

第10回 森羅万象学校  
「太陽の変動性と地球・惑星」  
2010年2月22-24日  
北海道 支笏湖

# 46億年の太陽史

*once upon a time....*

## ***The Faint Young Sun Paradox***

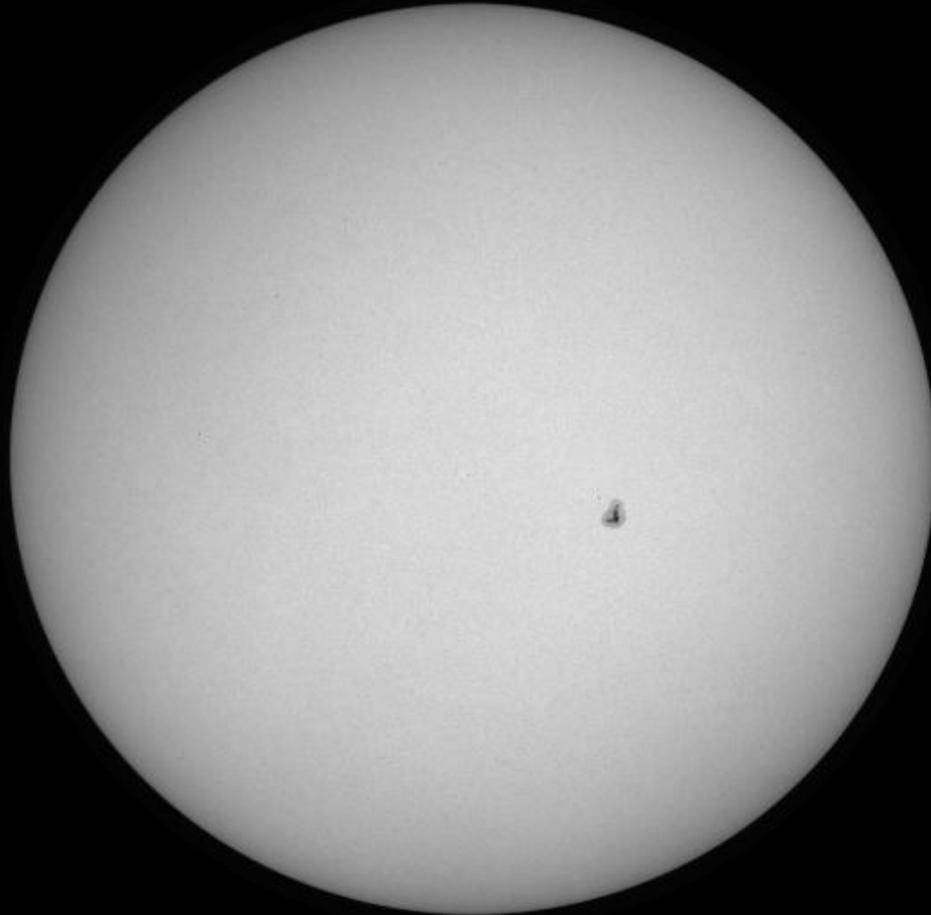
Piet Martens

Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

常田佐久

国立天文台

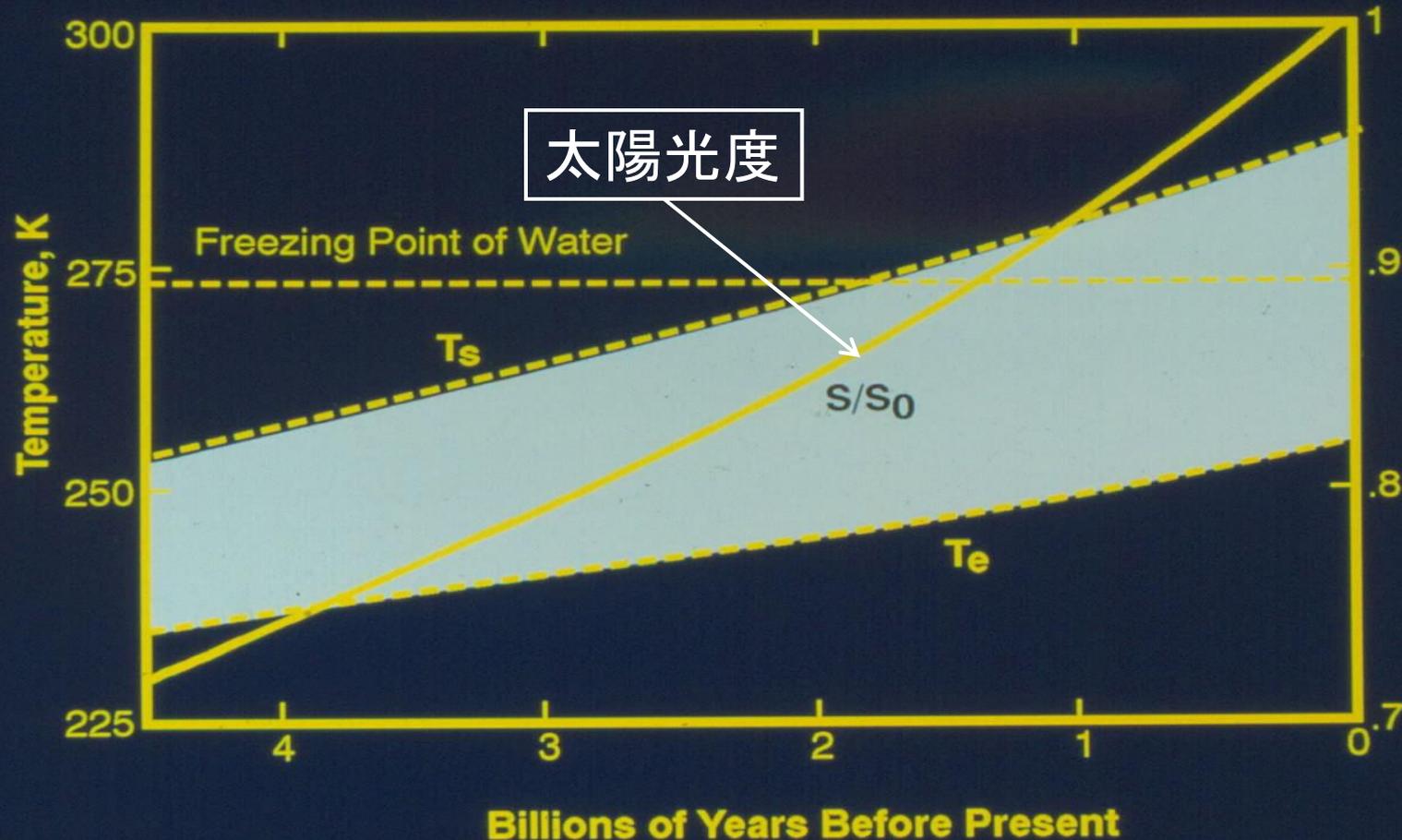
悠久の時間輝き続ける太陽  
と言われているが。。



*once upon a time....*

太陽は暗かった！

# 35億年前の太陽の放射量は 現在の約75%



現在を1としたときの太陽光度

# そのときの地球の温度は？

$$L = 4\sigma(1 - A)T_e^4$$

A = Earth Albedo

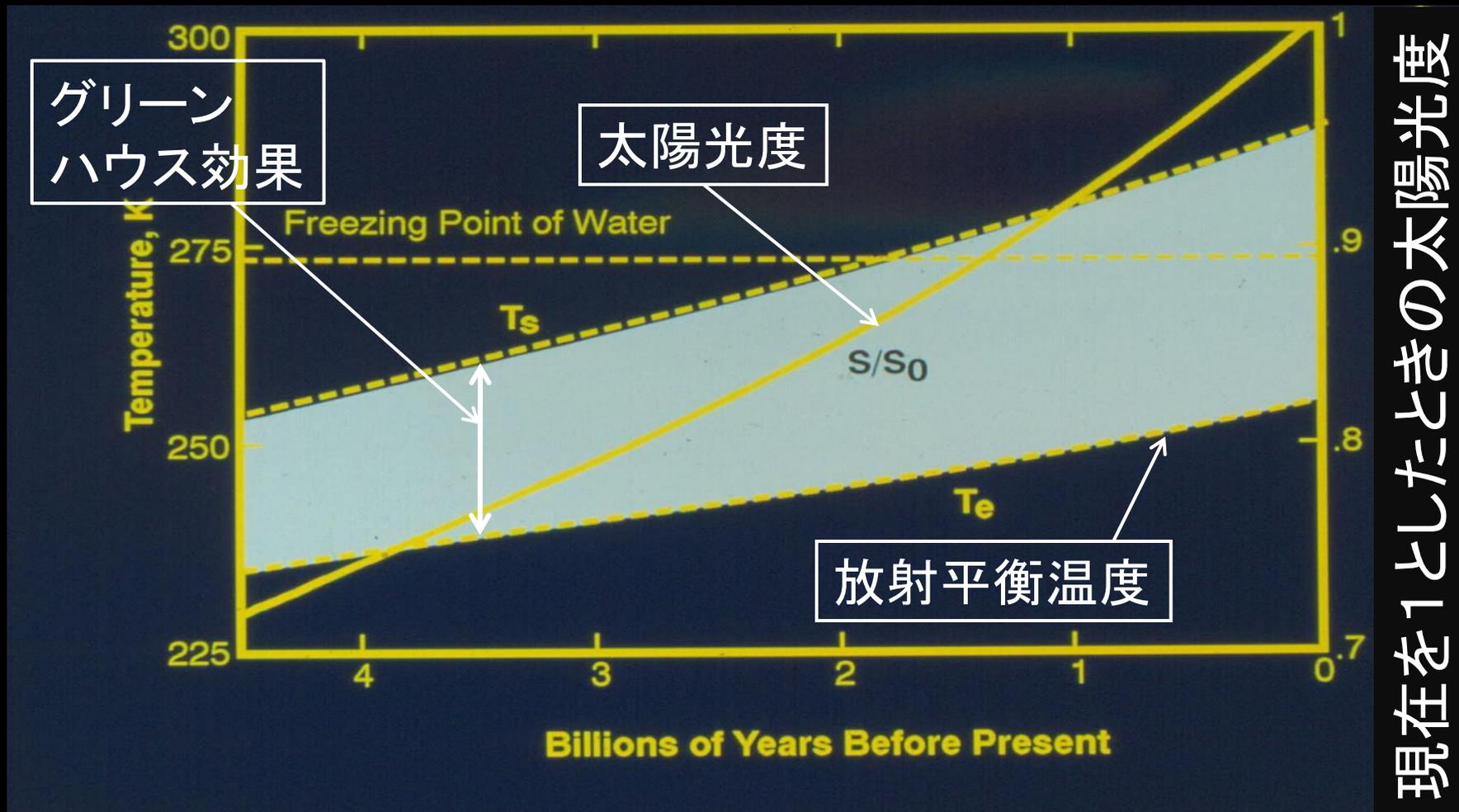
$\sigma$  = Stefan Boltzmann Constant

$T_e$  = Radiative Equilibrium Temperature

L = Solar Irradiance at Top of Earth Atmosphere

$$T_s \approx T_e + \Delta T_{greenhouse}$$

# 35億年前の太陽の放射量は 現在の約75%



Kasting et al, Scientific American, 1988

2010/2/22-24

梶田佐久 (国立天文台)

# Snowball Earth 全地球凍結？

全地球凍結  
が数回発生  
していた？



一種の熱的不安定性による：  
氷によるアルベド率の上昇  
による熱吸収の減少  
Run awayによるsnowball化？

CO<sub>2</sub>の増大による  
Global melt?

