

Какво означава “фина настройка” на Вселената¹

Бернард Коен

Често се казва, че физичните свойства на нашата Вселена са “фино настроени”, т.е. те трябва да бъдат почти точно такива, каквито са, за да направят възможна еволюцията на интелигентни същества⁽¹⁾. Заключениеята от това твърдение, наречено “антропен принцип”, са обсъждани нашироко във философски смисъл⁽²⁾, но научната основа за твърдението⁽³⁾ не се разбира добре извън общността на специалистите. Моята цел тук е да обясня как излагам някои части от тази научна основа, макар и с известно заобикаляне на трудните и/или по-маловажни подробности, пред студенти в магистърските степени на хуманитарни и социални специалности, както и пред възрастни граждани, преминаващи програми за “учене през целия живот”, които нямат професионална научна основа. В тази статия се концентрирам върху жизнено важните процеси на водородното горене и на хелиевото горене.

Аз започвам с Вселената такава, каквато е съществувала една милисекунда след Големия взрив, като разглеждам извънредно сложните по-ранни събития като част от “сътворението” на нашата Вселена. Онова, което е било “сътворено” в края на тази милисекунда, е било:

А. Две семейства от неразрушими частици: адрони и лептони. Единствените важни адрони са нуклоните – протонът (p) и неутронът (n); единствените важни лептони са електронът (e) и неутриното (ν). Всяка от тези частици има определена маса m и определени други свойства като електричен заряд и спин, които могат да имат по една или две стойности. Ако за единица маса приемем $9,109 \cdot 10^{-31}$ kg, техните маси са съответно $p - 1836,1$; $n - 1838,6$; $e - 1,000$; $\nu -$ около $1,0 \cdot 10^{-6}$.

Б. Между тези частици действат четири фундаментални взаимодействия: гравитационно (G), електромагнитно ($E-M$), силно ядрено ($S-N$) и слабо ядрено ($W-N$). Ако приемем за единица характерната сила на силното ядрено взаимодействие ($S-N$), относителната сила на останалите е както следва: за $G - 1 \cdot 10^{-38}$, за $E-M - 0,0073$ и за $W-N - 1 \cdot 10^{-11}$. Друга важна характеристика на взаимодействията е зависимостта на породените от тях сили от разстоянието (или радиусът на действие): $1/r^2$ за G и $E-M$, около $1,3 \cdot 10^{-13}$ cm за $S-N$, и твърде малко, за да има някакво значение – за $W-N$. Важният ефект от наличието на $W-N$ е, че благодарение на него протича процесът:

$$(1) \quad p + e \leftrightarrow n + \nu .$$

¹ От майската книжка на The Physics Teacher, 2008. Статията би могла да стане основа за провеждане на обобщителен урок в края на обучението по физика и астрономия. (Бел. прев.)

В. Законите на механиката, изразени главно в уравнението на Дирак, описват как тези взаимодействия влияят на частиците. Някои от следствията от тези закони, които са съществени за нашето обсъждане, са:

(1) Енергията (E) се запазва, като масата се разглежда като енергия по силата на равенството $E = mc^2$.

(2) Частиците имат вълнови свойства, като дължината на вълната $\lambda = \frac{h}{mv}$ се изразява посредством константата на Планк h – една от “фино настроените” при “сътворението” величини, и скоростта v .

(3) Не е възможно две идентични частици да имат еднакъв спин и еднаква форма на вълната².

(4) На всяка частица съответства една античастица (означавана с чертичка над означенията e , ν , p или n), която има същата маса и обратен по знак електричен заряд. В правилото за “неразрушимост” на частиците, по-известно като “запазване броя на адроните” и “запазване броя на лептоните”, една античастица е отрицанието на частицата. Така например, ако добавим един антиелектрон \bar{e} или едно антинеутрино към двете страни на процеса (1), стига да запазват енергията, могат да се осъществят процесите на бета-разпад:

$$(2) \quad p \rightarrow n + \bar{e} + \nu$$

$$(3) \quad n \rightarrow p + e + \bar{\nu},$$

тъй като те не нарушават “запазването на броя на лептоните”.

