دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد

عنوان

# اختلاط ذرات و ماتریس $CKM$ در نظریه میدانهای کوانتومی

استاد راهنما

**دکتر قادر نجارباشی**

استاد مشاور

**دکتر فرهاد ذوالفقارپور**

پژوهشگر

**نوید اله یار**

دی‌ماه ۱۳۸۹

## چکیده

در این پایان‌نامه ابتدا به معرفی ذرات بنیادی و طبقه بندی و تاریخچهٔ مختصری بر آنها پرداخته و سپس به بررسی تقارنهای $C$ و $P$ و $T$ می‌پردازیم و نقض $CP$ در ذرات را معرفی می‌کنیم و در ادامه اختلاط ذرات را از دیگاه مکانیک کوانتومی برای نوترینوها و کوارکها مطالعه می‌کنیم و درآخر اختلاط ذرات را برای دو سیستم فرمیونی و بوزونی از دیدگاه نظریهٔ میدانهای کوانتومی بطور جداگانه مورد بحث قرار می‌دهیم.

# فهرست مندرجات


۱ **مقدمه ای بر فیزیک ذرات بنیادی** ۱

۱.۱ فیزیک ذرات بنیادی . . . . . ۲

۲.۱ چگونگی تولید ذرات بنیادی . . . . . ۳

۱.۲.۱ پرتوهای کیهانی . . . . . ۴

۲.۲.۱ راکتورهای هسته ای . . . . . ۴

۳.۲.۱ شتاب دهنده‌های ذرات . . . . . ۵

۳.۱ چگونگی آشکارسازی ذرات بنیادی . . . . . ٦

۴.۱ تاریخچه‌ای مختصر بر ذرات بنیادی . . . . . ٦

۵.۱ طبقه‌بندی ذرات بنیادی . . . . . ۹

۲ **نقض $CP$ در ذرات بنیادی** ۱۳

۱.۲ $P$،$C$ و $T$ در دینامیک کلاسیک . . . . . ۱۴
۱.۱.۲ مکانیک کلاسیک . . . . . ۱۴
۲.۱.۲ الکترودینامیک . . . . . ۱۴

۲.۲ $P$،$C$ و $T$ در مکانیک کوانتومی غیر نسبیتی . . . . . ۱۷
۱.۲.۲ تبهگنی کرامر . . . . . ۲۷

۳.۲ $P$،$C$ و $T$ در مکانیک کوانتومی نسبیتی . . . . . ۲۹
۱.۳.۲ میدانهای اسپین ۱ . . . . . ۳۱
۲.۳.۲ میدانهای اسپین صفر . . . . . ۳۴

۴.۲ کشف ذرات شگفت . . . . . ۳۶

۵.۲ معمای $\theta - \tau$ . . . . . ۳۸

۶.۲ قاعدهٔ $\Delta I = \frac{1}{2}$ . . . . . ۳۹

۷.۲ ناوردایی $CP$ نوسانات $K^\circ - \bar{K}^\circ$ . . . . . ۳۹

۸.۲ بازتولید $K_S$ . . . . . ۴۲

۹.۲ علامت عدم تقارن $CP$ . . . . . ۴۳

۱۰.۲ اگر زمان واپاشی را مشاهده نکنیم چه اتفاقی می افتد؟ . . . . . ۴۵

۱۱.۲ خلاصه‌ای درباره‌ی نوسانات $P^\circ - \bar{P}^\circ$ . . . . . ۴۷

**۳ اختلاط ذرات و ماتریس $CKM$ در مکانیک کوانتومی** ۴۹

۱.۳ نوترینوها . . . . . ۵۰

۱.۱.۳ اختلاط نوترینو . . . . . ۵۵

۲.۱.۳ نوسان نوترینو . . . . . ۵۹

۳.۱.۳ نمایش اپتیکی برای نوسانات نوترینو . . . . . ۶۳

۴.۱.۳ دامنه‌های نوسان نوترینو . . . . . ٦٦

۵.۱.۳ نقض $CP$ و $T$ در نوسانات نوترینو . . . . . ۷۲

٦.۱.۳ نوسان نوترینو و درهم‌تنیدگی . . . . . ۷۸

۲.۳ کوارکها . . . . . ۸۳

۱.۲.۳ اختلاط کابیبو . . . . . ۸۵

۲.۲.۳ مکانیسم گلاشو، ایلیوپولوس و مایبانی . . . . . ۸۸

۳.۲.۳ ماتریس اختلاط کوارک . . . . . ۸۹

۴.۲.۳ نوسان و نقض $CP$ در سیستم $B$ . . . . . ۹۹

۵.۲.۳ مزونها، کوارکها و دیاگرام جعبه ای . . . . . ۱۰۸

٦.۲.۳ حالتهای مزونی وابسته به زمان . . . . . ۱۱۲

۷.۲.۳ فرضیهٔ نقض $CP$ بیشینه و قرار داد فازی ماتریس $CKM$ . . . ۱۱٦

۴ اختلاط ذرات از دیدگاه نظریهٔ میدانهای کوانتومی ۱۲۲

۱.۴ اختلاط فرمیونها ۱۲۳
۱.۱.۴ نوسان نوترینو در مکانیک کوانتومی ۱۲۳
۲.۱.۴ نوترینوهای مایورانا ۱۲۵
۳.۱.۴ نوترینوهای دیراکی ۱۲۹
۴.۱.۴ نظریهٔ میدانهای کوانتومی اختلاط فرمیون ۱۳۱
۵.۱.۴ تعمیم تبدیلات اختلاط ۱۳۸
۶.۱.۴ ساختار جریان برای اختلاط میدان ۱۴۰
۷.۱.۴ فرمول دقیق اختلاط نوترینو ۱۴۴

۲.۴ نظریهٔ میدان کوانتومی اختلاط بوزون ۱۴۵
۱.۲.۴ اختلاط میدانهای بوزونی در نظریهٔ میدانهای کوانتومی ۱۴۶
۲.۲.۴ جریانها برای میدانهای بوزون آمیخته ۱۵۰
۳.۲.۴ فرمول دقیق برای نوسان بوزونها ۱۵۳

A پیوست ۱۵۵

B مراجع ۱۷۳

C واژه نامه ۱۷۶

## مقدمه

اختلاط کوانتومی در زمرهٔ مهمترین عناوین در فیزیک ذرات است. مدل استاندارد، اختلاط کوانتومی را در فرم ماتریس $CKM$ در بر دارد، که تعمیمی از اختلاط کابیبوی اولیه بین کوارکهای $d$ و $s$ است. همچنین اخیراً مدارک متقاعد کننده‌ای از اختلاط نوترینو بوسیلهٔ آزمایشات $super-kamiokande$ و $SNO$ فراهم گردیده است. بنابراین نوسانات نوترینو محتمل‌ترین نتیجه را برای معمای نوترینوی خورشیدی و جرمهای نوترینو بیان می‌کند. در اواسط قرن زمانی که اختلاط کوانتومی اولین بار در سیستمهای مزونی مشاهده شد، این پدیده نقش بسیار مهمی را در پدیدار شناسی فیزیک ذرات بازی کرد. در سال ۱۹۶۰ اختلاط $K^\circ$ و $\bar{K}^\circ$، یک اثباتی برای نقض $CP$ در اندرکنشهای ضعیف ارائه کرد. بعدها اختلاط $B^\circ\bar{B}^\circ$ برای تعیین آزمایشگاهی مثلث یکانی $CKM$ بطور فراوان مورد استفاده قرار گرفت. بالا بردن دقت آزمایشات اختلاط در مقیاس مزونی برای جستجوی هر انحرافی از یکانی بودن ماتریس $CKM$ واجب بود و بنابراین قیدهای زیادی در فیزیک جدید فراسوی مدل استاندارد قرار دارد. در همان زمان در مقیاس فرمیونی کشف اختلاط نوترینو و جرمهای نوترینو، دانسته‌های بنیادی ما را از نقض $CP$ و بنابراین مدل استاندارد به چالش کشید [۵]. آزمایش‌های نوسان نوترینوی شتابدهنده $(K2K)$، راکتور، اتمسفری و خورشیدی $(KamLAND, CHOOZ)$، با مدارک قوی بما می‌گویند، که نوترینوها جرمدار بوده و طعمهای لپتونها آمیخته هستند. پدیدهٔ اختلاط طعم لپتونی می‌تواند بوسیلهٔ یک ماتریس یکانی ۳ × ۳، یعنی $V_{MNSP}$، توصیف شود [۲۲]. در مدل استاندارد با $SU(2) \times U(1)$، بعنوان گروه پیمانه‌ای اندرکنشهای الکتروضعیف، هردوی کوارکها و لپتونها با دوتایی‌های چپ دست و تک‌تایی‌های راست دست بیان می‌شوند. ویژه حالتهای جرم کوارک با ویژه حالتهای ضعیف تفاوت دارند و ماتریس مربوط کنندهٔ این پایه‌ها برای شش کوارک تعریف شده و با یک پارامتریزاسیون روشن بوسیلهٔ کوبایاشی و ماسکاوا در سال ۱۹۷۳ بدست آمد [۱۰]. اختلاط ذرات، نقض $CP$ و واپاشی‌های کمیاب مزونهای $B$ و $K$ بخش مهمی از مدل استاندارد و در کل فیزیک ذرات را تشکیل می‌دهند. بعد از پارامتریزاسیون اولیهٔ ماتریس $CKM$ برای سه خانواده،

پارامتریزاسیونهای مختلف زیادی پیشنهاد شد. در همهٔ این موارد، ماتریس اختلاط $V$ برحسب چهار پارامتر، سه زاویه و یک فاز، پارامتریزه می‌شود [۲]. پایان‌نامه حاضر شامل چهار فصل است:

- در فصل اول به معرفی ذرات بنیادی، اعم از تاریخچه و چگونگی تولید و آشکار سازی و غیره پرداخته و سپس به طبقه بندی آنها می‌پردازیم.

