

生命の起源と宇宙論/
ダークエネルギーと人間原理/
高速電波バースト

(Origin of Life and Cosmology / Dark Energy and
Anthropic Principle / Fast Radio Bursts)

戸谷 友則 (TOTANI, Tomonori)

東京大学・理学系・天文学専攻 Dept. Astronomy, Univ. Tokyo

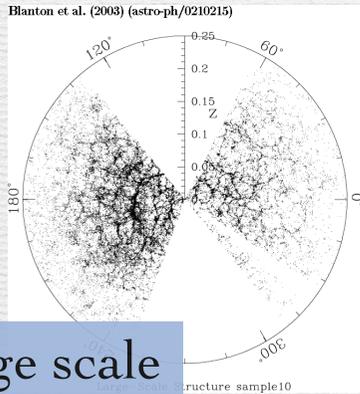
31th ICEPP symposium
Feb. 16-19, 2025, Shiga, Nagano

自己紹介 / 本日の内容

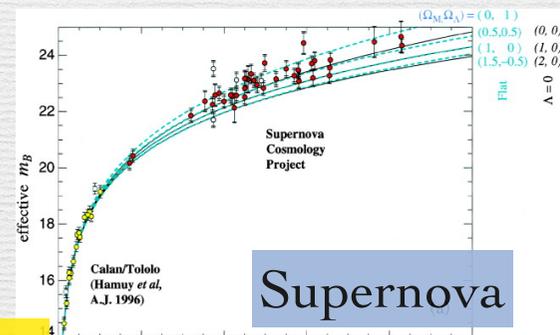
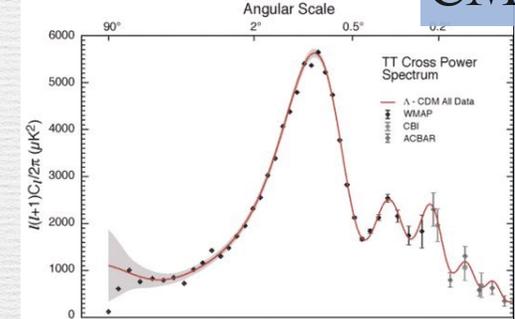
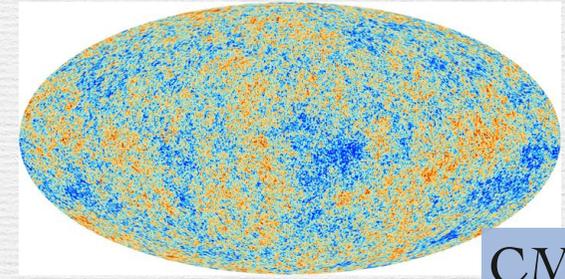
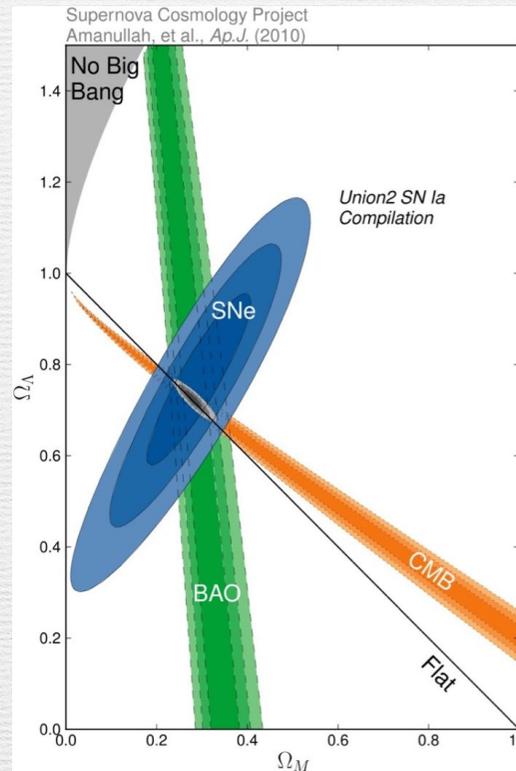
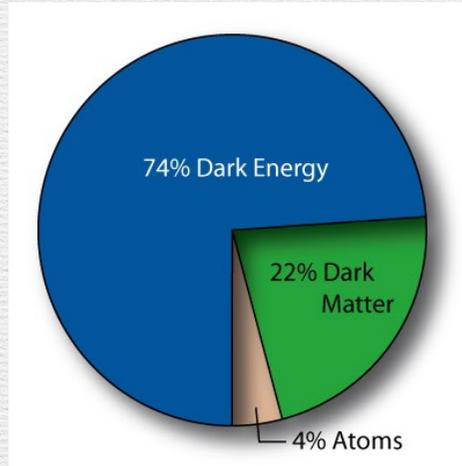
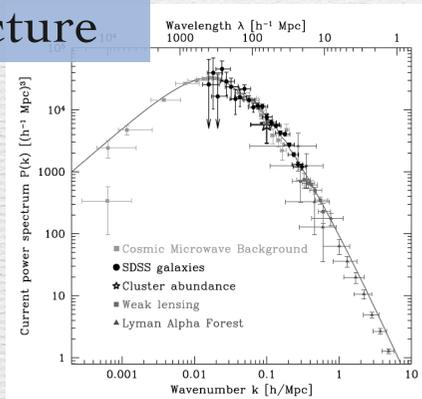
- 研究分野：天文学、宇宙物理学（主に理論、時々観測も）
 - 突発天体、高エネルギー天体物理学
 - Supernovae, gamma-ray bursts, fast radio bursts
 - Galaxy formation/evolution
 - Cosmology
- 最近の関心
 - 生命の起源
- 今日の内容：
 - Part I: ダークエネルギー/宇宙定数と人間原理
 - Part II: 生命の起源と宇宙論
 - Part III: 高速電波バースト Fast radio bursts (FRBs)の最近の話題

Part I
ダークエネルギー (宇宙定数 Λ) vs. 人間原理

the concordance Λ CDM cosmology



large scale structure



Supernova

The observed universe is best described with a non-zero cosmological constant Λ

What is Λ ?

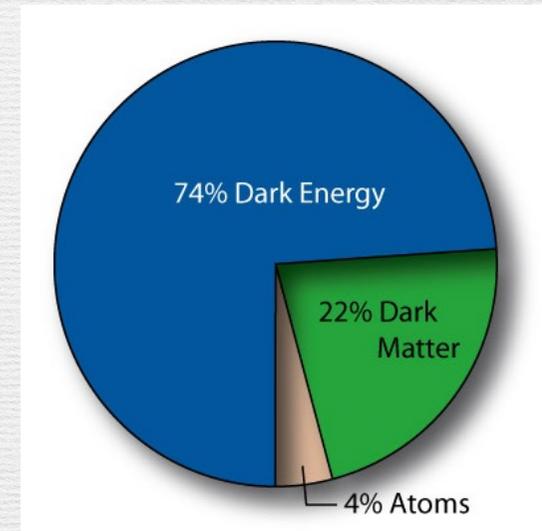
The Einstein eq.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\mathcal{R}g_{\mu\nu} \equiv G_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

Space-time curvature

Energy density
of matter

- Energy-momentum tensor proportional to the metric tensor
- Physical meaning: vacuum energy density
- Repulsive force in contrast to matter gravity
 - Static universe possible (Einstein 1917)
 - Exponential (accelerated) expansion $\propto \exp(Ht)$



Theoretical Problem of Cosmological Constant

- Problem 1: the smallness
 - Λ is vacuum energy density $\rho_{\text{vac}} \sim (\text{energy})^4$ in the natural units from the viewpoint of quantum field theory
 - observed $\rho_{\Lambda} \sim \rho_{\text{matter}} \sim (\text{meV})^4$ in the present time we exist
 - $\rho_{\text{vac}} \sim (\text{Planck scale} = (\hbar c^5/2\pi G)^{1/2} \sim 10^{19} \text{ GeV})^4 \sim 10^{120} \rho_{\text{matter}}$
 - $\rho_{\text{vac}} \sim (\text{electroweak scale} = 100 \text{ GeV})^4 \sim 10^{50} \rho_{\text{matter}}$
- Problem 2: the coincidence
 - There may be some mechanisms to cancel Λ , but its observed value is not exactly zero!
 - furthermore, somehow $\rho_{\Lambda} \sim \rho_{\text{matter}}$ just in our present time
 - no known first-principle-based explanation about this

Proposed models/explanations

- Proposed solutions?
 - the cosmological constant Λ
 - dark energy, a generalized form of vacuum energy
 - e.g. a potential energy of a particle field (like inflation)
 - not necessarily constant, but variable in time
 - modified theory of gravity
- no persuasive solution based on the first principle
 - energy scale too low
 - difficult to explain coincidence
- anthropic argument?

the anthropic argument for Λ

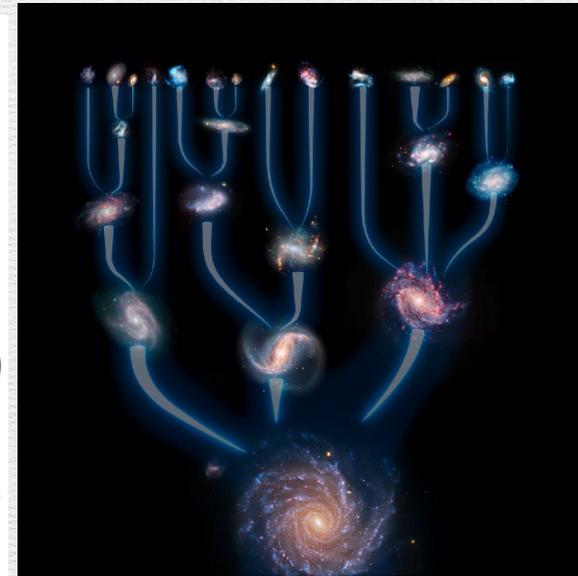
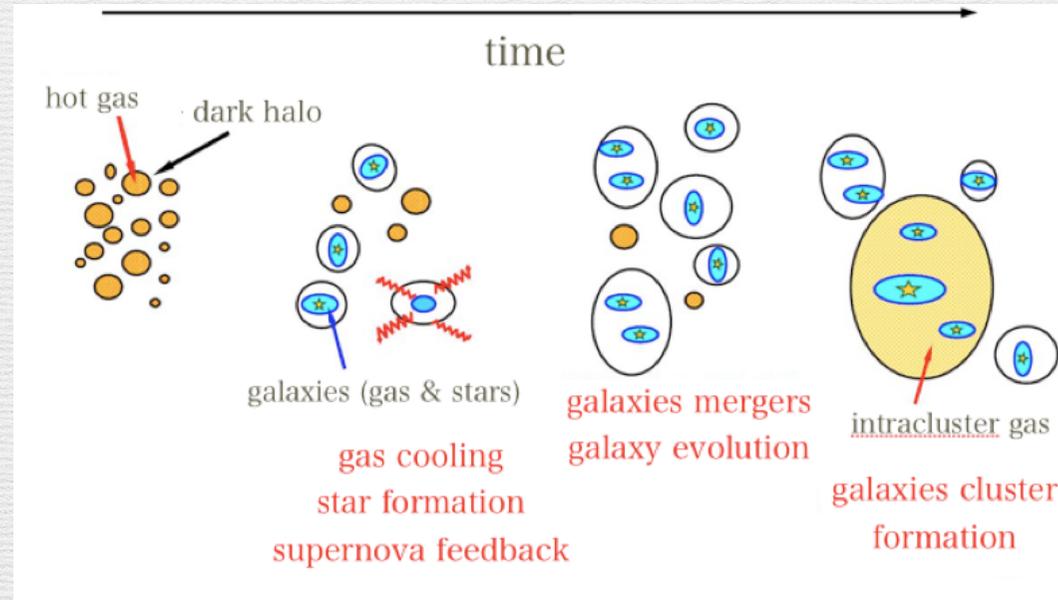
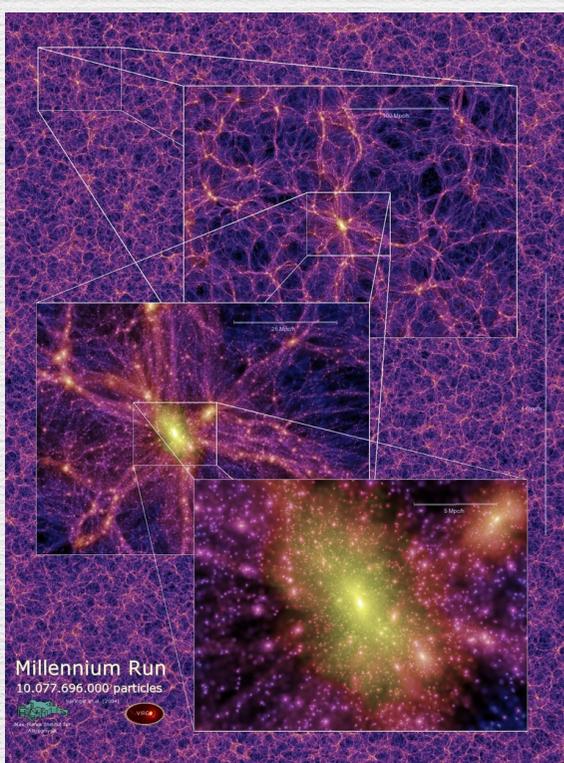
- Λ may be stochastically determined when the universe is born
 - theoretically possible, e.g. multiverse motivated by string theory
- galaxies do not form when $\Lambda \gg \Lambda_{\text{obs}}$, so no observer
 - Barrow and Tipler 1986; Weinberg 1987; Efstathiou 1995; Martel et al. 1998; Garriga et al. 2000; Peacock 2007; ...
- universe will collapse within 10 Gyr when $\Lambda < -\Lambda_{\text{obs}}$, so no observer
- so $|\Lambda| \lesssim \Lambda_{\text{obs}}$ is expected.
 - perhaps the only one explanation of the smallness & coincidence problem without fine tuning

Probability Distribution of Λ ?

- a natural prior probability distribution of Λ : “flat” about Λ
 - $dP_{\text{pri}}/d\Lambda = \text{const. around } \Lambda=0$
 - because physically natural scale of $\Lambda \gg \gg \gg \gg \gg \gg \Lambda_{\text{obs}}$
 - coincidence problem solved: $\Lambda \ll \Lambda_{\text{obs}}$ is statistically disfavored because $P(<\Lambda) \propto \Lambda$
- observable distribution $dP_{\text{obs}}/d\Lambda \propto n(\Lambda) \times dP_{\text{pri}}/d\Lambda$
 - $n(\Lambda)$: number of observers appearing in the universe
 - observable distribution can be calculated by astrophysics!

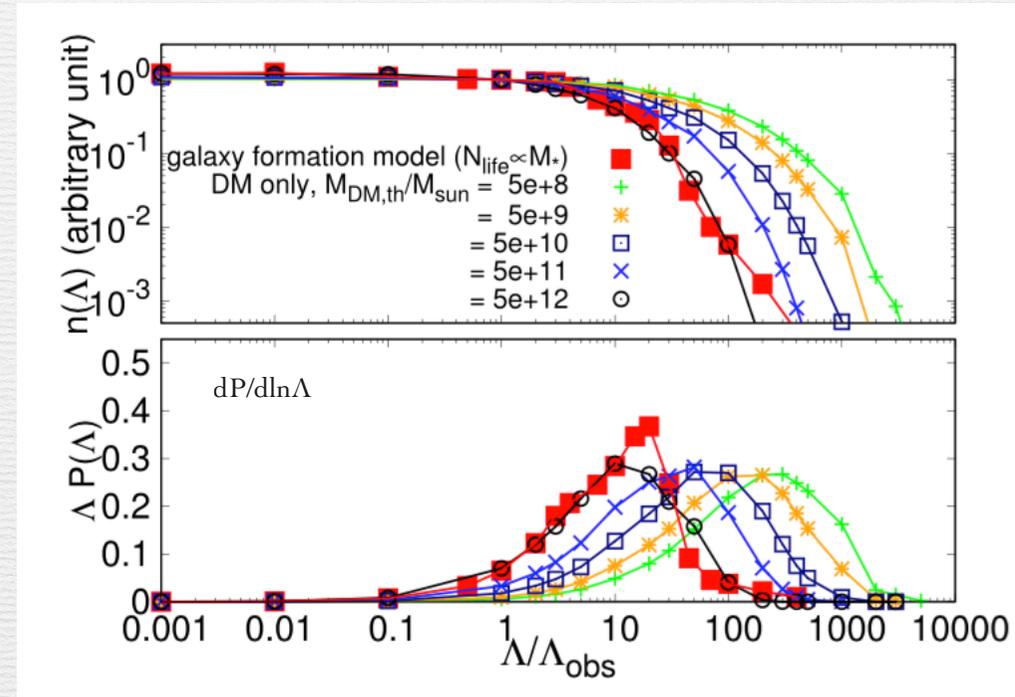
Galaxy formation in the universe

- Driven by cold dark matter
- Formation of dark halos by gravity
- Gas cooling, star formation, and feedbacks
- Theoretical prediction (e.g. galaxy number density) now in good agreement with observations at various redshifts



Λ distribution from galaxy formation theory

- Sudoh, TT+17
 - using a semi-analytic model of galaxy formation
 - assuming $n(\Lambda) \propto$ stellar mass, we found $P(\Lambda < \Lambda_{\text{obs}}) = 6.7\%$, with the distribution peak at $\Lambda/\Lambda_{\text{obs}} \sim 20$
- Barnes+'18
 - using the EAGLE numerical simulation of galaxy formation, they found $P(\Lambda < \Lambda_{\text{obs}}) = 2\%$ and peak at $\Lambda/\Lambda_{\text{obs}} \sim 60$



$P(\Lambda < \Lambda_{\text{obs}})$ to small?

- If we assume that all stars produce an observer equally, the probability of finding the small Λ as observed is small:
 $P(\Lambda < \Lambda_{\text{obs}}) \sim 2\%$
- What options do we have?
 - Forget the anthropic argument. Search other explanations for Λ .
 - Well, we just drew a relatively small odds of 2%.
 - There may be other anthropic effects to make Λ_{obs} smaller?
 - Supernova explosions may be one!

$P(\Lambda < \Lambda_{\text{obs}})$ to small?

- If we assume that all stars produce an observer equally, the probability of finding the small Λ as observed is small:
 $P(\Lambda < \Lambda_{\text{obs}}) \sim 2\%$
- What options do we have?
 - Forget the anthropic argument. Search other explanations for Λ .
 - Well, we just drew a relatively small odds of 2%.
 - There may be other anthropic effects to make Λ_{obs} smaller?
 - Supernova explosions may be one!



$P(\Lambda < \Lambda_{\text{obs}})$ to small?

- If we assume that all stars produce an observer equally, the probability of finding the small Λ as observed is small:
 $P(\Lambda < \Lambda_{\text{obs}}) \sim 2\%$
- What options do we have?
 - Forget the anthropic argument. Search other explanations for Λ .
 - Well, we just drew a relatively small odds of 2%.
 - There may be other anthropic effects to make Λ_{obs} smaller?
 - Supernova explosions may be one!



