Динамические обобщения формулы Дрейка: линейная и нелинейная теории

А. Д. Панов
НИИЯФ МГУ, г. Москва

1 Введение

Под *коммуникативными цивилизациями* (КЦ) будем понимать такие цивилизации нашей Галактики, от которых по каналам связи или любым другим способом (например, путем наблюдения астроинженерной деятельности) может быть получена информация, интерпретируемая как осмысленная и разумная в нашем современном понимании. Предполагается также, что такие цивилизации в принципе могут принять и интерпретировать информацию, посылаемую с Земли. Считается, что *коммуникативная фаза* в развитии любой цивилизации имеет лишь конечную длительность. Эту величину часто называют временем жизни технической цивилизации и традиционно обозначают буквой L [1, С.12]. Предполагается, что КЦ локализуются на планетах около звезд, и что в истории каждой планеты коммуникативная фаза может возникнуть только один раз. Последнее предположение является очень сильным. Обычно считается, что задачей SETI является поиск именно таких коммуникативных цивилизаций.

Будем исходить из такой постановки задачи, хотя нужно отметить, что в ней имеется ряд неявных допущений и ограничений. Например, завершение коммуникативной (в нашем понимании) фазы может означать вовсе не гибель цивилизации, но лишь переход ее в некоторое новое качество (см. также [2, С.405]) и т. д. С точки зрения развиваемого ниже формализма существенно только то, что время жизни цивилизаций в коммуникативной фазе конечно, а в нелинейной теории важно также, что в этот период цивилизации могут оказывать некоторое влияние друг на друга.

Важнейшим вопросом для проблемы SETI является то, как далеко от нас находится ближайшая КЦ. Ответ на этот вопрос зависит от числа КЦ в настоящее время в Галактике. На рис. 1 для справок показано, как зависит ожидаемое расстояние от Солнца до ближайшей КЦ от количества КЦ в Галактике. Расчет произведен методом Монте-Карло с использованием реалистичной модели распределения звезд в Галактике [3, С.405] и с учетом реального положения Солнца (8.5 кпк от центра Галактики, вблизи плоскости симметрии галактического диска).

Рассмотрим вопрос о числе КЦ. Наиболее известным способом ответа на него является использование формулы, предложенной Ф. Д. Дрейком, которая в интерпретации К. Сагана записывается так [1, С.12]:

$$N_C = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L, \tag{1}$$

где R_* — скорость образования звезд в Галактике, усредненная по всему времени ее существования, f_p — доля звезд, обладающих планетными системами, n_e — среднее число планет, входящих в планетные системы и пригодных для жизни, f_l — доля планет, на которых действительно возникла жизнь, f_i — доля планет, на которых после возникновения жизни развились ее разумные формы, f_c — доля планет, на которых разумная жизнь достигла коммуникативной фазы, L — средняя продолжительность существования коммуникативной фазы.

Формула Дрейка решает проблему числа КЦ только в довольно грубом приближении. Прежде всего, в соответствии с формулой (1), N_C не зависит от времени[1]. Между тем очевидно, что когда-то КЦ в Галактике не было совсем, затем был переходный период, когда их количество каким-то образом росло. Может существовать динамика количества КЦ, связанная с непостоянством скорости звездообразования, особенностями процесса возникновения жизни и другими факторами. Фактически формула Дрейка описывает лишь существенно стационарную ситуацию, что может оказаться очень далеко от истины. Реальное количество КЦ может сильно зависеть от того, на какую фазу динамических процессов в популяции КЦ приходится текущий момент времени. Оценка числа КЦ зависит от понимания природы этих процессов.

Большие проблемы возникают с интерпретацией некоторых множителей в формуле Дрейка. Например, что такое доля планет, на которых возникла жизнь (фактор f_l)? Если имеется в виду вероятность возникновения жизни на планете с подходящими условиями, то это число само по себе мало что дает для анализа. Например, если бы такая вероятность была равна единице, но необходимое время для зарождения жизни составляло бы несколько десятков миллиардов лет, то никакой жизни в Галактике сейчас бы не было, так как возраст галактического диска составляет всего 10–12 млрд. лет. Ясно, что реальный смысл имеет только совместное использование вероятностей вместе с соответствующими временами развития, но формула Дрейка этого не отражает. Одним из первых, кто отметил, что в вопросе о числе цивилизаций нельзя пользоваться просто вероятностями, так как речь идет о процессах, разворачивающихся во времени, был Ф. А. Цицин [4]. Если же f_l есть не вероятность, а именно доля всех реально существующих планет, пригодных для жизни, на которых жизнь действительно возникла, то эта величина сложным образом связана с динамикой возникновения планет и другими факторами и очень неудобна для оценок, так как не имеет фундаментального характера.

Необходимо такое динамическое обобщение формулы Дрейка, которое учитывало бы времена развития, непостоянство скорости звездообразования, конечное время жизни звезд. Такое динамическое обобщение было дано Дж. Крейфелдтом [5] и развито Л. М. Гиндилисом [6]. Основную формулу для числа КЦ в Галактике в теории Крейфелдта-Гиндилиса можно привести к виду

$$N_C(T) = \int_0^T d\tau\, \tilde{R}(T-\tau) \int_0^\infty d\omega\, [C(\tau) - C(\tau-\omega)] P_L(\omega), \tag{2}$$

[1]Есть неявная зависимость через величину R_*, но она вообще является неверной, если под R_* буквально понимать среднюю скорость звездообразования от момента образования Галактики до описываемого времени. Формула была бы верной, если под R_* понималась бы мгновенная скорость звездообразования, но при этом все времена развития должны быть много меньше характерных времен изменения R_*, что в нашей Галактике заведомо не выполняется.

где T — время, отсчитываемое от начала формирования Галактики; $\tilde{R}(t)$ — скорость возникновения подходящих звезд в момент $t, 0 < t < T$; $C(\tau)$ — вероятность возникновения коммуникативной фазы ранее времени τ, считая от возникновения звезды; $P_L(\omega)$ — плотность распределения КЦ по временам жизни. В теории Крейфелдта и в теории Гиндилиса формулу можно записать в одном и том же виде, но интерпретации некоторых множителей в теории Гиндилиса более проработаны. Например, в функцию $\tilde{R}(T-\tau)$ в теории Гиндилиса включен фактор конечности времени жизни звезд, а в теории Крейфелдта — нет, и др. То, что было сделано, можно назвать линейной теорией, так как количество цивилизаций оказывается линейным откликом на скорость звездообразования и линейно зависит от других модельных функций.

Настоящая работа развивает эту проблематику. Здесь воспроизведена (и немного обобщена) линейная теория Крейфелдта-Гиндилиса, но основные формулы этой теории получены новым способом и в несколько иной форме. В то время как раньше они получались из общих теоретико-вероятностных соображений сразу практически в готовом виде, здесь они получены как решение системы динамических уравнений. Хотя новый подход дает мало нового собственно для линейной теории, он допускает далеко идущие обобщения для описания нелинейных явлений, и тем очень полезен. Создан пакет программ, позволяющий в рамках линейной теории получать численные решения для *любых* модельных функций, входящих в теорию, в то время как раньше исследовались только очень примитивные модели, в которых было легко до конца провести аналитический расчет [6]. Некоторые результаты расчетов с реалистичными исходными данными (скорость звездообразования и др.) приводятся в статье. В рамках этой же модели исследованы возможные следствия гипотезы галактического самосогласованного происхождения жизни [7]. На основе линейной теории в ее новой формулировке построена динамическая нелинейная теория, которая обобщает линейную теорию и учитывает возможное взаимовлияние КЦ друг на друга. В рамках этой теории получены некоторые интересные численные решения уравнений.

2 Линейная теория

2.1 Модельные функции и определяемые величины

Так как цивилизации связаны со звездами, то, очевидно, динамику популяции цивилизаций порождает динамика популяции звезд. Следовательно начать надо с описания динамики популяции звезд. Под популяцией звезд Галактики будем понимать популяцию звезд галактического диска, так как подавляющее большинство планет земного типа должно быть сосредоточено именно в диске. Звезды гало содержат очень мало тяжелых элементов и существование планет земного типа там маловероятно. Основными характеристиками звезд являются масса и начальный химический состав. Известно, что звезды диска имеют похожий химический состав [8, стр. 150–152], поэтому основные характеристики большинства звезд диска определяются их массами. Поэтому скорость рождения звезд будем характеризовать функцией $R(M, T)$, показывающей, с какой частотой рождаются звезды массой M в момент времени T. Время T отсчитывается от начала образования галактического диска.

Функция $R(M,T)$ нормирована таким образом, что интеграл

$$\int R(M,T)dM = R_*(T) \tag{3}$$

есть полная скорость звездообразования. Продолжительность жизни звезд дается вероятностью выживания $L_S(M,\tau)$, представляющей собой вероятность того, что звезда массы M еще не сошла с главной последовательности в момент времени τ, отсчитываемый от момента ее рождения. Фактически вид этой функции для фиксированной массы M близок к обратной ступеньке единичной высоты вблизи времени жизни звезды, так как все звезды одной массы живут примерно одно и то же время (см. рис. 2), но для теории это не является существенным. Функции $R(M,T)$ и $L_S(M,\tau)$ однозначно задают динамику популяции звезд.

Далее следует задать модельные функции, определяющие динамику популяции КЦ. В принципе, следует отдельно охарактеризовать времена развития и вероятности наличия подходящих условий для каждого из переходов: возникновение жизни, возникновение цивилизации, переход цивилизации в коммуникативную стадию. Можно пойти еще дальше, и задать вероятности переходов и времена развития отдельно для каждой из фаз развития биосферы [7]. Однако в теорию соответствующие распределения вероятностей нигде не входят по отдельности. Проще охарактеризовать сразу весь процесс развития для возникновения коммуникативной фазы цивилизации начиная с момента образования звезды, не деля его на отдельные (в общем, не очень надежно установленные и отчасти произвольные) фазы. Это можно сделать с помощью единственной функции $B(M,\tau)$, дающей плотность вероятности возникновения КЦ спустя время τ после возникновения звезды для выбранной наугад звезды массой M. Функция $B(M,\tau)$ нормируется таким образом, что

$$\int B(M,\tau)d\tau = \alpha(M) \tag{4}$$

есть вероятность того, что у звезды массой M имеются условия, подходящие для возникновения КЦ[2]. Это значит, что в предположении, что время жизни звезды очень велико, КЦ возникнет хотя бы когда-нибудь с вероятностью $\alpha(M)$. Когда она может возникнуть, определяется деталями поведения функции $B(M,\tau)$ в зависимости от времени. Важно, что в вероятности $\alpha(M)$ не учтен фактор конечного времени жизни звезды. Обрыв эволюции из-за гибели звезды автоматически учитывается введенной выше функцией выживания звезды $L_S(M,\tau)$. Заметим, что пока предполагается, что функция $B(M,\tau)$ не зависит явно от галактического времени, то есть условия эволюции на планетах остаются постоянными. Это условие может быть неверным, и ниже будет рассмотрен случай, когда оно нарушается. Вероятность наличия подходящих условий считается, вообще говоря, зависящей от типа звезды. Это и естественно, так как, например, легкие звезды обладают значительно более узкой «зоной жизни», чем более тяжелые, что может уменьшать величину α, многие звезды спектрального класса K проявляют вспышечную активность, также ведущую к уменьшению α и т. д.

[2]Строго говоря, это есть среднее число планет с подходящими условиями на звезду. Теоретически эта величина может быть больше 1 и не должна интерпретироваться как вероятность. Фактически эта величина заведомо меньше 1, поэтому ее можно отождествить с вероятностью, что дальше всюду будет делаться.

Нетрудно показать, что функция $B(M,\tau)$ равна свертке по времени аналогичных функций, характеризующих отдельные фазы эволюции. Чисто технически, если все эти функции заданы по отдельности, то полную функцию $B(M,\tau)$ легко найти, вычислив соответствующую свертку.

Длительность коммуникативной фазы развития КЦ, задается функцией $L_C(M,\omega)$, которая дает вероятность выживания коммуникативной фазы спустя время ω после ее возникновения (см. рис. 2). Это есть достаточно произвольная функция, монотонно падающая от единицы до нуля при $\omega \to \infty$. Время ω будем называть просто возрастом цивилизации. Как видно, здесь тоже допускается зависимость от массы звезды, но нет явной зависимости от галактического времени или от других параметров.

