
Българска академия на науките
Институт по Астрономия
с Национална астрономическа обсерватория

**Неравновесни процеси в ранната Вселена и техните
космологични ефекти и ограничения**

Даниела Петрова Кирилова

АВТОРЕФЕРАТ на ДИСЕРТАЦИЯ
за присъждане на научна степен
"ДОКТОР на НАУКИТЕ"

София, 2015 г.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 2015 г. от : часа в зала 301 на Институт по електроника, БАН, бул. "Цариградско шосе" № 72. Материалите по защитата са на разположение на интересувашите се в библиотеката на ИА с НАО, БАН и на адрес [**http://www.astro.bas.bg/~dani/thesis/**](http://www.astro.bas.bg/~dani/thesis/)

Българска академия на науките
Институт по Астрономия
с Национална астрономическа обсерватория

НЕРАВНОВЕСНИ ПРОЦЕСИ В РАННАТА ВСЕЛЕНА И ТЕХНИТЕ КОСМОЛОГИЧНИ ЕФЕКТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Даниела Петрова Кирилова

АВТОРЕФЕРАТ на ДИСЕРТАЦИЯ
за присъждане на научна степен "доктор на науките"
в професионално направление 4. Природни науки, математика и информатика,
4.1 Физически науки (Астрофизика и звездна астрономия)

Рецензенти:

доц. д-р Димитър Младенов (ФзФ, СУ)
проф. дфн Екатерина Христова (ИЯИЯЕ, БАН)
проф. дфн Илиан Илиев (ИА с НАО, БАН)

София, 2015 г.

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от Научния семинар на Института по Астрономия с НАО, БАН, проведен на 01.06.2015 г.

Авторът работи в Института по Астрономия с Национална астрономическа обсерватория, БАН, като доцент. Основната част от изследванията са проведени в:

Институт по Астрономия с НАО (1995-2015),

Международен институт по теоретична физика, Триест (1999-2006),

Свободен университет в Брюксел (2004-2005),

ОИЯИ, Дубна и ЦЕРН.

Дисертационният труд е на английски език, съдържа 275 страници, включващи 45 фигури и 244 цитирани източника.

Съдържание

1	Описание на дисертацията	5
1.1	Актуалност	5
1.2	Цели и задачи на изследването	12
1.3	Пробация на дисертационния труд	13
1.4	Структура и обем на дисертационния труд	13
2	Съдържание на дисертацията	15
2.1	Процеси включващи неутрино. Неравновесни неутринни осцилации и космологичните им ефекти . . .	15
2.2	Производство на He-4 в космологичен нуклеосинтез с неутринни осцилации и космологични ограничения вър- ху неутринните осцилации	20
2.3	Генерация на лептонна асиметрия и нейните космоло- гични ефекти и ограничения. Взаимовръзка между леп- тонната асиметрия и неутринните осцилации	24
2.4	Процеси съществени за генерация на барионната асиметрия на Вселената	29
2.5	Процеси съществени за генерация на барионни нехомогенности във Вселената	30
2.6	Процеси с кирални тензорни частици в ранната Вселена	32
3	Основни резултати и приноси	35
4	Публикации по темата на дисертацията	42
	Благодарности	46

1 Описание на дисертацията

1.1 Актуалност

Настоящата дисертация е посветена на неравновесни процеси, свързани с произхода, химичния състав и структурата на веществото във Вселената, с неговите фермионни компоненти - барионна и лептонна. Разглежданите процеси и допълнителни частици представляват физика отвъд Стандартния модел на електро-слабите взаимодействия (СМ) и отвъд Стандартния космологичен модел (СКМ). Космологичните изследвания на процеси, представляващи физика отвъд СМ са актуални понеже предоставят допълнителна, а често и уникална научна информация, недостъпна в наземните лаборатории.

Изследването на космологичната роля на разглежданите в дисертацията процеси и частици са актуални и поради: *наличието на прецизни наблюдателни данни* (от COBE, WMAP, Planck, BESS, AMS, PAMELA и др.) относно редица характеристики на Вселената, като плътност на барионното вещество, плътност на лъчението, характеристики на Космичния микровълнов фон (КМФ), Хъбблова константа, възраст на Вселената, обилието на леки елементи и др.; *наличието на експериментални данни* (Super Kamiokande, SNO, KamLAND, K2K, T2K, LSND, KARMEN, MiniBoone, SOUDAN, ATLAS на LHC); *усъвършенстването на космологичните и физичните модели и теории*, в частност космологичния нуклеосинтез (КН), инфлационната теория, генерирането на КМФ, на космичния неутринен фон (КНФ) и теорията на образуване на структурите във Вселената, модели на тъмно вещество (ТВ) и тъмна енергия (ТЕ). Това позволи сравняване на предсказанията на космологичните модели с прецизните астрофизични и космологични наблюдателни данни и получаване на ценна информация относно характеристиките на Вселената, условията в ранната Вселена, както и относно изследваната нова физика отвъд СМ. В дисертацията са получени космологични ограничения върху характеристиките на разглежданата нова физика на базата на космологични и астрофизични наблюдателни данни.

Неравновесните процеси не бяха систематично изучени, което бе една от причините да разглеждаме тези процеси, като предложим подходящ кинетичен подход за тяхното изследване. Изборът на конкретните процеси и частици, а именно генерация на барионната компонента, на нейната структура на големи мащаби, на химичния ѝ състав, генерация на лептонната асиметрия, неутринни осцилации в КН епоха, процеси на раждане на частици от променливо скаларно поле, процеси с нови кирални тензорни частици, бе обусловено от експерименталните данни и указанията за тяхното наличие в природата, които за всеки отделен случай са описани подробно в уводната глава и в уводните части на съответните глави в дисертацията.

Процеси включващи неутрино

Изследването на космологичната роля на процеси с участие на неутрино предоставя възможност както за изучаване на свойствата на неутрино, така и за уточняване на условията в ранната Вселена. Активното неутрино играе важна роля на ранния стадий на Вселената: то е определяща динамиката компонента, електронното неутрино участва във взаимодействия с нуклоните, което го прави важен фактор за генерацията на химическия състав на Вселената, играе роля при формирането на КМФ, формирането на едромасшабната структура на Вселената. Стерилното неутрино представлява най-простото разширение на СМ. Неговите космологични приложения са многобройни: като представител на ТВ, като решение на проблема с тъмната радиация, резонансните активни-стерилни неутринни осцилации предлагат възможност за лептогенезис и бариогенезис, и т.н.

Детектирането на неутринните осцилации представлява единствената за сега експериментално установена физика отвъд СМ. Получени са доказателства за наличието на неутринни осцилации от неутринни експерименти: наземни детектори (LSND, KamLAND, K2K), детектори на неутрино от Слънцето (Homestake, Kamiokande, Super Kamiokande, Gallex, SAGE, SNO), атмосферно неутрино (Super Kamioka, Macro, Soudan 2, IMB), Gallium и реакторните експерименти LSND, MiniBooNe, указващи на стерилно неутрино с маса около eV.

Слънчевата и атмосферната неутринни аномалии бяха обяснени чрез неутринни осцилации с доминантни канали - осцилациите между активните неутринни състояния. Годици преди неутринните експерименти да установят доминантните канали, космологичните изследвания (включая нашите резултати) отхвърлиха две от разглежданите стерилни решения (осцилации между активно и стерилно неутрино) на слънчевия неутринен проблем и на атмосферната неутринна аномалия. Ролята на стерилното неутрино с маса в sub-eV диапазона и активно-инертните канали се изследваха (LSND, KARMEN) и се изследват и по настоящем от MiniBooNe и други неутринни експерименти с къса база. Евентуално активно-инертно смесване позволява по-добро фитиране на данните, което обуславя актуалността на неговото изследване и в космологични модели.

В дисертацията разглеждаме установени и хипотетични характеристики на неутриното. Втора, трета и четвърта глава са посветени на космологичната роля на неутриното върху динамиката на Вселената, върху космологичния синтез лептогенезиса, както и на получаване на космологични ограничения върху Физиката отвъд СМ в неутринния сектор.

Изследванията на неутрино и неутринни осцилации, представени в дисертацията, дават уникална възможност за изясняване на свойствата на електронното и стерилното неутрино. Например малки масови разлики, като в проведеното от нас изследване, са недостъпни за изследване в наземните лаборатории. От друга страна извършеното моделиране и получените ограничения върху характеристиките на неутриното дават ценна информация за условията в ранната Вселена при температури недостъпни в наземни лаборатории и характерни за космологичния нуклеосинтез.

Космологичен нуклеосинтез с неутринни осцилации

Произходът на химичния състав на Вселената е основен космологичен въпрос. Обяснението на наблюдаваните обилия на леки елементи във Вселената от КН е едно от големите постижения на СКМ, според който на ранния стадий ($1 - -0.1\text{MeV}$) условията в ранната Вселе-

на са подходящи за синтез на леките елементи деутерий D, хелий-3, хелий-4 и литий-7.

Днес КН представлява точна количествена теория, подкрепена от експериментални данни, касаещи КН: сечения на процесите, константи на взаимодействие и др. КН предсказанията за обилието на леките елементи са в отлично съгласие с наблюденията. Обилията на леките елементи D и He-4 са измерени с добра точност, което позволява използването на КН като най-ранен прецизен тест на физичните условия в ранната Вселена и на новата физика при тези енергии. КН е най-добрият бариомер и спидомер в ранната Вселена, поради високата чувствителност на производството на деутерий от барионната плътност и на хелий-4 от скоростта на разширение на Вселената. Сред леките елементи хелий-4 е и най-чувствителен лептомер, предоставя и най-прецизен тест на неутринните свойства. КН представлява прецизна космична лаборатория за изследване на физиката отвъд СМ, в частност на неутринната физика отвъд СМ и СКМ (неутринни осцилации, разпади, неравновесни процеси).

Трета и четвърта глава на дисертацията са посветени на КН, лептонната асиметрия и процесите в модифицирани КН модели (с допълнителни частици, активно-стерилни неутринни осцилации, неутринни разпади, лептонна асиметрия, нестандартна барионна плътност и др.)

Лептонна и барионна асиметрия

Лептонната и барионната асиметрия са основни характеристики на Вселената. Барион-фотонното отношение е измерено с висока точност от КН, както и от КМФ, т.е. при различни епохи. Лептонната асиметрия не е директно измерена. Точните механизми на бариогенезис и лептогенезис не са известни, необходимите CP- и B-нарушаващи процеси и евентуални L-нарушаващи процеси все още не са детектирани. Механизмите на генериране на наблюдавания барионен излишък и евентуална лептонна асиметрия L се изучават и са сред основните проблеми на съвременната физика и космология.

Знанието за B и L е нужно за прецизното определяне на оста-

налите космологични параметри и за конструиране на реалистични космологични модели. Определянето на B и L би способствувало за избор на физиката отвъд СМ сред множеството различни модели.

Лептонната асиметрия на Вселената все още не е измерена директно, поради което представляват интерес изследвания, които предоставят възможност за индиректното ѝ определяне. Лептонната асиметрия на Вселената обикновено се задава чрез:

$$L = (N_l - N_{\bar{l}})/N_\gamma, \quad (1.1)$$

където N_l е плътността на лептоните, $N_{\bar{l}}$ на антилептоните, а N_γ на фотоните. КНФ не е детектиран, ето защо L се определя индиректно чрез нейните ефекти върху процеси, които са оставили наблюдаеми следи: КН, КМФ, формирането на едромащабната структура на Вселената и други. Обикновено се предполага, че L е от порядъка на барионната асиметрия β . Обаче, стойности $L > \beta$ са възможни и се обсъждат в редица модели (Кирилова, Чижов, 1996, 1997, 2000; Фут, Томпсън и Волкас, 1996; Долгов, Кирилова, 1990). В този случай L се съдържа главно в неутринния сектор. Независимо от величината ѝ, L е част от лептонния състав на Вселената, има интересни космологични ефекти. Освен това изследването ѝ е важно и от гледна точка на теоретичната и неутринната физика.

Във втора и в четвърта глава на дисертацията разглеждаме въпроси свързани с лептонната асиметрия на Вселената: изследвали сме взаимовръзката между неравновесни неутринни осцилации и L , предложили сме и сме изследвали механизъм за нейната генерация в резонансни активно-стерилни неутринни осцилации (Кирилова, Чижов, 1996, 1997, 2000; Кирилова, 2012), провели сме числен анализ на ефектите на $|L| < 0.01$ върху КН, определили сме изменението на космологичните ограничения в присъствието на $L > \beta$, показали сме, че КН с неравновесни неутринни осцилации е най-прецизен лептомер (Кирилова, Чижов, 1998, 2000; Кирилова, 2012). Малки лептонни асиметрии и техният ефект върху неутринните осцилации и КН се разглежда за пръв път.

