

宇宙論が怪しくなる本 1991年 JICC出版局

橋元 淳一郎(はしもと じゅんいちろう)

1947年生まれ。京都大学理学部物理学科卒業、同大学院にて赤外線天文学を専攻。第9回ハヤカワSFコンテスト1位入選。内藤淳一郎のペンネームにて、SFマガジンなどにユニークな短編小説を精力的に発表する新鋭SF作家。

金子 隆一(かねこ りゅういち)

1956年神戸生まれ。サイエンスライター、ハードSF研究家。最新科学から未来科学まで幅広い領域に関心を持ち、ポピュラー科学雑誌などで活躍中。

上山 明博(うえやま あきひろ)

1956年岐阜県生まれ、天秤座。エディター兼コピーライターを本業とするかたわら、消費社会のドライバビリティを追求する新進科学ライターとして活躍。現在、雑誌に連載記事「ドクターズ・カタログ」を執筆。

板垣 良一(いたがき りょういち)

1948年大阪生まれ。東京大学大学院科学史科学基礎論修士課程修了。現在、東海大学助教授。マッハとアインシュタインの関係、アインシュタインの相対論の受容過程を研究中。吉田伸夫氏とは勉強仲間。

沼田 寛(ぬまた ひろし)

1948年滋賀県生まれ。京都大学理学部卒業。出版社勤務を経て、フリーの編集者兼ライターに。

吉田 伸夫(よしだ のぶお)

1956年生まれ。東京大学大学院博士課程修了。理学博士。東海大学非常勤講師。量子色力学という専攻のほかに、科学一般に対する基礎研究を行なっており、分子生物、脳科学、精神医学、言語学に詳しい。

木幡 士(こわた たけお)

1943年福島県生まれ。東北大学理学部卒業、同大学大学院理学研究科博士課程中退。グロリア・インターナショナル日本支社を経て、77年よりフリーとなり、サイエンスライター、科学評論家として活躍。都内の短期大学講師も務める。

前野 昌弘(まえの まさひろ)

1963年生まれ。神戸大学理学部物理学科卒業。大阪大学大学院にて素粒子論を専攻。超ひも理論の流行のなかで院生時代を過ごす。現在もオーバードクターとして、ひもの場の理論を研究中。

福江 純(ふくえ じゅん)

1956年生まれ。京都大学理学部卒業、同大学院宇宙物理学専攻課程修了。現在、大阪教育大学助教授。専門は宇宙流体力学で、「降着円盤」や「宇宙ジェット」といった新しいタイプの天文現象に興味を持っている。

大本 健十(おおもと けんじゅう)

1963年東京生まれ。半在米ハイテク・ジャーナリスト。中学時代より日米を往来する慌ただしい生活を送る。米航空宇宙学会会員。現在、元ロッキード社の戦闘機デザイナーと共同で、航空機の革新的複合材適用技術に関連するベンチャービジネスの準備に追われるかたわら、過度に巨大化した米国の航空技術の今後を検証する単行本を執筆中。

名和 小太郎(なわ こたろう)

1931年、東京下町生まれ。東京大学理学部物理学科卒業。工学博士。石油資源開発(株)、旭化成工業(株)を経て、(株)旭リサーチセンター取締役。この秋より、新潟大学で教鞭をとる予定。石油探査、公害研究、口ケット生産、情報システム開発、社会調査などの経験をふまえた、情報社会への鋭い提言は評価が高い。

永瀬 唯(ながせ ただし)

1952年静岡県生まれ。東京都立大学理学部卒業。SF史、技術文化史、科学文化史専攻。現在は19世紀後半のエーテル論、原子論、とくに四次元的エーテル論、逸脱後のニコラ・テスラに代表される20世紀初頭の電磁気学的宇宙論、さらにライプニッツ以降の可能世界論の空間的、多次元的、代替歴史的、また内宇宙論的展開に興味を持っている。

