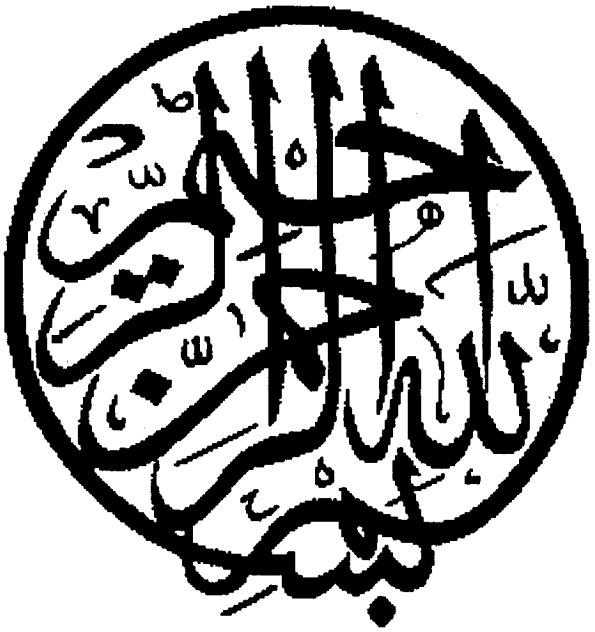

٣١٦٧٣

۱۳۷۹ /۶/ ۱۰

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

دانشگاه تهران

دانشکده علوم - گروه فیزیک

عنوان پایان‌نامه:

نوسان نوترینو در فضا- زمان با پیچش

8228

استاد راهنما:

دکتر مسعود علیمحمدی

دانشجو:

عباس عبدلی آرانی

۳۱۶۷۳

« بسمه تعالی »

اداره تحصیلات تکمیلی دانشگاه

احتراماً باطلاع می‌رساند که جلسه دفاع از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد آقای xxxxx عباس عبدلی آرانی

تحت عنوان:

"گوسان نوترونیو در فضا - زمان با پیچش"

در تاریخ ۷۸/۱۱/۳۰ در محل دانشکده علوم دانشگاه تهران برگزار گردید.

هیأت داوران براساس کیفیت پایان‌نامه، استماع دفاعیه و نحوهٔ پاسخ به سؤالات، پایان‌نامه ایشان را برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک معادل با شش واحد با نمرهٔ ۱۸ (هیجده) بادرجهٔ مورد تأیید قرار دارد.

هیأت داوران

سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبهٔ دانشگاهی - دانشگاه	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر مسعود علیمحمدی	دانشیار - دانشگاه تهران	
۲- استاد مشاور	دکتر محمد نوری زنوز	استادیار - دانشگاه تهران	
۳- استاد ناظر	دکتر احمد شریعتی	استادیار - مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان	احمد شریعتی
۴- استاد مدعو			
۵- نمایندهٔ تحصیلات تکمیلی گروه	دکتر محمدتقی توسلی	دانشیار - دانشگاه تهران	محمدتقی توسلی

سرپرست تحصیلات تکمیلی گروه: دکتر محمدتقی توسلی

مدیر گروه: دکتر هوشنگ روحانی نژاد

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر رسول اخروی

از راهنمایی‌های حکیمانه و صبورانهٔ استاد گرامی جناب آقای

«دکتر مسعود علیمحمدی»

که پشتوانهٔ محکم اینجانب در انجام این مهم بود کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایم.

همچنین از اساتید بزرگوار آقایان: دکتر مسعود علیمحمدی، دکتر محمد خرمی، دکتر محمدتقی توسلی، دکتر علی پذیرنده و... که در این دوره افتخار شاگردی آنها را داشته‌ام کمال سپاسگزاری را دارم.

