

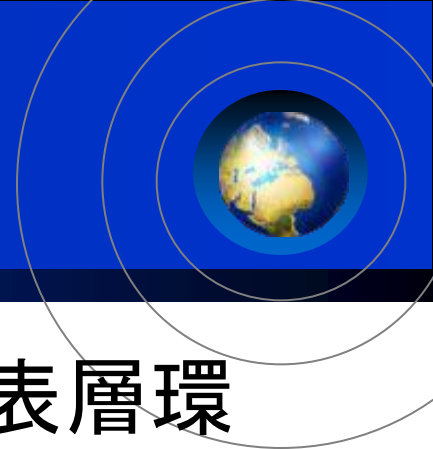
比較惑星学と 太陽活動の長期進化



北海道大学

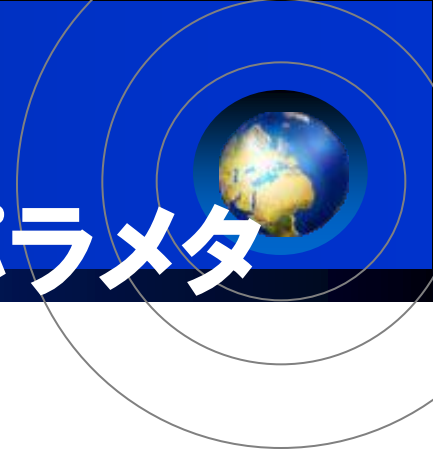
倉本 圭

ねらい



- 太陽活動の45億年間の進化が惑星表層環境にもたらす影響について、理解の現状を紹介する
 - － 太陽活動の長期進化の最新像: “暗い若年期” “活動的な若年期”
 - － 地球・火星大気進化の最新像: “CO₂パラダイム” から新パラダイムへ
- 従来の常識を検証し新しい切り口を探索したい

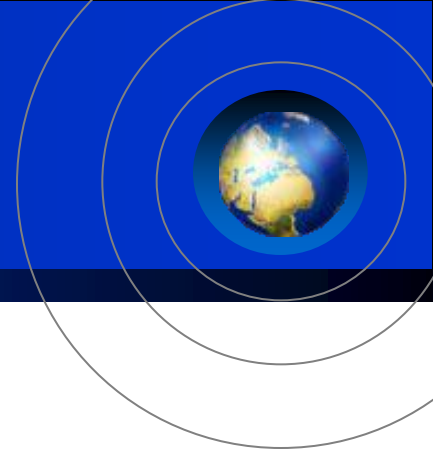
惑星進化に関連する 太陽活動を特徴づける主要パラメタ



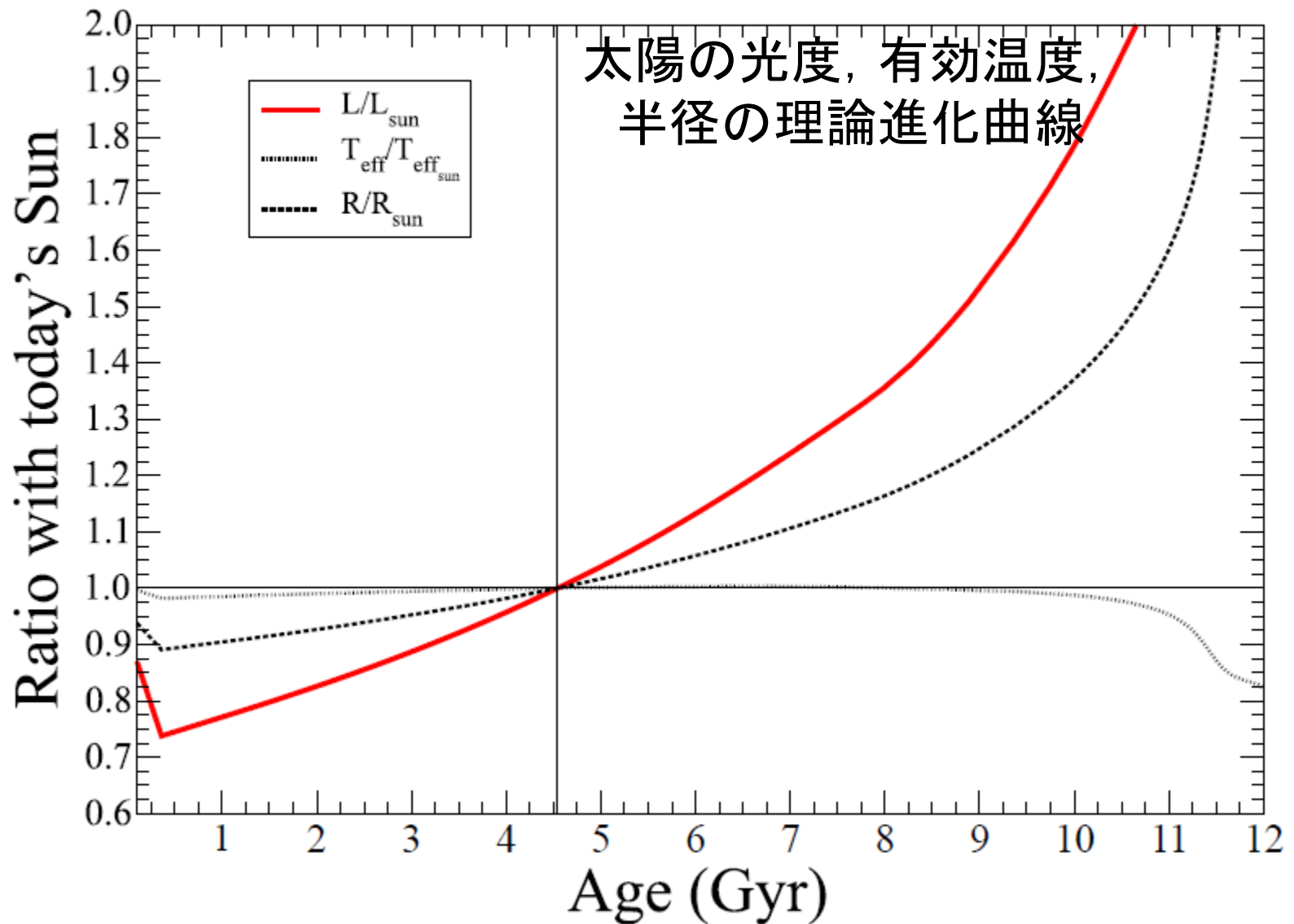
- 放射
 - － 光度, スペクトル
- 質量放出
 - － フラックス・組成・エネルギー・スペクトル
 - － 太陽風, 太陽宇宙線, (太陽ニュートリノ)
- 磁場

全て太陽系の歴史の間に変化した

光度進化



- 45億年間におよそ30%光度が上昇
 - 主系列星のエネルギー源：核融合反応
 - 正味の反応： $4p+2e\rightarrow\text{He}^{2+}$ ($\Delta m/m=-0.007$)
 - 粒子数が減少→星の重さを支える圧力を作るために温度上昇し光度も増す
- 惑星表層の熱収支に影響する



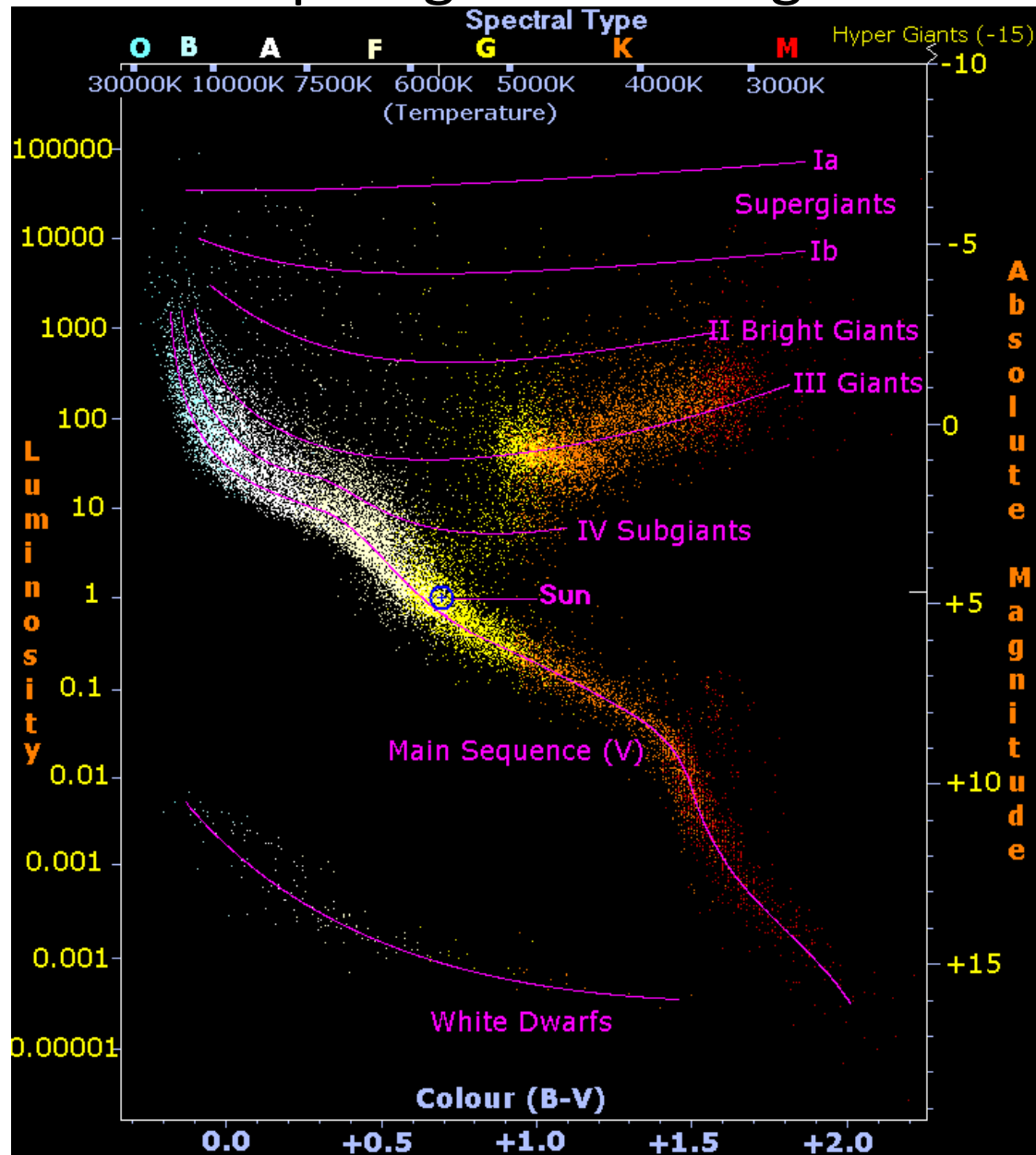
Ribas (2009) in “Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets”
Proceedings IAU Symposium No. 264.

