

سلام علیکم

۱۴۰۷/۱۰



دانشگاه گیلان

دانشکده علوم  
گروه فیزیک

**پایان نامه:**

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
در رشته فیزیک (گرایش هسته‌ای)

**عنوان:**

**بررسی توزیع زاویه‌ای هادرون‌های تولید شده در پراکندگی  
الکترون-پوزیترون با استفاده از داده‌های جدید**

استاد راهنما:

**دکتر قاسم فروزانی**

استاد مشاور:

**دکتر سعید سهیلی**

پژوهشگر:

**کاظم زارعی**

۱۳۸۶ / ۱۲ / ۰۵

زمستان ۸۶

۱۰۴۵۷۱

همه امتیازهای این پایان نامه به دانشگاه بوعلی سینا همدان تعلق دارد. در صورت استفاده از تمام یا بخشی از مطالب پایان نامه در مجلات، کنفرانس ها و یا سخنرانی ها باید نام دانشگاه بوعلی سینا (یا استاد یا استادان راهنمای پایان نامه) و نام دانشجو با ذکر ماخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.



دانشگاه بوعلی سینا

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

گرایش هسته‌ای

تحت عنوان:

بررسی توزیع زاویه‌ای هادرون‌های تولید شده در پراکندگی

الکترون-پوزیترون با استفاده از داده‌های جدید

استاد راهنما:

دکتر قاسم فروزانی

استاد مشاور:

دکتر سعید سهیلی

پژوهشگر:

کاظم زارعی

تصویب و ارزشیابی توسط کمیته ارزیابی پایان نامه:

۱- استاد راهنما: دکتر قاسم فروزانی ..... دانشیار دانشگاه بوعلی سینا

۲- استاد مشاور: دکتر سعید سهیلی ..... استادیار دانشگاه بوعلی سینا

۳- استاد مدعو: دکتر فریدون سموات ..... استادیار دانشگاه بوعلی سینا

۴- استاد مدعو: دکتر سید کامران مؤیدی ..... استادیار دانشگاه اراک



دانشگاه بوعلی سینا

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای کاظم زارعی در رشته فیزیک

(گرایش هسته‌ای)

تحت عنوان:

بررسی توزیع زاویه‌ای هادرون‌های تولید شده در پراکندگی

الکترون-پوزیترون با استفاده از داده‌های جدید

به ارزش ۶ واحد در روز چهارشنبه ۱۳۸۶/۱۱/۳ ساعت ۱۱ صبح در سالن آمفی تئاتر ۱

دانشکده علوم پایه و با حضور اعضای هیأت داوران زیر برگزار گردید و با نمره .....۱۹.....

و درجه .....عالی..... به تصویب رسید.

هیأت داوران:

| ردیف | سمت در هیأت داوران | نام و نام خانوادگی    | مرتبه علمی - گروه / دانشکده / دانشگاه | محل امضاء |
|------|--------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------|
| ۱.   | استاد راهنما       | دکتر قاسم فروزانی     | دانشیار - فیزیک/علوم/بوعلی سینا       |           |
| ۲.   | استاد مشاور        | دکتر سعید سهیلی       | استادیار - فیزیک/علوم/بوعلی سینا      |           |
| ۳.   | استاد مدعو         | دکتر سید کامران مؤیدی | استادیار - فیزیک/علوم/اراک            |           |
| ۴.   | استاد داور (داخلی) | دکتر فریدون سموات     | استادیار - فیزیک/علوم/بوعلی سینا      |           |

تقدیم به

پدر و مادر فداکارم که مهرشان بنایی شد برای تلاش پرشورم در کسب علم و دانش

و

همسرم مهربانم که شگوه نگرش او سرپای وجودم را فرا گرفته است.

## تشکر و قدردانی

سر برآستان جلال پروردگار بی‌همتا می‌سایم که دگر بار توفیق اندوختن دانشی هرچند اندک را روزیم فرمود. اینک که توفیق جمع آوری و تهیه این پایان‌نامه را یافته‌ام، بر خود واجب می‌دانم از تمامی عزیزان و سرورانی که در طی انجام این پژوهش بنده را یاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم.

