محاسبه عامل رنگ با استفاده از جت‌های کوارک و گلوئون در برهمکنش‌های مختلف

صالح‌مقدم، ریحانه[۱]؛ زمردیان، محمد ابراهیم[۱]

[۱]دانشکده فیزیک دانشگاه فردوسی مشهد، میدان آزادی، ۱۴۳۶-۹۱۷۷۵ ، مشهد

چکیده

در این مقاله، عامل رنگ را به عنوان یکی از پارامترهای اساسی در نظریه QCD مورد بررسی قرار می‌دهیم. مقدار این کمیت را از دو روش محاسبه و با پیش‌بینی QCD مقایسه می‌کنیم. در اولین روش، نسبت میانگین تعداد ذرات باردار در جت گلوئون به جت کوارک را تحقیق می‌کنیم و در روش دوم، نسبت میانگین چندگانگی جت گلوئون به جت کوارک را وابسته به تکانه عرضی ذرات موجود در جت بررسی می‌کنیم. از نتایج به‌دست آمده، نتیجه می‌شود که مقدار این عامل با افزایش انرژی، صعودی است و در انرژی‌های بالاتر به مقدار ۲,۲۵ نزدیک می‌شود. جزئیات این بررسی‌ها در متن مقاله توضیح داده شده است.

Calculation of color factor by using the quark and gluon jets in different interactions

Saleh Moghaddam, Reihaneh[1]; Zomorrodian, Mohammad Ebrahim[1]

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

Abstract

In this paper, we study the color factor as one of the basic parameters in QCD theory. We calculate the value of this quantity by two methods and compare it with QCD prediction. In the first method, we investigate the ratio of the average number of charged particles in a jet gluon to a quark jet, and in the second method, we investigate the ratio of the average multiplicity of a gluon jet to a quark jet depending on the transverse momentum of the particles in the jet. From the obtained results, it can be concluded that the value of this factor is rising with increasing energy and approaches 2.25 at higher energies. The more details are described in the text of the article.

PACS No. 12.20.−m; 12.38.Aw; 12.38.Mh

مقدمه

نظریه QCD به عنوان نظریه‌ای که ساختار درونی ذرات و برهمکنش‌های بین آن‌ها را بررسی و پیش‌بینی می‌کند، یکی از بنیادین‌ترین نظریه‌هاست. در این نظریه، عامل رنگ (r) یکی از پارامترهای اساسی است که نسبت تعداد بارهای رنگ C_A را به مقدار C_F مشخص می‌کند.

با توجه به اینکه بارهای رنگ شامل سه رنگ آبی، سبز و قرمز (B, G ,R) هستند، بنابراین مقدار C_A را برابر با ۳ و مقدار C_F را از رابطه $(N^2-1)/2N$ برابر ٤/۳ در نظر می‌گیریم. در این‌صورت مقدار عامل رنگ طبق پیش‌بینی QCD برابر ۹/٤ یا ۲,۲۵ است [۱]. در این مقاله می‌خواهیم این عامل رنگ را از دو طریق مورد بررسی و محاسبه قرار دهیم. بدین منظور از داده‌های شبیه‌سازی با استفاده از برنامه PYTHIA [۲] در برهمکنش‌های الکترون–پوزیترون، الکترون–پروتون و پروتون–پروتون بهره می‌گیریم.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در تارنمای انجمن فیزیک ایران به آدرس زیر معتبر است:

https://www.psi.ir/f/physics۱۴۰۰

تابع ترکش

پارامتری که بیانگر اختلاف بین جت کوارک و گلوئون می‌باشد مربوط به تابع ترکش است. تابع ترکش توصیف‌کننده‌ی گذار پارتون اولیه به هادرون‌های نهایی است. اختلاف جت‌های کوارک و گلوئون در توابع ترکش به صورت کسری از انرژی است که توسط هر ذره حمل می‌شود:

$$X_E = \frac{E_{particle}}{E_{Jet}} \qquad (۱)$$

در این رابطه، $E_{particle}$ انرژی هر ذره در رویداد است و E_{Jet} نیز انرژی جت مورد بررسی را مشخص می‌کند. به منظور یافتن این کمیت‌ها، ابتدا با بهره‌گیری از الگوریتم JADE، جت‌های کوارک و گلوئون را از یکدیگر جدا کنیم. منظور از جت، دسته‌ای از هادرون‌هاست که در راستایی یکسان گسیل می‌شوند. اگر پس از برخورد ذرات اولیه، هادرون‌ها در دو جهت واپاشی شوند، یک رویداد دو جتی شامل جت‌های کوارک و پادکوارک تشکیل می‌شود. اما چنانچه پس از واپاشی، تعداد دسته‌ها افزایش پیدا کند، رویدادهای سه‌جتی یا با تعداد جت‌های بیشتر که از جت‌های کوارک، پادکوارک و گلوئون تشکیل شده‌اند، ایجاد می‌گردد.

الگوریتم JADE

وجود جت‌های ذرات و ارتباط یک جت به یک پارتون، به این واقعیت استناد می‌کند که ذرات پدید آمده از یک پارتون در طی هادرونی شدن، تنها اندازه‌حرکت عرضی محدودی از اندازه‌حرکت پارتون دریافت می‌کنند. بنابراین جهت غالب ذرات به‌وسیله پارتون‌ها تعیین می‌شود.

الگوریتم مربع جرم ناوردای مقیاس شده JADE به منظور تشکیل جت‌ها، در رویدادهای هادرونی توسط ادغام ذرات با افزودن چار بردار آن‌ها به یکدیگر، برای تشکیل شبه ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این الگوریتم جرم ناوردای هر جفت از هادرون‌های نهایی محاسبه می‌شود. اگر جرم ناوردای هر کدام از جفت‌های هادرونی از کسر معینی از انرژی مرکز جرم Y_{cut} کوچکتر باشد، این جفت‌ها با هم ترکیب می‌شوند و یک شبه ذره را تشکیل می‌دهند. پس از ترکیب دو ذره با یکدیگر، طیف جدیدی از هادرون‌ها را مشاهده خواهیم کرد. برای این طیف جدید از هادرون‌ها جرم ناوردا را دوباره محاسبه می‌کنیم و این شیوه تا زمانی که هیچ جرم ناوردایی کوچکتر از Y_{cut} نباشد، ادامه می‌یابد.

برای همه جفت‌های ذرات i و jمربع جرم ناوردای مقیاس شده Y_{ij} به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳]:

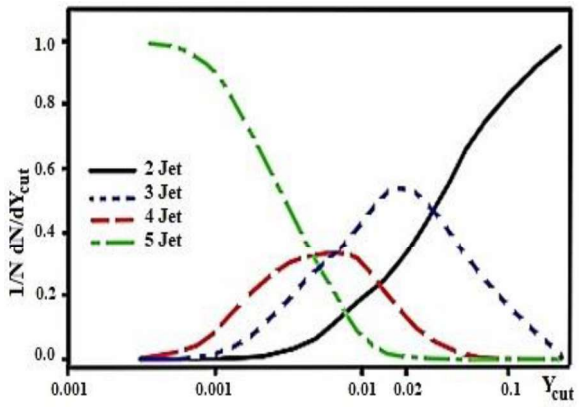
$$Y_{ij} = \frac{M_{ij}^2}{E_{vis}^2} \qquad (۲)$$

E_{vis} انرژی قابل‌مشاهده هر رویداد است که برابر با مجموع انرژی‌های ذرّات ورودی در آن رویداد می‌شود. مربع جرم ناوردای M^2_{ij} برای الگوریتم JADE به این شکل است:

$$M_{ij}^2 = 2E_i E_j(1 - cos\theta_{ij}) \qquad (۳)$$

E_i و E_j انرژی ذره i و j هستند که توسط زاویه‌ی θ_{ij} از هم جدا می‌شوند. هنگام استفاده از Y_{cut}های کوچک در رویداد، تعداد جت‌های زیادی یافت می‌شود، در حالی‌که برای Y_{cut}های بزرگ فراوانی رویدادهای دوجتی بیشتر خواهد بود و رویدادهای سه‌جتی $q\bar{q}g$ کمتر پدید می‌آیند.

