



## جداسازی ایزوتوپ $^{34}\text{S}$ به روش مولکولی لیزری دو بسامدی IR-IR با بهره‌گیری از یک لیزر $\text{TEA CO}_2$ چند خط

بهجت، عباس<sup>۱</sup>؛ سیلاخوری، کاوه<sup>۲</sup>؛ ناصری، احمد<sup>۱</sup>؛ حداد، محمدعلی<sup>۲</sup>؛ طالبی، محمد و

صدر قاینی، سیدمحمدرضا<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک (یزد، صندوق پستی ۷۴۱/۸۹۱۷۸)

<sup>۲</sup> سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده لیزر و اپتیک (تهران، صندوق پستی ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹)

### چکیده:

در این پژوهش، برای نخستین بار در کشور، آرایه‌های گونه‌گونی برای دستیابی به گسیل دو خط از یک لیزر تپی  $\text{TEA CO}_2$  بر روی خط‌های  $10P(20)$  و  $9P(20)$  چیده شدند و با بهره‌گیری از آنها، فرآیند گسست چند فوتونی دو بسامدی IR-IR، با گزینش ایزوتوپ  $^{34}\text{S}$  در مولکول  $\text{SF}_6$  به انجام رسید. از آنجا که دو باریکه‌ی لیزری با دو بسامد جداگانه‌ی تشدید کانونی شده و غیرتشدید کانونی نشده، از جدایی فضایی کامل برخوردار بوده‌اند، به روشنی نشان داده شد که پدیده‌ی دیده شده، یک فرآیند MPD دو بسامدی IR-IR بوده است. در این آزمایش‌ها، انرژی و پهنای زمانی دو تپ فرودی برابر  $E=1\text{ J}$  و  $\text{FWHM}=100\text{ ns}$  بوده است و بیشینه‌ی گزینندگی به دست آمده به  $S=1/67$  می‌رسید.

**کلید واژه:** جداسازی لیزری مولکولی، گسست چند فوتونی دو بسامدی، ایزوتوپ  $^{34}\text{S}$ ، لیزر  $\text{TEA CO}_2$  چند خط.

### پیش درآمد:

از کشف پدیده‌ی درآشامی چند فوتونی<sup>(۲۹)</sup> و گسست چند فوتونی<sup>(۲)</sup> مولکولی زیر تابش تپ‌های کانونی شده‌ی لیزرهای پرتوان، نزدیک به چهار دهه می‌گذرد و سال‌هاست که جداسازی ایزوتوپ‌های  $^{13}\text{C}$  و  $^{34}\text{S}$  به روش لیزری مولکولی تک بسامدی در اندازه‌های آزمایشگاهی در کشور پیگیری می‌گردد [۱-۳]. تنها گزارش از جداسازی ایزوتوپ  $^{34}\text{S}$  به روش دو بسامدی در کشور، دربرگیرنده‌ی یک لیزر  $\text{TEA CO}_2$  کوک نشده بود، که فرض می‌شد تپ‌های آن آمی‌زه‌ای از چند بسامد نزدیکی به هم باشند [۴ و ۵]. از آنجا که لیزرهای  $\text{CO}_2$  با توانایی

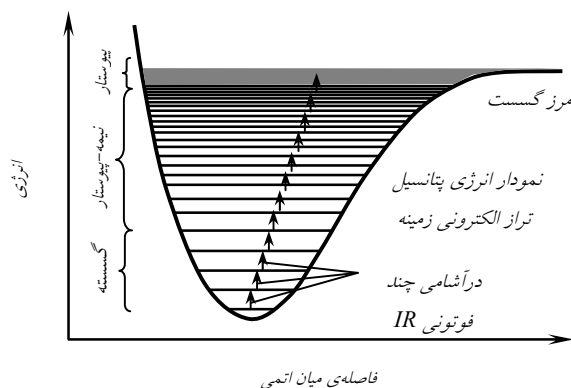
\* s.a.alavi@phys.usb.ac.ir



گسیل همزمان چند بسامد جداگانه، به تازگی و به دست همین گروه پژوهشی دستیاب گردیده است [۶]، زمینه برای کار درست و بنیادی بروی شگردهای چند بسامدی چنین فرآیندهایی هموار گردیده است.