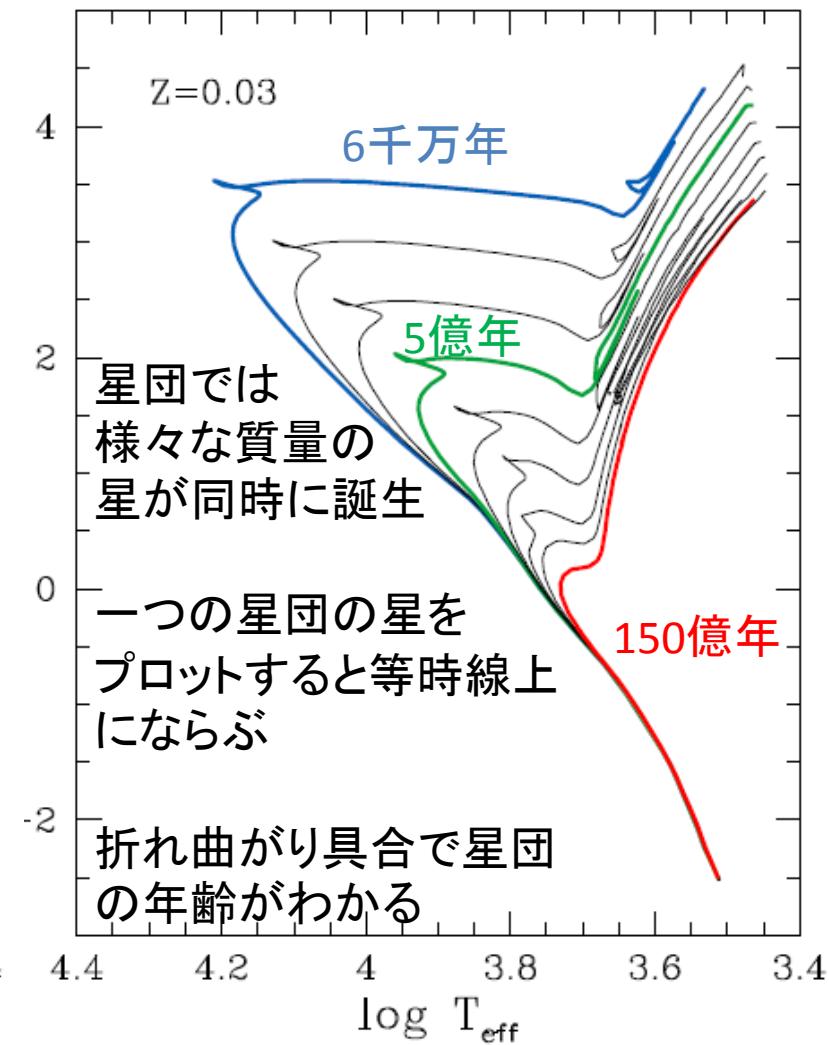
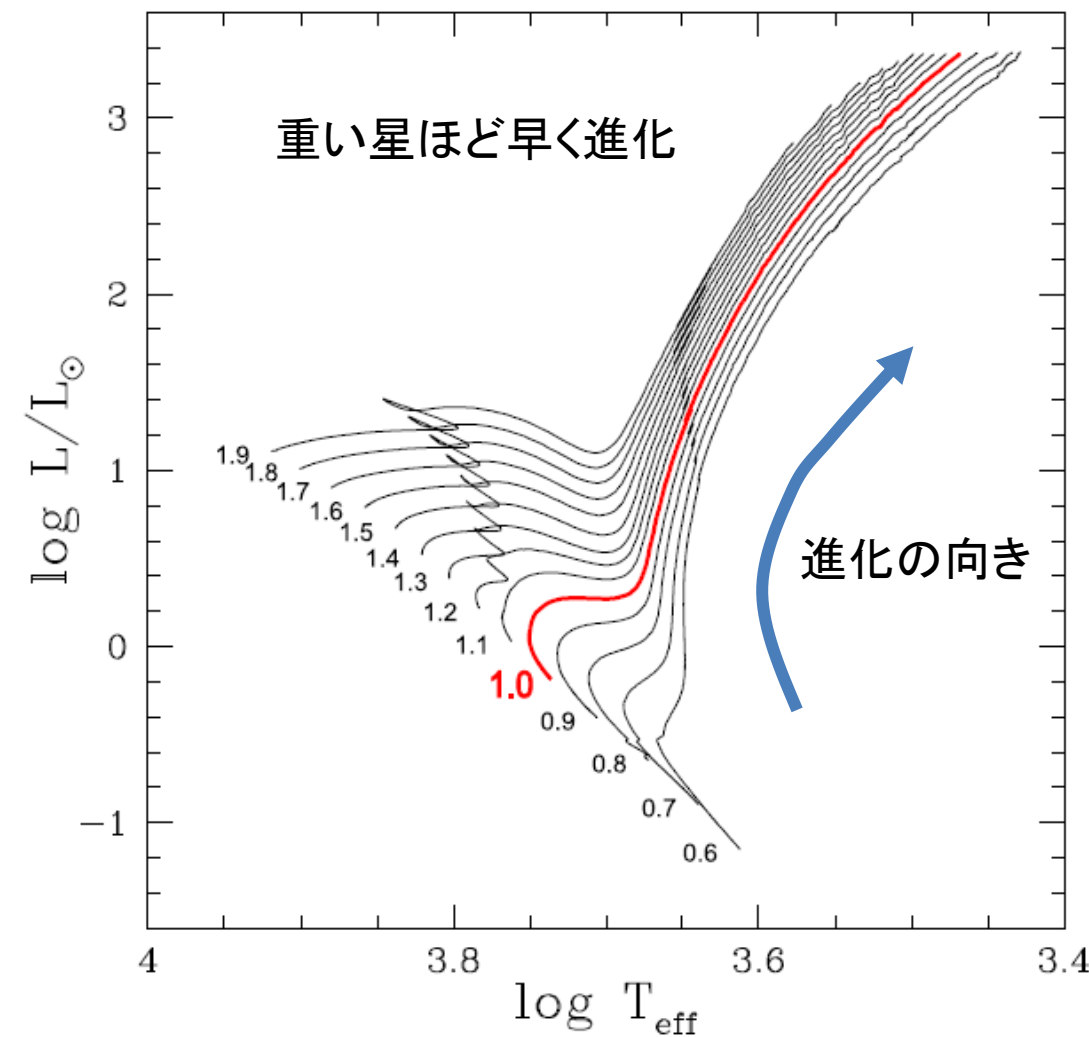
他のパラメタの進化