武田 雅哉(たけだ まさや)

1958年生まれ。北海道大学文学部助手。回文詩人。著書に「翔べ! 大清帝国」、訳書に「世紀末中国のかわら版」。

～一般相対性論の描く宇宙像～

ainshutainの宇宙方程式が導き出す解

現代宇宙論は、ainshutainの宇宙方程式に始まったと言ってよいだろう。宇宙の構造を天才ainshutainはたった1行の方程式の中に凝縮したのである。宇宙方程式とは、次のようなものである。

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

この数式の意味を詮索しても仕方ないが、いちおう登場する記号のおおまかな意味を述べておくと、 $R_{\mu\nu}$ はリッチ・テンソルと呼ばれていて、空間の曲がり具合(曲率)を表わす量であり、 $g_{\mu\nu}$ は高校の物理で勉強する重力加速度 g を拡張したものだと思ってもらえばよい。 G はニュートン力学に登場する万有引力定数、 c は光の速さ。そして $T_{\mu\nu}$ は、物理学において重要な役割をなすエネルギー・運動量を示すテンソルである。

つまり、宇宙方程式とは何を記述した式かと言えば、宇宙の構造を図形で表わすと、図形の性質はその曲がり具合(曲率)で示すことができる、そして、その宇宙の曲率を決める要素がエネルギーの塊である物質である、ということだ。万有引力や光速がそのなかをとりもつ定数として現れてきている。

ところで、 R や g 、 T などに添え字としてついている $\mu\nu$ は、それぞれ0、1、2、3という数字である。1、2、3は空間の縦、横、高さの三次元を表わす。そして0は時間である。お気づきのようにainshutainは時間と空間を同じものと考えたわけだ。そこで $R_{\mu\nu}$ は 4×4 の16の要素を持つことになる。こういう量をテンソルと言う。

この16個の要素のうち6個はまったく同じものであることが、対称性の性質からわかっているので、結局 $R_{\mu\nu}$ (つまり宇宙の曲率)を求めるということは、 $R_{\mu\nu}$ の10個の要素を求めるということになる。そこで、1行のainshutain方程式は、中学や高校で勉強する方程式のかたちに書き直すと合計10個の連立方程式となるのである。

10元連立方程式と言われると、それだけで解く気がなくなってしまうが、この宇宙方程式はたんなる連立方程式ではなく非線形偏微分方程式という難解な代物で、たった1つでも解くのがたいへん面倒なのである(というより、一般には解けない)。そういうわけで、方程式をつくったainshutainは結局この方程式を解くことはしなかった。その意味で、ainshutainは素人のわれわれに近い存在だと言うことができる。このわれらの天才は数学的解法を追求するより、宇宙の本質とは何かという哲学的思索の方により興味があったのである。

ところが世の中には物好きな人が必ずいるもので、この難解な方程式を解く人びとが出てくるのである。

ainshutain方程式から導き出されたブラックホール

まず最初にシュヴァルツシルド。

シュヴァルツシルドは、一般相対論が発表された翌年、すなわち1916年に早くもainshutain方程式の1つの解を見つけた。それは、球形の物質(たとえ

ば星)が宇宙空間に静止しているとき、その周りの空間はどのように曲がっているか、という場合を想定したときの解である。こういう特別の条件を課した場合にのみ、AINシュタイン方程式はきちんと解けるのである。そして、この解からブラックホールが発見されたことは周知のとおりである。その後、カー、ペンローズやホーキング、さらには富松・佐藤などといった人びとが、球対称でないブラックホール、あるいは回転しているブラックホールという解を次々に発見していったのである。

