

10270

7702

5135

2567

科学技術と文化総合講義 (宇宙と地球の科学)

片岡龍峰

第9回:2012年7月9日

「暗い太陽のパラドックス」

授業内容

- 1. 授業ガイダンス(オーロラ上映あり) 4月16日
- 2. 太陽地球環境1(大地から太陽系の果てまで)
- 3. 太陽地球環境2(生命を守る3つの盾「太陽風・地磁気・大気」) 4月23日
- 4. 太陽地球環境3(生命を脅かす3つの槍「宇宙線、宇宙塵、太陽紫外線」) 4月30日
- 5. 宇宙災害1(磁気嵐と大停電) 5月7日
- 6. 宇宙災害2(放射線帯と人工衛星障害) 5月21日(休講) 5月14日
- 7. 宇宙災害3(銀河宇宙線と太陽放射線被ばく) 5月28日
- 8. 宇宙天気予報1(世界の宇宙天気モニター) 6月4日
- 9. 宇宙天気予報2(宇宙天気の数値予報) 6月18日(休講) 6月11日
- 10. 太陽気候関係1(マウンダー極小期と魔女狩り) 6月25日(休講)
- 11. 太陽気候関係2(宇宙線雲仮説) 7月2日
- 12. 宇宙史と地球史1(暗い若い太陽のパラドックス) 7月9日
- 13. 宇宙史と地球史2(超新星と大絶滅) 7月16日
- 14. 宇宙史と地球史3(暗黒星雲と雪玉地球) 7月23日
- 15. まとめ

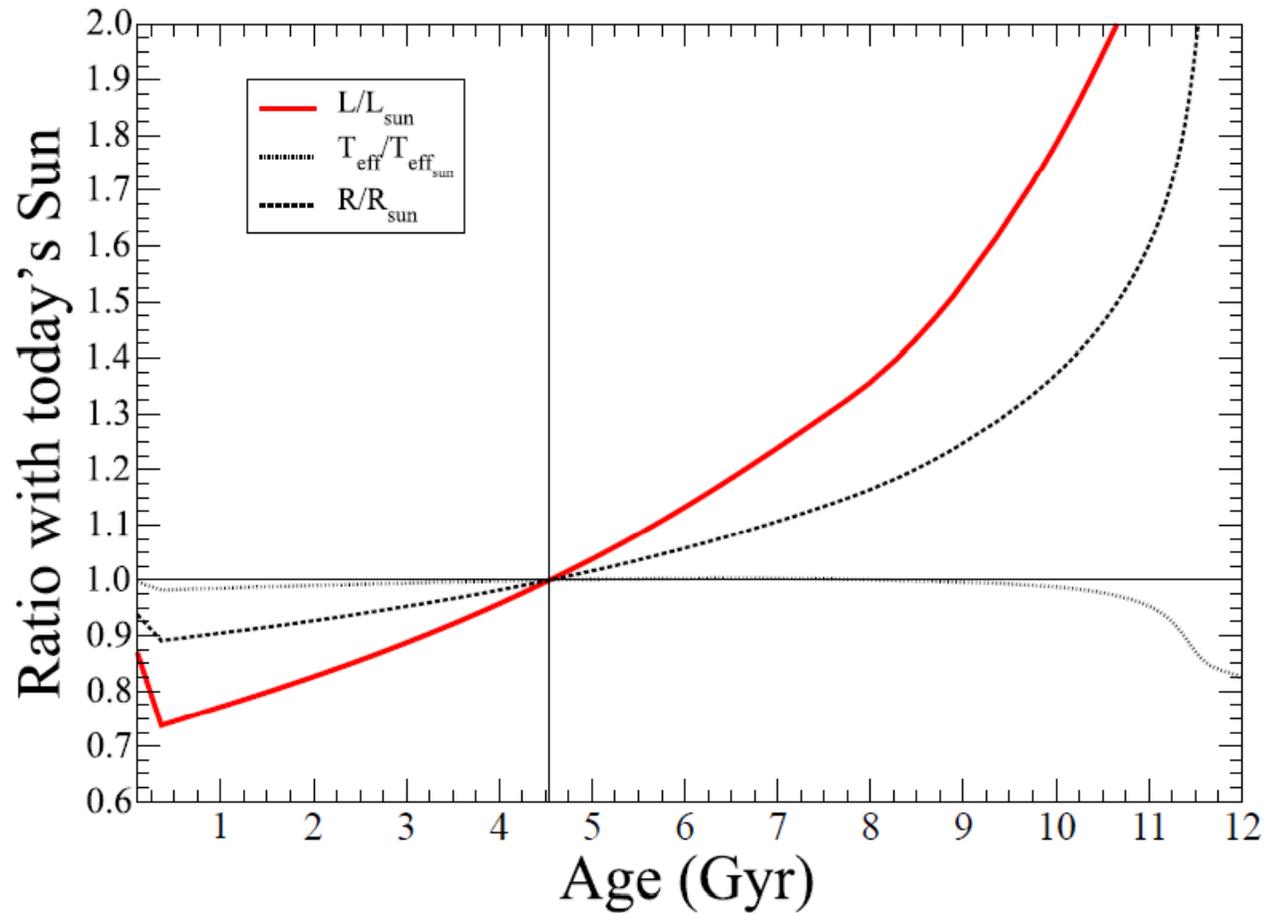
* 授業の内容は進み具合や最新的话题に合わせて適宜調整します。

暗い太陽のパラドックス

- 大気組成とアルベドに変化がなければ23億年前より過去の地球の平均気温は氷点下になる
 - 標準太陽モデルによると太陽光は今の8割以下
- 約30億年前より以前から、地球は液体の水に覆われていたことを示す地質学的証拠が存在する
 - 火星にも当時の流水地形の痕跡が豊富に存在
- 太古の大気組成が温室効果ガスに富んでいたと考える一つの仮説
 - Sagan and Mullen (1972) Science, 177, 52-56

