

# 大統一理論と宇宙論

佐藤 勝彦  
小玉 英雄



アステク人の円宇宙

現代の宇宙論は進化する膨張宇宙という考え方の上に成り立っている<sup>1)</sup>。すなわち宇宙は最初、極めて高温高密度の火の玉（素粒子のガス）として生まれそれが膨張するにつれて温度密度が低下しそれに伴って現在観測的に知られている様な多様な宇宙の階層構造が形成されたと考えられているのである。3°K 宇宙黒体輻射の発見がこの火の玉宇宙モデルの正当性を決定づけたのはよく知られているとおりである。しかしこの火の玉宇宙モデルの全過程がこれによって確立されたわけではない。観測的事実に基づいてある程度確実なことが言えるのは元素合成の時代、つまり中性子・陽子から He 原子核が形成される頃以後（宇宙の温度  $<10^{10}$ °K）だけなのである。それ以前の高温の時代ではどのような物理法則が支配していたかということ自体不明であったためである。したがってこれまではこの時代は高温高密度の素粒子のプラズマで満ちた非常に単調な構造を持っているにすぎないと考えられていたのである。（以後この単調なモデルを標準モデルと呼ぶ。）

ところが近年の素粒子論の発展、特に自然界のすべての相互作用をゲージ理論によって統一しようとする理論、大統一理論（Grand Unified Theories, 略して GUT）が事態を大きく変えてしまったのである。この宇宙の初期の時代は単調どころか最も変化に豊んだ重要な時代であった可能性が明らかになってきたのである。ここではこの宇宙論の新たな展開——GUT 宇宙論——を紹介することにしよう。

## 膨張宇宙論の基本問題

標準火の玉宇宙モデルは現在の宇宙の構造進化を説明する上で非常に大きな成果をおさめているが、現在も未解決のままの重要な問題がいくらかある。

### (1) 宇宙のバリオン数の起源<sup>2)</sup>

現在の宇宙の物質は陽子、中性子などの正のバリオン数を持った粒子でありその反粒子はほとんど存在しないと考えられている。このバリオン数非対称を表すのに宇宙のバリオン数密度と光子数密度の比  $n_B/n_\gamma$  がよく使われている。これはこの比が宇宙が断熱的膨張をするかぎり宇宙の膨張によって減少も増大もしない不変量だからである。現在の宇宙の観測から  $n_B/n_\gamma \sim 10^{-(8\sim 11)}$  であることがわかっているが、これは宇宙初期において正のバリオン数を持つ粒子と負のバリオン数を持つ粒子がほぼ等量存在する時代においても、その差と光子数の比はやはり  $10^{-(8\sim 11)}$  であることを意味している。

### (2) 宇宙の一樣等方性

3°K 黒体輻射の空間的一樣性は、現在観測されている宇宙が大域的に非常に一樣等方であることを示している。しかもこの一樣等方性は宇宙の粒子的地平線、つまり互いに因果関係を持つことのできる最大距離、を越えて成立している。

### (3) 銀河の種となる密度ゆらぎの起源

現在の宇宙は大域的には一樣であるが、局所的には銀河団、銀河が存在し一樣ではない。これは宇宙が高温高密度の時代に宇宙のエネルギー密度  $\rho$  にこの特徴的なサイズのわずかなゆらぎが存在

したことを意味する。(宇宙の温度が  $10^{50}\text{K}$  で  $\delta\rho/\rho\sim 10^{-4}$  の程度)

もちろん(1)~(3)の事実を標準モデルによって説明する様々な試みはおこなわれているが十分な説得力を持ってはいない。それに対して GUT cosmology はこれらの問題に対してもっともらしい説明を与えるのである。

### 相互作用の進化と宇宙のバリオン数

近年における素粒子論の最大の成果はワインバーグとサラムによる弱い相互作用と電磁相互作用の統一理論の成功であろう。ワインバーグ等は一見まったく異なるこの2つの相互作用を、 $SU(2)\times U(1)$  という大きな内部対称性に付随するゲージ相互作用が対称性の自発的破れ (Spontaneous Symmetry Breaking) というメカニズムにより2つに分裂するというアイデアにより見事に統一してみせたのである。この考えをさらに発展させることにより強い相互作用まで含めた統一理論を作ろうとする試みが大統一理論である。この理論では  $SU(3)\times SU(2)\times U(1)$  を部分群として含むさらに大きな群  $G$  にもとづく対称性とその自発的対称性の破れを考えることになる。現在、すでに様々なモデルが提案されているが、その詳細は井上氏の解説をみていただくことにし、以下ではモデルの詳細によらない問題のみに着目する。

