



X

161/R



الجمهورية العربية السورية
هيئة الطاقة الذرية
دمشق - ص. ب. ٦٠٩١

تقرير عن دراسة علمية مكتبية
قسم الفيزياء

فصل نظير الإتيريوم ^{168}Yb بالليزر بالطريقة الذرية
Atomic Vapor Laser Isotope Separation (AVLIS)

الدكتور عبد القادر جزماتي

تموز ٢٠٠٤

هـ ط ذ س - ف / ت د ع ٥٧٣

فصل نظير الإتيربيوم ^{168}Yb بالليزر بالطريقة الذرية
Atomic Vapor Laser Isotope Separation (AVLIS)

د. عبد القادر جزماتي

قسم الفيزياء هيئة الطاقة الذرية، ص ب 6091، دمشق، سوريا

خلاصة

نتناول في هذه الدراسة بعض الخواص الفيزيائية والكيميائية لعنصر الإتيربيوم Yb بالإضافة إلى مخطط تأين التجاوبي للنظير ^{168}Yb . كما نذكر الأطوال الموجية الثلاثة المناسبة لعملية الفصل وعمر السويات المستخدمة في التأين كما سنتناول الدراسة شروط الحزم اليزرية من حيث الشدات و العرض الطاقى كما نتناول شروط الحزمة الذرية و أموراً أخرى تتعلق بعملية الفصل.

الكلمات المفتاحية: فصل النظائر، ليزر، عنصر الإتيربيوم Yb،

Separation of ^{168}Yb Isotope using (AVLIS) Method
Atomic Vapor Laser Isotope Separation

Dr. Abdul Kader Jazmati

Phys. Dept. AEC of Syria, PO Box 6091 , Damascus, Syria

Abstract

We report in this study some physical and chemical properties of Yb element. Resonance ionization schemes of ^{168}Yb isotope are also reported. The three concerned suitable wavelengths are reported, in addition to the lifetime of the involved energy states that produce ions. Also some parameters related to the atomic and laser beams such as intensity, bandwidth, and others are reported.

Key Words : Isotope separation, Laser, Ytterbium Yb.

المخلص

نتناول في هذه الدراسة بعض الخواص الفيزيائية والكيميائية لعنصر الإتيربيوم Yb بالإضافة إلى مخطط تأين التجاوبي للنظير ^{168}Yb . كما نذكر الأطوال الموجية الثلاثة المناسبة لعملية الفصل وعمر السويات المستخدمة في التأين كما ستتناول الدراسة شروط الحزم اليزرية من حيث الشدات و العرض الطاقى كما تتناول شروط الحزمة الذرية و أموراً أخرى تتعلق بعملية الفصل.

Abstract

We report in this study some physical and chemical properties of Yb element. Resonance ionization schemes of ^{168}Yb isotope are also reported. The three concerned suitable wavelengths are reported, in addition to the lifetime of the involved energy states that produce ions. Also some parameters related to the atomic and laser beams such as intensity, bandwidth, and others are reported.

المحتويات

- 1- المقدمة
- 2- تعريف النظائر
- 3- منشأ طريقة فصل النظائر بالليزر
- 4- الخواص الفيزيائية و الكيميائية لعنصر الإتيربيوم Yb
- 5- المنشأ التاريخي للعنصر
- 6- النظائر المستقرة لعنصر Yb
- 7- النظائر المشعة لعنصر Yb
- 8- مخططات التأين التجاوبي
1-8 المخطط الأول
2-8 المخطط الثاني
- 9- الانتقائية S (selectivity)
- 10- عمر السويات الطاقية و معدل الإنتقالات
1-10 سويات التأين الذاتي
2-10 عمر السويات المثارة في الإتيربيوم النري
3-10 التابعة الزمنية لإشارة الفلورة
- 11- الوسائط الرئيسية في عملية فصل نظير ^{168}Yb باستخدام الليزر
1-11 مواصفات اليزرات الصباغية و ليزرات بخار النحاس
- 12- تأثير توليف التواتر التجاوبي على إسكان السويات
- 13- خلاصة
- 14- المراجع

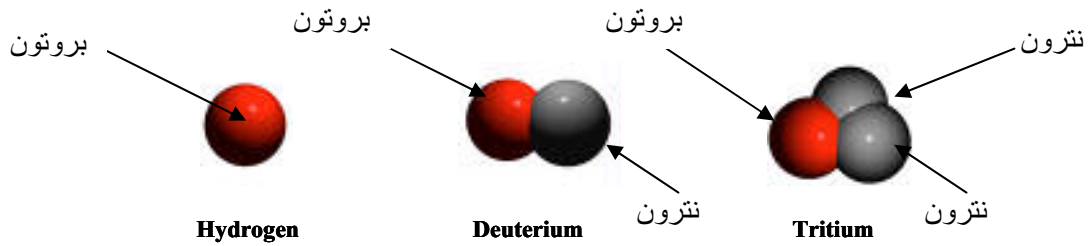
1- المقدمة

تتناول هذه الدراسة بعض الخواص الفيزيائية والكيميائية لعنصر الإتيريوم Yb بالإضافة إلى مخطط تأين هذا النظير والأطوال الموجية المناسبة لعملية الفصل وعمر السويات المستخدمة في التأين كما سنتناول الدراسة شروط الحزم البصرية من حيث الشدات و العرض الطاقى كما نتناول شروط الحزمة الذرية و أموراً أخرى تتعلق بعملية الفصل.

قبل الدخول بالتفاصيل التي تتعلق بالنظير ^{168}Yb من حيث بعض الخواص و طريقة الفصل نود أن نذكر بشكل موجز تعريف النظائر.

2- تعريف النظائر:

النظائر هي ذرات متشابهة في عدد البروتونات و تختلف عن بعضها في عدد النوترونات ضمن النواة وبالتالي هي متماثلة في عدد الإلكترونات التي تحيط بالنواة وذلك لشرط تعادل الشحنة. إن تساوي عدد الإلكترونات في النظائر يكسبها خواص كيميائية متشابهة جداً مما يجعل عملية فصلها صعبة. نذكر مثلاً بسيطاً على ذلك إن لكل من الهيدروجين و الديتيريوم و التريتيوم بروتوناً واحد ولكنها تختلف في عدد النوترونات كما هو مبين في الشكل (1)



الشكل (1): نواة كل من من الهيدروجين و الديتيريوم و التريتيوم

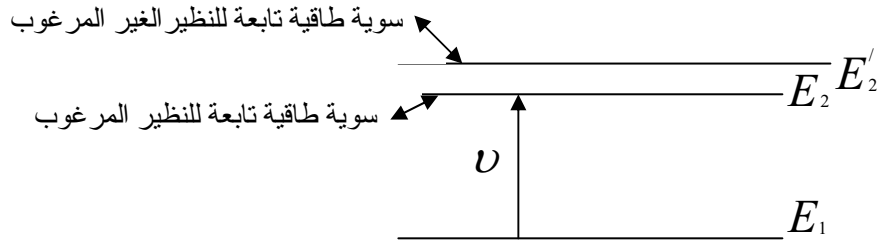
إذا كان Z هو عدد البروتونات و N هو عدد النوترونات فإن العدد الكتلي A يعرف في العلاقة $A=Z+N$ وبالتالي فإن لكل نظير عدد كتلي مختلف عن الآخر. غالباً ما يستثمر هذا الفرق في العدد الكتلي في عملية الفصل

3- منشأ طريقة فصل النظائر بالليزر

بما أن للنوترون عزمًا مغناطيسياً ذاتياً وبالتالي فإن السبين النووي يختلف من نظير إلى آخر. يؤدي هذا الاختلاف إلى فوارق في الطيوف الذرية الناتجة عن البنية فوق الدقيقة (وذلك بأخذ التأثير المتبادل بين سبين النواة و الاندفاع الزاوي المداري للإلكترون بعين الاعتبار) وهذا ما يستثمر في حال استخدام الليزر في فصل النظائر.

