



Художник А. Астрин

Сцена для вселенского спектакля

Этой публикацией мы начинаем цикл статей «Вселенная: материя, пространство, время» о том, как устроен окружающий нас мир. Его автор — И.А.Сокальский — специалист по нейтринной астрофизике высоких энергий, который много лет работал в Институте ядерных исследований РАН, где принимал участие в создании нейтринной обсерватории на озере Байкал, а затем в международных экспериментах ANTARES и NEMO, цель которых — регистрация нейтрино космического происхождения.

Кандидат
физико-математических наук
И.А.Сокальский

Пролог

Глядя на мир, нельзя не удивляться!

Козьма Прутков

Каждое утро мы просыпаемся и поднимаемся с постели. Мозг переходит из режима сна в режим бодрствования и рассылает по нервным каналам сигналы, обеспечивающие перевод организма в «дневное» состояние. Пищеварительная система перерабатывает завтрак, извлекая из него энергию, необходимую телу. В почтовом ящике мы находим письмо, которого давно ждали. Сердце начинает биться сильнее, в кровь выбрасывается адреналин. Мы выходим из дома и движемся в направлении работы. В метро становится душно — дыхание учащается, потому что легкие должны переработать больше воздуха, чтобы снабдить организм необходимым ему количеством кислорода...

Мы живем, и каждое мгновение нашей жизни, каждый шаг, каждый вздох, каждая радость или огорчение — непрерывные трансформации материи, происходящие в некоторой области пространства в течение некоторого интервала времени. И человеческая жизнь, и жизнь элементарных частиц, и жизнь звезд — все это изменение состояния материи в пространстве и времени. Не будь материи — всему, что есть в этом мире, не из чего было бы состоять. Не будь пространства — материи не в чем было бы перемещаться. Не будь времени — материи не в чем было бы изменяться. Материя, время и пространство — ключевые, базисные сущности. Без них не могло бы быть нашего мира.

Пространство и время образуют ту сцену, на которой материя видоизменяется и взаимо-



действует с другими видами материи. Материя движется в пространстве и времени. И по сути дела, больше ничего не происходит, только этот спектакль. Но сюжет его невообразимо сложен. Он охватывает миллиарды лет и развивается на пространстве в миллиарды миллиардов километров. Однако в этом спектакле далеко не второстепенными могут оказаться и сюжетные линии, которые длятся миллиардные доли секунды и разыгрываются на масштабах миллиардных долей сантиметра. И для каждого такого сюжета есть свое место в общем сценарии.

Как и когда начался этот спектакль? Каким будет его финал и когда он наступит? Кто действующие лица? В каких отношениях они находились, находятся и будут находиться? Об этом написаны сотни тысяч статей и книг, однако полной ясности нет и по сей день. Я хотел бы еще раз прикоснуться к этой теме и рассказать о том, что известно о ней сейчас, в начале XXI века. Мой рассказ ни в коей мере не претендует на полное и всеобъемлющее изложение. Это именно прикосновение. Не больше, но и не меньше. Приподнимем занавес и рассмотрим сцену.

Сцена: пространственный аспект

Нет столь великой вещи, которую не превзошла бы величиною еще бо́льшая. Нет вещи столь малой, в которую не вместились бы еще меньшая.
Козьма Прутков

В школьных учебниках, в научных статьях и книгах, в железнодорожных расписаниях и рекламных буклетах — всюду встречается множество чисел, обозначающих размеры и расстояния. Каждый из читателей хранит некоторые из этих чисел в памяти. Диаметр Земли — 13 тыс. км, размер атома водорода — 10^{-8} см, расстояние до Солнца — 150 млн. км, а до ближайшей к нам галактики М31 (она же туманность Андромеды) — 2 млн. световых лет. Расстояния, которые вы не

помните, легко найти в соответствующем справочнике. Тысячи (если не миллионы) расстояний и размеров известны человечеству. Но как их почувствовать? Правильно ли обычный человек осознает масштабы микромира и всей Вселенной, а также их соотношения?

