

Динамика межзвездного зонда

В. Г. Сурдин

Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, Университетский проспект 13, Москва, 119992, Россия

Обсуждается возможность создания автоматического межзвездного аппарата, способного переносить информацию в пределах Галактики со скоростью в несколько процентов от скорости света без существенных затрат энергии со стороны отправителя.

DYNAMICS OF INTERSTELLAR PROBE, by V.G.Surдин. The opportunity of invention of the automatic interstellar probe is discussed. It will be capable to transfer the information within the Galaxy with a speed of some percent from speed of light without essential consumptions of energy on the part of a sender.

1. Зонд-вестник Брейсуэлла

Идея использования межзвездных зондов для связи между цивилизациями принадлежит американскому радиоастроному Брейсуэлли (1960). Она была вызвана к жизни несколькими известными недостатками прямой межзвездной радиосвязи: высокой энергоемкостью сигнала, низкой пропускной способностью канала связи и низкой вероятностью случайных совпадений момента времени и пространственного направления приема/передачи. За прошедшие годы эта идея обсуждалась не раз (см., например, Шкловский, 1987; Гиндилис, 2004), причем с годами она становится все более привлекательной по нескольким причинам. Во-первых, прогресс электроники позволил миниатюризировать носители информации и управляющие системы; как результат, существенно уменьшились размер и масса космических зондов. Во-вторых, появились новые идеи и даже опытные разработки методов разгона космических аппаратов, позволяющие сообщать им скорости вплоть до $10^2 - 10^3$ км/с (ионные двигатели, электромагнитные ускорители, и др.). Наконец, полувековые бесплодные усилия по поиску радиосигналов внеземных цивилизаций позволяют усомниться в широкой распространенности этого способа межзвездной связи и заставляют искать альтернативные методы.

Сегодня идея зонда-вестника Брейсуэлла видится как метод односторонней, альтруистической (по выражению Шкловского) рассылки информации в форме так называемой “космической энциклопедии”, содержащей все сведения о нас и окружающем нас мире. Предполагается, что в сторо-

ну каждой звезды, потенциально способной быть прибежищем жизни, посылается автоматический аппарат, имеющий средства радиосвязи и содержащий в своей памяти все без исключения знания, накопленные человечеством. Подготовить и записать такое послание уже сегодня, в принципе, возможно (Роуз и Райт, 2004).

Можно считать, что первые эксперименты в области такого рода “космической бутылочной почты” уже состоялись. Как известно, пределы Солнечной системы уже покинули четыре американских межпланетных зонда: “Пионер-10 и -11”, запущенные в 1972-3 гг., и “Вояджер-1 и -2”, запущенные в 1977 г. Облетев внешние планеты, они вырвались из поля притяжения Солнца и теперь безадресно удаляются в межзвездное пространство. Поскольку есть шанс, что они когда-нибудь попадут в руки разумных существ, каждый зонд несет для них послание. Внутри “Пионеров” заложены небольшие металлические пластинки с выгравированной на них “визитной карточкой” землян, содержащей наш галактический обратный адрес. По сути, это одна картинка, объемом порядка 10 килобайтов. Послание, отправленное через 5 лет с “Вояджерами”, значительно богаче: каждый из аппаратов несет видеодиски объемом около 100 мегабайтов, на которых классическим эдисоновским способом записаны 118 статических изображений, а также несколько часов звуковой информации: музыка, голоса людей, птиц, зверей и шумы природы.

Авторам посылки на “Вояджерах” потребовалось изрядное напряжение сил, чтобы составить и уместить в объеме одной грампластинки емкое и уравновешенное послание неведомым братьям по

разуму от лица всех землян. Но за прошедшие три десятилетия плотность упаковки информации повысилась на много порядков. Поэтому сегодня уже можно не ломать голову над содержанием послания, а просто отправить им всю письменную и электронную информацию, созданную человечеством. Это не так уж и много — всего около 10^{18} байтов. Пусть читают, смотрят, слушают и узнают о нас все, что захотят. Такой “паниформизм” вполне оправдан, ибо гарантирует небесплодность существования цивилизации. Кстати, одной из целей подобного проекта является сохранение наших текущих знаний для будущих поколений человечества: разместив несколько экземпляров этой суперэнциклопедии подалеже от Земли, например, на Луне, мы гарантировали бы сохранность плодов своего разума от всяческих катаклизмов.

