

膨張する宇宙¹⁾

佐藤 文隆*

最近、急に宇宙論への興味がたかまってきた。その原因を考えると、まず第一に天文学のいろんな分野が、全体として進歩して精密化したことである。第2には電波天文学と結びついて、この5~6年の間に、銀河系外についての情報が豊かになったことである。準星の発見などはその主なものである。しかしこれらの形勢に直接に火をつけたのは、宇宙全体を満たしている黒体輻射の観測であった。

宇宙にちらばっている銀河が、我々から後退しつつあることが発見されたのは、40年近くも前の1929年であった。アインシュタインは一般相対論を確立した頃から、それを宇宙の構造に適用することを試みたが、彼の理論を適用して膨張宇宙のモデルを見出したのはフリードマンだった(1922)。1929年のハッブルの発見後、相対論を用いた膨張宇宙の理論が、ルメートルやその他多くの人達によって展開された²⁾。この時期が現代的宇宙論の第一の時期といえる。第2のエポックは第二次大戦直後の1948年頃である。この時期には二つの動きがあった。一つはガモフらを中心として元素起源、銀河の生成などを全て膨張する宇宙の中で考え、宇宙を進化論的にみる研究である³⁾。もう一つはホイール、ボンディ、ゴールドの定常宇宙論⁴⁾、彼らは宇宙を全体としては進化しないものと考えた。ガモフの宇宙論においては、宇宙膨張の初期では物質の密度が高いだけでなく高温の状態にあったと仮定する。そして初期での熱核融合反応を考えることによって元素の起源を説明しようとした。アルファー、ハーマン達がこの計算を精力的に行なった。日本でも林が素粒子反応を考えて初期物質は陽子と中性子が共存していることを示したのもこの時期であった。

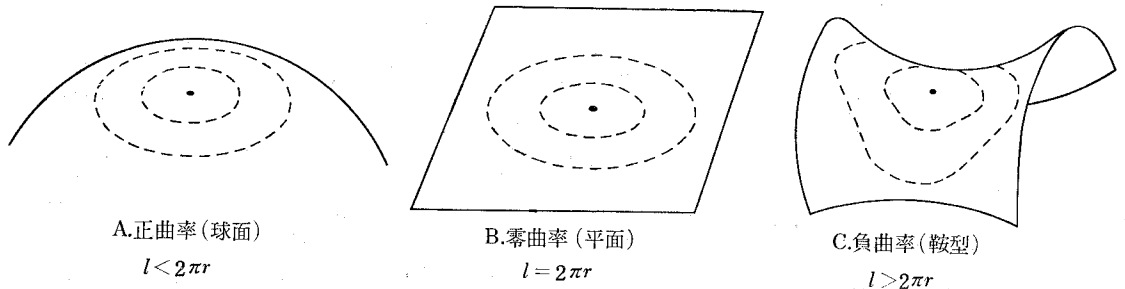
モデル	A	B	C
曲率の符号	正	0	負
減速係数 q_0	>0.5	0.5	0.5~0
空間	閉	開	
時間的変化	振動	膨張だけ	

第1表 膨張宇宙のモデル

その後、元素の起源は星の内部や爆発時での核反応を通じて説明されるようになったこともあってこの宇宙論はしばらく鳴りをひそめていた。そして今回の第3のエポックがやってくる。準星の発見が一般相対論を天体現象に適用しようという雰囲気を作っていたことも重要な背景としてある。とにかく現在は宇宙論の問題が多方面から研究されだした時期といえる。以下、膨張する宇宙の構造とその中でどんなことがおこるかをみていきたい。