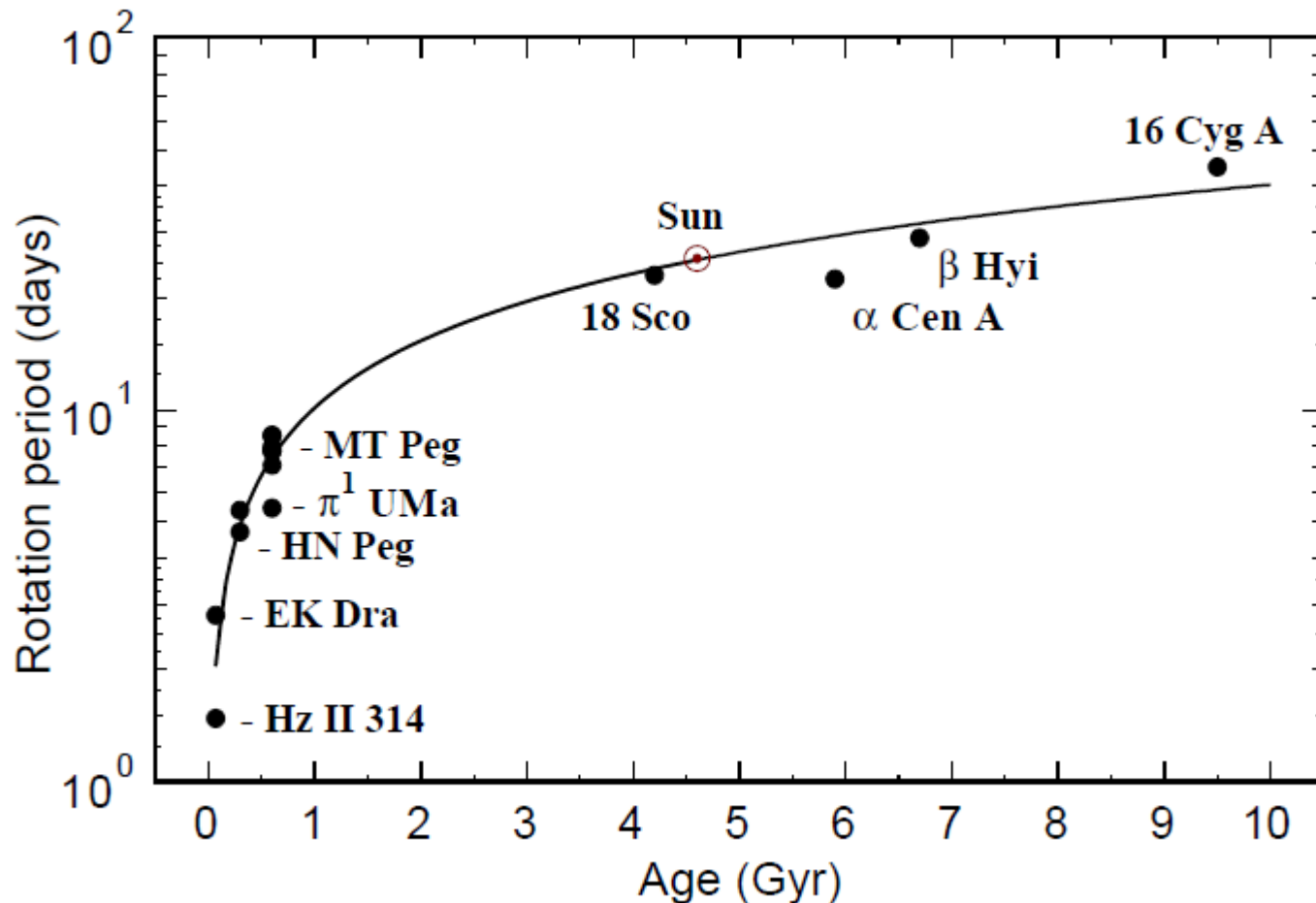


- 放射スペクトルの短波長成分, 質量放出, 磁場は桁違いに大きかったらしい
 - いずれも太陽表面の活動に強く依存
- 様々な年齢の恒星の観測を基に推測
 - 星団に属する星: 星団のHR図の等時線フィット
 - 孤立した星: 有効温度, $[Fe/H]$, 可視等級と星の進化モデルをフィット
 - きちんと年齢推定できる星は必ずしも多くない
 - 近年進展

Hertzsprung-Russell diagram





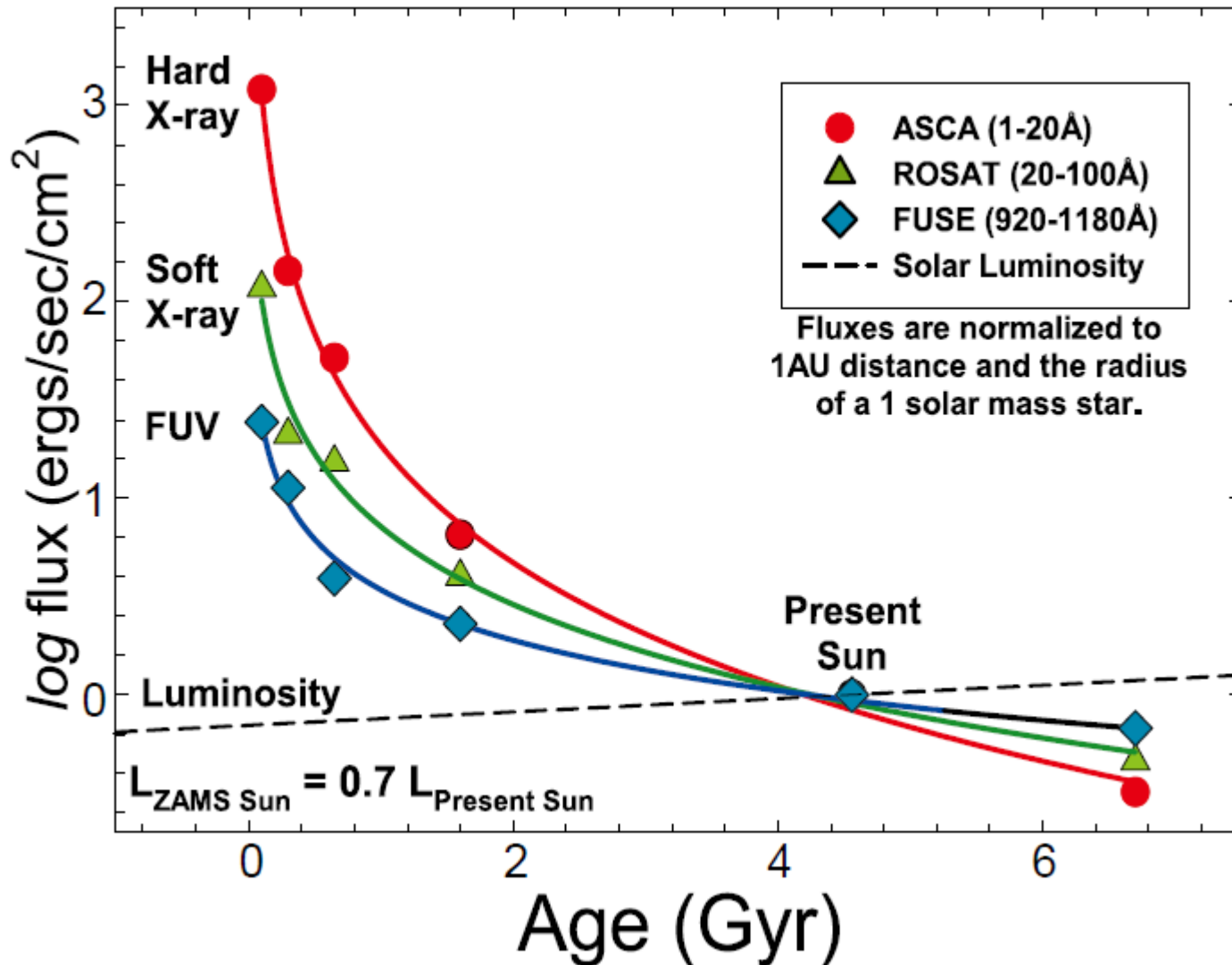


星表面の磁場活動(強度・変動性)は星の自転が早いほど激しいと考えられている。

若い星ほど自転が速い。

質量放出によって角運動量を失うとみられている

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



若い星は磁場活動に起因して発生すると考えられている短波長の放射のフラックスが桁で大きい。

若年期の太陽は暗いけれども活動的と考えられる

上層大気の構造に大きな影響がある

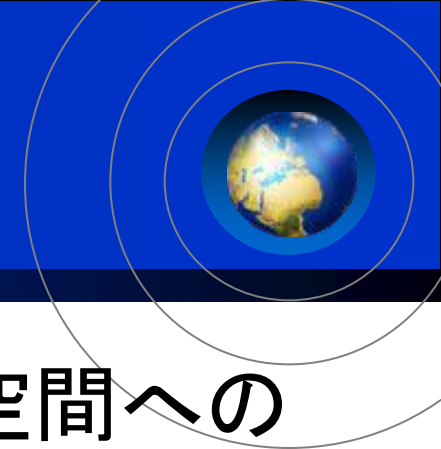
暗い太陽のパラドックス



Sagan and Mullen (1972) Science, 177, 52-56

- 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
- しかし約30億年より以前から、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
- 太古の大気組成が温室効果ガスに富んでいたと考えるのが自然

惑星の平衡温度



- 太陽放射の吸収量と惑星から宇宙空間への射出量のバランス

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

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

- 現在の地球の平均表面温度288Kとの差33Kは温室効果による.

温室効果の簡単な表現



- 大気が下向きに放つ放射も地表面を加熱

$$\sigma T_s^4 \approx \sigma T_e^4 + c\sigma T_s^4$$

$$T_s \approx T_e / (1 - c)^{1/4}$$

温室効果因子 $1 / (1 - c)^{1/4} = 1.13$ for modern Earth

- もしも太陽光度が30%減ると

$$T_e = 255 \times (0.7)^{1/4} = 233 \text{ K}$$

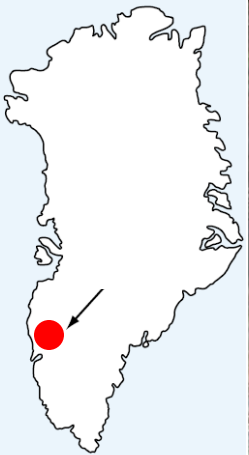
$$T_s = 233 \times 1.13 = 263 \text{ K}$$