قد يكون السبين النووي لنظير ما معدوماً ($I=0$) وللآخر قيمة معينة ($I=1/2$) كما هو الحال في كل من ^{168}Yb و ^{171}Yb على الترتيب. يؤدي هذا إلى فرق كبير نسبياً في طيوف الامتصاص و بالتالي يكون هناك فرق في التواتر و طول الموجة التي يحدث عندها الامتصاص.

و تجدر الإشارة هنا إلى أنه قد تقدم كل من Jean Robieux و Jean Michel Auclair في / 21 / أكتوبر لعام 1963 [1] بأول براءة اختراع في فصل النظائر و ذلك بالاستفادة من خاصية ترابط الأشعاع الليزري و إمكانية تركيز الطاقة ضمن مجال طيفي ضيق جداً.



الشكل (2): E_2 ، E_2' سويتان طاقتان إلكترونيتان تعودان لنظيرين مختلفين

فإذا كان لدينا السويتات الطاقية E_2 ، E_2' ، E_1 كما في الشكل (2) فإن تواتر الفرق الطاقى يعطى بالعلاقة

$$V_{12} = \frac{E_2 - E_1}{h} \neq \frac{E_2' - E_1}{h}$$

وإذا كان تواتر الشعاع الليزري U فإذا تطابق كلاً من التواترين $\nu_1 = \nu_2$ فإن انتقالاً إنتقائياً يمكن أن يحدث وبالتالي تحدث إثارة لنظير دون نظير آخر وفي مرحلة لاحقة يمكن أن يؤين النظير المثار وبالتالي يمكن فصل هذا النظير عن النظائر الأخرى الغير مثارة أو مؤينة.

فإذا كانت السويتات الطاقية التي يتفاعل معها الإشعاع الليزري تعود إلى سويتات البنية فوق الدقيقة لذرات العنصر و هو في حالة بخار ذري فإن الطريقة تعرف بالطريقة الذرية لفصل النظائر بالليزر **Atomic Vapor Laser Isotope Separation (AVLIS)** أما إذا كانت السويتات التي يتفاعل معها الإشعاع الليزري تعود إلى السويتات الطاقية للجزيء الذي يحتوي ذرة العنصر فإن الطريقة تعرف بالطريقة الجزيئية لفصل النظائر بالليزر **Molecular Laser Isotope Separation (MLIS)** و نذكر هنا أن الطريقة الذرية هي الأكثر كفاءة وفعالية ومردوداً.

4- الخواص الفيزيائية و الكيميائية لعنصر الإتيربيوم Yb

الرمز الذري Yb

العدد الذري 70

الوزن الذري 173.04

التوزيع الإلكتروني : $[Xe]6s^24f^{14}$

الكثافة 6.965 gm/cc

درجة حرارة الإنصهار 819°C

درجة حرارة الغليان 1194°C

الناقلية الحرارية: $0.349 \text{ W/cm/ K @ } 298.2 \text{ K}$

حرارة التبخير: 38 K-Cal/g at 1194 ° C

الكهرسلبية: 1.1 Paulings

الحرارة النوعية: 0.0346 Cal/g/ K @ 25 ° C

من خواص هذا المعدن أنه طري، طيع (قابل للطرق)، لدن وهو ذو بريق فضي لامع. يستخدم في خلائط (stainless steel) لتحسين متانتها و خواصها الميكانيكية. رغم أن هذا المعدن مستقر إلا أنه يفضل حفظه في حاويات (علب) مغلقة وذلك لحمايته من الهواء و الرطوبة. يتفاعل هذا المعدن بشكل بطيء مع الماء فيما ينحل بسرعة في أحماض المعادن [2].

يستخدم أحد نظائر هذا العنصر و هو النظير المشع ^{169}Yb (32d) كمنبع إشعاعي لأجهزة x-ray المحمولة و المستخدمة في التصوير الإشعاعي في الأماكن التي لا تتوفر فيها الكهرباء. ليس لهذا العنصر خواص بيولوجية إلا أنه يقال أنه يحرض عمليات الأيض أو الاستقلاب (metabolism)

5- المنشأ التاريخي للعنصر

تم إكتشافه في عام 1878 من قبل Maignac في قرية سويدية تدعى إتربي (Ytterby) حيث عرف باسم إتربيا (Ytterbia) و من ثم عرف فيما بعد باسم إربيا (erbia).

يترافق وجود عنصر الإيتربيوم مع بعض عناصر الأتربة النادرة الأخرى. يتم استخراجها بشكل تجاري من رمل يعرف (Monazite Sand) والذي يحتوي على نسبة 0.03% من هذا العنصر. يتم عزله عن طريق التبادل الشاردي في المحاليل حيث تم إحراز تقدم كبير في الفترة الأخيرة في عملية فصله عن باقي العناصر النادرة. يتوفر عنصر الإيتربيوم Yb بشكل تجاري و بنقاوة جيدة 99% بسعر حوالي 875\$/Kg . يتوفر النظير ^{168}Yb بشكل تجاري على شكل أكسيد و حسب شركة Isoflex فإن سعره يتعلق بدرجة الإغناء حيث أن قيمة واحد ميلي غرام من الأوكسيد ذي إغناء قدره 35.2% تبلغ \$190 دولار في حين أن هذا المبلغ يصل إلى \$690 دولار من أجل درجة إغناء 85.2%.

6- النظائر المستقرة لعنصر Yb

نورد في الجدول (1) النظائر المستقرة لعنصر الإيتربيوم Yb

النظير	الوفرة الطبيعية (%)	السين النوي
Yb (168)	0.13	0
Yb (170)	3.05	0
Yb (171)	14.30	-1/2
Yb (172)	21.90	0
Yb (173)	16.20	-5/2
Yb (174)	31.80	0
Yb (176)	12.70	0

الجدول (1): النظائر المستقرة لعنصر الإيتربيوم Yb

7- النظائر المشعة لعنصر Yb

كما نورد في الجدول (2) النظائر المشعة لعنصر الايتريبيوم Yb

النظير	الكتلة	عمر النصف	نمط الإضمحلال	السيين النووي
166Yb	165.933875	2.363 d	EC to 166Tm	0
167Yb	166.934947	17.5 m	EC to 167Tm	5/2
169Yb	168.935187	32.03 d	EC to 169Tm	7/2
175Yb	174.941273	4.19 d	b- to 175Lu	7/2
177Yb	176.945257	1.9 h	b- to 177Lu	9/2

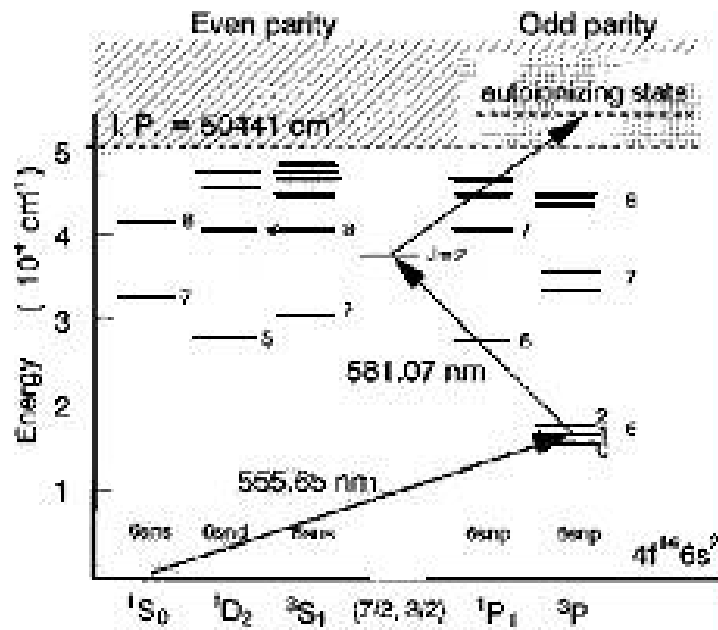
الجدول (2): النظائر المشعة لعنصر الايتريبيوم Yb

