

問3：星間分子の分光測定

星間空間^[1]で原子どうしが出会う確率は小さい。それらが出会う（そういった原子同士の遭遇の大部分は氷^[2]の表面で起きると考えられている）と、ラジカルや分子が生成される。そんなラジカルや分子は（一部は生命の誕生の一役を担っていると考えられている）、いろいろな分光法で確認される。星間物質が宇宙の背景放射^[3]を吸収すれば、その吸収スペクトルを観測できる^[4]。また、高エネルギー状態（励起状態）から出る発光のスペクトルも観測されている。星間空間にある CH や CN など単純な二原子分子は、もう 60 年以上も前に特定された。

- 3-1. 星間空間の背景放射は、黒体^[5]が出す放射スペクトルに似たエネルギー分布をもつ。ウィーン法則によると、絶対温度 T の黒体が出す放射スペクトルのピーク波長 λ は、式 $T \cdot \lambda = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ に従う。ある星のそばにある温度 100 K の空間を考えよう。100 K の黒体放射スペクトルのピーク波長で光子^[6] 1 個のエネルギーはいくらになるか、ジュール単位で計算せよ。

双極子モーメントをもつ分子の回転は、電磁波の吸収や放射を生む。分子の回転のエネルギーはマイクロ波領域の電磁波のエネルギーにあたるため、分子の回転に関する分光学をマイクロ波分光学という。二原子分子の回転エネルギー準位 E_J は、 J を回転量子数、 h をプランク定数、 I を慣性モーメント ($= \mu R^2$) として次式に書ける。

$$E_J = J(J+1)h^2/8\pi^2I$$

量子数 J は 0, 1, 2, … の整数値をもつ。 μ は換算質量といい、二原子分子（原子の質量 m_1, m_2 ）なら $m_1 \cdot m_2 / (m_1 + m_2)$ と表される。 R は原子間の距離（結合距離）である。

- 3-2. 一酸化炭素は、水素分子に次いで 2 番目に多くある星間分子である。回転遷移（回転量子数 J が変化する遷移）のうち、最小エネルギーの遷移はどのような遷移か^[7]。また、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 分子の最低遷移エネルギーをジュール単位で計算せよ。CO の結合距離は 113 pm である。CO の遷移エネルギーを問 3-1 の放射エネルギーと比べて、そこから推察できることを述べよ。背景放射の温度は吸収・放射スペクトルに影響するため、異なるエネルギー準位にある分子数の分布は、背景放射の温度と関係する。

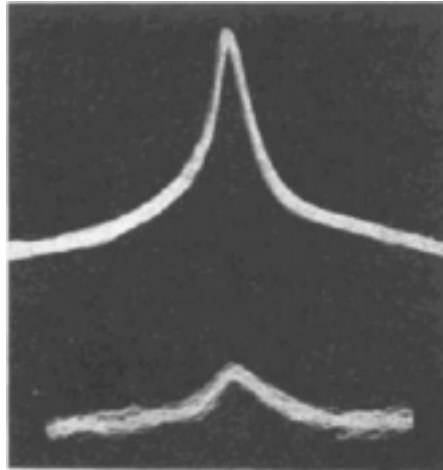


Figure 3-1. 振動数 115,270 MHz で $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 分子が示す最低回転遷移のスペクトル。上は液体空気温度でのスペクトル、下はドライアイス温度でのスペクトル。(Reference: O. R. Gilliam, C. M. Johnson and W. Gordy. *Phys. Rev.* vol. 78 (1950) p.140.)

- 3-3. 回転エネルギー準位を表す式は、水素分子の回転にも当てはまる。ただし、水素分子は双極子モーメントがゼロだから^[8], $\Delta J=1$ の遷移は起こらない。そのかわり, $\Delta J=2$ のごく弱い遷移が観測される。背景放射のピーク波長における光子エネルギーが水素分子 ($^1\text{H}_2$) の $J=0$ と $J=2$ の準位間の遷移エネルギーに等しい星間空間の温度を計算せよ。H-H 間の結合距離は 74 pm とする。

¹ 銀河系内の空間。

² 氷は星間空間内に塵として存在している。

³ 宇宙の全方向から地球に届くマイクロ波域の電磁波。いわゆる「ビッグバン」のなごりだと考えられる。現在では約 3 K の黒体放射スペクトルと一致する。黒体放射とは高温の物質が電磁波を出す現象をいい、豆電球が光るのもフィラメントの黒体放射による。

⁴ 「背景放射を光源に使える」と言ってもよい。

⁵ どんな波長の電磁波も完全吸収する物体を黒体いう。炭は黒体に近い。電磁波を完全に反射する壁で空洞をつくり, その壁に空けたごく小さな穴を通して見た空洞の内部は黒体とみてよい。黒体から放出される放射を黒体放射と呼ぶ。

⁶ 光は波でもあり粒子でもある。粒子とみた光は光子 (photon) の集まりになる。光子 1 個のエネルギー E_p は, $E_p=h\nu$ (h はプランク定数 $=6.63\times 10^{-34}$ J \cdot s, ν は波とみた光の振動数 $=c/\lambda$. c は光速, λ は真空中の光の波長) と書ける。

⁷ 回転遷移は J の変わる遷移だから, J の変化に伴うエネルギー変化が最小となる J 値の組を答えればよい。

⁸ 同じ水素原子 2 個からでき, 分子内に電荷のかたよりにないため, 双極子モーメントもゼロとなる。