دراسة توسع العتمة لأيونات شبيهة الهليوم في بلازما الالمنيوم المنتجة بواسطة الليزر

*نبيل جنان بهنام**

استلام البحث 28، ايلول، 2009
قبول النشر 29، اذار ، 2010

الخلاصة:
تم أجراء دراسة تحليله لدراسة توسع العتمة الحاصلة للخطوط الطيفية المنبعثة من بلازما الألمنيوم المنتجة بواسطة ليزرNd-YLF تراوحت كثافة البلازما المدروسة بين m^{-3} (10^{26}-10^{28}) وطول البلازما حوالي 300μm و تمت دراسة العتمة كدالة لكل من كثافة البلازما والعدد الكمي الأساسي لمستويات الطاقة للخطوط الطيفية المنبعثة , أظهرت النتائج زيادة مقدار توسع العتمة بزيادة كثافة البلازما وكذلك كلما قل الفرق بين مستويات الطاقة للخطوط الطيفية المنبعثة.

الكلمات المفتاحية:laser produced plasma, opacity, plasma, LPP, laser

المقدمة:
تتميز البلازما المنتجة بالليزر ببعض الصفات التي تميزها عن بقية أنواع البلازما أهمها أن الاشعاعات المنبعثة منها تكون ذات أطوال موجة قصيرة تصل إلى بضع مئات من المايكرو متر(several hundred of μm) وذات درجة حرارة عالية تقدر بحوالي 0.1-10 Kev وكثافة عالية تصل إلى أكثر من cm^{-3} 10^{24}[3,2,1] وتكون ذات درجة عالية جداً من التأين بحث أنها تكون تقريبا شبه متاينة بصورة كاملة.أن مثل هذه المادة ذات درجة الحرارة والكثافة العالية والتأين شبة التام تبعث إشعاعات في مناطق مختلفة من الطيف مثل x-ray, ultraviolet, visible, infrared, etc.. [4] وتعتبر هذه الأشعة ذات أهمية كبيرة وخصوصا تلك التي تبعث منها في منطقة ال x-ray إذ أنها تعتبر واحدة من أهم مصادر إنتاج ال x-ray الحديثة ذات الشدة العالية والتي تدخل في العديد من التطبيقات مثل الطباعة الالكترونية (lithography),الميكروسكوب البايولوجي (microscopy),الدراسات البايلوجية (studies biology) ,الإنماء البلوري (crystallography), وفي الفيزياء الذرية والفيزياء الصلبة (atomic and solid state physics)[5].وبصورة عامة فأن هذه الأشعة المنبعثة من داخل البلازما تنتج إما من الانتقالات المقيدة بين مستويات الطاقة (bound–bound transitions) والتي ينتج عنها طيف خطي (spectral line) أو الانتقالات الحرة (– Free Free transitions) وينتج عن مثل هذه الانتقالات طيف مستمر(continuous spectra) [6]. أن الخطوط ألطيفة الناتجة من الانتقال بين مستويات الطاقة (bound–bound transitions) يحدث فيه توسعات (broadening) تؤدي هذه التوسعات إلى حدوث تشوه في شكل الخط الطيفي (deformation of spectral line shape) وكذالك تؤدي إلى نقصان شدة هذه الخطوط الطيفية المنبعثة[7]. وبصورة عامة توجد ثلاث أنواع من التوسعات (broadening) التي تحصل للخطوط الطيفية المنبعثة من بلازما الليزر(LPP)[8] وهي: أولاً توسع دوبلر (Doppler broadening) والذي ينتج عن التصادمات بين جسيمات البلازما ويعتمد على الطاقة الحركية للجسيمات المتصادمة ودرجة حرارة البلازما ,ثانياً توسع ستارك (Stark broadening) والذي ينتج عن المجالات الكهربائية للجسيمات المشحونة وثالثاً توسع العتمة (opacity broadening) أو أحيانا يسمى توسع العمق البصري للبلازما (optical depth of plasma وينتج هذا التوسع عن أعادة من امتصاص البلازما للأشعة المنبعثة من منها. أن توسع دوبلر يلاحظ في درجتي الحرارة والكثافة المنخفضتين أما توسعي ستارك وتوسع الامتصاصية فيلاحظان في درجات الحرارة والكثافة العاليتين[9] .

