رویدادهای چهارجتی و تاثیر طعم کوارک های مختلف برثابت پیوندی در مرتبه‌ی NNLO

ابراهیمی، سحر[۱]؛صالح مقدم، ریحانه[۱]؛زمردیان، محمد ابراهیم[۱]

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

چکیده

در این مقاله هدف ما بررسی تأثیر طعم کوارک‌های مختلف بر روی ثابت پیوندی می‌باشد. داده‌های مورد استفاده در این بررسی، داده‌های شبیه‌سازی مونت کارلو هستند که در آن‌ها طعم‌های مختلف کوارک وارد شده است. با استفاده از الگوریتم JADE، آهنگ رویدادهای چهارجتی را بدست می‌آوریم. در نهایت ثابت پیوندی را محاسبه نموده و نتایج را تحلیل می‌کنیم. بررسی نتایج نشان می‌دهد که ثابت پیوندی مستقل از طعم کوارک می‌باشد. این نتیجه با QCD اختلالی سازگار است. تقریب‌های اختلالی NLO وNNLO، تصحیحات اختلالی مهم در بسیاری از تحقیقات به شمار می‌آیند. در این مقاله تقریب NNLO را برای رویدادهای چهارجتی مورد بررسی قرار می‌دهیم. جزئیات بیشتر در متن آمده است.

Four jet events and the effect of different quarks on coupling constant in NNLO order

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

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

Abstract

Our aim is to investigate the effect of different quark flavors on the coupling constant. We are using the Monte-Carlo generated events by inserting different flavors. We calculate the four jet rate event by using the JADE algorithm. The results show that the coupling constant is independent of the quark flavor. This result is consistent with the QCD theory. In this thesis we do our analysis up to NNLO corrections. We explain more details in this article.

*PACS No.*11.15.Bt; 12.38.Aw; 13.66.Bc

مقدمه

دینامیک کوانتومی رنگ (QCD)، نظریه‌ای در زمینه‌ی میدان‌های کوانتومی است که واکنش‌های میان کوارک‌ها و گلوئون‌ها را مبتنی بر مفهوم بار کوانتومی جدید، مشابه با بار الکتریکی توضیح می-دهد.این بارجدیددر سه شکلموسوم به بار رنگ ظاهرمی‌شود. کوارک‌ها علاوه بر داشتن بار الکتریکی، حامل بار رنگی نیز می-باشند.

عدد کوانتومی رنگ به عنوان یک درجه‌ی آزادی بیشتر در مدل کوارک‌ها از هادرون‌ها معرفی شده است. این مدل فرآیند $e^+e^- \to hadrons$ را توصیف می‌کند. معرفی سه رنگ برای کوارک‌ها، سطح مقطع پراکندگی e^+e^- را به وسیله‌ی یک ضریب سه افزایش می‌دهد.

از نقطه نظر تئوری، فرآیند تولید هادروناز کوارک و پادکوارک، در نابودی زوج e^+e^-، ترکیبی از دو مرحله‌ی متفاوت اختلالی و غیراختلالی است.مرحله‌ی اول، خلق پارتون‌ها می‌باشد که در انرژی‌های بالا و فواصل کم رخ می‌دهد. آزادی مجانبی دلیلی است بر این که محاسبات مربوط به این مرحله، به صورت اختلالی انجام شود.مرحله‌ی دوم، مربوط به هادرونی شدن [۱] یا ترکش می‌باشد، ترکش کوارک‌ها و گلوئون‌های رنگی به هادرون‌های بدون رنگ،

در فواصل زیاد صورت می‌گیرد.چون گذار پارتون‌ها به هادرون‌ها در یک انرژی پایین (حدود۱GeV)رخ می‌دهد، این مرحله را نمی-توان به صورت اختلالی مورد بررسی قرار داد.

در ادامه به منظور مطالعه‌ی رویدادهای چهارجتی به تفکیک جت‌ها می‌پردازیم.