Для создания суперэнциклопедии Роуз и Райт (2004) предлагают самый современный способ — сканирующий туннельный микроскоп, манипулирующий отдельными атомами. Он может делать записи, например, атомами ксенона на никелевой подложке. В принципе, такой метод записи позволяет достичь плотности упаковки информации до $7,5 \times 10^{25}$ бит/кг (при использовании легких атомов лития и бериллия). Это выше, чем, например, в молекуле РНК вируса полиомиелита ($3,6 \times 10^{24}$ бит/кг). Но даже если использовать для запаса надежности по 1000 атомов никеля на бит, создавая элементарные метки размером в нанометр, то все равно плотность упаковки получается невероятно высокой — около 10^{22} бит/кг. При этом всю информацию человечества можно упаковать в объеме менее 1 см^3 (в булавочной головке!). Поразительно: вся культура человечества, размещенная в суперэнциклопедии весом в 1 грамм! Правда, чтобы ее прочитать, понадобится весьма дорогой сканирующий туннельный микроскоп.

К сожалению, кристалл памяти весом в 1 грамм нельзя отправить в межзвездное путешествие на тысячи лет, поскольку его структура будет повреждена космическими лучами. Для защиты от них суперэнциклопедия должна быть укрыта “броней”, сравнимой с земной атмосферой (1 кг/см^2). Это существенно утяжеляет посылку: толщина брони составит несколько метров, а масса — сотни тонн. Если использовать помехоустойчивые коды записи, то можно снизить уровень защиты, уменьшив толщину брони, но, тем не менее, капсула будет весить не одну тонну. Для межзвездного перелета за разумное время ей необходимо сообщить скорость около 1000 км/с .

2. Межзвездный гравитационный маневр

Для первоначального разгона межзвездного зонда, в принципе, может быть использована существующая ракетная техника, но затраты при этом окажутся очень велики. Существенно сократить их при массовом запуске зондов может электромагнитный ускоритель, прототип которого был создан в рамках программы стратегической оборонной инициативы (Сурдин, 1988). Однако в любом случае трудно ожидать, что в ближайшей перспективе стартовая скорость зонда составит существенно более 100 км/с . Поэтому для рассылки зондов в пределах значительной части Галактики требуются дополнительные методы разгона, по возможности использующие природные источники энергии. Один из таких методов — межзвездный гравитационный (пертурбационный) маневр, использующий для ускорения зонда кинетическую энергию звезд (Сурдин, 1985).

Гравитационный маневр уже несколько десятилетий успешно применяется в пределах Солнечной системы. Например, он был использован для осуществления экспедиции “Вояджеров” (NASA) по маршруту Земля-Юпитер-Сатурн-Уран-Нептун, для полета зонда “Кассини-Гюйгенс” (NASA-ESA-ISA) по маршруту Земля-Венера-Венера-Земля-Юпитер-Сатурн и в некоторых других случаях. Суть гравитационного маневра в том, что пролет зонда мимо каждой промежуточной планеты планируется таким образом, чтобы ее притяжение ускоряло космический аппарат и сообщало ему направление движения, обеспечивающее сближение со следующей планетой. Добавка к скорости зонда в результате каждого пролета, в принципе, может достигать удвоенной скорости движения планеты. Реализуется это в том случае, если планета движется навстречу зонду, а направление полета зонда в результате сближения с планетой изменяется на угол порядка 180° .

Точно так же может осуществляться и межзвездный гравитационный маневр. Его стратегия вполне очевидна: на дальних подступах к очередной звезде-ускорителю автопилот зонда должен наметить из числа ближайших звезд следующую, движущуюся ему навстречу, и так скорректировать траекторию сближения аппарата с первой звездой, чтобы гравитационный маневр направил его в сторону второй звезды. Если коррекция траектории происходит достаточно далеко от точки сближения, то для этого потребуется мизерное количество топлива или даже, как мы покажем ниже, вообще будет достаточно безрасходных методов управления.

