

相対性理論と方程式 —アインシュタイン方程式とダークエネルギーの謎—

郡 和範

1. それは謎なのか？

現在の宇宙はダークエネルギーが支配的に満たしていることが観測から明らかになってきた。^{1,2)} ダークエネルギーという言葉は、しばしばアインシュタインの宇宙定数のことを指したり、またはそれを拡張した概念であるエネルギー密度がほとんど時間変化しないようなエネルギー形態のことを指す。また、後に説明するダークマターとは、全く別物である点に注意する必要がある。

ダークエネルギーを物理学を用いて研究する上で、謎だと呼ばれていることの意味には大きく分けて2つある。一つ目は、ダークエネルギーのエネルギー密度のエネルギースケールが小さすぎるという問題があること。二つ目は、この宇宙において、そのエネルギースケールがなぜその値になったのかという問題があることである。また、後に議論するように、これらの問題を解決するために哲学で使われる“人間原理”を持ち込むならば、問題は解決されたように思えなくもないが、「人間の存在がこの宇宙の性質を特徴付けている」という驚くべき解釈を与えてしまう。先に出た2つの問題を理解していただくためには、物理に現れるスケールの概念を理解していただく感覚が必要であろうと思われる。

本文では、素粒子物理学と宇宙論でしばしば用いられる $\hbar = c = k_B = 1$ の Heaviside-Lorentz 単位系を用いる。この単位系では、 $1 \text{ g} = 5.6 \times 10^{23} \text{ GeV}$ 、 $1 \text{ cm}^{-3} = 7.7 \times 10^{-42} \text{ GeV}^3$ 、 $1 \text{ K(ケルビン)} = 8.6 \times 10^{-14} \text{ GeV}$ であることに注意されたい。また、重力定数 $G = 6.7 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ sec}^{-2} = 1/M_{\text{p}}^2$ 、プランク質量 $M_{\text{p}} = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV}$ 、換算プランク質量 $m_{\text{pl}} \equiv M_{\text{p}}/\sqrt{8\pi} = 2.4 \times 10^{18} \text{ GeV}$ を用いる。

2. アインシュタイン方程式

次に、具体的な式を説明しよう。一般相対性理論に現れるアインシュタイン方程式は次のように書く事ができる。

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}. \quad (1)$$

添字の μ と ν について、 $\mu = 0, 1, 2, 3$ と $\nu = 0, 1, 2, 3$ の値をとる。0 は時間成分、1, 2, 3 は、空間成分を表す。ここで、左辺の $G_{\mu\nu}$ はアインシュタインテンソル、

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}, \quad (2)$$

であり、 $g_{\mu\nu}$ は計量テンソル、 $g^{\mu\nu}$ はその逆行列を表す。 R はリッチスカラー $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$ を表し、添字の μ や ν が繰り返されている場合、それぞれ 0, 1, 2, 3 の全てにおいて和をとるという、アインシュタインの縮約記法という慣習に従うこととする。 $R_{\mu\nu}$ はリッチテンソルで

$$R_{\mu\nu} = \frac{\partial \Gamma_{\mu\lambda}^{\lambda}}{\partial x^{\nu}} - \frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}}{\partial x^{\lambda}} + \Gamma_{\mu\lambda}^{\kappa} \Gamma_{\nu\kappa}^{\lambda} - \Gamma_{\mu\nu}^{\kappa} \Gamma_{\lambda\kappa}^{\lambda} \quad (3)$$

となる。ここに使われた接続 $\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}$ は、次のように計量テンソルを用いて定義される。

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} = \frac{1}{2} g^{\lambda\rho} \left[\frac{\partial g_{\rho\nu}}{\partial x^{\mu}} + \frac{\partial g_{\mu\rho}}{\partial x^{\nu}} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^{\rho}} \right] \quad (4)$$

