

کاربرد تجربی جت های پلاسمای فراصوتی در بیناب نگاری لیزری رادیکالهای آزاد

محمد علی حداد^{۱،۲}

^۱ گروه فیزیک اتمی-مولکولی- دانشکده فیزیک- دانشگاه یزد- یزد- ایران.

^۲ گروه فیزیک اتمی-مولکولی و لیزر-دانشکده علوم-دانشگاه فرای آمستردام-آمستردام-هلند.

چکیده - بیناب نگاری لیزری رادیکالها، یونها و مولکولهای نجومی در دمای پایین، همواره مورد توجه بسیاری از بیناب نگاران تجربی و منجمین بوده است. جت های پلاسمای فراصوتی به عنوان ابزاری ممتاز در تولید آزمایشگاهی نمونه های مولکولی مذکور به حساب می آیند. جت پلاسمای صفحه ای و جت پلاسمای دایروی متقارن دو نوع از جت های پلاسمای فراصوتی می باشند که در سالهای اخیر در آزمایشگاههای بیناب نگاری لیزری مورد استفاده قرار گرفته اند. در این مقاله جزئیات تکنیکی بکارگیری این دسته از چشمه های پلاسمایی ارایه می گردد و همچنین مزایا و معایب تجربی هر یک مورد بحث قرار خواهد گرفت.

کلید واژه- بیناب نگاری لیزری، جت پلاسمای فراصوتی، رادیکالهای آزاد، اخترفیزیک آزمایشگاهی.

The Experimental application of supersonic plasma jets in laser spectroscopy of free radicals

Mohammad Ali Haddad^{1, 2}

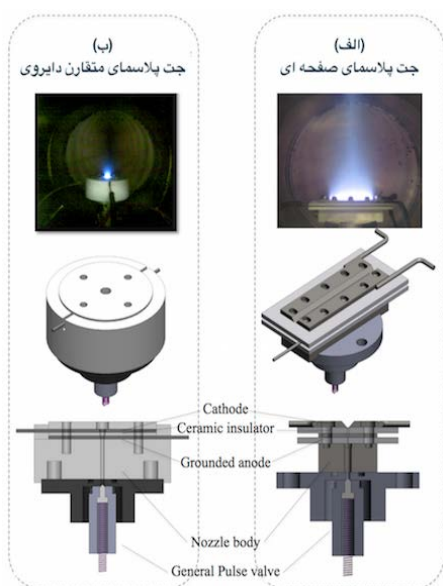
¹ Atomic and Molecular Physics Group, Department of Physics, Yazd University, Yazd, I.R. Iran.

² Atomic and Molecular Physics Group, Department of Physics and Astronomy, VU University, Amsterdam, Netherlands.

Abstract- High resolution laser spectroscopy of cooled radicals, ions and the molecules of astronomical interests at low temperatures have been of considerable interest to both astronomers and laboratory spectroscopists. Supersonic plasma jets offer an elegant method to generate such a molecular species. (1) circular (or pinhole) plasma jet and (2) planar (or slit) plasma jet are two type of supersonic plasma jets, which have been applied recently in many experimental attempts. This article presents technical aspects of these devices and describes how they have been used to record high resolution absorption spectra of radicals. Finally, the experimental advantages and disadvantages for present plasma systems have been discussed.

Keywords: Laser spectroscopy, Supersonic plasma jet, Free radicals, Laboratory astrophysics.

۱- مقدمه



شکل ۱: جت پلاسمای صفحه ای و جت پلاسمای دایروی

لیزری دو نمونه مولکولی، مزایا و معایب تجربی بکارگیری هر یک از چشمه های پلاسمایی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- جت های پلاسمایی فراصوتی

با توجه به شکل هندسی، جت های پلاسمای فراصوتی به دو نوع جت پلاسمای صفحه ای^۲ و جت پلاسمای متقارن دایروی^۳ تقسیم بندی می شوند. این دو چشمه های پلاسمای در شکل ۱ نشان داده شده اند. هر یک از این چشمه ها، از ساختاری چند لایه شامل لایه کاتدی، لایه عایق و لایه آندی تشکیل شده اند.

