

محاسبه ثابت پیوندی با استفاده از توصیف اختلالی ذرات در برهمکنش‌های پروتون-پروتون و الکترون-پروتون

نبی قوشخانه، عباس^۱؛ صالح مقدم، ریحانه^۱؛ زمردیان، محمد ابراهیم^۱

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

چکیده

در این مقاله به بررسی و محاسبه ثابت پیوندی در ناحیه اختلالی تا مرتبه NNLO می‌پردازیم. در بررسی این مدل، از نمودارهای میانگین متغیرهای شکل رویداد تراست، پهنای جت بیشینه و پهنای جت کل استفاده می‌کنیم. سپس با برازش روابط ناحیه اختلالی با این نمودارها، مقدار عددی ثابت پیوندی را به دست می‌آوریم. با محاسبات انجام شده، مقدار این پارامتر در برهمکنش الکترون-پروتون برابر است با: $\alpha_s = 0.1125 \pm 0.0250$ در برهمکنش پروتون-پروتون برابر است با: $\alpha_s = 0.1228 \pm 0.0248$. مشاهده می‌کنیم که نتایج ما با نظریه QCD سازگارند.

Calculations of coupling constant in perturbative region in pp and ep interactions

Nabi Ghoshkhaneh, Abbas¹; Saleh Moghaddam, Reihaneh¹; Zomorrodian, Mohammad Ebrahim¹

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

Abstract

In this paper, we are calculating the strong coupling constant up to NNLO in perturbative region of the QCD theory. To achieve this we are using the mean values of event shape variables namely thrust, wide jet and also total wide jet Next by fitting the QCD theory in perturbative region with our distributions in this region we find the coupling constant which is equal to $\alpha_s = 0.1125 \pm 0.0250$ for electron-proton and $\alpha_s = 0.1228 \pm 0.0248$ for proton-proton interactions. Our results are consistent with the QCD theory.

PACS No. 13.66.Bc; 34.80.-I; 12.38.Cy

برهمکنش‌های مختلف از جمله: برهمکنش‌های الکترون-پروتون و پروتون-پروتون را توصیف می‌کنند.

متغیرهای شکل رویداد

الف) تراست: محور تراست محوری در امتداد بیشینه مؤلفه طولی ذرات نسبت به حاصل جمع تکانه‌ی تمامی ذرات است [۲]:

$$T = \max \left(\frac{\sum_i |\vec{p}_i \cdot \vec{n}|}{\sum_i |\vec{p}_i|} \right) \quad (1)$$

مقدمه

در بررسی برهمکنش‌های الکترون-پروتون و پروتون-پروتون به منظور محاسبه ثابت پیوندی روش‌های گوناگونی وجود دارند. در این مقاله، نظریه اختلالی NNLO مدل QCD را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. این مدل برپایه میانگین‌گیری از متغیرهای شکل رویداد بنا شده است [۱]. در ابتدا به اختصار متغیرهای شکل رویداد را به تفکیک تعریف می‌کنیم. این متغیرها، حالت‌های فیزیکی ذرات تولید شده در

که در آن:

$$\bar{A}_F = A \quad \bar{B}_F = B - \frac{3}{2} C_F A \quad (7)$$

$$\bar{C}_{y,n} = C_{y,n} + \frac{3}{2} C_F B_{y,n} + \left(\frac{9}{4} C_F^2 - K_2\right) A_{y,n} \quad (8)$$

$$Q/2 \leq \mu \leq 2Q, \quad \beta_0 = \frac{(33-2N)}{12\pi} \quad (9)$$

$$C_F = \frac{(N^2-1)}{2N} = \frac{4}{3}, \quad C_A = 3 \quad (10)$$

ضرایب اختلال A ، B و C مستقل از انرژی مرکز جرم هستند که توسط انتگرال‌گیری روی تابع توزیع‌های سطح پارتون که قبلاً تا دقت NNLO محاسبه شده‌اند، در جدول زیر قرار دارند:

جدول ۱: ضرایب A ، B و C برای متغیرهای شکل رویداد.

