



## ارزیابی آشکارساز Micromega به روش المان محدود برای قطبش‌سنجی پرتو ایکس

الهام عدالتخواه\*

پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

\*Email: eedalatkhah@aeoi.org.ir

مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۹/۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۹

### چکیده

در این پژوهش عملکرد یک آشکارساز گازی میکرو از نوع صفحه موازی، آشکارساز Micromega، برای قطبش‌سنجی پرتو ایکس ارزیابی شد. بدین منظور از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics که قابلیت حل معادلات دیفرانسیل را برپایه روش المان محدود دارد استفاده شد. بدین ترتیب که با حل معادله پواسون در هندسه آشکارساز، میدان الکتریکی در نقاط مختلف به دست آمد. سپس بهره آشکارساز با استفاده از میدان الکتریکی به دست آمده و حل معادله پیوستگی محاسبه شد. نتایج نشان دادند آشکارساز شبیه‌سازی شده در ولتاژ ۴۰۰ V بهره‌ای برابر ۱۰۰ دارد. نتایج به دست آمده با نتایج شبیه‌سازی این آشکارساز با کد Garfield هم‌خوانی خوبی دارند که مؤید درستی شبیه‌سازی انجام شده به روش المان محدود است. این آشکارساز با توجه به ویژگی‌های خوبی مانند توان تفکیک بالا، سطح حساس بزرگ و قابلیت عملکرد در شار بالای ذرات، ابزار مناسبی برای قطبش‌سنجی پرتو ایکس می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** آشکارساز گازی میکرو، Micromega، آشکارساز پرتو ایکس، روش المان محدود

## Assessment of a Micromega detector based on Finite Element Method for X-ray polarimetry

E. Edalatkhah\*

Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box:11365-3486, Tehran-Iran

Technical Paper

Received 28.11.2021 Accepted 28.2.2022

### Abstract

Performance of a micropattern gaseous detector of parallel plate type, a Micromega detector, was assessed for X-ray astronomical studies in this research. For this purpose, COMSOL Multiphysics software which solves differential equations based on Finite Element Method was used. Thus, by solving Poisson equation in the detector geometry, electric field in each point was obtained. Gain of the detector was estimated by using the obtained electric field and solving continuity equation. Results show that simulated detector gain was 100 at voltage of 400 V. Obtained results corresponds well with the results of simulation of the detector with Garfield code which verifies the performed simulation. This detector is a proper tool for X-ray polarimetry with respect to its good characteristics such as high resolution, large area and good performance at high flux.

**Keywords:** Micropattern gaseous detectors, Micromega, X-ray telescope, COMSOL



## ۱. مقدمه

اختر فیزیک پرتو ایکس امکان مشاهده بسیاری از پدیده‌های مهم جهان را فراهم می‌آورد. استخراج اطلاعات از پرتوهای الکترومغناطیس در اخترشناسی اساساً بر چهار شاخه استوار است: نورسنجی، تصویربرداری، اسپکتروسکوپی و قطبش‌سنجی. نورسنجی، تصویربرداری و اسپکتروسکوپی در گستره انرژی پرتو ایکس نرم (10 keV-1 keV) با مأموریت‌های مشهور انجام شده به خوبی شناخته شده‌اند، در حالی که قطبش‌سنجی پرتو ایکس همچنان بحث‌برانگیز است [۱]. مطالعات قطبش‌سنجی با وجود انجام آزمایشات معدود در ماهواره‌ها، پیشرفت‌های زیادی چون کشف تابش سینکروترون از سحابی خرچنگ [۲]، مطالعه ترکیب اجرام منظومه شمسی [۳]، نقشه‌برداری و تحلیل میدان‌های مغناطیسی کهکشانی بزرگ مقیاس [۴] را در پی داشته است.

قطبش‌سنجی پرتو ایکس به عنوان آخرین وجه ناشناخته اخترشناسی پرتو ایکس، با اندازه‌گیری قطبش فوتون براساس فرایندهای فیزیکی مانند اثر فتوالکتریک، پراکندگی تامسون و پراکندگی کامپتون انجام می‌شود [۵]. با توسعه آشکارسازهای گازی در اواخر دهه نود و معرفی آشکارسازهای گازی میکرو، تمایل دانشمندان برای تحقیق در این زمینه افزایش یافت. در واقع این آشکارسازها سبب ارتقای قطبش‌سنج‌های متداول شدند [۶، ۷].

