

O. V. ザイツェフ

重力“定数”か、それとも変化する“重力係数”か

日本語版について

- * 本訳書は、O.V. Зайцев «Гравитационная “постоянная” или меняющийся “гравитационный коэффициент» のロシア語原文からの全訳である。
原文は <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/2267.html> で入手することができる。
- * 著者：オレーク・ヴィクトロヴィッチ・ザイツェフ（Олег Викторович Зайцев, Oleg Victorovich Zaitsev）。
- * 訳者：吉田 正友
- * 訳者のサイト：「物理の旅の道すがら」（<http://naturalscience.world.coocan.jp>）
- * 日本語版公開：2025年6月
- * 訳文中の角括弧 [] 内は訳注である（文献番号を除く）。
- * 訳文中の「物質*」については巻末の「訳注」を参照されたい。

重力“定数”か、それとも変化する“重力係数”か

UDC 530.12 : 531.51

© O.V. Zaitsev

保存則に基づいて一連の思考実験の一貫性に関する分析がなされた。その結果、いわゆる「重力定数」 G は、全重力ポテンシャルの値に関数的に依存する係数であることが判明した。 G の値の相対的変化は、全重力ポテンシャルの相対的変化の3乗に反比例していることが突きとめられた。

目次

第I部	2
1. 導入	
2. エレベーターキャビン中における「エネルギーのパラドックス」について	3
3. 全重力ポテンシャルの関数としての物体の質量	4
4. 全重力ポテンシャルの関数としての時間間隔と空間間隔	5
5. 全重力ポテンシャルの関数としての重力係数	7
6. 第I部の結論	9
第II部	11
1. 運動質量理論の基礎. ポスト相対論的アプローチ	11
2. 光子の場合のドップラー効果. ポストニュートン係数. 絶対速度の関数として重力係数	13
3. 結論部	18
文献一覧	21
記号	22
用語と定義	22
[訳注] 訳文中の「物質*」について	25

第I部

I.1. 導入

「重力定数」 G は、歴史的には一連の基礎物理量の中で最初に現れた量である。そして、その数値を決定する試みがなされたのは3世紀以上前のことであるにもかかわらず、測定精度はそれでもなお比較的低いままとなっている [1]。

G の値の精緻化の問題を測定方法の欠陥という観点の範囲外に引き出そうという意見が存在する。 G は「宇宙」時間の経過とともに単調に減少するという予想 [2] ; G は世界質量の総体によって創出される「重力背景」の値に依存している可能性があるという予想 [3, 4] (ここでは、予想される依存性は反比例の形を持っている) が述べられている。これらの理解は現在にいたるまで満足すべき根拠によって裏付けられていないという点に、特に注目すべきである。これらの理解が持つ思弁的性格が、当然のことながら、これらの理解に基づいて得られるかもしれない、それに続く結果に対する信頼度を低下させている。

本研究の目標は、 G の値の性格という部分に関して、直観的・主観的な判断をより厳密な形式的論拠に置き換えるための根拠の探求である。全重力ポテンシャルの値に対する G の依存性の可能性に関するより十全な理解を得る試みがなされた。一連の思考実験に関するエネルギー保存則に基づく分析が主要な研究方法として選ばれた。

全重力ポテンシャルに対する G の関数的依存性は、2つの段階を経て突きとめることができる。第1段階では、重力相互作用に関与する諸物体の質量変化が生じるのか否かを決定しなければならない。第2段階は、第1段階の問いに対して肯定的な答えが得られた場合にのみ意味を持つことになる。この段階では、 G の次元から導き出される全ての共役パラメーターのあり得る変化を考慮に入れて、質量の変化が G の値にどのように反映されるはずであるかを解明しなければならない。

1.2. エレベーターキャビン中における「エネルギーのパラドックス」について

電磁放射の性質および放射能の効果に関する詳細な研究を行った結果、物体の観測される質量と物体のエネルギー状態との間の対応関係に関する命題は、当然の帰結として、仮説の範疇から経験的に裏付けられた事実の範疇に移行した。ちなみに、重力相互作用のエネルギーと結び付いている質量の性格に関する問題は、今にいたるまで解明されていない。

エネルギー保存則によれば、物体を上昇させる仕事をするためのエネルギー消費の結果における、系の何らかの1要素の値 Δm の質量減少は、系の何らかの別の要素のそれと正確に同じ値 Δm の質量増大によって完全に相殺されなければならない。

質量 Δm を獲得する側の要素を見出すため、そのキャビンの中に観測者がいるエレベーターを用いた思考実験に助けを借りよう。

思考実験の対象の初期状態として、次のような状態を取ろう：エレベーターは重力場中にあり、ロープによって静止状態に保持されている；観測者はエレベーターの床の上に立っている；エレベーターの床の上には質量 m_0 の荷物も存在している。

荷物に関して仕事が行なわれ、その結果、荷物はエレベーターの天井まで変位^[訳注]したとする。荷物は床のレベルに対し、追加エネルギー E_{pot} 、およびそれに対応する追加質量 Δm を獲得した：

$$m_1 = m_0 + \Delta m.$$

状況の展開は、エレベーターを保持しているロープの破断と関連している。エレベーター中にいる観測者の立場から見て、エネルギー E_{pot} および荷物の質量に何が生じるかという問いに答えることが求められる。

エレベーターが自由落下状態にある間、荷物が（観測者と同様に）無重量状態にあることは明らかである。この事実、荷物がエレベーターの範囲内において、エネルギー E_{pot} に相当する力学的仕事を自由にするに対する絶対的障害となっている。この場合に、エネルギー E_{pot} の成分の「一次的消失」、あるいはその成分の何か別のエネルギー形態への移行を予想することは許されるのであろうか？

E_{pot} の成分の「消失」を仮定することは、エネルギー保存則に反する。

E_{pot} の何か別のエネルギー形態、例えば「空間エネルギー」という仮説上の形態への移行を仮定することは、新たな問題の出現をもたらす。それらの問題は、「空間エネルギー」に相当する、荷物と観測者との間の空間領域に分布する「質量」の物理的解釈、また、ある形態から別の形態へのエネルギーの移行の特徴をめぐっても生じてくる。「空間エネルギー」は、エレベーターが自由落下している間はずっと不変の形態に保たれ、エレベーターが減速したときは E_{pot} に移行しなければならないはずである。

[訳注] 「変位」の定義については、「用語と定義」の「変位」の項目 (p.23) を参照されたい。

この種の理解は、現時点ではそれは具体的な根拠を持っていないという理由だけで排除されてはならない。原理的には、そのような理解は、それ以外の合理的な説明が見出されない場合に、「個別の場合」のための作業仮説として利用することが可能である。ただし、これは、それらの作業仮説自体が明らかな矛盾の発生源にならないことを条件としている。我々の事例においては、 E_{pot} の変換に対する禁忌が存在している。その禁忌とは、エレベーターがそれまでと同じ支持物に対してゼロ速度を持っており、したがって基準系の交代についてまだ語るができない間に、既にロープの破断時点に、ある形態から別の形態へのエネルギーの移行が生じると仮定することである。ある形態から別の形態へのエネルギーの任意の移行は、究極的には質量の再配分と結び付いており（質量の性質の1つは慣性である）、それゆえ、同時に実現されることは原理的に不可能である。

この事例においては、消去法の利用が独自の結果を与える。エネルギーの「不足」部分の本質に関する、それにもかかわらずエネルギー保存則と両立し、しかも同時に、これといった矛盾のない仮説を定式化することが可能であることが判明した。この仮説の核心は次のことにある：ポテンシャルエネルギーは独立して存在するエネルギー形態ではなく、物体の固有エネルギー（静止エネルギー）の不可分の構成要素である。我々は、物体を上昇させるときは、それによって物体の固有エネルギーを増大させ、またそれに対応して物体の静止質量を絶対的に増大させ、物体を下降させるときは、それらを減少させるのである。

検討されている思考実験の場合には、上昇された荷物の落下開始以前の質量は、落下開始直後における荷物の質量と正確に等しくなければならない。すなわち、エレベーター中にいる観測者との関係において、上昇された荷物の落下開始後の質量は $m_0 + \Delta m$ と等しく保たなければならない。それに対応して、荷物の全エネルギー E は $(m_0 + \Delta m)c^2$ と等しく保たなければならない。

1.3. 全重力ポテンシャルの関数としての物体の質量

前節において、物体が重力ポテンシャルの値が異なる領域へ変位したとき、物体の質量が絶対的に変化することが示された。我々は重力ポテンシャルに対する試験物体の質量の分析的依存性を見出すため、上記において下された結論を用いよう。それによれば、ポテンシャルエネルギー E_{pot} は物体の全エネルギーの構成要素である（すなわち $E_{\text{pot}} = \Delta E$ ）。また、(定義により)ポテンシャルエネルギーが重力ポテンシャルの差に比例していること、すなわち $\Delta \Phi = |\Phi_0| - |\Phi_1|$ を考慮しよう。この差は、観測者が留まっているポテンシャル値 Φ_0 の空間領域から、ポテンシャル値 Φ_1 の領域への物体の変位に対応している。これらの前提に基づき、次のように書こう：

$$\Delta E = (m_1 - m_0)c^2, \quad (1)$$

$$\Delta E = m_1(|\Phi_0| - |\Phi_1|). \quad (2)$$

これより、 m_1 を次のように表そう：

$$m_1 = m_0(c^2/(c^2 - |\Phi_0| - |\Phi_1|)). \quad (3)$$

試験物体を「無限遠」($|\Phi_1| = 0$ の場合)へ遠ざけるのに必要なエネルギーは、物体に作用する力を物体の変位経路全体にわたって積分する方法で決定することができる。距離に対する力の依存性を記述する双曲線関数の場合に特徴的なのは、距離が増大するにつれて（関数自体の次数にかかわらず）関数の減少が減速すること、またその結果として、積分結果の値が無限大になることである。(3)を簡単化するため、我々は「無限遠」におけるしかるべき境界条件、すなわち $\lim_{|\Phi_1| \rightarrow 0} (c^2/(c^2 - |\Phi_0| - |\Phi_1|)) \rightarrow \Gamma$ を利用し、これによって

