

物性論に基づく比較惑星学

－ 惑星はどのように形成されたか－



[CG 提供 Pixta]

太陽系が万有引力だけで星間分子雲から最も軽い水素原子の重力崩壊で発生したという従来の説には納得できません。宇宙塵の微粒子は他の微粒子と接触部分が短距離力によって付着します。その短距離力であるクーロン力は重力の約10の36乗倍に相当します。最初に公転軌道に均等に分布し宇宙塵が緩やかな接触によって塊を作ると考えられます。

星間分子雲の重力の中心に宇宙塵が向かって並進すると、中心部に近づくに連れて粒子の密度が高くなり、粒子が衝突する回数が増えます。その際に付着します。また、衝突によって運動方向が変えられます。運動方向を変える際には並進運動のエネルギーの一部が回転運動のエネルギーに変換されます。そして重力の中心の赤道面を周回する一部の星間物質は求心力と遠心力が平衡して同じ軌道に留まります。赤道面に垂直な運動成分を持つ星間物質は同じ軌道を公転し続けることはできません。太陽系の全体の0.13%が太陽を周回する角運動量を持つとしても不自然ではありません。

その塊が大きくなると表面の比率が減少して低いエネルギー状態となります。塊ができることにより公転運動の重心がずれることになり、偏心による摂動が宇宙塵の塊の成長を加速させます。惑星は太陽の摂動によって太陽の赤道の平面上に成長します。太陽の赤道面上に惑星がある様に、惑星の赤道の平面上に衛星が存在します。太陽風が吹いている環境で、木星や土星のように巨大なガス惑星が生まれるのは難しい。惑星は太陽と惑星は同時に形成し始めて太陽が核融合反応を始めた時には惑星はすでに成長していました。(J. S. ルイスの平衡凝縮説 [1974])。太陽に近い水星および金星を除くと、惑星の自転周期はそれ自身の質量に反比例するという関係があります。これは、惑星がその惑星の公転軌道を周回する物質を取り込んで大きくなったことを意味します。惑星では自転周期は公転周期が相違していますが、衛星は公転周期と自転周期が一致しているものが多い。これは衛星も太陽風の影響をあまり受けずに成長したことを示唆しています。

探査機「はやぶサ」が小惑星「竜宮」を調査した結果、この小惑星は隙間の多い構造で、重力が弱く脱出速度が30cm/secで歩く速度でも宇宙の放出されてしまいます。これは、星間物質が静かに接触して接触点が付着して小天体が誕生するというを示しています。惑星が近距離力で付着が進行することで大きく成長した天体が長距離力である万有引力を増すので、隕石が落下する際の衝突のエネルギーが大きくなります。(唐澤信司記 2021年6月4日アップロード)

[参考動画]

https://youtu.be/0qchcYRxuG4	固体の二酸化炭素による超微細 鉄粉末の酸化
https://youtu.be/Wi5G2F_pDXM	物性物理学の視点から説明される地球の内部構造
https://youtu.be/Kz8TTG1CHXI	隕石の起源
https://youtu.be/medU_Rq6StI	第2の太陽になり損ねた惑星の残骸が残る小惑星帯
https://youtu.be/BrzQAS2rr8Y	物性物理学によって統一的に理解される惑星の誕生

1 序論

太陽系外惑星「ペガサス座 51 星 B」が 1955 年に発見されました。その惑星は木星のような大きな惑星であり、中心の星に非常に近くに位置していました。この惑星が稀ではないことが明らかになり、そのような惑星は「ホットジュピター」と呼ばれています。恒星が核融合反応している付近で、巨大なガス惑星が形成されているとは考えられません。

伝統的な理論の第一段階では、“水素の重力崩壊”、すなわち、水素は水素自体の重力によって収集されます。しかし、水素は重力による収縮が最も遅い最も軽い原子です。

本文では太陽系の新しい形成理論について述べます。つまり、太陽と惑星が同時に塵を集めるようになったとします。最初に最も大きく成長した惑星は、最初に水素ガスを採取し始め、核反応が最初に始まります。原始太陽は太陽系で最初に巨大な惑星となり、水素の重力崩壊などを論じる必要はありません。

太陽系の中心部の原始太陽は大きくなるにつれて成長を加速します。太陽は核融合を始める以前に木星と似た内部構造になり、内部の中心にコアが存在しました。そこで、最初の核融合反応で中心部のコアが爆発してその破片は宇宙に放出されます。その太陽のコアの大爆発により膨大な量の破片の大部分が再び太陽に取り込まれます。しかし、その一部は隕石や小惑星となります。太陽系の惑星の初期太陽系の大規模な隕石や小惑星の衝突の痕跡があります。地球に飛来する隕石の多くは約 46 億年前に誕生したことを示しています。その隕石の由来は原始太陽のコアの破片であったと想像することが難しくありません。

核融合を起こさない物質は惑星によって捕獲することができます。水素は豊富にあるので、太陽は定常的に核融合反応を続けることができます。このように、太陽系の惑星は太陽が核融合反応を始める以前に誕生していたとして惑星の形成の説明を進めます。

2 微粒子の接触による結合

2.1 近距離力による微粒子の接着

宇宙塵は多くの原子が集まった粒子です。微粒子に気体分子が熱運動で衝突した場合には微粒子の内部状態は変化しません。気体分子は跳ね返ります。ところが微粒子と微粒子が接触すると接触部で電子状態がエネルギーの低い状態になり、局所的に化学反応がおこります。エネルギーの低い電子状態になればその状態を保ちます。物質は万有引力の力で接着しているわけではありません。

原子が原子の大きさ程度に接近すると、原子の電子が他の原子の電子と相互に作用して、高いエネルギー状態と低いエネルギー状態を発生し、新たな電子状態ができます。図 1. に結合状態によって低下する一個当たりの原子のエネルギーを示します。

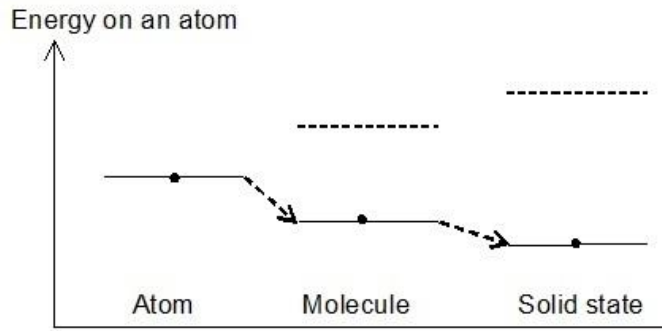


図 1. 結合状態によって変化する原子のエネルギー状態

理想気体において圧力と体積の積を変えないと空間距離を圧縮した時に、運動エネルギーは反比例して増加します。この運動量空間と距離空間の積を変えない条件が量子状態一定の条件になります。図 2.に 物質の量子状態を変えずに圧縮と膨張をした場合のエネルギー変化を示します。

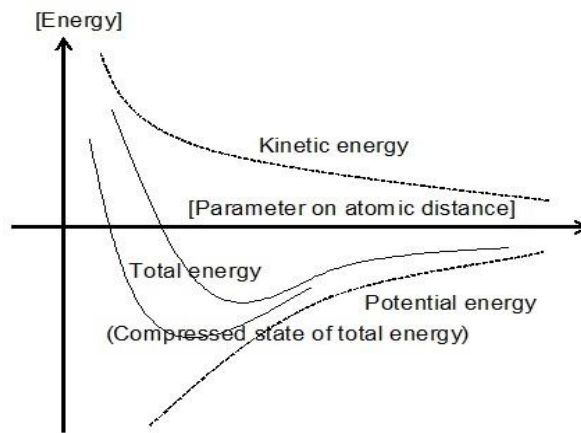


図 2. 原子間距離の縮小によるエネルギー状態の低下

原子核と電子に働く引き合うポテンシャルエネルギーはサイズに反比例して減少しますが、運動エネルギーはサイズの二乗に反比例して増加します。そこで、最低のエネルギー状態は運動エネルギーがポテンシャルエネルギーの半分の状態で与えられます（ビリアル定理）。

