بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران مرکز

دانشکده علوم پایه

پایان‌نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد فیزیک

(گرایش: ذرات بنیادی و نظریه میدان‌ها)

عنوان:

کوارک تاپ در برخورد دهنده‌های هادرونی (LHC)

استاد راهنما:

دکتر محمدوحید تکوک

استاد مشاور:

دکتر محمدرضا تنهایی اهری

نگارش:

حمیرا میرزامرجانی

تابستان ۱۳۹۰

Islamic Azad University

Tehran Markaz Branch

Basic Sciences Department

M.Sc Thesis of physics

Field: Elementary particles and Fields Theory

Title:

Top Quark physics at Hadron Coliders

Supervisor:

Mohammad Vahid Takook Ph.D.

Advisor:

Mohammad Reza Tanhaie Aharie Ph.D.

By:

Homaira Mirzamarjani

Summer 2011

تقدیر و تشکر

سپاس خدای راکه نعمت قدردانی و شکرگزاری را عنایت فرمود.

اکنون که این اثر علمی به پایان رسیده از کلیه کسانی که مرا در تهیه و تدوین آن یاری نمودند خصوصا استادار جمند آقای دکتر محمد وحید تکوک و جناب آقای دکتر محمدرضا تنهایی که بارا هنمایی بی دریغ خود یار یگرم بودند تشکر و تقدیر می نمایم.

خداوندا عزت و سلامتی به همه عزیزان عنایت فرما و آنچه خوب است تقدیرشان گردان.

تقدیم به:

روان پاک پدر بزرگوارم و تقدیم به مادر عزیزم که با شمع وجودشان راه فراگیری علم و دانش

را برایم روشن ساختند و همواره چراغ دلم را به نور امید روشن نگه داشته‌اند.

و تقدیم به همسر فداکار و فرزند دلبندم که همواره مشوق من بوده‌اند.

بسمه تعالی

تعهدنامه اصالت پایان نامه کارشناسی ارشد

اینجانب حمیرا میرزامرجانی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته فیزیک با شماره دانشجویی : ۸۸۰۶۵۱۱۹۶۰۰ اعلام می نمایم که کلیه مطالب مندرج در این پایان نامه با عنوان : **کوارک تاپ در برخورد دهنده های هادرونی** حاصل کار پژوهشی خود بوده و چنانچه دستاوردهای پژوهشی دیگران را مورد استفاده قرار داده باشم ، طبق ضوابط و رویه های جاری ، آنرا ارجاع داده و در فهرست منابع و مآخذ ذکر نموده ام . علاوه بر آن تاکید می نماید که این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح ، پایین تر یا بالاتر ارائه نشده و چنانچه در هر زمان خلاف آن ثابت شود ، بدینوسیله متعهد می شوم ، در صورت ابطال مدرک تحصیلی ام توسط دانشگاه ، بدون کوچکترین اعتراض آنرا بپذیرم .

تاریخ و امضاء

باسمه تعالی

در تاریخ: ۱۳۹۰/۶/۳۰

دانشجوی کارشناسی ارشد خانم **حمیرا میرزامرجانی** از پایان‌نامه خود دفاع نموده و با نمره‌ی: **۱۸** به حروف **هیجده** و با درجه **عالی** مورد تصویب قرار گرفت.