Каковы возможности этого метода? Характерные скорости движения звезд в солнечных окрестностях лежат в пределах от 10 – 20 км/с у молодых объектов диска до 250 – 300 км/с у старых звезд гало и компонентов тесных двойных систем. Значит, каждая встреча со звездой при соответствующем подборе траектории сближения добавит зонду несколько десятков, а то и сотен километров в секунду. Пределом для эффективного пертурбационного маневра является такое сближение, при котором зонд почти касается поверхности звезды. Нетрудно показать, что при этом максимальная скорость удаления зонда от звезды после их сближения будет равна $V_{\max} = 0,46V_{\Pi}$, где V_{Π} — скорость отрыва (вторая космическая скорость) у поверхности звезды.

У звезд главной последовательности в широком диапазоне их масс и радиусов значение V_{\max} остается приблизительно таким же, как у Солнца. Оно относительно невелико (≈ 300 км/с), и поэтому такие звезды для нас большого интереса не представляют. Особенно же привлекательны для гравитационных маневров старые компактные звезды — белые карлики, нейтронные звезды и, вообще говоря, черные дыры, хотя о последних мы в дальнейшем говорить не будем по причине их крайне малой изученности.

Светимость большинства компактных звезд невелика, и в этом смысле они не представляют большой опасности для пролетающего мимо них зонда. Но существует физический эффект, способный существенно ограничить возможности гравитационного маневра, особенно вблизи нейтронной звезды. Речь идет о приливном влиянии гравитационного поля звезды, которое стремится сообщить различным частям зонда взаимное ускорение $a = 2GM_s \Delta r / R^3$, где G — постоянная тяготения, M_s — масса звезды, R — расстояние от аппарата до центра звезды, Δr — характерное расстояние между частями аппарата. Как видно из табл. 1, приливное ускорение довольно велико у поверхности нейтронной звезды и может представлять опасность для конструкции аппарата. Сейчас промышленность изготавливает некоторые электронно-механические приборы, выдерживающие ускорение до 10^6 м/с². Поэтому выбранный нами в этой таблице интервал для минимального расстояния межзвездного зонда от поверхности нейтронной звезды кажется вполне разумным.

Нужно заметить, что в отличие от нормальных звезд, у которых масса приблизительно пропорциональна их радиусу, и поэтому между ними нет большого различия в величине V_{\max} , у нейтронных звезд и белых карликов радиус уменьшается с увеличением массы, что существенно сказывается

на величине V_{\max} . В табл.1 для этого типа звезд приведены средние значения, которые для индивидуальных звезд могут различаться в 3 – 4 раза.

Теперь оценим время, необходимое зонду для достижения скорости V_{\max} , если он стартовал из Солнечной системы со скоростью V_0 . Очевидно, таким же будет и время торможения, если необходимо доставить зонд в конкретную планетную систему и оставить его там. Пусть, для простоты, все звезды равномерно распределены в пространстве на среднем расстоянии S друг от друга и имеют одинаковые скорости хаотического движения σ . Если при каждом сближении со звездой зонд получает приращение скорости $\Delta V = \sigma$, то ему необходимо совершить $N = (V_{\max} - V_0)/\sigma$ гравитационных маневров, на которые будет затрачено время

$$t = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{S}{V_0 + k\sigma}.$$

Для оценки значения t эту сумму при $V_0 \ll \sigma$ можно заменить выражением $t \approx S/V_0$, а при $V_0 > \sigma$ заменить интегралом и получить $t \approx (S/\sigma) \ln(V_{\max}/V_0)$. Как видим, зависимость времени разгона от величины начальной и конечной скорости зонда слабая: для $V_0 = 100$ км/с и V_{\max} в диапазоне от 300 км/с до 10^5 км/с имеем $1 < \ln(V_{\max}/V_0) < 7$. Таблица 2 демонстрирует характерные значения обсуждавшихся величин. Как видим, при сделанных предположениях время разгона зонда в окрестности Солнца весьма велико ($\sim 10^5$ лет), но оно существенно сокращается в шаровых скоплениях ($\sim 10^4$ лет) и становится чрезвычайно коротким в ядре Галактики ($\sim 10^2$ лет). Здесь мы имеем в виду центральную область ядра радиусом ~ 1 пк.

