

## تأثیر زمان همدوسی تپ‌های لیزری پرتو ایکس بر انتقال جمعیت حالت‌های هسته‌ای در $^{97}\text{Tc}$ با روش گذار بی‌دررو

مقصود سعادت‌نیاری\*<sup>۱</sup>، بشیر ندائی شکراب<sup>۲</sup>

۱. گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، صندوق پستی: ۱۷۹، اردبیل - ایران

۲. گروه فیزیک، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، صندوق پستی: ۴۶۷، اردبیل - ایران

### مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۸/۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۲/۳

**چکیده:** تأثیر زمان همدوسی تپ‌های لیزری پرتو ایکس بر انتقال حالت‌های هسته‌ای در ایزوتوپ  $^{97}\text{Tc}$  با دو تراز زمينه و یک تراز تحریکی بررسی شده است. در این مطالعه، دو تپ لیزر پرتو ایکس، انتقال حالت‌های هسته‌ای یک سیستم سه تراز هسته‌ای را با استفاده از روش گذار بی‌دررو تحریکی رامان که یک شیوه‌ی اپتیک کوانتومی است، انجام می‌دهند. طول موج‌های کوتاهی که برای شرط تشدید لازم است با در نظر گرفتن برهم‌کنش باریکه‌ی هسته‌ای شتاب‌دار با دو تپ لیزر پرتو ایکس به دست می‌آیند. مشاهده شد که بازده انتقال جمعیت برای تپ‌های لیزری با زمان همدوسی کوتاه، کاهش می‌یابد. در نهایت، تأثیر تغییرات شدت تپ‌های لیزری و همچنین تأخیر زمانی تپ‌ها بر انتقال جمعیت برای مقدارهای مختلف زمان همدوسی تپ‌های لیزر بررسی شده است. برای مطالعه‌ی عددی از معادله‌ی مستر استفاده شد که در آن اثرهای ناهمدوسی ناشی از گسیل خودبه‌خود و واوکوی فازی در نظر گرفته شده است.

**کلیدواژه‌ها:** زمان همدوسی، حالت‌های هسته‌ای، لیزر پرتو ایکس، گذار بی‌دررو

## The effect of coherence time of X-ray laser pulses on the nuclear-state population transfer in $^{97}\text{Tc}$ using adiabatic passage

M. Saadati-Niari\*<sup>1</sup>, B. Nedaee-Shakarab<sup>2</sup>

1. Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, P.O.Box: 179, Ardabil – Iran

2. Department of Physics, Ardabil Branch, Islamic Azad University, P.O.Box: 467, Ardabil - Iran

**Abstract:** The effect of the coherence time of X-ray laser pulses on the population transfer in  $^{97}\text{Tc}$  with two ground states and one excited state is investigated. In this study, two X-ray laser pulses drive the population transfer in a nuclear three-level system via the quantum optics technique of the stimulated Raman adiabatic passage. The short wavelengths, which is needed to satisfy the resonance conditions, are achieved by using an accelerated nuclear beam, interacting with two incoming X-ray pulses. It is found that the transfer efficiency decreases for laser pulses with short coherence time. Finally, the effect of laser pulses intensity and pulse delay variations on the population transfer for different coherence time values of laser pulses is studied. For the numerical study we have used the Master equation. The decoherence effects that occur due to spontaneous emission of the excited state and short coherence time of X-ray laser pulses (dephasing) are considered in the Master equation.

**Keywords:** Coherence time, Nuclear states, X-ray laser, Adiabatic passage

## ۱. مقدمه

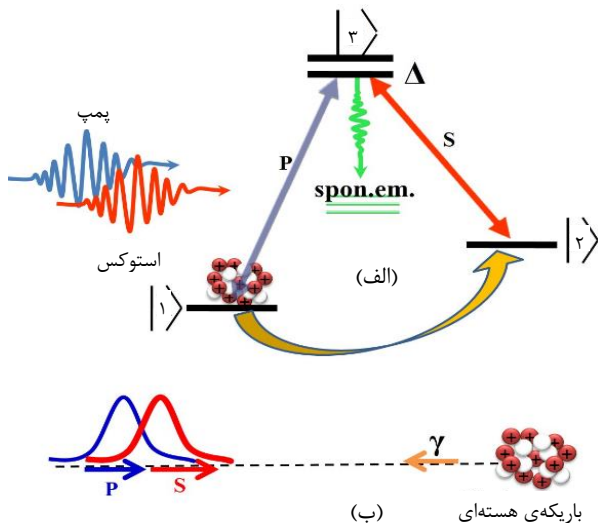
طرح‌واره‌ی پیشنهادی در مرجع [۱۲]، برای برهم‌نهی همدوس حالت‌ها در سیستم‌های هسته‌ای سه پایه با سه تراز زمینه و یک تراز تحریکی به کار گرفته شد [۱۴] و نشان داده شد که با استفاده از زنجیره‌ای از سه تپ لیزر پرتو ایکس با وابستگی زمانی یکسان، می‌توان یک برهم‌نهی همدوس از دو حالت زمینه‌ی هسته‌ای غیرتبهگن را در حالتی که هسته در ابتدا در حالت پایه قرار داشته باشد، ایجاد کرد.

