



相対論百年【1】

相対論が果たした役割

—ぼくたちは相対論的世界に住んでいる

福江 純（大阪教育大学）

1. 世界物理年 2005—World Year of Physics

本会がはじまってから十数年が経つだろうか。その間、会誌には、日本天文学会の動向や解説記事やその他の報告など、いろいろ書かせてもらったが、編集部からの依頼を受けて記事を書くのは今回が初めてのような気がする(笑)。あ、でも自分が編集委員をしていたときは、自分で自分に依頼してたっけ。

ともあれ、頂いたお題は、相対論が生まれて百年を迎える 2005 年に、相対論の果たした役割を見ていこうというテーマである(2005 年は同時にアインシュタイン没後 50 年に当たる年もある)。締め切りまでがあまりなくて詳細な調査はできなかつたが(早くから頼まれても同じだったけど；；)、この百年の間に相対論によってわかつたこと・相対論によって可能になったこと・相対論が必要だったことなどを概観してみたい。

さて、2005 年は世界物理年だが、まずその話を少し触れておこう。

百年前の 1905 年、アルバート・アインシュタイン(1879–1955)は光電効果の論文「光の発生に関するひとつの発見方法的観点」、学位論文「分子の大きさの新しい決定法」、ブラウン運動の理論「熱の分子論から要求される静止流体中の懸濁粒子の運動」、特殊相対性理論「運動する物体の電気力学」、そしてアインシュタインの式を導出した「物体の慣性はエネルギーに依存するか」という 5 つの論文を提出了。このうち、特殊相対性理論(相対論)、光電効果の理論(量子論)、ブラウン運動の理論(統計物理学)の 3 つは、今日の物理学の根

底をなす分野を切り開いたような論文である。たった一人の人間がほんの一年の間にこれだけの大きな成果を挙げた年であることから、1905 年は物理学史の上で“奇跡の年”と呼ばれている。

この奇跡の年から百年を祝し、国際純正応用物理学連合(IUPAP)は 2005 年を“世界物理年(2005—World Year of Physics)”と設定して、世界中の人々の物理学に対する意識を高めるため、さまざまな催しを予定している(<http://www.physics2005.org/aboutwyp.html>)。国連もその動きを後押ししている。科学界は、世界は、21 世紀のアインシュタインを求めているのである(図 1)。

本稿では、以下、2 節で特殊相対論と一般相対論について基本的な事柄を簡単にまとめ、3 節で特殊相対論が果たした役割を整理し、4 節で一般相対論的現象のうち弱い重力場に関するものを述べ、5 節で強い重力場に関するものに進み、6 節で宇宙全体に関わるもの紹介して、最後の節では 21 世紀における課題について簡単に触れる。



図 1 世界物理年のロゴマーク

2. 特殊相対論と一般相対論

一口に相対論(相対性理論)と言っても、大きく分けて運動に関する「特殊相対論(特殊相対性理論)」と、重力に関する「一般相対論(一般相対性理論)」とがある。

前者の特殊相対論は、アインシュタインが1905年に提案したものでまとめれば

★ 時間と空間を時空として統一した

★ エネルギーと物質を統一した

理論である。運動速度が光速に近い領域でその効果が顕著になる。

一方、後者の一般相対論は、アインシュタインが1915年から1916年にかけて完成したもので、

★ 時空とエネルギー・物質を統合した

理論である。非常に重力が強い領域でその効果が顕著になる。

今年、2005年は、特殊相対論の誕生から100年目であり、一般相対論の誕生からは90年目ぐらいにあたる。

2.1. 特殊相対論の原理と性質

特殊相対論は二つの基本原理に基づいて理論体系が構築されている。一つは、

光速度不变の原理：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。もう一つは、

特殊相対性原理：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。

という考え方で、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原理である。

光速度を不变な量としたため、ニュートン以来、絶対不变だと信じられていた時間と空間が不变ではなくなり、時空として統一されることになったのである。そして実際の自然

界も、そのとおりだったのだ。

特殊相対論から導かれる主な性質には、

(1) 運動系における時間の遅れ

(2) ローレンツ＝フィッヅジェラルド短縮

(3) 同時刻の相対性

(4) エネルギーと質量の等価性

などがある。

運動系における時間の遅りというのは、さまざまな運動をしている観測者同士の時計の進み方は同じではなく、自分に対して高速運動している相手の時計の方が遅れて見える現象だ(図2)。実際、宇宙から飛來した宇宙線によって発生した亜光速のミューオンは、本来は数マイクロ秒で崩壊するのだが、地上で観測していると寿命が延びて見える。

ローレンツ＝フィッヅジェラルド短縮というのは、時間ではなく空間的な問題で、運動している観測者同士の間では、相手のものさしが運動方向に縮んで観測される現象だ。

同時の相対性というのは、ある観測者から見て同時に起こっているように見える現象も、運動している別の観測者から見ると同時に見えない現象である。

エネルギーと質量の等価性というのは、有名なアインシュタインの式：

$$E = m c^2$$

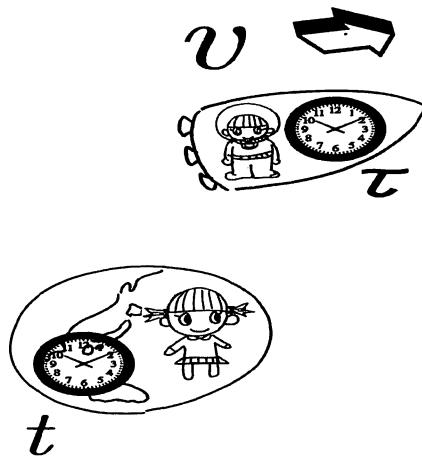


図2 高速運動における時間の遅れ

のことである。すなわち、ある質量 m は、それに光速 c の2乗をかけただけのエネルギー E に等しく、逆に、エネルギー E は、それを光速 c の2乗でわっただけの質量 m に等しいという関係だ。

2.2. 一般相対論の原理と性質

一般相対論も二つの基本原理に基づいて理論体系が構築されている。一つは、

等価原理：天体の重力によって生じる力と加速によって生じる力は、感覚的にあるいは正確には測定によって区別できないので、それらをまったく同じものだとみなそう。という提案である。もう一つは、

一般相対性原理：こちらは、重力場中にいる人にとっても、加速運動している人にとっても、どのような立場・状態にある観測者にとっても、自然の法則は同じように成り立つ。

という考えだ。この一般相対性原理は、特殊相対性原理をさらに普遍化したものである。

重力場を加速系のように扱うためには、ごくふつうに信じられているユークリッド的な平坦な時空では無理で、どうしても曲がった時空という概念を導入せざるを得ない。そして、またまた、自然はインシュタインの枠組み通りになっており、重力場のまわりではたしかに時空が曲がっていたのである。

