

## 学位論文題名

## On Coherence Lengths of Wave Packets

(波束の干渉効果)

## 学位論文内容の要旨

量子力学における散乱過程は、多くの場合平面波を用いて議論される。粒子の波動関数を平面波として扱った場合、平面波は空間的に無限に広がっている波であるので、粒子は散乱体と常に重なっている。これは実際の実験状況とはまったく異なっている。そこで、そういった問題を回避するために、波束を用いて粒子の局在性を表現した後に相互作用の領域に対しては十分広い波束であることを仮定して、平面波としての近似を使用している事が多い。実際、波束の必要性は古くから議論されてきたが、ほとんどの結果は特に素粒子実験の様な高エネルギー実験においては、平面波としての近似で十分実験結果と矛盾が無いと確認されている。しかし、ニュートリノ振動に代表されるように本質的に波束として取り扱わなくてはならない現象が近年の実験技術の向上とともに増えてきている。また、技術の向上によって今までは不可能だった実験が可能になりつつある。一方で、波束に関する議論については未だ十分であるとは言えない状況であると我々は認識している。

本研究では、現在の実験状況を反映できるような形で波束を用いた、特に相対論的な粒子による散乱の定式化を用いて、実験結果に対して有意な結果を引き起しうること、また今までの方法では検証が出来なかった現象についての考察が可能であることを示唆している。

具体的に波束について議論するために、まず波束がどのように形作られるかを議論する必要がある。波束の大きさは、一つは生成される段階で、波が自由に伝播できる距離である波の平均自由行程が重要な役割を果たすと考えられる。もう一つ、波束の大きさを指定する大きな要素としては、測定過程がある。特にニュートリノの実験においては、ニュートリノは原子核や電子との相互作用によって測定される。したがって、測定に用いられる原子核や電子の拡がりや波束の大きさに大きく関係している。これらのことから実験状況に対して適切な波束のサイズというパラメータを選ぶ事で具体的な取り扱いを行うことが出来る。

次に、実際にどのような状況で波束の効果が実験結果に表れるかを考察する。  
本研究で、主に対象とした現象は

1.  $\pi$ 中間子の崩壊におけるニュートリノの干渉
2. 原子炉ニュートリノの振動現象における波束の効果

3. 超高エネルギーニュートリノと背景放射光子との散乱における波束の効果である。

1の現象については、平面波を用いて計算することが不可能な、加速器ニュートリノ実験における $\pi$ 中間子の崩壊領域に依存するニュートリノの干渉を解析した。現在 T2K 実験が始まりつつあり、T2K 実験においてこの効果を用いることでニュートリノの質量の絶対値についての情報が得られる事を期待している。

2の効果については、ニュートリノ振動の理論的な定式化に関して、一部未だに曖昧になっている部分が存在する。具体的にはニュートリノ振動を引き起こす干渉に関連した位相部分の取り扱いであるが、現在までに様々な議論が展開されているが未だに完全な解決をしていない。この点に関しても波束を用いて包括的に取り扱うことで解決をすることが出来る事を示した。さらに、この結果から既存の実験における解析が不十分である可能性についても示唆される。

3については、観測された超高エネルギー宇宙線のフラックスが理論的な予測と異なっている可能性があるという問題について、波束を用いて議論をしている。具体的には、宇宙空間に満ちている背景放射光子を波束と取り扱うことで、超高エネルギー宇宙線との散乱過程を解析した。その結果波束の効果として、超高エネルギー宇宙線の持つエネルギー領域において従来考えられていた結果と有意に異なる結果を与えうることを示した。

本研究では、従来の定性的な波束の議論に加えて上記のような定量的な波束の効果が、実際の実験状況を反映した形で散乱現象を取り扱うことで、実験結果に有意に現れる可能性があることを示している。