アインシュタイン方程式の右辺に現れる $T_{\mu\nu}$ はエネルギー・運動量テンソルである。宇宙に現れる任意のエネルギーと運動量の状態について、理想流体のそれらとの類似性を考慮して、以下のようにエネルギー・運動量テンソルをパラメーター化すると便利である。

$$T_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここで、 ρ はエネルギー密度、 P は圧力を表す。また、その比例係数は重力定数 $G = 1/M_{\text{p}}^2 = 1/(1.2 \times 10^{19} \text{ GeV})^2$ であり、方程式の中で、座標 x^μ と $T_{\mu\nu}$ を除いて唯一次元を持つ量である (Heaviside-Lorentz 単位系では質量次元はマイナス 2)。物理学ではプランク質量よりも小さなエネルギースケールを扱うので、このままでは、重力には他のエネルギースケールは現れないことになる。しかし、後に議論するように、別の物理により、 $T_{\mu\nu}$ の中にその物理に特有なスケールが現れ、それが重力に影響を与える。逆に言うと、他に違うスケールを予言する物理がなければ、アインシュタイン方程式に現れるエネルギースケールはプランク質量のみとなることを意味する。

このアインシュタイン方程式を、一様等方時空である、ロバートソン・ウォーカー時空の計量

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (6)$$

$$= -dt^2 + a^2 \left[\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right]$$

を用いて変形する。 a はスケールファクターで、宇宙の相対的な大きさを表し、宇宙時間 t のみの関数である ($a = a(t)$)。ここでは、現在の (宇宙時間 $t = t_0$) スケールファクターを $a(t_0) = 1$ と定義する。今後、添字 0 により、現在の値を表すこととする。式 (6) に現れる K は曲率を表すパラメーターで 3 通りの宇宙の幾何学の分類に対して、次のように 3 通りある。

$$K = \begin{cases} +1 & (\text{閉じた宇宙}) \\ 0 & (\text{平坦な宇宙}) \\ -1 & (\text{開いた宇宙}) \end{cases} \quad (7)$$

3. フリードマン方程式

アインシュタイン方程式の (時間, 時間) 成分、つまり $\mu = 0$ と $\nu = 0$ の成分から、次のフリードマン方程式が得られる。

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{K}{a^2} \quad (8)$$

ここで、左辺に現れる量 (\dot{a}/a) はハッブルパラメータ $H \equiv \dot{a}/a$ と呼ばれる。以下では特に断らない限り平坦な宇宙 $K = 0$ の場合のみ扱う。

また、さきの (時間, 時間) 成分と、(空間, 空間) 成分から、以下の式が得られる。

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P) \quad (9)$$

この式は宇宙膨張の加速度 \ddot{a} を見積もる式である。右辺は、マイナスの $\rho + 3P$ に比例している。通常の物質だと、この $\rho + 3P$ は正であることが期待され、宇宙の加速度は負であり、減速膨張を意味している。ビッグバン宇宙であるにもかかわらず膨張の速さが減速しているのは、名前からくる印象とかなり mismatch していると言わざるを得ない。後で議論するように、 $\rho + 3P$ を負にするようなエネルギーで宇宙が満たされているならば、宇宙は加速膨張することになる。

式 (8) を微分して、式 (9) と組み合わせると、次の式を得る。

$$\frac{d\rho}{dt} = -3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + P) \quad (10)$$

これは式 (5) のエネルギー・運動量テンソルから導かれる、エネルギー・運動量保存の式と等価である。これに dt を掛けて微分形式に戻すと

$$d\left(\frac{4\pi}{3}a^3\rho\right) = -pd\left(\frac{4\pi}{3}a^3\right) \quad (11)$$

となり、体積を $V = a^3$ 、内部エネルギーを $U = \frac{4\pi}{3}a^3\rho$ と考えると、熱力学第 1 法則 $dU = -pdV + TdS$ との類推が成り立つ。 T を温度、 dS をエントロピーの変化だと考えると、宇宙は $dS = 0$ という断熱的な膨張をしていることを意味する。エントロピーを後から紹介する相対論的粒子の ρ と $P = 1/3\rho$ を用いて

$$S \equiv \frac{\rho + P}{T}a^3 = \frac{2\pi^2}{45}g_*T^3a^3 \quad (12)$$

で定義するならば、 $dS = 0$ は、 g_s の時間変化を除いて、宇宙の温度が宇宙膨張により $T \propto a^{-1}$ に従って変化することを示している。

