宙を生成させるのにちょうどいい値をとっているが、初期の宇宙ではこの定数がものすごく大きくないと、Inflation なんかは生じない。この宇宙定数の変化がどうして起きたのかも謎である。さらに、Inflation に関する Potential Energy がかなり長時間一定に維持されないと、地平線問題とか平坦性問題を解決してくれるぐらいの Inflation が生じないこともわかっているが、このためには物理を不自然と言えるまでに微調節する必要がある。これもかなり苦しい。

著者は1992年に光速が相転移によって変化すると考えることによって、Inflation を仮定しなくても、地平線問題とか平坦性問題を解決できるという考えに到達している。光速は、現在では1秒当たり約30万 km であるが、初期宇宙のようなきわめて高温の世界では、これの10の29乗倍くらい大きかったというのだ。我々の日常の世界でも、光が水面に当たると、減速して方向が変わるが、これに近いことを温度による相転移に担わせてしまおうという考えだ。つまり光の速度は温度の関数、しかも不連続な関数と

なる。こうしてやると、地平線が完全に取り払われて、宇宙全体を見渡せるようになり、地平線問題は雲散霧消する。さらに光速が超光速から現在の光速に急減少したことで平坦性問題も解決できる。要するに、光速の相転移に、Inflationに相当する Scenarioを担わせてしまおうという考え方だ。



[Albert Einstein](#)(1879-1955)

4次元時空でEinsteinの重力理論を修正する方法は二通りある。ひとつはRiemann幾何学とEinsteinの重力理論の枠組みは維持したままで、物質と時空の相互作用を修正する方法、いまひとつは全く新たな場を導入するか、もしくはRiemann幾何学を何らかの非Riemann幾何学に置き換えてしまう方法である。晩年のEinsteinが対称部分と非対称部分をもつ計量を用いて（Nonsymmetrical Gravitation Theory略してNGT）、重力と電磁気力を統一するいわゆる統一場理論を構築しようとしたことは、よく知られている。しかし、残念ながら、これはMaxwellの理論を正しく記述していない。著者は、1979年に、この理論をEinsteinが望んだ統一場理論としてではなく、重力理論の一般化として解釈し直し、後者のやり方による修正重力理論と看做せるという認識に到達している。計量の非対称部分は時空の幾何に振れをもたらす。この理論は、数学的にも大変豊かな構造を持っているが、場の方程式が異常な解をもつ懸念があ

る。著者は2003年には、時空はEinsteinの対称な計量によるものを用いるが、NGTの計量の非対称部分が担っていた役割を、方程式の追加の項に担わせ、これを（重力、電磁力、核子を安定にしている強い相互作用、 $\beta$ 崩壊等を引き起こす弱い相互作用に続く）第5の力と看做す理論を作った。理論はMetric-Skew-Tensor Gravity、略してMSTGと呼ばれる。さらに翌年には、MSTGを単純にして、対称的なEinstein Tensor、Phion場と名づけられたベクトル場、そして3つのスカラー場からなる重力理論を作っている。Phion粒子は第5の力を伝え、3つのスカラー場はそれぞれ、Newtonの重力定数の変化、Phion場と物質の相互作用、そしてPhion場の有効質量を記述する。この理論はScalar-Tensor-Vector Gravity、略してSTVGと呼ばれる。これらは修正重力理論（Modified Gravity、略してMOG）と総称される。

宇宙には、銀河という、ものすごい数の恒星が、重力により一団としてまとまった構造がある。たとえば我々の太陽系は、銀河系もしくは天の川銀河（GalaxyもしくはMilky Way Galaxy）と呼ばれる銀河に所属している。他に有名な銀河としては、大マゼラン星雲（Large Magellanic Cloud）があるが、ここで起こった超新星爆発の際に発生したニュートリノを、岐阜県神岡鉱山地下1000mに設置されたKamiokandeで捉えた功績で、小柴昌俊は2002年にNobel物理学賞を受賞している。地球や火星が太陽の周りを公転するように、大マゼラン星雲は、小マゼラン星雲（Small Magellanic Cloud）という銀河とともに、我々の銀河系のまわりを公転している。銀河がいくつか集まって、まとまった集まりを形作ることもあるが、規模の小さいものは銀河団（Group of Galaxies）、規模の大きいものは銀河群（Cluster of Galaxies）と呼ばれている。たとえばわれわれの銀河系は、局部銀河群（The Local Group）と呼ばれる40個以上の銀河からなる銀河群に所属しているが、その中で一番大きいのはアンドロメダ銀河（Andromeda Galaxy）で、これも有名である。我々の局所銀河群は、おとめ座銀河団（Virgo Cluster）の外縁に位置している。おとめ座銀河団は18世紀後半にフランスの天文学者Charles Messierによって見出された。地球から3.21億光年離れたところには、確認されているだけでも1000個以上の銀河を含む、かみのけ座銀河団（Coma Cluster）という大変おおきな銀河団がある。かみのけ座銀河団は、しし座銀河団（Leo Cluster）とともに、銀河団のひとつ上の構造であるかみのけ座超銀河団（Coma Supercluster）を構成する。

