

学 位 論 文 題 名

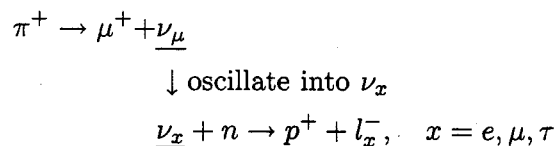
# Wave Packet Treatment of Neutrino Oscillations

(ニュートリノ振動の波束を用いた取り扱い)

## 学位論文内容の要旨

近年、標準模型を越える手がかりの一つとしてニュートリノ振動現象が注目され、実験と理論の両面で多くの研究がなされてきている。ニュートリノは弱い相互作用しかしないフェルミ粒子で、三種類あり弱い相互作用で対となって生成される荷電粒子の名を取ってそれぞれ電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノと呼ばれる。素粒子物理学の分野でもっとも成功している標準理論ではニュートリノの質量はゼロと仮定されているが、1960 年頃に Pontecorvo や牧、中川、坂田等によってニュートリノに質量があるとすると、それらは互いに移り変わることができる事が指摘された。ニュートリノの種類が移り変わる確率の大きさは混合角 ( $\theta$ ) と呼ばれるパラメーターで決まり、また確率はニュートリノの質量の二乗差 ( $\Delta m^2$ ) の逆数に比例する波長で周期的に変化することから、この現象はニュートリノ振動と呼ばれる。ニュートリノ振動は始め太陽から飛来する電子ニュートリノの欠損で注目され、その後日本、カナダ等でのニュートリノ観測や実験によって確認されている。その結果、ニュートリノの質量の二乗差や混合角についての情報が得られた。そして現在は、これら  $\Delta m^2$  や  $\theta$  の値をより精密に測定し、さらにレプトン族における CP 対称性の破れの確認を行うための実験が準備されている。

一般にニュートリノ振動現象を解析する際には、ニュートリノの生成過程と振動現象、そして観測過程の三つに分け、それぞれを独立なものとし議論する。この取り扱いの下では、ニュートリノ振動確率は量子力学によって与えられる。しかしこの取扱いは必ずしも現実の実験に即したものではない。例えば長基線ニュートリノ振動実験では、パイ中間子を準備しそれらを崩壊させてニュートリノを生成する。そしてそのニュートリノを数百 km 離れた測定器内の中性子と散乱させ、その散乱から出てくる電子(とそれが作るチェレンコフ光)を測定しニュートリノに関する情報を得ているのである。(下図参照)



つまり実際の実験で行われている事は、パイ中間子と中性子を用意し電子を観測する、ということである。そしてこれは一連の過程であり、一般的な取り扱いのように三つに分けれるものではない。

Giunti や Grimus 等はこの事実に着目し、遷移振幅  $\langle p^+, l_x^-, \mu^+ | \pi^+, n \rangle$  を場の理論を用いて解析することでニュートリノ振動現象を調べた。彼らはニュートリノが非常にマクロな距離を移動することから、始状態と終状態の粒子を波束状態として記述した。それにより、ニュートリノの空間的な重なりが保たれる距離、干渉長を見つけた。しかし彼らの解析は、全過程の時間間隔を無限大に取っており、また生成と観測の過程に関わる全ての粒子を同一の時空点に置くなど不完全なところがある。また数値的な解析もなされてない。一方で石川と矢吹は場の理論的枠組で外線粒子を平面波として表し、時間間隔を有限

にした状況でニュートリノ振動を解析的、数値的に調べ、量子力学に基づく標準公式とは異なる振動の振舞を見つけた。これは不確定性関係によるエネルギー保存則のわずかな破れの効果を定量的に示したものであり、同じく平面波を用いた標準公式と異なる結果を得たという点で非常に興味深い結果であった。しかし、平面波で粒子を近似することは先に述べた理由にから現実的ではない。これら先行研究に置ける不満を改めより完全な形でニュートリノ振動を解析するための振動公式を与えることは、将来行われる精密測定実験にたいして重要なことであると考ええる。

本研究では、場の理論の枠組の中で外線粒子を波束状態として記述しニュートリノ振動を解析する。先行研究とは異なり各粒子は実験状況に即し異なる時空点で準備し、時間間隔は有限に取る。またパイ中間子の寿命も取り入れ、これがニュートリノ振動現象に対してどのような影響を与えるかを調べることにする。そして得られた解析結果を基に、波束状態や寿命の効果がどのような状況で顕著に現れるのか、またどのような状況であれば標準公式が良い近似式となっているのかを調べる。

