

بررسی کیفی عملکرد آشکارساز ردیاب GEM مربوط به آزمایش PANDA

در شبیه‌سازی‌های فیزیکی

نازیلا دیوانی ویس^{1,2,3*}، محمد مهدی فیروزآبادی¹، تاکه سایتو^{2,3}

¹ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

² مرکز شتابدهنده یونهای سنگین GSI، دارمشتات، آلمان

³ انستیتو هلمهولتز ماینس HIM، ماینس، آلمان

دریافت: 1396/07/02 ویرایش نهایی: 1397/04/17 پذیرش: 1397/12/25

چکیده

به صورت تجربی، مطالعات ساختار هادرونی می‌تواند با کاوشگرهای مختلفی از جمله پادپروتون‌ها که ابزار بسیار عالی برای رسیدگی به مسائل موجود در نابودی پادپروتون-پروتون، ذرات با درجه آزادی گلوئونی و همچنین زوج ذره و پادذره‌ها که به طور تکراری تولید می‌شوند، می‌باشند و همچنین اجازه می‌دهند مطالعات اسپکتروسکوپی با آمار و دقت بسیار بالا انجام شود. به منظور شناخت هر چه بیشتر این موارد، آزمایش PANDA به گونه‌ای طراحی شده است که با استفاده از پتانسیل فیزیکی فوق‌العاده ناشی از در دسترس بودن باریکه‌های با شدت بالا و سرد پادپروتونی، به درک درست و کاملاً کمی از برهم‌کنش قوی و ارائه یک چالش فکری در تلاش برای درک ماهیت برهم‌کنش قوی و ماده هادرونی پردازد که خود سیستم‌های آشکارسازی متنوعی را شامل می‌باشد. یکی از مهمترین قسمت‌های چیدمان آزمایش PANDA طراحی سیستم‌های ردیابی ذرات بر مبنای آشکارسازهای تکثیرکننده الکترون گازی GEM خواهد بود که در این مقاله یک نمونه از طراحی و شبیه‌سازی مونت کارلوی این آشکارساز ارائه و عملکرد آن به طور کیفی بررسی شده است. بر طبق نتایج این مقاله، این آشکارساز قادر است قدرت تفکیک جرمی برای کانال واپاشی انتخابی، راندمان ردیابی و قدرت تفکیک تکانه ذرات در زوایای روبه‌جلو (زیر 22 درجه) را به نحو مطلوبی بهبود ببخشد. **کلیدواژه‌گان:** آزمایش PANDA، آشکارسازهای تکثیرکننده الکترون گازی GEM، کانال پنج‌مارک واپاشی مزون J/ψ اندازه‌گیری جرم ناورد، راندمان ردیابی، و قدرت تفکیک تکانه

مقدمه

برای این امکان جدید شتاب‌دهنده GSI به روزرسانی خواهد شد و در آینده، بیشتر به عنوان تزریقگر⁴ مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مرکز شتاب‌دهنده با ویژگی‌های ساختاری پیچیده‌ای از شتاب‌دهنده‌های جدید و حلقه‌های انبارش⁵ تکمیل خواهد شد. شتاب‌دهنده‌های FAIR پروتون اولیه و پرتوهای یونی و همچنین پرتوهای ثانویه پادپروتون‌ها و یا یون‌های رادیواکتیو را با انرژی بالا، شدت بالا و با کیفیت بالا

آزمایش PANDA

آزمایش PANDA (نابودی پادپروتون در دارمشتات¹) یکی از پروژه‌های کلیدی در فراهم نمودن امکانات تحقیقاتی آینده برای پادپروتون‌ها و تحقیقات یونی (FAIR)² است که در حال حاضر، در دست ساخت در مرکز GSI³، در دارمشتات آلمان می‌باشد.

*نویسنده مسئول: n_divani@birjand.ac.ir, n.divani@gsi.de

¹ antiProton Annihilation At Darmstadt

² The Future Facility for Antiproton and Ion Research

³ GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research

⁴ Injectors

⁵ Storage rings

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.

اطراف هدف داخلی را احاطه کرده‌اند، در یکی از دو بخش مستقیم HESR قرار داده شده است. در این آزمایش به‌خاطر کیفیت و شدت بی‌سابقه گسیل پرتوهای پادپروتونی، اندازه‌گیری‌های دقیقی به‌خصوص در ناحیه کوآرک افسون² امکان‌پذیر خواهد شد. نتایج این آزمایش می‌تواند یک ابزار منحصربه‌فرد برای بهبود آمار، بالا بردن دقت داده‌های موجود و بررسی‌های بیشتر در مورد فیزیک آن، مورد استفاده قرار گیرد. وجود یک آرایش از آشکارسازها برای آشکارسازی و ردیابی کامل حالات نهایی جهت دستیابی به اهداف فیزیکی مورد نظر در این مجموعه ضروری است. با نصب و راه‌اندازی این قسمت، شناسایی ذرات در زاویه‌های کاملاً بسته به‌خوبی پوشش داده خواهد شد همراه با جرم، شتاب و قدرت تفکیک فضایی بسیار عالی و 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 ردیابی³ (MVD⁴، STT⁵)، کالریمترهای الکترومغناطیسی (EMC⁷)، سیستم‌های میونی، آشکارسازهای چرنکوف (DIRC⁸) و RICH⁹، سیستم‌های زمان-پرواز (TOF¹⁰). شکل 2 شماتیکی از تجهیزات آشکارسازی موجود در آزمایش PANDA را نشان می‌دهد.