تفکیک جت

یک‌جت مجموعه‌ای‌از هادرون‌هاست که همگی در یک جهت خاص تولید می‌شوند. این جت‌ها را می‌توان به عنوان محصولات واپاشی کوارک‌ها تعبیر کرد.بنابراین می‌توان گفت که کوارک‌ها به طور غیرمستقیم به صورت جت‌های کوارکی حاصل از آزمایش-هایی مثل نابودی الکترون-پوزیترون قابل بررسی‌اند. هم‌چنین امکان دارد کوارک و پادکوارک حاصل از نابودی، گلوئون نیز تابش کنند. معمولا تابش گلوئون در انرژی‌های بالا رخ می‌دهد. برخی از رویدادها در انرژی‌های زیاد، چندین هادرون با تکانه‌ی عرضی بالا نیز تولید می‌کنند. یک توصیف ایده‌آل از چنین وضعیتی یک رویداد چهار جتی است. در یک رویداد چهار جتی، دو جت از هادرون‌ها در زاویه‌ی وسیعی تولید می‌شوند، حال آنکه دو جت دیگر یکی در جلو و یکی در عقب نیز حضور دارند.

برای تفکیک جت‌ها، از الگوریتم JADE استفاده می‌کنیم [۲]. الگوریتم‌های یابنده‌ی جت در نابودی الکترون-پوزیترون براساس ترکیب خوشه‌ای جفت ذرات نزدیک به هم است که برای تشکیل شبه ذرات بنا شده است. این روش به صورت تکراری برای ترکیب ذرات ادامه می‌یابد تا زمانی که رویدادها شامل تعداد اندکی شبه ذره جداشده‌ی مناسب در چارچوب قواعد تعریف شده در الگوریتم موردنظر باشند. شبه ذرات باقی مانده جت‌های خروجی را تشکیل می‌دهند. برای تعیین نزدیکی ذرات به یکدیگر در درون یک جت از اندازه حرکت عرضی استفاده می‌کنند.

از میان الگوریتم‌های یابنده‌ی جت از الگوریتمJADE استفاده خواهیم کرد [۲]. اساس این نوع الگوریتم‌های خوشه‌ای مطابق با روش زیر است:

الف)تعیین پارامتر تفکیک Y_{cut}.

ب)محاسبه‌ی جدایی متناظر $Y_{k,l}$ برای هریک از جفت ذرات k و l.

$$Y_{k,l} = \frac{2E_iE_j(1-\cos\theta_{ij})}{E^2} \qquad (۱)$$

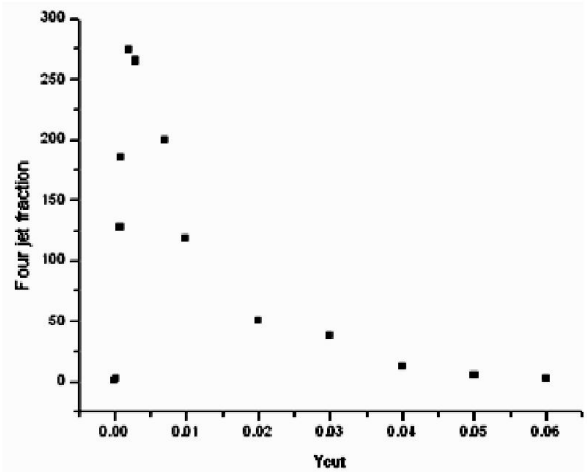
ج) اگر کوچکترین مقدار $Y_{k,l}$ محاسبه شده در مرحله‌ی (ب) کوچکتر یا مساوی Y_{cut}باشد، دو ذره در یکدیگر ادغام می‌شوند و یک شبه ذره را تشکیل می‌دهند.

د) مرحله‌ی (ب) و(ج) تا زمانی که جفت‌های ذره‌ای یا شبه ذره‌ای باقیمانده، دارای $Y_{k,l} \geq Y_{cut}$ گردند، تکرار می‌شوند. این شبه ذرات باقی مانده که دیگر قادر به ترکیب شدن با هم نیستند، جت نامیده می‌شوند. تعداد آن‌ها، تعداد جت‌های هر رویداد را نشان می‌دهد.

دراین مقاله از داده‌های شبیه‌سازی شده (Monte Carlo) با استفاده از برنامه‌ی PYTHIA استفاده می‌کنیم.

