

モノポールの宇宙論 [I]

— $t \sim 10^{-37}$ 秒, $T \sim 10^{28}$ 度の世界をかいまみる—

伊 沢 瑞 夫*・森 川 雅 博*

はじめにおことわり：編集理事の方から執筆依頼を受け、「モノポールの宇宙論」の解説を試みる。ただ、この分野（「素粒子論的宇宙論」とでも呼んでおこう）の話題は、一般の天文の方々には抵抗感をもたれるようである。大統一理論 (GUT) など、まだなじまれていない物理に基礎をおいているからだと思う。従って、本稿では、初歩的な素粒子物理学の説明からはじめて、簡単な GUT の紹介も行なう（過去の「月報」にも GUT や GUT 宇宙論の紹介は一つもない）。幸い、素粒子論に明るい森川君の協力が得られたので、今回 [I] は共著で「素粒子論の紹介から宇宙初期でのモノポール生成まで」を述べ、「モノポールと宇宙の進化」について述べるのは次回 [II] に回すことにした。この分野に明るい方は [II] だけを読んでいただいで十分だと思う。（この項伊沢）

1. 序 モノポールとその宇宙論的意義

詳細は追々説明することにして、まずモノポールとは何か説明しよう。よく知られているように、電気の場合は正電気（例えば陽子）や負電荷（例えば電子）を単独でとり出すことができる。しかし、磁気の場合には、磁石を思い出していなければよいのだが、必ずN極とS極が対になって現れ分離できない（双極子）と考えられている。実は、モノポール（単極子、より正確には磁気単極子）とは、このN極あるいはS極が単独で現れたものなのである。

ところで、このモノポールの存在を、近年盛んに研究されている素粒子の大統一理論 (GUT) が、その質量が $10^{-8}g$ であることと共に予言しているのである。では、なぜモノポールの宇宙論を考察する必要があるのだろうか。素粒子論の側からと宇宙論の側からの両方の必要性がある。まず、素粒子論の側からは、こんなに重たい粒子（陽子の 10^{16} 倍！）は、いかに加速器の技術が発達しようが人工的につくることは全く不可能である。そこで、ビッグバン宇宙論を信奉して（それを一挙に宇宙時間 $t \sim 10^{-37}$ 秒まで外挿する！）「モノポールは宇宙初期の熱いときに生成された、そして現在でも原理的には観測可能な粒子である」と考えるのである。一方、宇宙論の

側からも、逆に、モノポールはビッグバン宇宙論の検証の手段となる。従来、膨張宇宙論の観測的検証の限界は、宇宙の温度 $T \sim 10^{10}$ 度の頃のできごととされる元素合成期にあった。もし、宇宙の初期にのみ生成されうる重たいモノポールが発見されれば、それは宇宙がかつて $T \sim 10^{28}$ 度 ($t \sim 10^{-37}$ 秒に対応する) まで熱かったことを示し、一挙に 18 桁もさかのぼることができるのである。この意味で、モノポールの宇宙論的意義は極めて大きいといえよう。

2. ビッグバンモデル

さて、話が前後するけれども、ここで宇宙の標準的なモデルであるビッグバンモデルについて簡単に述べておこう。このモデルは、我々の宇宙は約 100 億年前に熱い火の玉として誕生し、それが膨脹・冷却していくにつれて銀河や星が形成され現在に至っていることを主張する。その観測的根拠として重要なものは次の3つである。

(i) 遠方の銀河のスペクトル線の赤方偏移……宇宙膨脹に起因する銀河の後退によるドップラー偏移とみなす（ハッブル則）。(ii) 絶対温度 3 度のごく等方な背景放射の存在……かつて宇宙の物質はすべて放射（光）と強く結合していた（火の玉時代）、そしてその時代の放射の名残である、と解釈する。(iii) 現在の宇宙におけるヘリウムの存在量……星の中でつくられる量だけでは不足しており、宇宙初期の $T \sim 10^{10}$ 度の頃の核合成反応の結果と考える。

これらの観測事実から、宇宙は膨脹してきて昔にさかのぼるほど熱くなることが予想される。そして、理論的に宇宙膨脹の力学を記述するのが一般相対論なのである。すなわち、宇宙の特徴的長さ、 R 、の時間発展は、アインシュタイン方程式

$$R^{-1}dR/dt = \sqrt{8\pi G\rho/3}$$

で記述される。ここで G は重力定数である。 ρ は宇宙のエネルギー密度であり、これが宇宙の膨脹を支配しているのである。一般に、宇宙初期 ($T \geq 10^9$ 度) では、宇宙のエネルギー密度は放射（より正確には相対論的粒子）が担っていると考えられ、 $\rho = (\pi^2/30)NT^4$ となる*。 T

