بررسی تکانه طولی و عرضی با استفاده از ویژگی‌های جت‌گونه ذرات در برهمکنش‌های پروتون-پروتون

نوری‌زاده، زینب[۱]؛ ناجی دومیرانی، جلیل [۱]؛ زمردیان، محمد ابراهیم[۲]؛ صالح‌مقدم، ریحانه[۲]

[۱]گروه فیزیک دانشکده علوم پایه، دانشگاه ایلام، ایلام

[۲]دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد، میدان آزادی، ۱۴۳۶-۹۱۷۷۵ ، مشهد

چکیده

در دینامیک کوانتومی رنگ مطالعهٔ ویژگی‌های برهمکنش‌های هادرونی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله به مطالعه و بررسی چند ویژگی یعنی تکانه عرضی و تکانه طولی ذرات با استفاده از ویژگی جت‌گونه ذرات در رویدادهای هادرونی (پروتون پروتون)می‌پردازیم.در این بررسی‌برای تعیین محور جت از متغیر شکل رویداد تراست استفاده می‌کنیم.بررسی میانگین مولفه ذرات در راستای این محور (تکانه طولی) و همچنین میانگین مولفه ذرات در راستای عمود بر این محور (تکانه عرضی) برحسب انرژی‌های مرکز جرم نشان می‌دهد که این مقادیر با افزایش انرژی دارای روندی صعودی هستند. با این همه سیر افزایشی تکانه طولی نسبت به سیر صعودی تکانه عرضی در هر دو برهمکنش (پروتون پروتون و الکترون پوزیترون) بیشتر است. این بدان دلیل است که با افزایش انرژی ذرات بیشتر در یک راستا قرار می‌گیرند، یا به‌عبارت دیگر همسوتر می‌شوند. از طرف دیگر افزایش اندک تکانه عرضی با انرژی نشان‌دهنده آن است که با افزایش انرژی امکان تابش گلوئون نیز بیشتر است. در نهایت نیز با استفاده از تکانه عرضی، مقدار ثابت پیوندی را در انرژی ۹۱/۲ GeV محاسبه می‌کنیم. مقدار به‌دست آمده برابر است با $\alpha_s = 0.123 \pm 0.004 GeV$*. این مقدار با پیش‌بینی نظریه QCD سازگار است. جزئیات این بررسی‌ها در متن مقاله آمده است.*

The study of transverse momentum and longitudinal momentum in proton-proton annihilations

Noorizadeh; Zeinab[1]; Naji Domirani, Jalil[1]; Zomorrodian, Mohammad Ebrahim[2]; Saleh Moghaddam, Reihaneh[2]

[1]Department of Physics, Ilam University, Ilam, Iran
[2]Department of Physics, Ferdowsi University of Mashhad, 91775-1436, Mashhad, Iran

Abstract

The study of the properties of hadronic interactions are of particular importance in Quantum Chromo- dynamics .We study in this paper the properties of longitudinal and transverse momentum by using proton proton interactions and electron positron annihilations. We are using the thrust variable to find the jet axis. The mean values of longitudinal and transverse momenta with respect to this axis show that both values increase by increasing the centre of mass energy. However the mean value of the longitudinal momentum has a faster rise when compared with mean value of the transverse momentum. This is true for both proton proton interactions and electron positron annihilations. The reason for such a behavior is that most of the momentum of each particle is directed along the jet axis. However the small rise of transverse momentum is due to the fact that there is a more chance of gluon radiation by increasing energy. Finally we are calculating the coupling constant by using transverse momentum. We find the value of $\alpha_s = 0.123 \pm 0.004 GeV$ *. This is consistent with the QCD theory. All these features will be explained in this paper.*

PACS No.12.38.-t; 13.66.Bc

مقدمه

هنگامی‌که در برهمکنش‌ها، ذرات و پادذرات تولید می‌شوند، این ذرات (پادذرات) قادرند جت های هادرونی را تشکیل دهند. بررسی فرایندهای نابودی ذرات، یکی از جنبه‌های مهم در فیزیک انرژی‌های بالا است. تشکیل هادرون‌ها در انرژی‌های بالا ابزار دقیقی برای بررسی درستی پیش‌بینی QCD (نظریه برهمکنش‌های قوی) است.