$K = 0$ の場合の任意の時刻のエネルギー密度の総和に相当する臨界密度 $\rho_{\text{cr}} = \rho_{\text{cr}}(t)$ は以下で定義される

$$\rho_{\text{cr}} = \frac{3H^2}{8\pi G} \quad (13)$$

ここで、現在のエネルギー密度について、具体的に値をみていこう。フリードマン方程式 (8) において、エネルギー密度 ρ を様々な成分に分解してみる $\rho = \rho_{\text{DE}} + \rho_{\text{CDM}} + \rho_{\text{Baryon}} + \rho_{\text{Radiation}}$ ここで、 ρ_{DE} はダークエネルギー、 ρ_{CDM} は (冷たい) ダークマター、 ρ_{Baryon} はバリオン、 $\rho_{\text{Radiation}}$ は放射 (光子+ニュート

リノなどの massless 粒子) の、それぞれのエネルギー密度を表す。物質 (非相対論的粒子) の総量のエネルギー密度 $\rho_M = \rho_{\text{CDM}} + \rho_{\text{Baryon}}$ も適宜用いる。

温度 T で熱平衡になっている粒子 j の数密度 n_j 、エネルギー密度 ρ_j 、圧力 P_j は、その運動量 p についての分布関数 $f_j(p, T)$ と統計的自由度 g_j を用いて次のように表される。

$$n_j = \int \frac{dp^3}{(2\pi)^3} g_j f_j(p, T) \quad (14)$$

$$\rho_j = \int \frac{dp^3}{(2\pi)^3} g_j E_j f_j(p, T) \quad (15)$$

$$P_j = \int \frac{dp^3}{(2\pi)^3} g_j \frac{p^2}{3E} f_j(p, T) \quad (16)$$

ここで $E = \sqrt{m_j^2 + p^2}$ はエネルギーを表す。

放射と呼ばれる相対論的な粒子、つまり massless 粒子 ($m_j \ll T$) の場合、エネルギー密度の総量は式 (15) を用いて、

$$\rho = \frac{\pi^2}{30} g_* T^4 \quad (17)$$

となる。 g_* は温度に依存する有効的な統計自由度で、粒子 j がボーズ粒子の場合の寄与は g_j そのものであるが、フェルミ粒子からの寄与については、 $7/8 g_j$ となる。ここでは全ての粒子からの寄与を足した表式にしている。相対論的な粒子の圧力は式 (16) により $P = \frac{1}{3}\rho$ となる。

一方、非相対論的粒子 j (物質と呼ばれ、バリオン (原子) やダークマターのこと) の場合、つまり静止質量 $m_j (\gg T)$ の場合、数密度は

$$n_j = g_j \left(\frac{m_j T}{2\pi} \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{m_j}{T} \right] \quad (18)$$

と表され、エネルギー密度は $\rho_j = m_j n_j$ と表される。また、圧力は $P_j = n_j T \ll T^4$ となり、相対論的な場合と比べて圧倒的に密度が低いため、宇宙論では慣例として非相対論的粒子の圧力を $P \approx 0$ とみなす。

各成分 ($j = \text{DE, CDM, Baryon, Radiation}$) のエネルギー密度を臨界密度で割る事により、それぞれの成分が宇宙を占める割合を近似的に表す、宇宙論的オメガパラメーターを定義する。

$$\Omega_j \equiv \frac{\rho_j}{\rho_{\text{cr}}} \quad (19)$$

また、フリードマン方程式 (8) を用いて、曲率項についても同様の定義で宇宙論的オメガパラメーターを定

義すると、次の関係式が得られる

$$\begin{aligned} \Omega_K &\equiv \frac{K}{(aH)^2} \\ &= \Omega_{\text{DE}} + \Omega_{\text{CDM}} + \Omega_{\text{Baryon}} + \Omega_{\text{Radiation}} \end{aligned} \quad (20)$$

観測から $\Omega_{\text{Radiation}} \sim 10^{-4}$ と $|\Omega_K| < 10^{-2}$ であることから、両者を無視する極限において、平坦な宇宙の帰結として、 $\Omega_{\text{DE}} + \Omega_M \simeq 1$ が成り立つ。ここで $\Omega_M \equiv \Omega_{\text{CDM}} + \Omega_{\text{Baryon}}$ である。