等式 $|\Phi_0| = c^2$ に到達する。 $|\Phi_0|$ という量は速度の2乗の次元を持っており、静止した観測者と結び付いている空間領域における全重力ポテンシャルという意味を持っている。得られた等式 $|\Phi_0| = c^2$ を用いて(3)を変形すると、次式が見出される：

$$m_1 = m_0 c^2 / |\Phi_1|, \quad (4)$$

または

$$m_1 = m_0 (\Phi_0 / \Phi_1). \quad (4')$$

(4)および(4')によって表されている重力ポテンシャルに対する観測される静止質量 m_1 の依存性は、質量の絶対変化という意味を持っている：物体の静止質量は、全重力ポテンシャルの絶対値の減少に比例して、すなわち物体の「上方」への変位時には絶対的に増大し、全重力ポテンシャルの絶対値の増大に比例して、すなわち物体の「下方」への変位時には絶対的に減少する。

注：例えば、質量1 tの物体は、地球(Φ_0)から太陽の表面($|\Phi_1| = c^2 + GM_\odot/R_\odot$)まで変位すると、(4)により、絶対計算で約2 gを失う。

観測者が「下方」へ変位したときの彼の質量の絶対的減少は、その他全ての物体の質量の彼によって観測される増大をもたらす。それゆえ、「変位された」観測者にとっては、全ての外部物体の質量は、「交差効果」を反映し、(4')とは逆の依存関係に従って変化することになる：

$$m_{n1} = m_{n0} (\Phi_1 / \Phi_0). \quad (5)$$

この場合には、 m_{n0} は全重力ポテンシャル Φ_0 を持つ空間領域にいる観測者にとっての外部物体の質量； m_{n1} は観測者が全重力ポテンシャル Φ_1 を持つ空間領域へ変位した後における観測者の質量基準との関係における、それと同一の物体の質量である。

質問：観測者の下降時に、文字どおり全ての外部物体の質量が増大するのだとすると、このことはエネルギー保存則と互いにどのような関係を持っているのか？

回答：グローバルな視点から見ると、エネルギー保存則は満たされている。なぜなら、「変位された」観測者にとっては、他ならぬ観測者の絶対質量が減少したのだから、全ての外部物体の質量の変化は主観的、見かけ的性格を持っているからである。観測者が「下方」に変位する場合には、エネルギー保存則の見かけの「破れ」はエネルギー的に有利であることが判明する可能性がある。その場合には、彼は絶対的により少ない量のエネルギーで満足することができるからである。

筆者は、質量の関数的依存性およびポテンシャルエネルギーの物理的意味という点に関して[筆者の見解と]意味的に近い見解がV.Kh.ホテーエフ教授によってその著作[5]において述べられていることに留意する必要があると考えている。

I. 4. 全重力ポテンシャルの関数としての時間間隔と空間間隔

アインシュタインによって公準として定められている一般共変性的アプローチの一要素としての「重力定数」の値の不変性[6]が、全重力ポテンシャルの値に対する時空間隔の依存性に関する理解における出発点の1つとなった。一般相対性理論の論理的・形式的構成に特徴的な多数の問題点[7,8,9]が、そのようなアプローチの正しさを疑う理由を与えている。

最初に決定された軌道に沿って、定められた目標[p.3参照]への進行を続けよう。異なる全重力ポテンシャル値を持つ空間領域へ物理実験室とともに変位された観測者を想像しよう。彼は、物体の慣性的性質の測定に基づいて物体の質量の絶対的変化を検出することはできない。なぜなら、観測者自身の体の質量も含め、全ての質量の値の変化は同期的に生じることになるからである。しかし、絶対的変化という事実を突きとめる可能性は、この

ことによって排除されない。もし物理実験室の変位の結果、物体間の相互の重力的引力を測定したとき、それ以外の全ての条件が等しいという条件下においてその引力の変化が記録されたとすれば、重力の変化の原因は、「重力係数」 G の値の変化にのみ関係付けることができる。

係数 G の次元は、質量の測定単位とともに、時間間隔および空間間隔の測定単位も含まれている。生じる可能性のある G の変化を見出すためには、3つの全てのパラメーターの変化が突きとめられなければならない。

周知のように、全ての巨視的物体は微視的粒子からなっており、微視的粒子の性質は粒子性と波動性の組み合わせによって記述される。粒子性（エネルギー/質量の存在）と波動性（周波数、波長）の組み合わせは、原理的に、質量の変化と時間特性および空間特性の変化とを結び付けることを可能にする。

時間の流れの速度は、客観的には、物質*の組織化の最も要素的なレベルにおける諸過程の進行速度の反映である。したがって、観測される時間の流れの速度は、一種の「要素的な一次要素」のレベルにおける時間相関によって完全に決定することができる。

「要素性」に近づくにつれて、波動性の割合の増大傾向が現れる。既知の微視的粒子の全てのクラスの中で、光子の波動性が最も鮮明に表れており、「一次質量」としての光子という、最もラジカルな仮説が既に述べられている [9]。 c （光速）の値および h （プランク定数）の値の完全不変性という理解は、この仮説と整合している。

光子の質量 m_γ と光子の周波数 ν_γ は、「内部に起因する」諸過程の進行速度の尺度として次の依存関係によって結び付いている：

$$m_\gamma c^2 = h\nu_\gamma. \quad (6)$$

c および h の不変性を考慮すると、光子の全質量 m_γ の絶対的減少という条件下では、その周波数 ν_γ もそれに比例して減少するという結論が(6)から導き出される。

領域 Φ_0 中における時間進行を時間間隔 dt_0 を通じて表すと、領域 Φ_1 中における時間進行を反映する時間間隔 dt_1 を、表式(4'), (6)を利用し、周波数パラメーターと時間パラメーターを結び付ける関係式 $\nu_{\gamma 0}/\nu_{\gamma 1} = dt_0/dt_1$ を考慮することによって見出すことができる：

$$dt_1 = (\Phi_1/\Phi_0)dt_0. \quad (7)$$

$|\Phi_1| > |\Phi_0|$ の場合には、間隔 dt_1 は間隔 dt_0 より Φ_1/Φ_0 倍大きい。このことは、領域 Φ_1 中における時間進行が領域 Φ_0 中と比べて遅いことを意味している。

時間の流れのテンポは、全重力ポテンシャルの値に反比例している。

光速 c の不変性によれば、時間進行の変化には空間間隔 dl の絶対的変化が伴わなければならない ($dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$ 。ここで x, y, z は当該空間次元の座標である)。このとき、係数 c を用いて表される光子の波長とその周波数の間の関係は、光子の起源、経路および観測者の位置に依存してはならない。

空間間隔を、そこでは時間の進行が時間間隔 dt_0 で表わされている領域の場合は dl_0 で表し、それに対応して、 dt_1 の領域の場合は dl_1 で表そう。すると次式が得られる：

$$dl_0 = cdt_0, \quad (8')$$

$$dl_1 = cdt_1. \quad (8'')$$

これより、(7)を考慮すると次式が得られる：

$$dl_1 = (\Phi_1/\Phi_0)dl_0, \quad (9)$$

空間間隔 dl の絶対値も全重力ポテンシャルの関数(9)であることが判明する。

注：次の理由にもとづいて、それと同様の結果が自然な形で得られる：基本的パラメーターの1つ（例えば巨視的物体と「結合」している光子の波長 $\lambda = c/\nu$ ）の変化は、変位される巨視的物体全体のそれに対応するパラメーター（この場合は巨視

的物体の幾何学的サイズ) の変化を引き起こす。

空間パラメーターの変化は距離のスケールの変化を意味しており、その変化に応じて物質*的物体の物理的サイズの絶対的変化をもたらす。物質*的物体が(絶対値で)より大きい全重力ポテンシャルの値を持つ領域へ変位するとき、物体の線形サイズは3つの全ての空間次元において絶対的に増大する。

空間間隔の値は全重力ポテンシャルの値に比例している。

注：我々は本節および前節において、全重量ポテンシャルの関数としての質量(4)、時間の進行(7)および空間間隔(9)の絶対値を表す3つ組の方程式を得た。変化するポテンシャルという条件下で見出された依存関係の総体的検証は、微視的および巨視的構造の安定性という基準(その内部の重力を無視することができる形成物であること)に基づいて行うことができる。ここでは最も単純な事例、すなわち全重力ポテンシャルの変化に対する電氣的に相互作用する物体の運動方程式の不変性の検証に話を限定しよう。質量 m および電荷 q_1 を持つ粒子を、それよりはるかに大きい質量および反対符号の電荷を持つ別の粒子の周りの半径 l の軌道に沿って回転させる。このような系の静止状態は方程式 $(|q_1||q_2|)/l^2 = mv^2/l$ によって記述される。この方程式は次の形に変換することができる：

$$|q_1||q_2| = ml(dl/dt)^2.$$

電荷は重力ポテンシャルに対して絶対的に不変である。電荷の変化は電荷保存則によって禁止されている。したがって、最後の方程式の左辺は定数である。右辺の質量、空間間隔および時間間隔に対し、(4)、(7)および(9)によって係数 k ($k = \Phi_1/\Phi_0$)を適用しよう。 $(m/k)(kl)(kdl/kdt)^2$ が確かに $ml(dl/dt)^2$ に等しいことを確かめるのは難しいことではない。

空間間隔の値の変化が持つ絶対的性格は、相異なる重力ポテンシャルを持つ領域の場合における物体のサイズおよび距離の「交差」評価において、スケール係数の値が互いに逆数になることを指し示している。空間間隔が絶対的により大きい(これは全重力ポテンシャル(9)の値が絶対値でより大きいことに対応している)領域に属している観測者は、外部物体までの距離をより小さいものとして感受する。なぜなら、彼はその距離を絶対的により大きい長さの単位で評価するからである。

