

木星族惑星の内部構造

清水 幹 夫 (お茶の水大理)

§ 1 序

木星の表面は縞状の構造を持った厚い雲によって包まれており、外から内部をうかがう術もない。縞の模様から言って、上昇気流のような大気運動があるらしいなどといろいろ推測されているだけである。土星より外側になると余りにも遠くなりすぎて観測は一層難しくなる。したがってこれらの惑星の内部構造に関するデータとしては質量、平均半径、ある種の力学常数、といったものがあるだけで、それに電波観測から推定される磁場の値、理論的に導かれた内部よりの熱流の値を二三の惑星に対しつけ加えると、現在我々の持っている知識は尽きてしまう。(第1表)しかし、こういった乏しいデータからでも、物性論的知見に基づいて多少の描像が得られない訳でもない。そしてその結果は、こういった大型惑星の問題が太陽系の諸問題にと結びつく豊富な側面を持っていることを示しているようである。

第一表 木星族惑星の内部構造に関する諸データ

	Jupiter (木星)	Saturn (土星)	Uranus (天王星)	Neptune (海王星)
質量※	318.35	95.3	14.54	17.2
平均半径※	10.97	9.03	3.72	3.38
平均密度	1.35	0.71	1.56	2.47
ϵ	dynamical 0.06518 optical 0.062~67	0.0978	0.06	0.017
κ	0.00052	0.00159	?	?
J	0.02206	0.02501	?	0.0074
K	0.00253	0.00386	?	?
磁 場	2~50 (gauss)	存 在	?	?

熱 流 $1.2 \times 10^4 \text{ (erg/cm}^2\text{sec)}$ 4×10^3 ? ?

註 * 印は地球を1とした相対値を表わす。

又 ϵ K は惑星の表面が

$$r = \bar{r} \left(1 - \frac{4}{45} \epsilon^2 - \frac{2}{3} \left(\epsilon + \frac{23}{42} \epsilon^2 + \frac{4}{7} \kappa \right) p_2 \frac{(\cos \theta)}{R_e - R_p} \right. \\ \left. + \frac{8}{35} \left(\frac{3}{2} \epsilon^2 + 4 \kappa \right) P_4(\cos \theta) + \dots \right),$$

は oblateness or polar flattening $\frac{R_e - R_p}{R_e}$,

J, K は惑星の重力ポテンシャルが

$$V = \frac{GM}{r} \left\{ 1 - \frac{2}{3} J \frac{a^2}{r^2} P_2(\cos \theta) + \frac{4}{15} K \frac{a^4}{r^4} P_4(\cos \theta) + \dots \right\}$$

と各々、記述できるとした際の定数を意味する。尚、慣性モーメントもこれらのデータから

$$\frac{I}{MR^2} = \frac{2}{3} \left\{ 1 - \frac{2}{5} \left(\frac{5}{2} \frac{\omega^2 R^3}{GM\epsilon} - 1 \right)^{1/2} \right\}$$

