

木星型惑星の大気

田 中 清*

§ 1. 惑星の概観

第1表を見てもわかる通り、冥王星を例外とすれば、惑星を火星より内側と木星より外側の2つのグループに分けることができる。いま内側の4つを地球型、外側の4つを木星型と呼ぶことにしよう。2つのグループの間には小惑星帯があり、成因的にもはっきりした違いがあるようだ。

太陽からの距離や大きさの違いは必然的に惑星表面の環境を変え、異なった大気構造を作りあげる。たとえば、地球型惑星は太陽に近いので、比較的高温で気体の分子運動がはげしい。しかも、質量が小さいため脱出速度も小さいから、水星のように大気を失ってしまったものもあるし、大気があっても N_2 のような重い分子が主成分となっている。それに対し、木星型惑星は表面温度が低く、脱出速度も大きいから H_2 , He といった軽い分子を主体とした大量の大気をもっている。

ここでは、木星を中心にして、これら惑星の大気について少しのべてみたいと思う。

§ 2. 木星のスペクトル

恒星大気の研究と同様、第1歩はスペクトルから始まる。木星は近く明るいので、よいスペクトルがたくさん撮れており、研究も一番進んでいる。

第1図は岡山天体物理観測所の74インチクーデ分光器で撮った木星の赤外スペクトルである。地球大気および太陽の吸収線とともに、アンモニア、メタンといった木星固有の吸収帯が写っている。

* 東大理

W. Tanaka; The Atmospheres of Jovian Planets.

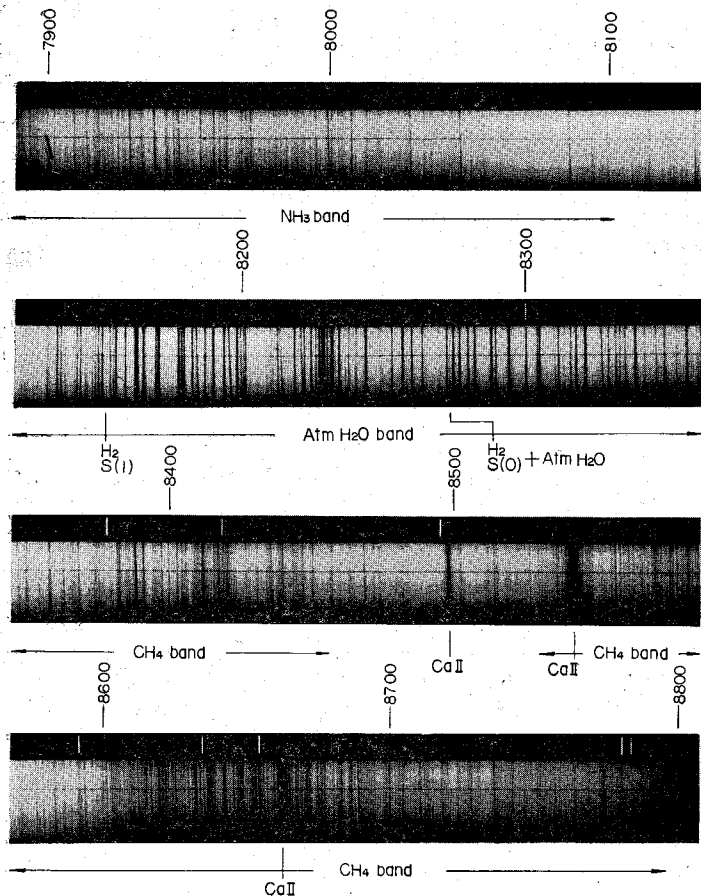
こうした吸収帯の存在が知られたのは1863年であるから、すでに100年も昔のことである。しかし、それがアンモニアとメタンによるものであることがわかったのは比較的新しい(1931, 32 ウィルト, 1933 ダンナム)。その後いろいろな人がこれを研究しているが、中でもカイパーは吸収帯の強度を測って、雲層¹⁾上のアンモニアおよびメタンの量をそれぞれ 700 cm-atm^2 , 15000 cm-atm と算出している(1949)。

ではアンモニアとメタンが木星大気の主成分かということ、そうでないことが別の観測から示された。1952年11月20日おひつじ座の σ 星が木星によって食されたが、バウムとコードは星が木星大気によって減光されてゆくありさまを光電測光し、平均分子量を $3.3^3)$ と算出した。これによれば木星大気の中にはもっと軽い分子である水素やヘリウムが大量に存在しなければならなくなる。