8- مخططات التأين التجاوبي

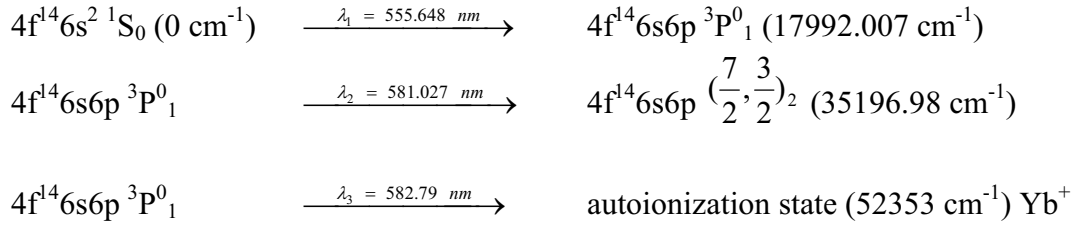
لدى مراجعة بعض الأدبيات العلمية [3] تبين أن هناك مخططين للتأين حيث يستخدم الأول ثلاثة أطوال موجية ضمن المجال الرئي للطياف الضوئي والآخر يستخدم طولين موجيين ضمن المجال الفوق بنفسجي.

1-8 المخطط الأول

يبين الشكل (3) مخطط التأين التجاوبي وذلك باستخدام ثلاثة أطوال موجية



الشكل (3): مخطط التأين التجاوبي وذلك باستخدام ثلاثة أطوال موجية



2-8 المخطط الثاني



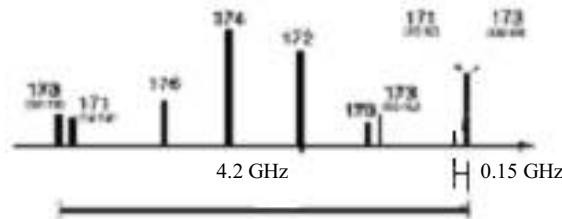
تجدر الإشارة إلى أن المخطط الأول هو المناسب أكثر للاستخدام في حالتنا وذلك نظراً لإمكانية توفر الأطوال الموجية اللازمة لعملية التأيين من الليزر الصبغى المضخوخ بليزر بخار النحاس.

يبين الجدول (3) الإنشطار النظيري بالنسبة للخط الأول ($\lambda_1 = 555.648\text{ nm}$) من المخطط الأول من مخططات

التأيين التجاوبي ويليه التمثيل البياني للجدول في الشكل (4)

Mass number	F' - F	ΔU (MHz)
173	7/2 - 5/2	-2409
171	1/2 - 1/2	-2136
176	1 - 0	-948
174	1 - 0	0
172	1 - 0	993
170	1 - 0	2283
173	5/2 - 5/2	2301
168	1 - 0	3656
173	3/2 - 5/2	3804
171	3/2 - 1/2	3816

الجدول (3): الإنشطار النظيري بالنسبة للخط الأول ($\lambda_1 = 555.648\text{ nm}$)

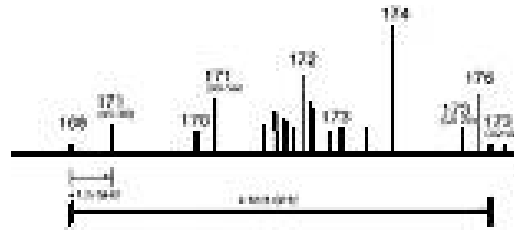


الشكل (4): التمثيل البياني للجدول (3)

كما يبين الجدول (4) الإنشطار النظيري بالنسبة للخط الثاني ($\lambda_2 = 581.027 \text{ nm}$) من المخطط الأول من مخططات التآين التجاوبي ويليه التمثيل البياني للجدول في الشكل (5)

Mass number	F' - F	ΔU (MHz)
168	2 - 1	-10293
171	3/2 - 3/2	-8805
170	2 - 1	-6318
171	5/2 - 3/2	-5973
173	1/2 - 3/2	-4147
173	3/2 - 3/2	-3612
173	5/2 - 3/2	-3302
171	3/2 - 1/2	-2862
172	2 - 1	-2711
173	7/2 - 5/2	-2532
173	3/2 - 5/2	-2426
173	5/2 - 5/2	-1833
173	9/2 - 7/2	-732
174	2 - 1	0
173	7/2 - 7/2	2172
176	2 - 1	2578
173	5/2 - 7/2	2894

الجدول (4): الإنشطار النظيري بالنسبة للخط الثاني ($\lambda_2 = 581.027 \text{ nm}$)



الشكل (5): التمثيل البياني للجدول (4)

9- الانتقائية S (selectivity)

تعرف الانتقائية (S): على أنها القابلية (المقدرة) على تأين النظير المرغوب مع بقاء النظائر الأخرى غير مثارة، أو القدرة على كشف نظير ذي وفرة منخفضة بوجود نظائر أخرى ذات وفرة عالية. فمن أجل انتقال ما هي نسبة شدة النظير المرغوب عند تواتره التجاوبي إلى شدة النظير الأخرى (المتداخل معه) وذلك عند التواتر التجاوبي للنظير المرغوب

$$S(\omega) = \frac{I_{M1}(\omega)}{I_{M2}(\omega)}$$

$I_{M1}(\omega)$ شدة النظير M1 عند التواتر التجاوبي (ω)

$I_{M2}(\omega)$ شدة النظير M2 عند التواتر التجاوبي (ω)

ومن أجل تأين ثنائي الخطوة تُحدد الانتقائية بالعلاقة

$$S(\omega_1, \omega_2) = \frac{I_{M1}(\omega_1, \omega_2)}{I_{M2}(\omega_1, \omega_2)}$$

$I_{M1}(\omega_1, \omega_2)$ وفرة النظير (M1) عندما يكون الليزر الأول مولفاً على التواتر (ω_1) والليزر الثاني مولفاً على التواتر (ω_2)

$I_{M2}(\omega_1, \omega_2)$ وفرة النظير (M2) عندما يكون الليزر الأول مولفاً على التواتر (ω_1) والليزر الثاني مولفاً على التواتر (ω_2)

وتحدد الانتقائية في حال وجود أكثر من نظيرين متداخلين بالشكل

$$S(\omega) = \frac{I_{M1}(\omega)}{I_{all}(\omega)}$$

$I_{M1}(\omega)$ شدة النظير M1 عند التواتر التجاوبي (ω)

$I_{all}(\omega)$ شدة كل النظائر الأخرى غير المرغوبة عند التواتر التجاوبي (ω) للنظير المرغوب

تعتمد الانتقائية الاجمالية (Overall selectivity) في عملية التأين الفوتوني متعددة المراحل (الخطوات) على

انتقائية كل خطوة في هذه العملية وتحسب الانتقائية عندها بالشكل

$$S = \prod_{i=1}^n S_i$$

S_i : انتقائية الانتقال التجاوبي (i).

n : عدد الانتقالات التجاوبية في مخطط التأين الفوتوني

فالانتقائية هي إذاً هي نسبة الوفرة النهائية إلى الوفرة البدائية فإذا كانت الوفرة البدائية للنظير 0.001%

وأصبحت بعد الإثارة الإنتقائية % 100 عندها نقول أن قيمة الإنتقائية هي $S = 10^5$.