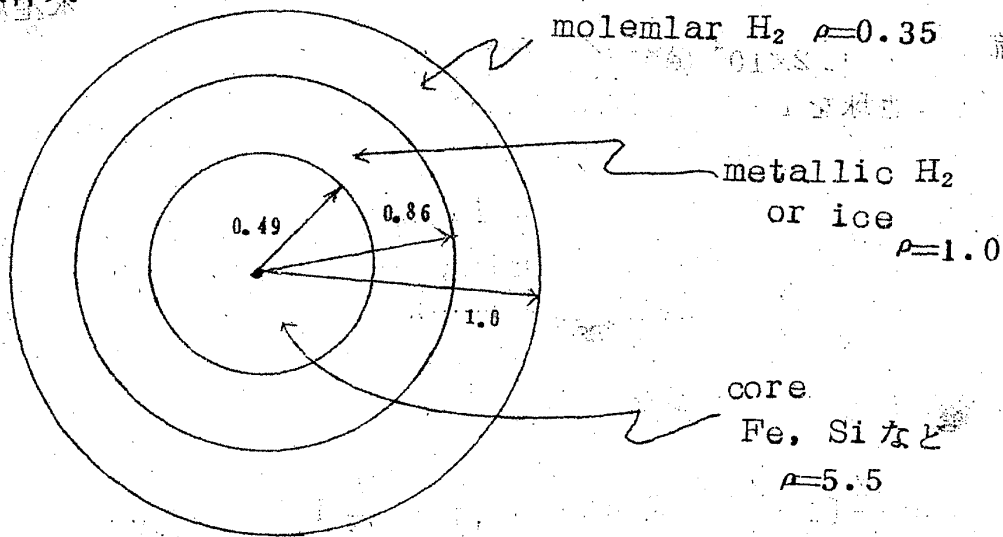
という式を使つて推定できる。

§2 木星と土星

§2.1 Wildt のモデル

Wildt⁽¹⁾ は、木星の内部構造に対する見通しを最も簡単に得るために、第1図のような三層構造のモデルを仮定し、各層の深度を木星の質量および磁性モーメントに合うように定めた。彼の初めのモデルでは中層部を高圧下の ice としていたが、これは当時、元来の宇宙組成のデータが不十分だったことに起因しているもので、後の論文では相転移により金属化した水素であると改められている。

清水幹夫



第1図 Wildtの木星モデル

§2.2 phase transition of hydrogen

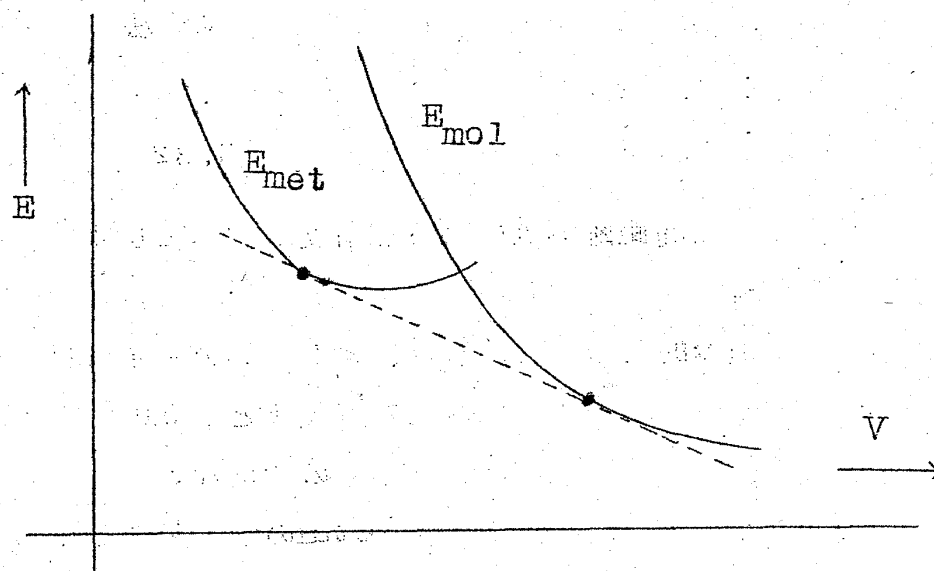
Wildt の suggestion に基づいて木星及び土星の内部構造に関するいくつかの計算が行われたが、その基礎になるのは、高圧における水素の相転移の問題である：

密度が深度と共に単調に増加すると仮定した際成立する

$$\rho_s \leq \frac{5}{2} \frac{I}{MP^2} \rho$$

という関係式を使うと、表面密度 ρ_s の上限は木星では0.8，土星では0.4 となり、固体表面を想像する限りこの条件を満足するのはH₂ の分子性結晶以外に存在しない。そこでこれらの惑星の表面層はmolecular hydrogenであると仮定しよう。すると次に問題になるのはこの物質が内部にあつて高圧に曝された際いかなる相転移が起り、新しい層が形成されるかという点である。残念ながら現在の技術では、絶体温度を数 °K に保ちながら高圧をかける限界は数万気圧であつて、これは相転移を惹きおこす圧力からはほど遠い。そこで何とか理論的にその転移圧を推測できないであろうかということになる。これを求めるにはmolecular hydrogenとmetallic hydrogen に対して第2図に示すようなatomic volume の函数としての1 atom当りのエネルギー E を計算し両者に共通の勾配値を出せば良ろしい。

molecular hydrogenのエネルギーの計算に一番簡単な方法は、分子間力にLenard-Jones のポテンシャル $\frac{A}{r^{12}} - \frac{B}{r^6}$



