

巨大数の謎と宇宙の調和

松田 卓也*

1. 数秘学

数というものは、不思議なものである。ピタゴラスが正多面体の数と惑星の数の関係を論じて以来、数と宇宙の間の神秘的な関係が、多くの人たちにより探究されてきた。ティティウス・ボーデの法則として知られる、惑星と太陽の距離をあらわす数列は、最も有名なものであろう。この法則の予言する場所に天王星と小惑星が発見されたことは、法則の信頼性をたかめた。しかし、海王星と冥王星に関しては、法則が正しくないことが分かり、ボーデの法則は偶然的な産物なのではないかという疑問を呼びおこした。その後も多くの人びとが、ボーデの法則にかわる法則の提案を行っている。筆者もアマチュアの人から熱心な提案を受けたことがある。しかし、有限個(10個)の数をうまく表現する数列なら、いくらでも考えられるであろうから、その有効性は疑問であるともいえる。

しかし一方では、バルマーの発見した、水素原子の放つスペクトル線の波長を表現する数列は、後にボーアの原子模型の発見へと導いた訳だから、こういった研究の有用性は否定できないものである。もっと別の例としては、ウェーバーとコールラオシュによる、電荷と磁荷の比が光速度に一致するという発見は、後にマクスウェルが電磁気学を建設する上で重要な指針となった。

このように、色々な数の間の関係を研究することは、より深い原理の発見に導くことがある。

2. エディントンの巨大数

自然界を支配する物理法則には、様々な物理定数が存在する。そのなかでも基本的なものとして、重力定数、光速、プランク定数、陽子と電子の質量、その電荷をあげることができる。これらの量から無次元量(単位のつかない量)をつくってみる。

$$\text{陽子の質量/電子の質量}=1840$$

$$\text{微細構造定数}=2\pi \cdot \text{基本電荷}^2 / (\text{プランク定数} \cdot \text{光速}) = 1/137$$

$$N_1 = \text{基本電荷}^2 / (\text{重力定数} \cdot \text{陽子の質量} \cdot \text{電子の質量}) = 0.2 \times 10^{40} \quad (1)$$

この中で、前の二つの量は、その大きさが1の程度である(これからの議論では1000程度の数までは1と同程度と考える。)それに対して、3番目の量 N_1 は 10^{40} と、とてつもなく巨大な数である。(ここで、数が巨大である

という言葉は、その数が無次元の場合に意味がある。次元のある数、つまり長さとか重さの単位のついた量の大小を議論することは意味がない。1mの木があったとして、この1という数字は、いったい小さいか大きいか。1mは100cmであるし、1000mmでもあるので、単位のとりかたによっては、大きくもなるからだ。それにたいてい、Aさんの体重がBさんの2倍あるとしたら、この2という数字は、体重をkgで測ろうが、貫で測ろうが同じことだ。こういった比を無次元数とよぶ。)

N_1 の意味は次のようなものだ。いま、電子と陽子がある距離離れて存在するとする。その粒子間に働く電気力の大きさは、基本電荷²/距離²、一方、重力の大きさは、重力定数・陽子の質量・電子の質量/距離²である。この二種類の力の比をとると N_1 が得られる。 N_1 が大きいということは、電気力に比べて重力が圧倒的に小さいということの意味している。(電気力は、このように大きいのだが、大きなスケールでは正負の電荷が打ちけしあって重力のほうがきいてくるのである。)

無次元の大きな数として、 N_1 の他にどんなものがあるだろうか。英国の有名な天文学者であるエディントンは、宇宙の大きさと電子の古典半径(=基本電荷²/(電子の質量・光速²))= 3×10^{-18} cm)の比を考えた。宇宙の大きさとしては、宇宙の地平線までの距離をとる。それは、宇宙の年齢×光速の程度の大きさとなる。つまり、宇宙が生まれて以来、光が走り続けてたどりついた距離である。この比を N_2 とよぶと、なんとその大きさも N_1 と同じくらいになる。

$$N_2 = \text{光速} \cdot \text{宇宙の年齢} / \text{古典電子半径} = 5 \times 10^{40}$$

(2)

