



3. 太陽活動と地球環境変動

3. Solar Activity and Terrestrial Environmental Change

3.5 天文学的視点から見た「The Faint Young Sun Paradox」

3.5 The Faint Young Sun Paradox: Astronomical Approach

今田 晋亮

IMADA Shinsuke

名古屋大学太陽地球環境研究所

(原稿受付：2013年8月17日)

地球に生命が誕生したとされる35億年前は、標準太陽モデルによると太陽は現在よりも暗かったため、地球は全球凍結の状態にあり、生命が誕生することが難しい状態にあったと考えられている (The Faint Young Sun Paradox)。この問題は太陽と地球環境の関係に関する最大の未解決問題のひとつでもある。本節では、その問題の解決に必要と考えられるものを説明するとともに、太陽物理学・天文学の立場から問題を解決する可能性について議論する。具体的には、35億年前の太陽は現在より重く明るく、自転速度も速かった可能性について、あらゆる角度から考察する。太陽の明るさを現在の太陽と同程度にするため、当時の太陽の質量が5%程度重かったと仮定する。すると、太陽の質量損失が現在より2~3桁大きい値でないと、現在の太陽と矛盾が生じる。そこで、35億年前の太陽風や Coronal Mass Ejection (CME) 等、初期太陽の電磁流体力学現象についてこれまで太陽物理学・天文学で得られた知見に基づいて、The Faint Young Sun Paradox を議論する。

Keywords:

plasma, star, stellar wind, coronal mass ejection, dynamo

3.5.1 はじめに

「The Faint Young Sun Paradox」についての議論が始まったのは1970年代初頭のことである。Sagan & Mullen [1]は太陽の進化を考慮し、地球のアルベドおよび大気組成に変化がなければ、地質学的または古生物学的な観測事実に反して、現在より23億年以前 (現在の太陽はおおよそ46億歳) の地球海水温度は氷点を下回ることを示した (図1)。太陽中心核でおこる核融合反応により太陽は明るく輝いているのであるが、初期太陽では核融合反応がそれほど進んでおらず、現在の太陽と比べて水素の量が多くヘリウムの量が少ない。星は年をとるにつれ核融合反応が進み中心核を構成しているガスの平均分子量が大きくなり、粒子数が減少する。すると星の重さを支える圧力を作るため温度があがり結果として核融合反応がより活発になる。そのため、現在の太陽では初期の太陽よりも激しく起きている。この星の進化を考慮すると、初期太陽の輝度は以下の式で記述され

$$L(t) = [1 + 0.4(1 - t/t_0)]^{-1} L_0 \quad (1)$$

現在の太陽のものの75%程度であったと考えられる [2] ($t = 10$ 億年, $t_0 = 46$ 億年, $L_0 = 3.85 \times 10^{26}$ W)。 L , t は太陽の輝度, 年齢を表し, 添字 0 は現在の太陽のものをあらわ

す。したがって、古の太陽は現在の太陽よりずっと暗かったため、23億年以前の地球全球平均温度が現在のものよりずっと低く、全球凍結していた可能性が大きい。そのような環境で生命が誕生することは可能なのだろうか。これがいわゆる「The Faint Young Sun Paradox」である。

ストロマトライト (藍藻類の死骸と泥粒等によって作られる層状の構造をした岩石) 等の古生物学的証拠から生命は35億年前に存在したことがわかっている [3, 4]。実際、太古の地球が温暖であった証拠は数多く存在する。例えば、グリーンランドのIsua地域に保存状態のよい岩体が残されており、これまで発見されている古い堆積岩や枕状溶岩等から約38億年前までさかのぼって情報を得ることが可能である [5]。チャート (SiO₂) の海水との同位体交換の温度依存性 [6] や、生命の進化系統樹の年代推定をし、あるタンパク質の安定温度から太古の海水温度を推定する研究 [7] が行われた。結果、太古の海水温は60℃を超えていた可能性が示唆されている (図2)。さらに近年では、数十億年前の火星についても観測的に研究が進んでいる。多クレータ地域に流水地形が豊富に存在すること等がわかり、過去20-30億年前に再三にわたり表面に水が存在していた兆候が発見されている [8, 9]。現在ですら氷点下である火星で、太陽が暗かった時代にどのようにして液体の水が存在してい

Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Chikusa, Nagoya, AICHI 464-8601, Japan

author's e-mail: shinimada@stelab.nagoya-u.ac.jp

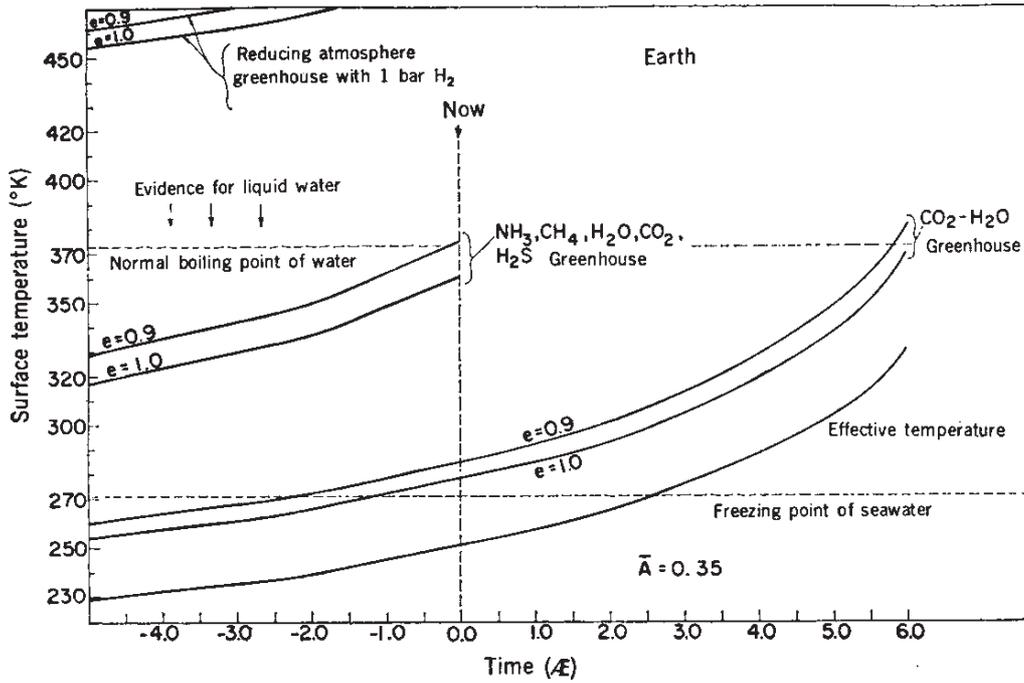


図1 地球全球平均温度の進化[1].

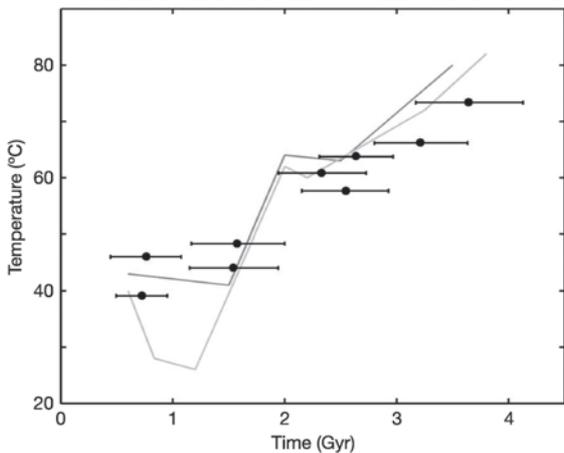


図2 約5億年前から35億年前の海水温度の進化. 横軸 (Time) の原点は現在を表している. 実線は $\delta^{18}\text{O}$ によるもの, 点は生命の進化系統樹の年代推定によるもの[7].

たか非常に深刻な問題である.

この「The Faint Young Sun Paradox」を解決するため, 以下のような方向性が考えられる.

- 生物学的解決: 凍りついた地球で生命誕生
- 古大気学的解決: 多量のグリーンハウスガス
- 地質学的解決: 地熱
- 天文学的解決: 太陽は暗くなかった

本説では, これまで有力視されてきた古大気学的解決についての現状について触れた後, 天文学的なこの問題へのアプローチについて述べる.

3.5.2 温室効果ガス (大気化学) による解決

パラドックスの最も有力な解決策として, 温室効果ガスによる影響が検討されてきた. 太古の地球大気組成が現在のものより温室効果ガスに富んでおり, そのため温暖な気候であったのではないかと考えられてきた.

惑星の平衡温度は2.で考察したように太陽放射の吸収量と惑星から宇宙空間への放出量のバランスで決まる.

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

A は惑星のアルベド, S は太陽表面からのフラックス, R は惑星半径, ϵ は地球大気の赤外放射率, σ はステファンボルツマン定数である[10]. 典型的な地球のアルベドおよび赤外放射率は0.34および0.6である[10, 11]. 式(2)において ϵ は温室効果を取りこんだ係数であるが, 温室効果の影響がなく赤外放射率 ϵ が1であった場合, 地球の平均気温は255 Kであることが計算でき, 現在の地球の平均表面温度288 Kより33 K低いことがわかる. つまり現在の地球は33 K程度, 温室効果によって温度が高くなっていることがわかる.

仮に太古の大気組成での温室効果ガスが原因で温暖な地球環境が保たれているとすると, この温室効果源はなんだろうか. Segan & Mullen[1]およびHart[12]では NH_3 や CH_4 が候補のひとつとして検討されている. これらの温室効果ガスは生命を生む化学進化にも適していると考えられ[13], 有力視されていた. しかし, 両者とも光化学的に分解されやすく短寿命である. 実際, NH_3 が0.01%大気に含まれていれば十分な温室効果ガスが得られるが, 寿命は40年以下と短い[14]. CH_4 についても同様に短寿命の可能性が高いことが示唆されている. 次に候補としてあがっているのは CO_2 である[15, 16]. CO_2 は化学的に安定であり調整機構も存在する. しかし, CO_2 モデルにもいくつか弱点がある. まず, 古土壌から復元される CO_2 分圧は低く[17], 太古の大気中に CO_2 が大量にあったとは考えにくい. また生命を生むための化学進化には不向きである. さらに後期隕石重爆撃期(約41-38億年前の惑星形成後に存在したとされている隕石衝突が非常に頻繁な時期)には高

い分圧を保てない[18]等, CO₂ モデルを支持しない要因も多い。この他, CO₂-CH₄ の複合モデルや, アルベドが著しく変化するモデル, 圏雲量の変化によって温室効果が強まるモデルなど, 様々なモデルが提唱されているものの決定的な議論にまだなっておらず, 「The Faint Young Sun Paradox」において古大気学的だけでは解決できない可能性も依然あり得る状況である。

3.5.3 35億年前の太陽地球環境

この小節では「The Faint Young Sun Paradox」の天文学的解決, つまりは”実は太陽は暗くなかった”可能性を議論するために必要な太陽物理学・天文学の基礎を述べる。

どのような状態であれば, 太古の太陽が現在の太陽と同程度の明るさでいられるであろうか。星の明るさは非常に星の質量に依存しており,

$$L \propto M^p \quad (3)$$

で表される。L はフラックス, M は星の質量で, p は星の大気の不透明度で決まる定数であり, およそ3-5程度であり[19], 初期太陽では4.75程度[20]であったと考えられる。ここで, 初期太陽が現在の太陽より質量が大きく, そのため初期太陽であっても今と同じ程度の明るさであったとしよう。現在の太陽と同じ質量の場合75%程度の明るさになるので, これと式(3)を考慮すると必要な初期太陽質量を求めることができ, およそ現在の太陽より6%程度重い必要があることがわかる。実際には太陽の質量が変わると地球の公転軌道が変化するので, そこまで考慮するとおおよそ4-5%程度, 初期太陽が重ければパラドックスを説明できることがわかる。Minton & Malhotra[21]では地球全球平均温度が太陽質量損失モデルの違いでどのように変化するか議論している(図3)。彼らが計算に用いた太陽質量損失モデルは, ベキ乗則に従って質量損失が星の年齢とともに下がっていくモデル, 指数関数に従って質量損失が星の年齢とともに下がっていくモデル, 地球の全球平均温度が273Kで一定になるような質量損失モデル, の3つである。図3左は3つの太陽質量損失モデルを用いて, 太陽質量進化の歴史を現在の太陽質量をもとに遡って計算し

た結果である。図3右はそれぞれの質量損失モデルを用いた際の地球全球平均温度進化の歴史である。この計算結果から, 少なくとも35億年前に273Kを下回らないためには, その時の太陽質量が現在の太陽質量より1%以上多くなくてはならないことがわかる。つまり, 約35億年で太陽が現在の太陽質量の数%程度損失したとすれば, 「The Faint Young Sun Paradox」は解決することになる。太陽からは常に太陽風が吹き出していることが知られており, 35億年かけて数%程度の質量変化というのは簡単そうな印象を受ける人もいるだろう。

それでは, この条件を満たす質量損失率がどのくらいのものか簡単に見積もってみよう。単純に35億年間一定の割合で質量損失し, 全部で現在の太陽質量の5%の質量を失ったとする。すると, 1年あたりの質量損失率は約 $1 \times 10^{-11} M_{\odot}/\text{年}$ であることがわかる ($M_{\odot} = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$, この値がいかに大きい値であるか, 現在の太陽の質量損失と比較する。図4は太陽の各物理パラメータ(27日平均)の長期変動を表している[22]。太陽極域磁場や黒点数を見るところおおよそ11年周期で変動していることがよくわかる。この変動にともない, 太陽風密度, 太陽風速度も変動する。その変動を考慮すると, 速い太陽風では速度がおおよそ600 km/s ($6 \times 10^5 \text{ m/s}$)程度, 密度が 4 cm^{-3} ($4 \times 10^{-6} \text{ m}^{-3}$)程度であり, 太陽の質量損失率を計算すると約 $1.8 \times 10^{-14} M_{\odot}/\text{年}$ であることがわかる。一方, 遅い太陽風では, 速度がおおよそ400 km/s程度, 密度が8/cc程度であり, 太陽の質量損失率は約 $2.4 \times 10^{-14} M_{\odot}/\text{年}$ であることがわかる。いずれの場合もおおよそ $2 \times 10^{-14} M_{\odot}/\text{年}$ であることがわかる。今, 「The Faint Young Sun Paradox」を解決するために必要な質量損失率は約 $1 \times 10^{-11} M_{\odot}/\text{年}$ であるので, 現在の太陽風による質量損失では3桁程度足りないことになる。この3桁大きい質量損失率を太陽風で担うことは可能であろうか。過去の質量損失率を直接観測することはできないが, 太陽と非常に近い型の若い恒星を観測することで太古の太陽質量損失を考察することができる。図5は太陽と非常に似ている恒星の質量損失率とX線のフラックス強度の関係を表す[23]。一般に星のX線のフラックス強度と年齢は深い関係にあるとされ, 若い星ほどX線で激しく

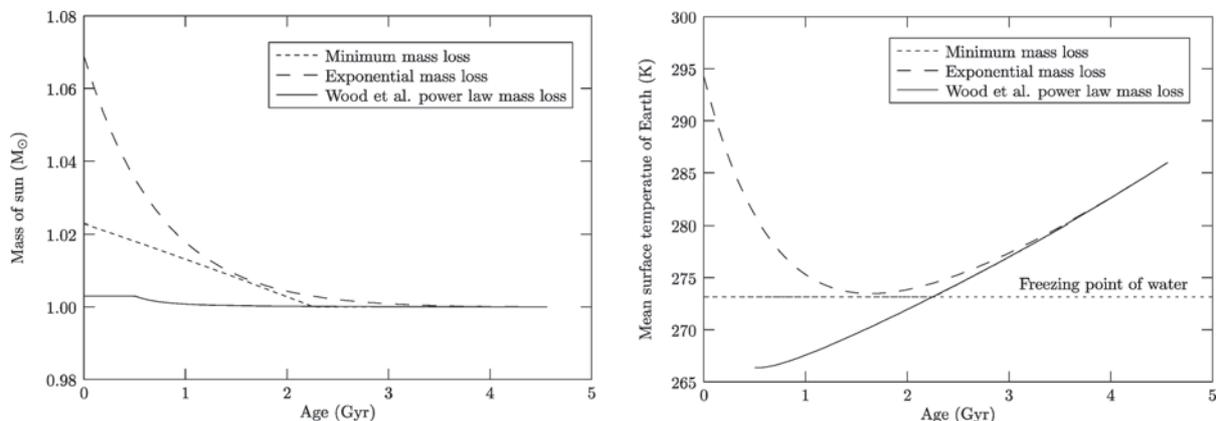


図3 (左)様々な太陽質量損失モデルによって見積もられた太陽の質量進化。
(右)様々な太陽質量損失モデルによって見積もられた地球全球平均温度の進化。

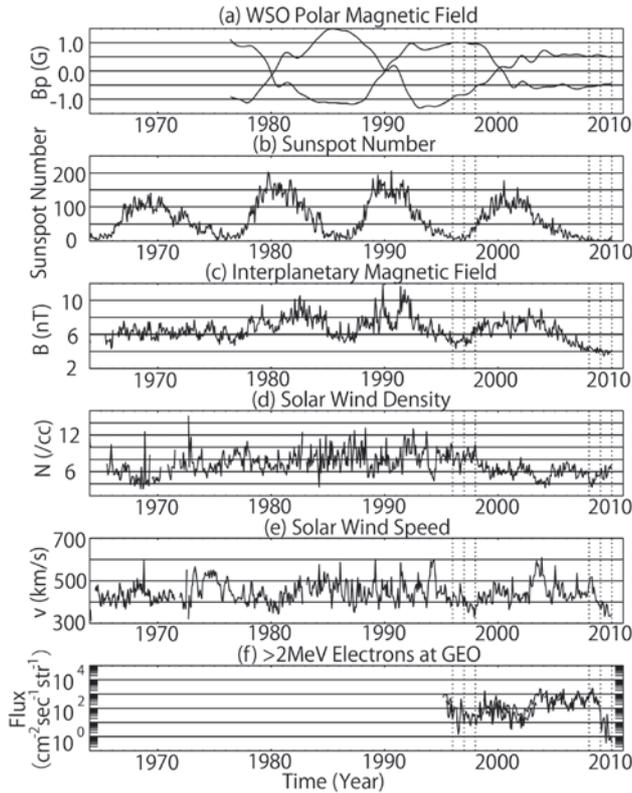


図4 太陽の各物理パラメータ (27日平均) の長期変動: 上から太陽極域磁場強度, 太陽黒点数, 地球周辺太陽風中の惑星間空間磁場強度, 太陽風密度, 太陽風速度, 地球静止軌道上の高エネルギー電子 [22].

輝いていることが知られている [24, 25]. 図 5 によると, 星の質量損失率は星の年齢 (X 線フラックス強度) とあるところ ($F_x \sim 10^6$) までは非常によく相関し, ある年齢以下になると減少・飽和するように見える. そのため質量損失率は最高でも現在の太陽風損失率の高々100倍程度となっている. どうして星の質量損失率が減少・飽和するのは現在も解決されておらず, この観測事実が正しいかどうかとともに議論がされている. この観測は様々な恒星で Ly α の吸収を分光観測することで恒星の質量損失率を求めているが, いくつか仮定が必要であり観測結果としては慎重に取り扱う必要がある (詳細は [23, 26]).

では, 太陽風以外で大量に質量を損失させる現象はないのだろうか. その候補の一つに, コロナ質量放出 (Coronal Mass Ejection; CME) という現象があげられる. CME は太陽フレアに付随して起ることが多く, コロナ中に蓄えられた磁気的エネルギーを使って積極的にコロナプラズマを惑星間空間へ放出する現象である. CME は現在の太陽観測で非常に精密に研究されている. 図 6 は現在の太陽で起こる CME の統計で, CME は 5 回/日程度で起こり, およそ一度の CME で平均 3.5×10^{11} kg 程度質量を損失することがわかっている. したがって, 現在の CME による質量損失率は約 $10^{-15} M_\odot$ /年程度であることがわかり, 現在の太陽ではおよそ太陽風の質量損失の 1 割程度であることがわかる. さて, 昔の太陽では CME でどの位質量を損失していたのであろうか. もちろん, 過去の CME に関して直接的に情報を得ることは難しい. しかし, 現在の太陽は詳細に観測

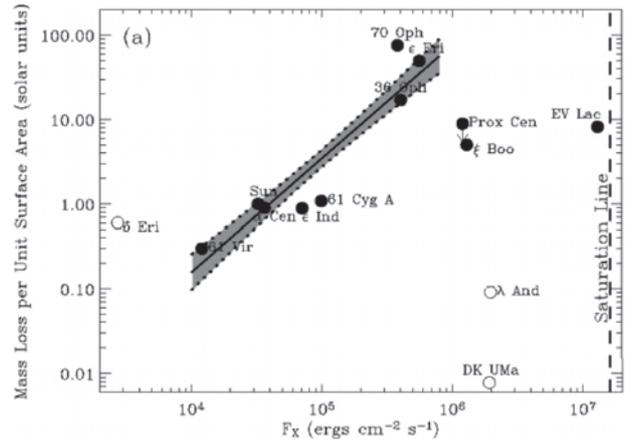


図 5 星の質量損失と X 線フラックス強度の関係 [23].

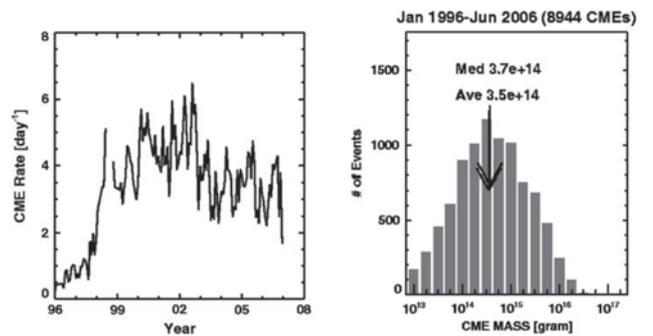


図 6 (左) SOHO 衛星で観測した年ごとの CME の起る頻度. (右) CME 一回あたりの質量損失の頻度分布の進化 [27].

的研究が進んでおり, それらを用いて過去の太陽で CME がどのようなであったか考察することができる. CME による質量損失率を求めるには, 1 度の CME でどれだけ質量損失をするか, および CME が起る頻度がわかればよい. まず, X 線フラックス強度と CME の頻度に関して, 現在の太陽で統計的に研究が行われている [27] (図 7 左). その結果によると, 両者の関係はベキ乗則で記述され, ベキはおよそ 2 程度である. この結果がそのまま太古の太陽にも適応できると仮定してみよう. 先に述べたが, 恒星の年齢と X 線フラックスの強度には相関があり, 経験的に次式で与えられている [25].

$$F_x \propto t^{-1.74} \tag{4}$$

F_x は X 線フラックス強度, t は星の年齢. つまり, 若い星は平均的に X 線フラックス強度が強く, CME 時の X 線フラックス強度もそれに比例して強いことが予想される. また, CME 時の X 線フラックス強度と 1 度の CME でどれだけ質量損失をするかの関係を統計的に明らかに研究した結果 [29] が図 7 右である. この結果によると, X 線フラックス強度と 1 度の CME でどれだけ質量損失をするかはベキ乗則に従い, ベキはおよそ 0.6 程度であることがわかる. 以上の関係を用いて, 太古の太陽の CME による質量損失を見積もってみる. まず, 式 (4) から地球に生命が誕生したと考えられる年齢の X 線フラックス強度は今のものの約 30 倍であることがわかる (年齢 7 億歳で計算). 次に, X 線フ

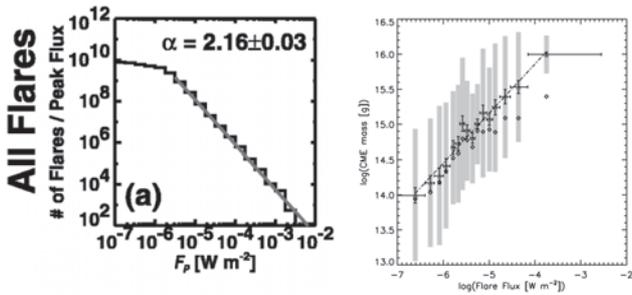


図7 (左)現在の太陽のX線フラックス強度とCME頻度の関係[28]。(右)現在の太陽のX線フラックス強度とCME一回あたりの質量損失の関係[29]。

ラックス強度とCMEの頻度から、X線フラックス強度が30倍の環境ではCMEの頻度がおよそ1000倍程度であることがわかる。さらに、X線フラックス強度と1度のCMEでどれだけ質量損失をするかの関係から、当時の1度のCMEでの質量損失量は現在のものの10倍程度であることがわかる。したがって、地球に生命が誕生した頃の太陽のようにX線フラックス強度が強い若い星では、太陽のCMEによる質量損失は10000倍程度になりうるということがわかり、「The Faint Young Sun Paradox」を解決しうる質量損失を担う可能性が示唆される。実際、太陽と同じような型の星で強いX線フラックスを伴って高頻度でCMEを起こすものもみつかっており[30, 31], CMEによる質量損失で「The Faint Young Sun Paradox」を解決するという天文学的なアプローチも否定できない状況となっている。

3.5.4 重たい初期太陽が及ぼす他分野への影響

これまで「The Faint Young Sun Paradox」を天文学的なアプローチで解決するという案を議論してきたが、もし初期太陽が今より数%重かった場合、太陽系の惑星形成、地球以外の惑星大気の進化、月に眠っている砂(レゴリス)の組成等、周辺分野に多かれ少なかれ影響を及ぼしうる。それぞれの分野で確立されている観測事実や理論モデルと重たい初期太陽は矛盾しないだろうか。逆に、これまで初期太陽が現在の太陽とそう変わらない太陽を想定していたために、説明できなかった現象はないだろうか。近年、火星や金星等の惑星大気の進化・流出過程が活発に議論されている。本節では詳しく議論はしないが、惑星大気流出の標準的なシナリオでは説明できない現象もあり、なかでも火星におけるH₂OやCO₂の古の大気流出量を説明するのに1-2桁足りないことは注目に値する。仮に、古の太陽風フラックスが現在の太陽のものの1000倍程度大きければ火星の大気流出を説明できないか等、現在、「The Faint Young Sun Paradox」の天文学的なアプローチは周辺分野も含めて議論が活発に行われるフェーズにきている。

3.5.5 まとめ

「The Faint Young Sun Paradox」の天文学的なアプローチはこれまで述べてきたように、十分に解決の可能性を持っており、今後、理論・観測の両面から詳細までつめることで具体性がさらにましていきと考えられる。それだけでなく、この太陽の質量放出の進化史を理解するというこ

