

神戸市外国語大学 学術情報リポジトリ

On the anthropic principle in modern cosmology

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2000-10-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 佐藤, 通, Sato, Toru メールアドレス: 所属:
URL	https://kobe-cufs.repo.nii.ac.jp/records/1449

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



現代宇宙論における「人間原理」について

佐藤 通

§ 1 はじめに

宇宙論における「人間原理」(Anthropic Principle; 以下“AP”と略称)とは次のような要請であると理解してよい:「自然界(宇宙)の物理法則は知的生命(人間)の発生を許容するようなものでなければならない」。現に人間がいるのだからこの要請は自明に見えるが、これは物理法則に対する一種の「選択原理」である。つまり、複数の物理法則の候補の中から、または法則に含まれる不定要素(パラメータ)の中から、知的生命の発生を許容するものを残し、許容しないものを排除する「原理」である。なぜ「人間」なのか。人間を持ち出すまでもなく、宇宙の観測事実を統一的に説明できることが物理法則の資格だが、“人間”はこの資格をより厳しく問うための材料となる。ビッグバン・銀河・恒星・惑星という時系列の“頂点”に人間の発生があり、人間に向かって収束するこの一連の流れを許容する物理法則だけが資格審査を生き残る。物理法則には、まるで人間発生をもくろむ密議があったかのようにきわどく微調整されている部分がある。従って人間発生の可否は物理法則の正否の最も厳しい審査基準となると期待される。ただし人間発生の詳細はほとんど分かっていないので、今のところ、地球上の炭素型生命(carbon-based life)の不可欠の要件と考えられるもの(炭素の存在など)を断片的に挙げているのが現状である。

APは(その名称からして)異質な要素を科学に持ち込む。宇宙の出来事を人間に収束させる発想法は“人間中心の”(anthropocentric)古代宇宙観

への接近でもある。APの中には「宇宙の物理法則は知的生命を生むように設計されている」という神学的・目的論的な主張がある（強い人間原理）⁽¹⁾。

また“宇宙はなぜ知的生命を生むような物理法則を持ったのか”という問いに「知的生命を生まない宇宙の中では“問い”そのものが発せられないから」と答えるのも一種のAPである。この返答はジョークに聞こえるが、真面目にとると「認識されない限り宇宙は存在しない」という主張であり、この議論は科学の土俵を離れて紛糾を生む。

さまざまなバージョンがある中で、APを上述したような「選択原理」と見るのが最も妥当な見方である。日本にAPを紹介してきた松田卓也氏は、APを「端的にいうと生物学から物理学を導くこと」と描いた⁽²⁾。佐藤文隆氏はAPを「逆問題」になぞらえて「人間が居るというデータ」から“物理法則”を出す⁽³⁾ことと特徴づけ、だが“まだ漠然とした主張だ”と述べた⁽³⁾。「われわれの存在を元にして宇宙の因果的連鎖をたどること」という見解⁽⁴⁾も含めて、これらの実質的な中身はみな選択原理としてのAPである。この“原理”は定量的な予言力を持たない。F. Hoyleによる炭素核の共鳴単位の予言（§2）がAPによる予言の例とされるが、正確な数値まで言い当てたわけではない。APの基本的文献とされるCarr & Rees⁽⁵⁾は、現在の（人間を含む）宇宙の姿が物理定数の間の“偶然の一致”の産物であることを多数の事例で示した。その論文の末尾でAPによる説明が持つ欠点として次の3点を挙げている。事後説明であること、人間中心の発想であること（他の知的生命の可能性）、正確な数値を予測する能力がないこと。1980年代中頃

(1) 流布しているのはこの意味でのAPである。例えばチェコ共和国ハベル大統領は演説（1994年6月ボストン）で、「人間原理の創始者たちは、宇宙は物質の進化の数ある可能性のうちから、内部に生命が宿る唯一の可能性を自ら選んだのだ、と指摘しております」と述べた。（<http://www.gulf.or.jp/~narc/habel.html>）

(2) 松田卓也、「科学」（岩波書店）1984年7月号、p.393。

(3) 佐藤文隆、「数理科学」（サイエンス社）1986年4月号

(4) G.F.R.Ellis, in “The Anthropic Principle”, ed. by Bertola & Curi, Cambridge University Press, 1988, p.25.

(5) B.J.Carr & M.Rees (1979), Nature, 278, 605

までの AP に関連する話題は、それを集大成した J. D. Barrow たちの大著⁽⁶⁾に徹底網羅されている。

Barrow たちの著作で列挙し尽くされたとも言える AP だが、その後の新しい動向を 2 点挙げる。第 1 に、選択する“選択肢”の中身がより具体的に論じられるようになったこと。この背景には超弦理論や M 理論を有望な候補とする素粒子“最終理論”への期待が昂じたことがある。それに伴って“最終理論”が理論で決定できない未定パラメータを残すかどうかの議論が現れた（経験でその値を決めるしかない未定パラメータは自然定数または物理定数として扱われる）。最近の 2 つの論文「宇宙はなぜ Just So なのか」⁽⁷⁾と「人間原理の終焉の始まり」⁽⁸⁾が対照的である。前者は、現在の素粒子「標準理論」が含む未定パラメータ（19 個）は、今後その多くを何らかの対称性原理の導入で減らし得たとしても、最後まで数個が未定のまま残ると予想する。後者の論文は、「超弦理論」が完成すれば物理定数はすべて理論から定まり、未定パラメータはなくなると主張する。もしそうなら選択の余地がなくなるから“AP の終焉”ということになるが、著者たちは、弦の真空解が多数存在するなら真空ごとに物理定数が異なる可能性はある（ただしその値は真空ごとに決定される）と保留している。前者の著者は、仮に超弦理論がすべての物理量を決定できたとしても、現実の低エネルギー世界では不定要素が出現すると反論した。主張の強弱はあるが、どちらも、いくつかの物理定数の値はユニークには定まらない、またはその可能性があるとして述べている。この未定のまま残る物理定数の値（連続無限または離散的）が AP の“選択肢”となる。ここで物理定数は時空の次元数なども含めた広い意味とする。

新しい動向の第 2 は、選択肢を担う実体として“多宇宙”が「真面目に」

(6) J. D. Barrow & F. J. Tipler, “The Anthropic Cosmological Principle”, Oxford University Press, 1986.

