



РЕЦЕНЗИЯ

относно дисертационен труд за получаване на научна степен
„Доктор на науките“

в професионално направление 4. Природни науки, математика и информатика
01.04.02 Физически науки „Астрофизика и звездна астрономия“

Автор на дисертационния труд:

доцент д-р Даниела Петрова Кирилова

Институт по Астрономия с Национална Астрономическа Обсерватория

Тема на дисертационния труд:

Неравновесни процеси в ранната Вселена и техните космологични ефекти и ограничения

Автор на рецензията:

доцент д-р Димитър Магдалинов Младенов

Физически факултет на Софийския Университет „Св. Климент Охридски“

1 Актуалност на темата на дисертацията

Съгласно Стандартния космологичен модел нашата Вселена се е родила в резултат на така наречения Голям взрив, започвайки своето съществуване от начална сингулярност на пространство-времето. Това означава, че Вселената е еволюирала от състояние с колосално високи плътност на енергията и температура в резултат на взривно разширение, като при това разширение Вселената е трябвало да изстива. То-ва означава, че в най-ранните моменти от еволюцията на Вселената симетрията между електромагнитното, слабото и силното взаимодействия се възстановява напълно. Така с построяването на теориите на Великото обединение се появява възможност за изучаване на все по-ранните моменти след раждането на Вселената. Този факт показва изключителната важност на единните теории на елементарните частици при изучаване на ранната Вселена.

От друга страна космологията се оказва неоценим източник на информация за съвременната теория на елементарните частици, тъй като единствената за сега известна ни лаборатория, в която са могли да съществуват и взаимодействват помежду си частици с енергии близки до планковите, това е нашата Вселена, намираща се в най-ранните моменти от своята история. Това показва, че в настоящия момент само космологията и астрофизиката, опериращи с енергии недостъпни за ускорителите, които могат да бъдат построени дори в доста отдалечено бъдеще, възможно ще позволят да бъдат проверени разнообразните предсказания на съвременната теоретична физика и на физиката на елементарните частици, такива като бариогенезис, лептогенезис, инфляция, съществуване и образуване на екзотически частици и на топологични обекти от типа на монополи, аксиони, космически струни и брани, обяснение

на състава и структурата на тъмната материя, а също така и изучаване на физика извън стандартните модели във физиката на частиците и космологията..

През последните няколко десетилетия се наблюдава все по-силно сближаване и взаимодействие на космологията и астрофизиката от една страна и физиката на елементарните частици и квантовата теория на полето от друга. Това тясно взаимодействие между толкова различни преди дялове на физиката превърна изучаването на строежа и еволюцията на Вселената, разглеждана включително и в най-ранните си етапи от своята еволюция, в една съвременна интердисциплинарна област.

Дисертационният труд на Даниела Кирилова представлява именно такова интердисциплинарно изследване, което включва разнообразни аспекти на най-съвременните и актуални тематики на области като космология, астрофизика, физика на елементарните частици и квантовата теория на полето.

В дисертацията се изследват интересни за съвременния етап от развитието на астрофизиката, космологията и физиката на елементарните частици задачи, които излизат както извън рамките на Стандартния модел във физиката на частиците, така и извън Стандартния космологичен модел. Тези изследвания включват изучаване на неравновесни физически процеси, противачи в ранната Вселена, и получаване на възможни космологични ограничения, следващи от съвременните експериментални данни, върху физическите параметри на процесите. Изучени са процеси, свързани с електрон-стерилен неутринни осцилации, процеси с участие на лептонна асиметрия, процеси свързани с бариогенезиса и с генерацията на барионни пертурбации, както и космологичния нуклеосинтез.

