

مطالعه تولید انحصاری جفت پایون‌های مثبت و منفی در برخوردهای پروتون- پروتون با انرژی مرکز جرم ۷ ترا الکترون ولت

محسن خاکزاد

پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، پژوهشکده ذرات و شتابگرها، تهران

پست الکترونیکی: mohsen@cern.ch

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۰۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۱/۲۸)

چکیده

در این مقاله اندازه‌گیری انحصاری^۱ جفت پایون در برخوردهای پروتون-پروتون معرفی شده‌اند که در این رویدادها، پروتون‌ها شکسته نمی‌شوند. این اندازه‌گیری در شتاب دهنده بزرگ هادرونی LHC^۲ با استفاده از آشکارساز CMS^۳ در انرژی مرکز جرم ۷ TeV و با درخشانی^۴ $45.0 \mu\text{b}^{-1}$ انجام شده است. سطح مقطع تولید جفت پایون در فضای فاز با تکانه عرضی $P_T > 0.2 \text{ GeV}/c$ و تندایی^۵ $|y| > 2$ ، اندازه‌گیری شده است. سطح مقطع اندازه‌گیری شده برابر است با $0.8(\text{lumi}) \mu\text{b} \pm 0.8(\text{syst}) \pm 0.3(\text{stat}) \pm 0.5$. همچنین در این مطالعه، سطح مقطع دیفرانسیلی تابع جرم ناوردای جفت پایون، با مدل‌های پدیده شناختی مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: انحصاری، پایون، سطح مقطع

۱. مقدمه

این رو در تبادل دو پامرون احتمال تولید گلوئون‌گوی^۶ فراهم می‌شود و فرایند بالا مناسب‌ترین رویکرد برای بررسی گلوئون‌گوی است [۳، ۴ و ۵]. افزون بر این، بررسی فیزیک تولید پامرون، اجازه می‌دهد مدلی برای این فرایند غیراختلالی بسازیم.

در گذشته فرایند تبادل دو پامرون در انرژی‌های 63 GeV تا $\sqrt{s} = 23$ در ISR^۷ و نیز در شتاب دهنده تواترون با انرژی مرکز جرم 1.96 TeV و $\sqrt{s} = 0.9$ مطالعه شده است [۴-۶]. از نظر تئوری و در انرژی‌های کمتر از $M = 2 \text{ GeV}/c^2$ (جرم

در برهم‌کنش $pp \rightarrow p(p^*) + \pi^+ \pi^- + p(p^*)$ ، دو پایون تولید می‌شوند و پروتون‌ها پس از برخورد، شکسته نمی‌شوند. انتظار می‌رود که دینامیک این گونه فرایندها در انرژی‌های بالا با تبادل دو پامرون^۵ انجام گیرد [۱ و ۲]. شکل ۱ نمایی از این برهم‌کنش است. پامرون ذره‌ای است که ساختار آن تنها شامل گلوئون است، از

۱. Exclusive
۲. Large Hadron Collider
۳. Compact Muon Solenoid
۴. Rapidity
۵. Pomeron

۶. Glueballs

۷. Intersecting Storage Ring

جلو^۷.

(۴) گرماسنج میونی دارای ساختاری با اتاقک گاز یونیزه و با آهنربا با شار برگشت.

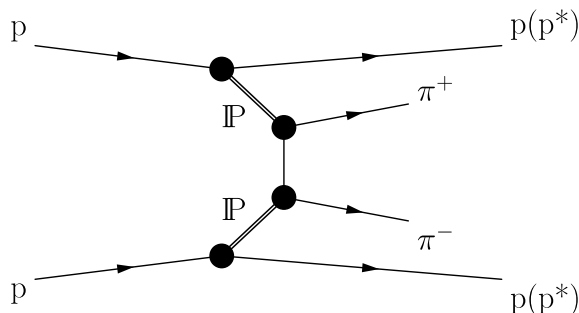
از ویژه‌گی‌های دستگاه CMS، پیچۀ ابرسانای^۸ آن است که ۱۳ متر طول و ۶ متر قطر دارد و میدان مغناطیسی بسیار قوی ۳/۸ تسلا را ایجاد می‌کند. دستگاه‌های پیکسل سیلیکونی و ردیاب نواری در مرکز CMS اند و با گرماسنج کریستال الکترومغناطیسی و گرماسنج برنج^۹-سوسوزن هادرونی احاطه شده است.

