

アインシュタインの相対性理論

京都産業大学 理学部 宇宙物理・気象学科 二間瀬 敏史

相対性理論とは

天才の代名詞としてアインシュタインの名前はほとんどの人が知っていると思います。アインシュタインが相対性理論をつくったことも知っているでしょう。実はアインシュタインは相対性理論以外にも多くの理論をつくっていますが、中でも相対性理論が有名なのは、それがそれまでの常識とはかけはなれた不思議で壮大な理論だからです。あまりに壮大すぎてすぐには認められませんでした。今では相対性理論がなければ宇宙は理解できないこと、そして私たちの身近なところでも関わりがあることが知られています。

相対性理論を一言でいえば、時間と空間を扱う理論です。この理論が現れる以前、時間とか空間はそもそも考える対象ではありませんでした。地球が存在する前から、もつといえば何も存在しなくても無限の過去から空間は存在していると思っていました。それで何の不都合もなかったのです。ところが19世紀末からこの考えにほころびが見えてきたのです。このほころびを端的に表す問いがあります。アインシュタインは高校生のとき、「光の速度で走っている人が、同じ方向に進む光を見たらどう見えるだろう？」という疑問を持ったのです。

当時すでに光というのは電気と磁気(正確には電場と磁場)が交互に振動しながら進む現象であることが分かっていました。その振動がなければ光は進みません。一方で光の速度で光を見たら光は止まって見えるはずですが、光が止まるということは電気と磁気の振動も消えるということです。光はそれを観測する人に無関係に存在しているはずですから、見る人によって振動が起こったり起こらなかったりするはずはありません。高校生のアインシュタインはこの疑問に答えることはできませんでしたが、ずつと心の中に残ったはずですが、そして26歳のときついにこの問いの答えを見つけます。それが特殊相対性理論です。

この理論は光の速さは光源の速度や観測者の速度に関係なく常に同じ速度にな

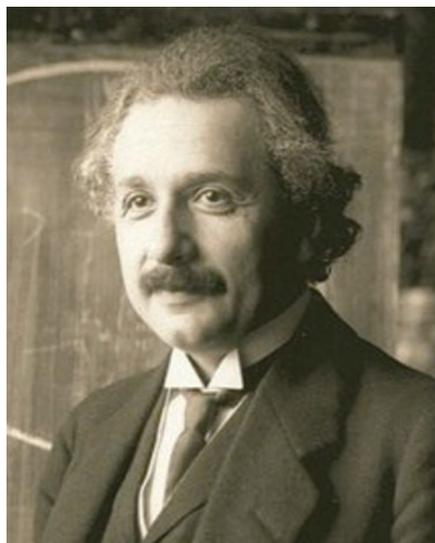
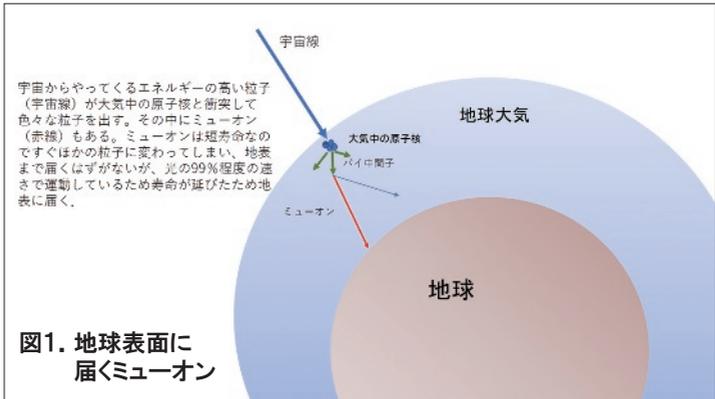


写真1. アルバート・アインシュタイン

ることを大前提としています。それは実際にそのことを示す実験があったからです。にもかかわらずアインシュタイン以外の物理学者はその実験結果を素直に受け取りませんでした。なぜならもしそれを受け入れると、光速度で走っている人が光を見ると光は光速度で進んでいるように見える、すなわち光速度を c と書くと $c-c=c$ という馬鹿げた結果になるからです。日常経験では速度 V で動いている列車を同じ速さの車で追いかけると、車から見て列車は止まっているように見えます。 $V-V=0$ ということです。アインシュタインは光の速さは特別なものだと考えたのです。そしてどんな運動をしている人が測っても光の速さが同じになるとして、その帰結を考えました。そしてたどり着いた答えが、「速度」はある時間間隔の間に進んだ距離(空間間隔)なので、誰が測っても光速度が同じ値になるように、運動状態によって時間の進みと空間の尺度が違っているという考えでした。これが特殊相対性理論の根本的な考えです。

