

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



نتایج مطالعات QCD در فرآیند نابودی الکترون - پوزیترون

دانشجو:

علیرضا سپهری

پایان نامه برای دریافت درجهی دکتری
در رشتهی فیزیک گرایش ذرات بنیادی

استاد راهنما:

دکتر محمدابراهیم زمردیان

استاد مشاور:

دکتر پروین اسلامی

بهمن ماه ۱۳۸۹

تقدیم به:

روح سبز مادرم

و

همسر مهربان و دلسوزم

تشکر و قدردانی:

از خداوند متعال که در تمام طول زندگی‌م و از جمله در زمان این تحقیق مرا یاری نموده است متشکرم.

همچنین از حضرت مهدی (عج) که با عنایت ویژه‌ی خود همواره مرا شرمنده ساخته است سپاسگذارم.

و نیز از ولی نعمتم امام رضا (ع) بسیار ممنونم.

برخود لازم می‌دانم که از زحمات دکتر زمردیان استاد راهنمای دلسوز و مهربانم که همواره مرا یاری نموده است قدردانی نمایم.

همچنین از اساتید گرامی دکتر اسلامی، دکتر جاویدان و دکتر سربیشه‌ای بسیار سپاسگذارم.

چکیده

در این پایان‌نامه ابتدا رویدادهای هادرونی حاصل از نابودی الکترون-پوزیترون در انرژی مرکز جرم 60 GeV تا 207 GeV مورد بررسی قرار می‌گیرند. داده‌های تجربی با مدل‌های جدید ارائه شده در نظریه QCD اختلالی مقایسه می‌شوند. نتیجه‌ی این مقایسه نشان می‌دهد هرچه مرتبه‌ی اختلال افزایش یابد سازگاری داده‌ها با مدل بیشتر می‌شود. همچنین ثابت پیوندی قوی با استفاده از سه روش ۱- ممان‌های توزیع ۲- آهنگ رویدادهای سه‌جتی ۳- توزیع‌های شکل رویداد تا تقریب مرتبه‌ی NNLO محاسبه می‌شود. مشاهده می‌کنیم که تغییرات ثابت پیوندی نسبت به انرژی با پیش‌بینی‌های QCD سازگاری دارد. پس از آن QCD در نزدیکی سیاه‌چاله‌های کوچک تولید شده در انرژی‌های بالاتر از TeV و همچنین رفتار تابع موج گلوئون‌ها، کوارک‌ها و مزون‌ها در نزدیکی این سیاه‌چاله‌های کوچک مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشاهده می‌شود تابع موج بیرونی سیاه‌چاله کاملاً از تحولات درون سیاه‌چاله تأثیر می‌پذیرد. نتایج محاسبات ما نشان می‌دهند که سطح مقطع گسیل مزون‌ها از درون سیاه‌چاله، از سطح مقطع تولید مزون‌ها بر اثر برهم‌کنش کوارک‌های بیرون سیاه‌چاله بیشتر است. سرانجام، وابستگی دامنه tree level گلوئون‌ها به توزیع‌های حرارتی آنها نزدیک سیاه‌چاله‌های کوچک مورد بحث قرار می‌گیرد.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱۴	مقدمه
۱۶	فصل ۱ مقدمه‌ای بر QCD
۱۷	۱-۱. لاگرانژی QCD
۱۸	۲-۱. رنگ و طعم برای کوارک
۲۰	۳-۱. تبدیلات Becchi– Rouet–Stora و میدان‌های گوست
۲۲	۴-۱. قوانین فاینمن
۲۴	۵-۱. اثر بهنجارش بر روی ثابت پیوندی
۳۷	فصل ۲ توزیع‌های شکل رویداد در نابودی الکترون-پوزیترون
۳۸	۱-۲. مقدمه
۳۸	۲-۲. تصحیحات NNLO
۴۰	۳-۲. شکل رویداد در نظریه‌ی اختلال تا مرتبه‌ی NNLO
۴۳	۴-۲. متغیرهای متناسب با شکل رویداد
۴۳	۱-۴-۲. تراست، T
۴۳	۲-۴-۲. پهن‌شدگی جت B_T و B_W
۴۴	۳-۴-۲. پارامتر C
۴۴	۵-۲. توزیع‌های NNLO
۴۶	۱-۵-۲. تراست
۴۸	۲-۵-۲. پهن‌شدگی جت
۵۱	۳-۵-۲. پارامتر C
۵۳	۶-۲. ممان‌های شکل رویداد در نابودی الکترون پوزیترون تا مرتبه NNLO
۵۵	۷-۲. سطح مقطع رویدادهای سه‌جتی در فرآیندهای نابودی الکترون-پوزیترون
۵۶	۱-۷-۲. تفکیک جت‌ها
۵۸	۲-۷-۲. سطح مقطع رویدادهای سه‌جتی تا مرتبه NNLO