توسع الامتصاصية(Opacity broadening):
أن الأشعة المنبعثة من البلازما تملك ثلاث احتمالات إما أن تنفذ بدون امتصاص أو تتشتت وتمتص جزئياً أو إن تمتص كلياً ولاتخرج من البلازما . يعتبر توسع الامتصاصية واحدة من أهم التوسعات التي تحدث للخطوط الطيفية لبلازما الليزر وخصوصاً في درجات الحرارة والكثافة

*جامعة بغداد/كلية العلوم للبنات/قسم الفيزياء

العاليتين كما اشرنا سابقا ,يمكن تعريف العتمة (opacity) بأنها أعادة امتصاص البلازما للأشعة المنبعثة من داخلها قبل مغادرتها للبلازما ولذلك فأن توسع الامتصاصية يطلق عليه أحيانا توسع أعادة الامتصاص (re-absorption) أو العمق البصري (optical depth)[6],وتعطى الامتصاصية (τ) بالعلاقة الآتية[10]:

$$\tau = \kappa\, l \quad .....(1)$$

حيث l طول البلازما

κ معامل الامتصاص الخطي والذي يعطى بالعلاقة التالية [11] :

$$\kappa = \frac{c^2}{8\pi\upsilon^2} A(p,q)\left[\frac{g_p}{g_q}\left(N_q - N_p\right)\right]\left[\int_{-\infty}^{+\infty}\phi(\upsilon)d\upsilon\right]^{-1} \quad .....(2)$$

حيث c سرعة الضوء $c=3\times10^8\ m/c$

υ تردد الأشعة المنبعثة من البلازما (Hz)

A معدل لانحلال التلقائي (spontaneous radiative decay rate) (s^{-1})

g_q, g_p هما الوزن الإحصائي للمستويين العلوي والسفلي لمستويات الطاقة على التوالي N_q,N_p هما كثافة المستويين العلوي والسفلي على التوالي (m^{-3})

$\left[\int_{-\infty}^{+\infty}\phi(\upsilon)d\upsilon\right]^{-1}$ يمثل شكل الخط الطيفي (line profile)

حيث نلاحظ من المعادلة (2) بأن معامل الامتصاص الخطي يعتمد بصورة على كل من تردد الخط الطيفي المنبعث υ , كثافة البلازما (N_q , N_p) وعلى معدل الانحلال التلقائيA (spontaneous radiative decay rate) والذي يعطى بالعلاقة التالية[6]:

$$A(p,q) = \frac{2\pi^2 e^2 \upsilon^2}{\pi\varepsilon_o m c^3} \times \frac{g_p}{g_q} \times f \quad .....(3)$$

حيث f هو شدة المتذبذب (oscillator strength) والذي يعطى بالعلاقة الاتية[9]:

$$f = 1.962\frac{n_2 {n_1}^3}{({n_1}^2 - {n_2}^2)^3} \quad .....(4)$$

حيث n_1 و n_2 العدد الكمي الاساسي للمستويين السفلي والعلوي على التوالي.

أما شدة الأشعة المنبعثة من البلازما فتعطى بالعلاقة الآتية[5]:

$$I = I_o\,(1 - e^{-\tau}) \quad .....(5)$$

حيث I_o تمثل شدة الأشعة المنبعثة من داخل البلازما

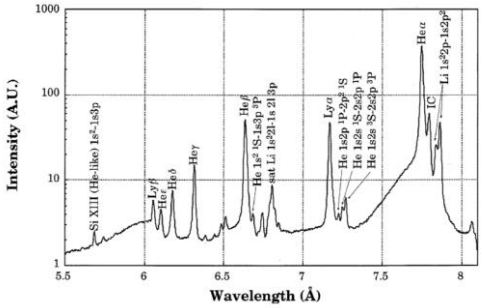
I تمثل شدة الأشعة التي تخرج من البلازما

آذ نلاحظ من المعادلة (5) بان شدة الخطوط الطيفية المنبعثة تعتمد بصورة أساسية على مقدار الامتصاصية الحاصلة لها. بصورة عامة فأن البلازما يمكن تقسيمها إلى ثلاثة أنواع تبعاً لمقدار الامتصاصية الحاصلة داخلها وهي[11] البلازما المنفذة للأشعة (optically thin plasma) وتسمى أيضا البلازما المنفذة بصريا وفي هذه الحالة فان لبلازما تسمح لجميع الأشعة المنبعثة من داخلها بالهروب إلى الخارج دون حدوث امتصاص لها تقريباً أو إن الامتصاصية الحاصلة تكون في حدود الإهمال وتحدث هذه الحالة عندما تكون قيمة الامتصاصية (τ) اصغر آو تساوي واحد $\tau \le 1$ [2]وهذه الحالة تحدث في البلازما قليلة الكثافة اما النوع الثاني من البلازما فيسمى البلازما المعتمة للأشعة (optically thick plasma) او البلازما المعتمة بصرياً وفي هذة الحالة فان البلازما تمتص جميع الأشعة المنبعثة من داخلها وتكون مشابهة للجسم الأسود (black body) حيث تكون قيمة لامتصاصية $\tau >> 1$[6],اما النوع الاخير من البلازما فيسمى البلازما المنفذة جزئياً (partially optically thin plasma) وهي الحالة الشائعة وفي هذه الحالة فان قيمة الامتصاصية (τ) اكبر من الواحد ولكن ليس بالحد الكبير بحيث الذي يجعلها تمتص جميع الأشعة المنبعثة منها بحيث أن هناك مقدار من الأشعة تنفذ إلى الخارج وتعتمد شدة هذه الأشعة المنبعثة بصورة أساسية على درجة الحرارة ,كثافة,وطول البلازما[12] وكذلك تعتمد احتمالية الانتقال (A) للخطوط الطيفية المنبعثة.أن دراسة توسع الامتصاصية (opacity broadening) في البلازما المنتجة بالليزر (LPP) لها أهمية كبيرة في تحديد متغيرات البلازما(plasma parameter) مثل درجة حرارة الالكترونات (electron temperature) ,كثافة الالكترونات (electron density),شدة الخطوط الطيفية المنبعثة (intensity of spectral lines) وكذالك شكل الخط الطيفي (spectral line shape)[13].

الحسابات:

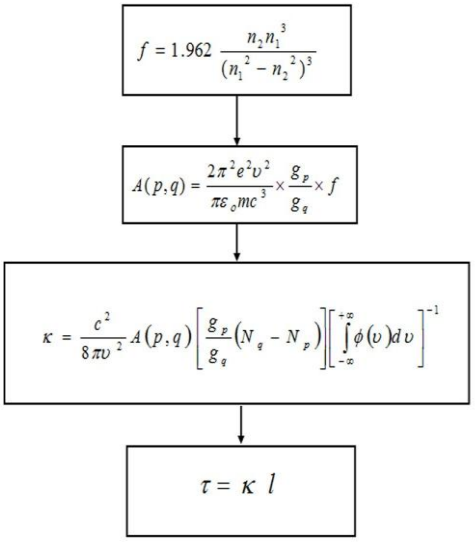
تم أجراء دراسة تحليله للخطوط الطفية ودراسة توسع العتمة (opacity broadening) لبلازما الألمنيوم التي تم الحصول عليها من قبل الباحث (**L. Labate**) [14] والناتجة من

تسليط ليزر Nd-YLF ذو الطول الموجي (Å 1.035=λ) , وأمد نبضة (3 ns) وطاقة تقدر بحوالي (3 J) بحيث كانت شدة القدرة الليزر الخارجة (out put power intensity) أكثر من (5×10^{14} W/cm^2), والذي أدى إلى تكوين بلازما بدرجة حرارة كانت تراوحت بين (eV 650-180) وكثافة (10^{26}-10^{28} m^{-3}) [14] .