運動している時計Aは静止している時計Bにくらべてゆっくり進みます。立場をかえて運動している時計Aから見ると運動しているのは時計Bです。したがって時計Aから見ると時計Bはゆっくり進みます。運動はあくまで相対的なものです。時間の進みも相対的なので相対性理論というのです。実際に走っている時計がゆっくり進む現象が観測されています。宇宙から地球にいろいろな粒子が飛んできますが、大気にぶつかるとうミューオンという素粒子を発生することがあります。ミューオンは約百万分の2秒という短い時間で電子に変わります。したがってミューオンが光速度に近い速度で進むとミューオンは約600メートル進んで消えてしまいます。高度何十キロという上空でできたミューオンは地球表面まで届くはずはありません。ところが実際に観測しているとミューオンがたくさん見つかるのです。その理由はミューオンの時間はゆっくり進んでいるからです。百万分の2秒というミューオンの寿命は、ミューオンが止まっているときに測った時間です。この時間に対して上空で発生するミューオンは高速で運動しているので時間が伸びて地表面まで生き残るのです。では運動しているミューオンから

みたらどうでしょう。ミューオンにとっては地球の方が猛烈な速度で迫ってきます。したがってミューオンはあっという間に電子になってしまうでしょう。なぜ地表面に届いたのでしょ



う。それは地球の大気の厚さが縮んだのです。動いている物体はその運動方向に長さが縮むのです。ミュオンにとって時間は普通に進みますが、(ミュオンにとって)運動している大気の方が縮んで地表面までの距離が短くなったのです。このように時間と空間は表裏一体のもので時間だけ、あるいは空間だけが単独で存在するものではないのです。そこで運動する速度の違いによって無数に時間と空間が存在すると考えるよりは、4方向の広がりをもった1つの4次元時空が存在して、その時空の中で時間方向と空間方向のとり方が運動状態によって違っていると考えるほうがよいのです。この4次元時空を思いついたのはミンコフスキーというアインシュタインの大学時代の数学の先生です。ミンコフスキーは相対性理論をつくったのがアインシュタインだと知って、「あの怠け者が？」といったそうです。大学時代のアインシュタインがどのように思われていたかがよくわかる話です。もちろんアインシュタインはただ怠けていただけではありません。興味のない授業には出ないかわりに興味のあることを猛勉強していたのです。

特殊相対性理論から一般相対性理論へ

特殊相対性理論をつくってもアインシュタインはなかなか認められず大学に就職できたのは30歳の時でした。当時働いていたチューリッヒにある特許局の上司に退職届を出したとき、上司は心配して「退職してこのさきどうするの？」ときいたそうです。「大学の先生になります」と答えたアインシュタインに上司は顔を真っ赤にして「冗談を言うのもほどほどにしる！」と怒ったといいます。上司の目からみるとアインシュタインは適当に仕事をしている「怠け者」とうつっていたのです。

大学の先生になって数年間、アインシュタインは悩みに悩んでいました。重力の新しい理論をつくろうとしていたのです。重力の法則は17世紀にニュートンが発見して、そのままになっていました。ニュートンの法則によると重力は一瞬で無限のかなたまで伝わります。たとえば仮に太陽がある瞬間に消えると、その影響は瞬時に太陽系のすべての天体に同時に伝わります。一方、特殊相対性理論では光よりも速く伝わる現象はありません。そこで重力の影響が光速で伝わるようにニュートン理論を改良して新しい重力理論をつくろうと、特殊相対性理論をつくった直後から心血を注いで挑戦していたのです。チューリッヒの特許局で「怠け者」だったのも、そのせいです。そして10年の試行錯誤の末1915年に新たな重力理論を完成することができました。それが一般相対性理論です。この理論は特殊相対性理論を前提としていましたが、さらに革命的なものでした。

一般相対性理論への第一歩はまだチューリッヒの特許局にいたときのことでした。1907年、「生涯で最も素晴らしいアイデア」と自身が回顧したアイデアがひらめいたのです。それは「落下する人は重力を感じない」ということです。現在の私たちにとってこれは不思議なことではありません。宇宙ステーションで宇宙飛行士が無重力で