موضوع مهم در برهمکنش‌های با انرژی‌های بالا درک روشی است که در آن، کوارک‌ها در فرایندی موسوم به هادرونی‌شدن به‌صورت هادرون‌های قابل‌مشاهده پدید آیند. یکی از روش‌های مطالعهٔ QCD، بررسی چگونگی نحوهٔ قرارگیری ذرات در دسته‌های مجزا (جت‌ها) است[۱].

در این مقاله برای تولید رویدادهای پروتون پروتون و مقایسهٔ آن‌ها با برهمکنش‌های الکترون پوزیترون از داده‌های شبیه‌سازی‌شدهٔ مونت کارلو با استفاده از برنامهٔ کامپیوتری (PYTHIA) استفاده شده است.

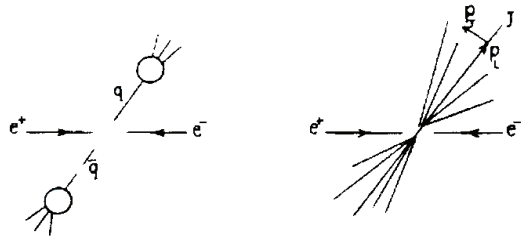
از طرفی به منظور تشخیص محور جت از متغیر تراست به‌عنوان یکی از متغیرهای شکل رویداد استفاده می‌کنیم. ازاین‌رو ابتدا به شرح مختصری از این متغیر می‌پردازیم.

تراست

متغیرهای شکل رویداد حالات فیزیکی ذرّات تولید شده در برهمکنش‌ها را توصیف می‌کنند [۲]. یکی از این متغیرها که تراست نامیده می‌شود، تعیین‌کنندهٔ محور جت است. محور تراست در امتداد بیشینهٔ تکانه طولی ذرّات نسبت به تکانهٔ کل ذرات در رویداد تعریف می‌شود که به محور جت نیز موسوم است. جت عبارت است از مجموعه‌ای از هادرون‌ها که در راستای یک زاویه‌ی فضائی کوچک جهت‌گیری می‌کنند. متغیر تراست در برهمکنش‌های هادرونی عبارت است از [۳]:

$$T = max\left(\frac{\Sigma_i|\vec{P}_i.\vec{n}|}{\Sigma_i|\vec{P}_i|}\right) \qquad (۱)$$

$\vec{p}_i$ تکانهٔ ذرهٔ iام در رویداد را مشخص می‌کند و بردار یکه $\vec{n}$ در جهتی قرار دارد که مقدار تراست بیشینه است. هرگاه جهت‌گیری ذرات در یک راستا باشند، آن رویداد را دوجتی می‌نامند. در این حالت، تراست به مقدار بیشینه آن یعنی یک نزدیک خواهد بود. از طرف دیگر با افزایش تعداد جت‌ها، مقدار این کمیّت به طور میانگین به سمت ۰/۵ میل می‌کند.



شکل ۱: مولفه‌های تکانه عرضی و تکانه طولی ذرات نسبت به محور تراست

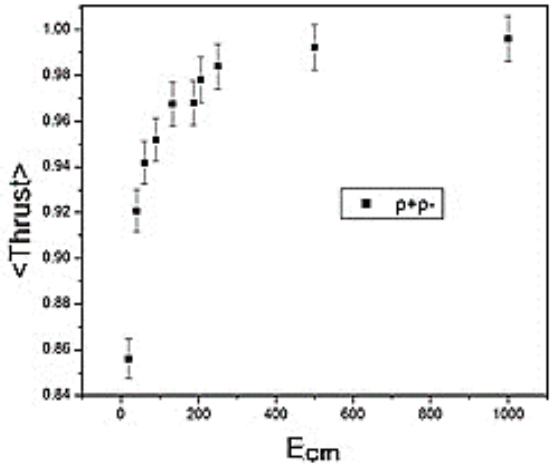
تکانه عرضی (P_T) نشان‌دهندهٔ مولفه عمودی هر ذره نسبت به محور جت و تکانه طولی (P_L) نشان‌دهندهٔ مولفه ذرات در راستای محور جت است. بدین ترتیب اگر محور تراست (جت) دارای بردارهای یکّه $\hat{n}_x$،$\hat{n}_y$ و $\hat{n}_z$ باشد، برای یک ذره با مولفه‌های تکانه p_x، p_y و p_z خواهیم داشت [٤]:

