

حساب خرج ليزر النيكل الشبيه بالنيون المضح بشكل تصادمي كتابع لطول الهدف والفاصل الزمني وكذلك بعض الوسائط الأخرى باستخدام برامج المحاكاة

طالبة الماجستير ليلي عبد الحق¹
اشراف أ.م.د يوسف أبو علي²

ملخص البحث

درسنا بالتفصيل ليزر الأشعة السينية للنيكل الشبيه بالنيون عند الطول الموجي 23.1 نانومتر، باستخدام البرنامج EHYBRID6 ذو البعد 1.5 والمتضمن في الفيزياء الذرية والذي يعتبر البلازما كمنع. لقد قمنا بحساب البارامترات القابلة للقياس المباشر باستخدام برنامج ثلاثي الأبعاد RAYTRACE الذي يتبع مسارات العديد من أشعة الليزر الصادرة تلقائياً من البلازما مع الأخذ بالحسبان حالة الاشباع. قمنا بمحاكاة حاسوبية لحساب طاقة خرج ليزر الأشعة السينية للنيكل الشبيه بالنيون بتابعية طول الهدف (البلازما) وكذلك بتابعية الفاصل الزمني (من قمة إلى قمة) بين نبضتي الليزر المستخدمة والمؤلفة من نبضة أولية بعرض 280 ps والنبضة الأساسية بعرض 1.2 ps بيكو ثانية وذلك باستخدام كل من البرنامجين EHYBRID6 و RAYTRACE. كتابة برنامج جزئي ضمن

¹ طالبة ماجستير دراسات عليا – المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته – جامعة دمشق – سوريا.

² قسم الفيزياء – كلية العلوم – جامعة دمشق – سوريا.

برنامج EHYBRID6 لحساب الأطياف والإصدارية لبلازما النيكل والتي استخدمت مع برنامج ملحق (Post-Processor) لحساب شدة خط التجاوب (Resonance Line) لليزر النيكل الشبيه بالنيون. حيث قمنا بمحاكاة شدة كل من الإصدار التجاوبي والإصدار المستمر عن بلازما النيكل بين 1.45-0.9 nm باستخدام برنامج مطّور Post-processor يستخدم مع خرج برنامج EHYBRID6 المعدل.

الكلمات المفتاحية: ليزر الأشعة السينية، البلازما المولدة بالليزر، الليزر المثار بالطريقة التصادمية، شروط البلازما، برامج المحاكاة.

Calculation of Ne-like Ni collisionally pumped laser output as function of target length and pulses separation and other parameter by using simulation codes

Abstract

In this research has studied emission from laser-plasmas utilised for X-ray lasing produced by collisional excitation.

The Ne-like Ni X-ray laser at 23.1 nm is investigated in detail using the 1.5-dimensional fluid and atomic physics code EHYBRID6. Directly measurable parameters are calculated using the combined optical raytracing and saturation calculation code 3D RAYTRACE. The energy output of a Ne-like Ni X-ray laser as function of plasma length and the peak-to-peak time separation between the main pulse 1.2 ps and 280 ps background pulse simulated using a combination of the EHYBRID with RAYTRACE codes. The intensity of resonance line and continuum emission between 0.9 and 1.45 nm emitted from Nickel plasma are simulated using the development of a post-processor to the modified EHYBRID code.

Key words: X-Ray laser, laser-produced plasma, collisionally excitation laser, Plasma conditions, simulation codes.

1. مقدمة (Introduction):

لقد بدأ توليد البلازما والتفاعل معها بواسطة ليزرات ذات طاقات عالية منذ اختراع الليزر عام 1960 ميلادي تقريباً. في حالة الليزر المنتج للبلازما، عندما تصطدم حزمة ليزرية شدتها عالية بهدف صلب سوف تولد بلازما ذات درجة حرارة عالية على سطح الهدف. حيث تتمدد هذه البلازما في الخلاء، وهكذا تتشكل بلازما تتراوح كثافتها من الخلاء إلى الكثافة الصلبة ودرجات الحرارة من مرتبة $(0.1-10)keV$. لقد كان ربط الليزر ذو الشدة العالية بالبلازما موضوع الأبحاث التجريبية لمدة 60 سنة الماضية. حيث ركزت التجارب على دراسة وقياس العديد من الظواهر مثل ظاهرة الطنين والامتصاص التصادمي ومنحني الكثافة والتغير في توزيع الجسيمات والنمو وإشباع عدم استقرار العديد من الوسائط. تعتمد هذه الظواهر على كل من خصائص الليزر (الشدة، طول الموجة، عرض النبضة، الترابط) وتركيب البلازما [1].

تعود العديد من المفاهيم الأساسية لليزرات الأشعة السينية إلى السبعينات من القرن الماضي، حيث لاحظ الفيزيائيون أنّ حزم الليزر المضخمة بواسطة الانقلاب الإسكاني في الأيونات ضمن البلازما تمتلك فوتونات ذات طاقة أعلى بكثير من الحزم المضخمة المستخدمة للذرات الحيادية في الغازات. يتطلب إنتاج ليزرات الأشعة السينية استخدام أوساط تضخيم مؤلفة من بلازما عالية التأين وذات درجات حرارة عالية والتي يتم الحصول عليها بتعريض سطح الهدف الصلب لنبضات ليزرية ذات شدات ضوئية عالية ويتم التحكم بهذه العملية بحيث نحصل على بلازما على شكل خط محرق (line focus) حيث تنتزع أشعة الليزر ذرات الهدف وتأيئها مولدة بلازما ذات درجات حرارة عالية وذات كثافة الكترونية تتناقص كلما ابتعدنا عن سطح الهدف. وبذلك نحصل على إسكان كبير في الحالات

الكمومية المثارة للسوية الليزرية العليا التي يتم منها الإصدار الليزري، فعمليات التضخيم والانقلاب الإسكاني تتم في الأيونات ضمن البلازما. وفي هذه الحالة نحصل على ليزرات بأطوال موجية قصيرة أقل من 50 nm التي لا يمكن الحصول عليها بالطريقة التقليدية المولدة لليزر وذات طاقات عالية جداً. فدرجات الحرارة العالية تتطلب أن يكون الوسط الفعّال المنتج لليزر هو بلازما.

يوجد العديد من المخططات للحصول على ليزر الأشعة السينية اللينة تجريبياً، ولكن برهنت طريقة الضخ التصادمي بأنها الطريقة الوحيدة المثبتة التي تعطي ربح عالي وهو النموذج الوحيد حتى هذا اليوم الذي أعطانا أقصر طول موجة ليزر مشبع وهو عند الطول الموجي 5.9 nm من أجل (Ni-like Dy) [2]. وهو النموذج المستخدم في هذا البحث.

إنّ البلازما المتولدة بواسطة ليزرات ضوئية ذات طاقة عالية التمرکز على أهداف الصلبة على شكل خط محرق تنتج ليزر أشعة سينية لينة مضخمة ومشبعة في مجال الأطوال الموجية (30 – 5.9) nm بواسطة الإثارة التصادمية [3-12]. يحدث إشباع الليزر عندما يبدأ الإصدار المحثوث باستنزاف الانقلاب الإسكاني وهو ضروري في عملية تطویر الليزر للحصول على خرج أعظمي ومردود ضخ مثالي. بعد التجارب الأولية المصممة لتوليد ليزر الأشعة السينية الغير مشبع المنتج باستخدام نبضات وحيدة من مرتبة النانو ثانية وطاقة خرج من مرتبة الكيلو جول "kJ" [13-14]، تهدف التجارب حالياً وبشكل متزايد إلى تقليص حجم الليزر الموجه الذي نحتاجه للحصول على ليزر مشبع [15-18]. ونقطة التحوّل الهامة التي تم ملاحظتها هي أنّ مردود الضخ يزداد عند استخدام نبضتي ليزر أو أكثر. إنّ النبضة الأولى ستؤدي إلى توليد بلازما أولية وتتبعها النبضة الرئيسية التي تمتص بكفاءة بحيث يكون الانكسار في نبضة ليزر الأشعة السينية صغير وحجم

منطقة الريح كبير [19-25]. وهذا سيضمن لنبضة ليزر الأشعة السينية أن تنتشر وتتضخم على طول كافٍ من البلازما وبذلك ستصل هذه النبضة إلى حد الإشباع قبل أن تنكسر حزمة ليزر الأشعة السينية خارج منطقة الريح. لقد مكّن استخدام الليزر ذو النبضة القصيرة من مرتبة البيكو ثانية من أن تكون طاقة الليزر الضروري لضخ عمليات إصدار الليزر في الأيونات كما في Ni-like silver منخفضة إلى عدة جولوات [26,27].