現在の宇宙では大統一理論のもつ本来の対称性は大きく破れて  $SU(3)\times U(1)$  対称性しか残っていない。これは  $G$  対称性に付随するゲージ場の自由度の内  $SU(3)\times U(1)$  に対応するもの以外が、自発的対称性の破れのため大きな質量  $M$  を持った結果、短距離力となって表に現れなくなったと見ることができる。このことは宇宙の温度  $T$  がこの質量  $M$  より高い時代 ( $T > M$ ) ではこれらの相互作用は長距離力となり元の対称性が回復することを予想させる。実際多くのモデルでは宇宙の温度が、宇宙初期に溯るにつれ上昇するとともに対称性は段階的に回復してゆくことがわかるのである。したがって温度が無限に高い宇宙開闢時には対称性は完全に回復していたはずである。つまり物質間に働く相互作用も、宇宙の膨張によって進化した、現在の4つの基本相互作用になったのだと

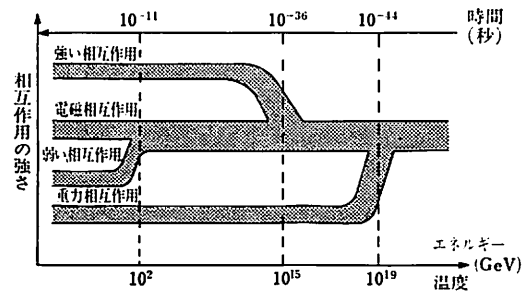


図1 相互作用の進化。宇宙の膨張により物質間に働く基本相互作用も進化する。

いうことがいえるのである。

この相互作用の進化という考え方は宇宙のバリオン数起源の説明に新しい道を開くことになった。それは大統一理論ではレプトンとクォークが入れ換る反応が存在し、もはやバリオン数は保存量ではないことにある。この反応を媒介する  $X$ -ボソンやヒグスポソンの質量  $M_X$  や  $M_H$  は  $10^{15}$  GeV のオーダーであり現在の温度の低い宇宙ではこの反応はほとんどおこらずバリオン数は実質的に保存量とみなしてよい。しかし宇宙の温度が  $M_X, M_H$  程度、もしくはそれ以上ではこの反応はさかんに起こるのでバリオン数はまったく保存しないのである。実際このバリオン数非保存過程の時間反転不変性を破るような GUT モデルでは宇宙開闢時に  $n_B/n_\gamma=0$  であっても現在の観測値をこの過程によって説明しうることが示されたのである<sup>2)</sup>。

### 真空の相転移と磁気単極子の過剰生産

統一ゲージ理論では自発的対称性の破れをひきおこすためにヒグス場と呼ばれるスカラー場  $\phi$  が必要となる。このヒグス場の簡単なモデルとして  $\phi$  場が一成分複素スカラー場で系のラグランジアンが  $U(1)$  変換:  $\phi \rightarrow e^{i\theta}\phi$  で不変な場合を考えてみよう。  $\phi$ -場が空間を一様に満たしている時のエネルギー密度  $\epsilon$  が温度  $T=0$  で次式のようにあたえられているとしよう。

$$\epsilon(\phi) = -\frac{1}{2}\mu^2\phi^2 + \frac{\lambda}{4}\phi^4 \quad (1)$$

$\mu^2, \lambda$  は正の定数である。図2からわかるように  $\epsilon$  は  $\phi=0$  で極大、 $|\phi| = \mu/\sqrt{\lambda}$  で極小となる。 $\phi=0$  の状態は  $U(1)$  変換に対して対称な状態で

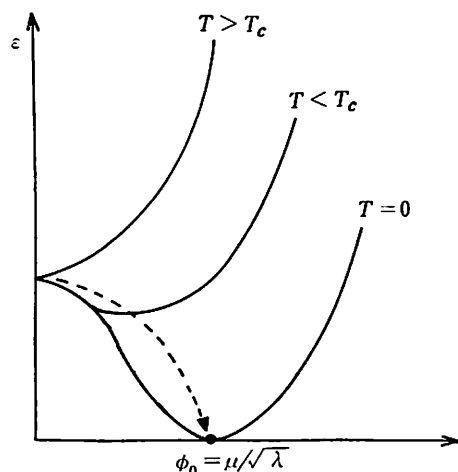


図2 2次相転移モデルでの真空のエネルギー密度. 相転移はなめらかに進行する.

