

13. 惑星系の形成

13-1 分子雲

星間ガスが密集し、水素の大部分が水素分子 H_2 として存在する領域を分子雲と呼ぶ。星間ガスには重元素も含まれるが、分子雲においてはそれらが氷、有機物、ケイ酸塩などからなる塵に凝縮している。塵は可視光をさえぎるため肉眼ではしばしば暗黒星雲として観測され、またほとんどが銀河の渦状腕に沿って分布する。

分子雲の温度と密度は赤外域から電波領域にかけての分光観測から推定でき、その典型的な温度は数十 K、平均的な密度は $100\sim 1000$ 分子/cm³ である。分子雲には様々な規模のものが存在するが、巨大分子雲は直径が $10\sim 100$ パーセク程度におよび、それぞれの質量は太陽のおよそ千倍から一千万倍に及ぶ。

分子雲中の物質分布は一様ではなく、特に密度が高まった直径 0.1 パーセク程度の領域を分子雲コアと呼ぶ。分子雲コアの密度はおよそ 1 万 ~ 100 万分子/cm³ に達し、その典型的な温度は 10 K、総質量は太陽の 10 倍程度である。分子雲コアは、ガスが特に密集し、分子の熱運動に抗し自身の重力でガスが収縮を開始する一歩手前の状態にある。

13-2 星の形成

分子雲コアの密度が十分に高まると、自身の重力でガスが収縮し、星が誕生する。分子雲には、しばしば様々な形成段階にあると考えられる若い星が観測される。主系列星に至るまでの進化段階の順に次のように分類される。

原始星 光度の大きな赤外線源として観測される。これは分子雲コアが収縮を開始し、中心には恒星が生まれているが、分子雲コアの外側のガスと塵がまだ晴れていない段階の天体と考えられる。中心星から放出された光は、一度塵に吸収され、波長の長い低温の放射として観測される。なおこの段階と、後に続くおうし座 T 型星の主なエネルギー源はガスの収縮で解放される力学的エネルギーと考えられる。またこれらの天体からは双極分子流と呼ばれるジェット流が噴出している様子も観測される。ガスの収縮に要する時間の理論推定から、原始星はガスの収縮開始からおよそ 10 万年までの生まれたての星と考えられる。

おうし座 T 型星 可視光で観測でき、HR 図上では主系列星の上方に位置する。強い赤外線と同時に放っていることが大きな特徴の一つであり、これは低温で大面積のガスと塵からなる円盤が付随していることによる。最近の観測では、実際に中心星を取り巻くガスと塵の円盤（星周円盤ないしは原始惑星系円盤と呼ぶ）が直接観測されている。この段階の恒星の進化は理論的に推定されており、HR 図上の位置から誕生からの経過時間（年齢）が推定できる。おうし座 T 型星の推定年齢はそれぞれ約百万年～数千万年まで分布し、年齢が高いものほど円盤に由来する特徴に乏しい。これはおうし座 T 型星が進化するとやがて円盤を失うことを意味する。十分に進化したおうし座 T 型星は主系列星に移行する。

13-3 惑星系の形成

恒星とそれを公転する惑星や小天体、塵などから系を惑星系と呼ぶ。現在では太陽系以外にも多数の惑星系が存在することが知られている。以下では、我々が暮らす惑星地球を含む惑星系である太陽系について、その形成過程の理解を示す。他の惑星系も大筋では太陽系同様に形成したと推定される。

原始太陽系星雲の形成 太陽の母体となった分子雲コアの収縮にともなって、原始星段階の生まれたての太陽に原始惑星系円盤（特に原始太陽系星雲と呼ぶこともある）が生じた。初期の円盤は、重力に引かれ中心に向かって物質が落ち込む際の重力エネルギー解放によって、高温状態になっていた。隕石に含まれる粒子の中で高温下で安定な白色包有物（Ca と Al に富む包有物, CAI）は、隕石物質の中でもっとも古い結晶化年代を示し、この段階で生じた物質と考えられる。便宜的に、最古の CAI の結晶化年代 45 億 6 千 7 百万年前は太陽系の時間の起点とみなされている。

微惑星の形成 原始星段階からおうし座 T 型星段階の前半にかけて、原始太陽系星雲には分子雲コアの物質が降り積もって行った。円盤内では固体粒子同士が付着合体を繰り返して成長する。また降り積もりが収まると、円盤は静かな状態になって赤道面に塵が密集し、それらが重力で引きつけあうことで、自己重力でまとまった小型の天体である微惑星が誕生した。微惑星の典型的な大きさは数 km から数十 km と推定される。原始太陽系星雲は太陽に近い内側ほど高温で、外側は低温である。太陽から 2~3AU までの範囲では、塵や微惑星は主にケイ酸塩と金属鉄からなるが、低温の外側ではこれに主に H₂O からなる氷が加わる。小惑星や彗星の一部はこうした微惑星が惑星に取り込まれずに残存したものと推定される。隕石の年代学から、微惑星の形成に至るには太陽系誕生後百万年前後の時間が必要だったと推定される。

原始惑星の形成 微惑星は互いの重力で引き付けあい、衝突合体を繰り返して数百万年をかけてさらに大きな天体に成長する。衝突を繰り返して惑星が成長する過程を惑星集積と呼ぶ。地球型惑星領域では月から火星サイズの原始惑星まで成長が進んだところで衝突頻度が下がり、成長が鈍ると推定されている。木星型惑星領域では、微惑星に氷が加わり、また軌道の周も大きいために、大量の固体物質を集めることができ、約10倍の地球質量に達するまで原始惑星の成長が進んだ。

巨大ガス惑星の形成 木星と土星の母体となった原始惑星は、十分に成長すると周囲の円盤ガスを重力によって集めて巨大ガス惑星となった。原始惑星の重力でいったんガスが効果的に集まり出すと、惑星の質量が増し、さらに多くのガスが集まるようになる。この過程をガス捕獲という。天王星と海王星は、軌道半径が大きく公転周期が長い分、原始惑星の成長が遅く、ガス捕獲を引き起こす質量に達する前に、周囲の円盤ガスが散逸してしまったと考えられる。そのため両惑星は星雲ガスを大量には獲得できず、巨大氷惑星となった。

地球型惑星の形成 地球型惑星領域に形成される数十個の原始惑星は、互いの重力の働きで次第に軌道が乱れて相互衝突を起こし、より大きな惑星へ成長した。こうした原始惑星同士の衝突を巨大衝突と呼ぶ。地球型惑星でもっとも大きな地球がほぼ現在の質量に達するには、数千万年を要したと推定される。また地球に生じた最後の巨大衝突によって地球周回軌道に放出された破片が、重力で集まることで月が形成されたと考えられている。