観測される距離の比と全重力ポテンシャルの比を結び付ける表式は、(9)とは異なり、逆比例の形を持っている：

$$r_1/r_0 = \Phi_0/\Phi_1. \quad (10)$$

ここで r_0 は Φ_0 の領域から決定される物体間の距離； r_1 は Φ_1 の領域から決定される、それと同じ物体間の距離である。

1.5. 全重力ポテンシャルの関数としての重力係数

これまでの諸節で得た全重力ポテンシャルに対する質量および間隔の依存性を考慮に入れて、全重力ポテンシャルが G の測定値に及ぼす影響を決定しよう。

全重力ポテンシャル Φ_0 の領域から全重力ポテンシャル Φ_1 の領域への試験物体の変位には、変位される物体の初期エネルギー状態と最終エネルギー状態の差に等しい、一定量のエネルギー ΔE の解放が伴う。 ΔE の値は、重力ポテンシャルおよび試験物体の質量の差の関数であるだけでなく、観測者の位置の関数でもある。領域 Φ_0 にいる観測者 O_0 にとっては、試験物体の初期質量が m_0 のとき、解放エネルギー ΔE_0 は次のようになる：

$$\Delta E_0 = (m_0 - m_0/k)c^2 = m_0c^2(1 - 1/k). \quad (11)$$

ここで $k = \Phi_1/\Phi_0$ である。

領域 Φ_1 にいる観測者（観測者 O_1 ）は、それとは異なる ΔE の推定値 ΔE_1 を与える。試験物体の質量は、(5)により、彼にとっては k 倍大きくなる。なぜなら、 O_1 の固有質量基準は、絶対的に O_0 の固有質量基準の k 分の1であるからである(4')：

$$\Delta E_1 = (km_0 - m_0)c^2 = m_0c^2(k - 1). \quad (12)$$

(11)および(12)によって決定される ΔE の値が、観測者 O_0 の立場(11)から見ても、観測者 O_1 の立場(12)から見ても、レベル Φ_0 に存在している試験物体の、レベル Φ_1 に対するポテンシャルエネルギー E_{pot} と数値的に等しいことは明らかである。

(2)を用いて、全重力ポテンシャル Φ_0 と Φ_1 の間の差を通じて ΔE を表そう。その際には、ポテンシャル Φ_1 および Φ_0 の観測値が、したがってまたそれらの観測値の差も観測場所の関数であることを考慮しよう。観測者 O_0 の場合には、ポテンシャル Φ_0 と Φ_1 の間の差が $\Delta\Phi_0$ のとき、試験物体の変位の初期地点および最終地点が Φ_0 および Φ_1 （ここで $|\Phi_0| = c^2$ ）によって特徴付けられるのに対し、観測者 O_1 の場合には、これらの同じ空間領域のポテンシャルはそれとは異なることが判明する。これらのポテンシャルの間の差が $\Delta\Phi_1$ のとき、これらのポテンシャルを Φ'_0 および Φ'_1 で表そう。このとき、 c^2 の値との数値的相等性を持つことになるのは、 O_1 の位置に対応するポテンシャル Φ'_1 の方である。次式が得られる：

$$\Delta E_0 = |E_{\text{pot}0}| = (c^2/\Phi_1)m_0|\Delta\Phi_0|,$$

$$\Delta E_1 = |E_{\text{pot}1}| = (c^2/\Phi'_0)m_0|\Delta\Phi_1|.$$

全重力ポテンシャルの比 $k = \Phi_1/\Phi_0 = \Phi_1/c^2 = c^2/\Phi'_0$ は、観測者の位置に対して完全に不変である。このことを考慮して次のように書こう：

$$\Delta E_0 = (m_0/k)|\Delta\Phi_0|, \quad (13)$$

$$\Delta E_1 = km_0|\Delta\Phi_1|. \quad (14)$$

ここで m_0 は、 O_0 にとっての試験物体の初期（変位前の）質量であり、このとき、 O_1 にとっては試験物体の最終（変位後の）質量である。

(11)と(12)を比較すると、 $\Delta E_1 = k\Delta E_0$ が得られる。これを用いて、(13)および(14)に含まれている $\Delta\Phi_0$ と $\Delta\Phi_1$ の間の関係を見出そう：

$$\Delta\Phi_1 = \Delta\Phi_0/k. \quad (15)$$

$\Delta\Phi_0$ および $\Delta\Phi_1$ を、重力係数 G_0 および G_1 （それぞれ O_0 および O_1 の場合の重力係数）ならびにパラメーター群 h_0, h_1 （試験物体の変位量）； M_0, M_1 および r_0, r_1 （ここで M はポテンシャル差 $\Delta\Phi$ を創出する強重力物体 [strongly gravitating object] の質量； r は強重力物体の質量中心までの距離）を通じて表そう。

O_0 の場合：

$$|\Delta\Phi_0| = \left(\frac{G_0M_0}{r_0} - \frac{G_0M_0}{r_0 + h_0} \right) = G_0M_0 \left(\frac{h_0}{r_0(r_0 + h_0)} \right). \quad (16)$$

観測者 O_1 の場合には、(5)と(10)の「交差」相関に従って量 M_0, h_0 および r_0 のスケール変換を用いよう：

$$\begin{aligned} |\Delta\Phi_1| &= \left(\frac{G_1M_1}{r_1} - \frac{G_1M_1}{r_1 + h_1} \right) = G_1kM_0 \left(\frac{h_0/k}{(r_0/k)((r_0 + h_0)/k)} \right) \\ &= G_1k^2M_0 \left(\frac{h_0}{r_0(r_0 + h_0)} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

(15)および(16)を考慮して、(17)を変換しよう：

$$\Delta\Phi_0/k = G_1 k^2 \Delta\Phi_0/G_0.$$

これより、 $G_1 = G_0/k^3$ 、または次式が得られる：

$$G_1 = (\Phi_0/\Phi_1)^3 G_0. \quad (18)$$

したがって、重力係数 G (G_1, G_0) を「重力定数」とみなすことはできない。なぜなら、重力係数 G は全重力ポテンシャルに対して不変ではないからである。

重力係数 G は全重力ポテンシャルの相対変化の3乗に逆比例している。

重力係数 G_1 の直接的な測定の結果 (G_{meas}) に基づいて、測定が行われた空間領域における全重力ポテンシャルの絶対値 $|\Phi_{\text{meas}}|$ について判定を下すことができる。「重力定数の参考値」を基準値として取り、初期値 $|\Phi_0|$ として c^2 をおくと (第 I.3 節参照)、次式が得られる：

$$|\Phi_{\text{meas}}| = \delta/(G_{\text{meas}})^{1/3}.$$

ここで係数 δ は $\delta \gg 3.65 \hbar 10^{13} \{m^3/s^4/kg^{1/3}\}$ である。

このように、全重力ポテンシャルの値は局所的に測定することが可能である。

より分かり易くするため、想像上の宇宙飛行士の感覚と観測結果を利用することにより、ここまでの結果をまとめてみよう。宇宙飛行士の輸送手段は、メタ銀河の任意の領域への幻想的な旅行をすることを可能にする。 $|\Phi|$ がより大きい領域にやって来た宇宙飛行士は、全ての遠方天体をより近くに、かつよりコンパクトに知覚する(10)。したがって、彼にとっては、メタ銀河のより大きい領域が観測可能になる。彼の視覚的知覚の結果は、レーザー測位を用いた機器による宇宙距離の測定結果と一致することになる。すなわち、宇宙飛行士の固有時計によれば、光が往復経路を進行するのに要する時間間隔はより小さくなる(7)。重力ポテンシャルがより小さい領域に存在する物体の放射は、宇宙飛行士により、より高い周波数に偏移したものとして知覚される。また、「残存放射の背景 [=宇宙背景放射]」は、彼にとってはより高い温度を持つことになる。

全重力ポテンシャルの変化は、微視的および巨視的物体の構造および安定性に影響を与えない。その変化は、それ自体としては宇宙飛行士の生物学的機能に影響を及ぼすことができない。しかし、宇宙飛行士をメタ銀河の全ての質量から、 $|\Phi|$ が何千分の1にまで絶対的に減少するほど遠ざけた場合には (それに対応して、重力係数 G は何十億倍にも増大する。表式(18)参照)、彼は、自分の体の諸部分の間における重力を受けることになる。

下された結論は、いわゆる「マッハの原理」[11] [邦訳あり] としてまとめられている、E.マッハの見解 [10] と完全に整合している。

I. 6. 第 I 部の結論

本論文の第 I 部で行われた思考実験の分析に基づき、全重力ポテンシャルの関数としての、質量(4)、時間間隔(7)および空間間隔(9)に関するスケール係数が決定された。スケール係数が重力係数 G に及ぼす影響を考慮したことが、全重力ポテンシャルの値に対する G の測定値の予想される依存性(18)を突きとめることを可能にした。

重力係数 G の値の可変性の可能性自体を認めることは、少なくとも 2 つの新たな側面について検討する必要性をもたらす。

1 番目の側面は、基本的理解の領域に属するもので、ここでは、かなり高い経験的地位を持っている古典的等価原理に対する態度のあり得る見直しと関係している。問題把握のこの段階では、相互排他的な 2 つの視点が存在する可能性がある。重力係数 G が物体の慣性的性質と重力的性質との間の比例性の尺度であることが判明した場合には、証拠基盤のあり得る一要素としての支援を古典的等価原理に求めることは、全重力ポテンシャルの不変性という条件によって制限される可能性がある。逆に、全重力ポテンシャルが任意の値

であるときにおける慣性質量と重力質量の恒等性を裏付ける説得力のある論拠が発見された場合には、一般に受け入れられている定式化での古典的等価原理の妥当性は揺るがないことになる。その場合には、重力係数 G の数値は、当該の連続体領域に特徴的な重力相互作用の有効性の尺度としての役割を果たすことができる。ここに挙げた側面は、重力係数 G の物理的本質のより深い洞察と関係しており、より詳細な研究を必要としている。

2番目の側面は、そのより大きな部分において応用的性格を持っている。例えば、ビッグバンのコンセプトによれば、約150億年から180億年前、メタ銀河の物質全体は超高密度状態にあった。そのような状態に対しては、物質凝集塊のすぐ近傍における全重力ポテンシャルのきわめて高い値、そして無視できるほど小さい重力係数 G の値が対応していた。これらの条件下では、重力は物質の飛散の性格に対して本質的な影響を及ぼすことはできなかった。「物質球」が膨大するにつれて、 G の値は増大していった。その増大は現在も続いている。メタ銀河の存在期間全体を通じた G の変性を考慮することは、かつて単一であったメタ銀河の雲の断片化の初期段階を決定した諸条件から、メタ銀河の進化の最終段階において生じ得る諸過程にいたるまでの宇宙進化の理解における、最重要命題の根本的見直しを前提としている。宇宙世界における現在の我々の位置が、物理量の現在の値、またビッグバンの瞬間から経過した時間に関する認識とともに、今後における外挿のための「基準点」となることができる。

重力係数 G の動態に関する信頼できる経験的データを可能な限り早い時期に得たいというある種の期待は、宇宙実験技術および観測天文学用機器の改良、また、これらの方向性の相互補完的な共益関係[symbiosis]と関係を持っている。宇宙進化モデルの正しい選択にとっては、諸知識に基づいた確信が原理的な重要性を持っている。過去と未来のグローバルな事象に関する我々の理解の今後におけるレベルは、その宇宙進化モデルに基づいて形成されることになる。