В резултат на процесите, които нахвърляхме по-горе, няколко минути след Големия взрив се оказва, че веществото във Вселената е разпределено (по маса) между 75 % протони и 25 % ядра на He^4 (комбинация от $2n$ и $2p$, иначе известна като α -частица). По-нататък се обсъждат последвалите събития, водещи до формиране на галактики и звезди и тяхната еволюция чрез водородно горене, хелиево горене, образуване на по-тежки елементи и тяхната окончателна съдба. Сега обаче ограничаваме разглежданията си до водородното горене и хелиевото горене

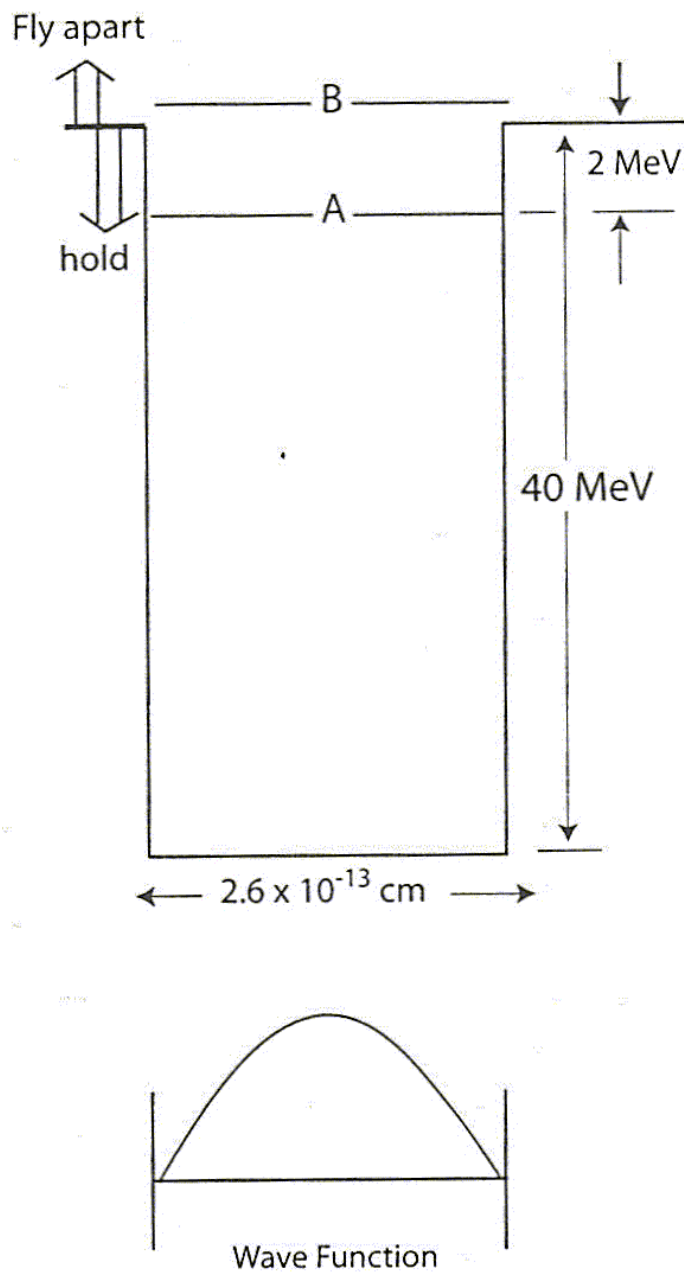
Водородно горене

² Изказано по този начин, без уговорки, това твърдение звучи погрешно. В контекста на статията обаче то е вярно, защото авторът разглежда само протони, неутрони, електрони и неутрини, а те всички са фермиони, за които принципът на Паули е валиден. (Бел. прев.)

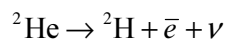
За да се разбере как се удържат електроните в атомите, или неутроните и протоните в атомните ядра, трябва да се използва вълновата природа на частиците. За целта следва да се започне със зависимостта на потенциала от разстоянието, която за електрона във водородния атом е $1/r$, но за взаимодействието между протон и неутрон се представя с много по-стръмна крива. Силно опростяващо обаче е вместо този потенциал да се разглежда едномерна потенциална яма, при това без да се изкривява съществено основата за разбирането. При това даже е възможно да се заобиколи и самото понятие потенциал, като се каже, че тази яма е “това, което държи нещата заедно” и се предположи, че вълновата функция на частиците трябва да бъде нула по стените на ямата (като по такъв начин се пренебрегнат експоненциално затихващите опашки). Това спомага лесно да се разбере наличието на енергетични нива, на най-ниското от които съответства половин дължина на вълната, равна на широчината на ямата, както е показано в долната част на фиг. 1. Аз обикновено обобщавам това до 1, $1\frac{1}{2}$, 2 ... дължини на вълната, побиращи се в ямата, плюс различните ориентации на движенията, за да обясня енергетичните нива на електроните в атомите и на нуклоните в ядрата, но това е излишно за настоящото разглеждане.

