



بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک  
ایران و چهاردهمین کنفرانس مهندسی و فناوری  
فوتونیک ایران،  
دانشگاه شهید چمران اهواز،  
خوزستان، ایران.  
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰



## انتقال جمعیت با روش گذار بی دررو تکه‌ای در اندرکنش لیزر اشعه ایکس با سیستم‌های هسته‌ای سه تراز

آرزو حیدرnezhad-گیگلو، مقصود سعادت‌نیاری

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل-ایران

[arezu199422@gmail.com](mailto:arezu199422@gmail.com), [m.saadati@uma.ac.ir](mailto:m.saadati@uma.ac.ir)

چکیده - در این مقاله روش گذار بی دررو تکه‌ای برای انتقال جمعیت حالت‌های هسته‌ای در اندرکنش هسته سه تراز با پالس‌های لیزری اشعه ایکس به کار گرفته شده است. نشان داده شده است که با استفاده از یک زنجیره از جفت پالس تاخیری می‌توان جمعیت را از تراز زمینه اول به تراز زمینه دوم با حداقل اثر گسیل خود به خودی منتقل کرد. با توجه به این‌که فرکانس لیزرهای اشعه ایکس موجود کمتر از فرکانس گذارهای پرتو گاما می‌باشد، هسته‌ها به صورت شتابدار در نظر گرفته شده‌اند تا با استفاده از اثر دوپلر نسبیتی شرط تشدید برقرار شود. در نهایت تاثیر تاخیر زمانی بین جفت پالس‌ها در هر مرحله بر بازده انتقال جمعیت در هسته‌های  $^{97}\text{Tc}$  و  $^{154}\text{Gd}$  بررسی شده است. با در نظر گرفتن اثر گسیل خود به خودی به داخل سیستم، برای مطالعه عددی از معادله مستر استفاده شده است.

کلید واژه- تاخیر زمانی، روش گذار بی دررو تکه‌ای، لیزر اشعه ایکس، هسته.

## Population Transfer in the Interaction of X-ray Laser with Three-Level Nuclear Systems using Piecewise Adiabatic Passage.

Arezu Heidarnezhad-Giglu, Maghsod Saadati-Niari

Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

[arezu199422@gmail.com](mailto:arezu199422@gmail.com), [m.saadati@uma.ac.ir](mailto:m.saadati@uma.ac.ir)

In this paper piecewise adiabatic passage is used to nuclear-state population transfer in the interaction of the three-level nuclei with X-ray laser. It is shown that using a chain of delayed pulse pairs, the population can be transferred from the first ground state to the second ground state with minimal spontaneous emission effect. Due to the fact that the frequency of existing X-ray lasers is lower than the frequency of gamma transitions, the nuclei are designed to be accelerated to achieve the resonance condition using relativistic Doppler effect. Finally, the effect of time delay between pulse pairs on population transfer efficiency is investigated for  $^{154}\text{Gd}$  and  $^{97}\text{Tc}$ . Considering the effect of spontaneous emission into the system, the master equation has been used for numerical study.

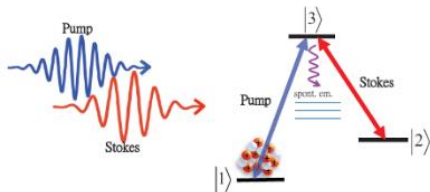
Keywords: nuclei, piecewise adiabatic passage, time delay, X-ray laser

## مقدمه

اندرکنش لیزر اشعه ایکس با هسته‌های مختلف و همچنین بازده انتقال جمعیت با استفاده از این روش مطالعه شده است. در این روش از یک زنجیره از جفت پالس‌های تاخیری برای انتقال جمعیت در سیستم‌های هسته‌ای استفاده شده و در نهایت تاثیر مقادیر تاخیر زمانی بین جفت پالس‌ها بر بازده انتقال جمعیت بررسی شده است. هر چند این تکنیک می‌تواند در هسته‌های مختلف به کار گرفته شود ولی برای مطالعات عددی در این مقاله، دو عنصر  $^{154}\text{Gd}$  و  $^{97}\text{Tc}$  انتخاب شده است که یکی دارای طول عمر تراز تحریکی پایین و دیگری دارای طول عمر تراز تحریکی بالا است تا بتوانیم اثر گسیل خود به خودی ناشی از تراز تحریکی را در مطالعات عددی بهتر بررسی کنیم.

