

НЕУТРИННА АСТРОФИЗИКА

Георги Иванов *

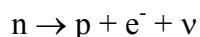
1. НЕУТРИНО

При явлението β -разпадане, което е известно при изучаване на естествената радиоактивност, от ядрото се появява електрон или позитрон. Било установено, че при β -разпадане от еднакви ядра излитат електрони с различни енергии, които образуват непрекъснат спектър от енергии. Най-голямата енергия на електроните била равна на енергията на дъщерното ядро, а минималната - на енергията на покой на електрона. Тези експериментални факти могли да бъдат интерпретирани като нарушение на закона за запазване на енергията, който е основен закон във физиката. Изходът от този парадокс изглеждал разрешим, ако се предположело, че от ядрото излита още някаква частица, която не се регистрира от уредите, която отнася част от енергията при разпадане на атомното ядро. Такава хипотеза изказва през 1931 г. известният физик-теоретик Волфганг Паули. Тя изглеждала толкова невероятна, че той дори не я публикувал.

Ядрото се състои от Z протона и $A-Z$ неутрона. A се нарича масово число и е приблизително равно на масата на ядрото, т.е. на сумата от масите на протоните и неутроните, а Z е сумарният заряд на ядрото, цяло число от елементарния заряд на електрона или протона. Ако атомното ядро не съдържа електрони, то не може да изпуска само един електрон при β -разпад, без да променя принадлежността си към фермионите (частици с полуцъл спин, които се подчиняват на статистиката на Ферми-Дирак, например електроните, протоните и неутроните) или бозоните (частици с цял спин, които се подчиняват на статистиката на Бозе-Айнщайн, например фотоните). Правилото за събиране на спиновете е: от четно число фермиони се получава бозон, а от нечетно число фермиони - фермион. Ядрото се състои от A фермиона (масовото число) и Z протона. и Ядрото може да има цял (бозон) или полуцъл спин (фермион). Правилото за събиране на спиновете е: от четно число фермиони (т.е. броят на протоните и неутроните) се получава бозон, а от нечетно число фермиони - фермион. Ядрото може да има цял спин (бозон) или полуцъл спин

* проф. дфн, Физ. факултет на СУ "Св. Кл. Охридски"

(фермион). Обаче при β -разпадането масовото число A не се променя, а само то определя дали ядрото е бозон или фермион, т.е. спинът на ядрото не се е променил. Само ако хипотетичната частица, наречена неутрино, е фермион, е възможно при β -разпадането да се отделят два фермиона (електронът и неутриното). По правилото за събиране на спиновете масовото число на ядрото не се променя. Само хипотезата за неутриното може да обясни двата експериментални факта: запазване на масовото число A при β -разпадането и закона за запазването на енергията, който е валиден при всички природни процеси. Хипотезата на Паули дава теоретично решение на двата парадокса, ако при β -разпадането се отделят две частици - електрон и друга неизвестна частица. Оставал неясен въпросът къде в ядрото е разположена тази частица. Отговор на този въпрос дава теорията на Енрико Ферми за β -разпадането след откриването на неутрона през 1934 г., според която един от неутроните на ядрото се превръща в протон като изпуска още две частици - електрон и антинейтрино:



Според теорията на Ферми в изходното ядро неутриното не съществува самостоятелно, а е продукт от β -разпадането. Тази теория е била първото потвърждение на хипотезата на Паули, но не е била достатъчна, за да се признае откриването на неутриното.