گسیل خواهند کرد. تجهیزات آزمایشگاهی که در این تأسیسات نصب خواهد شد طیف گسترده‌ای از موضوعات مختلف در زمینه فیزیک هسته‌ای، فیزیک هادرونی و نیز فیزیک اتمی و فیزیک پلاسما را شامل می‌شود.

شکل 1 شماتیکی از تجهیزات موجود در پروژه FAIR را نشان می‌دهد. در حال حاضر مرکز GSI از یک شتاب‌دهنده سینکروترونی (SIS18) برای شتاب دادن ذرات باردار و یون‌های سنگین استفاده می‌کند که تکانه ذرات در آن حدود $4.5 \text{ GeV}/c$ می‌باشد. در آینده در پروژه FAIR امکان استفاده از شتاب‌دهنده سینکروترونی (SIS100/300) برای داشتن انرژی‌های بالاتر فراهم خواهد شد که تکانه ذرات در آن به حدود $15 \text{ GeV}/c$ خواهد رسید [۱،۲].

آزمایش PANDA مطالعات دقیقی از نابودی پادپروتون-پروتون و واکنش پادپروتون‌ها با اهداف هسته‌ای (هسته‌های سنگین) را انجام می‌دهد. در این آزمایش پرتوهای پادپروتونی با تکانه‌ای در گستره $1.5 \text{ GeV}/c$ تا $15 \text{ GeV}/c$ توسط حلقه انبارش انرژی بالا (HESR)¹ فراهم می‌شوند. شبکه HESR به‌عنوان یک مسیر حلقوی شکل با حداکثر پایداری باریکه 50 Tm طراحی شده است. این ماشین از دو کمان 180° و دو طول 155 متر بخش مستقیم و با مساحت دور حلقه مجموعاً 575 مترمربع تشکیل شده است. دستگاه PANDA مشکل از مجموعه‌ای از سیستم‌هایی که

⁷ Electromagnetic calorimeters

⁸ Detector for internally reflected Cherenkov light

⁹ Ring Imaging Cherenkov counter

¹⁰ Time-of-flight system

¹ High-Energy Storage Ring (HESR)

