

- 5 - 2 Temporal ゲージでの 1 ループ近似
- 5 - 3 一粒子状態の分類
- 5 - 4 球対称 ansatz のもとの自由エネルギー
- 5 - 5 一般の一粒子状態に対する定式
- 6 章 宇宙のバリオン数問題への影響
- 7 章 まとめと残されている問題
- 謝 辞
- 付 録
- 参考文献

論文内容要旨

1章 序論

現在の確立された素粒子模型は、標準模型と呼ばれる $SU(2)_L \times U(1) \times SU(3)_c$ のゲージ群に基づいたゲージ理論である。その中に含まれる相互作用は摂動論ではバリオン数、及びレプトン数を保存する。非摂動論的な効果を考慮することにより、標準模型の、特に Weinberg-Salam 理論の枠内でバリオン数非保存過程の存在する事が 'tHooft によって指摘された(1976)。ゼロ温度ではその過程はトンネル効果にのみ因り、半古典的に WKB 近似により評価され、過程発生の確率は Weinberg-Salam 理論の結合常数 ($g \sim 0.63$) を用いて $\exp(-16 \pi^2/g^2) \sim 10^{-174}$ という非常に小さな因子により抑制される。

Manton と Klinkharmer は、Weinber-Salam 理論の中に、不安定ではあるが、時間に依存しない 3 次元的な励起状態を表す古典解が存在することを示し、スファルロン (sphaleron) と名付けた(1983)。この解の存在はバリオン数非保存過程に対して新たな可能性をもたらす。系の温度がスファルロン質量、数 Tev 程度になればバリオン数非保存過程が有意に起こる可能性が考えられる。これは、我々の現在のバリオン数と反バリオン数の間に見られる非対称性と関係して、重要な問題を提示する。かつて宇宙の温度が 10^{15} Gev であった時代にバリオン数の非対称性が生じたとする大統一理論による説明は、より低温での Weinberg-Salam 理論のバリオン数非保存過程により修正を受ける可能性がある。この様なことより有限温度でスファルロン励起を伴うバリオン数非保存過程の研究は重要である。

2章 量子異常項によるバリオン数非保存

Weinberg-Salam 理論でのバリオン数非保存過程は、アノマリーと呼ばれる、古典的には保たれていた対称性が量子論に於いて破れるという特異な効果、及びゲージ理論の真空状態として位相幾何学的に区別された多くの状態があり、それらの間の遷移過程 (NT 遷移) が存在するという非摂動論的な効果、の 2 点に依っている。多くの真空は巻数 (Q) と呼ばれる位相幾何学量により区別される。真空に対して Q は S^3 から S^3 への写像の次数 (整数) を与える。 $Q=Q_1$ の真空から $Q=Q_2$ の真空に遷移が起こると

$$\Delta N_B = n_g (Q_2 - Q_1)$$

だけのバリオン数 (N_B) の変化が生じる。ここで n_g は理論の世代数である。NT 遷移過程による、ゼロ温度での核子崩壊の寿命を評価してみると約 10^{158} 年であり、GUT により予想される寿命に比べて非常に長い。

スファルロンは $Q=Q_1$ と $Q=Q_1+1$ の真空間の遷移において系が越えなければならないポテンシャルエネルギーの頂点に位置する、 $Q=Q_1+1/2$ をもつ、場の運動方程式の鞍点解である。それは大きさ $r_{sp} \sim m_w^{-1}$, 及びエネルギー $m_{sp} \sim 4 \pi m_w/g^2$ をもつ空間的に局所化された励起状

態を表す。ここで m_w はゲージボゾン質量である。温度の上昇とともにスファルロンが熱的に生成され、あるひとつの真空にあった系がポテンシャルを飛び越えて隣の真空へ遷移する可能性が生じる。

3章 有限温度でのバリオン数非保存

現在おもに熱的な遷移確率の評価に用いられている方法は準安定状態から安定状態への遷移の際の不安定状態の生成確率に対するものである (Langer, 1969. Affleck, 1981)。それをスファルロン生成へ応用すれば、遷移によるバリオン数の変化率 $\Gamma_B = |dN_B/N_B dt|$ は、スファルロン質量 m_{sp} に対する温度 β^{-1} での Boltzmann 因子の他に、スファルロンを背景に持つ時と持たない時の W , Higgs 粒子の自由エネルギーの差 $\Delta F(\beta)$ によって書かれる。

$$\Gamma_B \propto \exp(-\beta m_{sp}) \exp(-\beta \Delta F)$$

特に第二の因子をエントロピー因子と呼ぶ。

遷移確率に対していくつかの評価が与えられておりそれによると宇宙の膨張率 $\Gamma_{ex} = dR/R dt$ に比べて、 Γ_B は数百 GeV の温度で $\Gamma_B/\Gamma_{ex} \sim 10^{10}$ と非常に大きい (Arnold, McLerran, 1987)。ここで R は宇宙のスケールファクターである。この結果はバリオン数非保存過程が、宇宙膨張に比べて十分速く起こり、宇宙のバリオン数非対称性の説明に重大な影響を持つ事を示す (Kuzumin, Rubakov, Shaposhnikov. 1985)。

