**АВТОРСКА СПРАВКА ЗА ОСНОВНИ НАУЧНИ ПРИНОСИ**

на дфн Даниела Петрова Кирилова

доцент в Института по Астрономия с НАО, БАН

Най-съществените от моите научни приноси в областта на неравновесните процеси в ранната Вселена са получени в работата ми по следните теми: неутринни осцилации в ранната Вселена, космологичен нуклеосинтез с неравновесни неутринни осцилации, космологичен нуклеосинтез с ненулева начална популация на стерилно неутрино, космологичен нуклеосинтез и лептонна асиметрия, космологични ограничения върху физиката отвъд стандартния модел, раждане на частици от променливо скаларно поле и космологичното им влияние, изпарение на бозоннен кондензат и космологичното му значение, бариогенезисни модели с кондензат на скаларно поле, нехомогенни бариогенезисни модели, антивещество и крупномащабна структура на Вселената, кирални тензорни частици в ранната Вселена.

1. **Неутринни осцилации в ранната Вселена**

1. Модели на неравновесни неутринни осцилации

Построени и изследвани са модели на неравновесни неутринни осцилации във вакуум [45] и във вещество [70,32] между електронно и нетермализирано стерилно неутрино, което излиза от термодинамично равновесие по-рано от активните неутрина. Разгледани са късни неутринни осцилации между електронно и стерилно неутрино, ефективни след излизане на електронното неутрино от равновесие.

2. К*инетични уравнения описващи осцилиращо неутрино в ранната Вселена*

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 на неутриното напред са сравними. Изведени са кинетични уравнения за матрицата на плътността на неутриното в импулсно пространство, описващи еволюцията на неравновесното осцилиращо неутрино в ранната Вселена в случай на вакуумни осцилации [45] и в случай на осцилации във вещество [70,32] отчитащи едновременно разширението на Вселената, неутринните осцилации и взаимодействията на неутриното. Уравненията осигуряват точно описание на еволюцията на редукцията на неутринната плътност, на енергийния спектър на неутриното и на асиметрията в неутринния сектор.

3 .Числен анализ на еволюцията на неутриното

Проведохме систематичен числен анализ на еволюцията на неутриното за целия диапазон на осцилационни параметри на модела в периода на охлаждане на Вселената от 2 MeV до 0.3 МеV, за случай на нерезонансни и за случай на резонансни неутринни осцилации [29,26] за различни нива на запълване на стерилното неутрино [20,18] и при различни значения на лептонната асиметрия [29,26,10,9]. Този период е съществен за нуклон-протонните взаимодействия с участието на неутрино, от които зависи космологичното производство на хелий.

4.Ефекти на неравновесни неутринни осцилации

Изследвахме космологичните ефекти на неутринните осцилации в целия диапазон на осцилационните параметри на модела в резонансния и нерезонансния случай на неутринни осцилации и при различна степен на запълване на стерилното неутринно състояние [29,26,20]. Установено бе, че:

* Неравновесните осцилации между активно и стерилно неутрино водят до

възбуждане на допълнително стерилно състояние и съответно довеждат до ускоряване на скоростта на разширение на Вселената.

* Неравновесните осцилации между активно и стерилно неутрино водят до

редукция на плътността на активното неутрино.

Освен систематичното изследване на този динамичния ефект на допълнителна степен на свобода и на интегралния ефект на редукция на плътността на електронното неутрино, ние открихме и изследвахме следните качествено нови ефекти на неравновесните неутринни осцилации, благодарение на точния кинетичен подход:

* дисторсия на спектъра на електронното неутрино и антинеутрино и

редукция на неутринните плътности

* изменение на асиметрията *в неутринния сектор* в резонансни осцилации

Бе проведен анализ на космологичното влияние на тези ефекти и установено тяхното съществено значение за процеси в ранната Вселена. Установихме, че в пред-нуклеосинтезната епоха те оказват доминиращо влияние за широк диапазон от осцилационни параметри върху космологичния нуклеосинтез с неутринни осцилации. Спектърът на неутриното може силно да се отличава от равновесния Ферми-Дирак спектър през периода 2 MeV-0.3 MeV. Изследвахме влиянието на началното ниво на запълване на инертното неутрино върху динамичния и кинетичен ефект на неутринните осцилации[20]. Установихме, че кинетичните осцилационни ефекти силно се влияят от ненулевата начална популация на стерилното неутрино,дисторсията на спектъра намалява с увеличаване на нивото на запълване. Изследвахме влиянието на дисторсията на спектъра върху неутриното от Космичния микровълнов фон [13].

