

系外惑星の内部熱源の起源に関する考察

増田 陸人、藤木 美羽、大下 怜莉、藤井 朝弘 (高2) 【大阪府立北野高等学校】

要旨

昨年度の本校の研究テーマであった、系外惑星の内部熱源と重力エネルギーの相関を再検証した。また、潮汐加熱、放射性物質の崩壊熱も内部熱源と相関するかを調べた。

1. 研究の方法

主星から入射するエネルギーと惑星から放出するエネルギーが釣り合うと仮定すると、 T_{eff} を主星の有効温度、 R を主星の半径、 a を公転半径としたとき、惑星の平衡温度 T_{eq} は $T_{eq} = T_{eff}\sqrt{R/2a}$ と表される。

また、惑星が主星の裏側を通過する際の減光率から求めた惑星の輝度温度 $T_{brightness}$ を観測温度、平衡温度 T_{eq} を予測温度と考え、必要なパラメータが分かっている68の系外惑星にこの計算を行った結果が図1である。

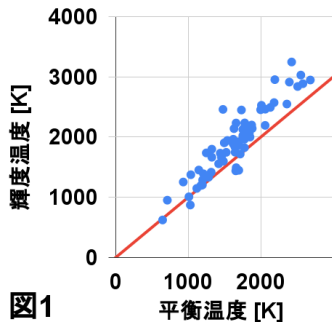


図1

直線は観測温度 = 予測温度を示している。ここから、観測温度が予測温度よりも数百K高い惑星が多いことがわかる。昨年の研究に引き続き、この温度差を内部熱源によるものだと考えて、その起源を探ることにした。

今回は一般に内部熱源の起源と言われている、潮汐加熱、放射性物質の崩壊時に発生する熱、重力エネルギーの三つについて検証する。以下 σ はステファン・ボルツマン定数、 R は惑星の半径、 $f(t)$ は時刻 t での輝度温度 $T_{brightness}$ を表す関数、 ω は惑星が公転するときの平均角速度、 G は重力定数、 e は惑星の離心率、 M は惑星の質量を表す。

まずは内部熱源と潮汐加熱との相関を調べる。ステファン・ボルツマンの方程式から、時刻 t 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

$$E_{lost} = 4\pi\sigma R^2 \{f(t)^4 - T_{eq}^4\} [J/s] \dots \textcircled{1}$$

$$\text{また、潮汐加熱の加熱量は } E_{tidal} = -\frac{21}{2} Im(k_2) \frac{(\omega R)^5}{G} e^2 [J/s]$$

ここで $-\frac{21}{2} Im(k_2)$ の値が不明なため、これを1として、内部熱源との相関のみを調べることにする。

次に放射性物質の崩壊時に発生する熱との相関を調べる。密度が $2.0g/cm^3$ 以上の惑星に絞り、 $1kg$ あたりに含まれる放射性物質の量と半減期が、参考文献にある地球の値と等しいと仮定し、崩壊熱を算出した。

最後に重力エネルギーとの相関を調べる。現在の時刻を t_1 としたとき、 $\textcircled{1}$ 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求められる。しかし、 $f(t)$ の式が不明なため、

$$E_{lost} = 4\pi\sigma R^2 \{T_{brightness}^4 - T_{eq}^4\} \cdot t_1 [J] \dots \textcircled{2}$$

としての $\textcircled{1}$ の積分の下限値を求めることにする。また、重力エネルギーは無限遠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、 $E_{gravity} = \frac{3GM^2}{5R} [J]$ で求めることができる。

2. 結果

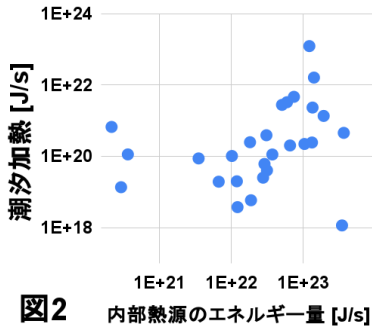


図2

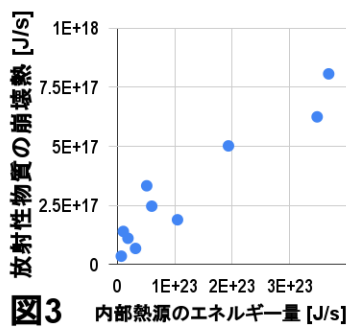


図3

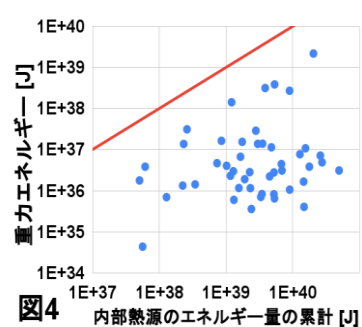


図4

3. 考察

図2より、外れ値を除外すると潮汐加熱のエネルギー量と内部熱源のエネルギー量との間に相関があることがわかる。図3より、放射性物質の崩壊熱も内部熱源エネルギー量との相関があることがわかる。しかし図4では、重力エネルギーと内部熱源エネルギー量の累計との間に相関があるグループと、相関がないグループがあることがわかる。このようなばらつきが生まれたのは、 $f(t)$ の式が不明であり、 $\textcircled{2}$ の値が正確ではないためだと考えられる。

4. まとめ

考察より、潮汐加熱と放射性物質の崩壊熱は内部熱源の起源であると言える。しかし、重力エネルギーは内部熱源に関与していると見られるものの、相関はあまり見られない。

5. 参考文献

- Charbonneau D. et al., 2005, The Astrophysical Journal, vol. 626, pp. 523-529.
- M. Segatz et al., 1988, Icarus, vol. 75, pp. 187-206.
- Turcotte D.L. and Schubert G., Geodynamics, Cambridge University Press, 2002
- 福江純・沢武文・高橋真聡 編 『極・宇宙を解く』恒星社厚生閣 (2020)
- The Extrasolar Planets Encyclopaedia <http://exoplanet.eu>
- NASA Exoplanet Archive <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>