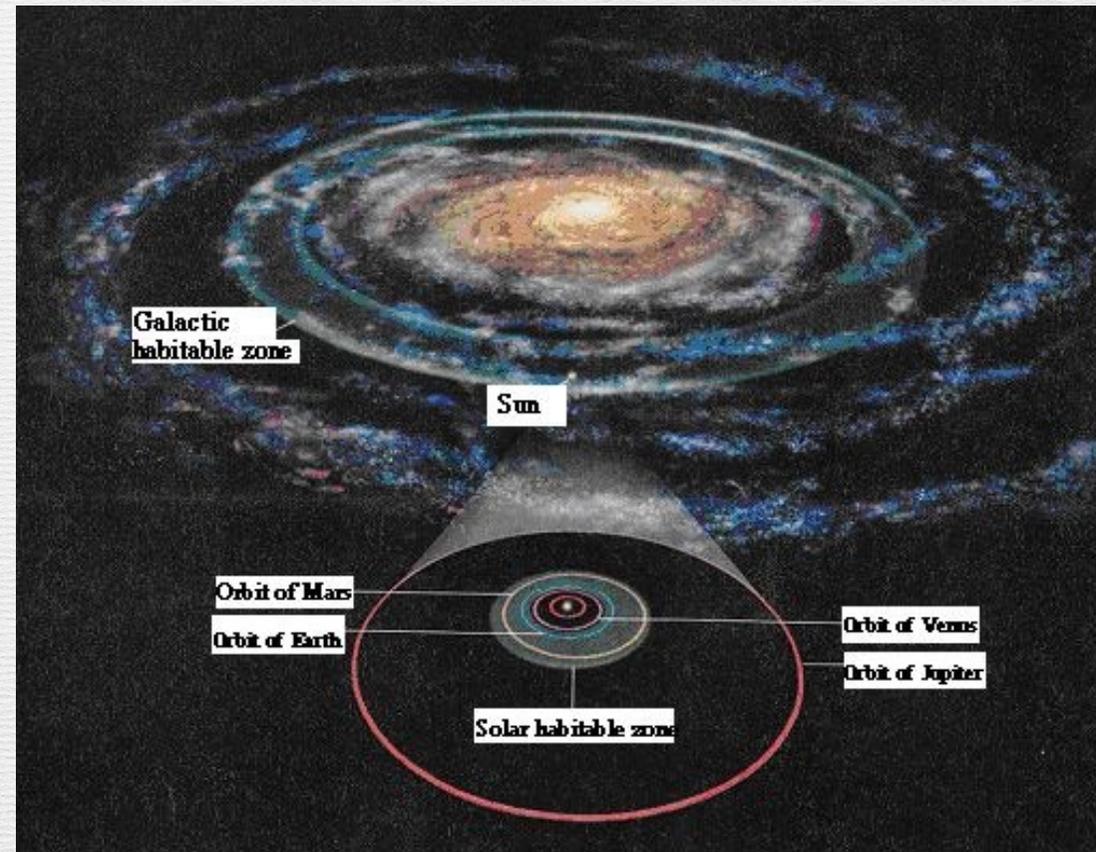
$P(\Lambda < \Lambda_{\text{obs}})$ to small?

- If we assume that all stars produce an observer equally, the probability of finding the small Λ as observed is small:
 $P(\Lambda < \Lambda_{\text{obs}}) \sim 2\%$
- What options do we have?
 - Forget the anthropic argument. Search other explanations for Λ .
 - Well, we just drew a relatively small odds of 2%.
 - There may be other anthropic effects to make Λ_{obs} smaller?
 - Supernova explosions may be one!

the Galactic habitable zone

- habitability depends on:
 - amount of stars
 - sufficient age for evolution of life
 - sufficient metal abundance for rocky planet formation
 - no hazardous supernovae / gamma-ray bursts
 - ...

Gonzalez+'01; Lineweaver+'04; ...

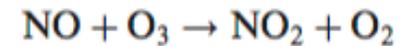


effect on life by a nearby supernova

- a supernova within ~ 10 pc would have a significant impact on the ozone layer of Earth

Ruderman 74; Whitten+'76; Reid+'78; Gehrels+'03; ...

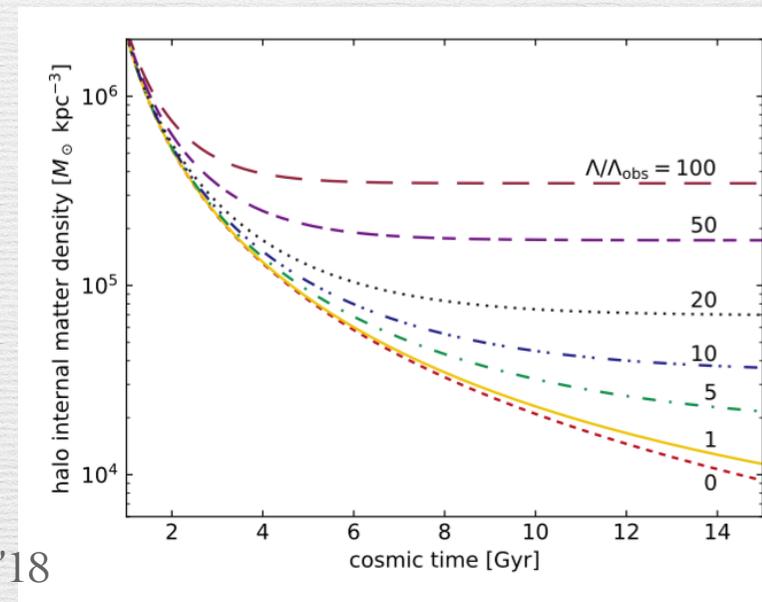
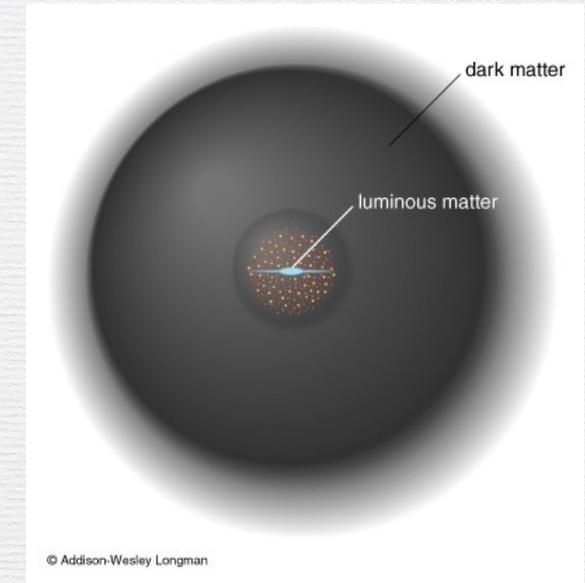
- gamma-ray/cosmic-ray radiation produces free N atoms, subsequently producing nitrogen oxides (NO_x) in the atmosphere
- nitrogen oxides catalytically destroy ozones



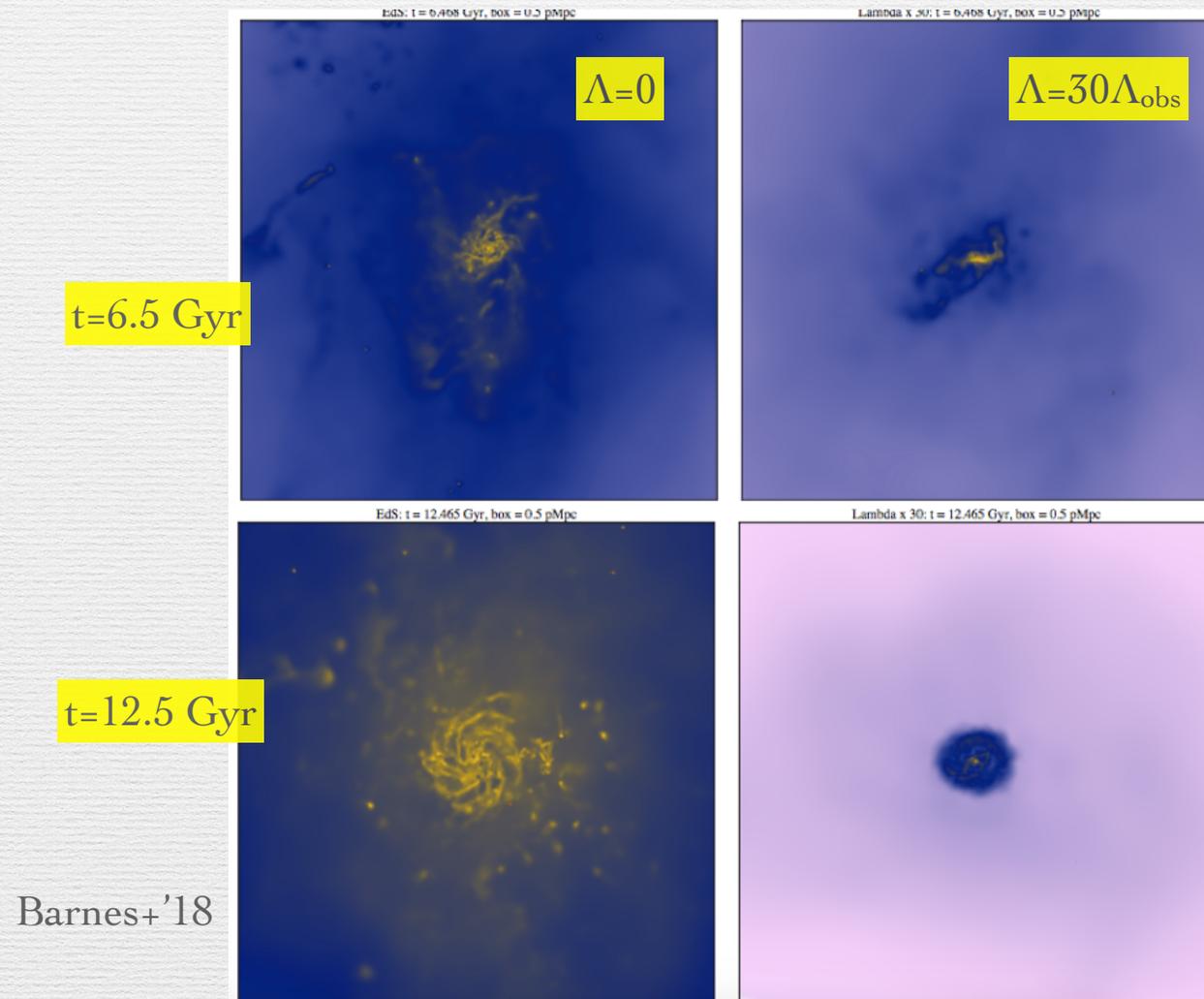
- land organisms could be significantly damaged
- the number of SNe within 10 pc from the Sun?
 - about one in 0.5 Gyr (time after the complex land organisms emerged on Earth)
 - An interesting coincidence! — we are living on the edge of habitable region about stellar density, implying that the supernova effect is actually working?

Stellar density in galaxy formation

- Halo virial density $\rho_{\text{vir}} \sim 200 \rho_{\text{universe}}$ at any z
- $R_{\text{disk}} \sim 0.1 R_{\text{vir}}$ by angular momentum conservation
- When Λ is large, galaxy formation stops earlier
 - e.g. if $\Lambda = 125 \Lambda_{\text{obs}}$, galaxy would not form after $z \sim 4$ ($\rho \propto (1+z)^3 \sim 125$)
- If $\Lambda/\Lambda_{\text{obs}} = 50$, internal density of any halo is ~ 20 times larger than the halo forming at ~ 10 Gyr in our universe.

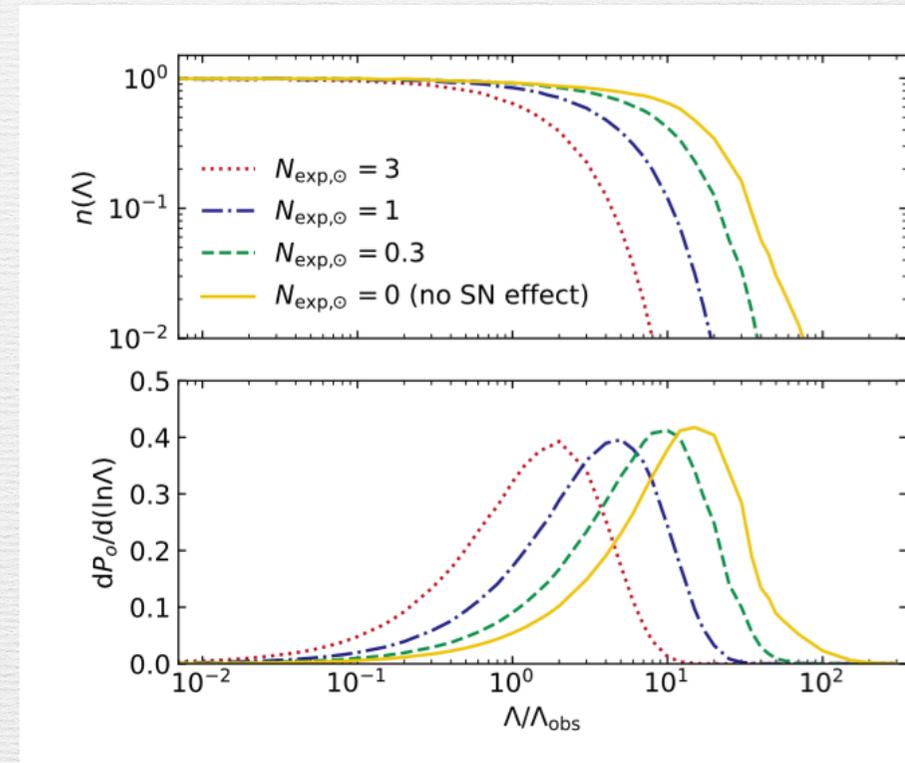


galaxy formation simulation in high Λ universe



probability distribution of Λ with the nearby SN effect

- N_{exp} : the expected number of lethal supernova around a star during the time of evolution of life to an observer
 - assuming $N_{\text{exp}} \propto \rho_{\text{star}} \propto \rho_{\text{vir}}$
 - life survival probability: $\exp(-N_{\text{exp}})$ (Poisson distrib.)
- controlling model parameter: $N_{\text{exp},\odot}$ (N_{exp} for the Sun)
 - $N_{\text{exp},\odot} \sim O(1)$ from SN rate around the Sun
- with $N_{\text{exp},\odot} = 0 \rightarrow 1 \rightarrow 3$,
 - distribution peaks at $\Lambda/\Lambda_{\text{obs}} \sim 20 \rightarrow 4 \rightarrow 2$
 - $P(\Lambda < \Lambda_{\text{obs}})$ increases to $6 \rightarrow 19 \rightarrow 41\%$



Part I: Concluding remarks

- 知的生命体が星の数に単純に比例して出現するなら、人間原理から期待されるラムダの確率分布は $P(\Lambda < \Lambda_{\text{obs}}) \sim 2\text{-}6\%$
- しかし $P(\Lambda < \Lambda_{\text{obs}})$ を大きくする効果は他にもありそう
 - e.g. 例：恒星数密度が高い領域での、近傍の超新星による生命絶滅
- もし将来、物理の基礎理論により、宇宙誕生時に Λ がランダムに決まるということが確立すれば、人間原理によってダークエネルギー問題は解決する

Part II
生命の起源と宇宙論

地球外生命の存在確率？

- ・ドレイクの式（銀河系のなかに、文明を持った知的生命はいくつあるか？）

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

From wikipedia

名前	定義
R_*	人類がいる銀河系の中で1年間に誕生する星（恒星）の数
f_p	ひとつの恒星が惑星系を持つ割合（確率）
n_e	ひとつの恒星系が持つ、生命の存在が可能となる状態の惑星の平均数
f_l	生命の存在が可能となる状態の惑星において、生命が実際に発生する割合（確率）
f_i	発生した生命が知的なレベルまで進化する割合（確率）
f_c	知的なレベルになった生命体が星間通信を行う割合
L	知的生命体による技術文明が通信をする状態にある期間（技術文明の存続期間）

- ・ハビタブル惑星において、実際に生命が発生する確率 = f_l の値は？
 - ・※ 典型的時間スケール（~10億年）の間に、非生物的に生命が生まれる事象の回数期待値と考えれば、 $f_l > 1$ もありうる

地球外生命の存在確率？

- ・ドレイクの式（銀河系のなかに、文明を持った知的生命はいくつあるか？）

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

From wikipedia

名前	定義
R_*	人類がいる銀河系の中で1年間に誕生する星（恒星）の数
f_p	ひとつの恒星が惑星系を持つ割合（確率）
n_e	ひとつの恒星系が持つ、生命の存在が可能となる状態の惑星の平均数
f_l	生命の存在が可能となる状態の惑星において、生命が実際に発生する割合（確率）
f_i	発生した生命が知的なレベルまで進化する割合（確率）
f_c	知的なレベルになった生命体が星間通信を行う割合
L	知的生命体による技術文明が通信をする状態にある期間（技術文明の存続期間）

- ・ハビタブル惑星において、実際に生命が発生する確率 = f_l の値は？
 - ・※ 典型的時間スケール（~10億年）の間に、非生物的に生命が生まれる事象の回数期待値と考えれば、 $f_l > 1$ もありうる

物理学者/天文学者と生命の起源

シュレーディンガー

ホイール

生命とは何か

物理的にみた生細胞

シュレーディンガー 著

岡 小天・鎮目恭夫 訳



量子力学を創造し、原子物理学の基礎をつくった著者が追究した生命の本質——分子生物学の生みの親となった20世紀の名著。生物の現象ことに遺伝のしくみと染色体行動における物質の構造と

法則を物理学と化学で説明し、生物におけるその意義を究明する。負のエントロピー論など今も熱い議論の渦中にある科学者の本懐を示す古典。



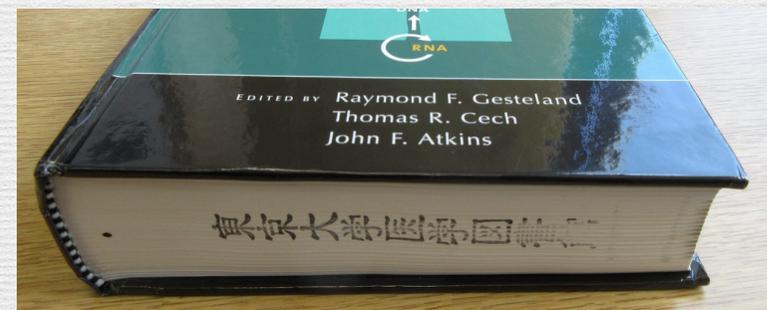
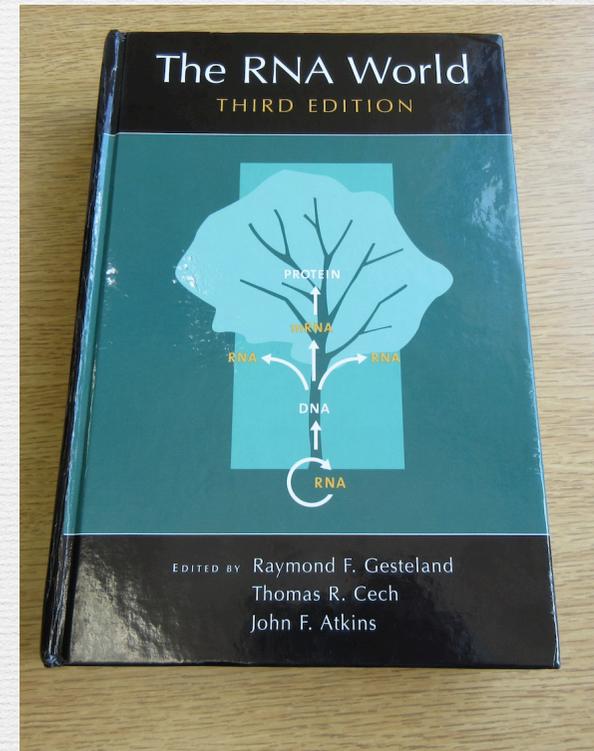
青 946-1
岩波文庫



