



隣のブラックホール【1】

ブラックホールの前口上

福江 純（大阪教育大学）

1-1. ブラックホールの前口上

本連載では、サルにもわかるブラックホールを目標に、相対論の初歩からブラックホールの真髄まで、ブラックホール物理学を概観したいと考えている。長年の間にためた講義ノートや講演素材をまとめたもので、全部連載して本にすると優に2冊分の分量があるので一実際、2冊分になる予定で、その点では期間限定商品（笑）だが、基礎的な部分だけでも纏めて紹介したい。

さて、ご存じの通り、新しい編集部は6月末になって急遽決まった上に、編集方針も大幅に変更したので、9月号の記事は十分には集まらないことが予想された。そこで、今月号は3回分を用意することにしたが、ご祝儀相場と思っていただけれどありがたい。

では、まずはブラックホールの前口上から聞いていただこう。

++++++

吾輩はブラックホールである（図1・1）。ブラックは黒、ホールは穴だから、黒い穴という意味だが、“黒穴”では何とも気分が落ち

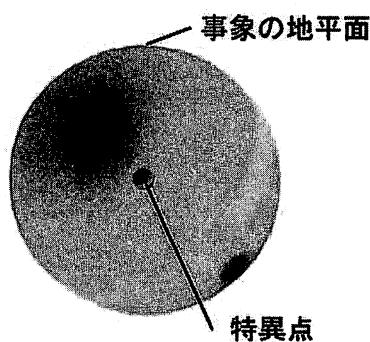


図1・1 ブラックホールのご尊顔

着かない。考えてみると、“黒”はともかくも、“穴”がいかんようだ。吾輩を“黑洞”と呼ぶ国もあるそうだが、“黒虚”とか“黒裂”ぐらいならまだましだったかもしれない。もっともブラックホールという名前は、たんに宇宙に浮かぶ小石に住む二本足共が付けた名で、真名（まな）ではない。吾輩は吾輩だ。

吾輩は宇宙の王である。吾輩はこの宇宙に活を入れている。この宇宙で起こる激しい活動は、すべてとは言わぬが、そのかなりの部分を吾輩が引き起こしているのだ。しかるに、ほんの須叟（しゅゆ）の過去に現れた小さかしい二本足共は、宇宙の王者である吾輩を、こともあろうに＜悪者＞呼ばわりする。曰く、“ブラックホールのように吸い込む”。曰く、“ブラックホールみたいなヤツだ”。とんでもない言いがかりである。たしかに星を食らうことはあるが、愚かにも吾輩の傍まで近づいてきた星だけだ。吾輩はあらゆるもの破壊し食らう力をもってはいるが、動き回ってその力を振り回すわけではなく、ふだんは鎮座しているのだ。だから、吾輩の縄張りに入ってきた方が悪い。吾輩にかなうものはいないのだから、いわば自業自得である。しかも慈悲深い吾輩は、吾輩の縄張りに入ってきた愚かなエサ共の一部をエネルギーに変えてやり、宇宙のために役に立たせてやっているのだ。吾輩は、悪者どころか、世の中に活を入れているという点では、むしろ善き存在だといえる。宇宙におけるエネルギーの源なのである。

1) 容姿体格

吾輩の体格は宇宙の横綱クラスである。吾

吾輩の体は丸い。なぜだか丸い。本当に丸い。身長も腰幅も同じだ(図1・2)。相撲取りでいえばアンコ型というやつだろう。しかも体重はかなりのものだ。相当重い。といつても、実は正確な体重は知らぬ。あまりに重過ぎて、吾輩の体重を量る秤がないからだ。しかしおおざっぱな体重は知っている。家系によっても違うのだが、吾輩の仲間では、軽いヤツでも、太陽の10倍ぐらいの体重がある。巨人の家系では、重いヤツになると、なんと太陽の1億倍もの体重をもつとんでもないやつもいる。もちろん軽いヤツは背も低く、重いヤツは背も高い。太陽の10倍ぐらいのヤツは、身長は60kmぐらいだが、太陽の1億倍も体重があるヤツは、太陽と地球の間の距離ぐらいの身長がある。10億トンほどで、小惑星ぐらいの、すごく軽いヤツもいるそうだが、まだ会ったことはない。そうそう、二本足共は、軽いヤツを「恒星ブラックホール」と、重いヤツを「銀河ブラックホール」とか「超大質量(超巨大)ブラックホール」と呼んでいるようだ。またすごく軽いヤツは「ミニブラックホール」とか「マイクロブラックホール」と呼んでいるらしい。どれも長く芸のない名前だ。太陽の10倍の家系は“十黒”、1万倍なら“万黒”、1億倍なら“億黒”とでもすれば、より引き締まった名前になろう。

吾輩には目も耳も鼻も口もない。ノッペラボーだ。いや、口はある。顔中、体中、これすべて口である。そして無限の胃袋ももっている。しかし、にもかかわらず、吾輩は宇宙一の美男子である。いやいや、吾輩に性別はないので、宇宙一の美女といつてもよい。吾輩の体は、頭も胴体も手足の区別もない。おまけにノッペラボーで、すべて口ときては、容姿をあれこれ言えないと思うかも知れぬ。ふふん、浅薄なる生物の基準では吾輩の容姿

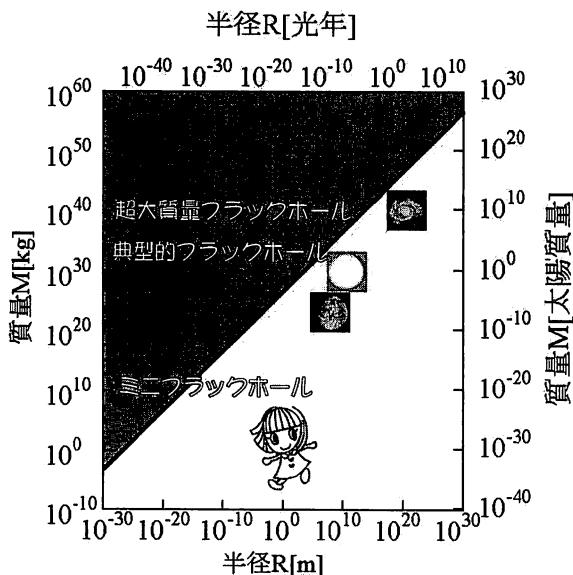


図1・2 ブラックホールの身長と体重の関係：
身長と体重は比例している。

は量れないだろう。しかしそう考えてみよ。丸いことは、それ自体が美しいのだ。宇宙に存在するものも、みな丸いではないか。しかも二本足共の住まう地球という惑星や、熱いガスの塊に過ぎない太陽や、その他の丸い星々に比べ、吾輩は真の球である。これぞ、完全なる姿、究極の美なのだ。