### پایه‌های فیزیکی:

نمودار پتانسیل در مولکول‌های به‌ویژه چند اتمی، که در شکل (۱) آمده، در انرژی‌های بیشتر از پتانسیل نوسانگر هماهنگ ساده دور می‌شود و گاف میان ترازهای انرژی ارتعاشی-چرخشی آنها پس از تنها چند تراز نخست، به تندی کوچک می‌شود. اگر چه چنین می‌نماید که این مولکول‌ها، که نردبان ترازهای ارتعاشی-چرخشی آنها ۳ گستره‌ی: گسسته، نیمه-پیوستار و پیوستار را در برمی‌گیرد، نباید بتوانند در برهمکنش با تپ‌های لیزری تک بسامد کوک شده، به ترازهای برانگیخته برسند، چنین فرآیندی باتابش تپ‌های لیزری کانونی و بسیار کوتاه لیزری با چگالی‌های انرژی تا چند  $J/cm^2$  دیده شده و نشان داده شده که اگر چگالی توان تپ فرودی بسنده باشد، گسست چند فوتونی مولکول نیز روی خواهد داد [۷-۱۱].



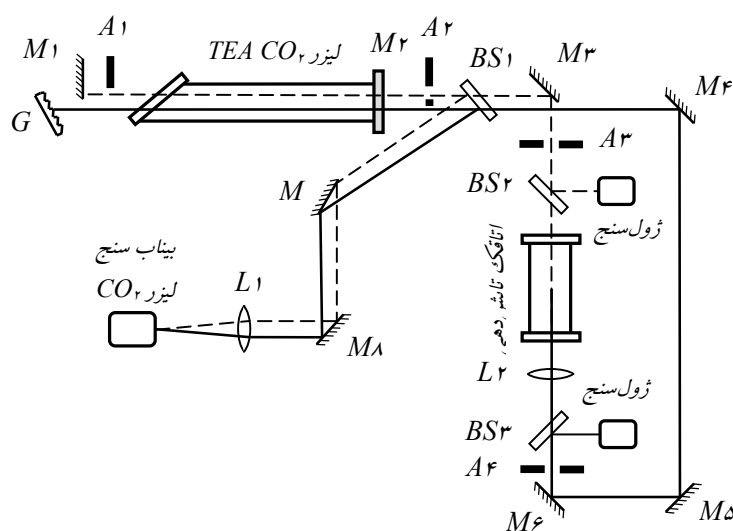
شکل ۱- نمایشی از ترازهای ارتعاشی در مولکول‌های چند اتمی و چگونگی درآشامی چند فوتونی در آنها [۱۲].

این ترازها در مولکول‌های با ساختارهای ایزوتوپی ناهمسان، دارای نابرابری‌های کوچکی به نام جابه‌جایی ایزوتوپی در ستیغ‌های درآشامی خود هستند. با تابش دهی یک گاز مولکولی با دو گونه‌ی ایزوتوپی، با تپ‌های لیزری کوک شده با گذارهای ارتعاشی-چرخشی تنها یک گونه، می‌توان تنها همان گونه را وادار به گسست نمود و به یک دگرگونی شیمیایی با گزینندگی ایزوتوپی در گاز رسید. از آنجا که پهن‌شدگی توانی بیناب درآشامی گاز و همپوشانی ستیغ‌های درآشامی گونه‌های ایزوتوپی، از گزینندگی فرآیندهای تک بسامدی می‌کاهند، چنین اندیشیده شد که با دو پاره کردن فرآیند تابش‌دهی، بتوان گزینندگی آن را بهبود بخشید. بدین شیوه که، بخش نخست و ایزوتوپ-گزین فرآیند، که درآشامی چند فوتون هم‌بسامد در ترازهای گسسته‌ی نخست را در برمی‌گیرد، با یک تپ کانونی نشده و کوک شده (تشدیدی) و بخش دوم که درآشامی ناگهانی ده‌ها فوتون در

گستره‌ی نیمه-پیوستار و پیوستار را دربرمی‌گیرد نیز، با یک تپ کانونی شده و کوک نشده (غیرتشدیدی) به‌انجام رسد. بدین‌سان، بخش نخست فرآیند با یک تپ تشدید با پهن‌شدگی ناچیز انجام می‌پذیرد تا گونه‌ی ایزوتوپی برگزیده با گزیندگی خوبی به گستره‌ی نیمه-پیوستار برسد. آنگاه، با فرود تپ غیرتشدیدی پرتوان با بسامدی دورتر از ستیغ درآشامی گونه‌ی ایزوتوپی برانگیخته، به مرز گسست می‌رسد. از آنجا که واهلش‌های برخوردی میان گونه‌های ایزوتوپی برانگیخته و نابرانگیخته به برانگیزش گونه‌های ناخواسته به ترازهای بالاتر و گسست آنها می‌انجامد، باید از تپ‌هایی سود جست که دارای دیرپایی کمتر از زمان میانگین واهلش‌های برخوردی باشند.