آشکارسازهای گازی طی چند دهه اخیر خصوصاً در فیزیک ذرات به صورت گسترده‌ای استفاده شده‌اند. این دوره در اواخر دهه ۱۹۶۰ با معرفی اتاقک تناسبی چند سیم<sup>۱</sup> توسط Charpak آغاز شد. بدین ترتیب برای اولین بار امکان تعیین مکان ذرات باردار، فوتون‌های ایکس و نوترون‌های حرارتی با دقت زیر میلی‌متر در سطح حساس بیش از یک مترمربع فراهم شد. در آغاز دهه ۱۹۹۰ با توسعه صنعت نیمه‌هادی دسته جدیدی از ابزارهای گازی تحت نام کلی آشکارسازهای گازی ریز الگو (Micro Pattern Gas Detector or MPGD) معرفی شدند. این آشکارسازها با ساختارهای بازخوانی ریزمقیاس (از مرتبه  $\mu\text{m}$ ) مشخص می‌شوند [۸].

ویژگی‌های خوب آشکارسازهای گازی میکرو سبب گسترش روزافزون کاربردهای آن‌ها در زمینه‌های گوناگون شده است. Micromesh GAs detector (MICROMesh GAs detector) از آشکارسازهای گازی میکرو از نوع صفحه موازی است [۸] که با توجه به توان تفکیک بالا، سطح حساس بزرگ و قابلیت عملکرد

در شار بالای ذرات، در آزمایشاتی چون CAST [۹]، کاربرد این آشکارساز در آزمایشات نوترینوی کم انرژی درحال توسعه است. این آشکارساز هم‌چنین ابزار مناسبی برای قطبش‌سنجی پرتو ایکس می‌باشد. ناسا در سال ۲۰۰۶ از یک قطبش‌سنج Micromesh جهت مطالعات اختر فیزیک استفاده نموده است [۱۲].

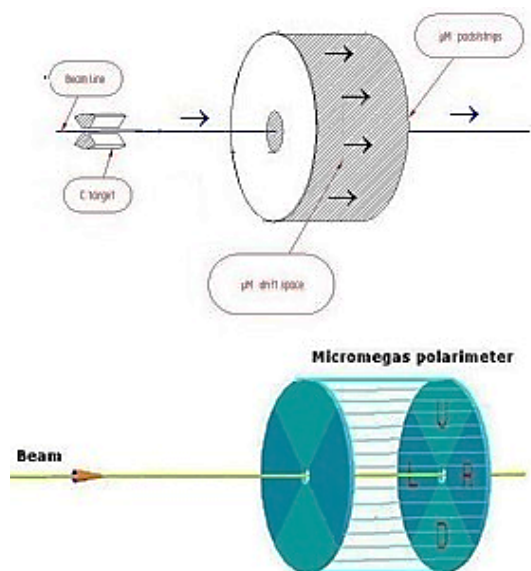
هدف این پژوهش، ارزیابی آشکارساز Micromesh برای قطبش‌سنجی پرتو ایکس است. واضح است که شبیه‌سازی آشکارساز Micromesh می‌تواند به درک بهتر فرایندهای یونش گاز و تولید بهممن الکترونی و بهینه کردن طراحی آن بیانجامد. در سال ۲۰۰۷، این آشکارساز با استفاده از برنامه Garfield، کد توسعه یافته سرن برای شبیه‌سازی عملکرد آشکارسازهای گازی، شبیه‌سازی شد [۱۳]. در این پژوهش، آشکارساز Micromesh با استفاده از نرم‌افزار COMSOL شبیه‌سازی شد، بهره آن ارزیابی گردید و نتایج مقایسه شدند.