第2図 固体水素のatomic volume V と1 atom当りのエネルギー E の間の関係。勾配が圧力を与える。

を仮定して、これをすべての H_2 pair に関して総和をとる方法である。しかしこのポテンシャルは分子間隔 r の小さい時にはよい近似になるとはいえず、分子衝突の実験などから得られ、より正確なポテンシャルを使うことが望ましく思われる。

一方metallic hydrogen の方の計算はこのところ大きな進歩を遂げた。この物質は金属量子論の最も簡単な対象であり、また半導体の不純物電気伝導、アルカリ金属の計算への足掛りといった意味もあつて多くの人々の興味を惹いたからである。まず考えられるのは、発展途上の多体問題の手法を用いて、古くからあるWigner-Seitz 流の計算⁽²⁾を改良できないかということだが、これらの試みは⁽³⁾⁽⁵⁾やや意外なことに良い結果をおさめていない。

水素が内殻を持たない為、電子の波動函数がかなりポテンシャルに敏感に感じて激しく振動する為であろう。そこでCalais⁽⁶⁾は原子軌道から出発したalternant molecular orbital (AMO)の方法を用い、エネルギーをだいぶ下げることに成功した。(第二表参照)しかしいわゆる多中心積分の困難のた

第二表 種々の方法によつて得られた金属水素の minimum energy^e_B と平衡核間距離 R_e (atomic units)

	Wigner Seitz	AMO 法
^e _B	0.025	0.048
R _e	2.88	3.32

めに我々の問題にする核間距離附近になると精度が落ちてしまい、その微分値を正確に出すことが難しくなるらしい。⁽⁷⁾

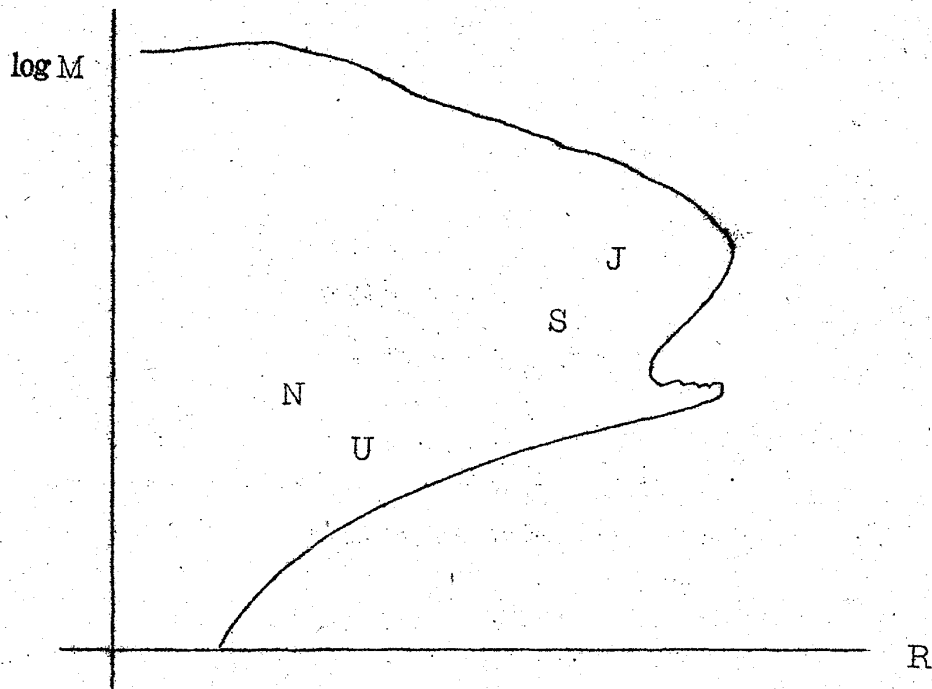
結局、転移圧を純理論的に求めることは、難かしいの一語に尽きる。Lennard-Jones と Wigner-Seitz をつなげて75万気圧とか360万気圧とか言う値が提出されているが、^{(8)~(10)} そう信用のおけるものではない。しかも高压における相転移が常に molecular crystal → metalの形で起きるとは限らず、石墨のような layer structure をもつ可能性も指摘されているのだから⁽²⁾ 問題はいよいよ複雑になる。