Состояние популяции звезд надо описывать таким образом, чтобы зная его в некоторый момент времени, можно было однозначно предсказать состояние популяции в будущем. Для этого, очевидно, мало знать сколько имеется звезд каждого типа, нужно еще знать возраст каждой звезды, для того, чтобы иметь возможность предсказать ее судьбу с учетом конечности времени ее жизни. Нетрудно понять, что этим требованиям удовлетворяет описание популяции звезд функцией $n_S(M,\tau,T)$, задающей плотность распределения звезд по их массам M и возрастам τ в зависимости от галактического времени T. Функция нормируется таким образом, что интеграл по всем массам и всем возрастам дает полное количество звезд в момент T:

$$N_S(T) = \int_0^\infty dM \int_0^T d\tau\, n_S(M,\tau,T). \tag{5}$$

Аналогично, для того, чтобы предсказать судьбу каждой цивилизации, про нее нужно знать, каков возраст цивилизации считая от начала коммуникативной фазы, а также каков был возраст звезды, когда эта цивилизация возникла, и какова продолжительность жизни соответствующей звезды, так как коммуникативная фаза может прекратиться по двум причинам: либо в результате ее естественного конца, либо в результате гибели звезды. Нетрудно понять, что полное статистическое описание популяции цивилизаций дается функцией $n_C(M,\tau,\omega,T)$, дающей количество коммуникативных цивилизаций около звезд с массой M, появившихся в возрасте τ звезды и имеющих собственный возраст ω в момент галактического времени T. Функция нормируется таким образом, что интеграл по всем массам звезд, по всем моментам рождения и по всем возрастам цивилизаций дает полное количество цивилизаций в момент T:

$$N_C(T) = \int_0^\infty dM \int_0^T d\tau \int_0^{T-\tau} d\omega\, n_C(M,\tau,\omega,T). \tag{6}$$

Распределения $n_S(M,\tau,T)$ и $n_C(M,\tau,\omega,T)$ полностью характеризуют задачу. Если распределение $n_C(M,\tau,\omega,T)$ известно, то используя соотношение (6) можно найти $N_C(T)$ — количество КЦ в зависимости от времени. Можно найти и другие полезные величины: распределение цивилизаций по типам звезд, по возрастам, средний возраст и т. д., выписав соответствующие интегралы. Задача состоит в том, чтобы написать систему кинетических уравнений, которым подчиняются распределения $n_S(M,\tau,T)$ и $n_C(M,\tau,\omega,T)$ и решить ее.

2.2 Кинетические уравнения популяции звезд и популяции цивилизаций

Рассмотрим сначала две более простые задачи.

1. Пусть в начальный момент времени создано N_0 некоторых объектов, вероятность выживания которых задана функцией $P(T)$. Тогда ожидаемое количество этих объектов в зависимости от времени меняется по закону

$$N(T) = N_0 P(T). \tag{7}$$

Продифференцировав обе части равенства в уравнении (7) нетрудно найти, что $N(T)$ удовлетворяет уравнению

$$\frac{dN(T)}{dT} = N(T)\frac{d\ln P(T)}{dT} = -\Lambda(T)N(T). \tag{8}$$

Это уравнение является обобщением уравнения радиоактивного распада на случай неэкспоненциального закона выживания $P(T)$. Если $P(T) = \exp(-\lambda T)$ то получим обычное уравнение распада $dN/dT = -\lambda N$.

2. Пусть имеются некоторые объекты, которые характеризуются возрастом и пусть в начальный момент времени имелось распределение этих объектов по возрастам $n(\tau, T)|_{T=0} = n_0(\tau)$. Полное число объектов есть

$$N_0 = \int_0^\infty n_0(\tau)d\tau.$$

Предположим, что с объектами ничего не происходит, но объекты, естественно, стареют. Это приведет к тому, что распределение $n(\tau, T)$ будет изменяться, причем таким образом, что начальное распределение просто равномерно двигается вправо:

$$n(\tau, T) = n_0(\tau - T). \tag{9}$$

Нетрудно убедиться, что функция $n(\tau, T)$ удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial n(\tau, T)}{\partial T} = -\frac{\partial n(\tau, T)}{\partial \tau}. \tag{10}$$

Рассмотрим теперь популяцию звезд. Здесь одновременно работают оба процесса, рассмотренных выше, причем для звезд с различными массами эволюция протекает раздельно. Отсюда, имя в виду уравнения (8) и (10), сразу легко записать уравнение для функции $n_S(M, \tau, T)$. Введя обозначение для логарифмической производной

$$-\Lambda_S(M, \tau) \equiv \frac{\partial \ln L_S(M, \tau)}{\partial \tau}, \tag{11}$$

приведем уравнение для $n_S(M, \tau, T)$ к виду

$$\frac{\partial n_S(M, \tau, T)}{\partial T} = -\frac{\partial n_S(M, \tau, T)}{\partial \tau} - \Lambda_S(M, \tau)n_S(M, \tau, T). \tag{12}$$

Помимо уравнения (12) функция $n_S(M, \tau, T)$ удовлетворяет начальному условию

$$n_S(M, \tau, 0) = 0, \tag{13}$$

которое говорит о том, что в начале истории Галактики никаких звезд не было, а так же граничному условию

$$n_S(M, 0, T) = R(M, T). \tag{14}$$

Граничное условие описывает процесс звездообразования. В соответствии с (14) оно показывает, с какой скоростью появляются звезды с нулевым возрастом. Уравнение (12) вместе с начальным условием (13) и граничным условием (14) полностью задают динамику звездной популяции.

Уравнение для функции $n_C(M, \tau, \omega, T)$ получается почти также. Разница лишь в том, что коммуникативная фаза цивилизации может иметь две различные причины окончания: естественный конец, задаваемый вероятностью выживания $L_C(M, \omega)$, и конец из-за гибели звезды. Соответствующее уравнение имеет вид

$$\frac{\partial n_C(M, \tau, \omega, T)}{\partial T} = -\frac{\partial n_C(M, \tau, \omega, T)}{\partial \omega} - [\Lambda_C(M, \omega) + \Lambda_S(M, \tau + \omega)] n_C(M, \tau, \omega, T). \tag{15}$$

Здесь введено очевидное обозначение $\Lambda_C(M, \omega)$ для логарифмической производной функции $L_C(M, \omega)$. Помимо уравнения (15) функция n_C удовлетворяет начальному условию

$$n_C(M, \tau, \omega, 0) = 0, \tag{16}$$

показывающему, что в момент образования Галактики цивилизаций еще не было, и граничному условию

$$n_C(M, \tau, 0, T) = n_S(M, \tau, T) B(M, \tau). \tag{17}$$

Граничное условие (17) показывает, что источником цивилизаций являются звезды и вероятность возникновения коммуникативной фазы дается плотностью вероятности $B(M, \tau)$.

Уравнения (12), (15) вместе начальными и граничными условиями (13), (14), (16), (17) полностью задают эволюцию как популяции звезд, так и популяции цивилизаций. Оказывается, задача имеет полное замкнутое аналитическое решение. Прямой подстановкой можно проверить, что решения уравнений имеют вид:

$$n_S(M, \tau, T) = R(M, T - \tau) L_S(M, \tau) \tag{18}$$

$$n_C(M, \tau, \omega, T) = n_S(M, \tau + \omega, T) B(M, \tau) L_C(M, \omega) \tag{19}$$

Искомые функции n_S и n_C весьма простым образом выражаются через модельные функции R, L_S, B, L_C. Именно поэтому Крейфелдту и Гиндилису удалось построить линейную теорию не прибегая к решению уравнений.

Для полного количества КЦ получаем выражение:

$$N_C(T) = \int_0^\infty dM \int_0^T d\tau \int_0^{T-\tau} d\omega \, n_S(M, \tau + \omega, T) \, B(M, \tau) \, L_C(M, \omega) =$$
$$\int_0^\infty dM \int_0^T d\tau \int_0^{T-\tau} d\omega \, R(M, T - \tau - \omega) L_S(M, \tau + \omega) B(M, \tau) L_C(M, \omega). \tag{20}$$

Видно, что количество цивилизаций является линейным функционалом от функции $n_S(M, \tau, T)$, описывающей популяцию звезд, или непосредственно от функции

$R(M,T)$, задающей скорость звездообразования. Именно поэтому теорию следует назвать линейной. Формула (20) дает *полное* решение задачи о числе КЦ в линейном приближении.

Полученное решение (20) позволяет исследовать огромное количество различных задач для разнообразных модельных функций. Это разнообразие имеет смысл сразу ограничить некоторыми рамками, которые кажутся разумными. С этой целью в дальнейшем анализе будут использованы небольшие упрощения чисто технического характера.

Так как есть основания предполагать, что спектр масс рождающихся звезд слабо зависит от времени [8, стр. 189–190], будем считать, что функция $R(M,T)$ может быть факторизована на два множителя:

$$R(M,T) = R_*(T)F(M), \tag{21}$$

где $F(M)$ — нормированный на единицу начальный спектр масс звезд.

Будем считать, что все звезды одной массы имеют строго одно и то же время жизни на главной последовательности. Тогда можно записать

$$L_S(M,\tau) = \Theta[\tau_*(M) - \tau], \tag{22}$$

где Θ — функция единичного скачка, а $\tau_*(M)$ — время жизни звезд с массой M.

Будем считать, что функция $B(M,\tau)$ может быть факторизована

$$B(M,\tau) = \alpha(M)b(\tau), \tag{23}$$

где $\alpha(M)$ есть в чистом виде вероятность реализации подходящих условий для возникновения КЦ на звездах массы M, а $b(\tau)$ есть плотность вероятности, нормированная на единицу, описывающая распределение времен развития. Предполагается, что время развития не связано явно с массой звезды. Будем также предполагать, что и вероятность выживания коммуникативной фазы не связана явно с массой звезды, т. е.

$$L_C(M,\omega) = L_C(\omega). \tag{24}$$

Действительно, не видно, в чем мог бы заключаться механизм такой зависимости. Еще раз подчеркнем, что введенные выше упрощения имеют чисто технический характер, так как имеется точное аналитическое решение задачи в самом общем случае.

Выражение (20) с использованием упрощенных выражений для модельных функций может быть переписано в виде, удобном для практического интегрирования:

$$N_C(T) = \int_0^\infty dM\,\alpha(M)F(M)\int_0^T d\tau\,b(\tau)\int_0^{\omega_{max}(M)} d\omega\,R_*(T-\tau-\omega)L_C(\omega), \tag{25}$$

где

$$\omega_{max}(M) = \min[T-\tau, \tau_*(M)-\tau].$$

Из выражения (25) можно получить формулы теории Крейфелдта-Гиндилиса [5, 6]. Соответствующий вывод громоздок и вынесен в Приложение. Здесь покажем, как в предельном случае может быть получена формула Дрейка.

Предположим,что:

1. скорость образования звезд не зависит от времени;

2. все звезды имеют бесконечное время жизни;

3. время развития любой КЦ меньше возраста Галактики (текущий момент времени T) за вычетом максимальной длительности коммуникативной фазы.

Тогда легко показать, что формула (25) приводится к виду:

$$N_C = R_* \cdot \int_0^\infty \alpha(M)F(M)dM \cdot \int_0^\infty L_C(\omega)d\omega. \qquad (26)$$

Первый интеграл в формуле (26) есть вероятность реализации подходящих условий возникновения КЦ, усредненная по всем типам звезд ($\bar{\alpha}$), второй интеграл есть средняя длительность коммуникативной фазы L. Поэтому выражение (26) можно переписать в виде

$$N_C = R_* \cdot \bar{\alpha} \cdot L. \qquad (27)$$

Это и есть формула Дрейка. Отличие от выражения (1) лишь в том, что здесь все вероятностные факторы Дрейка собраны в один множитель $\bar{\alpha}$. В предположениях 1–3 факторы Дрейка приобретают ясный вероятностный смысл.

2.3 Результаты вычислений в линейной теории

В расчетах использовался начальный спектр масс звезд по данным [9] и зависимость времени жизни звезд на главной последовательности от массы, аппроксимированная в [8, С.58]. На рис. 3 показаны соответствующие функции $F(M)$ и $\tau_*(M)$.

