

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03786

研究課題名(和文) 高強度場中の荷電粒子に働く輻射反作用力と輻射場及び誘導場の理解

研究課題名(英文) Understanding of radiation reaction force acting on charged particle in intense fields

研究代表者

中村 龍史 (Nakamura, Tatsufumi)

福岡工業大学・情報工学部・教授

研究者番号：40318796

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：輻射によるエネルギー損失を考慮した荷電粒子の運動方程式として Lorentz-Abraham-Dirac (LAD) 方程式が提案されているが、高階微分項の存在による数学的問題が指摘されている。そのためLAD方程式の摂動近似に相当するLandau-Lifshitz方程式やMo-Papas方程式など上記の問題を含まない方程式が代用されている。本研究では比較的簡単な系におけるこれらの方程式による運動の解析解を導出し、解の振る舞いの定量的な比較・検討を行った。その結果、各方程式の解には場の強度に依存する定量的な差が見られるが、量子効果が無視できる古典領域においてはいずれの解も差異が小さいことが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

輻射を考慮した運動方程式として提案されているLAD方程式は、高階微分項を含むため解析的求解のみならず数値的球解も難しくこのためLAD方程式の近似方程式に相当する方程式を代用することが多い。そこでこれらの方程式を用いて運動の解析解を導出し、それらの定量的な比較を行った。その結果、量子電磁力学的な効果が無視できるような電磁場の強度領域においては、LAD方程式の解とLandau-Lifshitz方程式、Mo-Paras方程式、Ford-O'Connell方程式の解の相対的な誤差は10⁻⁶程度と小さいことが示された。このことは、数値積分が可能な上記の近似方程式を用いる際の妥当性を示す根拠の一つとなる。

研究成果の概要(英文)：The Lorentz-Abraham-Dirac (LAD) equation is widely recognized as a correct equation of motion of charged particle, which includes the radiation reaction force. It is also known that the LAD equation has mathematical issues originating the Schott term which contains a third time-derivative term. Then other equations which do not suffer from the above issue such as the Landau-Lifshitz equation which is obtained by perturbative expansion of radiation reaction term in LAD equation, and others such as Mo-Papas equation. In this research, we obtained analytical solution of charged particle in relatively simple system by using the LAD and other equations, and compared them quantitatively. It was shown that there are some differences among solutions of those equations, such as the Lorentz factor, the differences are relatively small in the regime where the quantum effect is negligible and classical treatment is acceptable.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：輻射反作用 高強度場 LAD方程式 自己力 超高強度レーザー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 輻射反作用力を考慮した荷電粒子の運動方程式としては Lorentz-Abraham-Dirac(LAD)方程式が広く知られている。しかし、高階の時間微分項を含む LAD 方程式は解析解のみならず数値解の求解も難しく、実際には LAD 方程式の摂動近似による Landau-Lifshitz(LL)方程式などが代用されている。

(2) LAD 方程式に代用される方程式としては、LL 方程式のほかにも、Mo-Papas(MP)方程式や Ford-O'Connell(FO)方程式などが知られており、輻射反作用を考慮した電荷の軌道計算等に用いられている。しかし、LAD 方程式とこれら方程式の解の比較は、個別にはいくが行われているが、同一の系においてこれら全ての方程式の解について比較・検討はされていない。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、輻射反作用を考慮した荷電粒子の運動を LAD と LL、MP、FO の各方程式を用いて解析し、それらの解の定量的な比較を行う。そのために、比較的簡単な電磁場分布を設定し荷電粒子の解析解を求めることで、種々の物理量の比較を行う。

(2) 繰り込み手法により導出された LAD 方程式はその正当性がある程度確立されていると言える。これに対し、その後に提案された上記の他の方程式の妥当性について検討を行う。電磁場強度により、LAD 方程式と他の方程式の解の差異は増大すると予想され、どの程度の強度領域まで LL 方程式等が妥当といえるかを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 軸磁場とそれに直交する面内の回転電場中での電子を対象にえらび、その運動の解析解を導出する。それにより、LAD を含む 4 つの方程式を用いて求めた、ローレンツ因子や輻射率、運動量などの物理量の定量的比較を行う。