جت پلاسمای صفحه ای: شکل ۱- الف نمونه ای از چشمه پلاسمای صفحه ای را نشان می دهد. همانگونه که در شکل دیده می شود، دهانه نازل در این چشمه از دو فک^۴ فلزی (کاتد) جداگانه قابل تنظیم نسبت به یکدیگر تشکیل شده است که پهنای شکاف نازل را تعیین می کند. یک صفحه عایق سرامیکی (و یا تفلونی) باریک بین دو فک فلزی (کاتد) و صفحه فلزی آند قرار می گیرد. پس از تنظیم دقیق شکافها، تمامی لایه به کمک پیچهای عایق شده به یکدیگر و همچنین به بدنه اصلی چشمه پلاسمای متصل می شوند. پایداری پلاسمای ایجاد شده در این چشمه پلاسمایی به

مولکولهای ناپایدار، رادیکالها، یونها و خوشه های یونی به علت واکنش پذیری شیمیایی بسیار بالا، واسطه های مولکولی مهمی در واکنشهای محیطهای پلاسمایی، احتراق و همچنین محیطهای مشابه در فضای میان ستاره ای به حساب می آیند. به منظور آشنایی و مطالعه دقیق فرآیندهای شیمیایی موجود در چنین محیطهایی، بیناب نگاری این دسته از مولکولها از دیرباز مورد توجه پژوهشگران و بیناب نگاران بوده است. در این راستا، تلاشهای بسیاری برای تولید این مولکولها در آزمایشگاه به انجام رسید که استفاده از روش تخلیه الکتریکی در محفظه های حاوی نمونه های گازی مختلف را می توان به عنوان نخستین تلاشها برشمرد [۱-۳]. بینابهای ثبت شده برای مولکولهای تولید شده در این روش، غالباً نشان دهنده گذارهای چرخشی و ارتعاشی برخاسته از ترازهای انرژی بالایی مولکولها و دارای پهنای قابل توجه بینابی ناشی از پهن شدگی دوپلری میباشد که مطالعه دقیق گذارهای مشاهده شده را پیچیده و دشوار می کنند. بیناب نگاری مولکولها در دماهای چرخشی، ارتعاشی و حرکتی (انتقالی) بسیار پایین با استفاده از روش شناخته شده دیگری، با عنوان انبساط فراصوتی^۱ که در آن مولکولهای گازی از ناحیه ای پرفشار به ناحیه ای بسیار کم فشار (محفظه خلاء) منبسط می شوند، ممکن است [۴]. بکارگیری همزمان تخلیه الکتریکی و همچنین انبساط فراصوتی منجر به طراحی و ساخت جت های پلاسمایی فراصوتی شده است که استفاده از این چشمه های پلاسمایی روشی بسیار ممتاز در تولید آزمایشگاه مولکولهای سرد از جمله رادیکالها و یونها بشمار میرود. استفاده از این گروه از چشمه های پلاسمایی در بیناب نگاری لیزری مولکولها، نه تنها امکان مطالعه پارامترهای مولکولی در ترازهای انرژی پایین را فراهم می آورد بلکه با توجه به قابل مقایسه بودن دمای نمونه مولکولی با دامنه دمایی موجود در فضای میان ستاره ای، مقایسه داده های بینابی ضبط شده را با بیناب های ضبط شده رصدی ممکن می سازد.