* 京大理 Mizuo Izawa and Masahiro Morikawa: Cosmology of Magnetic Monopoles

* この分野では、通常、 c (光速) $= \hbar$ (プランク定数 $2\pi = k$ (ボルツマン定数) $= 1$ なる自然単位系を用いる。アインシュタインの関係 $E = mc^2$ を用いて、エネルギーと質量、更に温度をも同等に扱うのである ($E = kT$)。また、重力

は宇宙の温度であり、 N は輻射の自由度（種類）である。これら2式と断熱膨脹関係 $T \propto R^{-1}$ の仮定から、膨脹則 $R \propto t^{1/2}$ 、及び温度-時間関係 $T \approx 10^{10}(N/10^2)^{-1/4}(t/\text{秒})^{-1/2}$ 度 が得られる。この結果は、過去にさかのぼるほど宇宙は熱かったこと ($t \rightarrow 0$ で $T \rightarrow \infty$) を示しており、ビッグバンモデルの基本である。

しかし、初期宇宙の物質はただ単調に $\rho \propto T^4$, $T \propto R^{-1}$ に従っているのではない。もしそうなら、初期にさかのぼっても単に熱くなるだけで、何もおもしろいことはおこらないことになる。実際には、ビッグバンの基礎を変更するほどではない（と考えられている）が、 $\rho \propto T^4$ あるいは $T \propto R^{-1}$ からの多少のずれ（例えば粒子の生成・消滅や熱の発生）が生じ、様々なできごとが生ずるのである。この様子を知るには初期宇宙物質の物性の知識が必要だが、これを提供するのが（超）高エネルギー物理学すなわち素粒子論なのである。次節でこれを紹介しよう。

3. 素粒子物理学

3.1 物質と力（相互作用）

我々の周囲には様々な物質が存在し、それらが互いに力を及ぼしあっていることは、我々の日常体験するところである。さて、これらの物質を細分化していくと、何か“物質の最小単位”といったものが見えてくるのだろうか？

前世紀までの物理・化学は、すべての物質は分子から成り、更に分子は原子から成ることを明らかにした。こ

の時点では、物質間に働く力はすべて、日常おなじみの重力と電磁力に還元できた。しかし、今世紀初頭、原子は正電荷をもつ原子核のまわりを負電荷をもつ電子が回っていること、更に原子核は正電荷をもつ陽子と電荷をもたない中性子から成っていることがわかった。ここで新たに2つの力が発見された。核子（陽子と中性子のこと）を原子核として結合させる力（核力）と、ベータ崩壊のように原子核が他の原子核に転換される現象に現れる力である。その強さに起因して、前者を強い相互作用、後者を弱い相互作用という。いずれも日常なじみのうすい力なのだが、実は、強い相互作用が、水素原子核（これは陽子1個だけから成る）以外の原子核の安定性を保証するのである。更に、我々の生活のエネルギー源である太陽光は、太陽中心部での核合成反応の産物だが、この核反応において弱い相互作用は本質的な働きをしているのである。

結局、現在、自然界には、重力・電磁力・強い力・弱い力、の4つの力（相互作用）が存在すると考えられている。一方、物質に関しては、その後の実験の進展により、核子は実はクォークと称する構成子の複合体とみなすべきであることがわかった。更に、電子も、その後発見されたニュートリノと合わせて一群をなし、レプトンと称されることになった。すなわち、現時点での物質の最も微視的な構成子はクォークとレプトンなのである。なお、核子がクォークの複合体であることは実験（レプトンで核子の内部を探る）によって検証されており、クォークモデルの課題は核子内にとじこめられていない

表1 代表的な素粒子

		名称	記号	質量** (MeV)	スピン	バリオン数	レプトン数	電荷	相互作用***
レプトン		電子	e^-	0.5	1/2	0	1	1	電磁・弱
		陽電子	e^+				-1	-1	
		(電子型) ニュートリノ	ν_e	0(?)	1/2		1	0	弱
		(電子型) 反ニュートリノ	$\bar{\nu}_e$				-1	0	
ハドロン	メソン*	パイ粒子	π^\pm/π^0	140/135	0	0		$\pm 1/0$	強・電磁・弱/強・弱
	バリオン*	陽子	p	938	1/2	1	0	1	強・電磁・弱
		反陽子	\bar{p}			-1		-1	
	メソン*	中性子	n	940	1/2	1	0	0	強・弱
		反中性子	\bar{n}			-1		0	

