

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24340043

研究課題名(和文)ニュートリノの干渉・回折とニュートリノの質量

研究課題名(英文) Interference and diffraction of the neutrino and the absolute neutrino mass

研究代表者

石川 健三 (ISHIKAWA, Kenzo)

北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：90159690

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートリノの生成・消滅過程の量子力学の基本原則と多体シュレインジャー方程式に基づく解析から、ニュートリノ質量に敏感な多体干渉効果、遷移確率に加わる既存の標準項とは異質な修正項、並びに新たな量子効果・現象が解明された。修正項は、1927年ディラックによって発見された遷移確率の標準公式(黄金律)に付加され、極微な質量のニュートリノや、光の広いスペクトルにわたる新現象を導くと共に、幅広い自然現象の理解や、マクロな量子現象の理解を深める。本研究の成果である遷移確率の修正項より、今まで不可能であった現象の理解、新たな現象の予言、さらにニュートリノの質量の絶対値や他の物理量の決定法が示された。

研究成果の概要(英文)：Quantum interference and diffraction of the neutrino were solved based on the fundamental principle of the quantum mechanics. The transition probability bridges the physical law with natural phenomena and the formula derived by Dirac in 1927, which has been considered rigorous and used in wide area of natural science, was revised by the present project. A new formula that includes the old one and a new correction term, which is larger than the original one in certain situation, is derived. For the neutrinos, the correction terms give macroscopic quantum phenomena that depends on the absolute neutrino masses. Based on this, a new method for its determination is proposed. The correction terms were shown to give significant effects to many other phenomena, especially to those that have not been understood well with the old formula.

研究分野：素粒子理論

キーワード：フェルミの黄金律の修正 ニュートリノの干渉・回折 ニュートリノの質量 遷移における多体干渉効果

1. 研究開始当初の背景

(1) ニュートリノは、素粒子物理学の標準理論で、スピン 1/2 のフェルミ・ディラック統計に従う物質場であるが、電気的に中性で、0.1eV ほどの極微な質量をもち、他の物質場であるクォーク、荷電レプトンや、力や質量の起源であるゲージ場やヒッグス場と、大きく異なる。ニュートリノの質量は、半世紀ほど未知であったが、ニュートリノ振動現象が、太陽ニュートリノ、大気ニュートリノ、加速器ニュートリノ、原子炉ニュートリノ等の様々な観測や実験で確認され、零ではない小さい値であることがわかった。ニュートリノ振動は、一粒子の波の性質を反映し、3種のニュートリノ間の相互転換として、マクロな距離で起きる。

(2) ニュートリノ振動は、ニュートリノ間の質量の二乗の差で決まる現象であり、3種類のニュートリノの質量が、非常に近いいため、太陽-地球間の距離にまでわたるマクロな量子現象である。しかしながら、ニュートリノ振動は、ニュートリノ間の相互転換であり他の素粒子や物質に関与しないし、エネルギーのやり取りもない。振動の振る舞いから、質量の 2 乗の差や、混合角についての知識は格段に増えたが、質量の絶対値は、未知のままである。一方で、ニュートリノの他の自然現象への影響も未知である。

(3) 素粒子の相互反応、転換、崩壊は、量子場の理論として標準的な方法が定式化されている。これに基づき、高次の量子揺らぎを含む種々の計算がなされ、粒子性を反映した物理量について理論と実験の良好な一致をみてきた。しかし、広がった状態の波動性に起因する物理量は、計算に伴う困難のため、殆ど研究されず、ディラックに始まる平均量で置き換える処方箋が踏襲されてきた。波動性に起因する遷移確率の研究は、理論的にも実験的にもなされなかった。これは、高速な現象や大規模な現象で重要であり、多くの現代的な課題で必須な物理量である。

2. 研究の目的

(1) 極めて小さな質量と、物質とほとんど相互作用しない特異な性質をもつニュートリノの関与する現象から、量子論の基本原則から導かれる、多体量子状態に固有の干渉・回折効果を解明する。さらに、量子論の厳密な確率をあきらかにし、幅広い同種粒子多体系の示すマクロな干渉・回折現象や、遷移現象に適用する。

(2) ニュートリノの質量の絶対値の新たな測定方法の解明。今までの実験方法は、ニュートリノの粒子的な性質に着目した。しかしながら、小さすぎる質量の絶対値のために、測定からは、上限値だけが得られ、具体的な値は、未知のままである。本研究は、波とし