В принципе, возможны и более изощренные варианты гравитационного ускорения межзвездных зондов. Например, астрономам известны двойные звездные системы, состоящие из нейтронной звезды и белого карлика. Эти компактные звезды обращаются по орбите со скоростью более 1000 км/с. Сближение с одним из компонентов такой системы сразу может добавить к скорости зонда около 2000 км/с! Особенно часто такие системы должны встречаться в ядрах шаровых скоплений. Вообще, нужно заметить, что центральные части шаровых звездных скоплений — чрезвычайно привлекательные места для цивилизаций, делающих первые шаги на пути колонизации космоса.

Таким образом, гравитационный маневр в окрестности звезд представляется приемлемым методом массовой рассылки информационных зондов Брейсуэлла к объектам Галактики. С точки зрения отправителей он особенно эффективен

Таблица 1: Максимальная скорость зонда (V_{\max}) и приливное ускорение (a), которое он испытывает на масштабе $\Delta r = 1$ м при пролете вблизи звезды массы M_s и радиуса R_s , имеющей критическую (вторую космическую) скорость у поверхности V_{II}

Параметр	Нормальная звезда	Белый карлик	Нейтронная звезда	
			$R_{\min} = R_s$	$R_{\min} = 50R_s$
M_s/M_{\odot}	1	0,7	2	2
R_s	$1R_{\odot}$	$0,01R_{\odot}$	20 км	20 км
V_{II} , км/с	617	5165	16×10^4	23×10^3
V_{\max} , км/с	309	2583	8×10^4	12×10^3
a , м/с ²	10^{-6}	0,5	7×10^7	530

Таблица 2: Характерное время разгона зонда (t) при старте из различных мест Галактики и при использовании ее различных звездных населений. Принята начальная скорость $V_0 = 100$ км/с. В скобках указаны теоретические оценки исходных величин, без скобок — наблюдательные

Локализация	Население	n , пк ⁻³	σ , км/с	t , лет	V_{\max} , км/с
Окрестности Солнца	Звезды диска	0,1	45	10^5	400
	Звезды гало	0,005	250	2×10^5	400
	Белые карлики	0,06	50	2×10^5	5000
	Нейтронные звезды	(10^{-3})	(100)	4×10^5	10^5
Шаровые скопления	Нормальные звезды	4×10^4	20	4×10^3	400
	Белые карлики	(5×10^4)	20	3×10^3	5000
	Нейтронные звезды	(10^3)	20	10^4	10^5
Ядро Галактики	Белые карлики	(10^6)	250	300	5000
	Нейтронные звезды	(10^4)	250	10^3	10^5

для обитателей плотных звездных систем — шаровых скоплений и ядер галактик. А с точки зрения прочих обитателей Галактики эффективность этого метода указывает на необходимость поиска таких зондов в своих планетных системах.

Нам осталось обсудить важный вопрос — как управлять зондом в полете.

3. Сила Яркковского для управления зондом

Использование гравитационного маневра в окрестности звезд, очевидно, требует точных методов навигации и коррекции траектории полета. Оставляя в стороне вопросы навигации (принципиальных проблем в этой области не видно), сосредоточимся на методах коррекции траектории. В литературе обсуждалась возможность использовать для этого компоненты межзвездной материи, например, диффузный водород для ракетных двигателей и межзвездное магнитное поле как источник силы Лоренца. По очевидным причинам эти способы неприемлемы для компактного зонда. Поэтому мы рассмотрим возможность использования звездного излучения, несущего не только энергию, но

и импульс, который можно использовать для коррекции траектории.

В рамках небесной механики рассматриваются два радиативных эффекта — широко известный эффект Пойнтинга-Робертсона и малоизвестный эффект Яркковского. Первый из них возникает по причине абберации света и всегда создает тормозящее ускорение, лежащее в орбитальной плоскости объекта. Причиной второго эффекта служит импульс отдачи, вызванный переизлучением звездной энергии, поглощенной объектом. Этот эффект был предсказан российским инженером И.О.Ярковским в конце XIX века, но обнаружился в движении искусственных спутников Земли и астероидов только век спустя (см. Сурдин, 2004).