万有引力は距離の二乗に反比例して減少しますが遠方まで効果がおよびます。他方、クーロン力が正負の電荷で打ち消し合うので効果が及ぶのは原子レベルの程度です。宇宙塵の塊は微粒子の集団であり局所的な近距離力で構築されています。式 (3) に示すように、万有引力 (1) とクーロン力 (2) との差は約 36 桁もあります。

$$FG = G \cdot (m_p)^2/d^2; \quad G=6.67 \times 10^{-11} \text{ [N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}], \quad m_p=1.66 \times 10^{-27} \text{ [kg]} \quad (1)$$

$$FC = k \cdot (q_p)^2/d^2; \quad k=9.0 \times 10^9 \text{ [N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}], \quad q_p = 1.6 \times 10^{-19} \text{ [C]} \quad (2)$$

$$FG / FC = 1.84 \times 10^{-64} / (2.3 \times 10^{-28}) = 8 \times 10^{-35}. \quad (3)$$

2.2 鉄粉とドライアイスの混合による鉄粉の表面酸化

【固体と固体の接点の反応】

固体は微粒子比べてエネルギーが低い状態です。鉄微粉は微細になるに従い反応性が高くなります。水の分子や炭素が分子間結合をして接着剤の役割を果たします。星間物質の固体微粒子が接触して大きくなった塊は原子間結合状態の比率が増すので、全体としてエネルギーが低い状態になります。物質は万有引力の力で接着しているわけではありません。物質を直接の万有引力の力で分解することはできません。

空気中では鉄粉の酸化の進行が遅いです。また、二酸化炭素の気体 (CO_2) の中に置いた状態では鉄粉は短時間に酸化しません。しかし、微粉末の鉄粉(Fe)とドライアイス (CO_2) の粉末を混ぜて瓶に密封しておくと図 1 に示すように鉄粉が酸化します。ガラス容器の縁は図 2 に示すように灰色の Fe 、黒色の Fe_3O_4 及び、褐色の Fe_2O_3 が見られます。図 3 の左半分は還元鉄微粒子で還元鉄微粒子がとドライアイス (CO_2) 混合による表面の酸化を右半分に示します。



図 3.ガラス容器内の鉄粉 (Fe : #330)

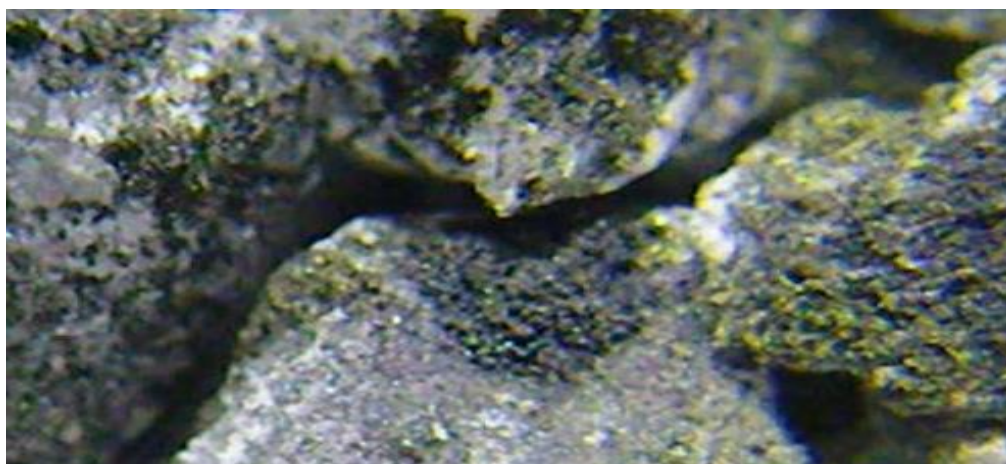


図 4.ガラス容器の壁の鉄粉 [灰色 : (Fe), 黒色 : (Fe_3O_4), 褐色(Fe_2O_3)]



図 5.還元鉄微粒子の表面酸化(右)

鉄微粉は微細な粒子になるに従い反応性が高くなります。シュウ酸鉄 ($\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) から作られた鉄の微粒子 (Fe) をドライアイス (CO_2) の結晶に振りかけて、鉄の微細粉末が冷たいドライアイスにより酸化することを確認する実験を行った。鉄の微粉末をドライアイスに振り



かけてしばらくすると図 6 に示すように極微細な粒子の煙が発生し、鉄の粒子は黒から赤みを帯びた色になります。赤みを帯びた色は赤紫酸化鉄 (Fe_2O_3) です。

図 6 ドライアイスの固体上に振りかけられた鉄の極微細粒子の酸化

[動画, <https://www.youtube.com/watch?v=0qchcYRxuG4> 固体二酸化炭素による超微細鉄粉末の酸化]

3 宇宙塵の集積

3.1 太陽系内の星間物質の分布

太陽系形成の従来の説では、星雲全体がゆっくり自転していると仮定し、星雲が収縮するに従い回転を増し、星雲が平たく潰れて、外縁部から順にリング状に星雲が切り離されて惑星を作ったとしています。この説によれば太陽は巨大な角運動量を持っていないければなりません。ところが太陽の角運動量は太陽系全体の角運動量の 0.5%しかありません。最初に星雲全体が自転している必要はありません。均一な密度でも星間物質の集まりにはその中心に重心があり、星間物質が重力ポテンシャルの低い重心に向かって集積します。個体粒子が中心に向かう並進運動で中心部に近づくにつれて、衝突する回数が増えて、その際に運動方向を変えろという回転運動を並進運動のエネルギーを回転運動のエネルギーに変換することにより中心部の密度が高くなります。

重心に近い位置の公転軌道の平衡状態は運動のエネルギーが大きく、公転周期は短いです。星間物質が自己重力により収縮すると星間物質が回転による遠心力と重心の引力とが釣り合って公転軌道を周回し続けます。太陽系の星間物質の 0.1%程度の量の物質が公転軌道に留まりました。重力は全ての物質に作用するので、均一な密度でも星間物質の集まりにはその中心に重心があります。星間物質が重力ポテンシャルの低い重心に向かって集積し、重心に近い程星間物質の密度が高くなります。重心に近い位置の公転軌道の平衡状態は運動のエネルギーが大きく、公転周期は短いです。星間物質が自己重力により収縮すると星間物質が回転による遠心力と重心の引力とが釣り合って公転軌道を周回し続けます。太陽系の星間物質の 0.1%程度の量の物質が公転軌道に留まりました。

