

«Квант» для младших школьников

ソ連科学誌・クヴァントから

やさしい物理学

37

小島 英夫 (静岡大学) 訳

人間原理を考える A. クジン (1990, No. 7, pp. 9-15)

世界は人間を中心に回っている……—A. S. プウシキン

ここに人間がいる。宇宙はいかにあるべきだろうか?—J. Wheeler

短い序文

この小論は、永遠の問題の一つに答えようとする科学的な試みである。その問題とは：この巨大な世界に小っぽけな人間が存在することにはどんな意味があるのか？ 人間とは何者で、宇宙の進化の究極の目的は何か？ 創造はある種の偶然で、自然に於ける他の過程と原理的に違わないのではないのか？ 人類の出現は宇宙進化の当然の結果であるのか、それともなんらかの偶然の産物なのか？ <それ自身については何も知らない>外部条件に生命が適応したのか、それともその条件の方が生命の誕生に適応したのか？

長い間、これらの疑問に納得のいく答えを与えるだけの科学的根拠をわれわれは持たなかった。

(論証を必要としない答えを与える根拠には、不足しなかったとしても。) 科学が手に入れた、世界についての情報は断片的で、宇宙の進化の全体像は描けなかった。しかし、4百年にわたる科学者の協同の努力が成果をもたらした。現在、われわれは科学的な世界像と統一的な宇宙観を真面目に語る事ができるようになった。もちろん、われわれの知らない事は沢山ある。したがって、与えられた答えが究極的なものと考え事はできない：これは人間が至高の産物であると<宣告される>判決ではない。懐疑論者は科学的な知識の限界を常に問題にする事ができる。したがって、この永遠の問題には、最終的な決着はない。

世界と人間についての科学的な問題設定

人間原理は、思考実験の産物である。その実験は、次のようになされる：自然法則に何等かの仮想的な変更を加えたとすると、そのとき人間は存在し得るだろうか？ この問題に答えるためには、人間の何等かの特質に注目する必要があるだろう—何故ならば、外界の変化に対して全てが変化しないことは有り得ない事であるから、多分、それが無ければ人間とは考えられない、人間の二つの基本的な属性として、理性と自由を挙げても間違いではないだろう。自由は、自分自身を支配する能力であり、ある時刻の周囲の状況によっては完全に支配されずに、内的に行動する能力である。理性は、自由の条件であり、それが無ければ周囲に対して能動的な対応をすることはできない(その意味では、理性はすべての動物に備っている)。一般的な意味での理性と自由は、自然科学が取り扱う事の出来る問題ではない。この包括的な問題を自然科学的に取り扱う切っ掛けを掴む必要がある。その鉤は、次の点である。

対象に活発に働きかけ、それを理解し、生活の要求に従って現実を変革することは、複雑な生物だけに出来る事である。複雑さの度合いは定量的に決める事が可能であり、これが自然科学に出来る事である。

人間原理は、次のような問にたいする答えとなる：どんな世界秩序を考えても、段階的に複雑化する構造の出現を予想できるだろうか？

そのような構造が発生することは、人類が出現する為の必要条件ではあるが十分条件ではないことを強調しておこう。しかし、この必要条件の分析は、進化の過程を理解する為に必要な多くの事を教えてくれる。

この観点から、宇宙の進化を考察しよう。

宇宙の進化についての概観

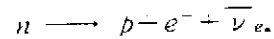
現在の宇宙観によれば、宇宙は時間的にも空間的にも有限である。つまりその年齢は限られており(約150億年)、体積も有限である。科学者によれば、宇宙に存在する粒子の数は莫大ではあるが、その数は有限で $N \sim 10^{40}$ 個である。宇宙の〈始まり〉は非常に高密度、高温の状態で、その宇宙の曲率半径は $\sim 10^{-34}$ cm であった。そのときから、ゴム風船がふくらむように宇宙は絶えず膨張を続け、その中の星雲、恒星、宇宙塵(物質)は、風船に描かれた模様のように互いに遠ざかり続けた。物質、空間および時間は、相互に依存している：それらは同時に生まれたので、〈宇宙が生まれる前には、何がどうなっていたのか?〉とか、〈宇宙の端まで行ったら、何が見えるか?〉というような質問は意味がない。時間には〈生まれる前〉はなく、地の果てへ行けないのと同じように、宇宙の端へは行けない。