2) 住居生活

吾輩の住処(じゅうきょ)は宇宙である。宇宙空間である。吾輩は宇宙の間に棲んでいる。実際、吾輩は宇宙のどこででも暮らせるが、まったく場所を選ばないわけではない。生まれや餌場の関係で、それなりのテリトリーがある。具体的には、太陽の10倍ぐらいの体重の恒星ブラックホール(図1・3)は、銀河のどこにでもいるが、太陽の1万倍とか1億倍もの体重をもつ銀河ブラックホールは、星の密集した銀河の中心に棲んでいる(図1・4)。

吾輩は何でも食す。好き嫌いはない。小は、素粒子、宇宙線、水素ガス、砂粒、生き物、惑

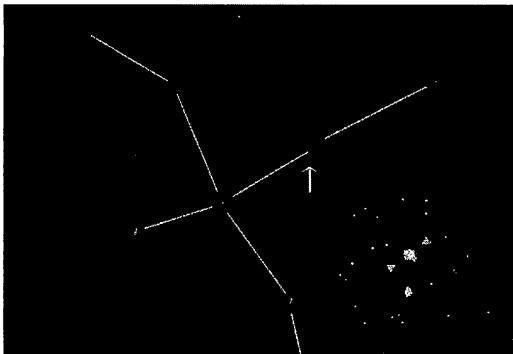


図1・3 ブラックホール はくちょう座X-1
(著者十大阪教育大学)

星から、大は、星や星間雲にいたるまで、何でも食す。物質だけでなく、熱エネルギー、光エネルギー、運動エネルギー、磁力線、などなど、非物質のモノでさえ、食す。そして食したモノはすべて、吾輩の体重になる。もともと質量を有していた物質はもちろん、質量のないエネルギーでさえ、体重に変換する。エサが少なければ少ないなりに、多ければ多いなりに、吾輩のまわりのエサを喰っていく。もっとも、いくら吾輩の体がすべて口だといっても、身長つまり体の大きさは有限なので、エサを喰える割合には制限がある。時間さえあればすべて食い尽くせるが、一時に喰える量には限りがあるので。あまりに大量のエサが落ちてきて、一時に喰いきれないときには、エサの一部を吐き出することもある。いわばゲップだが、口に入れる前に吐き出すのだから、吹き飛ばすというべきかもしれない。吾輩が吹き飛ばしたエサは、きれいな二本のジェットとして、宇宙における吾輩の存在を誇示することもある。

3) 家族親戚

吾輩にも親兄弟はいる。宇宙の王であるとはいえ、王も木の股から生まれたわけではない。吾輩にも親はいるのだ。吾輩の親は、星、である。ただし、太陽のような星ではなく、太陽よりも重い、太陽の数十倍の質量の星だ。

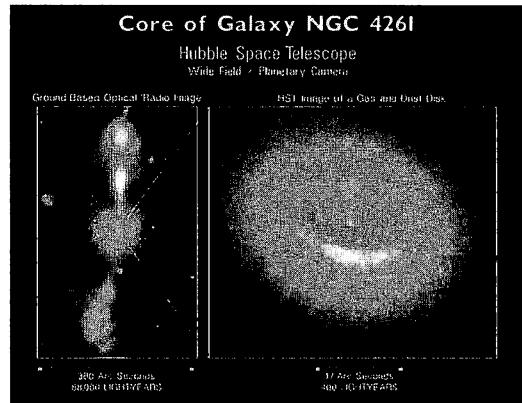


図1・4 活動銀河 NGC4261 中心部とジェット
(ハッブル望遠鏡)

そんな重い星が、自分を燃やし尽くし、超新星として壮絶な死を遂げた後、その灰の中から吾輩たちは生まれるのである。吾輩は、超新星の清浄な炎のなかから生まれたのだ。鳳凰・不死鳥・フェニックス、何と呼んでもよいが、もともと高貴な血筋なのである。ただし、巨人の家系である銀河（超巨大）ブラックホールの家系はそう単純ではない。恒星ブラックホールとして生まれ、だんだん超え太ったのもいるし、スライムが合体してキングスライムになるように、ブラックホール同士が合体して巨大になったものもいるからだ。

4) 結婚人生

意外かもしれないが、吾輩たちも結婚することはある。たしかに性別はないと言ったが、結婚が異性間だけだというのは偏見に過ぎる。雌雄性別がなくても結婚はできるのだ。吾輩たちが宇宙を彷徨っていると、まれにだが、他の同胞と出会うこともある。お見合いの結果、お互いが気に入れば、上手に近づいてお互いのまわりを回りあうようになるのだ。このように、伴侶が得られたときは、吾輩は嬉しくて、まわりの時空を振り動かすほどの雄たけびをあげるのである。さらにパートナー同士は、お互いのまわりを回っているだけではガマンできずに、時空に漣（さざな

み)を発しながら、遠からず合体して一つになってしまう。吾輩たちが合体した時は、宇宙に時空震を引き起こし、はるか宇宙の彼方においても、それを知ることができるだろう。しかもいったん合体したら決して別れることはない。離婚はあり得ないのだ。巨人の銀河ブラックホールは、何億回も結婚合体を繰り返した家系かもしれません。

吾輩の寿命はほとんど無限である。吾輩たちは宇宙のはるかな太古にもいたし、はるかな未来にもいる。永遠に輝くように思える星々が消えた後も、吾輩たちは生き残るだろう。宇宙そのものより長生きかも知れぬ。量子の気まぐれのために、吾輩の体表からはほんの僅かにエネルギーが蒸発しているが、その割合は非常に小さいので、吾輩はほとんど無限に生きる。吾輩こそは宇宙を統べる真の王なのだ。

5) 趣味希望

最後になったが、・・・

吾輩には趣味といえるものはない。というか、吾輩は忙しく、趣味道楽にウツツを抜かしているヒマなぞないのである。宇宙の王は傍目ほど楽な職業ではないのである。でも、まあ、たまには、星の光をちょいと曲げてやったりすることもある。その結果、宇宙には蜃気楼が生じて、二本足共を戸惑わせたりするが、その程度は楽しませてもらおう。

宇宙の王者であり忙しい吾輩にも、それなりに悩みはある。吾輩が食したあれだけのエサは、いったいどうなったのだろうか。食した本人が言うのもオカシイが、吾輩自身、知らないのだ。吾輩の胃袋はどこへつながっているのだろう。このことを考えると、胃の腑がモヤモヤしてくる。食欲もなくなるし夜もおちおち寝られなくなりそうだ。ま、もっとも、目の前にエサがあって食べなかつたことはないし、そもそも眠つたこともないのだが。また吾輩が食したものには、それなりに

