

O. V. ザイツェフ

## マッハの原理と惑星の近日点移動

\*\*\*日本語版について\*\*\*

- \* 本訳書は、O.V. Зайцев «Принцип Маха и орбитальная прецессия планет» 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/2295.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。

## マッハの原理と惑星の近日点移動

UDC 530.12 : 531.51

© O.V. Zaitsev

E.マッハの空間に関するコンセプトの理念に則って物理学的命題を定式化する試みがなされた。提案されている定式化における「マッハの原理」を満たすモデルを用いて、太陽に近い惑星の「ポスト古典的」近日点移動の値が決定された。重力理論のための新たな試験方法が提唱されている。

## 目次

1. 序論 .....	2
2. 「マッハの基準」 .....	4
3. 重力相互作用する物体のエネルギーと質量 .....	5
4. 物体の全ポテンシャルエネルギーと静止エネルギー の物理的意味 .....	7
5. 「マッハの原理」の内容の精緻化について .....	7
6. 計量曲率と「ニュートン」曲率について .....	8
7. 軌道安定性の問題に寄せて .....	11
8. ポスト古典的近日点移動の原因 .....	12
9. 結論 .....	15
文献一覧 .....	17
[訳注] 訳文中の「物質*」について .....	19

## 1. 序論

普通、「進歩」という言葉は、包括的な意味では物的手段（技術的手段、機器）の発達を意味している。結局のところ、技術的側面こそが科学の基盤をなし、情報の蓄積、更新および普及を保障している。

応用科学および高度技術の領域における疑う余地のない成功は、個人の意識の中で、高度の教養が考えられないほどの偏見と葛藤なしに共存することを可能にするような人的因子に対し、影響を及ぼす力を持っていない。[一人の人間の中で]ある方面における並外れた能力が別の方面における完全な無力さと組み合わせられているということは、例外ではなく、むしろ法則である。

基礎科学の発展は人間の脳が産出するアイデアから生まれるが、その脳は、進化の過程で完璧な分析作業のために準備されたものではない。客観的知識の境界は、あらゆる幻想に反し、実験事実および観測事実の限界によって区切られている。それらの限界（基礎科学およびサイエンス・フィクションの排他的領域）の外では、主観的因子が決定的となる。現代的観点の文脈の中で見ると、現実の反映に含まれている矛盾は、おそらく 200 年前、500 年前、あるいは 2000 年前と比べてより少ないというわけではない。

相対論的物理学、重力物理学、宇宙起源論および宇宙論といった基礎科学の応用領域には、超過激な A.アインシュタインの思想が浸透している。彼が現代人や追隨者の知性に与えた影響と比較可能なのは、おそらく、自分と同じほど有能だが成功には至らなかった同

僚たちを凌駕し、自分の思想の地位を「究極の真理」のレベルにまで高めたアリストテレスの影響のみであろう。この比較がどれだけ正しいかの評価は、より情報量の多い我々の子孫によって与えられることであろう。

一般相対性理論として知られているアインシュタインの重力理論は、今日にいたるまで現代物理学において排他的地位を占めている。本論文の範囲内では、我々は一般相対性理論の出発点をなす諸原理、エネルギー・運動量保存および補外法の問題に関する議論は差し控える。これら全ての問題は該当する文献で考察されている。観測データに対する理論の一致という事項にのみ注意を払おう。なぜなら、これが本論文のテーマと直接関連しているからである。

最近まで、一般相対性理論はアクセス可能な条件下における実験的検証に耐えられるとみなされていた：直接的観測により、太陽の重力場中における光線の偏向という部分において、理論の予言が裏付けられた；水星の近日点の「異常」回転成分の計算値もまた、天体観測の結果と満足すべき一致の範囲内にある。その一方で、一般相対性理論の枠内には、重力効果の計算に関する互いに両立しないいくつかの相異なる方法が「共存」していることを強調しなければならない。それらの方法の1つ [1], [2] に基づき、大質量物体による偏光が計算されている。この方法による計算結果は $2\alpha$ （ここで $\alpha$ はニュートン理論によって予言されている偏向角）となる。もう1つの方法 [1], [2] は、一般相対性理論の創出時点に既に知られていた水星の近日点の「異常」回転成分（この成分はS.ニューカムによって1世紀当たり $45''$ と推定された）を記述するために提案された。なぜなら、1番目の方法は観測される重力効果の $1/3$ の部分（すなわち、1世紀当たりわずかに約 $14.3''$ ）しか説明していないからである [3]。2番目の方法は、 $v \rightarrow c$ の極限における粒子の運動の場合としての重力場中における偏光の計算のために容易に適応させることが可能である。しかし、この場合には、その計算結果は主要な方法に基づく計算結果とは食い違っており、光子の偏向角を $4\alpha$ と予言している。

周知のように、一般相対性理論の最終バリエーションは質量の非存在下における平坦計量の要件を含んでいる [4]。これは、E.マッハの理解 [5] との間よりも、ニュートンの「絶対空間」のコンセプトとの間でより大きい度合で合致している。相対性理論の創始者自身はマッハの見解に対する一貫した支持者でも、徹底的な反対者でもなかった。このことは、その著作 [4, 6] における彼の考察が証言している。

「マッハの原理」の概念は、今にいたるまで明確な物理学的定義を与えられていない。その理由の1つとみなすことができるのは、マッハ自身の著作の文体である。彼の個々の言明の（現代の評価基準から見た）曖昧さが注意を引く。そこでは、明確で一義的な判断の代わりに、形式化の対象にはなり得ない着想の輪郭のみが表示されている。マッハの原理に対する極端な見解は次の文言によって表現されている：「…ディラックは、この原理は物理学的に不可解であり、したがってあらゆる真の物理学的知識の範囲外にあり、それゆえ、真面目で責任感のある科学者の武器庫に存在することはできないとみなしている…」 [7]。

おそらくこの理由により、「マッハの原理」という言葉により、次のような全く相異なった理解が意味されていることがある。1) 「…粒子の質量は、他の質量に接近したとき、増大するはずである…」 [8]； 2) 「…宇宙中における物質\*の含有率がより高くなり、その物質\*が試験物体により近い所に位置するほど、慣性力は重力と比べてより強くなる…」 [9]； 3) 「遠方の恒星は、物体の慣性的性質だけでなく、重力的性質をも決定している」 [10]； 4) 「…G場は物体の質量によって完全に決定されている… {マッハの原理は} 私の理解する限り、… $\lambda$ 項を導入することにより、場の方程式に関して満たされるであろう…」 [6]； 5) 「…マッハの原理は、それに対する加速運動について語るができるような絶対空間は存在しないと主張している。…この {マッハの原理を満たすという} 目的

により、物理学的リーマン計量と同時に、平坦“背景”計量を導入しよう」[11]；6)「スカラー・テンソル理論においては、マッハの原理は追加的な $\varphi$ 場を導入することによって“実現”される」[12]。

「マッハの原理」の相異なる、時には相互排他的な定式化を考慮している多数の理論構築は、それに対応して、重力効果の性格に関する相異なる理解も与えている。現実世界に合致する理論がただ1つしか存在し得ないことは、議論の余地がない。