	A	B	C
1-T	۲,۱۰۳۵	۴۴,۹۹۹±۰,۰۰۲	۸۷,۶±۲۱,۱۹
B _W	۴,۰۶۷۴	-۹,۸۸۸±۰,۰۰۶	۴۶,۲۰±۴۷,۰۸
B _T	۱,۰۶۷۴	۶۳,۹۷۶±۰,۰۰۶	۶۵,۵±۷۲,۰

نتایج فیزیکی

ابتدا نمودارهای مربوط به متغیرهای شکل رویداد را تا تصحیحات توانی مرتبه NNLO برای برهمکنش‌های مختلف رسم می‌کنیم. همان‌گونه که از تمامی شکل‌ها (۱ تا ۶) پیداست با افزایش انرژی مرکز جرم، نمودارها دارای روند نزولی هستند. با برازش روابط ناحیه اختلالی بر روی این توزیع‌ها، مشاهده می‌شود که این برازش با روند داده‌ها مطابقت دارد. با استفاده از نرم‌افزار ORIGIN مقدار ثابت پیوندی را محاسبه می‌کنیم. توزیع میانگین متغیرهای شکل رویداد تراست، پهنای جت بیشینه و پهنای جت کل برحسب انرژی مرکز جرم در برهمکنش الکترون-پروتون به ترتیب در شکل‌های ۱ تا ۳ آمده‌اند. جدول ۲ مقادیر ثابت پیوندی حاصل از برازش ناحیه اختلالی تا مرتبه NNLO را نشان می‌دهد.

در رویدادهای دوجتی، مقدار این کمیت به یک نزدیک می‌شود. از طرف دیگر با افزایش تعداد جت‌ها مقدار تراست از یک، فاصله قابل ملاحظه‌ای می‌گیرد. به گونه‌ای که مقدار آن به طور میانگین به سمت ۰,۵ تمایل پیدا می‌کند.

معمول است که برای همخوانی با دیگر متغیرهای شکل رویداد در محاسبات متغیر 1-T جایگزین می‌شود.

(ب) پهنای جت: در تعریف دو متغیر دیگر شکل رویداد، یعنی پهن‌شدگی کل (B_T) و پهن‌شدگی بیشینه (B_W)، پارامتر B_K را که مشخص‌کننده پهنای یک نیم کره است، به صورت زیر تعریف می‌کنیم [۲]:

$$B_K = \left(\frac{\sum_{i \in H_T} |\vec{p}_i \times \vec{n}_T|}{2 \sum_i |\vec{p}_i|} \right) \quad (2)$$

بدین ترتیب برای B_W و B_T خواهیم داشت:

$$B_T = B_1 + B_2 \quad (3)$$

$$B_W = \max(B_1, B_2) \quad (4)$$

در این مقاله از داده‌های شبیه‌سازی شده (PYTHIA) در برهمکنش‌های مختلف استفاده می‌کنیم. سپس با بهره‌گیری از روابط ناحیه اختلالی و برازش آن‌ها بر روی داده‌های مونت کارلو به محاسبه ثابت پیوندی می‌پردازیم. بنابراین در این مرحله، توصیفی از ناحیه اختلالی در مدل QCD را ارائه می‌دهیم.