## ۲. مواد و روش‌ها

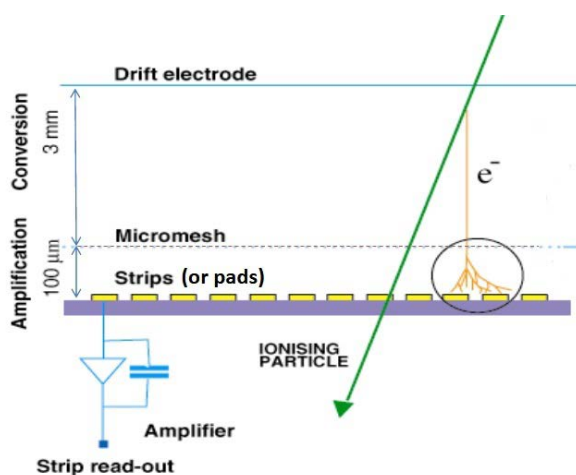
قطبش‌سنجی پرتوهای ایکس بر اساس فرایندهای فیزیکی متفاوتی بسته به انرژی آن‌ها در سه ناحیه انجام می‌شود. پراش بر بلور و آینه‌های چند لایه در ناحیه انرژی پایین‌تر از 1 keV استفاده می‌شود. در گذشته برای انرژی‌های بالاتر تا چند ده keV پراکندگی تامسون به کار می‌رفت و امروزه اثر فتوالکتریک استفاده می‌شود. در انرژی‌های بالاتر نیز پراکندگی کامپتون به کار می‌رود [۱۴].

قطبش‌سنجی در یک آشکارساز گازی از طریق اثر فتوالکتریک انجام می‌شود. در واقع یک فوتون فرودی در گاز به یک فتوالکترون تبدیل می‌شود. سطح مقطع گسیل فتوالکترون به  $\theta$  و  $\phi$ ، زوایای قطبی و سمتی فتوالکترون وابسته است که در شکل ۱ آورده شده‌اند. بردار الکتریکی فوتون فرودی جهت زاویه‌ای صفر  $\phi$  در شکل را تعریف می‌کند. طول مسیر یک فتوالکترون در گاز برای فوتون ایکس نرم از مرتبه چند میلی‌متر است. بدین جهت یک آشکارساز گازی برای قطبش‌سنجی مناسب است [۱۴].





شکل ۲. طرح شماتیک قطبش‌سنج Micromegas [۱۵].



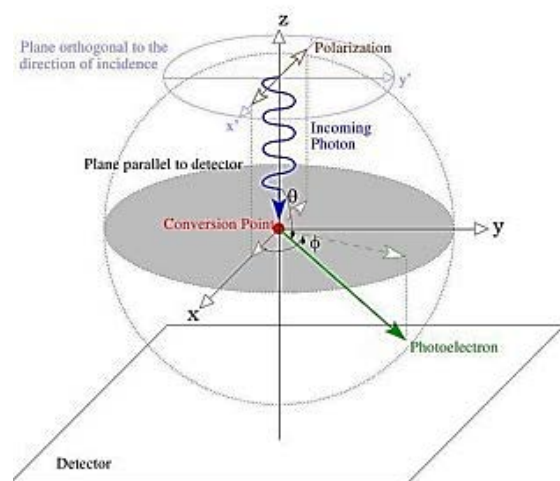
شکل ۳. طرح شماتیک آشکارساز Micromegas [۱۷].

در ابتدا معادله پواسون به منظور تعیین میدان الکتریکی در هندسه آشکارساز حل شد. با حل معادله پواسون، میدان الکتریکی در تمام نقاط (گره‌های رئوس مش در فضا) با توجه به شرایط مرزی یعنی ولتاژ اعمال شده به الکترودها محاسبه گردید. معادلات مربوط در روابط (۱-۲) آورده شده‌اند.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = -\vec{\nabla}\phi(\vec{r}, t) \quad (2)$$

که در آن  $E$  میدان الکتریکی،  $\phi$  پتانسیل الکتریکی است. برای محاسبه بار القایی، ابتدا معادله پواسون با شرایط مرزی دیگری برای به‌دست آوردن میدان وزنی حل شد. در این حالت فرض شد که فضای داخلی خلأ است، ولتاژ اعمال شده به همه الکترودها جز آند صفر است و پتانسیل ۱V به آند داده می‌شود.



شکل ۱. اثر فتوالکتریک [۱۴].

در شکل ۲ طرح شماتیک یک قطبش‌سنج Micromegas آورده شده است. آشکارساز Micromegas نخستین بار در سال ۱۹۹۲ توسط Charpak طراحی شد. سپس در سال ۱۹۹۶ توسط Giomataris به عنوان آشکارساز گازی حساس به مکان در شار بالای ذرات معرفی گردید [۱۵]. با گذشت چند سال از معرفی این آشکارساز، نمونه‌های آن در ابعاد بزرگ توسعه یافتند [۱۶].