* лептогенезис в резонансни неутринни електрон-стерилни осцилации

Възможността за лептогенезис чрез Михеев-Смирнов-Волфенщейн резонансни неутринни осцилации между електронно и стерилно неутрино 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 [70,39,26,10,9] показахме, че неравновесните неутринни осцилации предоставят възможност за значителен ръст на асиметрията - до 5 порядъка в случай на малки масови разлики и големи ъгли на смесване. Определихме зоната на нестабилност, в която е възможен лептогенезис.

1. **Космологичен нуклеосинтез с неравновесни неутринни осцилации**

5. Модели на космологичен нуклеосинтез с неравновесни неутринни осцилации

Построени и изследвани посредством числен анализ са модели на космологичен нуклеосинтез (КН)с неравновесни неутринни осцилации между електронно и стерилно неутрино, ефективни след излизане на електронното неутрино от равновесие [48,32,29,26,25,18,16,8,9]. Провели сме систематичен числен анализ на производството на Не-4 за пълния диапазон на осцилационните параметри на модела (за няколко стотин комбинации на стойностите им), както и при различни степени на запълване на стерилното неутрино и различни стойности на лептонната асиметрия в неутринния сектор. Изследвани са нерезонансен и резонансен случай на неутринни осцилации. Изследвани са динамичните и кинетични ефекти на електрон-стерилни неутринни осцилации върху КН [20].

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

6. Кинетичен подход за описание на еволюцията на осцилиращото неутрино и нуклоните

Предложили сме точен кинетичен подход за едновременното описание

на еволюцията на осцилиращото неутрино и еволюцията на нуклоните [70,32,29,26].В КН с неравновесни неутринни осцилации спекралното разпределение и плътността на електронното неутрино може силно да се отличава от това в стандартния КМ, което води до изменения в кинетиката на нуклоните преди и по време на КН и влияе върху синтеза на леките елементи.

7. Числен анализ на производството на He-4 в КН с неравновесни неутринни осцилации

Проведен бе числен анализ на производството на He-4 в този модифициаран модел на космологичен нуклеосинтез за стотици комбинации на осцилационните параметри в резонансния и нерезонансния случай. Установихме, че пълният ефект на неутринните осцилации за целия диапазон на параметрите на модела води до препроизводство на He-4. Бяха изследвани ефектите на неутринните осцилации върху КН. Установено бе, че кинетичният ефект на дисторсията на спектъра на електронното неутрино, причинена от осцилациите, има водеща роля в препроизводството на Нe-4 [29,26,20]. Ръстът на асиметрията в резонансните неутринни осцилации е съществен при малки ъгли на смесване и при тях се наблюдава редуцирано препроизводствона He-4 в сравнение със случая без отчитане на динамичната асиметрия.

8. Максималното препроизводство на He-4 в резултат на неутринните осцилации

Проведено бе количествено изследване на максималното препроизводство на He-4 в резултат на неутринните осцилации [65,22]. Установено бе, че максималното препроизводство на He-4 достига 32% в резонансния случай и 14% в нерезонансния. Т.е. свръхпроизводството на Не-4 е значително по-голямо (6 пъти) от определеното без отчитане на кинетичния ефект на осцилациите върху производството на хелий, а само на динамичния ефект на едно допълнително стерилно неутрино, което води до 5% препроизводство.

9 .Космологични ограничения върху осцилационните параметри от КН

Съвременната теория на КН представлява точна количествена теория,подкрепена от експериментални и наблюдателни данни, касаещи КН. He-4 е най-подходящият и традиционно използуван елемент за космологичен тест на нова физика в епохата на КН, в частност за поставяне на КН ограничения върху неутринните осцилации.

Определили сме изохелиевите контури в равнината на осцилационните параметри Δm2-θ, масова разлика – ъгъл на смесване, съответствуващи на 3%, 5% и 7% He-4 неопределеност за нулева начална популация на стерилното неутрино и лептонна асиметрия от порядъка на барионната. Проведен бе сравнителен анализ на наблюдателните данни за първично произведения He и D и теоретичните предсказания на модела за случая на нерезонансни и резонансни осцилации, на базата на който бяха получени ограничения върху осцилационните параметри - ъгъла на смесване и масовата разлика между електронно и стерилно неутрино [29,26,25].