عباس عبدلی آرانی

فهرست مطالب

عنوان: صفحه

چکیده ۱

مقدمه ۲

فصل اول: نوسان نوترینو ۹

۱-۱) نوسان نوترینو در خلأ ۱۰

۱ـ۱ـ۱) اصول نوسان نوترینو ۱۰

۱ـ۱ـ۲) نوسانات دو نوترینویی ۱۵

۱ـ۱ـ۳) نوسانات خاص ۱۷

۱ـ۱ـ۴) احتمال کلاسیک ۱۸

۱ـ۲) نوسان نوترینو در ماده ۱۹

۱ـ۲ـ۱) ویژه مقادیر و ویژه توابع برای چگالی ثابت ۲۰

۱ـ۲ـ۲) ماده با چگالی کند تغییر- تقریب آدیاباتیک ۲۷

۱ـ۳) نوسانات طعم از یک چشمهٔ جایگزیده ۳۳

۱ـ۳ـ۱) رابطهٔ بین آزمایشات توصیف فضایی و توصیف زمانی ۳۱

۱ـ۳ـ۲) نوترینو در میدان ضعیف ۳۶

۱ـ۴) معمای نوترینوهای خورشیدی ۳۷

۱ـ۴ـ۱) فرضیه‌های برای حل معمای نوترینوی خورشیدی ۴۰

فصل دوم: مروری بر هندسهٔ دیفرانسیل (هندسهٔ ریمانی) ۴۳

۲ـ۱) تانسورمتریک ۴۴

۲ـ۲) هموستار مستوی ۴۶

۲ـ۳) انتقال موازی و ژئودزیک ۴۸

فهرست مطالب

عنوان: صفحه

۲ـ۴) مشتق هموردای میدانهای تانسوری ۴۹

۲ـ۵) خواص انتقالی ۵۰

۲ـ۶) هموستار متریک ۵۱

۲ـ۷) انحنا و پیچش ۵۳

۲ـ۸) معنی هندسی تانسور ریمان و تانسور پیچش ۵۴

۲ـ۹) تانسور ریچی و انحنای اسکالر ۵۶

۲ـ۱۰) هموستار لوی- چویتا ۵۶

۲ـ۱۱) ویژگیهای جبری تانسور انحنا ۵۷

۲ـ۱۲) ژئودزیک ها ۵۸

۲ـ۱۳) پایه‌های غیر مختصاتی ۵۹

۲ـ۱۴) بردار کیلینگ ۶۱

۲ـ۱۵) معادلات میدان اینشتین ۶۲

۲ـ۱۶) حل شوارتس شیلد ۶۵

۲ـ۱۶ـ۱) فاصله‌ها و زمانها ۶۶

۲ـ۱۶ـ۲) انتقال‌های به سرخ ۶۷

۲ـ۱۶ـ۳) ثابت شوارتس شیلد ۶۸

۲ـ۱۷) چارچوب موضعی ۶۹

۲ـ۱۸) اسپینورها در فضا زمان خمیده ۷۰

فصل سوم: نوترینو در فضا زمان خمیده ۷۵

۳ـ۱) نوترینو در میدان گرانشی ۷۶

فهرست مطالب

عنوان: صفحه

۳ـ۱ـ۱) دیدگاه اول محاسبهٔ فازهای گرانشی نوسان نوترینو ۷۹

۳ـ۱ـ۲) دیدگاه دوم محاسبهٔ فازهای گرانشی نوسان نوترینو ۸۴

۳ـ۲) نوسان نوترینو در فضا زمان خمیده ۸۷

۳ـ۲ـ۱) تفسیر سادهٔ هندسی نوسانات نوترینو: فضا زمان تخت ۸۷

۳ـ۲ـ۲) تفسیر سادهٔ هندسی نوسانات نوترینو: فضا زمان خمیده .....