فصل ۳ نتایج تجربی

۶۰	
۳-۱	مقدمه.....
۳-۲	چندگانگی ذرات باردار.....
۳-۳	نقض Scaling در نابودی الکترون - پوزیترون.....
۳-۴	خصوصیات جت‌های کوآرک و گلوئون در نابودی الکترون - پوزیترون.....
۳-۵	تعیین ثابت پیوندی با روش‌های مختلف.....
۳-۵-۱	تعیین α_s با استفاده از میانگین ممان‌های شکل رویداد.....
۳-۵-۲	تعیین ثابت پیوندی با استفاده از مشاهده‌پذیرهای سه‌جتی.....
۳-۵-۳	تعیین α_s با استفاده از توزیع‌های شکل رویداد.....
۳-۶	نتیجه‌گیری.....

فصل ۴ QCD نزدیک سیاه‌چاله‌های کوچک در شتابدهنده‌های پرانرژی ۱۰۲

۴-۱	مقدمه.....
۴-۲	سطح مقطع تولید کوآرک top از سیاه‌چاله‌های کوچک در LHC.....
۴-۳	گلوئون‌ها نزدیک سیاه‌چاله‌های کوچک در شتابدهنده‌های پرانرژی.....
۴-۴	کوآرک‌ها نزدیک سیاه‌چاله‌های کوچک در شتابدهنده‌های پرانرژی.....
۴-۵	مزون‌ها نزدیک سیاه‌چاله‌های کوچک در شتابدهنده‌های پرانرژی.....
۴-۶	سیاه‌چاله‌های کوچک برانگیخته در شتابدهنده‌های پرانرژی.....
۴-۷	حالت‌های مختلف سیاه‌چاله‌های کوچک در نابودی الکترون-پوزیترون.....
۴-۸	نظریه‌ی پیمان‌ای در نزدیکی سیاه‌چاله‌های کوچک در شتابدهنده‌های پرانرژی.....
۴-۹	نتیجه‌گیری.....

۱۳۲ مراجع

۱۴۰ پیوست

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۱۶	فصل ۱ مقدمه‌ای بر QCD
۱۹.....	شکل ۱-۱. نسبت R به صورت تابعی از انرژی مرکز جرم.....
۲۵.....	شکل ۱-۲. دیاگرام خود انرژی کوآرک.....
۲۷.....	شکل ۱-۳. دیاگرام خودانرژی گلوئون.....
۲۸.....	شکل ۱-۴. سهم مربوط به حلقه‌ی گلوئون به پلاریزاسیون خالص در QCD.....
۲۸.....	شکل ۱-۵. سهم مربوط به حلقه‌ی گوست به پلاریزاسیون خالص در QCD.....
۲۹.....	شکل ۱-۶. سهم مربوط به حلقه‌ی کوآرک به قطبش خالص در QCD.....
۳۲.....	شکل ۱-۷. تصحیحات به رأس کوآرک-گلوئون.....
۳۳.....	شکل ۱-۸. تصحیحات به رأس کوآرک-گلوئون شامل سه گلوئون.....
۳۷	فصل ۲ توزیع‌های شکل رویداد در نابودی الکترون-پوزیترون
۳۸.....	شکل ۲-۱. $\gamma^* \rightarrow q\bar{q}g$ LO.....
۳۸.....	شکل ۲-۲. $\gamma^* \rightarrow q\bar{q}g$ (one loop), (a) $\gamma^* \rightarrow q\bar{q}gg$, (b), (c) Nlo.....
۳۹.....	شکل ۲-۳. (a) $\gamma^* \rightarrow q\bar{q}gg$. (b) $\gamma^* \rightarrow q\bar{q}ggg$. (c) NNLO.....
۴۱.....	شکل ۲-۴. $\gamma^* \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}g$
۴۶.....	شکل ۲-۵. ضرایب مربوط به سهم‌های LO, NLO, NNLO نسبت به T-1 [۱۸].....
۴۹.....	شکل ۲-۶. ضرایب مربوط به سهم‌های LO, NLO, NNLO نسبت به B_W [۱۸].....
۴۹.....	شکل ۲-۷. ضرایب مربوط به سهم‌های LO, NLO, NNLO نسبت به B_T [۱۸].....
۵۲.....	شکل ۲-۸. ضرایب مربوط به سهم‌های LO, NLO, NNLO نسبت به پارامتر C [۱۸].....
۵۹.....	شکل ۲-۹. آهنگ تولید رویدادهای سه جتی نسبت به y_{cut} ‌های مختلف در مرتبه‌های LO, NLO, NNLO [۳۴].....