色や匂いがあつただろうし、複雑な形や構造もあつただろう。ところが吾輩が食した後は、それらの多くの情報は消えてしまうらしいのだ。これも何故だか知らぬ。

吾輩は、自分に何ができるかについては知っているが、自分自身がどうなっているかについてはあまり知らないことを素直に認めよう。小さかしく悪賢い二本足共だが、もしかしたら、遠からず、吾輩の謎を解き明かしてくれるかもしれない。今日このごろの、ささやかな希望である。

++++++

1-2. 数式コーナー：シュバルツシルト半径

数式コーナーと銘打ってはいるが、そんなに大層な数式が出てくるわけじゃない。ここでは、ブラックホールの半径を表す式を紹介しておきたい。

静的で球対称なブラックホール（「シュバルツシルト・ブラックホール」）の半径は「シュバルツシルト半径」と呼ばれ、しばしば r_g や r_s で表される（ g は重力の g 、 s はシュバルツシルトの頭文字）。万有引力定数を G 、光速を c とすると、質量 M の天体のシュバルツシルト半径 r_g は、

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}$$

で表される。ただし、

$$\text{万有引力定数 } G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$$

$$\text{光速 } c = 3.00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

である。

具体的にいろいろな天体のシュバルツシルト半径を計算してみると、表1・1のようになる。

1-3. コラム：おばQ定理

物体・物質は、形や材質や色や匂いなど、一般に無数の特性をもっている。ところが重力崩壊してブラックホールになつてしまうと、これらの特性はほとんどすべて失われてしま

表1・1 天体のシュバルツシルト半径

天体	質量	半径	シュバルツシルト半径
地球	$6 \times 10^{24} \text{kg}$	6400km	9mm
太陽	$2 \times 10^{30} \text{kg}$	70万 km	3km
白色矮星	約1太陽質量	約1万 km	3km
中性子星	約2太陽質量	約10km	6km
恒星ブラックホール	10太陽質量	30km	30km
巨大ブラックホール	1億太陽質量	2天文单位	2天文单位

1太陽質量 = $2 \times 10^{30} \text{kg}$; 1天文单位 = $1.5 \times 10^{11} \text{m}$

う。そして最終的には、“質量”と“自転”と“電荷”という性質しか残らないことがわかっている。ブラックホールの属性として、たった3種類しか存在しないことを指して、ホイーラーは、“ブラックホールには毛がない”と述べ、この命題を「毛なし定理(No Hair Theorem)」と称した(1971年ごろ)。

この、ホイーラーの「毛なし定理」だが、日本人的には、もっともっとピッタリの名前がある。そう、質量・自転・電荷という3本の“毛”は残っているのだから、これは<おばQ定理>と呼ぶのが相応しい。ぼく自身は、10年以上も前から、毛なし定理は実は“おばQ定理”だと、呼んだり書いたりしてきたが、日本人なら誰だって思いつく名称なので、とくに特許を取るつもりもなかった。ところが、最近手にした啓蒙書で、ぼくが命名したと引用してあったのに、少し驚いた。うーん、たしかに、今まで読んだ多くの本の中では、“おばQ定理”なんて呼んでいた本はなかったわなあ。(日本人の)相対論屋さんは、マンガなんか読まないじめな人が多いのかなあ。

じゃあ、ありがたく命名者の特権を行使して、改めて声高くご唱和を：

“みんなで一緒に「おばQ定理」”(爆)



福江 純

fukue@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

**ガリレオは作りました
21世紀の僕らも ★
作って観ましょう**

カメラ、ビデオ三脚があれば
すぐ観察できます。

土星の環、
ガリレオ衛星
見えます。

三脚を自作
希望の方に…

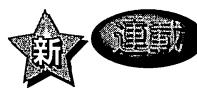
コルキット・スピカ
¥2,500.- 重さ:150g

木製三脚 ¥2,000.- 重さ:1.8kg
(送料¥800.-)
木ねじ、ボルトなど一式付属
(送料¥1,200.- 北海道)

◆団体でのご購入には特別価格でお求めいただいております。お問い合わせください。
カタログご請求ください。

Eメール: info@orbys.co.jp http://www.orbys.co.jp

オルビィス株式会社
〒542-0066 大阪市中央区瓦屋町2-16-2
Orbys Inc. TEL:06-6762-1538 FAX:06-6761-8691



隣のブラックホール【2】

時間と空間の統一

福江 純（大阪教育大学）

ここでは、特殊相対論の柱である光速度不変の原理、典型的な現象である時間の遅れ、そして特殊相対論における時間と空間の統一について説明する。

2-1. 光速度不変の原理と特殊相対論

1) 光速度不変の原理

光が真空中を伝わる速さ、すなわち光速（光速度）は、秒速約30万kmである（図2・1）。

$$\begin{aligned} \text{光の速さ (光速度)} & c \\ & = 29979\,2458 \text{ m/s} \\ & = \text{秒速約 } 30 \text{ 万 km} \end{aligned}$$

電波もX線も、電磁波はすべて光速で伝わる。異なるのは波長（振動数）なのである。では、この光速度cというのは何か特別な速度なのだろうか？

光を光速で追いかけたら、光は止まってみえるのだろうか？ 日常的な感覚ではそうだが、アインシュタインの直感は否定した。ではどうみえるのか？ 光は、誰からみても光、光速で走る光でなければならない。そういう意味で、光速度cはある絶対的な基準なのである。アインシュタインがたどり着いた答え。それは、“光は誰からみても光速で進む、どんなスピードで運動をしている観測者が測っても、光の速さはつねに光速度cにな

る”という原理である。これが、特殊相対論の一つの柱である「光速度不変の原理」だ。

ちなみに、光速度をcで表すが、これは、速さを意味するラテン語のケレリタス（celeritas）の頭文字を取ったものだ。大文字のCではなく、必ず小文字のcを使うのがお約束である。

2) 特殊相対性原理

特殊相対性理論（特殊相対論）のもう一つの柱は、「特殊相対性原理」である。こちらは、じっと静止している人にとっても、動いている人にとっても、自然の法則は同じように成り立つという考え方だ。この特殊相対性原理は、自然の法則は誰に対しても同じように成り立つという、ガリレイ以来の考え方をより広く捉えたモノである。

ところで光速度不変の原理は、特殊相対性理論の“基本原理”（の一つ）なので、観測や実験によって証明することはできない。しかし光速度不変の原理と特殊相対性原理から構築された特殊相対論は、（後で述べるように）時間の遅れとかアインシュタインの式とか、さまざまな成果や予想をもたらし、それらは観測や実験によってちゃんと検証することができる。そして、あらゆる観測事実や検証実験は、すべて、アインシュタインの特殊相対論を支持したのである。