## روش گذار بی‌دررو تکه‌ای در سیستم‌های هسته‌ای

اندرکنش دو لیزر اشعه ایکس با سیستم هسته‌ای متحرک  $\Lambda$ -گونه سه تراز را در نظر می‌گیریم. الگوی جفت شدگی لیزرهای اشعه ایکس با سیستم هسته‌ای سه تراز در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: الگوی جفت شدگی سیستم هسته‌ای سه تراز متحرک با دو پالس لیزری اشعه ایکس.

همایلتونی اندرکنش دو لیزر اشعه ایکس با سیستم هسته‌ای متحرک به صورت زیر خواهد بود:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & \Omega_p \\ 0 & 0 & \Omega_S \\ \Omega_p & \Omega_S & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

اگر انرژی ترازها به صورت  $E_i (i=1,2,3)$  باشد بنابراین شرط تشدید کامل که در همایلتونی بالا در نظر گرفته شده است به صورت زیر خواهد بود:

$$E_3 - E_1 = \gamma(1 + \beta)\hbar\omega_p \quad (2)$$

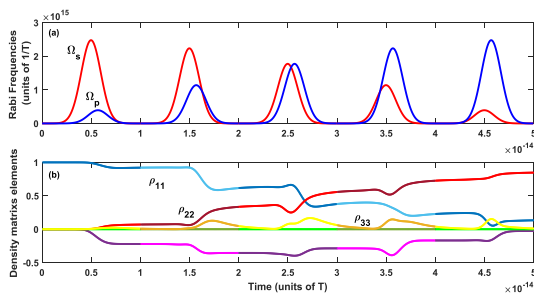
$$E_3 - E_2 = \gamma(1 + \beta)\hbar\omega_S \quad (3)$$

کنترل هم‌دوس دینامیک سیستم‌های کوانتومی به معنای تنظیم پارامترهای مختلف لیزر در اندرکنش لیزر با سیستم کوانتومی است، به طوری که به صورت هدفمند، سیستم از یک حالت اولیه به یک حالت نهایی منتقل شود. از میان تکنیک‌های مختلف برای انتقال حالت، تکنیک‌های مرتبط با قضیه بی‌دررو با توجه به غیر حساس بودن نسبت به تغییرات پارامترهای لیزری اهمیت خاصی دارند که روش گذار بی‌دررو تحریکی رامان یکی از مهم‌ترین آن‌ها می‌باشد [۱]. در تکنیک‌های مرتبط با قضیه بی‌دررو تحول زمانی سیستم باید تدریجی باشد که نیاز به پهنای پالس لیزری و یا پالس‌ها با شدت بالا دارند که ممکن است از لحاظ آزمایشگاهی رسیدن به این روش دشوار باشد. یکی از روش‌های پیشنهادی برای غلبه بر این مشکل روش گذار بی‌دررو تکه‌ای است [۲]، که در این روش به جای یک مرحله، از چند مرحله جفت پالس لیزری تاخیری با پهنای و شدت کم استفاده می‌شود. با پیشرفت‌های اخیر در زمینه ساخت لیزرهای اشعه ایکس، انتقال جمعیت در سیستم‌های هسته‌ای نیز با استفاده از لیزر اشعه ایکس امکان‌پذیر شده است و باعث ایجاد شاخه جدیدی به نام اپتیک کوانتومی هسته‌ای شده است [۳]. در طرحواره پیشنهادی در مرجع [۳] باریکه هسته‌ای به صورت شتابدار در نظر گرفته شده است تا با تنظیم فاکتور نسبیتی شرط تشدید برقرار شود. اخیراً انتقال جمعیت در سیستم‌های سه تراز و چهار تراز در اندرکنش لیزر اشعه ایکس با این سیستم‌ها در مراجع [۴ و ۵] مطالعه شده است. در این مراجع انتقال جمعیت با استفاده از یک زنجیره از پالس‌های همپوشان صورت گرفته است که در این روش باید هیچ تاخیر زمانی بین پالس‌ها در هر مرحله وجود نداشته باشد که همپوشان نگه داشتن پالس‌ها از لحاظ آزمایشگاهی چالش برانگیز است. در این مقاله، برای نخستین بار روش گذار بی‌دررو تکه‌ای برای کنترل دینامیک

