

系外惑星の表面温度の予測値と観測値の比較

國本 祥太郎、小川 武流、北 和寿、島村 拓実、秋山 拓輝、田淵 悠人 (高2)
【大阪府立北野高等学校】

要旨

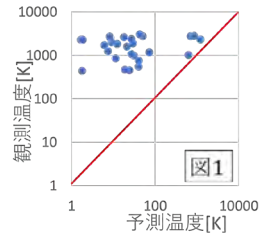
系外惑星の表面温度の予測を主星からの距離だけでなく、内部熱源の影響も考慮することでより正確に行うため、内部熱源の起源から考え、それが表面温度に与える影響を考察する。

1. 目的・背景

近年、環境問題が深刻化する中で、「第二の地球」を探すため系外惑星が注目されている。そんな系外惑星の表面温度の予測を、内部熱源の影響も考慮することにより、さらに精度の良い物にすることが目的である。

2. 研究の方法

惑星の表面温度 T は主星から入射するエネルギーと惑星の表面から放出するエネルギーが釣り合いから、 T を表面温度、 R を半径、 r を公転半径とすると



$$T_{\text{planet}} = T_{\text{star}} \sqrt{\frac{R_{\text{star}}}{2r}}$$

この計算を現在表面温度が観測されている27個の惑星に行った結果が図1である。

直線は予測値=観測値を示している。ここから、観測値が1000~2500K高い惑星が多いことがわかる。私たちはこの差が内部熱源の影響だと考え、その影響の大きさを考えることにした。

まず、一般的に内部熱源の起源と言われている重力エネルギーが本当に起源なのかを検証する。重力エネルギーが内部熱源の起源なのであれば、惑星が輻射によって失った内部熱源のエネルギー(①)が重力エネルギー(②)よりも小さい。まずはこれを確かめることで、重力エネルギーが内部熱源の起源であることに矛盾がないことを示す。

以下、 σ はステファン・ボルツマン定数、 R は惑星の半径、 t_1 は現在の惑星の年齢、 $f(t)$ は時刻 t での表面温度を表す関数、 T は先ほど求めた表面温度の予測値、 G は万有引力定数、 M は惑星の質量を表す。ステファン・ボルツマンの方程式から、時刻 t_1 で1秒間に惑星から輻射で失われる内部熱源のエネルギーは、

$$E_{\text{lost}} = 4\pi\sigma R^2 \int_0^{t_1} \{f(t) - T\}^4 dt [J \cdot s^{-1}]$$

これを区間 $[0, t_1]$ において t で積分することにより、今までに輻射で失った内部熱源のエネルギー量が、

$$E_{\text{lost}} = 4\pi\sigma R^2 \int_0^{t_1} \{f(t) - T\}^4 dt [J] \dots \textcircled{1}$$

と表せる。重力エネルギーは無限度から物体が集まって蓄えられることから、惑星の密度が一定なら、

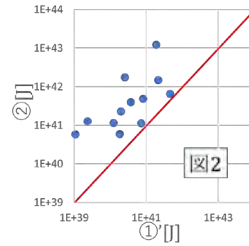
$$E_{\text{gravity}} = \frac{3GM^2}{5R} [J] \dots \textcircled{2}$$

と表せる。ここで①の被積分関数が不明なので、これが単調減少することに着目して、積分の値を

$$t_1 \cdot \{f(t_1) - T\}^4$$

として、この積分の下限値を求めることにした。これを使って求めた①の下限値を①'とおく。

この二つを計算に使う全てのデータが観測されている17個の系外惑星に行ったのが次の図2である。直線は①'と②が等しい場合である。図2からわか

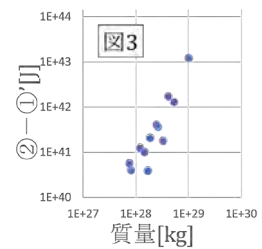


るように、全ての点が重力エネルギーの方が高いことを示している。

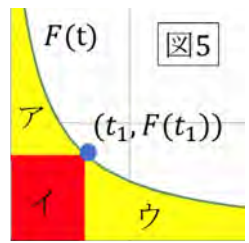
図3、4はそれぞれ①'と②の差と質量、年齢の相関関係を示したグラフである。

図3からは惑星の質量

に正の相関があることがわかり、図4からは年齢が相関を持たないことがわかった。



3. 考察



以下、簡単のために $F(t) = \{f(t) - T\}^4$ とおき、図5の領域の記号を使う。ウは正の方向へ無限に領域が続くとする。

ここでア+イは惑星が今までに輻射で失った内部熱源のエネルギー量、イはその下限値、ウは残っている内部熱源のエネルギー量を示している。

図3で質量と①'と②の差が正の相関を持ったのはア+イ+ウが大きくなったことが原因と考えられる。質量が増加すると重力エネルギーが増加し、また、内部熱源の起源が重力エネルギーであることから、ア+イ+ウは重力エネルギーと相関があるので、質量が増えるとア+イ+ウが大きくなり、ア+ウもそれにつれて大きくなったと考えられる。

図4で年齢と①'と②の差が相関を持たなかったのは、求めた①'が下限値だったことが原因と考えられる。tが大きくなるにつれてア+イは大きくなるが、求めた下限値のイは途中で $F(t)$ が小さくなりすぎて減少を始める。そのため単純な相関関係を持たなかったと考えられる。

図3は逆に、重力エネルギーと内部熱源の量に相関があるとわかるから、内部熱源の起源が重力エネルギーであるという根拠にもなる。

4. 結論

本研究により、主星との距離のみから推測される予測表面温度と実際の観測値との差が、内部熱源であることと、その内部熱源が重力エネルギーを起源に持つという通説に矛盾しないことがわかった。

参考文献

福江純・沢武文・高橋真聡 編(2020年)

『極・宇宙を解く』恒星社厚生閣

『The Extrasolar Planets Encyclopaedia』

(<http://exoplanet.eu>)