相対論的宇宙のモデル

現在の望遠鏡で観測される距離以内には約 10^{10} 個の銀河があるとされる。これらの銀河または銀河の集団の空間分布は比較的一様であり大きな非等方性はないとされている。このような観測を土台にして、一様かつ等方な宇宙モデルが考えられている。一般相対論によれば、このように物質が一様に満している空間は一定の曲率をもった“曲った空間”でありその曲率の大きさは各点で同じように時間的に変化している。宇宙のモデルは第1表のように曲率の符号に従って三つに大別される。曲った空間というのは一般にユークリッド幾何学の成立しない空間であって、例えば(円周/直径)の値は平らな空間では 2π であるが正曲率の空間では 2π より小さい。



第1図 2次元の曲った空間。点線は、定点から一定距離 r にある点の軌跡を示す。その一周の長さ l は、 $2\pi r$ より小 (A)、 $2\pi r$ に等しい (B)、 $2\pi r$ より大 (C) である。

* 京大理
H. Sato: Expanding Universe.

モデル	A	B	C
q_0	1.0	0.5	0.01
$\rho_0(10^{-30} \text{g/cm}^3)$	20	10	0.2
年令 (10^{10} 年)	0.74	0.87	1.25
R_0 (10^{10} 光年)	1.3	—	1.3
“水平線”の距離*	2.0	2.6	6.9
3C9の距離*	0.95	1.1	1.4

* 単位は 10^{10} 光年

第2表 膨張宇宙のモデルの例。 $H_0=75 \text{ km/sec} \cdot \text{Mpc}$ ととってある

この様子は第1図に示した2次元の曲面からも類推される。また正曲率の空間の全体積は有限で、閉じているといわれる。

曲率半径 R の時間変化はアインシュタインの重力場の方程式で記述される。これは丁度一次元の質点の運動のように次の式に従う。

$$\frac{1}{2} \dot{R}^2 - \frac{GM}{R} = \frac{1}{2} kc^2$$

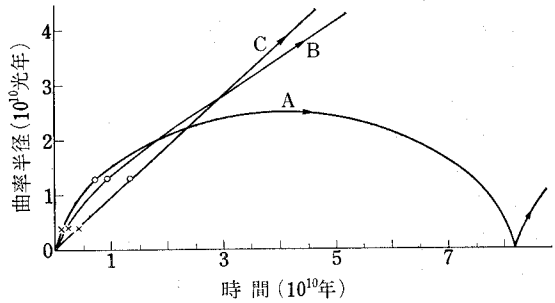
ここで k は曲率の符号で、 M は質量で $M=4\pi R^3\rho/3$ 。この運動は二つの初期値、例えば現在(添字 0 で表わす)における速度 \dot{R}_0 と加速度 \ddot{R}_0 を指定すると完全に定まる。普通この値の代りに、

$$\ddot{R}_0 = -q_0 R_0 H_0^2, \quad \dot{R}_0 = H_0 R_0$$

なるハッブル定数 H_0 と減速係数 q_0 をとる。先の式をこれを用いて書き直せば $q_0 = 4\pi G\rho_0/3H_0^2$, $2q_0 - 1 = kc^2/H_0^2 R_0^2$ この式から第1表のような対応関係が得られる。三つのモデルの例を q_0 を適当に選んで第2表に示してある。また第2図には R の時間変化を示す。ここで年令とは R が零の時刻から現在にいたる時間、“水平線”とは現在の私達が原理的に観測可能な最大距離である。

