

誘導コンプトン散乱のレーザー実験に向けての研究

田中周太¹, 山崎了¹, 蔵満康浩², 坂和洋一³

1 青山学院大学理工学部, 2 大阪大学大学院工学研究科, 3 大阪大学レーザー科学研究所

INTRODUCTION

本研究はレーザー・プラズマ非線形相互作用の一つである「誘導コンプトン散乱」についての理論的研究である。この研究を通して誘導コンプトン散乱に伴う現象を正しく理解し、さらに、その現象をレーザー実験によって検証することを目指す。誘導コンプトンは、研究代表者が専門としてきた天体現象への応用も考えられる相互作用である。

太陽の電波バーストや、パルサーからの電波パルス、さらに高速電波バーストなど、いくつかの天体からは非常に高輝度の放射が観測される。ここで高輝度というのは、光子の占有密度ないしは、輝度温度という量で特徴付けられ、黒体放射や高エネルギー粒子からのシンクロトロン放射などのインコヒーレントな放射では説明困難な輝度を持つということである。天体からのこのような放射は天然のレーザー発振と言え、そもそもその放射機構が今なお研究の対象である[1]。

ただし、ここで注目するのは放射機構ではなく、高輝度放射光の伝播過程である。その中でも特に「誘導コンプトン散乱」に注目する。高輝度放射は天体周辺のプラズマや星間プラズマと誘導コンプトン散乱を起こすことが期待される。宇宙物理において、我々は宇宙のはるか彼方で起こる現象を主に電磁波として観測し、放射するプラズマの性質を予測し、天体の周辺で起こる極限的物理現象を説明するという手法が取られる[2]。一方、放射された電磁波が伝播時に起こすプラズマと電磁波の非線形相互作用の痕跡、つまり、散乱光からも、天体周辺のプラズマ状態を予測することが可能である[3]。しかし現状、観測される電磁波と誘導コンプトン散乱光とを比較できるほど、この現象の明確な理解に至っているとは言えない。

一方で、レーザーを用いたプラズマと電磁波の相互作用に関する研究は古くから行われてきた。高輝度放射を実現できるレーザー光は、プラズマとの様々な非線形相互作用が期待される。その中でも誘導コンプトン散乱に関する実験は 1970 年代の前半にも行われており、それ以降も何度か実験の報告がある。我々が注目する「誘導コンプトン散乱された散乱光の振る舞い」を調べた研究があるが、実験結果は定性的な説明に留まっている[4]。多くの非線形相互作用から誘導コンプトン散乱が抜き出されているかという点で、解消すべき疑問がある。誘導コンプトン散乱のレーザー実験の可能性について議論し、誘導コンプトン散乱光の非線形発展を調べる。

研究方法

代表者らの過去の研究で誘導コンプトン散乱の非線形段階で見られるスペクトルの変化を扱った[5]。これまでの研究では[5]の方法を拡張することで最近の実験室レーザーを用いてどのような結果が得られるかを計算した。特に、利用可能性のあるレーザーについてそれらを調べて、予想されるスペクトルを計算した。この内容は現在論文にまとめている。

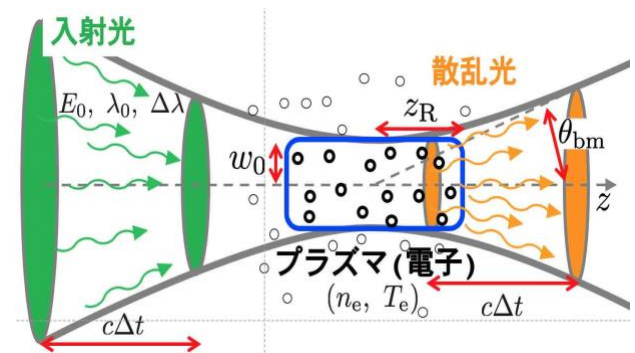


図 1: 実験室での誘導コンプトン実験の概念図。ガウスビームのレイリー領域で、散乱体となるプラズマ中の電子と相互作用する。

図 1 のようにガウスビームのレイリー領域での誘導コンプトン散乱を考える。入射光のエネルギー E_0 、中心波長 λ_0 、バンド幅 $\Delta\lambda$ 、パルス幅 Δt 、ウェスト幅 w_0 を利用可能性のあるレーザーについてまとめたのが表 1 である。これらのレーザーパラメータの違いにより、どのようなプラズマ(電子密度 n_e と温度 T_e) に対して、誘導コンプトンが他の非線形相互作用に対して卓越するかどうかを調べることができる。

表 1

パラメータ	J-KAREN-P	NCU100TW	LFEX
エネルギー[J]	10	3.3	400
中心波長[nm]	820	810	1053
バンド幅[nm]	50	35	3.3
パルス幅[fs]	30	30	1500
スポット径[um]	0.67	4.3	50

誘導コンプトンのレーザー実験の可能性を議論するのに必要なレーザーパラメータ: J-KAREN-P(関西光科学研究所)[6]、NCU100TW(台湾国立中央大学)[7]、LFEX(大阪大学)[8,9]。

