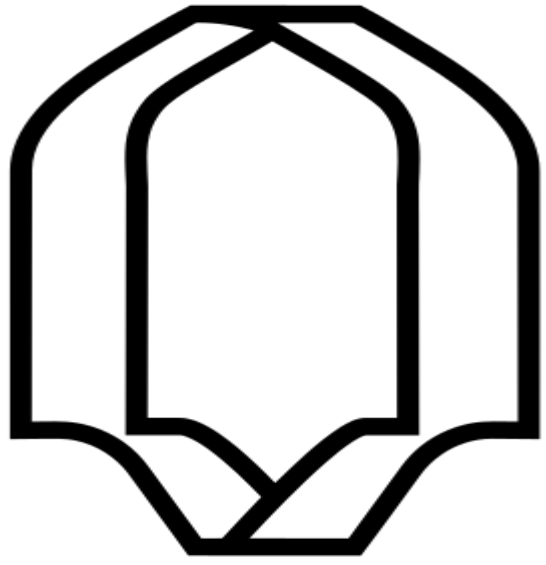




دانشگاه زنجان



انستیتو فیزیک

به نام خدا

شانزدهمین همایش ملی نجوم و اخترفیزیک ایران

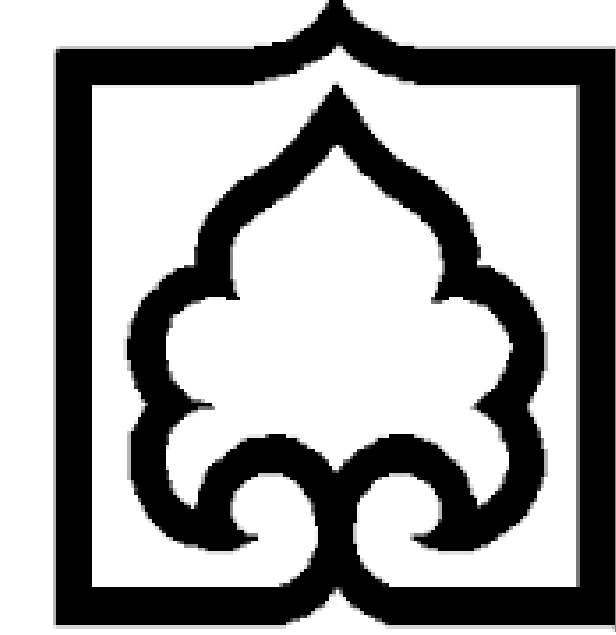
نوسان سالانه و روزانه نرخ برهم کنش نوترینوهای خورشیدی در آشکارسازهای حالت جامد

