

発展的研究計画スタート支援 中間報告書

高密度プラズマ物理研究系
後藤勇樹

研究テーマ名：リウビル力学に基づく自発放射光渦の古典的放射減衰解の構築

責任者：後藤勇樹

支援年度：令和4年度

1. 研究の進捗状況

本研究では、電子サイクロトロン放射による光渦場とサイクロトロン運動する電子との相互作用における減衰も含めた全系での光渦放射の力学を理論的に論じ、時間対称性を破る古典的減衰現象を解析することである。これはサイクロトロン運動(放射)という核融合科学に偏在する現象をより基礎的な側面から考察する核融合分野における学際的な研究である。

詳細は後述するが、現在までにFriedrichsによる量子系の定式化を追う事により、古典的コヒーレント状態という概念を導入し、それを通して古典的数表示なる概念も導入することに成功した(古典的Friedrichsモデル)。そにより量子力学と同じ代数計算で古典的リウビリヤンの固有値問題を解くことが出来る数学構造を構築し、これまで量子効果として知られていたいくつかの現象が古典力学にも存在することを明らかにした。

事の発端は2017年、古典的な円軌道を有する荷電粒子が作る放射場は光渦であることが理論的に明らかにされたことに始まる。この理論は光渦場と荷電粒子の相互作用を考慮した初めての理論である。しかし、上記の理論には輻射による荷電粒子の減衰過程は考慮されていない。一般的に古典輻射減衰に関する取扱はLiénard Wiechert potentialsから導かれるLorentz-Abraham (LA)方程式に基づいて行われている。この古典的減衰過程を取り扱うために提案されたLA方程式は、運動方程式の中に荷電粒子の位置の時間に関する3階微分項が現れているために力学の基本原則と抵触しており、この事象の理論的裏づけは未解決である。一方、量子系での自然放出のメカニズムはFriedrichsにより量子力学の基本原則に抵触しない形で解明されている。我々はこのFriedrichsの量子論的取扱を古典化することにより、ミクロな立場からリウビル力学に基づき古典輻射減衰を有する光渦の放射過程を解析した。ここでリウビル力学とは”古典的なシュレーディンガー表示”により系の状態量の変化を扱うものである。この時、古典的状态量の従う基本方程式をリウビル方程式と呼ぶ。本研究ではz方向に一様静磁場が印加されている円筒導波管内でサイクロトロン運動する電子に関し、無限自由度を持つ古典的放射場と電子が相互作用する系の時間発展をこのシュレーディンガー表示に対応するリウビル方程式から構築した。この手法の有用な点は、現在考えている古典的な物理モデルから得られる基本方程式がFriedrichsモデルと呼ばれるハミルトニアンから得られる量子力学での基本方程式と代数的に等価であるという点である。

2. これまでの成果と今年度の成果の見通し

共同研究者である田中智氏(大阪公立大)により、量子系でのFriedrichsモデルから自然放射による発光スペクトルの中にVan Hove特異性に基づいた特異なFanoスペクトルが現れること

が指摘された。古典的Friedrichsモデルは量子的Friedrichsモデルと代数的に等価なため、これらの効果が古典のサイクロトロン放射にも見いだされることをこれまでに明らかにした。

また現在は、サイクロトロン運動している電子とその放射場における全角運動量に着目した計算を行っている。つまり初期に角運動量を有しながら回転していた電子が、どのような機構でその角運動量を場に転写するかについての解析である。初期的な計算結果であるが、以下のような成果の見通しがある。サイクロトロン運動というのは電荷の正負、磁場の方向により回転方向が異なり、本質的に空間の対称性を破る現象である。従って、放出される場にも空間的な非対称性が存在することが考えられる。ここで場の非対称性とは、円筒境界内を伝搬する場の絶対値が、同じモード数でも正負によって相違があることを言う。現在までにこの非対称性が場に角運動量を与えていることが示唆されている。また場に転写される全角運動の時間発展を調べてみた結果、微小な振動成分が含まれていることが明らかになった。電子の角運動量の時間発展は単純な指数関数減衰であり振動成分は含まれていない。従ってこの場に含まれる振動成分は何らかの干渉成分であり、今後解析を進め干渉の発生機構を解明する。

3. 予算の使用状況と予定

本研究を米国で遂行するため出張旅費として主に渡航費、滞在費が支給されている。渡航費に関しては往復の航空券代として、滞在費に関しては現地のアパート代として使用している。アパート代は月払いとなっており、4月上旬まで支出の予定がある。

4. 次年度以降の展開の見通し

次年度以降では古典的なFriedrichsモデルを更に深掘りし、古典力学での自然放出機構の解明を目指す。

一般的な量子力学の教科書やWikipediaをみると、自然放出は電磁場を量子化することで説明が可能であり、古典力学では説明が不可能との記述が散見される。それは自然放出を論じる場合、第二量子化された形式で論じられていること及び量子真空の揺らぎの存在が根拠となっているからである。しかし我々は古典的Friedrichsモデルが量子的Friedrichsモデルと代数的に等価であることを用い、いくつかの量子力学的現象を古典力学に翻訳してきた。従って古典力学でも自然放出の記述が可能であると考えている。繰り返しになるがFriedrichsは量子的Friedrichsモデルを用いることで、励起準位の崩壊による光の自然放出の力学的根拠を明らかにした。彼は自然放出は真空の揺らぎが原因ではなくて、運動方程式の解の中に現れる共鳴特異性が原因であることを厳密に明らかにした。従って、古典的Friedrichsモデルのさらなる解析を行うことで、古典力学での自然放出による光の放射も共鳴特異性が根拠となっていることが示されると推測される。それどころか、古典系では真空は揺らぎは存在しないので、同時に真空の揺らぎが原因で自然放出が起こるのではないということも明らかになる。

5. 外部資金獲得の実績または見通し

日本学術振興会 科学研究費助成事業 若手研究, 2022年4月~2027年3月,ヘリカル波面を持つ電子サイクロトロン放射の発生とその応用, (直接経費)3,500,000円, (間接経費)1,050,000円, (代表者)後藤勇樹