Получените КН ограничения върху осцилационните параметри са на порядък по-строги от получените в предишни анализи и с 4 порядъка по-строги от експериментално получените до момента на публикуване на изследванията ни. Тези ограничения изключиха от КН съображения, години преди експерименталните резултати, две от възможните стерилни решения на проблема със слънчевото неутрино: решението с максимални ъгли (LMA) и решението с ниски масови разлики (LOW) [25].

1. **Космологичен нуклеосинтез с неравновесни неутринни осцилации при ненулева начална популация на стерилно неутрино**

10. Роля на началното ниво на запълване на стерилното неутрино и КН с неутринни осцилации

Проведохме числен анализ на КН с неравновесни осцилации между електронно и стерилно неутрино в по-общия случай на ненулево начално ниво на запълване на стерилното неутрино[20,18,16]. He-4 производство бе пресметнато за начални нива на запълване 0≤δNs<1, и за целия диапазон на осцилационните параметри на модела. Бе показано че кинетичните осцилационни ефекти силно се влияят от ненулевата начална популация на инертното състояние.

Бяха изследвани ефектите на ненулевата начална популация на инертното неутрино върху космологичния нуклеосинтез. Установени бяха за пръв път два типа ефекти:

* увеличение на скоростта на разширение

Този ефект води до по-ранно отключване на нуклоните от равновесие и увеличение на препроизводството на хелий.

* въздействие върху кинетичния ефект на осцилациите

В епохата на нуклеосинтеза, наличието на ненулево инертно сътояние води до намаляване на кинетичния ефект от осцилациите върху кинетиката на нуклоните, което рефлектира в намаляване на свръхпроизводството поради осцилациите на хелий.

За пълния набор на параметри на модела бе проведен числен анализ на взаимодействието на двата ефекта по време на космологичния синтез на Не-4. В частност, бе показано че кинетичния ефект на осцилациите силно се влияе от ненулевата начална популация на инертното състояние. На базата на числените резултати бе изведена емпирична формула описваща тази зависимост.

11. Обобщени космологични ограничения върху осцилационните параметри от КН в случай на ненулева популация на стерилното неутрино

Получени бяха изохелиевите контури съответствуващи на 3%,5%,7% и 9% свръхпроизводство на Не-4 при различни значения на началната популация на инертното неутрино [56,16,18]. Изведени бяха обобщени космологични ограничения върху параметрите на активно-стерилни неутринни осцилации в случая на ненулево състояние на инертното неутрино

0< δNs<1 в епохата предшествуваща космологичния нуклеосинтез. Установено бе, че КН ограничения могат да бъдат отслабени или усилени от ненулевото δNs. Възможността за подтискане на кинетичния ефект и отслабване на КН ограничения в резултат на ненулево δNs се обсъжда за пръв път. Бе показано, че наличието на ненулева популация на инертното неутрино води до усилване на ограниченията в случая на 3% Не-4 свръхпроизвоство и отслабване на ограниченията в случай на 5% Не-4 свръхпроизводство.

1. **КН, неравновесни неутринни осцилации и лептонна асиметрия**

12. Взаимодействие между неравновесните неутринни осцилации и лептонната асиметрия в неутринния сектор

Проведохме систематичен числен анализ на взаимовръзката между електрон -стерилни неутринни осцилации и малка лептонна асиметрия L << 0.01 в ранната Вселена, чиито динамичен и директен кинетичен ефект върху КН са пренебрежими [7]. Разгледани бяха два случая на лептонна асиметрия: първична и генерирана в резултат на осцилациите. Установихме значителни изменения на неутринната плътност и спектър за широк диапазон на L.

* Първична асиметрия

Бе изследван широк диапазон на началната лептонна асиметрия, а именно от 10-10 до 1. Установихме, че при наличие на 10-8<|L| неутриното и антинеутриното еволюират различно, численият анализ е по-сложен от случая на L равна на барионната асиметрия. L влияе върху осцилиращото неутрино, а именно: променя еволюцията му, неговата плътност, енергийния му спектър, изменя характера на осцилациите (подтиска ги или ги усилва). Установени са съответните диапазони от стойности на L. Получихме емпирични зависимости между величината на асиметрията и осцилационните параметри за всеки от случаите. Способността на лептонната асиметрия да усилва осцилациите е качествено нов ефект.