نتایج فیزیکی

ابتدا فراوانی توزیع رویدادهای چهارجتی را نسبت به Y_{cut}مورد بررسی قرار می‌دهیم. همانطور که از شکل ۱ پیداست رویدادهای چهارجتی یک بیشینه پیرامون $Y_{cut} \cong 0.01$ از خود نشان می‌دهند و پس از آن با افزایش Y_{cut} کاهش می‌یابند.



شکل ۱:فراوانی رویدادهای چهارجتی به ازایY_{cut}های مختلف برای داده-های مونت کارلو

همانطور که می‌دانیم آزادی مجانبی ما را مجاز می‌داند که سطح مقطع برهمکنش‌های ذرات بنیادی در انرژی‌های بالا و تاثیر تئوری اختلال را بر ثابت جفت‌شدگی قوی محاسبه کنیم. در بسط اختلالیLO، با انتخاب مقیاس بازبهنجارش ثابت جفت شدگی

تغییر می‌کند. در فرآیند هادرونی‌شدن، به دلیل وابستگی سطح مقطع به این مقیاس، شرایط مناسب تری وجود دارد تا بخش فواصل کوتاه و فواصل بزرگ برهمکنش‌های قوی را از یکدیگر تفکیک می‌کند. از این رو مقیاس LO برای محاسبه‌ی سطح مقطع، پیش بینی نسبتاً غیر قابل اعتمادی در بیشتر فرآیندهای این تئوری است. برای اصلاح این موقعیت، تصحیحات NLO مطرح شد. در سال‌های اخیر، تلاش‌های فراوانی برای محاسبه‌ی تصحیحات NNLO برای تابع توزیع پارتون و فرآیندهای بنیادی مهم صورت گرفته است.

آهنگ تولید برای یک رویداد چندجتی در نابودی الکترون-پوزیترون به صورت نسبت سطح مقطع برای رویدادها تقسیم بر سطح مقطع کل هادرونی تعریف می‌شود:

$$R_n = \frac{\sigma_{n-jet}(\mu)}{\sigma_{had}(\mu)} \qquad (۲)$$

آهنگ‌های تولید (سطح مقطع‌ها) در نظریه‌ی اختلال را می‌توان توسط بسط اختلالی محاسبه نمود. برای محاسبه‌ی بسط اختلالی یک رویداد چهارجتی خواهیم داشت:

$$\frac{\sigma_{4-jet}(\mu)}{\sigma_0(\mu)} = \left(\frac{\alpha_s(\mu)}{2\pi}\right)^2 B_4(\mu) + \left(\frac{\alpha_s(\mu)}{2\pi}\right)^3 C_4(\mu) + O(\alpha_s^4) \qquad (۳)$$

σ_0 عبارتست از سطح مقطع LO برای نابودی الکترون-پوزیترون به هادرون‌ها. ضرایب بکار رفته در این فرمول عبارتند از:

$$B_4 = B_4 + \frac{1}{2}\beta_0 \ln\left(\frac{\mu^2}{\mu_0^2}\right) A_4 \qquad (٤)$$

$$C_4 = C_4 + \beta_0 \ln\left(\frac{\mu^2}{\mu_0^2}\right) B_4 + \frac{1}{4}\left[\beta_1 + {\beta_1}^2 \ln\left(\frac{\mu^2}{\mu_0^2}\right)\right] \ln\left(\frac{\mu^2}{\mu_0^2}\right) A_4$$

که:

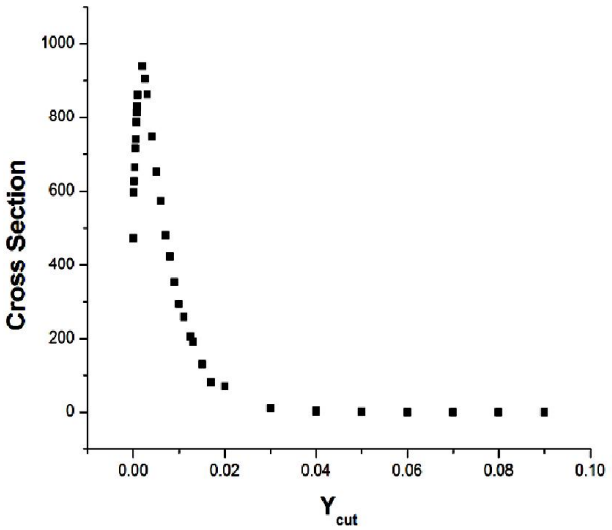
$$\beta_0 = \frac{11}{3} C_A - \frac{4}{3} T_R N_F \qquad (٥)$$

