

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



عضویت در خبرنامه



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛
شبکه های توجه گرافی
(Graph Attention Networks)



کارگاه آنلاین آموزش استفاده از
وب آو ساینس



کارگاه آنلاین مقاله روزمره انگلیسی

بررسی گشتاور مغناطیسی نوترینو مایورانا با استفاده از روش های مختلف عناصر ماتریسی هسته ای در واپاشی دو بتای بدون نوترینو

رشیدی، حسین؛ گودرزی، هادی؛ خدابخش، رسول

دانشگاه ارومیه، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده

در این مقاله روش های مختلف محاسبه عناصر ماتریسی هسته ای برای فرآیند برهمکنش ضعیف واپاشی دو بتای بدون نوترینو با هم مقایسه می شود. همچنین با استفاده از روش های مختلف عناصر ماتریسی هسته ای، گشتاور مغناطیسی انتقالی نوترینو مایورانا بررسی می شود. این نوترینو از طریق حلقه ذره S - ذره نقض کننده پاریته R در مدل استاندارد ابر تقارنی مینیمم تولید می شود.

Investigation of Majorana neutrino magnetic moment using the nuclear matrix elements in neutrinoless double beta decay

Rashidi, hossein; Goudarzi, hadi; Khodabakhsh, rasol

Department of Physics, Faculty of Sciences, Urmia university

Abstract

The different methods to obtain the neutrinoless double beta decay nuclear matrix elements are compared with each other. We use the nuclear matrix elements to calculate the Majorana neutrino transition magnetic moments, generated through particle–particle R -parity violating loop diagrams within the minimal supersymmetric standard model.

مقدمه

نوترینو یک ذره مایورانا (ذره مایورانا یعنی نوترینو، پاد ذره خودش باشد) باشد که در این صورت عدد لپتونی دیگر کمیت پایسته ای نیست [۲]. تئوری این واپاشی شامل دو قسمت است: اولاً یک فرآیند هسته ای است که نیاز به محاسبات دقیق عناصر ماتریسی هسته ای دارد و دوم یک مکانیسم خاص باید پیشنهاد شود که در آن نوترینوها انتشار نیابند. نیمه عمر واپاشی دو بتا بدون نوترینو به فرم زیر است:

$$(T^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_{ee} \rangle^2 \quad (2)$$

که در رابطه بالا $G^{0\nu}$ عامل فضای فاز، $M^{0\nu}$ عناصر ماتریسی هسته ای و $\langle m_{ee} \rangle$ جرم موثر نوترینو است که نشان دهنده برهمکنش های مدل غیر استاندارد است. ما روش های مختلف بدست

واپاشی دو بتایی بدون نوترینو ($0\nu 2\beta$) یک فرآیند نادر هسته ای است که در آن واپاشی دو بتا به طور همزمان در یک هسته رخ می دهد [۱]. در این واپاشی عدد اتمی Z دو واحد تغییر می کند اما عدد جرمی A ثابت می ماند که به فرم زیر است:

$$(Z, A) \rightarrow (Z + 2, A) + 2e^- \quad (1)$$

در این واپاشی نوترینوها منتشر نمی شوند که به نقض پایستگی عدد لپتونی منجر می شود $\Delta l = 2$ که در مدل استاندارد مجاز نیست، اما در بعضی مدل های خارج از مدل استاندارد مجاز است. در هر حال، در صورتی واپاشی دو بتا بدون نوترینو رخ می دهد که

وبرهمکنش حفره-ذره (g_{ph}) است. مقدار $M^{0\nu}$ آن برای ^{76}Ge بین 3.33 و 6.64 است [3].

برهمکنش مدل بوزونی IBM قبلاً برای این نوع محاسبات استفاده نمی شد اما بعداً معلوم شد که نتایجی می دهد که توافق خوبی با محاسبات RQRPA دارد. در این روش عناصر ماتریس فرمیونی برای بدست آوردن عملگر انتقال فرمیون ها استفاده می شود. عناصر ماتریسی این عملگر در طرح عمومی بررسی می شود و در پایان عملگر فرمیونی به عملگر انتقال بوزونیتصویر می شود که با استفاده از تابع موج IBM بررسی می شود. مقدار $M^{0\nu}$ بین 4.64 و 5.46 است که با روش (R)QRPA توافق خوبی دارد [4].