パンスペルミア説など

物理学者/天文学者と生命の起源

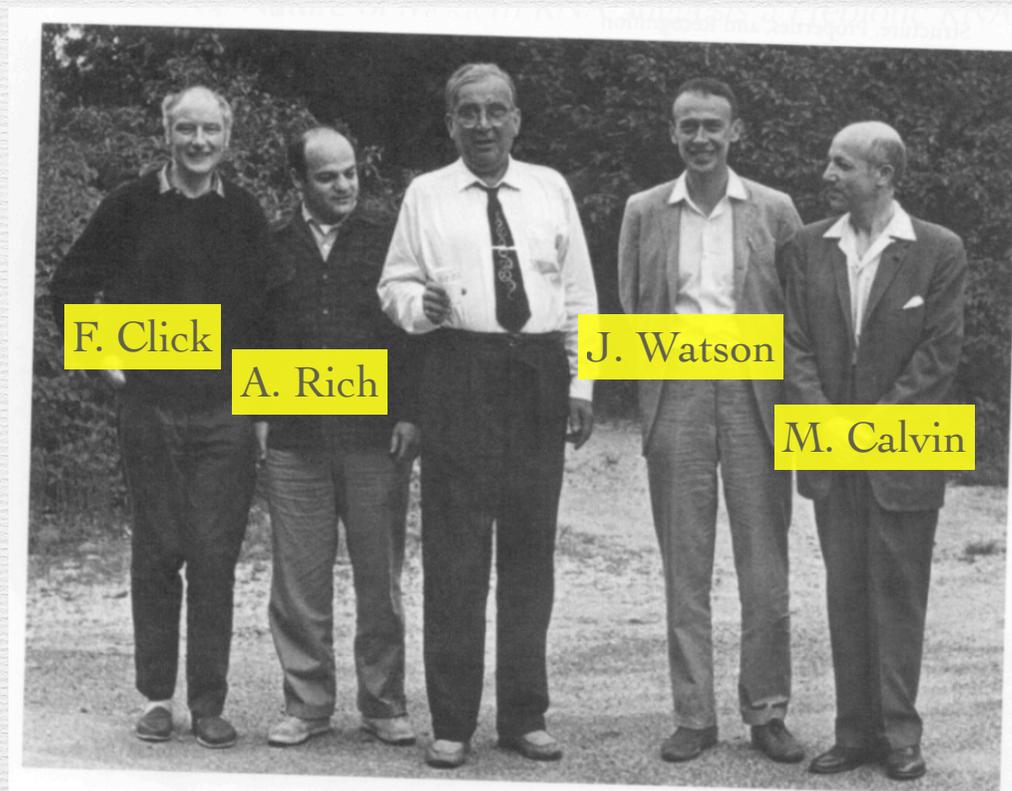
- 生命の起源の研究を始めて、RNA ワールドの本を調べる必要が出て、「東大医学部図書館」に初めて入った
- その最初のページに載っていた写真にびっくり！



物理学者/天文学者と生命の起源

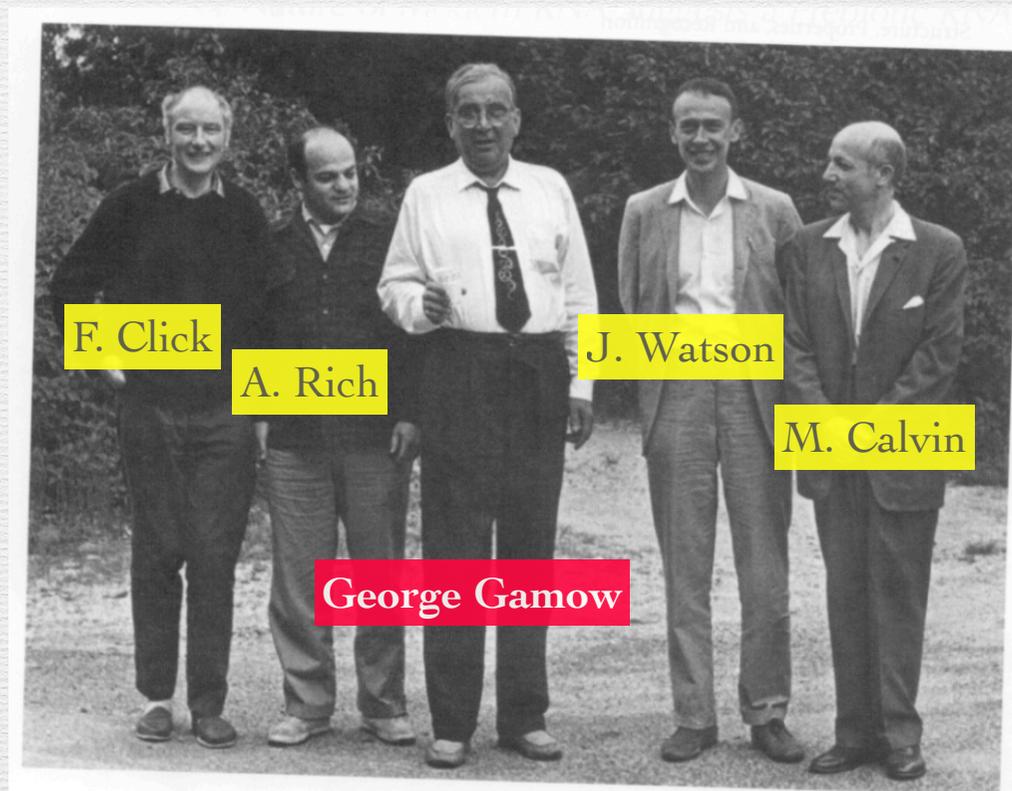


物理学者/天文学者と生命の起源



物理学者/天文学者と生命の起源

- ・ 1963年、ワトソン、クリックら（DNAの発見者）とともに「RNA タイクラブ」を創設



RNAに関するガモフの仮説

- RNA 遺伝情報は A, C, G, U の 4 文字で書かれている
- 3文字単語 ($4^3 = 64$ 通り) で、20種類の生体アミノ酸の種類を指定

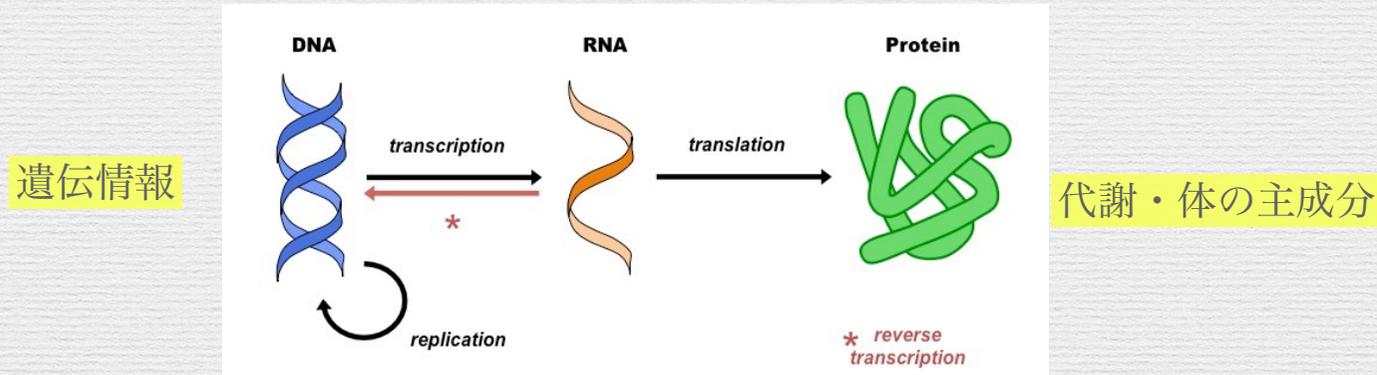
- ガモフの仮説：順番を問わない3文字の「組み合わせ」で決まるなら、組み合わせ数は $(3+4-1)! / (3! 3!) = 20$ 通り
→生体アミノ酸の種類数!?

コドン表

		2 番目				
		U	C	A	G	
1 番目	U	UUU フェニルアラニン	UCU セリン	UAU チロシン	UGU システイン	U
		UUC	UCC	UAC	UGC	C
		UUA ロイシン	UCA	UAA 停止	UGA 停止	A
		UUG	UCG	UAG	UGG トリプトファン	G
	C	CUU ロイシン	CCU プロリン	CAU ヒスチジン	CGU アルギニン	U
		CUC	CCC	CAC	CGC	C
		CUA	CCA	CAA グルタミン	CGA	A
		CUG	CCG	CAG	CGG	G
	A	AUU イソロイシン	ACU トレオニン	AAU アスパラギン	AGU セリン	U
		AUC	ACC	AAC	AGC	C
		AUA	ACA	AAA リジン	AGA アルギニン	A
		AUG メチオニン・開始	ACG	AAG	AGG	G
G	GUU バリン	GCU アラニン	GAU アスパラギン酸	GGU グリシン	U	
	GUC	GCC	GAC	GGC	C	
	GUA	GCA	GAA グルタミン酸	GGA	A	
	GUG	GCG	GAG	GGG	G	

生命とは何か？

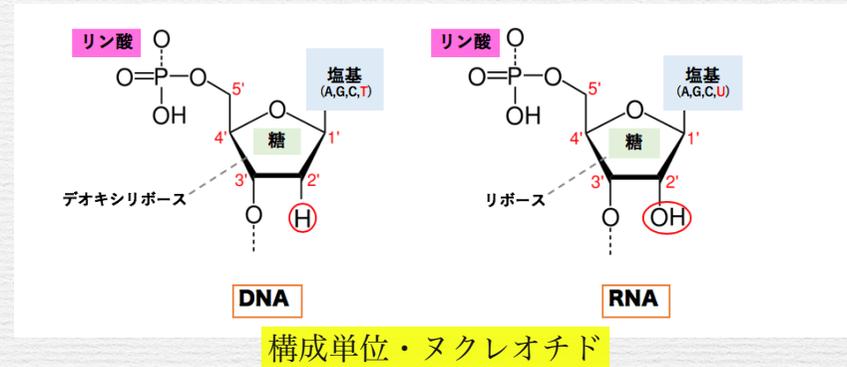
- 生命現象の本質 = 膜につつまれた DNA+タンパク質
 - DNAの遺伝子情報に基づくタンパク質合成と自己複製
 - 生命現象の主体はタンパク質とそれが行う代謝
- 地球生命の「セントラル・ドグマ」



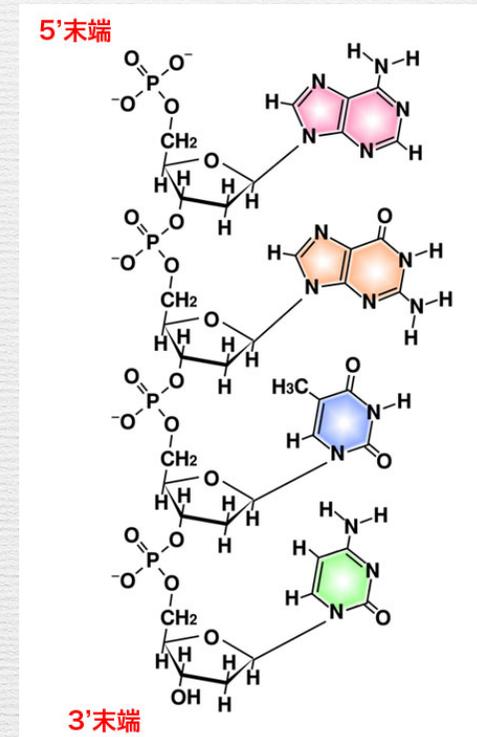
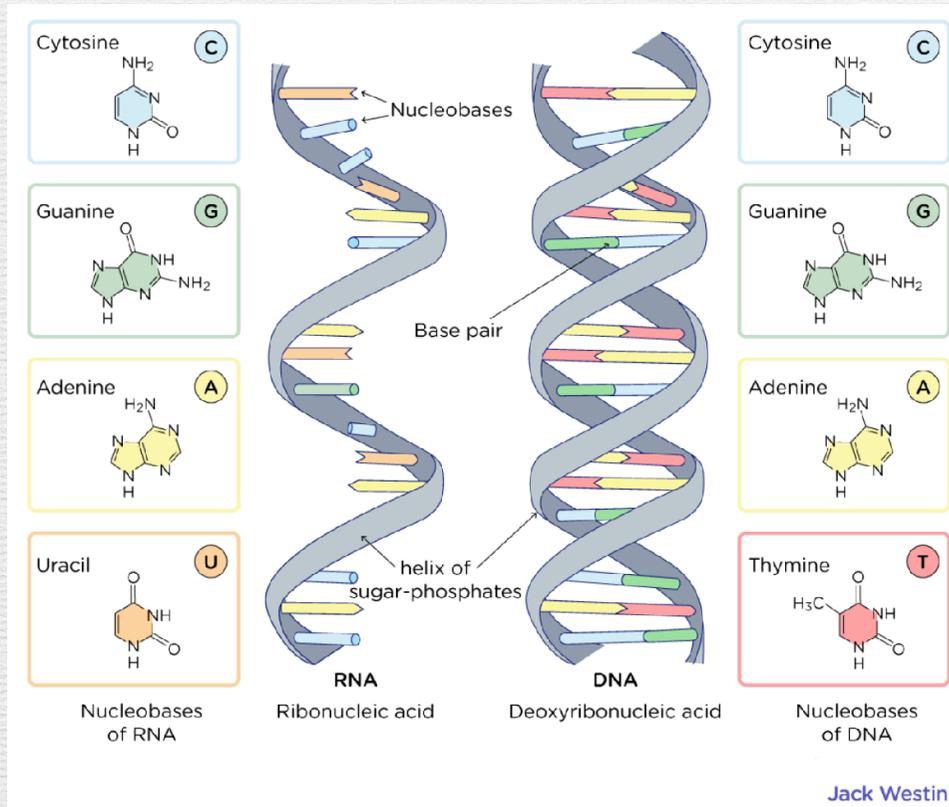
<https://ib.bioninja.com.au>

DNA と RNA

- ・ 4種のヌクレオチドが鎖状につながったもの
- ・ DNA は二重らせん
- ・ RNA は一本鎖



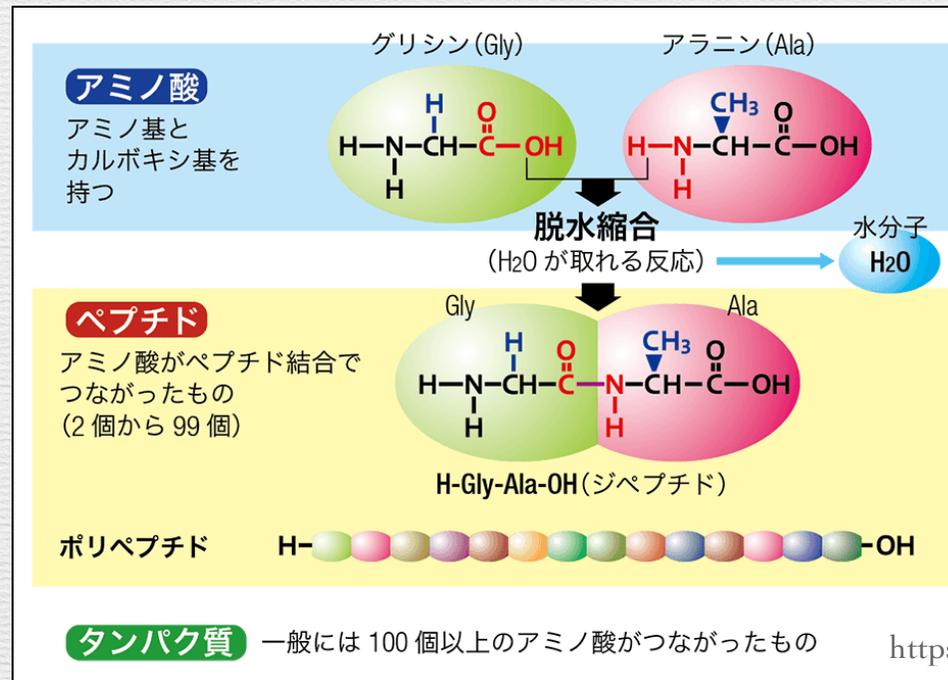
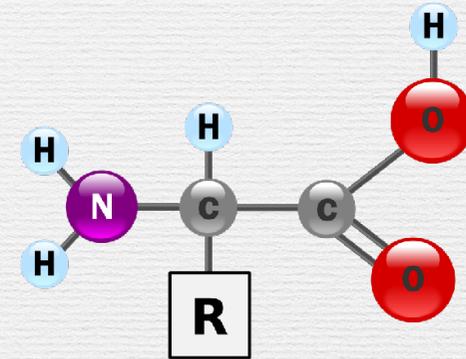
<https://lifescience-study.com/1-de-novo-synthesis-of-purine-nucleotides/>



http://nsgene-lab.jp/dna_structure/basic_structure/

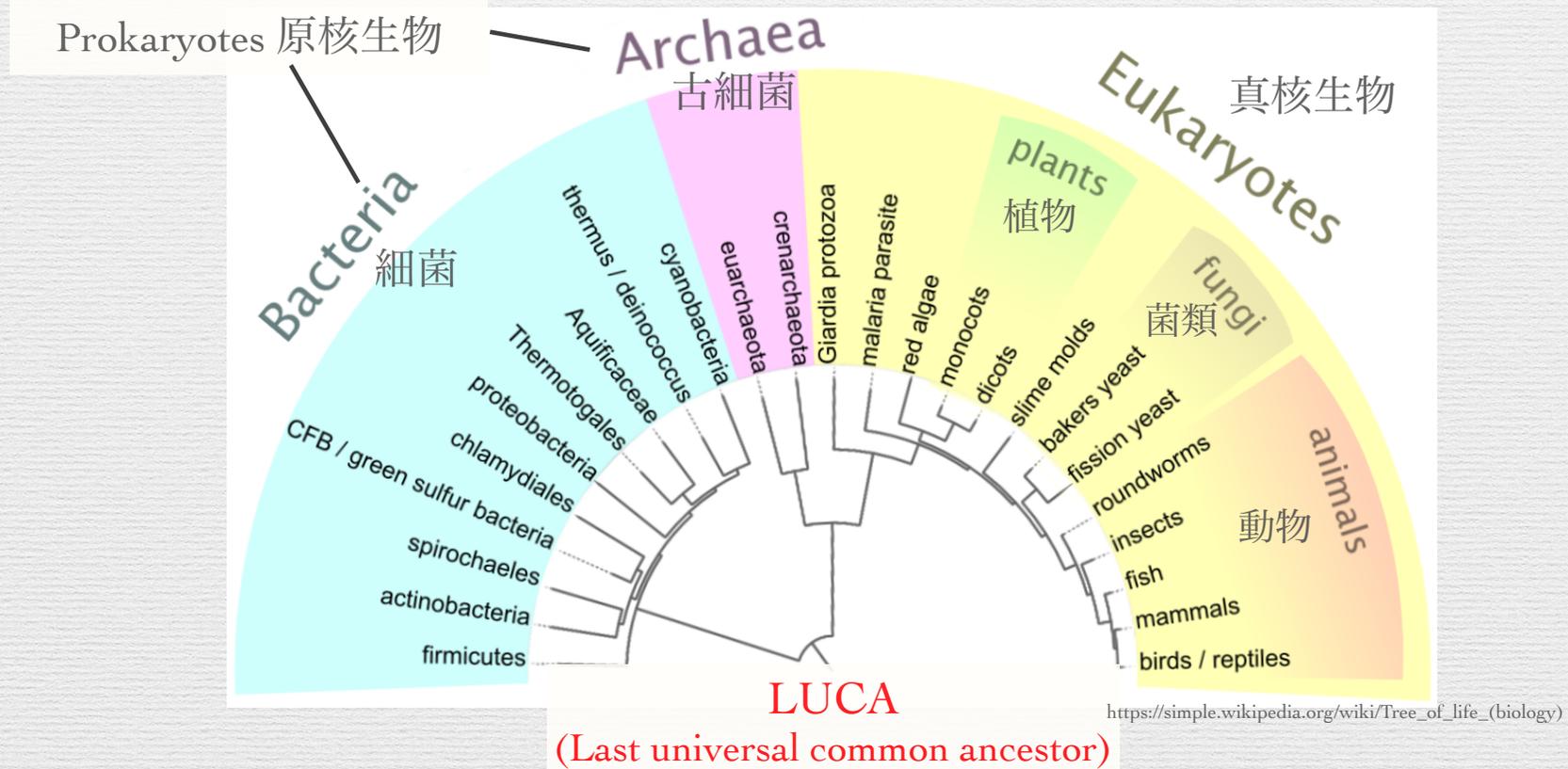
アミノ酸とタンパク質

- ・ アミノ酸 = NH_2 と COOH を持つ化合物
 - ・ “R” が様々な代わることで、様々な種類（天然で500種）
 - ・ 生物が利用しているのは20種類
- ・ タンパク質 = 多数のアミノ酸が紐状に繋がり、複雑な構造を持つ高分子