В дадената дисертация са изучени, от гледна точка на космологията, така наречените кирални тензорни частици, които след въвеждането им през 1993 година от Михаил Чижов, са обект на все по-голям научен интерес. Мотивацията за тяхното включване във физиката на Стандартния модел е това, че те осъществяват пълнота на взаимодействието на Юкава, а също така се явяват и реализация на всички непривидими представления на групата на Лоренц. Киралните тензорни частици се задават с антисиметрични тензори от втори ранг и, следователно, описват две частици със спин 1. Сега, след като киралните тензорни частици са вече въведени, те изглеждат относително естествено разширение на Стандартния модел, което не противоречи на известните досега експериментални данни. В момента търсенето на киралните тензорни частици на Големия адроненен колайдер (LHC) в ЦЕРН е в научната програма на експеримента АТЛАС. Евентуалното детектиране на тези частици ще допринесе изключително много за разбирането и развитието на физиката извън Стандартния модел и ще бъде една съществена стъпка в нашето познание за Природата. Предстои да видим.

Всичко казано досега показва, че тематиката на дисертацията на Даниела Кирилова, която изследва най-съвременни въпроси, свързани с изучаване на структурата и еволюцията на Вселената, е изключително интересна и актуална.

2 Структура на дисертацията

Дисертационният труд с название “*Nonequilibrium Processes in the Early Universe and Their Cosmological Effects and Constraints*“ е написан на английски език и се състои от 275 страници, разпределени в 8 глави, първата от които е уводна, а последната заключение. В дисертацията са включени 45 фигури, като е представен и техният списък, има също така и списък със съкращенията, използвани в текста, както и благодарности. Накрая дисертацията завършва със списък на публикациите, на които се основава дисертационният труд и със списък на литературата, който съдържа 244 заглавия, подредени по азбучен ред на фамилиите на авторите.

В **Първа глава**, която както беше отбелязано по-горе представлява увод в тематиката на дисертацията, е отбелязана актуалността на проблемите, свързани с изучаването на неравновесната термодинамика на процеси, протичащи в ранната Вселена и описващи състоянието на веществото в нея, както и съответните им космологични ефекти. Също така ясно и точно са описани целите, задачите и съдържанието на дисертацията.

В следващите глави са представени оригиналните резултати, включени в дисертацията.

Втора глава е посветена на изучаването на неравновесни процеси, свързани с неутринни осцилации, като подробно са изучени осцилациите между електронно и нетермализирано стерилно неутрино и е направено изследване на това каква роля играят тези процеси в космологията.

В **Трета глава** неравновесните неутринни осцилации се изучават от гледна точка на влиянието им върху космологичния нуклеосинтез и, в частност, върху производството на хелий-4. Кинетичните процеси, които в този случай протичат в ранната Вселена, могат да се отличават доста от тези, описвани от Стандартния космологичен модел, което от своя страна влияе върху синтеза на леките елементи.

Четвърта глава е посветена на изследването на лептонната асиметрия на Вселената. А именно, с използването на неравновесни неутринни осцилации е предложен механизъм за генерация на лептонната асиметрия, като е изследвано и влиянието ѝ върху космологичния нуклеосинтез.

В **Пета глава** е изследвана барионната асиметрия на Вселената с помощта на бариогенезисен модел с кондензат на скаларно поле, който от своя страна е съвместим с инфлационната фаза и предлага ефективна генерация на барионния излишък.

В **Шеста глава** се въвеждат и изучават нехомогенни бариогенезисни модели с кондензат на скаларно поле, с помощта на които се изследва механизъм за генерация на барионната плътност. На базата на този клас от модели тук се предлага да бъде разгледана по-сложна структура на Вселената, а именно Вселена разделена на области от веществото и на области от антивещество.

В **Седма глава** се изучава ролята, която играят в космологичните процеси, протичащи в ранната Вселена, така наречените кирални тензорни частици.

В **Осма глава** на дисертацията са изложени основните резултати, заключения и приноси, представени за защита. Приведен е и списък с публикациите, върху които се базира дисертацията.