10- عمر السويات الطاقية و معدل الإنتقالات

نذكر في الجدول (5) عمر و معدل الإنتقال للسويات المستخدمة في عملية الإثارة الإنتقائية كما هو مذكور في المرجع [3]

Transition	Lifetime (ns)	Excitation Cross section (cm ²)	Saturation Energy (μJ cm ⁻²)	Fluence (Photon cm ⁻²)
¹ S ₀ - ³ P ₁ 555.648 nm	850	1.16 × 10 ¹⁶	309	8.6 × 10 ¹⁴
³ P ₁ ⁰ - (⁷ / ₂ , ³ / ₂) ₂ 581.027 nm	1120	0.96 × 10 ¹⁶	357	1.0 × 10 ¹⁵

الجدول (5): عمر و معدل الإنتقال للسويات المستخدمة في الإثارة الإنتقائية

10-1 سويات التأين الذاتي

كما هو مذكور من قبل (Shenstone, Phys. Rev., 38, 873, 1931) فإن السويات الطاقية المكتملة في الذرة تنتشر حتى فوق مجال التأين المستمر ولكنها تكون عريضة طاقياً أي ذات عمر صغير جداً هذه السويات تقع فوق المجال المستمر للتأين (فوق نهايات السلاسل الطاقية) وتسمى بسويات التأين الذاتي حيث أنه إذا تمت إثارة الإلكترونات إلى تلك السوية فإن الذرة تتأين بشكل سريع جداً وكما هو معلوم فإن المقطع العرضي للإنتقال بين سويتين محددتين يكون كبيراً بالمقارنة مع المقطع العرضي للإنتقال بين سوية محددة والمجال المستمر وبالتالي فإن إختيار سويات التأين الذاتي يساعد في جعل المقطع العرضي للإنتقال أكبر منه في حال الإنتقال إلى المجال المستمر مباشرة. وكما هو معلوم فإنه كلما كان المقطع العرضي للإنتقال أكبر كلما زادت مردودية التفاعل وبالتالي كانت شدة الإشعاع اللازمة لتحقيق الإنتقال أقل.

يبين الجدول (6) الإنتقالات من السوية (⁷/₂, ³/₂)₂ إلى سويات التأين الذاتي [4] بالنسبة لعنصر الإثريبيوم

Absorption wavelength, nm	Energy of self-ionization level, cm ⁻¹	Width of self-ionization level, cm ⁻¹
574.38	52609.4	1.5
582.79	52353.2	13.5
588.75	52186.0	77
601.91	5197.0	25

الجدول (6): الإنتقالات من السوية (⁷/₂, ³/₂)₂ إلى سويات التأين الذاتي

إن المقطع العرضي للإنتقال بين السوية $(\frac{7}{2}, \frac{3}{2})^2$ و سوية التآين الذاتية (52353.2 cm^{-1}) هو $6.7 \times 10^{16} \text{ cm}^2$ يبين الجدول (7) عمر بعض السويات المحسوبة من قبل Porsev وزملائه [5]

State	Configuration	Lifetimes (nsec)
3D_1	$5d6s$	372 (30)
3D_2	$5d6s$	430 (35)
3D_3	$5d6s$	540 (55)
1D_2	$5d6s$	4400 (1800)
3S_1	$5d7s$	13.5 (1.1)
1S_0	$5d7s$	33 (13)
$^3P^0_1$	$6s6p$	875 (250)
$^3P^0_2$	$6s6p$	15.0 (1.5) sec
$^1P^0_1$	$6s6p$	5 (2)

الجدول (7): عمر بعض السويات المحسوبة من قبل Porsev وزملائه [5]

10-2 عمر السويات المثارة في الإيتريبيوم النري

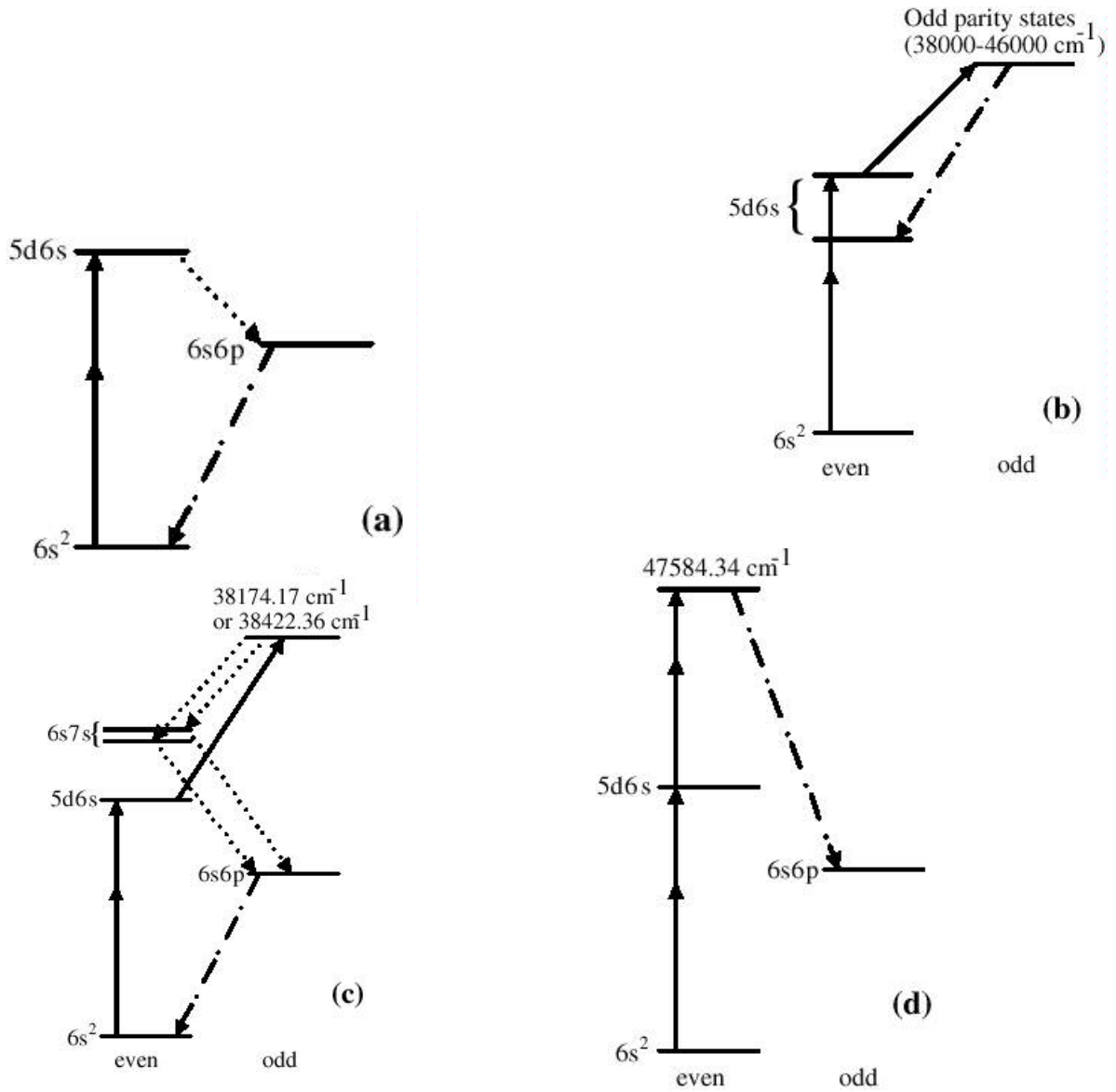
لقد درس كل من Bowers و زملائه [6] عمر عدد من السويات المثارة في Yb الذري حيث تم قياس و تحديد عمر 21 سوية و ذلك بعد إثارة الذرة باستخدام أشعة الليزر و تسجيل إشارة الفلورة الناتجة عن السويات المثارة كتابع للزمن. طبعاً تم استخدام ليزرات ذات زمن نبضة قصيرة بالمقارنة مع عمر السوية المدروسة. و فيما يتعلق ببعض التفصيلات التجريبية فقد استخدم Bowers و زملاؤه [6] فرناً لتشكيل حزمة ذرية من Yb حيث يتألف هذا الفرن بشكل بسيط من أنبوب التنتاليوم (Tantalum) بقطر 0.5 cm و طول قدره 6 cm أحد طرفيه مغلق. يسخن هذا الأنبوب بواسطة وشيعة كهربائية معزولة تلف حول الأنبوب. يعمل هذا الفرن عند درجة حرارة حوالي 750 K (تتوافق هذه الدرجة مع ضغط بخار مشبع من مرتبة 10 mTorr. يملأ هذا الأنبوب ببضعة غرامات من Yb المعدني والذي بدوره يمكن أن يولد حزمة ذرية لفترة عمل تتراوح بين 10 و 20 ساعة عمل. الكثافة الذرية في منطقة التفاعل و على بعد 5 cm من فتحة الفرن هي تقريباً $5 \times 10^{10} \text{ atoms/cm}^3$. من أجل التخلص من تأثير (Hanle effect or Zeeman quantum beats) على قياس عمر السويات تمت حماية منطقة التفاعل بإحاطتها بطبقة ذات سماكة 1 مم من خليطة CO-NETIC ذات النفوذية العالية. استخدمت ثلاث ليزرات في عملية الإثارة من أجل اسكان السوية المراد دراسة عمرها الزمني عن طريق تسجيل شدة الفلورة كتابع للزمن. حيث استخدم ليزر YAG:Nd المضاعف التواتر لضخ ليزرين صباغيين كما استخدم جزء من الحزمة الأساسية 1064 nm في إثارة بعض السويات التي تتطلب انتقالات

