

ثابت جفت شدگی در برهمکنش های الکترون-پوزیترون

صالح مقدم^۱، ریحانه^۱، خواججویی، لیلا^۱، زمردیان، محمد ابراهیم^۱

^۱گروه فیزیک دانشکده علوم پایه دانشگاه فردوسی مشهد، میدان آزادی، مشهد

چکیده

در این مقاله، ثابت جفت شدگی قوی در ناحیهی اختلالی را تا مرتبهی NNLO برای متغیرهای شکل رویداد در نابودی الکترون-پوزیترون محاسبه می کنیم. این محاسبات را با استفاده از داده های DELPHI، L3، AMY انجام می دهیم. در مرتبه های پایین، ثابت اختلالی به مقیاس بازینجارش بستگی دارد. با افزایش مرتبه در ثابت جفت شدگی مشاهده می کنیم که نتایج به دست آمده با پیش بینی QCD مطابقت بیشتری دارند.

Coupling constant in electron – positron annihilations

Saleh Moghaddam, Reihaneh¹; Khajouie, Leila¹; Zomorrodian, Mohammad Ebrahim¹

¹ Department of Physics, faculty of sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

Abstract

We measure the strong coupling constant by using the next-to-next-to leading order(NNLO) QCD predictions to the moments of event shape variables measured in e^+e^- annihilations. The data have been collected by the AMY, L3 and DELPHI detectors. In any finite order, perturbative constant shows an explicit dependence behavior on the choice of the renormalization scale. Our values for strong coupling constant in NNLO are consistent with those predicted by QCD calculations.

PACS No. 11.10.Gh; 13.66Bc; 12.38.Aw

بازینجارش

برای از بین بردن واگرایی لگاریتمی در محاسبه ی دامنه ناوردای پراکندگی رادرفرود، برش قطع M را به عنوان حد بالای انتگرال در نظر می گیریم. در نتیجه، دامنه ناوردای بدین صورت خواهد بود:

$$-im = (ie\bar{u}\gamma_0 u)(-i/q^2)(1 - (\alpha/3\pi)\text{Log}(M^2/m^2) - (\alpha/15\pi)(q^2/m^2) + O(e^4))(-iZe) \quad (2)$$

می توان عبارت بالا را به شکل زیر نیز بازنویسی کرد:

$$-im = (ie\bar{u}\gamma_0 u)(-i/q^2)(1 - e_R^2 q^2/60\pi^2 m^2) (-iZe_R) \quad (3)$$

که در آن،

$$e_R = e(1 - (e^2/12\pi^2)\text{Log}(M^2/m^2))^{1/2} \quad (4)$$

m جرم الکترون است.

مقدمه

در کرومودینامیک کوانتومی QCD، کمیت فیزیکی بدون بُعد \mathcal{R} می تواند به صورت یک سری بر حسب ثابت جفت شدگی قوی بیان شود. یک کمیت فیزیکی قدر نیست نامتناهی باشد، از این رو به کمک فرآیند بازینجارش، واگرایی هایی که در جریان محاسبات ایجاد می گردند، بر طرف می شود.

در نتیجه ی این فرآیند، \mathcal{R} و α_S به صورت توابعی از مقیاس بازینجارش بیان می شوند [۱]:

$$R \equiv R(Q^2/\mu^2, \alpha_S); \alpha_S \equiv \alpha_S(\mu^2) \quad (1)$$

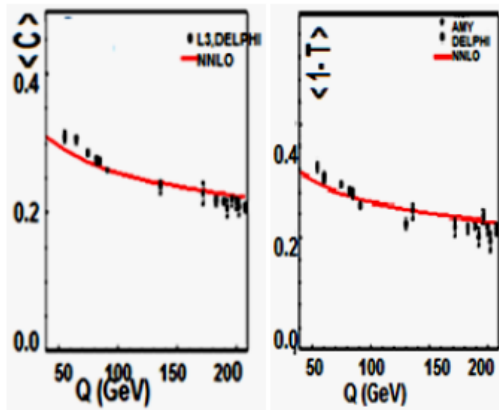
انتخاب مقیاس بازینجارش μ اختیاری است و کمیت فیزیکی \mathcal{R} نمی تواند به تغییرات آن وابسته باشد.