В последните години бе определена с изключителна точност и посредством независими методи величината на барионната плътност на Вселената. Барионната компонента съставлява 5% от пълната плътност на Вселената. Най-точно измерване на барионната плътност се получава чрез данните за деутерий, измерен към квазари с голямо червено отместване и ниска металичност (Петини, 2012):

$$\eta = N_B/N_\gamma = (6.0 \pm 0.3) \times 10^{-10} \quad \text{at} \quad 95\% \text{ CL.}$$

Подобна стойност е измерена и от данни от КМФ. В нашата Галактика се наблюдава силна асиметрия между вещество и антивещество:

$$\beta = (N_B - N_{\bar{B}})/N_\gamma \sim \eta.$$

Не са наблюдавани индикации за наличие на значителни количества от антивещество на разстояния < 1 Мрс (данни от космични лъчи) и разстояния $< 10 - 20$ Мрс (данни от гама-лъчи) (Стейгман, 1976, 2008; Стекер, 1985), освен малкото количество антипротони $\bar{p}$: $\bar{p}/p \sim 10^{-5} - 10^{-4}$, които са резултат от взаимодействие на космичните лъчи с междוזвездната среда.

СКМ предсказва на 9 порядъка по-малка стойност на β изхождайки от зарядово симетрично начало, което е естественото предположение за високотемпературната плазма в ранната Вселена.

Обяснението на наличната барионна компонента, нейната плътност и наблюдаваната барион-антибарионна асиметрия е сред основните теоретични въпроси на физиката и космологията. В случай на глобална асиметрия е необходимо да бъде установен бариогенезисния механизъм, който в след инфлационния стадий довежда до генерация на барионния излишък (Сахаров, Кузмин). Съществуват множество бариогенезисни модели. В глава пета ние сме представили и изследвали числено бариогенезисен модел с кондензат на скаларно поле, който е в съгласие с инфлационния стадий и с ниските температури на повторното загряване. Установили сме важната роля на процесите на раждане на частици от променливото скаларно поле и необходимостта от прецизното им отчитане в този бариогенезисен модел.

Нехомогенни бариогенезисни модели

Наблюдаваната локално барионна асиметрия на Вселената може да не е нейна глобална характеристика. За по-големи разстояния от 20 Мрс няма нито наблюдателни нито теоретични ограничения върху наличието на големи количество от антивещество. В този случай е необходимо да се установи механизма на разделяне на областите от вещество от тези от антивещество във Вселената. С тази цел се изследват нехомогенни бариогенезисни модели.

Нехомогенните бариогенезисни модели, позволяващи генерация на пространствено варираща барионна плътност и области от антивещество, са актуални и във връзка с резултатите на експериментите по изследване на гама-лъчите във Вселената и на експериментите BESS, AMS, PAMELA, посветени на детектиране на антипротони и антиядра в космичните лъчи, благодарение на които се очаква да бъдат прецизирани експерименталните данни и ограничения относно наличието на областите от антивещество и разстоянието до тях.

Глава шеста е посветена на нехомогенни бариогенезисни модели с кондензат на скаларно поле (КСП). Изследвахме възможността на тези модели да предоставят механизъм на разделяне на области от вещество от такива с антивещество, както и предсказания относно размерите и разстоянието до тях.

Друга причина за интереса към нехомогенните бариогенезисни модели предостави наблюдаваното квазипериодично разпределение на барионното вещество с характерен мащаб - $130h^{-1}$ Мрс. Първоначално наблюдавано в дълбоките обзори (Бродхърст, 1989, 1995; Етори 1995, 1997; Ейнасто, 1997), впоследствие потвърдено от наблюдателните данни на различни обекти: галактики, квазари, купове и свръхкупове от галактики, представящи индикации за наличие на такъв мащаб. Произходът на толкова голям мащаб в едромасщабната структура на Вселената изискваше обяснение отвъд стандартните модели за образуване на структурите в СКМ. В глава 6 се разглежда възможността наличието на квазипериодичност в разпределението на видимото вещество с този мащаб да бъде обяснено в рамките на не-

хомогенния бариогенезисен модел с КСП.

Тензорни частици в ранната Вселена

Допълнителни кирални тензорни частици (ТЧ) са въведени в СМ от М. Чижов през 1994 за пълнота на Юкава взаимодействията и за реализация на всички неприводими представяния на Лоренц групата. Те принадлежат на фундаменталното представяне на $SU(2)$ групата на СМ, което съдържа известните фермиони и Хигсовия дублет, т.е. те представляват разширение към фермионната компонента на Вселената. В множество публикации бе показано, че наличието на тези частици не противоречи на съвременните експериментални данни. Експериментално търсене на ТЧ и проверка на наличието на тензорни взаимодействия в природата в момента се провежда от експеримента ATLAS на Големия адронен колайдер в ЦЕРН.

Ето защо, поради изтъкнатото по-горе разглеждането на космологичната роля на кирални тензорни частици е особено актуално в момента. Седма глава на дисертацията е посветена на космологичното място и роля на ТЧ и е получено КН ограничение върху техните характеристики.

1.2 Цели и задачи на изследването

Основната цел на дисертацията е провеждане на интердисциплинарно изследване на неравновесни физични процеси, представляващи физика отвъд СМ и на тяхната роля в ранната Вселена, както и получаване на космологични ограничения върху техните характеристики на базата на наблюдателните данни.

Обект на изследването са космологичен нуклеосинтез, процеси свързани с неутриното, електрон-стерилни неутринни осцилации, процеси с участие на лептонна асиметрия, процеси с тензорни и други допълнителни частици, процеси свързани с бариогенезиса и с генерацията на барионни пертурбации.

Основните задачи включват: описание на кинетиката на неравновесните процеси, построяване на космологични модели включващи допълнителни частици и установяване на космологичното им влия-

ние, получаване на космологични ограничения върху характеристиките на разглежданата физика отвъд СМ, получаване на информация относно условията в ранната Вселена.

1.3 Пробация на дисертационния труд

Резултатите в дисертацията са отразени в 51 научни публикации в реферирани астрофизически и физически списания и трудове на конференции. От тях 22 са в издания с импакт фактор, 20 са в доклади от международни конференции, 5 от останалите публикации са в реферируеми международни журналы и 5 в реферируеми национални журналы. 25 от публикациите са самостоятелни, 23 са с 1 съавтор, 1 е с двама съавтора и 2 са с повече от двама съавтора, като дисертантът в 20 от тях е първи автор. Резултатите са докладвани на международни форуми в Европа, Русия, Япония, Бразилия, Индия, на множество реномирани работни срещи и школы, както и в различни международни центрове: ОИЯИ (Дубна), Международен център по теоретична физика (Триест), ЦЕРН. Резултатите са обсъждани на семинари в ГАИШ, МГУ, Университета Васеда (Токио), Нилс Бор Института (Копенхаген), Свободния университет в Брюксел, Женевския Университет (Женева), Институт Пиер и Мария Кюри (Париж), Майорана Център по теоретична физика (Ериче), Солунския Университет, Университета в Хелзинки, Белградския Университет и др. Забелязаните цитати (без автоцитати) са над 400. Резултатите от научните изследвания двукратно са избирани за достижения на ИА с НАО БАН.

Резултатите са важни за бъдещите изследвания в областта на космологията, космофизиката, неутринната физика и астрофизика, квантовата теория на полето и др.

1.4 Структура и обем на дисертационния труд

Съдържанието на дисертационния труд е разпределено в осем глави, библиография съдържаща 244 заглавия, списък с 45 фигури, списък

със съкращения, благодарности. Дисертацията съдържа 275 страници машинописен текст и е на английски език. Първа глава е уводна. Втора глава е посветена на неравновесни електрон-стерилни неутринни осцилации и изследване на техните ефекти върху плътността и спектъра на неутриното. Трета глава представя модифициран модел на КН с неравновесни неутринни осцилации. Четвърта глава разглежда въпроси свързани с лептонната асиметрия и взаимовръзката между нея и неутринните осцилации, както и влиянието на малки лептонни асиметрии върху КН в случай на неутринни осцилации. Петата глава дискутира барионната асиметрия на Вселената и предлага нейното обяснение в рамките на бариогенезисен модел с кондензат на скаларно поле. Шестата глава представя нехомогенния случай на този бариогенезисен модел и възможността в рамките на този модел да бъдат произведени барионни пертурбации. Разглеждат се различни възможности: в рамките на този модел е предложено обяснение на наблюдавата квази-периодичност на барионното вещество във Вселената на големи мащаби; анализирана е възможността за разделяне на области от вещество от такива с антивещество. Седма глава разглежда космологичното място и роля на нови кирални тензорни частици и ограниченията от КН върху силата на взаимодействията им. Осма глава съдържа заключенията и обобщението на основните научни приноси, както и списък с публикациите, върху които се базира дисертацията.

2 Съдържание на дисертацията

Първа глава е уводна. Дискутира актуалността на изследванията и резултатите представени в дисертацията, тяхната значимост, целите и задачите на дисертацията, използваните методи и представя общата структура и описание на дисертационния труд.

2.1 Процеси включващи неутрино. Неравновесни неутринни осцилации и космологичните им ефекти

Втора глава на дисертацията е посветена на процеси свързани с неутриното и техните космологични ефекти. Представени са основните установени и предсказани от СМ физични характеристики на неутриното. Направен е кратък обзор на ролята на неутриното в ранната Вселена, на свойствата на реликтовия неутринен фон и неговия произход и еволюция според СКМ. Числено е изследвана еволюцията на космично неутрино и космичния неутринен фон при наличие на неутринни осцилации, изследвана е космологичната роля на нетермализирано леко стерилно неутрино. Представени са следните оригинални резултати относно неравновесни неутринни осцилации и тяхната космологична роля:

Построен и изследван е модел на неравновесни неутринни осцилации (Кирилова и Чижов, 1996, 1997) между електронно ν_e и нетермализирано стерилно неутрино ν_s :

$$\begin{aligned}\nu_1 &= c\nu_e + s\nu_s \\ \nu_2 &= -s\nu_e + c\nu_s,\end{aligned}$$

където $c = \cos \vartheta$, $s = \sin \vartheta$ и ϑ представляват смесването, а ν_1 и ν_2 масовите състояния с маси m_1 и m_2 . Според модела ν_s излиза от термодинамично равновесие (ТДР) по-рано от ν_e и следователно неговото състояние е незапълнено: $\delta N_s = \rho_{\nu_s}/\rho_{\nu_e} < 1$. Разглеждат се неутринни осцилации между ν_e и нетермализирано ν_s , ефективни след излизане на ν_e от ТДР, т.е. $\Gamma_{osc} \geq H$ за $T \leq 2$ MeV. Диапазонът

на осцилационните параметри на този модел е:

$$\sin^2(2\vartheta)\delta m^2 \leq 10^{-7}\text{eV}^2. \quad (2.1)$$

Предложен е прецизен кинетичен подход за описанието на осцилиращо неутрино в ранната Вселена, подходящ за случая на неравновесни осцилации, когато скоростта на разширение, скоростите на осцилации и скоростите на процесите на разсейване напред на неутриното са сравними. Кинетичните уравнения за матрицата на плътността на неутриното в импулсно пространство, описващи еволюцията на неравновесното осцилиращо неутрино в ранната Вселена, изведени в (Кирилова, Чижов, 1996, 1997), са:

$$\frac{\partial \rho(t)}{\partial t} = H p \frac{\partial \rho(t)}{\partial p} + i [\mathcal{H}_o, \rho(t)] + i [\mathcal{H}_{int}, \rho(t)] + \mathcal{O}(\mathcal{H}_{int}^2),$$

p е импулса, ρ е матрицата на плътността на неутриното. Първият член в дясната част на уравнението описва разширението на Вселената, вторият - осцилациите, третият - разсейването напред на неутриното от средата, четвъртият се отнася за взаимодействията със средата, които в нашия модел са пренебрежими. $\mathcal{H}_o$ е свободния Хамилтониан:

$$\mathcal{H}_o = \begin{pmatrix} \sqrt{p^2 + m_1^2} & 0 \\ 0 & \sqrt{p^2 + m_2^2} \end{pmatrix},$$

$\mathcal{H}_{int} = \alpha V$ е Хамилтониана на взаимодействие, $\alpha_{ij} = U_{ie}^* U_{je}$,

$$V = G_F (+\mathcal{L} - Q/M_W^2) \quad (2.2)$$

V е ефективния потенциал, индуциран от взаимодействията със средата, $V_s = 0$. Първият член в V е в резултат на взаимодействието на ν_e с частиците в ранната Вселена посредством заредени и неутрални токове в дървесно приближение. Той е пропорционален на фермионната асиметрия на плазмата $L = \sum_f L_f$.

$$L_f \sim \frac{N_f - N_{\bar{f}}}{N_\gamma} T^3 \sim \frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_\gamma} T^3 = \beta T^3.$$

Разгледали сме различни случаи: когато тя е равна на барионната (3 глава) и когато е на порядъци по-голяма (4 глава). Вторият, нелокален член в V е резултат от W/Z пропагаторен ефект: $Q \sim E_\nu T^4$. В ранната Вселена и двата члена са съществени. Поради различната им температурна зависимост се наблюдава интересна зависимост между тях в процеса на разширение.

