



سن‌یابی کربن ۱۴ با استفاده از THGEM

سعیده خضری پور*^(۱)، محمدرضا رضایی رایینی نژاد^(۲)، علی نگارستانی^(۲)

^(۱)دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده علوم و فناوری های نوین، گروه فوتونیک

^(۲)دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده علوم و فناوری های نوین، گروه مهندسی هسته ای

چکیده:

در این مقاله سعی شده است که یک روش جدید برای محاسبه‌ی اکتیویته‌ی کربن ۱۴ با استفاده از آشکارسازهای THGEM در مد SQS معرفی گردد. اندازه‌گیری اکتیویته‌ی کربن ۱۴ در یک نمونه، کاربردهای زیادی در مطالعات مربوط به سن‌یابی، تعیین میزان آلودگی رادیواکتیو ناشی از رادیوکربن در موجودات و گیاهان موجود در محیط زیست (دریا، زمین و ...) دارد. در این روش نمونه‌ی آلوده به کربن ۱۴، در مقابل یک آشکارساز THGEM قرار می‌گیرد و با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، ابعاد آشکارساز برای اندازه‌گیری نور SQS/ایجاد شده در حفره‌های THGEM بهینه‌سازی شده و رابطه‌ی اکتیویته‌ی کربن ۱۴ به صورت تابعی از تعداد SQS های ایجاد شده بدست می‌آید. نتایج عملی نشان می‌دهد که تکنیک ارائه شده قادر به تشخیص اکتیویته‌ی کربن ۱۴ در موجودات زنده و گیاهان می‌باشد.

کلمات کلیدی: کربن ۱۴، سن‌یابی، آشکارساز THGEM، مد SQS، کد MCNPX

مقدمه:

در طبیعت کربن به صورت سه ایزوتوپ وجود دارد: کربن ۱۲، کربن ۱۳، کربن ۱۴ که این ایزوتوپ‌ها در تعداد نوترون‌های هسته نابرابرند. کربن ۱۲ و ۱۳ پایدار بوده اما کربن ۱۴ رادیواکتیو است و تجزیه می‌شود [۱، ۲]. در هر ۵۷۰۰ سال، از هر مقدار کربن ۱۴ نیمی از آن فرو می‌پاشد و باقیمانده در مدت ۵۷۰۰ سال دیگر تجزیه می‌شود [۳]. در این واپاشی کربن ۱۴ با گسیل یک ذره بتا یا الکترون به نیتروژن ۱۴ تبدیل می‌شود. با در نظر گرفتن میلیاردها سالی که از شکل‌گیری زمین می‌گذرد، هر کربن ۱۴ موجود در آغاز، باید تاکنون فروپاشیده باشد. ولی کربن ۱۴ جدید به طور مداوم از طریق بمباران اتم‌ها در جو به وسیله‌ی پرتوهای کیهانی تولید می‌شوند. مقدار تشکیل این کربن‌های جدید تقریباً معادل با مقدار فروپاشی است. بنابراین همواره مقدار اندکی کربن ۱۴ در جو موجود است که هنوز فروپاشی نکرده است. اتم‌های کربن ۱۴، پس

^۱ Thick Gas Electron Multiplier



از تشکیل به سرعت با اکسیژن ترکیب و به صورت $^{14}\text{CO}_2$ ، در فضا منتشر می‌شوند و سپس از طریق واکنش با آب‌های سطحی اقیانوس‌ها و انتقال به آب‌های عمیق‌تر و انتقال به چرخه حیات آبزیان، فتوسنتز و ورود به ساختار گیاهان و

