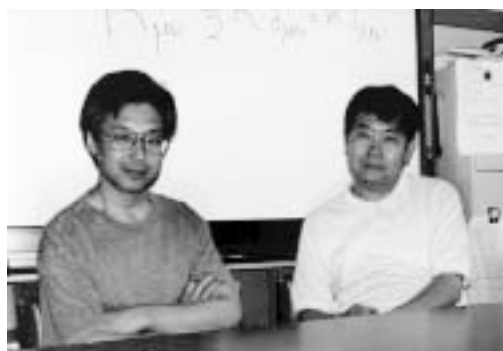




# 宇宙は大きな大きな実験装置

—— 細谷・石原研究室～物理学科 ——



(右) 細谷 暁夫 教授

(左) 石原 秀樹 助教授

わたしたちが宇宙の壮大さを見ると、そのあまりにも日常とかけはなれた、驚くべき姿に魅せられる。宇宙といえば星の空、夏に輝く天の川、そして地球から何億光年もはなれた、遠い遠い銀河たち…。

しかし細谷・石原研究室で研究されているテーマはさらにスケールが大きかった。東工大の物理学科でも異色の、宇宙論という分野である。その名のとおり宇宙全体を扱う物理学だ。けれども、人間が向き合うにはあまりにも大きすぎる宇宙。この宇宙について、私たちはいったい何を知りうるのか。石原秀樹助教授におうかがいした。



## 宇宙、ごくわずかな歪み。

突然だが、ここに前後左右の方向しか知らず、上と下という方向を知らない2次元人という生物がいると仮定する。彼らは本当は球面の上に住んでいるのだが、その球があまりにも大きいため、自分たちの住んでいる世界はどこまでも無限に続く平面であると信じていることにしよう。この彼らが次のような旅をした。まず彼らは最初点Aにいた(図1-a)。ここからまっすぐ歩いて点B、点Cにきたところでそれぞれ直角に右へ曲がった。さらにまっすぐ歩いていると、不思議なことに始めの場所に戻ってきてしまったのである。各頂点を直角に曲がってきたのだから、彼らを通ってきた三角形の内角は270度ということになるが、これはおかしい。三角形の内角は180度であるはずだ。ところが、実は彼らがいま通ってきた道は私たちからみると図1-bのようなものだったのである。彼らは「まっ平らな平面」を歩いていたつもりが、球面という「歪んだ面」を歩いていたのだ。しかし私たちはこの図を見て納得するにしても、これを2次元人たちに説明するのは至難の技にちがいない。なにしろ彼らは地面にへばりつ

いて生きていて、上下の方向をまったく知らないのである。もしかすると彼らの中には天才がいて、自分たちの住む世界が「歪んでいる」という考えにたどりつくかもしれない。けれども彼らはこの世界から出られないのだから、私たちのように外から見て確かめることはできないのである。

いままでは平面の歪みを2次元人がどうとらえるか、という話だった。では、私たちにとっての空間はどうなのか? このことを深く考えた人がアインシュタイン、一般相対論(以下相対論と略す)の生みの親である。相対論はニュートンの重

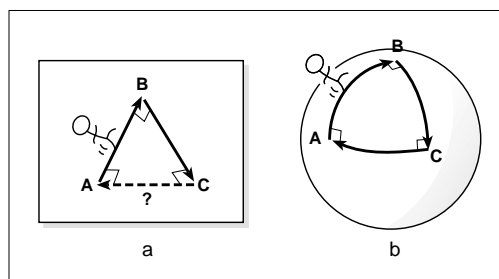


図1 2次元人の旅

力理論に代わって重力というものを「時空の歪み」で説明する理論だ。相対論によると、この宇宙の時間と空間はひとつになっていて「時空」というものを構成しているらしい。そして時空はその付近にある物質の質量に応じて「歪む」という。この歪みが重力なのだ。でも「時空が歪んでいる」とはどういうことか？ここで私たちはさきほどの2次元人と同じ気分を味わうことになる。平面が「歪んでいる」という考えは、2次元人には直観的に理解できないものだった。同じように私たちは時空が「歪んでいる」という事実を直観的には理解できないのである。しかし普通なら直進するはずの光が、重い星の周りでは曲がって進むことが観測されているから、たしかに時空は歪んでいるらしい。つまりこの場合の光の曲がり力は力によるものではなく「時空の歪み」によるものなのだ。光自身は時空の中をまっすぐ進んでいるつもりでも、時空そのものが歪んでいるため結果として曲

