

第1章

ニュートン力学を支えるガリレオの相対性原理は、絶対静止系という特別な慣性系の存在を仮定する。しかし、マイケルソン-モーリーが行った実験は、光速度が特別な慣性系によらず一定な値であることを明らかにした。

特殊相対性理論への道

1.1 奇跡の年

アルベルト・アインシュタイン (1879 ~ 1955) が特殊相対性理論を発表したのは、1905年のことである。この年は、「奇跡の年」として知られている。アインシュタインが、ブラウン運動、光電効果、そして特殊相対性理論という20世紀の物理学に大きな影響を与えることになる論文を、相次いで発表した年だからだ。奇跡の年から100年後、2005年は、国連によって世界物理年とされ、多くのイベントが国内外で行われた。

ブラウン運動に関する一連の論文は、顕微鏡で観測される水中の花粉のでたらめ(ランダム)な運動が原子・分子の運動によって引き起こされる、ということを解き明かしたものだ。原子の存在の証拠を示すとともに、後に確率過程と呼ばれることになる研究分野を切り開く礎となった。アインシュタインは、同じ1905年に、自身の博士論文としてまとめている。

光電効果の論文は、光がその振動数に比例したエネルギーを持った粒子である、という光量子仮説に基づいて、金属に光を当てると電子が飛び出す現象を説明したものである。これは、20世紀最大の物理革命の1つ、量子力学へと発展していく。アインシュタイン自身は、量子力学の考え方が気に入らず、その根本原理を覆すような仮想の実験(思考実験)を考案

して、量子力学に挑戦を試みているのは興味深い。量子力学の成立に大きな寄与をしたマックス・ボルンにあてて、「神はサイコロを振らない」と書いたことは有名である。アインシュタインは1921年のノーベル物理学賞を受賞しているが、その受賞理由は、「理論物理学への貢献、特に光電効果の法則の発見」である。

しかし、奇跡の年の研究成果として何と言っても有名なのは、特殊相対性理論であろう。長さや時間が伸び縮みするといった不思議な現象の存在を示すこと、また、基本原理から理論的な推論によって積み上げられているその構造の美しさから、物理学者だけでなく広く一般にも知られている。成立から100年以上経ているにもかかわらず、いまだあこがれの対象となっているのだ。

特殊相対性理論は、ニュートンの理論を超えた正しい理論、真の理論と考えている人も多い。しかし、そのように考えることは誤りである。物理学とは、自然をモデル化し、その本質を単純化して数式で表し、理解するという学問である。つまり、適用できる範囲内で十分正確に自然現象を記述できれば、それは「よい理論」なのだ。ニュートン力学は、その意味で、物体の速度が光の速度に近くなければ、十分によりよい理論であった。特殊相対性理論は、物体の速度が光速に近い場合によりよい理論であり、物体の速度が遅い極限ではニュートン力学と一致するのだ。特殊相対性理論もまた、自ずと適応限界がある。例えば、重力が非常に強い場合である。そこで考えられたのが一般相対性理論だが、このことは後の章にゆずろう。

例1.1 モデル化の例：太陽系の運動

太陽系は、中心に巨大な太陽があり、その周りを比較的軽い惑星が回っている。例えば地球の運動を記述するのに、太陽から地球が受ける重力の効果だけを考えるのがモデル化である。また、最も単純なモデル化は、「地球が円軌道を取る」、というものである。このように単純化することで、地球の運動はニュートン力学によって簡単に解ける。万有引力が向心力として働くことで、地球の運動は引き起こされている、という本質はこのことで十分に理解できる。一方、ニュートン力学の正しさを証明するためには、より厳密な観測との一致を見る必要がある。例えば、現実には地球はわずかに楕円軌道を取っている。そのことを考慮し、さらに、最も近く

にある天体である月や、太陽の次に大きな天体である木星などが及ぼす効果を考えに入れていくと、より観測との一致はよくなっていく。本質から精密化へと向かうのは、物理学の発展によく見られる道筋である。□

時として、精密化の結果、どうしても理論モデルの予想と合わなくなることがある。このとき、通常はモデルの方に新しいパラメーターを入れて切り抜ける。しかし場合によっては、モデルを破棄することも必要となる。太陽系のモデルについていえば、天王星の軌道運動がニュートン力学の予想からずれていることから海王星の存在が予想され、また予想された場所に実際に発見されたことは、前者の例である。新しいパラメーターとして海王星を導入し、成功したのだ。しかし、水星の軌道について同様の問題が見つかったときには、ニュートン力学の方をあきらめなければならなかった。このことについては、本書の後半、一般相対性理論のところで詳しく解説する。

