

Sequende of Events in the Early
History of the Solar System

Su-Shu Huang

Godara Space Flight Center, NASA
from Publ, Astron, Soc, Pacific 77 ('65) 42

太陽系の起源の問題は、カント、ラプラスの頃よりの問題で、今までにも色々な理論があり、これから色々なものが出るだろう。私はこれらを、この短い論文の中で総括するつもりはない。唯最近の理論と計算をつけ加えて、私自身の見解を明らかにしたい。

Reviw of Recent Relavant Thecries

最近の分析によつて ② Greensteiv, Hoyle は Li, Be, B は原子太陽の magnetic activity の盛んな時に Solar particle がまわりの planetesimal をたたいて出来たとして、その直径を 12m とした。③で、林、星、杉本は、原始太陽は輻射平衡でなく、対流平衡にあり、前主系列星の
が高かつた事を予言している。④で Fanlkner, Griffiths, Hoyle は Fowler や 林の説の Consistency に疑問をはさんで、次の点を述べている。Fowler 説では nebula の温度は低くなくてはならず、林説では luminosity は高いから、nebula の温度は高くなくてはならない。照射の時には nebula はすでに disk になつており、disk の不透明度はその低温を保証するためには高くなくてはならない。⑤ (Solar nebula の opacity は ⑥に論じられている) 方磁力線がもし disk の中だけでないとしたら、粒子は disk の中を通らぬから、結局極めてわずかの nebula にしか出会わない。この矛盾は定量的な扱いでもつとはつきりさせられねばならない。

Proveda は最近 flare star の理論を出した。⑦彼は二つの理論は矛盾しないと言う。flare star はその明るさを非常に速やかに非週期的に変える。⑧これらはいつもおそいスペクトル型の委星である。dMe star BD+20°2465 の flare の様子を説明するために、Gordon と Kron は太陽表面と同じ様な flare activity を提案した。⑨それ以来他の観測者達、例えば、

G.R. and E.M. Barbidze, L.Biermann, R.Liist 等もこの見解をとつた。(⑦を見よ) もし Solar flare が magnetic activity の結果で、それが Convective motion と differential rotation によつていゝとすれば、Poved は星の進化の過程で Convection が主として働いている。時には flare は極めて活ばつである筈だといふ。林等の計算③から彼は対流の状態が主となつてゐる星の H-R 図を得て、flare-star は皆それらの側になければならないとしている。

次に Schatzman の理論があるがこれは magnetic activity と mass loos による星の軸回転に対するブレーキングである。彼は又 magnetic activity は原始星の対流に源をもつもので、主系列星が F5 で軸回転を消失するのはこの効果によるといふ。太陽系の場合、惑星に角運動量の大部分が分布している様な現在の状態が原状態を代表しているとは信じ難い。Schatzman 説はこの意味で、原始星の回転停止の有効なメカニズムを提供している。林説の high luminosity と solar nebula の低温とを両立させるために、我々は磁線が赤道平面にとじこめられてなかつたといふ事を提案した。従つて Hyle の magnetic braking の説は除外される。けれども Schatzman の説はこれにおいて影響されない。

この様に観測と一致する結果を予言し、原始太陽の magnetic activity の激しかつた事を要求する三つの説 (Fowler, Poveda, Schatzman) と、HR 図上での新星を十分に説明し、magnetic activity の鍵を提供する一つの説 (林説) がある。これを四説はすべて、観測された現象を予言するばかりでなく、強固な理論的基盤をもつてゐる。この様に原始星に magnetic activity の現われる事は極めて確からしい事実である。

最後に付記するが、J.F. Iovring は 1957 年石質隕石に磁気を発見し、隕石が地球の様な、磁場を有する惑星中で生成されたと提案した。然し、Very は “大きな惑星を破壊する様な明らかな手段は何もないし、又現在の太陽系の中にはその様なものがかつて存在した事を示唆する痕跡は何もない。更に大きな惑星の大抵の物質は決して隕石に見られる様なもろい構造ではない” と言つてゐる。⑩そして彼は隕石に見られる磁気は、多分強い磁場の存在したような初期の時代に印加されたものだろうと考えてゐる。我々が今強調してゐる初期