در کلیه طرح‌واره‌هایی که شرح داده شد، تپ‌های لیزر به صورت کاملاً همدوس در نظر گرفته شده‌اند، به عبارت دیگر فرض شده است که زمان همدوسی تپ‌های لیزر در مقایسه با پهنای آن‌ها بزرگ است. اما در آزمایش‌های واقعی ممکن است که زمان همدوسی تپ‌های لیزر در مقایسه با پهنای آن‌ها کوچک باشد که این حالت موجب پدیده‌ای به نام واکوکی فازی می‌شود؛ این اثر باید به صورت جمله‌ی جداگانه‌ای در معادله‌ی تحول زمانی ماتریس چگالی در نظر گرفته شود. در این مقاله با در نظر گرفتن مقدارهای مختلف برای زمان همدوسی تپ‌های لیزر پرتو ایکس در برهم‌کنش لیزر پرتو ایکس با هسته‌ی  $^{97}\text{Tc}$  تأثیر زمان همدوسی تپ‌های لیزر بر بازده جمعیت‌دار شدن تراز شبه پایدار بررسی شده است. برای این کار فرض شده است که باریکه‌ی شتاب‌دار هسته‌ی  $^{97}\text{Tc}$  با دو تپ لیزر پرتو ایکس با بسامدهای متفاوت برهم‌کنش می‌کند و ضریب نسبیتی طوری تنظیم می‌شود که تپ‌های لیزر پرتو ایکس و ترازهای هسته‌ای در حالت تشدید کامل قرار داشته باشند. شدت تپ‌های لیزر و ترتیب زمانی تپ‌ها طوری در نظر گرفته می‌شوند که شرایط شیوه‌ی گذار بی‌دررو تحریکی رامان را برقرار کند.

## ۲. هامیلتونی برهم‌کنش هسته با لیزر پرتو ایکس

در ابتدا فرض بر این است که باریکه‌ی هسته‌ای شتاب داده شده با دو تپ لیزر پرتو ایکس شامل تپ‌های پمپ و استوکس، به صورت رودردو برهم‌کنش می‌کند. در این جا فرض می‌شود که بسامد تپ پمپ  $\omega_p$  متفاوت از بسامد تپ استوکس  $\omega_s$  باشد و با تنظیم مناسب آن‌ها و ضریب نسبیتی  $\gamma$  شرایط تشدید کامل در سیستم محاسبه می‌شود. هم‌چنین فرض می‌شود که هر دو تپ لیزر به صورت مستقیم و رودردو با باریکه‌ی هسته‌ای برهم‌کنش می‌کنند و با یک‌دیگر زاویه

در سال‌های اخیر همراه با پیشرفت‌هایی که در زمینه‌ی ساخت لیزر و به‌خصوص لیزرهایی با بسامد بالا (شامل لیزرهای پرتو ایکس) صورت گرفته است، شیوه‌های به کار گرفته شده برای انتقال جمعیت در اپتیک کوانتومی، علاوه بر فیزیک اتمی در سایر شاخه‌های فیزیک از جمله فیزیک هسته‌ای باعث ایجاد شاخه جدیدی به نام اپتیک کوانتومی هسته‌ای شده است [۱، ۲]. جمعیت‌دار کردن حالت‌های هسته‌ای با استفاده از لیزرهای پرتو ایکس می‌تواند کاربردهای زیادی همانند طیف‌سنجی گاما با کیفیت بالا و هم‌چنین ساخت باتری‌های هسته‌ای داشته باشد. در مرجع [۱] از روش تنظیم مساحت تپ [۳] برای انتقال حالت‌های هسته‌ای در سیستم‌های هسته‌ای دو تراز با استفاده از لیزرهای پرتو ایکس استفاده شده است. بسامد لیزر پرتو ایکس در مقایسه با اختلاف بسامد بین ترازهای هسته‌ای کم‌تر است و برای رفع این مشکل، در مرجع [۱] باریکه‌ی هسته‌ای به صورت شتاب‌دار در نظر گرفته شده است و از اثر نسبیتی دوپلر برای جبران اختلاف بسامد لیزر پرتو ایکس و ترازهای هسته‌ای استفاده شده است. در مرجع‌های [۴] و [۵] انتقال جمعیت بین دو تراز زمینه در سیستم‌های هسته‌ای سه تراز  $\Lambda$ -گونه شامل دو تراز زمینه و یک تراز تحریکی با استفاده از روش گذار بی‌درروی تحریکی رامان [۶-۱۱] پیشنهاد شده است. در روش پیشنهاد شده در مرجع‌های [۴] و [۵] از دو تپ لیزر پرتو ایکس استفاده شده و همانند مرجع [۱]، به منظور برقراری شرط تشدید، باریکه‌ی هسته‌ای به صورت شتاب‌دار در نظر گرفته شده است. هم‌چنین به منظور برقراری شرایط گذار بی‌دررو، از لیزرهای پرتو ایکس با شدت بالا استفاده شده است. در مرجع [۱۲] از روش زنجیره‌ی تپ‌های هم‌پوشان [۱۳] برای جمعیت‌دار کردن حالت‌های هسته‌ای در یک سیستم سه تراز  $\Lambda$ -گونه استفاده شده است که در آن با تعداد زنجیره‌ای دلخواه از تپ‌های لیزر تشدید پرتو ایکس، جمعیت از یک تراز زمینه‌ی پایدار به یک تراز زمینه‌ی شبه پایدار منتقل می‌شود و با افزایش تعداد زنجیره‌ی تپ‌ها حساسیت سیستم نسبت به اثر گسیل خودبه‌خودی و نوسان‌های شدت تپ لیزر کاهش می‌یابد. در مقایسه با طرح‌واره‌های پیشنهادی در مرجع‌های [۴] و [۵]، روش زنجیره تپ‌های پوشان در هر مرحله نیاز به شدت لیزر کم‌تری دارد.



شکل ۱. الف) الگوی جفت‌شدگی هسته‌ی شتاب داده شده با لیزر پرتو ایکس؛ ب) الگوی برهم‌کنش رودرروی لیزرهای پرتو ایکس با هسته‌ی شتاب داده شده در آزمایشگاه.