中心に近く1億気圧位になつた際には、水素もその他の不純物乃至 core 物質も皆プラズマ状態になり、その状態方程式は Thomas Fermi 方程式で良く近似されるであろうと予想される。従つて一番楽観的に固体水素の状態方程式を作るには、測定のある2万気圧位迄の領域と Thomas Fermi の成立する領域の間は適当に内挿して phase transition など平均化してしまつたものを採用するやり方である。⁽¹⁰⁾ 現在の惑星の観測性を議論するにはこれで充分であるという弁明の下に広く使われている。

§2.3 Hydrogen Planets と木星・土星のモデル

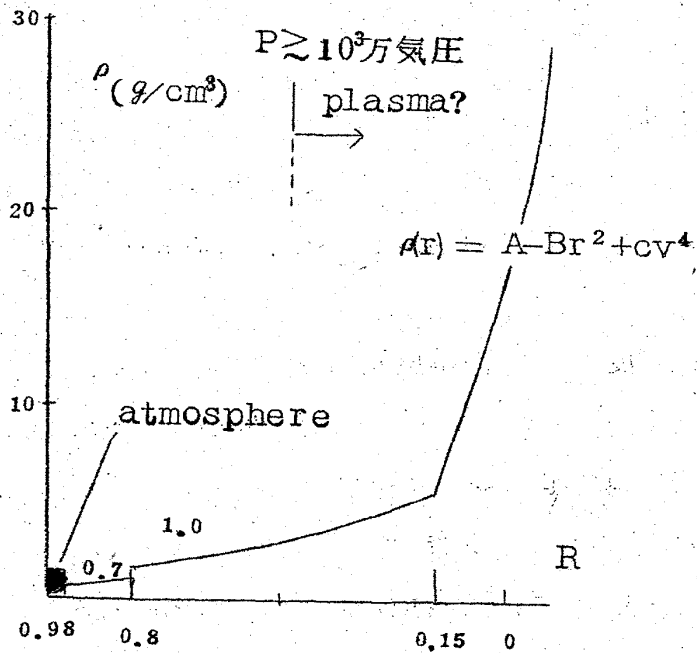
上の内挿によつて得られた状態方程式を採用すれば重力平衡、cold body の仮定のもとに純粹に水素のみから成る天体の質量-半径の関係が得られる。(第3図) 木星族惑星の観測値はこのグラフからかなり外れているので種々の不純物の存在が予測される。

de Marcus⁽¹⁰⁾ らは hydrogen planet の重力平衡の式を木星、土星に対し適当な深さ迄解き、これだけでは中心迄積分してもこれらの惑星の質量を与

