



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

بررسی اثرات مختلف میدان مغناطیسی بر رفتار یون در تله‌ی پائول

علی ملاابراهیمی، مسلم سوهانی

دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک، گروه هسته‌ای

چکیده:

در این کار به تحلیل رفتار یون $^{23}\text{Na}^+$ در تله چهارقطبی پائول در حضور میدان مغناطیسی خارجی پرداخته شده است. این میدان مغناطیسی در معادلات حرکتیون تاثیر گذاشته و باعث تغییر در ناحیه پایدار معادله متئو می‌شود. ما به بررسی معادلات حرکت یون در حضور میدان مغناطیسی و تفاوت‌های نواحی پایدار تله پائول در میدان‌های مختلف و همچنین شبیه‌سازی حرکت یون تحت تاثیر میدان مغناطیسی اعمالی پرداختیم.

کلیدواژه:

معادله متئو، تله چهارقطبی پائول

مقدمه:

تله‌های یونی پائول با پتانسیل‌های چهارقطبی الکتریکی یکی از رایج‌ترین سیستم‌ها در زمینه گیراندازی یون‌ها به منظور تحقیقات بنیادی و کاربردی فیزیک هسته‌ای محسوب می‌شوند [1-4]. شکل رایج این تله‌های چهارقطبی متشکل از سه الکتروود شامل یک حلقه و دو کلاهک در بالا و پایین با سطوح داخلی هذلولی شکل است. تله‌های یونی پائول با استفاده از پتانسیل الکتریکی متناوب می‌تواند یون‌ها را در سه بعد به دام بیندازد. معادله حرکت یون درون دستگاه به نام معادله متئو (۱) شناخته می‌شود که به صورت یک معادله مرتبه دوم است [5-6-7]:

$$\frac{d^2u}{dt^2} = -\frac{\Omega^2}{4}(a_u - 2q_u \cos \Omega t)u \quad (1)$$

u کمیت مکان جابجایی z ، Ω فرکانس پتانسیل متناوب است. و دو ضریب a_u و q_u دو کمیت بدون بعد بوده که معروف به پارامترهای پایداریو تعیین کننده‌ی جواب‌های پایدار معادله متئو هستند که تحت این جواب‌های

پایدار یون می‌تواند در درون تله به دام بیفتد [5-6-7]:

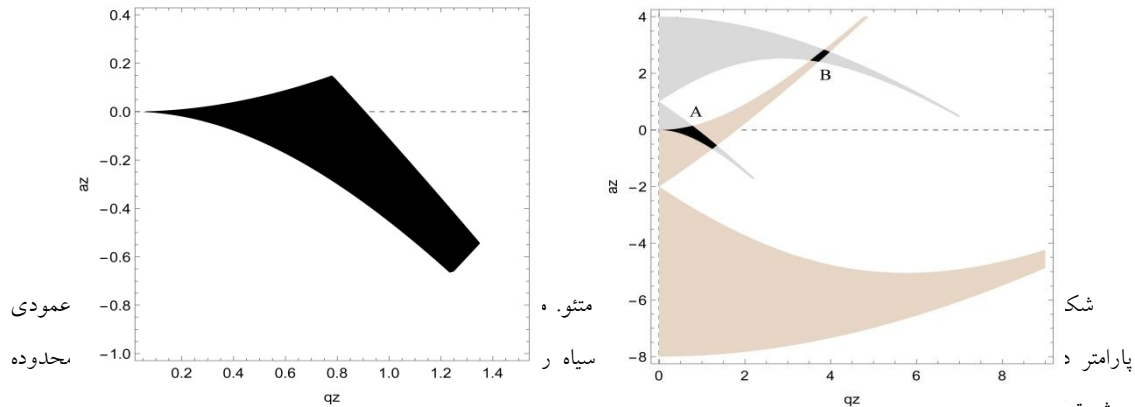
$$a_z = \frac{-16eU}{m(r_0^2 + 2z_0^2)\Omega^2} q_z = \frac{8eV}{m(r_0^2 + 2z_0^2)\Omega^2} \quad (2)$$



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ و انشگاه اصفهان

ناحیه پایدار مربوط به جواب‌های پایدار معادله متئو در شکل (۱) که به نمودار پایداری معروف است نشان داده شده از برهم‌نهی ناحیه پایدار شعاعی و محوری حاصل گردیده است. حاصل این همپوشانیدو ناحیه A, B بوده که یون هم‌زمان در هر دو ناحیه پایدار شعاعی و محوری قرار گرفته و در تله به دام می‌افتد.



اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت در راستای محوری موجب آن می‌شود که این ناحیه همپوشانی تحت تاثیر مستقیم یک جمله اضافی بدون بعد در پارامتر پایداری قرار گیرد. این جمله اضافی برگرفته از نیروی لورنتس اضافه شده در معادلات حرکت می‌باشد که باعث گسترش و یا کاهش ناحیه همپوشانی می‌گردد.

معادلات حرکت در حضور میدان مغناطیسی

با در نظر گرفتن یک میدان مغناطیسی ثابت و یکنواخت در راستای محوری $\vec{B} = B\hat{k}$ معادلات حرکت یون در مختصات استوانه‌ای به شکل زیر می‌شوند:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{-2e(U+V\cos\Omega t)r}{m(r_0^2+2z_0^2)} - \frac{e^2 B^2 r}{m^2} \quad (3)$$

حضور میدان مغناطیسی باعث شده معادلات حرکت در راستای r, ϕ شکل متفاوتی پیدا کنند اما معادله دیفرانسیل در راستای Z به همان شکل آشنا متئو ظاهر شده است. در تحلیل معادلات (۳) می‌توان نشان داد که با در نظر گرفتن

جمله $\dot{U} = U + \frac{eB^2(r_0^2+2z_0^2)}{2m}$ به عنوان پتانسل DC معادله r نیز به فرم معادله متئو در می‌آید:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{-2e(\dot{U}+V\cos\Omega t)r}{m(r_0^2+2z_0^2)} \quad (4)$$



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

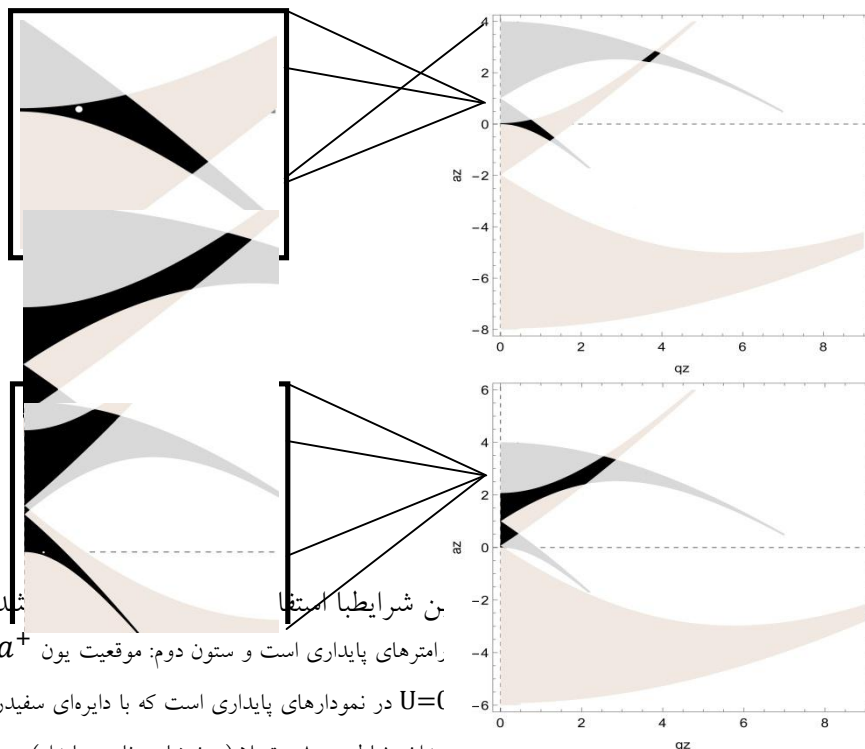
۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