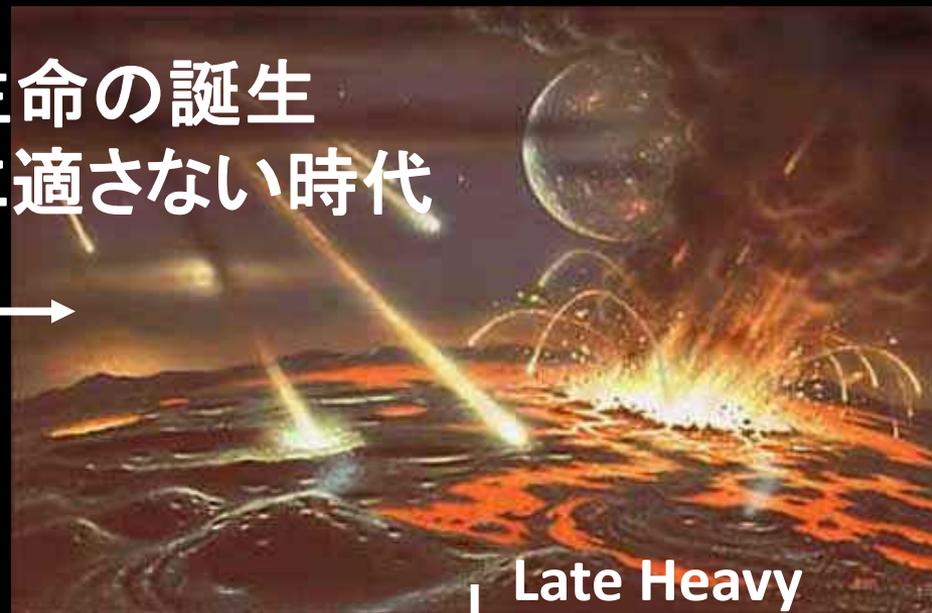
# Orpheusの地球との衝突

⇒月の形成



~4.5 Ga

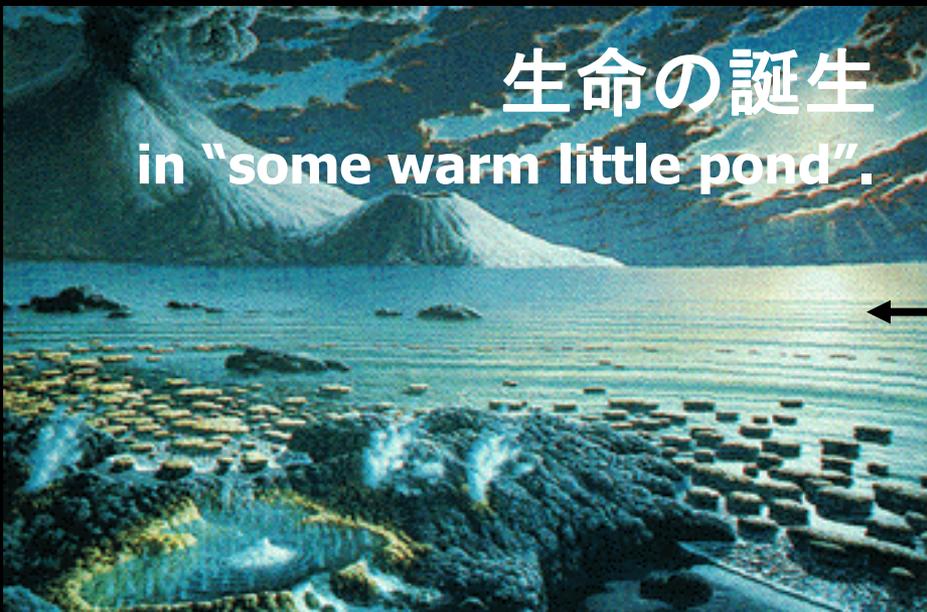
生命の誕生  
に適さない時代



Late Heavy  
Bombardment  
3.8-4.0 Ga



生命の誕生  
in "some warm little pond".



2010/2/22-24

3.5 Ga

常田佐久 (国立天文台) <http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/lectures/lifeform.htm>

<http://www.psi.edu/projects/moon/moon.html>

# The Faint Young Sun Paradox

EON	ERA	Duration in millions of years	Millions of years ago	
PHANEROZOIC	CENOZOIC	65	65	
	MESOZOIC	183	248	
	PALEOZOIC	295	543	
PRECAMBRIAN	PROTEROZOIC	LATE	357	
		MIDDLE	700	
		EARLY	900	
	ARCHEAN	LATE	500	
		MIDDLE	400	
		EARLY	400	
		HADEAN	800	
				4600

First shelly fossils (Cambrian explosion)

Snowball Earth ice ages

Warm

Rise of atmospheric O<sub>2</sub> (Ice age)

Ice age (?)

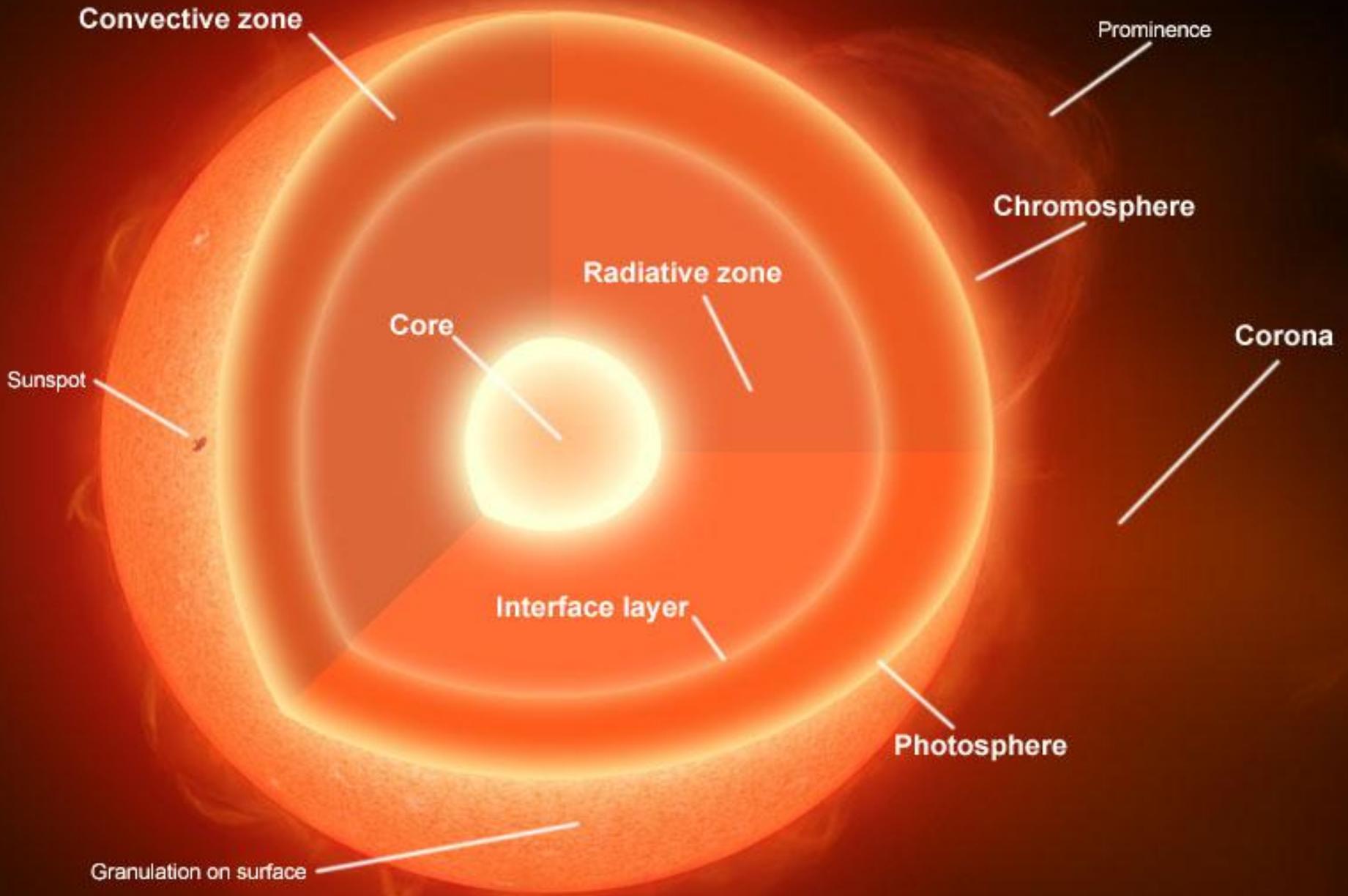
Warm (?)

← 生命の誕生？

2010/2/22-24

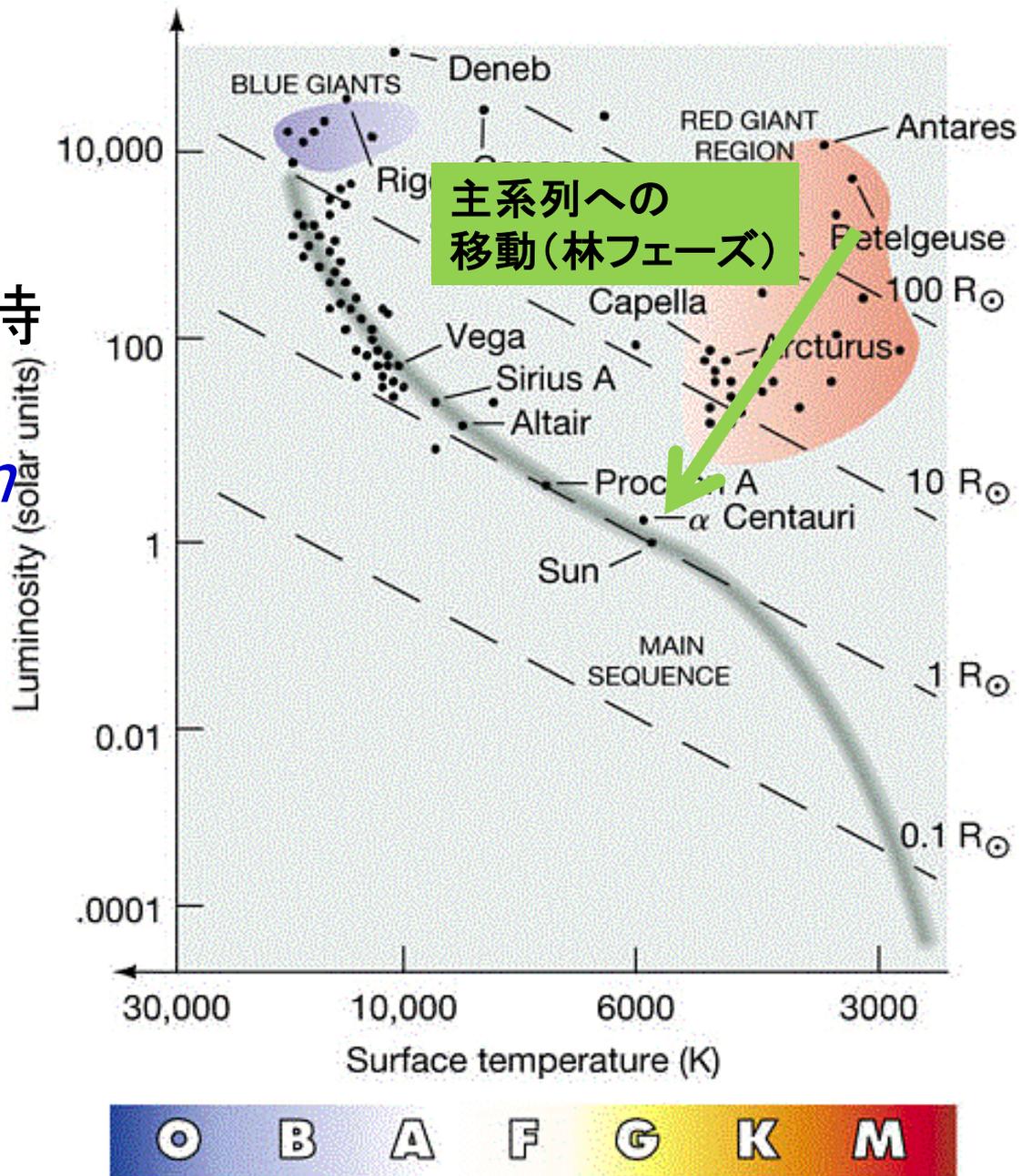
# *The Faint Young Sun Paradox*

- ・ 今から～35億年前、地球に生命の誕生したとき、地質学的・生物学的研究から、地球の温度は～60度Cあったとされる。一方、**精緻な標準太陽モデルは、疑いの余地なく、**当時太陽は現在の明るさの75%程度しかないことを示している。それが正しいとすると、地球は完全凍結状態にあったことになる。



# 太陽大気の構造

太陽:  
 主系列にたどりついた時  
 を0歳  
*ZAMS (Zero Age Main  
 Sequence Star)*と  
 言う  
 現在は、45.7億歳



Spectral classification

# 状態方程式

$$p = NkT$$

$$\rho = \mu m_H N$$

$$p = \frac{k}{\mu m_H} \rho T$$

- 平均原子量 $\mu$ により状態方程式は
- もし太陽が

– 電離水素だけでなるなら ●+○  $\mu = \frac{1}{1+1} = 2$

– 電離ヘリウムだけでなるなら (●●●●)+○○

$$\mu = \frac{4}{1+2} = 3$$

– 原子番号 $z$ の電離原子なら、(●...●)+○...○

$$\mu = \frac{2z}{1+z} \approx 2$$

1個の原子

$z$ 個の電子

–  $X, Y, Z$ を水素、ヘリウム、重原子の質量割合とすると全部合わせて

$$\mu = \frac{1}{2X + \frac{3}{4}Y + \frac{1}{2}Z}$$

# 太陽光度 $L$ は何に依存するか？

- Density

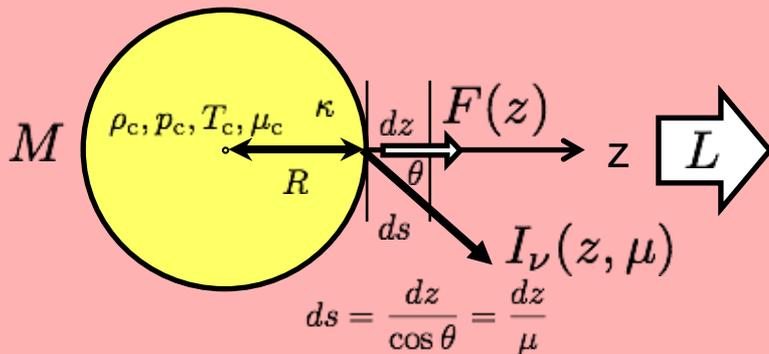
$$M = \int_0^R 4\pi\rho r^2 dr \longrightarrow \rho_c \propto M/R^3 \quad (1)$$