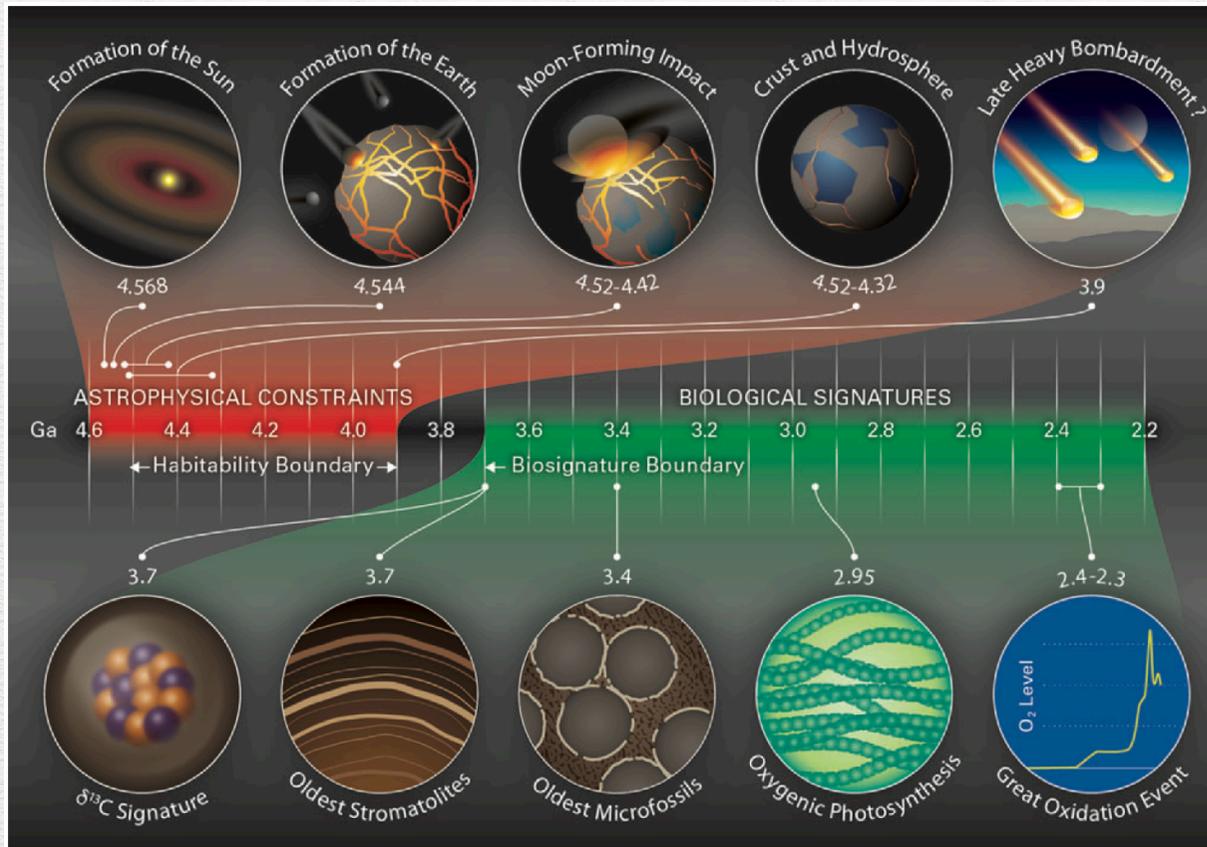
地球における生命の進化

- 地球における全ての現生生物は、たった一つの共通祖先 (last universal common ancestor, LUCA) から進化してきた
- 全生命に共通のDNAコードとキラリティ (アミノ酸は左旋性、DNAは右)
- 非生命からの生命の誕生 (abiogenesis) が複数回起きたことを示唆する観測事実なし



最初の生命はいつ誕生したのか？

- 化石や炭素同位体の研究から、37億年以上前とされる
- 45億年前に地球が誕生し、すぐに最初の地殻や海ができた→生命発生可能？
- 生命が発生するのにかかった時間 2~8億年 (地球の年齢の4-18%)

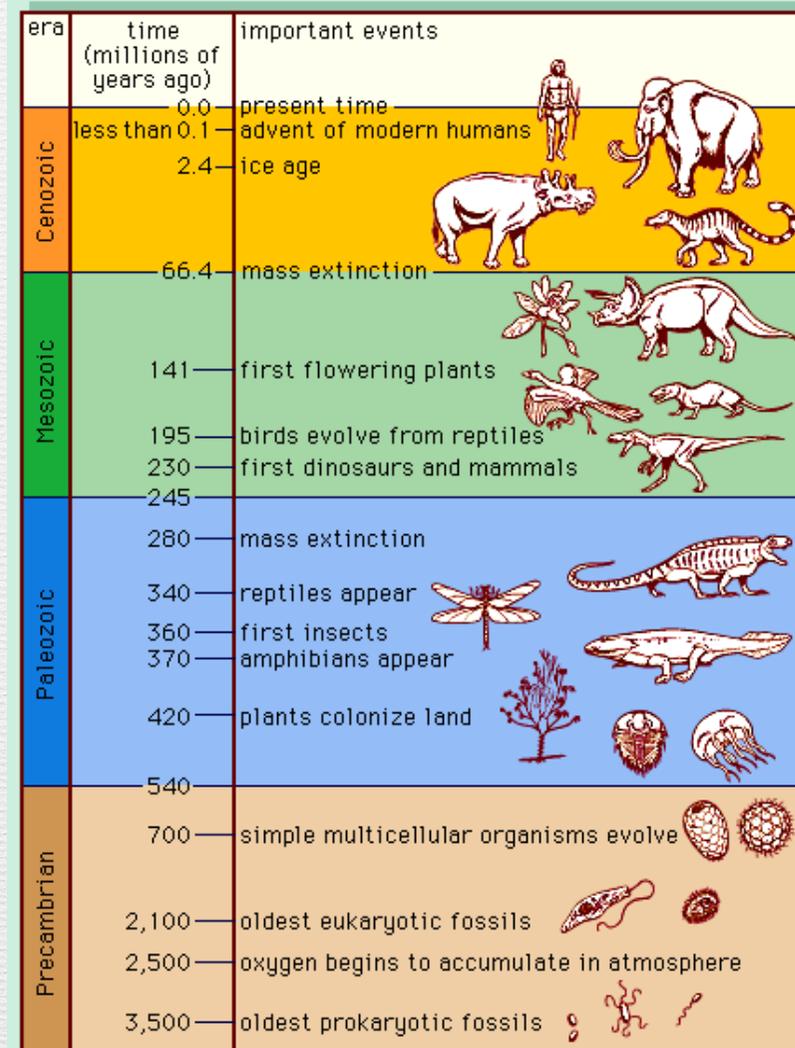


生命の発生確率は高い？低い？

- 生命は地球の歴史の最初の8億年以内に生まれた
 - 45億年の地球の歴史の中ではかなり最初の方
 - → 条件さえ整えば、原始生命が自然に発生する期待値は高い ($f_l > \sim 10$ 以上) ?
 - 高い確率/期待値を示唆する (唯一の) 事実だが…
- しかし、明確な結論を出すことは不可能
 - 地球の歴史の最初の 4~18% → たまたま、早く生命が誕生した可能性もある
 - 原始地球の環境が、原始生命の発生に特に適していた可能性もある
 - 進化系統樹の根元は超好熱菌が多い。原始地球はより高温と期待される
 - だとすれば地球の歴史の初期に原始生命が生まれたのは当然
 - 発生確率が高いのなら、地球の歴史の中で、現生生物とは独立な生命体が何度も誕生していいはずだが、その兆候もない

生命の発生確率が高い？低い？

- 人間原理？
 - 原始生命から知的生命への進化には長い時間(~40億年)がかかる
 - 進化にはいくつかの困難なステップ、e.g. 真核生物、多細胞生物…)
 - 太陽の光度は誕生以来緩やかに上昇
 - あと10億年もすれば生命は地球に住めなくなる？
 - 原始生命は地球誕生直後に生まれ、人類は生命存在可能期間の最後ギリギリで生まれた？
 - 最初の生命誕生が地球史の早い時期に起きないと、そもそも我々は存在できない
 - 「高い生命発生確率」を意味しない

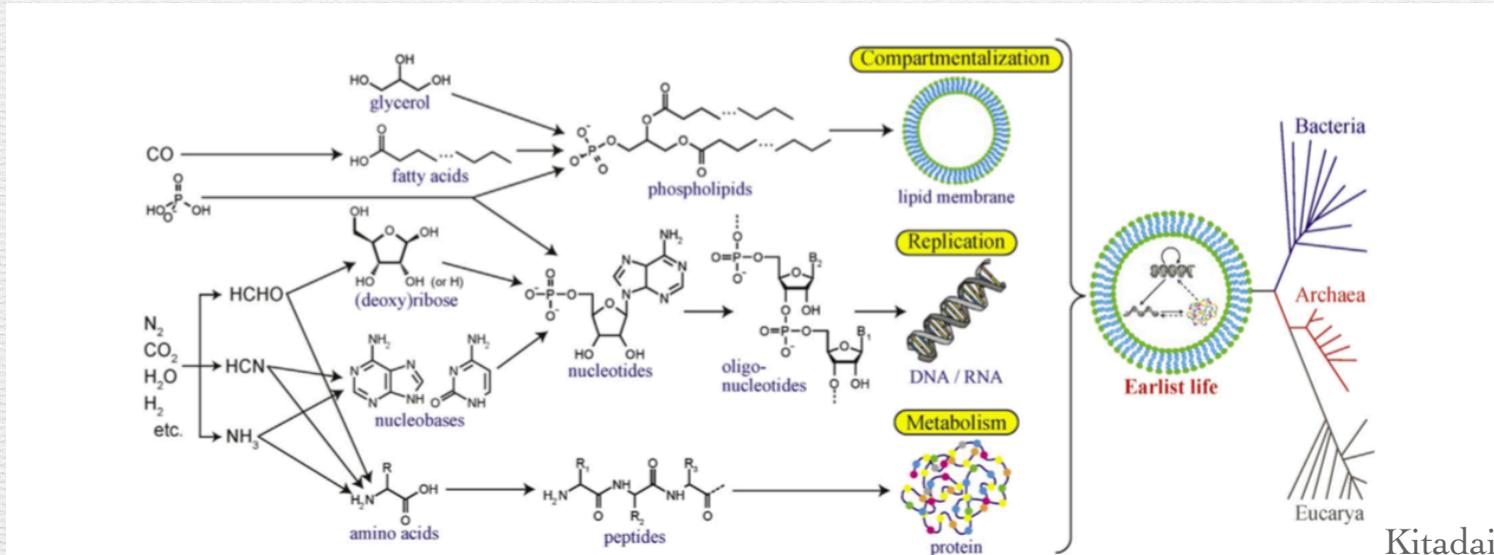


原始生命の発生確率は高い？低い？

- 生命発生確率（期待値） f_l の制限？
 - 上限値 $f_l < \sim 1$
 - 下限値？
 - 地球外生命がまだ見つからない
 - $f_l \ll 1$ でも、宇宙全体で生命が生まれている惑星が多数あれば、我々の存在と矛盾しない
 - 銀河系全体で一つだけ？ 10^{11} 個の恒星 $\rightarrow f_l > 10^{-11}$
 - 観測可能な宇宙（半径138億光年）で一つだけ？ 10^{11} 個の銀河、 10^{22} 個の恒星 $\rightarrow f_l > 10^{-22}$

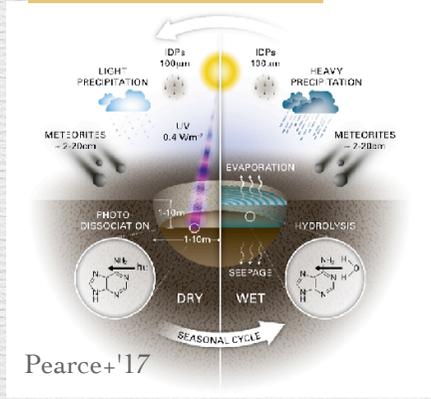
最初の生命はどのように現れたのか？

- 必要条件：水、有機物、エネルギー



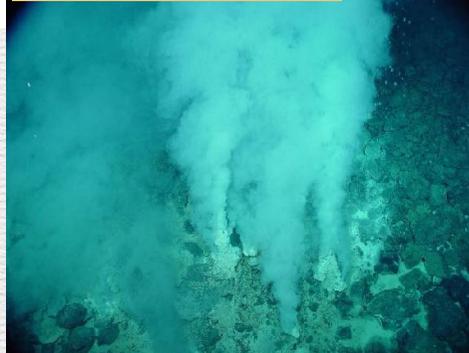
Kitadai+¹⁸

地上の水たまり？



Pearce+¹⁷

海底の熱水噴出孔？



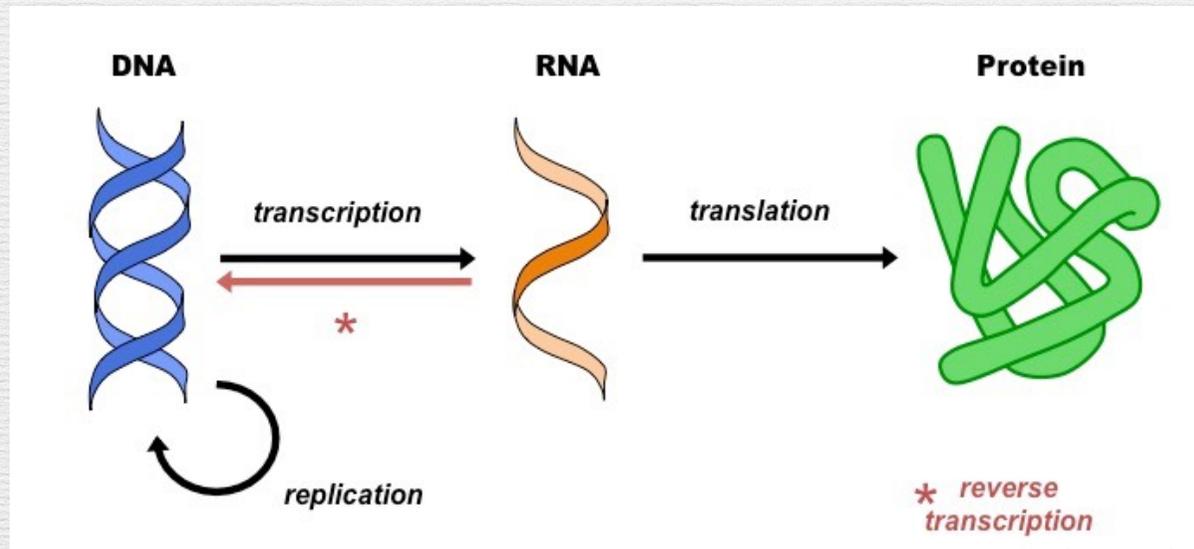
https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrothermal_vent

有機物（さらに生命）は宇宙から？



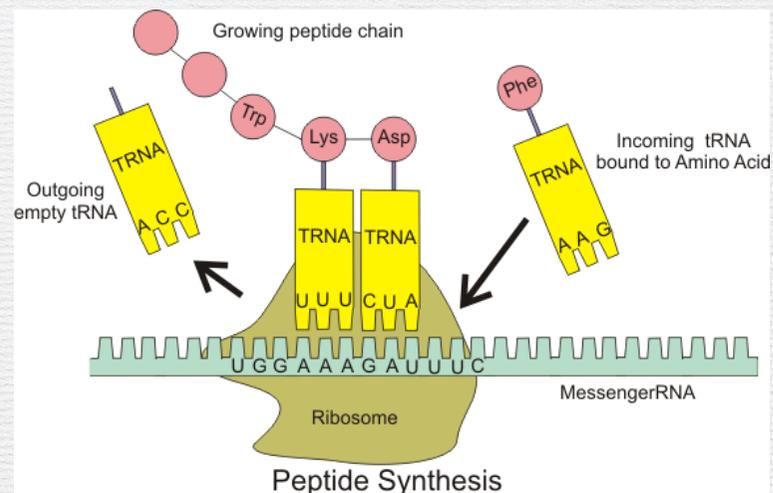
最初の生命はどんなものか？

- ・ ニワトリが先かタマゴが先か？
 - ・ タンパク質はDNAの遺伝情報に基づいて製造される
 - ・ DNAの複製にはタンパク質の酵素が必要
- ・ DNA vs. タンパク質：どちらが先か？
 - ・ 強力な回答: RNAが最初！



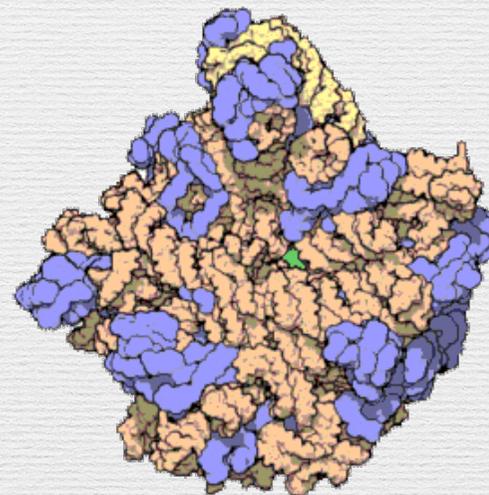
RNA ワールド仮説

- RNA は、タンパク質の酵素と同じように、生体化学反応の触媒になる
 - 「リボ核酸」 + 「エンザイム（酵素）」
 - → 「リボザイム」
 - リボソーム（RNAからタンパク質を作る超重要組織）の核心部はタンパク質ではなくRNA でできている



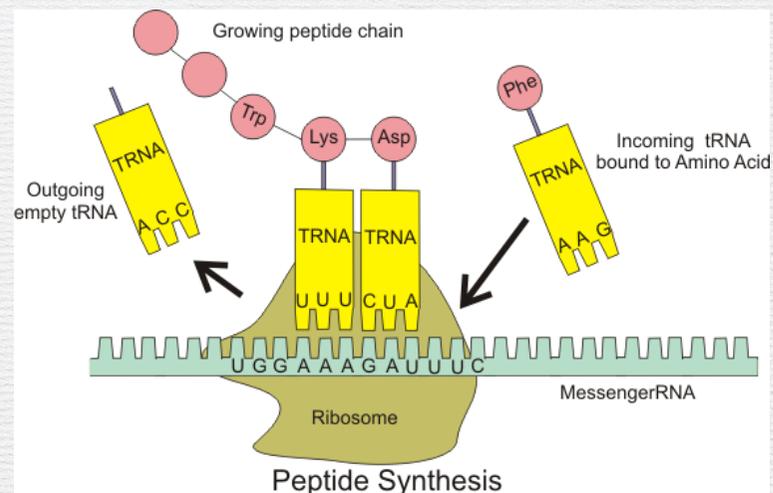
<https://en.wikipedia.org/wiki/Ribosome>

- RNAワールド仮説
 - 自己複製可能な生物的活性を持つRNAがまず登場し、その後、DNA-タンパク質ワールドへ進化していった
- 生命の起源に関して、最も有力な仮説の一つ



