

مقاله نامه بیست و دومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۱-۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۴)

اثر حرکت هسته‌ای بر تولید هماهنگ مرتبه بالا در سامانه H_2^+ تحت تپ‌های لیزری

شدید فوق کوتاه

سید حامد احمدی^۱، علی مقاری^۱، و محسن وفايي^۲

^۱گروه شیمی فیزیک، گروه شیمی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

^۲گروه شیمی فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

تأثیر حرکت هسته‌ای بر تولید هماهنگ مرتبه بالا برای سامانه H_2^+ و ایزوتوپ‌های آن، در تپ‌های لیزری شدید ۷ پرخه‌ای با پوش دوزنقه‌ای مورد بررسی قرار دادیم. برای این کار، معادله شرودینگر سه‌بعدی الکترونی وابسته به زمان را به صورت عددی با و بدون در نظر گرفتن تقریب بورن-اپنهايمر حل کردیم. بخش نزولی تپ‌های لیزری دوزنقه‌ای می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر روی طیف هماهنگ مرتبه بالا بگذارد که پیشتر گزارش نشده است. حرکت هسته‌ای نیز نقش قابل توجهی در جابجایی قرمز دیده شده در طیف هماهنگ‌ها بازی می‌کند و می‌توان با در نظر گرفتن حرکت هسته‌ای و انتخاب ایزوتوپ‌ها مناسب، طیف هماهنگ مرتبه بالا و در نتیجه تولید تپ‌های لیزری آتوتانیه را کنترل نمود.

مقدمه

امروزه، لیزرهای فروکوتاه پر شدت امکان تعقیب حرکت‌های درون مولکولی را فراهم کرده‌اند. تعقیب بلادرنگ حرکت‌های الکترونی به صورت تجربی از سال ۲۰۰۱ شروع شده است. در سال ۲۰۰۱، با استفاده از لیزرهای فمتوتانیه با توان بالا، تپ‌های لیزری آتوتانیه توسط روشی به نام هماهنگ مرتبه بالا تولید شدند. نظریه چگونگی تولید هماهنگ‌های مرتبه بالا در سال ۱۹۹۳ توسط کارکوم در کانادا ارائه شد [۱]. امروزه لیزرهای تا شدت 10^{22} W/cm^2 نیز موجود است. لیزرهایی با شدت‌های بالای تراوات ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$) نیروهای ایجاد می‌کنند که قابل مقایسه با نیروهای نگهدارنده الکترون در اتم‌ها و مولکول‌ها است. در شدت‌ها، می‌توان به پدیده‌های غیرخطی در اتم‌ها و مولکول‌ها، همانند یونش تونل‌زنی، یونش چندفوتونی، یونش بالای حد آستانه، تولید هماهنگ مرتبه بالا و پایداری و پدیده‌هایی مانند نرم شدن پیوند، سخت شدن پیوند، تفکیک زیر حد آستانه و به خط شدن مولکول‌ها اشاره نمود [۲]. پتانسیل سامانه در این شدت‌ها دچار دگرگونی می‌شود. این پدیده‌ها با نظریه اختلال وابسته به زمان قابل بررسی نیستند.

بر اساس مدل ارائه شده توسط کارکوم [۱]، برهم‌کنش یک میدان شدید نوسانی با اتم‌ها و مولکول‌ها، باعث جداسازی الکترون از قید نیروهای هسته‌ای می‌شود. بعد از این مرحله، الکترون آزاد شده توسط نیرویی که از طرف میدان الکتریکی لیزر به آن وارد می‌شود، در جهت مولفه الکتریکی میدان، شتاب می‌گیرد. البته میدان مغناطیسی هم وجود دارد که باعث یک جابجایی در امتداد انتشار موج می‌شود که به علت اثر کمتر میدان مغناطیسی، بیشتر مواقع از آن صرف نظر می‌شود، ولی در شدت‌های بسیار بالا قابل ملاحظه است [۳]. در این مرحله، الکترون از میدان انرژی جذب می‌کند و پس از تغییر جهت میدان، الکترون به سوی جایگاه نخستین خود بازمی‌گردد. در بازگشت الکترون به سوی هسته، پدیده‌های مختلفی ممکن است روی دهند که از میان آن‌ها می‌توان به پراش کشسان، پراش غیرکشسان و ترکیب دوباره الکترون و یون مادر و تولید همان گونه نخستین و آزاد شدن انرژی مازاد الکترون به صورت یک فوتون، اشاره نمود. انرژی که الکترون در طول یک دوره می‌تواند کسب کند، همان انرژی رفت و برگشتی ($U_p = \frac{I}{4\omega^2}$)

مقاله نامه بیست و دومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۱-۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۴)

است. این انرژی به شدت I و بسامد ω میدان لیزر وابسته است. هر چقدر انرژی رفت و برگشتی بیشتر باشد، در نتیجه، تپ تولید شده نیز کوتاه تر است. با این روش، تپ های آتوتانیه تولید شدند که در آن، انرژی فوتون تولید شده مضربی از بسامد میدان است. به این روش، تولید هماهنگ های مرتبه بالا گفته می شود [۱]. از روی طیف هماهنگ مرتبه بالا همچنین می توان خواص ساختاری و دینامیک سامانه مورد بررسی را بدست آورد [۴].

