



18 異常ブルーシフトのメカニズムの解明 Elucidation of the mechanism for anomalous blueshift

小瀧秀行¹、神門正城¹、J. K. Koga¹、中島一久^{1,2,3}

H. Kotaki¹, M. Kando¹, J. K. Koga¹, K. Nakajima^{1,2,3}

¹ 日本原子力研究所光量子科学研究センター

Advanced Photon Research Center, Japan Atomic Energy Research Institute

² 高エネルギー加速器研究機構

High Energy Accelerator Research Organization

³ 総合研究大学院大学光科学専攻

Department of Photo Science, The Graduate University for Advanced Studies

概要

高強度レーザーは、ガス中での自己収束およびプラズマ化にともないレーザー周波数のブルーシフトを起こす。ガス密度やレーザーパワーに依存せず、レーザーの全フォトンが一定の周波数にブルーシフトを起こす異常ブルーシフトを発見し、これについての研究を行った。反射型のレンズを用いた場合、周波数シフト量はプラズマのイオン化率が大きく影響するが、透過型のレンズを用いた場合は、色収差の影響によりレーザーのパルス幅の影響が大きくなる。さらに、シフト量は集光点でのイオン化の価数によって変化し、価数が高くなるほどシフト量が大きくなることを発見した。

1. 研究目的

現在の加速器施設は、SPring-8のような巨大ものとなっている。しかし、レーザーによるプラズマ振動を用いることにより加速勾配は現在の加速器の100~1000倍となり、加速器を小型化することが可能となる。このレーザー加速には、1本の高強度レーザーを用いて行うウェーク場加速[1,2]や周波数のわずかに違う2本のレーザーのビートによる粒子加速（ビート波加速）[1,3]が提唱されている。ビート波の位相速度は、2本のレーザーが同一方向のときはほぼ光速であり、対向するときはレーザーの周波数差で決定される。遅い速度の粒子加速はレーザーを対向させることで可能となるが、周波数差をつくることの困難さや、レーザーを2本使うために起こるタイミングジッターやポジションの安定性の問題のため進展していない。

レーザーが自己集束[4]をとめないガスをイオン化する過程において、レーザー周波数のアップシフト（ブルーシフト）が起こる[5-11]。一般に知られているブルーシフトは、ガスの密

度やレーザーパワーに依存し、レーザーのフォトンの1部のみがブルーシフトをする。この通常のブルーシフトは、他の研究所や大学等でも観測されている。しかし、我々は世界で初めて、ガス密度やレーザーパワーに依存せず、レーザーの全フォトンが一定の周波数にブルーシフトを起こす異常ブルーシフトを発見した[12,13]。この現象は、レーザーの自己組織化によると考えられるが、詳しくは分かっていない。実験研究を進めデータを蓄積することにより、この異常ブルーシフトのメカニズムを解明する。この異常ブルーシフトのメカニズムの解明により、上に述べたビート波加速のコントロールが可能となり、次の応用が考えられる。

(プラズマ中の電子加速)

プラズマ中の電子を位相速度の遅いビート波でウェーク場にインジェクションし、高エネルギーに加速する[14,15]。周波数干渉計[16,17]と組み合わせることにより、プラズマ中の電子のトラップ&加速が可能となる。この方法を使うことにより、これまでには得られなかった、高品質・超短パルス・高ピーク電流の電子ビームが生成できる。

2. 研究内容

2.1 はじめに

超短パルスレーザーの開発により、レーザーの電場によるプラズマ生成が可能となり、さまざまな大学や研究機関でレーザープラズマに関する研究が進められている。高強度超短パルスレーザーをガス中で集光すると、光電場によるイオン化(OFI : Optical Field Ionization)[18,19]によりプラズマ化する。自己集束の臨界パワー以上においては、自己集束をともないながらプラズマ化が起こる[4]。ガスフィルチャンバー内でレーザーを集光してやると、自己集束をともないながらのプラズマ化が起こり、レーザーのブルーシフトが起こる[5-11]。一般に知られているブルーシフトは、ガスの密度やレーザーパワーに依存し、レーザーのフォトンの1部のみがブルーシフトをするが、我々は、ガス密度やレーザーパワーに依存せず、レーザーの全フォトンが一定の周波数にブルーシフトを起こす異常ブルーシフトを発見した[12,13]。この現象は、レーザーの自己組織化によると考えられるが、詳しくは分かっていない。レーザーのパワー、ガスの密度、集光距離、レーザーのパルス幅といったパラメーターを変化させ、ガス密度やレーザーパワーに依存せず、レーザーの全フォトンが一定の周波数にブルーシフトを起こす異常ブルーシフトの発生条件について調べ、実験研究を進めデータを蓄積することにより、この異常ブルーシフトのメカニズムを解明する。この結果と理論を比較し、異常ブルーシフトのメカニズムの解明を行う。