3) 慣性系

人でも車でも宇宙船でも、現実の物体は、重力や摩擦力やロケットの噴射の反作用など、さまざまな力を受けて動いている。このような外部からの力がいっさい存在していな

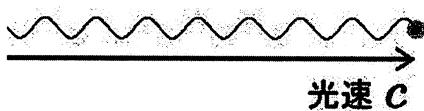


図2・1 光と光速度

ければ、物体は静止しているか、あるいは速度が一定のまま真っ直ぐに飛んでいく「等速直線運動」を行う（速度が 0 の等速直線運動は静止状態に他ならないので、広い意味では等速直線運動は静止状態を含む）。外部からの力が働いていないシステムを、いちいち、「外部からの力が働いていないくて等速直線運動をしている状態」というのは面倒なので、ふつうは簡単に「慣性系」と呼んでいる。たとえば、同じ速度で動き続ける電車の中や船の上や、また止まっている車などが、それぞれ慣性系だ。等速直線運動は、任意の速度で任意の方向に可能だから、慣性系は無数に存在することになる。また外力が働いていないのだから、慣性系は無重力である。特殊相対論では、どの慣性系においても、常に同じ物理法則が成り立つことを前提としているのである。

2-2 高速運動での時間の遅れ

1) 固有時間

ニュートンは、時間というものは、過去から未来に一様に流れ、かつ宇宙のどこでもまったく同じ時間になっていると考えた。これを「絶対時間」という。また空間についても、物体は空間の中で運動や変化をするが、空間自体はまったく変化せず永久不变に存在していると考えた。これを「絶対空間」という。しかし、アインシュタインは特殊相対論で、絶対空間とか絶対時間を放棄し、代わりに、光速度という基準を設定した。ニュートンの世界でもアインシュタインの世界でも、時間や空間の入れ物の中を光が進むことには変わりないので、光速度を絶対的な速度にすることは、入れ物である時間や空間が変わらざることになる。これは、時間や空間に対する新しい意味づけにはかならない。

実際、アインシュタインが主張したのは、無数に存在する慣性系一つ一つが、それぞれ自分の時間を持っているということだ。時間

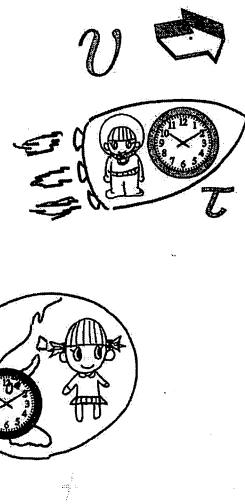


図 2・2 固有時間

は誰に対しても同じものなのではなく、それぞれの慣性系に属する固有の物理量であり、慣性系が異なれば、刻（とき）のきざみ方も違うと考えたのだ。そこで各慣性系の時間をそれぞれの系での「固有時間」と呼ぶ（図 2・2）。たとえば、等速直線運動している宇宙船内で起こったできごとを記録しているときに、宇宙船に載せた時計で計っている時間（船内時間）が宇宙船の固有時間で、地球と共に動く時計で計っている時間（地球時間）が地球の固有時間である。

なお、日常的な時間（ t ）と区別するためには、固有時間はギリシャ語の τ （タウ）を使って表すことが多い。静止している慣性系（静止系）と運動している慣性系（運動系）が出てくるときは、たとえば、静止系の時間を t 、慣性系の時間を τ と置いて区別する。

2) 光時計とローレンツ因子

各慣性系が固有の時間をもつといつてもビンとこないので、実際に静止系と慣性系での固有時間の違い、いわゆる高速運動における「時間の遅れ」について考えてみよう。よく、光速に近いスピードで航行する宇宙船内の時間は、地球の時間に比べてゆっくり進む、と

言われる。これが高速運動している慣性系での時間の遅れだ。光速度不变の原理を認め、時間に関する固定観念を改めれば、時間の遅れは自然に出てくる結論である。具体的に、光時計というアイテムを使って時間の遅れを証明しよう（図2・3）。

そもそも、時間を計るということは、（規則正しく起こる）周期的な現象を使って、繰り返し起こるできごとの回数を数えることだ。その周期的な現象が、広い意味での時計にほかならない。たとえば、一年は地球の公転で決まる長さだし、一日は地球の自転で決まり、柱時計は振り子の周期的な運動を使うし、クオーツ時計は水晶の結晶の振動を利用している。

そして、合わせ鏡を使って光を“振り子”にした時計が、「光時計」である。すなわち、光時計では、発光部（兼受光部）と鏡が向かい合わせになっていて、発光部から鏡に向かってレーザー光線が発射され、鏡で反射されたレーザー光線があたたび受光部まで戻ってきて検出される。

光時計の長さはいくらでもいいが、話を簡単にするために、長さを15cmにしよう。秒速30万kmの光が往復30cmの距離を進むには、ちょうど1ナノ秒=10億分の1秒かかる。だから、この光時計を“ナノ秒光時計”と呼んでおく。

そのような“ナノ秒”光時計を、高速で航行する宇宙船の内と外においてみよう。宇宙

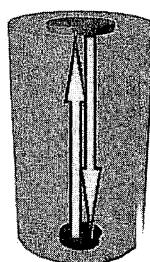


図2・3 “静止した”光時計

船の外（たとえば地球）で宇宙船の外にある光時計を見ていれば、光の信号が1往復するのに1ナノ秒かかる。一方、飛んでいる宇宙船の中で宇宙船の中にある光時計を見ていても、やっぱり1往復で1ナノ秒かかるはずである。宇宙船の外でも中でも物理法則は変わらないだろうし、これは、あまりにも当たり前そうな話だ。

では、宇宙船の外から、飛んでいる宇宙船の中にある光時計を見たらどうなるだろうか（図2・4）？ 宇宙船の外から見ると、発光部から最初に光が出てから鏡まで光が進む間に、宇宙船は飛んでいるので、横に移動する。その結果、光は斜めに進み、“長い距離！”走っていることになる。鏡で光が反射してからも同じである。つまり、宇宙船の外から見ると、光は（単純に往復するよりも）長い距離を進まなければならないのだ。光速度不变の原理から、宇宙船の中の光速度は、宇宙船の外から見ても同じなので（この点が大事！）、長い距離を進むにはより長い時間がかかる。こうして、宇宙船の外から見ると、宇宙船の中の光時計はゆっくりと時を刻むよう見えるわけだ。

これが、高速で航行する宇宙船では時間が遅れる、という話のカラクリである。

地球時間 t と船内時間 τ の比率、すなわち船内時間で1秒経過したときに地球時間ではその何倍の時間が経っているかという割合を、物理学者のローレンツ（Hendrik A. Lorentz）にちなんで「ローレンツ因子」と呼び、またギリシャ語の γ （ガンマ）で表す。地球（静止系、実験室系）に対する宇宙船（運動系、粒子系）の速度 v が大きくなるほど、ローレンツ因子 γ も大きくなる。具体的な数値を表2・1に示す。