- Hydrostatic equilibrium

$$\nabla p = -\frac{GM\rho}{r^2} \longrightarrow p_c \propto \frac{M^2}{R^4}$$

- Eqn. of state for ideal gas

$$p = \frac{\rho RT}{\mu} \longrightarrow T_c \propto \frac{\mu_c p_c}{\rho_c} \propto \frac{\mu_c M}{R} \quad (2)$$



By (1) & (2), (3) become  $L \propto \bar{\kappa}^{-1} \mu_c^4 M^3$

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\chi_\nu (I_\nu - S_\nu)$$

$$\longrightarrow I_\nu(z, \mu) = S_\nu - \frac{\mu}{\chi_\nu} \frac{\partial I_\nu}{\partial z}$$

$$\longrightarrow I_\nu(z, \mu) \approx B_\nu(T) - \frac{\mu}{\chi_\nu} \frac{\partial B_\nu(T)}{\partial z}$$

non-isotropic term

$$F(z) = \int_0^\infty d\nu \int d\Omega I_\nu \cos\theta$$

$$\longrightarrow F(z) \approx -\frac{4\pi}{3} \frac{\partial T}{\partial z} \int \frac{1}{\chi_\nu} \frac{\partial B_\nu(T)}{\partial T} d\nu$$

$$\text{Rosseland mean } \frac{1}{\chi_R} \equiv \frac{\int \frac{1}{\chi_\nu} \frac{\partial B_\nu(T)}{\partial T} d\nu}{\int \frac{\partial B_\nu(T)}{\partial T} d\nu} = \frac{4\sigma T^3}{\pi}$$

$$\longrightarrow F(z) \approx -\frac{16\sigma T^3}{3\chi_R} \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$L = 4\pi R^2 F \longrightarrow L \propto \frac{R^2 T_c^4}{\bar{\chi}_R R} \propto \frac{RT_c^4}{\bar{\kappa} \rho_c} \quad (3)$$

# 太陽の質量・光度関係

$$\bar{\kappa} \propto \rho_c T_c^{-3.5}$$
$$L \propto \mu_c^{7.5} M^{5.5} R^{-0.5}$$

- 現在の太陽中心部は、 $\mu_{\odot,c} \sim 0.61$
- ZAMSの太陽中心部は、 $\mu_{0,c} \sim 0.59$

$$\longrightarrow \frac{L_0}{L_{\odot}} \approx \left( \frac{\mu_{0,c}}{\mu_{\odot,c}} \right)^{7.5} = 0.75$$

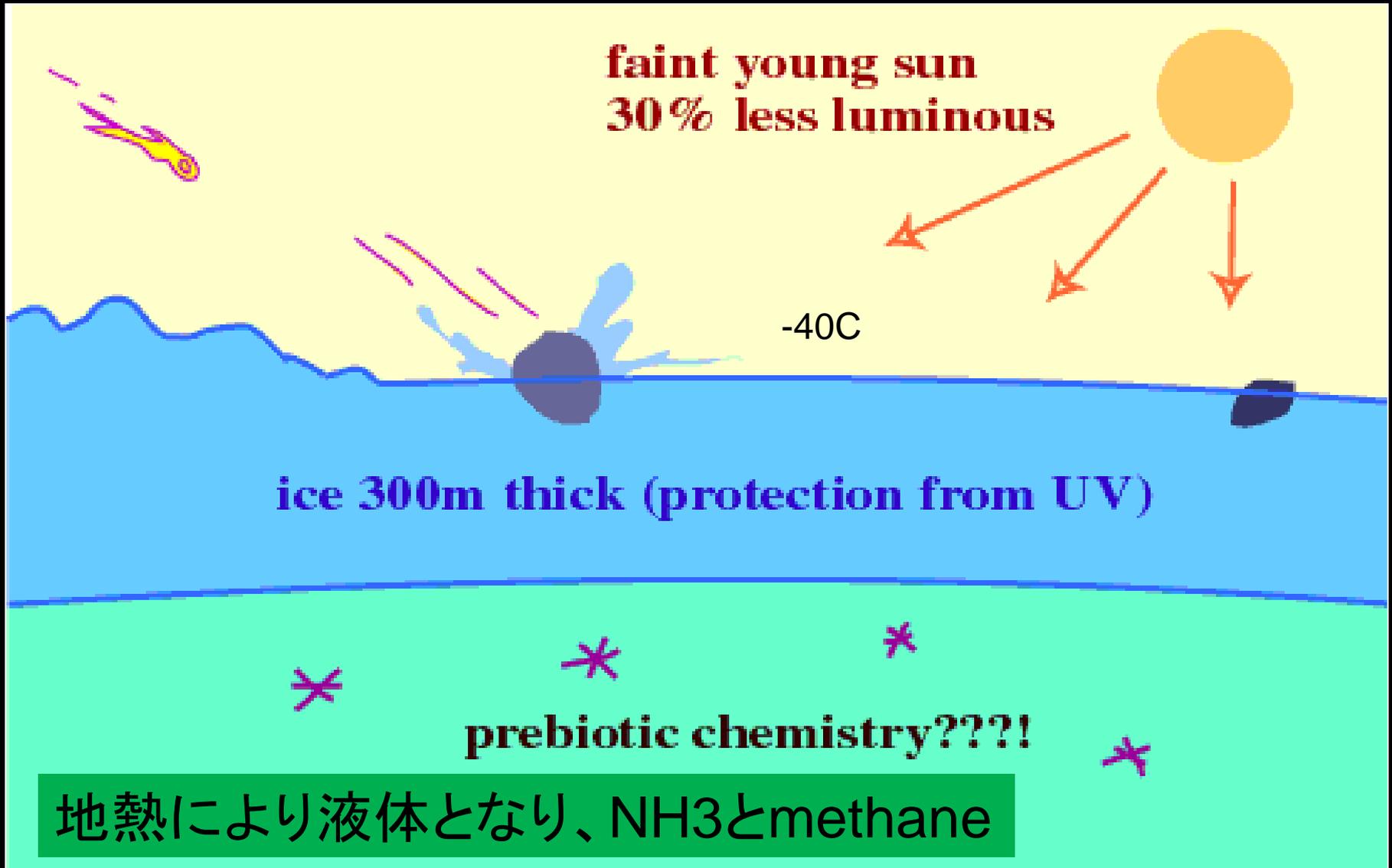
- ZAMSでの太陽光度は現在の75%程度

# *The Faint Young Sun Paradox*

## 解決の方向性

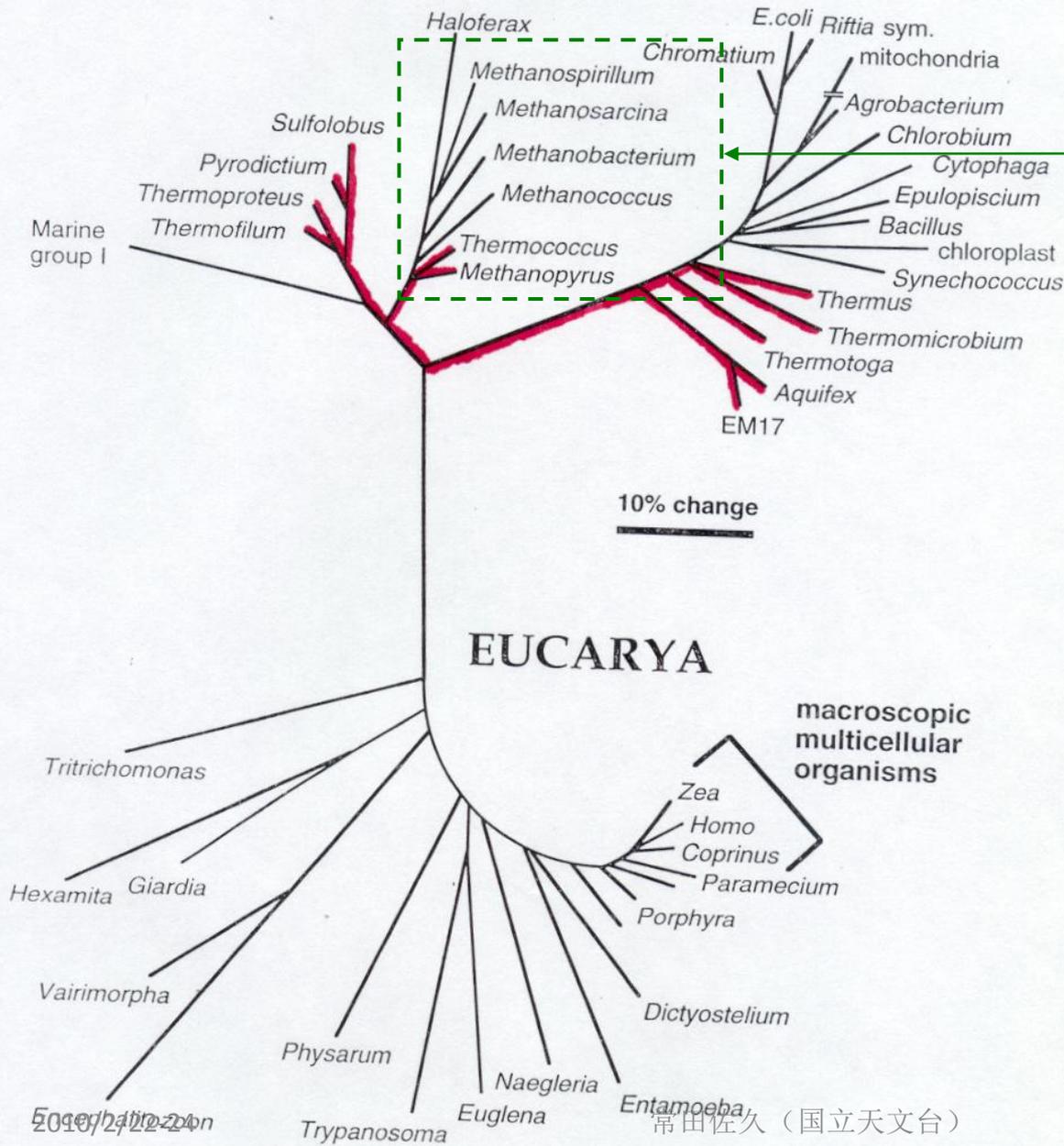
- 生物学的: 凍りついた地球で生命誕生
- 古大気: 多量のgreenhouse gases
- 地質学的: 地熱
- 基礎物理学: e.g., 重力定数の変化!?
- 天体物理学: 太陽は今より明るかった

# 生物学的解決？



# ARCHAEA

# BACTERIA



Methanogenic  
bacteria

生命の鎖を  
戻るとメタン  
バクテリア  
にたどり着く

Courtesy of  
Norm Pace

# Cold Genesis説の棄却

- 地表に水があった
- ストマトライトの存在

35億年前のストマトライト



Lake Thetis Stromatolites (Ruth Ellison)