2. الهدف من البحث (Aim of Research):

1. الحصول على ليزر في المجال الطيفي للأشعة السينية اللينة (Soft X-Ray) باستخدام البلازما كوسط فعال بطريقة الإثارة التصادمية وذلك باستخدام برامج المحاكاة.

2. استخدام كل من برنامجي EHYBRID و RAYTRACE للحصول على:

a. طاقة خرج ليزر الأشعة السينية كتابع لطول الهدف (Target Length).

b. طاقة خرج ليزر الأشعة السينية كتابع للفاصل الزمني (Delay Time) بين نبضتي الليزر الأولية والرئيسية. ومقارنتها مع النتائج التجريبية.

3. كتابة برنامج جزئي ضمن برنامج EHYBRID لحساب الأطياف والإصدارية لبلازما النيكل والتي استخدمت مع برنامج ملحق (Post-Processor) لحساب شدة خط التجاوب (Resonance Line) لليزر النيكل الشبيه بالنيون.

3. ليزرات الأشعة السينية المولدة باستخدام الأيونات الشبيهة بالنيون

(Ne-like ions):

يمكن أن تدرس الليزر المولدة بطريقة تصادمية بوضع نموذج ذري يحوي مخطط أيوني مناسب " مخطط السويات الطاقية للمادة المدروسة وأي من هذه السويات ملائمة للحصول على ليزر" كما هو واضح في الشكل (1) ونقوم باستخدام معادلة المعدل (rate equation) للحصول على إسكان كل سوية كوانتية. لكي تكون هذه الحسابات دقيقة نأخذ عدد من السويات الهامة بالإضافة للسويات التي يعطينا الليزر. إن دراسة عنصر نموذجي مثل النيكل، يبيّن أنه يمكن الحصول على ربح معقول عندما تكون الكثافة الإلكترونية مساوية $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ودرجة حرارة الإلكترون 800 eV [28]. وبالتالي فقد اقتصر هذه الدراسة على استخدام البلازما المولدة من أهداف صلبة كوسط ملائم لتوليد الليزر بالنسبة لـ Ne-like Ni.

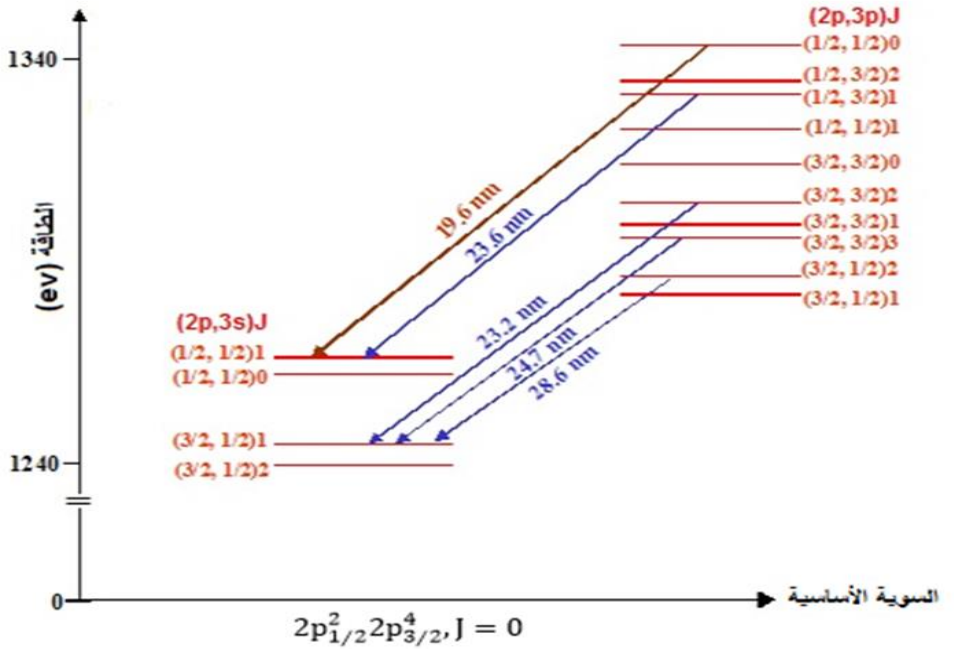
إن إثارة الإلكترون أحادي القطب من السوية الأرضية لـ Ne-like، $2s^2 2p^6$ ، يملأ السوية الليزرية العليا لـ Ne-like، $2p^5 3p$. يمكن أن يعبر عن معامل معدل إثارة أحادي القطب من أجل Ne-like ions بواسطة المعادلة الآتية [29]:

$$K(g, u) = \frac{1.5 \times 10^{-8}}{(Z-9)^{2.25}} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

حيث Z : العدد الذري للمادة الهدف. إن تباعية طول موجة الليزر للعدد الذري لمادة الهدف هي تباعية خطية:

$$\lambda \cong \frac{4600}{Z-9} \text{ (\AA)} \quad (2)$$

يتطلب توليد ليزر بطول موجة أقصر باستخدام Ne-like استخدام هدف ذو عدد ذري أكبر العلاقة (1). على أي حال، لقد وجد أن توليد بلازما بشروط مناسبة من أجل الحصول على ليزر Ne-like باستخدام مواد ذات عدد ذري



Z كبير صعب. يحدث الربح بين الانتقالات $3p-3s$ في Ne-like ions في الليزر المنتج للبلازما كما هو موضح في الشكل (1):

الشكل 1 يوضح مخطط سويات الطاقة بشكل مبسط لليزر الأشعة السينية باستخدام Ne-like Ni موضحاً الأطوال الموجية الموافقة للانتقالات الليزرية الممكنة.

تحدث الانتقالات الليزرية فقط من أجل الانتقالات المسموحة حيث $(\Delta J = 0, \pm 1)$ الانتقالات $(J = 0 \rightarrow 0)$ غير مسموحة، حيث J هو

العدد الكمومي للعزم الزاوي الكلي. إنَّ معدلات الإثارة أحادية القطب عندما يكون J ثابتاً عند القيمة (0) تكون أكبر منها في الحالة التي يكون فيها $J = 0$ في السوية الأرضية و $J=2$ في السوية المثارة، وذلك من أجل Ne-like ions للحصول على إصدار ليزري قوي يجب أن تضمحل السوية الليزرية الدنيا بسرعة إلى السوية الأرضية. وهذا يعني أن السوية الليزرية الدنيا ستملك $J = 1$ لذلك فإنَّ الاضمحلال الإشعاعي إلى السوية الأرضية يكون مسموحاً عندما تكون $\Delta J = -1$ وبالتالي الإصدار الليزري الأعظم من السوية الليزرية العليا يوافق $J = 0$.

ظهر في البداية أن الانتقالات $J = 2 \rightarrow 1$ تعطي ربحاً أكبر من الانتقالات $J = 0 \rightarrow 1$ في Ne-like ions عندما تستخدم نبضة ليزرية وحيدة لتوليد وضخ الوسط الليزري. إن هذا يتناقض مع معدلات الإثارة أحادية القطب المحسوبة بحيث يصبح الانتقال $J = 2 \rightarrow 1$ شاذاً. تم إيجاد حلاً لهذا الشذوذ باستخدام نبضات أولية لتشكيل بلازما أولية والتي تصطم بها نبضة الضخ الأساسية [30,28]. وهذا يقود إلى تقليل انكسار حزم ليزر الأشعة السينية وعندها تكون الانتقالات $J = 0 \rightarrow 1$ هي المسيطرة على الخرج الليزري.

4. برامج المحاكاة (Simulation Codes):

تعتبر المحاكاة الحاسوبية أداة مفيدة لتصميم وتشخيص تجارب ليزر الأشعة السينية. تساعد برامج المحاكاة التي تعتبر البلازما كمانع (fluid) على فهم تفاعل ليزر-بلازما وتمدد البلازما وقضايا الفيزياء الذرية في تجارب ليزر الأشعة السينية [33-31,28]. تساعد برامج المحاكاة أيضاً على تصميم التجارب وتساعد في إجراء دراسات لتحسين المردود و طاقة ليزر الأشعة السينية الناتج [33-31,28]. استخدمت هذه البرامج في محاكاة الليزر المنتج للبلازما منذ الأيام

الأولى لدراسة تجارب اندماج الليزر [34-36]. تمثل مقارنة النتائج التي تنتج بها برامج المحاكاة مع النتائج التجريبية بمثابة اختباراً لصلاحية البرنامج. مثل هذه المقارنات تكون مهمة خصوصاً عندما لا يكون من السهل حساب بعض البارامترات مثل طاقة الليزر الممتصة وتوزع طاقة الإلكترون تجريبيّاً.