原始の星間物質の密度が太陽からの距離に対してどのような分布であったかの関係を太陽系の外惑星の質量(m_{planet})と位置($L_{\text{Sun-planet}}$)とから推定します。無限遠点の値を 0 にして、惑星が太陽から現在の位置までの距離に移動した際に太陽の重力によるポテンシャルの変化を惑星が持つ重力ポテンシャルエネルギーとします。ニュートンの力学によれば惑星の重力ポテンシャルエネルギーは重心からの距離($L_{\text{Sun-planet}}$)に反比例します。それは各点の重力ポテンシャルに相当します。惑星がその周辺地域の星間物質を集めて得たポテンシャルエネルギーの値(Φ_{planet})は(4)式に示すように惑星の m_{planet} に比例し、 $L_{\text{Sun-planet}}$ に反比例します。

$$\Phi_{\text{planet}} = - m_{\text{planet}} \cdot (G \cdot M_{\text{Sun}}) / (L_{\text{Sun-planet}}) = - G \cdot M_{\text{sun}} \cdot (m_{\text{planet}} / L_{\text{Sun-planet}}) \quad (4)$$

図 7.に各惑星について($m_{\text{planet}}/L_{\text{Sun-planet}}$)の値の常用対数を、距離を横軸にして示します。

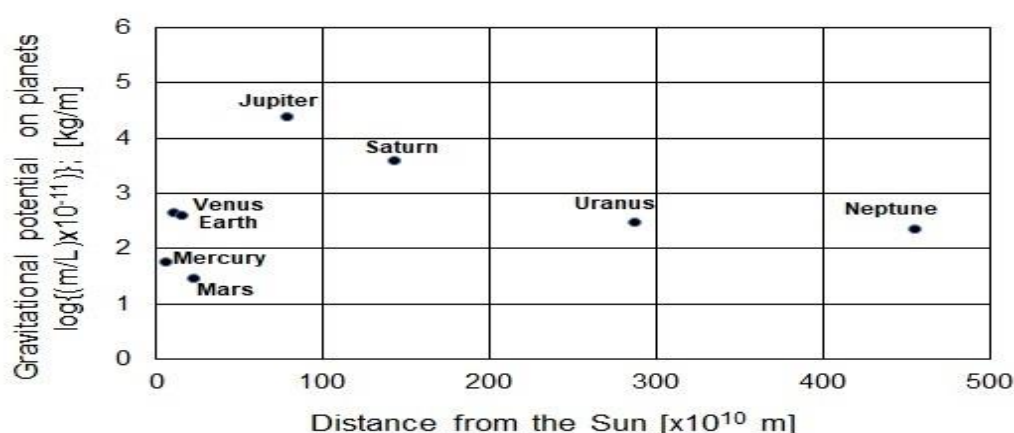


図 7. 惑星が持つ重力ポテンシャルの比較による星間物質の分布の推定

外惑星の木星、土星、天王星に関しては太陽からの距離に対して($m_{\text{planet}}/L_{\text{Sun-planet}}$)の値が指数関数的に減少しています。これは、原始星間物質が太陽からの距離に対して密度分布が指数関数的に分布する状態で巨大惑星が成長したことを示唆しています。なお、木星は地球の約 2 万倍の強い磁場を持っており、太陽風のイオンを磁束に巻き付けて惑星内に取り込むので質量が増加しています。また、太陽から 40 億 km 以上の遠方の(m/L)の値は指数関数のルールが成り立ちません。また、太陽に接近するので岩石惑星では指数関数のルールが成り立ちません

3.2 惑星の公転運動と自転運動

中心の天体に取り込まれずに公転している星間物質はその位置の重力ポテンシャルに対応した周回する角運動量を持っています。惑星の公転周期は重力場で平衡状態を保つ公転の速度で決まります。地球の公転周期は 1 年です。太陽から離れた場所を公転する惑星の公転周期はもっと長いです。

他方、天体の自転の起源については論議が殆どなされておられません。自転の周期には公転周期と一致している天体は稀ではありません。形成初期の天体では次のようにして公転周期と自転周期が一致します。

公転軌道上に均一に分布した星間物質が塊となると公転運動の中心が共通重心になり、中心にあった重心体が偏心運動をするようになります。中心の天体が偏心し回転をしているか、あるいは中心の天体が変形して自転しておれば、静止軌道(同期軌道)で周回する星間物質を集めることが出来ます。その場合に重心体の偏心運動は周回する惑星の公転と一致します。

星間物質が重力の中心に向かって収縮した状態では重力のポテンシャルが強くなり、平衡する運動エネルギーが増加して回転が速くなります。惑星や衛星は中心星に接近すると公転周期が短くなるので、中心星の自転の偏心を媒介すれば自転周期も短くなります。 中心の天体が成長する際に、周回しながら落下する星間物質を含むことによってその自転周期が短くなります。これが自転周期に天体の成長が反映するメカニズムです。

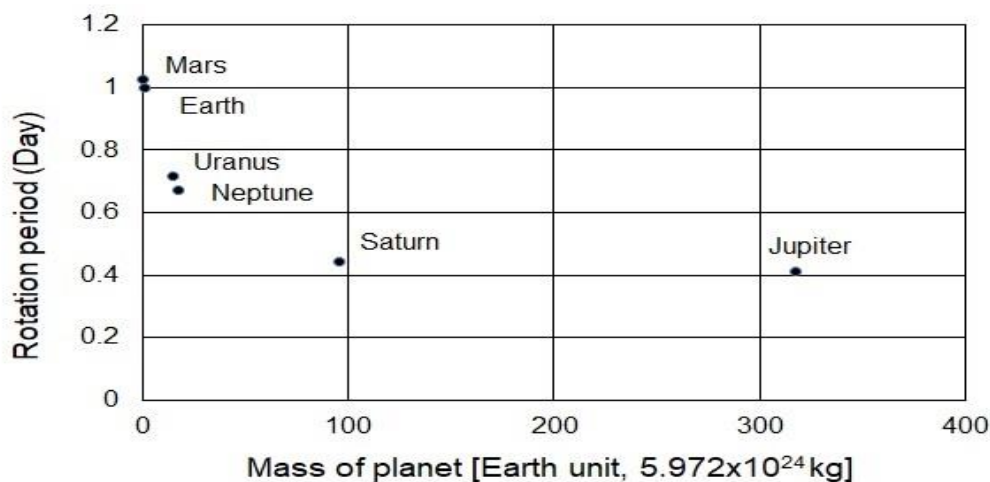


図 8. 惑星の質量に反比例する惑星の自転周期

図 8.に示すように太陽系の惑星は自転が非常に遅い水星と金星を除くと、惑星の質量に反比例して自転周期が短くなります。これは地球や火星を含む 6 個の惑星は惑星の回りを周回する物質を取り込んで成長したことを示します。地球と火星の自転周期は 1 日で、木星などの地球外惑星は 24 時間以下です。現在の太陽の自転周期は 25.38 日です。ところが水星の自転周期は 59 日で、金星は 225 日です。太陽に近い領域を公転する水星と金星は衛星を持っていません。原始太陽の回転周期は、太陽の構成物質の中に含まれる周回物質によって短縮されて、現在の太陽の自転周期は 25.38 日です。

3.3 月の公転周期と地球の自転周期

月は地球の外側を周回している宇宙塵を収集するので、地球 ($\rho_{\text{Earth}} = 5.52 \text{ g/cm}^3$) より軽い材料 ($\rho_{\text{Moon}} = 3.34 \text{ g/cm}^3$) で構成されています。月の質量が大きくなると、月と地球の共通の重心の回りを偏心して周回するようになり、月の自転周期と公転周期が一致します。その結果、月の裏側は軽い物質で構成されて厚く、火山性マグマが月の表側の低地に流出して月の海が形成されました。