の magnetic activity は正しく very のこの見解と一致している。

これに関連して、現在主系列星に向つて進化しつつある T Tauri star や flare star に magnetic activity があるか否かを見なければならない。Babcock⁽⁴⁾による magnetic star の表中にはこの様なものは現われていない。然しながら注意しなければならないのは、星の磁場が発見され得るのは dipole field の様に systematic になつている場合のみである。上述の理論で示唆される様に磁力線が random であれば、Polarization の測定によつて発見する事はむづかしい。

林等は動収縮から原始太陽の対流が止むまでの間を 10^6 年以下、水素核反応開始までを 25×10^6 年と与えた。もし進化の道すじにおいて Convective model が radiative model にぶつかる所で原子太陽の表面活動が現在の太陽のレベルまで下がる、とする Poveda の説に従うとすれば、Fowler 等の言う強い magnetic activity の時期は恐らく最初の 8×10^6 年の中に入るだろう。これは太陽の動収縮の年代として一般に受け入れられている年代である。もし強い magnetic activity が太陽が完全に対流状態にある時のみに現われるとすれば、平均直径 12m の Planetesimal は最初の 10^6 年の内に、太陽が静的平衡に達した後で出現しなければならない。laminarity も高く対流も完全な非常に初期の方が magnetic activity が後の年代に比して盛んであつたという事は考え得る。更に最初の数 $\times 10^6$ 以内に Planetesimal が造られたと十分期待して良いのではなからうか。

Sequence of Events Constructed According to the Previous Theories

(四つの説による太陽系生成の過程)

太陽について我々は次の二つの過程を考える。

1. Collapsing stage
2. hydrostatic equilibrium

次に惑星系については

1. spherical distribution
2. Disk distribution

の二つを考える事が出来るだろう。

the Early History of the Solar System

太陽の才一期については Ganstad ⑤は 5×10^5 y, と与えた。これは原始太陽雲の角運動量を見捨てた値であるが、現在の太陽系の角運動量から見ると、collapse の時の角運動量の time scale に対する影響は小さいと思われる。従つて $1.0 \sim 0.5 \times 10^6$ y と取る事にする。問題は惑星系才一期から才二期への移行が太陽が才二期に入つた後に起つたのかもしれないという事である。

物質が原始太陽に落下するにつれて、揮発性物質は物質を直接捕獲蓄積し、原子太陽よりはるか遠く太陽に対して球形に分布している原始惑星雲とみなされるものの中で小さな局所的な凝集体を形成する。我々はこれを低温で落下する物質の最外層と見做す事にする。

Donn 及び Sears の最近の研究によると⑥惑星雲中で最初に形成される粒子はフィラメント状、或は薄片状のものだろうと考えられ、これを猫のひげ (whisker) と呼んだ。whisker が集積すると、それは固くつまつたものでなく、ゆるく結集した凝集体をつくる。この様に惑星雲中の凝集体はベッドの綿くずもしくは秋空に平原を風にふかれてころげまわる雑草のたばに似た構造をもつのではないかと思われる。

Fowler 等の見積りでは planetesimal の平均質量は 10^{10} gm である。もし惑星雲の密度を知る事が出来れば、我々は簡単に直接捕獲による凝集の成長率を得る事が出来、⑩⑪ Planetesimal の形成される時間を知る事が出来る。残念ながら惑星雲密度の推定値は一定していない。色々な理由から、天文学者の或る者は 10^{-9} gm/cm³ と仮定すれば径 1 cm のものは $1/3 \sim 30$ 年で形成される。⑫密度が他の値であればこの成長率は密度に直接比例するので簡単に得ることができる。

前記の成長率は凝集体が固くつまつていと仮定した場合である。“Whisker” より作られたものが多孔質のものであれば半径の成長率はその実質の密度と多孔質物質の平均密度の比だけ速くなる。よつて solar nebula が disk につぶれる前の density が 10^{-9} g/cm³ より数 order 小さかつたとしても mass の凝集する時間は Fowler 等の planetesimals と同程度の数 10^6 年と期待してよいと思われる。

太陽が main Sequence に達する前の進化の才 2 段階において magnetic activity が現われた時、太陽から Solar nebula は必らず地球分布から