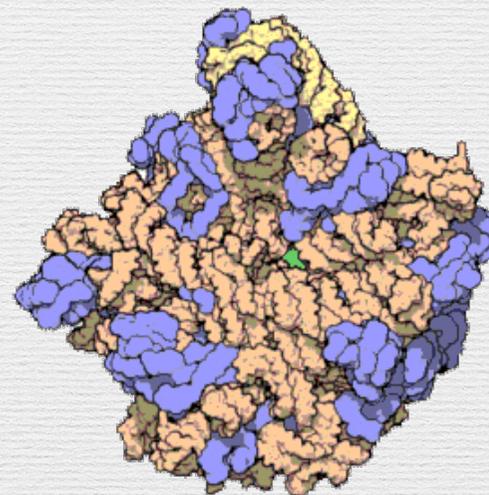
RNA ワールド仮説

- RNA は、タンパク質の酵素と同じように、生体化学反応の触媒になる
 - 「リボ核酸」 + 「エンザイム（酵素）」
 - → 「リボザイム」
 - リボソーム（RNAからタンパク質を作る超重要組織）の核心部はタンパク質ではなくRNA でできている



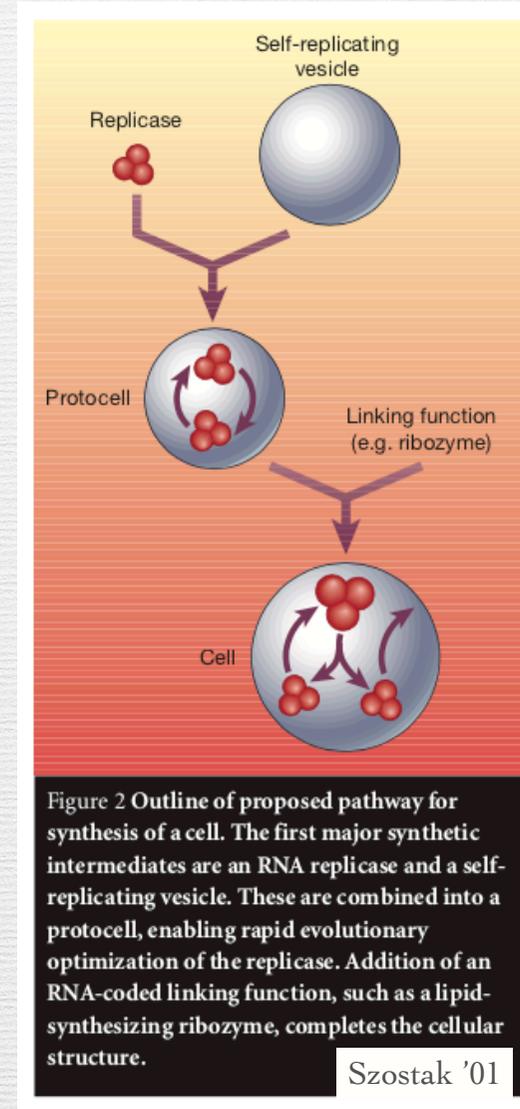
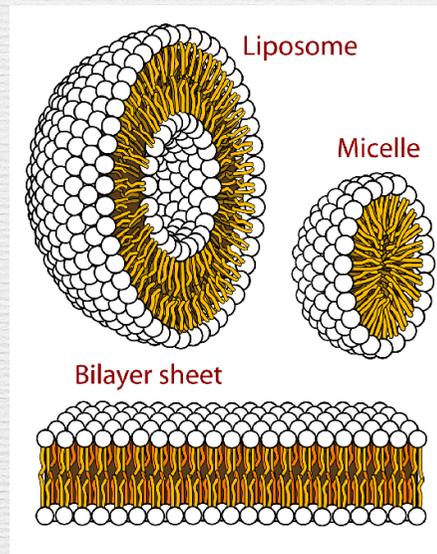
<https://en.wikipedia.org/wiki/Ribosome>

- RNAワールド仮説
 - 自己複製可能な生物的活性を持つRNAがまず登場し、その後、DNA-タンパク質ワールドへ進化していった
- 生命の起源に関して、最も有力な仮説の一つ



最初の生命の誕生へのステップ

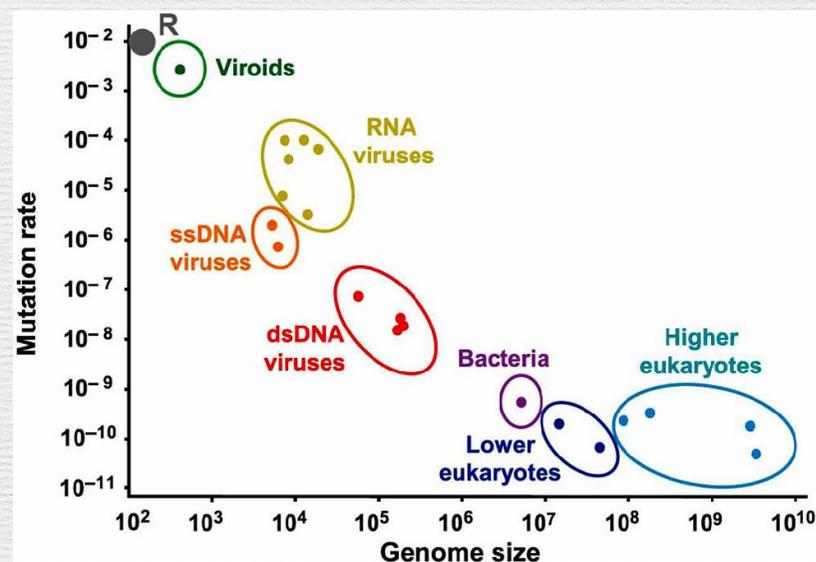
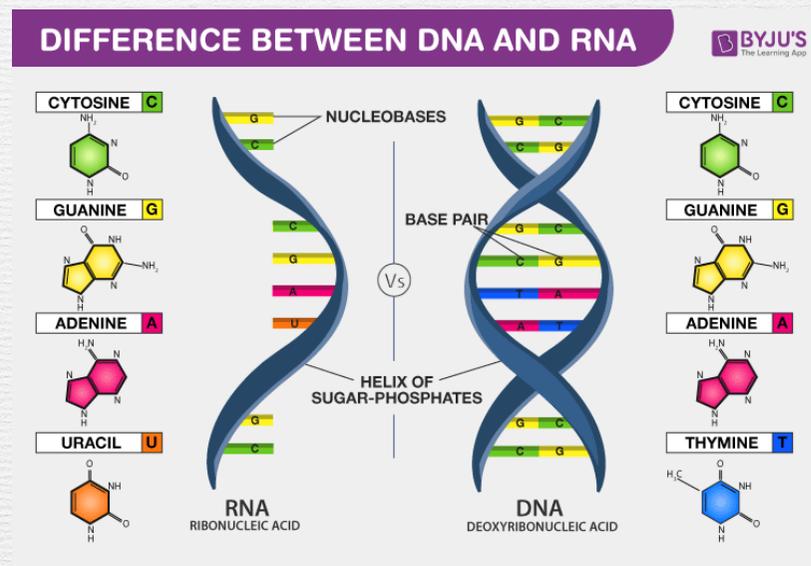
- ・ 自己複製可能なRNAが誕生
- ・ 膜の獲得（両親媒性のリン脂質）
- ・ その後、ダーウィン進化により、最初の生物細胞（LUCA）へ
 - ・ DNA-タンパク質ワールドへの進化
- ・ 最初の「自己複製するRNA」はどうしてできた？その長さは？



生物のゲノム

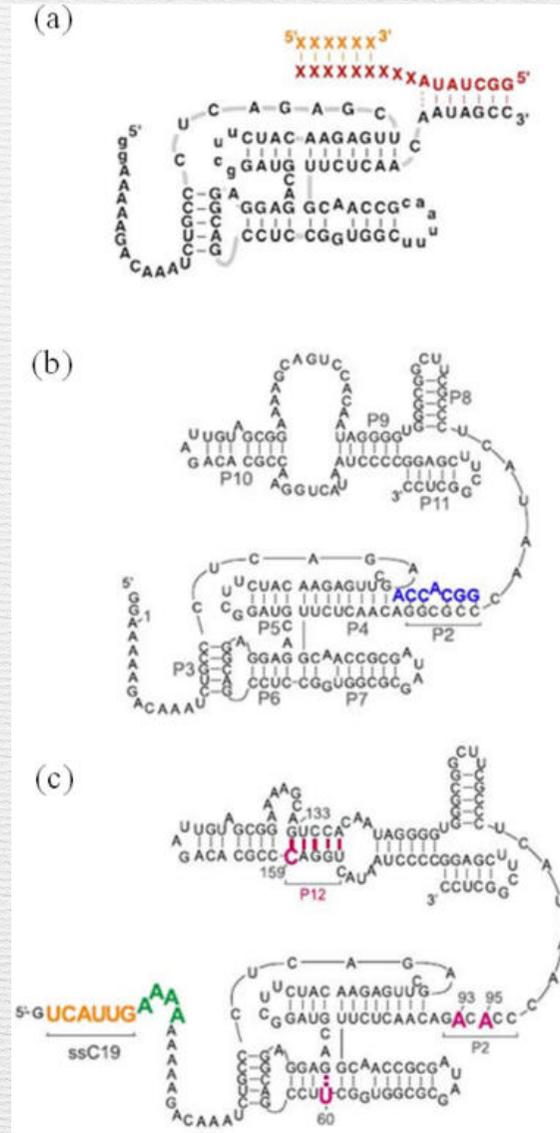
- ゲノム = ある生物のもつ遺伝情報の総体
- ゲノムサイズ (DNA の長さ [base-pair])
 - Polychaos dubium (アメーバの一種) 6.7×10^{11} (全ての生物の中で最大)
 - ヒト 3.0×10^9
 - 細菌/古細菌 1.1×10^5 — 1.6×10^7
 - ウイルス 2000 — 2.5×10^6
 - ウイロイド 250
 - 触媒活性を示すRNA (リボザイム) 100

Gago+'09; Ruiz-Mirazo+'14



最初のRNAはどのようなものだったのか？

- RNAの「試験管内進化」という手法で、実験的に、RNAの自己複製に近い活性をもつリボザイムが作られている
 - その長さはざっと100~200 nt (ヌクレオチド)
 - ヌクレオチド = RNA鎖の1単位
- 完全な自己複製能力を持ちうるRNAの最小の長さは？ 専門家によれば…(Szostak '93; Robertson+'12):
 - 25 nt 以下の長さのRNA は活性を示さない
 - 40~60 nt 以上の長さのRNAならば、自己複製能力を持つRNAができてよさそう
 - このあたりが、「最初の生命」？



原始生命誕生の確率はどれだけ小さい？

- ・ ランダムにヌクレオチドを結合させて生命が誕生する確率は恐ろしく低そう
- ・ 猿がでたらめにタイプして、シェークスピアの小説ができるか？



- ・ 「竜巻がジャンク置き場を通過したらジャンボジェットができたようなもの」 (F. Hoyle)



+



最初の「生きた」RNAの誕生確率？

- ヌクレオチドがランダムな化学反応で結合してできた？
 - 長鎖のRNAほど生成確率は急激に低くなる ($\propto 1/N!$, ポアソン統計)
 - 生物的活性を持つための特定のRNA配列になる確率？
 - ヌクレオチド 1つの分子量は 340
 - 長さ 40 のRNA $\rightarrow 4^{40}$ 通りの配列 $\rightarrow 27$ kg
 - 長さ 60 $\rightarrow 4.6 \times 10^{13}$ kg
 - c.f. 地球の生物の総質量 5.5×10^{14} kg (炭素換算)
 - 長さ 100 \rightarrow
- やっぱり確率は恐ろしく低そう…

最初の「生きた」RNAの誕生確率？

- ヌクレオチドがランダムな化学反応で結合してできた？
 - 長鎖のRNAほど生成確率は急激に低くなる ($\propto 1/N!$, ポアソン統計)
 - 生物的活性を持つための特定のRNA配列になる確率？
 - ヌクレオチド 1つの分子量は 340
 - 長さ 40 のRNA $\rightarrow 4^{40}$ 通りの配列 $\rightarrow 27$ kg
 - 長さ 60 $\rightarrow 4.6 \times 10^{13}$ kg
 - c.f. 地球の生物の総質量 5.5×10^{14} kg (炭素換算)
 - 長さ 100 $\rightarrow 4.6 \times 10^7$
- やっぱり確率は恐ろしく低そう…

最初の「生きた」RNAの誕生確率？

- ヌクレオチドがランダムな化学反応で結合してできた？
 - 長鎖のRNAほど生成確率は急激に低くなる ($\propto 1/N!$, ポアソン統計)
 - 生物的活性を持つための特定のRNA配列になる確率？
 - ヌクレオチド 1つの分子量は 340
 - 長さ 40 のRNA $\rightarrow 4^{40}$ 通りの配列 $\rightarrow 27$ kg
 - 長さ 60 $\rightarrow 4.6 \times 10^{13}$ kg
 - c.f. 地球の生物の総質量 5.5×10^{14} kg (炭素換算)
 - 長さ 100 $\rightarrow 4.6 \times 10^7 M_{\odot}$
- やっぱり確率は恐ろしく低そう…

なぜ生命が誕生できたのか？

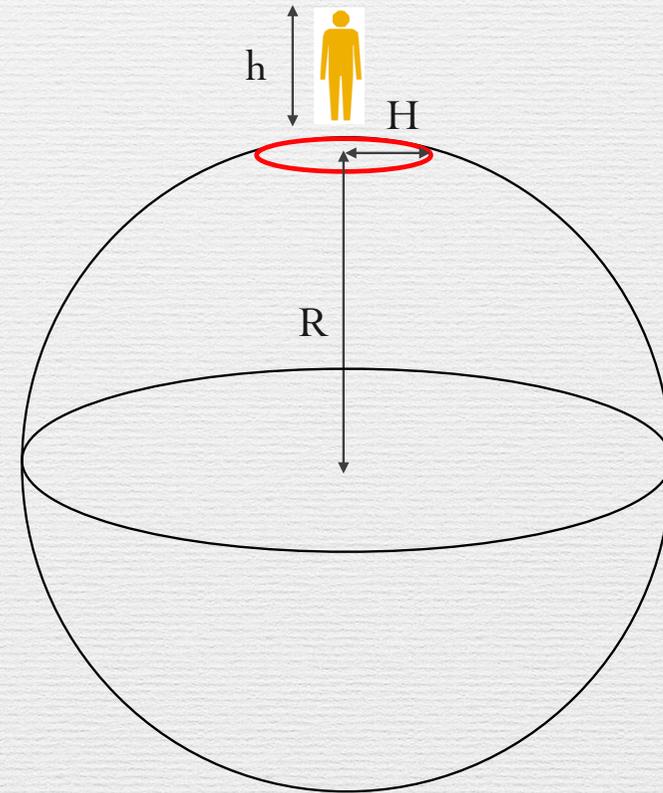
- ・ ランダムな化学反応では、観測可能な宇宙（半径138億光年）全体を考えても、一つもできない！？ ならばどうする？
- ・ 一部の（科学コミュニティの外の）人たち：
 - ・ 原始生命の誕生は科学では説明できない。
 - ・ 神？宗教？インテリジェンスデザイン？
- ・ 多くの科学者：
 - ・ より効率の高いRNA合成プロセスがあるのだろう（という期待）
 - ・ 段階的「進化」？でも進化には自己複製が不可欠…
 - ・ 今のところ、具体性無し

なぜ生命が誕生できたのか？

- ・ ランダムな化学反応では、観測可能な宇宙（半径138億光年）全体を考えても、一つもできない！？ ならばどうする？
- ・ 一部の（科学コミュニティの外の）人たち：
 - ・ 原始生命の誕生は科学では説明できない。
 - ・ 神？宗教？インテリジェンスデザイン？
- ・ 多くの科学者：
 - ・ より効率の高いRNA合成プロセスがあるのだろう（という期待）
 - ・ 段階的「進化」？でも進化には自己複製が不可欠…
 - ・ 今のところ、具体性無し
- ・ 私（Totani 2020）
 - ・ インフレーション宇宙全体では、ランダムな反応で生命できちゃうじゃない

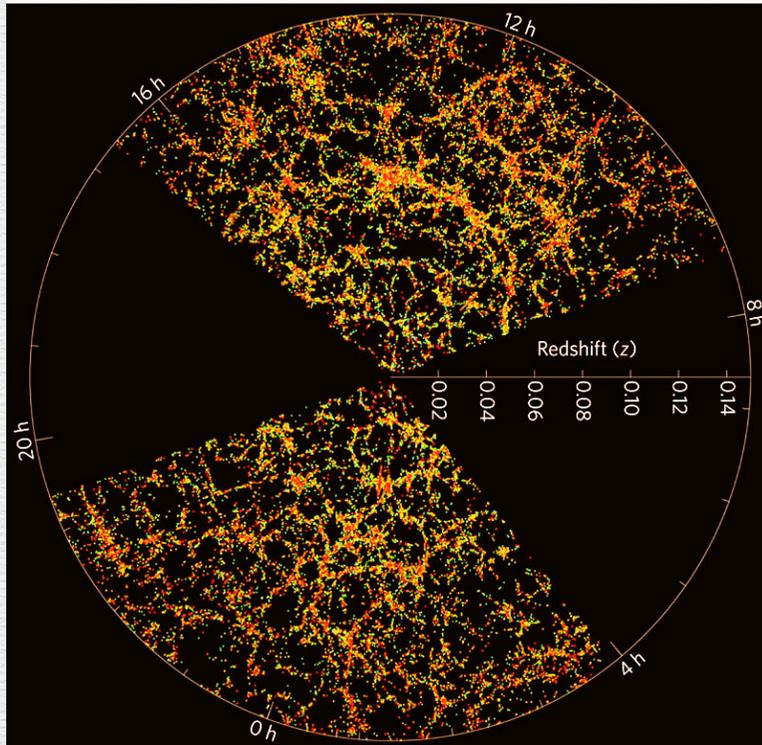
観測可能な宇宙 = 宇宙の地平線

- なぜ、「観測可能な宇宙」の中だけの生命発生確率を考えるのか？
- 地球の地平線
 - 高さ h の視点からの地平線までの距離 H は
 - $H = [2 h (R + h)]^{1/2}$
 - R = 地球半径 = 6371 km
 - 身長 1.7m の人なら、 $H \sim 5$ km
 - 地平線内の面積 = 地球表面積の $1/6,500,000$
 - 「地球の地平線内で生命が発生する確率」に何の意味があるのか？
 - 真の宇宙全体で生命が多数発生していれば、我々の存在と矛盾しない
 - では、宇宙の地平線を越えて、宇宙はどれだけ広がっているか？カギはインフレーション宇宙論！

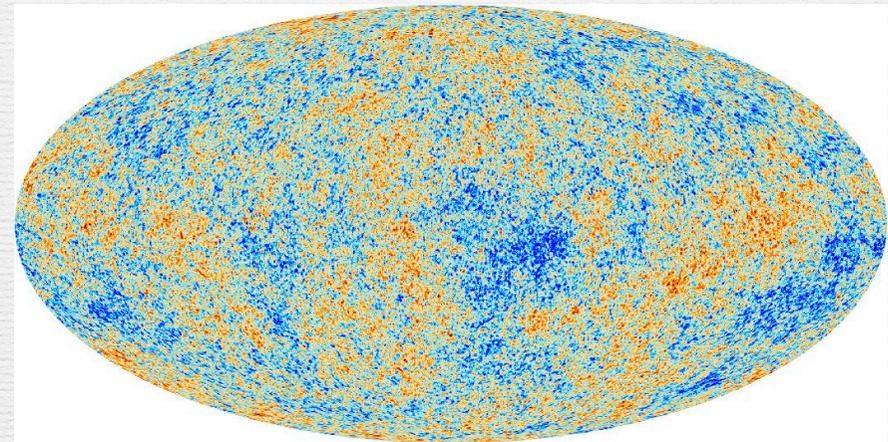


Cosmic inflation: what is it, & why do we need it?