Скорее нет, чем да. Человеческие способности восприятия созданы очень рационально, и лишних нам не дано. Естественный отбор обеспечил сохранение и закрепление тех свойств организма, которые были важны для выживания. Расстояния от нескольких миллиметров до нескольких десятков или сотен метров могут быть не только известны человеку, но и почувствованы им. Чтобы попасть футбольным мячом в ворота, расположенные в паре десятков метров от нас, не нужно знать законов механики и единиц измерения. Где-то в недрах мозга заложена врожденная способность правильно оценить и расстояние (даже не выражая его в числах), и необходимую силу удара. Но все, что не укладывается в узкую шкалу от 10^{-3} м до 10^3 м (6 порядков величины), непредставимо для любой, даже самой образованной человеческой особи. Между тем реальная шкала расстояний, на которых разыгрывается вселенский спектакль, простирается как минимум на 40 порядков — отношение размеров Вселенной к размерам атомного ядра выражается 41-значным числом. На такой шкале разница между размерами большого города и типографской точкой в тексте, который вы сейчас читаете, выглядит незначительной. Попытаемся все же представить себе всю шкалу расстояний, сравнивая одни размеры с другими и взяв за основу примерный средний рост человеческого существа: 1,7 м.

Для начала пройдемся «вниз» по лестнице масштабов. Чтобы мы могли хорошо разглядеть какой-либо предмет, его размеры должны быть порядка сантиметра. Если пропорционально увеличить все существующие размеры так, чтобы размеры атомов и состоящих из них молекул лежали в сантиметровом диапазоне (истин-

ные размеры атомов составляют около 10^{-9} м, одну миллиардную от размеров человека), то человеческий рост был бы равен примерно 200 тыс. км, то есть половине расстояния от Земли до Луны! В этом масштабе размер типичных шаровидных бактерий (одноклеточных организмов, видимых в неувеличенном виде только под сильным микроскопом) составлял бы 100–200 м. Такой мысленный эксперимент дает наглядное представление о разнице в размерах всего в миллиард раз (9 порядков величины). Даже если бы атомы увеличились до размеров едва заметных точек, которые можно изобразить очень острым карандашом на листе бумаги, человеческий рост был бы равен расстоянию от Москвы до Парижа. Но это только первая ступенька вниз.

Сделаем еще один шаг вниз и рассмотрим атомные ядра. Роль молекул и атомов — формировать химические свойства веществ. Последние зависят от числа электронов, которое определяется электрическим зарядом атомного ядра. Помимо этого, ядра, состоящие из протонов и нейтронов, играют и другую важную роль — они участвуют в термоядерных реакциях, происходящих в центральных областях звезд. Если размер атомного электронного облака 10^{-9} м, то ядро на четыре-пять порядков меньше: $10^{-(13-14)}$ м. Если размер ядра увеличить до одного сантиметра, то размер атома будет составлять несколько сот метров. Другими словами, крохотное ядро почти незаметно в существовании превышающем его по размерам атоме — это впервые заметил 94 года назад Эрнест Резерфорд в своих знаменитых опытах по облучению золотой фольги пучком альфа-частиц. В этом масштабе человеческий рост возрастет до размеров земной орбиты — 150 млн. км. Если мы внимательно рассмотрим протоны и нейтроны (еще одна ступенька), из которых состоит сантиметрового размера атомное ядро, то заметим, что это сложное образование; оно состоит из еще меньших объектов — кварков и склеивающих их глюонов.

Таким образом, спустившись по лестнице расстояний на три ступеньки вниз, мы прошли примерно 15 порядков по шкале масштабов, дошли до структуры нуклонов и увидели, что события, происходящие на каждой ступеньке, так или иначе влияют на свойства наблюдаемого мира. При этом для того, чтобы все хорошенько разглядеть, нам пришлось вырасти до размеров орбиты Земли. Вернемся теперь на исходную позицию и попробуем подняться по лестнице вверх.

Пусть первой ступенькой вверх будет Солнечная система — 9 планет, обращающихся вокруг центральной звезды, Солнца. Попытаемся на листе бумаги изобразить ее в реальном масштабе. Для этого сделаем Солнце (диаметр которого на самом деле 1,4 млн. км) точкой размером 0,1 мм, то есть уменьшим Солнце в четырнадцать триллионов раз, более чем на 13 порядков. Человек при этом уменьшился бы до такой степени, что атомы (если бы они остались прежних размеров) казались бы ему объектами километровой величины, а атомные ядра — размером с крупные виноградины. Диаметр земной орбиты на таком рисунке будет чуть больше 2 см, а диаметр орбиты одной из самых удаленных от Солнца планеты — Плутона — составлял бы 80 см. То есть даже при таком уменьшении одного листа бумаги для изображения Солнечной системы не хватило бы.

Ближайшая к Солнцу звезда — Проксима Центавра — в этом масштабе оказалась бы на расстоянии 3 км, а в радиусе 100 км находилось бы всего около 10 000 звезд (примерно одна десятимиллионная часть всех звезд нашей Галактики) — десять тысяч точек размером в 0,1 миллиметра, разбросанных по территории Московской области!

