

重力の遮閉



小玉 英雄

今では宇宙飛行は決して珍しいものではなく、地球の回りには人工衛星が所狭しと飛び回っている。しかし、宇宙船の打ち上げは未だに化学ロケットに頼っているのが現状であり、大型の宇宙船の打ち上げには膨大な費用と設備が必要である。さらに、最近のスペースシャトルの打ち上げ失敗に代表されるように宇宙飛行はまだ安全とは言えない。このような宇宙飛行の困難の最大の元凶はなんと言っても重力の存在である。したがって、重力を消し去ることさえできればこの困難は一挙に解決するのではとは、だれしも思うことである。しかし、果して重力を消し去ることは可能であろうか。

重力の影響を受けない物質は存在するか

よく知られているように、ニュートンの重力理論に従うと、重力と電気力とはどちらも逆二乗の法則にしたがう：

$$\text{電気力 } \frac{qQ}{r^2} \quad \text{重力 } -G\frac{mM}{r^2}$$

ここで q, Q は二つの物体の電荷、 m, M は二つの物体の質量、 r は物体間の距離である。しかし、この二つの力は現実の世界では大きく異なった現れ方を示す。例えば、人間と地球の間に働く電気力は通常重力に比べて無視できる位小さい。もちろんこれは、電気力が重力に比べて一般に弱いだけでなく我々人間や地球自体の帯びている電荷が小さいことによる。実際、我々の体も地球も総て分解すれば原子核や電子など電荷を帯びた粒子からなっている。これら分解された荷電粒子

間に働く重力と電気力を比較すると、前者は後者に比べて約37桁も小さい。一般には電気力は重力に比べてけた違いに強い力なのである。それにもかかわらず、電気力が日常の生活で余り目だたないのは、電子は負の電荷を、原子核は正の電荷を帯びていて、巨視的な物体はこれら異なった符号を持つ粒子が全電荷がちょうどゼロとなる割合で結合して出来上がっているためである。これは電気力が異符号の電荷間では引力、同符号の電荷間では斥力として働くことによる。すなわち、物体は電気力を自発的に遮閉するわけである。これに対して、通常の粒子の質量は常に正である。したがって、粒子を多く寄せ集めれば寄せ集めるほど質量は大きくなり、強い重力が働くことになる。

以上の電気力と重力の対比から、負の質量を持つ物質が存在すれば重力を消し去ることができるのではないかと思いたくなる。ところが事はそう簡単ではない。これまで質量という言葉が無頓着に使ってきたが、正確には物体の質量には慣性質量と重力質量という二つの質量概念がある。前者 m_i は物体の慣性の大きさを決定するものであり、加速度 a との積が力 f を定義する：

$$m_i a = f$$

一方、後者 m_g は重力場 g のもとで物体に働く重力の強さ f を決定する：

$$f = m_g g$$

すなわち、 m_g はバネばかりで測ることのできる質量で、電気力の場合の電荷に対応している。もし、 m_i が正で m_g が負の物質が存在すれば、このような物質を正の m_g を持つ物質と合わせて全

重力質量をゼロとすることにより、電気力の場合と同様に全く重力の影響を受けない物体が出来上がることになる。ところが、測定をしてみると重力質量と慣性質量は非常に高い精度で一致するという結論が得られる。この関係が常に成り立つとすると、重力場中の運動はその質量の大きさや符号によらないことになる：

$$a=g$$

したがって、どのような物質を寄せ集めようと、重力の影響を受けない物体を作ることはできないという結論が得られる。

等価原理

ところで、上記の $a=g$ という関係式は非常に深い意味合をもっている。この関係式は、これまで a や g を観測するのに使った基準系に対して加速度 g で運動する新たな基準系から物事を見ると $a'=a-g=0$ となり、見かけ上重力が存在しなくなることを表している。ここで、'見かけ上' という言葉を使ったが、局所的には最初の基準系と新たな基準系は対等の関係にある。したがって、重力場の作用は局所的には物事を加速系から眺めるのと同様であるということになる。これは、等価原理と呼ばれ、ニュートンの重力理論を発展させた一般相対性理論の基本原則の一つになっている。例えば、典型的な一般相対論的現象である重力場中で光線が曲がる現象は、直線運動が運動方向と垂直な加速度を持つ系からみると曲線運動に見える現象として、等価原理の立場から定性的に理解することができる。

もちろん、等価原理は重力場の変化する空間的スケールに比べて充分小さな広がりを持つ物体に関するものである。したがって、大きな広がりを持つ物体に対しては見かけ上、等価原理が破れて見えることはありうる。実際、一般相対論に従うと、有限な広がりを持ち自転している物体には、その角運動量に比例した余分な力が働く。しかし、その力の大きさは一般に非常に小さい。例えば地球の中心から r だけ離れた所におかれた δ 程度の広がりを持つ回転物体に働く余分な力は、もっとも大きい場合でも通常のニュートンの重力の強さの δ/r 倍程度しかない。 r が数 1000 km の大