* メソンはクォーク・反クォークの束縛系、バリオンはクォーク3個（あるいは反クォーク3個）の束縛系とみなせる。

** $E=mc^2$ によってエネルギーで量る。1MeV=1.8×10⁻²⁷ g。

*** 重力は除いてある。

定数の代わりにプランク質量 $m_{pl}=G^{-1/2} \approx 10^{19}$ GeV $\sim 10^{-5}$ g を用いることが多い。なお、1度 $\approx 10^{-4}$ eV $\approx 10^{-16}$ erg, 1 MeV $\approx 10^6$ eV, 1 GeV $\approx 10^9$ eV である。

自由なクォークが存在しないこと（とじこめの問題）だけである、と言っても過言ではない。

さて、ここで代表的な“素粒子”の表を掲げよう（表1）。この表では、実感をもっといただくため、クォークをあらわに出さずに、直接検出できるレベルでの素粒子を掲げた。術語の説明をしよう。まず、ハドロンとは強い相互作用をする素粒子の総称で、クォークから成るとされている。ハドロンのうちスピンの整数のものをメソン、半整数のものをバリオンという。スピンとは自転角運動量の如きもので、量子力学によれば \hbar を単位として整数（ボゾンという）か半整数（フェルミオンという）になる。更に、バリオン数（レプトン数）とはバリオン（レプトン）を特徴づけるラベル（量子数という）である。バリオン数・レプトン数とも、素粒子反応においてその総和の保存されることが極めて高い精度で検証されている。ここで反粒子について触れておこう。すべての素粒子に対して反粒子が存在する（粒子と一致することもある）。このことは、理論・実験両面から確立されている。例えば、電子の反粒子は陽電子、陽子の反粒子は反陽子である。反粒子は粒子と同じ質量・スピンをもち、バリオン数・レプトン数・電荷は粒子と逆符号である。

3.2 力を伝達する素粒子

次に、これらの素粒子の間に働く力について述べよう。現代物理学の一つの到達点である場の量子論は相対性理論と量子力学によって導かれるものであるが、この理論によれば、素粒子間の相互作用は素粒子そのものの交換によって説明されるのである。すなわち、素粒子には物質の（基本）構成子という性格と、力の媒介子という性格が与えられている。例を挙げよう。図1に相互作用の素過程を表わす図（ファインマン図という）を示した。(a)は電磁相互作用の素過程であり、荷電粒子の間に光子(γ)が交換されている。3.1で、光子を物質の構成子としての素粒子から除外していたのは、実は、光子には力の媒介子という性格を与える方がふさわしいからなのである。(b)はハドロンレベルでみた強い相互作用であり、核子の間にパイ粒子が交換されている。(c)はクォークレベルでみた強い相互作用であり、クォークの

間にグルオン（膠着子）と呼ばれるボゾンが交換されている。グルオンは直接発見されてはいないが、間接的にその存在を示している実験事実は十分にある。(d)は弱い相互作用の例で、弱ボゾンという重たい($\sim 10^2 \text{ GeV}$)粒子が交換されている。弱ボゾンには荷電をもつもの2種 W^+ , W^- と中性のもの1種 Z^0 があり、いずれも1982年に発見された。なお、重力は重力子（グラビトン）というボゾンの交換によると解釈されるが、重力に関しては満足しうる量子理論がつかられていないので、この解釈は類推にすぎない。

以上の説明から、フェルミオンが物質の構成子的な粒子であり、その間をボゾンがとびかうことによって力が伝達されていることがわかるだろう（クォークはフェルミオンであり、光子はボゾンである）。更に、力の到達しうる距離 r はその力を媒介するボゾンの質量 m に逆比例し $r \sim m^{-1}$ である。（質量 m の粒子に対し $2\pi\hbar/mc = 2\pi\hbar/mc$ をコンプトン長という。なお、 $r \sim m^{-1}$ 関係は、質量をエネルギー ($1/c^2$)、長さを時間 ($\times c$) だと思えば量子力学の不確定性関係から求められる）。この関係から、強い力と弱い力が、電磁力や重力と異なり、微視的世界にのみ現れることが理解できる。まず、光子と重力子は質量をもたないので、電磁力と重力の到達距離は無限大である。強い力に関しては、グルオンは質量をもたないので、到達距離は無限大であると考えたくなる。しかし、クォークレベルではとじこめがおこっているため、ハドロンレベルで考えねばならない。すなわち、パイ粒子のコンプトン長 $\sim 10^{-18} \text{ cm}$ が強い力の到達距離になっている。一方、弱い力に関しては、弱ボゾンの質量 $\sim 10^2 \text{ GeV}$ に対応して $r \sim 10^{-16} \text{ cm}$ となる。換言すれば、弱ボゾンの質量が通常の実験のエネルギーを上回っているために弱ボゾンをやりとりするのが困難で、この力は“弱く”なっているのである。但し、弱ボゾンをつくるだけのエネルギーがないと反応がおこらないように思われるかもしれないが、量子論によれば、弱い力による遷移確率は0ではない。