آشکارساز Micromegas که در شکل ۳ به صورت شماتیک آورده شده است، شامل الکترودها، گاف گازی به ضخامت چند میلی‌متر (ناحیه رانش) و یک مش فلزی نازک در فاصله  $100 \mu\text{m}$  از الکترودها (ناحیه تکثیر) می‌باشد. نواحی رانش و تکثیر معمولاً با ترکیب گاز نجیب پر می‌شوند [۱۷]. در این پژوهش، به منظور بررسی عملکرد آشکارساز Micromegas از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics استفاده شد. نرم‌افزار COMSOL ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی بسیاری از پدیده‌های فیزیکی است که قابلیت حل معادلات دیفرانسیل را برپایه روش حل عددی المان محدود (Finite Element Method) دارد [۱۸]. برای شبیه‌سازی، ناحیه رانش  $3 \text{ mm}$  و ناحیه تکثیر  $100 \mu\text{m}$  در نظر گرفته شدند. سه عدد حفره به ابعاد  $200 \mu\text{m}$  به عنوان الکترودها در نظر گرفته شد. حجم گازی در نظر گرفته شده به قطر  $3 \text{ mm}$  است که با گاز  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  (۸۰/۲۰) پر شد. الکترودها رانش و مش در پتانسیل منفی نگه داشته شدند و الکترودها بازخوانی زمین شد. پتانسیل‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که میدان الکتریکی در ناحیه رانش  $1 \text{ kV/cm}$  و در ناحیه تکثیر  $50 \text{ kV/cm}$  باشد. از مد الکتروستاتیک مازول AC/DC نرم‌افزار نسخه ۵.۶ استفاده شده است.



ناحیه رانش ۱ kV/cm و در ناحیه تکثیر ۵۰ kV/cm باشد. این آشکارساز براساس تکثیر بارهای الکتریکی تولید شده ناشی از یونش اتم‌های گاز توسط پرتو فرودی عمل می‌کند. ذرات باردار عبوری از فضای رانش، گاز را یونیزه می‌کنند. الکترون‌های آزاد شده به سمت مش حرکت می‌کنند. مش تقریباً نسبت به الکترون‌ها شفاف است چون میدان الکتریکی در ناحیه تکثیر بسیار بیش‌تر از میدان رانش است. الکترون‌ها در ناحیه تکثیر بر اثر میدان الکتریکی بالا شتاب گرفته، الکترون‌های ثانویه تولید شده و در نهایت بهمن الکترونی روی می‌دهد. سیگنال القایی بر الکتروود بازخوانی القا شد.

شکل ۵ بهره آشکارساز برحسب ولتاژ اعمالی به مش را نشان می‌دهد. یادآوری می‌شود پتانسیل‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که میدان الکتریکی در ناحیه رانش ۱ kV/cm و در ناحیه تکثیر ۵۰ kV/cm باشد. در این شکل، داده‌های تحقیق انجام‌شده با کد Garfield در سال ۲۰۰۷ نیز آورده شده است. کد Garfield و نسخه اخیر آن، Garfield++، ابزاری برای شبیه‌سازی آشکارسازهای گازی در فیزیک انرژی بالا می‌باشد که توسط سرن معرفی شده است. این کد از روش تحلیلی انتگرال‌گیری MagBoltz برای محاسبه ضریب تاونسند استفاده می‌کند [۱۳]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، داده‌ها تطابق خوبی باهم دارند. در نظر گرفتن پخش الکترون‌ها در شبیه‌سازی انجام‌شده با نرم‌افزار COMSOL می‌تواند اختلاف میان مقادیر دو روش را توجیه کند. همان‌طوری‌که از یک آشکارساز تناسبی انتظار می‌رود، بهره با افزایش ولتاژ به صورت نمایی افزایش می‌یابد. این امر که تأییدی بر درستی روند شبیه‌سازی انجام شده است، نشان می‌دهد استفاده از نرم‌افزار COMSOL و روش المان محدود می‌تواند درک خوبی از رفتار آشکارسازها ارائه نماید.