エディントンは、さらに宇宙の地平線の内部にある陽子の数 N が、ほぼ 10^{90} であることに着目した。つまり N の平方根が N_1 や N_2 と同程度の大きさになるのである。この関係を式にかくと

$$N_1 = N_2 = N^{1/2} \quad (3)$$

彼は N をもっとはっきり指定している。ターナー講義でエディントンはつぎのように述べている。「私の信ずるところでは、宇宙には15,747,724,136,275,002,577,605,653,961,181,555,468,044,717,914,527,116,709,366,231,425,076,185,631,031,296個の陽子と、同じだけの電子がある。」

この数の厳密な値は、今では意味をもたない。しかし概数は、やはり正しい。それでは(3)式の関係は、偶然

* 京大工 Takuya Matsuda: Mystery of Large Numbers and Harmony of the Universe

なのであろうか。あるいはなにか深い意味があるのだろうか。エディントンは、この式には深い意味があると考えて、それを説明しようと試みたが、かならずしも成功はしなかった。

3. 物理定数の時間変化

(3)式は少し奇妙な式だ。なぜなら N_1 は、物理定数のみからできているので、それ自身定数であるのにたいして、 N_2 は時間に比例している。つまり、昔は N_2 はもっと小さかったはずだし、未来はもっと大きくなるだろう。 N もおなじことである。だから (3) 式が成立するとしても、それは現在だけのことではないか。しかし、英国の有名な物理学者のディラックは、(3) 式はいつでもなりたつ関係であると考えた。これをディラックの巨大数仮説とよぶ。もし (3) 式が常に成立するとすれば、物理定数が時間によって変化するということになる。ディラックは変化する定数として重力定数を選んだ。(1) と (3) から

$$\text{重力定数} \propto 1/\text{宇宙年齢} \quad (4)$$

という関係が導かれる。

ディラックの考えは、とても大胆なものであった。しかし、その後の多くの人びとの研究から、重力定数がそのように変化すると、色々都合が悪いことが分かってきた。たとえば、過去に重力定数が大きいとすると、星は過去にはより強い力で圧縮されていたはずだから、それに対抗するために、星はよりたくさんのエネルギーを出していたことになる。すると、過去の地球はもっと高温であったはずで、生物は生存できなかったであろう。さらに過去の太陽がそんなに明るかったとすれば、現在までに既に燃え尽きているはずだ。

重力定数以外の定数を変化させる試みもガモフなどにより行われたが、どれも否定的な結論になっている。

4. ディッケの人間原理

1961年に米国の宇宙論学者であるディッケは、(3)式を証明する画期的な理論を提唱した。ディラックのいうような、定数の変化が生じないとすると、(3)が成立するのは、現在だけだということになる。すると宇宙の現在の年齢がほぼ百億年であることは単なる偶然ではないはずだ。それでは、自然界に百億年という年齢を持つ他の存在があるだろうか。それは星である。太陽のような主系列星の年齢が、ほぼ百億年であることは星の進化の理論からいえる。

それでは宇宙の年齢と主系列星の年齢が、なぜ一致しなければならないのだろうか。そこに、人間が登場する。現在の宇宙の年齢が百億年と認識しているのは人間である。もし現在、人間が存在しないとすれば、宇宙の年齢に思いをはせることもなく、したがって (3) 式の意味を考へることもない。もし人間が宇宙に発生するのが宇宙

誕生の百億年後でなく、百兆年後だとすれば、そのときは (3) 式は成立していない。つまり、人間の発生と主系列星の寿命には関係があるはずだ。

人間を構成しているものは、有機物であり、それには水素の他に、炭素、酸素、窒素といった、いわゆる重元素が主要な役割を果たしている。つまり、宇宙に重元素が存在しないことには、人間もできないわけだ。ところで、現代宇宙論によれば、宇宙の初期には、水素とヘリウムがつくられるが、重元素はほとんど存在していないことが知られている。これらの重元素は星の内部でつくられ、超新星爆発で周りに吹きとばされる。宇宙が誕生して膨脹を開始して温度が低下すると、まず銀河集団が、それから銀河が作られ、そして銀河の内部に星が形成される（この順序が逆であっても、この議論には関係ない。）そして星は進化して、その最後に超新星爆発をおこない重元素を放出する。この重元素で汚染された星間ガスから、次の星が誕生する。このようにして重元素量は時間とともに増加していく。惑星は珪素、鉄などの重元素を主体として形成され、その惑星のうえに炭素生命がうまれる。こう考えると、宇宙に人間が発生するには、ほぼ主系列星の年齢、百億年が経過する必要があることがわかるだろう。宇宙のもっと将来は、全ての星が燃え尽してしまうので、生命の維持は難しいだろう（もっとも、米国の物理学者ダイソンは、文明は永遠に存在すると主張しているが、たとえそうであっても、現在の議論には困らない。）