(2) これらの量は磁場強度および電場強度に依存するため、LAD 方程式から得られたものと、その他の各方程式から得られた量の相対誤差を計算し、その強度依存性から各方程式の妥当性が場のどのような強度領域において見とれられるかを判断する。

4. 研究成果

(1) z 軸方向の静磁場と x y 平面内で一定の角速度で回転する電場内での電子の運動を LAD 方程式を用いて解くことができる。これは他の先行研究において導出されており、ローレンツ因子や運動用の電場方向成分および電場垂直成分が電場および磁場強度の依存性としてあらわされている。同様に運動の解析解を LL、MP、FO 方程式に対して導出した。本研究で導出した LL 方程式に対する解と、MP 方程式の一般解は、特定の極限で先行研究で得られている解と一致することを確認している。

(2) 図 1 (a) に LAD 方程式を用いて得られたローレンツ因子 と、MP 方程式を用いて得られた との相対誤差を黒線でプロットしてある。横軸は規格化された電場強度 ($a_0 = eE_0 / (mc^2)$), ここで E_0 は電場強度、 e, m は電子の電荷量及び質量、 ω は回転電場の角周波数) である。 a_0 が 440 程度までは LL 方程式の解と MP 方程式の解の差は増大してゆくが、その後緩やかに減少している。誤差の最大値はおよそ 10^{-6} 程度である。

同様に、LL 方程式と LAD 方程式の相

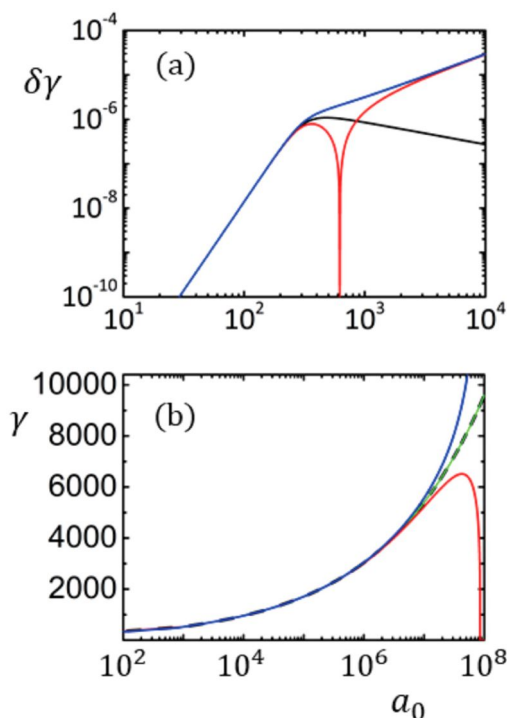


図 1 (a)LAD 方程式と MP(黒線)、LL(赤線)、FO(青線)方程式の解の比較。縦軸はローレンツ因子の相対誤差、横軸は電場強度。(b)ローレンツ因子の比較。

対誤差を赤線で、F0 方程式については青線でプロットしてある。それらの振る舞いは a_0 が 440 程度までは MP 方程式の結果とほぼ変わらず、それ以上の領域では、相対誤差が単調に増大していることが分かる。(b) はローレンツ因子の電場強度依存性を示している。広範な強度領域においてローレンツ因子の振る舞いに大きな差異は見られない。パラメータ等の詳細については文献[1]を参照。