Существуют разные способы экспериментального определения истории скорости звездообразования $R_*(T)$ (Star Formation Rate, SFR). В одном из способов для возможно большего количества звезд локального окружения Солнца (обычно используются звезды класса G) определяется их возраст. По возрасту можно определить, когда звезда возникла, и, таким образом, построить функцию распределения для времен рождения звезд. Очевидно, это распределение будет пропорционально SFR. Таким способом SFR была независимо определена в работах [10] (B. A. Twarog) и [11] (H. Meusinger). В относительной нормировке согласно работе [12] полученные функции показаны на рис. 4. Видно, что разные данные разумно согласуются между собой. В вычислениях в нашей работе использовались усредненные и интерполированные данные работ [10, 11] (показаны пунктиром на рис. 4). Другие способы определения SFR приводят к похожим результатам [12, 13], суть которых сводится к тому, скорость звездообразования прошла мощный максимум 5–7 млрд. лет назад. В области максимума интенсивность звездообразования была в несколько раз выше современной.

Для практического использования литературных данных была подобрана такая нормировка SFR, чтобы современная масса звезд диска получилась равной $8,7 \cdot 10^{10} M_\odot$ в соответствии с [14, С.70]. Это отвечает современной скорости звездообразования 11,3 штук в год, или примерно $5,5 M_\odot$ в год, так как средняя масса рождаемой звезды составляет около $0,5 M_\odot$. Эти величины согласуются с наиболее вероятными значениями современной SFR по литературным данным: $(4 \pm 1) M_\odot$ солнечных масс в год [8, С.142].

Значения SFR в [12] протабулированы от $T = 0$ до $T = 12$ млрд. лет. Соответственно, возраст галактического диска в расчетах принимается равным 12 млрд. лет. В будущее значение SFR экстраполируется равным значению в настоящее время.

В качестве вероятности реализации подходящих условий $\alpha(M)$ взята линейная функция, равная нулю при $M = 0.5M_\odot$ и равная 1 при $M = 2M_\odot$ (рис. 5, левый график). Такой выбор $\alpha(M)$ мотивируется тем, что для звезд с массой меньше $0.5M_\odot$ зона жизни становится очень узкой, а также тем, что такие звезды проявляют вспышечную активность, что не должно способствовать возникновению высокоорганизованной жизни. Значение 1 при $2M_\odot$ выбрано в достаточной степени произвольно. Для звезд массы Солнца такой выбор дает вероятность реализации подходящих условий 1/3, средняя вероятность для всех звезд, представляющих интерес (от 0,5 до 2 масс Солнца, с учетом спектра масс) оказывается около 0,02.

В качестве функции плотности распределения времен развития КЦ $b(\tau)$ выбрана функция, основанная на масштабировании и сдвиге функции

$$b_0(\tau) = \tau^2 \exp(-\tau). \tag{28}$$

При выборе конкретных параметров $b(\tau)$ для расчета имеется почти полный произвол. Чтобы как-то сократить многообразие вариантов, мы исходили из гипотезы существования универсальной шкалы времени эволюции [7], в соответствии с которой время развития КЦ на других планетах не должно сильно отличаться от 5 млрд. лет, имевших место на Земле (5 млрд. лет — это возраст Солнца). Кроме того, рассматриваются два альтернативных варианта: с существенно более короткой и существенно более длинной шкалой времени эволюции, но такие, что ни один из них не противоречит времени эволюции на Земле. Выбор функций $b(\tau)$ показан на рис. 6.

Вероятность выживания для коммуникативной фазы бралась в виде падающей экспоненты:

$$L_C(\omega) = \exp(-\omega/\Omega), \tag{29}$$

причем всюду полагалось $\Omega = 1000$ лет. Как будет пояснено ниже, выбор Ω практически не ограничивает общность результатов.

На рис. 7 показаны результаты расчетов, выполненных в указанных выше предположениях, и отвечающие различным распределениям времен развития КЦ. Все кривые имеют хорошо выраженный максимум, связанный с пиком скорости SFR. Пик в числе цивилизаций является линейным откликом на пик SFR и может быть назван *линейной демографической волной.* Для основного варианта расчетов (сплошная линия) настоящее время (12 млрд. лет) попадает в область максимума линейной демографической волны.

Обращает на себя внимание различная асимптотика при больших временах T для различных распределений времен развития. В соответствие с формулой Дрейка, для установившейся SFR следовало бы ожидать одной и той же асимптотики независимо от времени развития. Этот эффект связан с конечным временем жизни звезд, который формулой Дрейка не учитывается. Для коротких времен развития КЦ могут появляться около любых звезд, включая тяжелые короткоживущие, в то время как при больших временах развития подходящими являются только звезды класса G и более поздние. С этим и связан недостаток КЦ в асимптотике для больших времен развития.

Отметим, что, хотя рис. 7 построен для очень ограниченного набора параметров, с помощью него можно получить оценки для многих других сценариев. Так, амплитуда кривых будет пропорциональна среднему времени жизни КЦ (параметр Ω в формуле (29)) и практически не зависит от формы функции $L_C(\omega)$, если только речь не идет о временах жизни КЦ, сравнимых с временем развития или возрастом Галактики. Амплитуда кривых будет также пропорциональна максимальному значению вероятности реализации подходящих условий (см. рис. 5). Кроме того, с использованием функций $b(\tau)$ на рис. 6 графики на рис. 7 можно грубо интерполировать для получения зависимостей $N_C(T)$ и для других времен развития. Ясно, что в задаче о числе цивилизаций очень высокая точность пока не требуется. Приведем простой пример использования рис. 7. Пусть среднее время жизни цивилизации составляет 100000 лет, но максимальное значение вероятности реализации подходящих условий не 1, как на рис. 5, а лишь 0,1. Тогда амплитуда кривых на рис. 7 увеличится в 100 раз за счет роста времени жизни и уменьшится в 10 раз за счет убыли вероятности. Если предполагать, что гипотеза универсальной шкалы времени эволюции верна, то по графику получаем, что в настоящее время в Галактике должно быть около 10000 КЦ. С помощью рис. 1 находим, что вероятное расстояние до ближайшей цивилизации около 730 св. лет со стандартным отклонением около 300 св. лет.

2.4 Гипотеза самосогласованного галактического происхождения жизни и динамика популяции КЦ

До сих пор предполагалось, что условия протекания эволюции, приводящие к возникновению КЦ около звезд, остаются неизменными на протяжении всей истории галактического диска. В действительности это может быть не так по многим причинам (например, из-за изменяющегося фона космических лучей). И это заведомо не так, если верна гипотеза самосогласованного галактического происхождения жизни [7].

В этом случае до первого появления жизни в результате фазового перехода Галактики, эволюция, приводящая к возникновению КЦ, на планетах даже не могла начаться. После фазового перехода планеты, на которых протекает эволюция жизни, делятся на две категории.

В первую категорию входят планеты, на которых жизнь возникла в непосредственно в процессе фазового перехода. Это огромное число планет, которые непосредственно перед переходом находились в фазе предбиологической эволюции. На таких планетах почти синхронно (с точностью до характерного времени панспермии, около 300 млн. лет [7]) начинается эволюция биосферы. Если верна также и гипотеза универсальной шкалы времени эволюции, на этих планетах с относительно небольшим разбросом по времени (порядка ширины распределения $b(\tau)$) возникают КЦ, что должно привести к мощной вспышке разума в Галактике спустя среднее время развития до коммуникативной фазы после фазового перехода. Получаем демографический пик, который будем называть *фазовым пиком*, в отличие от линейной демографической волны, связанной с максимумом SFR.

Во вторую категорию входят планеты, сформировавшиеся после фазового перехода. На таких планетах эволюция биосферы начинается почти сразу после формирования планеты. Время развития до возникновения жизни на этих планетах практически равно нулю, так как жизнь на них появляется исключительно в результате панспермии. Судя по всему, Земля принадлежит к планетам второй категории, так как время предбиологической эволюции на ней было близко к нулю.

Найдем количество КЦ в Галактике с учетом фазового перехода. Легче всего количество цивилизаций для каждой из двух категорий планет найти отдельно, и полное количество КЦ вычислить как сумму. Обозначив количество цивилизаций на планетах первой и второй категории соответственно как $N_C^{(1)}(T)$ и $N_C^{(2)}(T)$ получим:

$$N_C(T) = N_C^{(1)}(T) + N_C^{(2)}(T). \tag{30}$$

Предполагая, что время фазового перехода Галактики много меньше ширины распределения времен развития $b(\tau)$, можно считать фазовый переход мгновенным. Обозначим момент фазового перехода как T_0. Тогда можно показать, что $N_C^{(1)}(T)$ дается выражением:

$$N_C^{(1)}(T) = \int dM\, F(M)\alpha(M) \int\limits_{T-T_0}^{T_{max}(M)} d\tau\, R_*(T-\tau) \times \int\limits_0^{T-T_0} b(T-T_0-\omega) L_C(\omega)\, d\omega, \tag{31}$$

где

$$T_{max}(M) = \max\{\min[T, \tau_*(M)],\, T-T_0\}.$$

Формула (31) является обобщением формулы, полученной В. С. Троицким (см. [15], формула (8)), который исследовал динамику популяции КЦ в предположении однократного «мгновенного» происхождения жизни. В формуле Троицкого не учитывалась переменность SFR, время жизни КЦ считалось строго фиксированным и имелись некоторые другие упрощения, которых нет в нашей формуле (31).

Нетрудно понять, что выражение для $N_C^{(2)}(T)$ можно получить точно также, как и основную формулу для числа КЦ линейной теории (20), но нужно считать, что галактический диск начал формироваться только в момент фазового перехода T_0. Это приводит к тому, что остается справедливой формула (20), но в верхних пределах всех интегралов нужно заменить T на $T - T_0$.

На рис. 8 приведены результаты расчетов динамики числа КЦ при возникновении жизни в фазовом переходе Галактики, в предположении $T_0 = 6$ млрд. лет (см.[7]). Предполагается также, что справедлива гипотеза универсальной шкалы времени эволюции, т. е. распределение $b(\tau)$ описывается средней кривой на рис. 6. Для сравнения на рис. 8 показан также расчет в простой линейной модели. Видно, что земная цивилизация в пределах разумных погрешностей оказывается где-то вблизи максимума фазового пика. Не исключено, что мы живем в особую эпоху галактической истории. Как будет видно из следующего раздела, мощный демографический пик особенно важен в связи с возможными нелинейными явлениями в развитии популяции КЦ, которые могут привести к новому фазовому переходу в Галактике, на сей раз связанному со становлением особого рода культурной среды. Наша эпоха может быть выделена близостью к этому второму фазовому переходу.

Земля, как уже говорилось, в рамках рассматриваемых здесь моделей должна быть отнесена к планетам, сформировавшимся после фазового перехода Галактики к эре жизни. Как видно из рис. 8, бóльшая часть КЦ, связанных с такими планетами, появляется после фазового пика. Однако, как видно из того же рисунка, существуют планеты этой категории, на которых КЦ возникают до фазового пика, хотя их число относительно невелико. Поэтому нельзя с уверенностью сказать, находится ли фазовый пик в прошлом, настоящем, или будущем.

В заключение этого раздела сделаем одно методическое замечание. Фазовый переход к эре жизни — это явление существенно нелинейное, но здесь не описывалась внутренняя динамика этого перехода. С точки зрения развитого формализма переход был некоторым внешним фактором, который был описан феноменологически, а при описании реакции популяции КЦ на этот внешний фактор мы не вышли за рамки линейной теории. Из формулы (31) видно, что $N_C^{(1)}(T)$ зависит линейно от каждой из модельных функций. Поэтому по отношению к рис. 8 верны все замечания, которые делались к рис. 7 о его связи с другими сценариями эволюции КЦ.

3 Нелинейная теория.