第 II 部

II.1. 運動質量理論の基礎. ポスト相対論的アプローチ

ブルーノとガリレイの時代以来、我々の世界全体は静的で、空間および時間の点で無限であり、その中には無限大の量の物質*が存在していると理解されていた。この描像はニュートンの理論と矛盾していたにもかかわらず（この描像の場合、ニュートンの理論は全重力ポテンシャルの無限大の値を与える）、構造的均質性という条件が補足されただけで、1920年代までの間、公理的に妥当とみなされていた。世界についてのこの理解の根本的見直しの最初のきっかけとなったのは、フリードマンの理論的研究、そしてそれに続く、星雲のスペクトル線の宇宙論的偏移の発見であった。ハッブルはこの発見を星雲の「後退」によって根拠付けた。

ニュートンの理論とフリードマンの研究を隔てる時期に、理論を既存の理解と整合させようとする試みがなされた。例えばゼーリガーは、2つの質量の引力は、大きな距離では $1/r^2$ より速く減少すると予想した。アインシュタインは既に1917年に、一般相対性理論の枠内で、「均質な世界」というコンセプトを救うための別の方法を発見した。彼の解釈は次のような意味を持っていた：空間の曲がりや条件付きの「空間の地平線」を越え出た物体をいわば「切り取り」、全重力ポテンシャルは有限な物体系の影響の関数であることが判明する。それ以外の任意の空間点の場合には、「空間の地平線」は物体系をそれとは異なる仕方で制約するが、しかし物体系はここでも再び有限であることが判明する。「こうすることにより、物質*的世界は何らかの中心を持っているという不愉快な考えから解放されることができる」[12]。

それより12年前、アインシュタインによって特殊相対性理論が創出された。この理論は、世界空間中における特定の（特権的な）位置が存在する可能性自体、したがってまたその位置に対して運動する可能性を完全に否定した。この点で、この理論は宇宙のグローバルな均質性という考えと完全に一致していた。

周知のように、アインシュタインは、非均質かつ非定常的な世界を支持していると解釈されるフリードマン解に対する心理的障壁を、彼にとって膨大な努力を払って克服した。

銀河の後退の検出に続いて、「爆発・膨張する世界」というコンセプトのさらにもう1つの裏付けとなる要素が出現した。それは、メタ銀河の「熱い」過去を指し示している可能性のある、等方的な熱的背景の検出である。

現在までに蓄積されている観測データの総体は、メタ銀河の中心に相当する、ある種の空間領域—特権的な空間領域—が存在している可能性を指し示している。その場合、特権的領域に対する運動は、絶対的運動という意味を持ち、絶対速度によって特徴付けられる。

「このように、総質量と結び付いている系は、実際に物理的に優越している。(略)もしその優越的系 [preferential system, 特権的系とも訳せる] が特定されれば、その系に対する慣性運動でさえ、新たな局所的物理法則系において、優越的系における法則との差異をもたらすに違いない」[13]。しかし、[13]の著書はその先で次のように書いている。「しかし、そのようなことは決して起こらない。(略)経験は、ある基準系から別の運動する基準系への移行時における自然法則の不変性を示している（そして、これが事実なのである！）」。

一失礼ですが（これは好奇心旺盛な読者が口を挟もうとして言っている言葉）、あなたはどのような経験的事実に基づいて、それほどまでに断定的な発言をなさっているのですか？

日常生活においては、我々は自宅にいるときと、飛行機に乗っているときとで、作用する物理法則の違いを感じることはまったくない。しかしこのことは、光速に近い速度で運動するとき、変化はまったくない、何も変化しないと予想する根拠を我々に与えない。

現在の宇宙実験室の速度は秒速 10km を超えない。加速器では亜光速が達成されているが、しかし、加速粒子の基準系中で物理的依存関係がどれだけ変化しているか（あるいは変化していないか）を、我々は直接観測することはできない。我々は間接的な結果で満足するしかなく、その解釈は多様な考え方を許容する。今日、速度が最大限まで変化したときにおける諸効果を直接評価することを可能にする諸条件は、自然自体によって与えられている。それは、地球の公転速度は光速の約 0.01% に達しているということである。残念ながら、このことが持っている可能性は今のところ実現されていない。それゆえ、実を言えば、自然法則の一般共変性に対する信頼できる実験的裏付けは存在しない。

その代わり、それとは別の種類の証拠が存在する。加速器でのそれと同じ実験において、ほぼ光速で運動する短寿命粒子は、それらの粒子の寿命に速度を掛けた積によって計算される距離よりはるかに大きな距離を進行することが確実に突きとめられている。一方では、高速運動系における時間の遅れを想定している相対論的解釈は、この結果と整合している。ところが他方では、全ての基準系の相等性原理（また、別の公準の要素としてアインシュタインによって公準として定められた、アインシュタインの相対性原理）の妥当性について考え直さなければならない理由が出現する。

学校生徒用の問題集には次のような問いが載っている：そこでは絶対的に全てのものが我々の世界におけるより 2 倍大きい世界は存在することが可能か？正しい答えはノーである。なぜなら、もし全ての線形サイズが 2 倍に増大したと仮定すると、全ての表面の面積は 4 倍に、全ての体積は 8 倍に増大するからである。物理量の次元を眺めてみると、時間の測定単位はそれらの物理量の中に相異なる形で含まれている。このことは、既にそれだけで警戒心を起こさせる徴候であり、ここで指摘したテーマについて考え続けなければならない理由となっている。

公準化 [postulation] は、きわめて責任重大なモーメントである。我々はこれより前、一般共変性の公準 (原理) を放棄することを余儀なくされた (第 I.5 節)。全ての基準系の相等性に関する公準 の放棄が、論理的根拠に基づいた次の一步となる。なぜなら、この公準を支持する本質的論拠はもはや残っていないからである。そもそも、その根拠が明白ではなく、直観的・感情的領域の限界によって制限されている「原理」や「公準」に助けを求めよう、我々は努力しよう。

ある程度の経験的裏付けを持ち、それとともに無矛盾な外挿を許容する命題の一つは、周知の古典的等価原理である。この原理によれば、試験物体に作用する、重力的本性を持つ力は、試験物体の慣性質量に厳密に比例しており、物体の質量の本性、物体の組成および内部構造に依存しない。

運動する物体の運動力学的エネルギー [kinetic energy] に起源を持つ質量 Δm_{kin} が、運動する物体の質量の一部をなしている。等価原理によれば、運動力学的質量 Δm_{kin} は物体の慣性を増大させるだけでなく、重力的引力も (値 Δmg だけ) 増大させる。もし値 Δm_{kin} が慣性質量のみの構成部分であるとする、光子は重力場中で偏向しないはずである。

等価原理を強重力物体 (すなわち、「試験物体」の定義の範囲内に入らない物体) との関連において検討する場合には、その物体によって創出される全重力ポテンシャルの増分もまた、その物体の質量の本性に依存しないはずである。運動する強重力物体は、それと正確に同じ物体であるが、しかし静止している物体と比べ、重力ポテンシャルの値に対してより大きい増分を与えるであろう。

観測者がメタ銀河の中心に対して運動している場合について検討しよう。この想像上の状況において、メタ銀河 M_{Σ} ($M_{\Sigma} = \Sigma_i m_i$) を構成している全ての「要素」物体 m は、メタ銀河の中心に対して (したがって互いに対しても) 静止しているとみなそう。この場合には、メタ銀河の各要素物体は運動する観測者に対して運動力学的エネルギーを持つことになる。このエネルギーを考慮すると、要素物体の全質量 m_v は値 E_{kin}/c^2 だけ大きくなる。そ

の値に従い、メタ銀河の質量もより大きくなる。

運動の結果における追加質量は、それと同様にして追加静止質量にも影響を及ぼす。そして最終的には、メタ銀河全体によって創出される運動する観測者に対する全ポテンシャルが増大し、その増大には、そこから導き出される全ての結果が伴う（間隔、質量、重力係数のスケールの変化。第I部参照）。このとき、関係式(4),(7),(9)および(18)は次の形で書くことができる。

$$m_v = (\Phi_0/\Phi_v)m_0, \quad (19)$$

$$dt_v = (\Phi_v/\Phi_0)dt_0, \quad (20)$$

$$dl_v = (\Phi_v/\Phi_0)dl_0, \quad (21)$$

$$G_v = (\Phi_0/\Phi_v)^3 G_0. \quad (22)$$

ここで Φ_v は運動する観測者の系における全重力ポテンシャルの値である。

静止基準系（特定基準系）における全静力学的ポテンシャル Φ_0 と区別して、ポテンシャル Φ_v を全運動学的ポテンシャル [total kinematic potential] と呼ぶことにしよう。任意の空間領域に関して、運動学的ポテンシャルは静力学的ポテンシャルより（絶対値で）常に大きい。特定基準系において、空間間隔は最小となる(21)；時間の進行速度は最大となる(20)。（特定基準系に対して）運動する基準系における物体の絶対質量は(19)に従ってより小さくなる。このことは、(22)の重力係数 G_v の値がより小さくなることに基づいて判定することができる。

注： 観測者がメタ銀河に対して運動する（このとき、メタ銀河を構成している物体の全質量はより大きく感受される）場合には、彼にとっての全重力ポテンシャルの値は、彼と同じ空間領域中にいる静止した観測者にとっての値より大きくなる。このことから次のことが導き出される： G_v の測定値はより小さい；時間の進行は遅くなる；全ての外部物体までの距離は視覚的に減少する。このとき、運動する観測者は、観測される M_2 の値の変化と関係している状況を正しく評価しなければならない。すなわち、観測される M_2 の増大は絶対的なものであることはできない（これはエネルギー保存則によって禁止されている）。このことは、観測者自身の絶対質量の減少が生じたことを意味している。

次節では、下された結論が、全体としてのエネルギー保存則とも、特に試験物体の全質量の等方性の条件とも矛盾していないことが示される。

II. 2. 光子の場合のドップラー効果. ポストニュートン係数. 絶対速度の関数としての重力係数

観測される周波数偏移という現象が最初に突きとめられたのは、「重量を持つ」媒質（気体媒質および液体媒質。このとき、振動源のエネルギーは媒質の構造要素（原子、分子）に直接伝達され、その次の要素へ逐次伝達されていく）中を伝播する波の場合に関してであった。これがいわゆる古典的ドップラー効果である。これらの場合に観測される振動周波数は、波面の運動速度が観測者に対して不変であるとき、振動の波長が変化した結果として変化する可能性があり（観測者は媒質に対して静止している；振動源が観測者に近付くか、または彼から遠ざかる）、また、波面の伝播速度が変化した結果として変化する可能性もある（観測者は振動伝播媒質中で運動している。このとき、彼の速度ベクトルは振動の伝播方向上への非ゼロの射影を持たなければならない）。

