

総説：地球形成の場にまつわるモデルとその束縛条件

小 出 良 幸
(神奈川県立博物館)

Review: Models and Constraints in Background of the Earth's Formation

Yoshiyuki KOIDE
(Kanagawa Prefectural Museum)

Abstract. The Earth exists under the influence of the Sun, Moon, Venus, Mars, and so on. The Earth was formed under the similar situation. The earth science, however, has not always taken their influence into consideration. Therefore, the future earth science should tackle with the information of not only other planets but also galaxies and univers. Their movements, structures, conditions, and evolutions will be revealed by the new observation depending on new technology. Our Earth is the lowest constituent in the universe hierarchy. The hierarchy is classified into some stages; universe, galaxy, star, planetary system. Our planet had been formed in the open system. The formation should be understood under the influence of all hierarchical constituents. This paper is a review of the standard models of each stage and constraints which are evidences and facts based on the observation and experiments, and analyses evaluated chemistry.

I はじめに

月による干潮，太陽による日射・昼夜の変化・季節変化，隕石の衝突などは，地球の進化に影響を与えた地球外の要因として，現在の地球科学に組み込まれている。最近では，太陽系外の星，銀河内での太陽系の運動，我々の銀河と隣の銀河との相互作用など，より大きなスケールの要因も，地球に影響を与えるという考えが提唱されている。これは，地球の営みが，地球だけの閉鎖系ではなく，宇宙という解放系の一部として行われていることを意味する。また，地球外の情報の増加によって，地球を含む解放系として少しずつではあるが定量的に扱えるようになってきた。

地球の起源は，太陽系の起源につながり，さらには星の起源につながる。また，地球の化学組成を考えると，隕石の化学組成，太陽の化学組成が必要で，星の化学組成，そして元素の起源の情報も必要とする。このようなつながりを考えると，今や，地球化学者も地球だけの知識では不十分で，地球外の情報を理解しておく必要がある。本論文は，地球形成に関与する可

能性がある、宇宙の進化、銀河の進化、星の進化、惑星系の形成についての標準モデルを概観することを目的とした。

地球外の物質の化学組成は、直接化学分析することは不可能なので、元素が発するあるいは吸収する電磁波を利用して間接的に調べる。分析手法は違っても、得られた化学組成からその物質の起源や進化を知るという目的は、同じである。当然、地球化学者もそのデータを吟味し、利用できる立場にある。本論文のもう一つの目的は、元素の形成から地球形成にいたる道筋で、化学組成が関与している部分を明らかにすることである。化学組成が、概観した標準モデルの根拠や束縛条件になっている部分を整理して提示することである。

著者は、地球の岩石の化学組成を通じて、岩石の成因や地球の進化などを検討してきた。しかし、長いタイム・スケールで地球の進化を考える場合、地球だけの閉鎖系ではなく、宇宙の一員として地球を考えるなければならないことを痛切に感じ始めてきた。そこで、本論文では、無謀を省みず、専門外のレヴューを試みた。何分、即席のレヴューなので、十分な論文調査や最新情報のフォローができていないと思われる。しかし、著者ような門外漢には、役立つので、利用していただき、間違いを指摘していただきたい。本論文では、古典的な論文の引用は省略した。東京大学の青木雄一郎氏には論文の収集や概略の内容について議論いただいた。

II 宇宙

時間軸の「現在」の位置に、我々の地球は存在する。現在の地球は、形成以降百数十億年たった宇宙にあり、その形成の場は、今から46億年前の宇宙である。この宇宙は、有限の時間のなかで、今の姿へと変化してきた。つまり、宇宙には始まりがあり、時間がたつとともに不可逆の変化をとげて、そして終わりを迎えることを意味する。宇宙に関する議論は、現在盛んに行われて、理論的モデルが多数提唱されている。そのモデルを検証するために天体観測や素粒子合成実験などが行われているが、まだ実証されているような定説は確立されておらず、いくつもの理論がつぎはぎ状に組み立てられている。このような状況を把握して、地球形成の舞台としての宇宙の進化を概観する。

1 宇宙の進化モデル

i 宇宙の始まり

現在、宇宙は膨張していると考えられている。この膨張している宇宙の時間を遡っていくと、宇宙は、限りなく小さな空間へと収斂していく。その極限のサイズは、PLANCK (1900) が古典的な物理学の作用する最小の単位として導入したプランク定数によって規定される。プランク定数 ($1.05 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{sec}$) と光の速さ ($3 \times 10^8 \text{m/sec}$)、重力定数 ($6.7 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$) から最小のプランク単位が得られる。プランク質量は 10^{-8}kg 、プランク長さは 10^{-35}m である。プランク質量をエネルギーに換算するとプランクエネルギーの 10^{10}GeV が得られ、プランク長さを光速で割るとプランク時間の 10^{-44}sec が得られる。

プランク単位より小さい世界は、量子力学によって記述される。極小の宇宙の始まりは、量子力学によってモデル化されている。モデルは宇宙の波動関数決定の問題になり、いくつかの仮説が提唱されている。VILENKIN が提唱する「無の状態」からの「創造説」やHAWKING らの提唱する「境界のない境界条件」を導入した「始まりのない宇宙説」などがある。

「創造説」とは、量子力学におけるトンネル効果によって、空間の大きさがゼロの状態「無の状態」から有限の大きさに遷移したという説である。無から遷移したときが宇宙の始まりである。一方、「始まりのない宇宙説」では、時空には始まりがないとする説である。我々が感じ

ることができる実数時間に対し、量子力学の世界では虚数時間を使用できる。量子力学の虚数時間を宇宙論に導入することによって、時間と空間の区別がなくなり、時空に端がなくなり完全に閉じた4次元空間となる。どこを始まりとみなしてもよい「境界のない境界条件」が設定される。「創造説」では始まりという特異点があったのに対し、「始まりのない宇宙説」では始まりという特異点をなくしてしまったのである。両モデルとも、今のところ実証のすべがないために、多分に形而上的なものである。

ii インフレーションとビックバン

宇宙誕生から 10^{-44} 秒たつと古典的な物理学の作用が始まる(図1)。プランク時間以降の量子宇宙からビックバン(big bang)へと移行する急激な加速膨張の時期を、インフレーション(inflation)と呼ぶ。このようなプロセスを想定すると、宇宙の平坦問題、地平問題などが解決できるほか、密度のゆらぎが量子的に形成されるという、ミクロとマクロの両方が結びつけられる利点がある。

ビックバンは、1946年ころGamowが提唱した宇宙の始まりを漠然と指すものであったが、現代宇宙論ではモデルにより様々に限定されて使われる。一般には、ビックバンは、宇宙の始まりの 10^{-35} 秒後で、インフレーションが終わった時期で、温度は 10^{27} Kから急激に下がり、大きさが 10^{-35} mから 10^{-2} mまで膨張する時期である。

ビックバンの時期に、物質の形成がおこなわれる。最初に形成される物質は、クォークとレプトンという素粒子である(素粒子については後述)。クォークが3個結びついて、中性子や陽子などのハドロンが形成される。これが「クォークの閉じこめ」(quark confinement)で、ハドロン期と呼ばれる。

ハドロン期のつぎに、レプトン期と呼ばれる時期がくる。レプトン期は、宇宙の温度が下がり、電子などのレプトンが宇宙の構成要素となり、ニュートリノが自由に飛び回る時期である。バリオン数(後述)に関しては非対称であることは判明しているが、レプトン数に関して非対称かどうかはわかっていない(佐藤勝彦, 1988)。

ビックバン期の高温状態では、電子が原子核に捕らわれることなく、プラズマ状態として遊離する。原子核が電子を取り込むのは、50万年後温度が3,000Kになってからである。このときまで、電子は自由に飛び回っているため、光が散乱されてまっすぐ進めなかったのが、水素原子形成を境にして光はまっすぐ進めるようになる。このときを「宇宙の晴れ上がり」という。

インフレーションでは急激な加速膨張の時期であったのが、ビックバンの時期には膨張速度が減りはじめる時期にあたる。宇宙に存在する物質の重力によって膨張速度にブレーキがかかり、時間とともに膨張のスピードが遅くなっていく。膨張にともなって宇宙の体積が大きくなると、エネルギー密度は小さくなり、宇宙は冷え、現在の2.7Kでまで下がった。

iii 宇宙の終わり

宇宙の将来は、その曲率が重要な鍵を握る。曲率を求める原理は非常に簡単で、宇宙空間で3点のつくる三角形の内角の和が180度以下なら閉じており、180度以上なら開いており、180度なら平坦である。現在、宇宙の曲率の正確な測定には成功していないが、現在の宇宙の曲率は、非常にゼロに近いとされている。

ハッブル定数(後述)がわかると、宇宙が閉じるために必要な、最低の密度が計算でき、臨界密度と呼ばれている。観測から、宇宙の平均密度が推定できる。観測された密度を臨界密度で割った値を Ω という。 $\Omega > 1$ ならば宇宙空間は閉じていることになり、 $\Omega < 1$ ならば開いて

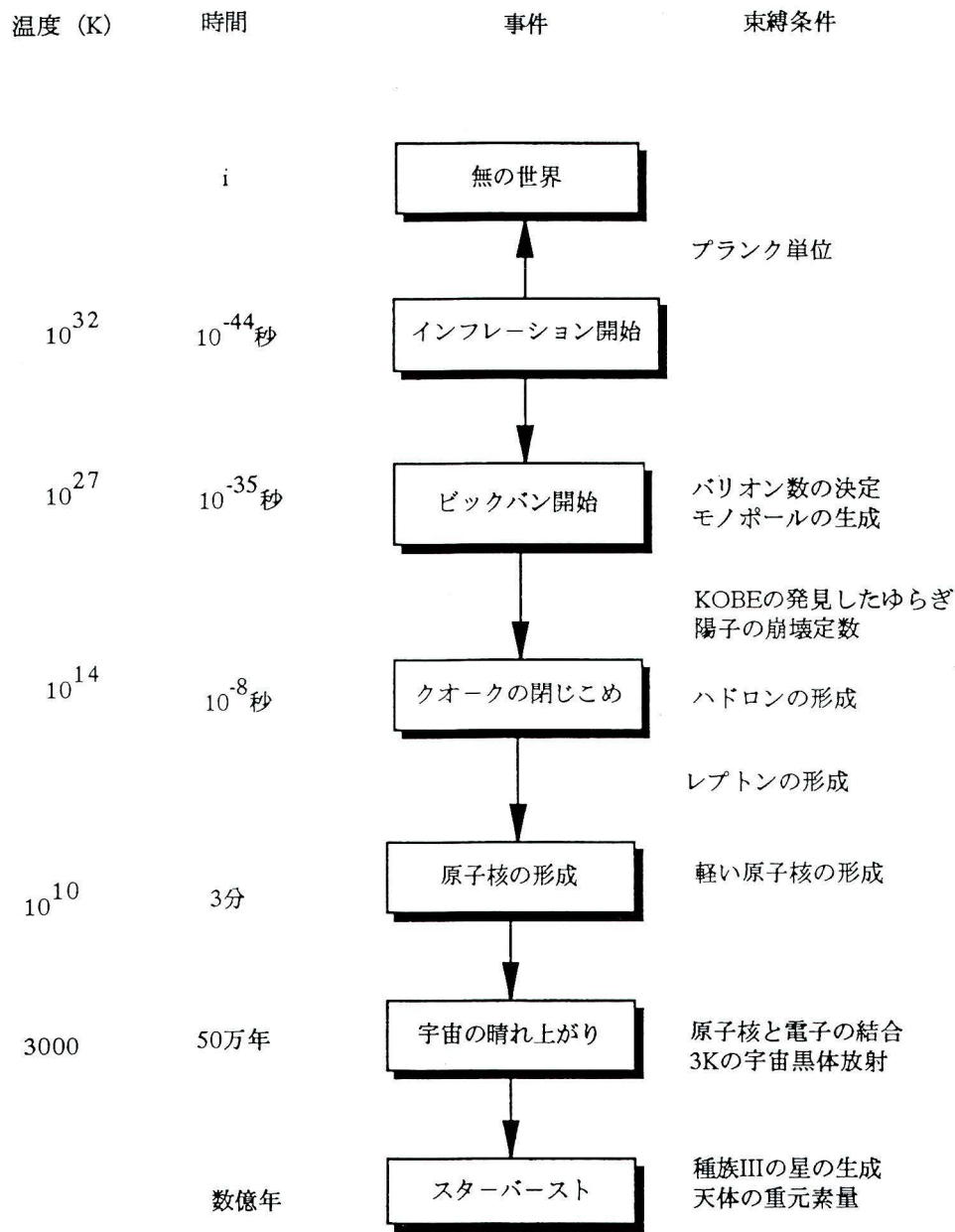


図1. 宇宙初期の進化. 宇宙初期に起きたと考えられている事件と時間, 温度そして事件と関連する束縛条件を示した. 温度は, ビックバンより50万年 (1.5×10^{14} 秒) 後を3,000 Kとして計算した.

おり, $\Omega = 1$ なら平坦であることになる。観測で求められる物質量は $\Omega = 0.01 \sim 0.1$ と小さい。一方, 百数十億年たった現在の宇宙がまだ膨張していることから, 宇宙の平均密度は $\Omega = 10$ 以下であると考えられる (並木, 1990)。もし, $\Omega \geq 1$ なら, 現在の観測技術では見つかっていない物質があると予想されている。このような物質は暗黒物質 (dark matter, invisible matter,

missing mass など) と呼ばれている。

Ω の値が 1 を境にして、宇宙の最後は、全く違ったものになる。

$\Omega = 1$ で宇宙の平均密度と臨界密度が等しいとき、空間の曲率はゼロとなる。宇宙はかろうじて膨張を続けることができる。このような状態の時空を、平坦な宇宙という。

$\Omega < 1$ の開いている宇宙の最後は、ひたすら膨張を続けることになる。並木 (1990) は、以下のような終わりを描写した。寿命の長い星やこれから生まれる星を考えると、今から 10^{14} 年後には、銀河にある星はすべて白色矮星や中性子星、ブラックホールになってしまう。重力により星どうしが接近しあって銀河面からの軌道が乱れ、銀河から脱出する星が増えていく。 10^{18} 年くらいたつと、銀河から星やガスが離れて、質量の 9 割くらいがなくなり、銀河は実質的に蒸発してしまう。 10^{29} 年くらいたつと、まだ確認はされていないが陽子の崩壊がおこったとすると、残った高密度星の陽子も崩壊して陽電子になる。陽子の半減期 (10^{32} 年) 程度たつと、宇宙の物質の半分が陽子崩壊する。 10^{100} 年たつと巨大ブラックホールも蒸発してしまう。そして最後には電子と陽子が崩壊してできた陽電子、ニュートリノ、光子のみとなる。

$\Omega > 1$ 以上の閉じた宇宙は、膨張がある時から収縮に転じる。収縮によって光子は高いエネルギーをえて、水素原子をイオン化する。更に収縮すると、星の外部の方が高温になり星は融け始める。同時に巨大ブラックホールは、星や星の残骸を吸い込んで巨大な銀河ブラックホールになっていく。銀河ブラックホールは成長を続け、ビックバンとは逆の爆縮 (ビッククランチ: big crunch と呼ばれる) がおこる。宇宙は、またビックバンをおこす。膨張、収縮を永遠に繰り返す振動宇宙になる。

2 観測事実と束縛条件

○宇宙の階層

1980 年代以降、観測データの増加によって、現在の宇宙の構造がかなり明らかになってきた。その結果、宇宙は各種の物質が雑多に存在するのではなく、構造を持ち、階層を形成していることがわかってきた (図 2)。