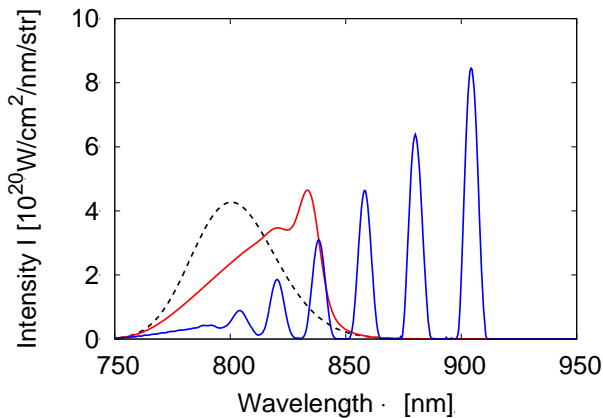


図 2: 台湾の国立中央大学にある NCU100TW レーザーのパラメータに対して予想される誘導コンプトン散乱光のスペクトル。黒点線が初期のスペクトルで、赤線が密度 10^{17}cm^{-3} のプラズマに照射した場合の散乱光、青線が密度 10^{18}cm^{-3} のプラズマに照射した場合の散乱光。

図 2 では、スペクトルがガウス分布をしたガウスビームを考える(黒点線)。ガウスビームのレイリー領域に散乱体があると考えて、その(電子)密度が 10^{17}cm^{-3} の時が赤線、 10^{18}cm^{-3} の時が青線のような散乱光スペクトルとなる。誘導コンプトン散乱は散乱過程なので光子数は保存するが、コンプトン過程により電子にエネルギーを渡す。そのために長波長側にスペクトルが変形していく。散乱が十分起こった状態である青太線のスペクトルは誘導コンプトン散乱によって、線スペクトルを複数伴う特徴的なスペクトルになっている。

図 2 では誘導コンプトン散乱が卓越するような状況が暗に仮定されている。本年度の研究ではどのような状況で、誘導コンプトン散乱が他の(非線形)プラズマ過程に比べて卓越するのかを調べた。レーザーパラメータについては、実験装置ごとに決まっているため、我々が調整できるのはプラズマの密度と温度である。次の四つの条件について調べた。

- ① 誘導コンプトン散乱が起こる。
- ② Debye 長が中心波長より長い。
- ③ バンド幅がプラズマ振動数よりも長い。
- ④ バンド幅が誘導コンプトン散乱に特徴的な線スペクトルよりも大きい。

①は図 1 に見られるようなスペクトルの変形が確認できるかどうかの条件。②は non-collective scattering になるための条件。③は誘導ラマン散乱が卓越しないための条件[10]。④は[5]で導出した方程式の適用限界に関する条件になっている。

結果

J-KAREN-P については、電子温度 $T_e \sim \text{keV}$ のプラズマに対して、電子数密度 $10^{15}[\text{cm}^{-3}] < n_e < 10^{17}[\text{cm}^{-3}]$ のプラズマであれば、誘導コンプトン散乱が卓越すると考えられる。NCU100TW については、電子温度 $T_e \sim 10\text{keV}$ のプラズマに対して、電子数密度 $10^{17}[\text{cm}^{-3}] < n_e < 10^{18}[\text{cm}^{-3}]$ のプラズマであれば、誘導コンプトン散乱が卓越すると考えられる。LFEX については、図 1 のような実験において、誘導コン

プトン散乱を観測するのは困難であることがわかった。

結論と今後の発展

レーザーパラメータによって、必要となるプラズマのパラメータ範囲は何桁も変動することがわかる。上記①-④のそれぞれの条件は、レーザーパラメータと複雑に絡み合っているために一概には言えないが、現状では大型の大エネルギーレーザーよりも、高強度短パルスレーザーが誘導コンプトン散乱の実験に適したレーザーパラメータを持つことがわかった。

幅広いレーザーパラメータの領域で普遍的に誘導コンプトン散乱が確認されるかどうかというのは興味深い問題であるため、激光 XII や LFEX といったハイパワーレーザーを適用できるようなセットアップがないか、理論的に模索している。これを次年度の共同利用・共同研究の内容にしようと考えている。

一方、誘導コンプトン実験を次年度の J-KAREN-P 実験に申請中である。うまくプラズマパラメータを調整することで、誘導コンプトン散乱の性質が世界で初めて実証される可能性がある。散乱光のスペクトルを計測するために必要となる計測器も競争的資金(青山学院大学アーリーイーグル研究支援制度)ですでに購入済みである。

ACKNOWLEDGEMENT(S)

本研究の一部は、青山学院大学アーリーイーグル研究支援制度の支援によって行われた。

REFERENCE(S)

- [1] Melrose, D. B., *Rev. Mod. Plasma, Phys.* **1**, 5 (2017).
- [2] 田中周太, 天文月報, 2013 年 **106** 巻 1 号
- [3] Tanaka, S. J., & Takahara, F., *Prog. Theor. Exp. Phys.* **123E01** (2013).
- [4] Decroisette, M., Peyraud, J., & Piar, G., *Phys. Rev. A*, **5**, 1391 (1972).
- [5] Tanaka, S. J., Asano, K., & Terasawa, T., *Prog. Theor. Exp. Phys.* **073E01** (2015).
- [6] Kiriyama, H. et al. *Opt. Lett.* **43**, 2595 (2018)
- [7] Hung, T.-S., et al., *Appl. Phys. B: Lasers and Optics* **177**, 1189 (2014)
- [8] Kawanaka, J., et al., *Journal of Physics Conference Series*, **112**, 032006 (2008)
- [9] Arikawa, Y., et al., *Appl. Opt.* **55**, 6850 (2016)
- [10] Galeev, A. A., & Syunyaev, R. A., *Soviet Phys. JETP*, **36**, 669 (1973)