

インフレーション宇宙に関する一考察
～拡張型ブラックホールモデルの提案～

山脇正人*

キーワード：ブラックホール、シュワルツシルト半径、赤方偏移、ビッグバン

概要

宇宙論は現代においても様々なモデルが提案されているが、宇宙を一つのブラックホールと解釈する一説に対して検証と考察を行い、新たな宇宙モデルへと展開した。ブラックホールなどの質量を宇宙の全質量に含めないと考えると、宇宙のインフレーションは必ずしも天体自体が遠ざかるものではなく、シュワルツシルト半径（事象の地平線）が拡大しており、また遠方の天体の赤方偏移はドップラーシフトによるものではなく、重力と等価なものによるものであるという結論に至った。

1. 緒言

近年、ブラックホールの存在を示す観測結果¹が得られるなど、宇宙物理学への関心が高まっている。現代宇宙論においてはビッグバン理論²が最も支持されているといえるが、近年興味深い宇宙モデルも提案されている。その一説³によれば、そもそも『我々はブラックホールの中に住んでいる？』とも解釈され、『我々から 138 億光年以上離れた場所は観測できず、宇宙の地平線（私たちに光が届くギリギリの場所）の先にあります。その先には何もないのではなく、観測できないだけで我々と同じような宇宙がずっと広がっているはずです。逆に言えば、138 億光年以上離れた観測者にとっては、我々は見えません。まさにこれはブラックホールと同じ状況です。』⁴と解説されている。そこで今回、この仮説（以下、ブラックホール宇宙モデルと称す）に対する検証と考察を行った。今回の検証と考察には、シュワルツシルト・ブラックホール⁵（質量のみ値を持ち、角運動量と電荷が 0 とする最も単純なモデルのブラックホール）を用いた。

2. ブラックホール

近年、銀河 M87 近傍から放出される光に、ブラックホールの存在を示す証拠となる赤方偏移が観測されたことが発表¹されている。ブラックホールは図 1 のように光すら脱出できなくなる重力場が形成されるが、その条件は①式ようになる。

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \quad \text{①}$$

(r_s : シュワルツシルト半径^{6, 7}, G : 万有引力定数、 M : 質量、 c : 光速)

* 国立研究開発法人産業技術総合研究所、e-mail: yamawaki.masato@aist.go.jp

ある天体の半径がシュワルツシルト半径 r_s 以下になるとき、その天体はブラックホールとなる。ブラックホールは超高密度な天体であるとイメージされることが多い。しかし、①式においては質量 M と半径 r_s が比例関係にあることから、例えば質量 M が2倍になると、体積は8倍（半径 r_s の3乗に比例）となり、その密度は1/4倍となる。つまり、ブラックホールは「質量」が大きくなればなるほど、その「密度」は小さくなっていくのである。

