

太陽系小天体について

金光研究室 野田 恵

1. 序論

どうして地球だけが海に包まれた生命に満ち溢れた星なのであろうか。それが奇跡の星と言われるところである。太陽の大きさ、巨大惑星木星の存在、太陽と地球の距離、地球の大きさ等、様々の偶然によって軌跡の星地球は誕生したのである。他のほとんどの恒星も惑星を持っているが、持っていたとしても生命の誕生するような星にはならないという。宇宙にはまだ解明されていない謎がたくさんあるのである。そんな中、2006 年は天文学、惑星科学にとって、非常に重要な年となった。国際天文学連合総会で、太陽系の惑星が初めて科学的に定義され、準惑星という新しいカテゴリーに、惑星とされてきた冥王星は位置付けられたのである。準惑星というカテゴリーは太陽系の多様性がより明らかにしたが、太陽系にはまだまだ未知の天体がたくさん存在すると考えられており、太陽系の外縁には一体どんな天体が隠れているのか、今後も注目される。

本研究では、太陽系小天体について理解した上で、話題になったこの冥王星が属するエッジワース=カイパーベルト天体が、惑星系形成過程の最終段階の惑星集積において、他の惑星等の重力によって、どのように影響を受け、現在の軌道に至るのかをシュミレーション分析した。

2. 太陽系とは

太陽系とは、恒星である太陽を中心に、その重力によって引き付けられて公転する 8 個の惑星、5 個の準惑星、100 を上回る衛星、多数の太陽系小天体から構成される天体の集団のことである。太陽から太陽系最果ての惑星である海王星までの平均距離は、30.1AU (約 45 億 km) であり、太陽系は大きく四つに分けることができる。

恒星(太陽)		
太陽の周りを回る天体	惑星	地球型惑星
		木星型惑星
		天王星型惑星
	準惑星	小惑星帯にある天体(ケレス)
		冥王星型天体など
	太陽系小天体	冥王星型天体以外の太陽系外縁天体
		小惑星
		彗星
太陽以外の周りを回る天体		衛星

3. 太陽系小天体

太陽系小天体とは、太陽の周りを回る天体のうち、惑星と準惑星を除く全ての天体のことである。これには小惑星、彗星、惑星間塵、太陽系外縁天体などが該当する。

3-1 小惑星

太陽系には、惑星以外にも大きさの小さな天体が無数に存在する。そうした天体のうち、周りにガスや塵からなるハローを持たないものを小惑星と言う。小惑星の存在する領域は太陽系内に広く分布しているが、特に小惑星帯に多く存在する。小惑星は、全小惑星質量を合わせても、地球の質量の 1/1000 以下であり、地球に衝突する危険性を持つ反面、鉱物資源の宝庫ともいわれ、遠い未来の人類のために、今後探査は益々重要になってくると考えられる。

3-2 彗星

彗星は、太陽系小天体のうち、主に氷や塵などから出来ており、太陽に近づいて一時的な大気であるコマや、コマの物質が流出した尾(テイル)を生じるものを指す。尾が伸びる姿から箒星とも呼ばれる。彗星の存在する領域は、オールト雲とエッジワース=カイパーベルトの二つの領域である。現在でも研究が活発に続けられ、彗星の核に探査機が送り込まれるなど、太陽系誕生の謎を解き明かしてくれる鍵として期待されている。

3-3 惑星間塵

惑星間塵は、太陽系に存在する微小な塵で、太陽系小天体の最小メンバーである。小惑星帯での小惑星同士の衝突や、彗星が徐々に壊れていくことによって作られると考えられ、光害や月明かりの無い地点から観測される黄道光や対日照などの原因とされている。