銀河団は、総質量が大きいほど、それをひとつにまとめる力は大きくなる。銀河団のなかにある銀河の質量とGasの質量を足し合わせれば簡単に総質量は算出でき、Newtonの重力理論に従って脱出速度（銀河団から離れていくために必要な速度）もわかる。1930年代後半にFritz ZwickyとWalter Baadeは、こう



した作業を、かみのけ座銀河団と、おとめ座銀河団に対しておこなったが、脱出速度が小さすぎることを見出した。これを鵜呑みにすると、かみのけ座銀河団とおとめ座銀河団は、推定寿命よりずっと前にバラバラになっていなくてははいけないはずだった。いわゆる欠損質量問題であるが、これに対する解決策として、Dark Matter (Zwickyはもう少し控えめにMissing Massと言っている) ということが言われるようになる。同じことは銀河についても言える。銀河内の恒星のSpeedが速すぎるのだ。これを説明するには、銀河内に未だ発見されていないDark Matterが大量にあるとするか、もしくはNewtonやEinsteinの重力理論を修正するしかない。Dark Matterの候補として色々なものが言われているが、Dark Matterは電子や陽子や中性子と衝突しても、きわめて弱い相互作用しかしないことだけは間違いない。そうでなければ、とっくの昔に検出されているはずだからだ。また、このDark Matterは安定な何かでなければいけない。簡単に崩壊するようなものでは、Dark Matterになれないのだ。いずれにしても、Dark Matter探しは、今や巨大産業に成長し、イギリス、フランス、日本、アメリカ、スイスといったところが血眼になって、一番乗り争いを繰り広げている。しかし、お叱りを覚悟で言えば、19世紀に多くの物理学者が信じていたEther (エーテル) や、先程述べた未知の惑星Vulkan探しの二の舞になる怖れが極めて高い。著者が主張するように、修正されるべきは重力理論である公算がきわめて高いのだ。著者のMOGでは、銀河や銀河団のScaleでは、重力はNewtonの逆二乗法則から大きくはずれ、重力源から離れるほど、重力は強まる。しかし、このScaleからかなり離れると、Newtonの逆二乗法則に回帰する。我々は、重力は離れる程弱まるという偏見に災いされてきたようだ。すでに量子色力学で記述される強い相互作用で (Quarksを核子内に強く閉じ込めておく力を指すが、漸近自由性といってQuarksは核子内では極めて自由に振舞う)、 そのことについてはよく学んだはずであったのだが…

Newtonの重力定数が変化するという話は、著者のMoffatを嚆矢とするわけではなく、少なくとも1930年代後半のDiracまで遡ることができる。ただし、Diracは重力定数Gが宇宙誕生以来どんどん小さくなっていく宇宙論を展開したが、Einsteinの重力理論の修正にまでは踏み込まなかったため、不完全燃焼のまま終わってしまった。予測をいくつか導いているが、御世辞にもご立派とは言いかねる代物であった。

Dark Matterを全く必要としない形に、Newtonの重力理論を書き換えるという話は、1980年代前半にMordehai Milgromというイスラエルの物理学者が唱えている。これは修正Newton力学 (Modified Newtonian Dynamics、略して、MOND) と呼ばれ、大変有名である。ただし、これは現象論的な話で、しかも重力Lens効果等の相対論的な現象を、全く取り扱うことができない。重力Lens効果というのは、遠方からやってくる光が、銀河や銀河団の近くを通る折に、一般相対性理論に従って近傍の時空が曲

がっているため、光源方向から逸らされる現象を指す（これを利用して銀河や銀河団の質量を正確に決定できる）。MONDの相対論Versionとしては、Mexico生まれのユダヤ人で、イスラエルのHebrew大学のJacob David BekensteinによるTeVeS（Tensor-Vector-Scalar Gravity）が有名であるが、これは残念ながら局所Lorentz不変性を破るので、特殊相対性理論以前の世界に我々を引き戻してしまう。極め付きは、この理論どおりだとすると、太陽はたった2週間しか輝かないようである。それでは、少し不便だと思うのだが、いかがだろうか？

非常に興味をそそるのは、STVGは実は調節可能なParametersを全くもたない理論だとわかったことだった。こういう調節できるParametersを全く持たない理論としてよく知られているのは、強い相互作用を取り扱うQCD（量子色力学）であるが、こういう理論は物理学者が常日頃求めてやまない理想である。こういう理論は、観測結果や実験結果に合わせて、Parametersを適当に調節してやるのが全く許されないの、理想的な形で経験的な検証にかけられる。当たるか外れるかのいずれかで、当たっているような、そうでないようなというような、モヤモヤしたものは残らない。言い訳がまったく許されない理論だということだ。だめであれば、捨てられるし、当たっていれば、物理の玉座に長しえにとどまるというだけの話だ。極めて潔い理論だといえる。