جدول ۱. پارامترهای مربوط به تب لیزر و مشخصه‌های هسته

نماد	توضیحات
$c$	سرعت سیر نور در خلأ
$\beta$	نسبت سرعت ذره‌ی هسته‌ای به سرعت نور
$k_{\tau i}$	عدد موج برای گذار $ i\rangle \rightarrow  3\rangle$
$I_{1(2)}$	تکانه‌ی زاویه‌ای حالت‌های پایه $ 1\rangle( 2\rangle)$
$L_{1(2)}$	چندقطبی متناظر با گذار $ i\rangle \rightarrow  3\rangle$
$B(\epsilon/\mu L_{i\tau})$	احتمال کاهش یافته برای گذار $ i\rangle \rightarrow  3\rangle$
$T_{P(S)}$	پهنای تب لیزر
$\tau_{P(S)}$	تأخیر زمانی تب‌ها
$I_{P(S)}^{eff}$	شدت مؤثر تب‌های لیزر پرتو ایکس
$\Delta_{P(S)}$	واکوکی بین ترازهای هسته‌ای و بسامدهای لیزر
$\gamma$	$\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$
$\epsilon_s$	ضریب گذردهی خلأ
$h$	ثابت پلانک
$\Gamma$	آهنگ گسیل خودبه‌خود از حالت $ 3\rangle$
$B_{\tau i}$	آهنگ شاخه‌ای گسیل خودبه‌خود $ i\rangle \rightarrow  3\rangle$

برای برقرار شدن شرط تشدید، در رابطه‌ی ۲ الف  $\hbar\omega_p = 12.4 \text{ keV}$  در نظر گرفته شد که این مقدار بسامد، در مرکز تحقیقات سینکروترون الکترون آلمان<sup>۱</sup> (DESY) لیزر پرتو ایکس گزارش شده [۱۵] و در مرجع‌های [۴] و [۵] این

ندارند. الگوی جفت‌شدگی هسته‌ی شتاب داده شده با لیزرهای پرتو ایکس و هم‌چنین نمایش آن در چارچوب آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده است که در آن  $|1\rangle$  نشان‌دهنده‌ی تراز پایه‌ی اول و  $|2\rangle$  نشان‌دهنده‌ی تراز پایه‌ی دوم و  $|3\rangle$  نشان‌دهنده‌ی تراز تحریکی است. سیستم ابتدا در حالت  $|1\rangle$  قرار دارد و هدف انتقال حالت هسته‌ای از حالت  $|1\rangle$  به حالت  $|2\rangle$  بدون اشغال حالت  $|3\rangle$  با استفاده از روش گذار بی‌دررو تحریکی رامان است. با توجه به این‌که پارامترهای زیادی در بسامدهای رابی مربوط به هامیلتونی مؤثر و جمله‌های مربوط به اثرهای ناهمدوسی ظاهر می‌شوند، این پارامترها در جدول ۱، جدول‌بندی شده‌اند.

هامیلتونی برهم‌کنش هسته با لیزرهای پرتو ایکس چنین به دست می‌آید [۴، ۵].

$$\hat{H}(t) = -\frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \Omega_p(t) \\ \cdot & -2(\Delta_p - \Delta_s) & \Omega_s(t) \\ \Omega_p(t) & \Omega_s(t) & 2\Delta_p \end{pmatrix}, \quad (1)$$

که در آن  $\Omega_p(t)$  و  $\Omega_s(t)$  بسامدهای رابی مربوط به تب‌های پمپ و استوکس،  $\Delta_p$  و  $\Delta_s$  واکوکی بسامدهای پمپ،  $\omega_p$ ، و استوکس،  $\omega_s$ ، نسبت به بسامدهای گذار هستند که با در نظر گرفتن اثر نسبیتی مربوط به حرکت هسته چنین خواهند بود.

$$\Delta_p = \omega_p \gamma (1 + \beta) - ck_{\tau i}, \quad (2 \text{ الف})$$

$$\Delta_s = \omega_s \gamma (1 + \beta) - ck_{\tau i}, \quad (2 \text{ ب})$$

در این‌جا،  $k_{\tau i}$  عدد موج برای گذار  $|i\rangle \rightarrow |3\rangle$  است.

ترازهایی از  $^{97}\text{Tc}$  که برای انتقال جمعیت حالت هسته‌ای انتخاب شده است عبارت‌اند از  $E_{\tau} = \hbar\omega_{\tau} = 657 \text{ keV}$ ،  $E_{\tau} = \hbar\omega_{\tau} = 324 \text{ keV}$ ، و بنابراین  $E_{\tau} = \hbar\omega_{\tau} = 96.57 \text{ keV}$  و

$$ck_{\tau i} = \frac{E_{\tau} - E_i}{\hbar} \text{ و هم‌چنین } ck_{\tau i} = \frac{E_{\tau} - E_i}{\hbar} \text{ در ادامه } \gamma \text{ طوری}$$

محاسبه شده است که شرط تشدید  $\Delta_p = \Delta_s = 0$  برقرار شود. ذکر این نکته ضروری است که برقراری شرط تشدید فقط برای روش گذار بی‌دررو تحریکی رامان نیست بلکه برای سایر روش‌های انتقال همدوس جمعیت نیز به کار می‌رود.