(7) C. J. Hogan (1999), astro-ph/9909295

(8) G. L. Kane, M. J. Perry & A. N. Zytlow (2000), astro-ph/0001197

想定されるようになったことである。⁽⁹⁾“多宇宙”の想定は以前から（選択原理としての）APの暗黙の前提だった。可能な物理定数の値ごとに可能な宇宙が随伴し、ある値を選択することはある宇宙を選択することだと仮想する。この考えの利点は、われわれの物理定数が知的生命の発生にとって“Just So”であることを「奇跡」と考えなくてもよいことである。多くの宇宙サンプルの中で“Just So”の宇宙にわれわれが発生したのであり、そうでない宇宙には発生し得なかつただけのことである。荒唐無稽に見えるこのような想定が「真面目に」取り上げられ始めたことを強く印象づける例がある。それは“究極理論”の志向者スティーブン・ワインバーグ⁽¹⁰⁾が、宇宙定数の問題の説明に多宇宙描像のAPを採用していることである。彼は「APによる説明が意味を持つのは（異なる宇宙定数を持つ）多数のビッグバン宇宙が存在する場合に限る」と述べている。⁽¹¹⁾

“多宇宙”の想定は、コペルニクス地動説からジョルダノ・ブルーノ多世界説への流れ⁽¹²⁾に類似している。しかしそれは科学に不可知の世界を導入することでもある。この論文はAP宇宙論の最近の動向を具体的に紹介することを主な目的とし、終章で批評を加える。第2章で物理定数（パラメータ）の微調整の例を見ておく。第3章で“多宇宙”描像を前提とした最近の具体的研究を4つの例で紹介する（ヒッグス・パラメータ、宇宙定数、時空次元、宇宙アンサンブル理論）。第4章でAPを批判的に考察する。

§ 2 微調整とパラメータ空間

APは以下のような経過で生まれた。エディントン⁽¹³⁾は自然界の無次元巨大数の間の奇妙な一致に着目した（1923年）。陽子・電子間の電気力と重力との比を N_1 、宇宙の地平線半径と電子の古典的半径との比を N_2 、宇宙の地

(9) APを含む最近の宇宙論の一般書として、M. Rees, “Before the Beginning”, Perseus Books, 1997.

(10) S. ワインバーグ著、小尾信彌・加藤正明訳『究極理論への夢』ダイヤモンド社、1994年。

(11) S. Weinberg (2000), astro-ph/0005265

(12) ブルーノ著、清水純一訳『無限、宇宙と諸世界について』現代思想社、1967年

平線内に含まれる核子の総数を N とすると、次の3つはどれもおおよそ 10^{40} という値になる⁽²⁾；

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

マイクロとマクロの両極端にまたがる互いに無関係な数の間にこういう一致があることは不可思議だった（宇宙がほぼ平坦とすると $N_1 N_2 \sim N$ が言える）。ディッケは次のように解釈した（1957年）。式(1)に気付く人類が誕生するのは、それに先立つ恒星内部での元素合成が必要だから、宇宙開始から少なくとも恒星の平均寿命 t_s （～約100億年）が経過した時期である。これが現在の宇宙年齢（の下限⁽¹³⁾）だから、 N_2 の地平線半径は ct_s となり、 t_s を物理定数で表わすと $N_1 \sim N_2$ が導かれる。これは平坦宇宙では(1)のことである。無関係なマクロ量とマイクロ量とが認識主体（人間）の存在条件を媒介させることによって関連づけられたことになる。この説明様式をディッケは「AP」と名付けた（“弱い人間原理”）。

この関連づけを比喩的に言うと、仮に人間存在の条件を $H = 0$ とし、互いに無関係な2つの量 x, y がこの条件に関与するため $H(x, y) = 0$ という陰の関数関係を持つ、ということである。また x, y をそれぞれマイクロ量（物理定数）とマクロ量（天体等の物理量）とすると、マクロ量 y が物理定数 x で表せる場合 $y = y(x)$ であり、上の条件は $H(x, y(x)) = 0$ となる。つまり人間存在の条件が物理定数 x に制約を課し、この式を満たす x の値が“選択”される。だから § 1 で述べた選択原理としての AP はディッケの“弱い AP”を言い換えたものである。

物理パラメータの組を P 、世界を W 、生命が存在するそれらを添字ゼロで表して $W = W(P)$ 、 $W_0 = W(P_0)$ と書く。生命が存在する世界の許容幅（例えばある元素の存在量が現在値の±何%以内）を ΔW_0 とすると、パラメータ変動の許容幅 ΔP_0 は

(13) 「人間が存在する」宇宙の年齢 t は $t \geq t_s$ だが、 $t \gg t_s$ だと惑星系の中心星が燃え尽きるし、銀河ガスが消費され恒星が生まれなくなるので、ほぼ $t \sim t_s$ としてよい。

$$\Delta P_0 = \Delta W_0 / |dW/dP|_0$$

パラメータ空間の生命可能領域は点 P_0 を中心に幅 ΔP_0 を持つ“島”としてイメージされる (habitable island)。もしパラメータ変動に対して世界が大きく変動する $|dW/dP|_0 \gg 1$ なら島の幅 ΔP_0 は小さく、パラメータはきわどく微調整 (fine-tuning) されていることになる。パラメータ空間は、それぞれの島に別生命が生息する“多島海” (archipelago) であるかもしれない。

島や多島海という譬えは Tegmark⁽¹⁴⁾ による。同論文は、我々の“低エネルギー世界”を特徴づける無次元・物理定数として次の6個を挙げている⁽¹⁵⁾；

$$\alpha_s, \alpha_w, \alpha, \alpha_G, \beta (= m_n/m_p), \delta (= m_n/m_p) \quad (2)$$