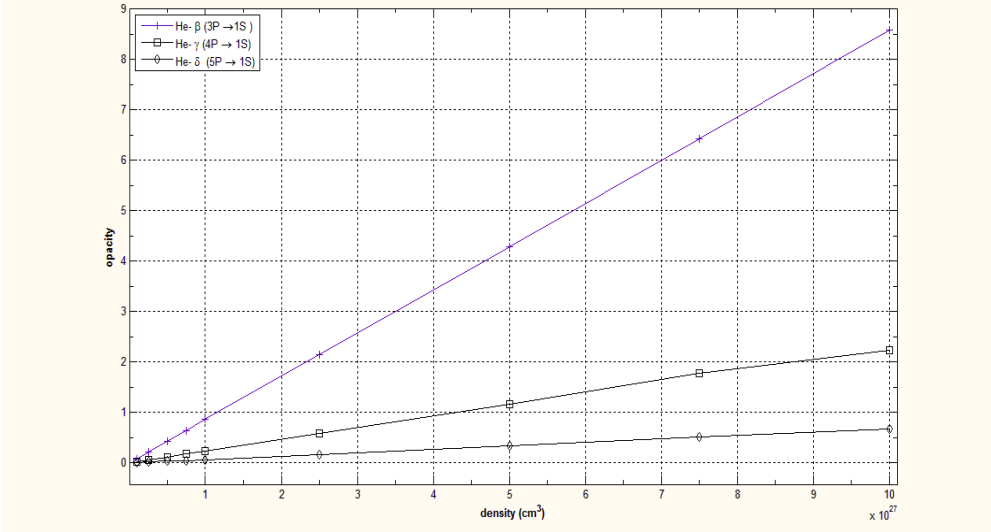
شكل (1): بلازما الألمنيوم التي تم الحصول عليها من قبل الباحث (*L. Labate*)[14].

استخدم برنامج matlab8 لتصميم برنامج code اطلق عليه (opacity3n), وهو برنامج بسيط كتب بصيغة M-file لحساب قيمة الامتصاصية الحاصلة في الخطوط الطيفية المنبعثة من البلازما, حيث يعمل برنامج (opacity3n) ببرامجه الفرعية على حساب كل من شدة المتذبذب (oscillator strength) f , احتمالية الانتقال (A), عرض الخط الطيفي عند المنتصف (FWHM)[15] ومن ثم حساب معامل الامتصاص (κ), وأخيرا فأن هذا البرنامج يقوم بحساب مقدار قيمة العتمة (τ) ومن ثم ارسال النتائج الى البرنامج الرئيس لرسم الامتصاصية كدالة للكثافة وعرض النتائج. أن هذه الحسابات كانت تجرى لجميع الخطوط الطيفية وكما موضح في المخطط ادناه.



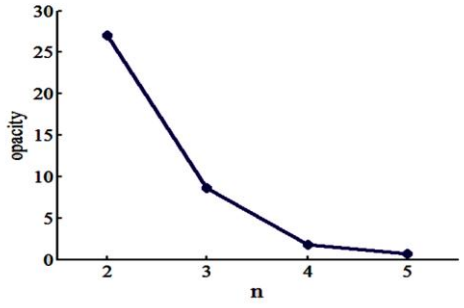
مخطط (1): يوضح الية عمل البرناج المستخدم في حساب العتمة τ

اختيرت الخطوط الطيفية المدروسة في منطقة الأشعة السينية المرنة (soft x-ray region) والتي لها الكثير من التطبيقات خصوصاً في المجال البايلوجي (biology field) ,تم حساب مقدار العتمة (τ) كدالة لكثافة البلازما لايونات الألمنيوم (AlXII (helium –like)) و لثلاثة انتقالات وهي: He-β (3P→1S) بطول موجي Å 6.63=λ , He-γ (4P→1S) ذي طول موجي 6.322Å = λ و He-δ (5P→1S) بطول موجي 6.117 Å =λ وكان طول البلازما تقريباً l≈300μm وكما في الشكل أدناه (2).



شكل(2): العتمة كدالة للكثافة للخطوط الطيفية المدروسة لبلازما الالمنيوم

كما تم حساب مقدار توسع الامتصاصية كدالة للعد الكمي الأساسي (n principle quantum number) كما في لشكل (3).



شكل رقم (3) العتمة τ كدالة للعد الكمي الاساسي.

المناقشة:

أظهرت النتائج بأن بلازما الألمنيوم عند كثافة تتراوح بين (10^{26}-10^{28} m^{-3}) وبطول $l\approx300\mu m$ تكون بلازما منفذة للأشعة جزئياً (partially optically thin plasma) وان امتصاصيتها تزداد بزيادة كثافة البلازما والذي يمكن تفسيره بأن زيادة الكثافة يعني زيادة عدد الجسيمات المتأينة ضمن حجم البلازما المتكونة وهذا يؤدي إلى زيادة عدد تصادمات الأشعة التي تحاول الهروب من البلازما مع الجسيمات المحيطة بها مما يؤدي إلى زيادة احتمالية امتصاصية هذه الأشعة وبالتالي يؤدي إلى نقصان شدة الأشعة المنبعثة[12] .