一般相対論から導かれる主な性質には、

- (1) 重力場中における時間の遅れ
- (2) 重力場近傍での空間の曲がり
- (3) 粒子軌道が橈円でなくなること
- (4) 光線の軌跡が曲がること

などがあるだろう。

重力場中における時間の遅りというのは、質量があつて重力場がある(あるいは強い)ところでは、重力場がない(あるいは弱い)ところに比べて、時間の進み方が遅くなる現象だ(図3)。実際、地上付近と、地上よりも重力

の弱い高空とでも、一般相対論の予言するところに、地上の方が時間の進み方が遅れることが測定されている。

重力場近傍での空間の曲がりというのは、質量(重力場)があると空間は平坦ではなくなり、三角形の内角の和が 180° よりも大きくなるような性質の曲がった空間になることを意味している。

粒子軌道が橈円でなくなることというのは、距離の2乗に反比例する引力が働くニュートン重力に比べて、一般相対論では重力が少し強くなるため、天体のまわりでの質量をもつた物体の運動は閉じた橈円にならないことを意味する。

光線の軌跡が曲がることというのは、質量(重力場)のまわりでは光線の伝播する空間自体が曲がっているので、その中を進む光線も曲がらざるを得ないということである。これもまた観測で実証されている。

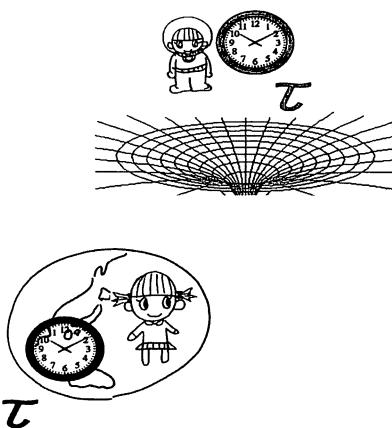


図3 重力場における時間の遅れ

3. 常用される特殊相対論

特殊相対性理論は、素粒子物理学や加速器実験、太陽エネルギーや高エネルギー宇宙現象の解明など、今日では、物理学や天文学のさまざまな場面で当たり前のように利用されている。理学部では(教育学部でも理系では)、

カリキュラムの一部として、特殊相対論の講義があるところも多い。物理学だけでなく、宇宙物理学においても、特殊相対論は必須といえるだろう。この節では、特殊相対論が重要な枠割りを果たす現象について概観したい。

■高エネルギー放射

陽子や電子などいわゆる素粒子の運動では、粒子の運動速度が光速に近くなつてエネルギーが高くなると、特殊相対論的効果が無視できなくなる。たとえば、陽子の近くを通り過ぎる自由電子から放射される「熱制動放射」は、電子が非常に高速になると「相対論的熱制動放射」となる。磁場中を運動する電子(荷電粒子)から放射される「サイクロトロン放射」は、電子の速度が非常に高速になると(相対論的な)「シンクロトロン放射」となる。さらに自由電子が光子を散乱する現象「電子散乱(トムソン散乱)」は(相対論的な)「コンプトン散乱」や「逆コンプトン散乱」と呼ばれるものになる。

実際太陽フレア、超新星残骸、パルサー、ブラックホール連星、銀河系中心、電波銀河、クエーサー、ガンマ線バーストなどなど、宇宙の随所で相対論的高エネルギー粒子からの放射が観測されている。そして、それらの高エネルギー放射の性質を観測することによってこそ、はるか宇宙の現場で何が起こっているのかを突き止められるのだ。

また、地上の加速器実験でも、大型加速器であるシンクロトロン加速器などでは、加速される粒子の速度は光速に近い。そもそもシンクロトロン加速器は、相対論的な効果を考慮しなければ、加速器自体が設計できないのである。

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るし、播磨科学公園都市でも SPring8(Super Photon ring-8GeV)と呼ばれる放射光施設が稼働している(図 4)。



図 4 大型放射光施設 SPring-8

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)。

■太陽のエネルギー

太陽のようなふつうの星「主系列星」の中心部では、物質が高温で高密度な状態になつていて、4 個の陽子(水素の原子核)が 1 個の α 粒子(ヘリウムの原子核)に融合する核反応が起こっている。この話は高校の教科書にも出ているのだがやや誤解を招きやすい。というもの、4 個の陽子が一挙に合体して α 粒子になるわけではない。陽子などが 2 個ずつ地道に融合をしていくって、最終的に、 α 粒子ができるのだ(図 5)。

ところで(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。この失われた質量の分が、先のアインシュタインの式にしたがってエネルギー(や他の粒子)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(またそれらは運動エネルギーをもっている)。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(電子と陽電子が出会うと、どちらも消滅して代わりに2つの光子が生まれる;後述)光のエネルギーとなって、太陽の輝きに寄与する。

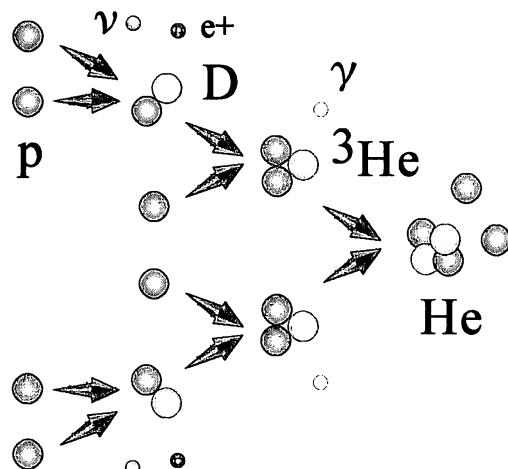


図5 水素の核融合。陽子一陽子連鎖反応の場合反応前は全部で6個の陽子(p)が2個ずつ融合しつつ、重水素(D)とヘリウム³(³He)を経て、ニュートリノ(ν)や陽電子(e^+)や光子(γ)を放出しながら、最終的に1個のヘリウムと2個の陽子に変換する。したがって、反応前と反応後を差し引きすれば、4個の陽子から1個のヘリウムとニュートリノや陽電子や光子などが生じたことになる。

■亜光速ジェット

中心の天体から、天体をはさんで双方向に吹き出す細く絞られたプラズマの流れ「宇宙ジェット」が、宇宙のそこかしこで発見されている。たとえば生まれたばかりの原始星から吹き出す毎秒数十kmの速度の「原始星ジェット」、白色矮星を含む連星系から吹き出す「ジェット流」、特異連星から吹き出す「SS433 ジェット」、SS433と同様にブラックホールを含むX線連星から吹き出す亜光速ジェット、クエーサーや電波銀河など活動銀河の中心から吹き出す100万光年もの長さをもった「電波ジェット」などなど。

これらのジェットの多くは噴出速度が亜光速であって、その解析には特殊相対論が不可欠である。たとえば、四半世紀前に発見されて大騒ぎになった SS433 ジェットでは、ジェットの速度は光速の 26% である。さらに他のいくつかの X 線連星からのジェットでは光速の 92% ということがわかっている。ちなみにジェットを吹き出すブラックホール X 線連星は、宇宙の彼方のクエーサーのミニチュア版というイメージから、最近では「マイクロクエーサー」と総称されている(図 6)。