فصل ۳ نتایج تجربی

۶۰

شکل ۳-۱. نمودار تغییرات $\frac{\langle n_{ch} \rangle}{D}$ بر حسب انرژی مرکز جرم. خط چین مدل پیش‌بینی

شده‌ی QCD را نشان می‌دهد. ۶۲.....

شکل ۳-۲. نمودار تغییرات $\langle N_{CH} \rangle$ بر حسب انرژی مرکز جرم [۷۱]..... ۶۳

شکل ۳-۳. نتیجه‌ی برازش توزیع داده‌های AMY با مقیاس KNO..... ۶۴

شکل ۳-۴. مقایسه‌ی سطح مقطع بهنجار شده‌ی $\frac{1}{\sigma_{tot}} \frac{d\sigma}{dx_{ll}}$ نسبت به $x_{ll} = \frac{2p_{ll}}{W}$

در انرژی‌های مختلف [۵۹]..... ۶۵

شکل ۳-۵. مقایسه‌ی سطح مقطع بهنجار شده‌ی $\frac{1}{\sigma_{tot}} \frac{d\sigma}{dx_T}$ نسبت به $x_T = \frac{2p_T}{W}$

در انرژی‌های مختلف [۵۹]..... ۶۶

شکل ۳-۶. درجه‌ی خلوص (purity) جت‌های کوآرک و جت گلوئون بر حسب Q_{jet} ۶۸

شکل ۳-۷. وابستگی مقیاس تابع ترکش جت کوآرک در bin‌های x_E (داده‌های AMY نتایج

ماست)..... ۶۹

شکل ۳-۸. وابستگی مقیاس تابع ترکش جت گلوئون در bin‌های x_E (داده‌های AMY نتایج

ماست)..... ۷۰

شکل ۳-۹. وابستگی x_E مربوط به تابع ترکش جت کوآرک در مقیاس‌های مختلف (داده‌های

AMY نتایج ماست)..... ۷۲

شکل ۳-۱۰. وابستگی x_E مربوط به تابع ترکش جت گلوئون در مقیاس‌های مختلف (داده‌های

AMY نتایج ماست)..... ۷۳

شکل ۳-۱۱. مرتبه‌ی اول ممان‌های توزیع تراسست در $\mu = 90$ در مرتبه‌ی NNLO و

مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی DELPHI, AMY, L3..... ۷۵

شکل ۳-۱۲. مرتبه‌ی دوم ممان‌های توزیع تراسست در $\mu = 90$ در مرتبه‌ی NNLO و

مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی DELPHI, AMY, L3..... ۷۵

شکل ۳-۱۳. مرتبه‌ی اول ممان‌های توزیع پهن‌شدگی عریض (wide) در $\mu = 90$ در

مرتبه‌ی NNLO و مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی DELPHI, AMY, L3..... ۷۶

شکل ۳-۱۴. مرتبه‌ی دوم ممان‌های توزیع پهن‌شدگی عریض (wide) در $\mu = 90$ در

مرتبه‌ی NNLO و مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی DELPHI, AMY, L3..... ۷۶

شکل ۳-۱۵. مرتبه‌ی اول ممان‌های توزیع پهن‌شدگی کل (total) در $\mu = 90$ در مرتبه‌ی

NNLO و مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی DELPHI, AMY, L3..... ۷۷

شکل ۳-۱۶. مرتبه‌ی دوم ممان‌های توزیع پهن‌شدگی کل (total) در $\mu = 90$ در مرتبه‌ی

NNLO و مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی DELPHI, AMY, L3..... ۷۷