1.2 特殊相対性理論前夜：相対性原理

特殊相対性理論は、決して一夜にしてアインシュタインによって「発明」されたものではない。ガリレオの運動学、ニュートンの力学、そしてマクスウェルの電磁気学の上に、特殊相対性理論は花開いたのである。それでは特殊相対性理論で最も重要な2つの基本原理、相対性原理と光速不変の法則について、簡単に歴史をひもといてみよう。

まずは相対性原理である。ニュートンの第1法則、すなわち慣性の法則は、「力が働いていない物体は、等速直線運動をする」、というものだ。この法則は、「誰から見て」等速直線運動なのかを定義しなければ意味をなさない。そこでニュートンは、絶対静止系を導入した。例えば、遠方の星を基準に取れば、静止していると考えることができる。

ここで絶対静止系に対して等速直線運動をしている系を考えてみよう。このとき、力の働いていない物体は、絶対静止系とは異なった速度ではあるが、やはり等速直線運動をするように見える。このような系を慣性系と名付ける。

異なる慣性系であっても、運動の法則が同じになることを相対性原理と

呼ぶ。もう少し正確に言うと、慣性系が異なっても、運動を決める方程式が同じ形を取るということだ。ガリレオは、ニュートン以前にすでにこの考えに到達していた。彼は1632年に発表した著書『天文対話』の中で、船のマストから石を落とす思考実験を考案している。船が止まっていても、動いていても、マストからまっすぐに落とされた石は、同じ場所に落ちる、つまり石の運動は、異なる慣性系であっても同じである、と見抜いているのである。

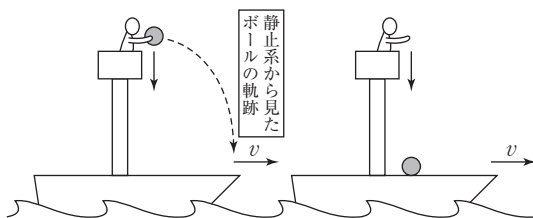


図1.1 船のマストからのボールの落下

今、慣性系 S があり、 (x, y, z) という座標で表されるとしよう。このとき、それに対して x 方向に速度 v で等速運動している別の慣性系 S' を考える。こちらの座標を (x', y', z') とする。両方の慣性系の座標は、時刻 $t = 0$ で一致させておく。すると、 S' 上に固定された x' という点は、 S で見ると、速度 v で動き $x = x' + vt$ と位置を変えていく。一方、 y', z' 、さらに時間は運動によって変化しない。つまり、 S と S' の2つの慣性系の間の変換は

$$x = x' + vt \tag{1.1}$$

$$y = y' \tag{1.2}$$

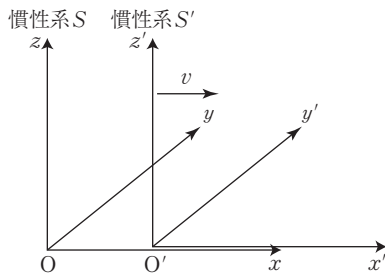


図1.2 2つの慣性系

$$z = z' \quad (1.3)$$

と表される。これをガリレイ変換と呼ぶ。ここで、両方の慣性系で時間は変化しない、という仮定について注意をしておこう。このことは絶対的な時間、というものの存在を暗に認めているのである。

次に、質量 m の物体の運動を2つの慣性系で表してみる。 x 方向に注目してみよう。座標の時間微分を取ると

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx'}{dt} + v \quad (1.4)$$

なので、速度は両方で異なったものとなる。一方、加速度については

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2x'}{dt^2} \equiv a_x \quad (1.5)$$

だから、 S 、 S' のどちらの慣性系でも等しい。なお、 y, z 方向については、同じ座標の値なので、速度、加速度とも等しくなる。結局、運動方程式は、どちらの慣性系でも $\vec{f} = m\vec{a}$ となり、不変である。ニュートンの運動法則は、慣性系によらないのである。これをガリレオの相対性原理と呼ぶ。

例題1.1 y - z 方向に運動する慣性系

上の慣性系 S に対して、 y 方向に v_y 、 z 方向に v_z で等速運動している慣性系 S'' を考える。 S'' での座標を (x'', y'', z'') としたとき、 (x, y, z) との関係を求め、それぞれの系から見た運動する物体の速度や加速度の関係についても求めよ。

解 両者の間の変換は

$$\begin{aligned} x &= x'' \\ y &= y'' + v_y t \\ z &= z'' + v_z t \end{aligned}$$

であり、速度は

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \frac{dx''}{dt} \\ \frac{dy}{dt} &= \frac{dy''}{dt} + v_y \\ \frac{dz}{dt} &= \frac{dz''}{dt} + v_z \end{aligned}$$

となる。互いの加速度はどの方向でも等しくなる。 ■