とには、様々な太陽物理学・天文学的な要素の複合系として理解することが要求される。例えば、先に若い星はX線フラックス強度が高いことを述べたが、実は、若い星は自転周期が短く高速で回転していることがわかっている。速く回転している星はダイナモ活動も活発であり、強い磁気活動が期待される。この磁気活動によりX線で強く輝くのである。このように、「The Faint Young Sun Paradox」の天文学的なアプローチというテーマはダイナモ、太陽風加速、フレア、CME等、これまで太陽物理が取り組んできた全てを総動員して考える魅力的なものである。今後ますますの進展が期待される。

最後に、本節は2011年9月5-6日に国立天文台(三鷹)で行われた「The Faint Young Sun Paradox」研究会で議論された内容をもとにしている。参加し議論に加わっていただいた皆様には心より感謝いたします。なかでも片岡龍峰氏、鈴木建氏、宮原ひろ子氏、常田佐久氏はその後も何度も議論をしていただき重ねて感謝いたします。

参考文献

- [1] C. Sagan and G. Mullen, *Science* **177**, 52 (1972).
- [2] D.O. Gough, *Sol. Phys.* **74**, 21 (1981).
- [3] R. Buick *et al.*, Western Australia. *Alcheringa* **5**, 161 (1981).
- [4] H.J. Hofman *et al.*, Western Australia. *Geol. Soc. Am. Bull.* **111**, 1256 (1999).
- [5] S. Moorbath *et al.*, *Nature* **245**, 138 (1973).
- [6] F. Robert and M. Chaussidon, *Nature* **443**, 969 (2006).
- [7] E.A. Gaucher *et al.*, *Nature* **451**, 704 (2008).
- [8] W. Luo and T.F. Stepinski, *J. Geophys. Res.* **114**, E11010 (2009).
- [9] S.W. Squyres *et al.*, *Science* **336**, 570 (2012).
- [10] J.B. Pollack, *Icarus*, **106**, 549 (1979).
- [11] D.L. Hartmann, *Global Physical Climatology* (San Diego: Academic Press, 1994).
- [12] M.H. Hart, *Icarus* **33**, 23 (1978).
- [13] S.L. Miller and H.C. Urey, *Science* **130**, 245 (1959).
- [14] W.R. Kuhn and S. K. Atreya, *Icarus* **37**, 207 (1979).
- [15] T.C. Owen *et al.*, *Nature* **277**, 640 (1979).
- [16] J.F. Kasting, *Precambrian Res.* **34**, 205 (1987).
- [17] R. Rye *et al.*, *Nature* **378**, 603 (1995).
- [18] N.H. Sleep and K. Zahnle, *J. Geophys. Res.* **106**, 1373 (2001).
- [19] I.J. Iben, *ARA&A* **5**, 571 (1967).
- [20] D.P. Doyle *et al.*, *J. Geophys. Res.* **100**, 5457 (1995).
- [21] D.A. Minton and R. Malhotra, *Astrophys. J.* **660**, 1700 (2007).
- [22] R. Kataoka and Y. Miyoshi, *Space Weather* **8**, S08002 (2010).
- [23] B.E. Wood *et al.*, *Astrophys. J.* **628**, L143 (2005).
- [24] A. Maggio *et al.*, *Astrophys. J.* **315**, 687 (1987).
- [25] A. Ayres *et al.*, *Astrophys. J.* **315**, 687 (1997).
- [26] T. K. Suzuki *et al.*, *PASJ* **65**, 5 (2013).
- [27] N. Gopalswamy *et al.*, *Earth Moon Planet* **104**, 295 (2009).
- [28] S. Yashiro *et al.*, *Astrophys. J.* **650**, L143 (2006).
- [29] A.N. Aarnio *et al.*, *Sol. Phys.* **268**, 195 (2011).
- [30] A. Young *et al.*, *Astrophys. J.* **267**, 655 (1983).
- [31] H.E. Bond, *Astrophys. J.* **560**, 919 (2001).