温室効果因子は水蒸気が主要な温室効果気体と考えると T_s が低いほど大気中の水蒸気量が減りもっと小さくなる

太古の地球が温暖だった証拠



- もっとも古い堆積岩と枕状溶岩
 - 約38億年前までさかのぼられている
 - グリーンランドのIsua地域に保存状態の良い岩体が残されている
 - Moorbath et al. (1973), Komiya and Maruyama (1995)



http://www.shizuoka.ac.jp/~geo/Pictures/Pictures_j.html

太古の地球が温暖だった証拠



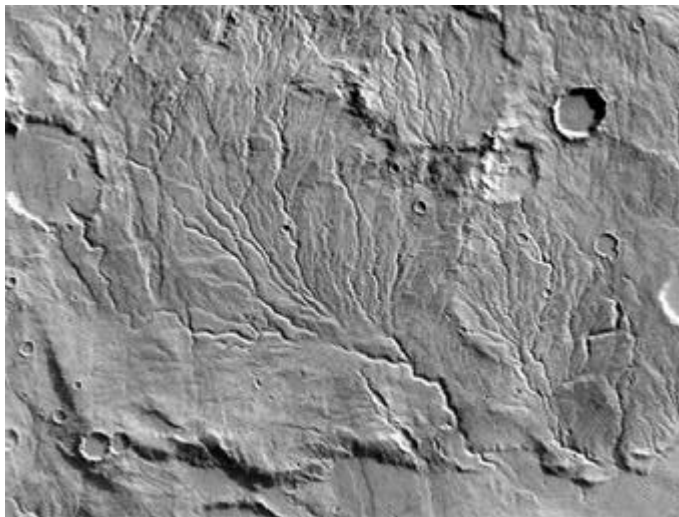
- もっとも古い砕屑性ジルコン (ZrSiO_4)
 - 44億2百万年 $\pm$ 800万年前
 - 西オーストラリアのJack Hills地域から採取
 - 同位体組成や微量元素濃度が、化学風化過程があったことを示唆
 - Wilde et al (2001)



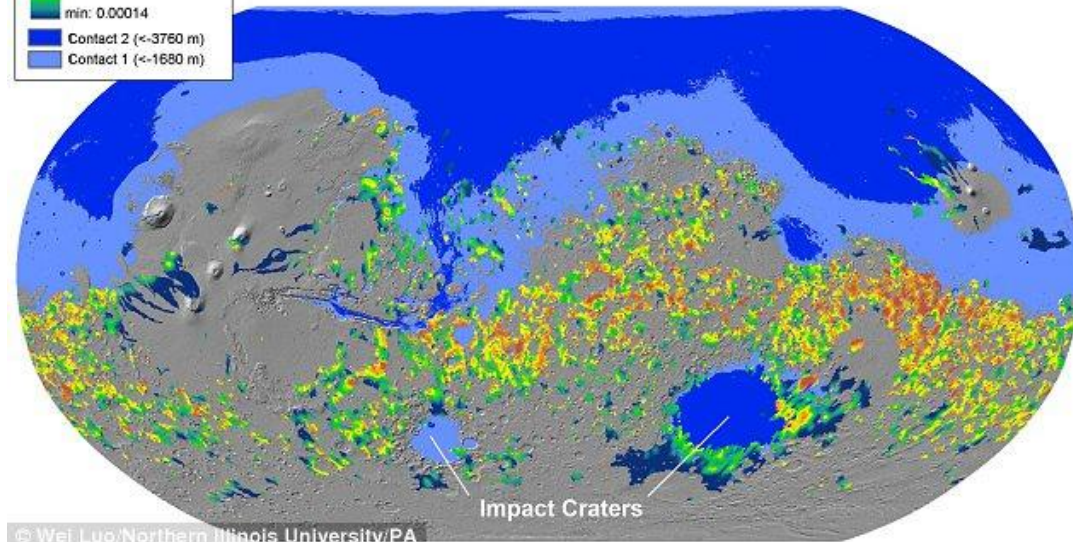
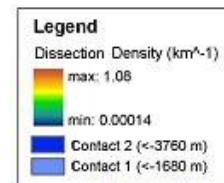
火星ではさらに問題が深刻



- 多クレータ地域に流水地形が豊富に存在
- 現在ですら氷点下なのに，太陽が暗かった時代に液体の水の流れを許す気候が存在したことを示している

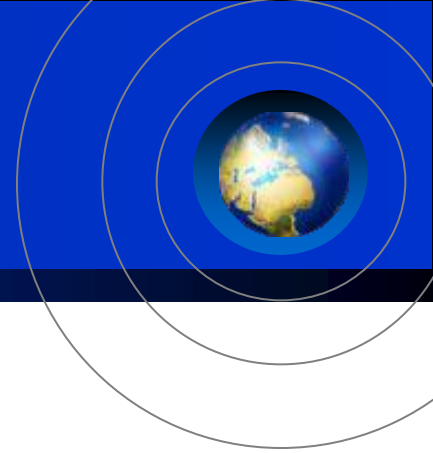


NASA/JPL-Caltech



© Wei Luo/Northern Illinois University/PA

若い太陽は暗くない？



● 太陽質量損失

- $\Delta M = 1 M_{\text{sun}}$ Willson et al. (1987)
- $\Delta M = 0.01 - 0.1 M_{\text{sun}}$ e.g. Sackmann and Boothroyd (2003)
- 太陽風の現在のフラックスでは $\Delta M = 10^{-4} M_{\text{sun}}$

温室効果源は何か

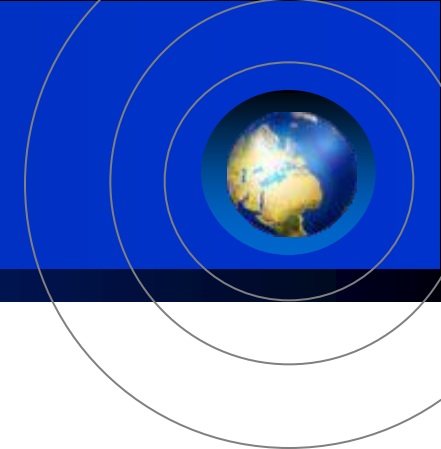


- NH_3 , CH_4
 - e.g. Sagan and Mullen (1973), Hart (1977)
 - 生命を生む化学進化に適している (e.g. Miller and Urey, 1959)
 - しかし光化学的に分解されやすく短寿命
 - NH_3 が0.01%含まれていれば十分な温室効果が得られるが寿命は< 40年 (Kuhn and Atreya, 1979)
 - CH_4 も同様? (Levine et al., 1982)



NASA

温室効果源は何か



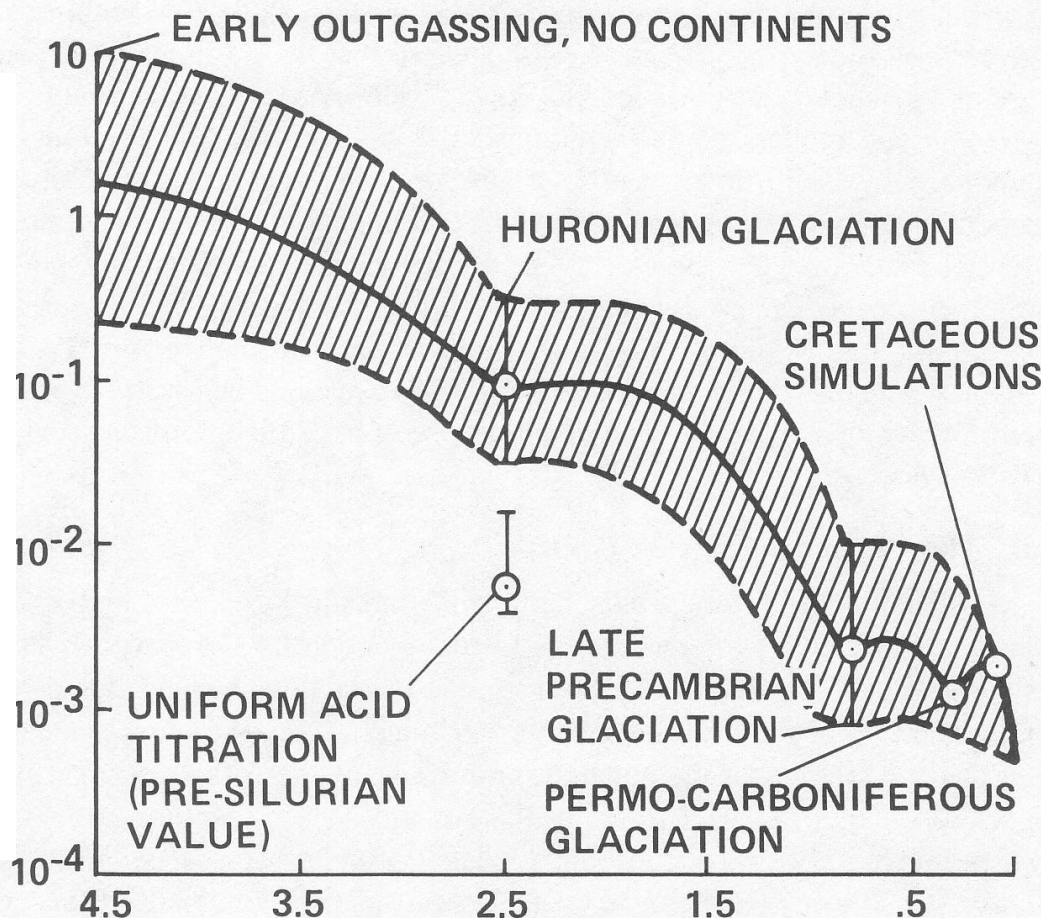
● CO₂

- e.g. Owen et al (1979), Kasting (1987)
- 化学的に安定
- 調節機構も存在する
 - CO₂を固定するUrey反応の温度依存性
 - $\text{CO}_2 + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_2 + \text{SiO}_2$
- 90年代に主流の考えに

CO₂温室効果による説明



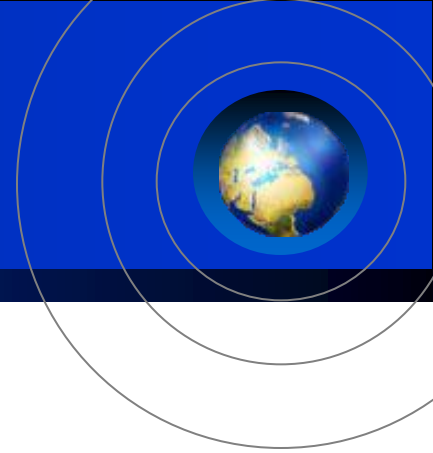
大気中の二酸化炭素分圧(気圧)



