دانشگاه الزهراء (س)

دانشکده علوم‌پایه

پایان‌نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی‌ارشد

رشته‌ی فیزیک

عنوان

لپتوجنسیس و مسئله‌ی تولید مازاد گرویتینو

استاد راهنما

دکتر یاسمن فرزان

استاد راهنمای همکار

دکتر کامران کاویانی

دانشجو

ساراخطیبی

شهریورماه ۱۳۸۹

تقدیم به

پدر و مادرِ عزیزم

قدردانی و تشکر

از سرکار خانم دکتر یاسمن فرزان استاد راهنمای عزیزم به خاطر تمام راهنمایی‌های ارزشمند و زحمات بی‌دریغ کمال تشکر و قدردانی را دارم. هم‌چنین لازم می‌دانم از آقای دکتر کامران کاویانی که در انجام این پروژه مرا یاری کردند، تشکر کنم. از پژوهشکده‌ی فیزیک ِ پژوهشگاه دانش‌های بنیادی برای فراهم آوردن زمینه‌ی کارهای تحقیقاتی سپاس‌گزارم.

چکیده

یکی از سئوالات پیش روی فیزیک‌پیشگان، نابرابری باریونی مشاهده شده در جهان است. مدل‌های متفاوتی برای این مسئله ارائه شده، که یکی از آن‌ها لپتوجنسیس می‌باشد.

در این پایان‌نامه ابتدا به مرور سناریوی لپتوجنسیس می‌پردازیم. سپس ابرتقارن را مرور می کنیم. مسئله‌ی گرویتینو را در چارچوب لپتوجنسیس ابرمتقارن مطرح کرده و یکی از راه حل‌های آن را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در آخر به بررسی گرویتینو به عنوان کاندیدای ماده‌ی تاریک در چارچوب مدل فوق می‌پردازیم.

فهرست

۱ مقدمه

۲ لپتوجنسیس

۱.۲ نابرابری باریونی ۴

۲.۲ شرایط ساخاروف ٦

۳.۲ مدل‌های باریوجنسیس ۷

۴.۲ لپتوجنسیس گرمایی ۸

۵.۲ مدل الاکلنگی ۹

۶.۲ ناهنجاری در نقض B+L ۱۱

۱.۶.۲ ناهنجاری دستیده ۱۲

۷.۲ مدل اسباب بازی برای لپتوجنسیس گرمایی ۱۴

۱.۷.۲ نقض CP($\epsilon_{\alpha\alpha}$) ۱۶

۲.۷.۲ خروج از تعادل دینامیکی (η_α) ۱۷

۳.۷.۲ نقض عدد لپتونی و B+L (c) ۱۸

۸.۲ نقض CP ۱۹

۳ اَبَرتقارن

۱.۳ مقدمه ۲۲

۲.۳ لاگرانژی اَبَرتقارن ۲۷

۱.۲.۳ لاگرانژی ابرچندتایی دستیده ۲۷

۲.۲.۳ لاگرانژی ابرچندتایی پیمانه‌ای ۳۰

۳.۲.۳ لاگرانژی جملات برهم‌کنش‌دار ۳۱

۴.۲.۳ برهم‌کنش‌های پیمانه‌ای ابرتقارن ۳۳

۳.۳ شکست ابرتقارن ۳۵

۴.۳ مدل استاندارد اَبَرمتقارن کمینه ۳۶

۱.۴.۳ شکست نرم اَبَرتقارن در $MSSM$ ۳۸

۵.۳ طیف جرم در مدل استاندارد اَبَرمتقارن کمینه ۳۹

۱.۵.۳ نوترالینوهاو چارجینوها ۴۰

۲.۵.۳ اس‌کوارک‌ها و اس‌لپتون‌ها ۴۴

۳.۵.۳ گلوینو ۴۶

۴.۵.۳ گرویتینو ۴۶

۴ لپتوجنسیس گرمایی در حضور نقض پاریته‌ی R

۱.۴ پاریته‌ی R ۴۹

۲.۴ لپتوجنسیس در حضور نقض پاریته‌ی R ۵۲

۵ گرویتینو به‌عنوان ماده‌ی تاریک در حضور نقض پاریته‌ی R

۱.۵ مقدمه ۵۹

۲.۵ قیدهای T_R ٦۱

۳.۵ واپاشی گرویتینو ٦۲

۴.۵ واپاشی سبک‌ترین نوترالینو ٦٦

٦ نتیجه

پیوست ۱: محاسبه‌ی مقدار چشم‌داشتی خلا برای اس‌نوترینو و اس نوترینوهای راست دست ۷۲