がってしまうのである。しかし時空の歪みは私たちの周りでは非常に小さいので、普段私たちは光がまっすぐ進むと考えて差しつかえない。だがたとえ時空の歪みが普段から無視できないくらい大きいとしても、それを外から見て確かめることはできないのである。

ところで、相対論で表されるのは時空の歪みだが、どこか宇宙の一部分の歪みだけが表されるわけではない。時空の歪みとは宇宙全体の歪み、つまり「一個の宇宙空間の形」なのだ。相対論が難解だと思われているのも、この宇宙全体を表せるという特徴のためだろう。細谷・石原研究室のテーマは多種多様であり、一見何の関係もないように見えるほど多くのテーマを扱っている。しかし、それらは相対論という一本の糸によってつながっている。宇宙論で時空のことを語るための道具として、アインシュタインの相対論は欠かせない存在となっているのだ。



## ブラックホール、謎の凝縮。

宇宙に数ある天体のなかでもいまだ多くの謎につつまれているのがブラックホールである。この内部では時空の歪みが極端に大きくなっている。いや極端どころではない。相対論によればこのブラックホールの中心には「特異点」とよばれる点があり、そこでの時空の歪みぐあいは無限大であるというのだ。時空がちょうど針の先のようにとがっているのである（図2）。この特異点にある距離より近づいたものは、たとえ光だろうが何だろうがもう2度とそこから抜け出せなくなってしまう。これが「ブラック」なる名前の由来である。太陽の何十倍も重い星は、最後の爆発のさい、自分自身でも支えきれないほどの重力が生じて内側へつぶれていく。その結果としてこの特異点ができるらしい。だがはたして物理法則はそんな点の存在を許しているのだろうか。

物理の法則はおもに微分方程式の形で与えられる。ところが特異点のようになにか無限大の量が入ると、積分はできない。したがって特異点では物理法則は適用できなくなる。特異点では何がおこっているかわからないのである。そんな点が宇宙に存在してもいいのか？相対論を使うと、確かにブラックホールの中心にはそのような点が存

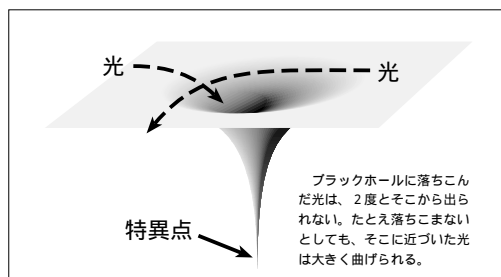


図2 ブラックホール

（ここでは時空を平面的に描いている）

在するという定理、「特異点定理」が証明できてしまう。しかし特異点がいつもブラックホールの中にあるなら、こういう考え方もできる。もし特異点で物理法則が破綻していても、ブラックホールからは光さえ外に出られないのだから、いかなる情報も外へ伝わらない。ならば、私たちの見える世界に特異点はないから心配無用だ、と。

ところが研究が進むにつれ、ブラックホールの中でなくても特異点が存在するということがわかってきたのだった。相対論によればそういう解もありうるのである。これはまずい。細谷・石原研究室ではテーマごとに何人かのグループをつ