* Динамична асиметрия

Численият анализ показа, че динамичната лептонна асиметрия, генерирана в резонансни неутринни осцилации, води до подтискане на осцилациите при малки ъгли на смесване на неутриното.

* Въздействие на неутринните осцилации върху асиметрията

Установихме, че активно-стерилните неутринни осцилации изменят асиметрията на средата, могат да подтискат или усилват L. Възможността за лептогенезис в резонансни активно-стерилни неутринни осцилации с малки масови разлики е качествено нов ефект, открит в [70] и систематически изследван в по-късни публикации [32,26,10,9]. Показано бе, че асиметрия се генерирана в резонансните осцилации при малки ъгли на смесване.

13. Спектрален резонанс в системи неутрино и антинеутрино

Благодарение на прецизния кинетичен подход в изследването установихме, че възможността на малки L да усилва неутринните осцилации е резултат от нов тип нискотемпературен резонансен преход между активни и инертни неутрино в неутринните осцилации - спектрален резонанс [28,9]. Oписано е ново явление на последователен резонанс в системи от неутрино и антинеутрино. То от своя страна води до резонансно производство на Не-4 и усилване на космологичните ограничения върху осцилационните параметри.

14. КН с неутринни осцилации и малка лептонна асиметрия

Бе проведен числен анализ на ефекта на малка неутринна асиметрия върху синтеза на хелий-4 в космологичния нуклеосинтез в присъствие на неутринни осцилации за целия диапазон на стойности на осцилационните параметри на модела и 10-8<L<<0.01 [28,9]. Изследвани са КН както с реликтова асиметрия, така и с генерирана в неутринни осцилации. Присъствието на лептонна асиметрия, в зависимост от величината и, може да води до усилване, подтискане или даже спиране на неутринните осцилации и съответно изменение на КН и на космологичните ограничения. Индиректният кинетичен ефект на малки лептонни асиметрии води до съществено изменение на производството на Не-4 в КН.

Установихме, че реликтова L може да увеличи или намали препроизводството на Не-4 или да го редуцира до това на стандартния КН. Намерени са емпирични зависимости между осцилационните параметри и L в различните случай, при които е възможно увеличаване или намаляване на производството на хелий-4. Установихме, че асиметрията генерирана при малки ъгли на смесване в

резонансните неутринни осцилации редуцира прероизводството на Не-4 при тези ъгли.

15 .Космологични ограничения върху осцилационните параметри от КН в случай на лептонна асиметрия

Установихме възможното изменение на КН ограничения върху осцилационните параметри на неутриното поради малки лептонни асиметрии L<0.01[28,9,10].

* КН ограничения и първична асиметрия

КН ограниченията може да бъдат усилени, отслабени или снети в зависимост от величината на асиметрията. Способността на L да усилва осцилациите и да усилва КН ограничения е открита за пръв път. Достатъчно големи L могат да подтискат осцилациите и снемат КН ограниченията върху осцилационните параметри. В този случай са изведени нови ограничения зависещи от L.

Установено е, че L~10-6 отслабва КН ограничения при големи ъгли на смесване и ги усилва при малки ъгли в сравнение със случая на L равна на барионната.

* КН ограничения и динамична асиметрия

Установихме, че асиметрията генерирана при малки ъгли на смесване в

резонансните неутринни осцилации редуцира препроизводството на Не-4 при тези ъгли и следователно отслабва КН ограничения върху осцилационните параметри.

* Проблема на тъмната радиация и КН с лептонна асиметрия

Възможността на малка L да подтиска осцилациите и да отслабва КН ограничения е предложена като решение на проблема с тъмната радиация [9,7]. Достатъчно големи L подтискат осцилациите и пречат на термализацията на стерилното неутрино чрез осцилации, т.е. отслабват КН ограничения върху стерилното неутрино.

16 .Космологични ограничения върху лептонната асиметрия

За разлика от барионна плътност, която е измерена изключително точно на базата на независими астрофизични и космологични наблюдателни данни, величината и знака на L не са измерени директно до сега. Ето защо са актуални изследвания, които предоставят възможност за индиректното определяне на L посредством влиянието и върху различни процеси, оставили наблюдаеми следи: КН, Космичен микровълнов фон (КМФ), формирането на едромащабната структура на Вселената и други.