階層のなかで最小の単位は、星である。星にも、惑星系というよりさらに下位の構造がある。星は、いくつかあつまり、星の集まりである星団を作る。星団は、散開星団と球状星団がある (表 1)。散開星団は、100 から 1,000 個の星の集まりで、若い星、種族 I の星 (後述) から構成されている。この星団は 300 光年ほどの厚さの薄い層の銀河面に分布する。一方、球状星団は、散開星団より、星の数や大きさの上でも大規模で、年老いた星、種族 II の星を主とする。球状星団は銀河をとりまく直径 20 万光年の球状のハローに分布する。

銀河は、 $10^{10} \sim 10^{12}$ 個の星、そして星と星の間に分布する星間物質によって構成されている。そして、我々の銀河以外に無数の銀河あることが明らかになった。現在、58,500 個ほどの銀河が記載されている。銀河も平均的に分布するのではなく、粗密があり、粗密の分布に階層的な構造がある。

銀河の上の階層は、銀河群と呼ばれるものである。20 個以下の銀河の集まりで構成されている。典型的な銀河群は、190 光年の範囲に 5 個ほどの銀河が集まっているものをいう。それぞれの銀河は相対速度 100 km/sec ほどで運動している。

次が、銀河団と呼ばれる階層である。銀河団は、50 個程度ときには 1,000 個を越す銀河が、1,000 万光年ほどの領域に密集している。現在、4,000 個ほどの銀河団カタログが作られている。それぞれの銀河団は、相対速度数百 $\sim$ 1,000 km/sec で運動している。

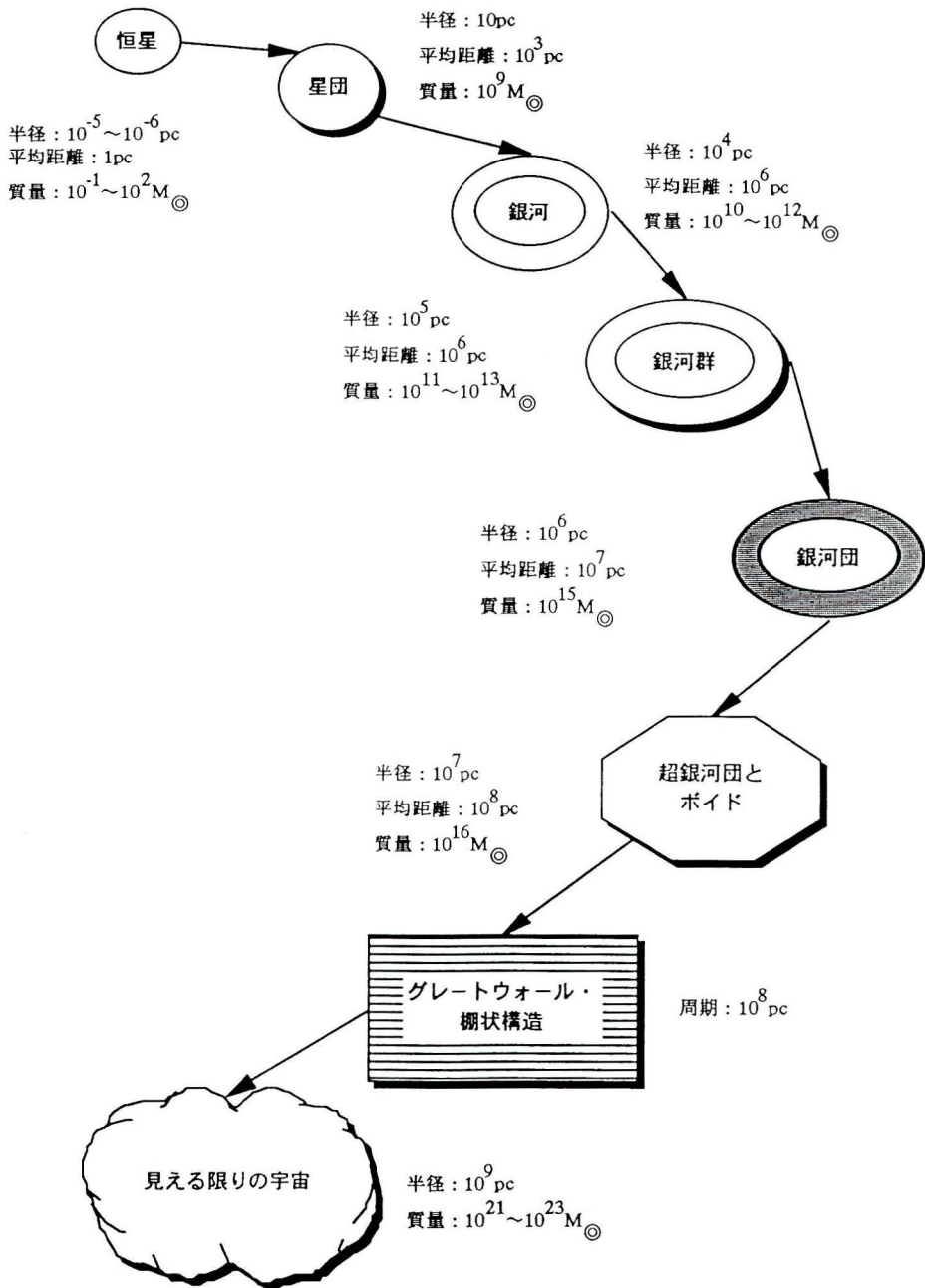


図2. 宇宙の階層. 上から下に向かって宇宙の階層が上がり, 大規模になる. 各階層には規模を示すデータを付け加えた. pcはパーセック(parsec)で $1 \text{ pc} = 3 \times 10^{16} \text{ m}$, $M_{\odot}$ は太陽質量で $1 M_{\odot} = 1.99 \times 10^{33} \text{ g}$ である.

表 1. 散開星団と球状星団.

	散開星団	球状星団
恒星数	$10^2 \sim 10^3$	$10^4 \sim 10^6$
半径	$2 \sim 10 \text{ pc}$	$20 \sim 200 \text{ pc}$
種族	I	II
年齢	0年～100億年	100億年～150億年
平均寿命	2億年	≥ 100 億年
重元素含有率	2% (太陽程度)	太陽の数分の1～1/100
銀河内の分布	銀河面と渦状腕	全体に球状分布
運動	銀河回転	離心率0.6
総数 (発見数)	≥ 2000 (約1500)	約200 (約130)
恒星の質量	$\leq 30 M_\odot$	$< 1 M_\odot$
星団の質量	500	10^5

pcはパーセック (parsec) で $1 \text{ pc} = 3 \times 10^{16} \text{ m}$, $M_\odot$ は太陽質量で, $1 M_\odot = 1.99 \times 10^{33} \text{ g}$ である.
磯部 (1993) による.

カミノケ座と隣のA1367銀河団の間にも銀河があり、つながっており、その回りには銀河がほとんどない領域がある。超銀河団とボイド (超空洞: void) である。超銀河団は、1 億光年ほどの大きさの銀河団や銀河群の集まりである。直径 3 億光年もあるような空洞域が見つっている。このような、超銀河団とボイドが織りなす構造は、宇宙のどこでも普遍的にあり泡状構造と呼ばれる。泡状構造は、泡の表面に銀河が分布し、泡の本体がボイドに相当するような 3 次元的なものである。泡状構造でもっとも近いものは、我々の銀河から 4 億光年のところに、銀河の密集するグレートウォール (great wall) がある。グレートウォールのような構造は、4 億光年周期で繰り返しており、棚状構造と呼ばれる。

宇宙には、物質の粗密が、さまざまなスケールで分布していることがわかってきた。池内 (1993) は、最近の観測結果を以下のようにまとめた。10Mpc ($1 \text{ Mpc} = 3.09 \times 10^{14} \text{ cm}$) のスケールの分布の規則性, 30Mpc を上限とする泡構造, 100Mpc を特徴的な長さとするグレートウォール構造, 10～50Mpc で500km/sec程度の一様膨張からのずれ, 宇宙の平均密度が平坦な宇宙になるには $\Omega = 0.2$ 程度であること, 銀河間ガスが $z > 4$ (z は赤方偏移: 後述)の時点でイオン化されていること, クェーサー (quasar) は $z = 4.9$ にでき $z = 2$ のころ急増し以降急減すること, 電波源をもつ銀河は $z = 3.8$ のころに現れ, 電波源を持たない銀河は $z = 3.4$ のころに登場すること, $z \geq 4$ のころ銀河間の雲や銀河の円盤が多数存在することなどである。以上のことから、池内は、 $z > 5$ 頃, 星の進化過程は我々の近傍の銀河のものつまり最近のものと差がないが、宇宙初期の大構造が形成された時期と考えた。

○素粒子の合成

宇宙の物質は、100種類程度の元素でできている。元素は、原子核と電子から構成されている。原子核は、陽子と中性子、その他の素粒子からできている。同じ元素であっても、中性子の数の違いが質量数の違いとなり、同位体を生じる。各元素は、一般に質量数の違う同位体をいくつか含み、同位体元素の数は、280程度になる。

素粒子は、現在300程度の種類が発見され、まだ未発見のものがあるとされている。素粒子は、

理論が予測し、検証を加速器がおこなってきた。加速器は、核子や素粒子をぶつける装置である。素粒子のぶつかる場所は、高エネルギー状態になる。つまり宇宙の初期状態を再現していることになる。

原子核を作る陽子 (proton) と中性子 (neutron) は核子 (nucleon) と呼ばれる。核子はクォーク (quark) 3 個からできていることが、加速器を用いた実験で確かめられた。核子や核子より重い素粒子をバリオン (baryon: 重粒子ともいう) という。中間子 (meson) とバリオンをハドロン (hadron) という。したがって、この世の形あるものは、すべてハドロンからできていることになる。ハドロンのうち中性子は、電子とニュートリノ (neutrino) を放出して陽子になる。その逆の反応もおこる。ただ、陽子は中性子より重いので、両反応は完全に対照的には起こらない。つまり、重い中性子から軽い陽子への反応の方がおこりやすくなる。

素粒子の中でも、クォークは基本的な素粒子だと考えられている。クォーク以外に基本的な素粒子として、光子 (photon) などからなるゲージ粒子 (gauge boson: 場の粒子) と、電子やニュートリノからなるレプトン (lepton: 軽粒子) がある。このような素粒子が、物質の基本的なものだと考えられている。基本的な素粒子の中で、トップクォークと呼ばれる素粒子以外は、加速器によってその存在は確認されている。

宇宙の始まりには、まだ陽子や中性子は存在せず「クォークのスープ」と呼ばれる時期があった。「クォークのスープ」とは、レプトンと力の粒子 (graviton: 未発見; ROZENTAL, 1988) がばらばらになったクォーク中にぎっしり詰まった状態をいう。大部分の正と反のバリオンは対消滅するが、正のバリオンが若干多かったのが残る。この残る割合は「宇宙バリオン数」と呼ばれ、バリオン全体の 10^{-8} ほどで、これが今の宇宙を作る物質になっている。

○宇宙の年齢

宇宙の年齢は、いくつかの方法で見積もられているが、何らかの前提をもうけて推定したものである。そのいくつかを紹介する。

RUTHERFORD & SODDY (1903) によって発見された放射性元素は、年代を測定するのに重要な役割を演じる。放射性元素を用いると定量的に年代が求められ、地球の岩石や隕石で成功している。

$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ と $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ の同位体比を用いるモデルによると、太陽系を作っている元素の合成は、それぞれ $11 \sim 16 \times 10^9$ 年前、 $12 \sim 17 \times 10^9$ 年前から始まったとされる (FOWLER, 1972)。 ^{87}Sr と ^{87}Rb を用いる方法では、 $10 \pm 3 \times 10^9 \sim 16 \pm 5 \times 10^9$ 年の年代が推定されている。 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 、 $^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U}$ の 4 つの同位体比を用いるモデルでは、 $10.6 \pm 2 \times 10^9$ 年の年代が得られている (FOWLER, 1972)。 ^{187}Os と ^{187}Re を用いた推定では、合成モデルによって $13 \pm 1 \times 10^9$ と $22 \pm 5 \times 10^9$ 年という結果が得られている (CLAYTON, 1968)。 ^{235}U と ^{238}U 、 ^{232}Th とその娘核種である ^{207}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{208}Pb を用いたモデル計算では、宇宙の形成年齢として、 1.08×10^{10} 年程度の年齢が得られている。

^{232}Th と ^{142}Nd の量をスペクトル観測から求め、宇宙の年齢を推測する方法がある。Th/Nd 比は、我々の銀河のディスク内の星では変化が認められない。この事実は、星の年齢が ^{232}Th の崩壊係数 2×10^{10} 年よりかなり短いことを示す (松本, 1988)。この事実を利用したモデル計算によると、 $0.96 \sim 1.1 \times 10^{10}$ 年の年齢が得られている。

球状星団の HR 図と星の進化理論を比較して宇宙の年齢を求めると、 1.3×10^{10} 年という推定値が得られている (野津, 1978)。

星の進化理論による白色矮星の寿命が $9.0 \pm 1.8 \times 10^9$ 年であること、観測による白色矮星の光度関数から、宇宙の年齢が $1.03 \pm 0.22 \times 10^{10}$ 年が推定されている。

遠くの星から届く光は、その距離が大きいほど古いものになる。したがって、最も遠くの天体を探せば、最も古い天体が決まり、宇宙はその天体よりも前にできたことになる。現在、最も遠い天体は、クェーサー (quasar) と呼ばれるものである。もっとも遠いクェーサーは、123億年前のPC1247+3406で、宇宙の形成は123億年より古いということになる。

ハッブル定数が決まれば、その逆数は宇宙の年齢 (ハッブル時間と呼ばれる) とみなすことができる。ただ、現在得られているハッブル定数は、誤差が大きい。したがって、ハッブル定数から導かれるハッブル時間の誤差の大きき、 $9.8 \sim 20 \times 10^9$ 年程度とされている (表2)。

表2. ハッブル常数.