3-4 太陽系外縁天体 <Trans Neptunian Object>

海王星軌道の外側をまわる天体の総称である。エッジワース=カイパーベルトやオールト雲に属する天体、かつて惑星と位置づけられていた冥王星もこれに含まれる。

エッジワース=カイパーベルト<Edgeworth-Kuiper Belt Object, Kuiper Belt Object>

太陽系の惑星中、最も遠くにあると考えられる海王星の海王星軌道(太陽から約30AU)よりさらに外側の黄道面付近にある、小天体が密集した穴の空いた円盤状の領域のことを言う。このエッジワース=カイパーベルトにある天体の総称がエッジワース=カイパーベルト天体(EKBO)である。現在、外側の境界は曖昧であるが、連続的にオールトの雲につながっていると考えられる。1990年代から観測が進み、エッジワース=カイパーベルト天体は現在1000個を超える数の天体が登録されている。

5. エッジワース=カイパーベルトの種類

5-1 共鳴エッジワース=カイパーベルト天体 <共鳴 TNO, 共鳴 EKBO>

共鳴天体 (レゾナント)

海王星との軌道共鳴により、公転周期が整数比(尽数関係)にある天体のことである。共鳴エッジワース=カイパーベルト天体は、海王星との公転周期の比率によって、冥王星族、トウティノ族などに分けることができる。

5-2 散乱エッジワース=カイパーベルト天体、散乱天体 (スキッタード)

海王星などの大惑星と接近して散乱された結果、現在の軌道に至ったエッジワース=カイパーベルト天体のことである。つまり海王星の重力の影響により、エッジワース=カイパーベルトからはじき出されたものと言える。海王星より内側に散乱された、軌道が比較的小さなケンタウルス族などを、至近散乱天体(スキッタード・ニア)、外側に散乱された、軌道が大きいものを拡散散乱天体(スキッタード・イクステンデッド)と呼ぶ。

5-3 古典的エッジワース=カイパーベルト天体、古典的天体 (クラシカル、キュビワノ)

共鳴天体、散乱天体のどちらにも属さないのが古典的エッジワース=カイパーベルト天体(古典的天体、クラシカル)である。海王星の永年共鳴を受けないため、軌道傾斜角も離心率も低い。海王星軌道の大きく外側を円形軌道に近い形で周っており、あまり海王星に近づかない。

6. シミュレーション

本シミュレーションでは、惑星系形成過程の最終段階の惑星集積において、太陽と海王星の重力に、エッジワース=カイパーベルト天体がどのように影響され、現在の軌道に至るのかを観察できるようなコンピュータシミュレーションを作る。

まず、エッジワース=カイパーベルト天体の質量は太陽と海王星の質量に比べると非常に小さなものであるので、考えないものとする。数値計算をする上で次のような単位にした。

長さの単位：1 AU = 1.496×10^{11} [m] 重さの単位：太陽質量 = 1.989×10^{30} [kg]

こうすると、重力定数 $G = 6.672 \times 10^{-11}$ [$\text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$]なので、 $G = 1$ になるように時間の単位を決める。

$$s = \sqrt{\frac{(1.496 \times 10^{11})^3}{(1.989 \times 10^{30}) \times (6.672 \times 10^{-11})}} = 5.023 \times 10^6 \text{ [秒]}$$

となるので、時間の単位：1 ステップ = 0.159 年となる。これらの単位を用いて、運動方程式の数値積分を行いシミュレーションを行なう。その際、運動方程式の数値積分にはルンゲ・クッタ法を用いた。このシミュレーションに使用する運動方程式は以下の2つである。

エッジワース=カイパーベルト天体と太陽

太陽、海王星間での万有引力 ($G = 1$)

$$\frac{dx}{dt} = u$$

$$\frac{du}{dt} = -\frac{M(x-x')}{r^3}$$

海王星間での万有引力 ($G = 1$)

$$\frac{dx}{dt} = u$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{M(x-x')}{r^3} - \frac{M_n(x-x_s')}{r_s^3}$$

シミュレーション I では、エッジワース=カイパーベルト天体の初期位置を海王星のすぐ外側に設定し、シミュレーション II では、太陽を挟んで海王星の反対側にエッジワース=カイパーベルト天体を設定し、この二つのシミュレーションを比較することにする。