Это упражнение с масштабированием показывает, что космос состоит в основном из пустоты: размеры звезд ничтожны по сравнению с разделяющими их расстояниями, однако пустота космоса даже внутри галактик неизмеримо выше пустоты атома с его малюсеньким центральным ядром и огромными электронными оболочками.

Галактики представляют собой «островки» вещества — именно в них сосредоточены звезды, которые распределены во Вселенной крайне неравномерно. Каждая галактика насчитывает десятки и сотни миллиардов звезд. Вещество, которое образуется в процессе звездной эволюции, остается в галактике и служит тем материалом, из которого образуются новые звезды и планеты. Если бы звезды были равномерно рассеяны по всему объему Вселенной, их формирование шло бы неизмеримо медленнее и Земли, а вместе с ней и нас могло бы и не существовать.

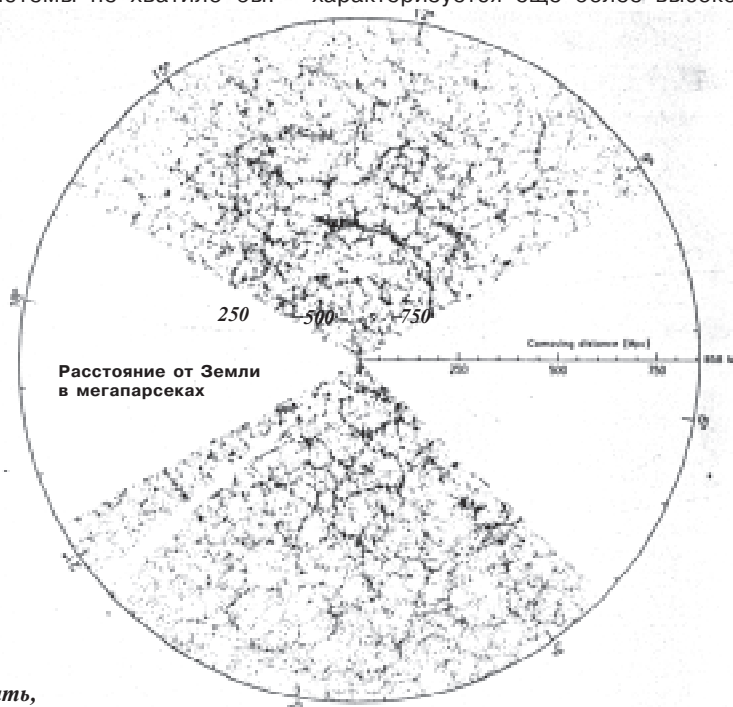
Пространство между галактиками характеризуется еще более высокой

степенью пустоты, чем в галактиках, поскольку звезд там нет совсем. Наша Галактика — Млечный Путь — имеет форму диска толщиной 10^{16} км, а ее диаметр — 10^{18} км. Диаметр Галактики оказывается, таким образом, в триллион раз больше диаметра Солнца (изображенного нами в виде точки размером в 0,1 мм) и в нашем масштабе составляет 100 тыс. км, что примерно равно одной четверти расстояния от Земли до Луны.

Сделаем диаметр Галактики равным человеческому росту, то есть пройдем еще 8 порядков по шкале расстояний. Тогда диаметр земной орбиты будет чуть больше размеров атома водорода. С этой ступеньки можно заметить, что галактики, как и звезды, собираются в островки. Наша Галактика входит в так называемую местную группу, состоящую примерно из 20 галактик, ближайшая из которых — туманность Андромеды, удаленная от нас на расстояние 2 млн. световых лет (это означает, что мы видим ее такой, какой она была 2 млн. лет назад). В нашем масштабе это расстояние равно 35 м. Интересно, что это первая ступенька на пройденной нами лестнице шкалы масштабов, на которой пустота пространства становится не такой заметной — расстояние между двумя соседними объектами всего в 20 раз больше, чем их размеры. Ни в мире атомов, ни в мире планет и звезд нет ничего похожего. Местная группа, в свою очередь, входит в большое скопление, состоящее из нескольких тысяч галактик, центр которого находится в созвездии Девы. Размер этого скопления в нашей шкале составит около 600 м.

Еще одна ступенька вверх. Уменьшим наше скопление галактик в 1000 раз, до 60 см. Земная орбита станет всего в 10 раз больше размеров атомного ядра. Наша Галактика (которую в действительности даже свет, движущийся со скоростью 300 тыс. км в секунду, пересекает за 100 тыс. лет) окажется диаметром 2 мм. Мы с вами на самой верхней ступеньке, с которой можно уже разглядеть границу Вселенной — до этой границы всего около 400 м. Все пространство заполнено скоплениями галактик. Размеры скоплений около метра, тогда как размер составляющих их галактик исчисляется миллиметрами. Скопления эти образуют трехмерную ячеистую структуру — она похожа на пену из тесно примыкающих друг к другу пузырьков. В стенках пузырьков много скоплений, в середине — почти нет.