最初の4つはそれぞれ強、弱、電磁、重力の相互作用の“微細構造定数” (微細構造定数 $\alpha = e^2/hc$ の e にそれぞれの結合定数を入れたもので、重力の場合は $G^{1/2}m_p$)、また m_e, m_p, m_n は電子、陽子、中性子の質量である。原子分子の現象の特性は ($\delta = 1$ として) ほとんど α と β で記述され、天体現象はこれに α_G が加わる。パラメータ空間の生存可能“島”は非常に狭い (同論文には図が2例紹介されている)。制限は主に原子、原子核、恒星の安定性に由来する。

宇宙スケールのパラメータにも“島”がある。宇宙背景輻射 (CMB) のゆらぎ振幅 Q は $10^{-6} < Q < 10^{-4}$ に制限される⁽¹⁶⁾。 Q が小さすぎるとガス冷却の効率が悪く構造形成が不可能になる。大きすぎると銀河内の恒星が密になり、恒星が頻繁に通過するため太陽系惑星の軌道が不安定になったり、オールトの雲が乱されて地球への彗星衝突が頻発する。宇宙の光子とバリオンの個数比 (観測値 $\sim 10^9$) は、構造形成の要請から $10^6 \sim 10^{11}$ の範囲に制限される⁽⁵⁾。宇宙定数については次章で述べる。

微調整の好例とされるのが元素合成である (ここで α は ^4He 核)。炭素が

(14) M. Tegmark (1998), *Annals. Phys.* **270**, 1

(15) この6個の測定値は (0.12, 0.03, $1/137$, 5.9×10^{-39} , $1/1836$, 1.0014)。

(16) M. Tegmark & M. J. Rees (1998), *Astrophys. J.* **499**, 526

恒星内部で合成 (3α 反応) されるためには、核のエネルギー準位の精巧な配置が必要である。第 1 に (${}^8\text{Be}$ 核が短寿命 10^{-16}s のため) ${}^8\text{Be} + \alpha$ のエネルギー ε_0 のすぐ上に ${}^{12}\text{C}$ 核の励起準位 ε_1 がなければならない (共鳴反応)。第 2 に, ${}^{16}\text{O}$ 核の励起準位が ${}^{12}\text{C} + \alpha$ のエネルギーの下側にないと C がすぐ O に変わってしまう。これを指摘した F. Hoyle の予言 (1953 年) は実験で確認された。準位差 $\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_0 \approx 0.3 \text{ MeV}$ がこれ以上広がると熱核反応の効率は激減するし, ε_1 が下がり過ぎて $\Delta\varepsilon < 0$ になると反応は起こらない。最近この敏感さの程度を詳しく調べた H. Oberhummer たちの計算例⁽¹⁷⁾によると、核子間の有効ポテンシャルの係数を 1 ± 0.004 倍しただけで ($\Delta\varepsilon$ が動き) 3α 熱核反応の反応率が $10^{\pm 2}$ 倍も変動し、元素合成は C で止まるか C を素通りして O に行く。核力のわずかに 0.4% の変化で C と O の両方が存在する世界は不可能になる。元素合成の中では 3α 反応からの制限が最もきつ⁽¹⁸⁾い。

AP がマイクロ物理定数に与える制約について Hogan は以下のように主張している。⁽⁷⁾ ミクロ物理の中で厳しい微調整が必要なのは、原子分子のパラメータよりも原子核であり、特に、核子を構成する第 1 世代クォーク u , d の質量である。第 2, 3 世代クォークは、超新星爆発を通して元素合成に関係するが、その質量の微調整は不要である。 u と d の質量の変化により核の世界は激変する。 m_d と m_u の変化量の差を δm_{d-u} として、 $\delta m_{d-u} < 0$ ならある閾値以下で陽子が不安定化し、 $\delta m_{d-u} > 0$ なら中性子は今以上に不安定になる。そのため前者の場合は、ビッグバン初期の元素合成で陽子が消え、中性

(17) H. Oberhummer et al. (1998), nucl-th/9810057; H. Oberhummer et al. (1999), astro-ph/9908247

(18) H. Oberhummer et al. (2000), nucl-th/0009046

(19) Hogan によれば、仮に本文 (2) の α と β が少し動いても原子分子の電子軌道は homologous に変化するから、DNA などの生体高分子の構造は (サイズは変わっても) ほぼ不変であろう。少々の変動は生物進化の選択過程で調整されるだろう。ただし、もし“電弱”と“強”相互作用が GUT で統一されると、 α と α_s の比は固定されるから、両者は独立なパラメータではなくなる。

(20) α と α_s の変化が炭素燃焼 (${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{20}\text{Ne} + {}^4\text{He}$) に及ぼす影響について調べた例によると、 α の変化幅が観測制限内なら影響は無視できるが、 α_s の 2% の変化は断面積を因子 2 も変える。M. Fairbairn (1999), astro-ph/9910328

子とヘリウム核だけが残る、太陽のような主系列星は存在しなくなる。後者の場合は、重水素をはじめ、重い原子核が次々に不安定になり、終には元素は陽子だけになる。(ただし電子質量の変化量 δm_e も関与する)。一方、 m_d と m_u の変化量の和 δm_{d+u} は、パイ中間子の質量 ($\propto \sqrt{m_u + m_d}$) の変化、従って核力の有効ポテンシャルの変化を通じて、核のエネルギー準位の変動につながる。 δm_{d+u} の値によっては核反応の様相が一変する (3α 反応がその例)。核に対する以上のような制限はヒッグス・パラメータに対する制限になる (§ 3)。

Hogan は次のように結論する。標準理論の19個のパラメータのうち、9個のフェルミオン質量(クォーク6個とレプトン3個)は4個のパラメータで表せるだろう。その4個を m_e , m_u , m_d , α (微細構造定数) とする。これを例えば2個まで減らす“統一”スキームもあるが、どんなに減らし得ても、少なくとも $(m_d - m_u)/m_p$ は第一原理だけから演繹できる量ではない。これはAPによって選択されるべき量である。

(2)のパラメータ空間が何次元空間か(真の独立パラメータの個数)は“最終理論”の完成まで未知である。0次元の可能性も排除されない。だがAPにとって次元数が減ることは問題の複雑化を意味する。多数のパラメータが少数の独立パラメータの変化に連動して変わるから、その波及効果の全貌の予測が困難になるからである。⁽²¹⁾