Първите експериментални опити за откриване на неутриното били неуспешни. Горната граница в спектъра на електроните, изпуснати при β -разпадането съвпадала (в границите на точността на измерванията) с отделената от ядрото енергия, което води до извода, че масата на неутриното е приблизително равна на нула. Ферми определя β -разпадането като процес на превръщане на един нуклон в друг с пораждање на две частици със спин $\hbar/2$. Този процес е предизвикан от т. нар. слабо взаимодействие и се осъществява с една от следните реакции:



където n и p са символите на неутрона и позитрона, e^- - на електрона и e^+ - на позитрона. Неутриното може да бъде два вида: неутрино (ν) и $\bar{\nu}$ - антинейтрино. По какво се различава неутриното от

antineutrino? Те се различават по лептонното число (лептонен означава лек), което за неутрино е $L = 1$, а за антинейтрино $L = -1$. Същите лептонни числа се преписват на електрона ($L = 1$) и на позитрона ($L = -1$). Според закона за запазване на лептонното число едновременно се раждат електрона и антинейтрино или позитрона и неутрино. Той е подобен на закона за запазване на барионното число (барионен означава тежък). Протонът е тежък ($B = 1$), антипротонът е също тежък, но с отрицателен барионен заряд ($B = -1$), електронът е лек ($B = 0$) и т.н. В двете записани по-горе реакции отляво и отдясно $B = 1$, а $L = 0$; освен това и зарядът от двете страни е еднакъв.

Първата реакция предполага разпадане на един от нуклоните в ядрото. Втората не може да се извършва извън ядрото, тъй като протонът е по-лек от неутрона с 2,5 електронни маси, поради което е устойчив. Неутронът е неустойчив с експериментално установено средно време на живот 15,5 min., поради което първата реакция може да се осъществява и извън ядрото на атома.

През 1934 г. Ханс Бете и Рудолф Пиърс доказват, че ако съществува неутрино, то е практически неуловимо. Например, за да се регистрира едно неутрино е необходим воден стълб с дебелина 1000 светлинни години. Най-близката звезда е на разстояние 4,3 св. г. Поради ниската вероятност за взаимодействие на неутрино с веществото, огромният поток от неутрино, излъчван от Слънцето, преминава безпрепятствено през Земята. Вероятността за взаимодействие на неутрино с други елементарни частици се оказва много малка. Неутрино с енергия 3-10 MeV трябвало да премине разстояние 1000 св. г. във вещество с плътността на водата, за да се осъществи едно взаимодействие. Регистрацията на такова събитие е много трудна. За откриването на неутрино най-важни са реакциите:



които са предсказани теоретично и са известни като обратно β -разпадане.

Първата от последните две реакции е доказана експериментално от Райнс и Коуен през 1956 г. Антинейтрино от реактор на протони е реагирало с воден разтвор от CdCl_2 . Регистрирани са и двата продукта от първата реакция - позитрона и неутрона. Позитронът почти мигновено е анихилирал с електроните на разтвора, като е давал

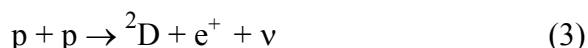
първата сцинтилация, която се регистрира от детектор. Неутронът се е разсейвал от H, като се е забавял в продължение на 5-10 μ s, след което се е захващал от ядрото на Cd. Възбуденото ядро на Cd излъчва γ -квант с енергия 3-10 MeV, който се регистрира като втора сцинтилация от детектора.

2. СЛЪНЧЕВО НЕУТРИНО

При температурата в централната област на една звезда се определя с уравнението:

$$T_c = 14 \cdot 10^6 M/R$$

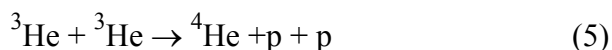
където M и R са съответно масата и радиусът на звездата в слънчеви единици. При температура в центъра на Слънцето $14 \cdot 10^6$ K в една област от около 1/3 от радиуса на Слънцето протича p-p цикъл



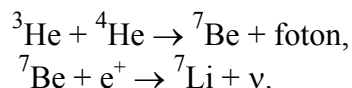
Неутрино ν е елементарна частица без електричен заряд и маса около 10^{-5} от масата на електрона или $m_\nu = 10^{-5} m_e$. Втората част от p-p цикъла:



Крайната реакция е:



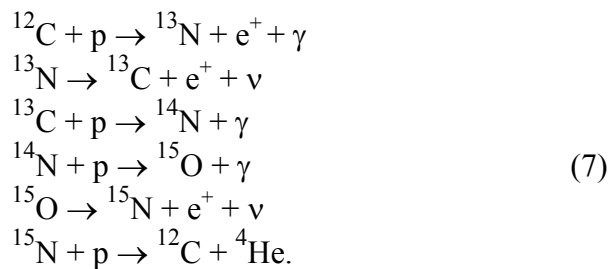
Отделеното при реакциите (3) ÷ (5) неутрино се нарича p-p неутрино. Възможна е и друга верига на p-p цикъл:



Отделеното при тази реакция неутрино се нарича берилиево. При реакцията



се отделя т. нар. борно неутрино. Веригата от реакции (3) ÷ (5) дава енергия, която осигурява около 83% от слънчевата светимост, а (6) ÷ (7) около 15% или общо 98%. Останалите два процента се осигуряват от въглеродо-азотния цикъл (CNO):



За CNO-цикъла ${}^{12}\text{C}$ е т. нар. ядрен катализатор, защото се възстановява при последната реакция.

Гама-квантите от термоядрената реакция се разпространяват от ядрото към фотосферата (наблюдаемия слой от Слънцето) чрез лъчиста дифузия, като всеки фотон се поглъща и преизлъчва от йоните вътре в Слънцето или разсейва от свободните електрони. Моделът за вътрешния строеж на Слънцето се базира на три основни физични закона: хидростатично равновесие, термодинамично равновесие и закона за пренос на енергията. Преносът на енергията от ядрото към фотосферата може да бъде лъчист или конвективен. От тези основни закони следва, че температурата в ядрото на Слънцето е $T_c = 15 \cdot 10^6 \text{ K}$, налягането е $P_c = 3,4 \cdot 10^{11} \text{ atm}$ и плътността е $\rho = 150\,000 \text{ kg/m}^3$. При тези физически условия най-вероятна е термоядрената реакция наречена p-p цикъл. Потокът от неутрино се определя с уравнението:

$$N_\nu = 2L_X / \Delta\epsilon$$

където $\Delta\epsilon$ е енергоотделянето при еднократно протичане на p-p цикъл, т.е. за образуването на едно хелиево ядро от четири протона. До Земята достига поток

$$F_\nu = N_\nu / 4\pi a_0^2 = 10^{15} \text{ m}^2/\text{s},$$

където $a_0 = 1 \text{ Уа}$ е астрономическата единица за дължина. Поради слабото си взаимодействие с веществото неутрино преминава през Земята без почти никакво взаимодействие. С малка вероятност неутрино взаимодействува с веществото, като се осъществява една от реакциите (1).

Звездите с маса по-голяма от тази на Слънцето имат температури $T_c = 16 \cdot 10^6 \text{ К}$, при която протича CNO-цикъл. Енергиите на неутрино, получено от различните вериги на термоядрената реакция, силно се различават една от друга. Например, p-p неутрино има максимална енергия 0,42 MeV, докато берилиевото - 0,86 MeV. Борното неутрино има широк спектър от енергии: $0 \div 14 \text{ MeV}$. Американският физик Раймонд Дейвис построява първия детектор за регистрация на слънчевите неутрина. Той се счита за основател на неутринната астрофизика. Започва първите опити за регистрация на неутрино в Националната лаборатория Брукхайвън в близост до Ню Йорк през 1948 г. Неговият детектор е представлявал варел с вместимост 250 l, напълнен с въглероден тетрахлорид CCl_4 (перилеп препарат). На ръчна количка той отнася своя подвижен детектор на една ливада, която се намира на около 500 m от ядрения реактор. След като решава, че достатъчно количество неутрино от ядрения реактор е облъчило течността, той я отнася в специална барака, оборудвана като химическа лаборатория, за да установи дали в течността не се е появил очаквания химичен елемент аргон вследствие на облъчването на CCl_4 с неутрино, което се предполагало, че се отделя в голямо количество от намиращия се в съседство ядрен реактор. Дейвис предполага протичането на следната ядрена реакция в неговия самоделен детектор.