از ترازهای زمینه به تراز تحریکی،  $I_{1(2)}$  اسپین ترازهای زمینه،  $c$  سرعت نور در خلاء،  $k_{31(2)}$  عدد موج مربوط به گذارها،  $B(\varepsilon/\mu L_{1(2)3})$  احتمال گذار چند قطبی برای گذارها می‌باشند.

### مطالعه عددی

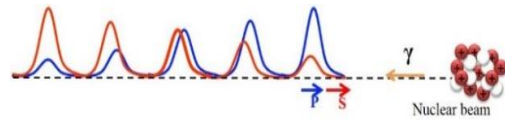
برای مطالعه عددی  $T_p = T_S = 10^{-13} s$  در نظر گرفته شده و با در نظر گرفتن تاخیر زمانی بین جفت پالس‌ها به صورت  $\tau_p = 0.7\tilde{T} / \sqrt{2} = 0.7 \times 10^{-15} s$  انتقال جمعیت با روش گذار بی‌دررو تکه‌ای و با استفاده از ۵ مرحله پالس تاخیری را برای هسته‌های  $^{154}Gd$  و  $^{97}Tc$  بررسی می‌کنیم. در هسته  $^{154}Gd$  ترازهای انرژی  $E_1 = 0$  و  $E_2 = 123 keV$  و  $E_3 = 1241 keV$  را در نظر می‌گیریم و با در نظر گرفتن انرژی فوتون پمپ به صورت  $\hbar\omega_p = 12.4 keV$ ،  $\gamma = 50.1$  و  $\hbar\omega_S = 11.7 keV$  محاسبه می‌شود. همچنین  $L_{13} = 1$ ،  $B_{32} = 4.9 \times 10^{-2} wu$ ،  $B_{31} = 4.4 \times 10^{-2} wu$ ،  $L_{23} = 1$ ،  $k_{32} = 5.679 \times 10^{12}$ ،  $k_{31} = 6.305 \times 10^{12}$  بنابراین شدت‌های موثر پالس‌های پمپ و استوکس به صورت  $I_S^{eff} = 8.42 \times 10^{27} W/m^2$  و  $I_p^{eff} = 2.86 \times 10^{25} W/m^2$  محاسبه می‌شوند.



شکل ۳: (a) تحول زمانی فرکانس‌های رابی استوکس و پمپ (b) نمودار انتقال جمعیت در سیستم‌های سه تراز هسته  $^{154}Gd$  با استفاده از پنج مرحله جفت پالس تاخیری.

همچنین در هسته  $^{97}Tc$  ترازهای انرژی  $E_1 = 96.57 keV$ ،  $E_2 = 657.47 keV$ ،  $E_3 = 324.90 keV$  و  $\hbar\omega_p = 12.4 keV$  را در نظر گرفته و مقادیر  $\gamma = 22.6$  و  $\hbar\omega_S = 7.36 keV$  را به دست می‌آوریم و سایر پارامترها به صورت  $L_{13} = 2$ ،  $L_{23} = 1$

که  $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$  فاکتور نسبیتی،  $\beta = v/c$  نسبت سرعت هسته به سرعت نور در خلاء،  $\hbar\omega_p$  انرژی فوتون پمپ و  $\hbar\omega_S$  انرژی فوتون استوکس است. برای بررسی روش گذار بی‌دررو تکه‌ای در هسته‌های سه تراز، ابتدا شرایط تکنیک جفت پالس همپوشان [۵] را برقرار کرده و سپس تاخیر زمانی بین جفت پالس‌ها در نظر می‌گیریم. الگوی آزمایشگاهی اندرکنش هسته شتابدار با چند مرحله پالس تاخیری در شکل ۲ رسم شده است.