ディッケは主系列星の年齢を簡単な考察から、基本的な物理定数であらわして、それを (2) 式の宇宙の年齢のところに代入して、(3) 式の前半を証明した。後半は次のようにして示すことができる。

宇宙の大きさは、宇宙全体が丁度ひとつのブラックホールであるかのごとき値をとる。だから

$$\text{宇宙の半径} = \text{重力定数} \cdot \text{宇宙の質量} / \text{光速}^2 \quad (5)$$

また

$$\text{宇宙の粒子数} = \text{宇宙の質量} / \text{陽子の質量} \quad (6)$$

を考慮すると、

$$\text{宇宙の粒子数} = N_1 \times N_2 = 10^{80} \quad (7)$$

が導ける。つまり (3) 式の後半の関係は、 $N_1 = N_2$ が言えれば、自動的に出てくる式である。

5. 宇宙の調和: $1, 10^{20}, 10^{40}, 10^{60}, 10^{80}$

ここまでの議論で、巨大な無次元数 $10^{40}, 10^{80}$ が登場した。この他に、このような無次元数はあるのだろうか。実は色々ある。たとえば、古典電子半径/プランク長さ $= 10^{20}$ である。ここでプランク長さとは、プランクがプランク定数、重力定数、光速から作った、長さの次元を持つ量で 2×10^{-32} cm である (表1参照)。星の重力半径 (その星がブラックホールになった場合の半径) と古

典電子半径の比も 10^{20} である。

ドイツの物理学者ヨルダンは、

$$\text{平均的な星の質量/陽子の質量} = 10^{60} \quad (8)$$

であることを示した。あるいは、星のなかには陽子が 10^{60} 個在るといってもよい。また、宇宙の半径/プランク長さ $= 10^{60}$ である。ところで 10^{20} は 10^{40} の平方根であり、 10^{80} は 10^{40} の 1.5 乗である。だから $1 : 10^{20} : 10^{40} : 10^{60} : 10^{80} = 1 : N^{1/2} : N : N^{3/2} : N^2$ という関係がなりたつ。これらの関係を表 1 に示す。これらは、全てが独立な関係というわけではない。そのうちのいくつかを証明すれば、あとは簡単に導くことができる。

表 1 宇宙における巨大数 (Harrison, 1981 より)

1	$N^{1/2} = 10^{20}$	$N = 10^{40}$	$N^{3/2} = 10^{60}$	$N^2 = 10^{80}$
$\frac{m_p}{m_e}$	$\frac{a}{a^*} = N_1^{1/2}$	$\frac{a}{a_g} \equiv N_1$		
$\frac{e^2}{\hbar c}$	$\frac{r}{a} = N_1^{1/2}$	$\frac{r}{a^*} = N_1$	$\frac{r}{a_g} = N_1^{3/2}$	
$\frac{N_1}{N_2}$	$\frac{L}{r} = \frac{N_2}{N_1^{1/2}}$	$\frac{L}{a} = N_1$	$\frac{L}{a^*} = N_1^{1/2} N_2$	$\frac{L}{a_g} = N_1 N_2$
	$\frac{m^*}{m_p} = N_1^{1/2}$	$\frac{M_{\odot}}{m^*} = N_1$	$\frac{M_{\odot}}{m_p} = N_1^{3/2}$	
	$\frac{M}{M_{\odot}} = \frac{N_2}{N_1^{1/2}}$		$\frac{M}{m^*} = N_1^{1/2} N_2$	$\frac{M}{m_p} = N_1 N_2$

