مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية ـ المجلد ١٣ (العدد ٣) ١٤١٢هـ ـ ١٩٩١م

تطبيقات جديدة لليزر ، الطيف الكتلوي التشردي التجاوبي للكالسيوم

د. إبراهيم كامل بلال
أستاذ مساعد في كلية العلوم
قسم الفيزياء ـ جامعة تشرين

سنستعرض في هذا البحث بإيجاز بعضاً من تطبيقات الليزر الجديدة مركزين بشكل خاص على الطيف الكتلوي التشردي التجاوبي (RIMS) لأبخرة المعادن . ثم سنستعين بطريقة RIMS لدراسة إمكانية تشرد هذه المعادن تجاوبياً بثلاث فوتونات،أي إيجاد الطرق التجاوبية الانتقائية نظائرياً لتشردها بفوتونين . وأخيراً سنستفيد من هذه الطرق في إيجاد وسيلة محسنة لإخصاب وكشف نظائر الكالسيوم .

منذ اكتشاف الليزر في الستينات كان يمكن الحصول من تشغيله الحر على استطاعة خرج من مرتبة KW . لكن بالاستفادة من طرق المفتاح Q (Q - Switches) وغلق النسق (mode locking) يمكن الحصول على نبضة ليزرية استطاعتها من مرتبة MW أو GW.وحالياً يستحصل من الليزر على استطاعة بحدود TW و PW باستخدام طرق التضخيم المتتابع (Chirpped amplification) وبزيادة استطاعة خرج النبضة الليزرية يتناقص عرضها حتى أصبح الآن من مرتبة Fsec . وإذا أضفنا إلى هذه الخواص استقرارية ($\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$) الليزر العالية التي تصل في بعض الأحيان إلى 10^{-14} وقابليته للتوليف يتضح لنا أهمية وتنوع مجالات تطبيق الليزر . لذا فإننا سنستعرض في هذا المقال بعضاً من تطبيقات الليزر الجديدة مركزين بشكل خاص على استخدامه في دراسة الطيف الكتلوي التشردي التجاوبي لأبخرة العناصر القلوية بغية إيضاح أهمية هذه التقنية في تفريق و إخصاب هذه العناصر، وبخاصة عنصر الكالسيوم .

١ـ التحقق الضوئي والذري من نظريات ميكانيك الكم والإشعاع الكهرطيسي الكوانتي :

إن نظريات الإشعاع الحديثة مبنية على أساس معادلة شرودنغر التي هي أساس ميكانيك الكم والتي تجمع بين الميكانيك الكلاسيكي الهاملتوني والنظرية الموجية وفرضية بلانك . وهناك صور متعددة لميكانيك الكم منها صورة Bohm[1] المبنية على التفسير السببي للمسارات والصورة الإحصائية التي تهمل الميكانيك الكلاسيكي ولا تعترف بالصورة الموجية والمسارات وصورة هايزنبرغ التي تنطلق من المعادلة التحريكية للجملة

المدروسة والمرتبطة بمعادلة شرودنغر بهاملتوني الجملة H وتأخذ بالاعتبار مبدأ التقابل ومصفوفة الكثافة ρ وتفترض أن المؤثرات هي مصفوفات بسيطة لاتبادلية [2].

نجحت صورة هايزنبرغ في إظهار التقريب شبه الكلاسيكي وتبيان أهمية الفعل وفق صيغة BOhm وفي دراسة بنية الذرات العادية والهجينة [3] (Exoticatoms) والمعقدة (باستخدام Multichanell QDT وطريقة [4] (R- Matrix) وبنية الجزيئات العادية والمتهيجة (Dimersand Eximers) وارتباط ذلك بالمفاهيم الضوئية مثل الإصدار والامتصاص والتبدد والتشتت (الذي يدرس باستخدام [5] (S - Matrix) أي تلك المفاعيل الخطية المستنتجة من معادلات مكسويل التي لها شكل النظرية الكوانتية لفوتون وحيد ، لذا فالتكميم الثاني ليس ضرورياً إلا عند دراسة مجموعة من الفوتونات .

استطاعت هذه النظرية أيضاً أن تجد حلاً لصعوبات تفاعل حقل الإشعاع مع الجملة الذرية سواء أكان الحقل مكوناً من حزمة حرارية فوتونية متحزمة أو من فوتونات ليزرية . وبينت أن حل المسألة يختلف بحسب كون الحقل ضعيفاً أم شديداً . ففي الحالة الأولى يؤدي اتباع الطريقة شبه الكلاسيكية إلى معادلات بلوخ [6] الضوئية وإلى إيجاد تفسير لمفعول ستارك المتناوب (A.C stark effect) أما لدراسة الحقول الليزرية المترابطة الشديدة فلا بد من أخذ حدود الترابط المختلفة ؛ أي لابد من أخذ مفاعيل الذاكرة الطورية والاضطراب من الرتب العليا باستخدام مخططات فاينمان . وتبين من ذلك أن الفعل الليزري يعدل خواص الفلورة ويعطي مفاعيل عديدة منها الاستقرارية الثنائية (Bistability).

إن الصورة الكوانتية التالية هي صورة كلاين – غوردون التي تطبق على البوزونات . إلا أن تفسير هذه النظرية لايتفق مع التفسير الإحصائي لميكانيك الكم . مما دفع ديراك إلى وضع نظرية جديدة استطاعت أن تتجاوز معظم صعوبات النظريات الكوانتية الأولية وأن تصف بشكل دقيق البنية الطيفية الناعمة (HFS) وتحدد خواص الالكترون والفوتون والنترينو وتدرس تفاعل الالكترون الوحيد مع الحقل ومختلف الانزياحات .

لكن رغم أن هذه النظرية لاتغيره لورنتزيا ؛ أي أن لها الشكل المناسب الذي تتطلبه النظرية النسبية الخاصة أوأن نقول كوانتيا إن احتمال مشاهدة الظاهرة لايتغير مع الزمن (وهذا سبب عدم تغير الضوء الفيزيائي في النسبية الخاصة) إلا أنها لاتستطيع أن تدرس النسبية والحوادث الفيزيائية في الجمل اللاعطالية (مثل مفعول Sagnac الذي يعتبر المقابل الضوئي لنواس فوكو والذي يمكن كشفه باستخدام الليزر الحلقي [7] .

إن نظرية ديراك هي أساس نظرية تكميم الحقول الكهرطيسية (QED,Quantum Electro Dynamic) التي تعطي تفسيراً لانزياح لامب [8] يتفق والنتائج التجريبية ، حيث وجد أن مقدار هذا الانزياح يتناسب [9] مع Z^4 لذا فهو من مرتبة 1 GHz في الهيدروجين ومن مرتبة 1μm (10^{14}Hz) في الكلورين . وتحديد هذا الانزياح بدقة يمكننا من تحديد سرعة الضوء تصل إلى 10^{-9} .

استطاعت نظرية QED أيضاً باستخدام تقنيات الاضطراب التعبير عن جميع المقادير الفيزيائية بدلالة نشر القوى المختلفة لثابتة البنية الناعمة (10) α. وهذا النشر يعطي تطابقاً جميداً بين النظرية والتجربة عند رتب الاضطراب الدنيا (11). هذا التطابق كان ممكناً نتيجة استخدام طرق قياس جديدة تعتمد على قياس مفعول هول الكوانتي (Quantum Hall) الذي يعطي قيمة α بدقة تصل إلى 0.024 PPm (PPm أي جزء من المليون) أو قياس مفعول Josphson الذي يعطي α بدقة تصل إلى 0.056 PPm أو قياس نسبة الدوران المغناطيسي γ_p (Gyromagneticratio) للبروتون في الماء (H_2O) التي تعطي α^{-1} بدقة قدرها 0.037 ppm (12) وهذا يمكننا من معرفة العزم المغناطيسي الشاذ (g-2) للالكترون والميون بدقة عالية (13). والدقة العالية في قياس (g-2) للالكترون والميون بالاضافة إلى معرفة العزم المغناطيسي العادي للالكترون μ_e والبروتون μ_p يمكن أن تستخدم لاختبار نظريات نقض النوعية (14) (parityviolation) في QED ونظريات CPT وفي ربط QED مع QCD (Quantumchromodynamic).

القياسات السابقة تمكننا أيضاً من تحديد h/2e ومن ثم استنتاج h بدقة عالية (15) جداً وبالتالي الحصول على ثابتة ريدبرغ R_∞ بدقة تصل إلى 10^{-9} ويمكن مقارنة هذه الدقة بدقة قياس R_∞ باستخدام الطرق الطيفية الليزرية (16) (انظر الجدول ١) التي تستند إلى استقرارية الليزر العالية. تلك الاستقرارية التي يمكن زيادتها باستخدام طرق تبريد الليزر نصف الناقل (17) حيث نستطيع التخلص من مفعول دوبلر من المرتبتين الأولى والثانية ومفعول زيمان من المرتبة الثانية والانزياح نحو الأحمر (18). مما يفتح الباب واسعاً أمام اختراع الساعة المنبعية الذرية (19) (Atom Fountian) التي يؤمل أن تكون بداية سلسلة من الاختراعات التي ستؤدي إلى وضع جمل معايير وقياس جديدة.

$H(2\ ^2P_{3/2}-3^2D_{5/2})$	109737.3130± 0.0006
$D(2\ ^2P_{3/2}-3\ ^2D_{5/2})$	109737.3150 ± 0.0006
$D(n = 2 \longrightarrow n = 3)$	109737.326 ± 0.008
$He^+(n = 3 \longrightarrow n= 4)$	109737.3208 ± 0.0085

كذلك فإن التجارب التي استفادت من تقنيات الليزر بينت أن التغير في شحنة الالكترون qe لايتجاوز 10^{-18} من شحنة الالكترون وأن شحنة النترون qn أصغر من شحنة الالكترون بمقدار 10^{-20} مرة (11)، وأن هذا بالإضافة إلى القياسات السابقة الدقيقة يساهم في اكتمال معرفتنا عن المقادير الفيزيائية في الطبيعة. ويعتبر خطوة مهمة على طريق معرفة ما إذا كانت هذه الثوابت تتغير مع الزمن أم لا، إذ يعتقد حاليا أن α تتغير بمقدار 10^{-16} في العام بينما ثابتة الجاذبية G تتغير بمقدار 10^{-11} في العام. ولهذا أهمية كبرى في نظريات التوحيد.

إن التطابق بين التجربة والنظرية والذي أشرنا إليه سابقاً، لايعود جيداً عند رتب الاضطراب العليا (الحقيقة يوجد اختلاف قدره 0.2MHz عند هذه الرتب) التي تبدو متباعدة نتيجة تباعد التكامل نظراً لوجود نقطة صفرية في معادلة الطاقة الذاتية (Self - energy). وللتخلص من هذا التباعد استخدم Bethe طريقة إعادة التنظيم (Renormalization) لكتلة الالكترون وشحنته الظاهرية (11). وهذا يعني أخذ تفاعل الالكترون مع الحقل الكهرطيسي بالاعتبار. عندئذ فإن تلك الأجزاء من الطاقة الذاتية غير المحتواة في كتلة الجسيم يمكن قياسها ومراقبتها. بعد ذلك استطاع كل من فاينمان وتوماناغا وشو اينغر (11,20) تعميم هذه الطريقة على جسيمات أخرى باستخدام مفهوم المتغير المرافق النسبوي بإدخال حدود خاصة فهمت على أنها مساهمة QED إلى شحنة وكتلة الجسيم اللامتغيرة بالنسبة لتحويلات لورنتز. عندئذ الكمية المشاهدة تجريبياً هي مجموع الحدين الإضافي والأصلي ولا يمكن أن نعرف أي منها بشكل منفصل.

إن نظرية إعادة التنظيم تبدو طبيعية إذا أعدنا النظر في مفهومنا للمكان والزمان عند المسافات الصغيرة والأزمنة القصيرة. وهذا سبب نجاحها في حل بعض المسائل الفيزيائية، لكنها لاتبدو نظرية أساسية نظراً لوجود العديد من المسائل خارج مجال تطبيقها. لكن رغم محدودية هذه النظرية إلا أنها ساهمت في اتساع مجال تطبيق QED، الذي لازال عاجزاً عن حل بعض المسائل الفيزيائية ولاكتماله لابد من :

١- أن نأخذ بالاعتبار أن الجسيمات الثقيلة ليست شحنات نقطية.

٢- لابد من أخذ التفاعلات المحيطة بالجسيم بالإضافة إلى تفاعل الالكترون مع الفوتون.

٣- عند زيادة طاقة الجسيمات إلى حدود Gev لابد من استبدال فكرة الجسيم بفكرة الحقل عندئذ يلعب التأثير عن بعد دوراً كبيراً (21).