閉じた宇宙の場合には宇宙の物質の量は有限で第2表のモデルAの場合には太陽の 4×10^{28} 倍、陽子の数にして 5×10^{30} 個しかないことになる。

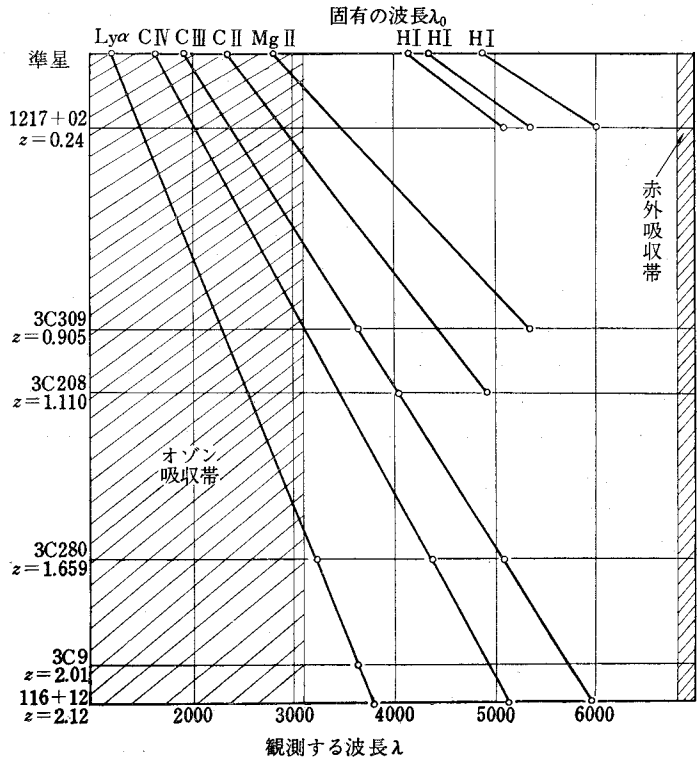
一樣かつ等方でない宇宙も考えられているが、例えば一樣ではあるが非等方な宇宙論が最近出されている⁹⁾。これは磁場などの等方でないものが宇宙の初期にできていて形が非等方になる場合を考える。しかし、現在では相当に等方であるから形はだいに等方的になるように膨張していなければならない。



第2図 曲率半径の時間的变化。曲線 A, B, C は第2表の各モデルに対応し、○印は現時刻を、×印は現在見ている 3C9 が光を發した時刻を表わす。B のモデルでは、現在の R の値をモデル A の曲率半径に等しくとってある。

H_0 と q_0 の測定

現実の宇宙に合うモデルをきめるには H_0 と q_0 の観測値を知る必要がある。 H_0 の観測は銀河の後退速度を光のスペクトル線の波長のずれ(赤方偏移)から求める。距離の測定はセファイド型変光星、新星、球状星団、HII 領域、最も明るい星などの絶対光度を規準にして行なわれている⁹⁾。また光の連続スペクトルの形のずれや⁷⁾ 水



第3図 準星の赤方偏移¹¹⁾。たて軸は z (下が大)、よこ軸は波長(単位はオングストロム)を表わす。斜線で示した波長域は地球大気による吸収帯である。Ly α はライマン α , CIV...HI は各々固有波長 λ_0 の輝線を出す原子又はイオンを指す。

素原子からの 21 cm の波長をもつ線スペクトルのずれを用いた観測もある⁹⁾。H₀ の値は 75~113 km/sec・Mpc の範囲にある⁶⁾⁹⁾。

H₀ の測定は距離が 3・10⁹ 光年以上の銀河の観測で十分であるが、q₀ の値は空間の曲がりに関係するからもっと遠方の銀河をみる必要がある。q₀ の値の測定には次の三つの方法が考えられている⁹⁾。(1) 銀河の赤方偏移と見かけの等級との関係、(2) みかけの等級とこの等級よりも明るい銀河の総数との関係、(3) 銀河のみかけの直径と赤方偏移との関係。このうち(3)は現在のところ難かしく、(2)はラジオ銀河について試みられているが¹⁰⁾、最も進んでいるのは(1)の方法である。

固有の波長を λ₀、観測する波長を λ とすると、赤方偏移の大きさは普通 $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$ で表わす。相対論によれば λ₀ と λ の比は銀河が光を放出した時刻の曲率と観測時(現在)の曲率半径の比に等しい。

ラジオ銀河、準星と観測が進むにつれてより遠方の銀河が観測されるようになった。準星の輝線スペクトルのずれのようすを第3図に示したが、波長が3倍以上に長くなって、もともと紫外部の線が可視部にまでずれている¹¹⁾。第2表にも示したようにこのような銀河の距離は 10¹⁰ 光年の程度である。