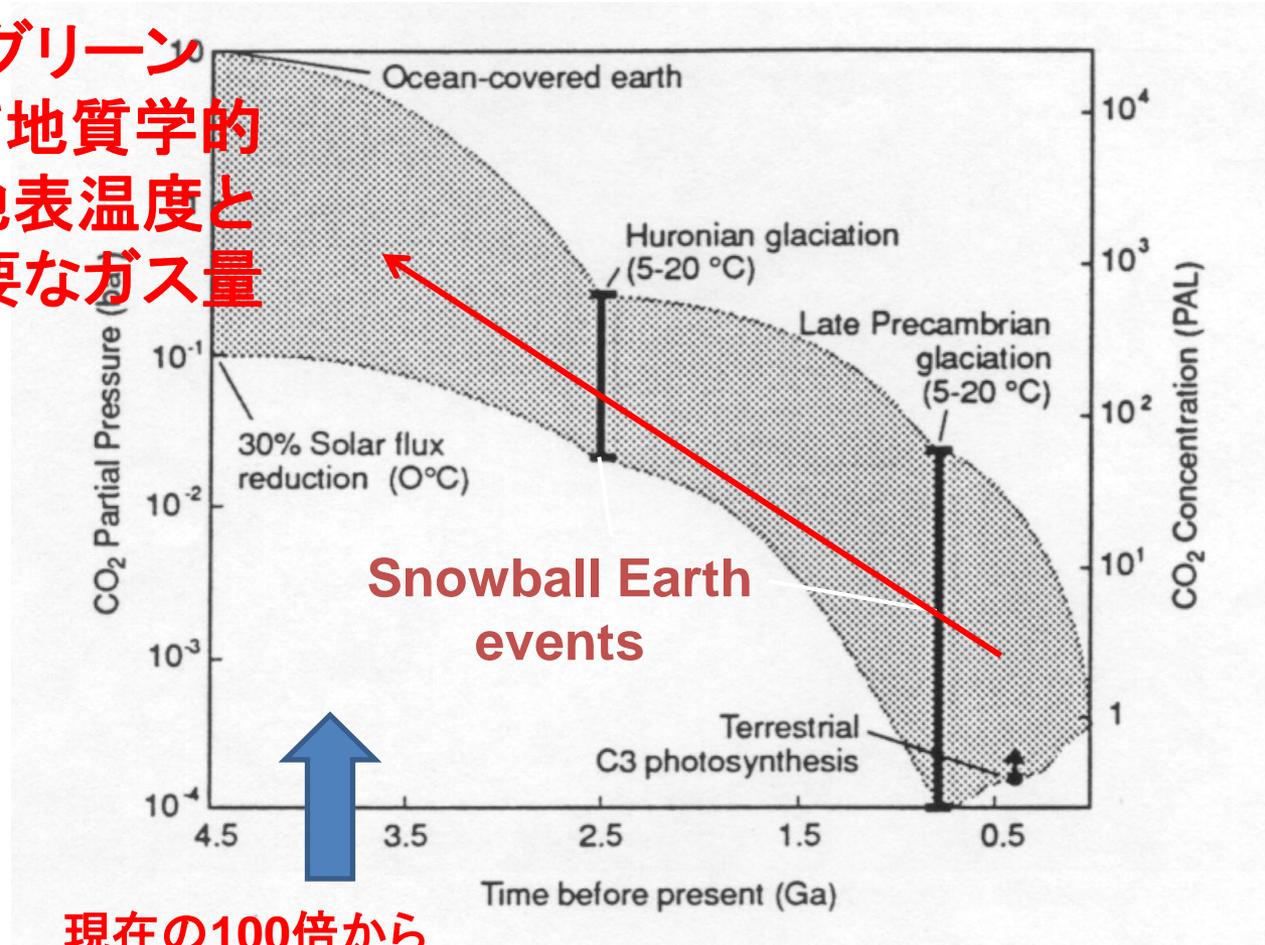


Precambrian stromatolite fossils  
from Glacier National Park

2010/2/22 21

# 多量のCO<sub>2</sub>による温室効果説

暗い太陽の影響をグリーン  
ハウスガスで補って地質学的  
データから求めた地表温度と  
一致させるのに必要なガス量

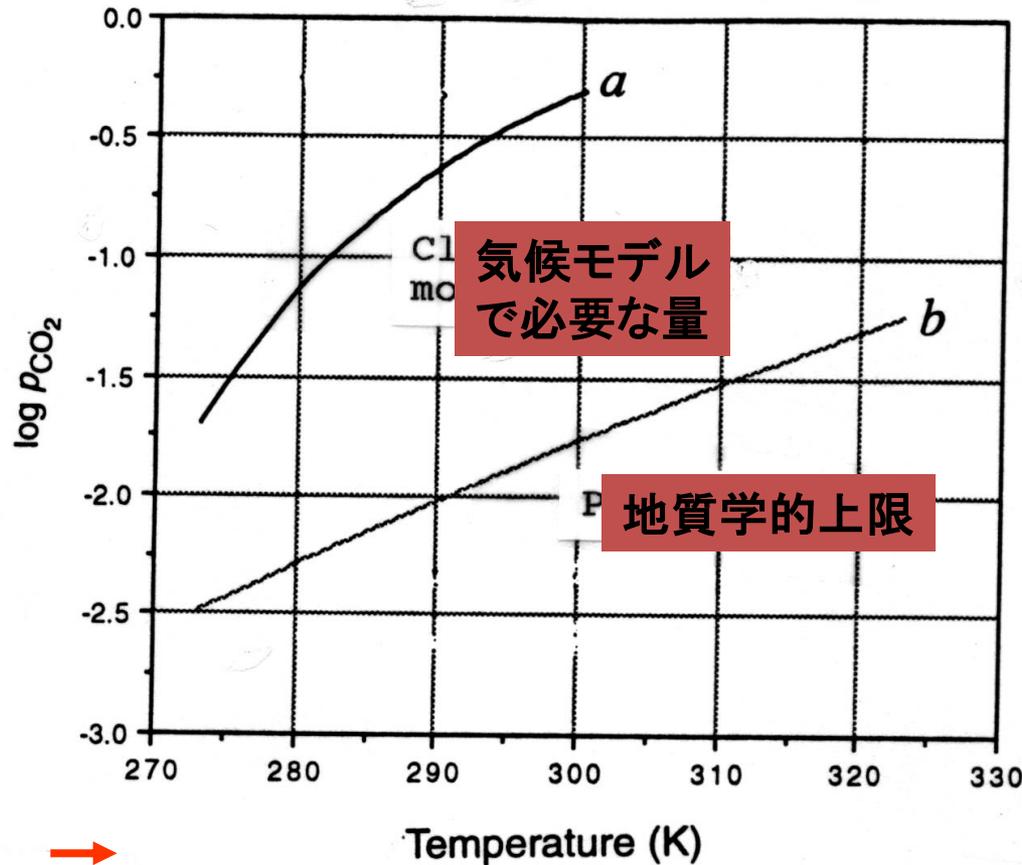


現在の100倍から  
一万倍のCO<sub>2</sub>量

常田佐久 (国立天文台)

J. F. Kasting, *Science* (1993)

# 地質学的証拠 (2.8 Ga)からCO<sub>2</sub>説は棄却される



siderite ( $\text{FeCO}_3$ ) から  $p_{\text{CO}_2}$  の上限が決まる  $\Rightarrow$  greenhouse gas は、 $\text{CO}_2$  ではない ( $\text{CH}_4$ ?)

必要なCO<sub>2</sub>量は温度に敏感

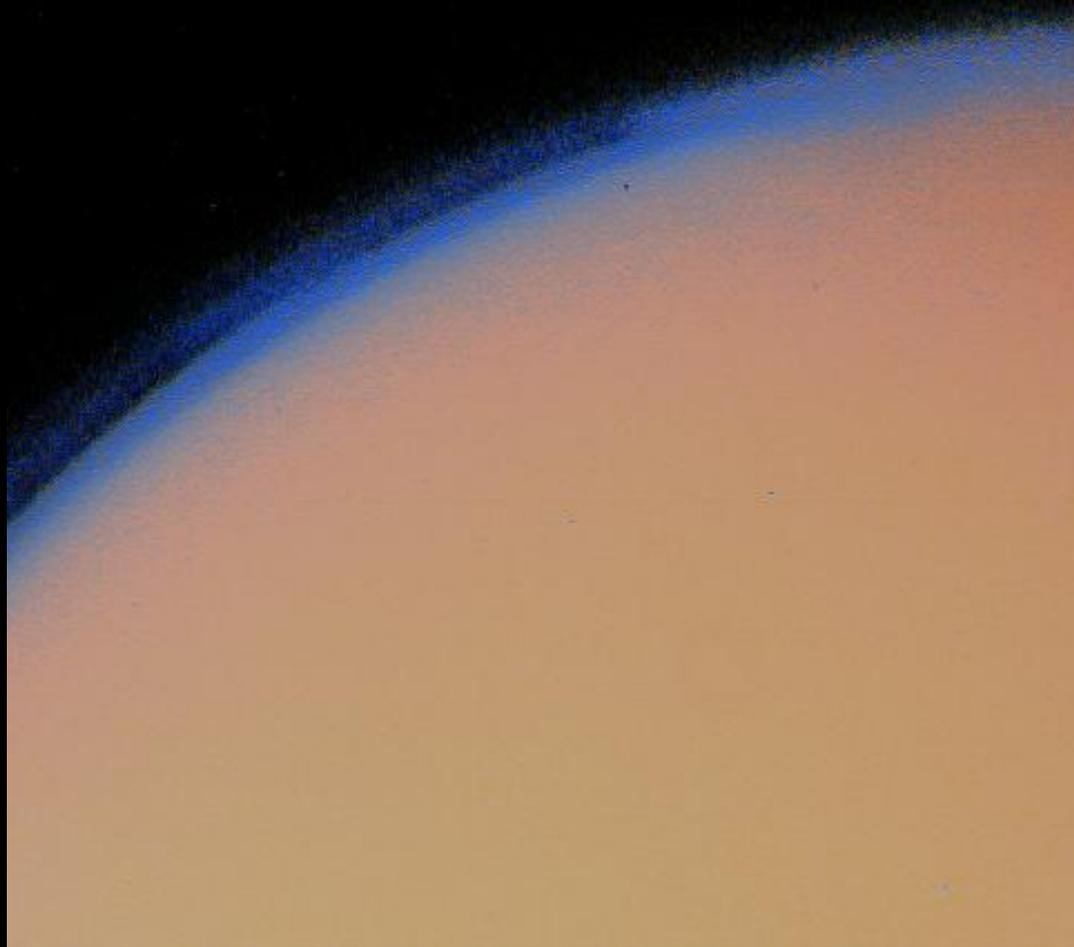
Today's CO<sub>2</sub> level ( $3 \times 10^{-4}$  atm)

Rye et al., *Nature* (1995)

# Titan's organic haze layer

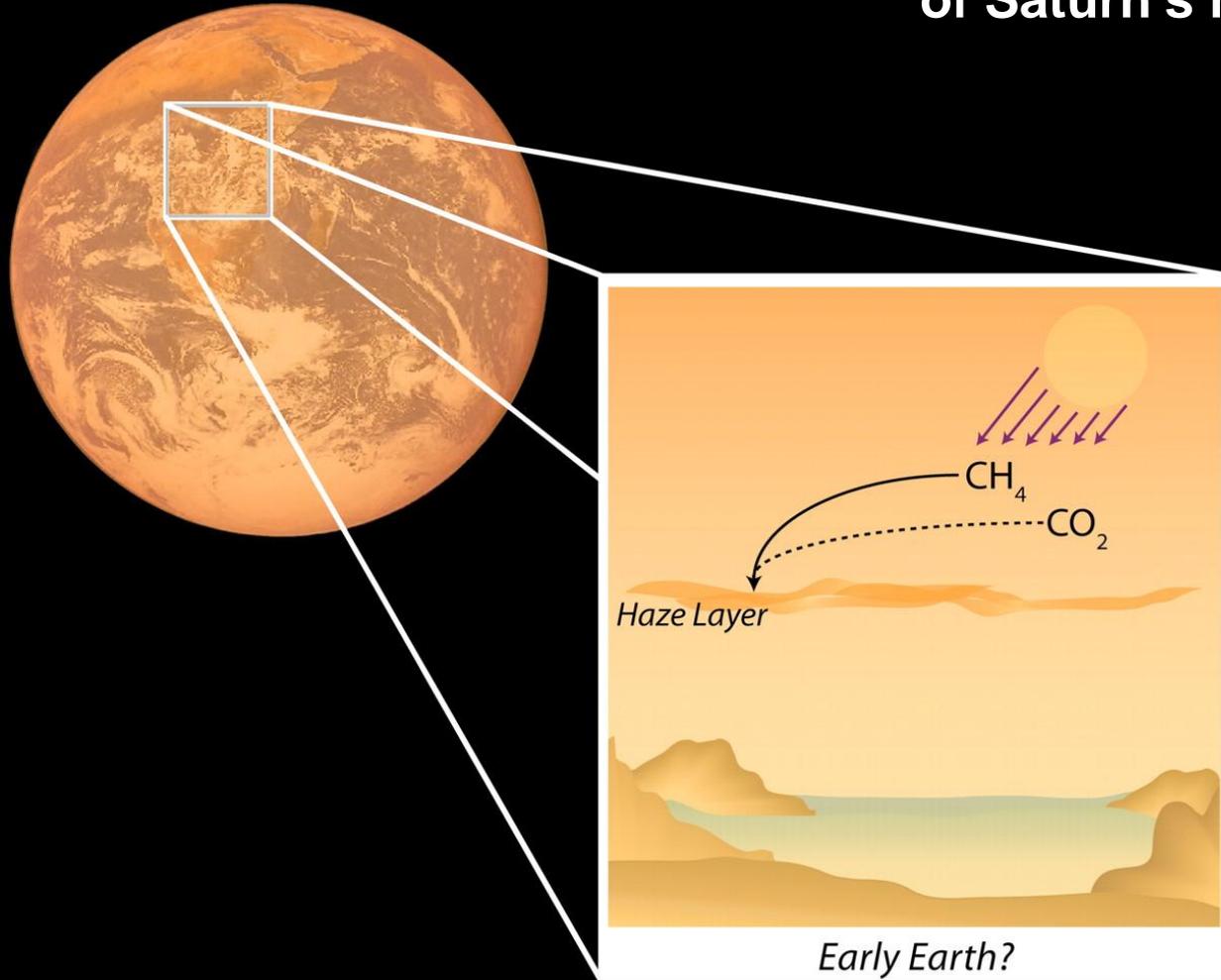
Haze is thought to form from photolysis (and charged particle irradiation) of  $\text{CH}_4$

- If  $\text{CH}_4$  becomes more abundant than  $\text{CO}_2$ , organic haze begins to form... Which constitutes an Anti-Greenhouse agent.
- So the limit on  $\text{CO}_2$  is an effective limit on  $\text{CH}_4$



A hazy early Earth? It has been proposed that if the early Earth's atmosphere contained CH<sub>4</sub>, photochemical formation of an organic haze layer may have made the Earth's appearance very similar to that of Saturn's moon Titan

初期地球はこんな色？



Trainer M G et al. PNAS 2006;103:18035-18042

courtesy of NASA/JPL/Space Science Institute.

# Climate Science Solution (Richard Linzen, MIT)

- Stratospheric clouds in nitrogen/methane atmosphere can produce sufficient greenhouse shielding to obtain high temperatures (albedo effect minor)
- How can this verified from observations?