ところが、これらの分子は完全な電子配置をもっているため、スペクトル線が出にくく、分光学的に検出することが困難である。特にヘリウムは間接的な方法によらざるをえない。一方、水素は量さえたくさんあれば、四重極子遷移による吸収線が見つかるはずだとの予言がヘルツベルグによってなされていた(1938)。キース等は赤外スペクトルをくわしく調べた結果、四重極子(3,0)バンドの吸収線を4本検出し、木星に水素のあることを確かめた(1960)。さらにツァプリスキーは等積幅を測り、ジェームスとクーリッジが計算で求めた(1938) oscillator strength を使って、雲層上の水素の量を 5 km-atm と算出した(1962)。これに対し、スピランラッド等は実

第1表 惑星表(主として1964年版理科年表による)

惑星名	軌道半径 (天文単位)	公転周期 (年)	赤道半径 (km)	質量 (地球=1)	密度 (g/cm^3)	赤道重力 (地球=1)	脱出速度 (km/sec)	反射能	自転周期 (日)
水星	0.387	0.241	2421	0.056	5.59	0.39	4.3	0.07	88.0
金星	0.723	0.615	6096	0.817	5.15	0.89	10.4	0.59	?
地球	1.000	1.000	6378	1.000	5.52	1.00	11.2	0.29	0.997
火星	1.524	1.881	3392	0.108	3.94	0.38	5.1	0.15	1.026
木星	5.20	11.87	71370	318.298	1.34	2.54	59.7	0.44	0.410
土星	9.57	29.62	60400	95.202	0.69	1.06	35.5	0.42	0.427
天王星	19.1	83.7	24800	14.580	1.36	0.96	21.7	0.45:	0.451
海王星	30.0	164	26500	17.264	1.32	1.00	22.8	0.52:	0.653
冥王星	39.3	246	7200	0.9	4	0.8	10	0.03:	0.67?



第1図 木星の赤外スペクトル

(1963. 11. 2, 岡山天体物理観測所 74" グレー分光器にて撮影, 分散度 8 Å/mm)

験的にえた吸収線の強度と比較して、もっと大きな 27 km-atm という値をえている (1963)⁴⁾。

ここでスペクトル線の傾きについてきょうなことが発見された。分光器のスリットを木星の赤道にそってセットすると、自転によるドップラー効果のため、スペクトル線が傾いて写る (第1図)。傾きには3種あって、地球大気の線は自転の影響をうけないので傾きはない。太陽の線は入るときと出るときと2度影響をうけるのもっとも傾きが大きい。これに対し、木星の線は1度だけ影響をうけるわけだから、太陽の線のちょうど半分の傾きをもっているはずである。ところが、スピラッド等は測定の結果、半分より小さい値をえたと報告している (1962)。これをそのまま解釈すれば、アンモニアやメタンが雲よりゆっくり自転していることになるが、そんなことはありそうにない。圧力による波長のずれだとかいろいろな説があるが、十分な説明はなされていない。また一方、正確な測定をした結果、誤差の範囲でちょうど半分の傾きを示したという報告もあり(ギヴァー, 1964)、どれが本当かわからなくなってしまった。

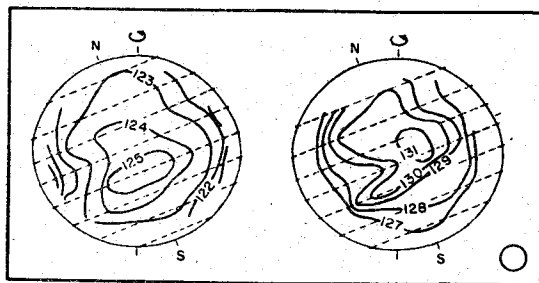
§ 3. 木星の表面温度

太陽からのエネルギー量と反射能とから、理論的な上限と下限を求めることができるが (内部に熱源がないとして)、木星の場合はそれぞれ 148°K, 105°K と計算されている。観測的にもいろいろな方法があるが、遠赤外の輻射強度を測るのがもっとも正確と思われる。古くはメンゼル, コブレンツ, ランプランドが 8~14 μ の強度から出した 120°K (および 140°K という報告があり (1926)), 最近ではムレーとウィルディーが 200 インチを使って、130°K という値を出している (第2図)。

§ 4. 木星大気の組成

すでに分光学的に検出されているもののほかにどんな分子が可能だろうか。第2表は比較的大量に存在する元素の存在比量である。これからヘリウムが相当大量に存在しそうなことが想像されるが、直接確かめる方法がないことはすでにのべた。カイパーは惑星大気中に存在可能な分子の一覧表を作っているが、第3表はその中から木星型惑星に関係が深いと思われる分子をあつめたものである。