てのニュートリノが示す、干渉・回折現象を活用する新しい方法である。過去の実験の解析から、有益な情報が得られた。

(3) ニュートリノ振動の解析より明らかになった、今までの標準的な散乱、崩壊の量子力学定式化の問題点を明らかにし、さらにこの問題点の関与しない新たな定式化を行う。従来の方法の適用できない領域での確率の計算と得られた遷移確率を適用して、種々のニュートリノ現象や、光現象を解析する。これには、高エネルギーでの素粒子物理学、中間エネルギーでの原子核物理学、さらに低エネルギーの原子・分子反応、物性物理学への応用、化学反応、生物反応への適用、さらには様々な技術的な応用がある。

3. 研究の方法

(1) 量子力学の基本法則・原理に立ち返って、広がった量子状態の遷移確率を計算する。このため、規格化された多体状態ベクトルを構成して、遷移を解析する。これは、一見自明な仕事に見えるが、沢山の今まで無視された点や、仮定された事柄が複雑に絡む多様な問題であり、極めて非自明である。ポーアの量子仮説までさかのぼって、量子力学の厳密な遷移確率を検討し、定式化する。

(2) 素粒子の多体系は、相対論的に不変な物理系であり、相対論的なラグランジアンでの記述が必須である。相対論的に不変な物理量については、十分な詳細な検討がなされてきた。標準的な場の理論は、そのように定式化された。例えば朝永-Schwinger-Feynmanにより、繰り込み理論で威力を発揮し、発散の問題を解決し、自然の理解を大幅に深めた。しかしながら、系の量子論の物理量がすべて相対論的に不変であるわけではない。また、規格化できない状態の遷移確率の問題は、初期には実験では深く立ち入ることが出来なかったが、現在実験状況は一変し、また、これが重要で緊急な課題となってきた。

(3) 規格化した多体状態に基づいた、場の理論の定式化を、相対論的に不変な物理系を含めて行う。ニュートリノを含む諸反応、や光を含む諸反応の定式化を行う。

4. 研究成果

(1) 量子力学の基本法則・原理に則った状態遷移の定式化がなされ、時間 T に依存する厳密な遷移確率、 $P(T) = T + P^{\text{ad}}$ が初めて計算された。 T は、従来からの標準項であり、 P^{ad} は新たに見つかった修正項である。完全系を成す規格化された状態ベクトルが具体的に構成され、時間に依存して変化する遷移確率が、多体シュレーディンガー方程式から求められた。これより、今まで省略され

ていた多体干渉・回折効果が明らかになり、今までの標準的な計算で落脱した寄与が、無視できない状況が多々あることが分かった。結果は、ボアの量子仮説までさかのぼって検討され、正しいと共に、今までの事実や実験と矛盾しないことが、明らかにされた。

(2) 相対論的に不変な素粒子の多体系の不変なラグランジアンの記事で、粒子性に起源をもつ項と、波動性に起源を持つ項の両面の発現が明らかになった。前者は、相対論的にあからさまに不変であり、今までの計算に一致する。後者は、異なる性質であり、今まで調べられていないが、本研究で求められた。関連して、初期には実験では深く立ち入ることが出来なかった規格化できない状態の厳密な遷移確率は、状況が一変した現在検証可能となりつつある。これらが重要な寄与をする遷移は、環境問題を初めとするマクロな領域で増加している。

(3) 規格化した多体状態に基づいた、場の理論の定式化が、相対論的に不変な物理系を含めて、はじめて行われ、遷移確率まで計算された。従来のグリーン関数による表現法で欠落する項が、求められた。

(4) ニュートリノの生成から観測までの物理過程を、多体のシュレーディンガー方程式に基づいて表し、遷移を解析した。自然現象は確率に比例して発現する、フォンノイマンの量子原理に基づいて、確率の絶対値を求め、現象を解析した。従来の計算値との相違点、新たに求めた確率の重要性をあきらかにした。粒子性に依拠して局所的である従来項と、修正項が異質であることが、確認された。

(5) 光が関与する様々な遷移現象において、修正項が求められ、従来項とは、質的に異なる点が、明らかにされた。特に、フェルミの黄金律からの従来項が小さいか零になり、修正項のほうが大きくなるいくつかの例が詳細に検討された。これらには、 $1+$ 中間子の2光子崩壊における、ランダウ・ヤンの定理の修正、パイ中間子の2光子崩壊の修正等から、光合成における励起エネルギー移動の大きな確率が、含まれる。フォン・ノイマンの確率原理に基づく遷移確率の有用性、重要性が確認された。これが、実験と一致することも、同時に確認された。低エネルギーから高エネルギーに及ぶ幅広い分野で、確率の修正項が重要な寄与を与えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