Аналогични уравнения са в сила за матрицата на плътността на антинейтрино, в този случай: L_f се заменя с $-L_f$. Нейтрино и антинейтрино ансамблите еволюират различно поради CP-асиметрията на средата. Установихме, че осцилациите могат да влияят върху асиметрията и обратно, тя на свой ред влияе върху осцилациите.

Проведохме систематичен числен анализ на еволюцията на нейтрино за целия диапазон на осцилационни параметри на модела, за различни нива на запълване на стерилното нейтрино и при различни значения на лептонната асиметрия за периода след 2 MeV до 0.3 MeV. Този период е съществен за нуклон-протонните взаимодействия с участието на нейтрино. Космологичното производство на хелий се определя от отношението на неутроните към протоните в епохата на излизане на тези взаимодействия от ТДР.

Изследвахме космологичните ефекти на нейтринните осцилации в целия диапазон на осцилационните параметри на модела в резонансния и нерезонансния случай на нейтринни осцилации и при различна степен на запълване на ν_s . Известно е, че наличието на допълнително леко нейтрино довежда до ускоряване на скоростта на разширение на Вселената (Шварцман, 1969). Осцилации между активно и стерилно нейтрино водят до възбуждане на допълнително стерилно състояние (Долгов, 1981) и до редукция на плътността на активното нейтрино (Барбиери, Долгов, 1990, 1991). Проведохме систематично изследване на космологичния ефект на нейтринните осцилации. Освен изследване на динамичния ефект на допълнително ν_s и на интегралния ефект на редукция на плътността на електронното нейтрино, *установихме два нови ефекта на неравновесните нейтринни осцилации благодарение на точния кинетичен подход*: дисторсия на нейтринния спек-

тър и изменение на асиметрията в неутринния сектор в резонансни осцилации (подтискане, усилване).

Установихме, че кинетичните ефекти в пред-нуклеосинтезната епоха оказват доминиращо влияние за широк диапазон от осцилационни параметри на КН с неутринни осцилации. Дисторсията на спектъра на неутрино $n_\nu(E)$ може силно да се отличава от равновесния Ферми-Дирак спектър през периода $(2 - 0.3 \text{ MeV})$, даже при значителна степен на запълване δN_s на ν_s .

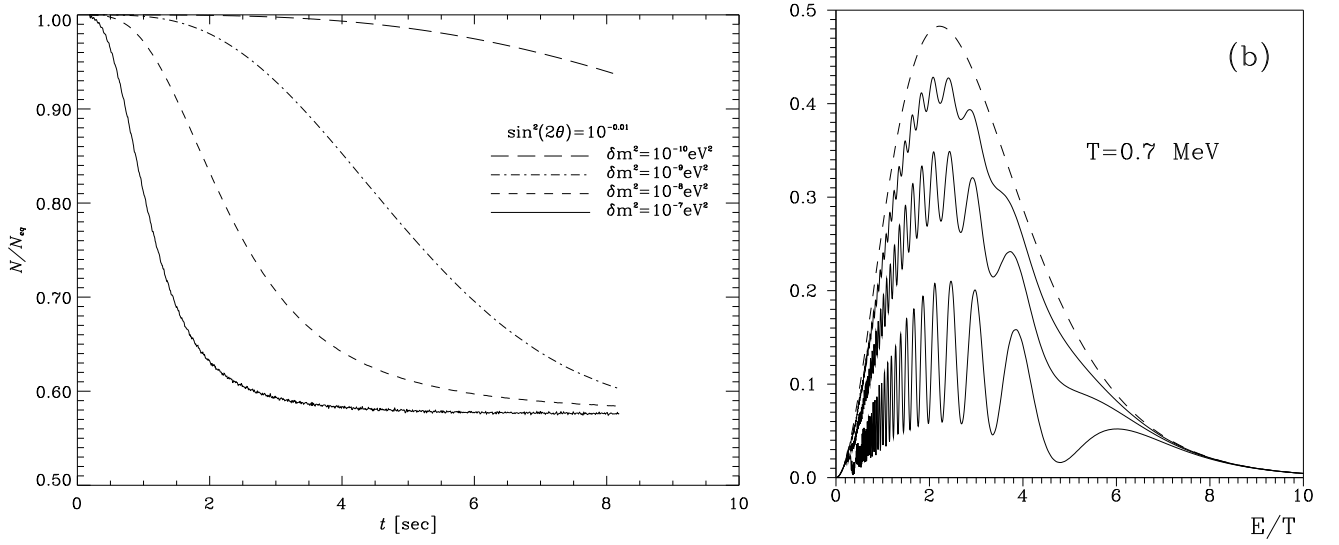
Възможността за лептогенезис чрез Михеев-Смирнов-Волфенщейн резонансни неутринни осцилации беше разглеждана в литературата и се считаше, че осцилациите водят единствено до подтискане на лептонната асиметрия. Благодарение на точния кинетичен подход в нашите изследвания и прецизния числен анализ (Кирилова, Чижов 1996, 1997, 2000) *показахме, че неравновесните неутринни осцилации предоставят възможност за значителен ръст на асиметрията* – до 5 порядъка. Възможност за ръст на асиметрията в резонансни неутринни осцилации бе установена аналитично от Фут, Томсън и Волкас, 1996, и Ши, 1996 при масови разлики $\delta m^2 > 10^{-5} \text{ eV}^2$.

В последващи систематични изследвания (Кирилова, 2011, 2012) *определихме зоната на нестабилност*, в която е възможен ръст на L . Добър аналитичен фит на тази зона е:

$$|\delta m^2| \sin^4 2\theta \leq 10^{-9.5} \text{ eV}^2. \quad (2.3)$$

В този модел на неутринни осцилации намаляването на активните неутрино е за сметка на увеличаването на инертните неутрино в резултат на осцилациите (Фиг. 2.1). Кривите илюстрират еволюцията на плътността на електронното неутрино в дискутирания модел на неравновесни неутринни осцилации при почти максимално смесване, $\sin^2(2\vartheta) = 0.98$, и при различни масови разлики δm^2 : 10^{-7} , 10^{-8} , 10^{-9} and 10^{-10} в eV^2 .

Изследвахме влиянието на началното ниво на запълване на инертното неутрино върху динамичния и кинетичен ефект на неутринните осцилации (Кирилова 2004, 2007). Установихме, че кинетичните



Фигура 2.1: Вляво: Еволюция на плътността на ν_e в случай на неравновесни неутринни осцилации, при $\sin^2(2\theta) = 0.98$ и различни масови разлики δm^2 , а именно: 10^{-7} , 10^{-8} , 10^{-9} и 10^{-10} eV^2 (фиг. 2.3 от дисертацията). Вдясно: Дисторсията на спектъра на ν_e в резултат на осцилациите при 0.7 MeV , $\delta m^2 = 10^{-7} \text{ eV}^2$ и $\sin^2 2\theta = 0.1$ и $\delta N_s = 0$ (долна крива), $\delta N_s = 0.5$ и $\delta N_s = 0.8$ (горна крива) (фиг. 2.7 от дисертацията).

осцилационни ефекти силно се влияят от ненулевата начална популация на ν_s : дисторсията намалява с увеличаване на δN_s . Дисторсията на спектъра на ν_e е илюстрирана на Фиг. 2.1 (вдясно).

В следващите глави са получени космологични ограничения върху неутринните характеристики на базата на астрофизични и космологични данни, в частност: ограничения върху броя на неутринните типове, неутринните масови разлики, неутринното смесване, лептонната асиметрия в неутринния сектор, възможните характеристики на стерилното неутрино, отклоненията от ТДР и др. Космологичните ограничения, получени в дисертацията, основно се базират на изследване на влиянието на новата физика върху КН (глава 3).

2.2 Производство на He-4 в космологичен нуклеосинтез с неутринни осцилации и космологични ограничения върху неутринните осцилации

В уводната част на трета глава е представен кратък обзор на стандартния КН. **Трета глава** е посветена на наши оригинални резултати, касаещи ефектите на неравновесни $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ неутринни осцилации върху КН и най-вече върху производството на хелий-4.

В КН с неравновесни неутринни осцилации спекралното разпределение и плътността на електронното неутрино може силно да се отличава от това в СКМ, което води до изменения в кинетиката на нуклоните преди и по време на КН и влияе върху синтеза на леките елементи.

He-4 е най-точно измерен сред леките елементи, най-точно пресметнат и най-обилно произведен елемент в КН и има проста еволюция след КН епоха. Освен това той е чувствителен към релативистката плътност, към нуклонната кинетика и към неутринните свойства. *Провели сме систематичен числен анализ на производството на He-4 в КН с неравновесни неутринни осцилации* в целия диапазон на осцилационните параметри на модела (за няколко стотин комбинации на стойностите им), както и при различни степени на запълване на стерилното неутрино $Y_p(\delta m^2, \vartheta, N_s)$ (виж фиг. 2.2) (Кирилова, Чижов, 1997, 1998, 2000; Кирилова, Панайотова, 2006; Кирилова 2011, 2012). Изследвани са нерезонансен и резонансен случай на неутринни осцилации. Изследвани са динамичните и кинетични ефекти на електрон-стерилни неутринни осцилации върху КН (Кирилова, 2004, 2007). За описание на еволюцията на нуклоните в пред нуклеосинтезната епоха са използвани точни кинетични уравнения, които са решени съвместно с уравненията описващи еволюцията на осцилиращото неутрино.

Определихме ефекта на осцилациите върху КН при празно начално състояние на стерилното неутрино и при лептонна асиметрия L равна на барионната. Установихме че дисторсията на неутринния спектър в резултат на $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ неутринните осцилации, която влияе

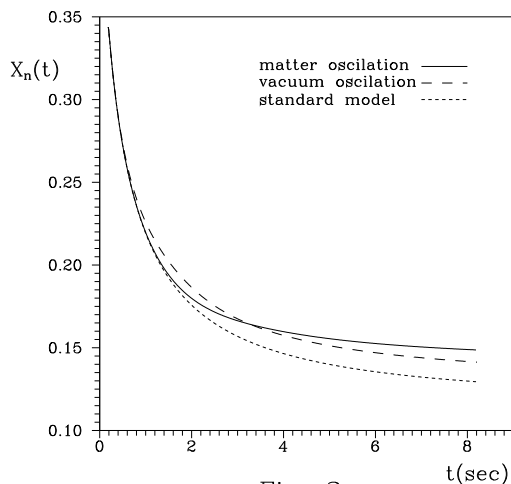
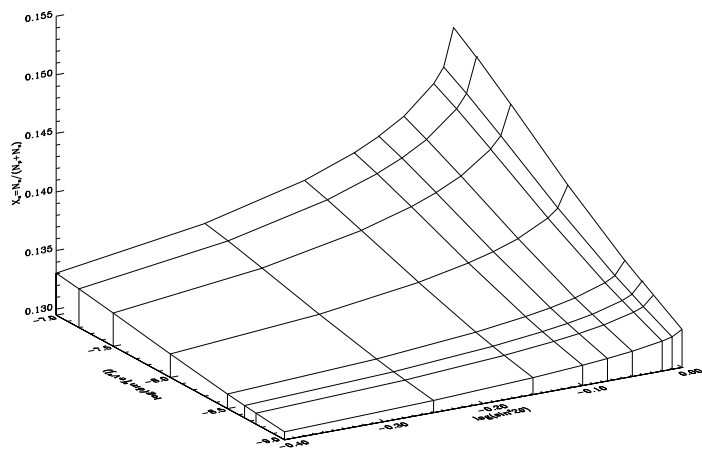


Fig. 2



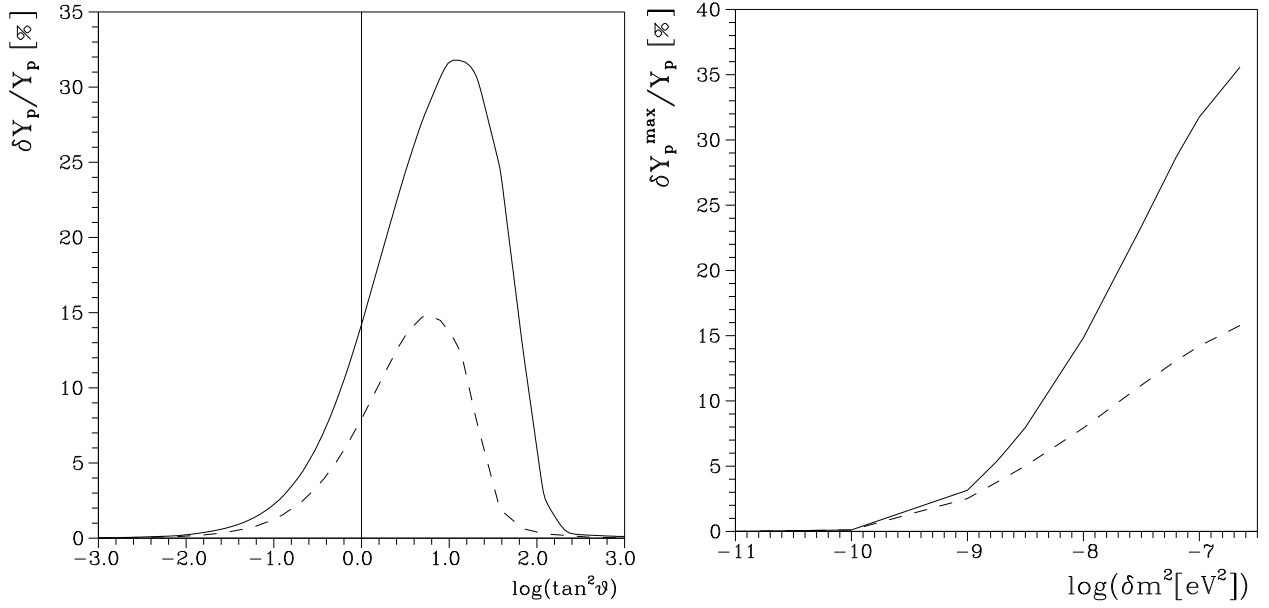
Фигура 2.2: Вляво: Еволюция на отношението на неутронната плътност към нуклонната $X_n(t) = N_n(t)/(N_p + N_n)$ за КН с неравновесни неутринни осцилации при $\delta m^2 = -10^{-8} \text{ eV}^2$, $\vartheta = \pi/8$. За сравнение е показана кривата съответстваща на стандартния КН (фиг. 3.7 от дисертацията). Вдясно: ^4He произведен в КН с нерезонансни неутринни осцилации като функция от осцилационните параметри $Y_p(\delta m^2, \vartheta)$ (фиг. 3.4 от дисертацията).