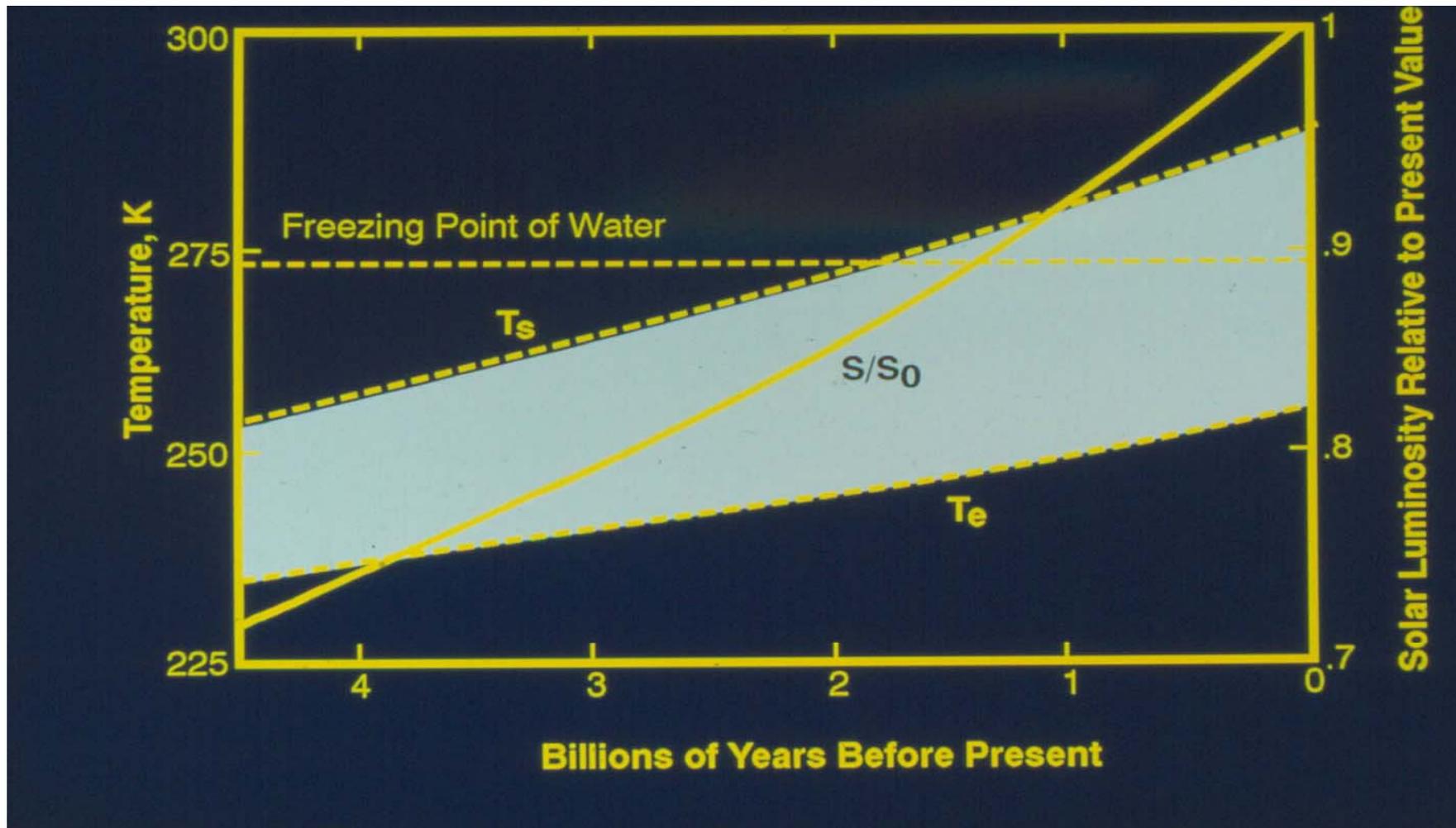
太陽は暗かったはず

標準太陽モデルによると、太陽は年をとるほど明るくなる。



Ribas (2009) in "Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets"
Proceedings IAU Symposium No. 264.

すると20億年以前の地球は氷点下



Kasting et al, Scientific American, 1988

惑星の平衡温度

- 入射エネルギーと放射エネルギーが等しい。

地球の断面積 x 太陽定数 x 吸収率 = 地球の表面積 x 黒体放射

$$\pi R^2 S(1 - A) = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$$

$$T_e = \left(\frac{S(1 - A)}{4\sigma} \right)^{1/4} = 255(S / S_{\odot})^{1/4} ((1 - A) / 0.7)^{1/4} \text{ K}$$

ステファンボルツマン定数
 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

太陽定数
 1366 W/m^2

アルベド
0.3

地球の平均気温 $15^{\circ}\text{C} = 288\text{K}$ との差、 33K は温室効果による。
太陽光が30%減ると、 $T_e = 255 \times 0.7^{0.25} = 233\text{K}$ 。

27億年前、地球は水に覆われていた物証

ストロマトライト(最古:27億年前)

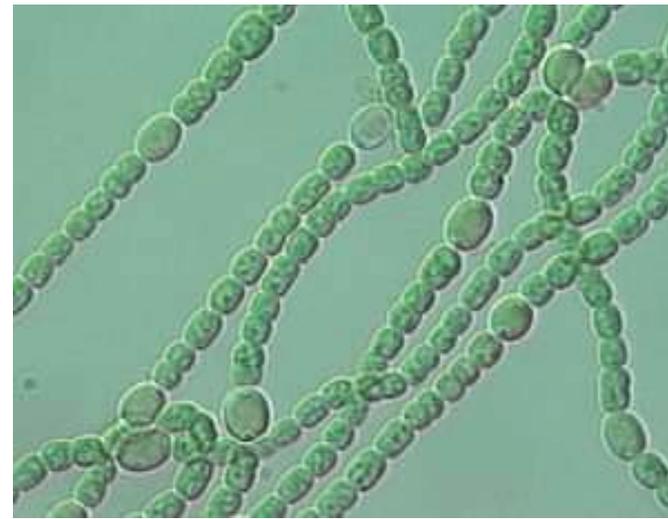
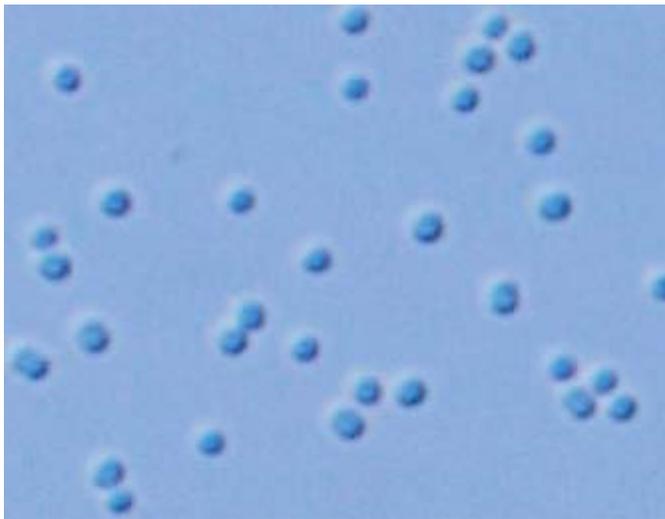
シアノバクテリアが代謝によって粘液を分泌し、この粘液に海中を浮遊している微粒子などが付着して次々と成長し、石化したもの



http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lake_Thetis-Stromatolites-LaRuth.jpg

シアノバクテリア

- 生物の進化の歴史の中で初めて、酸素の発生を伴う光合成の能力を獲得した生物。
- この地球上に酸素が豊富にあるのはシアノバクテリアのおかげ。



涙型の中州が、液体の流れがあったことを強く示唆する

火星の洪水地形

惑星形成後
10~15億年以内
にできたと推定
される非常に古
い地形が残る



現在ですら氷点下
なのに、太陽が暗
かったはずの時代
に液体の水の流れ

(NASA提供)

支流系を持ち、北半球の古い高地の至るところに見られる

火星のバレーネットワーク



(NASA提供)

大気密度が現在と変わらないため、桁違いの温室効果ガスはなかったことになる。

27億年前の雨化石から大気を復元



Figure 1 | Solid evidence. Som *et al.*³ have analysed the fossilized imprints of raindrops, such as those shown here, to determine the atmospheric density 2.7 billion years ago. Rule, 5 cm.

both on the size of the drop and on the nature of the substrate onto which it falls. To constrain these variables, the authors observed the size distributions of naturally occurring raindrops, and coupled this information with data from experiments in which they let water droplets fall onto volcanic ash — mimicking the conditions in which the fossil raindrops formed.