شکل ۳-۱۷. مرتبه‌ی اول ممان‌های توزیع پارامتر C در $\mu = 90$ در مرتبه‌ی NNLO و

مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی DELPHI, AMY, L3..... ۷۸

شکل ۳-۱۸. مرتبه‌ی دوم ممان‌های، پارامتر C در $\mu = 90$ در مرتبه‌ی NNLO و مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی DELPHI, AMY, L3	۷۸
شکل ۳-۱۹. مقایسه‌ی فراوانی رویدادهای سه‌جتی به ازای y_{cut} های مختلف [۷۶ و ۷۵] در انرژی ۶۰ GeV با تقریب مرتبه‌های LO, NLO, NNLO	۸۲
شکل ۳-۲۰. مقایسه‌ی فراوانی رویدادهای سه‌جتی به ازای y_{cut} های مختلف [۷۶ و ۷۵] در انرژی 91 GeV با تقریب مرتبه‌های LO, NLO, NNLO	۸۳
شکل ۳-۲۱. مقایسه‌ی فراوانی رویدادهای سه‌جتی به ازای y_{cut} های مختلف [۷۶ و ۷۵] در انرژی ۱۳۳ GeV با تقریب مرتبه‌های LO, NLO, NNLO	۸۳
شکل ۳-۲۲. مقایسه‌ی فراوانی رویدادهای سه‌جتی به ازای y_{cut} های مختلف [۷۶ و ۷۵] در انرژی ۱۷۷ GeV با تقریب مرتبه‌های LO, NLO, NNLO	۸۴
شکل ۳-۲۳. مقایسه‌ی فراوانی رویدادهای سه‌جتی به ازای y_{cut} های مختلف [۷۶ و ۷۵] در انرژی ۱۹۷ GeV با تقریب مرتبه‌های LO, NLO, NNLO	۸۴
شکل ۳-۲۴. تغییرات ثابت پیوندی به صورت تابعی از انرژی مرکز جرم [۷۶ و ۷۵]	۸۶
شکل ۳-۲۵. تأثیر یک جرم ۵ GeV کوارک bottom بر روی آهنگ رویدادهای سه‌جتی در انرژی ۶۰ GeV به صورت تابعی از پارامتر تفکیک جت $(\alpha_s = 0.124 \pm 0.006)$ [۷۵]	۸۷
شکل ۳-۲۶. تأثیر یک جرم ۵ GeV کوارک bottom بر روی آهنگ رویدادهای سه‌جتی در انرژی ۹۱ GeV به صورت تابعی از پارامتر تفکیک جت $(\alpha_s = 0.118 \pm 0.007)$ [۷۵]	۸۸
شکل ۳-۲۷. تأثیر یک جرم ۵ GeV کوارک bottom بر روی آهنگ رویدادهای سه‌جتی در انرژی ۱۳۳ GeV به صورت تابعی از پارامتر تفکیک جت $(\alpha_s = 0.111 \pm 0.008)$ [۷۵]	۸۸
شکل ۳-۲۸. تأثیر یک جرم ۵ GeV کوارک bottom بر روی آهنگ رویدادهای سه‌جتی در انرژی ۱۷۷ GeV به صورت تابعی از پارامتر تفکیک جت $(\alpha_s = 0.103 \pm 0.006)$ [۷۵]	۸۹
شکل ۳-۲۹. تأثیر یک جرم ۵ GeV کوارک bottom بر روی آهنگ رویدادهای سه‌جتی در انرژی ۱۹۷ GeV به صورت تابعی از پارامتر تفکیک جت $(\alpha_s = 0.105 \pm 0.005)$ [۷۵]	۸۹
شکل ۳-۳۰. توزیع تراست در مرتبه‌های LO (خط نقطه چین)، NLO (خط تیره) و NNLO (خط توپر) و مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی [۸۱ و ۷۶]	۹۱
شکل ۳-۳۱. توزیع پهن‌شدگی کل (total) در مرتبه‌های LO (خط نقطه چین)، NLO (خط تیره) و NNLO (خط توپر) و مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی [۸۱ و ۷۶]	۹۲
شکل ۳-۳۲. توزیع پهن‌شدگی عریض (wide) در مرتبه‌های LO (خط نقطه چین)، NLO (خط تیره) و NNLO (خط توپر) و مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی [۸۱ و ۷۶]	۹۳
شکل ۳-۳۳. توزیع پارامتر C در مرتبه‌های LO (خط نقطه چین)، NLO (خط تیره) و NNLO (خط توپر) و مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی [۸۱ و ۷۶]	۹۴
شکل ۳-۳۴. تغییرات ثابت پیوندی به صورت تابعی از انرژی مرکز جرم (داده‌های AMY, OPAL) [۸۱ و ۷۶]	۹۷
شکل ۳-۳۵. تغییرات ثابت پیوندی به صورت تابعی از انرژی مرکز جرم (داده‌های ALEPH) [۲۸ و ۱۸]	۹۸

شکل ۳-۳۶. تغییرات ثابت پیوندی و خطا به صورت تابعی از معیار بازه‌نجارش برای پارامتر C]	
.....[۸۱	۹۹
شکل ۳-۳۷. تغییرات ثابت پیوندی و خطا به صورت تابعی از معیار بازه‌نجارش برای پهن شدگی	
عریض	۹۹
شکل ۳-۳۸. تغییرات ثابت پیوندی و خطا به صورت تابعی از معیار بازه‌نجارش برای پهن شدگی	
کل	۱۰۰
شکل ۳-۳۹. تغییرات ثابت پیوندی و خطا به صورت تابعی از معیار بازه‌نجارش برای تراست.....	۱۰۰