فوتونية مضاعفة غير منطبقة (nondegenerate two photon transitions) كما هو مبين في الجدول (8)

و الشكل (6)

Energy (cm ⁻¹)	Leading configuration and term assignment	Excitation And detection Scheme	λ Fluorescence Detected, nm	τ, ns
Even Parity States				
24489.102	4f ¹⁴ 5d6s ³ D ₁	a	556	380(30)
24751.948	4f ¹⁴ 5d6s ³ D ₂	a	556	460(30)
27677.665	4f ¹⁴ 5d6s ¹ D ₂	a	399,556	6700(500)
47584.34	4f ¹³ 5d6s6p ¹ P ₁	d	330,338	125(12)
Odd Parity States				
17992.007	4f ¹⁴ 6s6p ³ P ₁	a	556	850(50)
38174.17	4f ¹⁴ 6s6p ³ P ₁	c	399	120(30)
38422.36	4f ¹³ 5d6s ² ³ D ₁	c	399	120(30)
42647.72	4f ¹³ 5d ² 6s ⁵ D ₂	b	551	140(13)
42725.78	4f ¹⁴ 5d6p ³ F ₂	b	548	68(9)
43254.78	4f ¹⁴ 5f6s ³ F ₃	b	540	88(10)
43297.51	4f ¹⁴ 5f6s ¹ F ₃	b	539	62(9)
43433.85	4f ¹⁴ 5f6s ³ F ₂	b	528,535	26(7)
43532.77	4f ¹³ 5d ² 6s ⁵ D ₁	b	525,532	1820(200)
43659.38	4f ¹⁴ 6s8p ³ P ₁	b	522,529	140(20)
43805.69	4f ¹⁴ 6s8p ³ P ₂	b	518,525,539	140(20)
43815.67	4f ¹³ 5d ² 6s ⁵ P ₃	b	525,539	120(12)
44017.60	4f ¹⁴ 6s8p ¹ P ₁	b	512,519	50(20)
44251.88	4f ¹³ 5d ² 6s ⁵ S ₂	b	513,527	450(30)
44453.47	4f ¹⁴ 5d6p ³ F ₃	b	508	22(7)
45155.33	4f ¹⁴ 5d6p ¹ D ₂	b	503	25(20)
45956.27	4f ¹⁴ 6s6f ³ F ₂	b	466,472	53(9)

الجدول (8): عمر السويات المثارة في الإثرييوم الذري



الشكل (6): مخططات الإثارة و الفلورة

الخط المستمر يمثل الإثارة باستخدام الليزر والخط المنقط يمثل عدم ملاحظة الفلورة و الخط نقطة - شحطة يمثل الفلورة المسجلة. هذا المخطط توضيحي ولا يتناسب مع القيم الحقيقية للسويات الطاقية.

3-10 التابعية الزمنية لإشارة الفلورة

في كثير من الحالات كان من الممكن ملاحظة الفلورة الناتجة بشكل مباشر من السوية التي تمت إثارتها باستخدام الليزر كما هو مبين في الشكل (6-b,d) ففي حالة أن الفلورة تمت بشكل مباشر من السوية المثارة فإن التابعية الزمنية لإشارة شدة الفلورة يمكن أن تعطى بالعلاقة التالية:

$$S(t) \propto \frac{1}{\tau} \exp(-t/\tau)$$

حيث τ هي عمر السوية المثارة.

أما في حالة تسجيل الفلورة من سوية أخفض من السوية المثارة وبالطبع أعلى من السوية الأرضية (الفلورة تحدث من سوية وسطية) فإن شدة الفلورة تتعلق في هذه الحالة بكل من عمر السوية المثارة τ_1 و عمر السوية الوسطية τ_2 كما في العلاقة التالية:

$$S(t) \propto \frac{1}{\tau_1 - \tau_2} (\exp(-t/\tau_1) - \exp(-t/\tau_2))$$

حيث τ_1 و τ_2 هما العمر الزمني لكل من السويتين المذكورتين.

وفي حال أن الفلورة سجلت من سوية ثالثة (أي تشكل شلال من ثلاث سويات مثارة) فإن التابعية الزمنية لشدة الفلورة من السوية الثالثة تعطى بالعلاقة:

$$S(t) \propto \frac{\tau_1 \exp(-t/\tau_1)}{(\tau_1 - \tau_2)(\tau_1 - \tau_3)} + \frac{\tau_2 \exp(-t/\tau_2)}{(\tau_2 - \tau_3)(\tau_2 - \tau_1)} + \frac{\tau_3 \exp(-t/\tau_3)}{(\tau_3 - \tau_1)(\tau_3 - \tau_2)}$$

حيث τ_1 و τ_2 و τ_3 تمثل العمر الزمني للسويات المثارة الثلاث المذكورة.