непосредствено на кинетиката на неутрон-протонните взаимодействия в пред нуклеосинтезната епоха, е водещ ефект за препроизводството на ^4He в КН с $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ неутринни осцилации, ефективни след излизане на ν_e от ТДР (Кирилова, Чижов, 1998, 2000).

Изследвахме зависимостта на максимално производство на ^4He от смесването и от масовите разлики. Установихме, че максималното препроизводство в случая на резонансни неутринни осцилации е до 32%, а в нерезонансния - 14% (виж фиг. 2.3) (Кирилова, 2003). Доказахме, че кинетичния ефект на осцилациите може няколкократно да превъзхожда динамичния ефект на едно допълнително стерилно неутрино, което води до 5% препроизводство.

Получихме космологични ограничения върху осцилационните параметри на неутрино на базата на сравнителен анализ на наблюдателните данни относно първично произведен хелий и теоретичните предсказания на КН с осцилации (виж фиг. 2.4).

Те са с 4 порядъка по строги от съществуващите експериментални ограничения и на порядък по-строги и по-точни от наличните космологични ограничения върху електрон-стерилните неутринни осцилации. Тези ограничения изключват от КН съображения, години преди



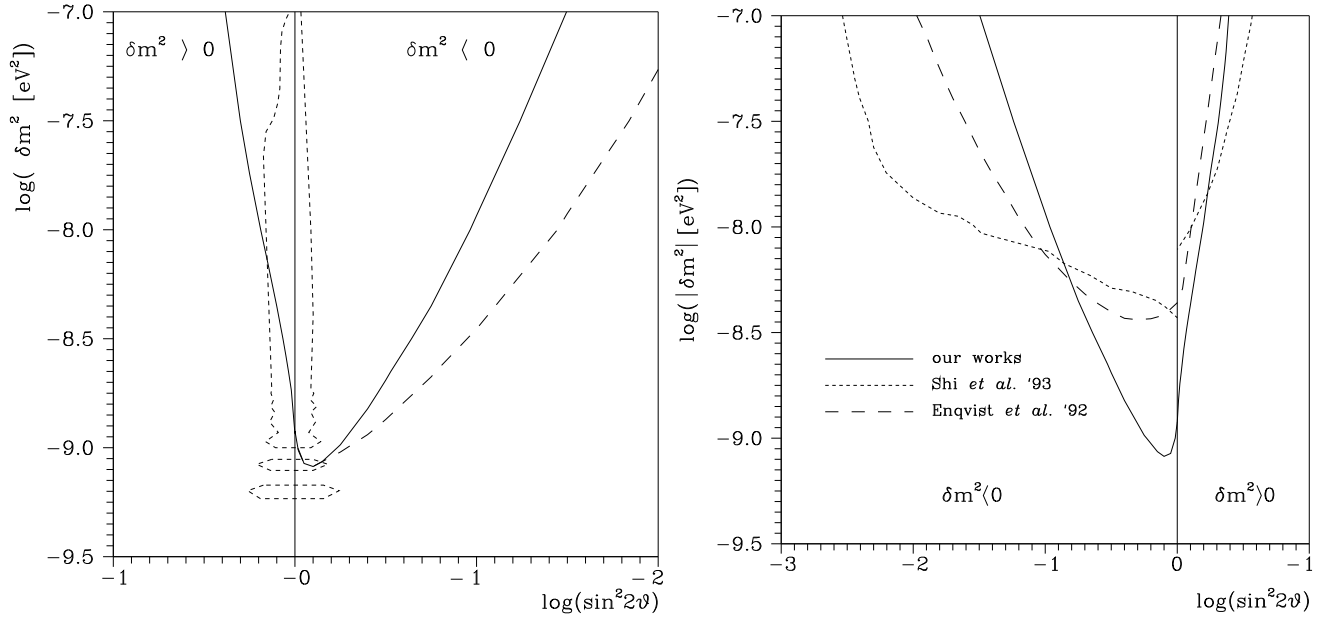
Фигура 2.3: Вляво: Максимално препроизводство на He-4 в случай на електрон-стерилни неутринни осцилации в зависимост от смесването, при $\delta m^2 = 10^{-7} \text{ eV}^2$ (горна крива) и $\delta m^2 = 10^{-8} \text{ eV}^2$ (фиг. 3.14 от дисертацията). Вдясно: Максимално препроизводство на He-4 в зависимост от масовите разлики, при максимално смесване (за нерезонансния случай) и при резонансен ъгъл на смесване за дадената маса (в резонансния случай) (фиг. 3.13 от дисертацията).

експерименталните резултати, две от възможните осцилаторни решения на проблема със слънчевото неутрино: решението с максимални ъгли (LMA) (изключено за пръв път от Барбиери, Долгов, 1990) и решението с ниски масови разлики (LOW) (Кирилова, Чижов, 1997, 2001).

Обсъдени са възможности за изменение на ограниченията.

Изследвахме ролята на частично запълнено стерилно състояние и получихме обобщени ограничения върху неутринните осцилации в този случай. Известно е, че наличието на допълнителни частици ускорява скоростта на разширение, което води до препроизводство на He и ограничения върху типовете леки частици по време на КН (Шварцман, 1969). Освен този динамичен ефект, δN_s , ние сме изследвали влиянието на допълнително незапълнено стерилно състояние върху кинетичния ефект δN_k на неутринните осцилации върху КН. Емпирично е установена следната корелация между ефектите (Кирилова, 2004).

$$\delta N_k = \delta N_k^0 - \delta N_s \times \delta N_k^0$$



Фигура 2.4: Вляво: Космологични ограничения върху електрон-стерилните неутринни осцилации за $Y_p = 0.24$. Пунктирната крива показва ограниченията в случай на пренебрегване на ръста на асиметрията в резонансния случай. Затвореният пункт представя LOW решението на проблема на неутрино от Слънцето (фиг. 4.13 от дисертацията). Вдясно: Комбинирани изохелиеви контури $Y_p = 0.24$ за резонансни неутринни осцилации, $\delta m^2 < 0$, и нерезонансни осцилации, $\delta m^2 > 0$, пресметнати в нашите изследвания и в предишни публикации от други автори върху производството на He-4 (фиг.3.12 от дисертацията).

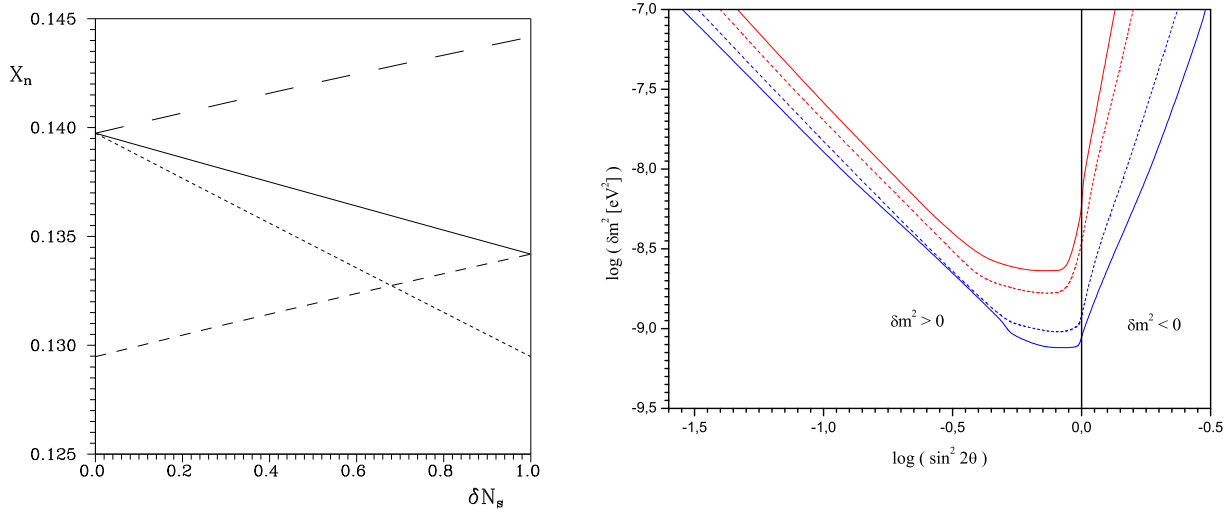
където δN_k^0 е кинетичния ефект в случай на $\delta N_s = 0$,

$$\delta Y_p \sim 0.013 \times (\delta N_s + \delta N_k)$$

Качествено нов резултат е изводът от числения анализ, че наличието на допълнително незапълнено стерилно неутрино може да подтиска кинетичния ефект на осцилациите върху He, което от своя страна води до редукция на хелиевото препроизводство в резултат на осцилациите и съответно до отслабване на космологичните ограничения. Изследвана е взаимовръзката между ефектите. Пълният ефект върху производството на хелий зависи от това кой ефект доминира.

На фиг. 2.5 (вляво) са показани различните ефекти от допълнителното частично запълнено състояние на стерилното неутрино върху He-4: динамичен ефект и кинетичен ефект.

Получени са изохелиеви контури съответстващи на различно хелиево препроизводство, на различни степени на запълване на стерилното състояние. На фиг. 2.5 (вдясно) са представени ограниченията



Фигура 2.5: Вляво: Зависимостта на относителната плътност на неутрони към нуклони при замръзване на взаимодействията, като функция на популацията на стерилното неутрино при $\delta m = \pm 10^{-8} \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta = 1$. Пунктирната низходяща крива представя кинетичния ефект, пунктирната възходяща долна крива - динамичния ефект, пунктирната горна крива - пълния ефект в случай на адитивност на ефектите (фигура 3.16 от дисертацията). Вдясно: космологични ограничения върху осцилационните параметри съответстващи на 3% He препроизводство и $\delta N_s = 0$ (долна пунктирна крива), $\delta N_s = 0.5$ (най-долен контур). Космологични ограничения върху осцилационните параметри съответстващи на 5% He препроизводство и $\delta N_s = 0$ (горна пунктирна крива), $\delta N_s = 0.5$ (най-горен контур) (фигура 3.19 от дисертацията).

върху осцилационните параметри съответстващи на 3% и 5% препроизводство на He-4 при различни степени на запълване на ν_s .

Зависимостта на кинетичния ефект от началната популация на ν_s води до изменение на космологичните ограничения върху неутринните осцилации в резултат на наличие на частично запълнено ν_s . Установихме че, при $\delta N_k^0 < 1$ наличието на ν_s води до усиляването им, а при $\delta N_k^0 > 1$ до редукция на хелиевото препроизводство и до отслабване на КН ограниченията върху осцилационните параметри (фиг. 2.5). Вторият случай представлява качествено нов резултат.

Определихме ефекта на осцилациите върху КН и при различни стойности на началната лептонна асиметрия L (глава 4).