همان‌طور که از گفته‌های فوق پیداست، Y_{cut} یک مقدار تجربی است و احتمال خطا برای تعیین آن وجود دارد؛ از این رو انتخاب بهترین مقدار Y_{cut} برای محاسبات نیاز به صرف وقت و بررسی دارد و بسته به انرژی و کاربردهای مطالعاتی مقادیر مختلفی انتخاب می‌شود. در این مطالعه ما از مقدار ۰٫۰۲ برای این پارامتر استفاده کردیم چون طبق شکل۱، امکان جداسازی رویدادهای سه‌جتی در این مقدار واضح‌تر است.



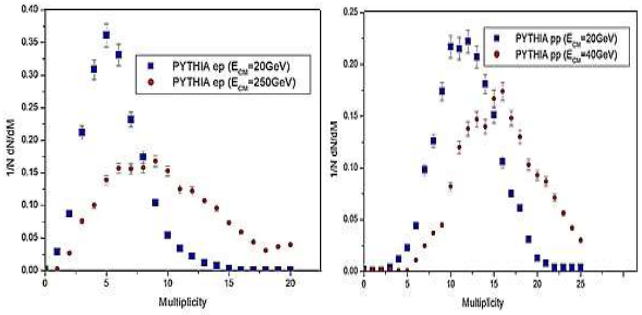
شکل۱ : تفکیک رویدادهای دو، سه، چهار و پنج جتی در Y_{cut}های مختلف.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در تارنمای انجمن فیزیک ایران به آدرس زیر معتبر است:
https://www.psi.ir/f/physics۱۴۰۰

نتایج فیزیکی

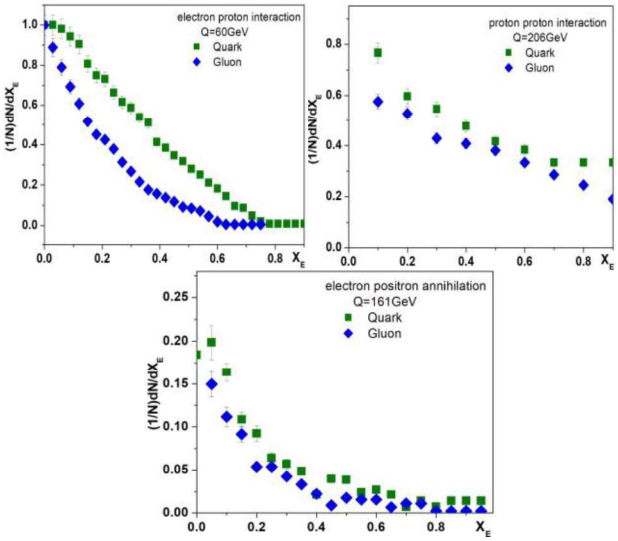
در این مقاله از داده‌های شبیه‌سازی‌شده مونت‌کارلو برای برهمکنش‌های مختلف استفاده می‌کنیم. در شکل۲، نمودار چندگانگی ذرات برای انواع برهمکنش‌ها در انرژی‌های مرکز جرم مختلف همراه با خطای سیستماتیک داده‌ها نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش انرژی مرکز جرم، نمودار چندگانگی ذرات پهن‌تر می‌شود. این ویژگی بدان دلیل است که با افزایش انرژی مرکز جرم، امکان رخداد رویدادهای سه‌جتی با افزایش انرژی بیشتر است.



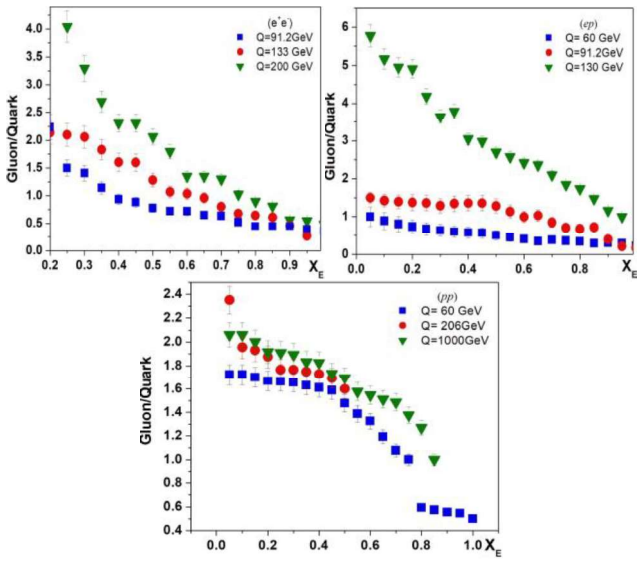
شکل۲ : مقایسه توزیع چندگانگی ذرات در انرژی‌ها و برهمکنش‌های مختلف.