۳ـ۲ـ۳) نوسانات نوترینو در فضا زمان شوارتس شیلد: نوسانات خلأ ۹۰

فصل چهارم: نوسانات نوترینو در حضور پیچش ۹۸

۴ـ۱) نوسانات نوترینوهای بدون جرم در حضور میدان پیچش ۹۹

۴ـ۲) نوسانات نوترینوی جرمدار در حضور میدان پیچش ۱۰۴

۴ـ۳) نوسانات نوترینو در فضا زمان با پیچش، U_4 ..... ۱۱۴

۴ـ۳ـ۱) محاسبهٔ انحنای اسکالر در فضا زمان با پیچش، U_4 ..... ۱۱۴

۴ـ۳ـ۲) نظریهٔ اینشتین ـ کارتان ـ دیراک ۱۱۸

۴ـ۳ـ۳) تأثیر پیچش روی نوسان نوترینو ۱۲۰

ضمائم: ۱۲۵

ضمیمهٔ الف) محاسبهٔ سهم غیر صفر هموستار اسپین در حضور گرانش ۱۲۶

ضمیمهٔ ب) محاسبهٔ سهم غیر صفر هموستار اسپین در حضور پیچش ۱۲۹

ضمیمهٔ ج) محاسبهٔ انحنای اسکالر در حضور پیچش ۱۳۲

ضمیمهٔ د) محاسبهٔ رابطهٔ بین ضرایب کریستوفل و دترمینان تانسورمتریک ۱۳۷

ضمیمهٔ ه) محاسبهٔ مؤلفه‌های تانسورهای پیچش و انحنا ۱۴۰

ضمیمهٔ و) معادلهٔ دیراک ۱۴۲

فهرست مطالب

عنوان: صفحه

و_۱) معادلهٔ دیراک و ماتریس‌های γ ۱۴۲

و_۲) ثابت حرکت دیراک ۱۴۶

و_۳) جواب‌های موج تخت ۱۴۷

و_۴) ویژگیهای نسبیتی ۱۴۸

واژه‌نامه **۱۵۲**

منابع **۱۵۵**

چکیده:

دراین گفتار تأثیر پیچش فضا بررفتار نوترینو را بررسی می‌کنیم و با فرض جرمدار بودن نوترینو میزان این تأثیر برپدیدهٔ نوسان نوترینو را مورد بررسی و محاسبه قرار می‌دهیم.

چون ویژه حالتهای پیچش و جرم متفاوتند بنابراین نوسان نوترینو یعنی تبدیل ν_e به ν_μ و ν_τ رخ می دهد و ممکن است نوسان تحت شرایط ویژه توسط پیچش قویاً متأثر شود.

با استفاده از نظریهٔ اینشتین- کارتان- دیراک اثر پیچش روی نوسان نوترینو را بررسی می‌کنیم و ملاحظه خواهیم کرد که پیچش نمی‌تواند نوسان تولید کند ولی هر وقت به هر دلیل نوسان تولید شود، روی نوسان اثر می‌گذارد. نشان می‌دهیم جایی که نسبت چگالی به انرژی نوترینو $\sim 10^{69} cm^{-3}/eV$ یا چگالی تعداد ذرات فرمیونی درون ماده $\sim 10^{69} cm^{-3}$ باشد، اثر پیچش روی نوسان نوترینو هم ارز اثر جرم نوترینو است.

مقدمه:

از قدیم الایام تا کنون انسان کنجکاو و کاوشگر خواستار شناخت عمیق در مورد آسمان و بخصوص خورشید این پدیدهٔ عجیب خلقت بوده است.

خورشید نوعی جعبهٔ سیاه است و منجمان فقط می‌توانند خروجی‌های آن را تحت بررسی قرار دهند. تمامی دانش جدید دربارهٔ خورشید براساس مطالعاتی به دست آمده که در مورد اشعهٔ منتشره از لایه‌های بیرونی آن صورت گرفته است. تقریباً هیچ اطلاعی از درون خورشید در دست نیست. به بیان روشنتر، نظریهٔ مربوط به ترکیبات داخلی خورشید که میزان انرژی ساطع شده توسط خورشید را منوط به واکنشهای‌گرما هسته‌ای می‌داند، مدلی صرفاً نظری است. نظریهٔ‌گرما هسته‌ای به روشنی قادر به توضیح فرآیندهای تحول ستارگان است و با ویژگیهای فیزیکی قابل رؤیت خورشید و دیگر ستاره‌ها مطابقت می‌کند. اما این نظریه نیز، همانند هر مدل نظری دیگر که برای توضیح انتظام درونی جعبهٔ سیاه ارائه شود چندان رضایت بخش نیست، زیرا مبتنی بر شواهدی غیر مستقیم است، دریافت اطلاعات مستقیم مهمتر است و این امر تنها با توجه به اطلاعات به دست آمده از درون ستارگان امکان پذیر خواهد بود.

