

氏 名 笠 原 克 昌  
かさ はら かつ あき  
 学位の種類 理 学 博 士  
 学位記番号 論 理 博 第 633 号  
 学位授与の日付 昭 和 54 年 1 月 23 日  
 学位授与の要件 学 位 規 則 第 5 条 第 2 項 該 当  
 学位論文題目 On the Apparent Break of Scaling Features in High  
 Energy Cosmic-Ray Components in the Atmosphere  
 (大気中の高エネルギー宇宙線諸成分のスケールリングの様相の  
 破れについて)

論文調査委員 (主 査)  
 教 授 長谷川博一 教 授 三宅弘三 教 授 町田 茂

### 論 文 内 容 の 要 旨

この論文は、大気中での高エネルギー宇宙線のミュー中間子成分、ハドロン成分および電子・光子成分のエネルギースペクトル、強度の高度による変化および強度の絶対値の実験データを、超高エネルギー素粒子反応における核相互作用断面積の増大およびスケール則の破れとの関連に重点を置いて解析したものである。

申請者はさきに、同様の分析を行い、100TeV(=10<sup>14</sup>eV)を越える超高エネルギーの素粒子反応においても加速器エネルギー領域のそれと同じくスケール則が成立すると仮定すれば、実験結果を再現することができないとの結論を得ていた。ここでいうスケール側とは相互作用の非弾性断面積がエネルギーによらず一定であることも含んでいる。

本論文において申請者は、この不一致の原因として、(1)核相互作用の非弾性断面積がエネルギーとともに増大する、(2)スケール則が破れる、(3)陽子換算した一次宇宙線のエネルギースペクトルが3×10<sup>13</sup>eV以上で steep になる、との可能性を考え、以下にその分析を試みた。

まず、核相互作用断面積のエネルギー依存性を検討する。加速器実験での陽子・陽子の非弾性衝突断面積から予想される超高エネルギーの断面積を、核子・空気原子核衝突の場合に換算した値を参照すると、非弾性断面積は入射エネルギーとともに、そのゆるやかなべき乗の形で増大すると近似してよいことが見出される。べきの数值は0.1以下である。

つぎに、このエネルギー依存性を仮定し、粒子発生スペクトルについて次の3つのモデルを導入する。

M0: 1回の衝突当りの粒子発生スペクトルは、これを発生粒子のエネルギーと入射粒子のエネルギーとの比xの関数であらわすと、入射エネルギーとともに非弾性断面積が増大するにもかかわらず、同一の関数である。これは広義で、スケール則が成立すると見なす場合である。

M1: 断面積の増大する部分と断面積一定の部分とは異なる物理的過程が対応する。断面積の増大するのは、非常にエネルギーの低い粒子発生によるもので、宇宙線現象にはこれらの粒子は寄与しない。こ

の場合スケール則は破れるが、その影響は小さい。

M2: 入射エネルギーの増大に伴い、粒子発生スペクトルをあらわす関数形は変化し、宇宙線現象に関する発生粒子の割合が減少する。また、そのような粒子の多重度は入射エネルギーの $1/4$ 乗に比例し、平均エネルギーを $X$ で測ると、入射エネルギーの $1/4$ 乗に反比例する。

以上3つの模型について、宇宙線の各成分の大気中での伝播を表わす微積分方程式をつくり、積分変換によって解き、断面積のエネルギー依存性をあらわすべきの種々の値について数値計算を行い、実験と比較する。