امضاء استاد راهنما

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

مقدمه ۱

فصل اول: کوارک تاپ در مدل استاندارد

۱-۱) مدل استاندارد فیزیک ذرات. ۴

۱-۱-۱) برهم کنش‌های الکتروضعیف ۷

۱-۱-۲) مکانیسم هیگز ۱۵

۱-۱-۳) برهم کنش قوی. ۲۴

۱-۲) مدل پیش‌بینی خواص کوارک تاپ. ۲۴

۱-۳) جرم کوارک تاپ و اندازه‌گیرهای دقیق الکتروضعیف ۲۶

۱-۴) کوارک تاپ در فیزیک طعم ۳۳

فصل دوم: کوارک تاپ تولید شده در برخورد دهنده‌های هادرونی

۲-۱). تولید $t\bar{t}$ ۳۸

۲-۱-۱). فاکتور پیشنهادی ۳۹

۲-۱-۲). پارامترهای از توابع توزیع پارتن ۴۰

۲-۱-۳). سطح مقطع پارتن. ۴۲

۲-۱-۴) خواص گلئون نرم. ۴۴

۲-۲). تولید کوارک تاپ منفرد. ۴۷

فصل سوم: تکنیک‌های آزمایشگاهی

۳-۱) برخورد دهنده تاوترن ۶۰

۳-۲) آشکارساز برخورد دهنده در آزمایشگاه فرمی (CDF) ۶۱

فهرست جداول

عنوان

صفحه

جدول ۱: سه نسل از کوارک‌ها و لپیتون‌ها که بار و جرم آنها داده شده است. ۵

جدول ۲: نیروی بین ذرات ۶

جدول ۳: جدول واسطه نیروها (بوزن‌های پیمانه‌ای) ۷

جدول ۴: اسپینورهای کایرال. ۹

جدول۵: داده‌های تجربی به طور کامل مناسب برای SM بوسیله کارگره LEP الکتروضعیف. ۳۰

جدول ۶: پیش‌بینی‌های سطح مقطع برای تولید $t\bar{t}$ در NLO تئوری اختلال شامل ویژگی حالت اولیه گلئون (LSGB) ۴۵

جدول۷: پیش‌بینی سطح مقطع کلی برای تولید کوارک t منفرد. ۵۱

جدول ۸: خلاصه‌ای تعریف متغیرهای سنیماتیک. ۶۰

جدول ۹: خلاصه اطلاعات گرماسنج CDF ۶۴

فهرست شکل ها

عنوان

صفحه

شکل ۱: نمودار تغییرات پتانسیل بر حسب حالت پایه خلاء ۱۷

شکل ۲: (a) یک مثال از نمودار سه گانه فرمیون است. ۲۶

شکل ۳: نتایج اطلاعات الکترو ضعیف ۳۱

شکل۴: نمودارهای حلقه از انتشارگر w، بیانگر وابستگی از M_W به M_{top} و M_H است. ۳۲

شکل۵: پایین‌ترین مرتبه نمودارهای فاینمن برای ترکیب مزون B– یک $\overline{B}^0(b\bar{s})$ یا یک $\overline{B}_S^0(b\bar{s})$ به $B^0(\overline{bd})$ یا $B_S^0(\overline{b}s)$، به ترتیب تبدیل شده است. ۳۳

شکل۶: PDFهای تابع توزیع پارتن. در $\overline{U},U$ و $\overline{d},d$ و گلئون‌ها در داخل هادرون‌ها. ۴۱

شکل۷: مقایسه پارامترهای CTEQ3M ، MRSRZ و MRSD از PDFهای از کوارک g,u... ۴۱

شکل۸: نمودار فانیمن مرتبه اول برای تولید $t\bar{t}$: نابودی کوارک- پاد کوارک $(q\bar{q} \to t\bar{t})$ و ترکیب گلئون $(gg \to t\bar{t})$ ۴۲

شکل ۹: مثالی از تصحیحات مرتبه دوم نمودارها فانیمن برای نابودی کوارک- پاد کوارک و ترکیب گلئون‌ها. ۴۳

شکل۱۰: سطح مقطع در $\sqrt{S} = 1/8Tev$ تابعی از جرم کوارک تاپ است. ۴۷

شکل۱۱: نمودارهای فانیمن برای سه مد تولیدی تاپ منفرد. ۴۸

شکل۱۲: شکل a دیاگرام مرتبه اول برای شکافت w-g است. c,b و تصحیحات α_s از مرتبه اول است. ۴۹

شکل ۱۳: (a). توزیع P_T از جت کوارک ناشی از ترکیب g-w b). توزیع زاویه از لپتون باردار در ترکیب w و در تاوترن $(\sqrt{S} = 2Tev)$ ۵۳

شکل ۱۴: مثال‌های از تصحیحات α_s کانال s، تولید کوارک تاپ منفرد. ۵۵

شکل ۱۵: نمایی از آشکارساز برخورد دهنده فرمی. ۶۲

مقدمه

کوارک تاپ یکی از به مراتب سنگین‌ترین شش فرمیون بنیادی در مدل استاندارد فیزیک ذرات است. بزرگی جرم موجب شده، فرایند جستجو برای کوارک تاپ طولانی و خسته کننده شود. از این رو شتاب‌دهنده‌ها با انرژی مرکز جرم بالا نیاز دارند.

در سال ۱۹۷۷ کشف کوارک bottom وجود سومین نسل کوارک‌ها را نشان داد و زمان کوتاهی بعد از آن تلاش برای یافتن کوارک تاپ آغاز شد. تحقیقات منتهی به برخوردهای الکترون و پوزیترون، پرتون و پادپرتون در طول سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ شد. سرانجام در سال ۱۹۹۵ کوارک تاپ در آزمایشگاه فرمی در تاوترن در برخورد دهنده‌های $\left(p\overline{p}\right)$ کشف شد. پس از آن اندازه‌گیرهای دقیق جرم تاپ صورت گرفت تا این‌که $M_{top}=(178/0\pm4/3)\frac{Gev}{c^2}$ بدست آمد[۱]. دقت نسبی این اندازه‌گیری ٪۲/۴ بهتر از دانش ما از هر گونه جرم کوارک دیگر است.

کوارک تاپ حدوداً ۴۰ بار سنگین‌تر از دومین کوارک سنگین که bottom است. جرم عظیم آن باعث شده که کوارک تاپ یک کشف ایده‌ال برای فیزیک ماوراء مدل استاندارد باشد. این آثار سؤالاتی در مورد فیزیک ذرات برای تحقیق باز می‌کند. هرچند که سلسله مراتب جرم مشاهده شده نتیجه‌ای برای دینامیک ذرات ناشناخته است.

این استدلال خواهد کرد که کوارک تاپ توانسته کلیدی برای فهم علت دینامیکی که چگونه ذرات جرم‌دار توسط فرایند شکست تقارنی الکتروضعیف در مکانیسم هیگز تولید می‌شوند. از این‌رو این جرم منجر به مقیاس انرژی که شکست اتفاق می‌افتد می‌شود. (ارزش انتظاری خلاء از میدان هیگز ۲۴۶Gev است)[۲]. بیشترین توجه غالب برای توضیح شکست تقارنی الکتروضعیف در مکانیسم هیگز است. جرم بوزن هیگز، بوزن W و کوارک تاپ ارتباط نزدیک به فرایندهای فیزیکی گوناگون از طریق تصحیحات بالاتر دارد. آگاهی دقیق از جرم کوارک تاپ همراه با اندازه‌گیرهای دقیق الکتروضعیف می‌تواند برای پیش‌گویی جرم بوزن هیگز مورد استفاده قرار گیرد.

کوارک‌های تاپ تاکنون می‌توانستند فقط بطور مستقیم در تاوترن تولید شوند. نتایج فیزیکی از آزمایشهای CDF در تاوترن در این پایان‌نامه گنجاده شده است. وضعیت آزمایشگاهی از فیزیک کوارک تاپ در شروع از مرحله II تاوترن، که بازده قابل توجه پیشرفت اندازه‌گیری‌ها در بخش بالا است. در ابتدای مرحله II تحلیل نتایج و خلاصه‌ای از آموخته‌های مرحله I بررسی می‌کنیم که این اطلاعات در فاصله سالهای ۱۹۹۵- ۱۹۹۰ بدست آمده است.

رئوس مطالب در این پایان‌نامه به صورت زیر است: در فصل ۱ خلاصه‌ای از مدل استاندارد فیزیک ذرات و تأکید بر اهمیت کوارک تاپ برای تصحیحات بیشتر تئوری اختلال الکتروضعیف ارائه می‌دهیم. به‌ویژه بحث در مورد اندازه‌گیری‌های دقیق الکتروضعیف که در پیش‌بینی جرم کوارک تاپ و همچنین جرم بوزن ها در مدل استاندارد مورد استفاده قرار گرفته است. در فصل (۲) شرح تئوری از مدل استاندارد کوارک تاپ تولید شده در برخورد دهنده‌های هادرونی و کوارک تاپ واپاشیده. در فصل (۳) شرح تکنیک‌های تجزیه استفاده شده برای کوارک تاپ در آشکار سازهای ذرات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل اول

کوارک تاپ در مدل استاندارد

۱-۱) مدل استاندارد فیزیک ذرات.

مدل استاندارد از فیزیک ذرات(SM) یک فرض است که تمام موضوعات براساس چند اصل، نقطه مشترک و ساختارهای سازنده ذرات بنیادی توصیف می‌شوند. یکی تشخیص دو گروه: کوارک‌ها و لپیتون‌ها است. که هر دو فرمیون هستند و اسپین $\frac{1}{2}$ حمل می‌کنند. کوارک‌ها در شش طعم مختلف ظهور می‌کنند. UP، down، charm، strange، top و bottom؛ و به طور قراردادی بوسیله اعداد کوانتومی اختصاصی طعم توصیف می‌شوند.
مدل استاندارد ترکیب شش لپتون است: الکترون $(\bar{e})$ و نوترینوی الکترون (νe)، میون $(\bar{\mu})$ و نوترینوی میون(ν_{μ})، تاوو $(\bar{\tau})$ و نوترینوی تاوو(ν_{τ})، الکترون، میون و تاوو اعداد کوانتومی حمل می‌کنند.

کوارک‌ها				لپیتون‌ها		
نسل	علامت اختصاری	بار	جرم $\left(\frac{Mev}{c^2}\right)$	علامت اختصاری	بار	جرم $\left(\frac{Mev}{c^2}\right)$
1	u	$+\frac{2}{3}$	4 تا 1/5	νe	0	23×10^{-6}
				$\bar{e}$	-1	0/51
1	d	$-\frac{1}{3}$	8 تا 4			
2	c	$+\frac{2}{3}$	$(1/5$ تا $1/35)\times10^3$	ν_μ	0	۲۰/۱۹
				$\bar{\mu}$	-1	۱۰۶
2	s	$-\frac{1}{3}$	130 تا 80			
3	t	$+\frac{2}{3}$	$(178\pm4/3)\times10^3$	ν_τ	0	218/2
				$\bar{\tau}$	-1	1777
3	b	$-\frac{1}{3}$	$(4/1$ تا $4/4)\times10^3$			

جدول ۱- سه نسل از کوارک‌ها و لپیتون‌ها که بار و جرم آنها داده شده است.

کوارک‌ها و لپیتون‌ها را می‌توان در سه نسل یا خانواده گروه‌بندی کرد که در جدول ۱ نشان داده شده است. که شامل جرم و بارهای ذرات است.

نسل سوم یک سلسله جرم ارائه کرده است که کوارک تاپ دارای بالاترین جرم تاکنون است فهمیدن عمق مطلب پشت سلسله و ساختار نسل است که هر کدام سؤالاتی در فیزیک ذرات باز می‌کند. هر کوارک و هر لپتون به پاد ذره با همان جرم و اسپین ، اما با بار مخالف، مربوط است پاد کوارک‌ها به شکل($\bar{U}$ و $\bar{d}$ و غیره) نوشته می‌شوند.

پاد ذره الکترون $\left(\bar{e}\right)$، پوزیترون $\left(\overset{+}{e}\right)$است.

پاد ذره، ذرات خنثی مثل فوتون و π^0 با خودشان یکسان است.

- نیروی بین ذرات.

نیروهای طبیعت که بین کوارک‌ها و لپتون‌ها عمل می‌کند بوسیله میدان‌های کوانتیده توصیف می‌شود برهم کنش بین ذرات به علت مبادله کوانتوم‌های میدان،که گفته می‌شود واسطه نیروها هستند. مدل استاندارد برهم نهی نیرو الکترومغناطیسی که عهده‌دار تابش نور از اتم

برانگیخته، نیروی ضعیف که باعث فروپاشی بتا هسته‌ای، و نیروی قوی که از پا برجایی هسته‌ای نگهداری می‌کند. جاذبه(گرانش) شامل مدل استاندارد نمی‌شود، اما بیشتر با تئوری نسبیت عام توصیف می‌شود. تمام ذرات با جرم یا انرژی، نیروی جاذبه را احساس می‌کنند هر چند که گرانش ضعیف با دیگر نیروهای عمل‌کننده در برهم کنش ذرات بنیادی رابطه دارد، در این پایان‌نامه بیشتر در نظر گرفته شده است.

در جدول ۲ نیروهای موجود در طبیعت لیست شده است.

نیروی بین ذرات در آینده نزدیک	حال	تئوری واقعی تا ۱۹۷۰	نیروها
؟	تغییر نکرده	فقط به صورت کلاسیک	گرانش
به دنبال تئوری وحدت برای هر سه نیرو	به وحدت رسیده‌اند	QED	الکترومغناطیس
		–	ضعیف
	QCD	–	قوی

جدول ۲: نیروی بین ذرات

– بوزن‌های پیمانه‌ای

نیروی الکترومغناطیسی، قوی و ضعیف بوسیله تئوری به اصطلاح پیمانه میدان‌های کوانتومی شرح داده می‌شوند. کوانتاهای این میدان‌ها اسپین ۱ حمل می‌کنند. بنابراین پیمانه‌های بوزنی نامیده می‌شوند. واسطه نیروی الکترومغناطیسی فوتون بدون جرم (γ) و واسطه نیروی ضعیف Z^0 و $w^{\pm}$ که سنگین هستند و واسطه نیروی قوی هشت گلئون بدون جرم (g) است.

کوارک‌ها در برهم کنش‌های الکترومغناطیسی، قوی و ضعیف نقش دارند. تمام لپتون‌ها نیروی ضعیف را تجربه می‌کنند. اگرچه بار منفرد نیروی الکترومغناطیسی را احساس می‌کند، اما لپتون‌ها در برهم کنش قوی شرکت نمی‌کنند [۲و۱].

اسپین واسطه‌ها	جرم واسطه‌ها	واسطه نیروها	روی چه ذراتی اثر می‌کند	نیرو
S=2	بدون جرم	گراویتون	همهٔ ذرات	گرانش
S=1	بدون جرم	فوتون (γ)	همه ذرات باردار	الکترومغناطیس
S=1	$M_w = (80/425 \pm \%38)$ $G^{cv}/_{c^2}$ $M_z = 91/1876 \pm 0/0021$	$w^{\pm}$ z^0	لپتون‌ها – کوارک‌ها (همه ذرات دارای طعم)	ضعیف
S=1	بدون جرم	گلئون (g)	کوارک‌ها (همه ذرات دارای رنگ)	قوی

جدول ۳: جدول واسطه نیروها (بوزن‌های پیمانه‌ای) [۲]

۱-۱-۱) برهم کنش‌های الکتروضعیف [۷]

در حقیقت چندین تلاش برای ایجاد تئوری پیمانه‌ای برای برهم کنش‌های الکتروضعیف وجود داشت. در سال ۱۹۵۷ اسکوینر مدلی براساس گروه O(۳) با پیمانه میدان سه‌گانه (V^0 و V^- و V^+) پیشنهاد کرد . عامل بوزن‌های ضعیف و خنثی، بوسیله فوتون شناسایی شد. اولین تلاش برای ایجاد ساختار V-A در تئوری پیمانه‌ای برهم کنش‌های ضعیف بوسیله بلادمن در سال ۱۹۵۸ صورت گرفت. این مدل براساس SU(۲)، گروه ایزواسپین ضعیف است که سه بوزن‌برداری نیاز دارد. هرچند در این مورد بوزن‌های پیمانه‌ای خنثی، مانند بوزنهای برداری سنگین، مسئول برهم کنش‌های ضعیف، اما بدون مبادله بار هستند(جریان خنثی).

نظریه بوزن‌های برداری مبادله شده در برهم کنش‌های ضعیف اگرچه مستقل توسط دانشمند دیگر در همان سال پیشنهاد شد. این فرایندها بطور تجربی در اوایل سال ۱۹۷۳ در آزمایشهای نوترینو در سرن مشاهده شد. گلاشیو در سال ۱۹۶۷ خبر داد که به منظور انطباق هر دو برهم کنش ضعیف و الکترومغناطیسی باید فراتر از ساختار ایزواسپین (۲)SU رفت. اول پیشنهاد گروه پیمانه‌ای (۱)U⊗ (۲) SU کرد که(۱) U با بار بزرگ لپتونی و y با ایزواسپین ضعیف (T) ارتباط دارد که بار الکتریکی از طریق فرمول ژل مان نیشی‌جی‌ما $Q = T_3 + \frac{Y}{2}$ بدست می‌آید.

