

## تأثیر گاز میانجی بر پهن شدگی دوپلری گذارهای اتمی بخار فلز قلیایی در حضور میدان مغناطیسی

ملیحه رنجبران<sup>۱</sup>، فاضله یحیوی کوچکسرایی<sup>۱</sup>، محمد مهدی طهرانچی<sup>۱ و ۲</sup>، سید محمد حسین خلخالی<sup>۳</sup> و سیده مهری حمیدی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده لیزر و پلاسماء، دانشگاه شهید بهشتی، ولنجک، تهران

<sup>۲</sup> دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، ولنجک، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشکده فیزیک، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

چکیده - بررسی گذارهای اتمی فوق ریز و زیمان در اتمهای قلیایی، در سالهای اخیر کاربردهای فراوانی یافته است. در این کاربردها یکی از محدودیت‌های اندازه‌گیری دقیق فاصله‌ی ترازها، پهن شدگی دوپلری می‌باشد. یکی از روش‌های کاهش این پهن شدگی استفاده از گاز میانجی در سلول حاوی فلز قلیایی می‌باشد. در این مقاله اثر گاز میانجی بر کاهش پهن شدگی ترازهای اتمی در گذار D<sub>1</sub> اتمهای روبيديوم طبیعی بررسی شده است. پرتوی نور لیزر قطبیده خطی و دایره‌ای وارد سلول حاوی روبيديوم و گاز میانجی می‌شود و گذارهای اتمی در میدان مغناطیسی زمینه و هم‌چنین در حضور میدان مغناطیسی با استفاده از روش نیمه تجربی بررسی می‌شود.

کلید واژه- فلرات قلیایی، جداشده‌ی زیمان، پهن شدگی دوپلری، گاز میانجی

## Buffer gas effect on the Doppler broadening of atomic transitions of Alkali metal vapor in the presence of magnetic fields

Malihe Ranjbaran<sup>1</sup>, Fazele Yahyavi Koochaksaraee<sup>1</sup>, Mohammad Mahdi Tehranchi<sup>1,2</sup>, Seyed Mohammad Hosein Khalkhali<sup>3</sup>, Seyede Mehri Hamidi<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Physics Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Physics Department, Kharazmi University, Tehran, Iran

**Abstract-** Investigation of hyperfine and Zeeman atomic transitions of alkali metal vapors have found numerous applications in recent years. In these applications, there are some spectral broadening, such as Doppler broadening, which affect the accuracy of measurement of energy difference between two levels. One of the preferable ways for reduction of the Doppler broadening is usage of Buffer gas in the alkali metal vapor cell. In this paper, the effect of Buffer gas on the reduction of Doppler broadening of D<sub>1</sub> atomic transition of natural rubidium has been investigated. Circularly and linearly polarized beam enters the rubidium cell containing Buffer gas and atomic transitions were studied in the earth magnetic field and also an applied magnetic field with a semi experimental way.

**Keywords:** Alkali metal, Zeeman effect, Doppler broadening, Buffer gas

در غیاب میدان مغناطیسی خارجی این زیرتازها تبهگن هستند. اما با اعمال میدان مغناطیسی خارجی، تبهگنی آنها شکسته می‌شود. تاثیر میدان مغناطیسی روی ترازهای فوق ریز یک اتم از هامیلتونی برهمنش بیان می‌شود، که به صورت

(۱)

$$H_B = \frac{\mu_B}{\hbar} (g_s S + g_L L + g_I I) \cdot B,$$

می‌باشد. در این هامیلتونی  $B$  میدان مغناطیسی ثابت،  $g_s$ ،  $g_L$  و  $g_I$  به ترتیب فاکتور  $g$  مربوط به اسپین الکترون، اوربیتال الکترون و اسپین هسته می‌باشد.