За система от два нуклона (единият бидейки привлечан от другия) картината е като представената на фиг.1. Дълбочината на ямата, 40 MeV, се определя от силата на S - N -взаимодействието. На една по-изкушена аудитория това би могло да се обясни във връзка с обсъждания потенциал. Широчината на ямата, показана като $2,6 \cdot 10^{-13}$ cm, представлява едномерен вариант на радиуса на действие на S - N -взаимодействието, по $1,3 \cdot 10^{-13}$ cm от всяка страна на центъра. Най-ниските енергетични нива, за които половината от дължината на вълната е равна на широчината на ямата, съответстват на състояние A , ако спиновете на частиците са еднопосочни, и на състояние B , ако спиновете са в противоположни посоки. Причина за тази разлика в енергиите на състоянията с еднопосочни и противоположни спинове е една особеност на силното ядрено взаимодействие – забележете, че подобна особеност при електромагнитното взаимодействие няма: по същество енергията на взаимодействие на електрона и ядрото в един атом не зависи от ориентацията на спиновете на частиците. Една система от протон и неутрон [$p + n$] би могла да бъде в състояние A , като в този случай имаме ядро на деутерий ${}^2\text{H}$, но система от два протона [$p + p$] не би могла да съществува в състояние A като ядро на някакъв изотоп на хелия – ${}^2\text{He}$, тъй като това би било система от две еднакви частици с еднакво насочени спинове и еднаква форма на вълната. Най-ниското енергетично ниво за такава система е състоянието B , което обаче е над ръба на

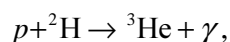
ямата! Това означава, че двата протона не са свързани и следователно се разлитат далеч един от друг за времето, което им е необходимо да пресекат ямата – около $3 \cdot 10^{-23}$ s.



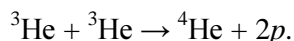
Именно с това извънредно кратко време разполага слабото ядрено ($W-N$) взаимодействие, за да предизвика процеса на бета-разпадане (превръщайки един протон в неутрон в съответствие с равенство (2)):



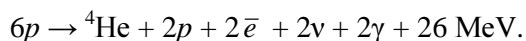
с вероятност около 10^{-3} за секунда. По такъв начин вероятността това да се случи преди двата протона да напуснат ямата е $(10^{-3}) \cdot (3 \cdot 10^{-23}) = 3 \cdot 10^{-26}$. При условията в центъра на Слънцето⁽⁴⁾: температура $15 \cdot 10^6$ К и плътност 150 g/cm^3 , всеки протон претърпява около 100 милиона (10^8) удара в секунда с друг протон, т.е. всяка секунда той образува кратко живущата система ${}^2\text{He}$. Тъй като вероятността тя да се превърне в ${}^2\text{He}$ е $3 \cdot 10^{-26}$, това означава, че даденият протон ще се окаже свързан в ядро на деутерия веднъж на $(10^8) \cdot (3 \cdot 10^{-26}) \approx 3 \cdot 10^{17}$ секунди, т.е. веднъж на 10 милиарда години. Следователно този процес продължава 10 милиарда години, преди приблизително всички протони да се свържат. Щом веднъж се формира ${}^2\text{He}$, той бързо се удря с друг протон и образува изотоп на хелия:



след което две ядра ${}^3\text{He}$ бързо дават:



Сумарно цялата тази верига от превръщания дава:



Посредством този процес, наречен “водородно горене” една звезда, подобна на Слънцето, поддържа стабилно както структурата си, така и едно постоянно излъчване на енергия за около 10 милиарда години.

Най-сигурните данни от биологията сочат, че при относително стабилни температурни условия, са необходими няколко милиарда години за възникване на живот на една планета и за еволюцията му до форми, които притежават разум. Няма друг процес в звездите, освен това водородно горене, който може да осигури подобна стабилност. Ако не съществуваше този процес, по всяка вероятност никъде във Вселената не биха могли да се появят разумни същества.