$$P_L = \left|\vec{P}.\hat{n}\right| = \hat{n}_x.p_x + \hat{n}_y.p_y + \hat{n}_z.p_z \qquad (۲)$$

$$P_T = \sqrt{\vec{P}^2 - P_L^2} \qquad (۳)$$

نتایج فیزیکی

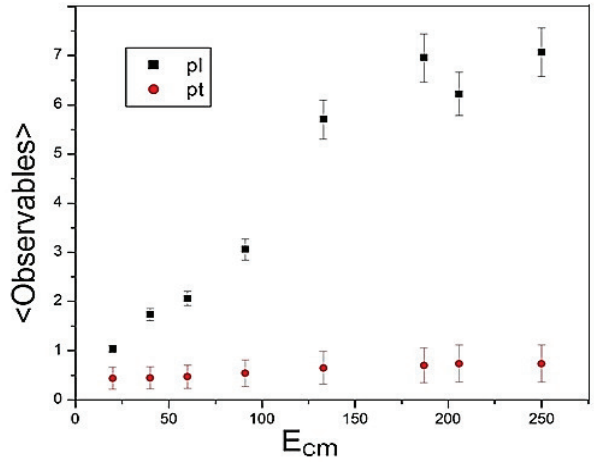
ابتدا با مشخص‌نمودن محور جت توسط متغیر تراست، در شکل ۲ تغییرات میانگین این متغیر را برحسب انرژی مرکز جرم برای داده‌های پروتون پروتون رسم می‌کنیم. همان‌طور که از شکل پیداست مقادیر تراست با افزایش انرژی مرکز جرم به مقدار یک نزدیک‌تر می‌شوند، طبق تعریف تراست این بدان معناست که ذرات به شکل مناسب‌تری در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و همراستاتر می‌شوند [۵و۶].



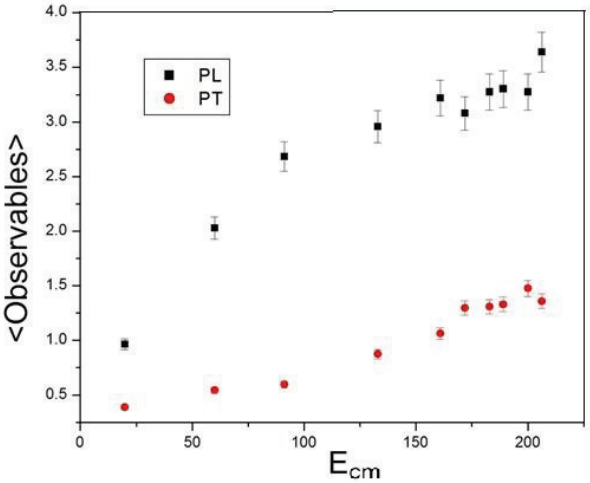
شکل۲: نمودار میانگین متغیر تراست برحسب انرژی مرکز جرم برای داده‌های پروتون پروتون

اکنون میانگین مولفهٔ ذرات در راستای محور تراست (P_L) و میانگین مولفهٔ عمودی ذرات نسبت به محور جت (P_T) برحسب انرژی مرکز جرم را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در شکل‌های ۳ و ٤ مشاهده می‌کنیم که با افزایش انرژی مرکز جرم، میانگین تکانه طولی ذرات بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر در انرژی‌های بالا ذرات همسوتر می‌شوند و تمایل بیشتری دارند تا در یک راستا قرار گیرند [۵]. همچنین با مقایسه دو نوع برهمکنش مشاهده می‌شود که این سیر صعودی در هر دو به‌خوبی نمایان است و بنابراین سازگاری خوبی بین برهمکنش‌ها در بررسی حالت جت‌گونه ذرات وجود دارد. از طرف دیگر در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش انرژی مرکز جرم، میانگین تکانه عرضی دارای روندی صعودی است. این افزایش تکانهٔ عرضی با زیاد شدن انرژی نشان می‌دهد که با افزایش انرژی، احتمال تابش و گسیل گلوئون نیز بیشتر می‌شود.