Действие эффекта Яркковского в основном определяется сочетанием собственного (суточного) и орбитального вращения объекта. Если направление суточного вращения объекта совпадает с направлением его орбитального обращения, то нагретая звездой сторона поверхности объекта постоянно развернута в сторону, противоположную направлению его движения. В этом случае импульс отдачи уходящего с нагретой стороны ин-

фрактального излучения направлен в сторону движения объекта и “подталкивает” его вперед. Если же моменты импульсов вращения и обращения антипараллельны, сила Ярковского тормозит объект. В общем случае импульс отдачи может быть направлен произвольно, так что эффект Ярковского способен влиять на все орбитальные параметры.

В отличие от эффекта Пойнтинга-Робертсона, эффективно действующего лишь на микроскопические частицы, эффект Ярковского проявляется в движении сравнительно крупных объектов. Например, в Солнечной системе его действие заметно в движении астероидов размером от метра до километра (Сурдин, 2005). Объекты меньшего размера легко прогреваются и не сохраняют различие температуры на разных участках поверхности; более крупные объекты слишком массивны.

Очевидно, что для искусственного объекта, каким является межзвездный зонд, управление вектором силы Ярковского не является проблемой. Достаточно разные части аппарата покрасить краской с разным альбедо и предусмотреть возможность их взаимного перемещения. Возможны и другие варианты, например, с использованием жидкого теплоносителя, “перемещающего” тепло по поверхности аппарата. При этом эффект Ярковского может быть использован с максимальной эффективностью.

Но как любой фотогравитационный эффект, эффект Ярковского слаб. Поэтому стратегия управления зондом с его помощью должна быть довольно сложной. Если рассматривать три очередные звезды, с которыми последовательно сближается зонд, то корректирующий импульс, полученный с помощью эффекта Ярковского при пролете мимо звезды N1 должен так уточнить его траекторию, уже и без того ведущую к звезде N2, чтобы пролет мимо нее без дополнительной коррекции направил зонд к звезде N3, расположенной произвольно относительно направления от N1 к N2, но уже намеченной при подлете к N1. И эта задача должна рекуррентно решаться при пролете мимо каждой очередной звезды. Каковы критические параметры зонда, при которых эффект Ярковского позволит решить задачу управления его полетом?

Пусть S — расстояние между звездами, L_s , M_s и R_s — соответственно светимость, масса и радиус звезды. Назовем “условием управляемости зонда” возможность при пролете мимо звезды N1 изменить его импульс так, чтобы при пролете вблизи звезды N2 под действием ее притяжения он смог изменить направление полета на угол порядка π (это позволит практически произвольно выбирать звезду N3). Если при пролете мимо звезды N1 зонд

получает удельный корректирующий импульс ΔV , его удельный момент импульса относительно звезды N2 изменяется на $S\Delta V$. Тогда при пролете звезды N2 на минимальном расстоянии около R_s со скоростью порядка $V_{II} = \sqrt{2GM_s/R_s}$ наше требование выразится неравенством:

$$S\Delta V > R_s V_{II}.$$

Отсюда условие управляемости:

$$\Delta V > \frac{2GM_s R_s}{S}.$$

Теперь оценим величину ΔV , которую может сообщить сила Ярковского. Пусть L_s — светимость звезды N1, R_p и V_p — минимальное расстояние и скорость пролета зонда мимо нее, m и r — масса и радиус зонда, c — скорость света. Тогда характерное время сближения со звездой составит R_p/V_p , поток лучистой энергии, падающей на поверхность зонда составит $L\pi r^2/4\pi R_p^2$, а результирующее изменение импульса составит

$$\Delta V m = \frac{\pi r^2 L}{4\pi R_p^2 c} \frac{1}{V_p} R_p.$$

При $V_p = \sqrt{2GM_s}$ получим удельный импульс

$$\Delta V = \frac{Lr^2}{4mc\sqrt{2GM_s R_p}}.$$

Теперь условие управляемости зондом силой Ярковского принимает вид:

$$\frac{m}{r^2} < \frac{L_s S}{8GcM_s R_s}.$$

Приняв типичные (солнечные) значения величин L_s , M_s и R_s , получим оценку максимальной поверхностной плотности зонда:

$$\frac{m}{r^2} < 5 \text{ кг/см}^2.$$

Как видим, это на порядок превосходит толщину “брони”, необходимой для защиты “информационного ядра” зонда от космических лучей. Такой “запас прочности” позволяет заключить, что управление полетом межзвездного зонда на основе эффекта Ярковского вполне осуществимо. Во всяком случае, если его траектория проходит в окрестности тех звезд, величина L/MR у которых не существенно меньше солнечной. Правда, в тех областях Галактики, где гравитационный маневр наиболее выгоден (шаровые скопления и ядро Галактики), уменьшение величины S в 10 – 100 раз потребует такого же увеличения параметра L/MR (либо менее материалоемкой защиты от космических лучей).