式 (10) を積分すると次のような成分 j ごとのエネルギー密度のスケールファクター依存性が得られる

$$\rho_j(t) = \rho_{j,0} \left(\frac{a(t)}{a_0} \right)^{-3(1+w_j)} \quad (21)$$

ここで、状態方程式 $w_j \equiv P_j/\rho_j$ は

$$w_j = \begin{cases} 1/3 & (\text{相対論的粒子}) \\ 0 & (\text{非相対論的粒子}) \\ -1 & (\text{宇宙定数}) \end{cases} \quad (22)$$

となる。最後の宇宙定数とは、エネルギー密度が定数であるという意味で、ある種、定義のようなものである。しかし、冒頭でも紹介したように、宇宙定数はダークエネルギーの、最も単純なモデルであり、観測的にも、Planck 衛星実験による最新の値として $w = -1.006 \pm 0.045^{(4)}$ という値が 68% の信頼度で得られている。時間変化する兆候は、全く報告されておらず、現在ではダークエネルギーは宇宙定数であることと無矛盾である。実際、この $P = -\rho$ を式 (9) に代入すると、その右辺は正となり、宇宙は加速膨張することになる。また、最新の観測から、物質とダークエネルギーの量の割合は、だいたい $\Omega_M = 0.3$ で $\Omega_{\text{DE}} = 0.7$ と決まっている、つまり、物質のエネルギー密度が全体の 30%、ダークエネルギー (宇宙定数) のエネルギー密度が 70% という意味である。^{3,4)}

4. ダークエネルギーと加速膨張

式 (22) の w_j の値を式 (21) に入れると、それぞれのスケールファクター依存性は

$$\rho \propto \begin{cases} a^{-4} & (\text{相対論的粒子}) \\ a^{-3} & (\text{非相対論的粒子}) \\ \text{定数} & (\text{宇宙定数}) \end{cases} \quad (23)$$

となる。これらを $K = 0$ のフリードマン方程式 (8) に代入して解く事により、それぞれの場合のスケールファクターの時間依存性が以下のように得られる。

$$a \propto \begin{cases} t^{1/2} & (\text{相対論的粒子}) \\ t^{2/3} & (\text{非相対論的粒子}) \\ \exp(Ht) & (\text{宇宙定数}) \end{cases} \quad (24)$$

つまり、宇宙定数(狭い意味でのダークエネルギー)が支配的な宇宙では、宇宙は指数関数的に膨張するのである。ちなみに、上の2つで、 t のべきが1より小さいことが、減速宇宙を意味している。

図1にスケールファクターの時間依存性を Ω_M 、 Ω_{DE} の組み合わせをいろいろ変えてプロットしている。上から順番に平坦な加速膨張宇宙、開いた減速膨張宇宙、平坦な減速膨張宇宙、収縮宇宙を表すパラメータが選ばれている。ここでは、観測をよく説明する $\Omega_M = 0.3$ 、

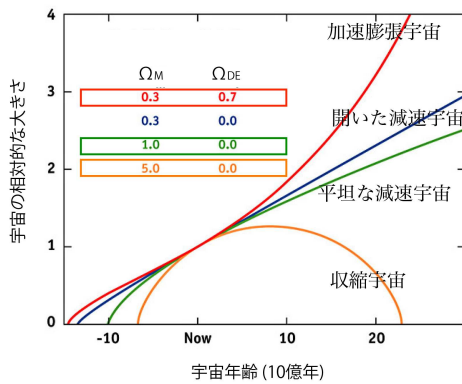


図1 宇宙の大きさの進化。単位は10億年。

$\Omega_{DE} = 0.7$ の場合、現在に近い時刻に加速膨張期にはいる様子が見られる。ちなみに、 $\Omega_M = 0.3$ の内訳はだいたい $\Omega_{CDM} = 0.25$ 、 $\Omega_{Baryon} = 0.05$ である⁴⁾。また、その場合、宇宙年齢も120億年を超えることが可能となり、球状星団の年齢が120億年程度という観測事実とも無矛盾となる。