1. The deutsches elektronen- synchrotron (DESY) (English german electron synchrotron)

$$\Omega_{P(S)}(t) = \frac{4\sqrt{\pi}}{\hbar} \left[ \frac{\gamma^\nu (1+\beta)^\nu I_{P(S)}^{eff} (L_{\nu(\nu)\tau} + 1) (\nu I_{\nu(\nu)} + 1) B(\varepsilon / \mu L_{\nu(\nu)\tau})}{c \varepsilon L_{\nu(\nu)\tau}} \right]^\nu \times \frac{k_{\nu(\nu)\tau}^{L_{\nu(\nu)\tau}-1}}{(\nu L_{\nu(\nu)\tau} + 1)!!} \exp \left\{ - \left[ \frac{\gamma(1+\beta)(t \mp \tau_{P(S)})}{\sqrt{\nu T_{P(S)}}} \right]^\nu \right\}, \quad (6)$$

### ۳. گذار بی‌دررویی تحریکی رامان در سیستم سه تراز

هامیلتونی مربوط به رابطه‌ی ۱ در حالت تشدید کامل داری سه ویژه مقدار است که یکی از این ویژه مقادیرا برابر صفر است. حالت مربوط به این ویژه مقدار صفر که حالت تاریک نامیده می‌شود، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$|D(t)\rangle = \frac{\Omega_S(t)}{\sqrt{\Omega_P^*(t) + \Omega_S^*(t)}} |1\rangle - \frac{\Omega_P(t)}{\sqrt{\Omega_P^*(t) + \Omega_S^*(t)}} |2\rangle. \quad (7)$$

براساس قضیه‌ی بی‌دررو، اگر حالت اولیه‌ی سیستم حالت تاریک، و مساحت زمانی تپ‌ها به حد کافی بزرگ باشد، در این صورت سیستم در حین تحول زمانی در حالت تاریک باقی خواهد ماند. همان‌طور که از رابطه‌ی ۷ برمی‌آید، یکی از ویژگی‌های مهم حالت تاریک این است که حالت تحریکی  $|3\rangle$  در آن وجود ندارد و اگر سیستم در حالت تاریک باقی بماند در این صورت اثر ناهمدوسی ناشی از گسیل خودبه‌خود به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. براساس رابطه‌ی ۷، اگر در شروع تحول زمانی سیستم، تپ استوکس  $\Omega_S(t)$  روشن و تپ پمپ  $\Omega_P(t)$  خاموش بوده باشد، سیستم در حالت  $|1\rangle$  خواهد بود. با گذشت زمان به تدریج دامنه‌ی تپ استوکس کاهش و دامنه‌ی تپ پمپ افزایش داده می‌شود، به طوری که در انتهای تحول زمانی، تپ پمپ روشن و تپ استوکس خاموش باشد. در این صورت در انتهای تحول زمانی، جمعیت به صورت کامل از حالت  $|1\rangle$  به حالت  $|2\rangle$  بدون اشغال حالت تحریکی  $|3\rangle$  منتقل خواهد شد؛ این روش، شیوه‌ی گذار بی‌دررویی تحریکی رامان نامیده می‌شود.

مقدار عددی برای محاسبه‌ها به کار گرفته شده است. با در نظر گرفتن این بسامد برای لیزرهای پرتو ایکس و برای  $\Delta_p = 0$  مقدار  $\gamma = 22.6$  از رابطه‌ی ۲ الف به دست می‌آید. با جای‌گذاری مقدار  $\gamma$  به دست آمده در رابطه‌ی ۲ ب و با در نظر گرفتن  $\Delta_S = 0$  مقدار بسامد مربوط به تپ استوکس محاسبه می‌شود که مقدار  $\hbar\omega_S = 7.36 \text{ keV}$  به دست می‌آید. دینامیک تحول زمانی سیستم با در نظر گرفتن اثر گسیل خودبه‌خود و نامیزانی فاز با استفاده از معادله‌ی مستر چنین نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = \frac{1}{i\hbar} [\hat{H}, \hat{\rho}] + \hat{\rho}_s + \hat{\rho}_d, \quad (3)$$

که در آن جمله‌ی مربوط به اثر گسیل خودبه‌خود و به صورت زیر است:

$$\hat{\rho}_s = \frac{\Gamma}{\nu} \begin{pmatrix} \nu B_{\nu\nu} \rho_{\nu\nu} & \cdot & -\rho_{\nu\nu} \\ \cdot & \nu B_{\nu\nu} \rho_{\nu\nu} & -\rho_{\nu\nu} \\ -\rho_{\nu\nu} & -\rho_{\nu\nu} & -\nu \rho_{\nu\nu} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

همچنین جمله‌ی مربوط به اثر واکوکی فاز که به زمان همدوس لیزر پرتو ایکس بستگی دارد این است،

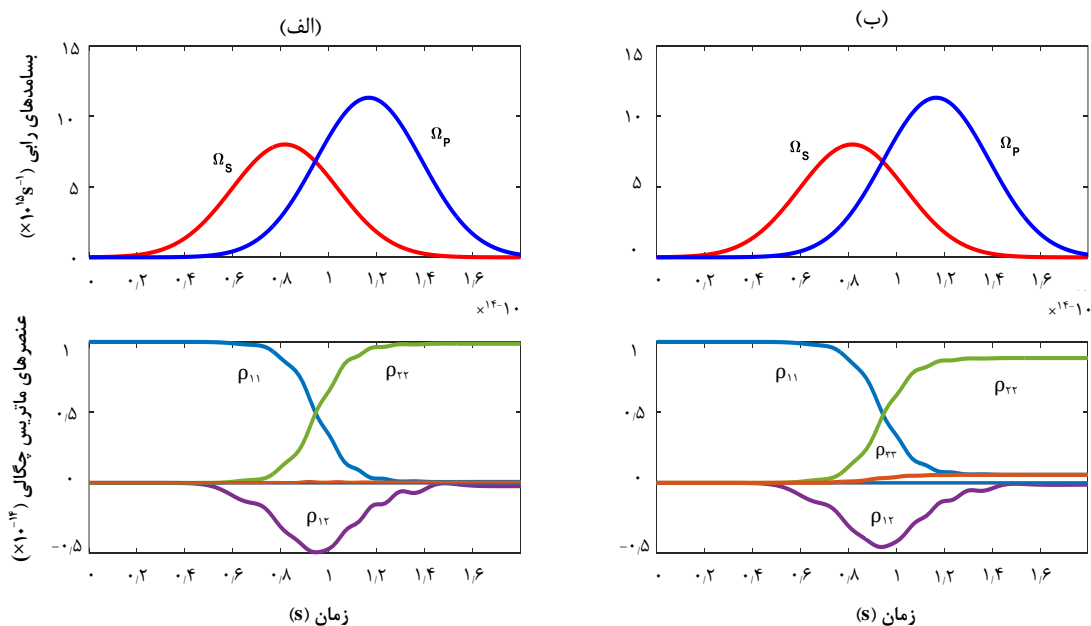
$$\hat{\rho}_d = -\frac{\gamma}{\tau_{coh}} \begin{pmatrix} \cdot & \eta_D \rho_{\nu\nu} & \eta_P \rho_{\nu\nu} \\ \eta_D \rho_{\nu\nu} & \cdot & \eta_S \rho_{\nu\nu} \\ \eta_P \rho_{\nu\nu} & \eta_S \rho_{\nu\nu} & \cdot \end{pmatrix}, \quad (5)$$

