

# 宇宙の始まりを 目指す長距離走者

## The long-distance thinker

Nature Vol.433(12)/6 January 2005

Martin Bojowald は、時間をさかのぼる旅路にある。ビッグバンのときに何が起こったかを調べる旅だ。Quirin Schiermeier が、この旅に同行した。

ベルリンから南西へ。ポツダムに近い小さな村、ゴルムへの旅は、世界の果てへと向かう 90 分間の鉄道旅行だ。霧のかかった 12 月の朝の列車の旅は、そんなふうに思えた。ポツダム郊外では、車窓から見えるのは水平線まで広がる農地だけだ。霧の中に最先端のガラスばりのビルが姿を現すまでは。

何の変哲もない場所にあるこの研究所は、マックス・プランク重力物理学研究所だ。アルベルト・アインシュタイン研究所と呼ばれることも多い。ご想像どおり、ここは物理学のもっとも深遠な問題と取り組む理論家たちの生息地だ。宇宙はどうして始まったのか。その最後はどうなるのか。宇宙の始まりと終わり、時間、空間、物質には何が起こるのか。

研究所を囲むわびしい風景は、31 歳のドイツ人の理論研究者 Martin Bojowald には合っているといてもよい。彼は、ほとんどの時間を宙を見つめて過ごしていると認める。Bojowald は、論文を書くときか、Eメールを書くとき以外はほとんどコンピューターを使わない。そして、思索のほとんどは自宅で行う。自宅でなら、自分が活発な人間ではないように人に思われることを気にしないで済むからだ。

Bojowald は、「ループ量子重力理論」

を支持している。これは極微のスケールでの重力の理論で、この理論を応用すれば、ブラックホールの内部を調べたり、宇宙の始まりの瞬間を調べたりすることができる。

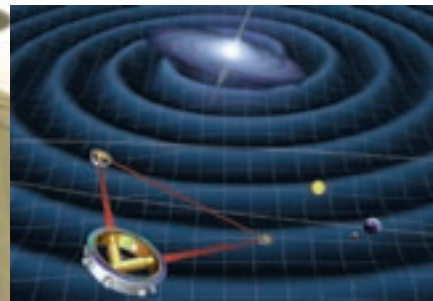
ループ量子重力理論は、一般相対性理論（重力がどのように宇宙を形作っているかに関するアインシュタインの理論）と、原子の世界の量子力学的描

像を調和させるひとつの方法だ。自然界の 4 つの基本的な力のうち、重力だけが量子力学の法則を重んじていないらしい。ループ量子重力理論は、アインシュタインの方程式を量子力学の枠組みの中で書き直すことにより、この問題に直接的に取り組もうと試みている。これとは別の量子重力理論で、よく知られているのがひも理論だ。ひも理論は素粒子論から起こったもので、宇宙のすべてのものは観測不可能な振動する「ひも」でできていると主張する。

量子論と一般相対性理論の統合を主張する理論は、一般相対性理論で未解決であるいくつかの宇宙論の難題を解決できなければならない。長年の難問のひとつは、ビッグバンのときに何が起こったかを解明することだ。ビッグバンは、約 150 億年前に起こった宇宙



Martin Bojowald はアインシュタインを尊敬している。Bojowald は、ビッグバンに関する自身の理論の証拠が NASA の LISA 計画（右図）で得られるはずだと期待している。



LISA/JPL/NASA

Q. SCHIERMEIER

の重大事件で、高温で高密度の火の玉を生み出し、星や銀河や人間のもととなった。アインシュタインの方程式は宇宙の歴史の大部分を記述できるのだが、この創世の瞬間に近づくと役に立たなくなる。