研究者	発表年	ハッブル定数 (km/sec/ 10^6 光年)	ハッブル年齢 (億年)
Hubble	1929	17	176
Sandage & Tammann	1974	17.0 ± 2.7	152~210
Sandage & Tammann	1975	17.5 ± 0.9	163~181
van den Bergh	1975	$29.1 (+4.6, -3.7)$	87~118
Sandage & Tammann	1976	15.4 ± 1.3	183~213
Tully & Fisher	1976	24.5	122
Heidmann	1977	25.5 ± 5.8	96~152
Lyden-Bell	1977	33.7	89
Peeble	1977	12.9~23.6	127~233
Peeble	1977	10.1~26.1	115~297
Visvanathan	1979	15.6	192
Visvanathan & Sandage	1977	15.1 ± 1.2	184~216
de Vaucouleurs	1979	30.7 ± 3.1	89~109
Hanes	1979	24.5 ± 3.4	108~157
Kennicutt	1979	$18.4 (+4.6, -3.1)$	130~196
Kennicutt	1979	19.9	151
Aaronson et al.	1980	29.1 ± 1.2	99~108
Kennicutt	1980	16.9	178
Mould et al.	1980	19.9 ± 1.2	142~160
Stenning & Hartwick	1980	23.0 ± 4.6	109~160
Sandage & Tammann	1982	15.3 ± 2.1	172~227
Nielsen	1984	23.6	127
Sandage & Tammann	1984	17.8 ± 3	144~203
Aenett et al.	1985	18.1	166
Aaronson	1986	28.2 ± 0.3	105~108
de Vaucouleurs	1986	33.4 ± 1.2	87~93
Bottinelli et al.	1986	18~21	143~167
Gouguenheim	1987	22.1 ± 1.0	130~142

松本 (1988) と鈴木敬信 (1991) より引用した。ハッブル年齢はハッブル定数から計算した。

各種の方法で宇宙の年齢は推定されているが、どれも誤差が大きく、 $0.9 \sim 2 \times 10^{10}$ 年と非常にレンジの広いものとなっている。宇宙の年齢の確定はされていないが、平均的には150億年がよく使われる。ただし、その誤差は、 ± 50 億年である。

○陽子崩壊の検証

「宇宙バリオン数」の説明には、まだ定説がないが、仮説のひとつに大統一理論（GUT: Grand Unified Theory）がある。GUTでは、モノポール（monopole：磁気単極子）の存在と共に、陽子が $10^{30} \sim 10^{32}$ 年で崩壊するという予言がなされている。もし、この陽子崩壊が確認されると、ビッグバンのころの宇宙の証拠を見いだしたことになる、GUTの信憑性がでてくる。

陽子崩壊の実証を各地で試みられている。日本の神岡鉱山の地下1,000mに設置されたカムイオカンデは、ニュートリノの観測装置として有名だが、もともとはGUTで予言された陽子崩壊の現場の検証を試るためのものであった。しかし、陽子の崩壊は現在まで一度も確認されず、 10^{31} 年以下の半減期ではないことが実証された。また、モノポールも今だに発見されていない。予言した現象が確認されないことから、GUTは改変をせまられている。

○「ゆらぎ」の発見

現在の宇宙には、星団、銀河、銀河群、銀河団、超銀河団、グレートウォールなどさまざまなレベルでの構造がある（図2）。このような構造の存在は、宇宙には物質のレベルで、ムラがあることを示している。

1989年、ゴダード宇宙飛行センターから打ち上げられたCOBE衛星は、宇宙背景放射を測定し、不均質さのあることを発見した。その宇宙背景放射に見つかった「ゆらぎ」は、 10^{-5} 以下のオーダーである。宇宙背景放射のゆらぎは、非常に初期の宇宙のゆらぎを見ていることになる。

いままでのモデルでは、このようなムラのできかたは示されていない。いつ、どこで、どうしてこのような構造ができたかが問題になってくる。背景放射のゆらぎは、温度のゆらぎを見ていることになる。温度のゆらぎは、密度のゆらぎに比例する。密度のゆらぎは、重力によって増幅されていくため、いったんできた密度のゆらぎは成長していく。

ゆらぎと宇宙の大構造との因果関係はよくわかっていない。暗黒物質による先導説や銀河規模の大爆発説、宇宙ひも（cosmic string）説、ソフト相転移（宇宙壁）説などがあるが決着がついていない。それは、池内（1993）によれば、このゆらぎに対応するような観測される天体がないこと、ゆらぎを形成するには暗黒物質のような重力以外の不明瞭な作用を必要とすることなどから、初期条件より時間を遡るようなモデルは今のところできそうもないらしい。

○ビッグバンの証拠

ビッグバン理論は、観測可能な3つの現象を含んでいる（並木、1990）。それは、ハッブルの法則と宇宙背景放射、軽い原子核の存在比である。実際に理論的に予言されたものは、宇宙背景放射である。この3つの観測事実によって、ビッグバン理論が第一近似としては正しいことが証明された。しかし、ビッグバン理論による宇宙の一樣かつ等方であるという「宇宙原理」は、前述の「ゆらぎ」の発見と宇宙の大構造の発見によって、ビッグバン理論やインフレーション理論の改変やより精密な理論の導入がせまられている。

ハッブルの法則

ハッブルの法則は、1929年にHUBBLEによって発見されたもので、銀河がお互いの距離に比

例した速度で離れていくというものである。速度は、赤方偏移で求められる。天体の赤方偏移は、宇宙の膨張によるドプラー効果であると考えられている。従って赤方偏移は、後退速度と光速の比 (z) で近似できる。

銀河の後退速度 (v) は、銀河間の距離 (r) とハッブル定数 (H_0) から、

$$v = H_0 \cdot r$$

と表現できる。ハッブル定数は、時間に依存せず一定の値を持つと仮定されているが、どのような時期でも一定であったという検証はなされていない。

ハッブル定数は、宇宙を記述するのに非常に重要なものであるにもかかわらず、精度良く決定されていない。それは、遠くの天体の距離を正確に決める方法が、まだ確立されていないためである。1970年以降のデータは、表2にまとめてある。このような値は、平均を求めることにあまり意味はなく、精度のよい観測値が出される必要がある。現在、 $15 \sim 31 \text{ km/sec} \cdot 10^6 \text{ 光年}$ 程度の値が使われている。

宇宙背景放射 (宇宙黒体輻射とも呼ばれる)

1965年のPENZIASとWILSONの偶然による宇宙背景放射の発見により、GAMOWの予言が確認され、ビックバン理論が実証された。ビックバンのときに放射された光が、現在宇宙を満たしている光である。光は激しいドプラー効果によって、その波長は約1,000倍に伸び、現在は主としてミリ波やマイクロ波にかけた電波領域で観測される。この光のスペクトルは、宇宙背景放射と呼ばれ、非常に均質なものである。この宇宙背景放射は、かつて宇宙が、高温・高密度の状態を経験したことを示している。

軽い原子核の存在比

GAMOWのビックバン理論では、宇宙の始まりの3分間で、宇宙を構成する元素がすべてできたとした。しかし、その後、ビックバンの膨張があまりに急激であったために、形成される原子は、ほとんどがHで、ついでHeと、少しのLiとBe、Bしかできないことがわかってきた(寺沢, 1986)。

宇宙が冷えてくると、中性子と陽子が結びついて ^2H (^2D とも書かれる)の原子核を作る(図3)。 ^2H は形成されても、高温状態ではすぐに光を吸って中性子と陽子に分解する。しかし、宇宙が膨張によって急速に冷えてくると一部が残り、 ^2H 同士がぶつかり結合する。そのとき陽子が飛び出すと ^3H (^3D とも書かれる)ができ、中性子が飛び出すと ^3He ができる。 ^3H に ^2H がぶつかり中性子が飛び出し ^4He の原子核が、 ^3He に ^2H がぶつかり陽子が1個飛び出して ^4He ができる。ビックバンから3分後には、温度が 10^9 K まで下がり、さらにLi, Be, Bが作られる。宇宙の創世時につくられる元素は、Bまでである。質量数5と8に安定な原子核が存在しないことと、非常に短期間での原子核合成であったので、軽元素だけしかできなかった。

陽子と中性子の生成と消滅の反応が対称的でないため、陽子と中性子の存在比は、1対1ではなく、10対2になる。このような条件のもとでは、HとHeの存在比は12対1で、質量比では3対1になると計算されている。

Heの合成は、星の中でも起こるが、星のなかで形成されるHeの量は、理論的には現在観測されているHeの量の100分の1程度にしかならず (ARIMOTO & YOSHII, 1986)、宇宙創世の時期にすでにHeが観測される程度合成されていたことになる。

宇宙の元素存在度は、全元素中のHの質量をX, HeをY, その他の重い元素をZで表わす。宇宙初期の元素合成モデルでは、初期条件の設定によってYは変化するが、ほぼ0.25になる (YANG *et al.*, 1984)。星の進化のモデルから、質量、光度、年齢を利用してYを求めると、

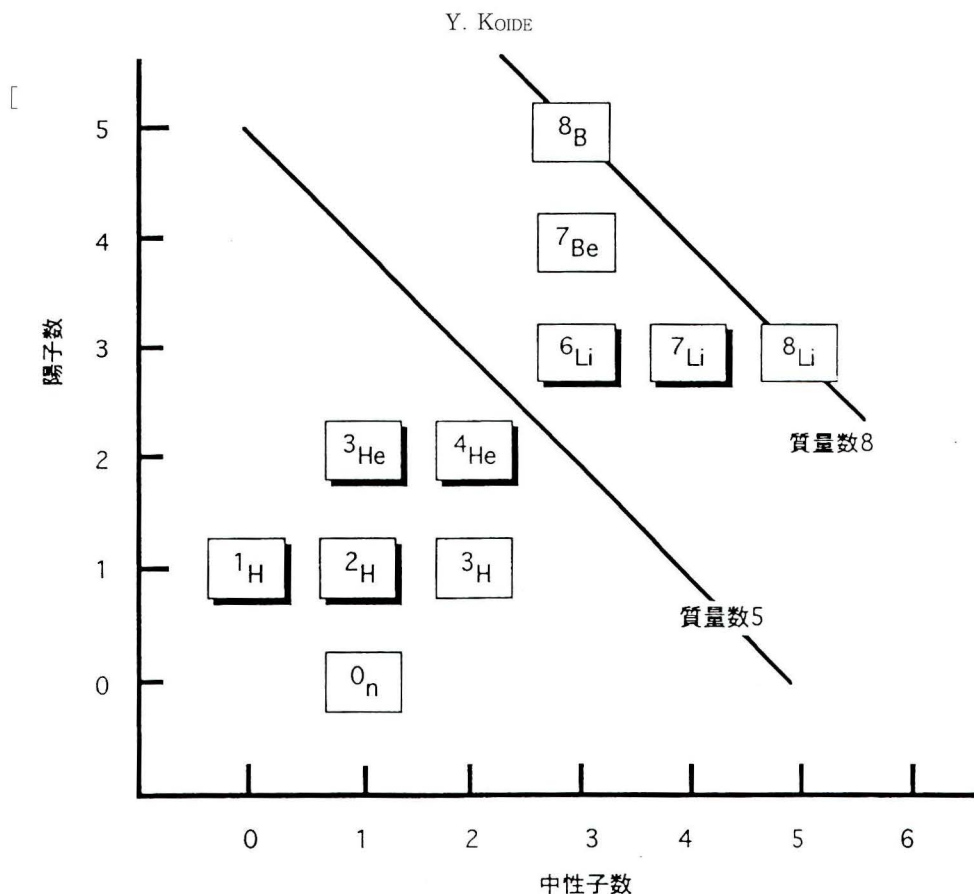


図3. ビッグバンで形成される原子核. 縦軸が陽子数で横軸が中性子数, 足したものが質量数になる. 四角の中に元素記号と質量数を示した. 元素記号のうち, nは中性子を示す. 影の付いた四角の原子核は安定で, 影のないものは放射性核種である. 実線で示した質量数5と8のところには安定な原子核はない.

0.27~0.32になる。我々の太陽プロミネンスのYの観測値は0.38, 太陽風のYは0.20である。一般の星のYは, 0.25~0.27である。我々の銀河の星間ガスのYは, 0.29である。大マゼラン星雲のYは0.29で, 230万年前の銀河NGC6822は0.27, 290万年前のNGC598 (M33と呼ばれる) 銀河はY=0.34, 約1,000万年前のNGC4449銀河はY=0.28である。宇宙のどこをとっても, どの時代をとっても, 非常にHeの値は一樣である。これは, 星の進化によってYがそんなに変化しないことを示す。つまり, 宇宙に存在するHeの存在度は, 星のなかではそんなに消費されず, 宇宙初期に形成された元素比のままであることを意味する。

厳密に始源的なYの値を議論するには, 星の核合成のHe分を差し引くか, 重元素で汚染されていないものを利用して比べる必要がある (佐藤勝彦, 1988)。重元素の汚染は, O/H比でチェックできる。O/H比が小さいほうが重元素による汚染が少ない。O/H比の少ないオリオンのHII領域 (後述) ではY=0.30±0.02, 小マゼラン星雲は0.27程度である。また, O/H比の少ないHII領域は, 0.22~0.3までばらつき, 平均では0.25程度である。その他, 化学的進化の進んでない小銀河の観測から, 0.23~0.27という観測結果が得られている。以上のことから, 宇宙創世の生産量は, Y=0.24±0.02と推定されている (YANG *et al.*, 1984)。He以外の

も、元素合成モデルから得られる値と観測値は非常によい一致を示す。

○暗黒物質

宇宙初期の高温・高密度状態では、各粒子の対創成が可能である。しかし、宇宙の膨張で温度が下がると、粒子は対消滅する。しかし、何らかの理由のために対消滅しなかったバリオンが残った。このような「バリオン数」は、ビッグバン時代の残存物(relict)とみなせる。物質はバリオンからできおり、遠くの天体もバリオンの放射(電磁波)を通じて存在が確認されている。

もし、宇宙の初期にバリオン以外の素粒子で対消滅を免れた残存物があったとし、その素粒子が質量を持っていたとしたら相当な量になるはずである。暗黒物質は、天体になりにくく、電磁波を放出せず、その他の相互作用も非常に弱いという条件を満たさなければならない(佐藤文隆, 1988)。現在の観測技術で暗黒物質を見つける方法は、暗黒物質の塊があれば、宇宙の各階層の構造に予想外の重力作用を及ぼすはずである。間接的ではあるが、このような重力作用から暗黒物質を探知できる。また、宇宙の膨張のスピードは、暗黒物質を含む総質量に見合ったものになるはずである。ハッブル定数の正確な測定ができれば、暗黒物質自体は確認できないが存在は確認できる。

光子もビッグバン時代の残存物である。宇宙初期の光子は宇宙背景放射として観測される。ただ、光子は質量がゼロのため暗黒物質とはならない。その他にも、各種の未発見の素粒子(アキシオン、質量を持つニュートリノ)やブラックホール、多数の褐色矮星などが暗黒物質の候補として考えられているが、まだ確定はされていない。

III 銀河

地球の起源を考える場合、その舞台として一番重要なのは、我々の銀河である。我々の銀河の外には、多数の銀河があることが知られている。そのような銀河の比較検討から、分類がなされ、そして進化モデルが提唱される。銀河には、多様なものがあり、単純な成因でなく複雑な生成環境や履歴をもっていることが予想される。銀河の分類とその進化モデルを概観する。

1 銀河の進化

i 銀河の分類

銀河は、形態によって分類されている。楕円銀河(E型)、渦巻銀河(S型)、レンズ状銀河(S0型)そして不規則銀河(I型)に分けられる(表3)。銀河の各タイプは、色との間により相関があり、不規則銀河→渦巻銀河→楕円銀河の順に青から赤みを帯びる(吉井, 1989)。

楕円銀河は、ディスク(円盤部)がなく、明るさが中心から外に向かって減っていく。球状のE0から極端な楕円までのE7までの8種に細分される。楕円銀河を構成している星は、ランダムな回転運動をしている。そのため楕円銀河全体としては、回転は非常に小さい。楕円銀河には、年老いた赤っぽい星が多く、星間ガスがほとんど残っていない。これは、楕円銀河内では、新しい星が生まれることが少ないことを物語っている。

渦巻銀河は、バジル(中心部)とディスク(円盤部)の部分からなる。丸い形をしたS型(SA型とも書かれる)と、バジルを串ざしにする棒状の構造をもつSB型に区分される。また、両タイプは、渦巻の開き具合によって、最も強く巻き付いたa、中くらいのb、緩く開いているcの3タイプに分けられる。ディスクの部分は、星間ガスが豊富で、若い星が主体であるのに対し、バジルでは老いた星が多い。渦巻銀河の中では、ScやSBc型が星間ガスを最も多

表 3. 銀河の分類.