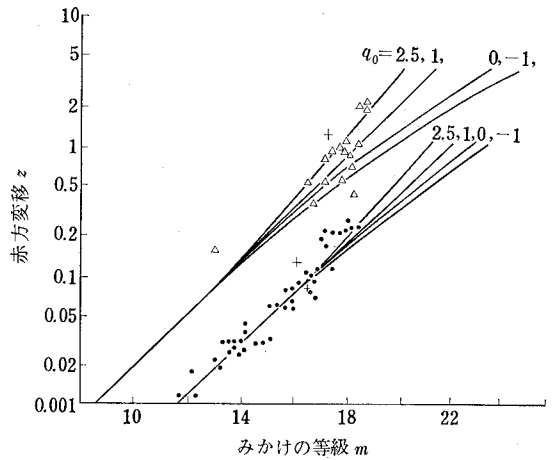
絶対光度の等しい銀河の見かけの等級 *m* と赤方偏移 *z* との間には、第4図のような理論的關係が成立¹²⁾。この関係は、*z* が大きいと q₀ の違いによってはっきり分かれてくる。従ってこの図上に *z* と *m* の観測値をプロットしてどの q₀ の線上にのるかをきめるのは原理的には可能である。現在のところまだ図のようにばらついているが、少なくとも定常宇宙論のモデル(図の q₀ = -1 の線)に合いそうにない。この方法で q₀ をきめるには、*z* がさらに大きい、より遠方の銀河の観測が必要となる。このことは銀河のより遠い過去の姿を見ることだから、銀河の進化とくにその絶対光度の時間変化が無視できなくなる。結局この方法は銀河の進化の問題につきあたる。

宇宙の年令

宇宙が膨張を始めて現在までの時間は、q₀ = 0(物質のない宇宙)のモデルで一番長く H₀⁻¹ であるが第2表のように q₀ が大きいモデル程短い。宇宙の天体の年令を第3表に示すが、宇宙の年令はこれらよりも長くなく

太陽系	0.45	放射性元素の半減期をもとにした年令
地球上のウラニウム	0.66~1.15	
NGC 188 星団(種族 I)	1.0±0.2	星の進化の理論をもとにした年令
M3 星団(種族 II)	1.2±0.3	

第3表 諸種の天体の年令(単位は 10¹⁰ 年)



第4図 赤方偏移と等級との関係。△準星的ラジオ銀河、●はラジオ銀河、+は準星の銀河の観測値。理論曲線を引く際に、ラジオ銀河と準星的ラジオ銀河では異った絶対光度を仮定してある。

ればならない。このことから q₀ 又は質量密度 ρ₀ の上限を与えることになる。例えば宇宙の年令を 10¹⁰ 年以上とすれば、ハッブル定数 H₀ の不定性を考慮しても、ρ₀ は 2・10⁻²⁹g/cm³ 以下である。

質量密度

質量密度 ρ₀ とは現在の宇宙を構成する諸要素の平均エネルギーで、これには銀河を構成している物質のほかにも第4表にあげたようなものも考慮する必要がある。一番はっきりしているのは銀河を構成している物質である¹³⁾。銀河外空間にただよっているガスの観測は最近行なわれつつある。中性水素の観測はラジオ銀河からでる電波の波長 21 cm の部分の吸収を使って行なわれている¹⁴⁾。また準星からでたライマン α 線の吸収からも推測される¹⁵⁾。自由電子はそれらの放出する放射量から上限をおさえることができる¹⁶⁾。これらの観測はまだはじまったばかりである。