جدول 1: عناصر ماتریس هسته ای واپاشی بدون نوترینو $M^{0\nu}$ برای ^{76}Ge با استفاده از سه روش مختلف. ستون آخر مربوط به حد بالای جرم موثر نوترینو [4].

روش	$M^{0\nu}$	مقدار متوسط	$\langle m_{ee} \rangle$
(R)QRPA	3.33-6.64	4.985 ± 1.655	0.22-0.43ev
LSSM	2.22-2.81	2.515 ± 0.295	0.51-0.65ev
IBM	4.64-5.46	5.050 ± 0.414	0.26-0.31ev

در ستون آخر جرم موثر نوترینو با استفاده از نتایج Heidelberg [5] محاسبه می شود. $T_{1/2}^{0\nu}(\text{Ge}) \leq 1.9 \times 10^{25} \text{ y}$ و عامل فاکتور فاز $G^{0\nu} = 2.55 \times 10^{-23} \text{ yev}^2$ برای مدل LSSM هسته ^{76}Ge در جدول (1) برابر $M^{0\nu} = 2.22$ است (بدون سهم مرتبه های بالاتر جریان هسته، به مقدار $2/58$ افزایش می یابد [4]).

گشتاور مغناطیسی انتقالی نوترینو مایورانا در نقض پاریته R مدل ابرتقارنی

گشتاور مغناطیسی مایورانا بین اجزای کایرال V_{il}, V_{jl}^c نوترینو مایورانا، اعمال می شود با فرض یک تئوری پیمانانه ای استاندارد که نوترینوها تنها چپ دست باشند. به عنوان یک نتیجه، کل عدد لپتونی را به دو واحد نقض می کند $\Delta l = 2$. هامیلتونی موثر H_{eff} از این برهمکنش به فرم زیر است:

$$H_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \mu_{ij} \tilde{V}_{il} \sigma^{\alpha\beta} V_{il}^c F_{\alpha\beta} + h.c \quad (3)$$

آوردن عناصر ماتریس هسته ای برای واپاشی دو بتایی بدون نوترینو با هم مقایسه می کنیم. از محاسباتی برای گشتاور مغناطیسی نوترینو مایورانا، در مدل مینیمم ابر تقارنی استاندارد با نقض پاریته R، استفاده خواهیم کرد.

محاسبه عناصر ماتریس هسته ای

روش های محاسبه عناصر ماتریس هسته ای $^{(1)}\text{(NME)}$ عبارتند از: مدل پوسته هسته ای $^{(2)}\text{(NSM)}$ ، مدل تقریب فاز شبه تصادفی $^{(3)}\text{(QRPA)}$ و مدل برهمکنش بوزونی $^{(4)}\text{(IBM)}$ است.

مدل پوسته هسته ای یکی از روش هائی است که اخیراً نسخه جدیدی از آن در مقیاس بزرگ $^{(5)}\text{(LSSM)}$ اعلام شده که محاسبات دقیق تری ارائه می دهد. این روش یک فضای ظرفیت معرفی می کند که ناشی از یک برهمکنش موثر هامیلتونی است سپس ماتریس هامیلتونی باید قطری شود. این ویژگی باعث می شود که عملاً این فضای ظرفیتی شامل همه مدارهای تک ذره نباشد. مزیت این روش این است که می تواند انرژی های کم انرژی را توصیف کند ولی برای برخی هسته ها فضای ظرفیت در NSM خیلی کوچک است.

در روش تقریب فاز تصادفی $^{(6)}\text{(RPA)}$ ، فرض بر این اساس است که حالت پایه به عنوان یک خلا بیان می شود. سپس یک دامنهگذار بین حالت پایه 0^+ هسته زوج-زوج و یک حالت برانگیخته هسته فرد- فرد مجاور آن محاسبه می شود. در اینجا امکان حالت برانگیخته بیشتر از حالت هسته میانی مجازی است که به عنوان نوسان هارمونیک ساده، بالاتر از حالت پایه بیان می شود. برای اینکه نتایج بهتر شود روش به QRPA و RQRPA اصلاح شد. روش RQRPA برای برانگیختگی کم هارمونیک خوب است اما برای برانگیختگی های بالاتر زیاد مناسب نیست. کاربرد QRPA در واپاشی دوبتا به اضافه کردن برهمکنش ذره-ذره (g_{pp})