Som *et al.* conclude that the atmospheric density 2.7 billion years ago was probably 50 to 105% of that today. This finding immediately calls into question solutions to the faint young Sun paradox that invoke elevated concentrations of greenhouse gases, unless small increases of greenhouse-gas concentration were able to exert a large warming effect. It is also unlikely that higher concentrations of greenhouse-enhancing nitrogen could have caused the paradox, because concentrations of twice or more the present atmospheric abundance

惑星の平衡温度

- 入射エネルギーと放射エネルギーが等しい。

地球の断面積 x 太陽定数 x 吸収率 = 地球の表面積 x 黒体放射

$$\pi R^2 S(1 - A) = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$$

$$T_e = \left(\frac{S(1 - A)}{4\sigma} \right)^{1/4} = 255(S / S_{\odot})^{1/4} ((1 - A) / 0.7)^{1/4} \text{ K}$$

ステファンボルツマン定数
 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

太陽定数
 1366 W/m^2

アルベド
0.3

地球の平均気温 $15^\circ\text{C} = 288\text{K}$ との差、 33K は温室効果による。

太陽光が30%減ると、 $T_e = 255 \times 0.7^{0.25} = 233\text{K}$ 。

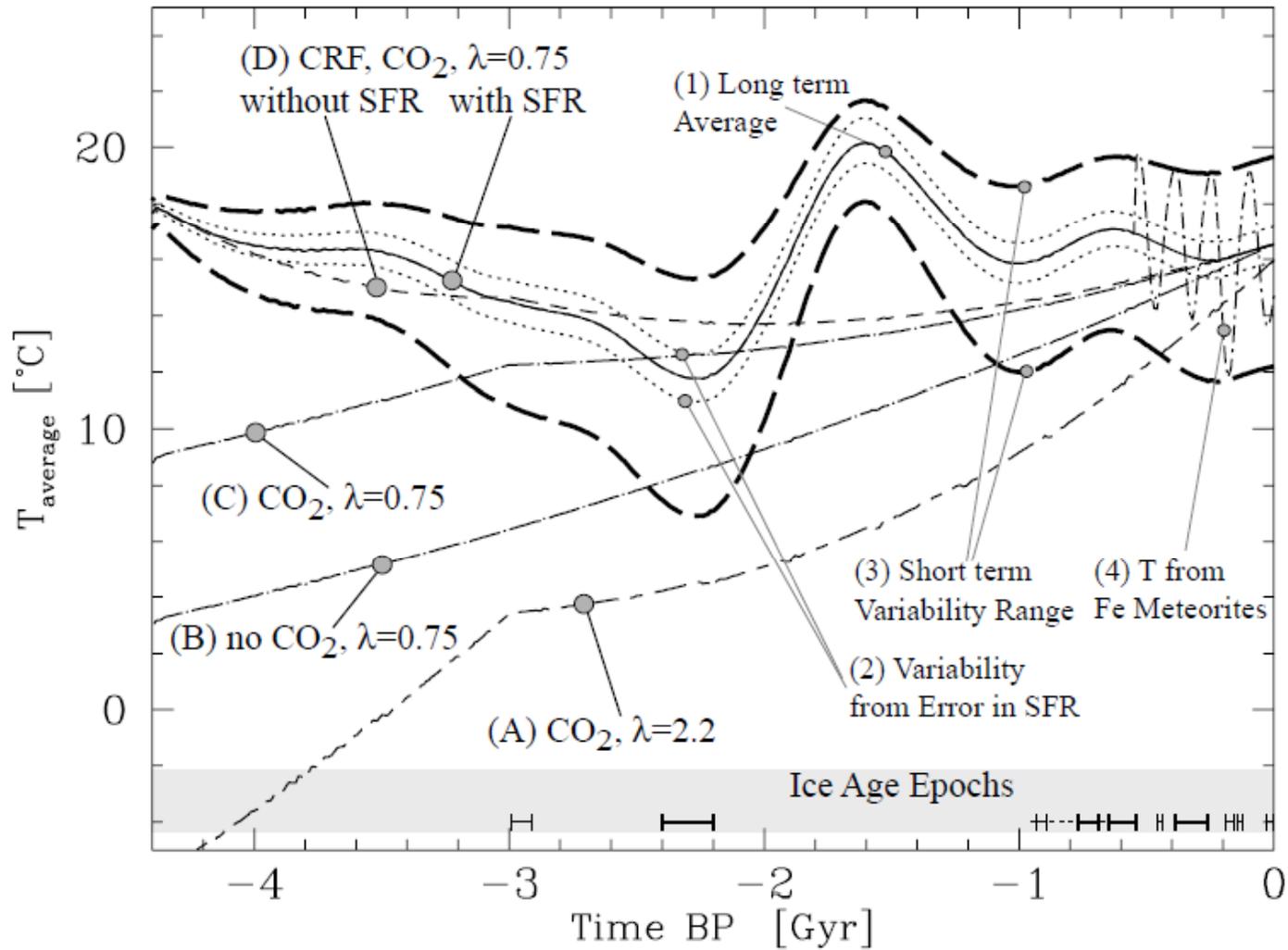
しかしアルベドが0.1だと、 $T_e = 233 \times (0.9/0.7)^{0.25} = 248\text{K}$ 。

An aerial photograph showing a vast, continuous layer of white, fluffy clouds that stretches across the entire horizon. The sky above is a clear, deep blue with some wispy clouds near the top. The perspective is from a high altitude, looking down on the cloud layer.

低い雲は光を反射して地球を冷やす(日傘効果)
・・・ほとんど雲のない地球だったら・・・

若い太陽の激しい太陽風で宇宙線が地球に到達しにくい→低層雲が減る

宇宙線を介した雲仮説



(Shaviv2003)