3.3 力の統一（ワインバーグ・サラム理論まで）

ところで、素粒子論は、自然界に存在する一見すると

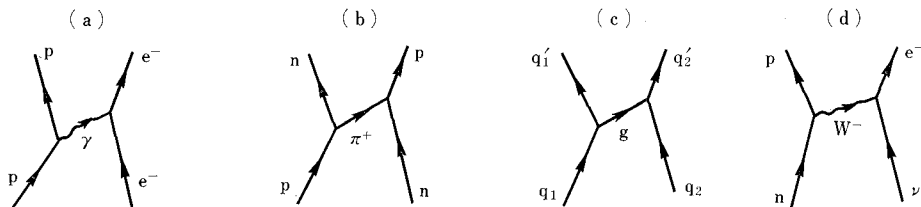


図1 相互作用を表わすファインマン図の例

(a) 電磁相互作用: γ は光子 (b) 強い相互作用 (ハドロンレベル) (c) 強い相互作用 (クォークレベル): q はクォーク, g はグルオン (d) 弱い相互作用: W は弱ボゾン.

異なってみえる4つの力を統一する方向に進んでいった。最初に電磁力と弱い力を統一する“電弱力”の理論(ワインバーグ・サラム理論)が建設された。この理論建設において本質的な役割を果たしたのが、自発的対称性の破れという概念である。これを説明する前に、“相互作用を表わす対称性”について述べねばならない。強い力を例にとる。クォークにはカラー(赤, 青, 緑の3つがある, 日常の色とは無関係)という属性があり, 電磁力の場合の電荷に対応して, 強い力に対する“感度”を表わす。実は, 基本原理として, 「クォークのカラーの計り方(色の名づけ方)を時空の各点ごとに変えても物理現象は同じである」こと(ゲージ原理という)を設定するのである。一般相対論で「どのような座標系をとっても物理法則は同じである」(一般座標変換に対して不変)というのと同じことなのである。相対論の場合は実際の時空の座標を考えているが, 強い力の場合はクォークのカラーの計り方といった“内部空間”の座標を考えているのである。内部空間で座標をどのようにとってもよいということは, この空間に一種の対称性があることを意味する。この対称性(数学の記号ではSU(3)となる)が強い相互作用を表わす対称性である。さて, 時空の各点でこのように勝手に座標系を選ぶと, それらを相互調整する必要が生ずる。実は, この働きをするのが強い力の場合はグルオンであり, 一般にはゲージ粒子と称される力を媒介するボソンなのである。一般に, 対称

性とゲージ原理から, 媒介粒子を含めて力の性格を完全に規定することができる。ゲージ原理が素粒子論の基本原理とされるゆえんである。なお, 電磁力においては光子が媒介のゲージボソンでありその対称性はU(1)と記されること, 及び(古典)重力理論もゲージ理論であることをつけ加えておこう。

次に, 自発的対称性の破れを説明しよう。理論自体がある対称性をもっている, 実際にその対称性が出現するとは限らない。実現するのは基底状態(エネルギー最小の状態, 「真空」)であり, 理論自体が有している対称性をもっているとは限らないのである。例として強磁性を考えよう。強磁性体(磁石のことだと思っただければよい)とは磁気双極子の向きがそろっている物質だが, この特徴は双極子間にその向きをそろえようとする力が働くことに起因する。このとき双極子がどの向きにそろうかは任意である。実際には双極子は偶然ある一つの向きにそろうのであり, どの向きを向く確率も同じである(図2(a)参照)。双極子に働く力(電磁気力)が回転対称性をもつ(どの向きでも同じ)にもかかわらず, 実際に出現する状態では双極子は特定の向きにそろってしまい回転対称性が破れているのである。さて, この例の場合は, 温度を上げると, ある臨界温度以上では強磁性を失ってしまう(磁石でなくなる)。高温では, 熱的揺動に対抗して双極子を特定の向きにそろえる方がポテンシャルの高い不安定な状態であり, 双極子の向きが完全に乱れてしまった方が安定になるからである(図2(b)参照)。