در نابودی الکترون-پوزیترون، معنویا مقیاس بازپنجارش را مقیاس فیزیکی $\mu = \sqrt{S}$ انتخاب می‌کنند و ضریب مقیاس بازپنجارش به صورت $x_\mu = \mu/\sqrt{S}$ تعریف می‌شود. بنابراین مقدار ثابت جفت شدگی در مرتبه NNLO عبارتست از:

$$\langle y^n \rangle = \bar{A}_{y,n} \left(\frac{\alpha_s(\mu)}{2\pi} \right) + \left(\bar{B}_{y,n} + \bar{A}_{y,n} \beta_0 \log \left(\frac{\mu^2}{E_{cm}^2} \right) \right) \left(\frac{\alpha_s(\mu)}{2\pi} \right)^2 + \left(\bar{C}_{y,n} + 2\bar{B}_{y,n} \beta_0 \log \left(\frac{\mu^2}{E_{cm}^2} \right) + \bar{A}_{y,n} \left(\beta_0^2 \log^2 \left(\frac{\mu^2}{E_{cm}^2} \right) + \beta_1 \log \left(\frac{\mu^2}{E_{cm}^2} \right) \right) \right) \left(\frac{\alpha_s(\mu)}{2\pi} \right)^3 + O(\alpha_s^4) \quad (4)$$

با استفاده از این رابطه ثابت جفت شدگی در مقیاس فیزیکی $\mu=Q$ را برای متغیرهای شکل رویداد در بازه انرژی ۸۶ تا ۲۰۷ GeV محاسبه می‌کنیم.

برای این منظور نمودارهای میانگین متغیر شکل رویداد را بر حسب انرژی رسم می‌کنیم. سپس منحنی‌های مربوطه را با معادله (۷) که در آن α_s به صورت یک پارامتر آزاد عمل می‌کند، برازش می‌دهیم. شکل‌های ۱ و ۲ نمودارهای مربوطه را نشان می‌دهند. منحنی تیره پر رنگ نیز، برازش مدل NNLO با داده‌های مورد نظر است. جدول‌های ۱ و ۲ مقادیر به دست آمده از این برازش را نشان می‌دهند.



قبلاً فرض بر این بود که e باری است که در پایین‌ترین مرتبه نمودارهای فاینمن ظاهر می‌شود، این فرضیه با مشکل مواجه می‌شود. فرض کنید e_R ، باری است که در جدول داده‌های ذرات نوشته شده است، در این صورت دامنه ناوردا (۳) متناهی می‌باشد و نامحدودی مربوط به برش قطع M در e_R ادغام شده است. این اولتیم رودرویی با بازپنجارش است.

یک پارامتر آزاد مانند μ را در نظر می‌گیریم که توسط بازپنجارش وارد محاسبات می‌شود. و با در نظر گرفتن $Q^2 = \mu^2$ می‌توان نامتناهی‌ها را با استفاده از بازپنجارش فیزیکی برطرف کرد. باری که از آزمایش بدست می‌آید، به Q^2 بستگی دارد و از این رو $\alpha(Q^2) \equiv e^2(Q^2)/4\pi$ را ثابت جفت شدگی روان می‌نامند. در حد انرژی‌های بالا برای ثابت جفت شدگی داریم:

$$\alpha(Q^2) = \frac{\alpha(\mu^2)}{1 - (\alpha(\mu^2)/3\pi) \text{Log}(Q^2/\mu^2)} \quad (5)$$

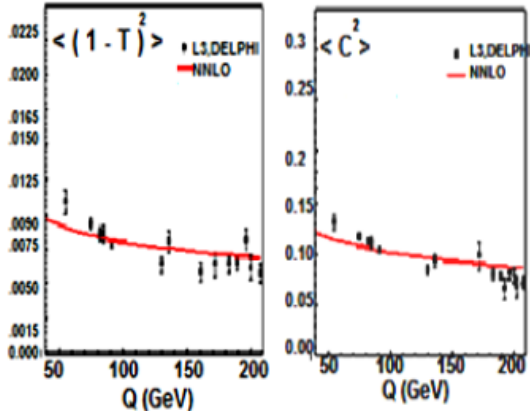
ثابت جفت شدگی روان نشان می‌دهد که چگونه بار مؤثر به فاصله جدایی دو ذره باردار بستگی دارد. بدین ترتیب بسط اختلالی QCD برای مسان متغیر شکل رویداد، به شکل زیر خواهد بود [۲]:

$$\langle y^2 \rangle = (\alpha_s/2\pi) \bar{A}_{y,2} + (\alpha_s/2\pi)^2 \bar{B}_{y,2} + (\alpha_s/2\pi)^3 \bar{C}_{y,2} + O(\alpha_s^4) \quad (6)$$

که در آن y متغیرهای شکل رویداد می‌باشد. همچنین ضرایب A, B, C برای هر یک از متغیرها در [۳] آمده است. این متغیرها عبارتند از: تراست، جرم جت سنگین، پارامتر C ، پهنای جت کل و پهنای جت بیشینه [۳].