11- الوسائط الرئيسية في عملية فصل نظير ^{168}Yb باستخدام الليزر

كما هو مذكور في ورقة علمية مطولة لـ SI Yakovlenko [7] فإن

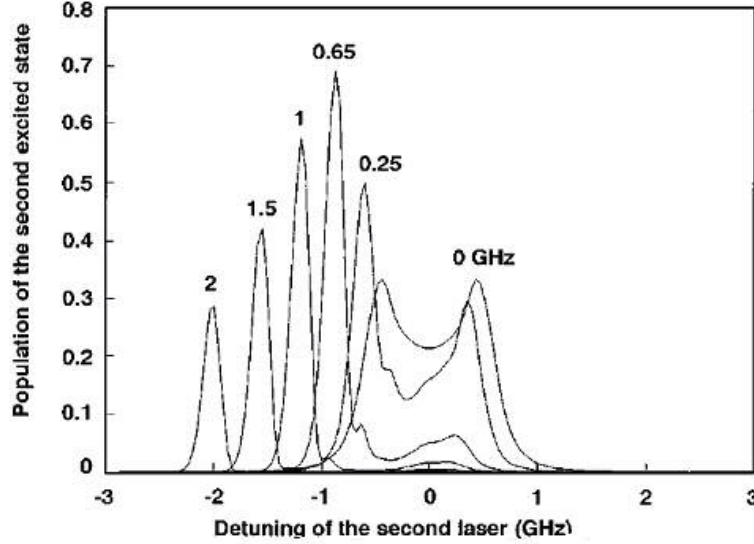
- كثافة البخار في منطقة التأيين هي $10^{12} \text{ atoms/cm}^3$ (1-5) و طول منطقة التأيين 1 m و المقطع العرضي للتفاعل $5-10 \text{ cm}^2$.
- معدل طاقة خرج الليزر الصباغي 1 W ~ بمعدل تكرارية 10 kHz عند كل من الأطوال الموجية $\lambda \approx 555.6 \text{ nm}$ و $\lambda \approx 581.1 \text{ nm}$. ومعدل طاقة خرج الليزر الصباغي 3-5 W بالنسبة للطول الموجي $\lambda \approx 582.8 \text{ nm}$ المستخدم في المرحلة الثالثة (مرحلة التأيين).

11-1 مواصفات الليزر الصباغي و ليزرات بخار النحاس

تضخ الليزر الصباغي بثلاث ليزرات بخار النحاس حيث أن العرض الزمني لنبضة بخار النحاس هي تقريباً 15 ns و بتكرارية 10 kHz. يستخدم أحد هذه الليزر كجهاز رئيسي و الليزران الآخران يستخدمان كمضخمين. يجب أن تتحقق استقرارية عالية في شدة الحزمة الليزرية. كما تستخدم وحدة إلكترونية متعددة المداخل من أجل تحقيق تزامن بين النبضات الليزرية في المجال من 1-2 ns. معدل طاقة خرج ليزري بخار النحاس المستخدم كمضخمين عند الطول الموجي 510 nm هي 18W و 30W. تراقب طول الموجة باستخدام مقياس طول موجة حيث تتم المعايرة باستخدام ليزر He-Ne مستقر. يقاس العرض الطاقوي بالنسبة لليزرين المستخدم في عملية الإثارة الإنتقائية للمرحلتين الأولى و الثانية بمقياس تداخلي و يجب ألا تتجاوز 0.5 GHz. أما عدم الإستقرارية فيجب ألا تتجاوز على المدى القصير 200 MHz و على المدى الطويل 400 MHz (فترة عمل تصل إلى 16 ساعة) و ذلك بسبب التغيرات الناتجة عن درجات الحرارة. يصحح الانحراف التواتري كل نصف ساعة أثناء التشغيل

12- تأثير توليف التواتر التجاوبي على إسكان السويات

درس كلا من Lee و Park و آخرون [8] تأثير توليف التواتر التجاوبي على إسكان السويات حيث يبين الشكل التالي اسكان السوية الثانية عندما يكون تواتر الليزر الأول مختلفاً عن التواتر التجاوبي للانتقال الأول بالقيم المذكورة في حين يتم تغير تواتر الليزر الثاني ليمسح المجال القريب من التواتر التجاوبي للانتقال الثاني.

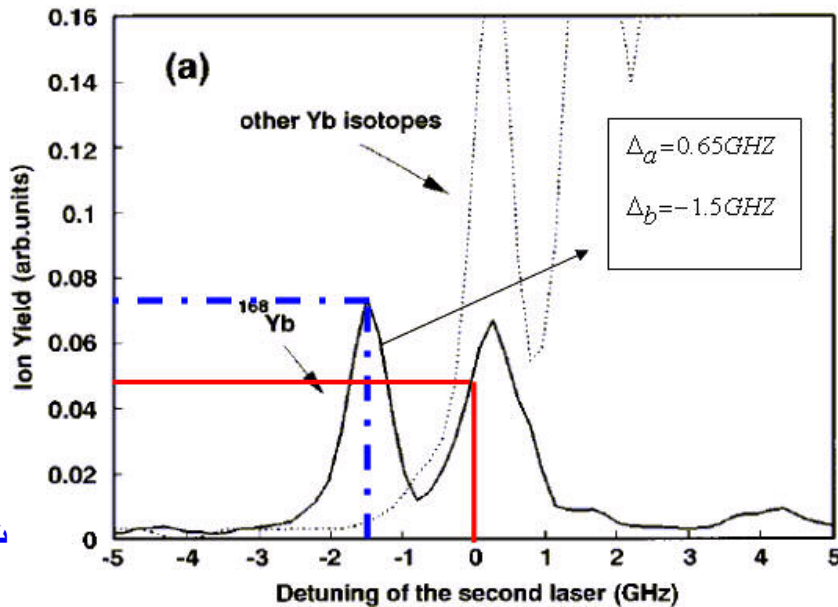


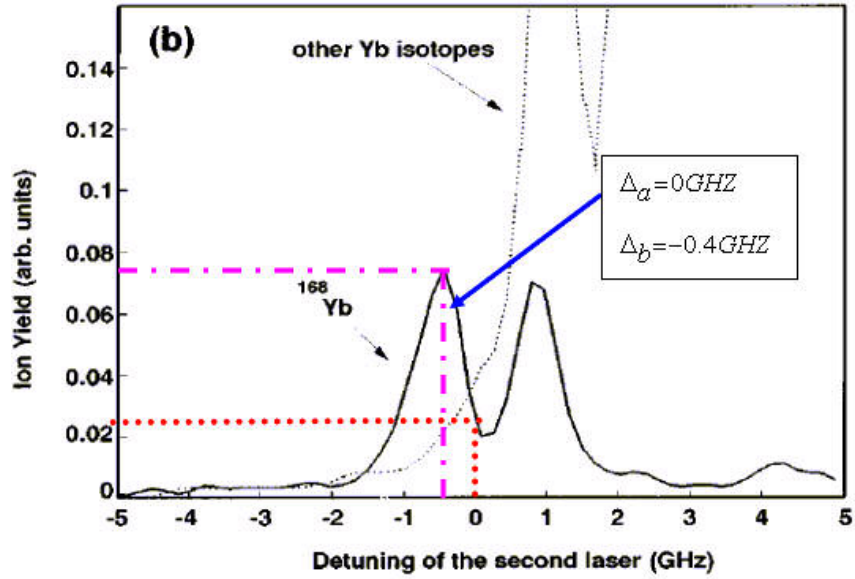
الشكل (7): اسكان السوية الثانية عندما يكون تواتر الليزر الأول مختلفاً عن التواتر التجاوبي للانتقال الأول

نلاحظ من الشكل (7) أنه مع ازدياد قيمة الإبتعاد عن التواتر التجاوبي (detuning) فإن اسكان السوية الثانية يزداد و يأخذ قيمة عظمى عندما تكون قيمة الإبتعاد هي 0.65 GHz. و مع استمرار ازدياد قيمة الإبتعاد فإن اسكان السوية الثانية يبدأ بالنقصان من جديد.