در این بخش پارامتر ترکش کوارک و پارامتر ترکش گلوئون با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با مقایسه توزیع‌ها در انرژی‌ها و برهمکنش‌های مختلف مشاهده می‌کنیم که در تمامی موارد، سطح مقطع توزیع ترکش جت کوارک از سطح مقطع متناظر برای جت گلوئون بیشتر است.



شکل۳ : مقایسه **توزیع‌های ترکش برای جت‌های کوارک و گلوئون در سه نوع برهمکنش.**

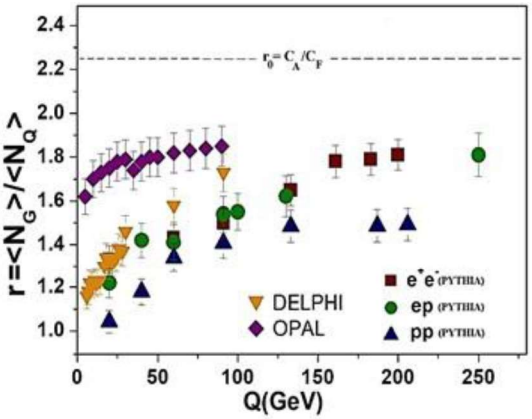
اکنون نسبت جت‌های گلوئون به کوارک را در هر انرژی مرکز جرم برحسب تابع ترکش براورد می‌کنیم. با مقایسه توزیع‌ها نتیجه می‌گیریم که این توزیع در انرژی‌ها و برهمکنش‌های مختلف نزولی است و در محدوده خطاهای سیستماتیک با افزایش انرژی مرکز جرم در هر برهمکنش نیز نسبت گلوئون‌ها به کوارک‌ها در حال افزایش است که تایید دیگری بر احتمال گسیل گلوئون‌ها در انرژی‌های بالاتر است.



شکل٤ : مقایسه نسبت جت‌های گلوئون به کوارک در انرژی‌ها و برهمکنش‌های مختلف.

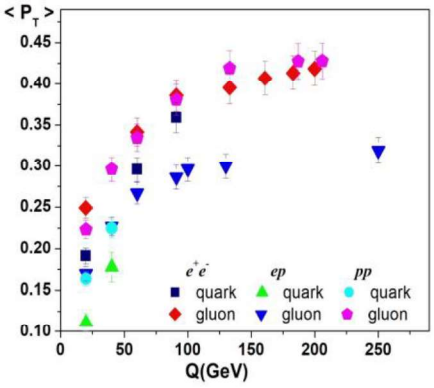
با محاسبه میانگین تعداد ذرات باردار در جت‌های گلوئون و کوارک و تقسیم آن‌ها بر یکدیگر، کمیتی به عنوان عامل رنگ معرفی می‌شود. این مقدار، از نسبت تعداد بار رنگ $C_A=N=3$ بر مقدار $C_F=(N^2-1)/2N$ محاسبه می‌شود که در QCD برابر با ۲,۲۵ پیش‌بینی شده است. از نتایج ما نیز همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، مشخص است که این نسبت در انرژی‌های بالا به سمت عدد ۲,۲۵ نزدیک می‌شود. خطاهای اندازه‌گیری‌شده در این نمودار شامل مجموع خطاهای آماری و سیستماتیک محاسبات است. در این شکل از داده‌های شبیه‌سازی شده برهمکنش‌های e^+e^-، ep و pp به همراه داده‌های آزمایشگاهی OPAL و DELPHI به منظور مقایسه بهتر استفاده شده است [٤].