# Piet Martens 博士の指摘

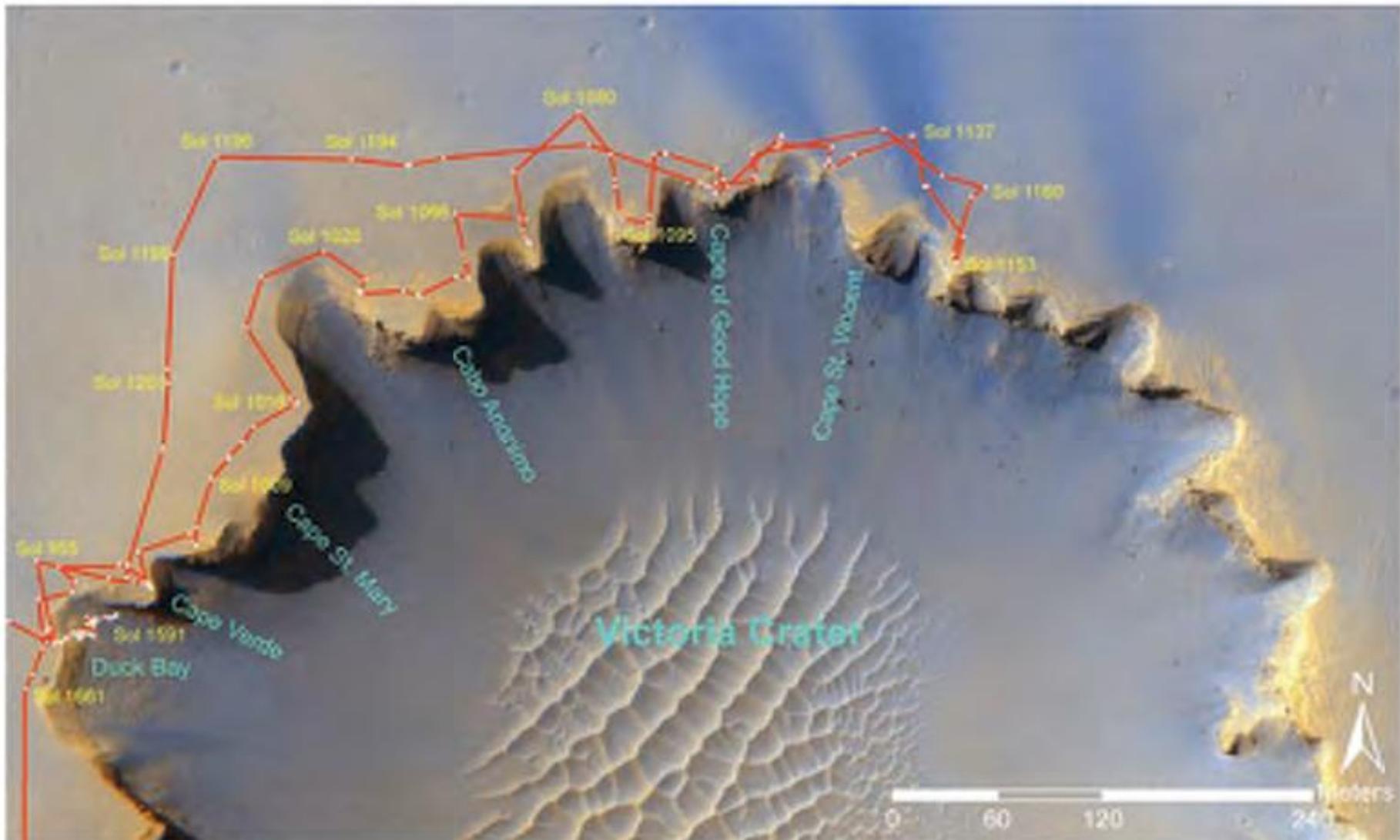
## *It's probably the Sun!*

● NASA Press release, May 2009: “NASA Rover Sees Variable Environmental History at Martian Crater” .....*“The data show water repeatedly came and left billions of years ago”.*

● Squyres et al. (Nature, May 2009):  
“...alteration may have required several hundreds of millions of years of water exposure”.



Victoria impact  
crater on Mars,  
explored for  
eight months  
by Mars Rover  
Opportunity



**Fig. 1.** Opportunity's traverse at Victoria crater. Image acquired by the Mars Reconnaissance Orbiter High Resolution Imaging Science Experiment camera.

# Panoramic View of the Crater Rim



If Mars has had surface liquid water for periods of hundreds of millions of years throughout the last two or three billion years, it's atmosphere must have been MUCH warmer than what a “faint young Sun” would sustain

# 太陽の質量が大きかったら？

- 現在の太陽中心部は、 $\mu_{\odot,c} \sim 0.61$
- ZAMSの太陽中心部は、 $\mu_{0,c} \sim 0.59$

$$\longrightarrow \frac{L_0}{L_{\odot}} \approx \left( \frac{\mu_{0,c}}{\mu_{\odot,c}} \right)^{7.5} = 0.75$$

- ZAMSでの太陽光度は現在の75%程度
- ZAMSの太陽質量が $M_0 = 1.05M_{\odot}$ なら

$$\longrightarrow \frac{L_0}{L_{\odot}} \approx \left( \frac{\mu_{0,c}}{\mu_{\odot,c}} \right)^{7.5} \left( \frac{M_0}{M_{\odot}} \right)^{5.5} = 0.99$$

- ZAMSの太陽質量が $M_0 = 1.1M_{\odot}$ なら、1.27倍

# 実際はもう少し小さくても良い

- Solar luminosity is a strong function of solar mass:  $L_{\odot} \sim M_{\odot}^4$  (前の式とちょっと違っている)
- Planetary orbital distance varies inversely with solar mass:  $a \sim M_{\odot}^{-1}$
- Solar flux varies inversely with orbital distance:  $S \sim a^{-2}$
- Flux to the planets therefore goes as

$$S \sim M_{\odot}^6$$

# 太陽の質量損失

- The faint sun problem を天文学的に解決するには、ZAMSにおける太陽質量を～5%大きくする必要がある。
- これによりZAMSで現在より30%程度太陽を明るくでき、地球の温度を生命発生時の～60度Cにできる。
- **現在の標準太陽モデルでは、太陽質量を一定としており、このようなことは考慮されていない。**
- **太陽は昔重く・明るく、それを現在の質量にするため、何らかの理由で大規模に質量を失ってきたのではない。**

# 太陽の幼年期に300倍の質量損失！

- 現在の太陽の質量損失： $\dot{M}_{sun} = 3 \times 10^{-14} M_{sun} / \text{yr} (\text{Sun})$

$$\dot{M}_{sun} = 10^{-15} \approx 10^{-16} M_{sun} / \text{yr} (\text{CME})$$

- 必要な質量損失：5%/46億年～

$$\dot{M}_{sun} = 1 \times 10^{-11} M_{sun} / \text{yr}$$

- 現在の約300倍の質量損失が必要。現在に近づくほど損失が現在の値に近づくことを考慮すれば、ZAMS近傍では、さらに大きな損失が必要。
- 質量損失は、角運動量損失をもたらす。

# 宇宙における多様な磁場の働き

- 波によってエネルギーを運べる
- ねじってエネルギーを蓄積できる
- ためたエネルギーをとりだせる（磁気リコネクションという現象）
- 不安定になり、CMEなどを引き起こす
- 磁場に垂直方向に物質や熱を運ばない
- 対流を抑える

# 磁場による質量損失の増大

- 磁場によるコロナ加熱が増大して、コロナの温度を5百万度以上にすると、コロナは太陽の重力場に束縛されず自由膨張状態になる
- 年100回くらいCoronal Mass Ejection (CME) があるとして、これが3万倍になれば(2分に1回)説明できる。
- どうすれば昔の太陽の質量損失レートを求めることができるか？

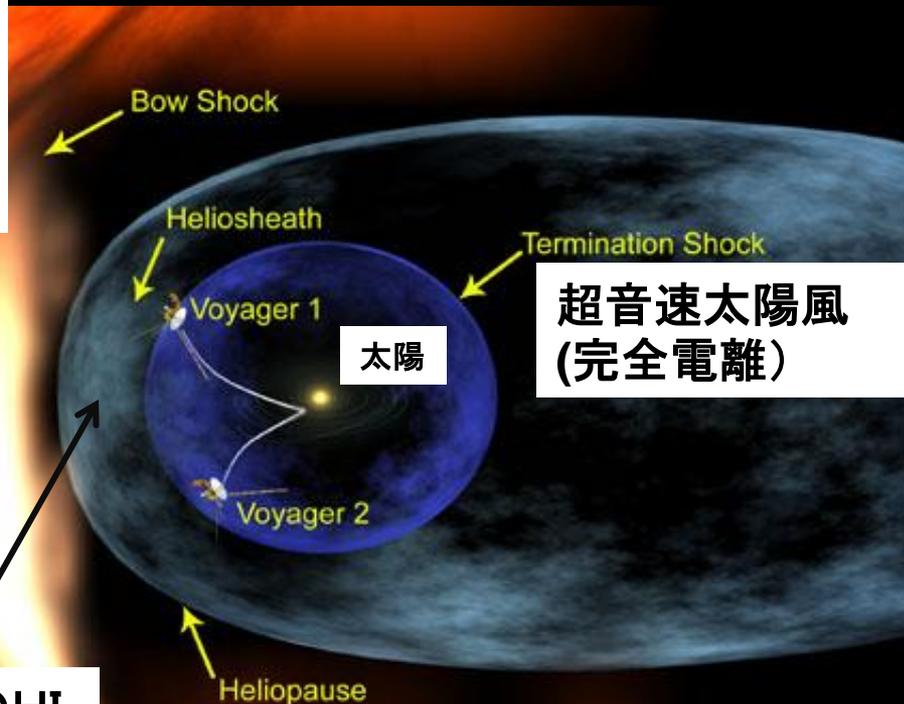
# ブレークスルーとなった研究 より若い太陽型星の質量損失を求め 太陽の過去の質量損失を推測する

B. Wood et al., *Ap. J.* 574, 412 (2002)

超音速星間風  
(8千度、部分電離)  
 $\text{Ly}\alpha$ の狭い吸収線  
(基準)

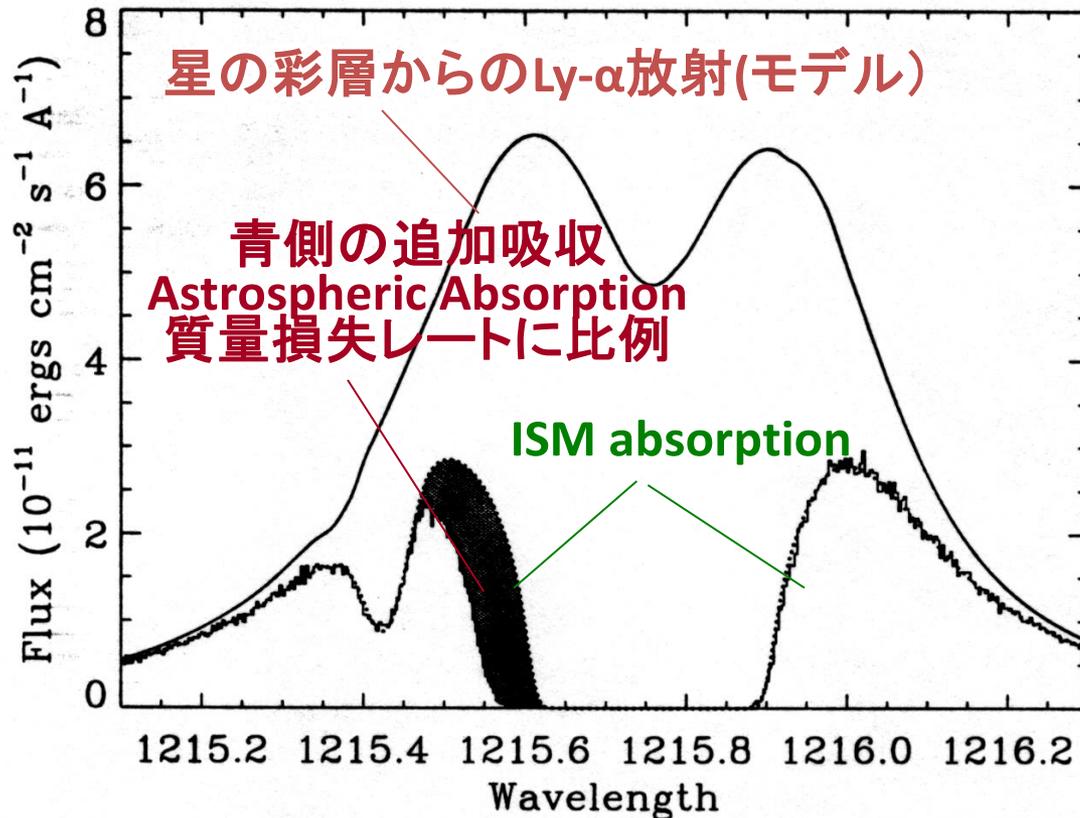
観測方向

20-40万度のHI  
水素壁  
 $\text{Ly}\alpha$ の広い吸収線  
(red shift)



超音速太陽風  
(完全電離)