3.1 Нелинейные процессы в популяции космических цивилизаций

В изложенной выше линейной теории распределения $B(M, \tau)$ и $L_C(\omega)$, описывающие рождение и жизнь коммуникативных цивилизаций, предполагались не зависящими от галактического времени ни явно, ни косвенно — через количество имеющихся цивилизаций или каким-нибудь иным способом. Функция $R(M, T)$, описывающая скорость образования звезд, также считалась никак не зависящей от популяции КЦ. Это так до тех пор, пока предполагается, что цивилизации не влияют ни друг на друга, ни на условия возникновения других цивилизаций, ни на условия возникновения звезд. Теория, предполагающая такое влияние, перестает быть линейной. Три важных распределения, на которые в принципе может оказывать влияние деятельность КЦ — $R(M, T)$, $B(M, \tau)$ и $L_C(\omega)$, — наводят на мысль о трех основных возможных механизмах нелинейных связей.

Первая возможность — «искусственное создание звезд», влияние на спектр масс образовавшихся звезд и т. д. Не будем останавливаться на этой возможности подробно.

Вторая возможность — влияние на распределение $B(M, \tau)$ — должна означать какой-то сорт направленной панспермии жизни либо разумной жизни. Нетрудно понять, что такое влияние может породить процесс с положительной обратной связью: чем больше цивилизаций, тем интенсивнее идет процесс панспермии, тем больше возникает новых цивилизаций, что еще усиливает процесс панспермии и т. д. Это может приводить к лавинообразным явлениям, напоминающим фазовый переход в масштабе Галактики с переходом в эру жизни [7].

Очевидно, направленная панспермия требует некоторого межзвездного транспорта. По поводу возможности межзвездных перелетов ничего не известно, поэтому трудно сделать какие-то разумные предположения о количественных характеристиках процесса направленной панспермии. Такие процессы трудно моделировать, и здесь не будет предприниматься такой попытки.

Третьей разновидностью нелинейных явлений — связанной с изменениями вероятности $L_C(\omega)$, — может быть взаимное влияние цивилизаций друг на друга за счет контактов по каналам связи. Имеется в виду, что под влиянием контактов может меняться длительность коммуникативной фазы. Вопрос о том, как может меняться эта длительность, конечно, крайне сложный. Однако, не ограничивая общности, можно считать, что КЦ делятся на три категории: первая категория — для которых контакт «вреден», так как сокращает длительность коммуникативной фазы, вторая категория — нейтральные КЦ, на продолжительность жизни которых контакт не оказывает влияния, и третья категория — для которых контакт «полезен», так как продлевает коммуникативную фазу. Назовем цивилизации последней категории *экстравертными*, и будем использовать для них аббревиатуру ЭКЦ. Наше мнение, которое мы стараемся обосновать в статье [16], состоит в том, что значительная часть КЦ является экстравертной.

Можно предполагать, что одним из важных свойств ЭКЦ является в каком-то смысле увеличение эффективности поиска партнеров и установления связи под влиянием уже установленных контактов. Действительно, на основе приобретенного опыта такие цивилизации получают дополнительную информацию, как и где можно найти другие цивилизации, и, кроме того, польза от установленного контакта может стимулировать поиски новых контактов и передачу собственной информации. Это обстоятельство ниже будет существенным образом использовано.

Важно, что если ЭКЦ вообще существуют, то в их популяции могут происходить интересные нелинейные явления. Нетрудно понять, что здесь может начаться процесс с положительной обратной связью. Чем больше в Галактике ЭКЦ, тем выше становится вероятность контакта, контакт увеличивает продолжительность жизни ЭКЦ, что ведет к росту популяции ЭКЦ, что еще более увеличивает вероятность контакта и т. д. Петля положительной обратной связи может привести к лавинообразному переходу в масштабе Галактики, сопровождаемому мощной вспышкой числа ЭКЦ с последующей стабилизацией плотности популяции на очень высоком уровне. ЭКЦ становятся преобладающим типом цивилизаций в Галактике, даже если до перехода это было не так. Некоторые детали этого явления и другие важные особенности динамики популяции ЭКЦ с учетом взаимного влияния по каналам связи описывает предлагаемый ниже формализм.

3.2 Общая нелинейная теория влияния по каналам связи

Для дальнейшего изменим интерпретацию распределений $B(M,\tau)$ и $L_C(M,\omega)$ (см. разд. 2.1). Пусть теперь они описывают не любые КЦ, а только ЭКЦ. В этом случае остается справедливым весь развитый выше линейный формализм, но он описывает популяцию не всех КЦ, а только подпопуляцию ЭКЦ. Покажем, как исходя из линейной теории можно построить нелинейную теорию влияния по каналам связи.

В линейной теории текущее состояние отдельной цивилизации описывалось только возрастом коммуникативной фазы ω. Это вместе с продолжительностью жизни звезды и моментом рождения цивилизации давало возможность статистически предсказать судьбу каждой цивилизации. Такому описанию соответствовало представление всех КЦ Галактики функцией распределения $n_C(M,\tau,\omega,T)$. Для учета взаимного влияния цивилизаций по каналам связи их надо описать более детально. Будем считать, что наряду с возрастом каждая цивилизация описывается некоторым вектором параметров $\mathbf{q}$, который мы будем называть «потенциалом». Термин «потенциал» надо понимать весьма условно. Это некоторый набор характеристик ЭКЦ, от которого зависит, прежде всего, ожидаемая продолжительность коммуникативной фазы (но не только это, см. ниже). Предполагается, что контакт в каком-то смысле увеличивает потенциал ЭКЦ, и благодаря этому увеличивается продолжительность коммуникативной фазы. Таким образом, следует считать, что вероятность выживания цивилизации зависит от ее потенциала, и функция распределения цивилизаций тоже должна включать потенциал одним из аргументов:

$$L_C(M,\omega) \;\;\to\;\; L_C(M,\mathbf{q},\omega) \tag{32}$$

$$n_C(M,\tau,\omega,T) \;\;\to\;\; n_C(M,\tau,\mathbf{q},\omega,T). \tag{33}$$

Уточним теперь представление об увеличении эффективности установления контактов под действием уже установленных контактов. Предположим, что от состояния двух цивилизаций A и B, то есть от их возрастов и потенциалов $(\mathbf{q}_A,\omega_A)$ и $(\mathbf{q}_B,\omega_B)$, зависит предельное расстояние, на котором они могут установить между собой хотя бы одностороннюю связь. Обозначим это расстояние как $r(\mathbf{q}_A,\omega_A,\mathbf{q}_B,\omega_B)$. Увеличение эффективности контактов будет означать просто рост предельного расстояния контакта с ростом потенциала цивилизаций.

Теперь нужно ввести динамическую модель взаимодействия цивилизаций — как меняется потенциал цивилизации под влиянием контакта. Тогда через функцию $L_C(M,\mathbf{q},\omega)$ можно будет узнать, как меняется ожидаемое время ее жизни. В случае получения цивилизацией A информации от единственной цивилизации B такая модель может быть фиксирована соотношением

$$\frac{d\mathbf{q}_A}{dT} = \mathbf{K}(\mathbf{q}_A,\omega_A,\mathbf{q}_B,\omega_B), \tag{34}$$

которое показывает только, что скорость изменения потенциала цивилизации A зависит от потенциала и возраста обеих цивилизаций. Функция $\mathbf{K}(\mathbf{q}_A,\omega_A,\mathbf{q}_B,\omega_B)$ задает модель контакта. В общем случае должна быть задана последовательность аналогичных функций, описывающая взаимодействие с двумя, тремя, и т. д. цивилизациями. Существенное предположение, фиксированное формулой (34), заключается в том, что скорость изменения контакта зависит только от текущих параметров цивилизаций, но не от предыстории.

Уравнение (15) для функции распределения цивилизаций сохраняет свою силу, в нем лишь появляется новый член, описывающий «ток» потенциала цивилизаций в $\mathbf{q}$-пространстве благодаря взаимодействию между ними. Кроме того, краевое условие теперь должно описывать, с какими весами ЭКЦ начинают коммуникативную фазу. Полная задача для функции распределения $n_C(M,\tau,\mathbf{q},\omega,T)$ записывается следующим образом:

$$\frac{\partial n_C}{\partial T} = -\frac{\partial n_C}{\partial \omega} - [\Lambda_C(M,\mathbf{q},\omega) + \Lambda_S(M,\tau+\omega)]n_C - \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}}[\mathbf{j}(\mathbf{q},\omega,T)n_C] \tag{35}$$

$$n_C(M,\tau,\mathbf{q},0,T) = n_S(M,\tau,t)B(M,\tau,\mathbf{q}) \tag{36}$$

$$n_C(M,\tau,\mathbf{q},\omega,0) = 0. \tag{37}$$

Нетрудно видеть, что уравнения (35), (36), (37) являются прямыми аналогами уравнений соответственно (15), (17), (16) линейной теории.

Выражение для тока $\mathbf{j}(\mathbf{q}, \omega, T)$ определяется деталями модели контакта. В общем случае (с учетом множественных контактов) получить для него выражение — не простая задача. В простейшем случае можно предполагать, что эффект от взаимодействия с несколькими цивилизациями одновременно аддитивен, т. е. при приеме цивилизацией A информации одновременно от цивилизаций $B_1, B_2, \ldots$ скорость изменения потенциала $\mathbf{q}_A$ определяется суммой членов, отвечающих каждой цивилизации B_i:

$$\frac{d\mathbf{q}_A}{dt} = \sum_i \mathbf{K}(\mathbf{q}_A, \omega_A, \mathbf{q}_{B_i}, \omega_{B_i}). \tag{38}$$

Введем важную для дальнейшего характеристику — среднее число партнеров по контакту в популяции ЭКЦ. Обозначим эту величину X, и будем называть ее степенью насыщенности контактов. Состояние Галактики, когда $X \ll 1$ будем называть *эрой одиночества*, состояние $X > 1$ — *эрой насыщения контактов.*

Введенное выше аддитивное приближение во всяком случае хорошо будет описывать как начальную стадию развития нелинейных процессов — переход от эры одиночества к эре насыщения контактов, так и возможную стадию завершения эры насыщения контактов (если темп возникновения новых цивилизаций по какой-то причине катастрофически падает), так как в обоих случаях процесс протекает при малой вероятности контакта одновременно со многими цивилизациями (X сопоставимо или меньше единицы). Можно показать, что для аддитивной модели контакта выражение для тока имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
&\mathbf{j}(\mathbf{q}, \omega, T) = \\
&\quad \frac{4\pi}{V_G} \int d\omega' \int d\mathbf{q}' \mathbf{K}(\mathbf{q}, \omega, \mathbf{q}', \omega') \int_{T - r(\mathbf{q}, \omega, \mathbf{q}', \omega')/c}^{T} c dT' [c(T - T')]^2 \cdot \\
&\quad \int dM \int d\tau n_C(M, \tau, \mathbf{q}', \omega', T').
\end{aligned} \tag{39}$$

В формуле (39) V_G означает объем галактики, а c — скорость света. Выражение (39) получено для очень большой и однородной галактики, т. е. для такой галактики, где цивилизации распределены равномерно и краевыми эффектами можно пренебречь. В более реалистичной модели следовало бы вводить явную зависимость плотности распределения цивилизаций и всех модельных функций от координат, а в выражении (39) появилось бы интегрирование по объему Галактики.

3.3 Численно решаемая нелинейная модель

Из-за наличия члена, отвечающего току потенциала, уравнение (35) оказывается очень сложным. Это нелинейное интегро-дифференциальное уравнение в частных производных и кратных интегралах. Об аналитическом решении не может быть и речи. Однако, оно не безнадежно сложное и поддается численному решению для простых моделей контакта при некоторых дополнительных упрощающих предположениях. Одна такая модель рассмотрена в этом разделе.

Будем считать, что потенциал цивилизации представляется единственным скалярным параметром q (вместо введенного выше вектора параметров $\mathbf{q}$), представляющим собой что-то вроде условного технологического потенциала. Предполагается, что все остальные существенные характеристики цивилизации являются однозначными функциями q. В частности, энергетические и информационные ресурсы цивилизации в каком-то смысле пропорциональны q (здесь нет смысла уточнять это утверждение, оно носит сугубо эвристический характер). Более того, предполагается, что q представляет не мгновенное значение потенциала, а значение потенциала, усредненное по всей коммуникативной фазе. Будем считать по определению, что потенциал есть безразмерная величина, определенная таким образом, что для изолированных ЭКЦ потенциал в среднем равен точно единице. Контакт между цивилизациями влияет на потенциал так, что потенциал может увеличиваться (что отражается и на значении этого параметра при усреднении по всей коммуникативной фазе).