پس از محاسبه میدان الکتریکی و میدان وزنی، مقادیر به‌دست آمده برای استفاده در معادله پیوستگی ذخیره شدند. برای حل معادله متغیر با زمان پیوستگی علاوه بر مش‌بندی فضا، زمان را نیز تقسیم‌بندی نموده و معادله را در گام‌های زمانی حل کردیم. تقسیم‌بندی زمانی و مش‌بندی فضا به طور مناسب بر همگرایی در روند حل مسأله بسیار مؤثر است. معادلات مربوط در روابط (۳-۷) آورده شده‌اند.

$$\frac{\partial}{\partial t} n_e + \nabla \cdot \vec{\Gamma}_e = S_e \quad (3)$$

$$\vec{\Gamma}_e = -\mu_e(E) n_e \vec{E} - D_e(E) \nabla n_e \quad (4)$$

$$D_e = \frac{kT_e \mu_e}{|e|} \quad (5)$$

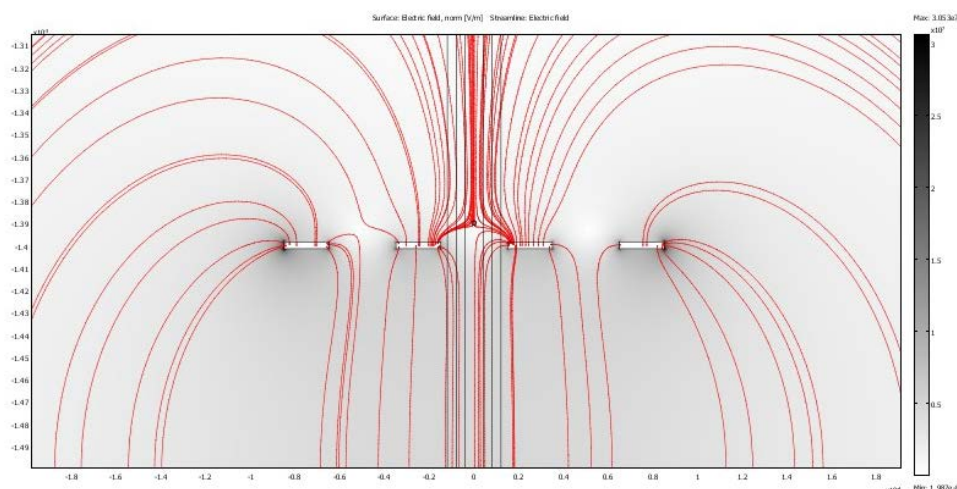
$$\vec{J}_e = -|e| \vec{\Gamma}_e \quad (6)$$

$$S_e = \frac{\alpha(E) |j_e|}{|e|} \quad (7)$$

در این معادلات  $n_e$ ،  $\Gamma_e$ ،  $S_e$ ،  $\mu_e$ ،  $D_e$ ،  $\alpha$ ،  $T_e$  و  $j_e$  به ترتیب نمایانگر غلظت الکترون، چگالی جریان الکترون، منبع الکترون، تحرک الکترون، ثابت پخش الکترون، ضریب تاونسند، دمای الکترون و چگالی جریان نقطه‌ای الکترون هستند [۱۹، ۲۰].

### ۳. نتایج

شکل ۴ خطوط میدان الکتریکی محاسبه شده آشکارساز Micromega با ولتاژ اعمالی ۴۰۰V را نشان می‌دهد. حجم بالای حفره‌ها ناحیه رانش و حجم پایین آن‌ها ناحیه بازخوانی است. تکثیر الکترون‌ها در داخل حفره‌ها (الکتروود مش) انجام می‌شود. واضح است که تراکم خطوط بزرگی میدان را نشان می‌دهد. ولتاژ مذکور به الکتروود مش اعمال شد. لازم به ذکر است پتانسیل‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که میدان الکتریکی در

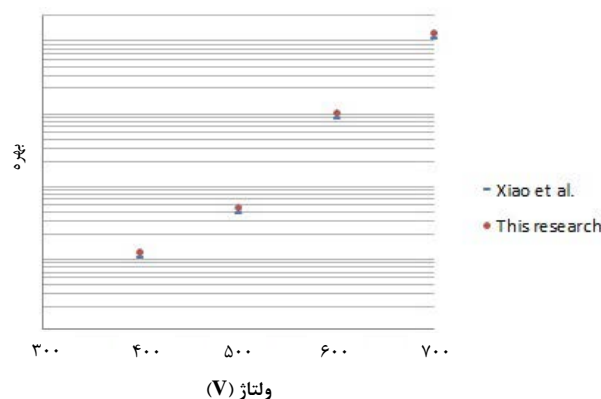


شکل ۴. میدان الکتریکی محاسبه شده در هندسه آشکارساز.