宇宙をパラメータ空間の1点で代表させる前提は宇宙でのパラメータの均一性である。主に遠方のクエーサーの吸収線の観測から物理定数の変動の上限が調べられている。⁽²²⁾ 例えば(2)の α について $\Delta\alpha/\alpha < 10^{-5}$ ($\dot{\alpha}/\alpha < 10^{-15} y^{-1}$)、⁽²³⁾ β について $\Delta\beta/\beta < 10^{-4}$ ($\dot{\beta}/\beta < 10^{-14} y^{-1}$)、⁽²⁴⁾ 陽子の g 因子も α とほぼ同じ上限が得られている。⁽²⁵⁾ 最近、オクロ現象(西アフリカの20億年前の天

(21) J. D. Barrow (1998), astro-ph/9811461

(22) レビューは(やや古いが) J. D. Barrow (1997), gr-qc/9711084

(23) J. K. Webb et al. (1999), Phys. Rev. Lett. 82, 884

(24) A. Y. Potekhin et al. (1998), astro-ph/9804116

(25) M. J. Drinkwater et al. (1997), astro-ph/9711290; astro-ph/9709227

然原子炉)の核分裂生成物の存在比の測定から、 α と α_S のより厳しい上限 $\Delta x/x < 10^{-7}$ ($\dot{x}/x < 10^{-17}y^{-1}$)⁽²⁶⁾が得られた($x = \alpha, \alpha_S$)。観測範囲内ではパラメータはほぼ均一である。ただし物理定数の可変性を“測定で”確かめることには微妙な問題がからむ。定数の測定は物理法則を根拠とするが、物理法則を変えずに定数の時間変化だけを許すのは consistent ではないからである。⁽²⁷⁾

§ 3 “多宇宙” 描像に基づく研究例

“多宇宙”説とは、異なる物理定数(または物理法則)を持つ多数の独立な宇宙が存在するという見解である(Multiverse, sub-universes, 多ドメインなどとも呼ばれる)。多宇宙の可能性の根拠とされるのが、量子論の多世界解釈、量子宇宙論⁽²⁸⁾、インフレーション宇宙論、素粒子の統一理論などだが、前二者は未解決の解釈問題がからむので、ここでは後二者を素描する。素粒子論の統一スキームは各種の対称性の導入によってなされる。高次の対称性ほど高エネルギーで成立し、低エネルギーになると順次それらは自発的に破れる。対称性の破れを媒介するスカラー場(秩序パラメータ)が導入され、スカラー場の自己相互作用ポテンシャルの最低状態が「真空」と定義される。対称性が破れて低位の「真空」に移った世界は、そこでのスカラー場の値で決まる結合定数を持つ有効低エネルギー物理学で記述される。ポテンシャルの形によっては異なる低エネルギー物理の世界が生まれる。それらを別個の宇宙として現実化する仕組みが、(対称性が破れる前の)真空エネルギーによるインフレーションである。最初に提唱されたインフレーション宇

(26) 藤井保憲, 岩本昭, 日高洋, 「日本物理学会誌」2000年9月号, p.679

(27) A. Albrecht & J. Magueijo (1999), Phys. Rev. D59, 043516

(28) 量子宇宙論の宇宙波動関数は量子論的な重ね合わせとしての“多”宇宙(多時空)を表現する。この解釈(観測問題)は、量子論の多世界解釈などいくつかあるが未解決である(佐藤文隆・小玉英雄『一般相対性理論』岩波講座・現代の物理学6)。

なお宇宙波動関数を(“無境界”境界条件のもとで)時空ワームホールからの寄与を入れて経路積分で評価すると“母宇宙”が無数の“ベビー宇宙”とワームホールで連結されて揺らぎを受けその自然定数の値はランダムになるという説がある(S. Coleman, 1988)。J. D. Barrow著, 林一訳『万物理論』みすず書房, 1999年。

宙論は GUT 真空の一次相転移に基づくものだった (A. Guth, 佐藤勝彦; 1981)。いくつかの困難を経た後, 現在では, インフレーションを起こすスカラー場 (インフラトン) の存在と “slow roll” 形のポテンシャルを仮定するインフレーション理論が主流になっている⁽²⁹⁾。このインフレーションは相転移を起こさず, インフラトン場の量子ゆらぎによってランダムに, 多重的に, かつ永続的に生じ得るので “混沌インフレーション” または “永久インフレーション” と呼ばれる⁽³⁰⁾。インフラトンは素粒子論的には未特定の場だが, 真空と有効低エネルギー物理を支配すると見なされ, ゆらいだ微視的領域を拡大する機構 (インフレーション) と相俟って “多宇宙” の可能性の根拠とされる。ただし S. Weinberg はこの根拠づけを批判して, もしそうならインフラトン場は物質場と結合する軽ボソンだから, 物質粒子の衝突や消滅過程で簡単に見つかっているはずだ⁽³¹⁾ という。なお超弦理論のコンパクト化に任意性があれば, そこからも物理定数の任意性が生じる⁽³¹⁾。

多宇宙説に基づく具体的な研究例を紹介する。

(1) ヒッグス・パラメータの制限。

標準理論のヒッグス質量パラメータ μ^2 の値 $\sim (10^2 \text{Gev})^2$ は, GUT スケールでの量子補正を考慮するとその 10^{26} 倍あってもよいのに異常に小さい (階層問題, 微調整問題)⁽³²⁾。Agrawal たちは μ^2 値が異なる (素粒子の質量が異なる) 多宇宙を想定し, バリオンや元素の安定性の要請から, 生命が存在し得る宇宙の μ^2 の許容幅を求めた⁽³³⁾。その結果ヒッグス真空期待値 v ($\sim |\mu|$) は $v/v_0 < 5$ に制限され (v_0 は現在の値), かつ μ^2 値が “異常に

(29) インフレーション宇宙論の最近のレビューとして, G. S. Watson (2000), astro-ph/0005003; A. Albrecht (2000), astro-ph/0007247; R. H. Brandenberger (1999), hep-th/9910410