که در آن،  $\eta_D = \nu + \nu\beta$  و  $\eta_S = \eta_P = 1 + \beta$  بوده و  $\tau_{coh}$  زمان همدوسی تپ‌های لیزر را نشان می‌دهد. زمان همدوسی تپ لیزر با رابطه‌ی  $\tau_{coh} = \lambda_0^2 / c \Delta\lambda$  به پهنای طیفی لیزر،  $\Delta\lambda$  وابسته است؛ در این جا  $\lambda_0$  طول موج مرکزی است. ذکر این نکته ضروری است که در طرح‌واره‌های مربوط به مرجع‌های [۴]، [۵]، [۱۲] و [۱۴]، تپ‌های لیزر به صورت کاملاً همدوس در نظر گرفته شده‌اند و از اثر واکوکی فازی صرف‌نظر شده است. بسامدهای رابی مربوط به تپ‌های پمپ و استوکس در چارچوب مرجع آزمایشگاه چنین به دست می‌آید،

صورت کامل از حالت  $|1\rangle$  به تراز  $|2\rangle$  منتقل می‌شود. ولی در حالتی که زمان همدوسی تپ‌های لیزر قابل مقایسه با پهنای تپ‌های لیزر است، بازده انتقال جمعیت به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. به منظور بررسی بهتر تأثیر زمان همدوسی بر بازده انتقال جمعیت، جمعیت نهایی ترازهای  $|1\rangle$ ،  $|2\rangle$  و  $|3\rangle$  به عنوان تابعی از زمان همدوسی تپ‌های لیزر در شکل ۳ رسم شده است. پارامترهای برهم‌کنش براساس شکل ۲ انتخاب شده‌اند تا شرایط گذار بی‌دررو تحریکی رامان برقرار باشد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش زمان همدوسی، در بازه زمانی  $\tau_{coh} > 10^{-11} s$  جمعیت با بازده نزدیک به ۱۰۰٪ به تراز  $|2\rangle$  منتقل می‌شود. نکته‌ی قابل توجه دیگری که در این شکل مشاهده می‌شود این است که در حالتی که زمان همدوسی تپ‌های لیزر کوچک است، در انتهای تحول زمانی، جمعیت به صورت مساوی بین ترازهای  $|1\rangle$ ،  $|2\rangle$  و  $|3\rangle$  تقسیم می‌شود.

#### ۴. بررسی اثر واکوکی فاز بر گذار بی‌درروی تحریکی رامان در $^{97}Tc$

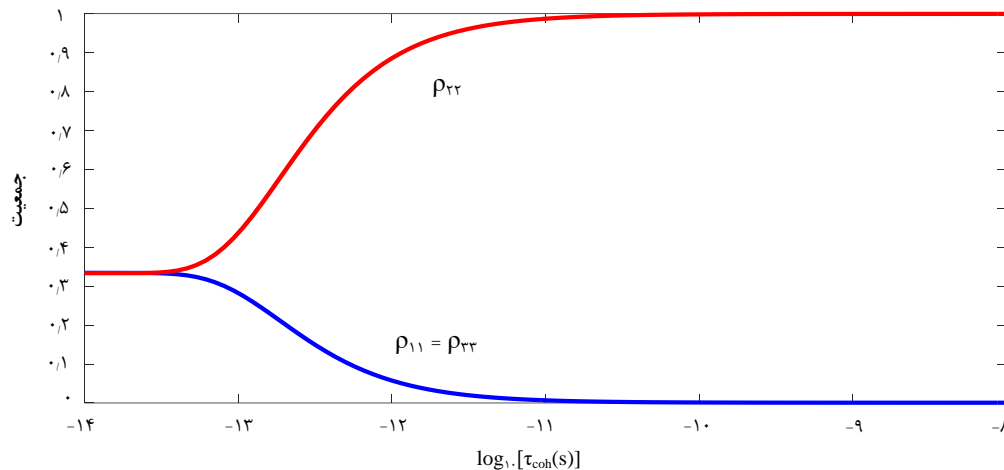
همان‌طور که در رابطه‌ی ۵ مشاهده می‌شود اثر واکوکی فاز به زمان همدوسی،  $\tau_{coh}$ ، تپ لیزر پرتو ایکس بستگی دارد. اگر زمان همدوسی تپ‌های لیزر کم‌تر از پهنای تپ‌های لیزر باشد، در این صورت واکوکی فاز می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر انتقال جمعیت در سیستم‌های هسته‌ای بگذارد. شکل ۲ تحول زمانی تپ‌های لیزر پرتو ایکس و عنصرهای ماتریس چگالی را برای عنصر  $^{97}Tc$  در دو حالت زمان همدوسی لیزر بیش‌تر از پهنای تپ لیزر (شکل ۲ الف) و زمان همدوسی لیزر برابر با پهنای تپ لیزر (شکل ۲ ب) نشان می‌دهد. مقدارهای استفاده شده برای محاسبه‌های عددی از جدول ۲ استخراج شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در حالتی که زمان همدوسی تپ‌های پمپ و استوکس بیش‌تر از پهنای تپ‌های لیزر است، با برقراری شرایط گذار بی‌درروی تحریکی رامان جمعیت به