5. D. Bernard, *High angular precision gamma ray astronomy and polarimetry above the pair creation threshold*, *International Conference on Micropattern Gaseous Detectors*, Japan (2011).
6. R. Bellazzinni, et al., *A sealed gas pixel detector for x-ray astronomy*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A.*, **579**, 853 (2007).
7. M. Eingorn, et al., *High energy photon polarimeter for astrophysics*, *Journal of Astronomical Telescopes Instruments and Systems*, **4**, 011006 (2018).
8. F. Sauli, *Micropattern gaseous detectors*, *Annual Review Nuclear. Part. Sci.*, **49**, 341 (1999).
9. S. Anue, et al., *Performance of the micromega detector in the CAST experiment*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A.*, **573**, 38 (2007).
10. C. Bernet, et al., *The 40×40 cm<sup>2</sup> gaseous microstrip detector Micromegas for the high-luminosity COMPASS experiment at CERN*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.*, A. **536**, 61 (2005).
11. T. Alexopoulos, et al., *Development of large size Micromegas detector for the upgrade of the ATLAS muon system*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A.* **617**, 161 (2010).
12. P. Blosser, et al., *The MEGA project: Science goals and hardware development*, *New Astronomy Reviews*, **50**, 619 (2006).
13. Z. Xiao, et al., *Simulation of Micromegas detector by Garfield Program*, *High Energy Physics and Nuclear Physics*, **31**, 1049 (2007).
14. S. Fabiani, *Instrumentation and Future Missions in the Upcoming Era of X-ray Polarimetry*, *Galaxies*, **6**, 54 (2018).
15. Y. Giomataris, et al., *Micromegas: a high granularity position sensitive gaseous detector for high particle flux environments*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A.* **376**, 29 (1996).
16. D. Bernard, et al., *An insulating grid spacer for large area Micromegas chambers*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A.* **481**, 144 (2002).
17. Y. Giomataris, *Development and prospects of the new gaseous detector "Micromegas"*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A.* **419**, 239 (1998).
18. [www.comsol.com](http://www.comsol.com).
19. F. Chen, *Introduction to plasma physics and controlled fusion*, *Second Ed.*, Springer, Los Angeles, (1974).
20. M. Sessa, *Design and construction of Micromegas detectors for the ATLAS Muon Spectrometer Upgrade*, *Nuovo Cimento*, **39**, 266 (2016).



شکل ۵. بهره آشکارساز برحسب ولتاژ.

#### ۴. نتیجه‌گیری

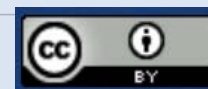
در این مقاله عملکرد آشکارساز Micromega با استفاده از نرم‌افزار COMSOL ارزیابی شد. بدین ترتیب که با در نظر گرفتن پدیده پخش، حرکت الکترون‌ها تا زمان جمع‌آوری بار بر الکتروود بازخوانی شبیه‌سازی گردید. با حل معادلات پواسون و پیوستگی در هندسه آشکارساز، میدان الکتریکی و بهره آشکارساز محاسبه شدند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج شبیه‌سازی این آشکارساز با کد Garfield مقایسه شد. داده‌های به‌دست‌آمده هم‌خوانی خوبی دارند که بر درستی استفاده از نرم‌افزار COMSOL و روش المان محدود برای بررسی عملکرد آشکارسازها تأیید می‌کند. آشکارساز Micromega با توجه به ویژگی‌هایی چون توان تفکیک بالا، سطح حساس بزرگ و قابلیت عملکرد در شار بالای ذرات ابزار مناسبی برای مطالعات اخترشناسی پرتو ایکس مانند قطبش‌سنجی پرتو ایکس است.

#### مراجع

1. E. Costa, et al., *An efficient photoelectric x-ray polarimeter for the study of black holes and neutron stars*, *Nature*, **411**, 662 (2001).
2. J.H. Oort, T. Walraven, *Polarization and composition of the Crab nebula*, *Bull. Astron. Soc. Neth.*, **12**, 285 (1956).
3. E. Bowell, B. Zellner, *Planets, stars, and nebulae: studied with photopolarimetry*, *Proceedings of IAU Colloq.*, 381 (1974).
4. R. Kulsrud, E. Zweibel, *The Origin of astrophysical magnetic fields*, *Rept. Prog. Phys.*, **71**, 046901 (2008).

#### 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

الهام عدالتخواه (۱۴۰۲)، ارزیابی آشکارساز Micromega به روش المان محدود برای قطبش‌سنجی پرتو ایکس، ۱۰۴، ۱۵۸-۱۶۲

DOI: 10.24200/nst.2023.1372

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1372.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1372.html)