銀河	略号	細分	頻度	星間物質	バジル	ディスク	構成種族
楕円 レンズ状	E	E0～E7	13.0	なし	あり	なし	種族II
	S0	S0 SB0	21.5	なし	あり 丸い 棒状	あり	種族II
渦巻	S	Sa, Sb, Sc	61.1	多い	あり	渦巻腕	バジル：種族II
		SBa, SBb, SBc			丸い 棒状		ディスク：種族I
不規則	I	Im, I0	4.3	最も多い	なし	なし	

く含んでおり、新しい星が次々と生まれている銀河である。

レンズ状銀河は、バジルとディスクの区別があるが、ディスクに渦巻状の腕を持たないものである。ディスクに棒状の構造を持つSB0と持たないS0型のふたつに分類される。レンズ状銀河は、楕円銀河と渦巻銀河の中間的なものに位置づけられる。比較的安定した回転運動をしているが、星間ガスがほとんどない。

不規則銀河は、上の3つのどれにも属さないものである。

ii 銀河の進化モデル

銀河の形態分類は、1920~1930年代にかけてHUBBLEがおこなったものである。HUBBLEは、形態の違いは銀河の進化の程度の違いであると考えた。しかし、現在では銀河の形態の違いは、銀河形成の初期条件の違いで、銀河のもとになったガス雲の回転の程度の差だと考えられている。

楕円銀河は、ガスの回転が弱いときにできると考えられている。ガスの回転が弱いと、ガスが急速に収縮して、星が一斉に成長し始める。このような星は、種族IIの星（後述）と呼ばれる。そのうち太陽質量の 10^{12} 倍ぐらいの大きな質量の銀河では、1億年程度で、巨星に進化してしまう。質量の小さな銀河では衝突の頻度が多くなり成長時間はもっと短くなる。巨星は高温・高圧のガスを吹き出し、超新星爆発をする。超新星爆発によるガスの放出は、ほとんど同時に起こる。多くの星から吹き出される高温のプラズマ状のガスによって、銀河に残っていた星間ガスも銀河の外に吹き飛ばされる。これを銀河風という。Arimoto & Yoshii (1987) のモデルでは、10億年程度で、銀河風がおきる。吹き出た高温のガスは、銀河を囲むハローとなる。このような銀河の中では、種族I（後述）の材料となる星間ガスが吹き飛ばされてしまうので、若い星が生まれてこない。

渦巻銀河では、銀河ガスの回転が強かったために、種族IIの星が一斉に生まれることはなく、隨時できることになる。そのためディスクのガスも飛び散ることもなく、種族Iの星の材料となる。種族Iの星は、何度もガスから星そしてまたガスへの輪廻を繰り返すことにより、重い元素を含んだ星へと変化していく。

我々の銀河は、Sb型の銀河である。太陽系は、銀河中心の回りを2億年かかって回っている。銀河ディスク内の星の公転速度は、200km/secで銀河の内側でも外側でも同じで、ほぼ円形の軌道をとっている。このような回転は、微分回転と呼ばれ、外側ほどゆっくり回転することになる。微分回転が渦巻き構造を形成したと考えられている。

星は、互いの重力で集まろうとするため、ディスク中に星の密度に粗密のむらができる。

密度むらはディスクの微分回転によって渦巻き状に引き延ばされる。密度の高いところにさしかかった星は重力によって引き寄せられ、密度の高いところを出ようとする星は引き戻される。いったんできた星の密度むらは、助長されることになる。一種の波状に密度むらがディスク内を伝わっていく。これを密度波という。密度波は、ディスクよりもゆっくり回転するため、星は密度波を通過していくが、星間ガスは停滞していく。この星間ガスの多い部分では、星ができ、渦巻き状の腕を形成される。

レンズ状銀河は、いくつかの起源の違ったものが混在している可能性がある（野口，1993）。その起源として、かつてはディスクがあったのだが、星の形成率が高かったのでガスを消費し尽くしレンズ状銀河になったもの、銀河の相互作用によってできたもの、渦巻銀河のガスが銀河間ガスと衝突してなくなったもの、などが考えられている。

不規則銀河には、衝突している銀河や、相互作用をしている銀河も含まれる。また、渦巻銀河で、渦巻とバジルを持たないディスクだけの銀河も含まれる。その典型は、大マゼラン星雲と小マゼラン星雲である。不規則銀河は、ガスが多く、全体的に青く、金属元素の含有量が少なく、あまり進化していない銀河と考えられている。しかし、その進化の実態は良くわかっていない。

2 観測事実と束縛条件

○スターバースト

数千万年という非常に短い期間のうちに、銀河質量の数％分が星を形成する。このように大量の星が短期間で形成される現象をスターバーストという。

スターバーストで形成されたとされるOB型星（後述）は、超新星爆発を起こした際放出されるシンクロトロン放射によるX線で観察され、OB型星に暖められた周囲のダストからの熱放射の赤外線でも観測できる。また、Hの出すH α 線でOB型星の周辺のHII領域（星が形成されやすいところ：後述）の観測などから、スターバーストの可能性が指摘されてきた。相互作用を起こしている銀河の中心核近傍の1～2 pcの狭い領域でスターバーストが発生していると考えられている。

野口（1993）のシミュレーションでは、銀河同士の相互作用によって、銀河に棒状構造ができ、銀河に中心部にガスの流入が起こり、激しい星の形成つまりスターバーストがおこることが示された。

○銀河の化学組成

B（ホウ素）以上の重元素の合成は星の中でおこる。したがって、銀河は、時間の経過とともに重元素の量が増えていく。

YOSHII & ARIMOTO（1987）のモデル計算によると、楕円銀河の質量が大きくなると、重元素の生成の比率も大きくなる。太陽質量の 10^{12} 倍程度の巨大楕円銀河では、星の重元素の量は太陽の0.1～10倍（太陽の量は0.02程度）、平均値で約2倍に、 10^7 倍の楕円銀河では0.1～0.01倍、平均で0.5倍になる。

渦巻銀河では、形成後10億年ほど経過したときにバジル風が発生し、大量の重元素をハローにまき散らしたと考えられている。バジルは楕円銀河と非常によく似ている。これは、楕円銀河の重元素の頻度分布モデルと、我々の銀河のバジルのK型巨星の重元素の頻度分布の観測値が一致することで確認されている（RICH, 1990）。渦巻銀河のディスクにおける重元素の形成過程は、主系列星の観測で知ることができる。ディスク内のG型星の重元素量は、太陽の0.1～

1.5倍、平均で0.5倍である。0.1倍より低い重元素量の星は極端に少ない。ディスクを形成した初期的なガスにはもともとある程度の重元素が含まれていたことになる。これは、銀河バジルの最初のスターバーストのときにハローに飛び散ったガスが銀河面に落ちてディスクを形成したことを意味する（有本，1993）。

○銀河の相互作用

図2に示したように、銀河間の平均距離は 10^6 pcである。銀河の半径が、 $10^4 \sim 10^5$ pcであるので、銀河の平均距離は、半径の10～100倍になる。一方、銀河の中の星の平均距離は、星の半径の100～10,000倍である。従って、宇宙は星のレベルでみるより、銀河のレベルでみるほうが込み合っていることになる。

一個の銀河が、宇宙年齢の間に衝突する確率は、約0.01回となる（野口，1993）。0.01回というのは、下限の値である。それは、銀河は密集している部分があること、また、宇宙が膨張しているためかつてはもっと銀河間距離が近かったことから、衝突の確率が多かったと考えられる。衝突、あるいは衝突にいたらない銀河同士の相互作用は、頻繁に起こったはずである。

銀河のbタイプは、棒状の構造を持つ。野口のシミュレーションによれば、棒状の構造は、2つの銀河の潮汐作用によってできる。しかし、別のシミュレーションでは、ディスクの質量がハローより大きければ、ディスクは不安定となり、自然に棒状構造ができることが示された。また、楕円銀河は渦巻銀河の接近・合体した結果だという説があり、シミュレーションの結果もその可能性を否定しない。どれが棒状構造の形成の原因かは決着が付いていない。

○銀河中心核

銀河の中心は、物質が多く、大きな重力をもつ。銀河が回転しているうちは、ガスが銀河中心核に落ちることはないが、回転速度が落ち始めると、ガスが銀河中心核をめざして落ち込んでくる。銀河の中心核は、巨大なブラックホールになっており、その回りを10,000 km/secのスピードで回転する降着円盤がある。ガスは、降着円盤に降りつもり、数万から数百万度の高温になり、強烈なX線や紫外線をだす。このような状態の銀河は、活動銀河と呼ばれる。全銀河の1%が、活動銀河であるとみなされている。また、クェーサーや電波銀河、セイファート銀河など観測的に異なる天体も、活動的な銀河中心核として理解されつつある。

IV 星

星の一生は比較的良好に理解されているが、まだ実証されていない部分も多い。星は、質量によってその一生が決定づけられ、いくつかの終焉が予想されている。銀河の中で、星が果たす役割は、重元素の生産とガスの放出である。星は、星間ガスから生まれ、星としての寿命を終え、また星間ガスへとかえる。物質は、一連の輪廻をめぐるたびに、重元素が増える。白色矮星や中性子星、ブラックホールなどは、物質循環の輪廻からはずれ、同じ形態のまま存在し続ける。

1 星の進化

i 星の分類

星は、高温である。高温の物体は、温度に応じた放射を行う。放射は、温度に依存するため、表面温度10,000度以上の星は青く、5,000度以下の星は赤く見える。放射とは、連続するス

表 4. 星のスペクトル型.

スペクトル型	表面温度(K)	スペクトルの特徴
O	80,000	He ⁺ ; 高次電離O、N線
B	20,000	He線 ; 電離O ⁺ 、N ⁺ 線
A	10,000	H線 ; 電離金属線
F	7,000	AとGの間 ; Ca ⁺ 線
G	6,000	中性金属吸収線 ; 最強Ca ⁺ 線
K	4,200	GとMの間 ; Ca線 ; CH、CN線
M	3,000	TiO分子線 ; Ca線 ; 各種分子線
R	3,000	ZrO分子線
N	3,000	C ₂ 分子線

ベクトルで、その中に星の大気に含まれる元素の輝線スペクトルが存在する。輝線スペクトルの種類とその強度によって、星はスペクトル型に分類される。温度の高い方から、O、B、A、F、G、K、Mと名付けられている。OからMに向かって早期から晩期と呼ばれる。OからMへの変化は連続しており、さらに0から9まで細分される。0はそのスペクトル代表的なもので、5は中間的なものになる。その他にも、C（炭素）のスペクトル線の強いN、Cが少なくZrOの輝線スペクトルが特徴のRが区分されている（表4）。

同じスペクトル型でも、星の大気の圧力によって、線スペクトルの幅が異なり、スペクトル級としてIからVIIに細分される。Iが超巨星（Ia明るい超巨星とIbそれほど明るくない超巨星に分けられる）、IIが明るい巨星、IIIが普通の巨星、IVが準巨星（巨星と主系列星の中間の星）、Vが主系列星、VIが準矮星（主系列星より1.5等級ほど暗い星）、VIIが白色矮星に相当する。

スペクトル型とスペクトル級が決まると星の明るさが決まる。星の明るさが決まると、連続スペクトルが求められる。推定された連続スペクトルと、観測された連続スペクトルを比べることによって、星間減光が求められる。星間減光とは、観測した星と地球の間にある塵による散乱や吸収によって起こる現象である。星の明るさと星の光の強さ、星間減光から地球と星の距離が推定できる。

星は、スペクトルによって大きく2つの種類に区分されている。一つは、重い金属元素のスペクトルがはっきり見える種族I（population I）と呼ばれる星と、重い金属元素のスペクトルがはっきりしない種族II（population II）の星である。

種族Iの星は、重元素とHの比が0.06～0.02で、年齢が若く、主系列の星が多い。種族Iの星は、散開星団をつくり、銀河のディスクを構成している。我々の太陽は、種族Iに属し重元素/H比は0.02である。一方、種族IIの星は、重元素/H比は0.01以下で重元素が少なく、年齢が古く、赤色巨星や超巨星が多い。種族IIの星は、球状星団をつくり、銀河のハローを構成している。

HR図は、横軸に星のスペクトル型（O型を左に、M型を右）をとり、縦軸に絶対等級をとって、星のデータをプロットしたものである。スペクトル型のかわりに、星の表面温度や色指数、色温度、有効温度を、絶対等級の変わりに星の真の明るさや光度などをとることもある（図4）。1905年にHERTSprungが考え、1913年にRUSSELLが図示したものである。2人の名前

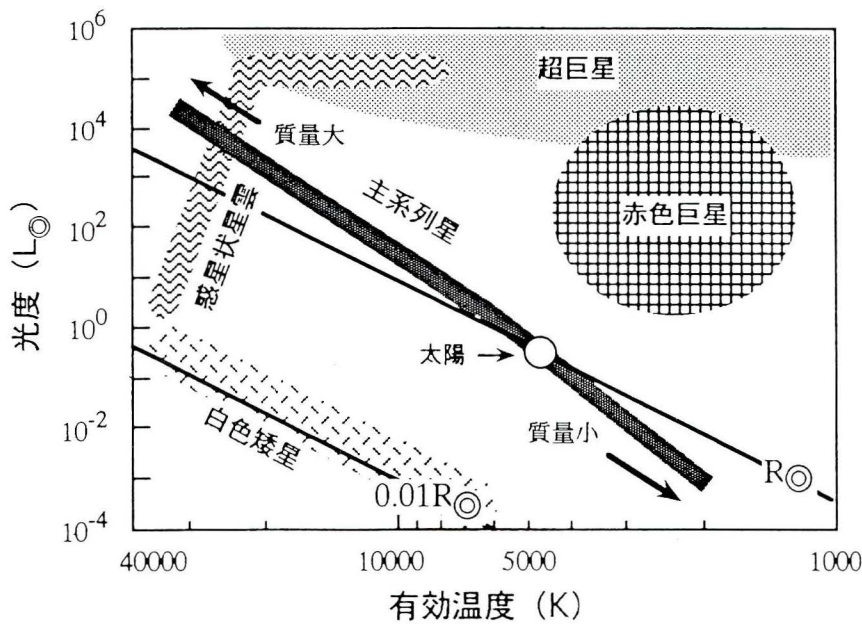


図4. HR図. 光度 ($L_{\odot}$) は太陽光度で $1 L_{\odot} = 2 \times 10^{33} \text{erg/sec}$, $R_{\odot}$ は太陽半径で $1 R_{\odot} = 6.96 \times 10^8 \text{m}$ になる. 主系列星と赤色巨星, 超巨星, 惑星状星雲の中心星, 白色矮星がプロットされる領域を示した. 実線は $1 R_{\odot}$ と $0.01 R_{\odot}$ の星の光度と有効温度の関係を示したものである. 主系列星の領域では, 左上の星ほど質量が大きく右下にいくほど質量は小さくなる.

表5. 恒星の進化.