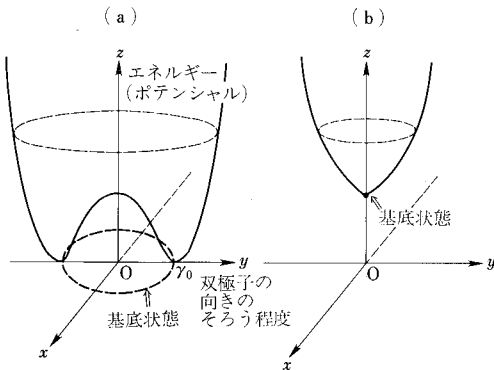


図2 対称性の破れとその回復(強磁性体の例)
(a) 低温の場合 (b) 高温の場合

xy 平面が, 双極子の向きのそろい程度とその向きを示している。双極子の向きが完全に乱れているのが0であり, 0から遠ざかるほど多数の双極子が向きをそろえている。 z 軸にはエネルギー(ポテンシャル)をとり, それぞれの状態に対するエネルギーを示した。勿論 z 軸対称であるが, 低温の場合(a)は, 基底状態は $x=y=0$ ではなく $r=\sqrt{x^2+y^2}=r_0$ ($\neq 0$)のところであり対称性が破れている。素粒子の統一理論の場合は, 双極子の向きのそろい程度がヒグズ粒子の凝縮度に代わる。原点0が統一された対称な状態である。

ワインバーグ・サラム理論においても, 強磁性体の場合と同じようなことがおこっている。すなわち, 高温(エネルギーが十分大きい)状態は対称状態(SU(2)×U(1)と記される)であり, この状態では電磁力と弱い力は同種の力になり, 弱ボソンは光子と同じく質量をもたなくなる。この理論において, 対称性の破れの程度を特徴づけるのは, 新たに導入されるヒグズ粒子の凝縮度なのである。すなわち, 通常エネルギーの低い(低温)状態では, ヒグズ粒子の凝縮がおこり統一された対称性SU(2)×U(1)がU(1)へと破れて, 2つの力に差異が現れるのである。なお, このとき, ヒグズ粒子は凝縮に際して弱ボソンに質量を与える(ヒグズ機構)のだが, これについては説明を省く。プラズマ中では光子はプラズモンとしてあたかも質量をもつかのように振舞う, という類似した例を挙げるにとどめる。

3.4 大統一理論(Grand Unified Theory: GUT)

さて, ワインバーグ・サラム理論は, 弱ボソンの質量の測定値が理論値とよく一致していること等から, 今日では確立された理論であるとみなしてよい。そうなる, 次には強い力を含めた統一が問題となる。この理論

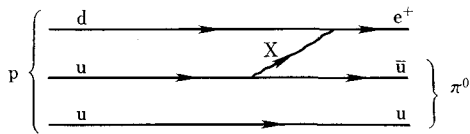


図3 陽子崩壊のファインマン図の例
 u, d はクォーク, \bar{u} は反クォークである. この例では陽子が陽電子と中性パイ粒子に崩壊した.

が大統一理論 (GUT) であり, 実は 1974 年に提唱されていたのである. その理論構造はワインバーグ・サラム理論と同じである. すなわち, 新しいヒグズ粒子が温度の降下と共に凝縮をおこして, 大統一された対称性 (モデルによって異なる. 最も単純なものは $SU(5)$ と称される. 以下では単に G と書いておく) が低温での対称性 $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$ に自発的に崩壊するのである. ここで, $SU(3)$ は強い相互作用の対称性, $SU(2) \otimes U(1)$ はワインバーグ・サラム理論の対称性である. ところで, 力が統一されるエネルギースケール (対称性の破れる温度) は, ワインバーグ・サラム理論では弱ボソンの質量に対応して 10^2 GeV 程度であったが, GUT の場合は何と 10^{15} GeV 程度になるのである. この値は力の強さのエネルギー依存性という概念を用いて理論的に求められるのだが, ここでは説明を省く.