始めに長基線ニュートリノ振動実験の状況での解析を行った。実際の実験状況に対応させるために、観測しない終状態の時刻を積分し全確率を求めた。その結果、各粒子の観測時間に対して干渉条件が導かれた。今まではニュートリノが移動するのに要する時刻または移動距離による条件のみが知られているだけである。また振動の周期の長さに対する条件も導かれた。この条件により振動の周期が各粒子の波束と速度で決まる時間幅以上に長くなると、振動は平均化され距離に対して一定の振動確率しか観測されなくなることがわかった。また各粒子の軌道に対する条件も現れ、全ての粒子が古典軌道を通る場合に遷移確率をもっとも大きくなることがわかった。さらに振動の位相に標準公式には無い項が現れ、それは終状態と始状態のエネルギー差に比例することがわかった。波束状態に対するエネルギー、運動量保存則は不確定性関係によりある程度の幅を持つため、あるパラメーター領域では位相が標準公式と異なる可能性があることが分かった。

次に上記の干渉条件や位相の新しい項がどのようなパラメーター領域で重要になるのかを調べるために、単純化したモデルでの数値解析を行った。数値解析は次の三つの場合を行った。(1) 長基線ニュートリノ振動実験、(2) 静止した $\pi$ 中間子を用いたニュートリノ振動実験、(3) 太陽中心部の ${}^7\text{Li}$ 生成における電子ニュートリノの観測。その結果、波束のサイズが $10^{-15}$  m 以上では私達の式は標準公式と良く一致しており、それ以下では標準公式からずれることがわかった。また寿命の効果を取り入れた場合と取り入れない場合とでは確率の大きさが異なることもわかった。

# 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 羽 部 朝 男  
副 査 助 教 授 鈴 木 久 男  
副 査 講 師 末 廣 一 彦

## 学 位 論 文 題 名

### Wave Packet Treatment of Neutrino Oscillations

(ニュートリノ振動の波束を用いた取り扱い)

ニュートリノはその存在が確認されてから50年近く経た近年になりようやく有限の質量を持つことがわかってきた素粒子である。物質と極めて弱く相互作用する粒子であるため、ニュートリノ現象はミクロな量子力学が使われる物理でもなく、極端に大きなスケールで起こる。ニュートリノは真空中だけでなく物質中でもほぼ自由伝播し、地球内部を通過する際の平均自由行程はエネルギーが10 MeVであるとき、地球と太陽の距離よりも長い。長い距離を伝播する間に有限な質量と複数ニュートリノの混合効果のため、互いに異なるニュートリノに変換する。ニュートリノ振動が起きてニュートリノ振動は、物質との弱い相互作用を反映して、従来主に一体問題として扱われてきた。しかし、直接観測にかかると反応の生成物や粒子に関して多体反応は扱えない。それにもかかわらぬこの研究は今まで殆どなされていなかった。申請者は、ニュートリノ振動に対して多体効果を考慮にいたった場の理論的な解析を行い、一体問題では見えにくい新しい粒子効果を見出すことを考えた。将来行われるニュートリノ振動の精密実験に際して重要な役割を担う散乱振幅を理論的に求めた。

ニュートリノ振動はニュートリノが質量をもつ時のみ引き起こされる現象である。質量や質量差が極めて小さいので、ニュートリノは生成の源である太陽、宇宙線、加速器、原子炉等と大きな距離で隔たった機器で観測される。ニュートリノは源で生成後真空中や物質中を長距離伝播して観測され、観測されるまで物質と一度も相互作用しない。しかし生成や観測は、他の物質と強く相互作用する素粒子により行われる。これらの素粒子は有限な大きさを持つ波束であり、また有限の平均寿命を持つものも含まれる。その相互作用、有限の大きさの波束や平均寿命等の効果が寄与する。申請者は単純なモデルに基き、今まで解析されてないこれらの効果を理論的に解明し、これらの効果を含む散乱振幅や振動確率を求めた。さらにこれらの結果と、通常の一様問題の結果との定量的比較を行った。

計算で求めた振幅や遷移確率は波束の大きさに依存するものであることがわかった。しかし現状では波束の確定した大きさは知られていないので、申請者はこれをパラメータとして様々な大きさの場合を扱った。振動確率にたいして、波束がミクロな大きさであるときはその効果は顕著であるが、セミミクロなミクロとマクロの中間程度の大さきの波束では結果は一体問題とほぼ同じものであった。また他の効果として、新たに微分断面の振る舞いが求められ波束の大きさに対する依存性を持つことが示された。これは場の理論的な計算で初めて求まるものであり、これらの結果は将来のニュートリノ振動の精密測定に際して有益なものである。

これを要するに、著者は場の理論的な扱いに基ずき、ニュートリノ振動の多体効果を取り入れた理論的な研究を行い、ニュートリノ振動の観測における粒子の波束や寿命の効果を解明した。この結果はニュートリノ振動、場の理論並びに素粒子物理学の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。