筆者は、マッハの創造遺産における全ての事項を明確化する使命を負うつもりはない。ここで設定されているのは、それとは別の課題である。すなわち、第1段階においては、マッハの研究[5]の理念に則って基準を定式化する。次に、「マッハの原理」を最大限具体的な物理学的命題の形で定義するための論理的根拠を提案する。さらに、その命題に対応する理論的構築物の実験的試験の可能性を示す。

## 2. 「マッハの基準」

E.マッハ[5]は自らの立場を根拠付けるため、I.ニュートン(『自然哲学の数学的諸原理』, 1686)がそれを用いて自らの立場を説明した、1本の糸に付けられた2つの球を用いた思考実験についての検討を継続した。

外部物体の総体<sup>〔訳注〕</sup>によって取り囲まれている2つの球が、それら自体の質量中心の周りに回転しているとしよう。そのとき、球を結び付けている糸は遠心力によってぴんと引っ張られた状態になる。次に、全ての外部物体が消滅したと仮定すると、ニュートンによれば、何も変化しない、つまり、糸は引っ張られた状態を保つ。なぜなら、「絶対空間」に対する回転は維持されているからである。それに対し、マッハによれば、外部質量が消滅すると、糸は弛緩する。なぜなら、球および糸は互いに対して静止した物体であり、一方、それに対する回転が遠心力の出現をもたしているはずのその他の物体は空間中に存在しなくなったからである。

ニュートンは、当時は必要とされていなかった「絶対空間」の本性に関するいかなる追加的仮説も提起しなかった。それとは異なる見解が存在しない状況の下で定式化された「絶対空間」の概念は、その重要性という点で、古典物理学の一連の基礎的公準の1つとなった。

マッハのコンセプトは、それと同時に、空間の本性および本質に関する概念の具体化を前提としている。マッハのコンセプトの理念においては、物質と空間との間の関係は完全に明確な仕方で表現されている：**物質と空間は、切り離しがたく結合した2つの実体** [substance] **である**。この理解によれば、外部物質が消滅したときには、それと結合している空間部分も消滅する。

全ての外部質量の消滅後、ニュートン-マッハの思考実験は、3つの対象(仮説上の無重量の観測者は勘定に入れない)、すなわち、互いに対して静止している1本の糸および2つの球をめぐって続いていく。もし「空間物質\*」が物質\*-質量の一部(成分)であれば、残りの諸物体のうちの各物体の空間成分が他の物体にとっての背景となる。このとき、空間連続体はそれらの物体と同期して回転していることが判明する。あるいは、これはマッハによれば同じことであるが、それらの物体は空間に対して静止する(すなわち、物体の回転は、外部質量の消滅とともに停止する)。つまり、球と球の間の糸の張力はまったく観測されなくなる。すなわち、外部質量の消滅は、それ自らとともに、糸の張力の原因をも除去するのである。

外部質量の消滅をめぐる思考実験上の状況は、こうして、2つの相互排他的な結論を許

〔訳注〕 「外部物体の総体」は、球および糸を取り囲んでいる実験室の物体、さらには地球、太陽系…全宇宙に存在する全ての物体を意味している。

容する。糸の弛緩という結論に対しては、**物質\*質量の成分としての空間実体、空間連続体の一体的本性** [integral nature]，そしてこれからの帰結として、**質量の非存在下における空間の存在の不可能性**，すなわち空間「それ自体」は存在し得ないという、完全に具体的な理解が対応している。

そこではマッハのコンセプトが実際に具現化されている理論は、外部質量の消滅（あるいは外部質量の「無限遠」への除去）という仮説的な場合を予言していることにより、糸の弛緩を持っている。この意味において期待される結論は、それを用いれば理論構築をマッハのコンセプトとの適合性という事項に関して検証することが可能になるような**基準**である。それを**マッハの基準** [Mach's criterion] と呼ぼう。

ある物理理論が、今検討されている思考実験に従って糸の弛緩を予言しているのであれば、それはすなわち、その理論はマッハの基準を満たしているということである。マッハの基準を満たしていない理論には、一般相対性理論も含まれる。

マッハの基準への適合性の十分条件は、空間実体を物質\*質量の成分として認めることである。この基準への適合性は、全重力ポテンシャルの変化という条件下における物体の質量（慣性質量および/または重力質量）の変化とはまったく無関係である。もし外部質量の除去が残りの諸物体の重力質量の減少およびそれらの慣性質量の増加をもたらすということが仮定されていたとしても、この場合においても、遠心力因子の非存在により、糸の弛緩が実現可能な条件であり続ける。

このように、マッハ以前には、**絶対空間**を主張するニュートンのコンセプトしか存在しなかった。有名な著作[5] (1883年に初版発行)に記述されているマッハのコンセプトは、30年間にわたってニュートンのコンセプトの唯一の代替案であり続けた。これらの事情を考慮すると、E.マッハの「物理的不可解さ」や言明の「非具体性」を非難することに根拠があるとは言い難い。

### 3. 重力相互作用する物体のエネルギーと質量

ばねで連結された2つの物体が存在するとしよう。我々がそれらの物体の間隔を広げると、ばねを変形させ、それによってばねに追加的エネルギーを伝達し、それに対応してばねの質量を増大させることになる。その結果は、ばねの質量増大による系(2つの物体プラスばね)の総質量の増大である。

状況を少しだけ変えてみよう。ばねの役割は、大質量物体の相互の重力的引力の役割を果たすことであるとしよう。2つの物体の間隔を広げるとき、我々はエネルギーを消費するが、このことは、エネルギー保存則に従い、必ず系の総質量の増大として発現しなければならない。ただし、ばねそれ自体はここには存在しない。いかなる質量もそれに対して対応しないような種類のエネルギーが存在する可能性があるという仮定は、エネルギー保存則に対する現代的解釈と矛盾する。余剰質量は物体間の空虚な空間全体に何らかの仕方で配分されるという理解は、それとは別の種類の問題の出現をもたらす。空虚な空間には「質量の性質」があると仮定することは、「空虚」それ自体が自分に対して影響を与え、それ自体が自分を引き付け、何らかの慣性を持つことが可能であることを意味することになる。また、物質の非存在下においてさえ、「空虚」の質量が、固有の空間計量(明らかに、非ユークリッド計量!)や「絶対的実体」としての空間のその他の属性を形成する能力を持つことになる。

**注:** 数十年前には、主として電磁相互作用との類推に依拠したいくつかの純粋に理論的な前提が存在していたのに対し、現在では、重力の場合には、我々はそれとは全く別の本性を持った「メカニズム」を持っている。重力子は依然として仮説上の粒子であり続けている。また、重力検出器の設計の巧妙さに体现されているあらゆる

努力にもかかわらず、間接的な徴候を通じてさえ、重力波を記録することにも、重力伝達体を観測することにも成功していない。

エネルギー保存則の枠内に留まる限り、今検討している重力的に連結している物体の例においては、それらの物体の間隔が広がるとき、各物体の質量は増大することを受け入れる以外の選択肢は残されていない。

