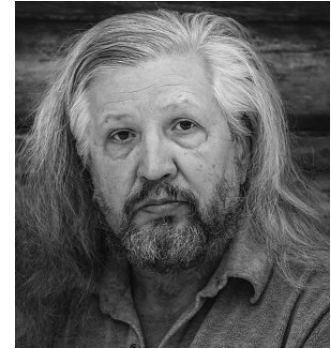




Прочти и передай другому!

СКОЛЬКО ЖИВУТ ЗВЁЗДЫ



Посвящается Андрею Жукову (1955–2020), с которым мы обсуждали этот номер летом. Он хотел его прочитать, но не успел, а теперь, по одной из теорий, знает об этом куда больше меня.

1. Инструментарий.

Наверное, практически каждому доводилось где-то встречать упоминание о том, что Солнце уже прожило половину своего срока и через пять миллиардов лет погаснет. Или, скажем, о том, что такая-то звезда имеет такой-то возраст.

Понятно, что все подобные утверждения не могут быть результатом экспериментального хронометража. Это результаты теоретических расчётов, базирующихся на физике звёзд. За этими двумя словами, физика звёзд, лежит почти вся прорывная физика XX века: и термоядерный синтез, и магнитная гидродинамика, и конвекция плазмы, и излучение, и осцилляция нейтрино, и общая теория относительности, и многое, многое другое.

Напомню, что примерно сейчас мы могли бы отмечать столетие начала догадок о том, что звёзды излучают энергию за счёт каких-то процессов радиоактивности. А первую количественную модель двух, пожалуй, главных термоядерных процессов в звёздах, протон-протонный и углеродно-азотный, разработал к 1938 году 32-летний немецкий физик Ганс Бете, бежавший от нацизма в Британию, а с 1935 года осевший в знаменитом Корнельском университете США.

Правда, идеи носились в воздухе: независимо от Бете, углеродно-азотный цикл открыл тогда же Карл фон Вайцеккер. Но Нобелевскую премию в 1967 году получил только Бете*. А экспериментальное подтверждение этого цикла было зафиксировано в солнечных нейтрино только что, в середине 2020 года.

После военной паузы, когда расчёты термоядерных процессов резко переключились на объекты массой этак на тридцать порядков меньше, чем звёзды, физики вернулись к звёздным высям. Хронологию этих работ и заслуги и промахи их авторов хорошо обзревает замечательный педагог и популяризатор В. Г. Сурдин в книге «Рождение звёзд» (3-е изд., 2001, гл. 1).

За коротким послевоенным десятилетием тружеников авторочки и логарифмической линейки началась сказочная эпоха, когда одна изрядно продырявленная картонная перфокарточка, вставленная в солидный агрегат размером со средний коттедж, смогла заменить невесть сколько движений прозрачного бегунка туда-сюда по гармонии

чески графлёному целлулоиду, не говоря уже о бесконечных листаниях толстых логарифмических таблиц с итерированием последних (курсивных, помнится) цифр! Слава вам, великие ЭВМ 1960-х, мгновенно перерабатывающие КИЛОБАЙТЫ информации!

Физики заделались программистами. Наблюдатели приносили факты: внешняя оболочка Солнца имеет такую-то температуру; такой-то состав элементов; скорость такой-то ядерной реакции так-то зависит от температуры и давления; в ядре Солнца, судя по нейтринным потокам, условия такие-то; и проч. и проч. Теоретики на базе фактов строили модели; и строят до сих пор, и, кстати, не все факты даже о Солнце, не говоря о других звёздах, объяснены на сегодняшний день. Например, самый знаменитый пробел: нет количественной теории, объясняющей необычайно высокую температуру солнечной короны.

И вот с тех пор астрофизики, специализирующиеся на вопросах звёздной эволюции, пишут и пишут программные коды, где последние достижения теоретиков проштопаны более или менее разумными предположениями в местах белых пятен эксперимента и теории, а кое-где и разумными упрощениями в местах, где повышение достоверности на копейку потребовало бы роста вычислений на рубль. А потом ведь ещё надо написать красноречивую заявку на грант, чтобы заплатить за недешёвое время работы суперкомпьютеров и получить результат работы своих новейших программ.



Hans Bethe (1906–2005)



Carl von Weizsacker (1912–2007)

* С научной точки зрения, всё честно: Бете рассчитал оба цикла, а Вайцеккер – только один (хотя первенство идеи обоих циклов, кажется, принадлежит ему). Но не будем сбрасывать со счетов и то, что атомную бомбу один делал для Рузвельта, а другой – для Гитлера. А с 1950-х оба стали борцами против неё.

Вот такой инструментарий стоит за фразами, с которых мы начали этот раздел.

Круг учёных, занимающихся в мире этими вопросами, довольно узок (видимо, для распорядителей грантов тема дальнейшего усовершенствования расчёта звёздной эволюции звучит как-то не очень вдохновляюще; уж точно не по-нобелевски). В России, как ни странно, при такой-то популярности астрономии и при таком-то наследии классической плеяды и астрофизиков и физиков-ядерщиков, расчётами эволюции звёзд то ли не занимаются вовсе, то ли занимаются на какой-то периферии или в засекреченной оборонке. А в мире научные группы и отдельные докторанты из этой сферы вряд ли перевалят за сотню. (И, если вы подумали об утечке русских умов туда, где за ум платят, то разочарую: в публикациях этих нескольких десятков групп русских фамилий мне что-то не попадалось.)

Внутри этого сообщества считается, что, хотя эффект некоторых допущений и упрощений трудно просчитать, но в целом их направление деятельности верное, а получаемым сегодня результатам можно доверять*. Когда несколько разных групп по разным программам вычисляют что-то идентичное или сильно похожее, разброс результатов между теми и другими обычно укладывается в десятки процентов, реже – в небольшое число раз.

Вероятность того, что в будущем какие-то новые теории радикально изменят сложившуюся сегодня картину эволюции звёзд, в сообществе оценивают как довольно маленькую. Хотя и не нулевую. Всё честно.

2. Краткий ликбез.

Кто подкован в азах науки о звёздах, этот раздел может смело пропустить, а для тех, кто думает, что мог что-то оттуда подзабыть, а о чём-то не иметь случая узнать, приведу конспективно ряд опорных фактов.

Зачатие звёзд покрыто туманом. Ясно, что гравитация должна стянуть более или менее однородный газ в звезду. Теоретическое решение дал Джинс в 1902 году: такое произойдёт при определённом сочетании плотности и температуры газа. Масса получившейся звезды тоже однозначно определится по плотности и температуре.

Позже у Джинса нашли шероховатости, исправили их. Затем, в 1940-х и 1950-х годах, развили теорию не для идеализированной однородной среды, а для реального (расширяющегося) космического пространства, где в упругом газе есть неупругая пыль (но часто чуткая к магнитным полям, которых в этом пространстве тоже хватает), где яркие новорожденные звёзды-гиганты своим излучением сильно разогревают разреженный газ, но слабо прогревают уже начавшие сгущаться области газо-пылевой конденсации (и этот контраст усиливает сжатие последних), где, наконец, всё имеет не идеально-сферическую, а случайную, «неправильную» форму, и при неизбежном наличии вращения на определённом этапе сжатия несферичное сгущение начинает прогрессивно дробиться, создавая широкий интервал масс будущих звёзд при одном и том же стартовом сочетании температуры и плотности среды. И так далее, и так далее...

А на исходе XX века открыли тёмное вещество, и оно оказалось крайне необходимым катализатором гравитационного сгущения обычного вещества. (А открытая тогда же тёмная энергия – наоборот, тормозит сгущение.)

Но и в новейших версиях теории критерии качественно остались теми же, что у Джинса: сжатие возможно во все космологические эпохи при определённых сочетаниях плотности и температуры газа (своих для каждой эпохи). А вот картина сжатия поменялась. В реальных условиях типичное сгущение совсем не похоже на сферически-симметричное стремление газа к центру. Образуется вначале эллипсоид

(«огурец»), затем он сплющивается в вытянутой «блин», далее сжимается в ширину до конфигурации «иглы», а последняя распадается на цепочку более или менее сфер. При этом гравитационные воздействия постоянного «броуновского движения» окружающих звёзд так быстро растаскивают эти сферы, что их «ожерелье» на глазах тает в звёздном хаосе. (Правда, типично сферы растаскиваются не поодиночке, а парами, тройками и т. д., поэтому большинство звёзд во Вселенной – двойные, тройные и выше.)

При сжатии газ разогревается, но на всех промежуточных стадиях до распада «иглы» этот разогрев ещё невелик. А вот когда сжатие идёт уже в сферах, продуктах распада «иглы», там температура, особенно в центре, переваливает за тысячи Кельвинов, и поэтому ещё до начала термоядерных реакций в ядре сгущения вся эта большая масса, называемая **протозвездой**, начинает светиться. (На нашем сайте mir.k156.ru есть масштабированный ролик, показывающий, как меняется во времени диаметр и цвет свечения сжимающейся протозвезды.)

Для удалённого (да хотя бы и близкого) наблюдателя это уже выглядит как звезда, но – снова казуистика определенной! – звездой это не признаётся, ибо энергия свечения вырабатывается гравитацией, а не ядерными силами. Впрочем, век протозвезды недолог: малые доли процента от времени последующего ядерного горения.

Начало ядерного горения считается рождением звезды.

В учебниках вы найдёте два утверждения:

– чем больше исходная масса звезды, тем короче время её жизни;

– чем больше исходная масса звезды, тем меньше таких звёзд рождается во Вселенной.

Однако второе утверждение, судя по новейшим данным звёздной и экзопланетной статистики, не совсем верно. Распределение числа звёзд, а также планет и астероидов по начальным массам, вероятно, будет квазигиперболическим в первом приближении (это установил Солпитер ещё в 1955 году), но с заметной «синусоидальностью» (а это открыли недавно). Возможно, это просто внутреннее свойство уравнений гравитации: какие-то массы при сгущении из однородной среды образуются легче, какие-то – труднее. А возможно, дело здесь в каких-то эффектах резонансной природы, подобных тем, которые действуют на планеты в Солнечной системе. Или ещё в чём-то.

Коричневые (иногда говорят «бурые») карлики – один из надёжных примеров «синусоидальности» распределения сгущённых тел по массам. Они менее массивны, чем красные карлики, и по закону Солпитера их должно было быть больше. Однако в действительности их меньше. Зато ниже по шкале масс располагаются планеты, и данные об экзопланетах уверенно указывают на то, что планет во Вселенной больше, чем звёзд. А астероидов, как мы знаем по Солнечной системе, ещё больше, чем планет, и чем меньше их массы, тем они многочисленнее. То есть на них закон Солпитера восстанавливается.

А вот первое утверждение, что массивные звёзды выгорают быстрее, оказывается верным во всём диапазоне масс звёзд, от сотых долей солнечной до сотен, а возможно, и тысяч масс Солнца. Это кажется парадоксом: топлива больше, а горит меньше. Но причина в том, что чем больше масса звезды, тем сильнее его внешние слои гравитационно давят на нижние. Это приводит к повышению температуры и плотности в центре звезды, а с ростом этих параметров скорость ядерного синтеза очень быстро возрастает. Настолько быстро, что большее количество топлива в итоге сгорает быстрее.

Если не говорить о бурых карликах, которые не признаются звёздами, потому что в них не происходит ядерного синтеза (если не считать эпизодического сгорания экзотических элементов типа дейтерия, количество которых в веществе бурого карлика ничтожно), то у всех других прото-

* См., например, в статье J.-C. Pecker «The Global Sun» в сборнике 1991 года «Solar Interior and Atmosphere», pp. 25–30: <https://books.google.ru/books?id=u3EAvRsJoZgC&pg=PA25>

звёзд первым начинается синтез гелия из водорода. Это самый долгий, а у звёзд массой менее примерно 0,5 солнечной (которые, между прочим, составляют около 2/3 звёзд Вселенной) – единственный этап жизни звезды. Он называется периодом нахождения на **главной последовательности (ГП)**.

После него начинается синтез более тяжёлых элементов из гелия, затем из всё более тяжёлых. Этот этап у звёзд с начальной массой менее примерно 1,3 солнечной длится втрое-вчетверо меньше, чем жизнь на ГП, а у более массивных он быстро сокращается. Так, у звёзд массой 1,5 солнечных это порядка 10%, у звёзд массой 3 солнечных – порядка 2,5% от времени жизни на ГП, и т. д.

В ходе жизни на ГП звезда сравнительно мало меняется, примерно вдвое увеличивая свою яркость (светимость) и ещё меньше вырастая в размере. Впрочем, этих изменений, как мы знаем по расчётам эволюции Солнечной системы, достаточно, чтобы радикально сдвинуть вдаль зону жизни (и либо изжить ту жизнь, которая родилась рано, как случится с Землёй примерно через миллиард лет, либо создать условия для позднего зарождения жизни на ранее холодных планетах, которым, увы, недолгой тёплой эпохи стареющей звезды вряд ли хватит на эволюцию к разуму).

