

宇宙物理学特論

宇宙論入門

宇宙論とはどんな分野か？

「なんで宇宙(この世界)って存在するのだろう？」って思ったことないですか？

宇宙論

🌐 95の言語版 🗑

ページノート

閲覧編集履歴表示ツール🗑

出典: フリー百科事典『ウィキペディア（Wikipedia）』

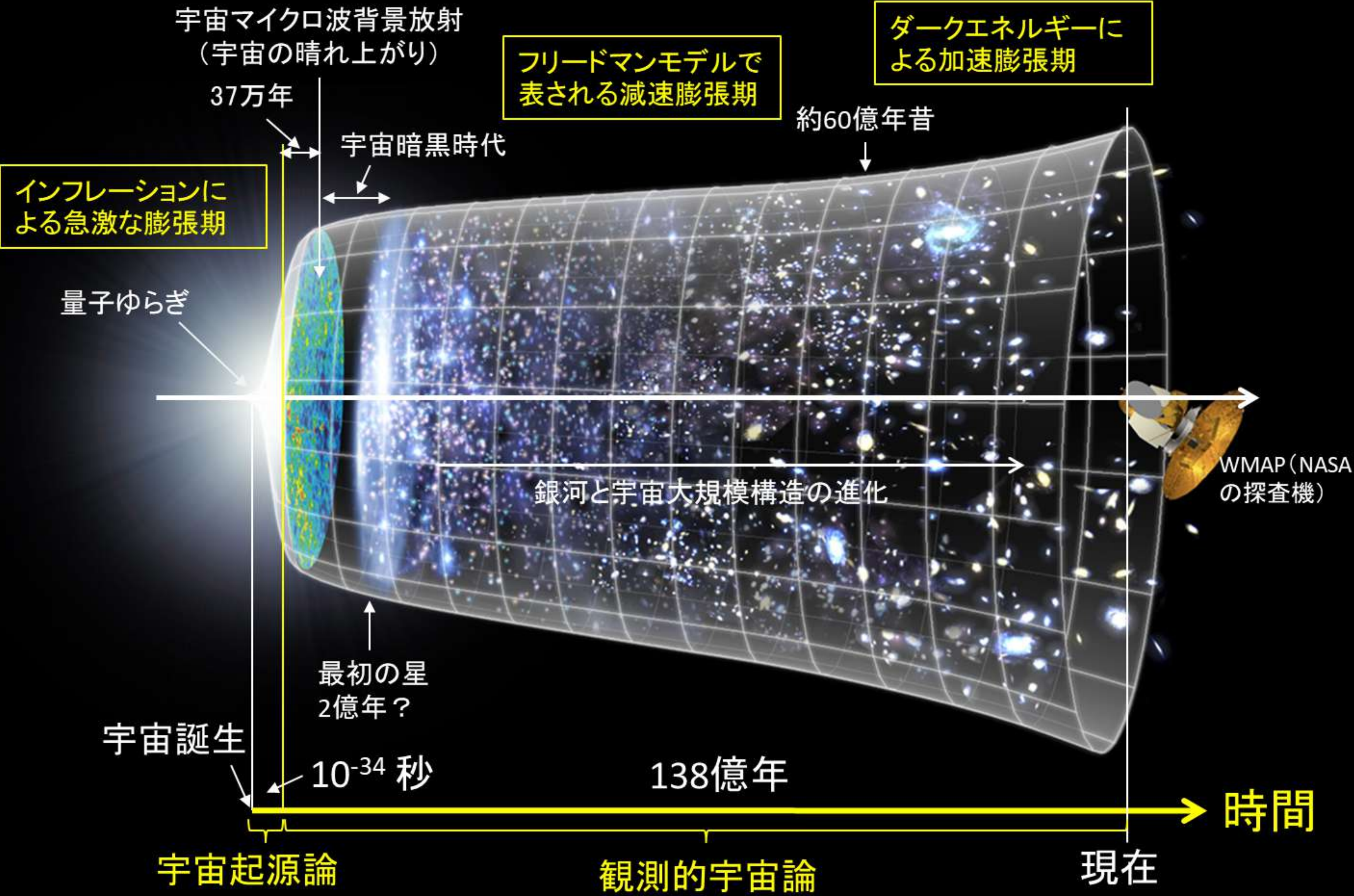
</

- 簡単に言えば、この世界を記述・説明しようとする分野
- 宇宙物理分野の花形 (超ムズイ & 競争率エグい)
- 古代からの人類のテーマ (例えば、古代インドでは聖典ヴェーダにおいて「無からの発生」といった宇宙創生論)
- 現代では、アインシュタインの「一般相対性理論」と遠方天体の観測技術の発展で1900年代から大きく進歩
- 物理の世界でも無からの宇宙の創生だと考えられている
- 個人的印象「人文科学 (歴史/哲学/他) と物理学の交差点」

誰もが一度は考えた事があるような疑問を
物理学で考えるとどうなるか？

宇宙進化のイメージ図

現在の宇宙論像

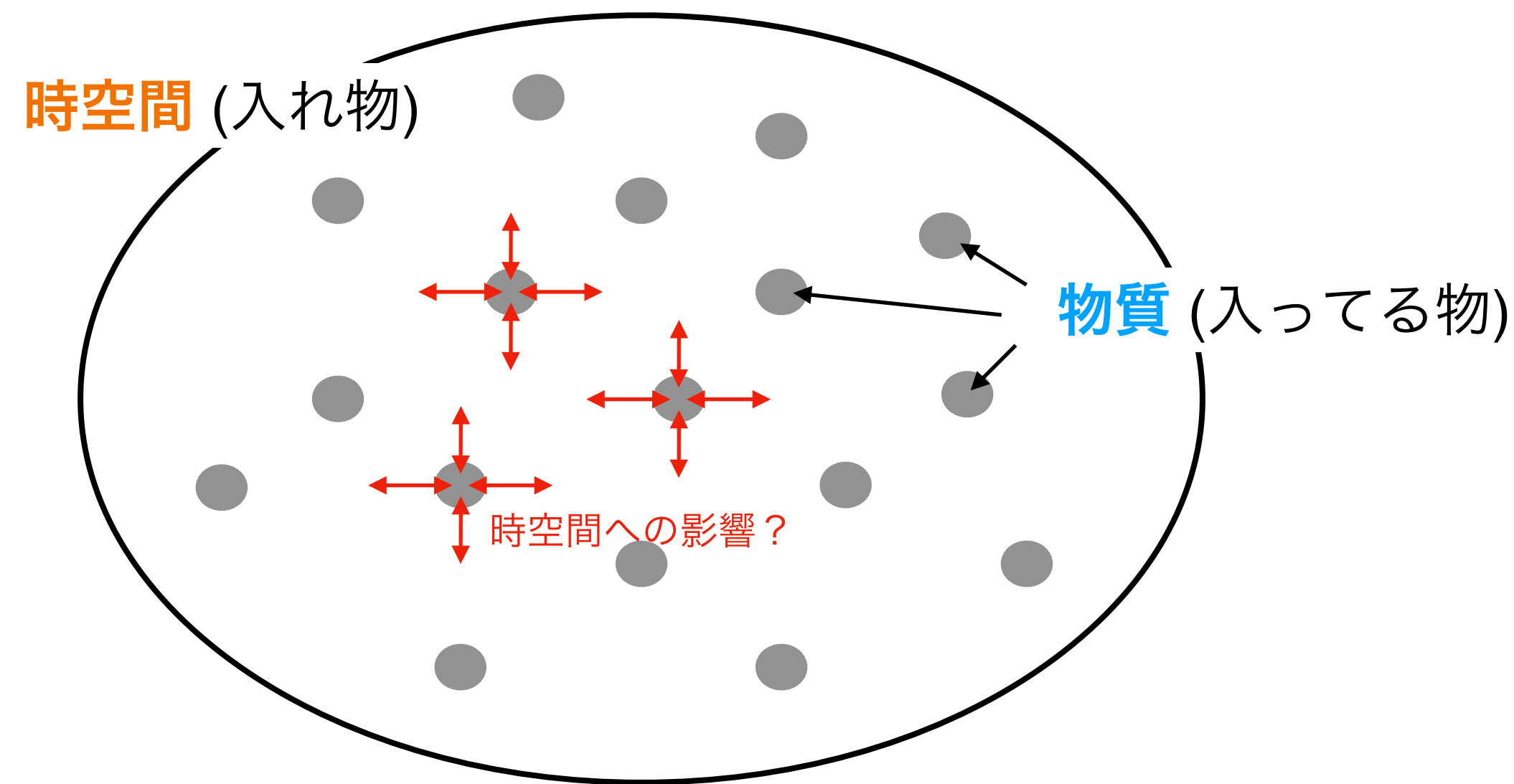


一般相対性理論と宇宙の記述

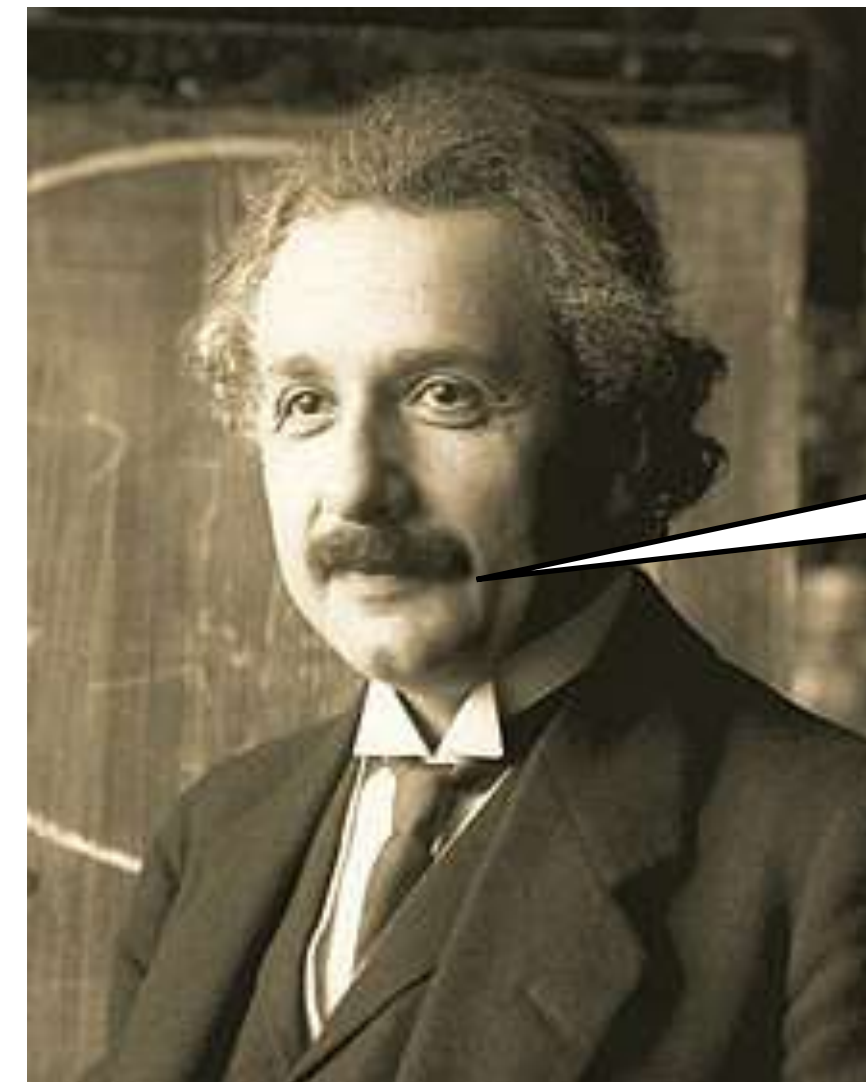
宇宙とは何なのか？ → 抽象化すれば「**時空間** (入れ物)」 + 「**物質** (入ってる物)」

時空間 と **物質** を記述する方程式があれば、宇宙そのものを議論できる？

単純化した宇宙のイメージ



アルベルト・アインシュタイン



時空間 と **物質** は
互いに影響を及ぼし
合っているのでは？

アインシュタイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

時空間が物質に or 物質が時空間に影響を与える結果として「重力」

一般相対性理論と宇宙の記述

一般相対論超入門: アインシュタイン方程式と測地線方程式 (重要な二つの方程式)

質量の存在 → 時空の歪み (= 重力)