بی‌تردید انجام این تحقیق بدون راهنمایی و مساعدت استاد محترم جناب آقای دکتر فروزانی مقدور نبود. بر خود لازم می‌دانم تا از تلاش‌های بی‌شائبه ایشان در پایه‌ریزی و مشاورت در طول انجام این پروژه صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر سهیلی که زحمت مشاوره این پایان‌نامه را بر عهده داشتند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از پدر و مادر بزرگوaram که همواره تکیه‌گاه و حامی من در کلیه مراحل زندگی‌ام بوده‌اند کمال سپاس و تشکر را ابراز می‌نمایم. از همسر عزیزم که در این مدت یار و پشتیبان من بودند، قدردانی می‌نمایم. از برادران و خواهران عزیزم که همراه همیشگی من در کلیه مراحل زندگی بوده‌اند، کمال سپاس و تشکر را دارم. همچنین از خواهر زاده عزیزم، مرتضی عالی نژاد، که در تایپ این پایان‌نامه کمک فراوانی کرده‌اند، تشکر می‌نمایم. از تمام دوستانم که در طول مدت تحصیل مرا مورد لطف و عنایت خود قرار دادند صمیمانه سپاسگزارم.

|  |                    |
|--|--------------------|
| نام خانوادگی دانشجو: زارعی   | نام: کاظم          |
| عنوان پایان نامه:  |                    |
| بررسی توزیع زاویه‌ای هادرون‌های تولید شده در پراکندگی الکترون-پوزیترون با استفاده از داده‌های جدید   |                    |
| استاد راهنما: دکتر قاسم فروزانی  |                    |
| مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد   | رشته: فیزیک        |
| گرایش: هسته‌ای   |                    |
| دانشگاه: بوعلی سینا  | دانشکده: علوم پایه |
| تاریخ فارغ‌التحصیلی: ۸۶/۱۱/۳   | تعداد صفحه: ۱۰۳    |
| کلید واژه‌ها: توزیع زاویه ای، پراکندگی الکترون-پوزیترون، آشکارساز، هادرون، اسپین   |                    |
| چکیده:   |                    |
| <p>واکنش نابودی الکترون-پوزیترون و سپس تولید زوج‌های دیگر (شامل لپتون‌ها و هادرون‌ها)، هم از جنبه نظری و هم از جنبه آزمایشگاهی مورد توجه است که در سال‌های اخیر از اهمیت زیادی در فیزیک ذرات بنیادی برخوردار شده است. برخورد الکترون و پوزیترون در شتابدهنده‌هایی مانند LEP، SLAC، VEPP-2M، TRISTAN، BEPC، با انرژی بالا انجام می‌شود. از لحاظ نظری، این واکنش اولین بار توسط P.A.M Dirac در سال ۱۹۳۰ مورد بررسی قرار گرفت.</p> <p>الکترون‌ها و پوزیترون‌ها در برهمکنش‌های قوی شرکت نمی‌کنند. در انرژی‌های فعلی، تنها راهی که برخورد <math>e^-e^+</math> می‌تواند بطور قوی ذرات برهمکنش کننده را تولید کند، از طریق یک فوتون مجازی است، <math>e^- + e^+ \rightarrow \gamma \rightarrow q + \bar{q} \rightarrow \text{hadrons}</math>. برای یک لحظه کوتاه کوارک‌ها جدا از هم در یک حالت آزادی حرکت می‌کنند اما هنگامی که فاصله آنها به <math>10^{-15}</math> متر (قطر یک هادرون) رسید، برهمکنش قوی آنها به قدری بزرگ می‌شود که جفت کوارک-آنتی کوارک‌های جدید تولید می‌شوند. این کوارک‌ها و آنتی کوارک‌ها، در عمل یک دوجین از آنها، در یک نمونه آزمایش مدرن، در هزاران ترکیب جهت ساختن مزون‌ها و باریون‌ها که به گونه واقعی در آشکارساز نشان داده می‌شود، به هم می‌پیوندند. همانند اغلب واکنش‌ها، کمیت مورد علاقه سطح مقطع دیفرانسیلی می‌باشد، <math>d\sigma/d\Omega</math>.</p> <p>در این پایان‌نامه، توزیع زاویه‌ای هادرون‌های تولید شده در این برهمکنش مورد بررسی قرار گرفته است. ما با استفاده از داده‌های جدید بدست آمده از آشکارساز OPAL در LEP، در محدوده انرژی مرکز جرم 130-205 GeV، همپنین آشکارساز KLOE در DAPHNE، در انرژی مرکز جرم 1.2 GeV توزیع زاویه‌ای هادرون‌های تولید شده در این واکنش را بدست می‌آوریم. سپس نتایج حاصل را با پیشگویی‌های نظری مقایسه می‌کنیم و نشان می‌دهیم که اسپین ذرات تولید شده نقش مؤثری در توزیع زاویه‌ای آنها دارد.</p> |                    |



# فهرست مطالب

| صفحه           | عنوان                                      |
|----------------|--|
| ۱              | مقدمه                                      |
| <b>فصل اول</b> |  |
| ۶              | ۱-۱ مدل کوآرک                              |
| ۷              | ۱-۲ نیروهای اساسی                          |
| ۸              | ۱-۳ الکترودینامیک کوانتومی (QED)           |
| ۱۴             | ۱-۴ قطبش خلاء در الکترودینامیک کوانتومی    |
| ۱۶             | ۱-۵ کرومودینامیک کوانتومی (QCD)            |
| ۱۸             | ۱-۶ برهمکنش های ضعیف                       |
| ۲۰             | ۱-۷ هموردایی لورنتز و نمایش چهاربرداری     |
| ۲۱             | ۱-۸ نظریه پراکندگی                         |
| ۲۲             | ۱-۹ سطح مقطع پراکندگی                      |
| ۲۵             | ۱-۱۰ پراکندگی رادرفورد                     |
| ۲۷             | ۱-۱۱ قاعده طلایی فرمی                      |
| ۲۸             | ۱-۱۲ پراکندگی دو ذره ای در مختصات مرکز جرم |
| <b>فصل دوم</b> |  |
| ۳۳             | ۲-۱ مکانیک کوانتوم غیر نسبیتی              |
| ۳۴             | ۲-۲ معادله کلین-گوردن                      |
| ۳۵             | ۲-۳ تفسیر فاینمن برای جواب های $E < 0$     |

- ۲-۴ نظریه اختلال غیر نسبیتی ..... ۳۷
- ۲-۵ برهمکنش الکترون بدون اسپین با میدان الکترو مغناطیسی  $A^\mu$  ..... ۴۰
- ۲-۶ پراکندگی الکترون-میون بدون اسپین ..... ۴۱
- ۲-۷ متغیرهای ناوردا (متغیرهای مندل اشتام) ..... ۴۴
- ۲-۸ انتشارگر ..... ۴۶
- ۲-۹ معادله دیراک ..... ۴۸
- ۲-۹-۱ معادله دیراک ..... ۴۸
- ۲-۹-۲ شکل هموردای معادله دیراک و ماتریس های  $\gamma$  ..... ۴۹
- ۲-۹-۳ پایستگی جریان و معادله همیوگ ..... ۵۰
- ۲-۹-۴ اسپینورهای ذره آزاد ..... ۵۱
- ۲-۹-۵ پاد ذرات ..... ۵۴
- ۲-۹-۶ نرمالیزاسیون اسپینور ها و روابط تمامیت ..... ۵۵
- ۲-۱۰ برهمکنش الکترون اسپین  $1/2$  با یک میدان الکترو مغناطیسی  $A^\mu$  ..... ۵۷

### فصل سوم

- پراکندگی الکترون-پوزیترون  $e^+e^-$  و تولید هادرون ها ..... ۶۰
- ۳-۱ پراکندگی مولر  $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$  ..... ۶۱
- ۳-۲ پراکندگی  $e^- \mu^- \rightarrow e^- \mu^-$  ..... ۶۳
- ۳-۳ پراکندگی  $e^- e^+ \rightarrow \mu^+ \mu^-$  ..... ۶۶
- ۳-۴ تولید هادرون ها در پراکندگی الکترون - پوزیترون  $e^- e^+ \rightarrow q \bar{q}$  ..... ۶۸
- ۳-۵ پراکندگی الکترون از یک چگالی بار ثابت ..... ۷۵
- ۳-۶ پراکندگی  $e^- \pi^+$  ..... ۷۹

|     |       |                                 |                |
|-----|-------|---------------------------------|----------------|
| ۸۱  | ..... | $e^+e^- \rightarrow \pi^-\pi^+$ | پراکندگی ۳-۷   |
| ۸۷  | ..... |                                 | نتیجه گیری ۳-۸ |
| ۸۹  | ..... |                                 | مراجع          |
| ۹۲  | ..... |                                 | پیوست A        |
| ۹۴  | ..... |                                 | پیوست B        |
| ۹۶  | ..... |                                 | پیوست C        |
| ۱۰۳ | ..... |                                 | چکیده انگلیسی  |

## فهرست شکل ها

صفحه

عنوان

### مقدمه

- شکل A- فوتون مجازی تولید شده در نابودی پرتو های الکترون و پوزیترون به زوج های کوآرک و آنتی کوآرک واپاشی می کند. .... ۱
- شکل B- میدان رنگی  $q\bar{q}$  بصورت  $V(r) \sim r$  می باشد و میدان کولمبی  $e^+e^-$  بصورت  $V(r) \sim 1/r$  می باشد. .... ۲
- شکل C- تشکیل جت هنگام جدا شدن کوآرک و آنتی کوآرک ..... ۲
- شکل D- جت های کوآرک و آنتی کوآرک تولید شده در برخورد سر به سر  $e^+$  و  $e^-$  در مرکز تصویر ..... ۳

### فصل اول

- شکل ۱-۱- ..... ۶
- شکل ۱-۲- ..... ۶
- شکل ۱-۳- ..... ۷
- شکل ۱-۴- ..... ۸
- شکل ۱-۵- ..... ۸
- شکل ۱-۶- نمودار های مرتبه بالاتر فاینمن ..... ۹
- شکل ۱-۷- ..... ۱۱
- شکل ۱-۸- محاصره شدن یک بار الکتریکی  $q$  به وسیله محیط عایق ..... ۱۲

- شکل ۱-۹ - بار موثر بصورت تابعی از فاصله ..... ۱۲
- شکل ۱-۱۰ ..... ۱۳
- شکل ۱-۱۱ ..... ۱۴
- شکل ۱-۱۲ ..... ۱۴
- شکل ۱-۱۳ ..... ۱۵
- شکل ۱-۱۴ ..... ۱۶
- شکل ۱-۱۵ ..... ۱۷
- شکل ۱-۱۶ - پراکندگی از یک پتانسیل سخت.  $\theta$  زاویه پراکندگی و  $b$  شاخص برخورد می باشد. ۲۱
- شکل ۱-۱۷ - برخورد ذره در ناحیه  $d\sigma$  با زاویه  $\Omega$  فضای پراکنده می شود. .... ۲۲
- شکل ۱-۱۹ - پراکندگی دو ذره ای در چارچوب CM ..... ۲۶

## فصل دوم

- شکل ۲-۱ - یک الکترون بدون اسپین با پتانسیل  $A^{\mu}$  برهمکنش می کند. .... ۳۸
- شکل ۲-۲ - نمودار فاینمن پراکندگی الکترون-میون ..... ۳۹
- شکل ۲-۳ - عامل راس و انتشارگر در پراکندگی الکترون-میون . .... ۴۰
- شکل ۲-۴ - نمودار  $s, t, u$  که نشان دهنده ناحیه فیزیکی برای واکنش  $e^{-} + e^{+} \rightarrow e^{-} + e^{+} \dots$  ۴۲
- شکل ۲-۵ - نمودار نابودی فاینمن  $e^{-} e^{+} \rightarrow \gamma \rightarrow e^{-} e^{+}$  که با استفاده از خطوط ذرات (الکترون ها) رسم شده است. .... ۴۳
- شکل های ۲-۶ - بخش جریان الکترومغناطیسی مربوط به یک الکترون اسپین  $1/2$  در نمودار فاینمن. .... ۵۵

## فصل سوم

- شکل ۳-۱- برخی از واکنش هایی که احتمال آنها در پراکندگی  $e^+e^-$  وجود دارد ..... ۵۶
- شکل ۳-۲- نمودار فاینمن برای پراکندگی  $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$  ..... ۵۷
- شکل ۳-۳- دومین نمودار برای  $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$  ..... ۵۸
- شکل ۳-۴- نمودار فاینمن برای پراکندگی الکترون-مئون ..... ۵۹
- شکل ۳-۵- نمودار فاینمن برای  $e^-e^+ \rightarrow \mu^+\mu^-$ . پادذرات بوسیله خطوط ذرات ( $\mu^-$  و  $e^-$ ) مشخص شده اند. .... ۶۳
- شکل ۳-۶- برخورد پرتوهای الکترون و پوزیترون که انرژی هر کدام  $E_b$  می باشد. .... ۶۴
- شکل ۳-۷- نمودار سطح مقطع واکنش هادرون های تولیدی در پراکندگی الکترون-پوزیترون با استفاده از داده های بدست از آشکار ساز DELPHI و مقایسه آن با مقادیر پیشگویی شده در مدل استاندارد. .... ۶۵
- شکل ۳-۸- نسبت سطح مقطع بدست آمده از آزمایش ( $\sigma_{EX}$ ) به مدل استاندارد ( $\sigma_{SM}$ ) ..... ۶۶
- شکل ۳-۹- توزیع زاویه ای اندازه گیری شده برای هادرون های تولید شده در پراکندگی الکترون - پوزیترون برای انرژی های مرکز جرم 161.34 GeV , 136.22 GeV , 130.25 GeV , 172.12 GeV , 196 GeV , 205 GeV .. ..... ۶۷
- شکل ۳-۱۰- نسبت  $R$  که بصورت تابعی از انرژی مرکز جرم در محدوده 0-40 GeV رسم شده است. داده ها با استفاده از آشکارسازهای موجود در Frascati و Beijing و Slac و Novosibirsk و Desy بدست آمده است. .... ۶۹
- شکل ۳-۱۱- نمودارهای فاینمن برای پراکندگی یک الکترون توسط یک بار ثابت Ze ( بطور مثال از یک هسته). .... ۷۱
- شکل ۳-۱۲- نمودار پراکندگی الکترون-پایون، شامل تصحیح هادرونی در راس  $\pi\pi\gamma$  ..... ۷۴
- شکل ۳-۱۳- انحراف یک الکترون توسط یک بار ثابت. .... ۷۴

شکل ۱۴-۳- پراکندگی  $e^- \pi^+$  ..... ۷۵

شکل ۱۵-۳- نمودار فاینمن برای  $e^- e^+ \rightarrow \pi^+ \pi^-$ . پادذرات بوسیله خطوط ذرات ( $\pi^-$  و  $e^-$ )

مشخص شده اند. .... ۷۷

شکل ۱۶-۳- نمودار توزیع زاویه ای پایون های تولید شده در پراکندگی الکترون و پوزیترون

در انرژی مرکز جرم 1.2 GeV ..... ۷۸

شکل ۱۷-۳- آشکارساز CMD-2 ..... ۸۰

شکل ۱۸-۳- تعریف پارامترهای پراکندگی در چارچوب مرکز جرم. .... ۸۰

شکل ۱۹-۳- توزیع فضای راس ها: نمودار سمت چپ توزیع فاصله راس تا محور بیم ها ( $\rho$ ) را

نشان می دهد و نمودار سمت راست بیانگر توزیع فاصله بین راس و مرکز آشکار ساز در طول

محور بیم ها ( $Z$ ) می باشد و ناحیه پر شده نشان دهنده رویدادهای زمینه است. .... ۸۱

شکل ۲۰-۳- نمودار سطح مقطع واکنش  $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^-$  بر حسب  $\sqrt{s}$  در بازه

.....  $0.6 < \sqrt{s} < 0.98 \text{ GeV}$  ۸۲

شکل ۲۱-۳- نمودار مربع عامل ساختار پایون  $F^2(s)$  بر حسب  $\sqrt{s}$  در بازه

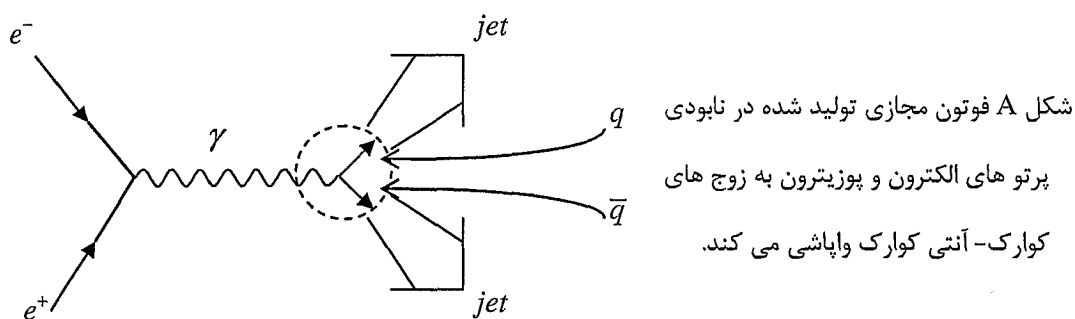
.....  $0.6 < \sqrt{s} < 0.98 \text{ GeV}$  ۸۲

# مقدمه

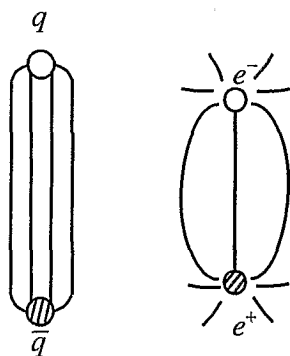


## مقدمه

در محدوده فیزیک انرژی بالا، پراکندگی الکترون پوزیترون یک آزمایش مناسب برای مطالعه مدل کوآرک و ساختار هادرون ها می باشد. در این آزمایش پرتو های الکترون و پوزیترون بصورت سر به سر با هم برخورد می کنند، که باعث نابودی زوج الکترون پوزیترون و تولید یک فوتون می شود. فوتون تولید شده به نوبه خود به یک زوج کوآرک آنتی کوآرک واپاشی می کند، که در شکل A نشان داده شده است. هنگامی که فاصله زوج کوآرک آنتی کوآرک به یک فرمی ( $1F = 10^{-13} \text{ cm}$ ) می رسد، ثابت جفت شدگی  $\alpha_s$  بزرگتر می شود. و به دنبال آن برهمکنش بین کوآرک و آنتی کوآرک افزایش یافته که باعث کم شدن انرژی جنبشی آنها می شود. این امر ناشی از برهمکنش رنگی آنها می باشد که بواسطه تبادل ذرات گلوئون بین آنها صورت می گیرد.



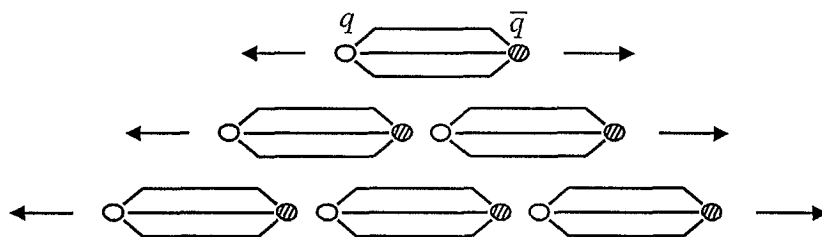
خطوط میدان رنگی بین کوآرک و آنتی کوآرک تولید شده به درون یک منطقه تیوپ مانند فشرده می شوند (شکل B). این امر باعث تفاوت این برهمکنش با برهمکنش الکترومغناطیسی می شود که در آن خطوط میدان با افزایش فاصله بارها باز شده و میدان ضعیف تر می شود.



شکل B. میدان رنگی  $q\bar{q}$  بصورت  $V(r) \sim r$  می باشد و میدان

کولمبی  $e^+e^-$  بصورت  $V(r) \sim 1/r$  می باشد.