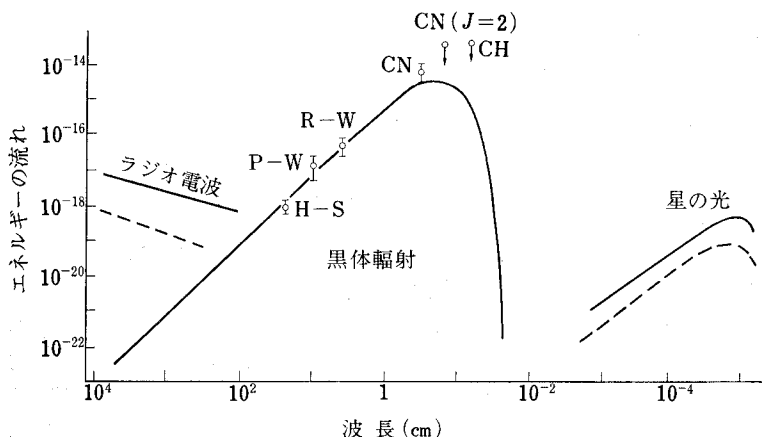
宇宙の温度

もう一昨年のことになるが、宇宙の黒体放射が観測されたという報告が発表された¹⁷⁾。これは初め波長 7.3cm のマイクロ波で観測され、その後も他の2つの波長で観測されている¹⁸⁾。この黒体放射の温度は約 3°K である。第5図に示したようにこの黒体放射がピークをもつ mm

の波長域の強度については、その直接的観測は地球大気の吸収などのため困難である。しかし、これを星間ガス雲内の分子による星の光の吸収線の比から基底状態と励起状態にある分子の存在比を求め、励起が黒体放射によるとしてその温度を算定する方法が試みられている¹⁹⁾。第5図のCN、CH はこうした分子を用いてこの方法で測定し

諸要素	$\rho_0(\text{g/cm}^3)$	文献
銀河構成物質 (星と星間ガス)	$3 \cdot 10^{-31}$	(13)
銀河外空間物質 (中性原子又はイオン)	$10^{-34} \sim 7 \cdot 10^{-31}$	(15), (14)
見えない天体 (死んだ星など)	?	—
黒体輻射	$7 \cdot 10^{-33}$	(17)
ニュートリノー, 重力波, 宇宙線など	?	—

第4表 質量密度にきく諸要素



第5図 バック・グラウンドの輻射の強度。たて軸の単位は $\text{erg/cm}^2 \text{sec}$
 Ster. Cps. ラジオ電波と星の光は、実線が銀河内、点線が銀河
 外の値を表わす。

た値である。

これまでも、宇宙の空間にはラジオ銀河から放出される電波や、星の光などを平均したものとしてバック・グラウンドの輻射があると考えられていたが、上述の輻射はその間に高くつきでている。この輻射は宇宙を一樣に満たし、その光子の数密度は 10^4 個/cm³ という大きなものである。従って、高エネルギー粒子が宇宙空間の中を走る時この光子に衝突して第5表のような反応をひきおこして、高エネルギー粒子はエネルギーを失う。したがって、エックス線、ガンマ線、電子線、空気シャワーによる銀河外空間の宇宙線観測などを通じて宇宙線物理学との関係が重要になる。実際、最近では電子線の観測が 300 Gev 程度まで行なわれた結果、必ずしも黒体

高エネルギー	光子との反応	エネルギー
γ	電子対発生 ^{a)}	10^{14}ev 以上
電	逆コンプトン効果によるX線, γ 線の発生 ^{b)}	10^{11}ev 以上
陽	π^0 および π^- の発生 ^{c)}	10^{20}ev 以上
原子核	光核分解 ^{c)}	10^{13}ev 以上

(a) Gould, Schreder, Phys. Rev. Letter **16** (1966), 252 (b) Hoyle, ibid., **15** (1965), 131 (c) Greisen, ibid. **16** (1966), 784.