さて, このように力を統一することにより, 我々の素粒子に対する認識がどのように深められるのだろうか? まず, 内部座標のラベルづけの際にクォークの自由度とレプトンの自由度を混合させてしまうので, クォークとレプトンに関係をつけることができる. 例えば, 電荷に関する関係から, 陽子と電子の電荷の絶対値の等しいことが保証される. 単にそれだけではなく, ワインバーグ・サラム理論における弱ボソンのように, 新たに極めて重い ($\sim 10^{15} \text{ GeV}$) ゲージボソン (X, Y と書かれる) が出現する. しかも, これらのボソンはクォークとレプトンを入れかえる働きをするのである. このことは極めて重要な現象をひきおこす. すなわち, クォーク 3 体系である核子がレプトンとメソンに崩壊しうる (図 3) ことになり, 今まで絶対的に安定であると考えられていた陽子も安定ではないことになった. この種の

反応ではバリオン数やレプトン数の保存則が成立していないことに注意. (クォークのバリオン数は $1/3$, 反クォークは $-1/3$ であり, レプトン数はいずれも 0 である.) 核子の安定性が成り立たなくなると共に, これらの保存則も近似的な法則になってしまったのである. さて, 実際にこのようなバリオン数非保存反応が頻繁におこっていれば, 核子はどんどん崩壊していき物質は直ちに消滅してしまうだろう. 現実には, 日常の低エネルギー現象では, X, Y といったボソンが極めて重いために, バリオン数非保存反応は著しく抑制されているのである. 例えば, 陽子の寿命は 10^{30} 年程度と見積もられており, 宇宙の年齢 ($\sim 10^{10}$ 年) と比べてもはるかに長い.

実は, GUT にはもう 1 つ重要な産物があり, それが本稿の主題であるモノポールなのである. 大統一された対称性 G が $U(1)$ (電磁力の対称性は $U(1)$ である) を含んだ小さな対称性に崩壊するとモノポールが生ずることがわかっている. すなわち, 低エネルギーでの対称性 $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$ を 1 つの対称性 G に統一すると必ずモノポールが出現するのである. ここで簡単に, GUT モノポールとはどんなものであるか述べておこう. 先に述べたように, GUT の統一された対称性が破れる (GUT 相転移という) 際にヒグズ粒子の凝縮がおこるが, このヒグズ核子には“向き”というべき自由度がある. 図 4 (a) に示したように, ある点のまわりでヒグズ粒子の向きが放射状になっているとき, 遠方から見るとその点にモノポールがあるように見えるのである. このことは, 磁場を計算することによって確かめることができる. ところで, GUT モノポールは, GUT のエネルギースケールに対応して, 10^{16} GeV という極めて大きな質量をもつ. 更に, その数学的構造によって安定であり, モノポールと反モノポール (N 極と S 極, 図 4 (b)) とが対消滅する以外には崩壊しえないのである. なお, モノポールの磁荷は, GUT のモデルによって異なるが, $g \simeq (2e)^{-1} \simeq 5.9$ (無次元) $\simeq 4.1 \times 10^{-18} \text{ Wb} \simeq 3.3 \times 10^{-9} \text{ emu}$ 程度である. この値は, 電気素量 $e/\sqrt{c\hbar}$ と無次元化すると 8.5×10^{-2}) と比べて極めて大きい.

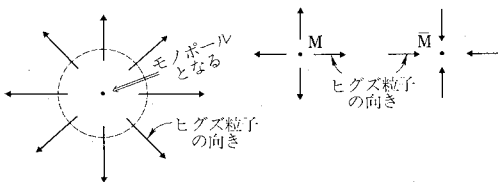


図 4 (a) GUT モノポールの概念図
 このように, 空間のある点のまわりでヒグズ粒子の向きが放射状になっているとき, この点にモノポールがあることになる.
 (b) モノポール (M) と反モノポール (\bar{M})

以上, 長々と GUT に到るまでの素粒子論をレビューしてきたが*, GUT は, 10^{15} GeV という超高エネルギースケールを対象としているとはいえ, 実験によって検証されうる理論なのである. モノポール探しの外にも,

* 素粒子論の全容を紹介することは勿論不可能であった. 更に詳しく知りたい人のために, 数ある一般向の解説書の中から次のものを挙げておく.

藤井昭彦 (編): 別冊サイエンス 55
 特集 素粒子 統一理論への歩み
 (日経サイエンス社 1982)