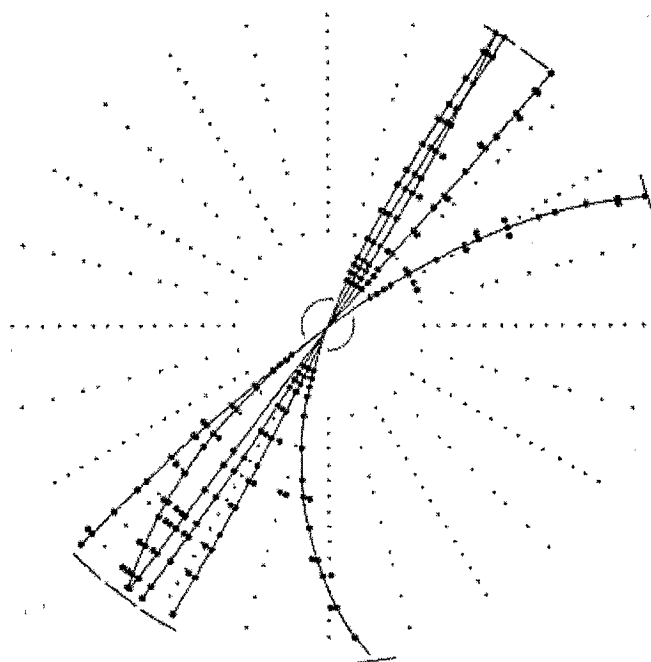
اگر برای محدوده حامل رنگ (شامل خطوط میدان) چگالی انرژی در واحد طول ثابتی در نظر بگیریم، انرژی پتانسیل بین زوج کوارک-آنتی کوارک با افزایش فاصله افزایش می یابد (زیرا  $V(r) \sim r$ ). بنابراین کوارک ها و گلوئون ها راه گریز ندارند. حال سؤال اینجاست که هادرون ها چگونه شکل می گیرند؟ همانگونه در شکل C نشان داده شده، فاصله زوج کوارک-آنتی کوارک تا جایی افزایش می یابد که انرژی پتانسیل بوجود آمده برای تولید زوج کوارک-آنتی کوارک دیگری کافی باشد.



شکل C. تشکیل جت هنگام جدا شدن کوارک و آنتی کوارک

به همین سبب تولید زوج کوارک و آنتی کوارک اضافی و گلوئون تا زمانی ادامه می یابد که تکانه داخلی کوارکها به حداقل ممکن برسد و رنگ خالص نهایی صفر شود. بنابراین حداکثر مقدار برای جفت شدگی رنگ بوجود می آید. کوارک های اولیه هرگز به صورت آزاد مشاهده نمی شوند. فقط پایون ها و دیگر هادرون ها به آشکارساز برخورد می کنند. هادرون های تولید شده اکثراً مزون های سبک پایون هستند. پیکان های پهن در شکل A نشان دهنده جت هایی از هادرون ها می باشد که

در جهت کوارک های اولیه و در خلاف جهت همدیگر (برای پایستگی تکانه) پراکنده می شوند. شکل D یک نمونه از فرآیند دوجتی است.



شکل D. جت های کوارک و آنتی کوارک تولید شده در برخورد سر به سر  $e^+$  و  $e^-$  در مرکز تصویر

بطور خلاصه کوارکها خاصیتی بنام رنگ ها همانند بار الکتریکی دارند. نظریه رنگ (QCD) و نظریه الکترومغناطیسی (QED) از جهاتی شبیه به هم هستند. گلوئون های بدون جرم بین کوارکهای رنگی مبادله می شوند، همانطور که فوتون بدون جرم بین الکترون ها مبادله می شود [1]. برای بررسی توزیع زاویه ای هادرون های تولید شده در این برهمکنش ابتدا مفاهیم اولیه مورد نیاز را بیان کرده و سپس به تجزیه و تحلیل این برهمکنش می پردازیم.

# فصل اول

- مدل کوآرک
- نیروهای اساسی
- الکترودینامیک کوانتومی (QED)
- قطبش خلاء در الکترودینامیک کوانتومی
- کرومودینامیک کوانتومی (QCD)
- برهمکنش های ضعیف
- هموردایی لورنتز و نمایش چهاربرداری
- نظریه پراکندگی
- سطح مقطع پراکندگی
- پراکندگی رادرفورد
- قاعده طلایی فرمی
- پراکندگی دو ذره ای در مختصات مرکز جرم