در مرکز آشکارساز، ردیاب‌های سیلیکونی قرار دارند و مسیر ذره‌های باردار را آشکار می‌کنند. ذره‌های برخورد کننده نخست، از این ردیاب می‌گذرند. طول این ردیاب ۵/۴ متر و قطر خارجی آن ۲/۴ متر است و ذرات باردار در محدوده شبه‌تندی^{۱۰} $|\eta| < ۲/۵$ شناسایی می‌شوند.

در گرماسنج الکترومغناطیسی، EB ناحیه $|\eta| < ۱/۴۸$ ، و EE ناحیه $۲ < |\eta| < ۱/۴۷$ را پوشش می‌دهد. گرما سنج هادرونی محدوده $|\eta| < ۱/۳$ را به وسیله HB و محدوده $۳/۰ < |\eta| < ۱/۳$ را به وسیله HE پوشش می‌دهد. دو گرماسنج HF هم ناحیه $۴/۹ < |\eta| < ۲/۹$ را پوشش می‌دهند که در فاصله ۱۱/۵ متری از نقطه برخورد، در دو طرف CMS قرار دارند.

۳. انتخاب رویدادها و تحلیل داده‌ها

داده‌هایی که در این مقاله بررسی می‌شوند از برخورد دو پروتون در انرژی مرکز جرم ۷ TeV با درخشانی^۱ $۴۵۰ \mu\text{b}^{-1}$ در آشکارساز CMS به دست آمده‌اند. رویدادها با مشاهده رد دو ذره باردار که هر دو در یک رأس مشترک و در راستای باریکه‌های برخوردی تولید می‌شود برگزیده شده‌اند. این ذره‌ها فعالیت دیگری ندارند. رویدادهای انتخاب شده با انرژی بیش از انرژی آستانه تولیدی، وارد گرماسنج می‌شوند. آستانه انرژی



شکل ۱. تولید $\pi^+\pi^-$ در برخورد پروتون-پروتون از طریق مبادلات دو پامرون.

ناوردا) تولید انحصاری دو پامرون، در چارچوب نظریه اختلالی و بررسی توابع ترکش برآمده از پامرون بررسی شده است.

مقاله پیش رو به بررسی تولید دو پامرون در فرایند انحصاری $pp \rightarrow p(p^*) + \pi^+\pi^- + p(p^*)$ با بیشینه جرم ناوردای $\sqrt{s} = ۳ \text{ GeV}/c^2$ پامرون در برخورد دهنده LHC با انرژی مرکز جرم $\sqrt{s} = ۷ \text{ TeV}$ می‌پردازد. سطح مقطع تولید جفت پامرون و تک پامرون با تکانه عرضی $p_T > ۰/۲ \text{ GeV}/c$ و تندی $|y| < ۲$ در آشکارساز CMS اندازه‌گیری و نتیجه با مدل‌های پدیده شناختی موجود مقایسه شده است.

۲. آشکارساز CMS

شرح کامل آشکارساز CMS، به همراه تعریف سیستم مختصات و متغیرهای سینماتیکی، در مرجع [۷] آمده است. در اینجا، توضیح کوتاهی آورده می‌شود. آشکارساز CMS، یک آشکارساز یکپارچه نیست. این آشکارساز از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده که اصلی ترین مولفه‌های آن عبارتند از:

- ۱) ردیاب: شامل پیکسل‌های سلیکون و ردیاب نواری.
- ۲) گرماسنج الکترومغناطیسی^۱ دارای قسمت‌های بشکه^۲ و کلاهک^۳.
- ۳) گرماسنج هادرونی^۴ دارای قسمت‌های بشکه^۵، کلاهک^۶ و