1. Nobuki Maeda, Tetsuo Yabuki, Yutaka Tobita, and Kenzo Ishikawa, Finite-size corrections to the excitation energy transfer in a massless scalar interaction model, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有、2017,073B02, DOI:10.1093/ptep/ptx066
2. Kenzo Ishikawa, Toshiki Tajima, and Yutaka Tobita, Anomalous radiative transitions, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有、2015,013B02(33pages), DOI:10.1093/ptep/ptu168
3. Kenzo Ishikawa and Yutaka Tobita, Matter-enhanced transition probabilities in quantum field theory, Annals of Physics, 査読有、2014,344,118-178 dx.DOI.org/10.1016/j.aop.2014.02.007
4. Kenzo Ishikawa and Yutaka Tobita, Finite-size corrections to Fermi's golden rule (I) Decays, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有、2013,073B02(54pages), DOI:10.1093/ptep/ptt049

[学会発表](計 18 件)

1. 石川健三、フェルミの黄金律の有限サイズ補正 IV: 異常な超前方散乱、日本物理学会、2017年3月20日、大阪府豊中市・大阪大学
2. 石川健三、太陽コロナと地球電離層におけるニュートリノの役割 II、日本物理学会、2016年3月21日、宮城県仙台市・東北学院大学泉キャンパス
3. 飛田豊、電離層を用いたニュートリノの電弱ホール効果の検証、日本物理学会 2016年3月21日、宮城県仙台市・東北学院大学泉キャンパス
4. 前田展希、分子の励起エネルギー移動モデルにおけるフェルミの黄金律の有限サイズ補正、日本物理学会 2016年3月19日、宮城県仙台市・東北学院大学泉キャンパス
5. 石川健三、太陽コロナと地球電離層におけるニュートリノの役割、日本物理学会、2015年9月26日、大阪府大阪市・大阪市立大学杉本キャンパス
6. 飛田豊、太陽大気吸収による太陽ニュートリノの減少、日本物理学会、2015年9月26日、大阪府大阪市・大阪市立大学杉本キャンパス
7. 石川健三、ニュートリノの異常電磁

- 崩壊：太陽コロナにおける電弱ホール効果 I、日本物理学会、2015 年 3 月 21 日、東京・早稲田大学
- 8 . 飛田豊、ニュートリノの異常電磁崩壊：太陽コロナにおける電弱ホール効果 II、日本物理学会、2015 年 3 月 21 日、東京・早稲田大学
- 9 . 石川健三、フェルミの黄金律の有限サイズ補正：ニュートリノ物理、PACFIC2014 国際会議、2014 年 9 月 18 日、仏領ポリネシア・タヒチ、モーレア
- 10 . 飛田豊、ニュートリノと光子の異常散乱 I、日本物理学会、2014 年 9 月 18 日、佐賀県佐賀市・佐賀大学
- 11 . 飛田豊、ニュートリノと光子の異常散乱 II、日本物理学会、2014 年 9 月 18 日、佐賀県佐賀市・佐賀大学
- 12 . 石川健三、フェルミの黄金律の有限サイズ補正 III、日本物理学会、2014 年 3 月 28 日、神奈川県平塚市、東海大学湘南キャンパス
- 13 . 飛田豊、有限サイズ補正を通じたニュートリノフレーバーの変化、日本物理学会、2014 年 3 月 28 日、神奈川県平塚市、東海大学湘南キャンパス
- 14 . 石川健三、フェルミの黄金律の有限サイズ補正 II、日本物理学会、2013 年 9 月 21 日、高知県高知市・高知大学朝倉キャンパス
- 15 . 飛田豊、3 体崩壊の崩壊率に対する有限サイズ補正、日本物理学会、2013 年 9 月 21 日、高知県高知市・高知大学朝倉キャンパス
- 16 . 石川健三、Finite-size corrections to Fermi's golden rule, 12 回アジア太平洋物理国際会議、2013 年 7 月 18 日、千葉県千葉市・幕張メッセ

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

〔その他〕
 ホームページ等

6 . 研究組織
 (1)研究代表者
 石川 健三 (ISHIKAWA, Kenzo)
 北海道大学・理学研究院・名誉教授
 研究者番号：90159690

(2)研究分担者
 鈴木 久男 (SUZUKI, Hisao)
 北海道大学・理学研究院・教授
 研究者番号：20192619

研究分担者
 矢吹哲夫 (YABUKI, Tetsuo)
 酪農学園大学・農学生命科学部・教授
 研究者番号：50275484

(3)連携研究者
 ()

研究者番号：

(4)研究協力者
 ()