公転と同じであった原始地球の自転は、周辺を周回する宇宙塵を集めて早くなりました。現在の地球の自転周期は 1 日で 1 回転です。地球の自転の周期と同じ周期の静止軌道の位置は地球から 42,300km という距離です。他方、遅れた地球の海水の運動の摂動が月の公転に加わるという”潮汐現象”によって月の公転が地球から離れることが繰り返されます。そこで、現在では、月は地球から 380,000km 離れて 27.3 日かけて周回しています。公転周期が長くなりましたが月の離心率が 0.055 と大きいので月の自転周期と月の公転周期は一致することを続けています。

海の水は蒸発して対流圏で凝縮して雲となり、雨となって地上に戻されます。この”コールドトラップ”によって、海水の量は保存されます。また、地球の上空には電離層があり、太陽風の水素イオン(H^+)は地磁気の磁束に巻き付き北極や南極で地球に侵入するので水素イオンとオゾンが結合して紫外線で分解された H_2O を太陽風の水素イオンが補給します。

海が出来てから海の水量も変化しなかったと仮定して、地球の海が出来てから海の潮汐作用で月の公転軌道が変化したことを検討します。

ケプラーの第三法則により公転軌道半径の 3 乗は公転周期の 2 乗に比例します。

$$L_{\text{Orbit of Moon}} = \{G \cdot M_{\text{Earth}} \cdot T_{\text{Orbital period of Moon}}^2 / (4\pi)^2\}^{1/3} \quad (5)$$

そこで、地球の質量が変わらないとして、月が静止軌道上にあったとしてその公転周期が 1 日の場合の軌道距離と現在の公転周期の 27.3 日との軌道距離の比が $L_{(27.3\text{days})}/L_{(1\text{day})} = \{(27.3)^2\}^{1/3} = (9.1)$ と計算できます。

この値を実際の月の公転軌道半径と静止軌道の距離比 $[(38/4.23) = 8.98]$ との差は少しです。公転軌道は重心の質量の立方根に比例することから、月が静止軌道にあった当時の地球の質量($m^*\text{Earth}$)と、現在の地球の質量(m_{Earth})の比を求めると $(m^*\text{Earth} / m_{\text{Earth}}) = (8.98/9.1)^3 = 0.96$ となります。潮汐作用は地球に海ができてから発生するので、海が誕生した時には地球は現在の質量の 96% あったこととなります。潮汐作用により海水の移動と月の公転が遅れることにより月が地球の静止軌道から現在の軌道まで 45 億年間かけて移動しました。レーザーによる測定では現在、毎年 3.8cm ずつ地球から離れています。

ここで、参考までに火星の衛星のデータを示します。

【フォボス】 $L_{\text{Phobos}} = 9,3800\text{km}$, $T_{\text{Phobos}} = 7.65$ 時間, $d = 26.8\text{km}$,

【火星の静止軌道】 $L_{\text{Synchro of Mars}} = 20,400\text{km}$, $T_{\text{Synchro of Mars}} = 24.62$ 時間,

【ダイモス】 $L_{\text{Deimos}} = 23,500\text{km}$, $T_{\text{Deimos}} = 30.30$ 時間, $d = 15\text{km}$,

火星の衛星のデータによれば火星が水を湛えた状態の期間は短かったと推測されます。

3.4 金星及び水星に及ぼす太陽風の影響

金星の公転周期は 225 日で、自転の周期は逆方向に 243 日です。逆方向に自転するのは外部の作用によります。太陽風が 25.38 日で自転する太陽から毎秒 10^9Kg の質量で放出されていて、太陽表面の回転速度は秒速 2km です。金星の大気の 96.5% は二酸化炭素です。その金星の大気と太陽の自転による回転成分を持つ太陽風とが歯車がかみ合うように作用すると、大気の周回は公転方向と逆になります。即ち、回転速度 2km/sec の太陽風が秒速 100m の硫酸の雲の“スーパー・ローテーション”の原因であると考えます。

金星では 45km から 70km の上空に、ミクロンサイズの硫酸(H_2SO_4)エアゾルの粒子の厚い雲があります。硫酸エアゾルは周囲の水蒸気を吸収してその水に自身が溶解して解離しています。この粒子層で太陽の光の 80% が反射され、太陽光と太陽風が対流圏を加熱します。ここで、太陽風は、 2km/sec の速度の回転が含まれています。それが緩く歯車の噛み合うようにして 100m/sec の速度の雲のスーパー・ローテーションを引き起こします。地面の近くの大気は速度は 2m/sec の微風で金星の回転と一致します。

このように大気が自転を逆方向に回転させる作用は他の惑星や衛星にありません。太陽表面での太陽風の回転の運動量($P = mv = 2 \times 10^{12} [\text{kg} \cdot \text{m/sec}]$)は金星の位置で面積比が $\pi(R_{\text{Venus}})^2 / 4\pi(R_{\text{Sun-Venus}})^2 = 2 \times 10^{-10}$ となるので、約 $400 [\text{kg} \cdot \text{m/sec}]$ の回転運動量に減少します。

他方、現在の水星の公転周期は 88 日で自転周期は 59 日です。水星ではナトリウムの巨大な雲が突如として現れ、瞬く間に消えるのが観測されました。そのような太陽風が吹く環境で惑星が誕生することは困難です。

表 1. に太陽系の惑星のデータをまとめて示します。

表 1. 惑星の公転軌道、自転周期、引力圏および同期軌道

	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星	[単位]
公転軌道	0.579	1.082	1.496	2.279	7.783	14.294	28.750	45.445	[10 ¹¹ m]
自転周期	58.65	243.0	0.997	1.026	0.414	0.444	0.718	0.671	[day]
同期軌道	24.3	153.7	4.23	2.04	16.01	11.22	8.27	8.35	[10 ⁷ m]
引力圏	2.4	16.9	25.9	12.9	2402	2416	1899	3231	[10 ⁷ m]

ここで、ケプラーの第三法則より導いた(6)式、および国立天文台編「理科年表」[2] 記載の数値を用いた。

$$L_{\text{Orbit of planet}} = \{G \cdot M_{\text{Sun}} \cdot T_{\text{Orbital period of planet}}^2 / (4\pi)^2\}^{1/3} \quad (6)$$

また、表 1 の引力圏は太陽と惑星の中間で太陽の引力と惑星の引力が等しくなる位置の惑星からの距離(L_{planet})を求める近似式として(7)式を用いて求めた。

$$M_{\text{Sun}} / (L_{\text{Sun-planet}})^2 \doteq m_{\text{planet}} / (L_{\text{planet}})^2 \quad (7)$$

なお、現在の太陽の自転周期で太陽の静止軌道を(5)式を用いて求めると $L_{\text{geosynchronous orbit of the Sun}} = 2.53 \times 10^{10} \text{ m}$ になり、太陽から水星までの距離の値の半分弱です。

4 惑星の形成

4.1 太陽の引力による収縮と太陽風による膨張

太陽の核融合は惑星の形成に大きな影響を与えました。これまでの説明から、太陽は惑星と同じ物質から生まれ、惑星は太陽が核融合を開始する直前に大きく成長していたことを前提にします。太陽の核融合が始まると、太陽から大量の太陽のコアの破片が放出されます。その核融合は現在も続いており、太陽風が吹き出しています。

太陽風は太陽系の外側の領域に達しています。太陽系外の星間物質の温度が 10 K とすると、水素イオンの太陽の重力ポテンシャルがそれに対応した値になる位置として、太陽系の端までの距離 (L_{max})が求められます。ビリアル定理より、重力ポテンシャルエネルギーは全エネルギー (E_{total})の 2 倍であり、(8)式で表されます。

$$2 \cdot E_{\text{total}} = m_p \cdot M_{\text{sun}} \cdot G / (L_{\text{max}}) \quad (8)$$