- The universe is surprisingly homogeneous and isotropic...
 - It is a problem! Why?



galaxy distribution within 2 billion light yr

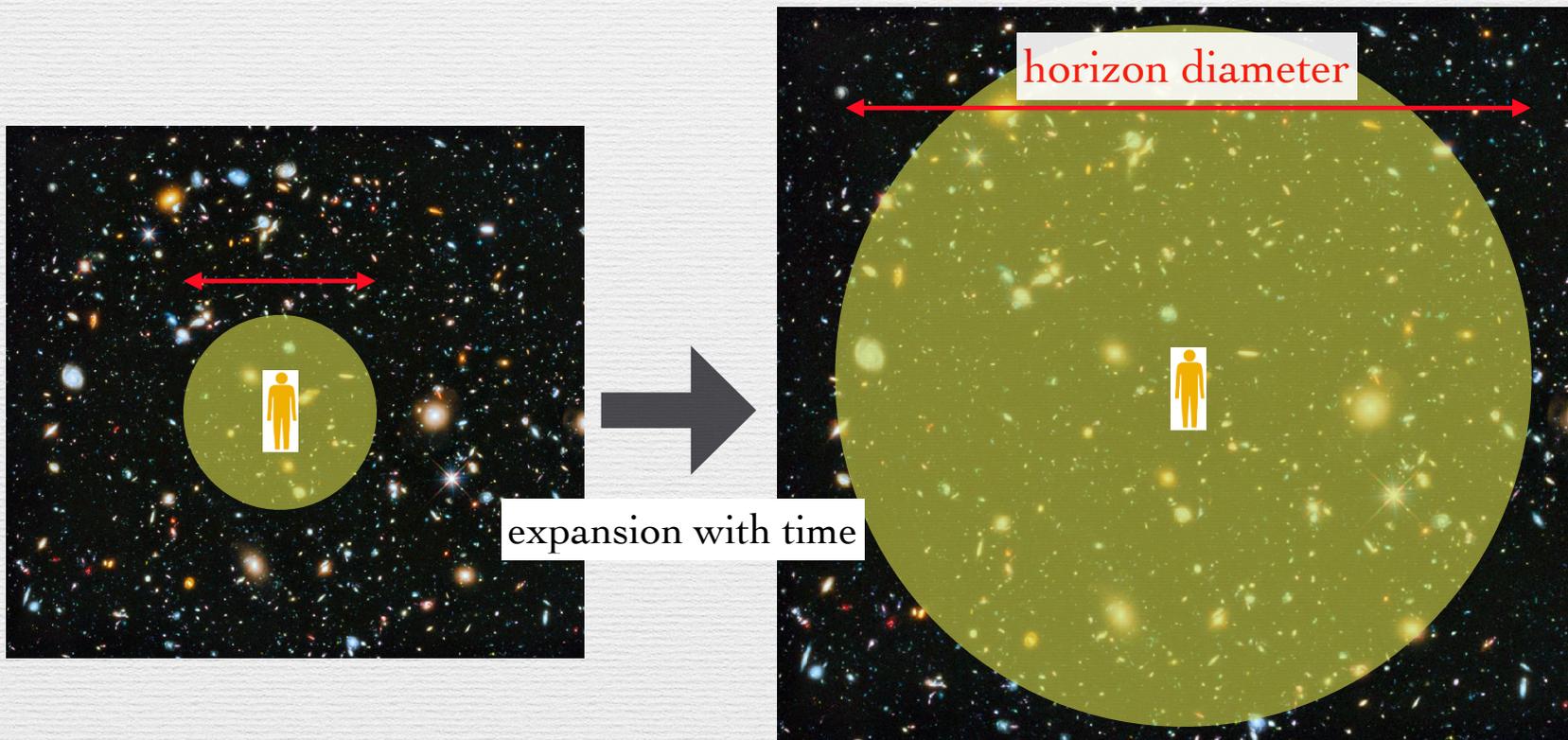


cosmic microwave background sky map
(the universe 380,000 yrs after Big Bang)

fractional density fluctuation only $\sim 1/100,000$

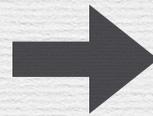
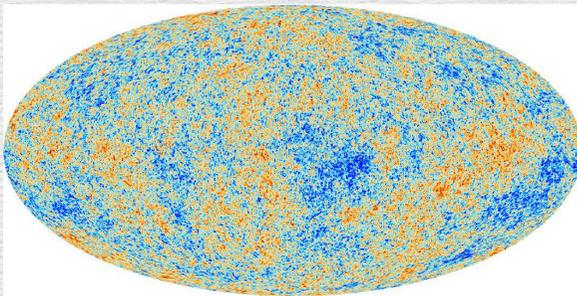
the homogeneity problem

- cosmic “horizon” = the observable universe, (light speed) \times (age of the universe)
- it is 13.8 billion light yr radius now
- horizon expands with time, with respect to matter/galaxy distribution
- In the early universe, only a tiny fraction of the currently observable universe could be causally connected (by light speed)
- Then why the universe is so homogeneous? You need a very fine tuning.

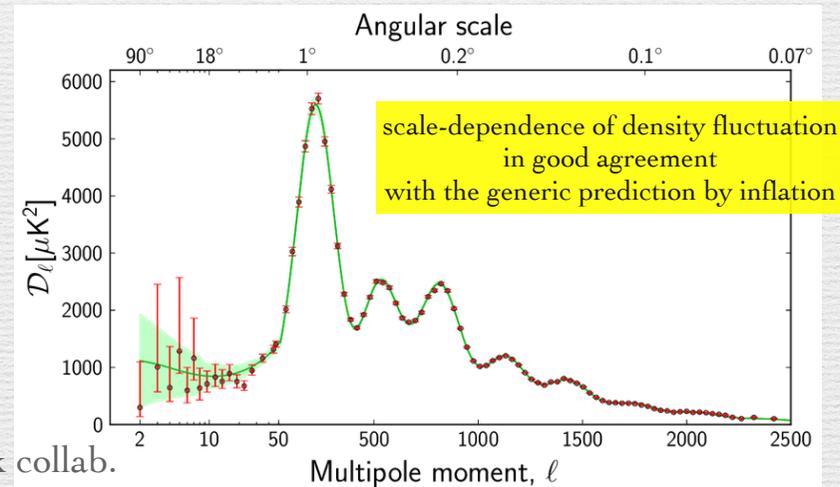


A natural (and currently only one) solution: Inflation

- In the very early epoch ($t \sim 1/10^{37}$ s), the universe expanded exponentially
 - size expansion by a factor of $\exp(N_i)$
 - driven by “vacuum energy”, naturally expected in this early time based on particle physics theory
 - causally connected region expanded by the same factor
 - if $N_i > N_{i,\min} \sim 60$, the homogeneity problem is solved by e^{60} -fold expansion
 - horizon at that time $\sim 3 \times 10^{-27}$ cm
 - $\rightarrow \sim 1$ cm by inflation, then phase transition to normal, big-bang universe
 - $\rightarrow 13.8$ Gyr now
- Strongly supported by rich data of precision cosmology
- Almost all cosmologists accept



Planck collab.



インフレーション宇宙はどれだけ広い？

- ・ 一様等方な宇宙を自然に説明するのがインフレーション宇宙論
 - ・ 宇宙初期に、宇宙サイズが $\exp(60)$ 倍に膨張（最低条件）
 - ・ ぴったり $\exp(60)$ で終わったとすれば、むしろ不自然
 - ・ $60 \propto$ インフレーションの継続時間、モデルによって簡単に変わる
 - ・ 観測可能な宇宙の外側も、一声、 $\exp(60)$ 倍程度に広がっているのは「自然」
- ・ つまりインフレーションでできた真の宇宙の大きさは、観測可能な宇宙の $e^{60} = 10^{26}$ 倍以上に広がっているのが自然。指数が2, 3倍で $e^{120} = 10^{52}$, $e^{180} = 10^{78}$ 倍でもおかしくない
 - ・ 体積で考えると、3乗して 10^{78} , 10^{156} , 10^{234} , ...
 - ・ 含まれる星の数は、 10^{100} , 10^{178} , 10^{256} ... 個（観測可能な宇宙にはたった 10^{22} 個）
- ・ もし、 10^{100} 個の星の中では生命が多数発生するなら、観測可能な宇宙 (10^{22} 個の星) では生命の発生確率がほとんどゼロでも、観測事実と矛盾はない

宇宙の大きさ vs. 合成されるRNAの長さ

- l_{\min} vs. N_*
 - l_{\min} =原始生命発生に必要なRNAの最小の長さ
 - N_* = その長さで活性をもつ (= 特定の情報配列) RNAがランダムな化学反応で一つ生まれるために必要な恒星の数
- その関係式を導くところになった (Totani 2020)

$$2.3 \lg N_* = \ln(l_{\min}!) - l_{\min} \ln p_r + (l_{\min} - \Delta l) \ln N_{nb} - \ln C$$

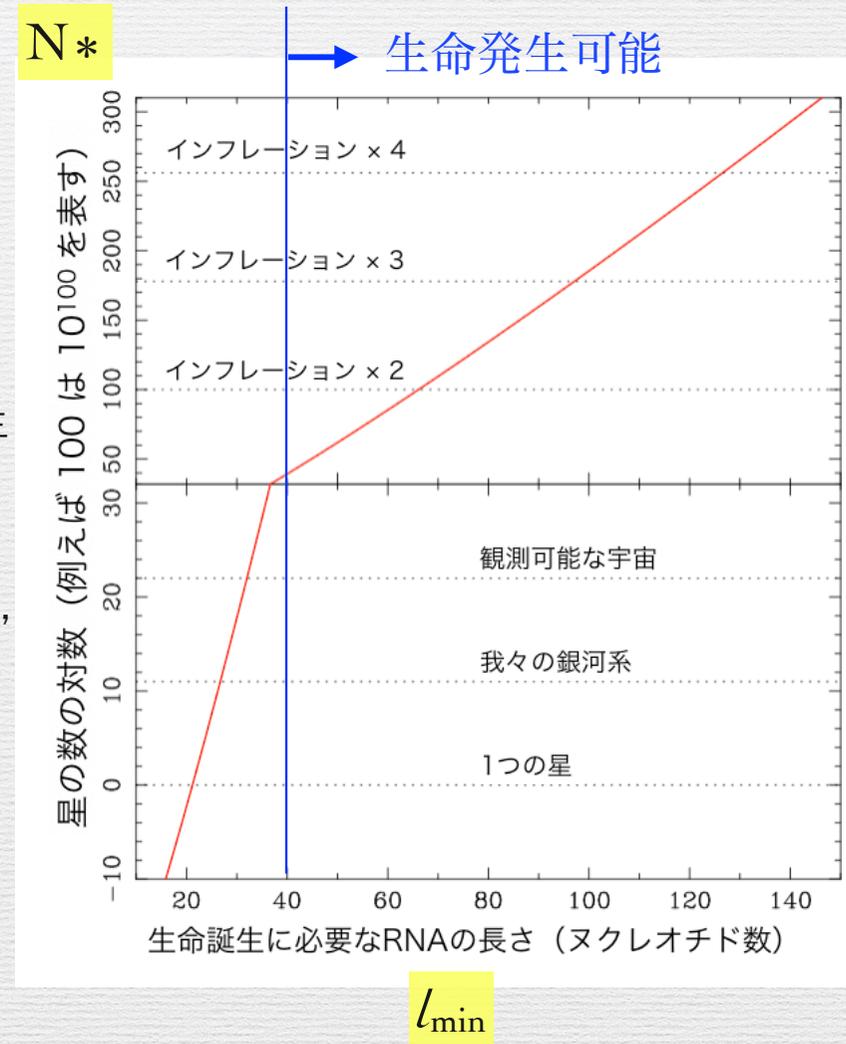
$$C \equiv f_{pl} N_m t_d t_c^{-1} P_{ev}$$

ある惑星でのヌクレオチド総量、
反応速度、サイクル回数など...

- $\lg N_*$ と l_{\min} の関係が重要 (確率 $\exp(-l_{\min})$ をインフレーション $N_* \propto \exp(N_i)$ で相殺)
 - C には大きな不定性があるが、 \log を取るので重要でない
 - 10桁間違えたとしても、インフレーションで $N_* \sim 10^{100}$ と言っているのが 10^{110} になる程度

宇宙の大きさ vs. 合成されるRNAの長さ

- $N_* = 10^{22}$ (観測可能な宇宙)でも $l_{\min} = 31$
- これに対し、生物学からは $l_{\min} > 40-100$ と予想される
 - $l_{\min} = 40$ なら、 $N_* = 10^{39}$
- 観測可能な宇宙を考えても、簡単に生命は生まれそうにない
- インフレーション宇宙なら $N_* = 10^{100}, 10^{178}, 10^{256}$ に対し $l_{\min} = 66, 97, 127$



インフレーション宇宙での生命発生

- ・ インフレーション宇宙を考えれば、ランダムな化学反応でも最初の生物活性を持つRNAが誕生してもおかしくない
- ・ 科学の枠組みで原始生命誕生は説明できる
 - ・ 非科学的なものに訴える必要はない
- ・ ランダムな反応より効率の良い RNA 合成、そして高い生命誕生確率の可能性は？
 - ・ 可能性はある（あったら面白いですね）
 - ・ しかし、その必要性もない
 - ・ インフレーション宇宙全体で多数の生命が発生していれば、観測事実と矛盾はない
 - ・ 観測可能な宇宙（全体の $1/10^{78}$ という超微小体積）で生命が多数発生していなければならぬ理由はどこにもない

地球外生命は見つかるか？

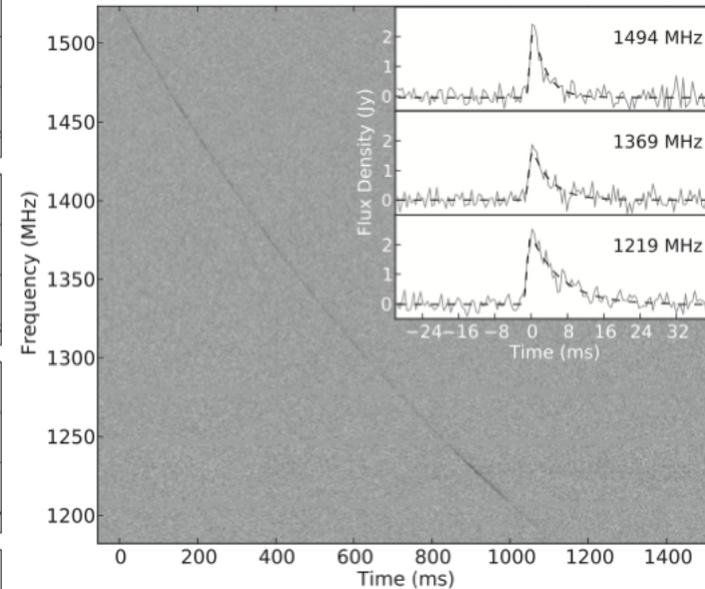
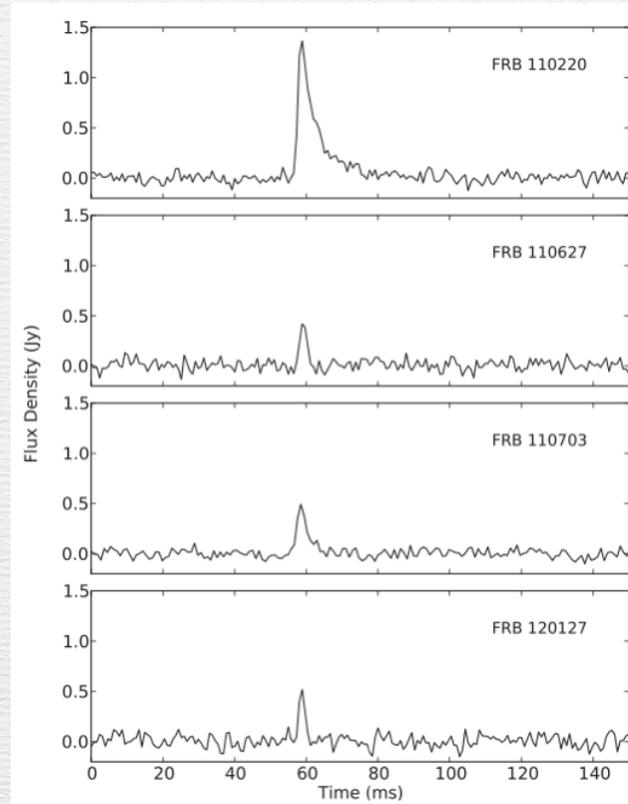
- 生命発生期待値 f_l の可能な範囲？
 - 理論的には全く不明、しかし $f_l \sim 1$ と期待する物理的な必然性は全くなし
 - $f_l \gg 1$ または $f_l \ll 1$ が自然
 - $f_l \gg 1$ は、地球で生命が一度しか誕生していないことと矛盾するかも
 - $f_l \ll 1$ の側では、 $f_l > 1/10^{100}$ であれば、我々の存在を説明可能
 - ありうる範囲： $1/10^{100} \sim 1$ ぐらいだろう
- 一方、太陽系外惑星から生命が見つかるには？（パンスペルミアの可能性は除く）
 - $f_l \sim 1$ が必要（太陽系のごく近傍しか検出できない）
 - 100桁の範囲の中での extreme fine tuning が必要！

Part III.