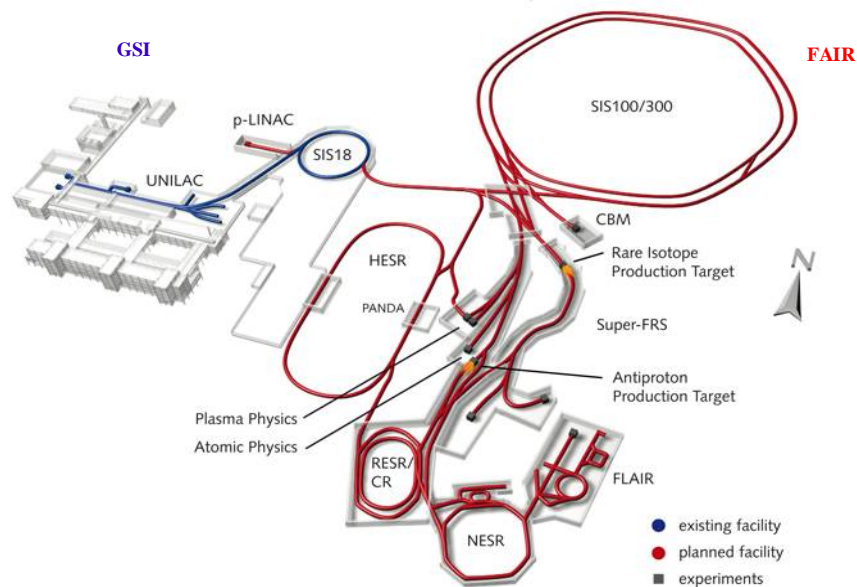
² Charmonium

³ Tracking detectors

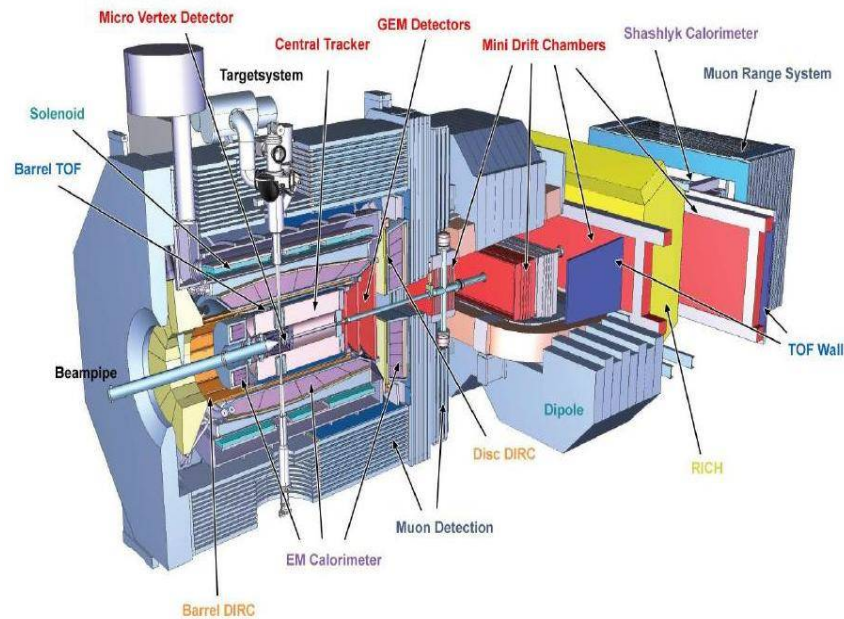
⁴ Micro vertex detector

⁵ Straw tube tracker

⁶ Gas electron multiplier



شکل 1. شماتیکی از تجهیزات موجود در پروژه FAIR. قسمت آبی رنگ امکانات موجود در مرکز GSI را نشان می‌دهد که شامل شتابدهنده سینکروترونی (SIS18) است و قسمت قرمز رنگ امکانات در دست ساخت پروژه FAIR را نشان می‌دهد که شامل شتابدهنده سینکروترونی (SIS100/300) است [۱،۲].

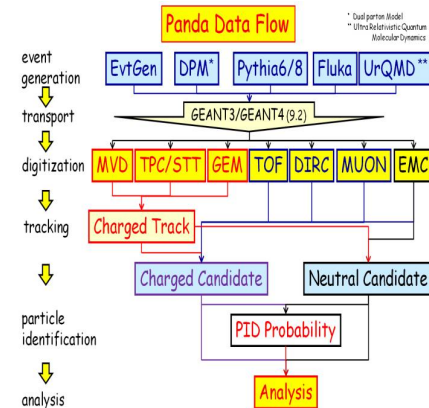


شکل 2. شماتیکی از تجهیزات آشکارسازی موجود در مجموعه آزمایش PANDA. این آشکارساز شامل یک طیف‌سنج هدف¹، TS، پیرامون ناحیه برهم‌کنش و یک طیف‌سنج روبه‌جلو²، FS، برای تشخیص ذرات گسیل شده در ناحیه روبه‌جلو می‌باشد. پرتوی پادپروتونی HESR از سمت چپ وارد دستگاه می‌شود [۲،۴].

¹ Target Spectrometer, TS
² Forward Spectrometer, FS

ساختار و روش‌های شبیه‌سازی فیزیکی

معیارهای طراحی، فرآیند بهینه‌سازی، راه‌حل‌های فنی و نتایج حاصل از این فرآیند از مطالعات گسترده فیزیک مونت کارلوی به دست می‌آیند. جهت آزمایش PANDA بسته نرم‌افزاری پروژه¹ بر مبنای محاسبات مونت کارلو [5] و نرم‌افزار روت² [6] با استفاده از زبان برنامه نویسی شیء‌گرای C تحت سیستم عامل لینوکس و با قابلیت استفاده از کدهای محاسباتی مانند Geant3، Geant4، و... نگارش و آماده شده است.



شکل 3. شماتیکی از روند کار بسته نرم‌افزاری پروژه PANDA [7].

کلیه قسمت‌های شبیه‌سازی، محاسباتی، ردیابی، آشکارسازی و شناسایی ذرات و همچنین آنالیز داده‌ها و مطالعات برهم‌کنش‌های فیزیکی مختلف توسط این بسته نرم‌افزاری قابل اجرا می‌باشد [7]. شکل 3 طرح‌واره‌ای از روند کار این بسته نرم‌افزاری برای آشکارسازهای مختلف این پروژه را نشان می‌دهد.

ردیاب تکثیرکننده الکترون گازی GEM

ردیاب‌های GEM³ از نوع آشکارسازهای گازی هستند که بسته به منطقه رانش⁴ بزرگ یا کوچک می‌توانند در دو ناحیه اتاقک یونش یا در ناحیه تناسبی کار کنند. تکثیرکننده الکترونی گازی در سال 1997