نهایتاً تغذیه حیوانات علفخوار و گوشتخوار و انتقال به بدن حیوانات و انسانها، وارد ذخیره جهانی کربن در کره زمین می‌شوند [۴، ۵]. لذا حیوانات نیز مقدار معینی کربن ۱۴ در بافت‌هایشان دارند [۶، ۷]. کربن ۱۴ به طور مداوم از طریق نوترون‌گیری ازت ۱۴ در اتمسفر بالایی تولید می‌شود. تولید کربن ۱۴ در اتمسفر در وضعیت موازنه با تجزیه پرتوزای آن قرار دارد و مادامی که بمباران پرتو کیهانی منظم است، کل ذخیره کربن ۱۴ کره زمین مقدار ثابتی است که از آن می‌توان برای سن یابی استفاده کرد. با مشخص کردن اینکه چه مقدار از هسته‌ی رادیواکتیو باقی مانده است می‌توان مشخص کرد که چند نیمه عمر ماده سپری شده و چون نیمه عمر عناصر مشخص است می‌توان سن نمونه را محاسبه نمود [۸]. به کمک زمان سنجی کربن ۱۴ طول عمر اجسام را تا ۶۰۰۰۰ سال می‌توان تعیین کرد. در رسوباتی که بیش از ۴۰۰۰۰ سال عمر داشته باشند تمامی کربن ۱۴ به ^{14}N تبدیل گشته و لذا کربن ۱۴ کلاً از بین رفته و ناپدید شده است. لذا این روش، اغلب در باستان‌شناسی و تعیین سن رسوبات به‌کار می‌رود [۹]. امروزه دانشمندان بدون بهره‌گیری از روش‌های دستگاهی سن یابی، قادر به تشریح سن نمونه‌های مختلف نیستند. کربن ۱۴ رادیوایزوتوپی با نیمه عمر ۵۷۰۰ سال است که برای سن‌یابی در باستان‌شناسی و نمونه‌ها کاربرد بسیار زیادی دارد. ایزوتوپ C-14 که در ۲۷ فوریه ۱۹۳۰ کشف شد در سن‌یابی کربن پرتوزا مورد استفاده است و تنها روشی است که با آن سن نمونه‌های کربن‌دار تخمین زده می‌شود [۱۰-۱۲].

مهم‌ترین جزء در سن یابی کربن ۱۴، دستگاه اندازه‌گیری اکتیویته‌ی کربن ۱۴ در نمونه‌ی مورد بررسی است. تاکنون از دستگاه‌های مختلفی مانند کنتور گایگر مولر و ... برای اندازه‌گیری اکتیویته استفاده شده است [۱۳-۱۶]. سه ناحیه‌ی اتاقک یونیزاسیون، ناحیه‌ی تناسبی و ناحیه‌ی گایگر مهم‌ترین نواحی عملکرد آشکارسازهای گازی هستند که در آنها مولکول‌های گاز تحت تاثیر ولتاژهای بالا، یونیزه می‌شوند. برخی مطالعات بین سال‌های ۱۹۶۶ تا ۱۹۷۰ نشان دادند که تحت شرایط خاصی، پاسخ اتاقک‌های سیمی به‌صورت پالس‌های سریع است [۱۷، ۱۸]. این پالس‌ها در مطالعاتی که تا اوایل سال ۱۹۷۹ ادامه یافت به نام مد نواری محدود آشناخته می‌شدند [۱۹-۲۲] تا اینکه در همان سال ۱۹۷۹ توسط الکسیو^۲ ستون خود فرو نشان‌ی^۳ SQS نام گرفت [۲۳]. در این تحقیق سعی شده است که با معرفی و تست روش جدید با استفاده از آشکارساز

^۲ limited streamer mode

^۳ Alekseev

^۴ Self-Quenching Streamer(SQS)