این مقاله به شرط در دسترس بودن در تارنمای انجمن فیزیک ایران به آدرس زیر معتبر است:
https://www.psi.ir/f/physics۱۴۰۰



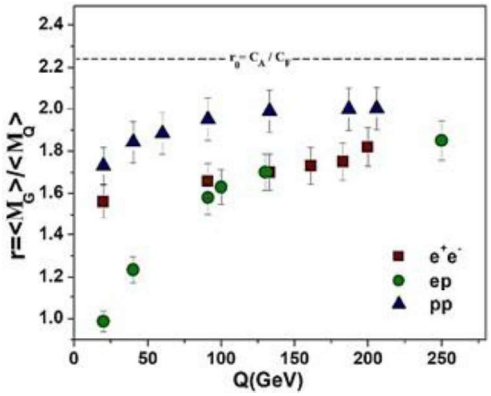
شکل۵ : محاسبه عامل رنگ در برهمکنش‌های مختلف.

از سوی دیگر، می‌توان عامل رنگ را نسبت چندگانگی جت‌های گلوئون به کوارک با توجه به تکانه عرضی ذرات نیز به‌دست آورد. بدین منظور ابتدا نمودار میانگین تکانه عرضی را در انرژی‌های مرکز جرم مختلف برای جت‌های کوارک و گلوئون رسم می‌کنیم. در شکل٦ مشاهده می‌شود که با بالارفتن انرژی، روند افزایش جت‌های گلوئون به مراتب از افزایش جت‌های کوارک بیشتر خواهد بود که نشان می‌دهد این جت‌ها در محدوده خطاهای سیستماتیک دارای تکانه عرضی بیشتر هستند که در نتیجه با احتمال ایجاد رویدادهای سه‌جتی یا بالاتر همراه است.



شکل٦ : میانگین تکانه عرضی جت‌های کوارک و گلوئون برحسب انرژی.

در نهایت با رسم نمودار نسبت میانگین چندگانگی جت‌های گلوئون به کوارک در انرژی‌های مختلف مقدار عامل رنگ (r) را محاسبه می‌کنیم. در شکل۷ همچون نمودار شکل۵ مشاهده می‌شود که با افزایش انرژی، روند توزیع عامل رنگ صعودی است و در انرژی‌های بالا به مقدار ۲,۲۵ می‌گراید. در این شکل خطاهای نشان داده شده، مجموع خطاهای آماری و سیستماتیک را دربرمی‌گیرند.



شکل۷ : محاسبه عامل رنگ باتوجه به میانگین چندگانگی ذرات برحسب انرژی.

نتیجه گیری

یکی از پارامترهای اساسی در نظریه QCD عامل رنگ است که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. این کمیت در نظریه QCD مقدار ۲,۲۵ پیش‌بینی شده است و ما از دو روش آن را محاسبه کرده و مورد بررسی و مقایسه قرار می‌دهیم. در اولین روش، نسبت میانگین تعداد ذرات باردار در جت گلوئون به جت کوارک و در روش دوم، نسبت میانگین چندگانگی جت گلوئون به جت کوارک را وابسته به تکانه عرضی ذرات موجود در جت تحقیق می‌کنیم. با توجه به نتایج به‌دست آمده، مشاهده می‌کنیم که مقدار عامل رنگ با زیاد شدن انرژی، روندی افزایشی دارد و مقدار آن در انرژی‌های بالاتر به عدد ۲,۲۵ نزدیک می‌شود که با پیش‌بینی نیز سازگار است.

مرجع‌ها

[۱] R. K. Ellis, W. J. Stirling, and B. R. Webber; "*QCD and Collider Physics*"; Cambridge University Press (1996).
[۲] T. Sjostrand, S. Mrenna, P. Z. Skands; PYTHIA 6.4 Physics and Manual, "*JHEP*"; **05** (2006) 026.
[۳] R. Saleh Moghaddan and M. E. Zomorrodian; "*JETP LETTERS*"; **101** (2015) 221.
[۴] DELPHI Coll. ; "*Eur. Phys. J. C*"; **13** (2000) 573 .

این مقاله به شرط در دسترس بودن در تارنمای انجمن فیزیک ایران به آدرس زیر معتبر است:
https://www.psi.ir/f/physics۱۴۰۰