〈始まり〉の最初の瞬間に、温度は非常に高く安定な構造は何も存在しなかった。素粒子でさえも互いに変換し合っていた。膨張するにつれて、温度は下がり、電子、陽子、中性子などの安定な粒子が作られた。これが最初の構造で、最初の驚くべき事実がその出現に関連した、次のような事実である：この始原の溶鉱炉では、粒子と反粒子は同数であったが、冷却するにしたがってその対称性は破れ、粒子の数 N_p は反粒子の数 N_a よりも多くなった。そのために、物質と反物質の消滅は完全でなく、すべての物質が光のエネルギーに変換されてしまうことはなかった。奇跡的に $\frac{(N_p - N_a)}{N_p} \sim 10^{-9}$ 、すなわち、10億分の1の粒子

が光にならずに残った。(この数には、他の場所でもまた出会うだろう。)

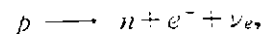
更に温度が下がると、最も簡単な元素、水素とヘリウムの原子が作られた。そのためには安定な

陽子の存在が必要だった。良く知られているように、陽子質量 m_p と中性子質量 m_n は少し違う： $m_n - m_p \approx 2.5 m_e$ (m_e は電子の質量)。少し重い中性子は15分しか生きられず、陽子、電子、反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ に崩壊する：



原子核の中では、核子の密度と運動エネルギーが大きく、この逆の反応も進行する。したがって、原子核の中では、中性子は動的平衡な状態にある。

中性子が陽子より軽いとすると、陽子は次のように崩壊する：



(e^+ は陽電子、 ν_e は電子ニュートリノ)。したがって、恒星の主な燃料であり、生命にとって不可欠な水の原料の水素は存在しないことになる。

しかし、ここでは原子が作られたことを前提に考える事にしよう。未だ、最も簡単な元素である水素とヘリウムしか存在しないことに注意する。それらは何処でも同時に合成されうるが、もっと重い元素を合成するには特別な条件が必要である：そのような元素の合成には、簡単な安定した核が原料として必要であり、さらにそれらの原子が合体するのに十分な高温が、十分長い時間(数十億年にわたって)持続する必要もある—熱核融合は急速には進行しない。一方、宇宙は数十億年ではなく、数十万年で既に現在の宇宙と同程度の、低い平均密度と温度に達したらしい。このような条件は原子の存在には好都合である(温度が高いと電子は核に束縛されにくい)が、核の融合には適さない。

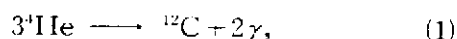
したがって、原子が安定する条件と核が融合する条件とは両立しない。複雑化の過程がさらに進行するためには、宇宙の空間的一様性が失われる必要があった。これは重力によってもたらされた。宇宙を満たす気体中で集積が起こり、未来の星雲が形成された。それらは自ずからさらに小さな凝縮体に分裂し、原星ができた。(宇宙があまり膨張しないうちに、重力が原星を作るのに成功した)ことに注意しよう。原星が濃縮されるにつれて、その温度は上昇し、核融合が始まり、エネルギーが高まってそれ以上の凝縮を抑えた。

最初の星が基本的に水素から出来ていたことは、重要である(若い宇宙の〈水素対ヘリウム〉

比は大体3:1であった)―それは陽子が中性子より少し軽かったからで、そのために全体がヘリウムになってしまうことが妨げられた。ヘリウム星は非常に高温で、寿命は短いので、その系内の惑星で生物学的な進化が起こるのに十分な長さの時間が保証されない。

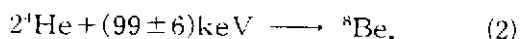
星の内部では、〈錬金術〉的変換―軽い元素の核の衝突、癒着およびより重い元素の核への変換―が進んだ。この段階における複雑化の過程は、核力と電磁気力のはなはだ微妙な性質の違いによって決定された。この性質の違いがなかったら、ヘリウムから炭素と酸素を経て鉄とさらに重い元素へ続く融合反応の連鎖は、最初の環で切れてしまっただろう。