ここで、式(23)に従って、エネルギー密度の時間変化を以下に図示する。現在でこそ、70%のエネルギーで支配的な宇宙定数であるが、時間を少しさかのぼるだけで、すぐに現在30%の物質のエネルギーに追い抜かれていることがわかる(時期は $z \sim 1$ 、約70億年前)。つまり、それより過去は物質優勢の宇宙であった。その物質密度も宇宙年齢約7万年の頃に放射のエネルギーに追い抜かれる。それより過去では、宇宙は放射に満ち満ちていた。実際、宇宙年齢約40万年より前には光子ですら直進できなため、この時期は太陽の中のように、火の玉のようであったに違いない。

ところで、現在のエネルギー密度の割合で、ダーク

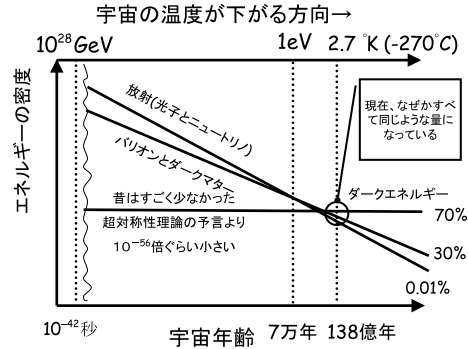


図2 エネルギー密度の各成分の進化

エネルギー70%で、物質がその約半分ぐらいの30%、さらにちょっと少ないが放射は0.01%を占めるが、長い宇宙の歴史で何十桁も宇宙のエネルギーが変わり、それに合わせて有効な物理の理論も変わってきた中で、この進化という見方をすると、驚くほど、同じようなオーダーの数となっている(0.01%放射成分でもたいへん近い)。宇宙年齢がちょっとでもズレれば、全く違う割合となり、どれかの成分の検出は不可能なレベルになるであろう。この現在において2つ(もしくは3つ)のエネルギーの割合が近い値になることは、偶然と考えるのも不自然なほどの一致の度合いである。このことから、この不自然さはコインシデンス問題(偶然の一致問題)と呼ばれている。後に、もう少し詳しく議論する。

5. ダークエネルギーのエネルギースケール

アインシュタイン方程式や、そこから導かれたフリードマン方程式には、座標を除いて、スケールの次元を持っているのは、プランク質量とエネルギー・運動量テンソル $T_{\mu\nu}$ だけである。つまり、プランク質量以外のスケールは、 $T_{\mu\nu}$ の中にもみられる可能性がある。 $T_{\mu\nu}$ に現れるスケールは、必然的にその $T_{\mu\nu}$ を決定する物理学が持っているスケールとなる。人間が勝手に任意のスケールを手でいれることはできないのである。

現在の宇宙定数のエネルギー密度 $\rho_{DE,0}$ は臨界密度 $\rho_{cr,0}$ の約70%なので、(約2meV(ミリ電子ボルト))の全体の4乗である。この値は、現在でこそ支配的であるが、宇宙が始まった頃(宇宙年齢がプランク時間ぐらいの頃)のエネルギー密度である、換算プランク質量(約 2×10^{18} GeV(ギガ電子ボルト))の4乗にくらべると、無視できるほど小さい。実に、 10^{120} 桁も

小さいのである。逆に言うと、このように小さい宇宙定数のエネルギー密度であったために、現在の宇宙年齢 138 億年でようやく 70% になったというようにも解釈できる。宇宙定数の値を換算プランク質量の 4 乗より小さい値にすることが期待される超対称性理論においても、自然な値としては $\rho_{DE,0}$ の 10^{56} 倍大きい値を予言する。しかし、人間が生まれて来るために必要な銀河をつくるために、 $\rho_{DE,0}$ より、多かたとしても 10^3 倍以下でなければならないことが理論的に分かっている。そうでなければ、宇宙はずっと早くに宇宙定数が支配的となり、ずっと早くから加速膨張してしまう。そうすると銀河のように固まった天体はつくられず、そこに太陽は作られないし人類も生まれないのである。