その他の雲仮説

- アルベド仮説

- 気温が下がると大気水蒸気量が減り、雲量も低下。そのため地球の太陽光の吸収が良くなる

- Rossow et al. 1982 Science

- 大きな海陸比と生物由来雲凝結核の欠乏

- Rosing et al. 2010 Nature

- 巻雲仮説

- 暗い太陽の下では湿潤対流が弱まって雲粒から雨粒への転換が悪くなる。そのために巻雲量が増え温室効果が強まる。

- Rondanelli and Lindzen 2010 JGR

生物・雲フィードバック

(B) CO₂を4倍にしても白亜紀の温暖期は説明できない。

(C) 雲粒径を2.2倍にすることで温暖期を説明できた。

生物起源のエアロゾルが無いために雲粒が大きくなる、と仮定した結果。

全球雲量: 64% → 55%
アルベド: 0.3 → 0.24

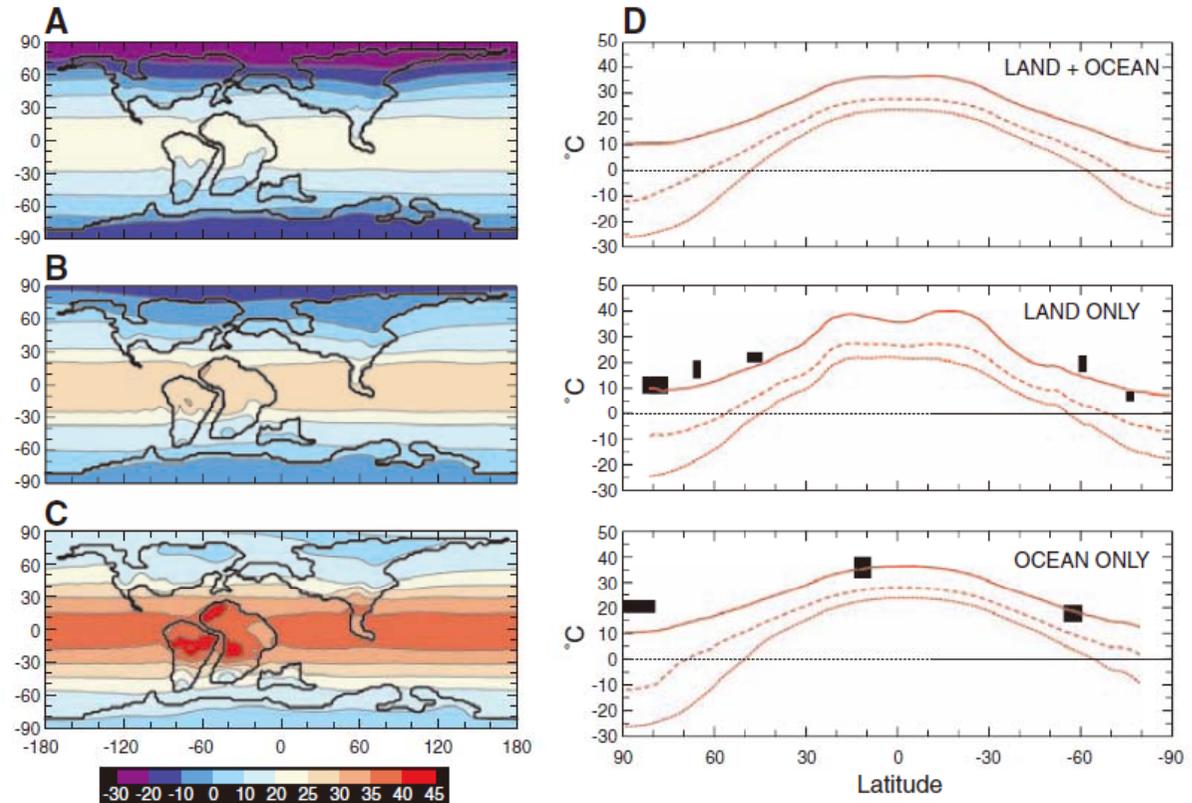


Fig. 1. Annual mean surface-air temperatures (°C) in GCM simulations of Middle Cretaceous (~100 Ma, low sea-level stand) and zonal averages **(A)** with CO₂ concentration 1× PAL (280 parts per million by volume), **(B)** with 4× PAL CO₂, and **(C)** with 4× PAL CO₂ and increased liquid-cloud r_e and P_e . **(D)** Zonal average temperatures for land and ocean, land only, and ocean only, with ocean (1) and terrestrial (6, 7) proxy temperature data for the Middle Cretaceous shown as solid rectangles. Dotted line indicates data from simulation with 1× PAL CO₂; dashed, with 4× PAL CO₂; and solid, with 4× PAL CO₂ and increased liquid-cloud r_e and P_e .

温室効果を高める巻雲



実は暗くなかった太陽仮説

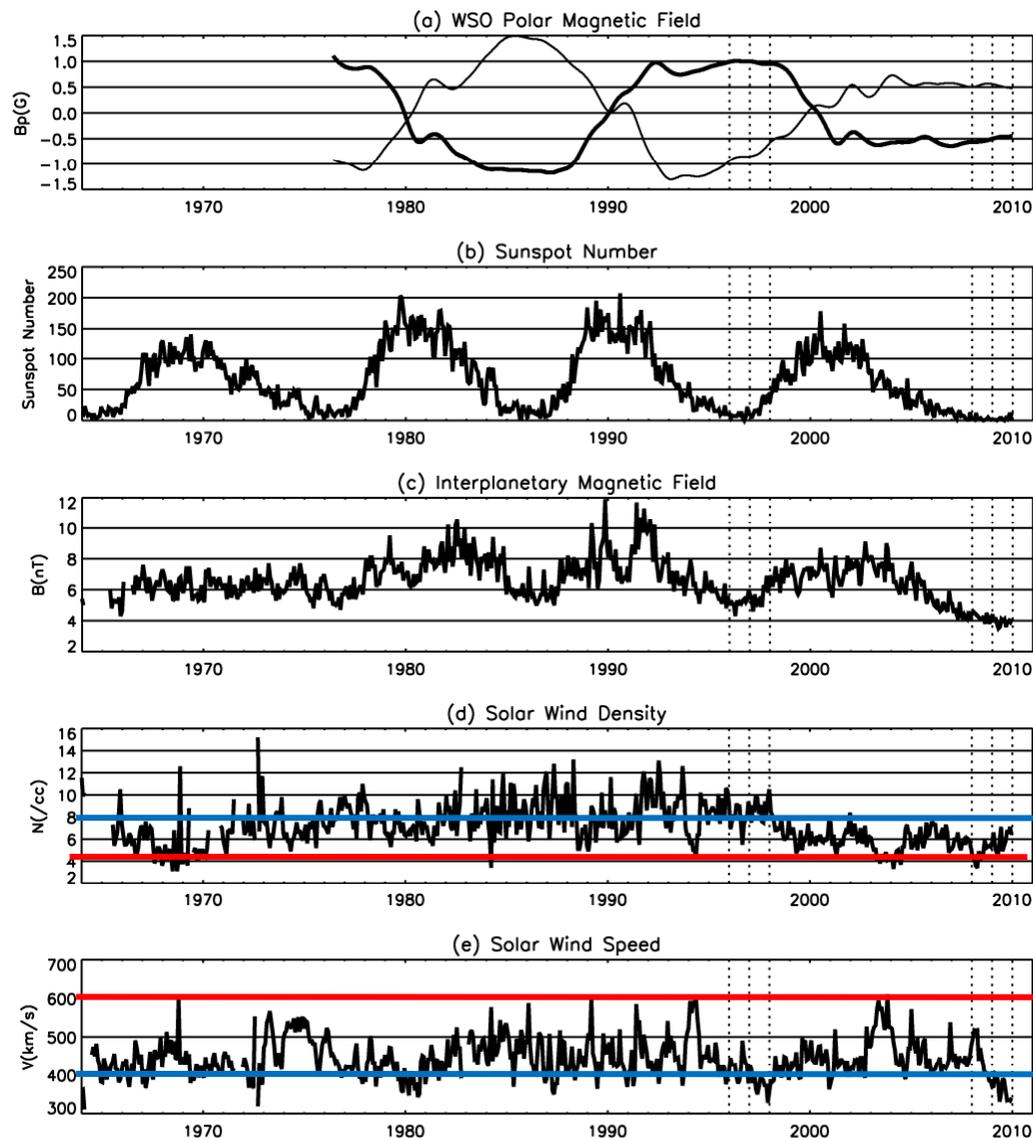
- 太陽の明るさは、質量の4乗に比例
– $L_{\odot} \propto M_{\odot}^4$
- 太陽と地球の距離は太陽の質量に反比例
– $a \propto M_{\odot}^{-1}$
- 太陽からの光量は距離の2乗に反比例
– $S \propto a^{-2}$
- 地球の表面の太陽からのエネルギーは、
– $S \propto M_{\odot}^6$

初期の太陽が今より5%重ければ太陽は十分明るかったことになるが、太陽風やコロナ質量放出によって太陽はどれくらい軽くなってきたのか。

今の太陽風

- 高速風@地球
 - 600km/s, 4/cc
 - $1.8 \times 10^{-14} M_{\odot}/\text{yr}$
- 低速風@地球
 - 400km/s, 8/cc
 - $2.4 \times 10^{-14} M_{\odot}/\text{yr}$