あるが、そこでは $\varepsilon$ が極大となっているので不安定な状態である。したがって基底状態としての真空の状態は安定な $|\phi| = \mu/\sqrt{\lambda}$ の状態に対応していると考えられる。この状態は $\phi$ の位相の自由度のために無限に縮退している。現実にはこのうちの1つの状態 $\phi = \phi_0$  ( $|\phi_0| = \mu/\sqrt{\lambda}$ )が選ばれる。ところがこの状態は $U(1)$ 対称性をもたない。これが自発的対称性の破れである。さて $T \neq 0$ とするとどのようなようになるであろうか。詳しい計算によると $\mu^2$ は温度 $T$ とともに変化し、ある臨界温度 $T_c$ 以上では $\mu^2 < 0$ となることがわかっている<sup>3)</sup>。図2から明らかのようにこの時 $\varepsilon$ は極小点のみを持ち、それは $\phi = 0$ に対応する。したがって $T > T_c$ では真空は $\phi = 0$ の状態に対応し、対称性が回復されたことになる。このような変化は物質論とのアナロジーで真空の相転移と呼ばれている。この真空の相転移にはやはり物質の相転移に対応して、1次相転移と2次相転移という2つの型が存在する。図2に示したように $\varepsilon$ 最小状態の $\phi$ の値が $T \leq T_c$ で $T$ と共に連続的に変化する場合は2次相転移、図3のように $T = T_c$ で不連続に変化する場合は1次相転移と呼ぶ。いずれの相転移が起るかはGUTモデルに依存する。われわれがこれから問題とするGUT相転移、 $G \rightarrow H$  ( $\supseteq SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ )は $T \approx T_c \sim 10^{16} \text{ GeV}$ で起る。このGUT相転移が1次であるか2次に

よってその宇宙論的影響は大きく異なる。まず2次相転移の場合を考えてみよう。相転移が起ると $\phi$ 場はゼロでない値をもつようになるが、その方向(前の例では位相 $\theta$ )は全宇宙にわたってそろえることはできない。それは $\phi$ -場はいわゆるコヒーレント長 $\xi$ 程度の距離までしか相関を持つことができないためである。したがって $T < T_c$ で宇宙は各々が $\phi$ の方向がランダムである $\xi$ 程度の広がりを持った領域で埋めつくされることになる。ところがこのような状態は全体としてエネルギーの高い状態であって真空の基底状態ではない。Kibble<sup>4)</sup>によって指摘されたようにこのコヒーレント領域によって囲まれた点に約1/10の確率で磁気単極子が作られてしまうのである<sup>5)</sup>。しかもそれは非常に大きな質量( $> 10^{16} \text{ GeV} \approx 10^{-8} \text{ g}$ )をもち、対消滅のみで消滅する安定なものなのである。相転移終了直後の磁気単極子の個数密度 $n_M$ はほぼ $n_M = (10\xi^3)^{-1}$ であるので $\xi$ が大きいほど作られる磁気単極子の数は少なくなることになる。ところが、 $\xi$ はどんな相転移モデルでも宇宙の粒子的地平線 $h$ (宇宙が生まれてからこの時間までに互いに情報交換が可能な最大距離)より大きくなれない。この制限のために磁気単極子と光子数の比 $n_M/n_\gamma$ は $10^{-11}$ より小さくすることはできないのである。これは磁気単極子の質量エネルギー密度が現在の宇宙の全エネルギー密度を越えないという条件 $n_M/n_\gamma \leq 10^{-24}$ をはるかに越えてしまっている。したがってGUT相転移が2次であるようなモデルは宇宙論的に否定されることになってしまうのである。

### 1次相転移とGUT宇宙論

GUT相転移が1次相転移の場合宇宙のモデルは大きく異なったものになる。図3に示されているようにこの場合 $T < T_c$ でも $\phi = 0$ の状態は $\varepsilon$ の極小点であり $\phi = 0$ の状態から、よりエネルギーの低い $|\phi| = \phi_0$ の状態にうつるためにはエネルギーの山を越えねばならない。(以後 $\phi = \phi_0$ の安定な真空を“真”真空、 $\phi = 0$ の状態を“偽”真空と呼ぶ)その結果、宇宙膨張に伴って $T < T_c$ になってもしばらくの間ヒグス場が $\phi = 0$ の状態に留まるといえることが起ることになる。このような