アインシュタイン方程式

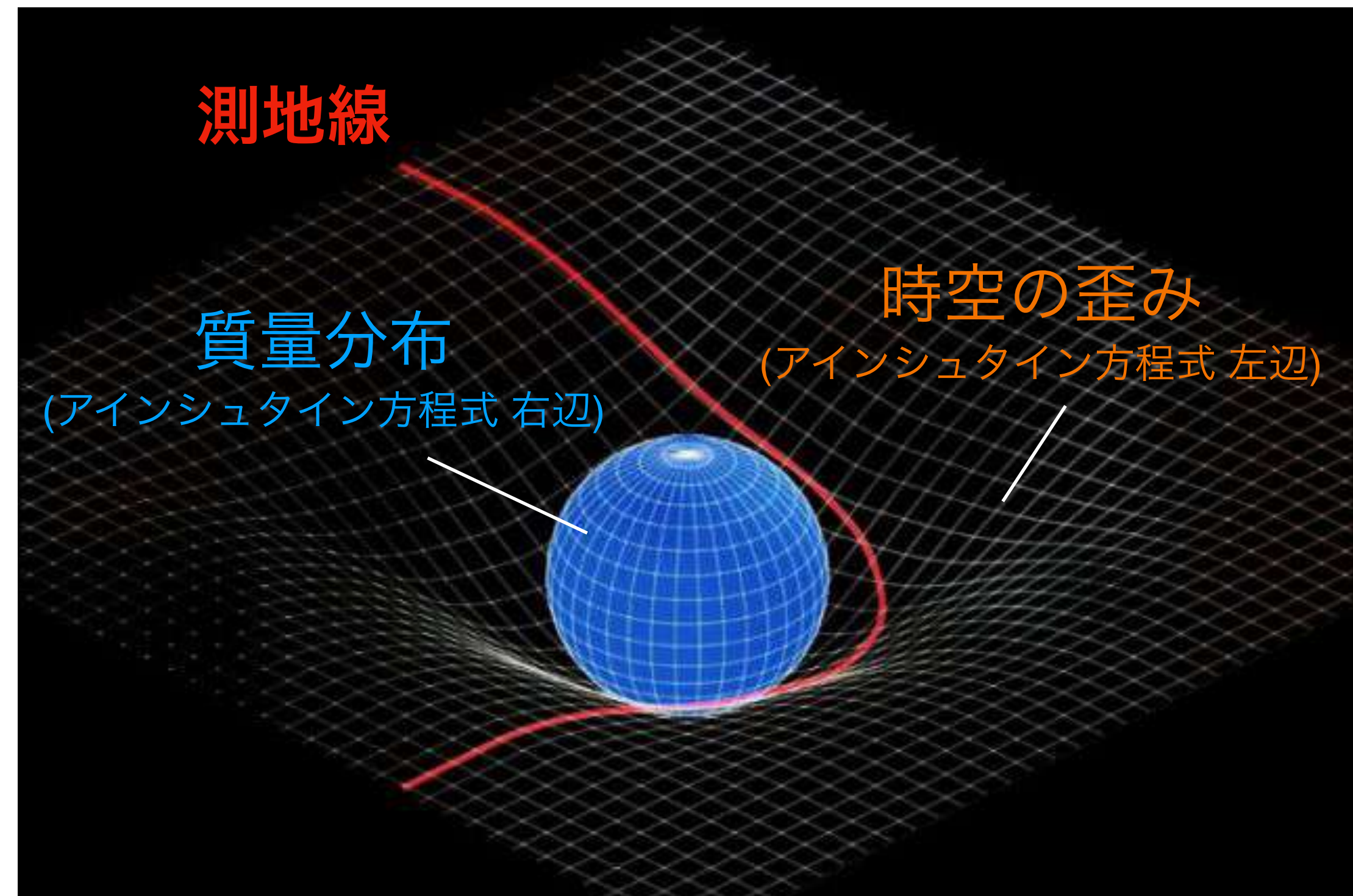
$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu}}_{\text{時空の歪み}} = \underbrace{\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}}_{\text{質量分布}}$$

測地線方程式

$$\frac{d^2x^\alpha}{d\tau^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\alpha \frac{dx^\mu}{d\tau} \frac{dx^\nu}{d\tau} = 0$$

クリストッフェル記号

$$\Gamma_{\mu\nu}^\alpha = \frac{1}{2}g^{\sigma\alpha}(\partial_\mu g_{\sigma\nu} + \partial_\nu g_{\sigma\mu} - \partial_\sigma g_{\mu\nu})$$



時空の歪みに沿って(= 重力)運動 → 測地線方程式

一般相対性理論と宇宙の記述

一般相対論超入門: アインシュタイン方程式と測地線方程式 (重要な二つの方程式)

アインシュタイン方程式

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu}}_{\text{時空の歪み}} = \underbrace{\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}}_{\text{質量分布}}$$

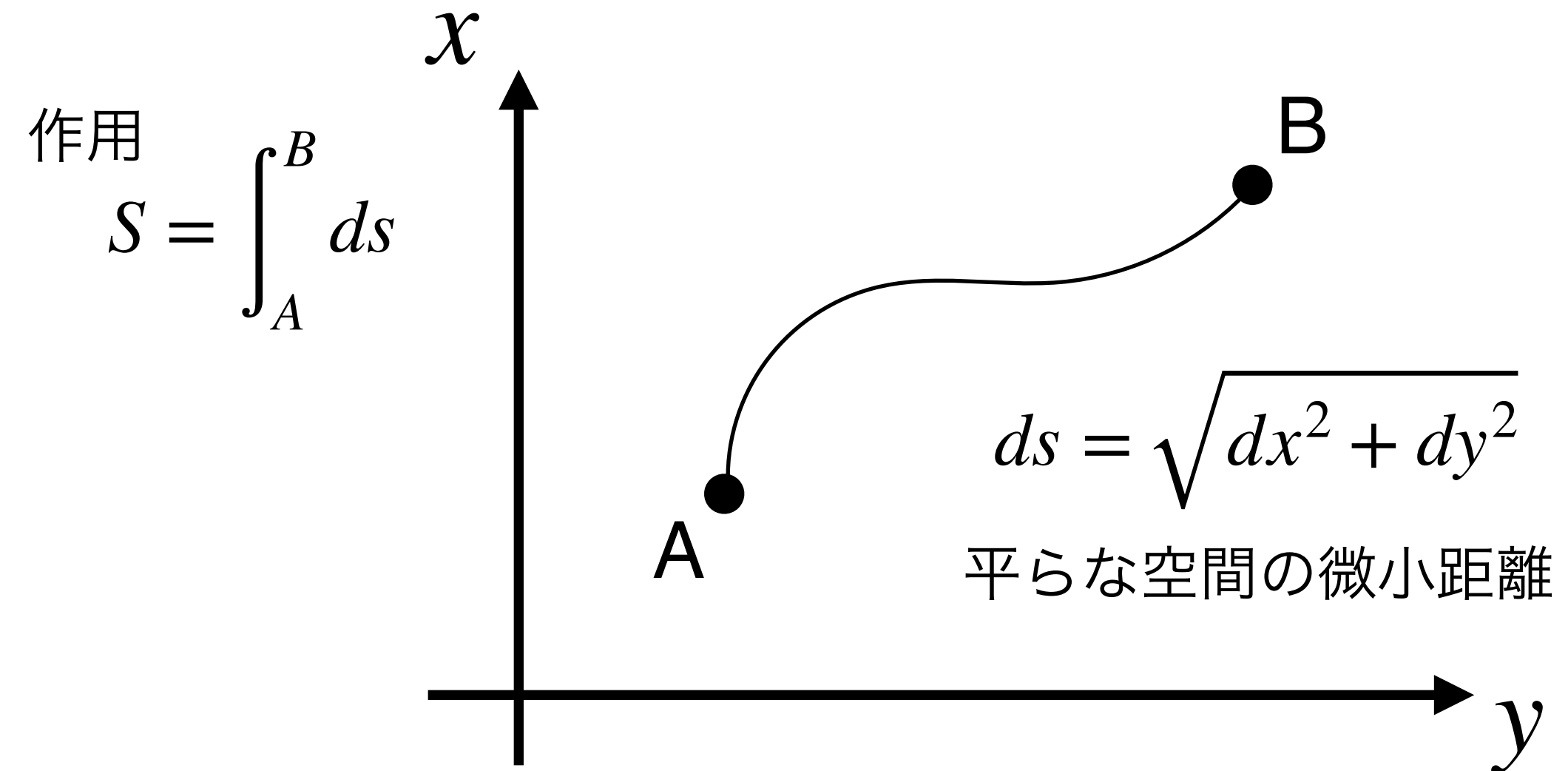
測地線方程式

$$\frac{d^2x^\alpha}{d\tau^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\alpha \frac{dx^\mu}{d\tau} \frac{dx^\nu}{d\tau} = 0$$

クリストッフェル記号

$$\Gamma_{\mu\nu}^\alpha = \frac{1}{2}g^{\sigma\alpha}(\partial_\mu g_{\sigma\nu} + \partial_\nu g_{\sigma\mu} - \partial_\sigma g_{\mu\nu})$$

測地線方程式は、曲がった空間の最短経路問題
(力学1を思い出しましょう)



変分原理

曲がった空間の微小距離 $ds = \sqrt{g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu}$

一般相対性理論と宇宙の記述

アインシュタイン方程式の左辺 (時空間) と右辺 (物質分布)

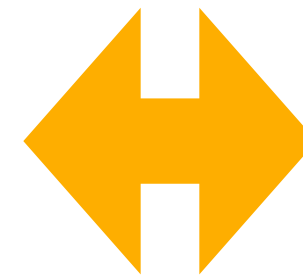
ここで、時空間の歪みと質量分布はそれぞれ $g_{\mu\nu}, T_{\mu\nu}$ の汎関数として考えて良い

アインシュタイン方程式をより簡単に表現 → $\text{時空間}(g_{\mu\nu}) = \text{質量分布}(T_{\mu\nu})$

計量テンソル

$$g_{\mu\nu} = \mathbf{e}_\mu \cdot \mathbf{e}_\nu$$

直行座標の場合 $\delta_{\mu\nu} = \mathbf{e}_\mu \cdot \mathbf{e}_\nu$



エネルギー運動量テンソル

$$T_{\mu\nu}$$

物質の分布: 重力を生じさせる源

とにかく、これら二つのテンソルで表現できる時空間と物質分布を繋ぎ合わせたものがアインシュタイン方程式

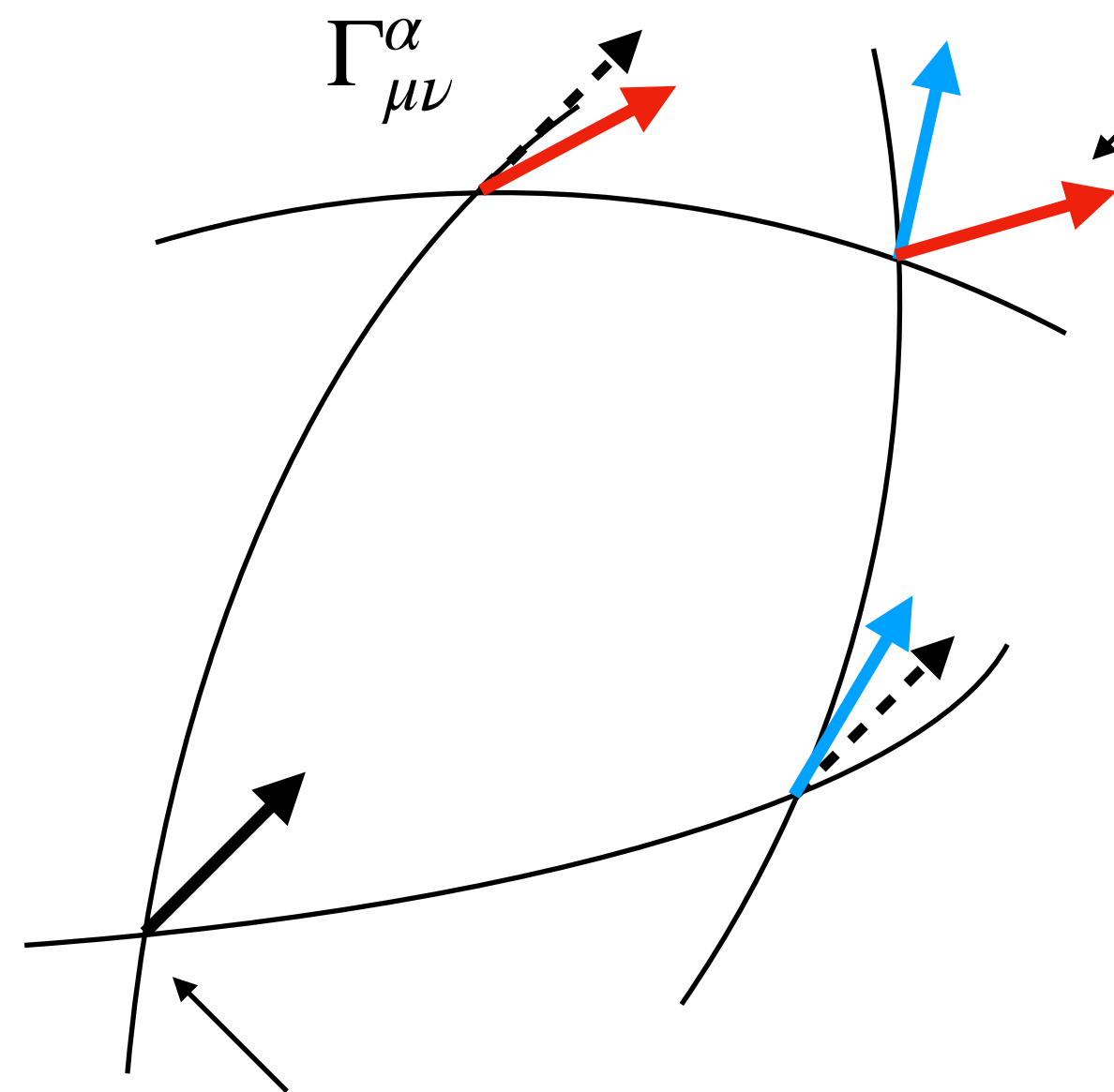
一般相対性理論と宇宙の記述

アインシュタイン方程式の左辺 (時空間) と右辺 (物質分布)