ここで、 $E_{\text{total}} = 10(K) \cdot (1.38 \times 10^{-23})J$, $M_{\text{Sun}} = 1.988 \times 10^{30} \text{ kg}$ を代入して太陽系の端までの距離 (L_{max}) が $L_{\text{max}} = 8.0 \times 10^{14} \text{ m} = 5.4 \times 10^3 \text{ au}$ となります。これは、海王星の公転軌道 ($4.5 \times 10^{12} \text{ m}$)よりはるかに遠く、オールとの雲までの距離($10,000 \text{ au} = 1.5 \times 10^{15} \text{ m}$)の半分程度です。太陽から放出された太陽風は太陽系の端までいって宇宙塵は塊になり彗星となって再び太陽の引力で引き戻されます。

4.2 中心の惑星の非常に近くに存在する小さい歪んだ衛星

木星に最も近い場所にある 4 個の衛星、及び火星の 2 個の衛星のデータを示します。

[メディス] $L_{\text{Metis}} = 120,960 \text{ km}$, $T_{\text{Metis}} = 6.97 \text{ 時間}$, $d = 40 \text{ km}$,
 [アドラストエア] $L_{\text{Adrastea}} = 128,980 \text{ km}$, $T_{\text{Adrastea}} = 7.15 \text{ 時間}$, $d = 26 \text{ km}$,
 [木星の静止軌道] $L_{\text{Geostationary orbit of Jupiter}} = 160,180 \text{ km}$, $T_{\text{Geostationary orbit of Jupiter}} = 9.94 \text{ 時間}$

[アマルテア] $L_{Analtha} = 181,300\text{km}$, $T_{Analtha} = 11.77$ 時間, $d=262\text{km}$,

[テールベ] $L_{Thebe} = 221,900\text{km}$, $T_{Thebe} = 16.08$ 時間 $d=110\text{km}$.

[フォボス] $L_{Phobos} = 9,370\text{m}$, $T_{Phobos} = 7.65$ 時間, $d=26.8\text{km}$,

[火星の静止軌道] $L_{Geostationary\ orbit\ of\ Mars} = 20,400\text{km}$, $T_{Geostationary\ orbit\ of\ Mars} = 24.62$ 時間,

[ダイモス] $L_{Deimos} = 23,500\text{km}$. $T_{Deimos} = 30.3$ 時間, $d=15\text{km}$,

これらの衛星は小さく歪んでおり、回転周期と自転周期は一致している。これらの衛星は、各センターの惑星の近くに位置しているため、衛星の周囲の宇宙塵が中心惑星から大きな重力ポテンシャルの環境にあり、対応する大きな運動エネルギーにより仮に物質が集ったとしてもそれが自ら分解するので、大きく成長することができません。

土星にリングが見られますが、万有引力には物体を引き裂くような力はありません。土星のリングが重力の力で分解したのであれば長期にわたり同じ軌道を周回しません。リングができるのは周回する彗星のような物質成分を持つ小惑星が惑星に近づいて惑星の重力ポテンシャルエネルギーが増加すると運動エネルギーも増加した状態になりますので宇宙塵などの微粒子の衝突でも部分的に崩壊します。その破片の公転軌道が変わらないのは同じ重心系では質量の大きさには関係しないというケプラーの第三法則により説明されます。天体が公転している状態は平衡状態にあります。

4.3 木星のガリレオ衛星

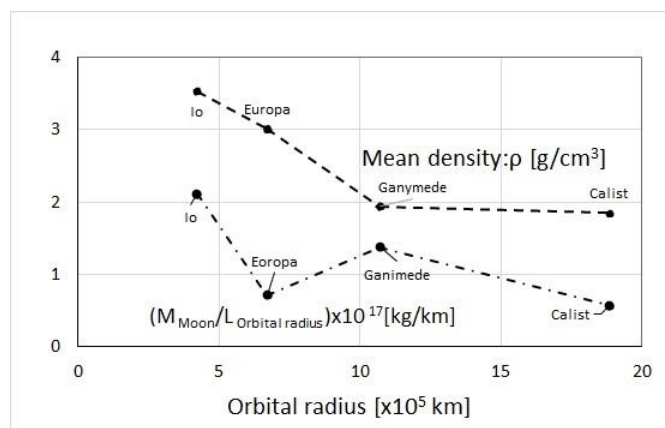


図.9 衛星の密度とそれぞれの衛星が集めた重力ポテンシャルの値($\Phi_{\text{satellite}}$)

ガリレオガリレオ衛星は岩石惑星の形成の初期状態を推測するのに役に立ちます。ガス惑星ほど大きく成長していません。そして中央の天体は核融合を始めていません。ガリレオ衛星の密度は、木星の位置に近いほど高くなっています。木星の近くの高い運動エネルギー状態にあるイオで塵を付着させたのは硫黄(S)およびナトリウム(Na)です。図 9 にガリレオ衛星の密度 ρ と衛星が集めた重力ポテンシャルの値 $\Phi_{\text{satellite}}$ (3.1 節の 4 式)を示します。重力エネルギーの半分が放出されるエネルギーになります。

半径(r)、質量(m)の衛星が持つ重力エネルギー($E_{\text{gravitation}}$)が(9)式で表されます。

$$E_{\text{gravitation}} = \{(3/5)G \cdot m^2\}/r \quad (9)$$

衛星の比熱を $0.8 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$ と仮定して、それぞれの衛星の平均の温度上昇に換算すると、 $\Delta T_{\text{Io}} = +1,230\text{K}$, $\Delta T_{\text{Europa}} = +750\text{K}$, $\Delta T_{\text{Ganymede}} = +1,410\text{K}$, $\Delta T_{\text{Callisto}} = +1,120\text{K}$ となります。

[イオ] ($\rho_{\text{Io}} = 3.528$, $L_{\text{Io}} = 421,600\text{km}$)は木星に最も近く、木星半径の約 6 倍の距離にあります。イオの表面温度は平均 130K です。イオの地殻の下にはマグマがあり、火山活動が活発で硫黄(S)やナトリウム(Na)を噴出しています。イオの内部構造には中心に比較的大きな鉄の核、溶けたケイ酸の層、その上に薄いケイ酸塩の地殻であり、金星と同様な成分の構成になっています。イオの大気は 90%が SO_2 です。

[エウロパ] ($\rho_{\text{Europa}} = 3.013$, $L_{\text{Europa}} = 670,900\text{km}$)はイオとガニメデの間にあり、エウロパの公転周期はイオの 2 倍であり、ガニメデの 1/2 である。エウロパはイオとの軌道共鳴時には木星の方向の引力を受け、ガニメデと軌道共鳴時には木星と反対方向の引力を受けます。そこで、エウロパはイオやガニメデの引力により揺すられて加熱され内部の氷が融けて液体の水となっています。エウロパの表面は氷でおおわれ、大気は希薄です。

[ガニメデ] ($\rho_{\text{Ganymede}} = 1.936$, $L_{\text{Ganymede}} = 1070,000\text{km}$)は太陽系に存在する衛星の中では最も大きな衛星で、水星よりも大きいです。内部は硬い氷の地殻、軟弱な氷の層、岩石のマントル、金属質の核となっていると考えられている。ガニメデの大気は薄く 100%が酸素(O_2)となっています。この酸素は上空で脱水素した H_2O によってもたらされました。