ブラックホールも当然、宇宙論の一部を構成するものではあるが、ここではブラックホールの詳細な議論はさておき、宇宙全体の構造について注目していくことにしよう。

じつは、シュヴァルツシルドに続いてもう1人、このAINシュタイン方程式を解いた人がいる。ロシアの数学者フリードマンで、1922年のことである(同じ年、ルメートルも独立に解を見つけている)。フリードマンは、この宇宙が一様で等方的であるという単純な条件のもとに、AINシュタイン方程式を解いたのだった。フリードマン・モデルとも呼ばれるこの解は、その後の宇宙論に大きな影響をおよぼすことになるのだが、その理由を理解していただくためにはここで、AINシュタインが生涯唯一の失敗だったと後悔したと言われる「宇宙項」という奇妙なものについて述べなければならない。

宇宙項の謎

話をAINシュタイン自身に戻そう。

AINシュタインは自分の方程式を数学的に厳密に解くことはしなかったが、むろんその発見を放っておいたわけではない。自分の方程式が何を語ってくれるか、ということには当然、重大な関心があったのである。ただ、方程式はそれだけですべての答えを出してくれるわけではない。これは、高校の教科書に登場するいちばん簡単な微分方程式をちょっとかじっていただくだけでわかることなのだが、微分方程式は周囲の環境条件が決まらないと答えが1つに決まらないのである。たとえば、池に生じる水の波は1つの方程式で表わすことができるが、池の大きさや形が決まらないと答えは完全に出せない。このような条件を「境界条件」あるいは「初期条件」と呼ぶ。つまり、宇宙の構造を知るためにも、宇宙の境界条件と初期条件がいるわけである。AINシュタインは、それを直観的に次のように考えた。

- ① 宇宙空間は大きな領域で見ると、どこでも同じ状態にある。そしてそこには物質が均等に存在している(この仮説は現在でも「宇宙原理」という名前で生きている)。
- ② 宇宙の大きさは、時間がたっても変わらない。

当時のAINシュタインの頭の中にあった直観的な宇宙像とは、ニュートンの宇宙像に似ていて、永遠不滅の静かな久遠の宇宙だったわけである。AINシュタインに限らず、1929年にハッブルが宇宙の膨張を発見するまでは、誰もがそのような静的な宇宙を信じて疑わなかったのはむしろ当然だろう。

しかし、ここにちょっとした困難が生じた。右の①、②の条件を認めると、

AINSHUTAIN方程式が成立しなくなるのである。

簡単に説明すれば、こういうことである。宇宙空間に物質が均等に満ちているとすると、物質は万有引力によって互いに引き合うことになる。そうすると宇宙は静的ではあり得ず、時間がたつとしだいに収縮していくことになり②の条件が満たされなくなってしまう。そこでやむなくAINSHUTAINは、方程式をなんの理論的必然性もないのに変更してしまったのである。

AINSHUTAINの行なったことは、一般相対論の原理に矛盾しない範囲で、しかも②の条件を満たすというそれだけのために方程式に1つの項をつけ加えることだった。そこで、前述したAINSHUTAINの宇宙方程式はこのようなかたちになった。

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu}R + \lambda g_{\mu\nu} = - \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

前述の方程式と比べていただければわかるように、この新たな方程式には $\lambda g_{\mu\nu}$ という1つの項が付加されている。この項を「宇宙項」というのである。端的に言えば、これは万有引力による宇宙の収縮を避けるための宇宙の反発力(斥力)を示すものである。

さてそこでフリードマンに戻ることにしよう。

フリードマンの主張は、「宇宙項」は不要であるというものだった。つまり、彼は意味不明の宇宙項を付加して方程式を人為的に変更するよりは、②の仮定を取り扱った方がよい、と主張したのである。フリードマンは、宇宙の大きさが時間がたつとともに大きくなったり小さくなったりするという「膨張縮小宇宙」を予言したのである。AINSHUTAIN方程式を解いたことよりも、当時は誰も思いつかなかった膨張宇宙というものを予言したことに、フリードマンの果たした意義がある。

その後、ハッブルによって宇宙の膨張が実際に観測され、フリードマンの宇宙モデルは宇宙論の中核になっていく。AINSHUTAINが宇宙項を「生涯の失敗」と述懐したのもうなづかれよう。