第5表 黒体輻射の光子と高エネルギー粒子の反応とそのエネルギー領域

輻射から予想される効果があらわれていないというので、この輻射の存在を疑うむきもある²⁰⁾。

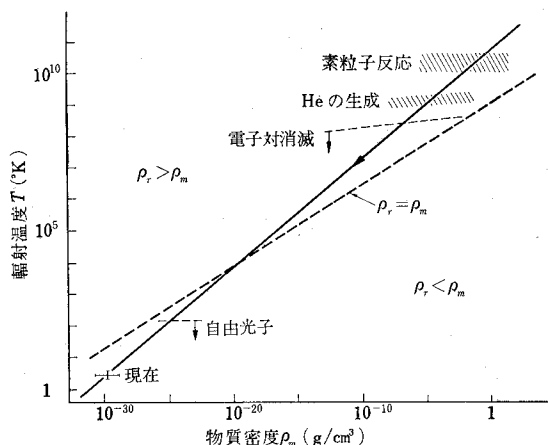
熱い宇宙

黒体輻射の存在は宇宙全体の物質が輻射に対して熱平衡にあったことを暗示している。宇宙は膨張しているから、物質密度は減少し、温度も下りつつある。現在では、この黒体輻射の光子は殆んど物質と作用しない自由な光子であるが、過去においては互いに作用していたのである。言いかえれば、過去のある時期まで宇宙は不透明であったが現在では透明であるということである。現在の物質密度と温度をもとにして過去にさかのぼれば第6図のようになる。このように黒体輻射の観測は始めに述べたガモフの熱い宇宙の仮定を確証したといえる²¹⁾。

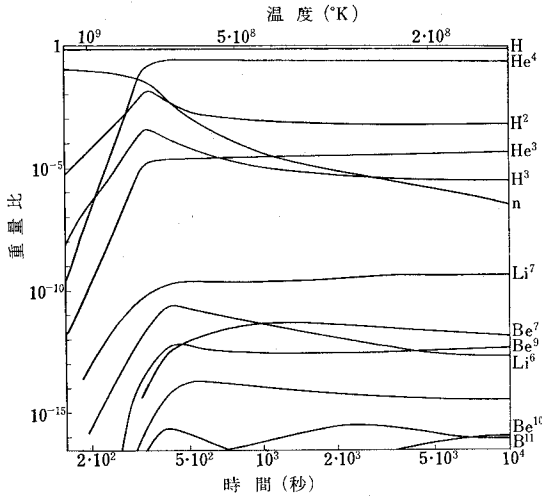
宇宙の初めには銀河も星もなく全体が熱いガスの状態にあり、膨張ともななって稀薄となりながら

冷えていく。初め水素もイオン化しているが約 3400°K の温度より下ると急に中性水素になる²²⁾。そしてこの時期に宇宙は透明となると考えてよい。私達が現在観測している黒体輻射の光子はこの時期に物質から放出されたものである。従って、その時期に宇宙に何か銀河のもとに対応するような構造があれば、黒体輻射の非一樣な空間分布が観測されるかも知れない²³⁾。

水素原子が中性になった後、水素ガスの温度は輻射の



第6図 物質密度と輻射温度の変化



第7図 元素の生成²³⁾。水素 H, ヘリウム He, リチウム Li, ベリリウム Be, ほう素 B の各同位元素の時間変化。nは中性子。現在の物質密度 $\rho_{0m}=3.10^{-30}\text{g/cm}^3$ の場合。

温度よりも急激に下ることになる。しかし、これはガスの加熱がないとした場合である。最近の観測ではまだはっきりしないが、現在の水素ガスは相当イオン化しており、電子温度は 10^4K に近いと云う説もある²⁴⁾。そしてこうした説では水素ガスは一度冷えた後、銀河の形成が進むにつれて宇宙線が発生し、それによってガスが加熱されるとしている²⁵⁾。