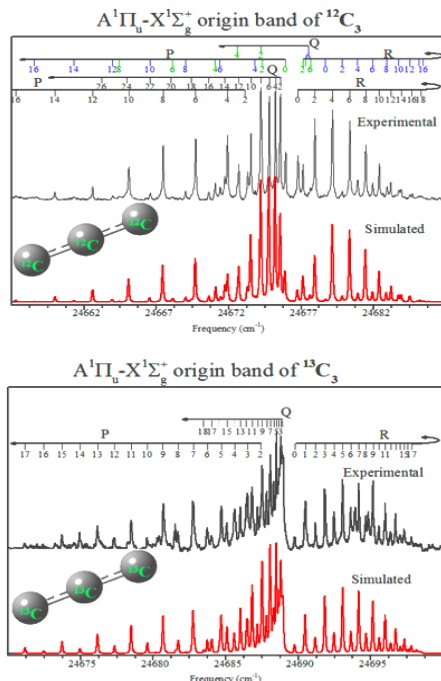
در این مقاله ابتدا، دو چشمه از جت های پلاسمای فراصوتی که غالباً مورد استفاده قرار می گیرند معرفی میشوند و با اشاره مختصر به نتایج تجربی بدست آمده از بیناب نگاری

^۲ Planar plasma jet

^۳ Circular plasma jets or pinhole plasma jet

^۴ Jaw

^۱ Supersonic expansion



شکل ۲: گذار $A^1\Pi_u-X^1\Sigma_g$ در رادیکالهای سه اتمی $^{12}C_3$ و گونه ایزوتوپی $^{13}C_3$.

برای ضبط بیناب جذبی شکل ۱ مورد استفاده قرار گرفت. برای آشنایی بیشتر با جزئیات این روش مطالعه مرجع [۶] پیشنهاد می شود. مراحل بیناب نگاری لیزری این نمونه مولکولی که در موسسه لیزر آمسترا به انجام رسید که جزئیات آن به تفسیر در مرجع [۷] آمده است. مشاهده گذارهای چرخشی برخواسته از ترازهای چرخشی با عدد کوانتومی پایین نشان می دهد که استفاده از جت پلاسمایی صفحه ای به تولید نمونه های مولکولی C_3 در دمای بسیار پایین در محدوده دمایی کمتر از ۲۰ کلین (قابل مقایسه با دمای موجود در محیط های میان ستاره ای) می انجامد [۸]. شایان ذکر است استفاده از گاز بافر حاوی در صد معینی از استیلن با غنای کامل ^{13}C ، منجر به تولید گونه های خالص $^{13}C_3$ در پلازما می شود.

بیناب نگاری سه زنجیره کربنی $^{12}C_3H$ ، $^{13}C_3H$ و $^{13}C_3D$ که شکل (۳) نوار مرجع برای گذار الکترونی $^2\Pi-X^2\Pi$ آنها نشان می دهد مثالی از بکارگیری چشمه پلازما دایروی تقارن است که جزئیات روش آزمایشگاهی انتخاب شده، به تفصیل در مرجع [۹] آمده است. بررسی بینابهای بدست

تنظیم دقیق مقدار گاز ورودی و اختلاف پتانسیل اعمالی به صفحات کاتد و آند دارد. بیناب نگاری لیزری نمونه های مولکولی دلخواه زمانی ممکن است که مولکولهای دلخواه با فراوانی نسبی مناسب در چشمه های پلاسمایی تولید شوند. از این رو انتخاب گاز بافر با ترکیبات مناسب از لحاظ تجربی بسیار مهم است. به عنوان مثال، انتخاب گاز بافری با ترکیب ۹۰٪ هلیوم و ۱۰٪ استیلن تعداد قابل توجهی از زنجیره های کربنی خطی و غیر خطی را در محیط پلاسمایی تولید می کند. آزمایشهای تجربی نشان می دهد که انتخاب گازهای آرگون و یا نئون به جای گاز هلیوم می تواند نرخ تولید برخی از زنجیره کربنی را افزایش دهد که به نوبه خود باعث افزایش کسر سیگنال به نویز (S/N) در خطوط بینابی این دسته از مولکولها می شود.

جت پلاسمای متقارن دایروی: طرز کار جت پلاسمای متقارن دایروی تا حدود بسیاری مشابه با جت پلاسمای صفحه ای است اما از لحاظ هندسی و در مواردی جزئی با آن متفاوت است. شکل ۱-ب، چشمه پلازما با تقارن محوری را نشان می دهد. همانگونه که دیده می شود یک صفحه سرامیکی بر روی صفحه آند قرار دارد که از آلودگی این صفحه فلزی جلوگیری می کند. نتایج تجربی نشان داده است که افزایش قطر روزنه ها با تغییر لایه ها از بدنه اصلی، لایه کاتدی، عایق سرامیکی اولیه، لایه آند و عایق سرامیکی ثانویه باعث افزایش نرخ تولید نمونه های مولکولی می شود [۵].