където ^{37}Ar е изотоп на аргона и може да се отдели от въглеродния тетрахлорид чрез химичен анализ. Този експеримент бележи началото на серия от неуспешни опити за откриване на неутрино като елементарна частица и е известен в науката като хлор-аргонен метод. Регистрацията на неутрино се оказва една от най-трудните експериментални задачи във физиката.

Вторият си опит за регистрацията на неутрино Дейвис провежда през 1954 г., като увеличава обема на течността на 450 l и я поставя на дълбочина 6 m под земята, за да екранира мюоните от

космическия фон. След това увеличава дълбочината на 20 m., но не открива нито един атом аргон. През 1956 г. повтаря опита с два резервоара с по 2270 l, но резултатът отново е нулев. През същата година Ф. Рейнс и К. Коуен експериментално регистрират антинеутриното при обратното β -разпадане, изразени с първата реакция от (2). Те използват друга експериментална идея - взаимодействието на антинеутриното с протона от воден разтвор на кадмиев хлорид, при което протича реакцията (2). Следва аниhilация:



при която се излъчват два фотона в обратна посока. Фотоните се регистрират от брояч на гама-фотони. Този опит е признат като откритие на теоретично предсказаното неутрино.

През 1995 г. на единия от откривателите Фредерик Рейнс е присъдена Нобеловата награда за физика, която той разделя с Рудолф Пайерлс за откритието на тау-лептона.

Ентусиазиран от откритието на своите колеги Дейвис пренася резервоар от 4540 l във варовикова мина на 700 m дълбочина, за да екранира мюоните с високи енергии от космичните лъчи, но и този път опита е неуспешен. Едва през 1958 г. се появяват теоретични разработки, които дават обяснение на нулевите резултати от експериментите на Дейвис. Слънчевата светимост почти изцяло се получава от фотоните, образувани в р-р цикъл, при който се отделят 98% от общия поток слънчево неутрино. Поради ниската си енергия това неутрино не може да се регистрира чрез хлор-аргонния метод, докато борното, берилиевото и CNO-неутриното имат достатъчна енергия, за да се регистрират от хлор-аргонния метод. Като има предвид този теоретичен резултат Дейвис поставя нов опит. Той увеличава обема на течността 100 пъти. Резервоар с обем 454 000 l, пълен с перхлоретилен C_2Cl_4 е поставен в златна мина на дълбочина 1,5 km, което осигурява почти пълно екраниране на високоенергетичните мюони от космичните лъчи. На тази дълбочина може да проникне един мюон за 3 седмици. Един от най-добрите теоретици по ядрена физика пресмята, че в детектора на Дейвис от 2 до 6 хлорни атома дневно ще се превръщат в аргон при ядрената реакция (8) вследствие потока слънчево неутрино. В продължение на 30 години Дейвис регистрира средно по един атом на аргона за 3 дни, което е 3 пъти по-малко от теоретично пресметнатия поток. Тази голяма разлика

между теорията и експеримента доведе до поставянето на нови експерименти за регистриране на слънчевото неутрино. Тъй като хлор-аргонният метод не детектира неутрино с ниска енергия от р-р цикъл, бяха създадени нови галиеви детектори за неутрино с ниска енергия. Такива са експериментите GALEX (Италия) и SAGE (Русия), при които се използват огромни резервоари от галий - 30 тона в Италия и 60 тона в Русия. Тези експерименти се основават на реакцията:



Резултатът от тези опити потвърждават резултата на Дейвис. Регистрираният поток е около 50% от теоретично очаквания. Потокът от слънчево неутрино е по-малък от теоретично пресметнатия. Има две възможни обяснения на този неочакван резултат:

1) Не познаваме напълно свойствата на неутрино като елементарна частица или

2) Теоретичният модел не е адекватен.