پیوست ۲: محاسبه‌ی مقدار عناصر ماتریس اختلال ۷۵

پیوست ۳: محاسبه‌ی واپاشی نوترالینو ۷۹

مراجع ۸۲

فصل اول

مقدمه

مدل استاندارد ذرات بنیادی با اضافه شدن جرم نوترینوها، توصیف موفقی از پدیده‌های شناخته شده کنونی ارائه می دهد. درستی آن در آزمایش‌هایی نظیر تواترون[۱] و لِپ[۲] تا حدود $100\mathrm{GeV}$ تحقیق شده است. امّا دلایل زیادی وجود دارد که نشان می‌دهد، مدل استاندارد یک تئوری موثر در انرژی‌های پایین است و در انرژی‌های بالاتر نیاز به فیزیک ورای مدل استاندارد داریم. دو دسته مشکل را می‌توان در مدل استاندارد نام برد:

۱. مشکلات نظری

۲. مشکلات مشاهداتی

از جمله مشکلات مشاهداتی می‌توان به نابرابری باریونی، مسئله ماده تاریک و جرم دار بودن نوترینوها اشاره کرد و از جمله مشکلات نظری، مسئله سلسله مراتب را می توان نام برد.

یکی از مکانیزم‌های موجود برای جرم دار کردن نوترینوها، مدل الاکلنگی[۳] می‌باشد. در این مدل با اضافه کردن نوترینوهای راست دست سنگین، جرم کوچک امّا غیر صفر نوترینوهای

[۱] Tevatron

[۲] Lep

[۳] Seesaw

مدل استاندارد را می‌توان توضیح داد. هم‌چنین مشاهدات نشان می‌دهد که تعداد باریون‌ها در جهان با تعداد پادباریون‌ها برابر نمی‌باشد. به عبارت دیگر همه‌ی ساختارهای جهان (کره‌ی زمین، کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی) از ماده تشکیل شده است. یکی از مزایای مدل الاکلنگی این است که می‌تواند نابرابری باریونی جهان را نیز توضیح دهد. در واقع یکی از سناریوهای موجود برای توصیف نابرابری باریونی لپتوجنسیس [۴] می‌باشد که در این سناریو از مدل الا کلنگی کمک گرفته می‌شود.

یکی دیگر از مشکلات موجود در انرژی های بالا مسئله‌ی سلسله مراتب می‌باشد. مقیاس پلانک، $M_p = 2.4 \times 10^{18} GeV$، که در آن اثرات گرانش کوانتومی مهم می‌شود، با مقیاس الکتروضعیف، $M_{EW} \simeq 10^2 GeV$، حدود 16 مرتبه‌ی بزرگی تفاوت دارد. بزرگی نسبت M_p/M_{EW} به خودی‌خود مشکلی برای مدل استاندارد ایجاد نمی‌کند، امّا برروی پتانسیل هیگز تاثیر می‌گذارد. یکی از راه‌های موجود برای رفع این مشکل ، نظریه‌ی ابرتقارن است. ابرتقارن تقارنی بین فرمیون‌ها و بوزون‌هاست. در این نظریه به ازای هر ذره‌ی مدل استاندارد یک ذره‌ی جدید وجود دارد که دارای همان اعداد کوانتومی است تنها اسپین آن‌ها به میزان $1/2$ با هم تفاوت دارد. با اضافه شدن این ذرات جدید مسئله سلسله مراتب حل می‌شود.

