

彗星の起源について

藪 下 信*

筆者は一年間ここケンブリッジ大学の理論天文学研究所で研究に従事する機会を与えられたので、ケンブリッジの天文学グループの簡単な紹介と同時に、最近の彗星研究の動向をも、紹介させて頂きたく思う。ホイール教授を中心とする天体物理学グループは最初、理論物理学および応用数学教室に所属しており、筆者が大学院生として研究に従事していたのはこの教室においてであった。その後、当理論天文学研究所が設置され、多くの若手研究者はこちらに移り、またテイラー、メステル、シアマ等が他大学に転出したため、応用数学教室の方には、天体物理学者はほとんどいなくなり、理論研究はこの研究所で主として行なわれるようになった。教授はホイール、リットルトンの2名であり、この他に graduate staff と呼ばれる研究員が 10 名近くいる。この他に海外から筆者のごとく、Visiting Fellow として研究に来るものと、夏期に Visitor として来るものがある。C.I.T. のファウラー教授や、La Jolla のパービッツ夫妻はほとんど毎夏来ているようである。研究トピックは宇宙論、高エネルギー、一般相対論的天体物理学、多体問題、星の進化等である。

さて、彗星の問題に帰えらう。惑星の起源、衛星の起源の問題は非常に難しい。困難を与える最大の原因は、形成後すでに 40 億年という長い年月が、経過しているからである。さらに存在する惑星の数が少ないため、説明を要する事実のどれだけが偶然に起因するものであり、どれだけが必然(あるいは、宇宙進化の必然の結果)によるかの判別がつきにくい。これに反して、彗星はその数が非常に多く、しかも、以下に簡単に説明するように、観測可能な対象として、惑星ほど長く存在し得ない。したがって、彗星の起源の問題はいくらか容易に解決され得るものと考えられる。

彗星は大別して長周期(周期 200 年以上)と短周期に大別されるが、短周期彗星は長周期彗星から、主として木星の重力により、捕獲されたものと考えられていて、この確率は非常に小さいので(百万分の一)、この過程はいまだに観測されていない。故に、長周期彗星の起源が問題となる。長周期彗星は、太陽系重心に関する結合エネルギーが非常に小さい。例えば半長軸が 10^3 天文

単位(以後 a.u. と略記する)の彗星の単位質量あたりの結合エネルギーは 5×10^{-4} (a.u.)⁻¹ である。他方、主惑星(主として木星で土星の影響は 1/6 である)は絶えず彗星のエネルギーに摂動を与えている。古くはシュトルムグレン(1935)によってこの摂動は計算された。摂動の大きさは彗星によって異なるが、結合エネルギーで 3.5×10^{-4} (a.u.)⁻¹ のオーダーである。正負のエネルギー変化が同様に起こり得る。このことは、彗星のエネルギーと同じ程度の摂動が惑星によって、与えられることになり、一部の彗星は太陽系から永久に失なわれることが考えられる。1889 I, 1897 I, 1898 VIII, 1899 I 等はすべて失なわれており、最近のプラディ(1970)の計算によっても、このことは確認される。

問題はそうすると、ある時期に彗星群が形成されたとして、どれ位の間太陽系にとどまり得るかである。この問題はファン・ウェルコム(1948)によって考えられ、リットルトンとオックスフォード大学の数理統計学者ハマスレイによってほとんど解決された。彗星の結合エネルギーは、それと同じ位の摂動を受けるので、惑星間に突入して来たときの周期と、出て行くときの周期は非常に異なっている。しかも、周期は惑星のそれよりもずっと長いので、個々の彗星の軌道を追跡したのでは、少しの誤差があっても、再突入した際の彗星の位置に大きな誤差が生ずる。しかも問題にしているのは個々の彗星ではなくて、彗星の集団である。そうすると、彗星の集団を考え、その個々のメンバーは、ある確率法則に従ったエネルギー摂動を、毎回惑星間に突入する度に受けるとして、問題を定式化できる。そして、正の結合エネルギーを得た彗星は太陽系から失なわれるので、彗星の数は絶えず減少していることになる。このためには、エネルギー摂動の確率分布と、その大きさを決めねばならない。ケンダール(1961)は過去のハレー彗星に関する計算からこれを求め、ケール(1961)は仮想的彗星の集団を考えて求めた。筆者も別の目的で計算を行ない、三者大體一致する結果を得た。これによると、五百万年で彗星の 90% は失なわれることになる。しかも、ヤコビー積分を用いてエネルギー摂動が知られている際の近日点距離の変化をも推定することができるが、近日点距離はほとんど変化を受けない。このことは、たとえ近日点距離が大きいため観測不可能な彗星が数多くあったとしても、惑星摂動によっては観測可能な近日点距離に彗星を

* Institute of Theoretical Astronomy, Cambridge University.