(3) 電磁場強度が大きくなると、量子電磁力学 (QED) の効果が無視できなくなる。QED パラメータとしてローレンツ力の大きさと臨界電場強度 $E_c = m^2 c^3 / (\hbar e)$ との比に相当するパラメータ a_0 が用いられる。図 2 (a) には a_0 の電場強度依存性がプロットされており、各線はそれぞれ異なる磁場強度 $b_0=10$ (青), 0 (赤), -10 (黒) に相当する。磁場強度依存性は小さいので、例として $b_0=0$ の場合を考えると、電場強度とともに a_0 の大きさは上昇し、およそ $a_0=440$ でスケールが変化している。 $a_0=440$ は輻射反作用とローレンツ力の比であらわされるパラメータの $1/3$ 条根に相当する量で、運動方程式においてローレンツ力と輻射反作用力のいずれが支配的となるかが入れ替わる強度領域に相当する。この強度を超えると、輻射反作用が支配的な領域となり、その時には QED パラメータがほぼ 1 となり QED 効果を無視することができないことが分かる。逆にそれ以下の領域では、QED パラメータは 1 より充分小さく、古典電磁気学による取扱を正当化することができる。そのような領域において、電子運動にどのような差があるかを図 1 で確認すると、丁度 MP, LL, F0 との差が見られない領域に相当しており、そこでの相対誤差は大きくても 10^{-6} 程度であることが分かる。また図 2(b) には QED パラメータの電場依存性をことなる回転電場周波数に対してプロットしてある。それぞれ、 $\omega/(2\pi c) = 10^7$ (青線)、 10^6 (赤線)、 10^5 (黒線) である。

これらのことから QED 効果を無視することができ古典電磁気学が適用できる範囲内では、LAD と他の LL, MP, F0 方程式の解の間に大きな差異は見られず、それらの妥当性を支持する一つの結果であるといえる。

引用文献

[1] T.Nakamura, Phys. Rev. E **102**, 033210 (2020).

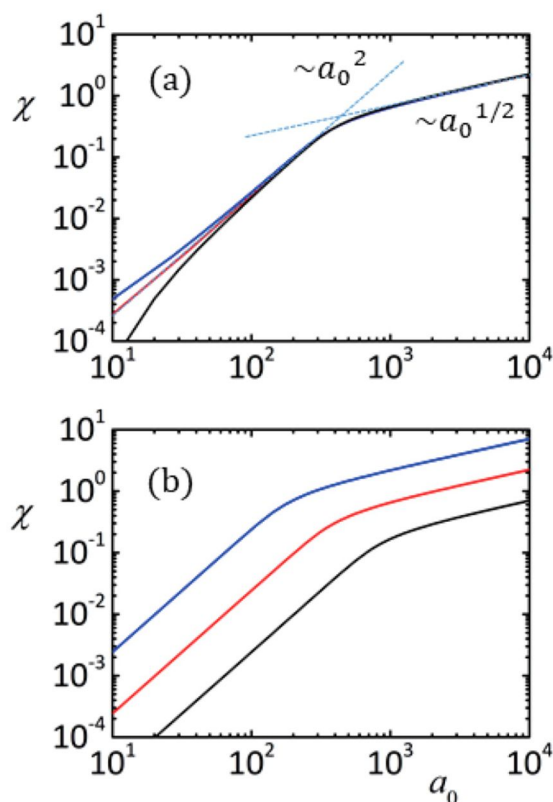


図 2 (a)量子電磁力学パラメータ χ の電場強度依存性。各線は異なる磁場強度に相当する。(b) χ のレーザー強度依存性の角周波数による違い。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nakamura Tatsufumi	4. 巻 4
2. 論文標題 On the Schott Term in the Lorentz-Abraham-Dirac Equation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quantum Beam Science	6. 最初と最後の頁 34 ~ 34
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/qubs4040034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Tatsufumi	4. 巻 102
2. 論文標題 Stationary solutions of equations of motion for a radiating charged particle including a radiation reaction effect	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 033210-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.102.033210	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Tatsufumi	4. 巻 11
2. 論文標題 Asymptotic velocity of relativistic $E \times B$ drift	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035303 ~ 035303
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0029013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 中村龍史
2. 発表標題 輻射反作用を考慮した輻射荷電粒子の定常解
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Nakamura
2. 発表標題 Effect of Schott term in Lorentz-Abraham-Dirac equation
3. 学会等名 46th Annual EPS plasma conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村龍史
2. 発表標題 サイクロトロン電子における輻射反作用効果
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関