شکل ۲: الگوی آزمایشگاهی اندرکنش هسته شتابدار با چند مرحله جفت پالس تاخیری.

فرکانس‌های رابی پمپ و استوکس در مرحله  $k$ -ام به صورت روابط زیر خواهد بود:

$$\Omega_p = \Omega_{0p} \sin \varphi_k \sqrt{\tilde{I}_p^{eff}} \exp \left[ - \left( \frac{t - \tau_p - \tau'_p}{\tilde{T}_p} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$\Omega_S = \Omega_{0S} \cos \varphi_k \sqrt{\tilde{I}_S^{eff}} \exp \left[ - \left( \frac{t - \tau_S}{\tilde{T}_S} \right)^2 \right] \quad (5)$$

پارامترهای به کار گرفته شده در روابط (۴) و (۵) را به صورت زیر معرفی می‌کنیم:

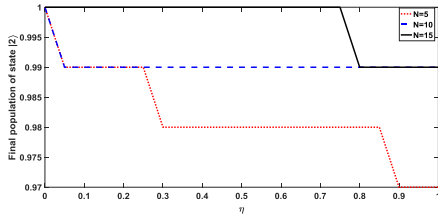
$$\Omega_{0p(S)} = \frac{4\sqrt{\pi}}{\hbar} \left[ \frac{\gamma^2 (1+\beta)^2 (L_{1(2)3} + 1) (2L_{1(2)} + 1) B(\varepsilon/\mu L_{1(2)3})}{c\varepsilon_0 L_{1(2)3}} \right]^{1/2}$$

$$\times \frac{L_{1(2)3}^{-1}}{k_{31(2)}} \frac{1}{(2L_{1(2)3} + 1)!!} \quad (6)$$

$$\tilde{T}_p(S) = \frac{\sqrt{2} T_p(S)}{\gamma (1+\beta)} \quad (7)$$

$$\tilde{I}_p^{eff} = \frac{I_p^{eff}}{\sin^2 \varphi_k} \quad (8) \quad \tilde{I}_S^{eff} = \frac{I_S^{eff}}{\cos^2 \varphi_k} \quad (9)$$

با توجه به شرایط تکنیک پالس‌های زنجیره‌ای باید مقادیر  $\sqrt{\tilde{I}_p^{eff}} \Omega_{0p(S)} = 2\sqrt{\pi} / \tilde{T}$  باشد، بنابراین  $\tilde{I}_p^{eff} = (2\sqrt{\pi} / \tilde{T} \Omega_{0p(S)})^2$  به دست می‌آید همچنین اگر  $N$  تعداد زنجیره پالس‌های تاخیری باشد  $\varphi_k = (2k-1)\pi / 4N$  خواهد بود. در روابط فوق  $\hbar$  ثابت پلانک،  $L_{1(2)3}$  مرتبه گذار



شکل ۶: جمعیت نهایی تراز  $|2\rangle$  در هسته  $^{97}\text{Tc}$  نسبت به تاخیر زمانی های مختلف  $(\eta\bar{T})$  و به ازای  $N = 5, 10, 15$  مرحله پالس تاخیری.

### نتیجه گیری

در این مطالعه روش گذار بی دررو تکه ای برای انتقال جمعیت در سیستم های هسته ای به کار گرفته شد. برخلاف روش های به کار گرفته شده در مراجع [۴ و ۵]، در این تکنیک لازم نیست که جفت پالس ها در هر مرحله از لحاظ زمانی همپوشان باشند. برای مطالعه عددی از دو عنصر  $^{154}\text{Gd}$  با طول عمر تراز تحریکی پایین و  $^{97}\text{Tc}$  با طول عمر تراز تحریکی بالا استفاده شده است. مشاهده شد که با افزایش تعداد زنجیره پالس های تاخیری در هر دو عنصر حساسیت سیستم نسبت به مقدار تاخیر زمانی کاهش می یابد. علت اینکه سیستم های سه تراز برای پیاده سازی این تکنیک استفاده شده است این است که در برخی موارد گذار مستقیم از حالت ۱ به حالت ۲ ممنوع می باشد همچنین در حالتی که گذار از حالت ۱ به حالت ۲ ممنوع نیست باید از تکنیک هایی استفاده کنیم که نسبت به تغییرات اندک پارامترهای لیزری حساس می باشند.