くって研究をしているが、そのテーマのひとつがこの特異点定理だそうだ。その結果、このような「裸の」特異点は確かに数学的な解としてはあり

うるのだが、それはちょうど針の上にボールをおいたような非常に不安定で実際には起こりえない現象らしい、と考えられている。



## ビッグバン、最初で最後の大実験。

地球から何十億光年も離れた遠い銀河には不思議な現象がみられる。どの銀河からくる光もみな、その波長が長くなっているのだ。これが「光のドップラー効果」。つまり、すべての銀河が地球から遠ざかっているのである。銀河どうしがお互いに離れつつあるのだ。これは一体なにを意味しているのか？ 相対論によれば、空間が時間とともにその大きさを増していく、いいかえれば「膨張していく」ということもありうる。そしていまわれわれの空間が膨張しているとすれば、大昔にはもっと小さかったはずで、銀河どうしもより近くにあったはずである。さらに時間をさかのぼれば時空の大きさはゼロ、宇宙のすべての物質は一点に集まっていた瞬間があったはずなのだ。これが現代の物理学で語られる「宇宙の始まり」、ビッグバンとよばれる瞬間である。われわれの宇宙は、どうやらこの時点から始まったらしい。そして宇宙は膨張を続け、現在に至ってもまだ膨張している。ビッグバンの直後にはまだ物質の構成要素

はバラバラでプラズマのような状態にあり、その高密度たるや光もろくに進めなかったほどだという。それが膨張するにつれて少しずつ温度が下がり、何千年か後のある時点で光が自由に動けるようになった。そしてその証拠に、いまもそのとき出た光が宇宙のあらゆる方向からやって来ている（図3）。私たちが見上げる空は、宇宙のもっとも古い光で満たされているのである。

このように現代の物理学はついに宇宙の始まりという神秘的な現象までさかのぼりつつあるのだが、それでは宇宙の終わりはわかるのだろうか？ これは微妙である。ニュートンの時代から、しばしばこういう疑問が繰り返されてきた。「もし万有引力がすべてのものを引っ張るとすれば、やがて宇宙の物質すべてが一箇所に集まってしまうのではないか？」このことは、重力の理論が相対論に置き変わってからもういわれている。先ほどみたように宇宙にはビッグバンによって膨張をはじめた勢いがついている。しかしいつか宇宙は自分自身の重力で膨張にブレーキをかけ、物質が集まりだして再び一点に収縮してしまうのかもしれない。こんなとき、宇宙の形（といっても本当の時空の形は私たちには想像できないので、ここでは平面を例に説明する）は自分自身の重力で球のように内側へと歪められている（図4-a）。これを「閉じた宇宙」という。このような宇宙は有限の大きさだが、どこまでも進め、はてがない。それは地球の表面をどこまでも進めるのと同じである。もし私たちの宇宙がこの形をしていると、いずれ宇宙が収縮を始めてこの世は終わるかもしれない！ でも心配は無用である。たとえ宇宙が収束するとしてもそれは何百億年も先の話なので、さしあたっては単位取得をあきらめたりヤケ酒を飲んだりする必要はない。それに宇宙の未来にはもっといろいろなシナリオもありうるのだ。もし物質の量がたいしたもの でなければ、宇宙はいつまでも膨張しつづける。これを「開いた宇宙」という（図4-c）。この図にも描ききれていないよ