برای میدان‌های مغناطیسی ضعیف، جدادشگی ترازها به صورت خطی می‌باشد و از رابطه‌ی

$$\Delta E_{|F,m_F\rangle} = \mu_B g_F m_F B_z, \quad (2)$$

محاسبه می‌شود. مقدار تقریبی  $g$  از رابطه‌ی (۲) بدست می‌آید. جدادشگی در این محدوده را اثر زیمان می‌نماید. تقریب میدان ضعیف را زمانی می‌توان استفاده کرد که شدت میدان مغناطیسی به اندازه‌ای باشد که شرط  $g_F \mu_B B = A_F$  را برآورده کند [۳].

$$g_F = g_J \frac{F(F+1) - I(I+1) + J(J+1)}{2F(F+1)} + \\ g_I \frac{F(F+1) + I(I+1) - J(J+1)}{2F(F+1)} + \\ g_s \frac{F(F+1) - I(I+1) + J(J+1)}{2F(F+1)}. \quad (3)$$

برای محاسبه مقدار دقیق جدادشگی ترازها و تغییرات آنها می‌توان از قطعی کردن ماتریس هامیلتونی استفاده کرد. نتیجه به صورت تحلیلی با استفاده از فرمول بریت-رابی داده شده است،

$$E(F, m_F) = -\frac{E_{hfs}}{2(2I+1)} - g_J \mu_B B m_F \pm \\ \frac{1}{2} E_{hfs} \left(1 + \frac{4m_F}{2I+1} x + x^2\right)^{1/2}, \quad (4)$$

که  $E_{hfs} = \frac{1}{2} A_F (2I+1)$  و  $x = (g_J + G_I) \mu_B B / E_{hfs}$  می‌باشد [۳].

در رابطه‌ی (۴)،  $g$  ضریب لانده،  $m_F$  عدد کوانتومی مغناطیسی،  $B$  شدت میدان مغناطیسی،  $I$  تکانه زاویه‌ای اسپین هسته و  $A$  ثابت ساختار فوق ریز می‌باشد. به این ترتیب می‌توان موقعیت هر تشید اپتیکی را برای هر زیرتاز

## ۱- مقدمه

بررسی ترازهای فوق ریز و شکافتگی زیمان اتم‌های قلیایی، توجه ویژه‌ای را در پایدارسازی بسامد لیزرها، سردسازی و گیرانداختن اتمی و همچنین حسگرهای مغناطیسی اتمی به خود معطوف داشته است [۱]. در حسگرهای مغناطیسی اتمی به منظور اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی بسیار ضعیف، نیاز است که فاصله‌ی زیرتازهای زیمان با دقت بالای اندازه‌گیری شود [۲]. اما وجود انواع پهن‌شدگی‌های طیفی به خصوص پهن‌شدگی دوپلری باعث ایجاد عدم قطعیت در اندازه‌گیری گذارهای اتمی مورد نظر می‌شود. در حال حاضر چیدمان اسپکتروسکوپی جذبی اشباعی [۳] و کوچک کردن سلول بخار [۴] از متدالترین روش‌های مورد استفاده به منظور کاهش پهن‌شدگی ترازهای اتمی می‌باشد که امکان تفکیک گذار بین ترازهای فوق ریز و زیرتازهای زیمان را فراهم می‌آورد.

روش دیگری که می‌تواند کاهش پهن‌شدگی ترازهای اتمی را به همراه داشته باشد، استفاده از گاز میانجی در سلول حاوی اتم قلیایی می‌باشد [۵]. این روش به نسبت روش‌هایی که در اسپکتروسکوپی دقت بالا استفاده می‌شود، یک روش ساده برای رسیدن به طیف اپتیکی بدون دوپلری می‌باشد. گاز میانجی عموماً شامل گازهای نجیب اتمی مانند هلیوم، نیتروژن و آرگون می‌باشد. وقتی اتم‌های روبيديوم از میان گاز میانجی منتشر می‌شوند، برخورد اتم‌ها با یکدیگر کمتر شده، مسیر آزاد متوسط بین اتم‌ها کوتاه‌تر از نصف طول موج تشید می‌شود (شرط دیک) و لذا پهن‌شدگی دوپلری کاهش می‌یابد [۶].

