



مطالعه و بررسی عملکرد آشکارساز ردیاب PANDA GEM در شبیه‌سازی فیزیکی

نازیلا دیوانی ویس^{۱، ۲*}، محمد مهدی فیروزآبادی^۱، تاکه‌هیکو سائیتو^۲

^۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۲ مرکز شتابدهنده یونهای سنگین GSI، دارمشتات، آلمان

چکیده

آزمایش PANDA با توجه به پتانسیل فیزیکی فوق العاده ناشی از در دسترس بودن باریکه‌های پادپروتونی با شدت بالا، طراحی شده و سیستم‌های آشکارسازی متنوعی را شامل می‌شود. یکی از مهمترین قسمت‌های آن سیستم‌های ردیابی ذرات بر مبنای آشکارسازهای تکثیرکننده الکترون گازی GEM خواهد بود که در این مقاله نمونه‌ای از شبیه‌سازی و عملکرد آن در اندازه‌گیری دقیقتر جرم ذرات گزارش شده است. کلیه مراحل شبیه‌سازی فیزیکی این آشکارساز با پکیج محاسباتی PandaRoot که برای این آزمایش توسعه یافته، انجام شده است. **کلمات کلیدی:** آزمایش PANDA، آشکارسازهای GEM، اندازه‌گیری جرم ناوردا.

PANDA GEM-tracker performance in the physics simulations

Nazila Divani Veis^{*1,2}, Mohammad M. Firoozabadi¹, Takehiko R. Saito²

¹Department of Physics, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

²Helmholtz Center for Heavy Ion Research, GSI, Darmstadt, Germany

Abstract

Tentatively, study about hadron structure can be done by electrons, pions, kaons, protons and antiprotons. Antiprotons are excellent tools to inspect the antiprotons-protons annihilation problems, a particle with gluonic degrees of freedom and particle and antiparticle pair which are produced repeatedly, and also allow spectroscopy studying with very high precision and statistics. In order to identify more such as these cases, PANDA experiment is designed to be completely extraordinary physical potential due to exploit the availability of cold and high-intensity beams of antiprotons. For more understanding and study of high-energy physics and strong interactions, PANDA experiment is designed. One of the significant parts of the PANDA set-up are gas electron multiplier tracking systems which are under studying and construction. In this article is tried to demonstrate the influence of one typical kind of these systems in order to improve precise particles mass measurement and resolution.

Keywords: PANDA experiment, GEM detectors, mass resolution

آزمایش PANDA

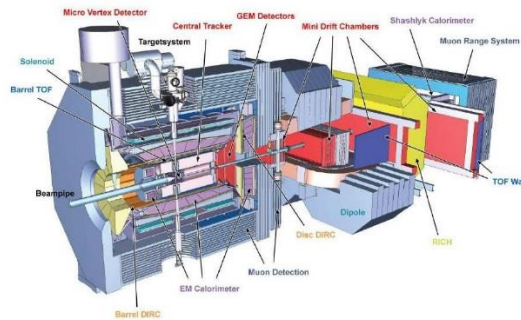
آزمایش PANDA^۱ یکی از پروژه‌های کلیدی در امکانات تحقیقاتی آینده برای پادپروتون‌ها و تحقیقات یونی (FAIR)^۲ است که در دست ساخت در مرکز GSI^۳ می‌باشد [۱]. این آزمایش مطالعات دقیقی از نابودی پادپروتون-پروتون و واکنش پادپروتون‌ها با اهداف هسته‌ای (هسته‌های سنگین) را انجام می‌دهد. در این آزمایش

¹ antiProton ANnihilation at DArmstadt

² The Future Facility for Antiproton and Ion Research

³ GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research

پرتوهای پادپروتونی با تکانه در گستره $1.5\text{GeV}/c$ تا $15\text{GeV}/c$ توسط حلقه انبارش انرژی بالا (HESR)^۱ فراهم می‌شوند. دستگاه PANDA متشکل از مجموعه‌ای از سیستم‌هایی که اطراف هدف داخلی را احاطه کرده‌اند، در یکی از دو بخش مستقیم HESR قرار می‌گیرند. در این آزمایش بخاطر کیفیت و شدت بی‌سابقه گسیل پرتوهای پادپروتونی، اندازه‌گیری‌های دقیقی به خصوص در ناحیه کوآرک افسون امکان پذیر خواهد شد. وجود یک آرایش از آشکارسازها برای آشکارسازی و ردیابی کامل حالات نهایی جهت دستیابی به اهداف فیزیکی مورد نظر در این مجموعه ضروری است. آشکارسازها قادر خواهند بود ذرات بارداری که ممکن است به ناحیه برهمکنش خیلی نزدیک باشند را شناسایی کنند. برخی از سیستم‌های آشکارسازی متنوع مورد استفاده در پروژه PANDA عبارتند از: آشکارسازهای ردیابی (MVD،^۲ STT،^۳ GEM،^۴)، کالریترهای الکترومغناطیسی (EMC)^۵، سیستم‌های میونی، آشکارسازهای چرنکوف (DIRC^۶ و RICH^۷)، سیستم‌های زمان-پرواز (TOF)^۸. شکل ۱ شماتیکی از تجهیزات آشکارسازی موجود در چیدمان آزمایش PANDA را نشان می‌دهد.