Будем пренебрегать конечностью времени жизни звезд, кроме того опустим все зависимости модельных функций от массы звезды. Для простоты будем также считать, что вероятность выживания цивилизации является чистой экспонентой, следовательно в уравнении (35) вместо функции $\Lambda_C(M, \mathbf{q}, \omega)$ будет фигурировать более простая функция $\Lambda_C(q)$, а слагаемое $\Lambda_S(M, \tau + \omega)$ вообще будет отсутствовать.

Далее, *a*) поскольку q есть усредненная по времени жизни цивилизации характеристика; *b*) поскольку вероятность выживания цивилизации есть чистая экспонента, следовательно плотность вероятности окончания коммуникативной фазы не зависит от времени; *c*) поскольку гибель звезды не может служить причиной гибели цивилизации, то возраст цивилизации ω и момент ее рождения τ вообще можно не рассматривать. Поэтому всю популяцию ЭКЦ вместо полной функции $n_C(M, \tau, \mathbf{q}, \omega, T)$ можно описывать более простой функцией $n_C(q, T)$.

Так как рассматривается модельная очень большая и однородная галактика, то удобно от функции распределения $n_C(q, T)$ для всей галактики перейти к функции распределения плотности цивилизаций в единичном объеме $\rho(q, T)$, нормированной таким образом, что

$$V_G \int \rho(q, T) dq = N_C(T). \tag{40}$$

Не нарушая общности, удобно несколько изменить постановку задачи. Так как возможное влияние КЦ на скорость рождения новых цивилизаций не рассматривается, то скорость генерации новых цивилизаций можно считать заданной функцией времени. Эту функцию легко получить из расчетов в рамках линейной теории. Скорость рождения цивилизаций, нормированную на единицу объема галактики, обозначим $f(T)$, а плотность распределения параметра q для изолированных цивилизаций обозначим $\phi_0(q)$. Распределение вероятностей $\phi_0(q)$ нормировано на единицу, и предполагается, что среднее значение q для распределения ϕ_0 равно единице, так как средний потенциал изолированной цивилизации по определению есть единица. С учетом всех перечисленных предположений уравнения (35), (36) могут быть переписаны в виде единственного уравнения

$$\frac{\partial \rho(q, T)}{\partial T} = -\Lambda_C(q)\rho(q, T) + f(T)\phi_0(q) - \frac{\partial}{\partial q}[j(q, T)\rho(q, T)]. \tag{41}$$

Физический смысл уравнения (41) прост. Первое слагаемое в правой части описывает сток функции распределения за счет исчезновения цивилизаций; второе слагаемое описывает источник функции распределения за счет возникновения новых цивилизаций, распределенных по потенциалам согласно ϕ_0; третье слагаемое описывает перенос функции распределения в пространстве q за счет взаимодействия цивилизаций, причем $j(q,T)$ есть соответствующий ток. Начальные условия для функции $\rho(q,T)$ могут быть заданы в любой момент времени произвольно, и уравнение (41) может решаться как начальная задача Коши.

Осталось получить явное выражение для тока $j(q,T)$, для чего нужно уточнить модель контакта (34). Рассмотрим контакт двух цивилизаций A и B, причем A — приемник информации, B — передатчик. Предположим, что увеличение потенциала приемника пропорционально количеству полученной информации, и, следовательно, пропорционально потенциалу передатчика и времени контакта. Далее, учтем тот опытный факт, что развитие идет, как правило, от достигнутого уровня, то есть имеет мультипликативный, а не аддитивный характер. Тогда закон изменения потенциала цивилизации A под действием контакта с цивилизацией B можно записать в дифференциальной форме следующим образом: $dq_A = Kq_Aq_BdT$, где K — некоторый коэффициент пропорциональности. В процессе контакта «обучаемость» цивилизации A может изменяться, например — падать, и при достижении некоторого предельного потенциала вообще достигать насыщения. Это обстоятельство можно учесть, введя в коэффициент K зависимость от q_A и q_B. Тогда модель контакта между двумя цивилизациями может быть записана как

$$\frac{dq_A}{dT} = K(q_A, q_B)q_Aq_B, \tag{42}$$

что является специальным частным случаем уравнения (34). Предполагая эффект от нескольких контактов одновременно аддитивным, непосредственно из выражения (39) можно получить выражение для тока

$$j(q,T) = 4\pi c^3 q \int dq'\, q' K(q,q') \int_{T-r(q,q')/c}^{T} dT'(T-T')^2 \rho(q',T'), \tag{43}$$

где предельное расстояние контакта $r(q,q')$ нужно понимать в усредненном смысле, подобно тому, как понимается и сам параметр q (поэтому у функции $r()$ отсутствуют аргументы ω, ω').

Для проведения расчетов необходимо задать модельные функции $K(q_A, q_B)$, $\Lambda_C(q)$, $r(q_A, q_B)$. Было исследовано множество различных вариантов модельных функций, ниже мы остановимся только на тех, которые были использованы в расчетах, результаты которых здесь приводятся.

Необходимо составить представление о том, каков может быть масштаб величины коэффициента K в модели контакта (42). Предположим, что когда ЭКЦ A находится под влиянием B в течение всей коммуникативной фазы, q_A увеличивается по порядку величины на q_B, по крайней мере в случае $q_A \sim 1$ и $q_B \sim 1$ в исходном состоянии. Нетрудно понять, что это имеет место, когда K по порядку величины совпадает со средним обратным временем жизни изолированной цивилизации $\Omega_0 = 1/L_0$: $K_0 \equiv K(1,1) \sim \Omega_0$ (мы ввели обозначение L_0 для среднего времени жизни изолированной цивилизации. Принималось $L_0 = 1000$ лет). Именно такое значение K_0 было принято в расчетах. Для простоты считалось, что коэффициент K фактически зависит только от потенциала приемника $K = K(q_A)$, при этом таким образом, что $K(1) = \Omega_0$, но по мере роста потенциала цивилизации ее способность к «обучению» постепенно падает до нуля. Использованная функция показана на рис. 9.

Считалось, что время жизни коммуникативной фазы растет пропорционально квадрату потенциала цивилизации (но сам потенциал может расти в очень ограниченных пределах, как это понятно из рис. 9). Так как так должно быть $\Lambda_C(1) = \Omega_0$, то

$$\Lambda_C(q) = \Omega_0/q^2. \tag{44}$$

Предельное расстояние контакта было выбрано в виде

$$r(q_A, q_B) = r_0 \times (q_A q_B)^{1/5}, \tag{45}$$

где $r_0 = 400$ св. лет есть предельное расстояние контакта для цивилизаций единичного потенциала. Выражение для $r(q_A, q_B)$ получено в предположении, что прием и передача ведутся только с помощью остронаправленной антенны. В статье [16] мы пытаемся пояснить, почему такое предположение не является произвольным. Для того, чтобы зарегистрировать сигнал от цивилизации B, находящейся на расстоянии r, нужно индивидуально изучить каждую подозрительную звезду на меньшем расстоянии. Предположим, что необходимые энергозатраты на мониторинг одной звезды пропорциональны квадрату расстояния до нее. Тогда суммарные энергозатраты на просмотр всех звезд ближе r будут пропорциональны r^5. В предположении, что количество энергии, которое цивилизация A может затратить на поиски соседей, пропорционально q_A, получим, что предельное расстояние коммуникации будет зависеть от q_A как $q_A^{1/5}$. Аналогичные рассуждения показывают, что и от q_B расстояние зависит как $q_B^{1/5}$. Так получается формула (45)

Распределение $\phi_0(q)$ было выбрано в виде

$$\phi_0(q) = \frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} \exp\frac{(q_0 - q)^2}{2\sigma^2}, \quad q_0 = 1,\ \sigma = 0.212. \tag{46}$$

При расчетах удобно следить за изменением величины насыщенности контактов X. Можно показать, что в веденной модели $X(T)$ дается выражением:

$$X(T) = \frac{\int dq\,\rho(q,T) \int dq'\,\rho(q',T)\frac{4\pi}{3} r^3(q,q')}{\int dq\,\rho(q,T)}. \tag{47}$$

3.4 Результаты расчетов в нелинейной модели

Начнем с результатов модельных расчетов, иллюстрирующих принципиально важный эффект бистабильности в популяции КЦ. Эти расчеты не имеют прямого отношения к ситуации в нашей Галактике. Суть явления бистабильности заключается в том, что при одной и той же скорости рождения новых цивилизаций в популяции имеется два различных стабильных состояния — с низким числом цивилизаций и низким значением насыщенности контактов X и с большим количеством цивилизаций и величиной X больше или порядка 1. Явление бистабильности иллюстрирует рис. 10.

Поясним, как проводился расчет и что значат полученные результаты. Предполагалось, что в начальный момент времени в галактике цивилизации отсутствуют, после чего скорость рождения цивилизаций F начинает медленно расти. Скорость роста бралась настолько медленной, чтобы в любой момент времени в популяции достигалось почти полное равновесие. На рис. 10 на левом графике показана зависимость числа цивилизаций от F (число цивилизаций приведено к объему нашей Галактики), на правом графике — зависимость степени насыщенности контактов X от F. По мере роста F растет и равновесное количество цивилизаций вместе с насыщенностью контактов, при этом точка на графиках сначала движется по нижней ветке петли гистерезиса слева направо и насыщенность контактов остается много меньше единицы. Имеет место эра молчания.

Однако из-за роста числа контактов ситуация становится все менее стабильной, и когда F достигает величины примерно 1,35 цивилизаций в год, а $X \approx 0,05$, равновесие нарушается. Из-за положительной обратной связи контакт-время жизни число цивилизаций и вероятность контактов начинают расти лавинообразно, при этом число цивилизаций делает скачок вверх примерно на порядок, а насыщенность контактов примерно на два порядка, достигая значения 10. Скачок насыщенности контактов превышает скачок числа цивилизаций, так как в соответствие с моделью под действием контакта растет не только время жизни, но и предельное расстояние коммуникации. Поэтому вероятность контакта растет не только за счет роста числа КЦ, но и за счет роста их «дальнобойности». Рост лавины обрывается из-за исчерпания возможности «обучения» при больших значениях потенциала q (см. рис. 9). Длительность перехода составляет несколько десятков L_0.

При дальнейшем росте F количество КЦ и X продолжают расти, но уже плавно, без скачков. Наступила эра насыщения контактов.

Затем в расчете рост скорости рождения цивилизаций прекращается, и начинается медленное, равновесное ее снижение. Сначала точка на графике движется в обратном направлении, повторяя траекторию при росте F. Однако, при достижении критического значения F, при котором произошел прямой переход из эры молчания в эру насыщения контактов, обратный переход не происходит. Этому препятствует положительная обратная связь количество контактов-время жизни. Вместо резкого скачка вниз продолжается медленное снижение N_C и X. Эра насыщения контактов продолжается. Можно сказать, что имеет место «закалка» состояния насыщенности контактов. На этом участке графика каждому значению F отвечает два различных устойчивых состояния популяции цивилизаций: одно на нижней ветви петли гистерезиса, другое на верхней ветви. Это и есть бистабильность.

Только при достижении величиной X значения около 0,5 положительная обратная связь уже не может удержать фазу насыщения контактов от разрушения, и количество цивилизаций и X резко падают и снова наступает эра молчания.

Существенно, что обратный переход наступает при значении F много меньшем, чем прямой. Замечательно также, что прямой переход начинается при значении X много меньшем единицы, поэтому непосредственно накануне перехода подавляющему числу цивилизаций должно казаться, что они единственные обитатели Галактики. После перехода каждая КЦ обеспечена несколькими партнерами по контакту.

Эффект бистабильности может быть крайне важным для судеб популяции КЦ нашей Галактики. Если переход в эру насыщения контактов когда-нибудь произойдет, то полученное состояние Галактики будет очень стабильным, и может быть разрушено только при катастрофическом падении скорости возникновения новых цивилизаций. Но галактическое сообщество сможет этому воспрепятствовать, если прибегнет к стратегии направленной панспермии.