また活動銀河中心からのジェットの速度は、正確にはわかっていないが、ジェットの速度が見かけ状だが超光速なように観測される現象から、実際に光速を超えているわけではないにせよ、かなり光速近い場合があることがわかっている。

さらに最近発見された超高エネルギーの爆発現象「ガンマ線バースト」も、おそらくは超新星爆発に伴って生じた、超高速のジェット噴出を見ているのだと思われている。ガンマ線バーストにおけるジェットの噴出速度は、なんと、光速の 99.99% ぐらいと見積もられている。

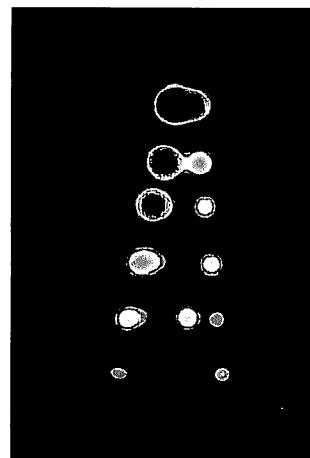


図6 マイクロクエーサー RS1915+105 (NRAO)。上から下に違う時期の電波画像を並べたもので、ジェットが左右に飛び出している。

■電子・陽電子対消滅

電子とその反粒子である陽電子が衝突すると、お互いに対消滅し、AINシュタインの式にしたがってエネルギーに変わる(図7)。衝突前と衝突後で運動量が保存されるため、対消滅によって必ず2個の光子ができるので、光子1個のエネルギーは、電子の静止質量エネルギーに相当する511keVになる(γ線になる)。

このような電子・陽電子の対消滅は、太陽フレアから星間空間、かにパルサー、はくちよう座X-1、銀河系の中心、そして活動銀河中心核にいたるまで、宇宙のあちこちで検出されている。

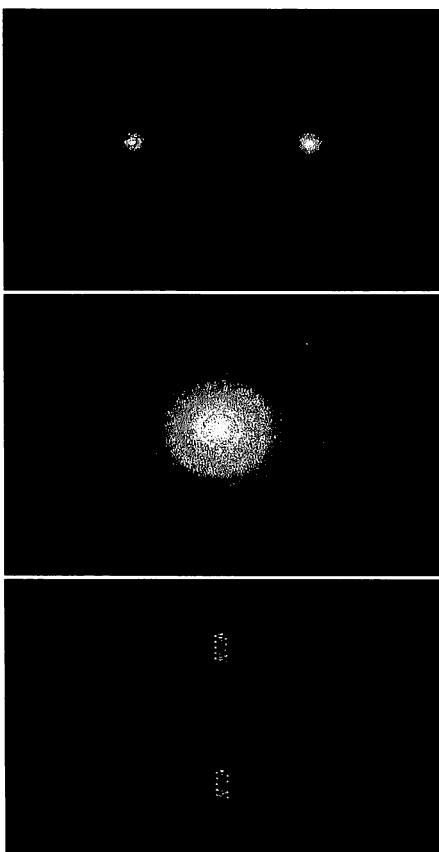


図7 電子・陽電子対消滅。電子と陽電子(上)が対消滅して(中)、2個のガンマ線光子の変換する(下)。

もちろん対消滅が起こるためにには、最初に大量の電子と陽電子が存在しなければならない。電子は通常の物質に含まれているが、陽電子は通常は存在しない。したがって対消滅に先だって陽電子を生成する機構が必要になる。そんなことは難しそうだが、地上でも加速器を使えば簡単に陽電子は作れる。宇宙では、高温のプラズマ中、具体的には、温度が60億度以上になった高温プラズマ中で、高エネルギーの陽子や電子や光子間の衝突によって、容易に電子・陽電子対が生成される。対生成も対消滅も、AINシュタインの式通りに起こっている。

■ディラック方程式

相対性理論と並ぶ20世紀科学の金字塔が量子力学である。概説だけなら、大学教養の講義で聞くことも多いはずだ。

量子力学の基本方程式でイの一番に習うのが、非相対論的な粒子の振る舞いを表した「シュレジンガー方程式」だ。シュレジンガー方程式は、たとえば、水素原子内の電子の振る舞いを見事に記述することができる。

ただし、シュレジンガー方程式は、電子の速度が光速に比べてあまり大きくない範囲でしか成り立たない。電子のエネルギーが高くなると(速度が大きくなると)、相対論の効果を取り入れなければならない。実際、シュレジンガー自身、最初は、相対論的な方程式を考えたのだが、やや問題があって、より単純な非相対論的な方程式を提案した。シュレジンガーが思いついていた相対論的な方程式は、後に、クライン=ゴルドン方程式として再発見されている。閑話休題。

相対論的な粒子(とくに電子)の振る舞いを正しく記述する方程式を導いたのはポール・エイドリアン・モーリス・ディラックで、今日、彼の美しい方程式は「ディラック方程式」と呼ばれている。とまあ、書いたが、実はば

くも、ディラック方程式の具体的な中身はまったく忘れた(笑)。でも、その美しさに感動したことだけは覚えている。そして、相対論的なディラック方程式こそが、はじめて電子の反粒子である陽電子を予言し、後にその実在が実証されたのだ。ディラック方程式は、自然界に反物質というものが存在することを予言した方程式なのである。

4. 太陽系近傍の弱い一般相対論的現象

自然界において、とくに重力が重要になる宇宙において、一般相対性理論も実にさまざまな場面で重要な役割を果たしている。以下では、便宜上、重力が弱い太陽系近傍の話と、ブラックホールその他の一般相対論的な宇宙現象、そして宇宙全体の問題とにわけて紹介しよう。まずここでは、太陽系近傍の一般相対論的効果について概観する。

■カーナビ

驚くなられ、ごく身近なカーナビ(カーナビゲーション)にも、実は、特殊および一般相対性理論が関係している。重力場中における時間の遅れの効果を考慮しないと、現在のカーナビはうまく働かないのだ。

現在のカーナビは、地球を周回する GPS衛星(全地球測位システム; Global Positioning System)と呼ばれる衛星システムからの電波信号をもとにして、自分の位置