我々が本論文で問題とすることは以下の点である。スファルロン励起に対してエントロピー因子を通しての抑制が現れる事はないか？この因子の計算にはスファルロンのまわりの W , Higgs ボゾンの一粒子状態を知る必要がある。もし一粒子状態に対してスファルロンが斥力の効果を与えるとすると、エントロピー因子は 1 より小さく、抑制として働く。無限個の一粒子状態の寄与として、エントロピー因子がスファルロン生成に対して重大な抑制を与える可能性が考えられる。

4章 Sphaleron と Static Minimum Energy Path

まず自由エネルギーを計算する前段階として、場の運動方程式の特解を求めスファルロン励起の生成される様子を調べる。場を、球対称 ansatz と名付けた配位空間に制限し、その ansatz の内で $Q=0$ の真空から $Q=1/2$ のスファルロンへ到る配位空間内の道を考える。各 Q に対して最もエネルギーの低い配位を求める (SMEP)。低温 ($T < m_{sp}$) ではこの様な道に沿って遷移が起きると予想される。

数値計算の結果、球対称 ansatz の内に SMEP が存在することが解った。得られた解を用いて Q に対して最小のエネルギーを書いたものが図 1 である。これは NT 遷移に対するポテンシャルという意味を持つ。途中でポテンシャルの微係数等が発散するような事は起こらない。励起過程の間励起に関与する領域の広がり具合は $r \sim m_w^{-1}$ で、だいたい一定である。これらの

道の存在により励起過程はほとんど球対称に有限の領域で起こる事が予想される。さらにこれはスファルロンの生成確率を評価する際に用いる希薄スファルロン気体近似と呼ばれる近似方法を正当化する。又球対称 ansatz は Manton, Klinkharmer による仮定より広いものであるがその範囲内でスファルロンと呼ばれる解はほぼ一意である事が確かめられた。

5章 Sphaleron の自由エネルギー

W, Higgs 粒子の自由エネルギーの計算を行う。そのためにスファルロンを背景に持つ時の W, Higgs 粒子の一粒子状態を求めることが必要である。スファルロンは、1) Hedgehog 回転, 空間回転と理論の SU(2)内部空間内の回転の積, 2) 変形された空間反転, スカラー場に対して(-)の固有パリティを割り当てた空間反転, に対して不変である。そのため一粒子状態は、量子数 (h, p') により分類される。一粒子状態の準位を求める固有値方程式において、異なる (h, p') の間の結合はない。各 (h, p') を持つ状態に対して固有値方程式は有限次元の連立常微分方程式に分解される。

スファルロンの影響が最も大きく現れると予想されるのは、最も小さな部分波により構成される $h=0$ の状態である。 $h=0$ に対して数値計算を行い、自由エネルギー、エントロピー因子の評価を行った。一粒子状態に対するスファルロンの効果は引力的であり、図2に示すようにエントロピー因子は希薄スファルロン気体近似の有効な領域で1.0-1.3程度の値である。励起に対してエントロピー因子による大きな抑制は現れない事がわかる。

また $h=0$ 状態に対して不安定モードが得られ、またそれは唯一であった。不安定モードとはスファルロンの不安定性を表す虚数の振動数を持つ状態の事であり、これの唯一であることは Langer らの理論を用いるに当たり必要な条件となる。エントロピー抑制についての結論を出すためにはしかしながら $h=0$ 以外の一粒子状態についての効果も含めたより詳しい解析が必要であると考えられる。

6章 宇宙のバリオン数問題への影響

Weinberg-Salam 理論のバリオン数非保存過程の存在により、宇宙のバリオン数 N_B 及びレプトン数 N_L は GUT スケールで生成された量から変化する。バリオン数非保存過程の存在する時、平衡状態でのバリオン数 $N_B(eq)$, レプトン数 $N_L(eq)$ は、GUT で生成されたバリオン数とレプトン数の差 $(N_B - N_L)_{GUT}$ を用いて

$$N_B(eq) = 4(N_B - N_L)_{GUT}/13$$

$$N_L(eq) = -9(N_B - N_L)_{GUT}/13$$

である。またその平衡状態への緩和時間が Γ_B^{-1} により評価される。 $h=0$ に限った場合のエントロピー因子を用いると、希薄スファルロン気体近似の成り立つ温度領域、 $T \sim$ 数百 GeV, で Γ_B

／ Γ_{ex} は 10^9 程度まで大きくなることがわかる。宇宙の中で十分に速く平衡状態が達成され、もし $(N_B - N_L)_{\text{GUT}} = 0$ ならば現在の宇宙のバリオン数非対称性は消えてしまう。バリオン数の非対称性の説明において $N_B - N_L$ を生成するようなモデルが必要である (Kuzumin, Rubakov, Shaposhnikov, 1985. Fukugita, Yanagida, 1986)。