何らかの物体、例えば重りを地表面（この表面を初期レベルとする）から持ち上げたとき、我々はエネルギー $E$ を消費し、その結果、自分の質量の一部 $\Delta m$ （ここで $\Delta m = E/c^2$ ）を失う。重りの質量が $\Delta m$ だけ増大することがその結果となる。持ち上げられた結果、重りはポテンシャルエネルギー $E_{\text{pot}} = \Delta m c^2$ 、あるいは

$$E_{\text{pot}} = (m - m_0)c^2 \quad (1)$$

を獲得する。ここで $m_0$ は初期レベルに対応する重りの質量； $m$ は重りのポテンシャルエネルギーを考慮した重りの全質量である（ $m = m_0 + \Delta m$ ）。

注：最大限正確に検討する場合には、重りと地球が互いに遠ざかるとき、 $\Delta m$ は重りの質量と地球の質量の間で再配分されることを考慮する必要がある。しかし、それらの質量の違いは膨大であるので、再配分の結果は、 $\Delta m$ の無視し得るほど小さい部分は地球の取り分となる。すなわち、地球が重りから遠ざかった結果における地球の近傍における重力ポテンシャルの変化は、重りが地球から遠ざかったときの重りの近傍における重力ポテンシャルの変化と比べ、きわめて小さい。

定義により、物体のポテンシャルエネルギーは、物体の質量 $m$ に重力ポテンシャルの変化量 $\phi$ を掛けた積、すなわち $E_{\text{pot}} = m\phi$ である。通常は、ポテンシャルエネルギーを持っているのは、ある初期レベルより上方へ持ち上げられた物体のみであると暗黙のうちに理解されている。変化量 $\phi$ を初期レベルの重力ポテンシャル $\phi_0$ および現在レベル [actual level] の重力ポテンシャル $\phi$ を通じて表すと、すなわち、

$$E_{\text{pot}} = m(|\phi_0| - |\phi|) \quad (2)$$

と表すと、 $|\phi| > |\phi_0|$ の場合には、表式(2)は負の値の $E_{\text{pot}}$ を与える。

注：負のポテンシャルエネルギーの意味は原理的には明瞭である：降下させた物体を初期レベルに戻すためには、エネルギーを消費する必要がある。負の値の $E_{\text{pot}}$ に対応する負の質量 $\Delta m$ は、物理的に実在する質量の値に対する補正值であるにすぎず、独立した物理的実体として登場することはできない。

上述した物体の質量変化を考慮に入れた、試験物体のポテンシャルエネルギーに関する表式を見出そう。(1)および(2)より、 $m$ を次のように表そう：

$$m = m_0(c^2/(c^2 - |\phi_0| + |\phi|)). \quad (3)$$

試験物体を全ての重力質量から「無限遠」に遠ざけるために必要なエネルギー（ $|\phi| = 0$ の場合）は、試験物体に作用する力を物体の移動経路全体に沿って積分する方法によって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（関数自体の次数とは無関係に）力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)を簡略化するため、それに対応する「無限大」の条件を利用しよう： $\lim_{|\phi| \rightarrow 0} (c^2/(c^2 - |\phi_0| + |\phi|)) \rightarrow \Gamma$ 。これによ

って等式 $|\phi_0| = c^2$ に到達する。量 $|\phi_0|$ は速度の2乗の次元を持っており、静止した観測者と関連付けられ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)を変換すると次式が得られる：

$$m = m_0 c^2 / |\phi|. \quad (4)$$

(4)によって反映されている、重力ポテンシャルに対する物体の質量 $m$ の依存性は、質量

の絶対的変化という意味を持っている：物体の質量は、重力ポテンシャルの絶対値 $|\Phi|$ の減少とともに、すなわち物体の「上方」への移動時には絶対的に増大し、 $|\Phi|$ の増大とともに、すなわち物体の「下方」への移動時には減少する。(4)を(1)に代入すると、物体のポテンシャルエネルギーに関して次式が得られる。

$$E_{\text{pot}} = m_0(c^2/|\Phi|)(c^2 - |\Phi|). \quad (5)$$

#### 4. 物体の全ポテンシャルエネルギーと静止エネルギーの物理的意味

$E_{\text{pot}}$ が観測者に対してゼロ値を取る初期レベルは、かなり暫定的なものである。初期レベルとみなすことができるのは、静止した観測者の位置に対応するレベルである。試験物体を破断しないロープで観測平面と連結し、物体の「下方」への移動を妨げるそれ以外の全てのものを取り除いた場合には、初期レベルはロープの長さだけ変位していることが直ちに判明するであろう。そのとき、同じ高さまで持ち上げられた、しかし相異なる長さのロープで観測平面と連結されている2つの完全に同様の試験物体は、観測者に対して相異なるポテンシャルエネルギーを持つことになる。2つの物体の初期エネルギー状態は同一であるにもかかわらず、長さがより大きいロープによって制約されている方の物体は、より大きい仕事をする能力を持っている。ここでは、エネルギー保存則との何らかの矛盾が生じているのではないか？

この状況に対しては次のような説明を与えることができる：2つの物体の初期時点における質量が相等しいとき、それらの最終状態は、それらの質量によって相異なったものとなる。このことは(4)および(5)から直接導き出される。物体がより低い所へ降下されるほど（自明のことであるが、より長いロープで繋がれた物体の方がより低い所に位置する）、その物体の質量 $m$ はより小さくなる（全重力ポテンシャルの絶対値 $|\Phi|$ はより大きくなる）。

無限に深いポテンシャル井戸（ $|\Phi| \gg c^2$ ）および好きなだけ長いロープの場合には、表式(4)の項 $c^2/|\Phi|$ はゼロに向かっていく。それに対応して、降下される物体の質量は減少し、物体の降下時に放出されるエネルギーは物体の初期静止エネルギー $E_0$ （ $E_0 = m_0c^2$ ）に向かっていく。

無限大のポテンシャル井戸中への降下時に物体が出力することが可能なエネルギーを全ポテンシャルエネルギーとみなした場合には、静止エネルギー $E_0$ （およびそれに対応する静止質量 $m_0$ ）の物理的意味は次のように表される：物体の静止エネルギーは物体の全ポテンシャルエネルギーの尺度である。

レベルが「より低い」ほど、物体はそのレベルに対してより大きいエネルギーを持つ。しかし、物体の降下の過程で抽出することが可能なエネルギー量は、（無限に深いポテンシャル井戸の底においても）その物体の初期静止エネルギーの大きさによって制限される。

#### 5. 「マッハの原理」の内容の精緻化について

このように、物体の静止質量は全重力ポテンシャル $\Phi$ の関数であり、このとき、物体がより大きい全重力ポテンシャルを持つ領域に移動すると、物体の質量は減少することが我々によって突き止められた。

注：マッハの着想の誇張化・単純化した理解に基づいた、広く流布している意見（例えば [8]）に反して、物体の質量（慣性的性質および重力的性質の尺度としての質量）は、それ以外の全ての質量から「付与された」性質ではない。そのような種類の「相互誘導」（例えば正のフィードバックを持っている系の相互誘導）は、系全体の平衡不安定性を創出するはずである。すなわち、ある1つの物体のそれ以外の質量に対する位置の任意のきわめて微々たる変化が、あるいは総質量

の減少（遠ざかったとき）、またあるいは総質量の無限の増大（諸物体の接近方向への初期変位がこのケースに相当するはずである）のなだれ現象的な過程を引き起こすはずである。