محاسبات فیزیکی

در این بخش به بررسی تغییرات مقیاس بازپنجارش و تأثیر آن بر ثابت جفت شدگی قوی، با استفاده از پیش‌بینی‌های کرومودینامیک کوانتومی در مرتبه NNLO می‌پردازیم. در این مطالعات از مقادیر میانگین متغیرهای شکل رویداد B_T, B_W, C ، $1-T, \rho$ استفاده می‌شود [۴]. این داده‌ها مربوط به آشکارساز-های L3, AMY, DELPHI در آزمایش‌های نابودی e^+e^- می‌باشند [۵ و ۶].



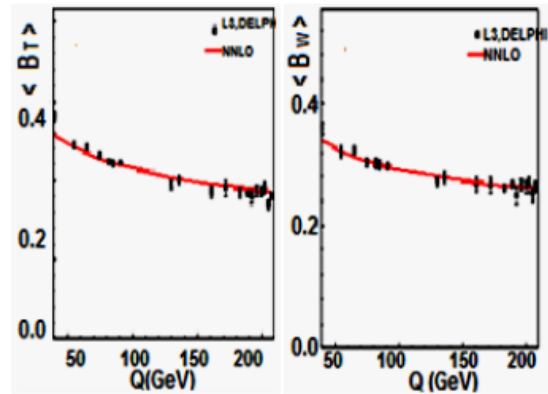
شکل ۲: برازش مدل NNLO بر داده‌های

حاصل از میانگین مرتبه دوم متغیرهای شکل رویداد

جدول ۲: مقادیر α_S برای مرتبه دوم متغیرهای شکل رویداد حاصل از مدل NNLO

α_S	متغیرهای شکل رویداد
0.1246 ± 0.012	$\langle \rho^2 \rangle$
0.1316 ± 0.010	$\langle 1 - T^2 \rangle$
0.1305 ± 0.011	$\langle C^2 \rangle$
0.1166 ± 0.009	$\langle (B_W)^2 \rangle$
0.1285 ± 0.011	$\langle (B_T)^2 \rangle$

مشاهده می‌شود که مقادیر به دست آمده از مدل NNLO تا مرتبه دوم برای داده‌های DELPHI و L3 با نتایج دیگر [۳] و پیش بینی QCD [۷] مطابقت دارند. شایان ذکر است هرگاه نمودارهای بالا را با استفاده از معادله (۷) تا مرتبه LO برازش دهیم، منحنی برازش همخوانی ضعیفی را با داده‌های تجربی خواهد داشت (مرجع ۸). از اینرو نتیجه می‌گیریم که در مرتبه‌های پایین، ثابت جفت‌شدگی به مقیاس بازه‌نشارش بستگی دارد. از طرف دیگر با افزایش مرتبه QCD وابستگی به مقیاس بازه‌نشارش ضعیف‌تر شده و در مرتبه‌های بالاتر به طور کامل از بین می‌رود.



شکل ۱: برازش مدل NNLO بر داده‌های حاصل از

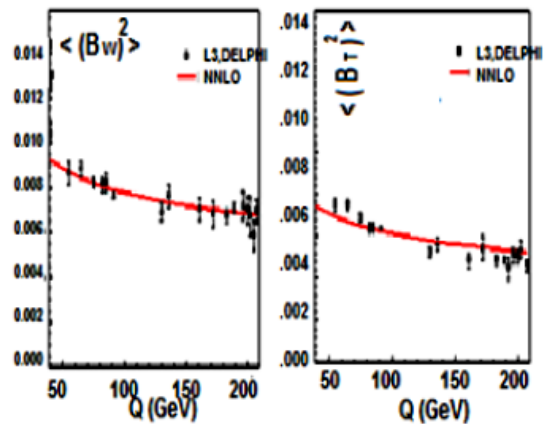
میانگین متغیرهای شکل رویداد

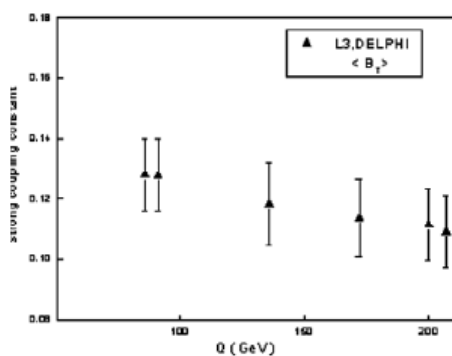
مقادیر ثابت جفت‌شدگی به دست آمده از نمودارها، در جدول ۱ قرار دارند.