٤- تعميم نظريات QED بحيث يمكن أن تطبق على الجسيمات الأخرى بالإضافة إلى الالكترون والفوتون والميون (22). ومعنى ذلك الاستفادة من مفاهيم نظريات تكميم الحقول QFT و QCD.

إن الصعوبات السابقة بالإضافة إلى صعوبات أخرى (لامجال لذكرها) دعت بعض العلماء لاقتراح النظرية الكلاسيكية الجديدة (23) (Newclassical therry,NCT) والتخلي كلياً عن فكرة تكميم الحقل الكهرطيسي.

إلا أن الدراسة والمقارنة أظهرتا أن نظرية QED تعطي نتائجاً أكثر

انسجاماً مع التجربة في معظم تجـــارب إشعاع الجمل الذرية والجزيئية وبخاصـــة في مجال إشعاع هذه الجمل ضمن مجاوبـــة أو مايطلق عليه الالكترونات الكميـــة (الليزر).لذا فإننا سنعتبر أن نظرية QED هي الأساس فيما تبقى من هـذا البحث .

٢- الضوء الفيزيائي الجديد :

إن اختراع الليزر أدى إلى إيجـــاد مفاهيم ضوئية مبنية على مفهومي الضـــوء المترابط والضوء المضغوط اللذين يمكـــن إيضاحهما كما يلي :

إن المعادلة التحريكية للهزاز التوافقي البسيط في بعد واحد يعبر عنها بدلالـــة الموضع وكمية الحركة P . كلاسيكياً x و P مستقلان،كوانتياً ، ونظراً لوجود ترجـح في x قدره Δx وفي P قدره ΔP ،فهما مرتبطان بعلاقة الارتباب . وبشكل مماثل يمكننا أن نعرف علاقة ارتياب بين ترجح سوية طاقة ما و تواتر الانتقال بيـــن سويتين مستقرتين . هنا نقول إنه لدينا سويات ذات ارتياب أصغري أو ما يسمـى بالسويات المترابطة (Coherentstates) المسألة نفسها تظهر في التحريك الكهرطيسي حيث تمثل المكثفة الطاقة الراكدة بينما تمثل التحريضية الطاقة الحركية ، ولمـــا كان تيار الانزياح $\varepsilon_0 \frac{dE}{dt}$ ينـــزاح بمقدار 90° عن مولد الحقل المغناطيسي فإننا نقول إن الطاقة الكهرطيسية يمكـــن أن تؤخذ على أنها طاقة الهزاز التوافقي البسيط (24). نعبر عما سبق بكتابـــة الحقل E بدلالة مؤثري التخلف +a والتفاقي a فيكون :

$$E = \varepsilon_w (a e^{-iwt} + a^+ e^{iwt}) \qquad (1)$$

واعتماداً على نظرية QED فمن الممكن برهان أن $\varepsilon_w = (\frac{\hbar w}{2 \varepsilon V})^{\frac{1}{2}}$ حيث V حجم المجاوبة و ε_0 عازلية الخلاء .

لكن لما كان لايمكن قياس +a و a فمن المفضل كتابة المعادلة (١) بدلالـــة المقدارين القابلين للقياس $E_1=(a+a^+)$ و $E_2=(a^+-a)$ اللذين يمثـــلان الحقل الكهربائي الوحيد النسق بالشكل(25).

$$E = E_1 \cos wt + E_2 \sin wt \qquad (2)$$

وفي حالة $|E_1| = |E_2| \geq \varepsilon_w$ (أو بكلمة أخرى $\Delta I > 2 \varepsilon_w \sqrt{I}$ حيث ΔI الترجح في شدة الحقل I) فإننـــا نحصل على حد الضجيج الكوانتي .

تمثل السوية التقليدية تحليلياً بنقطة وسعة هذه السوية بشعاع من المبدأ إلـــى النقطة والطور بالزاوية مابين هذا الشعـاع و F_i .(i=1,2) اما E_1 (أو E_2) فهـو استقطاب الشعاع على طول المحور(26) . كوانتياً E_1 و E_2 مؤثران مترافقـــان لذا فإن :

$$\Delta E_1 . \Delta E_2 \geq \frac{1}{4} \quad , \quad [E_1, E_2] = i/2 \qquad (3)$$

أي أن السويات الكوانتية هي منطقـــة ذات حدود غير معرفة . وهنا يمكـــن أن نعرف المتوسطات ومربع متوسط القيـــم .

إذاً السويات المترابطة هي أكثـــر السويات الكوانتية شبهاً بالسويـــات الكلاسيكية (27). ونظراً لكـــون $|E_1| = |E_2|$ فإن هذه السويات تمثيـل في المخطط الطوري (Phasediagram) بمخططات احتمالية دائريـــة (Circular probability profill) ولذا فإنها تسمى السويات ذات الارتيـاب الأصغري والمخططات الاحتمالية لجميـــع السويات المترابطة متماثلة ولكن متوسـط

السعة يمكن أن يكون مختلفاً ، فمثلاً سويات الخلاء هي ذات سعة متوسطة معدومة . وبشكل عام نلخص خواص السويات المترابطة كما يلي :

١- إن $\Delta E_1 = \Delta E_2$ وكل منهما يساوي ترجح النقطة الصفرية التي تمثل الحد الكوانتي النموذجي .

٢- الضجيج في هذه السويات ناتج عن ضجيج الفراغ .

٣- تقبل هذه السويات توزع بواسون، لذا فعدد الفوتونات يتناسب مع $\sqrt{\langle N \rangle}$ أو مع $\sqrt{\langle I \rangle}$ أي أن توزع الكترونات الحقل تابع دلتا . وبكلمة أخرى الالكترونات متحزمة أي أن الضوء مترابط عند لحظتين زمنيتين متتاليتين ولهذا تفسير كلاسيكي وكوانتي .

٤- إن تابع الترابط من الدرجة الثانية $g^{(2)}(0)$ معدوم في هذه السويات . أما السويات المضغوطة (26) Squeezed states فتعرف بأنها السويات التي يكون الارتياب في أحد مركباتها أصغر مما هو في السويات المترابطة ، أي أن $\Delta E_1 < \Delta E_2$ أو أن نقول إن $\Delta E_1 < \mathcal{E}_w$ بينما $\Delta E_2 > \mathcal{E}_w$.

وبكلمة أخرى نقول إن السويات المضغوطة هي سويات ذات ارتياب أصغري (27) حيث $(\Delta E_1)^2 \# (\Delta E_2)^2$ أي أنه يمكن أن نحصل على $\Delta I < I_{shot}$ (حيث I_{shot} حدود الضجيج الكوانتي) عن طريق مزج ليزرين (28) ذي طولين موجيين متساويين (Homodyne) أو ذي طولين موجيين مختلفين (Heterodyne)

بشكل عام لايمكن الحصول على السويات المضغوطة إلا عند ضخ ليزر بآخر كما هي الحال في ليزر الأصبغة المضخ بليزر Nd: YAG أو Ne .. الخ (29) أو في حال Helosteric laser حيث يضخ ليزر الجسم الصلب بليزر نصف ناقل . ونوضح الخواص العامة لهذه السويات كما يلي :

١- ان $\Delta E_1 \# \Delta E_2$ وقد أمكن تخفيض الضجيج تجريبياً إلى دون ترجح النقطة الصفرية بمقدار 25% ويمكن زيادة ذلك إلى 70% . وما سبق ناتج عن إعادة توزع لضجيج الخلاء. أي أن فوتونات الضجيج الكوانتي تحد من الحساسية التي تصل الآن إلى 10^{-18} . وهي قريبة جداً من الحساسية $\Delta\ell/\ell = 10^{-20}$ المطلوبة للكشف عن أمواج الجاذبية . ولعل الحصول على ذلك ممكن بالاستفادة من تقنيات الليزر الجديدة (مثل ليزر الالكترون الحر FEL والليزر الحلقي وليزر الأشعة السينية وأشعة غاما) وتقنية السويات المضغوطة . ولهذا تطبيقات في مجال النسبية العامة التجريبية .

٢- تظهر هذه السويات ضجيجاً تابعاً للطور . أي أن هناك علاقة ارتباب بين عدد الفوتونات وطورها وهذا يفسر تناقص عدد الفوتونات في النسق بتناقص طول الموجة و إمكانية تصغير عرض الخط الطيفي بوساطة السويات المضغوطة .

٣- إن التوزع الفوتوني مادون بواسوني وهذا يؤدي إلى ظاهرة عدم تحزم الفوتونات الذي لايوجد له مقابل كلاسيكي . لهذا يمكن أن يستخدم لدراسة العديد من مفاهيم QED

وهنا يجب أن نلاحظ أن الإحصاء مادون البواسوني وعدم التحزم ليسا متماثلين ولكن ظهور هذا الإحصاء يؤدي إلى جعل الاندثار أبطأ مما هو عليه عندما ينظر إليه من وجهة نظرالحركة البراونية .

٤- إن $g^{(2)}(0) < 1$ وهو يسمح بدراسة تحزم وعدم تحزم الفوتونات .

٣ - الأطياف الحدودية :

يقصد بذلك دراسة طيف سويات ريدبرغ في الذرات والجزيئات وطيف جزيئات فان درفالس . تتألف ذرات ريدبرغ من النواة والالكترونات الداخلية والكترون موجود في مدار بعيد جداً (15) عنهما . هذا الالكترون يرى لب (core) الذرة كشحنة نقطية متماسكة معاً إلا أن طور التابع الموجي لهذا الالكترون ينزاح بالنسبة لطور التوابع الموجية للعناصر الشبيهة بالهيدروجين (30) . وهذا الانزياح يمثل الفعل الاضطرابي ذا المدى القصير (Shortrange) مع الالكترونات اللبية ويعبر عن ذلك بدلالة التشوه الكوانتي (Quantum Defect) الذي يظهر في علاقة ريدبرغ لطاقة السويات المقيدة (bound) وقد أوضحنا الخواص الأساسية لهذه السويات في الجدول /٢/. بشكل مماثل يمكن أن نفهم سويات ريدبرغ في الجزيئات أي تلك التي توجد في سويات طاقة قريبة من حدود التشرد ولكنها تقاوم التفكك (31) (Disscociation)

أما جزيئات فان درفالس ، فهي جزيئات ضعيفة الترابط ، وترتبط معاً بقوى التجاذب ذات المجال البعيد (Longrange) وفقاً للحد الثاني من كمون ليونارد - جونز والناتجة عن التفاعل بين ثنائيات الأقطاب الكهربائية أو بين ثنائي ورباعي القطب الكهربائيين . وهذا التفاعل يعقد حركتها وخواصها الانتقالية والصدمية ويجعل معدل إصدارها مختلفاً عما هو في الجزيئات العادية (32) .

إن الفائدة الأساسية لسويات ريدبرغ وجزيئات فان درفالس تتجلى في أنهما يمثلان الحد الكلاسيكي (33) للجمل الكوانتية (وهذا سبب تسميتها بالذرات الحدودية وتسمية طيفها بالأطياف الحدودية (Frontier spectroscopy) وهذا يسمح بدراسة الانتقال من الفوضى في الجمل الكلاسيكية إلى مقابلها الكوانتي (34) . ولهذا أهمية كبرى في التحريك اللاخطي والفوضى الذي يعتبر أساس علم التشابه .

عدد صحيح n

الكمية	التعريف	2	10	30	100	الواحدة
الطاقة	$E=\frac{R_{\infty}}{(n-\delta_{\ell})^2}=\frac{R_{\infty}}{n^2}$	3.4	0.14	0.015	0.00014	ev
نصف القطر	$\langle r\rangle = a_o n^{*2}$	4	100	900	10000	a_o
المساحة	$\pi\langle r^2\rangle$	16	10	8.1×10^5	10^8	πa_o^2
زمن الحياة	τ	2×10^{-3}	0.151	23	1600	μS
التواتر	ν	2.5×10^6	6600	240	6.6	GHz
حقل التشرد	E	5×10^7	3×10^4	420	3	V/cm
الاصدار التلقائي	$A_{nn'}=\frac{e^2}{C^3}W^3\mid r_{nn'}\mid$					
	a) $n'>n, A_{nn'}\propto n^{-3}$	0.125	10^{-3}	3.7×10^{-5}	10^{-6}	Sec^{-1}
	b) $n'<n, A_{nn'}\propto n^{-5}$	3×10^{-2}	10^{-5}	4.4×10^{-8}	10^{-10}	sec^{-1}
ثنائي القطب الكهربائي	$r_{nn'}=ea_o n^{*2}$	4	100	900	1000	ea_o

الجدول رقم/ 2 / : ونوضح فيه خواص سويات ريدبرغ في الذرات ومن هذه الخواص نستطيع أن نجد الخواص الأخرى كالاستقطابية ... الخ. هذه الصفات تتبع القوى المختلفة للعدد $n^*=n-\delta_\ell$ حيث δ_ℓ الانحراف الكوانتي وهو معرف بالنسبة للعديد من العناصر كما في الجدول :

	NaI	MgII	AlIII	Si IV	P V	P VI	Cl VII
δ_ℓ	1.374	1.098	0.924	0.804	0.713	0.642	0.585

إذن δ_ℓ يتناقص على طول السلسلة لأن الشاردة تصبح قريبة من الذرات شبيهة بالهيدروجين وبالتالي فالاضطراب يصبح صغيراً ويزداد فعل كولوك .