古典的ドップラー効果の正しい物理的解釈にとって原理的な重要性を持つのは、次の命題である：受振振動の周波数の変化は、振動の各要素の放射時刻と受振時刻の間の時間間隔の変化に起因している。この時間間隔の変化は、受振器と放射源の間の距離 s の変化の結

果生じる可能性がある。このとき、振動周波数の偏移は、距離の変化の関数 ds/dt （距離の時間に関する導関数）、すなわち動径速度 v_r の関数である。

次のような状況について検討しよう。放射源は観測者に対して静止している。周波数 ν_0 の信号が観測者によって記録される。次に、放射源が観測者に対して対向方向に速度 v_r で運動し始める。その運動の結果、受振器と発振源の間の距離は、振動周期 T_0 の間に値 $\Delta s = v_r T_0$ だけ減少する。観測者によって記録される波長 λ は $\lambda = \lambda_0 - v_r T_0$ ；したがって $c/\nu = c/\nu_0 - v_r/\nu_0$ となる。これより、信号の観測される周波数 ν に関して次式が得られる：

$$\nu = (c/(c - v_r))\nu_0. \quad (23)$$

今度は、それとは若干異なる状況について検討しよう：観測者が周波数 ν_0 の信号を放射する放射源に対して対向方向に速度 v_r で運動し始める。観測者によって記録する周波数は前回より大きいことが判明する；今回は、より大きい周波数に対応する、より小さい周期の間における距離の減少分 Δs は $\Delta s = v_r T$ となる。この場合には、 $\lambda = \lambda_0 - v_r T$ ； $c/\nu = c/\nu_0 - v_r/\nu$ となる。周波数 ν に関する表式は、(23)とは異なった形を取る：

$$\nu = ((c + v_r)/c)\nu_0. \quad (24)$$

関係式(23)および(24)は、「重量を持つ」実体 [substance] が存在しており、その中を信号がある速度 c で伝播するという条件から導き出される。最初に検討した事例に対しては、その実体に対する観測者の静止状態が対応しており、2番目に検討した事例に対しては、放射源の静止状態が対応している。このとき、2番目の事例に対しては、信号が観測者に対して値 c とは異なる速度で伝播する可能性があることが許容されなければならない。光信号に関しては、その可能性は実現されないことを我々は確信している。測定される光速度は不変値であることが判明しているからである。そしてこのことは確実な実験的事実である。

光（より正確に言えば、電磁振動の全てのスペクトル）に関しては、観測されている周波数偏移の古典的解釈は、厳密に制限された範囲内においてのみ許容される。なぜなら、光振動は、重量を持たない（したがってまた非エネルギー的な）「空間実体」の中を伝播するからである。それらの振動のエネルギーは、そのような媒質によって蓄積されることはできず、媒質のある1点から別の1点へ伝達される。「光波」[単数]は、その伝播の過程においてエネルギーの凝集「クラスター」[単数]であり続ける。すなわち、「光波」は、波動性ととともに、粒子性（「波動量子」）をも持っており、さらにこれに加えて、「古典的な」波にも「古典的な」粒子にも特徴的でない性質を持っている。そこでは（波または粒子に対する）対向方向の運動が速度の算術的合成をもたらさないような一目瞭然たるモデルは、我々の思考様式に馴染みのある形象の中には見出されない。光の場合のドップラー効果の形象的および形式的表現においては、これら全ての事情が必ず考慮されなければならない。

光現象に関しては、2つの相互排他的な仮説のみが存在することができる：1) 光量子は「それ自体で」存在しており、光量子が伝播するためには、いかなる媒質も必要とされない；2) 光の伝播過程に関与するある種の媒質（「空間実体」）が存在している。また、ある種の「相殺メカニズム」が存在しており、そのおかげで、測定される光速度は常に c の値に等しいことが判明する。

1番目の仮説は、光量子は、自分がいかなる物体と出会うことになるかを事前に「知っていて」（すなわち、「予知能力」を持っている）、その物体に従って自分の速度を「修正」という予想と整合している。この仮説は、光子はその性質という点で唯一無二の粒子であることを無意識のうちに想定している。しかし、他ならぬこの点における光子の唯一性は、光子に固有な性質とされる性質が、適切な条件下では他の全ての粒子や物体において観測されるという理由によって既に疑わしい。光子の場合には、それらの性質が極端な

形で現れているだけなのである。

消去法により、2番目の仮説を選択しよう。

観測者が特定基準系と結び付いており、放射源が対向方向に運動している場合には、上記の「相殺メカニズム」の要素を、「絶対」速度 v_a （すなわち、特定基準系に対する放射源の速度）の関数である係数 k によって表そう。受信される信号の周波数 ν に関する表式は次の形を持つことになる：

$$\nu = k(c/(c - v_a))\nu_0. \quad (25)$$

それとは逆の状況（特定基準系と結び付いているのは放射源で、観測者が速度 v_a で対向方向に運動している）の場合には、「相殺メカニズム」の影響は、それに対応して逆の形で再現される。この場合における受信される信号の周波数 ν に関する表式には、係数 $1/k$ が入る：

$$\nu = (1/k)((c + v_a)/c)\nu_0. \quad (26)$$

光の場合のドップラー効果の形式的再現の精緻化から出発して、速度 v_a に対する係数 k の依存性の決定手続きを開始しよう。この目的のため、例によって思考実験に助けを借りることにしよう。

その固有質量が m_0 である物体が存在するとしよう。この物体は円軌道に沿って観測者に対して運動している。運動の結果、物体の全質量は、観測者にとってはより大きい、すなわち、 $m_0 n$ であることが判明する（ここで n は、観測者の基準系に対する物体の線形速度の関数である、運動力学的係数である）。

以下において、選択されたこの物体は1対の粒子からなっており、それらの粒子は物体の運動の過程で消滅し、観測者によって記録される光子に転化すると仮定しよう（光子 γ_1 は直接観測者の方へやって来る。2番目の光子 γ_2 の方向は、この思考実験の目的のため、観測者に対して静止している反射器によって変化するものとする）。

エネルギー保存則により、光子 γ_1 および γ_2 の総質量は、物体を構成している粒子の消滅の結果における物体の総質量の欠損 $\Delta m_0 n$ と正確に等しくなければならない。すなわち：

$$m_{\gamma_1} + m_{\gamma_2} = \Delta m_0 n. \quad (27)$$

$\Delta m_0 n$ の値は、観測者に対する物体の線形速度の増大とともに増大する（係数 n が増大する）。したがって、物体の線形速度の増大には、光子 γ_1 および γ_2 の青化が伴う。

この場合（物体が観測者の周りを回転する場合）には、速度の動径成分はゼロに等しい。したがって、受け止められる光子の周波数の変化は、古典的ドップラー効果に基づいて説明することができない。

速度の動径成分 v_r の非存在という条件下における振動周波数の変化現象は、横ドップラー効果という名称を与えられている。質量理論によって予言されている横ドップラー効果と特殊相対性理論によって予言されている横ドップラー効果との原理的な違いは、この効果が、質量理論では観測される振動周波数の増大の形で発現するのに対し、特殊相対性理論ではその減少という形で発現することにある。横ドップラー効果に伴う光子の「赤化」は、エネルギー/質量の欠損を説明することができないため、エネルギー保存則と整合することができない。横ドップラー効果に伴う光子の他ならぬ「青化」を指し示す実験データが存在する [14, 15] ^[訳注]。

[訳注] MacArthur D.W. *etal* の 1986 年の論文 [15] はネットで入手可能（「文献一覧」(p.21) 参照）。この論文に対しては James McKelvie が論文“An investigation of experimental reports on the relativistic relation for Doppler shift” (2022) ([file:///C:/Users/cbb30/Downloads/An Investigation of Experimental Reports on the Re.pdf](file:///C:/Users/cbb30/Downloads/An%20Investigation%20of%20Experimental%20Reports%20on%20the%20Re.pdf)) にいて厳しい批判を加え、この論文の結論の妥当性を完全に否定している。

考察のそれに続くブロックは、思考実験の変換に基づいて構築される。すなわち、[今回の思考実験では] 物体が円運動を続けている一方で、観測者は軌道平面内に留まりつつ、軌道の範囲を越えて移動するとしよう。この場合には、物体の軌道上の位置の各要素に対しては、観測者に対する物体の動径速度 v_r のある一定の値が対応している。しかし、動径速度が出現したことは、観測者がそれと結び付いている基準系に対する物体の速度の変化を意味しない：観測者は前と同じ基準系に属しており、変化したのは観測者の空間的位置のみである。それゆえ、今検討している状況の場合には、表式(27)は依然として妥当する。しかし今回は、一般的な場合には $m_{\gamma_1} \neq m_{\gamma_2}$ ^[訳注] という差がある。直接的な光子と反射された光の質量の最大差は、 v_r の最大値に対応する軌道上の点において観測されることになる。

v_r の値に対する質量 m_{γ_1} および m_{γ_2} の依存性は、特定基準系に対する物体および観測者の位置が周波数のドップラー偏移の値に影響を及ぼしていることを意味している可能性がある。そのような影響の可能性が(25)および(26)から導き出される。この理由により、状況は2つの視点から検討されなければならない。

まず最初に、特定基準系と結び付いているのは観測者の方で、物体は対向方向に速度 v_a で運動しているとしよう（観測者が物体の軌道から著しく遠方にいるときには、 v_r の最大値は絶対速度 v_a の値に近い；境界上においては $v_r = v_a$ とおこう）。この配置に対応しているのは表式(25)である。「直接的な」光子の質量 m_{γ_1} は次式に等しくなる：

$$m_{\gamma_1} = k \left(\frac{\Delta m_0}{2} \right) \left(\frac{c}{c - v_a} \right).$$

これに対応して、2番目の反射された光子の質量は次式に等しくなる：

$$m_{\gamma_2} = k \left(\frac{\Delta m_0}{2} \right) \left(\frac{c}{c + v_a} \right).$$