(30) 最近の解説として, A. H. Guth (2000), Phys. Rept. 333-334, 555

(31) 超弦理論のような多次元理論 (カルツァー & クライン型の理論) では, 余次元空間のコンパクト化の仕方が 4 次元時空の物理定数に反映する。超弦理論では余次元 (6 次元) 空間は “カラビ=ヤウ多様体” であり, そのトポロジーと計量 (モジュライ場) が素粒子の世代数, 結合定数, 質量を決めると考えられている (注(8))。従ってもしコンパクト化の仕方に任意性が残れば, それも低エネルギー物理定数の任意性の源となり得る。

(32) 長島順清『高エネルギー物理学の発展』朝倉書店, 1999年, 第 5 章

(33) V. Agrawal et al. (1998), Phys. Rev. D57, 5480

小さい”ことも自然な帰結となる。だから GUT の階層問題と微調整問題の解決には“テクニカラー”や超対称性よりも AP が有望であると主張する⁽³⁴⁾。一方、元素合成 3α 反応からの制限を v への制限に読み替えると $v/v_0 > 0.9$ となるので、ヒッグス真空期待値の許容幅は $0.9 < v/v_0 < 5$ となる。その後 Oberhummer たちはこれを一気に 1 ± 0.01 の幅に縮めた⁽¹⁸⁾。これも 3α 反応に基づく。

(2) 「宇宙定数」問題。

CMB ゆらぎと Ia 型超新星の観測から $0.2 \leq \Omega_m \leq 0.45$, $0.6 \leq \Omega_\nu \leq 0.85$ が確からしい (Ω_m , Ω_ν は物質密度と真空エネルギー密度の臨界密度に対する比)⁽³⁶⁾。真空エネルギー密度 ρ_ν はアインシュタインの宇宙項 (宇宙定数) として働くから、宇宙は今、宇宙項が優勢して加速膨張していることになる⁽³⁷⁾。宇宙定数問題とは主に次の 2 つである。第一に、 ρ_ν の自然な源は真空の量子ゆらぎであるが、量子場の理論 (それがプランクスケール近くまで使えらるとして) で評価した値は $\rho_\nu \sim 10^{110} \text{ erg/cm}^3$ となり、観測値 $10^{-10} \text{ erg/cm}^3$ の約 10^{120} 倍にもなる⁽³⁸⁾。このギャップは膨大である。第二に、本来、物質と真空のエネルギーは全く無関係なのに、両者がほぼ一致する時期がなぜ“今”なのかという問題である。

S. Weinberg たちは宇宙定数問題に限定して多宇宙描像の AP を採用し⁽¹¹⁾、以下のような説明をしている⁽³⁹⁾。真空エネルギー密度 ρ_ν を持つサブ宇宙の存在確率を $P_A(\rho_\nu)$ 、 ρ_ν のサブ宇宙に知的生命が存在する確率を $Q(\rho_\nu)$ とす

(34) V. Agrawal et al. (1998), Phys. Rev. Lett. **80**, 1822

(35) T. Jeltema & M. Sher (2000), Phys. Rev. **D61**, 017301

(36) 宇宙定数問題の観測・理論のレビューは、V. Sahni (2000), Int. J. Mod. Phys. **D9**, 373; S. M. Carroll (2000), astro-ph/0004075

(37) 加速膨張の直接の証拠とされるのは遠方の Ia 型超新星だが、その最新モデル (新星風理論) によると二重星の大気中に十分量の鉄元素が必要であり、早期の銀河中に Ia 型超新星が存在し得たかどうかは疑問だという。加藤万里子, 蜂巢泉, 『科学』2000年9月号, p.720

(38) 他のエネルギー・スケールで評価しても膨大なギャップは残る。超対称性があるとフェミオンとボソンの寄与がキャンセルして真空エネルギーが消えるが、それが破れるスケール (少なくとも 10^3 GeV 以上) で評価すると $\rho_\nu > 10^{50} \text{ erg/cm}^3$ はある。超対称性のレビューは、S. P. Martin (1997), hep-th/9709356

(39) H. Martel, P. R. Shapiro & S. Weinberg (1998), Astrophys. J. **492**, 29

ると、値 ρ_V が観測される確率は、

$$P_{obs}(\rho_V) \propto P_A(\rho_V) \cdot Q(\rho_V)$$

となる。 $Q \neq 0$ となる小 ρ_V 値 (大 ρ_V 値では構造形成が不可能だから知的生命は存在せず $Q = 0$) の狭い区間では、 P_A は一定としてよい (P_A のピーク $\rho_V \sim 10^{110}$ erg/cm³ から遠く離れた裾野になる)。すると P_{obs} は、実質的に構造形成の確率 ($\propto Q$) になり、真空エネルギーの起源や分布の問題には一切ふれずに、構造形成モデルだけから計算される。その結果、小さな観測値 ρ_V は (期待値には一致しないが)、それより大きい値を観測するサブ宇宙が全体の 5% しかないという意味で、自然な値であると結論した。また、 $y = \Omega_V/\Omega_m$ は a^3 で増大 (a は宇宙スケール因子) し、宇宙再結合の時期に $y \geq 1$ であるものは予め排除されているから、それ以降の時期 (広い意味での “今”) に $y \sim 1$ となるのは自明となる。こうして不自然に小さい ρ_V 値が “自然な値” になり、時期の不思議な一致が “自明” となる。そのトリックは、宇宙母集団の中から “観測者が存在しない” 圧倒的多数のサブ宇宙を除外したことにある。

Weinberg が “アприオリ確率” P_A を一定値としたのに対し Vilenkin たちは、インフレーション・モデルを利用して ρ_V に依存する P_A を求め、 P_{obs} を計算した。適当なポテンシャル形を仮定すると彼らよりも良い値が得られる⁽⁴⁰⁾。Weinberg は、彼らの仮定 (“slow roll” 形のポテンシャル) は “アприオリ確率が一定” と同じ内容だと反論した⁽⁴¹⁾。なお、どちらの議論も微小 ρ_V 値を含む膨大な選択肢の存在を前提とする。巨大個数の選択肢が離散値からなるとは考えにくい。もし連続値なら特定の値に固定化する仕組みが必要である。固定化を担う場を導入しても問題の移し変えにすぎない (その場の値を各ドメインごとに固定する機構が必要)。この機構の説明も AP