きさであることを考えるとこの補正は無視できるほど小さい。

このように、等価原理が破れない限り、物体に働く重力の作用を消し去ることはできない。それでは、等価原理は絶対的な法則であろうか。これに関して、最近、フィッシュバッハのグループが等価原理を非常に精密に検証した古典的実験であるエトヴェスの実験データを解析し直した結果、重力質量と慣性質量の間に 1/1000 程度の有意なずれが存在することを見つけたと発表して話題になった。このような等価原理の破れを問題にする際に注意しなければならないことは、その破れが、単に電磁力や重力以外の新しい長距離力の存在を意味するのか、それとも重力法則そのものの変更を意味するのかという点である。例えば、 m_0 が m_i のみに依存してはいるが m_i に一致（ないし比例）せず、 m_i の複雑な関数になることが示された場合は、重力法則そのものを変更することが必要となる。一方、 m_0 が m_i 以外の量に依存することが示された場合には、それは単に新たな長距離力が存在することを意味する。フィッシュバッハらの得た結果は、実は後者に相当する。多くの人々の分析の結果、フィッシュバッハらの主張は結局十分な根拠があるものでないということになったが、これを契機として、これまで知られている 4 つの力ないし相互作用である重力、電磁力、強い相互作用、弱い相互作用に加えて、巨視的な有効距離を持つ“第五の力”が存在する可能性が実験、理論の両者から真剣に検討され始めている。もっとも、これまでの実験では、そのような力が存在するとしても重力の 1/1000 程度の強さしかなく、重力を打ち消すのには役立ちそうにない。

負の質量を持つ粒子

このように、等価原理が非常に高い精度で成り立つと考えられている現状では、重力の影響を全く受けない物体を作ることはできそうにない。しかし、負の質量を持つ物質が存在すれば、重力場を有限な領域に渡って消し去ることは原理的には可能である。その考え方は、導体による電場の遮蔽と同じである。良く知られているように、電場

中に中空の導体をおくと導体で囲まれた空洞内では電場はゼロとなる。これは、静電誘導により、導体表面に正と負の電荷が誘起され、それによって外部の電場が打ち消されるためである。これと同じように、もし内部で自由に移動できる正の質量を持つ粒子と負の質量を持つ粒子からなる物質が存在すれば、そのような物質で囲まれた領域内では重力場は完全に打ち消されてしまうことになる。

もっともこれらの議論は、負の質量を持つ物質が存在するとしての話であるが、現実にはこれまで負の質量を持つ安定な物質は見つかっていない。これにはそれなりの理由がある。実際、もし負の質量を持つ安定な物質が存在したとすると自然界は非常に不安定になる。例えば、負の質量を持つ粒子が存在したとすると、全くエネルギーを消費することなく正の質量と負の質量を持つ粒子をどんどん対生成することが可能になる。したがって、自然界に存在する物質の量は不定になってしまう。更に、正の質量と負の質量を持つ粒子の対を考えると非常に奇妙な現象が起きることが分かる。重力の大きさは質量の積に比例するのでこれら2粒子間に働く力は斥力となる。したがって、正の質量を持つ粒子は負の質量を持つ粒子から遠ざかろうとする。ところが、負の質量を持つ粒子は慣性質量が負であるために斥力を受けると

逆に正の質量を持つ粒子の方に加速される。したがって、二つの粒子はどんどん加速されながらイタチごっこを続けることになる。これは一見エネルギー保存則に反するように見えるがそうではない。負の質量を持つ粒子は加速するとどんどん大きな負の運動エネルギーを持つため、正の質量を持つ粒子の運動エネルギーと合わせると全体としてはエネルギーは(粒子間の相互作用エネルギーの変化を別にすれば)変化しない。いずれにしても、世の中はすさまじい速度で飛び回る正負の質量を持つ粒子で満たされたことになる。自然は、このような不安定性を避けるために安定な負の粒子の存在を禁止しているようである。

おわりに

自然界では、エネルギー、慣性、重力は非常に深く結び付いている。アインシュタインの鋭い洞察によって明らかにされたように、この結び付きは重力が実は我々の存在の場である時空自体の構造と密接な関係にあることを意味している。重力の遮閉とはこの密接な関係にほころびを見つけることにほかならない。残念ながら、今までの所自然はそのようなほころびの存在する兆候を見せていない。

(こだま・ひでお, 東京大学・理学部)

数 理 学 6 月 号

特 集

宇宙の創成

“無”からの相転移

¥ 880

宇宙の進化と相転移

量子宇宙論—宇宙はなぜ始まったか

多次元宇宙論

インフレーションモデルの現状

インフレーション宇宙のダイナミックスと密度ゆらぎの形成

宇宙の相転移におけるゆらぎと散逸

相転移とモノポール・ストリング

QCD 相転移. クォーク・ハドロン相転移と宇宙

宇宙の階層構造の形成

佐藤 勝彦

藤井 保憲

和田 純夫

石原 秀樹

小玉 英雄

佐々木 節

阪上 雅昭

伊沢 瑞夫

宮村 修

窪田 窓二

《連載》 パズル⑩年賀用虫食い算・覆面算のパターン 高木 茂男

私のパソコン入門 第3部—① 久慈 要