質量 (太陽=1)	主系列時代の スペクトル	収縮時代 (年)	主系列時代 (年)
20	B0V	3×10^4	1×10^7
10	B1V	1.2×10^5	4×10^7
5	B5V	6×10^5	2×10^8
3	A0V	2×10^6	5×10^8
2	A8V	8×10^6	2×10^9
1	G2V	5×10^7	1×10^{10}
0.8	G7V	8.5×10^7	2×10^{10}
0.6	K5V	2×10^8	7×10^{10}
0.4	K9V	3×10^8	2×10^{11}
0.3	M2V	5×10^8	4×10^{11}
0.2	M5V	1×10^9	1×10^{12}

をとって、HERTSprung-RUSSELL 図、略して HR 図と呼ばれている。1950年代になり、星の進化と構造が、この図で系統的に表されることがわかってきた。

星の92%が主系列星と呼ばれる領域にプロットされる。散開星団の星は明瞭な主系列を作るが、球状星団の星は主系列の温度が低いところに短くプロットされるにすぎない。HR 図で、質量の大きい主系列星は左上で、質量の小さい星は右下にプロットされる。主系列星の高温の星と低温の星では、最大で1億倍ほどの温度差があるのに、その半径と質量の比は3倍ほどしか変わらない。質量/半径比は、星の内部温度にはほぼ比例する。これは主系列星の内部では同じ種類の核反応、つまり水素の熱核反応がおこっていることを示している（杉本，1991）。

ii 星の進化モデル

星の一生は、その質量によって定められている（表5）。核融合反応はエネルギーの放出をともしない、星を膨張させる。一方、星は質量に応じた自己重力で縮もうとする。膨張と収縮の力の釣り合いが、星の大きさを決定する。つまり、質量に応じて、星の性質が決まるということになる。このような力学的平衡状態は、非常に安定で、熱核融合反応が停止するまで続く。

星は、生まれるときと老いて死ぬときに激しい変化を起こす。星の誕生については、後述するので、ここでは星の死について説明する。

星の寿命とその終わりがたは、質量によって大きく変わる（図5）。主系列星の寿命は、質量の2乗にはほぼ反比例するといわれている。小質量の星は、エネルギー発生率が低い、つまり核合成のスピードが遅く長寿となる。質量の小さい星は、1,000億年以上の寿命をもつといわれている。非常に小さな質量の星は、暗くて見えないような低温の星、褐色矮星と呼ばれ、膨大な数の星が潜在的にあると考えられている。

主系列星内でHからHeへの核融合反応が終わると、星はエネルギー放出が減り、自己重力が勝り収縮する。充分な質量がある星では、収縮によってHeを利用した核融合が始まる。質量に応じてより質量数の大きい核融合が起きる（表6）。HからHeの核融合に比べ、質量数の大きな核種の放出するエネルギーは少ない。核融合のエネルギーの変化によって、星は不安定に

表 6. 核燃焼による元素合成.

燃焼	主な生成核種	温度 (10 ⁷ K)	恒星種
¹ H燃焼 (ppチェーン) (CNOチェーン)	² H, ⁴ He ⁴ He, ¹² C, ¹⁶ O	1.5~2	主系列星
⁴ He燃焼 (3α反応)	¹² C, ¹⁶ O	15	赤色巨星
¹² C燃焼	²⁰ Ne, ²⁴ Mg	70	赤色超巨星
²⁰ Ne燃焼	²⁴ Mg, ¹⁶ O	150	赤色超巨星
¹⁶ O燃焼	²⁸ Si	250	白色矮星
²⁸ Si- ²⁴ Mg燃焼	⁵⁶ Ni	400	超新星
⁵⁸ Ni	⁵⁶ Fe	400	超新星

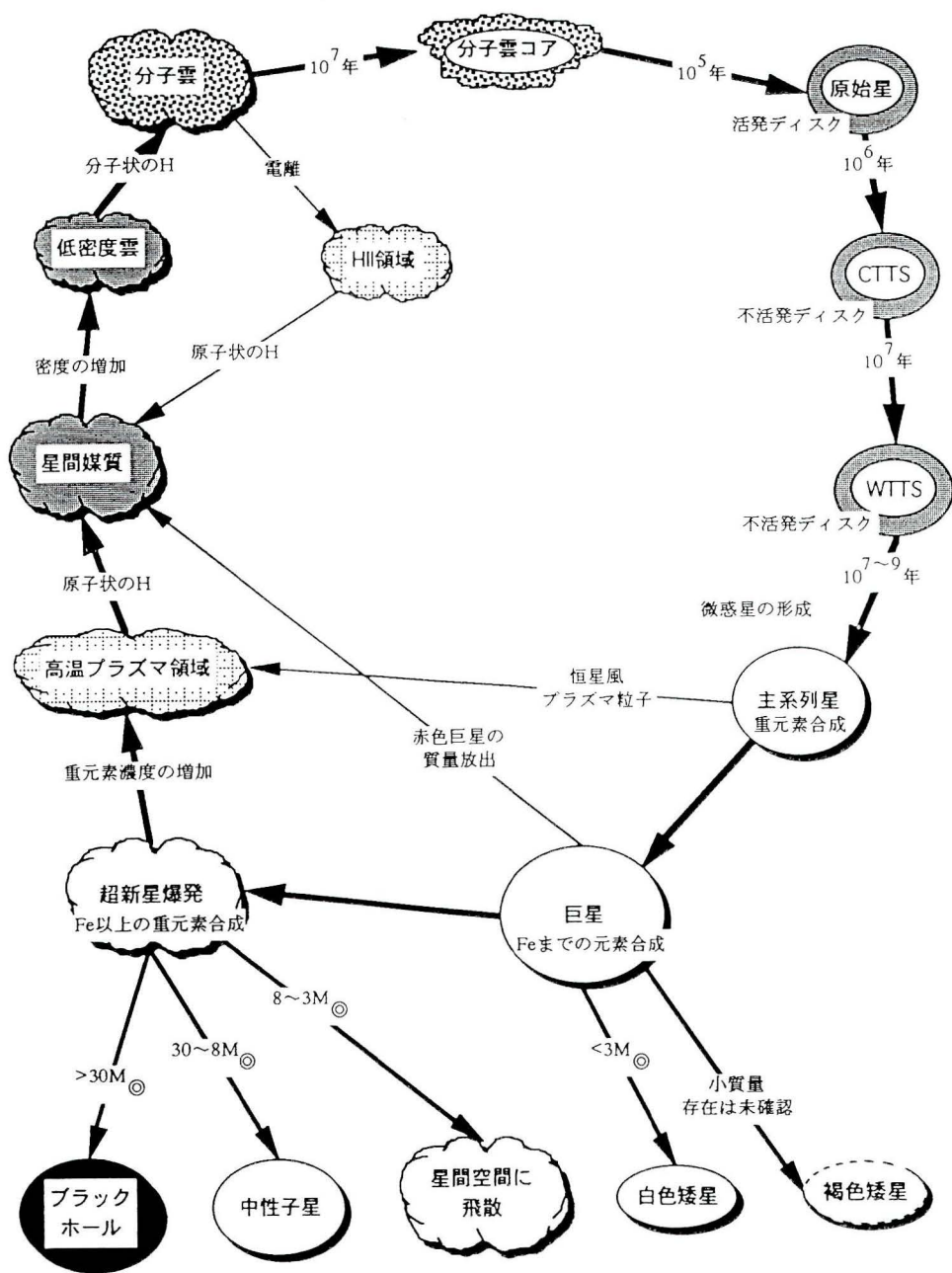


図5. 星間物質から星への輪廻. 星から各種の星間物質の輪廻を太い実線で示した. また, 巨星と超新星爆発で輪廻からはずれていくものを質量別に示した. 細い実線は, 主の輪廻以外の経路を示した. $M_{\odot}$ は太陽質量で, $1 M_{\odot}=1.99 \times 10^{33} g$ である.

なり星全体が膨張する。核融合によるエネルギーが減っているのに膨張するため、星の温度は下がっていく。つまり、赤くて大きい星になる。このような星は、赤色巨星という。赤色巨星のサイズは星の質量によって違うが、ここまではどの星もたどる運命である。

太陽の3倍以下の質量の星は、主系列星で数億～数百億年過ごした後、膨張して赤色巨星になる。星の外層が膨張を続けると、中心星の重力の影響は減り、最後には中心星から離れて星雲状のガスになる。これを、惑星状星雲という。惑星状星雲は、広がり続け、まわりの星間ガスとなっていく、やがて見えなくなる。星間物質として放出されたガスは、次の星の材料として輪廻のサイクルに入る。

中心部に残された星の温度は、数万度になり白く見える。中心星は非常に小さいため白色矮星と呼ばれる。白色矮星はエネルギー源を使い果たしており、あとは冷えるのみで、赤色矮星から黒色矮星となり死を迎える。

我々の太陽は、宇宙では一般的な質量をもつ星で、その寿命は約100億年(計算上104億年)といわれている。現在、太陽は46億年経過したので、寿命の約半分を生きたということになる。そして、赤色巨星から惑星状星雲への道をたどると考えられる(図6)。

大質量の星は、エネルギー消費量が多く、寿命が短い。大質量星の核融合反応は、Feの形成まで続く。Fe以上の原子核は、吸熱反応でエネルギーを与えないと核融合が起こらない。したがって星の中で形成される元素は、Feまでである。星の中心にFeが生成され、Si・S・Ca層、O・Ne・Mgの層、C・Oの層、Heの層、そして一番外側にHの層という多層構造を形成する。

大質量の星の中心部は、60億度以上の高温になり、高エネルギーの光子が発生して、Feの原子核をバラバラにしてしまう。バラバラになるとき中性子や陽子は、エネルギーを吸収するため、中心部の圧力が下がり、星は重力崩壊を起こす。重力崩壊が始まると、陽子は電子を取り

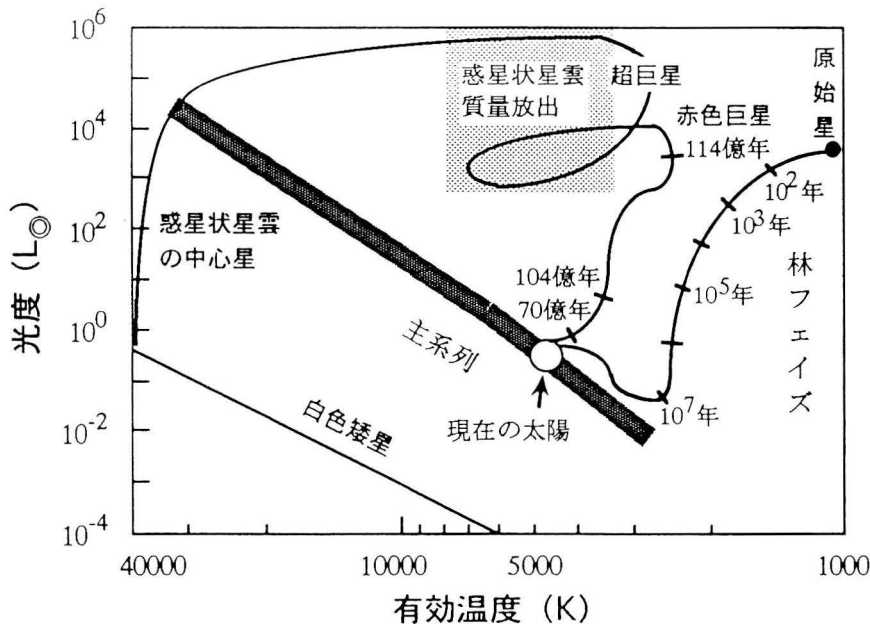


図6. 星の一生. HR図上で、太陽質量程度の星 ($1 M_{\odot} = 1.99 \times 10^{33} \text{ g}$) の進化過程を示した。原始星から主系列に達するまでの林フェイズの所用時間と、主系列から白色矮星までの経路と時間を実線で示した。

込み中性子になる。中性子になると電氣的な反発はなくなり、中心部はもっと高密度の状態になる。中性子がぎっしりつまった中心部では、重力崩壊がストップする。外側ではまだ重力崩壊が続くために、外から落ちてきた物質が中性子の芯の部分にぶつかりはねかえる。そのときに強い衝撃波ができ、外からくる物質をはね飛ばす。この衝撃波は、2, 3日で、星の表面にたっし、星の外側の物質をはね飛ばされる。これが超新星爆発と呼ばれるものである。

超新星爆発のとき、衝撃波が星の内部を通過すると、急激に温度が上昇し、激しい核反応が起る。核反応は、速い中性子の捕獲反応である r 過程や陽子捕獲反応である p 過程がおこり、Fe より重い元素が合成される。

超新星爆発は、H のスペクトル線が見えないか見えるかによって、I と II 型に区分される (VAN DEN BERGH & TAMMANN, 1991)。

3 ~ 8 太陽質量の星では、縮退がおこり、C と O の中心核が形成され成長するにつれて、C の核融合反応の暴走がおこり爆発する。このとき、星をつくっていた物質は完全に飛び散ってしまう。このような超新星爆発を I 型と呼ぶ。I 型の超新星爆発はあらゆる銀河でおこる。

8 太陽質量以上の星では、Fe の中心核ができ、 4×10^9 K 以上の温度になると、Fe は光分解する。このときの超新星爆発を II 型という。II 型の超新星爆発は、渦巻銀河だけで発生する。

太陽の 8 ~ 30 倍の質量の星は、青い色の主系列星から非常に明るく赤色超巨星 (表面温度 3,000 度) や青色超巨星 (表面温度 10,000 度以上) となる。II 型の超新星爆発では、星のほとんどの物質が飛び散ってしまうが、中心部の中性子の芯は星として残る。この中性子からできた星を、中性子星と呼ぶ。中性子星の磁極付近から、電波や X 線などの電磁波が放射される。磁極と自転軸は必ずしも一致せず、放射される電磁波は回転する。その回転の半径内に地球があると、放射線は、パルス状になって見える。このような強烈なパルスをだす星を、パルサー (pulsar) と呼ぶ。

太陽の 30 倍以上の質量の星も、II 型の超新星爆発を起こす。中心部は、重力が中性子の反発力に勝り、重力崩壊を止めることができず、光も抜けでることができないブラックホールとなる。

2 観測事実と束縛条件

○星間物質

宇宙の物質は、天体だけではない。天体以外にさまざまな形態の物質がある。それは、星間ガスとか星間物質と呼ばれるものである。星間物質は、種族 I の星とほぼ同じ元素組成をもつと考えられている。星間物質の元素の重量比は、H が 70 ~ 75%, He は 23 ~ 28%, 残りの重元素が 2 ~ 3% となる。宇宙空間の多くは中性の H が低密度・低温で存在する星間媒質と呼ばれるものでうめられている。星間媒質は一様ではなく、H の状態や温度・密度によって不均質があり、区分されている。そのような部分は、領域や雲と呼ばれている。星間空間は、宇宙の主要物質である H の状態によって、H が電離している状態、中性原子の状態、中性分子の状態に区分されている (図 7)。

電離している H (高温プラズマ領域、低密度 HII 領域、高密度 HII 領域)

H が電離している状態は、高温低密度で特徴づけられる高温プラズマ領域と、やや温度の低い HII 領域の 2 種に区分される。

高温プラズマ領域は、超新星爆発や高温度星からの紫外線や X 線などによる高次の電離イオン (O^{6+} や N^{4+}) が観測され、区分された。高温プラズマ領域は、電離が起こったときの衝撃

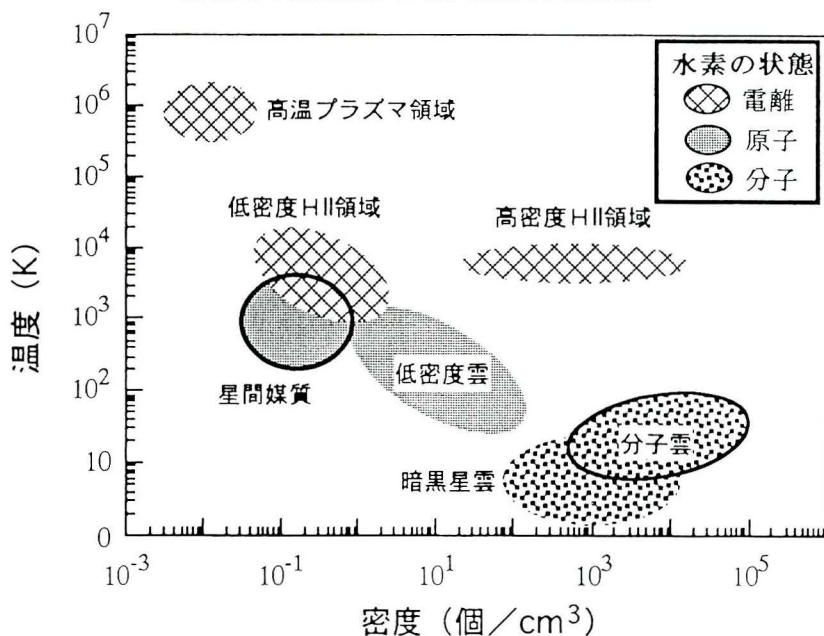


図7. 星間ガスの状態図. 星間物質の水素の状態（電離状，原子状，分子状）による区分とその領域範囲を示した.