3 Основни приноси

Някои от основните научни резултати, получени при изследванията в областта на дадената дисертация, могат да бъдат резюмирани по следния начин:

- С помощта на кинетичен модел детайлно са изучени неравновесни неутринни осцилации между електронно и стерилно неутрино. Според този модел термодинамичното равновесие се нарушава по-рано за стерилното неутрино, като след излизане и на електронното неутрино от термодинамично равновесие, се разглеждат ефективни неутринни осцилации. С помощта числен анализ, проведен в целия диапазон на осцилационните параметри на модела, са изследвани космологичните ефекти, следващи от неутринните осцилации, както в резонансния така и в нерезонансния случай.
- За изучение на неравновесните неутринни осцилации в ранната Вселена е предложен и използван точен кинетичен подход, с помощта на който са получени кинетичните уравнения, в импулсно пространство, за матрицата на плътността на неутриното. Прилагайки въведеният кинетичен подход и с използването на прецизен числен анализ, в дисертацията са описани нови ефекти, а именно показвано е, че неравновесните активно-стерилини осцилации водят до съществена дисторсия на неутринния спектър, както и до съществен ръст, до пет порядъка, на лептонната асиметрия.
- Изучени са динамиката и кинетиката на осцилациите между електронно и стерилно неутрино от гледна точка на влиянието им върху космологичния нуклеосинтез. Използван е числен анализ за оценката на производството на хелий-4 в космологичния нуклеосинтез, когато се отчитат и неравновесните неутринни осцилации, като е изучен целият диапазон на осцилационните параметри, както в резонансния така и в нерезонансния случай. В целият диапазон на параметрите на модела е получено препроизводство на хелий-4, което е чувствително по-голямо като величина от полученото в предишни изследвания.
- Получено е решение на точните кинетични уравнения, описващи еволюцията на нуклоните в моменти преди започване на космологичния нуклеосинтез, разглеждани съместно с уравненията, описващи динамиката на осцилиращо неутрино.
- Проведен е сравнителен анализ на теоретичните предсказания, относно първичното производство на хелия, на космологичния нуклеосинтез при отчитане на неутринните осцилации и съществуващите наблюдателни данни. Като резултат са получени космологични ограничения на осцилационните параметри на неутриното, които подобряват точността с четири порядъка на вече получените от експеримента ограничения и които от своя страна позволяват да бъдат изключени две от получените осцилаторни решения на проблема със слънчевото неутрино, а именно решението с максимални ъгли и решението с ниски масови разлики.

- В дисертацията е изследвана връзката между неравновесните неутринни осцилации и лептонната асиметрия. За описание на динамиката на осцилаторните неутринни процеси, неутроните и лептонната асиметрия се използват кинетични уравнения, които представляват сложна система от свързани интегро-диференциални уравнения за неутринната матрица на плътността и неутронната плътност. Тази система от интегро-диференциални уравнения е изследвана с помощта на численi методи и като резултат е получена зависимост между лептонната асиметрия и активно-стерилните неутринни осцилации. По-конкретно, получено е, че неутринните осцилации могат както да потискат, така и да усилват лептонната асиметрия. Това от своя страна позволява да бъде предсказана качествено нова картина, а именно, че при наличието на резонансни активно-стерилни осцилации се генерира лептонна асиметрия.
- С помощта на подходящо усъвършенстване на бариогенесисният модел, предложен от Афлек и Дайн, с цел коректно описание на процесите на раждане на частици от променливото скаларно поле, са изследани процесите на бариогенезис във Вселената. По-конкретно, в дисертацията е построен бариогенезисен модел с кондензат на комплексно скаларно поле, изследван с помощта на числен анализ, който позволява да се генерерира значителен барионен излишък. Изключително важно е, че при допустими и естествени стойности на параметрите на разглежданния модел се генерира барионна асиметрия, която е в съгласие с известните днес експериментални данни.
- С помощта на подходящо въведен нехомогенен бариогенезисен модел с кондензат на скаларно поле е изучен механизъм за генерация на барионната плътност, която се разглежда в стадия на инфлация. Разпределението на барионния заряд, при различни начални стойности и при вариране на параметрите на модела, е получено с използването на численi методи. При предположенията, че се разглежда гладко начално пространствено разпределение на барионния заряд и, че потенциалът е нехармоничен, началното гладко разпределение на барионния заряд става квазипериодично. Барионната плътност зависи явно от времето и изучаването на динамиката на модела показва, че възникват барионни пертурбации, които в резултат на инфлационната фаза от микроскопически величини могат да еволюират до космически значими стойности.
- При изследването на бариогенезиса, с помощта на нехомогенен бариогенезисен модел с кондензат на скаларно поле, в дисертацията е предявен механизъм за разделяне на космически значими области от вещество от такива с антивещество, като при естествени предположения за параметрите на модела е показано, че те се намират на разстояние, което е в диапазона от 1 Mpc до 100 Mpc, тоест между областите няма анихиляция.
- Изследвани са възможните ограничения върху свойствата на киранните тензорни частици от гледна точка на процесите, протичащи в ранната Вселена, в които те, ако съществуват, няма експериментални или теоретични забрани да участват. В дисертацията са разгледани също така и някои космологични ефекти, следващи от съществуването на киранните тензорни частици. По-конкретно,