Ясно, что с точки зрения возможности перехода Галактики в состояние насыщения контактов критически важно, каково максимально достигаемое значение скорости возникновения новых цивилизаций. Здесь ситуация может оказаться радикально различной для сценариев постоянного происхождения жизни и происхождения жизни в фазовом переходе Галактики, так как в последнем случае имеет место сильный, хотя и не очень продолжительный, скачок скорости образования цивилизаций. Результаты некоторых расчетов, показывающих разные варианты динамики КЦ для нашей Галактики в присутствии нелинейных связей, показаны на рис. 11 и рис. 12.

Для получения этих результатов на вход программы, предназначенной для расчета динамики КЦ в нелинейной теории (решение уравнения (41)), подавались результаты расчета скорости рождения цивилизаций (функция $f(T)$ в уравнении (41)), полученные с помощью линейной теории. Скорость рождения цивилизаций может быть легко получена непосредственно по рис. 8 с помощью формулы

$$N_C(T) = F(T)L_0.$$

На рис. 11 (левый график) видно, что при параметрах обратной связи, использованных в расчете, в сценарии с непрерывным рождением жизни переход в эру насыщения контактов не происходит, так как пиковое значение скорости рождения цивилизаций оказывается недостаточно большим. Нелинейный расчет дает лишь небольшое превышение числа цивилизаций над результатами линейного расчета. Из рис. 12 видно, что степень насыщенности контактов всегда остается много меньше единицы.

Напротив, из рис. 11 (правый график) видно, что скачок $f(T)$ в сценарии с рождением жизни в фазовом переходе оказывается достаточно высоким, чтобы переход в эру насыщения контактов произошел. Согласно результатам расчета, пиковое значение степени насыщенности контактов достигает 24,3.

После скачка $f(T)$ в сценарии с рождением жизни в фазовом переходе скорость рождения цивилизаций быстро падает, но установившаяся скорость остается в зоне бистабильности, поэтому состояние насыщения контактов не разрушается. Из рис. 12 видно, что в асимптотике X близко к единице, то есть почти каждая КЦ имеет по одному партнеру для контакта. В этой же ситуации величина X в сценарии с непрерывным рождением жизни очень мала. Это есть явление «закалки» фазы насыщения контактов благодаря положительной обратной связи.

Здесь хотелось бы сделать одно, как нам представляется, принципиально важное замечание по поводу астросоциологического парадокса (см. [2, Гл.6], [17]) — АСП. Под АСП понимается противоречие между широко распространенными представлениями о множественности КЦ и отсутствием явных проявлений их деятельности. Между тем, АСП может быть легко объяснен, если всего лишь предположить, что основным способом контактов между КЦ являются контакты по каналам связи с помощью остро направленных излучателей и приемников любой природы (как это и предполагалось в рассматриваемой здесь нелинейной теории). Покажем, что *даже в условиях эры насыщения контактов* обнаружение партнера по контакту может быть исключительно сложной задачей, требующей предельного напряжения сил всей цивилизации.

Предположим, что время фазового демографического пика уже прошло, и в Галактике сохраняется фаза насыщения контактов за счет эффекта закалки, как это имеет место при больших временах в исследованной здесь модели. Как видно из рис. 11 (правый график), количество КЦ в Галактике в этом случае составляет около 5000. По рис. 1 находим, что ожидаемое расстояние до ближайшей КЦ составляет около 1000 св. лет, но с заметной вероятностью может оказаться и 2000 св. лет. Для того, чтобы с гарантией обнаружить партнера по контакту, нужно достаточно продолжительное время держать под постоянным мониторингом на всех разумных частотах и во всех физических типах каналов (радио, оптические, ...) все подозрительные звезды внутри сферы радиусом 2000 св. лет. Так как плотность звездного населения в окрестностях Солнца составляет около одной звезды на 8 кубических парсек, то такая сфера содержит порядка 10^8 звезд. Даже если считать, что лишь одна из 100 звезд является подозрительной, то это означает непрерывный мониторинг 10^6 звезд. Это задача, требующая колоссальных ресурсов. Нетрудно показать, что даже в максимуме фазового пика, когда в Галактике имеется 125000 КЦ, должен осуществляться мониторинг примерно $5 \cdot 10^4$ звезд. В настоящее время речь идет лишь об эпизодических наблюдениях в лучшем случае нескольких десятков звезд на немногих радиочастотах. Что же удивляться, что мы никого не видим?

Как же может быть, что эра насыщения контактов все-таки устанавливается, если задача обнаружения партнера столь трудна? Наше мнение, которое мы обосновываем в статье [16], состоит в том, что для нашей цивилизации просто еще не пришло время, когда контакт является насущной потребностью, и поэтому она не готова потратить огромные ресурсы на поиск партнера. Земная цивилизация в этом смысле *пока* не является коммуникативной, поэтому наш современный опыт нельзя распространять на другие КЦ.

Не следует относиться к представленным результатам нелинейных расчетов слишком серьезно. Очевидно, что использованные модели крайне примитивны, да и выбор параметров этих моделей субъективен. Основное назначение этих расчетов — продемонстрировать, какого рода механизмы могут управлять динамикой популяции цивилизаций в Галактике.

В заключении обратим внимание на одно весьма слабое место представленной здесь нелинейной теории. В рассмотренной модели совершенно не учитываются флуктуации пространственной плотности КЦ, которые могут иметь очень большое значение. Предположим, что скорость рождения цивилизаций никогда не достигает критического значения, при котором происходит переход в эру насыщения контактов в нашей модели. Означает ли это реально, что переход в эру насыщения никогда не произойдет? Нет, не означает. Благодаря флуктуациям плотности случайно может образоваться локальное скопление нескольких цивилизаций, которые окажутся в зоне досягаемости друг друга. Тогда фаза насыщения контактов может возникнуть сначала локально, в зоне скопления. Благодаря положительной обратной связи остров фазы насыщения контактов может оказаться не только стабильным, но из-за увеличения предельного расстояния контакта будет вовлекать в сферу своего влияния более удаленные цивилизации, благодаря чему начнет расти. Так он со временем может охватить всю Галактику. Большой интерес представляла бы количественная теория этого явления.

Приложение. Теория Крейфелдта-Гиндилиса как специальный случай общей линейной теории

Для того, чтобы не перегружать изложение техническими деталями, покажем только, как из линейной теории настоящей работы может быть получен простейший вариант теории Крейфелдта-Гиндилиса, а именно — первоначальный вариант самого Крейфелдта [5].

Начнем с некоторого преобразования записи формулы Крейфелдта-Гиндилиса (2). Перепишем формулу сначала так:

$$N_C^{\text{Kreifeldt}}(T) = \int_0^T \tilde{R}_0(T-\tau)\pi(\tau)d\tau, \tag{48}$$

где $\pi(\tau)$ есть вероятность того, что подходящая звезда в возрасте τ находится в коммуникативной фазе (т. е. имеет около себя цивилизацию, находящуюся в коммуникативной фазе). Вероятность $\pi(\tau)$ дается выражением

$$\pi(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} [C_{T_0}(\tau) - C_{T_0}(\tau-\omega)] P_{L_C}(\omega) d\omega. \tag{49}$$

Будем предполагать, что наша модельная функция $B(M,\tau)$ факторизована в виде (23). Тогда, очевидно,

$$C_{T_0}(\tau) = \int_0^\tau b(\tau)d\tau. \tag{50}$$

Предположим, что выполняется упрощающее предположение (24) для вероятности выживания коммуникативной фазы. Тогда нетрудно понять, что

$$P_{L_C}(\omega) = \frac{d}{d\omega}(1 - L_C(\omega)). \tag{51}$$

С учетом того, что $P_{L_C}(\omega) \equiv 0$ для $\omega < 0$ и $C_{T_0}(\tau-\omega) \equiv 0$ для $\omega > \tau$, выражение (49) может быть записано как

$$\pi(\tau) = C_{T_0}(\tau) - \int_0^\tau C_{T_0}(\tau-\omega) P_{L_C}(\omega) d\omega. \tag{52}$$

Нетрудно показать, что

$$\int_0^\tau C_{T_0}(\tau-\omega) P_{L_C}(\omega) d\omega = \int_0^\tau b(\omega)[1 - L_C(\tau-\omega)]d\omega. \tag{53}$$

Действительно, обозначим интеграл в левой части равенства (53) через I_1, в правой части равенства — через I_2. Тогда, с учетом соотношений (50) и (51) легко получить

$$I_1 = \int_0^\tau d\omega \int_0^{\tau-\omega} d\xi \, b(\xi) P_{L_C}(\omega) \tag{54}$$

$$I_2 = \int_0^\tau d\xi \int_0^{\tau-\xi} d\omega \, b(\xi) P_{L_C}(\omega) \tag{55}$$

На основании выражений (54) и (55) легко убедиться, что I_1 и I_2 есть двойные интегралы от одной и той же функции $b(\xi)P_{L_C}(\omega)$, взятые по одной и той же треугольной области, только лишь порядок прохода этой области в выражениях (54) и (55) различный. Так как величина интеграла не зависит от порядка интегрирования, то $I_1 = I_2$, что и требовалось.

С использованием равенства (53) выражение (52) нетрудно преобразовать к виду

$$\pi(\tau) = \int_0^\tau d\omega\, b(\omega) L_C(\tau - \omega). \tag{56}$$

Подставляя (56) в (48), получаем новую запись формулы Крейфелдта-Гиндилиса:

$$N_C^{\text{Kreifeldt}} = \int_0^T d\tau\, \tilde{R}_0(T-\tau) \int_0^\tau d\omega\, b(\omega) L_C(\tau - \omega). \tag{57}$$

Простая теория Крейфелдта не учитывает конечное время жизни звезд. В нашу теорию конечное время жизни звезд входит в виде члена $L_S(M, \tau+\omega)$ в подинтегральное выражение в формуле (20). Для того, чтобы получить формулу Крейфелдта, следует положить

$$L_S(M, \tau + \omega) \equiv 1. \tag{58}$$

Будем подходящими звездами считать такие, которые имеют планету с подходящими условиями для возникновения КЦ в смысле, использованном в настоящей статье. Тогда, с учетом факторизации (23) полная скорость возникновения подходящих звезд в момент времени $T - \tau - \omega$ может быть записана как

$$\tilde{R}_0(T - \tau - \omega) = \int_0^\infty R(M, T - \tau - \omega) \alpha(M)\, dM. \tag{59}$$

С учетом соотношений (58), (59) формула (20) принимает вид

$$N_C(T) = \int_0^T d\tau \int_0^{T-\tau} d\omega\, \tilde{R}_0(T - \tau - \omega) b(\tau) L_C(\omega). \tag{60}$$

Сравним выражения (57) и (60) для количества коммуникативных цивилизаций в момент T.

Делаем в интеграле (60) замену переменных

$$\begin{aligned} \tau &\;\rightarrow\; \tau + \omega \\ \omega &\;\rightarrow\; \tau. \end{aligned} \tag{61}$$

Очевидно, якобиан преобразования (61) равен единице, поэтому подинтегральное выражение в (60) приобретает вид

$$R_0(T - \tau) b(\omega) L_C(\tau - \omega). \tag{62}$$

Так как преобразование (61) линейное, то треугольная область интегрирования интеграла (60) переходит в некоторую другую треугольную область. Легко убедиться, что новая треугольная область интегрирования в точности совпадает с треугольной областью интегрирования интеграла (57). Таким образом, после замены переменных (61) и подинтегральные выражения, и области интегрирования интегралов (57) и (60) совпадают, поэтому и сами интегралы равны друг другу. Таким образом, формула Крейфелдта (2) получена как частный случай общей линейной формулы (20).

Список литературы

[1] *Проблема CETI (Связь с внеземными цивилизациями).* Мир, Москва, 1975.

[2] Л. М. Гиндилис. *SETI: Поиск внеземного разума.* Физматлит, Москва, 2004.

[3] К. У. Аллен. *Астрофизические величины.* Мир, Москва, 1977.

[4] Ф. А. Цицин. Космос и разумные существа. *Природа*, N11, С.94–101, 1965.

[5] J. G. Kreifeldt. A formulation for the number of communicative civilizations in the galaxy. *Icarus*, V.14, P.419–430, 1971.

[6] Л. М. Гиндилис. К методике оценки числа цивилизаций в Галактике. В кн.: *Проблемы поиска внеземных цивилизаций*, С.126–148. Наука, Москва, 1981.