٤ـ مفاعيل الفوتونات المتعددة :

مع بدء اختراع الليزر ظهرت مفاعيل الفوتونات المتعددة. وأوضح مثال على ذلك تشتت رامان[31] . لكن تقدم تقنية الليزر مكنت العلماء من استخدام امتصاص فوتونين للحصول على نبضات ليزرية استطاعتها من مرتبة GW وذات عرض

من مرتبة [35] GHz (أي عرض نبضة من مرتبة النانو ثانية وما دون) وذلك باستعمال صباغ مناسب ومضاعفة التواتر في بلوره مناسبة . كما أصبح توليد التوافق الثلاثي [36] THG لتواتر معين (عن طريق مزج أربعة أمواج في البلورات أو الغازات [37] عملا شائعا. وأمكن مؤخراً الحصول على الخط الطيفي ($\lambda = 1216\ A^{\circ}$) L_{α} المهم جداً في تبريد الهيدروجين [38] وعلى تواترات ذات رتب عالية في الغازات [39]. كما يأمل العلماء في الحصول على ليزر في مجال UV - x (وفي مجال الأشعة السينية) باستخدام تقنية التشرد المتتالي (Stepwiseionization) للحلقات الداخلية في العناصر الثقيلة [40]. وهذا يعني وجود أطوال ليزرية مولفة تغطي مجال VUV و X- UV مما يسمح باستخدام الطرق الاضطرابية لدراسة التفاعلات الكيميائية بين الجزيئات [41] والتشرد مافوق العتبة [42]

Above threshold ionization, AII)

في الذرة والجزيء وما يطرأ على الذرة (وبخاصة ذرة الهيدروجين [43] وذرات العناصر الخاملة) أثناء وجودها في حقل كهرطيسي ليزري كهذا. بالإضافة إلى سويات ريدبرغ وجزيئات فان درفالس التي سبق الإشارة إليهما . وما سبق ماهو إلا تطبيق لمفهوم المفاعيل الفوتونية المتعددة اللاتجاوبية [44].

رغم أن طاقة الليزرات المتوفرة حاليا تصل إلى $50\ 000\ cm^{-1}$ إلا أنها ليست كافية لتشريد معظم الذرات بشكل مباشر (انظر الجزء اليميني من الشكل ١) إلا انه يمكن استخدام الطرق التجاوبية لتشريد العناصر التي يتراوح كمون تشردها بين 4 - 20ev . كما هي الحال في ابخرة العناصر القلوية (Na,K,CS, ...) . ولتحقيق ذلك فاننا نحتاج الى m(m=1,12,13,..) فوتون لتهييج الذرة من السوية $|0>$ الى السوية الوسطية(Intermediate state) والتي يمكن ان تكون سوية ريدبرغ . بعد ذلك نحتاج الى n(2 او n=1) فوتون للتشريد من السوية الوسطية $|1>$ عندئذ نقول انه لدينا عملية تجاوب [45] m فوتون وعملية تشريد (n+m) فوتون تجاوبي او ان نقول ان العملية هي (n+m) تشريد فوتوني محسنة متعددة (Resonance enhanced multiphoton ionization . REMPI)

وإذا كانت السوية هي سوية ريدبرغ فإننا يمكن أن نشرد العينة بحقل ميكروي أو بالطرق التصادمية .

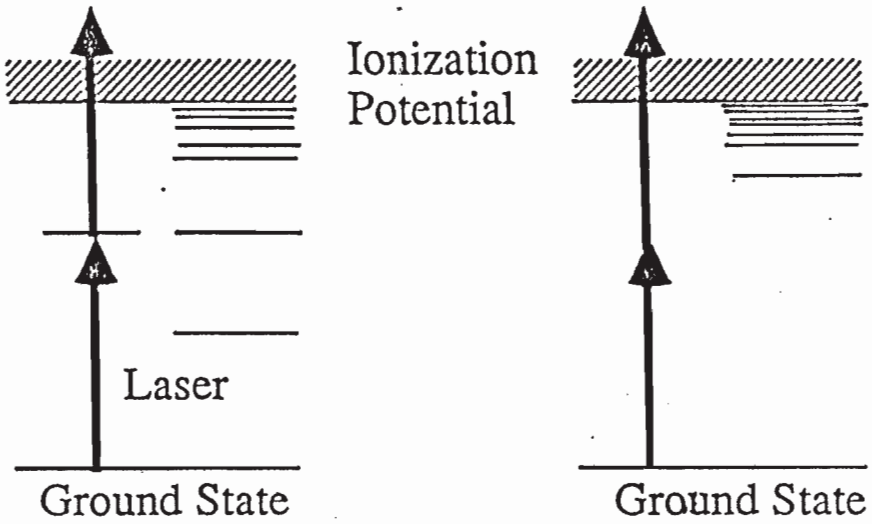
أما في الحالة العادية فإننا نحتاج إلى ليزر قد تختلف صفاته عن صفات الليزر المهيج [46] للقيام بالعملية (انظر الشكل ١ ، الجزء اليساري).

إن أحد أهم فوائد التشرد الطيفي التجاوبي

RIS,Resonanceionizations pectroscopy)

هو إمكانية الحصول على معلومات عن الانتقالات الطيفية الممنوعة وفق انتقال فوتون وحيد في بعض النظائر والمسموحة وفق فوتونين في نظائر أخرى . ولهذا أهمية كبرى في التشريد الانتقائي لبعض النظائر دون سواها . مما يوفر طريقة جديدة تختلف عن طرق تفريق النظائر التي سبق أن استخدمت في إخصاب (Enrichment)

العديد من العنـاصر كمـا هو موضح في الجدول / 3 /



Atom "A"

$A \longrightarrow A^{+}$

تشرد تجاوبـــــــي

Atom "B"

$B \longrightarrow B^{+}$

تشـــــرد مباشـــــر

الشكل (1) : ويظهر الفرق بين التشرد المبـاشر حيث تنتقل الذرة من السوية الأرضيـــــة إلى سوية التشرد نتيجة فقدها الالكترون ، والتشرد التجاوبي الـــــــــذي يستفيد من مفهوم السويـات الوسطية .

Isotope	Natrural Abundance %	Enriched Abundance%	Prices $/Mole	Methode of separation
D	0.015	99	1	Chem. exchange
^{12}C	98.9	-	-	-
^{13}C	1.11	96	10^3	Diffusion.
^{14}N	99,6	-	-	-
^{15}N	0.37	-	-	-
^{17}O	0.037	40	10^5	Distilation.
^{18}O	0.204	-	-	-
^{37}Cl	25	90	$6x10^4$	Calutron
^{40}Ca	97	-	-	-
^{42}Ca	0.64	-	-	-
^{43}Ca	0.145	-	$8x10^6$	-
^{44}Ca	2.06	-	-	-
^{46}Ca	0.003	-	$12x10^7$	-
^{48}Ca	0.18	-	$12x10^6$	-
^{57}Fe	2.19	90	$2x10^5$	Calutron
^{79}Br	50	99	$6x10^5$	Calutron.
^{196}Hg	0.15	48	$1x10^8$	Calutron.
^{235}U	0.75	3	$1x10^3$	—
^{238}U	99.7	-	-	—

الجدول / 3 / : حيث وضعت في العمود الأول النظير المدروس وفي العمود الثاني النسب المئوية للتواجد الطبيعي للعنصر وفي العمود الثالث النسبة المئوية للإخصاب وفي العمود الرابع كلفة المول بالدولار بينما وضعت في العمود الأخير طريقة الإخصاب المستخدمة .

٥ـ الطيف الكتلوي التشردي التجاوبي بواسطة عدة فوتونات لبعض النظائر :

إن دراسة التجاوب الفوتوني في بعض النظائر يتطلب استخدام المطياف الكتلوي Mass spectromet سواء ذلك الذي يستخدم قطاعاً مغناطيسياً (Magneticsector) أو الذي يعتمد على قياس زمن طيران الشاردة (Time of Flight,ToF انظر الشكل 2) . ورغم أن لهذه المقاييس قدرة تحليلية عالية على فصل النظائر

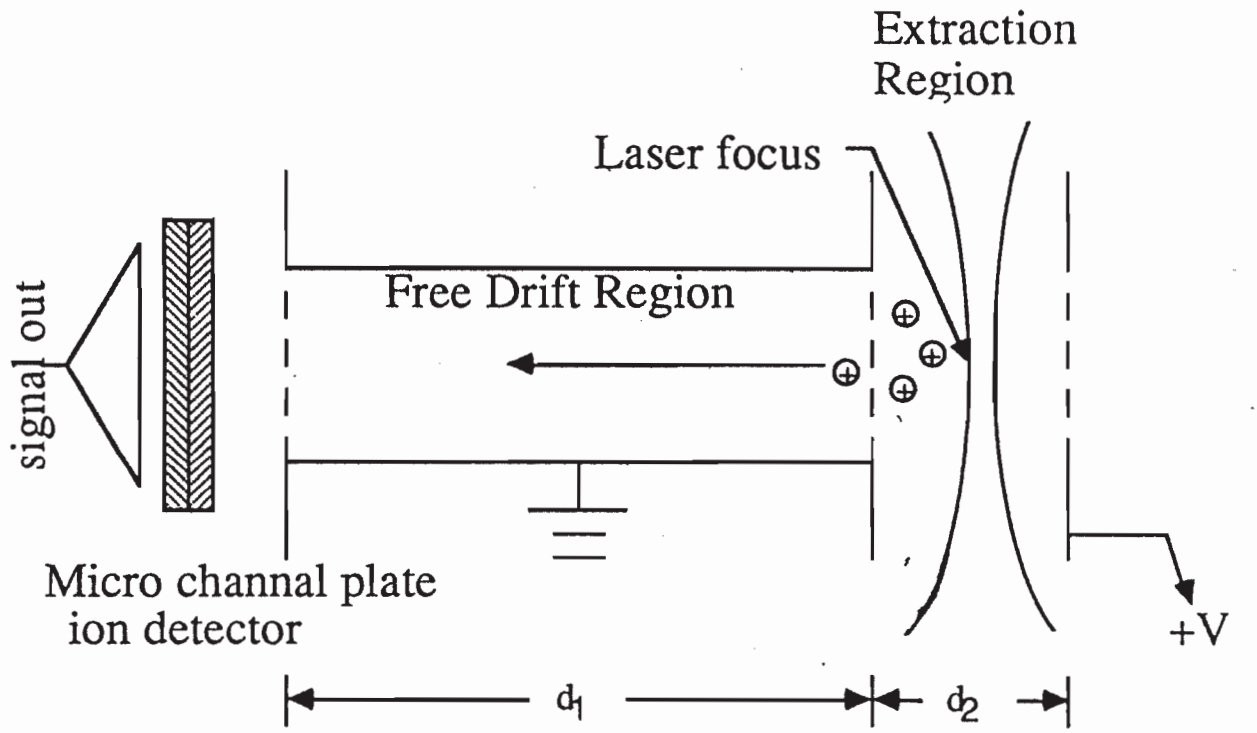
إلا أن انتشار طاقة الشوارد البدائية تجعل دقة تحليلية محدودة [47]. لذا يضاف إلى الجملة (في حال استعمال ToF MS) عاكس كهراكدا لجعل الشوارد أكثر تناسقاً مما يؤدي إلى زيادة المقدرة التحليلية [48] للمطياف وتوسيع مجال استخدامه ليشمل التذرية (Ablation) [49]

لكن التداخل الجزيئي وتماثل العناصر يمنعان استخدام تقنية المطيافية الكتلوية التقليدية . لذلك فإن الطرق التجاوبية التشردية الفوتونية المتعددة (MPI) تستخدم للكشف عن الذرات والجزيئات البسيطة .

وهذه الطرق تتبع عرض حزمة الليزر [45].

فإذا كانت الحزمة عريضة وتشرد كل النظائر انتقائياً وفي آن معاً نقول إننا ندرس الطيف الكتلوي التشردي التجاوبي (Resonance IOnization - Mass spectroscopy.RIMs)

وكما أوضحنا فإن الطرق الطيفية التجاوبية ومنها طريقة RIMS تستفيد من مفهوم السويات الوسطية . حيث نستخدم فوتوناً أو فوتونين (أي ليزراً ذا طول موجي λ_1 أو ذا طولين موجيين λ_1 و λ_2 وفي بعض الحالات قد يكون $\lambda_1 = \lambda_2$) لنقل الذرة إلى السوية الوسطية ومنها إلى سوية التشرد .