Так выглядит пространственная



Принято считать, что такая ячеистая структура Вселенной (из "The Astrophysical Journal", 2005, т. 624) возникла из-за действия ударных звуковых волн на самых ранних этапах ее образования. Большие белые сектора сверху и снизу соответствуют галактической плоскости. Вблизи этой плоскости находятся большие скопления непрозрачной межзвездной пыли, которые делают области Вселенной, лежащие в этих направлениях, ненаблюдаемыми.



структура нашего мира, увидеть которую мы смогли, опустившись сначала на три ступеньки вниз по шкале масштабов и пройдя 15 порядков величины, а потом поднявшись по трем ступенькам, ведущим вверх через 25 порядков. Однако сцена вселенского спектакля формируется не только

*Декабрьский блок календаря
Карла Сагана*

КАРТИНА МИРА: ФИЗИКА

пространством, но и временем. Как же выглядит временная составляющая сцены вселенского спектакля, о котором мы говорим?

Сцена: временной аспект

Где начало того конца, которым оканчивается начало?

Козьма Прутков Около 14 млрд. лет, или 400 млн. млрд. секунд, назад случился Большой Взрыв, в результате которого Вселенная начала расширяться и расширяется до сих пор. Все временные интервалы в нашем мире — от самых больших до самых маленьких — неизбежно вложены в этот максимальный интервал. Американский астроном Карл Саган предложил календарь, который позволяет наглядно представить себе взаимоотношение разных временных масштабов. Возраст Вселенной приравнен в ней к одному году, а все остальные интервалы пропорционально уменьшены.

Вот основные даты этого календаря. Большой Взрыв — 1 января 0^ч 0^м 0^с. Образование галактик — 10 января. Образование Солнечной системы — 9 сентября. Образование Земли — 14 сентября. Возникновение жизни на Земле — 25 сентября. Появление бактерий — 9 октября. Первые клетки с ядром — 15 ноября. Дальнейшие события, связанные с развитием жизни на Земле, вынесены в отдельный «декабрьский» блок, распланированный по дням. Заметим, что человек в этом временном масштабе существует только последние полтора «предновогодних» часа. А средняя человеческая жизнь длится чуть больше чем 0,1 секунды.

Пространство и время никак нельзя считать независимыми друг от друга. Постоянная Планка h (порядка 10^{-34} Дж·с) — минимальный квант действия — включает в себя обе компоненты: и времени, и пространства. Эта фундаментальная константа определяет минимально возможное изменение состояния материи в пространстве и времени, которое можно сравнить с кадром в киноленте. Подобно тому как кинематографические кадры, сменяя друг друга, создают у нас впечатление непрерывно и плавно меняющегося изображения, действительность вокруг нас состоит из мельчайших скачкообразных изменений, совокупность которых мы воспринимаем как непрерывный процесс — просто потому, что наши размеры и воспринимаемые чувствами интервалы времени слишком велики.

Связь времени и пространства в нашем макром мире можно заметить на астрономических масштабах. Наблюдая, например, квазары — объекты, отстоящие от Земли на миллиарды световых лет, — мы, по сути, видим не только отдаленные в пространстве области Вселенной, но и ее далекое прошлое. И чем дальше космический объект от нас, тем глубже удается в это прошлое заглянуть. Электромагнитное излучение, принимаемое от наиболее далеких квазаров сегодня, было рождено в эпоху, когда звезды только-только начинали формироваться. Другими словами, мы наблюдаем юную Вселенную.

Солнце мы видим таким, каким оно было восемь минут назад. Самые яркие звезды на небе посылают нам свет из прошлого «глубиной» в несколько лет или несколько десятков лет. По звездному каталогу можно выбрать звезду, расстояние до которой, выраженное в световых годах, примерно равно нашему возрасту. А потом найти эту звезду на небе и посмотреть, что происходило во Вселенной, когда мы пришли в этот мир...

И последнее. Средняя продолжительность человеческой жизни составляет, как мы видели, одну десятую секунды в масштабах космического года и немногим более 2 млрд. секунд по реальной шкале. Двойка и девять нулей. Из них около 700 млн. секунд мы спим, а 200 млн. секунд приходится на раннее детство. Как мы потратим оставшийся миллиард — зависит от нас. Примерно 500 секунд из этого миллиарда прошли, пока вы читали эту статью.