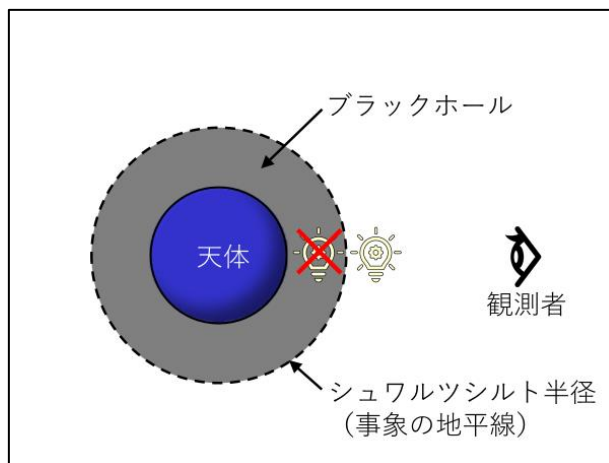


図1 ブラックホールの概要

3. ブラックホール宇宙モデルの検証

ブラックホール宇宙モデルを解釈すると、図2のようなイメージとなる。この仮説に対する検証を、シュワルツシルト・ブラックホールを用いて行った。

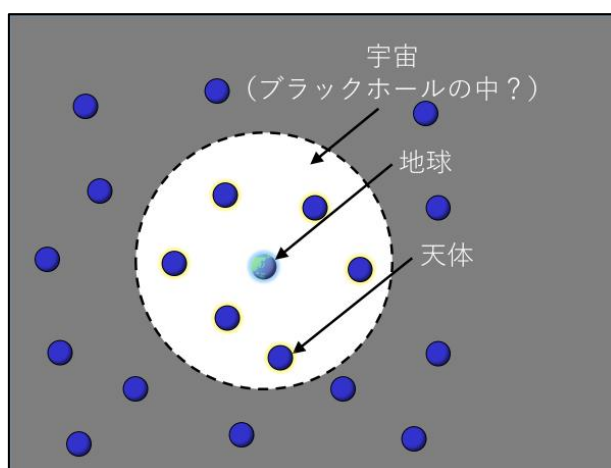


図2 ブラックホール宇宙モデルのイメージ

まず、宇宙を質量 M で半径 R の一つ天体と考え、①式からシュワルツシルト半径 r_s を求める。観測可能な宇宙の全質量 M は 1×10^{53} kg（平均的な天体の質量 2×10^{30} kg、天体数 5×10^{22} 個で計算⁸⁾）、万有引力定数 G は $6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ であること

から、シュワルツシルト半径 r_s は 1.48×10^{26} mとなる。一方で、観測可能な宇宙の大きさが、138 億光年⁹ (1 光年は約 1×10^{16} m) とすると 1.38×10^{26} mとなり、シュワルツシルト半径 r_s と観測可能な宇宙の半径 R がほぼ一致する。(ただし、このシュワルツシルト半径 r_s の見積りには、ブラックホールなどのダークマター・ダークエネルギー¹⁰を宇宙の全質量に含めていない。) よって、『我々はブラックホールの中に住んでいる?』とするブラックホール宇宙モデルは、まんざらでもなく思える。

しかしながら、宇宙は膨張しているという「インフレーション宇宙」¹¹が現代の宇宙モデルの常識となっている。ブラックホール宇宙モデルにおいてシュワルツシルト半径 r_s と観測可能な宇宙の半径 R が等しい ($r_s = R$) とするならば、宇宙の全質量 M の増減 (何らかの要因による質量の生成や消失) がない限り、①式から宇宙の膨張 (r_s の変化) を説明することができない。そこで、ブラックホールへと変化した質量は宇宙の全質量に含めない、すなわち「ブラックホールの生成」を「質量の消失」と解釈することにより、ブラックホール宇宙モデルにおける膨張について考察した。

4. ブラックホール宇宙モデルにおけるインフレーションの考察

まず、宇宙の平均的な密度を ρ とすると、宇宙の全質量 M は

$$M = \frac{4\pi r_s^3}{3} \rho \quad (2)$$

(ρ : 宇宙の平均的な密度)

となる。ここで①式に②式を代入し、 r_s に対して整理すると

$$r_s = \sqrt{\frac{3}{8\pi G\rho}} \quad (3)$$

となる。3つの変数 (r_s 、 M 、 ρ) は互いに従属関係にあることから、①式と③式は同時に成立しなければならない。つまり、①式からシュワルツシルト半径 r_s は宇宙の全質量 M と比例すると同時に、③式から宇宙の平均的な密度 ρ の平方根に反比例しなければならないことになる。ここで、ブラックホールの生成 (質量の消失) によるシュワルツシルト半径 r_s の変化について考えてみると、③式より宇宙の平均的な密度 ρ は減少し、シュワルツシルト半径 r_s は増加する。一方で、①式ではシュワルツシルト半径 r_s が増加すれば宇宙の全質量 M も増加しなければならないため、①式と③式の関係に相反する。つまり、ブラックホールの生成 (質量の消失) により宇宙の平均的な密度 ρ が減少すると同時に、何らかの要因で質量を獲得しなければならないと考えられる。そこで、ブラックホール宇宙モデル (図 2) に注目すると、シュワルツシルト半径 r_s の膨張により、観測可能な宇宙の「外側」から天体の質量を獲得することができるため、①式と③式を同時に成立させることができる。よって、①式は以下④式へと展開される。

$$r_s = \frac{2G(M - \Delta M_B + 4\pi r_s^2 \rho_{\Delta r_s} \Delta r_s)}{c^2} \quad (4)$$

(ΔM_B : ブラックホールへと変化した質量、 Δr_s : シュワルツシルト半径の変化、 $\rho_{\Delta r_s}$: 膨張した領域の平均的な密度)