После ГП, в зависимости от массы звезды, изменения становятся и более зрелищными и более разнообразными.

У звёзд массой от примерно 0,14 до примерно 9 солнечных размеры и яркость звезды могут возрастать, а затем убывать в сотни и тысячи раз (иногда неоднократно). Но в конце остаётся белый карлик, который, остывая в течение десятков и сотен миллиардов лет, должен превратиться в чёрный карлик. Ранее считалось, что у звёзд массой примерно между 8 и 12 солнечных иногда (это зависит от их исходного химического состава) происходит углеродная детонация ядра, и такая звезда полностью рассеивается. Но затем появились модели, в которых и при детонации белый карлик сохраняется.

Звёзды массой более примерно 9 солнечных после ГП дают вспышку сверхновой. Их рождается очень мало, доли процента от всего количества звёзд, и для жизни это очень хорошо, потому что пережить вспышку сверхновой в ближнем звёздном окружении весьма проблематично. Те из них, что имели исходную массу до 35–40 солнечных, оставляют нейтронную звезду, те, что были исходно потяжелее (но не тяжелее примерно 200 солнечных масс) схлопываются в чёрную дыру, а звёзды с исходной массой более 200 солнечных при вспышке сверхновой полностью рассеиваются.

3. Сколько живут звёзды на ГП.

Итак, если не брать в расчёт разные малораспространённые случаи, можно смело утверждать, что жизнь на ГП – это и есть длительность всей жизни звезды. Погрешность в этом утверждении сопоставима с той погрешностью, с какой мы сегодня научились моделировать звёздную эволюцию.

Срок жизни звезды на ГП зависит от трёх очень разноразличных по влиянию факторов.

Определяющим является исходная **масса** протозвезды.

Уточняющим является её исходный элементный **состав**.

И пренебрежимым является её исходная **скорость** вращения.

Начнём в обратном порядке. Рост **скорости** вращения увеличивает время жизни звезды, но почти всегда очень мало. На десятки процентов рост начинается лишь при скоростях выше нескольких сот км/с на экваторе звезды, и особенно заметен у звёзд массой выше 10 солнечных. Звёзд такой массы рождается вообще очень мало, а уж чтобы они ещё и так быстро вращались – совсем невероятно. Для наблюдавшихся астрономами звёзд массами от околосолнечных и ниже предел зарегистрированной скорости – порядка 100 км/с.

Влияние исходного элементного **состава** (то есть доля элементов тяжелее водорода и гелия) на время жизни звезды может достигать до 3,5 раз.

Исходный элементный состав примерно характеризует космологический возраст образования звезды. В молодой Вселенной были только водород и гелий со следами дейтерия и лития. Соответственно, самые первые протозвёзды Вселенной были практически лишены тяжёлых элементов. Но эти звёзды после кончины обогатили межзвёздную среду теми элементами, которые они синтезировали, и протозвёзды следующего поколения уже содержали порядка десятых долей процента тяжёлых элементов. Став звёздами, они обогатили межзвёздную среду тяжёлыми элементами ещё сильнее. Наше Солнце, которое, очевидно, является звездой третьего или четвертого поколения, если считать по порядку*, содержит уже 1,34% тяжёлых элементов.

Чем больше тяжёлых элементов в протозвезде, тем, как показало моделирование, дольше проживёт звезда. Однако контраст в разы (вдвое и больше) в моделях разных групп астрофизиков наблюдается в основном для звёзд с исходной массой от примерно 0,6 до примерно трёх солнечных (а максимум влияния тяжёлых элементов приходится примерно на солнечную массу). Самые же лёгкие, как и самые тяжёлые звёзды проживают почти одинаковую жизнь при любом элементном составе протозвезды. Тяжёлые элементы у таких звёзд прибавляют ко времени жизни всего лишь несколько десятков процентов, и чем дальше масса звезды от указанной зоны, тем слабее влияние состава на долгожительство.

Куда сильнее влияние **массы** протозвезды. Самые лёгкие звёзды по расчётам могли бы прожить триллионы лет (правда, их спокойной жизни на ГП может помешать внешний фактор, ускоряющееся расширение Вселенной: по некоторым моделям, примерно через несколько триллионов лет его сила станет такой колоссальной, что звёзды начнёт разрывать). А самые массивные звёзды, допускаемые теорией, живут всего около 2 млн. лет, то есть на шесть с лишним порядков меньше. При этом сами массы таких звёзд отличаются всего на три с небольшим порядка.

Как ни странно, мне не удалось найти сводной работы, где специалист обобщил бы результаты если не всех 60 лет, то хотя бы последних десятилетий моделирования звёздных эволюций, и пришлось искать и сводить данные, доступные в Сети, самостоятельно.

Как я уже упоминал, машинное время недёшево, поэтому типично предметом очередной статьи является моделирование достаточно узкой группы звёзд. К тому же лёгкие звёзды живут слишком уж долго, и детальные расчёты их триллионлетней (и довольно скучной) жизни, видимо, воспринимаются в сообществе как избыточное искусство для искусства. Обычно расчёт прерывают на возрасте, сопоставимом с текущим возрастом Вселенной, то есть на первых десятках миллиардов лет.

Единственная попавшаяся мне работа, где расчёт был доведён до многих триллионов лет, то есть до конца жизни бурых и красных карликов массами от 0,06 до 0,25 солнечной, – это публикация 1997 года, сделанная под руководством 60-летнего П. Боденхаймера двумя молодыми докторами-астрофизиками, Греггом Лафлином, защитившимся в 1994 г., и Фредом Адамсом, защитившимся в 1988 г. (Последние двое позже написали в соавторстве ещё интересную и популярную работу о далёком будущем Вселенной.)



Dr. Peter H. Bodenheimer, Dr. Fred Adams, Dr. Gregory P. Laughlin

* Однако в астрономии исторически сложилось называть самое раннее поколение звёзд третьим (Pop III), следующее, дочернее, – вторым, а современное, внучатое и правнучатое, – первым (Pop I).

Между 0,25 и 0,5 солнечной массы в собранных мною данных оказался пробел: такие (тоже очень долго живущие) звёзды, кажется, никто до конца их жизни не промоделировал, — хотя это добрая четверть всех звёзд Вселенной!

От 0,5 солнечной массы и выше данных было достаточно, и они, будучи получены в разные годы, разными коллективами, по разным программам, довольно хорошо совпадали друг с другом, с точностью обычно до десятков процентов.

Однако коварный пробел между 0,25 и 0,5 солнечной массы оказался затруднительно «сшить» с данными Лафлина, Боденхаймера и Адамса, с одной стороны, и с данными других коллективов, начинавшимися от 0,5 солнечной массы, с другой стороны. Тренды поведения модельных точек слева и справа от пробела вовсе не стремились гладко стыковаться (см. верхний график справа).