3) 高速運動における時間の遅れの実証

運動している系での時間の遅れは、実際に、さまざまな実験でも検証されている。素

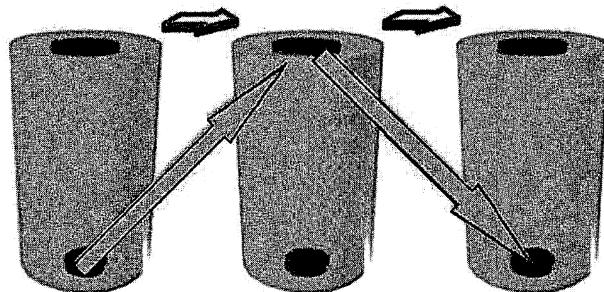


図 2・4 “動いている”光時計

粒子の寿命の延びが一番いい例だろう。

たとえば、宇宙空間から飛來した宇宙線が地球大気中の原子核と衝突したときに、ミューオンと呼ばれる素粒子が発生する。このミューオンは非常に不安定な素粒子で、平均寿命は約1.5マイクロ秒しかない。すなわち多数のミューオンを観測していると、1.5マイクロ秒より早く崩壊するものも遅く崩壊するものもあるが、平均的には約1.5マイクロ秒経った段階でミューオンの半数が崩壊していることを意味している。

さて宇宙線と原子核の衝突によって発生したミューオンは、きわめて高いエネルギーであり、ほぼ光速に近い速度で運動している。したがって、もし時間の遅れの効果がなければ、ミューオンの平均的な飛行距離は、 $\text{光速} \times \text{平均寿命} = 450\text{m}$ ほどしかないはずである。ところが現実には、はるか上空（だいたい高度20kmぐらい）で発生したミューオンが、地球大気の数十kmを走り抜け、地上まで到達しているのだ。すなわち、高速で飛ぶミューオンの寿命が延びているのである（もちろんわれわれから見ての話で、ミューオン自身は寿命が伸びたとは思わないだろうが）。

このような素粒子の寿命の延びは、地上でも測定されている。たとえば、日本だと、筑波学園都市に大型加速器トリスタンがあり、播磨科学公園都市でも SPring8 (Super Photonring-8GeV) と呼ばれる放射光施設が稼働している。これらの巨大加速器を用いた素粒子実験でも、素粒子の寿命が延びていることは実証されているのだ。というより、大型加速器であるシンクロトロン加速器などでは、相対論的な効果を考慮しなければ、そもそも加速器自体が設計できないのだ。ちなみに後者の、SPring-8 では、周囲 1436m の蓄積リングと呼ばれる環状の装置に 8GeV (80億電子ボルト) という高いエネルギーの電子を蓄えることができる（名前の8はエネルギーの値を表す）。

表 2・1 宇宙船の速度とローレンツ因子

速度 v/c	因子 γ	船内時間 τ	地球時間 t
0	1	1年	1年
0.1	1.005	1	1.005
0.2	1.021	1	1.021
0.3	1.048	1	1.048
0.4	1.091	1	1.091
0.5	1.155	1	1.155
0.6	1.250	1	1.250
0.7	1.400	1	1.400
0.8	1.667	1	1.667
0.9	2.294	1	2.294
0.99	7.089	1	7.089
0.999	22.366	1	22.366
0.9999	70.712	1	70.712
0.99999	223.61	1	223.61
0.999999	707.11	1	707.11

2-3 4次元時空の表現

1) 4次元時空

ところで、物体が存在したり運動したりする入れ物が「空間」で、物体の変化を刻む“方向”が「時間」だが、運動が起こる空間は運動の自由度に応じた「次元」をもっている。たとえば、高速道路のように、運動が曲線（直線）上に制限されていて運動の自由度が一つしかないのが1次元空間で、地球の表面のように、運動が曲面（平面）上に制限されているのが2次元空間である。そして、実際にわれわれが住んでいるのは、タテヨコ高さの3つの方向の自由度をもつ3次元空間である。

一方、時間は、過去、現在、未来という一つの方向しかないという意味で、1次元である。

かつては時間と空間は、まったく別な実体だと思われていた。しかし、アインシュタインが導入した光速度不変の原理によって、一見まったく性質が違うようにみえる1次元の時間と3次元の空間は、実は別々のモノではなく、一つのまとまった実体として扱えるこ

とがわかった。それを「4次元時空」とか「4次元時空連続体」などと呼んでいる。

2) 時空のダイアグラム

物体の運動のような、空間内における時間的変化は、一般的には、空間を固定して、その中の動き（動画）として表すことが多い。しかし、（特殊）相対論では、時間と空間はある意味では対等な立場になった。そして空間と時間を合わせて「時空」として捉える立場なので、時間座標を空間的に表した「時空ダイアグラム」を用いて、物体の運動を視覚的に表してみよう（図2・5）。

実際の空間は3次元もあり、（1次元の）時間と共に図示するのは難しいので、時空のダイアグラムでは、表現上、空間の次元を減らして表すことが多い。たとえば、横軸に空間の距離 x を、縦軸に時間 t を取ったり、水平方向に x 軸と y 軸を、縦方向に時間 t を取ったりする。時間軸は必ず縦軸（鉛直方向）で、下を過去、上を未来に取る。時間軸を縦軸に取っておけば、空間軸として水平方向に x 軸

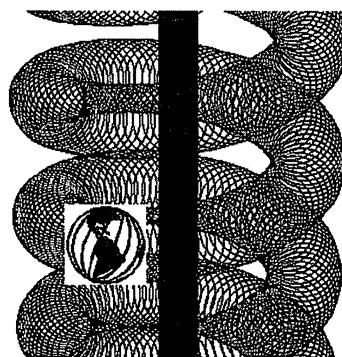
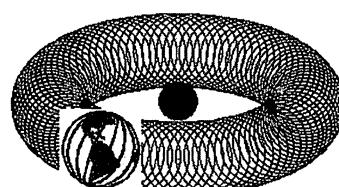
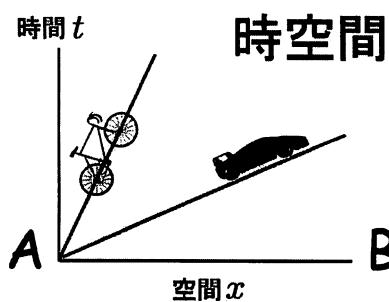
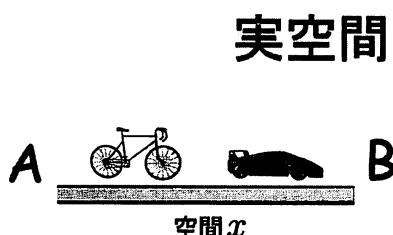