شکل (۱) شماتیکی از تجهیزات آشکارسازی موجود در مجموعه آزمایش PANDA. این آشکارساز شامل یک طیف سنج هدف^۹، TS، (در میدان مغناطیسی سلونوئیدی ۲ تسلا) پیرامون ناحیه برهمکنش و یک طیف سنج رو به جلو^{۱۰}، FS، (در میدان مغناطیسی دوقطبی ۱ تسلا) برای تشخیص ذرات گسیل شده در زوایای روبه‌جلو می‌باشد. پرتوی پادپروتونی از سمت چپ وارد دستگاه می‌شود [۱]. آشکارساز ردیاب GEM در ناحیه TS بعد از ردیاب مرکزی قرار می‌گیرد.

ساختار و روش‌های شبیه‌سازی فیزیکی

معیارهای طراحی، فرآیند بهینه‌سازی، راه‌حل‌های فنی و نتایج حاصل از این فرایند از مطالعات گسترده فیزیک مونت کارلوی بدست می‌آیند. جهت آزمایش PANDA بسته نرم‌افزاری پروژه^{۱۱} بر مبنای محاسبات مونت کارلو

^۱ High-Energy Storage Ring (HESR)

^۲ Micro vertex detector

^۳ Straw tube tracker

^۴ Gas electron multiplier tracker

^۵ Electromagnetic calorimeters

^۶ Detector for internally reflected Cherenkov light

^۷ Ring Imaging Cherenkov counter

^۸ Time-of-flight system

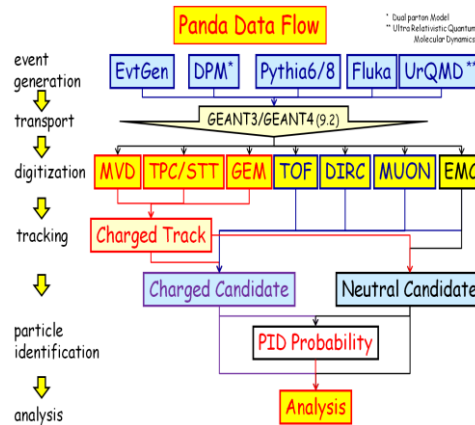
^۹ Target Spectrometer, TS

^{۱۰} Forward Spectrometer, FS

^{۱۱} PandaRoot framework



و نرم افزار Root با قابلیت استفاده از کد محاسباتی Geant4 نگارش و آماده شده است. کلیه قسمت های شبیه سازی، محاسباتی، هندسه آشکارساز، ردیابی، شناسایی ذرات و همچنین آنالیز داده ها و مطالعات برهمکنش های فیزیکی مختلف توسط این بسته نرم افزاری اجرا شده است [۲،۳]. شکل ۳ مراحل شبیه سازی در پکیج PandaRoot را نشان می دهد که کلیه فرآیندها از تولید رویدادها تا آنالیز داده ها را شامل می شود.



شکل (۲) شماتیکی از روند کار بسته نرم افزاری پروژه PANDA.

ردیاب تکثیرکننده الکترون گازی GEM

ردیاب های GEM^۱ از نوع آشکارسازهای گازی هستند که بسته به منطقه رانش بزرگ یا کوچک می توانند در دو ناحیه اتاقک یونش یا در ناحیه تناسبی کار کنند [۴]. در این شبیه سازی آشکارساز فویل GEM شامل دو لایه مسی با ضخامت حدود ۵ میکرومتر است که توسط یک لایه از پلیمر کاپتون^۲ با ضخامت ۵۰ میکرومتر از یکدیگر جدا شده است. فویل به صورت شیمیایی و بوسیله الگویی از حفره ها سوراخ می شود. با اعمال یک اختلاف ولتاژ، الکترون های ایجاد شده توسط تشعشعات به درون حفره ها کشیده شده و با تکثیر درون حفره ها از طرف دیگر خارج می شوند و هر حفره مانند یک تکثیرکننده تناسبی عمل می کند. تفکیک بودن طبقه تقویت از طبقه خواندن اطلاعات، منجر به سالم تر بودن عملکرد و آزادی عمل در طراحی الکترودهای گردآوری بار می شود. آشکارساز تکثیرکننده گازی الکترون به جهت پاسخ زمانی سریع و قدرت تفکیک انرژی بالا و مقاومت بیشترش نسبت به تشعشع، همواره در زمینه آشکارسازی پیشرفته مورد توجه بوده است.

