

Title	超相対論レーザー電子相互作用における放射の反作用の理論研究
Author(s)	瀬戸, 慧大
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/24961
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

技術進歩によりレーザーのピーク強度は年々上昇しており、これまで観測できなかった物理現象をレーザーと電子の相互作用の中に見出せるようになってきた。世界的に目標としているレーザー強度は $10^{24-25}\text{W}/\text{cm}^2$ であり、この領域では量子電磁力学効果が観測できると期待されてきた。現状、利用できるのはおよそ $10^{22}\text{W}/\text{cm}^2$ 程度であるが、目標との間にある $10^{22}\text{W}/\text{cm}^2$ における物理過程“放射の反作用”の基礎的な理論研究を行ってきた。基礎式であるLorentz-Abraham-Dirac方程式はその解に発散問題を含んでいた。これはSchott項と呼ばれる放射の反作用を表す1つの項であるが、物理的な理解を得られないと考え、まず2章では理論の基礎としてエネルギー保存式からSchott項を取り払うという方法をとった。結果として、新たに導かれた方程式は発散解を持たないことを数学的に証明することに成功した。この方程式を利用して、3章では超高強度レーザー(強度 $5 \times 10^{22}\text{W}/\text{cm}^2$, 波長 $1 \mu\text{m}$, パルス幅はレーザー周期の7倍の平面波)・高エネルギー電子(1GeV)の衝突配位の計算を行ったところ過去に行われたLandau-Lifshitzの近似式を用いた数値計算の結果を内包しうることが示された。放射の反作用を考慮した場合、レーザーのまだ低強度の部分で電子は慣性の大部分を放射に変換し、レーザーピーク強度付近と相互作用するときには制動放射の影響は外部から注入されたレーザーの影響に比べ無視できる程度となった。その際、相対論レーザー($10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ 以上の強度を持つレーザー)特有の8の字運動もピーク強度付近で発生することが分かった。また、4章では低強度レーザー(強度 $1 \times 10^{17}\text{W}/\text{cm}^2$, 波長 $1 \mu\text{m}$, パルス幅は20fsecの平面波)・低エネルギー電子(静止している電子から5MeVまで初期のエネルギーを変えた計算を行った)相互作用において、この場合の放射の反作用の影響はレーザーによるLorentz力に比べて 10^{-11} 倍と微々たるもので、それゆえ通常は考える必要はなかったが、拡張性の調査のために放射の反作用のモデル間の差を計算したところ、良く利用されるLandau-Lifshitzの計算と差異が確認できた。従来の計算方法とのずれは電子の高エネルギー側では見受けられず、低エネルギー側で実験的に観測可能だという提案を示したものであった。この差異はSchott項の有無に起因したもので、常識的な感覚では新しく提案した方程式の示す結果が有意であり、従来の理論に比べ古典物理のすべてのレンジで利用可能な方程式を導いたと結論付けた。

論文審査の結果の要旨

本論文は、超相対論レーザー電子相互作用の中で発生すると予測されている放射の反作用についての新たな知見を与え、まとめたものである。本研究で得られた研究成果をまとめると以下のようになる。

(1)放射の反作用は制動放射の影響を考慮した荷電粒子運動のことを言うが、これは最もオリジナルな方程式であるLorentz-Abraham-Diracの理論(1938年)を基礎としている。しかしながらこの方程式は発散解を含むために解を得ることができずにいた。この問題を解決するために本論文ではDiracの仮定とは違う仮定を採用することで、発散解を回避した放射の反作用を含む(古典)運動方程式を導出することに成功した。

(2)得られた新たな方程式を利用して $10^{22}\text{W}/\text{cm}^2$ の強度を持つ超相対論レーザーと1GeVのエネルギーを持つ高エネルギー電子が正面衝突する場合の数値計算を行った結果、レーザー電子相互作用の過程で電子は初期エネルギーの90%程度を制動放射で失うことが証明された。この結果は過去に計算されたLandau-Lifshitzによる近似式を用いた結果と完全に一致しており、高エネルギー電子について計算は信頼性があるという知見を得た。

(3)得られた方程式を用いて低強度レーザー($10^{17}\text{W}/\text{cm}^2$)と非相対論速度の電子の相互作用を数値計算した結果、従来利用されてきたLandau-Lifshitzによる近似では電子が自信が放射を行ったことを $\pi/2$ だけ遅れた時間で感知することに対し、提案された新モデルは時間ずれなく電子が自身の放射を行ったことを感知することが示された。これは古典点電子という、量子論的な電子構造の無いモデルにおいて望まれるべき挙動であり、従来の方法に対し大きな利点で

【153】

氏名	瀬戸 慧大			
博士の専攻分野の名称	博士(工学)			
学位記番号	第 26219 号			
学位授与年月日	平成25年3月25日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科電気電子情報工学専攻			
学位論文名	超相対論レーザー電子相互作用における放射の反作用の理論研究			
論文審査委員	(主査) 准教授 長友 英夫 (副査) 教授 村上 匡且 教授 田中 和夫 教授 中井 光男 教授 上田 良夫 教授 兒玉 了祐 教授 飯田 敏行			

ある。

以上のように、本論文は超相対論レーザー電子相互作用のみにとどまらず、一般のレーザー電子相互作用における放射の反作用の計算が可能な大変ダイナミックレンジの広いモデルであり、レーザー電子相互作用のモデル化に多大な貢献をした。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。