- $m_p = 1.67 \cdot 10^{-24}$ g (陽子の質量)
- $m_e = 9.10 \cdot 10^{-28}$ g (電子の質量)
- $e = 4.8 \cdot 10^{-10}$ esu (基本電荷)
- $h = 6.63 \cdot 10^{-27}$ erg·sec (プランク定数)
- $c = 3.00 \cdot 10^{10}$ cm/sec (光速)
- $G = 6.67 \cdot 10^{-8}$ dyn·cm²·g⁻² (重力定数)
- $M_{\odot} = 1.99 \cdot 10^{33}$ g (太陽質量)
- $M = 2 \cdot 10^{56}$ g (宇宙の質量)
- $\hbar = h/2\pi$
- その他の記号は表 2 参照

表 2 宇宙における基本的単位

$a = \frac{e^2}{m_e c^2} = 2.8 \cdot 10^{-13}$ cm	古典電子半径
$a^* = \left(\frac{G\hbar}{c^3}\right)^{1/2} = 1.6 \cdot 10^{-32}$ cm	プランク長さ
$r = \frac{GM_{\odot}}{c^2} = 1.5 \cdot 10^5$ cm	星の重力半径
$a_g = \frac{Gm_p}{c^2} = 1.7 \cdot 10^{-55}$ cm	陽子の重力半径
$L = ct = 1.5 \cdot 10^{28}$ cm	宇宙のハッブル半径
$m^* = \left(\frac{\hbar c}{G}\right)^{1/2} = 2.2 \cdot 10^{-5}$ g	プランク質量

6. 強い人間原理

ディッケの人間原理を採用すれば、たしかに (3) の等式は証明できる。すると、 N_2 が大きい。つまり宇宙が電子などに比べて、遙かに巨大であるのは、 N_1 が大きいから、つまり、重力が電気力に比べて、極端に弱いからであるといえる。しかし、そもそもなぜ重力がそのように弱いのかという理由は、ディッケの人間原理からは得られない。重力がもっと強い宇宙を考えたとしたら、そのような宇宙の大きさは、もっと小さく、従って宇宙の寿命も、もっと短くなるだろう。しかし、そのような仮想的な世界で、カゲロウのようにはかない一生を終える人間がいても良いのではないか。どうして、我々の世界は、こんなに巨大で長寿命なのであろうか。

カーターという学者は、ディッケの人間原理を弱い人間原理とよび、彼はそれとは別に強い人間原理を提唱した (1974)。それによれば、物理定数が現在の値ではなく、別の値をとる仮想的な世界を考える。物理定数が様々な値をとる宇宙の集合 (これを統計力学の概念を用いて、宇宙のアンサンブルとよぶ) を考え、そのなかで人間のような知的生命の発生に適した宇宙のみが認識されるのである。つまり、我々の宇宙が現在のような姿をしているのは、それは我々が存在するからだといえる。

カーターは、次のような例をあげている。生命が発生するためには、太陽のような星の存在が必要である。もし物理定数が現在の値と異なると、主系列星が全部、高温で短命の青色巨星になってしまうか、あるいは逆に、低温で長命の赤色わい星になってしまう。我々の太陽が青色巨星であれば、45 億年も燃料がもたないから、人間は発生しない。しかし、赤色わい星であれば、温度が低すぎるので、生命の存在には不適切である。

SF でも有名なホイルは、星の内部でおこる核融合反応について考える。水素が融合してヘリウムになり、つぎに 3 つのヘリウムが融合して炭素ができる。この炭素は、先にも述べたように、生命にとって重要な元素である。3 つのヘリウムが融合するためには、それぞれの原子核のエネルギー準位がうまくいかなければならない。しかし現実には、とてもうまくできている。できた炭素がすぐにまたヘリウムと融合して酸素になってしまうと、炭素の量が少なくなるが、現実はそのようになっていない。これらの核反応率を決定しているのは、強い相互作用の定数であり、これをいじって別の値にすると、宇宙に炭素が作られない。炭素の原子核としての性質も重要だが、原子のエネルギー準位も重要である。炭素は 4 価、つまり 4 本の化学結合の手をだして、複雑な有機物を形成する。だから、物理定数をいじくと、炭素のこの重要な性質がなくなる怖れもある。