Нека сега разгледаме кои са фините настройки за този жизнено важен процес. Той изисква енергетичното ниво A да бъде под горния край на потенциалната яма, за да може въобще да се осъществи реакцията, а енергетичното ниво B да бъде над горния край – в противен случай всички протони биха се комбинирали бързо в ${}^2\text{He}$, превръщайки водородното горене в твърде кратък процес, който не може да осигури стабилност в продължение на милиарди години. Връзката между енергията $E = mv^2/2$, представена от височината над дъното на потенциалната яма и половината дължина на вълната се определя от формулата:

$$\frac{1}{2}\lambda = h/2mv = h/2\sqrt{2mE} = 2,6 \cdot 10^{-13} \text{ cm (широчината на ямата)}.$$

Доколкото A е 2,2 MeV под горния ръб на ямата, ако слабото ядрено взаимодействие бе с 6 % по-слабо, дълбочината на ямата би се намалила от 40 MeV до 37,8 MeV и състоянието A би се оказало извън ямата. Ако обаче това взаимодействие бе само 0,25 % по-силно, дълбочината на ямата би била 40,1 MeV и състоянието B би се оказало вътре в ямата. При дадената сила на слабото ядрено взаимодействие, ако неговият радиус, който определя широчината на ямата, бе с 3 % по-малък, дължината на вълната за A би била с 3 % по-малка, правейки енергията с 6 % по-голяма, което измества нивото A над горния край на ямата. Ако обаче радиусът на слабото взаимодействие бе с 0,13 % по-голям, нарастването на λ би смъкнало състоянието B вътре в ямата.

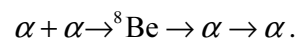
Доколкото $\lambda = h/mv = h/\sqrt{2mE}$, ако масата на нуклоните бе с 6 % по-малка, или ако стойността на h бе с 3 % по-голяма, A би се оказало над горния край на ямата и, обратно, ако m беше с 0,25 % по-голямо или ако h бе с 0,13 % по-малко, нивото B би било под ръба на ямата.

Следователно, за да съществува някъде във Вселената разумен живот, такъв, какъвто го познаваме, би трябвало силата и радиусът на слабото взаимодействие, масата на нуклоните и константата на Планк да се намират едновременно в посочените тесни граници, в което се състои и “фината им настройка”. Нещо повече, без онази особеност в детайлите на силното ядрено взаимодействие, поради която нивото на нуклони с еднакви спинове е с 2,2 MeV по-ниско от нивото на нуклони с противоположни спинове, или даже само ако тази особеност бе малко по-слабо изразена, отново нямаше да бъде възможно съществуването на разумен живот.

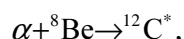
Хелиево горене

Не би могло да съществуват познатите ни форми на живот – разумен или друг, ако единствените налични химични елементи са водород и хелий. Ключовата първа стъпка към формирането на всички останали елементи е хелиевото горене.

След като водородът в ядрото на звездата се изчерпи и останат само ядра на ${}^4\text{He}$ (α -частици), ядрото се свива и нагрява, докато се достигнат условия, при които тези частици могат да участват в нова ядрена реакция⁽⁴⁾ – това означава температура $150 \cdot 10^6$ K и плътност 10^5 g/cm^3 . Този процес започва с

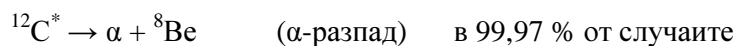


В системата $\alpha + \alpha$, представена с правоъгълна яма, най-ниското енергетично ниво на ${}^8\text{Be}$ е малко над горния край на ямата – само 0,09 MeV. В резултат на това времето на полуразпад на ${}^8\text{Be}$ е 10^{-16} s, 1000 пъти по-дълго, отколкото ако имаше малко повече енергия. В резултат на този относително дълъг живот във всеки момент в ядрото на звездата на всеки 10^9 α частици се пада едно ядро на ${}^8\text{Be}$. Ако една α -частица удари ядро на ${}^8\text{Be}$, преди то да се разпадне, протича началната реакция