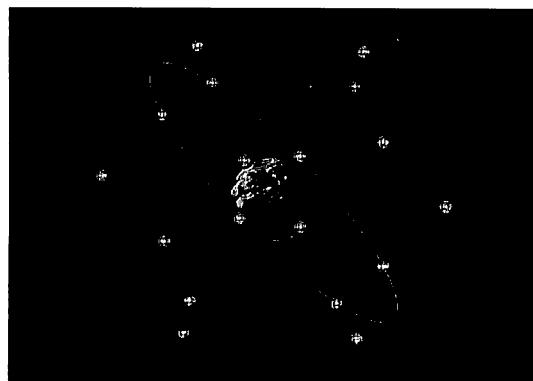


図 8 GPS衛星

を割り出している(図 8)。現在市販されている民生用の GPS 受信機は、約 15m 以内の精度で自分の位置を特定することができるそうだ。

これらの GPS 衛星は、21000km の高度を高速で周回している。そのため、GPS 衛星に積んだ時計は、高速で運動する際の特殊相対論的効果により、地上の時計より遅く進むようになる。また同時に、地上より重力場が弱いという一般相対論的効果により、地上の時計より早く進む。これらの両方の効果が相殺した結果、GPS 衛星の時計は地上の時計よりわずかに早く進むのだ。そこでその相対論的効果を補正するために、GPS 衛星の時計は 1 秒につき 0.445 ナノ秒(1 ナノ秒は 10 億分の 1 秒)だけ、すなわち一日につき 38 マイクロ秒(1 マイクロ秒は 100 万分の 1 秒)だけ遅く進むように調整してあるのである。

■GB-B衛星

AINSHUTAIN の一般相対性理論を検証するために特化した衛星が、2004 年の 4 月に打ち上げられている。「重力探査衛星 B (GP-B; Gravity Probe-B)」がそれだ(図 9)。

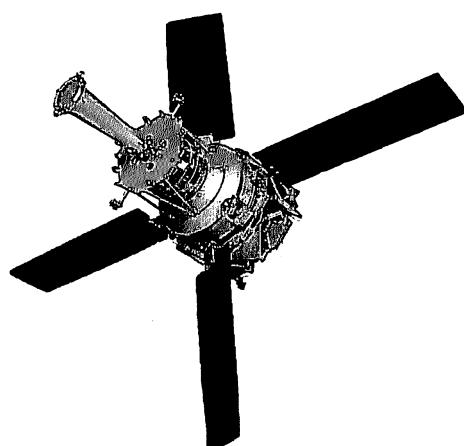


図 9 GP-B衛星(NASA)

NASA が開発した GP-B衛星は内部に、ほぼ完全な球に近い水晶球を 4 つ配置し、衛

星を地球周回軌道に乗せて、水晶球の回転を測定するのである。アインシュタインの一般相対性理論が正しければ、地球の質量と自転の効果(時空のひきずり効果と呼ばれる)によって、水晶球がわずかに回転すると予想されている。とくに地球の自転による時空のひきずり効果が期待されている。

最近のニュース(2004年10月下旬)によると、このG P-B衛星の結果を待たずに、他の衛星システムによって時空の引きずり効果が確認されたそうだ。すごい時代になったものだと信じられない思いである。

■水星の近日点移動

カーナビや時空の引きずり効果の後で、非常に古典的で心落ち着く話題を2つ。

先にも触れたように、一般相対論的効果が働くと、天体のまわりの運動では、橢円軌道は閉じなくなる。その結果、橢円軌道の上で中心の天体にもっとも近い場所－太陽の場合は近日点－の位置は、少しずつずれていくことになる。この性質を、「近日点の移動」と呼んでいる。

実際、太陽に一番近い惑星である水星では、その橢円軌道が完全に閉じておらず、少しずつ近日点の移動が起こっていることが知られていた(図10)。観測される移動量は、100年につき角度にして574秒角ほどもあった。574秒角は非常にわずかな角度(1秒角は1度の3600分の1)ではあるが、無視できない角度なのだ。もちろん太陽系の中には、木星などの巨大惑星もあるので、それらの重力によっても水星の軌道は影響を受け、近日点の移動は生じる。いろいろな惑星の影響を足し合わせていくと、100年につき531秒角までは説明できた。しかし、水星の近日点の移動量のうちで、ニュートン力学だけではどうしても説明できない部分が、100年につき43秒角だけ残っていたのだ。

この不具合を説明したのがアインシュタインである。アインシュタイン自身が、自分の構築した一般相対論を使って、この説明不能だった43秒角をあざやかに解決したのだ。

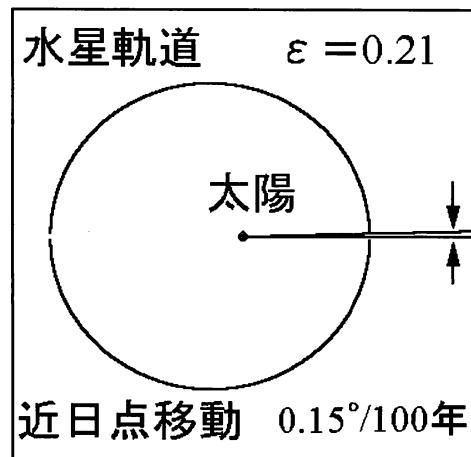


図10 水星の近日点移動

■太陽による光線の弯曲

重力場のまわりでは空間が曲がっているため、光線の軌跡も曲げられる。

たとえば太陽の縁をかすめる光線は、一般相対論を使って計算すると、最初の方向から角度にして1.75秒角曲がることが予想された。この角度は非常に小さく測定が難しい上に、太陽がきわめて明るために普段は太陽の方向の星を見ることはできない。しかし、皆既日食のときは、太陽の近くの星を写真に撮ることができる。そして皆既日食中に撮影した写真と、数ヶ月ずらした夜に撮影した写真とを比較して、星の見かけの位置のずれを測定することができる。もし一般相対論の予言通りに光線が曲がるのなら、皆既日食の際に、星の位置がわずかだけずれて見えるはずだ。しかもそのずれ方は太陽から離れる方向にずれているだろう(図11)。

アインシュタインが一般相対論を提案した数年後、第一次世界大戦直後の1919年に、

タイミングよく日食があった。そのときの日食観測で、著名な天体物理学者アーサー・エディントン卿の率いるイギリス観測隊は、太陽のまわりに見える星の位置が、まさに一般相対論の予言通りにずれていることを確かめたのだ。AINSHUTAINと相対論の名は一躍世界に知らしめられたのである。

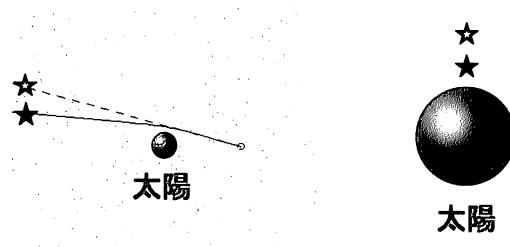


図 11 太陽の縁をかすめる星からの光線。星の真の位置は★にあるが、太陽のそばを通過するときに光線が曲げられるため、太陽から外向きにずれた☆の位置にあるように観測される。

5. 活動する宇宙の背後にある一般相対論

第二次世界大戦後にはじまった「電波天文」や 1970 年代ぐらいから発達した「X線天文学」など、電波や X 線という見えない光で宇宙を眺めるようになってから、宇宙は非常に騒々しくて激しく荒々しい場所であることがわかつってきた。またそのような激しい活動の背後には、まさに黒幕としてブラックホールが控えている場合も少なくないことがわかつってきた。ここでは究極の相対論的現象であるブラックホールに代表される強い相対論的效果を概観する。