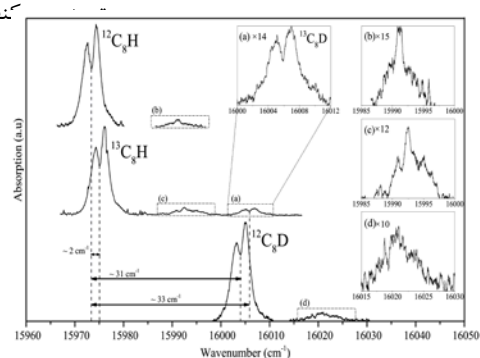
۳- روش آزمایشگاهی

بیناب نگاری لیزری نمونه های مولکولی سرد با استفاده از چشمه های پلاسمایی فوق در محدوده نورمرئی و فروسرخ امکان مقایسه بیناب های آزمایشگاهی را با بیناب های رصدی فراهم کرده است. جهت آشنایی با کارایی جت های پلازما فراصوتی، به نتایج آزمایشگاهی بینابهای جذبی دو نمونه مولکولی که در فضای میان ستاره ای توسط ابزار رصدی آشکار شده اند، اشاره می کنیم.

شکل (۲) بیناب جذبی نوار مرجع برای گذار $X^1\Sigma_g-A^1\Pi_u$ در رادیکالهای سه اتمی $^{12}C_3$ و گونه ایزوتوپی $^{13}C_3$ را نشان می دهد. روش بیناب نگاری *فراوانت-حلقه درون کاواکی* ^۶

^۶ Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS)

^۶ نویسنده تاکنون ترجمه فارسی مناسبتری از آنچه در متن بدان اشاره شده است نیافته است و پیشاپیش از اطلاع یافتن از عبارت شیواتری که توسط خواننده محترم مقاله پیشنهاد شود کمال تشکر را دارد.



شکل ۳: بیناب جذبی گذار الکترونی ${}^2\Pi-X^2\Pi$ در مولکولهای ${}^{12}\text{C}_8\text{H}$ و ${}^{13}\text{C}_8\text{H}$ که توسط جت پلاسمای دایروی متقارن تولید شده اند. پنجره a نشان گذار برای ${}^{13}\text{C}_8\text{H}$ است که به علت وجود ناخالص در گاز افر در پلازما تولید شده است. پنجره b, c و d نشان دهنده گذارهای الکترونیکی-ارتعاشی در گونه های ایزوتوپیست [۹].

آمده در دماهای کمتر و مولکولهایی با تعداد زوج-اتمهای کربن بیشتر نیز نشان از این واقعیت دارد که ترازهای برانگیخته الکترونی این دسته از مولکولها از طول عمر بسیار کوتاهی برخوردار است که جزئیات بیشتر آن در مرجع [۹] گزارش شده است.

۴- نتیجه گیری و جمع بندی

استفاده از چشمه های پلاسمای صفحه ای در مقایسه با چشمه پلازما دایروی متقارن دارای مزایای متعددی می باشد. نخست آنکه در این نوع از چشمه های پلازما، رادیکالهای آزاد تولید شده پس از تخلیه الکتریکی از مولفه سرعت بسیار ناچیزی در راستای شکاف چشمه پلاسمایی برخوردارند. از اینرو بیناب نگاری توسط باریکه لیزری که در این راستا تنظیم شده است منجر به کاهش پهنای دوپلری خطوط بینایی ضبط شده خواهد شد. مزیت بسیار مهم دیگری که این دسته از چشمه های پلازما برخوردارند آن طول-عبور جذبی طولانی تری که در این نمونه ها برای رادیکالهای تولید شده ایجاد می شود موجب افزایش چگالی اپتیکی^۷ در بیناب نگاری خواهد شد. علاوه بر این دو مزیت، در چشمه های پلاسمای صفحه ای، چگالی ذرات در پلازما با کندی بیشتری نسبت به فاصله ($\sim 1/R$) نسبت به چشمه پلاسمایی دایروی ($\sim 1/R^2$) تغییر می کند. از این رو با افزایش نرخهای برخوردی رادیکالها، تعادلی در دماهای ارتعاشی، چرخشی و انتقالی حاصل برای نمونه های مولکولی ایجاد می شود. این خاصیت از چشمه پلاسمایی صفحه ای، آن را به ابزاری ممتاز در بیناب نگاری تفکیک-بالای لیزری^۸

