Osaka University Knowledge Archive

Title	真空と光の非線形相互作用
Author(s)	門田, 裕一郎
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/59953
rights	© 2011 American Physical Society
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

【156】

氏　　名	門　田　裕一郎（もんでん ゆういちろう）
博士の専攻分野の名称	博　士（工学）
学　位　記　番　号	第　２６２２２　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	**真空と光の非線形相互作用**
論文審査委員	（主査） 教　授　兒玉　了祐 （副査） 教　授　田中　和夫　　教　授　上田　良夫　　教　授　飯田　敏行 教　授　村上　匡且　　教　授　中井　光男　　准教授　羽原　英明

論文内容の要旨

本論文では，真空と光の相互作用と物質と光の相互作用の違いを明らかにすることを目的とし，真空中にレーザー光が照射された場合に誘起される分極と磁化や真空から放射される光の光子数が，光の偏光状態や開口角，幾何学配置などにどのように依存するのかを調べた．

第１章は序論であり，本研究の背景として真空と光の相互作用に関する研究の概要と，真空非線形光学現象を通して真空を調べることの意義について述べた．また，従来の研究における問題点を指摘し，レーザー光をベクトル場として扱った上で真空と光の相互作用を考えることの必要性を述べた．

第２章では，シュインガー極限よりも十分強度の低い一様電磁場が真空中に存在する場合のラグランジアン密度の導出過程について述べた．

第３章では，第２章で導出したラグランジアン密度を用いて真空中におけるMaxwell方程式を導出し，物質中におけるMaxwell方程式との比較により真空中の分極と磁化を定義した．また，レーザー光が照射された場合に真空から放射される光の電磁場を，レーザー光よりも放射光の方が十分強度が低いという仮定の下で焦点から十分離れた点において計算した．

第４章では，ベクトル場の回折積分について述べ，これを用いて直線偏光と軸対称偏光のレーザー光を集光した場合の電磁場を求めた．

第５章では，直線偏光と軸対称偏光のレーザー光を集光することで生じる真空中の分極・磁化と真空からの放射光子数を計算した．分極と磁化の計算から，軸対称偏光のレーザー光により誘起される分極と磁化はその電磁場と類似した分布になるが，直線偏光のレーザー光を集光した場合に生じる分極と磁化はもとの電磁場とは全く異なる分布になるという結果が得られた．また，真空からの放射光子数の計算結果より，入射レーザー光の偏光状態は光子数に大きな影響を与えないが，開口角を１５°から１００°に変化させることで光子数は約７桁増加することが分かった．

第６章では，反対方向に伝搬する２つの直線偏光のレーザー光を１点に集光することで生じる真空中の分極・磁化と真空からの放射光子数を計算し，直線偏光の１ビームを集光した場合の計算結果と比較した．分極と磁化の計算から，対向するレーザー光により誘起される分極と磁化はもとの電磁場と非常に似た分布をもつという結果が得られた．また，レーザー光の強度や出力を一定にした場合でも分極と磁化の振幅は１ビームの場合と比べて非常に大きくなり，その結果として放射光子数も１ビームの場合と比べて３桁以上増加するという結果が得られた．

以上の結果から，物質中の分極と磁化は光の偏光状態や幾何学配置に関わらず電磁場と同様の分布になるが，真空中の分極と磁化は特定の偏光状態をもつ光が照射された場合にはその電磁場と異なる分布になることが分かった．また，物質と光の相互作用の大きさは光の強度以外にはあまり依存しないが，真空と光の相互作用の大きさは光の強度やエネルギーが一定の場合でも開口角やビームの幾何学配置によって大きく変化することが明らかになった．

論文審査の結果の要旨

本論文は，真空と光の相互作用と物質と光の相互作用の違いを明らかにすることを目的として，集光されたレーザー光により生じる真空非線形光学現象を計算したものである．真空非線形光学現象とは，光と真空の量子ゆらぎの相互作用によって誘起される分極と磁化のために，真空中の光の振舞いが古典的な Maxwell 方程式で記述されるものと比べて変化する現象である．当該分野における従来の理論的研究では，レーザー光の計算の際に厳密な波動光学が用いられていなかったため，計算の正確性や実験への適応の面で不十分な点が多く残されていた．本論文の計算では，ベクトル場の回折積分を用いることで従来の研究では無視されていた集光によるレーザー光の電磁場の変化を考慮している．これにより，真空非線形光学現象の偏光状態や開口角，レーザーの幾何学配置に対する依存性などのこれまで知られていなかった重要な性質を明らかにしている．

本論文は以下の 7 章で構成されている．第 1 章は序論であり，本研究の背景として真空と光の相互作用に関する研究の概要，真空非線形光学現象を通して真空を調べることの意義，また従来の研究における問題点を述べている．第 2 章と第 3 章では，レーザー光と真空の相互作用を計算するための理論モデルについて述べており，真空中における電磁場のラグランジアン密度を用いた Maxwell 方程式の導出，レーザー光の照射により真空から放射される光の電磁場の計算などを行っている．第 4 章では，ベクトル場の回折積分について述べており，これを用いて直線偏光と軸対称偏光のレーザー光を集光した場合の電磁場を計算している．第 5 章と第 6 章では数値計算の結果を示しており，直線偏光と軸対称偏光の 1 本のレーザー光，また反対方向に伝搬する 2 本のレーザー光が真空に照射された場合に生じる分極と磁化，真空からの放射光子数をそれぞれ計算している．

本論文の主要な研究成果は，真空と光の相互作用が物質と光の相互作用とどのような点で異なるのかを世界で初めて理論的に明らかにしたことである．真空中の分極と磁化の計算により，直線偏光のレーザー光を集光した場合に生じる分極と磁化はもとの電磁場とは全く異なる分布になるという結果を得ている．これにより，物質中の分極・磁化とは異なり，真空中の分極と磁化は特定の偏光状態をもつ光が照射された場合にはその電磁場と異なる分布になることを示した．また，レーザー光と真空の相互作用により生じる放射光の計算により，放射光子数は開口角の変化(15°→100°)により 7 桁，レーザーの対向照射により 3 桁増加するという結果を得ている．この計算結果により，真空と光の相互作用の大きさは入射光の強度やエネルギーが一定の場合でも開口角やビームの幾何学配置によって大きく変化することを明らかにしている．

以上の研究成果は，量子ゆらぎに起因する真空と光の相互作用を理解する上で非常に重要であるとともに，真空非線形光学現象の実験的な観測可能性を評価する上でも大変有用である．よって，本論文は博士論文として価値あるものであると認める．