この事情を明らかにする、最も驚くべき例を示そう。温度が1億度Kのとき、星の内部ではヘリウムが炭素に変換する：

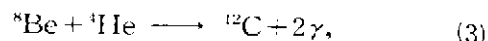
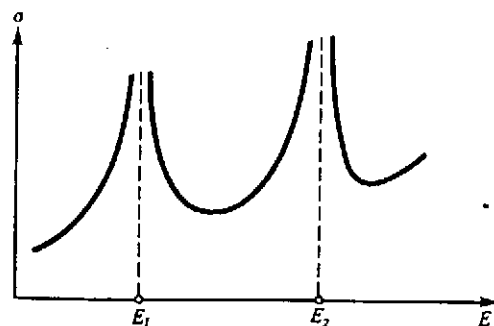


(γ はガンマ線量子を表す)。星の内部の希薄なプラズマの中で、三個のヘリウム核が出会う確率は非常に小さい(反応が起こるまでの時間は約 10^{-21} 秒である)ので、反応(1)は非常にゆっくりと進行し、地球のような惑星を形成するのに必要な炭素を作るには遅すぎる。

しかし、反応(1)は、2段階で実現することが分かった。第一段階では、2個の ^4He が ^8Be を作る：

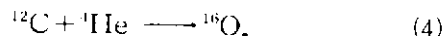


括弧内のエネルギーは¹、このエネルギーの供給がないと反応(2)は進行しないことを意味する：つまり、 ^8Be は崩壊性を持っている。(この核が安定であるとする、 ^{12}C を形成する、次の〈第二段階〉は時間とともに確率が小さくなる― ^4He は ^8Be を作るのに使い果たされてしまうから)。未だ崩壊しないでいる ^8Be は ^4He と合体して ^{12}C を作る：



^8Be 核の寿命は、次のヘリウム核との衝突がおこる時間の10000倍も長いので、2段階反応(2)―(3)の確率は、反応(1)の確率より非常に大きい。それだけではない、もう一つの、注目すべき事情がある。核反応の速度は衝突する粒子のエネルギーに単調に依存するのではなく、特定のエネルギーで急激に増大する(図)。反応速度の特定のエネルギーでの急激な増加は共鳴と、共鳴の起こるエネルギーは共鳴エネルギーと呼ばれる(図の E_1 と E_2)。これらのエネルギーは反応によって生成される核の性質だけで決まる。反応(3)では、共鳴は ^{12}C 核の共鳴エネルギー($7.656 \pm 0.008 \text{ MeV}$)で起こり、このエネルギーは ^8Be 核と ^4He 核の静止質量の和(7.3667 MeV)より、ほんの少し大きい。この差は恒星の内部での高温によって乗り越えられ、反応が起こる。

しかし、作られた炭素は〈燃えつきて〉しまわないのだろうか？ 何故ならば、次のような反応が存在するから：



それが、燃えつきてしまわないのだ。反応(4)は共鳴的でなく、非常にゆっくりと進行する(^{16}O の共鳴エネルギーは 7.1187 MeV であり、静止核 ^{12}C と ^4He のエネルギーの和 7.1616 MeV より小さい)。一方、高温であること、したがってこれらの核の運動エネルギーが大きいことは、共鳴を〈妨げる〉ように働くだけである。

このようにして、一連の偶然(^8Be の不安定性とそれに付随した寿命が比較的長いこと、反応(3)の共鳴性と反応(4)の非共鳴性)の結果、反応の連鎖は途切れることがなく、宇宙に生命が誕生するために非常に重要な炭素が、多量に得られたのである。恒星の中心部に重い元素がたまると、恒星はその輝度を急激に増して爆発し(超新星になる)、莫大な量の質量を放出する。その〈塵〉から、より多くの重い元素を含んだ新しい世代の恒星が生まれ、次々に進化が進む。宇宙論によれば、我々の太陽は恒星の第4世代に属する。宇宙は150億年のあいだ進化し、恒星の一世代の平均寿命は、約30億年である。しかし、その期間は生命の進化の為には十分でない(地球の年齢は約50億年である)。つまり、わが太陽は、非常に稀な、寿命の長い恒星なのである。多くの恒星の寿命は