図2・5 時空のダイアグラム

左：1次元空間と2次元の時空間／右：2次元空間と3次元の時空間

と y 軸を考えたときにも、対称的に綺麗な図にできるのである。

具体的な例をいくつか考えてみよう。まず、A 地点から B 地点まで一本道を進む場合、横方向に 1 次元の空間、縦方向に時間（上が未来）を取った時空のダイアグラムで物体の運動を表せる。静止した物体は、空間座標 x の値は変わらず時間だけが過ぎていくので、静止した物体の「軌跡」は鉛直方向に過去から未来に向かって伸びる直線になる。一定速度で動く物体（人や車や飛行機）の「軌跡」は傾いた直線になり、速度が速いほど直線の傾きは小さくなる。

今度は、太陽のまわりを回る惑星の運動を水平方向に 2 次元の空間を取った時空ダイアグラムで表してみよう。太陽は（原点に）静止しているので、太陽の軌跡は時間軸に沿った真っ直ぐな直線になる。一方、空間内で円運動している惑星の軌跡は、時間が進むにつれ上の方向（未来方向）に引き延ばされて、螺旋状になる。

毎日の通勤通学の時空ダイアグラム、新幹線で博多から東京まで行くときの時空ダイアグラム、ジェット機で世界一周するときの時空ダイアグラム、人生の時空ダイアグラムなども考えてみてほしい。

3) ミンコフスキーダイアグラム

相対論では特別な速度である光速度 c を基準にして世の出来事を考える。そこで相対論では、ふつうの時空ダイアグラムではなく、「ミンコフスキーダイアグラム」と呼ばれる、光速度を基準にした特別な時空ダイアグラムを使う（図 2・6）。ミンコフスキーダイアグラムがふつうの時空ダイアグラムと大きく違う点は、空間軸と時間軸のメモリの取り方（単位）である。空間軸に対して時間軸をすごく引き延ばしてあるのだ（空間軸をすごく押し縮めてあるとも言える）。なお、名前の由来は、当時わかりにくかった相対論を图形的に

ふつうの時空図 ミンコフスキーハ时空図

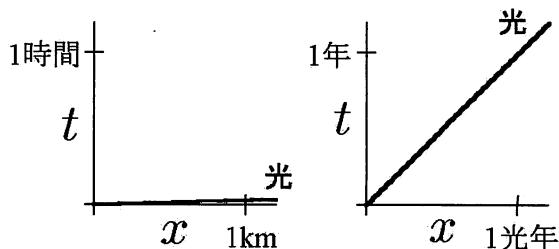


図 2・6 ミンコフスキーハ时空図

表現したミンコフスキーハ（H. Minkowski）にちなんだものだ。

ふつうの時空ダイアグラムだと、たとえば空間軸は m とか km の単位で測り、時間軸は秒や時間で計る。すなわち身のまわりのスケールで、それぞれの軸のメモリを刻んでいる。このメモリスケールでは、秒速 30 万 km もの高速の光の軌跡は水平に近い直線になるだろう。しかしミンコフスキーダイアグラムでは、時間軸の 1 メモリを 1 秒にするなら、同じ長さに取った空間軸の 1 メモリは 1 光秒に刻む（1 光秒は光速で進んで 1 秒かかる距離、すなわち 30 万 km）。あるいは、空間軸方向には 1 光年のメモリを、時間軸方向には 1 年のメモリを、同じ長さで刻むのである。こうすると、光は 1 年で 1 光年進むから（それが 1 光年の定義）、光の軌跡はミンコフスキーダイアグラムでは角度 45° の直線になる。言い方を変えれば、光の軌跡が常に傾き 45° の直線になるようにメモリを刻んだ時空ダイアグラムがミンコフスキーダイアグラムなのである。



福江 純

fukue@cc.osaka-kyoiku.ac.jp



隣のブラックホール【3】

エネルギーと物質の統一

福江 純（大阪教育大学）

ここでは、特殊相対論における性質の続きとして、光の波長が変化するドップラー効果、光線のやってくる方向が変化する光行差現象、そして有名なアインシュタインの式について説明しておく。

3-1 ドップラー効果

1) 赤方偏移

天体から送られてくる光（たとえばスペクトル線）を測定したときに、観測される波長（振動数）は実験室で測定されるもとの波長（振動数）としばしば異なっている。もし天体から発した光の波長が長くなつて（振動数は低くなつて）観測されたなら、色でいえば黄色の光が赤色の方に移動するので、「赤方偏移」といい、逆に、もし波長が短くなつて（振動数は高くなつて）観測されたなら、「青方偏移」という。またこれらを併せて赤方偏移と総称する。

赤方偏移すなわちスペクトル線の偏移が生じる原因には、

- ・光源と観測者の間の相対的な運動によるドップラー効果
- ・重力場のもとでの重力赤方偏移
- ・宇宙膨張にもとづく宇宙論的な赤方偏移の3つがある。実際に観測されるスペクトル線の赤方偏移は、しばしばこれらの原因が複雑に重なつたもので、分離できない場合も少なくない。

2) 光のドップラー効果

音源と観測者が相対的に静止しているときは、音源から発した音の高さと観測者が受け取る音の高さは同じである。しかし音源と観

測者が近づいているときは音の高さは高くなり（振動数は高くなり）、音源と観測者が遠ざかっているときは音の高さは低くなる（振動数は低くなる）。

救急車のピーポー音でもおなじみのこの現象は、音が波であるために起こる現象で、進行方向前方では一定時間内に届く波の数は多く（振動数は高く）なり、逆に進行方向後方では波の数は少なく（振動数は低く）なるために生じる（図3・1）。この現象を1842年に最初に研究したオーストリアの物理学者ドップラー（C. J. Doppler）にちなんで、「ドップラー効果」と呼んでいる。

天体からやってくる光も波の一種なので、（音の）ドップラー効果と似た現象が起こる。すなわち、光を出す天体（星やガス）が観測者（地球）から遠ざかるように運動しているときには、観測される波長がもとの波長より長くなり（赤方偏移）、逆に、地球に近づくように運動しているときには、もとの波長より短くなる（青方偏移）（図3・2）。光源と観測者の間の相対的な運動によって、観測される光の波長（振動数）が実験室で測定されるものとずれる現象を、「光のドップラー効果」と呼ぶ。光のドップラー効果による波長のずれの例を表3・1に示しておく。