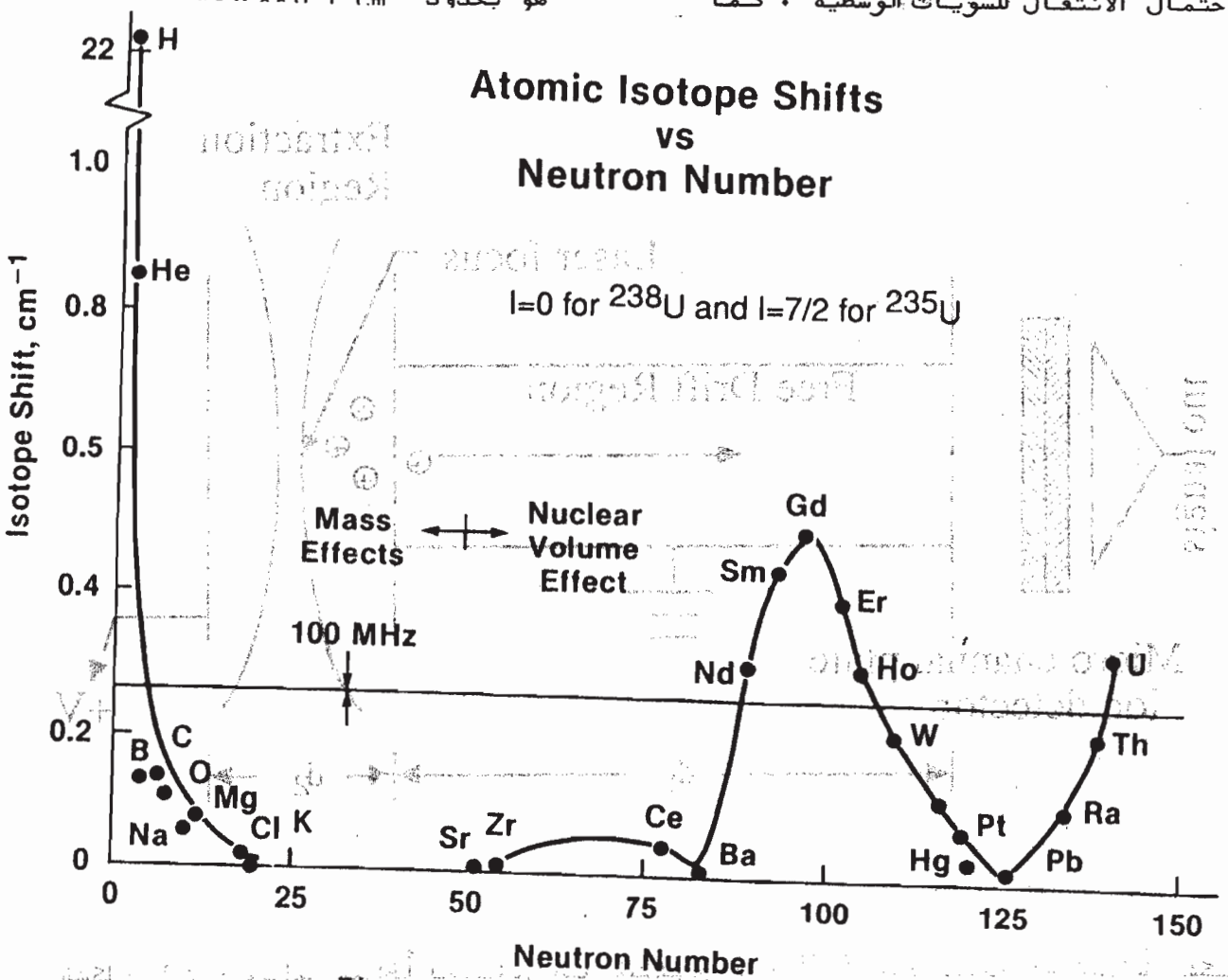
الشكل/ 2 / : ويظهر مخططاً لمقياس الطيف الكتلوي (TOFMS) وقد بنيت هذه الجملة بشكل قابل للتغير بحيث يمكن إضافة كاشف للسويات شبه المستقرة أو إضافة عاكس كهراكدي لزيادة مقدرة الجملة على الكشف ولاستخدامها في مجالات متنوعة .

إن طريقة RIMS تمكننا من إجراء تهيج فوتوني متعدد لسويات التشرد الآلي (Autolonization) بتحسين تجاوبي • وهي حساسة جداً وتتمتع بانتقائية عالية تصل إلى 1 : 10^{10} • وهذه الخواص بالاضافة إلى بعض الحسابات الممكنة في العناصر البسيطة (لملء العديد من الفراغات النظرية الموجودة) تجعل من الممكن الحصول على معلومات مفيدة للكيميائيين التحليليين والفيزيائيين الذريين عن البنية الذرية مثل سطح مقطع التشرد الضوئي لسويات التشرد وبالتالي إمكانية قياس معدلات التشرد الآلي واحتمال الانتقال للسويات الوسطية • كما

(ونسب النظائر) لكميات صغيرة تتراوح قيمها بين جزء من المليون (50) إلى جزء من البليون (1 PPm - 1PPb) • ولهذا أهمية كبرى في دراسة العينات المفيدة في التحليل العنصري في انصاف النواقل والشوائب والبيولوجيا والغبار الجوي والاختراق الداخلي واللهب (51) •

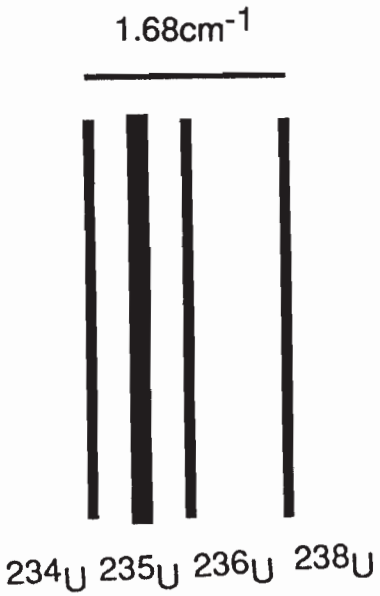
وللاستفادة من طريقة RIMS يمكن اتباع إحدى الطريقتين التاليتين :

١- إن أثر انزياح النظائر الذي ينتج عن كتلة وحجم الذرة ومفاعيل أخرى (انظر الشكل 3) كبير جداً بالمقارنة مع عرض الخط الطيفي الليزري (الذي هو بحدود $0.1\ Cm^{-1}$

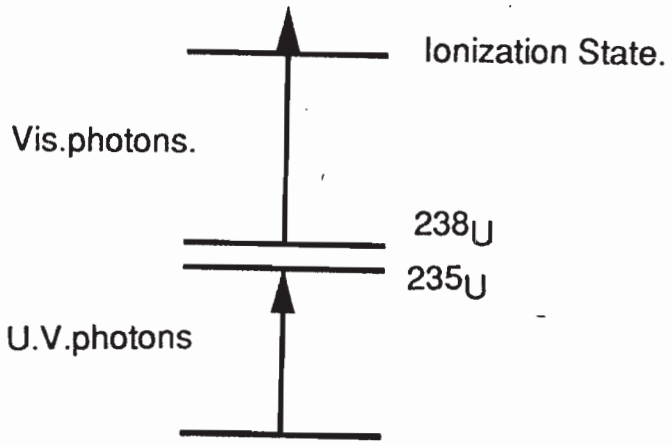


... الذي يميز تغير الانزياح النظائري (مقيساً بواحدة Cm^{-1}) بتغير عدد النترونات كما يتضح على الشكل أيضاً أثر كل من كتلة النواة وحجمها • يلاحظ أن أثر الكتلة واضح في العناصر الخفيفة بينما أثر الحجم واضح في العناصر الثقيلة •

على ذلك لتفريق ^{235}U عن بقية النظائر (انظر الشكل 4,a,b). لكن الأثر الحجمي والكتلوي في العناصر التي وزنها الذري M يتراوح بين 40 -100 AMU متعادل ومتعاكس (انظر الشكل 3) . والفرق في طول موجة نظيرين متجاورين يساوي $(2-5) \times 10^{-7}$ من طول موجة الانتقال التجاوبي الذي



الشكل (4 a) الذي يظهر انزياح مختلف نظائر اليورانيوم نتيجة أثر الفعل النظائري



الشكل (4b): ويظهر كيفية الاستفادة من انزياح النظائر في تفريق ^{235}U و ^{238}U بعضهما عن بعض حيث يهيج النظيران بوساطة فوتونات مافوق بنفسجية (UV) وليزر مرئي (Vis) مناسب لتفريق (عن طريق التشرد) ^{235}U عن ^{238}U 325 258 (أو العكس بحسب الطول الموجي المستخدم) وبهذه الطريقة تم إخصاب ^{235}U (الذي يوجد في الطبيعة بنسبة 0.7 %) إلى 3% (انظر الجدول 3).

يمكن مشاهدته بسبب انزياح البنية الدقيقة (HFS) . لكن النظائر الفردية تملك عزماً مغناطيسياً نووياً (59) لذا فكل الانتقالات الممنوعة والتي تبدأ من السوية الأرضية وتنتهي على سويات ذات نوعية فردية (Odd parity) حيث J = 0 أو 2 هي انتقالات مسموحة وفق قواعد العزم الذاتي النووي الذي يحرض مفاعيل ثنائية القطب كهربائياً تؤدي إلى مزج (Mixing) الانتقال J = 0 ⟶ J = 0 بمقدار يتناسب مع مزج الانتقال بين J = 0 ⟶ J = 1 وبالتالي فالانتقال الممنوع وفق قواعد ميكانيك الكم (رغم أن J عدد كوانتي جيد) يصبح مسموحاً في نظائر العناصر (53) الفردية مثل ^{43}Ca و ^{67}Zn .

٢- بالنسبة للنظائر الزوجية فإن انزياح دوبلر يقارن بانزياح (54) النظائر. ولذا يجب أن تدرس هذه النظائر بوساطة تجاوب فوتونين أي بوساطة التجاوب الفوتوني الخالي من انزياح دوبلر في المطياف الكتلوي (55) . ويتم ذلك بأن نرسل إلى العينة المطلوب دراستها طولين موجيين متعاكسين في الاتجاه ومتساويين في القيمة فيصبح شرط التجاوب (56) .

$$\frac{1}{\hbar}(E_f - E_i) = w'_1 - w'_2 = w_1 + w_2 - v(k_1 + k_2)$$

(حيث E_f و E_i طاقة سويتي النهاية والبداية و vk, $w'=w-vh$ انزياح دوبلر) في حال $w_1 = w_2$ و $k_1 = k_2$

و $2w = \frac{\Delta E}{\hbar}$ أي أن انزياح دوبلر معدوم وكل الذرات بغض النظر عن سرعتها تمتص فوتونين (2w) رغم أن سطح مقطع الاصطدام (57) من أجل فوتونين هو $10^{-50} cm^4 sec$ ؛ أي أن احتمال هذه المفاعيل أقل بمقدار 10^{-2} من احتمال الانتقال لفوتون وحيد . إلا أن حقيقة كون كل الذرات في سوية الامتصاص المدروسة يمكن أن تساهم في الإشارة الناتجة يعادل احتمال الانتقال الصغير ليصبح في بعض الحالات أكبر مما هو في حالة الإشارة المشبعة لفوتون وحيد .

إن الطريقتين السابقتين يمكن بشكل عام أن تستخدما لدراسة التشريد الانتقائي للجمل التي تحوي في مدارها الأخير الكترونين .. والمخطط العام لاستخدام أي من هاتين الطريقتين وفق RIMS في هذه العناصر موضح في الشكل (5) حيث تشرد الحزم الذرية بوساطة ليزر (أو ليزرات) مؤلف وينتج عن التشرد حزمة من الشوارد (Ions) تدخل إلى مقياس الطيف الكتلوي والكاشف المستخدم موصول إلى مجموعة معالجة المعلومات .

لقد اتبعنا الطريقتين السابقتين لتبيان كيفية التشريد الانتقائي لكميات من مرتبة البيكوغرام من الكالسيوم (58) والزنك (59) لكننا هنا سنقدم دراسة موجزة عن كيفية تحقق ذلك في الكالسيوم فقط .