مسئله‌ی ماده تاریک از جمله مشکلات مشاهداتی مدل استاندارد است. همان‌طور که می دانیم حدود 23 درصد عالم از ماده تاریک تشکیل شده است. ذره‌ی تشکیل‌دهنده‌ی ماده تاریک برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی و قوی ندارد و تنها از روی اثرات گرانشی به وجود آن می‌توان پی برد. در نتیجه ذره‌ای که به عنوان کاندیدای ماده تاریک در نظر گرفته می‌شود باید برهم کنش الکترومغناطیسی و قوی نداشته باشد و پایدار باشد یا حداقل نیمه عمر آن از عمر جهان بیشتر باشد. در چارچوب ابرتقارن کاندیداهای مناسبی برای ماده تاریک معرفی می‌شود. لپتوجنسیس در چارچوب ابرتقارن با مسئله‌ی نولید مازاد گرویتینو روبه‌رو می‌شود. با فرض این‌که سبک‌ترین نوترینو راست دست به‌صورت گرمایی تولید شده باشد، به روی دمای دوره بازگرمایش، T_R حد قرار می‌گیرد. در این حالت T_R باید از 10^9GeV بزرگ‌تر باشد.[9,10]. در چنین دمای بالایی با تولید مازاد گرویتینو روبه‌رو می‌شویم. راه حل‌های متفاوتی برای رفع

[۴] Leptogenesis

این مشکل مطرح شده است. یکی از این راه حل‌ها اضافه کردن جملات ناقض پاریته‌ی R در ابرپتانسیل است. این راه حل در مقاله‌ی ی. فرزان و خ. واله پیشنهاد شده است [2]. پاریته‌ی R یک تقارن گسسته است که بین ذرات معمولی و ابرتقارنی تفاوت قائل می‌شود. در این مدل نشان داده می‌شود که با اضافه کردن جملات ناقض پاریته‌ی R، T_R دو مرتبه بزرگی کاهش پیدا می‌کند و دیگر با مشکل گرویتینو روبه‌رو نخواهیم بود. در چارچوب این سناریو به علت حضور جملات ناقض پاریته‌ی R، تمام ذراتی که دارای برهم‌کنش ضعیف هستند با نیمه عمری حدود 0.1sec یا کمتر واپاشی می کنند و در نتیجه نمی توانند کاندیدای مناسبی برای ماده تاریک باشند. امّا ابرهمتای گرویتون می تواند کاندیدای مناسبی برای ماده تاریک باشد چرا که نیمه عمر آن می تواند بیش از نیمه عمر عالم باشد. در این مقاله مورد فوق مورد بررسی قرار نگرفته است و ما در این جا به بررسی آن می‌پردازیم.

در این پایان‌نامه ابتدا به مدل‌های موجود برای توضیح نابرابری باریونی می‌پردازیم. سپس لپتوجنسیس به عنوان یک سناریو موفق در این زمینه معرفی می‌شود. هم‌چنین مدل الاکلنگی و ارتباط آن با لپتوجنسیس بررسی می‌شود.

در فصل دوم نظریه‌ی ابرتقارن و راه حل آن برای مسئله سلسله مراتب مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مدل استاندارد ابرتقارنی کمینه (MSSM)[۵] و اجزای مختلف لاگرانژی آن معرفی می‌شود و در انتهای فصل به بررسی طیف جرم ذرات ابرتقارنی می‌پردازیم.

در فصل سوم ابتدا پاریته‌ی R را تعریف می‌کنیم و دلایل اولیه برای معرفی آن را بیان می‌کنیم. سپس راه حل مشکل گرویتینو در چارچوب نقض پاریته‌ی R به تفصیل توضیح داده می‌شود.

در فصل پایانی گرویتینو را به عنوان یک کاندیدای مناسب برای ماده تاریک در حضور نقض پاریته‌ی R مورد بررسی قرار می‌دهیم و مدهای واپاشی آن را محاسبه کرده و نیمه عمر آن را با عمر جهان مقایسه می‌کنیم.