もっと短く（恒星の寿命はその質量に依存する）、太陽型の恒星になるには重い元素の素材が必要である。

球の調和性を考えた古代人は、宇宙の諸過程を、オーケストラにも似た音を奏でる、調和的かつ合理的な思慮深い理性で表されたとした。その考えに従えば、恒星の活動はそのオーケストラの演奏に似ており、演奏者の役割を果たすのは自然の諸力で、それぞれの力が固有の楽器と役割を担っている。チェロは核力、オーケストラを指揮するバイオリンは電磁気力、絶えず高い音を出しているフルートは弱い相互作用力、重力はコントラバスで、第2楽章で指揮をとろうと待機している。協奏曲は、〈弱い〉相互作用のフルートとそれに伴奏するフレンチホルンの奏でる、爆発する超新星の中心から周辺の星雲へのニュートリノの急激な流れで完結する。

このようにして、メンデレーフの周期律表が生まれた。複雑化が一層進むと分子が形成されたが、炭素という素晴らしい元素の存在によって非有機的性格を持つこの過程が起こり得た。この基礎の上に、巨大な長さの分子鎖が生まれた。炭素はこの為には理想的であった。炭素²は4価で、価電子結合の間の角度は約90度である；炭素原子は互いに結合して鎖状につながり、残りの二つの価電子に他の原子あるいは分子を結合させて、

〈銘文〉を作る。炭素鎖が形成されるまでの宇宙的過程は、〈文章〉を作る過程に似ている；有機分子の形成は〈文字〉—原子を結合して〈単語〉—分子を作る。単語は未だ文章ではない。〈単語〉—分子の集まりと〈文章〉—生体の間には深淵が横たわっている。しかし、生命についての問題を考える前に、さらに非有機的な進化について考えることにしよう。

構造の複雑化が進むに連れて、この進行の条件は厳しくなる。原子核は十億度まで壊れないが、原子は数千度にも耐える事は出来ず、分子は数百度で壊れてしまう。温度はカオス（乱雑さ）の目安であり、カオスは構造と敵対する概念である。ところが、構造形成の過程はカオスなしには起こらない、というのは構造形成の為には運動が必要であり、温度が運動を引き起こすのだから。そう言う訳で、この過程は二つの極、熱と静止の間に締めつけられている；過熱は崩壊を意味し、過冷

却は固定を意味する。生命の誕生のレベルに達すると、複雑化の過程に共通なこの矛盾は非常に先鋭になり、有機分子を素材にした生命が存在するためには、極めて狭い温度領域しか残されていない。現在、正確には分からないが、その温度幅は10度から20度ではないだろうか。このような温度幅の存在は、どこにでも有り得ることではない。このような条件が成り立つことは、自然法則の間の非常に微妙な性質の違いによって保証される。原理的にそのような可能性は小さいとしても、その可能性の存在する場所はどこかに有るかもしれない。しかし、 $+20 \pm 15^\circ\text{C}$ の温度を、十億年間保持できるような場所を見つける事ができたとしても、そこで水は液体状態にあるだろうか（他の媒体中では有機物の〈スープ〉は作れない）、そこには恒星の恐るべき紫外線はないだろうか、などなど？ こうなると問題は、自然法則の問題ではなく、具体的な適合の問題になる。地球上の条件は、生命にとってこの上なく適したものだ。地球と太陽の距離が少し違っただけで、生命は破局的に脅かされていたろう。地球と太陽の距離がほんの少し遠かったら、温度の低下が雪崩的に起こる；極冠の成長は地表の光反射能を高め、それがさらに温度降下をうながす、等々。（全体の氷結さえ、起こり得る）。反対に、太陽に少し近付くと、最初僅かな温度の上昇が起こり、最終的に著しい温度上昇をもたらす；地球の環境は金星のものに似てくる。地球の特別の位置が、我々の近くの恒星の惑星系に、第二の地球を見出す期待を非常に小さくするのである。

生命の起源とその進化をここで考察することは、非常に複雑で難しい問題であり、よく分からないことも多いので、ここで取上げることが諦めようと思う。ただ、次の事を注意しておこう。〈試行錯誤〉的な生命の起源の仮説、すなわち、分子の偶然的な結合によって生命が誕生したと考えることは、二つの理由で否定されるだろう。第一に、自然発生が起こるためには、同じ種類の、非常に多数の分子が存在しなければならない。最小の生体細胞でさえ、十分に複雑であり、その規則的な構造は $\sim 10^{120}$ 個の多様性の中から選び出されなければならない。第二に、地上の生命は非常に早い段階に、實際上、惑星が冷えたら〈直に〉