2.2 理論的見解

レーザーが自己収束する条件において、レーザーによるガスのプラズマ化にともなって、レーザーのブルーシフトが起こる。ブルーシフトした後のレーザー周波数 ω_s は、シフト前のレー

レーザー周波数 ω_0 、シフト前のレーザー波長 λ_0 、イオン化の密度勾配の距離 (Gradient scale length) L_0 により、次のように表される[12,13]。

$$\omega_s = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{\lambda_0}{2L_0}} \quad (1)$$

L_0 が決定されれば、ブルーシフト後の周波数が決定される。この L_0 の値としては、次の4つのケースが考えられる (図1参照)。

- (1) OFIのイオン化率 W により決定 $L_0 = W^{-1}$
- (2) レーザーパルス幅の半値半幅 $L_0 = \tau_L c / 2$
- (3) レーザーパルスの $1/e^2$ 幅の半分 $L_0 = 0.85 \tau_L c$
- (4) (2)と(3)の間

どのケースになるかは、レーザーのフォーカス等の光学系によって決定される。

このブルーシフトを調べるため、ガスを充填したチャンバー中でレーザーを集光し、集光後のレーザーの波長の変化を測定した。

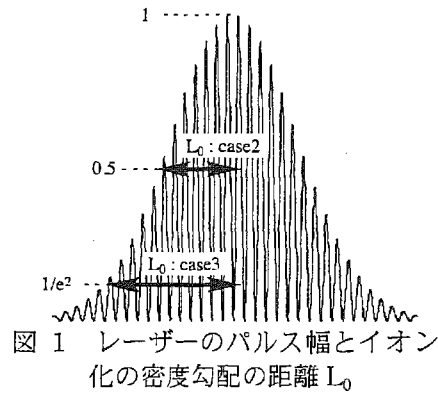


図1 レーザーのパルス幅とイオン化の密度勾配の距離 L_0

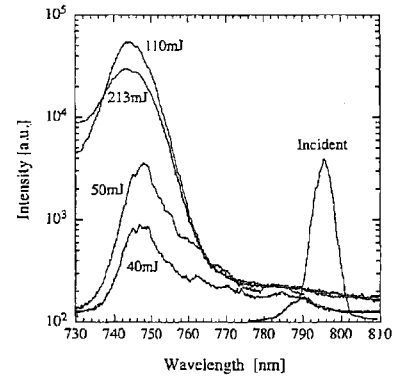


図2 反射型レンズを用いた場合の入射スペクトルとヘリウム400Torrにおけるブルーシフトスペクトル

3. 研究結果

3.1 Off-Axis-Parabolic ミラー (OAP) によるブルーシフト

反射型のレンズを用いているため色収差がなく、さらに自己収束により集光点でのレーザー強度分布が一様になる場合には、case1 に示した OFI のイオン化率 W により

$$L_0 = W^{-1} \quad (2)$$

$$W [s^{-1}] = 1.61 \omega_{au} \frac{Z^2}{n_{eff}^2} \left[10.87 \frac{Z^3}{n_{eff}^4} \frac{E_{au}}{E_L} \right] \exp \left[-\frac{2}{3} \frac{Z^3}{n_{eff}^3} \frac{E_{au}}{E_L} \right] \quad (3)$$

で表される。ここで、 $\omega_{au} = 4.1 \times 10^{16} s^{-1}$ は単位原子の周波数、 $E_{au} = 0.51 TV/m$ は単位原子の電場の強さ、 $E_L [TV/m] = 2.7 \times 10^{-9} \sqrt{I [W/cm^2]}$ はレーザー電場の強さ、 $n_{eff} = Z / \sqrt{U_i / U_H}$ は有効量子数、 Z はイオンの電荷、 U_i はイオン化ポテンシャル、 $U_H = 13.6 eV$ は水素原子のイオン化ポテンシャルである。ヘリウムガスのイオン化ポテンシャルから L_0 を計算すると、 $L_0 = 3.2 \mu m$ (10.7fs) が求まり、これより $\Delta\lambda/\lambda = 6\%$ となる。

