



ニュートリノと光の相互作用“電弱ホール効果”をはじめて解明

～ニュートリノは太陽内部や地球を素通りするが、太陽コロナは素通りしない～

ポイント

- ・磁気プラズマ中のニュートリノと光の相互作用ハミルトニアン^{*}の導出に成功。
- ・太陽コロナ中のニュートリノの電磁遷移を解明。
- ・太陽コロナの物理解明の進展に期待。

概要

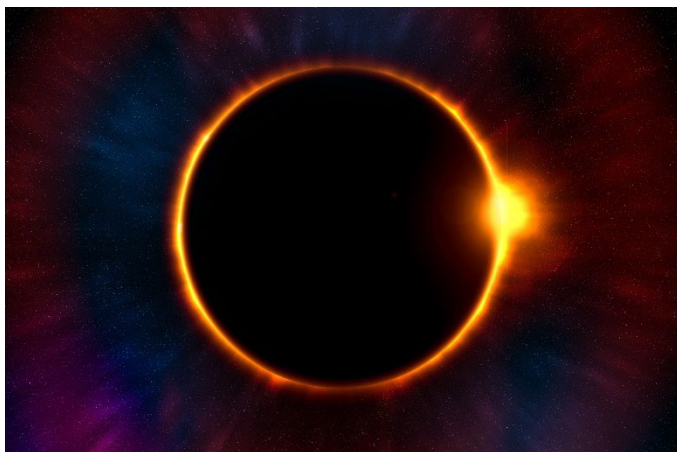
北海道大学の石川健三名誉教授（元大学院理学研究院教授）らの研究グループは、太陽コロナの内部で働くニュートリノ^{*1}と光の相互作用“電弱ホール効果”を理論的に解明し、これがニュートリノのエネルギーを光のエネルギーに変換し、太陽コロナに多量の熱を供給することを示しました。

ニュートリノは物質や宇宙を構成する素粒子で、太陽中心部における核融合で生成され、電磁気力と弱い相互作用を統一した電弱ゲージ理論で記述が可能です。当該理論においては、量子力学^{*2}的な効果によってニュートリノと光の相互作用が生じますが、極めて弱い相互作用であり現実の物理現象には無関係であると見なされていました。つまり、ニュートリノは、太陽中心部でつくられるものの、太陽コロナや地球内部を素通りすると考えられてきたわけです。

しかし、今回の研究により「ニュートリノは中心部でつくられた後、一部が、コロナを通過する際、光と軽いニュートリノに崩壊する（ただし、地球内部では従来と同じ）。」ことが明らかになりました。どうということかと言うと、同理論では極めて弱い相互作用とみなされていたニュートリノの光遷移を、今まで想像された値よりも 10^{40} 倍以上大きい確率にさせる「電弱ホール効果」という新たな相互作用の存在が示されました。電弱ホール効果により生成された光は、通常物質と電磁相互作用でエネルギーをやり取りします。つまり、核反応の大きさのニュートリノのエネルギーが、光を通して周囲の物質の熱エネルギーに転換されます。

さらに、この現象は、太陽のコロナ領域で発現し、太陽内部では起こらないことが分かりました。つまり、太陽コロナ領域だけに存在する新たな熱の生成機構の存在が明らかになりました。

なお、本研究成果は、2023年8月12日（土）公開の Physics Open 誌に掲載されました。



日食により観察できる太陽コロナ

【背景】

ニュートリノは極めて軽く電荷をもたない特異な素粒子であり、化学反応に関与しませんが、核分裂や核融合の原子核反応で大きなエネルギーを持って生成・放射されます。原子炉や太陽で大量に生成されますが、通常の物質内で、微弱な相互作用のために素通りすることから無害です。

ニュートリノと光の相互作用は、真空中や物質中ではさらに弱くなることが知られています。この事情は、太陽コロナの磁場と自由電子が共存する磁気プラズマ状態でも変わらないと仮定されています。基本的な物質の性質や変化は、量子力学や量子ゲージ理論を駆使して理論的に解明可能です。

さて、太陽コロナ（太陽表面から数千 km の領域）にある光や電子は、ニュートリノと同じく、物質を構成する素粒子の一種です。電磁気力と弱い相互作用を統一した電弱ゲージ理論で記述することができます（電弱統一理論）。太陽中心部における熱源はニュートリノ生成を伴う核融合であることが 20 世紀半ばにベータにより解明されましたが、周辺部の太陽コロナにおける熱源は、未知でした。

太陽の核融合は、高密度で高温の太陽中心部で起きていて、太陽コロナの熱源にはなりません。太陽コロナの加熱問題は、長年のパズルとなっており、古典電磁気学やプラズマ物理による理解、特に磁束再結合等の考えが提案されてきましたが、決定的な解明には至りませんでした。電弱統一理論で、量子力学的な効果によってニュートリノと光の相互作用が生じますが、極めて弱い相互作用であり現実の物理現象には無関係であると見なされていました。無関係というのはつまり、ニュートリノは、太陽中心部でつくられるものの、太陽コロナや地球内部を素通りすると考えられてきたわけです。

【研究手法】

本研究は、研究グループによる磁場中における電子系の特異な現象“量子ホール効果^{*3}”の理論を電弱ゲージ理論に拡張し、磁気プラズマ中における電子、光とニュートリノの相互作用を調べました。相互作用の形や結合の大きさに特に重点を置きました。

【研究成果】

ニュートリノは、光球内、太陽コロナや地球を素通りすると考えられてきたわけですが、今回の研究により「ニュートリノは中心部でつくられた後、一部が、コロナを通過する際、光と軽いニュートリノに崩壊する（ただし、地球内部では従来と同じ）。」ことが明らかになりました。