1.4 برنامج EHYBRID (The EHYBRID code):

إن برنامج EHYBRID هو برنامج هيدرودينامي (hydrodynamic) يحتوي على الفيزياء الذرية الذي يعتبر البلازما كمنحرف وهو ذو 1.5 بعد [31,37] يحاكي تفاعل الليزر مع هدف صلب والمستخدم لتوليد أوساط ليزر الأشعة السينية. يستخدم برنامج EHYBRID لغة البرمجة فورتران 77 هو برنامج Lagrangian يقسم البلازما إلى 98 خلية فراغية. يفترض أن تكون البلازما في كل خلية متساوية الحرارة، ويتم تبسيط المحاكاة العددية للبلازما بالسماح لها بالتدفق للحصول على الشكل التحليلي في الأبعاد الجانبية (أي بشكل عرضي على شعاع الليزر الوارد) بفرض أن التمدد المتماثل يأخذ الشكل الغوسي. في الاتجاه المقابل لليزر، يقوم البرنامج بحل معادلة الاستمرار للمائع (equation of continuity) ومعادلة Navier-Stokes لحساب منحني الكثافة. بما أن الكتلة ثابتة في كل خلية، فإن أبعاد الخلية تتغير تبعاً لشروط التجربة. يتم تحديد الضغوط ودرجة حرارة الإلكترونات والأيونات وكثافتهما عند مركز كل خلية في كل خطوة زمنية. يخفض انتقال الطاقة باتجاه مواز لليزر من حد التدفق الحر باعتبار حد التدفق 0.1. يفرض البرنامج أن امتصاص الليزر ضمن المادة الهدف يتم إمّا بواسطة امتصاص برمنشلتغ العكسي (inverse Bremsstrahlung) (absorption) أو بواسطة الامتصاص التجاوبي (resonance absorption) عند السطح الحرج. من أجل الامتصاص التجاوبي، فإننا نقوم بحذف 30% من

طاقة الليزر التي تصل إلى منطقة الكثافة الحرجة في خلايا الكثافة الحرجة، أما الطاقة المتبقية فتعكس للوراء إلى منطقة الكثافة المنخفضة لزيادة احتمال حدوث امتصاص برمنشلتغ العكسي. بما أن امتصاص برمنشلتغ العكسي عالي فإنَّ الإنقاص المفترض للطاقة عند السطح الحرج له تأثير صغير فقط على امتصاص طاقة الليزر الإجمالية. تؤخذ الخسارة في الطاقة الإشعاعية من خلال إعادة الاتحاد وإصدار برمنشلتغ وعمليات الإصدار الخطية بعين الاعتبار ضمن البرنامج. تعالج آليات الانقلاب الإسكان والتأين بشكل مستقل ذاتياً مع الهيدروديناميك وذلك باستخدام توازن طاقة الإلكترون الإجمالية. يتم ربط المسافة والزمن التابعين للفيزياء الذرية للمادة المصدرة لليزر بهيدروديناميكية البلازما [39,38].

يتضمن برنامج EHYBRID الحسابات التفصيلية لإسكانات السويات الذرية. بحيث تعالج أيونات Na-like و Ne-like و F-like ions من أجل المادة المصدرة لليزر بالتوازن الأيوني المرتبط بالزمن بشكل كلي مع المعالجة التصادمية الإشعاعية باستخدام عدداً كبيراً من السويات الذرية. منذ البداية، لقد وجد عند إجراء المحاكاة المستخدمة لبرنامج EHYBRID [41,40,28].

أنَّ الطاقة الكلية ضمن البلازما التي يعطيها البرنامج أكبر من تلك المستخدمة تجريبياً (وذلك قبل اعتبار أن 30% من طاقة الليزر امتصت بواسطة الامتصاص التجاوبي). قد تقلل من ضياعات الطاقة الناجمة عن النقل الجانبي للطاقة والتي تحدث بعد تشكل البلازما من تقدير قيمة طاقة الليزر أو قد يسخن جزء من طاقة الليزر الإلكترونات فوق الحرارية (superthermal electrons) التي لم تؤخذ بعين الاعتبار في البرنامج والتي لا تساهم في عملية الضخ للحصول على الانقلاب الإسكاني، للتغلب على هذا التناقض ندخل عامل تصحيح تجريبي f (correction factor) لتقدير طاقة الليزر المستخدمة. حيث يتم تخفيض قيمة شدة

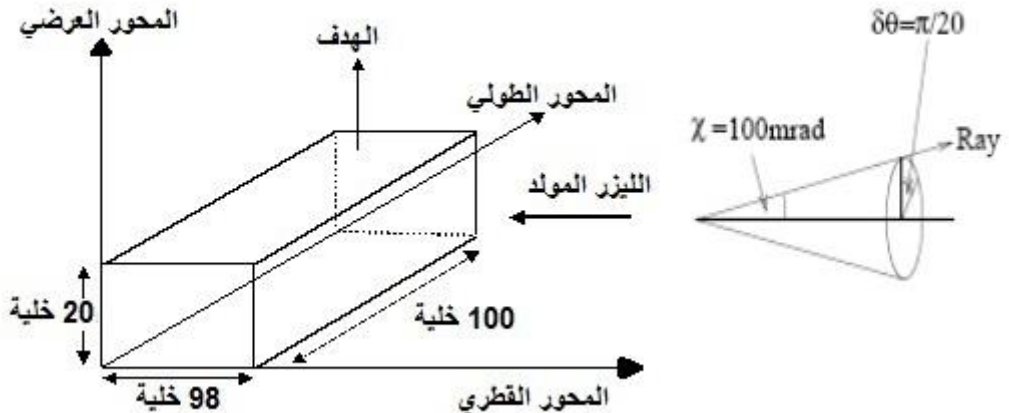
شعاع الليزر التجريبية بواسطة عامل التصحيح f ومن ثم يتم استخدامه كدخل للبرنامج، وقد تم تحديد قيمة عامل التصحيح f بالاعتماد على المرجع [42] لتكون $f = 0.3$. يمكن الحصول على المنحني الزمني والمكاني لمعامل الربح بالإضافة لذلك شروط البلازما من أجل المادة المصدرة لليزر المعطاة، وكذلك يمكن حساب طاقة الضخ باستعمال برنامج EHYBRID. ويحسب معامل الربح من العلاقة:

$$G(\nu) = \frac{g_2 A_{21} \lambda_{21}^2}{8\pi} \left(\frac{n_2}{g_2} - \frac{n_1}{g_1} \right) f(\nu) \quad (3)$$

حيث: n_1, n_2 عدد الإلكترونات في السويات 1 و 2. g_1, g_2 درجة التحلل (تعدد الحالات) للسوية الليزرية الدنيا والعليا على الترتيب λ_{21} طول موجة الانتقال A_{21} معامل أينشتاين للإصدار التلقائي $f(\nu)$ تابع شكل خط الإصدار الناشئ من آليات تعريض الخط.

2.4 برنامج RAYTRACE (RAYTRACE code):

قد تمَّ تطوير برنامج RAYTRACE ثلاثي الأبعاد من قِبَل Plowes [43] والمطور سابقاً من قبل Toft من نموذج أحادي البعد [44] بحيث يصف انكسار

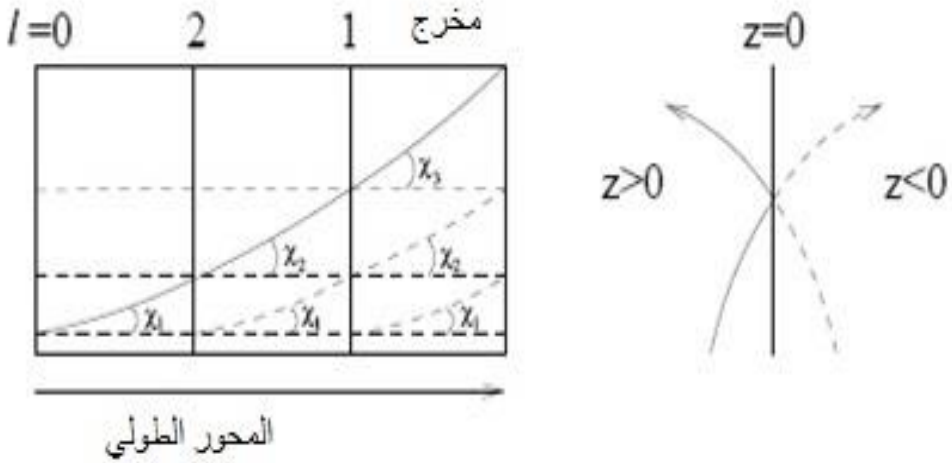


حزمة الليزر الواردة. يستخدم برنامج RAYTRACE لغة البرمجة **فورتران** (Fortran 90). يعمل البرنامج بمتابعة المسارات لعدد كبير من الأشعة الصادرة تلقائياً من البلازما مع أخذ حالة الإشباع بعين الاعتبار. حيث تقسم البلازما إلى 98 خلية في الاتجاه القطري و20 خلية في الاتجاه العرضي مع 100 خلية في الاتجاه الطولي على طول البلازما (الشكل 2).