دین محمدی، ابوالفضل^۱؛ صفری، حسین^۲؛ میرابوالفتحی، نادر^۳

^۱گروه فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان

^۲ دانشکده فیزیک و نجوم، دانشگاه A&M تگزاس، آمریکا

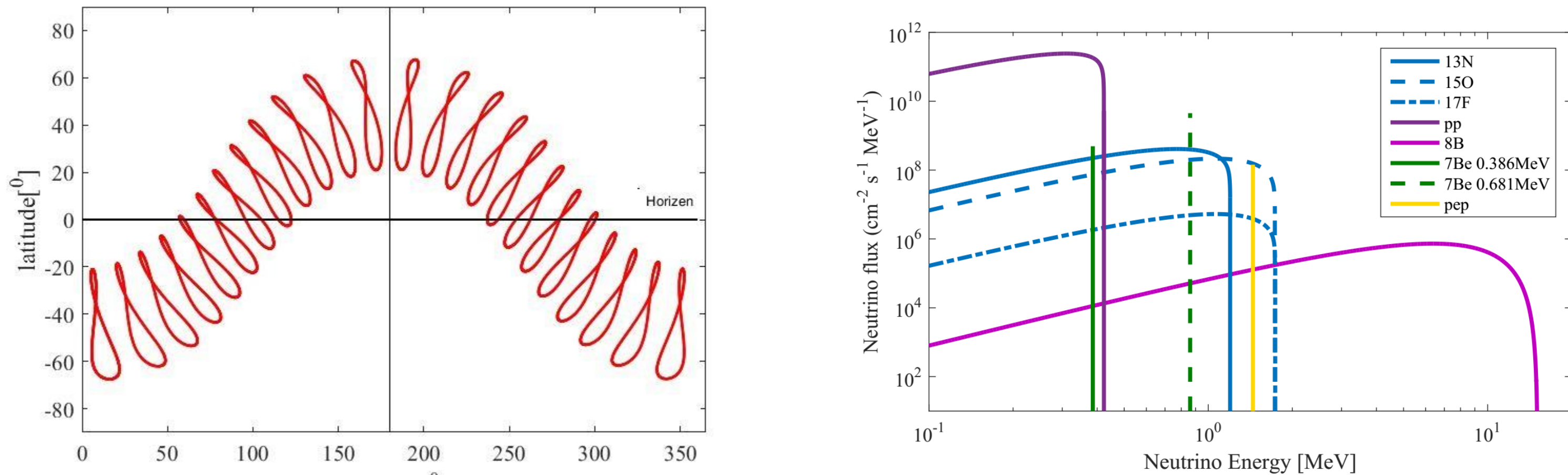
شماره همراه (دین محمدی): ۰۹۱۲۸۴۱۲۰۳۱



دانشگاه زنجان

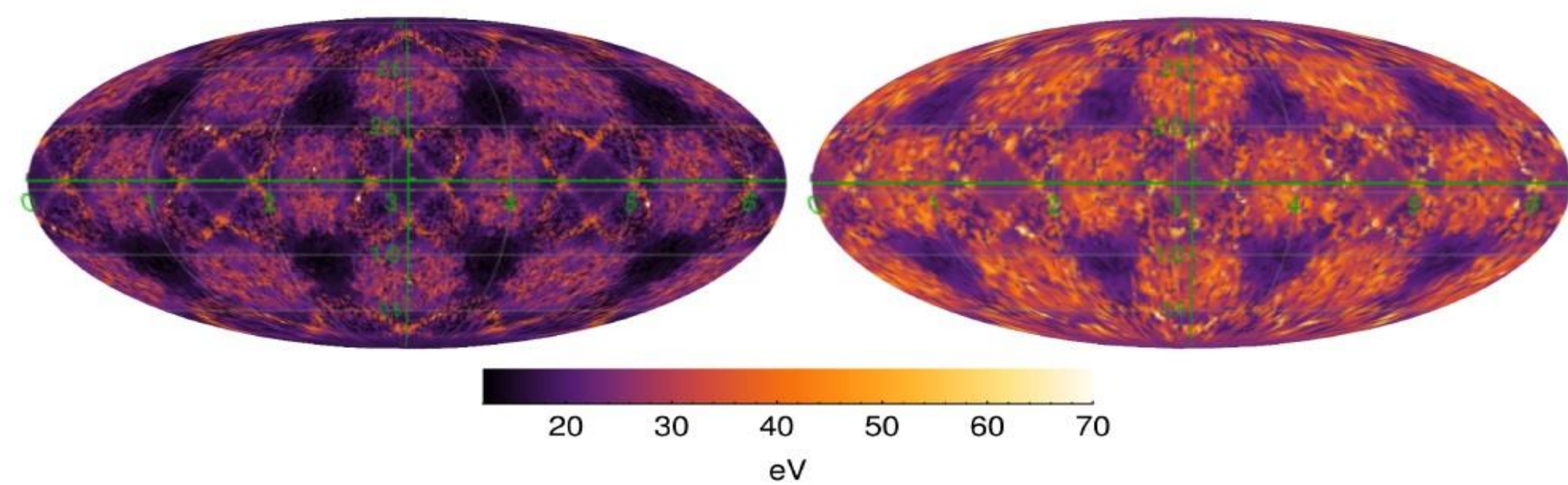
مقدمه

خورشید همانند سایر ستارگانی که هیدروژن سوزی دارند انرژی را با همجوشی هسته‌ای در چند مرحله آزاد می کند که معادله کلی آن به صورت $4p + 2e^- \rightarrow ^4He + 2\nu + 26.73\text{Mev}$ است [۱]. انرژی که درخورشید تولید می‌شود در هر ثانیه معادل $2.4 \times 10^{39}\text{Mev}$ است و به تعداد 1.8×10^{38} نوترینو در هر ثانیه به بیرون منتشر می‌کند. شار نوترینوهای خورشیدی در سطح زمین برابر $6.6 \times 10^{10}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ است. بخشی از نوترینوها در چرخه پروتون – پروتون و بخش دیگری در چرخه کربن – ازت تولید می‌شوند. شکل ۱، شار نوترینوهای خورشیدی را بر حسب انرژی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه زمین به دور خود و به دور خورشید حرکت می‌کند میتوان یک نرخ نوسان سالانه و روزانه از برهم کنش نوترینوهای خورشیدی و هسته‌های ماده‌ی آشکارساز بدست آورد. شکل ۱، (سمت چپ) موقعیت خورشید در آسمان برای یکسال که برای طول و عرض جغرافیایی $۴۵/۲$ و $۶/۷$ درجه رسم شده است [۴]. هر یک منحنی‌ها برای یک ساعت در طول روز است.



