

惑星大気の透過スペクトルの理論的推定

川島 由依 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

1995 年に系外惑星が発見されて以来、現在までに 900 個近い系外惑星が報告されている。系外惑星の代表的な観測手法として、トランジット法と視線速度法がある。前者から惑星半径、後者から惑星質量が検出される。さらに最近では、GJ 1214b や GJ3470b、GJ436b のような系外惑星については、トランジット時における大気の透過光スペクトルを検出することが可能となってきた (Narita et al. 2013)。この透過光スペクトルは、惑星大気中の気体分子による吸収の影響を受けていると考えられる。よって、透過光スペクトルから惑星大気の組成を制約することが可能である。惑星大気の組成は、惑星表面環境や惑星の熱進化を考える上でとても重要である。本研究では、透過光スペクトルの理論的推定を行った。水、二酸化炭素、水素の気体分子に着目しスペクトルを理論的に計算した。今回の理論スペクトルのピーク位置と透過光スペクトルのピーク位置を比較することで組成の特定につながることを期待される。

1 Introduction

1995 年に、ペガサス座 51 番星 b が発見されて以来、様々な系外惑星の発見が相次いでいる。最近では、GJ 1214b や GJ3470b、GJ436b のような地球から比較的近い距離にある系外惑星については、その大気の透過光スペクトルを検出することが可能となってきた (Narita et al. 2013)。気体分子の吸収線データから推定した理論モデルスペクトルと系外惑星の透過光スペクトルを比較することにより、その系外惑星の大気組成を制約することが期待される (Howe & Burrows 2012)。

本研究では、大気中の水、二酸化炭素、水素による透過スペクトルへの影響に着目する。水、二酸化炭素は赤外域での吸収が強い物質であり、惑星表層を温暖化させる可能性が大きい。惑星形成過程を考慮すると、水、水素は惑星の主要な材料物質となり得る物質である。吸収線データから水、二酸化炭素、水素分子の理論モデルスペクトルを計算する。

2 Methods

ここでは、吸収線のデータベースから、吸収線スペクトルを計算する方法について示す。吸収線パラメーターのデータベースについては、いくつかある

が、本研究では、HITRAN を用いる。HITRAN は、もともとは米国空軍地球物理学研究所 (US Air Force Geophysical Laboratory) により整備されていたが、現在はフィリップス研究所 (Phillips Laboratory) により維持されている。HITRAN のデータベースからは、吸収線の中心波数、吸収線強度、吸収線の半値幅などが得られる。

2.1 吸収線幅

ある波数 ν での吸収の強さを表す吸収係数 k_ν は、吸収線形を表す関数 $f(\nu - \nu_0)$ を用いることにより、次のように書ける (浅野正二 2010)。

$$k_\nu = S f(\nu - \nu_0) \quad (1)$$

ここで、 S は吸収線強度、吸収係数 k_ν を全波数空間で積分したもので、

$$S = \int_0^\infty k_\nu d\nu \quad (2)$$

という関係がある。 ν_0 は吸収線の中心波数である。このとき、吸収線形関数 $f(\nu - \nu_0)$ は、

$$\int_{-\infty}^\infty f(\nu - \nu_0) d\nu = 1 \quad (3)$$

と規格化された関数である。

大気中において、気体分子が吸収線幅を広げる主な原因は 2 つある。1 つは、気体分子の熱運動によるドップラー効果である。もう 1 つは、吸収物質と他の気体分子との衝突により吸収線が広がる効果である。

2.1.1 ドップラー効果による広がり

気体分子の速度分布がマクスウェル・ボルツマン分布に従うものとする、ドップラー効果による吸収線関数 $f_D(\nu - \nu_0)$ は、

$$f_D(\nu - \nu_0) = \frac{1}{(\alpha_D \pi^{1/2})} \cdot \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{\alpha_D^2}\right] \quad (4)$$

と書ける (浅野正二 2010)。ここで、 α_D はドップラー幅と呼ばれるものであり、次式で与えられる。

$$\alpha_D = \nu_0 \left(\frac{2k_B T}{mc^2}\right)^{1/2} \quad (5)$$

ここで、 k_B 、 m 、 c 、 T はそれぞれ、ボルツマン定数、分子質量、光速、温度である。

2.1.2 分子衝突による広がり

分子衝突による広がりとは、気体分子が励起状態に存在する寿命の有限性によるものであり、この効果による吸収線関数 $f_L(\nu - \nu_0)$ は、

$$f_L(\nu - \nu_0) = \frac{\alpha_L}{\pi[(\nu - \nu_0)^2 + \alpha_L^2]} \quad (6)$$