الشكل 2 (a) يوضح هندسة برنامج RAYTRACE بالنسبة لليزر المولد، المحاور العرضية والقطرية والطولية. يفترض أن تكون البلازما متناظرة حول المحور القطري في اتجاه المحور العرضي. **(b)** يبين مخروط الإشعاع الذي يبدأ عند مركز كل خلية، وزاوية رأس المخروط التي تشكلها الأشعة الخارجية 100 mrad [45].

يقوم برنامج RAYTRACE بمحاكاة الانكسار والربح لحزمة ليزر أشعة سينية المنتشرة على طول البلازما (المحور الطولي). تعطى بارامترات θ بما يشكّل قطري بعيداً عن سطح الهدف من قبل برنامج EHYBRID عند θ خلية وقد تم حسابها في المستوى العرضي باستخدام منحنى الكثافة الغوسي (a) المتناظر [31]. نفرض أن البلازما متجانسة طولياً على طول البلازما من أجل فترة انتشار ليزر الأشعة السينية. تؤدي فرضية التجانس على طول المحور الطولي ضمناً إلى أن البرامج قابلة للتطبيق بشكل محدد من أجل ضخ الموجة المنتشرة المتناظرة [46]، عندما تقابل حزمة ليزر الأشعة السينية وسطاً ثابتاً أثناء انتقالها فيه أو إذا لم تتغير شروط البلازما خلال الزمن لكي تنتشر نبضة ليزر الأشعة السينية على طول المحور الطولي. تخرج الأشعة الليزرية من الوجه الخلفي لكل خلية من خلايا البلازما لتشكل في النهاية مخروطاً إشعاعياً بزاوية سمتية 100 mrad . تزداد الزاوية السمتية γ بمقدار $(0 \leftarrow 0.1)$ ميلي راديان، عندما تزداد الزاوية θ من $(0 \leftarrow 2\pi)$ كما هو موضح في الشكل (2).

يعطي كل شعاع من أشعة الليزر جزءاً من معدل الإصدار التلقائي الكلي في واحدة الحجم ضمن الزاوية الصلبة للحزمة، E_0 ، في الخلية معروفاً بواسطة الزاوية الصلبة الجزئية للشعاع. تصف الحلول التحليلية للمعادلات انتشار الشعاع ضمن الوسط ثلاثي الأبعاد والذي تمتلك فيه قرينة الانكسار اتجاهياً ثابتاً في المستوي العرضاني لكل خلية وقد وصف ذلك بالتفصيل عن طريق Plowes [43]، وبمعرفة جيدة بأن مسار الشعاع الناتج في المستوي العرضاني يشكل قطعاً ناقصاً. تسمح هذه النتائج لمسار الشعاع بأن يعبر الخلية ليتم حسابه ومعرفة اتجاه الشعاع ومكانه في الفراغ بعد أن يغادر الخلية. لذلك، يمكن حساب المسار الكلي للشعاع على طول المحور الطولي للبلازما. يقود افتراض وجود تجانس في الاتجاه الطولي للبلازما إلى تبسيط مفيد لتقليل الزمن اللازم لتشغيل البرنامج للقيام



بالحسابات. بالإشارة إلى الشكل (3)، يمكن حساب مسار الشعاع الليزري الذي يبدأ في المستوي (1) حتى يخرج من البلازما. يقوم البرنامج بحساب طاقة خرج ليزر الأشعة السينية كتابع لطول الهدف (Target Length). وتابع للفاصل الزمني (Delay Time) بين نبضتي الليزر الهدف.

الشكل 3 يوضح مسارات الأشعة الليزرية والتي تكون متكافئة على طول المحور الطولي للبلازما. كما يبين تناظر الانعكاس على طول المحور القطري [45].

يكافئ المسار الذي يقطعه الشعاع في المستوي الأولي المسار الذي يقطعه في المستوي الثاني وهكذا على طول البلازما. ولذلك لحساب المسار الذي يقطعه الشعاع من المستوي الأول حتى خروجه من البلازما، نحتاج فقط لحساب مسار الشعاع بين المستوي الأول ونقطة خروجه منه فقط. وهكذا فقد تم تعيين مسار الشعاع الذي بدأ من النقطة $l = 0$ خلف البلازما على طول المحور الطولي للبلازما حتى خروجه من البلازما، وهو مكافئ لعدد من الأشعة التي يبدأ عند كل مستوي عرضاني وتكون متطابقة في اتجاهاتها ومكانها في الفراغ. ينشأ التبسيط الثاني من تناظر الانعكاس في المستوي العرضاني. الشعاع الليزري الذي يبدأ من النقطة $z = z_0$ يتقاطع مع السطح الحرج عند $z = 0$ و بالتالي ينعكس إلى الخلف ضمن الشبكة، كما أن الشعاع التابع يكون مطابقاً للشعاع الذي بدأ من النقطة $z = -z_0$ (كما هو موضح في الشكل 3).

5. نتائج المحاكاة باستخدام برنامجي EHYBRID و

:RAYTRACE

يحاكي العمل المقدم في هذا البحث العمل التجريبي المنفذ في مختبر رذرفورد المركزي في المملكة المتحدة (Rutherford Appleton Laboratory) (RAL, UK) [47] حيث تم توليد ليزر الأشعة السينية لـ (Ne-like Ni) عند طول موجة 23.1 nm الموافق للانتقال $3s^2 2p^5 3p^1 S_o \rightarrow 3s^2$ ($2p^5 3s^1 P_1$) عن طريق تسليط حزمي ليزر على أهداف من النيكل الصلب على شكل شرائح (slabs) من خلال الضخ الضوئي باستخدام ليزر ضخ

بطول موجة $1.06 \mu\text{m}$ (VULCAN glass laser)، حيث تم تشكل البلازما الأولية (a pre – plasma) باستخدام نبضة أولية (background pulse) ذات العرض 280 ps وشدها $2 \times 10^{13} \text{ W. cm}^{-2}$ في خط محرقى (line focus) طوله 16 mm وعرضه $100 \mu\text{m}$. أما النبضة الأساسية (main pulse) فعرضها 1.2 ps وشدها $7 \times 10^{15} \text{ W. cm}^{-2}$ في خط محرقى طوله 12 mm وعرضه $100 \mu\text{m}$. أدخلنا إلى برنامج RAYTRACE معلومات مفصلة عن خرج ليزر الأشعة السينية وخواص الحزمة متضمنة الطاقة. يتم تنفيذ حسابات برنامج RAYTRACE من أجل الطول المطلوب للهدف بخطوات زمنية قدرها 1 ps ويتم الحصول على طاقة الخرج الكلية بمكاملة استطاعات الخرج الناتجة على كامل الزمن. إن بنية سويات ليزر Ne-like ion معقدة ويجب أن تتضمن المحاكاة العددية لها على عدد كبير من الحالات المثارة. لقد تم تطوير مجموعة البيانات الفيزيائية للنيكل والمستخدم في هذه الحسابات في Belfast [48] وتتضمن الطاقات واحتمالات الانتقال الإشعاعي من أجل 112 سوية مثارة ل-Ne-like ion.