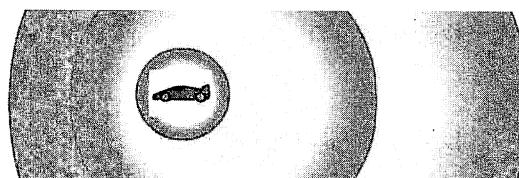


図3・1 音のドップラー効果

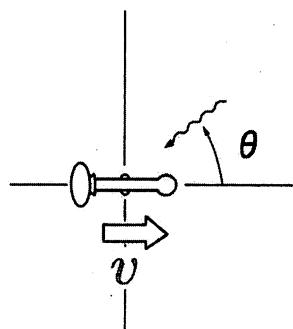


図 3・2 光のドップラー効果

3) ドップラー効果の実証

ドップラー効果については、実証するも何も、天体の運動を調べるための重要な観測手段として普通に使われている。具体的な例を挙げるにも、無数にあって困るぐらいだが、たとえば太陽表面のガスの運動（水素ガスの出す輝線）、連星の運動（星の大気の吸収線）、原始星ジェット（一酸化炭素などの分子の出す電波輝線）、銀河の回転運動（中性水素の21cm電波輝線）、などなど、枚挙にいとまがない。

相対論的なドップラー効果多くの天体で観測されているが、強いて一つだけ天体を挙げるとすれば、特異星SS433だろうか（図3・3）。特異星SS433は、わし座の方向16光年

の距離にある14等星で、宇宙ジェットのプロトタイプとして有名である。すなわち、SS433は、高温の伴星とコンパクト星（おそらくブラックホール）からなる近接連星で、コンパクト星のまわりにはガス円盤が形成されている。そして中心付近からは、実に光速の26%もの速度で、2方向へプラズマガスの噴流－宇宙ジェット－が吹き出しているのだ。この高速ジェットから放射された輝線のドップラー効果が見つかっているのである。というか、話は逆で、水素の輝線（可視光）や鉄の輝線（X線領域）のドップラー効果の観測から、高速ジェットの振る舞いがわかったのだ。さらに、SS433で特記すべきは、高速運動に伴う時間の遅れ効果である。光速の26%になると、時間の遅れが無視できないが、実際、SS433から到来する光には、“横ドップラー効果”が観測されているのだ。天体现象でドップラー効果はありふれたものだが、横ドップラー効果（時間の遅れ効果）はさすがに珍しい。

3-2 光行差現象

1) 光行差

雨の中を傘をさして歩いているとき、立ち止まっていれば雨が真上から降っている場合でも、歩いたり走ったりすれば、濡れないよ

表 3・1 光のドップラー効果

光源の状態	ドップラー効果による色の変化
静止している電球	電球から放射される光の波長（色）は、進行方向前方でも後方でも同じ。
秒速8kmのスペースシャトル	スペースシャトルから放射された600nm（黄色）の光は、近づく左側では0.01nmぐらい波長が短くなり、遠ざかる右側では0.01nmぐらい長くなる。
秒速3万kmの宇宙船	高速宇宙船から発した600nmの光は、左側では540nm（緑色）で見え、右側では660nm（赤色）で見える。
秒速27万kmの亜光速宇宙船	亜光速宇宙船から発した600nmの光は、左側では60nm（紫外線）まで偏移し、右側では1140nm（赤外線）まで波長が伸びる。

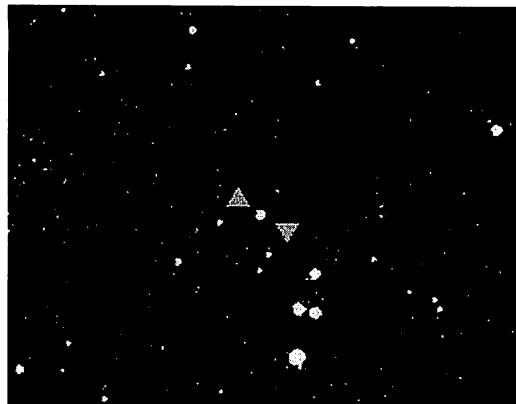


図3・3 特異星 SS433（大阪教育大学）

うにするために、傘を前方に傾けて歩かなければならぬ（図3・4）。

光でも同じようなことが起こる。

たとえば宇宙空間を高速で飛翔している宇宙船から、ある方向に見える天体を観測したとき、光速が無限大なら天体の見える方向は常に同じ方向にみえる。しかし光速は大きいとはいえ有限なので、光の到來ベクトルは観測者の運動ベクトルの分だけずれてしまい、天体の見える方向は（本来の方向よりも）宇宙船の運動方向前に少し移動して見える（図3・5）。このような、運動している宇宙船から見た天体の視位置が、静止しているときの視位置に比べ、宇宙船の進行方向前に移動して見える現象を「光行差」という。

2) 光行差の実証



図3・4 雨のお散歩

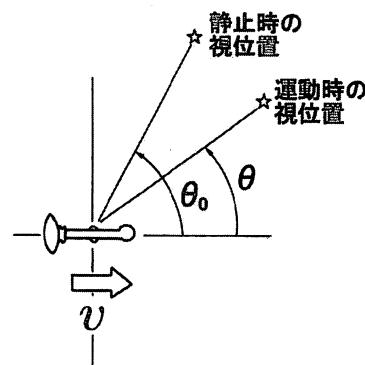


図3・5 光行差

地球から観測したときの天体の視位置は、大気差と呼ばれる地球大気の屈折効果や地球自転軸のふらつき、太陽のまわりの地球の運動、地球を引き連れた太陽の運動などなど、さまざまな理由により影響を受ける。それらのうちで重要なものの一つが、1727年、イギリスのブラッドリー（J. Bradley）によって発見された「年周光行差」である。年周光行差とは、天球上での星の見かけの位置が、1年を周期として橙円を描くように移動して見える現象だ（図3・6）。

この年周光行差の原因は、光速度が有限であるために、星から発した光の方向が地球の軌道運動によって影響され、別の方向からくるように見えるためである。その結果、たとえば黄道の北極方向にある星は、太陽のまわりの地球の公転運動にしたがって、天球上で北極のまわりを円を描くように動いて見える。また黄道の極以外の位置では、橙円を描くように動いて見えるのである。

地球は太陽のまわりを公転運動しているが、1天文単位の半径の円を1年で一周するので、その公転速度は秒速30kmになる。秒速30万kmの光速に比べ1万分の1程度しかないが、無視できるほど小さい量でもない。実際、ブラッドリーの発見したりゅう座γ星の年周光行差は、真の方向とのずれ（光行差角）が角度にして数十秒というきわめて小さなも