図2に、フォーカス距離 $f = 500 mm$ のOAPにより、400Torrのヘリウムに、中心波長 $793 nm$ ・パルス幅100fsのチタンサファイアレーザーを集光したときのブルーシフトしたレーザー波長を

示す。レーザーは、レーザーエネルギーに関係なく746nmに $\Delta\lambda/\lambda=6\%$ でシフトしており、理論値と一致する。

3.2 凸レンズによるブルーシフト

パルス幅 100fs・中心波長 795nm (図3参照)・入射レーザーの直径 $D=45\text{mm}$ のチタンサファイアレーザーを用いて、ガスの種類・ガスの密度 n_g ・レーザーのエネルギー E ・レーザーのフォーカス距離 f をパラメーターとして、凸レンズを通してレーザーをフォーカスしたときのブルーシフトを調べた。凸レンズを用いての集光の場合、色収差が出るため、2.2 節のケース2~4 になることが予想され、式(1)より、ケース2の場合785nmへシフト、ケース3の場合790nmへシフトする。

図4に $f=500\text{mm}$ 、 $n_g=400\text{Torr}$ 、 $E=100\text{mJ}$ でのレーザーのブルーシフトしたスペクトルを示す。シフト量より、ヘリウムの場合はケース3、アルゴンおよび窒素の場合はケース2に一致している。この差は、ヘリウムのイオン化の Threshold がアルゴンや窒素に比べて大きいためであり、 f を短くするとヘリウムガスでもケース2に一致する (図5参照)。アルゴンおよび窒素においても f によるシフト量の変化を調べた。図6に、アルゴンおよび窒素の $n_g=400\text{Torr}$ 、 $E=100\text{mJ}$ でのブルーシフトスペクトルを示す。 f が短い場合はケース2と一致し、 f が長くなるとケース2と3の混合状態 ($f=700\text{mm}$) を経てケース3と一致している。 $f=700\text{mm}$ においては、レーザーエネルギーが低い場合にはケース3、高い場合にはケース2と3の混合状態となっている。シフト量がケース2と3の間(ケース4)の値をとらずに混合状態となるのは、色収差や分布の不均一の差により、ケース2 (785nmへシフト) になる部分とケース3 (790nmへシフト) になる部分が混在したためと考えられる。

$f=500\text{mm}$ 、 $n_g=400\text{Torr}$ でのレーザーエネルギーを

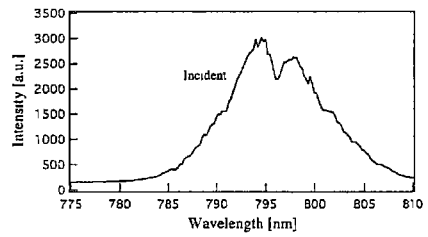


図3 透過型レンズを用いた実験における入射スペクトル

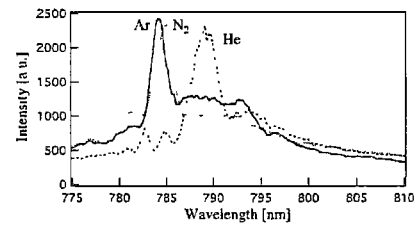


図4 $f=500$, $E=100\text{mJ}$, $n_g=400\text{Torr}$ でのブルーシフトスペクトル

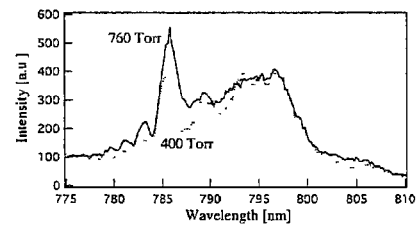
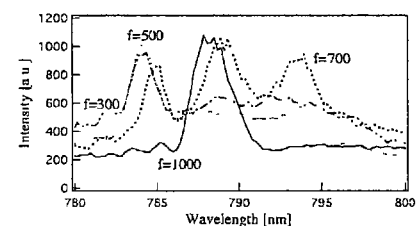
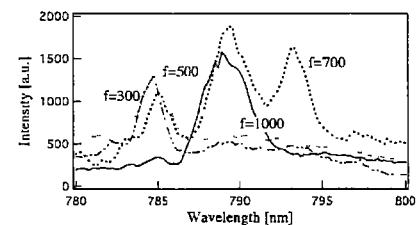