重力係数 $G$ の変化もまた、重力ポテンシャルの変化という条件下における物体の静止質量の変化と直接的に関連している。重力場の強度ベクトルに沿って複数の試験物体と一緒に移動している観測者は、それらの物体の慣性的性質に基づいてそれらの質量の変化に気付くことができない。なぜなら、観測者自身の質量を含め、全ての物体の質量は同等に変化するからである。しかし、質量の変化という現実には、物体間の重力的引力を測定したとき、重力計によって裏付けられる。質量の減少が持つ絶対的性格は、重力係数 $G$ の観測可能な減少をもたらす。論文 [13] <sup>[訳注]</sup>はこの問題の詳細な検討をテーマとしている。

系が世界質量の総体から遠ざかるにつれて、系の慣性的性質との比較において系の重力的性質（系の内部における重力的性質）の強化が認められるであろう。系が世界質量から遠ざかるとき、系の重力的性質との比較において系の慣性的性質が弱体化すると断定することも妥当となる。これら 2 つの言明は原理的に同義であり、マッハの見解 [5] と完全に一致している。

本論文の第 2 節および第 3 節に含まれている、物質\*質量の 2 成分組成（物質成分プラス空間成分）および全重力ポテンシャルの関数としての物体の質量の値に関する相互補完的命題を、有名な、しかし今にいたるまで非一義的に理解されている「マッハの原理」の定義をそれに対して用いることが可能な、統合的概念の 2 つの要素とみなすことが推奨される—この偉大な科学者の学問的功績の承認の印として。

上記のニュートン・マッハの思考実験との関連において、マッハの原理（提案されている解釈によるもの）は、外部質量の消滅時における系の弛緩だけでなく、球の間における重力的引力の何倍もの増大の結果による球同士の急速な接近をも予言している。

## 6. 計量曲率と「ニュートン」曲率について

計量的アプローチの枠内における既存の方法は、計量テンソル $g_{\mu\nu}$ を見出すこと、特に、大質量物体の近傍における連続体曲率を記述する計量成分 $g_{xx}$ （一般相対性理論では $g_{44}$ または $g_{00}$ ）（例えば [14], [15]）を見出すことを見込んでいる。これらの方法の妥当性は疑いの対象とすることができる。なぜなら、それらは、全ての質量から無限遠における空間の計量のガリレイ極限に関する仮定に立脚しているからである。そのような仮定の採用が特異解のクラスの出現をもたらし、それらの解の解釈が原理的に解決不可能なエネルギーのパラドックスおよび因果関係のパラドックス（「ブラックホール」、時間的な逆行運動、等々）をもたらした。このこととの関連において、いかなる仮定も導入することなく連続体計量を見出すことが特別の興味を引く。

新たな定式化におけるマッハの原理（第 5 節参照）は、重力相互作用エネルギーを、相互作用する質量の中に直接的に含まれているエネルギーとして一義的に解釈する。重力実体（それは「質量の空間成分」に他ならない）は、それ自体としては**無質量**であり、それゆえ、エネルギーを持つことができない。重力場中における試験物体の運動を、そのときに落下する物体の全エネルギーが増大する過程とみなすことは、原理的に誤りである。そうみなすことは、重力実体が、自分が持っていない固有エネルギーを物体の加速のために消費することを意味する。エネルギー保存則に忠実に従えば、それとは異なった描像が描かれる。すなわち、自由落下する物体の全エネルギーは変化せず、物体の固有のエネルギー成分（運動力学成分 [kinetic component] およびポテンシャル成分）が物体の初期エネルギー

<sup>[訳注]</sup> 論文 [13] 「重力“定数”か、それとも変化する“重力係数”か」の邦訳が <http://naturalscience.world.coocan.jp/> に掲載されている。

一の範囲内で再配分されるのである。

重力場中における粒子の運動時におけるその軌道の曲がり（いわゆる「重力屈折」）は、2つの因子（古典的な「ニュートン」因子および計量因子）の作用に起因している。これらの各因子の影響は論文[16]で検討されている（[この論文では]「ニュートン」因子は「重力」因子と呼ばれていた）。我々の当面の課題は、提案されている「マッハの原理」の定式化の道筋に沿って一般化を継続することである。

粒子の軌道の曲がりの「ニュートン」因子および計量因子は、両方とも**連続体実体**（連続体実体は宇宙の全質量の連続体成分の重ね合わせの結果である）と関係している。連続体実体の特性は物質の分布によって規定されている。連続体実体の特性には、次のものが含まれる：**a)** 物質\*的物体に属する、観測される連続体実体の量 $\{m^3/s^2\}$ 。これは、数値的には物質\*的物体の観測される（全）質量 $M$ に、観測者が存在している領域の重力係数の値 $G$ を掛けた積に等しい；**b)** 連続体「密度」 $\{m^2/s^2\}$ 。これは、数値的には全重力ポテンシャル $\Phi$ の絶対値に等しい；**c)** 連続体実体の非一様性 $grad|\Phi| \{m/s^2\}$ 。これは、座標系を最適に選択すれば、 $d|\Phi|/dr$ に帰着させることができる；**d)** 連続体曲率 $K \{1/m\}$ または**連続体曲率半径** $R_M = 1/K \{m\}$ 。これは、ユークリッド座標系の諸方向からの空間計量線 [spatial metric lines] の偏向特性である。

時空連続体全体が唯一の物体 $GM$ によって形成されている（言い換えると、宇宙の質量全体が物体 $GM$ 中に集中している）と想像した場合には、空間連続体の曲率は、もっぱらこの物体の物質分布によってのみ決定されることになり、この物体の範囲 $1/r$ を超える値となる。ここで $r$ は、連続体実体の「密度」が $GM/r$ のときにおける、この物体の中心までの距離である。しかし、観測可能な場合において我々に与えられているのは、外部質量（他の全ての大質量物体の質量）の存在下における物体 $GM$ （月、太陽、等々）である。当然のことながら、この場合における物体 $GM$ の表面近傍における空間の曲率は、外部質量が存在しないときの曲率より小さいことが判明するであろう。すなわち、物体 $GM$ の固有の連続体成分は外部質量の連続体実体と混合することになり、それらの外部質量の空間分布は一様に近い分布とみなすことが可能であるからである[16]。このような混合の結果は連続体曲率半径 $R_M$ を通じて表され、次の比例関係から計算される：

連続体密度 …………… 連続体曲率半径

$$\begin{array}{l} GM/r \text{ -----} \rightarrow r \\ |\Phi_0| + GM/r \text{ -----} \rightarrow R_M. \end{array}$$

これより、既に得られた関係式 $|\Phi_0| = c^2$ を考慮すると、次式が得られる：

$$R_M = c^2/g + r. \quad (6)$$

(6)より、物体の近傍における重力場の任意の強度 $g$ のとき、物体の質量 $M$ がどれだけ大きくても、また半径 $r$ がどれだけ小さくても、計量半径 $R_M$ が物体自体の半径 $r$ より小さくなることは決してないということが導き出される。このことは、物体の周囲空間の「自己閉鎖」が生じることは不可能であること（特異状態が生じることは不可能であること）を意味している。

