

学 位 論 文 題 名

Unruh effect and proton decay

(Unruh 効果と proton 崩壊)

学位論文内容の要旨

量子論で「加速」を扱う研究が進められ、慣性運動のみを扱っている場合とは大きく異なる結果が現れることがわかってきた。その中でも次の2つの結果は静止系の場合の常識を破る注目すべき帰結であると言える。

1973年に Unruh によって、静止系での真空は加速度系では熱浴になることが示された。もちろん慣性系どうしでは真空は共通のものであるが、観測者が加速すると何も存在しなかった真空に粒子が現れるというものである。これは、一般座標変換の下では正のエネルギーが正のエネルギーだけに変換されるわけではなく、負のエネルギーも現れることにより起こるものである。これは Unruh 効果と呼ばれている。

2つ目の加速度系に固有の現象として「陽子の崩壊」がある。1997年 Muller によりフェルミ粒子もボソン粒子として扱うなどの大胆な簡略化を行ったモデルで、加速が粒子の崩壊へ与える影響が調べられた。その中で、慣性運動では安定粒子である陽子までもが加速を大きくしていくと崩壊確率をもつことが示されている。加速運動はエネルギーを与えられて初めて実現するものであり、これは外力との相互作用があるために起こるものである。

この2つの結果はともに大きな加速があった場合にその効果が現れ始めるものであり、現在実験で確かめることは非常に困難なものである。しかし、この2つの結果が無矛盾であることを理論的に検証をしようとする試みがなされてきた。それは、1999年に Matsas 等が、静止する観測者に対する加速する陽子の崩壊確率と加速する陽子と共に加速する観測者に対する陽子の熱浴の粒子を吸収する確率が一致することを示そうとしたものである。しかし、彼らは2次元で解析し、ニュートリノの質量をゼロとする簡略化を行ったが、解析的に一致することはできず数値的に一致することを確認しただけであった。この両結果が同じ値を与えることを示すことは重要な問題であるにもかかわらず、今まで誰も成功していない。

本研究では、静止系での陽子の崩壊確率と加速度系での陽子の Unruh 効果による粒子の吸収確率が完全に一致することを解析的に示す。また、彼らが使った簡略化を行わず、4次元でニュートリノの質量を無視せずに証明する。これらの簡略化は通常の方法では解析計算が行えないような複雑なものになるために導入されたものあり、これを廃止すればさらに計算は煩雑なものとなることが容易に想像できる。しかし、これらの簡略化をしないことは実際の物理現象に対応する解析をする上で避けることができない重要なことである。

ただし、この解析では Matsas 等と同様に次のような近似を用いる。それは、軽い電子やニュートリノなどに関しては場の理論で扱うが、これらの粒子に比べて十分重い陽子と中性子には古典的な加速軌道を与えるというものである。この意味でこの解析は semi-classical の解析である。

この解析をうけて、1999 - 2001年、G. E. A Matsas と D. A. T. Vanzella は加速する粒子の散乱断面積に対し、一方で加速する粒子と共に加速運動をする観測者を考えると加速している粒子は静止しているが、その代わりに Unruh 効果による粒子を吸収して前述の散乱断面積になるのではないかと考え、この一致を見ることにより Unruh 効果の理論的確認を試みた。

特に、加速粒子の散乱断面積の変化の中で最も興味深いのは、慣性運動のときに安定な粒子が加速の影響で崩壊するところだ。その例は proton であり、その過程は慣性運動のものと同じく

$$\Gamma_{\text{rest}}; \quad p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e. \quad (1)$$

というものである。一方で加速度系として、加速する proton に加速して付いていく観測者を考えると、proton は静止しているので安定だが、今度は観測者が加速をしているため Unruh 効果による粒子が空間に存在し、proton は粒子を吸収する逆 β 崩壊を起こす。

$$\begin{aligned} \Gamma_{\text{acc}}; \quad & p^+ + e^- \rightarrow n + \nu, \\ & p^+ + \bar{\nu} \rightarrow n + e^+, \\ & p^+ + e^- + \bar{\nu} \rightarrow n. \end{aligned}$$

これらは同じ物理現象の散乱断面積なので、観測者の選び方に依らず一致すべきものである。しかし、重力場中ではなく加速度系を扱っているとはいえ、加速度系での Dirac 方程式の解は特殊関数になり、例え proton を classical current で表し、tree level に限ってもその解析計算はとても複雑なものになる。

そのため、彼らは静止系と加速度系の両方から散乱断面積の一致を2次元での解析で試みた。また、ニュートリノをマスレスにすることで、さらに簡略化して Minkowski 空間での解析計算を行った。しかし、加速度系では積分が複雑になってしまい、解析的に結果を出すことができなかった。それで彼らは最終的に数値的に一致することを確認した。

この一致によって、Unruh 効果による粒子が、加速度系では実際に観測できる粒子であることに矛盾がないことが理論的確認されたと言える。この確認の面白いところは、ずっと以前に理論的に確立していた Unruh 効果が、最近になって崩壊確率の計算により、再確認されたというところだ。