図5 ヘリウムを用いたときの $f=300$, $E=100\text{mJ}$ でのブルーシフトスペクトル



(a)



(b)

図6 (a)アルゴンおよび(b)窒素を用いた場合の、 $n_g=400\text{Torr}$ 、 $E=100\text{mJ}$ でのさまざまな f におけるブルーシフトスペクトル

表1 イオン化のしきい値 [W/cm²]

	1価	2価	3価	4価
アルゴン	2.5×10^{14}	3.6×10^{15}	2.2×10^{16}	6.3×10^{17}
ヘリウム	1.5×10^{15}	3.9×10^{16}	-	-

変化させた場合のアルゴンおよび窒素を用いた場合のブルーシフトスペクトルを図7に示す。エネルギーが低い場合はケース3と一致し、エネルギーが上がるにつれてケース4になる。さらにエネルギーが上がるとケース2と一致している。図6のf=700mmのような混合状態にならないのは、f=500mmがf=700mmより短焦点のため、色収差や分布の不均一による影響が小さいからであると考えられる。

アルゴンのガス密度を変化させたときのブルーシフトスペクトルを図8に示す。図のようにガス密度による影響は、fやEに比べて非常に小さい。ガス密度はレーザーの自己収束力に影響するが、レーザーパワーが自己収束の臨界パワーを越えてブルーシフトの条件を満たせば、レンズによる集光を行っているため、fやEの方がプラズマ化に大きく影響するためである。

シフト量には、Eとfが大きく係わっていることより、レンズによる集光での集光強度が大きく影響していると考えられる。集光強度によってイオン化の価数は決定され、集光点での価数が低い場合は低集光状態からイオン化していくのでL₀が長く(ケース3)、価数が高い場合は高集光状態から多価イオンになるのでL₀が短く(ケース2)となる。アルゴンおよびヘリウムのイオン化のしきい値を表1に、集光点でのスポットサイズw₀をF=f/Dの3倍と仮定したときのアルゴンおよびヘリウムのイオン化の価数とシフト位置とのプロットを図9に示す。窒素は、シフトの傾向・イオン化の価数ともアルゴンとほぼ同じである。図に示した通り、アルゴンの場合は2価と3価で、ヘリウムの場合は1価と2価でシフト量に変化している。価数が

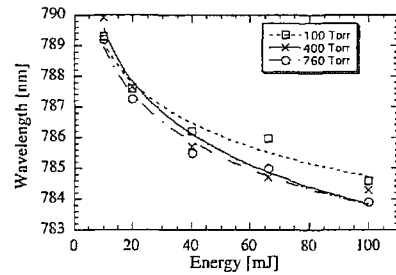


図7 アルゴンを用いた場合の、f=500でのさまざまなEにおけるブルーシフトスペクトルの変化

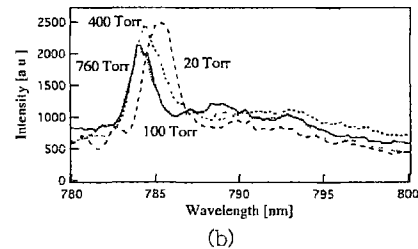
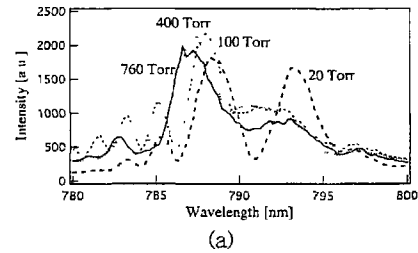


図8 アルゴンを用いた場合の、f=500でのさまざまなn_gにおける(a)E=20mJ、(b)E=100mJのブルーシフトスペクトル

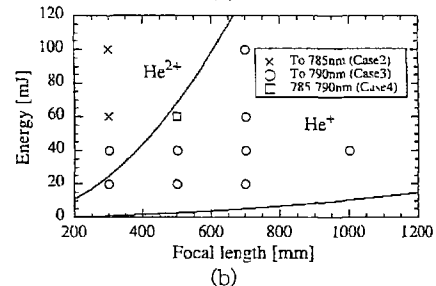
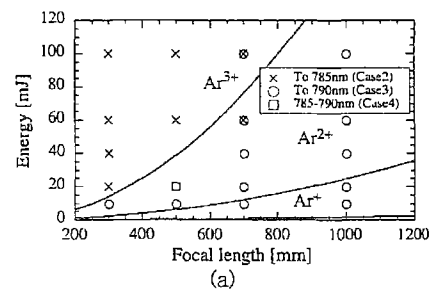