مواد و روش ها

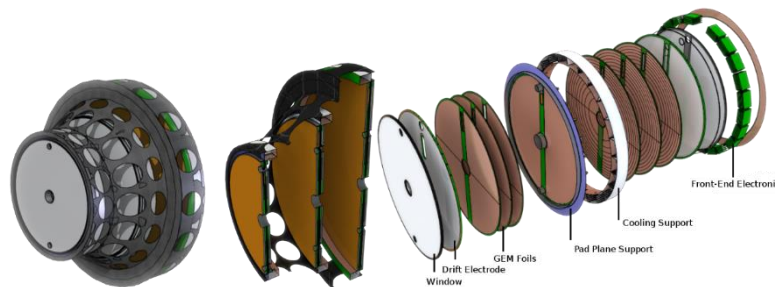
در شبیه سازی فیزیکی، عملکرد برخی آشکارسازها، با استفاده از واپاشی $\Psi(2S)$ که به تولید تعدادی از هادرون ها و لپتون ها منجر خواهد شد، مورد مقایسه و بررسی قرار می گیرد. مهم ترین پارامتری که باید قابل اندازه گیری باشد، جرم (انرژی) اینگونه ذرات توسط روش بازسازی ناوردایی جرم^۳ است. به دلیل نیاز به دقت

^۱ GEM tracking systems

^۲ کاپتون ماده ای پلاستیکی با مقاومت الکتریکی $10^{11} \Omega/m$ و قدرت دی الکتریک بالاست و قابلیت ساخت در ضخامت های بسیار کوچک را داراست.

^۳ Invariant Mass Reconstruction

بسیار زیاد برای ردیابی مسیر تولید ذرات و البته برای تجزیه و تحلیل تکانه ذرات تولید شده در اطراف ناحیه هدف، آشکارسازهای سیلیکونی^۱ مورد استفاده خواهند بود. با این حال، آنها زاویه پذیرش کوچکی برای ذرات در جهت های روبه جلو خواهند داشت. بنابراین، یک مجموعه از صفحات مسطح دورویه با مساحت بزرگ از آشکارسازهای تکثیرکننده الکترون گازی به عنوان اولین آشکارساز ردیاب روبه جلو پس از سیستم ردیاب مرکزی قرار می گیرند. به این منظور، طراحی و تعیین اندازه و پارامترهای آشکارساز GEM و هندسه پیچیده آن با استفاده از ابزار و امکانات نرم افزاری و سخت افزاری پروژه FAIR مطالعه شده است. هر چند پیاده سازی همه جزئیات هندسه در شبیه سازی مقدور نیست ولی طراحی اولیه هندسه آشکارساز تکثیرکننده گازی GEM شامل بررسی جنس، ساختار فیزیکی آشکارساز، اندازه، تعداد دقیق صفحات مورد نیاز و موقعیت قرارگیری آنها شبیه سازی شده است.



شکل (۲) شماتیکی از هندسه طراحی شده ردیاب GEM برای پروژه PANDA، شکل چپ: هندسه کلی، شکل وسط: سه ایستگاه مجزا و شکل راست: جزئیات هر ایستگاه را به تفکیک نشان می دهد که شامل صفحات دو رویه آلومینیوم-کاپتون-آلومینیوم برای پنجره های ورودی و الکترودها، و مس-کاپتون-مس برای فویل های اصلی GEM و سایر بخش های الکترونیکی می باشند.