この結論を詳細に説明すると、磁気プラズマ中におけるニュートリノと光の相互作用について、新たな相互作用“電弱ホール効果”の存在が明らかになりました。電弱ホール効果により、重いニュートリノが崩れて、軽いニュートリノと光になる（ニュートリノの光崩壊^{*4}）、というものです。“電弱ホール効果”によって導かれるニュートリノの光遷移の振幅は、従来のもものよりも 20 桁以上大きく、時空座標に対する特異な不変性を持ちます。

これらの結果、ニュートリノの光崩壊が大きく増幅されました。つまり、電弱統一理論において、ニュートリノと光の間には、極めて弱い相互作用だけが働くため、現実の物理現象には無関係であると見なされていましたが、磁気プラズマ中ではそれほど弱くない相互作用がもたらされることが明らかになったのです。

ただし、この崩壊は、プラズマ中の光子の有効質量が、ニュートリノの質量差よりも小さい時に起こります。この必要条件は「太陽コロナで満たされ、光球の内部では満たされない」です。それゆえ、ニュートリノの光遷移は、太陽コロナ領域でだけ起き、光球の内部では発現しません。ニュートリノの遷移で生じた太陽コロナ中の光は、周囲にある分子、原子、電子等に電磁相互作用を通してエネルギー（熱）を与えます。よって太陽コロナ領域は、高い温度となるのです。

【今後への期待】

理論を研究対象とする研究グループとしては、近い将来行われるであろう、大規模な測定機器を用いた検証に期待しています。特に有力なのは、二つの物理量を用いる方法です。一つは、太陽コロナからの光のスペクトルであり、二つ目は太陽からのニュートリノのスペクトルです。これらの観測データは、電弱ホール効果の影響を受けます。よって、理論データと比較することで検証可能と思われます。

一つ目については、太陽観測衛星をはじめとする様々な太陽観測が現在進行中ですので、観測の過程でどのようなことが明らかになるか、研究グループとしても大いに期待しています。二つ目は、太陽コロナにおける光崩壊により生じたニュートリノスペクトル変化を直接検証することで、検証できるのではないかと考えています。次世代ニュートリノ観測装置として建設が進んでいるハイパーカミオカンデ装置による高精度のニュートリノ観測で、直接検証も可能でしょう。また、実験室での検証も原理的には可能ですが、長距離の空気中における測定は今のままでは至難であり、今後の更なる研究が待たれます。

論文情報

論文名	Topological interaction of neutrino with photon in a magnetic field - Electroweak Hall effect (ニュートリノと光子のトポロジ的な相互作用—電弱ホール効果)
著者名	石川健三 ¹ 、飛田 豊 ² (北海道大学大学院理学研究院 ¹ 、北海道科学大学工学部 ²)
雑誌名	Physics Open (物理学の専門誌)
D O I	10.1016/j.physo.2023.100174
公表日	2023 年 8 月 12 日 (土) (オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院理学研究院 名誉教授 石川健三 (いしかわけんぞう)

T E L 011-706-4486 F A X 011-706-4926 メール ishikawa@particle.sci.hokudai.ac.jp

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

北海道科学大学研究推進課 (〒006-8585 札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目 4-1)

T E L 011-688-2241 F A X 011-688-2392 メール kenkyu@hus.ac.jp

【用語解説】

- *1 ニュートリノ … 素粒子の一種で、スピンは電子と同じ、電氣的に中性、質量は電子の 10^{-8} 程度であり、原子核分裂、核融合反応や原子核・素粒子のベータ崩壊で生成される。質量の異なる 3 種類のニュートリノがあり、原子炉や太陽で大量に生成されるが、物質や地球を素通りしている。超新星爆発で生じたニュートリノが 1987 年観測され、またニュートリノがゼロでない小さな質量を持つことが分かったのは、その後のことである。これらには、神岡にあるカミオカンデやスーパーカミオカンデ測定器が、威力を発揮した。ニュートリノについては、まだ分かっていないことが多い。
- *2 量子力学 … 20 世紀初めに発見されたミクロな世界を記述する現代物理学の柱の一つである力学体系。物体の位置の変化を運動方程式が記述するニュートンの運動法則とは異なり、粒子の状態を表す波動はシュレディンガー方程式に従う複素数であり、古典波動のような物体の変位を表す実数ではない。そのかわり、現象の生ずる確率をあらわす。古典力学は、我々の日常生活、認識や理解の基礎になっているので、理解が易しい。しかし量子力学は、これらと異質であり理解は易しくない。量子力学は、1900 年のプランクの黒体輻射の理論から始まったが、100 年以上経過した現在も新たな理解や応用が進展中である。(拙著：レクチャー量子力学、I,II (裳華房))
- *3 量子ホール効果 … SiMOSFET や Ga 超格子半導体で極低温・強磁場かで発見された、特異なマクロ量子現象。電気抵抗が、微細構造定数に厳密に比例する。抵抗標準となっていると共に、微細構造定数の精密な決定に使われている。
- *4 ニュートリノの光崩壊 … 一つのニュートリノが光と他のニュートリノに変化することである。量子力学により計算される最も重要な物理量である“状態遷移の確率”は、“フェルミの黄金律”公式で与えられる。しかし実は、フェルミの黄金律は、厳密ではなく補正項が伴うことが、筆者らの研究で明らかにされている。ニュートリノの光崩壊でも、補正項は重要な役割を担っている。