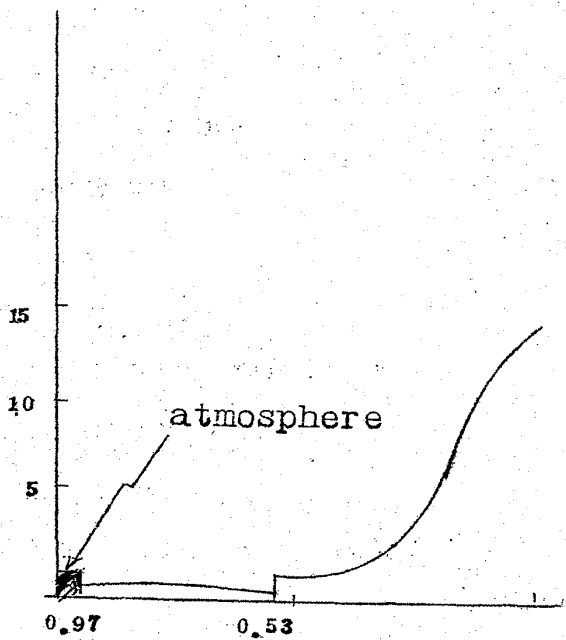


第3図 hydrogen Planet の M-R relation

えないことを考慮して、それから先を重い core 物質 (He, c, N, O, Fe, Si など) にすりかえるという方法で内部構造の計算をした。その結果を第4, 5図に示す。通常の物質は1000万気圧より高くなると、イオン化エネルギー



第4図 木星の ρ 分布



第5図 土星の ρ 分布

清水幹夫

と等しい位の弾性エネルギーを持つに至るので、それから先の深部では物質はプラズマ状態にあるものと思われる。

§3.4 Temperatureと Fluidity

惑星の平均温度は太陽輻射線が惑星面からの黒体輻射と平衡にあるとして求められるが、木星土星の場合には観測値がこの理論値よりずっと高く、内部よりの熱流があるかもしれないことを示唆する⁽¹⁾そこで計算を行うと熱流はそれぞれ $1.2 \times 10^4 \text{ erg/cm}^2 \text{ sec}$ 、 $4 \times 10^{13} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}}$ となり、これらは太陽輻射と同じオーダーである。地球の場合には地下からの熱流は太陽輻射に比べ問題にならぬ位小さかつたから、これは一考を要する。

Critchfield⁽²⁾は Sommerfeld-Bethe 流の計算で metallic hydrogen の熱伝導率 λ を評価した。これによると密度 ρ 以外に適当な数値を代入して

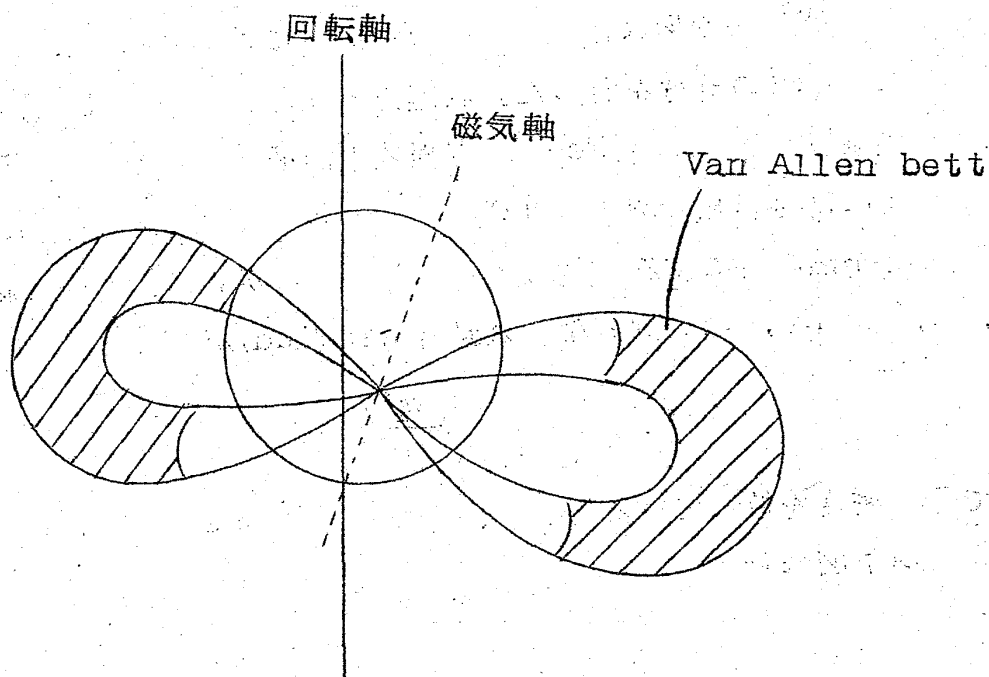
$$\lambda = 107 \rho^2 (1 - 0.25 \rho^{-\frac{1}{3}})^4 \text{ cal/deg-sec-cm}$$