[۵] Minimal Supersymmetric Standard Model

فصل دوم

لپتوجنسیس

۱.۲ نابرابری باریونی

مشاهدات نشان می‌دهد تعداد باریون‌ها (پروتون‌ها و نوترون‌ها) در جهان با تعداد پادباریون‌ها (پادپروتون‌ها و پادنوترون‌ها) برابر نمی باشد. مطابق مشاهدات ما، همه‌ی ساختارهایی که در جهان می بینم (کره‌ی زمین، ستاره‌ها، کهکشان‌هاو خوشه‌ها) از ماده (باریون و الکترون) ساخته شده‌اند. ملاحظات متفاوت پیشنهاد می‌کند که جهان از یک حالت با تعداد باریون و پادباریون مساوی شروع و نابرابری باریونی مشاهده شده دینامیکی حاصل شده است. این سناریو به باریوجنسیس[۱] معروف است.

حداقل دو دلیل برای این فرض وجود دارد که نابرابری باریونی، دینامیکی تولید شده و یک

[۱] Baryogenesis

شرط اولیه نبوده است . اگر این نابرابری یک شرط اولیه باشد، نیاز به تنظیم دقیق اعداد اولیه داریم[۲] . دلیل دوّم که شاید مهم تر نیز باشد این است که بر اساس مشاهده‌ی ویژگی‌های تابش پس زمینه‌ی میکروموج‌های کیهانی ، در دوره‌ای از تحول جهان ، تورم رخ داده است، در نتیجه هر نابرابری اولیّه، به دلیل این تورم به صورت نمایی رقیق شده است.

نابرابری در جهان، یک معمّای بزرگ در فیزیک ذرات محسوب می‌شود. مدل استاندارد ذرات بنیادی در توضیح نابرابری به بزرگی مشاهده شده ناتوان است. به این دلیل به سراغ فیزیک ورای مدل استاندارد می‌رویم.

نابرابری باریونی در جهان از دو راه زیر تعریف می‌شود:

$$\eta \equiv \left.\frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma}\right|_0 = (6.21 \pm 0.16) \times 10^{-10} \tag{2.1}$$

$$Y_{\Delta B} \equiv \left.\frac{n_B - n_{\bar{B}}}{s}\right|_0 = (8.75 \pm 0.23) \times 10^{-11} \tag{2.2}$$

که در این‌جا n_B چگالی عددی باریونی ، $n_{\bar{B}}$ چگالی عددی پاد باریونی، n_γ چگالی عددی فوتون و s چگالی اِنتروپی می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$s = g_* \frac{2\pi^2}{45} T^3$$

در این‌جا g_* تعداد درجات آزادی پلاسما و T دما می‌باشد.

رابطه (2.1) و (2.2) از طریق زیر به هم مربوط می‌باشند:

$$Y_{\Delta B} = (\frac{n_{\gamma_0}}{s_0})\eta \simeq \frac{\eta}{7.04}$$

سومین تعریف برای بیان نابرابری باریونی به صورت زیر است:

$$\Omega_B \equiv \frac{\rho_B}{\rho_{crit}} \tag{2.3}$$

که از طریق رابطه زیر به η وابسته است:

$$\eta = 2.74 \times 10^{-8} \Omega_B h^2$$

[۲] Fine-tuning

h در رابطه بالا ثابت هابل است:

$$h \equiv \frac{H_0}{100 \cdot km \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-1}} = 0.701 \pm 0.013$$

مقدار نابرابری باریونی جهان از دو راه مستقل قابل اندازه‌گیری می‌باشد:
1) سنتز هسته‌ایی مهبانگ[۳] . در این روش یک ناحیه برای تغییرات Ω_B به دست می‌آید[4]:

$$0.017 \leq \Omega_B h^2 \leq 0.024 \tag{2.4}$$

2)اندازه‌گیری ناهمسانگردی میکروموج‌های پس زمینه‌ی کیهانی (CMB).ناحیه تغییرات به‌دست آمده از این روش[5]:

$$0.02149 \leq \Omega_B h^2 \leq 0.02397 \tag{2.5}$$

توافق جالب بین ناحیه تغییرات به دست آمده از دو روش یکی دیگر از موفقیّت‌های تئوری مهبانگ داغ است.(پیروزی اوّل تعیین دقیق دمای CMB است.)