次の図で、 Ω の支配の移り変わりを示す。宇宙初期

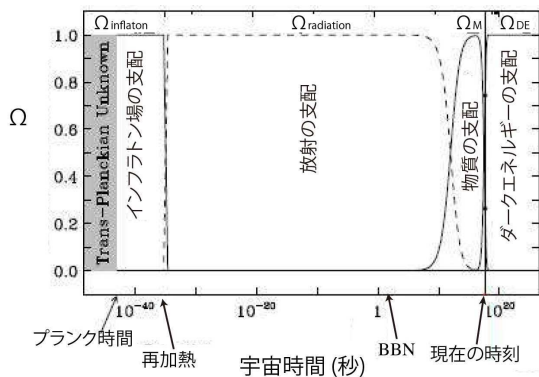


図 3 Ω の支配の移り変わり。

のインフレーションの後、インフレーションを起こす場であるインフラトンの振動エネルギーが宇宙を支配していた。その後、インフラトンの崩壊により(再)加熱した宇宙では放射のエネルギー密度が支配的となった。ビッグバン元素合成 (BBN) が起こったのはこの放射優勢期である。その後、宇宙時間約 7 万年から物質が支配し、宇宙時間約 70 億年からダークエネルギーが支配するようになってきた。 $\rho_{DE,0}$ が約 $(2\text{meV})^4$ であったために、宇宙年齢として、ごく最近になって(つまり宇宙時間が現在の宇宙年齢より何桁も短い時期ではなく約半分ぐらいの時期になって)、ようやくダークエネルギーが宇宙で支配的になったことがよくわかる。

しかし、ダークエネルギーについては、まだほとんど何も解明されていないと言っても過言ではない。現在の Ω パラメーターの値がほんのちよつと観測的に精度よく決定されただけである。宇宙論という学問は Ω

パラメーターを決定することが最終目的ではない。その背後にある物理学を理解することが目的である。まだ、ダークエネルギーは何か?、現在のダークエネルギーのエネルギー密度はなぜ約 $(2\text{meV})^4$ なのか? という問いに答えていない。後者の問いは、さらに 2 つの問題に分ける事ができる。2 つのうち一つは、Q1 「なぜダークエネルギーのエネルギー密度はこんなに小さいのか?」、もう一つは Q2 「なぜダークエネルギーのエネルギー密度は約 $(2\text{meV})^4$ なのか?」である。

Q1 について、超対称性理論を重力を含むように拡張した超重力理論では、超対称性の破れのエネルギースケールが、そのまま宇宙定数として現在まで残っている可能性を示唆している。もし残っているならば、そのエネルギー密度のスケールは小さく見積もっても約 $(100\text{GeV})^4$ と期待されており、 $(2\text{meV})^4$ にくらべると、約 10^{56} 倍大きい。しかし、約 10^{56} 倍大きな宇宙定数は観測と矛盾する。観測的に有限の宇宙定数が発見される前には、超対称性理論の自由度を用いて、いっそのこと宇宙定数はゼロになっているのではないかと期待されていた。しかし、有限で小さな宇宙項が発見された今、この論理は使えない。宇宙定数を小さくした、なにか未知の対称性に基づく機構が働いているのかもしれない。しかし、そのような対称性は知られていない。

Q2 について、現在の物理学では $(2\text{meV})^4$ という、エネルギー密度のスケールを説明することはできない。これまで、ニュートリノ質量スケールを利用するモデル、アクシオンの質量スケールを利用するモデルなど新しい物理学でそのスケールを説明するモデルも提唱されてきている。しかし、それぞれに微調整がそれなりに必要であり、満足するモデルにはいたっていない。

6. コインシデンス問題と人間原理

なぜ現在の宇宙年齢で、ダークエネルギーと物質(と放射)が似たような大きさのエネルギー密度になっているのか? という問題がコインシデンス問題であった。ようやく人類が自分達の住んでいる宇宙のエネルギー密度のそれぞれの成分の割合を測れるようになった時代に、これら 2 つか 3 つの成分が同じぐらいの量であったのは、驚くべき一致である。ダークエネルギーのエネルギー密度が $2(\text{meV})^4$ ではなかったら、このような偶然の一致問題はなかった。しかし、前章でも紹介したとおり、現代の物理学ではそのスケールを説明す

ることはできていない。もしかしたら、近い将来に量子重力理論が完成した暁には、その理論により説明されるのかもしれない。量子重力理論の候補の超弦理論のあるモデルでは、物理法則を決める真空の数は 10^{500} ほど存在する。それぞれの真空が違う物理法則に対応することになる。その中には、我々のダークエネルギーの量が、本当に統計的なゆらぎなどで事後的に小さくなったのがあるかもしれない。宇宙定数の問題が物理学で解決され、宇宙の一つ作った時には、必ず今の宇宙になるという理論を作れる事を信じて我々物理学者は日夜、研究に勤しんでいるのである。