### 基本はループ

従来学説では、ビッグバンは時間を含めたすべての始まりだとされている。だから、ビッグバンそのものやそれ以前に何があったかを問うても意味がない。これまではそう説明されてきた。しかし、創世の瞬間に物理法則が役に立たなくなる問題（特異点問題）のため、宇宙の初期条件について分かることが限定される。これでは、勝手な仮定が可能になってしまう。たとえば、現在の宇宙を実現するための、初期宇宙の急速な膨張（インフレーション）などだ。

ループ量子重力理論にもとづいた宇宙論が、異論も少なくはないものの、高く評価される理論となったことには Bojowald も貢献している。英国・ポーツマス大学の宇宙論研究者 Roy Maartens は、「ループ理論にもとづく宇宙論による予測を計算し、その予測が観測で検証されるかどうかを決定する可能性への扉を Martin が開いた」と話す。

ループ量子宇宙では、時間を含めたすべてが量子化され、つまり、離散的になる。空間はわずか  $10^{-99}$  立方センチの「キューブ」に分割される。ひとつの「キューブ」は空間の最小単位だが、空っぽではない。各キューブは、交わりあう「ループ」という形の空間、時間、物質を含んでいる。

Bojowald は「この理論は、現実世界の理解にはほとんど関係しない」と話す。ループは、私たちが知覚できる世界よりもずっと小さなスケールで作用する。「しかし、ループ理論の離散性のおかげで、初期宇宙との矛盾をなくすことが数学的および概念的にずっと簡単になった」と彼は説明する。

### ビッグバンを超えて

ループ理論は複雑だが、その背景にある数学はエレガントだ。Bojowald は、ビッグバンの特異点でも物理法則がだめにならない枠組みを作った (M. Bojowald *Phys. Rev. Lett.* **86**, 5227-5230; 2001)。彼の研究結果は、極端に小さなスケールでは量子重力が斥力となり、時空の特異点への崩壊を防ぐ可能性があることを示唆した。「この効果は、一般相対性理論とは矛盾するだろうが、アインシュタインの方程式の量子化の結果かもしれない」と Bojowald は話す。

特異点問題が片付いたため、Bojowald はビッグバン「以前」の時間を考察できるようになった。彼は、時間が逆向きに流れるにもなって膨張する、ビッグバンの向こう側の「反転した宇宙」（私たちの宇宙の鏡像）を発見した。

Bojowald のモデルは、インフレーションがどうして起こるのかについても、気になる描像を与えた (M. Bojowald *Phys. Rev. Lett.* **89**, 261-301; 2002)。重力の反発作用は、収縮する宇宙の崩壊を防ぐだけでなく、拡大している宇宙を引き離しもする、と Bojowald は考えている。Maartens は、「この理

論が人を納得させるものになるまでには、まだいくらかの道のりがある」と注意する。だが、Bojowald が遠い道のりにためらうことはない。彼は、実生活でも研究の面でも長距離ランナーなのだ。

「理論が登場した初期には批判が多かった。しかし、事態は変わった。そしてその間に、多くの宇宙論研究者がループ方程式に強い興味を持ってくれるようになった」と Bojowald は言う。

欧州宇宙機関 (ESA) が 2007 年に打ち上げる観測衛星「プランク」で得られるデータが、Bojowald の理論の間接的な証明になることを彼は期待している。この衛星は、ビッグバン当時から今も残っている放射を調べることで、初期宇宙の理論を検証するものだ。米航空宇宙局 (NASA) が 2011 年に打ち上げる予定の「宇宙レーザー干渉計重力波アンテナ」(LISA) は、時空のさざ波を観測して、初期宇宙からの量子重力効果を見つけ出すかもしれない。

シカゴ大学（米国イリノイ州）で理論的に宇宙論を研究している Sean Carroll は、「ひも理論が量子重力に関する多くの問題を解決してきたことを考えれば、今後もひも理論はループ量子重力理論よりも人気があるだろう。しかし、新しいアイデアは歓迎するし、真剣に検討されなければならないと思う」と話した。 ■

Quirin Schiermeier は Nature のドイツ特派員。