получени са ограничения върху взаимодействията на киранните тензорни частици, следващи от космологичния нуклеосинтез, като за константата им на взаимодействие е намерено, че тя е $G_T = 10^{-2}G_F$. Присъствието на киранни тензорни частици в Стандартния модел води до негово модифициране, което се изразява, в частност, в това, че се увеличава плътността на енергията на Вселената, което пък от своя страна изменя нейната динамика, описана в рамките на общата теория на относителността. Като резултат се получава, че скоростта на разширение на Вселената се увеличава в периода на ефективност на киранните тензорни частици.

4 Научни публикации. Цитиране на научните трудове

Общият брой на представените в дисертацията публикации е **51**, като в това число:

A. В реферирани списания — **31**

 A1. Международни списания — **25**

 A2. Национални списания — **6**

B. Публикации в материали на конференции, сборници и абстракти — **20**.

Забелязаните досега независими цитирания са над **400**.

5 Автореферат

Авторефератът напълно правилно и точно отразява съдържанието на дисертацията.

6 Забележки

Съществени критични бележки по дисертацията нямам.

7 Някои лични данни

Даниела Кирилова завършва висшето си образование през 1983 година във Физически факултет на Софийския Университет „Св. Климент Охридски“, специалност физика, специализация астрономия. През 1990 година успешно защитава дисертация и получава научната степен „кандидат на физико-математическите науки“. Дисертацията е защитена в ГАИШ при Московския Държавен Университет „М.В. Ломоносов“ под ръководството на професор Александър Дмитриевич Долгов. От 1995 година е научен сътрудник I степен, а от 2003 година и до сега е доцент (тогава старши научен сътрудник II степен) в Института по Астрономия с Национална Астрономическа Обсерватория, БАН.

Научната дейност на Даниела Кирилова се характеризира с над 80 публикации в научни международни издания, които включват научни списания и трудове от

международн конференции, като още 10 публикации тя има и в български научни списания. Нейните трудове са цитирани над 400 пъти в международни научни публикации и има 12 цитата в български списания. Взела е участие в над 60 международни симпозиума, конференции, школи и семинари в страни от Европа, а също така и в Русия, Япония, Бразилия и Индия. Тя е научен редактор на 6 книги в различни области, а именно физика, астрономия и биофизика, а от 2012 година и досега е главен редактор на научното списание **Bulgarian Astronomical Journal**.

Освен с активни научни изследвания Даниела Кирилова се занимава и с учебно-образователна дейност, която, в частност, включва курсовете от лекции „Увод в Космологията“ и „Космология и релативистка астрофизика“, и двата предвидени за студенти-магистри от Физически факултет на Софийски Университет „Св. Климент Охридски“. Също така в Американския университет в Благоевград тя е чела два лекционни курса с наименования, съответно, „Звездна астрономия и космология за студентите“ и „Астрономия“. Изнасяла е също така и много лекции пред ученици.

Тук бих искал да кажа, че съм имал предостатъчно възможности да сформирам мое лично мнение за доцент Кирилова. От както я познавам много пъти сме обсъждали научни теми, слушал съм нейни доклади на семинари и на научни конференции. Засега не съм имал възможността да посещавам лекциите, които тя е водила, но съм чувал отзиви от бивши и настоящи студенти и колеги, присъствали на лекциите, че освен с изключително коректното и строго изложение на материала те се характеризират и с, нека да го нарека, ентузиазъм, като неизменно се харесват на слушателите.