جدول ۱: مقادیر α_S برای مرتبه اول میانگین متغیرهای شکل رویداد

α_S	متغیرهای شکل رویداد
0.1287 ± 0.010	$\langle \rho \rangle$
0.1273 ± 0.012	$\langle 1 - T \rangle$
0.1308 ± 0.012	$\langle C \rangle$
0.1228 ± 0.011	$\langle B_W \rangle$
0.1204 ± 0.012	$\langle B_T \rangle$

همچنین در مرتبه دوم، با برازش بر روی نمودارهای شکل ۲، مقادیر ثابت جفت‌شدگی برای متغیرهای مختلف به دست می‌آیند (جدول ۲):



شکل ۴: نمودار مقادیر ثابت جفت شدگی قوی برای B_T

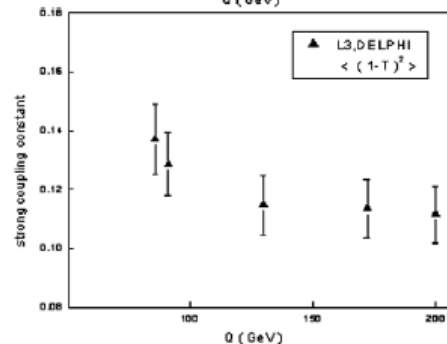
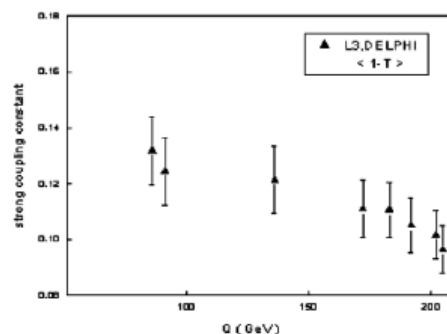
نتیجه گیری

در این مقاله، تغییرات مقیاس باز بهنجارش و تأثیر آن بر ثابت جفت شدگی قوی، با استفاده از پیش بینی‌های QCD در مرتبه NNLO بررسی گردید. این مطالعات با استفاده از متغیرهای شکل رویداد انجام می‌شود. در انجام محاسبات، داده‌ها مربوط به آشکارسازهای L3، DELPHI و AMY می‌باشند. در صورتیکه در محاسبات QCD تمام مرتبه‌های بالاتر در نظر گرفته شوند، وابستگی α_s به مقیاس باز بهنجارش از بین می‌رود. ولی از آنجائیکه این محاسبات فقط تا مرتبه معینی ادامه پیدا می‌کنند، پیش بینی‌های QCD وابستگی روشنی به انتخاب مقیاس باز بهنجارش دارند. انجام محاسبات تا مرتبه بالاتر NNLO توافق بیشتری با نتایج تجربی دارند.

مرجع‌ها

- [۱] S. Bethke, *J. Phys. G* **26** R 27 (2000)
 [۲] A. Gehrmann-De Ridder, T. Gehrmann, E.W. N. Glover and G. Heinrich, *JHEP* **0905**106(2009)
 [۳] R. Saleh Moghaddam, M. E. Zomorrodian, *Pramana journal of physics*. **81**, 5 775-790 (2013)
 [۴] صالح مقدم، ریحانه زمردیان، محمدابراهیم «بررسی مدل پراکندگی در نابودی الکترون-پوزیترون» سومین کنفرانس فیزیک ذرات و میدانها، شماره ۶، بهمن ماه ۱۳۹۱، صفحه ۱۳۵.
 [۵] L3 Collaboration, *Phys. Lett. B* **489** 65-80 (2000)
 [۶] DELPHI Collaboration, *Eur. Phys. J. C* **37** 1-23 (2004)
 [۷] N Brambilla, Y Sumino and A Vairo, *Phys. Lett. B* **513** 381-390 (2001)
 [۸] خواجوی، لیلا، زمردیان، محمدابراهیم « محاسبه پارامتر قطع در نابودی الکترون-پوزیترون» پایان نامه کارشناسی ارشد، شهریور ماه ۱۳۸۹.

اکنون در موقعیتی هستیم تا بتوانیم ثابت جفت شدگی را در هر کدام از متغیرهای شکل رویداد و برای انرژی‌های مرکز جرم مختلف به دست آوریم. شکل‌های ۳ و ۴ مقادیر ثابت جفت شدگی برای دو متغیر ممان شکل رویداد را به عنوان نمونه در مرتبه ۱ و ۲ نشان می‌دهند. همان‌گونه که از نمودارها پیداست، مقدار ثابت جفت شدگی با افزایش انرژی کاهش می‌یابد. مقادیر به دست آمده نیز در گستره‌ای جای می‌گیرند که با نظریه QCD کاملاً سازگار است [۷].

شکل ۳: نمودار مقادیر ثابت جفت شدگی قوی برای $1-T$ 