こうして宇宙項は宇宙論のメイン舞台からいったん降りたのだが、興味深いことに、現代の宇宙論は再びこの宇宙項という亡靈の復活を検討し始めたのである。

宇宙項を復活させたインフレーション仮説

宇宙項を復活させた最大の推進役は、宇宙のインフレーション仮説である。

宇宙項の役割は、原因はなんであれ、万有引力による収縮に対抗する斥力の導入である。もし、この斥力が物理的に実在するなら、宇宙項は存在意義を持ってくるのである。

宇宙創造の初期に起こったとされる、インフレーションという激しい宇宙の膨張は、そのエネルギー源を真空から得ている。これは次節で紹介する量子論とも関連してくるのだが、真空とは何ものも存在しない「無」の空間ではないのである。簡単に言ってしまえば、真空には熱い真空と冷たい真空がある。熱い真空が冷たい真空へと冷えるとき(これを真空の相転移と言う)、その内部に持っていたエネルギーが物質世界に現れて、それが宇宙を急激に膨張させる。これがインフレーション仮説の大ざっぱな仕組みである。

インフレーションは、宇宙創造の瞬間にただいちどだけ起こった出来事である

が、それでは現在、われわれの周囲に存在する真空が本当に冷えきった真空かというと、その保証は何もない。絶対0度という完全に冷えきった物質がこの世には存在しないように、完全に冷たい真空などない、と考えた方が自然である。すると、真空にはつねに潜在的にエネルギーがため込まれているということになる。

この真空にため込まれたエネルギーが解放されるとき、それが宇宙を膨張させるエネルギーになるとしたら、アインシュタインの宇宙方程式には、当然このことが含まれていなければならないことになる。(なぜなら、アインシュタイン方程式は、宇宙の構造を包括しているものなのだから)。そして、それこそがまさに「宇宙項」なのだ!

こうして、宇宙項は復活した。

宇宙項はなぜ人気があるのか!

真空のエネルギーは量子論的に扱わねばならない。宇宙項の復活はあくまで一つの仮説であって、現時点では確立されたものではない。しかし、目下流れは宇宙項に有利である。多くの宇宙論者は、宇宙項に好意を持っている。なぜなら、宇宙項を導入することによって、現在謎とされている宇宙論のさまざまな矛盾が解決されるからである。

まず、宇宙が現在膨張しているという事実がある。もし、この膨張がやがて収縮に転じるという慣性的(慣性的と言ってもよい)なものではなく、宇宙の本質であるとするなら、宇宙項は必然的に必要になってくる。万有引力に逆らって宇宙を膨張させているなんらかの物理的メカニズムが存在しなければならないはずだからである。そして、観測事実はそのことを支持しているのである。

宇宙に存在する物質が、われわれの知っている星や銀河、それに光り輝いてはいないが存在するはずの塵やダストといったものだけから出来ているとするならば、どう計算しても宇宙を膨張から引きとどめることはできない。

天文学者は、この矛盾を解決するために、われわれには未知の暗黒物質が存在するという仮説を立てている。この暗黒物質は、ニュートリノの質量として説明されたり、アクションと呼ばれるまったく新たな素粒子として説明されたりしている。しかし、どの説明もいまだ説得力のある仮説とはなっていない状況である。

もし、宇宙項を認めるなら、これらの矛盾はすべて解決されることになる。つまり、宇宙は収縮に転ずる必要がなく、宇宙項による斥力によって永久に膨張し続けると考えればよいのだ。ゆえに宇宙項は今、宇宙論者からもてはやされているというわけなのだ。