نواحی پایداری

این جابجایی پتانسیلی در پتانسیل DC موجب آن می‌شود که شکل پارامترهای پایداری q_u و a_u معادلات (۲) به شکلی متفاوت با گذشته درآیند:

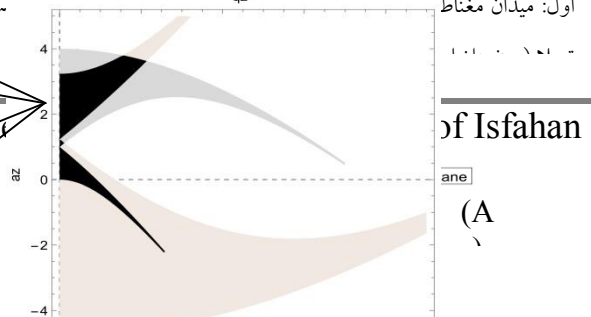
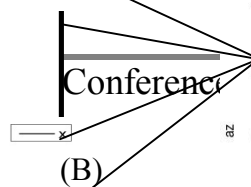
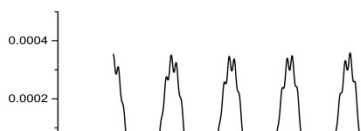
$$a_z = \frac{-16eU}{m(r_0^2 + 2z_0^2)\Omega^2} q_z = \frac{8eV}{m(r_0^2 + 2z_0^2)\Omega^2} \quad (5)$$

درواقع تاثیر این میدان مغناطیسی در پارامتر پایداری \tilde{a}_r نمایان گردیده است که اضافه شدن یک جمله بدون بعد $\frac{4e^2 B^2}{m^2 \Omega^2}$ نسبت به حالات گذشته موجب اتفاق جالبی گردیده که گستردگی ناحیه همپوشانی نمودارهای پایداری را مستقیماً وابسته به نسبت بار به جرم یون ($\frac{e}{m}$) و همچنین شدت میدان مغناطیسی اعمالی و فرکانس پتانسیل متناوب نموده است. در شکل (۲) با استفاده از نرم‌افزار Mathematica به بررسی این نواحی پایدار به ازای میدان مغناطیسی‌های متفاوت پرداخته شده است. و همچنین مکان یون $^{23}Na^+$ در ناحیه پایدار دستگاه، در سمت چپ شکل‌ها به منظور شبیه‌سازی رفتار یون تحت این شرایط نشان داده شده است:



در شکل (۳) در شکل ۲: $z_0 = 0.9 \text{ cm}$

بن شرایطی است
رابطه‌های پایداری است و ستون دوم: موقعیت یون $^{23}Na^+$ در تله‌ای با مشخصات $U = ($ در نمودارهای پایداری است که با دایره‌ای سفید رنگ مشخص گردیده. ردیف میدان مغناطیسی ۸ تسلا (یون خارج ناحیه پایدار). ردیف سوم: میدان مغناطیسی ۱ تسلا است. همانطور