Разгледали сме модел на КН с късни електрон-стерилни неутринни осцилации и малка лептонна асиметрия L>10-11 [9]. Показано е, че този модел представлява изключително прецизен лептомер в ранната Вселена и е чувствителен към лептонна асиметрия L>10-8.

От получените зависимости между осцилационните параметри и лептонната асиметрия и използувайки индикациите за електрон-стерилни неутринни осцилации, дискутирани от Холанда и Смирнов са изведени космологични ограничения върху лептонната асиметрия на порядъци по строги от съществуващите до момента в научната литература, L<5 .10-4 [7]. 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 строго КН ограничение върху асиметрията.

**V. Космологичен нуклеосинтез и космологични ограничения върху физиката отвъд стандартния модел**

17 .Химична еволюция на леките елементи

Анализирано бе обилието на елементи във Вселената и тяхната космичната химична еволюция [63,64]. Проследена бе химическата еволюция на леките елементи D, He-3, He-4, Li, от КН до днес.

Космологическия нуклеоситез е надежден индикатор на физичните условията в ранната Вселена в епохата на нуклеосинтез. Това позволява да бъдат получени строги ограничения върху диапазона на изменение на параметрите, характеризиращи физиката на ранната Вселена. Изследвали сме различни нестандартни модели на космологичен нуклеосинтез, с цел получаване на космологични ограничения върху физиката отвъд Стандартния модел [49,5], в частност нуклеосинтез с допълнително безмасово и леко стерилно неутрино, нуклеосинтез с допълнителни леки разпадащи се частици, нуклеосинтез с изменена барионна плътност и други.

18. Космологичен нуклеосинтез с допълнителни частици

Изследван бе ефекта на допълнителни частици върху синтеза на леки елементи на ранния стадий на еволюция на Вселената. Бяха изследвани няколко модифицирани модела на нуклеосинтез с участие на допълнителни частици.

* КН модели с допълнителни безмасови и допълнителни леки частици.

Бяха изследвани модифицирани модели на нуклеосинтез с участие на допълнителни частици [49,5,52].

* КН модели с допълнителни леки разпадащи се частици.

Бе изследван модел с допълнителни леки частици, с маси от порядъка на МеВ, разпадащи се в пред-нуклеосинтезната епоха, с време на разпад от порядъка на секунда [39,54]. Изучени бяха взаимодействията на продуктите на разпада с нуклоните и тяхното влияние върху производството на Не-4.

Изследвана бе зависимостта на произведения хелий-4 от характеристиките

на допълнителните частици: маса, време на живот и характерна температура на замръзване на взаимодействията.

19. Космологични ограничения от космологичен нуклеосинтез с допълнителни частици

На базата на наблюдателни данни от космичните мисии посветени на изследване на космичния микровълнови фон, WMAP и Planck, от дълбоките съвременни обзори на крупномащабната структура на Вселената, както и данни за обилието на леките елементи във Вселената, са получени ограничения върху физиката отвъд стандартния модел на електрослабите взаимодействия и отвъд стандартния космологичен модел, в частност, върху броя на поколенията частици [49,5,52].

Изучени бяха възможностите за отслабване на строгите космологични ограничения върху броя на типовете леки релативиски по време на нуклеосинтеза частици. Беше определен диапазона от възможни стойности на параметрите на модела, при които такова отслабване на ограничението е възможно [39,5,49,52].

Бе изучена също възможността за разширяване на допустимия диапазон на барионната плътност в периода на КН [62].

1. **Раждане на частици от променливо скаларно поле и космологичното им влияние**

В инфлационните космологични модели главна роля играе инфлатона - скаларно поле, благодарение на чиято еволюция се реализира инфлационния стадий на Вселената и в разултат на разпадите на което Вселената преминава през период на загряване и се реализира радиационно доминирания стадии в нейната еволюция. Изследвали сме аналитично и числено процеси на раждане на частици от пространствено еднородно променливо скаларно поле и космологичното им значение [37,33,27,17,4].

20. Раждане на частици от вакуума от външно променливо скаларно поле

Използуван е метод на каноническите преобразования на Боголюбов за описание на раждането на частици от скаларното поле. Изведени са за пръв път аналитически формули за вероятността на раждане на частиците от променливо скаларно поле в два пределни случая, които са удобни за космологически приложения: в теория на пертурбациите и в квазикласическо приближение [37]. Изведените формули са приложени за оценка на температурата на загряване на Вселената.