しかし、宇宙項を認めたとしても、それでは宇宙項をもたらしている物理的実在は何か、という問い合わせまだ残されていることを忘れてはならないことは、言うまでもない。

～量子論による宇宙像～

物質はモヤモヤした、一種の波なのである！

一般相対論が宇宙を一つの地球儀のようなものに見立てて、マクロな宇宙像を提供するのに対して、量子論は分子、原子、素粒子といったミクロな世界を対象にする。こうしたミクロの世界では、もはやわれわれの常識が通用しないことはよく知られている。

しかし、それはあくまでミクロな世界の話であり、宇宙という巨大な広がりを扱うときには、量子論をニュートンの古典的な力学で置き換えてよいはずである。それなのに、なぜ量子論が宇宙論にとって必要になってくるのか。

その大きな理由は、宇宙創造の瞬間には宇宙は一つの素粒子よりも小さかったからである。

この宇宙創造の瞬間という「神」への挑戦については次節で詳しく見ることにして、ここではその準備も兼ねて、量子論をもう少し異なる視点から眺めてみたい。

量子論のかかえるパラドックス

量子論はミクロの世界を扱う物理だと先に述べたが、この表現はじつは正確ではない。たしかに、原子1個とか素粒子数個とかといった対象を記述するのに量子論は適している。しかし、それはスケールが非常に小さな世界という意味ではないのである。

具体的な例を紹介するのがいいだろう。

光は素粒子の一つである。人間の目はきわめて敏感な光子検出装置で、たった1個の光子でも条件さえよければ感知できると言われている。つまり、真っ暗闇の中で1個の光子が目の中に飛び込んできたとき、われわれはかすかに何かが光ったと感知するのである。

夜空の星はこうした光子を何光年もかなたから放出し、その光子がわれわれの目に届いているわけである。

ところで、遠方の星からやってきた光子1個はどれくらいの大きさをしているのだろう。人間の目の網膜に1点として映るのだから、それはとてもなく小さいと言わねばならない。たしかに、それは事実である。

しかし、量子論の結論はそうではないのだ。後ほど紹介する不確定性原理によって、遠方の星からやってきた1個の光子は、何十 m (!)もの広がりを持っていなければならないのだ。だから素粒子が小さいというのはウソである！ 1個の素粒子は巨大な広がりを持っているのである。しかし、それをわれわれが感知(観測)するとき、その素粒子は瞬時に1点に収束してしまうのである。その収束の速さはとんでもないもので、たとえ何光年にもわたって広がっていた素粒子といえども、観測が行なわれるとその瞬間それは1ヶ所に集まってしまう。すなわち、光速の制限などは無視されてしまうわけだ。

この矛盾を現代物理学では説明することができない。

量子論は、「観測問題」というパラドックスをその原理の中に含んでいるのである。アインシュタインが、この量子論の矛盾を指摘し、終生量子論を信じようとはしなかったのもそのためである。1935年に、アインシュタインは2人のア

メリカ人物理学者と協力してこの矛盾のある思考実験で表現した。ここでは本筋から離れるので詳細は述べないが、これは「айнシュタイン＝ポドルスキ＝ローゼン (EPR) のパラドックス」という名で有名である。

「ベルの定理」——局所的な実在はありえない

さて、この「айнシュタイン＝ポドルスキ＝ローゼンのパラドックス」から一つの事実を見つけ出した人がいる。ジョン・スチュアート・ベルというイギリスの素粒子物理学者で、1964年、まだ学生であった彼は一つの単純で動かしがたい定理を発見した。