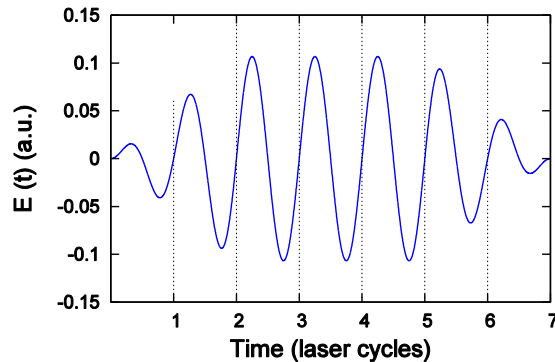
در این پژوهش معادله شرودینگر وابسته به زمان سه بعدی الکترونی در دستگاه قطبی-استوانه ای برای سامانه H_2^+ را به صورت عددی با و بدون در نظر گرفتن تقریب بورن-اپنهایمر حل کردیم [۵-۷]. اندازه جعبه شبیه سازی به اندازه کافی بزرگ انتخاب شده است که اتلاف جمعیت از جعبه قابل چشم پوشی است. در این کار از تپ لیزر ۷ چرخه ای با پوش دوزنقه ای با شدت $I = 4 \times 10^{14} \text{ Wcm}^{-2}$ و طول موج مرکزی ۸۰۰ نانومتر استفاده کردیم که در شکل ۱ نیز رسم شده است. با استفاده تبدیل فوریه از شتاب دوقطبی الکتریکی $a(t)$ ، طیف هماهنگ مرتبه بالا را بصورت

$$S(\omega) = \left| \frac{1}{T_{tot}} \int_0^{T_{tot}} dt a(t) H(t) \exp[-i\omega t] \right|^2$$

محاسبه نمودیم که در آن

$$H(t) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos 2\pi \frac{t}{T_{tot}} \right]$$

است.

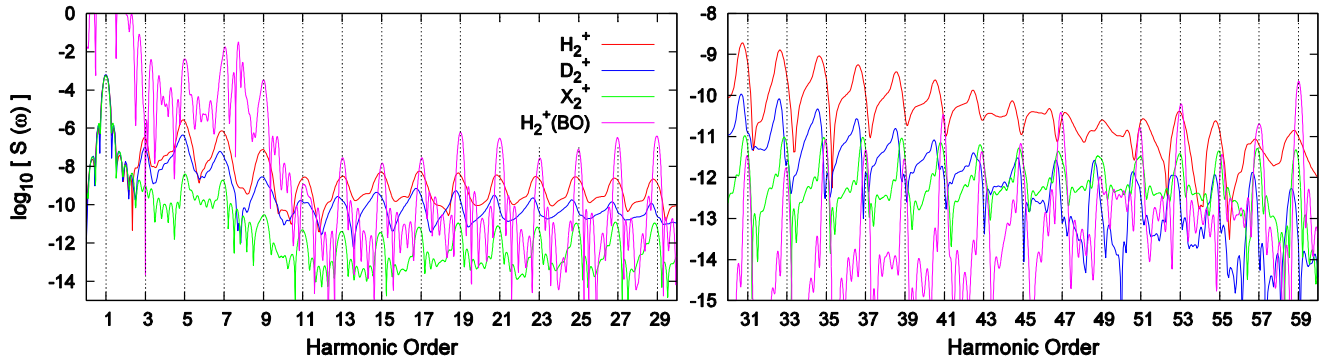


شکل ۱: تپ لیزر ۷ چرخه ای بکارگرفته شده در این پژوهش با طول موج مرکزی ۸۰۰ نانومتر و شدت 4×10^{14} وات بر سانتیمتر مربع.