■X線星とブラックホール

2 つの星がお互いのまわりを回りあっている連星の中で、強い X 線を放射しているものを「X 線連星」と呼んでいる。ブラックホールを含むものとしてもっとも有名なのは、はくちょう座の方向にある X 線連星、はくちょう座 X-1 だろう(図 12)。

X 線連星はすべて、中性子星かブラックホールと通常の恒星からなる近接連星で、恒星からコンパクト星へガスが降り注いで、コンパクト星の近傍で超高温になったガスが X 線を放射していることがわかっている(図 13)。ブラックホールを含む場合を、とくに「ブラックホール連星」と呼ぶこともある。

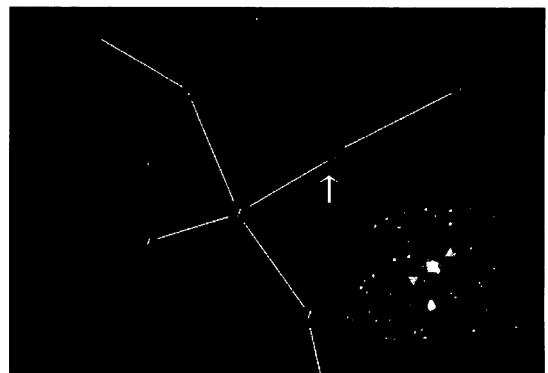


図 12 はくちょう座と X-1。右下に埋め込んだ△印で挟んだ星(9 等星)が、ブラックホールの相方の青色超巨星 HD226868。

ブラックホール周辺のガスは円盤状になっていることが多い(いわゆる降着円盤)。ガスの温度は、ブラックホールのごく近くでは、「低温」な場合でも数千万度、高温な場合には数十億度から 1 兆度ぐらいにもなる。“死んだ天体”ともいわれるブラックホールは、実は、宇宙でもっとも激しい活動を引き起こす黒幕でもあるのだ。

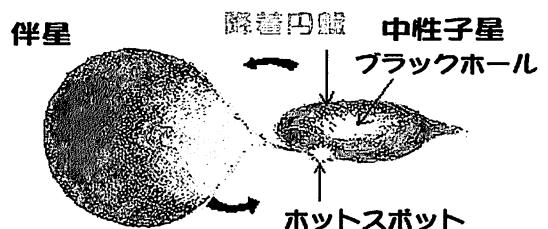


図 13 X 線連星の描像

■ ケーサーと超巨大ブラックホール

通常の銀河に比べて、中心核が非常に明るかったり、強い電波やX線を出していたり、数十日とか1年のタイムスケールで明るさが変動したり、ジェットなどの特異な構造を示していたり、その他、中心核などがきわめて活発な活動をしている一群の銀河を「活動銀河」と呼んでいる。活動銀河には、中心域が異常に明るく激しいガス運動を示す「セイファート銀河」、強い電波を放射している「電波銀河」(図14)、非常に遠方にあって星のような点状にしか見えない「ケーサー」、激しく変光している「ブレーザー」など、さまざまなものがある。

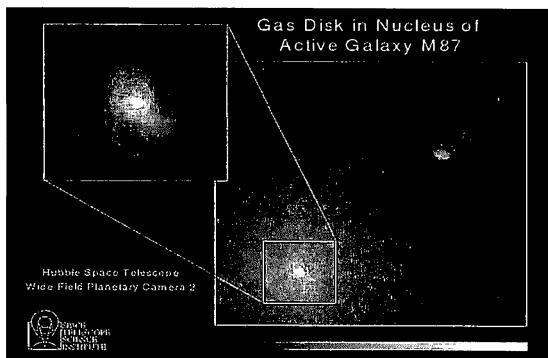


図14 電波銀河M87とジェット(STScI/NASA)。中心部にはガス円盤が写っている。また右上にはジェットが見えている。

現在の定説では、活動銀河の中心には太陽の1億倍もの質量を有し、回りが火星軌道ほどもある「超巨大(超大質量)ブラックホール」が鎮座している(図15)。

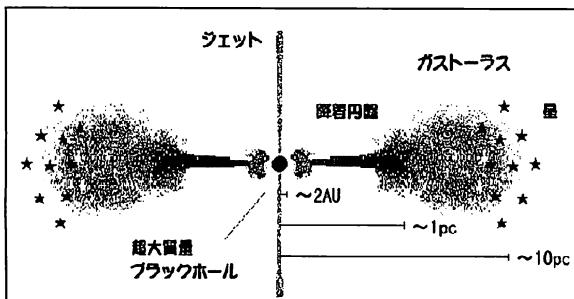


図15 活動銀河の描像

その超巨大ブラックホールに向かって、ガスが円盤状に渦を巻きながら落ちていき、半径1光年ものサイズの特大の降着円盤を作っている。

回転運動をしている降着円盤の中では、ガス同士が互いに接しているために、ガスの間で“摩擦”が働く。その結果、ガスは加熱され、ついには輝き始めるのである。そして円盤ガスは、内部で生じる摩擦によってどんどん熱くなり、ついには強い可視光、X線、電波を放出するようになる。

■ 重力レンズ天体

光源となる遠方の天体と観測者との間に、重力をおよぼす別の天体があれば、遠方の天体から出た光は、より近くの天体の重力場で曲げられて観測者まで届くことになる(図16)。本来はあさっての方向に向かっていて観測者には届かなかつたはずの光が、観測者に集まつくるために、結果として光源は明るく見える。観測者と光源の間の天体が一種のレンズの役割を果たすと考えられるため、この現象は「重力レンズ」と呼ばれる。

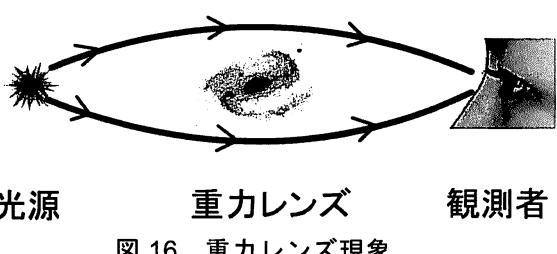


図16 重力レンズ現象

もつとも、実は、意外なことに、アイシュタイン自身は、重力レンズ効果が実際に観測される可能性は小さいだろうと考えていた。重力レンズ効果を計算した論文も書いているのだが、その中で、光源と重力レンズ天体と観測者が一直線に並ぶ確率は非常に低いだろうと述べているのだ。ところが、自然はアイシュタインの予想をイイ意味で裏切り、ア

インシュタイン生誕百年にあたる 1979 年、重力レンズ像クエーサー 0957+561A,B が劇的に発見された。重力レンズ現象も山ほど見つかっていて、具体的な事例にはことかかないが、大阪教育大学で撮像された二重レンズ像を紹介する(図 17)。