[カリスト] ($\rho_{\text{Callisto}} = 1.851$, $L_{\text{Callisto}} = 1880,000\text{km}$)はガリレオ衛星の中で木星から最も離れています。表面を氷が覆っていますが 内部は未分化です。地殻は氷が多く中心部へ向かい岩が多くなっています。なお、カリストの表面温度は 120K 以下で、その大気は 100% CO_2 です。2.2 節で述べたように固体状態の CO_2 は金属の微粉末と結合します。

4.4 水星および金星

4.4.1 水星

太陽に直面した水星の地表の温度が 440℃ まで上昇して、ナトリウムの蒸気を放出しますが、夜間には-180℃まで下がります。水星ではナトリウムの雲が現れ、瞬く間に消えることが観測されています。この現象には毎秒 100 万トンもの物質が太陽から放射されている太陽風が関与していると考えられます。太陽風の回転成分は秒速 2km であり、1 時間で水星を半周します。このような太陽風が吹いている状態で水星が誕生することは困難です。今日の水星は核融合反応で放出された太陽風で削られており、太陽が核融合を始める前に成長していました。水星は地球の 0.055 倍程度の質量しかありません。これは太陽に近い環境によると考えられます。即ち、水星の周辺のように太陽の近くでは、物質はその大きな重力ポテンシャルに平衡する大きな運動エネルギーを持っています。そのために、氷やドライアイスなどの固体は分子に分解してしまいます。水星ではナトリウムのような金属や低融点の岩石が接着材の役割を果たしており、中心部には比較的大きな鉄のコアを持ち薄い岩石のマントルに覆われています。水星に磁場があるのは、硫黄と鉄が混じり比較的低い温度で液体状態が存在するのが理由と考えられています。水星の公転周期は 88 日であり、水星の自転周期は 59 日です。水星を公転する星間物質を取り込むことによって水星の自転は加速されて水星の自転の周期が短くなりました。

4.4.2 金星

金星は地球より質量が若干少ないが、大気圧は地球の 90 倍もあります。この金星の大気には厚い硫酸(H_2SO_4)の厚い雲がありその 96.5%が CO_2 です。そこで、原始金星は硫黄; $\text{S}(\text{solid state})$ やドライアイス; $\text{CO}_2(\text{solid state})$ に宇宙塵が付着して成長したと考えます。

現在の金星の公転軌道は円形に近く、自転は金星だけが公転と逆方向に非常にゆっくり自転しています。惑星が成長する際には公転と自転が同じ方向になるのが普通です。金星の回転が逆方向になったのは次のように説明できます。

太陽風の速度は 2km/sec の回転を伴い 350~700 km/sec で磁気圏のない金星に衝突しています。金星の上空には約 45km から 70km にわたってマイクロサイズの粒子半径の硫酸エアゾルの厚い雲の層があります。SO₂ は水を吸収して、水に溶けます。そのため、硫酸エアロゾルは水に溶解した状態として安定し、水素イオン(H⁺) と硫酸イオン (S₂O₄⁻) で構成しています。3.4 節でのべましたが、太陽風がその大気を歯車がかみ合うように回転させて、秒速 100m の周回速度の“スーパー・ローテーション”を起こしています。

マイクロサイズの硫酸の粒子による雲で太陽光の大部分が反射され、日射の残りの 2%程度が地面に到達しています。太陽光と太陽風で加熱されて起こる大気の対流で硫酸エアロゾルの大気は宇宙に飛散せずに金星を周回しています。それが金星の大気の温度が高い理由です。地上 31km 以下ではその雲を構成する粒子は消えて、地面の秒速 2m の金星の自転速度まで気体分子によって減速されます。金星の地面の温度は 464℃であり、一様です。地殻から脱気した H₂O は蒸発して上空の硫酸の雲で滞留して、残りはその上層から宇宙に放出されました。

4.5 ハビタブル・プラネットはどのように形成されたのか？

液体の水は宇宙空間には存在しません。液体の水の中で水の分子を繋いでいる水素原子は激しく入れ替わるので、液体の水は宇宙空間では直ぐにバラバラになります。宇宙空間でも氷であれば存在し、塊を構成します。

太陽系では太陽から離れた場所に置かれた惑星においては氷が宇宙塵をつなぎとめる役割を果たします。ところが、重力の強い場所ではナトリウムや硫黄などの物質が宇宙塵をつなぎとめる役割を果たします。4.3 節で述べた様に木星の衛星のイオでは硫黄やナトリウムを噴出しています。そして、エウロパ、ガニメデ、カリストには氷が地表を覆い、内部に氷や液体の水が存在しています。水星は Na が融けて宇宙塵を付着し、金星の大気は CO₂ や SO₂ が大気となっております。そして、太陽系では地球には豊富な水があり、火星には液体の水があった痕跡が残されています。

形成初期の地球と火星はエウロパ、ガニメデのように氷を介して誕生したと考えられます。3.1 節の図 6. に示すように惑星の集めた重力ポテンシャルが火星と地球は異常に少なくなっています。原始火星や原始地球が水素を集めたガス惑星になっていたのであれば、太陽が核融合によって発生した衝撃波によってそのガスは失われます。続いて太陽のコアの破片の隕石が多量に落下しますので、地球型惑星の揮発物質は脱ガスします。

凍結線の内側にある地球と火星では氷が解凍し液体の水になります。地球の海の水の総量は 3.3 節で述べたように主にコールドトラップによって維持されました。火星には現在では液体の水は地表には存在しません。火星に水が減る理由は火星の質量が小さいことに因ります。火星のコアの冷却が早かったので地磁気が早く弱くなってしまい、水素イオンを上空で保持する機能が弱くなり、宇宙に放出されました。

ここで、現在の火星の重力エネルギーの放出量を計算して、火星の内部温度を推定します。火星の重力のエネルギー(W_{Mars})は密度一定として(11)式と同様な式で求められます。火星の質量： M_{Mars}=6.42x10²³ kg,火星の半径： R_{Mars}=3,397 km とすると W_{Mars}=4.86x10³⁰J となります。この W の半分の値を放出される熱エネルギーとして、比熱(c)を砂の値(c=0.8 [J/(g・K)])を用いて温度上昇(ΔT)に換算すると(12)式になります。

$$\Delta T_{\text{Mars}} \doteq 4,730 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

従って、過っては火星も内部ではかなり高温になり金属が溶融することができました。

6 地球及び火星

4.6.1 原始の地球と今日の地球の形成

地球の海は如何にして誕生したのでしょうか。原始地球は太陽で核融合が始まる前に多量の氷を取り込んで成長したと想定します。太陽で核融合が始まると、最初に衝撃波が地球を襲い、原始地球を覆っていたガスは吹き飛ばされます。続いて爆発した太陽のコアの破片が固体のコアがむき出しになった地球を襲います。氷を内部に持つ地球は、カタストロフィックな脱ガスが起ります。即ち、含まれていた氷が融け、液体となった水が蒸発します。しかし、地球では液体の水が蒸発しても、上空で凝結して雨となって降り注ぎ、海が形成されました。

地球の上空では紫外線により H_2O は分解されます。しかし、地球には地磁気があつて、太陽風の酸素イオン(H^+)は地磁気の磁束に巻き付いて分解した酸素と反応して水に戻る所以地球の水の量は保たれます。また、北極や南極では酸素イオンとオゾンが結合して極域成層圏雲ができることから”オゾンホール”ができると説明します。