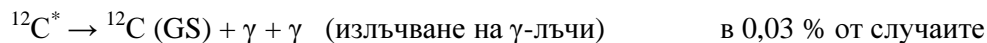


Където ${}^{12}\text{C}^*$ е състояние на въглерод-12 с енергия на възбуждане 7,37 MeV, плюс кинетичната енергия, дължаща се на енергиите на ударилите се частици. Вероятността за този процес се увеличава извънредно много, ако би могло да се формира действително състояние на ${}^{12}\text{C}$. Поради относително ниската енергия на удрящите се частици, ъгловият момент (J) на процеса е предимно $J = 0$ (т.е. много по-малко от $J = 1$) в единици на константата на Планк \hbar . Следователно увеличението на вероятността за протичане на процеса нараства силно, ако състоянието има $J = 0$. Четирите най-ниски възбудени състояния на ${}^{12}\text{C}$ имат енергии както следва: 0 (основно състояние – GS), $J = 0$; 4,4 MeV, $J = 2$; 7,65 MeV, $J = 0$; и 9,64 MeV, $J = 3$. С добавката от кинетичната енергия на удрящите се частици може да се достигне нивото 7,65 MeV и тъй като то има $J = 0$, това прави осъществяването на реакцията относително лесно. И така, ${}^{12}\text{C}$ се създава в състояние с енергия 7,65 MeV.

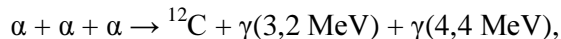
Веднъж образувано, ядрото на ${}^{12}\text{C}$ може да се разпадне по два начина:



или



(първият γ -разпад оставя ядрото в състояние с енергия 4,4 MeV, което след това излъчва отново и попада в основното състояние). Следователно, има една рядка реакция, представена общо като



която се нарича “хелиево горене”. Енергията, освобождавана при нея възпира понататъшното гравитационно свиване и води до превръщането на звездата в “червен гигант”. Това е единственият процес, чрез който може да се получи елемент, по-тежък от хелия.

Чиста случайност е, че жизнено важното състояние 7,65 MeV, $J = 0$ възниква при разширяването и свиването на външната повърхност на ядрото (осцилации на радиуса в

навън и навътре), картинно наречено “дишаша мода”. Всички ядра притежават подобно състояние.

Но ако $\alpha + {}^8\text{Be}$ може да реагират и образуват ${}^{12}\text{C}$, какво пречи по аналогичен начин $\alpha + {}^{12}\text{C}$ да образуват ${}^{16}\text{O}$? Това може да изглежда много по-лесно, тъй като все пак ${}^8\text{Be}$ се разпада само след 10^{-16} секунди, а ${}^{12}\text{C}$ е стабилно ядро. Дишашата мода на ${}^{16}\text{O}$ с $J = 0$ обаче е с енергия 6,05 MeV, докато $\alpha + {}^{12}\text{C}$ води до възбудено състояние на ${}^{16}\text{O}$ с енергия 7,16 MeV, така че 6,05 MeV е твърде ниска енергия, за да протече процесът, а следващото $J = 0$ ниво е при 10,95 MeV, т.е. – твърде много над 7,16 MeV, за да бъде достигнато. Следователно образуването на ${}^{16}\text{O}$ (GS) може да се осъществи чрез процеси с много по-малка вероятност. В резултат, само около половината от въглерода се превръща в кислород.

Това обаче не е съвсем краят на историята, защото кислородът може да бъде разрушен в една подобна реакция $\alpha + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{20}\text{Ne}$. Работата обаче е в това, че $\alpha + {}^{16}\text{O}$ води до енергия на възбуждане 4,7 MeV в ${}^{20}\text{Ne}$, докато най-ниската енергия на възбуждане на това ядро с $J = 0$ (дишаша мода) е 6,7 MeV, т.е. – твърде далеч, за да бъде достигната. Следователно вероятността за този процес е много малка и затова кислородът оцелява. Нашата Вселена и нашата Земя съдържат приблизително еднакви количество въглерод и кислород, а биолозите твърдят, че тъкмо това е едно от условията за съществуване на живота такъв, какъвто го познаваме. Невероятното е, че това условие се осъществява благодарение реализацията на три несвързани помежду си факта: че енергията на дишашата мода ($J = 0$) е твърде ниска за ${}^{16}\text{O}$, твърде висока – за ${}^{20}\text{Ne}$, и точно “колкото трябва” за ${}^{12}\text{C}$.