波面によってできた，巨大な泡状や泡が連なったトンネル状として存在する。Hイオンの密度は， $1 \text{ 個}/\text{cm}^3$ 以下だが， 10^6 K 以上の高温のプラズマとして存在する。HII領域は， $7,000 \text{ K}$ 以上の高温の星間物質で，若い高温の星のまわりにできる活発な活動をしている領域である。HII領域は，Hイオンの密度が $100 \text{ 個}/\text{cm}^3$ 以上の高密度の領域と， $100 \text{ 個}/\text{cm}^3$ 以下の低密度の領域に細分される。

中性のH原子（HI領域，HI雲，低密度雲，星間媒質）

宇宙空間は，Hの原子核が電子を伴った中性の状態ではばらに存在する。このような領域は星間媒質（inter stellar medium）と呼ばれる。星間媒質は，H原子が $1 \text{ 個}/\text{cm}^3$ 以下， $6,000 \text{ K}$ 以下の温度である。中性のあるいは分子状のHの領域は，星間雲と総称される。星間雲は，密度によって低密度雲と分子雲（分子状のHが存在：後述）に区分される。低密度雲は，HII領域より低温の $6,000 \text{ K}$ 以下の領域で， $1 \sim 100 \text{ 個}/\text{cm}^3$ の密度でHが中性の状態が存在する。低密度雲の質量は太陽質量の 10^3 倍程度である。

低密度雲は星の光の吸収によって観測される。また， 21 cm のH原子の出す波長の電波で観測される。HI領域の分布から，我々の銀河の渦状腕があることが判明した。

低密度雲は，星間媒質と同じく重力的束縛状態ではなく，圧力的に平衡状態にある。低密度雲や星間媒質は温度が低く密度がやや高く，高温プラズマ領域と低温HII領域は低密度であるが温度が高い。そのため，低密度雲や星間媒質と，低密度HII領域，高温プラズマ領域は，似たような圧力平衡にあると考えられる。

観測されている低密度雲の化学組成比を太陽系のものと比較すると，表7のようになる。低密度雲のMgやSi，Al，Ca，Ti，Feなどのほとんどの重元素は，太陽系の化学組成に比べて，数桁少なくなっている。これは，ガスの成分のみを観測しているためで，固体成分の宇宙塵が加わっていないからだと考えられている（鈴木博子，1983）。

表 7. 太陽系と星間ガスの化学組成.

元素	太陽系	低密度雲	宇宙線 観測値	源
H	2,700,000	10,000,000	-	-
He	270,000	-	49,000	30,700
Li	0.06	-	118	-
Be	0.00007	-	53	-
B	0.003	-	246	-
C	1,000	1,000	1,000	1,000
N	310	200	228	60
O	2,400	2,000	913	1,280
F	0.08	-	22	7
Ne	340	-	132	160
Na	6	3	32	27
Mg	110	20	169	295
Al	8.4	0.02	30	44
Si	99	6	118	280
P	1.0	0.4	4.7	6
S	51	100	19.3	38
Cl	-	-	4.2	3
Ar	10	3	7.4	8
K	0.37	0.1	6	7
Ca	6.0	0.006	15.9	37
Sc	0.003	-	3.4	-
Ti	0.24	0.002	12.6	-
V	0.03	-	6.7	-
Cr	1.3	-	12.8	-
Mn	0.95	-	8.5	-
Fe	89	2	71	305
Co	0.22	-	0.2	-
Ni	4.9	0.1	-	-

太陽系の元素比は ANDERS & EBIHARA (1982), 低密度雲は鈴木博子 (1983), 宇宙線は西村 (1988) による. 元素比は, C を 1,000 個としてすべて再計算した.

宇宙線に含まれる化学組成では, Li や Be, B などの元素 (L 核元素と呼ぶ) がきわめて多い. このような元素は, 恒星内の熱核反応ではできにくいものである. また, できたとしてもすぐ壊れてしまう元素である. したがって, 宇宙線源にもこのような元素が多量に存在していたのではなく, 破砕核反応によって形成されたものだと考えられている (西村, 1988).

そこで, 破砕核反応によって形成された分を抜いたものが宇宙線の源だと考えられる (表 7). 宇宙線を発する物体は, 恒星内の元素合成 (s 過程) 以外に, 超新星爆発のときに生じた元素 (r 過程) も含む. 質量数が 60 程度まで (Fe 付近) は, 太陽系の組成にやや似ているが, その誤差は大きい.

分子の H (分子雲, 暗黒星雲, 散光星雲)

星間雲のうち分子雲は、 $1,000\text{個}/\text{cm}^3$ 以上で、 $10\sim 30\text{K}$ の低温である。分子雲内では、大部分のHeより重い元素は、半径 $0.1\mu\text{m}$ 程度の固体粒子になっていると考えられる。このような固体粒子は、星間塵とか宇宙塵と呼ばれ、紫外線の吸収によって観測される。そのほかに、COやホルムアルデヒド、シアン化水素、エチル基、シアノアセチレン、ホルミル基などの分子が、普遍的に存在する。CO分子が $300\text{個}/\text{cm}^3$ 以上あれば 2.6mm の電波で観測可能である。

銀河の中心部1万～2万光年には、分子雲の多い領域がリング状にある。銀河全体として、分子雲は5,000個程度ある。1個の分子雲は、直径 $30\sim 300$ 光年で、質量は太陽質量の $10^4\sim 10^6$ 倍程度である。星間雲は、星と同じように銀河の中心の回りを $250\text{km}/\text{sec}$ で回転している。そのほかに $10\text{km}/\text{sec}$ の無秩序な運動もおこなう。銀河内の分子雲の総質量は、太陽質量の 10^9 倍、銀河内の星の質量の20%に匹敵し、星間物質の90%をしめる。

星間雲は、直接みることはできないが、回りの星との関係でみるのが可能である。星間雲が背後に見えるはずの星を遮っている場合を暗黒星雲と呼ぶ。温度は 10K で2光年程度の半径、太陽質量の100倍以上の不定形である。星間雲が近く of 明るい星の光を反射している場合を散光星雲という。

暗黒星雲は、定義によれば、分子雲のうち暗いシルエットを作るものをいい、分子雲とは見え方だけの違いである。しかし、慣例により分子雲より質量が少ないものを暗黒星雲といたり、星の生まれている場所を指したりする。暗黒星雲という呼び方は、使い方が必ずしも区別されていないので、物理量を議論するときは注意を要する。

○星の重元素濃度

宇宙における星の役割のうち、ガスの放出が物質の進化には重要である。星は星間物質から生まれ、ガスを放出して一生を終わるという一連の輪廻をもっている(図5)。この輪廻で生まれるガスは、星を作ったガスとは違う。それは、星の中の核融合と超新星爆発の重元素の合成によって、重い元素を含むガスへ変化していく。輪廻が繰り返されるにしたがって、重元素の比率が多い星間物質になっていく。この変化をうまく読みとれば、星や銀河、宇宙の進化に関する情報を引き出せる。

1957年にBURBIDGEらは、すべての元素の合成過程を示す試みをおこなった(BBFHモデルと呼ばれる)。ビックバンのときに形成された軽元素以外は、恒星内と超新星爆発で合成されるというモデルである。恒星内では、核燃焼のH反応、 α 反応、e過程などでFeまでの元素が合成される(表6)。さらに ^{13}C や ^{17}O などの $(4n+1)$ 核の (α, n) 反応でできた中性子の捕獲によるs過程で、星の内部でもわずかながら、重い元素ができる。

超新星爆発における核合成は、s過程とともに、速い中性子捕獲反応(r過程)や陽子捕獲反応(p過程)がおこる。このような過程によってFe以上の重元素(超U元素まで)の合成がおこなわれる。1987年2月23日に大マゼラン星雲で発生した超新星SN1987Aによって、Uあたりまでの多くの重元素が実際に観測され核合成モデルが検証された。また、各地のニュートリノ検出装置でもこの超新星爆発のときに発生したニュートリノを検出した。これは、太陽系外からの初めてのニュートリノである。

重元素の放出は、主として星の末期の超新星爆発と惑星状星雲の形成時におこなわれる。CやNは超新星爆発ではあまり放出されず、惑星状星雲の中にたくさん見いだされる。

I型超新星爆発では、 0.7 太陽質量におよぶ大量のFeの放出をおこなう。一方、II型の超新星爆発では、Feより質量の小さい、OやMg、Neなどの元素が放出される。 20 太陽質量程度の

星の場合、Feの放出量は0.07太陽質量である。銀河形成初期には、II型超新星爆発だけが重元素を供給し、時間がたつにつれてI型超新星爆発も重元素を供給するようになった。太陽付近の星は、IとII型の超新星爆発による重元素供給比は1:9程度と考えられている(辻本・野本, 1993)。

○遠く of 天体

遠く of 天体は、非常に古い光を観察することになり、「宇宙の化石」のようなものと考えられる。したがって、古い天体を探すことは、宇宙の歴史の解明に重要である。一番遠い銀河は、4C41.17という赤方偏移 $z=3.8$ の宇宙誕生から41億年後のものである。 $z=4.7$ のPC1158+4635というクェーサー(準恒星状天体、準星とも呼ばれる)が、光速の94%のスピードで遠ざかっているのが遠く of 天体であった。最近、PC1247+3406というクェーサーが発見された。このクェーサーが現在、一番遠くにあるとされるもので、 $z=4.897$ 、123億光年の距離である。宇宙の150億年のうち、123億年までの天体が見つかることになる。

クェーサーは、一般に赤方偏移が大きく、遠くにある天体である。しかし、普通の銀河より明るく輝いているので、遠く of クェーサーでも観測することができる。エネルギーの発生率が通常の天体の10倍以上あるので、通常の天体や銀河の活動とは違った機構が働いているはずである。現在、確定したモデルはないが、活動的な中心核をもつ銀河と考えられている。クェーサーは古い天体であることから、宇宙の初期や銀河の形成時期の履歴を保存している可能性があるが、まだ十分な検討はなされていない。

○種族IIIの星

現在観測されている星には、種族としてIとIIの2つがあることは前述した。この他に、種族IIIという星が考えられている。実際には、種族IIIの星は見つかっていないが、ビッグバンで形成された元素から作られた星が、かつては存在したと考えられている。種族IIIの星は、ビッグバンで形成された元素組成と、現在の星を構成している元素組成のとのギャップを埋めるものである。

その根拠は、重元素の存在量である。現在の星の重元素/H比は、最小値でも 10^{-4} 以上ある。この比が、 10^{-5} 以下の星は見つかっていない。我々の銀河は、すべて種族IかIIの星で構成されている。我々の銀河を構成している物質の大部分は、重元素をある程度含んだ物質からできていることを示している。つまり、我々の銀河は、ビッグバンで合成された元素から直接できたのではなく、すくなくとも一度は、重元素合成のメカニズムを通り抜けた物質からできている。

種族IIIの星がもし存在したとすると、その星の質量は、巨大で、短寿命で、できてすぐに寿命が終えたと考えられる。種族IIIの星の残骸は識別されていないが、高温プラズマ領域は、種族IIIの星の超新星爆発や恒星風で加熱された可能性が指摘されている。

もう一つ、種族IIIの星の存在を示唆するデータとして、近赤外線領域の宇宙背景放射がある。その観測値は、予測値を大きく上回るものであり、波長 $2\mu\text{m}$ 付近に強いスペクトルらしきものがある(松本, 1988)。赤方偏移の大きいところでおきた現象は、近赤外線領域でその影響が表れやすいため、宇宙の初期におきた事件を記録している可能性がある。観測値は、3Kの宇宙背景放射の数%を占めるほどのエネルギー量に相当し、激しい事件が起きたことを示す。また、 $2\mu\text{m}$ の強いスペクトルは、赤方偏移したライマン α つまりHの輝線スペクトルの可能性がある。このような現象は、銀河形成以前の大質量の種族IIIの星が一斉に形成され、爆発し

た名残かも知れない。

V 惑星系

地球は、他の惑星や衛星と一緒に、惑星系形成の一連の過程によってつくられたはずである。もし地球だけが、特別なところ、特別なときに作られたとしたら、地球や生命に関する研究は地球固有の特殊なものになってしまう。しかし、他の惑星や地球の持つ規則性は、地球が太陽系で特別な星ではなく、他の惑星などと一連の因果関係をもっていることを強く示唆する。また、惑星系も、我々の太陽系特有のものではないということも観測事実からわかってきた。惑星系の形成を概観する。

1 惑星系形成モデル

i モデルの変遷

惑星系と太陽との成因関係は定かではなかったが、科学の土俵で議論され、太陽系は太陽や惑星、各種の衛星、彗星などを含めて形成されたい。しかし、詳細は不明な部分が多い。このような不確かさが、現在の太陽系形成のモデルの現状である。代表的なモデルの変遷を以下で概説する。

渦動説：DESCARTES (1644) が提唱

DESCARTES (1644) は、科学的な太陽起源説を初めて提唱した。渦動こそが運動の基本であり、太陽系の起源も渦動運動で説明しようとした。しかし、たぶんに哲学的なモデルで、実証性はなかった。COPERNICUSの地動説がでてすぐの時代でもあり、太陽や惑星の性質も万有引力の法則もわかっていない時代であった。モデルの内容よりも太陽系起源に科学の光を当てたことを評価すべきであろう。

星雲説：KANT (1755) が提唱、LAPLACE (1796) が修正

ゆるく自転していた高温のガスが太陽系の始まりとする説である。ガスは、冷え、収縮し、回転が早くなる。ガス玉の赤道面から遠心力によってガスがちぎれとび、それが惑星となった。ガスの飛び出たガス玉は収縮し、自転速度が速くなり、さらにガスを放出する。このようなことが何度か繰り返されていくつかの惑星ができ、最後に残ったガス玉が太陽になった。この説の最大の弱点は、角運動量が惑星にあり太陽にはないことが説明できない点である。

遭遇説：CHAMBERLIN (1901) が提唱、MOULTON (1905) が修正

2つの星が偶然遭遇することによって太陽系ができたとする説である。太陽はもともと1個の恒星として単独に存在した。この太陽の近くを偶然別の恒星が通過した。その時、天体間の潮汐力によって、ガスが噴出した。流出したガスは、急速に冷めていき、微惑星になり、惑星に成長したとする。この説では、質量の少ない惑星が、角運動量の大部分をもっているということが説明可能になった。

潮汐説：JEANS (1916) が提唱、JEFFREYS (1918) が修正

遭遇説と同様に2つの天体がたまたま近くを通り過ぎたというのが原因で、太陽系の惑星ができたという説である。遭遇説との違いは、潮汐力で流出するガスが、連続した塊であるという点である。潮汐力が最初弱く、最大の潮汐力を経て、最後にはまた弱まる。これに対応して、ガスの量も変化して紡錘状になる。形に見合った量のガスが分裂して各惑星になったとする説である。従って、惑星は、真ん中の木星が一番大きく、木星から離れると小さくなるとい