また、④式を Δr_s に対して整理すると

$$\Delta r_s = \frac{c^2 r_s - 2G(M - \Delta M_B)}{8\pi G r_s^2 \rho_{\Delta r_s}} = \frac{c^2 r_s - 2GM + 2G\Delta M_B}{8\pi G r_s^2 \rho_{\Delta r_s}} = \frac{c^2 r_s - c^2 r_s + 2G\Delta M_B}{8\pi G r_s^2 \rho_{\Delta r_s}} = \frac{\Delta M_B}{4\pi r_s^2 \rho_{\Delta r_s}} \quad (5)$$

となり、ブラックホールが生成 ($\Delta M_B > 0$) すれば、シュワルツシルト半径も膨張 ($\Delta r_s > 0$) することになる。すなわち、宇宙の膨張は必ずしも天体自体が動いている (遠ざかっている) ということではなく、シュワルツシルト半径が膨張している、というモデル (図3。以下、拡張型ブラックホール宇宙モデル) が得られる。

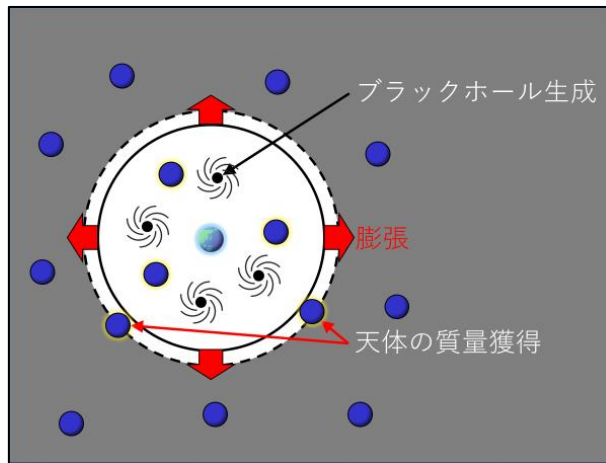


図3 拡張型ブラックホール宇宙モデル (新提案モデル)

5. ビッグバン理論との関係

ビッグバン理論の根拠の一つに、遠方の天体の赤方偏移 (ハッブルの法則¹²⁾) がある。図4のように、天体は地球から遠くなればなるほど、距離に比例した速さで遠ざかっており、宇宙の果てではほぼ光速に達する。

$$v_r = \frac{r}{R} c \quad (6)$$

(v_r : 地球からの距離 r における天体の遠ざかる速度)

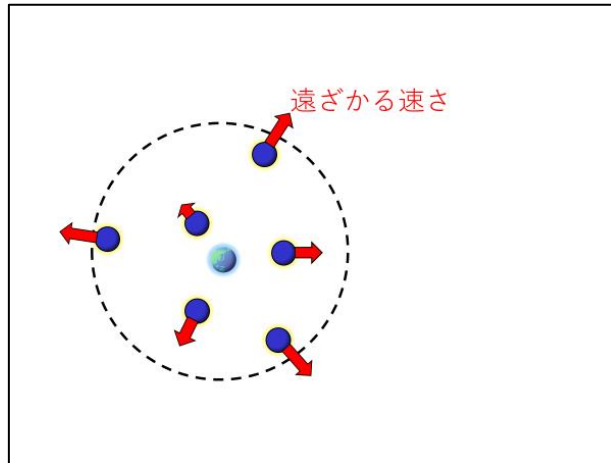


図4 地球から遠ざかる天体（ハッブルの法則）

ビッグバン理論では、この赤方偏移はドップラーシフトによるものとされる。（図5）

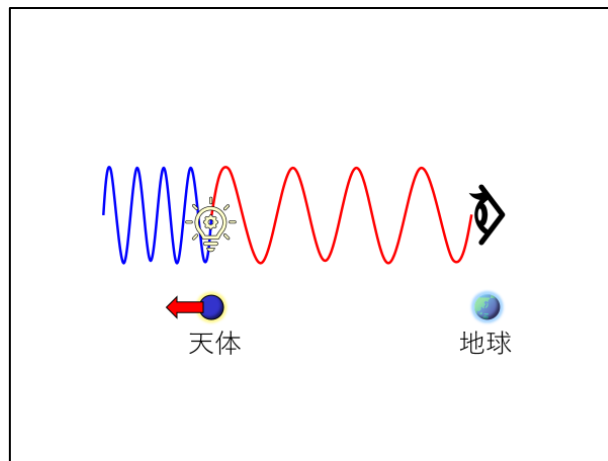


図5 ドップラーシフトによる赤方偏移（ビッグバン理論における赤方偏移）

ここで、特殊相対性理論¹³について考えると、天体の遠ざかる速度に対する時間と長さとの関係は⑦式となる。

$$t_0 = \frac{t_r}{\sqrt{1-\frac{v_r^2}{c^2}}}, l_0 = \frac{l_r}{\sqrt{1-\frac{v_r^2}{c^2}}}, M_r = \frac{M_0}{\sqrt{1-\frac{v_r^2}{c^2}}} \quad \text{⑦}$$