Да разгледаме сега аспектите на фината настройка за хелиевото горене. Времето за полуразпад от 10^{-16} секунди на ${}^8\text{Be}$ е хиляда пъти по-дълго от времето, за което една α -частица може нормално да се измъкне, тъй като има на разположение едва 0,09 MeV енергия. Положението може да се разбере отново от фиг. 1, но като се има предвид, че сега дълбочината на ямата, която сега се определя от силното ядрено взаимодействие между двете α -частици, е 10 MeV. Ако взаимодействието беше само с 1 % по-силно, дълбочината на ямата би била 10,1 MeV, оставяйки нивото на енергията под горния край на ямата и ${}^8\text{Be}$ би било стабилно ядро. В този случай хелият в звездите би се преобразувал във въглерод със скоростта, с която водородът се превръща в хелий и това би променило коренно еволюцията на звездите. Според един анализ⁽⁵⁾, всички планети, включително Земята, биха били от твърд въглерод, примесен с нишожни количества кислород и други по-тежки елементи, или изобщо без такива – една среда,

твърде неблагоприятна за развитие на живот. Същият ефект би се наблюдавал, ако дължината на вълната $\lambda = h/\sqrt{2mE}$ би била по-малка от широчината на ямата – например, ако при непроменена сила на ядреното взаимодействие нарасне радиусът на действието му. Широчината на ямата се определя от този радиус и ако той е само с 0,5 % по-голям, толкова пъти по-голяма ще бъде и дължината на вълната на състоянията, което ще намали с 1 % тяхната енергия и те ще останат под горния край на потенциалната яма. Алтернативно, ако характеристиките на силното взаимодействие са такива, каквито са, но константата на Планк бе с 0,5 % по-малка, или, като друга възможност – масата на нуклоните (а следователно и масата на α -частците) бяха малко по-малки, енергетичните нива биха били далеч над горния край на ямата и времето за полуразпад на ${}^8\text{Be}$ би било много по-малко. В този случай хелиевото горене би изисквало много по-високи температури и по-голяма плътност, което също би променило драстично звездната еволюция, вероятно водейки до експлозия на звездата преди образуването на тежки елементи.

Разположението на енергетичното ниво с $J = 0$ на необходимото място, за да увеличи рязко вероятността в ядрото на ${}^{12}\text{C}$, но не и в ядрата на ${}^{16}\text{O}$ или в ${}^{20}\text{Ne}$, е резултат от особеностите на силното ядрено взаимодействие (зависимост на силата от разстояние между нуклоните, от спиновете им и т.н.) и зависи от тях по извънредно сложен начин, но тъкмо това е решаващото. Ако това енергетично ниво не беше където трябва в ${}^{12}\text{C}$, хелиевото горене би изисквало много по-горещи и по-плътни условия, силно променяйки пътя на еволюцията на звездите и вероятно би довело до избухване на звездата преди да могат да се образуват по-тежки елементи. Фред Хойл, прочутият астрофизик, нарича наличието на това ниво на съответното място “нагласена работа”. Липсата на такова ниво в ${}^{16}\text{O}$ и в ${}^{20}\text{Ne}$ е много важно за съотношението между количествата на въглерод и кислород; според едно изследване⁽⁶⁾, ако силното взаимодействие бе с 0,5 % по-силно, на практика във Вселената нямаше да има въглерод, а ако бе с 0,5 % по-слабо, не би имало кислород. Във всяка от тези две ситуации е трудно да си представим възникването и еволюцията на живот.

Комбинирайки изискванията за водородното и за хелиевото горене, ние покажахме, че за да се развие някъде във Вселената разумен живот, такъв, какъвто го познаваме, силното ядрено взаимодействие не трябва да бъде нито с 0,5 % по-слабо, нито с 0,25 % по-силно, неговият радиус на действие не трябва да бъде нито с 3 % по-малък, нито с 0,13 % по-голям, масата на нуклоните не трябва да бъде с 6 % по-малка

или с 0,25 % по-голяма, а константата на Планк не трябва да бъде 0,13 % по-малка или с 3 % по-голяма от сегашната.

Литература

1. Y.V. Balashov, "Resource letter AP-1; The anthropic principle", *Am. J. Phys.* **59**, 1069-1076 (Dec. 1991).
2. J. Leslie, *Physical Cosmology and Philosophy* (McMillan, New York, 1989).
3. J. D. Barrow and F.J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle* (Clarendon, Oxford, 1986).
4. C.E. Rofls and W.S. Rodney, *Cauldrons in the Cosmos*, (Univ. of Chicago Press, 1988).
5. M. Rees, *Just Six Numbers* (Basic Books, New York, 2000).
6. H. Oberhummer, A. Caoto, and H. Schiotti, "Stellar production rates of carbon and its abundance in the universe", *Sci.* **289**, 88-90 (July 7, 2000).

Превод Х. Д.