ここで、時空間の歪みと質量分布はそれぞれ $g_{\mu\nu}, T_{\mu\nu}$ の汎関数として考えて良い

アインシュタイン方程式をより簡単に表現 → 時空間($g_{\mu\nu}$) = 質量分布($T_{\mu\nu}$)

平行移動を表現



局所的な距離と角度の定義 $g_{\mu\nu}$

異なる経路間での

ベクトルの違い = 曲率

リーマンテンソル $R^\rho_{\sigma\mu\nu}$

$$(\equiv \partial_\nu \Gamma^\rho_{\sigma\mu} - \partial_\mu \Gamma^\rho_{\sigma\nu} + \Gamma^\rho_{\mu\lambda} \Gamma^\lambda_{\nu\sigma} - \Gamma^\rho_{\nu\lambda} \Gamma^\lambda_{\mu\sigma})$$



リーマンテンソルの対称性から

$$R^\mu_{\nu\alpha\beta;\gamma} + R^\mu_{\nu\beta\gamma;\alpha} + R^\mu_{\nu\gamma\alpha;\beta} = 0$$

(ビアンキの恒等式)

ここからリッチテンソル、スカラー曲率

$$R_{\alpha\beta} \equiv R^\mu_{\alpha\mu\beta} \quad R \equiv R^\mu_{\mu}$$

エネルギー運動量テンソル (完全流体近似)

$$T^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \rho & \rho v_x & \rho v_y & \rho v_z \\ \rho v_x & p + \rho v_x^2 & \rho v_x v_y & \rho v_x v_z \\ \rho v_y & \rho v_x v_y & p + \rho v_y^2 & \rho v_y v_z \\ \rho v_z & \rho v_x v_z & \rho v_y v_z & p + \rho v_z^2 \end{pmatrix}$$

エネルギー密度

エネルギーフラックス

T_{00}	T_{01}	T_{02}	T_{03}
T_{10}	T_{11}	T_{12}	T_{13}
T_{20}	T_{21}	T_{22}	T_{23}
T_{30}	T_{31}	T_{32}	T_{33}

せん断力

圧力

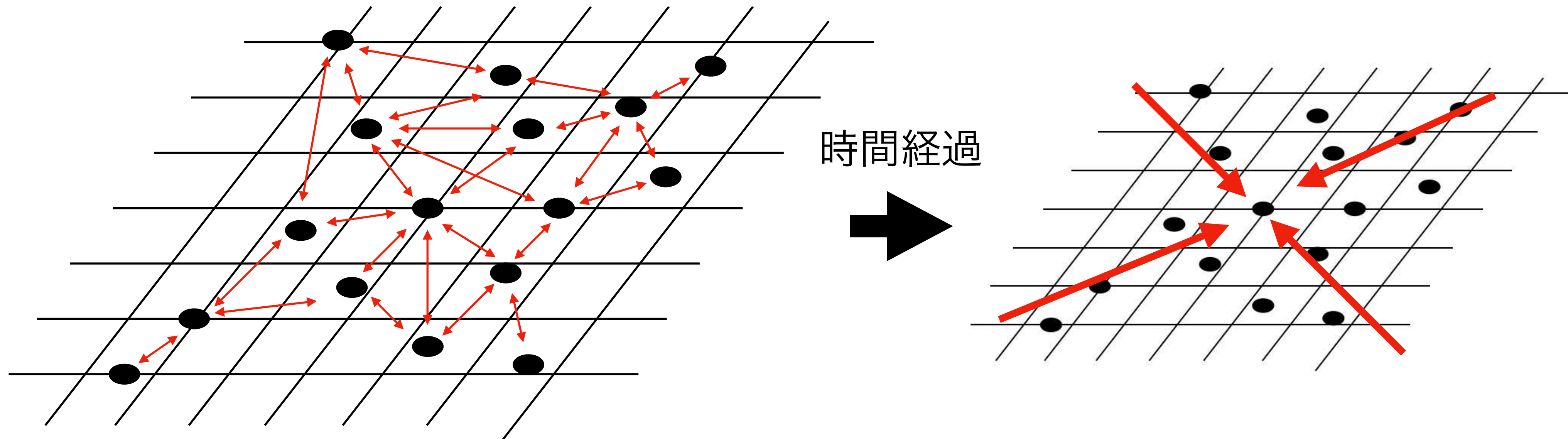
運動量密度

運動量フラックス

アインシュタイン方程式の問題点？

方程式から宇宙の時間発展も予測可能: 一様・等方な宇宙を仮定すると「動的」な宇宙

(一様 = 物質が均等に分布、等方 = 宇宙に特別な方向はない)



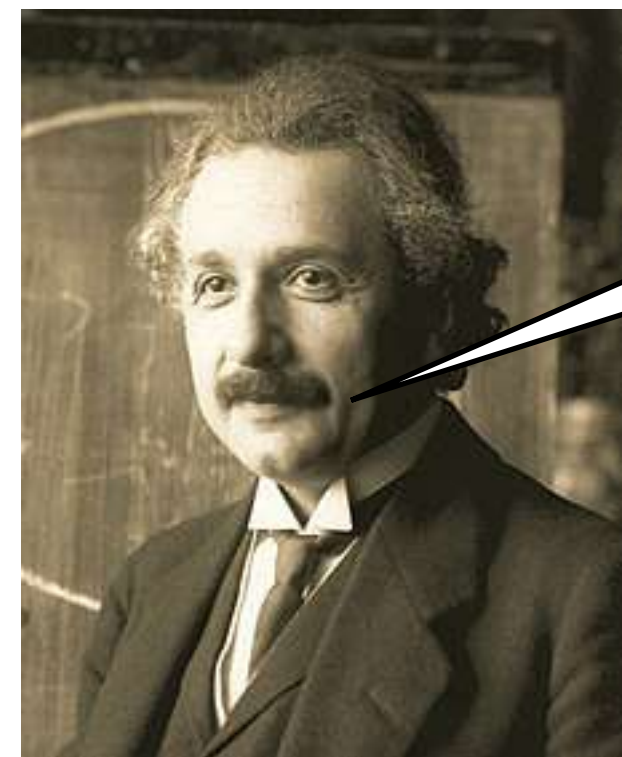
アインシュタイン方程式の結論: 宇宙は「膨張」か「収縮」するはず!?

→ なかなか受け入れ難い事実 → 方程式をイジって宇宙を止めよう

一般相対性理論と宇宙膨張 ①相対論とフリードマンモデル

アインシュタインを含む多くの学者は宇宙は静止していると1900年代初頭は考えていた

アルベルト・アインシュタイン

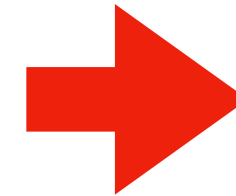


- 時間と空間と物質は密接に結びついている
- 静止宇宙にするため「宇宙項」を足そう

アインシュタイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \boxed{\Lambda g_{\mu\nu}} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

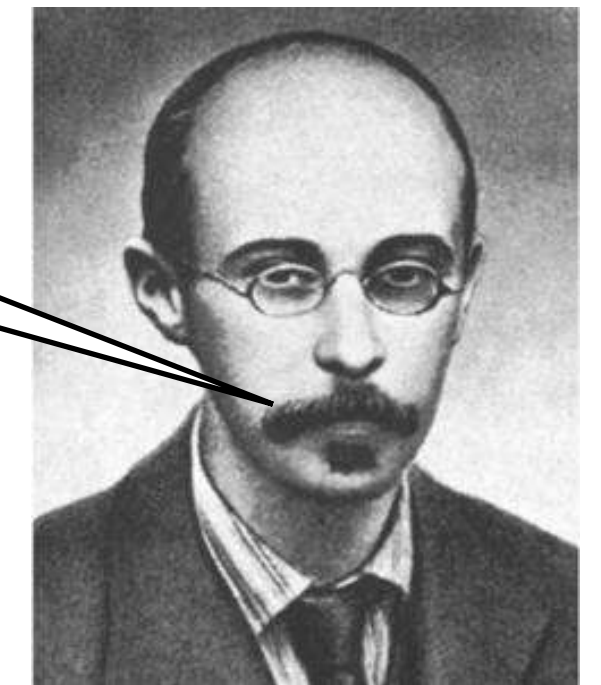
宇宙項



フリードマン方程式

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2} + \boxed{\frac{\Lambda c^2}{3}}$$

宇宙項



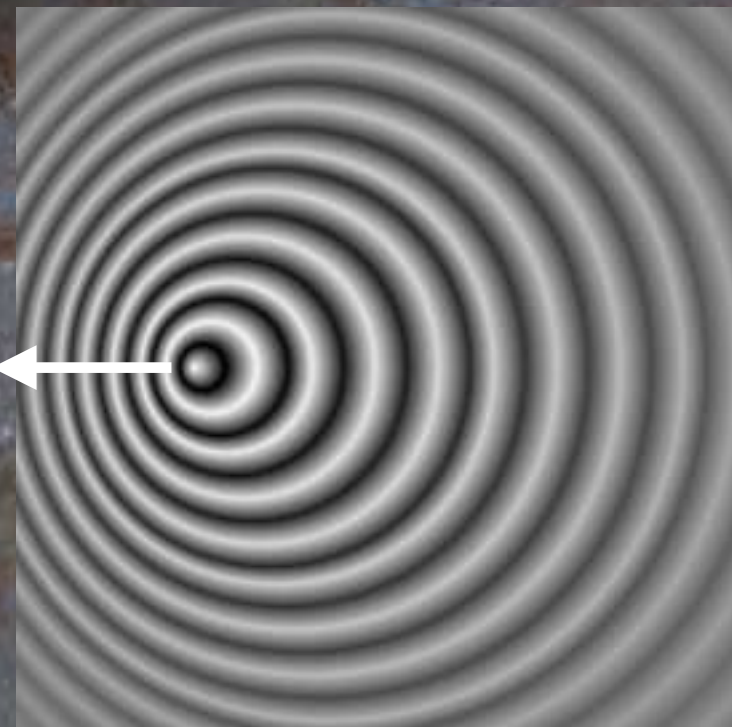
- 宇宙項を考慮した解は不安定
- 宇宙項足しても静止宇宙にはならない！

結局、宇宙は膨張したり収縮したりする!?