と与えられる。 $\rho = 1.0$ を仮定すれば、これは銀の40倍程度という大きな熱伝導率を与えることになる。この結果は内部の高温が外へ伝わりやすいことを思わせ、木星などが極めて大型の惑星で、放射性元素（特に core 中に多いであろう）からの熱を多量に発生しやすいことを考え合せると前記の熱流の話を納得させそうである。しかし以上の計算はあくまで純金属の時の話で、実際には impurity により熱担体が electron から phonon に移り、伝導度が一桁落ちる可能性が強いから、対流や輻射による熱伝導の問題と共に、これからの解析に待つ点が多い。

こういつた訳で木星、土星の内部温度構造は理論的に未解析のままで、その為、内部の或る領域で液体化しているのではないかといった疑問にも答えることができない。もし上層部の molecular phase が液化していると表面に近い Jupiter V のような衛星の運動に効いてくる筈であるが現在迄のところその影響は観測されていない。また、磁場の存在から液状の core が推定されている。

§3.5 磁場と van Allen Belt⁽¹³⁾

木星と土星からは波長数mm~70cm 位のマイクロ波、波長デカメーター領域のラジオバーストが発射されている。前者の中には熱輻射や電離層のプラズマ振動などに帰し得ない偏波部分が存在し、これはこれらの惑星をとり囲む Van Allen belt 中での高速 electron が発射する synchrotron radiation によるものと考えられている。また後者は、例えば木星の衛星イオによって擾乱を受け van Allen belt からこぼれ落ちた荷電粒子が非常に濃い電離層にぶつかって plasma 振動をひき起し、それが何らかの機構で横波に変ったものであると解釈する人もいる。この二つは一応全然独立に測定できるのであるが、以上の解釈のもとに木星の magnetic dipole の位置を推定してみると、どちらからも殆んど同じ。答が出るのは面白いことである。(第6図参照)



第6図 木星の Van Allen Belt と磁場

磁場は恐らく core の運動に附随して起つているから、電波を追うことによって木星の回転に一つのスケールを入れることができる (System III と呼ばれる。) これと関連して面白いのはいわゆる red spot の運動である。この長さ 4 万 km 巾 1 万 1 千 km の大赤斑は同一緯度を動くのみで (1831 年より現

清水幹六

在迄 1080° 流れた) 南北方向に全然流れないという奇妙な物体だが、これが何か plateau の上の気流変化に基づくものであり、従がつて mantle 運動の目印になるものであるとすれば、system III との関係を追求することによって core-mantle 相互作用分析の手がかりになる可能性があるかも知れない。