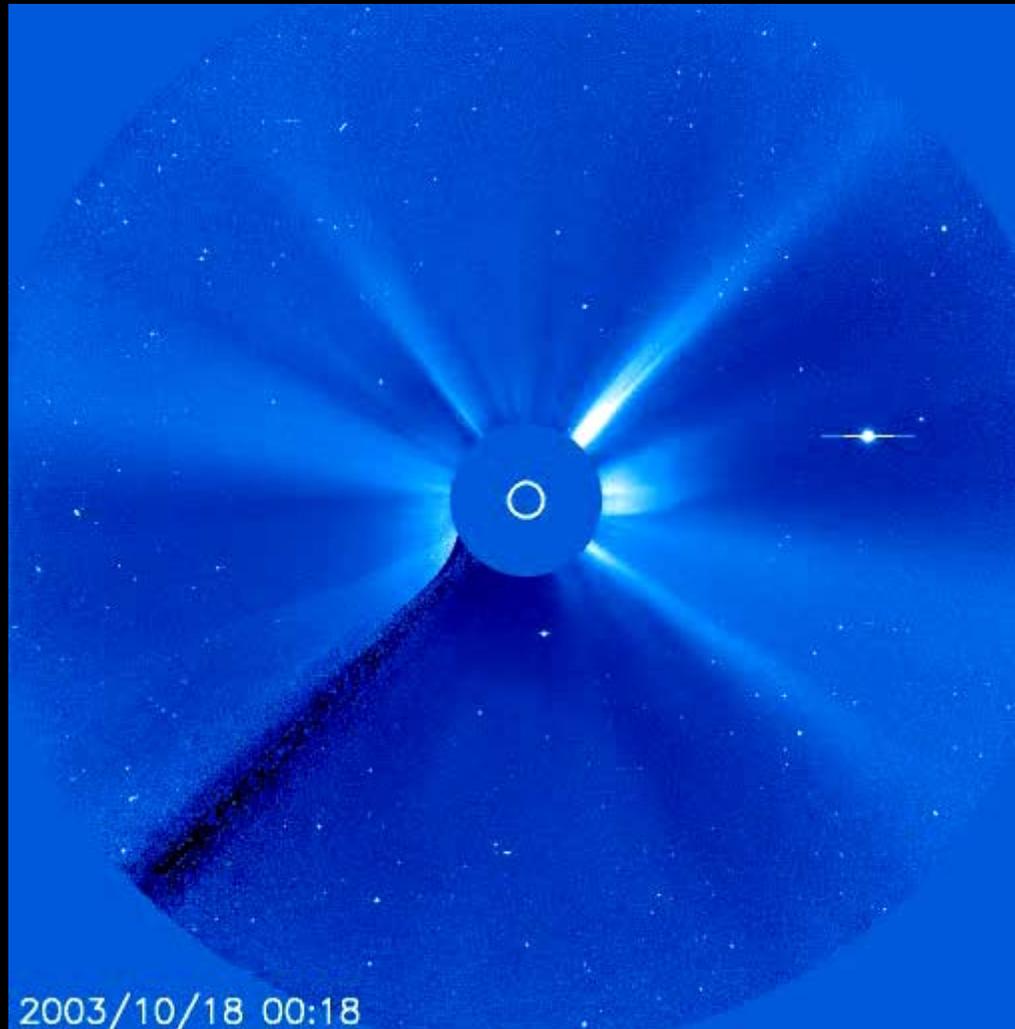
太陽質量は 2×10^{30} kgだから、
10億年で何%減るかな？



人工衛星による直接観測
Kataoka and Miyoshi, 2010

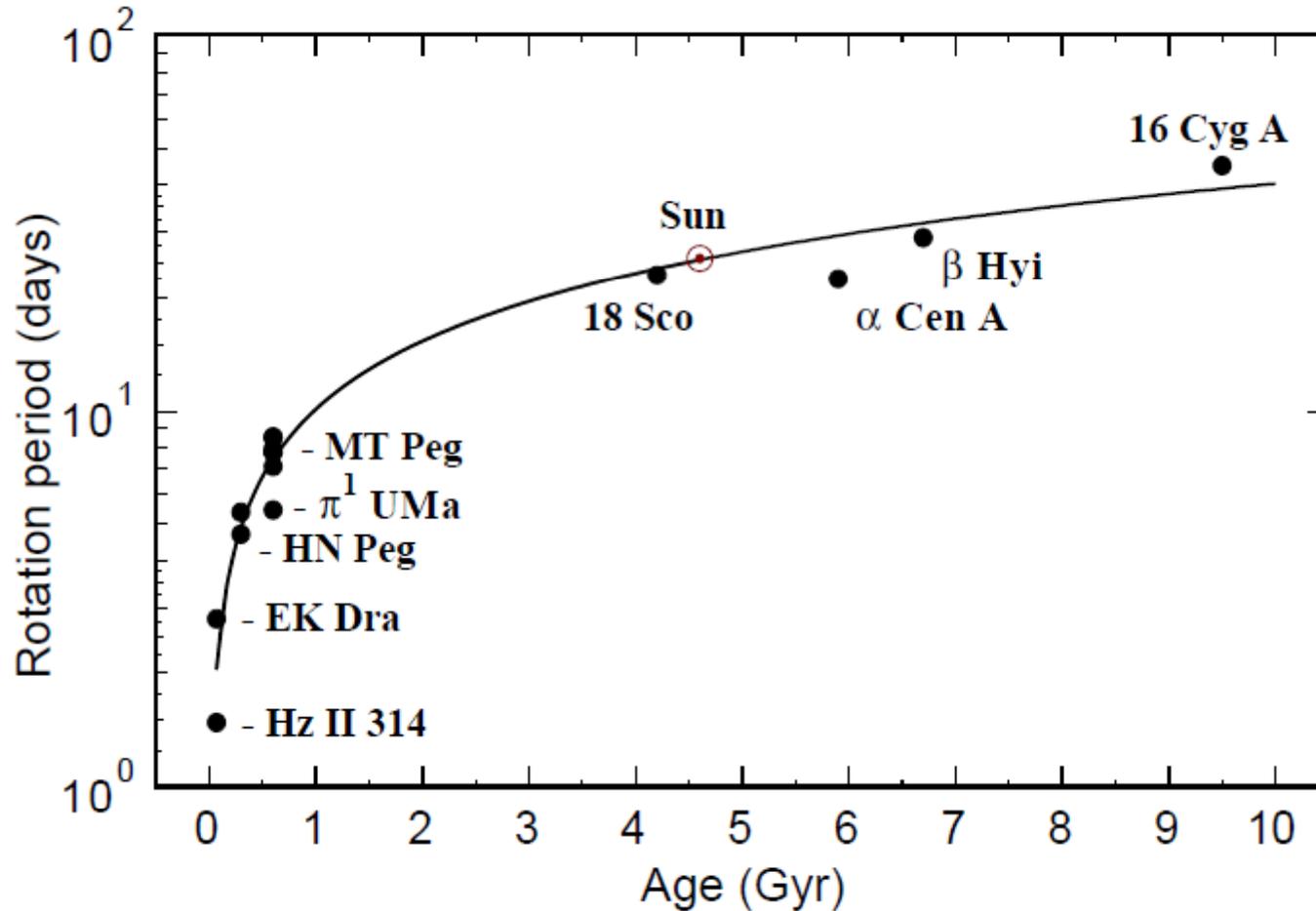
今のコロナ質量放出

$10^{-15} M_{\odot}/\text{yr}$



質量放出によって角運動量を失うという観測的制限がある。

若い星ほど自転が速い

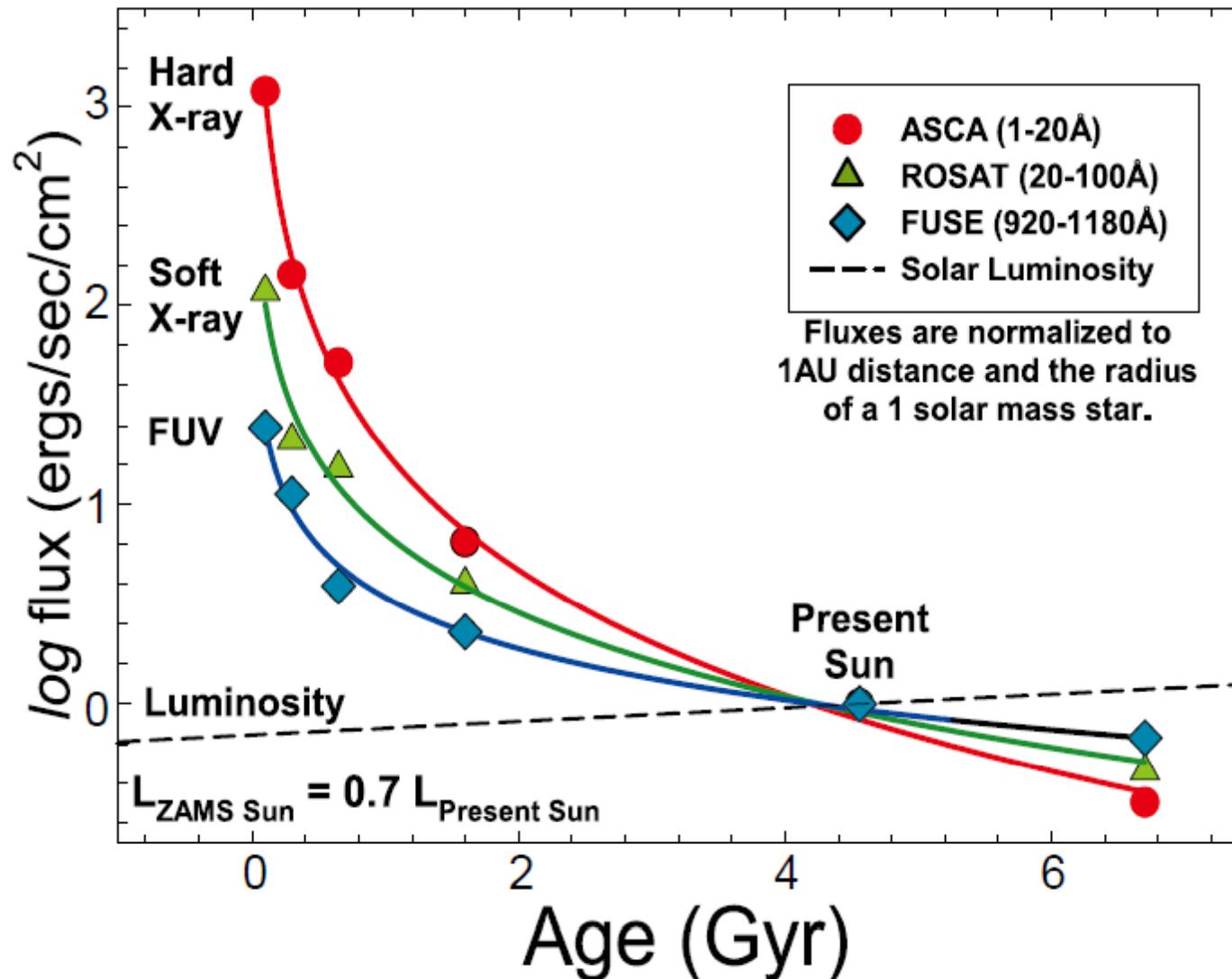