ここで疑問「では、本当に宇宙は静止してるの？」→ そんな事確かめられる？



赤いシミみたいなもの = 遠くの銀河



光のドップラー効果で波長長く(赤く)

NGC5728 by HST

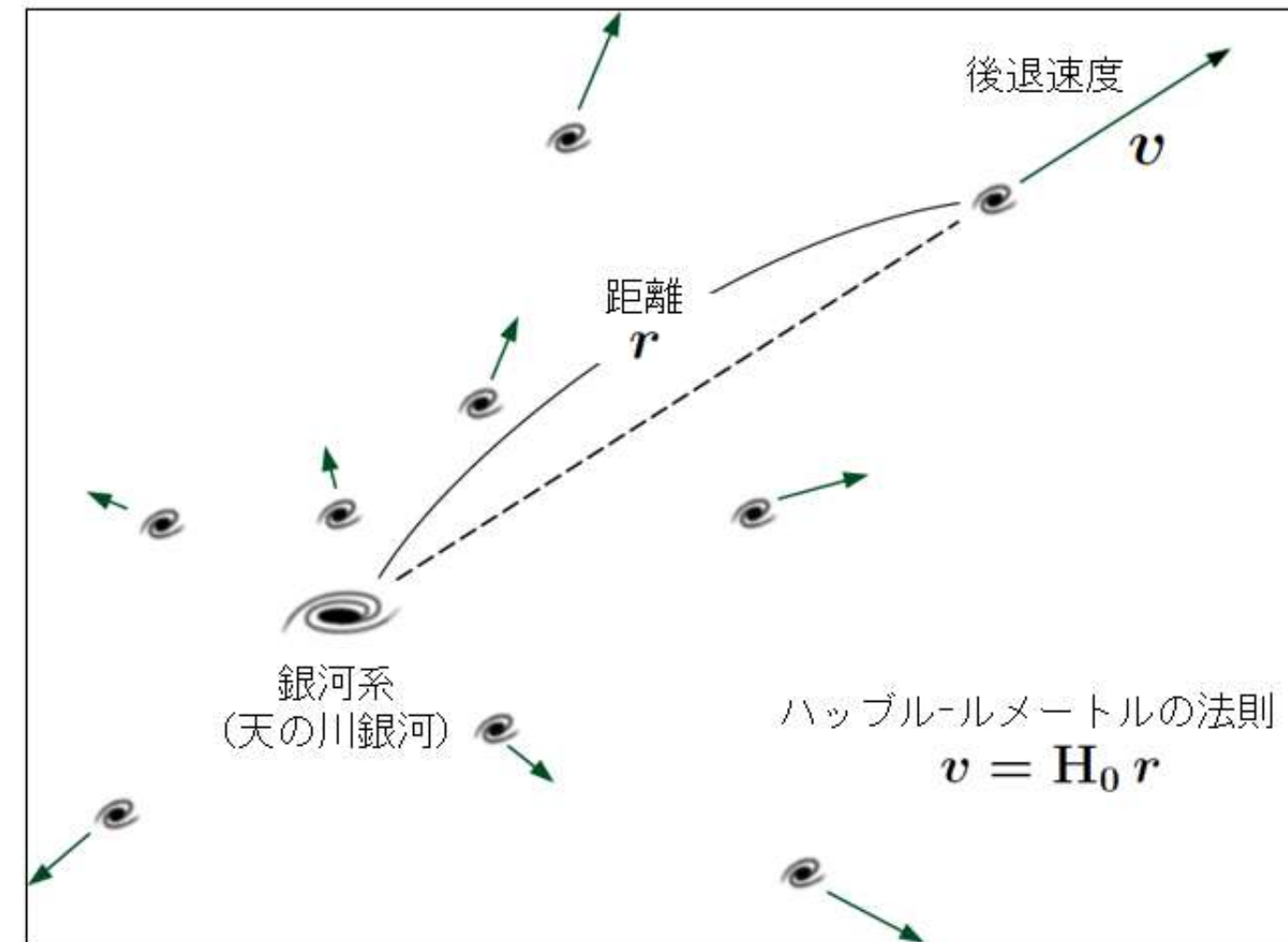


遠くの銀河は後退してる？

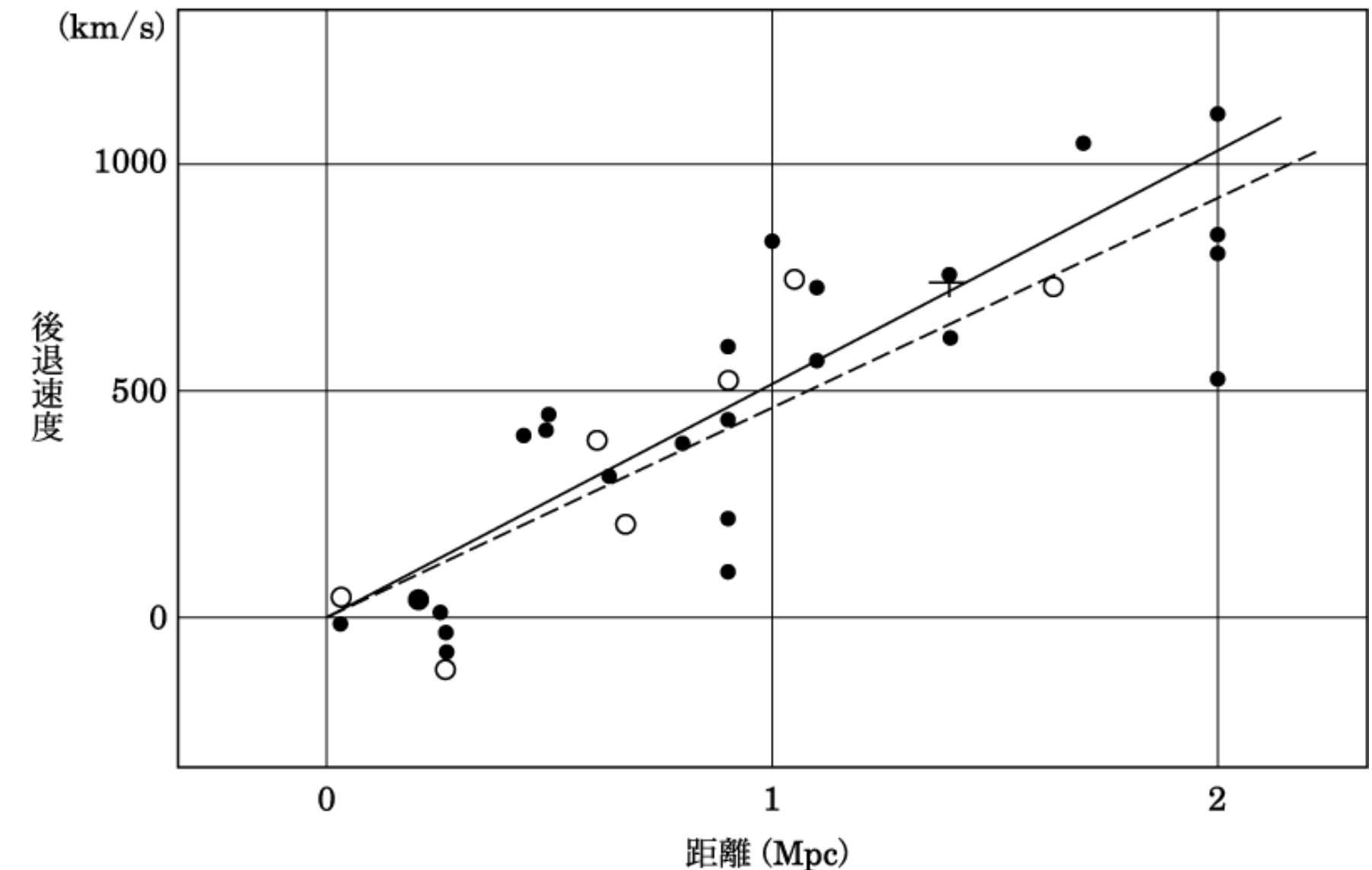
一般相対性理論と宇宙膨張 ②宇宙膨張の発見

遠くの銀河ほど、速い速度で後退している → 宇宙膨張の発見 by ハッブル

エドウィン・ハッブル



現在のハッブル定数 $H_0 \approx 70 \text{ km/s/Mpc}$

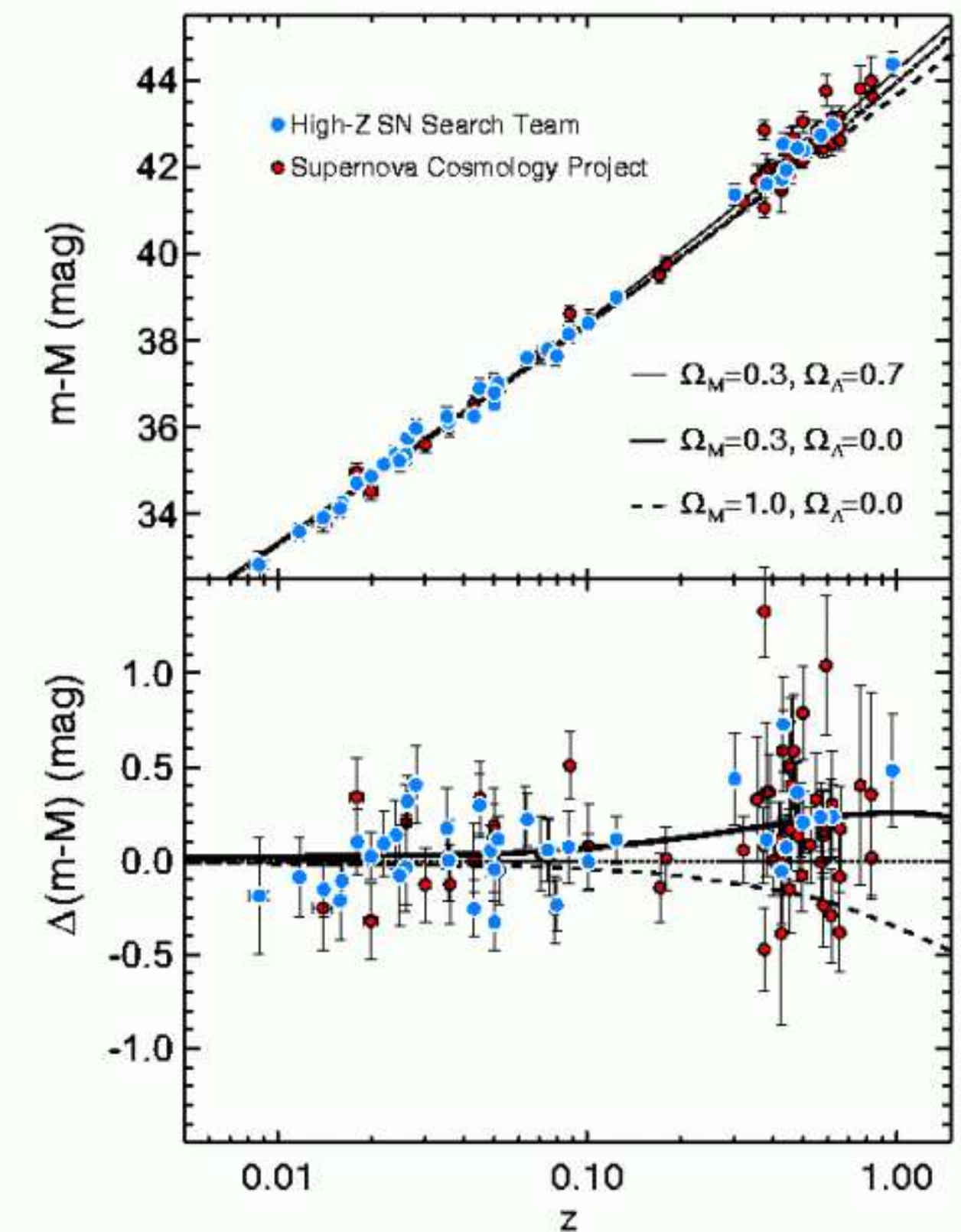


膨張しているのであれば、宇宙項はそもそも要らなかった？

→ アインシュタイン 「我が人生最大の失敗」

一般相対性理論と宇宙膨張 ③宇宙加速膨張の発見

宇宙加速膨張の発見 by → 宇宙項の復活 = 暗黒エネルギーの必要性



だいたい質量が同じ白色矮星の爆発をキャンドルに、宇宙膨張が加速していることを観測

ビッグバン宇宙論と宇宙背景放射 (CMB)

宇宙は今膨張しているということは... 昔は小さかった!? 宇宙に始まりがある!?

ジョージ・ガモフ

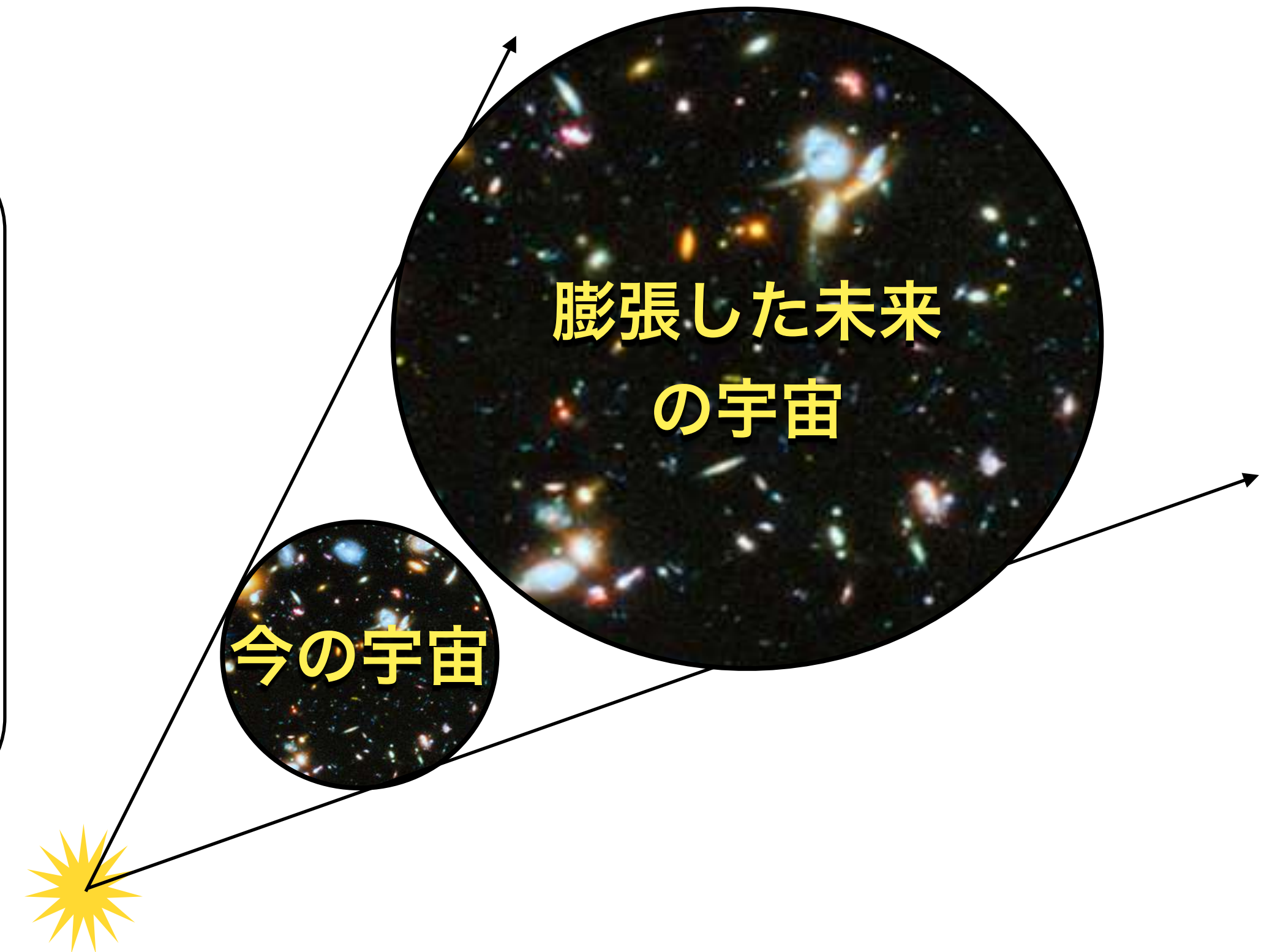


ガモフの予想

- 宇宙は、高温高密度の火の玉「ビッグバン」で誕生し、膨張と共に冷却してきた
- 宇宙の元素もその時に作られたに違いない



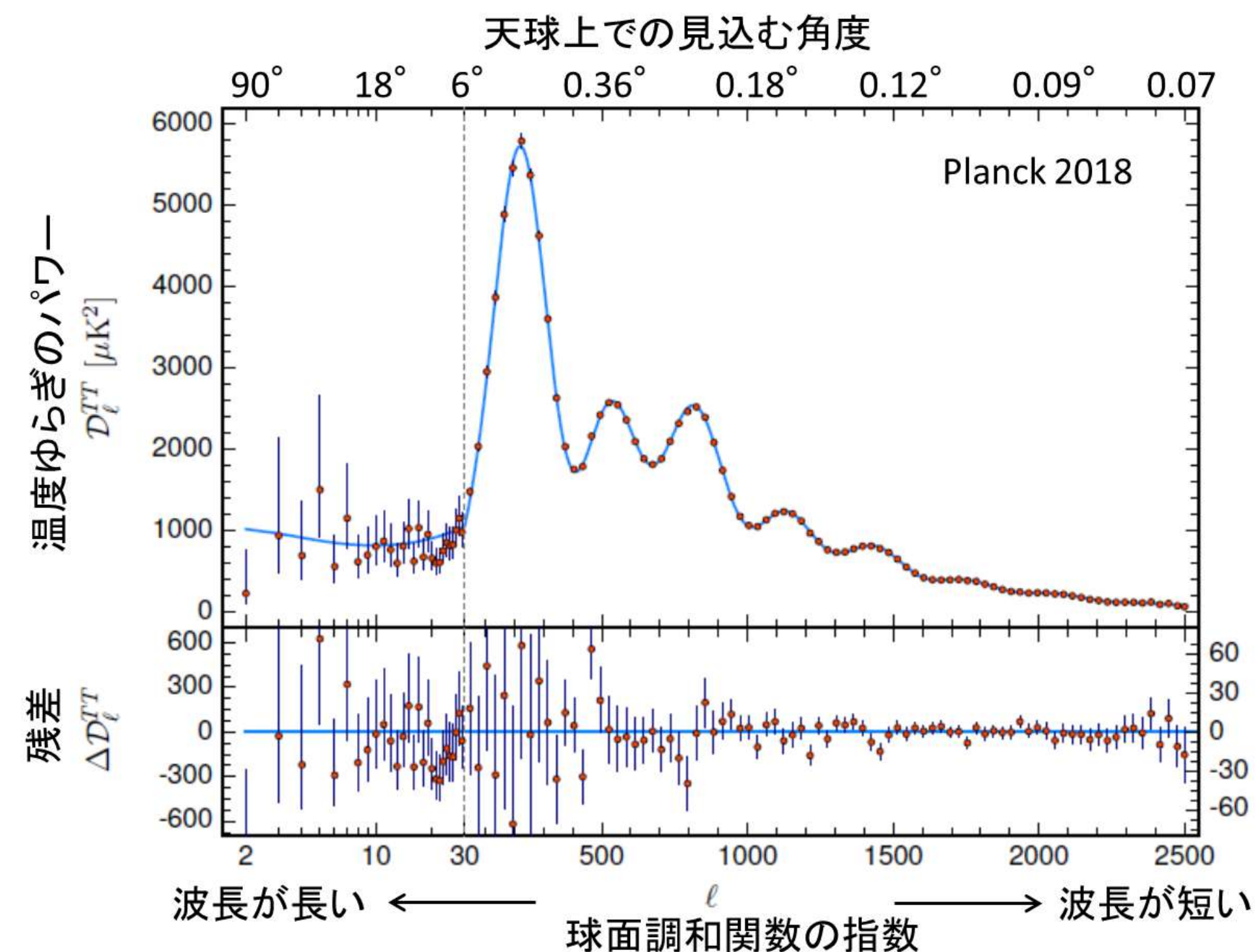
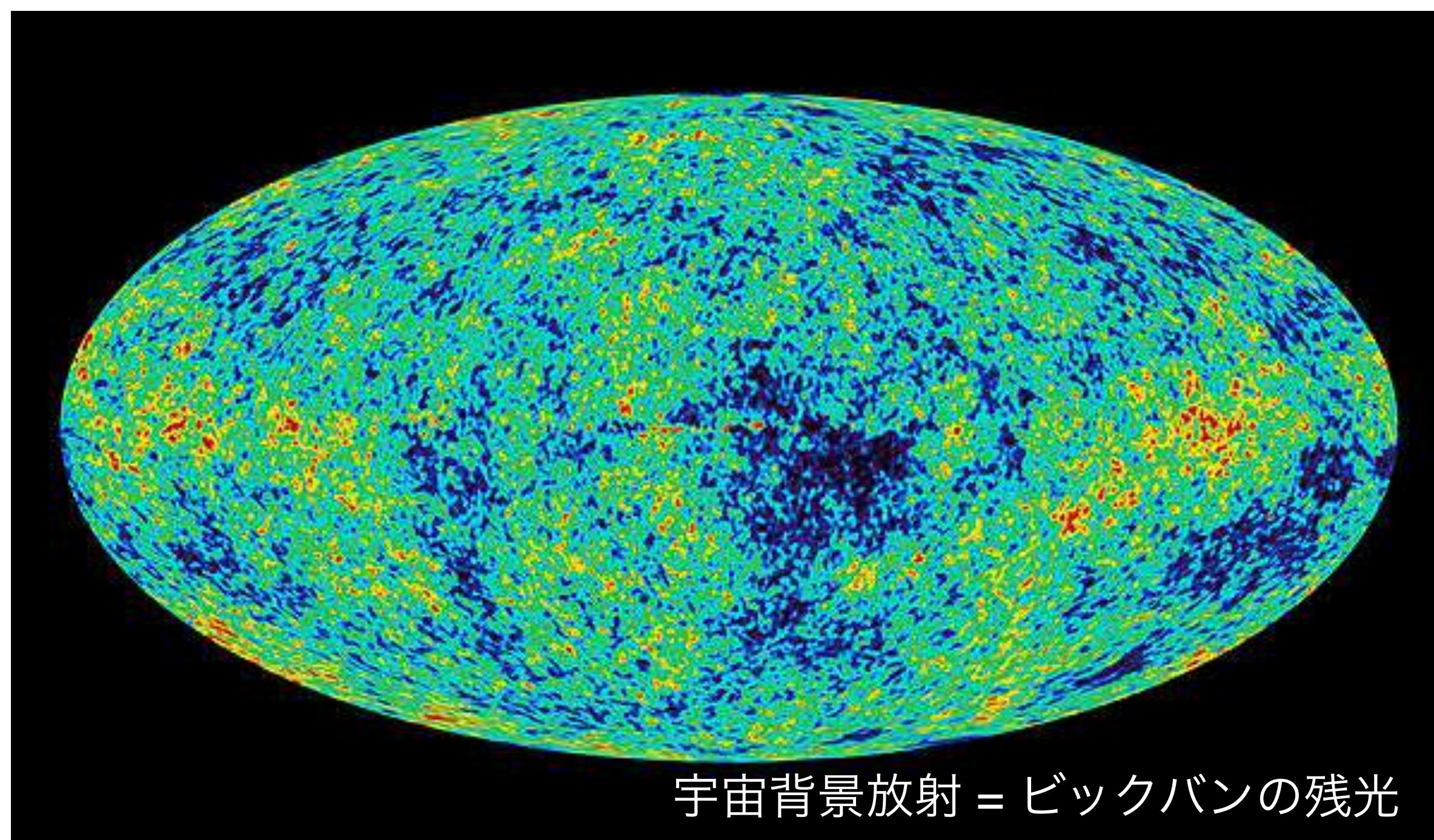
一つ目正解、二つ目不正解



宇宙の始まり? = 熱い火の玉「ビッグバン」

ビッグバン宇宙論と宇宙背景放射 (CMB)

では、なぜビッグバンがあったと今言えるのか？ → ビッグバンの残光が実際に観測できるから



ハッブル定数 (宇宙膨張)、宇宙年齢、エネルギー密度 (通常物質・暗黒物質・エネルギーの割合など)、宇宙初期の構造ゆらぎ、など

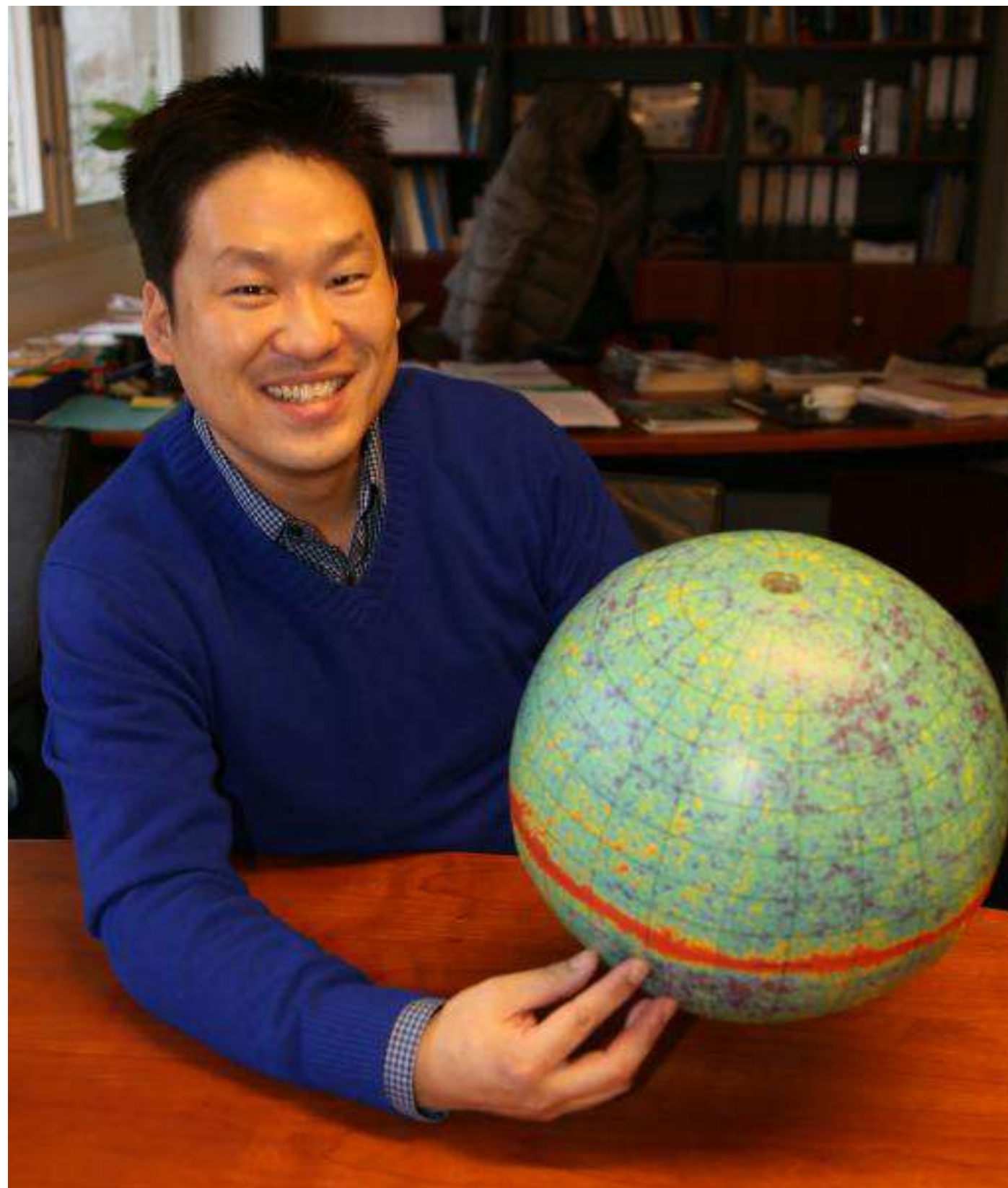
我々の宇宙の誕生直後の情報が観測から精密に測定可能

ビッグバン宇宙論と宇宙背景放射 (CMB)

実は、CMB で現在の宇宙年齢とか決定した人は日本人

小松英一郎さん

マックスプランク宇宙物理学研究所 所長



Institute of Physics

<https://iopscience.iop.org> > article

一万以上の研究に影響を与えている
(数千行くとノーベル賞級)

SEVEN-YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY ...

E Komatsu 著・2011・被引用数: 12039 — SEVEN-YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE (WMAP^{*}) OBSERVATIONS: COSMOLOGICAL INTERPRETATION. ...

アメリカでの研究奮闘記 (宇宙興味あるなら読んでみて)

WMAP とプリンストンでの4年間を
ふりかえって (1)

—目指せ、WMAP チーム潜入！

小 松 英一郎

〈Department of Astronomy, The University of Texas at Austin〉
e-mail: komatsu@astro.as.utexas.edu

WMAP とプリンストンでの4年間を
ふりかえって (2)

—ああ、怒涛のデータ解析—

小 松 英一郎

〈Department of Astronomy, The University of Texas at Austin〉
e-mail: komatsu@astro.as.utexas.edu

https://www.asj.or.jp/geppou/archive_open/2005_98_02/98_107.pdf (一つ目の記事)

https://www.asj.or.jp/geppou/archive_open/2005_98_03/98_182.pdf (二つ目の記事)

https://www.asj.or.jp/geppou/archive_open/2016_109_02/109_113.pdf (三つ目の記事)

副教材: 佐藤文隆「宇宙物理」1-1章と1-6章の内容 (少し違う視点けど)

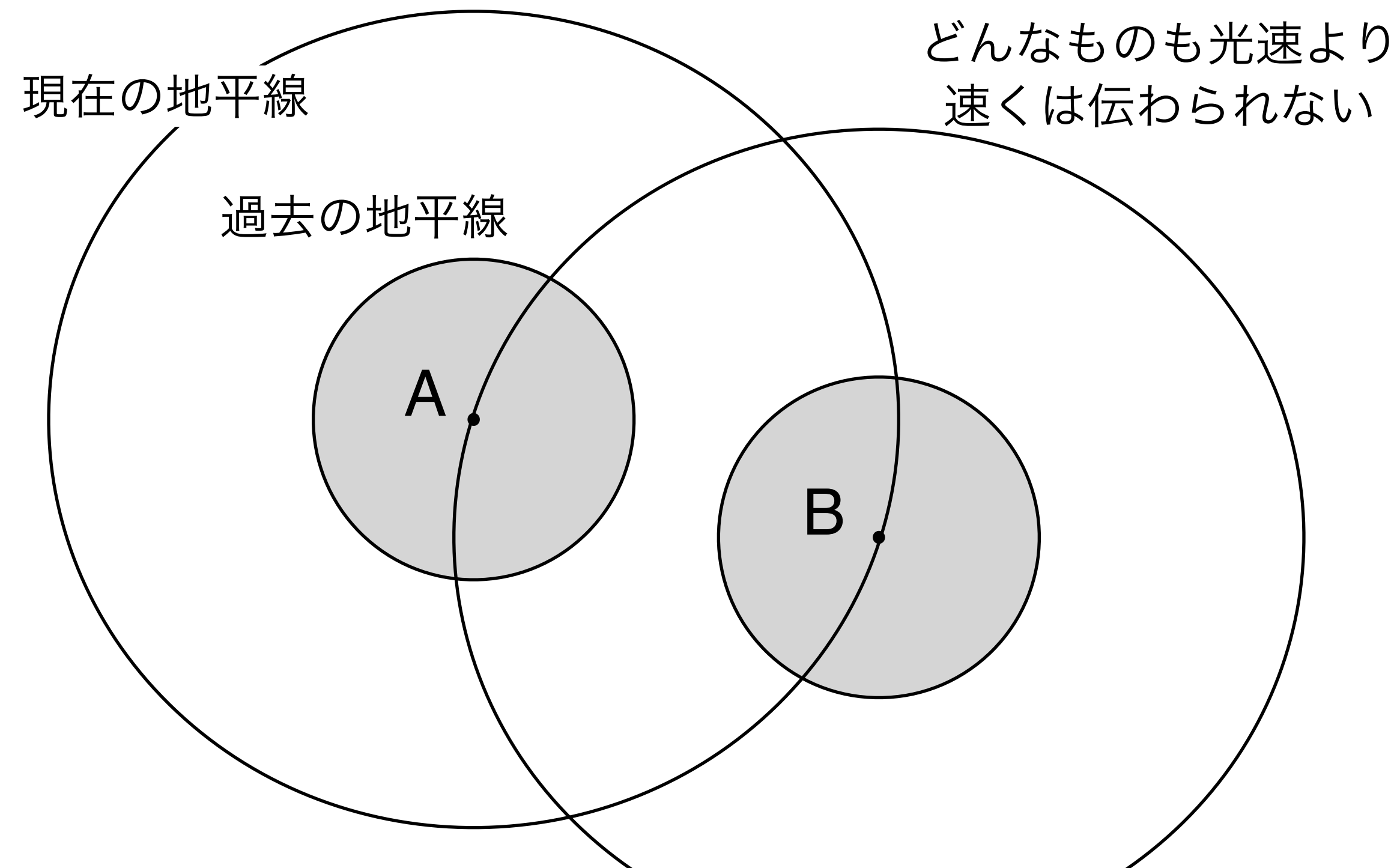
インフレーション宇宙論

ビッグバン宇宙モデルの困難: 地平線問題 (一例)