Резултатите представляват важен принос за развитието на съвремения космологичен модел , на инфлационната теория, както на теорията на загряване на Вселената след инфлационния стадий. В частност, те се ползуват за оценка на температурата на Вселената в слединфланционния стадий в резултат на разпада на инфлантона. Публикацията [37] е основополагаща в тази област.

21. Роля на раждането на частици в бариогенезисни модели и модели на крупномащабната структура.

Раждането на частици от променливо скаларно поле оказва влияние на еволюцията на барионния заряд в бариогенезисни модели базирани на Афлек-Дайн механизма. В редица от публикации [41,33,27,17,4] сме изследвали ролята на процесите на раждане на чистици върху различни бариогенезисни модели, както и върху формиране на крупномащабната структура на Вселената. Проведено бе аналитично отчитане на процесите на раждане на частици, използувайки скоростта на раждане на частици, определена в теорията на пертурбациите и числено отчитане [27,17,4].

Установено бе, че раждането на частици играе важна роля в този тип бариогенезисни модели тъй като влияе значително върху еволюцията на скаларното поле и генерирания барионен излишък, при естествен избор на параметрите на модела. 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. Доказана бе необходимостта от точен анализ на процесите на раждане на частици.

Предложен е метод за отчитане в явен вид на раждането на частици от

скаларното поле взаимодействащо с фермионите, посредством член в уравнението на движение на полето [33]. Определили сме честотата на изменение на полето и скоростта на раждане на частици от точния числен анализ на еволюцията на полето [17]. Числените пресмятания може да се отличават на порядъци от аналитичните оценки, т.е. необходимо е точно численото отчитане на раждането на частици.

**VII. Изпарение на бозоннен кондензат и космологическото му значение**

Процесите на изпарение на бозоннен кондензат изискват детайлно термодинамическо разглеждане, тъй като играят важна роля при определянето на температурата на загряване на Вселената, при опредеяне на величината на генерираната барионна асиметрия на Вселената, степента и механизмите на нейното редуциране до наблюдаемата днес величина.

22. Изпарение на бозонен кондензат

Изследвали сме състоянието на термодинамично равновесие на космологичната плазма, образувана след пълен и след частичен разпад на кондензат на скаларно поле със зададени заряд и плътност на енергията [38]. Получени са зависимости на характеристиките на равновесното състояние на системата от бозони и фермиони, като Т на плазмата, химически потенциали на частиците, барионен заряд на фермионите, плътност на бозонния кондензат, от величините на началните параметри на системата. Установено е, че при малки начални значения на барионния заряд на кондензата, той напълно се изпарява и Т на получената плазма е по-голяма от масата на частиците. При увеличаване на барионния заряд става възможно само частично изпарение на кондензата, Т на термализация на плазмата остава по-голяма от масата на частиците, но при голям начален баринен заряд се реализира случай на нерелативиски частици при наличие на кондензат.

23 . Космологично значение на точното отчитане на процеса на изпарение на бозонен кондензат

Изследвана е ролята на процесите на изпарение на бозонен кондензат при определяне на температурата на разогрев на Вселената и на барионната асиметрия на Вселената в бариогенезисния модела на Афлек-Дайн. Показано е, че барионната асиметрия е значително по-малка от оценките съществуващи в литературата, получени без точно отчитане на изпарението на бозонния кондензат. Отчитането на големите химически потенциали и наличието на бозонния кондензат изменят също изводите относно възможните механизми за загряване в ранната Вселена [38,36].

Резултатите са използувани в последващи наши публикации разглеждащи модели на нискотемпературен бариогенезис [33,27,17], както и в публикации на други учени посветени на инфлационния стадий, бариогенезисни модели и др.

**VIII. Бариогенезисни модели с кондензат на скаларно поле**

Обяснението на наличната барионна компонента, нейната плътност и наблюдаваната барион-антибарионна асиметрия е сред основните теоретични въпроси на физиката и космологията. Точните механизми на бариогенезис не са известни, съответните СР- и В-нарушаващи процеси все още не са детектирани.Генерирането на барионна асиметрия в популярните модели на велико обединение на взаимодействията изисква високи температури, които не се достигат при разогрева на Вселената след инфлационния стадий. В тази връзка актуални са изследванията на нискотемпературни бариогенезисни модели.