# $\epsilon$ -EridaniからのLy- $\alpha$ Spectrum (HST)



B. Wood et al., *Ap. J.* **574**, 412 (2002)

atrosphereによる

冷たいISMによる吸収に対して

blue shiftした吸収

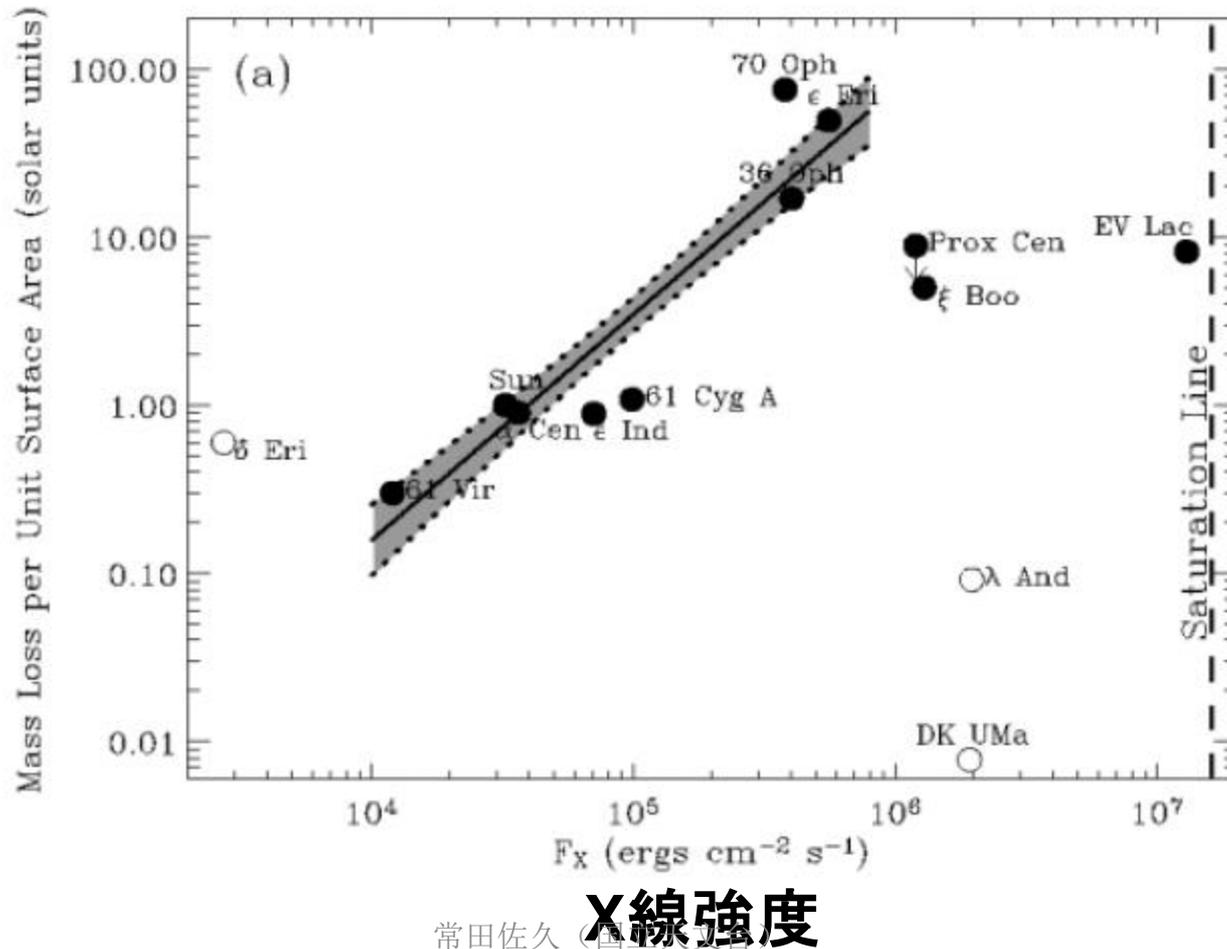
red shiftした熱い星間物質による吸収

# 太陽型星の質量損失レート

- 70 Ophiuchi, mass  $\sim 0.92 M_{\text{sun}}$ , age  $\sim$  **8 億年**,  
mass loss  $\sim$   **$3 \times 10^{-12} M_{\text{sun}}/\text{yr}$** (上限?)
- E-Eridani, mass  $\sim 0.85 M_{\text{sun}}$ , age  $\sim$  **5-10 億年**,  
mass loss  $\sim$   **$10^{-12} M_{\text{sun}}/\text{yr}$**
- The present Sun  $\sim 3 \times 10^{-14} M_{\text{sun}}/\text{yr}$
- 太陽型星はその幼年期に、現在の $\sim 100$ 倍の  
質量損失レートであった可能性が高い。

# コロナからの軟X線強度 と質量損失

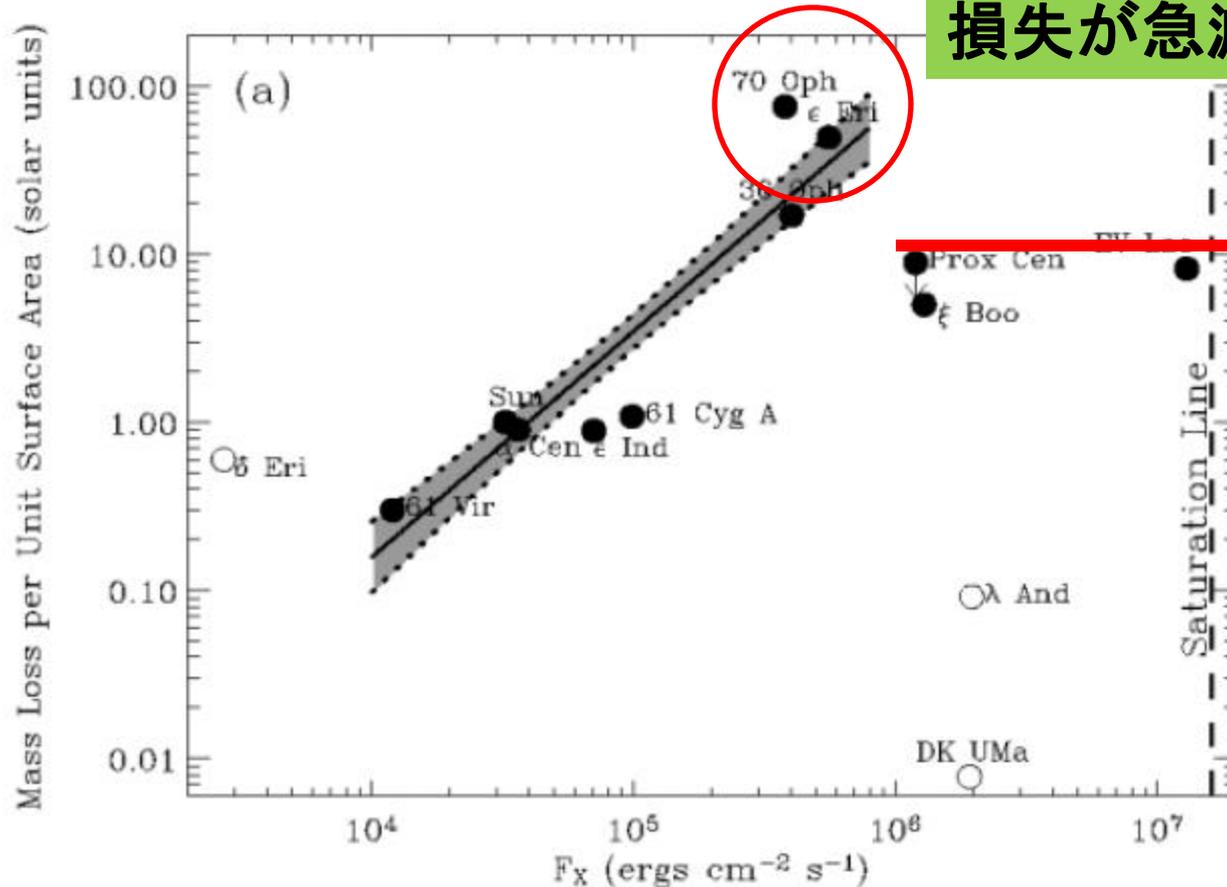
質量損失レート



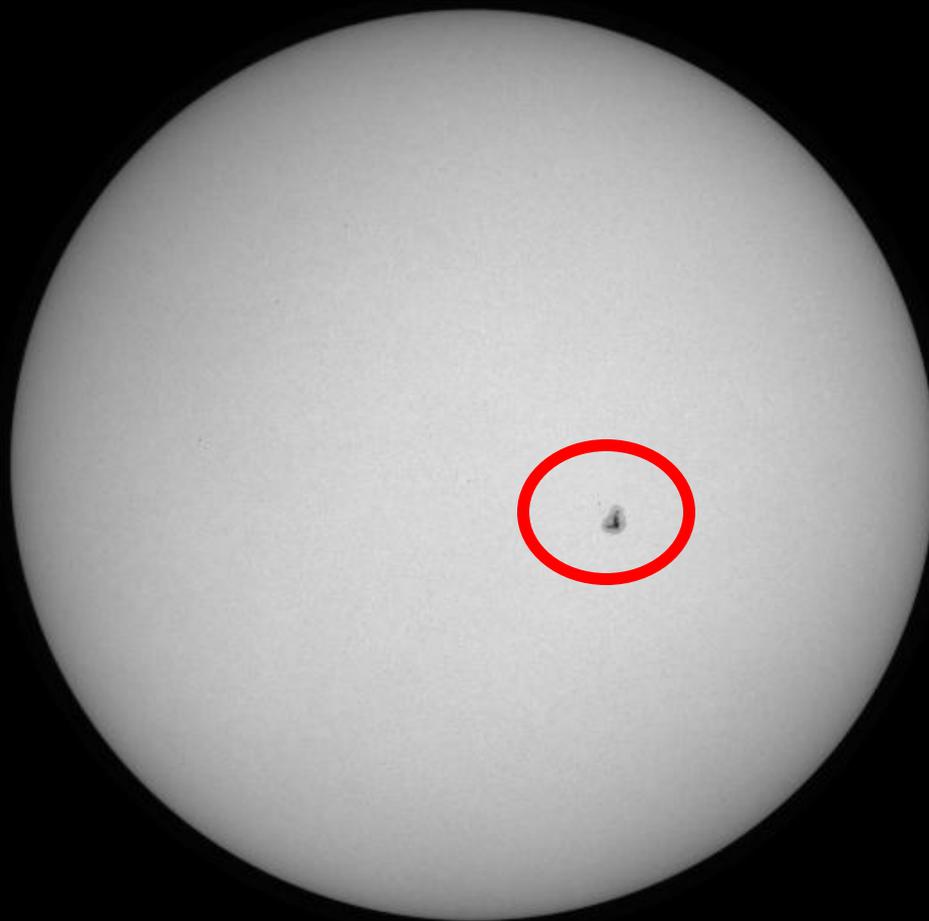
# コロナからの軟X線強度 と質量損失

X線コロナ強度がある  
値以上になると質量  
損失が急減する！

質量損失レート



X線強度



むかしむかし

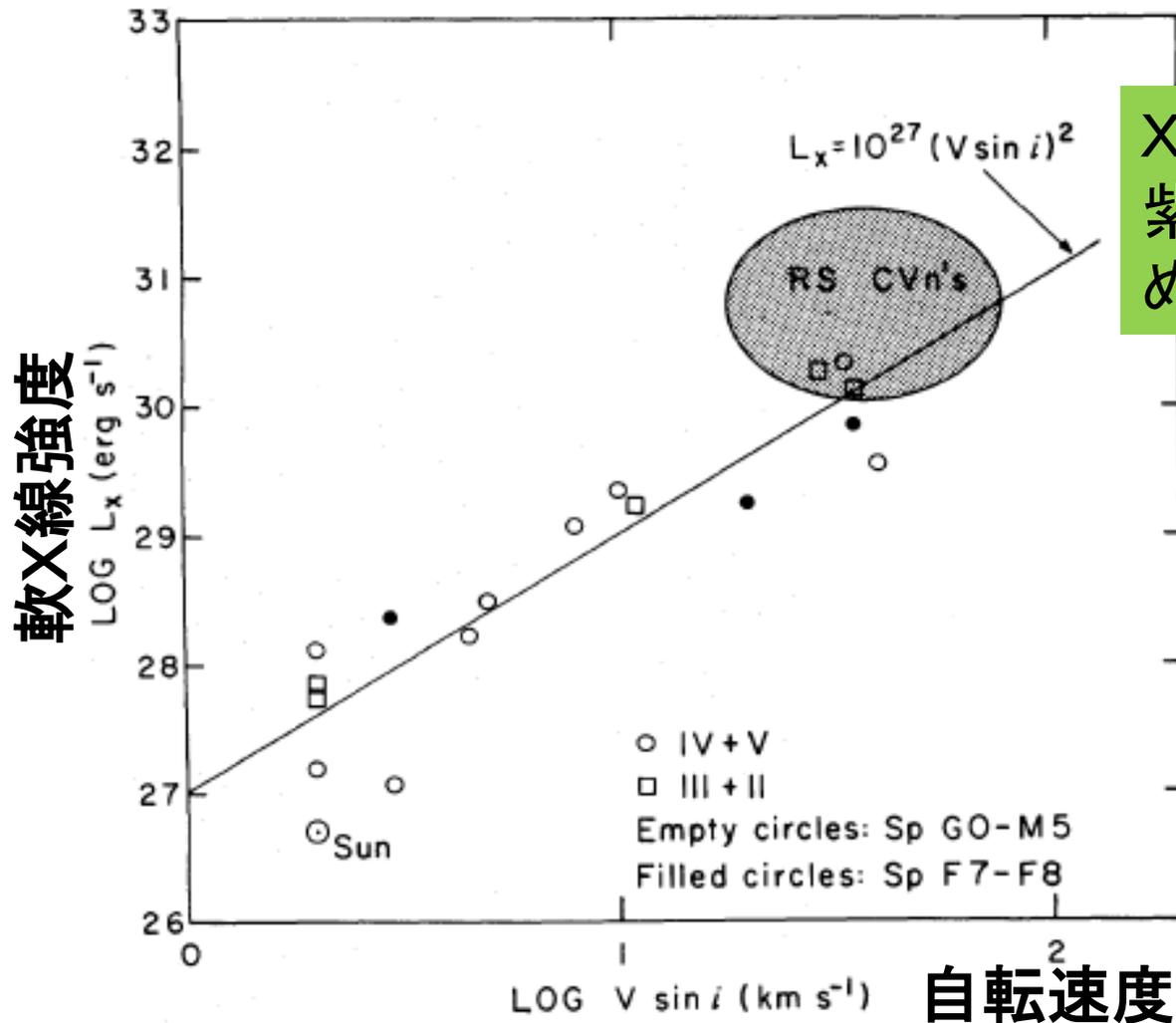
太陽の極域には大黒点があった？

極域大黒点に  
より星風が抑圧  
されたのでは？



こんな感じでは？

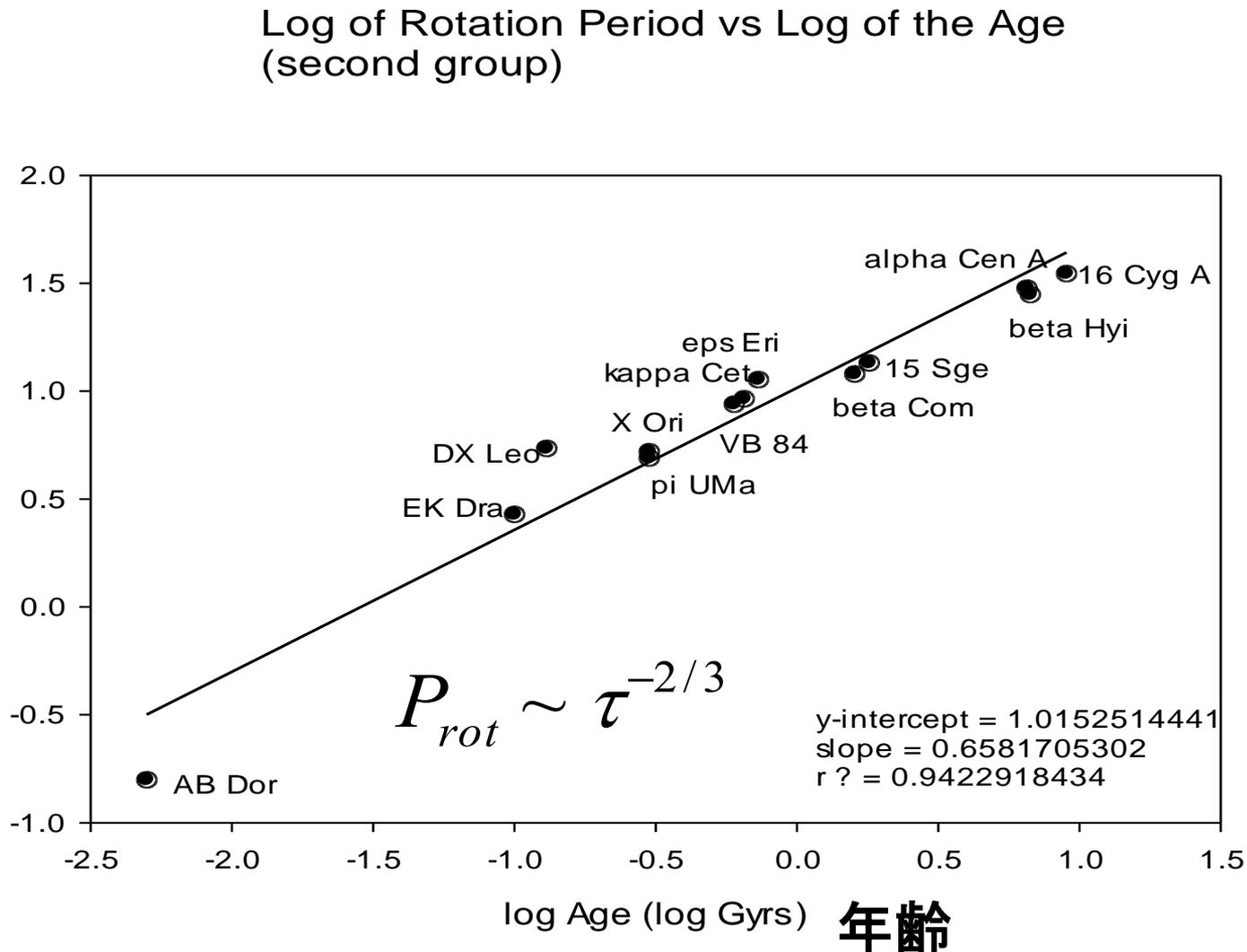
# 晩期型星の自転周期と軟X線強度



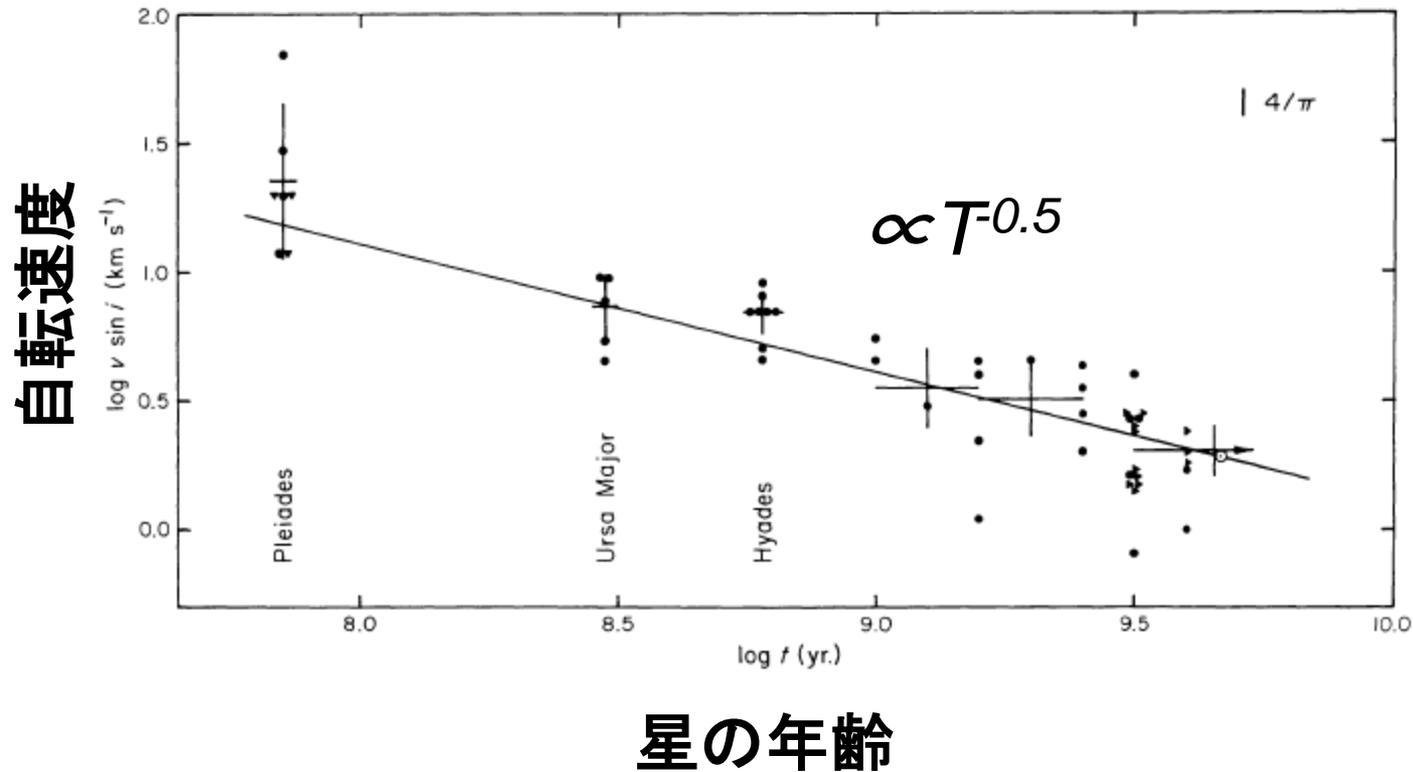
X線だけでなく  
紫外線量も極  
めて大きい

# 太陽型星の年齢と回転周期

自転周期



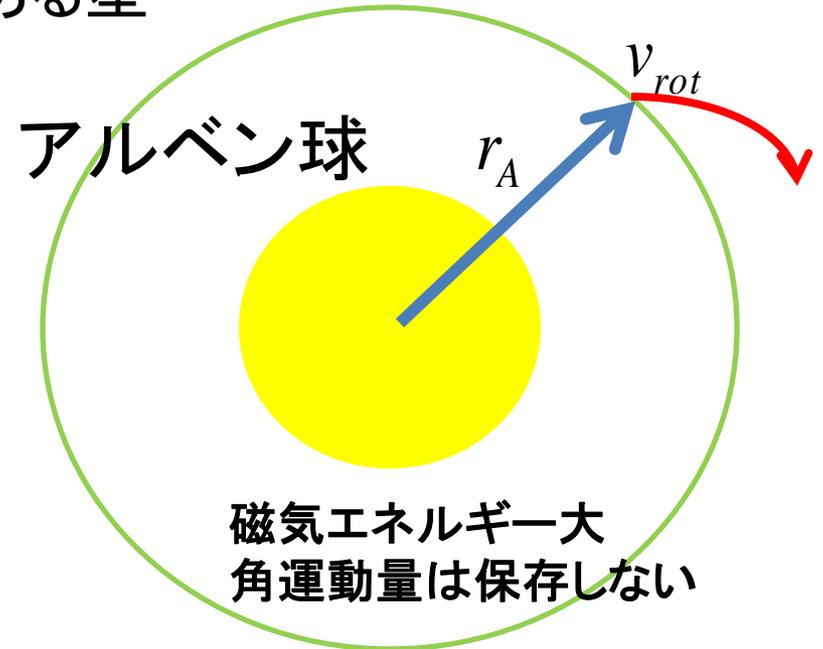
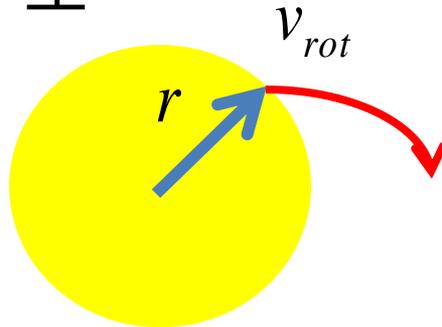
# 星の年齢と自転速度の関係



# 磁場とアルベン球が星の自転に与える大きな影響

磁場のある星

磁場のない星



太陽風による角運動量ロス

$$\dot{L} = \dot{M} \times r \times v_{rot} = \dot{M} \times r^2 \times \omega$$

星の自転に影響を与える  
大きさにはならない

太陽風による角運動量ロス

$$\dot{L} = \dot{M} \times r_A \times v_{rot} = \dot{M} \times r_A^2 \times \omega$$

$r_A$  は太陽半径の10倍以上ある！

# 磁気ブレーキによる星の減速

- アルベン半径：太陽風のエネルギーが磁気エネルギーと一致する半径。太陽では、3–10太陽半径程度。
- アルベン半径の内側では、磁気エネルギーが大きく、太陽風プラズマは、太陽とco-rotationしている。
- アルベン半径の外側では、逆に、等角運動量運動をしている。
- このため、太陽風により太陽が失う角運動量は、アルベン半径が太陽半径の10倍の場合100倍となり、星をの回転を減速させる。

# 星は質量損失すると減速する

(このLは角運動量)

$$\dot{L} = \dot{M} \times r_A \times v_{rot} = \dot{M} \times r_A^2 \times \omega$$

$$L = M \times r_I \times v_{rot} = M \times r_I^2 \times \omega$$

角運動量ロスレートは、質量ロスレートに比例する：

$$\frac{\dot{L}}{L} = \frac{\dot{M}}{M} \times \left(\frac{r_A}{r_I}\right)^2$$

$$\tau_{mass-loss} \left(\frac{M}{\dot{M}}\right) = \tau_{spin-down} \left(\frac{L}{\dot{L}}\right) \times (r_I / r_A)^2$$