再びエネルギー保存則を適用すると、次式が得られる：

$$k \left(\frac{\Delta m}{2} \right) \left(\frac{c}{c - v_a} \right) + k \left(\frac{\Delta m}{2} \right) \left(\frac{c}{c + v_a} \right) = \Delta mn. \quad (28)$$

今度は、2番目の視点から見た状況について検討しよう。ある時刻に、物体は特定基準系に対して静止しており、観測者は物体に対して対向方向に一定速度 v_a で特定基準系に対して運動している。この場合にも、観測者にとっての物体の全質量はより大きい。物体から放出された光子の質量 m_{γ_1} および m_{γ_2} は、(26)により次式のようなになる：

$$m_{\gamma_1} = \left(\frac{\Delta m_0}{2k} \right) \left(\frac{c + v_a}{c} \right); \quad m_{\gamma_2} = \left(\frac{\Delta m_0}{2k} \right) \left(\frac{c - v_a}{c} \right).$$

エネルギー保存則と全質量の等方性の条件を同時に考慮すると、この場合には次のように書くことができる：

$$\left(\frac{\Delta m_0}{2k} \right) \left(\frac{c + v_a}{c} \right) + \left(\frac{\Delta m_0}{2k} \right) \left(\frac{c - v_a}{c} \right) = \Delta m_0 n. \quad (29)$$

注： 全質量の等方性の条件は次のように定式化することができる：観測者にとっての試験物体の全質量は、観測者に対する物体の速度の関数であり、物体の運動方向には依存しない（すなわち、物体の全質量は特定基準系の位置には依存しない）。等方性の条件の根拠付けは次のようにして行うことができる。

特定基準系ではないある系の中でこまが回転している。こまの回転面は、こまの各要素が特定要素に対する自分の速度を周期的に変化させており、速度を増大させたり、または逆に減少させたりするようになっている。全質量の非等方性の可能性

[訳注] $m_{\gamma_1} \neq m_{\gamma_2}$ の \neq は原文における文字化けである。この2つ後の段落の m_{γ_1} および m_{γ_2} に関する表式から判断すると、おそらく、正しくは $m_{\gamma_1} > m_{\gamma_2}$ であろうと推測される。

を仮定した場合には、所与の瞬間に特定要素に対して最小速度を持っている点は、最小の（または最大の）全質量を持つことになる。それらの点の反対側に位置する点の場合には、それとは反対の効果が観測されることになる。このことは、こまの軸に加わる力が相殺されなくなり、こまの質量中心があるいは特定要素の方向へ、あるいは特定要素と逆の方向へ運動（自己加速）し始めるという結果をもたらす。

全ての微視的粒子は静止状態では存在する「能力を持たない」動力的構造物であるから、いたる所で「自己運動」が出現するはずである。このような類の予想がエネルギー保存則および運動量保存則と両立し得ないことは明らかである。

速度の非等方性という形での相殺要素を導入する方法でこの状況を改善しようとする試み（これ自体は根拠のないことである）は、肯定的な結果をもたらさない。例えば、速度は、エネルギーに関する表式中には 2 乗で含まれおり、運動量に関する表式中には 1 乗で含まれている。そのような方法によってこれら 2 つの条件を同時に満たすことが不可能であることは明らかである。

ここで直ちに、運動量保存則およびエネルギー保存則の無条件の妥当性に基づき、先に述べた結論と対になった次の結論が定式化されることに注目するべきである：全質量の等方性は、相対速度の等方性、すなわち、系 B から決定された系 B に対する系 A の速度は、系 A から決定された系 A に対する系 B の速度と等しいことを前提としている。

表式(29)においては、全質量の等方性の条件は、表式(28)におけるのと同様に、その右辺において、 Δm のときの運動学的係数が n に等しいことによって考慮されている。

(28)と(29)の左辺を等置することにより、運動学的係数 k を決定しよう：

$$k = \sqrt{1 - \frac{v_a^2}{c^2}}. \quad (30)$$

見出された運動学的係数 k は、完全に具体的な物理的意味を持っている。この係数は、パラメーター v_a を持つ基準系中における空間的性質の非等方性の尺度である。前節から導き出されるように、この非等方性は、絶対質量、時間の進行、空間間隔および重力係数（表式(19)–(22)）に関して発現する。

係数 k と n の関係は、我々によって検討された個別状況の範囲内では、 k の代わりに (30)のその値を表式(28)または(29)に代入することによって見出される： $n = 1/k$ 。放射源および観測者が特定基準系と結び付いていない一般的な場合には、次式が得られる：

$$n = \sqrt{1 - \frac{v_{\text{rel}}^2}{c^2}}.$$

ここで v_{rel} は観測者に対する源の速度である。

本論文の主要テーマである G の変化の法則の定式化は、ドップラー効果のより詳細な研究を必要としない。それにもかかわらず、本論文の基本テーマとは無関係なものとして計算の途中式は省略するが、しかし本論文で述べられている諸前提に基づいて得られたドップラー効果の最終的公式を挙げるのが適切であると筆者は考える：

$$\omega = \omega_0 \frac{c - v_{\text{rel}} \cos \beta}{\sqrt{c^2 - v_{\text{rel}}^2}} \sqrt{\frac{c^2 - v_{\text{src}}^2}{c^2 - v_{\text{obs}}^2}} \quad (31)$$

ここで β は、振動源の（観測者に対する）速度ベクトルと、観測者から振動源までの線との間の角度； v_{src} および v_{obs} はそれぞれ振動源および観測者の絶対速度である。

関係式(22)および(30)に基づき、絶対速度 v_a に対する重力係数 G_v の測定値の依存性が決

定される：

$$G_v = (1 - v_a^2/c^2)^{3/2} G_0. \quad (32)$$

基準系の絶対速度の増大とともに、基準系中で測定される重力係数は減少する。

このように、運動基準系中における G_0 を測定し、具体的な空間領域中における特定基準系に特徴的な係数 G_0 の値を知れば、絶対運動速度を決定することができる。

地球の軌道運動は、6番目の有効数字以下のレベルにおいて、 G の値の年周変化 ((18)および(32)に従った、特定基準系に対する地球の軌道の方位に依存する変化) を与える可能性がある。現時点では、 G の値の直接的決定に関する実験の機器誤差は、予想される効果の値を著しく上回っている。

11.3. 結論部

本論文の第I部では、「純粋な形」での重力効果が検討された。第II部では、得られた結果の運動の場合への一般化の試みがなされた。このような順序—重力理論から運動理論へ—は、最も法則にかなった順序であると我々には思われる。

もし選ばれた推論の進め方が、周知のローレンツ変換 (横ドップラー効果を含む) に基づいて予言されているのと同じような、予想される運動学的効果の性格へ我々を導いたとすれば、本論文の結論部はきわめて短いものになっていたはずである。しかし、生じた状況は、この違いが生じた原因を解明するよう促している。

ローレンツ変換は、(フィッツジェラルドの最初の考察からアインシュタインおよびミンコフスキーの相対論的解釈にいたるまでの) 進化の過程全体を通じて、本質的には周知のマイケルソン・モーリーの実験の結果に依拠していた。ローレンツ変換を用いることにより、「エーテル」中における光の伝播という理解に基づいて、また、そもそも光の伝播過程と何らかの実体との関係抜きで、観測される干渉像の不変性という事実を説明することができた。その際、ローレンツもアインシュタインも、フィッツジェラルドの考察の中にまだ暗黙の形で含まれている厳格な条件を満たすことを断念しなかった。それは、干渉像の観測結果は、任意の観測位置から見て同一でなければならない、すなわち、相異なる基準系に属する観測者たちによって同様に感受されなければならないという条件である (この要件は「干渉計観測の恒等性の条件」と呼ぶことができる)。実は、干渉縞のゼロシフトは、干渉計に対して静止している観測者によって感知される。その干渉像が別の基準系に属する観測者の場合にもそのまま維持されるか否かを、完全に確定的に断言することはできない。なぜなら、この場合には、観測される光線の波動構造を変化させる能力を持つ、それ以外の効果 (例えばドップラー効果) が状況に介入するからである。

アインシュタインは、周知のようにそこには速度($c + v$)と($c - v$)が登場する、ローレンツ変換の本来の論理を基本的に堅持しつつ、課題にさらにもう1つの要件、すなわち「…各光線が、 K と K' の両方の系において同一の速度で伝播するようにしなければならない」という要件を追加した [16]。一度に全ての観測者にとっての同一の光線の速度の相等性を意味するこの要件 (ここではもう、「常識 [=健全な判断力]」について想起するよう促したくなる) は、ローレンツ変換を用いる可能性自体と矛盾に陥る。様々な矛盾がこのようにして堆積されたとき、パラドックスの花束が形成されたのは驚くべきことではない。そしてその花束の色鮮やかな花の1つとなったのが、「同時性の相対性」の、暫定的概念の範疇から「因果性」の概念と密接に結び付いた物理的現実の範疇への移行であった。

状況が「同時性の相対性」のパラドックスを擁護する論拠にとって有利な方向へ傾いているとき、周知の理論の支持者たちから最もよく聞こえてくるのは、「同時性の相対性」は「因果性原理」と矛盾しないという主張である。この主張は、反対派を納得させるのに十分な場合がときにはあるが、ときにはそうでない場合もある。

「因果性原理」に関する現実の状況は、今のところ、(特殊相対性理論の物理学的に粗野な形式主義の限界を越えて)それを分析的に定義することなど論外であるといった状況である。時間、因果性それ自体、また因果関係の本質に関して我々が持っている皮相な判断は、「因果性」それ自体が独立した物理的原理の基礎を構成することができるようになるためには不十分である [17]。そしてこのことなしには、それを根拠として、あれこれの結論が因果性条件に適合しているか否かに関する具体的結論を下すことが許されるような判断基準を確定することはできない。その例証として、尊敬する同僚の著作からの抜粋を示したい：「つい最近、(略)過去への旅行を可能にする閉じた時間線がその中で発生する「タイムマシン」を構築することが原理的に可能であるという意見が発表された。ここでは、我々は、時間線の閉鎖性と因果性原理との間の関係は、決してそれほどトリビアルなものではないという点に注目しよう。おそらく、時間線の閉鎖性からは、因果性原理の破れは決して一義的に導き出されない(略)」[13]。一般的に、人間は物事を自分が欲するように理解するものだ。このような啓示を聞いた後には、因果性原理には、何か魔法の呪文のような、「最後の論拠」の役割が割り当てられているのではないかという感じが生じてくるのではなからうか。