توسط ساولی⁵ در آزمایشگاه‌های سرن معرفی شد. این آشکارساز شامل یک فویل پلیمری است که یک پوشش فلزی دو طرف آن را می‌پوشاند و حفره‌هایی میکرومتری به صورت شیمیایی بر روی آن ایجاد می‌شود. یک فویل معمولی GEM شامل دو لایه مسی با ضخامت حدود 5 میکرومتر است که توسط یک لایه از پلیمر کاپتون⁶ با ضخامت 50 میکرومتر از یکدیگر جدا شده است. کاپتون ماده‌ای پلاستیکی با مقاومت الکتریکی $10^{11} \Omega/m$ و قدرت دی‌الکتریک بالاست و قابلیت ساخت در ضخامت‌های بسیار کوچک را دارد. فویل به صورت شیمیایی و به وسیله الگویی میکرومتری از حفره‌ها سوراخ می‌شود. با اعمال یک اختلاف ولتاژ، الکترون‌های ایجاد شده توسط تشعشعات به درون حفره‌ها کشیده شده و با تکثیر درون حفره‌ها از طرف دیگر خارج می‌شوند. در این حالت هر حفره مانند یک تکثیرکننده تناسبی عمل می‌کند. این تکثیرکننده می‌تواند به تنهایی مانند یک آشکارساز یا پیش‌تقویت کننده عمل کند. بهره تناسبی برای این آشکارساز معمولاً بیش از 10^3 برای انواع گازهاست. تفکیک بودن طبقه تقویت از طبقه خواندن اطلاعات، منجر به سالم‌تر بودن عملکرد و آزادی عمل در طراحی الکترودهای گردآوری بار می‌شود. بررسی‌های دقیق در خصوص بهره و نواحی تخلیه در آهنگ‌های شمارش بالا و همچنین برای ذرات با یونیزاسیون بالا نشان می‌دهد که این آشکارساز نسبت به بقیه ادوات با الگوی میکرومتری، برتری دارد. آشکارساز تکثیرکننده گازی الکترون به جهت پاسخ زمانی سریع و قدرت تفکیک انرژی بالا و مقاومت بیشتر نسبت به تشعشع، همواره در زمینه آشکارسازی پیشرفته مورد توجه بوده است [8].

⁴ Drift Region

⁵ Fabio Sauli

⁶ Kapton

¹ PandaRoot framework

² ROOT

³ GEM tracking systems

مواد و روش‌ها

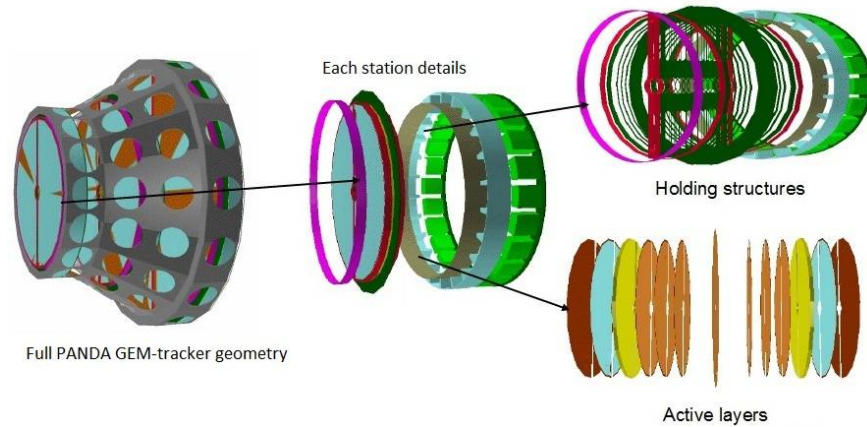
این مقاله پیاده‌سازی شده است و عملکرد آن به‌طور کیفی مورد بررسی قرار گرفته است. البته، از آنجایی که شبیه‌سازی این آشکارساز با توجه به محدودیت‌های موجود در چیدمان آزمایش PANDA و بر مبنای طراحی فنی-مفهومی منحصربه‌فردی صورت گرفته است لذا امکان مقایسه با موارد دیگر مانند آشکارسازهای GEM موجود در پروژه‌های ALICE [9,10]، COMPASS [11]، و یا TOTEM [12] وجود نداشته است.

طراحی هندسه آشکارساز در شبیه‌سازی

در حال حاضر این آشکارساز به‌صورت سه بعدی طراحی شده و شامل سه ایستگاه دیسکی شکل در راستای ردیاب مرکزی چیدمان اصلی آزمایش PANDA می‌باشد که هر ایستگاه از تعداد 49 لایه با جنس و ابعاد مختلف شامل پنجره ورودی دکتور، کاتد، فویل‌های GEM، لایه‌های حساس به‌شمارش ذرات، قسمت‌های خنک‌کننده و بخش مربوط به اجزای الکترونیکی و منطقه خوانش⁴ سیستم تشکیل شده است. شعاع خارجی هر ایستگاه با توجه به محدودیت فضای موجود تقریباً از حدود 45 تا 75 سانتیمتر در نظر گرفته شده است. در سرتاسر محیط آشکارساز ترکیب گاز $Ar/CO_2(70\%-30\%)$ وجود دارد. این لایه‌های دیسکی شکل قادر خواهند بود آشکارسازی ذرات تولید شده در برهم‌کنش پادپروتون-پروتون را در زوایای قطبی تقریباً 3 تا 20 درجه پوشش بدهند. در شکل 4 جزئیاتی از هندسه طراحی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است.