Shin Yabushita: On the Origins of Comets

持ってくるできないことを示している。したがって、何らかの機構で彗星が形成されるか、小さな近日点距離に持って来られるかしなければ彗星は太陽系から無くなってしまふであろう。筆者は、このリットルトンとハマスレイの論文 (M. N. 127, 257) を、最近の彗星について書かれた文献の中でも最も重要なものの一つと考えている。この力学的過程の他に、流星群を作ったり、太陽熱による気化のためにも彗星の数は減少する。

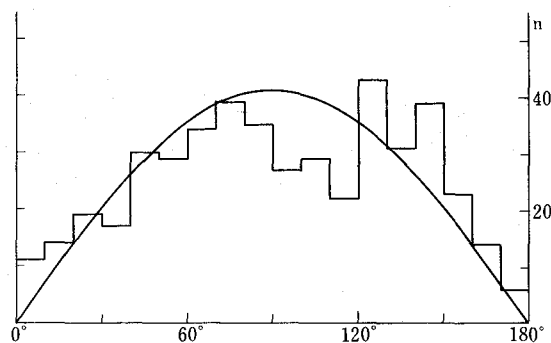
この困難をさけるために提唱されたのが、オールトの理論 (B.A.N. 11, 91) と、リットルトンの理論 (The Comets and Their Origin, 1953) である。これらの他にも理論は存在するが定量的議論を行なえるような形で、仮説が設定されているのは筆者の知る限りこの2つである。筆者は物理的観点からは議論するのを避け、力学的観点からこれらの理論に自己矛盾する点がないかどうかを議論してみたい。

オールトに依れば、太陽系を取り囲む彗星が 10^5 a.u. にまで存在し、通常これらは近日点距離が大きい観測されないが、太陽系近傍を時々通過する星の摂動に依り、近日点距離が変化を受け観測可能になる。この理論を議論する前にどの程度の近日点距離をもった彗星が主惑星によって、大きく摂動を受けるかを調べる必要がある。このため惑星によるエネルギー摂動の大きさを、近日点距離の関数として求めなければならぬ。このようにして得られた結果と、リットルトン—ハマスレイの計算を総合すると、 $q(=a(1-e^2))$ が 18 a.u. よりも大なる彗星群は40億年間、太陽系に所属し得ることがわかる。そうすると次に問題となるのは、星の摂動が q を 18 a.u. から、観測可能な領域すなわち $q < 2$ a.u. に持ってくるができるかである。これは星と彗星の間の最短距離が非常に短い遭遇 (10^4 a.u. 以下) によって可能であることがわかる。したがって、オールトの機構はかなり有望に思える。ただ問題になるのは、オールトの仮定する彗星群 (半長軸 10^5 a.u.) が果して 40 億年も存在し得るかということである。時々、太陽系近傍を通過する星は、平均的に、彗星にエネルギーを与え、彗星は太陽から逃げようとする。オールトは彼の計算で、星の平均空間密度を 0.02 pc^{-3} としているが、これは 0.1 の方がより正しいのではないか。筆者は、運動方程式を数値積分することにより、彗星群の挙動を調べたが、半長軸 10^4 a.u. のもので 2.5×10^9 年で太陽系から逃げ去って行く。この時間は 10^5 a.u. の彗星に対しては、さらに短いであろうことが考えられるから、オールトの理論は彗星群を如何にしてとどめておくかということで、困難な点を含んでいるように思える。最近のチェボタレフ (1965) の計算によれば銀河核の潮汐力によって、 10^5 a.u. を半長軸にもつ彗星群の一部は太陽系から逃げ去って行くこと

が示された。この機構はオールトの理論の困難さを助長することになる。

次にリットルトンの説について考えたい。彼の仮説によれば、彗星は最初半長軸が数百 a.u.、近日点距離が太陽半径の約2倍の軌道を持つ accretion 流として存在を始める。タイラー (1957) は天球上の遠日点がグループを構成するか否かを調べて、グループが存在することを示して、この機構の裏付けとした。天球上の遠日点の分布が惑星摂動によって大きく変化しなければ、この機構の裏付けとした。天球上の遠日点の分布が惑星摂動によって大きく変化しなければ、現在観測される分布は、彗星が形成された時の分布とみなして良い。筆者はこの問題を考察するために、惑星によって彗星角運動量がどの程度の摂動を受けるかを調べ、遠日点の移動を調べた。遠日点の位置は彗星の寿命中せいぜい 10° 位しか変化を受けない。故にタイラーの得たグループはもし本当であるなら、彗星形成時のそれと一致する。リットルトンの理論の最大の困難は近日点距離に関するものである。1~2 a.u. を近日点距離にもつ彗星は多いが、惑星摂動によっては、エネルギーに大変化を与えることなしに (この際彗星は太陽系から逃げるか、あるいは短周期彗星になる)、近日点距離はほとんど変化を受けない。このことはハレー彗星の過去数回の出現の際の q の値をみても分る。周期そのものはかなり変動するが q はほとんど一定である。したがって、リットルトンの彗星が 1~2 a.u. の近日点距離を得るためには、エネルギーが摂動を受け半長軸が 10^5 a.u. 位になり、星の摂動をそこで受けねばならない。このことは、この仮説がうまくいくためには二種の摂動を彗星は受ける必要があることを示し、この理論に対する信憑性を減少せしめる。