Итак, идея межзвездной связи, основанная на рассылке “космической энциклопедии” с помощью зонда-вестника Брейсуэлла, получает развитие. Создание миниатюрной суперэнциклопедии, содержащей весь информационный багаж человечества, уже сегодня выглядит технически осуществимым. Использование электромагнитного ускорителя, гравитационного маневра в поле тяготения звезд и управления зондом с помощью эффекта Яркковского дает принципиальную возможность свести к минимуму энергетические затраты при массовой рассылке подобных зондов. Не требуя затрат массы для коррекции орбиты, такой зонд может чрезвычайно долго путешествовать в Галактике, сохраняя “информационный портрет” посланшей его цивилизации.

Если обратиться к табл. 1, мы увидим принципиальную возможность послать информационные зонды даже в соседние галактики, поскольку значение V_{\max} превосходит скорость отрыва из центральной области типичной галактики (Бинни и Тремейн, 1987), в том числе и нашей ($\sim 10^3$ км/с). Если максимально эффективно использовать возможности гравитационного маневра в поле нейтронных звезд, то можно сообщить зонду скорость $\sim 10^5$ км/с, с которой он достигнет объектов Местной группы галактик за время, сравнимое с характерным временем эволюции человека $\sim 10^7$ лет. Разумеется, в столь отдаленной перспективе могут быть найдены и более эффективные методы сохранения и перемещения информации, но тот факт, что мы уже сейчас видим принципиальную возможность реализации автоматических межзвездных посланников с долговременным хранением информации, внушает оптимизм. Идея информационного посланника настолько заманчива, что не может долго оставаться нереализованной. Новые научные принципы и технические решения делают эту идею все более осуществимой, а отсут-

ствие электромагнитных сигналов от иных цивилизаций делает ее все более насущной. Не исключен вариант, что в каждый момент времени в Галактике существует не более одной технически развитой цивилизации. В этом случае узкие “информационные фронты” электромагнитных сообщений, пересекающие Галактику за короткое время ($\sim 10^4$ лет), вообще не имеют шанса быть принятыми. Информационный зонд дает единственную возможность передать сообщение не только в пространстве, но и во времени, и не только цивилизациям иных звезд, но и тем, которые сменят нас в окрестности Солнца. Подобные зонды нужно искать и создавать самим.

Исследования динамики межзвездного зонда были частично поддержаны грантами РФФИ 04-02-17447-а, 06-02-16077-а, 06-02-16366-а и грантом поддержки ведущих научных школ НШ-5920.2006.2.

Список литературы

- Бинни и Тремейн (Binney J., Tremaine S.), 1987, “Galactic Dynamics”, Princeton: Princeton University Press
 Брейсуэлл (Bracewell R.N.), 1960, Nature, **186**, 670 (Русск. перев.: Брейсуэлл Р. Сигналы высокоразвитых галактических цивилизаций. Межзвездная связь. М.: Мир, 1965. С. 271-277. См. также: Брейсуэлл Р. Жизнь в Галактике (там же), с. 257-270)
 Гиндилис Л.М., 2004, “SETI: Поиск внеземного разума”, М.: Изд-во физико-математической литературы
 Роуз и Райт (Rose Ch., Wright G.), 2004, Nature, **431**, 47
 Сурдин В.Г., 1985, Астрон. вестник, **9**, 354
 Сурдин В.Г., 1988, “Звездные войны: научно-технический аспект”, М.: Знание
 Сурдин В.Г., 2004, Природа, **11**, 91
 Сурдин В.Г., 2005, Физика, **1**, 13
 Шкловский И.С., 1987, “Вселенная, жизнь, разум”, М.: Наука