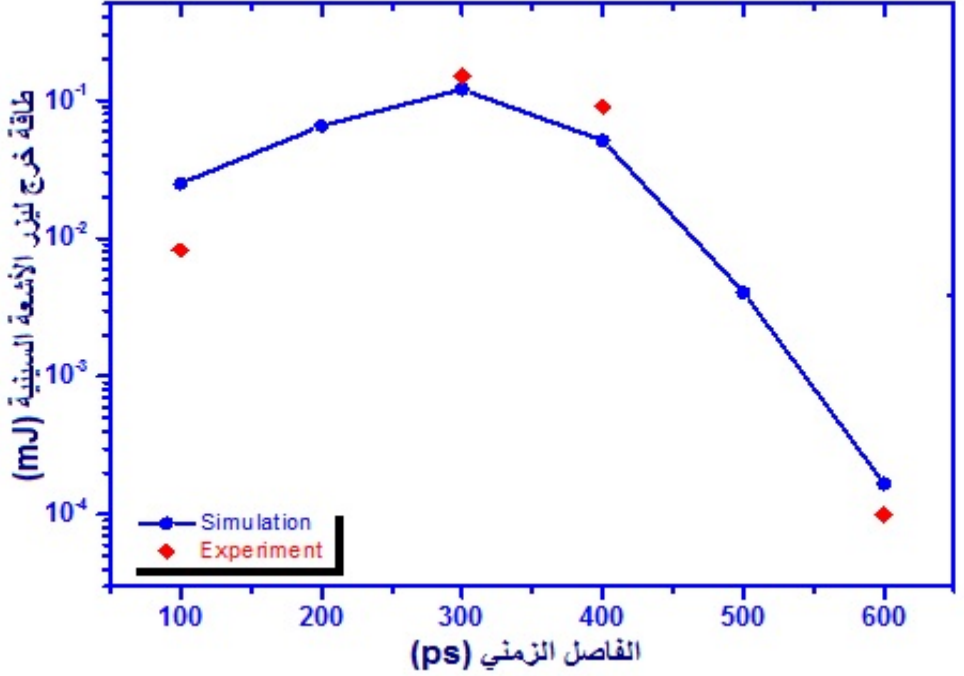
قمنا بتشغيل برنامج EHYBRID بطاقات ضخ ليزر مختلفة (نفس الطاقات المستخدمة في العمل التجريبي المأخوذ من المرجع [47]) وبعد الحصول على النتائج من برنامج EHYBRID استخدمناها كدخل لبرنامج RAYTRACE، وقمنا بتشغيله لتحديد الفاصل الزمني الأمثل بين النبضة الأولية والنبضة الرئيسية (من قمة النبضة الأولية إلى قمة النبضة الرئيسية) ولحساب طاقة ليزر الأشعة السينية الناتجة من Ne-like Ni كتابع لطول الهدف وتم مقارنة نتائج المحاكاة مع النتائج التجريبية.

تم إجراء سلسلة من التجارب على أهداف من النيكل طول كل منها 2 mm لتحديد الفاصل الزمني الأمثل بين النبضة الأولية الطويلة والنبضة الأساسية القصيرة، نلاحظ من الشكل (4) أن أفضل فاصل زمني بين نبضتي الليزر المستخدمتين تجريبياً هو 300 ps والذي يعطي أعلى طاقة خرج لنيكل ليزر الأشعة السينية. وأنه يوجد تطابق جيد بين النتائج التجريبية المأخوذة من المرجع [47] ونتائج المحاكاة.

حيث يبين الجدول (1) التالي طاقة خرج طاقة خرج ليزر Ne-like Ni الذي تم الحصول عليه باستخدام برنامجي EHYBRID و RAYTRACE عند طول الموجة 23.1 nm كتابع للفاصل الزمني بين قمتي النبضتين الرئيسية 1.2 ps و الأولية 300ps و النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها من المرجع [47].

طاقة خرج ليزر الأشعة السينية التجريبية (mJ)	طاقة خرج ليزر الأشعة السينية باستخدام برامج المحاكاة (mJ)	الفاصل الزمني (ps)
0.0082	0.025	100
	0.06528	200
0.15	0.12	300
0.09	0.0512	400
	0.00407	500
1.00E-04	1.67E-04	600

الجدول (1)



الشكل 4 يوضح طاقة خرج ليزر Ne-like Ni الذي تم الحصول عليه باستخدام برنامجي EHYBRID و RAYTRACE عند طول الموجة 23.1 nm كتابع للفاصل الزمني بين قمتي النبضتين الرئيسية 1.2 ps و الأولى 300ps ومقارنتها مع النتائج التجريبية [47].

بعد تثبيت الفاصل الزمني بين النبضتين على القيمة 300 ps (بناءً على النتائج السابقة) قمنا بتحديد طاقة حزمة ليزر الأشعة السينية الكلية (Ne-like Ni) الموافق للانتقال ($2p^5 3p^1 S_0 \rightarrow 2p^5 3s^1 P_1$) باستخدام برنامجي EHYBRID و RAYTRACE كتابع لطول الهدف، ومقارنته مع المنحني التجريبي الذي تم الحصول عليه باستخدام flat-field و CCD كاميرا [47]، بإجراء عدة تجارب

على أهداف بطول يتراوح من 2-12 mm وبعرض 100 μm وسماكة 1 μm كما هو موضح في الشكل (5).

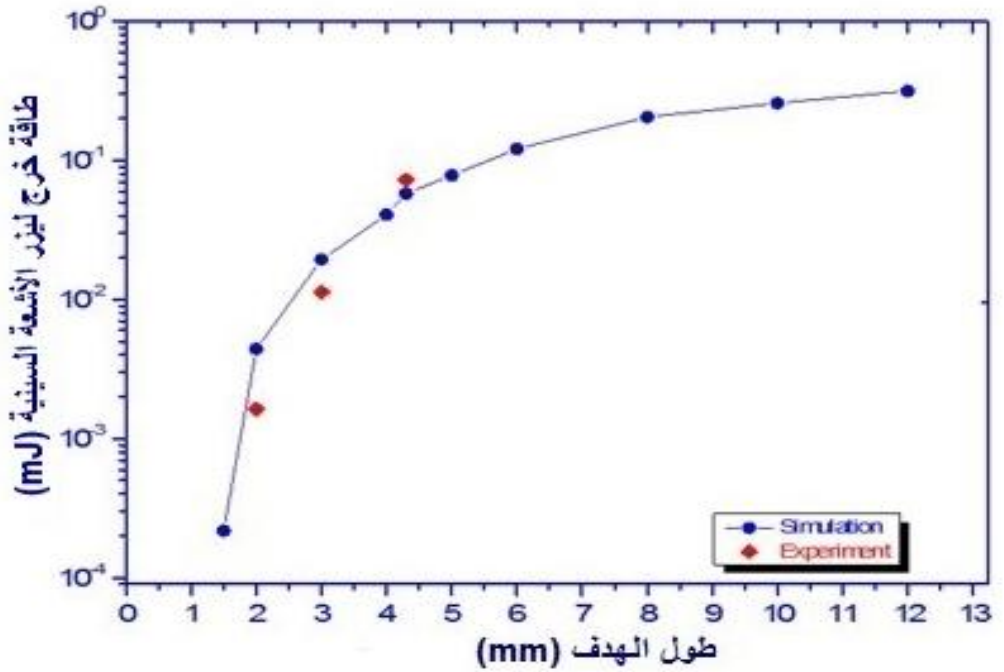
يبين الجدول (2) التالي طاقة خرج طاقة خرج ليزر Ne-like Ni الذي تم الحصول عليه باستخدام برنامجي EHYBRID و RAYTRACE عند طول الموجة 23.1 nm كتابع لطول الهدف بين قمتي النبضتين الرئيسية 1.2 ps و الأولية 300ps و النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها من المرجع [47].

طاقة خرج ليزر الأشعة السينية التجريبية (mJ)	طاقة خرج ليزر الأشعة السينية باستخدام برامج المحاكاة (mJ)	طول الهدف (mm)
-	2.18E-4	1.5
0.0016	0.00441	2
0.0112	0.0194	3
-	0.0407	4
0.07	0.0578	4.3
-	0.0781	5
-	0.121	6

حساب خرج ليزر النيكل الشبيه بالنيون المضخ بشكل تصادمي كتابع لطول الهدف والفاصل الزمني وكذلك بعض الوسائط الأخرى باستخدام برامج المحاكاة

-	0.205	8
-	0.258	10
-	0.316	12

الجدول (2)



الشكل 5 يوضح منحني الطاقة الناتجة من خط الليزر الموافق للانتقال $2p^5 3p^1 S_0 \rightarrow 2p^5 3s$ من أجل ليزر الأشعة السينية المنتج بواسطة Ne-like Ni عند 23.1 nm كتابع لطول الهدف (البلازما) والذي تم الحصول عليه من المحاكاة العددية باستخدام برنامج RAYTRACE وبرنامج EHYBRID. ومقارنتها مع النتائج التجريبية [47].

نلاحظ من الشكل (5) وجود تطابق جيد بين المنحني التجريبي ومنحني المحاكاة من برنامجي EHYBRID و RAYTRAC. عند طول هدف أكبر من 5 mm تصل طاقة خرج ليزر الأشعة السينية إلى مرحلة الإشباع أي الحصول على أكبر طاقة ممكنة.