شکل ۲. الف) فرایند گذار بی‌درروی تحریکی رامان در  $^{97}Tc$  و برای حالتی که زمان همدوسی تپ‌های لیزر ( $\tau_{coh} = 10^{-11} s$ ) بیش‌تر از پهنای تپ‌های پمپ و استوکس در چارچوب مرجع آزمایشگاه ( $T_p = T_s = 10^{-12} s$ ) است؛ ب) فرایند گذار بی‌درروی تحریکی رامان در  $^{97}Tc$  و برای حالتی که زمان همدوسی تپ‌های لیزر ( $\tau_{coh} = 10^{-10} s$ ) برابر با پهنای تپ‌های پمپ و استوکس در چارچوب مرجع آزمایشگاه ( $T_p = T_s = 10^{-12} s$ ) است. شدت تپ‌های لیزر و تأخیر زمانی تپ‌ها در هر دو مورد برابرند با  $\tau_p = \tau_s = 1.75 \times 10^{-15} s$ ،  $I_p = 1.002 \times 10^{17} W cm^{-2}$ ،  $I_s = 1.1757 \times 10^{17} W cm^{-2}$ ، سایر پارامترهای مربوط به تپ‌های رابی در جدول ۱ درج شده است. به منظور برقراری شرایط تشدید کامل در سیستم،  $\gamma = 22.6$ ،  $\hbar\omega_p = 12.4 (keV)$  و هم‌چنین  $\hbar\omega_s = 7.26 (keV)$  انتخاب شده‌اند.

جدول ۲. مقدارهای مختلف برای انجام مطالعات عددی در  $^{97}\text{Tc}$ : انرژی حالت‌های انتخاب شده، پهن شدگی حالت  $|3\rangle$ ، چندقطبی برای گذار  $|i\rangle \rightarrow |3\rangle$  در واحد وایسکوف و هم‌چنین گسیل خودبه‌خود شاخه‌ای  $|3\rangle \rightarrow |i\rangle$  ( $i=1,2$ )

$E_1$	$E_2$	$E_3$	پهن شدگی تراز $ 3\rangle$ (MeV)	$L_{13}$	$L_{23}$	$B(\varepsilon/\mu L)$ $ 1\rangle \rightarrow  3\rangle$ (wsu)	$B(\varepsilon/\mu L)$ $ 2\rangle \rightarrow  3\rangle$ (wsu)	$B_{31}$	$B_{32}$
۹۶٫۵۷	۳۲۴٫۰۰	۶۵۷٫۰۰	۰٫۶۱	E1	E2	$5 \times 10^2$	$6.7 \times 10^{-5}$	۰٫۹۶۵۳	۰٫۰۰۵۸



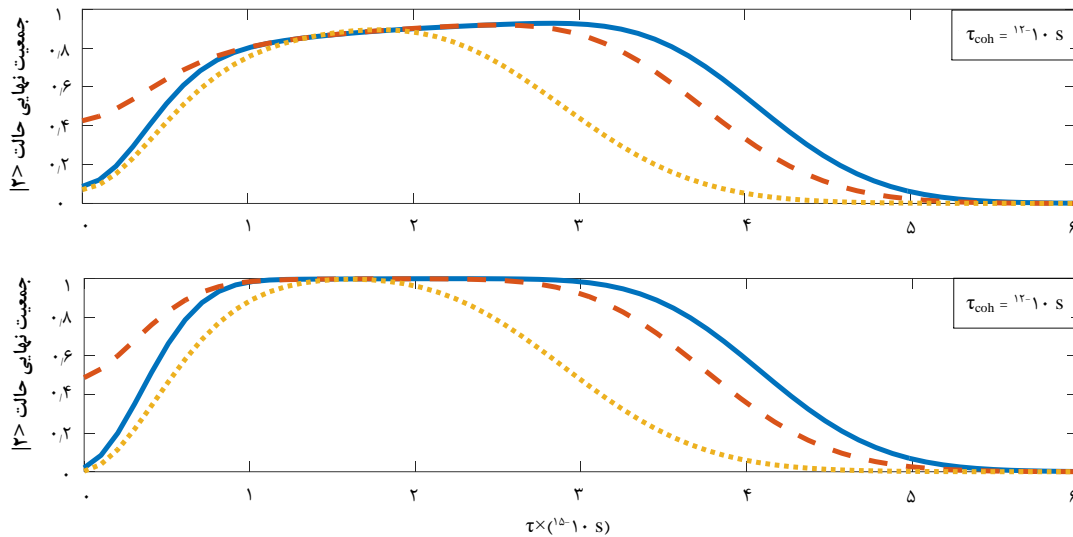
شکل ۳. جمعیت نهایی حالت‌های  $|1\rangle$ ،  $|2\rangle$  و  $|3\rangle$  به عنوان تابعی از زمان همدوسی تپ‌های لیزری برای  $^{97}\text{Tc}$ .

همدوسی تپ‌های لیزر به مقدار کافی بزرگ باشد، جمعیت نهایی حالت  $|2\rangle$  در بازه‌ی بزرگی از تأخیر زمانی تپ‌ها برابر با ۱ خواهد شد. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که شدت بالای تپ لیزر نمی‌تواند اثر ناشی از واکوکی فاز را از بین ببرد و شدت‌های بالای تپ لیزر تنها شرایط گذار بی‌درروی تحریکی رامان را برقرار می‌کنند.