木星大気は水素を大量に含んでいるため、強い還元性を示すにちがいない。したがって、酸化物は不安定であり、水素化合物が主力をしめることになる。酸素はもっぱら水として存在するが、温度が低い氷となり、蒸気圧がゼロに等しいから検出されないのだと考えられる。また窒素の量からいうとアンモニアがもっとあってもよさそうだが、やはり大部分が固体となっているのだろう。こうしてできた氷粒と固体アンモニアが、いわゆる雲を形づくっていると考えられる。



第2図 木星の温度

(Murray & Wildey, 1962. 10. 27 (左) と 11. 3, パロマー天文台 200" にて 8~14 μ の強度測定 (単位は °K). 右下の円はフォトメーターのダイアフラムの大きさを示す。点線はスキャンを行なった方向。Sky & Tel., 27, 17, 1964)

第2表 元素の存在比量 (Aller)

原子番号	元素	原子量	log N	$N \times 10^{-10}$
1	H	1.0	12.00	100
2	He	4.0	11.21	16.2
6	C	12.0	8.60	0.040
7	N	14.0	8.05	0.011
8	O	16.0	8.95	0.089
10	Ne	20.2	8.70	0.050
12	Mg	24.3	7.40	0.0025
14	Si	28.1	7.50	0.0032
16	S	32.1	7.35	0.0022
17	Cl	35.5	6.25	0.0002
18	Ar	39.9	6.88	0.0008

いろいろな分子の中で比較的可能性の大きいのは炭化水素のなかまだが、筆者はアセチレンによると思われる吸収線を数本認めている。

安定した分子のほかに、 CH , CH_2 , CH_3 , CN , NH , NH_2 , OH といった、フリーラジカルと呼ばれる化合物も考えられるが、これらは oscillator strength が大きく検出しやすにもかかわらず、今だに発見されたという知らせを聞かない。おそらく存在しないのだろう。(このことについては後述する。)

以上を総合して木星大気の組成をきめることができる。第4表は筆者が自分の観測といままでいろいろな人が出した結果をもとにしてきめた木星大気の組成である。ヘリウムおよびネオンはメタンの量をもとに元素の存在比量から計算した。アンモニアは量的に問題にならない。存在比量からいえば、水素がもっとあってもよさそうだが、すでに一部が失われてしまったのだろう。ヘリウムも減っているのではないかとの疑問が生ずるが、分子運動にボルツマンの分布則をとり、準平衡の状態を保ちながら脱出速度を越えた分から順に失われてゆくと仮定すれば、水素とヘリウムの脱出量を比較することができる。計算によれば、ヘリウムの脱出量は水素に比べてきわめて微々たるものであることがわかる。

この組成から平均分子量を求めてみると 3.2 となり、バウムおよびコードの出した値 (3.3) とよく一致する。また雲層上での全圧力は 3.1 気圧と計算されるが、これも妥当な値といえる。

§ 5. 木星大気の構造

地球大気が層状の構造をしていることはよく知られている。一番下が対流圏で、上ほど温度が低く、上昇気流が起こって気象が生ずる。次に温度のほぼ一定な成層圏があり、その上の電離圏では逆に温度は高さとともに増し、 1000° を越える高温に達して外圏へとつながっている。

木星ではどうであろうか。いわゆる雲と呼ばれるものがある以上、それを支える上昇気流がなくてはならない。したがって対流圏が存在することになる。くわしいことは雲があってよくわからないが、縞模様のみだれや、電波観測によって発見された雷のようなものが発生することなどから、かなりはげしい気流が存在することは確かだろう。われわれが調べた組成や温度は、雲層上のものであるから、木星の成層圏の状態と考えることができる。

問題は次の電離圏だ。電離圏が存在するためには、大気をイオン化するだけの紫外線強度が必要である。このことに関して次のような事実がある。彗星の尾は太陽の紫外線⁵⁾によって本体から飛び出したフリーラジカルやそのイオンによってできているが、その出現は小惑星帯であるとされている。つまり木星あたりでは、そうした光化学反応が進むには紫外線強度がたりないことになる。実際すでに述べたように、木星にはフリーラジカルやそのイオンが見つかっていない。以上の理由から木星には電離圏が存在せず、地球のように、上層が非常

第3表 存在可能な気体分子の表 (Kuiper)