2.3 Генерация на лептонна асиметрия и нейните космологични ефекти и ограничения. Взаимовръзка между лептонната асиметрия и неутринните осцилации

Четвърта глава на дисертацията е посветена на изследване на вза-

имовръзката между неутринните осцилации и асиметрията в неутринния сектор и ефектите ѝ върху КН. В уводната част е направен кратък обзор на известните космологични ефекти на $|L| > 0.01$, която е изследвана систематично: динамичния и ефект, причинен от увеличението на плътността на енергията при наличие на ненулева L , кинетичния ефект в случай на L в сектора на електронното неутрино, поради участието на неутрино в неутрон-протонните преходи в пред нуклеосинтезната епоха, определящи производството на хелий. Тези ефекти са значителни при $|L| > 0.01$. Въз основа на тях са получени КН ограничения върху лептонната асиметрия на Вселената: $|L| < 0.1 - 0.2$ (Долгов и др., 2002; Мангано и др., 2013).

В дисертацията се изследва космологичната роля на малки $|L| \ll 0.01$, реликтови или генерирани в резонансни неутринни осцилации, чиито динамичен и директен кинетичен ефект върху КН са пренебрежими. Изследвахме взаимодействието между неутринните осцилации и лептонната асиметрия.

Изследвахме числено еволюцията на неутрино при наличие на неутринни осцилации и различни стойности на начална лептонна асиметрия $10^{-8} < |L| \ll 0.01$. Следната система кинетични уравнения за неутринната матрица на плътността и неутронната плътност в импулсно пространство беше използвана за описание на еволюцията на осцилиращите неутрино, лептонната асиметрия и неутроните:

$$\begin{aligned} \partial \rho(t) / \partial t &= H p_\nu (\partial \rho(t) / \partial p_\nu) + \\ &\quad + i [\mathcal{H}_o, \rho(t)] + i \sqrt{2} G_F (\mathcal{L} - Q/M_W^2) N_\gamma [\alpha, \rho(t)] + O(G_F^2), \\ \partial \bar{\rho}(t) / \partial t &= H p_\nu (\partial \bar{\rho}(t) / \partial p_\nu) + \\ &\quad + i [\mathcal{H}_o, \bar{\rho}(t)] + i \sqrt{2} G_F (-\mathcal{L} - Q/M_W^2) N_\gamma [\alpha, \bar{\rho}(t)] + O(G_F^2), \end{aligned}$$

$$L_{\nu_e} = \int d^3 p (\rho_{LL} - \bar{\rho}_{LL}) / N_\gamma$$

$$\begin{aligned} \partial n_n / \partial t &= H p_n (\partial n_n / \partial p_n) + \\ &\quad + \int d\Omega (e^-, p, \nu) |\mathcal{A}(e^- p \rightarrow \nu n)|^2 [n_e - n_p (1 - \rho_{LL}) - n_n \rho_{LL} (1 - n_e)] \end{aligned}$$

$$- \int d\Omega(e^+, p, \tilde{\nu}) |\mathcal{A}(e^+ n \rightarrow p \tilde{\nu})|^2 [n_{e^+} n_n (1 - \bar{\rho}_{LL}) - n_p \bar{\rho}_{LL} (1 - n_{e^+})],$$

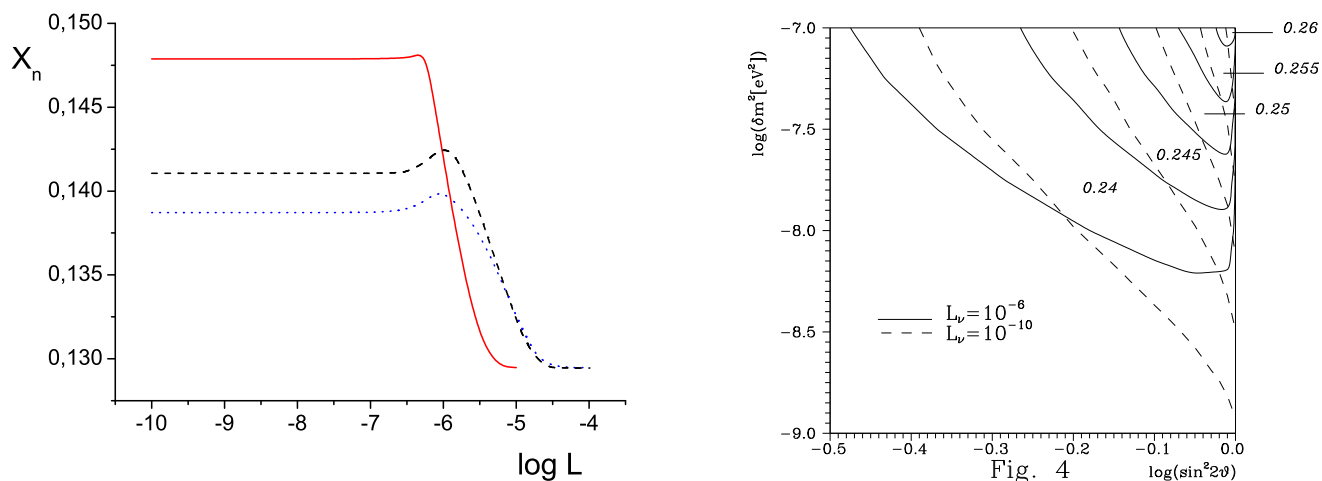
$$\mathcal{L} \sim 2L_{\nu_e} + L_{\nu_\mu} + L_{\nu_\tau}, \quad L_{\mu,\tau} \sim (N_{\mu,\tau} - N_{\bar{\mu},\bar{\tau}})/N_\gamma.$$

Първите две уравнения описват еволюцията на неутринния и на антинеутринния ансамбли. Наличието на L води до свързани интегро-диференциални уравнения за матрицата на плътността на неутрино-то и на антинеутрино-то. Т.е. при наличие на $10^{-8} < |L|$ неутрино-то и антинеутрино-то еволюират различно, численият анализ е по-сложен от случая $L \sim \beta$.

Открихме нов вид резонанс. Поради свързаните чрез L неутрино и антинеутрино ансамбли се наблюдава следното поведение: Когато резонансно условие е изпълнено за неутрино-то с дадена енергия (антинеутрино-то) се реализира резонансен преход, който преминава като вълна през неутринния ансамбъл с различни енергии. Поради силната връзка след кратко времево отместване антинеутринния ансамбъл също преминава през резонансен преход. Способността и на двата ансамбла да изпитват резонанс при дадена стойност на L е качествено нов резултат, разкрит благодарение на прецизния анализ използващ точно описание на еволюцията на неутринния спектър.

Установихме значително влияние на малки лептонни асиметрии посредством индиректен кинетичен ефект върху КН: Показахме, че в случай на неравновесни $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ осцилации, L в диапазона: $10^{-8} < |L| \ll 0.01$ влияе върху осцилиращото ν_e , а именно: променя еволюцията му, неговата плътност, енергийния му спектър, изменя характера на осцилациите (подтиска ги или ги усилва). Така, посредством влиянието си върху ν_e , въздейства на неутрон-протонната кинетика в пред нуклеосинтезната епоха (Кирилова, Чижов, 1998, 2000; Кирилова, 2011, 2012).

Установихме, че *активно-стерилните неутринни осцилации изменят асиметрията на средата*, могат да подтискат или усилват L . Както бе дискутирано във 2 глава, възможността за лептогенезис в резонансни активно-стерилни неутринни осцилации с малки масови разлики е качествено нов ефект открит в (Кирилова и Чижов, 1996,



Фигура 2.6: Вляво: Замразеното отношение на неутрони към нуклони като функция на началната лептонна асиметрия за $\delta m^2 = 10^{-7} \text{ eV}^2$. Плътната крива съответства на максимално смесване и $\sin^2 2\theta = 10^{-0.05}$, пунктирната на $\sin^2 2\theta = 10^{-0.1}$ (фигура 4.5 от дисертацията). Вдясно: Илюстрирано е изменението на КН ограничения върху осцилационните параметри в зависимост от стойността на лептонната асиметрия. Пунктирните контури са за $L = 10^{-10}$, плътните за $L = 10^{-6}$ (фигура 4.10 от дисертацията).

2000) и систематически изследван в по-късни публикации (Кирилова, 2011, 2012). Показано бе, че асиметрия се генерирана в резонансните осцилации при малки ъгли на смесване и при тези ъгли тя оказва обратен ефект - подтиска неутринните осцилации.

Проведохме числен анализ на производството на хелий-4 в КН с неравновесни нерезонансни неутринни осцилации и реликтова асиметрия за целия диапазон на стойности на осцилационните параметри на модела $Y_p(L, \delta m^2, \vartheta)$ и при $10^{-8} < |L| \ll 0.01$. Установихме, че реликтовата асиметрия влияе върху осцилациите, подтиска ги (Фут и Волкас, 1995) или ги усилва (Кирилова, Чижов, 1998; Кирилова 2011, 2012). Възможността на малки L да усилят осцилациите бе открита за пръв път в резултат на прецизния кинетичен подход. Тя се дължи на спектрален резонанс, нов вид резонанс, открит благодарение на точното описание на дисторсията на спектъра на осцилиращите неутрино. На фиг. 2.6 е илюстрирана зависимостта на първично произведения хелий от величината на L .

Установихме как L влияе върху производството на He чрез неутринните осцилации. Получени бяха следните емпирични зави-

симости описващи взаимовръзката между малки L и осцилациите: $10^{-7} \leq L \leq 0.1(\delta m^2/\text{eV}^2)^{2/3}$ може да усилва неутринните осцилации, т.е. да увеличава препроизводството на хелий, $L > 0.1(\delta m^2/\text{eV}^2)^{2/3}$ подтиска осцилациите и редуцира препроизводството на хелий, а $L > (\delta m^2/\text{eV}^2)^{2/3}$ спира осцилациите. Ограниченията върху осцилационните параметри в последния случай се заменят от следните: $\delta m^2/\text{eV}^2 < L^{3/2}$.

Изследвахме зависимостта на КН ограничения върху осцилационните параметри от наличието на малки L . Установихме, че в зависимост от величината и L може да усилва или отслабва КН ограничения. В частност, бе разгледан случая КН с неутринни осцилации и $L = 10^{-6}$ и бяха получени КН ограничения върху осцилационните параметри. Установихме, че L усилва КН ограничения при малки ъгли на смесване и ги отслабва при големи ъгли на смесване (виж фиг. 2.6), в сравнение със стандартния случай на $L \sim 10^{-10}$.

Установихме, че КН с електрон-стерилни неутринни осцилации е много чувствителен лептомер: той "мери" $10^{-8} \leq L \ll 0.01$. Направеният анализ на взаимовръзките между неутринните осцилации КН и лептонната асиметрия позволява от измерените стойности на електрон-стерилните осцилационни параметри в бъдещи експерименти да бъде поставено *КН ограничение върху асиметрията*. Например, използвайки индикациите за електрон-стерилни неутринни осцилации, дискутирани от Холанда и Смирнов: $\delta m^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2$, следва следното строго КН ограничение:

$$L < 5 \times 10^{-4}.$$

Предложено е решение на проблема с тъмната радиация базиращо се на възможността на L да подтиска осцилациите и да отслабва КН ограничения (Кирилова, 2013): Достатъчно големи L подтискат осцилациите и пречат на термализацията на стерилното неутрино чрез осцилации, т.е. отслабват КН ограничения върху стерилното неутрино.

2.4 Процеси съществени за генерация на барионната асиметрия на Вселената

В пета глава, след кратък преглед на съвременните наблюдателни данни относно барионната асиметрия на Вселената и обзор на най-известните бариогенезисни модели, проведохме систематичен числен анализ на бариогенезисен модел с КСП, базиран на Афлек и Дайн бариогенезисния механизъм. Този модел предлага ефективна генерация на барионния излишък, той е съвместим с инфлацията и избягва недостатъчния разогрев, тъй като се реализира при по-ниски енергии, (Долгов, Кирилова, 1991).

Описание на модела: Моделът предполага наличие на комплексно скаларно поле $\langle \phi \rangle$ на инфлационния стадий, носещо барионен заряд. Потенциалът на полето $U(\phi)$ съдържа B -нарушаващи (BV) членове, имащи значение при големи стойности на полето. Кондензат на барионния заряд, съдържащ се в $\langle \phi \rangle$ се генерира на инфлационния стадий, $B \sim H_I^3$. Величината на този заряд намалява поради разширението на Вселената и поради процесите на раждане на частици.

На стадия на B -съхранение B се трансформира в кварковия сектор при разпада на $\langle \phi \rangle$ и определя барионната асиметрия на Вселената, след евентуална редукция от процеси увеличаващи ентропията.