ناحیه اختلالی

مقدار میانگین متغیرهای شکل رویداد در ناحیه اختلالی به صورت زیر بررسی می‌شود:

$$\langle y \rangle = \frac{1}{\sigma_{had}} \int_0^{y_{max}} y \frac{d\sigma}{dy} dy \quad (5)$$

با استفاده از بسط ناحیه اختلالی تا مرتبه NLO داریم:

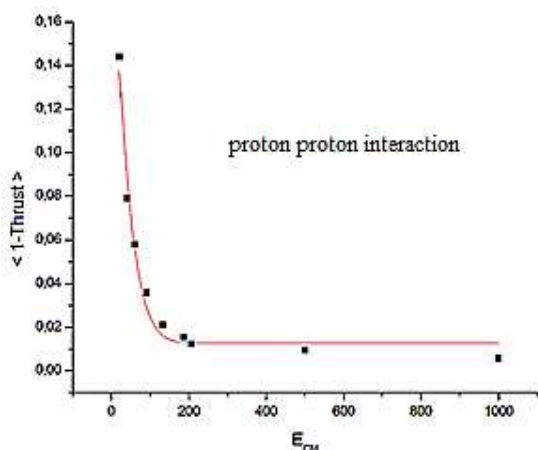
$$\langle y \rangle_{pt} = \left(\frac{\alpha_s}{2\pi}\right) \bar{A}_F + \left(\frac{\alpha_s}{2\pi}\right)^2 \left(\bar{B}_F + \bar{A}_F \beta_0 \log\left(\frac{\mu^2}{Q^2}\right) \right) + \left(\frac{\alpha_s(\mu)}{2\pi}\right)^3 \left(\bar{C}_{y,n} + \bar{B}_{y,n} + \bar{A}_{y,n} (\beta_0 \log\left(\frac{\mu^2}{Q^2}\right) + \beta_1 \log\left(\frac{\mu^2}{Q^2}\right)) \right) \quad (6)$$

جدول ۲: مقادیر ثابت پیوندی محاسبه شده از برازش روابط ناحیه اختلالی در برهمکنش الکترون-پروتون

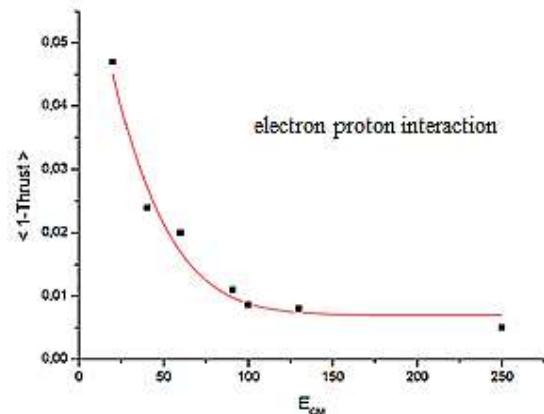
متغیر شکل رویداد	$\alpha_s(M_{Z^0}):NLO$	$\alpha_s(M_{Z^0}):NNLO$
$\langle 1-T \rangle$	0.1156 ± 0.0494	0.1119 ± 0.0417
$\langle B_{W^+} \rangle$	0.1146 ± 0.0314	0.1138 ± 0.0139
$\langle B_T \rangle$	0.1070 ± 0.0034	0.1119 ± 0.0195

مشاهده می‌کنیم که در برهمکنش الکترون-پروتون، نتایج به‌دست آمده برای ثابت پیوندی در ناحیه اختلالی از مرتبه ۱، ۰، ۱ است. همچنین با در نظر گرفتن محدوده خطاها، نتایج به‌دست آمده با یکدیگر همخوانی دارند.