نظریه اکنون به چهار پیمانه بوزنی نیاز دارد. سه‌گانه $\left(w^1, w^2, w^3\right)$ که با ژنراتور (۲) SU و میدان B که با (۱)U ارتباط دارد. بار بوزنهای ضعیف به صورت ترکیب خطی از w^2, w^1 است در حالی که فوتون و بوزنهای خنثی ضعیف هر دو بوسیله w^3 و B_μ بدست می‌آیند. مدلی مشابه به وسیله‌ی سلام ووارد در سال ۱۹۶۴ پیشنهاد شد.. مؤلفه جرم برای $w^{\pm}$ و z^0به صورت دستی گذاشته شد. هر چند که در این روش، شکست واضح پیمانه ناوردای نظریه را می‌توان دید. در سال ۱۹۶۷ واینبرگ در سال ۱۹۶۸ و سلام به طور مستقل، ایده شکست خودبخودی تقارن و مکانیسم هیگز برای جرم دادن به بوزنهای برداری ضعیف و در همان زمان برای حفظ ناوردایی پیمانه پیشنهاد کردند. مدل گلاشیو- واینبرگ و سلام در حال حاضر به نام مدل استاندارد بر هم کنش‌های الکتروضعیف شناخته شده است که بازتاب موفقیت‌های آن زیاد بود.

قبل از ارائه مدل استاندارد الکتروضعیف بعضی از ویژگی‌های حالات فرمیونیک را معرفی می‌کنیم.

- حالت‌های فرمیونی کایرال

در تئوری میدان‌های کوانتومی کوارک‌ها و لپتون‌ها به وسیله اسپینورهای دیراک U(p,s) و V(p,s) نمایش داده می‌شوند که توابعی از چهار بردار ممنتوم P_μ هستند و ویژه تابع ماتریس γ^5 هستند این ذرات با اسپین $\frac{1}{2}$، دارای $m_s = \pm\frac{1}{2}$ هستند. مقدار $\frac{m_s}{s}$ را هلیسیته

ذره می‌نامند. پس ذرات با اسپین $\frac{1}{2}$ دارای هلیسیته (+۱) که راستگرد (R) و هلیسیته (−۱)،که چپگرد (L) می‌نامند:

$$U\begin{matrix}R\\L\end{matrix}=\frac{1}{2}\left(1\pm\gamma^5\right)\mathrm{U}\quad,\quad V\begin{matrix}R\\L\end{matrix}=\frac{1}{2}\left(1\mp\gamma^5\right)\mathrm{V},$$

که $R\equiv\frac{1}{2}\left(1+\gamma^5\right)\quad,\ L\equiv\frac{1}{2}\left(1+\gamma^5\right)$

عملگرهای هلیسیته(عملگر تصویرگر) نام دارند

ویژگی این عملگرها: $L+R=1,\qquad L^2=L,$

$RL=LR=0,\qquad R^2=R.$

برای اسپینورهای الحاقی داریم:

$$\overline{U}_L = U_b^+\gamma^0 = (LU)^+\gamma^0 = U^+L^+\gamma^0 = U^+L\gamma^0 = (U^+\gamma^0)R = \overline{U}R,$$

$$\overline{U}_R = \overline{U}L$$

و فرمیون‌ها ترکیب راستگرد و چیگرد است: $\overline{U}U = \overline{U}_R U_L + \overline{U}_L U_R$

از طرف دیگر، بردار جریان الکترومغناطیس ترکیب آنها را ندارد

$$\overline{U}\gamma^\mu U = \overline{U}_R\gamma^\mu U_R + \overline{U}_L\gamma^\mu U_L .$$

و در نهایت، جریان فرمیونی ضعیف (V-A) را می‌توان برحسب حالات هلیسیته نوشت

$$\overline{U}_L\gamma^\mu U_L = \overline{U}R\gamma^\mu LU =$$

$$= \overline{U}\gamma^\mu L^2 U = \overline{U}\gamma^\mu LU$$

$$= \frac{1}{2}\overline{U}\gamma^\mu(1-\gamma^5)U .$$

که نشان می‌دهد که فقط فرمیون‌های چیگرد در بر هم کنش‌های ضعیف شرکت می‌کنند [۲].

ذرات	پاد ذرات
$U_L = \frac{1}{2}(1-\gamma^5)u$	$V_L = \frac{1}{2}(1+\gamma^5)V$
$U_R = \frac{1}{2}(1+\gamma^5)u$	$V_R = \frac{1}{2}(1-\gamma^5)V$
$\overline{U}_L = \overline{U}\frac{1}{2}(1+\gamma^5)$	$\overline{V}_L = \overline{V}\frac{1}{2}(1-\gamma^5)$
$\overline{U}_R = \overline{U}\frac{1}{2}(1-\gamma^5)$	$\overline{V}_R = \overline{V}\frac{1}{2}(1+\gamma^5)$

جدول ۴- اسپینورهای کایرال.