Съвременната физика познава три вида неутрино: електронно ν_e , мюонно ν_μ и тау неутрино ν_τ . Някои физици-теоретици смятат, че неутрино има маса $m_\nu \neq 0$. Възможно е неутрино да осцилира, т.е. да се превръща от един вид в друг, докато изминава разстоянието от Слънцето до Земята за около 8 минути. Последният вид не може да се открие.

Втората възможност е Слънцето да е с около 10% по-студено от теоретично пресметнатото. От това предположение следва, че температурата и радиусът на Слънцето са по-ниски от наблюдаваните, което е неприемливо ако се имат предвид наблюдателните данни. Една друга хипотеза е, че Вселената съдържа много масивни слабо взаимодействащи частици (WIMPS), които имат маса като неутрона или протона, но подобно на неутрино слабо взаимодействат с веществото. Тези частици са гравитационно свързани със Слънцето и са дълбоко в неговото ядро. Те пренасят достатъчно енергия, за да понижат температурата в центъра на Слънцето с около 10%. Същата хипотеза допуска 90% от материята във Вселената да е в такава форма, което е известно като тъмна материя във Вселената.

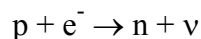
3. СВРЪХНОВАТА ЗВЕЗДА

Тази звезда избухна на 23.02.1987 г. в Големия Магеланов Облак, който е галактика-спътник на Млечния път. Свръхновата избухна в огромна емисионна мъглявина, известна като Тарантула, поради подобната на паяк форма или известна още като 30 Doradus. В максимумът на своята светимост тя е била толкова ярка, че се е наблюдавала с просто око. Тази свръхнова бе необикновена за астрономите. Първата особеност бе, че в максимума тя има светимост 10% от средната за свръхновите звезди. Второ, Прародителят на свръхновата бе син свръхгигант, докато на другите свръхнови обикновено е червен свръхгигант. Масивните звезди с маса $M = 20M_{\odot}$ описват на диаграмата на Херцшпрунг-Ръсел еволюционен трек, така че преди избухването като свръхнова звездата се превръща в син свръхгигант, който има радиус $R = 10R_{\odot}$ и температура $T = 3000 \text{ K}$. Ядрото на свръхновата се състои от He, C и незначително количество от други елементи с по-висока атомна маса. Масата на ядрото е $M_c = 6 M_{\odot}$. Непосредствено преди взрива на свръхновата ядрото се е състояло от желязо с маса $M_c = 1,5M_{\odot}$ и температура $T_c \approx 10^9 \text{ K}$.

Във Fe ядро не могат да протичат термоядрени реакции, които да поддържат хидростатичното равновесие на звездата. Има два възможни физически механизма, които могат да поддържат равновесието в едно Fe ядро:

1) Ако масата на ядрото е по-малка от $M_c \leq 1,4 M_{\odot}$, налягането на изродения електронен газ спира колапса. Образува се бяло джудже.

2) Тъй като масата на ядрото на свръхновата е $M_c = 1,5 M_{\odot}$, при колапса ядрото се превръща в релятивистки изроден газ. Скоростта на електроните $v_e \approx c$. Електроните преодоляват ядрения бариер на ядрото, при което протичат реакциите:



Колапсиращото ядро се превръща в неутронен газ с висока плътност. Разстоянието между неутроните е $\approx 10^{-14} \text{ m}$. Появяват се ядрените сили на привличане и отблъскване между неутроните. Ядрените сили на отблъскване могат да противостоят на гравитацията. Появява се нова устойчива звезда, наречена неутронна звезда, което означава, че на мястото на свръхновата 1987A трябва да е останала неутронна звезда, но такава не е открита.