همانگونه که در شکل 2 مشاهده می‌شود در پروژه PANDA از آشکارسازهای سریع و دقیقی جهت آشکارسازی استفاده می‌شود. عملکرد برخی آشکارسازها، با استفاده از واپاشی ذراتی که به تولید تعدادی از هادرون‌ها و لپتون‌ها منجر خواهد شد، مورد مقایسه و بررسی قرار می‌گیرد. مهم‌ترین پارامتری که باید قابل اندازه‌گیری باشد، جرم (انرژی) اینگونه ذرات توسط روش بازسازی ناوردایی جرم¹ است. به دلیل نیاز به دقت بسیار زیاد برای ردیابی مسیر تولید ذرات و البته برای تجزیه و تحلیل تکانه ذرات تولید شده در اطراف ناحیه هدف، آشکارسازهای سیلیکونی² مورد استفاده خواهند بود، با این حال، آنها زاویه پذیرش کوچکی برای ذرات در جهت‌های رو به جلو خواهند داشت. بنابراین یک مجموعه از صفحات مسطح با مساحت بزرگ از آشکارسازهای تکثیرکننده الکترون گازی نیز به‌عنوان اولین آشکارساز ردیاب رو به جلو پس از سیستم ردیاب مرکزی قرار می‌گیرند. به این منظور، طراحی و تعیین اندازه و پارامترهای آشکارساز GEM و هندسه پیچیده آن با استفاده از ابزار و امکانات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری پروژه FAIR در مرکز GSI آلمان با کمک گروه DL³ در دست مطالعه می‌باشد. هر چند پیاده‌سازی همه جزئیات هندسه در شبیه‌سازی مقدر 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 بر اساس شبیه‌سازی با استفاده از بسته نرم‌افزاری این پروژه و توسط نویسنده

³ Detection Laboratory⁴ Readout¹ Invariant Mass Reconstruction² Si Vertex Detector



شکل 4. شماتیکی از هندسه طراحی شده ردیاب تکثیرکننده الکترون گازی GEM برای پروژه PANDA. هندسه کلی، یک ایستگاه مجزا و جزئیات هر ایستگاه را نشان می‌دهد.

پادپروتون و با استفاده از موتور شبیه‌سازی TGeant4 در کد PandaRoot اجرا گردید. برای درک بهتر نقش تأثیر گذار این آشکارساز در بهبود زاویه‌ای فضایی پوششی روبه‌جلو و راندمان ردیابی ذرات، کل هندسه آزمایش PANDA به‌همراه آشکارساز طراحی شده GEM با تکانه متوسط $6\text{ GeV}/c$ و با استفاده از کانال (بنچ‌مارک) واپاشی مزون چارمونیم چپسای (پیسایون) $\text{antiP+P} \rightarrow \Psi(2S) \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ ($J/\Psi(1S)$) $\rightarrow \gamma J/\Psi(1S)$ شبیه‌سازی شده و مقادیر حاصل برای جرم ذرات $J/\Psi(1S)$ و $\Psi(2S)$ به‌روش بازسازی ناورداي جرم مطابق اندازه‌گیری‌های PDG¹ به‌دست آمد [16]. با هدف مقایسه بهتر نتایج، کلیه شبیه‌سازی‌ها بدون حضور این آشکارساز در هندسه اصلی چیدمان آزمایش PANDA نیز مجدداً انجام گرفت و مشاهده شد که این آشکارساز توانایی بهبود قدرت تفکیک تکانه و جرم ذرات گسیل شده در زوایای زیر 22 درجه را دارا می‌باشد.

بررسی میزان پذیرش زاویه‌ای آشکارساز

برای بررسی میزان زاویه پوششی آشکارساز طراحی شده، نمودار میزان راندمان پذیرش² آن برحسب زاویه

ویژگی اصلی این طراحی که آنرا از سایر نمونه‌های این نوع آشکارسازها متمایز می‌کند [۱۳، ۱۴، ۱۵]، شکل خاص آن با توجه به محدودیت فضای موجود و محل قرار گرفتن بخش الکترونیک دستگاه است که در دورتادور لبه‌های خارجی صفحات اصلی قرار گرفته است تا مانعی برای عبور پرتوها و رسیدن آنها به سایر نواحی و سیستم‌های آشکارسازی چیدمان آزمایش PANDA نباشند. همچنین طراحی نوع دوطرفه و دوبعدی صفحات آند دستگاه مربوط به بخش خوانش الکترونیکی آشکارساز است که راندمان و قدرت ردیابی را افزایش خواهد داد.

انجام شبیه‌سازی و بررسی عملکرد آشکارساز طراحی شده در چیدمان اصلی آزمایش PANDA

به‌منظور بررسی کیفی چگونگی عملکرد هندسه طراحی شده و همچنین بررسی نقش آشکارساز GEM در اندازه‌گیری دقیقتر جرم و تکانه ذرات، پس قرارگیری آشکارساز مورد نظر در هندسه اصلی چیدمان آزمایش PANDA کلیه برنامه‌های شبیه‌سازی به‌ازای تعداد ده هزار رویداد برای برهم‌کنش پروتون-

² Acceptance

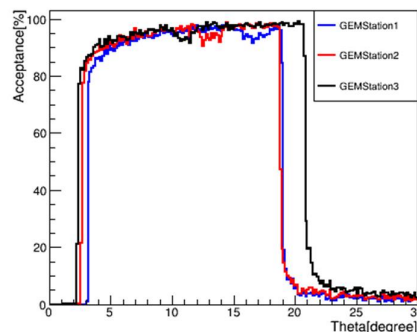
¹ Particle Data Group

یافته است، قله منحنی نیز تیزتر و اندازه جرم دقیقتر شده است.