Проведохме числен анализ на еволюцията на барионния заряд $B(t)$ в КСП от инфлационния стадий до епохата на B -съхранение t_b при следния избор на $U(\phi)$:

$$U(\phi) = m^2 \phi^2 + \frac{\lambda_1}{2} |\phi|^4 + \frac{\lambda_2}{4} (\phi^4 + \phi^{*4}) + \frac{\lambda_3}{4} |\phi|^2 (\phi^2 + \phi^{*2}). \quad (2.4)$$

Уравнението на движение описващо еволюцията на скаларното поле в разширяващата се Вселена е:

$$\ddot{\phi} - a^{-2} \partial_i^2 \phi + 3H\dot{\phi} + \frac{1}{4} \Gamma \dot{\phi} + U'_\phi = 0, \quad (2.5)$$

$a(t)$ тук е мащабния фактор, а $H = \dot{a}/a$ е скоростта на разширение. Бързите осцилации на ϕ след инфлационния стаии водят до раж-

дане на частици и редукция на амплитудата на ϕ и на барионния заряд във ϕ (фиг. 2.7, вляво). Предложен е метод за отчитане в явен вид на раждането на частици от скаларното поле взаимодействащо с фермионите, $g\varphi f_1 f_2$, $g^2/4\pi = \alpha$ посредством члена $\Gamma\dot{\phi}$, (въведен в работата Чижов, Кирилова, 1996).

Проследихме числено еволюцията на полето и на барионния заряд $B(t)$ за около сто комбинации от различни стойности на параметрите на модела. Изследваният диапазон на параметрите на модела бе: $\lambda = 10^{-2} - 5 \times 10^{-2}$, $\alpha = 10^{-3} - 5 \times 10^{-2}$, $H = 10^7 - 10^{16}$ GeV, $m = 100 - 1000$ GeV.

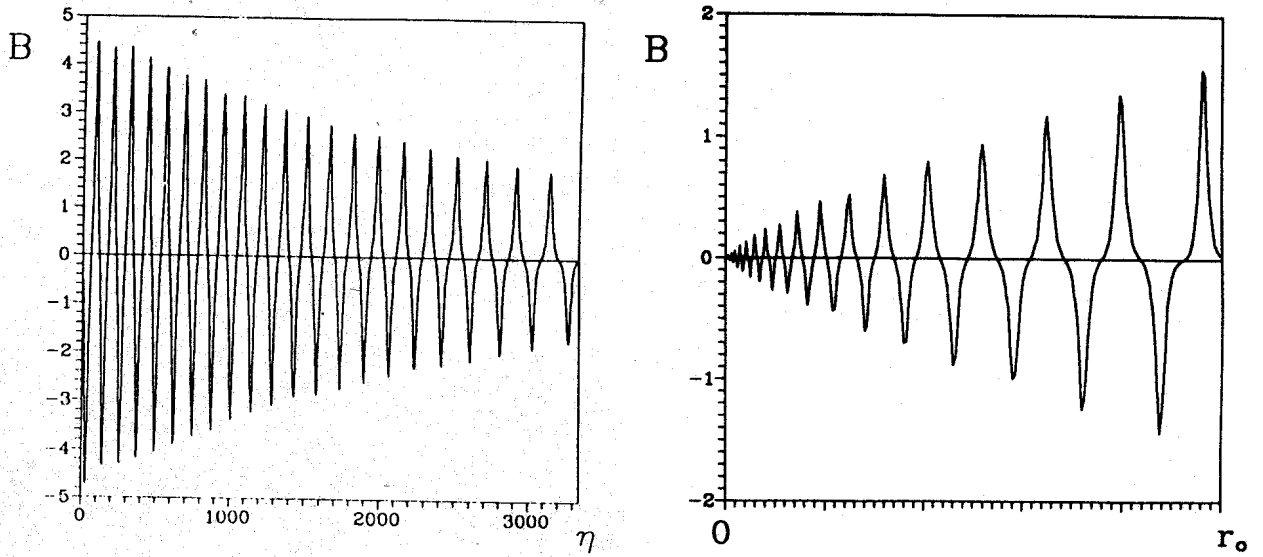
Проведено бе аналитично отчитане на процесите на раждане на частици, използвайки скоростта на раждане на частици, определена в теорията на пертурбациите (използувахме аналитичните формули изведени от (Долгов, Кирилова, 1990)) и числено отчитане (Кирилова, Чижов, 2000; Кирилова, Панайотова, 2007). Установено бе, че раждането на частици играе важна роля в бариогенезисния модел с КСП и силно редуцира B (фиг. 2.7, вляво). Доказана бе необходимостта от точен числен анализ на процесите на раждане на частици, тъй като резултатът получен числено на порядъци се отличава от аналитичните оценки.

Изследвахме зависимостта на еволюцията на КСП и на барионния заряд, съдържащ се в него, от параметрите на модела $B(m)$, $B(H)$, $B(\alpha)$, $B(\lambda_i)$. Предложихме оценка на температурата на повторно загряване.

Установихме че КСП бариогенезисния модел може да обясни наблюдаваната локално барионна асиметрия за естествен избор на стойностите на параметрите на модела.

2.5 Процеси съществени за генерация на барионни нехомогенности във Вселената

В глава шеста ние изследвахме механизъм за генериране на пертурбации на барионната плътност на инфлационния стадий в рамките на нехомогенен КСП бариогенезис. Проведен бе числен анализ



Фигура 2.7: Вляво: Еволюция на барионния заряд $B(\eta)$ съдържащ се в кондензата $\langle \phi \rangle$ при $\lambda_1 = 5 \times 10^{-2}$, $\lambda_2 = \lambda_3 = \alpha = 10^{-3}$, $H_I/m = 10^7$, $\phi_o = H_I \lambda^{-1/4}$, и $\dot{\phi}_o = 0$. Вдясно: Пространственото разпределение на барионния заряд в момента на бариогенезис за $\lambda_1 = 5 \times 10^{-2}$, $\lambda_2 = \lambda_3 = \alpha = 10^{-3}$, $H_I/m = 10^7$.

на еволюцията на пространственото разпределение на барионния заряд $B(t, x)$ за различни начални стойности (при естественото предположение за плавно начално пространствено разпределение) $\phi(r, t_0)$, $B(r, t_0)$ и различен набор от стойности на параметрите на модела (Кирилова, Чижов, 1996, 2000).

В случай на нехармоничен потенциал честотата зависи от амплитудата (Долгов, Чижов, 1992), за разгледания в глава 5 потенциал $U(\phi)$, тя е $\omega \sim \lambda^{1/2} \phi_i(r)$. В резултат на това началното плавно разпределение преминава в квазипериодично $B(t_b, r)$ (Кирилова, Чижов, 2000; Кирилова, 2003). След време районът с начално плавно изменение на плътност се разделя на области с по-голяма и по-малка плътност, т.е. генерират се барионни пертурбации (фиг. 2.7, вдясно). В резултат на инфлацията микроскопичното разпределение на става астрономически значимо.

Показано бе, че нехомогенният КСП бариогенезис предоставя механизъм за разделяне на значителни количества вещество от анти-вещество. В този модел барионната плътност плавно намалява към границите на областите, т.е. няма значима анихилация на ранния етап при разпадането на кондензата в частици и античастици. На

по-късен етап областите са разделени с войдове, няма директен контакт и са избегнати ограниченията от космични лъчи и гама-лъчи.

Определен е характеристичния размер между областите в зависимост от параметрите на модела $l_b(\lambda_i, \phi(r, t_i), t_b, r_0)$. В резултат на проведения числен анализ бе установено, че при естествен подбор на параметрите на модела разстоянието между областите с вещество и антивещество може да е в диапазона: 1 – 100 Мрс. Разгледани бяха различни видове СР-нарушение и различни възможности за структури от антивещество, от размери на звезден куп до свръхкупуве от галактики (Кирилова, 1998, 2003). Изследвани бяха наблюдателните ограничения върху размерите и разстоянията до тези обекти от космични и гама-лъчи, от КН и от КМФ.

Нехомогенният бариогенезисен модел бе изследван и с цел обяснение на квазпериодичното разпределение на барионното вещество в едромащабната структура на Вселената. Бе установено, че този механизъм за генериране на пертурбации на барионната плътност може да обясни съществуването на големия характеристичен мащаб $120 - 130h^{-1}$ Мрс в разпределението на видимото вещество.

2.6 Процеси с кирални тензорни частици в ранната Вселена

Допълнителните кирални тензорни частици, които разглеждаме, принадлежат на фундаменталното представяне на $SU(2)$ групата на СМ, което съдържа известните фермиони и Хигсовия дублет (Чижов, 1994). **В седма глава** на дисертацията сме разгледали космологичното място и роля на тези ТЧ. В уводната част е представен кратък обзор на съвременния статус на ТЧ в разширения СМ, сигнатура и експерименталните ограничения, както и възможността за тяхното детектиране в експеримента АТЛАС.

Оригиналната част на седма глава съдържа изследването на следните космологични ефекти и ограничения на ТЧ (Кирилова, Чижов и Велчев, 1995; Чижов, Кирилова, 2009): динамичен ефект, взаимодействия с компонентите на високотемпературната плазма, ограничения от КН върху взаимодействията им.

Изследвахме динамичния ефект от наличието на ТЧ. Допълнителните ТЧ и допълнителните Хигсови дублети, предсказани в разширената теория на СМ с ТЧ, дават принос в тензора на енергията-импулса в дясната част на уравненията на Айнщайн в ОТО, увеличавайки плътността на енергията на Вселената и променяйки найната динамика. Увеличението на степените на свобода в разглеждания модел е следното:

$$g_* = g_{\text{SM}} + g_{\text{ChT}} = 106.75 + 28 = 134.75.$$

То води до увеличена скорост на разширение на Вселената в периода на ефективност на ТЧ $H \sim g_*^{1/2} T^2$.

Разгледахме характеристикните взаимодействия на ТЧ в ранната Вселена. ТЧ участвуват в различни взаимодействия: раждане, разсейване, аниhilация и разпад. Взаимодействията в разширяващата се Вселена са ефективни когато техните скорости са по-големи от скоростта на разширение: $\Gamma_{\text{int}} \sim \sigma n > H(T)$. Ние сме пресметнали характеристикните взаимодействия на ТЧ в ранната Вселена и сме определили техния период на ефективност, съответните космологични времена и температури.

В резултат на направения анализ установихме, че периодът на ефективност на ТЧ е от момента на тяхното създаване t_c до момента на техния разпад t_d :

$$t_c = 1.9 \times 10^{-40} \text{ s} < t < t_d = 6.5 \times 10^{-27} \text{ s}$$

съответстващ на енергийния интервал $10^{16} - 10^9 \text{ GeV}$.

От проведеното изследване може да се направи извода, че ТЧ се разпадат достатъчно рано за да не нарушат КН и КМФ. От друга страна те присъствуват при енергии типични за инфлацията, рихтинга и барио и лептогенезиса, т.е. бъдещи изследвания на космологичната роля на ТЧ в тези процеси представляват интерес.

Получихме космологични ограничения върху константата на взаимодействие на ТЧ. От КН ограничение върху допълнителни леки частици и съхранението на ентропията, сме получили ограниче-

ние върху температурата на излизане от ТДР на стерилното неутрино $T < 130 \text{ MeV}$ и върху константата на взаимодействие на ТЧ: $G_T < 10^{-2} G_F$. Изводът е направен при предположение, че ТЧ взаимодействуват с 3 типа леки десни неутрина. В случай на по-малък брой на леки десни неутрино ограничението е по-слабо.

Осма глава на дисертацията разглежда основните резултати, заключения и приноси представени за защита. Приведен е списък с публикацииите, върху които се базира дисертацията.

3 Основни резултати и приноси

Неравновесни неутринни осцилации

1. Предложен е прецизен кинетичен подход за описание на еволюцията на неравновесно осцилиращо неутрино в ранната Вселена. Изведени са кинетични уравнения за матрицата на плътността на неутриното, отчитащи едновременно разширението на Вселената, неутринните осцилации и взаимодействията на неутриното. Уравненията осигуряват точно описание на еволюцията на неутринната плътност, енергийния спектър на неутриното и асиметрията в неутринния сектор.

2. Построен и изследван е модел на неравновесни електрон-стерилни неутринни осцилации, ефективни след излизане на активното неутрино от равновесие в ранната Вселена. Численият анализ на ефектите на неутринните осцилации е проведен за целия диапазон на параметрите на модела и за различни степени на начално запълване на стерилното неутрино $0 \leq \delta N_s < 1$.

3. Благодарение на точния кинетичен подход открихме качествено нови ефекти на неравновесните неутринни осцилации. Установихме, че неравновесните активно-стерилни осцилации водят до значителна дисторсия на спектъра на електронното неутрино и антинеутрино и редукция на техните плътности. Дисторсията намалява с увеличаването на δN_s .

4. Установихме, че резонансните Михеев-Смирнов-Волфенстейн неравновесни неутринни осцилации между електронно и стерилно неутрино водят до ръст на лептонната асиметрия в неутринния сектор.

а) В разглеждания модел на неутринни осцилации (малки масови разлики и големи ъгли на смесване) максималният ръст на L е 4-5 порядъка.

б) Определихме зоната на нестабилност, в която е възможен значителен ръст на L .