По-голямата част от енергията на свръхновата се отнася от неутриното, което се образува в изобилие при колапса на Fe ядро през

първите 10 s. Пълната енергия, отнесена от неутрино по време на колапса, е $E_\nu = 10^{46}$ W. Тази огромна енергия е само 10 пъти по-малка от оптичното излъчване на всички звезди във Вселената, а тя е излъчена за секунди. Неутринните детектори в САЩ и Япония откриват неутринен взрив три часа преди визуалния взрив на свръхновата. Свръхновата се оказва от типа SN II. Астрономите класифицират свръхновите в два типа в зависимост от техните спектри: SN II имат ярки линии на водорода, а SN I нямат спектрални линии на водорода. Свръхновите SN II се получават от взрив на масивни звезди, които имат изобилие от H в атмосферата си преди взрива, докато SN I преди взрива са загубили богатите на H външни слоеве. Последният тип се дели на два подтипа: SN Ia, SN Ib.

Първият подтип SN Ia е взрив от звезда, която е преминала стадия на червения свръхгигант и се е превърнала в бяло джудже, което се състои от C и O и е компонента на полуразделена двойна система. Другата компонента е червен свръхгигант, който е препълнил граничната повърхнина на Рош. От червения свръхгигант протича газ, който се натрупва върху бялото джудже. Когато общата маса на бялото джудже стане $M_c \approx 1,4 M_\odot$ започва термоядрената реакция на горене на C. С нарастването на температурата налягането не расте, защото газът е изроден. Когато температурата премине определена граница, газът в бялото джудже престава да бъде изроден, поради което налягането нараства и звездата избухва като свръхнова, която в своя спектър няма H и He. Ако термоядрената реакция на C се разпространява в бялото джудже по-бързо от скоростта на звука, получава се топлинна експлозия. Ако термоядрената реакция на C се разпространява в бялото джудже по-бавно от скоростта на звука, получава се термоядрена експлозия. По време на взрива се образува Ni, който чрез радиоактивно разпадане преминава в Co, който от своя страна се превръща в стабилен изотоп на Fe. По времето на взрива светимостта на свръхновата се поддържа от бета-разпадането на тежки елементи. Този процес поддържа сравнително дълго време постоянна светимост около максимума на свръхновата. При бета-разпадането в изхвърлената обвивка на звездата се образуват химични елементи с атомна маса по-висока от масата на Fe.

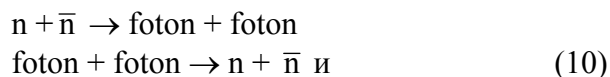
Вторият подтип SN Ib е избухване от звезда, която е преминала през стадия на WR звезда или е била в тясна двойна система. И в двата случая звездата при своята еволюция губи външните си слоеве. Поради това свръхновата SN Ib няма в своя спектър H, а е богата на He.

Свръхновите SN II експлодират поради колапс на Fe ядро. Тъй като ядрото е прозрачно за неутрино, при взрива на свръхнова звезда се излъчва огромен поток от неутрино. За регистрирането на това неутрино се строят специални детектори. Те се основават на взаимодействието на неутрино с водата, която е богата на H, а следователно и на протони. В редките случаи, когато неутрино взаимодействува с веществото, протича реакцията (2). Получава се откратен електрон или позитрон. Ако скоростта на тези частици е по-голяма от скоростта на светлината за съответната среда, наблюдава се къса светлинна траектория, т. нар. светлинно избухване, известно във физиката като ефект на Черенков. На 23 февруари 1987 г. на неутринния детектор в Япония са наблюдавани 12 следи от Черенковия ефект, а в САЩ - 8 следи. Ако неутрино има нулева маса, неговата скорост е равна на тази на светлината ($v = c$). В такъв случай всички неутрина ще пристигнат до детектора едновременно. Неутрината с различни енергии и маси ще достигнат до детектора за някакъв интервал от време. Интервалът от време, за който са пристигнали регистрираните неутрина от SN 1987A, предполага маса на неутрино между 0 и 16 eV, която съответства на горна граница на масата на неутрино $m_\nu \approx 10^{-5} m_e$. Освен неутрино, информация за колапса на свръхновите звезди могат да бъдат гравитационните вълни, които са по-трудни за детектиране от неутрино.