یکی از راههای دستیابی به چنین اطلاعاتی روش نجومی نوترینو یا به بیان دقیق‌تر علمی، اختر فیزیک نوترینو است. نوترینو ذرهٔ گریزانی است که مستقیماً در جریان فعل و انفعالهای دما هسته‌ای حاصل می‌شود. فیزیکدانان و اخترشناسان معتقدند که انرژی خورشید بر اثر زنجیرهٔ تبدیل هسته‌های هیدروژن (پروتون‌ها) به هسته‌های هلیوم، تولید می‌شود. در این فرآیند مقدار زیادی الکترون با بار مثبت (پوزیترون) و نوترینوی الکترون به همراه ۲۵ میلیون الکترون ولت انرژی گرمایی به ازای سوختن هر چهار پروتون تولید می‌شود. تقریباً در هر ثانیه با تبدیل ۶۰۰ تن هیدروژن به هلیوم در ناحیه‌های مرکزی

خورشید، انرژی آزاد می‌شود. نور و گرمای خورشید بخشی از این انرژی است که زندگی را بر روی زمین ممکن می‌کند[۱]. ما خورشید را به کمک طیف مرئی آن می‌بینیم.این انرژی گرمایی پس از گذشت حدود $۱۰^{۶}$ سال از زمان تولید و با تحمل $۱۰^{۳۰}$ برخورد، از خورشید خارج می‌شود و به ما می‌رسد و طی این همه تحولات به قدری دگرگون می‌شود که دیگر نمی‌تواند اطلاعات زیادی از شرایط تولیدش به دست بدهد [۲]. اما نوترینوها بر خلاف ذرات نور (فوتون‌ها)، فقط به طور ضعیف با ماده بر هم کنش می‌کنند، یا به عبارت دیگر، با دیگر ذرات، تأثیر متقابل بسیار ناچیزی دارند. این بر هم کنش ضعیف باعث می‌شود که آنها مستقیماً از مرکز خورشید بگریزند و اطلاعات گرانبهایی از مرکز نزدیکترین ستاره در اختیار اخترشناسان قرار دهند. بر هم کنش نوترینوها با ماده آنقدر ضعیف است که به راحتی از میان توده‌های بزرگ ماده می‌گذرند، بی‌آنکه مسیرشان تغییر کند یا به ذرهٔ دیگری تبدیل شوند. شار نوترینوی خورشیدی در روی زمین اگرچه زیادتر از آن است که قابل صرف نظر باشد- در هر ثانیه حدود $۱۰^{۱۱}$ نوترینوی خورشیدی با شار انرژی معادل چند درصد انرژی گرمایی خورشید به هر سانتیمتر مربع از زمین می‌رسد [۲] اما آشکار سازی آن به خاطر سطح مقطع ناچیز بر هم کنش بسیار دشوار است و چون نوترینوها فقط به صورت ضعیف با ماده بر هم کنش می‌کنند، برای آشکار کردن آنها به آشکارسازهای خیلی بزرگ که از صدها یا هزارها تن ماده ساخته شده‌اند، نیاز داریم. این آشکارسازها باید در محل‌هایی در عمق زمین، در پناه جاهایی مثل معادن قرار داده شوند. در غیر اینصورت بر هم کنشهای نادر نوترینوهای خورشیدی در آشکارسازها که احتمالاً نتیجه‌ای قابل مشاهده دارند با بر هم کنش‌های ذرات پر انرژی پرتوهای کیهانی که از قسمتهای مختلف آسمان به ما می‌رسند، اشتباه خواهند شد.

بنابراین فقط در صورت به دام انداختن نوترینو است که می‌توان با مشاهدهٔ آن به

پدیده‌های درون خورشید پی برد. اما این پیشنهاد مشکل به نظر می‌رسد، چون نوترینو را فقط می‌توان به طور غیر مستقیم در فعل و انفعالهایش با دیگر ذرات به هنگام واکنشهای هسته‌ای مشاهده کرد و نتایج حاصل را به ثبت رساند.

