

Implications of Solar Evolution for the Earth's Early Atmosphere

M. J. Newman and R. T. Rood

要旨 様々な太陽モデルの一般的な結論として、太陽ニュートリノ実験で示唆される不確定性とは関係なく、太陽はその寿命の間に輝度がおおよそ 25% 増大する。Sagan and Mullen が最初に指摘したように、これは地球の気候の変遷と対立し、もし、恒星進化の理論に根本的な間違いがないのならば、この対立を回避するような効果がなくてはならない。地球大気の詳細なモデルによれば、10~20 億年前は現在よりも温室効果が非常に重要だったという解釈が可能である。

第 1 段落

- ほとんど全ての太陽モデルで、太陽輝度はその寿命の間に 25% 増大するという結果になる。
- 太陽定数が過去に十分小さかったという観測的・実験的証拠はない (1)。
- 最近の証拠から、宇宙時間スケールで地球の温度は実際に減少したことが示唆される (2)。
- 単純な地球の気候モデル (3,4) から、太陽定数を数% 減らしただけで完全に凍結した地球ができることがわかる。
- 凍結した地球を溶かすには、氷のアルベドが高いので、現在の太陽定数の値よりも大きな値を必要とする。
- 見かけ上、太陽モデルと生物学的・同位体的な地球の温度の変遷との間に対立がある。

第 2 段落

- 気候学者や恒星進化理論学者の間ではこの問題は長い間気づかれていた (5) が、コミュニティ全体としては無視されてきた。
- Sagan and Mullen(6) や Katz(7) は太陽輝度が増加するという予測に大きな間違いはなさそうで、地球の温度の変遷と対立すると指摘し、地球の初期の大気の解を修正することを提案した。
- 太陽の進化が地球に与える影響で最も興味があるのは、過去数百万年の温度の振動であり、太陽輝度の時間変化との関係である。
- いくつか提案されている太陽ニュートリノ問題¹⁾の解が輝度の変化に関係しているという事実は興味深い。

¹⁾地球上のニュートリノ観測で検出される太陽ニュートリノの数は、恒星内部の核反応の理論から予測される値の半分程度しかない。(『ウィキペディア』より)

第4段落

- ここで議論している輝度の増加は、太陽のエネルギー源は水素からヘリウムへの核融合であるという避けがたい仮定に依存している。

第5段落

- (10) にあるような恒星の構造の式の次元解析から輝度は次式のように示される。

$$L \sim \frac{ac}{\kappa_0} M^{3+\beta-\alpha} R^{3\alpha-\beta} \left(\frac{G\mu M_H}{k} \right)^{4+\beta} \quad (1)$$

ここで、Opacity low は $\kappa = \kappa_0 \rho^\alpha T^{-\beta}$ ととる。 ρ は密度、 T は温度。 M と R は恒星の質量と半径。 M_H は水素原子の質量。 μ は平均分子質量。 a は放射密度定数。 c は光速。 G は重力定数。 k は Boltzmann 定数。

- 太陽に対しては $\alpha \simeq 1, \beta \simeq 3.5$ であり

$$L \sim \frac{ac}{\kappa_0} M^{5.5} R^{-0.5} \left(\frac{G\mu M_H}{k} \right)^{7.5} \quad (2)$$

第6段落

- 半径の依存性は小さい（また、太陽半径はそれほど速くは変化しない）ので、水素が燃えて μ が増加すると L は近似的に次のように増加する。

$$\frac{1}{L} \frac{dL}{dt} \sim \frac{7.5}{\mu} \frac{d\mu}{dt} \quad (3)$$

第7段落

- 太陽光球面の重元素存在度に対して $Z/X \simeq 0.02$ 、また、 $\mu \simeq 1.33/(1 + 1.66X)$ 。ここで、 Z はヘリウムより重い物質の質量比であり、 X は水素の平均質量比（標準モデルの初期値は $\simeq 0.75$ ）である。
- X はエネルギー保存を通して L と関係がある。

$$\frac{dX}{dt} \simeq -\frac{L}{\epsilon M} \approx -0.01/10^9 \text{ years} \quad (4)$$

ここで、 $\epsilon (\simeq 6.4 \times 10^{18} \text{ erg/g})$ は水素がヘリウムに変換されるときに放出されるエネルギー。

- これら初歩的な考察により

$$\frac{1}{L} \frac{dL}{dt} \simeq \frac{12.5L}{M\epsilon(1 + 1.66X)} \quad (5)$$

という結論を得る。

- 現在の標準的な値はおおよそ $0.05/10^9 \text{ years}$ である。

- この結果は表 1 にあげた様々な詳しい太陽モデルの結果と一致する。
- 表 1 のそれぞれのモデルに対して異なる物理や近似を用いているので、数値を単純に比較するのは無意味である。
- 輝度の短い変動が、ゆっくりとした一定の増加に乗っている。