円盤状分布につぶれる。この Collapse が起る時が Solar nebula のオ一段階とオ2段階を画することになる。

従つて、太陽と Solar nebula のオ一段階からオ2段階への移行が同時に起るとしてゐるのではない。太陽が流体的な motion から強い magnetic field と発達させ、ang. momentum が外へもちだされるにいたる時間がその差になるのである。

我々は T. Tauri Stars を研究することにより disk が出来るまでの時間を決めることが出来るであろう。主に Herbig ⑧ Haro ⑧等の研究より我々は、T. Tauri Stars はまだ main sequence に達していない星であろうと信じてゐる。言い換えれば、これらの星は我々興味の対象である原始太陽とほぼ同じ進化の状態にあると言える。Herbig ⑨によれば T-Tauri Star は回転していることが観測されてほぼ確認されている。このことはこれらの回転が完全にはブレーキをかけられていないことを示している。よつて前の議論から Solar nebula が ang momentum を得ることによつてつぶれる時は原始太陽が丁度 T-Tauri stage を通過する時か又はその後であろう。

nebula がつぶれる時に局所的に凝集したものは一時的にあたためられたぶんとけ出すか、あるいは速い凝集のために多孔質の物体のマトリックスをうめてしまうかもしれない。ともかく局所的な凝集はこれらの物体の多孔質という性質を失なわしめ planetesimals になる。Fowler はこの様に回転する円盤に planetesimals が落ち着いた時には太陽からの高エネルギー粒子に照射されるとした。Solar nebula が球状から円盤状へつぶれるには、nebula が冥王星の外までないとするなら約100年を要する。故に我々はこれら planetesimals が照射を受けている時にはすでに回転円盤の中にいたとみている。

球状→円盤状への Collapse は最初内側から、そして ang momentum が外側へ移るにつれて外側に広がっていくものと思われる。その初期において、Solar nebula が球状でなくなるものは、magnetic braking による Schatzman の mechanism が働く前に始まるであろう。原始太陽が現在 planetary System がもつている全角運動量をもつていたとすると太陽の重力収縮の段階において回転の不安定が必然的に起る結果として原始太陽の赤道面に回転する ring が形成される。この回転の ring は nebula disk の前の状

態とみなすことが出来る。

ang momentum を非常に遠くまで運びだすのはむづかしいので Collapse は多分太陽の近傍、冥王星の軌道をこえない程度の所まではおこるであろう。この範囲にある局所的な凝集体は全てこの disk に落ちこまなければならない。もしも最初の Collapse で生きのこつた凝集体があつたとしても、そのうちに disk を通過し速度の垂直成分を失なわない disk のガスと dust の運動と同じ様に動かなければならなくなる。

Collapse に出会わなわつた球状分布をしている solar nebula に含まれる局所的凝集体は solar nebula が完全に消えてなくなるまで物質を直接捕獲してくつつけていくであろう。Fowler によれば disk 形成のころにおけるこの凝集体の平均の mass は $10^{10} g$ である。つぶれた領域より遠くにある凝集体の mass はこれより小さいであろう。なぜなら遠くの density は内側より小さいと期待されるからである。他方前に述べた様に球状分布の部分では物質の附着がなお続く。凝集体形成時の統計的ゆらぎによつて個々の凝集体の mass は非常に広い range にわたり、容易に Comets の mass の range に overlap する。

我々は Comets の mass について確かな情報がない。よく言われる値としては $10^5 \sim 10^{17} g$ であるがこれは両側にはるかに拡がっているものと思われる。ここに言われている様な値に制限する理由はみつからないようである。よつて Fowler の言っている planetesimals の mass は Comets の mass とそれほどかけはなれていないとは言えない。そこで我々は、これら外側の球状分布に残っている凝集体が物質をもつと附着させて今日の Comets の核になつたのであると主張したい。Comets の観測される軌道が random であるということが形成の時の球状分布を示している。よつて現在の説明からすれば solar system において Comets の核も planetesimals も昔においては同じ範中にはいるものであり、違いは、planetesimals においては、disk につぶれ density が高いなどの理由で planet になり、Comets の核においては、Solar system の外側における低温低密度によつて、そのまま変らずに（あるいは凍りついて）いる。太陽からはるかに離れたところで彗星が形成されるという事は前にもしばしば言われた事であるが (17) 我々は Fowler 等の言う planete-

simal と Comet nuclei との関係のみを強調しておきたい。

Collaps に出会わなかつた凝集体は今日 Comet の核について信じられている様な多孔質のままであろう。即ち Comets は月の表面と同様に我々が Solar System の起源の手がかりをさぐるのに重要な役割を演ずるであろう。