非一様空間中を自由運動する粒子は、絶対的に直線的な座標系によって与えられた初期方向から不可避的に偏向する。それだけでなく、その粒子は、運動の過程で（ホイヘンスの原理との類推に基づいて）連続体媒質の非一様性からの直接的影響を受け、相対「密度」がより大きい方へ追加的に変位する。連続体媒質の密度の尺度は、全重力ポテンシャルの絶対値 $|\Phi|$ である。すなわち、限られた体積中により多くの物質\*が局在化するほど、物体 $GM$ の近傍における密度 $|\Phi|$ はより大きくなり（ $|\Phi| = c_2 + d|\Phi|$ ）、それに対応して連続体密度もより大きくなる。物体 $GM$ に対する外部質量が存在しない場合には、連続体の非一様性はその限界値である $d|\Phi|/dr$ と等しくなる。

ここでは粒子の速度ベクトル $\mathbf{v}$ が連続体密度の勾配ベクトルに対して垂直となっている粒子の軌道区間の場合に話を限定しよう。質量 $m$ の粒子の直線からの偏向は、向心力 $gm = mv^2/R$ の作用下で生じる。この区間上では、粒子は半径 $R_N$ の円の要素に沿って運動する。粒子の軌道の曲がり成分（「ニュートンの」曲がり成分）もまた、次の比例関係から見出すことができる：

$$\begin{aligned} d|\Phi| & \text{-----} \rightarrow dr/mc^2 \\ c^2 + d|\Phi| & \text{-----} \rightarrow R_N mv^2. \end{aligned}$$

これより、 $R_N = (c^2 + d|\Phi|)v^2 dr / c^2 d|\Phi|$ となる。これを簡略化すると次式が得られる：

$$R_N = v^2/g + v^2 r/c^2. \quad (7)$$

ここに見られるように、「ニュートン」因子による粒子の軌道の曲がりの値は速度 $v$ の関数である。光子の軌道は、重力場の力線に対して垂直に運動するとき最小曲率を持つ。この場合（ $v = c$ ）には、表式(7)は次のように書かれる：

$$R_N = c^2/g + r. \quad (8)$$

微視的粒子は静止条件下では存在することができない。任意の巨視的物体は一定の仕方で組織化された微視的粒子の集積体であり、それらの各粒子は絶えず歳差運動しながら、連続体の非一様性の影響を受け、密度がより大きい方へ変位している。その結果、巨視的物体もまた、強度 $\mathbf{g} = \text{grad} |\Phi| \{m/c^2\}$ の力場の場合と同様に、連続体密度がより大きい方へ変位する。

古典的等価原理の実験的に裏付けられている妥当性は、物質\*質量に特徴的な極限的に要素的 [elementary] なレベル（第一質量のレベル）においては、全ての形態の物質\*は同一タイプの粒子からなっており、それらの粒子は値が一定の光速度に等しい瞬間速度で振動しているということ、何分の1かの確からしさで主張することを可能にしている。第一質量のレベルを、それらの結合状態が全ての素粒子の基礎となっている、独特な仕方で相互作用する光子によって表す可能性も排除されない [17]。

表式(6)と(8)の右辺の一致は、曲率の計量因子および「ニュートン」因子の発生が共通の本性を持っていることを指し示していると理解することができる。しかし、「コインの両面」との類推によれば、これらの因子の物理的発現は、類似性の要素とともに、根本的な差異も持っている。表1にはこのことが反映されている。

試験物体は、(6)または(8)によって記述されている2つの半径のうち一方の線に沿ってではなく、測地線に沿って運動する。測地線の曲率半径 $R_G$ は、曲率の2つの因子を考慮する方法で見出される：

$$R_G = R_M R_N / (R_M + R_N). \quad (9)$$

光速度で運動する物体の場合には、 $R_M = R_N$ である。それゆえ、大質量物体のそばを通過する光線は、曲がりの2つの因子のうち一方のみの考慮に基づいて予言される曲げ作用と比べ、2倍の曲げ作用を受けることになる。それに対し、その運動が光速度よりはるかに小さい速度で行われる物体の場合には、「ニュートン」成分が決定的となる。

計量的アプローチの主要なイデオロギー的要素は、計量が一次的なものとされ、重力は計量によって決定されるとされていることである。それにもかかわらず、重力的性質の一次性と計量の二次性、あるいは何らかの第3の要素に関するあれこれの性質の二次性から出発しても、結果はそれと変わらない。理論の形式的部分は、原因と結果を分離する能力を原理的に持っていないのである。まさにそれゆえに、状況を適切に反映し、正しい結論を得るためには、理論のイデオロギーが最も重要な意味を持つ。

空間曲率の原因は、重力の原因と同様に、空間中における非一様な質量分布に起因する連続体の非一様性である。 エネルギーおよび運動量の保存則との合致という見地から見て

満足すべき計量重力理論の構築の試みが不首尾に終わっていること [18] は、空間の計量特性が質量分布との関連から見て二次的なものであることの間接的裏付けとみなすことができる。**物理的作用**を及ぼす性質および**仕事**をする能力を計量曲率に帰する試み（例えば水星の軌道の追加的な回転成分を説明するために）を、正しいと認めることはできない。計量的アプローチの枠内で天体の軌道運動の「異常」を解釈することには原理的な難点があることについては、この先の第8節で述べられる。

表 1

	計量曲率	「ニュートン」曲率
原因	連続体実体の非一様性 $\text{grad }  \Phi $	連続体実体の非一様性 $\text{grad }  \Phi $
物理的本質	ユークリッド座標系の諸方向からの空間計量線の偏向によって表される。	空間計量線からの試験物体の軌道の偏向によって表される。
試験物体の空間的位置に対する影響の特徴	その発現は、軌道の起点と終点の間の空間間隔の範囲内における空間の幾何学的特徴によって決定される。 a) 計量曲率の影響は、試験物体の速度、また試験物体が任意の空間領域中に存在している時間に依存しない。計量曲率は、静止物体との関係においては発現しない。 b) 往復経路全体上における試験物体の変位、または試験物体が閉じた軌道に沿って運動するときにおけるその変位はゼロに等しい（計量曲率の影響は相殺される）。	試験物体の変位は、非一様な空間中に存在している時間の積分関数である。
試験物体のエネルギー成分に対する影響	軌道の曲がりの計量因子は静的である：試験物体の $E_{\text{pot}}$ と $E_{\text{kin}}$ の間の比率は変化しない。	試験物体の軌道の曲がりには、物体の $E_{\text{pot}}$ と $E_{\text{kin}}$ の再配分が伴う。
主観的な感受	困難である。なぜなら、曲がった空間中では、尺度および基準は空間と同じ程度に曲がるからである。外部の標定物を用いれば直接的測定が可能である。	複数の質量間における重力的引力の存在として発現する。