6. نمذجة إصدار خط التجاوب: (Modelling of resonance)

(line emission)

تم تعديل برنامج الفيزياء الذرية والهيد وديناميكية EHYBRID ليحاكي إصدار خط الطنين. وتم حساب إصدارية الخطوط الطيفية ε عند زمن معين ضمن EHYBRID باستخدام العلاقة:

$$\varepsilon = \sum N_i A_{ij} \frac{hc}{\lambda_0} dV \quad (4)$$

حيث: N_i إسكان السوية العليا من أجل انتقال معطى، A_{ij} احتمالية الانتقال الاشعاعي من أجل الانتقال، h ثابت بلانك، c سرعة الضوء في الخلاء، λ_0 طول موجة الخط الطيفي، dV حجم كل خلية، والجمع على كامل خلايا EHYBRID. تم تعديل برنامج EHYBRID الأصلي لحساب معدلات الانتقال التلقائي A_{ij} من شدات هزاز الامتصاص (absorption oscillator) المستخدمة في تقدير توازن التأين (ionization balance). ومن ثم تم حساب شدات الخط الطيفي ل 112 سوية من Ne-like عند (3p-2s) و 642 سوية من F-like عند (3d-2p) لمحاكاة إصدار خط الطيف لبلازما النيكل. إن الإصدارية المحسوبة من المعادلة السابقة مكافئة للشدة الإشعاعية المنتجة إذا كانت البلازما رقيقة ضوئياً، ولكن في أغلب الأحيان تكون خطوط الطنين سميكة ضوئياً لأنها تمتلك شدة اهتزاز قوية. لقد تم حساب عدم الشفافية (Opacity) من خلال معامل الهروب التقريبي (escape factor) المعتمد على تابع هولستن (Holstein function) من أجل خطوط تعريض دوبلر [49-51]. وتم تقييم شدات الخطوط الطيفية بواسطة كتابة برنامج جديد (new post-processor) [52] يستخدم مع برنامج EHYBRID

وذلك باستخدام محاكاة كثافات الإسكان N_i (population densities) ومعامل الهروب T (escape factor). نستطيع إعادة كتابة المعادلة (4) لكي تعبر عن الشدة الصادرة الكلية I_{tot} لخط طيفي معين بالشكل:

$$I_{tot} = \quad (5)$$

$$\sum N_i \frac{hc}{\lambda_0} T A_{ij} dV$$

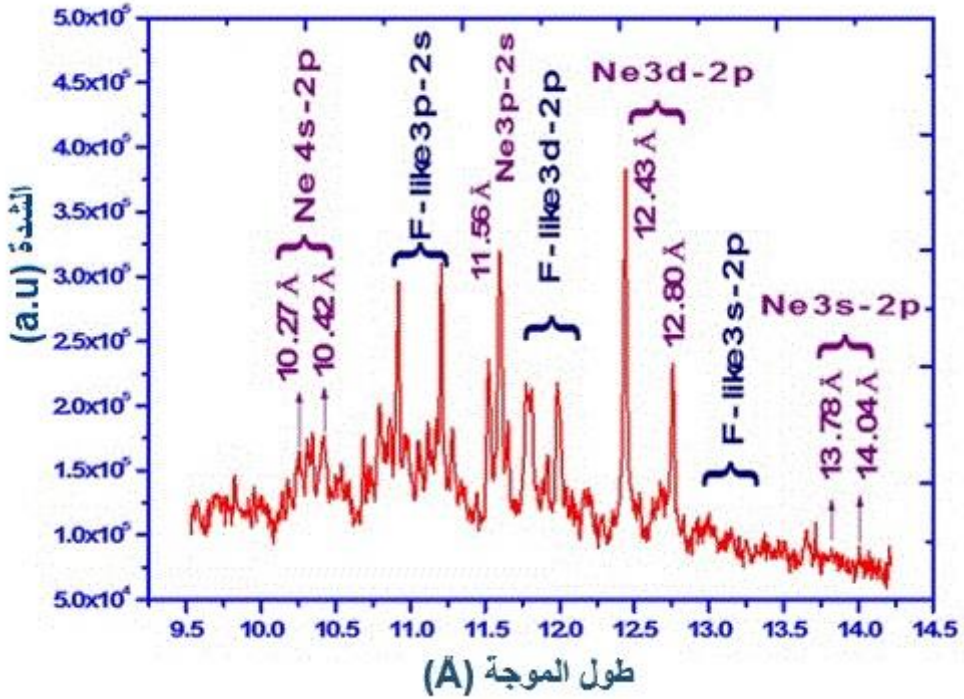
إن إسكان السويات المثارة Na-, Ne- and F-like ions في أوساط ليزر الأشعة السينية تكون في حالة توازن كوروني (coronal equilibrium) تقريباً بالنسبة للحالة الأرضية. بناء على ذلك في حساب الإصدار الناتج، لا يوجد حرج في اختيار نموذج عامل الهروب T من أجل الحساب الدقيق لتأثير عدم الشفافية. في حالة التوازن الكوروني، يسبب تأثير الإثارة الضوئية إصداراً إضافياً يوازن خسارة الإشعاع بسبب الامتصاص [53]. لقد تم الأخذ بعين الاعتبار عند إجراء عملية المحاكاة للخطوط الطيفية إسكان 11 سوية مثارة من Na-like ion و 112 و سوية مثارة من Ne-like ion و 215 سوية مثارة من F-like ion. يوضّح الشكل (6.a) الطيف التجريبي لبلازما النيكل [47] الذي تم الحصول عليه تجريبياً باستخدام المقياس الطيفي (KAP crystal spectrometer) أما الشكل (6.b) فيوضّح الطيف الذي تم الحصول عليه باستخدام برنامج Ehybrid المعدّل وبرنامج Post-processor.

وقد تم الأخذ بعين الاعتبار عند حساب الطيف النظري مرشح من نوع Be وبسماكة $25\mu\text{m}$ كالمستخدم في التجربة [47]. بالمقارنة بين الطيفين التجريبي والنظري نلاحظ وجود تطابق جيد. لقد تم تحديد الخطوط الطيفية لـ Ne-like باستخدام النتائج المنشورة بواسطة العالم Boiko [54]، أما من أجل F-like فقد تم تحديد الأطوال الموجية باستخدام نتائج العالم Gordon [55]. أما

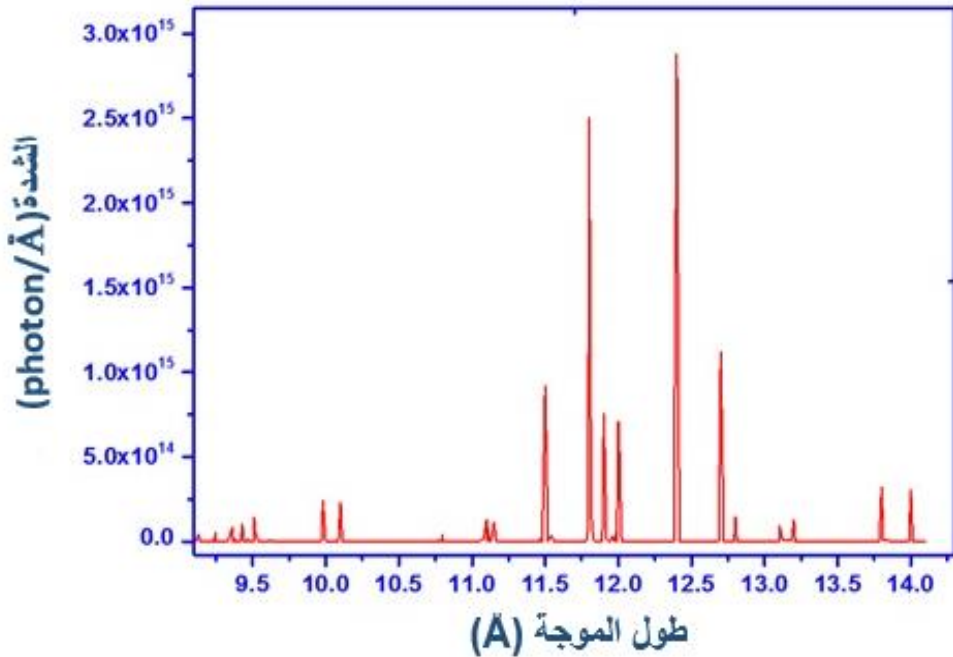
تحديد الخطوط الطيفية النظرية (الأطوال الموجية) فقد تم تحديدها ضمن برنامج
Ehybrid اعتماداً على حسابات العالم cowan [56].

حساب خرج ليزر النيكل الشبيه بالنيون المضخ بشكل تصادمي كتابع لطول الهدف والفاصل الزمني وكذلك بعض الوسائط الأخرى باستخدام برامج المحاكاة

(a)



(b)



الشكل 6 (a) يوضّح الطيف التجريبي الذي تم تسجيله بواسطة crystal spectrometer و CCD كاميرا [47]. (b) طيف إصدار خط الطنين لبلازما النيكل والذي تم الحصول عليه باستخدام برنامج EHYBRID المعدل ومعالج بوست الجديد Post-processor.

7. الخاتمة (Conclusion):

لقد قمنا باستخدام برنامجي Ehybrid و RAYTRACE لتحديد الفاصل الزمني الأمثل بين النبضة الأولية والنبضة القصيرة الرئيسية وحساب طاقة ليزر الأشعة السينية الناتجة Ne-like Ni كتابع لطول الهدف، كما تم كتابة برنامج جزئي ضمن برنامج Ehybrid لحساب الخطوط الطيفية لبلازما النيكل، وبعد ذلك تم استخدام النتائج التي تم الحصول عليها مع برنامج ملحق Post-processor لحساب شدة خط التجاوب لليزر وتم الحصول على طيف إصدار خط التجاوب لبلازما النيكل. ومقارنتها مع النتائج المسجلة تجريبياً.

8. المراجع (References):

- [1] M. N. Rosenbluth and R. Z. Sagdeev, Eds., "Handbook of Plasma Physics", Volume 3. Physics of Laser Plasmas, A. M. Rubenchik and S. Witkowski, Eds. (Elsevier Science Publishers, B. V., 1991), Chapter 9.
- [2] A. ROCKWOOD, "Compact gain-saturated x-ray lasers down to 6.85 nm and amplification down to 5.85 nm," *Optica*, Vol. 5, No. 3, pp. 257-262, (2018).
- [3] Tallents, G, J., 2003. The physics of soft x-ray lasers pumped by electron collisions in laser plasmas. *J. Phys. D: Appl. Phys.* V. 36, No. 15, pp. 259-276.
- [4] Carillon, A., Chen, Z., Dhez, P., Dwived, L., Jacopy, J., Jaegle, P., Jamelot, G., Zhang, Jie., Key, M, H., Kidd, A., Klisnick, A., Kodama, R., Krishnan, J., Lewis, C, L, S., Neely, D., Norreys, P., O'Neill, D., Pert, G, J., Ramsden, S, A., Raucourt, J, P., Tallents, G, J., and Uhomoiibhi, J., 1992. Saturated and Near-Diffraction-Limited Operation of an XUV Laser at 23.6 nm. *Phys. Rev. Lett.* V. 68, No. 19, pp. 2917-2920.
- [5] Zhang, J., Zepf, M., Norreys, P, A., Dangor, A, E., Bakarezos, M., Danson, C, N., Walsh, A. Dyson, A. P. Fewes, P. Gibbon, M. H. Key, P. Lee, P. Loukakos, S. Moustazis, D. Neely, F, N., and Wark, J, S., 1996. Coherence and bandwidth measurements of harmonics generated from solid surfaces irradiated by intense picosecond laser pulses. *Phys. Rev. A.* V. 54. No. 2, pp. 1597-1603.
- [6] Lin, J, Y., Tallents, G, J., Smith, R., MacPhee, A, Wolfrum, G, E., Zhang, J., Eker, G., Keenan, R., Lewis, C, L, S., Neely, D., O'Rourke, R, M, N., Pert, G, J., Pestehe, S, J., Wark, J, S., 1999. Optimization of

double pulse pumping for Ni-like Sm x-ray lasers. J. Appl. Phys. V. 85, No. 2, pp. 672-675.

[7] Smith, R., Tallents, G. J., Zhang, J., Eker, G., McCabe, S., Pert, G. J., Wolfrum, E., 1999. Saturation behavior of two x-ray lasing transitions in Ni-like Dy. Phys. Rev. A, V. 59, No. 1, pp. 47-59.

[8] Kuznetsov, J., Filevich, F., Dong, M., Woolston, W. L., Chao, E. H., Anderson, E. R., Bernstein, D. C., Crick, Rocca, J. J., and Menoni, C. S. 2015. Three-dimensional nanoscale molecular imaging by extreme ultraviolet laser ablation mass spectrometry. Nat. Commun. V. 6, pp. 6944.

[9] Vaschenko, G., Brewer, C., Brizuela, F., Wang, Y., Larotonda, M. A., Luther, B. M., Marconi, M. C., Rocca, J. J., Menoni, C. S., Anderson, E. H., Chao, W., Harteneck, B. D., Liddle, J. A., Liu, Y. and Attwood, D. T. 2006. Sub- 38 nm resolution tabletop microscopy with 13 nm wavelength laser light. Opt. Lett. V. 31, pp. 1214–1216.

[10] Brizuela, F., Carbajo, S., Sakdinawat, A., Alessi, D., Martz, D. H., Wang, Y., Luther, B., Goldberg, K. A., Mochi, I., Attwood, D. T., La Fontaine, B., Rocca, J. J., and Menoni, C. S. 2010. Extreme ultraviolet laser-based table-top aerial image metrology of lithographic masks. Opt. Express. V. 18, No. 14467.

[11] Meng, L. M., Alessi, D., Guilbaud, O., Wang, Y., Berrill, M., Luther, B. M., Domingue, S. R., Martz, D. H., Joyeux, D., De Rossi, S., Rocca, J. J. and Klisnick, A. 2011. Temporal coherence and spectral linewidth of an injection-seeded transient collisional soft x-ray laser. Opt. Express. V. 36, No. 2164.

- [12] RockWood, A., Wang, Y., Wang, S., Berrill, M., Shlyaptsev, V. N. and Rocca, J. J. 2018. Compact gain-saturated x-ray lasers down to 6.85 nm and amplification down to 5.85 nm. *Optica*, V. 5. No. 3, pp. 257 – 262.
- [13] Matthews, D. L., Hagelstein, P. L., Rosen, M. D., Eckart, M. J., Ceglio, N. m., Hazi, A. U., Medecker, H., MacGowam, B. J., Trebes, J. E., Whitten, B. L., Campbell, E. M., Hatcher, C. W., Hawryluk, A. M., Kauffman, R. L., Pleasance, L. D., Rambach, G., Scofield, H. J., Stone, G., and Weaver, T. A., 1985. Demonstration of a Soft X-Ray Amplifier. *Phys. Rev. Lett.* V. 54, No. 2, pp 110-114.
- [14] Lee, T. N., McLean, E. A., and Elton, R. C., 1987. Soft X-Ray Lasing in Neonlike Germanium and Copper Plasmas. *Phys. Rev. Lett.* V. 59, No. 11, pp. 1185-1188.
- [15] Nickles, P. V., Shlyaptsev, V. N., Kalachnikov, M., Schnürer, M., Will, I., and Sandner, W., 1997. Short Pulse X-Ray Laser at 32.6 nm Based on Transient Gain in Ne-like Titanium. *Phys. Rev. Lett.* V. 78, No. 14, pp. 2748-2751.
- [16] Dunn, J., Osterheld, A. L., Shepherd, R., White, W. E., Shlyaptsev, V. N., and Stewart, R. E., 1998. Demonstration of X-Ray Amplification in Transient Gain Nickel-like Palladium Scheme. *Phys. Rev. Lett.* V. 80, No. 13, pp. 2825-2828.
- [17] Warwick, P. J., Lewis C. L. S., Kalachnikov, M. P., Nickles, P. V., Schnürer, M., Behjat, A., Demir, A., Tallents, G. J., Neely, D., Wolfrum, E., Zhang, J., Pert, G. J., 1998. Observation of high transient gain in the germanium x-ray laser at 19.6 nm. *J. Opt. Soc. Am. B.* V. 15, No. 6, pp. 1808-1814.

[18] Kuba, J., Klisnick, A., Ros, D., Fourcade, P., and Jamelot, G., 2000. Two-color transient pumping in Ni-like silver at 13.9 and 16.1 nm. Phys. Rev. A, V. 62, No. 4, pp. 43808-43815.

[19] Nilsen, J., MacGowan, B, J., Da, Silva, L, B., and Moreno, C., 1993. Prepulse technique for producing low-Z Ne-like x-ray lasers. Phys. Rev. A. V. 48, No. 6, pp. 4682-4685.

[20] Daido, H., Kato, Y., Murai, K., Ninomiya, S., Kodama, R., Yuan, G., Oshikane, Y., Takagi, M., and Takabe., 1995. Efficient Soft X-Ray Lasing at 6 to 8 nm with Nickel-like Lanthanide Ions. Phys. Rev. Lett. V. 75, No. 6, pp. 1074-1077.

[21] Cairns, G, F., Lewis, C, L, S., Lamb, M, J., A. MacPhee, G., Neely, D., Norreys, P., Key, M, H., Healy, S, B., Holden, P, B., Pert, J. G, J., Plowes, A., Tallents G, J., and Demir, A., 1996. Using low and high prepulses to enhance the J = 0-1 transition at 19.6 nm in the Ne-like germanium XUV laser Optics Commun. V. 123, No. 123, pp. 777-789.