Ribas (2009) in "Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets"
Proceedings IAU Symposium No. 264.

自転が速いほど磁場活動が激しい

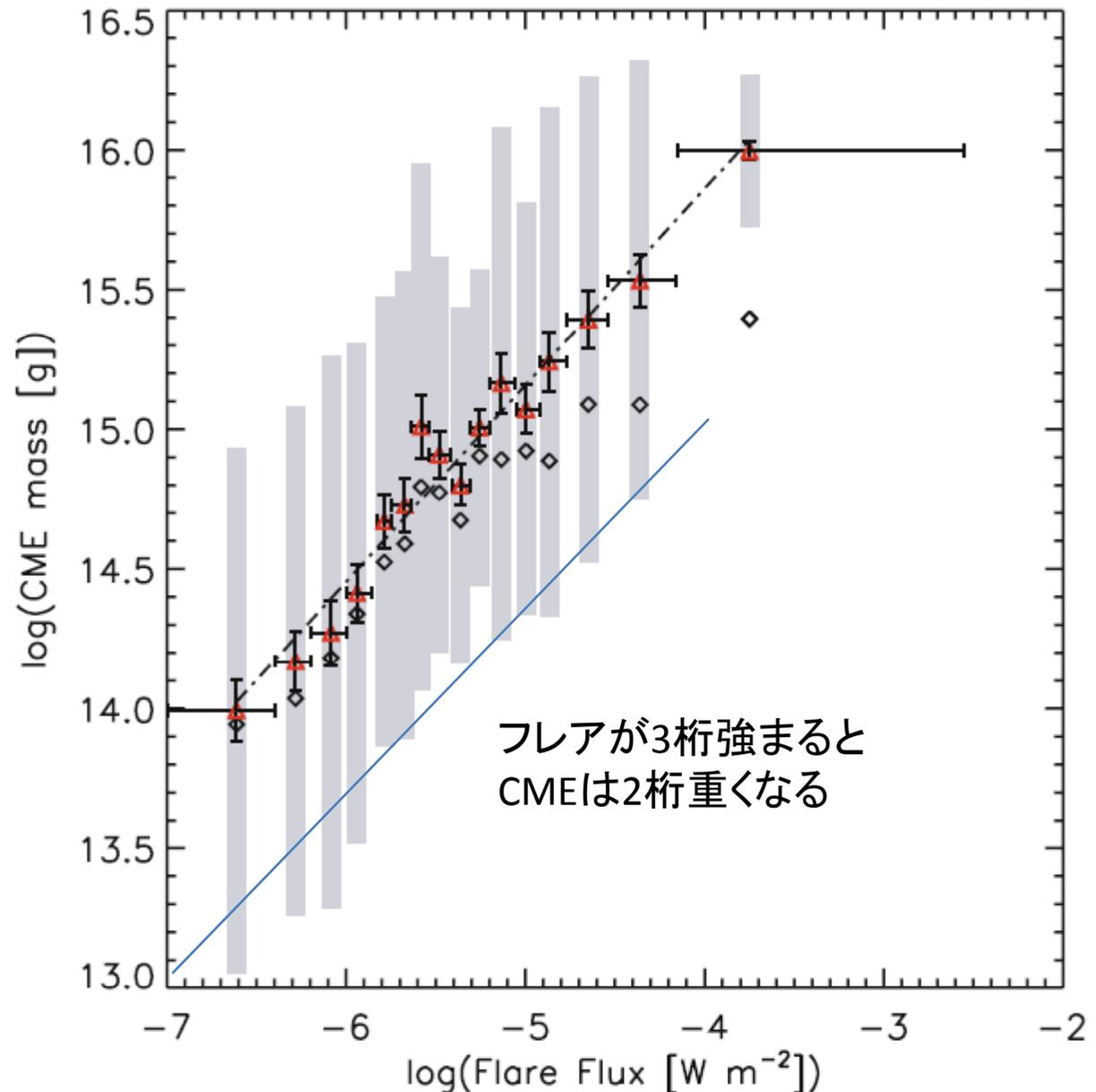
短波長に敏感な超高層大気への影響などを介して、惑星の進化に重大な影響がある

若い太陽の激しい磁場活動



Guinan, E. F. and Engle, S. G. (2009) in "The Ages of Stars"
Proceedings IAU Symposium No. 258