ところが、これとは真逆の考え方がある。デカルト(1596年 - 1650年)が提唱した人間原理(Anthropic Principle)である。もともとの意味は”我思う、故に我あり”(cogito ergo sum)である。これを宇宙物理学的に言い換えてみる。Q「なぜ宇宙の法則は偶然人間に都合良く出来ているのか?」という問いに対して、人間原理とは“宇宙の法則がこうであるので、この問いを問かける人間が生まれてきた”と答える原理である。逆に言うと人間原理では“変な物理法則の宇宙には、このような問いを問かける人間は生まれてこないの、もともとその宇宙の法則が変だとは誰も問かけない”と答えてもよい。確かに解決しているように思えなくもない。

人間原理の使い方には、つぎのような簡単な例もある。Q「なぜ地球にはたくさんの酸素があるのか?」という問いについて、人間原理では、“酸素のない星には人間は生まれないので、そのような星のことは誰も語らないからだ”と説明できるかもしれない。しかし、ここで思考を止めて、科学的な探求をやめてしまうのであればたいへんなことである。なぜなら、酸素の多い地球型の惑星は実は稀であるという帰結を導くに至った惑星科学の進展や、酸素の多い星で適者生存の原理で酸素を使うよう進化してきた地球の生物を、進化論を使って理解するという学問の正しい方向性の研究はずっと遅れてしまうかもしれないからである。人間原理による説明は、最初から科学の問題に適用するのではなく、最後にとっておくべきなのである。

7. 結び

現代物理学では、まだダークエネルギーのエネルギー密度のスケールを第1原理から導きだすことはできていない。その意味で、冒頭に紹介した2つの謎は、ま

だ解かれていないのである。この謎を解く一つのアイディアとして、人間原理による解決の方法も紹介した。しかし、これを信じると、人間の存在が、人間の住む宇宙の性質を決めてしまっているという、驚くべき解釈になる。この場合、人類が長い時間をかけて信じるようになってきた“コペルニクス原理”的な発想に疑問が投げかけられる。オリジナルのコペルニクス原理の言うことは、地球は特別な星ではないということであった。さらに拡張して、現代宇宙論では、この宇宙は一様(平行移動について不変)で等方(回転について不変)という“宇宙原理”を採用することになっている。つまり、この宇宙の中で、我々の住む銀河は、特別ではなくありふれた銀河で、その場所は特別な場所ではないと言っているのである。このことは観測からも示唆されている。しかし、沢山の宇宙が作られ得るという、より現代物理学的な描像に立つ時、状況が変わる。我々の宇宙は、人類を生み出す条件が偶発的に微調整されて実現された特別な宇宙なのかもしれないというものである。そうであるならば、ダークエネルギー問題の解決のためには、“コペルニクス原理”的な原理は、捨てなければならないかもしれないという皮肉な結果となる。

先にも書いたが、人間原理を科学の問題に適用することは、最終兵器として温存しておかなければならない。そうしないと、科学的な思考を早々と放棄することになるからである。もちろん、我々物理学者は、ひとたび宇宙が誕生したならば、物理学の言葉でダークエネルギーのスケールも含めて必然的にこの宇宙になるのだと説明することを目指して、新理論づくりの研究を続けている。しかし、このダークエネルギーの謎は、もしかしたら、人類が科学の問題に初めて人間原理を適用しなければ解く事のできない大問題なのかもしれない。その意味で、私はこの問題を科学の問題の中で最大の難問だと思っている。ダークエネルギーの謎は、宇宙が人類の科学に叩き付けた挑戦状なのである。

参考文献

- 1) 小玉英雄、井岡邦仁、郡和範、KEK 物理学シリーズ「宇宙物理学」、共立出版(2014年)
- 2) 向山信治、「数理科学」、2014年9月号、22-28、サイエンス社(2014年)
- 3) A.G.Riess et al, *Astrophys.J.* 560 (2001) 49-71
- 4) P. A. R. Ade *et al.* [Planck Collaboration], arXiv:1502.01589 [astro-ph.CO].

()