上記の考察より太陽系の初期においては comets はもつと沢あつたであろう。なぜなら、Comets の核となるべきものを含んだ空間の体積（即ちつぶれなかつた Solar nebula の体積）が大きかつたからである。大惑星からそれほどはなれていない所を運動していた Comet の核のほとんどは惑星の摂動を受け、あるいは太陽の近傍に来てそこで分解したか或いは太陽から遠方に行つて生き残つた。

もともと非常に遠くあつたものは変化を受けずにそのままである。この様にして Comets の貯蔵庫を、遠方の球状分布に求めることが出来る。今日みられる Comets はこの貯蔵庫より星の摂動によつて飛来する。このことは Opik J.H.Oort により前から Suggest されていた（この問題は近ごろ Whipple ②によりとり上げられた、彼は前の仕事において references を与えている）

最後に我々は Solar System の初期の状態の出来事の一般的な様相を述べたにすぎないことを注意しなければならない。定量的な記述は余りにも不確定な factor が多すぎるのでやめにした。またここに suggest したことから導びかれるところの太陽系の起源について結論を出すことも我々の意図するところではない。

References

- 1) R.Jastrow and A.G.W. Cameron, Origin of the Solar System (New York: Academic Press, 1963) .
- 2) W.A.Fowler, J.L. Greenstein, and F.Hoyle, Geophys. J., 6 , 148 1962.
- 3) C.Hayashi, R.Hoshi, and D.Sagimoto, Prog. Theor. Phys.

the Early History of the Solar System

Supperments No.22, 1962.

- 4) F.Faulkner, K.Griffiths, and F.Hoyle, M.N.R.A.S., 126, 1, 1963.
- 5) S.-S.Huang, Sky and Tel, 28, 13, 1964.
- 6) B.Donn and G.W.Sears, Science, 140, 1208, 1963.
- 7) A.Poveda, Nature, 202, 1319, 1964.
- 8) G.Haro, in Non-Stable Stars, G.H.Herbig, ed. (Cambridge, England:University Press, 1957); P.26; G.Haro, in Proceedings of the Symposium on Stellar Evolution, J. Sahade, ed. (La Plata, Argentina La Plata Observatory, 1962) p 37.
- 9) K.C.Gordon and G.F.Kron, Pub. A.S.P., 61, 210, 1949.
- 10) E.Schatzmann, Ann. d' Ap., 25, 18, 1962.
- 11) O.Strave, Ap.J. 72, 1, 1930.
- 12) F.Hoyle, Quart, J.R.A.S. 1, 28, 1960.
- 13) H.C.Urey, in Space Science, P.P.Le Galley, ed, (New York : John Wiley and Sons, 1963', chap. 4.
- 14) H.W.Babcock, Ap.J. Supplments, 3, 141, 1958 (No.30).
- 15) J.E.Gaustad, Ap.J., 138, 1050, 1963.
- 16) S.Chandrasekhar, Rev, Modern. Phys., 18, 94, 1946.
- 17) G.P.Kuiper, in Astrophysics, J.A.Hynek ed, (New York: Mc-Graw -Hill, 1951) p.357.
- 18) G.H.Herbig, is Non-Stable Stars, G.H.Herbig ed, (Cambridge, England:University Press, 1957) p.3; G.H.Herbig, in Proceedings of the Symposiwm on Stellar Evolution, J.Sahade, ed, (La Plata, Argentina:La Plata Observatory, 1962) p.23 and p.45.
- 19) G.H.Herbig, J,R.A.S.,Canada, 46, 222, 1952; Ap.J., 125, 612, 1957.
- 20) F.L.Whipple. Ap. J. 111, 375, 1950.

21) F.L. Whipple, Proc. Nat. Acad. Sci., 51, 711, 1964.

22) S-S. Huang, Pub. A.S.P., 71, 421, 1959; Ap. J. in press.