現在の時間(単位10億年)

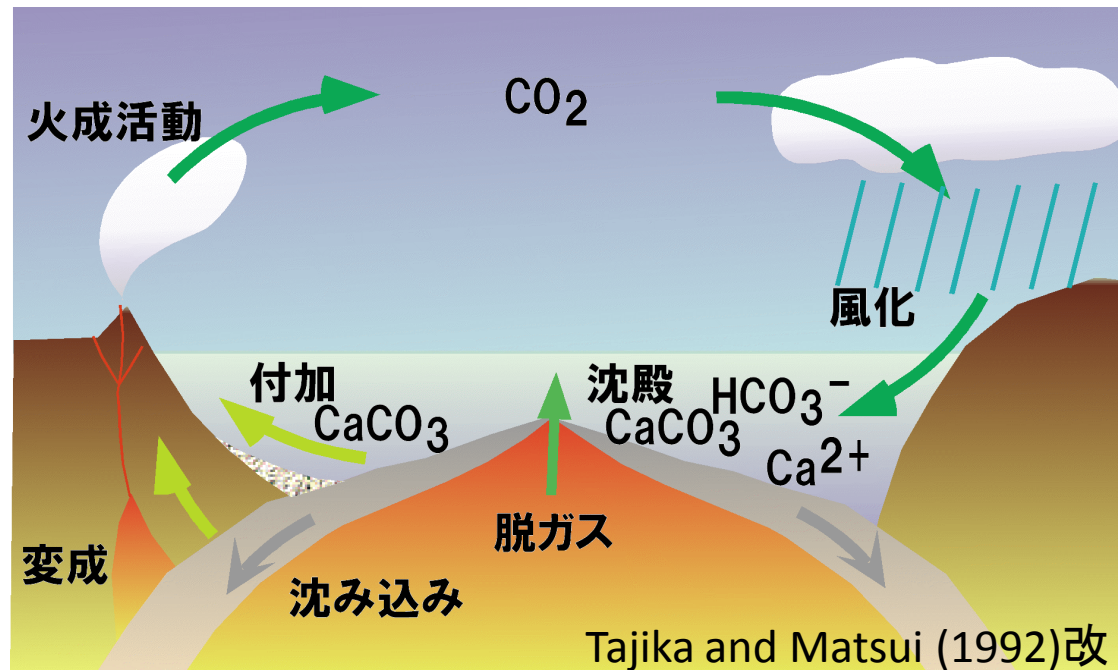
- 大量にCO₂が存在すれば地球は凍結しない
~0.1bar at 25億年前
~1bar at 40億年前

大気CO₂量調節



- Walker et al. (1981)

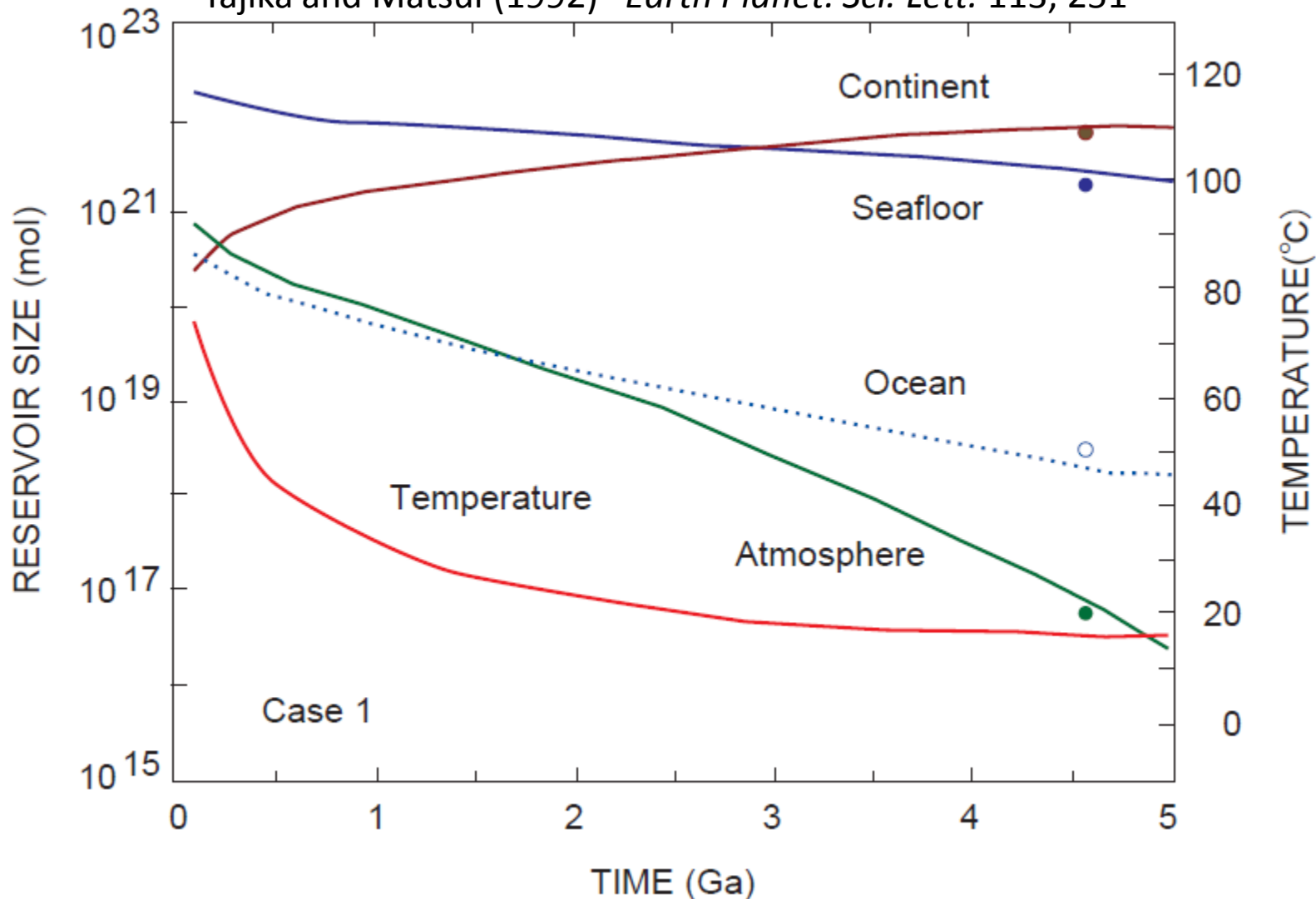
- Urey反応のフラックスは気温が高いほど大きい
- 気温変化と大気量変化に負のフィードバック (Walker feedback)



地球化学的炭素循環モデル



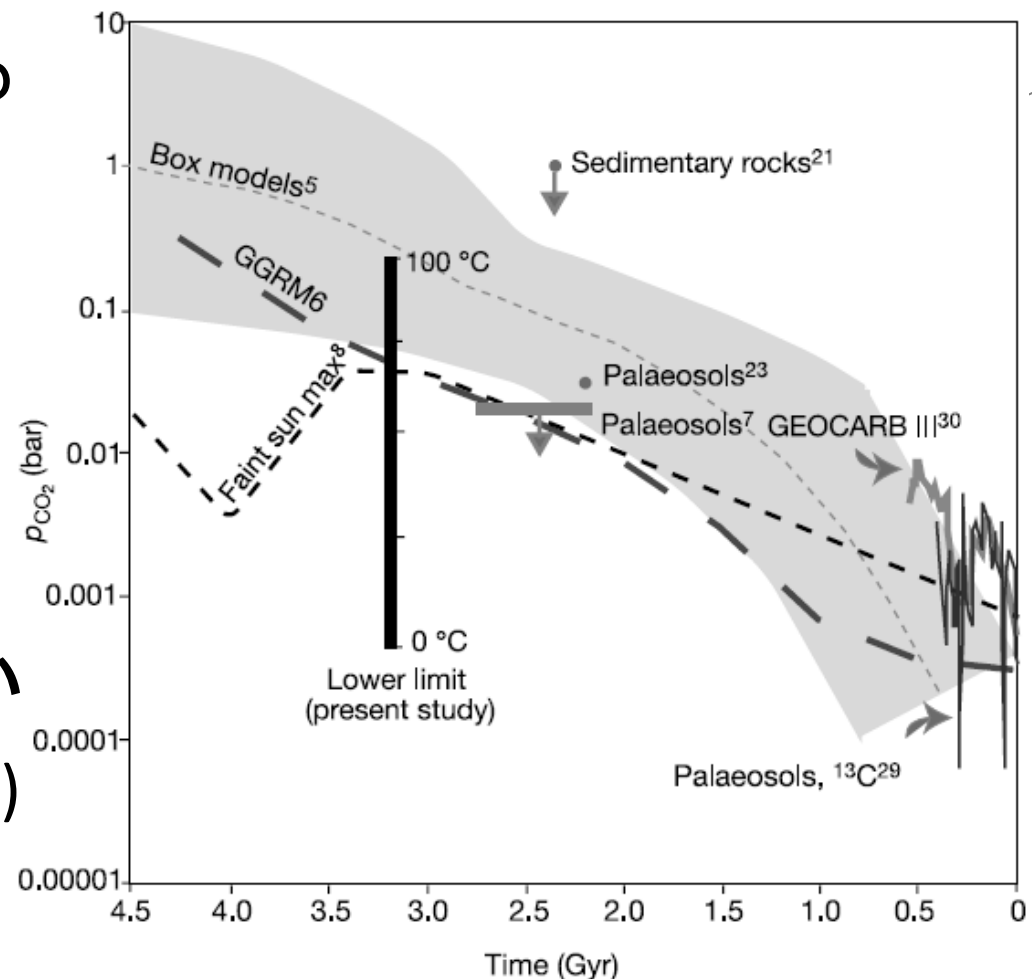
Tajika and Matsui (1992) *Earth Planet. Sci. Lett.* 113, 251