(40) J. Garriga & A. Vilenkin (2000), Phys. Rev. D61, 083502; J. Garriga, M. Livio & A. Vilenkin (2000), Phys. Rev. D61, 023503

(41) S. Weinberg (2000), astro-ph/0002387

の課題となる。⁽⁴²⁾

APに頼らない第五元素 (quintessence)⁽⁴³⁾ 説は宇宙項を定数ではなく動的スカラー場と考える。これはアトラクターに似た解を持つため、細工なしに自然に宇宙定数問題を解決すると主張されるが⁽⁴⁴⁾, 細工 (スカラー場ポテンシャルの微調整) が不要だとは言えない。⁽³⁶⁾ 超弦理論・M理論が宇宙定数問題を解決するという期待も強い。これはコンパクト化される“余次元”空間の物理量によって4次元時空 (3-ブレイン) の物理量を調節するというアイデアである。⁽⁴⁵⁾ 膨大なギャップの調節という点で宇宙定数問題と相互作用スケール階層問題⁽⁴⁶⁾は似ている。⁽⁴⁷⁾ 最近のある報告⁽⁴⁸⁾によると, その両者を同時に解決する試みはどれも真空の多重性と低エネルギー実効ラグランジアン⁽⁴⁹⁾の不定性を招いてしまう。著者たちは不定性を安易にAP選択に結び付けることに反対し, APによる説明は, モデルによらず一般性を持つ議論が“病的な”帰結をもたらす場合に限るべきだと主張する。その資格があるのは宇宙定数と時空次元の問題だけだという。

(3) 時空の次元。

時間を m 次元, 空間を n 次元とすると我々の低エネルギー宇宙は $(m, n) = (1, 3)$ である。この次元数の必然性を述べた Tegmark の議論を紹介する。⁽⁴⁹⁾

時間が1次元の場合 ($m = 1$), 空間次元が $n \geq 4$ だと, 古典論でも量子論でも安定軌道が不可能であることは昔から知られていた (一般相対論でも

(42) J. F. Donoghue (2000), hep-ph/0006088

(43) R. R. Caldwell et al. (1998), Phys. Rev. Lett. **80**, 1582. 定数説と第五元素説を比較した, S. Bludman (2000), Nucl. Phys. A**663-664**, 865

(44) P. J. Steinhardt et al. (1999), Phys. Rev. D**59**, 123504; C. Armendariz-Picon et al. (2000), astro-ph/0006373

(45) 例えば, C. P. Burgess et al. (1999), astro-ph/9911164

(46) 余次元の空間サイズが階層問題を解決する可能性と, それを実験で検証される可能性を解説した記事として, 山口昌弘『日本物理学会誌』2000年8月号, p.612

(47) 宇宙定数は電弱とプランクの2つのスケールのエネルギーだけで決まるとした, N. Arkani-Hamed et al. (2000), astro-ph/0005111

(48) T. Banks, M. Dine & L. Motl (2000), hep-th/0007206

(49) M. Tegmark (1997), Class. Quant. Grav. **14**, L69

同様)。地球は太陽に吸い込まれるか太陽系から飛び去り、水素原子は束縛状態を持たず潰れる。一方 $n \leq 2$ だと複雑な神経回路が組めないから知的生物はない。だから我々は $n = 3$ 以外の空間には存在し得ない。時間が複数次元 ($m \geq 2$) の場合はどうか。場の量子論で粒子の崩壊が可能なのは、 $m = 1$ なら、崩壊後の静止質量の和が崩壊前の静止質量より小さい場合に限られる。だが $m = 2$ ではこの制限がなくなり、陽子が中性子に崩壊したり、光子が任意の粒子に崩壊したりする。そもそも安定な真空が定義できない。Tegmark は予測可能性の観点から次の理由を追加した。我々は場の時間的な挙動を双曲型偏微分方程式に基づいて予測する。このとき初期値を与える“空間的”超平面が $m \geq 2$ の場合には存在しない。だから初期値問題を解くことが出来ず、予測に基づく知的活動が不可能になる。唯一の例外は $(m, n) = (3, 1)$ だが、この世界は“タキオン”が現れて不安定になる。

(4) 宇宙のアンサンブル。

多宇宙はインフレーションによって因果的に隔絶した世界だから認識の対象外にある。認識不能でも AP の議論には必要とされる。例えば多宇宙アンサンブルにおける物理量の確率分布を計算し、我々の宇宙での物理量の‘尤もらしさ’を確認する。上記の Weinberg や Vilenkin による宇宙定数の説明はその一種である。Vilenkin は‘尤もらしさ’の尺度を、我々の宇宙での値が“habitable”な宇宙アンサンブルの平均値近傍にあることとし、これを AP に代わる「平凡性 (mediocrity) の原理」と呼んだ⁽⁵⁰⁾。彼はこの議論を他の物理定数に広げた⁽⁵¹⁾。それは実質的にインフラトン場の確率分布の計算になるが、永久インフレーションという性質のため分布が定常にならず、どの時期での確率分布なのかが問題になる⁽⁵²⁾。同様の計算をした Linde たちは、ブラ

(50) A. Vilenkin (1995), gr-qc/9512031

(51) 例えば宇宙の密度パラメータ Ω について、A. Vilenkin & S. Winitzki (1997), Phys. Rev. D55, 548

(52) A. Vilenkin (1998), Phys. Rev. Lett. 81, 5501; V. Vanchurin & A. Vilenkin (2000), Phys. Rev. D61, 083507

(53) A. Linde (1994), hep-th/9410082

ンス&ディッケ理論に基づいて重力定数 G の確率分布を求めた⁽⁵⁴⁾。Guth はインフレーションと確率の問題をレビューし、1 個だけの宇宙に確率を適用する意味についてコメントした⁽⁵⁵⁾。他に、これとは異なる観点（結合定数の running）からクォーク質量の分布を求めた例がある⁽⁵⁶⁾。