در حال حاضر این آشکارساز بصورت سه بعدی و دوطرفه طراحی شده و شامل سه ایستگاه دیسکی شکل در راستای ردیاب مرکزی چیدمان اصلی آزمایش PANDA می باشد که هر ایستگاه از تعداد ۴۹ لایه با جنس و ابعاد مختلف شامل پنجره ورودی دکتور، کاتد، فویل های GEM، لایه های حساس به شمارش ذرات، قسمت های خنک کننده و اجزای الکترونیکی سیستم تشکیل شده است. شعاع خارجی هر ایستگاه با توجه به محدودیت فضای موجود تقریباً از حدود ۴۵ تا ۷۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. در سرتاسر محیط آشکارساز ترکیبی از گاز Ar/CO₂ (با نسبت ۳۰-۷۰ در فشار ۱bar) وجود دارد. این لایه های دیسکی شکل قادر خواهند بود آشکارسازی ذرات تولید شده در برهمکنش پروتون-پادپروتون را در زوایای قطبی تقریباً ۳ تا ۲۰ درجه پوشش بدهند [۵،۶]. در شکل ۲ جزئیاتی از هندسه طراحی و شبیه سازی شده نشان داده شده است.

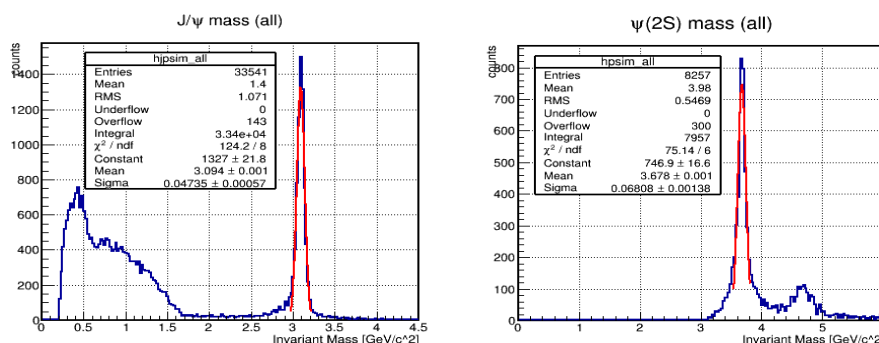
¹ Si Vertex Detector



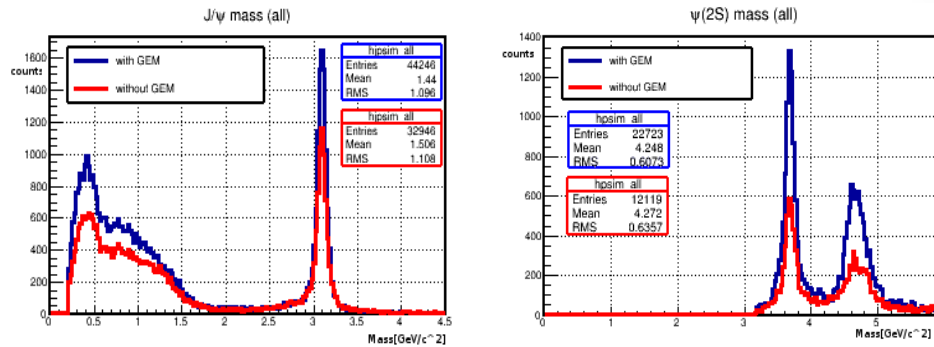
با نصب و راه اندازی آن، شناسایی ذرات در زاویه های کاملاً بسته بخوبی پوشش داده خواهد شد همراه با اندازه گیری دقیق جرم، شتاب و قدرت تفکیک فضایی بسیار عالی. به منظور بررسی عملکرد هندسه طراحی شده و بررسی نقش آشکارساز GEM در اندازه گیری دقیقتر جرم ذرات، کلیه برنامه ها به ازای تعداد ده هزار رویداد برای برهمکنش پروتون-پادپروتون و با استفاده از موتور تولید رویداد EvtGen [۷] برای شبیه سازی سیگنال های مربوط به کانال واپاشی موردنظر و کد ترابرد ذرات TGeant4 اجرا گردید. کل هندسه آزمایش PANDA به همراه آشکارساز طراحی شده GEM با تکانه ذرات متوسط $6\text{GeV}/c$ و با استفاده از کانال بنچ مارک واپاشی مزون چارمونیم جپسای $\bar{p}+p \rightarrow \Psi(2S) \rightarrow \gamma+J/\Psi(1S) \rightarrow \mu^++\mu^-$ شبیه سازی شده و مقادیر حاصل برای جرم ذرات $\Psi(2S)$ و $J/\Psi(1S)$ به روش بازسازی ناوردا ی جرم مطابق اندازه گیری های PDG [۸] بدست آمد.