КН с неравновесни неутринни осцилации

5. Построихме и изследвахме посредством числен анализ модел на КН с неравновесни $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ неутринни осцилации, ефективни след излизане на електронното неутрино от равновесие.

а) Предложихме точен кинетичен подход за едновременното описание на еволюцията на осцилиращото неутрино и еволюцията на нуклоните.

б) Проведохме числен анализ на производството на ${}^4\text{He}$ в космологичен нуклеосинтез при наличие на електрон-стерилни неутринни осцилации за стотици комбинации на осцилационните параметри в резонансния и нерезонансен случай.

в) Установено е, че пълният ефект на неутринните осцилации за целия диапазон на параметрите на модела е препроизводство на ${}^4\text{He}$.

г) Изследвахме ефектите на неутринните осцилации върху КН. Установено бе, че кинетичният ефект на дисторсията на спектъра на електронното неутрино, причинена от $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ осцилациите има водеща роля в препроизводството на ${}^4\text{He}$; Ръстът на асиметрията в резонансните неутринни осцилации е съществен при малки ъгли на смесване и при тях се наблюдава редуцирано препроизводство на ${}^4\text{He}$ в сравнение със случая без отчитане на асиметрията.

6. Проведено бе количествено изследване на зависимостта на максималното препроизводство на ${}^4\text{He}$. Установено бе, че в резултат на неутринни осцилации максималното препроизводство на ${}^4\text{He}$ може да достигне 32% в резонансния случай и 14% в нерезонансния. Т.е. препроизводството е няколкократно по-голямо от причиненото от динамичния ефект на едно допълнително леко стерилно неутрино, дискутирано в литературата преди нас.

7. Определили сме изохелиевите контури в равнината $\delta m^2 - \theta$, съответстващи на 3%, 5% и 7% ${}^4\text{He}$ неопределеност. Наблюдателните данни относно първично произведения ${}^4\text{He}$ и D бяха използвани за получаване на космологично разрешения диапазон за осцилационните параметри. Получихме КН ограничения върху неравновесните

$\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ осцилации, които са:

- на порядък по-строги от получените в предишни анализи;
- с 4 порядъка по-строги от експериментално получените. Изключихме почти напълно LOW електрон-стерилното решение на проблема със слънчевото неутрино, освен LMA стерилните решения на проблемите със слънчевото и атмосферното неутрино, изключени в предишни изследвания.

8. Изследвахме различни възможности за изменение на КН ограничения върху осцилационните параметри: Пресметнахме препроизводството на хелий-4 при различни нива на запълване на стерилното неутрино в нерезонансния и резонансния случай на електрон-стерилни неутринни осцилации. Поради взаимодействието между динамичния и кинетичен ефект на допълнителното стерилно състояние е възможно увеличение или намаление на ${}^4\text{He}$ препроизводство, КН ограничения може да бъдат усилены или отслабени, съответно. Присъствието на лептонна асиметрия, в зависимост от величината и, може да води до усиляване, подтискане или даже спиране на неутринните осцилации.

Ненулево начално ниво на запълване на стерилното неутрино и КН с неутринни осцилации

9. Проведохме числен анализ на КН с неравновесни $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ осцилации в случай на начално ненулево ниво на запълване на ν_s , $\delta N_s \neq 0$.

а) ${}^4\text{He}$ производство бе пресметнато за δN_s , $0 \leq \delta N_s < 1$, и за целия диапазон на осцилационните параметри на модела.

б) Бе проведен точен числен анализ на ефектите на δN_s върху замръзването на нуклоните и производството на ${}^4\text{He}$ в КН с неутринни осцилации. За пръв път бе установено, че δN_s има различни ефекти върху ${}^4\text{He}$, а именно:

- увеличение на скоростта на разширение, водещо до Y_p препроизводство;
- подтискане на кинетичния ефект на осцилациите, водещо до намаляване на препроизводството на Y_p .

10. Бяха получени изохелиеви контури, съответстващи на 3%, 5%, 7% и 9% препроизводство на Y_p . Бяха пресметнати по-обща КН ограничения върху $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ осцилационните параметри, съответстващи на 3% и 5% Y_p неточност и за различна популация на стерилното състояние, $0 \leq \delta N_s < 1$. Установено бе, че КН ограничения могат да бъдат отслабени или усилены от ненулевото δN_s . Възможността за подтискане на кинетичния ефект и отслабване на КН ограничения в резултат на ненулево δN_s се обсъжда за пръв път.

Малки лептонни асиметрии и КН с неутринни осцилации

11. Проведохме систематичен числен анализ на взаимовръзката между $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$ неутринните осцилации и малка лептонна асиметрия $|L| \ll 0.01$. Установихме значителни изменения на неутринната плътност и спектър за широк диапазон на L .

12. Установихме, че L може да подтиска, усилва или възпрепятства неутринните осцилации. Установени са съответните диапазони от стойности на L . Способността на лептонната асиметрия да усилва осцилациите е качествено нов ефект. Намерени са емпирични зависимости между осцилационните параметри и L в различните случаи, при които е възможно увеличаване или намаляване на производството на хелий.

13. Установихме, че възможността на малки L да усилва неутринните осцилации е резултат от нов тип резонанс в неутринните осцилации - спектрален резонанс.

14. Индиректният кинетичен ефект на малки лептонни асиметрии $|L| \ll 0.01$ върху КН бе изследван числено в модел на КН с $\nu_e \leftrightarrow \nu_s$. Изследвани са както реликтова асиметрия, така и генерирана в неутринни осцилации.

а) Установихме, че реликтова L може да увеличи или намали препроизводството на Y_p или да го редуцира до това на стандартния КН.

б) Установихме, че асиметрията генерирана при малки ъгли на смесване в резонансните неутринни осцилации редуцира препроизводството на Y_p при тези ъгли.

15. Установихме възможното изменение на КН ограничения върху осцилационните параметри на неутриното поради малки реликтови лептонни асиметрии $|L| > 10^{-8}$: КН ограниченията може да бъдат усилены, отслабени или снети.

а) Способността на L да усилюва осцилациите и да усилюва КН ограничения е открита за пръв път.

б) Достатъчно големи L могат да снемат КН ограничения върху осцилационните параметри. В този случай са изведени нови ограничения от L .

в) Установено е, че $L \sim 10^{-6}$ отслабва КН ограничения при големи ъгли на смесване и ги усилюва при малки ъгли.

16. Изведени са космологични ограничения върху лептонната асиметрия в случаите на КН с неутринни осцилации и на КН с неутринни осцилации и реликтова лептонна асиметрия. От индикациите за активно-стерилни неутринни осцилации с $\delta m^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2$ е получено ограничението: $|L| < 5 \times 10^{-4}$.

17. Способността на лептонната асиметрия да подтиска неутринните осцилации е използвана за решение на проблема с тъмната радиация.

Бариогенезисен модел с КСП и процеси на раждане на частици

18. Проведен е анализ на бариогенезисен модел с КСП, базиращ се на Афлек-Дайн бариогенезисния сценарий. Еволюцията на скаларното поле ϕ , носещо барионния заряд, е проследена в след инфлационния период аналитично и числено, използвайки точни кинетични уравнения и отчитайки процесите на раждане на частици от скаларното поле.

а) Числено сме определили произведената барионна асиметрия за естествен диапазон на параметрите на модела и за над сто различни комбинации на параметрите.

б) Изследвана е зависимостта на произведения барионен излишък от параметрите на модела, а именно определили сме зависимостта на B от m , H_I , α и λ_i при различни стойности на другите параметри.

Установихме, че освен основополагащи за развитието на съвременния космологичен модел касаещо инфлационната теория, теорията на повторно загряване на Вселената след инфлационния стадий, процесите на раждане на частици играят важна роля за моделите на бариогенезис с КСП.

19. Показахме, че в разглеждания модел раждането на частици влияе значително върху еволюцията на скаларното поле и генерирания барионен излишък. Предложихме явно отчитане на процесите на раждане на частици в уравнението на движение на полето. Установихме, че раждането на частици води до значително намаляване на амплитудата на полето, което рефлектира в силно редуциране на барионния заряд, съдържащ се в конденсата на полето.

а) Аналитично и числено изследвахме процесите на раждане на частици от променливо скаларно поле. Определихме честотата на изменение на полето и скоростта на раждане на частици от точния числен анализ на еволюцията на полето. Установихме, че числените пресмятания може съществено да се отличават от аналитичните оценки.

б) Показахме, че численото отчитане на скоростта на раждане на частици е задължително, тъй като стойността на барионната асиметрия получена при аналитичните оценки може да се отличава на порядъци от случая, когато раждането на частици е отчетено с числен анализ.

Нехомогенен бариогенезисен модел с КСП, структури и антивещество във Вселената

20. Изследвахме механизъм за производство на пертурбации на барионната плътност на инфлационния стадий. Изучихме еволюцията на разпределението на плътността на барионния заряд в рамките на нехомогенни бариогенезисни модели с КСП.

В резултат на числен анализ установихме, че нехомогенният бариогенезисен модел, позволяващ генерация на пространствено варираща барионна плътност, предлага решение на проблема за квазипери-

одичното разпределение на видимото вещество във Вселената и за наличието на мащаб от порядъка на $130h^{-1}$ Мрс.

21. Изследвахме механизъм за разделяне на области от вещество от такива с антивещество в рамките на нехомогенен бариогенезисен модел с КСП.

а) Численият анализ показва, че моделът предсказва големи области от антивещество, разделени от тези с вещество от празнини.

б) Моделът предлага елегантен механизъм за достатъчно разделяне на областите с бариони от тези с антибариони, необходимо за предотвратяване на контакта между вещество и антивещество с голяма плътност.

в) В зависимост от параметрите на модела и вида СР нарушение, различни структури с антивещество, разделени от тези с вещество на разстояния 1 Мрс – 100 Мрс са възможни. Наблюдателните данни от космични, гама-лъчи, КМФ и КН са използвани за получаване на ограничения върху възможното разстояние между структурите и техните размери.

Процеси с кирални ТЧ в ранната Вселена

22. Изучихме космологичното място и роля на кирални тензорни частици. Показахме, че наличието на такива частици е разрешено от космологична гледна точка.

а) Динамичният космологичен ефект в резултат на увеличението на плътността поради въвеждането на ТЧ бе оценен.

б) Определени бяха характерните взаимодействия на ТЧ в ранната Вселена и съответния период на тяхното космологично влияние.

в) Бе получено КН ограничение върху силата на взаимодействията на ТЧ.

4 Публикации по темата на дисертацията

Дисертацията е базирана на следните 51 научни публикации, от които 31 са статии в реферирани журналы, 20 са доклади в пълен текст, представени на международни научни конференции и симпозиуми.

А. Реферирани международни и национални журналы

1. Kirilova D., Neutrinos from the Early Universe and physics beyond standard models, Open Physics, v.13, 2015, pp.22-33, IF:0.905
2. Kirilova D., Lepton Asymmetry and neutrino oscillations interplay, Hyperfine Interactions, v.215, Issue 1, 2013, pp.111-118 (DOI) 10.1007/s10751-013-0790-0, IF:0.21
3. Kirilova D., J.-M. Frere, Neutrino in the Early Universe, New Astronomy Reviews, v.56, issue 6, 2013, pp.169-180, IF:1.321
4. Kirilova D., BBN with Late Electron-Sterile Neutrino Oscillations - The Finest Leptometer, JCAP 1206, 2012, 007, IF:6.036
5. Kirilova D., On Lepton Asymmetry and BBN, Progress in Particle and Nuclear Physics 66, 2011, pp.260-265, IF:3.860
6. Kirilova D., Chizhov M., BBN Constraints on Neutrino and CNB, Progress in Particle and Nuclear Physics, v.64, Issue 2, 2010, pp. 375-378, IF:4.020
7. Chizhov M., Kirilova D., Speeding the Friedman expansion by chiral tensor particles, Int.J.Mod.Phys.A 24, 2009, pp.1643-1647, ISSN: 0217-751X, IF:0.98
8. Kirilova D., More General BBN Constraints on Neutrino Oscillations Parameters - Relaxed or Strengthened, IJMPD 16, 7, 2007, pp.1-14, IF:1.87
9. Kirilova D., Panayotova M., Relaxed Big Bang Nucleosynthesis constraints on neutrino oscillation parameters, JCAP 12, 2006, 014, IF: 6.7
10. Kirilova D., Neutrino oscillations and the early Universe, Central Eur. J. Phys.2, 2004, pp.467-491, IF: 0.381
11. Kirilova D., Neutrino Spectrum Distortion Due to Oscillations and its BBN Effect, Int.J.Mod.Phys. D13, 2004, pp.831-842, IF:1.5
12. Kirilova D., Baryogenesis Model predicting antimatter in the Universe, Nucl. Phys. Proc. Suppl. v.122, 2003, pp.404-408, IF:0.99
13. Kirilova D., Overproduction of helium-4 in the presence of neutrino oscillations, Astropart. Phys. v.19, 2003, pp.409-417, IF:4.022
14. Kirilova D., Chizhov M., Neutrino oscillations in the early Universe, Nucl.Phys. B Proc. Suppl. 100, 2001, pp.360-362, IF:0.947
15. Kirilova D., Chizhov M., Cosmological nucleosynthesis and active-sterile neutrino oscillations with small mass differences: The resonant case, Nucl.Phys.B 591, 2000, pp.457-468, IF:4.225
16. Kirilova D., Chizhov M., Non-GUT Baryogenesis and Large Scale Structure of the Universe, MNRAS 314, pp.256-262, 2000, IF:4.685