我々は、常識的な論拠のみを信頼すると、きっぱりと約束しようではないか。

「…の恒等性の条件」や、今のところまだ幻のような、何事も決定していない「因果性原理」に対する代替物を見出し、その代替物が常識の保証としての役割を自任することができるようにするという唯一の目的に従い、本論文にとって最後の思考実験を行おう。

さて、鉄道の路床に沿って 1 両の車両が運動している。車両の中心に放射器が存在し、閃光を形成している。放射器から等しい距離の所に 1 対の同期された時計が配置されており、そのうち一方の時計は車両の運動方向の側へ変位しており、2 番目の時計は運動方向の反対側へ変位している。車両中の放射器からすぐ近くに 1 番目の観測者がいる。2 番目の観測者はプラットホーム上において、鉄道の路床に対して静止している。また、光の伝播速度は、2 番目の観測者に対する車両の運動速度と共通の尺度で測定することが可能であるとしよう。

ある時刻に、放射器が閃光を形成する。運動している観測者にとっては、状況の対称性は明らかである。彼は、両方の時計から反射された光の光線中において、同期的に進行している時計の一致した示度を観測することになる。

ところが、一般相対性理論が主張するところによれば、閃光は、プラットホーム上の観測者には時計の相異なる示度を届ける。この観測者の立場からの説明は、光は、運動方向の側へ変位している時計に対してはより小さい速度で伝播し、他方の時計に対してはより大きい速度で伝播するという事に帰着する。

では、どちらの観測者が正しいのか？

尊敬する読者の皆さん、問題は、どちらの光線が観測者により早く(またはより遅く)到達するかではなく、光線中において観測される時計の示度がどのようなものになるかであることに注意を払っていただきたい!

興味深いことに、相対性理論は両方の観測者が正しいとみなしている。しかし、観測者たちはそのことを知ることができないので、自分が勝つまで論争を続けるという目標を自らに与えるのは、もったもなことである。

さてここで、我々は共同の努力によって実験条件を改善することができる。両方の文字盤の下に設置された写真乾板が状況を明瞭にすることができることは明らかである。

露光した写真乾板は、「一般相対性理論によれば静止した観測者が観測するはずであった時刻に、時計には光が当たっていなかった」ことを示すであろう。すなわち、静止している観測者は、文書によって記録された時計の示度以外の示度を見ることはできなかったのである。このことから、1 番目の観測者の時計の示度と 2 番目の観測者の時計の示度は

相異なるものになることはできない!という結論が導き出される。

このような結論が出た以上、我々は、一般相対性理論の解釈を放棄し、観測者たちの間にはいかなる論争も生じない!と宣言する権利が我々にはあるとみなす。

反射された閃光[複数]の静止した観測者への到着時刻は一致しない可能性がある。また、反射された信号[複数]自体は相異なる周波数を持っている(また、持たなくなる)可能性がある。しかし、これら全ての効果は、時計と2番目の観測者の間の相異なる、絶えず変化する距離によって完全に説明可能であり、観測時における不一致の原因の自明性を考慮すると、原理的な論争の対象になるはずがない(そのような論争の性格は、向かい合って立っている2人にとっての左側と右側に関する論争に類するものになる)。

我々の場合において2台の時計の観測される示度の一致(一般的な場合には、文書によって裏付けられる結果の整合性)を宣言している原理(これを「結果の整合性の原理」として定義しよう)は、特殊相対性理論の理念における「同時性の相対性」現象を否定している。既にこのことにおいて、この原理が持っている肯定的な役割が見られる。

科学的探究の最も重要な側面は、あれこれの理論的見解に起因する内部矛盾が残らず歴然たる形で露呈するような視角から状況を凝視することである。残りはもう、俗に言うところの技術的な問題である。すなわち、確実に立証された物理的原理に基づいて状況の分析を行い、そこから最大限の利益を引き出すよう努力することである。

本論文において強調されているアプローチは、ある質の点で損をしている。それは、単純さという点である。[本論文の叙述における]運動学的部分の全体を通じて、我々は、その部分に余計なものを沢山詰め込むのを避けるため、極限まで単純な状況の検討の範囲内に叙述を限定した。特定要素および相互に対して相異なる速度で運動する系同士の間における移行を分析した場合には、最終的な方程式は、特殊相対性理論におけるそれらに対応する関係式と比べて、より煩雑なものになる(例えば(31)参照)。

特殊相対性理論は、極限まで単純な数学的アレンジが施された「ヒットソング的理論」として意図的に創出された可能性がある。自然界における相互関係はそれより複雑である可能性が十分にある。外見上の単純さは、必ずしも実在する事物[realia]には対応していない。

それゆえ我々は、誠実な目的意識は、必ずそれにふさわしい果実をもたらすという確信を持ち続けたいものである。

文献一覧

1. Izmailov V.P., Karagioz O.V., Parkhomov A.G. 「重力定数の測定結果のバリエーションに関する研究」, 『ロシアの物理学的思惟』, 1999, No.1/2, pp.20-26. [本論文は http://www.chronos.msu.ru/old/RREPORTS/parkhomov_issledovaniye.pdf で入手可能]
2. Spiridonov O.P. 『基本物理定数』, モスクワ, Vysshaya shkoka, 1991, pp.203-204.
3. Dicke R. 『重力と宇宙』, モスクワ, Mir, 1972, 103 p. [著者のフルネーム: Robert Henry Dicke]
4. Treder H.-Jü. 「統一物理理論に対するヘルムホルツ, プランクおよびアインシュタインの見方」, 『物理学の諸問題: 古典と現代』, 監修: H.-Jü. Treder, モスクワ, Mir, 1982, pp.295-314. [著者のフルネーム: Hans-Jürgen Treder]
5. Khoteev V.Kh. 『自然界における質量の種類』, ウラリスク, 1991. [著者のフルネーム: Viktor Kharitonovich Khoteev]
6. Einstein A. 「一般相対性理論の基礎」, 『科学論集』, 全4巻, モスクワ, Nauka, 1965, 第1巻, pp.452-504.
7. Hilbert D. //Göttingen Nachrichten. 1917. V. 4. S. 21. [論文名: Hilbert, D. "Die Grundlagen der Physik. (Zweite Mitteilung)." *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse* 1917 (1917): 53-76.]
8. Logunov A.A., Loskutov Yu.M. 『一般相対性理論の予想の非一義性と相対論的重力理論』, モスクワ, モスクワ国立大学, 1986, 31 p. [本書は http://www1.jinr.ru/Archive/Pepan/1987-v18/v-18-3/pdf/obzory/v18p3_1.pdf で入手可能。著者のフルネーム: Anatoly Alekseyevich Logunov, Yuriy Mikhailovich Loskutov. これらの著者とあと1名の共著英語論文 A.A. LOGUNOV, YU. M. LOSKUTOV, and M.A. MESTVIRISHVILI, RELATIVISTIC THEORY OF GRAVITY, *International Journal of Modern Physics A* VOL. 03, NO. 09 を [International Journal of Modern Physics A](http://www1.jinr.ru/Archive/Pepan/1987-v18/v-18-3/pdf/obzory/v18p3_1.pdf) VOL. 03, NO. 09 で購入可能。]
9. Zaitsev O.V. 『物理学: 小さいものと大きいものについて』, ロストフ・ナ・ドヌ, Uprpoligrafizdat, 1992, 35 p.
10. Mach E. Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt. - Leipzig, 1883.
11. Zaitsev O.V. 「マッハの原理と惑星の近日点移動」, 『Congress-98 “自然科学の基本問題” 論集』, サンクトペテルブルク, サンクトペテルブルク国立大学, 1991, 第1巻, pp.308-320. [邦訳あり: <http://naturalscience.world.coocan.jp/>]
12. Einstein A. 「特殊および一般相対性理論について」, 『科学論集』, 全4巻, モスクワ, Nauka, 1965, 第1巻, p.584.
13. Novikov I.D. 『宇宙の進化』, モスクワ, Nauka, 1990. [著者のフルネーム: Igor' Dmitriyevich Novikov. イーゴリ・ドミトリエヴィッチ・ノヴィコフは「ノヴィコフの首尾一貫の原則」で広く知られている。日本語版 Wikipedia の記事「親殺しのパラドックス」および「因果のループ」参照。]
14. Pobedonostsev L.A., Parshin P.F. 「ドップラー効果における角度依存性の実験的研究」, 『ロシア哲学会研究雑誌』, 1992, No.1, pp.71-79.
15. MacArthur D.W. *et al.* Test of the Special - Relativistic Doppler Formula at $\beta = 0.84$ // *Phys. Lett.*, 1986, V. 56. No. 4. [本論文は <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.56.282> で入手可能]
16. Einstein A. 「相対性理論」, 『科学論集』, 全4巻, モスクワ, Nauka, 1965, 第1巻, p.419.
17. Vigier J.-P. 「アインシュタイン=ポドルスキー=ローゼンのパラドックスに関する報告」, 『物理学の諸問題: 古典と現代』, モスクワ, Mir, 1982, pp.227-254. [原論文: Jean-Pierre Vigier, Report on the Einstein-Podolsky-Rosen Paradoxon. [本論文は <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/9783112729496-019/html> で購入可能]

推奨文献

1. 『相対性原理. 論集』, 編集 : A.A.Tyapkin, モスクワ, Atomizdat, 1973.
2. Nelepin E.A. 『相対性と絶対性』, レニングラード, レニングラード高等軍事航海技術学校, 1967.