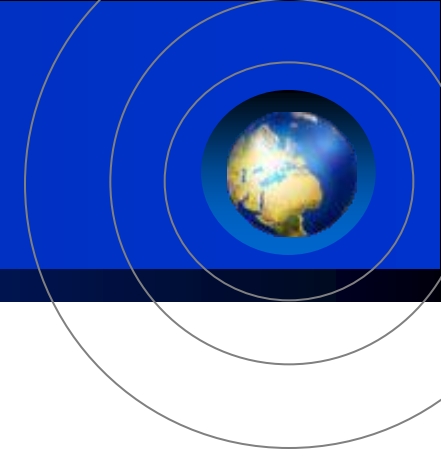
CO₂モデルの潜在的弱点



- 古土壌から復元されるCO₂分圧は低い
 - e.g. Rye et al (1995)
- 生命を生むための化学進化には不向き
- 後期隕石重爆撃期には高い分圧を保てない
 - Sleep and Zahnle (2001)

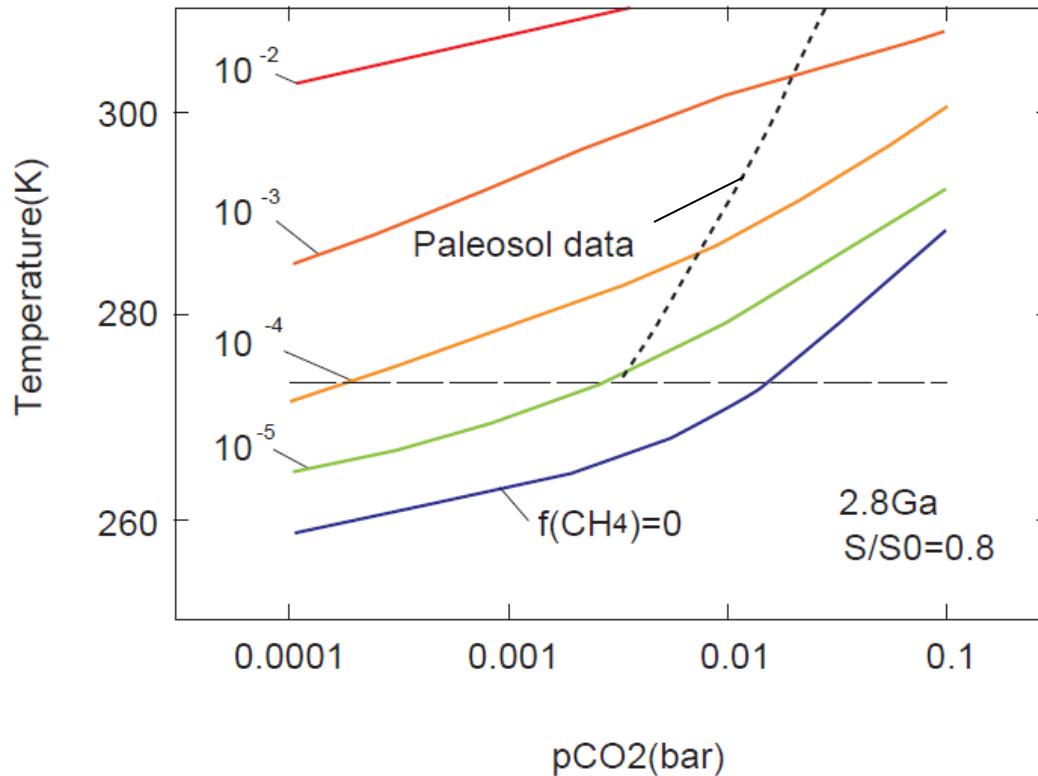


新たな仮説



● CO₂-CH₄モデル

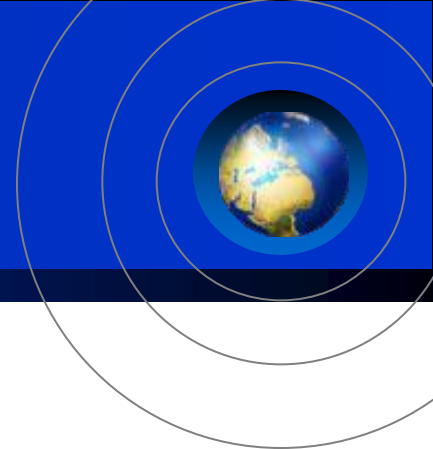
— e.g. Pavlov et al. (2000), Kasting (2005)



Pavlov et al. (2000) *J. Geophys. Res.* 105, 981

- 温室効果の不足分をCH₄で補う
- CH₄ソース:生物・マントル・小天体衝突
- O₂分圧の増大期(25億年前)にCH₄が消費され, 全球凍結が起きたことを説明する

他の仮説群



● アルベド仮説

- e.g. Henderson-Sellers and Cogley (1982), Rossow et al. (1982)
- 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。

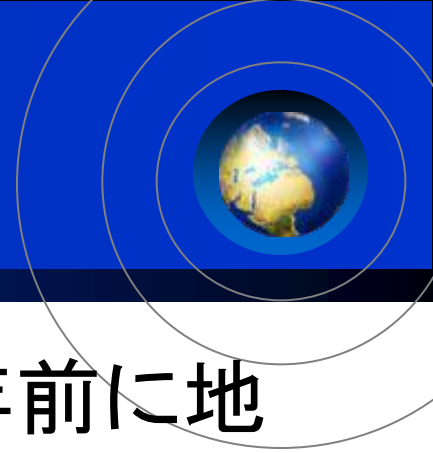
● 圏雲仮説

- Rondanelli and Lindzen (2010)
- 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。そのために圏雲量が増え温室効果が強まる。

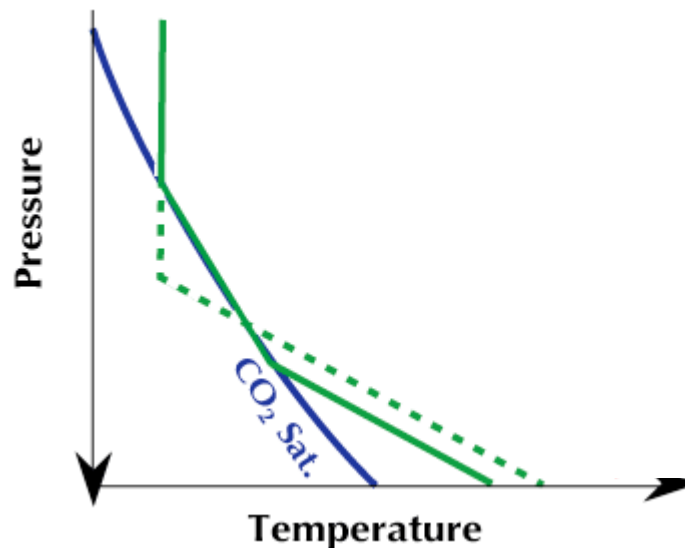
● 温暖化観測で検証できる可能性



火星



- CO₂気体のみの温室効果では38億年前に地表温度が氷点を越えられない
 - 対流圏でCO₂凝結が生じ、それにより加熱された大気層から宇宙空間へ強い熱放出が起きてしまう (Kasting , 1991)