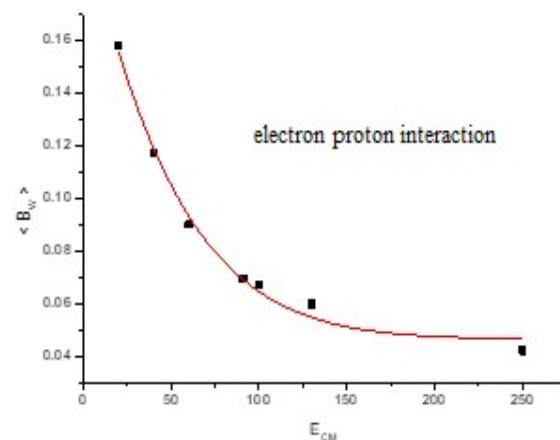
با مقایسه میانگین مقادیر به‌دست آمده از همه‌ی متغیرها ($\alpha_s = 0.1125 \pm 0.0250$) مشاهده می‌کنیم نتیجه با مقدار پیش-بینی شده در نظریه QCD که برابر با $\alpha_s = 0.1185 \pm 0.0006$ است، سازگاری دارد [۳]. این نتایج با مقادیر به‌دست آمده از تحقیقات قبلی [۲] و نتایج آزمایشگاهی [۵] نیز همخوانی دارند. در ادامه نمودار توزیع میانگین متغیرهای شکل رویداد را برحسب انرژی مرکز جرم در برهمکنش پروتون-پروتون رسم می‌کنیم که به ترتیب در (شکل‌های ۴ تا ۶) نشان داده شده‌اند. مقادیر ثابت پیوندی به‌دست آمده از برازش روابط ناحیه اختلالی روی این داده‌ها تا تصحیحات مرتبه NNLO، در جدول ۳ گردآوری شده‌اند.



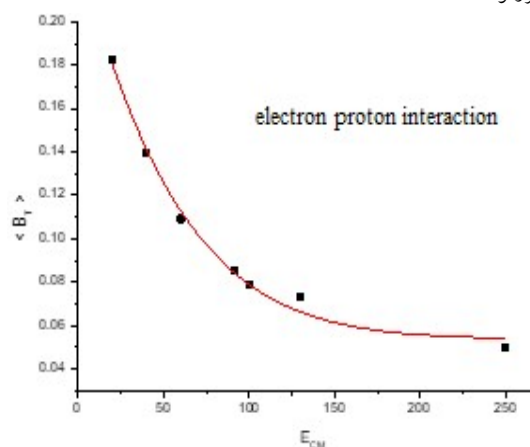
شکل ۴: توزیع میانگین 1-T برحسب انرژی مرکز جرم در برهمکنش پروتون-پروتون



شکل ۱: توزیع میانگین 1-T برحسب انرژی مرکز جرم در برهمکنش الکترون-پروتون



شکل ۲: توزیع میانگین Bw برحسب انرژی مرکز جرم در برهمکنش الکترون-پروتون



شکل ۳: توزیع میانگین B_T برحسب انرژی مرکز جرم در برهمکنش الکترون-پروتون

$\alpha_s = 0,1228 \pm 0,0248$ به دست آورد که بار دیگر مطابقت خوبی را با پیش‌بینی QCD [۴] و نتایج داده‌های واقعی [۶] نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

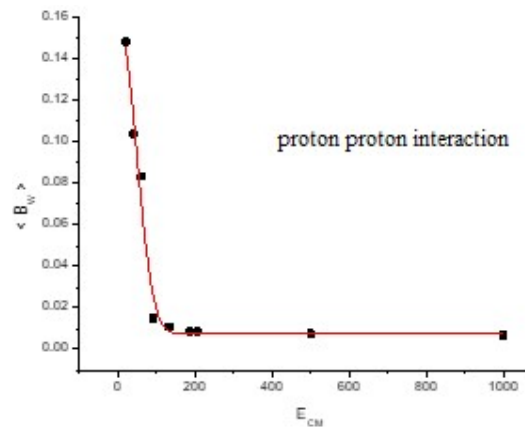
در این مقاله به بررسی ناحیه‌ی اختلالی در مدل QCD برای برهمکنش‌های الکترون-پروتون و پروتون-پروتون می‌پردازیم. در این بررسی‌ها از داده‌های مونت کارلو در انرژی‌های مختلف استفاده شده است.

برای این منظور متغیرهای شکل رویداد $1-T$ ، B_W و B_T را به کار می‌بریم.