24. Модел на нискотемпературен бариогенезис с кондензат на скаларно поле

Ние предложихме и изследвахме аналитично и числено модел на нискотемпературен бариогенезис с конденсат на скаларно поле генерирано на инфлационния стадий [36]. Моделът се базира на бариогенезисния сценарий на Афлек-Дайн, който позволява генерация на барионна асиметрия при ниски температури и е съвместим с инфлационния стадий. Моделът предполага наличие на комплексно скаларно поле на инфлационния стадий, носещо барионен заряд. Потенциалът на полето съдържа В-нарушаващи членове, имащи значение при големи стойности на полето. Кондензат на барионния заряд, се генерира на инфлационния стадий. Величината на този заряд намалява поради разширението на Вселената и поради процесите на раждане на частици от променливото скаларно поле. На стадия на В-съхранение, при ниски стойности на полето, B се трансформира в кварковия сектор при разпада на полето и определя барионната асиметрия на Вселената.

* Бе проведено изследване на изпарението на бозонния кондензат,

както и отчитане на процесите на раждане на частици от скаларното поле в този бариогенезисен модел [27,17,4]. Бяха изследвани бариогенезисни модели с кондензат на скаларно поле, с прецизен числен анализ на еволюцията на полето и на барионния заряд аналитично и числено, използувайки точни кинетични уравнения, от инфлационния стадий до епохата на разпад на полето и образуване на барион-антибарион асиметричната плазма.

25. Числен анализ на еволюцията на барионния заряд

Проследихме числено еволюцията на полето и на барионния заряд,

за около сто комбинации от различни стойности на параметрите на модела [4]. Изследвахме зависимостта на еволюцията на скаларното поле и на барионния заряд, съдържащ се в него, от параметрите на модела – масата на полето, скоростта на разширение на Вселената на инфлационния стадий и др. при различни стойности на другите параметри. Предложихме оценка на температурата на повторно загряване. Числено сме определили произведената барионна асиметрия за различни параметри на модела.

Установихме че този тип бариогенезисни модели могат успешно да обяснят

наблюдаваната локално барионна асиметрия за естествен избор на

стойностите на параметрите на модела.

**IX. Нехомогенни бариогенезисни модели, области с антивещество и крупномащабна структура на Вселената**

26. Генериране на пертурбации в нехомогенни бариогенезисни модели

Изследвахме модел за генериране на пертурбации на барионната плътност на инфлационния стадий в рамките на нехомохенни бариогенезисни модели с кондензат на скаларно поле. Изучихме еволюцията на разпределението на плътността на барионния заряд в рамките на такива модели. Проведен бе числен анализ на еволюцията на пространственото разпределение на барионния заряд B(t,x) за различни начални стойности (при естественото предположение за плавно начално пространствено разпределение)и различен набор от стойности на параметрите на модела [33,27].

В случай на нехармоничен потенциал на полето честотата зависи от амплитудата. В резултат на това началното плавно разпределение преминава в квазипериодично [27,21]. След време районът с начално плавно изменение на В плътност се разделя на области с по-голяма и по-малка плътност, т.е. генерират се барионни пертурбации.В резултат на инфлацията микроскопичното разпределение на В става астрономически значимо.

27. Нехомогенни бариогенезисни модели и механизъм за разделяне на вещество от антивещество

Наблюдаваната локално барионна асиметрия на Вселената може да не е нейна глобална характеристика. За по-големи разстояния от 20 Мрс няманито 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. Посредством числен анализ е показано, че разглежданият нехомогенен бариогенезисен модел предоставя механизъм за разделяне на големи области от антивещество [27], разделени от тези с вещество от празнини, необходимо за предотвратяване на контакта между вещество и антвещство с голяма плътност. B 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.

28. Размери и разстояния между областите с вещество от тези с антивещество - теоретични предсказания и наблюдателни ограничения.