地球軌道近傍(太陽から約 $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ 離れた地点)では太陽風に含まれる陽子 (H^+) の数は $1 \sim 10 \text{ 個/cm}^3$ で、 H^+ が 1 cm^2 の面積を 1 秒間に通り抜ける数は 10^8 個もあります。平均 450 km/sec の太陽風の H^+ が、脱ガスした CO_2 , N_2 と衝突するので、 $-\text{NH}_2$, $-\text{OOH}$, $-\text{C}_n\text{H}_{2n-1}$ 等が生成されて生体分子の構成要素が生成された可能性があります。

4.6.2 原始の火星と今日の火星の形成

前節で述べたように、原始火星は太陽が核融合を始める直前には水素を集めた巨大ガス惑星になったと想定します。巨大ガス状態の原始火星は太陽の核融合が始まると激変します。太陽のコアが核融合反応によって爆発して、衝撃波によって水素やヘリウムのガスが掃きとられます。質量が失われると引力が弱くなるので、質量を失うサイクルに陥ります。ガス惑星のコアがむき出しになった火星に次々とコアの破片が衝突します。すると、コアの内部に閉じ込められていた水素が放出されます。コアに含まれた多量の水素を放出したので火星の質量が小さくなりました。大規模な地殻変動が起りました。

現在の火星の表面温度は $-125 \sim +25^{\circ}\text{C}$ です。火星に過去に液体の水が存在した痕跡がありますが、現在ではありません。火星で水がなくなったのは隕石の衝突が主たる原因ではありません。火星の質量が少ないことが原因です。蒸発した水を引き留める力が弱く、また、コアが冷えるのが早く地磁気を失ったことによります。

火星のコアには水素が含まれていた所以火星の密度は小さい ($\rho_{\text{Mars}}=3.39$)。NASA の探査機「マーズ・オデッセイ」が行ったガンマ線スペクトロメータから得られた観測で火星の地中には多量の水素が含まれていることが確かめられています。現在の火星の大気の成分は $\text{CO}_2=95.2\%$, $\text{N}_2=2.7\%$, $\text{Ar}=1.6\%$, $\text{O}_2=0.13\%$, $\text{CO}=0.07\%$, $\text{H}_2\text{O}=0.03\%$ です。

5 太陽の誕生

5.1 木星、土星、天王星、海王星

惑星が大きくなり、水素分子を集めることができると、惑星は急速に成長します。木星、土星、天王星、及び海王星は水素を主成分とした大気を持っています。また、液体水素の層や氷を含むコアを持っています。4個の巨大ガス惑星にはリングがあります。宇宙塵との摩擦で周回する衛星がエネルギーを失うときにその衛星はエネルギーの低い軌道に移ります。

その際に平衡状態の法則（ビリアル定理：virial theorem）により、重力エネルギーの低下の半分のエネルギーが運動エネルギーの増加になります。低下した重力エネルギーに対応して運動エネルギーが増加することで彗星のような衛星が惑星に近づくに従い徐々に崩壊してリングが形成されます。彗星のような衛星でも重力の力で分解するのは困難です。

太陽系の外惑星の木星と土星は大きな惑星になっていたのに、太陽が核融合を始めても1次大気を失なわれませんでした。逆に、大きなガス惑星は太陽の核融合で放出された水素を取り込みこともできました。天王星と海王星は太陽から遠く離れているので、太陽の核融合で放出された水素を取り込むような影響はあまり受けませんでした。

核融合を始める前の太陽の構造は木星のような構造であると考えられています。木星には強い磁場があります。しかし、氷の層も水の層もありません。木星は金属水素の層が厚いので、低エネルギー状態の金属状態の水素が更に低エネルギーになります。液体の中で水素原子は動き回ることができます。そこで、金属水素の層に接した H_2O の水素は金属水素層の一部として取り込まれます。そこで、脱水素された H_2O の自由酸素(O)は金属と化合します。更に、水素イオン(H^+)はコアの内に侵入して金属と水素の化合物も作ります。太陽が核融合を始める前の内部構造は10図に示す木星の構造と同様であったと推定されます。

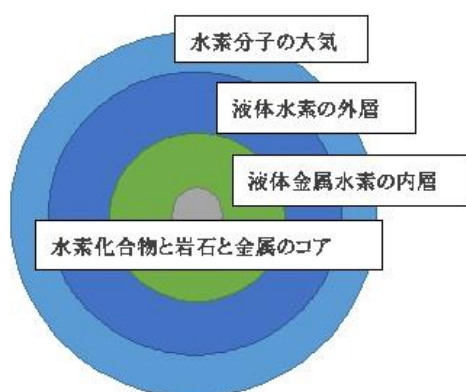


図 10. 太陽が核融合を始める前の巨大ガス惑星の構造

5.2 太陽の核融合反応

5.2 太陽の核融合反応

太陽系形成の標準モデルでは、核融合反応を始める前の原始太陽が T タウリ星の状態を経て形成されたとしています[4]。T タウリ星の状態ではイオン群が高速で公転しているため、その円運動の中心部に垂直方向の磁場が発生します。荷電粒子がその磁力線に巻きついて外に放射されることにより膨張・収縮が繰り返されます。この現象は水素イオンで構成される天体で発生します。他方、太陽が宇宙塵を集めてコアを形成した後で、水素ガスを集めるようになったとすると T タウリ星の状態において発生する大規模なイオンの回転運動はありません。

コアを持つ超巨大ガス惑星においても水素の層があります。原始太陽ではコアがあって、そのコアは核融合しない元素で構成されています。しかし、水素が多量に集まればコアがあっても核融合が起ります。コアに水素の核融合によって膨大なエネルギーを与えられると、コアは爆発して破片が放射状に太陽から放出されます。

核融合による爆発で放出された物質の多くは重力によって太陽に引き戻されます。エッジワース-カイパーベルトまで到達する物質もあります。その移動中の破片が惑星の近くを通れば惑

星に落下します。核融合爆発による放出と重力による集積が同時に作用するので水素の核融合反応は休止せず続けられることもあります。爆発による膨張で核融合反応が休止する場合でも、太陽の重力で再び水素が集積されるので、再び核融合反応を引き起こすことができます。

5.3 太陽のコアの爆発で誕生した隕石

太陽のコアの物質は核融合による放射能にさらされて宇宙空間に放出されます。その原始太陽のコアの破片が隕石になりました。隕石に含まれる放射性元素がいずれも 46 億年前に誕生したことを示している事実が原始太陽には宇宙塵から形成されたコアがあつて、核融合反応による爆発によって放出されたことを示しています。

原始太陽から放出された物質が太陽に引き戻される途中で一部が惑星に捉えられました。惑星の表面に多くのクレータがあります。その大部分は 46 億年前の最初の太陽の核融合爆発で放出された破片に由来すると推測されます。

木星の外衛星には不規則な形をした、直径数キロメートルの惑星が多く存在し、その多くは木星の自転方向と逆の方向に公転しています。これらの逆行する衛星は木星の自転と反対方向から飛来して捉えられたと考えられます。

6 小惑星帯の形成

6.1 小惑星帯は如何にして形成されたか？

現在の火星と木星の間に多数の隕石や幾つもの小惑星を持つ小惑星帯があります。小惑星帯の星間物質の全質量は 2.1×10^{21} kg と見積られており、地球の月の(1/35)です。現在はこの領域が惑星の空白領域になっています。

核融合爆発で放出された多数の隕石や幾つもの小惑星が都合よく小惑星帯に停留する仕組みがありません。そこで、小惑星帯の中央のセレス(Ceres)位置において惑星(A)が水素ガスを集め始めて木星より巨大なガス惑星になり、一回だけの重水素の核融合爆発をして、粉々になったコアの破片が隕石や小惑星をなつたと考えました。