فصل ۴ QCD نزدیک سیاه‌چاله‌های کوچک در شتابدهنده‌های پرانرژی ۱۰۲

شکل ۴-۱. سطح مقطع تولید سیاه‌چاله در LHC نسبت به جرم سیاه‌چاله [۸۲].....	۱۰۶
شکل ۴-۲. تعداد میانگین کوارک‌های top تولیدشده از یک سیاه‌چاله به صورت تابعی از جرم	
کوارک top	۱۰۷

۱۳۲ مراجع

۱۴۰ پیوست

فهرست جداول

۱۶	فصل ۱ مقدمه‌ای بر QCD
۳۷	فصل ۲ توزیع‌های شکل رویداد در نابودی الکترون-پوزیترون
۳۹	جدول ۱-۲. سهم‌های پارتونی در یک رویداد ۳جتی تا مرتبه‌ی NNLO [۱۸]
۴۷	جدول ۲-۲. ضرایب مربوط به سهم‌های LO, NLO, NNLO نسبت به $1-T$ [۲۸]
۴۹	جدول ۳-۲. ضرایب مربوط به سهم‌های LO, NLO, NNLO نسبت به B_W [۲۸]
۵۰	جدول ۴-۲. ضرایب مربوط به سهم‌های LO, NLO, NNLO نسبت به B_T [۲۸]
۵۲	جدول ۵-۲. ضرایب مربوط به سهم‌های LO, NLO, NNLO نسبت به C [۲۸]
۵۴	جدول ۶-۲. ضرایب مربوط به سهم‌های LO, NLO, NNLO [۳۳]
۶۰	فصل ۳ نتایج تجربی
۷۹	جدول ۱-۳. مقادیر ثابت پیوندی به دست آمده با برازش دادن داده‌های ممان توزیع تراست با معادله‌ی (۸-۳) به ازای مقادیر متفاوت مقیاس بازپهنجارش.....
۷۹	جدول ۲-۳. مقادیر ثابت پیوندی به دست آمده با برازش دادن داده‌های ممان توزیع B_T با معادله‌ی (۸-۳) به ازای مقادیر متفاوت مقیاس بازپهنجارش.....
۸۰	جدول ۳-۳. مقادیر ثابت پیوندی به دست آمده با برازش دادن داده‌های ممان توزیع B_W با معادله‌ی (۸-۳) به ازای مقادیر متفاوت مقیاس بازپهنجارش.....
۸۰	جدول ۴-۳. مقادیر ثابت پیوندی به دست آمده با برازش دادن داده‌های ممان توزیع C با معادله‌ی (۸-۳) به ازای مقادیر متفاوت مقیاس بازپهنجارش.....
۸۱	جدول ۵-۳. ضرایب A_{3-jet} , B_{3-jet} , C_{3-jet} به ازای مقادیر مختلف y_{cut}
۸۵	جدول ۶-۳. مقادیر ثابت پیوندی برای انرژی‌های مختلف [۷۵ و ۷۶] در تقریب مرتبه‌های LO, NLO, NNLO.....
۹۵	جدول ۷-۳. مقادیر ثابت پیوندی برای انرژی‌های OPAL, AMY و مشاهده‌پذیرهای مختلف در تقریب مرتبه‌ی LO [۷۶ و ۸۱].....
۹۵	جدول ۸-۳. مقادیر ثابت پیوندی برای انرژی‌های OPAL, AMY و مشاهده‌پذیرهای مختلف در تقریب مرتبه‌ی NLO [۷۶ و ۸۱].....
۹۶	جدول ۹-۳. مقادیر ثابت پیوندی برای انرژی‌های OPAL, AMY و مشاهده‌پذیرهای مختلف در تقریب مرتبه‌ی NNLO [۷۶ و ۸۱].....

جدول ۳-۱۰. مقادیر ثابت پیوندی برای انرژی‌های مختلف [۷۶ و ۸۱]..... ۹۷

فصل ۴ QCD نزدیک سیاه‌چاله‌های کوچک در شتابدهنده‌های پرنرژی ۱۰۲

۱۳۲ مراجع

۱۴۰ پیوست

مقدمه:

دنیای پیرامون ما پر از شگفتی و راز و رمز است و بشر به دلیل فطرت حقیقت‌جوی خود همواره به دنبال کشف چگونگی و چرایی پدیده‌های اطراف خود بوده است. از جمله چیزهایی که ذهن کنجکاو و جستجوگر آدمی سعی در درک آن داشته است، شناخت سنگ بنای این عالم است. سؤالی که با توجه به پیشرفت‌های فوق‌العاده‌ی بشر در عرصه‌های گوناگون علمی هنوز پاسخ روشنی ندارد. پاسخ به این سؤال در شاخه‌ی ذرات بنیادی و در شتابدهنده‌های با انرژی بسیار بالا مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