「ベルの定理」として有名なこの発見は、単純な言葉で表現できる。

「局所的な実在はありえない」

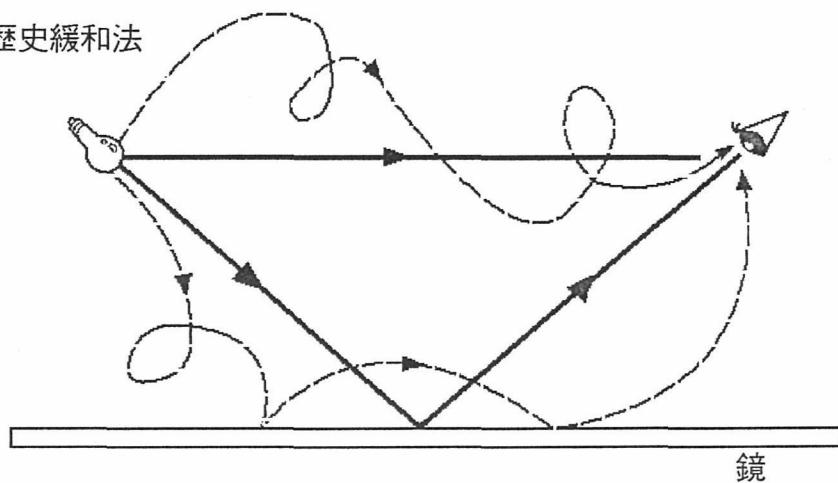
むろん、ここで実在とは何か、という議論も生まれるわけだが、それを単純にわれわれが認識できる物質や光や、こうした物理的存在ということにしておこう。簡単に言えば、素粒子である。それが局所的でない、とは、素粒子は空間の1点に存在しているのではなく、広がっているということだ。それも並の広がりではない。宇宙全体に広がっているのである。だから、言い換えると、1個の素粒子の振舞いはその素粒子が観測される小さな領域に影響を与えるだけでなく、宇宙のすべての存在に即座に影響をおよぼすというのである。

ここに「ベルの定理」を支持する一つの物理法則を紹介しておこう。

それは、多彩な趣味とそのちゃめっ氣で有名だったノーベル賞物理学者リチャード・ファインマンのつくり出した量子論である。ファインマンはシュレディンガーやハイゼンベルクとは違った方法で量子論を表現した。

ファインマンによると、1個の粒子がどんな軌道を描いて運動するかを調べるために、その粒子はあらゆる経路を通過すると考えてそれらをすべて足し合わせなければいけない、とした。これは「ファインマンの歴史総和法」という名で知られている。

ファインマンの歴史緩和法



光はあらゆる経路をたどって目に到達する

たとえば、光が鏡で反射して直進するのは自明のことのようだが、実際に光の

経路を算出するときには、光は、常識では考えられないような奇妙な曲線を描く経路もあることを考慮しなければならないのである。光は宇宙のあらゆる場所を経由して運動していくのだ、と言っても間違いではないだろう。すなわち「歴史総和法」は「ベルの定理」の主張と合致するわけである。

いずれにしても、この「ベルの定理」はその論理がきわめて単純なので、誰も誤りを指摘することができない。つまり、疑いようのない真実なのだ。すると結論は次のようになるだろう。

宇宙を論じるときには、1個の素粒子の振舞いを無視することはできない。その1個の素粒子の振舞いを記述する物理は量子論であり、したがって、量子論を考慮せずに正しい宇宙論を確立することはできない、と。

波動としての実在

それでは、量子論が宇宙論に具体的にどのような影響をおよぼすのかについて見ていくことにしよう。この話は重要である。なぜなら、この議論こそが現代の量子論的宇宙論の土台となっているからである。

「ベルの定理」が成立する根本的な理由は、量子論においては物質が波動関数という一種の波として表わされるところにある。

波であるから、当然境界がはっきりしない。原子というと、よく教科書や解説書でお目にかかるのはピンポン玉のような形をしたものだが、本当はそうではない。モヤモヤと広がりを持っているのである。

ところで、このように広がりを持ったモヤモヤはたんに形だけの話ではない。その1個の原子なり素粒子に関係しているあらゆる物理量——速さやエネルギーや運動量などなど——もまた、モヤモヤとした波なのである。なぜなら、量子論が物質を記述する方程式、すなわちシュレディンガー方程式は波動方程式という波を扱う方程式のかたちになっているからである。ニュートン流に物質を粒子のような硬い表面を持ったものとして扱うと現象が説明できず、波動として扱うときにだけ、実験事実を説明できるのである。