強い相互作用の定数を、少し小さくすると、そもそも水素以外の原子核ができないし、逆に大きくすると、巨大な原子核ができる。また、弱い相互作用の定数をいじると、宇宙初期の元素合成の様子が異なって、全部がヘリウムになってしまったり、逆に全部が水素のままであったりする。このような考察は、いくらでもすることができる。つまり、現在の世界は、物理定数の微妙なバランスの上に成り立っているということだ。

ここまでは、物理定数の値について述べた。しかし、強い人間原理はそれだけではなく宇宙の初期条件についても、条件を課す。現在の宇宙は、非常に等方的であることが、3Kの宇宙黒体放射の観測から知れている。その理由として、英国のコリンズとホーキングは、宇宙がもともと平坦であれば、非等方であった宇宙が等方的になるからであるとのべている。それでは、この宇宙はなぜ平坦なのだろうか。彼等によれば、もしそうでなければ、銀河や星ができる条件になく、従って生命も発生しなかったからだという。

7. おわりに

人間原理の論理は、いままでの科学の論理とは、全くことなっている。コペルニクスが地球を宇宙の中心的位置から追放して以来、人間は宇宙のなかで、つねに片田

舎においやられてきた。人間は宇宙のなかでいかなる意味でも特殊な位置を占めないという、この考えを「コペルニクスの原理」、あるいは「平凡性原理」とよぼう。「人間原理」は、これに真向から反対する。たしかに、我々がこの宇宙の空間的中心にいるということはないとしても、この宇宙をかくあらしめているのは、それは人間の存在であるというのだ。知的生命の存在しない宇宙は、たとえ存在しても、その存在が認識されることはないし、問われることもないわけだ。

人間原理の欠点は、それが後追いの解釈であって、新しい現象や法則の予言に使われたことがないことだろう。本当は(3)式も人間原理などによらず、より深い物理理論から説明できるとしたら、物理学者はその方を喜ぶだろう。しかし、もしそうだったとしたらこの宇宙が、我々の存在にとって、かくも都合よくできているのは、奇跡的なことと言えるであろう。

文 献

- J. D. Barrow, Q. J. R. Astr. Soc., 22 (1981), 388.
 P. C. W. Davies, The Accidental Universe (1982), Cambridge University Press.
 E. R. Harrison, Cosmology Chap. 17 (1981), Cambridge University Press.

星座のさがし方からブラックホールの謎まで——宇宙の神秘にいとむ新シリーズ

星の世界をたずねる 全6巻

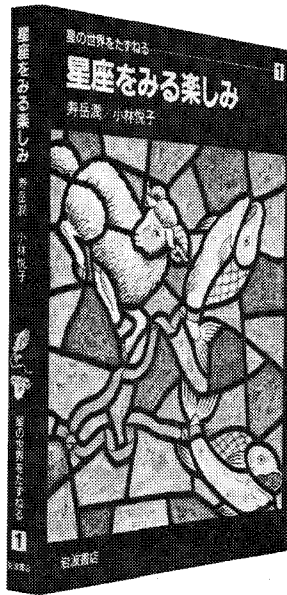
☆アマチュアの観測と天文学の最新の成果とを合体させたユニークな新シリーズ。

☆初めての星座観望からブラックホールのなぞまで、天文の全般を、やさしく楽しく語る。

☆第1巻、第2巻、第6巻は実際の観察・観測や発見に役立ち、アマチュア天文家の必読書。

☆第3巻から第5巻では、天文学の第一線で活躍する研究者が、一般の天文ファンのために、最新の宇宙像をていねいにわかりやすく紹介する。

A5判変型・並製カバー
平均200頁・カラー口絵



■第1回・第1巻*発売

星座をみる楽しみ

寿岳 潤 / 小林悦子 定価1600円

星座の楽しみ方を徹底的に追求しよう。星にまつわる数々の体験談は、読者を星のとりこにする。美しい全天星座絵と写真で観察ポイントをガイド。

■続刊——

- 2 天体望遠鏡をもとウ……………富田弘一郎
- 3 太陽系をさぐる……………中村 士
- 4 星と銀河の世界……………海野和郎 / 渡辺正明
- 5 ビッグバンからブラックホールへ……………松田卓也 / 二間瀬敏史
- 6 新しい天体をみつけよう……………〈7月27日刊〉関 勉

岩波書店



東京 千代田一ツ橋
振替〈東京〉6-26240