火星を温めたのは何か



- CO₂雲の温室効果

- 散乱温室効果: Forget and Pierrehumbert (1997)
- 凝結核密度や臨界過飽和度などに依存する

- 他の温室効果気体

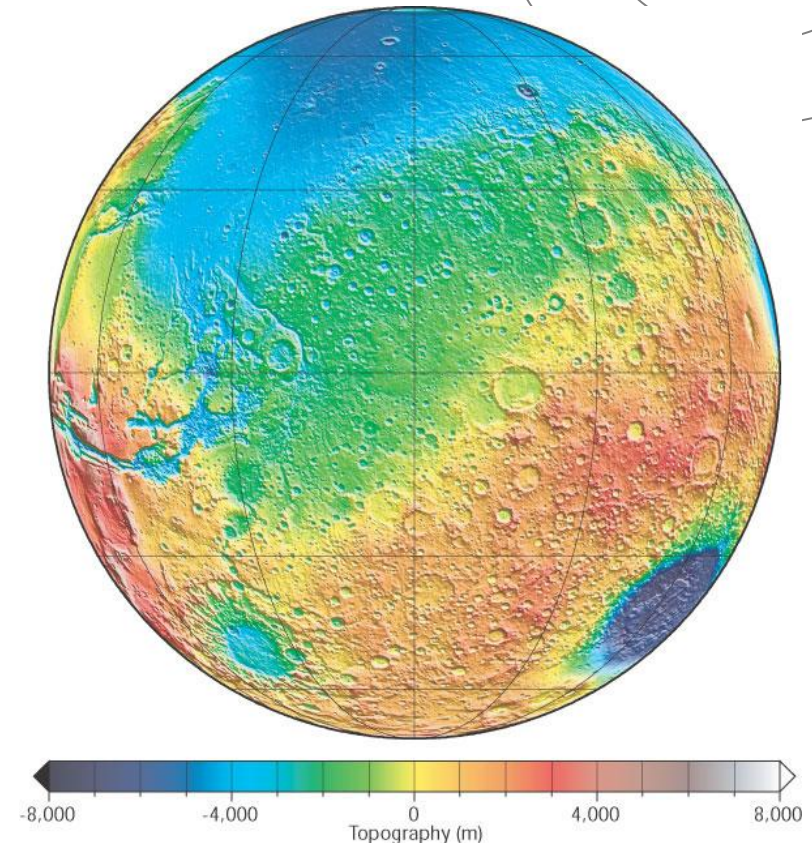
- NH₃, CH₄, SO₂, ... 百家争鳴



火星は基本的に冷たい？

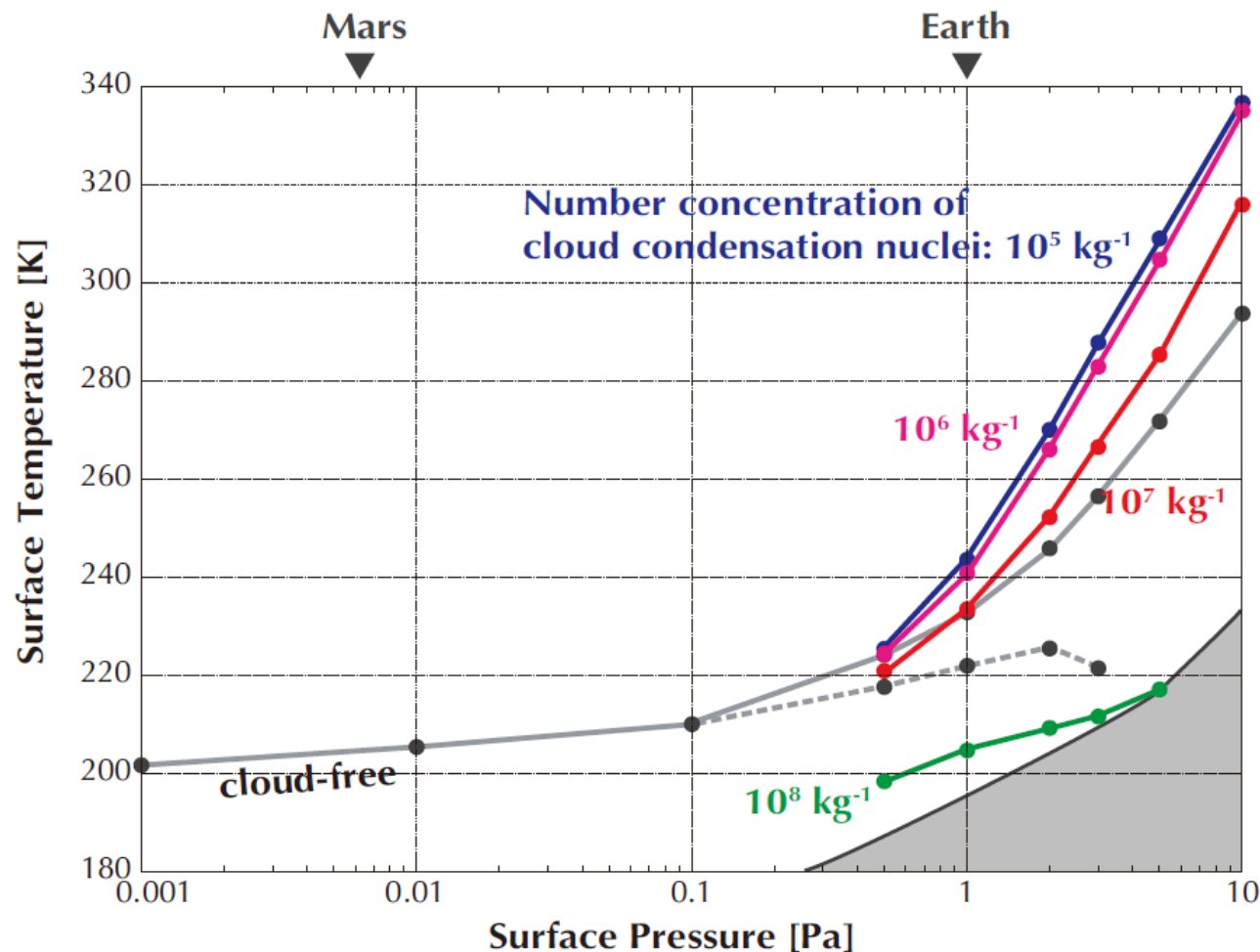
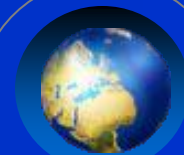


- クレーターの保存
 - 長期間温暖湿潤だと説明できない
 - e.g. Golombek and Bridges (2003), Gaidos and Marion, (2003)
- 年齢40億年の火星隕石の ^{40}Ar 損失が小さい
 - Shuster and Weiss (2005)
- 基本的には寒冷で、間欠的に温暖化したとも考えられる



Zuber (2001) Nature, 412,

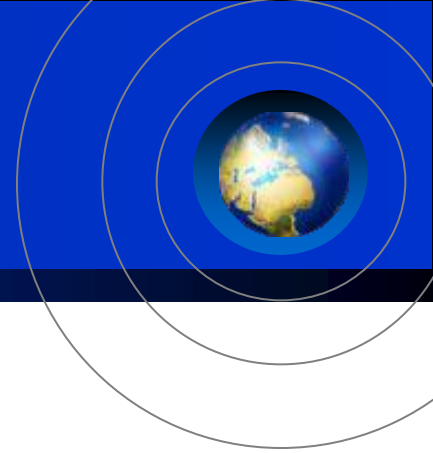
CO₂氷雲温室効果の間欠性



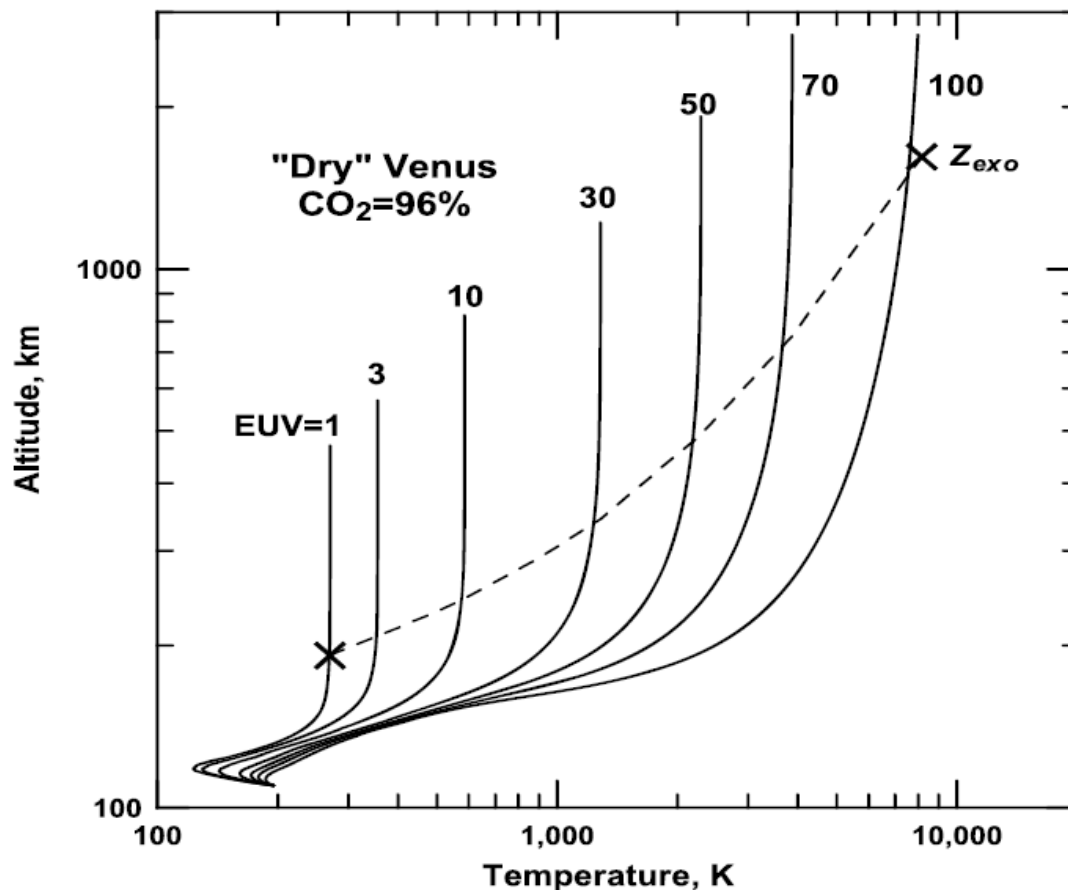
光田 (2006)