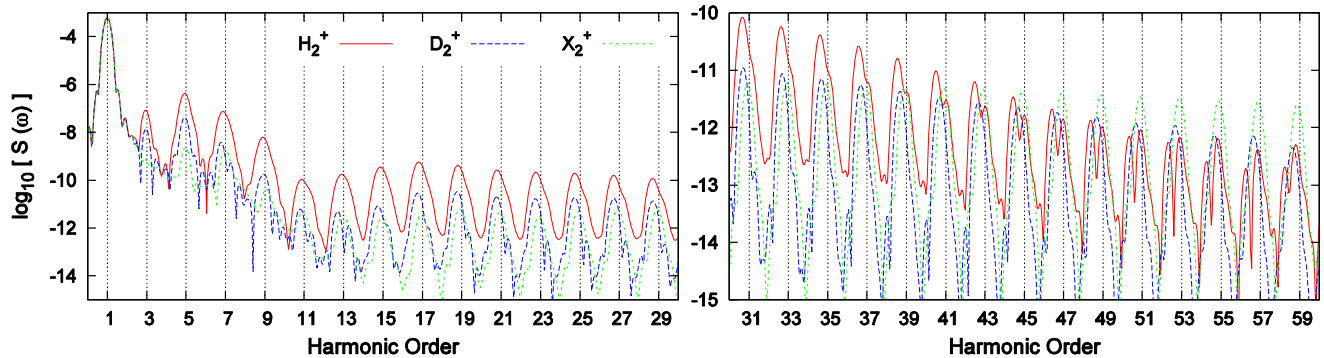
در شکل ۲، طیف هماهنگ مرتبه بالای H_2^+ و ایزوتوپومرهای آن برای تپ لیزر ۷ چرخه ای با پوش دوزنقه ای با شدت $I = 4 \times 10^{14} \text{ Wcm}^{-2}$ و طول موج مرکزی ۸۰۰ نانومتر نشان داده شده است. برای مورد هسته های ثابت ($H_2^+(BO)$)، تنها هماهنگ های فرد دیده می شود ولی در مورد ایزوتوپومرهای با هسته های متحرک، طیف های هماهنگ مرتبه بالا الگوی پیچیده ای به خود می گیرند. برای نمونه برای X_2^+ ، جابجایی های قرمز برای هماهنگ های فرد دیده می شود که برای هماهنگ های مرتبه بالاتر این این جابجایی ها مشهودتر است. برای دو ایزوتوپ سبکتر D_2^+ و H_2^+ ، طیف هماهنگ ها پیچیده است. الگوی پیچیده هماهنگ ها ناشی از سهم دو چرخه پایانی تپ لیزر است که دارای بخش نزولی است. حرکت هسته ای باعث تولید قوی هماهنگ های مرتبه بالا در دو چرخه پایانی می شود که در ایزوتوپومرهای سبک تر، به دلیل حرکت سریع تر هسته ها، این رخداد شدیدتر می شود. برای اثبات ادعای بالا، طیف های هماهنگ مرتبه بالا در شکل ۲ در شکل ۳ رسم شده است با این تفاوت که برای

مقاله نامه بیست و دومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۱-۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۴)

بدست آوردن طیف هماهنگ‌ها، تبدیل فوریه برای ۵ چرخه لیزر انجام رفته است تا سهم بخش نزولی تپ لیزر حذف شود. همان‌گونه که در شکل ۳ نمایان است، بر خلاف شکل ۲، طیف هماهنگ‌های مرتبه بالا الگوی ساده تری پیدا کرده‌اند و هماهنگ‌های فرد به خوبی دیده می‌شوند.



شکل ۲: طیف هماهنگ مرتبه بالا در یون مولکول هیدروژن و ایزوتوپ‌های آن. پارامترهای لیزر مشابه با شکل ۱.



شکل ۳:

مشابه با شکل ۲ با این تفاوت که تبدیل فوریه بر روی ۵ چرخه لیزر انجام شده است.

نتیجه‌گیری

بخش نزولی تپ لیزر در تپ‌های لیزری دوزنقه‌ای نقش مهمی در طیف هماهنگ مرتبه بالا بازی می‌کند و نباید نادیده گرفته شود. حرکت هسته‌ای نیز نقش قابل توجهی در شکل طیف هماهنگ‌ها بازی می‌کند و می‌توان با در نظر گرفتن حرکت هسته‌ای و انتخاب ایزوتوپ‌ها مناسب، طیف هماهنگ مرتبه بالا و در نتیجه تولید تپ‌های لیزری آتوانایی را کنترل نمود.

مرجع‌ها

- [1] P. B. Corkum, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 1994 (1993).
- [2] T. Brabec, *Strong field laser physics*; Springer, (2008).
- [3] H. Sabzyan, H. Ahmadi and M. Vafaei, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **47**, 105601 (2014).

مقاله نامه بیست و دومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۴)

- [4] H. Ahmadi, A. Maghari, H. Sabzyan, A. R. Niknam and M. Vafae, *Phys. Rev. A.* **90**, 043411 (2014).
- [5] M. Vafae and H. Sabzyan, *J. Phys. B.* **37**, 4143 (2004).
- [6] M. Vafae, *Phys. Rev. A.* **78**, 023410 (2008).
- [7] M. Vafae and B. Shokri, *Phys. Rev. A.* **81**, 053408 (2010).