気体分子	分子量	融点	沸点	蒸気圧 (mmHg)	
				-100°C	-150°C
H_2	2.0	-259°C	-253°C	気体	気体
He	4.0	-272	-269	気体	気体
N_2	28.0	-210	-196	気体	気体
O_2	32.0	-218	-183	気体	気体
Ne	20.2	-249	-246	気体	気体
Ar	39.9	-189	-186	気体	気体
H_2O	18.0	0	+100	0.00001	0
HCl	36.5	-111	-85	340	1.34
H_2S	34.1	-83	-60	43.3	0.126
NO	30.0	-161	-151	気体	気体
N_2O	44.0	-102	-90	288	0.369
NH_3	17.0	-78	-33	3.78	0.00056
CO	28.0	-207	-192	気体	気体
CO_2	44.0	...	-78	101.7	0.0627
HCN	27.0	-14	+26	0.222	0.00009
CH_2N_2	42.0	-145	-23
HCHO	30.0	-92	-21	...	0
CH_4	16.0	-184	-161	気体	気体
CH_3OH	32.0	-98	+64	0.0013	0
C_2N_2	52.0	-34	-20	0.222	...
C_2H_2	26.0	...	-84	210	0.431
$\text{C}_2\text{H}_2\text{O}$	42.0	-151	-56	15	0.7
C_2H_4	28.0	-169	-104	気体	16.55
C_2H_6	30.0	-172	-88	393.8	4.1:
SiH_4	32.1	-185	-112	気体	40.7

第4表 木星大気の組成

気体	分子量	存在量 (km-atm)	分圧 (atm)
水素 H ₂	2.0	40	0.88
ヘリウム He	4.0	50	2.20
メタン CH ₄	16.0	0.15	0.026
ネオン Ne	20.0	0.15	0.033

な高温になっていることはないと考えられる。

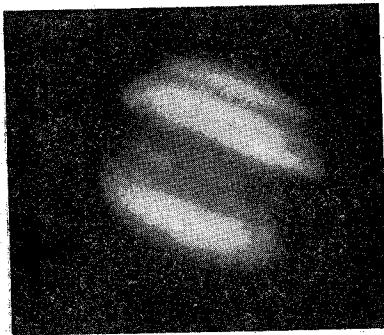
最後に縞模様についてふれておこう。木星の縞模様は小さい望遠鏡でもよく見えるので有名だが、その正体はまったくはっきりしない。赤道に平行になることは、地球大気の大循環と同様に考えれば説明がつくが、あの赤っぽい色は何だろうか。赤い方のスペクトルでは縞とそうでないところの区別がつかない。写真でも青い光で撮った方が縞がはっきり写ることから、青い方のスペクトルを調べれば正体がつかめるかもしれない。縞模様はまた年とともに変化するが、その原因が何なのかもわかっていない。さらに例の大赤斑と呼ばれる模様が何を意味するのか、今のところ想像の域を出ない。

§ 6. 土星の大気

土星は密度が異常に小さい(0.69)から、木星より多くの大気を持っているらしいが、それ以外は木星とたいした違いはない。ウィルトはアンモニアおよびメタンの存在を認め、カイパーはメタンの量を 35000 cm-atm、ダンハムはアンモニアの量を 200 cm-atm と見積っている。アンモニアの量が少ないのは温度が低いためだろう。

水素も四重極子遷移の(4,0)バンドをスピラットが見つけているが、まだ量的な値を出すまでには到っていない(1963)。

温度は理論値として 78°K~110°K が計算されているが、赤外域(8~14 μ)の実測値ではこれより高い 128°K がえられている(メンゼル, コブレンツ, ランプランド, 1926)。



第3図 木星の縞模様

(1962. 10. 24, 東大天文学教室 40 cm 反射にて撮影。当時の木星面の異常がとらえられている。)

§ 7. 天王星と海王星

この2つの惑星は暗いので、まだよいスペクトルが撮られていない。ウィルトはメタンの存在を認め、カイパーはその量を天王星に対し 220000 cm-atm、海王星に対し 370000 cm-atm と見積っている。アンモニアは見つかっていないが、温度が低いので全部固化しているためだろう。

カイパーは 8270 Å に幅広いバンドを見つけたが(1949)、ヘルツベルグは実験でえた高圧水素のスペクトルとくらべて、これが圧力によって生じた水素の双極子遷移の(3,0)バンドであることを示した(1952)。