٦- التشرد الانتقائي التجاوبي الكتلوي لنظائر الكالسيوم :

لقد بينت الدراسة أنه يمكن تجريبياً إجراء التشرد الانتقائي التجاوبي الكتلوي في الكالسيوم بالاستفادة من مميزات

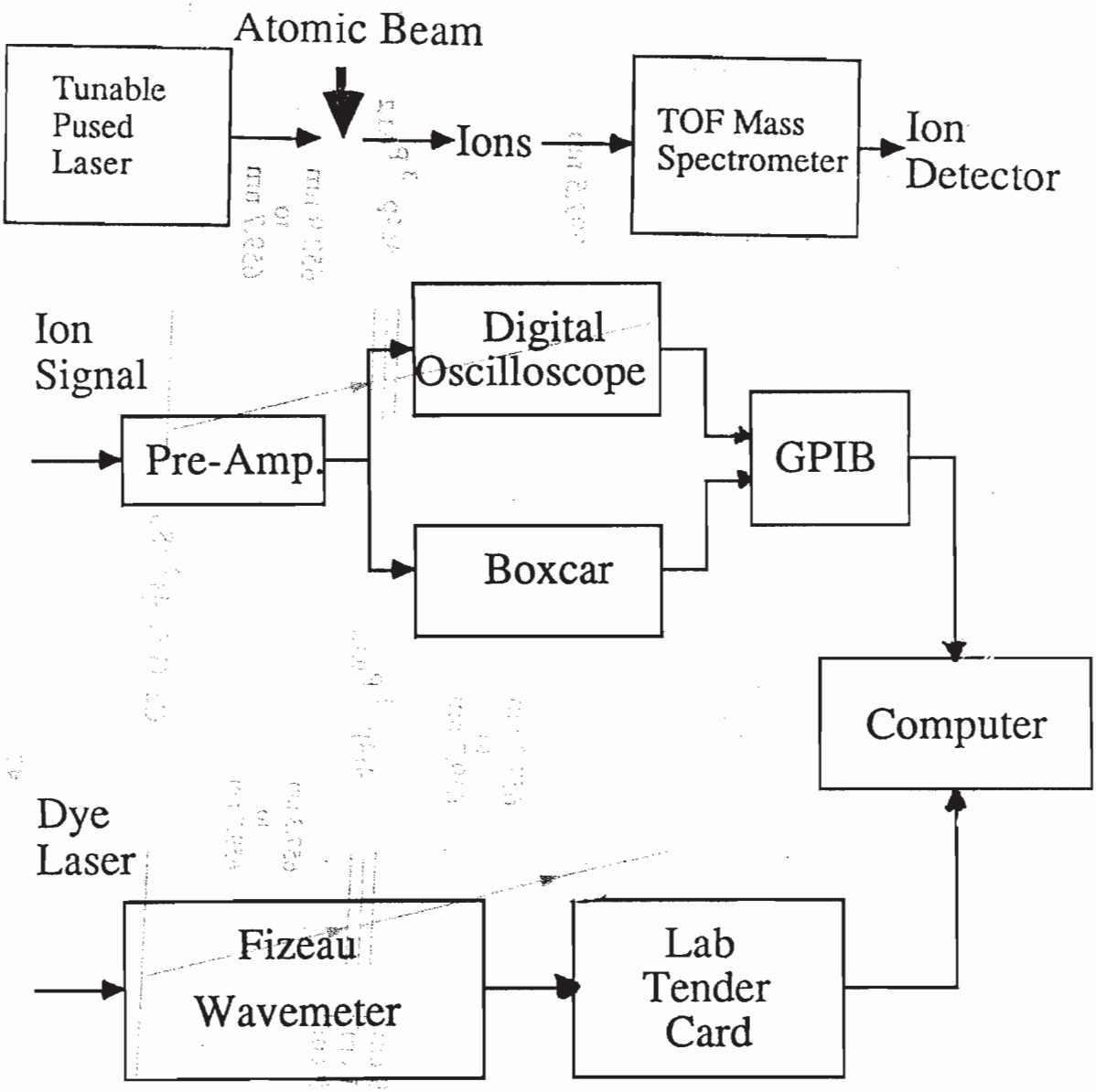
بعض الانتقالات والتي سنوضحها كمايلي:

آـ الانتقالات المحرضة بالانتقائية النظائرية النووية :

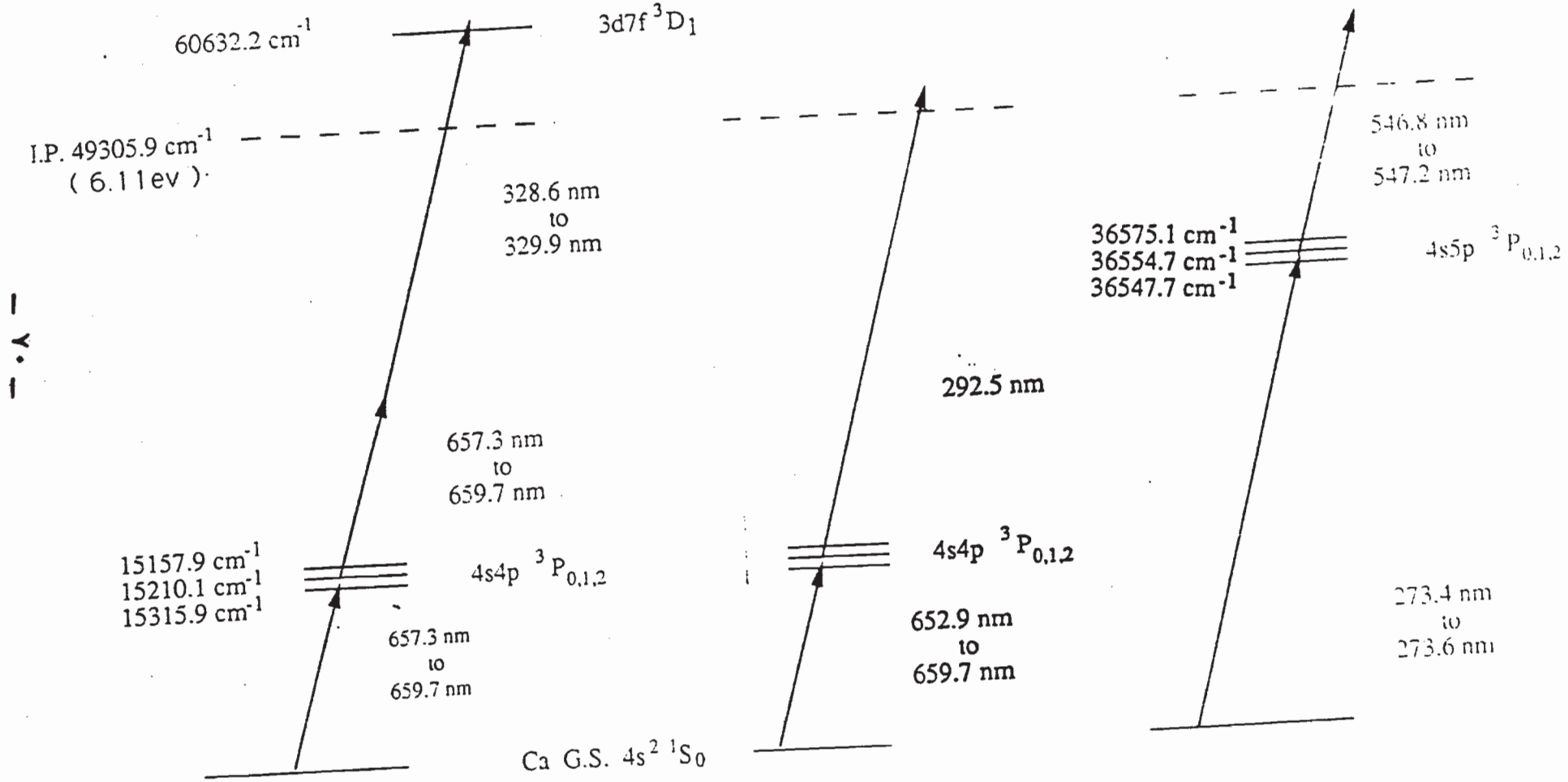
لقد درست هذه الطريقة وطبقت على ^{43}Ca (النظير الوحيد الفردي في الكالسيوم) بتوليف طول موجة الإشعاع الليزري بحيث يتجاوب مع أحد الانتقالين (اللذين لهما نوعية نووية)التاليين .

$$4S_2\ {}^1S_o \longrightarrow 4S\ 4P^3P_o \quad (5)$$
$$\longrightarrow 4S\ 5P^3P_o$$

إذ التحسين مردود التهيج والحصول على انتقائية نظائرية لابد من أن يمر التشرد عبر احدى السويتين 4S4P أو 4S5P . ولتشريد الجملة عبر السوية الوسطية الأولى تحتاج إلى ضخ الجملة الذرية بثلاث فوتونات .



الشكل/ 5 / : حيث يظهر في الجزء العلوي المخطط العام لاستخدام طريقة RIMS في العناصر التي تحوي في مدارها الأخير الكترونين فقط، وفي الجزء السفلي تظهر تفاصيل جملة معالجة المعلومات المستخدمة تجريبياً .



الشكل (6) الذي يظهر مختلف المخططات الممكن اتباعها لتفريق ^{43}Ca عن بقية النظائر

إذ نحتاج إلى فوتون أحمر لإحداث التهيج وفوتونين آخرين أحدهما أحمر والآخر مافوق بنفسجي لإحداث التشرد (انظر الشكل 6a) أو يمكن أن نقوم بذلك باستخدام فوتونين أحدهما أحمر للتهيج والآخر مافوق بنفسجي للتشرد (انظر الشكل 6b) . أما للحصول على انتقائية نظائرية عبر السوية الوسطية $4S5P$ فإننا نحتاج إلى فوتون في مجال UV للتهيج وفوتون آخر أصغر للتشرد (انظر الشكل 6C) . وفي جميع هذه المخططات كي نصل إلى سوية التشرد يجب أن نستخدم ليزرين من لونين مختلفين (ومن هنا تسمى عملية التشرد هذه بعملية التشرد ذي اللونين) ويجب أن يكون الليزران قادرين على إعطاء طاقة قدرها $60632.2\ cm^{-1}$ كافية للوصول إلى السوية $3d7f\ ^3D_1$

رغم أننا سبرنا في تجاربنا إمكانية استخدام جميع المخططات السابقة وحصلنا من ذلك على نتائج جيدة حول الاستفادة منها في تفريق ^{43}Ca عن بقية النظائر إلا أننا ركزنا اهتمامنا على المخطط (6a) لأنه أكثرها أهمية وأفضلها مردوداً .

ب ـ الانتقالات الخالية من تعرض دوبلر :

يمكن أن نشرد نظائر الكالسيوم الزوجية بشكل مباشر بوساطة ثلاثة فوتونات مرئية أو فوتونين في مجال UV (انظر الشكل 7) . لكن سبق أن بينا أن التشرد المباشر أقل مردوداً من التشرد التجاوبي . لذا يستفاد من قرب السوية الوسطية $4S5\ ^1P_1$ (التي تبعد $66.4\ Cm^{-1}$ و $72\ Cm^{-1}$) عن سوية التجاوب الوسطية للانتقالين في تحسين مردود التشرد والحصول على انتقائية عالية للنظير ^{48}Ca من النظائر الزوجية الأخرى شرط أن يمر التشرد عبر أحد الطريقين التاليين :

$$4S^2S_o^1 \longrightarrow \longrightarrow 4S10S_o^1 \text{—} 3d7P^1P_1 \quad (6)$$
$$\longrightarrow \longrightarrow 3d5S^1D_1 \text{—} 3d7P^1P_1$$