記号

Δm —試験物体の質量欠損 ; m_0 —試験物体の静止質量 (固有質量) ; E_{pot} —試験物体のポテンシャルエネルギー ; Φ —全重力ポテンシャルの値 ; c —光速 ; h —プランク定数 ; ν_γ —光子の周波数 ; dt, dl —それぞれ, 時間間隔および空間間隔 ; $H_0 (H_1)$ —全重力ポテンシャル $\Phi_0 (\Phi_1)$ を持つ空間領域中に位置する観測者を表す暫定的記号 ; k —全重力ポテンシャルの比 Φ_1/Φ_0 に等しい係数 ; G_0 —「重力定数」の基準値。

用語と定義

- **物体の質量の絶対変化—質量の絶対基準**と比較する方法で決定される, 物体の質量の変化。
- **絶対速度** v_a —特定基準系に対する速度。
- **特定基準系**—世界質量の総体に関する運動学的 [kinematic] 積分の値がゼロの基準系。
- **重力係数** G (これが「重力定数」なのである) —物体の慣性的性質と重力的性質とを結び付ける係数。重力係数は文字通りの意味での「定数」ではない。重力係数は全重力ポテンシャルの関数である。
- **不変量群**—全重力ポテンシャルの値に対して不変な物理単位および物理定数の総体。一般共変性の公準とは異なり, **不変量群**は, 現行の物理法則, 実験的に根拠付けられた原理および公準から論理的に導き出される命題に基づいて形成される。**不変量群**には, 光速 c , プランク定数 h (初期命題は光子一次質量の公準), 電気量および磁気量の単位 (初期命題は電荷保存則) その他いくつかのものが含まれる。**重力係数** G およびこれから派生する全ての量 (いわゆる「プランク基準」を含む) は**不変量群**には属さない。
- **運動学的係数** [kinematic coefficient] k —空間の性質の絶対的異方性を反映する, 絶対速度の関数。無次元量。
- **運動学的全重力ポテンシャル**—特定基準系ではない基準系中における全重力ポテンシャル。
- **運動力学的係数** [kinetic coefficient] n —観測者に対して運動する物体の全質量 (観測される質量) の相対的増大を反映する, 相対速度の関数。無次元量。
- **古典的ドップラー効果**—離散媒質中における振動の伝播時に観測される周波数偏移現象。
- **古典的等価原理**—ある命題の歴史的に確立している (しかし形式的には不正確な) 名称。その命題の本質は, 重力場がその中に存在する物体に及ぼす普遍的影響 (この影響はそれらの物体の質量の本性には依存しない) に関する公理の設定に帰着する。
- **質量理論における質量**—1. 物質*の具現化 [realization] の形態の 1 つ ; 2. 相対的計算における物体に含まれるエネルギーの尺度としての (固有質量), または絶対的計算における物体に含まれるエネルギーの尺度としての, 物質*-質量からなる物体の主要特性の 1 つ。
- **慣性質量 ; 重力質量**—それぞれ, 物体の慣性的性質および重力的性質を決定する, 物体の特性。
- **物体の静止質量**—その質量中心が観測者に対して静止している物体の, 観測者の基準の

質量単位で表される特性。**物体の静止質量**は、物体と観測者の間における全重力ポテンシャルの差の関数である。

- **スケール因子**—絶対的かつ現実的な測定条件下における諸パラメーター（質量，空間間隔および時間間隔）を結び付ける比例係数。
- **メタ銀河**—我々の時空連続体の全ての物質*・質量の総体。
- **物体の観測パラメーター**—観測者の基準に適合する測定単位で観測者系から評価される，物体系中における物体のパラメーター（質量，サイズ）および時間の進行速度。
- **変位**—物体の空間的位置の変化であって，その変化の結果，物体の運動パラメーターが不変に保たれるもの。
- **物体の全質量**（これは「物体の観測される質量」に他ならない）—物体に含まれる全エネルギーの光速の2乗に対する比。**物体の全質量**は，物体の相対速度および物体と観測者の間における全重力ポテンシャルの差の関数である。
- **横ドップラー効果**—運動の縦方向成分成分が存在しない（相対速度の動径成分がゼロに等しい）ときに観測される，観測者の基準系に対して電磁放射源が運動することに起因する，電磁放射の周波数の変化（増大）。横ドップラー効果の存在は，エネルギー/質量保存則の直接的な結果である。
- **ポストニュートン効果**（これは「ポスト古典効果」に他ならない）—亜光速時に発現する効果（**亜光速効果**。これは相対論的理論では「相対論的效果」である），ならびに全重力ポテンシャルの著しい変化という条件下（ここでは**重力係数G**の不変性が出現する）で発現する効果の総体。
- **一般共変性の公準**（これは「一般共変性の原理」に他ならない）—相異なる重力ポテンシャルを持つ相異なる基準系中および空間領域中における例外なしに全ての基本物理量の不変性を公準として定める命題。**質量理論**においては，一般共変性の公準は満たされない。
- **全ての基準系の相等性に関する公準**—それによれば，局所的に行われる実験において，ある基準系が**特定基準系**に対して運動しているか否かを明らかにすることは不可能であるという仮説。特定性の否定は，全ての慣性基準系の相等性の採用を自動的にもたらず。
- **光子一次質量に関する公準**—質量理論の基本命題の1つ。それによれば，任意の有質量物体 [massive object] は，要素的なレベルでは光子の「結合」状態の形で表現することができる。**光子一次質量に関する公準**の論理的延長は，重力作用の普遍性に関する公準（これは古典的等価原理に他ならない）および**不変量群**の構成要素の根拠付けである。
- **特権基準系** [privileged reference frame] —メタ銀河の中心に対して静止している**基準系**。**特権基準系**は自動的に**特定基準系**である。
- **マッハの原理**—変化する「重力背景」の条件下における物体の慣性的性質および重力的性質の可能性に関する E.マッハ [10] の見解の体系を反映した物理学的命題。**マッハの原理**は，世界質量の総体から物体が遠ざかるとき，物体の慣性的性質はその重力的性質と比べて弱化すると思っている [11]。
- **重力効果と運動学的効果の相似原理**—古典的等価原理の一要素。これによれば，**ポストニュートン運動学的効果**は，**スケール因子**に及ぼす影響の性格の点で重力効果に似ている。
- **相対性原理**—**特定基準系**の存在を否定する物理学的命題。
- **因果性原理**—ある事象がそれに先行する全ての事象に影響を及ぼすことは不可能であることを宣言する命題。
- **試験物体**—具体的条件下において，その固有重力場の影響を無視することができる物理的物体。「粒子」，「質点」，「中心天体の衛星」は**試験物体**と意味的に等価である。

- **強重力物体**—理論モデルにおける「試験物体」の対蹠。
- **基準系**—それに属する物体がそれに対して静止状態にある空間座標系。**慣性座標系**—その運動パラメーターがもっぱら固有慣性によって規定されている物体と結び付いている、経時的に不変な空間的方位系。
- **物体の固有質量**—その物体と結び付いている観測者の基準の質量の単位で表現された物体の特性（観測者と物体は重力ポテンシャルによって分離されておらず、同一の基準系に属している）。
- **物体の固有サイズ**—その物体と結び付いている観測者の基準の長さの単位で表現された物体のサイズ（観測者と物体は重力ポテンシャルによって分離されておらず、同一の基準系に属している）。
- **固有時間間隔**—ある基準系に属している時計によって決定された、その基準系中における時間間隔。
- **標準的測定条件**—基準の確認および測定機器の較正のための、事前に取り決められた条件（全重力ポテンシャル Φ の値あるいは重力係数 G の値の部分における条件を含む）。
- **静力学的全重力ポテンシャル**—特定基準系から決定された空間領域のポテンシャル。
- **亜光速粒子**（相対論的理論では「相対論的粒子」）—光速に近い運動速度を持っている粒子。
- **亜光速効果**—光速に近い運動速度での運動時に発現されるパラメーターのスケールの変化。
- **質量理論**—新たなコンセプトに基づく理論であり、そこでは、質量は物質*の具現化 [realization] の形態の1つである；光子は光子-一次質量とみなされる（光子-一次質量に関する公準参照）
- **試験物体の全質量の等方性の条件**—それによれば、運動力学的係数 n はもっぱら観測者に対する物体の速度によって決定され、特定基準系に対する物体および/または観測者の速度には依存しないという物理学的命題。系Bに属する物体の質量が、系Aから観測したとき、 n 倍大きく感知される場合には、系Aに属する物体の質量もまた、系Bから観測したとき、 n 倍大きく感知される。
- **基準の数値**—スケール因子を考慮することなく採用された測定単位での基準の固有値を特徴付けるパラメーター。

発表年月日： 2001年10月9日

掲載サイト： SciTecLibrary.ru [科学技術図書館 <http://sciteclibrary.ru/cgi-bin/public/YaBB.pl>]

〔訳注〕訳文中の「物質*」について

他の欧米諸語と同様、ロシア語には「物質」を意味する複数の単語がある。物理学で主に使われている用語は「**материя** [materia]」と「**вещество** [veshchestvo]」である。本来、この2つの単語の日常的用法における概念は大きく重なっており、両者の違いを文脈から切り離して定義することは事実上不可能である。しかし、ロシアの物理学界ではこれらの用語の使い分けについてある程度の合意が成立しているように思われる（当然のことながら、両者の概念の具体的な内容は論者の立場によって異なる）。

したがって、ロシア語文献からの訳文の理解に混乱を生じさせないためには、両者を訳し分けなければならない。しかし、訳者の知る限り、これらの用語に対応する日本語の物理学用語は「物質」の1語しか存在しないため、異なる用語によって訳し分けることはできない。そこで訳者は、多少煩わしさを感じさせるかもしれないが、「**материя**」は「物質*」、**「вещество」**は単に「物質」と表記することで両者の違いが分かるようにしている。

かなり大まかな括り方をすると、「**материя** (物質*)」は「**вещество** (物質)」の上位概念であり、「**материя** は **вещество** および場などからなる」と言うことができる。おそらく、日常的な語感では、日本語の「物質」から思い浮かぶのは「**вещество**」のほうであろう。

ロシア語版 Wikipedia の記事「**Материя**」は次のように説明している（一部のみ抜粋）。

「**материя** —— 客観的現実, 空間の内容物, 科学および哲学の主要カテゴリーの1つ, 物理学の研究対象。

物理学は、空間と時間（時空）の中に存在する何ものかとしての **материя**（ニュートンに始まる理解——空間は事物の入れ物, 時間は事象の入れ物）、または空間と時間の性質をそれ自体が与える何ものかとしての **материя**（ライブニッツに始まり、後にアインシュタインの一般相対性理論において表現された理解）を記述する。時間の中で様々な形態の **материя** とともに生じる変化が物理的現象をなす。物理学の主な課題は、あれこれの種類の **материя** およびその相互作用の性質を記述することにある。

主な種類の **материя**

現時点では3つの形態の **материя** が存在する。

・ **вещество** —— ハドロン物質, バリオン物質／古典的理解における物質, 反物質／中性子物質／その他の種類の物質／クォークグルーオンプラズマ／仮説上のプレクォーク超高密度物質*形成物

вещество とは異なり、場の内部に空虚はなく、場は絶対的な稠密性を持っている。

- ・ 場（古典的意味での） —— 電磁場, 重力場／量子場
- ・ 物理的本性が不明な物質*の対象物 —— 暗黒物質*, 暗黒エネルギー」