温度はまだ十分な測定がなされていないが、理論的には 50~70°K と求められている。

§ 8. 将来の問題

惑星は天体としてもっともポピュラーな存在である。だれしも望遠鏡を買って、まずながめてみるのが惑星である。だがそのわりにはわからないことが多い。それは惑星の温度が低いため理論的なあつかいが困難だからである。恒星は大望遠鏡をもってしても点にしか見えませんが、その本体は高温のガスであることがわかっている。その結果とりあつかいが容易となり、内部構造から進化まで追求することができた。惑星はそういうことはできないが、地道な観測の積みかさねによって、次第にその本質があきらかにされつつある。しかしながら、観測は意外に容易でない。一例をあげれば、第1図のスペクトルを撮影するのに、3時間の露光を必要とした。これは6~7等星の露光に相当する。土星ともなれば1晩を必要とするだろう。

一方、近い将来ロケットによって直接に調べることの可能性もでてきた。そこまでのいかなくても、大気圏外での観測の準備が着々と進んでいる。その本質がわれわれの前に示される日も近いことであろう。

註

- 1) われわれが見ている木星面は、本当の表面ではなく、いわゆる“雲”の上面だと一般に考えられている。したがって、分光学的にえられる情報も雲の上のみにかぎられる。
- 2) 0°C, 1気圧にして 700 cm の厚さに相当するアンモニアが存在するという意味。
- 3) 減光の time scale から scale height を求め、温度を適当にとると平均分子量が求まる。温度に違った仮定をすると 1.8~5.1 という不確かさが出るが、いずれにしても軽い分子が存在しなくては説明がつかない。
- 4) 四重極子遷移の計算はかなり複雑なので、計算で出した oscillator strength はあまりあてにならない。

い、したがって、スピラッドの値の方が真に近いと思われる。

- 5) 放射線といった方がよいかも知れない。紫外線ばかりでなく、いわゆる solar wind も尾の生成にあずかっている。

参考文献

- 1) G. P. Kuiper: Planetary atmospheres and their origin (The atmospheres of the earth and planets, p. 306, 1952, The University of Chicago Press).
- 2) H. C. Urey: The atmospheres of the planets (Hdbh. d. Phys., L II, p. 363, 1959, Springer-Verlag).

(209 頁より続く)

1960m ウィルターネン周期彗星 1961年3月9日 18等

1960n キャンデー彗星 1961年5月14日

また予報が発表されて搜索されたが発見できなかった彗星に次のものがある。

デュトワ周期彗星 1945 II

ニュージュミン III 周期彗星

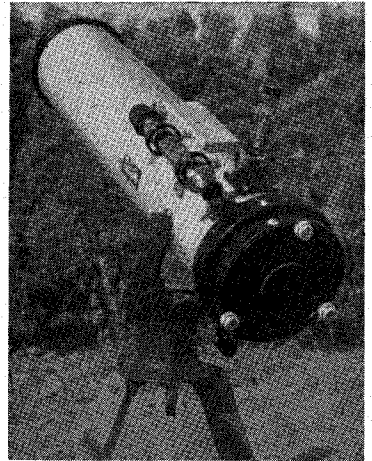
クリン周期彗星 1939 VIII

表の軌道要素はなるべく最新のデータによった。Tはすべてで ET 示してある。



カンコー天体反射望遠鏡

二十糎CG式焦点距離二段切換
天体反射望遠鏡



- ★ 天体望遠鏡完成品各種
- ★ 高級自作部品
- ★ 抛物面鏡、平面鏡、軸外し抛物面鏡
- ★ アルミニウム鍍金
- ★ 電源不要観光望遠鏡 (カタログ要 30 円切手)

関西光学研究所

京都市東山区山科竹鼻 TEL 京都 0057

西村製の

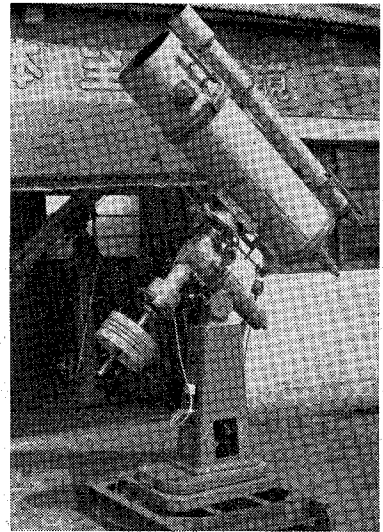
30 cm 反射望遠鏡

下記へ納入して好評を博しております

- 米 ゴッダード・スペース・フライト・センター
ハインド JR 短期大学
ムレ大学
- 英 オックスフォード大学
- スイス バーゼル大学

株式会社 西村製作所

京都市左京区吉田二本松町 27
電話 (77) 1570, (69) 9589



30 cm 反射望遠鏡

ニュートン・カセグレン兼用