¹Nuclear matrix elements

²Nuclear shell model

³Quasi-Random Phase approximation

⁴interacting boson model

⁵Large scale shell model

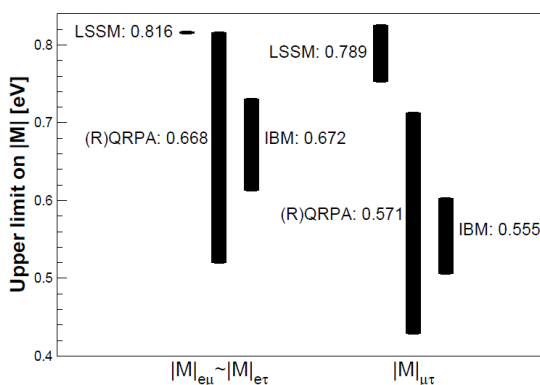
⁶Random phase approximation

اختلاط های بسیار ضعیف در بخش لپتون های باردار را در نظر نمی گیریم بنابراین [۷]:

$$\mu_{\nu i i'}^l = (1 - \delta_{ii'}) \frac{4Q_e m_e}{16\pi^2} \sum_{jk} \lambda'_{ijk} \lambda'_{i'kj} \left(\frac{\omega_{jk}^l}{m_{e_j}} - \frac{\omega_{kj}^l}{m_{e_k}} \right) \mu_B \quad (6)$$

انتگرال حلقه، مانند قبلی است با این تفاوت که $\theta^k \rightarrow \phi^k$ و $x_i^{jk} \rightarrow y_i^{jk} = \frac{m_{l_i}^2}{m_{l_i}^2 - m_{l_k}^2}$ برای بدست آوردن نتایج عددی، مدل بوسیله اعمال وحدت بزرگ GUT در مقیاس انرژی بالا محدود می شود، $M_{GUT} \approx 1.2 \times 10^{16} \text{ GeV}$ ، بنابراین فقط با پارامترهایی با درجه آزادی کمتر شروع می کنیم. m_0 مقیاس جرم مشترک، $m_{1/2}$ جرم مشترک فرمیون ها و A_0 عامل ثابت جفت Yukawa، $\tan\beta$ نسبت مقدار انتظاری خلا هیگز.

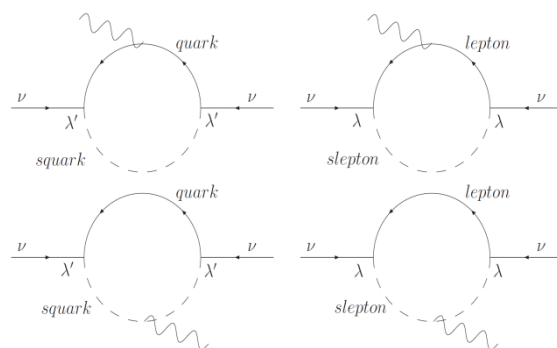
در ادامه معادله های گروه بهنجارش برای بدست آوردن مقدار جفتها و پارامترهای جرم در مقیاس کم انرژی مورد استفاده قرار می گیرد. λ, λ' جفت های سه خطی نقض کننده پارامتر R هستند که نمی توانند از GUT محدود شده بدست آیند، آنها از ماتریس جرم بررسی می شوند. این روش اجازه می دهد تا گشتاور مغناطیسی انتقالی را محاسبه کنیم [۷].



شکل ۲: بازه ی ماکزیمم مقدار عناصر غیر قطری ماتریس جرم نوترینو، حاصل از عناصر ماتریس هسته ای مختلف و پاشی دو بتا بدون نوترینو

شکل (۲) نشان می دهد که چگونه عناصر غیر قطری در ماتریس جرم نوترینو، وابسته به عناصر ماتریس هسته ای است. هر نوار

که در رابطه $F_{\alpha\beta}(\xi)$ تانسور میدان الکترومغناطیسی قوی است و $\sigma^{\alpha\beta}$ ماتریس پائولی. ما در مدل مینیمم ابر تقارنی استاندارد با نقض پارامتر R ، کار می کنیم [۶]. در این شرایط ممکن است فرآیندی به نظر برسد که در آن نوترینو یک ذره مایورانا باشد، با وجود این که از لحاظ بار خنثی است ولی به طور موثر با یک فوتون خارجی برهمکنش می کند. دامنه چنین فرآیندی به وسیله گشتاور مغناطیسی نوترینو کنترل می شود. ما در برهمکنش بین دو نوترینو مایورانا در نظر می گیریم که، راس برهمکنش موثر به یک حلقه ذره-S ذره گسترش می یابد که در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱: فرآیندی که به گشتاور مغناطیسی انتقالی نوترینو مایورانا منجر می شود [۶].

سه حلقه کوارک-S کوارک، می تواند شامل ترکیب کوارک d نیز باشد. (V ماتریس CKM) با فرمول زیر [۷]:

$$\mu_{\nu i i'}^q = (1 - \delta_{ii'}) \frac{12Q_d m_e}{16\pi^2} \sum_{jkl} \lambda'_{ijk} \lambda'_{i'kl} \sum_{ja} V_{ja} V_{la} \frac{\omega_{ak}^q}{m_d} - (k \leftrightarrow j) \quad (8)$$

ω انتگرال حلقه ای است که از انتگرال روی گشتاور مجازی ذرات داخل حلقه ناشی می شود

$$\omega_{jk}^q = \frac{\sin 2\theta^k}{2} \left(\frac{x_2^{jk} \ln x_2^{jk} - x_2^{jk} + 1}{(1 - x_2^{jk})^2} - (x_2 \leftrightarrow x_1) \right) \quad (9)$$

و $x_i^{jk} = \frac{m_{d_j}^2}{m_{d_i}^2}$ نسبت مربع جرمی کوارک و S کوارک را نشان می

دهد و اینجا θ^k زاویه اختلاط S کوارک است. سهم حلقه لپتون-S لپتون در مجموع بیش از سه رنگ کوارک را شامل نمی شود و

با این حال اختلاف بین بالاترین مقدار QRPA (R) و کمترین مقدار LSSM با حدود ۱۰ درصد تقریباً یکی است. البته پیش بینی نیمه عمر واپاشی ($0\nu 2\beta$) یا جرم موثر نوترینو ممکن است شیوه متفاوتی داشته باشد، در چنین موردی روش QRPA (R) و IBM برای این کار، ارزش توصیه دارند.

منابع

- [۱] F. T. Avignone, S. R. Elliott, J. Engel, Rev. Mod. Phys. 80, 481 (2008).
 [۲] E. Majorana. Nuovo Cim., 14:171, 1937.
 [۳] F. Šimkovic, A. Faessler, V. Rodin, P. Vogel, Phys. Rev. C 77 (2008) 045503.
 [۴] E. Caurier, J. Menéndez, F. Nowacki, A. Poves, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 052503; J. Menéndez, A. Poves, E. Caurier, F. Nowacki, Nucl. Phys. A 818 (2009) 139.
 [۵] H. V. Klapdor-Kleingrothaus et al. (Heidelberg-Moscow Collaboration), Eur. Phys. J. A 12 (2001) 147.
 [۶] H. L. Haber, G. L. Kane, Phys. Rep. 117 (1985) 75; R. Barbier et al., Phys. Rep. 420, 1 (2005).
 [۷] M. Gózdź, W. A. Kamiński, F. Šimkovic, A. Faessler, Phys. Rev. D 74 (2006) 055007.

محدوده ای برای روش های مختلف عناصر ماتریس هسته ای با عددهایی در مقدار متوسط نشان می دهد.

می بینیم که روش IBM و QRPA (R) توافق خوبی با هم دارند در حالی که مدل پوسته (LSSM) نتایج بهتری می دهد. البته تمایل داریم داده های گشتاور مغناطیسی حفظ شود که در جدول (۲) و (۳) نشان داده شده است. محاسبات شامل دو مورد است: یکی پارامترهای GUT در مقیاس کوچک و دیگری پارامترهای GUT در مقیاس بزرگ. برای هر مورد سه امکان است: (۱) حلقه لپتون-S لپتون (۲) حلقه کوآرک-S کوآرک به اضافه کوآرک-d (۳) کوآرک-S کوآرک بدون ترکیب کوآرک-d

جدول ۲: گشتاور مغناطیسی انتقالی نوترینو مایورانا μ_{ij} در μ_B برای پارامترهای GUT در مقیاس کوچک: $A_0=150\text{Gev}$ و $m_0=m_{1/2}=150\text{Gev}$ و $\tan\beta=19$. $\langle\mu\rangle_0$ بازه مربوط به گستره NME در روش های مختلف [۷].

ij	LSSM	(R)QRPA	IBM
	مکانسیم حلقه لپتون-S لپتون		
$\epsilon_{\mu,et}$ $\mu\tau$	(1.33,1.33) 10^{-15} (1.23,1.35) 10^{-15}	(8.46,13.3) 10^{-15} (7.02,11.6) 10^{-15}	(9.99,11.9) 10^{-15} (8.28,9.86) 10^{-15}
	مکانسیم حلقه کوآرک-S کوآرک بدون اختلاط کوآرک-d		
$\epsilon_{\mu,et}$ $\mu\tau$	(9.49,9.49) 10^{-15} (8.69,9.52) 10^{-15}	(6.04,9.49) 10^{-15} (4.95,8.22) 10^{-15}	(7.13,8.50) 10^{-15} (5.34,6.96) 10^{-15}
	مکانسیم حلقه کوآرک-S کوآرک با اختلاط کوآرک-d		
$\epsilon_{\mu,et}$ $\mu\tau$	(8.22,8.22) 10^{-15} (7.24,7.93) 10^{-15}	(5.24,8.22) 10^{-15} (4.13,6.85) 10^{-15}	(6.18,7.36) 10^{-15} (4.87,5.80) 10^{-15}

جدول ۳: گشتاور مغناطیسی انتقالی نوترینو مایورانا μ_{ij} در μ_B برای پارامترهای GUT در مقیاس بزرگ: $A_0=500\text{Gev}$ و $m_0=m_{1/2}=1000\text{Gev}$ و $\tan\beta=19$. $\langle\mu\rangle_0$ بازه مربوط به گستره NME در روش های مختلف [۷].

ij	LSSM	(R)QRPA	IBM
	مکانسیم حلقه لپتون-S لپتون		
$\epsilon_{\mu,et}$ $\mu\tau$	(3.48,3.48) 10^{-17} (3.26,3.57) 10^{-17}	(2.22,3.48) 10^{-17} (1.86, 3.08) 10^{-17}	(2.62,3.12) 10^{-17} (2.19,2.61) 10^{-17}
	مکانسیم حلقه کوآرک-S کوآرک بدون اختلاط کوآرک-d		
$\epsilon_{\mu,et}$ $\mu\tau$	(2.53,2.53) 10^{-18} (2.32,2.54) 10^{-18}	(1.61,2.53) 10^{-18} (1.32,2.19) 10^{-18}	(1.90,2.27) 10^{-18} (1.56,1.86) 10^{-18}
	مکانسیم حلقه کوآرک-S کوآرک با اختلاط کوآرک-d		
$\epsilon_{\mu,et}$ $\mu\tau$	(2.15,2.15) 10^{-18} (2.03,2.22) 10^{-18}	(1.37,2.15) 10^{-18} (1.16,1.92) 10^{-18}	(1.62,1.93) 10^{-18} (1.36,1.62) 10^{-18}

می بینیم که تفاوت در گشتاور مغناطیسی برای عناصر هسته ای مختلف ناچیز است و بازه ها اغلب با یکدیگر همپوشانی می شوند. همانطور که انتظار می رود LSSM نتایج بهتری می دهد،

SID



سرویس های
ویژه



سرویس ترجمه
تخصصی



کارگاه های
آموزشی



بلاگ
مرکز اطلاعات علمی



عضویت در
خبرنامه



فیلم های
آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛
شبکه های توجه گرافی
(Graph Attention Networks)



کارگاه آنلاین آموزش استفاده از
وب آوساینس



کارگاه آنلاین مقاله روزمره انگلیسی