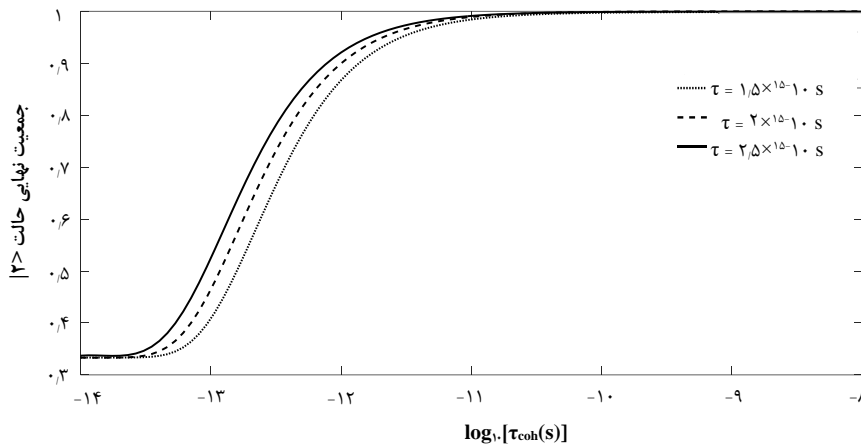
به منظور بررسی بهتر تأثیر تأخیر زمانی بر بازده انتقال جمعیت در  $^{97}\text{Tc}$ ، جمعیت نهایی حالت  $|2\rangle$  به صورت تابعی از زمان همدوسی تپ‌های لیزر برای سه مقدار مختلف تأخیر زمانی تپ‌ها، در شکل ۵ رسم شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، وقتی که زمان همدوسی تپ‌های لیزر کاهش می‌یابد، برای هر سه مقدار مربوط به تأخیر زمانی تپ‌ها، جمعیت نهایی حالت  $|2\rangle$  به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند. نکته‌ی مهمی که در شکل ۵ وجود دارد، این است که در حالتی که تأخیر زمانی تپ‌ها کم‌تر است ( $\tau = 1.5 \times 10^{-10}$  s)، کاهش جمعیت نهایی حالت  $|2\rangle$  با شدت بیش‌تری صورت می‌گیرد.

### ۵. بررسی اثر تغییرات تأخیر زمانی تپ‌ها بر بازده گذار بی‌درروی تحریکی رامان در $^{97}\text{Tc}$ در نرخ‌های مختلف زمان همدوسی تپ‌های لیزر

در شکل ۴ جمعیت نهایی حالت  $|2\rangle$  به صورت تابعی از تأخیر زمانی تپ‌های لیزر در شدت‌های مختلف تپ‌های لیزر رسم شده است. زمان همدوسی  $\tau_{\text{coh}}$  تپ‌های لیزر، در بخش‌های بالایی و پایینی به ترتیب  $10^{-12}$  s و  $10^{-10}$  s در نظر گرفته شده است. در هر دو حالت و برای تمام شدت‌های تپ لیزر در مقدارهای کوچک تأخیر زمانی تپ‌ها، بازده انتقال جمعیت بسیار پایین است و جمعیت نهایی تراز  $|2\rangle$  همراه با افزایش تأخیر زمانی  $\tau$  تپ‌ها، افزایش و پس از رسیدن به یک حد مشخص به شدت کاهش پیدا می‌کند. علت این پدیده این است که برای تأخیر زمانی تپ‌ها در روش گذار بی‌درروی تحریکی رامان حد معینی وجود دارد [۱۶] و در بعد از این حد، شرایط گذار بی‌درروی از بین می‌رود. در هر دو مقدار زمان همدوسی، همراه با افزایش شدت تپ‌های لیزر جمعیت نهایی حالت  $|2\rangle$  افزایش می‌یابد با این تفاوت که وقتی زمان



شکل ۴. رابطه‌ی بین جمعیت نهایی حالت  $|2\rangle$  و تأخیر زمانی تپ‌ها در  $^{97}\text{Tc}$  برای مقادیر مختلف شدت تپ‌های لیزر. برای خطوط کامل  $I_p^{\text{eff}} = 1.002 \times 10^{13} \text{ W cm}^{-2}$  و  $I_s^{\text{eff}} = 1.1757 \times 10^{12} \text{ W cm}^{-2}$ ، برای خطوط خط‌چین  $I_p^{\text{eff}} = 0.5$  و برای خطوط نقطه‌چین  $I_p^{\text{eff}} = 0.1$ .



شکل ۵. جمعیت نهایی حالت  $|2\rangle$  در  $^{97}\text{Tc}$  به عنوان تابعی از زمان هم‌دوسی تپ‌های لیزر برای سه مقدار متفاوت تأخیر زمانی تپ‌ها؛ سایر پارامترها براساس شکل ۲ الف جای‌گذاری شده‌اند.

## ۶. نتیجه‌گیری

تحریکی رامان در بازه محدودی از تأخیر زمانی تپ‌ها برقرار است. در همان بازه‌ی محدود اگر زمان هم‌دوسی تپ‌های لیزر کاهش یابد، بازه انتقال جمعیت به شدت کم می‌شود ولی برای حالتی که تأخیر زمانی تپ‌ها کوچک‌تر است، این افت جمعیت سریع‌تر صورت می‌گیرد. هم‌چنین نتیجه گرفته شد که در حالتی که زمان هم‌دوسی تپ‌های لیزر کوچک است، در انتهای تحول زمانی، جمعیت به صورت مساوی بین ترازهای  $|1\rangle$ ،  $|2\rangle$  و  $|3\rangle$  تقسیم می‌شود. علت انتخاب عنصر  $^{97}\text{Tc}$  برای این مطالعه این است که نیم-عمر حالت تحریکی  $|3\rangle$  که در این عنصر به عنوان حالت تحریکی انتخاب شده است در حدود