۲.۲ شرایط ساخاروف

ساخاروف[۴]، فیزیکدان روسی، سه شرط را برای تولید نابرابری باریونی فرمول‌بندی کرده است که به قرار زیر است[16]:
1) نقض عدد باریونی: این شرط برای رفتن از حالت اولیّه $Y_{\Delta B} = 0$ به حالتی با $Y_{\Delta B} \neq 0$ لازم است.
2) نقض C و CP: اگر C و CP پایسته باشند، فرآیند تولید باریون دقیقاً با سرعتی برابر فرآیند معکوس پیش می‌رود. در نتیجه نابرابری به‌وجود نمی‌آید.
3) خروج از تعادل ترمودینامیکی: در حالت تعادل سرعت یک فرآیند با سرعت عکس آن

[۳] Big bang nucleosynthesis
[۴] Sakharov

فرآیند برابر است. اگر یک فرآیند به تولید باریون منجر شود، عکس آن فرآیند باریون تولید شده را از بین می‌برد، در نتیجه نابرابری ایجاد نمی‌شود.
سه شرط بالا در مدل استاندارد وجود دارد:
1) فرایندهای اِسفلرون [۵] عدد باریونی و عدد لپتونی را نقض می کنند در حالی که $B-L$ را پایسته نگاه می‌دارند. این فرآیندها به بی‌هنجاری‌های کوانتومی مربوط می‌باشند.
2) برهم‌کنش ضعیف در مدل استاندارد C را به صورت بیشینه نقض می‌کند. برهم‌کنش ضعیف CP را از طریق فازδ_{KM} کوباياشی – ماسکاوا نقض می‌کند.
3) گذار فاز الکتروضعیف که در $T \sim 100GeV$ اتفاق می‌افتد، می‌تواند گذار فاز مرتبه‌ی اوّل و خارج از حالت تعادل گرمایی باشد.
امّا تنها شرط اوّل در مدل استاندارد به صورت کامل ارضاء می‌شود. نقض CP در مدل استاندارد بسیار کوچک‌تر از آن است که بتواند نابرابری مشاهده شده را توضیح دهد. هم‌چنین اگر گذار فاز الکتروضغیف از مرتبه‌ی اول باشد آن‌گاه ذره‌ی هیگز باید سبک باشد، $m_H \leq 70\text{GeV}$. در حالی که آزمایش‌ها حد $m_H \geq 114\text{GeV}$ را بیان می کنند. در نتیجه مدل استاندارد نمی‌تواند مقدار نابرابری باریونی مشاهده شده را توضیح دهد. با توجّه به بحث بالا فیزیک جدید حداقل باید از دو راه مدل استاندارد را گسترش دهد:
1) معرّفی منابع جدید نقض CP.
2) معرّفی فرآیندهای دیگری که خارج از حالت تعادل باشند.(مثل واپاشی ذراتِ جدیدِ سنگین در خارج از حالت تعادل)

۳.۲ مدل‌های باریوجنسیس

تعدادی از مکانیزم‌های باریوجنسیس در زیر آورده شده است :
1) GUT باریوجنسیس[11]: در این مکانیزم نابرابری باریونی از طریق واپاشی بوزون‌های

[۵] Sphaleron

سنگین تئوری اتّحاد بزرگ، در خارج از حالت تعادل، تولید می‌شود. پیش بینی کلی مدل های اتحاد بزرگ واپاشی پروتون است که تاکنون مشاهده نشده است.

2) باریوجنسیسِ الکتروضعیف[12]: این نام به یک رده از مدل‌ها که به وسیله‌ی گذار فاز الکتروضعیف از حالت تعادل خارج می‌شوند، اطلاق می‌شود. در نتیجه مدل استاندارد به این رده تعلق دارد، امّا همان‌طور که در بالا ذکر شد گذار فاز آن در مرتبه‌ی اوّل قوی نیست و نقض CP آن هم کوچک است. مدل‌هایی از این رده باید پتانسیل اسکالر را اصلاح کنند. یکی از این مدل‌ها $2HDM$ می‌باشد. در این مدل دو دوتایی $SU(2)$ هیگز وجود دارد، در نتیجه پتانسیل هیگز پارامترهای بیشتری دارد که می‌توانند ناقض CP باشند. مدل جالب دیگر از این رده $MSSM$ باریوجنسیس است.

