

Численная модель гипотезы внеземной жизни и разума

Дункан Форган

A Numerical Testbed for Hypotheses of Extraterrestrial Life and Intelligence

Duncan H. Forgan

13 Октября 2008г.

Scottish Universities Physics Alliance (SUPA)
Institute for Astronomy, University of Edinburgh
Royal Observatory Edinburgh
Blackford Hill, Edinburgh EH9 3HJ, UK

Tel: 0131 668 8359 Fax: 0131 668 8416 Email: dhf@roe.ac.uk

Источник: <http://arxiv.org/abs/0810.2222>

Перевод на русский язык: Теллурин К.Г. tellurin@yandex.ru

Реферат

Успех поиска внеземного разума в рамках проекта SETI во многом зависит от решения уравнения Дрейка, которое дает оценку количества коммуникативных цивилизаций Млечного Пути, и от разгадки парадокса Ферми, гласящего: “Если они есть, то где они?”. Оба ответа полагаются на средних значения ключевых параметров, таких как средняя продолжительность существования сигналов коммуникативных цивилизаций. Более точный ответ должен принимать в расчет распределение звезд, планет и биологических показателей в галактике, также как и учитывать стохастическую природу самой эволюции жизни в космосе. Эта статья описывает реализацию метода Монте-Карло, которая это учитывает, и, следовательно, позволяет оценить распределения ключевых параметров в проблеме SETI и заодно количественно определить погрешность метода (и уровень неопределенности результатов). Более того, данный подход дает возможность численного сравнения конкурирующих теорий формирования жизни и разума.

Ключевые слова: численный, Монте-Карло, внеземной разум, ПВЗР, уравнение Дрейка, парадокс Ферми

Keywords: Numerical, Monte Carlo, extraterrestrial intelligence, SETI, Drake Equation, Fermi Paradox

1. Введение

Научное обоснование SETI в сравнении с практической астрономией всегда страдало от нехватки количественных оценок (просто потому, что статистика пока располагает лишь одним примером). В 1961 году Франк Дрейк предпринял первые шаги для количественного описания в этом направлении, разработав ныне известное уравнение Дрейка - простое алгебраическое выражение, дающее оценку числа коммуникабельных цивилизаций в Млечном Пути. К сожалению, его упрощенная форма оказалась открытой для частных переформулировок, в итоге существует фактически несколько вариантов уравнения, но нет ясной канонической формы. Для целей данной статьи, использовалось следующее уравнение [27]:

$$N=R_*f_gf_p n_e f_i f_c L \quad (1)$$

где символы обозначают следующее:

N = число галактических цивилизаций, способных к установлению связи с Землей

R_* = средняя скорость формирования звёзд в Млечном Пути;

f_g = доля звёзд с обитаемыми планетами;

f_p = доля звёзд с планетными системами;

n_e = число потенциально обитаемых планет в каждой системе;

f_i = доля обитаемых планет с высокоорганизованной жизнью;

f_i = доля планет с разумной жизнью;

f_c = доля планет с технологически развитой разумной жизнью;

L = среднее время жизни технологической цивилизации в состоянии коммуникабельности;

Само уравнение имеет ряд ключевых слабостей: оно основано строго на средних оценках переменных, таких как скорость образования звезд; оно неприменимо для учета физико-химических и зависящих от времени процессов развития Галактики. В самом деле, уравнение подвергается критике за поляризацию людей на “оптимистов” и “пессимистов” контакта, которые дают весьма разные оценки входящим в него параметрам, приводящим к большому разбросу ожидаемого числа N коммуникативных цивилизаций в диапазоне от 10^5 до 10^6 (!).

За десять лет до этого события Энрико Ферми пытался проанализировать проблему с другой точки зрения, оценивая порядок интервала времени необходимого для развития цивилизаций земного типа и колонизации ими галактики, чтобы прийти к заключению, что Млечный Путь должен буквально кишеть разумными существами, и что они должны быть видны повсюду в небе. Это привело его к формулировке так называемого парадокса Ферми с постановкой

вопроса “Где же они?” Степень остроты данной проблемы, ассоциируемой с огромной цепью событий, необходимых для того, чтобы разумные наблюдатели могли появиться на Земле и осознать это, привела многих к заключению, что цветущая жизнь является весьма редким, возможно даже уникальным для Земли явлением [28]. Вывод работы [15] о том, что средний возраст землеподобных планет Млечного Пути на 1.8 ± 0.9 млрд. лет старше Земли предполагает, что значительное число внеземных цивилизаций имели достаточно времени для развития и, следовательно, для того, чтобы быть нами замеченными. То, что мы их не обнаружили до сих пор, прибавляет вес гипотезе так называемой “редкой Земли”. Однако на парадокс Ферми имеется ряд положительных ответов, допускающих возможность существования внеземного разума, таких как:

1. Они уже здесь, но скрываются
2. Контакт с Землей запрещен по этическим соображениям
3. Они были здесь, но погибли
4. Они будут здесь, если Человечество просуществует достаточно долго

Некоторые из этих ответов связаны с социологией и сложны для моделирования. Другие зависят от эволюции Галактики и её звезд, поэтому гораздо лучше пригодны для проверки. В целом сегодня астробиологи находятся в гораздо более выгодной ситуации по сравнению с Дрейком и Ферми: развитие астрономии за последние пятьдесят лет (в частности, открытие первой планеты вне солнечной системы [17] и затем ещё нескольких сотен, так же как и развитие концепций обитаемых зон вокруг звезд [11] и в самой галактике [16]) позволили более глубоко проанализировать эту проблему. Однако ключевым моментом, всё ещё оказывающим сильное влияние на SETI (и в целом на астробиологию), является отсутствие консенсуса по вопросу о том какие значения приписывать базовым *биологическим* параметрам, входящим в уравнение Дрейка и объясняющим парадокс Ферми. Более того, если нельзя оценить доверительные интервалы и погрешности определения этих параметров, то невозможно сравнить различные гипотезы существования жизни (например, панспермию – см. обзор [9] или гипотезу “Редкой Земли” [28]). Данная статья описывает методику применения метода Монте-Карло для исследования параметрического пространства разумных цивилизаций более строго и помогает оценить погрешность итоговых распределений жизни и разума.

Статья организована следующим образом: в разделе 2 описана методика; в разделе 3 обсуждаются входные данные; в разделе 4 показаны результаты нескольких тестов; в разделе 5 дается обзор метода.

2. Метод

В целом методика расчета включала следующую последовательность шагов:

1. Генерация N_* звезд галактики в соответствии с параметрами наблюдаемого распределения
2. Генерация планетных систем для этих звёзд
3. Присвоение значения вероятности жизни некоторым планетам в зависимости от наиболее жизненно важных параметров (например, положения в обитаемой зоне звезды или вне её)
4. Использование для каждой планеты с жизнью стохастических уравнений, соответствующих эволюции жизни от простых форм к разуму

Эта последовательность даёт единственную реализацию метода Монте-Карло (MCR) для Млечного Пути в целом. Концепция использования методики MCR в астробиологии сама по себе не нова: в недавних работах Вукотича и Чирковича [24],[25] применены аналогичные процедуры исследования временной шкалы, на которую оказывают сильное воздействие глобальные регуляторные механизмы, наподобие предложенных Аннисом [1].

Для оценки погрешности эту процедура необходимо повторить много раз, чтобы продуцировать множество MCR, и, следовательно, получить результаты с надежно определенным средним значением и стандартным отклонением. Процедура основана на генерации параметров в трех категориях: *звездной, планетарной и биологической*.

2.1. Свойства звезд

Изучение звёзд Млечного Пути исторически шло экстенсивным путём, и их свойства вполне ограничены. Предположение о том, что все рассматриваемые звёзды являются объектами главной последовательности, позволяет нам считать, что большинство их характеристик должны определяться их массой. Массы звезд для получения случайного распределения наблюдаемой функции первоначальной массы (IMF) Млечного Пути взяты из работы [22] (см. Рис.1).

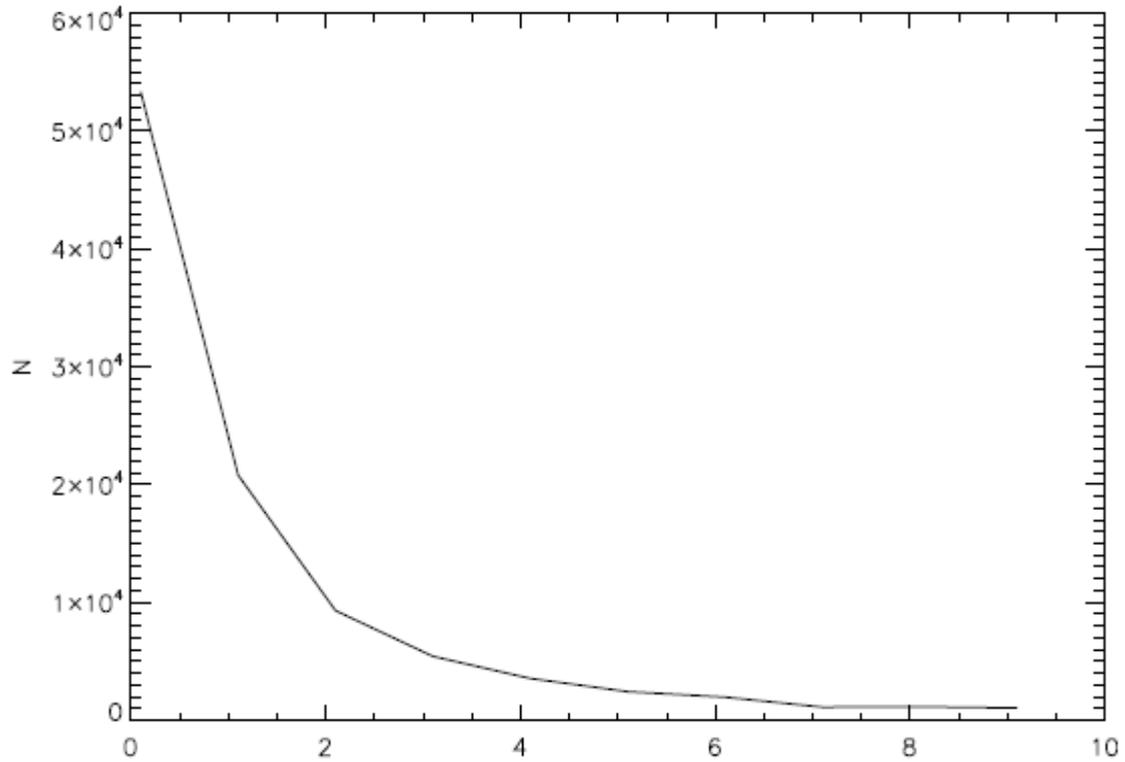


Рис. 1: Функция начальной массы звезд IMF, используемая в данной работе.

Пример единичной реализации MCR.

Далее могут быть вычислены радиусы звезд, как в работе [19]:

$$\frac{R_*}{R_{\odot}} = \left[\frac{M_*}{M_{\odot}} \right]^{\frac{n-1}{n+3}} \quad (2)$$

где $n = 4$, если первичный механизм ядерного синтеза представлен цепочкой p-p ($M_* \leq 1.1 M_{\odot}$), и $n = 16$, если первичный механизм ядерного синтеза представлен циклом CNO ($M_* > 1.1 M_{\odot}$). (Обратите внимание, что в данной статье знак \odot означает Солнце, например, M_{\odot} показывает значение одной солнечной массы). Светимость определяется простым соотношением между светимостью и массой:

$$\frac{L_*}{L_{\odot}} = \left[\frac{M_*}{M_{\odot}} \right]^3 \quad (3)$$

Следовательно, время жизни на главной последовательности, является:

$$\frac{t_{MS}}{t_{MS,\odot}} = \left[\frac{M_*}{M_{\odot}} \right]^{-2} \quad (4)$$

Эффективная температура звёзды вычисляется исходя из предположения о черном теле:

$$T_* = \left[\frac{L_*}{4 \pi R_*^2 \sigma_{SB}} \right]^{1/4} \quad (5)$$

Возраст звёзд принят дискретным, чтобы воспроизвести процесс их формирования в Млечном Пути [23], см Рис. 2.

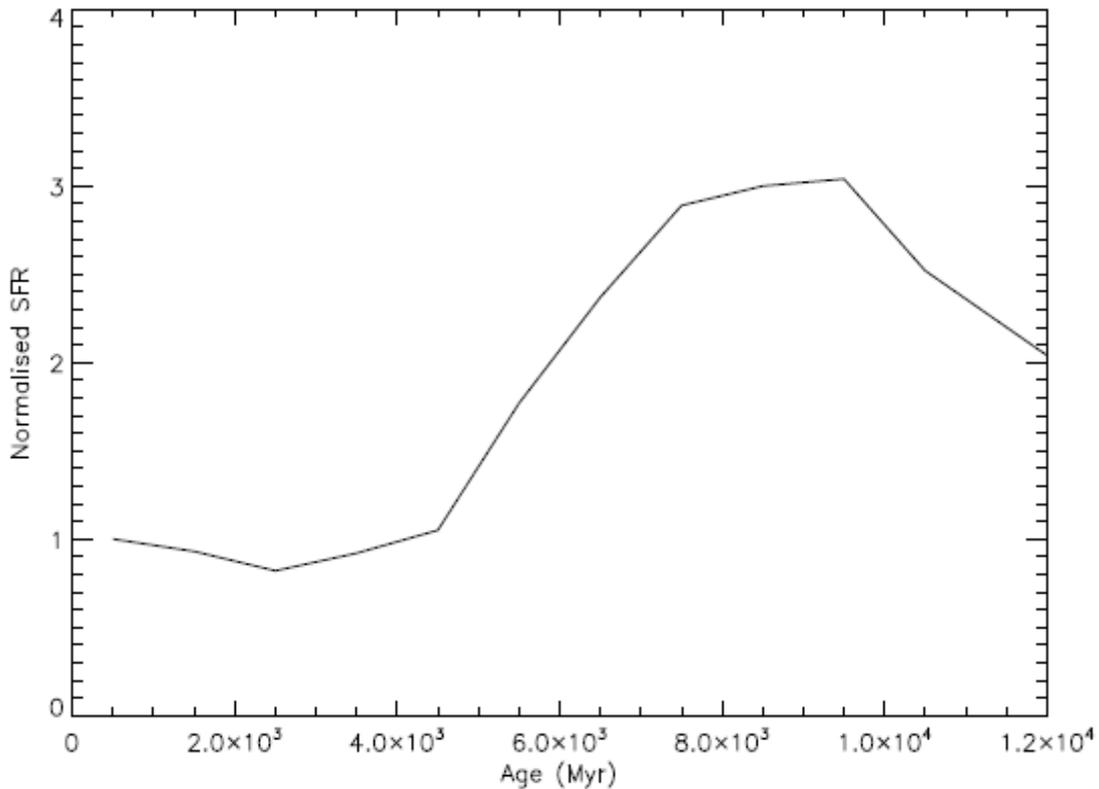


Рис. 2: Функция звездообразования SFR, используемая в данной работе

Металличность звезды зависит от градиента металличности галактики и, соответственно, её галактоцентрического радиуса r_{gal} . Выборка выполняется таким образом, чтобы плотность поверхности галактической массы была эквивалентна плотности Млечного Пути (в предположении о простой двумерной структуре диска):

$$\Sigma(r_{gal}) = \Sigma_0 e^{-r_{gal}/r_h}, \quad (6)$$

где r_h – единичный отрезок галактической шкалы (принят равным 3.5 кпс). Поэтому, при заданном галактоцентрическом радиусе, металличность звезды, в величинах $\left[\frac{Fe}{H}\right]$, вычисляется с использованием простой параметризации of the abundance gradient:

$$Z_* = -z_{grad} \log\left(\frac{r_{gal}}{r_{gal,\odot}}\right) \quad (7)$$

где z_{grad} принят равным 0.07 [12] (Hoу, Prantzos and Boissier, 2000). Затем звёзды в соответствии с их галактоцентрическими радиусами помещались в один из четырёх логарифмических спиральных рукавов (показанных в виде четырёх главных логарифмических спиральных рукава Млечного Пути на рис.3).

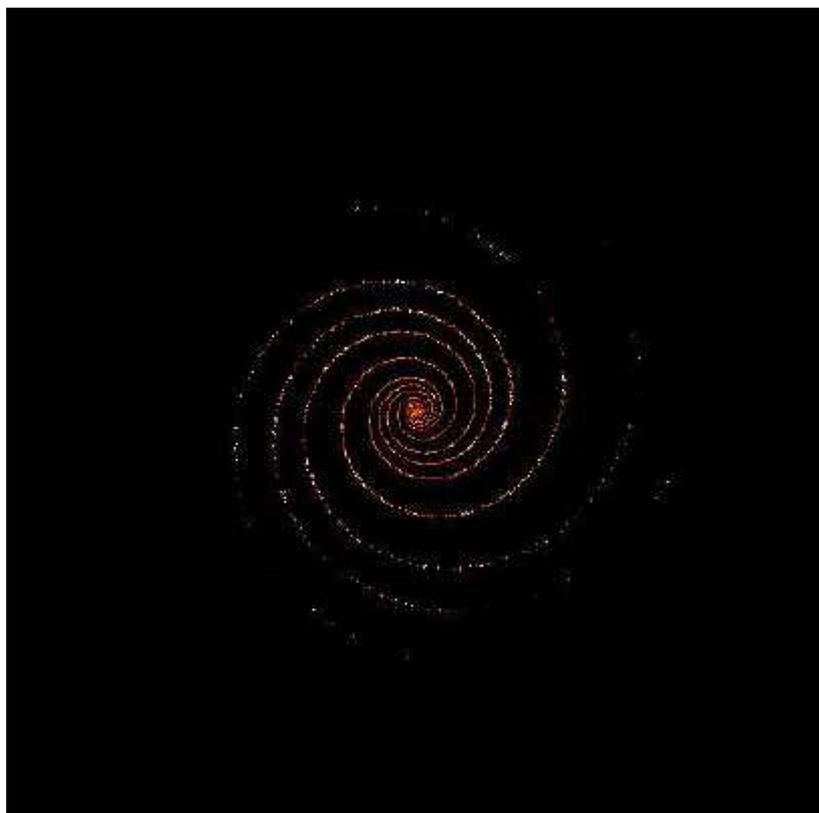


Рис. 3: Пример звёздной карты, полученной в результате одного *MCR*.
В светлых областях звезды более массивны

Наконец, звёздам в соответствии со степенью их металличности присваивалось наличие планет (распределение значений металличности для получения выборки экзопланет представлено на рис.6). Некоторые звёзды остались совершенно без планет, другие получили по одной единственной планете, тогда как третьи стали обладателями сразу нескольких планет (на основании доказанного существования внесолнечных систем с множеством планет)¹.

2.2. Свойства планет

С момента обнаружения первой планеты 51 Peg B вне солнечной системы [17] (Mayor et al., 1995), данные об экзопланетах пополняются с возрастающей скоростью. Когда писалась эта статья было известно свыше 300 экзопланет, открытых различными астрофизическими методами (радиальная скорость, транзит, микролинзирование и т.д.). Полученные данные дают распределения параметров экзопланет, которые можно использовать в выборке: функцию масс планет (PMF), распределение орбитальных радиусов экзопланет и распределение металличности звёзд, имеющих планеты.

По аналогии с параметрической генерацией звезд, популяция планет вокруг родительских звезд может создаваться с заданными статистическими характеристиками, соответствующими наблюдениям. Однако эти статистические данные всё же могут сильно отклоняться от

истинных величин, поскольку каталоги экзопланет пока весьма не полноценны. Для получения распределения землеподобных планет не хватает данных, поэтому нами предполагается, что жизнь способна развиваться и вокруг спутников планет. По сути это дает нижний предел количества обитаемых планет: в работе [13] показано, что если судить по функции металличности, то пригодные для жизни планеты земного типа столь же распространены, как и зарегистрированные в настоящий момент планеты гиганты (или даже встречаются более часто).

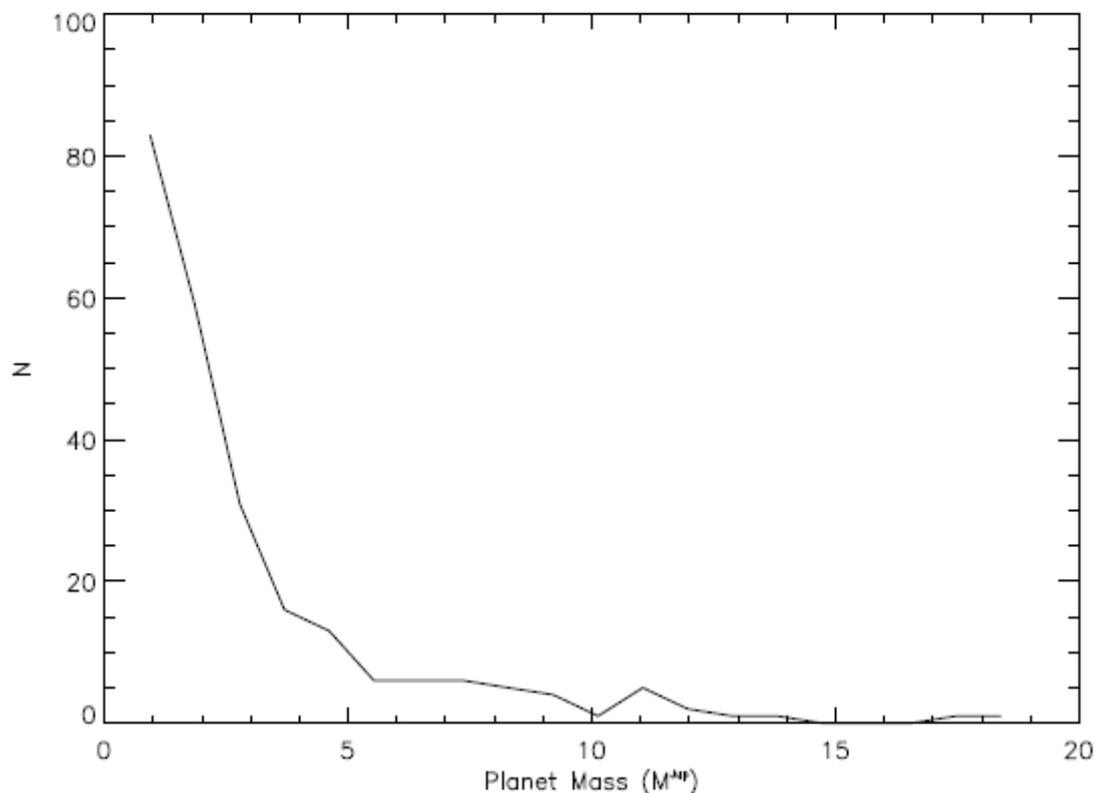


Рис. 4: Распределение масс планет, построенное по данным энциклопедии экзопланет (<http://exoplanet.eu>)

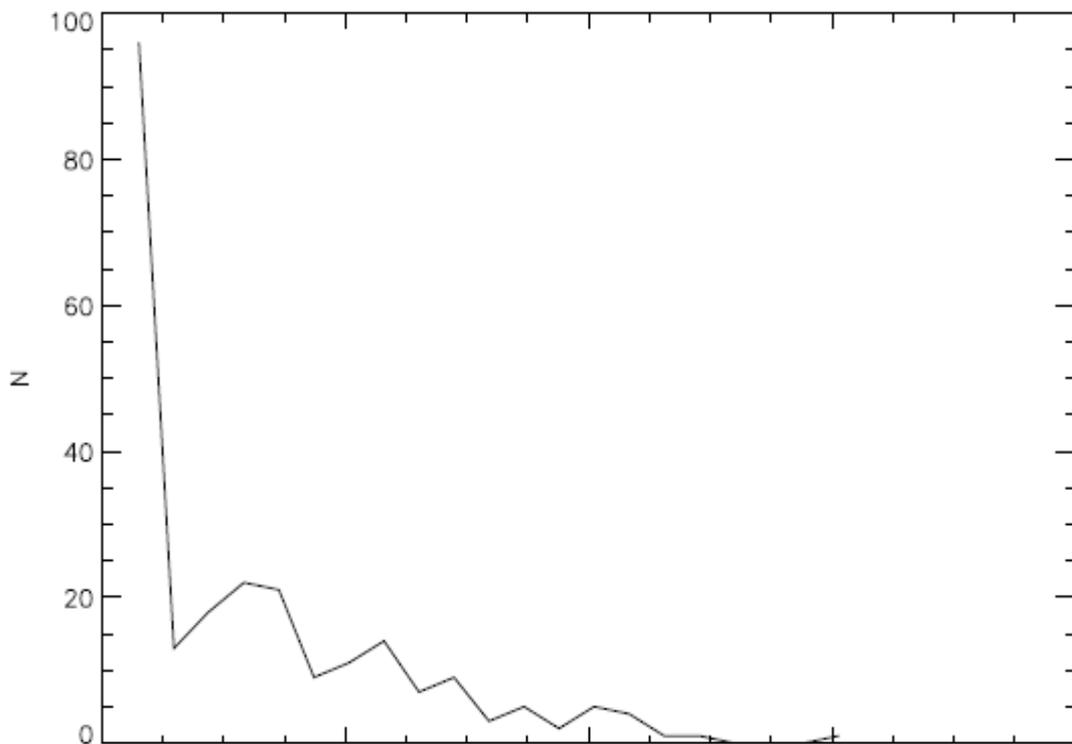


Рис. 5: Распределение радиусов орбит планет, построенное по данным энциклопедии экзопланет (<http://exoplanet.eu>)

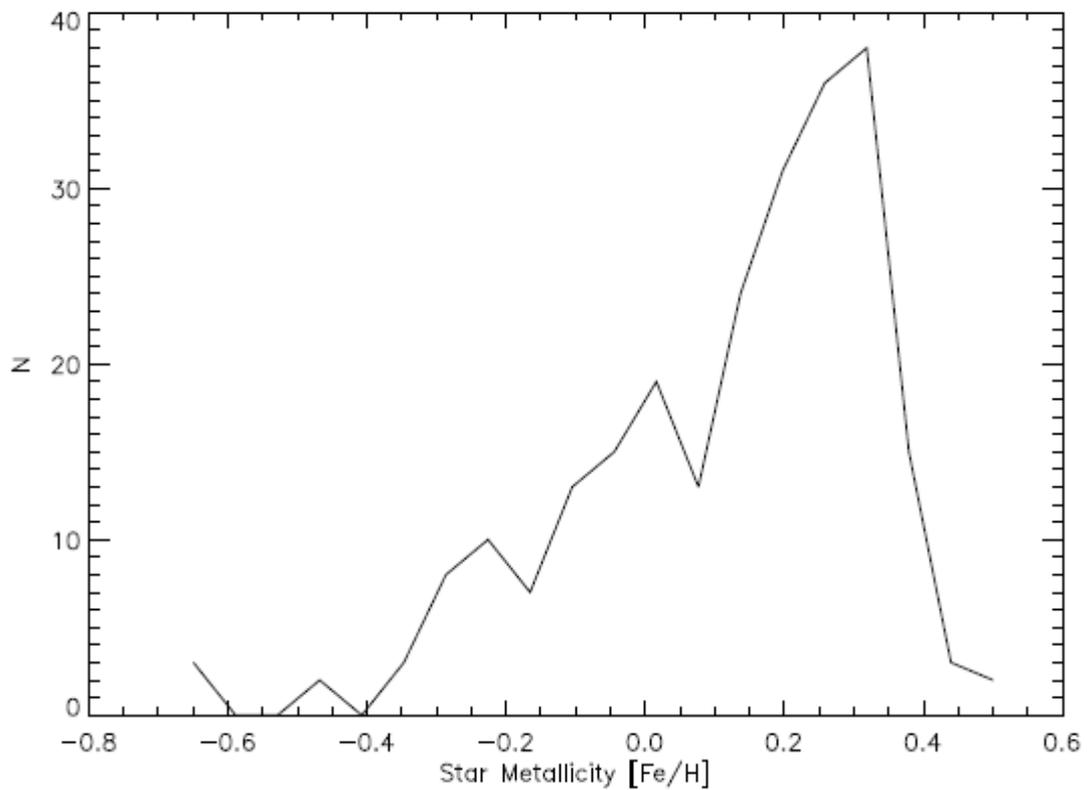


Рис. 6: Распределение металличности родительских звезд, построенное

по данным энциклопедии экзопланет (<http://exoplanet.eu>)

Эти данные являются всё же полезными для иллюстрации эффективности метода Монте-Карло (по меньшей мере, пока наблюдения землеподобных планет не станут статистически доступны). Всё это надо иметь в виду при рассмотрении результатов данной работы.

Два следующих параметра, требующих подтверждения и для которых трудно получить данные наблюдений, это вероятность появления жизни на данной планете P_{life} и число разрушающих биологию событий N_{resets} , происходящих на планете в ходе эволюции жизни на ней (таких как локальные вспышки сверхновых, гамма-лучей [1], ударов комет и т.д.). С этого момента модель выходит за рамки сравнительно хорошо известных параметров и становится в большей степени гипотетической. Параметр N_{resets} определяется в виде функции от галоцентрического радиуса - при уменьшении расстояния от центра Галактики происходит больше событий сброса в исходное состояние (главным образом в результате взрывов сверхновых SNe):

$$N_{resets} = \mu_{resets,0} \left(\frac{r_{gal}}{r_{gal,\odot}} \right)^{-1} \quad (8)$$

где $\mu_{resets,0}$ равное 5 отражает так называемые “большие пять” случаев массового вымирания согласно найденным на Земле окаменелостям [20]. Надо отметить, что это упрощенная параметризация: реальное распределение событий сброса является более сложным, в частности для коротких гамма вспышек GRB и взрывов сверхновых SNe типа I, которые пока весьма неопределенны по своим пространственным проявлениям. Данное простое выражение дано для того, чтобы не смешивать эти вопросы: дальнейшая работа будет включать вывод более строгого выражения. Все данные по планетам были взяты из энциклопедии экзопланет (<http://exoplanet.eu>): в общей сложности для построения модели использовалось 242 планеты, имеющих входные параметры для всех необходимых полей данных.

2.3. Биологические параметры

2.3.1. Параметры жизни

По данному вопросу модель оказывается в области весьма гипотетичных предположений: все доступные данные по оценке биологических параметров являются производными от наблюдений единственной биосферы и, следовательно, мало что можно сделать для выяснения диапазона значений этих параметров (по крайней мере без привлечения широкомасштабных предположений о механизме жизни в целом). Модель неявно предполагает сценарий “трудного шага” эволюции [3], то есть жизнь должна достичь некоторого высокого уровня развития, чтобы появились разумные организмы, способные конструировать достаточно сложные технологические вещи. Список ключевых биологических

параметров включает:

- N_{stages} - число стадий эволюции жизни при формировании разума;
- τ_i – время протекания каждой стадии;
- τ_{int} - время, необходимое для формирования технологической цивилизации после зарождения жизни;
- $P_{annihilate}$ - вероятность того, что при сбросе эволюции произойдёт уничтожение биосферы

Время формирования разума τ_{int} вычислялось в соответствии со следующим стохастическим процессом: если жизнь зародилась не на планете, а была привнесена, то выборка N_{stages} бралась случайной. События сброса N_{resets} задавались равномерно по каждой стадии. Если $N_{resets} > N_{stages}$, то в любой из стадий могло произойти несколько событий сброса эволюции. Таким образом, для каждой i -й стадии применялась следующая процедура:

1. выбрать τ_i
2. если выпадает сброс, то проверить приводит ли он к гибели: если выпадает гибель, то жизнь заканчивается и процесс прекращается; иначе i уменьшить на 1.
3. время τ_{int} увеличивается на некоторую долю τ_i (или просто на время τ_i , когда нет сброса)
4. увеличить i на 1 и вернуться к пункту 1

Данная процедура выполняется до тех пор, пока либо а) жизнь не достигнет финальной стадии (не разовьется цивилизация, способная к интеллектуальным технологиям), либо б) время становления разума не станет больше времени существования родительской звезды на главной последовательности: $\tau_{int} > \tau_{MS}$. Как только сформировалась технологическая цивилизация, то предполагается, что она начинает распространять сигналы, которые или можно обнаружить, или возможна утечка подобных сигналов космическое пространство. Распространение сигналов будет продолжаться до тех пор, пока либо (а) цивилизация не разрушит себя, либо (б) родительская звезда не сойдёт с главной последовательности (см. следующий раздел). Это даёт консервативную оценку продолжительности жизни цивилизации в период её возможного обнаружения, поскольку цивилизации кроме того могут ещё и перемещаться от звезды к звезде и практически заниматься звёздной инженерией для продления жизни своей родительской звезды.

Параметр $P_{annihilate}$ определяется следующим образом:

$$P_{annihilate} = 1 - e^{r_{gal} - r_{gal,\odot}} \quad (9)$$

Совместно с градиентом металличности и параметром сброса N_{resets} , описанными в предыдущем разделе, параметр $P_{annihilate}$ задает Галактическую Обитаемую Зону (Galactic Habitable Zone, GHZ), которая в целом имитирует зону, определенную в [16] как кольцеобразную область галактики, где металличность достаточно высока для формирования планет (с жизнью), а число разрушительных

для биологии событий достаточно мало (и их разрушительная сила достаточно низка), что позволяет в целом обеспечить развитие жизни.

2.3.2. Цивилизационные параметры

Если где-то сформировалась технологическая цивилизация, то она обязательно должна пройти через фазу созревания или пору «юности»: в этот период она особенно восприимчива к ряду катастрофических событий, вызванных частично или полностью своими собственными действиями (такими как войны, эпидемии, катастрофы из-за изменения климата, небрежно выполненные макроинженерные проекты и т.д.). Это учитывается параметром $P_{destroy}$ - вероятностью того, что незрелая цивилизация сама себя разрушит. Если цивилизация сможет пережить эту фазу, то она становится достаточно продвинутой для того, чтобы предотвратить подобное самоуничтожение и становится стабильной на временном интервале τ_{adv} . Если цивилизация самоуничтожается, то она будет существовать лишь некоторый отрезок времени от τ_{adv} до катастрофы.

Чем станет заниматься в дальнейшем продвинутая цивилизация остается полностью на усмотрении исследователя: цивилизации могут колонизировать все планеты в составе своей солнечной системы и, в итоге, все планеты в ней будут распространять сигналы. В разные уголки Галактики могут быть отправлены многочисленные зонды, расширяющие, таким образом, исследованную область продвинутой цивилизации. Цивилизации могут даже попытаться создать новые биосферы на соседних планетах – модель “прямой панспермии” [7]. В данной статье предполагается, что когда цивилизация становится технологически высокоразвитой, то происходит колонизация всех *ненаселенных* планет в родительской звёздной системе (колонизация является обобщающим термином как для управляемых, так и автоматических устройств, имеющих на поверхности или на орбитах планет)².

Ключевыми параметрами для цивилизаций являются:

- τ_{adv} - время перехода цивилизации из фазы “созревания” к “продвинутой” форме.
- $P_{destroy}$ - вероятность того, что незрелая цивилизация уничтожит себя.
- L_{signal} - время жизни любого сигнала или утечки сигнала от цивилизации.

Длительность времени излучения сигнала погибшей цивилизации равна:

$$L_{signal} = x\tau_{adv}, \quad (10)$$

где x является случайным числом, выбранным в диапазоне между 0 и 1. Если цивилизация становится продвинутой, то время длительности сигнала будет

$$L_{signal} = \tau_{MS} - \tau_{int} \quad (11)$$

(то есть цивилизации существуют до тех пор, пока их родительская звезда не сойдёт с главной последовательности). Для планет, колонизированных развитой цивилизацией, время трансляции определяется выражением:

$$L_{signal} = \tau_{MS} - \tau_{int} - \tau_{adv} \quad (12)$$

В конце очередного испытания по методу MCR каждой планете присваивается индекс обитаемости, на основании её биологической истории.

$$I_{inhabit} = \begin{cases} -1 & \text{Есть биосфера, которая погибла} \\ 0 & \text{Планета безжизненна} \\ 1 & \text{На планете есть примитивная жизнь} \\ 2 & \text{На планете есть разумная жизнь} \\ 3 & \text{На планете есть разум, но он уничтожил себя} \\ 4 & \text{На планете есть развитая цивилизация} \\ 5 & \text{Планета колонизирована развитой цивилизацией} \end{cases}$$

Если планета имеет индекс обитаемости 1 или 2, то биологический процесс заканчивается вместе с гибелью родительской звезды. Планеты с индексом -1 или 1 могут содержать биомаркеры в атмосфере (например, спектральные линии озона или воды), которые можно обнаружить. Планеты с индексом 2 и выше будут распространять сигналы или будет происходить их утечка. Планеты с индексами 4 или 5 могут демонстрировать признаки постбиологической цивилизации или крупномасштабные “макро инженерные” проекты, например, сферы Дайсона [10]. Сигналы от этих систем могут даже соответствовать сигналам от цивилизаций II типа по Кардашеву (способных утилизировать всю энергию своей родительской звезды) и, следовательно, способных изменить спектральные характеристики звёзд, которые астрономы Земли смогут обнаружить.

3. Исходные данные

При сравнении гипотез важно свести число свободных параметров к минимуму. Этому способствует биологическая версия принципа Коперника: земная биосфера не уникальна и не особенна. Поэтому жизнь на других планетах будет иметь аналогичные значения характерных параметров. Из этого следует, что многие из параметров могут представлять собой константы, общие для всех гипотез: в частности те, которые ответственны за появление разума. Они представляют собой выборку функции распределения Гаусса (в предположении, что каждая переменная суть есть результат взаимодействия многих факторов и применяя в неявном виде центральную предельную теорему статистики). Среднее число стадий

N_{stages} принято равным 6, что отражает главные этапы эволюции жизни на Земле [3]:

- 1 биогенез;
- 2 появление бактерий;
- 3 появление эукариот;
- 4 комбинированный генезис
- 5 появление многоклеточных;
- 6 рождение технологической цивилизации.

Для каждой гипотезы было сгенерировано по 100 испытаний MCR: в Таблице 1 представлены параметры, использованные для всех тестов. Результаты проверки трех гипотез описаны ниже.

3.1. Гипотеза панспермии

В этой хорошо документированной теории предполагается, что жизнь может распространяться от одной планеты, на которой она зародилась, к другим, приводя к тому, что жизнь формируется практически одновременно в множестве систем. В этой модели полагается, что если жизнь зародилась на одной из планет звездной системы, то другие планеты могут быть засеяны жизнью в соответствии со следующими предпосылками:

$$P_{life} = \begin{cases} 1, & \text{если планета находится в обитаемой зоне звезды} \\ e^{-\Delta R} e^{-\left(\frac{L_*}{L_{\odot}}\right)}, & \text{если планета находится вне зоны обитания этой звезды} \end{cases}$$

Жизнь может распространяться между планетами в том случае, если расстояние ΔR между обитаемой планетой и планетой назначения достаточно мало, а светимость звезды значительно ниже той, что способна уничтожить биологические организмы при транзите. Предполагается, что жизнь появляется на исходной планете в то время, когда идёт её интенсивная бомбардировка небесными телами и выбитые семена жизни засевают другие планеты (уносимые в кусках пород, выбитых с поверхности населенной планеты ударами астероидов), что происходит, следовательно, практически мгновенно. Вероятность разрушения $P_{destroy}$ задана априори равной 0.5, отражая текущее отсутствие знаний о развитии внеземных цивилизаций.

Эта гипотеза ограничивает панспермию только планетами родительской звездной системы: к сожалению, модель в настоящий момент неспособна моделировать интересную возможность межзвёздной панспермии [18], [26]. Это само по себе служит сильной мотивацией к улучшению модели в дальнейшем, и оставляет путь для будущей работы.

3.2. Гипотеза редкой жизни

Вследствие имеющегося сегодня недостатка данных по землеподобным экзопланетам, известная гипотеза “Редкой Земли” [28] не может быть протестирована полностью. Для данного кода возможна несколько иная гипотеза (предположение о том, что планеты гиганты типа Юпитера в обитаемой зоне могут иметь землеподобные луны, на которых возможна жизнь). В принятой гипотезе предполагается, что появившаяся жизнь является устойчивой и может достаточно легко эволюционировать в разумную, однако, тем не менее, феномен первоначального самозарождения жизни представляется весьма сложным: условия на планете должны удовлетворять некоторым критериям, необходимым для начала эволюции жизни. Эти критерии следующие:

1. Планета должна находиться в зоне обитания звезды
2. Масса родительской звезды должна быть меньше $2M_{\odot}$.
3. Система должна иметь по меньшей мере ещё одну планету, в качестве дополнительной защиты от бомбардировки
4. Металличность звезды должна быть как у Солнца или выше ($Z_* \geq Z_{\odot}$)

Если удовлетворены *все* перечисленные критерии, то жизнь может появиться. Параметр $P_{destroy}$ берется равным 0.5 по той же самой причине, что и в предыдущем случае. Снова надо заметить, что это существенно отличается от гипотезы Редкой Земли и их нельзя сравнивать. Более точное сопоставление покажет, являются ли последние несколько стадий жизни (развитие многоклеточных и разумной жизни) редкими: это больше подойдет для дальнейшей работы после улучшения модели.

3.3. Гипотеза черепахи и зайца

Как последний пример, эта гипотеза демонстрирует способность кода моделировать социологические прогнозы. Жизнь легко эволюционирует на многих планетах, однако эволюция в направлении разума и продвинутой цивилизации является наиболее сложной. Существенно то, что цивилизации, становление которых происходит слишком быстро, более склонны к самоуничтожению, в то время как те, которые проходят долгий путь становления имеют большую вероятность выжить в фазе взросления. Это параметризуется следующим образом:

$$P_{destroy} = \frac{\tau_0}{\tau_{int}} \quad (15)$$

где $\tau_0 = N_{stages}\tau_{min}$ есть константа нормализации, которая задает минимальное время эволюции (если число сбросов $N_{resets} = 0$, а каждая стадия занимает минимально возможное время τ_{min}) (Замечание: если эти расчеты применить к Человечеству, то вероятность нашего собственного самоуничтожения составит примерно 0.8 (!)). Если планета находится в зоне обитания, то $P_{life} = 1$, то есть такая же, что и

для других гипотез. Надо заметить, что это является чрезмерным упрощением: потенциальное существование жидкой воды на Энцеладе и Европе (оба спутника находятся вне зоны обитания) предполагает, что P_{life} должно представлять собой распределение, зависящее от орбитального радиуса, с хвостом, распространяющимся во внешнюю часть зоны: однако для целей данной статьи простой ступенчатой функции вполне достаточно.

Таблица 1: Параметры, используемые во всех гипотезах

Гипотеза	Параметр	Среднее	Стандартное отклонение
Все	N_{stages}	6	1
Все	τ_i	0.8 млрд.лет	0.25 млрд.лет
Все	τ_{adv}	2.5×10^{-4} млрд.лет	1.0×10^{-4} млрд.лет
Гипотеза	Параметр	Значение	
Все	N_{MCR}	100	
Панспермия	P_{life}	как в уравнении (14)	
Панспермия	$P_{destroy}$	0.5	
Редкая жизнь	P_{life}	1 (все критерии выполнены)	
Редкая жизнь	$P_{destroy}$	0.5	
Заяц и черепаха	P_{life}	1 (если в обитаемой зоне)	
Заяц и черепаха	$P_{destroy}$	как в уравнении (15)	

4. Результаты

4.1. Гипотеза панспермии

Единственная численная статистика для этой гипотезы показана в Таблице 2. Как и ожидалось, примерно половина всех возникающих цивилизаций разрушает себя (так как $P_{\text{destroy}} = 0.5$). Примерно 0.1% всех планет на протяжении существования Галактики оказываются населены либо примитивной, либо разумной жизнью и примерно 10% этих населенных планет могут иметь разумные формы жизни. В сравнении с гипотезой Черепахи и Зайца (см. ниже), доля необитаемых планет увеличивается незначительно при наличии возможности заселения соседей: это является следствием, главным образом, малого разнообразия среди уже открытых экзопланет (примерно 11%).

Таблица 2: Статистика для гипотезы панспермии

Параметр	Среднее	Стандартное
$N_{\text{planets,total}}$	4.7295×10^8	401530
$N_{\text{inhabited}}$	690983.63	53
$N_{\text{fledgling}}$	75923.04	8
$N_{\text{destroyed}}$	37958.07	11
N_{advanced}	37964.97	20

Рис. 7 показывает обитаемую зону Галактики для данной гипотезы: при малом галактоцентрическом радиусе, скорость гибели увеличивается в точке, где цивилизации не могут развиваться (хотя сама жизнь там и может появиться, но она быстро выкорчевывается в результате разрушительных астрофизических событий). В правой части рис.7 показан распад обитаемых типов планет для жизни в Галактике. Большое число планет с индексом -1 (уничтожение биосферы) дают солнечные системы с низким галактоцентрическим радиусом, богатые металлом и легче формирующие планеты (и, следовательно, жизнь), но претерпевающие быстрое наступление биологической катастрофы. Доля колонизации (планеты с индексом населенности 5) довольно низка: скорее всего это происходит в результате того, что распространение жизни при интенсивной панспермии уменьшает число пустующих соседних планет, пригодных для колонизации.

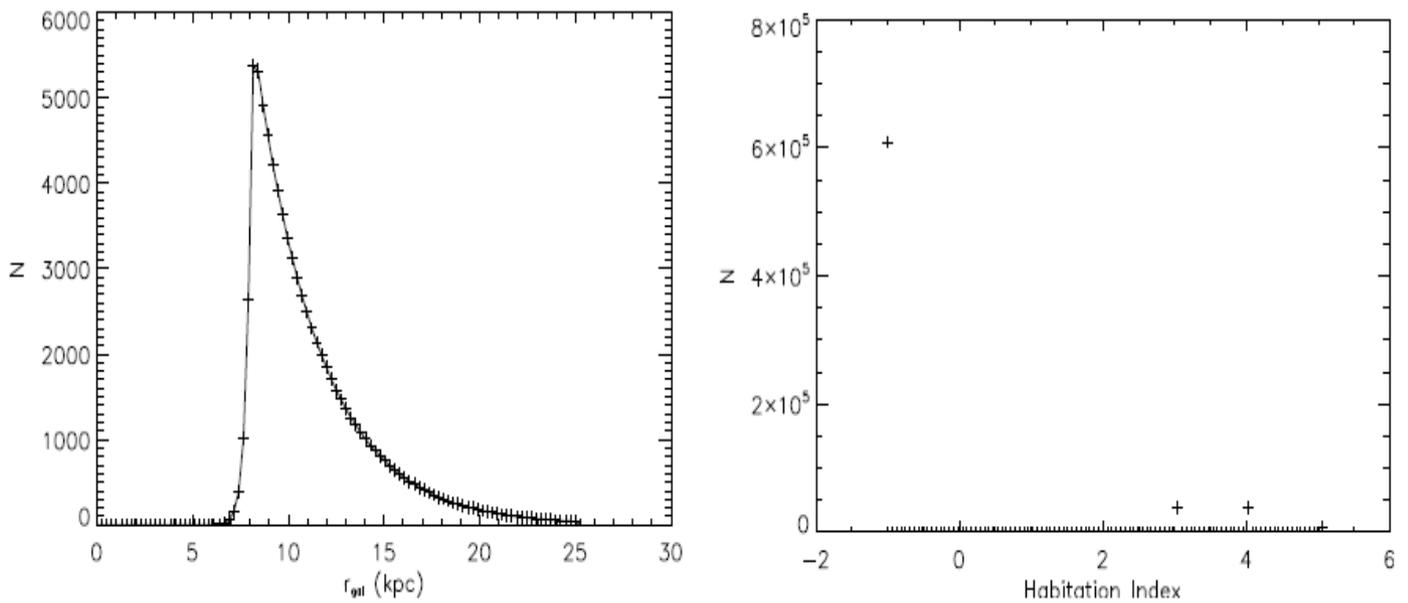


Рис. 7: Распределение галактоцентрического радиуса (слева) и индекса обитаемости (справа для гипотезы Панспермии).

Функция распределения параметров звёзд для планет с цивилизациями (рис.8) демонстрирует тяготение подобных планет к звездам с малой массой. Это происходит по причине смещения выборки для так называемых “горячих Юпитеров”: эти объекты имеют столь малый радиус орбиты, что когда они располагаются в обитаемой зоне, то эти зоны также должны иметь небольшой радиус и, следовательно, принадлежать звездам с малой массой. Металличность находит отражение в галактической зоне обитания: цивилизации имеют минимум галактоцентрического радиуса, и, следовательно, максимум металличности. Что касается времени коммуникативной фазы, то оно существенно зависит от времени нахождения родительской звезды на главной последовательности и является функцией массы. Изучая зависимость периода передачи сигналов от массы становится ясно, что эти два параметра имеют высокую степень корреляции между собой. Если сигналы нанести на график в виде функции времени (рис. 9, справа), то видно, что рост числа сигналов N претерпевает переход от небольших значений к высоким за время $t \sim t_H$, где t_H – возраст Хаббла (то есть возраст вселенной). Эта свойственно принципу Коперника, ограничивающего множество биологических параметров - любая произвольная цивилизация достигнет стадии разумности в среднем за то же время, что и наша цивилизация.

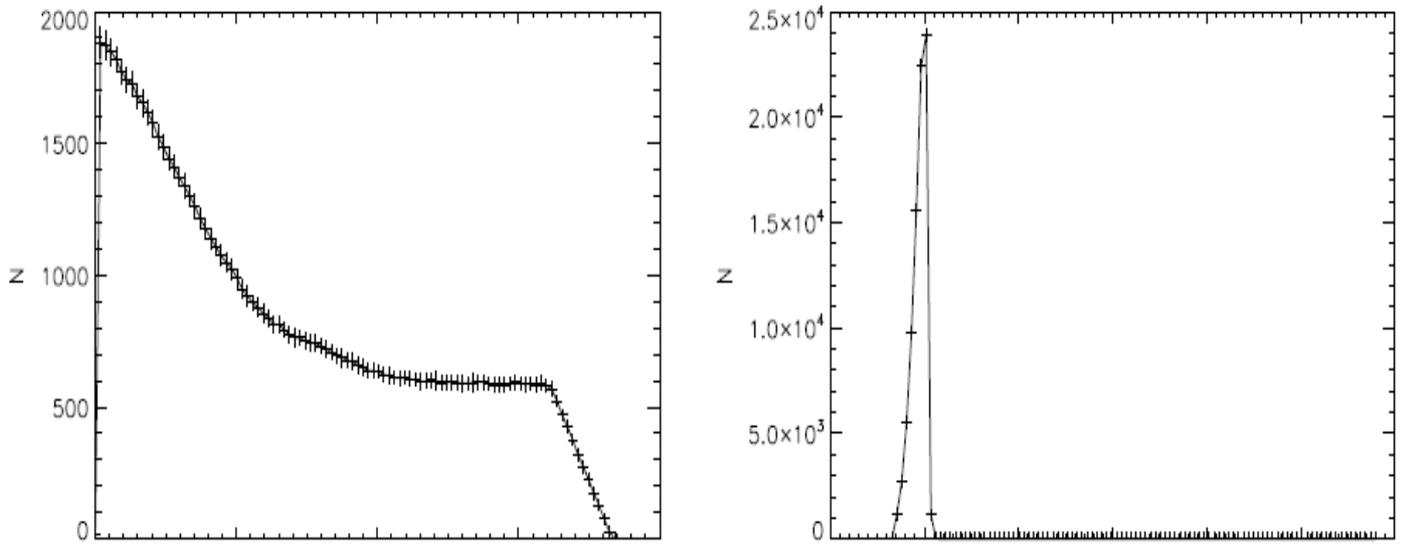


Рис. 8: *Распределение масс родительских звезд (слева) и металличности (справа) для гипотезы Панспермии*

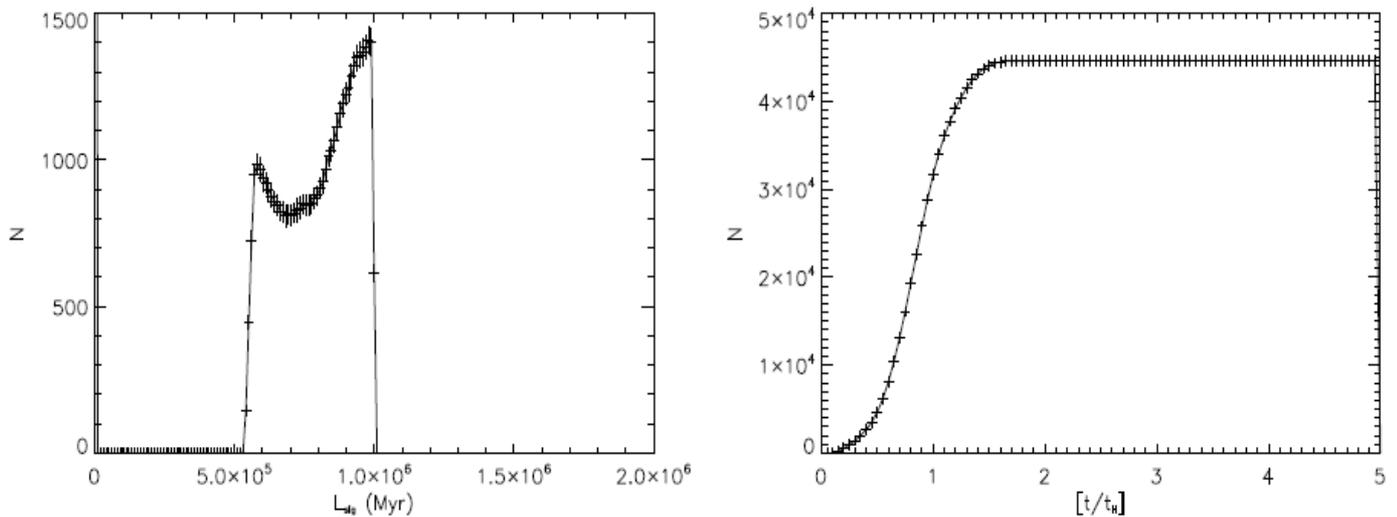


Рис. 9: *Распределение времени (слева) и эволюция распространения сигналов в Галактике (справа) для гипотезы Панспермии.*

4.2. Гипотеза редкой жизни

Жесткая привязка к суровым природным факторам в этой гипотезе проявляется в том, что она существенно уменьшает популяцию планет с жизнью по сравнению с другими гипотезами (с долей обитаемости равной всего лишь 0.01%). Однако, несмотря на эту крайнюю суровость, за время существования Галактики может образоваться значительное число цивилизаций: около 1% всех жизнеспособных планет порождают разумных

существ. И вновь, как и ожидалось, примерно половина цивилизаций самоуничтожается.

Таблица 3: Статистика для гипотезы «Редкой жизни»

Переменная	Среднее	Стандартное отклонение
$N_{\text{planets} \rightarrow \text{total}}$	4.770×10^8	381
$N_{\text{inhabited}}$	80090	22
$N_{\text{fledgling}}$	728.6	1
$N_{\text{destroyed}}$	367.3	0
N_{advanced}	361.2	2

Распределение галактоцентрических радиусов имеет довольно резкий пик (рис. 10, левая панель).

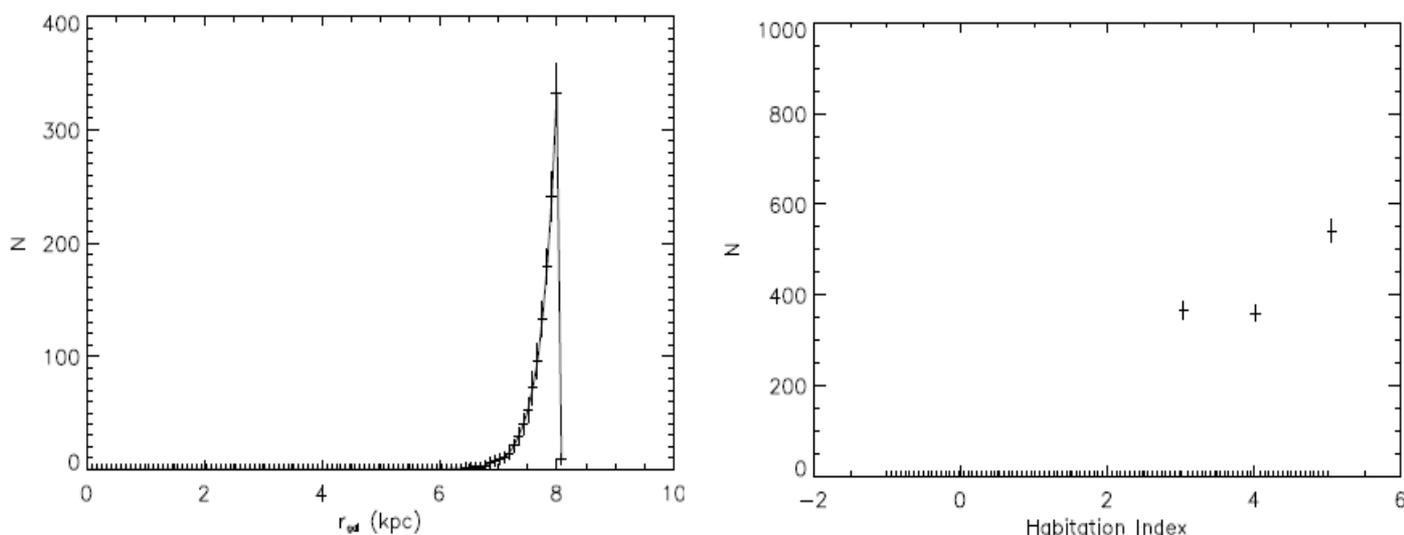


Рис. 10: Распределение галактоцентрических радиусов (слева) и индекса обитаемости (справа) для гипотезы Редкой Жизни.

Это происходит потому, что в этой гипотезе для жизни требуется металличность $Z_* \geq Z_{\odot}$ (что ясно видно на рис. 11, правая панель) при фиксированном максимальном галактоцентрическом радиусе r_{gal} , за пределами которого жизнь зародится не может. Что касается индекса обитаемости (рис. 10, правая панель), то можно отметить большую вероятность развития колонизации. Это вытекает из того критерия, что жизнь может развиваться только в планетных системах с множеством планет и, следовательно, любой продвинутый космический разум *должен* принять участие в колонизации. Распределение масс звёзд, хотя и значительно меньше по абсолютной величине, является таким же, как для

гипотезы Панспермии и, соответственно, распределение времени передачи сигналов также аналогичное.

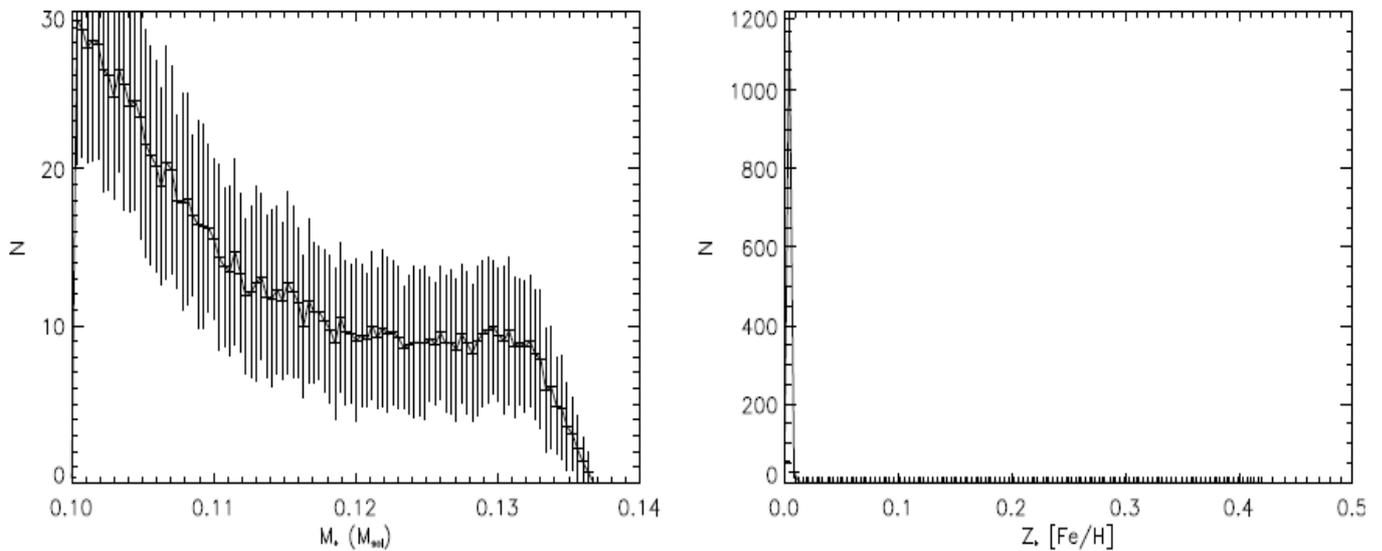


Рис. 11: *Распределение звездных масс родительских звёзд (слева) и металличность (справа) для гипотезы Редкой Жизни.*