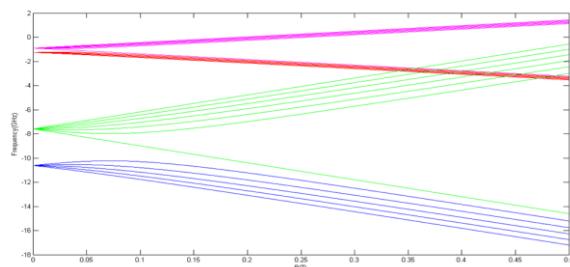
در این مقاله با بررسی عبور نور قطبیده خطی و دایره‌ای از سلول حاوی بخار فلز روبيديوم و گاز میانجی، خطوط جذبی گذار D1 این اتم، در حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی، مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین با استفاده از تحلیل‌های تئوری، گذارهای بین ترازهای اتمی فوق ریز و همچنین زیرتازهای زیمان در حضور میدان مغناطیسی، بدست آمده و به همراه داده‌های تجربی، یک روش نیمه تجربی برای بررسی زیرتازهای زیمان معرفی شده است.

## ۲- توصیف تئوری

هر تراز انرژی فوق ریز (F) شامل  $2F+1$  زیرتاز مغناطیسی است که توزیع زاویه‌ای تابع موج الکترون را تعیین می‌کند.

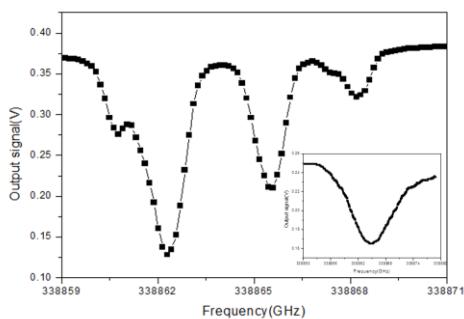
#### ۴- بحث و نتایج:

با حل معادله (۴) در میدان‌های مغناطیسی مختلف، می‌توان ساختار فوق ریز زیمان را برای هر کدام از ایزوتوپ‌های  $^{85}\text{Rb}$  و  $^{87}\text{Rb}$  بدست آورد. در شکل (۲) نمودار تئوری جداسدگی زیمان برای گذار D1 روبیدیوم ۸۵ در میدان مغناطیسی صفر تا ۵۰۰ میلی‌تسلا آورده شده است.



شکل ۲: ساختار فوق‌ریز ترازهای مربوط به گذار D1 روبیدیوم ۸۵ در حضور میدان مغناطیسی خارجی

به همین ترتیب با جایگذاری پارامترهای روبیدیوم ۸۷ برای گذار خط D1 در معادله (۴)، جداسدگی ترازهای فوق‌ریز  $^{87}\text{Rb}$  در حضور میدان مغناطیسی خارجی بدست آمده است. طیف نور عبوری از سلول حاوی روبیدیوم با حضور گاز میانجی و بدون آن (شکل درونی) در میدان مغناطیسی زمینه زمینه در شکل (۳) نشان داده شده است.

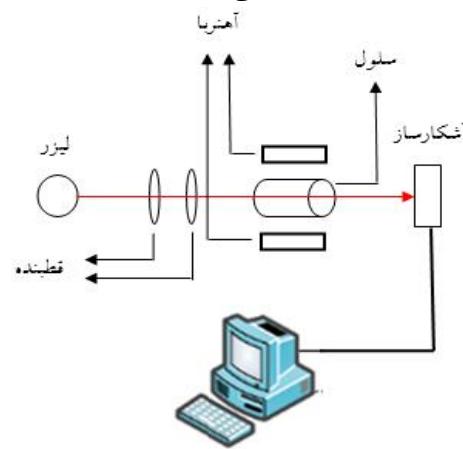


شکل ۳: طیف عبوری از سلول حاوی روبیدیوم با حضور گاز میانجی و بدون آن (شکل درونی) در میدان مغناطیسی زمینه با استفاده از یک روش نیمه تجربی می‌توان به بسامدهای تشیدی جذبی موجود در منحنی تجربی رسید. با استفاده از منحنی‌های تئوری، محل بیشینه‌ها را می‌توان تعیین کرد، به این صورت که در محل گذارهایی که از تئوری بدست می‌آید، بیشینه نسبت داده شود. با توجه به این که هر بیشینه در منحنی تجربی به صورت یک برهمنهی از دو یا چند بیشینه بدست آمده از تئوری می‌باشد، با استفاده از برنامه‌ای اریجین تعداد بیشینه‌های مجاز بدست آمده از نتایج تئوری بر منحنی‌های تجربی منطبق می‌شود تا هر بیشینه به

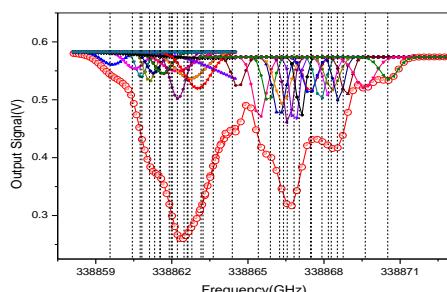
زیمان در میدان مغناطیسی داده شده با استفاده از رابطه (۴) محاسبه کرد.

#### ۳- چیدمان آزمایشگاهی

به منظور اندازه‌گیری ترازهای فوق‌ریز، پرتوی لیزر در طول موج  $\lambda = 794/8 \text{ nm}$  (گذار D<sub>1</sub>) از سلول حاوی روبیدیوم طبیعی (شامل دو ایزوتوپ  $^{85}\text{Rb}$  و  $^{87}\text{Rb}$ ) و ۵۵۰ تور گاز میانجی He عبور می‌کند. با عبور نور لیزر از این سلول، در صورتیکه بسامد لیزر با بسامد گذار بین ترازهای فوق‌ریز زیر روبیدیوم برابر باشد نور لیزر جذب اتم‌های روبیدیوم شده و آن‌ها را برانگیخته می‌کند، در غیر این صورت، نور لیزر بدون جذب از سلول شیشه‌ای عبور می‌کند. بنابراین با ثبت و بررسی نور عبوری از سلول می‌توان بسامد گذارهای اتمی در ترازهای فوق‌ریز را تعیین نمود. به منظور بررسی گذار بین زیرترازهای زیمان، نور لیزر بعد از عبور از قطبینده به صورت نور قطبیده خطی و بار دیگر پس از عبور از تیغه ربع موج به صورت نور قطبیده دایره‌ای، وارد سلول بخار قلیایی که تحت تاثیر میدان مغناطیسی ثابت قرار گرفته است، می‌شود و با توجه به قاعده‌ی انتخابی گذار، اتم‌های روبیدیوم را به تراز بالا برانگیخته می‌کند. میدان مغناطیسی از طریق دو آهنربای قوی که در دو طرف سلول به صورت عرضی قرار گرفته‌اند اعمال می‌شود. با تغییر فاصله‌ی آهنرباها نسبت به سلول روبیدیوم میزان میدان اعمالی به سیستم کنترل می‌شود. در نهایت با جاروب بسامد لیزر، طیف عبوری از سلول توسط آشکارساز ثبت می‌شود.



شکل ۱: چیدمان اندازه‌گیری ترازهای زیمان با استفاده از نور قطبیده خطی



شکل ۷: کل گذارهای زیمان مجاز برای نور خطی در روبیدیوم ۸۵ و ۸۷ در میدان مغناطیسی ۱۲۹ میلیتسلا روی نمودار تجربی

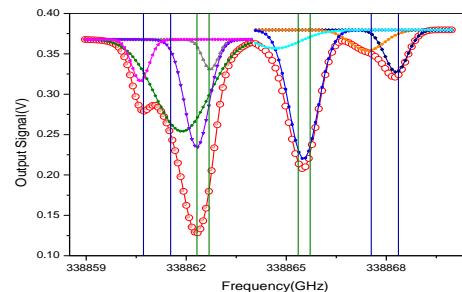
## ۵- نتایج:

با توجه به کاربرد گسترده مطالعه گذارهای اتمی در فلزات قلیایی، روش‌های بسیاری جهت کاهش پهن شدگی این ترازها ارائه شده است. در این مقاله، یکی از ساده‌ترین روش‌های کاهش پهن شدگی دوبلری جهت مطالعه ترازهای فوق ریز و زیمان مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از یک روش نیمه تجربی، متشکل از اندازه‌گیری طیف تجربی و گذارهای تعیین شده از تحلیل‌های تئوری، در عدم حضور و با اعمال میدان مغناطیسی گذارهای بین زیرترازهای زیمان با تابش نور قطبیده خطی و قطبیده دایره‌ای بدست آمد.

## مراجع:

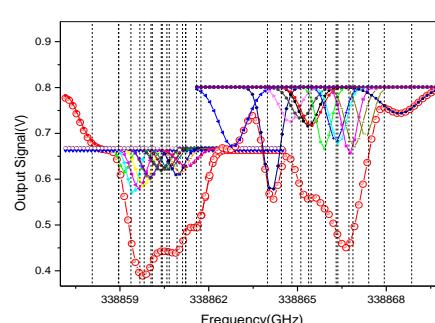
- [1] V. B. Tiwari, S. Singh, S.R. Mishra, H.S. Rawat, S.C. Mehendale, "Laser frequency stabilization using Doppler-free bi-polarization spectroscopy", Optics Communications, Vol. 263, pp. 249–255, 2006.
- [2] M. Ranjbaran, M. M. Tehranchi, S. M. Hamidi, S. M. H. Khalkhali, "Harmonic detection of magnetic resonance for sensitivity improvement of optical atomic magnetometers" J. Magn. Magn. Mater, Vol. 424, PP. 284–290, 2017.
- [3] J. B. Kim, H. A. Kim, H. S. Moon, H. S. Lee, "Saturated-absorption spectroscopy of weak-field Zeeman splittings in rubidium: comment", J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 14, pp. 2946-2947, 1997.
- [4] D. G. Sarkisyan, A. V. Papoyan, T. S. Varzhapetyan, K. Blush, M. Auzinsh, "Zeeman Effect on the Hyperfine Structure of the D1 Line of a Submicron Layer of 87Rb Vapor", Optics and Spectroscopy, Vol. 96, pp. 328–334, 2004.
- [5] P. Gill, "Frequency standards and metrology, Proceedings of the sixth symposium", World scientific publishing Co. pp. 184, 2001.
- [6] C. Audoin, B. Guinot, "The Measurement of Time: Time, Frequency and the Atomic Clock", Cambridge University Press, pp. 124, 2001.

بیشینه‌های تشکیل دهنده‌اش تجزیه شده و محل دقیق بسامدهای تشدید را نشان داده شود.



شکل ۴: کل گذارهای ساختار فوق ریز روبیدیوم ۸۵ و ۸۷ در میدان مغناطیسی زمینه روی نمودار تجربی در شکل (۴) خطوط عمودی سبز مربوط به گذارهای فوق ریز  $F_g = 2 \rightarrow F_e = 3$ ،  $F_g = 2 \rightarrow F_e = 2$ ،  $F_g = 3 \rightarrow F_e = 3$  و  $F_g = 3 \rightarrow F_e = 2$  برای  $^{85}\text{Rb}$  و خطوط عمودی آبی مربوط به گذارهای فوق ریز  $F_g = 1 \rightarrow F_e = 2$ ،  $F_g = 1 \rightarrow F_e = 1$  برای  $^{87}\text{Rb}$  برای  $F_g = 2 \rightarrow F_e = 2$  و  $F_g = 2 \rightarrow F_e = 1$  می‌باشد.

به همین ترتیب در حضور میدان مغناطیسی گذارهای زیمان با استفاده از پرتوی لیزر با قطبش دایره‌ای چیگرد در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به اینکه این نور دارای تکانه زاویه‌ای ۱- می‌باشد، در این حالت اسپین الکترون پس از گذار باید یک واحد کاهش پیدا کند، در نتیجه گذارهای مجاز می‌شوند که  $\Delta m_F = -1$  باشد.



شکل ۵: کل گذارهای زیمان مجاز برای نور قطبیده دایره‌ای در  $^{85}\text{Rb}$  و  $^{87}\text{Rb}$  در میدان مغناطیسی ۱۲۹ میلیتسلا روی نمودار تجربی. در حضور میدان مغناطیسی گذارهای زیمان با استفاده از پرتوی لیزر با قطبش خطی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در شکل (۶) نشان داده شده است. تفاوت این نتیجه با شکل ۵ در این نکته است که نور قطبیده خطی گذارهای را مجاز می‌کند که  $\Delta m_F = 0$  باشد.