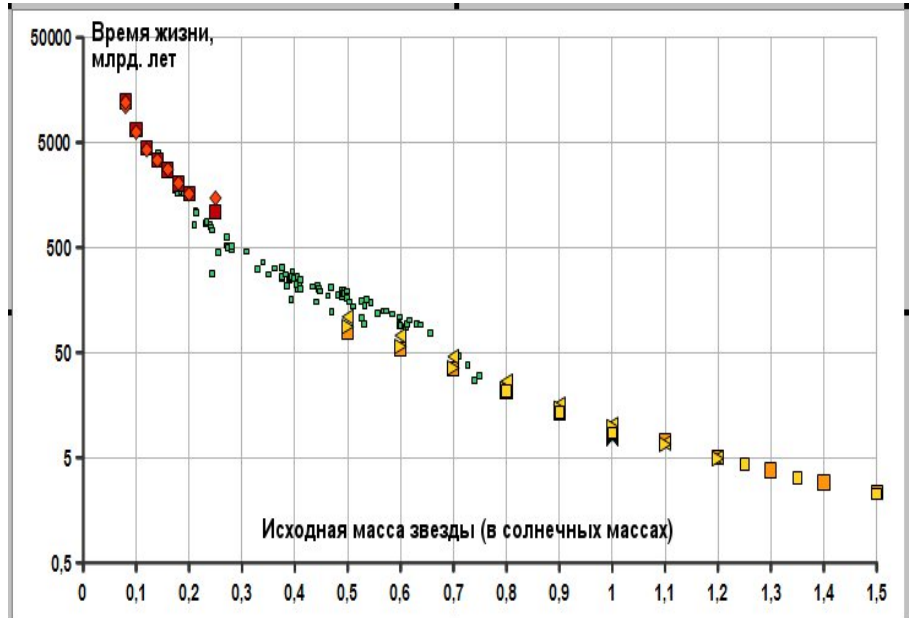
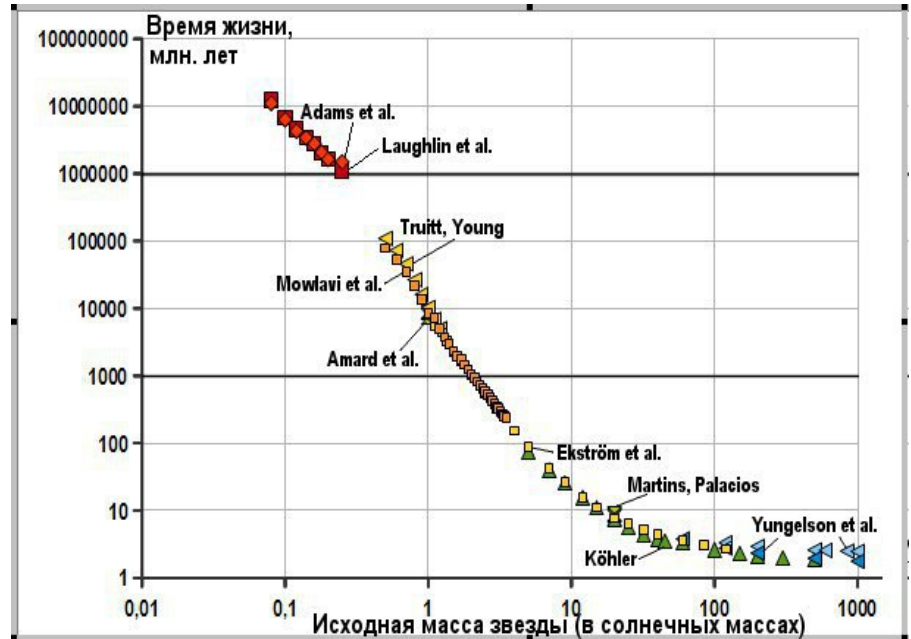
К счастью, для этой области масс есть десятки звёзд, массы и светимости которых измерены астрономами сравнительно точно, т. е. с погрешностями не более 10%. А по массе и светимости можно оценить возраст звезды.

Светимость показывает, сколько единиц массы водорода в секунду превращается в звезде в гелий. Я упоминал, что светимость в ходе жизни звезды растёт примерно вдвое, но у звёзд из зоны пробела сроки жизни так велики, что в сравнении с ними те миллиарды лет, которые они уже светят, — это почти ничто! Смело можно принять, что у всех них текущая светимость совпадает со стартовой. А средняя (за весь срок жизни) светимость должна быть примерно в 1,5 раза выше. Ошибёмся не более чем на несколько десятков процентов, это в данном случае вполне годная точность.

Ну, а масса звезды указывает на запас водорода. Правда, моделирование показывает, что в гелий превращается не весь водород звезды, а лишь его часть, и у звёзд разной массы эта часть слегка варьируется. С той же погрешностью в несколько десятков процентов можно по данным моделирования принять, что доля переходящего в гелий водорода линейно растёт при убывании стартовой массы звезды, и в зоне нашего пробела составляет порядка 20–30% этой массы.

Поделив массу реакционноспособного водорода, вычисленную по массе звезды, на среднюю скорость его расходования, вычисленную по средней светимости звезды, мы получим оценку срока, в течение которого будет происходить горение водорода, т. е. срок жизни звезды на ГП.

Так, заполнив пробел в моделировании реальными астрономическими данными, удалось получить единую картину того, сколько живут звёзды разных масс (см. нижний



график, где показана только область масс вокруг пробела, а сам пробел и зоны слева и справа от него заполнены маленькими точками астрономических данных).

На обоих графиках показаны данные моделирования для звёзд, совпадающих по содержанию тяжёлых элементов с Солнцем. В среднем, примерно такие звёзды и рождались в последние миллиарды лет.

Из верхнего графика видно, что звёзды исходной массой более ста солнечных живут все примерно по 2–2,5 млн. лет. А поскольку первые звёзды Вселенной были, видимо, такими, то, увы, чтобы их увидеть, надо пробраться нашими телескопами практически к дням их рождения, к самым первым сотням, а то и десяткам миллионов лет после Большого Взрыва. Пока мы умеем видеть лишь ярчайшие объекты, отстоящие от него на миллиард лет. Но техника совершенствуется на глазах, так что будем ждать!

А пока — с Новым годом, братцы!