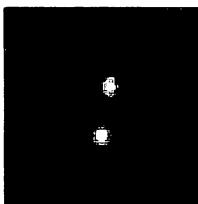


図 17 双子クエーサー 0957+561A,B。重力レンズが生んだ一つのクエーサーの二重像。
(大阪教育大学)

■重力波

電磁波は、電気を帯びた粒子が身震いする時に放射されて、時空間という入れ物の中を、電場と磁場が変動しながら伝播してゆく波だ。一方、「重力波」はやはり物体が身震いすると放射されるが、別に電気を持っていなくても構わない。重力波は、物体(正確に言えば質量)が運動することによって時空間そのものが歪み、さらにその歪みが周りの時空間へ伝わってゆく波なのだ。一般相対論によって、時空と物質が相互作用することがわかったために、存在が露わにされた波動である。一般相対論以前にも自然界に重力波は存在していたはずだが、一般相対論によって、その存在を人間が知るに至ったわけである。

重力波と電磁波の似ている点は、両方とも横波で、しかもどちらも光速で伝わることだ。重力作用も光速で伝わるので、たとえば太陽がこの瞬間に消滅したとしても、地球は 8 分あまり軌道運動を続けるだろう。

重力波が存在することは確実だが、重力波は非常に弱い波なのでいまだに直接的な検出はされていない。間接的な検出はされていて、間接的な検出だけでもノーベル賞になった(連星パルサーの解析を行ったハルスとティラー、1993 年)ぐらいだから、重力波の直接

検出が成功すれば、ノーベル賞は確実である(図 18)。そうそう、ブラックホールの衝突合体などによって重力波が発生する。

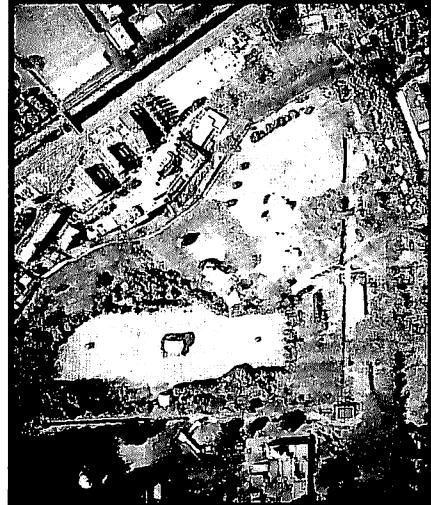


図 18 レーザー干渉型重力波検出器 TAMA300(国立天文台)

6. 宇宙観の大転換をもたらした一般相対論

一般相対性理論は、人類の宇宙観に対して、コペルニクス以来の大転換をもたらした。コペルニクス以前、地球は宇宙の中心であり太陽や諸惑星は地球のまわりを回っていると考えられていた。コペルニクス以降、太陽のまわりを回っていると考えられるようになった地球は、絶対不動の存在ではなくなつた。しかし、地球や諸天体を含む宇宙全体は、あくまでも絶対静止した存在であり、このことはニュートンの宇宙像で確立された。ところが、インシュタインの一般相対論は、その宇宙自体が絶対静止したものではなく、ダイナミックに変化していることを明らかにしたのである。

あえて言えば、相対論以前、宇宙は人知の及ばない、いわば神の領域だったのが、相対論以後、宇宙そのものさえも人の手の届く領域、科学の対象となったのである。

■ アインシュタイン方程式

特殊相対論では時間と空間が時空に統合され、一般相対論では時空と物質・エネルギーが統合された(物質とエネルギーはアインシュタインの式で変換できるので一緒に扱おう)。一般相対論は、物質やエネルギーが存在する曲がった時空の幾何学であり、したがってまた、物質やエネルギーに満ちた宇宙そのものを表現できる理論でもある。

アインシュタインの一般相対性理論では、時空と物質の関係を表す基本方程式は、アインシュタイン方程式と呼ばれている(図 19)。アインシュタイン方程式の表す意味を一言で書けば、

(時空の形状) =

(定数) × (物質・エネルギーの分布)
という内容になっている。

入れ物である時空と、内容物である物質・エネルギーは、本来はまったく異質なものだったはずだ。しかし、それらをたった一本の式で関係づけてしまったところに一般相対性理論の極意がある。その結果、時空構造と物質・エネルギーがお互いに影響を与え合うことがわかったのである。すなわち、物質・エネルギーは時空の曲がりに沿って運動し、また時空の曲がり方自体は物質・エネルギーの分布によって決まるのだ。

$$R_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{ik}$$

g_{ik} : 時空の計量テンソル

R_{ik} : 時空のリーマン曲率テンソル

R : 時空のスカラー曲率

T_{ik} : 物質などのエネルギー運動量テンソル

図 19 アインシュタイン方程式(宇宙項なし)。魔法の呪文と思って眺めて欲しい。

■ ビッグバン膨張宇宙

宇宙全体にアインシュタイン方程式を適用すると、宇宙の構造(時空の形状)と宇宙に存在する物質・エネルギーの分布とが関係づけられることになる。すなわち、宇宙全体の物質・エネルギー分布がわかれば、アインシュタイン方程式から、宇宙の時空構造を決めることができる。逆に、宇宙の時空構造が決まれば、アインシュタイン方程式から、その時空構造に合わせた物質・エネルギー分布が決まるのだ。

アインシュタイン自身は、宇宙が一樣で等方であるという仮定(宇宙原理)と、宇宙が時間的に変化しないという仮定のもとで、自分が導いた方程式を解き、いわゆる静止宇宙のモデルを構築した。このとき、静止宇宙が自分自身の重力で潰れることを防ぐために、斥力の働きをする「宇宙項」を導入した。しかし、宇宙が静止していなければ、時間的に変化してもよければ、話は別である。

実際に、アインシュタイン方程式を解いて、宇宙の大きさが一定ではなく時間的に変化している、それも動的に膨張している解が存在することを突き止めたのは、ロシア人の數学者アレクサンドル・フリードマンとベルギー人神父で宇宙論学者のアベ・ジョルジュ・ルメートルである。

フリードマンは 1922 年に、宇宙項のないアインシュタイン方程式を解いて、膨張する宇宙を表す解を見いだした(図 20)。このような宇宙でも、もちろん宇宙全体の物質・エネルギーによる重力作用は働いているが、宇宙そのものが静止しておらず動的に変化しているので、アインシュタインが静止宇宙を作るために導入した宇宙項は必要ない。アインシュタインが導入した宇宙項は棄却されたが、後年、インフレーション宇宙モデルによって復活することとなる。

フリードマンの膨張する宇宙像は、その後、

遠方の銀河が実際に膨張運動している「ハッブルの法則」の発見(1929年)や、宇宙初期が火の玉状態だったというビッグバンの残照である3K 宇宙背景放射の発見(1965年)などによって、観測的にも立証された。