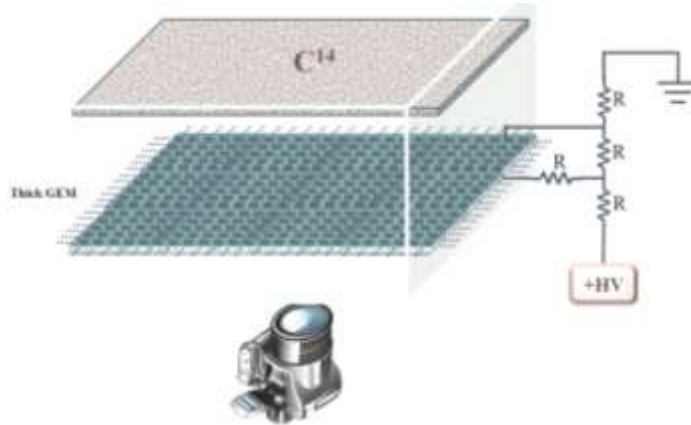


THGEM در مد SQS، دستگاه مناسبی جهت سن یابی کربن ۱۴ در مطالعات باستان‌شناسی، گیاهان زمینی (چوب‌ها، برگ‌ها، منسوجات)، مواد ارگانیک رسوبات دریایی، پستانداران زمینی (شاخ‌ها، کرک و پشم، استخوان و دندان‌ها) طراحی گردد. در ادامه با استفاده از روش‌های تجربی و شبیه‌سازی مبتنی بر کد MCNPX، نتایج مربوطه بدست خواهد آمد.

روش کار :

برای اندازه‌گیری بقایای کربن ۱۴ نمونه را می‌سوزانند تا به صورت گاز متان یا اتان دربیاید گاز حاصل را که دارای کربن ۱۴ است به مدت یک ماه درون یک محفظه نگه می‌دارند در این مدت ترکیبات اورانیوم که ممکن است باعث اندازه‌گیری غیر واقعی عمر شوند واپاشیده شده و مقدارشان به حداقل می‌رسد. این نمونه به عنوان چشمه‌ی بتا با انرژی 0.156 MeV (که ناشی از واپاشی اتم کربن ۱۴ است) مورد استفاده قرار می‌گیرد. دستگاه موردنظر شامل یک آشکارساز THGEM در مد SQS است که شماتیک آن در شکل ۱ رسم شده است. در قسمت بالای آشکارساز THGEM نمونه‌ای از ماده که شامل کربن ۱۴ است قرار داده می‌شود. GEM اولین بار در سال ۱۹۹۷ به عنوان یک تقویت‌کننده توسط فابیو سالی^۰ معرفی شد و طی بیست سال اخیر تلاش‌های فراوانی در توسعه‌ی آن صورت پذیرفته است. مطابق شکل ۱، قسمت بالای THGEM که در معرض چشمه قرار می‌گیرد به زمین اتصال دارد و قسمت پایین آن نیز به سر مثبت High voltage متصل است. کل پیکربندی داخل یک محفظه با دیواره‌های پلکسی‌گلاس با ضخامت 0.5 cm قرار می‌گیرد و داخل محفظه با گاز P-10 پر شده است. ابعاد THGEM برابر با $6 \times 6 \text{ cm}^2$ با ضخامت کلی ۴۰۰ میکرومتر است (۳۵۰ میکرومتر ضخامت Fr4 و ۲۵ میکرومتر ضخامت هر یک از دو لایه‌ی مس). تعداد ۳۷۲۱ حفره با فاصله‌ی 1 mm بر روی هر یک از آنها تعبیه شده است. قطر بزرگتر و کوچکتر حفره‌ها به ترتیب 0.7 mm و 0.5 mm می‌باشد.

^۰ Fabio Sauli



شکل شماره (۱): نمای کلی آشکارساز

نتایج :

بررسی امکان رسیدن به مد SQS در آشکارساز THGEM با استفاده از چشمه‌ی بتای ناشی از ^{14}C قرار گرفتن در مد SQS در یک آشکارساز می‌تواند با برآوردن شرط ریدر حاصل شود. شرط ریدر بیان می‌کند که تعداد الکترون‌های ایجاد شده در اثر تکثیر یک الکترون اولیه (Q) برای GEM های ضخیم بایستی بین 10^6 تا 10^7 باشد. طبق این شرط، مقدار بار تولید شده‌ی ناشی از تکثیر الکترون‌های اولیه (Q)، برای آشکارسازهای مقیاس-ریز باید در رابطه‌ی (۱) صدق کند [۲۴].