○ 開始直後の様子

シミュレーション I



シミュレーション II

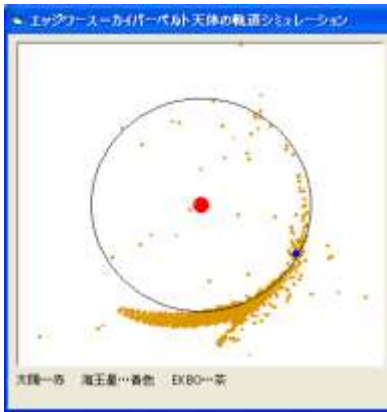


海王星を 30AU の地点に配置し、シミュレーション I では海王星のすぐ外側に、シミュレーション II では太陽を挟んで海王星の反対側にエッジワース=カイパーベルト天体をそれぞれ 1200 個配置した。シミュレーションを開始した直後、どちらのシミュレーションもエッジワース=カイパーベルト天体は海王星と同じ方向(反時計回り)に向かって公転し始めた。

シミュレーション I もエッジワース=カイパーベルト天体は海王星と同じ方向(反時計回り)に向かって公転し始めた。

○ 1000 ステップ後

シミュレーション I



シミュレーション II

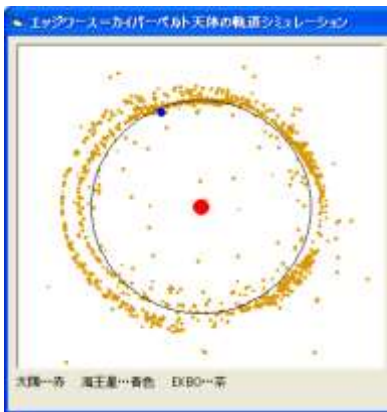


I では、エッジワース=カイパーベルト天体は、内側や外側にはじき飛ばされ、ばらけが見られるようになっている。これは、太陽や海王星の引力をエッジワース=カイパーベルトが受けた結果である。共鳴天体(レゾナント)、エッジワース=カイパーベルトから

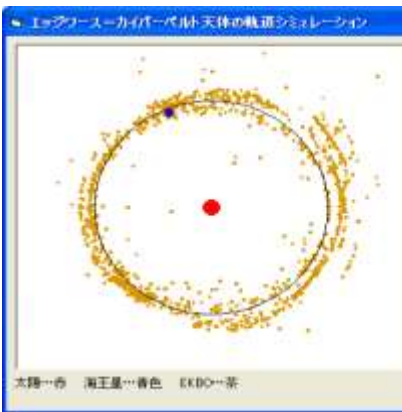
太陽系内部に落ち込みつつあるケンタウルス族などの至近散乱天体、エッジワース=カイパーベルトから外にはじき飛ばされた大きな軌道周期を持つ拡散散乱天体、また、海王星の軌道の内側に入ることもなく、海王星の重力の影響をそれほど受けずに、大きく外側を円軌道に近い形で回っている古典的天体も観察できるようになっている。一方、II では開始直後のエッジワース=カイパーベルト天体に比べて範囲は広がっているものの、I のようなばらつきは見られない。これは海王星の重力の影響が小さかった結果と思われる。

○ 10000 ステップ後

シミュレーション I



シミュレーション II



I のエッジワース=カイパーベルト天体は、ほぼ 40AU 前後を円軌道で運動していて、現在のエッジワース=カイパーベルト天体の位置と同じくらいの位置に分布していることがわかる。

一方、II も I とほぼ同じ形となった。つまり、このときには I と同じように海王星からの重力を受けていると言える。

7. 考察

今回は、エッジワース=カイパーベルト天体が、太陽や海王星の重力によってどのような軌道をとるのかをエッジワース=カイパーベルト天体の初期位置を変えて、比較したシミュレーションを行った。エッジワース=カイパーベルト天体の研究は、太陽系の謎を解く重要な天体の一つであるので、さらなる研究に励みたい。また今後は、さらに様々な天体が太陽の重力や、他の天体の重力の影響を受けて、現在の軌道に至るのかをシミュレーションしたい。