現れたのである。(この事実を素に、V.I. ペルナツキは、生命が宇宙に常に存在していた、と仮定している位である。しかしこのような仮定は、明らかに火の玉宇宙の理論とは矛盾する。)

生命の誕生は、我々にとって明らかでないが、その進化は多かれ少なかれ知られている。無生物の中に生物の誕生を、非理性的なものの中に理性的なものの誕生を明らかにすることができれば、理性の起源を理解することが可能である。これは、一つの複雑さの段階から次の段階への飛躍と同様に、同じ規則に従って起こる：より複雑なものは、最初それが未だ軌道に乗る迄は、育成し、育むための特別な条件がないと完成しない。大人はロバよりも賢く、生存条件の変化にも適応できるが、幼児はロバよりもずっと無力である。

複雑さが可能に成る条件を作り出す諸条件の〈一致〉は、数学を基礎に取り扱うことが出来るだろう。次の節でそのような取扱を試みよう。

物理定数の方程式系としての人間原理

殆どすべての自然法則の数学的取扱は、我々が勝手に決めることができず、与えられたものとして受け取らざるを得ない、あるパラメータを含んでいる。最も簡単な例を、次に示そう：任意の電荷は電子電荷の倍数であり、次の式で表される、 $Q = Ne$ (N は整数である)。この場合のパラメータは、電子電荷 e である。次のもう一つの例を示す： r_{12} だけ離れた二つの質量 m_1 , m_2 の間の万有引力は、次の式で表される、

$$f = G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2}.$$

ここでパラメータは、万有引力定数 G である。もう一つの例：光子のエネルギーはその振動数 ω に比例する、 $E = \hbar \omega$ 。パラメータはプランク定数 \hbar である。

e , \hbar , G , c (光速) のような量は、物理学において普遍定数と呼ばれている。これらの定数の数値が特別の意味を持たないことは、単位系を変えればそれが変ることからも分かる。しかし、その無次元の組合せがあり、それは普遍的な意味を持つ。例えば、 e , \hbar , c から作られる唯一の無次元定数は、数 $\alpha = e^2 / \hbar c \simeq 1/137$ である。この数は微細構造定数と呼ばれる：これは電磁相互作用

用を特徴付ける。原子中の電子の間および自由電子間の相互作用の特性エネルギーは、その静止エネルギー $m_e c^2$ に対する小さな補正 (α の何乗かの次数の程度) となる。例えば、原子番号 Z の原子の中の電子のエネルギーに対する補正は、次の式で与えられる。

$$E \sim m_e c^2 (Z\alpha)^2.$$

α が小さいので、電子が他の粒子に転換する過程の確率は小さい。 α が小さいために、電子—陽子構造、つまり原子、固体などの安定性が保証される。原子番号 Z が、条件 $Z \leq \alpha^{-1} = 137$ を満たす重い原子は不安定である：核の表面の電磁場が大きくなって、電子—陽電子対を作り始め、それが核の〈過剰〉電荷を遮蔽して、電荷の有効値を $e\alpha^{-1}$ より小さくする。

同じような無次元定数を、他のすべての相互作用—強い相互作用 (S)、弱い相互作用 (W) および重力相互作用 (G) に対して書き下すことができる。最後のものでは、

$$\alpha_G = G m_p^2 / \hbar c \sim 10^{-39},$$

(m_p は陽子質量)。さらに、 $\alpha_s \sim 15$, $\alpha_w \sim 10^{-5}$ が知られている。これら二つの相互作用は、核の半径の程度の距離においてだけ作用する。

したがって、四つの相互作用—四つの自由パラメータ $\alpha_k (k \rightarrow e, G, S, W)$ が存在する。これらのパラメータに、我々の空間の次元 $d = 3$ 、宇宙内の粒子数 $N \sim 10^{80}$ 、光子数の粒子数にたいする比 $S \sim 10^9$ 、および電子質量と陽子質量の比 $m_e/m_p \simeq 1/1837$ を付け加えることができる。最後の数値は原理的に α , α_s , α_w をつかって表せる筈だが、今のところ成功していない。一般的に言って、物理学者の究極の夢は、これらすべての数値を何等かの一つの数から導くことである。しかし、今のところそれは単なる夢にしかすぎない。