بررسی عملکرد آشکارساز طراحی شده GEM در بهبود راندمان ردیابی و قدرت تفکیک تکانه ذرات

به منظور بررسی عملکرد آشکارساز طراحی شده GEM در بهبود راندمان ردیابی¹ و قدرت تفکیک تکانه² ذرات، نمودارهای شکل 8 و 9 به ازای تکانه‌های مختلف ذرات فرودی به ترتیب 0.1، 0.2، 0.5، 1، 2 و 5 GeV/c، به ازای دو حالت با حضور و بدون حضور این آشکارساز در هندسه کلی چیدمان اصلی آزمایش PANDA شبیه‌سازی و رسم شده‌اند. در شکل 9 نقش حضور آشکارساز طراحی شده GEM را در بهبود راندمان ردیابی ذرات و همچنین در شکل 10 نقش حضور آشکارساز طراحی شده GEM را در بهبود قدرت تفکیک تکانه ذرات به ازای زوایای پوششی روبه‌جلو (همان‌طور که در متن اشاره شده است طراحی هندسه به‌گونه‌ای است که قادر است فقط زوایای زیر 22 درجه را پوشش دهد) به خوبی نشان می‌دهند. همان‌طور که این نمودارها نشان می‌دهند به ازای ذرات فرودی با تکانه کم (0.1 و 0.2 GeV/c) نقش این آشکارساز محسوس نمی‌باشد، ولی به ازای ذرات فرودی با تکانه‌های بالاتر (0.5، 1، 2 و 5 GeV/c) نقش این آشکارساز در بهبود راندمان ردیابی و قدرت تفکیک تکانه ذرات به ازای زوایای پوششی روبه‌جلو به خوبی نمایان شده است.

قطبی‌تتا در شکل 5 رسم شده است. این نمودار میزان پذیرش زوایه‌ای را به تفکیک برای هر سه ایستگاه GEM که در سه سایز مختلف هستند نشان می‌دهد. همان‌طور که در متن اشاره شده است این آشکارساز برای پوشش زوایای بسته روبه‌جلوی کمتر از 22 درجه کاربرد خواهد داشت.



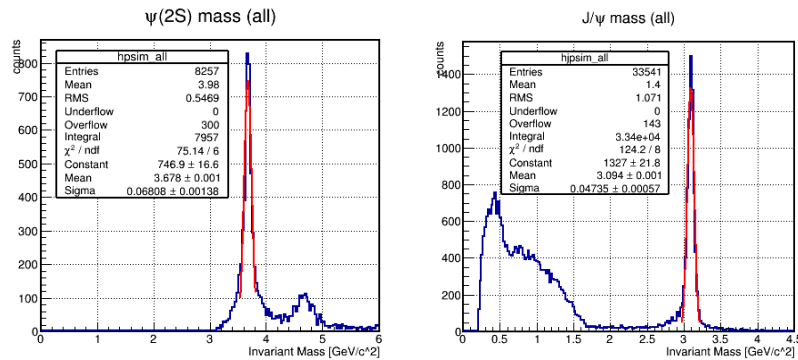
شکل 5. نمودار میزان پذیرش زوایه‌ای را به تفکیک برای هر سه ایستگاه GEM.

بررسی عملکرد آشکارساز طراحی شده GEM در بهبود بازسازی جرم ذرات

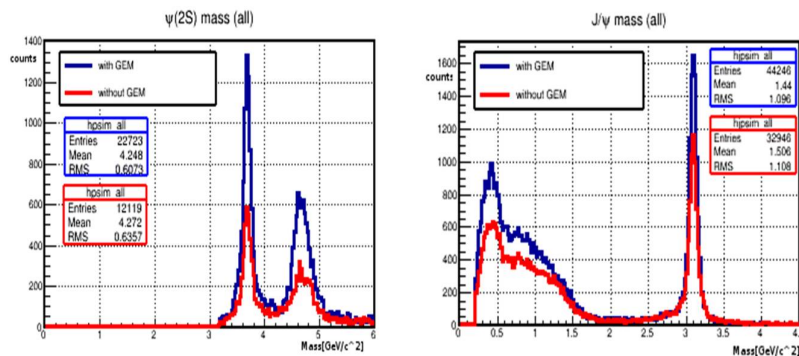
شکل 6 نمودار توزیع جرمی را برای $\Psi(2S)$ و $J/\Psi(1S)$ نشان می‌دهد که مقدار جرم آنها به ترتیب $3,094 \pm 0,0014 \text{ GeV}/c^2$ و $3,678 \pm 0,0012 \text{ GeV}/c^2$ حاصل شد. برای پرداختن به اهمیت وجود این آشکارساز در هندسه کلی چیدمان آزمایش PANDA این نمودارها با ازای وجود و عدم وجود این آشکارساز در هندسه کلی در شکل 7 رسم شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود این آشکارساز در بهبود و افزایش دقت مقادیر اندازه‌گیری شده نقش مثبتی دارد و با استفاده از آشکارساز GEM تعداد ذرات ردیابی شده افزایش