4. РЕЛИКТОВО НЕУТРИНО

След Големия взрив в ранната Вселена са протичали реакциите на аниhilация и раждане на неутрони и протони. Енергията на елементарните частици, които аниhilират, се дава с известната формула на Айнщайн $E = mc^2$.

Тази енергия съответства на температура $E = kT$. Температурата на ранната Вселена, при която протичат процеси на раждане и аниhilация на неутроните е $T = 1,093 \cdot 10^{13} \text{ K}$:



С разширяването на Вселената температурата намалява. При $T < 1,093 \cdot 10^{13}$ К не протича втората част от реакцията, поради което неутроните повече не се образуват. Неутронът е нестабилна частица, поради което протича бета-разпадане:

$$n \rightarrow p + e^+ + \bar{\nu}$$

Времето за полуразпадане е 15,5 min, поради което тези неутрони от ранната Вселена, наречени реликтови, не са се запазили, но са напълнили Вселената с реликрово антинейтрино. Малко по-късно температурата на Вселената е спаднала до $T = 1,088 \cdot 10^{13}$ К, при която започват да протичат реакциите на образуване и аниhilация на протоните:

$$\begin{aligned} p + \bar{p} &\rightarrow \text{foton} + \text{foton} \text{ и} \\ \text{foton} + \text{foton} &\rightarrow p + \bar{p}. \end{aligned} \quad (11)$$

При възраст на Вселената $t \approx 2$ s броят на протоните и неутроните е приблизително равен на $N_p \approx N_n$. В този момент Вселената става прозрачна за нейтрино и антинейтрино. По-нататък $N_p > N_n$. Въпреки че от този момент нататък неутроните намаляват поради бета-разпадането, Вселената не може да остане без неутрони, защото започват термоядрени реакции на сливане между протоните и неутроните в деутериеви ядра и обратното разпадане на деутериевите ядра на протони и неутрони.

$$p + n \leftrightarrow {}^2\text{D} + e^+ + \nu.$$

Деутериевите ядра се разрушават от високоенергетичните гама-фотони. Това явление е известно като деутериева тапа, което пречи за образуването на He ядра. Когато възрастта на ранната Вселена $t \approx 3$ min, енергията на фотоните намалява и деутериевите ядра вече не се разрушават от фотоните. Започва p-p цикъл. В този момент, поради бета-разпадането на неутроните, само част от тях могат да участват в p-p цикъл. Броят на протоните е много по-голям: $N_p = 6N_n$. При протичането на първата стъпка от реакцията (3), във фона на Вселената към антинейтрино от бета-разпадането на неутроните се добавя още нейтрино. Тази термоядрена реакция продължава от 2 s до 3 min. Поради това, че Вселената става прозрачна за нейтрино в първите 2 s от разширяването, т.е. много по-рано, отколкото за фотоните, за които

$t \approx 10^6$ г., фонът от неутрино и антинейтрино вследствие разширението на Вселената е по-студен, отколкото фонът на фотоните, които се образуват при р-р цикъл до 3 min и вследствие разширяването температурата е спаднала на 2,7 К. Концентрацията на неутрино, което се е образувало до 2 s е $5,5 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3}$. Като се има предвид, че броят на протоните е шест пъти по-голям от този на неутроните, $N_p = 6N_n$, оказва се, че от 2 s до 3 min от 12 протона и два неутрона се образуват едно He ядро и 10 протона, т.е. спазва се съотношението 6:1. След 3 min термоядрените реакции спират, защото температурата става твърде ниска за протичането на термоядрени реакции на синтез на He. До този момент съотношението на He ядра към протоните е 1:10. Ранната Вселена се оказва пълна с фотони, неутрино и антинейтрино, които остават като фон на съвременната Вселена, т. нар. реликтов фон.

