

氏名・（本籍）	いの　　うえ　　はじめ 井　　上　　一
学位の種類	博　士（理　学）
学位記番号	理博第1519号
学位授与年月日	平成9年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科，専攻	東北大学大学院理学研究科（博士課程）原子核理学専攻
学位論文題目	粒子崩壊への宇宙膨張の効果
論文審査委員	（主査）教授 吉村 太彦 教授 日笠 健一，助教授 江沢 潤一

## 論 文 目 次

第1章	序論
第2章	古典粒子の運動
第3章	自由場
第4章	相互作用場
第5章	高エネルギー粒子の崩壊確率
第6章	崩壊確率の性質
第7章	結論
付録A	作用のスケール不変性
付録B	$\gamma_5$ を含む相互作用がある場合

## 論 文 内 容 要 旨

宇宙の発展を記述する理論としていわゆるビッグバン宇宙論が議論されてきた。これは我々の宇宙は非常に高温のプラズマ状態（火の玉宇宙）から始まり、宇宙が膨張するにつれて温度が下がっていった現在の宇宙になったというものである。この温度が下がってゆく過程で相転移やバリオン生成、軽元素合成などが起こったと考えられている。

初期宇宙でのこれら興味ある現象の多くに、素粒子物理学的解析がなされてきた。それらには膨張の効果を入れずに、平坦なミンコフスキー時空における結果が従来使用されてきている。これは粒子の散乱や対消滅などの単位時間当たりの反応確率 $\Gamma_{int}$ が、宇宙膨張を特徴づけるハッブルパラメーター $H$ よりも十分大きい（ $\Gamma_{int} \gg H$ ）という前提に基づいている。つまり膨張の時間スケール $t_H = 1/H$ よりも粒子の反応の時間スケールの方が短く、 $\Gamma_{int}$ に対する膨張の効果は無視できると考えるのである。

一方、 $\Gamma_{int} < H$ のときには膨張の方が激しく、他の粒子との相互作用は切れて粒子は孤立してしまう。その場合でも粒子の寿命 $t_{decay}$ が膨張の時間スケールよりも十分短い（ $t_{decay} \ll t_H$ ）ならば、平坦な時空における結果を用いることは正当化される。粒子は膨張の効果を感じる前に崩壊してしまうからである。逆

に粒子の寿命が十分長いときには、単に膨張とともに粒子の物理的運動量がスケール因子に反比例して減少していくのみであると考えられてきた。

しかし荷電粒子の場合を考えてみると、宇宙膨張によって減速させられた粒子は一般に輻射を出し、エネルギーを失ってゆくと予想される。このような粒子が輻射を出す効果は、従来の解析では見落とされてきた。ミンコフスキー時空では4元運動量の保存から、自由な粒子が輻射を出すことは一般には禁止されている。だが、粒子が他の粒子のつくり出す電磁場中を運動する場合には可能となる。膨張宇宙においても粒子は重力場という外場と相互作用しているのでエネルギーは保存せず、輻射放出は原理的に可能であると考えられる。実際、一般の曲がった時空における古典的な制動輻射についての定式化はすでになされていた。しかし、具体的解析あるいは量子効果を含めることまでは試みられていなかった。

そこで本論文では粒子が輻射あるいは零質量粒子を放出する過程のみならず、もっと一般に粒子が2体へ崩壊する過程を考えそれを場の量子論的に扱った。ただし、崩壊する粒子の質量は崩壊後に生成された2粒子の質量の和よりも小さいとする。つまりミンコフスキー時空では起こり得ず、宇宙膨張の効果があって初めて起こる反応である。ここで考えているような過程を我々は重力場による制動輻射 (geometric bremsstrahlung) あるいは重力場による粒子崩壊と呼ぶことにする。

膨張の効果を十分に受けやすいのは前に述べたような、他の粒子との相互作用が切れて孤立した寿命の長い粒子である。そのような“長寿命粒子”の例としては超重力理論におけるグラビティーノやポロニー場など他の粒子と重力相互作用しつかないものが挙げられる。これらが軽元素合成の時期以降に崩壊すると、従来の宇宙論のシナリオを変更してしまう可能性がある。したがって長寿命粒子の崩壊を考えることは非常に重要である。本論文ではその第一歩として計算方法の確立に重点をおいて研究を行なった。

背景時空としては空間的に平坦なロバートソン・ウォーカー時空を考えた。このとき共形座標をとると時空の計量は $g_{\mu\nu} = a^2 \eta_{\mu\nu}$ と表される。ここに $a$ はスケール因子、 $\eta_{\mu\nu}$ はミンコフスキー計量である。

まず、 $p_{\text{phys}} H/m^2 \ll 1$  の場合には古典的粒子描像が良く、古典論で議論できる。ただし $p_{\text{phys}}$ は粒子の物理的運動量、 $m$ は質量である。荷電粒子の運動を輻射の反作用も考慮して解析すると、制動輻射の効果は確かに存在することが分かった。その時間スケールは宇宙膨張の時間スケールに比べると十分長くなり、一般相対論における等価原理にも抵触しない。

一方、 $p_{\text{phys}} H/m^2 \gg 1$  の場合には量子論的に扱う必要があるが、高エネルギー粒子が2つの高エネルギー粒子に崩壊する確率を場の量子論的に求めた。