## 7. 軌道安定性の問題に寄せて

中心天体 $GM$ の周りを公転している質量 $m$ の天体で、中心天体との間の重力相互作用の力によってのみ軌道上に留まっている天体は、中心天体の衛星とみなされる。このとき、条件 $m \ll M$ が満たされなければならない。したがって、中心天体の衛星は測地線に沿って運動する。衛星の円軌道に対応する速度 $v_1$ を見出そう。この目的のため、(9)より、 $R_N$ を次のように表そう：

$$R_N = R_G R_M / (R_M - R_G). \quad (10)$$

そして次に、表式(6),(7)および円軌道の条件 $R_G = r$ （ここで $r$ は軌道半径）を用いて、(10)を次の形に導こう：

$$v_1^2/g + v_1^2 r/c^2 = (rc^2 + gr^2)/c^2.$$

これより、 $g = GM/r^2$ を代入して $v_1$ を計算しよう：

$$v_I = (GM/r)^{-1/2}. \quad (11)$$

試験物体の自由落下の結果におけるエネルギー保存の条件より、「脱出」速度 $v_{II}$ （第二宇宙速度）を得よう：

$$GM/r = c^2 \left( (1 - v_{II}^2/c^2)^{-1/2} - 1 \right).$$

これより，次式が得られる：

$$v_{II} = c \left( 1 - (c^2/(c^2 + GM/r))^2 \right)^{1/2}. \quad (12)$$

$v_I$ から $v_{II}$ までの速度範囲が軌道安定性を決定する。外部擾乱要因が衛星に作用したとき，衛星の瞬間速度が変化するが，瞬間速度がその範囲を超え出ない場合には，衛星は中心天体の場から抜け出さず，しかし中心天体に落下することもしない。

重力場が相対的に弱い中心天体（太陽もそのような天体に分類される。なぜなら，太陽の重力ポテンシャルの数値は $c^2$ の値より著しく小さいからである）の場合には， $v_I$ の値と $v_{II}$ の値は約 $\sqrt{2}$ 倍異なっている。これは(11)と(12)の比較から導き出される。それより大きい重力場を生み出している中央天体の場合には， $v_I$ の値と $v_{II}$ の値の相対的差異は低下する。このことは，それらの天体の衛星の軌道安定性の余裕が減少することを示している。表式(11)と(12)の右辺を等式にして，すなわち $v_I$ と $v_{II}$ の相等性という条件を用いて，天体 $GM$ の衛星の安定性の境界に対応する最小軌道半径を決定しよう：

$$r_{\min} \cong GM/0.62c^2. \quad (13)$$

軌道半径が $r_{\min}$ に等しい衛星に対する任意の擾乱的影響は，いかに小さい影響であっても，衛星の運動を同心らせん軌道へ遷移させ，衛星の無限の後退 [遠ざかり]，または中心天体への落下を引き起こす。

その重力ポテンシャルが $0.62c^2$ を超える天体（例えば中性子星がそのような天体である可能性がある）は，原理的に低軌道に衛星を持つことができない。

(13)による限界値 $r_{\min}$ を(11)または(12)に代入することにより，限界軌道速度 $v_{\max}$ を決定しよう： $v_{\max} \cong 0.79c$ 。

## 8. ポスト古典的近日点移動の原因

19世紀後半，U.ルヴェリエ，A.ガイヨ [Aimable Gaillot] および S.ニューカムにより，惑星の相互の影響を考慮に入れた太陽系諸惑星の運動に対する軌道補正が計算された。観測される水星の近日点移動は1世紀あたり約 $570''$ であり，そのうち他の全ての惑星の擾乱的影響によって説明することができたのは $525''$ にすぎなかった。不足している $45''$ を説明するため，いくつかの仮説が提唱された [19]。一般相対性理論の出現後は，A.アインシュタインの仮説が最大の人気を得た。アインシュタインの意見によれば，太陽近傍の空間の曲率が水星の軌道の曲率を増大させ，それによって水星の追加角度 $\varepsilon$ の方向転換を引き起こす [1]。このような説明が破綻していることは，保存則の破れによって明らかとなる。

力学の主要命題から導き出されるように，作用は，それと絶対値が等しい反作用を不可避的に伴う。2つの物体—太陽と金星—の結合系に関する正しい考察は，太陽に対する水星の影響という構成要素を含んでいなければならない。質量の値の大きな違いにより，太陽と水星の共通の質量中心に対する太陽の公転の振幅は，水星より何倍も小さいが，しかし，任意の時点において，各空間次元における運動量を反映している次の関係式が完全に成立するのに十分な大きさを持っている： $MV_x = -mv_x$ ;  $MV_y = -mv_y$ 。ここで $M$ および $m$ は太陽および水星の質量； $V_x, V_y, v_x, v_y$ は，それぞれ，公転面上における直交方向 $x$ および $y$ への太陽および水星の速度ベクトルの射影である。その結果，質量中心に対する水星—

太陽系の総運動量はゼロに保たれる。

アインシュタインの仮説によれば、水星は太陽の周りを周期 $T = 2\pi + \varepsilon$ で公転している。太陽に対する水星の影響が「反作用」として定義されるためには、太陽と水星の運動は相互に逆位相でなければならない（これは二次系に特徴的なことである。今検討されている系はまさに二次系である）。この場合においては、「逆位相」という概念は、位相差 $\pi + \varepsilon/2$ に相当する。この条件が満たされないことは、2つの物体のうち的一方が他方に対して絶対的に遅れるか、または進むことを意味することになる。しかし、この条件が満たされることは物理的に不可能である。

全ての場合において、反対の空間方向の間の角度は、直交方向の間の角度を2倍したものの、すなわち $\pi$ に等しいのだから、 $\pi$ とは異なる任意の位相シフトには、運動量の非相殺成分 $\Delta P_{x(y)} \rightarrow \Delta P_{y(x)}$ の出現が伴わなければならない。その非相殺成分は、周期の1/4の間に、方向 $x$ から方向 $y$ へ「移転」され ( $|\Delta P_x| = mV_x(1 - \cos \varepsilon/2)$ ;  $|\Delta P_y| = mV_y \sin \varepsilon/2$ )、次に、その逆に、方向 $y$ から方向 $x$ へ「移転」される ( $|\Delta P_y| = mV_y(1 - \cos \varepsilon/2)$ ;  $|\Delta P_x| = mV_x \sin \varepsilon/2$ )。このような可能性の実現は、ある方向から別の方向への運動量の「移転」という形での、運動量保存則の永久的な破れをもたらすはずである。そして、全体としては1つの公転周期の間に運動量は不変に保たれるにもかかわらず、軌道の各要素の通過には運動量の局所的非保存が伴うことになる。これは許されない。

非擾乱運動の場合における、任意の空間方向に対する軌道の対称性は、各方向における運動量の保存の結果である。したがって、近日点移動は計量曲率の影響の結果ではあり得ない。

下記においては、新たな定式化におけるマッハの原理（第5節参照）から直接的に導き出される水星の「ポスト古典的」近日点移動に対する、別の説明が与えられる。

任意の大質量物体の空間成分は、その物体の物質成分と分かちがたく結び付いている。それゆえ、物体の任意の運動は、それに対応する空間成分の運動をもたらす。すなわち、物体が自転すると、その物体に属する空間部分 $\varphi$ も運動する ( $|\varphi| = GM/r$ 。ここで $M$ はその物体の質量;  $r$ は質量中心からの距離である。表式(6)の導出のための初期関係式参照)。