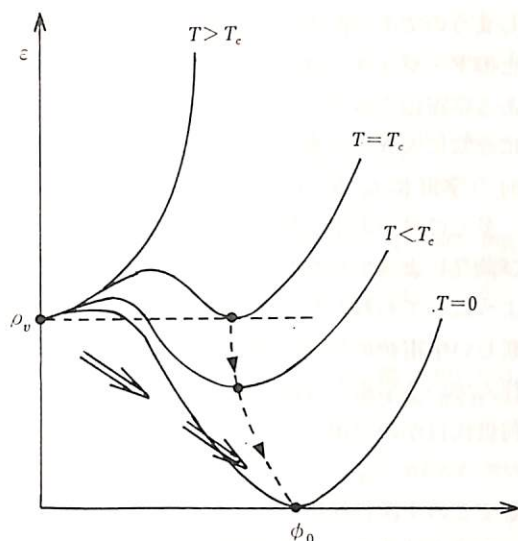


図3 1次相転移モデルでの真空のエネルギー密度。温度が  $T < T_c$  となっても、 $\phi = 0$  と  $\phi = \phi_0$  の間にある小さな山のため相転移は著しく遅れる。

現象は気相-液相の転移の時のアナロジーで宇宙の過冷却と呼ばれる。このような過冷却状態にある宇宙は興味深いふるまいを示す。空間的に平坦で一様等方な宇宙では宇宙の大きさを表すスケールファクター  $R(t)$  と宇宙の全エネルギー密度  $\rho$  はアインシュタイン方程式により次のように結ばれている。

$$\left(\frac{dR}{dt} / R\right)^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} \rho \quad (2)$$

ここで  $c$  は光速、 $G$  は重力定数である。宇宙初期の非常に高温の時代では輻射のエネルギー密度が  $\rho$  に寄与するので  $\rho$  は  $T^4$  に比例する。一方温度は宇宙膨張と共に  $R(t)$  に反比例して降下するので、 $R(t)$  は

$$R \propto \sqrt{t} \quad (3)$$

に従ってゆるやかに増大する<sup>1)</sup> (フリードマン時

代)。

ところが GUT 宇宙論では図3に示されているように真空もエネルギー密度を持つのでこれも加えておかねばならない。特に宇宙が過冷却状態におちいると  $\rho_r$  は膨張と共に減少するのに対して真空のエネルギー密度  $\rho_v$  は一定のままである。その結果宇宙のエネルギー密度は真空のエネルギー密度ばかり、つまり  $\rho = \rho_v$  (一定) となり(2)式より  $R(t)$  は  $t$  に関して指数関数的に急激に大きくなるようになるのである。

$$R(t) \propto \exp(t/\tau) \quad (4)$$

$$\tau \equiv (8\pi G \rho_v / 3c^2)$$

多くの GUT モデルでは  $\rho_v \sim (10^{15} \text{ GeV})^4$  となりこれは  $\tau \sim 10^{-36}$  秒に対応し、過冷却状態にある宇宙は非常に急激に膨張し始めることを示している。実際、標準モデル<sup>1)</sup>がプランク時  $\sim 10^{-44}$  秒(実質的に宇宙の始まりと考えられる)から現在の時刻 100 億年の間に行う膨張を、わずか70倍の  $\tau$  の時間  $10^{-34}$  秒で達成してしまうのである。

#### 1次相転移によるワームホールの生成<sup>6),7)</sup>

過冷却状態におちいった宇宙もいつかは相転移を起す。状況は過冷却の気体で起る過程と似ている。まず急激に膨張する“偽”真空の中にぼつりぼつりと“真”真空の泡が発生する。この泡は光速でふくらんで行き、ついには互いに衝突して融合する。各泡の内部はミンコフスキー的時空構造を持ち、泡の表面、壁には真空の相転移によって解放されたエネルギーが運動エネルギーとして貯えられている。このエネルギーは泡どうしの衝突の際に起る散逸過程により通常の物質のエネルギーに変化すると考えられる。図4に示すように相転移の進行によって泡のしめる体積はしだいに大きくなる。そして、ついには泡によって“偽”真空領域