（ t_0 ：地球からの距離0の天体の時間、 t_r ：地球からの距離 r の天体の時間）

（ l_0 ：地球からの距離0の天体の長さ、 l_r ：地球からの距離 r の天体の長さ）

（ M_0 ：地球からの距離0の天体の質量、 M_r ：地球からの距離 r の天体の質量）

拡張型ブラックホール宇宙モデルでは、宇宙の膨張は必ずしも天体自体が遠ざかるものではない。（シュワルツシルト半径が膨張している）そこで、等価原理から⑦式に⑥式（ R は r_s とする）を代入すると⑧式、⑨式、⑩式が得られる。

$$t_0 = \frac{t_r}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{r_s^2}}} \quad (8)$$

$$l_0 = \frac{l_r}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{r_s^2}}} \quad (9)$$

$$M_r = \frac{M_0}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{r_s^2}}} \quad (10)$$

⑧式から、遠方の天体では時間の遅れが生じ、宇宙の果てでは時間が停止することとなる。

⑨式からは、遠方の天体で長さの収縮が生じる。ブラックホール近傍から放出される光の「重力」赤方偏移は、収縮した空間から光が脱出する際に波長が引き延ばされることに起因していることから、 l を λ （波長）に変換して考えると、遠方の天体の赤方偏移は「重力と等価なもの」に起因すると考えることができる。（図6）

また、⑩式を宇宙の密度に換算すると⑪式となる。

$$\rho_r = \frac{\rho_0}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{r_s^2}}} \quad (11)$$

（ ρ_0 ：地球からの距離0の宇宙の密度、 ρ_r ：地球からの距離 r の宇宙の密度）

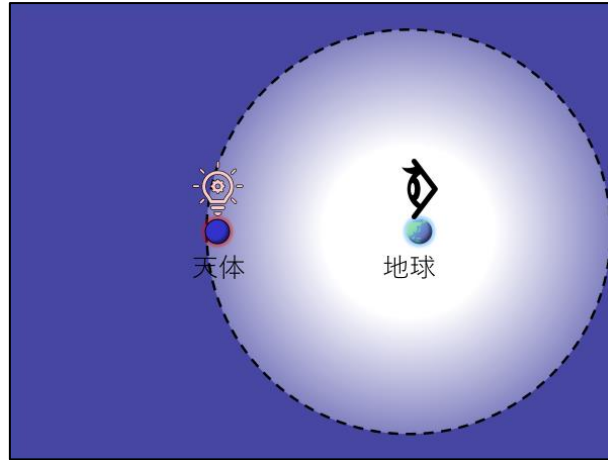


図6 拡張型ブラックホール宇宙モデルにおける赤方偏移のイメージ

図6で示す宇宙の密度分布のグラデーションについては、④式におけるブラックホールの生成により、現在の宇宙の平均的な密度 ρ が膨張した領域の平均的な密度 $\rho_{\Delta r_s}$ よりも小さくなっている（ $\rho_{\Delta r_s} > \rho$ ）ためと解釈できる。

一方で、シュワルツシルト半径近傍では⑩式より天体の質量 M_r が無限大になってしまうことになる。そこで、⑪式を用いて宇宙の全質量 M について考えると⑫式が得られる。

$$M = \int_0^{r_s} 4\pi r^2 \rho_r dr = \int_0^{r_s} \frac{4\pi r^2 \rho_0}{\sqrt{1 - r^2/r_s^2}} dr = \left[2\pi r_s \rho_0 \left(-r \sqrt{r_s^2 - r^2} + r_s^2 \sin^{-1} \frac{r}{r_s} \right) \right]_0^{r_s} = \frac{\pi^2}{2} \rho_0 r_s^3$$