空間の静止部分 $\Phi_S$  ( $\Phi_S = c^2 - |\varphi|$ ) は、全ての外部質量の寄与全体によって形成されている。

自転する物体 $M$ の近傍における空間連続体の回転は、成分 $\varphi$ と成分 $\Phi_S$ の混合の結果である。このとき、空間連続体の回転周期 $T_k$ は、回転部分と静止部分の比率を比例的に反映して、物体 $M$ の自転周期 $T_0$ の $(1 + \Phi_S/\varphi)$ 倍であることが判明する：

$$T_k = T_0 r c^2 / GM. \quad (14)$$

回転する空間連続体は物体 $M$ の衛星を自分の運動過程に「引き込み」、それらの衛星の近日点移動をもたらす。

観測されている1世紀当たり $\cong 45''$ の水星の近日点の「異常な」方向転換に対しては、 $T_k \cong 1.1 \cdot 10^9$ 日（地球日）が対応する。これは、(14)によれば、太陽の自転周期 $T_0$ が約28日のときに得られる。 $T_0$ のこのような値は、太陽の自転の性格に関する既存データと完全に一致している：太陽の赤道部分の自転の対構成周期は25.38日であり、極部分のそれは約33日である [20]。

水星の軌道に属する空間領域に対する水星の公転周期が $2\pi$ （他の惑星からの擾乱作用の差し引き後）に等しい状態に保たれているのに対し、追加的角度 $\varepsilon$ は空間全体の方向転換に対応している。すなわち、追加的角度 $\varepsilon$ には、太陽の近傍領域における方向 $x$ および $y$ の方向転換が伴っている。太陽と金星との相互擾乱の間における位相シフトは $\pi$ に等しい状態に保たれている。これは運動量保存則と完全に一致している。

したがって、水星の近日点移動の「異常」成分は、太陽の自転によって引き起こされる

太陽近傍空間の回転によって余すところなく説明される。このとき、惑星の軌道は、空間的方位を決定する暫定座標系とともに歳差運動する。

(14)に従って計算された、太陽の自転により引き起こされる太陽に近い惑星の近日点移動を表2の3列目に示す。表の2列目には、一般相対性理論の方法に基づいたそれらの惑星の軌道のポストニュートンの「異常」の計算結果が示されている。

表2. ポスト古典的近日点移動 (秒角/世紀)

惑星	一般相対性理論による 計算結果	マッハの原理による 計算結果
水星	43 (14.3*)	45
金星	8.4 (2.8*)	24
地球	3.8 (1.3*)	17
火星	1.3 (0.4*)	11
木星	0.06 (0.02*)	3.3

注： \*計算は一般相対性理論の方法 [1] に基づいて行われた。そこでは、惑星の1公転周期当たりの軌道の追加的方向転換角度 $\epsilon$ は、関係式 $\epsilon = 2\pi GM/c^2 a(1 - e^2)$  (ここで $a$ は軌道の半長軸； $e$ は軌道の離心率) によって決定されている。

表から導き出されるように、2つの理論的予言の間の不一致は、惑星の軌道が太陽から遠ざかるにつれて増大している。木星には顕著な離心率 ( $\approx 0.05$ ) が存在すること、また木星に対する他の惑星からの影響が最小である (木星に著しい影響を及ぼしているのは土星のみである) ことを考慮すると、対象の運動の諸成分を研究する上で、木星は最も好都合な対象である。

注： 補足として述べると、空間曲率はそれでもやはり軌道パラメーターに影響を及ぼすことに注目すべきである。質量 $M$ の周囲には計量曲率は存在しないという仮説の場合に対応するのは、軌道高度が同一のとき、相対的に若干小さい軌道速度である。このことは、関係式(11)と、(7)から直接導出される表式 $v_1 = c\sqrt{GM/(rc^2 + GM)}$ との比較から導き出される。水星の場合、計算速度の間の差はわずかに2 m/hである。これは、相対的計算においては1パーセントの100万分の1である。これほどまでに小さい差は、光速と比べて小さい水星の軌道速度 (約48 km/s) に起因している。

何十年間にもわたって一般相対性理論を称賛してきた多数の出版物では、一般相対性理論の「予言」は観測されている水星の近日点の回転と一致していると、一貫して指摘されている。一般相対性理論の出現の15年前、S.ニューカムは水星の軌道の場合の異常成分 ( $\approx 45''$ ) とともに、地球 ( $\approx 11''$ ) および火星 ( $\approx 9''$ ) の軌道の回転の異常成分の存在を示した [21]。観測データに基づく結果は、一般相対性理論に基づく計算結果を何倍も上回っていることが判明した (地球の場合は約3倍、火星の場合は約7倍)。もちろん、アインシュタインがそうしたように [1]、観測データの正確性に対する疑念を利用することができる。しかし、観測精度に悪影響を及ぼす要因 (小さい離心率、大きい軌道周期) とともに、観測品質に好影響を与える要因も挙げることができる。例えば、火星は水星より2倍重く、地球は水星より約20倍 (!) 重く、このことが近く惑星からの軌道擾乱を弱め、観測結果の処理を容易にしている。火星の軌道の離心率は十分に明確である (その離心率が火星より大きいのは水星のみであり、水星と比べると2分の1)。我々の惑星はその座標に関するデータが直接的な方法で決定されているという点でも、さらに好都合である。

一般相対性理論の創出に続く、観測データの処理結果の一般相対性理論の側への無意識的な (それとも意図的な?) ドリフトが、最もカルト的な理論の1つであるこの理論の立

場をさらに強化した。しかし、最も重要なのは、観測結果の擦り合わせの方向へ進む次なる各一步が、それらの結果の作者たちに対し、科学的権威の増大と申し分のないイメージを保証したということである。「理論を裏付けている」結果 [22] がきわめて有意な「重み」を獲得したため、技術的手段が革命的に改善された（現在では、それらの技術的手段は金星や火星の表面までの距離を数十 cm 以下の誤差で決定する性能を持っており、それゆえ、それらの軌道の現在の方角を前例のない精度で評価することを可能にしている）にもかかわらず、[22] の発表後、この領域における研究への関心はほぼゼロのレベルまで低下した。

太陽系諸惑星の近日点移動に関する理論的データと観測データの精細な比較の可能性を現在のレベルの実験・観測基盤に基づいて実現することが可能であり、実現しなければならぬ。既知の現象に対する無矛盾な代替的解釈の出現が、近距離宇宙の研究への薄れつつある関心と呼び覚まし、「天体力学」の課題の正しい解決の探求を刺激する可能性がある。精緻化されたデータが、その帰結として、大規模宇宙構造の運動を支配している諸法則の根本的見直しを持っているかもしれない。

近い将来、その軌道が太陽の子午面中に方位を持っている人工衛星の発射を伴う実験が設定される可能性がある。上記において叙述されている考察によれば、太陽の自転は、人工衛星の軌道面の、太陽の自転と一致する方向における回転をもたらす。予想される軌道の回転周期は(14)によって見出される。一般相対性理論に基づいて予想される人工衛星の軌道面の回転速度は、それより著しく小さく、数桁だけ小さいものとなる（レンゼーティリング効果 [Lense-Thirring effect] [23]）。人工衛星の軌道に関する十分明確な実験を行うとき、我々は追加的なテストを完璧に実現することになる。一般相対性理論が ([1] に示されている関係式によれば) 人工衛星の軌道面中における近日点回転効果の保存を予言しているのに対し、上述したコンセプトの枠内における理解は、そのような効果の発現の可能性を否定している。言うまでもなく、観測データの処理に際しては、他の惑星が人工衛星に及ぼす擾乱的影響を考慮する必要がある。