17. Kirilova D., Chizhov M., Neutrino Degeneracy Effect on Neutrino Oscillations and Primordial Helium Yield, Nucl.Phys.B 534, pp.447-463, 1998, IF:3.322
18. Kirilova D., Chizhov M., Cosmological Nucleosynthesis and Active-Sterile Neutrino Oscillations with Small Mass Differences: The Nonresonant Case, Phys.Rev.D 58, pp.073004-073014, 1998, IF:3.558
19. Kirilova D., Chizhov M., Nonequilibrium Neutrino Oscillations and Primordial Production of He-4, Phys.Lett.B 393, 1997, pp.375-382, IF:3.581
20. Kirilova D., Chizhov M., Velchev T., Antisymmetric Tensor Particles in the Early Universe, Compt. Rend. Bul. Acad. Sci., t.48, No 6, 1995, pp.25-28, IF: 0.198
21. Kirilova D., Baryon Density in alternative BBN Models, A&Astroph Tr., v.22, pp. 425-428, 2003
22. Kirilova D., Primordial He-4 Overproduction due to neutrino oscillations, A&Astroph Tr, v.22, pp.421-424, 2003
23. Kirilova D., Baryogenesis Model Suggesting Antigalaxies, A&Astroph Tr, 1998, v.15, pp. 211-217
24. Kirilova D., Chizhov M., Is There A Cosmological Evidence For Additional Particles, A&Astroph. Tr., 1998, v.15, pp.205-210
25. Chizhov M., Kirilova D., Generation of 128 Mpc Periodicity of the Universe in the Scalar Field Condensate Baryogenesis Scenario, A&Astroph. Tr., 1996, v.10, pp.69-75
26. Dolgov A., Kirilova D., Production of particles by a variable scalar field, Jad. Phys. 51, p.273, 1990; Sov. J. Nucl. Phys. 51, p.172-177, 1990, IF: 0.2
27. Panayotova M., Kirilova D., The dependence of the baryon asymmetry generation on the couplings of the baryon charge carrying scalar field, BAJ 20, 2014, pp.45-50
28. Kirilova D., From Mateev's Baryogenesis Ideas to Contemporary Cosmological Constraints, Bulg. J. Phys. 38, 2011, pp.242-251
29. Kirilova D., Big Bang Nucleosynthesis: The best baryometer, speedometer and leptometer, BAJ 15, 2011, pp.3-17
30. Kirilova D., Neutrino in the Universe, BAJ 10, 2008, pp.1-9
31. Kirilova D., Panayotova M., The Role of Particle Creation Processes in the Scalar Condensate Baryogenesis model, Heron Press, Bulg.J.Phys. 34, s2, 2007, pp.330-335

В. Доклади на международни конференции и симпозиуми

32. Kirilova D., Neutrinos and Physics Beyond Electroweak and Cosmological Standard Models, invited review lecture in Theme Collection "Cosmology and Particle Physics Beyond Standard Models, Ten Years of the SEENET-MTP Network, edited by Luis Blvarez-Gaumй, Goran S. Djordjevic, Dejan Stojkovic, CERN-Proceedings-2014-001 ISBN 978-92-9083-398-7 pp.131-138, <https://cds.cern.ch/>
33. Kirilova D., Panayotova M., Inhomogeneous baryogenesis model and antimatter in the Universe, Proc. 8th Serbian-Bulgarian Astronomical Conference (VIII SBGAC),

Leskovac, Serbia 8-12 May, Publ. Astron. Soc. "Rudjer Boskovic "N11, 2013, pp.259-264

34. Kirilova D., On leptogenesis and lepton asymmetry effects in the early Universe, Proc. of the 45th Rencontres de Moriond, La Thuile, 2010, 2010 Cosmology, La Thuile, Aosta Valley, Italy, eds. E. Auge, J. Dumarchez, J. Tran Than Van, The GIOI Publishers, pp.363-365, SJR=0.1

35. Kirilova D., Neutrinos in Cosmology, invited review lecture Proceedings of the 6th SREAC Meeting "Astrophysics and Astrodynamics in Balkan Countries in the International Year of Astronomy Belgrade, Serbia, 28-30 Sept. 2009, www.aob.bg.ac.yu/sreac, Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade, 90, 2010 Eds: Istvan Vince and Tanyu Bonev, ISSN 0373-3742, pp.45-60

36. Kirilova D., Chizhov M., A Possible TeV Window on the Universe, Proceedings of XXIth Rencontres de Blois "Windows on the Universe 21-26 June, 2009, in the Chateau de Blois, Loire Valley, France eds. L. Celnikier, J. Dumarchez and J. Tran Thanh Van, The Gioi Publishers, Vietnam GPXB 4 - 1000/XB-QLXB Series: Moriond Astrophysics Meeting, pp.627-628

37. Kirilova D., Non-equilibrium Neutrino In The Early Universe Plasma, AIP Conf. Proc., 1121, School and Workshop on Space Plasma Physics, 31.08-07.09, Sozopol, Bulgaria, ed.I. Zhelyazkov, 2009, pp.83-89, ISSN 0094-243X and <http://sp.phys.uni-sofia.bg/Sozopol08> ISSN 1551-7616, SJR=0.148

38. Kirilova D., Generalized cosmological Constraints on Neutrino Oscillations - Relaxed or Strengthened, Proc. 6th Intern. Symposium on Frontiers of Fundamental and Computational Physics, 26-29 September, Udine, Italy, Frontiers of Fundamental Physics, eds. B. Sidharth, F. Honsell, A. De Angelis, Kluwer Academic Publishers, 2006, pp. 55-59; DOI 10.1007/1-4020-4339-2-9

39. Kirilova D., Cosmological Constraints on Neutrino Oscillations, Proc. of Manev International Conference on Historical and Contemporary Aspects of Astronomy, Theoretical and Gravitational Physics, 20-22 May, 2004, Sofia, Prof. Manev's Legacy in Contemporary Astronomy, Theoretical and Gravitational Physics, eds. V. Gerdjikov, M. Tsvetkov, Haron Press Ltd., Sofia, 2005, pp.228-238

40. Kirilova D., Panayotova M., Cosmological constraints on neutrino oscillations for initially non-zero sterile state, presented at 4th Serbian-Bulgarian Astronomical Conference (IV SBGAC), 21-24 April 2004, Belgrade, Serbia, eds. M. Dimitrievich, V. Golev, L. Popovic and M. Tsvetkov, Publ. Astron. Soc. "Rudjer Boskovic "5, 2005, pp.201-207

41. Kirilova D., Neutrino oscillations and the early Universe, invited review lecture, Proceedings of the XIII National Conference of Yugoslav Astronomers, 17-20 Oct. 2002, Belgrade, Publ.Astron.Obs.Belgrade, No.75, 2003, pp.167-178

42. Kirilova D., Baryonic Content in Nonstandard BBN Models, to be published in Proc. of Int. Conference "Where's the Matter? Tracing Dark and Bright Matter with the New Generation of Large Scale Surveys", June 2001, Marseille, Treyer&Tresse Eds,

Frontier Group, pp.273-275

43. Klecker B. et al. (20), Galactic Abundances: Report of Working Group 3, in proc. Joint SOHO-ACE Workshop "Solar and Galactic Composition Bern, 6-9 March, 2001: AIP CP 598 "Solar and Galactic Composition"ed. Wimmer-Schweingruber R., American Institute of Physics, Melville, New York, 2001, pp.207-220

44. Busemann H., Altwegg K., Binns R., Chiappini C., Glockler G., P. Hoppe, D. Kirilova, R. Leske, O.Manuel, R. Mewaldt, E. Mobius, S. Suess, R. Wieler, R. Wiens, R. Wimmer and N., Yanasak, Applications of Abundance Data and Requirements for Cosmochemical Modeling, in AIP Conf.Proc. 2001 of Joint SOHO-ACE Workshop "Solar and Galactic Composition Bern, 6-9 March, 2001: CP598 "Solar and Galactic Composition"ed. Wimmer-Schweingruber R., American Institute of Physics 2001, pp. 357-379 and www.phim.unibe.ch/internal/nf01web/node76.html

45. Kirilova D., Primordially Produced Helium-4 in the presence of neutrino oscillations Proc. Joint SOHO-ACE Workshop "Solar and Galactic Composition Bern, 6-9 March, 2001, pp.405-410

46. Kirilova D., Chizhov M., Big Bang Nucleosynthesis and Cosmological Constraints on Neutrino Oscillations Parameters, invited review talk, Proceedings of the International Workshop "Hot Points in Astrophysics"JINR, Dubna, 22-26 August, 2000, pp.56-66

47. Kirilova D., Chizhov M., Lepton Asymmetry Effect on Neutrino Oscillations and Primordial Helium-4, in the International Conference CAPP 2000, Verbier, Switzerland, 17-28 July, 2000, Switzerland, published in "Cosmology and Particle Physics AIP Conference Proceedings, Melville, New York, 2001, v.555, pp.433-436; eds. J. Garcia-Bellido, R. Durrer, and M. Shaposhnikov

48. Kirilova D., Chizhov M., Large Scale Structure and Baryogenesis, in Galaxy Clusters and the High-Redshift universe observed in X-rays, eds. J. Tran Thanh Van and Doris M. Neumann, Proc. of XXXVIth Rencontres de Moriond, XXI Moriond Astrophysics Meeting, Les Arcs, Savoie, France, March 10-17, 2001

49. Kirilova D., Chizhov M., Nonequilibrium Neutrino Oscillations and Primordial Helium Production, invited talk at the 17 International Conference on Neutrino Physics, NEUTRINO 96, Helsinki, 1996; Proc. of NEUTRINO 96, Helsinki, 1996, pp.478-484

50. Kirilova D., Big Bang Nucleosynthesis with Neutrino Oscillations, Fourth Advanced Research Workshop "GRAVITY, ASTROPHYSICS AND STRINGS AT THE BLACK SEA, June 10-16, 2008, Bulgaria <http://tcpa.uni-sofia.bg/conf/GAS/gas2007.html>

51. Kirilova D., Dolgov A., The Effect of Some Nonequilibrium Processes on the Primordial Nucleosynthesis, Proc. IUPAP Conference "Primordial Nucleosynthesis and the Evolution of Early Universe Tokyo, Japan, 4-8 Sept. 1990, ed. K. Sato, J.Audouze, Kluwer Acad. Publishers, 1991, p.55-59.

Благодарности

Благодарна съм на Я. Б. Зельдович и М. Д. Матеев за подкрепата на моето обучение и работа в областта на космологията и космофизиката. Благодаря на Александър Дмитриевич Долгов за научното ръководство, съвети и грижа. Благодаря на съавторите си А. Долгов, М. Чижов и Жан-Мари Фрер за честта да споделя с тях удоволствието от съвместната ни работата в областта на космофизиката и космологията. Благодаря на докторантката си М. Панайотова и на магистрите си Т. Велчев и Т. Вълчанов за търпението и старанието да следват идеите ми. Благодаря на А. Смирнов, Д. Шама, И. Ткачов, В. Кадишевски, А. Старобински, В. Семикоз, И. Новиков, М. Шапошников, М. Сажин, Г. Сенянович, М. Титгат, Ж. Лезгург, А. Захаров, О. Атанацкович, Р. Даеми, В. Генчев, Л. Литов, Р. Ценов, П. Кръстев, Д. Съселов, Е. Христова, Д. Младенов, С. Петков за подкрепата и за ползотворните дискусии. Благодаря на колегите си от ИА с НАО и от ФзФ СУ, София, и на приятелите си за интереса към моите изследвания. Доволна съм, че много от студентите ми от курсовете по Космология и Астрофизика във Физическия факултет на СУ, София и в Американския университет в България, Благоевград, споделиха интереса ми към Космологията и Астрофизиката и ентусиазма да откриваш и да научаваш.

Задължена съм на моите родители за неоценимата помощ за децата ми по време на визитърските ми позиции. Задължена съм и на семейството ми за разбирането и помощта.

Моите изследвания по темата имаха следната финансова подкрепа: 1996/1997 Датски правителствен грант за работата в Нилс Бор Института в Копенхаген, грантове за научни изследвания и визитърски позиции в Международния институт по теоретична физика в Триест, визитърски позиции и грант за кореспондиращ сътрудник в ЦЕРН, грант Мария Кюри и визитърски позиции в Свободния университет в Брюксел и др.