نتایج

شکل ۳ نمودار توزیع جرمی را برای $\Psi(2S)$ و $J/\Psi(1S)$ نشان می دهد که مقدار جرم آنها به ترتیب $3.678 \pm 0.0012 \text{ GeV}/c^2$ و $3.094 \pm 0.0014 \text{ GeV}/c^2$ حاصل شد. برای پرداختن به اهمیت وجود این آشکارساز در هندسه کلی چیدمان آزمایش PANDA این نمودارها با ازای وجود و عدم وجود این آشکارساز در هندسه کلی در شکل ۴ رسم شده اند. همانطور که مشاهده می شود این آشکارساز در بهبود و افزایش دقت مقادیر اندازه گیری شده نقش مثبتی دارد و با استفاده از آشکارساز GEM تعداد ذرات ردیابی شده افزایش یافته است، قله منحنی نیز تیزتر و اندازه جرم دقیقتر شده است (مطابق جدول ۱).



شکل (۳) نمودار بازسازی جرم ناوردا برای مزون چارمونیم جپسای: $\Psi(2S)$ (راست) و $J/\Psi(1S)$ (چپ).



شکل (۴) نمودارهای مقایسه‌ای برای اندازه‌گیری بازسازی جرم ناوردا برای $\Psi(2S)$ (راست) و $J/\Psi(1S)$ (چپ)، با حضور آشکارساز GEM (آبی) و بدون آن (قرمز) در هندسه کلی آزمایش PANDA.

جدول (۱) مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده برای نمودارهای جرم $\Psi(2S)$ و $J/\Psi(1S)$ با و بدون حضور آشکارساز GEM از برازش نمودار گاوسی روی قله آنها.

| برای نمودار جرم $J/\Psi(1S)$ | | | برای نمودار جرم $\Psi(2S)$ | | | چیدمان آزمایش PANDA |
|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Sigma [%] | Peak Width [GeV/c ²] | Number of counts under peak | Sigma [%] | Peak Width [GeV/c ²] | Number of counts under peak | |
| 6.22 | 0.1469 | 6167 | 7.99 | 0.1888 | 3012 | GEM بدون |
| 4.93 | 0.1162 | 9224 | 5.20 | 0.1227 | 6485 | GEM با |

بحث و نتیجه‌گیری

طراحی و برنامه‌ریزی پروژه PANDA بگونه‌ای است که دقیقاً به مطالعه و بررسی چگونگی تشکیل جرم ذرات از روی برهمکنش قوی بین کوارکها بپردازد. از آنجایی که هنوز نمی‌دانیم چه ذراتی ناشی از واپاشی گلوبالها هستند، پس آشکارسازها باید قادر به ردیابی و اندازه‌گیری انواع ذراتی که در تمامی جهات پرواز می‌کنند و پراکنده می‌شوند، باشند و تمامی نواحی اطراف هدف را به طور کامل پوشش دهند. چالش‌های اضافی این واقعیت این است که گلوبالها بسیار گونه‌های نادری هستند و در نتیجه باید میلیاردها حادثه‌ای که اتفاق می‌افتد ثبت شود تا اینکه یک سیگنال مربوط به گلوبالها بدست آید. پس آشکارسازها مسؤولیت ثبت در حدود ۱۰ میلیون نابودی در هر ثانیه را بعهده دارند. نتایج حاصله نشان می‌دهند که آشکارساز GEM در اندازه‌گیری دقیقتر جرم نقش موثری را ایفا و به افزایش قدرت تفکیک جرمی کمک خواهد کرد.

مراجع

- [1] FAIR/PANDA/Physics Book; Physics Performance Report, PANDA Collaboration.
- [2] I. Hrinacova et al. 2003 Proc. of Computing in High Energy and Nuclear Physics (La Jolla) THJT006.
- [3] S. Spataro, The PandaRoot framework for simulation, reconstruction and analysis, Journal of Physics: Conference Series 331 (2011) 032031, DOI:10.1088/1742-6596/331/3/032031.



- [4] F. Sauli, The gas electron multiplier: Operating principles and applications, NIM A 805 (2016) 2-24.
- [5] N. Divani Veis et al, Monte Carlo simulation for the PANDA GEM-tracking detector, GSI SCIENTIFIC REPORT 2015, P. 92, DOI: 10.15120/GR-20161-1.
- [6] N. Divani Veis et al, Implementation of the PANDA Planar-GEM tracking detector in Monte Carlo simulations, NIM A, DOI: 10.1016/j.nima.2017.10.036.
- [7] D. Lange, The EvtGen particle decay simulation package, 2001 Nucl. Intr. Meth. A 462 152-155.
- [8] Particle Data Group, www-pdg.lbl.gov.