比較される実験は、ミュー中間子成分、ハドロン成分、電子・光子成分のいずれも、エマルジョンチェンバーで測定された結果を用いる。得られた結論は次の通りである。

- (1) 多重発生における前方発生粒子のスケール則が、非弾性断面積一定のもとで成立つためには、陽子換算一次宇宙線スペクトルが $3 \times 10^{13}$ eV以上で急激に折れ曲がっていなければならない。このような陽子換算スペクトルが実現するためには、一次宇宙線中の鉄原子核の成分が増加し、 $10^{17}$ eV以上ではほとんどすべて鉄成分でなければならない。
- (2) 非弾性断面積がエネルギーとともに増大し、前方に発生する粒子についてスケール則が破れない場合(模型M0およびM1)では、ハドロン成分と電子・光子成分の実験から非弾性断面積のエネルギー依存性はきわめて小さくなければならないことが結論され、結局上の(1)と同じ結果になる。
- (3) 前方に発生する粒子についてのスケール則が破れる場合(模型M2)では、非弾性断面積の入射エネルギー依存性をあらわすべき指数として0.04ととれば、すべての成分についてエネルギー・強度の高度による変化および強度の絶対値が説明できる。この場合には、一次宇宙線中の鉄成分の異常な増大を仮定する必要がない。

以上を要約すると、超高エネルギー素粒子反応においては、前方に発生する粒子についてのスケール則は $10^{13}$ eV前後から徐々に破れ、 $10^{14}$ eVを越えるとその破れは顕著になる。非弾性断面積の増大は、入射エネルギーの0.04乗程度である。この増大は加速器領域から連続的に起っている。との結論が得られる。

### 論文審査の結果の要旨

申請者の論文は大気中での高エネルギー宇宙線の諸成分を分析して、超高エネルギー領域における素粒子反応の特徴を明らかにしたものである。

加速器による実験から高エネルギーの素粒子反応におけるスケール則の成立が提唱されているが、宇宙線の実験によってこの法則がより高いエネルギーで破れることが示唆され、その破れの様相を見出すためにいくつかの試みがなされた。

申請者はさきに、もしスケール則が $10^{13}$ eV以上のエネルギー領域でも成り立つならば、高エネルギー宇宙線の各成分の挙動は、一次宇宙線のエネルギー・スペクトルがこのエネルギー領域で急激な折れ曲がりを持ち、かつ核子・空気原子核の非弾性衝突断面積がエネルギーと共に増大しない限り説明できないことを結論した。本論文では、この結論の極めて自然な発展として、まず非弾性衝突断面積について加速器領域および宇宙線領域での実験を総括して、それが入射エネルギーのゆるやかなべき乗で増加するとみるべ

きことを論じた。つぎに、発生粒子のエネルギースペクトルについて、断面積の増大することを除いて発生粒子の全エネルギー領域にわたってスケール則が保たれる場合(模型 M 0)、断面積の増大はエネルギーの小さい粒子の発生に起因し、宇宙線現象に寄与する前方へ発生する粒子に限ればスケール則がみたされる場合(模型 M 1)、およびスケール則が破れて入射エネルギーの増大とともに前方へ発生する粒子はそのエネルギーが減少し多重度は増加する場合(模型 M 2)を想定した。この3つの模型は、超高エネルギーにおけるスケール則の破れの様相について考える多くの可能性のなかで本質的な場合を尽くしており、また加速器領域の素粒子反応の実験結果から予想される自然な疑問に定量的な答を与える。

実験との比較のためには、宇宙線中のミュー中間子成分、ハドロン成分および電子・光子成分の大気中の拡散方程式をつくり、それを解かなければならない。これらの拡散方程式は2変数の線型の微積分方程式である。従来の方法ではその解は無限級数になるが、申請者はこれを複素積分表示に直して最終的な数値を求めることを容易にした。また比較すべき実験としては、上の3つの成分のいずれもエマルジョン・チェンバーにより測定された結果のみを採用し、測定装置の種類や配置に起因するバイアスを極力避けるという注意をしている。

その結果、前方に発生する粒子についてスケール則が破れる場合(模型 M 2)にのみ、すべての成分についてのエネルギースペクトル、強度の高度依存性および強度の絶対値について説明できる、との結論を得ている。この結果は、従来の同種の分析では見過されてきた非弾性断面積の増大という加速器領域から連続する現象を十分に考慮に入れた上で、スケール則の破れの様相を明らかにしている点で非常に重要な意味をもつものと言うことができる。

また、参考論文はいずれも申請者が宇宙線物理学の分野において豊富な知識と優れた研究能力とを持っていることを示している。

よって、本論文は理学博士の学位論文として価値があるものと認める。