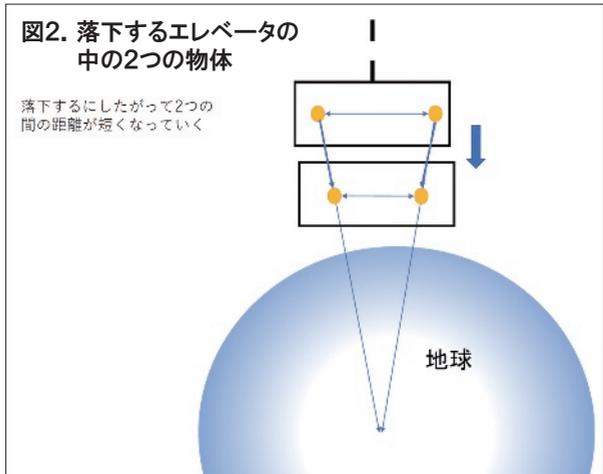
漂っている映像はおなじみです。これは宇宙ステーションが、地球の重力が届かないほど地球から離れているからではありません。宇宙ステーションの高度はたった地上400キロメートルです。重力は地表面より数%弱いだけです。宇宙ステーションが地球に落下しているのです、その中で無重力状態が実現されているのです。まっすぐ進みながら常に地球に落下しているのです。地球の周りをまわっていられるのです。落下していると宇宙ステーション自身も宇宙飛行士を含めてその中のすべてのものが同じように(同じ加速度で)落下しています。宇宙飛行士にとってみると周りのものすべてが止まっているのです。手からリンゴを離してもリンゴは手を離れた位置で止まっています。重力は消えたのです。このことは400年以上も前にガリレオが気づいています。ピサの斜塔から鉄の玉と木の玉を落として地面に同時につくことを確かめたという伝説が残っています。それから400年後、アインシュタインが初めてその本当の意味に気がついたのです。

空間は曲がっている

落下運動というのは徐々に落下速度が速くなっていく加速度運動です。加速度運動をすれば重力が消えるのです。逆に考えると重力がないところでも加速度運動をすれば重力をつくることができるということです。これはエレベータにのると経験できます。エレベータが上に上がり始めるときわずかに下に押されるような感じを受けます。エレベータの上に上がる加速度によってエレベータの中の人は下向きの力を感じるのです。では重力は運動状態によってできた見かけの力なのでしょうか？ そうではないとアインシュタインは考えました。落下運動をもう少し慎重に考えてみましょう。仮に地球からはるかに離れた場所から地球の重力にひかれて落下する2つの物体を考えます。2つの物体は少し離れていて、たがいに光をやり取りしてお互いの位置を正確に記録できるとします。すると落下していくにつれてお互いの距離が近づいています。これは2つの物体に働く重力が地球中心に向っているので落下方向がわずかに違っているからです。アインシュタインはこの運動を決して消すことができない重力の本性と考えたのです。そしてこの運動は物体が鉄であろうがピンポン玉であろうが全く同じで

図2. 落下するエレベータの中の2つの物体

落下するにしたがって2つの間の距離が短くなっていく



す。したがって物体間に働く力というよりも、その場所の空間が持っている性質とみなすほうが自然だとアインシュタインは考えたのです。これはちょうど地球の赤道上から北極に向けてまっすぐに飛び立ったジェット機が北上するにつれてだんだん近づいてくるようなものです。近づく理由は地球表面が平らでなく丸いからです。こう考えてアインシュタインは重力が存在すると空間は曲がると考えたのです。一方、特殊相対性理論では空間と時間は別々に考えることはできません。したがって空間が曲がると時間の進み方にも影響が現れます。要するに重力とは時空の曲がりであるとアインシュタインは考えたのです。後は時空の曲がりを決める方程式を発見することです。生涯最良のアイデアから時空の曲がりという考えに達するには、それほど時間がかかりませんでした。この方程式を発見するにはリーマン幾何学という当時最先端の数学が必要で、数年を費やしてようやくたどりつきました。この方程式はアインシュタイン方程式と呼ばれています。