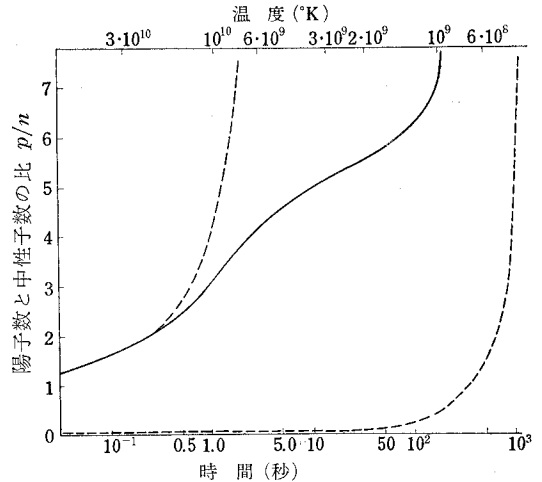
元素の形成

銀河ができる更に更に前にさかのぼれば、温度は星の中心などよりもっと高くなって来るから、熱核融合反応がおこる。星の中心部と違う点は温度が急激に冷えつつあることで、反応率の大きい反応しかおこらない。例えば、星の中心部では始め陽子と陽子が結合して重水素となり更に重い核が作られるが、この反応は非常にゆっくりしたもので今の場合にはおこらない。その代りに後述するように宇宙の始めには陽子と共に中性子が存在しているのでこの両者が結合して重水素となる。このようにしてヘリウムまでの核がおもに作られる²⁶⁾。しかしヘリウムより原子数の大きい原子核もわずかながら作られる。特に、リチウム (Li), ベリリウム (Be), ほう素 (B) は星の内部では作られないが今の場合は作られる²⁷⁾²⁸⁾。

(第7図参照) 第6表には現在の密度の不確かさを考慮

現在の密度 $\rho_{0m}(\text{g/cm}^3)$	ヘリウム(重量比)	重水素(個数比)
2×10^{-29}	0.31	$\ll 10^{-5}$
7×10^{-31}	0.27	$3 \cdot 10^{-5}$
2×10^{-31}	0.17	$3 \cdot 10^{-3}$

第6表 元素の生成量。現在の輻射温度は 3°K としてある²⁶⁾。



第8図 宇宙初期の陽子と中性子の存在比

した三つの場合の元素生成量が考えてある。

陽子と中性子の共存

ガモフは宇宙の初期物質は中性子だけであると仮定して、元素の起源を考えた。これを $\alpha\text{-}\beta\text{-}\gamma$ 理論といっている²⁹⁾。その後、林は陽子と中性子がベータ崩壊とその逆過程による反応によって共存していることを示した³⁰⁾。即ち 10^{10}K といった高温では、陽子は電子と反応して中性子に一部なり、中性子は崩壊して陽子とニュートリーノになる。結局これらの過程を通じて陽子と中性子が共存しそのようすは第8図のようになる。この時期に存在している陽電子、陰電子対の大部分は消滅するが、ニュートリーノはのこって現在も黒体輻射とほぼ同じエネルギー密度をしていることになる。

元素の存在比とその起源

元素の起源は 1957 年のいわゆる B²FH と呼ばれる論文³¹⁾に集大成されているように、大部分の元素が星の進化にもなつてその内部や、超新星の爆発の際に作られると考えられている。しかし、ほう素 (B) よりも軽い元素については $\alpha\text{-}\beta\text{-}\gamma$ 理論のように宇宙初期で作られるのかも知れない。

とくにヘリウムが何時作られたかということは星の構造、進化の問題に大きな影響をおよぼす。ヘリウム量の

(105 頁につづく)

天 体	ヘリウム/水素	観 測 者
太 陽	0.09	Gaustad (1964)
オリオン星雲	0.09	Mendez (1963)
ガス状星雲	0.11	Mathis (1962)
惑星状星雲	0.09~0.19	O'Dell (1963)
B 型 星	0.16	Aller (1961)
小マゼラン銀河の星	0.11	Aller et al (1962)

第7表 ヘリウム量の観測データ