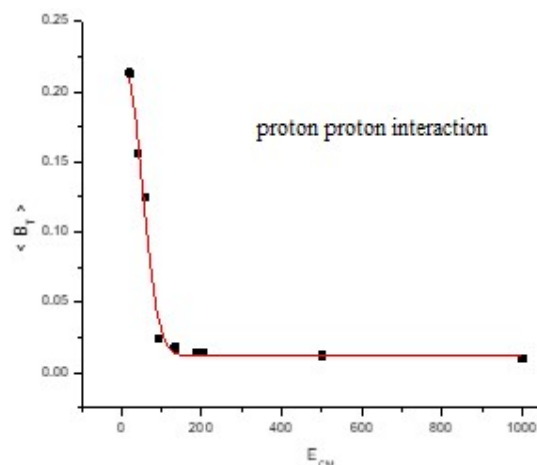
با برازش روابط ناحیه‌ی اختلالی بر روی این نمودارها، مقدار ثابت پیوندی به دست می‌آید. مشاهده می‌شود که مقادیر میانگین-گیری شده از تمامی متغیرها در مرتبه NNLO برای برهمکنش الکترون-پروتون ($\alpha_s = 0,1125 \pm 0,0250$) و همچنین برای برهمکنش پروتون-پروتون ($\alpha_s = 0,1228 \pm 0,0248$) با مقادیر پیش‌بینی‌شده‌ی نظریه QCD و نتایج آزمایشگاهی [۶-۵] سازگار است.

مرجع‌ها

- [۱] S. Kluth, "Test of quantum chromodynamics at e^+e^- colliders"; *Rept. Prog. Phys.* **69** (2006) 1771-1846.
- [۲] R. Saleh Moghaddam and M. E. Zomorrodian, "Comparison of coupling constant by using momentum spectra and event shape variables in different interactions"; *Can. J. Phys.* **98**, No. 10 (2020) 900-906.
- [۳] نبی قوشخانه، عباس؛ «محاسبه ثابت پیوندی با استفاده از توصیف اختلالی در برهمکنش‌های الکترون-پروتون و پروتون-پروتون»؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، تابستان ۱۳۹۹.
- [۴] N. Brambilla, Y. Sumino and A. Vario, "Quarkonium Spectroscopy and Perturbative QCD: A New Perspective"; *Phys. Lett. B.* **513** (2001) 381-390.
- [۵] S. Bethke, "Experimental Tests of Asymptotic Freedom"; *Prog. Part. Nucl. Phys.* **58** (2007) 351-386.
- [۶] P. A. Zyla et al. [Particle Data Group], "Review of Particle Physics"; *Prog. Theor. Exp. Phys.* **083C01**, No. 8 (2020).



شکل ۵: توزیع میانگین B_W برحسب انرژی مرکز جرم در برهمکنش پروتون-پروتون



شکل ۶: توزیع میانگین B_T برحسب انرژی مرکز جرم در برهمکنش پروتون-پروتون

جدول ۳: مقادیر ثابت پیوندی محاسبه شده از برازش روابط ناحیه اختلالی در برهمکنش پروتون-پروتون

متغیر شکل رویداد	$\alpha_s(M_{Z^0}):NLO$	$\alpha_s(M_{Z^0}):NNLO$
$\langle 1-T \rangle$	$0,1099 \pm 0,0263$	$0,1227 \pm 0,0366$
$\langle B_W \rangle$	$0,1024 \pm 0,0423$	$0,1227 \pm 0,0282$
$\langle B_T \rangle$	$0,1504 \pm 0,0188$	$0,1230 \pm 0,0097$

مشاهده می‌شود که در برهمکنش پروتون-پروتون نیز نتایج به دست آمده برای ثابت پیوندی در ناحیه‌ی اختلالی از مرتبه‌ی ۰,۱ است. همچنین با در نظر گرفتن خطای اندازه‌گیری، مقادیر به دست آمده با یکدیگر همخوانی دارند. با میانگین‌گیری بر روی این نتایج می‌توان مقدار ثابت پیوندی در برهمکنش پروتون-پروتون را