共形座標 $(\eta, x)$ をとり $a$ でスケールした場で作用を書き直すと、時空の計量が $\eta_{\mu\nu}$ で質量が $ma$ に置き換わった理論になる。そこで通常の平らな時空の場の理論のように摂動論を使って崩壊確率を求めた。摂動の0次の“自由場”の方程式は一般には正確に解けないので、粒子の運動量が非常に大きく $p_{\text{phys}} \gg m$ 、 $H$ を満たすとしてWKB近似を使った。ここに自由場とは他の粒子との相互作用はないが、外場(重力場)とは相互作用している場のことである。

また、スケール因子としては時刻 $\eta = -1/\omega$ より過去、および時刻 $\eta = 1/\omega$ より未来では殆んど一定であるもの考えた。これは反応の始状態と終状態を明確に定義するためである。現実の膨張宇宙と関連づける場合には期間 $-1/\omega \leq \eta \leq 1/\omega$ の部分を切りとったものと考えている。平らな時空( $a = \text{一定}$ )では起き得ない反応を考えているので、この期間内でしか粒子崩壊は起きない。今回の研究では必ずしも現実的なスケール因子とは限らず、条件 $p_{\text{phys}} \omega/m^2 \gg 1$ 、 $p_{\text{phys}} \gg H$ を満たせば漸近的に平坦である以外は任意であるとした。スケール因子が輻射優勢の宇宙などを表す場合には $\omega$ はハッブルパラメーターのオーダーである。

さて、粒子崩壊は崩壊後にできた2粒子の運動量が崩壊前の粒子の運動量と殆んど並行である場合が支配的になった。これは近似的なエネルギー保存を意味し、これを大きく破る場合にはその寄与は非常に小

さく無視できる。逆に近似的エネルギー保存を満たすような運動量の配位の場合には、スケール因子は階段型にしても良いことが示され、形の詳細は失われる。

以上のような近似のもとにスカラー場の3点相互作用 ( $n$ 次元)、湯川型相互作用、ベクトル場とスピノル場およびベクトル場とスカラー場の相互作用について、包括的に崩壊確率  $W$  を評価した。

崩壊確率  $W$  は本来スケール因子の汎関数であるが、繰り込み可能な相互作用の場合には高エネルギー極限においては膨張の詳細には依らず、スケール因子依存性は  $b = a_i / a_f$  の形でのみあらわれる。ここに  $a_i, a_f$  はそれぞれ時刻  $\eta_i, \eta_f$  におけるスケール因子である。そして様々な崩壊様式にも関わらず  $W$  における  $b$  の関数形は

$$\frac{1+b^2}{1-b^2} \log \frac{1}{b} - 1$$

$$1 - \frac{2b}{1-b^2} \log \frac{1}{b}$$

$$1 - \frac{2\sqrt{b}}{1-b}$$

の3種類のみがあらわれることが明らかになった。これらは全て変換  $b \leftrightarrow 1/b$  について対称であるという性質を持つ。この対称性はスカラーの3点相互作用においては、時間反転および座標のスケール変換によって理解できることを示した。

また、崩壊確率は粒子の質量や結合定数にも依存しているが、始状態の粒子が同質量の粒子と零質量粒子に崩壊する場合、ミンコフスキー時空における零質量粒子の放出過程（制動輻射）と同様に赤外発散があらわれる。だがこれは、運動量（あるいはエネルギー）に対する分解能が有限であれば問題はない。分解能以下の運動量を持つ零質量粒子を放出する過程は、零質量粒子を放出しない過程と区別がつかないので両者の遷移確率を加える必要がある。このとき赤外発散は相殺することも示した。

今回の解析によって粒子の運動量が非常に大きいときには、重力場による粒子崩壊の効果が（4次元に限らず）存在することが分かった。それゆえ長寿命粒子の崩壊に適用した場合、従来議論されてきた宇宙のシナリオに変更を与える可能性がある。したがって今後素粒子モデルに基づいた具体的シナリオで、このような解析をおし進めることが重要になってくると考えられる。

## 論文審査の結果の要旨

曲った時空での場の量子論は、宇宙初期の物理を理解するうえで大きな意義をもつと考えられる。このような観点から宇宙のスケール因子の時間変化を仮定する背景時空のもとで、場の粒子生成などの問題が広範に議論されてきた。

本論文は、曲った時空の効果も粒子の崩壊現象にはじめて応用したものである。粒子生成の場合は場の2次形式が問題となるが、崩壊現象ではより複雑な場の3次項を扱う必要が生じる。ロバートソン・ウォーカー計量を背景にする時空では、場の方程式の係数に時間依存性が現れる。本論文では、粒子の運動量が大きい場合に有効な量子論的な計算法を開発し、粒子崩壊の確率を求めた。スケール因子の振舞いとして、無限の過去と無限の未来に平坦な時空を仮定して漸近状態をあいまいさなく定義する計算が用いられた。

結果は、宇宙年齢より長寿命のゆっくり崩壊する粒子に特に有効であり、等価原理に矛盾しない興味ある現象が見出された。平坦な時空ではエネルギー運動量保存則により禁止される崩壊も許されるという結果である。始状態と終状態のスケール因子の増大比に対数的に依存する確率が得られたために、定量的には、宇宙論に与える大きな効果を期待できないが、新しい効果を見出したことは高く評価できる。また、崩壊を記述する相互作用に対する種々の場合が計算されており今後この結果を利用するのに便利である。

以上の内容は、本人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。従って、井上 一提出の論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。