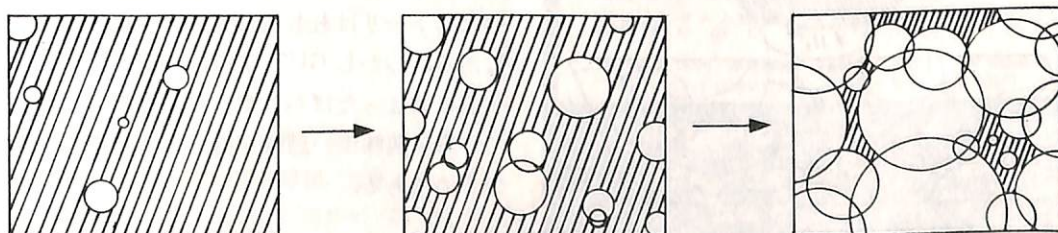


図4 1次相転移の進行。斜線領域が“偽”真空領域である。泡の中は“真”真空である。

(図の斜線領域)は完全に切り離され、泡、つまり“真”真空によって完全にとり囲まれてしまうようになる。1次相転移が進行している宇宙では、明らかに宇宙のエネルギー密度は空間的に凸凹だらけであるので、その時空構造も激しく空間的に変化したものになってしまうことは予想される。特に泡によって囲まれた“偽”真空領域およびそのまわりの時空構造を調べてみると実はこの領域は外部から因果的に切り離されてしまうことがわかるのである。具体的には、泡に囲まれた時のこの領域の大きさ  $r_0$  が小さい場合 ( $r_0 < l \equiv ct$ ) にはブラックホールに、逆に大きい場合 ( $r_0 > l$ ) にはワームホールと呼ばれる時空構造が作られるのである。ワームホールは内部の“偽”真空領域と外部の“真”真空領域の間に2つのホライズン(光速で広がっているが表面積の変化しない面)  $H_1, H_2$  を含んでいる。外部の情報は  $H_2$  まで、内部の情報は  $H_1$  までしか達しない。すなわち内部と外部は完全に因果的に分離されている。したがって外部からみるとワームホールはブラックホールと何等違いはないのである。以上の事実は“偽”真空領域が泡によって分断され孤立した領域にとじこめられた時点をもって実質的に相転移が終了したと見なして良いことを意味しているのである。

ところで上記の1次相転移によって形成されるワームホールは実にファンタスティックな可能性を提供してくれる。ワームホールの時空構造はブラックホールのものと非常に似かよっている。そこでブラックホールと同様に Hawking メカニズムによりワームホールも蒸発するとしてみよう。ワームホールの蒸発は図5で示されている内部と外部をつなぐ橋の部分が消滅することを意味する。すなわち内部の領域が元の宇宙から完全に独立し

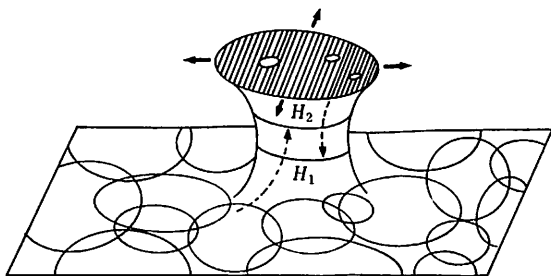


図5 1次相転移によって作られたワームホールの模式図。

てしまうのである。ところがこの内部領域はもとのド・ジッター時代(指数関数的に膨張する)にある宇宙のミニチュア版であり、膨張によりすぐに非常に大きく成長してもとの宇宙と対等な一人前の宇宙になる。そこでは再び相転移が進行し、多くのワームホールが形成される。それらは再び蒸発によって独立し新しい宇宙を生じる。このようにしてわれわれは宇宙の多重発生という全く新しい宇宙像に到達するのである。われわれの今住んでいる宇宙もこの宇宙の多重発生で生まれた何世代目かの宇宙だということになるのである。

さてこの1次相転移モデルでは、2次相転移モデルではさけることのできなかつた磁気単極子の過剰生産は防ぐことができるだろうか。1次相転移モデルではコヒーレント長  $\xi$  は泡の大きさだと考えてよい。したがって泡の発生確率が小さいと1個1個の泡のしめる体積は大きくなるので  $\xi$  も長くなる。したがって1次相転移モデルでは、泡の発生確率さえ十分小さければ、 $\xi$  が長くなるので磁気単極子の過剰生産は原理的に解消される。また、1次相転移モデルでは銀河の種としてのゆらぎも相転移によって作られるゆらぎから作ることができると期待されている。

相転移が1次であるGUT宇宙論は、このようにこれまでの標準火の玉宇宙モデルでは説明困難であった重要問題にもっともらしい解答をあたえるのみならず、宇宙の多重発生という驚くべき暗示をも含んでいるのである。もっとも1次相転移モデルにはまだ未解決の問題も多く残されている。重力の効果を厳密に考慮した泡の発生論は不完全なままであるし、また泡の衝突によってどのようなプロセスをへて、エネルギーが熱化されるのか不明なままである。今後の研究によって今述べたストーリーはもちろん大きく変更される可能性はある。しかしGUT宇宙論の研究はつい3~4年前に始まったばかりであり、今後の研究によってさらに興味深い結果が得られる可能性を秘めているのである。