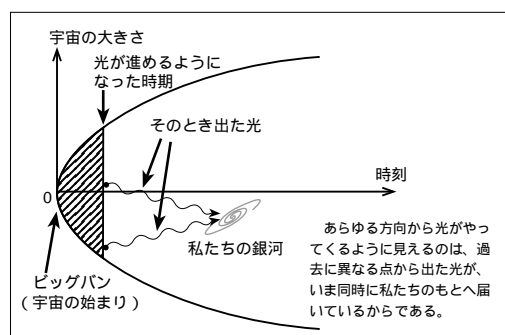


図3 宇宙で最初に出た光

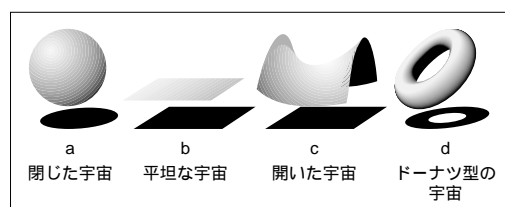


図4 宇宙の「形」

うに、この時空は無限の大きさをもつ。また、時空の歪みがまったくない「平坦な宇宙」も考えられる(図4-b)。これは2次元人の信じていたような「まっ平らな平面世界」と同じことだ。これも大きさは無限である。するとここで次のような疑問が生まれる。では開いている宇宙は終わりがなく、閉じている宇宙はかならず重力が勝利してしまうのだろうか？

ここで細谷・石原研究室の人々が研究している



## インフレーション、大人になる宇宙。

さて、現在私たちの宇宙は前にあげたいいくつかの形のうちどれなのか？...という実はまだよくわかっていない。非常に非常に微妙なところなのだ。わかっているのは、宇宙の歪みがかなりまっ平らに近いということで、平らに近いからもしかすると微妙に開いているかもしれないし閉じているかもしれない。そもそも宇宙が全体としてこんなにも歪みが小さいのは、たいへん不思議なことなのである。さっき、宇宙のあらゆる方向から微弱な光がやってくるって書いた。この光は、宇宙のあらゆる方向からほぼ等しい強さでやってくる。宇宙に中心はないから、過去には宇宙のすべてが同じ光を発射していたといっている。つまり、宇宙はこのときすべての領域がほぼ同じ温度にあったのだ。同時に、この時刻での時空のでこぼこはとても小さかったことになる。これは宇宙の始めにあったであろう時空のでこぼこが、膨張によってならされてしまったと考えるべきだ。しかし宇宙が現在のように大きくなるためには、宇宙は始め自分自身の巨大な重力をふりきって膨張する必要がある。相対論によれば、その時必要な速度はほとんど無限ともいえる超高速である。そんな高速で膨張していたら宇宙のエネルギーをすべて拡散させ、温度を均一にしている暇はあるのだろうか？無限に近い速度で離れつつある物質をかきまぜることができるのだろうか？もちろん、宇宙は誕生当初からすでによく均一に混ざりあっていてと考えることもできるが、そんなのは少しですぎた話ではないだろうか？宇宙の最初はもっと混沌としていて時空の歪みも物質の分布もめちゃくちゃだったというほうがありそうな話ではないか。

のが図4-dのような宇宙である。このドーナツ形の宇宙は、空間的に有限であり、つまり「閉じている」。しかし球ではない。ここが重要なところだ。相対論の数学的な考察によれば、このような宇宙だと、重力によって1点には収縮しないのだという。これによって従来の定説とされてきた「閉じた宇宙 = かならずいずれ収縮する」という常識はあてはまらなくなるそうだ。

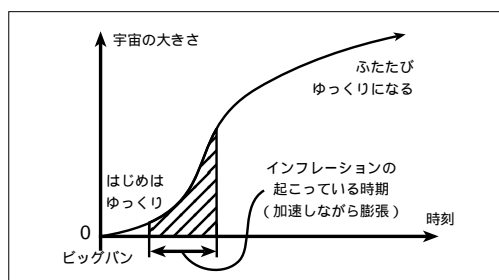


図5 インフレーション

物理は「自然」を探究する学問だから、ありそうもないこと、自然でないことを「運がよかっただけ」と決めつけることは御法度である。ありそうもないことが起きても、実はそれがごく「自然に起こりうる」ことなのだと言えなければならない。そこで現れたのが「インフレーション理論」である。インフレーション理論はこう主張する。「宇宙はビッグバンの直後にはゆっくり膨張し、その間に物質がまざる時間があつた。その後、インフレーションと呼ばれる途方もない膨張が一気に起きて、現在の大きさに近い状態になった」...しかし、これは先ほどの「ですぎた話」よりもさらに不自然に思える。ところが、ビッグバン直後の素粒子論のモデルと相対論を考慮すると、このインフレーションがかなり自然に起こるらしいということがわかってきた。素粒子論によると、宇宙の始めには「真空のエネルギー」というものが満ちている。普通なら宇宙はその中にある物質の重力により膨張がだんだん遅くなっていくのだが、真空のエネルギーが満ちている時はどんどん加速しながら膨張するという。そしてそれを使い果たすとまたゆっくりになるのである。今までこ