う法則性を説明している。

連星説：RUSSELL (1935) が提唱, LYTTLETON (1941) が修正

かつて太陽は、連星であったとする説である。太陽の近くを別の星が通過したとき、太陽と伴星の間におきた潮汐力によって、潮汐説と同じようなシナリオで惑星が形成されたとする。伴星は、通り過ぎた恒星とともに太陽から離れていった。

三遭遇説：ALFVEN (1942) が提唱

単独の太陽が、固体粒子からなる暗黒星雲を通り抜け、そのとき捕らえた物質が月と火星になったという説である。その後、別の星間物質を通り抜けたときに捕らえた物質で、木星型惑星やその衛星などができた。さらに、大きな暗黒星雲を通り抜けたとき、水星、金星、地球、天王星の衛星などを作った。惑星の形成にあたっては、太陽の磁力によって、捕らえた電離物質に太陽の自転のエネルギーが伝えられ、公転運動になった。この運動量の移動が、現在の質量と運動量の不均衡を作ったとした。

渦流理論：WEIZSACKER (1944) が提唱

単独に存在した太陽が、暗黒星雲の密度の濃い部分を通過したとき、とらえたものが惑星の起源になったとする説である。取り込まれた星雲成分は、自転していたため赤道面上に集まり、円盤状になっていく。円盤状の星雲成分の中では乱流が発生し、多数の渦が発生する。やがて渦は、同一円軌道に5個になっていく。このような円形軌道が、多数できるが、一軌道に5個の渦という初期条件が、やがて太陽からの距離 $2R$ という軌道に収斂していく。渦と渦の間に物質が集まり、やがて惑星に成長していくというモデルである。

隕石理論：SCHMIDT (1944) が提唱

単独の太陽が、濃い星間雲に突入し、ガスと固体粒子も取り込んでまわりに星雲をつくり、それが惑星のもとになったとする説である。捕獲された物質は、円盤状の扁平な星雲となる。物質同士が衝突・合体をして、惑星へと成長していく。物質量は、各軌道に木星程度の惑星を作るほどあったのが、太陽に近い惑星では、大量に太陽に落下して地球型惑星になるだけしか残らなかった。

自転暗黒星雲説：WHIPPLE (1947) が提唱

この説は、太陽と惑星が同時にできるというものである。ゆるく自転する暗黒星雲が、回りの星の光の圧力によって収縮を始める。収縮を始め密度が大きくなると、重力の効果も加わり収縮がより進む。収縮が進むにつれて自転が加速され、扁平な円盤状の星雲となっていく。収縮の程度の違いによって星雲中に乱れができ、粒子の多く集まるところができる。そこでは衝突が頻繁におこり成長するものが現れる。成長した粒子がある程度の大きさになると重力の作用で回りの粒子を集めだし、加速度的に成長し、太陽になっていくとする。

宇宙塵説：UREY (1952) が提唱

地球、月、隕石の成因を中心に展開された説である。固体粒子を含むHを主体とする低温のガスが太陽となり、残りのガスが太陽の周りに円盤状に分布し、微惑星へと成長していく。もともと含まれていた少量の固体粒子が微惑星になる。微惑星は、高温の時期を経る。この高温期に、鉄の酸化物が還元され、揮発成分や一部の固体の成分も抜けていく。再び、微惑星は冷え、集合して惑星へと成長する。

伴星超新星説：HOYLE (1955) が提唱

直径1.5光年程度の星間物質から惑星と太陽が同時に形成されるという説である。収縮して原始太陽が形成される。収縮とともに自転速度を速め、やがては遠心力によって原始太陽の赤

道から物質が飛び出し、環ができる。環のなかのHは電離しており、太陽の磁力によって、引きずられる。そのときに太陽の自転から回りの環に運動量が伝えられる。角運動量の大きくなった環は太陽から離れていく。環が遠ざかっていくと温度が低下して固体物質が凝縮する。このような固体物質が惑星へと成長していく。成長していくとき、地球型惑星の位置にはガスはもうなくなり、木星型惑星の位置にはまだ大量のガスが残っていた。このため、地球型惑星と木星型惑星の違いができたとする。

ii 標準モデル

1950年代まで多くの太陽系起源説が提唱されてきたが、1960年代以降は、観測事実の集積によって、モデルは完成版ではないが収斂しつつある。骨子となっているのは、SAFRONOV (1969) や林 (1972), GOLDBREICH & WARD (1973) などのモデルである。

太陽系のもととなる分子雲が収縮を始め、回転を始める（分子雲コアの形成）。回転しながら重力落下してきたガスが、原始太陽とその赤道面に円盤状の星雲になる（原始星とディスクの形成）。そのときに余分の物質やエネルギーを回転軸の両極から双極分子流として噴出し、熱核反応が始まり明るく輝く始め、円盤も赤外線をだして輝く（古典的Tタウリ期星と活動的ディスクの形成）。原始太陽はいったん活動を弱め、ディスクも安定する（弱輝線Tタウリ期星と不活発ディスクの形成）。赤道面上に、凝縮温度の高い物質から順次固化しダストとなり、ダスト同士が衝突し付着合体し、微惑星が形成される（微惑星の形成）。微惑星が原始惑星へと成長する（原始惑星の形成）。

このようなモデルの詳細を以下にのべる。

○分子雲コアの形成

宇宙空間には、分子の密度の高いところが存在する。このような部分は、分子雲（molecular cloud）と呼ばれ、実際に観測によってたくさん見つかっている。分子雲は、 $10^2 \sim 10^3$ 個/ cm^3 程度の分子を含んでいる。

このような分子雲が何らかの原因で、密度に不均質が形成される。密度の大きい部分は、分子雲コア（molecular cloud core）と呼ばれる。密度は、1桁から2桁大きくなる。おうし座の分子雲コアは、サイズが 10^4 天文単位（AU）、質量が太陽の数倍、温度が10Kという条件をもっている。このような分子雲コアが、原始太陽系形成の場となる。分子雲コアは、一般に角速度 $5 \times 10^{-14}/\text{sec}$ 程度で回転している。

○原始星と原始惑星系ディスクの形成

密度が、ある一定量を越えると、分子雲コアは動的収縮を始める。動的収縮とは、ガスが、拡散しようとするときの圧力と、重力によって収縮しようとする力の関係で、重力が勝った場合、収縮が始まる。これに対して、準静的収縮というのがある。圧力と重力が釣りあっているのに、磁場などに別の条件が働いて、ゆっくりと収縮が起こることをいう。磁場が分子雲にあるときはまさに準静的収縮がおこる条件にある。準静的収縮は、密度の増えるに従って、収縮のスピードが速くなり、動的収縮に移る。その条件は、密度によって決まる。太陽質量の程度の分子雲コアの場合、磁場がない時には 2×10^6 個/ cm^3 、磁場がある時は 10^9 個/ cm^3 といわれている。

動的収縮が始まると、分子雲コアの密度が大きくなる。密度の増える様子を図8に示した。

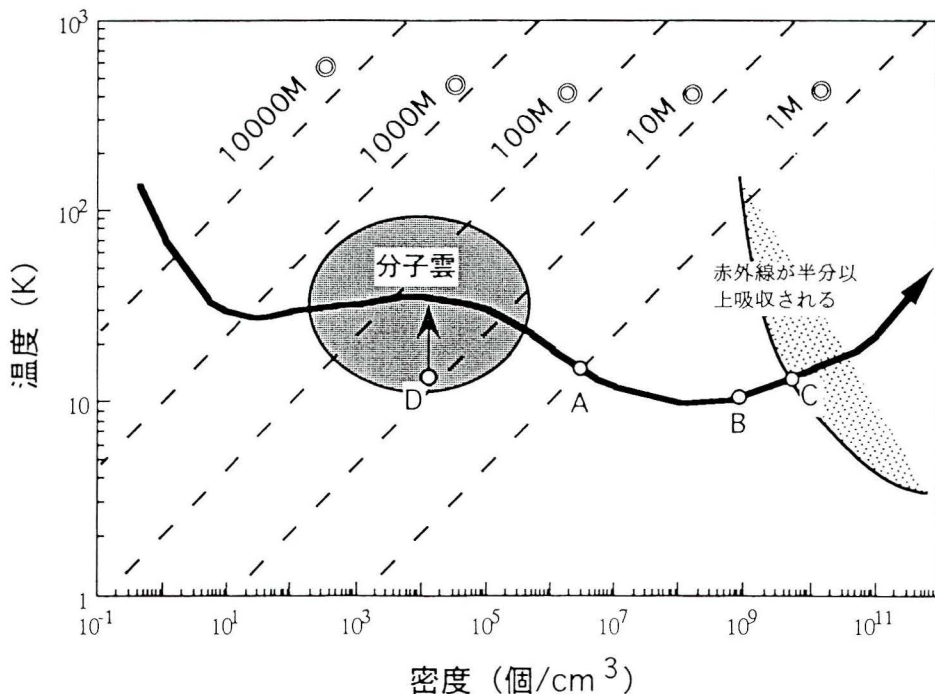


図8. 星間ガスの平衡状態図. 太い実線は星間ガスの平衡状態の条件を示す(中野, 1983). 平行な破線は星間ガス(太陽質量単位: $1 M_{\odot} = 1.99 \times 10^{33} \text{ g}$)が収縮を始める境界線を示す. Aは太陽質量が収縮を始めるところ, Bは宇宙空間に磁場がある時に収縮する条件, 実線とアミをかけた部分は赤外線が半分以上吸収される領域で, Cでは原始星へと進化を始める点である.

圧縮による加熱と赤外線による熱の放射冷却の関係が, 分子雲コアの温度を決定する(中野, 1983). 密度が小さい場合, 加熱と放射は釣りあっており, 温度上昇をあまりせず, 密度が増加する。しかし, ある一定以上に密度が大きくなると, 赤外線の放射が妨げられる。つまり, 断熱圧縮が始まり, コアの温度は上昇し始める。質量の中心部, つまり分子雲コアの中心で密度が最大になり, そこをめがけてガスが集まる。断熱収縮による温度の上昇と重力の平衡に達したところで収縮は止まる。力学的平衡の地平は, ガスの収縮にともなって広がる。このような力学的地平が原始星(protostar)となる。

ガスの衝突によって, ガスの持っていた運動エネルギーは熱エネルギーに変換され, 中心部の温度は上昇する。原始星では, 熱核反応は起こらないが, かなり高温になる。しかし, 周りのガスがじゃまをして, 光はほとんど外にもれない。

分子雲コアが角運動量をもっていると, 収縮にともなって遠心力が増加する。重力による収縮と, ガスの持っていた遠心力の釣りあった状態になる。このような力学的均衡は, 回転する分子雲コアの赤道面上で達成される。やがてガスは回転する円盤のようになり, 原始惑星系ディスク(protoplanetary disk)を形成する。

原始星や原始惑星系ディスクにもはいりきれず, 周りにとどまっているガスが少なからずある。このようなガスを分子雲コアと区別するために, エンベロープ(envelope)と呼ぶ。

○古典的Tタウリ期星と活動的ディスクの形成

収縮によって原始星の温度・圧力が急激に上昇する。ガスもディスクに落ちついて平衡に達すると、光が外に漏れ始める。つまり、星が輝き始め、星が誕生する。太陽程度の質量の星では、表面温度は3,000~5,000 Kほどになり、光度が現在の太陽の1,000倍程度になる。このような非常に活発な若い段階の星を、古典的Tタウリ期星 (classical T Tauri star: CTTSと略す) という。

この時期、余分の物質やエネルギーを回転軸の両極から噴出するジェット (双極分子流: bipole flow) が表れる。

原始惑星系ディスクには、ガスや微粒子が降り続け成長する。質量の増加にともなって、ディスクは重力的に不安定が生じ、激しい乱流状態になる。CTTSは、この乱流の効果によって太っていく。やがて、活動的ディスク (active disk) と呼ばれる活動的な時期がくる (accretion diskとも呼ばれる)。ディスク内の温度が上昇する。その原因は、急激な収縮によってCTTSの表面から衝撃波が発生してディスクの温度を上昇させるという説 (中川, 1983 a) や、CTTSの放つ強烈な光がガスに吸収され温度が上昇する (中野, 1983) 説などが考えられている。この時、内惑星域で2,000 Kくらいまで上昇し、微量存在した微粒子も蒸発する。外惑星域でも氷が蒸発する程の温度まで上昇する。収縮が終了すると熱力学的平衡に達し、温度は下がり、固体の微粒子は凝固する (中川, 1983 d)。これを、固体凝縮 (consolidation of solid particle) という。

ディスク内では、固体の微粒子が成長しながら赤道面に降りてくる。約3,000年ほどで固体粒子が赤道面においてきて固体層を作る (中川, 1983 c)。1 μ m程度の微粒子は、赤道面に降りてきて、固体層を作る頃には、1 cm程度まで成長している。固体層ができて2,000年ほどたつと、ディスクの層厚はもとの 10^{-5} 以下になる。

固体凝縮の平衡温度は、地球軌道付近では氷が凝縮しない200 K程度で、木星軌道付近では氷が再び凝縮する100 K程度となる。氷の原料となるHとOは、もともとガスのなかに大量に含まれていた元素である。そのため、固体粒子の中に氷を含むか含まないかは、固体粒子に大きな差を生じる (中川, 1983 d)。内惑星軌道では氷の再凝縮がおこらず金属と岩石を主とする地球型惑星が生まれる。一方、外惑星軌道では、氷を主成分とする大きな惑星核ができ、大きな重力で周りのガスを集め、大きな木星型惑星となる。

○弱輝線Tタウリ期星と不活発ディスクの形成

原始太陽は、活動が落ちつき、CTTSに比べてH α 線の輝線スペクトルの強度が弱い時期がおとずれる。スペクトルの特徴から、弱輝線Tタウリ期星 (week line T Tauri Star: WTTS) と呼ばれる。WTTSの時代は、 $3 \times 10^6 \sim 3 \times 10^7$ 年程度継続する。

CTTSからWTTSをあわせてTタウリ期星と総称される。原始星からCTTS, WTTSまでをあわせて、林フェーズと呼ばれる。林フェーズとは、HR図で、温度が一定で光度が下がっていく段階のことをいう。

ディスクの質量の大部分 (約80%) が、 10^4 年ほどで中心星に落下すると、ディスクは重力的に安定する。このような状態を不活発ディスク (passive disk) という。CTTS時代のディスクは乱流状態であったのに対し、WTTSの時代は、激しかった乱流も納まり穏やかな状態になる。ガスの状態が穏やかになると、惑星形成へと一気に進む。

WTTSで、赤外線の放射は少なくなる。この放射は、ディスク内部の発熱が減り、中心星か

らの光を受るだけだと考えられている。しかし、ディスクの放射は、X線での測定が可能である。

○微惑星から原始惑星の形成

ディスクのダストの沈降がすすむにしたがって、ダストの成長がすすみ、微惑星 (planetesimal) と呼ばれるものまで成長する。微惑星とは、直径数km、質量 $10^{18} \sim 10^{21}$ g ほどの天体である。このような微惑星が、約 10^{11} 個ほどが形成される。微惑星は、星雲ガスを引きつけるほどの重力を持たない (中沢, 1978)。

原始惑星 (proto planet) は、微惑星の衝突・合体によって、質量が 10^{25} g に達したものをいう (中川, 1983 b)。微惑星がガスを引きつけるほどの重力がなかったのに対し、原始惑星は、ガスを大量に引きつけ厚い大気を持つようになる。