# 数字を入れてみると

$$\tau_{mass-loss} = \tau_{spin-down} \times (r_I / r_A)^2$$

$$\tau_{spin-down} = 2 \times 10^9 \text{ years}$$

$$r_I = r_{star} \times (1/3 - 1/6)$$

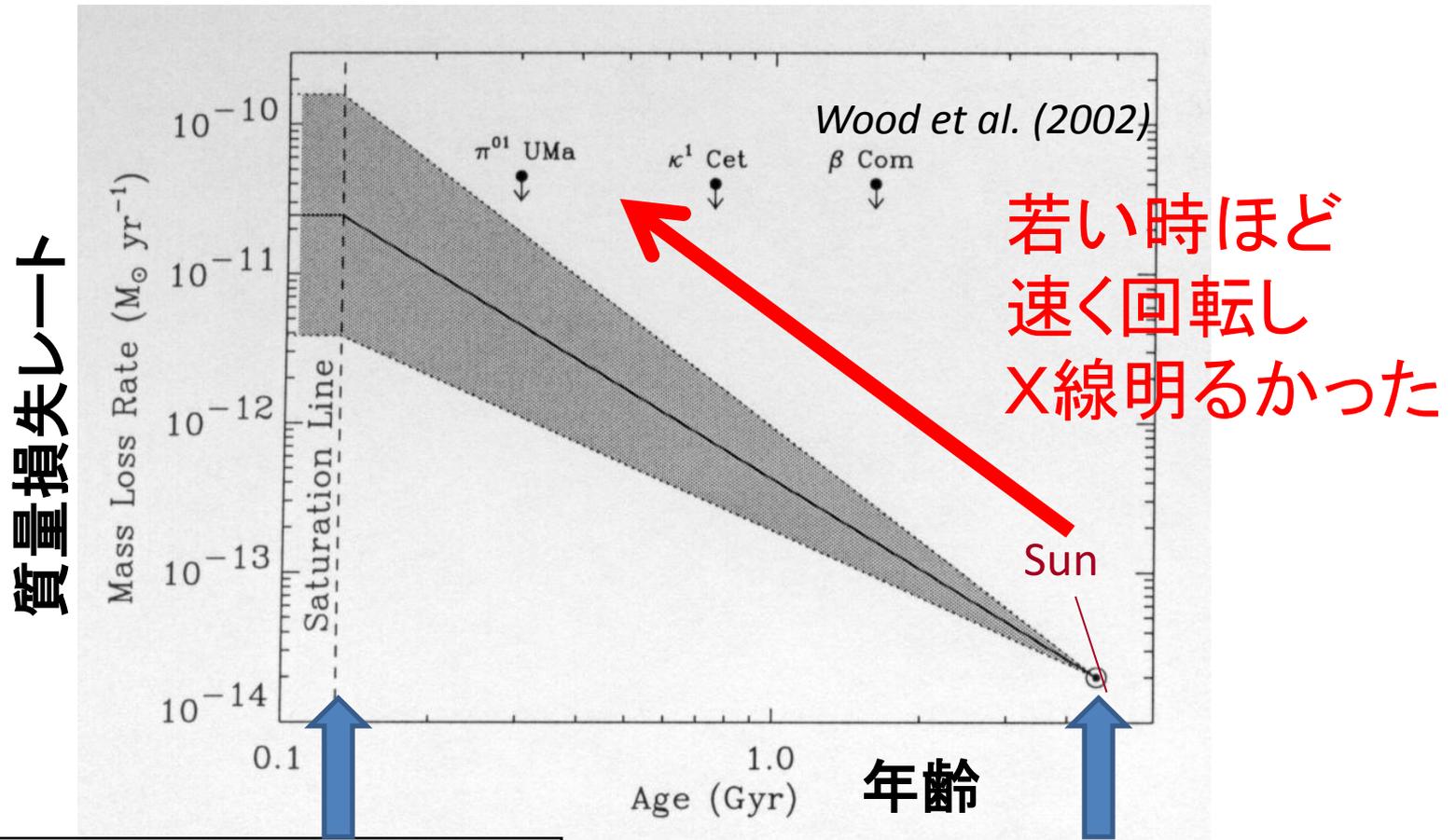
$$r_A = r_{star} \times (3 - 10)$$

$$\tau_{mass-loss} = 2 \times 10^{11} - 2 \times 10^{12} \text{ years}$$

# いろいろな相関関係。。。

- 自転速度と年齢は負の相関
  - **若いほど**早く回転
- 自転速度とX線強度は正の相関
  - 速く回転するほどX線で明るい
- X線強度と質量損失は正の相関
  - X線明るいほど**質量損失が大きい**
- ∴ **若い星ほど質量損失が大きい**

# 太陽の年齢と質量損失の関係

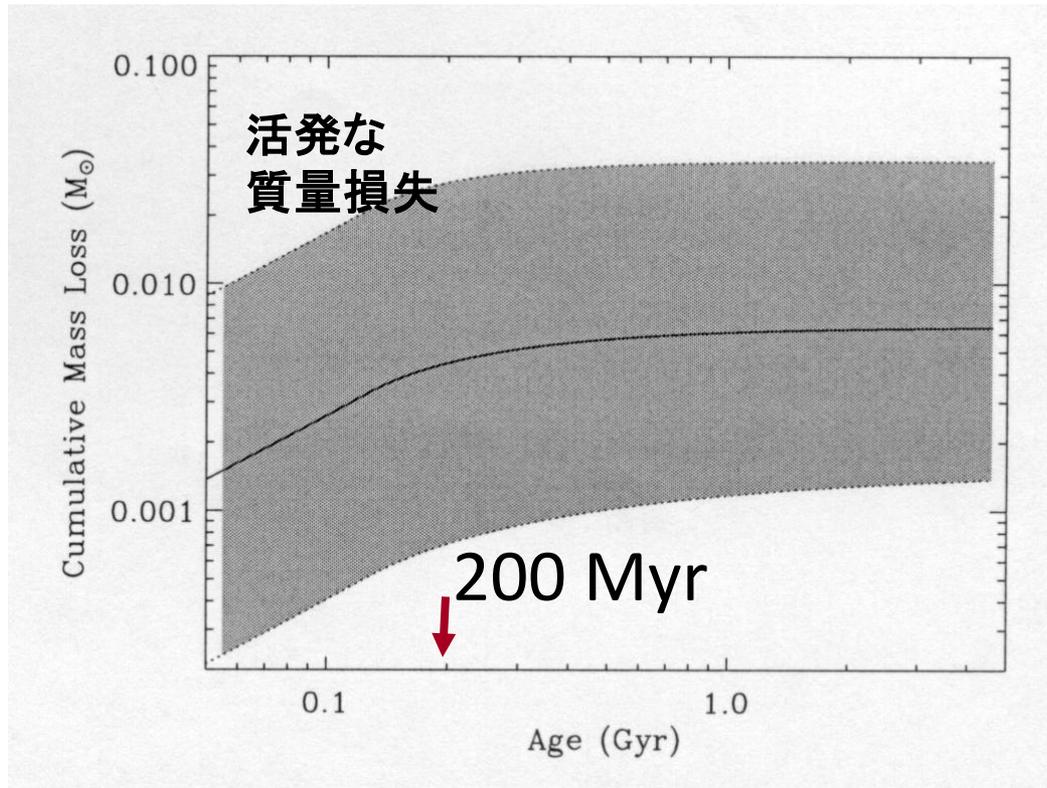


質量損失のサチュレーション  
自転が速いと極に大黒点??

2010/2/22-24

常田 佐久 (国立天文台)

# 積分質量損失



% Changes

質量 損失	光度 変化
0.6	3.6
1.0	6.0
2.0	13
3.0	19

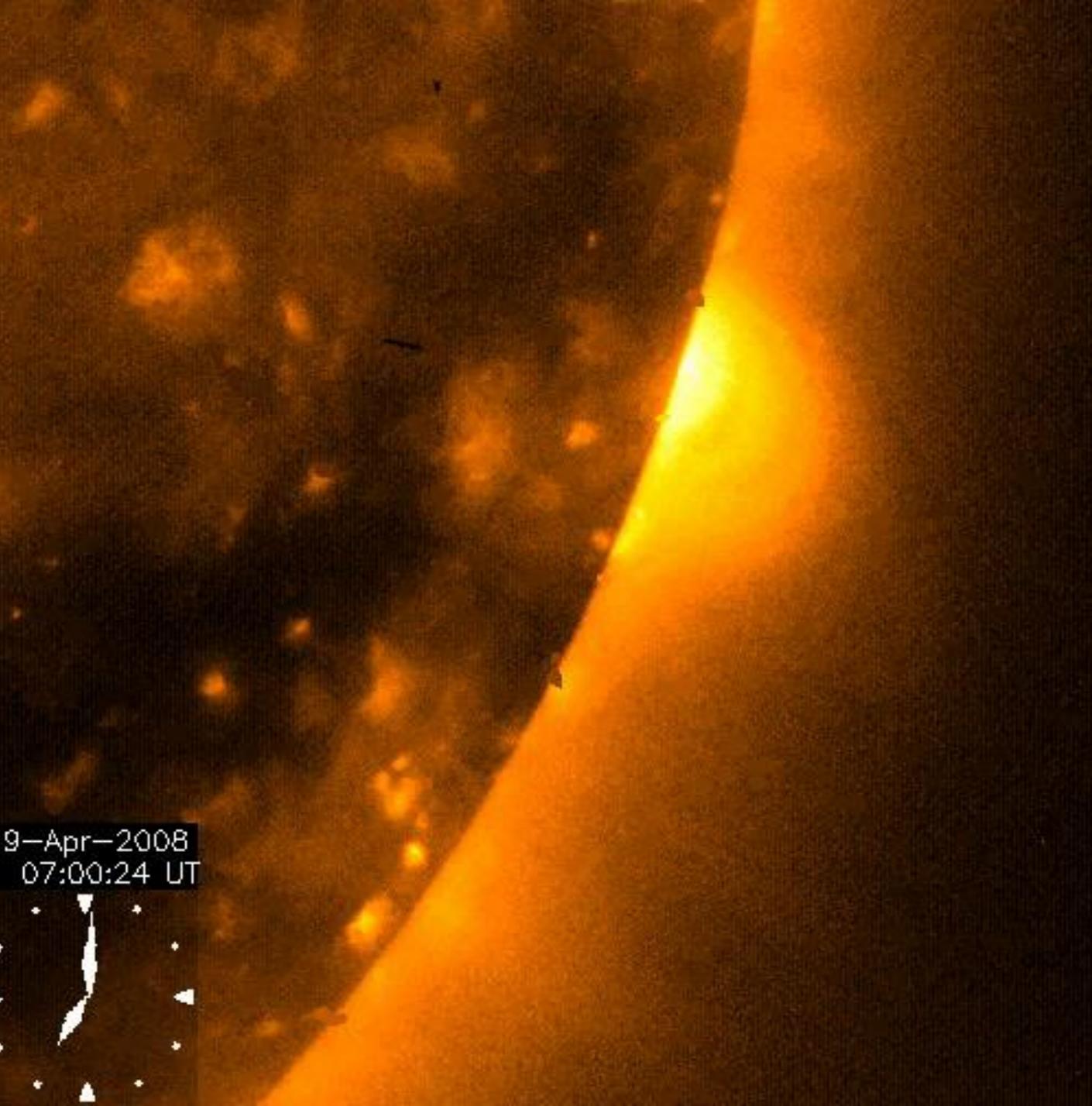
*Wood et al. (2002)*

44億年前には、質量損失が抑圧されていた時期を脱している。

# “Faint Young Sun paradox”

## 一つの推測。。。。

- “Faint Young Sun paradox”への電磁流体力学的解釈を提案した。
- 太陽の幼年期に、その質量は今より～5%大きく、その回転速度は、数日（現在は28日）であったかもしれない。
- そのような幼年期の太陽は自転と対流の相互作用により、現在よりはるかに活発なダイナモ活動と磁場の生成が行われていた。
- 太陽風は自由膨張状態にあり、CMEは2分ごとに発生していた。
- その結果、太陽は現在の300倍から1千倍のレートで質量を失い、同時に磁気ブレーキにより自転は減速していった。
- **このようば大規模な質量損失の痕跡(erosion)を磁気圏がなく大気のない惑星の表面で見つけることはできないだろうか**



9-Apr-2008  
07:00:24 UT

***Coronal Mass Ejection (CME)  
another way to launch mass to  
interplanetary space. 4.4 billion  
years ago, powerful CMEs every  
30 sec may dominate gentle solar  
wind.***

# 参考文献

- Kasting et al.(1988), Scientific American (ISSN 0036-8733), vol. 258, Feb. 1988, p. 90-97.
- Lubick (2002), Nature, Volume 417, Issue 6884, pp. 12-13
- <http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/lectures/lifeform.htm>
- <http://www.psi.edu/projects/moon/moon.html>
- Bada et al.(1994), Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Volume 91, Issue 4, pp. 1248-1250
- [http://www.chem.duke.edu/~jds/cruise\\_chem/Exobiology/sites.html](http://www.chem.duke.edu/~jds/cruise_chem/Exobiology/sites.html)
- Kasting(1993), Science (ISSN 0036-8075), vol. 259, no. 5097, p. 920-926.
- Rye et al.(1995), Nature, Volume 378, Issue 6557, pp. 603-605
- Trainer et al.(2006), PNAS 103, 18035-18042
- Squyres et al. (2009), Science, Volume 324, Issue 5930, pp. 1058-
- Wood et al.(2002), The Astrophysical Journal, Volume 574, Issue 1, pp. 412-425.

# 参考文献

- Pallavicini et al.(1981), *Astrophysical Journal*, Part 1, vol. 248, Aug. 15, 1981, p. 279-290.
- *Nandy and Martens (2007)*, *Advances in Space Research*, Volume 40, Issue 7, p. 891-898.
- Soderblom (1983), *Astrophysical Journal Supplement Series* (ISSN 0067-0049), vol. 53, Sept. 1983, p. 1-15.