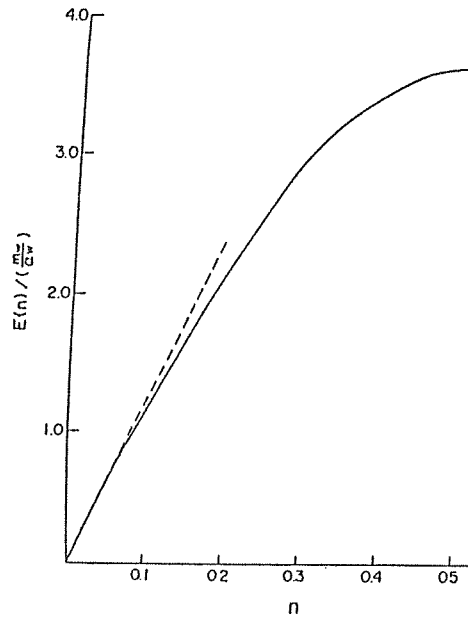


图 1

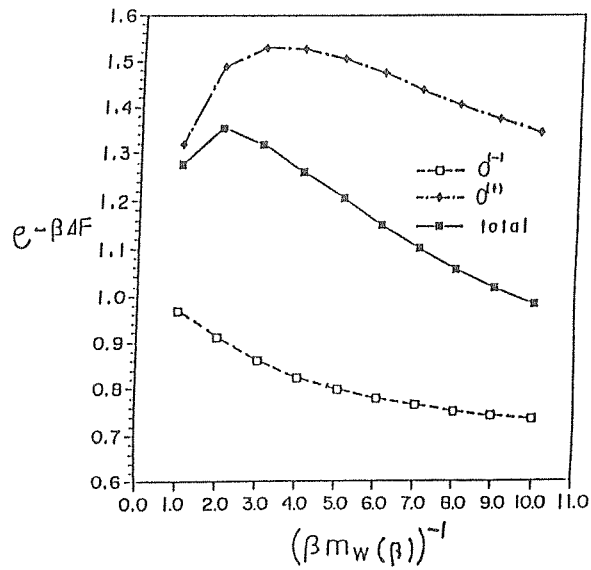


图 2

論文審査の結果の要旨

素粒子の標準理論として現在認知されている $SU(2)_L \times U(1)$ 電弱統一理論においては、場の方程式はスファロン (sphaleron) と呼ばれる静的な (不安定) 解を持つ (Manton 1983)。この解は、それを經由してバリオン数 (N_B) 非保存過程が起こる可能性があるために広く注目されてきた。ただしスファロンの場合でも、インスタント的トンネル効果として N_B 非保存過程が起こる確率は非常に小さくて全く問題にはならない。インスタントと違う点は、スファロンが不安定かつ数 TeV という非常に重い質量ながらも本当の粒子的な解であること、そのために十分な高温領域ではその熱的励起を經由してかなりの確率で N_B 非保存過程が起こるかも知れない、という点である。

菊地尚志提出の学位論文においては、このスファロン解の分析及び宇宙が数百 GeV の高温だった時代に上記のような熱的過程として N_B 非保存が起こる確率の詳細な計算がなされている。彼が導いた知見の主要なものは次のとおりである。

- (1) Manton らの分析におけるよりもっと広い Ansatz のもとで解析してみてもスファロン解が唯一の静的解であること、及びその解の不安定モードはただ一つしかないことを示した。この結果はスファロン励起を經由する熱的過程の計算に Langer-Affleck 理論を適用することの正当性を示唆するものである。
- (2) 問題の N_B 非保存過程が起こる確率を支配する重要な因子である「エントロピー因子」を計算した。この因子の計算は非常に複雑なため、今までにはその具体的定量的計算を行った例はない。菊地尚志は方程式の対称性に着目してこの因子に寄与する配位を分類し巧妙な計算法を考案、十分説得力のある近似を導入して計算に成功した。彼の近似の範囲内では、このエントロピー因子は何ら抑制効果をもたらさず、その結果数百 GeV の温度領域では N_B 非保存遷移確率は宇宙の膨張率の約 10^9 倍もの大きな値になることが期待される。
- (3) 上記の結果は宇宙論、特に現在の宇宙におけるバリオン数の実測データの説明の定説に重大なかかわりを持つ。菊地尚志はこの問題も考察して、従来の定説のように GUT スケールの温度の時代にバリオン数が生成されるものとすれば、その際適当な大きさの $N_B - N_L$ (N_L はレプトン数) が作り出されるようなモデルが必要であることを指摘している。

この学位論文が取上げた問題は現在注目を集めている重要なテーマの一つであり、得られた知見もいずれも重要かつ影響の大きいものであり十分高く評価される。

本論文は著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって菊地尚志提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。