تبدیل ساخته است. در کنار تمام مزایای یاد شده، آلوده شدن بسیار سریع فکهای فلزی کاتد و مصرف زیاد گاز بافر در چشمه پلاسمایی صفحه ای را می توان یکی از معایب آن برشمرد که در چشمه های دایروی دو مورد اخیر کمتر موجب نگرانی می شوند. از معایت اصلی هر دو چشمه پلاسمایی معرفی شده در این مقاله آن است که قادر به تولید گزینشی رادیکالها نیستند. به عبارت دیگر در پلاسمای ایجاد شده مجموعه متنوعی از رادیکالها از مولکولهای بسیار کوچک همچون CH و C_2 تا رادیکالهایی بزرگتر تشکیل می شوند که البته این نقص با بیناب نگاری گونه های ایزوتوپی مولکول دلخواه و بکارگیری برخی از روش های تحلیل داده های تجربی قابل جبران است.

سپاسگزاری

نویسندگان از راهنمایی های دکتر دنگ فنگ ژاوو (از دانشگاه علوم و تکنولوژی هیفای - چین) در طراحی و ساخت چشمه های پلاسمایی تشکر می کنند.

مراجع

1. G. Herzberg, *Molecular spectra and molecular structure*. Vol. 1, Van Nostrand Reinhold, 1950.
2. I. Nenner, *Molecules and Grains in Space: 50th International Meeting of Physical Chemistry*, Mont Sainte-Odile, France, vol. 312, 1993.
3. P. Bernath, "High resolution infrared spectroscopy of transient molecules", *Annu. Rev. Phys. Chem.* 41, no. 1, pp. 91-122, 1990.
4. R. E. Smalley, L. Wharton, and D. H. Levy, "The fluorescence excitation spectrum of rotationally cooled NO_2 ", *J. Chem. Phys.* 63, no. 11, pp. 4977-4989, 1975.
5. N. Wehres, D. Zhao, W. Ubachs, and H. Linnartz, *Chem. Phys. Lett.* 501, pp. 232-237, 2011.
6. B. Giel, and R. Engeln, eds. *Cavity ring-down spectroscopy: techniques and applications*. John Wiley & Sons, 2009.
7. M. A. Haddad, D. Zhao, H. Linnartz and W. Ubachs, "Rotationally resolved spectra of the 4051 Å comet band of C_3 for all six ${}^{12}\text{C}$ and ${}^{13}\text{C}$ isotopologues", *J. Mol. Spectr.* 297, pp. 41-50, 2014.
8. M.R. Schmidt, J. Krelowski, G.A. Galazutdinov, D. Zhao, M.A. Haddad, W. Ubachs, H. Linnartz, "Detection of vibronic bands of C_3 in a translucent cloud towards HD169454", *Monthly Not. Roy. Astron. Society* 441, pp. 1134-1146, 2014.
9. M. A. Haddad, D. Zhao, H. Linnartz and W. Ubachs, "The ${}^2\Pi-X^2\Pi$ electronic spectra of long carbon-chain (${}^{13}\text{C}_{2n}\text{H/D}$ molecules for ($n = 4-6$))", *Mol. Phys.* 113, pp. 2063-2072, 2015.

^۷ Optical density

^۸ High Resolution Laser Spectroscopy