² Momentum resolution

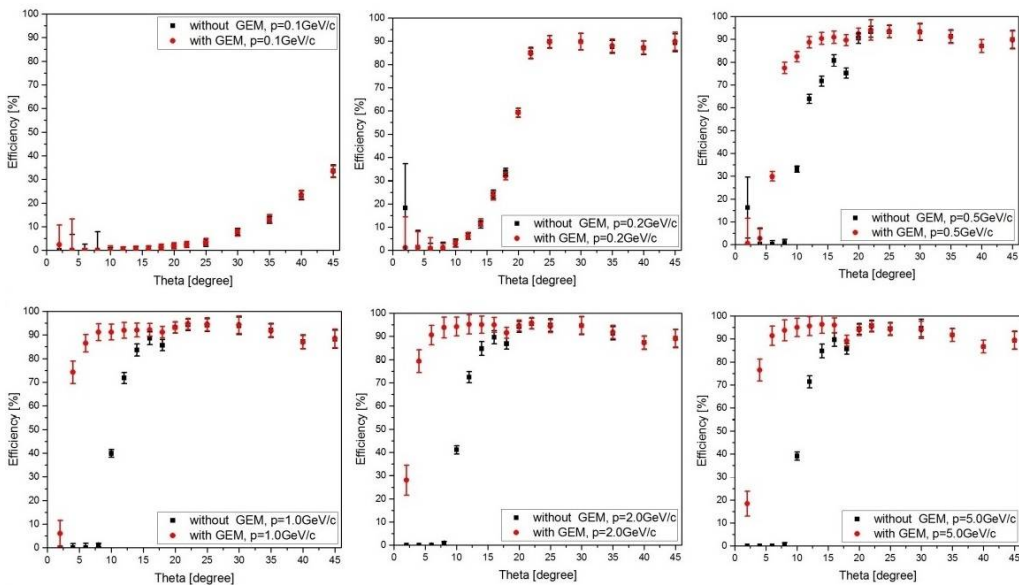
¹ Tracking efficiency



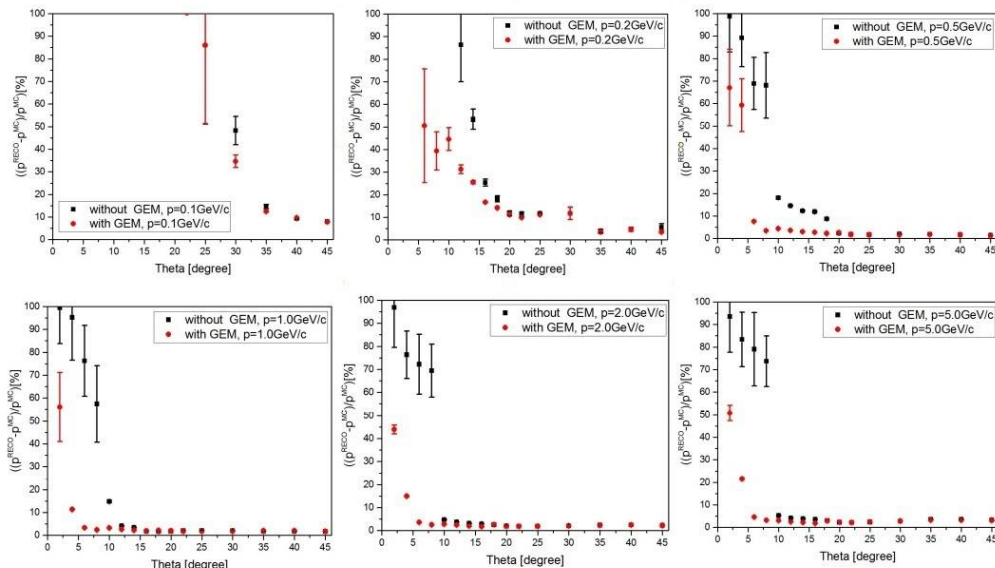
شکل 6. بازسازی جرم ناوردا برای کانال واپاشی مزون چارمونیم جسیای (پیسایون): $\Psi(2S)$ (نمودار راست) و $J/\Psi(1S)$ (نمودار چپ).



شکل 7. نمودارهای مقایسه‌ای برای اندازه‌گیری بازسازی جرم ناوردا برای $\Psi(2S)$ (نمودار راست) و $J/\Psi(1S)$ (نمودار چپ)، با حضور آشکارساز GEM (رنگ آبی) و بدون آن (رنگ قرمز) در هندسه کلی آزمایش PANDA.



شکل 9. نمودارهای مقایسه‌ای برای اندازه‌گیری راندمان ردیابی ذرات به‌ازای تکانه‌های مختلف ذرات فرودی 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.1 و 5.0 GeV/c به‌ازای دو حالت با حضور آشکارساز GEM (مربع‌رنگ قرمز) و بدون حضور آشکارساز GEM (دایره‌رنگ سیاه) در هندسه کلی آزمایش PANDA.



شکل 10. نمودارهای مقایسه‌ای برای اندازه‌گیری قدرت تفکیک تکانه ذرات به‌ازای تکانه‌های مختلف ذرات فرودی 0.1، 0.2، 0.5، 1.0، 2.0 و 5.0 GeV/c. به‌ازای دو حالت با حضور آشکارساز GEM (مربع‌رنگ قرمز) و بدون حضور آشکارساز GEM (دایره‌رنگ سیاه) در هندسه کلی آزمایش PANDA.

را به‌طور کامل پوشش دهند. چالش‌های اضافی این واقعیت این است که گلوبال‌ها بسیار گونه‌های نادری هستند و در نتیجه باید میلیاردها حوادثی که اتفاق می‌افتد ثبت شود تا اینکه یک سیگنال مربوط به گلوبال‌ها به‌دست آید. پس در پروژه PANDA، آشکارسازها مسئولیت ثبت در حدود 10 میلیون نابودی در هر ثانیه را به‌عهده دارند. از جمله آشکارساز GEM (تکثیرکننده الکترون گازی) که در این پروژه نقش غیرقابل انکاری خواهد داشت و در اندازه‌گیری دقیقتر جرم نقش مؤثری را ایفا خواهد کرد. همان‌گونه که در نتایج کیفی ارائه شده در شکل‌های 6 تا 9 مشهود است این آشکارساز طراحی و شبیه‌سازی شده، قادر است قدرت تفکیک جرمی، راندمان ردیابی و قدرت تفکیک تکانه ذرات را در زوایای روبه‌جلو (زیر 22 درجه) به‌خوبی بهبود ببخشد.

بحث و نتیجه‌گیری

امروزه با وجود پیشرفت‌های عظیم به‌دست آمده در فیزیک، هنوز هم بسیاری از مشکلات حل نشده در مورد ساختار ماده و تکامل جهان وجود دارد. پروژه PANDA برای فهمیدن چگونگی خلق ذرات کاربرد دارد. طراحی و برنامه‌ریزی این پروژه به‌گونه‌ای است که دقیقاً به‌مطالعه و بررسی چگونگی تشکیل جرم ذرات از روی برهم‌کنش قوی بین کوارک‌ها بپردازد. در آشکارسازهای این پروژه ذراتی شناسایی می‌شوند که ناشی از برهم‌کنش پادپروتون‌های چرخان در داخل حلقه انبارش HESR با هدف‌های پروتونی یا هسته‌های دیگر هستند. از آنجایی که ما هنوز نمی‌دانیم که چه ذراتی ناشی از واپاشی گلوبال‌ها هستند، پس آشکارسازهای PANDA باید قادر به آشکارسازی و اندازه‌گیری انواع ذرات باشند. این امر باعث می‌شود آشکارسازها و تجهیزات آنها بسیار پیچیده بوده و چون این ذرات در تمامی جهات پرواز می‌کنند و پراکنده می‌شوند، آشکارسازها باید تمامی نواحی اطراف هدف

[8] Fabio Sauli, The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **805** (2016) 2-24.

[9] B. Ketzer, et al., Performance of triple GEM tracking detectors in the COMPASS experiment, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **535** (2004) 314–318.

[10] B. Ketzer, et al., A triple-GEM Detector with pixel readout for high-rate beam tracking in COMPASS, *Nuclear Science Symposium Conference Record* (2007).

[11] The ALICE Collaboration, Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Time Projection Chamber, CERN-LHCC-2013-020 / ALICE-TDR-016.

[12] M.G. Bagliesi, et al., The TOTEM T2 telescope based on triple-GEM chambers, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **617** (2010) 134–137.

[13] B. Ketzer et al., A triple-GEM Detector with pixel readout for high-rate beam tracking in COMPASS, *Nuclear Science Symposium Conference Record* (2007).

[14] The ALICE Collaboration, Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Time Projection Chamber, CERN-LHCC-2013-020 / ALICE-TDR-016.

[15] M.G. Bagliesi et al., The TOTEM T2 telescope based on triple-GEM chambers, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **617** (2010) 134-137.

[16] Particle Data Group, www-pdg.lbl.gov.

قدردانی

ضمن قدردانی از حمایت‌های مرکز شتاب‌دهنده یون‌های سنگین آلمان و اینستیتو هلمهلتز دانشگاه ماینس (HIM)، لازم به ذکر است که کلیه حقوق علمی و معنوی این پروژه برای مرکز GSI محفوظ می‌باشد.

مرجع‌ها

[1] FAIR-ESAC/Pbar/Technical Progress Report for: PANDA (Antiproton Annihilations at Darmstadt), Strong Interaction Studies with Antiprotons, PANDA Collaboration.

[2] PANDA Experiment website: www.panda.gsi.de.

[3] MOPCH079, Proceedings of EPAC (2006) Edinburgh, Scotland.

[4] FAIR/PANDA/Physics Book; Physics Performance Report for: PANDA (Antiproton Annihilations at Darmstadt), Strong Interaction Studies with Antiprotons; PANDA Collaboration.

[5] I. Hrinacova et al., Proc. of Computing in High Energy and Nuclear Physics (2003).

[6] R. Brun, F. Rademakers, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **389** (1997) 81-86.

[7] Stefano Spataro, The PandaRoot framework for simulation, reconstruction and analysis, *Journal of Physics: Conference Series* **331** (2011).