كما لوحظ إن مقدار العتمة يزداد كلما قل الفرق بين مستويات الطاقة الابتدائية والنهائية للخطوط الطيفية المنبعثة وهذا ينتج من أن زيادة الفرق بين مستويات الطاقة يؤدي إلى زيادة نقصان تردد الأشعة المنبعثة والذي يؤدي بدوره إلى نقصان طاقة هذه الأشعة مما يؤدي إلى امتصاصها جزئياً أو كلياً[17,16] اعتماداً على حالة البلازما وظروف التجربة.

المصادر:

1. Chen F. Francis. 1984. Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion. Plenum Pub Corp,2nd,421.
2. Sabeeh. S. H, 2000.some Radiative Processes Produced from laser plasma interaction. Ph.D. Thesis, University of Technology, Department of applied Sciences.
3. Hora. H, 2000. Plasmas at high temperature and density. Springer, Heidelberg, Regensburg University, 2nd, 456.
4. Rymell. L, 1997. New laser-plasma source for microscopy and lithography. PhD. Thesis, Department of Physic, Lund Institute of Technology, Sweden.
5. AL-Hadithi .Y. M. R, 1995. Uniformity and energy transport in x-ray laser plasma. Ph.D. Thesis, Department of Physics, University of Essex.
6. Griem, H.R. 1997. *Principles of Plasma Spectroscopy*. Cambridge University Press, UK,366.
7. Griem. H. R., 1974. Spectral line broadening by plasmas, New York: Academic Press,410.
8. McWhirter. R. W. P., 1965.Plasma Diagnostic Techniques, Academic, New York,627.
9. Key. M.H., 1985. Introduction to the physics and application of laser produced plasmas, "Laser plasma Interactions" V3 Editor by M.B. Hooper (University of Edinburgh), 14(1) :234-245.
10. Pestehe. S.J, G.J. Tallents, 2002. Escape factors for laser-plasmas , J. Quant. Spect. Rad. Trans, 72(6): 853-878.
11. Rahman Ismiel Mahdi, 2006. Analytical Study of Opacity and Escape Factor in Laser Produced Plasma. M.S.c thesis, Department of applied sciences. University of Technology.
12. Griem .H. R, 2000. Stark Broadening of the Hydrogen Balmer-a Line in Low and High Density Plasma.Contrib. Plasma Phys. 40(1-2): 46-56.
13. Donald Umstadter, 2003. Relativistic laser–plasma interactions. J. Phys. D: Appl. Phys. 36 (8) :R127-R150.
14. Labate .L, Galimberti .M, Giulietti .A, Giulietti. D, Gizzi .L.A, NUMICO. R, & SALVETTI. A, 2001. Line spectroscopy with spatial resolution of laser–plasma X-ray

16. Rosmej .F. B. 2001. Observation of two-electron transitions in dense non-Maxwellian laser-produced plasmas and their use as diagnostic reference lines, J. Quant. Spect. Rad. Trans, 71(2): 639-653.
17. Rosmej. F. B, 2000. The Heβ emission in dense non-Maxwellian plasmas, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **33**(1): L1-L9.
emission, Laser and Particle Beams, Cambridge University Press ULIA-2 Special Issue 19,(1) :117–123 .
15. Henke .B. L, Gullikson. E. M, and Davis. J. C, 1993. "X-Ray Interactions: Photoabsorption, Scattering, Transmission, and Reflection at *E* = 50-30,000 eV, *Z* = 1-92 ", At. Data Nucl. Data Tables, 54(2):181.

Study of opacity broadening in spectral lines for helium like ions in aluminum plasma which produced by laser

Nabil Janan Bahnam *

*Physics science department/College of science for women / University of Baghdad.

Abstract:

A theoretical analysis studied was performed to study the opacity broadening of spectral lines emitted from aluminum plasma produced by Nd-YLF laser. The plasma density was in the range (10^{26}-10^{28}) m^{-3} with length of plasma about (300μm) , the opacity was studied as function of plasma density & principle quantum number. The results show that the opacity broadening increases as plasma density increases & decreases with the spacing between energy levels of emission spectral line.