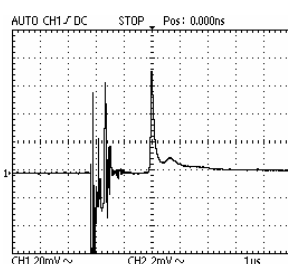
### روش کار:

بیناب IR مولکول  $SF_6$  در مد  $\nu_2$ ، دارای دو ستیغ جداگانه در بسامدهای  $948\text{ cm}^{-1}$  و  $931\text{ cm}^{-1}$  از آن گونه‌های ایزوتوپی  $^{32}SF_6$  و  $^{34}SF_6$  با فراوانی‌های  $95/2$  و  $4/22$  درصد است، که برای تابش‌دهی، خط  $(20)P(10)$  تشدید ایزوتوپی  $(20)P(20)$  غیرتشدیدی ( $\nu_1=944/21\text{ cm}^{-1}$ ) و  $(20)P(20)$  تشدید ایزوتوپی ( $\nu_2=1046/85\text{ cm}^{-1}$ ) به‌کار رفته‌اند. همان‌گونه که در شکل (۲) آمده، شالوده‌ی این آزمایش‌ها، یک لیزر  $CO_2$  TEA با توانایی گسیل تپ‌هایی با دیرپایی  $FWHM=100\text{ ns}$  و انرژی پیرامون  $E=5\text{ J}$  بوده، که به روش جدایی فضایی مسیره‌های اپتیکی چند خط شده است [۱۳].



شکل ۲- نمایی از آرایه‌ی تابش‌دهی دوسامدی به‌کار رفته.

در این آرایه، حجم فعال لیزر به گونه‌ای میان آینه‌ی تخت M1 و توری پراش G بخش شده، که هر کدام همزمان بازآواگر جداگانه‌ای را با آینه‌ی جلویی M2 می‌سازند. بدین سان، بازآواگر M1-M2 خط ۱۰P(۲۰) و



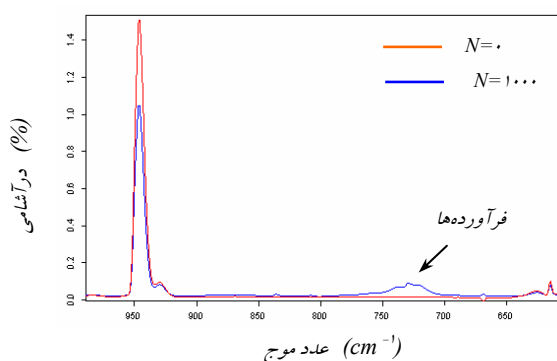
تشدید و بازآواگر G-M2 نیز، خط ۹P(۲۰) غیر تشدید را در همراستا و چسبیده به هم گسیل می‌نمایند، که پس از جدایی با دریچه‌ی A2 و پایش به کمک باریکه‌شکاف BS1 و بیناب‌نمای S، از دو راستای رو در رو، راهی اتاقک می‌شوند. تپ‌های لیزری نشان داده شده در شکل (۳)، یک پیشانی با دیرپایی  $FWHM=100\text{ ns}$  و یک دنباله با درازای بیش از  $4\text{ }\mu\text{s}$ ، که ۵۰٪ از انرژی تپ را در خود جای می‌دهد، دربر می‌گیرند.

شکل ۳- رفتار زمانی تپ‌های لیزری به کار گرفته شده.

اتاقک تابش دهی، استوانه‌ای شیشه‌ای به درازای ۱۲ cm و شعاع ۰/۸ cm بود، که از آمیزه‌ی  $1:5:\text{SF}_6:\text{H}_2$  با فشار ۱/۵ mbar پر می‌شد. دریچه‌های A3 و A4، انرژی هر دو تپ فرودی را برابر  $E=1\text{ J}$  نگه می‌داشتند، تا چگالی باریکه‌ی تشدید برابر  $\Phi_{th} = 2\text{ J/cm}^2 < \Phi_1 = 0/44$  باشد و باریکه‌ی غیر تشدید نیز، که با عدسی L2 با فاصله‌ی کانونی  $f=10\text{ cm}$  درون اتاقک کانونی می‌گردد، لکه‌ای با چگالی  $\Phi_2=50\text{ J/cm}^2$  فراهم می‌آورد.

### نتایج:

خوشبختانه، بیناب آمیزه‌ی گازی پیش و پس از تابش دهی با ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ جفت از تپ‌های لیزری تشدید خوشبختانه، بیناب آمیزه‌ی گازی پیش و پس از تابش دهی با ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ جفت از تپ‌های لیزری تشدید ۱۰P(۲۰) و غیر تشدید ۹P(۲۰)، مانند شکل (۴) که پاره‌های گسست به خوبی در آن دیده می‌شوند، نشان از گسست گزینشی مولکول‌های  $^{32}\text{SF}_6$  داشت، که گویای انجام موفقیت‌آمیز گسست دو بسامدی IR-IR در آن است.