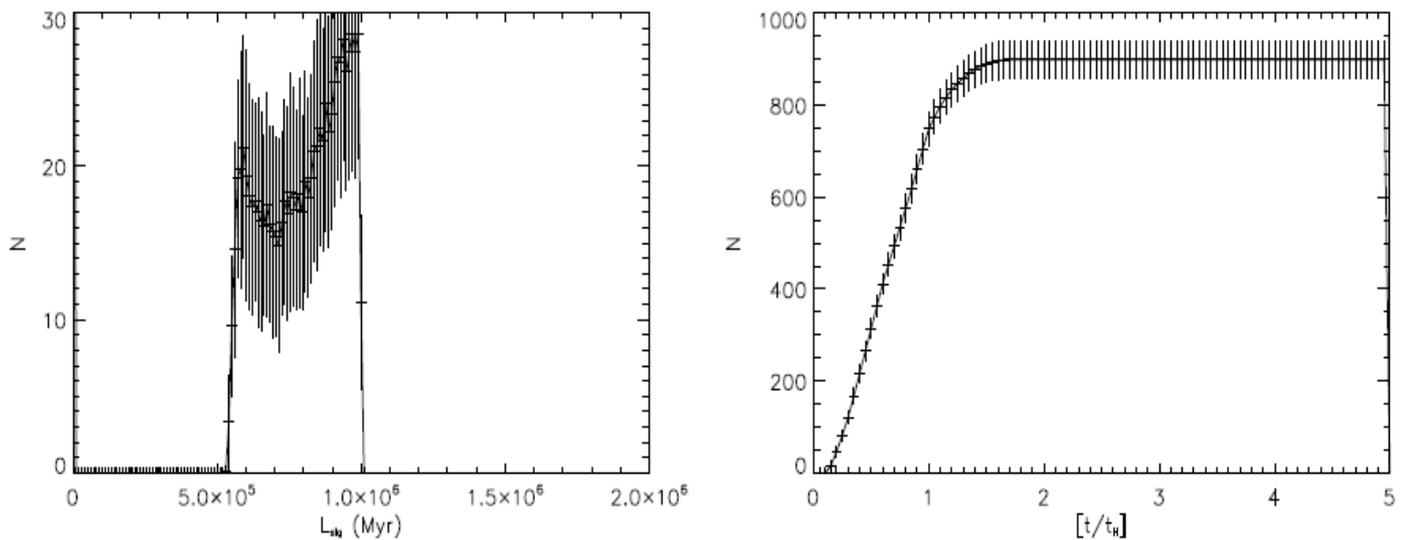


Рис. 12: *Распределение времени (слева) и эволюции распространения сигналов в Галактике (справа) для гипотезы Редкой Жизни*

4.3. Гипотеза Черепахи и Зайца

Биологические данные для этой гипотезы не отличаются существенно от гипотезы Панспермии, показывая долю обитаемости примерно 0.1%. Однако, истинное различие состоит в цивилизационных данных: вместо

соотношения вероятностей приблизительно 1:1 между самоуничтожением и далеко идущим прогрессом мы видим, что эта гипотеза слегка тяготеет к саморазрушению в случае незрелой цивилизации, с соотношением приблизительно 1.38:1. Несмотря на это, около 4% пригодных для жизни планет обеспечивает развитие разумной жизни, которая выживает в фазу юности.

Таблица 4: Статистика гипотезы Черепахи и Зайца

Переменная	Среднее	Стандартное отклонение
$N_{\text{planets, total}}$	4.770×10^8	1593
$N_{\text{inhabited}}$	684399.26	2
$N_{\text{fledgling}}$	75200.3	20
$N_{\text{destroyed}}$	43626.82	1
N_{advanced}	31573.52	20

Галактическая зона обитания такая же, как и в гипотезе Панспермии: слабый тренд в сторону саморазрушения можно наблюдать на правой панели рис. 13.

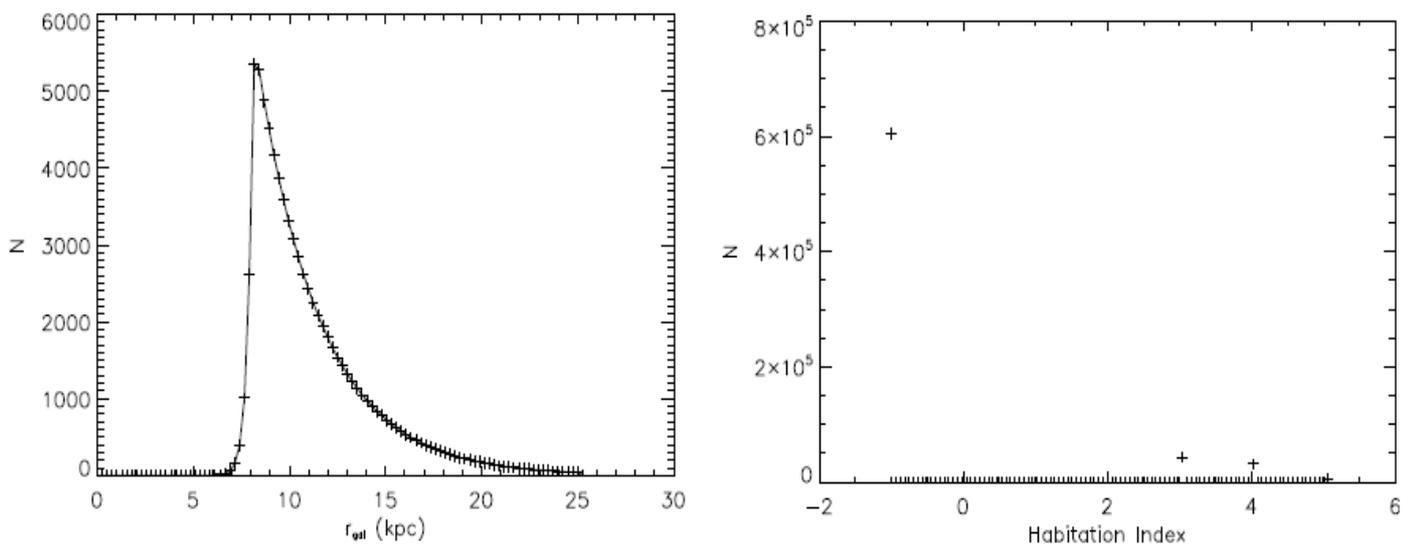


Рис. 13: Распределение галактоцентрического радиуса (слева) и индекса обитаемости (справа) для гипотезы Черепахи и Зайца.

Сравнение данных между этими гипотезами и гипотезой Панспермии показывает, что как количественное, так и качественное поведение является похожим. Это отражает схожесть двух гипотез по биологическим

параметрам и то, что ключевым различием является социологический параметр P_{destroy} .

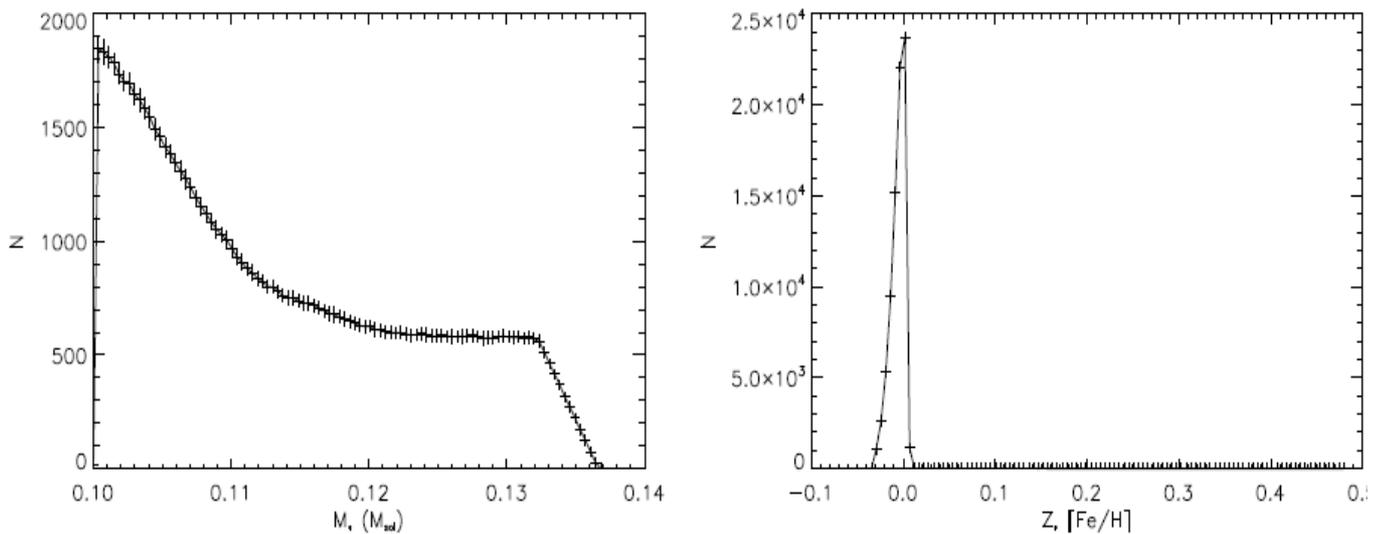


Рис. 14: *Распределение масс родительских звезд (слева) и металличности (справа) для гипотезы Черепахи и Зайца.*