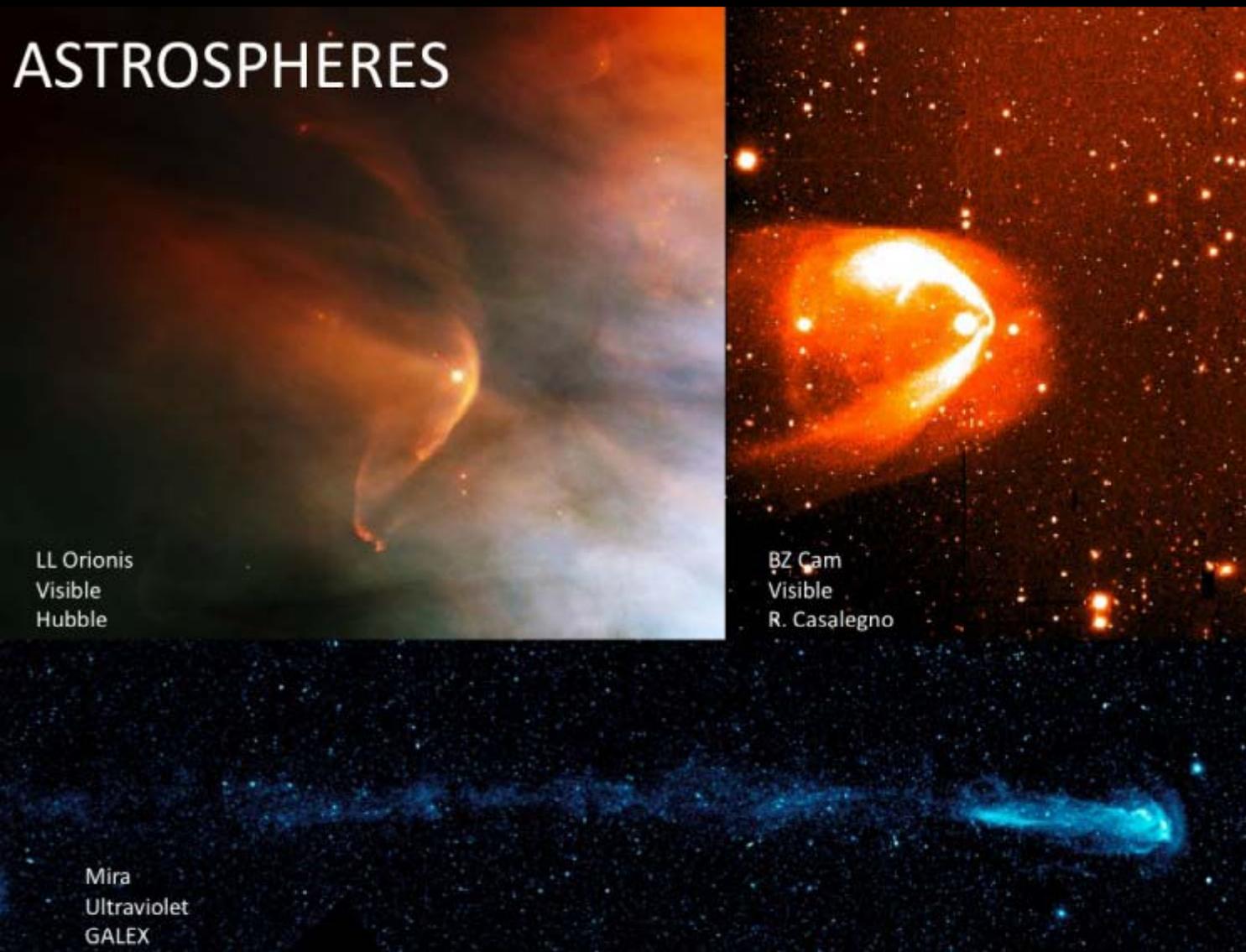
Figure 16 As in Figure 15, the relationship between flare flux and CME mass is shown. In this case, we include the sample of CMEs with poorly constrained mass measurements (Figure 1, dashed histogram), and see a relationship (diamonds, black) much like the one in Figure 15. The triangles (red) indicate how the function would change were we to include halo CMEs; we assign halo CMEs the maximum mass from the bin occupied by its associated flare. This function, fit by the dot-dashed (black) line, represents the steepest slope we could anticipate assuming that halo CMEs have masses which lie within the observed distribution.



初期に爆発的な質量損失の可能性

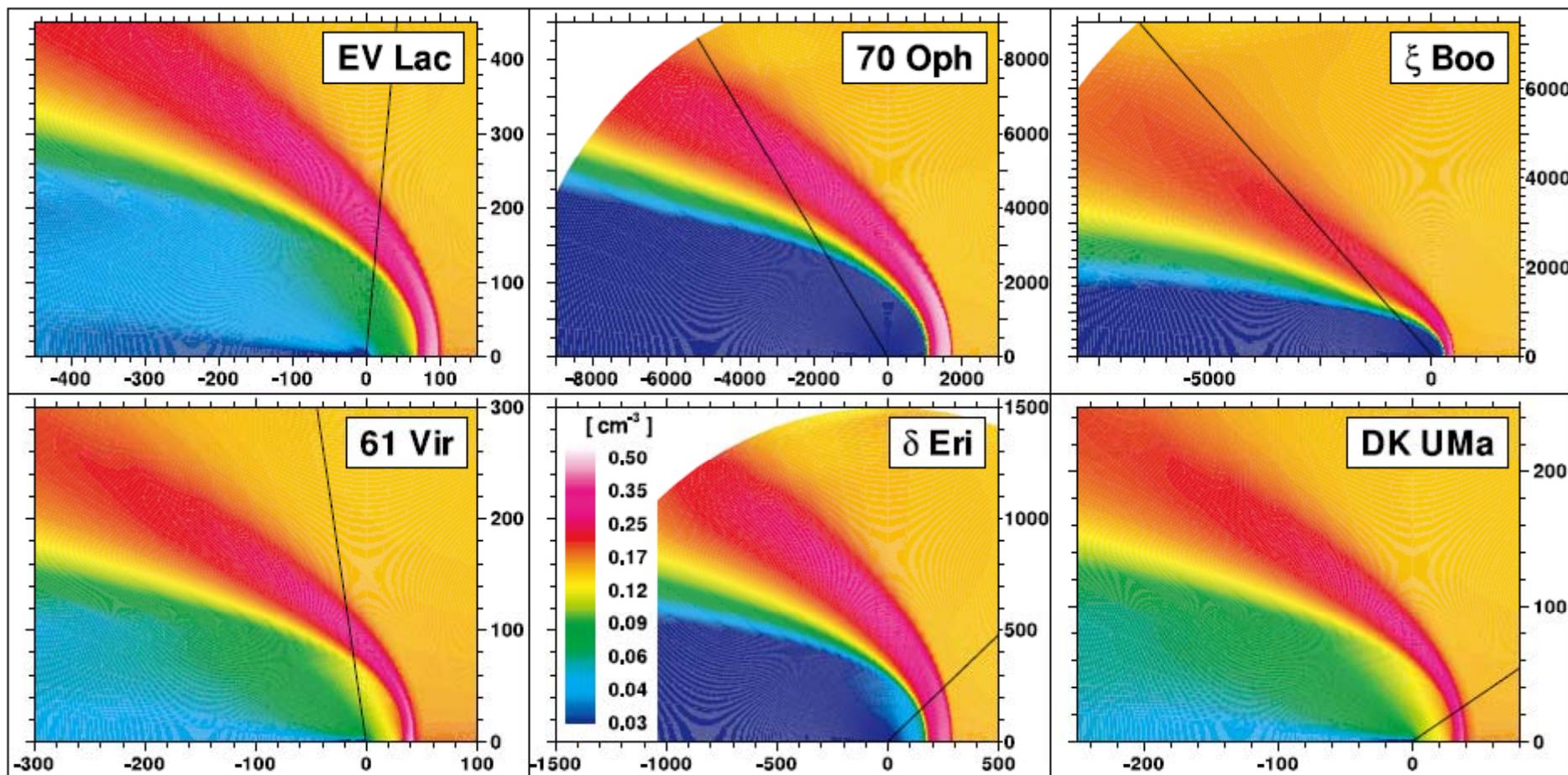
- 今の質量損失は低速風が支配的
 - 低速風 : $10^{-14} M_{\odot}/\text{yr}$
 - CME : $10^{-15} M_{\odot}/\text{yr}$
 - 定常風質量損失の1割程度。
- 初期の質量損失はCMEが支配的
 - CME : $10^{-11} M_{\odot}/\text{yr}$
 - 2桁重く、数が2桁多かった。定常風質量損失の10倍。