と書ける (浅野正二 2010)。ここで、圧力 p 、温度 T でのローレンツ半値幅 $\alpha_L(p, T)$ は以下のように表される。

$$\alpha_L(p, T) = \alpha_L(p_0, T_0) \left(\frac{p}{p_0}\right) \left(\frac{T_0}{T}\right)^n \quad (7)$$

ここで、 $\alpha_L(p_0, T_0)$ は、ある基準の圧力 p_0 、温度 T_0 でのローレンツ半値幅である。また、 n は温度依存を表す指数で、気体分子の種類や各エネルギー準位の遷移によって異なる。

2.1.3 Voigt 関数

ドップラー効果による広がり、分子衝突による広がり、レイリー散乱を考慮するには、両方の効果を組み込んだ Voigt 線形と呼ばれる関数形を用いる必要がある。Voigt 線形 $f_V(\nu - \nu_0)$ は、次のように書ける (浅野正二 2010)。

$$f_V(\nu - \nu_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f_L(\nu' - \nu_0) f_D(\nu - \nu') d\nu' \quad (8)$$

2.2 レイリー散乱

入射波長に比べて極めて小さい、均質な球形粒子による散乱を、レイリー散乱と呼ぶ。波長 λ におけるレイリー散乱の散乱断面積 σ_S^R は、以下のように与えられる (浅野正二 2010)。

$$\sigma_S^R = \frac{128\pi^5}{3\lambda^4} \alpha^2 \quad (9)$$

ここで、 α は、分子の分極率である。

分子の分極率のデータは、CRC HANDBOOK OF CHEMISTRY and PHYSICS Version 2012 を用いた。

2.3 吸収線プロファイル

ドップラー効果による広がり、分子衝突による広がり、レイリー散乱を考慮すると、吸収係数は以下のように書ける。

$$k_\nu = S f_V(\nu - \nu_0) + \frac{128\pi^5 \nu^4}{3} \alpha^2 \quad (10)$$

3 Results

本研究では、吸収線データから水、二酸化炭素、水素分子の理論モデルスペクトルを計算した。例として、図 1 に圧力 $P = 1$ [atm]、温度 $T = 500$ [K] での酸素分子の吸収線スペクトルを示す。この計算では、分子衝突による広がりのみを考慮しており、ドップラー効果、レイリー散乱は考慮していない。

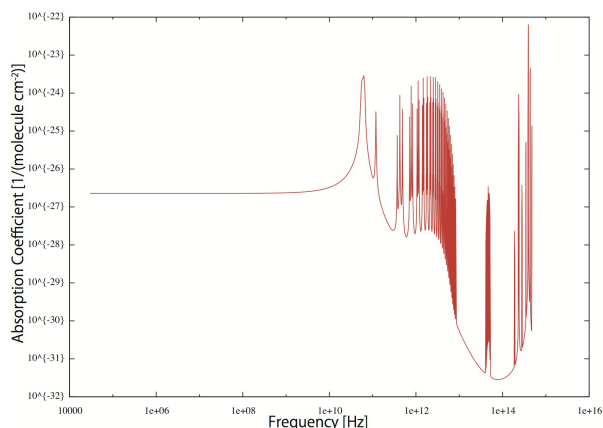


図 1: O₂ の吸収線スペクトル

L.S.Rothman et al. 2009. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 110 (2009) 533-572

N.Narita, A.Fukui, M.Ikoma, Y.Hori, K.Kurosaki, Y.Kawashima et al. 2013. arXiv:1305.6985

A. R. Howe & A.S.Burrows. 2012. THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 756:176(14pp), 2012 September 10

4 Discussion

今回の理論スペクトルのピーク位置と透過光スペクトルのピーク位置を比較することで、組成の特定につながることを期待される。本研究で計算したスペクトルは、惑星大気温度構造による影響は含まれていない。今後は、今回計算した分子のスペクトルを用いて、大気構造モデルと組み合わせ透過光スペクトルの理論的推定を目標としたい。

5 Summary

本研究では、透過光スペクトルから組成を推定するため、水、二酸化炭素、水素の気体分子に着目し、スペクトルを理論的に計算した。今回の理論スペクトルのピーク位置と透過光スペクトルのピーク位置を比較することで組成の特定につながることを期待される。分子のモデルスペクトルと大気構造モデルとを組み合わせることで、より詳細に透過光スペクトルの理論的推定が行えると考えられる。

Reference

浅野正二. 2010. 朝倉書店

日本分光学会. 2009. 国宝社

CRC HANDBOOK OF CHEMISTRY and PHYSICS
Version 2012

W. M. Haynes. 2012. CRC PRESS

L.S.Rothman et al. 1998. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 60 (1998) 665-710