⑫

よって、宇宙の全質量 M は有限値となり、無限大には発散しないことから本宇宙モデルは①式に相反しない。

また、⑫式を②式に代入すると⑬式が得られる。

$$\rho_0 = \frac{8}{3\pi} \rho \quad \text{⑬}$$

地球からの距離 0 の宇宙の密度 ρ_0 は、宇宙の平均的な密度 ρ に対し約 0.85 倍であり、宇宙の密度分布は ρ_0 から単調増加する。

次に、宇宙のインフレーションの始まりについて考察する。⑪式（および⑬式）から求められる宇宙の密度分布を図7に示す。現在の宇宙の平均的な密度 ρ を③式から計算すると $8.17 \times 10^{-44} \text{ kg/m}^3$ となる。時間の経過とともに宇宙は膨張しているならば、宇宙の平均的な密度 ρ が大きいほど過去の宇宙といえる。

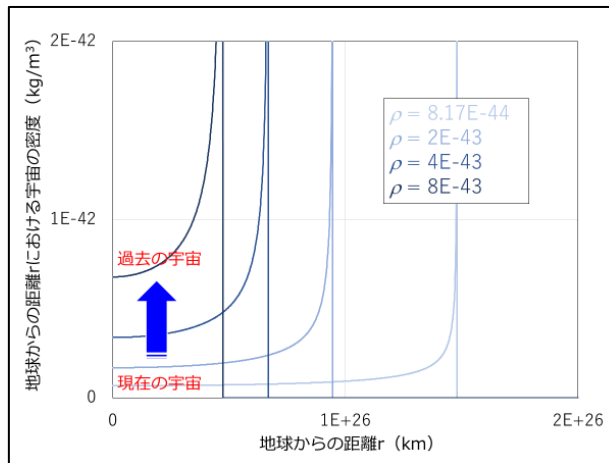


図7 拡張型ブラックホール宇宙モデルにおける宇宙の密度分布

図7の結果から、宇宙は過去へ遡るほど、縦軸切片の値は大きくなっていくことがわかる。また、宇宙の密度分布の傾向は、 ρ_0 からの単調増加であることに変化はない。これは、ブラックホール宇宙におけるインフレーションの起点が「ある銀河」、さらには「ある天体」へ行きつくことを示唆している。銀河の中心にはブラックホールが存在¹⁴していると考えられていることから、「ある銀河」の構造と宇宙の密度分布の傾向は相反しない。一方で、通常天体は密度分布が一様（むしろ中心部が高密度）であることから、「ある天体」の構造と宇宙の密度分布の傾向は相反する。もしブラックホール宇宙におけるインフレーションの起点が「ある天体」であるとするならば、天体中心部での質量の消失、すなわち「ブラックホール宇宙のインフレーションは、ある天体の内部でブラックホールが生成したことが起点である」と考えられる。

最後に参考として、⑤式から得られるもう一つの解釈を加えて本考察を終える。

⑤式に対する単位時間当たりの変化 (Δt) について考えると⑭式となる。

$$\frac{\Delta r_s}{\Delta t} = \frac{1}{4\pi r_s^2 \rho_{\Delta r_s}} \frac{\Delta M_B}{\Delta t} \quad (14)$$

宇宙は光速で膨張していることから $\Delta r_s / \Delta t = c$ として、(14)式を整理すると

$$\Delta M_B = 4\pi r_s^2 \rho_{\Delta r_s} c \Delta t \quad (15)$$

となり、ブラックホールの生成 ($\Delta M_B > 0$) に伴い、時間が経過 ($\Delta t > 0$) することになる。すなわち、ブラックホールの生成 (及び宇宙の膨張) が無ければ時間も進まない。

6. 結言

ビッグバン理論の支持を集めるきっかけとなった主な宇宙観測に、宇宙膨張速度の測定¹¹、宇宙マイクロ波背景放射の揺らぎの観測¹⁵がある。今回提案する「拡張型ブラックホール宇宙モデル」は、現代宇宙論の常識となっているビッグバン理論よりも、1960年代多くの科学者から支持されていた定常宇宙論¹⁶に近い。定常宇宙論ではビッグバンを必要としない点で本モデルと一致しているが、全宇宙の質量などが常に一定に保たれることや、「真空中」から物質が創生されるという点で本モデルとは異なる。本モデルでは、シュワルツシルト半径を決めるための宇宙の全質量に、ダークマターやダークエネルギー⁹を含めないと考えるが、それにより(5)式の関係が得られ、宇宙の膨張を説明することができる。