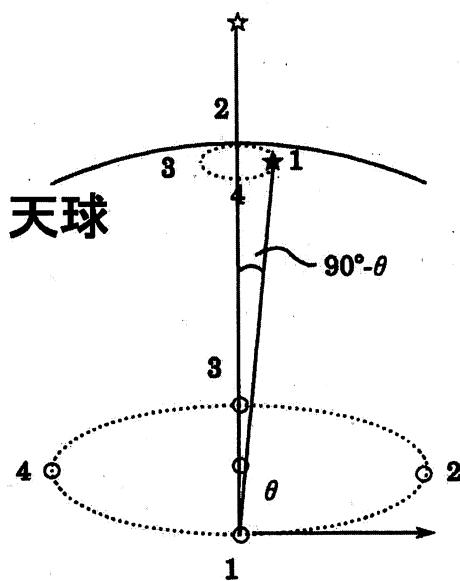


図3・6 年周光行差

のだったが、測定できたのである。

3-3 アインシュタインの式

1) 静止質量エネルギー

$$E = mc^2 \text{ (イイコールエムシージょう)}$$

“質量はエネルギーと等価である”

相対論のさまざまなコンセプトの中でも、ブラックホールと並び、もっともよく知られたコンセプトだ。とくに核爆弾を手にした現代では、この方程式の現実性は疑いの余地もない。「アインシュタインの式」 $E = mc^2$ は、おそらく自然科学のさまざまな基本方程式の中で、もっとも有名な式である。

具体的な数値を少し挙げておく。国際単位系SIでは、時間は秒で、長さはmで、質量はkgで、そしてエネルギーはJ（ジュール）で測る。光速は30万km/s = 3億m/sなので、アインシュタインの式から、1kgの質量は、

$$1 \times 3 \text{ 億} \times 3 \text{ 億} = 9 \times 10^{16} \text{ J (9京J)}$$

に等しい。これはどれぐらいのエネルギーに相当するのだろうか？

たとえば、体重60kgの人が地上で1mの段差を飛び降りたときの落下のエネルギーは、

600Jである。また狭い部屋にたくさん的人が集まるとムンムンしてくるが、ふつうの人が1秒間に放射する（熱）エネルギーは、だいたい100Jほどである（つまり人は100Wの電球と同じ！？）。だから人が1日に放射するエネルギーは、だいたい900万Jほどだ。雷のエネルギーが、おおざっぱに、100億Jぐらいだそうだ。地球のまわりを周回している500kgぐらいの人工衛星の運動エネルギーや位置エネルギーが、ちょうど同じぐらいである。さらに、広島型原爆（15キロトン）のエネルギーが約60兆J (6×10^{13} J) で、ビキニ水爆（15メガトン）のエネルギーが約6京J (6×10^{16} J) になる。やっと、上の値ぐらいになってきた。

そう、1kgの質量の物質は、人類が生んだ最大の破壊的エネルギーに等しいぐらいのエネルギーをもっているのだ。

2) 運動エネルギー

アインシュタインの式は、もっとも単純な形では、静止状態の物質と等価なエネルギーを表す式だが、物質が運動状態にあると、物質の運動エネルギーも加味する必要がある。その場合は、ローレンツ因子 γ をちょいと掛けて、

$$E = \gamma m c^2$$

と修正すれば、運動エネルギーまで含めたアインシュタインの式の拡張になっている。いくつかの数値例を表3・2に示しておく。

3) アインシュタインの式の実証

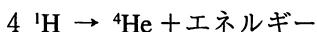
アインシュタインの式の実証も、化学反応や加速器の実験から宇宙の彼方の電子・陽電子対消滅反応まで、これまた例示に事欠かない。ここでは、ごく標準的な例として、太陽の中心部の核融合反応に触れておこう。

太陽のような主系列星の中心部では、物質が高温で高密度な状態になっていて、4個の陽子（水素の原子核）が1個の α 粒子（ヘリ

表3・2 運動エネルギーまで含めた数値例

粒子	質量m	エネルギーE
電子（静止状態）	$9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$	$8.20 \times 10^{-14} \text{J}$
光速の99.9%の速度の電子		$1.83 \times 10^{-12} \text{J}$
陽子（静止状態）	$1.67 \times 10^{-27} \text{kg}$	$1.51 \times 10^{-10} \text{J}$
光速の99.9%の速度の陽子		$1.83 \times 10^{-12} \text{J}$
波長600nm（可視光）の光子		$3.38 \times 10^{-19} \text{J}$
511keV（ γ 線）の光子		$8.20 \times 10^{-14} \text{J}$

ウムの原子核）に融合する核反応：



が起こっている（図3・7）。（反応前の）4個の水素原子の質量と（反応後の）1個のヘリウム原子の質量とは同じではなく、反応後の質量の方がごくわずかに小さい。ヘリウム原子核1個の質量は、4個の水素原子核の質量を合わせたものよりも、2.9%だけ小さいのだ。1個の水素原子あたりにすれば、その質量の0.7%になる。この割合を、「質量欠損」と呼んでいる。

すなわち、水素の核融合反応によって、1個の水素原子あたり、その質量の0.7%がエネ

ルギーに変換されるのだ。具体的には、2個の陽電子と2個の電子ニュートリノが発生する。電子ニュートリノは物質と相互作用せず、ほぼ光速で宇宙空間へ逃げ去っていくが、陽電子は周囲の電子とすぐに対消滅し輻射のエネルギーとなって、太陽の輝きに寄与する。

AINシュタインの式は、質量とエネルギーの間の関係を表している。AINシュタイン以前には、“質量”と“エネルギー”とは別の存在形態だったのが、AINシュタイン以後、質量はエネルギーに転換できる、あるいはまたエネルギーは質量に転換できることがわかった。それまで異質だった質量とエネルギーが、AINシュタインの式で結びついたのである。

次回からはいよいよ重力とブラックホールの話に入りたい（打ち切りになつたりして）。

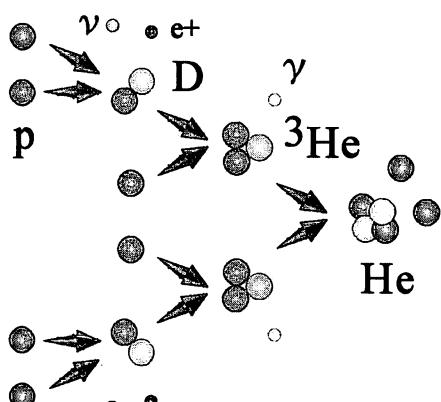


図3・7 水素の核融合

陽子-陽子連鎖反応の場合、6個の陽子(p)が、重陽子(D)とヘリウム3(^3He)を経て、ニュートリノ(ν)や陽電子(e⁺)や光子(γ)を放出しながら、最終的に1個のヘリウム(He)と2個の陽子に変換する。