微惑星が誕生して 10^5 年ほどすると、原始惑星が数個成長してくる。原始惑星への成長は、一様に進むのではなく、数個のものが選択的に急成長をおこなう。このような成長を、爆走成長 (runaway growth) という。原始惑星は、 10^6 年ほどで地球くらいの大きさまで成長する。内惑星領域では、原始惑星ができるころには、微惑星はほとんどなくなっている。外惑星領域では、ディスクの厚さや半径も大きいため材料も多く、長く惑星は成長できる。 10^7 年後には、地球の10倍程度の質量になり、木星型惑星の核となる。

2 観測事実と束縛条件

○原始太陽系の形成条件

原始星は、可視光では観測できないが、赤外線やサブミリ波で観測される。1967年のBN天体と呼ばれるものが、最初の赤外線源の発見である。1983年、赤外線天文衛星 (IRAS: Infrared Astronomical Satellite) が打ち上げられた。12, 25, 60, $100 \mu\text{m}$ の4つの波長で1年間全天を観測した。その結果、多くの赤外線源が発見された。このような赤外線源には、多くの原始星の候補が含まれていると考えられている。

Herbig Haro天体 (Herbig, 1951) と呼ばれ分類されているものが、ガスが晴れた頃の星だと考えられている。Herbig Haro天体は、暗黒星雲の周縁部に見つかる。また、1970年代のミリ波の分子ガスの測定から、CTTSの段階を示すと考えられる双極分子流やガス円盤が、イッカクジュウ座R星やオウシ座L1551 IRS 5, ガカ座 β 星などで見つかった。このような星ではLiの吸収スペクトルが観察される。Liは熱核反応が始まると使われてしまい、すぐなくなっていく。このような観測事実は、まだ核反応は起こっておらず、重力エネルギーの解放によって輝いているCTTSであると推定されている。その他、10%を越える偏光、1等~2等程度の不規則な変光、赤外線・紫外線の過剰放射、パルマー線などの輝線スペクトルなどが観測される (佐藤, 1983)。このような現象は、活動的ディスクの存在によって起こる現象だという説が有力である。

図8で、太い実線で示したものが、分子雲、分子雲コアそして原始星の温度-密度の平衡条件である (中野, 1983)。点Dで示したような実線上以外の条件にある場合でも、最終的には、平衡状態にたどりつく。実線で示した温度-密度の平衡条件は、密度と温度の関係から求められる境界条件で、Jeans Massから導かれる。密度が 10^3 個/ cm^3 で温度が10Kの分子雲の場合、10.9太陽質量がJeans Massで、分子雲コアの質量になる。密度が 10^4 個/ cm^3 の分子雲では、5.4太陽質量となる (中川・渡辺, 1993)。点Bは、磁場がある時の境界条件である。分子雲が、磁場の力に勝って自己収縮始めるための密度は、磁束密度が $30 \mu\text{G}$ で半径が1 pcの時、 10^4 個/ cm^3

となる。星間空間には、一般に磁場があるので、 10^4 個/ cm^3 が、原始星へと進化を進めるかどうかのもう一つの境界条件になる（中川・渡辺, 1993）。

物体が収縮するとき、重力による自由落下することから、収縮するための時間条件が規定できる。密度が 10^5 個/ cm^3 で一様なとき、自由落下時間は、 2×10^5 年となり、密度が 10^4 個/ cm^3 のとき 1.1×10^6 年になる（中川・渡辺, 1993）。

赤道面上に、凝縮温度の高いダストが固化する。ダスト同士が衝突し付着合体する。中川ほか（1981）は、数値シミュレーションで、約 3×10^3 年で、1 cmほどのダスト層ができることを示した。

惑星の成長時間は、太陽からの距離が重要なファクターになる。中沢・中川（1984）の計算によれば、地球の成長時間は 9×10^6 年となる。一般のモデルでは、外惑星の（海王星、冥王星など）形成時間が異常に長い（45億年以上）という致命的な問題が残されている。

微惑星の成長は、ディスク内で穏やかにおこなわれる。強い乱流がディスク内に存在すると、微粒子の沈積が妨げられる。 μm サイズの微粒子が沈降するには、乱流の速度は、数10m/年以下でなければならない。

惑星の形成の段階にはいると、システムの大きな変換点を迎える。それは、構成物質のサイズが、 μm から km のオーダーまで10桁を越える変化がおこるからである。当然、これに関与する物理作用は、大きく変化する。ミクロの世界では、電磁気力が主要な物理現象を支配するのに対し、 km オーダーの世界では重力が支配する。このような物理作用の変化は、 10^4 年程度の短時間で起こる。

○我々の太陽系からの束縛条件

太陽系を構成するものには、太陽以外に9個の惑星、衛星、多数の小惑星、多くの彗星、そして惑星間物質がある。このような構成物質の物理・化学的特徴が、太陽系起源論の中で説明される必要がある。

惑星や衛星の特徴は、母星（太陽や惑星）との距離、運動、物理量によって記述できる。運動は、自転と公転の2種類がある。それぞれの速度と回転方向（順行、逆行、同調）、さらに公転は離心率と軌道傾斜角を記述する必要がある。物理量は、惑星の質量、半径、惑星内の構造、構成物質などを意味する。太陽系の天体に関してのこのようなデータは、まだ充分にはわかっていない。

太陽系の惑星系の特徴として、以下のものが考えられる（水谷, 1978; 鈴木, 1986）。

- 惑星の公転方向が一致すること
- 惑星の軌道面が一致すること（水星、冥王星は例外）
- 惑星の軌道の離心率は小さく円軌道に近いこと（離心率0.206の水星と0.248の冥王星は例外）
- ボーデの法則（ $0.4 + 0.3 \times 2^n$ ）が成立すること
- 太陽の自転と惑星の公転の方向が一致すること
- 太陽の赤道面と惑星の公転面のなす角度が小さいこと（黄道面に対して $7' 15''$ ）
- 質量は太陽が99.9%を占めるが、角運動量の98%は惑星が持つこと
- 惑星には地球型と木星型があること
- 天体間には尺度関係があること

このような特徴は、万有引力の法則に反するものではないが、必然的に導かれるものではない。

い。このような特徴をつくる過程があったことは明らかである。ただし、このような束縛条件には、例外が付きものである。例外もやはり最終的には形成モデルの中で説明されなければならないはずである。標準モデルでも、上で述べた特徴を説明できないものがある。今後、モデルは改訂されていく運命にある。

VI まとめ

科学は実証性を伴わなければ説得力がなく仮説で留まるしかなく、真実に近付けない。

現在、本稿で示した宇宙や銀河、恒星、惑星系の進化モデルが提唱されている。しかし、これは、まだ仮説にすぎない。宇宙や銀河、星の進化などを考える場合、時間の経過によってその変化が記述される。時間変化に対応した観測例があげられる。それはいかにも既成事実で実証されたもののように見える。気をつけなければいけないのは、モデルに基づいて観測事実が並べられているのであって、モデルが、客観的に実証されたものではないのである。

同じような経緯が、地球の古生物の進化に関する研究であった。古生物の進化モデルと銀河や星の進化モデルの大きな違いは、その実証性である。

地球の古生物の進化モデルは、多少の不確かさはあるが、地層の上下関係を丹念に追うことによって、時間の前後関係が厳密に設定され、また化石群集の組み合わせや火山灰などを利用して同一時間面が決定される。そして放射性同位体を用いた絶対時間の導入で、時間軸の確立がおこなわれている。一方、銀河や星の進化モデルでは、時間軸が確立されていない。これは、モデルがかわれば、観測事実の並び替えが行われる可能性があるということである。

銀河や星の進化モデルにおける時間軸の確立の可能性は大いにある。たとえば、ハッブル定数の決定である。ハッブル定数が正確に決まれば、事件の記録が正確な時間軸の中でおこなえる。天体が遠くなるほど、つまり古くなるほど分解能は悪くなるが、宇宙背景放射やクエーサーなどの宇宙初期の古い時代の記録も残されている。宇宙の科学はまだ未完成で今後大きなモデルの改変がたびたびあるはずで、目が離せない。同じような試練や改革は、地球を相手にしている地質学者も乗り越えてきたし、今後も起こるはずである。

参考文献

- ANDERS, E. & M. EBIHARA, 1982. Solar-system abundances of the elements. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**: 2363-2380.
- 有本信雄, 1993. 進化する銀河. 科学, **63**: 86-94.
- ARIMOTO, N. & Y. YOSHII, 1986. Photometric and chemical evolution of galaxies based on a evolutionary method of population synthesis. *Astrom. Astrophys.*, **164**: 260-273.
- ARIMOTO, N. & Y. YOSHII, 1987. Chemical and photometric properties of a galactic wind model for elliptical galaxies. *Astrom. Astrophys.*, **176**: 23-38.
- BURBIDGE, E. M., M. BURBIDGE, W. A. FOWLER & F. HOYLE, 1957. Synthesis of the elements in stars. *Rev. Mod. Phys.*, **29**: 547-650.
- CLAYTON, D. D., 1968. Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis. 612 pp. McGraw Hill, New York.
- FOWLER, W. A., 1972. New observations and old nucleocosmochronologies. In Reines, F., ed., *Cosmology, Fusion and other Matters*, pp. 67-123. Colorad. Associated Univ. Press, Boulder.

- GOLDREICH, P. & W. R. WARD, 1973. The formation of planetesimals. *Astrophys. Jour.*, **183**: 1051-1061.
- 林忠四郎, 1972. 太陽系形成の理論. 月・惑星シンポジウム報告集, pp. 13-18.
- HERBIG, G. H. 1958. T Tauri stars, flare stars, and related objects as members of stellar associations. In O'Connell, D. J. K., ed., *Stellar Populations*, pp. 129-142. North Holland, Amsterdam.
- HOYLE, F., 1955. *Frontiers in Astronomy*. pp. 68-72. William Heinemann, London.
- 池内 了, 1993. 銀河はいつできたのか. 科学, **63**: 82-85.
- 磯部瑋三, 1993. 宇宙のしくみ. 174 pp. 日本実業出版, 東京.
- JEANS, J. H., 1916. *The Dynamical Theory of Gases*. Cambridge Univ. Press., Cambridge.
- KANT, E., 1755. *Allgemeine Naturgeschichte und Theories des Himmels*.
- LAPLACE, P. S., 1795. Exposition du systeme du monde. In *Corpus des Oeuvres de philosophie en langue française*. Fayard, Paris.
- 松本敏雄, 1988. 第5章膨張宇宙の観測. 早川幸男・佐藤文隆・松本敏雄編, 現代の宇宙論, pp. 133-160. 名古屋大学出版会, 名古屋.
- 水谷 仁, 1978. 第1章太陽系の基礎データ. 小沼直樹・水谷 仁編, 岩波講座地球科学13, pp. 1-19. 岩波書店, 東京.
- 中野武宣, 1983. 第Ⅲ章2原始星. 高倉達雄監修, 現代天文学小事典, pp. 144-148. 講談社, 東京.
- 中川義次, 1983 a. 第Ⅲ章3原始原始太陽星雲. 高倉達雄監修, 現代天文学小事典, pp. 148-151. 講談社, 東京.
- 中川義次, 1983 b. 第Ⅲ章4原始惑星. 高倉達雄監修, 現代天文学小事典, pp. 151-152. 講談社, 東京.
- 中川義次, 1983 c. 第Ⅲ章5固体層. 高倉達雄監修, 現代天文学小事典, pp. 152-154. 講談社, 東京.
- 中川義次, 1983 d. 第Ⅲ章6固体の凝縮. 高倉達雄監修, 現代天文学小事典, pp. 154-156. 講談社, 東京.
- NAKAGAWA, Y., K. NAKAZAWA, & C. HAYASHI, 1981. Growth and sedimentation of dust grains in the primordial solar nebula. *Icarus*, **45**: 517-528.
- 中川義次・渡辺誠一郎, 1993. 5惑星系の起源. 清水幹夫編, 惑星の科学, pp. 185-219. 朝倉書店, 東京.
- 中沢 清, 1978. 第2章太陽系の起源と進化. 小沼直樹・水谷 仁編, 岩波講座地球科学13, pp. 21-87. 岩波書店, 東京.
- 中沢 清・中川義次, 1984. 第2章惑星形成のシナリオ. 長谷川博一・大林辰蔵編, 現代の太陽系科学上, pp. 48-81. 東京大学出版会, 東京.
- 並木雅俊, 1990. 星と宇宙の物理読本. 254 pp. 丸善, 東京.
- 西村 純, 1988. 第9章宇宙線. 早川幸男・佐藤文隆・松本敏雄編, 現代の宇宙論, pp. 264-317. 名古屋大学出版会, 名古屋.
- 野口正史, 1993. 銀河の相互作用. 科学, **63**: 95-102.
- 野津憲治, 1978. 第1章宇宙年代学. 小嶋 稔・斎藤常正編, 岩波講座地球科学6, pp. 1-17. 岩波書店, 東京.

- RICH, R. M., 1990. Kinematics and abundances of K giants in the nuclear bulge of the Galaxy. *Astrophys. Jour.*, **362**: 604-619.
- ROZENTAL, I. L. 1988. Big Bang Big Bounce; How Particles and Field Drive Cosmic Evolution. 池内 了訳, 1991. 163 pp. Springer-Verlang東京, 東京.
- RUTHERFORD, E. & F. SODDY, 1903. Radio-active Change. *Phil. Mag.*, **5**: 576-591.
- SAFRONOV, V. S., 1969. Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and the Planets. Nauka, Moscow. Translated by the Israrel Program for Scientific Translation (1972).
- 佐藤文隆, 1988. 第8章宇宙初期と暗黒物質. 早川幸男・佐藤文隆・松本敏雄編, 現代の宇宙論, pp. 230-263. 名古屋大学出版会, 名古屋.
- 佐藤勝彦, 1988. 第7章バリオンと元素の起源. 早川幸男・佐藤文隆・松本敏雄編, 現代の宇宙論, pp. 204-229. 名古屋大学出版会, 名古屋.
- 佐藤修二, 1983. 第Ⅲ章14おうし座T型星. 高倉達雄監修, 現代天文学小事典, pp. 171-173. 講談社, 東京.
- SCHMIDT, O. Y., 1944. Meteoritic Theory of the Origin of the Earth and Planets. U.R.S.S., Dokl Akad. Nantz.
- 杉本大一郎, 1991. 第8章星はどのように進化するのか? 日本物理学会編, 現代の宇宙像, pp. 97-107. 培風館, 東京.
- 鈴木博子, 1983. 第Ⅴ章6星間物質. 高倉達雄監修, 現代天文学小事典, pp. 273-276. 講談社, 東京.
- 鈴木敬信, 1986. 天文学通論. 495 pp. 他人書房, 東京.
- 鈴木敬信, 1991. 天文学辞典. 830 pp. 他人書房, 東京.
- 寺沢信雄, 1986. 宇宙の元素合成. 日本物理学会誌, **41**: 102-110.
- 辻本拓司・野本憲一, 1993. 銀河の化学力学進化と超新星. 科学, **63**: 103-112.
- UREY, H. C., 1952. The Planets: Their Origin and Development. 245 pp. Yale Univ. Press, New Haven,
- VAN DEN BERGH, S. & G. A. TAMMANN, 1991. Galactic and extragalactic supernove rates. *Annu. Rev. Astrom. Astrophys.*, **29**: 363-407.
- YANG, J., M. S. TURNER, G. STEIGMAN, D. H. SCHRAMM, & K. A. OLIVE, 1984. Primordial nucleosynthesis: A critical comporison of theory and observation. *Astrophys. Jour.*, **281**: 493-544.
- 吉井 譲, 1989. 銀河の進化と観測的宇宙論. 科学, **59**: 709-718.
- YOSHII, Y. & N. ARIMOTO, 1987. Spheroidal system as a one-parameter family of mass at their birth. *Astrom. Astrophys.*, **188**: 13-23.