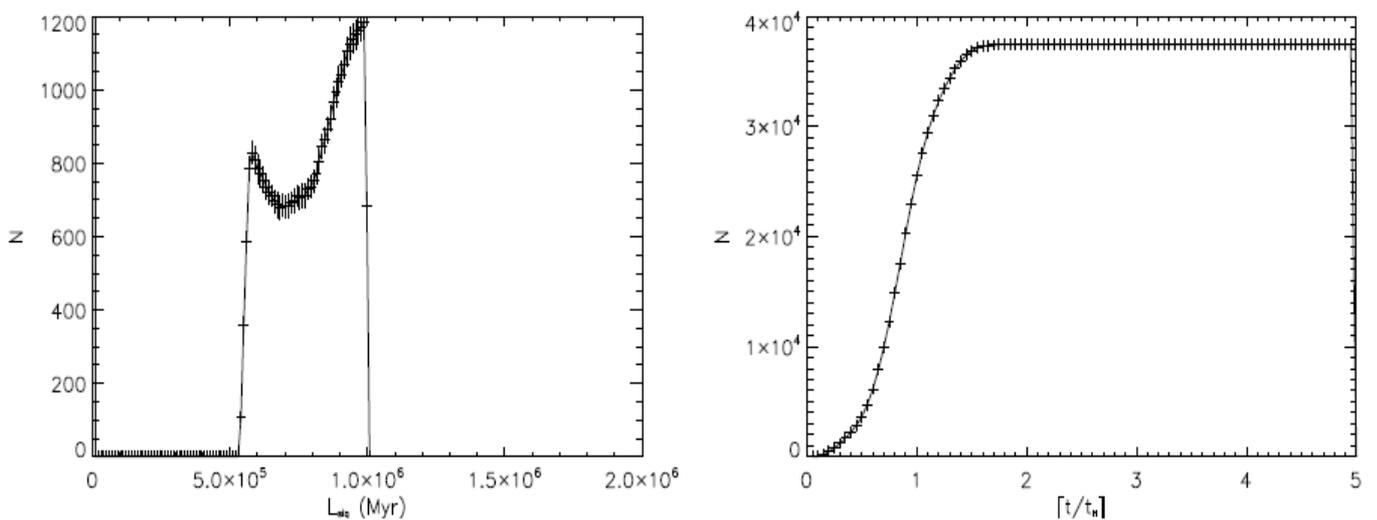


Рис. 15: *Распределение времени (слева) и эволюции распространения сигналов в Галактике (справа) для гипотезы Черепахи и Зайца*

5. Заключение

Результаты всех трех гипотез демонстрируют очевидные тенденции в

данных. Во всех случаях обитаемые планеты вращаются вокруг звезд с низкой массой (в имеющихся на сегодня данных преобладают горячие Юпитеры); интервалы времени передачи сигналов зависят, соответственно, от масс звёзд (как и ожидалось, задаваемых функциональной формой). История распространения сигналов для всех трех гипотез показывает, что время перехода между низкой и высокой плотностью сигналов равно примерно $t \sim t_H$; вновь можно использовать симптоматику биологического аналога принципа Коперника для введения ограничения τ_i , N_{stages} , и т.д.

Настоящая статья очерчивает контуры методики, с помощью которой можно оценить ключевые параметры SETI, принимая во внимание разнообразие планетных условий, имеющихся, как известно, в Млечном Пути, и стохастическую природу самой эволюции жизни, с оценкой погрешности этих параметров. Однако из предосторожности надо сделать следующие два замечания:

1. Читатель может подозрительно отнестись к высокой точности приведенной статистики: стоит отметить, что стандартные отклонения этих результатов на самом деле низкие, а данные являются точными: но их точность не столь определена. Выходные данные будут полезны лишь настолько, насколько таковыми являются входные данные (вечная проблема “мусор на входе, мусор на выходе”). Существующие данные по экзопланетам хотя и уточняются с каждым днем, однако всё же недостаточно полноценны для детального исследования параметров их масс и радиусов орбит и, поэтому все представленные здесь результаты не являются окончательными. С другой стороны, по мере улучшения наблюдений и составления более полных каталогов эффективность реализации данного метода Монте Карло также должна улучшиться. Будущие исследования будут направлены также на рассмотрение планетных параметров в соответствии с выборкой, которая будет больше соответствовать развитой теории образования планет, а не текущим наблюдениям.

2. Представленный метод в настоящее время не дает полной картины взаимосвязи металличности и возраста (AMR – Age Metallicity Relation). Возраст, металличность и галактоцентрический радиус являются внутренне связанными в данном подходе: чтобы получить более реалистичные данные для всех этих трех самостоятельных параметров необходимо построить улучшенную трехмерную модель Галактики, которая должна принять в расчет все её геометрические особенности (вздутия, бар, и т.д.), так же как и время эволюции Галактики. В дальнейшей работе будет предпринята попытка представить более целостную модель, которая позволит учитывать все три параметра для

выполнения корректной выборки. В частности, дальнейшие усилия позволят использовать преимущество усовершенствованных числовых моделей эволюции звездообразования (см. например, [21], Rocha-Pinto et al., 2000), и пространственного распределения звёзд (см. например, [8], Dehnen and Binney, 1998).

Хотя в данной статье для моделирования биологических процессов используется “сценарий трудного шага”, сам метод является достаточно гибким и позволяет вводить другие параметры эволюции жизни и разума. Детали того насколько точно рассчитаны биологические параметры не влияют в целом на саму концепцию: данная работа показывает, что можно симулировать реалистичные выводы (на основе характеристик звёзд и планет) для эволюции инопланетного разума ETI вне зависимости от того моделируется ли это по сценарию “трудного шага” или иными стохастическими методами. Включение в модель новых эмпирических данных от следующего поколения устройств поиска скалистых планет, например, от телескопа Кеплер [2] (Borucki et al., 2008) и прочих астробиологических исследований, совместно с новыми теориями, более углубленно учитывающих физику и биологию, усилит эффективность данного метода Монте-Карло, открывая новый путь к решению проблемы SETI на основе средств соединения воедино многих до сих пор несопоставимых областей астрономических исследований.

6. Благодарности

Автор хотел бы поблагодарить рецензента за ценные замечания и комментарии, которые способствовали улучшению статьи. Моделирование, описанное в данной статье было выполнено с помощью высокопроизводительных вычислений, финансируемых объединением шотландских университетов в области физики (SUPA - Scottish Universities Physics Alliance).

Сноски

¹ Хотя здесь это и не рассматривается, но надо отметить, что слишком высокая металличность так же как и слишком низкая металличность может быть негативным фактором, поскольку системы с высокой металличностью по-видимому склонны порождать океанические миры [14] (Leger et al., 2004), которые могут быть враждебны формированию разумной жизни.

² Имеет смысл предположить, что планета с биосферой, возможно и с разумной жизнью, была бы более привлекательным кандидатом для колонизации, чем безжизненная планета: Однако, для предотвращения статистической путаницы (и чтобы не иметь дело с вероятностью межпланетных конфликтов среди разумных существ) в работе принято,

что колонизация проводится только на необитаемых планетах.

Ссылки

- [1] *Annis, J., 1999, J. Br. Interplanet. Soc, 52, pp 19-22*
- [2] *Borucki, W., Koch, D., Basri, G., Batalha, N., Brown, T., Caldwell, D., Christensen-Dalsgaard, J., Cochran, W., Dunham, E., Gautier, T. N., Geary, J., Gilliland, R., Jenkins, J., Kondo, Y., Latham, D., Lissauer, J.J., Monet, D., 2008, Proc. IAU, 249, pp17-24*
- [3] *Carter, B., 2008, IJA, 7, pp 178-182*
- [4] *Cirkovic, M.M., 2004, J. Br. Interplanet. Soc, 57, pp 209-215*
- [5] *Cirkovic, M.M., 2004, Astrobiology, 4, pp 225-231*
- [6] *Cirkovic, M.M., 2007, IJA, 6, pp 325-329*
- [7] *Crick, F.H.C, Orgel, L.E., 1973, Icarus, 19, pp 341-346*
- [8] *Dehnen, W., Binney, J., 1998, MNRAS, 294, 429*
- [9] *Dose, K., 1986, Adv. Space. Research, 6, pp 181-186*
- [10] *Dyson, F.J., 1960, Science, 131, pp 1667-1668*
- [11] *Hart, M.H., 1979, Icarus, 37, pp 351-357*
- [12] *Hou, J.L, Prantzos, N., Boissier, S., 2000, A & A, 362, pp 921-936*
- [13] *Ida, S., Lin, D.N.C., 2004, ApJ, 616, pp 567-572*
- [14] *Leger, A., Selsis, F., Sotin, C., Guillot, .T, Despois, D., Mawet, D., Ollivier, M., Labe`que, A., Valette, C., Brachet, F., Chazelas, B., Lammer, H.,2004 Icarus, 169, 499-504*
- [15] *Lineweaver, C.H., 2001, Icarus, 151, pp 307-313*
- [16] *Lineweaver, C.H., Fenner, Y., Gibson, B.K., 2004, Science, 303, pp 59-62*
- [17] *Mayor, M., et al, 1995, IAU Circ., 6251, p 1*
- [18] *Napier W.M., 2004, MNRAS, 348, pp 46-51*
- [19] *Prialnik, D., 2000, "An Introduction to the Theory of Stellar Structure and Evolution", Cambridge University Press, pp 121-122*
- [20] *Raup, D.M., Sepkoski, J.J., 1982, Science, 215, pp 1501-1503*
- [21] *Rocha-Pinto, H.J., Scalo, J., Maciel W.J., Flynn, C., 2000, A & A, 358, pp 869-885*
- [22] *Scalo, J.M., Miller, G.E., 1979, ApJs, 41, pp 513-547*
- [23] *Twarog, B.A., 1980, ApJ, 242, pp 242-259*
- [24] *Vukotic, B., Cirkovic, M.M., 2007, SerAJ, 175, pp 45-50*
- [25] *Vukotic, B., Cirkovic, M.M., 2008, SerAJ, 176, pp 71-79*
- [26] *Wallis, M.K., Wickramasinghe, N.C., 2004, MNRAS, 348, pp 52-61*
- [27] *Walters, C., Hoover, R.A., Kotra, R.K., 1980, Icarus, 41, pp 193-197*
- [28] *Ward, P.D., Brownlee, D., 2000, "Rare Earth: Why Complex Life is Uncommon in the Universe", Springer, New York*