[7] А. Д. Панов. Масштабная инвариантность социально-биологической эволюции и гипотеза галактического самосогласованного происхождения жизни. Статья в этом сборнике.

[8] В. Г. Сурдин. *Рождение звезд.* УРСС, Москва, 2001.

[9] M. R. Meyer, F. C. Adams, L. A. Hillenbrandt, J. M. Carpenter, R. B. Larson. The stellar initial mass function: constraints from young clasters and theoretical perspectives. astro-ph/9902198, 1999.

[10] B. A. Twarog. ??? *ApJ*, V.242, P.242, 1980.

[11] H. Meusinger. ??? *Ap&SS*, V.182, P.19, 1991.

[12] H. J. Rocha-Pinto and W. J. Maciel. History of the star formation in the local disk from the G dwarf metallicity distribution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, V.289(4), P.882–888, 1997.

[13] K. M. Lanzetta, N. Yahata, S. Pascarelle, H.-W. Chen, and A. Fernandez-Soto. The star formation rate intensity distribution function—implications for the cosmic star formation rate history of the universe. astro-ph/0111129, 2001.

[14] А. А. Сучков. Галактика. В кн.: *Физика космоса: маленькая энциклопедия. Издание второе.*, С.63–75. Советская Энциклопедия, Москва, 1986.

[15] В. С. Троицкий. К вопросу о населенности Галактики. *Астрономический журнал*, Т.58(5), С.1121–1130, 1981.

[16] А. Д. Панов. «Экзогуманитарные» цивилизации как потенциальные партнеры по межзвездной связи и возможные носители галактического культурного поля. Статья в этом сборнике.

[17] Л. М. Гиндилис. Астросоциологический парадокс в проблеме SETI. В кн.: *Астрономия и современная картина мира*, С.203. ИФРАН, Москва, 1997.

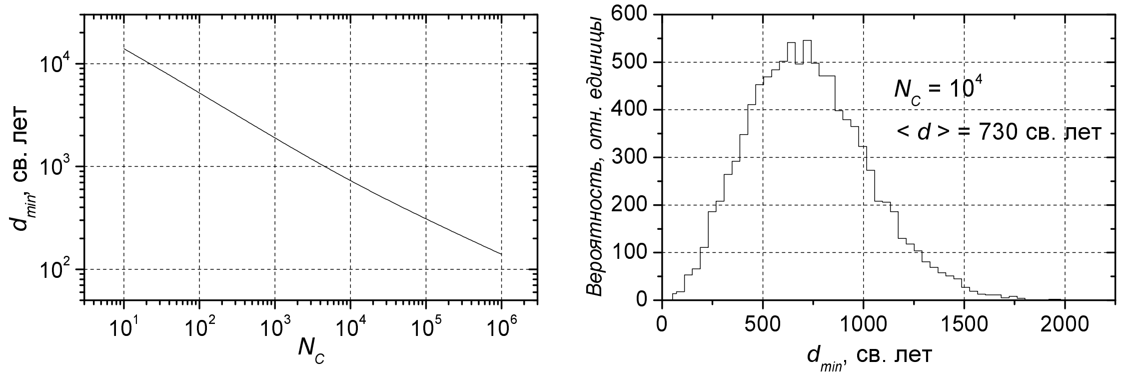

Рис. 1: Ожидаемое расстояние до ближайшей КЦ в зависимости от количества КЦ в Галактике и распределение вероятностей расстояний до ближайшей КЦ для случая $N_C = 10000$. Профиль функции распределения для других значений N_C аналогичен, отличается лишь наиболее вероятное значение расстояния.

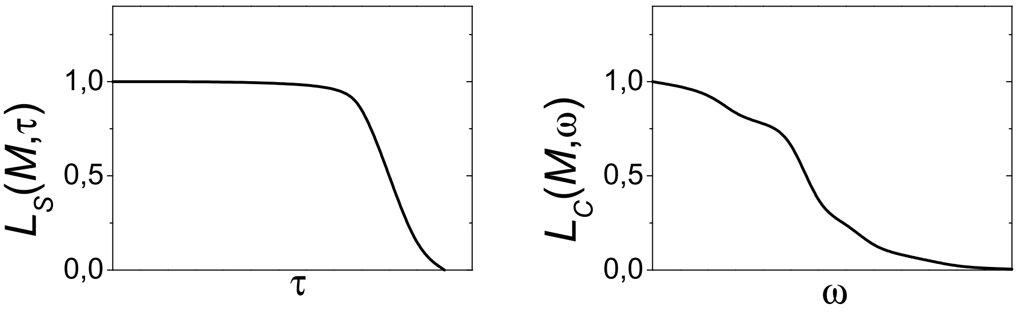

Рис. 2: Левый график: схематичное изображение вероятности выживания звезд $L_S(M, \tau)$; правый график: вероятность выживания коммуникативной фазы $L_C(M, \omega)$.

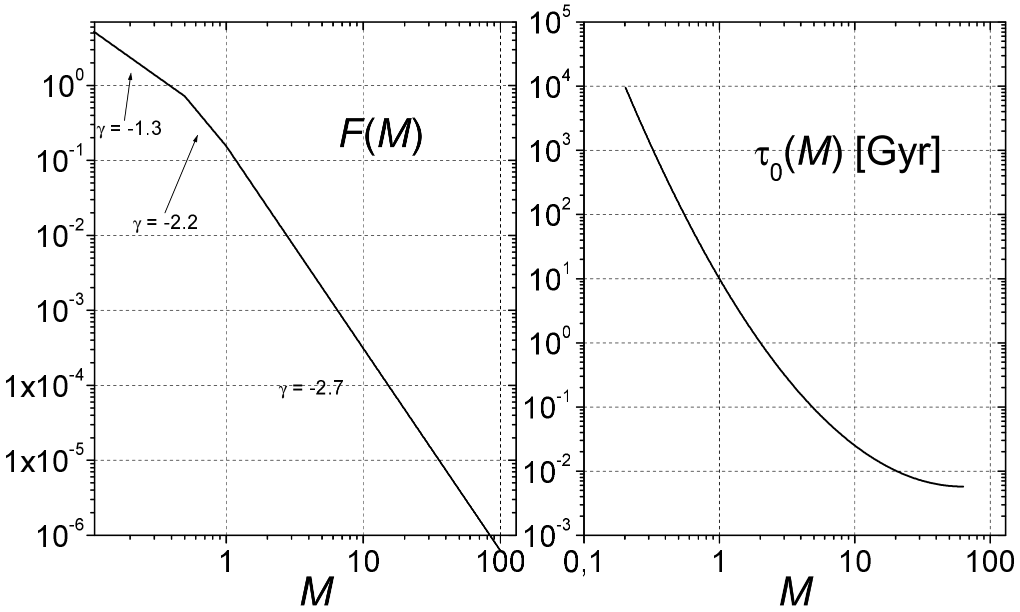

Рис. 3: Начальный спектр масс звезд [9] (левый график) и время жизни звезд [8, С.58] (правый график). Масса звезд в солнечных массах. Величина γ на графике $F(M)$ показывает показатель степенной функции, отвечающий разным участкам спектра.

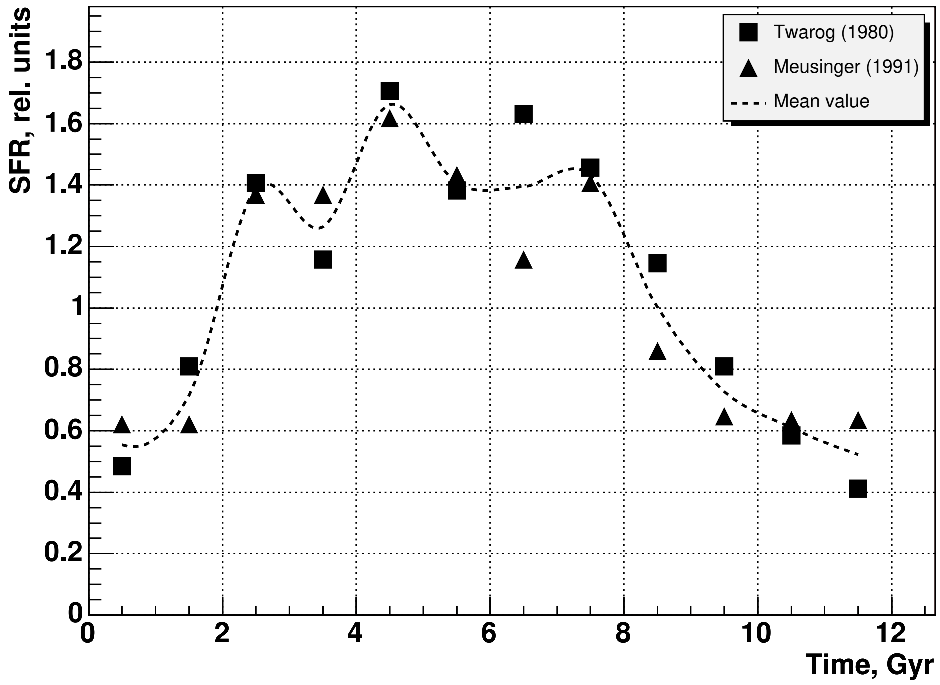

Рис. 4: Зависимость скорости звездообразования от времени

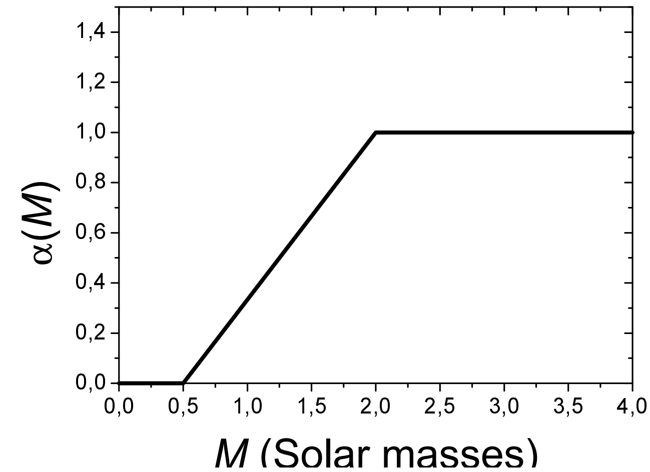

Рис. 5: Выбор вероятности реализации подходящих условий для возникновения КЦ $\alpha(M)$.

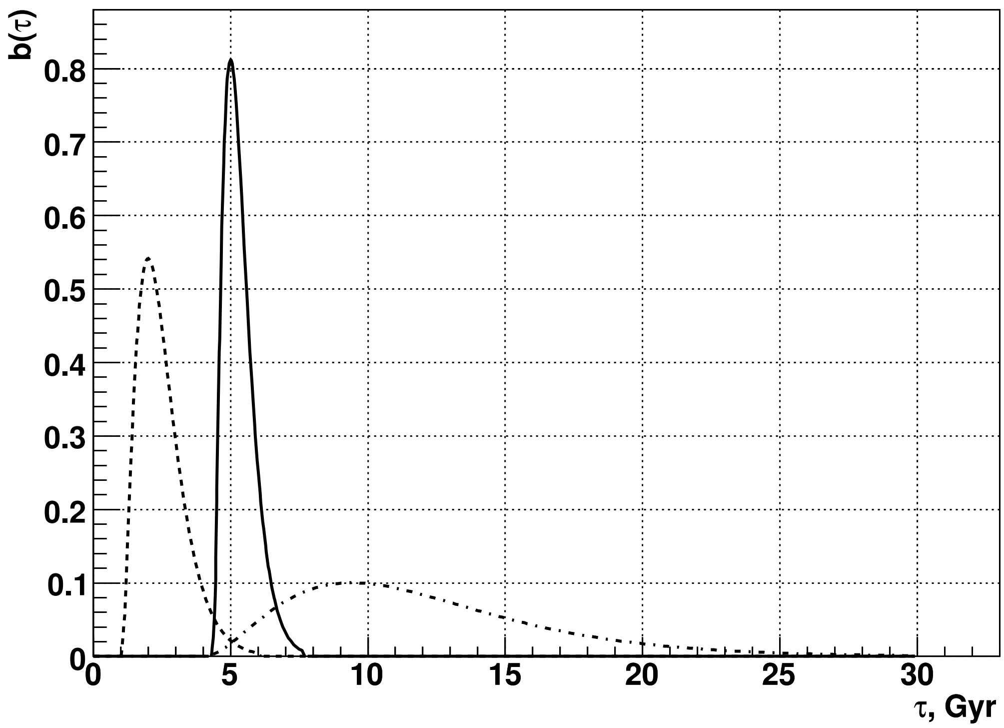

Рис. 6: Выбор вероятностей времен развития. Сплошная линия — вариант, основанный на гипотезе универсальной шкалы времени эволюции, и альтернативные варианты.

