

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



# دانشگاه یزد

دانشکده فیزیک

گروه ذرات بنیادی

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

فیزیک ذرات بنیادی

از پراکندگی ناکشسان ژرف تا تشکیل سیستم‌های هادرونی، مطالعه

و بررسی

استاد راهنما: دکتر ابوالفضل میرجلیلی

استاد مشاور: دکتر سید محمد موسوی نژاد

پژوهش و نگارش: فاطمه السادات منتظری

بهمن ماه ۱۳۹۲



## سپاس‌گزاری ...

با سپاس خداوندگار حکیم، ابتدا وظیفه خود میدانم از زحمات بی دریغ استاد راهنمای خود، جناب آقای دکتر میرجلیلی، صمیمانه تشکر و قدردانی کنم که قطعاً بدون راهنمایی‌های ارزنده ایشان، این مجموعه به انجام نمی‌رسید. از جناب آقای دکتر موسوی نژاد که زحمت مطالعه و مشاوره این رساله را تقبل فرمودند و در آماده‌سازی این رساله، به نحو احسن اینجانب را مورد راهنمایی قرار دادند، کمال امتنان را دارم.

در پایان بوسه می‌زنم بر خداوندگاران مهر و مهربانی، پدر و مادر عزیزم و بعد از خدا، ستایش می‌کنم وجود مقدس‌شان را و تشکر می‌کنم از همسر عزیزم به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودش که در طول دوران تحصیل، بهترین پشتیبان من بودند.

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

و

همسر مهربانم



## چکیده

در این پایان‌نامه، توابع ترکش در فرایندهای هادرونی را معرفی و توابع ترکش هادرون  $\pi$  را با استفاده از معادله‌ی DGLAP تحول می‌دهیم. توابع ترکش، توابعی بدون بعد هستند که حالت نهایی هادرون‌های تشکیل شده ناشی از نابودی زوج، پراکندگی لپتون-نوکلئون یا پراکندگی هادرون‌های با تکانه‌ی عرضی بالا در برخورد فوتون-ها درون و هادرون-ها درون را توصیف می‌کنند. تابع‌های ترکش در مقیاس اولیه‌ی انرژی معرف QCD غیراختلالی در فرایندی نظیر نابودی زوج الکترون-پوزیترون بوده و معمولاً توسط "مدل‌های هادرونی‌شدن" توصیف می‌شوند. این توابع از طریق معادلات تحولی به مقیاس انرژی وابسته می‌شود. این توابع می‌توانند با توزیع پارتونی در آبشار پارتونی ایجاد شده ارتباط داشته باشند. در اینجا، توابع ترکش مربوط به تشکیل هادرون  $\pi$  ناشی از ترکش پارتون‌ها را با استفاده از معادله‌ی DGLAP تحول می‌دهیم. این محاسبات را تا دومین مرتبه‌ی اختلال (NLO) به انجام رساندیم. نتایج با مدل‌های پدیده‌شناسی موجود در تطابق خوبی می‌باشد. در نهایت تابع ساختار هادرون  $\pi$  را محاسبه نمودیم که نتیجه‌ی بدست آمده با داده‌های آزمایشگاهی موجود بخوبی سازگار است.





## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
<b>فصل ۱ مقدمه‌ای بر فیزیک انرژی‌های بالا</b>	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ هادرون‌ها	۴
۳-۱ مدل راه هشت‌گانه	۵
۴-۱ بار رنگ	۱۰
۵-۱ مدل پارتونی	۱۴
۶-۱ نیروهای چهارگانه	۱۶
۷-۱ مدل استاندارد	۱۷
۸-۱ پراکندگی ناکشسان ژرف DIS	۱۹
۹-۱ سینماتیک پراکندگی لپتون-هادرون	۲۲
<b>فصل ۲ تصحیحات مراتب بالا در فیزیک ذرات</b>	۲۵
۱-۲ مقدمه	۲۶
۲-۲ تصحیح بار الکتریکی	۲۶
۳-۲ اثر جابجایی لمب	۴۰
۴-۲ تصحیح ممان دو قطبی مغناطیسی الکترون	۴۳
۵-۲ ثابت ساختار ریز در QED	۴۷
۶-۲ ثابت جفت‌شدگی رونده برای QCD	۴۹
۷-۲ نتیجه‌گیری	۵۲
<b>فصل ۳ نابودی زوج و فرایند تشکیل هادرون‌ها</b>	۵۳
۱-۳ مقدمه	۵۴
۲-۳ پراکندگی‌های رایج و پرکاربرد	۵۵
۳-۳ فرایندهای هادرونی	۵۶
۱-۳-۳ نابودی زوج در QCD	۵۷
۲-۳-۳ نابودی $e^-e^+$ به هادرون‌ها ( $e^-e^+ \rightarrow q\bar{q}$ )	۵۸

۶۲	۴-۳ فرایند تولید آبشار پاتونی
۶۳	۵-۳ مفهوم تابع ترکش
۶۳	۳-۵-۱ ترکش جت
۶۸	۳-۵-۲ روابط اساسی تابع ترکش
۷۰	۳-۵-۳ ترکش مستقل
۷۱	۳-۵-۴ ترکش ریسمان
۷۳	۳-۵-۵ ترکش خوشه‌ای
۷۵	۳-۶ ترکش به هادرون $\pi^+$
۷۶	۳-۷ مدل‌های پدیده‌شناسی مربوط به تشکیل هادرون‌ها
۷۷	۳-۸ معادله‌های تحول
۷۹	۳-۹ نقض مقیاس‌بندی
۸۲	۳-۱۰ روش‌های حل معادله DGLAP
۸۲	۳-۱۱ معرفی فضای ملین
۸۳	۳-۱۲ نتیجه‌گیری
۸۴	<b>فصل ۴ محاسبه تحول توابع ترکش و ساختار هادرون پایون</b>
۸۵	۴-۱ مقدمه
۸۵	۴-۲ معادله تحول و توابع ترکش و جواب معادله در فضای ملین
۹۱	۴-۳ توابع شکافتگی فرایند ترکش در فضای ملین
۱۰۱	۴-۴ پارامتربندی کردن توابع ترکش
۱۰۳	۴-۵ توابع ترکش مزون $\pi^+$ در مرتبه‌ی NLO
۱۱۵	۴-۶ محاسبه‌ی تابع ساختار هادرون پایون
۱۱۷	۴-۷ نتیجه‌گیری
۱۱۸	واژه‌نامه فارسی به انگلیسی
۱۲۰	واژه‌نامه انگلیسی به فارسی

## فهرست اشکال

عنوان .....	صفحه .....
شکل ۱-۱ الگوی هشت تاییه باریونی .....	۵
شکل ۲-۱ الگوی هشت تاییه و تک تاییه $(SU(3))$ مربوط به مزون های شبه برداری .....	۶
شکل ۳-۱ الگوی ده تاییه باریونی .....	۶
شکل ۴-۱ کشف ذره امگا منفی .....	۷
شکل ۵-۱ الگوی مثلثی کوارک ها .....	۸
شکل ۶-۱ الگوی مثلثی پاد کوارک ها .....	۸
شکل ۷-۱ ترکیب رنگ های هادرون ها .....	۱۲
شکل ۸-۱ تابع ساختار نوکلئونی در دو مقیاس متفاوت انرژی .....	۱۴
شکل ۹-۱ نمایی از تابع ساختار در مقیاس انرژی متفاوت .....	۱۵
شکل ۱۰-۱ سه نسل کوارک ها و لپتون ها به ترتیب افزایش جرم .....	۱۹
شکل ۱۱-۱ دیگرام های مدل استاندارد برای فرایندهای پراکندگی ناکشسان عمیق .....	۲۱
شکل ۱۲-۱ پایین ترین مرتبه ی نمودار فاینمن برای فرایند ناکشسان عمیق .....	۲۲
شکل ۱-۲ قوانین فاینمن برای پراکندگی راترفورد .....	۲۷
شکل ۲-۲ انحراف یک الکترون از یک بار ساکن .....	۳۰
شکل ۳-۲ نمودار فاینمن برای پراکندگی راترفورد و نوسان فوتون به جفت $e^-e^+$ .....	۳۰
شکل ۴-۲ نمایش تصویر اصلاح انتشارگر فوتون در پایین ترین مرتبه .....	۳۲
شکل ۵-۲ مجموعه ی کامل از نمودارهای فاینمن $O(\alpha^2)$ .....	۴۴
شکل ۶-۲ اصلاح انتشارگر و چگالی جریان در نمودارهای فاینمن $O(\alpha^2)$ .....	۴۴
شکل ۱-۳ نمایش قسمت های اختلالی و غیر اختلالی فرایند نابودی زوج .....	۵۴
شکل ۲-۳ برخورد سربه سر باریک های الکترون و پوزیترون هر کدام با انرژی $E_b$ .....	۵۷
شکل ۳-۳ نتیجه احتمالات آزمایشگاهی از فرایند نابودی زوج .....	۶۰
شکل ۴-۳ نسبت $R$ به عنوان یک تابعی از انرژی کلی مرکز جرم $e^-e^+$ .....	۶۰
شکل ۵-۳ نمودارهای فاینمن برای تصحیحات در سطح مقطع کلی هادرونی در نابودی $e^-e^+$ .....	۶۱
شکل ۶-۳ فرآیند اولیه ی آبشار پارتونی .....	۶۱
شکل ۷-۳ تصویری از یک فرآیند آبشاری پارتونی .....	۶۲
شکل ۸-۳ نابودی الکترون-پوزیترون و تولید جفت کوارک-پاد کوارک .....	۶۳

- شکل ۳-۹ یک هادرون نوع  $h$  مشاهده شده با کسر  $z = \frac{2E_h}{Q}$  از انرژی کوآرک ..... ۶۴
- شکل ۳-۱۰ تصویر کلی از هادرونی شدن ریسمانی ..... ۷۳
- شکل ۳-۱۱ تصویر کلی از مدل هادرونی شدن خوشه‌ای ..... ۷۴
- شکل ۳-۱۲ تابع ترکش  $e^-e^+$  برای همه‌ی ذرات باردار برای انرژی‌های متفاوت مرکز جرم ..... ۷۹
- شکل ۳-۱۳ توزیع  $\frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dx_F}$  برای همه‌ی ذرات باردار در مقادیر متفاوت  $\omega$  ..... ۸۰
- شکل ۴-۱ نمودار توابع ترکش مزون پایون برای کوآرک‌های  $u, \bar{d}$  به ازای  $Q_0 = 1 GeV$  ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۲ نمودار توابع ترکش مزون پایون برای کوآرک‌های  $s, \bar{s}, d, \bar{u}$  به ازای  $Q_0 = 1 GeV$  ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۳ نمودار توابع ترکش مزون پایون برای گلئون به ازای  $Q_0 = 1 GeV$  ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۴ نمودار توابع ترکش مزون پایون برای کوآرک‌های  $c, \bar{c}$  به ازای  $Q_0 = 1/43 GeV$  ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۵ نمودار توابع ترکش مزون پایون برای کوآرک‌های  $b, \bar{b}$  به ازای  $Q_0 = 1/43 GeV$  ..... ۱۰۶
- شکل ۴-۶ نمودار توابع ترکش مزون پایون برای گلئون به ازای  $Q = M_z$  ..... ۱۱۳
- شکل ۴-۷ نمودار توابع ترکش مزون پایون برای کوآرک‌های  $u, \bar{d}$  به ازای  $Q = M_z$  ..... ۱۱۳
- شکل ۴-۸ نمودار توابع ترکش مزون پایون برای کوآرک‌های  $s, \bar{s}, d, \bar{u}$  به ازای  $Q = M_z$  ..... ۱۱۴
- شکل ۴-۹ نمودار توابع ترکش مزون پایون برای کوآرک‌های  $c, \bar{c}$  به ازای  $Q = M_z$  ..... ۱۱۴
- شکل ۴-۱۰ نمودار توابع ترکش مزون پایون برای کوآرک‌های  $b, \bar{b}$  به ازای  $Q = M_z$  ..... ۱۱۵
- شکل ۴-۱۱ نمودار تابع ساختار مزون پایون به ازای  $Q = M_z$  ..... ۱۱۷

## فهرست جداول

عنوان .....	صفحه
جدول ۱-۱ کوارک .....	۳
جدول ۲-۱ ساختار کوارکی باریون‌ها ( $qqq$ ) برحسب بار الکتریکی و عدد شگفتی .....	۹
جدول ۳-۱ ساختار کوارکی مزون‌ها ( $q\bar{q}$ ) برحسب بار الکتریکی و عدد شگفتی .....	۹
جدول ۴-۱ نیروهای چهارگانه با در نظر گرفتن تئوری فیزیکی و واسطه‌ی آن‌ها .....	۱۶
جدول ۵-۱ نسل لپتون .....	۱۸
جدول ۶-۱ نسل کوارک‌ها .....	۱۸
جدول ۱-۴ پارامترها در مدل استاندارد .....	۱۰۲
جدول ۲-۴ پارامترهای حاصل از تحول توابع ترکش پارتون‌های $i = (u, d, s, \bar{u}, \bar{d}, \bar{s})$ در انرژی $Q = m_c = 1/43 GeV$ .....	۱۰۹
جدول ۳-۴ پارامترهای حاصل از تحول توابع ترکش پارتون‌های $i = (g, u, d, s, \bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, c, \bar{c})$ در انرژی $Q = m_b = 4/3 GeV$ .....	۱۱۰
جدول ۴-۴ پارامترهای حاصل از تحول توابع ترکش پارتون‌های $i = (g, u, d, s, \bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, c, \bar{c}, b, \bar{b})$ در انرژی $Q = M_z = 91/2 GeV$ .....	۱۱۲



## فصل ۱

مقدمه‌ای بر فیزیک انرژی‌های بالا

## ۱.۱ مقدمه

در بنیادی‌ترین سطح یعنی در کوچک‌ترین مقیاس اندازه‌ها، فیزیک ذرات بنیادی این پرسش را مطرح می‌کند که ((ماده از چه چیز ساخته شده است؟)) در حقیقت فیزیک ذرات بنیادی به مطالعه و بررسی ساختار درونی مواد و برهم‌کنش‌های آن‌ها می‌پردازد، اینکه ماده در سطح زیراتمی از تکه‌های کوچکی تشکیل شده است که فضای خالی بزرگی بین آن‌ها وجود دارد، واقعیتی چشم‌گیر است. قابل ملاحظه‌تر آن‌که این تکه‌های کوچک که تنوع آن‌ها نیز کم است (الکترون‌ها، پروتون‌ها، نوترون‌ها، مزون‌های پی، نوترینوها و غیره) به میزان عظیمی تکرار می‌شوند و همه مواد اطراف ما را تشکیل می‌دهند. این موجودات تکراری نسخه‌های کاملی از هم هستند و نه تقریباً مشابه‌اند، بلکه کاملاً تمیزناپذیراند. چنین تمیزناپذیری مطلق در دنیای ماکروسکوپیکی مشابهی ندارد.

اولین ذره‌ی بنیادی که کشف شد الکترون بود. این ذره دارای بار  $1.6 \times 10^{-19}$  کولمب و جرمی برابر با  $0.511 \text{ MeV} / c^2$  را داراست و دارای دو حالت اسپینی است که تعداد این حالت‌ها بصورت  $2s + 1$  حالت نمایش داده می‌شود، اسپین الکترون  $\frac{1}{2}$  می‌باشد.

بعد از الکترون، پروتون شناخته‌شده‌ترین ذره معرفی می‌گردد. پروتون هسته اتم هیدروژن را تشکیل می‌دهد، دارای بارالکتریکی مثبت و جرمی برابر با  $938 \text{ MeV} / c^2$  را داراست. این ذره نیز همانند الکترون فرمیون بوده، دارای اسپین  $\frac{1}{2}$  است.

فیزیک ذرات بنیادی با کشف الکترون در سال ۱۸۹۷ به وسیله‌ی تامسون<sup>۱</sup> متولد شد. آزمایش پراش رادرفورد<sup>۲</sup> که مربوط به شلیک پرتویی از ذرات  $\alpha$  به ورقه‌ی نازک طلا بود نهایتاً منجر به کشف پروتون به عنوان ذره‌ی سنگین در مرکز اتم گردید. فوتون ذره‌ی است که وجوه مشترکی با ذرات W و Z که مربوط به مدل واینبرگ-سلام<sup>۳</sup> می‌باشند دارد و در سال ۱۹۸۳ کشف شد. بحث روی مزون‌ها که جرمی بین پروتون و الکترون دارند از سال ۱۹۳۴ آغاز شد و تا سال ۱۹۴۷ ادامه داشت. پس از آن نیز با وجود شواهدی در معادلات دیراک<sup>۴</sup> وجود پادذره لازم به نظر می‌رسید و اندکی بعد نیز وجود نوترینو ثابت شد [۱].

<sup>۱</sup> Tamson

<sup>۲</sup> Raderford

<sup>۳</sup> Wayenberg Salam

<sup>۴</sup> Dirac Equation



تمام هادرون‌ها از اجزای بنیادی‌تری تشکیل شده‌اند که گلمان<sup>۱</sup> آن را کوارک نامید. کوارک‌ها فرمیون‌اند (اسپین نیم صحیح دارند) اسپین‌شان  $\frac{1}{2}$  است و بار الکتریکی  $\frac{2}{3}e$  و  $-\frac{1}{3}e$  را حمل می‌کنند. شش طعم برای کوارک‌ها وجود دارد که عبارت‌اند از طعم  $u, d, s, c, b$  و  $t$ . کوارک‌ها را در سه نسل دسته بندی می‌کنند که نسل اول را کوارک‌های  $u$  و  $d$ ، نسل دوم را کوارک‌های  $s, c$ ، و نسل سوم را کوارک‌های  $b$  و  $t$  در بر می‌گیرد.  $u, d$  و کوارک‌های سبک‌اند و  $c, b$  و  $t$  کوارک‌های سنگین می‌باشند. با توجه به جدول ۱.۱ کوارک  $u$  سبک‌ترین و کوارک  $t$  سنگین‌ترین کوارک می‌باشد  $(m_t = 172 \text{ GeV}/c^2)$ . کوارک  $t$  با طول عمری از مرتبه‌ی  $10^{-34}$  ثانیه قبل از این که بتواند به هادرون تبدیل شود واپاشی می‌کند [۲]. کوارک  $t$  برخلاف کوارک‌های دیگر از جمله کوارک  $b$  که مزون  $B$  و کوارک  $c$  که مزون  $\psi$  را تشکیل می‌دهد قادر به تشکیل دادن حالت مقید نیست به همین دلیل است که هنوز وجود هادرونی که کوارک  $t$  تشکیل‌دهنده آن باشد به‌وسیله‌ی آشکارسازها آشکار نشده است. در جدول ۱.۱ کوارک‌ها برحسب نسل، طعم، بار و جرم‌شان مرتب شده‌اند [۷۲].

جرم ( $\text{GeV}/c^2$ )	بار	طعم	نسل
۰/۰۰۴۲	$-\frac{1}{3}$	$d$	نسل اول
۰/۰۰۱۷	$+\frac{2}{3}$	$u$	
۰/۱۲	$-\frac{1}{3}$	$s$	نسل دوم
۱/۲۵	$+\frac{2}{3}$	$c$	
۴/۲۵	$-\frac{1}{3}$	$b$	نسل سوم
۱۷۲	$+\frac{2}{3}$	$t$	

جدول ۱.۱: کوارک.

<sup>۱</sup>Gellman

<sup>۲</sup>Up, down, strange, charm, bottom, top

## ۲.۱ هادرون‌ها

برای دوره‌ی کوتاهی در سال ۱۹۴۷ تصوّر می‌شد که مسئله‌ی ذرات بنیادی حل شده است. پس از یک جستجوی طولانی برای میون سرانجام مدل یوکاوا (پایون) پیدا شد. سپس پوزیترون دیراک پیدا شده بود و نوترینوی پائولی اساساً تحت کنترل بود و نقش میون‌ها تا حدودی سوال برانگیز شده بود و کلاً ضرورتی برای آن احساس نمی‌شد. اما در کل احساس می‌شد که کار فیزیک ذرات بنیادی در سال ۱۹۴۷ اساساً تمام شده است. اما این وضعیت دیری به طول نینجامید. در دسامبر همان سال راجستر و پالتر عکس اتافک ابری را منتشر کردند که در آن ذرات پرتوهای کیهانی وارد اتافک شده بودند و به یک صفحه‌ی سربی برخورد کرده و یک ذره‌ی خنثی تولید کرده بودند که وجود آن وقتی مشخص شد که به ذره‌ی باردار ثانویه واپاشیده شده بودند. یک تحلیل مفصل نشان می‌دهد که این ذرات باردار عملاً یک پایون مثبت و یک پایون منفی هستند. پس در اینجا یک ذره خنثی جدید با جرمی حداقل دو برابر جرم پایون وجود دارد که آن را کائون نامید. سپس ذره لاندای کشف شد که همراه با پروتون و نوترون در خانواده باریون‌ها جای گرفت و پس از آن قوانینی برای فرآیندهای باریونی وضع شد و شخصی بنام اشتوگلیبرگ برای این منظور قانون عدد باریونی را مطرح کرد. در سال ۱۹۳۸ به هر باریون عدد باریونی ۱ و به هر آنتی‌باریون عدد باریونی -۱ را نسبت دادند. در این صورت در هر فرآیندی مجموع اعداد باریون‌ها می‌بایست محفوظ باشد. پروتون به عنوان سبک‌ترین باریون است که بقای عدد باریونی ضامن پایداری آن است. در چند سال بعد باریون‌های سنگین بیشتری نظیر  $\Sigma$ ها و  $\Delta$ ها و غیره کشف شدند. باعث اندکی تعجب بود که این ذرات سنگین باریونی و مزونی پدیدار شده بودند. به همین علت همه آن‌ها جمعاً به عنوان ذرات شگفت شناخته شدند. ذرات جدید نه تنها دور از انتظار بودند بلکه یک مفهوم فنی‌تر از اینکه شگفت بنظر می‌رسیدند وجود داشت. آن‌ها به میزان فراوانی تولید می‌شوند ولی نسبتاً کند واکنش می‌کنند به این دلیل بود که پیس<sup>۱</sup> و دیگران مکانیزم تولید آن‌ها را کاملاً متفاوت با مکانیزم واپاشی آن‌ها دانستند. به زبان امروزی ذرات شگفت به وسیله‌ی نیروی قوی تولید می‌شوند ولی واپاشی آن‌ها با نیروی ضعیف انجام می‌شود. باغی که در سال ۱۹۴۷ اینقدر کوچک و کم درخت بود در سال ۱۹۶۰ به یک جنگل بزرگ تبدیل شد و فیزیک هادرون‌ها دچار هرج و مرج شده بود. کل ذرات مرتبط با اندرکنش‌های قوی به دو خانواده بزرگ تقسیم شد که عبارتند از باریون‌ها و مزون‌ها و اعضای هر خانواده از نظر بار الکتریکی، شگفتی و جرم مشخص

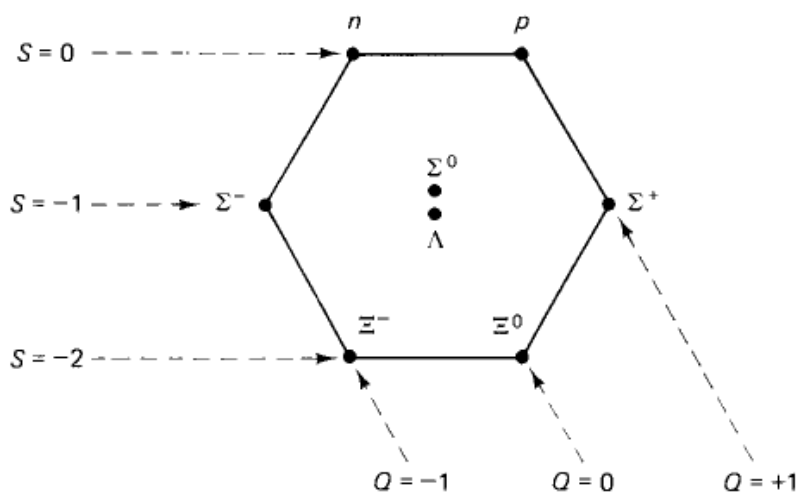
---

<sup>۱</sup> Pise

می‌شدند. در سال ۱۹۶۰ ذرات بنیادی انتظار جدول تناوبی خاص خود را می‌کشیدند که گلמן مدل‌های زیبایی برای دسته بندی باریون‌ها و مزون‌ها ارائه داد [۳].

### ۳.۱ مدل راه هشت‌گانه

مورای گلמן<sup>۱</sup>، مندلیف<sup>۲</sup> ذرات بنیادی بوده؛ اصطلاح راه هشت‌گانه‌ی خود را در سال ۱۹۶۱ ارائه کرد [۴]. در راه هشت‌گانه، باریون‌ها و مزون‌ها بسته به بار الکتریکی و شگفتی خود به شکل‌های هندسی مرتب می‌شوند. هشت باریون سبک‌تر در یک آرایه شش‌ضلعی قرار گرفته و دو ذره در مرکز واقع می‌شود. این گروه را هشت‌تایی باریونی می‌نامند. توجه داشته باشید که ذراتی که دارای بار مشابه اند در طول خط قطری با شیب به سمت پایین قرار می‌گیرند: برای پروتون و  $\Sigma^+$  با  $Q = +1$  (در واحد بار پروتون) و برای نوترون، لاندای،  $\Sigma^0$  و  $\Xi^0$ ،  $Q = 0$  و برای  $\Sigma^-$  و  $\Xi^-$  و نوترون،  $S = -1$  برای خط وسط و  $S = -1$  برای دو  $\Xi$ ‌ها.  $Q = -1$  می‌باشد. خطوط افقی مربوط به ذراتی است که دارای شگفتی برابر با  $S = 0$  برای پروتون.

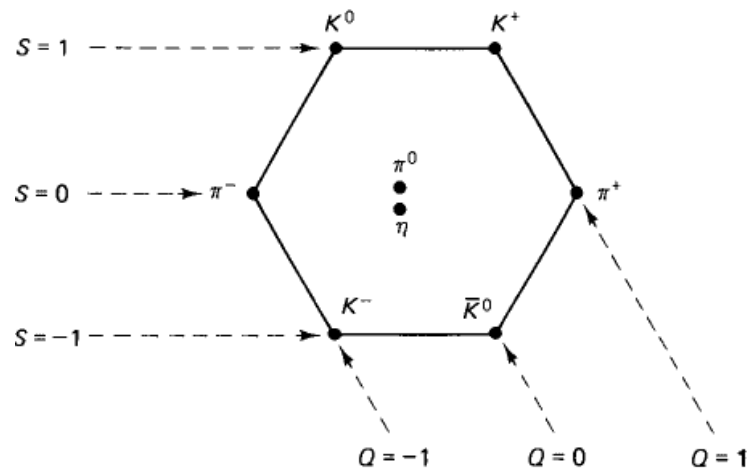


شکل ۱.۱: الگوی هشت‌تاییه باریونی.

هشت مزون سبک‌تر، یک شش‌ضلعی مشابه را پر می‌کنند و هشت‌تایی مزونی را تشکیل می‌دهند. دوباره، خطوط قطری مورب بار الکتریکی و خطوط افقی، شگفتی را مشخص می‌کند، اما این بار، خط بالایی  $S = 1$  را دارد، خط میانی  $S = 0$  و خط پایینی  $S = -1$  بعد از ۱۹۶۱ یک کمیت جدید به نام ابربار معرفی شد که برابر بود با  $S$  برای مزون‌ها و  $S \pm 1$  برای باریون‌ها. ولی بعداً

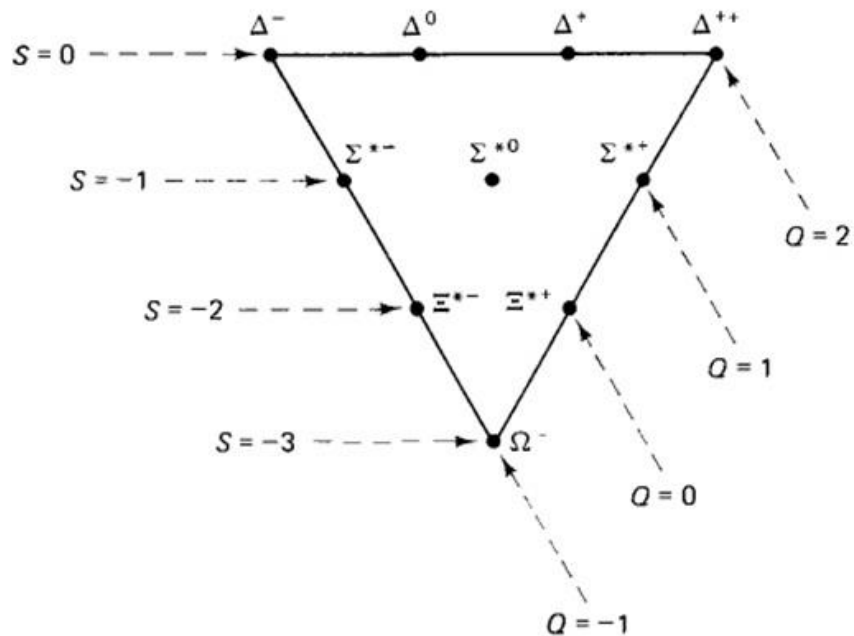
<sup>۱</sup>Murry GImann  
<sup>۲</sup>Mendeleeev

معلوم شد که شگفتی کمیت بهتری است و کلمه ابربار هم اکنون به منظور دیگری مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۲.۱: الگوی هشت تاییه و تک تاییه  $SU(3)$  مربوط به مزون‌های شبه‌برداری.

شش ضلعی‌ها تنها شکل‌های مجاز برای هشت‌گانه نبودند؛ برای مثال یک آرایه‌ی مثلثی وجود دارد که ۱۰ باریون سنگین‌تر را در برمی‌گرفته یعنی ده‌گانه<sup>۱</sup> باریون.



شکل ۳.۱: الگوی ده‌تاییه‌ی باریونی.

<sup>۱</sup>Dicuplet