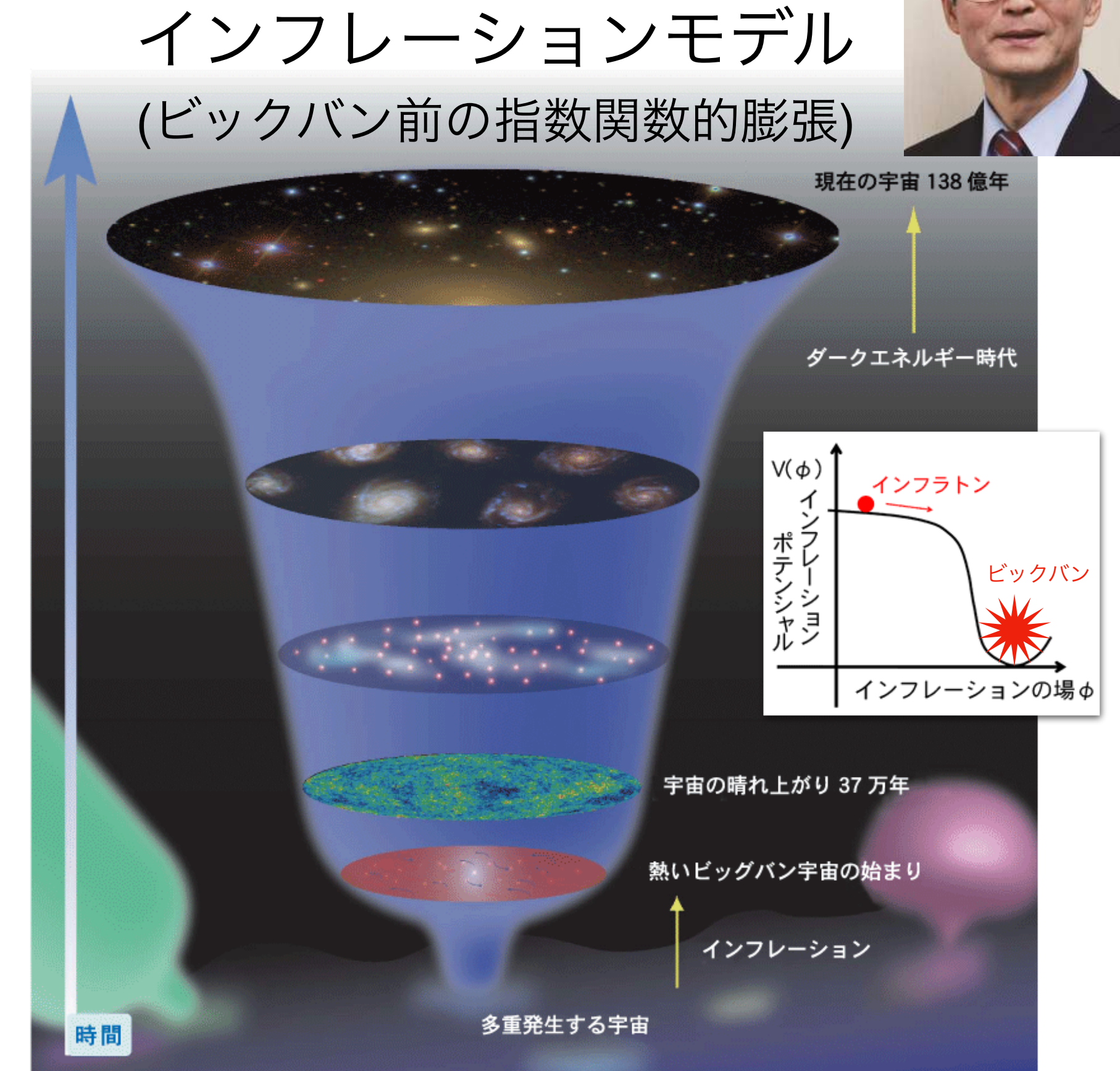
佐藤勝彦先生



宇宙背景放射は全天で非常に等方的 → 変じゃない？



宇宙の2点 A, B は過去において因果関係がない
→ 背景放射も全天において因果関係がないはず



様々な問題点を解決可能だが、観測的検証は難しい

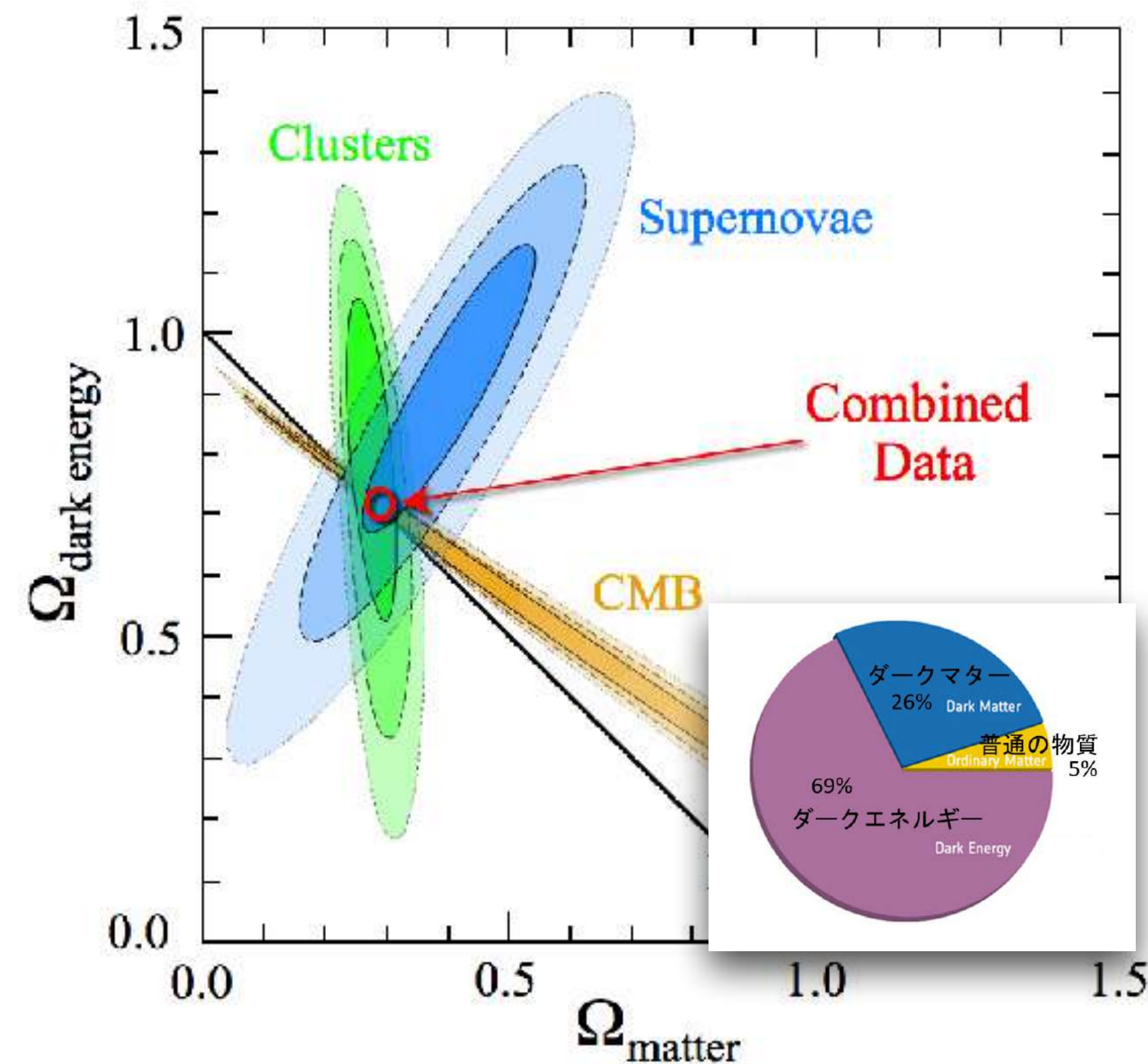
副教材: 佐藤文隆「宇宙物理」1-1章と1-6章の内容 (少し違う視点けど)

現在の宇宙論の標準モデル: Λ -CDM モデル

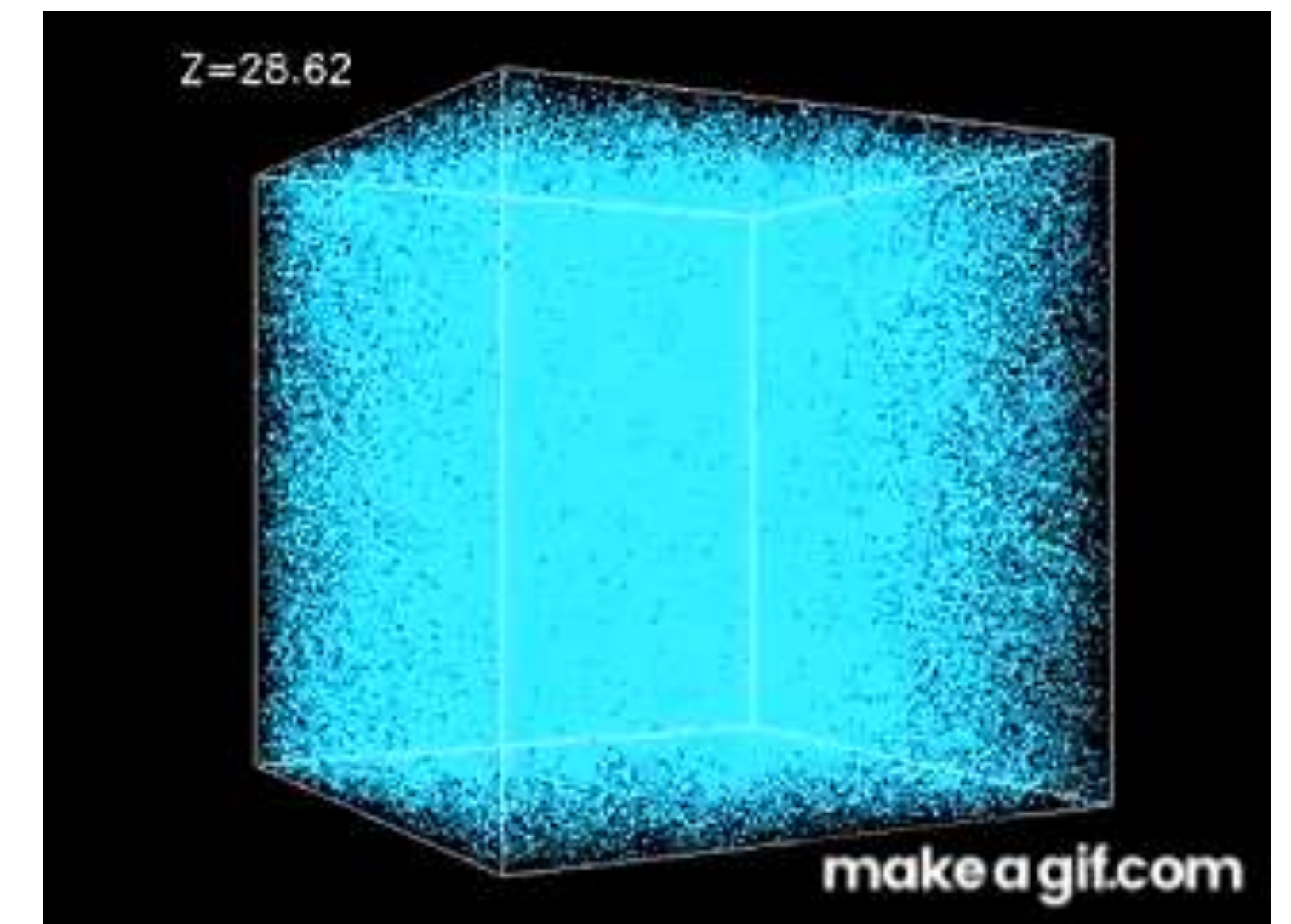
宇宙項(暗黒エネルギー)ありの冷たい暗黒物質モデル: 宇宙の 90% 以上はダーク(正体不明)



小沢健二×峯田和伸「ある光」



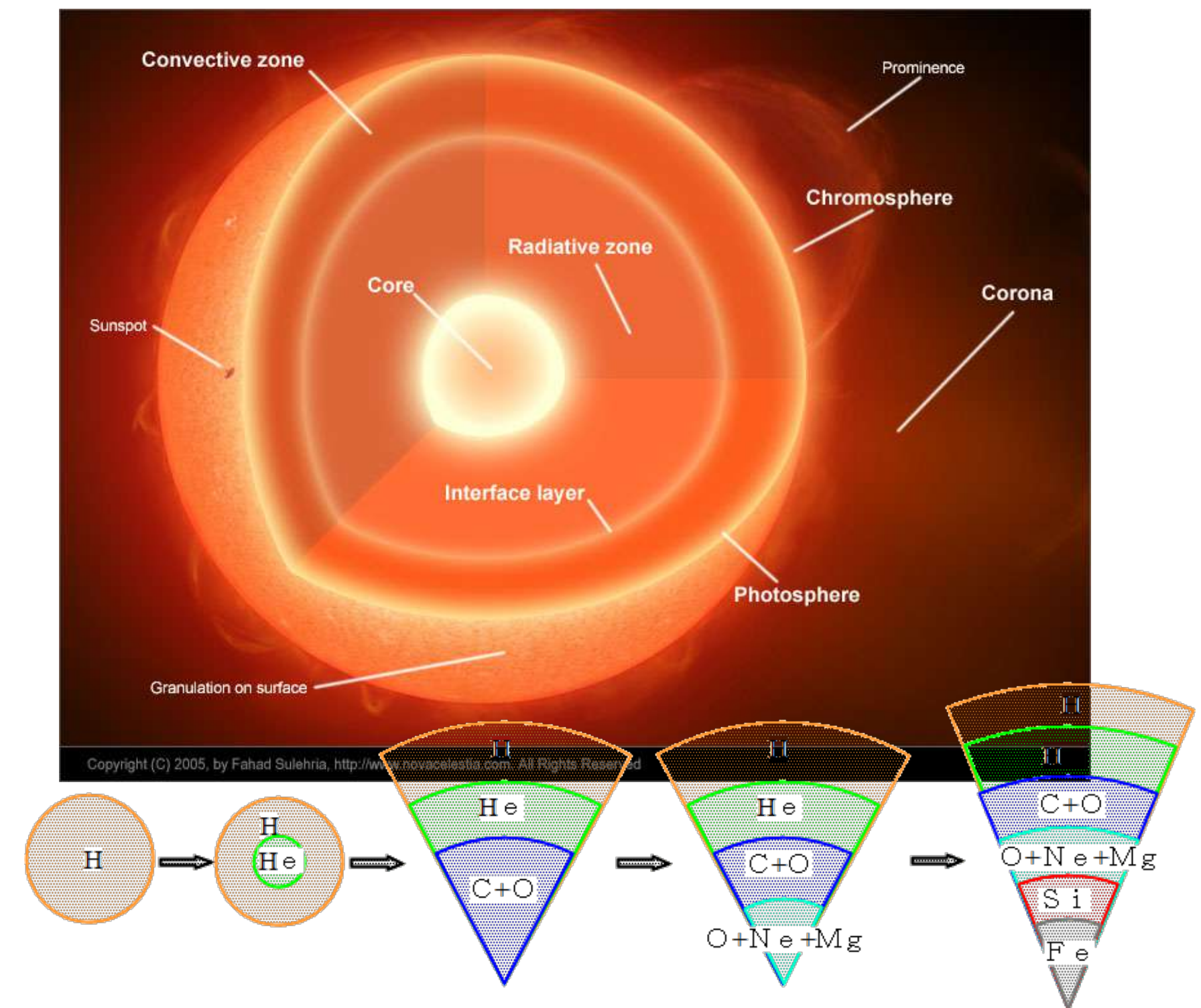
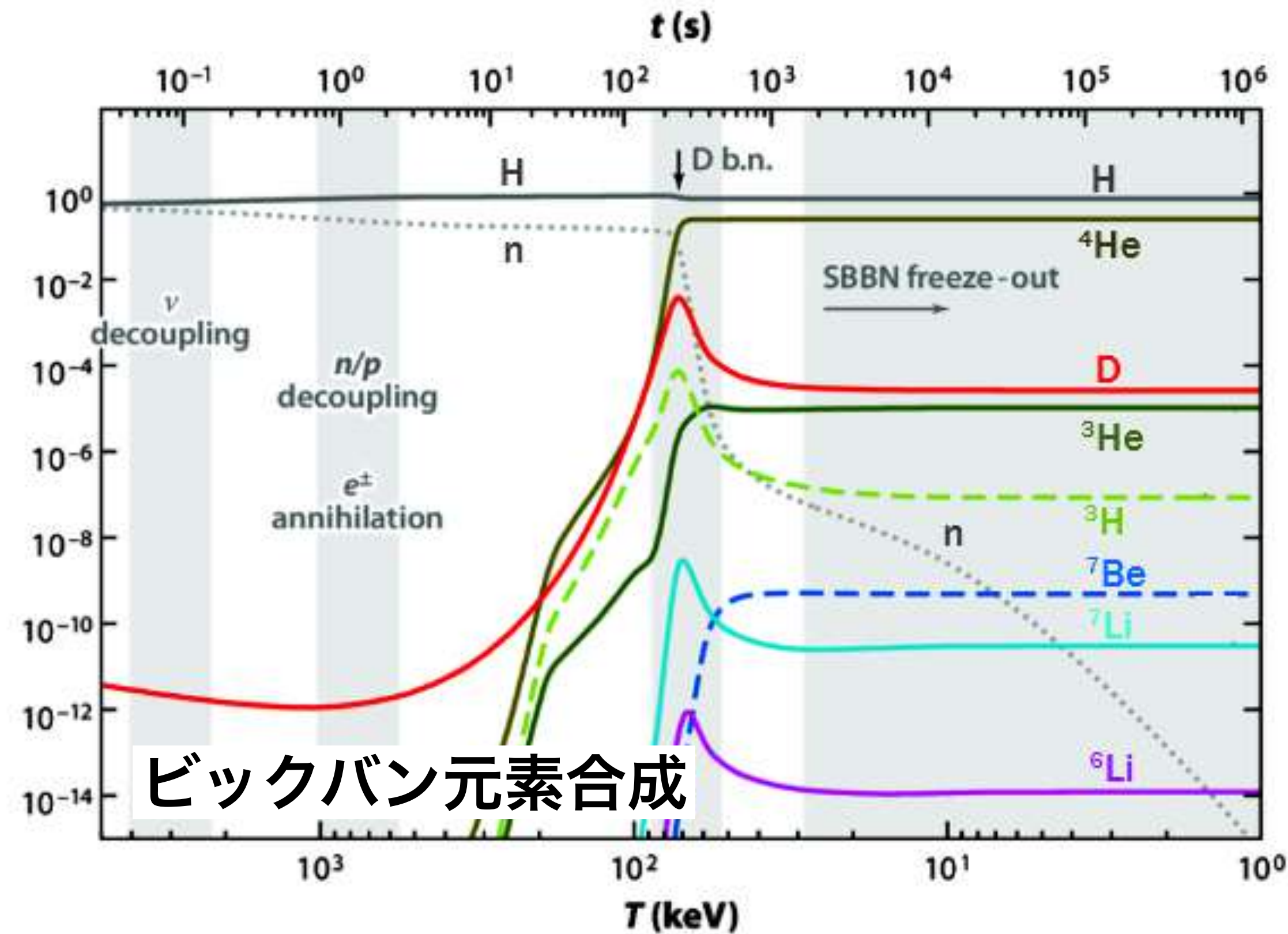
ビッグバン、インフレーション、暗黒物質などを考慮して、現在の宇宙を計算で再現