شکل ۴- بیناب IR آمیزه‌ی گازی پیش و پس از تابش‌دهی.

با همهی روشنی داده‌ها، بای‌د از دیدگاه منطق علمی نشان داده می‌شد که چنین فرآیندی، در هیچ مقیاسی، با تنها یکی از دو بسامد فرودی انجام‌پذیر نیست. در این راستا، هر بار راه نوسان یکی از دو باریکه با درجه‌ی A1 بسته شد و بدین‌سان، به روشنی نشان داده شد که گسست چندفوتونی مولکول‌های  $^{32}\text{SF}_6$  هرگز با بهره‌گیری از تنها یکی از دو بسامد فرودی روی نمی‌دهد. در دنباله، برای به‌دست دادن چارچوبی از سنجش‌گزینه‌ی این فرآیند با تابش‌دهی تک بسامدی، راه نوسان خط  $9P(20)$  با درجه‌ی A1 بسته شد و تنها باریکه‌ی تشدید برجا مانده‌ی  $10P(20)$  با بهره‌گیری از عدسی  $L_2$  در اتاقک کانونی شد، تا گسست چندفوتونی تک بسامدی گونه‌های ایزوتوپی  $^{32}\text{SF}_6$  روی دهد. گزیده‌ای از داده‌های وابسته به این دو روش تابش‌دهی در جدول (۱) گرد آمده است.

جدول (۱): داده‌های وابسته به تابش‌دهی تک بسامدی و دو بسامدی.

| S     | $\beta$ | $\nu$    |           | $\Phi$<br>( $\text{J}/\text{cm}^2$ ) |          | $H_r : \text{SF}_6$ | P( $\text{SF}_6$ )<br>(mbar) | N    |
|-------|---------|----------|-----------|--------------------------------------|----------|---------------------|------------------------------|------|
|       |         | $\nu_2$  | $\nu_1$   | $\Phi_2$                             | $\Phi_1$ |                     |                              |      |
| ۲۳/۱۷ | ۴/۶۸    | ---      | $10P(20)$ | ---                                  | ۱۵       | ۵:۱                 | ۰/۲۵                         | ۳۰۰  |
| ۱/۶۷  | ۱/۲۶    | $9P(20)$ | $10P(20)$ | ۵۰                                   | ۰/۴۴     | ۵:۱                 | ۰/۲۵                         | ۱۰۰۰ |
| ۳/۲۸  | ۱/۶۸    | $9P(20)$ | $10P(20)$ | ۵۰                                   | ۰/۶      | ۵:۱                 | ۰/۲۵                         | ۱۵۰۰ |

### بحث و نتیجه‌گیری:

با همهی شگفتی، دیده می‌شود که اگرچه به انگیزه‌ی بهره‌ی بالای گسست در تابش‌دهی تک بسامدی، به‌ناچار شمار تپ‌ها و چگالی انرژی فرودی کاهش داده شده‌اند، باز هم گزینه‌ی فرآیندهای تک بسامدی بیشتر است. برای پی‌بردن به ریشه‌ی فیزیکی چنین رفتار دور از چشمداشتی، بای‌د نگاهی ژرف‌تر به رفتار زمانی تپ‌های لیزری انداخت. گفته شد، که نیمی از انرژی تپ‌ها از آن دنباله‌ی آنهاست و در یک بازه‌ی زمانی بیش از  $4 \mu\text{s}$ ، مولکول‌ها همچنان فوتون‌های بسیاری را برای درآشامی در پیرامون خود در دسترس خواهند داشت. با نگاهی به آنچه از واهلش‌های برخوردی گفته شد، روشن می‌گردد که، تنها بخشی از مولکول‌هایی که با درآشامی تپ تشدید به گستره‌ی نیمه-پیوستار رفته‌اند، در برخورد با پیشانی تپ غیرتشدید گسست می‌یابند و شماری از آنها، که در نزدیکی‌های مرز گسست سرگردان می‌مانند تا یا به‌گونه‌ای کاتوره‌ای و یا برخوردی گسست یابند، از زمان بسنده برای برخوردهای کاتوره‌ای با گونه‌های ایزوتوپی ناخواسته و رساندن آنها به گستره‌های نیمه-پیوستار و پیوستار برخورددارند. آنگاه، این گروه از مولکول‌های تازه برانگیخته، تا زمان دراز چند  $\mu\text{s}$  می‌توانند با

درآشامی دنباله‌ی تپ دوم، خود را به مرز گسست برسانند و پالودگی ایزوتوپی و گزینندگی فرآیند را دچار افت نمایند.