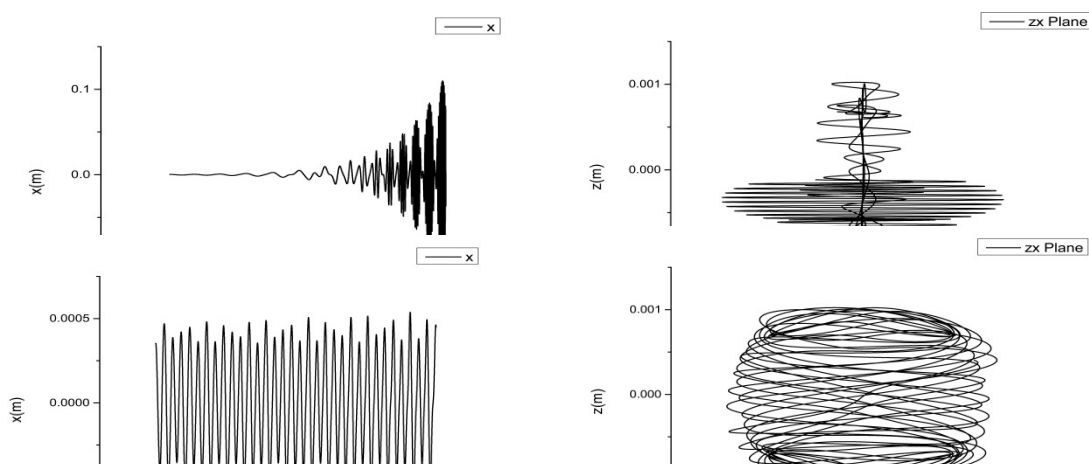




بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

موضوع است. در این شرایط محدوده حرکتی یون با گذر زمان سریعاً افزایش یافته و یون از تله خارج می‌شود. اما در بقیه حالات یون در ناحیه پایدار جای گرفته و در تله به دام افتاده است:



شکل ۳: شبیه‌سازی حرکت یون به ازای میدان مغناطیسی‌های متفاوت. ستون (A) حرکت یون در صفحه Z-X و ستون (B)

(B) محدوده حرکتی X بر حسب زمان t است. ردیف اول: میدان مغناطیسی ۰.۱ تسلا. ردیف دوم: میدان مغناطیسی ۰.۸ تسلا.

ردیف سوم: میدان مغناطیسی ۱ تسلا.

نتیجه‌گیری

اعمال میدان مغناطیسی $\vec{B} = B\hat{k}$ در تله‌های یونی پائول موجب‌افزایش شدن یک جمله بدون بعد $\frac{4e^2 B^2}{m^2 \Omega^2}$ در پارامتر پایداری a_T می‌گردد که همپوشانی نواحی پایدار شعاعی و محوری را به طور مستقیم وابسته به جرم و بار یون و همچنین شدت میدان مغناطیسی اعمالی و فرکانس پتانسیل متناوب می‌کند. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده، در مورد یک یون $^{23}\text{Na}^+$ که در غیاب میدان مغناطیسی در ناحیه پایدار جای می‌گیرد، نشان داده شد که به ازای میدان‌های مغناطیسی متفاوت ممکن است خارج از ناحیه پایدار قرار گیرد که البته، به وضوح در این کار در میدان مغناطیسی ۰.۸ تسلا این عدم پایداری نمایش داده شده است.

منابع

- 1- X. Fl'échard, E. Li'enard, A. M'ery, D. Rodr'iguez, G. Ban, D. Durand, F. Duval, M. Herbane, M. Labalme, F. Mauger, O. Naviliat-Cuncic, J.C. Thomas, and Ph. Velten, Paul trapping of radioactive $^6\text{He}^+$ ions and direct observation of their β decay, Physical Review Letters, 101, 212504, 2008.



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

- 2- B. B. Blinov, D. Leibfried, C. Monroe, and D. J. Wineland, Quantum Computing with Trapped Ion Hyperfine Qubits, *Quantum Information Processing*, 3, 45, 2004.
- 3- C. W. Chou, D. B. Hume, J. C. J. Koelemeij, D. J. Wineland, and T. Rosenband, Frequency Comparison of Two High-Accuracy Al^+ Optical Clocks, *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 104, 070802, 2010.
- 4- C. Monroe, D. Leibfried, B. E. King, D. M. Meekhof, W. M. Itano, and D. J. Wineland, Simplified quantum logic with trapped ions, *PHYSICAL REVIEW A*, NUMBER 4, Volume 55, Page 55, 1997.
- 5- Raymond E. March, John F. J. Todd, *Quadrupole Ion Trap Mass Spectrometry*, WILEY & SONS, INC, New Jersey, 50-58, 2005.
- 6- Raymond E. March, *Quadrupole ion trap mass spectrometry: a view at the turn of the century*, *International Journal of Mass Spectrometry*, Issues 1–3, Volume 200, Pages 285, 2000.
- 7- Mustapha Said Herbane, Minimized computational time method for the dynamics of ions trapped in an ideal quadrupole ion trap, *International Journal of Mass Spectrometry*, 303, 73-80, 2011.