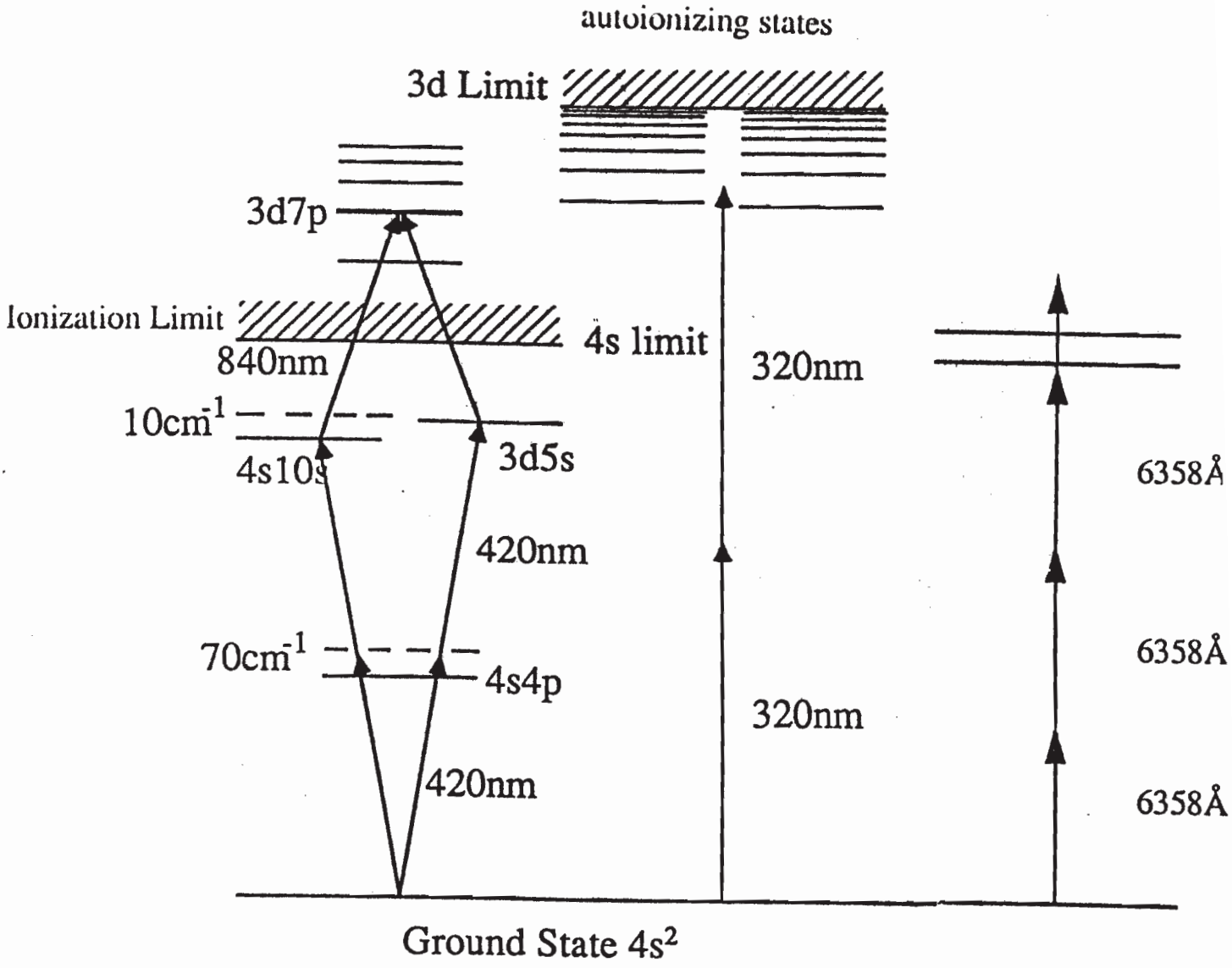
لكن قبل ذلك لابد من تحديد أي من الطريقين السابقين هو الأفضل أي لابد من دراسة مردود التشرد وفق كل من الطريقين (60) . وهذا ما تمت دراسته باستخدام فوتونين حيث الطول الموجي w_1 (421.5nm والذي يستحصل عليه من مضاعفة التواتر w_2 الذي طول موجته 843 nm) يهيج بشكل تجاوبي السوية $3d5S^1D_1$ عند طاقة قدرها 47449.08 أو السوية $4S10S\ ^1S_o$ عند طاقة قدرها $47439\ Cm^{-1}$ (انظر الشكل 7) .

من رسم الإشارة الشاردية الكلية كتابع لتدفق ($\int Idt$) فوتونات الطول الموجي 843 nm من أجل التشرد عبر السوية 3d5S (وإبقاء إشعاع الطول الموجي 421.5nm ثابتاً) . ثم رسم المخرج الشاردي كتابع لتدفق الاشعاع 421.Snm عبر السوية نفسها (مع إبقاء الإشعاع 843nm ثابتاً) استطعنا أن نبين أن الفوتونات التي طول موجتها 843 nm أكثر فاعلية في التشريد وأن معدل التشرد يصبح معدوماً عندما ينعدم (60) الإشعاع الذي طول موجته 843 nm .

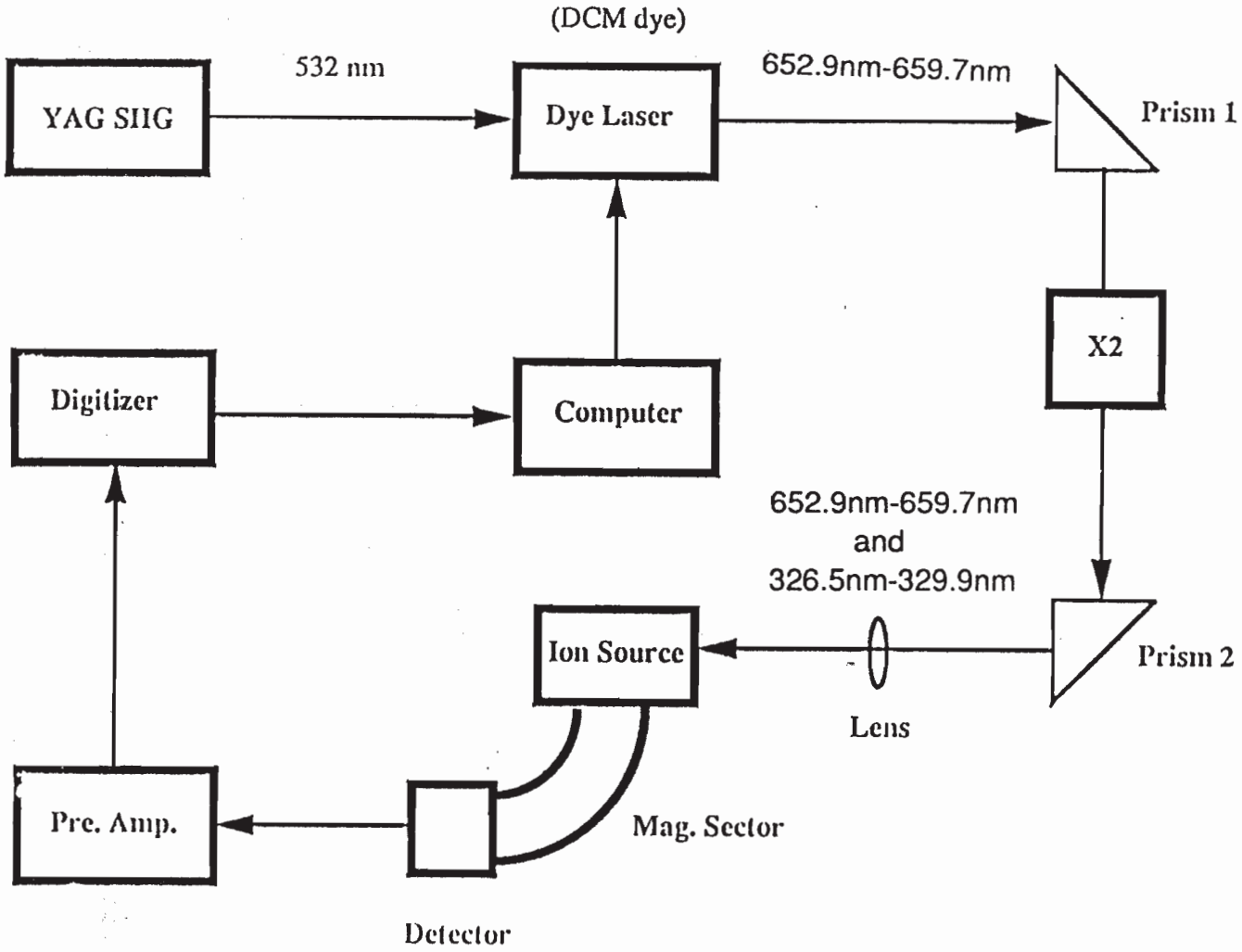
وبإجراء رسم مماثل من أجل التشرد عبر السوية 4S10S وإجراء مقارنة بين التشرد عبر السويتين 3d5S و4S10S تبين أن مردود التشرد عبر السوية 4S10S أقل مردوداً من التشرد عبر السوية 3d5S ولذا فقد اتبعنا في تجاربنا هذا الطريق .

إن المخطط التجريبي العام المستخدم لتحقيق التشرد التجاوبي للكالسيوم بفوتونين أو ثلاث فوتونات موضح في الشكل (8) . والعناصر الأساسية في هذا المخطط هي :

١- جملة المذري (61) (Atomizer) الذي يقوم بتبخير الكالسيوم الموضوع على مهبط من الرينوم المعاير حرارياً .



الشكل/ 7 / : ويظهر مختلف المخططات الممكن اتباعها لتفريق ^{48}Ca عن مختلف نظائر الكالسيوم .



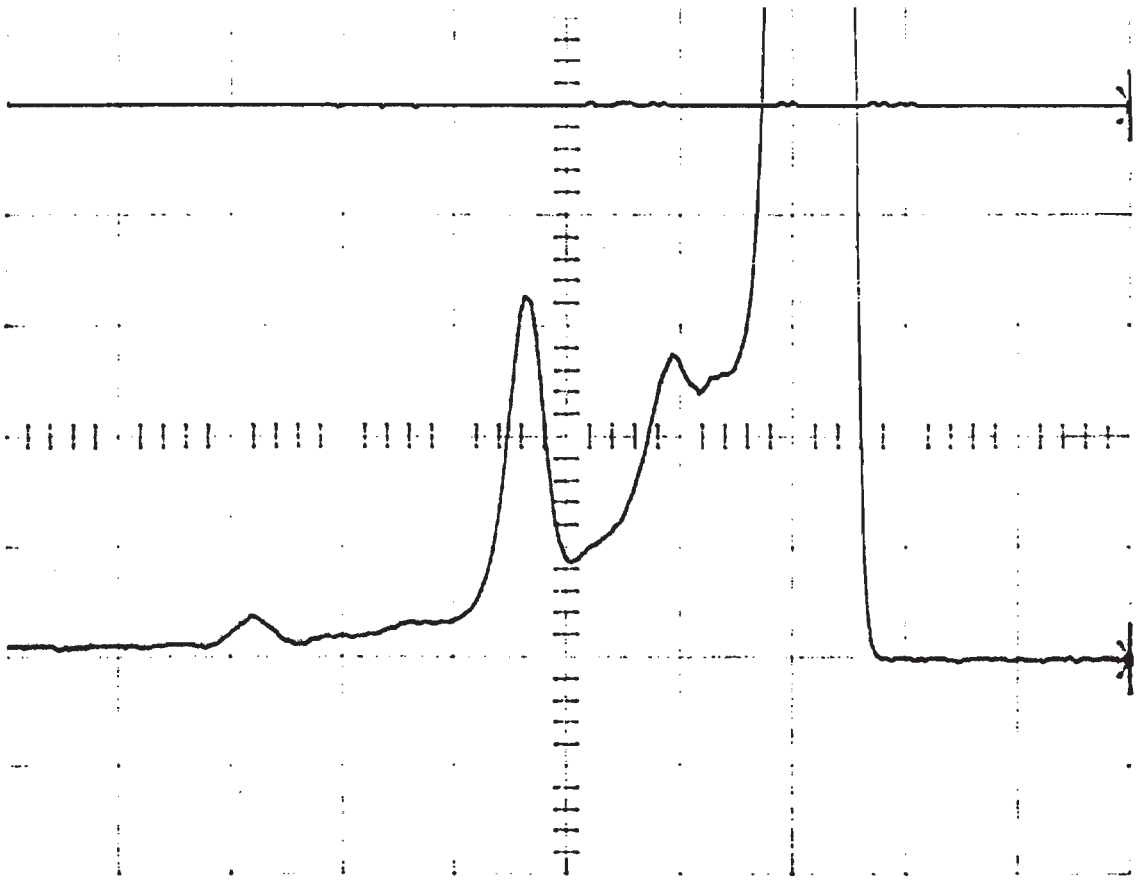
الشكل / 8 / : الذي يظهر المخطط التجريبي العام المستخدم لتفريق نظائر الكالسيوم

٢- جملة المطياف الكتلوي (الذي يمكن أن يكون ذا قطاع مغناطيسي كما في الشكل 8 أو ذلك الذي يعتمد على TOF). وهذه الجملة (47) ذات مقدرة على التحليل ($m/\Delta m$) عالية . وقد تم معايرتها قبل استخدامها للتأكد من إمكانية فصلها للنظائر المختلفة (انظر الشكل 9).

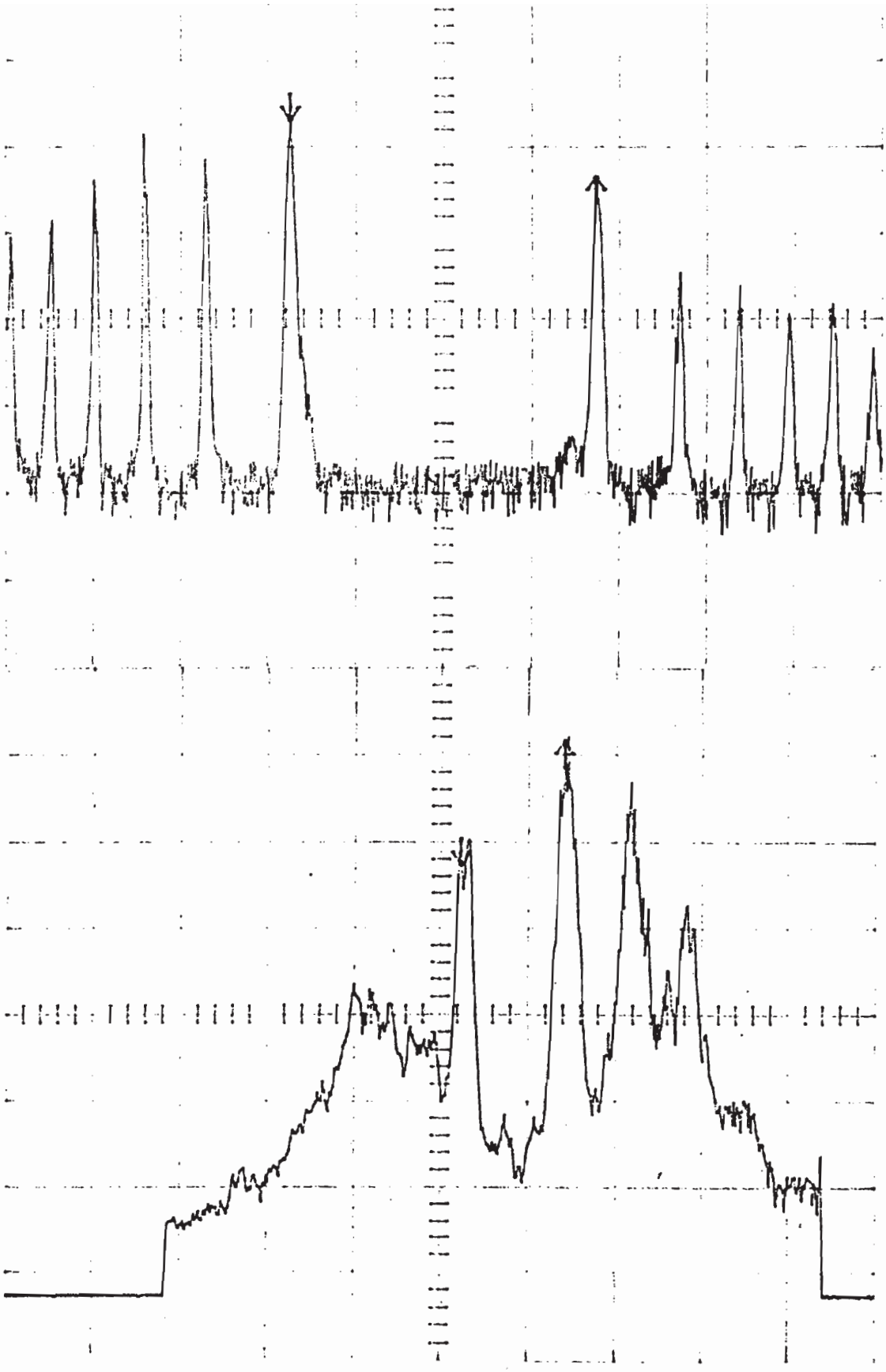
وتمتاز هذه الجملة بأنها قابلة للتبديل والتحسين نظراً لارتباطها مع جملة تفريغ قادرة على إعطاء ضغط من مرتبة 10^{-10} torr (علماً بأننا لم نحتج في تجاربنا الحالية إلى ضغوط أقل من 10^{-8} torr

٣- جملة الليزر ومضاعفاته ، الذي يمتاز بعرض خط طيفي (قيس بوساطة فابري-

بيرو ذي مجال طيفي قدره $1\ Cm^{-1}$ من مرتبة $0.07Cm^{-1}$ (أي 2GHz)
ونعومة قدرها 20 وكاشف ضوئي ذي ثقب (انظر الشكل 10) .

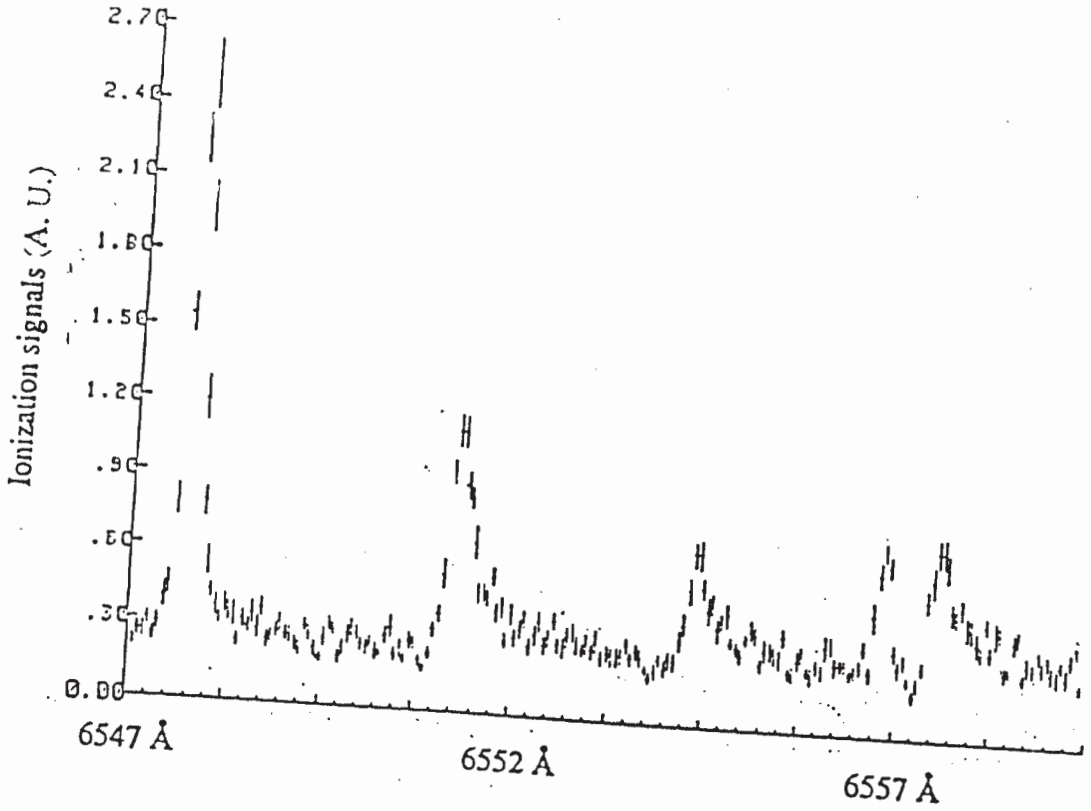


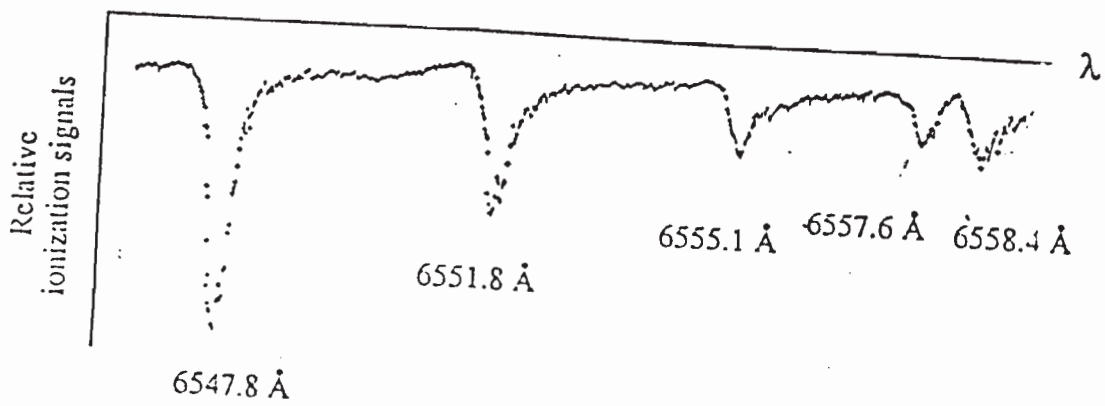
الشكل(9) : الذي يظهر مقدرة المطياف الكتلوي على تحليل الإشارة الناتجة عن معظم نظائر الكالسيوم ،علماً بأن للكالسيوم عدة نظائر هي ^{40}Ca و ^{42}Ca و ^{43}Ca و ^{44}Ca و ^{46}Ca و ^{48}Ca ونسب تواجدها المئوية في الطبيعة هي 97 و 0.94 و 0.145 و 2.06 و 0.003 و 0.18 على التوالي ومن ذلك يتضح لنا ندرة وبالتالي غلاء قيمة كل من ^{43}Ca و ^{48}Ca .



الشكل (10) : الذي يظهر عرض الخط الطيفي لليزر الصباغي المستعمل (الجزء السفلي) بينما يظهر في الجزء العلوي عرض الخط الطيفي لليزر He – Ne للمقارنة .

إن الميزة العامة للمخطط الموضح في الشكل (8) هي قابليته للتعديل مما يسمح عند تغير الصباغ أو البلورة بالحصول على المجال الطيفي (327 - 330nm) الضروري لتحقيق المخطط (6 a) والطول الموجي 843 nm الضروري لتحقيق المخطط (7) .وخاصة التعديل بالإضافة إلى إمكانية استبدال المطياف ذي القطاع المغناطيسي بمطياف يعتمد على زمن طيران الشاردة (TOF) يسمح لنا بمقارنة النتائج .وهذا ما تم التحقق منه بمقارنة سويات التشرد الآلية مقيسة بكلا المطيافين





الشكل(١١) : حيث يظهر في الجزء العلوي سويات التشرد الآلية مقيسة بمطياف ذي قطاع مغناطيسي (الجزء العلوي) وبمطياف TOF (الجزء السفلي) ونلاحظ مدى تطابق موضع وشدة الإشارة .

لقد سبق لنا أن تكلمنا عن نتائج هذه الدراسة في أبحاث سابقة . لكننا هنا سنوجز أهم ماتوصلنا إليه .

١- لقد استطعنا تحديد مواضع العديد من سويات التشرد الآلية التي لم تكن معرفة سابقاً . ويظهر بعض منها في الشكل /١١/٠

٢- لقد استطعنا أن نحدد تجريبياً أن الانتقائية في الانتقالات وفق الانتقالات / 5 / ، تتبع كلا من عرض حزمة الليزر وبنية النسق ونسبة زمن ترنح الالكترون إلى زمن النبضة الليزرية ومقدار مزج البنية الدقيقة (HFS) للسويات الناعمة (FS) . واستطعنا أن نحدد تجريبياً سطح مقطع التشرد الضوئي σC وتواتر رابي Ω_2 لفوتونين وقد تبين أن القيم المستحصل عليها تجريبياً متفق مع القيم المستحصل عليها من الدراسة النظرية وفق نموذج السويتين المهدد (ETL) الذي وضعه (62) (Eberly) .

٣- لقد تبين لنا تجريبياً أن الانتقائية المرجوة (المقدرة بمقدار 10^5) وفق الانتقالات الموضحة في المعادلات(6) تتحقق باستخدام ليزر ذي عرض من مرتبة MH_3 10-20. وهذا يعني أن زيادة إشارة شاردة الكالسيوم يتوافق مع التناقص في حزمة الليزر من هنا نتبين ضرورة استخدام طرق تطبيق العرض الليزري (Laser Narrowirg techniques) للوصول إلى العرض المطلوب و الانتقائية المرجوة . كما يمكن الحصول على ماسبق باستخدام CW ليزر أو ليزر نبضي أو ليزر ذي ترددعال .

٤- لقد تبين لنا من خلال الدراسة السابقة أنه للاستفادة من طرق التحليل الطيفي الدقيقة جداً لابد من الحصول على ليزرات ذات مجال توليف عريض يمتد من مجال VUV إلى IR أي من 200 - 800 nm والطريقة المستخدمة حالياً لتحقيق ذلك هي توليد ليزر صباغي مؤلف في مجال معين تم استخدام تقنية ما لتوليد التوافق المطلوب للدراسة الطيفية . لكن هناك صعوبات عديدة ترافق العمل مع الليزر الصباغي بالإضافة إلى أنه لايخلو من العيوب والمساوئ(63) . لذلك يحاول العلماء الآن إيجاد بدائل لليزر الصباغي لتوليد التوافقات المطلوبة مثل استخدام الطرق الوسيطية الاهتزازية في بلورة BBO مناسبة أو استخدام ليزر الجسم الصلب المضخ بليزر نصف ناقل(29) . أو استخدام ليزر بلورة (64) Alexindevite. كن وجدنا أن أفضل منبع ليزري يحقق الأهداف المرجوة هو ليزر تيتانيوم ياقوت Ti - sapphire إذ إن هذا الليزر يعطي إشعاعاً مترابطاً ذا استطاعة خرج جيدة وله مجال توليف عريض ويمكن تضييق حزمته كي يفي بمتطلبات تحسين خرج RIMS لذا يأمل العلماء استخدام هذا الليزر في تطبيقات(66) عديدة ويعتقدون أنه قد يكون ليزر المستقبل .