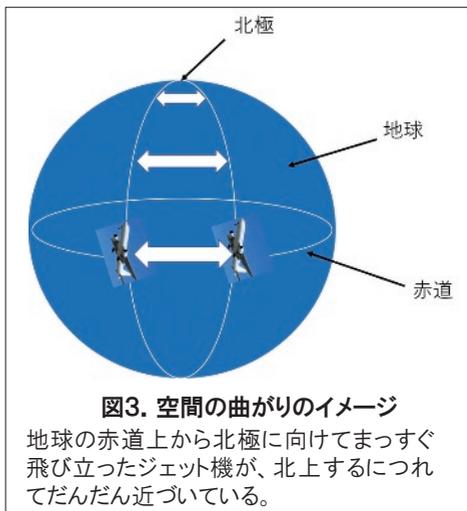


図3. 空間の曲がりのイメージ

地球の赤道上から北極に向けてまっすぐに飛び立ったジェット機が、北上するにつれてだんだん近づいている。

一般相対性理論が予言するブラックホールと重力波

アインシュタイン方程式によって天体の周りでどのように時空が曲がるかを計算することができます。また物体が運動すると周りの時空が振動して、その振動が遠くに伝わっていく重力波と呼ばれる現象が存在することが分かりました。また天体が回転すると、その周りの空間が天体の回転に引きずられるように回ることも分かりました。時空そのものが運動することができるのです。それが極端な形で現れたのがブラックホールです。天体の周りの時空は、ちょうどゴムの膜に物を置くと凹むように曲がっていきます。天体が小さくて重たいほど周りの時空はまるで下りのエスカレータのように引きずり込まれてどんどん曲がっていきます。天体の表面から外向きにでた光は、下りのエスカレータを登っていくような状況になります。そしてついには外向きに出た光がその位置で止まることが起こります。その場所から出た光は決して外に進むことはできません。光よりも速いものは存在しないので、その場所を通過した物体は二度と戻ることができなくなります。こういう状態が実現している天体がブラックホールです。ブラックホールの中では時空そのものが光速以上で際限なく落下しているので最後には特異点と呼ばれる一般相対性理論が扱うことができない時空という概念自体すら意味を失う状況が実現します。実際に宇宙でこんなことが起こるということを数学的

に証明したのがペンローズ博士です。この功績でペンローズ博士は、2020年度のノーベル物理学賞を受賞しました。同時に受賞したのは私たちの銀河系の中心に太陽の質量の約400万倍という巨大なブラックホールが存在するという観測をした2人の天文学者です。また2015年には約13億光年彼方で質量が太陽の30倍程度の2つのブラックホールが衝突して合体した際に放射された重力波がアメリカの重力波検出器で検出され、大きな話題となりました。

このように一般相対性理論は宇宙で起こっている様々な現象の解明になくてはならない重要な理論ですが、私たちの身近なところにも使われています。カーナビは2万キロメートル上空で地球を周回している衛星からの信号をもとに現在地が決められています。このとき衛星から放出された電波信号の時刻とカーナビが受信した時刻の差から距離を求めるという作業が行われているのです。いくつかの衛星からの距離を正確に知ることによって場所の特定ができるのですが、正確な時刻を知るために衛星には原子時計が搭載されています。ここで問題なのは、地上の時間の進み方と衛星での時間の進み方が違うということです。この違いは2つの原因があり、衛星が地上に対して秒速4キロメートルで運動していることからくる時間の遅れ（特殊相対性理論の効果）と、衛星が高度2万キロメートルにあるために地表よりも重力が弱いことからくる時間の進み（一般相対性理論の効果）です。この時間の進み方の違いを補正しなければ、1日当たり11キロメートルほどの距離のずれが起きることになります。カーナビが私たちを目的地に連れて行ってくれるのは、特殊相対性理論と一般相対性理論のおかげなのです。

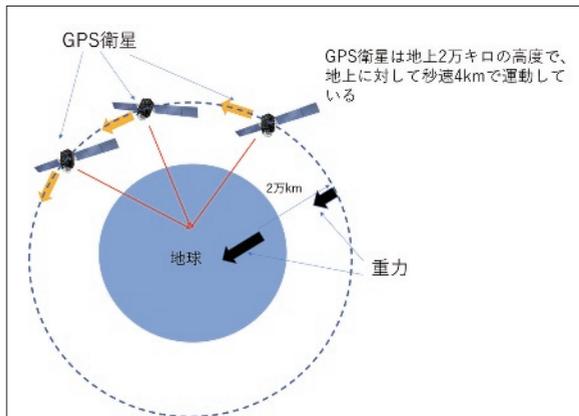


図4. GPS衛星には相対性理論が考慮されている

著者紹介 二間瀬 敏史(ふたませ としふみ)



1953年、札幌市生まれ。1972年、京都大学理学部卒業。ウェールズ大学カーディフ校応用数学天文学部博士課程修了。マックス・プランク天体物理学研究所研究員、ワシントン大学物理学部研究員などを経て弘前大学理学部助教授、東北大学大学院理学研究科教授に。2016年から京都産業大学理学部宇宙物理学気象学科教授。東北大学名誉教授。