- CO₂氷雲の温室効果は凝結核濃度に強く依存
- 凝結核濃度は様々な理由で変動する
 - 予測難だが
- 火星を説明する可能な解の一つ

活動的な若い太陽

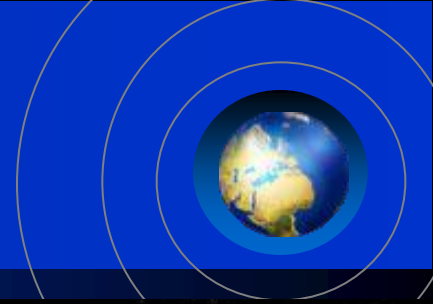


● 惑星上層大気を強烈に熱する

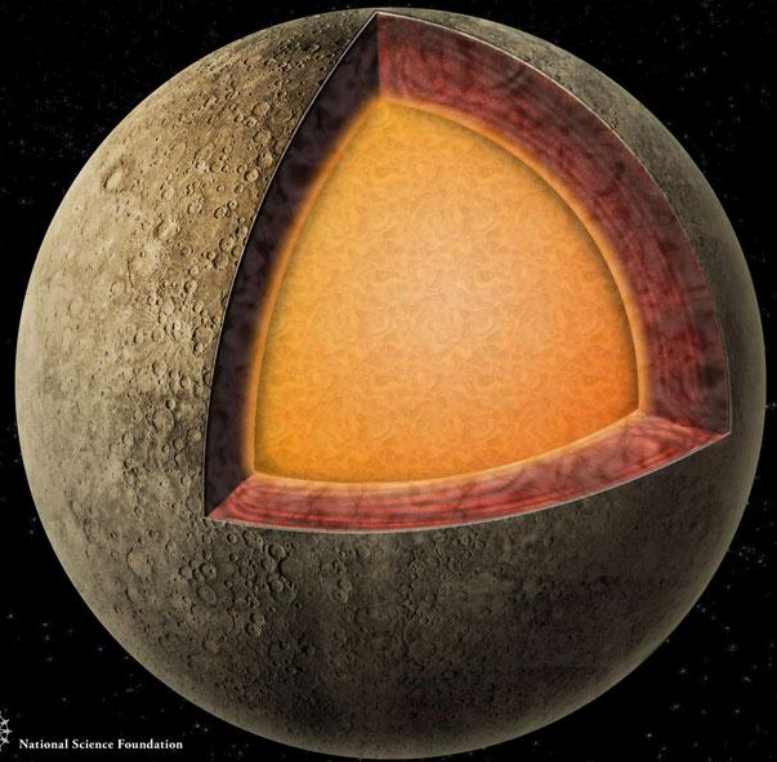


- 金星では熱圏温度が8000Kにも達し、膨張
- O^+ がsolar windに容易にpick upされる
- 1海洋質量の H_2O が失われた可能性がある (Kulikov, 2006)

水星



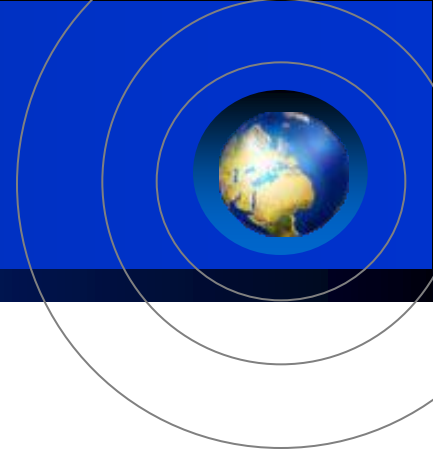
- XUVと太陽風によってマントルがはぎ取られる?
 - 高密度で金属核が相対的に大きいことをこれで説明 (Tehrany et al. 2002)
 - 標準的な理解は巨大衝突によるマントルのはぎ取り



 National Science Foundation

Image credit: Nicolle Rager Fuller, National Science Foundation

地球と火星



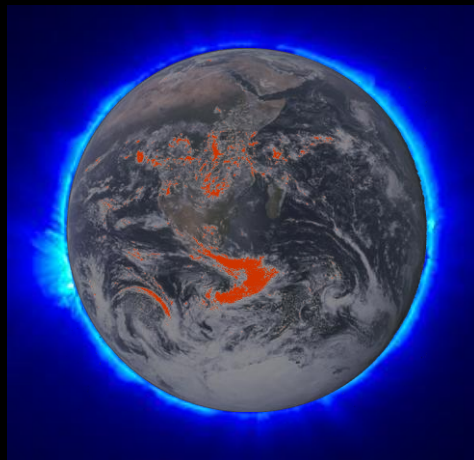
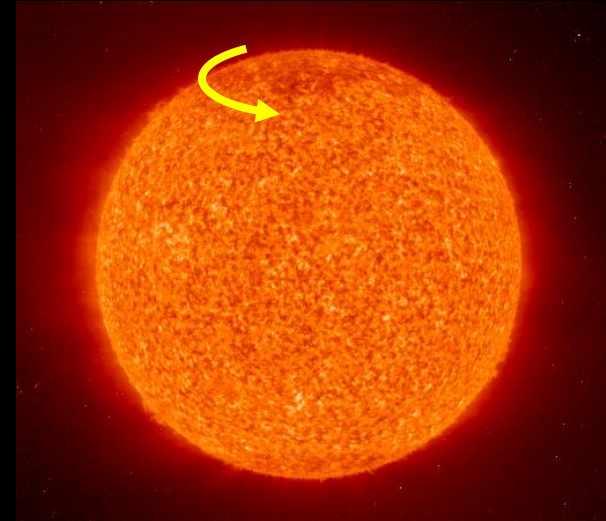
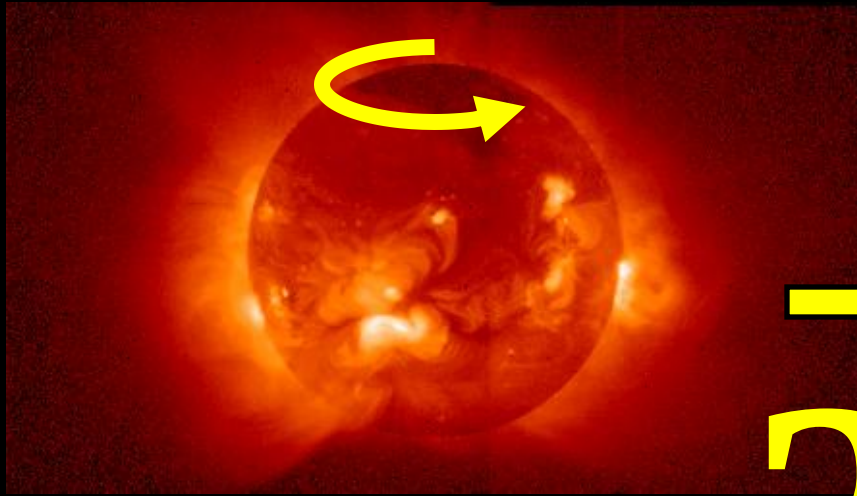
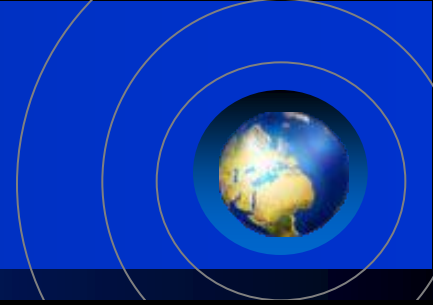
- H_2O が全散逸する恐れがある
- 残すには CO_2 が多いほど好都合 (Lammer et al. 2008)
 - 熱圏を冷却してくれる
 - 固有磁場の影響？
 - 定量化はこれから



David A. Aguilar

http://www.cfa.harvard.edu/image_archive/2006/34/lores.jpg

まとめ



参考文献

- Ribas (2009) in “Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets” Proceedings IAU Symposium No. 264.
- Richard Powel, <http://www.atlasoftheuniverse.com/hr.html>
- Girardi et al. (2000) Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 141, 371–383.
- Guinan and Engle(2009) in “The Ages of Stars” Proceedings IAU Symposium No. 258
- Sagan and Mullen (1972) Science, 177, 52–56
- Moorbath et al. (1973) Nature, Volume 245, Issue 5421
- Wilde et al (2001) Nature 409, 175–178
- Kuhn and Atreya, 1979 Icarus
Volume 37, Issue 1, January 1979, Pages 207–213
- Sagan and Mullen (1972) Science
New Series, Vol. 177, No. 4043 (Jul. 7, 1972)
- Miller and Urey (1959) Science, Volume 130, Issue 3370, pp. 245–251

参考文献

- Hart(1979)Origins of Life, Volume 9, Issue 4, pp.261–266
- Owen et al (1979)Nature 277, 640 – 642 (22 February 1979); doi:10.1038/277640a0
- Kasting (1987)Science, Volume 235, Issue 4787, pp. 415
- Kasting and Toon (1989) in “Origin and evolution of planetary and satellite atmospheres” University of Arizona Press, p. 423
- Walker et al.(1981)JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 86, NO. C10, PP. 9776–9782, 1981 doi:10.1029/JC086iC10p09776
- Tajika and Matsui (1992) Earth Planet. Sci. Lett. 113, 251
- Rye et al.(1995)Nature, Volume 378, Issue 6557, pp. 603–605 (1995)
- Sleep and Zahnle (2001) JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 106, NO. E1, PP. 1373–1399, 2001doi:10.1029/2000JE001247
- Pavlov et al. (2000), JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 105, NO. E5, PP. 11,981–11,990, 2000 doi:10.1029/1999JE001134
- Henderson–Sellers and Cogley (1982), Nature 298, 832 – 835 (26 August 1982); doi:10.1038/298832a0

参考文献

- Rossow et al. (1982) New Series, Vol. 217, No. 4566 (Sep. 24, 1982), pp. 1245–1247
- Rondanelli and Lindzen (2010) JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 115, D02108, 12 PP., 2010 doi:10.1029/2009JD012050
- Kasting (1991) Icarus Volume 94, Issue 1, November 1991, Pages 1–13
- Forget and Pierrehumbert (1997) Science 14 November 1997: Vol. 278 no. 5341 pp. 1273–1276 DOI: 10.1126/science.278.5341.1273
- Gaidos and Marion, (2003) JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 108, 5055, 19 PP., 2003 doi:10.1029/2002JE002000
- 光田千紘, 横畠徳太, 倉本圭『放射冷却による二酸化炭素氷雲の形成と古火星大気の温室効果』, 日本気象学会 2006 年 秋季講演会, 名古屋, 2006. 10.
- Shuster and Weiss (2005) Science, Volume 309, Issue 5734, pp. 594–597 (2005)
- Lammer et al. (2008) Space Sci Rev 139: 399
- http://www.cfa.harvard.edu/image_archive/2006/34/lores.jpg