さて、彗星の天球上の遠日点の位置は惑星摂動によってほとんど影響を受けないことについてはすでに述べたが、それでは彗星軌道の傾斜角の分布から何か分らないだろうかという疑問が出てくる。第1図に観測された長周期彗星の傾斜角分布と、正弦カーブを示す。もし



第1図 長周期彗星の傾斜角分布

遠日点が天球上一様に分布しているならば、傾斜角は正弦カーブに従うはずであるが、第1図から見られるところでは、 $i=90^\circ$ の周辺では観測数が理論数より少なく、 $i=120^\circ$ 周辺ではこの逆の傾向がみられる。筆者は惑星摂動の大きさを傾斜角の関数として求めたが、それによると、一般的に順行軌道の方が逆行軌道よりも大きく摂動を受ける。また、この摂動の大きさは $i=0^\circ$ から減少し、 $i=120^\circ$ 付近で最少値を取り、しかるのち再び増加して $i=180^\circ$ に到達する。したがって、たとえば彗星が天球上で一様に形成されたとしても、惑星摂動を最も受けにくい $i=120^\circ$ 付近の彗星が最も多く太陽系に残ることになる。しかし $i=90^\circ$ 周辺の観測彗星数の欠如は惑星摂動の結果としては理解できない。また逆行彗星の方が、順行彗星よりも多く存在しなければならないのに、観測データに関する限り、ほぼ同数個存在している。リットルトン教授によれば、逆行彗星は地球に対する相対速度が大きいため、それだけ発見しにくいのかも知れないとのことである。これは一つの可能性である。

以上において彗星群の力学に関する簡単な紹介を試みたが、リットルトンの仮説は近日点距離に関して困難があるように思える。そうすると太陽系をとり囲む彗星群が存在し、何らかの摂動でその一部が観測可能領域に

持ってこられるという仮説の方が受け入れやすい。オールトは星の摂動を考えるが、チュボタレフの計算からも分るように銀河核の潮汐力も無視できない。銀河核による摂動は簡単に解析的に計算ができるが、 5×10^4 a.u.位の半長軸を有する彗星に対しても近日点距離に充分な大きさの摂動を与え得る。オールトは観測される彗星結合エネルギーの分布から、 $a=10^5$ a.u. 近傍の彗星が多いことを示したが、この問題を、太陽、銀河核、彗星という制限三体問題として考えたとき、潮汐力が重要となってくるのは $a=10^5$ a.u. のオーダーである。さらにこの太陽系を取り囲む彗星群の起源について考えてみると、オールトは太陽系初期にある惑星が爆発しその破片が惑星摂動で遠くに送られたと説明する。ところがたとえ彗星が惑星間空間で形成されたとしても、銀河核の潮汐力の助けを借りて彗星が太陽に捕獲されることは力学的に可能であり、その際の半長軸は 10^5 a.u. 位であろう。オールトの仮説が正しいか、それとも星間空間形成説が正しいかを定める一つの方法は彗星の一部を地上に持ち帰り、年代決定をすることであろう。W. ファウラー教授(1971)によれば地球、月、隕石は45億年前の数百万年の間に形成された。彗星の形成時が同様な方法で
(247 頁下段へつづく)

好評発売中

1971 年版 天文年鑑

1971年の天文の出来事が一目でわかる天文年鑑

71年夏には久しぶりの火星大接近が観測できるので、今年とはとくに火星の予報記事に力を入れてあります。グラフィにはピク・デュ・ミディ天文台(フランス)から送られた土星の新リング発見の写真や、オーストラリアで撮影された国産衛星「おおすみ」の写真をのせました。

天文年鑑編集委員会編

●B6判/122ページ/定価260円



天文用語事典

近刊予告

●B6判/250ページ
予定価550円/天文ガイド編

天文用語を、天体器械・写真、太陽・地球・月・こよみ・人工衛星・彗星、太陽系、恒星・銀河系の4項目に分類し、約500語を簡明に解説したハンドブックです。天文年鑑、天体観測ハンドブックとともに、アマチュア天文家は、ぜひ1冊そなえて下さい。

誠文堂新光社 東京・神田錦町1の5 振替東京6294