در نتیجه برای هر دو نوع برهمکنش مشخص است که سیر صعودی تکانهٔ عرضی نسبت به سیر صعودی تکانهٔ طولی به مراتب کمتر است. این بدان دلیل است که با افزایش انرژی مرکز جرم، ذرات تمایل بیشتری به همسو شدن دارند (تشکیل رویدادهای دوجتی شامل تنها جت‌های کوارک و پادکوارک). از این‌رو بخش عمده تکانهٔ ذرات به صورت تکانهٔ طولی ظاهر می‌شود. از طرف دیگر افزایش اندک تکانهٔ عرضی نیز نشان‌دهندهٔ آن است که با افزایش انرژی، امکان تابش گلوئون و ایجاد رویدادهای سه‌جتی (کوارک، پادکوارک و گلوئون) بیشتر می‌شود [۷].



شکل۳ : توزیع میانگین تکانه طولی و تکانه عرضی
برحسب انرژی مرکز جرم برای داده‌های پروتون پروتون.

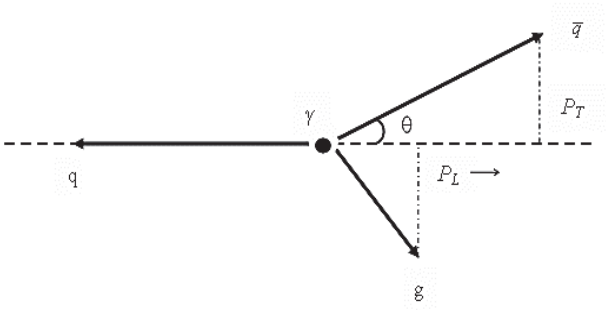


شکل٤ : توزیع میانگین تکانه طولی و تکانه عرضی
برحسب انرژی مرکز جرم برای داده‌های الکترون پوزیترون.

اینک با استفاده از رویدادهای سه‌جتی و به‌کارگیری تکانه عرضی ثابت پیوندی را در انرژی‌های مرکز مختلف محاسبه می‌کنیم. برای این منظور روش آلتارلی-پاریزی را مورد استفاده قرار می‌دهیم.

روش آلتارلی- پاریزی

شکل ۵ یک رویداد سه‌جتی را به‌طور شماتیک نشان می‌دهد. تکانه‌های $g,\bar{q},q$ که توسط فوتون مجازی در حال سکون ایجاد می‌شوند، در شکل مشخص شده است.

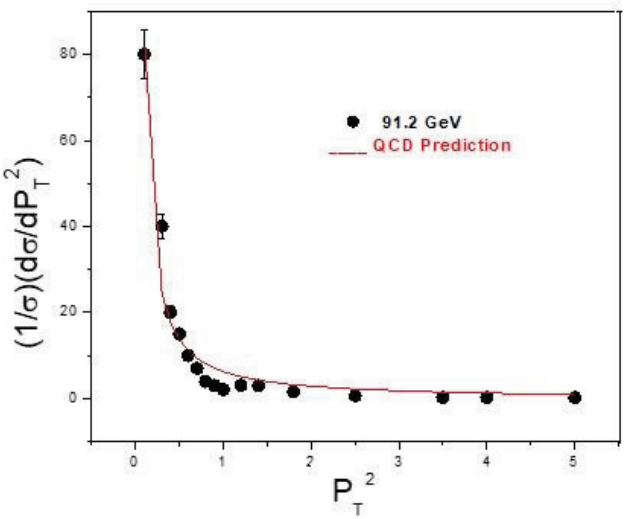


شکل۵ : **فرایند** $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g$ **در دستگاه مرکز جرم**

با درنظرگرفتن تکانه عرضی و سطح مقطع رویدادها می‌توان مقدار ثابت پیوندی را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\frac{1}{\sigma}\frac{d\sigma}{dP_T^2}=\frac{4\alpha_S}{3\pi}\frac{1}{P_T^2}\ln\left(\frac{Q^2}{4P_T^2}\right) \qquad (4)$$

با انتگرال‌گیری و برازش داده‌ها با توزیع P_T^2 مقدار این ثابت را مساوی با $\alpha_s = 0.123 \pm 0.004 GeV$ به دست می‌آوریم. همچنین در جدول ۱ مقادیر ثابت پیوندی در انرژی‌های مختلف با استفاده از روش آلتارلی پاریزی آمده است. مشاهده می‌شود که این نتایج با پیش‌بینی QCD مطابقت دارد.



شکل ٦ : سطح مقطع دیفرانسیلی رویدادهای سه‌جتی نسبت به متغیر P_T^2.

جدول۱ : مقادیر ثابت پیوندی α_s در انرژی های مختلف با استفاده از مدل آلتارلی پاریزی

Q(GeV)	$\alpha_s(GeV)$
60 (AMY)	0.133±0.003
60	0.131±0.002
91.2	0.122±0.003
133	0.118±0.003
172	0.111±0.002

نتیجه‌گیری

در این مقاله به مطالعه و بررسی تکانه عرضی و تکانه طولی ذرات با استفاده از ویژگی‌های جت‌گونهٔ ذرات در رویدادهای پروتون پروتون پرداخته شده است. برای این منظور از متغیر شکل رویداد تراست برای مشخص‌کردن محور تراست (محور جت) استفاده می‌کنیم. مولفهٔ ذرات در راستای این محور نشان‌دهندهٔ تکانهٔ طولی و مولفهٔ عمود بر این محور مشخص‌کننده تکانهٔ عرضی ذرات است. میانگین متغیر تراست نسبت به انرژی مرکز جرم نشان می‌دهد که با افزایش انرژی یک سیر صعودی وجود دارد که با توجه به تعریف تراست نتیجه می‌گیریم که با افزایش انرژی مرکز جرم، ذرات همسوتر می‌شوند.

سپس با بررسی میانگین تکانهٔ عرضی و میانگین تکانهٔ طولی نسبت به این محور در انرژی‌های مختلف مشاهده می‌کنیم که این کمیت‌ها نیز با افزایش انرژی دارای سیر صعودی هستند. با این همه تکانهٔ طولی نسبت به تکانهٔ عرضی افزایش بیشتری را از خود نشان می‌دهد. این بدان دلیل است که با افزایش انرژی، ذرات بیشتر در یک راستا قرار می‌گیرند، یا به‌عبارتی همسوتر می‌شوند. با این همه افزایش اندک تکانهٔ عرضی نشان دهنده آن است که با افزایش انرژی امکان تابش گلوئون نیز بیشتر می‌شود. با درنظرگرفتن تکانه عرضی و سطح مقطع رویدادها می‌توان مقدار ثابت پیوندی را نیز محاسبه کرد. برای این منظور از مدل آلتارلی پاریزی استفاده شده است. مقدار به دست آمده از این مدل برابر است با $\alpha_s = 0.123 \pm 0.004 GeV$ که این مقدار با نظریه QCD سازگار است.

مرجع‌ها

[۱] R. Gottgens. et al. Nucl. Phys. B**178** 392-400 (1981).
[۲]ATLAS Collaboration, *Eur. Phys. J. C***72** 2211 (2012).
[۳] P. A. Movilla Fernandez, O. Biebel, S. Bethke, S. Kluth, *arXiv: hep-ex/9708034 v2*, (1997)
[۴] C. Pahl, S. Bethke, O. Biebel, S. Kluth, J. Schieck, *Eur. Phys. J.C***64**: 533-547 (2009).
[۵] R. Saleh Moghaddam and M. E. Zomorrodian, *Indian Journal of physics,* **8**77 687-690 (2013).
[۶]The ALEPH Collaboration, *Eur. Phys. J.* **C35** 4 (2004).
[۷] نوری‌زاده، حدیث؛«**بررسی تکانه عرضی و تکانه طولی ذرات با استفاده از ویژگی جت‌گونه ذرات**»؛پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، ۱۳۹۷.