Tegmark は宇宙アンサンブルをユニークな視点で論じた⁽¹⁴⁾。（以下は筆者なりの要約である）。真空の多様性やインフレーションなどの特定の物理モデルに拘束されずに、より普遍的に多宇宙を議論することが可能だろうか。彼は、数学的に存在するものは物理的にも存在するという要請（物理的世界と数学的構造との同型性）を唯一の仮定として“数学的構造”からなる宇宙アンサンブルを考察した。数学的構造とは無矛盾な形式的数学体系である（ブール代数、実数論、多様体論、リー代数、…）。十分な「複雑性と予測可能性と安定性」を備えた数学的構造の内部には、自分が属する世界（数学的構造）を物理的実在と感じる“自己意識”（self-aware substructures）が住むとする。我々の世界では、まず自己意識（人間）が世界を“内的な”視点で知覚し、次にそれを鳥瞰的に（数学的構造として）把握するという順番で、世界を理解する。例えば3次元空間のローカルな体験を、相対性理論で4次元ミンコフスキー（リーマン）時空の世界線として鳥瞰するように。われわれが宇宙アンサンブルを考察するときはこの逆が必要である。ある数学的構造に住む自己意識がその世界について何を知覚し、予測するかを、我々が推察しなければならない。初めは“彼”が有用と感じるもの（継続性のある安定な“もの”や、局所的に生起する“こと”など）から出発するであろう。Tegmark は、異なる記述法が内容的に同型なものとして統合されるように、数学的構造や自己意識は創発的（emergent）なものだとし、だから、我々の世界の（究極的）数学的構造は未知ではあるが、宇宙アンサンブルの中で普遍性を持つだろうと期待する。我々の数学的構造の未知の部分

(54) J. Garcia-Bellido et al. (1994), *Phy. Rev.* **D50**, 730

(55) A. Guth (2000), *astro-ph/0002188*

(56) J. F. Donoghue (1998), *Phys.Rev.* **D57**, 5499

を不定パラメータとして、パラメータ空間における我々人間の存在可能領域を調べてみると、§2で述べたように狭い“島”に限定される。特に上の(3)で見たように時空次元は厳しく制限される。この種の考察は、他の数学的構造における自己意識の存否を推定する手掛かりとなる。また我々は、自己意識が存在する他の数学的構造の様相を次のように推測することが出来る。「ある数学的構造 M の中で、ある測定値 Y が得られた後に（ある時間後に）ある値 X が測定される事後確率 $P(X|Y)$ 」をベイズ統計の手法で計算すると、自己意識を持つすべての宇宙アンサンブルにわたっての和が関与することになる。従って（ M を我々の世界とすると）各種の測定値を通して、宇宙アンサンブルに関する情報が得られる。従ってこの宇宙アンサンブル理論は“反証可能”になる。

この構想を Tegmark は“究極アンサンブル理論”と呼び、自由パラメータを残さない“Theory of Everything”だとする。彼自ら言う“急進プラトン主義”の立場の妥当性を別にしても疑問点は多数ある。特にアンサンブルの情報が入手可能だとする根拠は納得し難い。しかし構想は雄大である。

§4 おわりに

APに関係する最近の諸論文（量子宇宙論を除いて⁽²⁸⁾）を中心に、APの新しい傾向を紹介してきた。その特徴を概括すると、イ）“物理定数が異なる多宇宙”という描像が積極的に採用され、ロ）議論が定量的かつ詳細になされ、ハ）ある物理量（宇宙定数、時空次元）についてはAPによってのみ説明可能だとされ、ニ）（認識不能な）宇宙アンサンブルさえ議論の対象になってきたこと、が挙げられる。APを紹介するというより、APを応用して、ある具体的な物理量を詳細に検討するというスタイルの論文が増えている。しかも議論の対象は、宇宙定数から、核力、ヒッグス・パラメータ、物理定数一般（宇宙アンサンブル）へと広がりつつある。

この背景には素粒子“統一理論”の進展がある。高度の対称性による物

理法則の純化は、対称性が破れた現実世界との乖離を犠牲として成立する。その結果、アリストテレス自然学が宇宙を、理想的な法則（永遠の円運動）が支配する“天上界”と、自然的運動と暴力的運動が混在する“月下界”とに分けたのと類似した状況が生まれた（第五元素“quintessence”という名称まで復活した）。アリストテレスは天上と月下を峻別したが今は前者から後者に下降する（時間軸に沿った）道がある。道は多数に分岐して“多宇宙”に通じており、我々はそのどれか一つ（“人間に優しい宇宙”）をAPによって選択する。

以下でAPについて検討したい。無次元巨大数が人間の存在を考慮することで自然に解釈された（§2）ように、人間は解釈者であるだけでなく解釈のためのデータとしても機能する。人間は最も堅固な事実（データ）である。人間をデータとして物理法則の不定要素から適合するものが選択される。ここで選択は2つの意味がある。一つは、我々の宇宙が不定要素の中からのどの要素を選択したのかをつきめることである。これは例えば、パラメータを絞り込んでパラメータ空間の「島」（§2）を確定することにあたる。もう一つは、宇宙アンサンブルからの我々の宇宙の選択である。アンサンブルの“在庫”の中に人間存在可能な宇宙があることを、奇跡としてでなく、十分に期待できることとして確認する。これは確率の議論になる。

人間をデータとした選択原理はうまく機能しているだろうか。APは人間を物理法則の産物と見る。そこに誤りはないにしても、両者を直接にリンクさせるのは明らかに無理である。物理法則と生命は単純と複雑の両極である。物理法則は1個の方程式で表される“万物の理論”（TOE）を目指してますます単純化される。一方、人間は、我々が知る限りこの世で最も複雑な物質系である。超弦理論からDNA構造を導出できるとは誰も思わない。そこでAPは人間を“元素”として単純化する。「炭素のない宇宙には天文学者はいない」（B. Carter）というように、人間は多くの場合、炭素という元素の塊と見なされる。この単純化によって物理法則と生命とのリンクが可能にな