كما يبين الشكل (8) المرفق المنحنيات التي تبين كمية إنتاج الأيونات لكل من نظير الإيتيربيوم 168 المطلوب و النظائر الأخرى مع تغير التواتر (التوليف) للانتقال الثاني و ذلك باعتبار قيمتين للتواتر الأول: القيمة الأولى

(a) ممثلة بالمنحني $\Delta_a = 0.65 \text{ GHz}$ و القيمة الثانية من أجل $\Delta_a = 0 \text{ GHz}$ ممثلة بالمنحني (b)

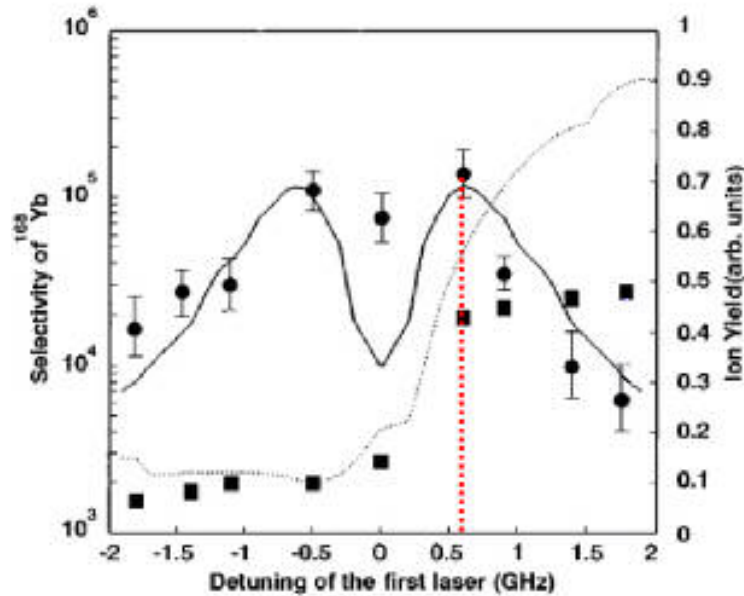




الشكل (8): منحنى كمية إنتاج الأيونات لكل من ^{168}Yb والنظائر الأخرى مع تغير التواتر للإنتقال الثاني

كما يبين الشكل (9) النتائج التجريبية والعديدية لكل من الإنتقائية وكمية إنتاج الأيونات ^{168}Yb كتابع لتغير تواتر الليزر الأول. يمثل الخط المستمر كمية إنتاج الأيونات (عددياً)، يمثل الخط المنقط الإنتقائية (عددياً)، تمثل النقط الدائرية النتائج التجريبية لكمية إنتاج الأيونات، وأخيراً تمثل النقط المربعة النتائج التجريبية للإنتقائية كما يلاحظ من الشكل أنه مع تغيير التوليف من الأحمر باتجاه الأزرق فإن الإنتقائية تزداد بشكل ملحوظ حيث أن القيمة المثلى للتوليف التي تتوافق مع كمية أيونات وإنتقائية عاليتين هي في مجال التوليف الأزرق وهي

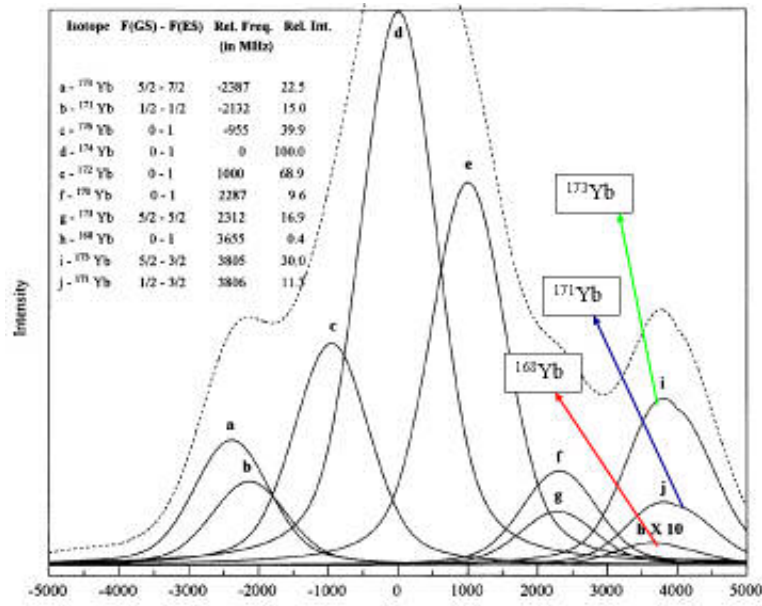
$$\Delta_a = 0.65 \text{ GHz}$$



الشكل (9): النتائج التجريبية والعديدية لكل من الإنتقائية وكمية إنتاج الأيونات ^{168}Yb

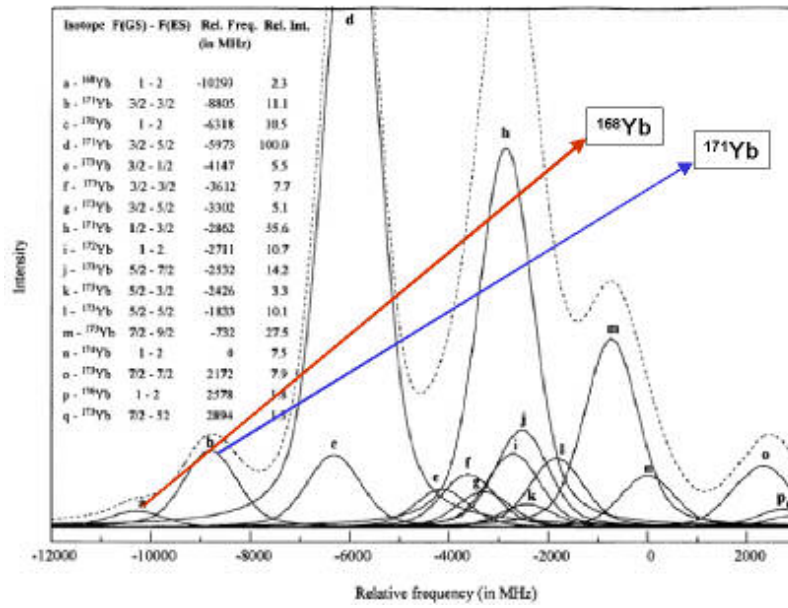
يبين الشكل (10) محاكاة لطيف الإثارة لعنصر Yb من أجل الإنتقال الأول $^3P_1^0 \rightarrow ^1S_0$ $\lambda_1 = 555.648 \text{ nm}$

بافتراض أن عرض الخط الليزري هو 1000 MHz و أن التوسع الدوبلري للسويات هو 500 MHz. كما هو ملاحظ إن هناك تراكباً (overlap) كبير بين أجنحة القمم لكل من النظيرين ^{171}Yb و ^{173}Yb مع النظير ^{168}Yb و نتيجة لهذا التراكب فإن الإنتقائية صغيرة إلى حد ما. أي أنه ولهذا السبب فإنه في المرحلة الأولى من الإثارة فإن النظائر الثلاث ^{171}Yb ، ^{173}Yb و ^{168}Yb تثار معاً. كما تبين أنه حتى باستخدام خط ليزري أضيق تظل الإنتقائية منخفضة أي أنه يطرأ تحسن قليل على الإنتقائية من القيمة 4.3×10^{-3} إلى القيمة 6.4×10^{-3} لذا فإن استخدام ليزر بعرض طاقي كبير نسبياً (~1000 MHz) لايشكل خسارة كبيرة في الإنتقائية في هذه المرحلة.



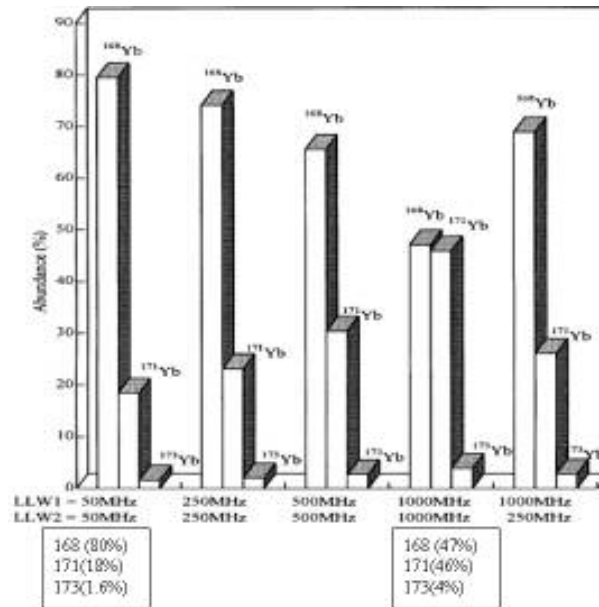
الشكل (10): محاكاة لطيف الإثارة لعنصر Yb من أجل الإنتقال الأول $^3P_1^0 \rightarrow ^1S_0$ $\lambda_1 = 555.648 \text{ nm}$

يبين الشكل (11) محاكاة لطيف الإثارة لعنصر Yb من أجل الإنتقال الثاني $(\frac{7}{2}, \frac{3}{2})_2 \rightarrow ^3P_1^0$ $\lambda_2 = 581.027 \text{ nm}$ وذلك أيضاً بافتراض أن عرض الخط الليزري هو 1000 MHz و أن التعريض الدوبلري للسويات هو 500 MHz. كما هو ملاحظ أن التراكب (overlap) بين القمم لكل من النظيرين ^{171}Yb و ^{168}Yb أقل منه في حال الإنتقال الأول و نتيجة لهذا فإن زيادة توسع الخط الليزري يؤدي إلى انخفاض في الإنتقائية بشكل ملحوظ. ولهذا السبب فإن الإنتقائية الكلية تعتمد بشكل حرج على إنتقائية المرحلة الثانية و ذلك باعتبار أن الإنتقال الثالث هو شبه تام بسبب وجود سويات التآين الذاتي



الشكل (11): محاكاة لطيف الإثارة لعنصر Yb من أجل الإنتقال الثاني

يمثل الشكل (12) درجات الإغناء للنظائر ^{171}Yb ، ^{173}Yb و ^{168}Yb كتابع لعرض خط ليزرات الإثارة الأول (LLW1) والثاني (LLW2) وذلك بافتراض ان التوسع الدوبلري هو 500 MHz.



الشكل (12): درجات الإغناء للنظائر ^{171}Yb ، ^{173}Yb و ^{168}Yb كتابع لعرض خط ليزرات الإثارة

ما هو متوفر القسم:

يتوفر في قسم الفيزياء ثلاث ليزرات بخار النحاس ذات استطاعة حوالي 4 W للطولين الموجيين الأخضر والأصفر معاً حيث استطاعة الضوء الأخضر عند الطول 510 nm هي حوالي 1 W وللضوء الأصفر عند الطول 578 nm هي حوالي 3W . إن معدل التكرار (repetition rate) للليزرات بخار النحاس هو 16kHz والعرض الزمني للنبضة هو 40 ns. أما بخصوص الليزرات الصباغية فيجري العمل في الدائرة على تصميم ليزرات صباغية ذات عرض طاقي ضيق واستطاعة عالية مناسبة لكي تستخدم في مشروع فصل النظائر في الليزر. كما يجري العمل على تصميم حجرة فصل تتضمن مبخر حراري لذرات الإيتريوم.

المعوقات والصعوبات:

تكمن الصعوبات في هذا العمل في أنه يجب بناء ليزرات صباغية ذات عرض طاقي ضيق واستقرارية عالية بالإضافة على كون هذه الليزرات ذات استطاعة عالية. كما يتطلب العمل بالإضافة إلى تقنيات تصنيع الليزرات تقنيات أخرى مثل توليد حزمة ذرية من المعدن المراد فصله ذات كثافة محددة. كما يتطلب العمل عزل الأيونات المشكّلة من النظير المرغوب بعد تفاعل البخار مع الليزر و ذلك بواسطة إلكترونيات فصل كهربائية. كما يجدر الذكر أن كل من أنظمة الليزر و المبخر وإلكترونيات الفصل ومطيافية زمن الطيران والليزرات الصباغية يجب أن ترتبط على الحاسب معاً ويتحكم بها بالإضافة إلى موضوع التزامن المطلوب بين الليزرات الصباغية الثلاث وهو من مرتبة النانومترات. كما يجدر بالذكر أن تصحيح صدر الموجة يلعب دوراً مهماً في زيادة مردودية التفاعلات بين المادة الإشعاع.

13- خلاصة

يمكن أن نستخلص من هذه الدراسة المكتبية أن عملية فصل النظائر بالليزر هي تقنية فعالة و جيدة و ذات مردودية مرتفعة إلا أنها تحتاج إلى ليزرات صباغية ذات عرض طاقي ضيق بما لا يتجاوز 500 MHz و استقرارية عالية بحدود 200 MHz. طاقة هذه الليزرات تتراوح بين 1-5 W حسب طول الموجة و نوعية الانتقال و المقطع العرضي للانتقال كما تقدم ذكره سابقاً. عادة تضخ هذه الليزرات الصباغية بثلاثة ليزرات بخار النحاس ذات طاقات تتراوح بين 15-30W. كما تجدر الإشارة إلى أنه يمكن أن تضخ الليزرات الصباغية بليزرات صلبة مثل Nd:YAG ذات الطاقات العالية.

- 1- High power laser interactions: Isotopes separation nuclear fusion control elementary particles selective creation, *Robieux, Jean*, Hampshire: Intercept limited, 2000
- 2- CRC handbook of chemistry and physics: A ready reference book of chemical and physical data, *Lide, David R* : Edition (24) 83rd Ed.
- 3- Selective photoionization of the ytterbium atom by coherent two-photon excitation, *Hyumin Park, Jongmin Lee, Jai-Hyung Lee, and Joon-Sung Chang*; : Physical Review A, 53 (3) 1751-1755 (1995).
- 4- Effective scheme of photoionization of Ytterbium atoms for laser separation of isotopes, *Krynetskii, B.B., V.A. Mishin, and A.M. Prokhorov*.: Journal of Applied Spektrosk., v. 54 p. 338-343, 1991
- 5- Electric-dipole amplitudes, lifetimes, and polarizabilities of the low-lying levels of atomic ytterbium, *SG Porsev, YG Rakhlina, MG Kozlov* : Physical Review A, 1999, Vol 60, Iss 4, pp 2781-2785,
- 6- Experimental investigation of excited-state lifetimes in atomic ytterbium, *CJ Bowers, D Budker, ED Commins, D DeMille, SJ Freedman, AT Nguyen, SQ Shang, M Zolotarev*: Physical Review A, 1996, Vol 53, Iss 5, pp 3103-3109
- 7- Principal physical problems in laser separation of weighable amounts of a rare ytterbium isotope, *SI Yakovlenko*: Quantum Electronics 28 (11) 945-961 (1998)
- 8- Selective photoionization of ^{168}Yb in a three-level atomic medium by the collinear propagation of laser pluses, *A.S. Choe, Yongjoo Rheet, Jongmin Lee, M. A. Kuzmina and V. A. Mishin*: J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 28 (1995) 3805- 3820
- 9- Studies on the isotope selective photoionization of the low-abundant ^{168}Yb isotope, *M. Sankari, and M. V. Suryanarayana*: J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 31 (1998) 261- 273



SY0501275

**SYRIAN ARAB REPUBLIC
ATOMIC ENERGY COMMISSION (AECS)
DAMASCUS, P.O.BOX 6091**



**Report on Scientific Bibliographic Study
Department of Physics**

**Separation of ^{168}Yb isotope using (AVLIS) method
Atomic Vapor Laser Isotope Separation**

Dr. A. K. Jazmati