Определен е характеристичния размер между областите в зависимост от параметрите на модела. Бе установено, че при естествен подбор на параметрите на модела разстоянието между областите с вещество и антивещество може да е в диапазона: 1 - 100 Mpc. Разгледани бяха различни видове СР-нарушение и различни възможности за структури от антивещество, от размери на звезден куп до свръхкупуве от галактики [30,21,61]. Наблюдателните данни от космични, гама-лъчи, данните по обилието на леките елементи и данните от анизотропията на микровълновия фон са използувани за получаване на ограничения върху възможното разстояние между структурите и техните размери. Анализирани бяха различни нехомогенни бариогенезисни модели, позволяващи генерация на пространствено варираща барионна плътност и области от антивещество. Бяха анализирани наличните данни от различни видове наблюдения и теоретични модели относно съществуването на значителни области антивещество във Вселената.

Нехомогенните бариогенезисни модели, позволяващи генерация на пространствено варираща барионна плътност и области от антивещество, са актуални и във връзка с резултатите на космичните експерименти по изследване на гама-лъчите във Вселената и на експериментите BESS, AMS, PAMELA, посветени на определяне 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.

29. Модели с квазипериодично разпределение на видимото вещество.

Нехомогенните бариогенезисни модели представляват интерес и във връзка с наблюдаваното квазипериодично разпределение на барионното вещество с характерен мащаб 120 - 130h-1Mpc. Ние анализирахме наблюдателните данни относно квазипериодичността с този характерен мащаб в пространственото разпределение на веществото във Вселената. Произходът на толкова голям мащаб в едромащабната структура на Вселената изискваше обяснение отвъд стандартните модели за образуване на структурите в Стандартния космологичен модел. Ние изследвахме нехомогенният бариогенезисен модел с цел обяснение на квазипериодичното разпределение на барионното вещество в едромащабната структура на Вселената. В резултат на числен анализ установихме, че този механизъм за генериране на пертурбации на барионната плътност предлага решение на проблема за квазипериодичното разпределение на видимото вещество във Вселената и на наличието на мащаб от порядъка 120 - 130h-1Mpc [41,33,27].

**X. Кирални тензорни частици в ранната Вселена**

Построен е космологичен модел на ранната Вселена с допълнителни антисиметрични тензорни частици (ТЧ). Допълнителните кирални тензорни частици, които разглеждаме, принадлежат на фундаменталното представяне на SU(2) групата на Стандартния Модел, което съдържа също известните фермиони и Хигсовия дублет. В рамките на този модел сме определили космологичното място и роля на тези частици [34,14,31,53,1].

30. Космологична роля на кирални тензорни частици

Анализирани бяха следните ефекти от наличието на допълнителните частици: динамичен ефект и допълнителни взаимодействия на частиците на високотемпературната плазма на ранната Вселена с тензорните частици. Получено бе космологично ограничение върху силата на взаимодействията на ТЧ.

* Динамичен ефект

Допълнителните тензорни частици и допълнителни Хигсови дублети, предсказани в разширената теория на Стандартния модел с ТЧ, дават принос в тензора на енергията-импулса в дясната част на уравненията на Айнщайн, увеличавайки плътността на енергията на Вселената и променяйки нейната динамика. Увеличението на степените на свобода е значително и води до увеличена скорост на разширение на Вселената в периода на ефективност на тези частици. Оценено е изменението на температурно-времевата зависимост на ранната Вселена в резултат на изменението на ефективните степени на свобода.

* Характеристични взаимодействия

ТЧ участвуват в различни взаимодействия: раждане, разсейване, анихилация и разпад. Ние сме пресметнали характеристичните взаимодействия на ТЧ в ранната Вселена и сме определили съответния период на тяхното космологично влияние, съответните космологични времена и температури. В резултат на направения анализ установихме периодът на ефективност на ТЧ и съответствуващия енергиен интервал. Анализът показва, че ТЧ се разпадат достатъчно рано за да не нарушат КН и Космичния микровълнов фон. От друга странате присъствуват при енергии типични за инфлацията, загряването на Вселената след инфлационния стадий и барио и лептогенезиса, т.е. бъдещи изследвания на космологичната роля на ТЧ в тези процеси на ранната Вселена представляват интерес.

* Космологични ограничения

От ограничението на космологичния нуклеосинтез върху допълнителни леки частици и съхранението на ентропията, сме получили ограничение върху температурата на излизане от ТДР на стерилното неутрино T<130 MeV и върху константата на взаимодействие на ТЧ: Gт<0.01 GF. Изводът е направен при предположение, че ТЧ взаимодействуват с 3 типа леки десни неутрина. КН ограничението указва на свръхслаби взаимодействия и е в съответствие с експерименталните данни.