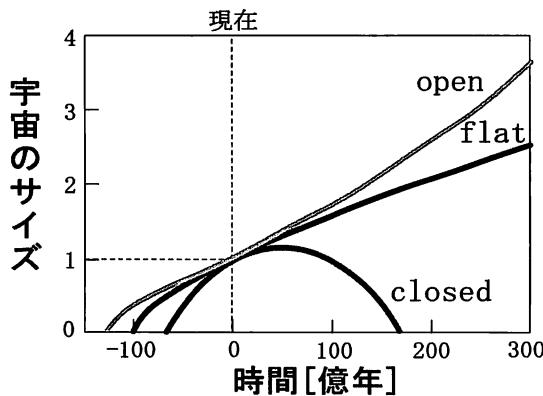


図 20 膨張する宇宙モデル。宇宙に存在する物質の多寡によって、閉じた宇宙、平坦な宇宙、開いた宇宙の3種類のモデルがある。最新の研究では、宇宙は平坦であり、かつダークエネルギー(斥力として働く宇宙項)のために、137億年前にスタートして以来、加速しつつ膨張していることが確実視されている。

■インフレーション宇宙

ビッグバン宇宙モデルは、宇宙の進化を記述する理論としては、基本的には正しいモデルだと現在でも信じられている。

ただし、宇宙に関する観測が進み、宇宙に対する理論的理解も深まってくると、ビッグバン宇宙モデルの綻びも見えてきた。それらの問題を一挙に解決するのが、「インフレーション宇宙モデル」である。

ここでいう“インフレーション”とは、宇宙開闢直後の急激な膨張のことをさしている(図 21)。宇宙が生まれた直後、宇宙は時間が経つにつれ倍々になるように、すなわち指数関数的に、急激に膨張したというのだ(ビッグバン宇宙モデルでは膨張は緩やか)。

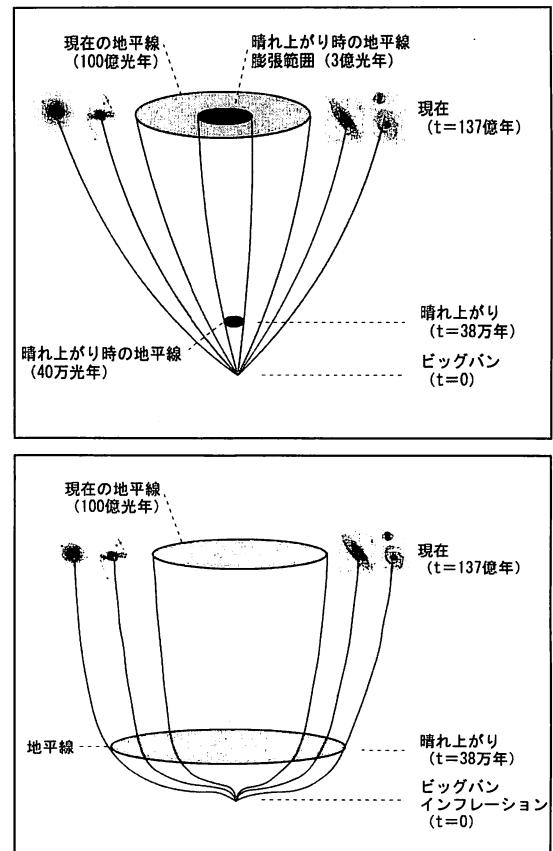


図 21 ビッグバン宇宙モデルの膨張とインフレーション宇宙モデルの膨張。水平方向が空間的な拡がりを、鉛直方向が時間的な流れ(下が過去、上が未来)を表す。

宇宙のごく初期にインフレーションは起こったと考えられている。量子的サイズのミクロな領域が、インフレーションによって、 10^{40} 乗かそれ以上も引き延ばされたと想像されている。そして宇宙のごく初期には、一様になりうる地平線領域も非常に小さかったが、インフレーションによる急激な膨張によって一挙に引き延ばされ、観測される宇宙の範囲よりもはるかに大きくなったのである。そして(急激な)インフレーション的膨張の後に、宇宙は(比較的緩やかな)ビッグバン的膨張に移行するが、現在でも、一様な領域は現在の宇宙の地平線よりも十分に大きいのだ。

■ ブレーンワールドと多元時空

さらに、われわれの認識する4次元時空は、より高次の次元の一部であり、高次元空間における4次元時空は3次元空間における2次元の膜のようなものだという考え方、「ブレーンワールド」と呼んでいる(図22)。ブレーンワールドの“ブレーン”は、メンブレーン(膜)の意味である。

4次元時空以外の他の次元(「余剩次元」と呼ばれる)は、ぼくたちの4次元世界を支配する力の枠外にあるために、ぼくたちは認識できない。ただし、重力相互作用だけは、全次元で働いていると考える。

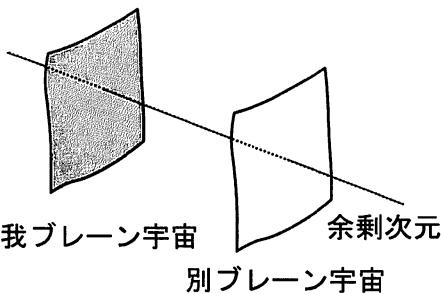


図22 高次次元におけるブレーンワールド

ただし、単純に空間の次元が増えると、重力場の性質が変わってしまう。たとえば、3次元空間が4次元空間になっただけで、3次元空間における万有引力の逆2乗の法則は成り立たなくなるのだ。その問題を回避する一つの方法が、時空のコンパクト化である。4次元時空以外の次元が非常に小さなサイズ(プランク長さ程度)になっていれば、それぐらいの領域で重力がおかしくなっていても気にならないわけだ。もう一つが、重力場に非等方性を導入する方法だ。重力場は、ぼくたちの住むブレーン内部では等方的で万有引力の法則に合致しているが、余剩次元の方向には非等方だとするのである。

現在では、このようなブレーンワールドに

おけるAINシュタイン4次元時空の開闢、高次元時空におけるブレーンワールドの創世、高次元時空そのものの存在などなど、さまざまなアイデアが噴き出している研究途上だ。ブレーンの無からの創世や高次元時空におけるブレーン同士の衝突などが議論されている。遠からず、新しい時空の枠組みが得られ、自然界の統一的理解が大きく進展していくだろう。

7. 相対性理論を超えて

相対性理論が誕生して一世紀。相対性理論は時空と重力の仕組みを明らかにし、宇宙におけるさまざまな現象を解明してきた。一方、現代科学において、相対論と並ぶ重要な柱である量子力学は、ミクロな世界の仕組みを明らかにし、宇宙のはじまりを議論できるようにした。しかし、残念なことに、これら二つの基礎理論は、まだ両立していないのだ。一般相対論と量子力学はいまだ統一されていないのである。21世紀にはそれらが融合した「量子重力理論」が登場するだろう。