### سپاسگزاری:

از خانم خویلو و آقای قاسم عزیزآبادی به انگیزه‌ی همکاری‌های بی‌دریغ فنی سپاسگزاری می‌گردد.

### مراجع:

- [1]. ک. سیلاخوری، "جداسازی ایزوتوپها به کمک پالسهای تیز لیزری به روش جذب چند فوتونی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک و علوم هسته‌ای، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۹.
- [2]. م. هوشور، جداسازی ایزوتوپ‌های مولکولی مانند ایزوتوپ‌های  $SF_6$  با لیزر  $CO_2$  پالسی به طریق جذب چند فوتونی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک و علوم هسته‌ای، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۲.
- [3]. م.ع. حداد، "جداسازی لیزری مولکولی ایزوتوپ کربن-۱۳ با بهره‌گیری از تپهای لیزرهای پرتوان کوک پذیر"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، ۱۳۸۴.
- [4]. ب. سجاد، "برانگیزش و گسست انتخابی گونه‌های مولکولی  $SF_6$  با لیزر گاز کربنیک پالسی چند خط"، پایان نامه دکتری، دانشکده فیزیک و علوم هسته‌ای، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۲.
- [5]. B. Sajad, P. Parvin, K. Silakhori, Z. Zamanipour and N. Hooshvar, "Dissociation Rate Measurement for Selectivity Evaluation in  $SF_6$ , Selective Dissociation by Multiline vs., Single Line  $CO_2$  Laser", *J. Nuclear Science and Technology*, Vol.41, No. 7, 771-776, 2004.
- [6]. ا. ناصری، "جداسازی لیزری ایزوتوپ  $^{32}S$  در مولکول  $SF_6$  به روش دوسامدی (IR-IR) با بهره‌گیری از لیزر  $TEA CO_2$  چندخط"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، ۱۳۸۶.
- [7]. پ. پروین، ک. سیلاخوری، ز. زمانی پور، ب. قنبرزاده، ا. جعفرقلی، ع. ا. یراقچی و ف. سلطانمرادی، "جداسازی ایزوتوپ‌های  $^{32}S$  با فرآیند گسست ناشی از جذب چندفوتونی مولکول‌های  $SF_6$  توسط پرتودهی لیزر پرتوان گازکربنیک"، اولین کنفرانس کاربردهای فیزیک و علوم هسته‌ای در پزشکی و صنعت، دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۷۸.
- [8]. پ. پروین، ک. سیلاخوری، ب. سجاد، م. هوشور، ا. جعفرقلی، ع. ا. یراقچی و ز. زمانی پور، "جداسازی مولکولی لیزری ایزوتوپ  $^{32}S$  در مولکول  $SF_6$  با به کارگیری طیف‌سنج فروسخ"، هفتمین گردهمایی اپتیک پیشگان کشور، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۷۹.
- [9]. پ. پروین، ک. سیلاخوری، ب. سجاد، م. هوشور و ز. زمانی پور، "جداسازی ایزوتوپ‌های سبک به روش MOLIS"، هفتمین گردهمایی فیزی‌کدامان و متخصصین هسته‌ای کشور، دانشگاه پیام نور فریمان، ۱۳۷۹.
- [10]. پ. پروین، ب. سجاد، م. هوشور، ز. زمانی پور و ک. سیلاخوری، "افزایش گزینندگی گسست مولکول  $SF_6$  با پرتودهی لیزر گازکربنیک TEA کوک شده در خط  $10/6$  میکرون"، نهمین همایش فوتونیک انجمن فیزیک ایران، دانشگاه زنجان، ۱۳۸۱.
- [11]. م.ع. حداد، ک. سیلاخوری، ع. بهجت، ف. سلطانمرادی، "جداسازی لیزری ایزوتوپ  $^{13}C$  با استفاده از تپهای لیزر آمونیاک"، مقاله نامه کنفرانس هسته‌ای ایران، مشهد، ۱۳۸۵.
- [12]. A.M.Ronn, "Laser Chemistry", *Scientific American*, Vol.249, No 5, 1979.
- [13]. ا. ناصری، ک. سیلاخوری، ع. بهجت، م.ح. حداد، م. طالبی و س. م. ر. صدرقاینی، "چند خط سازی یک لیزر  $TEA CO_2$  به روش جدایی فضایی مسیر اپتیکی"، مجله علوم و فنون هسته‌ای، زیر چاپ.