نخستین آزمایش آشکارسازی نوترینوی خورشیدی در سال ۱۹۶۸ به رهبری ریموند دیویس انجام شد [۳]. پس از آزمایش معروف گروه دیویس مشاهده شد که میزان شار نوترینوی مشاهده شده از خورشید در حدود $\frac{۱}{۳}$ شار پیش بینی شده توسط مدلهای استاندارد خورشیدی است [۴]. از آن پس آزمایشهای متعددی انجام شده است[۵] و نتایج همهٔ آنها مؤید کشف دیویس هستند. این مسئله به «معمای نوترینوهای خورشیدی» معروف است. طرح معمای نوترینوی خورشیدی آغاز جدالی بین فیزیکدانان و اخترشناسان شد تا اخترشناسان ادعا کنند که فیزیکدانان فرآیندهای مربوط به بر هم کنش نوترینو را خوب نمی‌دانند و فیزیکدانان ادعا کنند که اطلاعات منجمان از واکنشهای درون خورشید ناقص است. از آن پس راه حلهای متعددی برای حل این معما مطرح شده است: یک راه حل ممکن نوسانات طعم نوترینو است که اولین بار توسط پونته کوروو پیشنهاد شد [۶]. حتی برای نوسانات نوترینو چندین مکانیزم فرض شده است مثلاً: نوسانات نوترینو در خلاء [۷]، نوسانات نوترینو در ماده [۸] که مشهورترین نوع این پاسخ با فرض جرمدار بودن نوترینو اثر MSW می‌باشد [۹و۱۰]. راه حل ممکن دیگر فرض گشتاور مغناطیسی برای نوترینو است [۱۱]. البته حدود سه دههٔ قبل ارتباطی تجربی بین مکانیک کوانتوم و گرانش مشاهده شد [۱۲] و سپس اثرات گرانشی روی پدیدهٔ مکانیک کوانتومی نوسانات نوترینو مورد بررسی قرار گرفت [۱۳] و ملاحظه شد که گرانش روی نوسان نوترینو اثر می‌گذارد [۱۴و۱۵و۱۶و۱۷] یکی از تأثیرات جالب گرانش بر مسئله نوسانات نوترینو در نظر گرفتن تأثیر پیچش فضا بر نوسان نوترینو است [۱۸و۱۹]. که پیچش فضا همراه با

متریک، مشخصات اصلی هندسهٔ یک فضا زمان است [۲۰] و فضایی که دارای متریک غیر تخت و نیز پیچش باشد، بر رفتار تمام ذرات در آن فضا تأثیر می‌گذارد. پیچش غیر معمولترین میدان در فیزیک می‌باشد. با وجود حدود دو سوم قرن تحقیق در مورد پیچش، هنوز یک توافق عام، نه روی فرمولبندی پیچش و نه روی مفهوم فیزیکی پیچش، وجود ندارد.

بعد از اینکه کارتان، پیچش را به عنوان قسمت پادِ متقارن هموستار مستوی معرفی کرد، اینشتین، شرودینگر و دیگران در یک نظریهٔ وحدت یافتهٔ گرانش و الکترو مغناطیس، از پیچش استفاده کردند و بدین ترتیب پیچش، در نیمهٔ دوم قرن ۲۰ ، جایگاه بالاتری پیدا کرد. کاریانگ و میلز، در مورد میدانهای پیمانه‌ای موضعی، محرکی شد تا ابتدا Utiyama و بعد kibble و sciama گرانش را به عنوان یک نظریهٔ پیمانه‌ای ارائه کنند و بنابراین حیات جدیدی به پیچش، در زمینهٔ یک تانسور متریک متقارن، داده شد.

در اواسط ۱۹۷۰ Hehl، نظریه‌ای را تحت عنوان نظریهٔ اینشتین- کارتان (EC) ارائه کرد که در آن فقط داخل ماده‌ای که یک چگالی اسپین ذاتی به آن داده می‌شود، پیچش وجود دارد. در این نظریه تفسیر فیزیکی روی اسپین است به ویژه اینکه اسپین ذاتی ذرهٔ بنیادی پیچش خلق می‌کند[۱۱] و نوترینوها (و نیز سایر اجرام آسمانی) در حضور این ذرات قرار دارند. لذا مطالعه میزان این پیچش بر دینامیک نوترینو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

همچنین اگر نوترینو دارای جرم باشد، پدیدهٔ نوسان نوترینو یعنی تبدیل ν_e به ν_μ و ν_τ رخ می‌دهد. لذا محاسبهٔ میزان تأثیر پیچش فضا بر نوسان نوترینو، که یکی از مسائل لاینحل فیزیک معاصر است،می‌تواند لااقل در چارچوب نظری جالب باشد.

البته همانطور که خواهیم دید، این اثر تنها زمانی نتایج محسوسی دارد که چگالی

ذرات محیط بسیار زیاد باشد و این شرایطی است که برای خورشید محقق نمی‌شود. بنابراین این اثر در محیطهای بسیار چگال و یا گرانش‌های بسیار قوی (که احتمالاً در عالم اولیه موجود بوده است) می‌تواند مطرح باشد.

نکتهٔ دیگر آن است که مدلهای دیگری هم برای وارد کردن اندر کنش نوترینو با پیچش وجود دارد، که در چارچوب آن مدلها، مقدار چگالی لازم برای محسوس بودن اندر کنش، بسیار کمتر از مدلی است که در اینجا مورد بررسی قرار گرفت.