۶. EndCap (HE)

۷. Forward (HF)

۸. Superconducting solenoid

۹. Brass

۱۰. Pseudorapidity

۱. ECAL

۲. Barrel (EB)

۳. EndCap (EE)

۴. HCAL

۵. Barrel (HB, HO)

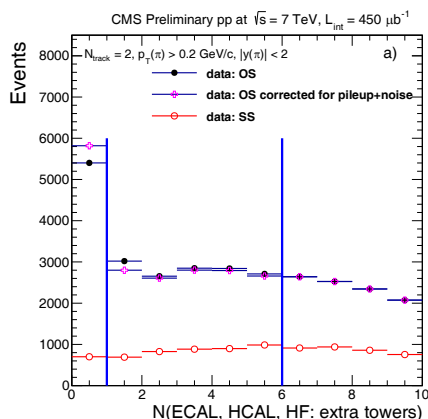
محدوده جرمی بسیار دشوار است و نویسنده هم سعی برای جدا کردن کائون پاد- کائون از پروتون پاد- پروتون نمی‌کند. در رویدادهای انحصاری جفت‌های پایون، لازم است که هیچ گونه فعالیت اضافی در ناحیه $4/9 < |\eta|$ در گرماسنج وجود نداشته باشد. این شرط با شمردن تعداد برج‌های گرماسنج (N_{extra}) که دارای سیگنال بالاتر از انرژی آستانه دارند، شدنی است. شکل ۲ تابع توزیع N_{extra} را نشان می‌دهد که در آن دایره‌پر مربوط است به رویداد با بار مخالف (OS) و دایره‌خالی مربوط است به رویدادهای با دو بار موافق (SS). همان طور که دیده می‌شود ناحیه سیگنال مربوط به $N_{extra}=0$ و رویدادهای پس زمینه غیرانحصاری در ناحیه ۵-۲ می‌باشد. بعد از انجام اصلاحات، تعداد رویدادهای سیگنال از 5402 به 5818 افزایش می‌یابد.

۴. نتایج

سطح مقطع تولید جفت‌های با بار مخالف پایون که از معیارهای انتخاب شده به دست آمده برابر است با $\sigma_{\pi^+\pi^-} = 20.5 \pm 0.3 \text{ (stat)} \pm 3.1 \text{ (syst)} \pm 0.8 \text{ (lumi)} \mu\text{b}$ این نتیجه پس از اصلاح همه‌ی پس زمینه‌ها در فضای فاز $p_T > 0.2 \text{ GeV}/c$ و $|y| < 2$ به دست آمده است. در مقایسه با مدل‌های تئوری پیش‌بینی شده استرلایت^۴ و دایم^۵ [۹]، نتایج به دست آمده، بزرگ‌تر است. یک دلیل شاید این است که در مدل‌های یاد شده پیامدهای اثرات پروتون‌های شکسته شده در نظر گرفته نشده است.

سطح مقطع دیفرانسیلی جفت پایون پس از اصلاح پس زمینه در شکل ۳ نمایش داده شده است (محور y خطی (سمت چپ) و لگاریتمی (سمت راست)).

همان طور که مشاهده می‌شود توزیع جرم در $0.3 \text{ GeV}/c^2$ افزایش می‌یابد و در $0.8 \text{ GeV}/c^2$ به حداقل مکانی می‌رسد، که با تولید مزون $\rho(770)$ در فرایند p - γ فوتوپروودکشن^۶ سازگار است. در مدل‌های استرلایت و دایم سطح مقطع محاسبه شده در این ناحیه جرمی، پایین‌تر از داده‌های تجربی است. با افزایش



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) توزیع N_{extra} برج بالاتر از انرژی آستانه برای پایون‌های با جفت مخالف (OS) و پایون‌های با جفت‌های موافق (SS) نشان داده شده است.

در قسمت‌های مختلف گرماسنج به ترتیب: $EB = 0.52 \text{ GeV}$ ، $EE = 2.18 \text{ GeV}$ ، $HB = 1.18 \text{ GeV}$ ، $HE = 1.95 \text{ GeV}$ و $HF = 4 \text{ GeV}$ در برخورد پروتون- پروتون، رویدادهای دیگری با همان پارامترهای تولید دو پایون وجود دارند. این‌ها به راستی پایون نیستند و پس زمینه رویدادهای دیده شده را می‌سازند. برای جدا کردن آنها از پایون‌های واقعی، دو شرط زیر در نظر گرفته شده است:

- کاهش ردهای کاذب بر اساس پارامترهای عرضی و طولی به دست آمده از برازش^۱ انجام می‌گیرد.
- فاصله عرضی ردهای برگزیده شده کمتر از 15 cm ، از مرکز برخورد در آشکارساز باشد.