Според мен много съществено е тук да се отбележи и това, че Даниела Кирилова е възпитаник на една забележителна научна школа, сформирана в ГАИШ някъде около началото на 1970-те, научен лидер на която до 1987 година е академик Яков Борисович Зельдович, един от пионерите в създаването на научната област, която е предмет на изследванията, проведени в дадената дисертация. Кандидатската ѝ дисертация е написана в групата на професор Долгов, в която научните критерии са изключително високи и изцяло съответстват на световните стандарти.

Всичко това взето заедно, по един безспорен начин показва, че доцент Даниела Кирилова има ведуща роля и много голям личен принос в научните изследвания, в които е участвала.

8 Обща характеристика на дисертацията

- Дисертационният труд на Даниела Кирилова представлява едно интердисциплинарно изследване, което включва разнообразни аспекти на най-съвременните и актуални тематики на области като космология, астрофизика, физика на елементарните частици и квантовата теория на полето.
- Основна цел на дисертацията е да бъдат поставени и успешно решени интересни за съвременния етап от развитието на астрофизиката, космологията и физиката на елементарните частици задачи, които излизат както извън рамките на Стандартния модел във физиката на частиците, така и извън Стандартния космологичен модел. Тези изследвания включват изучаване на неравновесни

физически процеси, протичащи в ранната Вселена, и получаване на възможни космологични ограничения, следващи от съвременните експериментални данни, върху физическите параметри на процесите.

- Като резултат от изследванията, проведени в дисертацията са направени предсказания с изключителна важност за съвременната физика.
- При решението на поставените задачи са използвани както аналитични техники, така и най-modерни техники на числения анализ и математическото моделиране. Тук бих искал да отбележа, че лично на мен винаги ми е харесвало, така да се каже, плодотворното сътрудничество на числени и аналитични техники, така че от моя гледна точка това е една много положителна черта на дадената дисертация.
- Тук бих искал също да отбележа, че лично на мен винаги ми е импонирало прилагането на най-modерни аналитични техники, особено от арсенала на съвременната квантова теория на полето, към интересни за физиката задачи. Така, че този факт, лично за мен, е също една изключително положителна черта на дисертацията.
- Научните резултати са публикувани във високоrenomирани международни научни списания, такива като **Physical Review D**, **Physics Letters B**, **Nuclear Physics B**, **Journal of Cosmology and Astroparticle Physicscs**, както и в пълен текст в трудовете на известни международни школи и конференции. Тук бих искал да отбележа, че голяма част от публикациите, а именно 23 от тях, са самостоятелни, 26 публикации са с 1 съавтор, като в 23 от тях доцент Кирилова е първи автор.
- Публикациите, на които се основава настоящата дисертация са станали достояние на международната физическа общност, което ясно си личи и по това, че са цитирани многократно от специалисти, активно работещи в дадената област, както и в области близки до научната тематика на дисертацията.
- При преглед на използваната литература, както в дисертацията, така и в публикуваните научни трудове, съвсем ясно се вижда, че обхватът на научните изследвания, които са в основата на дадената дисертация, е изключително голям, като също така проличава и, че дисертантката отлично познава и много актививно работи в изследваната област.
- Въпреки детайлното изследване, проведено в дисертацията, остават много интересни, актуални и засега все още нерешени задачи, пряко свързани с тематиката на дисертацията. Тук бих искал да отправя и едно пожелание към доцент Кирилова, а именно, по възможност да сформира научна група за продължаване на изследванията.

Като цяло дисертацията на Даниела Кирилова оставя впечатление на един изключително професионално написан труд, доста надхвърлящ както изискванията,

отразени в Закона за развитие на академичния състав в Република България, така и вътрешните, специфични изисквания на Института по Астрономия с Национална Астрономическа Обсерватория, БАН.

9 Заключение

Предвид всичко казано досега, без никакво колебание препоръчвам на многоуважаемото жури да присъди на Даниела Петрова Кирилова научната степен „Доктор на науките“.

С уважение:



доцент д-р Димитър Младенов

30 септември 2015 година
София