در این گفتار می‌خواهیم تأثیر پیچش فضا بر رفتار نوترینو را بررسی کنیم و با فرض جرمدار بودن نوترینو، میزان این تأثیر بر پدیدهٔ نوسان نوترینو (که به احتمال بسیار زیاد، عامل کاهش شار نوترینوی خروجی از خورشید است) را مورد بررسی و محاسبه قرار می‌دهیم. محاسبات بر اساس مدل اینشتین- کارتان- دیراک انجام می‌شود.

برای این منظور ابتدا مسئله نوسان نوترینو و سپس فضا زمان با پیچش را مورد بررسی قرار می‌دهیم تا بتوانیم تأثیر پیچش بر نوسان نوترینو را توضیح دهیم و میزان آن را محاسبه کنیم. البته در اینجا ابتدا نوسان نوترینو در فضا زمان بدون پیچش یعنی در حضور گرانش را بررسی خواهیم کرد و تأثیر گرانش روی نوسانات نوترینو را توضیح خواهیم دا د. در واقع کار ما تعمیم این حالت به حالت پیچش دار و نیز محاسبهٔ میزان تأثیر پیچش بر نوسان نوترینو می‌باشد.

در فصل اول: نوسان نوترینو را به اجمال بررسی می‌کنیم و ملاحظه خواهیم کرد که نوسان نوترینو وقتی ممکن است که یک ویژه حالت طعم، یک ویژه حالت جرمی نباشد بلکه ترکیبی خطی از ویژه حالتهای جرمی باشد و خواهیم دید که نوسان نوترینو در خلأ با زوایای ترکیب بزرگ قادر به حل معمای نوترینوی خورشیدی می‌باشد که البته چنین زوایایی را آزمایش تأیید نمی‌کند. سپس نوسان نوترینو در ماده و اثر MSW را بررسی

خواهیم کرد.

نشان می‌دهیم که فازهای نوسانی فضایی و زمانی تولید شده، دو توصیف از نوسان هستند که توسط سرعت گروه به نتایج یکسان منجر می‌شوند. و در پایان فصل معمای نوترینوهای خورشیدی و برخی راه حلهای این معما را به اجمال مرور می‌کنیم.

در فصل دوم: مروری بر هندسهٔ دیفرانسیل خواهیم کرد. در این فصل هندسهٔ ریمانی مورد بحث قرار می‌گیرد و با معرفی تانسور متریک و ضرایب هموستار، تانسورهای پیچش و انحنا را به طور جبری و هندسی بررسی خواهیم نمود. مفهوم انتقال موازی و ژئودزیک را توضیح خواهیم داد. پایه‌های غیر مختصاتی و چارچوبهای موضعی را بیان می‌کنیم و با نگرشی به اصل کنش، فضا زمان شوارتس شیلد را به اختصار مرور می‌کنیم و در پایان فصل اسپینورهای دیراک در فضا زمان خمیده را معرفی خواهیم کرد.

در فصل سوم: نوسان نوترینو در حضور گرانش را بررسی می‌کنیم. ابتدا فازهای نوسانی تولید شده از یک چشمهٔ جایگزیده در حضور میدان گرانشی را تعیین می‌کنیم و از دو دیدگاه نظریه خطی سازی گرانش و نظریهٔ نسبیت عامی، نتیجهٔ فوق را تصدیق می‌کنیم. سپس نوسان نوترینو در فضا زمان خمیده (بدون پیچش) را به روش سادهٔ هندسی بررسی خواهیم کرد و ملاحظه خواهیم کرد که فرمولهای نوسان توسط گرانش تغییر داده می‌شوند. در پایان این فصل نوسان نوترینو در فضا زمان شوارتس شیلد را توضیح خواهیم داد و تأیید خواهیم نمود که سهم گرانش در تغییر جهت اسپین در فضا زمان شوارتس شیلد ایستای متقارن کروی صفر است.

در فصل چهارم: تأثیر پیچش روی نوسان نوترینو را بررسی و میزان این تأثیر را محاسبه خواهیم کرد. ابتدا نوسانات نوترینو در حد جرم صفر را در نظر می‌گیریم که مربوط به بر هم کنش با یک میدان پیچش و با وجود نوترینوهای راست دست است.