هدف این پایان‌نامه آن است که فرآیندهای QCD را در نابودی الکترون-پوزیترون مورد مطالعه قرار دهد. از آنجا که این بررسی محدود به انرژی خاصی نمی‌شود علاوه بر بررسی فرآیندهای مربوط به شتابدهنده‌های اخیر، برخی از تحولات پیش‌بینی شده‌ی نظری شتابدهنده‌های پر قدرت آینده نیز در این پایان‌نامه مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

بر مبنای نظریه‌های QCD اختلالی بر اثر نابودی الکترون-پوزیترون در انرژی‌های بالاتر از GeV یک فوتون مجازی تولید می‌شود و سپس این فوتون به کوارک-پادکوارک واپاشی می‌کند. کوارک‌ها به دلیل داشتن ویژگی حبس نمی‌توانند به صورت مجزا و مستقل وجود داشته باشند و آنچه که در آشکارسازها دیده می‌شود، به شکل خوشه‌هایی از ذرات هادرونی هستند که به آن‌ها جت‌های هادرونی می‌گویند. نظریه‌ی QCD مدل‌هایی را برای سطح مقطع هادرونی ارائه داده است که یکی از اهداف این پایان‌نامه تجزیه و تحلیل داده‌های واقعی با استفاده از این مدل‌ها می‌باشد.

مطالعات نظری جدیدتر [۸۲] در ارتباط با انرژی‌های بسیار بالا در حد Tev نشان می‌دهد که در صورت نابودی الکترون-پوزیترون به جای فوتون مجازی یک سیاه‌چاله‌ی کوچک تولید می‌شود که خواص آن با سیاه‌چاله‌های کیهانی متفاوت است. از این نظر که این سیاه‌چاله نیمه عمر بسیار کوتاهی دارد و سریعاً به ذرات سنگینی مانند کوارک top واپاشی می‌کند. در صورت تشکیل چنین سیاه‌چاله‌هایی سطح مقطع تولید کوارک top بیشتر از فرآیند نظریه‌ی QCD اختلالی خواهد بود. از دیگر اهداف این پایان‌نامه پیدا کردن راهی مناسب برای توصیف کوارک‌ها، گلوئون‌ها و مزون‌ها در نزدیکی این سیاه‌چاله‌های کوچک می‌باشد.

در فصل اول به بررسی نظریه‌ی QCD می‌پردازیم.

در فصل دوم ابتدا به بررسی متغیرهای شکل رویداد تا مرتبه NNLO می‌پردازیم و توزیع مربوط به شکل رویدادها را در مرتبه‌های مختلف نظریه‌ی QCD شرح می‌دهیم. پس از آن ممان‌های شکل رویداد را بررسی نموده و سرانجام مدل‌های پیش‌بینی شده‌ی QCD را برای رویدادهای سه جتی معرفی می‌کنیم.

در فصل سوم ابتدا KNO را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. سپس به بررسی نقض **Scaling** می‌پردازیم. پس از آن خصوصیات جت‌های گلوئون و جت‌های کوارک را به تفصیل بررسی می‌کنیم. در ادامه‌ی فصل از خصوصیات این جت‌ها استفاده خواهیم کرد تا ثابت پیوندی را تا مرتبه‌های مختلف QCD محاسبه نماییم. محاسبه با روش‌های گوناگون (۱- روش ممان شکل رویداد ۲- روش آهنگ رویدادهای سه جتی ۳- روش توزیع شکل رویداد) در انرژی‌های مختلف انجام خواهد شد.

در فصل چهارم نظریه‌ی QCD را در نزدیکی سیاه‌چاله‌های کوچک تولید شده در انرژی‌های بالاتر از TeV مورد بررسی قرار می‌دهیم.

فصل ۱

مقدمه‌ای بر QCD

۱-۱. لاگرانژی QCD

QCD یک نظریه‌ی میدانی ناوردای پیمانه‌ای $SU(3)$ است. شکل این لاگرانژی به صورت زیر است [۴-۱]:

$$L_{QCD} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a,\mu\nu} + i \sum_q \bar{\psi}_q^i \gamma^\mu (D_\mu)_{ij} \psi_q^j - \sum_q m_q \bar{\psi}_q^i \psi_q^j \delta^{ij} \quad (1-1)$$

ψ_q^j نشان‌دهنده‌ی تابع موج کوارک است. اندیس بالا، $j=1,2,3$ ، سه رنگ کوارک را نشان می‌دهد و اندیس پایین، $q=u,d,c,s,b,t$ ، نمایانگر طعم کوارک می‌باشد.

$F_{\mu\nu}^a$ تانسور قدرت میدان به میدان‌های گلوئونی A_ν^a بستگی دارد:

$$F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a - g f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c \quad (2-1)$$

$a,b,c=1,..8$ مربوط به هشت درجه‌ی آزادی رنگ گلوئون است. در معادله‌ی بالا g ثابت پیوندی قوی، f^{abc} ثابت‌های ساختار نظریه‌ی گروه. تنها پارامتر آزاد در QCD شش جرم کوارک و ثابت پیوندی پیمانه‌ای است. در مورد دلایل وجود سه رنگ در بخش بعد صحبت خواهیم کرد. مشتق پیمانه‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(D_\mu)_{ij} = \delta_{ij} \partial_\mu + ig \sum_a (T^a A_\mu^a)_{ij} \quad (3-1)$$

در هر گروه $SU(N)$ مولدهای T^a مربوط به نمایش بنیادی در رابطه‌ی زیر صدق می‌کنند:

$$\sum_a T^a_{ij} T^a_{jk} = C_F \delta_{ik}, i, j, k = 1, \dots, N \quad (4-1)$$

$$C_F = \frac{N^2 - 1}{2N}$$

$$[T^a, T^b] = if^{abc} T^c$$

برای گروه $SU(3)$ مولدهای T^a توسط ماتریس‌های Gell-Mann $T^a = \lambda^a / 2$ نمایش داده می‌شوند

[۳-۱].

۲-۱. رنگ و طعم برای کوارک

یکی از راه‌ها برای آنکه به تعداد طعم‌ها و رنگ‌های کوارک پی ببریم آن است که سطح مقطع نابودی الکترون-پوزیترون به کوارک-پادکوارک را با سطح مقطع نابودی الکترون-پوزیترون به میوئون مقایسه کنیم [۳].

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^- \mu^+) = \frac{4\pi\alpha^2}{3Q^2} \quad (۵-۱)$$

انرژی مرکز جرم بارابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$S = Q^2 \quad (۶-۱)$$

با فرض وجود طعم و رنگ برای کوارک‌ها سطح مقطع تولید کوارک و پادکوارک به صورت زیر است:

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q}) = N_c e_q^2 \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^- \mu^+) \quad (۷-۱)$$

e_q بار کوارک و N_c تعداد رنگ کوارک‌ها است. سطح مقطع تولید هادرونی از جمع بر روی تمام طعم‌ها و رنگ‌های کوارک به دست می‌آید:

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow hadrons) = \sum_q \sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q}) = N_c \sum_q e_q^2 \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-) \quad (۸-۱)$$

حال نسبت سطح مقطع تولید هادرون‌ها را به سطح مقطع تولید میوئون با آزمایشات تجربی مقایسه

می‌کنیم:

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow hadrons)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-)} = N_c \sum_q e_q^2 \quad (۹-۱)$$

همان‌طور که در شکل (۱-۱) می‌بینیم تنها در صورتی که $N_c = 3$ ، مقادیر تجربی و مقادیر تئوری با یکدیگر توافق خواهند داشت. همچنین بار مرتبط با طعم‌های مختلف باید به صورت زیر باشد:

$$e_q = \frac{2}{3} \quad \text{for } u, b, t \quad (10-1)$$

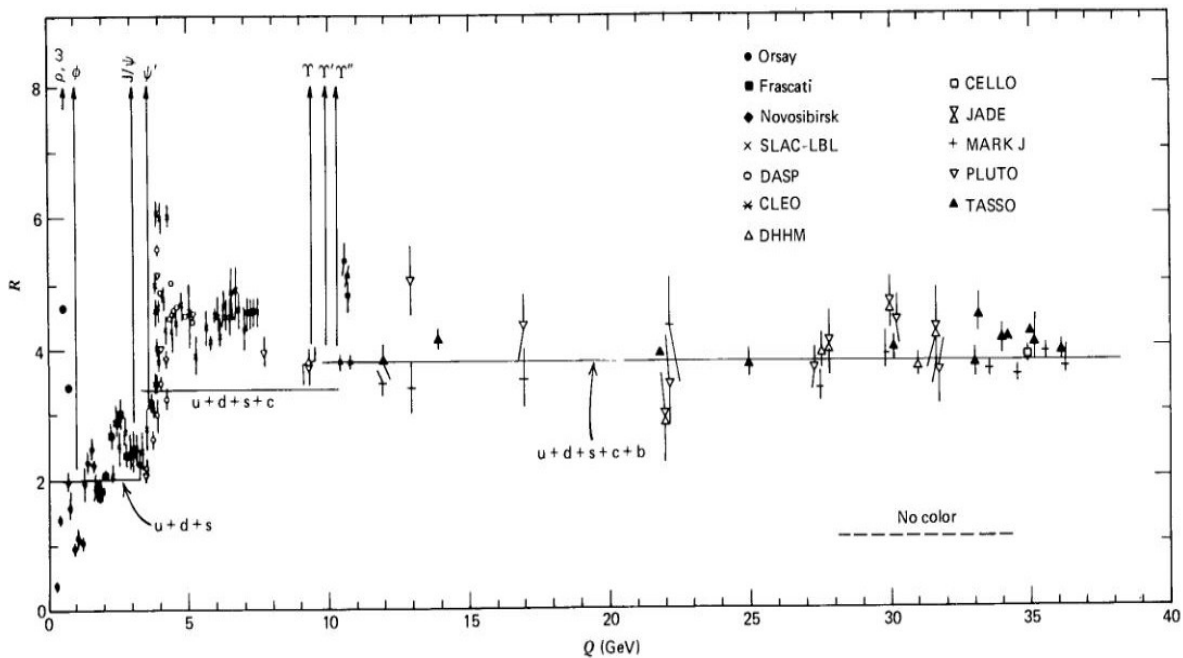
$$e_q = -\frac{1}{3} \quad \text{for } d, s, c$$

در این صورت نسبت مربوطه از لحاظ تئوری به صورت زیر خواهد بود:

$$R = 3\left[\left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2\right] = 2 \quad \text{for } u, d, s \quad (11-1)$$

$$= 2 + 3\left(\frac{2}{3}\right)^2 = \frac{10}{3} \quad \text{for } u, d, s, b$$

$$= \frac{10}{3} + 3\left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{11}{3} \quad \text{for } u, d, s, b, c$$



شکل ۱-۱. نسبت R به صورت تابعی از انرژی مرکز جرم

همان‌طور که از شکل (۱-۱) پیداست، نتایج تجربی با پیش‌بینی‌های تئوری سازگارند. پس می‌توانیم مطمئن باشیم که تعداد رنگ و بار طعم‌های مختلف را به درستی انتخاب نموده‌ایم.

۳-۱. تبدیلات Becchi– Rouet–Stora و میدان‌های گوست

میدان‌های گوست، میدان‌هایی هستند که در حلقه‌های QCD ظاهر می‌شوند و به صورت میدان‌های خارج از حلقه که به صورت آزاد منتشر می‌شوند ظاهر نمی‌شوند. کاربرد این میدان‌ها در از بین بردن جملات واگرا در بهنجار کردن نظریه QCD می‌باشد. در این بخش ثابت می‌کنیم برای آن که لاگرانژی QCD تحت تبدیلات Becchi– Rouet–Stora [۵] ناوردا بماند، نیاز است که میدان‌های گوست را در لاگرانژی وارد کنیم [۱ و ۵]:

$$L_{\text{effectiv}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + L_{GF} + L_{FPG} \quad (12-1)$$

$$L_{GF} = -\frac{1}{2} (\partial^\mu A_\mu^a)^2$$

$$L_{FPG} = -\bar{\eta}^a \partial^\mu D^\mu \eta^a$$

$$D_\mu \eta^a = [\partial_\mu \eta^a + g f^{abc} A_\mu^b \eta^c]$$

تبدیلات Becchi– Rouet–Stora به صورت زیرند:

$$\delta A_\mu^a = -\frac{1}{g} D_\mu \eta^a \lambda \quad (13-1)$$

$$\delta \eta^a = -\frac{1}{2} f^{abc} \eta^b \eta^c \lambda$$

$$\delta \bar{\eta}^a = -\frac{1}{ag} \partial^\mu A_\mu^a \lambda$$

حال باید اثبات کنیم که لاگرانژی تحت این تبدیلات تغییر نمی‌کند:

$$\delta L_{GF} = \frac{1}{\alpha} (\partial^\mu A_\mu^a) \frac{1}{g} (\partial^\nu D_\nu \eta^a) \lambda \quad (14-1)$$

$$\delta L_{FPG} = -(\delta \bar{\eta}^a) \partial^\mu D_\mu \eta^a - \bar{\eta}^a \partial^\mu (\delta D_\mu \eta^a)$$

$$-(\delta \bar{\eta}^a) \partial^\mu D_\mu \eta^a = \frac{1}{\alpha g} (\partial^\mu A_\mu^a) \lambda (\partial^\nu D_\nu \eta) = -\frac{1}{\alpha g} (\partial^\mu A_\mu^a) (\partial^\nu D_\nu \eta) \lambda$$

اگر تغییرات دو جمله‌ی لاگرانژی را با هم جمع کنیم خواهیم داشت:

$$\delta L_{GF} + \delta L_{FPG} = -(\bar{\eta}^a) \partial^\mu \delta D_\mu \eta^a \quad (15-1)$$

اکنون اثبات می‌کنیم که عبارت بالا صفر می‌شود: