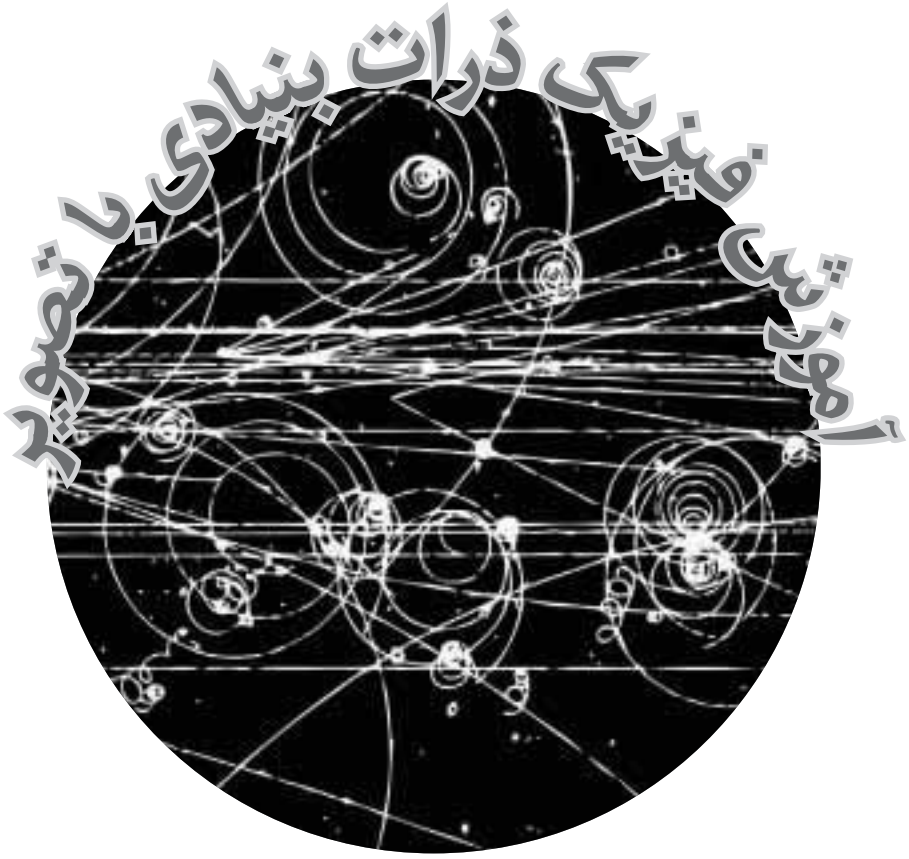
آموزش فیزیک ذرات بنیادی با تصویر



علی هدایتی

دبیر و مدرس مراکز ضمن خدمت فرهنگیان میانه

چکیده: **ذرات بنیادی کوچک‌ترین اجزای ماده هستند که از دو گروه فرمیون‌ها[1] و بوزون‌ها[2] تشکیل شده‌اند. پروتون‌ها و نوترون‌ها از ذرات کوچکی به نام کوارک[3] ساخته شده‌اند که با ذرات بنیادی دیگری به نام گلوئون[4] به همدیگر متصل شده‌اند. کوارک‌ها و گلوئون‌ها دارای بار رنگی[5] هستند که این ویژگی آن‌ها عامل اصلی برهم‌کنش بین کوارک‌ها معرفی شده است. مبادله گلوئون بین کوارک‌ها نیروی قوی را پدید می‌آورد که این نیرو مانع دور شدن کوارک‌ها و دیگر ذرات درون هسته می‌شود.**

چهار نوع نیروی بنیادی در طبیعت وجود دارد این نیروها شامل نیروی الکترومغناطیسی، نیروی هسته‌ای قوی، نیروی هسته‌ای ضعیف و نیروی گرانشی است، همه این نیروها با تبادل بوزون‌ها بین ذرات (فرمیون) مبادله می‌شوند.

در این نوشته تلاش بر آن شده است که به پرسش‌هایی نظیر (ذرات بنیادی، ماهیت نیروی جاذبهٔ بین نوکلئون‌ها[6]، ماهیت نوکلئون‌ها، سازوکار پرتوزایی و...)، که ذهن بسیاری از دانش‌آموزان و دانشجویان عزیز را به خود مشغول می‌کند تا حد امکان پاسخ داده شود.

کلید واژه‌ها: ذرات بنیادی، فرمیون، بوزون، نوکلئون، کوارک، گلوئون.

ابداع روش‌های نوین آزمایشگاهی و اختراع دستگاه‌های پیشرفته، باعث کشف ذرات جدیدتر در داخل اتم می‌شود اما از میان صدها ذره کشف شده فقط تعدادی معدودی در حکم ذره بنیادی هستند. ذرات درون اتم به روش‌های تجربی به وسیله دستگاه‌های شتاب‌دهنده خطی، سیکلوترون‌ها، برخورددهنده‌ها و غیره شناسایی می‌شوند.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که نیروهای جاذبهٔ بسیار قوی بین ذرات هسته وجود دارد و این نیروها بر دافعه الکتروستاتیک بین پروتون‌ها غلبه می‌کند. سرشت نیروی جاذبه نوکلئون‌ها مستقل از بار الکتریکی آن‌هاست و به خاصیت دیگری از ذرات هسته‌ای ارتباط دارد.

برخی از ذرات بنیادی اجزای ماده‌اند و ماده را تشکیل می‌دهند اما برخی دیگر

از آن‌ها حامل، نیروهای بنیادی بین ذرات ماده هستند.

گرچه در ظاهر هسته اتم فقط از پروتون‌ها و نوترون‌ها تشکیل شده است اما بررسی دقیق‌تر نشان می‌دهد که چند نوع ذره دیگر در ساختار هسته وجود دارد که برهم‌کنش بین این ذرات کوچک‌تر، نیز بسیار شگفت‌انگیز است.

تاریخچه ساختار ذره‌ای ماده

حدود ۴۰۰ سال پیش از میلاد مسیح، لوکیپوس؛ فیلسوف یونان باستان، مطرح کرد که ماده ساختار ذره‌ای دارد، یعنی ماده از اجتماع ذره‌های بسیار بسیار ریزی تشکیل شده است. به عقیده او این ذرات بسیار ریز آخرین حد از تقسیم ماده‌اند و دیگر قابل تقسیم نیستند، او این ذرات را اتم نامید.

پس از وی یکی از شاگردانش به نام دموکریتوس، اولین نظریه درباره اتم را ارائه داد، اما نظریه دموکریتوس به دلیل این‌که بر پایه آزمایش نبود و اندیشه‌اش بسیار فراتر از سطح درک انسان‌های آن زمان بود فراگیر نشد. پس از گذشت ۲۲ قرن، در سال ۱۸۰۸ جان دالتون، دانشمند مشهور انگلیسی، براساس شواهد و قوانین تجربی که خود و دیگر دانشمندان کشف کرده بوده‌اند به ویژگی ذره‌ای ماده که دموکریتوس مطرح کرده بود، پی برد. دالتون، اتم‌ها را گوی‌های توپری فرض کرد که به ذرات دیگری قابل تجزیه نبودند (شکل ۱).

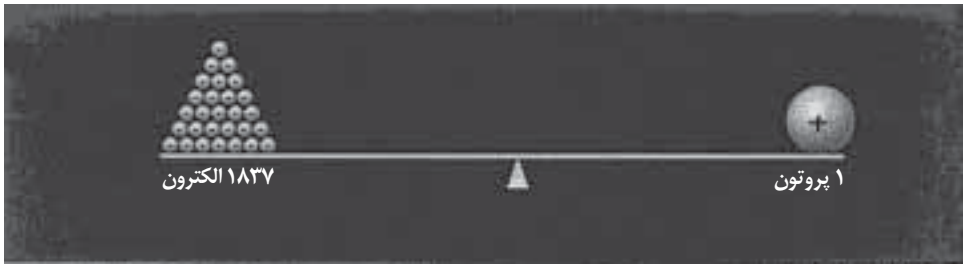
شکل ۱: مدل اتمی دالتون

پس از نظریه اتمی دالتون آزمایش‌های تامسون و رادرفورد نشان داد که هر اتم از ذرات دیگری به قرار زیر تشکیل شده است.

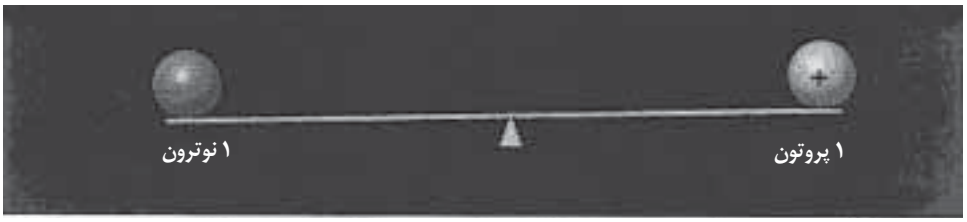
الف) الکترون: ذره‌ای با بار منفی که جرم آن $\frac{1}{1837}$ جرم پروتون است به عبارت دیگر جرم پروتون معادل جرم ۱۸۳۷ الکترون است (شکل ۲).

ب) پروتون: ذره‌ای با بار مثبت که جرم آن معادل جرم ۱۸۳۷ الکترون است.

ج) نوترون: ذره‌ای خنثی که جرم آن اندکی از جرم پروتون بیشتر است ولی می‌توان جرم آن را تقریباً معادل جرم پروتون فرض کرد (شکل ۳).



شکل ۲: مقایسه جرم پروتون با الکترون



شکل ۳: مقایسه جرم نوترون با پروتون

ذرات بنیادی اتم

ذرات بنیادی در واقع کوچک‌ترین جزء شناخته شده ماده‌اند که به ذرات ریزتر و کوچک‌تر قابل تقسیم نیستند. قبلاً تصور می‌شد که پروتون‌ها، نوترون‌ها و الکترون‌ها تنها ذرات بنیادی سازنده اتم‌ها هستند اما مطالعات دقیق‌تر نشان داد که نوترون‌ها و پروتون‌ها خود از ذرات دیگری ساخته شده‌اند. در فیزیک ذرات بنیادی، مدلی به نام **مدل استاندارد** مطرح شده که تمام **ذرات** و **نیروهای** جهان هستی را شرح می‌دهد. این مدل صدها ذره زیر اتمی و برهم کنش‌های پیچیده آن‌ها را به کمک ۱۷ ذره بنیادی زیر توضیح می‌دهد (جدول ۱).

در این مدل فرمیون‌ها (کوارک‌ها و لپتون‌ها[۲]) سنگ بناهای ماده‌اند اما بر هم‌کنش بین آن‌ها با خانواده دیگری از ذرات به نام بوزون‌ها توجیه می‌شود. برهم‌کنش بین ذرات منشأ تولید نیروهای بنیادی بین ذرات است و برای هر **نیروی خاص** یک نوع ذرهٔ متفاوت وجود دارد. مثلاً فوتون‌ها (ذرات نور) حامل‌های نیروی الکترومغناطیس‌اند؛ گلوئون‌ها،

	فرمیون‌ها			بوزون‌ها
کوارک‌ها	u بالا	c افسون	t بالا	γ فوتون
	d پایین	s شگفت	b ته	Z بوزون Z
لپتون‌ها	ν_e نوترونیوی الکترون	ν_μ نوترونیوی مئون	ν_τ نوترونیوی تاو	W بوزون W
	e الکترون	μ مئون	τ تاو	g گلوئون

ذرات حامل نیرو

بوزون هیگز

جدول ۱: ۱۷ ذره بنیادی

حامل‌های نیروی قوی و بوزون‌ها (باردار و خنثی) حامل نیروی ضعیف هستند.

۱. فرمیون‌ها: ذرات تشکیل‌دهنده ماده هستند که تمایل به اشغال حالت کوانتومی یکسان ندارند و از اصل طرد پاولی پیروی می‌کنند. این ذرات از مکانیک آماری فرمی ـ دیراک پیروی می‌کنند، عدد کوانتومی اسپین این ذرات مانند الکترون ۱/۲ است. این ذرات شامل کوارک‌ها و لپتون‌ها هستند.

۲. بوزون‌ها: این ذرات حامل نیروهای بنیادی بین فرمیون‌ها بوده و به ذرات تبادلی نیز معروف هستند. این ذرات تمایل به اشغال حالت کوانتومی یکسان دارندو از اصل طرد پاولی پیروی نمی‌کنند. این ذرات از آمار بوز ـ اینشتین پیروی می‌کنند مانند نور لیزر، عدد کوانتومی اسپین این ذرات عدد صحیح است. برخی بوزون‌ها مانند فوتون (γ) گلوئون (g) بدون جرم هستند ولی برخی از آن‌ها مانند بوزون‌ها از نوع Z، W و بوزون هیگز[۸] جرم دارند، به پنج بوزون بالا، بوزون‌های بنیادی می‌گویند.

بوزون هیگز: این ذره اخیراً پیشنهاد شده است و جرم آن بیشتر از بوزون W یا Z است.

کوارک و انواع آن: کوارک‌ها اجزای بنیادی ماده‌اند که در اواخر سال‌های ۱۹۶۰ و اوایل سال ۱۹۷۰ مطرح شده‌اند. ویژگی‌های کوارک شامل بار الکتریکی، بار رنگی، اسپین و جرم است. کوارک‌ها اجزای سازنده پروتون و نوترون هستند و بار الکتریکی آن‌ها کسری است، کوارک‌های دارای بار الکتریکی ۲/۳+ است c، u و t و کوارک‌های دارای بارالکتریکی ۱/۳− s، d و b هستند. همان‌طور که در جدول (۳) آمده است، شش نوع کوارک شناسایی شده است که از بین آن‌ها فقط کوارک u (بالا) و d (پایین) پایدار است و جرم هر یک از آن‌ها ۱/۳ جرم پروتون یا نوترون است.

مجزا کردن[۹] کوارک منفرد غیرممکن است اما ترکیب دو یا چند کوارک با یکدیگر تشکیل ذراتی به نام هادرون[۱۰] می‌دهد که به‌وسیله دستگاه‌های پیشرفته قابل ردیابی هستند، هادرون‌ها به دو دسته باریون[۱۱] و مزون[۱۲] تقسیم می‌شوند.

باریون‌ها، ذراتی هستند که از سه کوارک تشکیل شده‌اند و مشهورترین آن‌ها همان پروتون و نوترون است. مزون‌ها، ذراتی هستند که از یک کوارک و پادکوارک تشکیل شده‌اند و مشهورترین آن‌ها پیون[۱۳] است.

لپتون‌ها: بار الکتریکی این ذرات خنثی و یا (۱−) است، اما عدد کوانتومی اسپین این ذرات مانند کوارک‌ها ۱/۲ است به‌طور کلی شش نوع لپتون وجود دارد سه نوع از آن‌ها دارای بار الکتریکی و سه نوع دیگر هم فاقد بارالکتریکی هستند. لپتون‌ها ذرات بنیادی هستند و معروف‌ترین لپتون همان الکترون است.

پادماده: دانشمندان عقیده دارند که برای هر نوع ذرهٔ یک پاد ذره وجود دارد مثلاً پوزیترون پاد ذره الکترون است که فقط از نظر بار الکتریکی با آن تفاوت دارد وقتی ذره و پاد ذره در کنار هم باشند بلافاصله همدیگر را نابود کرده و به انرژی تبدیل می‌شوند.

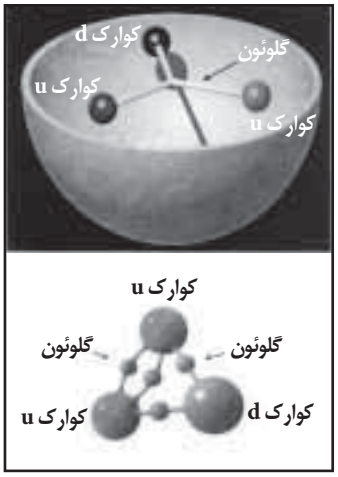
کوارک‌های سازنده پروتون

پروتون که دارای بار (۱+) است از دو کوارک u (۲/۳+) و یک کوارک d (۱/۳−) تشکیل شده است (شکل ۴).

۱+= (۲/۳+۲/۳+−۱/۳) = بار پروتون

شکل ۴: کوارک‌های سازنده پروتون

در پروتون، کوارک‌ها را ذرات دیگری به نام گلوئون به یکدیگر پیوند می‌دهد (شکل ۵).



شکل ۵: ساختار ترکیبی پروتون

گلوئون‌ها: گلوئون از واژه glue به معنی چسب و پسوند on گرفته شده است، این ذرات از نوع بوزون بوده و شبیه فوتون‌های نور هستند، این ذرات بار الکتریکی و جرم ندارند. کوارک‌های پروتون یا نوترون به وسیله گلوئون‌ها، به یکدیگر متصل می‌شوند. امروزه به روش‌های **پیچیده ریاضی ۸** نوع گلوئون پیش‌بینی شده است. نماد این ذره حرف g است و اولین شواهد تجربی این ذرات در سال ۱۹۷۹ به دست آمد.

ذرات سازنده نوترون: هر نوترون از دو کوارک d (۱/۳−) و یک کوارک u (۲/۳+) تشکیل شده است بنابراین نوترون از نظر بار خنثی است.

۰= (۱/۳−۱/۳−+۲/۳+)= بار نوترون

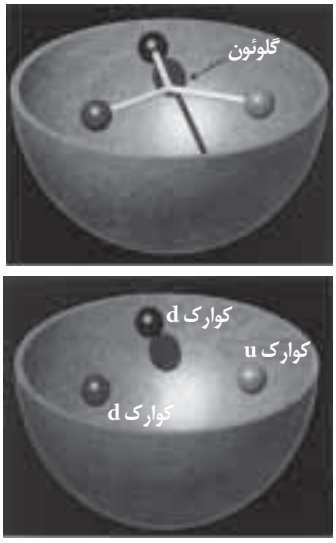
در هر نوترون نیز کوارک‌ها را گلوئون‌ها به یکدیگر پیوند می‌دهد (شکل ۶).

نوکلئون: پروتون‌ها و نوترون‌ها را به‌طور کلی نوکلئون می‌نامند.

ساختار ترکیبی نوکلئون (پروتون و نوترون)

هر نوکلئون‌ها شامل سه کوارک است که به‌وسیله گلوئون به یکدیگر متصل شده‌اند و تفاوت آن‌ها فقط در نوع کوارک‌های سازنده است به‌طوری‌که

در فیزیک ذرات بنیادی، مدلی به نام مدل استاندارد مطرح شده که تمام ذرات و نیروهایی که جهان هستی را می‌سازند شرح می‌دهد. این مدل صدها ذره زیر اتمی و برهم کنش‌های پیچیده آن‌ها را در عالم به کمک ۱۷ ذره بنیادی زیر توضیح می‌دهد



شکل ۶: ذرات سازندهٔ نوترون

پروتون از دو کوارک u و یک کوارک d ولی نوترون از یک کوارک u و دو کوارک d ساخته شده است (شکل ۷).

انواع پیون: با توجه به نوع کوارک و پاد کوارک‌های سازنده، پیون‌ها شامل سه نوع (پیون منفی، پیون مثبت و پیون خنثی) است.

۱. **پیون منفی:** از یک کوارک d و یک پاد کوارک u تشکیل شده است. ($d, \bar{u}$)

۲. **پیون مثبت:** از یک کوارک u و یک پاد کوارک d تشکیل شده است. ($u, \bar{d}$)

۳. **پیون خنثی:** از یک کوارک d و یک پاد کوارک d ($d, \bar{d}$) یا از یک کوارک u و یک پاد کوارک u تشکیل شده است ($u, \bar{u}$).

قطر ذرات بنیادی

قطر کوارک در حدود ۰/۰۰۰۰۰۰۱ قطر هسته است و قطر هسته در حدود ۰/۰۰۰۱ قطر اتم است. پس می‌توان گفت اگر قطر یک اتم را ۱ سانتی‌متر فرض کنید قطر هسته آن یک ده هزارم (۰/۰۰۰۱) سانتی‌متر ولی قطر هر کوارک فقط یک **میلیاردم** (۰/۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰۱) سانتی‌متر خواهد بود. پس کوارک‌ها در ناحیه بسیار کوچکی از هسته متمرکز شده‌اند و قسمت زیادی از فضایی هسته

شکل ۷: ذرات سازنده پروتون و نوترون

اتم خالی است (شکل ۸).

بار رنگی (نیروی رنگ): بار رنگی، ویژگی شبیه بار الکتریکی ذرات است که به کوارک‌ها و گلوئون‌ها نسبت داده می‌شود. به‌وسیله بار رنگی، حالت کوانتومی، یکسان برخی کوارک‌ها (کوارک‌های همنام) **در داخل نوکلئون‌ها توجیه می‌شود، نظریهٔ این پدیده به نظریه کوانتومی کرومودینامیک[۱۴] (QCD) معروف است. در مدل استاندارد پاد کوارک‌ها نیز مانند کوارک‌ها دارای بار رنگی هستند (پاد قرمز، پاد سبز و پاد آبی).** بار رنگی کوارک‌ها با رنگ‌های واقعی فرق دارد و یک تصویر ذهنی است که برای سادگی بحث به رنگ‌های اصلی تشبیه می‌شود. اگرچه بار الکتریکی ذرات فقط شامل دو حالت می‌شود (مثبت یا منفی) ولی بار رنگی کوارک‌ها، مانند رنگ‌های اصلی، شامل سه حالت (قرمز، سبز و آبی) است. در این مدل رنگ هر کوارک می‌تواند یکی از سه رنگ اصلی (قرمز، آبی و سبز) را داشته باشد و همان‌طور که از ترکیب این سه رنگ، رنگ سفید به دست می‌آید از برهم‌کنش چند کوارک، ذره‌ای سفید رنگ به دست می‌آید، و ذراتی قابل مشاهده در طبیعت که شامل باریون (پروتون و نوترون)، مزون (پیون)

شکل ۸: قطر ذرات درونی اتم

و... هستند هر یک از آن‌ها بی‌رنگ بوده و از سه رنگ اصلی به‌وجود آمده‌اند (شکل ۹ و ۱۰).

برهم‌کنش کوارک‌ها و مبادله گلوئون بین آن‌ها منشأ تولید نیروی بسیار قوی است و مانع جداشدن کوارک‌ها از هم می‌شود. با توجه با این‌که رنگ هر گلوئون مخلوطی از یک رنگ و یک پاد رنگ فرض شده، معادله‌های ریاضی وجود ۸ نوع گلوئون را پیش‌بینی می‌کند. در فرایند فرضی زیر رنگ گلوئون مبادله شده مخلوطی از دو رنگ قرمز و پاد سبز است و تبادل گلوئون بین کوارک‌ها، رنگ کوارک قرمز را به سبز و کوارک سبز را به قرمز را تغییر می‌دهد (شکل ۱۱).

اگرچه فوتون‌ها به هنگام مبادله، بار الکتریکی ذرات را تغییر **نمی‌دهند** اما گلوئون‌ها به هنگام مبادله، رنگ کوارک را تغییر می‌دهند.

مبادله گلوئون بین کوارک‌ها نیروی چسبندگی کوارک‌ها را تأمین می‌کند و از جدا شدن آن‌ها جلوگیری می‌کند (شکل ۱۲).

نیروهای بنیادی: بین ذرات بنیادی (فرمیون‌ها) چهار نوع نیرو حاکم است، منشأ این نیروها مربوط به مبادله ذره‌هایی از نوع بوزون (فوتون، گلوئون) است این نیروها شامل نیروهای الکترومغناطیسی، نیروهای هسته‌ای ضعیف، نیروهای هسته‌ای قوی و نیروهای گرانش به شرح زیر می‌باشد:

۱. نیروهای الکترومغناطیسی

وقتی دو ذره باردار مثل الکترون به یکدیگر نزدیک می‌شوند تبادل فوتون بین آن‌ها نیروی الکترومغناطیس را پدید می‌آورد و بر اثر ظهور نیروی الکترومغناطیس سرعت و جهت حرکت دو الکترون تغییر می‌کند (شکل ۱۳).

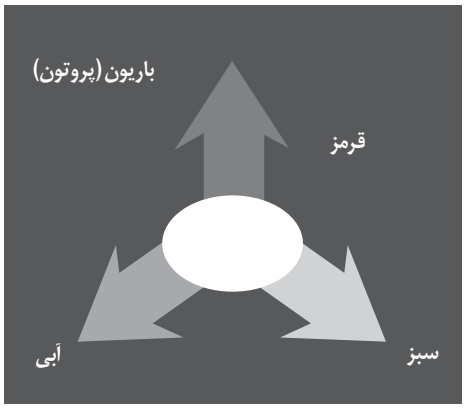
۲. نیروی هسته‌ای قوی

نیروی هسته‌ای قوی یکی از چهار نیروی بنیادی طبیعت است. این نیرو علاوه بر این‌که کوارک‌ها را در کنار هم نگه می‌دارد، نوکلئون‌ها را نیز در داخل هسته اتم به هم پیوند می‌دهد. این نیرو همانند نیروی الکترومغناطیسی با تبادل نوعی بوزون به نام **گلوئون** اعمال می‌شود. نیرویی که پروتون‌ها و نوترون‌ها را در هسته اتم‌ها نگه می‌دارد و از جدا شدن آن‌ها بر اثر نیروی دافعه بارهای مثبت پروتون‌ها جلوگیری می‌کند، یک نیروی عظیم است که این نیرو با تبادل ذره‌ای به نام **پیون** انجام می‌گیرد (شکل ۱۴).

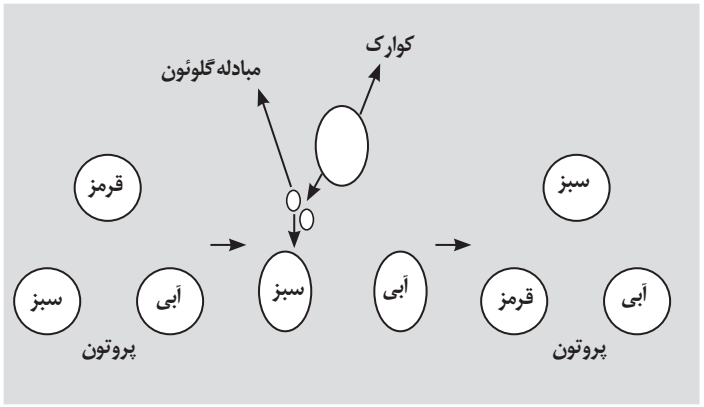
پیون، نوعی بوزون ترکیبی است که از یک کوارک و یک پادکوارک تشکیل شده است (شکل ۱۵).

اگر قطر پروتون‌ها و نوترون‌ها در این شکل ۱۰cm بود، قطر کوارک‌ها و الکترون کمتر از ۰/۱mm و اندازهٔ کل اتم حدود ۱۰km می‌شد

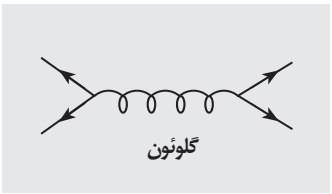
شکل ۹: پیون خنثی ترکیبی از دو کوارک



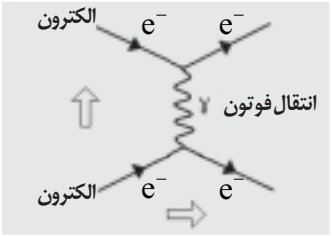
شکل ۱۰: پروتون، ترکیبی از سه کوارک



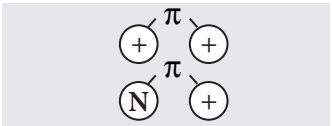
شکل ۱۱: تغییر رنگ کوارک‌ها بر اثر مبادله گلوئون



شکل ۱۲: مبادله گلوئون بین دو کوارک آبی و سبز



شکل ۱۳: دافعه الکترومغناطیس الکترون‌ها بر اثر تبادل فوتون



شکل ۱۴: تبادل پیون حامل نیروی قوی

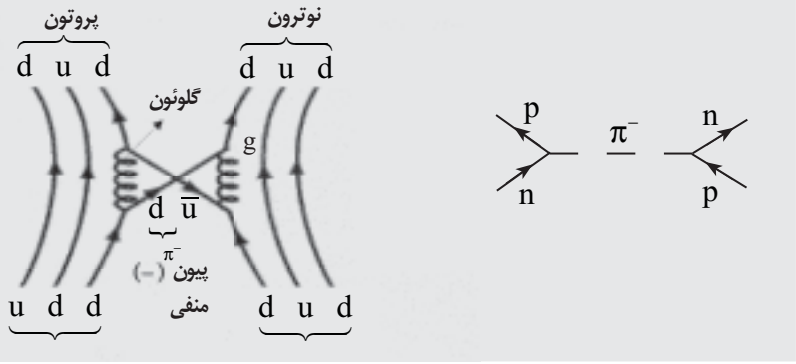
شکل۱۵: ساختار ترکیبی پیون (+)

رنگی کوارک‌ها سرچشمه می‌گیرد.

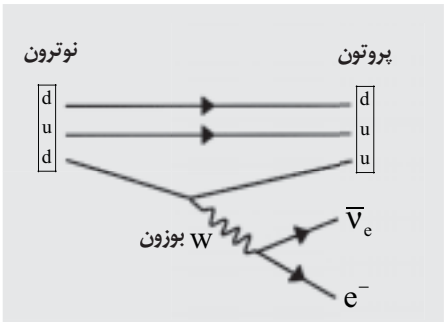
به عبارت دیگر نیروی جاذبه قوی بین پروتون‌ها و نوترون‌ها، حاصل نیروی رنگی کوارک‌هاست که در فراسوی ذرات (نوکلئون‌ها) گسترش یافته است.

۳. نیروی هسته‌ای ضعیف

نیروی هسته‌ای ضعیف که بین کوارک‌ها و لپتون‌ها وجود دارد، باعث تبادل انرژی و تکانه بین آن‌ها می‌شود و به اندازه 10^{-13} مرتبه از نیروی هسته‌ای قوی ضعیف‌تر است. همانند، سایر نیروهای بنیادی طبیعت، نیروی هسته‌ای ضعیف نیز توسط تبادل بوزون‌ها صورت می‌گیرد، که در اینجا ذرات مبادله شده **بوزون‌های** از نوع W یا Z هستند. این نیرو همان نیروی دخیل در فرایند واپاشی بتاز است (شکل ۱۷).



شکل ۱۶: تبادل پیون بین پروتون و نوترون



شکل ۱۷: تبادل بوزون به هنگام تبدیل نوترون به پروتون

۴. نیروی جاذبه گرانشی

گمان می‌رود که ذره‌ای با نام گراویتون (نوعی بوزون) که هنوز مشاهده نشده مسئول نیروی گرانشی باشد؛ اما هنوز امکان ارائهٔ نظریهٔ جامعی که شامل گراویتون باشد، قطعی نیست.

ویژگی‌های انواع نیروهای بنیادی: چند ویژگی مهم نیروهای بنیادی (شدت، نوع ذره تبادلی و برد مؤثر نیرو) به شکل زیر است، با توجه به این جدول، نیروی هسته‌ای قوی، قوی‌ترین و نیروی گرانشی، ضعیف‌ترین نیرو بین ذرات است (جدول۲).

جدول۲: ویژگی‌های انواع نیروهای بنیادی

نیروی بنیادی	ذره تبادلی	شدت نیرو	برد نیرو (متر)
الکترومغناطیسی	فوتون	10^{36}	بی‌نهایت
نیروی هسته‌ای ضعیف	بوزون W.Z	10^{25}	10^{-18}
نیروی هسته‌ای قوی	گلوئون	10^{38}	10^{-15}
گرانشی	گراویتون	۱	بی‌نهایت

نتیجه‌گیری

۱. ذرات بنیادی، کوچک‌ترین ذرات شناخته شده ماده‌اند که تاکنون ۱۷ ذره از آن‌ها شناسایی شده است.

۲. ذرات بنیادی شامل دو گروه فرمیون‌ها و بوزون‌ها هستند که فرمیون‌ها سنگ بناهای ماده بوده ولی بوزون‌ها حامل نیروهای بنیادی بین ذرات هستند.

۳. پروتون‌ها و نوترون‌ها از ذرات کوچک‌تری به نام کوارک تشکیل شده‌اند که این ذرات به‌وسیله گلوئون‌ها به یکدیگر متصل شده‌اند.

۴. کوارک‌ها و گلوئون‌ها دارای ویژگی بار رنگی هستند که این ویژگی عامل اصلی برهم‌کنش بین کوارک‌هاست.

۵. مبادله گلوئون بین کوارک‌ها نیروی قوی را پدید می‌آورد که این نیرو مانع پراکنده شدن کوارک‌ها و دیگر ذرات درون هسته می‌شود.

۶. نیروهای بنیادی شامل نیروهای هسته‌ای قوی، نیروهای هسته‌ای ضعیف، نیروی الکترومغناطیسی و نیروی گرانشی است که همه آن‌ها با تبادل بوزون بین ذرات اعمال می‌شوند.

۷. قطر هسته بسیار کم است در نتیجه قسمت زیادی از حجم اتم خالی است.

پی‌نوشت

1. Fermions
2. bosons
3. quark
4. Gluon
5. color charge
6. nucleon
7. Lepton
8. Higgs boson
9. isolation
10. Hadron
11. baryon
12. meson
13. pion
14. quantum chromodynamics

منابع

۱. **آشنایی با فیزیک هسته‌ای**، کنت کرین، مترجم: محمد ابراهیم ابوکاظمی و منیژه رهبر، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، چاپ اول، ۱۳۷۱
۲. **سیری در جهان ذرات زیر اتمی**، سیندی شوآرتز، مترجم: جلال‌الدین کاشانی راد و محمد ابراهیمی ابوکاظمی، انتشارات فاطمی، چاپ اول، ۱۳۷۵
۳. **شیمی عمومی (۲)**، تألیف چارلز مورتیمر، مترجم یاوری، عیسی، ویرایش ششم، انتشارات علوم دانشگاهی، ۲۷ آبان ۱۳۸۸
4. http://education. jlab. org/faq/index.html by Steve Gagnon 2009
5. http://www.phys.ncku. edu.tw/mirrors/physicsfaq/ Administrivia/ copyright. html by James Bottomley and John Baez, 1996
6. http://en.wikipedia.org/ wiki/Gluon 23 June 2010
8. http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/forces/ funfor.html 2008
9. http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/particles/ quark.html 2008