る。元素は恒星にそして銀河に還元される。Vilenkin は宇宙アンサンブルでの物理定数の確率分布を計算するとき、惑星上で知的生命が発生するプロセスは未知だから、その詳細に関係しない物理定数（宇宙定数、宇宙密度パラメータなど）に議論を限定すると断っている。⁽⁵²⁾ AP は、生命に必要な諸元素を一括して恒星で代表させ、それを銀河で代表させて、構造形成の可否を（生命可否の）基本的な選択原理とする。パラメータ空間の「島」を確定する議論も大同小異である（原子や恒星の安定性も考慮される）。つまり AP は厳密な意味での「人間」原理としてはまだ機能していない。人間は‘人間ならでは’の有意なデータになっていない。「元素」や「構造」は人間なしでも説明されるべきデータである。AP がもし機能しているとするれば、諸データの中から人間にとって重要度の高いものを“選択”する指針、つまり一種の“史観”としてである。例えば、もし人間が炭素型生命でなければ、その“生命”に必須の（今の我々が度外視している）別の微調整を発見してそれを最重要の事項と見なしていただろう。人間は事実であるが、視野を人間に限定するバイアス（選択効果）があることも事実である。

AP の源は、我々の物理法則が人間の発生に適合していること（微調整）への驚きである。AP は“なぜ人間に適合するのか”という「問い」に対して宇宙アンサンブルからの選択で「答え」る。この説明の正否は確かめようがない。それを大目に見たとしても、次のような奇妙な展開が続くことが予想される。選択肢の中に適合する宇宙があることの保証は、例えば宇宙定数の場合のように、宇宙アンサンブルにわたっての宇宙定数の確率分布を計算し、我々の宇宙の値を取る確率がゼロでないことで示される。確率がゼロに近いと“奇跡”と同じことになるから、ほどほどの値が欲しいが、その基準はない。そこで Vilenkin のように、我々の観測値が宇宙アンサンブル（の“habitable”な部分集合）の平均値の近くにあるべきだという要請（平凡性の原理）が置かれる。すると平均値を観測値に近づけるべく宇宙アンサンブル・モデル（インフラトン・ポテンシャル）を精密化することが目標に

なる。しかしいくら精密化しても、それを観測で確かめ得るのは宇宙アンサンブル中の“測度ゼロ”に近い一点（我々の宇宙）においてのみである。“より良い説明”はモデルの“尤もらしさ”⁽⁵⁷⁾の競合になり、その正否の判定基準は観測ではなく数学的整合性だけになる。

つまり、これまで「経験」（実験&観測）と「数学」（演繹的論理体系）という両翼で飛行してきた科学が、「経験」の要素を欠いた片翼飛行になる。もし“最終理論”が（低エネルギー領域で）理論から決定できない不定性を不可避免的に伴うのなら、その理論はAPという選択ルールによって補完されない限り現実世界での説明能力を持たない。するとAPは暫定的な説明手段ではなく科学の正当な“嫡子”として認知され、上のような説明が正統シナリオになる。「原子」のように、かつての仮想物が実在に転化した例は多数あるが、それは原子が経験の射程内の存在だったからである。プランク・スケールでの出来事はすでに十分“不可知”と言えるかもしれないが、それでも因果の外部にあるわけではない。だが多宇宙は原理的に経験の射程外にある不可知の存在である。⁽⁵⁸⁾それを道具とする説明には違和感を禁じ得ない。

今のところ選択原理としてのAPは、人間に関しては“元素近似”で止まり、宇宙に関しては不可知のものを動員する、という妙な形になっている。これはそのまま現段階での、生命についての未知と、物理法則と宇宙初期についての描像の反映である。この後の進展は予測できないが、筆者は“人間と物理法則をリンクさせる”というAPの発想自体に視野狭窄のようなものを感じる。それについて空想に類するメモを記して終わることにする。

1) APがリンクさせる人間と物理法則の間には（人間自身の複雑さに加えて）少なくとも2つの複雑なシステムが介在する。「地球」と「生態系」

(57) インフラトン・ポテンシャルの“尤もらしさ”について、A. Albrecht (1994), gr-qc/9408023.

(58) 我々の宇宙と多宇宙のどれかは、インフレーション期の一瞬に“母体”を共有したかもしれないという意味で、接点は皆無ではない。宇宙定数があれば超“天文学的”な遠い将来に（他の宇宙が）因果の地平線内に入ってくる可能性は消える。ただし、真空エネルギーによって将来（明日かもしれない）、我々の宇宙の内部からインフレーションやトンネル効果で“子宇宙”が生まれる可能性はあるという（F. C. Adams & G. Laughlin, astro-ph/9701131）。

である。複雑さは脆弱さであると共に柔軟性でもある。複雑システムの介在はリンクの仕方に膨大な自由度を作り、変動の吸収体ともなる。

- 2) リンクが短絡であるのを免れているのは AP が元素の多様性を保証するからである。人間と生態系と地球の複雑さは多様な元素（原子分子を含む）を抜きにしてはあり得ない。複雑なものを形成する安定な単位として我々が知っているのは元素だけである。だが必要な安定性と十分に多様な“結合の手”を持つ“ブロック材料”は元素に限るのだろうか。
- 3) 生命科学は「生命」（知的生命）を、物質を限定せずに機能で一般化できるほど成熟してはいない。“あり得る生命一般”を定式化することは及びもつかない。
- 4) だがもし我々が“あり得る生命”の“自由度”を地球上の炭素型生命に固定しているとすれば、固定化の代償としてその“自由度”を他のものに転化しているとは考えられないか。ちょうど天動説の周転円（の一方の円）が、地球公転の自由度を固定して惑星の側に負わせたものだったように。生命の“自由度”を宇宙の側に転化したものが“多宇宙”であるという可能性も考えられなくはない。

AP は科学につきまとう最も執拗な「問い」（“なぜ物質のルールは知的生命の発生に適合するのか”）であると言える。人間の由来を科学に求める問いであり、科学時代の宗教的な問いでもある。AP は「問い」の形で、科学の“審問官”として存続するだろうと思われる。