[22] Behjat, A., Lin, J., Tallents, G, J., Demir, A., Kurkcuoglu, M., Lewis, C, L, S., MacPhee, A, G., McCabe, S, P., Neely, D., Wolfrum, E., Healy S, B., and Pert, G, J., 1997. The effect of multi-pulse irradiation on X-ray laser media. Optics Commun. V. 135, No. 135, pp. 49-54.

[23] Yuan, G., Murai, K., Daido, H., Kodama, R., and Kato, Y., 1995. Two - dimensional beam characteristics of tripke-pulse pumping a Ne-like Ge soft x-ray laser at 19.6 nm. Phys. Rev. A. V. 52, No. 6, pp. 4861-4866.

- [24] Tommasini, R., Löwenthal, F., and Balmer, J. E., 1999. Saturation in a Ni-like Pd soft-x-ray laser at 14.7 nm. *Phys. Rev. A*. V. 59, No. 2, pp. 1577-1581.
- [25] Sebban, S., Daido, H., Sakaya, N., Kato, Y., Murai, K., Tang, H., Gu, Y., Huang, G., Wang, S., Klisnick, A., Zeitoun, Ph., Koike, F., and Takenaka, H., 2000. Full characterization of a high-gain saturated x-ray laser at 13.9 nm. *Phys. Rev. A*. V. 61, No. 4, pp. 043810-043819.
- [26] Dunn, J., Li, Y., Osterheld, A. L., Nilsen, J., Hunter, J. R., and Shlyaptsev, V. N., 2000. Gain Saturation Regime for Laser-Driven Tabletop, Transient Ni-Like Ion X-Ray Lasers. *Phys. Rev. Lett.* V. 84, No. 21, pp. 4834-4837.
- [27] Janulewicz, K. A., Lucianetti, A., Priebe, G., Sandner, W., Nickles, P. V., 2002. A table-top collisional Ni-like Ag X-ray laser at 13.9 nm pumped by single picosecond laser pulse. *AIP Conference Proceedings*. V. 641, No. 1, pp. 26-30.
- [28] Holden, P. B., Healy, S. B., Lightbody, M. T., Pert, G. J., Plowes, J. A., Kingston, A. E., E. Robertson, Lewis, C. L. S., and Neely, D., 1994. A computational investigation of the neon-like germanium collisionally pumped laser. *J. Phys. B*. V. 27, pp. 341-367.
- [29] R. C. Elton, "X-ray lasers", Publisher Academic Press (1990).
- [30] J. Nilsen, B. J. MacGowan, L.B. Da Silva and J. C. Moreno, *Phys. Rev. A* 48, 4682 (1993).
- [31] Pert, G. J., 1983. The hybrid model and its application for studying free expansion. *J. Fluid Mech.* V. 131, pp. 401-426.
- [32] Jacquemot, S., and Bonnet, L., 1997. Investigation of Ne- and Ni-like collisional excitation schemes in plasmas driven by multiple laser pulses. *Proc. SPIE*, V. 3156, 10.1117/12.293386.

- [33] Nilsen, J., 1997. Analysis of a picosecond-laser-driven Ne-like Ti x-ray laser. *Phys. Rev. A*. V. 55, No. 4, pp. 3271-3274.
- [34] Zimmerman, G, B., and Kruer, W, L., 1975. Numerical simulation of laser-initiated fusion. *Comments Plasma Phys. Controlled Fusion*. V. 2, No. 2, pp. 51-60.
- [35] Christiansen, J, P., Ashby, D, E, T, F., and Roberts, K, V., 1974. MEDUSA a one-dimensional laser fusion code. *Computer Phys. Comm.* 7, No. 5, pp. 271- 287.
- [36] Bodner, S, E., Colombant, D, G., Gardner, J, H., Lehmborg, R, H., Obenschain, S, P., Phillips, Lee., Schmitt, A, J., Sethian, J, D., Seka, W., Verdon, C, P., and Knauer. J, P., 1998. Direct-drive laser fusion: Status and prospects. *Phys. Plasmas*. V. 5, No. 5, pp. 1901.
- [37] Pert, G, J., 1987. The use of flows with uniform velocity gradient in modelling free expansion of a polytropic gas. *Laser and Particle Beams*. V. 5, No. 4, pp. 643–658.
- [38] Pert, G, J., 1978. Algorithms for the calculation of ionization in rapidly changing plasmas. *J. Comp. Phy*. V. 27, No. 2, pp. 241-255.
- [39] Pert, G, J., 1981. Efficient integration of the time dependent collisional-radiative equations *J. Comp. Phy*. V. 39, No. 2, pp. 251-271.
- [40] G. F. Cairns, S. B. Healy, C. L. S. Lewis, G. J. Pert and E. Robertson, *J. Phys. B* 29, 4839-4854 (1996).
- [41] R. E. King, G. J. Pert, S. P. McCabe, P. A. Simms, A. G. MacPhee, C. L. S. Lewis, R. Keenan, R. M. N. O'Rourke, G. J. Tallents, S. J. Pestehe, F. Strati, D. Neely, and R. Allott, *Phys. Rev. A* **64**, 053810 (2001).
- [42] Y Abou-Ali, Q L Dong, A Demir, R E King, G J Pert and G J Tallents, "Quantitative simulations of short pulse x-ray laser," *At. Mol. Opt. Phy.*, vol. **37**, pp. 1-14, (2004).

- [43] Plowes, J, A., 1995. Ray optic of X-ray lasers. Ph. D. Thesis, University of York
- [44] Toft, D., 1979. Numerical modeling of plasmas produced by long pulse lasers. Ph. D. Thesis, University of Hull.
- [45] Robert king, "*Computational Modelling of Short Pulse X-Ray Lasers*" PhD thesis (University of York, UK) (2001).
- [46] Plowes, J, A., Pert, G, J., and Holden, P, B., 1995. Refraction compensation by target curvature in X-ray lasers. *Opt. Commun.* V. 116, pp. 260-268.
- [47] Y. Abou-Ali, G. J. Tallents, M. Edwards, R. E. King, G. J. Pert, S. J. Pestehe, F. Strati, R. Keenan, C. L. S. Lewis, S. Topping, O. Guilbaud, A. Klisnick, D. Ros, R. Clarke, D. Neely, M. Notley, A. Demire, 2003-Measurement of the duration of of X-ray laseing pumped by an optical laser pulse of picosecond duration. *Opt. Commun.* 215, 397– 406.
- [48] A. Kingston, In *X-Ray Lasere 1990*, volume 116, pages 289-296 (IOP Conf. Series, 1990).
- [49] Holstein, T., 1947. Imprisonment of Resonance Radiation in Gases. *Phys. Rev.* V. 72, No. 12, pp. 1212-1233.
- [50] Holstein, T., 1951. Imprisonment of Resonance Radiation in Gases. II. *Phys. Rev.* V. 83, No. 6, pp. 1159-1168.
- [51] Sobolev, V, V., 1957. The Diffusion of Lalpha Radiation in Nebulae and Stellar Envelopes. *Sov. Astron. Astrophys. J.* V. 1, pp. 678-689.
- [52] Abou-Ali, Y., Demir, A., Tallents, G, J., Edwards, M., King, R, E., and Pert, G, J., 2003. Comparison of simulated and experimental time resolved emission for a Ne-like nickel x-ray laser. *J. Phys. B.* V. 36, pp. 4097-4106.

- [53] Pestehe, S, J., 2001. Spectroscopic studies of X-ray laser media. Ph. D. Thesis, University of York.
- [54] Boiko, V. A., Faenov, A. Ya. and Pikuz, 1978- X-ray spectroscopy of multiply charged ions from laser plasmas. S. A. J. *Quant. Spect. Radiat. Trans.* V. 19. pp. 11-50.
- [55] Gordon, H., Hobby, M. G., and Peacock, N. J. 1980- Classification of the x-ray spectra of transitions in the Ne, F and O I isoelectronic sequences of the elements from iron to bromine and in the Na I isoelectronic sequence of gallium to bromine. J. Phys. B.13. pp. 1985-1999.
- [56] Cowan, R, D., 1968- Theoretical Calculation of Atomic Spectra Using Digital Computers. J. Opt. Soc. Am. V. 58, No. 6, pp. 808-818.

حساب خرج ليزر النيكل الشبيه بالنيون المضخ بشكل تصادمي كتابع لطول الهدف والفاصل الزمني
وكذلك بعض الوسائط الأخرى باستخدام برامج المحاكاة