新たな謎の突発天体・高速電波バースト

高速電波バーストとは

- fast radio burst (FRB)
- 1-10 msec という短時間で、電波(~GHz帯)で輝く天体現象
- 2006年に最初の発見報告。2013年以降、研究が本格化。まだ謎が多い
- 最大の特徴：大きな dispersion measure
 - 視線上に自由電子が存在すると、分散効果により、振動数に依存してシグナル到着が遅れる
 - 銀河系内のパルサーのDMよりはるかに大きい → 銀河系外天体？



Thornton+'13

$$t = k_{\text{DM}} \cdot \left(\frac{\text{DM}}{\nu^2} \right)$$

$$\text{DM} = \int_0^d n_e dl$$

$$k_{\text{DM}} = \frac{e^2}{2\pi m_e c} \approx 4.149 \text{ GHz}^2 \text{ pc}^{-1} \text{ cm}^3 \text{ ms}$$

銀河系外天体の dispersion measure

- 宇宙のバリオン物質（元素、主に水素）の大半は銀河間空間にある
- 宇宙誕生後40万年 ($z \sim 1100$)、温度低下により中性化（晴れ上がり）
- 宇宙誕生後 ~5億年 ($z \sim 10$) 以降、電離されている（宇宙再電離）
- その電離ガスにより、銀河系外天体は大きなDMを持つ
 - $DM \propto z$
 - Ioka '03, Inoue '04
- FRB は宇宙論的遠距離に？
 - $z \sim 0.1-1$

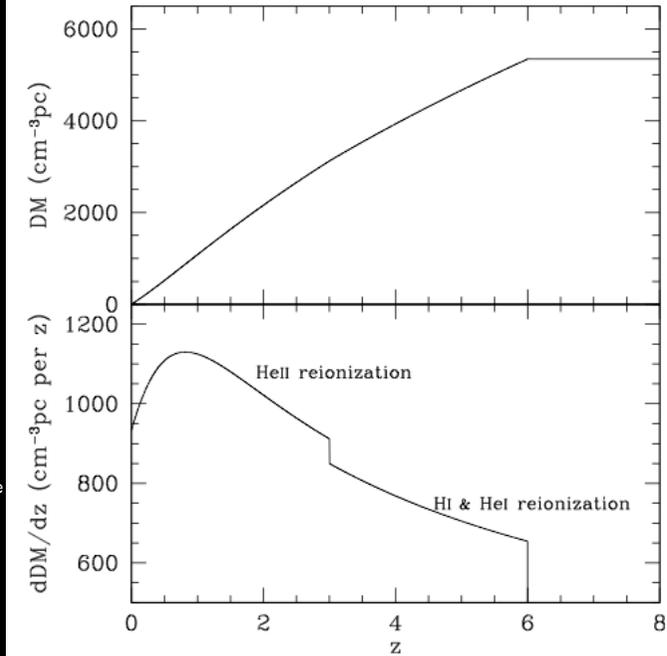
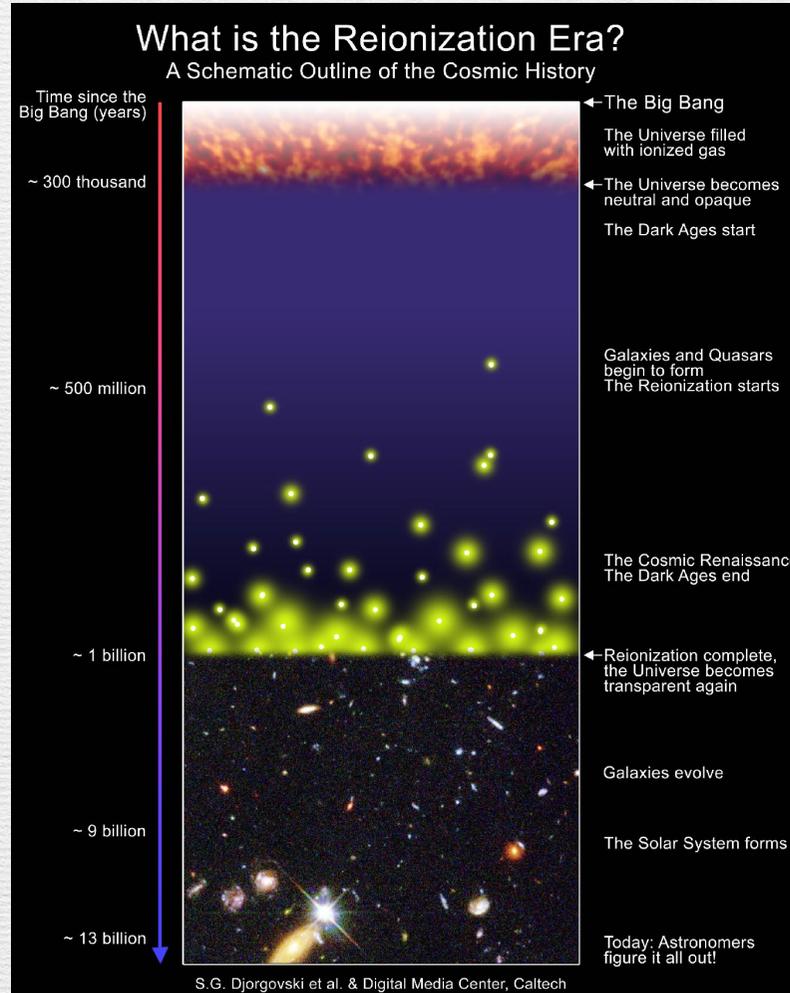


Figure 1. Illustration of using dispersion measure to probe the epoch of reionization of He II. Top and bottom panels show DM and its derivative as a function of redshift, respectively. A sharp H I and He I reionization at $z \sim 6$ and a sharp He II reionization at $z \sim 3$ are assumed.

様々な仮説

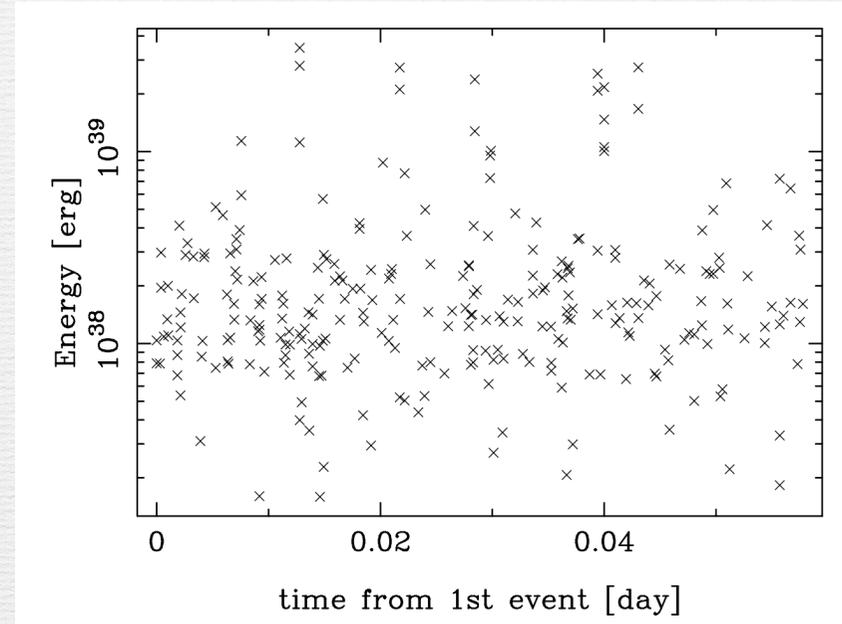
- 初期は、仮説の数 > FRB 検出数
- 多くは中性子星に関係したもの

Table 1
Tabulated summary.

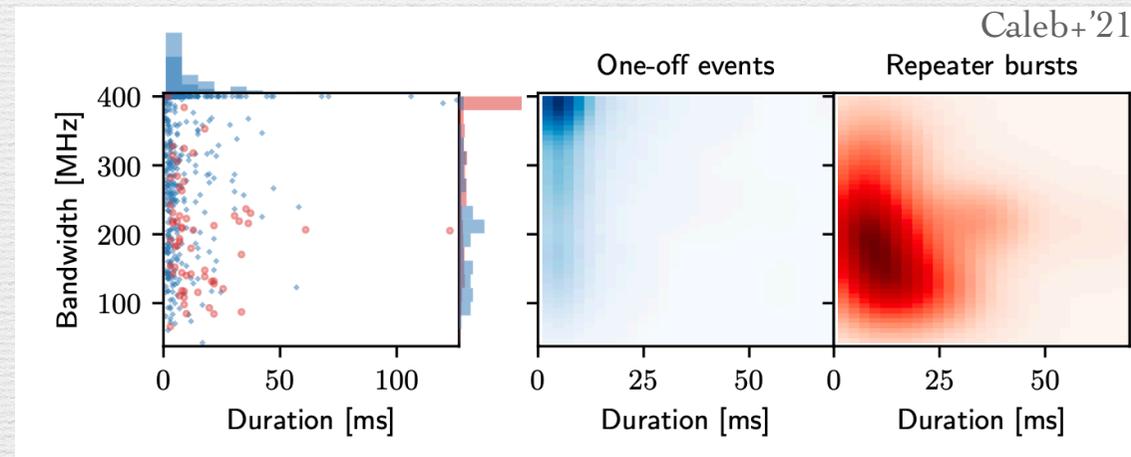
	Progenitor	Mechanism	Emission	Counterparts	Type	References
Merger	NS-NS	Mag. brak.	-	GW, sGRB,	Single	Totani (2013)
		Mag. recon. Mag. flux	Curv. -	afterglow, X-rays, kilonovae	Both	Wang et al. (2016) Dokuchaev and Eroshenko (2017)
	NS-SN	Mag. recon.	-	None	Single	Egorov and Postnov (2009)
	NS-WD	Mag. recon.	Curv.	-	Repeat	Gu et al. (2016)
		Mag. recon.	Curv.	-	Single	Liu (2018)
	WD-WD	Mag. recon.	Curv.	X-rays, SN	Single	Kashiyama et al. (2013)
	WD-BH	Maser	Synch.	X-rays	Single	Li et al. (2018b)
	NS-BH	BH battery	-	GWs, X-rays, γ -rays	Single	Mingarelli et al. (2015)
	Pulsar-BH	-	-	GWs	Single	Bhattacharyya (2017)
	KNBH-BH (Inspiral)	Mag. flux	Curv.	GWs, sGRB, radio afterglow	Single	Zhang (2016a)
KNBH-BH (Magneto.)	Mag. recon.	Curv.	GW, γ -rays, afterglow	Single	Liu et al. (2016)	
Collapse	NS to KNBH	Mag. recon.	Curv.	GW, X-ray afterglow & GRB	Single	Falcke and Rezzolla (2014) Punsly and Bini (2016) Zhang (2014)
	NS to SS	β -decay	Synch.	GW, X- & γ -ray	Single	Shand et al. (2016)
	NS to BH	Mag. recon.	Curv.	GW	Single	Fuller and Ott (2015)
	SS Crust	Mag. recon.	Curv.	GW	Single	Zhang et al. (2018)
SNR (Pulsar)	Giant Pulses	Various	Synch./ Curv.	-	Repeat	Keane et al. (2012) Cordes and Wasserman (2016) Connor et al. (2016)
	Schwinger Pairs	Schwinger	Curv.	-	Single	Lieu (2017)
	PWN Shock (NS)	-	Synch.	SN, PWN, X-rays	Single	Murase et al. (2016)
	PWN Shock (MWD)	-	Synch.	SN, X-rays	Single	Murase et al. (2016)
Mag.)	MWN Shock (Single)	Maser	Synch.	GW, sGRB, radio afterglow, high energy ν -rays	Single	Popov and Postnov (2010) Murase et al. (2016) Lvibarskv (2014)

繰り返すものと、繰り返さないものと

- 一部のFRB源は繰り返し発生（リピーター）
 - 1時間に数千発という例も
 - 中性子星が有力
- 一方、一回しか検出されないFRB源も多い
 - 間隔の長いリピーターか？
 - 真に一度きりの、別種族か？
 - 継続時間、電波バンド幅の分布に違い



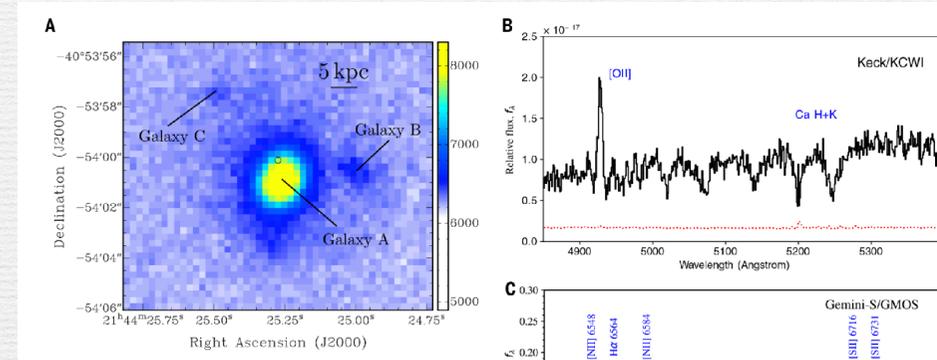
FRB 20121102A
Data: Jahns+'23



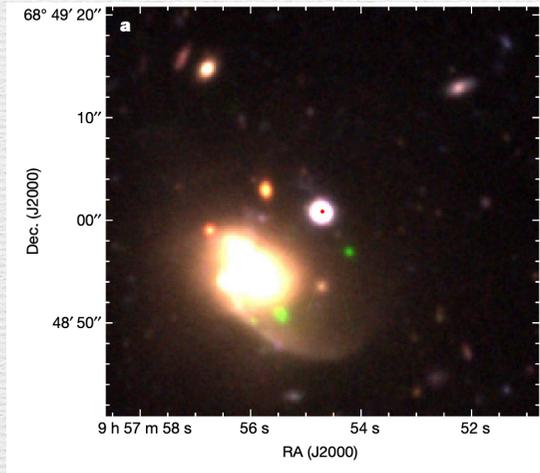
Caleb+'21

母銀河の性質から見えてくるもの

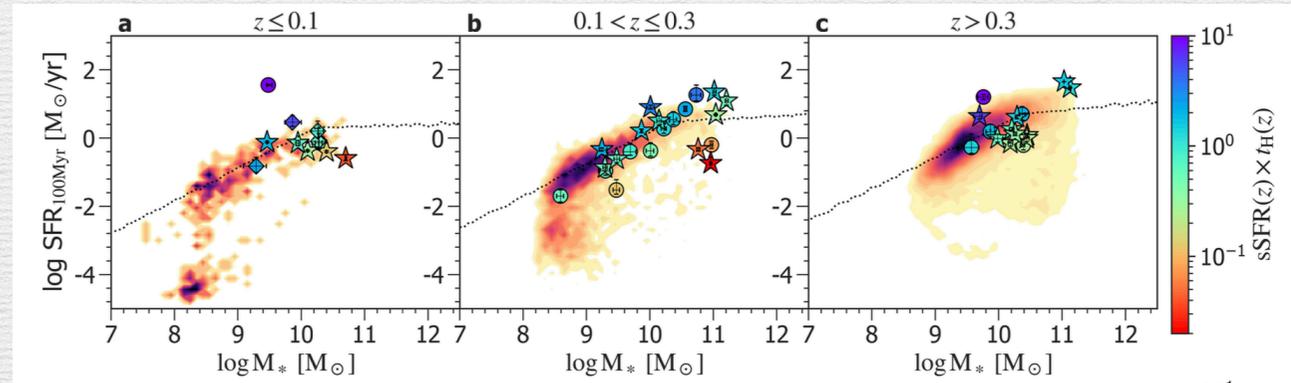
- すでに数十のFRB源の母銀河が特定されている
- FRBの母銀河は、星を活発に作っている若い銀河でも、星を作っていない古い銀河や球状星団でも起きる
- 重力崩壊超新星など、大質量星の最期に直接関係したものだけではない
 - 大質量星は短寿命→星形成銀河だけで発生
- 様々な種族の混合？



FRB 121102 host, Bannister+'19



20200120E in a globular cluster in M81, Kirsten+'22



Sharma+'24

宇宙論的示唆・ミッシングバリオン問題の解決

- 精密宇宙論により、宇宙のバリオン物質密度が決定されている

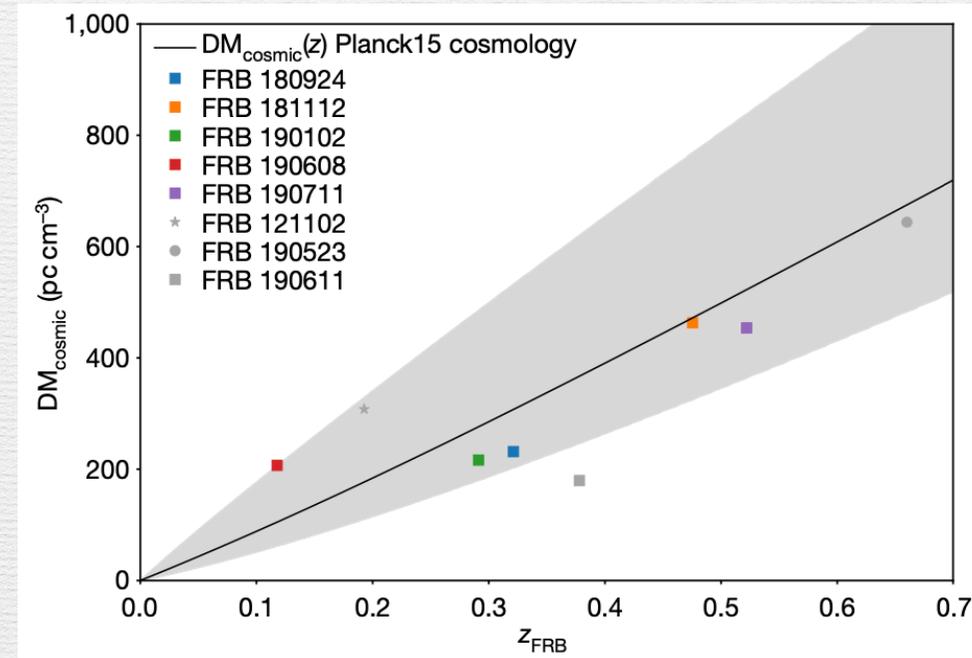
- $\Omega_b = \rho_b / \rho_{\text{crit}} \sim 0.04$

- $\rho_{\text{crit}} = 3H^2 / (8\pi G) = 9.2 \times 10^{-30} h_{70}^2 [\text{g cm}^{-3}]$

- その大半は銀河間空間の電離ガスとして存在すると考えられてきた

- しかし、直接、観測で捉えられていたわけではなかった
- 「ミッシングバリオン問題」

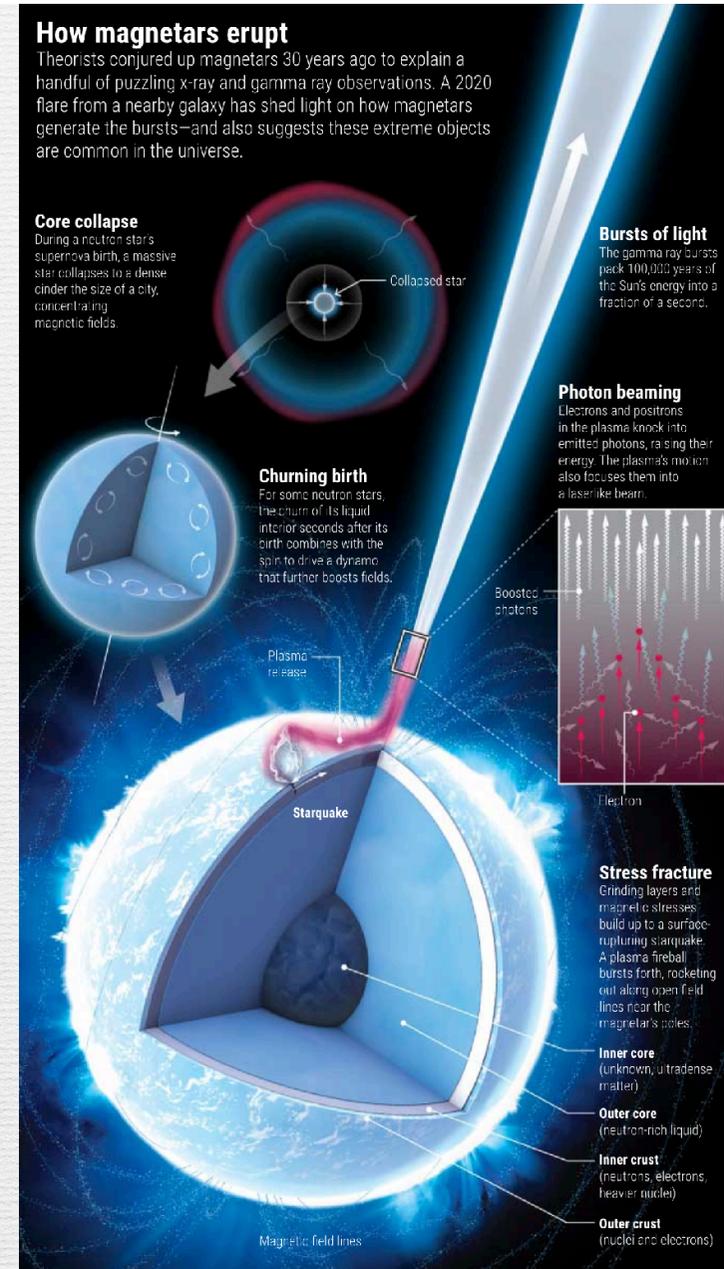
- FRB の DM vs. z 関係は、最新宇宙モデルの予想と一致！



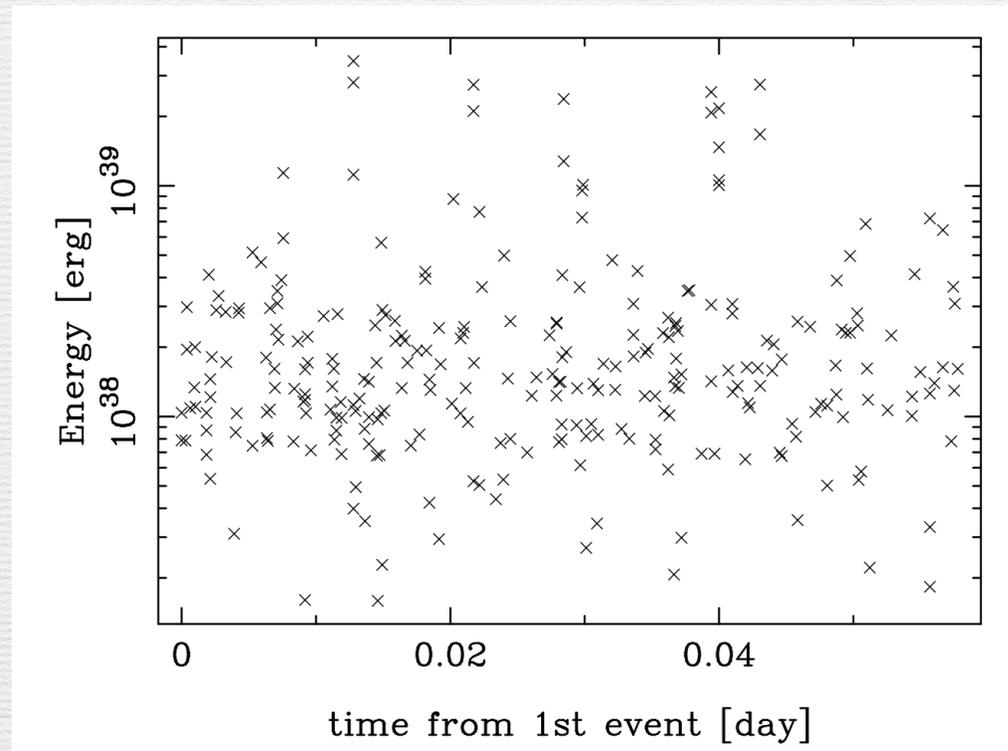
Macquart+'20

マグネターからのFRB

- マグネターとは？
 - 10^{14} G以上の強磁場を持つ中性子星
 - 普通のパルサーは 10^{12} G程度
 - 磁気エネルギーが内部から浮上し、中性子星地殻に圧力をかけて破壊 = 「星震」
 - それをきっかけに様々な爆発・フレア現象
- 銀河系内のマグネター SGR 1935+2154 から、極めて明るいミリ秒の電波バーストが発見
 - 遠方の銀河で同様の現象が起きれば、典型的なFRBとして観測される
 - 少なくとも一部の FRB は、マグネター起源