$$Q = (E/W) A e^{\alpha V} \quad (1)$$

W انرژی لازم برای تولید یک زوج یون در گاز آشکارساز می‌باشد. A و α پارامترهای آزاد در آشکارساز هستند که به ترتیب برابر با ۰/۰۴۵۰۵ و ۰/۰۲۱۲۹ می‌باشند. از آنجاکه برای گاز P-10، $W = 26.5 \text{ eV}$ می‌باشد با گرفتن لگاریتم از طرفین معادله‌ی (۱)، به معادله‌ی (۲) می‌رسیم:

$$\log(E) = -3.23 + \log(Q) + 0.4243\alpha V \quad (2)$$

طبق شرط ریدر برای حالتی که Q برابر با 10^7 باشد، رابطه‌ی V به صورت معادله‌ی (۳) است:



بیست و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۸۰۷ اسفندماه ۱۳۹۸- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران

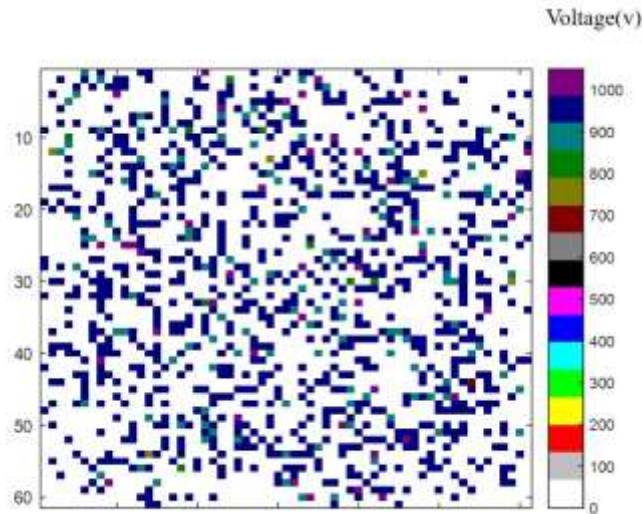


$$V = \frac{3.42 - \log(E)}{0.4343\alpha} \quad (3)$$

برای محاسبه‌ی E که انرژی جذب شده در گاز در ناحیه‌ی فعال آشکارساز است بایستی محل و نواحی فعال GEM مشخص شود. برای مشخص شدن نواحی فعال توزیع دوز بتا محاسبه شود.

محاسبه‌ی انرژی بجامانده در نواحی فعال و ولتاژ قابل اعمال به آشکارساز جهت رسیدن به مد SQS:

برای محاسبه ی دوز بایستی ناحیه‌ی فعال مشخص شود، این ناحیه دقیقاً در بالای THGEM و چسبیده به آن واقع شده است و ضخامت آن در حدود ۴۰۰ میکرومتر می‌باشد. با استفاده از شبیه‌سازی انرژی بجامانده‌ی بتا در این ناحیه محاسبه شده است. با جایگذاری انرژی بجامانده در معادله ی آخری می‌توان ولتاژ اعمالی برای رسیدن به مد SQS را بدست آورد. مد SQS مدی است که با ورود یک ذره ی باردار مانند بتا به ناحیه‌ی فعال آشکارساز، یک باریکه ی نور مشاهده می‌شود. این باریکه ی نور را میتوان توسط یک دوربین عکاسی ثبت نمود. توزیع ولتاژ قابل اعمال به دو سر آشکارساز با استفاده از شبیه‌سازی طبق شکل ۲ بدست می‌آید.



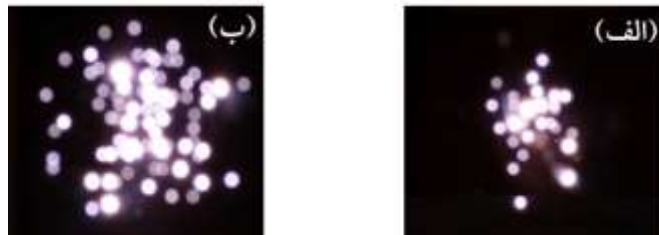
شکل شماره (۲): توزیع ولتاژ قابل اعمال به دو سر آشکارساز

محاسبه‌ی اکتیویته و تعیین سن نمونه:

با استفاده از شبیه‌سازی رابطه‌ی بین واپاشی کربن ۱۴ (D) و تعداد ستون‌های نور مشاهده شده در حفره‌های GEM (h) به صورت معادله‌ی (۴) محاسبه شده است:

$$D = 238 \times h^{0.55} \quad (4)$$

در قسمت تجربی با اعمال ولتاژ شبیه‌سازی شده به دو سر THGEM، دستگاه در مد SQS قرار گرفته و ستون‌های نور بر روی حفره‌های GEM مشاهده می‌شوند با استفاده از یک دوربین عکاسی تصویری از ستون‌های نور مربوط به ذرات بتای ناشی از واپاشی کربن ۱۴ موجود در نمونه، در مدت ۱۶۰ ثانیه به ازای ۷۰۰ ولت و ۹۵۰ ولت ثبت شده است (شکل ۳ الف و ب).



شکل شماره (۳) : تصویری از ستون‌های نور مربوط به ذرات بتای ناشی از واپاشی کربن ۱۴ موجود در نمونه الف- 700 v ب- 950

با توجه به تصویر مربوطه تعداد ستون‌های نور شمرده شده در این مدت زمان برابر ۸۲ می‌باشد. با تقسیم عدد D بدست آمده بر مدت زمان پرتودهی (۱۶۰ ثانیه)، اکتیویته‌ی نمونه‌ی ۷۰ گرمی برابر $17/2 \text{ Bq}$ و اکتیویته‌ی ویژه‌ی آن (اکتیویته تقسیم بر جرم یا A_0) برابر $0/245 \text{ Bq/g}$ خواهد بود. اگر 100 g زغال سنگ در مدت ۳۰۰ ثانیه در بالای آشکارساز قرار گیرد تعداد ستون‌های نور شمرده شده در این مدت زمان برابر ۲۸ و اکتیویته برابر $0/052 \text{ Bq/g}$ خواهد بود. با جایگزینی اکتیویته در معادله‌ی سن یابی در رابطه (۵)، سن نمونه‌ی مورد نظر ۱۲۴۲۳ سال بدست می‌آید.

$$T = -8033 \ln (A/A_0) \quad (5)$$

بنابراین سن یابی کربن ۱۴ با استفاده از آشکارساز THGEM در مد SQS روش مناسبی برای بدست آوردن سن عناصر حیاتی و زیستی که با هوا تماس دارند می‌باشد.

نتیجه گیری :



در این تحقیق یک روش جدید جهت سن‌بازی براساس اندازه‌گیری اکتیویته‌ی کربن ۱۴ با استفاده از آشکارساز THGEM در مد SQS معرفی شده است. برای این کار ابتدا یک معادله‌ی مهم با استفاده از کد MCNPX

استخراج می‌شود که نشان دهنده‌ی تعداد واپاشی در نمونه‌ی قرار داده شده در بالای آشکارساز THGEM برحسب تعداد حفره‌هایی است که در آنها ستون نور SQS اتفاق افتاده است. سپس نمونه‌های شاهد و نمونه‌ی مجهول را در بازه‌های زمانی مشخصی در بالای آشکارساز قرار داده و با ثبت SQS های اتفاق افتاده توسط یک دوربین CMOS و قرار دادن این تعداد در معادله‌ی معرفی شده، تعداد واپاشی در نمونه محاسبه و با تقسیم این عدد بر جرم و زمان پرتودهی، اکتیویته‌ی نمونه‌ی شاهد و مجهول بدست می‌آید و با استفاده از معادله‌ی اکتیویته‌ی وابسته به زمان کربن ۱۴، سن نمونه‌ی مجهول قابل استخراج است.