$$\beta_1 = \frac{34}{3} - 4\left(\frac{5}{3} C_A + C_F\right) T_R N_F \qquad (٦)$$

$$C_A = N_C \quad , C_F = \frac{N_C^2 - 1}{2N_C} \qquad (٧)$$

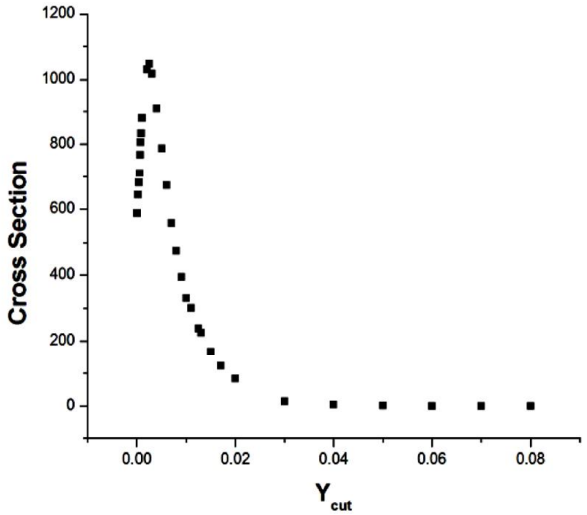
N_C به تعداد رنگ‌ها و N_F به تعدادطعم کوارک اشاره دارد.

در این قسمت تأثیر طعم کوارک‌های مختلف را بر ثابت پیوندی مورد مطالعه قرار می‌دهیم. در شکل ۲ فراوانی رویدادهای چهارجتی را با استفاده از طعم کوارک u نشان می‌دهیم.



شکل ۲: فراوانی رویدادهای چهارجتی کوارک u
در انرژی مرکز جرم۶۰GeV

شکل ۳ نیز فراوانی رویدادهای چهارجتی را برای کوارک با طعم c در این انرژی نشان می‌دهد.



شکل ۳: فراوانی رویدادهای چهارجتی کوارکc
در انرژی مرکز جرم۶۰GeV

هر دو نمودار یک بیشینه را در اطراف $Y_{cut} \cong 0.005$ نشان می‌دهند، پس از این مقداربیشینه مشاهده می‌کنیم که سطح مقطع با افزایش Y_{cut}ک اهش می‌یابد. روند این کاهش برای کوارک‌ها با طعم‌های مختلف مشابه یکدیگر است [۳].

اکنون با استفاده از فرمول (۳) به محاسبه‌ی ثابت پیوندی در طعم‌های مختلف کوارک می‌پردازیم. ضرایب B_4 و C_4 در Y_{cut}های مختلف از مرجع[٤] اقتباس شده است. با استفاده از این ضرایب و همچنین با استفاده از آهنگ رویدادهای چهارجتی (نسبت تعداد رویدادهای چهارجتی به تعداد کل رویدادها) که از طریق الگوریتم JADE به‌دست آمد، α_S را محاسبه می‌کنیم.

مقادیر α_S محاسبه شده برای پنج طعم کوارک به ازای Y_{cut}های مختلف در انرژی‌های ٦٠GeV و ۹۱/۲GeV در جدول‌های ۱و۲ آمده است:

جدول۱: نتایج محاسبه شده‌ی ثابت پیوندی در Y_{cut}های مختلف در انرژی مرکز جرم ٦٠GeV