生命が可能となるための条件は、自由パラメータの間になんらかの関係が成り立っていることである、と思われる。簡単な例を、いくつか示そう。

恒星を形成するのに最適な宇宙の膨張速度は、次の関係で決められる：

$$N\alpha_c^2 \sim 1.$$

熱すぎず冷たすぎない、太陽型の恒星が存在する可能性は、次の関係で決められる：

$$\alpha_G \sim \alpha^{12} (m_p/m_e)^4.$$

ニュートリノ流(弱い相互作用だけをする)が超新星の雲を吹き飛ばすには、次の条件が必要である:

$$\alpha_w \sim \alpha_G (m_p/m_e)^6.$$

宇宙の進化の過程で、宇宙の不均一性を作り出す重力不安定性が発展するのに十分な量の原子が形成されるには、次の関係が成り立つことが必要である:

$$S \sim \alpha^{-2} (m_p/m_e),$$

$$S \leq \alpha^{10} (m_p/m_e) \alpha_G^{-1}.$$

前の節で述べた、恒星の内部での核反応について、そこで示した諸条件の〈一致〉も、原理的に普遍定数の言葉で表現できることを、注意しておこう。

我々にとって次の事は重要である: 定数を決めるための必要条件の数(すなわち方程式の数)は、それらの定数の数をはるかに越えている。未知数の数が方程式の数より少ない連立方程式は解を持たない。解が存在するためには、〈余分の〉方程式を残りの式で表せなければならない。

つまり、自然法則の構造自身に、なにか非常に重要な未知の原理が隠されている筈である。我々はそれが数学的に定式化されるかどうかを知らない(それは、普遍定数の間のなんらかの対称性ではなかろうか)。そのような定式化は、空間と時間とその構造の展開の基本原理が、宇宙の〈アイデア〉で表現されることなのかもしれない。現在我々が知っているのは、その未知の原理の結果だけである。すべての個々の自然法則は、人間が誕生する筈であるという、一つの一般的な法則に融合されるだろう。

- 1 核物理学ではエネルギーを電子ボルト eV で測る。1eV = 1.6×10^{-19} J.
- 2 他の4箇の元素、例えばシリコンがそれほど優れていない理由については、ここでは述べない。

(訳 こじま ひでお)

メビウスの遺産 数学と天文学

J. フォーベル編/山下純一訳

A 5 2781円

この本にある6つのエッセイはかなり広い領域をカバーしている。まず、初めの章でメビウスの経歴、生活、努力についてのおおまかなアウトラインが描かれる。続く2つの章では、メビウスのライフワークの双子のアカデミックな背景——数学と天文学——について解説される。そのあと2つの章ではメビウスが関係した数学的な分野——幾何、力学、トポロジー——の発展史が紹介される。最後に、メビウスに関連して発生した20世紀数学のいくつかの分野について論じる。



めざせ、数学オリンピック!

J. コフマン/山下純一訳 A 5 2987円

これは数学オリンピックに挑戦しようという高校生のための「スーパーハイウェイ」ともいうべきテキストだ。この本は、I: 練習問題、II: 問題解決へのアプローチ、III: 数学史の中の問題、IV: 20世紀のやさしい有名問題、という4つのパートからなっている。I、IIのパートでは、過去の各種数学コンテストの問題を中心にして、問題のパターンに応じて配列されているので焦点がしぼりやすい。また、IIIでは今後出題が予想される問題という意味も含めて、歴史的かつ基本的な問題が紹介されている。最後のIVでは、予備知識なしで考察可能な最近の問題のいくつかが紹介されている。フェルマー予想を「拡張」したような問題: 「 $X^3 + Y^3 = Z^3$ 」をみたす自然数 X, Y, Z は存在するか? などがある。

自分の得意な、あるいは不得意なタイプの問題からランダムに選んで解いていくことができるし、そうするうちに、ちょっとヒネった問題やアツと驚く問題でも楽しく解けるようになるだろう。問題にはすべて詳しい解答が付いているが、最初はまず自分で考えてみてほしい。

(山下純一)

現代数学社