## 9. 結論

本論文において裏付けられている、「マッハの原理」という統一的名称で呼ばれている命題の総体により： a) 我々の時空連続体の範囲内においては、物質\*の特異状態が生じることは不可能であることが示された（関係式(6)）； b) 水星の近日点の回転の「異常」成分の本性に関する、運動保存則と矛盾しない新たな解釈が提唱された。低ポテンシャル物体（特に太陽）の場合における、重力場中での光子の軌道の曲がりについての（関係式(6)–(9)に基づく）計算結果は、観測結果および一般相対性理論の予言と事実上一致している。

提唱されているマッハの原理の解釈に基づく理解は、観測天文学のその他一連の問題の解決のための新たな道を開いている。「特異状態」という障壁によってその解決策が見えなくなっている一連の問題の中で、クエーサーの問題は決して最後の順位を占めているわけではない [20]。[我々の理解においては、] きわめて大きなパラメーター値  $M/r$  を持つ物体についての「正規の手順による」検討が持っている可能性が、クエーサーの輝線のシフト（少なくともシフトの大部分）は重力的本性を持っていると仮定することを可能にしている。クエーサーの綿密な観測が、恒星座標系に対する一部のクエーサーの位置変化を検出することを可能にするであろう。このこととの関連において、クエーサーまでの距離の [従来より] 何分の 1 も小さい推定値が理論的に許容されるようになり、それに対応して、クエーサーの光度の推定値もより小さくなるであろう。クエーサーの本性に対する見方の再検討は、当然、星や銀河の進化、また初期メタ銀河中における諸過程に関する現在広く受け入れられている理解の一部の修正をもたらすであろう。

こうして、そのそれぞれが独自の支持者たちを持っている多数の誤った信念体系は、唯一の正しい信念体系に到達することになる。本論文の筆者は、今から1世紀以上前にE.マッハによってその基礎が置かれた着想と考察が、時とともに、当然の評価を受けるようになるであろうと確信している。悲しむべきことに、現在君臨しているアカデミー学派の教義体系が別の体系に置き換えられるまでにはさらに少なからぬ時間が経過し、それまでの間、知的ポテンシャルが無意味に浪費されるであろう。

確定された指針と疑わしいコンセプトの全体主義的押し付け、この数十年間における基礎科学のあまりにもわずかな成果、さらにこれら全てに加えて、科学技術分野の知識人の生活条件に関する我々の純粋にロシア的問題、これら全てが相まって、基礎研究に対する関心の急激な低下、そして金銭的利益の見通しがより現実的な領域への頭脳流出を引き起こしている。

これがいかに逆説的に聞こえようと、古典物理学の「最後の波」の代表者たち（運命の気まぐれにより、アインシュタインの天才は長い間彼らの肩の上に立っていた<sup>〔訳注〕</sup>）の着想ともの見方は、フレッシュな科学的思考のきわめて効率的な触媒となる能力を持っている。

---

〔訳注〕 ニュートンの「私がかなたを見渡せたのだとしたら、それは巨人の肩の上に立っていたからです」という有名な言葉を想起されたい。

## 文献一覧

1. Einstein A. 「水星の近日点移動の説明」, 『科学論集』, 全 4 巻, モスクワ, Nauka, 1965, 第 1 巻, pp.349-447.
2. Fock V.A. 『空間, 時間および引力』, モスクワ, 国営物理数学文献出版社, 1961. [著者のフルネームの英訳: Vladimir Aleksandrovich Fock]
3. De Sitter W. Planetary motion and the motion of the moon according to Einstein`s theory // Amst. Proc. - 1916. V.19. P.367.
4. Einstein A. 「宇宙論の諸問題と一般相対性理論」, 『科学論集』, 全 4 巻, モスクワ, Nauka, 1965, 第 1 巻, pp.601-612.
5. Max E. 『力学』, サンクトペテルブルク, 1906 (翻訳) .
6. Einstein A. 「一般相対性理論の主要内容」, 全 4 巻, モスクワ, Nauka, 1965, 第 1 巻, pp.613-615.
7. 『物理学の諸問題: 古典と現代』, 監修: G.-Yu. Treder, モスクワ, Mir, 1982.
8. Thirring W.E. 「重力理論への代替的アプローチ」, 『重力』, 第 2 巻, 第 2 号 (1996), p.50. [著者のフルネーム: Walter Eduard Thirring. 著者の業績については英語版 Wikipedia を参照されたい。]
9. Dicke R. 『重力と宇宙』, モスクワ, Mir, 1982, p.83. [著者のフルネーム: Robert Henry Dicke]
10. Granada Kh.K., Chubykalo A.E. 「マッハの原理と慣性質量と重力質量の等価原理の間の調整」, 『高等教育機関紀要. 物理学』, 1990, No.6, p.11. [英訳論文名: Reconciliation between the Mach principle and the principle of equality of the inertial and gravitational masses, <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01324998>]
11. Anisovich K.V. 「スカラー・テンソル重力理論…」, 『重力』, 第 3 巻, 第 1 号 (1997), p.15. [著者のフルネームの英訳: Kliment Vladislavovich Anisovich]
12. Will C.M. 『重力物理学における理論と実験』, モスクワ, Energoatomizdat, 1985. [著者のフルネーム: Clifford Martin Will]
13. Zaitsev O.V. 「重力 “定数” か, それとも変化する “重力係数” か」, Гравитационная “постоянная” или меняющийся “гравитационный коэффициент” [邦訳あり: <http://naturalscience.world.coocan.jp/>]
14. Pauli W. 『相対性理論』, モスクワ, Nauka, 1991.
15. Landau L.D., Lifshitz E.M. 『場の理論』, モスクワ, Nauka, 1973.
16. Zaitsev O.V. 「一般相対性理論と質量理論の物理学的諸原理」, クラスノダール, 『人間と宇宙』, 1995.
17. 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, 1993.
18. 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. [本書は [http://www1.jinr.ru/Archive/Pepan/1987-v18/v-18-3/pdf\\_obzory/v18p3\\_1.pdf](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 VOL. 03, NO. 09](http://www1.jinr.ru/Archive/Pepan/1987-v18/v-18-3/pdf_obzory/v18p3_1.pdf) で購入可能。]
19. Roseweare N.T. 『水星の近日点. ルヴェリエからアインシュタインまで』, モスクワ, Mir,

1985. [原著名 : Mercury's perihelion. From Le Verrier to Einstein, 1982]
20. Klimishin I.A. 『現代の天文学』, モスクワ, Nauka, 1986. [著者のフルネーム : Ivan Antonovich Klimishin]
21. Newcomb S. // Wash. Astr. Pap., 1898. V.6. P.108. [著者のフルネーム : Simon Newcomb]
22. Whitrow G.J., Morduch G.E. Relativistic theories of gravitation.// Vistas in astronomy. Vol.6. Ed. A. Beer. - New York: Pergamon Press, 1965.  
[<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0083665665900024>]
23. Lense J., Thirring H. // Phys. Ztschr., 1918. Bd.19. S.156.

発表年月日 : 2001 年 10 月 16 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」