هدف آزمایش، جدا کردن داده‌های غیرانحصاری^۲ و همچنین رویدادهایی است که بیش از یک رأس در برخوردهای پروتون- پروتون دارند و انباشتگی^۳ نامیده می‌شوند. شناسایی هادرون‌ها با استفاده از انرژی یونشی $\left(\frac{dE}{dx}\right)$ [۲۲] در مواد ردیاب، انجام می‌گیرد که برای $p_T < 0.7 \text{ GeV}/c$ ، پایون و کائون قابل تمایز می‌باشند. حدود ۹۰٪ از این ذرات پایون هستند. با این وجود، جدا کردن پایون‌ها از کائون‌ها در تمامی

۴. Starlight

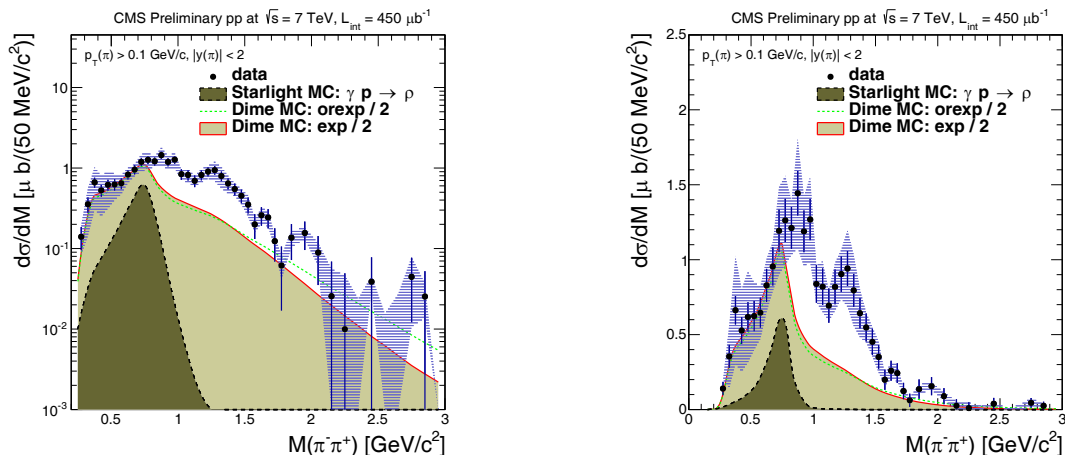
۵. Dime

۶. Photoproduction

۱. Fit

۲. Non-exclusive

۳. Pileup



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) سطح مقطع دیفرانسیلی یک جفت پایون از تابع جرم ناوردا، با مدل‌های پیش‌بینی شده دایم (به صورت خط مستقیم و نقطه-چین) مقایسه شده، که به مدل استرلایت (به صورت خط-چین) اضافه شده است.

جرم، یک کاهش در ناحیه $1 \text{ GeV}/c^2$ و یک قله در ناحیه $1/3 \text{ GeV}/c^2$ دیده می‌شود. خط‌های عمودی خطی در رویدادهای تجربی، عدم قطعیت آماری را نشان می‌دهد. عدم قطعیت سیستماتیک به صورت نوار نشان داده شده‌اند. نتایج به دست آمده با پیش‌بینی شبیه‌سازی دایم که با دو مدل عامل شکل‌نمایی و اریر^۵ که به صورت "exp" و "orear" همراه است، مقایسه شده است. در این مقایسه، مدل دایم با مدل استرلایت جمع شده است. در مدل دایم، امکان برهم‌کنش دو پروتون با تبادل پامرون و تولید ذره‌های اضافی در نظر گرفته نشده است. در نتیجه انتظار می‌رود که این اثر تأثیری با ضریب ۲ در سطح مقطع داشته باشد. بنابراین مدل دایم در این مطالعه بر ۲ تقسیم شده است. در مجموع، سطح مقطع حاصل از مدل‌های پیش‌بینی شده برابر با $12 \mu\text{b}$ می‌باشد، که نصف داده‌های تجربی است. لازم به تذکر است که هیچ یک از مدل‌های دایم و استرلایت اثرات شکسته شدن پروتون در جرم‌های پایین را شامل نمی‌شوند، علاوه بر این دایم تولید تشدیدها را هم در نظر نمی‌گیرد.