1916年に一般相対性理論を完成したAINシュタインが、その後40年近く、終生追い求めたのが「統一場理論」である。

現在、自然界における力の場としては、質量をもった物質・エネルギーの間に働く宇宙の巨視的な構造を支配する「重力」、原子核の中で陽子や中性子を結びつけている「強い力」、中性子を放射性崩壊させる「弱い力」、そして電荷をもった粒子の間に働く「電磁力」が知られている(表1)。1916年当時は、力の場としては、重力場と電磁場のみが知られていたのだが、AINシュタインはそれらの統一的枠組みを作ろうと努力したのだ。AINシュタインはあまりにも時代に先駆けていたというべきだろう。

表1 自然界における4つの力

力の場	力を感じる粒子	力を伝える粒子
電磁力	荷電粒子	光子
弱い力	クォーク、レプトン	弱ボース粒子
強い力	クォーク	膠着子
重力	すべての粒子	重力子

表2 フェルミ粒子およびボース粒子と
それぞれの超対称性パートナー

フェルミ粒子	ボース粒子
(スピン 1/2)	(スピン 0)
電子	超電子
ニュートリノ	超ニュートリノ
クォーク	超クォーク
(スピン 1/2)	(スピン 1)
フォーチーノ	光子(フォトン)
ウィーノ	W ボソン
ジーノ	Z ボソン
グルイーノ	膠着子(グルーオン)
グラビチーノ	重力子(グラビトン)

今日では、統一場理論の重要性は非常に高く認識されている。実際、特殊相対性理論と量子論の合体という形で「量子電気力学」が完成し、電磁力と弱い力は「量子電弱力学」として統一され、強い力も「量子色力学」によって記述されることがわかった(現在では、量子電弱力学と量子色力学を素粒子の標準理論と呼んでいる)。量子力学と融合せずに残っているのは、重力場だけなのだ。量子重力理論こそが残っているのである。

統一の鍵は、フェルミ粒子(物質の粒子)とボース粒子(力の粒子)の間に成り立つ「超対称性」という性質だと考えられている(表2)。超対称性粒子の一部は、いわゆるダークマターに寄与している可能性もある。1955年にアインシュタインが死去してから半世紀、時代がようやくアインシュタインに追い付いたのかもしれない。

参考文献(宣伝コーナー)

本文内では個別の引用はしていないが、もっと詳しく知りたい人のために、全般にかかる参考図書を挙げておく。といっても、自著が多いので、宣伝コーナーになっちゃったけど。

まずは、いましがた命名したところの“アインシュタイン・シリーズ”。小学生高学年向けだが大人が読んでも面白い『ぼくだってアインシュタイン』(岩波書店、1994年)、中学生以上向けだが大人が読んでも面白い『となりのアインシュタイン』(PHPエディターズグループ、2004年)、一般向けだが子供でも読めるかも知れない『アインシュタインの宿題』(大和書房、2000年)(光文社知恵の森文庫、2003年)の3冊が超お勧め。ただし、全部揃えても特典はない。あ、それはケチくさいかなあ(笑)。翻訳した『ブラックホールへようこそ!』(三田出版会、1996年)によければ、在庫があるので差し上げます。ただし着払い。やっぱりケチくさい(爆)。

本稿の話題の多くは、近刊『100歳になった相対性理論(仮題)』(講談社サイエンティフィク、2005年、1月刊行予定だから、もう出たかなあ)からトピックスをエットコ取りした。編集者が柴田一成さんの教え子で、ぼくの後輩にもあたり、断り切れなかった企画だが、結果的には、タイムリーで内容もいい本になったと思うので、これもお勧め。

一般向けの相対論の本は最近はあまり読まないのだが、ぼくからみても、これは面白い!、力作だと思ったのが、相対論の大御所キップ・ソーンが著した『ブラックホールと時空の歪み』(白揚社、1997年)とブライアン・グリーンの『エレガントな宇宙』(草思社、2001年)。

本稿で取り上げた天文学関連の説明については、福江他『星空の遊び方』(東京書籍、2002年)、『<見えない宇宙>の歩き方』(PHP

新書、2003年)、栗野諭美・福江共編『最新宇宙学』(裳華房、2004年)などを参考して欲しい。

天文学や宇宙物理学の用語については、『最新天文学小辞典』(東京書籍、2004年)を教室に一冊必置。惑星の名前の由来などにも詳しいので、ネタ本としても大変重宝すると思う。ただ、月の満ち欠けは入れ忘れた(笑)。

大学レベルの相対論の教科書は多いが、もし無人島で暮らすことになって、たった1冊しか本を持って行けないときには、ぼくは迷わず、相対論のバイブルであるランダウ＝リフシツ『場の古典論』(東京図書、1978年)を持参する。2冊持つて行ってよければ、加藤正二『天体物理学基礎理論』(ごとう書房、1989年)がお勧めだが、こちらは大学院向け。

AINSHUTAIN自身の話については、アブラハム・パイス『神は老猿にして…：AINSHUTAINの人と学問』(産業図書、1987年)、金子務『AINSHUTAIN劇場』(青土社、1996年)などがいいだろう。AINSHUTAINだけに限らず、湯川秀樹、朝永振一郎、ファインマン、シュレジンガー、ハイゼンベルグら、科学者の自伝や伝記は、それぞれに読み応えがある。

宿題

少し長めの解説になったが、講義の後にはレポートというのが決まりである。高校生にもできそうな相対論に関わるテーマを、思いつくままいくつか挙げてみよう。

- ・AINSHUTAINの式のいろいろな導出方法を調べ、新しい方法を考案せよ。
- ・大型加速器の見学をして、新しい加速器の設計をしてみよ。
- ・重水素の核融合反応を調べ、重水素で燃えている星の質量や性質を論じよ。
- ・反物質の発見の歴史をまとめよ。
- ・カーナビの精度を実測し、GPS衛星の時計の調整をしなかったらどれだけ精度が悪くなるかを検証せよ。
- ・太陽系外で発見されている系外惑星のうち、ホットジュピターのような母星に近い惑星について、相対論的な近星点移動を計算し、観測可能性を論じよ。
- ・ブラックホール時空を近似的に表現できる擬ニュートンポテンシャルを用いて、ブラックホール現象の計算をせよ。(擬ニュートンポテンシャルについては、『天文月報』2005年1月号などに掲載予定の記事を参照)
- ・ブラックホール発見の歴史的経緯を詳細に調査せよ。
- ・降着円盤エネルギーを利用した宇宙文明の在り方を検討せよ。
- ・レーザー干渉型重力波検出器の見学をして、卓上の重力波検出器を設計し、その性能を論ぜよ。
- ・相対論や宇宙論の専門家にインタビューして、科学的発見のシナリオをまとめよ。

これらは、ほんとに思いつきで挙げただけなので、ほかにももっともっといろいろなテーマが転がっているはずだ。是非チャレンジしてみて欲しい。