کوارک	$\alpha_S(Y_{cut} = 0.01)$	$\alpha_S(Y_{cut} = 0.02)$	$\alpha_S(Y_{cut} = 0.004)$
u	۰/۰۸۹±۰/۰۲	۰/۰۷٤±۰/۰۲	۰/۰۸۹±۰/۰۰٤
d	۰/۰۹±۰/۰۲	۰/۰۷٦±۰/۰۲	۰/۰۹۲±۰/۰۰٦
b	۰/۱۲±۰/۰٤	۰/۰۸۸±۰/۰۲	۰/۱±۰/۰۰۲
c	۰/۰۹٤±۰/۰۲	۰/۰۸±۰/۰۲	۰/۰۹۷±۰/۰۰۵
s	۰/۰۸±۰/۰۳	۰/۰۷۲±۰/۰۲	۰/۰۹۱±۰/۰۰۵

جدول۲: نتایج محاسبه شده‌ی ثابت پیوندی در Y_{cut}های مختلف در انرژی مرکز جرم ۹۱/۲GeV

کوارک	$\alpha_S(Y_{cut} = 0.01)$	$\alpha_S(Y_{cut} = 0.004)$	$\alpha_S(Y_{cut} = 0.005)$
u	۰/۰٦۲±۰/۰۲	۰/۰۷۹±۰/۰۰۸	۰/۰۷٦±۰/۰۰٦
d	۰/۰٦٤±۰/۰۲	۰/۰۷۹±۰/۰۰۷	۰/۰۷۷±۰/۰۰۸
b	۰/۰۷۳±۰/۰۲	۰/۰۹۸±۰/۰۰۹	۰/۰۹۵±۰/۰۰۹
c	۰/۰٦۸±۰/۰۲	۰/۰۸٤±۰/۰۰۹	۰/۰۸۱±۰/۰۰۹
s	۰/۰٦٤±۰/۰۲	۰/۰۷۸±۰/۰۰۹	۰/۰۷٤±۰/۰۰٦

همان‌گونه که جدول‌ها نشان می‌دهند، مقادیر به‌دست آمده برای ثابت پیوندی در کوارک b از مقادیر به دست آمده برای بقیه‌ی کوارک‌ها بیشتر است، اما در محدوده‌ی خطاها با مقادیر به‌دست آمده توسط کوارک‌های سبک‌تر سازگار است.

نتیجه می‌گیریم که وارد نمودن طعم کوارک‌ها در محاسبه‌ی ثابت پیوندی، تاثیر قابل ملاحظه‌ای از خود نشان نمی‌دهد، به عبارت دیگر مقدار ثابت پیوندی مستقل از طعم کوارک است .

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده‌ی مونت کارلو الکترون- پوزیترون در انرژی‌های ٦٠GeV و ۹۱/۲GeV ثابت پیوندی را برای رویدادهای چهارجتی محاسبه می‌کنیم. برای این منظور تاثیر طعم‌های مختلف کوارکی را مد نظر قرار می‌دهیم. مشاهده می‌کنیم که با افزایش انرژی، ثابت پیوندی کاهش می‌یابد. این نتایج با مقادیر به‌دست آمدهاز آزمایش‌های دیگر و همچنین با نظریه‌ی QCD سازگارند.

از طرفی همان‌گونه که از جدول‌های ۱و ۲ پیداست، مقدار α_S برای طعم کوارک b افزایش محسوسی را در مقایسه با بقیه‌ی طعم-ها از خود نشان می‌دهد، اما در محدوده‌ی خطاهای به‌دست آمده مقدار آن با مقادیر ثابت پیوندی محاسبه شده از طعم‌های سبک‌تر سازگار است.

بنابراین با توجه به نظریه‌یQCD، ثابت پیوندی در برهمکنش-های قوی، مستقل از طعم کوارک است. نتیجه می‌گیریم که اندازه-گیری‌های ما با مدل QCD نیز سازگار است.

مرجع‌ها

[۱] L3 Collaboration, *Phys.Rept.***399** 71-174 (2004)
[۲] D.E. Bethke, S.Kunszt, Z.Soper, *Nuclear Physics B*, **370**310 (1992)
[۳]سحر ابراهیمي، پایان‌نامه کارشناسي ارشد، دانشگاه فردوسي مشهد، (۱۳۹۳)
[۴] S.Weinzierl, *Eur.Phys.J.C***71** 1565(2011)