شکل ۱: (سمت راست) شار نوترینوهای خورشیدی به تفکیک مؤلفه‌های آن. (سمت چپ) موقعیت خورشید در آسمان برای یکسال که برای طول و عرض جغرافیایی $۴۵/۲$ و $۶/۷$ درجه رسم شده است. هر یک منحنی‌ها برای یک ساعت است.

در آزمایشگاههایی که از مواد جامد مخصوصا از ژرمانیوم یا سیلیسیوم استفاده می‌کنند با توجه به اینکه می‌توان از جرم بیشتری در حجم کم استفاده کرد می‌توان نرخ برهم کنش را افزایش داد. در آشکارسازهای حالت جامد اساس کار بر این است که وقتی یک ذره با هسته‌های ماده‌ی آشکارساز برخورد می‌کند اگر انرژی کافی به هسته انتقال دهد باعث ایجاد یک نقصان در پیکربندی آن می‌شود [۵]. در کریستالهای سیلیسیوم و ژرمانیوم انرژی آستانه مؤثر ایجاد نقصان به زاویه‌ی پس‌زنی بستگی دارد. این انرژی با انرژی جانشرانی آستانه حساس به جهت قابل مقایسه است و یک ناهمسانگردی در انرژی آستانه ایجاد می‌کند [۵]. این ناهمسانگردی توسط هولمستروم و همکاران [۶] برای کریستال‌های ژرمانیوم و سیلیسیوم را برای جهت‌های مختلف با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی بدست آمده است. شکل ۲، توزیع زاویه‌ای این انرژی آستانه در سیلیسیوم و ژرمانیوم را نشان می‌دهد [۷]. این انرژی آستانه در محاسبه نرخ برهم کنش به عنوان بازه پایین انتگرال گیری برای جهت‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. در این مقاله ما با در نظر گرفتن تأثیرات جهتی در آشکارسازهای حالت جامد با آستانه‌ی فراپایین یک نوسان روزانه و سالانه از نرخ برهمکنش نوترینوهای خورشیدی با هسته‌های آشکارساز را بدست می‌آوریم. در آزمایشگاههای آشکارسازی مستقیم ماده‌ی تاریک، نوترینوها به عنوان نهایی‌ترین پس زمینه شناخته شده‌اند. شناخت ماهیت برهمکنش نوترینوها با ماده‌ی آشکارساز در آزمایشگاهها می‌تواند نقشه راهی برای جداسازی سیگنال آنها باشد.



شکل ۲: توزیع زاویه‌ای آستانه انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک نقصان در کریستال‌های سیلیسیوم (راست) و ژرمانیوم(چپ). این انرژی برای سیلیسیوم بین $۱۷/۵$ تا $۷۷/۵$ الکترون ولت و برای ژرمانیوم بین $۱۲/۵$ تا $۶۳/۵$ الکترون ولت است.

محاسبه‌ی نرخ برهمکنش نوترینوها

برای محاسبه نرخ برهمکنش نوترینوها از آنالیز ارایه شده در [۲و۳] استفاده می‌کنیم. دیفرانسیل سطح مقطع پراکندگی نوترینو با هسته‌ها به صورت زیر است:

$$\frac{d\sigma}{dE}(E_r, E_\nu) = \frac{G_F^2}{4\pi} Q_W^2 m_N \left(1 - \frac{m_N E_r}{2E^2} \right) F^2(E_r), \quad (1)$$

در اینجا، E_r انرژی پس زنی، E_ν انرژی نوترینو، m_N جرم هسته هدف، $F^2(E_r)$ فرم فاکتور هسته‌ای است و برابر یک در نظر می‌گیریم [2]. $Q_W = A - 2(1 - 2\sin^2\theta_W)Z$. بار ضعیف هسته با Z پروتون و N نوترون، θ_W زاویه اختلاط ضعیف و G_F ثابت جفت شدگی فرمی است. دیفرانسیل نرخ برهم‌کنش بر حسب انرژی و زاویه پس‌زنی به صورت زیر است:

$$\frac{d^2R}{dE_r d\Omega_r} = \frac{N}{2\pi} \Phi(t) \int \frac{d\sigma}{dE_r} \frac{dN}{dE_\nu} \delta(\cos\theta_\odot - f(E_r, E_\nu)) dE_\nu, \quad (2)$$

$$f(E_r, E_\nu) = \frac{\sqrt{E_r} E_\nu + m_N}{\sqrt{2m_N} E_\nu}, \quad (3)$$

در اینجا $\frac{dN}{dE_\nu}$ توزیع انرژی نوترینو و N تعداد اتم‌ها در واحد جرم است. $\theta_\odot$ زاویه بین بردار جهت پس زنی و برداری که جهت خورشید را در هر لحظه نشان می‌دهد. شار نوترینو $\Phi(t)$ با زمان به دلیل تغییر فاصله‌ی زمین از خورشید با رابطه زیر تغییر می‌کند:

$$\Phi(t) = \frac{\Phi_0}{\sqrt{1-e^2} (1-e \cos E(t))}, \quad (4)$$

در این رابطه Φ_0 میانگین شار نوترینو در سطح زمین، e خروج از مرکز مدار زمین و $E(t)$ انحنای خارج از مرکز در زمان t است.

با استفاده از تابع دلتا می‌توان انتگرال روی E_ν را حساب کرد و نرخ دیفرانسیلی را به صورت زیر نوشت:

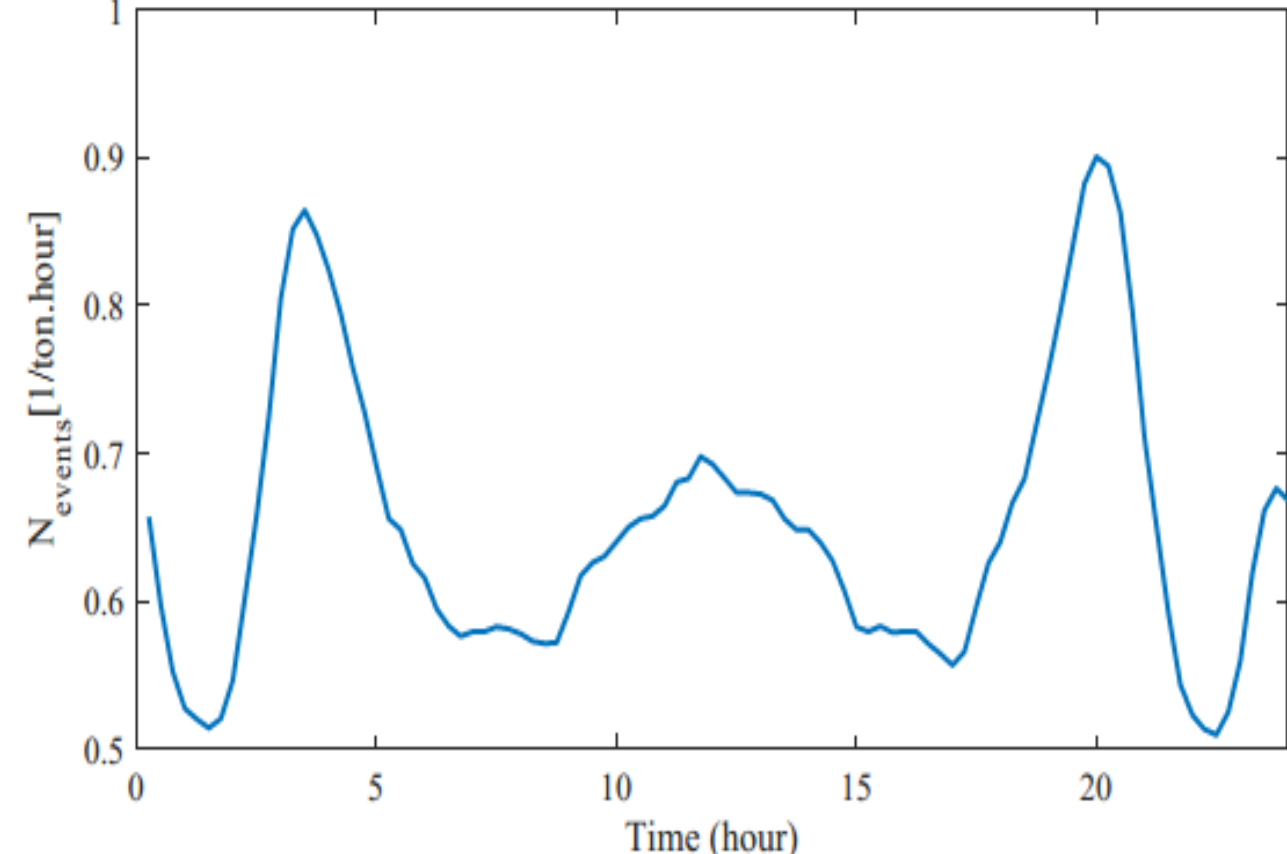
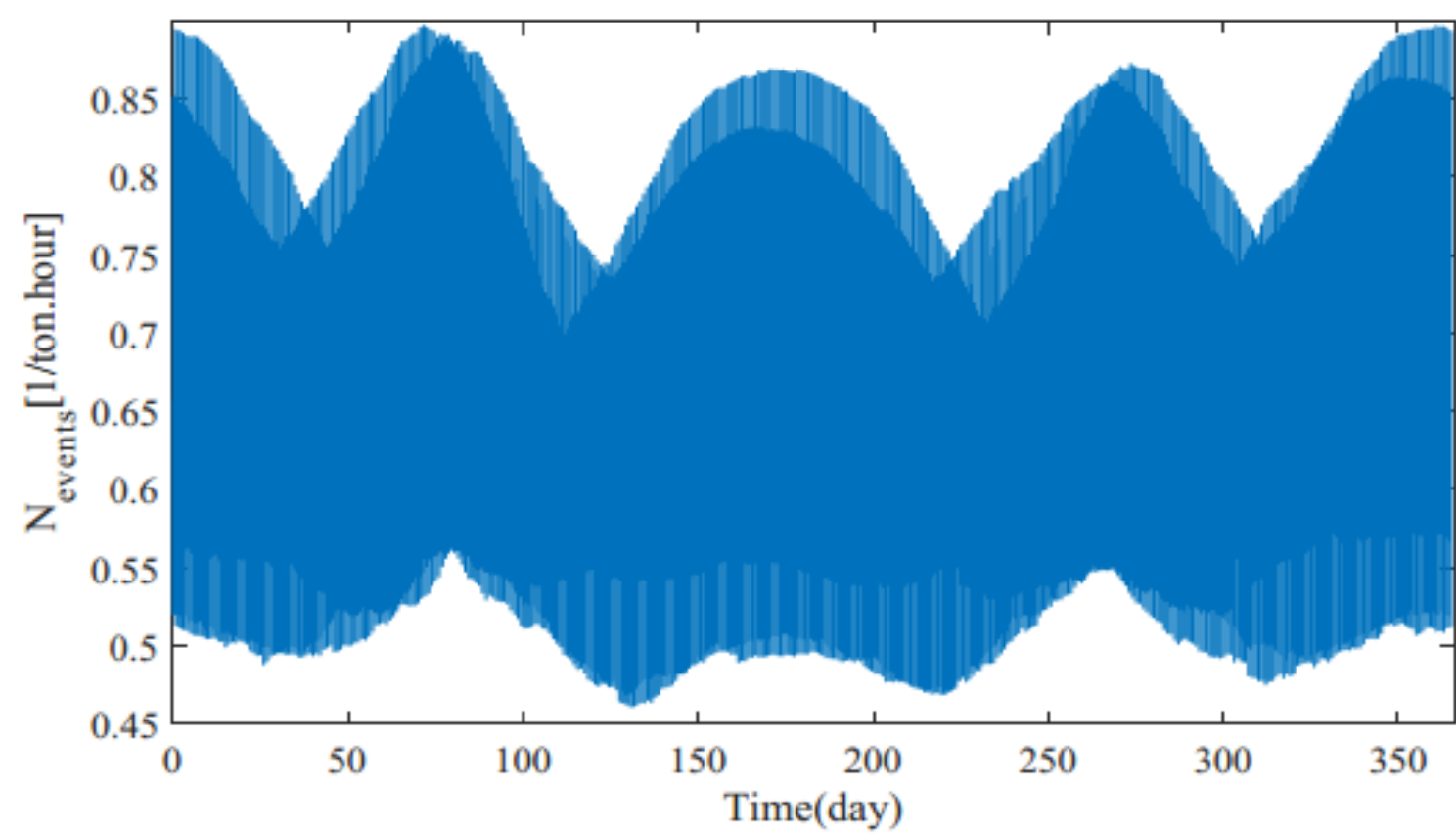
$$\frac{d^2R}{dE_r d\Omega_r} = \frac{\Phi(t)}{2\pi} \frac{\epsilon^2}{E_\nu^{\min}} \frac{d\sigma}{dE_r}(E_r, \epsilon) \frac{dN}{dE_\nu}(\epsilon) \Theta(\cos\theta_\odot), \quad \epsilon = (\cos\theta_\odot / E_\nu^{\min} - 1 / m_N)^{-1} \quad (5)$$

در رابطه‌ی ۵، $E_\nu^{\min} = \sqrt{m_N E_r / 2}$ کمترین انرژی نوترینو برای ایجاد انرژی پس‌زنی است.

برای بدست آوردن نرخ برهمکنش نوترینوها با هسته‌های آشکارساز از معادله ۵، نسبت به E_r انتگرال می‌گیریم و بازه پایین انتگرال گیری را از داده های شبیه‌سازی شده در شکل ۲ برای هر جهت قرار دادیم و مقدار $\frac{dR}{d\cos\theta_\odot}$ برای هرجهت را بدست آوردیم. در آخر برای بدست آوردن نرخ در هر لحظه میانگین $\frac{dR}{d\cos\theta_\odot}$ را برای تمامی جهات بدست آوردیم.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله ما ژرمانیوم به عنوان ماده آشکارساز قرار دادیم و برای نمونه نوسان نرخ برهمکنش نوترینوهای حاصل از را با این نیم رسانا برای یکم ژانویه سال ۲۰۲۰ میلادی بدست آوردیم. شکل ۳، (سمت راست) نمودار این نرخ را نشان می‌دهد. این تغییرات در نرخ برهمکنش روزانه به علت چرخش زمین به دور خود که باعث تغییر در جهت نوترینوها با گذشت زمان می‌شود. همچنین به علت ساختار کریستالی ژرمانیوم و وابستگی انرژی آستانه جانشرانی به جهت این کریستالها است. در شکل ۳، (سمت چپ) سری زمانی این برهمکنش را برای یکسال نیز بدست آوردیم. بیضی بودن مدار زمین باعث تغییرات در شار نوترینوها در سطح زمین می‌شود این تغییرات شار نیز سبب تغییرات نرخ در طول سال می‌گردد. در آزمایشگاههای آشکارسازی مستقیم ماده‌ی تاریک، نوترینوهای خورشیدی به عنوان نهایی‌ترین پس زمینه شناخته شده‌اند. تحلیل وبررسی این سری‌های زمانی و شناخت برهمکنش نوترینوها در این آشکارسازها می‌تواند نقشه راهی برای جداسازی این پس زمینه از سیگنالهای برهمکنش ماده‌ی تاریک باشد.



شکل 3: (سمت راست) نوسان روزانه برهمکنش نوترینوی حاصل از ^{76}Ge برای یکم ژانویه سال 2020. (سمت چپ) نوسان سالانه برهمکنش نوترینوی حاصل از برای سال 2020.

مراجع

[1] آنتونی.سی. فیلیپس؛ « فیزیک ستاره‌ها» میتکران؛ صفحه ۱۴۳ تا ۱۸۳.

[2] Sebastian Sassi, Abolfazl Dinmohammadi, Matti Heikinheimo, Nader Mirabolfathi, Kai Nordlund, Hossein Safari, and Kimmo Tuominen; “Solar neutrinos and dark matter detection with diurnal modulation”; Phys. Rev. D, (2021), 104, 063037.

[3] C. A. J. O’Hare, A. M et al; “Readout strategies for directional dark matter detection beyond the neutrino background”; Phys. Rev. D, (2015),92,063518.

[4] Jenkins, Alejandro. "The Sun’s position in the sky." European Journal of Physics 34, no. 3 (2013): 633.

[5] F. Kadribasic et al.; “Directional Sensitivity in Light-Mass Dark Matter Searches with Single-Electron-Resolution Ionization Detectors”; Phys. Rev. Lett. (2018), 120, 111301. 1.

[6] E. Holmström, A. Kuronen, and K. Nordlund; “Threshold defect production in silicon determined by density functional theory molecular dynamics simulations”; Phys. Rev. B (2008) 78, 045202.

[7] M. Heikinheimo et al.; “Velocity Dependent Dark Matter Interactions in Single-Electron Resolution Semiconductor Detectors with Directional Sensitivity”; Phys. Rev. D, (2019), 99, 103018.