図9 (a)アルゴンおよび(b)ヘリウムでの周波数シフト量とイオン化の価数

変化することにより、イオン化に必要な強度が変化し、 L_0 が変化したためである。

3. まとめ

高強度レーザーが自己集束をとめないガスをイオン化する過程において、レーザー周波数のブルーシフトが起こる。ガス密度やレーザーパワーに依存せず、レーザーの全フォトンが一定の周波数にブルーシフトを起こす異常ブルーシフトを発見し、この現象についての実験的研究を行った。反射型のレンズを用いた場合にはレーザー周波数のシフト量はプラズマ化のイオン化率に大きく依存し、透過型レンズを用いた場合にはレーザーのパルス幅に大きく依存し、この場合のシフト量は集光点でのイオン化の価数により決定される。

参考文献

- [1] T. Tajima and J. M. Dawson, *Phys. Rev. Lett.* **43**, 267 (1979).
- [2] K. Nakajima, D. Fisher, T. Kawakubo, H. Nakanishi, A. Ogata, Y. Kato, Y. Kitagawa, R. Kodama, K. Mima, H. Shiraga, K. Suzuki, K. Yamakawa, T. Zhang, Y. Sakawa, T. Shoji, Y. Nishida, N. Yugami, M. Downer, and T. Tajima, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 4428 (1995).
- [3] Y. Kitagawa, T. Matsumoto, T. Minamihata, K. Sawai, K. Matsuo, K. Mima, K. Nishihara, H. Azechi, K. A. Tanaka, H. Takabe, and S. Nakai, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 48 (1992).
- [4] P. Sprangle, E. Esarey, and A. Ting, *Phys. Rev. A* **41**, 4463 (1990).
- [5] E. Esarey, G. Joyce, and P. Sprangle, *Phys. Rev. A* **44**, 3908 (1991).
- [6] S. C. Wilks, J. M. Dawson, W. B. Mori, T. Katsouleas, and M. E. Jones, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 2600 (1989).
- [7] B. M. Penetrante, J. N. Bardsley, W. M. Wood, C. W. Siders, and M. C. Downer, *J. Opt. Soc. Am. B* **9**, 2032 (1992).
- [8] S. C. Rae, and K. Burnett, *Phys. Rev. A* **46**, 1084 (1992).
- [9] W. M. Wood, G. B. Focht, and M. C. Downer, *Opt. Lett.* **13**, 984 (1988).
- [10] S. P. LeBlanc, R. Sauerbrey, S. C. Rae, and K. Burnett, *J. Opt. Soc. Am. B* **10**, 1801 (1993).
- [11] C. W. Siders, N. C. Turner III, M. C. Downer, A. Babine, A. Stepanov, and A. M. Sergeev, *J. Opt. Soc. Am. B* **13**, 330 (1996).
- [12] J. K. Koga, N. Naumova, M. Kando, L. N. Tsintsadze, K. Nakajima, S. V. Bulanov, H. Dewa, H. Kotaki, and T. Tajima, *Phys. Plasmas* **7**, 5223 (2000).
- [13] H. Kotaki, JAERI-Research 2002-031, Chapter 3 (2002).
- [14] E. Esarey, R. F. Hubbard, W. P. Leemans, A. Ting, and P. Sprangle, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 2682 (1997).
- [15] C. B. Schroeder, P. B. Lee, J. S. Wurtela, E. Esarey, and W. P. Leemans, *Phys. Rev. E* **59**, 6037 (1999).
- [16] H. Kotaki, M. Kando, T. Oketa, S. Masuda, J. K. Koga, S. Kondo, S. Kanazawa, T. Yokoyama, T. Matoba, and K. Nakajima, *Phys. Plasmas*, **9**, 1392 (2002).
- [17] H. Kotaki, JAERI-Research 2002-031, Chapter 4 (2002).
- [18] L. V. Keldysh, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **47**, 1945 (1964) [*Sov. Phys. JETP* **20**, 1307 (1965)].
- [19] M. V. Ammosov, N. B. Delone, and V. P. Krainov, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **91**, 2008 (1986), [*Sov. Phys. JETP* **64**, 1191 (1986)].