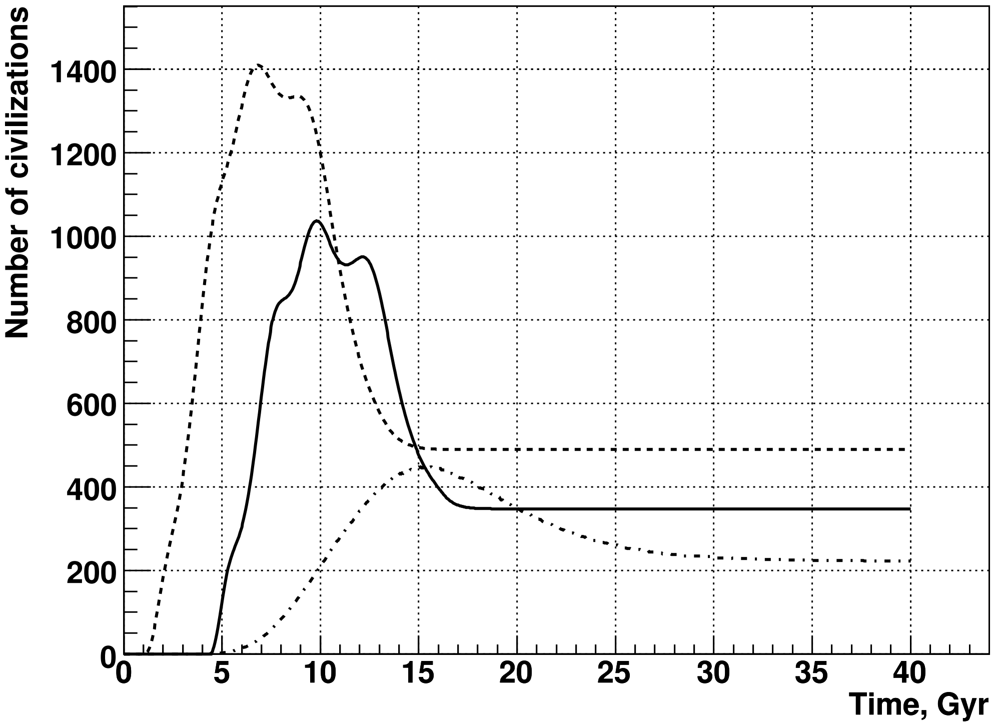

Рис. 7: Результаты расчетов простой линейной теории, отвечающие разным распределениями времен развития КЦ. Типы линий на этом графике соответствуют линиям, использованным на рис. 6 с различными функциями $b(\tau)$.

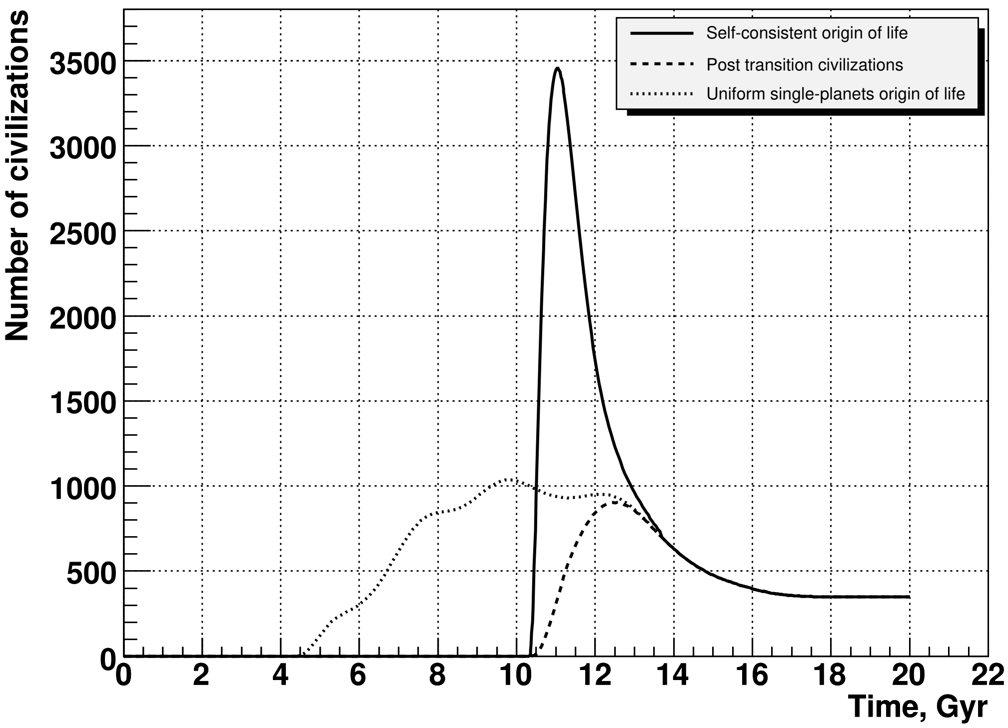

Рис. 8: Линейная динамика популяции КЦ при возникновении жизни в Галактике путем самосогласованного фазового перехода спустя 7 млрд. лет после начала формирования галактического диска и ее сравнение с простой линейной динамикой при постоянном формировании КЦ с временем развития 4 млрд. лет

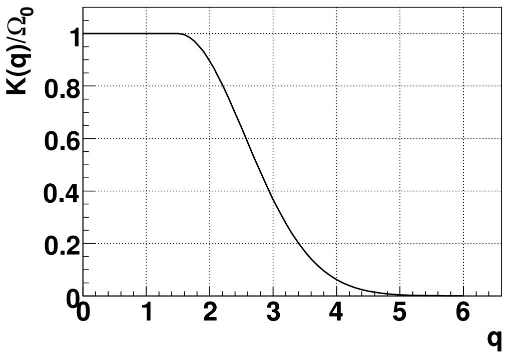

Рис. 9: Функция $K(q)$, использованная в расчетах.

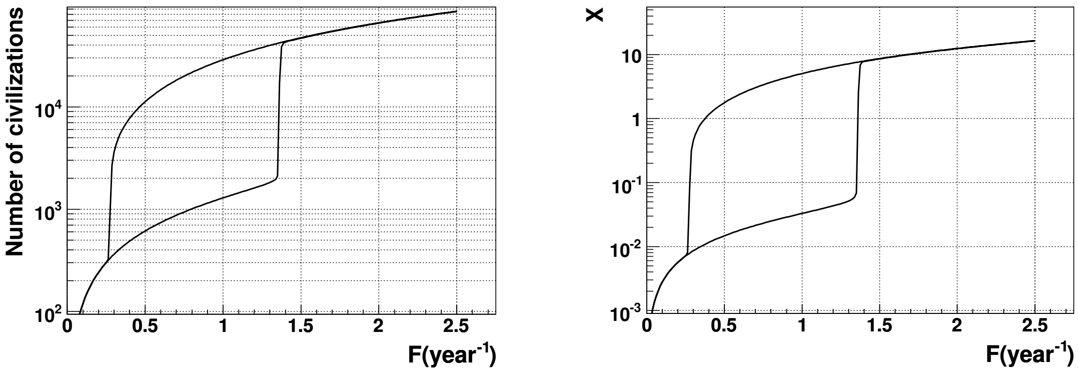

Рис. 10: Эффект бистабильности в популяции КЦ. Пояснения см. в тексте.

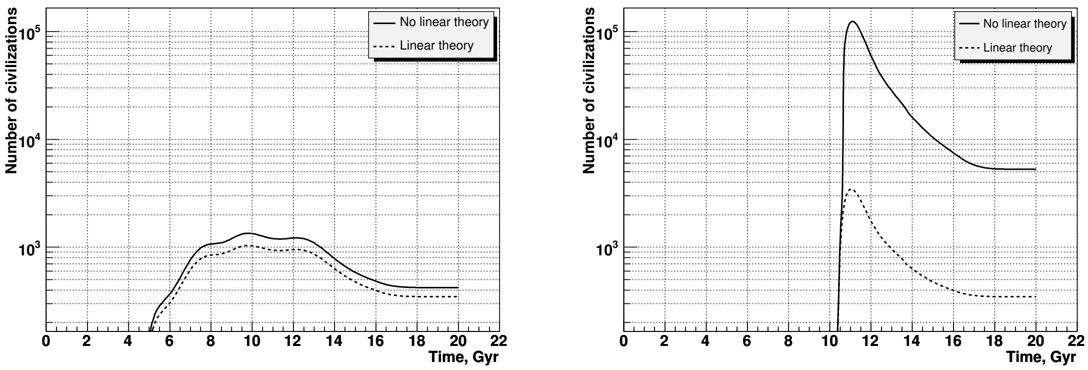

Рис. 11: Сравнение динамики популяции КЦ в линейной теории и в нелинейной теории, учитывающие взаимное влияния КЦ по каналам связи. Левый рисунок — условия возникновения жизни не зависят от галактического времени. Правый рисунок — возникновение жизни в самосогласованном фазовом переходе Галактики.

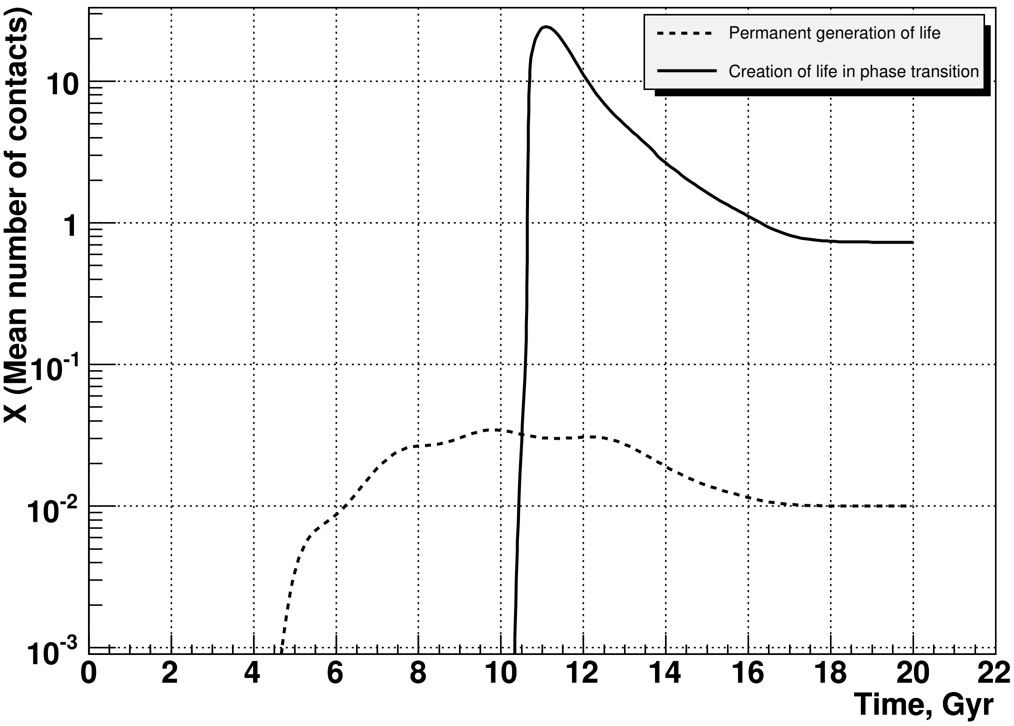

Рис. 12: Поведение степени насыщенности контактов в сценариях постоянного происхождения жизни и происхождения жизни в фазовом переходе Галактики. В последнем случае происходит переход в эру насыщения контактов, и после падения скорости возникновения цивилизаций состояние насыщения контактов сохраняется за счет эффекта «закалки» популяции КЦ.