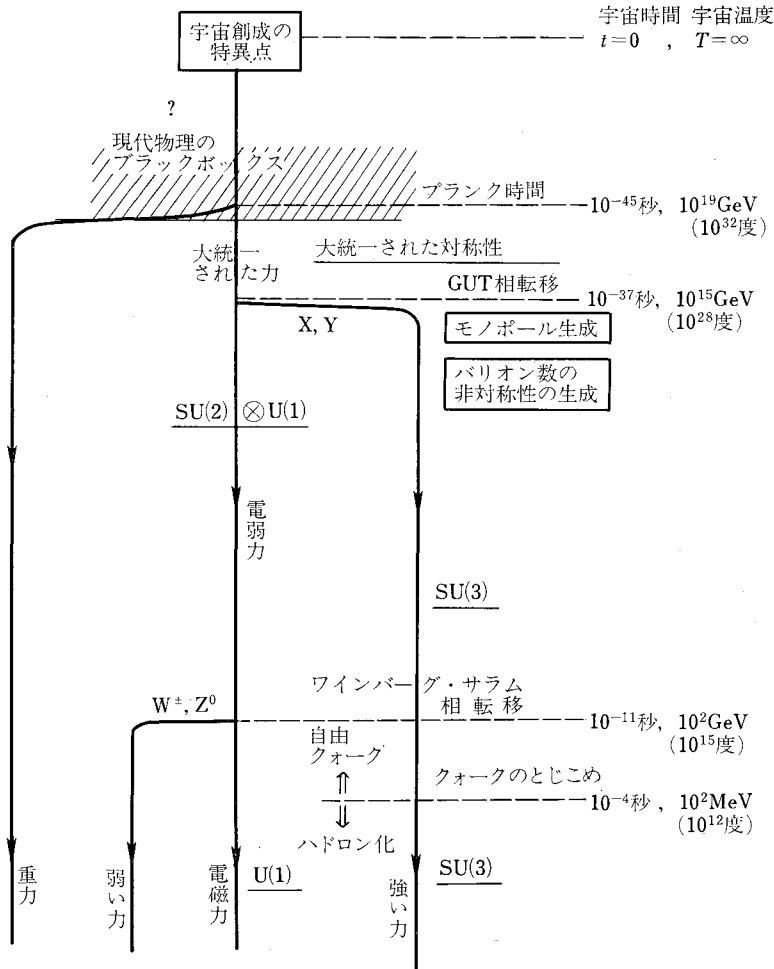


図 5 宇宙の進化に伴う相互作用の分化

核子崩壊の実験が世界各地で行なわれており、理論(値)との比較ができる段階に来ている。これで素粒子物理の話は終わってその宇宙論における応用に進むわけだが、その前に、GUT という理論が素粒子論の自然な進展として誕生したこと、及び実験によって検証可能な理論であることを改めて強調しておきたい。

4. 素粒子論的宇宙論

前節で紹介した素粒子論に基づいて宇宙初期の姿を描いてみよう。GUT が記述するのは 10^{15} GeV 程度より低いエネルギースケールの物理であり、それよりもはるかに温度の高い世界に外挿できる保証はない。それに、重力は含まれていない。しかし、既に述べたように、重力に関しては、満足すべき量子理論が建設されていないので、古典的なアインシュタイン方程式によって取り扱えない。重力に対する量子効果が重要になるエネルギ

ースケールは、プランクエネルギー(プランク質量) $m_{pl} \sim 10^{19}$ GeV 程度である、と推定できる。このような超高エネルギーの世界では、時空の量子的ゆらぎが無視できなくなるのである。古典物理の範囲では、原理的には $T = \infty, t = 0$ の宇宙創成の特異点にまでさかのぼることができるけれども、量子論に基づく限り、現在の知識では、 $T \sim 10^{19}$ GeV までさかのぼりうるだけで、それ以前は単に外挿して済まずしかないのである。

以上のことを念頭にして、宇宙の進化に伴う相互作用の分化の図(図5)を見ていただこう。宇宙の温度が $T \geq 10^{15}$ GeV のときは、強・電磁・弱の3つの力が大統一されて1つの力として作用している。重力は、 $T > 10^{19}$ GeV では大統一された力と更に統一されていたかもしれないが、 10^{15} GeV $< T \ll 10^{19}$ GeV の時代には既に分化されており、弱くなっている。前節でも説明したように、 $T \sim 10^{15}$ GeV でヒッグス粒子の一部が凝縮し、GUT

相転移がおこって強い力と電弱力が分化する。更に、 $T \sim 10^2 \text{ GeV}$ で残りのヒグズ粒子も凝縮し、ワインバーク・サラム相転移となって電磁力と弱い力が分化する。なお、強い力に関しては、 $T \sim 10^{-1} \text{ GeV} = 10^2 \text{ MeV}$ でクォークがハドロン内にとじこめられる、と考えられている。

以上図5に示した段階(“素粒子の時代”)は、観測的に検証されている時代よりも昔のことである。ビッグバン宇宙論の観測的根拠のうち最初のできごとは元素合成であり、それはもう1段階後の $T \sim 1 \text{ MeV}$ ($\approx 10^{10}$ 度)、 $t \sim 1$ 秒の時代のできごとなのである。更に、 $T \sim 4000$ 度で、輻射(光子)は物質と相互作用しなくなり、光は自由にとびかうようになって宇宙は晴れ上がる(遊離; decoupling)。その後、物質(バリオン等)のゆらぎが成長して、極く最近(背景輻射温度で $T \sim 10 \text{ K}$?) 銀河、更に、星が形成されて、現在の宇宙ができあがるのである。