جرم، یک کاهش در ناحیه $1 \text{ GeV}/c^2$ و یک قله در ناحیه $1/3 \text{ GeV}/c^2$ دیده می‌شود. خط‌های عمودی خطی در رویدادهای تجربی، عدم قطعیت آماری را نشان می‌دهد. عدم قطعیت سیستماتیک به صورت نوار نشان داده شده‌اند. نتایج به دست آمده با پیش‌بینی شبیه‌سازی دایم که با دو مدل عامل شکل‌نمایی و اریر^۵ که به صورت "exp" و "orear" همراه است، مقایسه شده است. در این مقایسه، مدل دایم با مدل استرلایت جمع شده است. در مدل دایم، امکان برهم‌کنش دو پروتون با تبادل پامرون و تولید ذره‌های اضافی در نظر گرفته نشده است. در نتیجه انتظار می‌رود که این اثر تأثیری با ضریب ۲ در سطح مقطع داشته باشد. بنابراین مدل دایم در این مطالعه بر ۲ تقسیم شده است. در مجموع، سطح مقطع حاصل از مدل‌های پیش‌بینی شده برابر با $12 \mu\text{b}$ می‌باشد، که نصف داده‌های تجربی است. لازم به تذکر است که هیچ یک از مدل‌های دایم و استرلایت اثرات شکسته شدن پروتون در جرم‌های پایین را شامل نمی‌شوند، علاوه بر این دایم تولید تشدیدها را هم در نظر نمی‌گیرد.

۵. خلاصه

سطح مقطع تولید جفت پایون در فرایند،

جرم، یک کاهش در ناحیه $1 \text{ GeV}/c^2$ و یک قله در ناحیه $1/3 \text{ GeV}/c^2$ دیده می‌شود. خط‌های عمودی خطی در رویدادهای تجربی، عدم قطعیت آماری را نشان می‌دهد. عدم قطعیت سیستماتیک به صورت نوار نشان داده شده‌اند. نتایج به دست آمده با پیش‌بینی شبیه‌سازی دایم که با دو مدل عامل شکل‌نمایی و اریر^۵ که به صورت "exp" و "orear" همراه است، مقایسه شده است. در این مقایسه، مدل دایم با مدل استرلایت جمع شده است. در مدل دایم، امکان برهم‌کنش دو پروتون با تبادل پامرون و تولید ذره‌های اضافی در نظر گرفته نشده است. در نتیجه انتظار می‌رود که این اثر تأثیری با ضریب ۲ در سطح مقطع داشته باشد. بنابراین مدل دایم در این مطالعه بر ۲ تقسیم شده است. در مجموع، سطح مقطع حاصل از مدل‌های پیش‌بینی شده برابر با $12 \mu\text{b}$ می‌باشد، که نصف داده‌های تجربی است. لازم به تذکر است که هیچ یک از مدل‌های دایم و استرلایت اثرات شکسته شدن پروتون در جرم‌های پایین را شامل نمی‌شوند، علاوه بر این دایم تولید تشدیدها را هم در نظر نمی‌گیرد.

۵. خلاصه

سطح مقطع تولید جفت پایون در فرایند،

۵. Orear

سپاس‌گزاری

لازم است که از همه همکاران پژوهش‌کننده ذرات و شتابگرها در گروه CMS و همچنین همکاران گروه CMS در سرن که در انجام

مراجع

این پروژه کمک کردند قدردانی گردد. از همکار محترم دکتر فیروز آرش که در تصحیح این متن کمک کردند کمال تشکر را دارم.

- (2014).
7. The CMS Experiment at the CERN LHC, CMS Collaboration, *JINST*, **3** (2008) S08004.
8. S Klein, *et al.*, “STARlight: A Monte Carlo simulation for ultra-peripheral collisions of relativistic ions”, arXiv: 1607.03838.
9. L A Harland-Lang, V A Khoze, M G Ryskin, and W J Stirling, *Eur. Phys. J., C* **72** (2012) 2110.
10. M G Albrow, “Hadron Spectroscopy in Double Pomeron Experiments”, arXiv:1701.09092v1, hep-ex, 31 Jan. (2017).
1. CMS Collaboration, “Measurement of Exclusive $\pi^+\pi^-$ production in proton-proton at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, CMS-PAS-FSQ-12-004.
2. M G Albrow, *Int. J. Mod. Phys. A* **29** (2014) 1402006.
3. M G Albrow, T D Coughlin, and J R Forshaw, *Prog. Part. Nucl. Phys.* **65** (2010) 149.
4. R Waldi and K R Schubert, and K Winter, *Z. Phys. C* **18**, (1983) 301.
5. T Åkersoon, and *et al.*, *Nucl. Phys. B* **264** (1986) 154.
6. G Gutierrez, and M A Reyes, *Int. J. Mod. Phys. A* **29**