2世紀にローマ帝国の市民であったギリシャ人のClaudius Ptolemaeus（プトレマイオス）が著したAlmagest（アルmagest）という天文学の書物は、その後1000年以上にわたってヨーロッパやイスラム世界を支配した。ここでの基本的な考え方は、2つあって、ひとつは地球を宇宙の中心にもってくこと、もうひとつは惑星や太陽の軌道を、すべてを円軌道で捉えようとする事だ。といっても単一の円では実際の軌道からずれてしまうことはすぐわかるので、円軌道を動きながらそこで更に円軌道を動くといった周転円が必要になってくる。この周転円を重層的に用いることで、当時の観測技術に見合った、宇宙の幾何学的Modelを提供するのが、この本である。ここに描かれている宇宙観を打破して、近代的宇宙観の世界を切り開くためには、地球ではなく太陽を宇宙の中心にもってくことと、円軌道の呪縛から解き放たれて楕円軌道を認めることがどうしても必要で、そのためにCopernicus（コペルニクス）とKepler(ケプラー)という二人の天才を必要とした。こうして天才中の天才、Newtonの出番を待つだけとなる。

Dark Matterの理論による説明は（理論と呼べるとしての話だが）、Ptolemaeus流の周転円に似たところがあって、いかなる観測結果がでて、変幻自在にそれにあわせて説明ができるところがあり、なかなか

か反証するのがむずかしい。銀河団を構成する成分は大きく言って、3つに分かれる。ものすごい数の恒星、銀河の間に広がる高温のGas、そして（存在するとすれば）Dark Matterである。小さな銀河団と大きな銀河団が衝突すると、高温のGasは重力以外の抵抗で、もとの銀河団から引き剥がされるが、重力以外の力を受けないと考えられているDark Matterは銀河団と行動を共にする。こうして高温のGasとDark Matterが分離されるはずであるが、2004年にArizona大学の天文学者のGroupが、りゅうこつ座（Carina）にある1 E 0657-56と呼ばれる銀河団にこれを観測し、Dark Matterの存在を裏付けるものという意見が優勢となった。銀河団1 E 0657-56は、約1億5千万年前に二つの銀河団が衝突した結果形成されたもので、衝突した銀河団の中心に2つの高温のGasの塊をもつが、うちひとつが弾丸のような形をしているので、別名弾丸銀河団（Bullet Cluster）とも呼ばれる。2006年にNASAがDark Matterの存在を確認した旨の発表を行ったので、世間をおおいに沸かせた。MONDに対するDark Matterの勝利と、大喜びした向きも多かった。ところが2007年にVictoria大学とCalifornia工科大学の天文学者のGroupが、オリオン座にある別の衝突銀河団Abell 520を観測したところ、今度はどうもDark Matterは銀河団と一緒にではなく、高温のGasと一緒にいるようだという話になった。もともと一体何なのかがさっぱりわからないDark Matterが、実は2種類あるのではないかなどという奇妙奇天烈な話まで飛び出してきて、Dark Matter派の間に広がっていた祝勝Moodは完全に冷や水を浴びせられる格好となった。

素粒子論だと、地上での加速器を用いた実験と、宇宙から偶然もたらされる情報が、経験的検証の2本柱である。加速器も最初は小さかったが（最初の加速器は直径10cmだった）、段々大きくなっていて、欧州原子核研究機構（CERNと呼ばれる）にある円形加速器（LHC）なんか、全周が27kmもあり、スイスとフランスに国境を挟んでまたがっている。これに対して、重力というのは電磁気力や核力に比べて極めて弱い力で、宇宙からもたらされる情報だけが頼りである。電磁気力、弱い相互作用、強い相互作用、そして重力という4つの力の中で、最初にまともな理論が作られたのが重力だったが（Newtonによる万有引力の理論）、1970年代に素粒子論における標準模型が確立して、あらためてよく見渡してみると、重力というのが一番難しいというのが、よくわかる。この本を読むと、その重力についても、かなり本質に肉薄しつつあるという感を深くする。電荷を帯びた粒子が運動すると電磁波を放出するが、同じように質量のある物体が運動すると重力波が生じる。そのことはEinsteinが1910年代に既に指摘しているが、直接重力波を観測することにはまだ誰も成功していない。ただし、かなり間接的なやり方では成功していて、その功でJoseph TaylorとRussel Hulseは1974年にNobel物理学賞を受賞している。割と最近の話になるが、球状星団（Globular Cluster）に関する観測によると、恒星の速度は

Newtonの重力理論による予測とよく一致し、まったくDark Matterを必要としないように見える。球状星団というのは、恒星がお互いの重力で球形に集まった天体で、重力によって強く束縛されている。通常これらは宇宙最古の天体と考えられている。多くの天文学者はDark Matterは銀河のHaloにしかなく、銀河核にはないと信じているが、なぜ銀河核に無いのかもなぞである。いずれにしても、この本で著者が提唱しているMOGを含めて、どの理論が生き残るかは、こうした観測によるべきであり、今後の展開が楽しみである。