New Laser application , RIMS studies
of calcium

Abstract: Recent new laser applications will be reviewed, with special emphasis on Resonance Ionization Mass spectroscopy (RIMS) studies of metal vapours .

RIMS will be used to explore the possibilities of isotopically selective tow - photon resonance, three - photon ionizationpathwars, to provide enhenced means for enriching and detecting calcium isotopes.

This research, was done while the autbor was a Fulbright scholar during 1990 at the National Institute of standards and Technology(NIST).Washington D.C, U.S.A .

SUMMARY

Non - Linear crystals, rare gases or metal vapours, when irradiated at suitable intensity , can produce second, third or fourth harmonics which cover a wide spectroscopic range up to VUV region .With incresses in attainable laser power the generation of higher order harmonics has become feasible;This offers the prospect of producingcoherent radiation in the soft Xray spectral region .The different wave lengths ranges have long been used as pumps to produce narrow band tunable dye lasers which were useful in many application .

They were of great value to test QED theories in free space and in optical cavity; new definition of the fundamental constant relates it to the quantum Hall effect (QHE); or Josphson effect. These effects can be measured with the help of new based laser techniques very accurately , so the value of can be determined with an accuracy of few (PPM).

Also, Laser generated a new novel optics, Like coherent and Squezed states which may be suqeezed in one of its components beyond quantum limit . This new concept contains many newphysicl ideas unhnown classic ally and may offer a possibility of detecting gravitation waves .

Too , Lasers have long been used extensivily in atomic and molecular spectroscopy special mention should be made to their use in studying Rydberg states and Van der Valls molecules. Theses species represent the classical limit to the quantum systems, so they can be used to study chaos in classical system and in itsquantum counterpart. Also they offer the means to study the perturbing effect of short range interaction with the core electrons by studying the phase shift in the wave function of Rydberg electrons relative to these appropriate to hydrogen like species. This phase shift can be expressed in terms of "Quantum defect " which appears in Rydberg formula for the energy levels of the bound states .

The importance of lasers in spectroscopy will be exasperated when cooling of Na to 25 k° becomes feasible and the VUV lasers are used to generate the L_{α} (1216 A°) Line, which may be used to cool H atoms .

Recently; it has been experimentally possible to use the very short pulse duration of the laser to study femto second reactions its very high intensity to study above Thresholdionization (ATI), its narrow band width combined with its high energy to perform selective multphoton resonance ionization mass

spectroscopy of metal vapour isotopes whose ionozation potential ranges from 4 - 20 ev

The RIMS method is extremely higly sensitive and selective, so it can precisely measure accurately the isotopic composition of picogram quantity with selectivity of up to $1:10^{10}$

The RIMS advantages supplemented with tractable calculations in simple elements (to fill the many existing gaps) makes it possible to provide analytical chemist and atomic physicst very val uable information about atomic structures such as excited state photionization cross - section and hence the possibility of studying the intermediate statesautoinization rates and transition probabilities

RIMS method can be used in general to selectively photoioniz two electron systems Like Be, Ca , Zn , Sr , Ba , Pb, Hg , Mo , Sn . etc . This method was used in our laboratory to demonstrate isotopic selectivity in Zinc and Calcium isotops . However in this paper we will present the study of photiionization pathways of calcium isotopes , which can be achieved via 1) photoionization pathways which are isotopically selective by virtue of strict selection rules; and 2) two - photon Doppler transitions .

The first possibility can be utilized in ^{43}Ca (the only calcium odd isotope) by tuning the laser wave length properly on resonance with one of the following (odd parity) transitions $4s^2\ ^1S_o$ to $4S4P\ ^3P_o$ or to $4S5P\ ^3P_o$ to enhance excitation and then ionize the excited states of ^{43}Ca. It will be shown that to achieve isotopic selectivity in both transition we need to use two coloured lasers (i.e.the energy of two or three photons).

The other possibility can be used to enhance selectivity of ^{48}Ca from the other even calcium isotops via one of the following transitions $4S^2\ ^1S_o \longrightarrow 4S10S\ ^1S_o \longrightarrow 3d7P\ ^1P_1$ or $4S^2\ ^1S_o \longrightarrow 3d5s\ ^1D_1 \longrightarrow 3d7P\ ^1P_1$

due to the proximity of the intermediate level $4s4P\ ^1P_1$ (which is 66.4cm $^{-1}$and 72 cm^{-1}off resonance from the tworespective lonization transitions). But ionization yield studies of both routes performed with 421 , 504nm($^W2$)generated by doubling 843,009 nm($^W1$) from the 4S los ionization pathway is significantly less efficient than the3d5s ionozation .

The experimental set up were the standard type in this kind of work. Howe ver thesetup was arranged in a moddular fashion, so it was possible , to perform the experiments without the need to do major changes .Also the system could accept a further modifications for future use .

We will show that isotopic selectivity can be achieved in the first possibility if we take in consideration the laser wave length effect, its mode structure and its pulse duration assuming that the mixing of ($j = 0 \longrightarrow j=0$) transition is sufficient .

Also experiments performed according to the second possibility using circulary polarized laser (so the selection rule $m_j=0$ or 2, is valid experimentally) showed enhancment in the Ca^+ consistent with the decrease in the laser band width. So the projected isotopic selectivity of 10^5 is achievable with an appropriately narrow (10 - 20 MHz) band width , cworpulsed at high - repetition rate (like copper pumped dye) laser .

Beside isotopic selectivity, we were able to identify manyautoionization levels in calcium . These levels were confirmed by another group working at NIST .But the main advantage of this work is the possibility of using lasers for ionozation , so it is expected that a mature Ti - Sapphire solid state laser , which can give 30w and operate at 840nm and with 10% efficiency(or 3w at 420 nm) Willselectively ionize beams with a cross - section around $0,1cm^2$. The throughput for sush a beam is 10^5 ^{48}Ca atoms / sec or 0,3mg ^{48}Ca/hour .

1- A.O.Barut and M.Basic.Ic/88/161

2-P.A.M.Dirac"Lectures of Quantum field theory "Belforegraduate school of science. yeshiva University. N.Y.1961

3- G.Backenstoss in"progress in Atomic spectroscopy"partB Ed.by W. Hanel and K.K.kelinpopin.plenum-press. London. 1978 look also at similar articles in Exoticatoms conference proceedings 1984 .

4- P.C. Burke and W.D.Rubb "The R - Matrix theory of Atomic processes" Advances in Atomic physics 1975.

5- Quantum mechanics vol and 2"C.C. Tannoudji.D.Diu and F.Lalol.wiley interscience 1977 .

6- H.Walters. "High resolution spectroscopy" 1982 .

7- J.R.Wilkinson "Ringlasers"prog. Quant Elect. 11.1987.

8- V.W.Hughes "Atomic physics and funtamental principles"Atomic - physics Ed. by H . Narumi and I. Shimamuro.Elsevier publishers1987.

9- J.D.Silver.Physicascripta. 37.720. 1988 .

10- Young ki - kim . Work shop II "Future opportunities in atomic, molecularand optical physics" "Washington . March 1990 .

11- "La theorile Quantique de champs" collection of Articles published by the International Institute of physics about savoy conferences 1961 .

12- Edwin R. Williams. spring meeting of the American physical society (APS) Washington. April 1990

13- T.Kinoshita. From"The Hydrogen atom " Ed. by G.F. Bassani, M. Ingusi and J.W. Hansch.Springer - Verlag Berlin 1989 .

14- L.Poittier " Parity violations in atoms"Exoticatoms conference 1984 .

15- "Current Trends in atomic spectroscopy" reporton a workshop held in Tuscon Arizona oct. 24-26 1984 .

16- A.Corney"Atomic and laser spectroscopy " oxford University press pp 62 and the refrences there in .

17- D.Sesk , C.G.Fan and C.E.Wieman J.OPT.Soc . Am.B.5.1225.1988

18- Robbert E.Dullinger.Spring meeting Of APS Washington April,1990 .

19- Stev chu. Spring meeting of Aps. April 1990 .

20- R.P.Feynamon."Quantum Electro - dynamic " The Benjamin cimming publishing co.inc. 1962 .

21 - A.O.Barut "Electro dynamic and classical theory of fields and particles" Macmillan company.N.Y 1964 .

22- F.B.Birula and Z.B.Birula"Quantum Electro dynamic " Pergaman press. 1975 .

23- E.T.Jaynes"Survey of the present status of Neo classical radiation theory 'From " Coherence and Quantumoptics" Ed.by. L.Mandel and E. Wolf plenumpress. London 1973.

24- G.Leuchs. contmp.phys. 29.299.1988

25- P.Grangier Adriatico research conference on "Coherent sources for Frontier spectroscopy" 30 Aug. 2 sep . 1988 .

26- D.F.Walls .Nature.306.141. 1983.

27- S.M.Barnnett and M.A. Du pertuis. Internal report to the imperial college. London 1986 .

28- J.H.Shapiro.I.EEE.QE.21. 237.1985

29- M.H.Dunn a lecture at"Laserin science and technology"Amman Jordan . 1989 .

30- Charles w.clark works at NIST . USA. 1990

31 - M.N.R. Ashfold and J.D.Prince contemp.phys.29.125. 1988 .

32- A.S.Pine" Coherent Sources for frontier spectroscopy"adriatico conference 30 aug - 2sep.1988

33 - Lioyed Arm strong.Workshop II "Future opportunities in Atomic Molecular and optical phycics "Washington . March 1990 .

34- R.V.Jensen Atomic physics 10, 1987 .

35- A.F.Gibbson . And .M.H. Kay report on progress in physics vol 13 . NO 1. 1980 .

36- David.M.Bloom from "Lasers induced fusion and X- ray laser studies "Ed.by stephen. F.Jacobs, Marlon O.Scully.Murry sargent III and Cyrus D.Cantrel III .Addison - Wesly. Pub. Co. 1976 .

37 - X - xiong work.at NIST .USA 1990.

38- William D.Philips lecture at NIST. USA. Oct 1990.

39- G.Mainfray. RIS. 88.Caithersburg. 10 - 15 April 1988.

40- Goran Wendin etal.Phys.Rev.lett 56.1241.Also look xing -Bong mu et al. paper in the same volume PP.1909.1986.

41- Ahmed Zwail lecture at"Lasers in science and technilogy"Amman Jordan 1989 .

42 - P.H.Buchsbaumetal J.Opt.soc.Am B.4.720.1987.

43- Karl H.Welge lecture at NIST . 1990 and at Minneapolis.minisota 1990 .

44- Charles K. Rhodes.Science 229. 1345. 1985

45- P.Lambro Poulos and A.Lyras. phys.Rev.A.40.2199. 1989.

46- KW D.Ledingham.Private communication 1990 .

47- "Advances in time of flight mass spectrometers"Ed.by.J.E.compana. Marcel Dekker Inc. 1987.

48-B.A.Mamyrinand D.V.S hmikh.JETP May.762. 1979 .

49- C.J .MC.Lean et al ,Int.J. of Mass.Spec. and Ion Proc. 96- R1 - 1990 .

50- J.Traves work at NIST.USA 1990.

51- J.A.cool APP.Opt.23.1559. 1984

52- H.Kopferman"Nuclear moments " Academic press.1958.

53- T.B. Lucatorto et al.Opt.com.48 406 - 1984 .

54- G.L.Epstien and S.P.Davis phys. Rev .A.4.464.1971 . .

55- C.M.Brown and. M.L.Ginter opt . com.21.279. 1977.

56- W.Demtroder "Laser spectroscopy Basic Concepts and instruments" spring- verlag 1981 .

57- J.A.painser and R.W.solar z From "Laser spectroscopy and its applications" Ed.by L.S. Radziemski.R.W.solarz and J.A. Paisner Marcel Dekker inc. 1987.

58- Ibrahim K.BELAL.ILS.VI meeting of APS Minneapalis Minisota USA 16 - 19 sep . 1990 .

59- X-Xiong. Ibrahim.K.BELAL.J.D. Fassett and L.J.Moore.Prelimimary results of this research was presented as poster at the meting of OSA in Boston 4-9 Nov.1990 a full report was presented to NASA the Financial supporter of the project .

60- QI li et al RIS. 90 Italy sep 1990 .

61- J.H.Eberly phys. Rev .Lett 42 . 1049 - 1979 .

62 -N.O mentoo. Winter college on "Atomic and Molecular physics analytical laser spectroscopy 9 march - 7 April 1987 . Also pook Ibrahim K.BELAL ph.D.Thesis Univ of st Andrews U.K. 1977

63- L.G Nair prog. quant Elect.7.153- 1982 .

64- D.Heller and J.C.Welling.IL - VI. Minnepolis Minisota sept.16 - 19 1990.

65- KWD Leingham and RP singhal private communication .

66- Lasers and optronics pp 44.Oct . 1990 .