他の星の太陽圏は？



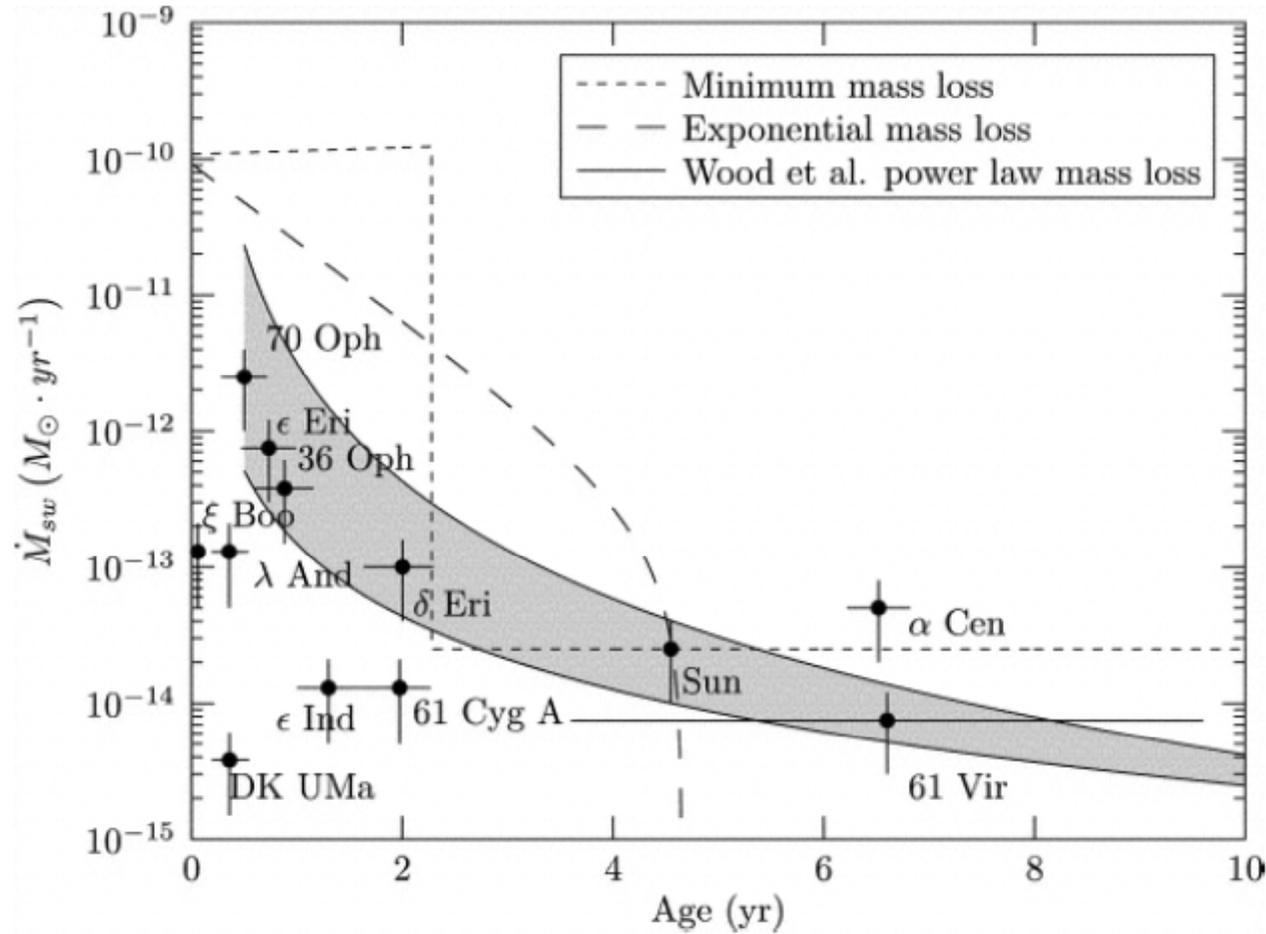
若い太陽と似た星の太陽風は？

ピンクの領域に溜まった水素の吸収線が、太陽風の圧力で変わることから質量損失を計算



太陽と似た星を集め、複雑な太陽圏モデルを介した結果では今のところ

初期の激しい質量損失の確証なし



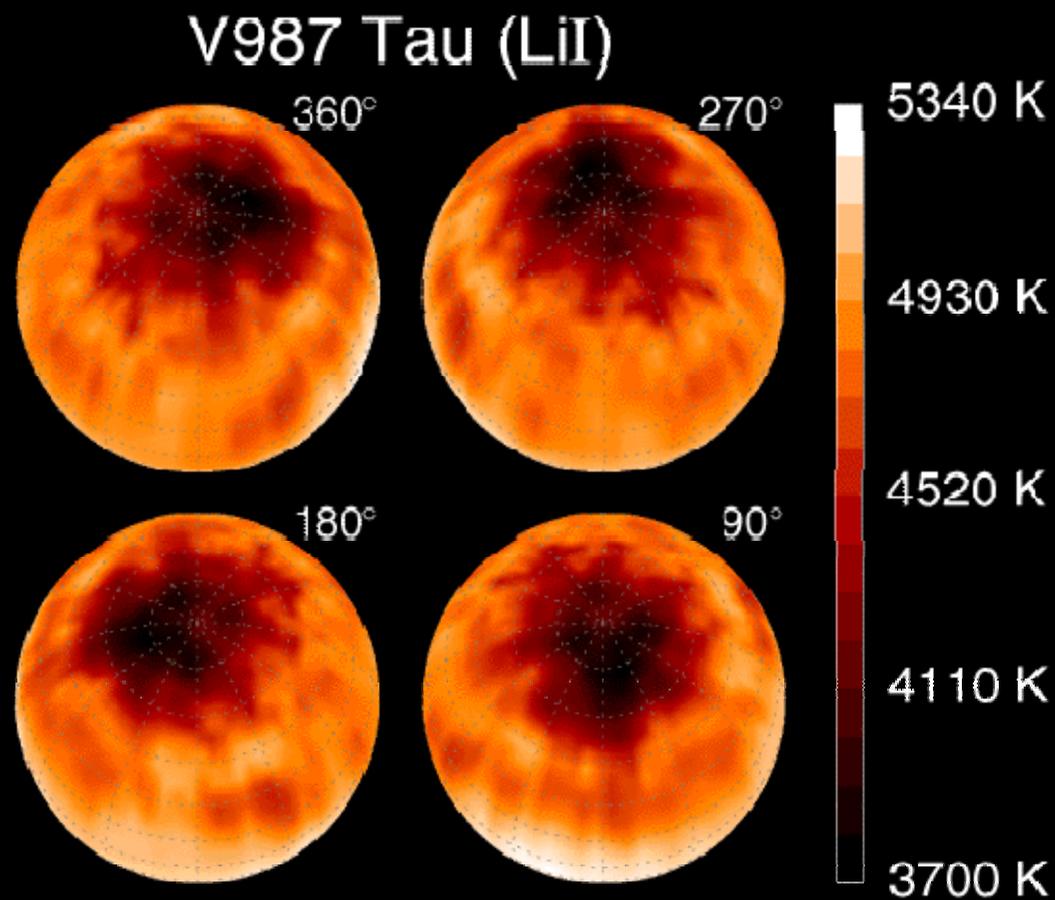
点線と破線は、地球の平均気温が氷点下にならないモデル

影の部分がWoodの結果

Minton and Malhotra 2007

実際、昔の太陽はどんなだったのだろう？巨大白斑説など他の可能性も？

Polar Spot



Credit: K. Strassmeier et al., <http://www.aip.de/groups/activity/DI/maps/>

「暗い太陽のパラドックス」まとめ

- 大気組成とアルベドに変化がなければ23億年前より過去の地球の平均気温は氷点下になる
 - 標準太陽モデルによると太陽光は今の8割以下
- 約30億年前より以前から、地球は液体の水に覆われていたことを示す地質学的証拠が存在する
 - 火星にも当時の流水地形の痕跡が豊富に存在
- 太古の大気組成が温室効果ガスに富んでいたと考える仮説は旗色が悪い
 - ほかにも雲アルベド仮説などが提唱されている

第9回アンケート

- 感想は自由に記入してください。
- 最終レポートのタイトルを教えてください。
 - 提出期限: 7月23日授業で回収します。
 - 7月16日に提出して頂いても構いません。
 - 短すぎず長すぎず4ページ程度にまとめること。
 - 図や表を示し、具体的な数字と根拠を出すこと。
 - 必ず文献を引用すること。
 - テーマは自由です。
 - ただし「宇宙と地球の科学」に関係すること。