第 8 段落

- 核エネルギーを減らす以外に L の増加を遅らせるためには、ある物理定数もしくは太陽の質量を変化させなくてはならない。
- G の変化がいくつかの宇宙論によって予測されており、Brans-Dicke 宇宙論による太陽の初期の解析で太陽輝度が大きく減少することがわかった (12,13)。
- Brans-Dicke 理論に対する証拠としてしばしば引用される、Pochoda and Schwarzschild のより詳しいモデルはパラメータとして非常に大きさに減少させるような値を使っている。
- Dirac の大数仮説²⁾によって予測される G の変化に対して Roxburgh(14) は Brans-Dicke 理論と同様の議論を用いた。
- G が大きいと地球は太陽に近くなるはずであり、太陽定数を一定にするためには、 $(dG/dt)/G \simeq -3 \times 10^{-12} \text{year}^{-1}$ であればよいだろう。
- これは (12-14) で考えられているものより 1 オーダ小さな変化であり、Shapiro and Reasenberg(15) の上限と一致する。
- それは van Flandern(16) で報告されているものより小さいオーダである。
- 平らな Brans-Dicke 宇宙論に対してはそのような変化は $\omega \simeq 12$ であることを要求するが、最近の光の湾曲の観測 (17) から $\omega > 23$ である必要があるので、除外される。

第 9 段落

- 太陽距離スケールでの G は実験室での値よりも小さいために太陽質量が $\gg 2 \times 10^{33} \text{g}$ であるようなモデルでは L の変化は小さくなる。しかし、必要なヘリウムの存在度に問題が生じる。
- スピンアップする速く回転する核のモデルは L の減少に幅を持つが扁平率が大きすぎる。
- 一般に式 2 の予測は、最も奇抜なケースを除いて、全てにおいて支持される。

²⁾宇宙の基本定数の中に 10^{40} という数字が頻繁に現れ、宇宙はいつもこれを維持するようにできているという仮説。これより、重力定数 G は時間とともに変化する。

第 10 段落

- 恒星の構造の理論より、太陽は昔は暗かったという結論は避けがたいことがわかったので、気候の結論を変更することにする。
- 大気がないとして考えた地球の温度変化は観測と矛盾する。
- 現在の地球に対する単純なモデル (3,4) では、いくらか違うところもあるが、共通する振る舞いを示す。
- North(4) の図 1 に、氷床の端の太陽定数に対する緯度依存性を示した良い例がある。
- 彼は三つの分枝を持つ解を見つけた (一つは不安定)。
- 現在の地球は曲線の急な部分にある (ゆっくり変化する安定解は完全凍結の地球)。
- 太陽定数が減少するにつれて、現在の分枝が完全に覆い尽くすまで氷床は急速に増える。
- これは、太陽定数が現在よりも数%小さくなるだけで起こる。
- 現在の気候状態に戻すには太陽定数を現在の ~ 1.3 倍にする必要がある。

第 11 段落

- そのような単純なモデルに対する疑いがある。
- 過去数百万年の氷床の増加と地球の軌道、傾斜角、歳差の変化による平均入射量の変化との強い相関がある (20)。
- 非常に小さなエネルギー入力の変化でも、比較的大きな氷床の増加があるということは、North が発見したように、大きな反応性があるということである。

第 12 段落

- これらのモデルは現在の地球に対するものである。
- 数十億年前は大陸の配置も大気成分も全く異なっていた。
- 現在の大気にはない成分による温室効果の寄与もあったかもしれない (6)。
- 地球が形成された後に月が捕捉されたという可能性も地球の気候を大きく変えたかも知れない (21)。
- 大気成分を決めるのに生命が大きな役割を演じた可能性がある。
- 地表面の温度をほぼ一定に保つように生物圏自身が調節している (22)。
- 放射能による加熱の増加は地殻変動や火山活動、大気への物質の供給率を変えるかも知れない。

- Hart(23) は地球大気進化の詳細なコンピュータシミュレーションに多くの可能性を取り入れ、自由な O_2 が現れる以前に地球が主に強い温室効果によって高温になることを発見した。

第 13 段落

- そのような計算には、よく理解されていない量も含め、多くの不確定性が入っている。
- $1 \sim 2 \times 10^9$ 年前に大気は酸化的になり (24)、これは (6,22,23) で要求される温室効果成分に対して強い制限を課す。
- 地球大気の変遷と 10^9 年を超えるスケールでの古気候を理解するれば、このような複雑なモデルが正しいかどうか、劇的な大気進化によって過去に太陽エネルギーの入力が少なかったことを補ったのかどうか (またはもしかすると地球のもしくは生物学的なサーモスタッド (22) が働いたかどうか) が示されるだろう。
- 宇宙物理的な問題に関して、もし、Hart によって発見された効果を除外したとすれば、太陽輝度の増加の一般的性質は恒星の構造の研究において太陽ニュートリノのジレンマよりもずっと根本的な問題をもたらすだろう。