一つのリピーターFRBから多数のバースト…地震との類似性は？



data for FRB 20121102A
from Jahns+'23

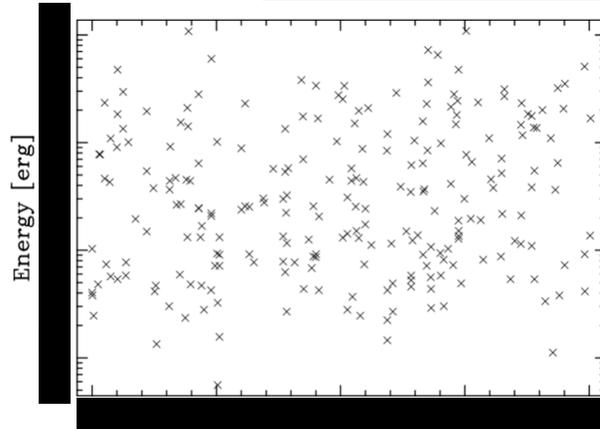
FRB と地震…どっちがどっち？

- 相関関数 $\xi(\Delta t)$

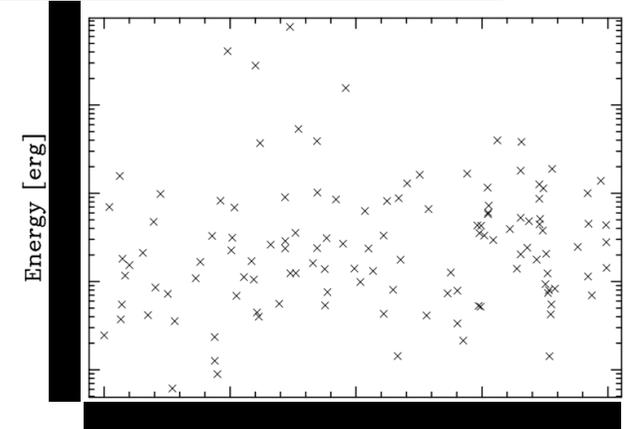
- Δt だけ離れた2つのバーストペアの生じやすさ (無相関の場合に比べて)

- 相関関数 ~ 余震の発生頻度

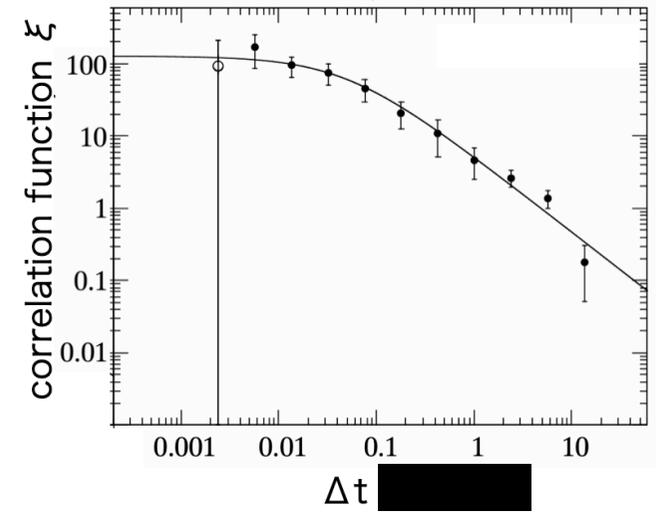
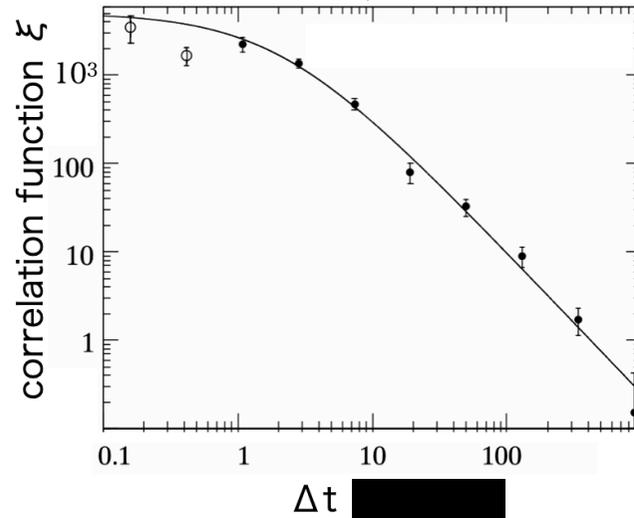
- 地震の余震の発生頻度は $(\Delta t)^{-1}$ のべき乗で減衰 (大森法則)



time [day]



time [day]



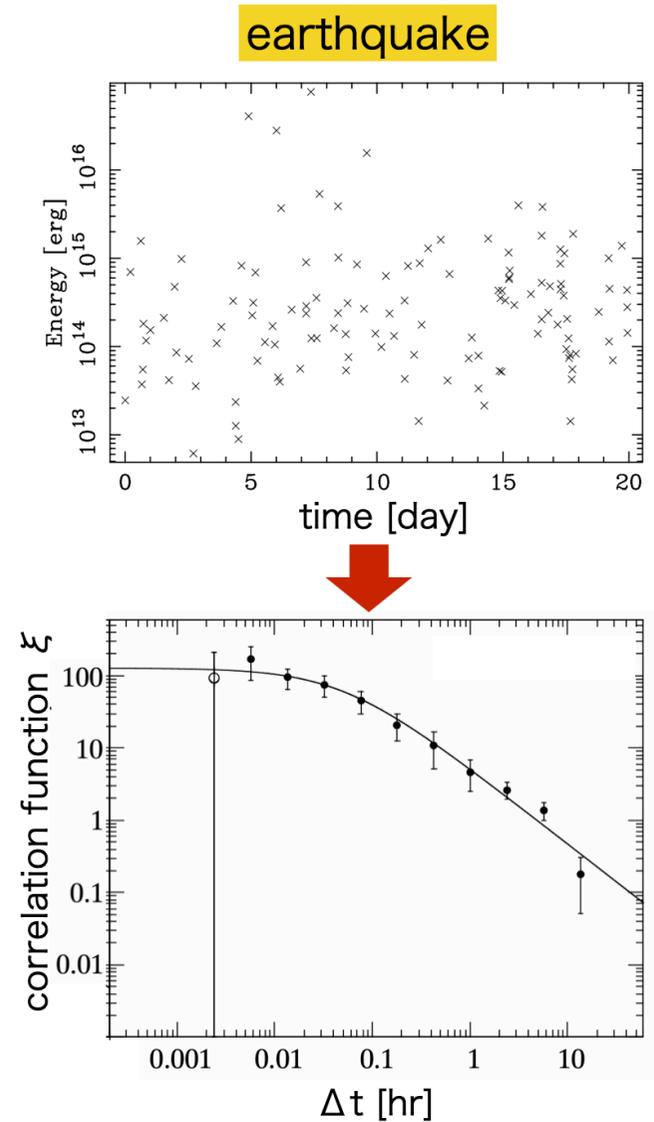
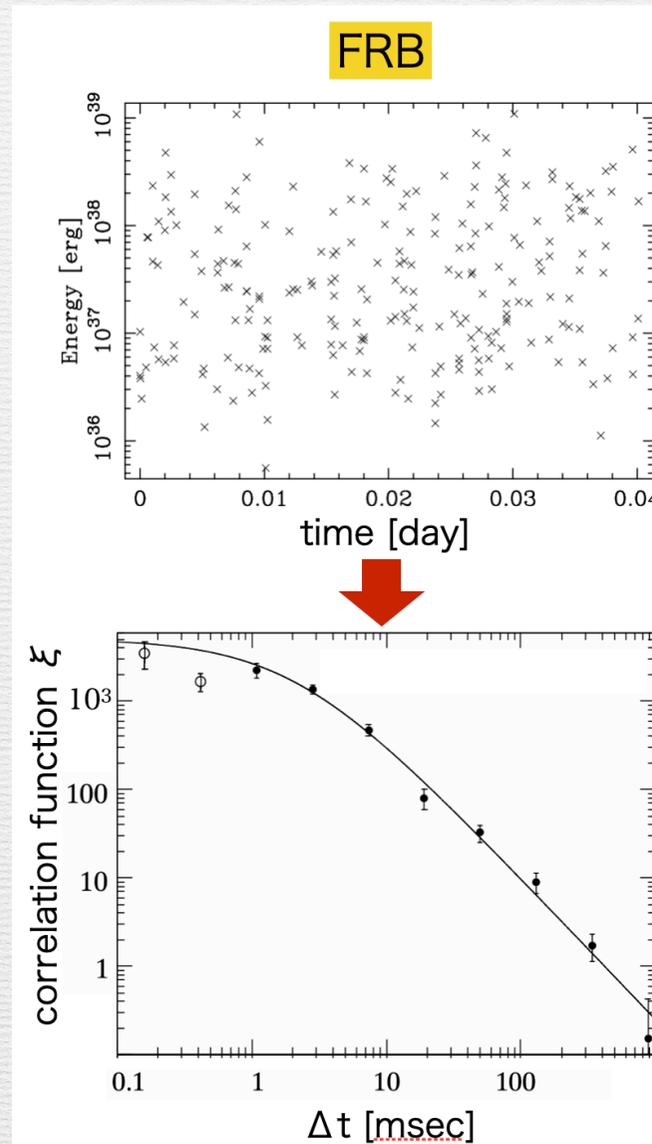
FRB と地震…どっちがどっち？

- 相関関数 $\xi(\Delta t)$

- Δt だけ離れた2つのバーストペアの生じやすさ (無相関の場合に比べて)

- 相関関数 ~ 余震の発生頻度

- 地震の余震の発生頻度は $(\Delta t)^{-1}$ のべき乗で減衰 (大森法則)



地震研究における日本の巨人たち

- 大森 房吉 (1868-1923)
 - 大森公式 Omori, F. “On the after-shocks of earthquakes.” The journal of the College of Science, Imperial University, Japan 7, 111-200 (1894).
 - 余震レート $\propto (\Delta t + \tau)^{-1}$
- 宇津徳治 (1923-2004)
 - 拡張大森公式 Utsu+ '94
 - 余震レート $\propto (\Delta t + \tau)^{-p}$



On the After-shocks of Earthquakes.

by

F. Ōmori, *Rigakushi.*

I. General Considerations.

§ 1. A strong earthquake is almost invariably followed by weaker ones and when it is violent and destructive the number of minor shocks following it may amount to hundreds or even thousands. When after-shocks are not reported to have happened it is probably because they were deemed unimportant to record. Or it may be that the seat of origin of the earthquake being very deep or far out under the ocean-bed, the after-shocks did not reach the observer.

Complete records of after-shocks were obtained, I believe, for the

地震研究における日本の巨人たち

- 地震のエネルギー分布がベキ則になることを、Gutenberg-Richter (1944)則と言いますが…
 - $\log N(>M) \propto M^{-b}$, $dN/dE \propto E^{-1-2b/3}$, $b \sim 1$
- 和達清夫(1902-1995, 「和達-ベニオフ面」で有名)が、1932年に見つけていた
 - Wadati, K. “On the frequency distribution of earthquakes.” Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II 10, 559–568 (1932) (in Japanese).
 - Richter がマグニチュードの概念を提唱した際も、和達の研究に触発された
- 余談・和達三樹（1945-2011, 物性物理学者、東大物理学科教授）は息子



氣象集誌第二輯第十卷第十號
論 文
地震回数分布に就いて
(中央氣象臺彙報)
和 達 清 夫
On the Frequency Distribution of Earthquakes.
by K. Wadati.

一、緒 言
昭和七年六月の地震研究所談話會に於いて、寺田教授は「地震の分布と観測所の分布」と題する研究を發表された。本文は之と同様な構想に依つてなされたものである。
一般に観測される地震の回数は、観測所の數が多い程増加し、観測所の地震計の感度が鋭敏なる程又増加する。即ち勢力の小なる地震は観測されない場合があるからである。今地震の發現回數が到る所同じである、換言すれば地震發現回數密度が一定であると假定する。かゝる場合に於いても、ある一個所の観測所に依つて観測される地震の分布は、観測所附近に密であり、観測所を距るに従ひ疎となる。

二、理 論
地震のエネルギーを E とする。而して此の地震のために、震源より r だけ距つた所に存在する観測所に於いて観測された地震波の振幅を A とする。其の時は

は、第一に地震のエネルギー如何に減衰し震のエネルギー發現回數が到る所に最も多く發現し、地震の發現回數が到る所に最も多く有する。よく

この觀測結果から
一、地震發現回數の地震エネルギーに對する分布を知る事が出来る。本文に於ては其の方法、並びに東京の地震觀測結果より調査したる實例に就いて述べられて居る。
二、地震發現回數と震源の深さとの關係

く有する。後にて詳説された地震の分布にかなり複雑なものが期待される筈であるが、併し適當な考慮を加へる時は、

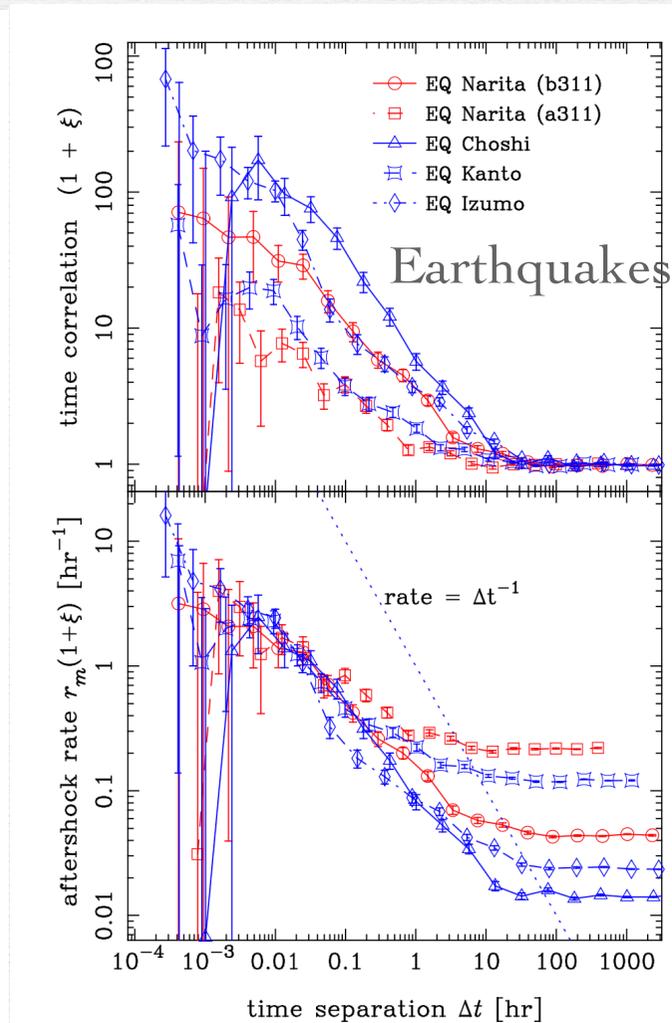
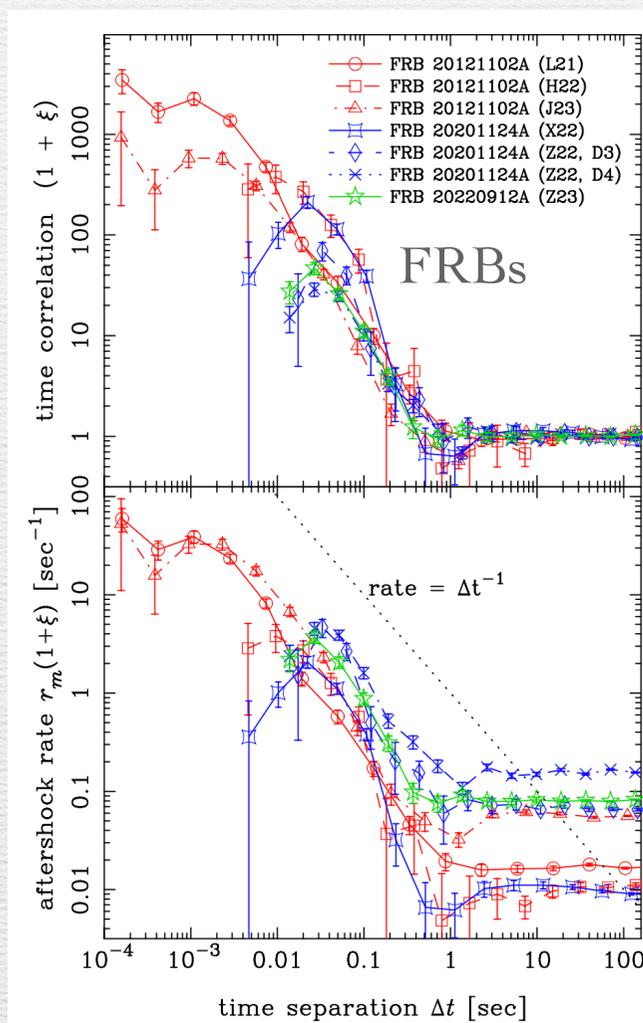
五五九



FRB と地震の余震の類似性の発見

Totani+'23

- FRB も地震と同じように、頻度がべき乗で減衰する余震を起こしている
 - どの FRB 源でも、どの震源地域でも普遍的
- ただしべき指数が異なる。 $(\Delta t)^p$
 - 地震 $p \sim -1$
 - FRB $p \sim -2$
- 一つのイベントに付随して起きる余震の回数期待値(~ 0.1)も、両者で一致
- FRB は中性子星の地殻破壊、星震に由来？
 - 中性子星物質の物理に迫る新たな手がかり？



地震データにも同じ解析をしてみた

- JUICE (Japan Unified hi-resolution relocated Catalog for Earthquake)カタログを使用