の現象は限られた宇宙の状況でしか考えられてこなかった。細谷・石原研には、もっと一般的な宇宙にもインフレーションが起こりうるかどうかを研究しているグループがある。ビッグバンだけでも信じ難いの、宇宙ではさらに驚くべきことが起きていたのだ。

さて、いままでビッグバンの瞬間、つまりわれわれの宇宙誕生の瞬間がどうだったかという話はずっと後回しにしてきた。なぜかと言うと、ここは正直なところ「よくわかっていない」からである。ビッグバンの瞬間には、現在の宇宙にあるすべての物質が一点に集中していたと考えられている。つまり、密度が無敵大だったのである。したがってこのビッグバンの一点もやはり特異点であることが、特異点定理により証明されるのだ。これでは宇宙の始まりの瞬間は追えないことになってしまう。

しかし、相対論と量子力学を結び付けることができる。と事情は違ってくる。量子力学には不確定性原理といって「物質の位置と運動量はかならずある誤差でふらついている」という法則がある。同時にエネルギーもふらついているというのである。「量子重力理論」は、このふらつきを重力に

も適用しようという理論だ。相対論には特異点が存在しているが、これは量子力学を考慮にいれていない。もし重力が量子力学のようにふらふらすものだとすればビッグバンにもブラックホールにも特異点というものは存在しないのかもしれない。だがこの量子重力理論、現在のところまだまだ完成にはほど遠い。相対論と量子力学、この2つの理論を統一することは不可能ではないにしても非常に難しいらしいのだ。そこで現在、研究室には量子重力理論の簡易版のようなものを作って、その性質を調べているグループもある。

宇宙はどのようにして誕生し、今の姿になったのか。私たちができるのは、宇宙からくるさまざまな現象に耳をすますことだけである。宇宙を実際に作り、動かしてみることはできない。ここに宇宙論の難しさがある。普通、科学の理論は数多くの実験を通して検証される。十分なデータが得られるまで、何度も実験を繰り返すことができる。しかし宇宙の生成はあとにも先にもただ一回きりで、私たちは他の宇宙の例を知らないのだ。にもかかわらず人間はすこしずつではあるが、宇宙誕生の瞬間へと近づいているのである。



## 東工大生、まじめすぎる学生たち。

最後に、石原先生に東工大の印象を聞いてみた。石原先生は、昨年京大からここへ移ってこられたばかりである。京大の学生と比べて、東工大の学生はどのように違うのだろうか。先生は開口一番、次のように言われる。

「なんか...ものすごくマジメだという感じがするなあ。マジメすぎておもしろくないですね。たとえば、京大なんか一年生のときは演習がないんですよ。だから本当に勉強したい学生は授業だけじゃ物足りなくて自主的にゼミを開いたりする。でも、結局は研究は自分でやるものですから、そういうのは非常に身になるんです。それにひきかえ東工大は演習がいっぱいあるし、学習効率は高くてもいいけど逆になんでも用意されすぎて過保護ともいえますね。確かに平均的に優秀ではあるんですけど、自分からなにかするっていう能力をもうすこし身につけてほしいと思います。」

石原先生の部屋にはなぜかケンダマが3つも置



ケンダマをする石原先生(デジタルカメラで撮影)

いてある。何の研究材料かなと思ったら、なんと先生はケンダマ初段の腕前の持ち主だったのだ。「ケンダマはスポーツですからね」と先生は嬉しそうに言っておられた。この研究室、なんだかじつに楽しそうなのである。

( 新山祐介・長竹茂紀 )