彼らの解析は2次元でのものであり、ニュートリノをマスレスとした簡略化されたものですが、現在ニュートリノは質量を持つことが確認されており、また、4次元での現実の散乱断面積で解析したいところである。

それでこの博士論文では、4次元でニュートリノの質量を入れて、加速する proton の静止系と加速度系での散乱、吸収の散乱断面積の解析的一致を示した。

基本的に加速度系では、被積分関数がいくつかの modified Bessel 関数の積になり、その関数の変数ではなく index での積分になってしまうため、解析計算はあきらめられてきたが、modified Bessel 関数をすべて、留数を拾うことにより modified Bessel 関数の定義の級数になるように作られている Barnes タイプの積分表示にすることにより、容易に積分できる形にすることができるのである。これにより、双方の散乱断面積をすべて積分をおえた形で解析的一致をさせることができた。

この解析的一致は、いままでその確認を数値的一致に頼ってきた、静止系の β 崩壊と加速度系の逆 β 崩壊が観測者の違いにより異なる現象になっているだけの同じ物理現象であることをより確実にするものであり、Unruh 効果の存在の状況証拠となるものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 川 健 三
副 査 教 授 河 本 昇
副 査 助 教 授 鈴 木 久 男
副 査 助 教 授 羽 部 朝 男
副 査 講 師 末 廣 一 彦

学位論文題名

Unruh effect and proton decay

(Unruh 効果と proton 崩壊)

互いに等速度運動する座標系は互いに同等であり、どちらで観測しても物理現象は全く同じに見えるという相対性の原理は前世紀に確定した事である。量子論でもこの事情は変わらない。ところで加速度運動する座標系のときは、事情は全く異なる。量子場の理論で、一つの座標系での真空を別の加速度運動している座標系では見るとどう見えるか？この問題を調べるために、Unruh効果、もとの座標系での真空は加速度系では有限の温度を持つ熱浴として振舞うことを見つけた。これをUnruh効果という。加速度系にはいつもエネルギーが注ぎ込まれていて、このように事がおきる。場の理論で量子化を行う際は、エネルギーモードと負エネルギーモードへと分解するが、この正負エネルギーモードが加速度運動している座標系への変換で入り交じるためおきる現象でもある。一方粒子が加速度運動するとき運動量が一定ではないため、通常とは異なる現象が生ずる。その一つに通常は安定な陽子が加速度運動のためにベータ崩壊を起す不安定になる現象がある。この現象を、空間で静止した座標系で観測する場合、上記のように運動量が変化する。この現象を、現象とみえるが、粒子と一緒に加速度運動する座標系で観測する場合は静止した陽子がUnruh効果による熱浴の電子やニュートリノと逆ベータ反応を起こす現象とみえる。同じになるはずである。これはまた直接実験で確認出来るはずである。しかし現在の現実可能な加速度には限度があるため、この効果が現状では非常に小さい値であり、Unruh効果の直接的検証の実験はまだなされていない。しかし、理論的に両計算が一致することを示す事により、間接的にUnruh効果の検証を行う事が出来る。これが本申請者の研究の目的である。今まで数値計算に基づき、この両計算が一致する事が近似的に示されていた。しかし、両計算結果の同等性は原理的な事柄であるため、厳密な解析的な計算に基づく証明が欲せられていた。しかし、これに成功したものは今までいなかった。

山田邦雅氏は加速度運動している陽子崩壊の振幅を二つの座標系で計算した。以前の数値的研究では電子やニュートリノの質量を零と置く計算がとられたが、申請者は電子やニュートリノの質量を無視せず計算を実行した。空間静止系では、陽子が古典的な加速運動を与えられた時中性子と電子とニュートリノに崩壊する確率をもとめた。一方加速度系では、静止した陽子がUnruh効果により熱浴に生じた電子やニュートリノを吸収して中性子に変換される確率を求めた。加速度系でのこれらの確率はmodified Bessel関数の積を含む複雑な形をしていて、その為、両結果の同等性は今まで数値的にしか議論されて来なかったが、申請者は特殊関数の複素積分表示を巧妙に使い厳密な証明を与える事に成功した。これにより、同等性に關する解析的な証明が初めて与えられた。これらの同等性が証明されたことより、静止系の真空は加速度系では熱浴となる事が間接的に確認された。即ち、Unruh効果が間接的に証明された。

実験によるUnruh効果の確認には極めて大きな加速度が要求され、近い未来での確

認は至難のことである。その為、本研究は間接的ではあるが、現時点での Unruh 効果の証明を与えたものとして意味のあるものである。

これを要するに、著者の研究は加速度系での場の量子論についての Unruh 効果、即ち一つの座標系における真空がこの座標系から加速度運動している観測者からは熱浴とみえること、の存在を間接的に証明したものである。この結果は場の理論並びに一般相対性理論の物理的理解に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者が北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。