- در فصل دوم تقارنهای گسستهٔ $C$ و $P$ و $T$ را بررسی کرده و در ادامه نقض $CP$ و اقسام آنرا در سیستم $K$ مزون و $B$ مزون و غیره مورد بحث و بررسی قرار می‌دهیم.

- در فصل سوم اختلاط ذرات، ابتدا نوترینوها و سپس کوارکها را از دیدگاه مکانیک کوانتومی بررسی کرده و سپس ماتریس $CKM$ را معرفی کرده و نقش پارامتر نقض $CP$ در ماتریس $CKM$ را تحقیق می‌کنیم.

- در فصل چهارم اختلاط ذرات بوزونی و فرمیونی را از دیدگاه نظریهٔ میدانهای کوانتومی مورد بررسی قرار می‌دهیم.

# فصل ۱

# مقدمه ای بر فیزیک ذرات بنیادی

## ۱.۱ فیزیک ذرات بنیادی

فیزیک ذرات بنیادی به بررسی این پرسش می‌پردازد که ماده از چه ساخته شده است؟ آن هم در بنیادی‌ترین سطح، یعنی کوچکترین مقیاس اندازه گیری. این یک واقعیت شایان توجه است که ماده در سطح زیر اتمی از ذرات بسیار کوچک تشکیل شده که فضاهای خالی بسیاری بین آنها واقع شده است. حتی از این شایان توجه‌تر اینکه این ذرات بسیار کوچک انواع محدودی دارند (الکترون، پروتون، نوترون، مزون پای، نوترینو و غیره)، که به شمار نجومی تکثیر شده و مواد موجود در جهان را تشکیل می‌دهند. برای ذراتی که اندازه آنها همانند اندازه اتم‌هاست، مکانیک کلاسیک جای خود را به مکانیک کوانتوم می‌دهد. سرانجام، برای اشیایی که هم کوچکند و هم سریع حرکت می‌کنند، به نظریه‌ای نیاز داریم که اصول نسبیت و کوانتوم را در بر دارد. یعنی نظریهٔ میدان‌های کوانتومی، ذرات بنیادی هم بسیار کوچکند و هم بطور معمول بسیار سریع حرکت می‌کنند. از اینرو فیزیک ذرات بنیادی طبیعتاً در قلمرو نظریهٔ میدان‌های کوانتومی جای می‌گیرد. هدف فیزیک ذرات بنیادی حدس زدن مجموعه‌ای از قانون نیروهاست، که رفتار ذرات را توصیف می‌کند.

برای مثال در نسبیت، انرژی و اندازه حرکت همواره محفوظ می‌مانند، ولی جرم (در حال سکون) چنین نیست. از اینرو واپاشی $\Delta \to p + \pi$ کاملاً قابل پذیرش است، اگرچه وزن $\Delta$ بیش از وزن مجموع وزن‌های $p$ و $\pi$ است. این فرایند در مکانیک کلاسیک نمی‌تواند روی دهد، زیرا در آنجا جرم کاملاً محفوظ می‌ماند. از این گذشته بنابر نسبیت، ذرات دارای جرم (سکون) صفر می‌توانند وجود داشته باشند. در مکانیک کلاسیک، چیزی به اسم ذرهٔ بدون جرم وجود ندارد. اما همانگونه که خواهیم دید، فوتون‌ها، نوترینوها و گلوئونها (به ظاهر) بدون جرم هستند.

در مکانیک کوانتومی هر دستگاه فیزیکی با حالت آن $|s\rangle$ مشخص می‌شود (که در فرمول بندی دیراک با $|s\rangle$ و در فرمول بندی شرودینگر با $\psi_s$ نمایش داده می‌شود). هر فرآیند فیزیکی همچون پراش یا واپاشی، شامل گذار از یک حالت به حالتی دیگر است، اما در مکانیک کوانتوم نتیجه به

طور منحصر به فرد باشرایط اولیه مشخص نمی‌شود؛ فقط در حالت کلی می توان احتمال بروز یک حالت گذار معین را پیدا کرد. این عدم قطعیت در مشاهدهٔ رفتار ذرات انعکاس می‌یابد. برای نمونه مزون پای باردار معمولاً به یک میون و یک نوترینو تجزیه می‌شود، ولی گاهی نیز پیش می آید که به یک الکترون و یک نوترینو شکافته شود. تفاوتی در مزون‌های اولیه نیست. آنها همگی یکسان هستند. فقط طبیعت است که به یکی می‌گوید این گونه رفتار کن و به دیگری می‌گوید طور دیگر.

در چند سال گذشته نظریه‌ای مطرح شده که تمام اندرکنش‌های شناخته شدهٔ ذرات بنیادی بجز جاذبه را توصیف می‌کند. این نظریه یا بهتر بگوییم، این مجموعه نظریه‌های مرتبط با هم که شامل الکترودینامیک کوانتومی، نظریه فرآیندهای الکتروضعیف گلاشو — واینبرگ — سلام و کرومودینامیک کوانتومی است، مدل استاندارد نامیده شده است. هیچکس مدعی نیست که مدل استاندارد آخرین کلام در این موضوع است، اما از سال ۱۹۷۸ تا کنون مدل استاندارد از هر آزمایشی موفق بیرون آمده است. از این گذشته، یک زیبایی جذب کننده دارد. در مدل استاندارد، تمام اندرکنشهای اساسی از یک اصل کلی ساده نتیجه می‌شوند، یعنی شرط ناوردائی پیمانه‌ای محلی.

## ۲.۱ چگونگی تولید ذرات بنیادی

برای الکترونها و پروتون‌ها مشکلی نداریم؛ اینها اجزاء پایدار ماده معمولی هستند. برای تولید الکترون کافی است، یک تکه فلز را گرم کنیم، الکترون از آن بیرون خواهد زد. اگر پرتوی از الکترونها را بخواهیم، یک صفحهٔ دارای بار مثبت را نزدیک فلز قرار می‌دهیم، تا آنها را جذب کرده و سوراخ کوچکی در آن ایجاد شود؛ الکترونهایی که سوراخ در آن ایجاد می‌کنند، پرتو الکترونی را تشکیل می‌دهند. این تفنگ الکترونی جزء اولیهٔ لامپ تلویزیون یا اسیلوسکوپ یا شتاب دهندهٔ الکترون است.

برای بدست آوردن پروتون، هیدروژن را یونیزه می‌کنیم (یعنی الکترون آن را می‌گیریم). در واقع اگر از پروتون‌ها به عنوان هدف استفاده کنیم، دیگر لازم نیست نگران الکترون‌ها باشیم. آنها آنقدر سبک هستند، که هر ذره پر انرژی که از راه می‌رسد، آنها را از مسیر منحرف می‌کند. از این رو یک مخزن هیدروژن در اصل مخزن پروتون‌هاست. برای ذرات شگفت انگیزتر سه منبع عمده وجود دارد: پرتوهای کیهانی، راکتورهای هسته‌ای و شتاب دهنده‌های ذرات.

### ۱.۲.۱ پرتوهای کیهانی

ذرات پر انرژی (در اصل پروتونها) که از فضای بیرون جو می آیند، همواره زمین را بمباران می‌کنند. منبع این ذرات جزء اسرار است؛ به هر صورت، هنگامی‌که این ذرات در بالای جو با اتم‌ها برخورد می‌کنند، ذرات ثانویه بسیار تولید می‌کنند (که اکثراً هنگامی که به سطح زمین می‌رسند، میون هستند)، که همواره بر سر ما می‌بارند. پرتوهای کیهانی به عنوان منبع ذرات بنیادی دو ویژگی دارند: آزاد هستند و می‌توانند انرژی بسیاری را در خود ذخیره کنند، خیلی بیش از آنچه در آزمایشگاه می‌توان تولید کرد، اما دو عیب عمده دارند: سرعتی که با آن به یک آشکارساز با اندازه‌ای معقول برخورد می‌کنند، بسیار کم است و کاملاً کنترل ناپذیر هستند. از این رو آزمایش با پرتوهای کیهانی نیاز به صبر و حوصله و شانس دارد.

### ۲.۲.۱ راکتورهای هسته ای

زمانی که یک هسته رادیواکتیو تجزیه می‌شود، انواع ذرات از آن گسیل می‌شوند. نوترون، نوترینو و آنچه پرتوهای آلفا نامیده می‌شود، پرتوهای بتا و پرتوهای گاما.

### ۳.۲.۱ شتاب دهنده‌های ذرات

با الکترونها و پروتونها آغاز کنید، آنها را شتاب دهید تا پر انرژی شوند و آنها را به سوی یک هدف روانه کنید. با قرار دادن ماهرانهٔ جذب کننده‌ها و آهنرباها می‌توانید از ذرات بدست آمده آنچه را می‌خواهید بررسی و گزینش کنید. امروزه به این ترتیب می‌توان پرتوهای شدید ثانویهٔ پوزیترون، میون، پایون، کائون و آنتی پروتون تولید کرد و آنها را نیز به سوی هدفی دیگر شلیک کرد. ذرات پایدار الکترونها، پروتونها، پوزیترونها و آنتی پروتونها را حتی می‌توان به سوی حلقه‌های غول پیکری فرستاد که با هدایت آهنرباهای قوی، هربار ساعت‌ها با سرعت زیاد گردش داده می‌شوند، تا در زمان استخراج شده و به مصرف برسند.

روی هم رفته هرچه ذره‌ای را که می‌خواهید تولید کنید سنگین‌تر باشد، انرژی برخورد باید شدیدتر باشد. به همین خاطر از نظر زمانی، نخست ذرات سبک وزن کشف شده و با گذشت زمان، شتاب دهنده‌ها قوی‌تر شده‌اند و ذرات سنگین‌تر یافت می‌شوند. امروزه سنگین‌ترین ذره شناخته‌شده، $Z^{\circ}$ است، که جرم آن تقریباً ۱۰۰ برابر جرم پروتون است. وقتی دو ذره پر سرعت را بطور سر به سر به هم برخورد می‌دهیم، برخلاف شلیک یک ذره به سوی یک هدف ثابت، ذره انرژی بسیار زیادی را بدست می‌آورد. از این رو بیشتر آزمایشهای معاصر شامل برخورد پرتوهای حلقه‌های ذخیرهٔ رویاروی است. اگر ذرات در مرحلهٔ نخست به هم برخورد نکنند، برای بار دوم تلاش می‌کنند. در واقع با الکترونها و پوزیترونها از همین حلقه می‌توان استفاده کرد، بطوریکه ذرات با بارهای مثبت در یک جهت و بارهای منفی در جهت دیگر گردش می‌کنند.

دلیل دیگری نیز برای دنبال کردن انرژی‌های بیشتر از سوی فیزیکدانان ذرات وجود دارد. روی هم رفته هرچه انرژی برخورد بیشتر باشد، دو ذره به یکدیگر نزدیکتر خواهند شد. از این رو اگر بخواهید اندرکنش را در دامنه‌ای بسیار کوتاه بررسی کنید، به ذرات بسیار پر انرژی نیاز دارید.

## ۳.۱ چگونگی آشکارسازی ذرات بنیادی

انواع گوناگون آشکارسازهای ذرات بنیادی موجود است. شمارشگر گایگر، اتاقک ابر، اتاقک حباب، اتاقک جرقه، امولسیون‌های عکاسی، شمارشگرهای چرنکوف، چشمک زن‌ها، تکثیر کننده‌های نور و غیره. در عمل، یک آشکارساز نوین دارای آرایش کامل این وسایل است و به یک رایانه وصل هستند، که ذرات را دنبال کرده و مسیر حرکت آنها را روی یک صفحه تلویزیون نمایش می‌دهد. ما به جزئیات موضوع کار نداریم، اما به یک نکته اشاره می‌کنیم، بیشتر مکانیزم‌های آشکارسازی مبتنی بر این نکته‌اند، هنگامی‌که ذرات باردار پر انرژی از ماده عبور می‌کنند، اتم‌های بین راه را یونیزه می‌کنند. یون‌ها نیز به عنوان دانه عمل کرده و قطره یا حباب یا جرقه، بسته به مورد، تولید می‌کنند، اما ذرات خنثی، یونش به وجود نمی‌آورند و مسیری بر جای نمی‌گذارند [۱۱].

## ۴.۱ تاریخچه‌ای مختصر بر ذرات بنیادی

فیزیک ذرات بنیادی تقریبا ۱۰۸ سال قدمت دارد. تامسون در ۱۸۹۷ الکترون را کشف کرد و الکترون بعنوان اولین ذره بنیادی است، که بشر کشف کرد.

در حالیکه ذرات دیگری که تا به امروز کشف شدند، چنین وضعیتی را ندارند. بزودی اتم رادرفورد، هسته و کوانتش بوهر آمدند. نوترون، نوترینو و پوزیترون ۳۰ سال بعد کم کم پیش بینی و کشف شدند. در این میان سالهای زیادی طول کشید تا وجود نوترینو ثابت شود. با دانستن برهمکنش ذرات بنیادی مکانیک کوانتومی و نسبیت هردو مورد نیاز قرار گرفتند.

نظریهٔ میدان کوانتومی ترکیب ناوردایی لورنتس و مکانیک کوانتومی را کامل کرد و بخوبی ذرات بنیادی و برهمکنش آنها را توصیف کرد.

نظریهٔ میدان بطور صریح جذب و خلق کوانتای میدان را محاسبه می‌کند.

کشف الکترون به اولین مدل اتم منجر شد. بزودی پس از آن آزمایش رادرفورد که توسط گایگر[۱] و مارسدن[۲] انجام شد، نادرستی اتم تامسون را اثبات کرد و بنابراین هسته در شکل صحیح آن بالاخره فهمیده شد.

این بسرعت به کشف پروتون منجر شد. در قرن اخیر سه ذره بنیادی کشف شدند: الکترون، فوتون و پروتون.

در یک اثر متقابل بین پیشرفت‌های تئوری و آزمایشات، لیست ذرات کشف شده شروع به افزایش نمود و نوترون و پوزیترون در ۱۹۳۲ به این لیست اضافه شدند.

در ۱۹۳۰ نظریهٔ میدان توسعه پیدا کرد و در ۱۹۵۰ الکترودینامیک کوانتومی $QED$ فاینمن و شوئینگر وتوموناگا[۳] و برنامه‌های بازبهنجارش به حد اعلی خود رسید.

فرمی با استفاده از نظریهٔ تابش الکترومغناطیسی یک نظریهٔ مؤثر چهار فرمیونی از واپاشی را معرفی کرد. پایین‌ترین مراتب به شدت واگراست. سازگاری آزمایشات با محاسبات مراتب پایینتر بسیار خوب بوده و تئوری یک نوترینو خلق می‌کند، که حتی تا ۱۹۵۳ آشکارسازی نشده بود. برهمکنش چهار فرمیون غیرقابل بازبهنجارش است. بنابراین یوکاوا نظریهٔ تابش الکترومغناطیسی را با برهمکنش قوی توسعه داد و یک میدان کوانتومی جدید را معرفی کرد، که نام آن پایون بود. پایون متناظر با فوتون در الکترومغناطیس است، اما با اسپین صفر و جرم غیر صفر، نظریه یوکاوا قابل بازبهنجارش است.

پس از جنگ جهانی دوم برخی یافته‌های جدید باعث پیشرفت‌هایی در فیزیک ذرات شد، اما معماهای زیادی ایجاد شد و باعث سردرگمی گردید، که اولین آن کشف یک فرمیون جدید بنام میون بود. این سردرگمی از اینجا ناشی می‌شد که ابتدا تصور می‌شد که میون همان پایون یوکاوا است، اما کانورسی [۴] و همکارانش در رم این نظریه را رد کردند. پایون خیلی زود کشف شد و پس از آمدن ذرات شگفت ناگزیر ایده‌های کاملاً جدیدی از قوانین پایستگی و اعداد

۱ *Geiger*
۲ *Marsden*
۳ *Tomonaga*
۴ *Conversi*

کوانتومی افزوده شده ارائه شد. پیشرفت‌های سریع و کشف ذرات جدید هردو باعث سردرگمی شدند و باعث ارائه ایده‌های جدید شد، که سرانجام به آنچه که ما امروز درباره ذرات بنیادی و برهمکنش‌های آنها می‌دانیم منتهی گردید.

جدول (۱.۴.۱) ذرات بنیادی در ۱۹۶۰

| بنیادی؟ | نام کلی | نماد | $j$ |
|---|---|---|---|
| نه | مزونهای اسکالر | $\pi^{\pm,\circ}$,$\mathrm{K}^{\pm,\circ,\circ}$,.. | 0 |
| نه | لپتونها | $e, \mu, e_\mu, \nu_\mu$ | 1/2 |
| نه | باریونها | $p, n, \Lambda, \sum$, .. | 1/2 |
| بله | فوتون | $\gamma$ | 1 |
| نه | مزونهای برداری | $\rho, \omega$ | 1 |
| نه | باریونها | $\Delta^{++,+,\circ,-}$, ..$\Xi^{-,\circ}$... | 3/2 |

شاید عجیب بنظر برسد که امروز فیزیک ذرات به بن بست رسیده است. بسیاری از ایده‌های جدید که ارائه می‌شوند را بدون آزمایش نمی توان تایید یا رد کرد. فیزیک ذرات در گذشته بوسیله تجربه و تئوری ترکیب زیبایی از ایده‌ها را بنا کرد. فهرستی از ذرات بدست آمده تا ۱۹۶۰ در جدول (۱.۴.۱) نمایش داده شده است. اکثر ذرات بنیادی کشف شده در چند دهه اخیر امروز همانطور باقی نمانده‌اند. جدولی که ما امروزه برای ذرات بنیادی داریم، بصورت زیر است.

جدول (۱.۴.۲) ذرات بنیادی در۲۰۰۳

| مشاهده شده؟ | نام کلی | نماد | $j$ |
|---|---|---|---|
| نه | اسکالر هیگز | $H$ | 0 |
| بله | لپتونها | $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ | 1/2 |
| بله | کوارکها | $u, d, c, s, t, b$ | 1/2 |
| بله | فوتون | $\gamma$ | 1 |
| بله | گلئونها (۸) | $g_j^i$ | 1 |
| بله | بوزونهای برداری | $W^{\pm}, Z^{\circ}$ | 1 |
| نه | گراویتون | | 2 |

## ۵.۱ طبقه‌بندی ذرات بنیادی

مدل استاندارد ذرات بنیادی را به دو گروه اصلی تقسیم می‌کند[۱۱ ،۱۲]:

۱) بوزون‌ها: بوزون‌ها ذرات با اسپین ذاتی صحیح هستند که از آمار بوز انیشتین تبعیت می‌کنند. در نظریهٔ میدان کوانتومی[۵] بوزون‌های اساسی واسطه‌ها هستند: فوتون، $W^{\pm}$،$Z^{\circ}$ ، $\gamma$ و گلئون‌ها.

۲) فرمیون‌ها: فرمیون‌ها ذرات با اسپین ذاتی نیم صحیح هستند که از آمار فرمی دیراک تبعیت می‌کند. همه مواد در جهان از ترکیب فرمیون‌ها تشکیل یافته‌اند، به‌طوری‌که فرمیون‌های بنیادی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- لپتون‌ها: در اندرکنش قوی شرکت نمی‌کنند، شامل ٦ جفت ذره و پاد ذره هستند که جفت جفت تولید می‌شوند:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \bar{\nu}_e \\ e^+ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\nu}_\mu \\ \mu^+ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\nu}_\tau \\ \tau^+ \end{pmatrix}$$

لپتون‌های باردار در اندرکنش‌های الکترومغناطیسی و ضعیف شرکت می‌کنند در حالی‌که نوترینوها فقط در اندرکنش ضعیف شرکت می‌کنند.

- کوارک‌ها: ساختار تشکیل‌دهنده هادرون‌ها هستند، که در ٦ طعم مختلف وجود دارند. خواص کوارک‌ها و اعداد کوانتومی آن‌ها در جدول (۱.۵.۳) آمده‌است. به طوری‌که $S$ عدد شگفتی $C$ عدد افسون، $B$ عدد باریونی، $T$ عدد حقیقت و $\widetilde{B}$ عدد زیبایی می‌باشد و داریم:

$$Q = I_۳ + Y/۲$$
$$Y = S + C + \widetilde{B} + B + T$$

---

۵ *Quantum field theory*

جدول (۱.۵.۳) کوارک‌ها

| flavour | | I | $I_3$ | $S$ | $C$ | $\widetilde{B}$ | $T$ | $Q$ | $B$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $up$ | $u$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | $+\frac{2}{3}$ | $+\frac{1}{3}$ |
| $down$ | $d$ | $\frac{1}{2}$ | $-\frac{1}{2}$ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | $-\frac{1}{3}$ | $+\frac{1}{3}$ |
| $strange$ | $s$ | ۰ | ۰ | $-1$ | ۰ | ۰ | ۰ | $-\frac{1}{3}$ | $+\frac{1}{3}$ |
| $charm$ | $c$ | ۰ | ۰ | ۰ | $+1$ | ۰ | ۰ | $+\frac{2}{3}$ | $+\frac{1}{3}$ |
| $bottom$ | $b$ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | $-1$ | ۰ | $-\frac{1}{3}$ | $+\frac{1}{3}$ |
| $top$ | $t$ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | $+1$ | $+\frac{2}{3}$ | $+\frac{1}{3}$ |

این‌ها اعداد کوانتومی جمعی هستند و طعم ذره مرکب، مجموع طعم کوارک‌های تشکیل‌دهندهٔ آن می‌باشد. کوارک شگفت، عدد کوانتومی شگفتی $-1$ را دارد و در بحث کائون‌ها مورد توجه می‌باشد.

**هادرون‌ها:** هادرون‌ها فقط در اندرکنش قوی شرکت می‌کنند و حالات مقید کوارک‌ها هستند که به دو صورت مشاهده می‌شوند:

۱) مزون‌ها: دو کوارکی هستند$(q_1\bar{q}_2)$ مثلاً $\pi^+ = u\bar{d}$ و $\pi^- = \bar{u}d$ و $\pi^\circ = u\bar{u}, d\bar{d}$.

۲) باریون‌ها: سه کوارکی هستند$(q_1q_2q_3)$ مثلاً $P = uud$ و $n = udd$.

باریون‌ها از تعداد فرد کوارک‌ها تشکیل یافته‌اند که دارای اسپین نیم‌صحیح هستند و بنابراین فرمیون می‌باشند، در حالی‌که مزون‌ها از تعداد زوج کوارک‌ها تشکیل یافته‌اند و بنابراین بوزون هستند. باریون‌ها بسته به بارالکتریکی و عدد شگفتی به شکل‌های هندسی مرتب می‌شوند، هشت باریون در یک آرایهٔ شش ضلعی قرار می‌گیرند که هشت‌تایی باریونی نامیده می‌شود.

اگر سه کوارک سبک $u$ و $d$ و $s$ داشته باشیم از ترکیب این کوارک‌ها، $۳^۲ = ۹$ مزون خواهیم داشت. بنابراین انتظار می‌رود مزون‌ها یک دسته ۹ تایی از ذرات را تشکیل دهند.

به‌علاوه کوارک‌ها ذرات اسپین $\frac{1}{2}$ هستند و قاعده جمع تکانه زاویه‌ای حالات سه تایی $(J=1)$ و حالت اسپین تکتایی $(J=0)$ می آفریند.

پایون‌ها سبک‌ترین مزون‌ها هستند و بنابراین انرژی کمتری را نسبت به مزون‌های دیگر دارند،

بنابراین آن‌ها کاندید خوبی برای واپاشی مزون‌های سنگین‌تر هستند. خاصیت دیگر اینست که مزون‌ها بدون طعم‌اند چون در مزون‌ها به ازای هر کوارک، یک پادکوارک وجود دارد که اعداد کوانتومی مربوط به کوارک‌ها و پادکوارک‌ها مخالف هم می‌باشد در نتیجه مزون‌ها بدون طعمند.

$$S = T = C = \widetilde{B} = ۰$$

در جدول زیر سبک‌ترین هادرون‌ها و ساختار کوارکی آن‌ها نشان داده شده است.
همان‌طورکه می‌بینیم سبک‌ترین هادرون‌ها، فقط متشکل از کوارک‌های بالا و پایین می‌باشد که سبک‌ترین کوارک‌ها هستند. سبک‌ترین باریون‌ها، نوکلئون‌ها و سبک‌ترین مزون‌ها، پایون‌ها هستند. پایون‌ها ناپایدارند و در واپاشی کائون‌ها ظاهر می‌شوند که می‌توانند باردار یا بدون بار باشند. باریکه کائون‌ها خنثی است و بنابراین در اتاقک حباب ظاهر نمی‌شوند، بنابراین با محصولات واپاشی‌شان که پایون‌ها[۶] باشند، آشکارسازی می‌شوند. خود پایون‌ها هم با محصولات واپاشی‌شان تعیین و شناسایی می‌شوند.

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$$
$$\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu}_e$$
$$\pi^\circ \to \gamma + \gamma$$

جدول (۱.۵.۴) سبک‌ترین هادرون‌ها و ساختار کوارکی آن‌ها

| هادرون | | کوارک |
|---|---|---|
| باریون | $p$ | $uud$ |
| باریون | $n$ | $udd$ |
| مزون | $\pi^+$ | $u\bar{d}$ |
| مزون | $\pi^-$ | $\bar{u}d$ |
| مزون | $\pi^\circ$ | $\frac{۱}{\sqrt{۲}}\{u\bar{u} + d\bar{u}\}$ |

**هادرون‌های شگفت:** هادرون‌های شگفت دو نوعند:

۱) باریون شگفت (که هیپرون نامیده می‌شود.)

[۶] پایون‌ها، بوزون‌های مجازی واسطه در برهم‌کنش‌های قوی هستند

۲) مزون شگفت (که سبک‌ترین مزون شگفت، مزون‌های $K$ می‌باشند که کائون نامیده می‌شود.)

کائون‌ها سبک‌ترین ذرات شگفت هستند، به‌طوری‌که $C = T = \widetilde{B} = ۰$ و کوارک‌های $u$ و$\bar{u}$ و$d$ و$\bar{d}$ و$S$ و$\bar{S}$ یافته‌اند.

کوارک بالا، سبک‌ترین کوارک است. از ترکیب این کوارک (یا پادکوارک)، با کوارک شگفت (یا پادکوارکش)، کائون‌های باردار $K^{\pm}$ بدست می آید. کائون‌های خنثی نیز ترکیب کوارک پایین (یا پادکوارک) با کوارک شگفت (یا پادکوارکش) می‌باشد، که آن‌ها کمی سنگین‌تر از کائون‌های باردار می‌باشند.

**تشدیدها:**

تشدیدها حالات برانگیخته‌ای هستند که در برخورد ذرات در انرژی‌های خاص می‌توانند ایجاد شوند. رزونانس‌ها با جرم و پهنا و اسپین‌شان تعیین می‌شوند. اگر ما سطح مقطع پراکندگی را بر حسب انرژی رسم کنیم نمودار ما دارای پیک‌هایی خواهد بود که این پیک‌ها در انرژی‌های خاصی اتفاق می‌افتد و این‌ها با رزونانس‌ها مطابق می‌باشد که جرم—انرژی، انرژی بیشترین بیشینه می‌باشد، پهنا نیز پهنای بیشینه است.

تشدیدها حالات برانگیخته‌ای هستند که با برهم‌کنش قوی واپاشی می‌کنند در نتیجه نیمه عمر از مرتبه $۱۰^{-۲۳}$ ثانیه را دارد. (نیمه عمر $\tau = \frac{۱}{\Gamma}$ می‌باشد که $\Gamma$ پهنای توزیع سطح مقطع[۷] می‌باشد.)

**تشدید $\varphi$:** کائون‌ها $K^{\circ}$ و $\bar{K}^{\circ}$ معمولاً در تشدید $\varphi$ در برهم‌کنش‌های شامل $e^+$ و $e^-$ تولید می‌شوند.

$$e^- + e^+ \to \varphi \to K^+ + K^- + \gamma$$
$$e^- + e^+ \to \varphi \to K^{\circ} + \bar{K}^{\circ} + \gamma$$

به‌طوری‌که $\varphi$، $۱۰۲۰ Mev/c^۲$ می‌باشد.

[۷] سطح مقطع احتمال اندرکنش شاری از ذرات تصادفی می‌باشد.