مراجع:

- [1] D. H. Menzel, "The identification and cosmic abundance of carbon isotopes," *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 42, pp. 34-36, 1930.
- [2] J. Buckley, "Isotopes' radiocarbon measurements X," *Radiocarbon*, vol. 15, pp. 280-298, 1973.
- [3] H. Godwin, "Half-life of radiocarbon," *Nature*, vol. 195, pp. 984-984, 1962.
- [4] W. F. Libby, E. C. Anderson, and J. R. Arnold, "Age determination by radiocarbon content: world-wide assay of natural radiocarbon," *Science*, vol. 109, pp. 227-228, 1949.
- [5] G. A. Goodfriend and J. J. Stipp, "Limestone and the problem of radiocarbon dating of land-snail shell carbonate," *Geology*, vol. 11, pp. 575-577, 1983.
- [6] M. J. DeNiro and S. Epstein, "Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals," *Geochimica et cosmochimica acta*, vol. 42, pp. 495-506, 1978.
- [7] E. Fichtler, D. A. Clark, and M. Worbes, "Age and long-term growth of trees in an old-growth tropical rain forest, based on analyses of tree rings and ^{14}C ," *Biotropica*, vol. 35, pp. 306-317, 2003.
- [8] W. F. Libby, "Dating by radiocarbon," *Accounts of Chemical Research*, vol. 5, pp. 289-295, 1972.
- [9] F. Johnson, "Radiocarbon dating and archeology in North America," *Science*, vol. 155, pp. 165-169, 1967.
- [10] S. Bowman, *Radiocarbon dating* vol. 1: Univ of California Press, 1990.
- [11] K. C. Druffel-Rodriguez, D. Vetter, S. Griffin, E. R. Druffel, R. B. Dunbar, D. A. Mucciarone, *et al.*, "Radiocarbon and stable isotopes in Palmyra corals during the past century," *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 82, pp. 154-162, 2012.
- [12] X. Liu, H. V. Hunt, and M. K. Jones, "River valleys and foothills: changing archaeological perceptions of North China's earliest farms," *Antiquity*, vol. 83, pp. 82-95, 2009.



- [13] M. Eidinoff, "Measurement of radiocarbon as carbon dioxide inside Geiger-Müller counters," *Analytical Chemistry*, vol. 22, pp. 529-534, 1950.
- [14] P. Williams, H. Oeschger, and P. Kinney, "Natural radiocarbon activity of the dissolved organic carbon in the North-east Pacific Ocean," *Nature*, vol. 224, p. 256, 1969.
- [15] A. Michczyński, T. Goslar, A. Pazdur, and M. F. Pazdur, "A data acquisition system for proportional counters at Gliwice," *Radiocarbon*, vol. 37, pp. 781-787, 1995.
- [16] R. Taylor, "Radiocarbon dating: Development of a noble method," in *Radiocarbon and Climate Change*, ed: Springer, 2016, pp. 21-44.
- [17] H. Neuert, "Kernphysikalische Meßmethoden," *Karlsruhe, G. Braun*, 1966.
- [18] G. Charpak, "Evolution of the automatic spark chambers," *Annual review of nuclear science*, vol. 20, pp. 195-254, 1970.
- [19] R. Bouclier, G. Charpak, and Z. Dim, "ovski, HG Fisher, F. Sauli, G. Coignet and G. Flfigge," *Nucl. Instr. and Meth*, vol. 88, p. 149, 1970.
- [20] J. Fischer, H. Okuno, and A. Walenta, "Spatial distribution of the avalanche in proportional counters," *Nuclear Instruments and Methods*, vol. 151, pp. 451-460, 1978.
- [21] G. Alekseev, N. Kalinina, V. Karpukhin, D. Khazins, and V. Kruglov, "On a high-current mode of wire-chamber performance," *Nuclear Instruments and Methods*, vol. 153, pp. 157-159, 1978.
- [22] G. Battistoni, E. Iarocci, M. Massai, G. Nicoletti, and L. Trasatti, "Operation of limited streamer tubes," *Nuclear Instruments and Methods*, vol. 164, pp. 57-66, 1979.
- [23] G. Alekseev, D. Khazins, and V. Kruglov, "Self-quenching streamer discharge in a wire chamber," *Lettere al Nuovo Cimento (1971-1985)*, vol. 25, pp. 157-160, 1979.
- [24] V. Peskov and P. Fonte, "Research on discharges in micropattern and small gap gaseous detectors," *arXiv preprint arXiv:0911.0463*, 2009.