§3. 天王星と海王星

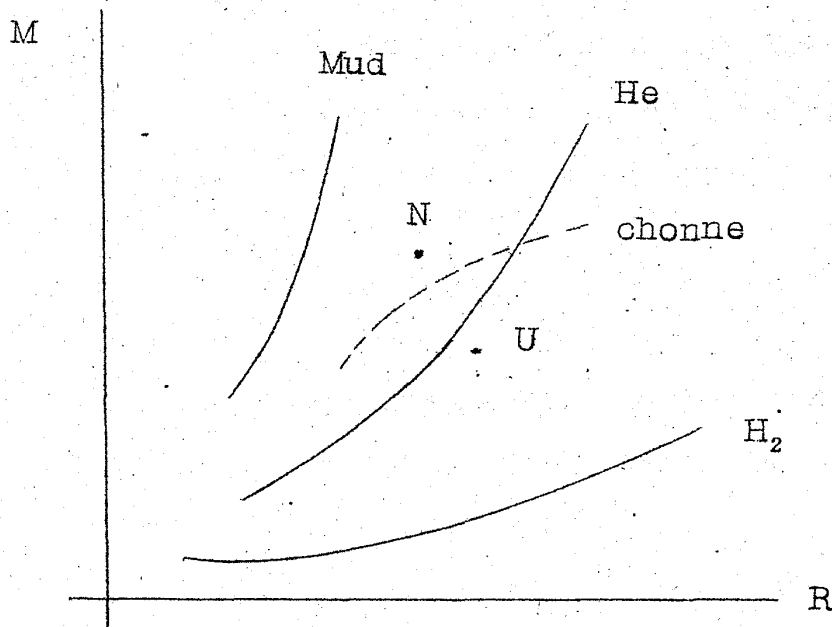
これらの惑星は密度が高いから、H の量はずつと少なくなっているものと思われるが、さてそれではどういった組成になっているかということになると非常に異なつて説が対立しており、しかもどちらという決め手がないといった状態である。

§3.1 Helium Planet

de Marcus⁽¹³⁾ は水素はこの二惑星の形成時に殆んど逃げ去つたと考え、helium planet の計算を行つた。状態方程式としては hydrogen と時同様、低圧での実験値と Thomas Fermi 方程式を内挿して出し、M-R 図を描く。He の場合には金属化に関する計算はないといつてよいから、phase transition など全然論外にする。彼はついでに、各々が w_i といった組成比を持つた C, N, O, Ne, Si, Fe などの混合物質 (mud) が

$$\frac{1}{\rho_{\text{mean}}} = \sum \frac{w_i}{\rho_i}$$

の形で平均密度を持つているとして、その mud planet の M-R 図をも導いている。(第 7 図参照)



第7図 いろいろなモデルplanet のM-R図

§ 3.2 Chonne Plant

Ramsey⁽¹⁴⁾はhydrogenはC, N, Oなどと結合して CH_4 , NH_3 , H_2O の形でこれらの惑星上に残っていると考え、宇宙組成を基に CH_4 14.4% H_2O 65.9% NH_4 11.4%, Ne 8.3%の混合物質（彼は上記物質の文字をつなぎ合せしこれをchonne materialと呼ぶ）を基質とする惑星の研究を行った。その際状態方程式は主として分子衝突の分析から出した分子間力より求めた。特に NH_3 に対しては、Wigner Seitz法でBecnal-Masseyが計算した金属 NH_4 の考えも用いられている。その結果は第7図に目盛られているが、He planetと同程度の一致であると見られよう。なおRamsayは、UranusとNeptuneの比重が非常に違うのは、中心で H_2O が金属化する、しないの差からくるのではないかとsuggestしている。

清水幹六

文 献

- (1) R. Wildt : *A_p. J.* 87 ('38) 508.
- (2) E. Wigner and H. B. Huntington :
J. Chem. Phys. 3 ('35) 764.
- (3) F. Stern and R. M. Talley : *Phys. Rev.* 100 ('55) 1638.
- (4) A. Bellman and M. De Leener :
Phys. Rev. Lett. 6 ('61) 603.
- (5) W. J. Carr, J_R. : *Phys. Rev.* 128 ('62) 120.
- (6) J. L. Calais : *Arkiv för Fysik* 29 ('65) 255.
- (7) J. L. Calais : private communication.
- (8) R. Kronig, J. de Boer and J. Korringa :
Physica 12 ('46) 245.
- (9) A. A. Abrikosov : *Voprosi Cosmogonii*
3 p. 11 (Moscow : Academia Nauk)
- (10) W. C. De Marcus : *A. J.* 63 ('58) 2.
- (11) E. Öpik : *Icavus* 1 ('62) 200.
- (12) C. N. Cvitchfield : *Ap. J.* 96 ('42) 1.
- (13) 第11回 Liège colloquium 報告 ('62)
Liège University.
- (14) W. H. Ramsey : *Month. Not.* 125 ('63) 469.