様々な観測から宇宙誕生時の条件が示され、大規模理論シミュレーションで宇宙が再現されている

宇宙の化学進化 (重い元素の供給歴)

ビッグバンでは、重い元素ができない → 天体内部で合成されてばら撒かれてきた



重い元素の起源や恒星進化に関しては、今後の講義で扱います

ちょっと変わった宇宙論「人間原理」

「我思う、ゆえに我あり」の宇宙物理学バージョン

弱い人間原理

宇宙が若すぎると十分な元素がないし、年を取りすぎると安定した惑星系がなくなる

→ 今の宇宙では、宇宙年齢 約138億年程度が人類の存在に最適

強い人間原理

知的生命体が存在し得ないような宇宙は観測され得ない

→ 宇宙は、知的生命体が存在するような構造をしていなければならない

関連した話 by ホーキング

宇宙の時間が逆転する可能性はあるかもしれないが、人類に観測し得ない

ちょっと変わった宇宙論「人間原理」

少し最近の話題: 観測で得られた宇宙項 Λ は実は、小さすぎる? → 人間原理で議論

素粒子理論から予測される宇宙項は観測されたものより、少なくとも $\sim 10^{50}$ 倍大きい
→ 一方で、この宇宙の小さすぎる宇宙項でなければ、人類は存在できないのでは?

Lethal radiation from nearby supernovae helps to explain the small cosmological constant

Abstract

The observed value Λ_{obs} of the cosmological constant Λ is extremely smaller than theoretical expectations, and the anthropic argument has been proposed as a solution to this problem because galaxies do not form when $\Lambda \gg \Lambda_{\text{obs}}$. However, the contemporary galaxy formation theory predicts that stars form even with a high value of $\Lambda/\Lambda_{\text{obs}} \sim 50$, which makes the anthropic argument less persuasive. Here we calculate the probability distribution of Λ using a model of cosmological galaxy formation, considering extinction of observers caused by radiation from nearby supernovae. The life survival probability decreases in a large Λ universe because of higher stellar density. Using a reasonable rate of lethal supernovae, we find that the mean expectation value of Λ can be close to Λ_{obs} , and hence this effect may be essential to understand the small but nonzero value of Λ . It is predicted that we are located on the edge of habitable regions about stellar density in the Galaxy, which may be tested by future exoplanet studies.

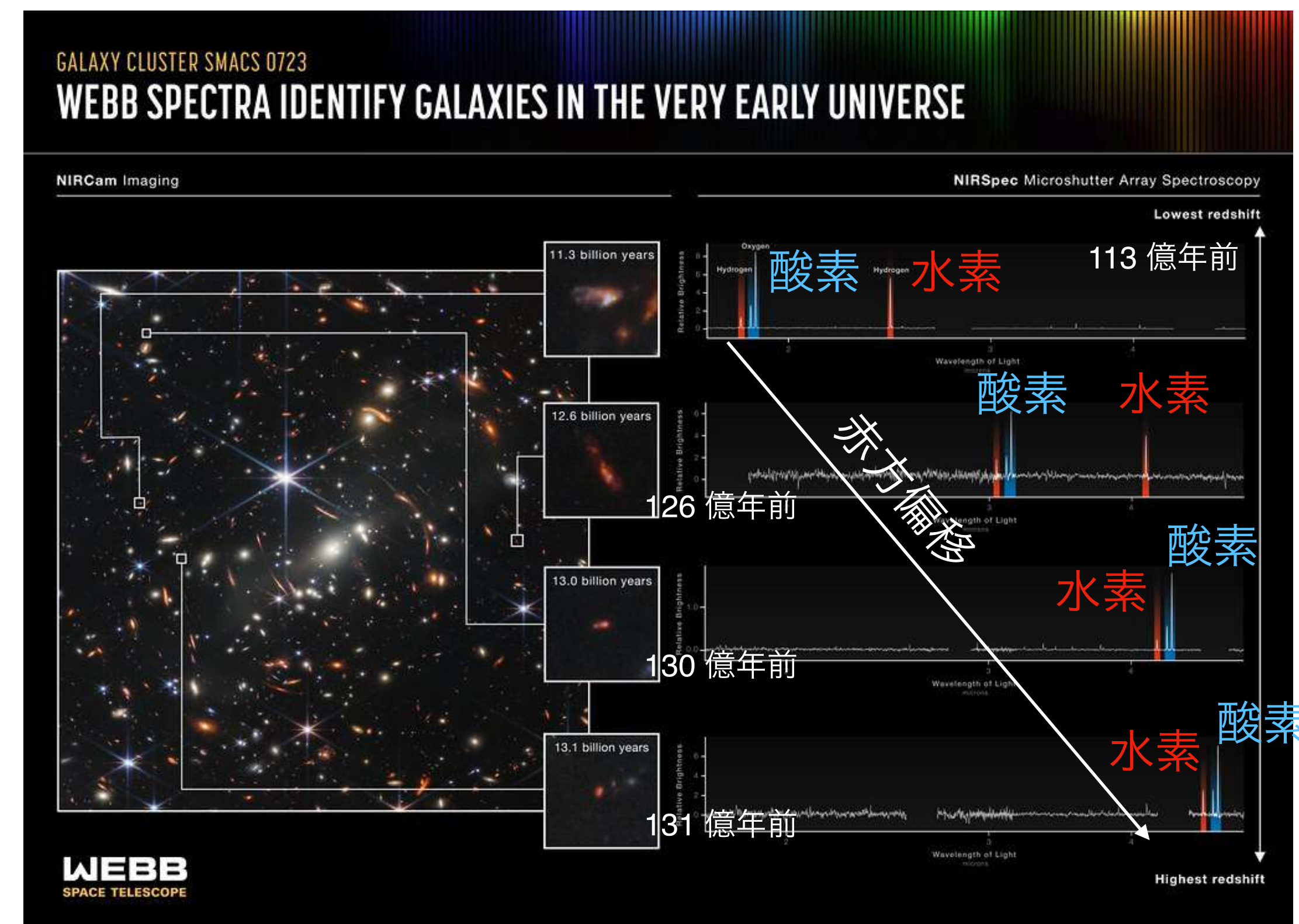
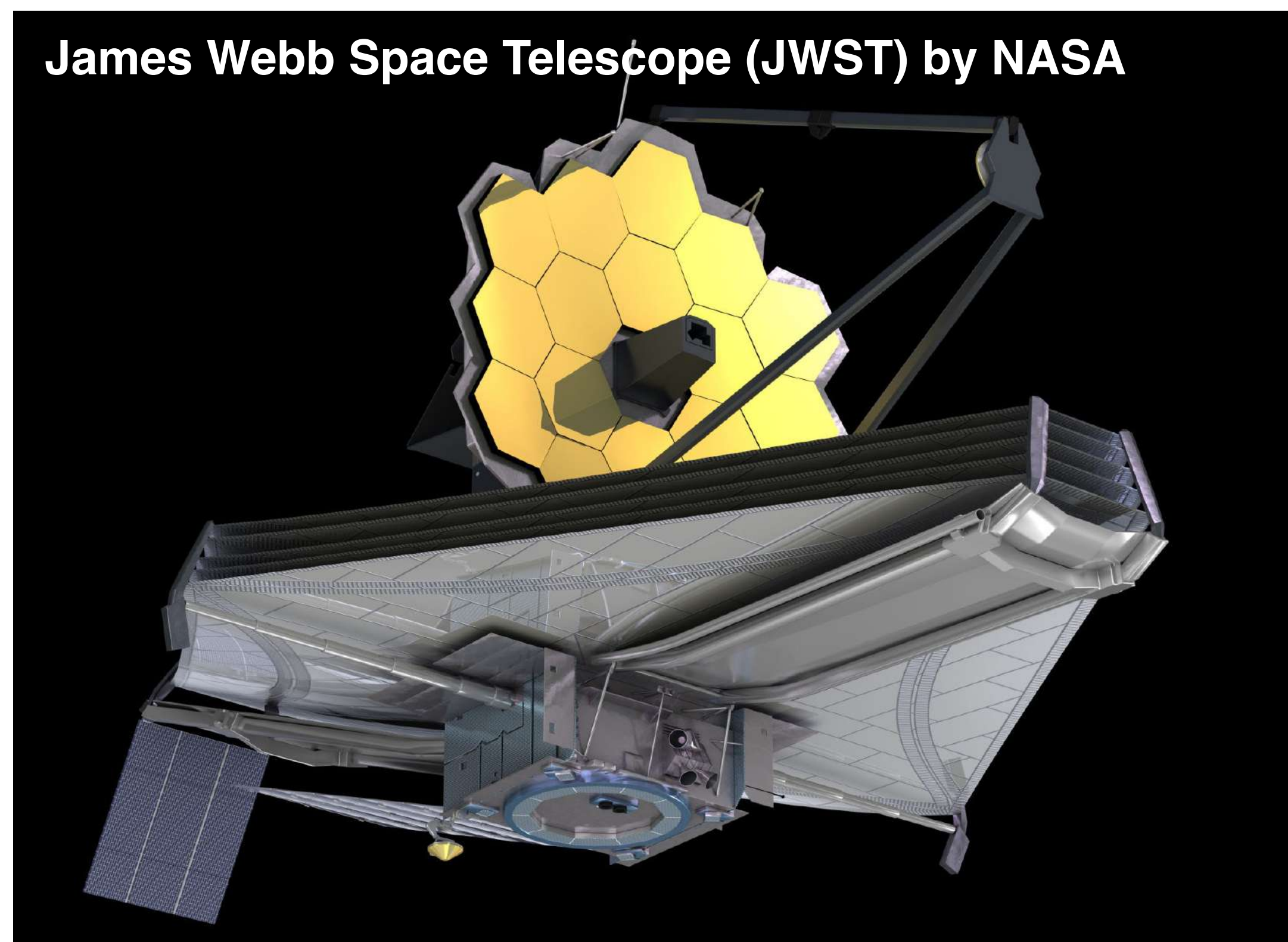
Totani et al. (2019)

要約: 人間原理による制限が弱まりつつあったが、
近傍超新星の生物絶滅が効いてやっぱり重要かも



現在の遠方宇宙の最前線: James Webb Space Telescope (JWST)

約130億年前の宇宙の姿が今まさに見え始めている！



宇宙誕生 数億年で銀河・銀河団の形成し始め、その中で星も生まれ死んでいる

→ 現在の宇宙形成を理解する上で大きな一歩

まとめ: 人類の予想をことごとく裏切ってきた宇宙像

1. もともと、宇宙は静止した動かないものとして考えられていた
2. 一般相対論は、「動的」な宇宙を予言
3. 観測から宇宙は膨張していた → つまり、始まりがあった？
4. ビックバン宇宙論の誕生と宇宙背景放射による検証
5. ビックバン宇宙論の矛盾点 → インフレーション宇宙論
6. ビックバンだけでは宇宙の元素は賄えない → 宇宙の化学進化