さて、GUT の特徴であるバリオン数非保存反応とモノポールの存在が、膨脹宇宙の進化の中でどのような役割を果たすのか見えていこう。まず前者を考える。観測事実としては、我々の周囲のものはすべて“物質”から成っており“反物質”は存在していない。地球、太陽系、銀河……とより大きなスケールに目を向けていっても、“物質”ばかりが存在し、“反物質”が大量に存在することを示唆する証拠は1つもない。すなわち、我々の宇宙は“物質”すなわちバリオンから成っていて、全バリオン数は0ではない。定量的には、宇宙のバリオン数密度は $n_B \approx 10^{-9} \sim 10^{-8} \text{ cm}^{-3}$ と推定されている。輻射との比をとって断熱不変量にすると、 $n_B/n_r \approx 10^{-8} \sim 10^{-10}$ となる。(n_r としては、3K 背景輻射の数密度 $n_r \sim 400 \text{ cm}^{-3}$ をとる)。この比は、GUT 提唱以前は初期条件とみなす外なかったが、現在では宇宙初期のバリオン数非保存反応の名残と考えるのである。すなわち、GUT 相転移直後には、バリオン数非保存反応を媒介する X, Y といった重たいボゾンも数多く存在した。これらのボゾンの崩壊の際に粒子-反粒子対称性が破れていけば、バリオン数の非対称性 ($n_B \neq 0$) をつくりうるのである。理論に基いてバリオンと輻射の数比、 n_B/n_r が計算されているが、その値は GUT のモデルに依って大きく異なる。しかし、観測値を説明することは可能だと考えられている。かつて原子核物理学建設期に、ガモフらによって宇宙初期の原子核合成の計算がなされたが、今では GUT を応用して、更に 18 桁も昔のできごとであるバリオン数の非対称性生成の計算がなされているのである。

さて、最後になったが、本稿の主題である、宇宙初期におけるモノポール生成について述べて [I] を閉じよう。図4(a)に示したように、モノポールとはその周囲でヒグズ粒子の向きが放射状になっている配置のことで

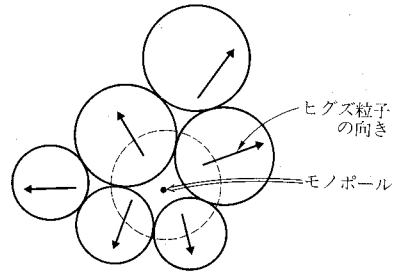


図6 相転移後のヒグズ粒子の向きのドメイン構造とモノポールの生成。

あった。GUT 相転移の際に、ヒグズ粒子は凝縮をおこし(それ以前は凝縮していないので、“凝縮度”は0であり向きというものは存在しない)向きをもつようになる。ヒグズ粒子がどちらを向くかは全くランダムであり、図6に示したように、相転移後の宇宙はヒグズ粒子の向きのそろったドメイン構造になると考えられる(3.における強磁性体の例参照)。この際、確率的には、図6の黒丸のように、そのまわりでヒグズ粒子の向きが放射状になっている場所も生ずる。先に説明したように、これがモノポールなのである。(なお、統計的考察によれば、ドメインに囲まれた場所がモノポールになる確率は約10%である。)

この節で紹介したように、GUT は、宇宙初期にさかのぼれば、単に熱くなるだけではなく、ヒグズ粒子の凝縮による相互作用の分化、バリオン数の非対称性の生成、モノポール生成といった華やかな世界を我々に示してくれる。この中でも、モノポールは、宇宙初期に GUT 相転移がおこれば必ず生成されるのであり、しかも 10^{-5} g という大きな質量をもつ故、初期宇宙でのみ生成されるのである。それ故、モノポールを発見しさえすれば、素粒子論としての GUT が検証されるだけではなく、ビッグバン宇宙論が一举に $T \sim 10^{15} \text{ GeV} \sim 10^{29}$ 度まで検証されてしまうのである。しかし、モノポール生成を考慮して宇宙の進化を検討すれば、話は決してそんなに甘くはなく、むしろ宇宙論と素粒子論の一方もしくは両方の基盤をゆるがしかねないほど難解な矛盾が生じてしまうのである。この問題について述べるのが今回の内容である。(続)

☆

☆ ☆ ☆

☆