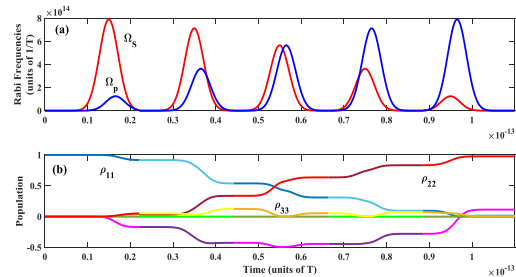
### مرجع ها:

- [1] Gaubatz, U., Rudecki, P., Schieman, S., & Bergmann, K. *The Journal of Chemical Physics*, 92(9), 5363-5376, 1990.
- [2] Shapiro, E. A., Pe'er, A., Ye, J., & Shapiro, M. *Phys. Rev. Lett.*, 101(2), 023601, 2008.
- [3] Bürvenich, T. J., Evers, J., & Keitel, C. H. *Phys. Rev. Lett.*, 96(14), 142501, 2006.
- [4] Nedaee-Shakarab, B., Saadati-Niari, M., & Zolfagharpour, F. *Phys. Rev. C*, 96(4), 044619, 2017.
- [5] Nedaee-Shakarab, B., Saadati-Niari, M., & Zolfagharpour, F. *Phys. Rev. C*, 94(5), 054601, 2016

بنابراین  $B_{32} = 6.7 \times 10^{-5} wu$ ،  $B_{31} = 5 \times 10^2 wu$ ، خواهد بود. با در نظر گرفتن اثر گسیل خود به خودی از معادله مستر به صورت زیر استفاده می کنیم.

$$\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = \frac{1}{i\hbar} [\hat{H}, \hat{\rho}] + \hat{\rho}_S \quad (10)$$

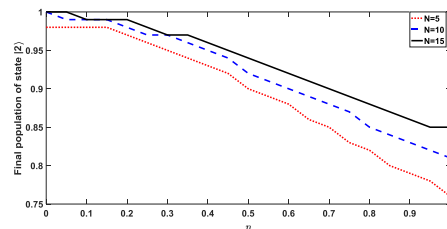
که در رابطه بالا  $\hat{\rho}$  ماتریس چگالی و  $\hat{\rho}_S$  نشان دهنده ماتریس اثر گسیل خود به خودی است. نمودار انتقال جمعیت با استفاده از ۵ مرحله پالس تاخیری در شکل های ۳ و ۴ برای  $^{154}\text{Gd}$  و  $^{97}\text{Tc}$  رسم شده است که جمعیت در  $^{154}\text{Gd}$ ، ۸۴٪ و در  $^{97}\text{Tc}$ ، ۹۷٪ منتقل شده است.



شکل ۴: (a) تحول زمانی فرکانس های رابی استوکس و پمپ (b) نمودار انتقال جمعیت در سیستم های سه تراز هسته  $^{97}\text{Tc}$  با استفاده از پنج مرحله جفت پالس تاخیری.

### تاثیر تاخیر زمانی جفت پالس ها بر انتقال جمعیت

برای مطالعه تاثیر تاخیر زمانی بر بازده انتقال جمعیت در هسته های  $^{97}\text{Tc}$  و  $^{154}\text{Gd}$  تاخیر زمانی بین جفت پالس ها در هر مرحله را  $\eta\bar{T}$  در نظر می گیریم که  $0 \leq \eta \leq 1$  می باشد و به ازای  $N = 5, 10, 15$  مرحله پالس تاخیری، جمعیت نهایی را برای هر دو هسته به دست آورده و نمودارها را به صورت شکل ۵ و ۶ رسم می کنیم:



شکل ۵: جمعیت نهایی تراز  $|2\rangle$  در هسته  $^{154}\text{Gd}$  نسبت به تاخیر زمانی های مختلف  $(\eta\bar{T})$  و به ازای  $N = 5, 10, 15$  مرحله پالس تاخیری.