در این مقاله، تأثیر زمان هم‌دوسی تپ‌های لیزر پرتو ایکس بر انتقال جمعیت حالت‌های هسته‌ای در  $^{97}\text{Tc}$  با روش گذار بی‌درروی تحریکی رامان بررسی شد. مشاهده شد که در حالتی که زمان هم‌دوسی تپ‌های پمپ و استوکس کوچک‌تر از  $10^{-10}$  s است، بازه انتقال جمعیت به شدت کاهش پیدا می‌کند. مطالعه نشان داد که افزایش شدت تپ‌های لیزر باعث برقراری شرایط گذار بی‌درروی می‌شود ولی اثر ناهم‌دوسی ناشی از واوکوی فازی تپ‌های لیزر را کاهش نمی‌دهند. در بررسی تأخیر زمانی تپ‌ها، مشاهده شد که شرایط گذار بی‌درروی

6. U. Gaubatz et al. *Population transfer between molecular vibrational levels by stimulated Raman scattering with partially overlapping laser fields. A new concept and experimental results*, J. Chem. Phys. **92**, 5363 (1990).
7. K. Bergmann, H. Theuer, and B.W. Shore, *Coherent population transfer among quantum states of atoms and molecules*, Rev. Mod. Phys. **70**, 1003 (1998).
8. N. V. Vitanov et al. *Coherent manipulation of atoms and molecules by sequential laser pulses*, Adv. At. Mol. Opt. Phys. **46**, 55 (2001).
9. N. V. Vitanov et al. *Laser-induced population transfer by adiabatic passage techniques*, Annu. Rev. Phys. Chem. **52**, 763 (2001).
10. K. Bergmann, N. V. Vitanov, and B. W. Shore, *Perspective: Stimulated Raman adiabatic passage: The status after 25 years*, J. Chem. Phys. **142**, 170901 (2015).
11. N. V. Vitanov et al. *Stimulated Raman adiabatic passage in physics, chemistry, and beyond*, Rev. Mod. Phys. **89**, 015006 (2017).
12. B. Nedaee-Shakarab, M. Saadati-Niari and F. Zolfagharpour, *Nuclear-state population transfer by a train of coincident pulses*, Phys. Rev. C. **94**, 054601 (2016).
13. A. A. Rangelov and N. V. Vitanov, *Complete population transfer in a three-state quantum system by a train of pairs of coincident pulses*, Phys. Rev. A **85**, 043407 (2012).
14. B. Nedaee-Shakarab, M. Saadati-Niari and F. Zolfagharpour, *Nuclear-state engineering in tripod systems using x-ray laser pulses*, Phys. Rev. C. **96**, 044619 (2017).
15. M. Altarelli et al. *XFEL: The European X-Ray Free-Electron Laser. Technical Design Report*, (DESY, Hamburg, 2009).
16. N. V. Vitanov, *Creation of coherent atomic superpositions by fractional stimulated Raman adiabatic passage*, J. Phys. B. **32**, 4535 (1999).
17. P. Spiller and G. Franchetti, *The FAIR accelerator project at GSI*, Nucl. Instrum. Meth. A. **561.2**, 305 (2006).
18. <http://www.gsi.de/en/research/fair.htm>.

ps ۰٫۷۶ است که در مقایسه با پهنای تپ‌های لیزری که با در نظر گرفتن اثر نسبی از مرتبه‌ی fs است، بزرگ‌تر است. با توجه به این‌که آهنگ گسیل خودبه‌خودی  $\Gamma$  با طول عمر تراز تحریکی نسبت عکس دارد، در این مطالعه گسیل خودبه‌خود تأثیر چندانی بر تحول زمانی سیستم نداشته و تنها زمان همدوسی تپ‌های لیزر بر بازده جمعیت‌دار شدن سیستم تأثیر می‌گذارد. مقدار ضریب نسبی  $\gamma = 22/6$  که در این مطالعه استفاده شده است در مرجع‌های [۴] و [۵] نیز به کار گرفته شده است و قابل دسترسی در سیستم‌های واقعی است. در پروژه‌ی FAIR [۱۷] در مرکز تحقیقات یون سنگین GSI در آلمان [۱۸] مقدار ضریب نسبی  $\gamma \approx 40$  در آینده‌ی نزدیک در دسترس خواهد بود. در کنترل همدوس سیستم‌های هسته‌ای سه تراز، جمعیت از یک حالت پایدار به یک حالت شبه پایدار که حالت ایزومری نامیده می‌شود، منتقل و حالت ایزومری اشغال می‌شود که دارای انرژی متفاوت با حالت پایه است. این فرایند می‌تواند در موردهای متعدد همانند طیف‌نمایی گاما با کیفیت بالا و هم‌چنین ساخت باتری‌های هسته‌ای به کار گرفته شود [۵].

#### مراجع

1. T. J. Bürvenich, J. Evers, and C. H. Keitel, *Nuclear Quantum Optics with X-Ray Laser Pulses*, Phys. Rev. Lett. **96**, 142501 (2006).
2. B. Adams et al. *X-ray quantum optics*, J. Mod. Opt. **60**, 2 (2013).
3. B.W. Shore, *The Theory of Coherent Atomic Excitation*, (Wiley, New York, 1990).
4. W.-T. Liao, A. Pálffy, and C. H. Keitel, *Nuclear coherent population transfer with X-ray laser pulses*, Phys. Lett. B. **705**, 134 (2011).
5. W.-T. Liao, A. Pálffy, and C. H. Keitel, *Three-beam setup for coherently controlling nuclear-state population*, Phys. Rev. C. **87**, 054609 (2013).

#### COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



#### استناد به این مقاله

مقصود سعادت‌نیاری، بشیر ندائی شکراب (۱۳۹۸)، تأثیر زمان همدوسی تپ‌های لیزری پرتو ایکس بر انتقال جمعیت حالت‌های هسته‌ای در  $^{99}\text{Tc}$  با روش گذار بی‌دررو، ۸۹،

۳۸-۳۱

DOI: 10.24200/nst.2019.1023

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1023.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1023.html)