# 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	教授	鈴木久男
副査	教授	加藤幾芳
副査	准教授	中川隆一
副査	講師	末廣一彦

## 学位論文題名

# On Coherence Lengths of Wave Packets

## (波束の干渉効果)

近年、様々な量子的波動の伝播や干渉に関する研究が盛んに行われている。しかし、その多くは定在波か平面波の性質を応用したものであり、非定在波や小さな波束における研究は皆無である。また、特異な素粒子であるニュートリノの波や波束としての性質を解明することは応用上も基本的な物理としても重要なテーマであるが、今までほとんどなされていない。特に、ニュートリノの干渉効果は、その弱い相互作用のため今まで手がつけられていない。干渉効果は、今まで未知であるニュートリノの質量のような物理量の値を解明するのに役立つ可能性を秘めているにもかかわらず、その研究は皆無である。これら、空間的に小さな波の干渉効果の研究や、ニュートリノの波としての干渉効果の研究は未開拓の分野で、今後の発展が待たれている状況にある。

本論文は、このような現況にある量子的な波の干渉効果について、波束を用いて定式化を行い、有限時間や有限距離における散乱振幅を求め、さらにこれを使い宇宙背景放射の光や、ニュートリノにおける干渉効果に関して理論的に研究し、背景放射の光やニュートリノに関する有益な物理量を得ることを目的としたものである。

干渉は、波動に固有な現象として発現し、様々な電磁波、光子、電子、中性子等の干渉は物質の組成や構造の解析に応用され威力を発揮している。これらでは、波長よりはるかに長いコヒーレンスを保ち、ほぼ平面波とみなせる波が通常使われる。ビームに関する技術の進展は著しく、高い性能の光や電子の波による干渉の研究は大幅に進展しつつある。しかし一方で、コヒーレンスの短い波の理論的研究は、実験的に困難であることも反映して今まであまり進展していない。また、波の性質は、構成する量子の質量やその性質に大きく依存する。質量の小さい相対論的な量子の波は、時間的な発展と空間的な発展が密接に関連しているため、興味深い性質を示す。ニュートリノの質量は、電子の質量の6桁以上小さい微細な値であるので、その効果は興味深くまた、その値を知ることは重要である。

著者は、先ず様々な波に関して研究し、

- (1) 波束のコヒーレンス長に関する媒質や多体相互作用の効果を明らかにするとともに、極めて希薄な媒質中において生ずる新たな多体効果を明らかにした。

さらに(1)の結果を基礎にして、広範囲にわたるニュートリノの現象に適用してニュートリノの干渉効果を明らかにした。それらは、

- (2) マクロな物質によるニュートリノの干渉効果、
- (3) 高エネルギー粒子によるニュートリノの干渉効果、
- (4) 原子炉により生成された低エネルギーニュートリノによる干渉効果に関するものである。

干渉を引き起こすためには、位相の異なる複数の波動が必要である。位相差を生ずる起源として(2)では物質とのマクロな相互作用、(3)では崩壊位置の異なる高エネルギー粒子、(4)では、測定方

法の違いに起因する異なる位相を持つ振幅が使われている。それぞれの現象で、複数の異なる位相をもつ波動または振幅を重ねあわせた振幅が測定にかかる時、位相差を反映した干渉が発現する。著者は、位相差が有限時間効果として観測されることを示すとともに、その大きさ並びに生ずる干渉がニュートリノの質量の絶対値によってかわる特異な性質をもつことを明らかにした。この理論的な研究結果を実験値と比較することにより、干渉項の観測が質量の絶対値の測定に導く可能性があることになる。現状では、実験はまだなされていないが、ビームに関する技術の進展は著しく、近い将来なされることを期待している。このように、著者は、今まで未開拓であったニュートリノの干渉効果を初めて理論的に研究し新たな事柄を解明した。

これを要するに、著者は、物理学において重要な働きをする波束の運動やその性質、並びに干渉効果を解明し、それを素粒子ニュートリノに適用して新知見を得たものであり、素粒子物理学に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、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。