3) مدل آفلِک—داین [6][13]: یک میدان اسکالر کلاسیک که می‌تواند به ذرات دیگر واپاشی کند، به‌وجود آورنده‌ی نابرابری باریونی در این مدل می‌باشد.

4)گروی لپتوجنسیس[7][14]: در این مدل از امواج گرانشی برای توضیح نابرابری ماده و ضد ماده استفاده می شود.

5) لپتوجنسیس[8][1,7]: یکی از موفّق‌ترین سناریوهای باریوجنسیس است که برای اوّلین بار فوکوجیتا و یاناگیدا [7]آن را مطرح کردند و در این پایان‌نامه بر روی این سناریو تمرکز می‌کنیم.

۴.۲ لپتوجنسیس گرمایی

لپتوجنسیس به مکانیزمی کلی اطلاق می شود که در چارچوب آن ابتدا نابرابری لپتونی به وجود می‌آید، آن‌گاه این نابرابری به نابرابری باریونی از طریق فرآیندهای اسفلرون [9] تبدیل می شود. معروف ترین و از نظر تاریخی قدیمی‌ترین مدل لپتوجنسیس، مدلی است که بر

[6] Affleck-Dine

[7] gravi-leptogenesis

[8] Leptogenesis

[9] Sphaleron

اساس مکانیزم الاکلنگی[10] [8] استوار است.در این پایان نامه نیز بر روی این مدل تمرکز خواهیم کرد.

لپتوجنسیس علاوه بر این که مدلی برای توصیف نابرابری باریونی است، از طریق مکانیزم الاکلنگی جرم کوچک امّا غیر صفر نوترینوها را نیز توضیح می‌دهد. ذرات جدید تک‌تایی $SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$، از طریق مکانیزم الاکلنگی معرّفی می‌شوند، که جفت‌شدگی یوکاوای آن‌ها منبع جدید نقض CP را به‌وجود می‌آورد. جرم مایورانای این ذرات جدید ناقض عدد لپتونی است، در واقع نوترینوهای جدید و سنگین خارج از حالت تعادل واپاشی می‌کنند و نابرابری لپتونی به‌وجود می‌آورند. به عبارت دیگر هر سه شرط ساخاروف به صورت طبیعی در این مدل وجود دارد. در نهایت هم فرآیندهای اسفلرون درمدل استاندارد، نابرابری لپتونی را به نابرابری باریونی تبدیل می‌کنند.

در این مدل N_i نوترینو هر یک با جرم M_i معرّفی می‌شود که معمولاً جرم آن‌ها از مقیاس شکست الکتروضعیف سنگین‌تر می‌باشند:

$$M_i \gg \nu_u$$

لپتوجنسیس به‌وسیله‌ی گروه‌های متعددی مورد مطالعه قرار گرفته است. درآنالیزهای اولیّه تاثیرات طعم مورد بررسی قرار نمی‌گرفت. امّا مطالعات بعدی نشان داد که طعم لپتونی دارای اهمیّت می‌باشد [17]. در این فصل ابتدا مدل الاکلنگی مرور می‌شود. فرآیندهای ناقض B+L مطرح و سپس یک مدل اسباب بازی برای لپتوجنسیس بررسی می‌شود.

۵.۲ مدل الاکلنگی

در مدل استاندارد ذرات بنیادین کوارک‌ها و لپتون‌ها، بعد از شکست خودبه‌خودی تقارن به وسیله‌ی جفت‌شدگی یوکاوا جرم‌دار می‌شوند. امّا نوترینوها بدون جرم باقی می‌مانند، زیرا

[10] Seesaw

مدل استاندارد فاقد نوتریتوی راست‌دست است. امروزه بر اساس شواهدی از جمله نوسان نوترینوها، می‌دانیم که نوترینوها جرم‌دار هستند. در نتیجه نیاز به یک مکانیزم برای جرم‌دار کردن نوترینوها داریم. هم‌چنین می‌دانیم که جرم کوارک‌ها از مرتبه‌ی $10^6 eV$ است، در حالی که مشاهدات نشان می‌دهد که جرم نوترینوها کمتر از $1eV$ می‌باشد. در نتیجه هر مکانیزمی برای جرم‌دار کردن نوترینوها باید این اختلاف بزرگ را نیز توضیح دهد.