だから量子論は、実験的に確かめられた確立された理論であり、本当の実在は何か、という根源的な問いをけば、ものの本性は波動として表わすとすべてうまくいくということになる。

さて、波には独特の面白い性質がある。身近な例で、あなたがCDでモーツアルトの交響曲を聞くとしよう。その音楽はじつは0と1のパルス波から構成されている。0と1のパルス波が合成されて、モーツアルトが楽譜に記した音が出るようになっているのである。

モーツアルトの交響曲を構成するには0と1のパルス波でなければならない理由は何もない。ちょっとした数学的な論理から証明できるのだが、どんな形の波でもモーツアルトの音楽を構成できる(大学の教養課程で数学の講義を受けた人は、フーリエ解析というのを思い出していただければよい)。だから、カエルの声(の合成)でモーツアルトを奏でることもできれば、都会の騒音(の合成)で奏でることもできるのである。

こうなると、モーツアルトの交響曲はいかなる実在から構成されているか、という問い合わせるのにはほとんど不可能になってくる。

すでにおわかりのように、われわれの周囲にたしかに存在する物質が、そういう性質のものなのだ。なぜなら、物質は波動関数で表現されるからである。

不確定性原理から見た宇宙論

ところで、この波動の不思議な振舞いが、宇宙論とどのように関わってくるのかを考えてみよう。

たとえばモーツァルトの交響曲をさきほどはいろいろなかたちに分解してみたが、こう解釈する人もいるだろう。それは、モーツァルトの交響曲という唯一のものから出来上がっているのであって、それ以外の何ものでもない。

まさにそのとおりである。

これを粒子の観測という行為に置き換えてみると、次のようなことになる。

ある粒子がどこにいるかを観測してみると、A点という1点に見つかった。これをファインマン流に解釈するなら、この粒子は宇宙のあらゆる点に存在しているのだが、その合成としていまA点に見えているのだ、ということになる。しかし、単純な観測者はこういうだろう。この粒子はほかのどの場所にも存在しない、ただA点に唯一存在するだけなのだ、と。

ここまでならファインマンの負けであり、モーツァルト雑音説の敗北である。しかし、現実はそう単純ではないのである。

粒子の観測者が、A点に見つかった粒子の速度(あるいは正確には運動量)を同時に調べてみたいとする。するとこのとき、観測者はどのような工夫をこらしても粒子の運動量を決定することはできないのだ。言い換えると、このとき粒子はまったく不確定の運動量を持つことになる。

これは、モーツァルトの交響曲をどうしても都会の雑音だと主張するとどうなるか、ということと同じである。モーツァルトを都会の雑音だと言うことはできるが、それではどの都市の雑音か、ということを特定することはできない。そうではなくて、それはあらゆる都市の雑音の合成なのである。すなわち都市の雑音としてはまったく不確定なのである。

モーツァルトの音楽と雑音を比較するのは野暮だと言われるかもしれないが、粒子の位置と運動量がこのような関係にあるとするとこれは深刻である。

このようにして、量子論はわれわれが観測するあらゆる物理量には、必ずペアとなるものがあって、片方を確実に決めるとき片方はまったく不確実になることを主張している。このペアは互いに「相補的」な関係にあるとされ、この原理のことを不確定性原理と呼ぶのである。

不確定性原理は1927年、ハイゼンベルクによって唱えられた。この有名な原理は、えてして人間の実験技術の未熟さのせいだと説明されがちで、その本質がここに述べたような物質の波動としての実在と深く関わっていることは、意外に知られていないようである。

さて、この不確定性原理は今見てきたように、あらゆる物質量において本質的に成立する。それゆえ、一般相対論の節で紹介したアインシュタインの宇宙方程式にもまたそれは適用されねばならないのである。