現在の木星には内部に金属水素の層があり、強い磁場があります。その磁場に太陽風のイオンが捉えられて磁極の周辺で上層の大気分子と衝突して速度を失い、木星内に取り込まれます。惑星(A)も木星のように内部に熱い金属水素の層があり、強い磁場を持ち、広い範囲の星間物質を捉えて大きくなり、太陽が核融合を始めた時期に水太陽のコアの破片やイオンを取り込んだとします。

小惑星帯のセレスの位置(4.28×10^{11} m)に木星の 13 倍の質量($m_{(X)} = 2.5 \times 10^{28}$ kg)の惑星(A)が存在したと仮定して、惑星(A)の引力が太陽に向かって太陽の引力に等しくなる惑星(A)からの距離を求めると、 $L_{\text{Gravitational sphere on A}}: 0.71 \times 10^{11}$ m となります。この距離は木星までの距離の半分以下です。小惑星帯のセレスの位置は木星より星間物質の密度が高いので、小惑星帯の位置に過去に大きな惑星が成長した可能性があるという説と矛盾しません。

6.2 第2の太陽に成り損ねた惑星の爆発

木星の質量の 13 倍を超える天体は一時的に重水素の核融合を行うことができるという報告があります[5]。木星より星間物質の水素密度が高い領域で巨大になった惑星(A)はその成長を加速します。水素の層の内部では物質分化により重心に近い位置は重水素の比率が高くなります。そこで、高温高圧になった重水素が核融合を起こす可能性があります。惑星(A)で重水素の核融合が起ると連鎖反応によりコアが爆発して、その破片の一部が小惑星帯の多数の隕石や幾つもの小惑星となります。

この核融合爆発で惑星(A)の水素ガスが飛散します。惑星(A)が質量の大部分の水素ガスを失うと、太陽風で流されて元には戻りません。惑星(A)の核融合による爆発は一回だけで終わります。惑星(A)のコアの破片は太陽や木星に捉えられます。その爆発した惑星(A)の破片の一部は他の惑星にも落下しました。それが 38 億年前頃に惑星が受けた後期隕石重爆撃の原因であると説明できます。核融合爆発で放出された惑星(A)のコアの破片が相互に衝突してその一部が現在の小惑星帯に残りました。

6.3 小惑星帯における巨大ガス惑星 (A) の存在の可能性

小惑星帯において重水素核融合を起こしたとする惑星(A) を次のように考えました。

太陽が核融合を開始する以前には凍結線は存在しないので、太陽が核融合を始める直前(4.6 億年前)には原始地球も原始火星も大きくなっていました。原始地球の質量は天王星と同じであったとします。火星の質量は土星と同じであったとします。ただし、コア成分については原始地球のコアは土星のコアと同じようであり、原始火星のコアは H_2O が金属水素によって分解されて木星と同じようなコアであったとします。ここで、太陽が核融合を始める直前には小惑星帯のセレスの位置には木星の 5 倍の質量を持った惑星(A)があったとします。

46 億年前に太陽が核融合を始めると発生した太陽風が原始火星及び原始地球を襲い、輻射熱によって加熱されます。そこで質量の大部分を占めていた水素が失われます。ところが惑星(A)は木星よりはるかに質量が大きく、かつ強い磁場を持っていたので、太陽風のイオンを取り込み、原始火星や原始地球からも解放された大量の水素も取り込みました。こうして、惑星(A)は広い範囲の星間物質を捉えて更に大きくなり続けます。そして、重水素核融合を引き起こす条件である木星の 13 倍の質量に 38 億年前に達したとしました。

図 11. 小惑星帯で重水素核融合を起したと想定した惑星(A)と原始火星及び原始地球及び現在の惑星を示します。ここでは、仮想原始惑星の公転軌道の距離は変わらず、原始火星は土星と同じ質量、原始地球は天王星と同じ質量、惑星(A)がセレスの位置にあったとしました。

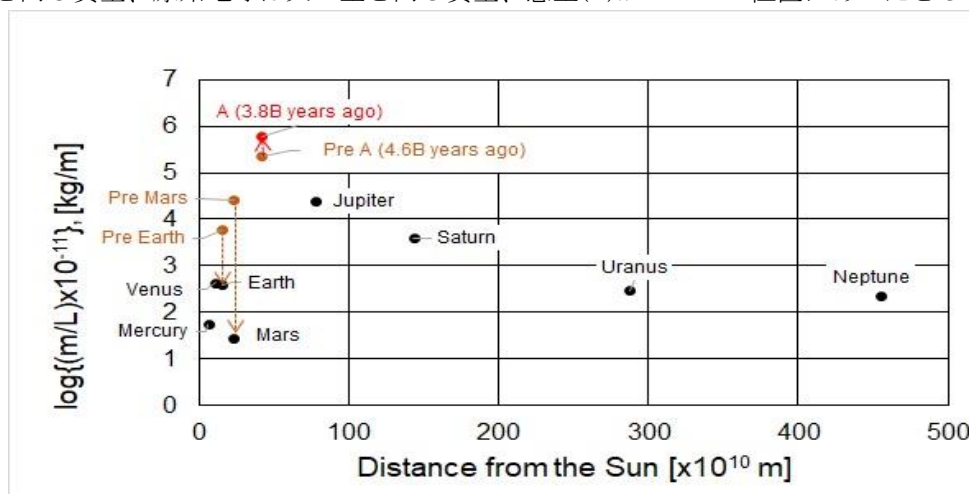


図 11. 小惑星帯で重水素核融合を起したとした惑星(A) と原始ガス惑星及び現在の惑星

あとがき

惑星の運動はニュートン力学によって記述される長距離力で記述されます。ところが惑星は分子間結合や化学結合といった近距離力で構成されています。宇宙塵が付着するのは万有引力の

力ではなく、クーロン力です。太陽系は宇宙塵が接触して塊になることから始まったとすると、宇宙塵が結合する物質の科学が必要です。

20 世紀後半から惑星探査が行われた結果、惑星に関する多くの写真や物理データが得られた。そこで物性論に基づいた比較惑星学としてまとめるデータが得られました。これまで隕石の衝突など、天体の運動で説明することが試みられてきました。しかるに、Hayashi 等の標準モデルの論文^[1]の冒頭で、(1)原始太陽系円盤の形成、(2) 原始太陽系円盤のガス成分消失、(3) 隕石の起源を未解決の課題としていますその指摘された課題はまだ完全には解決されてはいません。著者は、このウェブサイトが惑星の進歩に貢献することを期待しています。

Website 制作 唐澤信司

[参考文献]

- [1] マーティン・リース編、「宇宙大図鑑」ネコ・パブリッシング, 2014. [Original: Martin Rees ed., “Universe -A long tour of the universe-”, Dorling Kindersley Led. 2012].
- [2] 国立天文台編、「理科年表」丸善出版.平成 30 年第 91 冊、2017.
- [3] David C. Black et. al. ed., “Protostars & Planets II” The Univ. of Arizona Pres.1985.
- [4] C. Hayashi, et.al, “Formation of the solar system”, “Protostars & Planets II” The Univ. of Arizona Pres. pp.1100-1153, 1985.
- [5] Chabrier, G., Baraffe, I., Low-mass stars and substellar objects, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 38 (2000) 337-377.
- [6] 森山茂, "大気の歴史-原始大気から惑星大気へ-", 東京堂出版, 1981.