今回、『我々はブラックホールの中に住んでいる?』という仮説から、ブラックホール生成による質量の消失、シュワルツシルト半径の拡張、拡張された宇宙から天体の質量を獲得、という「拡張型ブラックホール宇宙モデル」が得られた。さらにそこから、遠方の天体の赤方偏移は「ドップラーシフト」によるものではなく、「重力と等価なもの」に起因するという結論に至った。

以下雑記になるが、冒頭の解説⁴で『その先には何も無いのではなく、観測できないだけで我々と同じような宇宙がずっと広がっているはずです。』という示唆があるが、ここから本モデルの「拡張された宇宙から天体の質量を獲得」へと繋がる。(ただし、宇宙マイクロ波背景放射を考慮すると、獲得する質量を「天体」から「電離状態の電子と陽子」へ修正する必要があるかもしれない。) この様子はブラックホールが周囲の物質を飲み込んでゆくことと同等であることから、「ブラックホールの生成」を「質量の消失」と考えることも自然である。

次に、『逆に言えば、138億年以上離れた観測者にとっては、我々は見えません。』という示唆があるが、これは図6で「逆に天体から地球を見た場合」に相当すし、この問いに対する答えは「双方で赤方偏移を観測する」と予想される。この問題は「双子のパラドックス」¹⁷と同等な議論であり、(8)式、(9)式、(10)式を得るために特殊相対性理論を用いたためと考えられる。特殊相対性理論では双方の時間の遅れを、「加速度」により時間が補正されると説明することができるが、双方の赤方偏移

に関しては「収縮した空間への移動」が時間などを補正すると予想される。この議論については改めて報告したい。

ブラックホール宇宙におけるインフレーションの起点が「ある天体」であるとするならば、既にその天体はブラックホールとなり消失してしまっている可能性が高く、そもそも宇宙の年齢と言われている 138 億年とは、「地球がブラックホールに取り込まれてからの経過時間」と考える方が自然なのかもしれない。もしそうであるならば、宇宙の果てこそが宇宙の起点ともいえる。

利益相反

本原稿にかかわる開示すべき利益相反関連事項はない。

付記

本原稿は、産業技術調査の一部から個人的な考察をしたものである。

参考文献

- ¹ The Event Horizon Telescope Collaboration *et al*/2019 *ApJL* **875** L1,
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7>
- ² R. A. Alpher, H. Bethe, and G. Gamow, *Phys. Rev.* 73, 803 – Published 1 April 1948,
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.73.803>
- ³ Popławski, N.J. A nonsingular, anisotropic universe in a black hole with torsion and particle production. *Gen Relativ Gravit* 53, 18 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s10714-021-02790-7>
- ⁴ <https://dot.asahi.com/dot/2022022500042.html?page=1>
- ⁵ <https://astro-dic.jp/black-hole/>
- ⁶ <https://astro-dic.jp/schwarzschild-radius/>
- ⁷ <https://youtu.be/46g2QvXVj1s>
- ⁸ [https://w.wiki/4\\$C2](https://w.wiki/4$C2)
- ⁹ <https://www.nao.ac.jp/faq/a0602.html>
- ¹⁰ <https://astro-dic.jp/%ce%bbcdm-model/>
- ¹¹ <https://astro-dic.jp/inflationary-cosmology/>
- ¹² Hubble, E. P., 1929, *Proc. National Academy of Science of the USA*, Vol. 15, 168.
<https://doi.org/10.1073/pnas.15.3.168>
- ¹³ A. Einstein, (June 30, 1905), *Annalen der Physik (Leipzig)* 322 (10): 891–921.
<https://doi.org/10.1002%2Fandp.19053221004>
- ¹⁴ Robert Antonucci, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 1993 31:1, 473-521
<https://doi.org/10.1146/annurev.aa.31.090193.002353>
- ¹⁵ Penzias, A. A. and Wilson, R. W., 1965, *Astrophysical Journal* 142, 419-421 1965.
<http://dx.doi.org/10.1086/148307>
- ¹⁶ F. Hoyle, A New Model for the Expanding Universe, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 108, Issue 5, October 1948, Pages 372–382,
<https://doi.org/10.1093/mnras/108.5.372>
- ¹⁷ 千代島雅、『双子のパラドックスの理論』、晃洋書房、2002
ISBN: 9784771013612