یک مکانیزم برای جرم‌دار کردن نوترینوها، مدل الاکلنگی [۱۱] می‌باشد. در این مدل n نوترینوی راست دست که تکتایی $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ هستند، با نام نوترینوی ابتر [۱۲]معرفی می‌شود. با اضافه شدن این نوترینوها دو نوع جمله‌ی جرمی برای نوترینوها می‌توان نوشت:

۱.جمله‌ی جرمی دیراک:

$$\pounds_D = \bar{N}_i M^D_{ik} \nu_k \tag{2.6}$$

که M_D بر حسب جفت شدگی یوکاوا به صورت زیر است:

$$M^D_{ik} = \lambda_{ik} \frac{v}{\sqrt{2}} \tag{2.7}$$

۲. جمله‌ی جرمی مایورانا:

$$\pounds_M = \frac{1}{2} \bar{N}_i M^M_{ij} N^c_j \tag{2.8}$$

که در بالا ν و N به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} &\nu = (\nu_e \;\; \nu_\mu \;\; \nu_\tau)^T \\ &N = (N_1 \;\; N_2 \;\; ...N_n \;\;)^T \\ &N^c = C\bar{N}^T \qquad\qquad C = i\gamma^2\gamma^0 \end{aligned} \tag{2.9}$$

هم‌چنین در حالت کلی M^M یک ماتریس $n \times n$ و M^D یک ماتریس $n \times 3$ می‌باشند.

نکته قابل توجه در این‌جا این است که اگر عدد لپتونی N یک باشد، جمله‌ی جرمی دیراک

[۱۱] Seesaw

[۱۲] Sterile

تقارن عدد لپتونی را حفظ می‌کند امّا جمله‌ی جرمی مایورانا عدد لپتونی کل را دو واحد نقض می کند. نکته‌ی بعدی این که جمله‌ی جرمی مایورانا تقارن $U(1)$ ندارد در نتیجه نمی‌توان هیچ باری به آن نسبت داد. نوترینوهای راست دست هیچ‌گونه باری ندارند، پس می‌توان برای آن‌ها جمله‌ی جرمی مایورانا نوشت.

در نتیجه لاگرانژی بخش جرمی نوترینو به شکل زیر خواهد بود:

$$-\pounds_M = \bar{N}_i M^D_{ij} \nu_j + \frac{1}{2}\bar{N}_i M^M_{ij} N^c_j + h.c. \tag{2.10}$$

لاگرانژی فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$-\pounds_M = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} \bar{\nu} & \bar{N} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 0 & M^D \\ M^D & M^M \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \nu \\ N^c \end{pmatrix} \tag{2.11}$$

ویژه مقدارهای ماتریس جرمی نوترینو:

$$\begin{aligned} m_\nu &= \tfrac{(M^D)^2}{M^M} \\ m_N &= M^M \end{aligned} \tag{2.12}$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود هر چه که مقدار m_N بزرگ‌تر باشد، مقدار m_ν کوچک‌تر می‌شود. از این جهت این مدل را مدل الاکلنگی می‌نامند. معمولا m_N خیلی بزرگ‌تر از مقیاس شکست الکتروضعیف می باشد و این مدل می‌تواند جرم کوچک امّا غیر صفر نوترینوهای مدل استاندارد را توضیح دهد.

۶.۲ ناهنجاری در نقض B+L

هدف این بخش معرفی واکنش های ناقض عدد باریونی غیراختلالی است که نقش مهمی را در لپتوجنسیس بازی می کند. عدد باریونی B و عدد لپتونی L_α در لاگرانژی بازبهنجارش پذیر مدل استاندارد پایسته باقی می مانند. به سبب ناهنجاری دستیده، پیکربندی از میدان پیمانه ای غیر اختلالی وجود دارد که منبعی برای نقض $B + L_e + L_\mu + L_\tau$ است.(نکته: