

# Все формулы мира

КАК  
МАТЕМАТИКА  
ОБЪЯСНЯЕТ  
ЗАКОНЫ  
ПРИРОДЫ



СЕРГЕЙ ПОПОВ

*С иллюстрациями*  
РОСТАНА ТАВАСИЕВА



# Все формулы мира

КАК  
МАТЕМАТИКА  
ОБЪЯСНЯЕТ  
ЗАКОНЫ  
ПРИРОДЫ

СЕРГЕЙ ПОПОВ

*С иллюстрациями*  
РОСТАНА ТАВАСИЕВА

**АНО**  
АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Москва  
2019

УДК 51  
ББК 22.1  
П58

Научный редактор Игорь Иванов, канд. физ.-мат. наук  
Редактор Полина Суворова

**Попов С.**

П58 Все формулы мира. Как математика объясняет законы природы / Сергей Попов. — М.: Альпина нон-фикшн, 2019. — 288 с.

ISBN 978-5-00139-169-2

Галилео Галилею принадлежат слова: «Книга природы написана на языке математики». Спустя почти четыре столетия мы не устаем удивляться тому, что математические методы прекрасно подходят для описания нашего мира. Еще большее изумление вызывают естественно-научные открытия, сделанные на основе математического анализа уравнений. Создание любой сложной конструкции — от хитроумной дорожной развязки до квантового компьютера — сопряжено с математическими расчетами. Для полноценного понимания действия гравитации или квантовых явлений нам также не обойтись без математики. Но это кажется таким сложным и запутанным! Как перестать бояться формул и полюбить математику? Почему она так эффективна в естественных науках? Есть ли этому предел, или, наоборот, для более глубокого понимания природы придется создавать математические конструкции, уже не укладывающиеся в голову человека? Все эти вопросы затрагиваются на страницах книги, а их художественное осмысление представлено в серии рисунков художника Ростана Тавасиева. На многие из них невозможно найти окончательные однозначные ответы. Но мы продолжаем обсуждать их и пытаемся понять, как устроен этот мир. Для этого понадобится преодолеть разделение на «две культуры»: «гуманитариев» и «естественников». Попробуем сделать еще один шаг в этом направлении.

УДК 51  
ББК 22.1

*Все права защищены. Никакая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети интернет и в корпоративных сетях, а также запись в память ЭВМ для частного или публичного использования, без письменного разрешения владельца авторских прав. По вопросу организации доступа к электронной библиотеке издательства обращайтесь по адресу [nylib@alpina.ru](mailto:nylib@alpina.ru).*

© Попов С., 2019  
© Тавасиев Р., иллюстрации, 2019  
© ООО «Альпина нон-фикшн», 2019

ISBN 978-5-00139-169-2

# Содержание

Предисловие автора.....	5
Предисловие художника .....	7

## Часть I. Новый язык

Глава 1. Формулы и законы природы .....	13
Глава 2. Три доски.....	25
Глава 3. Клубок ниток .....	35

## Часть II. Эволюция

Глава 4. «Эволюционное древо формул» .....	45
Глава 5. «Эволюция, детка» .....	55
Глава 6. Возрастание сложности .....	65
Глава 7. Чем математика похожа на глаз?.....	77
Глава 8. Эволюция формы и содержания.....	87

## Часть III. Метаморфозы и варианты

Глава 9. Агрегатные состояния идей.....	97
Глава 10. Снежинки теорий.....	109
Глава 11. Воображаемые миры .....	119
Глава 12. Другая математика? .....	129

## Часть IV. Предвидение

Глава 13. Неизбежность математических выводов.....	139
Глава 14. «Приподнимем занавес за краешек...» .....	149
Глава 15. Что могло бы быть «научной магией» .....	159
Послесловие (которое могло бы быть предисловием).....	167

## Приложения

Приложение 1. Закон Хаббла и сверхсветовые скорости в космологии .....	171
Приложение 2. Метод размерностей. Параметры в центре Солнца и пульсации звезд .....	177
Приложение 3. Аккреция, предельная светимость и массы сверхмассивных черных дыр .....	181
Приложение 4. Одиночные черные дыры.....	189
Приложение 5. Астрофизика нейтронных звезд .....	209
Приложение 6. Быстрые радиовсплески.....	224
Приложение 7. Популяционный синтез экзопланет .....	232
Приложение 8. Падение тела.....	241
Приложение 9. Высота гор и форма астероидов.....	246
Приложение 10. Гипотезы в астрофизике .....	249
Приложение 11. Зачем нужна астрономия .....	261
Примечания.....	270

# Предисловие автора

Меня всегда удивляли фразы, в которых встречалось выражение «наука и культура». Звучит как «литература и культура» или «искусство и культура». Такое разделение и даже противопоставление лишено смысла, ведь, безусловно, наука — неотъемлемая часть современной культуры. Также меня всегда расстраивало противопоставление «двух культур» — гуманитарной и естественно-научной, о котором писал еще Чарльз Сноу в своей знаменитой работе. Кажется, что такое разделение — а оно до сих пор заметно — основано в первую очередь на взаимном непонимании, свойственном многим людям и с той и с другой стороны. Чтобы лучше понять друг друга, надо больше общаться. Отчасти предлагаемая читателю книга является попыткой такого общения. Соответственно, основной ее адресат — человек, считающий себя в большей степени «гуманитарием», что в первую очередь подразумевает нелюбовь ко «всяким формулам».

В некотором смысле книга состоит из трех частей, и важнейшая из них связана с набором иллюстраций, созданных Ростаном Тавасиевым. С самого начала идея проекта вращалась вокруг визуальных образов, которые могли бы по-своему выразить роль математики в познании и описании мира, а также ее связь с другими подходами. Поэтому иллюстративный ряд — не просто дополнение к тексту, а самостоятельная сущность, у которой есть создатель, своими методами выражающий собственную точку зрения на мысли и образы, представленные в основной — текстовой — части книги.

В 15 главах, составляющих эту часть, формул практически нет. Целью был разговор о математическом методе описания мира с точки зрения

ученого, который им активно пользуется, но сам его не развивает, создание некоего внятного образа, подкрепленного разнообразными аналогиями (с которыми, разумеется, можно не соглашаться) и примерами, которые я брал в первую очередь из физики и астрофизики. Мне хотелось, чтобы читатель понял, что математика — не способ все запутать, а единственная возможность понять очень и очень многое из того, что мы узнали и узнаем о мире, в первую очередь в результате физических исследований. Кроме того, математика — метод не только (и не столько) представления и описания, но еще и исследований природы, поскольку оказалось, что множество новых результатов удается вначале получить с помощью анализа уравнений (а иногда даже создания нового математического аппарата), а эксперимент или наблюдения впоследствии их лишь подтверждают.

Однако многим продвинутым читателям покажется, что слов недостаточно, — надо и уравнения выписывать. Рассказывать о математических методах в физике без помощи формул — все равно что говорить о живописи без иллюстраций или показа картин. Поэтому появилась третья часть книги — приложения, куда вынесен ряд примеров, призванных непосредственно продемонстрировать, как математика применяется в физике и астрономии. Там формулы присутствуют в большом количестве, правда, сложных выражений среди них нет. Фактически приложения — это ряд независимых научно-популярных статей разного объема, посвященных самым разным методам, процессам и объектам. Стандартного курса нетехнического вуза по высшей математике и физике (или даже естествознанию) будет вполне достаточно, чтобы во всем разобраться. Не возникнет сложностей и у старшеклассников из физико-математических школ или астрономических кружков.

Особняком стоят два последних больших приложения, одно из которых посвящено гипотезам в астрофизике, а второе — практической пользе фундаментальных исследований вообще и астрономических в частности. Читатель, все-таки желающий формул избежать, может, пропустив первые девять приложений, смело браться за два последних, не боясь столкнуться с «математическими монстрами».

# Предисловие художника

Предложение Сергея Попова иллюстрировать книгу про математические формулы застало меня врасплох. Как иллюстрировать то, чего не понимаешь? Но я решил довериться удивительному дару Сергея Борисовича объяснять непостижимое.

В школе мир цифр казался ужасно скучным. Клетку в тетради воспринимал как средство ограничения свободы воображения. И боролся за эту свободу заполняя тетрадки рисунками. Рисовал и в учебниках, визуализируя условия задач и украшая буденновскими усами портреты великих математиков.

И вот теперь мои рисунки снова встретились с математикой на страницах этой книги. Подозреваю, что стал тем максимально не подготовленным «гуманитарием», на котором автор тестировал свой текст. Если поймет этот художник, то, вероятно, и другие тоже поймут.

Издательство попросило пояснить в этом коротком вступлении, как устроены иллюстрации. Они состоят из трех основных элементов: клякса, чертеж (или карандашный рисунок) и орнамент. Клякса, след падения капли акварели на белом листе, — естественное физическое явление. Чертеж этой кляксы — попытка человека измерить и понять это физическое явление. Орнамент — один из первых доступных человеку способов описать через рисунок и ритм окружающий мир.

Собранные из этих элементов иллюстрации я отправлял Сергею Борисовичу на благословение. В ответ получал наставительные комментарии и исправлял рисунки. Так, шаг за шагом, приближался к пониманию смысла каждой главы. Теперь эта книга у вас в руках. И вы даже уже прочитали предисловие.

*Ростан Тавасиев*





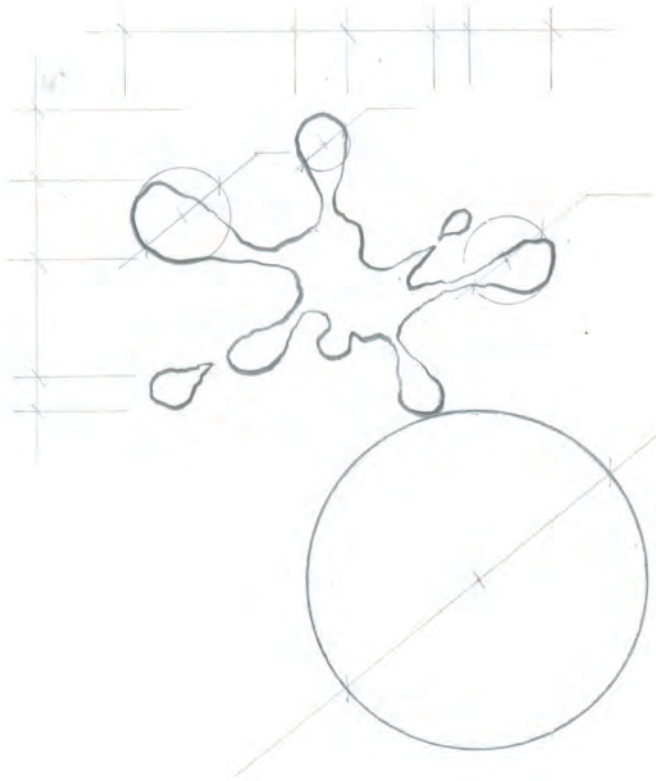
ЧАСТЬ I

---

# НОВЫЙ ЯЗЫК

**А.** Законами природы мы называем надежно установленные закономерности, описывающие процессы в реальном мире. Математические методы помогают не только четче формулировать эти законы, но и использовать проверенные алгоритмы и правила как для расчетов результата их действия, так и для получения новых соотношений, т.е. новых законов природы.

**Б.** «Непостижимая эффективность математики» состоит в первую очередь в том, что законы и правила, сформулированные и доказанные для идеальных математических объектов, оказываются с высокой точностью применимы к реальным объектам и процессам.





# Формулы и законы природы

Самый глобальный процесс — расширение вселенной\* — описывается формулой всего лишь из трех символов:  $v = Hr$ . Это закон Хаббла. Здесь  $r$  — так называемое собственное расстояние до объекта («нормальное» расстояние «в метрах» в данный момент времени),  $v$  — скорость изменения этого собственного расстояния со временем по часам наблюдателя (так называемое *cosmic time*), связанная с расширением. Наконец,  $H$  — постоянная Хаббла. Это коэффициент пропорциональности, характеризующий, насколько быстро происходит расширение в данную эпоху. Закон Хаббла можно сформулировать и словами (вообще, чем проще уравнение, тем, как правило, легче это сделать): скорость удаления галактики за счет расширения вселенной прямо пропорциональна расстоянию до нее. Однако весь контекст лучше проявляется именно при формуль-

\* Вселенная с прописной буквы — это все сущее, наблюдаемое и ненаблюдаемое. Мы не знаем свойств Вселенной, поскольку наблюдаем лишь вселенную. Вот ее параметры нам более или менее известны. Именно о ней здесь речь. Иными словами, когда мы говорим о мультивселенных, то это Вселенная, состоящая из множества вселенных, в одной из которых мы живем.

ной записи даже в таком простом случае. И сам закон выводится с очевидной неизбежностью именно на языке формул (см. приложение 1).

Закон Хаббла был получен на основе анализа данных наблюдений в 1929 г., но еще в 1922-м Александр Фридман и независимо от него в 1927-м Жорж Леметр вывели соответствующее соотношение из решений уравнений Эйнштейна для однородной и изотропной вселенной\*.

Наблюдения позволяют проверять закон Хаббла. Для не слишком далеких галактик их скорость можно с хорошей точностью определить по красному смещению, используя закон Доплера (хотя космологическое красное смещение имеет другую природу, тем не менее можно показать, что вплоть до расстояний в несколько миллиардов световых лет доплеровская формула дает довольно правильный результат). Для более далеких галактик скорость рассчитывается в рамках заданной космологической модели.

Удивительным для многих фактом является то, что скорость в законе Хаббла может превосходить световую<sup>1</sup>. Расстояние, на котором это происходит, соответствует сфере Хаббла. До нее сейчас всего лишь около 14 млрд световых лет. Мы наблюдаем галактики, находящиеся в данный момент более чем вдвое дальше, т. е. можем указать на снимке (например, в Ультраглубоком поле Хаббла — на изображении небольшого участка неба размером меньше диска Луны, полученном в результате длительных наблюдений с помощью Космического телескопа имени Хаббла) объект, скорость удаления которого от нас в настоящий момент превосходит 300 000 км/с.

В этом примере хорошо иллюстрируются ключевые преимущества математического подхода в физике (и других науках):

— вывод ключевого закона природы из четко сформулированных предположений путем применения проверенного аппарата (математика);

\* Интересно, что в 2018 г. на Генеральной ассамблее Международного астрономического союза была принята резолюция, призывающая рекомендовать использовать название «закон Хаббла — Леметра».

- компактная, ясная запись (открывающая также путь к наглядной визуализации путем построения графиков);
- возможность расчета следствий (что позволяет, в частности, сравнивать предсказания теории с наблюдениями).

Именно с началом использования математических методов физика стала быстро развиваться, ведь без этого точные экспериментальные данные до некоторой степени были не востребованы (разумеется, верно и обратное: приход математики отчасти стимулирован появлением точных измерений наблюдаемых параметров). То же самое можно сказать и о многих других науках. Замена качественных описаний и построений на количественные расчеты, основанные на развитом математическом аппарате, позволила выйти на новый уровень.

Ретроспективно окидывая взором разнообразные попытки человечества постигнуть суть вещей, мы вряд ли сможем представить, что возможна какая-то альтернатива математическому описанию физических законов. Более того, для нас теперь само их понимание означает, по сути, построение количественной модели, позволяющей успешно описывать данные наблюдений и экспериментов, а также предсказывать исходы будущих опытов. Без формул это сделать невозможно. Именно поэтому некоторые физики (а также химики, молекулярные биологи и многие другие ученые) немного свысока взирают на те науки, где уровень использования математики гораздо ниже и где много качественных (не синоним слова «хороших») словесных рассуждений. Значит, казалось бы, всякий любознательный человек, стремящийся понять, как устроена природа, должен пытаться уяснить все на языке формул. Не тут-то было! Формульный язык, по всей видимости, слишком «неестественен». Человеку как виду несколько миллионов лет, а формулы мы используем в тысячу раз меньше времени. Да и применяют-то их далеко не все. Наш мозг развивался не для того, чтобы использовать формулы. А жаль. О мозге, специально для них приспособленном, мы поговорим в последней главе. Пока же ограничимся современным человеческим восприятием.



Человек уже сталкивался с расширением привычного восприятия мира, ограниченного нашими органами чувств. Сначала в XVII веке были изобретены телескоп и микроскоп. Оказалось, что и на макро-, и на микроуровне «есть многое на свете, друг Горацио, что и не снилось нашим мудрецам». Неожиданно выяснилось, что наши органы чувств недостаточно совершенны для того, чтобы увидеть мириады звезд, из которых состоит Млечный Путь, и мельчайшие живые организмы в капле воды. Позже стало ясно, что существуют виды электромагнитного излучения, недоступные человеческому глазу. Затем выяснилось, что и космос, и окружающее нас пространство пронизывается потоками частиц (например, нейтрино), которые мы не замечаем. Теперь к этому набору прибавились гравитационные волны. Кажется очевидным, что наших врожденных свойств недостаточно для адекватного постижения мира — ни с точки зрения наблюдений за ним, ни, вероятно, с точки зрения полного его осмысления. Однако, так же как телескопы и детекторы разнообразных излучений позволили больше и лучше «видеть», математика помогает нам лучше описывать и понимать, хотя иногда это становится очень непростой задачей.

Сколько людей боится формул! В связи с этим часто раздаются просьбы рассказать о чем-то (космологии, черных дырах, гравитационных волнах) «совсем-совсем без формул». Иногда ученый или популяризатор чувствует себя врачом (например, стоматологом), которого просят помочь, но «так, чтобы не было больно». Благодаря существенным успехам в сфере анестезии сегодня можно, например, безболезненно удалить зуб. Объяснить особенности специальной теории относительности, не пользуясь формулами, заметно сложнее. Тут даже общим наркозом делу не поможешь. Всем памятно утверждение редактора, работавшего со Стивеном Хокингом, о том, что одно уравнение уменьшает продажи научно-популярной книги вдвое. Однако, чтобы как следует в чем-то разобраться, формулы необходимы (и Хокинг не смог обойтись без  $E = mc^2$ ).

Можно выделить три основных случая применения формул, которые при этом могут существенно отличаться по внешнему виду и сути:

формулы в чистой математике, формулы для записи законов природы, химические формулы.

Первый тип формул — это, по сути, элементы особого языка, особого способа описания структуры, которую мы выявляем (открываем) лишь постепенно, на протяжении многих сотен лет. Существенно, что ее элементы оказываются связанными друг с другом (иногда довольно «чудесным», т. е. причудливым и неожиданным, образом) определенными законами и правилами, которые также выявляются лишь по ходу выявления свойств структуры.

Второй тип формул — способ описания мира, в первую очередь реального. Однако, как мы увидим позже, работа с гипотезами (которые в основном оказываются неверными в применении к наблюдаемой природе) приводит к тому, что физические формулы служат и для описания возможных миров, отличающихся от нашего. Сила второго вида формул состоит в наличии их первого типа. Иначе говоря, к законам природы можно применять методы манипулирования, уже разработанные математиками для абстрактных структур.

Особняком стоят химические формулы, описывающие структуры молекул и реакции между ними. Наверняка именно та или иная форма записи строения какой-нибудь молекулы — первое, что приходит в голову многим людям при упоминании слова «формула» (эти ассоциации используют в рекламе, рассказывая о новом моющем средстве или моторном масле). В первую очередь формулы — очень удобный способ визуализации. В данном случае они не имеют отношения к математике. Соответственно, мощные методы этой науки неприменимы для манипуляций с химическими формулами. Однако у химиков есть свои методы, да и математические формулы они тоже активно используют.

Отдельно можно выделить четвертый тип формул, связанный с диаграммами, соответствующими реакциям в самых разных науках. Это или схемы, или одна из форм математической записи, т. е. они выделяются скорее по форме, чем по содержанию, и демонстрируют заметное разнообразие, если их не сортировать по подклассам. В первую очередь здесь стоит назвать диаграммы Фейнмана. В данном случае речь идет не просто о визуализации,

а о методе, упрощающем вычисления. Так что с некоторыми оговорками можно считать эти диаграммы подвидом формул второго типа.

Нас в первую очередь будут интересовать формулы в физике (законы природы) и стоящая за ними математика, обеспечивающая аппарат манипулирования. Вместе это страшная сила. Как пишет Михаил Громов, «математика заполняет своим огнем все, что зовется физическими науками: облака, скрывавшие от нас то, что теперь мы пишем как законы природы, рассеиваются в лучах такой физики»<sup>2</sup>.

Сама идея законов природы довольно нетривиальна. На первом шаге речь идет о том, что мы можем выявить в природе строго выполняющиеся закономерности, которые можно записать в виде математических соотношений. Отсюда один шаг до восприятия мира как машины с четкой предсказуемостью всех будущих событий. Интересно, что дальнейшее движение «той же тропой» привело в итоге к отказу от строгого детерминизма механистических моделей благодаря, например, созданию таких теорий, как хаотическая динамика и квантовая механика. Но в начале пути строгого математического описания природы (без божественного вмешательства, например) мы видим именно детерминизм.

Как бы то ни было, можно сказать, что настоящая наука появилась, когда ученые начали предпринимать попытки выявить именно законы природы. Эта концепция требует веры в то, что естественные процессы происходят по неким неизменным правилам, т. е. что мы не живем в мире случайностей и чудес (возможно, с оговоркой, что нечто, кажущееся в данный момент чудом, найдет свое объяснение в рамках более общего закона природы). Если исходить из этой точки зрения, то одним из первых ученых является Евдокс Книдский (IV век до н. э.)\*. Ему принадлежит первая серьезная попытка создать модель «Вселенной» (в том объеме, в каком ее воспринимали древние греки), т. е. представить движение небесных тел (Солнца, Луны, пяти видимых невооруженным глазом пла-

\* Примерно на полтора столетия раньше Пифагор и его ученики также выявили несколько важных закономерностей. Однако этой школе явно мешал чрезмерно идеологизированный подход, т. е. некоторая концептуальная зашоренность в подходе к изучению природных явлений.

нет) в виде набора концентрических сфер, можно сказать «шестеренок». И речь не идет о том, чтобы ограничиться словесным описанием. Целью Евдокса Книдского было именно создание четкой конструкции, позволяющей рассчитывать траектории небесных объектов. Такую модель при желании можно воплотить в металле в виде механического устройства, если бы это позволяли технические возможности того времени. Тогда можно было бы, «вращая ручку», прокручивать движение планет в будущее или прошлое, демонстрируя их конфигурацию в любой момент времени. При этом очевидно, что все это бесконечно далеко от магии. Евдоксу Книдскому не могло бы прийти в голову, что, создав правильную модель и воплотив ее в бронзе, он сможет «подкручивать» шестеренки, меняя тем самым движение светил. Иными словами, законы природы представлялись греческому ученому некой объективной реальностью, существующей независимо, а потому не подверженной магическому воздействию.

Представление о мире как о гигантском часовом механизме, с одной стороны, очень вдохновляющее, а с другой — отчасти пессимистическое. Сделаем небольшое отступление. В наши дни прогресс в математике заметно отличается от прогресса в естественных науках (будем для определенности говорить о физике). В физике мы понимаем, что практически любой фундаментальный теоретический результат в той или иной степени неокончателен, неполон. Мы всегда работаем с приближенными моделями, обладая недостаточной информацией. На смену ньютоновской механике пришли теория относительности (даже две!) и квантовая механика. Надеюсь, их сменит какой-то вариант квантовой гравитации. Будет ли это «окончательной теорией»? Мы не знаем, мы сомневаемся. В математике, если теорема доказана, то она доказана. Это результат на века. Заменить можно только математику целиком (да и то все старые результаты останутся верными в рамках исходной концепции, как шахматные композиции, если вдруг поменять правила игры). Вернемся к механистической картине мира. Представляется, что ощущения ученых, занимавшихся физикой в XVII–XVIII веках, скорее походили на ощущения математиков, только были глобальнее, поскольку они, что очевидно,

непосредственно связаны со всей большой Вселенной. Работавшие в те времена физики вполне могли представлять, что напрямую постигают истинную структуру мира, божественный замысел (если им была нужна эта гипотеза). Законы природы, если они представлялись надежно установленными, выглядели окончательными и не подлежащими пересмотру.

Идея законов природы, подчиняющихся математическим закономерностям, еще более нетривиальна. Именно на этом основано утверждение Юджина Вигнера о непостижимой эффективности математики<sup>3</sup>, к которому мы будем неоднократно возвращаться. Ведь одно дело — провести эксперименты или наблюдения, а затем на их основе сформулировать закон в виде математического выражения, и совсем другое — взять математическую формулировку закона, добавить новые гипотезы, провести некоторые математические операции и получить новый, доселе неизвестный закон природы, который потом можно проверить и найти полное совпадение теоретического предсказания с экспериментальным результатом!

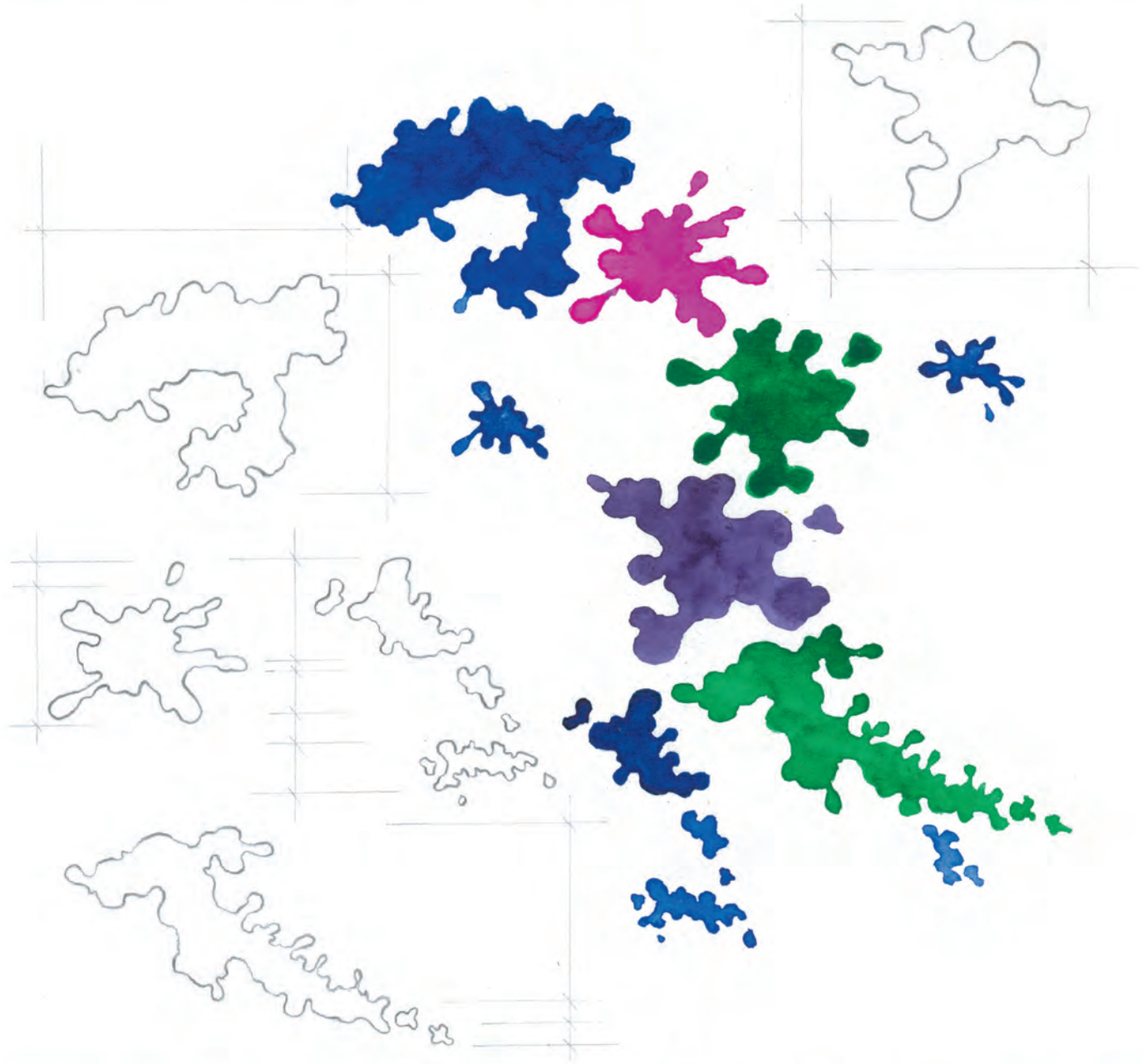
Здесь начинает проявляться одна из «магических» особенностей математических формул в роли законов природы. Что-то там написав на бумаге (т. е. проделав манипуляции с математическими символами), можно предсказать положение неизвестной планеты и некоторые из ее свойств, а можно — существование элементарной частицы, определить, из чего состоят частицы, казавшиеся элементарными. Это дает ощущение удивительного единства мира, подчиняющегося относительно простым, по крайней мере постигаемым, правилам, что удивляло и самого Эйнштейна: «Самое непостижимое в этом мире — это то, что он постижим». Для тех же, кто не постигает мир посредством математически сформулированных законов, все это выглядит как волшебство, а ученые воспринимаются как маги. То ли добрые, то ли нет.

Итак, многие люди боятся формул и считают их чем-то сродни магии, а потому, не понимая смысла, относятся к печатной странице, исписанной математическими выражениями, со специфическим уважением. Статья по теоретической физике может выглядеть для них как некий странный артефакт, принципиально отличающийся от страницы обычного текста на непонятном языке.



**А.** В истории физики есть немало примеров того, что описание ряда явлений, казавшихся не связанными друг с другом, удалось провести в рамках общего подхода. Физическая реальность представляется единой структурой, элементы которой функционируют по единым правилам. Далеко не все взаимосвязи внутри этой структуры нам известны. Однако рабочая гипотеза состоит в возможности построения единой теории, из которой законы для всех конкретных зависимостей между физическими величинами могут быть выведены с помощью математических методов.

**Б.** Использование математики позволяет на основе уже выявленных взаимосвязей между различными процессами и явлениями обнаруживать ранее неизвестные свойства физических объектов, предсказывать пока не наблюдавшиеся явления, а также формулировать новые законы природы.







# Три ДОСКИ

Представим себе три доски в университетской аудитории. Все они плотно заполнены формулами, но отличаются по смысловой нагрузке. Однако для многих неискушенных зрителей эти доски выглядят практически одинаково. Дело в том, что определить, в каких надписях есть смысл, в каких — нет, а на какой доске отражена некая единая идея, может быть затруднительно.

В данном случае первая доска заполнена абсолютной абракадаброй. На ней написаны несуществующие формулы — случайные сочетания математических символов и букв латинского и греческого алфавитов. На второй изображены известные уравнения, никоим образом не связанные друг с другом, и трудно представить себе контекст, в котором они стали бы элементами единого сюжета. Наконец, последняя доска содержит последовательный вывод некоего закона, т. е. каждое уравнение связано с предыдущим и в итоге мы получаем осмысленный и важный результат.

Давайте сравним чувства, возникшие при взгляде на эти три доски, с ощущениями, которые появились бы у нас в случае, если бы они были заполнены текстом на неизвестном языке. Снова одна доска была бы

исписана случайным набором букв (разумеется, с сохранением разбиения на слова, синтаксисом и т. п.), вторая содержала бы реальные слова, но текст выглядел бы как бред, а третья представляла бы собой связный рассказ. Впечатления от доски с формулами и от доски с текстом, как правило, различны. Текст не впечатляет, мы слишком к нему привыкли. Только утверждение, что он имеет дело с древним языком исчезнувшей цивилизации (для любителей экзотики — с инопланетным языком) или секретным шифром, может заставить среднего человека вглядываться в каракули. Тем и притягателен манускрипт Войнич<sup>4</sup>. Тем и красив кодекс Серафини<sup>5</sup>. Мы думаем, что там скрыт какой-то особый смысл (даже зная, что у Серафини его нет, а скорее всего, нет и в манускрипте Войнич<sup>6</sup>). Примерно так же на многих действует страница формул.

Они могут быть просто красивыми. У большинства людей сам вид сложных комбинаций непонятных символов вызывает душевный трепет и ощущение тайны. Магия... Но формула — не заклинание. Это выражение вполне определенной связи между конкретными параметрами. Есть формулы очень известные (такие как  $E = mc^2$ ), есть менее узнаваемые. Некоторые из них выражают наиболее фундаментальные законы, лежащие в основе современного понимания (а значит, и описания) мира.

Страница, исписанная формулами, вызывает бурю самых разных ассоциаций. Одновременно можно вспомнить и то, как трудно что-то давалось в школе или институте, и черные дыры, и атомную бомбу. Мы (многие, возможно, подсознательно) понимаем, что наш мир стоит на формулах, поскольку они лежат в основе техники, а куда всем нам без нее. Странно слышать про низкий авторитет науки, когда одними из самых действенных рекламных слоганов служат словосочетания: «новая формула» и «формула успеха»\*.

\* Любопытно, что в данном случае, видимо, в сознании слушающего странным образом переплетаются математические и химические формулы. Наверняка, если провести тест и сразу после прослушивания рекламы со словами «формула успеха» попросить написать любую формулу, то получим что-то вроде  $E = mc^2$ , закона Ома или основного тригонометрического тождества, а не бензольное кольцо или формулу воды. А в случае рекламы со словами «новая формула» в применении к какой-нибудь жидкости — наоборот.

Однако важно отметить, что физические формулы (включая самые известные и фундаментальные) существуют не сами по себе, а как часть большой структуры. Они взаимосвязаны друг с другом, и в этом смысл третьей доски. Путем преобразований (следующих определенным правилам) из одних формул можно получать другие. И это не является тавтологией: само обнаружение некоторых связей является научным открытием.

В XIX веке оказалось, что электричество и магнетизм — две стороны одной медали. Появилась теория электромагнитного поля. В начале XX столетия целью стало объединение электромагнетизма с гравитацией. Казалось, Теодор Калуца и Оскар Клейн нащупали перспективный подход<sup>7</sup>. Альберт Эйнштейн тоже посвятил последние годы своей жизни поискам возможностей для такого объединения, однако из этого, к сожалению, ничего не вышло. Зато обнаруженное позже слабое ядерное взаимодействие\* удалось успешно объединить с электромагнитным в так называемое электрослабое взаимодействие. Это было сделано Стивеном Вайнбергом, Шелдоном Ли Глэшоу и Абдусом Саламом более полувека назад. А уже в 1980-е гг., когда в ЦЕРН были открыты и изучены W- и Z-бозоны, стало ясно, что получены надежные экспериментальные подтверждения верности предложенной ими модели.

Нет больших сомнений, что в будущем удастся добавить в единое описание и сильное ядерное взаимодействие, а также проверить это экспериментально или с помощью наблюдений. Такая теория получила наименование «Великое объединение» (Grand Unification Theory — GUT). Активные работы в этом направлении ведутся с 1970-х гг. Продолжаются и попытки объединения всех четырех фундаментальных взаимодействий в общую модель. Это уже «Теория всего» (Theory of Everything — TOE). Теория струн, которая сейчас у всех на слуху, как раз является одним из подходов к созданию TOE.

В настоящее время считается, что объединение взаимодействий происходит при высоких энергиях взаимодействующих частиц (например,

\* Первые серьезные теоретические модели в этой области появились в 1930-е гг., когда Энрико Ферми начал работать над описанием бета-распада.

это могло иметь место в новорожденной вселенной). Получить прямые экспериментальные данные в этой области практически невозможно. А потому единые теории — вотчина теоретиков, и основные надежды пока связаны как раз с тем, что на основе известных законов, базирующихся на надежных экспериментальных данных, используя новые гипотезы и всю мощь математического аппарата (нередко для таких целей придумывают новые математические конструкции), можно построить внутренне непротиворечивую теорию, которая, с одной стороны, будет давать верное описание для уже известных явлений, а с другой — предсказывать новые эффекты.

Таким образом, возможность вывода новых формул из уже существующих демонстрирует единство структуры описания, взаимосвязь между разными понятиями и явлениями, процессами и законами. В то же время манипулирование с формулами, которое следует математическим правилам, может приводить к новым открытиям, и это важная сторона «удивительной» эффективности математики в физике. В истории тому есть множество свидетельств.

Классическим примером эффективности (и подтверждением правильности) ньютоновской механики считается открытие Нептуна. Напомним, что на основе наблюдавшихся отклонений в движении Урана Джону Адамсу и Урбену Леверье удалось рассчитать положение новой большой планеты Солнечной системы, и в сентябре 1846 г. это небесное тело было обнаружено астрономами берлинской обсерватории.

В случае открытия Нептуна речь идет не о том, что с помощью математических преобразований получены новые законы природы, а о том, что была триумфально продемонстрирована предсказательная сила теории (в данном случае — ньютоновской механики и теории гравитации), которая к этому времени успела обзавестись мощным математическим аппаратом. Частично новые математические методы развивались именно для решения задач небесной механики. Это один из первых ярких примеров взаимного обогащения физики и математики: математики разрабатывают методы — физики их применяют, у физиков возникают запросы на решение интересных актуальных задач — математики разрабатывают

новые методы. Неудивительно, что спустя несколько десятилетий анализ небесно-механических задач привел к новым поразительным результатам сразу и в физике, и математике.

В конце XX века, рассматривая некоторые варианты задачи трех тел, Анри Пуанкаре получил неожиданные решения. Орбиты вели себя нерегулярным образом. Предсказать точное положение тела оказывалось невозможным даже при ничтожной неопределенности в начальных условиях. Это были первые хаотические решения в динамических системах<sup>8</sup>.

Такое положение дел сильно удивило бы маркиза Пьера-Симона Лапласа — одного из отцов небесной механики. Ему принадлежит красивая идея воображаемого существа, получившего имя *Демон Лапласа*, которое, зная положение всех частиц во вселенной, могло бы предсказывать сколь угодно отдаленное будущее. Оказалось, что это невозможно уже в рамках обычной небесной механики (позже квантовая механика внесла свой вклад в непредсказуемость). Сколь угодно малые неопределенности в начальных условиях могут приводить к сколь угодно большим отклонениям в параметрах системы в будущем. Это красивейший пример открытия, сделанного чисто теоретическими методами анализа уравнений.

Если с детерминизмом Лаплас просчитался, то в другом им было сделано интересное предсказание, которое сбылось, правда, снова не совсем так, как это мог себе представить маркиз. Речь о черных дырах. В конце XVIII века Джон Мичелл в Британии и чуть позже (но независимо) Лаплас во Франции пришли к идее существования темных тел, у которых комбинация массы и радиуса такова, что скорость убегания на поверхности (вторая космическая скорость) равна скорости света или превосходит ее.

Идея выглядит крайне простой. Удивительно, что, например, еще Ньютон не написал о подобной возможности, тем более что он придерживался корпускулярной теории света, вполне разумной в его время. Существование темных объектов Мичелла — Лапласа следует из формулы, которую в наше время каждый школьник обязан узнать лет в 15–16.

Сейчас благодаря общей теории относительности мы представляем себе черные дыры совсем не так, как Мичелл и Лаплас. Если для них это

были просто тела с более или менее нормальной поверхностью и плотными сплошными недрами, то для нас, в рамках геометрической интерпретации гравитации, черная дыра — это область пространства, окруженная горизонтом, представляющим собой некий аналог мембраны, проницаемой лишь в одну сторону. Пространство так «свернуто», что даже световые лучи не могут выйти из области, ограниченной горизонтом событий, наружу. Попав под горизонт, вещество (за исключением некоторых очень экзотических случаев) движется к сингулярности (которая может иметь нетривиальную форму и структуру), где формально сжимается до бесконечной плотности, что в реальности означает переход в состояние, которое мы не можем описать в рамках известной на данный момент физики. И все это — выводы из теоретической модели. Проверить предсказания о том, что происходит под горизонтом, и даже доказать его существование у какого-нибудь объекта с помощью наблюдений мы пока не можем.

У астрономов есть множество кандидатов в черные дыры. В основном это или черные дыры звездных масс, возникшие в результате коллапса ядер массивных звезд, или сверхмассивные черные дыры в центрах галактик, которые постепенно набирали массу, пока не выросли в гигантов с массой, достигающей иногда до десятков миллиардов масс Солнца. Все эти объекты массивные и компактные настолько, что мы не можем объяснить их свойства в рамках известной физики без привлечения идеи о черной дыре. Все они не демонстрируют присутствие какой бы то ни было поверхности. Формально их приходится называть кандидатами в черные дыры, но, по сути, это черные дыры с *астрофизической точки зрения*. Разобравшись с наблюдательным статусом этих объектов, можно заниматься вопросом о том, как они устроены, т. е. выяснять, *что такое черные дыры с точки зрения физиков*. Такие ли это объекты, какими их рисует сейчас общая теория относительности, или есть какие-то отличия, пока незаметные во время наблюдений.

С открытием гравитационно-волновых сигналов от сливающихся кандидатов в черные дыры мы получили, пожалуй, самые надежные на сегодняшний день свидетельства в пользу гипотезы о существовании объектов

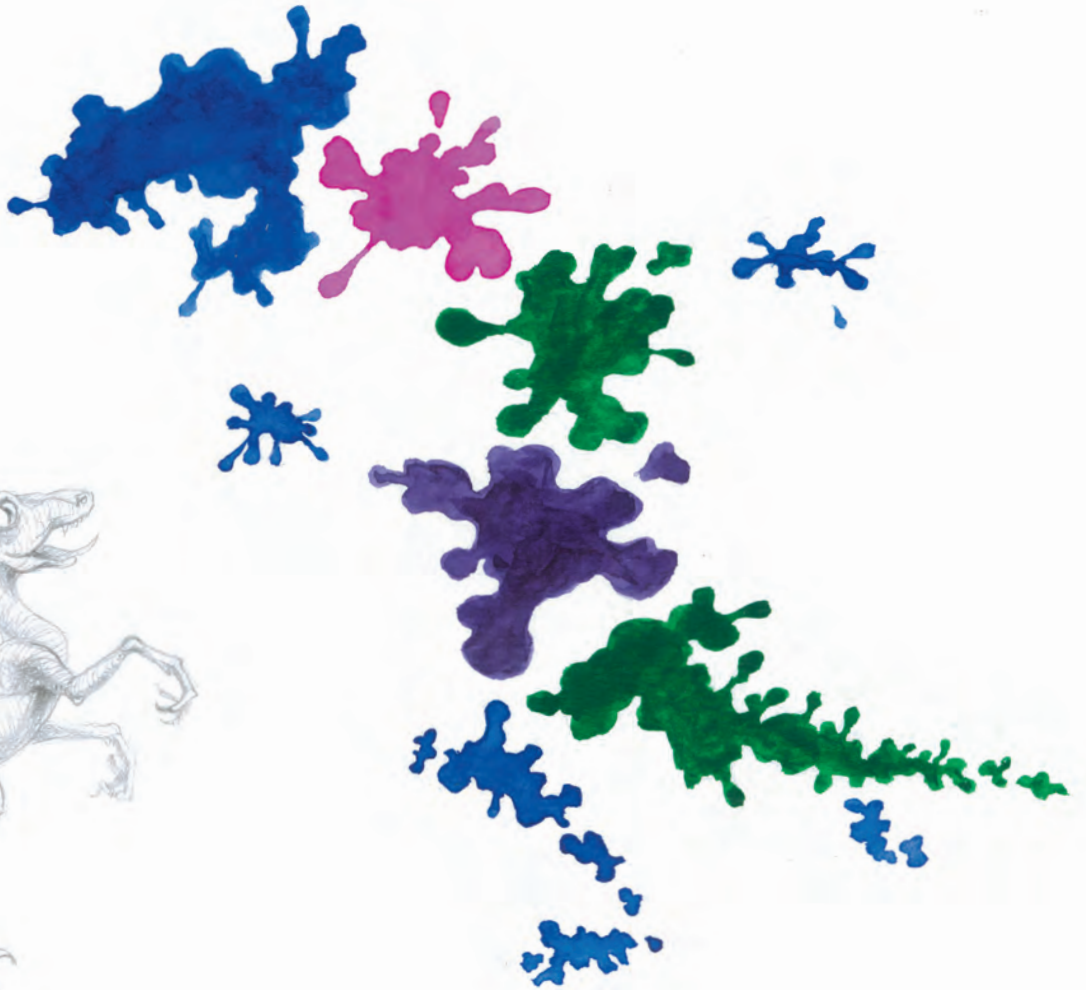
с горизонтом. По мере развития гравитационно-волновых антенн будут получены еще более сильные аргументы. Кроме того, радионаблюдения помогают увидеть так называемую тень черной дыры при наблюдениях центральных массивных объектов. Это уже удалось сделать в галактике М87 в созвездии Девы<sup>9</sup>. Можно надеяться, что кое-что удастся получить при наблюдениях черной дыры в центре нашей Галактики. В недалеком будущем к этому списку может добавиться центральный массивный объект в Туманности Андромеды. Если и этого покажется мало, то у нас есть еще надежда на другие подходы, например увидеть вспышки, связанные с последними стадиями испарения черных дыр. Это, наверное, будет самым надежным доказательством того, что такие удивительные объекты существуют и мы качественно правильно понимаем их физику (исключая поведение вещества в сингулярности).

Возвращаясь к трем доскам, мы видим, что важно, чтобы и в формульном изложении был сюжет. Так, начав тянуть за ниточку, свитую еще Ньютоном, Мичелл и Лаплас вытянули идею невидимых объектов, которые мы считаем неким прообразом черных дыр. Разбираясь с динамикой тел в Солнечной системе в рамках небесной механики, созданной в существенной мере и трудами Лапласа, ученые столкнулись с парадоксом смещения перигелия Меркурия. Объяснить аномалию, используя идею еще одной планеты, как в случае с Ураном и Нептуном, не получилось. Разгадка была найдена только с созданием общей теории относительности. И тогда, уже в XX веке, вначале благодаря работам Карла Шварцшильда, а затем и многих других ученых (включая Давида Финкельштейна<sup>10</sup>, Стивена Хокинга и многих других) возникла современная концепция черных дыр. Вот такой закрученный сюжет!



**А.** Математические методы в применении к естественным явлениям — это новый язык описания и обсуждения природы, дающий возможность выявлять и осознавать ранее неизвестные свойства и процессы. Кроме того, этот язык может быстро развиваться, совершенствоваться.

**Б.** С точки зрения физика, математика выглядит как набор хорошо упорядоченных и надежных взаимосвязанных друг с другом методов, позволяющий исследовать взаимосвязи между физическими параметрами и величинами.





# КЛУБОК НИТОК

На протяжении тысячелетий человечество пытается дать определение, что же такое человек. То ли это «двуногое без перьев», то ли «смеющееся животное», то ли перетрудившаяся обезьяна. У нас противопоставленный большой палец и крупный (при нашей массе тела) сложный мозг, у нас затянувшееся детство и нет шерсти. Людей выделяет также и то, что они одеваются и используют формулы (здесь Диоген Синопский мог бы произнести фразу: «Математики следят за Солнцем и Луной, а не видят того, что у них под ногами» — и скинуть с себя остатки одежды, чтобы предъявить циничный контрпример).

Тем не менее одежда — важная отличительная особенность человека. Здесь вспоминается и Гулливер в стране гуингнмов, и миф о грехопадении. Можно создавать одежду из естественных природных элементов, например листьев. Именно так, согласно Книге Бытия, пришлось поступить Адаму и Еве. Можно делать одежду из шкур, что несколько практичнее. Однако все равно таким способом удастся создать лишь довольно примитивные вещи.

Напрашивается аналогия между способами укрыть себя, чтобы защититься от внешнего мира, и тем, как человек описывает этот мир. Рано

возникающий естественный язык напоминает попытки делать одежду непосредственно из окружающих предметов, подвергая их лишь минимальной обработке. Повязка из листьев, шкура животного... Такая одежда прикрывает наготу и хоть как-то защищает от холода, т. е. удовлетворяет простейшие нужды, но как же далека она от современной одежды во всем ее многообразии (от дизайнерского коктейльного платья до космического скафандра, от спортивного костюма для бега на коньках до пуленепробиваемых жилетов)! Точно так же и ранние версии естественных языков, удовлетворяя простейшие коммуникационные потребности, существенно ограничены с точки зрения точности и охвата описываемых объектов и явлений. Конечно, языки развиваются, поэтому дают возможность выразить широкую гамму чувств и сформулировать множество идей. Уже у древних народов мы находим прекрасные литературные памятники и глубокие философские мысли. Это можно уподобить красивой одежде из дорогого меха. Естественные языки позволяют произносить проникновенные речи, поднимать людей вдохновляющими лозунгами. Но в смысле описания мира они не могут выйти за рамки того, что мы находим в поэме «О природе вещей» Лукреция. Человечеству понадобился новый тип языка, как и принципиально новый подход к изготовлению одежды, где огромным шагом вперед стало изобретение нитей и тканей из них.

Из нитей можно ткать, вязать, плести, шить и даже вышивать. Первые материалы выходили довольно грубыми, но это были еще и не настоящие нити, а жилы, чтобы скреплять ими шкуры и сделать что-то неестественное, зато подходящее для человеческого тела, или плетенные из веток вещи. Их можно сравнить с философским языком. Он все больше отходит от естественного, в нем появляются новые выражения и конструкции, но все-таки используются слова, а это не самые лучшие инструменты в очень многих ситуациях. Манипуляции с естественным языком трудно алгоритмизировать. Создание системы математического описания природы сродни появлению ткачества. Мы теперь не просто описываем мир с помощью естественных слов языка, а можем, образно говоря, соткать, сшить материю, которая идеально ляжет на сложную форму мира,

т. е. способны создать огромный гобелен, который не сделать из шкур и листьев.

Естественный язык основан на непосредственном опыте. Язык отражает основные особенности мышления человека (собственно, они развиваются вместе). Наш опыт определяется размерами человеческого тела, возможностями восприятия и обстоятельствами, например системой отсчета. Мы видим, что Солнце, Луна и звезды всходят и заходят, а себя ощущаем находящимися на неподвижной Земле (которая вовсе не кажется нам шаром, а тем более геоидом). Планеты смещаются на фоне звезд. Все обычные тела падают вниз (во времена Аристотеля не было еще шариков с гелием), и чем они тяжелее, тем быстрее достигают земли. Для нас очевидно, что, если сдвинуть предмет, он рано или поздно остановится. И т. д. и т. п. Теперь мы знаем, что мир устроен не совсем так, как нам представлялось. Но для этого понадобилось создать другой язык и научиться получать другой опыт. Это привело и к изменению типа мышления (по крайней мере, у некоторых).

Отличие математики от естественного языка в том, что она внезапно проявляется в реальном мире. Нельзя, бредя по неизведанным землям, вдруг понять: мы видим, что «дыр бул щыл»<sup>11</sup>, равно как и что «убеш щур скум». А вот осознать, что колебательные процессы удобно описывать в терминах комплексных переменных, — можно. Равно как и понять, что гравитацию и пространство-время лучше описывать тензорами<sup>12</sup>.

Прелесть математического языка в том, что математика активно развивается. Гораздо быстрее, чем естественные языки, поскольку они в основном откликаются на медленные и не столь уж многочисленные изменения во внешней среде (по крайней мере, именно такие изменения чаще остаются в языке, если сравнивать их с экстремальными поэтическими экспериментами). Даже быстрее, чем нужно. Математики как бы непрерывно свивают все новые и новые нити с разными свойствами, из которых можно делать ткани для самых необычных применений. При этом сами эти приложения еще неизвестны<sup>13</sup>.

Первые нити и ткани создавались из естественного сырья — льна, шерсти, хлопка... Но постепенно пришло время синтетических тканей, и некоторые из них имеют совершенно удивительные свойства. Нельзя

сделать космический скафандр из пальмовых волокон и ангорской шерсти. Даже на Земле постоянно нужны ткани с уникальными характеристиками, чтобы исследовать вулканы или нырять на большую глубину, заживлять раны или ставить спортивные рекорды. Для новых целей и новых миров нам нужны новые материалы. Для описания новых открытий нам также нужен новый язык.

Одежду из ткани, в отличие от одежды из листьев или шкур, можно точно подогнать по фигуре. Для этого есть два способа: или шить по мерке, или выбирать из множества вариантов готовой одежды. Первый лучше, но дороже и затратнее по времени. Используя наши методы описания природы, мы действуем похожим способом. Одна возможность состоит в выборе из уже готовых математических конструкций, тех, которые наилучшим образом подходят для решаемой задачи. Вторая — специально разрабатывать подходы применительно к конкретной проблеме. И то и другое позволяет не просто составить описание объектов или явлений на некотором языке, но и сопоставить описание, основанное на нашем понимании явлений (т. е. на некоей теории), с реальностью.

Скафандр долго изготавливается по индивидуальным меркам с учетом детальных анатомических особенностей конкретного космонавта. Защитные костюмы для работы с опасными вирусами и бактериями тщательно тестируются на предмет соответствия очень жестким требованиям. Также и в естественных науках мы можем добиваться очень точного количественного соответствия теоретического описания и экспериментальных данных, потому что математический метод позволяет представить наше описание в виде точно рассчитанных величин, и тогда не возникает проблем с различным толкованием, как это неизбежно происходит при использовании не столь четких средств выражения. Здесь хочется поспорить с известными строками Николая Гумилева: «А для низкой жизни были числа, / Как домашний, подъяремный скот, / Потому, что все оттенки смысла / Умное число передает».

Как раз словесное описание может содержать разные оттенки, за что мы его и любим. Численное (формульное) описание, наоборот, более ограничено. Это, скорее, очень специализированный инструмент, который

годится лишь для того, для чего создан. Зато в своей области применения он вне конкуренции.

Одежда (возможно, с момента своего появления) использовалась не только для того, чтобы сохранить тепло, укрыть от дождя и т. д. То, что мы носим, имеет еще и социальные, и эстетические функции. Ткани нужны не только для удовлетворения чисто утилитарных нужд, они используются и в искусстве. И это не только холст, на котором пишется картина. Ковры и гобелены, кружева и вышивка сами могут быть произведениями искусства. Напрашивается аналогия и с наукой, которая также нужна не только для практического применения. Точно так же, как работа ведущих модельеров состоит не том, чтобы одежда была теплее или долговечнее, ведущие математики и физики-теоретики чаще всего размышляют над задачами, далекими от сиюминутных бытовых нужд. Многие научные конференции напоминают показ авангардной моды тем, что демонстрируемые идеи покажутся очень странными для непосвященного слушателя. Его естественная реакция на дефиле: «Я в таком на улицу не выйду». В самом деле, эта одежда не предназначена для каждодневной носки. Но то, в чем мы ходим ежедневно, есть отголосок высокой моды. Причем, как правило, не самой современной. Так и в науке: многие высокотехнологичные вещи вокруг нас — результат научных исследований начала и середины XX века (а иногда и более ранних времен).

Образ нити возникает и тогда, когда мы вспоминаем о том, что математические методы позволяют добывать новое знание путем определенных манипуляций с формулами. Это относится и к естественным наукам, и к самой математике. Потянув за ниточку, мы можем распутать целый клубок загадок. Или иначе: брошенный на землю волшебный клубок начинает разматываться и ведет нас к цели. Именно это позволяет существовать теоретической физике, занимающейся явлениями, пока недоступными для наблюдений. Именно так было предсказано существование бозона Хиггса и кварков, позитрона и расширения вселенной. Забросив удочку или закинув сеть, никогда не знаешь, что выловишь. А ведь и для удочки, и для сетей нужны нити.



Люди придумали нити и ткани для создания одежды и других полезных (а иногда просто красивых) предметов. Точно так же и создание математического описания природы — не самоцель. Это метод, позволяющий выйти на принципиально другой уровень постижения явлений реального мира и нашего представления о нем. И главное, метод, прекрасно приспособленный для сравнения нашего понимания с объективной реальностью, что позволяет отбрасывать неправильные гипотезы. Мы можем проводить измерения (эксперименты, наблюдения), получая числа, а затем сопоставлять их с теми числами, которые дают нам наши теории, путем строго количественного сравнения. Также мы можем использовать саму математику для получения новых результатов, касающихся реального мира, потому что единая математическая структура в заметной степени соответствует единой структуре физической реальности.

Жизнь не стоит на месте. Теперь мы можем, минуя стадию нити, создавать ткани из искусственных материалов. Они начинают напоминать «одежду из баллончика» в романе Станислава Лема «Возвращение со звезд». Аналогом этого в современных научных методах может быть, например, численное моделирование, основанное на клеточных автоматах. Наш способ описания мира постоянно развивается, эволюционирует.

ЧАСТЬ II

---

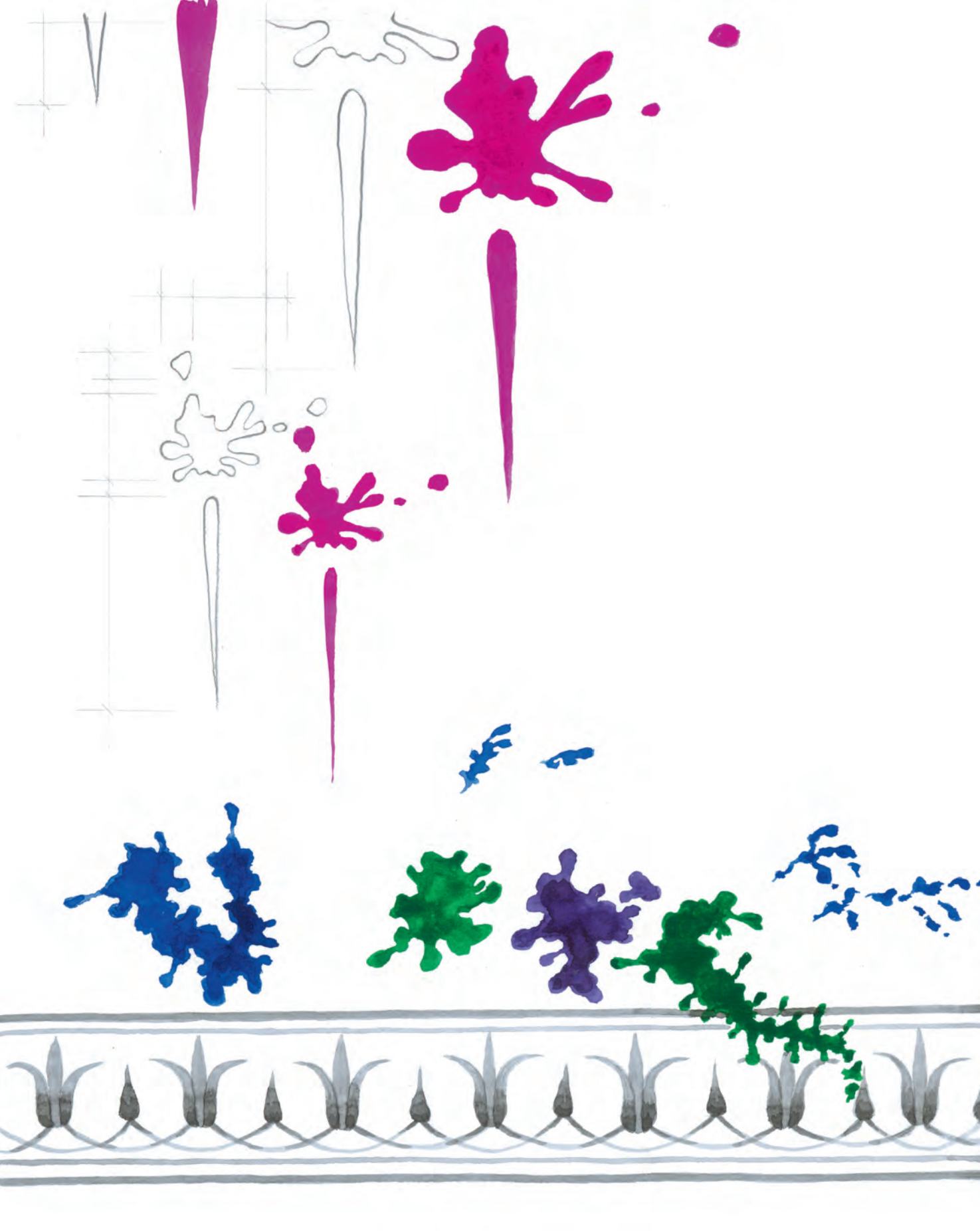
# ЭВОЛЮЦИЯ

**А.** В развитии теорий (например, физических) существует определенная преемственность, соседствующая с революционными изменениями парадигм.

**Б.** В ходе развития науки какие-то теории развиваются, иногда преобразаясь почти до неузнаваемости, а какие-то «вымирают». Если теория не «вымирает», то часто старые формы остаются в ходу для описания неэкстремальных явлений.

**В.** Эволюция науки далека от окончания. Во многом она только ускоряется. Есть еще много явлений, к которым нам надо «приспособить» наши теории.

**Г.** Физика, химия и математика на других планетах должны быть похожи на наши.





# «Эволюционное дерево формул»

Поразительным фактом является наличие связей между всеми существующими биологическими видами. У нас у всех есть единый общий предок — LUCA<sup>14</sup>. Разнообразие существующего животного мира объясняется эволюцией, которая не имеет долговременной цели. На каждом отдельном этапе «решается» конкретная задача. В результате возникает множество видов, занимающих всевозможные биологические ниши и связанных друг с другом. Иногда эволюция была относительно плавной, а иногда происходили революционные изменения, в том числе связанные с внешними катастрофами. При этом важно, что наряду с высокоразвитыми сложными организмами продолжают существовать и простейшие формы жизни, мало изменившиеся за сотни миллионов лет, поскольку и для них есть свои ниши, условия в которых менялись незначительно.

В развитии науки можно увидеть множество аналогий с биологической эволюцией. Разные теории создавались в разное время, когда экспериментальные данные находились на разном уровне. Целью в первую очередь было (и остается) объяснение конкретных, наблюдаемых сейчас фактов.

Именно так происходило совершенствование и развитие. При этом новые модели в той или иной степени строились на основе уже имеющихся. Хотя иногда случались и научные революции, значительно менявшие текущую парадигму. Так же, как в мире живых существ, мы видим, что более продвинутые теории, имеющие более широкую область применимости и учитывающие тонкие эффекты, часто не вытесняют полностью простые, но эффективные старые подходы. Так, мы продолжаем активно пользоваться простой ньютоновской физикой там, где эффекты теории относительности малы, т. е. ими можно пренебречь.

Рассмотрим, например, небесно-механические задачи. С некоторой долей уверенности можно утверждать, что именно с описания видимого движения Солнца, Луны и планет начинаются современные естественные науки.

Первые модели движения небесных тел были основаны на идеализированном качественном рассуждении о том, как должен быть устроен мир. Оказалось, что это не очень хорошая идея — задаваться жесткими парадигмами, вытекающими из общефилософских и/или идеологических источников. В частности, из-за такого подхода на эволюционном древе мы видим и тупиковые ветви. Геоцентрическая система мира — одна из них.

В оправдание древних надо сказать, что с чего-то надо было начинать, и это сейчас, имея за плечами сотни лет развития науки, нам легко их критиковать. Не исключено, что в чем-то мы и сами пока блуждаем в потемках. Но главное, что ранние схемы, описывающие поведение небесных тел, были кинематическими. Ничего не было известно о природе и характере тех сил, которые определяют их движение.

Тем не менее даже при таком подходе, детально анализируя большой комплекс подробных и точных наблюдательных данных<sup>15</sup>, да еще с использованием самой передовой на тот момент математики, Иоганн Кеплер смог показать, что планеты движутся по эллиптическим орбитам, а центральное тело находится не в центре, а в одном из фокусов эллипса. Итогом этого анализа явились три закона Кеплера.

Вывод этой троицы на основе понимания физических основ движения планет стал возможен только с появлением ньютоновского закона всемирного тяготения. Стало ясно, что движением планет управляет гравитация.

Уточнился и третий закон Кеплера. Теперь в него добавилась масса центрального тела и его спутника. Однако Кеплер не случайно смог описать данные наблюдений Тихо Браге без этих дополнительных членов уравнения. В Солнечной системе масса Солнца во много раз превосходит массу любой планеты и даже сумму их масс. Поэтому для оценок мы иногда продолжаем использовать третий закон Кеплера в оригинальной формулировке: квадраты периодов обращения относятся друг к другу, как кубы больших полуосей орбит<sup>16</sup>.

После появления теории Ньютона стало возможным решать разнообразные задачи о движении небесных тел, поскольку теперь можно было записать уравнения для действующих между ними сил и решать их, получая на выходе скорости и координаты, меняющиеся со временем. Разумеется, из-за взаимного влияния орбиты теперь не являются идеальными эллипсами<sup>17</sup>. А если комбинация масс и расстояний такова, что на интересующий нас объект сравнимые влияния оказывают хотя бы два тела (например, Солнце и Юпитер, если речь о какой-нибудь комете или астероиде), то траектория может стать очень сложной.

Анализ таких движений существенно способствовал эволюции физики и математики. Для решения актуальных задач разрабатывались новые методы, открывались новые закономерности. Это было стадией постепенной эволюции, но впереди ученый мир ждало очередное потрясение, сравнимое с созданием ньютоновской механики. Речь, конечно же, о появлении специальной (СТО) и общей (ОТО) теорий относительности.

В начале XX века с интервалом чуть более 10 лет появились две теории, созданные одним автором. Обе радикально изменили физику, а кроме того, дали сильнейшую мотивацию для развития сразу нескольких разделов математики.

Первая теория касалась кинематики при движении с большой скоростью. Что значит большой? Сравнимой со скоростью света. Если нас не интересует точность выше 1%, то мы можем пользоваться обычными формулами вплоть до скоростей порядка 10% от световой. Но чем ближе мы подбираемся к пределу, тем заметнее новые эффекты: замедление времени, изменение длины и др.



Специальная теория относительности быстро была принята физиками. За короткий срок удалось проверить ее предсказания, прекрасно совпавшие с данными измерений. Несмотря на всю свою парадоксальность (относительность одновременности, парадокс близнецов и т. д.), физическая теория верна. Давайте потратим немного времени на то, чтобы проговорить, что мы подразумеваем под словами «физическая теория верна».

Если верна СТО, значит ли это, что старая кинематика неверна? Не значит. Формулы Галилея прекрасно работают при низких скоростях. Конечно, с одной стороны, повышая точность измерений, мы *при любой* (не нулевой) скорости можем обнаружить отклонения, но тем не менее прекрасно решим задачу «из пункта Ц в пункт Ы вышел пешеход», пользуясь обычными формулами сложения скоростей. С другой стороны, если сейчас нам не удастся увидеть отклонений от СТО, то означает ли это, что мы никогда их не увидим? Не означает: может, да, а может, и нет. Для физической теории (в отличие от математической теоремы) важна область применимости. Если в математике всегда можно четко очертить условия, относящиеся к теореме, то в физике это удастся сделать только постфактум, когда обнаружено, что есть случаи, когда теория перестает работать. Тогда ее надо менять на более общую, в которой, в свою очередь, старая рассматривается как предельный случай<sup>18</sup> (например, при стремлении скорости к нулю в случае СТО и преобразований Галилея).

Общая теория относительности делает еще один шаг. По сути, это теория гравитации. Она существенно сложнее СТО, отчасти потому, что базируется на более сложных математических структурах. К ключевым свойствам ОТО можно отнести геометрическое описание гравитации и принцип эквивалентности, гласящий, что гравитационная и инертная масса равны друг другу. Он иллюстрируется известным эйнштейновским мысленным экспериментом с лифтом. Находясь в замкнутой коробке, невозможно определить, движется ли она с постоянным ускорением или покоится в однородном гравитационном поле.

Выводы СТО и ОТО радикально противоречат многому из того, что люди считают здравым смыслом, поскольку в процессе своей эволюции они не сталкивались с движением с околосветовыми скоростями

или сильными гравитационными полями, заметно искажающими движение света. Вероятно, это и к лучшему. Но в результате кажущаяся парадоксальность ряда выводов СТО и ОТО (а также многих других теорий) мешает многим как следует осознать суть этих построений, т. е. понять, как устроен мир. Для многих формулы в этом смысле решают проблему: если мы способны что-то подсчитать, то можно считать, что понимаем, как это работает. Вопрос об «истинном понимании» непростой, и мы к нему еще вернемся, а пока продолжим разговор об эволюции на примере последовательности физических теорий.

Итак, ОТО — сложная теория. В ней трудно разобраться, и ее непросто применять в расчетах. Но это не беда, если вам не нужна высокая точность или вы не рассматриваете сильные гравитационные поля. Даже в сильных полях можно придумывать какие-то аппроксимации, облегчающие жизнь (например, знаменитый потенциал Пачинского — Вииты<sup>19</sup>). Конечно, рассчитывая движение межпланетных станций в Солнечной системе и анализируя телеметрию с них, приходится учитывать эффекты ОТО. Тем не менее огромное количество небесно-механических задач можно рассматривать, игнорируя дополнительные осложнения, связанные с тонкостями общей теории относительности. Расчеты поведения колец Сатурна или анализ непростой динамики систем спутников планет-гигантов часто проводят в рамках ньютоновской механики. В этих случаях эффекты СТО и ОТО достаточно малы, чтобы ими можно было пренебречь.

Точно так же дело обстоит с учетом квантовых эффектов. Они малы не только в обычной жизни, но и вообще в макроскопическом мире<sup>20</sup>. Расчеты гравитационно-волновых сигналов при слияниях черных дыр требуют детального учета эффектов ОТО, но квантовыми эффектами можно пренебрегать. Зато они станут важны, если вы анализируете данные с детектора — антенн LIGO или VIRGO. Там работают лазеры, и важны так называемый квантовый шум и многие другие эффекты микромира. Мы описываем расширение вселенной в рамках ОТО без квантовых эффектов, но, чтобы понять, как сформировались изначальные флуктуации плотности, из которых затем возникли первые звезды, галактики

и их скопления, а в конечном счете и мы с вами, необходимы квантовые процессы на стадии инфляции и выхода из нее. Какие-то ситуации мы вообще не можем точно рассчитать (например, финальные стадии испарения черных дыр), потому что наши теории еще недостаточно проэволюционировали, чтобы быть к этому готовыми. Они пока не включают совместное описание гравитации и квантового мира.

Если мы говорим о зарождении жизни и ее эволюции, то интереснейшим вопросом является такой: возможны ли принципиально иные формы жизни? Земная биология основана на углероде и воде в качестве универсального растворителя. Возможна ли иная биохимия? Пока люди не знают ответа. Лишь на нашей планете мы видим примеры существования живых существ. Теоретические исследования и лабораторные эксперименты не позволяют дать надежный ответ о возможности альтернативной биохимии, а тем более о самозарождении жизни на ее основе и о распространенности таких форм<sup>21</sup>. Вероятно, эта проблема будет решена не в ходе теоретического моделирования или лабораторных исследований, а в результате прямых поисков вне Земли. Не исключено, что уже через 20–30 лет ученые столкнутся с другими формами живых существ, даже, кто знает, в Солнечной системе, где-нибудь на спутниках больших планет. В ближайшие два-три десятилетия планируется осуществить соответствующие изыскания с помощью автоматических межпланетных станций на Европе — спутнике Юпитера, и Энцеладе — спутнике Сатурна.

Однако есть основания полагать, что жизнь, основанная на углероде и воде, наиболее часто должна встречаться и на других планетах. Это связано и с распространенностью воды по сравнению с альтернативными вариантами жидкостей, которые могли бы выступить в роли растворителей, и с особенностями углерода с точки зрения образования химических связей<sup>22</sup>. Молекула воды состоит из водорода, первого по распространенности элемента во вселенной, и кислорода — он стоит на третьем месте (при этом занимающий второе место гелий является инертным газом и молекулы практически не образует). Поэтому вода, что подтверждается и наблюдениями, — более распространенное вещество в сравнении

с другими возможными растворителями, такими как аммиак, метанол и метан. Хотя идея замены углерода на кремний в качестве «элемента жизни» и популярна у фантастов, при научном анализе проблемы ученые сталкиваются с трудностями. Кроме того, что кремний — существенно более редкий элемент, его преимущества перед углеродом начинают проявляться при столь экзотических условиях (например, высоких температурах и/или высоком давлении), что они сами по себе могут стать препятствием на пути развития живых организмов.

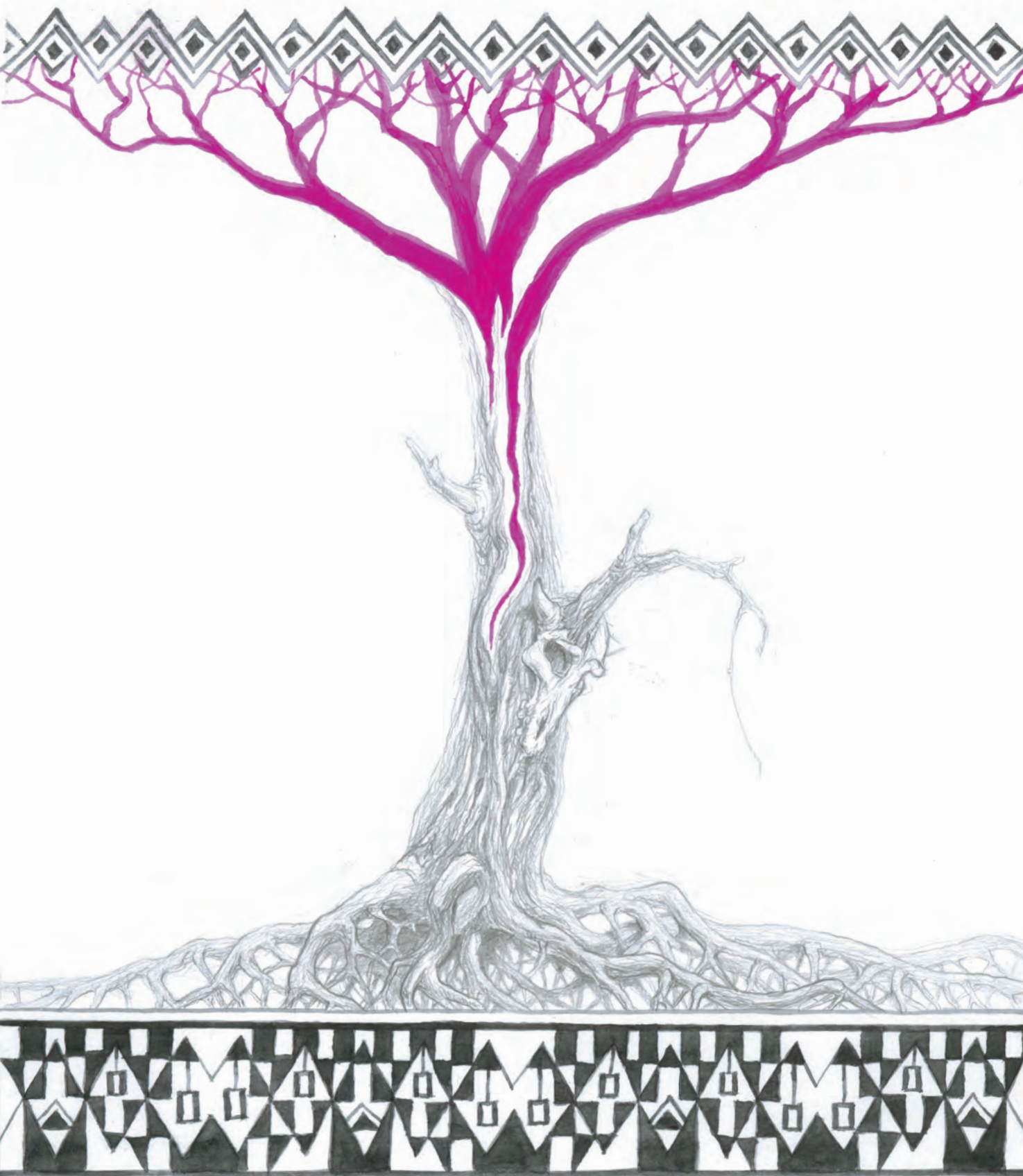
Сейчас достоверно известно о нескольких тысячах экзопланет — планет, вращающихся вокруг других звезд<sup>23</sup>. Активно обсуждаются поиски биомаркеров — веществ, свидетельствующих о наличии биосферы. В ближайшие годы это станет возможным благодаря работе новых космических инфракрасных телескопов, а также гигантских наземных оптических инструментов. Анализ спектральных свойств атмосфер экзопланет позволит выявить присутствие биосфер. Но, вероятнее всего, это будет жизнь, качественно похожая на земную, т. е. основанная на углероде и воде.

Возвращаясь к нашей аналогии, можно сказать, что и наука в других мирах должна быть похожа на существующую у нас. Физики, химики, математики с разных планет должны найти общий язык, поскольку они описывают одну Вселенную, а эффективно это можно делать, видимо, одним способом. По крайней мере, на нашем уровне развития.

**А.** Кажущиеся иногда чудесными возможности современной математики и теоретической физики во многом объясняются длительным развитием этих наук, множеством попыток придумать те или иные методы и конструкции, из которых лишь немногие вошли в современный арсенал науки, выдержав все проверки.

**Б.** Развитие математики началось с практических и достаточно простых по современным меркам задач.

**В.** В ходе эволюции науки многие физические теории оказались тупиковыми и в итоге стали достоянием «хранилищ научных окаменелостей».





# «Эволюция, детка»

Мы уже упоминали о «непостижимой эффективности математики». Некоторые ситуации выглядят абсолютно чудесными<sup>24</sup>. В XIX веке математики для своих надобностей (я бы не побоялся сказать: «Во время своей игры в бисер») придумали тензоры. А потом Марсель Гроссман, который как раз и был математиком, вовремя рассказал о них Эйнштейну. В результате получилась общая теория относительности. Разве это не чудо, что к тому моменту, когда Эйнштейн (а также, например, Давид Гильберт) размышлял о природе гравитации, у математиков был готов весь необходимый инструментарий? Иначе говоря, не просто были придуманы «какие-то тензоры», а разработаны методы работы с ними, доказаны соответствующие теоремы, под все подведен надежный базис. В 1912 г., когда произошел важный обмен идеями между Гроссманом<sup>25</sup> и Эйнштейном, тензоры уже стали неотъемлемой частью большой математики и вся надежность и достоверность этой науки были в распоряжении исследователей гравитации (о которой математики наверняка обычно не задумываются, принимая ее как должное и/или неизбежное).

Кажущаяся «магия» математики во многом связана с тем, что чаще всего люди видят лишь конечный результат. В самых разных областях и ситуациях,



если мы не знаем о длительном процессе развития, об огромных усилиях, о пробах и ошибках, о множестве отброшенных вариантов, то удивленно восклицаем: «Как это у них получается!» Например, одежда из ткани, которая не горит, не протыкается ножом, но при этом легкая, удобная и теплая, поразила бы древнего человека. С его точки зрения, это практически чудо, но на самом деле — результат долгого, постепенного развития технологии. Это можно было бы ему продемонстрировать, начав с того, как делается нить из шерсти или хлопка, затем объяснить, как из этого ткется ткань, потом показать процесс создания искусственных нитей и т. д. и т. п.

Нелишне заметить, что подобные рассуждения верны не только для развития технологии и науки, но и для высокоорганизованных социально-политических структур. Устойчивые демократические общества пришли к такому состоянию в результате продолжительного и зачастую весьма болезненного развития, через периоды напряженной работы общества в целом, перемежаемые революциями и другими потрясениями.

Длительное и хотя бы относительно устойчивое развитие может приводить к удивительным по сложности результатам, если оценивать их исходя из начального состояния. «Чудеса» современной математики в этом смысле подобны «чуду глаза», чему мы посвятим отдельный разговор. Неоднократно сложность зрительного аппарата представляли в качестве аргумента против эволюции: «Как мог сразу возникнуть такой сложный орган?» Но глаз не возник одномоментно. Он — продукт длительной естественной эволюции *без конечной цели*, начавшейся с очень простых «устройств». В эволюционном процессе при каждом шаге обычно происходят не такие уж большие усовершенствования, призванные решить локальные проблемы.

Похожим образом развиваются и математика, и области ее применения в науке. Стартовав с простых (по современным меркам) и понятных задач, нередко носивших сугубо практический характер, математика за два тысячелетия достигла уровня, на котором лишь единицы узких специалистов могут реально разобраться в тех или иных самых современных результатах в своей области. Древние греки, начавшие писать первые уравнения, не думали о развитии математического аппарата для теории струн.

При этом в биологической эволюции бывают и большие скачки, сопровождаемые массовым вымиранием одних видов и появлением или бурным развитием других. Такие события происходят и в развитии науки, в частности математики и физики.

Примеров «вымерших» теорий и моделей очень много. В физике это и уже упоминавшаяся выше геоцентрическая система мира, и теплород, и теория эфира. В математике можно вспомнить задачу о квадратуре круга, неразрешимость которой была доказана только в конце XIX века, и другие подобные проблемы, над решением которых бились веками (иногда получая попутно важные результаты). В борьбе конкурирующих моделей в естественных науках выживает более приспособленная — та, что лучше описывает реальный мир. В сегодняшней науке мы видим противостояние различных подходов к созданию квантовой гравитации, разных моделей ранней вселенной. Идут споры о необходимости гипотезы слабовзаимодействующих элементарных частиц, не входящих в так называемую Стандартную модель (т. е. гипотезы о темном веществе), для объяснения большого комплекса астрофизических данных. Продолжаются дискуссии о природе черных дыр — о процессах вблизи горизонта и под ним. Почти все из обсуждающихся моделей окажутся ошибочными, а потому со временем будут забыты. То же самое верно и для менее глобальных вопросов. Вообще, можно сказать, что активная научная деятельность существует, только если есть соперничество различных подходов к описанию или объяснению каких-то явлений. В этом смысле наука всегда находится в стадии становления. Она существует в относительно тонком переходном слое, отделяющем познанное от непознанного: впереди — темный лес, позади — учебники.

Длительный эволюционный процесс нашего понимания мира подарил нам ряд удивительных открытий. Среди кажущихся парадоксальными выводов в духе «Неужели такое может быть?!» можно выделить корпускулярно-волновой дуализм. Чтобы прийти к заключению, что у элементарных частиц проявляются волновые свойства, а некоторые волны в ряде процессов ведут себя как поток частиц, пришлось проделать долгий путь.

«Из точки А в точку Б вышел... вышла... вышло...» Что может переместиться из одной точки в другую? Во-первых, объект, предмет. Маленький объект — частица, кусочек вещества. Во-вторых, волна. Вот вы в полный штиль ловите рыбу, смотрите на поплавок и бросаете подкормку. Поплавок начинает колебаться, но вы не напрягаетесь, так как понимаете, что это до него дошла волна, в данном случае продольно-поперечная. Бывают чисто поперечные волны, как при колебаниях струны, или продольные, например звуковые. Но это все равно волны.

В XVII веке начали активно изучать волновые процессы и параллельно начался спор о природе света: то ли это поток частиц, то ли волны. Мнения ученых разделились: Ньютон считал, что частицы, а Франческо Гримальди, открывший дифракцию и интерференцию, — что волны.

Дифракция, по сути, сводится к тому, что волна может огибать препятствие, а интерференция — к тому, что волны могут складываться или вычитаться так, что сигнал оказывается усиленным или ослабленным. Это довольно легко наблюдать на волнах, появляющихся на воде. Оказалось, что свет ведет себя похожим образом. В XIX веке сложилось четкое понимание, что свет — это поток поперечных волн, что было закреплено в теории Максвелла. Однако к концу того же века стали накапливаться данные, не вписывающиеся в волновое описание света. Это были, во-первых, фотоэффект, а во-вторых — так называемая ультрафиолетовая катастрофа.

Теорию фотоэффекта построил Эйнштейн и именно за это получил Нобелевскую премию. Парадокс в первую очередь состоял в том, что при освещении некоторых материалов даже незначительным потоком коротковолнового излучения они начинают испускать электроны, а если светить мощным потоком излучения с большой длиной волны, то эффекта нет. Это странно, ведь во втором случае мы передаем образцу гораздо больше энергии. Кроме того, если измерить индивидуальную энергию вылетающих электронов, то оказывается, что она растет не при увеличении мощности потока излучения, а с уменьшением длины волны  $\lambda$  (т.е. с ростом частоты электромагнитных волн  $\nu = c / \lambda$ , где  $c$  — скорость света).

Загадку удалось разгадать, предположив, что свет представляет собой поток частиц — фотонов. Таким образом, энергия излучения передается электрону при индивидуальном взаимодействии двух частиц. Если свет имеет большую длину волны (т. е. низкую частоту,  $\lambda\nu = c$ ), то энергия фотонов ниже ( $E = h\nu$ , здесь  $h$  — постоянная Планка). Поэтому, несмотря на большую мощность потока (много фотонов), каждый из них несет маленькую энергию и не может оказать сильного воздействия на электрон: ниже некоторой энергии вообще не может его вырвать, а если вырывает, то не может придать большую энергию этой частице.

Парадокс с фотоэффектом возник раньше, чем была осознана проблема ультрафиолетовой катастрофы, но его удалось разрешить на несколько лет позже. В самом конце XIX века, в 1900 г., Макс Планк смог объяснить, почему формула Рэлея — Джинса, описывающая распределение энергии излучения в спектре так называемого абсолютно черного тела (им может быть, с некоторой точностью, нагретый металлический шар или плотное облако газа), дает «безумный» (катастрофический) результат для коротких (ультрафиолетовых) волн. Гипотеза Планка состояла в том, что свет может испускаться лишь порциями — квантами. Энергия одного кванта пропорциональна частоте, а коэффициент пропорциональности впоследствии назвали постоянной Планка. Отметим, что это одна из трех самых важных констант в современной физике (две другие — это скорость света и гравитационная постоянная).

Теперь возник другой парадокс, с которым нам жить: свет одновременно и волна, и частица. При этом нельзя представлять себе излучение как поток неделимых частиц: можно поглотить порцию электромагнитных волн одной частоты и переизлучить на другой частоте. Разумеется, число квантов до и после переизлучения будет разным, если сохраняется полная энергия квантов. Иначе говоря, электромагнитная волна как таковая не имеет какой-то минимальной порции. Эйнштейн пояснял его так: «Если пиво всегда продают в бутылках, содержащих пинту, отсюда вовсе не следует, что пиво состоит из неделимых частей, равных пинте».

У электромагнитных волн высокой частоты (гамма- и рентгеновский диапазоны) в большей степени проявляются свойства частиц, а в радиодиапазоне, наоборот, заметнее волновые свойства. Например, в астрономии детекторы излучения в разных диапазонах спектра работают по принципиально разным методикам. В радиодиапазоне, где длина волны велика, приборы регистрируют именно волны (т. е. колебания электромагнитного поля), а детекторы гамма-квантов похожи на детекторы элементарных частиц. Однако в случае и малой, и большой длины волны можно поставить эксперименты, где будут проявляться как корпускулярные, так и волновые свойства<sup>26</sup>. Таким образом, «двойственная» природа света стала надежно подтвержденным фактом.

Думаете, на этом все закончилось? Вовсе нет —ягодки были еще впереди. Если про свет со времен Ньютона и Гримальди спорили, то про электроны (а заодно и другие частицы) — нет. Это же *частицы!* Оказалось, тоже не совсем. Эксперименты показали, что электроны также демонстрируют дифракцию и интерференцию, равно как и другие элементарные частицы. И даже не совсем элементарные. Современные эксперименты позволяют увидеть волновые свойства даже у довольно крупных молекул<sup>27</sup>. А в 2018 г. волновые свойства удалось непосредственно продемонстрировать и у частиц антивещества<sup>28</sup>.

Такие «волны материи» называют волнами де Бройля в честь Луи де Бройля, впервые построившего соответствующую теорию. В общем и целом она заключается в том, что если две частицы имеют одинаковые скорости, то чем больше масса частицы, тем меньше длина соответствующей ей волны. Соответственно, тем сложнее наблюдать волновые свойства таких объектов. Если масса частицы равна так называемой массе Планка (примерно 0,00001 грамма), то соответствующая ей длина волны равна так называемой планковской длине (около  $10^{-33}$  см)<sup>29</sup>.

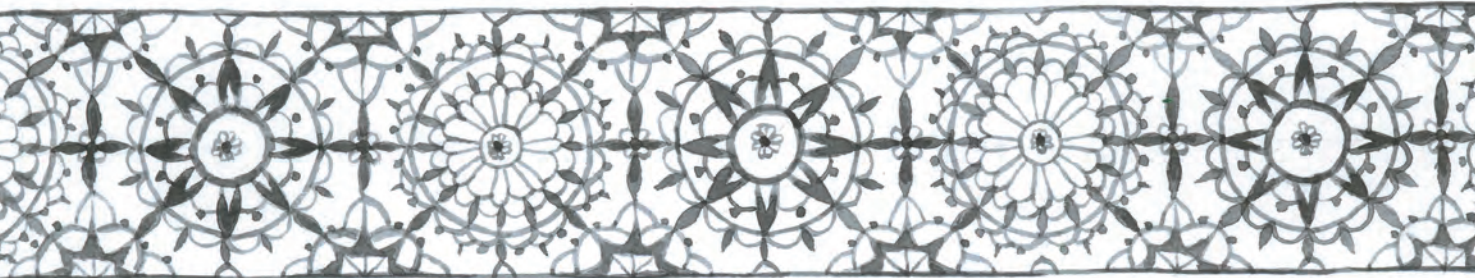
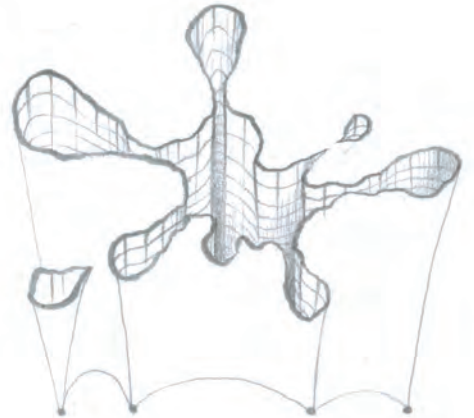
Интересно представить себе, как мы переносимся в XVII век, усаживаем за один стол Ньютона и Гримальди и объясняем им (видимо, на латыни, придется брать с собой продвинутого гуманитария в качестве переводчика), что оба они правы. Конечно, педант вспомнит, что в год

смерти Гримальди (1663) Ньютону было всего 20 лет, но это не остановит наш полет фантазии.

Описание поведения света и частиц существенно усложнилось за сотни лет, разделяющих времена Рене Декарта, впервые объяснившего радугу, и Эрвина Шрёдингера, заложившего основы волновой квантовой механики. Готов поспорить, что прогресс в этой области может заметить даже неспециалист, просто на глазок сравнив публикации XVII и XX веков.

**А.** По мере развития математики и теоретической физики уравнения становятся сложнее: в физике появляются новые процессы и явления (включая гипотетические), нуждающиеся в описании, а в математике возникают новые методы и конструкции.

**Б.** Физические модели явлений становятся со временем все сложнее, поскольку описание становится более детальным и комплексным: в него включаются все новые эффекты и все более мелкие детали.







# Возрастание сложности

Одной из самых ярких иллюстраций усложнения науки является исчезновение ученых-универсалов. Теперь трудно не то что работать в нескольких разных областях, но даже внутри своей науки (физики, биологии, химии, математики, да даже астрофизики) практически невозможно разбираться на профессиональном уровне в очень широком круге проблем. Как у животных по мере совершенствования в ходе эволюции нередко сужаются ареалы обитания, так и ученые занимают свои небольшие экологические ниши. И это очевидная общая тенденция. Раньше один механик мог разобраться в любой проблеме в гоночной машине, теперь же специалист по коробке передач вряд ли сможет исправить сбой в бортовом компьютере болида «Формулы-1». Раньше один врач лечил от всех болезней, а теперь для каждого органа нужен свой доктор (а то и не один).

Сравнив научные приборы начала и конца XX века, любой сделает вывод о том, что прогресс есть, причем довольно стремительный. Тут даже не надо быть специалистом. Посмотрите на первый ускоритель, построенный в начале 1930-х гг. и помещавшийся на столе, а теперь сравните его с... — читатель ждет уже продолжения «с Большим адронным коллайдером». Ну так с ним и сравните! Посмотрите на первые радиотелескопы (тоже,

кстати, 1930-х гг.) и на систему ALMA<sup>30</sup>, на телескоп Галилея и JWST<sup>31</sup>. А способен ли неспециалист заметить прогресс, глядя только на уравнения?

Можно выделить по крайней мере три причины, почему более поздние научные публикации с формулами будут отличаться от ранних в сторону глазом заметного усложнения, а также одну причину для обратного эффекта. Во-первых, появляются новые сферы исследований. Во-вторых, в уже существовавших областях начинает использоваться новый матаппарат. В-третьих, даже в рамках одних и тех же областей и одних и тех же подходов с точки зрения математики модели становятся детальнее, т. е. в уравнениях появляются дополнительные члены. И так, возникают уравнения про что-то новое, новые типы уравнений, новые члены в уравнениях.

Если мы возьмем университетские учебники по физике за несколько сотен лет, то, конечно же, заметим существенную разницу из-за того, что постоянно появляются новые разделы, новые темы. Соответственно, растет объем учебников и/или увеличивается их количество. В учебниках XIX века мы не увидим уравнений общей теории относительности и квантовой механики. В учебниках XVIII века нет уравнений электродинамики. В XVII веке и более ранних веках будет, в общем-то, только механика в разных ее проявлениях.

Чтобы заметить эту разницу, не надо разбираться в том, что означают уравнения. Надо просто быть внимательным. Новые области появляются в первую очередь благодаря развитию экспериментальной физики. Теоретикам приходится описывать новые грани реальности, а для этого используют другие математические выражения с другой структурой, потому что старые не подходят. И выглядят они иначе.

Можно провести такой эксперимент. Пригласить давнего выпускника физического факультета, который не имел никакой связи с наукой с момента окончания университета, и начать показывать ему на карточках разные уравнения. Причем все их писать с ошибками (плюс поменять на минус, оператор дивергенции заменить на лапласиан, синус — на косинус, вторую степень — на третью и т. д.). Наверняка тем не менее человек будет угадывать: «Вот это — уравнения Максвелла, это — уравнение Шрёдингера» и т. д., потому что он запомнил их общий вид. Соответственно,

появление новых «формульных образов» можно заметить, листая учебники физики разных лет.

Перейдем ко второму пункту программы. Как мы уже неоднократно отмечали, часто оказывается, что у математиков есть большой набор методов, пока невостробованных физикой. Последняя по мере своего развития обращается к этим методам. Условно говоря, экспериментаторы что-то открыли, теоретик пытается это описать, но у него не хватает «слов», и он идет к математикам. В результате в физических статьях появляются гиперболические синусы и косинусы, матрицы, тензоры, какие-то элементы топологии, что-то из теории групп и т. д.

Особая статья здесь — новые статистические методы и новые методы работы с данными. Оказавшийся на самом переднем крае науки исследователь всегда сталкивается с тем, что сигнал лишь чуть-чуть сильнее шума. Причем сам шум может иметь очень необычные свойства. Данных всегда не хватает: экспериментальных точек мало. Чтобы получить необходимую информацию для надежных выводов, надо не просто провести эксперимент или наблюдения, но и обеспечить тщательную обработку данных, выжав из них все, что только можно (и при этом не выжать больше — не получить то, чего в данных нет, а хочется). Для этого ученые постоянно создают все более продвинутые методы, и уравнения, с ними связанные, выглядят по-новому, что тоже можно заметить, просматривая публикации.

В современной науке яркие примеры, в которых именно сложные математические методы помогают что-то рассмотреть, связаны с поиском гравитационных волн и получением прямых изображений экзопланет. Установки LIGO — первый пример настоящих больших данных (big data) в астрофизике. Принимаемый сигнал очень слабый, наблюдениям мешают самые разные шумы — сейсмические, тепловые, квантовые, поэтому с очень высокой частотой (ведь принимается сигнал с частотой до пары килогерц) снимаются десятки тысяч параметров разных узлов установки. Все эти данные надо учесть при анализе. Не исключено, что важным вкладом гравитационно-волновых обсерваторий в народное хозяйство станет именно разработка алгоритмов работы с большим объемом зашумленных данных.

В чем-то аналогична ситуация с наблюдениями экзопланет<sup>32</sup>. Сейчас более чем для десятка из них получены прямые изображения. Это не просто «щелк — и фотография». Планета — очень слабый источник, расположенный рядом с яркой звездой. Угловое расстояние между планетой и звездой составляет в лучшем случае сотые доли угловой секунды<sup>33</sup>. Обычно удается рассмотреть лишь молодые гигантские планеты, расположенные от своих звезд заметно дальше, чем Юпитер от Солнца. Эти планеты, продолжая сжиматься, светятся не за счет отраженного излучения звезды, а за счет собственного излучения, приходящегося в основном на инфракрасный диапазон спектра, в котором сама звезда уже не такая яркая, поскольку максимум в спектре ее излучения приходится на видимый диапазон. Сжатие позволяет превратить часть гравитационной потенциальной энергии в тепло. Поэтому внешние слои таких планет достаточно горячи, их температура (сотни, иногда даже больше тысячи Кельвин) намного выше, чем, например, у Юпитера, которому более 4,5 млрд лет. Пока система молода, звезда может быть окружена так называемым остаточным, или осколочным, (debris) пылевым диском, который, так же как и планеты, излучает в ИК-диапазоне спектра, давая тем самым лишнюю «засветку». Таким образом, даже в случае гигантских молодых планет, расположенных в десятках астрономических единиц от своих звезд, выделение их света является крайне сложной задачей, для решения которой приходится применять математически сложные методы обработки цифровых изображений, убирая свет звезды и шумы.

Прошли те времена, когда фраза «астрономы увидели» точно соответствовала бы действительности. Теперь она обычно подразумевает «астрономы провели наблюдения и в результате многомесячного процесса сложной обработки данных с использованием новейших алгоритмов обработки сильно зашумленной информации смогли выделить слабый, но статистически значимый сигнал». Если бы постоянно не разрабатывались новые методы анализа данных, то многие открытия просто не состоялись бы, несмотря на гигантские телескопы, большие ПЗС-матрицы и оптоволоконные системы.

При расширении описания на новые области исследования, а также введении новых математических методов не только добавляются новые уравнения и появляются элементы с новой структурой («синтаксисом»), но и расширяется «алфавит». Для обозначения новых величин используются новые символы или их комбинации. Это также может бросаться в глаза при сравнении научных текстов.

Наконец, третий упомянутый нами пункт связан не с появлением новых уравнений, а с модификацией уже имеющихся. Даже если революционных прорывов нет, новая математика не понадобилась или не подошла, все равно в новых статьях формулы будут немного другими — скорее всего, длиннее, так как авторы расширяют модели, включая в них новые эффекты, известные, но не учтенные ранее. В уравнениях появляются новые слагаемые, сомножители и коэффициенты. Скажем, решали уравнение для движения астероида вокруг Солнца и добавили влияние Юпитера. А потом и Сатурна, Марса... Изучали аккрецию на одиночные нейтронные звезды, пренебрегая неоднородностями в межзвездной среде, а потом, добавив их, сделали модель детальнее.

Можно взять научные статьи по одной тематике, например небесной механике, и посмотреть, как они менялись на протяжении веков. В «Математических началах» Ньютона формул на удивление мало, там больше слов и рисунков<sup>34</sup>. Оттолкнувшись от его идей, несколько поколений европейских ученых активно развивали эту область. Поскольку в течение долгого времени не появлялось существенно новых подходов, ученые демонстрировали все бóльшую и бóльшую изошренность в рамках одной и той же парадигмы. Это приводило к росту визуальной сложности используемого аппарата, особенно с точки зрения непрофессионала. Можно взять в качестве примера сложные небесно-механические расчеты середины XIX века, например книгу Шарля-Эжена Делоне о движении Луны<sup>35</sup>. Фактически вся книга — лишь пара формул. Вроде бы сложно и накручено, но по сути это только ньютоновская механика. Эдакий аналог стимпанка: паровоз, похожий на звездолет.

Развитие какой-нибудь области теоретической физики может приводить и к компактификации записи. Собственно, ученые специально тратят

значительные усилия, чтобы упростить себе жизнь, придумав новые методы записи уравнений или расчетов. Введение лагранжианов и гамильтонианов позволило сделать многие рассуждения и операции в классической механике существенно проще, прозрачнее. Изобретение фейнмановских диаграмм облегчило жизнь физикам-теоретикам в области изучения элементарных частиц<sup>36</sup>. Добившись более рационального способа манипуляций с уравнениями в одной области, можно позволить себе потратить освободившиеся интеллектуальные ресурсы на интеграцию разных физических процессов в едином подходе к описанию какого-нибудь феномена.

При развитии моделей возможно их усложнение путем добавления эффектов из других областей, т. е. происходит некий синтез разных частей физики в приложении к одному явлению. Скажем, на первом этапе, изучая поведение плазмы в астрофизическом источнике, пренебрегли магнитными полями, ограничившись гидродинамикой и ньютоновской механикой. А затем добавили магнитные поля, учли конечную проводимость плазмы. Потом стали учитывать и реакции в плазме. Модель становится все детальнее, и число уравнений растет или же увеличивается их длина.

Хорошим примером возрастания сложности моделей могут служить расчеты вспышек сверхновых. Напомним, что выделяют два основных типа сверхновых: коллапс ядра массивной звезды (типы Ib, Ic и II) и термоядерный взрыв сверхкритического белого карлика (тип Ia)<sup>37</sup>. Чтобы не усложнять изложение, рассмотрим только сверхновые, связанные с коллапсом.

Он начинается, когда давление в ядре не может больше противостоять гравитации. Данная стадия наступает, если в звездных недрах исчерпаны возможности для дальнейших термоядерных реакций, так что обычно коллапсирует железное ядро, окруженное оболочками с преобладанием других элементов (кремния, кислорода и т. д.), — так называемая луковичная структура звезды. Если быстрое сжатие не остановится\*, то образуется черная дыра, и никакого мощного энерговыделения не будет.

\* В самой центральной части ядра звезды коллапс на крайне короткое время останавливается при достижении ядерной плотности даже в случае формирования черной дыры. Но затем очень быстро натекающее из внешних слоев ядра вещество довольно скоро приводит к окончательному коллапсу.

Однако чаще всего масса ядра для этого недостаточна, а потому коллапс резко прекращается. Это происходит, когда плотность вещества в сжимающемся объеме достигает плотности атомного ядра. Образуется компактный плотный объект — протонейтронная звезда, а снаружи на него падают внешние слои звездного ядра. В результате за короткое время — менее секунды — выделяется колоссальная кинетическая энергия схлопывающегося ядра и падающих на него оболочек. Это и приводит в конечном счете к взрыву сверхновой, если образовавшаяся ударная волна сможет пробиться через окружающее вещество наружу.

Основная часть энергии уносится нейтрино. Заметная доля перейдет в кинетическую энергию сбрасываемого вещества. Наконец, какая-то небольшая часть будет испущена в виде электромагнитного излучения. И этой «какой-то небольшой части» хватит, чтобы вспышка превзошла по блеску все звезды не слишком крупной галактики.

Физика этого события сложна и многогранна. До сих пор мы не можем с уверенностью сказать, что хорошо понимаем процесс взрыва сверхновой. Несмотря на полвека исследований, до сих пор нет достаточно надежной и полной трехмерной компьютерной модели, в которой удалось бы получить разлет вещества без дополнительных предположений. Не хватает совсем чуть-чуть энергии ударной волны, и идет напряженная работа в попытках раскрыть эту загадку.

На протяжении десятилетий модели сверхновых постоянно совершенствовались. Постепенно в расчеты добавлялись всё новые и новые ингредиенты. Первые расчеты начали проводить Стирлинг Колгейт (Stirling Colgate) и его соавторы во второй половине 1960-х гг. Вспышки сверхновых наблюдались с давних времен, но лишь в 1930-е гг. начали вырисовываться основные черты этого явления с наблюдательной точки зрения. К началу 1960-х стало ясно, что коллапс (возможно, сопровождаемый выделением энергии в термоядерных реакциях) способен обеспечить нужную энергетику.

Модель Колгейта и Уайта (Richard White), опубликованная в 1966 г., включала в себя гидродинамику, базовые предположения, касающиеся ядерной физики, и простейшие оценки переноса нейтрино (замечу,



что Колгейт, как и многие первые исследователи сверхновых, в том числе и в нашей стране, до того как пришел в астрофизику, занимался разработкой термоядерного оружия; причина проста: у этих задач много общего в смысле физики процессов). Несмотря на то что статья была настоящим прорывом и оказала большое влияние на развитие сценариев взрывов сверхновых (это, в частности, выражается и в том, что сейчас на нее есть несколько сотен ссылок из других, более поздних, научных публикаций), модель была слишком простой (отмечу, что при этом в статье мы обнаруживаем более сотни только пронумерованных формул!), чтобы дать адекватное описание феномена.

В ходе дальнейших исследований многочисленные авторы, входящие в разные исследовательские группы по всему миру (изучение сверхновых — очень интернациональная область астрофизики), развивали и совершенствовали подходы к моделированию взрыва. Так, группа Геннадия Бисноватого-Когана в Москве сделала ставку на учет процессов, связанных с вращением и сильными магнитными полями, образующимися в результате сжатия ядра. Энергия вращения и магнитного поля растет при коллапсе за счет гравитационной потенциальной энергии. Важно, что значительную ее часть можно затем передать оболочке, а именно это нужно, чтобы получить взрыв. Однако физика резко усложняется, если к и без того непростой гидродинамике и переносу нейтрино добавлять магнитную гидродинамику, да еще с быстрым вращением, что требует в идеале трехмерных расчетов (первые модели сверхновых были, по сути, одномерными, т. е. рассматривался сферически-симметричный случай), а они не только технически сложнее с точки зрения алгоритмизации и программирования, но и требуют гораздо более мощных компьютеров для вычислений.

Важным этапом в развитии моделей сверхновых стал детальный учет эффектов общей теории относительности. Они, безусловно, становятся важны в задаче о коллапсе, так как в центре взрыва находится компактный массивный объект. Оказалось, что эффекты ОТО помогают взрыву. Это было хорошей новостью. Плохая заключалась в том, что их недостаточно, чтобы решить все проблемы.

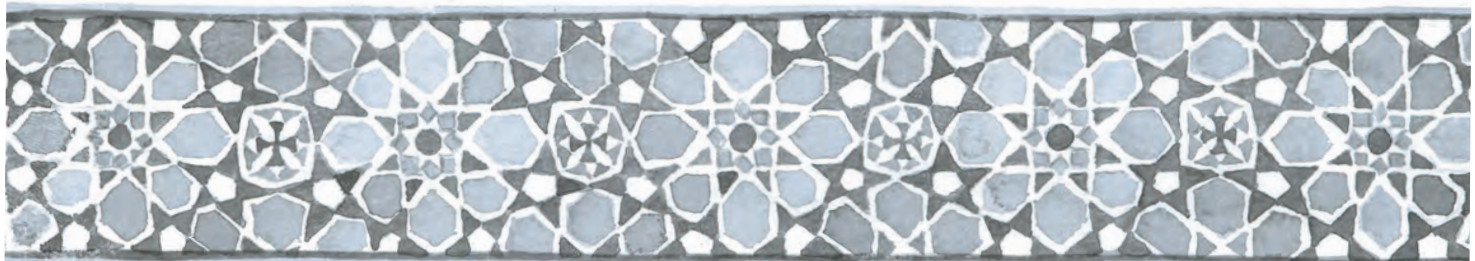
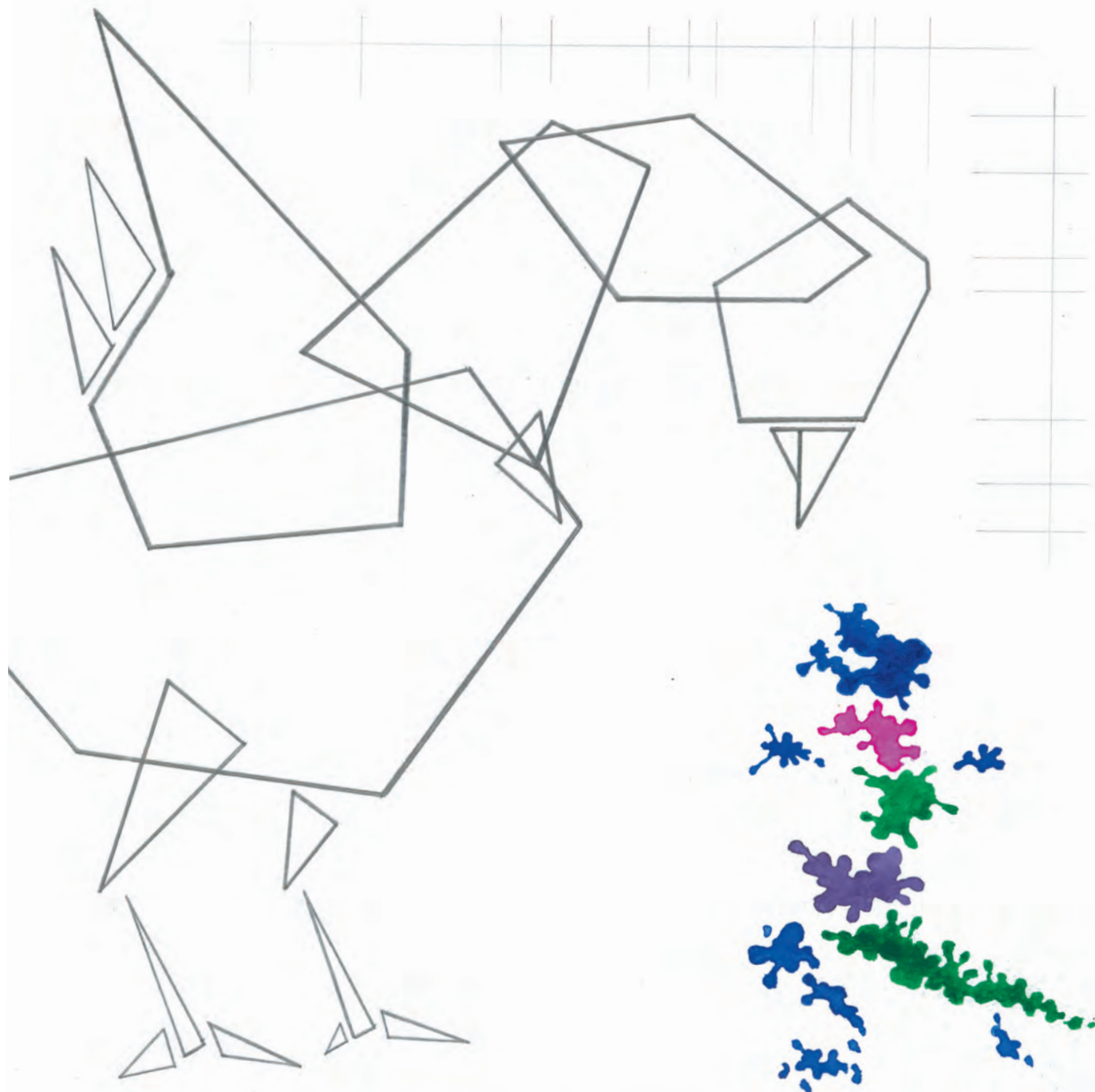
Модели продолжали оттачиваться. Авторы начали детально рассчитывать эффекты, связанные с турбулентностью в коллапсирующем веществе. Все более детально учитывалась физика нейтрино. Например, стали принимать во внимание нейтринные осцилляции, а также процессы с участием этих частиц в сильном магнитном поле (уточню, что такие эффекты сильных полей принципиально отличаются от учета магнитного поля в смысле динамики плазмы или передачи энергии оболочке). Все более детально учитывались эффекты, связанные с ядерной физикой. А это не только многочисленные реакции, но и использование уравнений состояния, все лучше описывающих поведение вещества. Уравнение состояния показывает, как давление зависит от плотности, т. е., в частности, определяет, как вещество сопротивляется сжатию. Мы относительно неплохо понимаем, как устроено уравнение состояния вплоть до ядерных плотностей. Но внутри протонейтронной звезды плотность уже начинает превосходить это значение — там «живут драконы». У нас нет экспериментальных данных или надежной теории для описания процессов в сверхплотном веществе, тем более при такой большой температуре, как при коллапсе ядра звезды. Поэтому тут открывается простор для усилий теоретиков. В 2015 г. группе Ханса-Томаса Янки (Hans-Thomas Janka) в Германии удалось путем учета вклада так называемых странных ( $s$ -) кварков<sup>38</sup> получить взрыв сверхновой в трехмерном расчете. Однако и это не стало финальной точкой — физика кварков сама по себе достаточно сложна, а в расчетах пока были использованы лишь довольно простые варианты их описания.

Сейчас физика сверхновых — это в первую очередь сложные компьютерные модели. Теория в этой области исследований прошла большой путь от простых аналитических оценок энергии взрыва до трехмерных расчетов с использованием самых мощных суперкомпьютеров на Земле (и даже на них расчет каждого варианта занимает месяцы, а надо ведь еще варьировать параметры моделей!). Сможем ли мы с помощью дифференциальных уравнений и традиционных численных методов добиться полного понимания? Или понадобится какой-то эволюционный скачок в попытке воспроизвести сверхновую в компьютере?

**А.** МАТЕМАТИКА ПРЕДЛАГАЕТ НАМ МЕТОДЫ, УДИВИТЕЛЬНО ПОДХОДЯЩИЕ ДЛЯ РАБОТЫ С АКТУАЛЬНЫМИ ЗАДАЧАМИ, СВЯЗАННЫМИ КАК С ЕСТЕСТВЕННЫМИ, ТАК И С ИСКУССТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ. ПРИЧЕМ ЗАЧАСТУЮ МЕТОДЫ БЫЛИ РАЗРАБОТАНЫ БЕЗ ВИДИМОЙ СВЯЗИ С РЕАЛЬНЫМ МИРОМ ВОКРУГ НАС.

**Б.** МАТЕМАТИКА (А ОТЧАСТИ И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА) СТОЛЬ СОВЕРШЕННА, ПОТОМУ ЧТО ОНА НЕ ТОЛЬКО ЭВОЛЮЦИОНИРОВАЛА И РАЗВИВАЛАСЬ, НО И МОГЛА ИЗБАВЛЯТЬСЯ ОТ СЛЕДОВ НЕУДАЧНЫХ ПОПЫТОК РАЗВИТИЯ ГОРАЗДО ЭФФЕКТИВНЕЕ, ЧЕМ ЭТО УДАЕТСЯ ЖИВЫМ СУЩЕСТВАМ В ХОДЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ.

**В.** МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ РЕАЛЬНОСТИ (Т.Е., ПО СУТИ, МЕТОДЫ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК) МОГУТ ПРЕТЕРПЕТЬ В БУДУЩЕМ СЕРЬЕЗНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ, ПРЕДСТАВИТЬ КОТОРЫЕ МЫ В ЛУЧШЕМ СЛУЧАЕ МОЖЕМ В САМЫХ ОБЩИХ ЧЕРТАХ.





# Чем математика похожа на глаз?

«Чем ворон похож на письменный стол?» Не исключаю, что Льюису Кэрроллу понравился бы вопрос: «Чем математика похожа на глаз?» Мой ответ: «И то и другое удивительно, и в обоих случаях мы можем понять почему».

Нередко, если ребенок быстро и хорошо считает, ему говорят: «Математиком будешь». Совсем не факт, что это окажется близко к истине (более того, можно и навредить), так как математика вовсе не похожа на устный счет. Хотя истоки, конечно, восходят именно к нему. «Счет должен был появиться десятки тысяч лет назад, — говорят нам антропологи. — Один мамонт, два мамонта». Однако важно было перейти к понятию числа, абстрагироваться, так сказать, от этих хоботных млекопитающих. Со временем мамонты вымерли и абстрагироваться от них стало проще.

Как бы то ни было, более трех тысячелетий назад в Египте уже существует нечто среднее между простым устным счетом и математикой, т. е. продвинутая арифметика, а также методы вычисления площадей и объемов. Постепенно методы вычислений развиваются, но практически нет

«решений в общем виде», а также системы, связывающей различные элементы воедино, — пока не существует ни алгебры, ни геометрии. Это не позволяет начать строить логически связанную систему, известную нам как математика.

Всем известно, что важный рубеж смогли преодолеть античные греки. К пифагорейцам можно возвести начала алгебры, поскольку именно они начали строить систему операций с (целыми) числами, основанную на некоторых постулатах<sup>39</sup>, а к платоникам — геометрию. Существенным стало именно создание логически связанной структуры, базирующейся на наборе аксиом. В таком случае мы можем не только решать текущие задачи, но и развивать наш метод, используя его внутренние ресурсы. С этой точки зрения настоящим памятником культуры является евклидова геометрия. Это образец понятного и строгого вывода, основанного на разумных постулатах, к тому же более или менее соответствующих нашему опыту.

На фундаменте, заложенном древними греками (которые сами учились чему-то у египтян, а чему-то — у других народов), выросло современное здание математики, парадоксальное и восхитительное. К нашему удивлению, математика предлагает неожиданные готовые решения проблем, в том числе и самых насущных: как правильно составить расписание, как лучше организовать транспортную сеть, как быстрее найти информацию в большой базе данных и т. д. Ну или совершенно неактуальных в быту: как описать движение частиц в многомерном искривленном пространстве, как из данных о колебаниях лучевой скорости звезды в системе девяти планет определить параметры каждой из них и т. д. и т. п. Более того, эффективность математических методов настолько велика, что позволяет делать естественно-научные открытия «на кончике пера», т. е. просто путем анализа решений уравнений.

«Непостижимая эффективность математики» сродни чуду человеческого глаза (хотя глаза стрекозы или лобстера не менее, а может быть, даже и более удивительны). И то и другое заставляет некоторых людей объяснять его сверхъестественными причинами.

«Необъяснимая» сложность глаза служит аргументом для теории разумного замысла. Ведь никто не поверит, что сам собой (в результате

случайных мутаций) неожиданно появился столь хитроумный орган, выполняющий так много функций. Но он таким способом и не появлялся! Проблема долгое время состояла в том, что органы зрения древних животных очень трудно изучать. Это же не костные останки, достаточно хорошо сохраняющиеся в грунте, благодаря чему мы можем десятки миллионов лет спустя восстановить полные скелеты динозавров (у которых, к слову, уже было вполне продвинутое зрение) и посмотреть, как они связаны с ныне живущими видами. Тем не менее развитие научных методов привело к тому, что мы все-таки можем восстановить основные вехи в становлении структуры светочувствительных органов, приведшем к появлению зрения современного человека.

Эффективность математики также иногда служит аргументом в пользу наличия Творца. Если для Ньютона это был «Великий часовщик», то теперь для кое-кого — творцы Матрицы. Ведь это поразительно, как просто и гармонично устроен мир. Вот закон Всемирного тяготения — а вот из него выводятся эллиптические орбиты планет и все прочие законы Кеплера. При этом сам закон напрямую связан с трехмерностью нашего пространства. Более того, например, математика — явно искусственно созданная и развиваемая человеком структура. Однако она позволяет в некоторых случаях не только описывать, но и предсказывать явления в реальном мире! Книга природы *написана* на языке математики. Кем? Неважно, кем конкретно, но ведь не сама же себя написала?<sup>40</sup>

С математикой произошло нечто, похожее на появление глаза, — эволюция. Именно это объясняет ее сложность и поразительную адаптированность к миру (вероятно, в мирах, не описываемых в рамках достаточно простых законов, жизнь попросту невозможна; об этом говорит и антропный принцип, см. главу 10). Причем если в случае глаза (и других органов) людям в наследство достались разные неудобные странности (перевернутая сетчатка, слепое пятно), то развитие науки часто позволяло по ходу изучения этого органа вносить коррективы. Тем не менее какие-то рудименты остались. У нас на руках 10 пальцев, поэтому базовая система счисления десятиричная (хотя для счета времени и угловых координат мы используем шестидесятиричную, а в компьютерах — двоичную).



У нас есть устоявшиеся традиции расположения осей в трехмерном пространстве (и иногда, когда вдруг удобнее использовать другой вариант, например при описании движения объектов в нашей Галактике, возникает путаница). Читатель может попробовать привести свои примеры.

Поразительная эффективность математики во многом объясняется тем, что она возникла в ответ на практические нужды и развивалась, не отрываясь полностью от реальности и постоянно соотносясь с естественными науками — астрономией, физикой и др., а теперь еще и с кибернетикой, IT-технологиями, социологией<sup>41</sup>. К тому же не надо забывать, что огромное количество математических структур не нашли (и, скорее всего, никогда не найдут) применения в естественных науках. Так что между математикой и физическим миром, как нам кажется, нет соответствия «один в один».

Те же методы математики, что нашли себе применение, часто активно используются при численном моделировании сложных процессов. И вот тут можно находить многочисленные примеры эволюции с сохранением рудиментов. Любой, кто достаточно долгое время писал какой-нибудь пакет программ, развивая его и создавая новые версии на протяжении ряда лет, сталкивался с этим.

Поскольку в астрофизике прямые эксперименты, как правило, невозможны, в этой науке активно используются численные (как говорится, кто может — делает, кто не может — симулирует). Можно моделировать отдельные сложные процессы (слияния нейтронных звезд и черных дыр, формирование планетных систем, столкновение галактик), а можно рассчитывать свойства и эволюцию большой совокупности объектов (звезд, планет, пульсаров). Последнее называется популяционным синтезом.

Нередко одна группа авторов может заниматься моделированием какого-то широкого класса объектов на протяжении десятилетий. За это время не только идет развитие науки, но также появляются новые вычислительные средства, компьютерные языки, алгоритмы. Иногда возникает возможность написать новую версию программы с нуля. Тогда можно перейти на более продвинутый язык (скажем C++ или Python вместо Фортрана), использовать современные вычислительные схемы, ну

и, разумеется, добавить новую физику, ради чего все и затевалось. Как правило, это происходит, если в команду приходит новый (и, что важно, молодой) человек. А между такими прогрессивными событиями дорабатывается старая версия путем вписывания новых строк кода, добавления подпрограмм, модулей и т. п. И вот здесь происходит эволюция, весьма похожая на биологическую. Если мы вначале ходили на четырех конечностях, а потом перешли на прямохождение, будут проблемы с позвоночником. Если окажется, что нужен большой мозг, будут проблемы с родами.

Обычно анализ популяции источников начинается с очень простых моделей. Например, вначале мы считаем, что все нейтронные звезды рождаются с очень короткими периодами вращения, с внешней средой не взаимодействуют, магнитное поле у них сохраняется и они замедляют свое вращение по так называемой магнито-дипольной формуле<sup>42</sup>. Достигнув определенной комбинации магнитного поля и периода, пульсар выключается — перестает производить мощное радиоизлучение. Задав такие предположения, мы пишем программу, моделирующую эволюцию радиопульсаров, а затем, задав темп рождения нейтронных звезд, начинаем создавать эти объекты в разных частях компьютерной Галактики. Результаты моделирования сравниваем с наблюдениями. Получается что-то похожее, но с заметными отличиями. Начинаем модифицировать нашу модель, пока не достигнем желаемого совпадения.

Какие-то изменения внести достаточно просто: к примеру, задать другое распределение по начальным периодам вращения или по магнитным полям, какие-то — уже сложнее, но можно, например, дописать модули, рассчитывающие движение пульсаров в галактическом гравитационном потенциале другого вида. А вот если вы с самого начала построили программу таким образом, что магнитное поле постоянно, то можно столкнуться с проблемами. Для полей, меняющихся по относительно простым законам, когда уравнения легко интегрируются аналитически, ситуацию еще можно выправить. Но, если эволюция поля слишком сложная, придется существенно переделывать программу или же отказаться от идеи использования таких законов. Еще хуже, если вы захотите учесть тот факт, что заметная доля нейтронных звезд рождается в двойных системах.

Теперь вам надо моделировать эволюцию звездных пар. А это отдельная большая проблема. Так что вы или начинаете работу над новым полноценным кодом, куда ваш войдет как часть (как клетки когда-то получили митохондрии), или начинаете делать довольно искусственные упрощения поведения двойных, чтобы хоть как-то учесть их вклад.

Сценарии популяционного синтеза обладают практически бесконечным потенциалом совершенствования, ведь пределом является полное воспроизведение в компьютере вселенной от Большого взрыва до настоящего времени. В наши дни сделано уже очень многое, чтобы к этому приблизиться. Программы EAGLE, Illustris и подобные им рассчитывают эволюцию вселенной от первичных флуктуаций плотности до наших дней, доходя в детализации до масштабов в сотни парсек. Это позволяет воспроизводить облик далеких галактик в таких подробностях, которые сейчас показывают крупные телескопы. Вы можете, например, найти в результатах расчетов эволюции большой области вселенной галактики интересующего вас типа и посмотреть, как они возникали, с чем взаимодействовали. Любой может использовать данные EAGLE или Illustris в качестве начальных условий для своей программы популяционного синтеза населения какой-нибудь галактики. Такие расчеты путем сравнения с данными наблюдений позволяют проверить, насколько хорошо мы понимаем происхождение и эволюцию разнообразных астрономических объектов в рамках большой космологической картины.

Мир земных животных демонстрирует большое разнообразие устройства и характеристик органов зрения<sup>43</sup>. Это можно воспринимать и как отличие от математики (ведь она едина), и как сходство (внутри математики есть разные области, сильно непохожие друг на друга, взять хотя бы алгебру и геометрию). Интересно, а как обстоит дело со зрением и математикой в других мирах?

Зрение большинства животных на нашей планете адаптировалось к солнечному излучению (подчеркну, что это верно и для ряда ночных животных, поскольку ночной свет тоже во многом солнечный: отраженный свет луны, звезды, рассеянный солнечный свет в сумерках). Кривая чувствительности человеческого глаза очень напоминает спектр Солнца

(желтый и зеленый в радуге мы замечаем лучше всего). Нам незачем было вырабатывать способность хорошо видеть чистый фиолетовый цвет. В других обстоятельствах все могло повернуться иначе. Мы можем представить себе обитаемый мир, всегда укрытый плотным слоем облаков, или планету у очень красной звезды. Это вполне реалистичные варианты. Там глаза могут быть устроены по-другому и будут иметь другую спектральную чувствительность. А может ли существовать другая математика?

Возможно, ответ содержится не в пространстве, а во времени. Не исключено, что и наше зрение, и математика в будущем претерпят значительные изменения. И то и другое может быть связано с развитием технологий. Вряд ли кто-то отказался бы от идеального зрения, к тому же не только в видимом диапазоне, но хотя бы еще в ультрафиолете и ИК. Био-электронно-механические системы будущего могут дать нам такую возможность. Если вместо человека (или вместе с человеком) будут существовать искусственные разумные существа, то их зрение может быть принципиально иным, причем оно приобретет свои свойства не в результате эволюции, а в результате конструирования. Может быть, аналогичный процесс приведет и к созданию другой версии математики (см. главу 15). Будущее предсказывать трудно, проще посмотреть на историю.

**А.** У современной науки и современного искусства много общего. Они заметно (так, что это видно и неспециалисту) отличаются от своих предшественников всего лишь вековой давности. А кроме того, в обоих случаях самые современные достижения с трудом воспринимаются неподготовленной публикой.

**Б.** В современной науке, как и в современном искусстве, зачастую отсутствует «нулевой» уровень понимания, для которого достаточно бытового опыта и представлений о мире.

**В.** Искусство и наука XX века, несмотря на свою кажущуюся оторванность от бытовых проблем, существенно влияют на нашу жизнь, хотя не всегда это лежит на поверхности и легко заметно глазу.





# Эволюция формы и содержания

Мы склонны воспринимать исторический процесс в целом как прогресс. Не только технический, но и, например, социальный (от рабовладения до современной демократии в Нидерландах и Скандинавии). Не только социальный, но и культурный. В смысле культуры, вероятно, заметная часть людей старше примерно 40–45 лет исключит последние два-три десятилетия, сочтя их регрессом, но так происходит уже много веков в самых разных областях культуры: хотя мы воспринимаем творчество Ван Гога и Модильяни как шаг вперед по сравнению с их непосредственными предшественниками, современники этих художников в массе своей считали иначе.

Заметнее всего прогресс технический. Новые поколения антибиотиков (к старым всякая зараза уже приспособилась — биологическая эволюция не стоит на месте!), новые смартфоны... Ускорители все больше, процессоры все меньше, умными стали даже дома и часы. Научный прогресс тоже не отстает. Но вряд ли случайный прохожий сможет рапортовать вам об успехах математики или теоретической физики за последние лет 15–20. Разве что скажет: «Перельман отказался от премии». Это нормально: следить



за развитием данных областей неспециалисту очень трудно. Но нас будет интересовать заметность «на глаз» прогресса в теоретических науках в сравнении с другими областями культуры на больших масштабах времени, где разница должна быть видна.

Представьте себе такой опыт. Мы хотим посмотреть, как менялся облик артефактов европейской культуры, представленных в печатном виде, за период с XVII по XXI век. Чтобы отвлечься от не имеющих отношения к делу деталей, перепечатаем все документы, используя одинаковую бумагу и шрифты. Мы даже можем выбрать тексты на языке, которого не знаем, поскольку важен именно вид, а не содержание. Возьмем по несколько страниц прозы и стихотворений, представляющих каждый век (скажем, тексты, опубликованные в 1615, 1715... 2015 гг.). Также напечатаем отрывки из философских трудов того же периода. Возьмем ноты музыкальных произведений, написанных в эти эпохи. Наконец, возьмем статьи по математике и теоретической физике, где формул побольше. Будем, разумеется, избегать совсем специфических случаев. Более того, попробуем по возможности выбрать «типичных представителей». Как вы думаете, каков будет результат? Сможем ли мы отличить философский текст XVIII века от текста, созданного в XX, не понимая содержания? А если язык все-таки понятный, но читает неспециалист?

На мой взгляд, заметно различаться будут только физико-математические тексты<sup>44</sup>. Основные причины изменения вида научных текстов с формулами мы рассмотрели в главе 7. Лишь у них заметно меняется и «алфавит», и «синтаксис», что может заметить даже внимательный сторонний наблюдатель, не понимающий собственно содержания. В других областях суть текстов, обсуждаемые проблемы, используемые метафоры и т. п. могут значительно меняться, но нет существенного изменения формы в смысле печатного варианта. Специалист может с этим не согласиться, но это и понятно, потому что только для него эта разница особенно заметна! Если за 400 лет в языке не менялся алфавит, то большой разницы во внешнем виде и не будет. Более того, если алфавит менялся, как у нас в стране, то сейчас старые тексты печатают уже по-новому, «без ятей» (а вот из формулы «ять» не выкинешь!).

Пожалуй, только в изобразительном искусстве разница будет еще более заметной, чем в научных текстах<sup>45</sup>. Разумеется, так происходит потому, что первоочередная задача этого вида творчества как раз и состоит в том, чтобы создавать новые оригинальные визуальные образы. Так что современное искусство и современная физика с математикой визуально отличаются от своих более ранних аналогов даже на взгляд неспециалиста.

Вообще, на мой взгляд, очень многое роднит современную науку с современным искусством (и не только изобразительным, особенно если мы говорим об авангардных течениях)<sup>46</sup>. В частности, у них общие проблемы с трудностями восприятия массовым зрителем-читателем-слушателем. Для адекватного понимания и оценки нужна дополнительная информация. Точно так же как невозможно, на мой взгляд, адекватно представить неподготовленной публике современные космологические модели во всей их полноте, так и нельзя рассчитывать на то, что случайно зашедший в музей человек сможет оценить полотно Джексона Поллока. Необходим труд популяризаторов, чтобы сделать рассказ о теории инфляции доступным для неспециалиста. Нужно показывать, как от простых представлений о мире (хотя бы в объеме школьной программы) можно перейти к идее самовоспроизводящейся вселенной. Точно так же надо постепенно подводить зрителя к пониманию абстрактных полотен.

Интересный пример был представлен на выставке картин Василия Кандинского в Третьяковской галерее на Крымском Валу в 2016 г. В специальном зале была представлена мультимедийная экспозиция, показывающая, как поэтапно создавались картины, известные нам как «Композиция VI» и «Композиция VII»<sup>47</sup>. В ролике, посвященном «Композиции VI», видно, как из понятных образов, вначале появившихся в рисунке на стекле «Потоп», постепенно складывается беспредметная композиция. История отдельных элементов «Композиции VII» начинается с картины «День всех святых II», где еще легко угадываются фигуры и объекты. На рисунке на стекле «Страшный суд» образы уже менее отчетливы. Постепенно, через ряд других набросков, рисунков и картин авторы инсталляции показывают, как в итоге возникает масштабная «Композиция VII».

Любопытно, что в научно-популярных видеороликах, посвященных астрофизическим темам, иногда остаются непонятные для непосвященного зрителя моменты, несмотря на довольно подробный рассказ о соответствующих сложных процессах. Общая картина, конечно, ясна, но есть и вопросы. Это напоминает мне описанные выше инсталляции с картинами Кандинского, где, конечно же, тоже не все элементы окончательной версии разъяснены (а эксперту они могут быть известны или же специалист сможет сам их выявить). Примером может служить известное видео, в котором рассказывается о движении галактик в нашем сверхскоплении Ланиакеа<sup>48</sup>.

В 2014 г. Ричард Brent Талли (Brent Tully) и его коллеги впервые смогли достаточно детально изучить кинематику галактик в нашей космологической окрестности вплоть до расстояний порядка 500 млн световых лет. Удалось выявить динамику процесса формирования сверхскопления галактик, в которое входит и наш Млечный Путь. Это проиллюстрировано красивой графикой, основанной на наблюдениях, их анализе и компьютерных расчетах. Моделирование показывает, как двигаются галактики, параметры которых были определены по результатам обработки данных наблюдений. Рассказывается о собственных (пекулярных) скоростях галактик, определяющих их движение относительно друг друга при небольших по космологическим меркам расстояниях. Однако внимательный зритель заметит, что на рисунках по осям отложены не расстояния, а скорости. Это скорости, связанные с космологическим расширением (так называемым хаббловским потоком), и их можно перевести в расстояния, задав космологические параметры и проведя простые вычисления. При этом реальная скорость галактики относительно нас складывается из пекулярной скорости и скорости хаббловского потока на соответствующем расстоянии. Детали того, как эти величины определялись, как они связаны друг с другом и т. п., остаются за кадром популярного изложения. Вдобавок сверхскопление формируется долго. За это время вселенная успевает заметно расширяться, и постоянная Хаббла изменяется. В результате перевод скорости расширения в расстояния должен производиться с другим коэффициентом. Чтобы разобраться во всем этом, нужно смотреть университетские учебники, научные монографии и статьи. Попытка в деталях рассказать

сразу обо всем в пятиминутном ролике, по всей видимости, вызвала бы у неподготовленного зрителя лишь полное смятение.

Современное искусство и современная наука (в лице математики, теоретической физики и некоторых других областей) достаточно сильно оторвались от «нужд простых граждан», бытового опыта и здравого смысла (вспомним эйнштейновское: «Здравый смысл — это сумма предубеждений, приобретенных до восемнадцатилетнего возраста»). Поэтому их трудно воспринимать, если не потратить какое-то время на изучение «матчасти».

Это не значит, что теперь наука и искусство достигли каких-то необразимых высот. Конечно, они стали сложнее, но главное то, что в ряде случаев просто пропал «нулевой уровень понимания». Если мы смотрим на картину эпохи Возрождения, то можем не понимать, что на ней изображено, кто все эти люди, о чем говорит символика, какие художественные решения использованы, вообще — в чем был замысел автора. Но мы видим «красивую картинку» (и подозреваем, что сами так нарисовать не сможем). Видим привычные образы — людей, здания, пейзаж, и это успокаивает, дает некоторую иллюзию понимания. Вот он — нулевой уровень.

Подобным образом и наука, скажем, до середины XIX века кажется нам привычной. Во-первых, она еще не слишком далека от бытовых представлений. Здесь, правда, необходима ремарка: *наших* бытовых представлений. Мы пользуемся электроприборами, а потому нам понятны некоторые рассуждения про электрический ток. Мы накачиваем шины и готовим еду в скороварках, поэтому что-то понимаем про давление. Представьте себя на месте простого горожанина начала XIX века. Электрического утюга у него нет, что такое пневматические шины, он не знает. Так что современная ему физика времен Ома и Клапейрона заметно оторвана от бытового опыта 1800-х гг. — примерно в той же степени, как сейчас мы далеки от всяких аксионов и нейтралитно. Во-вторых, нам физика до начала XX века включительно знакома по школьному курсу, а кое-что из более свежих достижений (пусть и в искаженном виде) — по научно-фантастическим произведениям. Привычные вещи не пугают, поэтому мы готовы их если не воспринимать, то хотя бы терпеть.

Теперь, если мы посмотрим на картину Пауля Клее или задумаемся об относительности одновременности, ситуация изменится. Что на картине — непонятно (и многим кажется, что они нарисовали бы не хуже), а рассуждения о восприятии события в разных системах отсчета напоминают неудачную попытку объяснить опоздание на работу или урок.

Тем не менее и парадоксальная наука XX века, начиная с ОТО и квантовой механики, и современное искусство (включая, скажем, супрематизм, кубизм и другие авангардные течения, в том числе и более современные) постоянно оказывают влияние на нашу жизнь, хотя многие этого не замечают (особенно если речь идет об искусстве). Гаджеты и системы навигации, МРТ и чип в транспортной карте — все это включает в себя новую физику. И, конечно, мы живем в мире, внешний облик которого во многом сформирован современным искусством. Возможно, не именно современным нам искусством XXI века. Ну так и теория относительности, и квантовая механика — наука начала XX века, а МРТ — его второй половины. Практически весь дизайн бытовых вещей — от мебели до шариковой ручки, от принта на футболке до формы стакана из магазина «ИКЕА» — испытал сильное влияние искусства XX века. Все вокруг было бы совсем иным, если бы не ученые и художники последних 100 лет.

Отвечая на вопросы журналистов и публики, скажем, о гравитационных волнах, я регулярно сталкиваюсь и с такими: «Можно ли сделать, используя их, систему связи?», «Можно ли применить энергию этих волн в промышленности?» и «Зачем вообще тратить столько денег на эти исследования?». Ответ на первые два: «Нет», по крайней мере в сколь-нибудь обозримом будущем (а скорее всего, так будет всегда). Ответ на третий не может быть кратким, если хочется, чтобы он был и содержательным, и небанальным. Фундаментальная наука приходит в нашу жизнь через прикладную, а искусство — через дизайн. В итоге приходится доверяться специалистам, решающим, например, что финансировать, а что — нет, причем как в науке, так и в искусстве. Попытки ширнармасс диктовать, каким должно быть современное искусство, похожи на попытки «с лопатами и с вилами» помочь физикам.

Часть III

---

# Метаморфозы и варианты

**А.** В современной физике обычно для представления идеи на всеобщее обозрение ее необходимо развить и хорошо аргументировать, согласовать с данными наблюдений и эксперимента, а также представить в виде математической модели.

**Б.** Фантазия теоретиков ограничивается не только данными экспериментов, но и свойствами математики.

**В.** Представление гипотезы в виде математической модели позволяет проводить расчеты, необходимые для сравнения предсказаний с наблюдениями.







# Агрегатные состояния идей

По мнению некоторых экспериментаторов, теоретики могут предлагать и публиковать все что угодно. Один наблюдатель мне так и сказал: «Вам легко: придумал идейку — написал статью, а тут человек спектры мерил!» Разумеется, не все думают столь прямолинейно, но бывает. Так вот, это не очень-то легко! Теоретики могут *пробовать* придумывать что угодно. Но потом приходится считаться с некоторыми ограничениями, а главное — нельзя опубликовать (в приличном месте) «просто идейку».

Во-первых, ограничения связаны с совокупностью известных данных экспериментов и наблюдений. Как говорится, «уродливый факт уничтожает прекрасную теорию». Но для многих областей это не слишком существенное ограничение. Ведь если фактов мало, то они не очень-то и мешают. И тогда на передний план выходит второй тип ограничений, связанный уже с внутренней кухней теоретических методов.

Эти внутренние ограничения условно можно разделить на физические и математические. Первые говорят о том, что, согласно нашему

пониманию, нечто невозможно (или не реализуется) в нашем мире, а вторые — что это невозможно нигде.

Например, самые разнообразные наблюдения (космические лучи, фон неба в гамма-лучах и т. д.) свидетельствуют о том, что в нашей вселенной антивещества очень мало. Теоретический анализ говорит, что довольно трудно представить себе вселенную, в которой вещество и антивещество присутствуют примерно в равном количестве и скопления галактик из вещества соседствуют с конгломератами звездных систем из антивещества. Таким образом, с физической точки зрения у нас есть жесткое ограничение на количество антивещества в нашем мире и на возможную структуру миров с близкими долями обычного вещества и его антипартнера. Однако нет жесткого запрета на существование вселенных с антивеществом с точки зрения математики.

Математика, т. е. решения уравнений физической теории, может в некотором смысле диктовать свойства объектов (или же утверждать, что наши уравнения недостаточно хороши для полного описания всех параметров). Здесь в качестве примера можно рассмотреть свойства черных дыр в общей теории относительности. Стандартным является утверждение о наличии сингулярности (в случае невращающейся черной дыры это точка в ее центре<sup>49</sup>). Этот вывод основан на решениях уравнений ОТО, т. е. на математической процедуре, а не на качественных (т. е. словесных) рассуждениях. В данном случае математика говорит нам, какими должны быть параметры объекта в рамках заданной модели. Мы понимаем, что в реальном мире это недостижимо: плотность не может достигать бесконечной величины. Но уравнения формально приводят к такому выводу. Значит, как минимум мы можем утверждать, что в недрах черной дыры формируется нечто очень плотное и компактное, и мы не можем это описать с помощью той физики, которую заложили. Иначе говоря, математика показывает нам ограниченность наших физических моделей.

Другой пример «математического диктата». Возьмем четырехмерное пространство и попробуем рассчитать в нем орбиты планет, обращающихся вокруг звезд. В таком пространстве закон всемирного тяготения изменится. Теперь в знаменателе будет стоять не квадрат расстояния, а третья

степень — куб. Вообще, показатель степени у расстояния в законах всемирного тяготения и Кулона равен размерности пространства минус единица. Это объясняется тем, что такую зависимость от радиуса имеет площадь сферы: на данном расстоянии воздействие как бы «размазано» по поверхности сферы (можно представлять себе, как уменьшается световой поток на единичную площадь при удалении от источника). Так вот, окажется, что существование устойчивых орбит, например круговых, в четырехмерном пространстве невозможно. Такой вывод не является следствием неполноты теории — это очень общее свойство, связанное именно с геометрией. Гравитация в мире с еще одним измерением будет спадать слишком быстро при росте расстояния между тяготеющими телами, и такое поведение не позволит получить стабильные орбиты. Значит, мы имеем дело именно со свойством решений уравнений. Таким образом, в данном случае математика жестко ограничивает фантазии теоретиков.

От замысла до воплощения научная идея проходит ряд «агрегатных состояний». Часто это начинается со смутных идей, непродуманных гипотез. У нас есть пока лишь что-то эфемерное, «газообразное». Постепенно в процессе продумывания оно начинает сгущаться, и в какой-то момент происходит фазовый переход — «газ» превращается в «жидкость». В этот момент идея хорошо вербализована, ее можно начать обсуждать, но это еще не научная теория. Нужен еще один переход — «кристаллизация». Только теперь у нас есть математические формулировки. Мы получили уравнения, которые можно решать, а результаты сравнивать с наблюдениями и делать количественные предсказания.

Хочется сказать, что остановка на первом («газообразном») уровне соответствует поэтическому способу познания реальности, второй («жидкий») уровень — философии, а третий — науке. При этом именно последнему свойственны наиболее заметные ограничения. Газ и жидкость могут заполнить любой сосуд. Они аморфны — готовы принять форму тела, в котором находятся, особенно газ. А вот снежинки, несмотря на все свое многообразие, имеют вполне определенные симметрии<sup>50</sup>.

Если человек не может как следует придерживаться ограничений, связанных с современными методами исследований, или не пытается пройти

всю цепочку «газ — жидкость — кристалл», то он не занимается наукой. Доведение идеи «до числа», позволяющее провести количественное сравнение с данными и сделать предсказания для проверки, — совершенно необходимый элемент работы ученого, по крайней мере в физике. Опубликовать «голую идею» в сколь-нибудь приличном журнале невозможно — необходимо представить развернутую аргументацию на количественном уровне и предложить методы количественной проверки. Аргументация должна быть основана в том числе на сравнении с имеющимися данными, а потому игнорирование даже части комплекса экспериментальных и наблюдательных результатов делает работу неполноценной. И, уж конечно, наличие проблем с математикой (т. е., попросту говоря, ошибок в расчетах) полностью ее обесценивает.

Парадокс «сумасшедших ученых», когда признанный специалист вдруг начинает упорно продвигать маргинальные идеи, на мой взгляд, чаще всего состоит именно в нежелании следовать этим ограничениям и требованиям. Как правило, речь идет об игнорировании значительной части известных данных, т. е. идея доводится «до числа», и проблем в расчетах нет, но при этом не обращается должного внимания на то, как идея вписывается в общий контекст. По сути, авторы сознательно игнорируют часть серьезных проблем, способных разрушить предлагаемую модель.

Можно предположить, что этот интересный эффект связан с тем, что многие (если не большинство) ученых приходят в науку с желанием совершить яркое большое открытие в духе тех, о которых мы в детстве читали в научно-популярных книгах. Им хочется воскликнуть: «Эврика!» В таких книгах (а особенно в фильмах) часто сам момент озарения считается ключевым. А это только фаза «газообразной» идеи или ее «конденсации». Про дальнейшую работу рассказывают реже, так как это «скучно». Следовательно, есть исходная селекция в пользу определенного склада характера.

Попав в университет, человек постепенно начинает открывать для себя весь комплекс ограничений. Приходится учиться работать именно в таком консервативном ключе. Похоже на то, как какой-нибудь герой

приключенческой книги внезапно оказывается «родовитым», попадает в светское общество, о котором всегда мечтал, но оказывается, что там много нудных правил, которым нужно неукоснительно следовать (по крайней мере, на публике). В результате наш герой может в какой-то момент все бросить и «уйти в разбойники или пираты». Такой образ многим близок. Не просто пират, а пират-дворянин. Похожими притягательными свойствами обладает и именитый ученый, вдруг начавший заниматься чем-то практически лженаучным или, по крайней мере, околонучным или не совсем научным, но ярким и притягательным (НЛО, сверхъестественные явления). И, уж конечно, харизматичен образ знатного бунтаря. Известный ученый, начинающий все ниспровергать и покушаться на «священных коров», — просто находка для публики и журналистов. Кажется, чаще всего такой «бунт» и отрицание стандартных ограничений, являющихся основой нормального функционирования науки, происходит, когда человек достигает довольно высокого уровня, который он считает достаточным для себя. Теперь можно пренебречь правилами и вернуться к изначальным юношеским порывам, не удерживая их в слишком жестких рамках.

Но вернемся к нашей аналогии. Получив «снег и лед», мы можем двигаться дальше. Из снега можно что-то лепить, из льда — высекать. Нельзя построить воздушный замок, а вот ледяной дворец — вполне реально. Конечно, можно сказать, что из лапласианов и синусов нельзя сложить слово «счастье», но никто к этому не стремился и этого не обещал.

Однако существенно, что кристаллы имеют определенные свойства, и это как раз соответствует внутренним ограничениям, накладываемым математикой. Если мы начали с паров воды, то получим вполне определенные кристаллы. Начав с некоторых физических рассуждений, мы получим, облекая их в форму уравнений, модели определенного типа. Здесь можно вспомнить, что в разных условиях и лед приобретает разные свойства (например, при высоком давлении в недрах планет). Это верно, и это можно уподобить тому, как наши физические модели дают разные предсказания для разных наборов параметров, а иногда при этом используется и разная структура уравнений — разная математика, как,

к примеру, в случаях ньютоновской механики и общей теории относительности. Тем не менее нельзя получить что угодно. Раз уж мы упомянули физические свойства вещества в планетах, то приведем пример из этой области.

Планеты формируются в протопланетном диске, окружающем новорожденную звезду. Диски могут быть достаточно массивны (обычно порядка нескольких процентов от массы звезды), и в них содержится практически вся таблица Менделеева вплоть до урана. Значит, там могут образовываться какие угодно планеты? Конечно, нет.

Три основных ингредиента, из которых в той или иной пропорции могут состоять планеты, — это камни (сюда же будем включать все металлы), лед и газ. И пропорция не может быть любой. Основная причина в том, что, с одной стороны, газа намного больше, чем льда, а льдов<sup>51</sup> — больше, чем каменных частиц. Кроме того, вещество достаточно хорошо перемешано. Поэтому, хотя в протопланетном диске может хватать, например, углерода для формирования планеты размером с Землю, такого не происходит в природе.

Более того, очень трудно (практически невероятно) создать планету массой в 20–30 земных и больше только из камней, потому что, как только планета в диске набирает такую массу, она начинает гравитационно захватывать газ, быстро превращаясь в газового гиганта, в основном состоящего из водорода и гелия (именно эти вещества доминируют в газовой составляющей диска, поскольку они — самые распространенные элементы во вселенной и именно из них в основном и состоят межзвездные облака и сами звезды). Альтернатива состоит в том, чтобы наращивать массу каменной планеты после исчезновения газового диска<sup>52</sup>, но тогда остается мало материала, который к тому же трудно собрать в единое тело. Остается один-единственный вариант: как-то лишить газового гиганта его массивной протяженной атмосферы. Это возможно в результате взаимодействия планеты со звездой. Такие гипотетические планеты называют *хтоническими мирами*. Однако очевидно, что если они и существуют, то это чрезвычайно редкие тела (встречающиеся в чрезвычайно экстремальных условиях).

Таким образом, основные типы планет — это небольшие (в основном твердые, исключая в некоторых случаях внутреннее ядро) железно-каменные планеты, ледяные планеты (внутри которых лед находится в экзотическом жидком состоянии) и газовые гиганты (содержащие ядро из элементов тяжелее гелия, но вещество там обычно не находится в твердом состоянии из-за высокого давления). Примером первого типа являются четыре внутренние планеты Солнечной системы (Меркурий, Венера, Земля и Марс). Ледяные гиганты — это Нептун и Уран. Газовые — Юпитер и Сатурн. Кроме того, в Галактике распространен тип планет, называемый сверхземлями. Эти планеты, имеющие массу примерно 5–10 земных, могут состоять из железа и камней (т. е. являются массивными аналогами Земли) или льдов (таким образом, это мини-нептуны)\*.

Итак, распространенность элементов во вселенной, особенности процесса звездообразования и физики протопланетных дисков определяют ключевые свойства планет, их типы и распространенность каждого из них. Несмотря на то что каждая планетная система образуется независимо и в Галактике их сотни миллиардов, наличие единых правил и общность начальных условий не приводят к появлению большого разнообразия планет. В фантастическом романе можно описать планету из чистого железа или воды, но в реальности это невозможно. В естественных условиях осуществляется далеко не все, что можно себе представить. И мы лучше начинаем это понимать, когда доводим наши идеи до количественных характеристик.

Три «агрегатных состояния идей» сильно отличаются друг от друга. Конечно, нельзя сказать, что «лед лучше пара и воды». Лед лучше для того, чтобы построить дом (пусть в нем и прохладно). Но для многих других целей больше подойдут жидкость или газ. Как сказал поэт, «хочется пить, но не выпить твердую воду». Мы не сумеем дышать без газов, жизнь была бы невозможна без жидкой воды (или ее заменителя в качестве универсального растворителя). В мире идей и фантазий тоже

\* Большинство сверхземель должно иметь также довольно плотную атмосферу, которая, однако, по своей массе намного уступает основной части планеты.



не все сводится к науке, к счастью. Но и заменить научный метод ничто не может.

Для меня лично в этих «фазовых переходах идей» есть элемент творческого чуда, когда мысли, пока существующие лишь в виде слов или образов, обретают плоть (и одновременно каркас) в виде формул (для меня это почти всегда так или иначе готовые формулы, я их не изобретаю — только использую). Это похоже на внезапную кристаллизацию. Именно в данный момент идея становится научной. Из воды получается лед, из пуха — нить, и ясно, что с этим можно дальше работать. Из нитей делать ткань. Кристалл может продолжать расти. В частности, получив «теоретическую снежинку», ее можно сравнивать с настоящими. Если совпадение есть, значит, идея правильная или, по крайней мере, имеет право на существование.



**А.** Модели физиков-теоретиков всегда в той или иной степени неверны. Или они в самом деле ошибочны, или являются лишь приближенным описанием, или нереализуемы в нашей вселенной. Наилучшее, что мы можем получить, — приближенное описание, соответствующее при определенных условиях и на определенном уровне точности экспериментов наблюдениям.

**Б.** Работа с «неверными» моделями является естественным, неизбежным и при этом достаточно эффективным следствием нашего подхода к познанию мира. Исследования продвигаются вперед методом проб и ошибок, перебором и развитием разнообразных гипотез, лишь немногие из которых применимы в нашем мире.

**В.** Побочным результатом работы с «неправильными» гипотезами может быть развитие математического аппарата, применяемого в исследованиях.

**Г.** Одним из подходов к объяснению фундаментальных свойств наблюдаемой вселенной является антропный принцип. Однако это скорее философское построение, чем физическая модель. Важно продолжать искать объяснения в рамках естественных наук.





# Снежинки теорий

Снежинки являются символом уникальности. Любопытно, что это разнообразие форм существует, невзирая на строгие законы, связанные со свойствами молекул воды. Более 400 лет назад Иоганн Кеплер написал небольшой трактат «О шестиугольных снежинках»<sup>53</sup>. Наука того времени не располагала возможностью достаточно полно объяснить правила, определяющие вид этих объектов. Однако многие считают, что именно эта работа лежит в основе современной кристаллографии, поскольку в ней впервые на достаточно хорошем уровне была сделана попытка объяснить свойства кристаллов, используя не только качественные рассуждения, но и математику. Кеплер, разумеется, ничего не знал о молекулах воды, поэтому было бы удивительно, если бы он смог найти полностью правильный ответ на вопрос о форме снежинок. Тем не менее в его книге изложено много любопытных идей, причем не только о кристаллах. Это очень интересный (и доступный, практически научно-популярный) пример того, как логика и математика помогали работать с гипотезами о свойствах природных явлений на заре возникновения современной физики.

Представим цивилизацию, обитающую на планете, где в естественных условиях снежинки не образуются, к тому же пусть вообще жизнь

на этой планете основана не на воде. Межпланетная станция исследовала холодный спутник близкой планеты и прислала фотографию снежинки. Теперь ученые в лаборатории пытаются воспроизвести ее форму. Поняв, что снежинка состоит из молекул воды, они довольно быстро научатся делать самые разнообразные снежинки, которые будут похожи на оригинал, но не будут в точности его воспроизводить. Ученые установят, что существуют различные типы снежинок, возникающие при разных комбинациях параметров (влажность, температура и т. д.), но воссоздать их точную форму можно будет только путем манипулирования с отдельными молекулами, а не воспроизводя естественные условия: слишком много вариантов. Важно, что исследователи поймут, почему снежинки шестиугольные (и не бывает пяти- или семиугольных). Может быть, им удастся установить, что снежинки из других видов льда (неводяного) будут иметь другую симметрию, но опять-таки не всё возможно. И вероятно, в течение долгого времени нерешенным останется вопрос о деталях происхождения воды на этом небесном теле.

Такая ситуация похожа на то, как физики-теоретики пытаются понять мир. Физическая реальность — некая уникальная реализация множества физических параметров, но она подчинена каким-то единым физическим законам, которые в полной мере нам пока неизвестны. Однако мы знаем уже довольно много. Это позволяет строить все более реалистичные модели. Некоторые из них ухватывают глобальные черты «снежинки», а некоторые пытаются точно воспроизвести отдельные «лучики».

Здесь хочется сделать один важный комментарий. Занимаясь конструированием «снежинок», не совпадающих с оригиналом, ученый не работает впустую. Хотя он и не изучает непосредственно исходную «снежинку» (реальный мир), но он исследует снег, воду, взаимодействие молекул. Иными словами, даже создавая модели, явно не имеющие отношения к наблюдаемой реальности, теоретик может заниматься важной, осмысленной деятельностью, связанной с изучением физики (и, возможно, математики). Таким образом, потенциальные возможности физики в некотором смысле превосходят конкретную реализацию в виде нашей наблюдаемой части вселенной.

В фильме «В ожидании волн и частиц»<sup>54</sup> Сергей Троицкий, физик-теоретик из Института ядерных исследований в Москве, высказывает интересную мысль: «Теоретик должен заниматься тем, что не существует, но что могло бы существовать. То, что существует, экспериментаторы и так откроют». Разумеется, это высказывание отчасти шуточное. Но лишь отчасти! Изучение нереализованных в природе возможностей (проводимое в соответствии с довольно строгими правилами и ограничениями, о которых мы говорили выше) — важная составляющая исследовательской работы.

Почему же мы наблюдаем некоторую реализацию из ряда возможностей? Почему именно эту? С одной стороны, мы можем надеяться найти прямой и детальный ответ на этот вопрос. Правда, сделать это будет нелегко, так как почти наверняка для достоверности результата нам придется научиться исследовать другие варианты не только теоретически, но и экспериментально (или убедительно доказать, что наша наблюдаемая вселенная — единственная). Но часть вариантов мы можем отбросить, используя довольно оригинальный подход, наиболее четко впервые сформулированный Бренденом Картером вначале в препринте, опубликованном в 1967 г., а затем в докладе на симпозиуме Международного астрономического союза в 1973 г., проходившем в Польше и посвященном 500-летию со дня рождения Коперника. На основании этих идей Картером была написана классическая статья, опубликованная в 1974 г. в журнале *Classical and Quantum Gravity*. Именно на симпозиуме в Кракове им был предложен и прижившийся термин «антропный принцип»<sup>55</sup>.

В самой простой формулировке принцип звучит так: *мы наблюдаем такой мир, потому что в других (сильно отличающихся) мирах нет наблюдателей, подобных нам*. Разумеется, в той или иной степени подобные мысли возникали задолго до рубежа 60-х и 70-х гг. XX века у разных людей. Но эти идеи не выстраивались в некую целостную концепцию, которую можно развивать и пытаться приложить к объяснению реальных данных. Развитие происходит на стыке физики и философии, что накладывает свой отпечаток. На сегодняшний день существует несколько вариантов формулировки антропного принципа.



В первую очередь важно разделение на так называемые слабый и сильный антропные принципы. Приведенная выше формулировка в большей степени относится к слабому. Его идея до некоторой степени даже банальна. В самом деле, мы знаем довольно много, для того чтобы утверждать, что не при всех комбинациях физических параметров может существовать жизнь в высокоразвитой форме (а для появления разумного наблюдателя это необходимо; исключим из рассмотрения так называемый больцмановский мозг<sup>56</sup>). Жизнь вряд ли появится в мирах с двумя или четырьмя пространственными измерениями (здесь речь о макроскопических, т. е. некомпактифицированных<sup>57</sup>, измерениях. Таким образом, пространство может быть и 10-, и 11-мерным, но дополнительные измерения «свернуты» и в макромире не проявляются непосредственно: например, орбитальное движение планет или даже движение электронов в атоме происходят в трехмерии).

Если жизнь в гипотетическом мире основана на наборе частиц, похожем на наш (протоны, нейтроны, электроны), то возникает ряд ограничений на их свойства, например на соотношения масс. Есть и более тонкие «настройки». Известен пример с энергией одного из уровней возбуждения ядра атома углерода, предсказанный Фредом Хойлом. Если бы энергии частиц в так называемой тройной альфа-реакции (синтез ядра углерода из трех альфа-частиц, т. е. ядер гелия<sup>58</sup>) не были особым образом согласованы, то термоядерный синтез в звездах практически не приводил бы к образованию углерода. А без него не могла бы существовать наша форма жизни. Оттолкнувшись от факта ее существования, Хойл предсказал наличие такого согласования параметров. Таким образом, если мы представим себе мир, где массы протонов и нейтронов чуть-чуть отличаются от наших, то там такого совпадения не будет, а значит, там нет и большого количества углерода, т. е. отсутствует жизнь, подобная земной. Отметим, что в нашей вселенной углерод занимает четвертое место по распространенности, а в первую тройку, напомним, кроме гелия, входят водород и кислород, составляющие вместе воду. Иначе говоря, углерод и вода — основа нашей жизни — чрезвычайно распространены.

История с возбужденным уровнем ядра углерода считается примером успешного применения антропного принципа: исходя из факта нашего существования удалось предсказать реальные свойства физических объектов. Правда, это не только наиболее яркий пример, но и практически единственный<sup>59</sup>. Тем не менее и этого достаточно, чтобы более серьезно отнестись к идее, на первый взгляд кажущейся слишком банальной или слишком философской.

Итак, слабый антропный принцип говорит нам, что сам факт нашего существования требует отбросить такие варианты устройства вселенной, при реализации которых нас бы не было. Заметим, что это не дает никакого ответа на вопрос о том, «почему же все-таки так получилось». Поэтому многие ученые не считают антропный принцип частью науки<sup>60</sup>. Иными словами, все равно важно искать ответы на вопросы, почему измерений именно три, почему массы частиц именно такие и т. д. Ведь в физике мы всегда стремимся добраться до сути, понять механизмы явлений.

Сильный антропный принцип выглядит несколько более странно и является куда как более спорным утверждением. Одна из формулировок гласит: «Свойства вселенной должны быть таковы, чтобы в ней могла появиться разумная жизнь». Звучит вполне как тезис какой-нибудь религии. Для многих так оно и есть. Существуют и более наукообразные формулировки, например связанные с некоторыми вариантами интерпретации квантовой механики: «Наблюдатели необходимы, чтобы вселенная реально существовала»<sup>61</sup>. В таком подходе в отсутствие наблюдателя «нет реальности» (дерево в лесу падает беззвучно, если этого никто не слышит). Наконец, еще один вариант связан с возможностью существования мультивселенных. В этой формулировке под словом «Вселенная» понимается вся совокупность миров: «Рано или поздно во Вселенной появляется разумный наблюдатель». Если верен сильный принцип, то автоматически верен и слабый.

Аргументы в пользу сильного антропного принципа очень косвенные и часто, скорее, «философские», даже если они связаны с интерпретацией квантовой механики. Зато такой подход потенциально претендует на объяснение исключительности набора физических параметров в нашей

вселенной. И слабый, и сильный варианты призваны помочь понять, почему наша «снежинка» именно такая. Однако сами по себе эти подходы похожи не на снежинки, а, скорее, на капли воды.

Понимание того, что наш мир в принципе мог бы быть другим (пусть в нем не было бы нас самих), дает простор фантазии. Причем фантазировать можно, рассматривая все уровни: газообразный, жидкий и твердый. Иначе говоря, можно сделать конструирование миров предметом искусства, философских рассуждений или даже рассмотрений в рамках теоретической физики. Ведь если мы не могли бы появиться и/или жить в какой-то вселенной, это еще не значит, что мы не можем ее полностью описать с помощью формул.

Мы можем наслаждаться созданием «снежинки» — теории и ее конкретной формой как творением человеческого разума, вдохновленного реальными вопросами устройства мира<sup>62</sup>. С определенной точки зрения это «игра в бисер», но важно помнить, что методы и задачи теоретической физики не являются отвлеченными от актуальных вопросов науки, включая и прикладные. Скорее уж, это похоже на проектирование фантастических городов, которые никогда не будут построены, но архитектура и инфраструктура которых просчитываются достаточно детально.

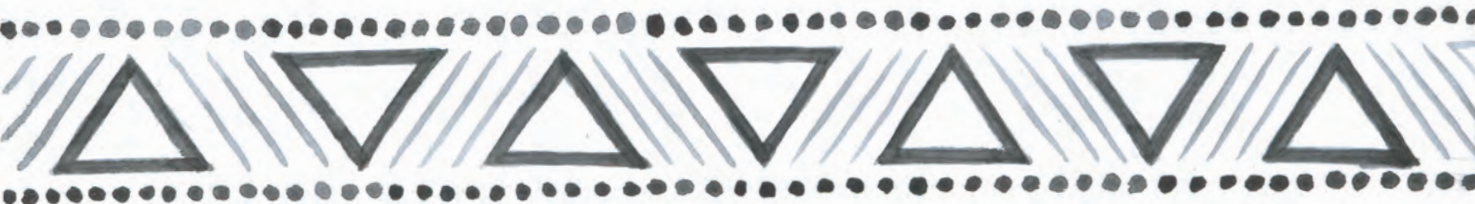
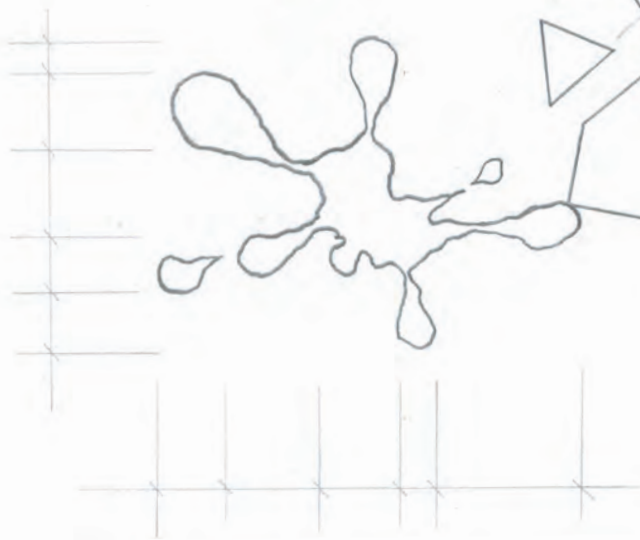
В последние десятилетия появились научные аргументы в пользу осмысленности такого подхода, а также возможность подвести основу под антропный принцип. В частности, некоторые из них связаны с теорией струн и так называемым струнным ландшафтом<sup>63</sup>, о которых мы поговорим в следующей главе.



**А.** Некоторые из решений уравнений, являющихся частью математических моделей, призванных описывать наш мир, могут найти применение для описания свойств других вселенных.

**Б.** Обсуждаются различные варианты гипотезы Мультивселенной. Некоторые из них подразумевают отличие физических законов или значений фундаментальных констант в разных вселенных.

**В.** Правильной может оказаться такая фундаментальная физическая модель, предсказания которой нельзя будет проверить напрямую, так как нам недоступны наблюдения других вселенных.





# Воображаемые миры

В становлении математики важным моментом было появление уравнений и методов их решения «в общем виде». Решая детскую задачу про путника, вышедшего из пункта А в пункт Б и двигавшегося с постоянной скоростью, важно понять, что время рассчитывается как расстояние, деленное на скорость. Тогда мы можем подставлять любые разумные значения и будем получать верные ответы. Иногда уравнения дают нефизичные результаты. Например, квадратное уравнение может иметь отрицательные корни. Если задача была про «сколько яблок», то ответ «минус два» может ничему не соответствовать в нашем привычном мире. Однако это не означает, что ответ вообще бессмысленный (скажем, «минус два электрона» может означать две «дырки» в полупроводнике или в другой ситуации — два позитрона). Корни также могут быть мнимыми, но и мнимым числам нашлось применение в физике. Тем не менее возможны ситуации, когда анализ физической теории приводит к множеству возможных ответов, из которых в наблюдаемом мире, как говорят наблюдения, присутствует только один. А что с остальными вариантами?

Самый простой подход — вообще не задаваться таким вопросом. В самом деле, теорию построили? Уравнения решили? Получили ответы,



один из которых соответствует данным эксперимента? Чего ж еще желать? Желаем понять, почему так происходит.

Один из вариантов ответа — слабый антропный принцип. Мы живем в мире, где реализовался именно такой набор параметров, потому что другие варианты исключают появление наблюдателей вроде нас. Кое-кого этот ответ устраивает. Но многим этого мало. Во-первых, каков механизм реализации конкретного варианта, какими законами природы это описывается? Во-вторых, можно ли было получить иную реализацию, не исключая присутствия наблюдателя (допустим, у нас есть такое решение)? В-третьих, а что с другими решениями, есть ли какие-то другие миры, где они реализованы? И как узнать об их существовании???

Сделаем лирическое отступление. Давайте подумаем, что можно было бы поменять в «Гамлете», сохранив не только самую общую идею, но и ход развития сюжета и основные детали антуража. Без проблем можно было бы сделать практически кого угодно из персонажей на год старше или младше. Наверное, можно было бы перенести действие в другую европейскую страну (скажем, в какой-нибудь итальянский город). Не возникло бы затруднений с вливанием яда не в ухо, а в уху. Но что, если мы рассмотрим более радикальные перемены?

Скажем, если вместо принца взять принцессу, то мы столкнемся с ограничениями, диктуемыми укладом эпохи. Принцесса не могла бы поехать в другую страну в университет. Таким образом, Розенкранц и Гильденстерн превращаются в подруг, с которыми, скажем, главная героиня провела вместе время в монастыре в качестве воспитанницы. Офелия, разумеется, должна стать юношей. С этим вроде бы особых проблем нет, а вот финал теперь не может включать дуэль. Кроме того, принцесса вряд ли смогла бы сильно подружиться с бродячей труппой — пришлось бы как-то иначе вводить в действие актеров. В общем, со сменой главного героя произведение меняется очень сильно.

С другой стороны, мы могли бы перенести действие пьесы в наши дни, и все было бы в порядке. И с университетом, и с поединком, и с артистами. Иначе говоря, мы можем разыграть весь сюжет с героиней вместо героя, но не в эпоху Шекспира, а в наше время (но не в любой стране — остались

еще островки Средневековья и в современном мире, кроме того, в некоторых случаях семью монархов пришлось бы заменить, скажем, на семью магнатов). Иначе говоря, даже воображаемые события не во всех «воображаемых мирах» возможны. Теперь вернемся к физике и математике.

Математика сама по себе, а также математика в физике (физические модели и теории) описывает не только наш мир, но и «возможные миры». Физик-теоретик чаще всего занят работой с моделями (гипотезами, идеями), которые не реализованы в нашем мире. Так происходит, потому что нельзя всегда сразу выбрать верный путь из множества потенциально возможных и, что важно, не противоречащих базовым закономерностям и законам. При этом может быть построена вполне устойчивая модель, и лишь эксперименты или наблюдения покажут, что она не реализована в природе. Примерно такая ситуация возникает в романе «Отягощенные злом, или Сорок лет спустя» братьев Стругацких. Там астрофизик заключает договор с дьяволом, чтобы тот подправил физические константы таким образом, чтобы именно теория этого ученого описывала некоторые реальные процессы.

Наш реальный мир подправлять уже, видимо, поздно. Но не может ли быть так, что теория не работает только в нашей вселенной, а в каких-то других — вполне? Точного ответа мы не знаем, но есть основания полагать, что такое возможно. Это приводит нас к концепции мультиверса, или мультивселенных.

Обсуждается несколько сценариев существования мультивселенных, связанных с разными физическими подходами. Макс Тегмарк в своем обзоре<sup>64</sup> описывает четыре основных варианта. Во-первых, это причинно не связанные области внутри очень большой (или даже бесконечной) единой вселенной. Например, уже в стандартной инфляционной модели наша большая вселенная (наш «пузырек») имеет гигантский объем. Наблюдаемая часть вселенной, ее еще называют Метагалактикой, является ничтожной частью этого пузыря, раздувшегося на стадии инфляции. Мы можем определить наши горизонт частиц и горизонт событий<sup>65</sup>. Первый из них соответствует современному расстоянию до самого далекого объекта, который мы сейчас хотя бы теоретически могли бы увидеть.

А второй — расстоянию, отделяющему нас сейчас от самого далекого объекта, до которого сможет дойти посылаемый нами сигнал. Внутри каждой такой метагалактики, находящейся в огромном объеме, возникшем в ходе инфляции, действуют одни и те же физические законы, а вот начальные условия были различными (можно сказать, «бог по-разному бросил кости»). Но из-за огромного количества галактик, звезд, планет в каждой из мириад метагалактик возможны и очень похожие комбинации параметров. Это необязательно означает, что где-то есть ваша точная копия (если бы мы говорили о бесконечном объеме, то означало бы), тем не менее вполне вероятно, что где-то есть очень похожая на Землю планета, на которой происходят в целом сходные события.

Во-вторых, инфляционная космологическая модель<sup>66</sup> дает нам еще один тип мультивселенных. Кроме нашего крайне раздувшегося «пузырька», должно быть бесчисленное количество других. Вот это уже настоящие другие миры (там бог играет не только в кости, но и где-то в шахматы, а где-то — в лапту). Согласно, например, теории струн, в них могут реализовываться разные физические законы. Современная физика не видит способа путешествовать между такими мирами (вероятнее всего, таких путей и нет). Тем не менее мы можем пытаться строить физические модели для них, основываясь на наших знаниях.

В-третьих, мультивселенные возникают в так называемой эвереттовской интерпретации квантовой механики<sup>67</sup>. В данной модели каждый раз, когда, например, электрон в известном опыте проходит через одну или другую щель, реализуются оба варианта, но лишь один из них — в нашей вселенной. Такую интерпретацию квантовой механики называют *многомировой*, потому что можно сказать, что в результате мы оказались в мире, где электрон прошел через правую щель. При этом существует и мир, где он прошел через левую. В разных мирах действуют одинаковые законы, и в них одинаковые наборы фундаментальных констант. Просто «мы с разных сторон смотрим на кубики, брошенные богом».

Среди трех перечисленных вариантов первый — самый банальный, последний — самый спорный. Наконец, четвертый из числа обсуждаемых

Тегмарком сценариев еще более необычен. Здесь речь идет уже о «другой математике». Его мы отложим до следующей главы.

Из всей троицы вариантов лишь второй соответствует вселенным с разными физическими законами\*. На настоящий момент наиболее весомую аргументацию для него предоставляет теория струн. Особенностью современных версий этого сценария является великое множество вариантов так называемого ложного вакуума. Именно вакуум конкретной реализации теории определяет базовые свойства мира. Математика, на которой базируется теория струн (многообразия Калаби — Яу), предсказывает гигантское количество возможностей, достигающее до  $10^{500}$ . Это невообразимо большое число, если сравнивать хоть с чем-то соразмерным нашему миру. Скажем, если объем видимой части вселенной выразить в планковских единицах, то мы получим «всего лишь» число порядка  $10^{186}$ , а количество частиц обычного вещества (протонов, нейтронов, электронов) в ней составляет около  $10^{81}$ . Таким образом, теория струн (являющаяся пока лишь одной из нескольких конкурирующих моделей) предсказывает гигантское количество возможных вселенных с разными свойствами.

Какие-то из множества мультивмиров струнной космологии будут отличаться от нашего не сильно, какие-то — радикально. В каких-то возможна жизнь земного типа, в каких-то она может существовать, лишь будучи принципиально отличной от известной нам, а какие-то вовсе необитаемы. В моделях вечной инфляции все эти варианты могут реализоваться. И, если окажется, что теория струн является правильной моделью в нашей вселенной, а, кроме того, теория космологической инфляции получит окончательные наблюдательные подтверждения, у нас будут сильные аргументы в пользу существования фантастически большого числа других вселенных, которые мы сможем изучать, скорее всего, лишь теоретически, т. е. лишь решая уравнения и строя компьютерные модели.

\* Отметим, что речь идет об аналогах того, что мы сейчас называем физическими законами. Наверняка, если этот вариант осуществляется, то можно сформулировать метазакон, единые (в некотором высшем смысле) для всех вселенных мультиверса.

Наши эксперименты и астрономические наблюдения могут позволить проверить предсказания теории струн и инфляционной модели в пределах метagalактики. Допустим, что и та и другая гипотезы пройдут эту проверку. Таким образом, мы установим, что они верно описывают свойства нашего мира. Из правильности этих двух теорий автоматически должно следовать существование определенного типа мультивселенных. Математика будет говорить нам об этом. Однако прямые эксперименты или наблюдения других миров могут оказаться невозможными. Значит, мы окажемся в довольно интересном положении: у нас появится уверенность, основанная на теоретических выводах, но не будет возможности провести решающие тесты. Зато деятельность по построению теоретических описаний других вселенных станет более осмысленной и оправданной.

Итак, работа физика-теоретика нередко связана с исследованием гипотетических возможностей, согласующихся в первую очередь с математическими правилами. Чаще всего обсуждаются вероятные свойства нашего мира. Хотя в некоторых случаях речь идет о том, как в принципе могут быть устроены разные вселенные. Возникает образ нашей Метagalактики, являющейся крохотной частью гигантской (не исключено, что и бесконечной) структуры возможных миров. Теоретические физические модели иногда выглядят как «одежда для несуществующих существ» в кодексе Серафини. Это одежда, сделанная если не из той же ткани, то по крайней мере из тех же нитей, что и наша. А можем ли мы представить себе другие нити?



**А.** Можно выделить три подхода к оценке роли математики в описании и познании мира: открываемая нами математика и есть истинная структура мира; математика является наиболее адекватным языком для описания реального мира; математика не отражает истинную структуру мира, а чрезмерное увлечение математизацией всех наук способно повести нас по ложному пути.

**Б.** Если математика лежит в основе структуры нашего мира, то можно рассуждать о мультивселенных, описывающихся другой математикой.







# Другая математика?

Если акции все время растут, то к радости могут начать примешиваться тревога и сомнения: не пора ли подумать о том, чтобы все их сбросить? Ведь курс не может расти вечно? Или может? На рынках вряд ли вероятен вечный рост, а вот с научным прогрессом ситуация не столь очевидна. С одной стороны, не будет большим преувеличением сказать, что вот уже почти полтысячелетия продолжается период практически экспоненциального роста естественно-научного знания, сопровождающийся столь же быстрым развитием техники. С другой — постоянно звучат упреки в односторонности, однобокости этого процесса. В частности, потрясающие успехи, связанные с применением математики в естественных науках, у некоторых могут вызывать некий дискомфорт.

Во-первых, критику может вызывать чрезмерное доверие к математике при ее применении как в естественных и технических науках, так и в социально-гуманитарных и экономических. У многих возникает желание отталкиваться в исследованиях не от реальности, а от ее математического описания. Иными словами, ход мысли начинается не с загадки о свойствах реальных объектов, не с изучения их свойств и взаимосвязей между ними, а с анализа уравнений и их модификации: «Давайте

добавим еще один член в лагранжиан». Многократно такой подход демонстрировал свою эффективность. Но еще чаще, о чем знают только специалисты, бывает наоборот.

Вполне типична такая ситуация: исследователь освоил определенную методику и начинает плодить ряд публикаций, основанных на достаточно механическом переборе каких-нибудь экзотических вариантов решений, которые, с одной стороны, не имеют отношения к реальности, а с другой — не способствуют сколь-нибудь значимому прогрессу в области математики или математической физики. Научные журналы заполнены огромным количеством таких статей, что многим, естественно, не нравится. Хотелось бы как-то уменьшить этот поток, однако ситуация не так проста. Никто не хочет выплеснуть с водой ребенка. Кроме того, нелишне заметить, что это очень дешевая наука, ведь никакие приборы и установки не нужны, только «бумага, карандаши и ластик» (хотя в последние годы к этому необходимо добавить и компьютеры, иногда с приставкой «супер-»). К тому же авторы таких статей часто являются вузовскими преподавателями, и подобный вид научной активности можно рассматривать и как «умственную гимнастику», позволяющую им поддерживать интеллектуальную форму, определенный исследовательский тонус.

Есть, однако, и более фундаментальная критика. Если первое сомнение, описанное выше, свойственно в основном самим участникам процесса, то второе звучит извне. В какой-то мере эта критика всего научно-технического направления развития в целом. Она состоит в сомнении в состоятельности самого подхода — математического описания мира. Прочитав еще раз Николая Гумилева: «А для низкой жизни были числа, // Как домашний, подъяремный скот». Не отрицая достигнутых успехов как таковых, критики считают, что это глобально неверный путь. «Истинная» структура мира не имеет отношения к математике, а потому, затрачивая основные усилия — и интеллектуальные, и финансовые — на такой способ познания мира (мы же понимаем, что, перефразируя Хайдеггера, «Большой адронный коллайдер заработал еще в теореме Пифагора»), мы уходим от возможности познания его сути.

Спорить с таким утверждением довольно сложно, так как разные стороны практически говорят на разных языках. Мы не знаем «истинных» первооснов мироздания. Сейчас у нас есть довольно эффективный путь постоянно узнавать что-то новое об устройстве нашего мира. Рабочая гипотеза состоит в том, что надо следовать этому пути, не забывая, в принципе, о других. Если мы увидим, что этот путь когда-нибудь перестанет работать, можно будет пробовать новые. Если окажется, что какой-то другой подход становится очень эффективным, то, очевидно, он перетянет на себя ресурсы, так как в познании мира учеными в первую очередь движет любознательность, и они сами перебегут туда, где открываются новые возможности ее удовлетворить.

Интересно заметить, что первые этапы формирования математики проходили достаточно независимо в разных регионах. При этом, используя разные подходы к записи математических выражений, везде ученые решали сходные задачи, разрабатывали похожие методы и, главное, закладывали основы одного и того же подхода к изучению мира и развития одной и той же модели математики. Иначе говоря, нет сомнений, что при длительном независимом развитии и в Египте, и в Индии, и в Китае, и, возможно, в Южной и Центральной Америке возникла бы одна и та же математика. Вероятно, где-то были бы сильнее развиты геометрические подходы, где-то — алгебраические, какие-то народы больше продвинулись бы в статистических методах, другие — в теории чисел. Но в целом в результате исследований раскрывалась бы одна и та же математическая структура. Возможно, это связано с особенностями нашего физического мира: отталкиваясь от конкретных запросов, диктуемых практикой и, таким образом, связанных со свойствами природы, мы разрабатываем одни и те же наборы методов, складывающиеся в единую стройную систему. Возможно и обратное.

Пока кто-то критикует чрезмерную математизацию науки, среди ученых появляются сторонники другой крайности: математика не просто отражает структуру мира, она и есть эта структура. Такой подход, например, развивает Макс Тегмарк<sup>68</sup>. Мы уже цитировали известное высказывание Галилея о том, что книга природы написана на языке математики.

Существенно, что здесь подразумевается не то, что мы описываем природу таким способом, а то, что «книга» уже существует до того, как мы начинаем пытаться ее прочесть, т. е. математическое описание предшествует нашим попыткам понять устройство мира. Можно вспомнить идеи пифагорейцев о математической в своей основе структуре мира. Есть и более современные примеры такого подхода к оценке взаимоотношений физической и математической структуры реальности.

Например, Поль Дирак говорил о том, что следует пытаться искать физические аналоги для всех математических структур, т. е. начинать не с анализа физических объектов, пытаясь разобраться в том, как их лучше описывать математическими методами, а с математических элементов, подыскивая их реализацию в физическом мире. Правда, существенно, что здесь предложен сложный творческий подход, а не встречающийся в современной научной литературе механический перебор решений или добавление новых слагаемых и сомножителей, о чем речь шла выше.

Предлагавшийся Дираком подход был бы крайне продуктивным, если и в самом деле открываемая математиками структура является истинной структурой мира во всей своей полноте, во всем многообразии. Другое дело, что так же, как математическая структура открывается нам не сразу, а в результате длительного поступательного движения вперед, так и о физических объектах и процессах мы лишь постепенно узнаем что-то новое. Поэтому попытки настойчиво искать аналогии между известными математическими объектами и уже выявленными свойствами реального мира могут долго не давать положительного результата или заводить не туда, потому что пока не обнаружен партнер с той или другой стороны.

Если наша вселенная является математической структурой, то это открывает интересное направление для рассуждений о других вселенных с другой математикой. Однако такая экзотика выходит за рамки нашего обсуждения. Сейчас идея «математической вселенной» кажется лишь привлекательной концепцией, скорее любопытной, чем многообещающей, скорее философской, чем научной, поскольку аргументы в ее пользу достаточно косвенны. Пока большинство исследователей считают математику лишь удивительно подходящим способом описания мира.

Такая интерпретация похожа на свод очень хороших общественных законов. В основе жизни общества, безусловно, лежит набор неких внешних свойств. Человек — продукт эволюции, и многие его устремления, реакции, чувства базируются именно на этом. Без понимания биологических основ поведения очень трудно понять многие мотивы, двигающие людьми. Успехи современной антропологии позволяют гораздо лучше понять происхождение морали, религии<sup>69</sup>.

Представляете, как трудно было, скажем, Дэвиду Юму?<sup>70</sup> Было бы здорово создать «единую теорию человеческих обществ», но пока нам не хватает для этого знаний. Кроме того, вряд ли получилось бы эффективно использовать ее для «проектирования будущего». Мы могли бы в итоге успешно объяснять прошлое с учетом сильно меняющихся обстоятельств в жизни разных сообществ (что напоминает возможное применение гипотетической единой теории в физике для частных случаев низких скоростей, слабых гравитационных полей, макроскопических объектов и т. д.). Но написание идеальных законов для современного и будущего общества натолкнулось бы на сильную обратную связь.

Показательно, что социальные законы плохо описываются с помощью математических методов. Еще хуже — психологические. Это может указывать на то, что в данном случае подлежащая структура не соответствует современным математическим методам. Удастся ли найти (разработать) необходимые подходы в рамках современной математики, неизвестно. А вот в физике математические методы работают несравненно лучше. Хотя иногда есть ощущение, что в некоторых случаях теоретики вынуждены прибегать к сложным (и потенциально бесперспективным) конструкциям, потому что так их ведет математика. Разумеется, математика тут не виновата: она не обещала всегда направлять физиков туда, куда им надо.

Например, в настоящее время в физике очень перспективным считается сценарий с дополнительными измерениями. Напомним, что впервые подход был использован в модели Калуцы — Клейна с целью дать единое описание гравитации и электромагнетизма. С одной стороны, авторы показали потенциальную перспективность подхода, с другой — конкретная

модель не сработала (еще одна тупиковая веточка на эволюционном древе физических теорий). На протяжении десятилетий разные авторы многократно пытались двигаться в этом направлении, что привело к появлению ряда перспективных подходов, а также к развитию ряда разделов математической физики. Однако проводились и проводятся различные эксперименты с целью обнаружить присутствие дополнительных измерений<sup>71</sup>, и на сегодняшний день установлены важные пределы на их параметры.

В настоящее время концепция дополнительных измерений является одним из краеугольных камней теории струн. Попав в лабиринт пространств Калаби — Яу<sup>72</sup>, смогут ли физики найти выход или им придется возвращаться обратно?

Часть IV

---

# Предвидение



**А.** При решении уравнений часто получают неожиданные результаты, не только не соответствующие, но и противоречащие ожиданиям и при этом правильно описывающие ранее неизвестные свойства реального мира.

**Б.** В рамках теоретической физики решение уравнений — это тоже своего рода эксперимент по изучению возможных особенностей математической структуры нашего мира (или одной из мультивселенных, описываемых той же математикой).





# Неизбежность математических выводов

Слово «формула» пришло из юриспруденции и подразумевает неизбежность вывода (виновность — невиновность) в зависимости от выявленных обстоятельств. Благодаря использованию математического аппарата мы имеем возможность проводить процедуру строгого вывода одних уравнений из других и вычислять итоговый результат. Наличие единой математической структуры, элементы которой взаимосвязаны с помощью строгих правил, гарантирует правильность последовательности манипуляций. Важно только сформулировать вашу гипотезу на языке математики, что в случае физики и родственных областей удается делать достаточно хорошо. Именно это свойство физики объясняет значительную часть ее успехов.

Довольно часто мы сталкиваемся с такой цепочкой: физическая гипотеза — ее математическая формулировка — процедура работы с гипотезой в математической форме — расчеты — сравнение с экспериментами и наблюдениями. Чаще всего лишь процесс расчетов бывает достаточно прост. Все остальные этапы могут оказаться очень сложными.

Начинается все с идеи. По мнению многих сторонних наблюдателей, этим все практически и заканчивается, а дальше, как говорится, дело техники. Однако крайне редко случается именно так. Как мы обсуждали выше (см., например, главу 9), без формулировки на языке уравнений (а это почти всегда весьма нетривиальная задача) идея практически бесполезна. В отсутствие этого пункта мы находимся еще на донаучной стадии.

Идей обычно много, но мало хороших. Здесь у сторонних наблюдателей также иногда возникает странная иллюзия: если они не слышали про какую-то идею (естественно, на уровне научно-популярной литературы и всяких новостей, но будем предполагать, думая о людях только хорошее, что они прошерстили и профессиональные издания хотя бы с помощью [scholar.google](https://scholar.google.com/)), то думают, что она никому не приходила в голову, и немедленно спешат поделиться ею со всем человечеством (или с отдельным представителем научного сообщества путем написания ему электронных писем или сообщений в соцсетях). Почему это иллюзия? Дело в том, что ученых в самом деле много. И идей у них много. Но мысль надо в достаточной степени развить, иначе добросовестные исследователи ее не только не публикуют, но даже и не озвучивают на публике, разве что обсуждают с коллегами в узком кругу (о различном статусе гипотез см. приложение 10).

Физическую гипотезу, если она не связана непосредственно с организацией нового эксперимента (или проведением наблюдений), надо сформулировать в виде формул. Иногда это может потребовать какого-то нового, ранее не использовавшегося в физике математического аппарата. Правильно реализовать такое удастся немногим, это высший пилотаж. Обычно же используется стандартная математика, уже применяемая в данной области исследований.

Иногда в основе лежит не совсем физическая гипотеза. Иначе говоря, исходно размышления не касаются, например, непонятных свойств известных объектов, которые надо объяснить. Начальным пунктом рассуждения может быть собственно какое-то уравнение. Разница в подходе (начинать с физики или математики) может объясняться как случайными обстоятельствами, так и личными склонностями и предпочтениями, т. е.

индивидуальным стилем рассуждений и научной работы конкретного ученого. Но все равно нужна новая идея (теперь уже более математическая, чем физическая) — важно обратить внимание на какое-то ранее незамеченное свойство формулы.

Итак, пусть у нас есть идея и мы смогли записать исходные формулы. Наша цель — получить числа, которые можно проверить с помощью экспериментов (уже проведенных или будущих). Именно это будет ключевым критерием истинности. Работа с исходными выражениями (решение уравнений) — чаще всего совсем не техническая процедура. Хотя не исключено, что в ближайшие годы она все более будет становиться таковой благодаря развитию техники численных вычислений, включая простые формы искусственного интеллекта. Уже сейчас сложный, но потенциально берущийся на «листочке» интеграл (не говоря уже о более сложных ситуациях) часто или считается численно, или с ним работают в программе вроде Mathematica или Maple.

Если уравнения решены (т. е. это сделано аналитически или же написаны программы для их решения), то теперь можно заняться собственно вычислениями для интересующего нас набора параметров<sup>73</sup>. Ответ будем сравнивать с тем, что наблюдается в реальном мире.

Здесь нас будет интересовать часть работы от записи исходных уравнений до расчетов, поскольку на этапе использования матаппарата исследователей могут поджидать сюрпризы: порой результат не соответствует ожиданиям, более того, он их превосходит. При работе физика-теоретика часто выходит, что «так получилось». Метод сам вывел на определенный результат, как говорят, «уравнение оказалось умнее своего творца». Это важная часть «непостижимой эффективности математики в физике».

Как так может быть? Ответ отчасти состоит в том, что применяемые математические методы базируются на структуре, которая в своей основе имеет вполне реальные вещи. Ведь математика стартовала с конкретных задач, касающихся практики. Ее неоднократно сравнивают с языком; и в самом деле, вначале это был один из способов описания реальности и одновременно метод манипулирования с ней. Таким образом, основы математики были сформированы в тесном контакте с бытовыми,

в общем-то, задачами\*, а потом оказалось, что этот язык можно развивать, опираясь уже не на внешние запросы, а на внутренние связи.

Тем не менее не только в самом начале, но и в процессе своего развития математика постоянно получала запросы от различных областей знания, изучающих природу или социальные и лингвистические структуры. Речь шла не только о вопросах типа «Нет ли у вас подходящего инструмента для такой-то задачи?», но и о разработке новых методов. Иными словами, если придерживаться точки зрения, что математика — это создаваемая человеком абстрактная структура, то важно, что и в ее фундаменте лежат наблюдаемые закономерности, и в ходе строительства некоторые этажи проектировались по заказу.

Результатом стало «строение», поразительным образом соответствующее реальному миру<sup>74</sup>. Это как дом, хорошо вписанный в сложный пейзаж. Его проект начали создавать, исходя из ключевых требований (защищать от дождя и ветра) и базовых особенностей местности (солнце — на юге, холодный ветер с моря — на севере), затем стали учитывать и «внутренние причины», не связанные с «пейзажем» (от типичного набора помещений — столько-то спален, столько-то ванных комнат, столько-то гостевых, кухня, гостиная и т. д. — до чисто «механических» особенностей существующих стройматериалов, их наличия в окрестностях, а также таких «наивных» параметров, как рост людей и т. п.<sup>75</sup>), но по ходу строительства в проект постоянно вносились коррективы уже в связи с вновь выявившимися внешними причинами (появились новые члены семьи, завели козу). В итоге мы поражаемся, насколько уместно постройка смотрится в данном месте и как в ней всем комфортно.

Однако представьте свое удивление, если при строительстве дома, буря скважину, чтобы провести воду, вы обнаруживаете источник с удивительно целебной минеральной водой, при рытье котлована находите древний клад и т. д. С решением уравнений такое происходит. Одним

\* Чтобы представить себе альтернативный вариант, подумайте, например, о сложной логической игре с богатой структурой. Скажем, о шахматах (можно представить и какие-то продвинутые варианты — трехмерные шахматы, в которые играли Шелдон с Леонардом в «Теории Большого взрыва»). Никто не говорит о «непостижимой эффективности шахмат».

из самых ярких примеров получения неожиданного результата служит предсказание позитрона Полем Дираком в 1928–1931 гг.

Целью Дирака было записать уравнение для описания свойств электрона с учетом и квантовой механики, и специальной теории относительности. Решение уравнения давало не только состояния с положительной энергией (которые и соответствовали электрону), но и с отрицательной. Анализ этой «аномалии» привел к выводу о существовании антиэлектрона — частицы с положительным зарядом (равным по модулю заряду электрона) и такой же, как у электрона, массой. При взаимодействии друг с другом электрон и антиэлектрон должны исчезать (аннигилировать), а их энергия — переходить в излучение. Это стало рождением идеи антивещества. Позитроны были обнаружены экспериментально в 1932 г. при изучении космических лучей. Затем антипартнеры были открыты и для других частиц.

В настоящее время антивещество изучают и на ускорителях, и в космической среде. В реакциях столкновений тяжелых ионов на коллайдерах удалось даже получить ядра антигелия. Кроме того, в специальных установках были созданы атомы антиводорода: вокруг антипротона вращается позитрон. В космических лучах регистрируются позитроны и антипротоны (ядра антигелия и более тяжелых элементов пока не обнаружены, но их активно ищут). Антипротоны и позитроны возникают в столкновениях протонов высоких энергий с ядрами атомов в межзвездной среде. В дополнение к этому важным источником позитронов могут быть радиопульсары. Кроме того, античастицы могут возникать из-за аннигиляции частиц темного вещества и испарения черных дыр, но соответствующие избытки пока не выявлены.

Симметрия, существующая в уравнениях, рассказавших нам об антивеществе, наводила на естественную мысль о том, что во вселенной должно быть одинаковое количество вещества и антивещества. Однако они не могут быть перемешаны, так как в этом случае будут идти интенсивные процессы аннигиляции, сопровождаемые наблюдаемыми последствиями. Вещество и антивещество исчезало бы, порождая мощные потоки жесткого излучения. Современные данные наблюдений говорят,



что доля антивещества в межзвездной среде всего лишь  $10^{-15}$ – $10^{-16}$ . Иначе говоря, на один антипротон приводится миллион миллиардов протонов. Если бы где-нибудь в Галактике поместили звезду из антивещества, то, превратившись в красный гигант или взорвавшись как сверхновая, она породила бы мощное аннигиляционное гамма-излучение.

Значит, единственная возможность — это большие области, в которых доминирует вещество, и такие же большие области из антивещества. Андрей Вознесенский писал: «Да здравствуют Антимиры! // Фантасты — посреди муры». Можно представить себе галактики и их скопления из антивещества, отделенные от их «антиподов» огромными практически пустыми пространствами. Но и тут не все просто. Ведь когда-то не существовало галактик и звезд, а плотность вещества была гораздо выше. Космологические данные говорят против того, что в видимой части вселенной может существовать симметрия вещества и антивещества. Интересно, что ключевой результат был получен Кохеном, Де Рухолой и Глэшоу в 1998 г. Но еще в 1961 г. Вознесенский заканчивал свое стихотворение «Антимиры» так:

...Знакомый лектор мне вчера  
сказал: «Антимиры? Мура!»  
Я сплю, ворочаюсь спросонок,  
наверно, прав научный хмырь...

По всей видимости, в ранней вселенной существовал небольшой перевес вещества над антивеществом. Поскольку в результате аннигиляции образовывались фотоны, мы можем сказать, насколько невелик был перевес. Сейчас на одну частицу вещества приходится более миллиарда фотонов. Значит, в раннюю эпоху вещества было примерно на одну миллиардную больше — по числу частиц, — чем антивещества.

Как сформировался этот небольшой перевес, доподлинно неизвестно. Данный вопрос называют проблемой бариогенезиса<sup>76</sup>. В 1960-е гг. Андрей Сахаров сформулировал три ключевых условия, необходимых для бариогенезиса. Во-первых, нарушение барионного числа. В обычных условиях

число барионов не меняется. Однако известны процессы, в которых сохраняется лишь некоторая комбинация числа барионов и лептонов<sup>77</sup>. Вторым условием является нарушение так называемой CP-инвариантности<sup>78</sup>. В том, что это условие может выполняться, также нет сомнений. Наконец, третье условие — отсутствие теплового равновесия. Это может обеспечиваться, например, быстрым расширением вселенной в первые доли секунды — сразу после стадии инфляции.

Во время эпизода космологической инфляции барионное число можно считать равным нулю. Окончание этого эпизода в жизни вселенной соответствует собственно Большому взрыву — заполнению расширяющейся вселенной горячим плотным веществом. На ничтожные мгновения быстрое расширение приводит к падению плотности и температуры, в результате чего могут стабильно существовать барионы и антибарионы. Тут-то и должна происходить «битва между веществом и антивеществом».

В итоге наш мир состоит в основном из вещества. Но и в естественных процессах, и в экспериментах могут рождаться античастицы, предсказанные теоретиками благодаря свойствам решений математических уравнений.

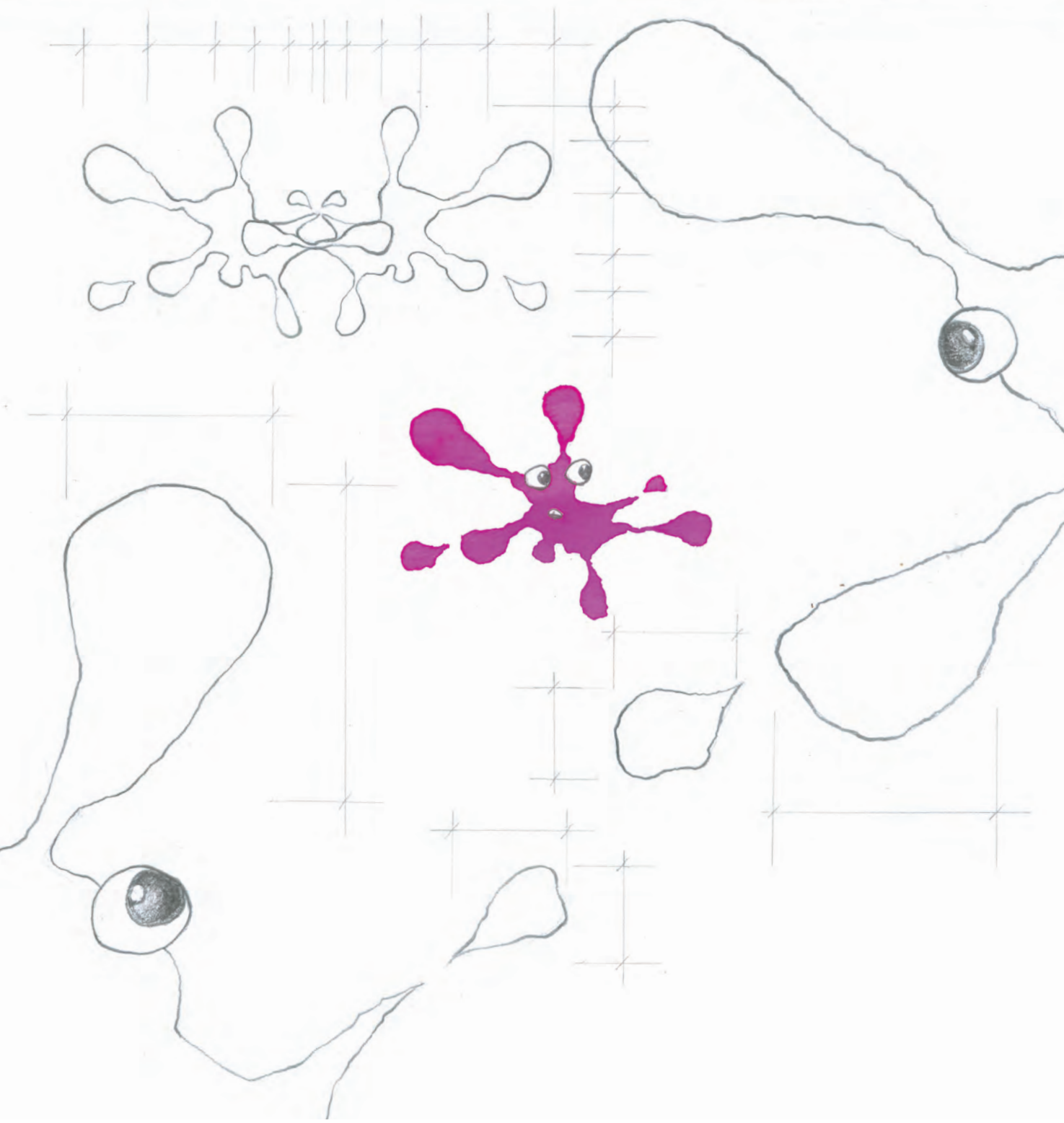
На протяжении всей истории современной физики мы видим, как использование процедуры математического анализа уравнений приводит к удивительным предсказаниям, некоторые из которых оказываются верными. Потянув во времена древних греков за нужную ниточку, мы постепенно вытаскиваем огромную структуру мира (и можем использовать это знание в технике). Как писал Мартин Хайдеггер, «атомная бомба взорвалась уже в поэме Парменида». В этом смысле современная физическая картина мира в специфическом смысле предопределена успехами довольно древней математики.

**А.** Как физические приборы помогают нам увидеть и измерить процессы, недоступные нашим органам чувств, так математика позволяет выявлять и описывать особенности и закономерности, к которым трудно подступиться другими методами.

**Б.** В процессе познания мы можем столкнуться с принципиальными сложностями: во-первых, некоторые концепции, например в теоретической физике, имеющие полноценное математическое (или компьютерное) описание, могут исключать полностью адекватные образы и, соответственно, понимание на «человеческом» уровне; во-вторых, некоторые фундаментальные теории могут оказаться лишенными возможностей для их прямой проверки в экспериментах; в-третьих, продвижение в области развития математических методов может натолкнуться на невозможность достаточно полного доказательства некоторых важных утверждений из-за объема необходимой работы.

**В.** Полноценное понимание включает в себя возможность применения знаний.

# 后西文设计





# «Приподнимем занавес за краешек...»

Мир не сводится лишь к тому, что мы непосредственно воспринимаем нашими органами чувств. Но также, видимо, нельзя сказать, что именно математическое описание — это и есть «сама реальность». Скорее, математизированные подходы в естественных науках (в первую очередь в физике) позволяют заглянуть за занавес кажимости, показывая закономерности в природных процессах. И эти закономерности мы можем формулировать в виде законов природы, записанных в виде набора уравнений. Совокупность уравнений вместе с соответствующим описанием формирует теорию. В настоящее время различные комплексы явлений описываются различными теориями, зачастую не имеющими друг с другом никакой связи. Рабочая гипотеза состоит в том, что можно создать единую теорию (ТОЕ), из которой все другие будут вытекать как частные или предельные случаи.

Поэт может подобрать нужные слова, художник — вызвать эмоции изображением на холсте и рассказать внешнему — материальному — миру о внутренних чувствах (в том числе не только своих, но и разделяемых

другими — теми, кому выразить их сложнее). В некотором смысле ученый с помощью математики проделывает обратную процедуру: трудно-обнаруживаемые закономерности внешнего мира преобразуются в умопостигаемые модели.

Философия науки периодически обращается к разнообразным вопросам изучения мира; некоторые из них касаются формульного представления знаний. Очевидно, что наш мозг эволюционно не приспособлен для «мышления в формулах». Означает ли это, что с языка уравнений всегда нужен перевод на что-то более доступное нам? И на что именно: слова, визуальные образы? Кроме того, критерием истинности мы считаем сравнение с наблюдениями. Теория дает нам в конце концов числа, и их же дает эксперимент. Мы сравниваем первые со вторыми. А если это станет невозможным? Что нас ждет, если мы и дальше будем поднимать занавес?

Начнем с обсуждения роли визуализации и вербализации в понимании. Что, если наиболее адекватное описание мира будет со временем получено не в виде формул, которые можно понять и переформулировать словами, а в виде, скажем, численного моделирования с помощью клеточных автоматов? Будем ли мы тогда называть удачные модели «элементами понимания» устройства мира, или будем манипулировать им без понимания в нашем современном смысле?

Здесь мы снова можем вспомнить о том, что в астрономии понятие «видеть» претерпело существенные изменения как из-за освоения невидимых диапазонов электромагнитного спектра и других видов излучения (включая данные по нейтрино и другим частицам), так и благодаря применению сложных методов обработки данных. В физике постоянно используются необычные виды многомерных «пространств», например фазовое пространство. В космологии любят использовать замены для времени, применяя, скажем, конформное время, а при изучении черных дыр постоянно вводятся экзотические системы координат, помогающие лучше проиллюстрировать и понять те или иные процессы. Но все же в том или ином виде концепция изменений величин в некоторых «пространственных» координатах, как правило, сохраняется.

Наше мышление работает в терминах пространства и времени. Уже объединение этих понятий может вызывать сложности. Многомерные модели запутывают еще больше, если мы хотим внятных визуальных образов (вы можете представить себе пятимерный куб?). Теперь задумайтесь: что, если мы придем к модели, в которой на самом фундаментальном уровне нет пространства-времени<sup>79</sup>. Так, например, обстоит дело в петлевой квантовой гравитации (и вообще во многих моделях, описывающих квантовые и гравитационные процессы вместе). В таком случае, скорее всего, мы не сможем в обычном смысле представить себе происходящее в виде сколь-нибудь привычных образов, однако сумеем строить модели и проводить расчеты. Именно такая ситуация была недавно рассмотрена Себастьяном де Харо (Sebastian de Haro) и Хенком де Регтом (Henk de Regt)<sup>80</sup>.

Эти авторы предлагают считать, что мы понимаем тот или иной процесс с научной точки зрения, если выполняются три условия. Первые два вполне очевидны: объяснение не должно быть внутренне противоречивым и не должно вступать в противоречие с эмпирическими данными. Третье можно сформулировать так: объяснение должно быть основано на теории, которую мы можем применять (например, ОТО — это не только принцип эквивалентности, но и возможность рассчитывать орбиты космических тел). Важным проявлением третьего условия является возможность использования теории для качественного предсказания протекания феноменов без детальных расчетов. Для появления такой возможности нужна интерпретация теории, т. е. ее описание на смысловом уровне, а не только в виде системы уравнений.

Понимание отличается от просто «знания». Любой сдававший экзамен мог с этим столкнуться: вы все отбарабанили по билету, но преподаватель спрашивает: «А почему?» В итоге — максимум тройка. Знания были, понимания — нет. В вульгарном смысле каждый создает свою интерпретацию теории, о которой что-то узнает, создавая некоторые визуальные образы, помогающие представить, как там все происходит. Так что для большинства людей научное понимание неразрывно связано с визуализацией. Наличие представляемых образов также облегчает



манипулирование с элементами теории, т. е. ее применение для описания (и предсказания) поведения объектов.

Представление о том, что означает «понимать», менялось с течением времени. Например, есть разница между тем, что вы что-то уложили у себя в голове (сюда попадают и «интуитивно понятные — для вас — идеи», и «у меня есть внутренняя уверенность, что...»), и тем, что вы можете связно и аргументированно изложить. Наконец, есть еще один уровень — применение знаний. Скажем, читатель хорошей научно-популярной литературы ощущает, что нечто стало понятным. Автор научно-популярной литературы может изложить некую модель, т. е. объяснить ее другим. Наконец, ученый способен применять и развивать это знание. Иными словами, речь идет не просто о знании и даже не о знании причин, а о некотором навыке, позволяющем применять знания, в том числе для получения новых знаний.

В ряде случаев переходы между этими категориями оказываются затруднительными. Сейчас очень распространена ситуация, когда, начитавшись научно-популярной литературы и пресс-релизов, энтузиасты идут «нести свет в массы», но получается это у них плохо, особенно если начать задавать им вопросы (какие-то знания есть, а понимания — нет, как у студента на экзамене в примере, приведенном выше). Хорошие популяризаторы, не работая профессионально в какой-то конкретной научной области, иногда пытаются предстать в ней в роли экспертов, но оказывается, что их знания недостаточно глубоки (они на самом деле не понимают важных деталей, не понимают причины), и оценка оказывается в лучшем случае поверхностной, а нередко и ошибочной.

На этих разных уровнях понимания часто задействованы разные средства. Стороннему интересующемуся человеку (скажем, мне — в области биологии) важно *представить* себе некоторую научную концепцию на уровне «пешехода» (пешехода XXI века, с высшим образованием и тысячей прочитанных книг за плечами, но все равно *пешехода*). Огромная удача — придумать новый яркий образ, хорошо поясняющий какую-то простую научную концепцию или хотя бы какой-то ее существенный аспект. Именно к таким образам и должен стремиться популяризатор. Но все это не дает

возможности *работать* в соответствующей области. Это верно не только для популярного уровня. Современная наука стала достаточно сложной и разветвленной, так что и университетские преподаватели оказываются в положении, когда в своих общих лекционных курсах, касающихся очень широкого круга вопросов, они оперируют понятиями, которыми не владеют на уровне профессионалов в соответствующей узкой области.

На этапе применения сложных понятий часто визуальные образы уже оказываются не нужны. На этом уровне люди думают по-другому, поэтому вполне типична ситуация, когда ведущий эксперт в какой-то сложной научной сфере не может «в двух словах, буквально на пальцах» объяснить, казалось бы, базовые понятия из его области. Например, «как представить себе вечную инфляцию». Поэтому я категорически не согласен, что настоящий специалист *в любой* области должен уметь объяснить, чем он занимается, пятилетнему ребенку. Не всегда это можно объяснить на должном уровне и 55-летнему доктору *других* наук.

По мере развития науки таких ситуаций может быть все больше, в том числе и в областях, касающихся самых первооснов. Это связано с тем, что, углубляясь в строение мира, мы оказываемся в областях, сильно отличающихся от тех, в которых мы эволюционировали. Наш разум оказывается не приспособлен для непосредственного восприятия (представления) того, что там происходит. Нам приходится учиться понимать по-новому, в частности обзавестись новой интуицией, так как старая не годится. Уже с квантовой механикой, СТО и ОТО возникают проблемы. Но нас может ждать еще более радикальный переход, если на каком-то микроуровне не просто изменяются, а исчезают понятия пространства и времени\*. И здесь, видимо, под пониманием мы будем понимать (такой вот каламбур) в первую очередь способность математически анализировать объекты и процессы.

А что, если наши теоретические модели, которые, допустим, можно представить в виде компактных понятных формул, не дают непосредственных вычислимых количественных предсказаний, которые можно

\* Разумеется, в таких теориях на больших масштабах пространство-время должно тем или иным образом появляться. В какой-то степени ситуация аналогична тому, что на привычных нам масштабах не проявляются квантовые эффекты или эффекты теорий относительности.

было бы сравнить с наблюдениями? Отсутствие количественных выводов теории может быть связано с тем, что конечный компьютер за конечное количество итераций не может совершить вычисление с неопределенностью (ошибкой), меньше заданной. Иначе говоря, не существует алгоритма для проведения точных расчетов. В ходе такого анализа мы не можем быть уверены, что члены, которые сыграют роль на последующих итерациях, не уведут результат сильно в сторону\*. Как мы в данном случае будем судить об истинности теорий? Что скажет Поппер??? Такое, как показывают исследования, может произойти в некоторых моделях квантовой гравитации, и обсуждение такой странной перспективы уже идет. Роберт Герох (Roberg Geroch) и Джеймс Хартл (James Hartle) полагают<sup>81</sup>, что это не должно нас останавливать. Оптимистический взгляд на такую возможность говорит, что прогресс все-таки реален, пусть и путем больших усилий и временных затрат. Пессимистическое отношение к таким построениям состоит в том, что на этих теориях нельзя основать научное понимание в современном смысле, так как ни путем расчетов, ни путем качественных рассуждений мы не сможем давать надежные и достаточно точные предсказания о протекании процессов и поведении объектов. Может быть, в самом деле изменится смысл «научного понимания»...

Пока же именно формулы в физике дают нам и понимание, и предсказание, и возможность создавать технические устройства. А кроме того, математический аппарат позволяет нам двигаться дальше, углубляя наши знания. Кто-то полагает, что «книга природы написана на языке математики», кто-то считает, что мы лишь придумали очень удобный язык для описания мира (и продолжаем его разрабатывать). Но, как бы то ни было, сейчас без формул невозможно представить себе эффективное познание мира. А что будет в будущем?

\* Здесь можно провести такую аналогию. Представьте, что вы строите философскую картину мира, а ваш «компьютер» — физика. Вы начинаете в XVII веке, но пока не удовлетворены ее успехами. Проходит время Ньютона, но вы терпеливо продолжаете дожидаться результатов «моделирования» и вот в конце XIX века решаете наконец, что пора. А потом наступает время квантовой механики и теории относительности, и ваша картина оказывается существенно неверна, поскольку следующая «итерация» привела к значительной модификации текущего результата.



**А.** Техническая новинка, принцип действия которой мы не понимаем, может вызывать ощущение «магии». То же самое иногда происходит и с научными результатами.

**Б.** Современные «чудеса света» — это крупные научные установки и комплексы вроде МКС и LIGO.

**В.** В развитии науки мы можем столкнуться с ограничениями, связанными с возможностями нашего мозга. Один из вариантов преодоления этого препятствия — создание полноценного искусственного интеллекта, превосходящего человеческий.

**Г.** Не исключено, что в будущем развитием науки будут заниматься искусственные существа, а человеку останется только читать научно-популярную литературу, написанную ими же.





# Что могло бы быть «научной магией»

Известное высказывание Артура Кларка гласит, что достаточно развитая технология неотличима от магии. Это применимо не только к фантастической ситуации палеоконтакта или истории вроде «Янки при дворе короля Артура». Техника воспринимается как волшебство не только при контакте современной цивилизации с небольшим племенем, затерявшимся в лесных дебрях или живущим на небольшом острове в Тихом океане. Любой из нас почти ежедневно сталкивается с устройствами или процессами, действие которых мы не понимаем достаточно полно. Это может быть сотовый телефон или навигатор, лекарство или медицинская процедура. О многом мы просто не задумываемся: как получен прочный пластик или сплав, использованный в нашем автомобиле, как считывается информация с матрицы фотоаппарата, что позволило сделать долгохранящийся кекс, не теряющий мягкости, как поисковая система столь быстро обрабатывает запрос или как работает программа машинного перевода<sup>82</sup>. К большинству из таких технологий мы попросту привыкли, но уберите эффект привычки — и у вас появится ощущение чего-то магического.



Попробуйте взять две пары солнцезащитных очков-поляридов и покажите ребенку, как свет полностью исчезнет, если смотреть сразу через два стекла, повернув их определенным образом, а потом появится обратно, когда вы повернете какие-то очки на 90 градусов. Можно развлекаться и с одними очками, если сесть перед монитором или взять сотовый телефон. LCD-экран дает поляризованный свет. Соответственно, надев поляризационные очки, можно, наклоняя голову, видеть, как меркнет экран (я это обнаружил когда-то давно совершенно случайно и в первый момент испугался, подумав, что теряю сознание, — не знал о таких свойствах излучения экрана своего нового компьютера). Наконец, можно даже обойтись без очков. Возьмите электронные часы и сотовый телефон, зайдите в темную комнату и посветите на часы. LCD-экран, дающий поляризованный свет, освещает жидкокристаллический циферблат часов. Снова, вращая часы или телефон, можно добиться того, что циферблат будет черным несмотря на яркий свет. Разве не фокус? Разве не чудо? Теперь попробуйте рассказать ребенку, почему это все происходит. А уж если вы попытаетесь объяснить, как так получается, что в современном многолинзовом объективе свет почти не теряется за счет так называемой просветленной оптики, то нередко вы, общаясь даже с взрослым собеседником, наткнетесь на непонимание, точнее, на некоторое отторжение контринтуитивной информации: как же так, нанесли лишние пленки, а стало прозрачнее.

При этом чаще всего в нашем столкновении с «магией технологии» речь не идет о самом переднем крае науки. Объяснение поляризации света — это XIX век (а обнаружили ее вообще в XVII веке), да и просветленной оптике уже более 100 лет! За редчайшими исключениями наиболее свежие фундаментальные результаты очень медленно попадают (если это вообще происходит) в область интереса прикладных исследований и разработок массовых изделий. Зато ультрасовременные идеи часто используются при создании методов и приборов для получения новых научных результатов. Именно это позволяет науке в последние лет 100 развиваться очень быстрыми темпами. В результате работа многих экспериментальных установок выглядит отчасти «магической» даже для самих ученых, не занятых непосредственно в данном исследовании. Методы

работы гравитационно-волновых детекторов и анализа их данных, многие способы изучения экзопланет, эксперименты с целью зарегистрировать частицы темного вещества — все это вызывает законное чувство удивления и восхищения у тех, кто не занимается этим непосредственно.

В современном мире хорошая попытка назвать семь чудес света должна привести к выделению семи научных установок, а вовсе не самых больших статуй, телебашен или мостов. Наверняка в такой список попали бы Большой адронный коллайдер и установки LIGO и VIRGO, Международная космическая станция и телескоп Джеймса Вебба, самые быстрые суперкомпьютеры и мощнейшие системы лазеров, приборы для исследования ДНК и манипуляций с генетическим материалом. Именно в единичных суперпродвинутых научных приборах сконцентрировано то, на что сейчас способно человечество.

Заметим, что и в древности чудеса восхищали современников в первую очередь технологической сложностью (а некоторые и до сих пор думают, что пирамиды построили инопланетяне). Правда, тогда это были, скорее, гигантские объекты, сложность создания которых мы бы сейчас назвали достаточно механической. Но ведь и другой науки не существовало! Древний мир — это мир механики. Сейчас чудом скорее мог бы стать не самый высокий небоскреб, а какой-нибудь чип или наноробот, умещающийся не то что на ладони, а на кончике пальца. Важен не размер, важно, сколько творческого, интеллектуального труда было вложено в разработку, включая создание средств, делающих возможным появление этого современного чуда. Поэтому на него скорее похожа эффективная вакцина, чем самые большие в мире сковородка и моток бечевки.

В наши дни вполне возможна такая ситуация. Имеется большая научная установка, в которой соединено множество технически сложных узлов, и практически в каждом из них использованы новые нетривиальные решения. А кроме того, для анализа результатов применяются специально разработанные хитроумные алгоритмы. Да и сама научная задача, для решения которой создавался прибор, представляет собой обширный раздел передовой науки. В результате нет ни одного специалиста, который в подробностях понимал бы весь объем методов, использованных

в проекте. Это нормально. Ведь нет врачей, которые могли бы на самом высоком уровне заниматься всеми болезнями и органами: и печень пересадить, и нейрохирургическую операцию сделать, и правильно диагностировать любую инфекционную болезнь, и много что еще. Даже доктору Хаусу нужна была команда из разных специалистов. Если попробовать во всех деталях разобраться во всем самому, то просто не хватит времени.

Природа устроена не проще человека. Ведь в работе тела неважны эффекты общей теории относительности, врачу не надо знать, как устроена физика за пределами Стандартной модели, чтобы поставить верный диагноз, в нас нет сверхтекучих жидкостей и сверхпроводящих керамик. Сможем ли мы сами полностью разобраться в том, как устроена природа? Это только вопрос времени или же людям придется справляться с еще более принципиальными трудностями?

Собственно, уже сейчас практически каждый из нас сталкивается с тем, что полноценное понимание каких-то разделов науки — на таком уровне, чтобы самому можно было в них получать новые результаты, — ему не по силам: ума не хватает. Я с этим сталкивался и сталкиваюсь. Не скажу, что обескуражен, — эффект понятен и ожидаем, тем не менее он вызывает некоторый дискомфорт. Проекстраполировав это, мы можем высказать следующую гипотезу. Начиная с определенного уровня, для адекватного описания реальности могут потребоваться интеллектуальные возможности, превосходящие человеческие. Это могут быть и собственно когнитивные сложности. Могут быть проблемы оперирования с большими объемами информации. Но, так или иначе, не исключено, что с какого-то момента дальнейшее продвижение по пути научного прогресса станет не под силу простому Homo Sapiens.

Если ваш компьютер уже «не тянет», то естественный выход — замена или апгрейд. На первом этапе «усовершенствования человека» было бы крайне соблазнительно хотя бы расширить объем своей памяти (в компьютер мы бы добавили оперативной памяти и заменили HDD на SSD большего объема), а затем и «подключить мозг к интернету». Не исключено, что нечто подобное в отдаленном будущем удастся сделать. И это, разумеется, уже будет заметным подспорьем в развитии науки человеком. Однако, как мы

знаем, люди с феноменальной памятью вовсе не всегда (а скорее, довольно редко) входили в историю как великие ученые. Выучив наизусть большой орфографический и толковый словари, не стать хорошим поэтом. Даже выучив самые большие и полные англо-русский и русско-английский словари, не стать хорошим литературным переводчиком. Этого мало.

Можно фантазировать о формальном увеличении быстродействия мозга. Правда, не очень ясно, как это сделать. Но кажется, что это довольно бесполезная вещь сама по себе. Если память уже расширена, то умение быстро читать и запоминать не принесет так уж много пользы. Умение быстро считать еще никого не сделало великим математиком. Конечно, быстродействие поможет скорее находить нужную информацию. Но и все. Это мало что дает с точки зрения развития фундаментального знания. Нам же может понадобиться Эйнштейн 2.0.

Таким образом, мы хотим супермозг для решения суперзадач. И вовсе не факт, что к этому можно прийти путем совершенствования человека. Уже достаточно давно многие фантасты (и не только) склонны думать, что будущее за искусственным интеллектом, что человек — первый вид на Земле, который своими руками (и мозгами) создаст того, кто придет ему на смену<sup>83</sup>.

«Придет на смену» необязательно воспринимать в смысле полного исчезновения человечества. Просто человек может перестать быть «самым умным на Земле». И в первую очередь это имеет отношение к тому, кто на нашей планете будет отвечать за научный прогресс. Может быть, через сотни лет все ведущие физики-теоретики и математики на Земле будут не белковыми?

Если в будущем деятельность по научному постижению мира будет переложена на искусственный разум, то мы (человечество) можем оказаться в странной ситуации. Не люди, а искусственный интеллект будет продолжать развитие науки. Будут создаваться новые теории, доказываться новые теоремы, развиваться новые технологии. Вроде бы, все хорошо. Это можно сравнить с тем, что теперь, например, не нужно руками копать тоннель в холме — его сделают машины, а нам останется гордо проследовать по построенной дороге в быстром автомобиле, созданном

на полностью роботизированном заводе. Но в ситуации с наукой, знаниями возможен довольно неприятный поворот дел. В ходе прогресса в познании мира нечеловеческим разумом может кардинально измениться само понятие «понимание», если искусственный мозг будет работать иначе (на совсем иных принципах в сравнении с нашим). Или же просто «количество перейдет в качество»: мы не сможем изучить достаточный объем имеющихся знаний, чтобы разобраться в новом. Иными словами, так или иначе, но люди не будут в состоянии даже адекватно осознать, усвоить это новое знание и полноценно разобраться в том, как работают новые технологии. Эдакие «маглы в мире андроидов».

К слову, уже сейчас можно столкнуться с тем, что многие вычисления (включая аналитические) заметная доля современных студентов, аспирантов и даже специалистов не может воспроизвести, так как, скажем, интеграл или посчитается численно, или с ним разберется программа вроде Mathematica или Maple. Вспоминается какой-то старый научно-фантастический роман, где подобная ситуация зашла достаточно далеко, и при глобальном сбое всех вычислительных систем никто не в состоянии провести жизненно важные для цивилизации вычисления на бумаге, и не потому, что они выходят за рамки человеческих возможностей, а потому, что этому перестали учиться и учить, — предметом изучения были исключительно расчеты с помощью компьютеров. Но нас интересует все-таки тот случай, когда для получения или полного понимания новых научных результатов необходимы сверхчеловеческие возможности.

Повторюсь, на уровне отдельного человека тут нет большой новизны. Подавляющее большинство из нас не может пробежать стометровку быстрее чем за 10 секунд. И это не вопрос тренировок. Даже если бы мы с детства занимались только этим, все равно у большинства ничего бы не вышло. То же самое происходит не только с прыжками в высоту или толканием ядра, но и с написанием великих романов, созданием ключевых фундаментальных теорий, а нередко, что уж скрывать, и с пониманием этих теорий. Не надо обольщаться мыслью, что «если бы мне было очень интересно, то я бы полностью разобрался с тем, что сделал Перельман». Может, и разобрались бы, а может, и нет. Но приятно

думать, что кто-то другой на это способен. А в будущем дело может повернуться так, что никто из людей не сможет понять во всей полноте, что же и как доказал небелковый математик 1616FG#7687765 и в чем суть новой теории физика-теоретика 8747LD@8785780.

Тогда, по сути, все собственно человеческое знание в естественно-научной (а также, возможно, математической) области станет «научно-популярным», т. е. неполным, упрощенным, адаптированным. Новые устройства будут для всех выглядеть «магическими», так как полного описания технологий никто из людей не сможет дать. Ими будут успешно управлять вербально (устными командами), или «взмахами руки», или мысленным приказом, а они будут «как-то работать», выполняя наши желания. Популяризаторы тоже будут небелковыми. Люди же будут продолжать писать стихи и картины, играть на скрипке и в футбол.

Пока же, в принципе, во всем можно разобраться, если затратить некоторое (возможно, значительное) время. Весь объем знаний охватить нельзя, но каждый конкретный вопрос почти всегда можно разобрать, если есть время. Не теряйте его.



# Послесловие

---

(КОТОРОЕ МОГЛО БЫ БЫТЬ ПРЕДИСЛОВИЕМ)

Как читатель мог убедиться, это не научно-популярная книга в обычном смысле, т. е. (исключая приложения) не доступное изложение некоего консенсуса в современной науке, представленное специалистом в соответствующих областях. В целом содержание основной части книги представляет собой лишь субъективный взгляд автора на роль математики в естествознании.

В последние несколько лет появилось несколько очень интересных книг о математике, написанных математиками высочайшего уровня. Упомяну лишь три из них: «Математика как метафора» Юрия Мамина (М.: МЦНМО, 2010), «Апология математики» Владимира Успенского (М.: Альпина нон-фикшн, 2017), «Кольцо тайн: вселенная, математика, мысль» Михаила Громова (М.: МЦНМО, 2017). Казалось бы, зачем нужна еще одна, да еще написанная астрофизиком?

Эта книга появилась на свет почти случайно, став продолжением моего разговора с нижегородским искусствоведом Ксенией Ануфриевой. Начав с невинного вопроса о том, использовал ли кто-то страницы научных статей в качестве реди-мейд-объектов на художественных выставках, я был «вынужден» пуститься в пояснения, касающиеся того, что, на мой взгляд, в массе своей публика зачастую относится к достижениям современной науки как к чему-то магическому. Мы ведь любим рассматривать в этнографических музеях атрибуты магических ритуалов? С этой точки зрения современные ученые могут восприниматься как какое-то особое племя с очень сильной магией, которая вот-вот откроет нам порталы в далекие галактики, прошлое, будущее и другие измерения, которые мы все видели в кино, а артефакты научного процесса выглядят как колдовские книги и предметы из арсенала шаманов.



С подачи Ксении я начал размышлять над тем, что можно было бы показать на такой выставке, какие мысли передать зрителям. Как, с одной стороны, отразить это «магическое» восприятие, а с другой — разоблачить его. Последующие разговоры, в том числе с художниками, привели к дальнейшему развитию сюжета. Выписывание всего этого (поскольку некоторые диалоги шли через обмен электронными письмами) с пояснениями и сопутствующими рассуждениями привело в конце концов к появлению небольшой книги. Получились своего рода «пролегомены ко всякой будущей выставке о роли математики в современной науке». Отчасти следуя советам тех, кто видел разные отрывки черновика или с кем я обсуждал идею книги, я добавил к основному повествованию приложения, в которых примеры применения математических методов в физике и астрофизике излагаются также и на уровне формул, включая выводы некоторых из них.

Однако словесный (и даже «формульный») рассказ, выросший из обсуждения визуальных образов, был бы неполон без иллюстративной части. При этом было важно, чтобы это были не графики и поясняющие схемы, а самостоятельные художественные произведения. К счастью, к проекту подключился отличный художник Ростан Тавасиев, с которым мы уже сотрудничали, но совсем в других форматах, что в конечном счете позволило создать книгу такой, какой вы ее видите. Обсуждения с Ростаном также помогли мне лучше понять и выразить некоторые из идей и аналогий, представленных в этой книге.

По ходу развития проекта я показывал черновики и обсуждал их с коллегами и знакомыми. Среди них были и художники, и журналисты, и ученые. Особенно я хотел бы поблагодарить математика Николая Андреева и астронома Геннадия Ширмина.

Огромная благодарность научному редактору книги Игорю Иванову, который не только нашел несколько серьезных неточностей в первоначальном варианте рукописи, но и сделал ряд полезных замечаний и комментариев, способствовавших улучшению книги (а также просто расширивших мой кругозор).

Пробные версии некоторых глав и приложений публиковались в газете «Троицкий вариант — Наука». Я признателен коллективу издания и персонально Максиму Борисову и Алексею Огнёву за подробные комментарии, а читателям — за отзывы.

# Приложения



# Закон Хаббла и сверхсветовые скорости в космологии

Если ввести величину, равную важности физического закона, деленную на сложность формулы, то закон Хаббла будет среди лидеров, а может быть, займет первое место. В самом деле, он выражает один из самых грандиозных процессов — расширение вселенной. С другой стороны, это просто линейное уравнение, связывающее всего лишь две величины — скорость удаления объектов друг от друга с расстоянием между ними — с помощью так называемой постоянной Хаббла. Итак,  $v = rH$ !

Эдвин Хаббл выявил это соотношение из наблюдений. Но, что важно, оно следует и из (относительно) простых теоретических рассуждений. Для этого нам надо задать характеристики нашего пространства-времени. Это делается с помощью метрики. Ее можно представить как некоторую математическую структуру — так называемый интервал (точнее, нам понадобится квадрат интервала), определяемую для двух очень близких точек. Хитрость в том, чтобы выбрать такую структуру, которая не зависела бы от способов измерения, т. е. была так называемым инвариантом.

Начнем с метрики Фрийдмана — Робертсона — Уокера. Она соответствует однородной изотропной вселенной (т. е. миру, где все направления равноценны и в каждый момент времени свойства везде идентичны). Это самый естественный выбор предположений о глобальных свойствах нашего мира. Кроме того, все наблюдения пока подтверждают его: не обнаружено ни выделенных направлений, ни неоднородностей на больших масштабах (сравнимых с размером видимой части вселенной).

В общем случае метрика записывается для искривленного пространства, но мы выпишем формулу для плоской вселенной — не только потому, что она проще, а еще и потому, что в пределах точности измерений кривизна вселенной равна нулю. «Плоскостность» нашего мира, в частности, говорит о том, что в больших масштабах можно пользоваться евклидовой геометрией (при этом, разумеется, пространство трехмерно).

Сделаем еще одно упрощение при записи метрики. В общем случае в него должны входить три пространственные координаты. Удобно взять не декартову тройку  $x, y, z$ , а радиальную и две угловые координаты. Но нас будут интересовать лишь радиальные движения (например, галактика или удаляется от нас, или приближается к нам, но не смещается по небесной сфере), так что угловые координаты мы отбросим. В итоге получается очень простое выражение для квадрата интервала:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 dl^2,$$

где  $c$  — скорость света,  $dt$  — временной интервал,  $dl$  — элемент длины. Изменяющаяся со временем величина  $a(t)$  называется масштабным фактором, она характеризует изменение интервала длины, который мы обозначим  $dr$ .

Итак, расстояние между двумя очень близкими точками записывается как  $dr = a dl$ . Чтобы получить расстояние  $r$  между двумя реальными объектами, нам надо интегрировать:

$$r = \int a dl.$$

Введем еще одно обозначение: так называемые сопутствующие координаты. Их особенность в том, что они не меняются по мере расширения. Пусть два объекта имеют сопутствующие координаты  $\chi_1$  и  $\chi_2$ , тогда соответствующее сопутствующее расстояние  $\chi = \chi_1 - \chi_2$  остается постоянным, если мы пренебрегаем так называемым пекулярным движением объектов относительно друг друга, связанным, например, с их взаимным гравитационным притяжением.

Определяя  $r$  в какой-то момент времени, мы можем считать масштабный фактор  $a$  постоянной величиной (ведь он изменяется только со временем и в каждый момент один и тот же для всей вселенной). Значит,

$$r = a \int dl .$$

А интеграл от  $dl$  равен, по определению, сопутствующему расстоянию:

$$\chi = \int dl .$$

Расстояние  $r$  называют собственным. Именно оно показывает, сколько сантиметров (метров, километров, парсек или световых лет) между двумя объектами в данный момент времени. Это расстояние растет в расширяющейся вселенной, что описывается изменением масштабного фактора. Обычно удобно считать, что в настоящий момент  $a = 1$ . Соответственно, в прошлом  $a < 1$ , а в будущем  $a > 1$ .

Теперь, введя все необходимые величины, переходим к выводу закона Хаббла. Определим скорость как производную от собственного расстояния:

$$v = dr / dt .$$

Дальше произведем короткую цепочку простых преобразований, помня, что мы считаем сопутствующее расстояние неизменяющимся:

$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{da}{dt} \chi = \left( \frac{1}{a} \frac{da}{dt} \right) a \chi .$$

Вспомним, что  $r = a\chi$ , и введем обозначение:

$$\frac{1}{a} \frac{da}{dt} = H.$$

Получаем искомое  $v = Hr$ , где  $H$  — постоянная Хаббла.

Вот мы и вывели закон Хаббла. Теперь посмотрим на некоторые следствия из него.

Крайне существенно, что в космологии надо использовать общую теорию относительности. Это не та ситуация, где можно обойтись лишь СТО, такая попытка приведет к неправильным результатам и только запутает. Например, скорости в космологии складываются по простому галилеевскому правилу.

Если у нас есть три галактики на одной прямой — 1, 2 и 3, то скорость третьей относительно первой составит:

$$v_{13} = v_{12} + v_{23} = Hr_{12} + Hr_{23} = Hr_{13},$$

где  $r_{13} = r_{12} + r_{23}$ .

Это верно для любых скоростей: не только близких к скорости света, но и превосходящих ее.

Кроме участия в космологическом расширении — так называемом хаббловском потоке, галактики могут иметь пекулярные скорости (например, пара галактик может сближаться, как Млечный Путь и Туманность Андромеды). Такие скорости соответствуют изменению сопутствующих координат:

$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{d(a\chi)}{dt} = \chi \frac{da}{dt} + a \frac{d\chi}{dt}.$$

Здесь первое слагаемое — обычное космологическое расширение, а второе связано с пекулярной скоростью. Снова мы имеем дело с простой суммой, какими бы большими ни были скорости.

А они могут быть большими. Если пекулярные скорости не могут превосходить световую, то скорость, связанная с космологическим расширением (именно она входит в закон Хаббла), может быть любой, если расстояние сколь угодно велико. Таким образом, есть расстояние, на котором она сравнивается с  $c = 300\,000$  км/с.

Хаббловской сферой называют поверхность, собственное расстояние до которой определяется как  $r = c/H$ . Иными словами, в данный момент времени галактики, находящиеся на сфере Хаббла, удаляются от нас из-за расширения Вселенной со скоростью, равной скорости света. Заметим, что мы можем наблюдать галактики, находящиеся сейчас за сферой Хаббла. Следовательно, эта поверхность не является горизонтом.

Постоянная Хаббла меняется со временем (зато она одинакова во всех местах в данный момент времени). В нашей вселенной в течение всей ее истории по окончании стадии инфляции постоянная Хаббла уменьшается. Соответственно, поскольку скорость света постоянна, собственное расстояние до хаббловской сферы в настоящее время растет (т. е. в метрах, сантиметрах и т. д. это расстояние возрастает).

Вопрос в том, с какой скоростью увеличивается расстояние до сферы Хаббла. В ускоренно расширяющейся вселенной это расстояние растет со скоростью меньше световой, а в замедленно расширяющейся — быстрее. Точная формула для этой скорости  $c(1+q)$ , где  $q$  — так называемый параметр замедления; этот параметр меньше нуля во вселенной, расширяющейся с ускорением (у нас сейчас он равен примерно 0,55), и больше нуля — в противоположном случае. Знак параметра замедления обратен знаку второй производной масштабного фактора. Масштабный фактор в расширяющейся вселенной всегда растет, соответственно, его первая производная положительна. А вот вторая как раз отражает, происходит ли рост расстояний все быстрее и быстрее (ускоренно расширяющаяся вселенная) или нет.

В ускоренно расширяющейся вселенной галактики «вылетают» за сферу Хаббла, поскольку «чуть за» сферой Хаббла их скорость больше световой (вспомним, что не надо бояться сверхсветовых скоростей



в космологии), и сфера от них отстает, потому что движется с меньшей скоростью. Это можно описать как «продвижение» сферы Хаббла в нашу сторону, если говорить о сопутствующем расстоянии. Таким образом, сопутствующее расстояние до сферы Хаббла уменьшается. Во Вселенной, расширяющейся с замедлением, ситуация обратная.

Замечу, что в космологии можно говорить о разных определениях расстояний, скоростей и времени. Если это не уточняется, то может возникнуть путаница. Подробнее почитать обо всем этом можно в серии статей на сайте «Астронет»<sup>84</sup>.

# Метод размерностей. Параметры в центре Солнца и пульсации звезд

Яркой иллюстрацией того, как с помощью качественных рассуждений можно получать правильные физические формулы, является метод размерностей<sup>85</sup>. Мы рассмотрим здесь два простых примера: параметры в центре Солнца и период пульсаций звезд.

Идея метода крайне проста. Мы хотим получить формулу для расчета какой-то величины  $A$ , имеющей определенную размерность. Подумаем, от каких параметров она может зависеть. Пусть это другие величины  $B$ ,  $C$ ,  $D$ . Обычно зависимости носят степенной характер (т. е. величины входят в конечную формулу в какой-то степени). Возьмем выбранные нами величины, а показатели их степени будут нашими неизвестными:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Наше гипотетическое уравнение имеет вид:  $A = B^x C^y D^z$ . Теперь существенно, что все это — размерные величины\*. Размерность обозначают символом величины в квадратных скобках:  $[A]$ . Значит, для размерностей должно выполняться то же самое уравнение:

$$[A] = [B]^x [C]^y [D]^z .$$

Ведь если слева секунды, то и справа должны получаться секунды, а не сантиметры или граммы. Уравнение для размерностей дает нам систему простых линейных уравнений, решение которой может дать показатели степени  $x, y, z$ . Иначе говоря, мы найдем нашу искомую формулу. Конечно, в ней также могут быть безразмерные коэффициенты. С ними разбираться уже сложнее, но иногда и это оказывается возможным. Посмотрим на примеры.

Начнем с оценки давления в центре Солнца (а затем получим температуру, правда, уже не методом размерностей, а используя физику 10-го класса средней школы). Солнце находится в состоянии гидростатического равновесия. Градиент давления (оно растет внутрь) уравновешивает силу тяжести. Значит, давление должно выражаться через параметры, связанные с солнечной гравитацией. Таким образом, в нашу формулу войдет масса Солнца  $M$  и гравитационная постоянная  $G$ . Сила гравитации зависит от расстояния. Характерный масштаб в задаче — размер Солнца,  $R$ . Добавим и его. Тогда для давления получим:

$$P = G^x M^y R^z .$$

Теперь займемся размерностями. С массой и радиусом все просто:  $[M] = \text{г}$ ,  $[R] = \text{см}$ . Давление — это в первую очередь плотность энергии, т. е. для него можно записать:

$$[P] = \frac{[E]}{[R]^3} .$$

\* Кроме того, крайне важно, чтобы величины  $B, C, D$  сами не образовывали безразмерную комбинацию, иначе задача будет иметь бесконечное число решений.

Размерность энергии, выраженную через базовые величины, можно вспомнить благодаря формуле  $E = mv^2/2$ :  $[E] = \text{г см}^2 \text{с}^{-2}$ . Значит, для давления получим:  $[P] = \text{г см}^{-1} \text{с}^{-2}$ . Остается гравитационная постоянная. Ее размерность, конечно, можно взять из справочника, а можно вспомнить закон всемирного тяготения:

$$F = G \frac{M_1 M_2}{R^2}.$$

Для размерностей должно выполняться такое же соотношение:

$$[F] = [G] \frac{[M_1][M_2]}{[R]^2}.$$

Иначе говоря,  $[G] = [F][R]^2 / [M]^2$ . Размерность силы (напомним, что сила равна произведению массы на ускорение) равняется  $\text{г см с}^{-2}$ . Значит,  $[G] = \text{г см с}^{-2} \text{см}^2 \text{г}^{-2} = \text{г}^{-1} \text{см}^3 \text{с}^{-2}$ . Теперь можно вернуться к нашему уравнению для давления, записав его для размерностей:

$$\text{г см}^{-1} \text{с}^{-2} = (\text{г}^{-1} \text{см}^3 \text{с}^{-2})^x (\text{г})^y (\text{см})^z.$$

Преобразуем правую часть и упорядочим ее, получим:

$$\text{г см}^{-1} \text{с}^{-2} = \text{г}^{y-x} \text{см}^{3x+z} \text{с}^{-2x}.$$

По отдельности должны выполняться равенства для каждой базовой размерности слева и справа, т. е. имеем систему уравнений:  $1 = y - x$ ;  $-1 = 3x + z$ ;  $-2 = -2x$ .

Решая ее, получим:  $x = 1$ ;  $y = 2$ ;  $z = -4$ .

Иначе говоря,  $P = GM^2R^{-4}$ . Это то, что мы и хотели! Формула для расчета давления в недрах Солнца!!! Остается подставить солнечную массу ( $2 \cdot 10^{33}$  г) и радиус (696 000 км). Получим, что давление в центре Солнца в 10 млрд раз больше атмосферного давления у поверхности Земли!

Чтобы получить температуру, возьмем формулу для идеального газа из школьного учебника:

$$PV = M\mathfrak{R}T / \mathcal{M},$$

где  $V$  — объем,  $\mathfrak{R}$  — универсальная газовая постоянная, а  $\mathcal{M}$  — молярный вес (для простоты можно считать, что Солнце состоит из атомарного водорода). Вместо давления подставим  $P = GM^2R^{-4}$  и преобразуем формулы, выразив температуру:

$$T = G \frac{M\mathcal{M}}{R\mathfrak{R}}.$$

Остается подставить числа. Ответ — температура порядка 20 млн Кельвин. Полученные нами оценки температуры и давления близки к верным значениям.

Аналогично можно получить формулу для периода пульсаций звезды. Правда, здесь ответ будет менее точным из-за наличия безразмерного коэффициента, который нам трудно определить точно таким же методом. Зато зависимость от ключевых величин мы получим правильно.

Снова будем искать формулу для периода в виде  $G^x M^y R^z$ . Есть всего лишь один набор показателей степени  $x, y, z$ , дающих величину с размерностью времени. Эта комбинация:  $R^{3/2} / (GM)^{1/2}$ . Заметим, что частное от деления массы на куб радиуса имеет размерность плотности. Тогда получим, что период пульсаций звезды (вообще, газового шара),  $P_{puls}$ , пропорционален квадратному корню из произведения гравитационной постоянной на среднюю плотность. А поскольку  $G$  — постоянная, то важным фактом является пропорциональность периода пульсаций обратному квадратному корню из плотности:

$$P_{puls} \propto \frac{1}{\sqrt{G\rho}}.$$

У звезд типа Солнца чем меньше масса, тем выше средняя плотность. Это говорит о том, что с ростом массы растет и период пульсаций. Кроме того, низкая средняя плотность проэволюционировавших и раздувшихся звезд приводит к большим периодам, что и наблюдается. Если у Солнца основной период пульсаций составляет около часа, то у звезд-гигантов он может составлять десятки дней, что неудивительно, ведь их радиусы в сотни раз больше.

# Аккреция, предельная светимость и массы сверхмассивных черных дыр

Возьмем предмет, поднимем его над полом и отпустим. Он со стуком упадет. Звук — это продольные волны, распространяющиеся в среде и переносящие энергию. Откуда взялась эта энергия в случае падающего тела? Ответ дается в школьном курсе физики. Там рассказывается, что тело на высоте  $h$  имеет так называемую потенциальную энергию  $E_p = mgh$ , где  $m$  — масса тела, а  $g$  — ускорение свободного падения. Ускорение можно рассчитать из закона всемирного тяготения:

$$g = F / m = G \frac{M}{(R+h)^2}.$$

где  $G$  — ньютоновская постоянная,  $M$  — масса Земли, а  $R$  — ее радиус.

В школьных задачах чаще всего можно считать, что высота, с которой падает тело, намного меньше радиуса Земли ( $R \gg h$ ), поэтому  $g$  не изменяется.

При падении тело разгоняется, так как на него действует сила в направлении движения. Растет кинетическая энергия, равная:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Этот рост происходит за счет уменьшения потенциальной энергии. К моменту удара, как учит нас школьный учебник, вся потенциальная энергия успела перейти в кинетическую. Затем практически мгновенно вся кинетическая энергия перейдет в другие формы, например в тепловую энергию и в энергию звуковой волны. В бытовых ситуациях тепловой эффект мы обычно не замечаем, но вот если на Землю падает крупный метеорит, то нагрев более чем заметен, свидетельством чего являются так называемые тектиты — оплавленные куски стекла, возникающие из-за нагрева пород при ударе.

Школьное описание является несколько упрощенной версией. Нас будет интересовать падение вещества на нейтронные звезды и черные дыры, при этом расстояние, с которого оно прилетает, намного больше размеров компактных объектов. Для такого случая запишем потенциальную энергию более корректно:

$$E_p = -G \frac{Mm}{R+h} = -G \frac{Mm}{r},$$

где  $M$  — масса массивного тела, а  $m$  — масса падающего объекта (в такой постановке  $M \gg m$ ).

Буквой  $r$  мы обозначили расстояние, с которого прилетает вещество, отсчитывая его от гравитирующего центра (т.е. от центра массивного тела).

Вы уже обратили внимание, что потенциальная энергия отрицательна. Она отражает, насколько сильна связь между телами, т.е. сколько нужно энергии, чтобы эту связь разорвать. Скажем, если объект покоится

на поверхности массивного тела, то, сообщив ему кинетическую энергию, меньшую, чем модуль потенциальной энергии, но бóльшую, чем его половина, мы сможем вывести его на орбиту. А в результате передачи кинетической энергии, большей модуля потенциальной, объект перестанет быть гравитационно связанным с массивным телом, поскольку сумма потенциальной и кинетической энергии станет положительной.

Нас сейчас будет интересовать аккреция вещества, т. е. его падение на гравитирующий центр. Полная энергия для частиц такого вещества будет отрицательной (мы не рассматриваем случай, когда частицы просто «влетают в лоб», т. е. случайно имеют траекторию движения, пересекающуюся с поверхностью тела). При падении потенциальная энергия уменьшается (отрицательная величина растет по модулю). Значит, должны расти другие виды энергии, имеющие положительное значение, и по крайней мере часть этой энергии может быть излучена. Поэтому в астрофизике аккреция нередко приводит к появлению заметных источников излучения.

Возьмем один грамм вещества на большом расстоянии от массивного тела. Пусть вначале скорость вещества пренебрежимо мала, т. е. его полная энергия примерно равна потенциальной (тут мы не учитываем энергию покоя и внутреннюю энергию вещества). Если расстояние достаточно велико (как говорят, «вещество падает из бесконечности»), то энергия равна нулю. При достижении поверхности потенциальная энергия для единичной массы ( $m = 1$ ) станет равной  $E_p = -GM / r$ .

Но полная энергия должна оставаться нулевой, т. е. излучена может быть энергия, равная по модулю  $E_p$  (обычно не вся эта энергия излучается, часть перейдет в другие формы). Оценим, насколько эта величина может быть велика.

При падении на Землю (если пренебречь влиянием атмосферы) энергия от падения 1 грамма вещества составит примерно  $6 \times 10^{11}$  эрг (или 60 кДж). Это всего лишь 15 г в тротиловом эквиваленте. Но если мы теперь возьмем массу километрового астероида, то получим около 20 000 Мт ТНТ! Много, но с галактических расстояний такое не разглядеть.



Посмотрим на другие источники. Один грамм, упавший на поверхность массивного белого карлика, даст в миллион раз больше, чем при падении на Землю. Иными словами, примерно 40 граммов дадут одну килотонну, а в случае нейтронной звезды уже один грамм будет давать несколько килотонн! Это примерно 10% от  $E = mc^2$ . Вспомним, что термоядерные реакции в недрах звезд имеют КПД всего лишь 0,7% (т. е. при синтезе гелия из водорода выделяется лишь 0,007 от  $mc^2$ ). Стало быть, нет ничего удивительного в том, что аккрецирующие нейтронные звезды наблюдаются как мощные источники.

А что с черными дырами? Они же еще компактнее нейтронных звезд. Да, но зато у них нет поверхности. Поэтому в принципе падающее вещество может унести энергию с собой под горизонт. Значит, надо заставить вещество выделить ее достаточно близко от него. Такая ситуация реализуется при формировании аккреционных дисков вокруг черных дыр. Вещество, обладающее достаточно большим орбитальным моментом, закручивается в диск вокруг тяготеющего центра. Из-за трения вещество в диске нагревается, что и позволяет излучить значительную долю энергии.

Откуда же взять много вещества, чтобы возник мощный источник? Чтобы за счет аккреции на нейтронную звезду обеспечить светимость, равную солнечной, надо примерно раз в минуту сбрасывать на нее комету. Что может быть регулярным источником такой массы? Во-первых, есть межзвездная среда. Плотность ее невелика, но в некоторых случаях ее может быть достаточно, чтобы одиночная аккрецирующая нейтронная звезда стала заметным источником. Пока такие объекты не открыты, но ждать, видимо, остается недолго\*. Во-вторых, звезды часто рождаются не поодиночке, а парами. Перетекание вещества (или его перенос за счет звездного ветра) со звезды-соседки на компактный объект может привести к появлению источника большой светимости.

Светимость по порядку величины можно посчитать по такой простой формуле:

\* Я почти уверен, что телескоп eROSITA на борту российского спутника «Спектр-РГ» сможет открыть такие источники.

$$L = \frac{dm}{dt} \frac{GM}{R}.$$

Первый сомножитель  $dm/dt$  называют темпом аккреции, он показывает, сколько вещества аккрецирует за единицу времени. Казалось бы, неограниченно наращивая темп аккреции, мы получим сколь угодно большую светимость. Не тут-то было!

Существует предельное значение светимости, которое носит имя Артура Эддингтона, — эддингтоновская светимость. Физика здесь довольно проста: свет оказывает давление. Значит, если поток излучения слишком велик, то он будет попросту «сдувать» лишнее вещество. Установится некоторый баланс между действием гравитации, стремящейся притянуть как можно больше вещества, и излучением, поток которого растет по мере возрастания темпа аккреции. Попробуем получить формулу для эддингтоновской светимости.

Рассмотрим водородную плазму, поскольку типичный — так называемый солнечный — состав вещества звезд соответствует водородно-гелиевой смеси, на 90% по числу атомов состоящей из самого легкого элемента. У нас есть частицы всего двух сортов: тяжелые протоны и легкие электроны, и их количество равно друг другу, так как вещество должно быть электрически нейтральным. Соответственно, рассмотрим пару электрон-протон.

На частицы действуют две силы: гравитация и давление излучения. Можно считать, что сила тяжести в основном действует на протоны (поскольку они примерно в 2000 раз тяжелее электронов), а давление света — на электроны. И эти силы, приложенные к паре, уравнивают друг друга.

Рассмотрим вещество у поверхности объекта массой  $M$  и радиуса  $r$ . С гравитацией все просто:

$$F_{\text{grav}} = \frac{GMm_p}{r^2},$$

где  $m_p$  — масса протона.

Теперь нам надо разобраться с силой, связанной с давлением излучения. Введем величину потока излучения, равную энергии, проходящей через единичную площадь за единицу времени:

$$I = \frac{L}{(4\pi r^2)},$$

где  $L$  — светимость (т. е. мощность источника).

Но нам нужно рассчитать силу, действующую на один электрон. Мы сделаем это так: запишем силу как давление, создаваемое излучением, на площадь.

Поскольку сила действует на электрон, то в качестве площади возьмем так называемое томсоновское сечение,  $\sigma_T$ . По сути, это эффективная площадь электрона при рассеянии на нем электромагнитных волн. Точная формула такова:

$$\sigma_T = \left(\frac{8\pi}{3}\right) \left(\frac{e^2}{m_e c^2}\right)^2,$$

где  $m_e$  — масса электрона, а  $e$  — его заряд.

Величину  $e^2 / m_e c^2$  называют классическим радиусом электрона.

Итак, мы знаем площадь, как теперь оценить давление? Очень просто. Давит излучение. Давление же характеризуется плотностью энергии, т. е. нам надо оценить плотность энергии излучения. Мы знаем поток, или сколько энергии проходит в единицу времени через единичную площадь. Плотность энергии будет равна потоку, деленному на длину, проходимую излучением за единицу времени. Длина равна произведению скорости (в нашем случае это скорость света) на время (т. е. на единицу, так как мы рассматриваем единичный интервал). Для давления получаем:  $I / c$ . А для силы:

$$F_{\text{rad}} = \left(\frac{I}{c}\right) \sigma_T.$$

Из равенства  $F_{\text{grav}} = F_{\text{rad}}$  получим:

$$G \frac{M m_p}{r^2} = \left( \frac{I}{c} \right) \sigma_T.$$

Подставим выражение для  $I$ , и тогда:

$$G \frac{M m_p}{r^2} = \left( \frac{L}{4\pi r^2 c} \right) \sigma_T.$$

Видим, что равенство не зависит от расстояния. Выражаем светимость (и вводим обозначение  $L_{\text{Edd}}$ ):

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi G M m_p c}{\sigma_T}.$$

Подставляя характерные значения и константы, получим:

$$\begin{aligned} L_{\text{Edd}} &= 1,26 \times 10^{38} \frac{M}{M_{\odot}} \text{ эрг/с} = 1,26 \times 10^{31} \frac{M}{M_{\odot}} \text{ Дж/с} = \\ &= 3,2 \times 10^4 \frac{M}{M_{\odot}} L_{\odot}, \end{aligned}$$

где  $L_{\odot}$  — солнечная светимость, а  $M_{\odot}$  — масса Солнца.

Таким образом, для каждой массы центрального объекта (будь то обычная звезда или нейтронная, черная дыра звездной массы или сверхмассивная) есть предельная светимость. Мы рассматривали сферически симметричную геометрию, отклонения от нее могут немного увеличить предельную светимость. Если рассмотреть не чисто водородную плазму, то мы также получим несколько иной результат. Тем не менее предел есть, и он работает.

Наличие предельной светимости позволяет делать оценки массы центральных объектов. Например, если в центре какой-то галактики мы наблюдаем активное ядро, то его светимость позволяет дать нижний предел на массу сверхмассивной черной дыры. И наоборот, знание о диапазоне

масс сверхмассивных черных дыр позволяет предсказать диапазон их светимостей. В типичных квазарах массы центральных объектов составляют десятки миллионов солнечных. Значит, светимости квазаров не должны превосходить примерно несколько триллионов светимостей Солнца.

Наконец, ответим еще на один вопрос. В каком диапазоне будет излучать аккрецирующая нейтронная звезда при светимости, близкой к предельной? Это легко оценить. В данном случае можно предположить, что вся поверхность компактного объекта (и/или внутренняя часть аккреционного диска, чья площадь по порядку величины близка к полной площади поверхности нейтронной звезды) нагрета до определенной температуры и излучает так называемое абсолютно черное тело. В таком случае светимость равна:

$$L = 4\pi R^2 \sigma_{\text{SB}} T^4,$$

где  $\sigma_{\text{SB}}$  — постоянная Стефана — Больцмана.

Подставив эддингтоновскую светимость и радиус нейтронной звезды 10 км, получим, что температура составляет порядка 20 млн Кельвин. Такая температура соответствует рентгеновскому излучению, поэтому нейтронные звезды в тесных двойных системах с большим темпом аккреции мы наблюдаем именно как рентгеновские источники.

# Одиночные черные дыры

Черные дыры, безусловно, являются крайне интригующими объектами, ускользающими не только от однозначной идентификации наблюдательными методами, но еще и от четкого определения<sup>86</sup>. Тем не менее в астрофизике существует несколько методов, позволяющих регистрировать даже одиночные черные дыры звездных масс. Какие-то из них уже работают, какие-то — только на подходе. Ниже мы обсудим три ситуации: аккрецию вещества межзвездной среды, гравитационное микролинзирование и, наконец, испарение черных дыр (хотя этот процесс важен лишь для черных дыр малых масс).

## 4А. АККРЕЦИРУЮЩИЕ ОДИНОЧНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Ядра массивных звезд в завершение их эволюции могут превращаться в черные дыры. Точные интервалы начальных масс прародителей этих компактных объектов неизвестны, но для простой оценки предположим, что основная доля звезд, имеющих при рождении массы более

30 солнечных, в конце порождают именно черные дыры\*. Далее предположим, что распределение звезд по начальным массам можно описать так называемой солпитеровской функцией<sup>87</sup>:

$$\frac{dN}{dM} \propto M^{-2.35}.$$

Это означает, что количество звезд  $dN$  в небольшом интервале масс шириной  $dM$  — от  $M$  до  $(M + dM)$  — пропорционально массе в степени  $-2,35$ , т. е. количество звезд быстро падает с ростом массы\*\*. Данная зависимость была установлена на основе наблюдений.

В качестве минимальной массы звезды возьмем  $0,1 M_{\odot}$ , а в качестве максимальной —  $100 M_{\odot}$ . Теперь, чтобы посчитать долю звезд с массой более 30 солнечных, нам надо найти отношение двух интегралов:

$$\int_{30}^{100} M^{-2.35} dM / \int_{0.1}^{100} M^{-2.35} dM.$$

Это отношение примерно равно 0,00045. Учитывая, что за время существования Галактики в ней сформировалось около 300 млрд звезд, мы получим, что сейчас в ней должно быть около 135 млн черных дыр (заметим, что это очень близко к более точным расчетам). Типичная масса таких объектов — 5–10 масс Солнца. Это следует и из теории, и из наблюдения черных дыр в тесных аккрецирующих двойных системах.

При рождении черные дыры, в отличие от нейтронных звезд, в среднем не получают большую дополнительную скорость, связанную с асимметрией взрыва сверхновой (так называемый кик). Значит, они остаются в галактическом диске, и мы можем легко оценить их плотность в солнечной окрестности. Представим диск Галактики в виде цилиндра с радиусом

\* В действительности существует несколько диапазонов масс звезд-прародителей, которые при разных условиях заканчивают свою эволюцию как черные дыры. Некоторые из них делают это без взрыва сверхновой, а некоторые — со взрывом.

\*\* Уменьшение числа звезд при росте массы — надежно установленное свойство. А вот конкретный вид функции может зависеть от ряда факторов (от массы, от химического состава и т. д.). Тем не менее солпитеровская функция остается хорошим первым приближением.

около 15 кпк и толщиной около 1 кпк. Разделив его объем на количество черных дыр, получим объем, приходящийся на один объект, — это около 5000 кубических парсек. Значит, расстояние до ближайшей одиночной черной дыры будет порядка 10 пк.

Таким образом, черных дыр звездных масс в Галактике много, и они могут находиться не так уж далеко от нас. Вопрос в том, как их обнаружить.

В приложении 3 мы обсудили, что аккреция на черные дыры может приводить к выделению значительной энергии. Надо только найти эффективный источник вещества. Если компактный объект одиночный, т. е. бороздит просторы Галактики сам по себе, тогда единственным источником будет межзвездная среда<sup>88</sup>.

Плотность межзвездного вещества вблизи плоскости диска Галактики в солнечных окрестностях не слишком высока — около одного атома водорода в кубическом сантиметре. В молекулярных облаках это значение возрастает в десятки, а то и в сотни раз. Нам нужно оценить, с каким темпом черная дыра может захватывать это вещество.

Чаще всего, когда на популярной лекции заходит речь о черных дырах, выясняется, что хотя бы кто-то из слушателей полагает, что черные дыры — это такие пылесосы, которые «затягивают в себя все и когда-нибудь совсем все и затянут». Это совсем не так.

Действие черных дыр на другие тела определяется гравитацией. Если мимо черной дыры пролетает тело, то нам надо сравнить его кинетическую энергию, связанную с движением относительно компактного объекта, и гравитационную потенциальную энергию, связанную с взаимодействием между телами. Формулу для кинетической энергии все помнят:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Потенциальную энергию удобно считать отрицательной, и для нее выражение выглядит так:

$$E_p = -\frac{GMm}{r},$$



где  $G$  — гравитационная (ньютоновская) постоянная,  $M$  — масса массивного центрального тела (в нашем случае — черной дыры),  $m$  — масса пролетающего тела, а  $v$  — его скорость.

Ясно, что если скорость слишком велика, то кинетическая энергия тоже будет велика, и, таким образом, полная энергия, равная сумме кинетической и потенциальной, будет больше нуля, т. е. система будет гравитационно несвязанной. Иными словами, тело пролетит мимо. Точно так же при большом расстоянии между телами —  $r$  — потенциальная энергия будет мала, и снова связанная система не образуется. Таким образом, чтобы черная дыра захватила пролетающее тело (им может быть и молекула газа межзвездной среды), надо, чтобы выполнялось некоторое условие<sup>89</sup>. Вот оно:

$$r < R_G = \frac{2GM}{v^2}.$$

Критическое расстояние  $R_G$  называют радиусом гравитационного захвата.

Однако мало тело захватить, ведь оно может просто вращаться вокруг черной дыры на устойчивой орбите (как Земля вокруг Солнца или Луна вокруг Земли). Телу нужно избавиться от вращения — потерять орбитальный момент. В системе двух тел такой возможности практически нет (исключение составляют приливы, а в случае черной дыры и атома водорода какие уж тут приливы!). Необходимо, чтобы вокруг центрального массивного объекта вращалось несколько тел, которые могли бы достаточно эффективно обмениваться энергией и орбитальным моментом. Тогда часть из них сможет перейти на более низкие орбиты и в конечном счете выпасть на центральный объект.

В случае аккреции вещества межзвездной среды захватывается газ, поэтому за счет вязкости можно обеспечить довольно эффективный отвод орбитального момента наружу. Взаимодействие частиц газа в потоке будет приводить к переносу орбитального момента прочь от гравитирующего центра, а вещество, потерявшее момент, будет течь в его сторону.

Поэтому аккреция начинается, если вещество проникло под радиус гравитационного захвата. Теперь мы можем сделать простую оценку максимального темпа аккреции.

Итак, черная дыра массы  $M$  летит со скоростью  $v$  сквозь межзвездную среду плотностью  $\rho$ . Будем считать, что все вещество, попадающее внутрь радиуса гравитационного захвата, в итоге поглотится черной дырой. Значит, объем поглощенного за единицу времени вещества будет равен объему цилиндра, длина которого равна произведению скорости на интервал времени (не забываем, что он у нас единичный), а площадь основания равна  $\pi R_G^2$ . Таким образом, темп аккреции будет равен:

$$\dot{M} = \pi \frac{4(GM)^2 \rho}{v^3}.$$

Учет некоторых тонкостей может изменить численный коэффициент, но общие зависимости останутся, и по порядку величины эта оценка верна.

Необходимо сделать один комментарий относительно скорости. Глядя на формулу, кажется, что можно достичь очень высокого темпа аккреции, если черная дыра будет двигаться относительно среды с очень низкой скоростью. Однако необходимо учесть, что частицы среды сами движутся, и в космических условиях эта скорость может быть довольно велика. Хорошей оценкой характерной скорости будет величина скорости звука  $v_s$  в межзвездной среде, которая в зависимости от комбинации температуры и плотности может составлять от нескольких сотен метров в секунду в самых холодных и плотных областях до десятков километров в секунду. С учетом скорости звука формула немного изменится:

$$\dot{M} = 4\pi \frac{(GM)^2 \rho}{(v^2 + v_s^2)^{3/2}}.$$

Если мы подставим в формулу типичные значения:  $\rho = 10^{-24}$  г/см<sup>3</sup>,  $M = 2 \cdot 10^3$  г, а для обеих скоростей возьмем значения 10 км/с (в случае скорости звука это типичное значение, а вот для скорости движения — скорее, нижний предел), то получим примерно  $10^{13}$  грамм в секунду.

Теперь возникает более сложный момент — посчитать эффективность аккреции, т. е. сколько энергии выделится на грамм вещества, провалившегося в конце концов в черную дыру. И вот тут ясности нет. Дело в том, что поверхность-то у черной дыры отсутствует! Иначе говоря, выделить энергию при контакте с поверхностью невозможно. Значит, все энерговыделение должно идти в потоке. Насколько оно эффективно, в ряде случаев неясно. Если аккрецируемое вещество обладает достаточно большим орбитальным моментом, то вокруг черной дыры формируется аккреционный диск. За счет вязкости (по сути, за счет трения слоев газа друг о друга) энерговыделение достигает больших значений. Именно поэтому мы видим мощное излучение квазаров, блазаров и других активных галактических ядер, а также черных дыр в рентгеновских тесных двойных системах. В том случае, если и при аккреции из межзвездной среды формируется диск, можно рассчитывать на довольно значительную светимость. Давайте попробуем оценить верхний предел для нее.

Поступим очень просто. Оценим гравитационную потенциальную энергию на внутреннем крае аккреционного диска. В случае черных дыр существует важное понятие *последней устойчивой круговой орбиты*. Для невращающейся вокруг своей оси черной дыры (а мы думаем, что одиночные черные дыры, блуждающие по Галактике, в основном имеют относительно медленное вращение, поскольку раскрутить черную дыру можно в первую очередь мощной аккрецией в тесной двойной системе) радиус такой орбиты равен  $6GM/c^2$ , т. е. трем шварцшильдовским радиусам. После достижения этой границы вещество в диске очень быстро «вспираливаются» под горизонт. Таким образом, плотность вещества в потоке под критическим радиусом мала, а потому там трудно сгенерировать мощное излучение за счет вязкости. На радиусе гравитационного захвата вещество имеет практически нулевую энергию. Значит, верхний предел на энерговыделение будет примерно равен по модулю потенциальной энергии на последней устойчивой орбите. Воспользовавшись приведенной несколько выше формулой для массы  $m$ , получим энерговыделение ( $mc^2/6$ ). Это много: каждый грамм будет давать  $1,5 \cdot 10^{20}$  эрг. Объединив это с полученной выше оценкой темпа аккреции и немного

округлив, получим примерно треть светимости Солнца — довольно заметный источник!

Однако до сих пор одиночные аккрецирующие черные дыры не идентифицированы (здесь я нарочито избегаю слов «не обнаружены», поскольку потом может оказаться, что какие-то из известных слабых источников относятся к данному классу объектов). Расчеты показывают, что в спектре излучения одиночных аккрецирующих черных дыр может быть два максимума: в инфракрасной и рентгеновской области. Соответственно, предпринимались попытки выявить слабые источники с такими свойствами. Проводились специальные поиски в направлениях молекулярных облаков, где выше плотность среды, а значит, выше темп аккреции и, следовательно, светимость. Но все пока безрезультатно.

Вероятнее всего, приведенная выше оценка темпа аккреции завышает реальную величину, а значит, черные дыры будут более слабыми источниками. Однако нет никаких сомнений, что в Галактике блуждают многие десятки миллионов черных дыр звездных масс, потихоньку поглощающих вещество межзвездной среды. При этом выделяется какое-то количество энергии в виде электромагнитного излучения. Стало быть, рано или поздно они будут обнаружены.

А пока есть другой, уже работающий способ открывать одиночные черные дыры.

## 4Б. Линзирование

Любое тело обладает массой, а значит, искривляет пространство-время вокруг себя. Это сказывается на движении всех объектов в данной области. Разумеется, чем массивнее тело, тем на большем расстоянии оно может оказывать заметное влияние. Нас будет интересовать, как присутствие массивного тела сказывается на распространении электромагнитных волн, и в частности света.

Заметим, что отклонение световых лучей как таковое — это не совсем «изобретение» общей теории относительности. Согласно ньютоновской модели, свет, если представить его себе как поток очень легких частиц

(именно так себе представлял свет сам Ньютон), также должен отклоняться, только эффект будет в два раза меньше, чем в ОТО<sup>90</sup>. Наблюдения смещения положения звезд во время солнечных затмений (а затем и другие многочисленные наблюдения и эксперименты) показали, что верен расчет в рамках ОТО — при небольших углах отклонения работает формула

$$\delta\phi = \frac{4GM}{c^2 r},$$

где  $\delta\phi$  — угол, на который отклоняется свет,  $M$  — масса гравитационной линзы, а  $r$  — минимальное расстояние между траекторией светового луча и центром линзы.

Гравитационное линзирование встречается в астрономии в самых разных вариантах. В роли источника может выступать далекий квазар, а в роли гравитационной линзы — массивная галактика. Или же источником является далекая сверхновая, и ее свет линзируется на скоплении галактик. Мой любимый пример таков. Источником является аккреционный диск в далекой активной галактике, а его излучение линзируется на отдельных звездах более близкой галактики на луче зрения<sup>91</sup>. В такой поразительной ситуации мы можем измерить параметры диска (по сути, определить, как его температура меняется с радиусом).

Однако здесь нас будет интересовать случай так называемого *микрولينзирования*. Микро-, потому что линза относительно легкая, это объект звездной массы. Источником в такой ситуации обычно является звезда нашей Галактики, и, конечно, в ней же находится и линза.

Если мы смотрим на какую-то случайно выбранную звезду, то понадобятся сотни тысяч лет, пока еще какой-то умеренно массивный объект (другая звезда, бурый карлик или компактный остаток) пролетит столь близко к лучу зрения, что вызовет заметный эффект.

Какие эффекты могут возникать при таком пролете? Во-первых, это просто смещение видимого положения звезды-источника. Такой случай называют *астрометрическим линзированием*. Наблюдать эффект очень трудно, так как он мал. Но иногда это удастся (если знать, куда смотреть

с помощью крупных телескопов), а кроме того, спутник Gaia вскоре должен представить много данных по таким явлениям. Но более известным является так называемое *фотометрическое микролинзирование*, к которому мы и перейдем.

Гравитационная линза всегда работает таким образом, что усиливает блеск источника. Для этого он должен оказаться на небольшом угловом расстоянии от линзы — внутри так называемого *конуса Эйнштейна*. Если считать, что источник расположен гораздо дальше линзы, то этот кружок на небе характеризуется угловым радиусом, вычисляемым по очень простой формуле (вот только вывод ее не так уж прост, и здесь мы его приводить не будем):

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2 d_L}},$$

где  $d_L$  — расстояние от наблюдателя до линзы, а  $M$  — ее масса.

Если подставить звездную массу и расстояние порядка нескольких тысяч световых лет, то мы получим угол примерно в несколько сотых угловой секунды. Вероятность того, что одна из звезд попадет в такой кружок, крайне мала, поэтому и надо ждать сотни тысяч лет, пока это произойдет. Но если уж такое случилось, то блеск звезды возрастает в несколько раз, что легко заметить.

С появлением цифровых приемников излучения, чья главная характеристика — число мегапикселей, астрономы научились сразу измерять блеск большого числа звезд. Это дало возможность начать специальные программы наблюдений, охотящихся за случаями микролинзирования. Сейчас счет зарегистрированным событиям идет на многие тысячи.

А что же черные дыры? Насколько часто в роли линзы может выступить такой объект? Чтобы в этом разобраться, нам надо сравнить количество и массы обычных звезд, черных дыр, а также нейтронных звезд и белых карликов<sup>92</sup>.

Начнем с масс. Наблюдения говорят нам, что средняя масса белых карликов составляет примерно 0,6 солнечных, нейтронных звезд — 1,3,

а черных дыр — 5–10. Для обычных звезд мы снова воспользуемся начальной функцией масс в виде:

$$\frac{dN}{dM} \propto M^{-2,35}.$$

Масса звезд в интервале  $dM$  в окрестности какой-то массы  $M$  равна просто произведению этой массы на  $dN$ . Соответственно, полная масса звезд будет пропорциональна интегралу

$$\int_{0,1}^{100} M M^{-2,35} dM.$$

А полное количество звезд, как и выше в приложении 4А, — интегралу

$$\int_{0,1}^{100} M^{-2,35} dM.$$

Коэффициент пропорциональности одинаковый. Соответственно, средняя масса звезды, равная отношению массы всех звезд к их количеству, будет отношением этих интегралов. Учитывая, что нижний предел гораздо меньше верхнего, а под интегралом стоят отрицательные степени, по модулю большие единицы, мы получим, что отношение примерно равно  $0,1 \frac{1,35}{0,35}$ . Это дает 0,38. Обычно используется средняя звездная масса, равная 0,3, поскольку в качестве нижнего предела подставляется неокругленное значение 0,08 солнечных масс.

Итак, звезды в среднем вдвое легче белых карликов, примерно в пять раз — нейтронных звезд и примерно в 20 раз — черных дыр. Это важно, так как для этих объектов будут пропорционально квадратному корню из массы изменяться параметры конусов Эйнштейна.

Теперь оценим относительное количество этих четырех типов объектов. Выше, в приложении 4А, мы уже сравнивали количество черных дыр с количеством звезд. Аналогичным способом, меняя пределы интегралов, можно получить, что нейтронных звезд примерно в 5 раз, а белых карликов раз в 20 больше, чем черных дыр.

Собирая все вместе, получаем, что почти 90% случаев линзирования должны быть связаны с обычными звездами\*. Примерно в 10% случаев линзами могут являться белые карлики, а вот на долю нейтронных звезд и черных дыр вместе приходится около 1–2% (вклад нейтронных звезд несколько уменьшается из-за их высокой скорости, так как они быстро покидают диск Галактики). Однако, поскольку случаев линзирования известно уже более десяти тысяч, то и 1% — это хорошо.

В самом деле, на сегодняшний день выявлено более десятка случаев линзирования, где линзой является нейтронная звезда или черная дыра. Здесь первый шаг таков. Данные наблюдений позволяют получить распределения вероятностей для массы линзы и расстояния до нее. Затем мы можем попытаться увидеть объект, выступивший в роли линзы. При типичных массах нейтронных звезд и черных дыр это были бы довольно заметные звезды. Таким образом, если ничего не удастся увидеть, то это сильный аргумент в пользу того, что мы имеем дело именно с компактным объектом, а не с обычной звездой.

На втором шаге нам надо попробовать различить нейтронные звезды и черные дыры. И тут подход очень прост. Если масса темной линзы превосходит три солнечных, то объект считают черной дырой. На сегодняшний день выявлено несколько таких кандидатов. Из-за значительной массы черных дыр и их относительно небольшой скорости продолжительность событий линзирования на таких объектах весьма велика — обычно более года! Так что времени для детального построения кривой блеска источника предостаточно. Проблема в том, что мы не можем изучать, не можем (пока?) никаким способом идентифицировать черную дыру по окончании эпизода линзирования. Поэтому часть коллег считают, что все такие кандидаты недостаточно надежны. Тем не менее на сегодня это единственный, хоть как-то работающий способ получать прямую информацию об одиночных черных дырах звездных масс.

\* Здесь мы не учитываем вклад бурых карликов, который, вообще говоря, немал и может превосходить вклад белых карликов. Можно считать, что в оценках мы приплюсовали бурых карликов к обычным звездам, которым они заметно уступают по вкладу в линзирование.



## 4В. ИСПАРЕНИЕ

Одним из самых потрясающих открытий, которые к тому же могут произойти в любой момент (надо только много-много везения), было бы обнаружение испарения черных дыр. Это не только доказало бы существование хокинговского излучения, не только стало бы самым надежным доказательством существования черных дыр, но вдобавок дало бы нам в руки уникальный инструмент по проверке моделей квантовой гравитации.

Как мы увидим в дальнейшем, только очень легкие черные дыры могут дойти до финальных стадий испарения за 13–14 млрд лет — время жизни вселенной. В настоящее время испаряются черные дыры, имевшие вначале массы порядка  $10^{15}$  г, а черные дыры тяжелее  $10^{26}$  г (это примерно масса Луны) вообще наращивают массу, а не уменьшают ее. Откуда же берутся такие черные дыры?

Еще в конце 1960-х гг. начали обсуждать возможность рождения черных дыр в молодой вселенной, когда плотность вещества была очень велика (одними из первых такие идеи высказали Яков Зельдович и Игорь Новиков). А начиная с 1970-х гг. благодаря трудам Стивена Хокинга и других ученых эта идея стала весьма популярной гипотезой, в верности которой сейчас мало кто сомневается.

Сама идея крайне проста, и ее можно объяснить «на пальцах». Уже в самые ранние эпохи существования вселенной (первые доли секунды) плотность не распределена равномерно. Из-за флуктуаций (в инфляционной модели за эти вариации плотности ответственны квантовые эффекты) вещество распределено «где-то густо, а где-то пусто». Под действием гравитации области повышенной плотности могут сжиматься, а если масса и размер области соответствуют параметрам черной дыры, то и коллапсировать.

Существенно, однако, что вселенная еще очень молода. Поэтому сигналы (в том числе гравитационное взаимодействие) успели распространиться лишь на небольшое расстояние. Как говорят, «горизонт еще мал», т. е. размеры причинно-связанных областей невелики. Коллапсировать

может лишь причинно-связанная область (иначе одна часть «не знает» о гравитационном влиянии другой). Если критическая комбинация массы и радиуса достигается лишь при большем размере, то придется подождать. По мере жизни вселенной размер горизонта растет как произведение времени на скорость света. Но не будем забывать, что и сама вселенная расширяется! Иначе говоря, области повышенной плотности могут растягиваться. И тут уж «кто кого переборет»: или размер горизонта успеет дорасти до нужного масштаба и произойдет коллапс, или флуктуация растянется и формирования черной дыры удастся избежать.

Важно, что коллапсирует область размером порядка текущего горизонта<sup>93</sup>. Соответственно, в разное время формируются черные дыры разной массы: чем позже — тем больше\*. Процесс идет от самых ранних моментов (когда теоретически в некоторых моделях масса может доходить до планковской —  $10^{-5}$  г) до примерно одной секунды (тогда могут образовываться дыры с массой около 100 000 масс Солнца). Для массы черной дыры в зависимости от времени формирования существует простая формула, определяемая массой вещества внутри горизонта:

$$M \approx \frac{c^3 t}{G} \approx 10^{15} \left( \frac{t}{10^{-23} \text{ с}} \right) \text{ г},$$

где  $c$  — скорость света,  $G$  — ньютоновская постоянная, а  $t$  — время.

Результат приведен в граммах, и время нормировано на момент формирования тех дыр, чья жизнь сейчас, согласно хокинговской модели, подходит к концу.

В своей знаменитой работе 1975 г. Стивен Хокинг предложил механизм, с помощью которого черная дыра может «испаряться»<sup>94</sup>. Детали механизма довольно нетривиальны с бытовой точки зрения,

\* Вспомним, что «средняя плотность» черной дыры падает с ростом массы (а значит, и размера), так что какая-то относительно крупная область высокой постоянной плотности может соответствовать условиям коллапса в целом, а вот ее части схлопываться не будут. Таким образом, надо дожидаться, когда космологический горизонт увеличится до соответствующего размера.

а упрощенные иллюстрации лишь вводят в заблуждение. Но, как бы то ни было, вблизи горизонта (что не означает микроскопических расстояний от него!) за счет квантовых эффектов формируются частицы (и кванты электромагнитного излучения, и частицы, имеющие массу покоя), уносящие энергию дыры, т. е. уменьшающие ее массу. Чем меньше черная дыра, тем активнее она излучает. Для внешнего наблюдателя черная дыра выглядит как источник теплового излучения.

Температура излучения черной дыры определяется следующей формулой:

$$T = \frac{hc^3}{16\pi^2 GMk},$$

где  $h$  — постоянная Планка, а  $k$  — постоянная Больцмана.

Видно, что с уменьшением массы температура растет. Давайте попробуем получить эту формулу с точностью до численного коэффициента.

Начнем мы, как ни странно, с принципа неопределенности Гейзенберга и корпускулярно-волнового дуализма. Легенда гласит, что в разговоре с Яковом Борисовичем Зельдовичем Владимир Наумович Грибов высказал следующую мысль. Возникает парадокс, если мы применим принцип Гейзенберга к черным дырам. С одной стороны, мы говорим, что из них ничего не вылетает, а с другой — как же мы локализуем в маленькой черной дыре частицу, длина волны которой превосходит размер черной дыры? Иными словами, в некотором смысле квантовая механика вступает в противоречие с ОТО. Грибов полагал, что «квантовая механика победит».

Предельный масштаб, на котором мы можем локализовать частицу, связан с ее комптоновской длиной волны:

$$\lambda = \frac{h}{mc},$$

где  $m$  — масса частицы.

Что же это за длина волны? Это можно пояснить таким образом (хотя в таком упрощенном комментарии есть элемент передергивания).

Каждой длине волны соответствует частота, которую можно рассчитать, используя скорость распространения волны. В данном случае — скорость света:  $\nu = c / \lambda$ . С одной стороны, если мы рассматриваем волну, то энергия частицы будет равна  $E = h\nu$ . С другой — энергия частицы при такой предельной локализации будет порядка ее энергии покоя:  $E = mc^2$ . Таким образом,  $h\nu = hc / \lambda = mc^2$ . А отсюда мы сразу получаем, что

$$\lambda = \frac{h}{mc}.$$

Принцип неопределенности Гейзенберга записывается таким образом:

$$\Delta x \Delta p \approx \hbar,$$

где  $\Delta x$  — неопределенность координаты, а  $\Delta p$  — неопределенность импульса частицы.

В нашем рассуждении существенно, что мы пытаемся локализовать частицу по координате с точностью порядка ее комптоновской длины волны. Это приведет к тому, что неопределенность импульса будет порядка  $\Delta p = mc$  (именно поэтому выше мы могли использовать скорость света при сопоставлении частоты и длины волны). Тогда для  $\Delta x$  получим:

$$\Delta x = \frac{\hbar}{mc}.$$

Таким образом, эта величина равна комптоновской длине волны, деленной на  $2\pi$ . Эту величину называют *приведенной комптоновской длиной волны* и записывают так:  $\tilde{\lambda} = \lambda / 2\pi$  (а величину  $\hbar = h / 2\pi$  называют *приведенной или редуцированной постоянной Планка*).

Теперь получим оценку температуры черной дыры. С одной стороны, пределом для «вылезания» частицы из дыры будет равенство диаметра черной дыры и приведенной комптоновской длины волны (напомним, что мы всего лишь даем некую иллюстрацию, на самом деле никакие

частицы из черной дыры не «вылупляются», они не пересекают горизонт «оттуда сюда», а возникают «с нашей стороны» из-за изменений параметров вакуума, связанных с нестационарностью горизонта). С другой стороны, при излучении у нас есть равенство для тепловой энергии частицы и энергии кванта:

$$kT = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

где длина волны — это комптоновская длина.

Приведенную длину мы оценили как удвоенный радиус черной дыры, для которого используем стандартную формулу Шварцшильда:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}.$$

Таким образом получаем:

$$\lambda = 2\pi \times 2 \times \frac{2GM}{c^2}.$$

Теперь соберем все вместе и получим выражение для температуры:

$$T = \frac{h\nu}{k} = \frac{hc}{k\lambda} = \frac{hc}{k \times 2\pi \times 2 \left( \frac{2GM}{c^2} \right)} = \frac{hc^3}{8\pi GMk}.$$

Формула лишь коэффициентом  $\pi$  отличается от точного значения. Разумеется, это совсем не строгий вывод, и, только зная аккуратно полученный правильный результат, можно потирать руки, радуясь тому, что мы таким простым способом получили столь фундаментальную формулу. Тем не менее приятно, что можно построить такую наглядную цепочку рассуждений.

Отметим, что при уже упоминавшейся массе  $10^{26}$  г температура будет примерно равна современной температуре реликтового излучения, заполняющего всю вселенную (в прошлом температура была выше). Так что, даже если мы сейчас поместим черную дыру в совсем пустую область

космоса, она все равно будет расти за счет поглощения фотонов реликта при массе больше  $10^{26}$  г.

Итак, у нас есть температура, значит, в первом приближении мы можем посчитать светимость\*. Для теплового излучения сферы радиуса  $R$  она рассчитывается по формуле

$$L = 4\pi R^2 \sigma_{\text{SB}} T^4.$$

Напомним, что постоянная Стефана — Больцмана равна:

$$\sigma_{\text{SB}} = \frac{\pi^2 k^4 (2\pi)^3}{60 h^3 c^2}.$$

В качестве радиуса излучающей поверхности подставим шварцшильдовский радиус. Затем светимость запишем в таком виде:

$$L = \frac{dM}{dt} c^2,$$

т. е. мощность излучения определяется темпом потери массы. Тогда мы сможем записать:

$$M^2 \frac{dM}{dt} \propto \frac{hc^4}{G^2}.$$

Проведем интегрирование от начальной массы  $M$  до нуля (полное испарение) и для времени полного испарения получим:

$$\tau \propto \frac{G^2 M^3}{hc^4}.$$

Точная формула выглядит так:

$$\tau = \frac{2\pi G^2 M^3}{hc^4}.$$

\* Отметим, что здесь мы получаем оценку для того периода испарения черной дыры, когда испускаются только кванты электромагнитного излучения. Именно этот этап жизни черной дыры длится дольше всего.

Мы снова с точностью до численных коэффициентов получили верный результат!

Можно получить его и несколько иначе. Пусть энергия уносится квантами электромагнитного излучения (напомним, что на первых этапах испарения, пока температура недостаточно велика, частицы не рождаются — только излучение). Энергия одного кванта равна  $E_\gamma = h\nu = hc/\lambda$ . Характерное время испускания составляет  $\Delta t = \lambda/c$ . Запишем вначале такое выражение (оно соответствует светимости  $L$ ):

$$\frac{E_\gamma}{\Delta t} = \frac{hc^2}{R_s^2}.$$

Значит:

$$\Delta t = \frac{4E_\gamma G^2 M^2}{hc^6}.$$

Нам надо оценить время излучения всей массы черной дыры, т. е. время потери энергии  $E = Mc^2$ . Обозначим это время, как и выше, буквой  $\tau$  и вместе с  $E_\gamma$  подставим в уравнение  $E = Mc^2$ . Это можно описать и иначе:

$$\tau = \frac{E}{L} = \frac{Mc^2}{L}.$$

Получим:

$$\tau \propto \frac{G^2 M^3}{hc^4}.$$

Иначе говоря, снова тот же результат, верный с точностью до небольшого численного коэффициента.

Когда температура черной дыры становится достаточно высокой для того, чтобы рождались не только кванты электромагнитного излучения, но и частицы, коэффициент в формуле немного изменяется. Поэтому для совсем легких черных дыр формула работает лишь примерно: они испаряются несколько быстрее.

Что здесь для нас важно с точки зрения астрофизики? Испаряющиеся черные дыры являются уникальными источниками, проявления которых можно надеяться выявить. Здесь астрономы идут разными путями.

Во-первых, можно искать сами вспышки, связанные с последними моментами жизни черных дыр, причем как в гамма-диапазоне (ведь температура растет с падением массы, и на финальных стадиях испускается много гамма-излучения), так и в других, в первую очередь в радиодиапазоне. К сожалению, ничего пока не обнаружено. Заметим, что на финальных стадиях, несмотря на высокую температуру, светимость объекта невелика (намного меньше солнечной). Действительно, ведь от черной дыры почти ничего не осталось — за последнюю десятую долю секунды испаряются последние тонны вещества (а за последнюю минуту — несколько сотен тонн). Поэтому вспышки в гамма-диапазоне (где их легче искать) доступны с помощью современной аппаратуры лишь с расстояний порядка одного парсека и меньше.

Остроумный подход использовала коллаборация спутника Fermi<sup>95</sup>. Допустим, мы могли пропустить вспышку (или ни один из аппаратов не смотрел в нужную сторону, или вспышка была слаба, или еще что-то помешало, например солнечная активность). Но за годы до момента своего исчезновения достаточно близкая черная дыра является заметным гамма-источником, чьи светимость и спектр меняются по более или менее известному закону. А кроме того, поскольку объект достаточно близкий, можно заметить его смещение на небе. Соответственно, был проведен поиск источников, которые исчезли за несколько лет мониторинга всего неба в гамма-диапазоне обсерваторией «Ферми», и при этом определенным образом эволюционировали их светимости и спектральные параметры, а также изменялись координаты. Опять-таки ничего обнаружить не удалось, но был дан самый жесткий предел на темп испарения черных дыр в наших окрестностях: менее десятка тысяч событий в год в объеме один кубический парсек.

Второй путь связан не с поиском вспышек, а с попытками обнаружить суммарный вклад множества испаряющихся черных дыр. Во-первых, можно искать «лишнее» гамма-излучение. Например, от черных дыр в центральной части нашей Галактики или от соседних галактик.



А во-вторых, можно искать частицы, рождающиеся на финальных стадиях испарения, причем не просто частицы, а античастицы.

Чтобы выполнялся закон сохранения электрического заряда, частицы должны рождаться парами: электроны-позитроны, протоны-антипротоны\*. Электронов и протонов вокруг много — трудно выявить лишние, а вот позитронов и антипротонов — мало. Понятно, что в тарелке супа проще обнаружить лишнюю ложку соли, чем лишнюю ложку воды. Вот и астрофизики ищут избыток античастиц. Пока также ничего не выявлено, однако попытки обнаружить сигнал продолжаются. Например, недавно появились интересные результаты со спутников «Вояджер», вылетевших за пределы гелиосферы<sup>96</sup>. За гелиопаузой проще обнаружить лишние позитроны, так как солнечный ветер и относительно большое магнитное поле во внутренних частях Солнечной системы не мешают их распространению. Увы, снова ничего.

Наконец, черные дыры можно искать способами, описанными нами в приложениях 4А и 4Б: с помощью микролинзирования и поиска аккрецирующих источников<sup>97</sup>. Такие работы были проведены, и тоже с нулевым результатом\*\*. Хотя... В 2019 г. появилась работа, в которой представлены шесть ультракоротких событий линзирования по данным проекта OGLE<sup>98</sup>. Не исключено, что это могут быть первичные черные дыры с массами порядка земной. Хотя более вероятно, что это просто блуждающие одинокие планеты.

Подведем итоги. Все основные космологические модели предсказывают, что в первые доли секунды существования вселенной должны были возникать черные дыры. Таких объектов может быть много, и иногда их даже обсуждают как кандидатов для объяснения хотя бы части темного вещества. Тем не менее, несмотря на применение разнообразных методов поиска, пока ничего не обнаружено. Теория не может дать надежного предсказания о количестве таких объектов. Поэтому поиски продолжаются, и в любой момент кому-то может повезти. Как говорил Семен Семенович Горбунков, «будем искать».

\* Кстати, если черная дыра изначально была заряжена, то за счет испарения она довольно быстро становится нейтральной. Так же быстро испаряющиеся черные дыры избавляются и от вращения.

\*\* Здесь важно подчеркнуть, что такие поиски не завязаны на гипотезу о работе хокинговского механизма излучения.

# Астрофизика нейтронных звезд

Нейтронные звезды — одни из самых интересных физических объектов<sup>99</sup>. В результате коллапса ядер массивных звезд формируются тела с массами 1–2 солнечных и радиусами 10–15 км. Столь высокая компактность приводит к ряду экзотических свойств, связанных со сверхвысокой плотностью, сильной гравитацией и мощными магнитными полями. В этом приложении мы обсудим несколько аспектов, связанных с физикой нейтронных звезд, попробовав на уровне простых формул продемонстрировать суть дела, а также сделав ряд количественных оценок.

## 5А. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Многие особенности нейтронных звезд связаны с тем, что они обладают очень сильными магнитными полями. Если на поверхности Земли поле не превышает 1 Гс, а в лабораторных экспериментах на мгновение удастся получить поле в миллион раз больше, то на нейтронных звездах типичными считаются поля в миллион миллионов ( $10^{12}$ ) Гс! У некоторых магнитаров они еще в тысячу раз выше. Откуда эти поля взялись?

Нейтронные звезды образуются в результате коллапса ядер массивных звезд. Поскольку все звезды имеют магнитное поле, то оно должно достаться в наследство и нейтронной звезде. Более того, в ходе коллапса поле возрастет. Это достаточно легко понять.

Представьте себе звезду, пронизанную линиями магнитного поля. Плотность силовых линий — сколько их проходит через данную площадку — будет определять величину поля. Мысленно выделим ядро и опояшем его по экватору. Начинается коллапс — ядро сжимается. При этом число линий поля внутри кольца, охватывающего экватор, сохраняется (как говорят, «сохраняется магнитный поток»), а площадь поверхности ядра уменьшается, ведь она равна  $4\pi R^2$ , где  $R$  — радиус сферы. Значит, будет расти плотность силовых линий, т. е. будет возрастать поле:  $B \propto R^{-2}$ . Если до коллапса радиус ядра составлял 10 000 км и в итоге сформировалась нейтронная звезда с радиусом 10 км, то поле возрастет в миллион раз. Поле в ядре незадолго до коллапса может быть заметно выше, чем на поверхности звезды (где поля могут доходить до нескольких тысяч Гаусс), поскольку ядро постепенно поджималось (и уплотнялось) в течение эволюции звезды, так что значения порядка 1 млн Гс не должны быть редкими. В результате после коллапса мы легко получим нейтронную звезду с полем  $10^{12}$  Гс.

Однако, чтобы создать магнитное поле, которое, напомню, в тысячу раз выше, нужно что-то еще. Скорее всего, на стадии протонейтронной звезды, когда формирующийся компактный объект полностью конвективен (т. е. в нем идут бурные процессы перемешивания вещества), работает так называемый динамо-механизм, усиливающий магнитное поле. Источником энергии для формирующегося гигантского магнитного поля магнитара служит вращение протонейтронной звезды.

Давайте разберемся с энергией вращения и энергией магнитного поля. Представьте себе вращающийся шар. Каждый его маленький кусочек движется по окружности, перпендикулярной оси вращения. Пусть период вращения равен  $P$ , а радиус шара —  $R$ . Рассмотрим кусочек вещества массой  $\Delta m$ . Он вращается на расстоянии  $r < R$  от оси. Его скорость  $2\pi r / P$ . Значит, он обладает кинетической энергией  $\Delta m (2\pi r / P)^2 / 2$ .

Чтобы получить полную энергию, связанную с вращением, нам надо просуммировать энергии всех кусочков вещества. Строго это получается интегрированием по объему шара. Ясно, что полная масса равна  $M$ , при этом все кусочки вращаются внутри шара, т. е. их скорости меньше  $2\pi R/P$ . Значит, полная кинетическая энергия будет меньше, чем  $4\pi^2 MR^2/2P^2$ . Насколько меньше, зависит от того, как меняется плотность вещества внутри шара. Для нейтронных звезд она изменяется слабо, поэтому энергия будет ненамного меньше максимальной.

Чтобы упростить запись формул, удобно ввести две величины: угловую частоту вращения и момент инерции. Угловая частота — это просто  $2\pi/P$ . Обозначим ее буквой  $\omega$ . Момент инерции (его обозначим буквой  $I$ ) показывает, насколько инертно тело в смысле вращения, т. е. насколько трудно его раскрутить, а потом — затормозить (смысл примерно как у массы, характеризующей инертность в смысле поступательного движения). Момент инерции шара пропорционален произведению массы на квадрат радиуса (дополнительный безразмерный множитель зависит от распределения вещества в шаре). Энергия вращения запишется теперь в простом виде, напоминая формулу для кинетической энергии:  $E = I\omega^2 / 2$ . В случае нейтронной звезды  $I \approx MR^2$ , что составляет примерно  $10^{45}$  г·см<sup>2</sup>. Период вращения может составлять 0,001 секунды. Таким образом, получаем, что энергия вращения нейтронной звезды может достигать колоссальной величины  $>10^{52}$  эрг. Насколько это много? Это больше, чем Солнце излучает за всю свою жизнь! Так что, даже если малую часть этой энергии конвертировать в энергию магнитного поля, можно получить очень большую величину.

Как посчитать энергию магнитного поля? Не будем начинать с самых основ, а сразу скажем, что плотность магнитной энергии (т. е. магнитное давление) вычисляется по формуле:  $B^2 / 8\pi$ . Значит, чтобы узнать примерную магнитную энергию, содержащуюся в нейтронной звезде, надо эту величину умножить на объем звезды (для простоты предполагаем, что поле заполняет весь компактный объект). Если поле на поверхности равно  $10^{12}$  Гс, то полная энергия будет равна  $2 \cdot 10^{41}$  эрг. Совсем немного. Но если поле магнитное, то энергия возрастает до  $10^{47}$  эрг, столько

Солнце излучает за 1 млн лет. Однако видно, что энергия вращения может быть больше, так что ее хватит для усиления поля.

С чем еще можно сравнить энергию магнитного поля? Например, с потенциальной (гравитационной) энергией нейтронной звезды. Она вычисляется как  $GM^2 / R$ . В типичном случае это составит  $4 \cdot 10^{53}$  эрг. Эта величина позволяет понять, каким может быть предельное магнитное поле. Из

$$\frac{GM^2}{R} = \left( \frac{B^2}{8\pi} \right) \frac{4}{3} \pi R^3$$

получим, что поле никак не может быть больше  $10^{18}$  Гс, иначе звезду «разорвет».

У нас нет примеров нейтронных звезд со столь сильными полями; скорее всего, в природе они не встречаются. Но уже типичные магнитарные поля могут исказить сферическую форму нейтронной звезды, ведь магнитное поле распределено в ней неравномерно. Нейтронные звезды могут быть немного вытянутыми вдоль магнитной оси, а могут быть сплюснутыми, что должно сказываться на том, как компактный объект вращается, поэтому есть надежда увидеть это в данных наблюдений. Кроме того, вращение такого несимметричного объекта (если магнитная ось не совпадает с осью вращения) должно приводить к испусканию гравитационных волн. Не исключено, что детекторы следующего поколения (например, так называемый Телескоп Эйнштейна) смогут зарегистрировать такие сигналы.

Итак, энергии вращения много. Часть можно успеть превратить в энергию магнитного поля, пока компактный объект молод и быстро вращается. А что дальше? Дальше магнитное поле может способствовать постепенному превращению энергии вращения в энергию излучения и улетающих с околосветовыми скоростями частиц. Так работают радиопульсары.

Типичный компактный объект этого типа рождается с вращательной энергией около  $10^{51}$  эрг и магнитным полем  $10^{12}$ – $10^{13}$  Гс. Если энергию вращения расходовать медленно, то ее хватит очень надолго. Но пульсары так не умеют. Чем быстрее они вращаются, тем быстрее тормозятся. А значит, тем больше излучают. Светимости молодых пульсаров могут легко

превосходить миллион светимостей Солнца. Часть этой энергии уносится электромагнитными волнами, поэтому мы видим такие объекты как яркие источники во всех диапазонах спектра — от радио- до гамма-. Однако, как мы упоминали, основная доля уносится быстро движущимися (релятивистскими) заряженными частицами. Благодаря этому релятивистскому ветру вокруг многих молодых пульсаров мы видим красивые туманности — плерионы. Самым известным примером здесь является Крабовидная туманность. Если в ней «выключить» радиопульсар, то прекратится «накачка» энергии, и туманность постепенно погаснет.

В деталях механизм излучения пульсаров известен плохо, но его можно наглядно проиллюстрировать и даже получить качественно верное выражение для светимости, пользуясь очень простыми соображениями.

Мы уже рассматривали вращающийся шар и помним, что каждая частица шара вращается со скоростью, равной  $\omega r$ , где  $r$  — расстояние от оси вращения. Иначе говоря, чем дальше частица, тем быстрее она вращается. Теперь представьте, что из шара торчат линии магнитного поля. Они жестко связаны с внешними слоями нейтронной звезды, так что вращаются с той же самой частотой (т.е. с тем же периодом). Теперь, как бусинку на проволоку, мы помещаем на линию магнитного поля частицу. Ее скорость вращения также равна  $\omega r$ . Но мы уже рассматриваем вращение вне нейтронной звезды, а потому с ростом расстояния можем добраться до скорости света!

Ни частица, ни магнитная линия не могут вращаться со скоростью, превышающей световую. Значит, есть критическое расстояние, на котором замкнутая магнитосфера, заполненная заряженными частицами, перестает существовать. Поверхность, отстоящую от оси вращения на  $R_l = c/\omega$ , называют световым цилиндром. Вне светового цилиндра будут присутствовать только электромагнитные волны и релятивистские частицы, улетающие от нейтронной звезды. Они-то и уносят энергию вращения, т.е. тормозят пульсар. Теперь, качественно представив себе физическую картину, мы готовы получить формулу для светимости пульсара.

Светимость — это количество энергии, испускаемое в единицу времени. Энергия у нас запасается в магнитосфере внутри светового

цилиндра, а характерное время испускания — период вращения (напомним, что  $P = 2\pi/\omega$ ). Сколько же у нас есть энергии? Снова воспользуемся произведением плотности энергии магнитного поля  $B^2/8\pi$  на объем, но теперь возьмем объем магнитосферы, а величину поля — на световом цилиндре (нас интересуют самые внешние области с большим объемом, которые могут участвовать в процессе излучения). С расстоянием поле спадает как куб радиуса. Пусть поле на поверхности нейтронной звезды с радиусом  $R_0$  равно  $B_0$ . Тогда для энергии получим:

$$B_0^2 \frac{R_0^6}{R_l^6} \frac{1}{8\pi} \frac{4}{3} \pi R_l^3 = \frac{1}{6} B_0^2 R_0^6 R_l^{-3}.$$

Подставив выражение для радиуса светового цилиндра  $R_l = c/\omega$ , получим энергию (пренебрегая численными множителями):

$$E \propto \frac{B_0^2 R_0^6 \omega^3}{c^3}.$$

Теперь, чтобы получить светимость, остается разделить это на характерный период. Получим:

$$L \propto \frac{B_0^2 R_0^6 \omega^4}{c^3}.$$

Таким образом, светимость больше для нейтронных звезд с более сильным полем, но, самое главное, она очень быстро спадает с ростом периода: пульсар с периодом 1 с излучает в 10 000 раз меньше, чем при периоде 0,1 с.

Мы уже выписывали уравнение для энергии вращения:  $I\omega^2/2$ . Возьмем производную по времени от этой величины. Момент инерции не меняется со временем, поэтому для темпа потерь энергии вращения получим выражение  $I\omega\dot{\omega}$ , где точка сверху обозначает производную по времени (т. е.  $\dot{\omega} = d\omega/dt$ ). Приравняв эту величину к светимости (добавим в формулу для светимости безразмерный коэффициент\*  $k$ , чтобы учесть отброшенные безразмерные множители), получим:

\* Этот коэффициент меньше нуля, что отражает тот факт, что частота уменьшается, а период растет.

$$d\omega / dt = k \frac{B_0^2 R_0^6}{I c^3} \omega^3 .$$

Можно теперь заменить угловую частоту на период и проинтегрировать. Получим, что период нейтронной звезды на стадии радиопульсара возрастает как квадратный корень из времени. Иными словами, если молодая нейтронная звезда возрастом 100 лет имеет период 0,1 с, то к миллиону лет этот период возрастет до 10 с. Это примерно отражает поведение типичного радиопульсара.

Разобравшись с выделением энергии вращения и некоторыми ее свойствами, перейдем к выделению энергии магнитного поля. Да-да, это возможно, ведь поле порождается электрическими токами. А энергию токов мы используем постоянно.

У нейтронной звезды нет батареек, и она не подключена к розетке, поэтому текущие в ней токи со временем затухают, а из-за этого уменьшается магнитное поле. Затухание тока связано с электрическим сопротивлением. Легко сообразить, что сильные токи будут затухать сильнее, а это означает, что сильные поля быстрее уменьшаются. Немного упростив ситуацию, мы можем представить это в виде такой несложной формулы:

$$\frac{dB}{dt} \propto -B .$$

Она показывает, что темп изменения поля (он стоит слева) прямо пропорционален величине поля (она стоит справа), а знак минус указывает на то, что поле со временем становится меньше. Решая это уравнение, мы получим, что поле уменьшается экспоненциально с некоторым характерным временем  $\tau$  (это время зависит от коэффициентов в уравнении, которые мы обсуждать не будем):  $B \propto e^{-t/\tau}$ .

Энергия тока в таком случае выделяется постепенно, переходя в тепло. Мы с этим постоянно сталкиваемся в быту (пока я пишу эти слова, вскипел чайник, а руками я чувствую, как нагрелся мой ноутбук, — все из-за электрических токов и сопротивления!). Но можно выделять энергию токов быстро — в результате короткого замыкания.



Не пытайтесь проверить, но короткое замыкание — очень эффективный способ быстрого выделения большой энергии. Пожалуй, только так в домашних условиях можно легко оплавить не слишком легкоплавкий металл. Именно с помощью природного электрического пробоя в фильме «Назад в будущее» смогли решить проблему, возникшую из-за поломки ядерного реактора. Если устроить короткое замыкание в коре нейтронной звезды, то можно выделить заметную долю от полной энергии магнитного поля в компактном объекте. Так работают магнитары.

Во время самой мощной из известных магнитарных вспышек пиковая светимость составила примерно  $10^{47}$  эрг/с. Это более чем 10 000 000 000 000 светимостей Солнца. Намного больше светимости целой галактики! А источником был всего лишь 10-километровый шарик.

Даже если энергосвечение не связано с вращением или диссипацией энергии токов, магнитное поле все равно может оказаться «при деле». Так происходит в аккрецирующих нейтронных звездах.

## 5Б. АККРЕЦИРУЮЩИЕ ОБЪЕКТЫ

В приложениях 3 и 4 мы уже обсудили некоторые особенности процесса аккреции и смогли оценить его высокую эффективность, если вещество падает на массивные компактные объекты. В случае аккреции на поверхность нейтронной звезды каждый грамм вещества выделяет огромную энергию, которую можно оценить как  $GM/R_0$ , где  $R_0$  — радиус нейтронной звезды, а  $M$  — ее масса. Подставим типичные для этих компактных объектов параметры и получим  $10^{20}$  эрг на 1 грамм\*. Это примерно 10% от  $mc^2$ ! В десять с лишним раз больше, чем у термоядерных реакций в недрах Солнца. Неудивительно, что аккрецирующие нейтронные звезды являются мощными источниками. Теперь посмотрим, какие особенности есть при аккреции на нейтронные звезды, обладающие магнитным полем.

Действие поля возникает из-за того, что падающее вещество является плазмой (преимущественно водородно-гелиевой). Заряженные частицы не могут падать, пересекая линии поля. Поэтому если не возникает

\* Или  $10^{13}$  Дж.

неустойчивостей (и если мы пренебрегаем диффузией), то плазма движется только вдоль силовых линий — к магнитным полюсам. Плазма взаимодействует с магнитосферой, а она, в свою очередь, жестко связана с поверхностью нейтронной звезды. В результате компактный объект и вещество могут обмениваться энергией и моментом импульса. Последнее приводит к тому, что вращение нейтронной звезды может замедляться или ускоряться. Однако до стадии аккреции ей еще надо дожить.

Обычно первую часть своей жизни нейтронная звезда проводит как радиопульсар (или на очень похожей стадии, когда доминирует испускание релятивистского ветра частиц, покидающих область светового цилиндра). Но, как мы помним, период вращения пульсара растет, соответственно, уменьшается частота, а ведь светимость пропорциональна последней в четвертой степени! Кроме того, может уменьшаться магнитное поле, при этом светимость пропорциональна ее квадрату. Значит, уменьшается давление, которое ветер частиц и излучение оказывают на окружающую среду.

А среда всегда есть, и это вещество стремится попасть на нейтронную звезду. На каком-то расстоянии давление внешней среды уравновешивается давлением ветра и излучения. Пока это расстояние превосходит размеры светового цилиндра, нейтронная звезда продолжает оставаться эффективным источником частиц. Но вот когда вещество начинает проникать под световой цилиндр, ситуация меняется. Нейтронная звезда переходит на новую эволюционную стадию.

Как правило (если только компактный объект не обладает большой скоростью, превосходящей примерно 400 км/с, относительно межзвездной среды), когда вещество оказалось под световым цилиндром, оно уже гравитационно захвачено нейтронной звездой. Гравитация стремится притянуть вещество к ее поверхности, но на пути встает магнитное поле, ведь вещество является ионизованным (хотя бы частично) газом. Мы уже знаем, что давление магнитного поля пропорционально квадрату величины поля. А поле растет как третья степень расстояния при приближении к компактному объекту. Стало быть, давление увеличивается как шестая степень удаления от поверхности! Очень быстро!

В падающем веществе плотность энергии (т.е. давление) определяется гравитацией. Мы можем оценить давление как  $\rho v^2/2$ . Здесь  $\rho$  — плотность вещества, а  $v$  — его скорость. Скорость есть просто скорость свободного падения:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}.$$

Теперь рассчитаем плотность. Вещество втекает с радиуса гравитационного захвата, о котором мы говорили в приложении 4, с темпом  $\dot{M}$ . Напомню, что эта величина имеет размерность [г/с]. Поскольку мы рассматриваем сферически симметричную ситуацию, то за единицу времени эти граммы распределяются по объему  $4\pi r^2 v$ . Здесь  $4\pi r^2$  — это площадь сферы, а  $v$  — скорость, т.е. расстояние, проходимое веществом за единицу времени. Значит, плотность будет равна:

$$\rho = \frac{\dot{M}}{4\pi r^2 v}.$$

Собираем теперь все вместе, чтобы получить выражение для давления в падающем веществе:

$$P = \dot{M} \frac{\sqrt{GM}}{4\sqrt{2}\pi} r^{-5/2}.$$

Таким образом, давление повышается при приближении к звезде, но довольно медленно. Значит, более быстрый рост давления магнитного поля приведет к остановке вещества. Это произойдет на расстоянии, которое мы будем называть радиусом магнитосферы, или альвеновским радиусом, названном в честь шведского физика Ханнеса Альвена (Hannes Alfvén).

Чтобы определить этот радиус, надо просто приравнять давление падающего вещества к магнитному давлению:

$$\frac{B_0^2}{8\pi} \frac{R_0^6}{r^6} = \dot{M} \frac{\sqrt{GM}}{4\sqrt{2}\pi} r^{-5/2}.$$

Выразим отсюда радиус, обозначив его  $R_A$ :

$$R_A = \left( \frac{B_0^2 R_0^6}{M \sqrt{2GM}} \right)^{2/7}.$$

Теперь мы знаем, где магнитное поле останавливает падающее вещество. Если поле слишком слабое или темп аккреции слишком большой, альвеновский радиус может оказаться меньше радиуса нейтронной звезды. Значит, в такой ситуации влиянием поля можно пренебречь. В других случаях его необходимо учитывать.

Мы помним, что вещество представляет собой плазму, а потому не может двигаться поперек силовых линий<sup>100</sup>. Стало быть, плазма будет течь к магнитным полюсам (ситуация похожа на ту, которая приводит к полярным сияниям на Земле). Именно там выделится кинетическая энергия падающего вещества. Из-за этого магнитные полярные шапки на поверхности нейтронной звезды будут горячее остальной поверхности, т. е. будут сильнее излучать. Поскольку компактный объект вращается, то его блеск будет периодически меняться, и возникнет рентгеновский пульсар. Однако не может ли что-то еще предотвратить падение вещества на поверхность?

Падающее вещество сильно взаимодействует с магнитосферой, а она быстро вращается, так как жестко связана с нейтронной звездой. На расстоянии  $r$  скорость вращения будет составлять  $\omega r$ . На каком-то расстоянии эта скорость сравняется со скоростью кругового вращения вещества под действием гравитационного поля. Если радиус магнитосферы больше этого критического расстояния (которое мы назовем радиусом коротации), то вещество будет остановлено: центробежная сила не позволит аккрецирующей плазме достигнуть поверхности. Из-за возникновения центробежного барьера вещество будет отбрасываться быстро вращающимся магнитным полем. Такую стадию назвали пропеллером. А для радиуса коротации мы можем записать простую формулу. Из  $\omega r = \sqrt{GM/r}$  получим:

$$R_{co} = \left( \frac{GM}{\omega^2} \right)^{1/3}.$$

При периоде вращения 10 с радиус коротации равен примерно 10 000 км. Это больше, чем альвеновский радиус нейтронной звезды с магнитным полем  $10^{13}$  Гс на поверхности и темпом аккреции  $10^{17}$  г/с (10% от предельного). Иначе говоря, такая звезда не начнет аккрецировать.

Видно, что радиус коротации уменьшается с ростом частоты (т. е. с уменьшением периода вращения). Значит, быстровращающаяся нейтронная звезда начнет аккрецировать вещество, только если у нее слабое магнитное поле или же очень велик поток вещества (и то и другое приводит к уменьшению альвеновского радиуса). Значит, компактному объекту надо замедлить свое вращение, чтобы аккреция началась. К счастью для наблюдателей, это происходит довольно быстро, так как на стадии пропеллера интенсивное взаимодействие магнитного поля с окружающим веществом приводит к быстрому торможению вращения нейтронной звезды.

В Галактике и ее спутниках — Магеллановых Облаках — известны сотни двойных систем с аккрецирующими нейтронными звездами. Многие из них являются рентгеновскими пульсарами. Предоставляем читателю самостоятельно оценить их типичные периоды вращения из равенства радиуса коротации и альвеновского радиуса при стандартном магнитном поле  $10^{12}$ – $10^{13}$  Гс и типичном темпе аккреции, соответствующем светимости около 10% от эддингтоновской.

## 5В. АТМОСФЕРЫ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Как и многие другие тела, нейтронные звезды имеют атмосферу. И как всё у нейтронных звезд, атмосфера у них необычная. Из-за мощной гравитации на поверхности атмосфера оказывается очень тонкой. Мы сможем получить формулу для определения ее толщины, применять которую, кстати, можно не только к нейтронным звездам.

Представьте себе любую атмосферу, например земную. Газ не улетучивается в космос, потому что его удерживает земная гравитация. Но при этом газ и не выпадает на поверхность. Это происходит из-за того, что атмосфера нагрета. Равновесие обеспечивается балансом между силой

гравитации и тем, что в нижних слоях атмосферы давление выше. Попробуем разобраться в этом на уровне формул, которые позволят нам сделать и количественные оценки.

Рассмотрим тонкий прямоугольный объем в атмосфере (хотя в целом атмосфера — это сферический слой, но если размер тела намного больше толщины атмосферы, то можно рассмотреть плоский случай). Он имеет массу  $M$  и объем  $V$ , равный произведению его площади  $S$  на толщину нашего тонкого слоя внутри атмосферы  $dh$ . Масса складывается из суммы масс отдельных частиц. Будем рассматривать атмосферу, преимущественно состоящую из атомов или молекул одного сорта. Массу одной частицы обозначим  $m$ , а их концентрацию (количество в единице объема)  $n$ . Тогда:

$$M = mnV = mnSdh.$$

На этот слой действуют три силы: сила давления сверху, сила давления снизу и гравитация. Силу гравитации легко записать: это произведение массы слоя на ускорение свободного падения  $g$ . Сила давления — это произведение давления на площадь. Снизу давит сильнее, и если давление снизу мы обозначим  $P$ , то сверху оно меньше на небольшую величину  $dP$ .

Наш слой находится в равновесии, т. е. силы уравниваются друг друга:

$$PS - (P + dP)S = mnSgdh.$$

Это уравнение легко упростить, и мы получим  $-dP = mngdh$ .  $dP$  — отрицательная величина (давление падает с высотой).

Из школьной физики мы помним, что давление в идеальном газе — это плотность энергии движения составляющих его частиц. Каждая частица имеет энергию  $kT$ , где  $T$  — температура, а  $k$  — постоянная Больцмана. Значит, давление равно  $P = nkT$ . Можно считать, что в тонком слое температура меняется слабо, а изменение давления связано в первую очередь с уменьшением концентрации частиц при подъеме вверх (атмосфера становится разреженнее). Тогда  $dP = kTdn$ , где  $dn$  (тоже отрицательная

величина) показывает, насколько концентрация частиц внизу слоя больше, чем вверху. Подставим это в нашу формулу и получим:

$$kTdn = -mgndh.$$

Теперь перепишем это и получим простое дифференциальное уравнение:

$$\frac{dn}{n} = -\frac{mg}{kT}dh.$$

Мы уже сталкивались с похожим уравнением выше, а потому помним, что после интегрирования получим экспоненциальное решение:

$$n(h) = n_0 e^{-\frac{mgh}{kT}} = n_0 e^{-\frac{h}{h_0}},$$

где  $n_0$  — концентрация частиц на нулевой высоте, а  $h_0 = kT/(mg)$ . Последняя величина как раз задает характерную толщину атмосферы: при подъеме на такую высоту концентрация частиц падает в  $e$  раз.

Теперь мы можем подставить значения концентрации частиц, температуры и ускорения свободного падения, характеризующие конкретную атмосферу, и получим ее характерную толщину.

В случае Земли температура равна примерно 300К, ускорение свободного падения —  $10 \text{ м/с}^2$  (что в системе СГС дает нам  $1000 \text{ см/с}^2$ ), а масса одной частицы примерно равняется  $30 \cdot 10^{-24}$  г. Постоянная Больцмана равна  $1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/К. В итоге получим, что характерная толщина земной атмосферы составляет около 1 млн см, т. е. 10 км.

А что у нейтронных звезд? Если мы говорим о достаточно молодых объектах с возрастами от нескольких сотен до сотен тысяч лет (именно такие компактные объекты удается наблюдать по тепловому излучению их поверхности), то температура составляет примерно 1 млн Кельвин. Типичный состав такой атмосферы — водород (если на нейтронную звезду натекло немного вещества) или железо. Соответственно, массы

частиц или около  $10^{-24}$  г, или  $56 \cdot 10^{-24}$  г. Ускорение свободного падения гигантское, его можно посчитать как  $GM/R^2$ , где  $M$  — масса, а  $R$  — радиус компактного объекта. Получим огромную величину  $10^{14}$  см/с<sup>2</sup>, т. е. толщина атмосферы от 1 мм (в случае железа) до 1 см (если основной газ — водород).

Удивительно, но даже такой тонкий слой вещества может сильно влиять на исходящее от поверхности излучение. Без влияния атмосферы мы видели бы от одиночных молодых нейтронных звезд практически идеальный тепловой спектр, а наблюдения показывают, что это не так. Из-за поглощения в толстой (несколько сантиметров!) водородной атмосфере фотоны низкой энергии выходят беспрепятственно лишь из ее внешних слоев, где температура немного ниже\*. Наоборот, высокоэнергичные кванты рентгеновского излучения (а при 1 млн Кельвин поверхность испускает именно рентген) меньше поглощаются, поэтому достигают наших детекторов из более глубоких слоев. В результате регистрируемый спектр начинает отличаться от чернотельного.

В некоторых случаях природа подкидывает нам интересные загадки: спектр нейтронной звезды может плохо описываться водородным или железным составом. Тогда приходится подбирать нужные ингредиенты. Это не просто подгонка параметров. Дело в том, что после коллапса ядра и взрыва сверхновой часть выброшенного вещества иногда выпадает обратно на компактный объект, поэтому в атмосфере может появиться практически все — от водорода до железа. Что и в каком количестве окажется на поверхности, зависит от параметров взрыва. Таким образом, анализ состава атмосфер молодых нейтронных звезд помогает изучать, как происходят вспышки сверхновых.

\* Выше мы считали температуру постоянной, но это верно при рассмотрении очень тонкого слоя, а в общем, всем известно, что при подъеме температура воздуха падает, о чем нам постоянно напоминают пилоты лайнеров, сообщая о параметрах за бортом.



# Быстрые радиовсплески

Возможно, сейчас, когда вы читаете эту книгу, загадка быстрых радиовсплесков уже решена. Пока же на протяжении нескольких лет она остается одной из самых «горячих» в астрофизике, вызывая потоки интересных идей и бурные споры.

Кратко напомню, что первый всплеск был выявлен в 2007 г. Дунканом Лоримером и его коллегами. Но настоящий бум начался в 2013-м, когда появилось сообщение об обнаружении сразу четырех ярких миллисекундных радиовсплесков<sup>101</sup>. Уже в 2007 г. начали появляться первые теоретические модели, призванные объяснить новый тип источников, а к осени 2013 г. — после второй важной статьи наблюдателей — счет шел уже едва ли не на десятки. Давайте посмотрим, что дали самые первые наблюдения, т. е. что надо было объяснять теоретикам.

Всплески были обнаружены в архивных данных наблюдений 64-метрового телескопа в Парксе (Австралия) на частоте 1,4 ГГц. Длительность всплесков составляла всего лишь несколько миллисекунд, зато регистрируемый поток излучения был довольно большим. Правда, если расстояние неизвестно, то светимость источника мы по измеренному потоку определить не можем (но об этом чуть позже).

Существенно, что уже по одному всплеску можно было дать оценку темпа их появления на земном небе. И спустя 12 лет эта оценка по порядку величины остается верной! Как же это возможно? Дело в том, что всплеск был обнаружен в результате не каких-то случайных наблюдений, а обработки данных обзора, который проводился в основном с целью поиска радиопульсаров.

Представьте, что наш телескоп круглые сутки (в радиодиапазоне это вполне возможно) наблюдает одну и ту же небольшую площадку на небе, и в течение всего времени наблюдений на небе в случайных местах происходят всплески. Площадка маленькая. В случае телескопа в Парксе она сравнима с видимым размером лунного диска. Примем, что это около половины квадратного градуса. А на небе квадратных градусов более 40 000! Значит, мы видим примерно одну стотысячную от всей площади небесной сферы. Соответственно, если мы ведем наблюдения в течение суток и за это время на небе происходит тысяча всплесков, то вероятность регистрации одного из них составляет примерно 1%. Иначе говоря, нам в среднем понадобится несколько месяцев, чтобы зафиксировать хотя бы одно событие, и тогда по нему мы уже сможем дать оценку темпа всплесков. Таким образом, если мы ведем систематические наблюдения, то даже по очень небольшому количеству зарегистрированных событий нам удастся верно оценить их темп, если только мы не столкнулись с заметно нетипичными событиями. Уже в первой статье Дункан Лоример и его соавторы дали оценку, говорившую о том, что яркие быстрые радиовсплески происходят несколько сотен раз в день. В последующие годы были обнаружены более слабые события, и они, разумеется, происходят в более высоком темпе — несколько тысяч раз в день. Это то число, которое надо объяснять теоретикам.

Кроме того, уже в первой работе появилась качественно верная оценка расстояния до источника. Вот на чем она была основана. Мы привыкли говорить, что скорость электромагнитных волн равна примерно 300 000 км/с. Но это в вакууме. А вот если волна распространяется в среде, то скорости будут разными для волн разной длины (и, соответственно, разной частоты). Радиоволны от источника всплеска распространяются в плазме. Перенос

энергии (которую мы и регистрируем) связан с так называемой групповой скоростью волн. Эта скорость тем меньше, чем ниже частота радиоволны, поэтому сначала всплеск приходит к нам на более высокой частоте и чуть позже — на низкой. Величина задержки определяется количеством электронов в плазме на пути следования сигнала — именно с ними взаимодействует волна. Таким образом, задержка будет большой, если сигнал прошел через область плотной плазмы или если путь сигнала просто был большим. Задержка может набираться в межзвездной среде нашей Галактики, затем — в межгалактической среде, потом — в межзвездной среде галактики источника и, наконец, в непосредственной окрестности источника, если он погружен в плотную оболочку.

Уже у первого всплеска задержка была достаточно большой, чтобы сказать, что он находится за пределами Галактики<sup>102</sup>. Если мы предположим, что в основном задержка связана с влиянием межгалактической среды, то можно прикинуть расстояние. По порядку величины оно получилось равным 1 Гпк (что составляет более 3 млрд световых лет!). Данная оценка давала возможность оценить радиосветимость всплеска (если энергия излучается симметрично во все стороны): примерно  $10^{42}$  эрг/с. Учитывая миллисекундную длительность события, получаем, что полное энерговыделение в радиодиапазоне составляет около  $10^{40}$  эрг. Это само по себе очень много (Солнце столько излучает за месяц). Но также важно учесть, что крайне редко механизмы излучения позволяют поместить основное выделение энергии в радиодиапазон, т. е. полная (болометрическая) светимость источника должна быть гораздо выше! Значит, мы имеем дело с какими-то колоссальными вспышками, происходящими при этом достаточно часто. Если 1 Гпк — это типичное расстояние, то в галактике вроде нашей такие события должны происходить раз в несколько сотен лет (для сравнения: слияния нейтронных звезд друг с другом или с черными дырами происходят раз в несколько десятков тысяч лет).

Таким образом, уже в первых моделях надо было объяснять темп вспышек (как на небе, так и во вселенной), короткий масштаб времени и большую радиосветимость. Не так уж много моделей могло отвечать этим требованиям, к тому же довольно скоро они еще возросли. Во-первых,

в 2014 г. астрономы научились выявлять вспышки не только по архивным данным, но и «на лету». Это позволило сразу начать наблюдения в области локализации всплесков в других диапазонах спектра. Если бы радиовсплески были связаны со сверхновыми или гамма-всплесками, это сразу бы заметили. Во-вторых, в 2016 г. появилась статья, в которой был представлен первый случай регистрации повторяющихся всплесков от одного и того же источника. Иными словами, стало ясно, что механизм вспышки должен исключить катастрофические события, приводящие к полному разрушению источника. А таких моделей было предложено уже довольно много.

Сценарии, предлагавшиеся для описания быстрых радиовсплесков, можно разделить на две группы: нейтронные звезды и всякая экзотика. Стремление привлечь экзотику (космические струны, облака аксионов, белые дыры и т. п.) вполне понятно: теоретику всегда приятно, если его любимая модель вдруг начнет обсуждаться в контексте реальных данных (даже если сразу кажется, что вероятность того, что удастся все объяснить в рамках сколь-нибудь реалистичного сценария, довольно мала). Поэтому перейдем сразу к нейтронным звездам.

Во-первых, из-за того что это компактные массивные объекты, легко получить короткий масштаб времени. Нейтронные звезды могут вращаться с периодом около 1 мс. Время свободного падения вблизи поверхности такого объекта составляет доли миллисекунды. Кроме того, сигналы во внутренних частях магнитосфер нейтронных звезд, где сосредоточена основная доля магнитной энергии, распространяются за несколько миллисекунд (так называемая альвеновская скорость в плазме близка к скорости света). Иначе говоря, с короткими вспышками проблем не возникает.

Во-вторых, мы знаем, что нейтронные звезды связаны с разнообразными процессами выделения большого количества энергии: это и вспышки магнитаров, и слияния нейтронных звезд с другими компактными объектами, и рентгеновские барстеры. Плюс можно легко придумать еще множество сценариев взрывных процессов большой мощности, связанных с нейтронными звездами.

В-третьих, есть радиопульсары и так называемые вращающиеся радиотранзиенты (RRATs<sup>103</sup>) — источники коротких всплесков в радиодиапазоне, т. е. нейтронные звезды известны как источники довольно мощного импульсного радиоизлучения.

На основе простых формул мы можем составить общую схему модели быстрого радиовсплеска, порождаемого нейтронной звездой. Выше (приложение 5А) мы уже записывали соотношения для оценки энергии, запасенной в магнитосфере нейтронной звезды. Плотность энергии магнитного поля (т. е. энергия единичного объема) равна  $B^2 / (8\pi)$ . Магнитное поле простирается до радиуса светового цилиндра, т. е. до расстояния  $R_l = c / \omega = cP / 2\pi$ , где  $P$  — период вращения нейтронной звезды. Однако, поскольку магнитное поле быстро спадает с удалением от поверхности —  $B(r) \propto 1/r^3$ , — основная энергия находится вблизи компактного объекта. Значит, оценка полной энергии в невозмущенной магнитосфере  $E_{\text{mag}} = B_{\text{NS}}^2 R_{\text{NS}}^3 / 6$ , где  $B_{\text{NS}}$  — величина поля на поверхности. Если мы возьмем обычный пульсар типа Краба, то энергия составит всего лишь  $10^{42}$  эрг. Всю сразу ее трудно выделит, поэтому так быстрые радиовсплески излучать плохо. А вот если взять поле, как у магнитара, да еще перекрутить магнитосферу (это приведет к усилению электрических токов в ней), то хватит и небольшой доли запасенной энергии.

Теперь надо эту энергию быстро выделит. Для этого необходимо как-то «встряхнуть» магнитосферу. Было предложено много разных идей, в основном связанных с катастрофическими событиями. Можно просто устроить коллапс нейтронной звезды в черную дыру. Например, это происходит в модели так называемых *супрамассивных* нейтронных звезд. Такие объекты могут образоваться в результате коллапса ядра звезды или слияния нейтронных звезд. Их основное свойство — большая масса, превосходящая критическую, а от схлопывания удерживает чрезвычайно быстрое вращение. По мере замедления этот барьер перестает работать, так как с ростом периода вращения центральная плотность наконец-то дорастает до критической величины, и тогда образуется черная дыра. Или же можно превратить нейтронную звезду в кварковую.

Такой процесс тоже приведет к перестройке структуры объекта, а значит — к «встряхиванию» магнитосферы. Важно, что и коллапс, и формирование кваркового ядра (деконфайнмент) происходят быстро. Другой интересный способ — взорвать рядом с нейтронной звездой сверхновую. Ударная волна уж точно сильно «тряханет» магнитосферу, причем из-за высокой скорости сброшенного при взрыве вещества произойдет это быстро. Такое в принципе возможно в тесных двойных системах. В общем, потенциально существует много способов устроить всплеск\*.

Но есть и проблемы. Необходимо предложить механизм излучения, в котором радиовсплески будут очень мощными (на многие порядки мощнее всего, что наблюдалось от нейтронных звезд), нужно придумать, как при этом избежать яркой вспышки в других диапазонах, ну и надо оставить объект целым. Последнее сразу отбрасывает слияния нейтронных звезд и их коллапс в черную дыру. Также отпадает и превращение нейтронной звезды в кварковую, если мы хотим объяснить в рамках единой модели и обычные, и повторные источники (которых сейчас известно уже несколько штук).

Что же остается? Выживают два основных класса моделей: пульсарные и магнитарные. В первом случае излучается энергия вращения нейтронной звезды. Известно, что пульсар в Крабовидной туманности иногда испускает так называемые гигантские импульсы. Это очень короткие радиовсплески очень высокой интенсивности. Сами по себе они не могут объяснить быстрые радиовсплески — светимости не хватит. Но можно проделать такую экстраполяцию: если предположить, что энергия гигантских импульсов тем больше, чем больше полные потери энергии вращения пульсаром, можно добраться до необходимых величин при условии, что мы имеем дело с очень быстро вращающейся звездой.

Выше мы показали, что темп потери вращательной энергии пропорционален квадрату магнитного поля пульсара и четвертой степени частоты

\* Здесь важно, что потенциально все идеи могут работать, но, видимо, не для конкретного класса быстрых радиовсплесков. Многие модели неприменимы для этих событий просто потому, что предсказывают слишком низкий темп. Так что можно надеяться, что в будущем нас еще ждут открытия радиотранзиентов, которые объясняются тем или иным из предложенных сценариев.

его вращения. Период вращения пульсара в Крабе — 33 мс. Предельный период — порядка 1 мс. Значит, нетрудно представить себе пульсар с потерями энергии вращения в миллион раз больше. Если такие объекты давали бы гигантские импульсы в миллион раз мощнее, то это сразу объясняло бы быстрые радиовсплески.

В магнитарных моделях источником энергии является магнитное поле. В нашей Галактике наблюдалось несколько мощных вспышек магнитаров: в 1979, 1998 и 2004 гг. Последнее событие — часто его выделяют и называют гипervспышкой — имело пиковую светимость в рентгеновском и гамма-диапазоне под  $10^{47}$  эрг/с. Однако важно, что с расстояний в сотни миллионов световых лет такое современными приборами не увидеть. А вот если всего лишь одну миллионную от этой энергии излучить в радиодиапазоне, то опять-таки удастся объяснить быстрые радиовсплески.

Можно объединить эти две модели и говорить о молодых магнитарах, у которых одновременно и период вращения маленький, и магнитное поле очень сильное. Это позволяет не только получить значительное выделение энергии в очень коротком импульсе, но и обеспечить их многократность, что важно для объяснения источников повторяющихся всплесков. К тому же молодая нейтронная звезда в норме окружена плотной оболочкой, сформировавшейся после вспышки сверхновой из сброшенного вещества звезды (а также того, что оболочка успела нагрести во внешней среде), а это помогает объяснить значительное распывание радиосигнала (те самые задержки всплеска на низких частотах).

Конечно, последнее слово остается за наблюдателями. Загадка космических гамма-всплесков мучила астрофизиков почти 30 лет. Также высказывалось множество разнообразных идей, строились модели... И это продолжалось до тех пор, пока не удалось одновременно зарегистрировать события в гамма-диапазоне (где было невозможно определить координаты вспышки с высокой точностью) и в рентгеновском диапазоне. В результате было не только доказано, что гамма-всплески происходят в далеких-далеких галактиках, но и появилась окончательная

ясность в интерпретации: короткие гамма-всплески связаны со слияниями нейтронных звезд, а длинные — с особым типом сверхновых. Наверное, что-то подобное должно произойти и с очередной загадкой. Так что мы продолжаем ждать или регистрации источников быстрых радиовсплесков в других диапазонах, или настолько детальных и точных радиоданных, что полная идентификация станет возможной уже благодаря им.



# Популяционный синтез экзопланет

Говоря о непостижимой эффективности математики, мы неоднократно упоминали о поразительной способности математических методов описывать реальный мир. Численное моделирование позволяет не просто воспроизводить в компьютере отдельные экземпляры или ситуации, но и создавать искусственные галактики и вселенные, конечно во многом упрощенные и идеализированные. Однако даже такое моделирование позволяет эффективно использовать математические методы для детального сопоставления предсказаний и данных наблюдений. В астрофизике одним из успешных и общеизвестных методов подобных исследований является популяционный синтез<sup>104</sup>.

Суть метода состоит в воспроизведении свойств одной или нескольких популяций астрономических объектов. Для этого задаются начальные условия (например, параметры объектов при рождении или параметры среды, в которой что-то будет происходить) и законы эволюции. Естественно, и начальные распределения, и законы эволюции обычно задаются в виде аналитических математических выражений (иногда

используются и таблицы, но это просто значит, что в конечном счете они были рассчитаны на основе каких-то аналитических соотношений). Вид этих формул и значения коэффициентов, входящих в них, могут быть как обусловлены чисто теоретическими соображениями, так и следовать из данных наблюдений.

Когда все уравнения заданы, можно начинать моделировать. Как правило, моделируется именно эволюция с каким-то шагом по времени, который может меняться, быть разным для разных объектов и т. д. Как бы то ни было, искусственная популяция начинает жить своей идеальной жизнью. На каждом шаге параметры с предыдущего шага пересчитываются, согласно заданным законам, их изменения со временем, если надо, учитывается, как объекты взаимодействуют друг с другом, и... делается новый шаг.

Величина шага определяется скоростью изменения объектов. Чаще всего она достаточно велика, и, чтобы проследить эволюцию на протяжении астрономически интересного времени, требуются миллионы шагов. Если мы моделируем популяцию хотя бы из тысячи объектов (а это обычно мало, чаще бывают миллионы), то получается, что нам нужны уже миллиарды этапов. На каждом из них нужно проделать довольно много вычислений, поэтому нередко для этого используют если не суперкомпьютеры, то хотя бы кластеры. Но кое-что можно посчитать и на ноутбуке.

Представим, что расчеты завершены. У вас в компьютере есть эволюция каких-то объектов. Пусть для начала это будут радиопульсары в нашей Галактике. Идеальные радиопульсары в идеальной Галактике. Теперь мы можем попробовать сравнить их свойства с реальными, наблюдаемыми. Что это нам даст? Мы сможем проверить свои предположения: начальные распределения и законы эволюции. Если «компьютерные» пульсары в целом (как популяция) похожи на своих реальных собратьев, значит, в реальном мире работают те же законы, что были сформулированы для идеального. Таким образом, одной из задач популяционного синтеза является проверка нашего знания о начальных условиях и законах эволюции путем сравнения синтезированных популяций с реальными.

Отметим, что крайне важно сравнивать именно популяции. В астрономии нередко бывает так, что среди источников какого-то типа есть один-два хорошо изученных объекта. Именно под них создаются модели строения и эволюции, а потом оказывается, что эти объекты не слишком типичны для своего класса, и все разваливается, так как не были учтены популяционные аспекты. При работе с большими группами источников мы зачастую не можем перейти на высокий уровень детализации в описании некоторых процессов, зато ухватываем целостную картину. Я бы сказал, что работа с отдельными объектами напоминает психологию, а с популяциями — социологию. И то и другое важно, и то и другое позволяет нам больше узнать о человеке. Так же и с астрономическими источниками: надо использовать и индивидуальный подход, и анализ общих характеристик.

На каждом шаге популяционного синтеза запоминаются не только внутренние параметры объектов. Важно рассчитывать и наблюдаемые величины, например спектральные характеристики, поток излучения от источников и т. д. Именно это и позволяет сопоставлять параметры модели с реальными данными. Однако это нельзя делать напрямую. Причина проста: за редчайшими исключениями не все существующие источники какого-либо типа мы можем наблюдать. Иначе говоря, необходимо также промоделировать наблюдения: сравнивать искусственно созданные и искусственно пронаблюдавшиеся источники с реально возникшими и реально зарегистрированными.

Нужно провести расчеты, позволяющие количественно отразить, как синтетические источники будут наблюдаться конкретными астрономическими инструментами, получившими данные об известных объектах, с которыми мы хотим провести сравнение. Зачастую это очень непростая задача, особенно если наблюдения были довольно разрозненными и проводились на сильно отличающихся друг от друга телескопах.

Еще до начала воспроизведения в расчетах того, как реальные инструменты наблюдали бы источники, нужно рассчитать, как сигнал мог измениться при распространении. Самое очевидное — это уменьшение принимаемого потока излучения с расстоянием. Но могут быть и другие

эффекты: поглощение излучения средой, рассеяние сигнала, подмешивание в него сигналов других источников. Наконец, космологическое красное смещение. В конечном счете все это можно с некоторой степенью точности учесть, и тогда мы получаем «искусственную искусственно наблюдаемую вселенную». Теперь мы действительно имеем право сравнить синтезированные наблюдения с реальными и сделать выводы, что и является сутью первой задачи популяционного синтеза.

Вторая его важнейшая задача — предсказания свойств еще не открытых объектов. В первую очередь это важно при планировании новых крупных наблюдательных проектов: важно заранее знать хотя бы примерно, что они смогут увидеть. Это требуется и для оптимизации самих проектируемых инструментов, и для продвижения проекта (ведь чаще всего авторы должны доказывать его целесообразность в конкурентной борьбе с другими претендентами), и для планирования наблюдений (например, совместно с другими установками).

Популяционное моделирование помогает на основе известных свойств объектов предсказать параметры более слабых (т. е. пока не наблюдаемых) объектов\*. При этом, разумеется, мы уже не проверяем начальные распределения и эволюционные законы, а доверяем им и используем их для получения нового знания. Конечно, доверяя, мы понимаем, что какие-то неточности и неопределенности там все равно остаются, поэтому результаты популяционных расчетов будут отличаться от реальных данных, которые в будущем получит новый инструмент. И тогда мы вернемся к задаче номер один — уточнению распределений и уравнений эволюции.

Например, параметры установок LIGO и VIRGO рассчитывались исходя из данных по известным системам: нейтронная звезда плюс нейтронная звезда. А долгоживущие системы из нейтронной звезды и черной дыры или двух черных дыр неизвестны до сих пор. Тем не менее удалось достаточно точно предсказать ожидаемый темп слияний этих

\* Разумеется, бывает и так, что популяционный синтез используется для оценки свойств не просто более слабой, а вообще принципиально не наблюдавшейся популяции. Так, например, было при расчетах темпа слияний двойных черных дыр.

объектов во вселенной, что позволило зарегистрировать сигнал практически сразу же после выхода установок на плановую чувствительность.

А теперь дальнейшие наблюдения гравитационно-волновых всплесков позволяют набрать статистику по таким системам и существенно уточнить модели эволюции тесных двойных систем, используя совершенно новый канал информации. Соответственно, для популяционных расчетов, которые будут проводиться с целью предсказать темп событий на гравитационно-волновых антеннах нового поколения, мы сможем использовать более точные входные данные, а значит, получим и более точные результаты.

В качестве примера рассмотрим более подробно популяционный синтез других объектов — экзопланет. На сегодняшний день самые известные работы в области популяционного синтеза экзопланет относятся к процессу их формирования и ранней эволюции в протопланетном диске<sup>105</sup>. Здесь целью является предсказание свойств сформировавшихся планет, переживших бурный этап роста и миграции в газопылевом диске материнской звезды. Начальными условиями служат параметры звезд и протопланетных дисков. Эволюционные законы связаны с поведением диска, процессами формирования и роста планет и их взаимодействием друг с другом и диском.

Масса звезды определяет гравитационный потенциал на заданном расстоянии от нее (вдобавок масса диска коррелирует с массой звезды). Кроме того, звезда является источником излучения, которое и нагревает диск, и испаряет его, а светимость в первую очередь зависит от массы. Наконец, химический состав звезды задает состав диска, что крайне важно для формирования планет\*.

Химический состав диска говорит нам, сколько там газа, пыли и льда (это три основные составляющие планет). От него же зависит поглощение излучения в диске, что будет определять распределение температуры

\* Конечно, можно говорить, что химический состав звезды и диска изначально задается составом протозвездного облака. Это верно. Но в наблюдениях экзопланет мы можем измерить только состав звезды по ее спектру, поэтому удобно говорить, что состав звезды задает состав протопланетного диска.

в нем. От массы диска зависит, сколько вещества доступно для формирования планет и как они будут перемещаться по диску.

Законы эволюции в случае формирования и ранней истории планетных систем известны плохо. Отчасти этим данная область исследований и интересна — тут много загадок! В деталях пока неясно, как зародыши планет достигают размеров в сотни метров. Плохо понятно, как формирующиеся планеты перемещаются по газопылевому диску за счет гравитационного взаимодействия с ним. Список можно продолжать и продолжать.

Сложность процессов открывает возможность для постепенного совершенствования моделей. Проследив короткую историю популяционных расчетов образования планет, можно увидеть процесс последовательного приближения к все более и более адекватным сценариям. Вначале применяются модели, неизбежно вызывающие воспоминание о «сферическом коне в вакууме», но довольно быстро они начинают усложняться, и «искусственный мир молодых экзопланет» становится все более похожим на мир реальный.

Современные расчеты неплохо воспроизводят многие особенности распределения планет по массам и расстояниям от своих звезд. Однако, с одной стороны, остаются проблемы в согласовании теоретических построений с наблюдениями, а с другой — пока не хватает данных с телескопов для достаточно полной картины. В ближайшие годы продолжающиеся наземные наблюдения изменения лучевых скоростей звезд позволят обнаруживать планеты на довольно больших расстояниях от звезд. Находящийся на орбите спутник TESS откроет тысячи новых экзопланет, в первую очередь с орбитальными периодами меньше нескольких месяцев. Спутник Gaia должен представить свои данные по экзопланетам на основе астрометрических методов. Темп открытий в этой области велик и постоянно растет, поэтому нужны и новые модели популяционного синтеза.

Уже сейчас они учитывают многие детали изменения параметров диска, постепенного роста планет и планетезималей<sup>106</sup>, взаимодействий между ними, миграции планет и т. д. Постепенно становится понятным, в каких частях диска начинают образовываться планеты разных типов.

Условия в разных частях диска отличаются друг от друга. Меняются температура и плотность, меняется состав. Все вместе это приводит и к изменению состояния вещества, от чего зависит процесс роста планет. Важным понятием является так называемая *снеговая линия*. Обсудим ее подробнее.

Мы уже указали, что три важнейшие составляющие протопланетного диска — газ, пыль и лед. В газовой составляющей доминируют водород и гелий. Это два самых обильных элемента во вселенной в целом, в Галактике, в межзвездной среде, в звездах... В типичном протопланетном диске в начале его эволюции водород и гелий могут составлять до 98–99% массы. Неудивительно, что самые крупные планеты (как Юпитер в Солнечной системе) состоят в основном из них.

Пыль бывает очень разная, в том числе ледяная, но о ней позже. Начнем с более привычной. В ней могут доминировать углерод, кремний, железо (также будет наличествовать кислород, поскольку в состав пыли могут входить оксиды). Это тугоплавкие частицы, поэтому они выживают даже вблизи звезды (на расстояниях более нескольких звездных радиусов). Элементы, начиная с углерода и дальше, а особенно кремний и железо, составляют незначительную часть массы диска. Но поскольку они способны образовывать пылинки, а те в свою очередь могут слипаться друг с другом и таким образом наращивать массу, то именно они играют ключевую роль в начале процесса формирования планет во внутренних частях диска. Даже Юпитер начинался когда-то с пыли.

Правда, вероятнее всего, с другой пыли. С ледяной. Вдали от звезды такие вещества, как вода, метан, аммиак, могут существовать не в виде газа, а в виде льда. Это крайне важно, потому что их составляющие (водород, углерод, азот) более обильны, чем кремний и железо. Иначе говоря, ледяной пыли больше, чем кремниевой и железной, причем в несколько раз. А именно от пыли зависят первые фазы роста планеты. Поэтому там, где есть ледяная пыль, планеты растут быстрее и вырастают сильнее. Там — это за снеговой линией.

Снеговая линия разделяет области, где данное вещество (вода, метан и т. д.) может или не может формировать пылинки. Граница будет разной

для разных веществ, но они довольно близки друг к другу. Кроме того, среди льдов чаще всего доминирует вода (молекула воды — одна из самых распространенных), поэтому для примера можно обсудить только водяной лед.

А теперь дадим совсем несложную оценку (аналогичным способом можно оценить в простейшем случае положение внешней границы зоны обитаемости; для точного расчета границ зоны обитаемости надо учитывать влияние атмосферы планеты и некоторые другие эффекты). Посчитаем, на каком расстоянии от звезды температура освещаемого ею объекта будет равняться нулю по шкале Цельсия\*.

Предположим, наш объект поглощает все падающее на него излучение (что не совсем точно). Представьте себе концентрические сферы распространения излучения вокруг звезды, начиная с ее радиуса. Разумеется, через каждую сферу проходит одинаковая энергия, т. е. мы можем себе представить, что поверхность звезды испустила какую-то энергию. Затем всю ее поглотила следующая сфера, после чего переизлучила ту же самую энергию дальше. При этом каждая сфера, начиная с поверхности, испускает тепловое излучение. Тогда для их светимости есть простая формула, которую мы уже использовали выше в других приложениях:

$$L = 4\pi R^2 \sigma_{SB} T^4.$$

Напомним, что здесь  $L$  — светимость,  $T$  — температура,  $R$  — радиус сферы.

Чем дальше мы отдаемся от звезды, тем ниже температура сферы, а значит, и каждого ее элемента. Следовательно, меньше будет и температура маленького поглощающего излучение объекта. Нам надо найти расстояние, на котором температура упадет до величины, соответствующей замерзанию воды\*\*.

\* На самом деле снеговая линия для водяного льда соответствует немного более низкой температуре, но мы здесь не будем обсуждать эти детали.

\*\* На всякий случай напомним, что в протопланетном диске не может быть жидкости, так как давление мало. Поэтому из твердого состояния совершается переход сразу в газ, и наоборот.



Обозначив температуру поверхности звезды  $T_*$ , а ее радиус —  $R_*$ , получим:

$$T = T_* \sqrt{\frac{R_*}{R}}.$$

Можем выполнить упражнение: подставим в формулу температуру и радиус Солнца (5800К и 696 000 км) и получим, что 273К (около нуля по Цельсию) достигается примерно на расстоянии 2 а.е. Параметры молодого Солнца отличались от теперешних, но качественная оценка остается верной: для звезд, похожих на молодое Солнце, снеговые линии находятся (для разных веществ) на расстоянии от 2 до 4 а.е. Соответственно, сразу за снеговой линией должно идти активное формирование планет, потому что там и ледяная пыль уже есть, и плотность вещества еще высока (она уменьшается с удалением от звезды).

Именно за снеговой линией формируются планеты-гиганты. Их ядра успевают быстро набрать массу около 10 земных, и тогда начинается быстрый процесс захвата газа из диска (надо торопиться, звезда своим ультрафиолетовым излучением испаряет диск). А внутри снеговой линии рост планетезималей идет медленнее, да и доступного вещества меньше, поэтому достичь критической массы для начала превращения в газовый гигант не удастся. В итоге в Солнечной системе внутри снеговой линии мы видим Меркурий, Венеру, Землю и Марс, а за ней — массивные планеты-гиганты. Приятно, что планеты земного типа образуются как раз в зоне обитаемости! Таким образом, в Солнечной системе мы не видим противоречий с описанным выше сценарием.

Но одно дело — объяснять формирование единственной системы (пусть и очень хорошо изученной), и совсем другое — увязать в целостную картину не только весь комплекс данных по экзопланетам, протопланетным дискам и их звездам, но и наше теоретическое понимание процессов, ответственных за формирование и раннюю эволюцию планетных систем. Сделать это можно только с помощью популяционного синтеза, позволяющего сравнивать созданный нами в компьютере искусственный идеальный мир с миром реальным со всеми его «шероховатостями».

# Падение тела

Задача о падении тела позволяет на достаточно простом примере продемонстрировать, как мы можем улучшать результаты с помощью расчетов на основе все более точных моделей. Мы последовательно рассмотрим три задачи: падение вблизи поверхности Земли в пренебрежении сопротивлением воздуха, падение с очень большой высоты, падение с учетом сопротивления среды.

Первый вариант задачи совсем школьный — движение с постоянным ускорением. Ускорение создается силой земного притяжения и равно:

$$g = \frac{GM}{R^2},$$

где  $G$  — гравитационная постоянная, а  $M$  и  $R$  — масса и радиус Земли. Тело падает с небольшой высоты  $h$ , которая намного меньше  $R$ , а потому изменением ускорения можно пренебречь.

Все необходимые формулы приведены в учебнике физики за 9-й класс. За время  $t$  скорость будет возрастать на величину  $gt$ . При нулевой начальной скорости за время  $t$  тело проходит расстояние, равное  $gt^2 / 2$ . Откуда берется такая формула, легко представить графически.

Нарисуем график зависимости скорости от времени для равноускоренного движения. Это будет прямая линия. Путь, пройденный за небольшой промежуток времени  $dt$ , равен произведению текущей скорости (за маленький интервал времени она не успевает существенно измениться) на  $dt$ . Эта величина равна площади вытянутого в вертикальном направлении прямоугольника на графике. Соответственно, весь пройденный путь складывается из суммы таких прямоугольников и, таким образом, равен площади фигуры под линией изменения скорости, представляющей собой треугольник. Его площадь можно вычислить: умножим половину длины стороны на высоту треугольника, опущенную к этой стороне. Сторона равна  $t$ , а высота — это конечная скорость, равная  $gt$ . Соответственно, время падения с высоты  $h$  равно квадратному корню из удвоенной высоты, разделенной на ускорение свободного падения:  $t = (2h/g)^{1/2}$ .

Теперь рассмотрим более сложный случай — падение с большой высоты, сравнимой с радиусом Земли. В такой постановке ускорение будет меняться, т. е. скорость будет расти все быстрее. Подобный эксперимент можно было бы поставить на Луне, где не мешает атмосфера.

Мы не будем решать задачу до конца путем интегрирования (хотя интеграл там табличный), но зато получим качественную зависимость времени падения от начального радиуса для случая, когда он намного больше радиуса планеты  $R$ . Очевидно, что чем дальше мы отходим от поверхности, тем меньше ускорение:  $a(r) = GM/r^2$ , где  $r = R + h$ .

Значит, если мы рассмотрим небольшой интервал времени  $dt$ , в течение которого смещение невелико и ускорение меняется слабо, то  $dr = v(r) dt + a(r) (dt)^2/2$ . Полное время падения с расстояния  $r$  будет в основном определяться медленным движением вдали от планеты: там и скорость еще мала, и ускорение невелико. Значит, верхним пределом на время падения будет величина, которую можно получить из уже записанной формулы  $t = (2h/g)^{1/2}$ . Заменим здесь высоту  $h$  на  $r$ , а ускорение  $g$  — на соответствующую величину  $a(r) = GM/r^2$ . В итоге мы получим, что при больших расстояниях от поверхности время падения растет как  $r^{3/2}$ .

Неплохой оценкой времени падения является отношение начального расстояния  $r$  к скорости свободного падения на этом расстоянии:  $v = (2GM/r)^{1/2}$ . Иными словами,  $t \propto r^{3/2} / (2GM)^{1/2}$ . Такую оценку часто применяют, например, для определения времени падения захваченного из межзвездной среды вещества на нейтронную звезду. Разумеется, точная величина будет несколько меньше, но по порядку величины это очень хорошая простая оценка.

Для случая, когда расстояние, с которого начинается падение, намного больше размера центрального тела, можно получить более точную оценку, воспользовавшись третьим законом Кеплера. Представьте себе две орбиты, касающиеся в одной точке. Одна — круговая с радиусом  $r$ . Вторая — крайне эксцентричная, практически «иголочка». В первом случае большая полуось равна  $r$ , а во втором —  $r/2$ . Падение соответствует половине орбитального периода второй орбиты. Для первой легко посчитать орбитальный период:

$$T_1 = \frac{2\pi r}{(GM/r)^{1/2}} = 2\pi r^{3/2} / (GM)^{1/2}.$$

Период второй орбиты, в соответствии с третьим законом Кеплера, будет меньше в  $2^{3/2}$  раза. Таким образом, время падения составит:

$$\left(\frac{1}{2}\right)T_2 = \frac{\pi r^{3/2}}{(8GM)^{1/2}}.$$

Теперь рассмотрим роль сопротивления воздуха. Все знают, что при падении с большой высоты (скажем, если кто-то выпал из самолета) скорость возрастает лишь до некоторого предела. Поэтому, кстати, все равно, с какой высоты падать — один или десять километров, все равно в момент удара скорость будет та же самая. Очевидно также, что объект большой площади наберет меньшую скорость, поэтому прыгать лучше с парашютом. Получим простую количественную оценку\*.

\* Здесь мы существенно идеализируем ситуацию. Тем не менее итоговый ответ дает верную оценку по порядку величины.

Итак, с какого-то момента тело перестанет увеличивать скорость, т. е. его ускорение будет равно нулю. Значит, сила тяжести уравновешена силой сопротивления среды. Напомним, что сила — это изменение импульса за данное время. Сила сопротивления складывается из ударов множества молекул. Значит, нам надо посчитать, какой импульс передадут молекулы за время  $t$  телу с площадью  $S$ .

Наше тело движется со скоростью  $v$  в среде с плотностью частиц  $n$  (эта величина показывает, сколько частиц содержится в единице объема, ее можно рассчитать. Разделим плотность среды на массу одной частицы, т. е. в нашем случае это примерно плотность воздуха  $\rho$ , деленная на массу молекулы азота  $N_2$ ). Каждая молекула передает импульс, равный удвоенному произведению скорости тела на массу молекулы. Стало быть, нам надо узнать, сколько молекул сталкивается с телом за время  $t$ .

Сделать это легко. Надо лишь подсчитать объем, «заметаемый» телом при движении. Он равен произведению площади  $S$  на скорость и на время. Теперь этот объем умножаем на концентрацию молекул  $n$ . В итоге сила сопротивления равна:

$$F = \frac{2Nm_0v}{t} = \frac{2Svtnm_0v}{t} = 2Sv^2\rho,$$

где  $m_0$  — масса молекулы.

Эта сила уравновешена силой тяжести, равной  $mg$ , где  $m$  — масса падающего тела, а  $g$  — ускорение свободного падения. Равенство двух сил позволяет вывести простую формулу для соответствующей скорости:

$$v = \left( \frac{mg}{2S\rho} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Зависимости прозрачны. Чем массивнее тело, тем быстрее оно будет падать. Чем больше плотность среды, тем меньше скорость. Большая площадь также позволяет уменьшить скорость падения (забыли парашют — распахните пальто).

Можно подставить какие-нибудь характерные значения и дать оценку скорости. Округляя, мы получим, что тело массой около 100 кг и площадью 1 кв. м может набрать скорость порядка 100 км/ч. Такая скорость набирается при падении с высоты метров 40. У человека площадь меньше, поэтому, с одной стороны, можно разогнаться до пары сотен км/ч<sup>107</sup>, а с другой — получить оценку, что парашют с площадью порядка 100 кв. м должен замедлять спуск до безопасных скоростей.

# Высота гор и форма астероидов

Уже более 300 лет назад астрономы могли убедиться, что наблюдаемые небесные тела (планеты и их спутники) имеют округлую форму. Однако очевидно, что камень (в том числе и летающий в космосе) может иметь довольно причудливую форму. Легко сообразить, в чем дело: гравитация придает крупным телам сферическую форму, «сглаживая» неровности, как мы, создавая давление руками, лепим круглые снежки.

Можно ли примерно оценить размер тела, при котором оно уже не сможет поддерживать заметно несферическую форму? Оказывается, сделать это легко. Надо всего лишь знать закон всемирного тяготения.

Догадаться о структуре закона, определяющего гравитацию, тоже можно. Во-первых, сообразить, что чем массивнее тела, тем больше гравитационное взаимодействие между ними. Во-вторых, из-за трехмерности однородного и изотропного пространства сила будет спадать как квадрат расстояния. Получаем известный из школьной физики закон:

$$F = G \frac{M_1 M_2}{R^2}.$$

Здесь в числителе стоят массы притягивающихся тел. Нас будет интересовать ситуация, когда  $M_1$  — масса планеты,  $M_2$  — масса заметной неоднородности на ней (по сути, речь идет о горе на поверхности). А стоящая в знаменателе величина  $R$  — радиус планеты.

Теперь нам надо правильно сформулировать задачу на качественном уровне. Мы знаем, что самые высокие горы на Земле имеют высоту несколько километров. Давайте положим предельную высоту равной 10 км. Если гора будет более высокой, то породы в ее основании не выдержат давления, и гора осядет. Давление (обозначим его  $P$ ) равняется частному от деления силы на площадь (обозначим ее  $S$ ):  $P = F/S$ . Сделаем разумное предположение, что критическое давление будет одним и тем же для всех космических тел, интересующих нас. Запишем равенство критического давления в двух ситуациях:

$$\frac{GM_1M_2}{(S_1R_1^2)} = \frac{GM_3M_4}{(S_2R_2^2)}.$$

Слева — давление в основании горы массой  $M_2$  на первой планете с массой  $M_1$  и размером  $R_1$ , а справа — давление в основании горы массой  $M_4$  на второй планете с массой  $M_3$  и радиусом  $R_2$ .

Теперь, чтобы рассчитать силу, нам надо знать массу горы. Представим себе гору как конус. Его масса пропорциональна объему. Математика дает нам возможность рассчитать объем конуса. Он пропорционален произведению высоты ( $h$ ) на площадь основания:  $M \propto V \propto hS$ . Нам нужно получить давление, таким образом, площадь основания не войдет в ответ.

Масса планеты пропорциональна ее объему. Объем шара пропорционален кубу радиуса:  $M \propto R^3$ . Подставив это в формулу и сократив все, что можно сократить, мы получим простое соотношение:

$$R_1h_1 = R_2h_2.$$

Нас интересует случай, когда второе тело имеет заметно несферическую форму, т. е. высота горы на второй планете сопоставима с радиусом,



т. е.  $R_2 = h_2$ . Соответственно, для оценки критического радиуса тела, которое может начинать заметно отклоняться от сферической формы, получаем:

$$R_2 = \sqrt{R_1 h_1} .$$

Подставим в качестве  $R_1$  радиус Земли, в качестве  $h_1$  — предельную высоту гор на Земле и получим:  $R_2 \approx 250$  км.

Эта простая оценка прекрасно соответствует действительности: спутники и астероиды с диаметром менее нескольких сотен километров уже могут иметь заметно несферическую форму (примером может служить спутник Сатурна Прометей), а более крупные (как, например, Церера) — округлую. Разумеется, чем меньше размер, тем заметнее может быть отклонение от правильной формы. 500-километровые Веста и Паллада лишь слегка несферичны, а 100-километровая Лютеция уже сильно отклоняется от шарообразной формы.

Таким образом, воспользовавшись простыми геометрическими формулами (объем конуса, объем шара) и записав наши предположения о физике тела в математической форме, мы сумели в рамках простой модели рассчитать предельный размер тела, которое своей гравитацией может заметно сглаживать рельеф на своей поверхности. Конечно, можно проводить более детальные и точные расчеты, учитывая в первую очередь разницу во внутреннем строении различных тел (спутники и астероиды могут состоять из менее плотных пород, чем земная кора). Но прелесть именно в том, что уже без этих деталей можно получить вполне разумный результат.

# Гипотезы в астрофизике

Ньютону принадлежит известная фраза: «Гипотез не измышляю». Что здесь имеется в виду? Ведь ученые постоянно работают с гипотезами. На мой взгляд, речь идет о том, что не надо придумывать «чайник Рассела»<sup>108</sup>, но не более того. Не имея никаких дополнительных данных, Ньютон считал преждевременным рассуждать о природе гравитации. Слишком мало информации было в то время (равно как век и даже два века спустя), чтобы высказывать разумные гипотезы, которые можно было бы проверить или хотя бы развивать таким образом, чтобы это выходило за рамки общефилософских рассуждений. Такой подход, однако, не мешал сэру Исааку развивать и защищать корпускулярную природу света — об этом явлении в его время знали гораздо больше, и в данной области гипотезы были вполне уместны.

Таким образом, важно, насколько гипотеза обоснована и что из нее можно извлечь. Возьмем в качестве примера вопрос о форме Земли. С одной стороны, совсем банально-бытовой опыт говорит, что Земля плоская (ну, может, слегка выпуклая, как плоско-выпуклая линза). С другой — философской — точки зрения греки могли бы начать обсуждать платоновы тела (куб, икосаэдр, октаэдр, тетраэдр, додекаэдр). Однако

существовал целый комплекс (sic!) данных, говорящих о том, что Земля имеет шарообразную форму.

Кроме всяких косвенных и частичных данных, а также аналогий, имелся ключевой факт (к понятию косвенных данных и ключевых фактов мы еще вернемся в конце главы), связанный с лунными затмениями. Конфигурация тел при этом событии всем известна: Земля располагается точно между Луной и Солнцем. Таким образом, наблюдая край земной тени, мы можем определить ее форму. Разумеется, чтобы быть уверенным, что мы не имеем дело лишь с одной проекцией Земли, нам надо пронаблюдать несколько затмений, когда Луна находится в разных участках неба. А лучше провести еще наблюдения из разных точек земной поверхности, в том числе и одновременно. К счастью, лунные затмения происходят не так уж редко и видны сразу на большой территории, поэтому задача вполне выполнима. Мы можем убедиться в том, что край земной тени всегда представляет собой дугу окружности. Значит, Земля — шар.

Теперь, воспользовавшись этой гипотезой, можно ни больше ни меньше как измерить размер Земли! Это сделал Эратосфен в III веке до н. э. Если у нас есть шар и мы можем достаточно точно измерить отрезок дуги большого круга<sup>109</sup>, зная, какому углу она соответствует, то немедленно получим радиус. Углы измерялись по высоте Солнца в полдень, а длина — по пройденному пути в направлении север-юг. В результате была получена величина, достаточно близкая к верной. Иначе говоря, гипотеза была не чисто умозрительной и привела к важному результату (с потенциальными возможностями практического применения; например, можно было рассчитать примерную длину пути при кругосветном путешествии).

Перенесемся в наше время. Как сейчас наука работает с гипотезами? Вначале нам необходимо разделить их хотя бы на два класса. В первый попадут гипотезы «для внутреннего использования» (назовем их *рабочими*), а во второй — для широкого обсуждения (их обозначим как *публичные*). Рабочие гипотезы — это внутренняя кухня. Они пока недостаточно обоснованы, чтобы с ними выходить на публику, даже узкопрофессиональную. С такими гипотезами идет работа, их обсуждают

с соавторами, ну или в «курилке» (хотя курящих ученых даже среди теоретиков почти не осталось, так что, скорее, «у кофейного аппарата»).

Рабочие гипотезы, как правило, со стороны не видны, что иногда приводит к ряду недоразумений. Некоторые активные неравнодушные граждане полагают, что раз какая-то идея не обсуждается на публике вообще и в печати в частности, то «ученые об этом не подумали». Маловероятно, поскольку экспертов много. Почти наверняка кто-то подумал и попробовал с этой гипотезой что-то сделать, но вот разработать нечто осмысленное на основе такого подхода не получилось (или же просто было показано, что он не работает). Голые идеи и отрицательные результаты (в духе «пришла в голову мысль — оказалось, ерунда») публикуют исключительно редко, да и то в виде коротких ремарок в конце статьи, в разделе «Обсуждение».

В самом деле, было бы странно представлять в виде самостоятельной публикации краткое изложение гипотезы, которую не получается развить, проверить и т. д. Чтобы новое научное предположение заслужило честь быть представленным публике, надо выполнить четыре условия. Во-первых, необходимо оформить идею в виде уравнений, во-вторых, продемонстрировать, что с ее помощью можно описать какие-то известные явления, в-третьих, обсудить (на количественном уровне) отсутствие противоречий с имеющимися данными и, наконец, в-четвертых, показать, как гипотеза может быть проверена. Вот это — повод для публикации. Здесь из рабочего статуса гипотеза переходит в разряд публичных.

Для публичных гипотез у нас будет целых четыре категории. Две центральные соответствуют тому, что в данное время обсуждаемая гипотеза является *фактом науки*. Я бы отнес к таким результаты и гипотезы, в достаточной степени воспринятые мировым научным сообществом. Выражается это в публикациях в сильных научных изданиях и не эпизодических дискуссиях как в тех же журналах, так и на профессиональных конференциях и семинарах. Не буду вдаваться в формализацию того, что считается сильным. В любой области есть набор журналов с высоким уровнем рецензирования и ответственными профессиональными редколлегиями. Каждый специалист знает такие издания в своей области.

Также каждый специалист представляет, чего стоит по гамбургскому счету его коллега, т. е. круг хороших профессионалов может быть очерчен. Не слишком четко, не однозначно, но тем не менее. И есть круг вопросов, идей, задач, которыми эти люди в данный момент занимаются. Если какая-то идея не попала в этот круг, то на данный момент она не является *фактом* большой науки. При этом автор идеи может считаться ученым (так, условно говоря, написано в трудовой книжке), гипотеза может быть опубликована в издании, формально относящемся к научным (а иногда даже вполне хорошему), и т. п. Но есть вполне отчетливое представление о месте этой гипотезы в современной науке: она за бортом.

Разница между двумя центральными категориями в том, что одна — это *мейнстрим*. Это означает, что гипотеза активно обсуждается сообществом и считается хотя бы потенциальным претендентом «на победу» в отсутствие безоговорочного лидера. Ко второй категории относятся аутсайдеры, эти идеи находятся (по крайней мере, в данный момент) на обочине. Назовем их *непопулярными альтернативами*. Примерами могут служить многие альтернативы черным дырам. Однако существенно, что даже такие *непопулярные* модели могут быть вполне обсуждаемыми. В отличие от еще одного вида гипотез, которые мы назовем *маргинальными*. Это идеи, которые подавляющее большинство серьезных ученых не считают достойными внимания, однако так или иначе они прорвались в научное пространство, будучи опубликованными в изданиях, которые причисляются к научным. Чаще всего — в одном из многочисленных очень слабых журналов, расплодившихся в последнее время.

Противоположностью *маргинальным* являются *стандартные* гипотезы. Это больше чем просто *факт науки*. Сюда попадают сценарии, которые пока не имеют окончательного подтверждения, но лишь немногие сомневаются в их правильности (по крайней мере, на уровне класса моделей). Яркие представители — темное вещество, космологическая инфляция, черные дыры. Мы не в курсе, какие частицы составляют темную материю, не знаем, какая конкретно из множества инфляционных моделей реализуется, нет ясности с деталями природы черных дыр. Однако статус

этих концепций таков, что они являются вполне общепринятыми, а по научно-популярным книгам даже может создаться впечатление, что это уже и не гипотезы, а установленная истина.

Гипотезы могут менять статус с течением времени. Так, например, лямбда-член (более известный сейчас как один из видов темной энергии) прошел путь от маргинального уровня до мейнстрима и вот-вот может стать стандартной гипотезой. Наоборот, разнообразные модели стационарной вселенной ушли в небытие (автору как-то посчастливилось увидеть на одной конференции «последних из могикан», отстаивавших идеи своей молодости). Интереснее, если статус менялся не монотонно. В некотором смысле таким примером может быть комплекс идей, связанных с внеземной жизнью.

С началом космической эры внезапно резко вырос интерес к поискам жизни вне Земли<sup>110</sup>. В начале 1960-х гг. многие ученые полагали, что вот-вот мы и на Марсе что-то найдем и сможем поймать сигналы от далеких «собратьев по разуму». Однако через 10–20 лет усердных поисков и бурных обсуждений, не давших никакого результата, энтузиазм начал исчезать. Уже к концу 1970-х стало ясно, что быстрого прогресса не будет. А может, и медленного тоже. И вся эта деятельность быстро стала маргинальной. Расцвела уфология. Ситуация начала меняться в конце 1990-х благодаря открытиям экзопланет. В настоящее время, с одной стороны, есть серьезные надежды получить данные об атмосферах потенциально обитаемых планет в конце 2020-х гг. С другой — растет активность поиска разумной жизни, в первую очередь благодаря инициативе Breakthrough. В связи с этим появляется больше публикаций, так или иначе связанных с вопросами жизни во вселенной. При этом отдельные публикации на темы SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence) появлялись и в «период упадка». Продолжались наблюдения в различных диапазонах спектра, призванные найти искомый сигнал, отправлялись послания с Земли. Не будет большим преувеличением сказать, что программа наблюдений на любом крупном радиотелескопе включала в себя эпизодические сеансы по тематике SETI. В результате удалось сохранить и некоторую преэминентность в исследованиях.

На этом примере мы видим, что здоровый консерватизм в науке сочетается с академической свободой. Ученые активно работают с гипотезами, если есть ощущение, что это может быть продуктивно в данное время, и возвращаются к старым идеям и подходам, если появляются новые данные и возможности для развития.

Отношение конкретного ученого к конкретной гипотезе в какой-то момент может существенно зависеть от его текущей работы. Скажем, если исследователь развивает свою идею, то в качестве модельных предположений, касающихся всего остального, он, как правило, будет стремиться взять максимально стандартные предположения. Например, если задачей является изучение недр нейтронной звезды (а для решения такой проблемы требуется использовать теорию гравитации для случая сильного поля), то разумным выбором будет применять классическую общую теорию относительности, поскольку проверять разом несколько альтернативных моделей будет затруднительно. Такой подход не отменяет необходимости работать над развитием теории гравитации, чем и занимается множество теоретиков по всему миру.

Популярность ОТО объясняется как проработанностью самой теории, так и огромным количеством постоянно идущих проверок ее предсказаний, а вовсе не «заговором ученых». Важно понимать, что усилия наблюдателей и экспериментаторов, занимающихся тестами теорий гравитации, направлены не на очередное подтверждение стандартной модели, а на обнаружение отклонений. Задача ученого — не покрывать коллег в их заблуждениях, а открывать нечто новое. Более того, несравненно интереснее и, если угодно, почетнее не подтвердить в очередной раз некую стандартную концепцию, а показать ее несостоятельность. Есть полное понимание того, что ОТО не может быть окончательной теорией, поэтому многие крупные конференции включают в себя специальные сессии, посвященные альтернативным теориям гравитации (и это даже без, скажем, квантовой гравитации — ей посвящаются отдельные заседания!). Однако если вы размышляете, какую теорию сейчас использовать в своей работе, то выбор не стоит между ОТО и «идеальной будущей теорией». Вы можете выбирать лишь между реальными разработанными

моделями и ОТО — разумный консервативный выбор. Что, конечно, не мешает астрофизикам рассчитывать внутреннее строение нейтронных звезд или космологические сценарии с использованием других подходов, альтернативных ОТО.

Напомню, что наука сейчас — это очень конкурентная область деятельности с большим числом классных независимых специалистов. Если мы говорим об астрофизике и близких тематиках (космологии, например), то это бурно развивающиеся направления исследований с огромным количеством новых данных. Темп обсуждения — усвоения — отбрасывания гипотез очень высок. Прodelывается огромная работа, и рассуждать о «косности» ученых или наличии «заговора» просто глупо. Поэтому, если гипотеза оказалась за бортом, то для этого есть объективные основания. Часто такими основаниями является как анализ отдельных ключевых фактов, так и рассмотрение очень широкого комплекса данных. В качестве примера можно привести астрофизику черных дыр и темное вещество.

Несмотря на все успехи физики и астрономии, черные дыры остаются гипотезой. В том смысле, что нет прямых доказательств существования горизонта у этих объектов. С одной стороны, физика вблизи горизонта такова, что необходимых прямых аргументов может не появиться еще очень и очень долго, поэтому исследователи пытаются разрабатывать разнообразные альтернативные модели. С другой стороны, постоянно идут наблюдательные работы с целью проверить наличие гипотетической поверхности у кандидатов в черные дыры.

Например, сильные аргументы содержатся в серии работ Рамеша Нараяна (Ramesh Narayan) и его коллег<sup>111</sup>, в которых показано, что отсутствие горизонта приводило бы к накоплению вещества на поверхности или внутри альтернативного компактного объекта. Такая аккумуляция критического количества водорода или гелия приводила бы к вспышкам, подобным тем, что наблюдаются от так называемых рентгеновских барстеров — известных двойных систем с нейтронными звездами. Наблюдения показывают, что вспышек от кандидатов в черные дыры нет.

В другой серии работ проводился анализ излучения сверхмассивных черных дыр с целью выделить вклад от поверхности и фотосферы над ней.



Были детально рассмотрены случаи черной дыры в центре нашей Галактики<sup>112</sup>, а также нескольких сверхмассивных центральных объектов в других галактиках, где наблюдались вспышки излучения, связанные с приливным разрывом звезд<sup>113</sup>. Снова никакого вклада поверхности не видно.

Наконец, обнаружение гравитационно-волновых сигналов от сливающихся черных дыр открывает новые возможности, касающиеся поисков присутствия поверхности. Пока данные не обладают очень высокой точностью, но их анализ проведен, и результат состоит в том, что предсказанного сигнала от поверхности нет. Это позволяет отбросить некоторые из альтернатив.

Подчеркнем, что проверка альтернативных вариантов — важнейшая составляющая в подобных исследованиях. Причем существенно, чтобы гипотеза объясняла весь комплекс данных, а не только отдельные (пусть и ключевые) факты. Скажем, в случае черных дыр это означает, что модель должна естественным образом описывать и компактные объекты звездных масс (включая механизм их формирования), и сверхмассивные тела в центрах галактик. В ситуации, когда из множества мейнстримных, непопулярных и маргинальных гипотез выживает только одна, немедленно делает ее стандартной. Но именно стандартной *гипотезой*.

Пока с астрофизической точки зрения гипотеза о черных дырах не сталкивается с необъяснимыми фактами, несмотря на постоянные попытки их найти. Таким образом, нет никакой слепой веры в черные дыры. Они являются достаточно естественным следствием из хорошо проверенной теории. Любая альтернатива черным дырам требует привлечения крайне экзотических предположений, не подтвержденных наблюдениями. Так что приверженность черным дырам — это следствие разумной консервативности исследователей. Иначе говоря, с точки зрения физики и астрономии черные дыры — самая неэкзотичная модель. Эту ситуацию очень емко обрисовал Эдвин Салпитер (Edwin Salpeter): «Черная дыра в источнике Лебедь X-1 — это самая консервативная гипотеза».

Другим примером стандартной гипотезы, базирующейся как на нескольких ключевых фактах, так и на большом комплексе более косвенных наблюдений, является темная материя. Предположение состоит в том,

что мы здесь имеем дело с небарионным веществом, т. е. недостающая масса не может объясняться протонами и нейтронами. Более того, кандидатами вообще не могут быть частицы из Стандартной модели. У теоретиков есть несколько хороших кандидатов в частицы темной материи, которые достаточно естественным образом возникают в физических моделях. Тем не менее постоянно обсуждаются альтернативы темному веществу. Действительно, было бы здорово обойтись без введения нового типа частиц, которые тем более никто пока не смог «ухватить за бороду», несмотря на десятилетия поисков. Может быть, есть более простые пути?

Путь есть, но вот прост ли он... Самый популярный альтернативный подход состоит в изменении законов гравитации. Он начал развиваться в начале 1980-х гг. и на момент своего появления был хорошей гипотезой. В это время ключевые данные по темному веществу связывались со скоростью вращения галактик и отчасти с поведением галактик в скоплениях. В рамках модели Мордехая Милгрона (Mordehai Milgrom)<sup>114</sup> удалось с помощью введения одного нового параметра хорошо объяснить скорости вращения галактик без гипотезы о темном веществе. В дальнейшем модель получила развитие с точки зрения теории благодаря работам Якова Бекенштейна (Jacob Bekenstein)<sup>115</sup>. А вот с наблюдениями все пошло не так хорошо.

Новые данные показывали отклонения от старой базовой модели (без изменения законов гравитации и без темного вещества) на самых разных масштабах и в разных ситуациях. Стало трудно обходиться одним параметром. Понадобилось или усложнять модель, или все-таки добавлять в нее темное вещество. Модель перестала быть элегантной из-за необходимости тонкой настройки параметров и введения новых.

Не могу сказать, что мне кажется более простым и естественным менять закон всемирного тяготения всякий раз, когда у нас что-то не сходится. Наоборот, введение новой, причем одной частицы, для возникновения которой есть физическая мотивация, кажется более простым. Здесь уместно вспомнить о том, как Вольфганг Паули ввел нейтрино. Речь ведь шла ни много ни мало как о возможном нарушении законов сохранения! И многие известные физики уже были готовы на такую

жертву. Но появилась гипотеза о том, что в некоторых реакциях (например, при бета-распаде) рождается дополнительная, пока неизвестная частица. Причем ее свойства таковы, что она очень плохо взаимодействует с веществом. Согласитесь, вроде не самый лучший способ решать проблемы — предложить новую неуловимую корпускулу. Но в итоге это оказалось верным. Законы сохранения устояли. А кроме того, физики и астрофизики получили новый канал информации: появилась нейтринная астрономия<sup>116</sup>. Видимо, такова же ситуация и с темным веществом.

Тем более что есть два набора данных, которые дают очень сильные аргументы в пользу именно темной материи, а не модифицированной гравитации. Во-первых, это большой комплекс космологических данных. Здесь нет возможности вдаваться в детали, но объяснение данных по реликтовому фону, формированию крупномасштабной структуры и т. д. и т. п. без привлечения темного вещества потребует такой странной экзотики, что модель будет выглядеть шаткой, противоестественной и малопривлекательной. Опишем лишь два аргумента, кажущиеся крайне важными. Первый из них связан с формированием крупномасштабной структуры.

Данные по реликтовому излучению показывают, насколько различной была плотность обычного (барионного) вещества в разных областях вселенной спустя 350–380 тыс. лет после начала расширения, когда вселенная стала прозрачной для излучения (тогда произошла так называемая рекомбинация). Далее, у нас есть данные по распределению галактик и их скоплений в больших масштабах, начиная примерно с 1 млрд лет после Большого взрыва. Есть хорошие численные модели (которые непрерывно совершенствуются), позволяющие рассчитать рост структуры из первичных возмущений плотности. Так вот, необходимо, чтобы на момент рекомбинации вариации плотности были гораздо выше, чем это следует из очень надежных данных по реликтовому излучению. Флуктуации плотности обычного вещества не могли расти до рекомбинации из-за влияния излучения, заполнявшего вселенную. Однако темное вещество практически не взаимодействует с электромагнитными волнами, и рост флуктуаций его плотности был возможен. Таким образом, каркас будущей крупномасштабной структуры уже сформировался к моменту

рекомбинации, и все благодаря темному веществу. Объяснить это без гипотезы о частицах, слабо взаимодействующих с излучением, очень трудно.

Второй аргумент связан с геометрией вселенной и данными по первичному нуклеосинтезу. Наблюдения того же самого реликтового излучения говорят нам, что вселенная — «плоская». Что имеется в виду? Речь идет о том, что в больших масштабах вселенная хорошо описывается евклидовой геометрией, т. е., например, сумма углов треугольника со сторонами порядка миллиарда световых лет и больше будет равна  $180^\circ$ . Такие данные позволяют оценить среднюю плотность любых форм материи во вселенной.

Если теперь мы попробуем объяснить всю эту плотность обычным (барионным) веществом, то столкнемся с трудностью. Дело в том, что примерно с первой по десятую минуту своей жизни вселенная прошла через стадию так называемого первичного нуклеосинтеза. Из протонов и нейтронов в веществе высокой плотности и температуры формировались ядра более тяжелых элементов. Наблюдения позволяют нам узнать, сколько каких элементов возникло. Это дает жесткое ограничение на плотность барионного вещества — оно вносит лишь около 5% в полную плотность. Значит, нужно что-то еще. Существенный вклад в недостающую плотность как раз и вносит темное вещество.

Нельзя не упомянуть потрясающие данные по столкнувшимся скоплениям галактик (так называемым Bullet Cluster)<sup>117</sup>. Совмещение нескольких методов наблюдений дало возможность показать, что основная масса вещества в скоплениях сосредоточена в невидимом веществе, частицы которого слабо взаимодействуют как друг с другом, так и с обычным веществом. Это важнейший ключевой факт, который должна естественным образом объяснять любая модель, претендующая на статус обсуждаемой альтернативы темному веществу. А кроме этого, есть многочисленные данные по различным галактикам и их скоплениям, которые находят естественное объяснение именно в модели темного вещества. Конечно, для окончательного подтверждения гипотезы надо будет поймать частицы с помощью лабораторных установок. И эксперименты идут. Но сейчас и без положительных результатов по лабораторному поиску

темная материя является стандартной гипотезой, поскольку она позволяет с минимальными предположениями объяснить широкий комплекс данных, чего не могут сделать альтернативные теории.

Таким образом, современная обсуждаемая гипотеза должна удовлетворять ряду непростых требований, чтобы быть обсуждаемой, быть *фактом науки*. Добраться до статуса *стандартной* еще сложнее. Для этого надо существенно превосходить альтернативные варианты. Подход науки остается умеренно консервативным: вся «стандартная экзотика», несмотря на свои удивительные свойства, менее противоестественна, чем предлагаемые альтернативы. Однако свобода в исследованиях позволяет разрабатывать и непопулярные варианты, и даже совсем маргинальные. Так что если в будущем ситуация изменится, то поменяются и стандартные гипотезы.

# Зачем нужна астрономия

Надо сразу сказать, что вопрос о «пользе астрономии» (как и любой другой фундаментальной науки) вполне законен и справедлив. Поскольку ученые проводят фундаментальные исследования в основном на деньги налогоплательщиков, то резонно требовать от исследователей в доступной форме рассказывать и о достигнутых результатах, и о планах, а также аргументировать необходимость больших расходов<sup>118</sup>.

Хотя большие ли они? Смотря с чем сравнивать. С бытовой точки зрения несколько сотен миллионов долларов — гигантская сумма. Однако бюджет современного блокбастера вроде «Пиратов Карибского моря» или «Аватара» имеет такой же порядок величины. Две серии «Пиратов» стоили дороже спутника «Кеплер», открывшего тысячи экзопланет. Но с определенной точки зрения сравнение с киноиндустрией не совсем корректно, поскольку она существует (по крайней мере, на уровне блокбастеров) на самоокупаемости. На мой взгляд, более правильно сравнивать научные расходы с военными.

Полная стоимость программы разработки бомбардировщиков B-2 Spirit в 1997 г. составляла \$2,1 млрд в расчете на один самолет. Даже с учетом последующего серийного производства большого количества этих машин их современная цена составляет около \$1 млрд за каждую. Создание авианосца обходится дороже, чем строительство крупного ускорителя, и т. д. Так что в сравнении с военными издержками научные уже не выглядят столь пугающе.

Тем не менее аргументация в защиту значительных расходов на фундаментальные научные исследования необходима. Развернутый ответ, на мой взгляд, можно разбить на несколько составляющих, и не все из них одинаково очевидны и широко известны.

Самый простой и общепринятый аргумент в пользу необходимости многих фундаментальных исследований состоит в том, что даже в среднесрочной перспективе мы не можем предсказать, чем изыскания обернутся. Что уж говорить об отдаленном будущем? Поэтому научные работы нужно вести как можно более широким фронтом, постоянно анализируя, на каких направлениях можно достичь особенно значимых прорывов. Втянувшись в научно-технический прогресс, человечество, по сути, имеет только один путь — вперед. Видимо, только новые технологии позволят решить проблему обеспечения человечества энергией, так как вряд ли мы просто готовы снизить уровень ее потребления. Например, мы не хотим включать электричество на час, а не на весь вечер, или существенно ограничить использование воды (не только горячей), или чаще пользоваться общественным транспортом вместо своего автомобиля. Мы хотим, чтобы лампы просто потребляли меньше энергии, а машины — топлива, чтобы энергию можно было получать по возможности более чистым способом, чтобы сырье не истощалось и т. д.

К тому же многие научные результаты, казавшиеся во время своего появления совершенно бесполезными, сейчас составляют основу нашей жизни, без них мы себя уже не представляем. Кроме очевидного примера с электричеством, упомянем, например, развитие небесной механики. Без нее нельзя представить себе космонавтику. А без космонавтики не было бы современных систем коммуникации и навигации, прогнозы

погоды были бы менее точны. А есть еще космическая разведка (причем не только геологическая) и многое-многое другое.

Выделим два астрономических примера практических приложений «беспольных» открытий. Оба связаны с системами навигации.

Современный человек все чаще и чаще использует такие системы, как GPS и ГЛОНАСС. А как ориентируются спутники? В течение долгого времени основой систем ориентации служили звезды. Это далекие стабильные источники, положение которых можно достаточно точно измерить, а меняется оно довольно слабо. Однако если требуется очень высокая точность, то звездная ориентация перестает удовлетворять всем требованиям. К счастью, были открыты более подходящие объекты.

После войны в Британии начала бурно развиваться радиоастрономия. Проводились подробные обзоры неба, в ходе которых было открыто множество радиоисточников. Некоторые из них удалось отождествить с объектами, наблюдаемыми с помощью оптических телескопов. Неожиданностью стало то, что некоторые мощные радиоисточники в оптике выглядели как звезды. Это странно, потому что звезды не должны так много излучать в радиодиапазоне. Новый класс объектов назвали квазизвездными радиоисточниками, сокращенно — квазарами.

В дальнейшем выяснилось, что тут мы имеем дело с ядрами далеких-далеких галактик, где вещество аккрецируется сверхмассивной черной дырой. Излучение аккреционного диска наблюдается в оптическом диапазоне, а в джетах — струях, бьющих из внутренней части диска, — рождается радиоизлучение. Квазары находятся на расстояниях в миллиарды световых лет, поэтому их смещение на небесной сфере крайне мало<sup>119</sup>. Кроме того, в радиодиапазоне, благодаря использованию интерферометров со сверхдлинной базой (когда в наблюдениях участвуют телескопы, разбросанные по всему земному шару), можно измерять положение источников с колоссальной точностью, недостижимой пока в оптическом диапазоне. Все это привело к тому, что сейчас наши системы ориентации имеют в своей основе данные по квазарным наблюдениям. Если бы в середине XX века астрономы не открыли квазары, то организовать доставку пиццы дроном прямо в форточку было бы гораздо сложнее.



Квazarы были идентифицированы в 1963 г., а в 1967-м открыты радиопульсары. Им тоже нашлось применение в народном хозяйстве. Пульсары — это быстро вращающиеся нейтронные звезды с сильными магнитными полями. Излучение возникает в их магнитосферах. Со временем выяснилось, что испускаются не только радиоволны, но и оптическое, рентгеновское и гамма-излучение.

Рентгеновская астрономия начала развиваться в 1960-е гг., когда впервые соответствующую аппаратуру стали выводить в космос\*. В результате полувекowego развития рентгеновские детекторы стали компактными, надежными, недорогими и потребляющими мало энергии. Теперь их можно ставить в качестве не основной нагрузки спутника, а дополнительной. Почему это важно?

Дело в том, что пульсары обладают легко наблюдаемыми, уникальными и стабильными периодами вращения. Иначе говоря, пульсары легко идентифицировать по рентгеновским наблюдениям — каждый несет индивидуальную метку, что позволяет создать надежную систему ориентации спутника. Но это еще не все.

Наблюдения пульсаров позволяют определить скорость аппарата (например, относительно центра масс — барицентра, Солнечной системы) без связи с Землей! Если аппарат движется в сторону пульсара, то из-за эффекта Доплера период будет казаться короче, если в противоположную — длиннее. Наблюдение за парой десятков объектов, разбросанных по всему небу, позволяет с высокой точностью измерить трехмерную скорость аппарата.

Таким образом, рентгеновские наблюдения за пульсарами дают возможность реализовать автономную систему ориентации (определения координат и скоростей) спутника. Это важно, например, для межпланетных станций, находящихся далеко от Земли (сигнал идет туда-сюда несколько часов). В настоящее время все ведущие космические агентства ведут разработки подобных систем. Китайский спутник уже тестирует такой

\* Отметим, что побочным продуктом развития рентгеновской астрономии стало появление рентгеновских детекторов в аэропортах.

способ ориентации. Отдельные элементы системы опробуются на МКС в рамках американского проекта рентгеновского телескопа NICER. Российское и европейское агентства тоже пытаются не отставать.

Научные проекты в самых разных областях являются идеальными заказчиками разработок новых высоких технологий. Проводя современные фундаментальные исследования, ученые работают на пределе возможного. При этом каждый раз хочется отодвинуть этот предел, попытаться исследовать область, ранее недоступную для изучения по причинам несовершенства инструментов. Поэтому каждый новый астрономический спутник — не просто еще один прибор. Это, как правило, принципиально новый аппарат, который хотя бы по одному из существенных параметров (например, по чувствительности) превосходит предшественников на порядок. Спутники далеко не всегда можно делать просто больше по размерам. Это, во-первых, было бы дороже, а во-вторых, есть физическое ограничение, связанное с размером обтекателя ракеты или грузового отсека космического челнока. Поэтому приходится искать новые технические решения, т. е. ученые вообще и астрономы в частности выступают в роли двигателей технического прогресса. Запросы ученых многократно превосходят запросы других категорий заказчиков по уровню требований (разве только военные составляют тут конкуренцию, но разработки, сделанные для них, по очевидным причинам начинают использоваться, скажем так, в бытовой технике куда как медленнее). Существенно, что расходы по этим передовым разработкам, как правило, берет на себя государство, финансирующее фундаментальные исследования. В итоге фирмы получают для коммерческих приложений уже готовый и оплаченный продукт — разнообразные know how (или получают возможность разработать соответствующие технологии на бюджетные средства). Таким образом, государственные расходы на разработку и создание передовых научных установок обычно окупаются, так как являются инвестициями в развитие высоких технологий.

Без заказов со стороны фундаментальной науки нам пришлось бы очень долго ждать многих разработок. Одним из ярких известных примеров является создание важных элементов сети интернет. Необходимость

проводить исследования в области физики элементарных частиц, где работают гигантские международные коллективы, привела к развитию системы коммуникации, которая со временем превратилась во Всемирную паутину.

Менее известным примером является история возникновения Wi-Fi. Ключевой элемент этой технологии был разработан радиоастрономом Джоном О’Салливаном (John O’Sullivan), работавшим тогда в Австралии. Интересно, что мотивацией заняться этой областью исследований для него была идея Стивена Хокинга об испаряющихся черных дырах. В 1970-е гг. Мартин Рис (Martin Rees) показал, что финальные стадии процесса могут сопровождаться радиовсплеском. Именно их хотел обнаружить О’Салливан.

Следующий важный аспект пользы астрономии связан с исследовательским потенциалом этой области. Вселенная является гигантской естественной лабораторией, в которой постоянно идут процессы, недоступные для лабораторных исследований. Яков Зельдович не зря говорил, что «вселенная — это ускоритель для бедных». Современные данные свидетельствуют о том, что из космоса на Землю прилетают частицы с энергиями выше  $10^{20}$  эВ, что примерно в 100 млн раз больше, чем можно получить на Большом адронном коллайдере. Происхождение этих частиц неизвестно. Вероятно, решение этой загадки будет представлять интерес не только для астрофизики, но и для фундаментальной физики.

В астрономических объектах мы сталкиваемся с плотностями, превосходящими ядерную, магнитными полями, превышающими так называемое швингеровское поле (в таком поле из вакуума могут спонтанно рождаться электрон-позитронные пары, а отдельный фотон даже небольшой энергии с большой вероятностью может породить электрон-позитронную пару). А уж с точки зрения теории гравитации именно вселенная — идеальный полигон.

Самым свежим на сегодняшний день достижением в этой области является регистрация гравитационно-волновых сигналов от слияний компактных объектов. Кроме доказательства верности предсказаний ОТО, эти наблюдения позволили измерить несколько важных фундаментальных

величин (или поставить более ограничивающие пределы). Например, благодаря регистрации электромагнитного излучения от слияния с участием нейтронной звезды впервые напрямую удалось определить скорость распространения гравитации.

Другие примеры важности астрономических исследований с точки зрения практической пользы так или иначе связаны с человеческим ресурсом. Это и подготовка специалистов, и поддержание уровня профессоров, и коммуникация науки и общества, и, конечно, привлечение в науку новых поколений будущих исследователей. Начнем по порядку.

Предположим, что общество (например, в отдельно взятой стране) заинтересовано только в прикладных исследованиях, поскольку их польза очевидна, а на фундаментальных хочется сэкономить. Опыт показывает, что для развития прикладных работ в научных сферах, где технологии достигают достаточно высокого уровня, необходимы специалисты с опытом исследовательской работы в фундаментальных областях. Связано это не только с различиями в багаже знаний у выпускников инженерных факультетов и, скажем, выпускников классического физфака. Дело в формировании разных подходов к решению задач.

По моему опыту, студенты научных специальностей, начиная работу над своими первыми исследовательскими проектами, сталкиваются с психологическими проблемами. До этого они решали исключительно задачи, ответы на которые уже есть. В редких случаях студент может столкнуться с новой проблемой, но ее характер обычно таков, что ответ все равно заведомо существует и надо лишь преодолеть технические сложности (подчас существенные), чтобы до него добраться. В научных проектах ситуация может быть совершенно иной — там мы вступаем не на тропу, по которой кто-то уже ходил, а на «нетоптаную» территорию. У нас нет полной уверенности в том, что мы получим в конце. Умение решать такие проблемы (а тем более их ставить!) — очень важный опыт, полезный и в прикладных задачах, поэтому команда из инженеров и ученых с большей вероятностью добьется прорыва в новой области и создаст нечто доселе невиданное, чем команда из одних инженеров. Таким образом, уже для подготовки специалистов, которые будут заниматься прикладными

вопросами, необходимо существование серьезной фундаментальной науки, дающей возможность получить необходимые навыки и знания.

Тем не менее пускай наше модельное «государство высокой эффективности» считает, что относительно небольшое количество ученых (их в мире «все-го» несколько миллионов) можно импортировать, а у себя готовить только инженеров. Но их надо *готовить!* Им нужно читать курсы математики, физики и химии, проводить семинары и т. д. и т. п. Иными словами, необходимы профессора.

Хороший профессор — это не человек, который выучил учебник раньше и лучше студента, а потому может его связно пересказать. Скорее, это человек, способный написать новый учебник по новому предмету (или по старой дисциплине, но с учетом самых свежих результатов). Хороший новый учебник требует не просто знаний о новых достижениях, необходимо хорошо знать, как они получены, как они вписываются (или нет) в общий контекст картины мира. И, разумеется, нужно знать и понимать несравненно больше, чем попадет на страницы, — важен отбор наиболее значимой информации, произвести который может только человек, серьезно работающий в соответствующей области. Стало быть, автор должен являться сильным ученым, работающим в этой сфере. Значит, для того чтобы были хорошие профессора, необходима фундаментальная наука высокого уровня, которой они занимаются. Разумеется, такая аргументация связана не только с учебниками, а со всеми составляющими учебного процесса.

Следующий пункт связан с глобальной проблемой взаимоотношений большой науки и общества. Наука становится все более сложной и специализированной. Все труднее рассказывать о передовых открытиях ученых. Зачастую для того, чтобы понять, в чем изюминка научной новости, нужно быть специалистом хотя бы в смежной специальности\*. И при этом исследования требуют все больше и больше средств и усилий. Постоянно нужны новые кадры, а в научных исследованиях

\* Как говорил мой научный руководитель профессор В.М. Липунов, «чтобы удивляться, надо много знать».

одним их количеством не обойтись — важно качество. Таким образом, нужно привлекать для получения научного образования и работы в науке по возможности более талантливых людей. Все это естественным образом требует выстраивания public relations, если угодно, рекламы науки в обществе. Как каждый бренд стремится иметь свое «лицо», так и науке нужна своя фотомодель. И тут «гордая муза Урания» вне конкуренции.

В самом деле, астрономические результаты достаточно часто удается популярно объяснить: они захватывающи и их можно красочно проиллюстрировать. В наши дни многие науки совершенно не могут этим похвастаться. При этом речь идет действительно о важных результатах на переднем крае науки. Поэтому неудивительно, что в новостях мы непропорционально часто слышим о новых успехах в астрофизике, хотя наука эта очень маленькая по числу ученых и публикаций, если ее сравнивать, например, с физикой твердого тела.

Возможность относительно простого, яркого, но вместе с тем достоверного рассказа о современных достижениях астрофизики (часто связанных с актуальными проблемами фундаментальной физики) приводит нас к последнему пункту в разговоре о «практической пользе». Это раннее увлечение наукой, которое потом перерастает в профессиональную деятельность.

Многие из тех, кто пришли на физические факультеты, в детстве заинтересовались наукой благодаря популярной астрономии. Существенно, что из числа выпускников тех же физических факультетов лишь малая доля идет потом в фундаментальную науку. Во всем мире потребность в высококлассных исследователях в прикладных областях во многом обеспечивается именно выпускниками научных факультетов. Реальность такова, что для того, чтобы получить классного специалиста-прикладника с естественно-научным образованием, его нужно еще в детстве увлечь наукой. И редко когда это можно сделать без какого-то яркого и доступного (но вместе с тем достоверного) образа. В наши дни астрофизика хорошо справляется с этой задачей. Возможно, в этом и состоит сейчас главная «польза от астрономии».

# Примечания

1. См., например, статью «Сверхсветовое разбегание галактик и горизонты Вселенной: путаница в тонкостях» на сайте «Астронет» (<http://www.astronet.ru/db/msg/1194830>).
2. *Громов М.Г.* Кольцо тайн: вселенная, математика, мысль. — М., МЦНМО, 2017. — С. 3.
3. Статья Ю. Вигнера «Непостижимая эффективность математики в естественных науках» доступна в переводе в журнале «Успехи физических наук» за 1968 г. См.: <https://ufn.ru/ru/articles/1968/3/f/>
4. Иллюстрированный кодекс, написанный на неизвестном языке неизвестным автором предположительно в XV веке. Расшифровать текст не удастся. Скорее всего, это и невозможно, поскольку он не имеет смысла.
5. Кодекс Серафими (Codex Seraphinianus) — иллюстрированный кодекс, созданный в 1970-е гг. архитектором Луиджи Серафими. Представляет собой вымышленную иллюстрированную энциклопедию несуществующего мира. Для ее создания автор придумал специальное письмо. Однако текст не имеет смысла, он не является результатом шифровки или использования искусственного языка.
6. Отметим, что регулярно появляются заявления о расшифровке кодекса Войнича. Последнее (на момент написания книги) появилось в мае 2019 г., когда Джерард Чешир из Университета Бристоля заявил о своем успехе (см.: <https://indicator.ru/news/>

- 2019/05/15/rasshifrovan-manuskript-vojnicha/). Однако и оно сразу же подверглось жесткой критике (см.: <https://nplus1.ru/blog/2019/05/15/diditagain>) и вскоре было отозвано.
7. В 1921 г. немецкий математик Теодор Калуца представил модель, объединяющую гравитацию и электромагнетизм в пятимерном пространстве Минковского. В рамках этого подхода из уравнений общей теории относительности удалось получить классические уравнения Максвелла.
  8. Детальнее об орбитальном хаосе можно прочесть в 8-й главе книги Иэна Стюарта «Величайшие математические задачи» (М.: Альпина нон-фикшн, 2019).
  9. В апреле 2019 г. были представлены изображения центральной части галактики M87, полученные с помощью Телескопа горизонта событий. Удалось рассмотреть линзированное изображение фотонной сферы центральной сверхмассивной черной дыры. Наблюдать черную дыру в нашей Галактике с помощью этой системы телескопов гораздо сложнее, так как наша черная дыра примерно в тысячу раз менее массивна, а значит, во столько же раз меньше ее размер. Из-за этого переменность данного объекта гораздо более быстрая, что не позволяет получить четкую картинку при длительных наблюдениях на Телескопе горизонта событий, продолжающихся несколько часов. Возможно, радикальным выходом является лишь создание системы космических телескопов, работающих как интерферометр в миллиметровом диапазоне длин волн.
  10. Благодаря работе К. Финкельштейна, написанной в 1958 г., возникло современное понимание свойств горизонта черной дыры.
  11. «Дыр бул щыл» и «убеш щур скум» — цитаты из стихотворения А. Крученых. Пример так называемого заумного языка.
  12. Тензор — математический объект. Тензоры удобно представлять как многомерные таблицы (матрицы). Это отличает их от более привычных скалярных величин (одно число) и векторов (одномерный массив чисел), хотя можно рассматривать векторы и скаляры как частные случаи тензоров.



13. Например, такие числа, как седенионы, пока не нашли широкого применения в физике. Однако теоретики пытаются приспособить их для работы над квантовой гравитацией и теорией великого объединения. Младшие братья седенионов, октонионы, тоже пока не слишком востребованы физиками.
14. Гипотетический одноклеточный организм LUCA (Last Universal Common Ancestor, или последний универсальный общий предок). Популяция таких организмов представляет собой последних по времени общих предков всех современных живых организмов на Земле. Гипотеза об их существовании была впервые высказана Чарлзом Дарвином. С тех пор генетические исследования позволили получить множество аргументов в ее пользу.
15. Кеплер в основном пользовался данными наблюдений Марса, полученными Тихо Браге — лучшим астрономом-наблюдателем того времени, а может быть, и всей дотелескопической эпохи.
16. Большая полуось — это, по сути, половина длинного диаметра эллипса, который проходит через центр и оба фокуса эллипса.
17. Уже во времена Лапласа возникла проблема объяснения движения Юпитера и Сатурна, которые из-за взаимного влияния заметно отклоняются от идеальных кеплеровских эллипсов.
18. Это так называемый принцип соответствия: новая научная теория должна включать старую и ее результаты как частный (предельный) случай. Большую популярность принцип приобрел благодаря Нильсу Бору после появления квантовой механики.
19. Потенциал Пачинского — Вииты был предложен в 1980 г. Он применяется при приближенных расчетах движения тел на расстоянии больше нескольких шварцшильдовских радиусов от массивного компактного тела. В формуле для гравитационного потенциала в знаменателе расстояние  $r$ , отсчитываемое от центра массивного тела, заменено на разность этого расстояния и радиуса Шварцшильда:

$$\Phi(r) = -\frac{GM}{r - r_g}.$$

20. Разумеется, макроскопические параметры объектов могут определяться квантовыми законами. Например, массы и радиусы нейтронных звезд и белых карликов зависят от квантовых процессов, происходящих на микроуровне. Наблюдая в лабораторных экспериментах сверхпроводимость и сверхтекучесть, мы также сталкиваемся с макроскопическим проявлением квантовых свойств вещества.
21. Вопросы происхождения жизни рассматриваются, например, в книге М.А. Никитина «Происхождение жизни. От туманности до клетки» (М.: Альпина нон-фикшн, 2019).
22. О различных аспектах астробиологии — науки о жизни вне Земли — можно почитать в книге: *Schulze-Makuch D., Irwin I. N. Life in the Universe: Expectations and Constraints.* — New York: Springer, 2008. Кроме того, есть несколько прекрасных обзоров, доступных на сайте академии наук США ([www.nap.edu](http://www.nap.edu)), среди них — *The Limits of Organic Life in Planetary Systems*.
23. Существует несколько профессиональных онлайн-каталогов экзопланет, в которых собраны имеющиеся данные по этим объектам. Сравнительный анализ этих каталогов можно найти здесь: <http://www.astronet.ru/db/msg/1391325>
24. Много ярких примеров можно найти в уже упоминавшейся известной статье Ю. Вигнера.
25. В знак признания важного вклада Гроссмана в создание ОТО каждые три года проводятся международные конгрессы, носящие его имя и собирающие сотни ученых, работающих в области изучения гравитации и связанных с этим вопросов. На сегодняшний день состоялось уже 15 таких конференций.
26. Например, длинноволновым излучением можно возбуждать атомы, заставляя электроны переходить на более высокие орбиты. Это возможно благодаря квантовой природе излучения. А просвечивание рентгеновскими лучами кристаллов приводит к формированию красивой (и сложной) интерференционной картины — это проявление волновых свойств рентгеновских лучей.

27. Популярное описание недавних результатов эксперимента по интерференции крупных частиц можно найти на сайте Phys.org: <https://phys.org/news/2017-08-massive-particles-standard-quantum-theory.html>. Оригинальные результаты о наблюдениях квантовой интерференции крупных органических молекул представлены в статье Стефана Герлиха и его коллег в журнале *Nature*, опубликованной в 2011 г. (см.: <https://www.nature.com/articles/ncomms1263>).
28. Популярный рассказ об этом эксперименте см. здесь: <https://indicator.ru/news/2018/09/17/volnovye-svoystva-antimaterii/>, а оригинальную статью можно найти в Архиве: <https://arxiv.org/abs/1808.08901>
29. Из основных фундаментальных констант — скорости света, гравитационной постоянной и постоянной Планка — можно составить несколько комбинаций разных размерностей. Комбинация, имеющая размерность длины, записывается как квадратный корень из произведения постоянной Планка на гравитационную постоянную, деленного на куб скорости света. Планковское время равно частному планковской длины и скорости света. Планковская масса равна квадратному корню из произведения постоянной Планка и скорости света, деленного на гравитационную постоянную.
30. ALMA (Atacama Large Millimeter Array) — система из 66 телескопов, работающих в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах спектра. Установлена в высокогорной пустыне Атакама в Южной Америке. Основными задачами является изучение формирования звезд и планет.
31. JWST (James Webb Space Telescope) — новый космический телескоп с раскладывающимся зеркалом, создание которого сейчас завершается.
32. Экзопланеты — планеты, обращающиеся вокруг других звезд. Первые объекты этого типа были надежно идентифицированы в середине 1990-х гг. На сегодняшний день надежно известно несколько тысяч экзопланет.

33. Читатель легко может оценить это сам, разделив типичное расстояние от планет до звезд — несколько астрономических единиц, т. е. примерно 1 млрд км, что равно  $10^{14}$  см, — на типичное расстояние до звезд, скажем 1000 световых лет, т. е. примерно  $10^{21}$  см. Получим  $10^{-7}$ . Это угол в радианах. Чтобы перевести его в угловые секунды, надо умножить полученное число на 206 265. В итоге получаем примерно 0,02 угловой секунды.
34. Желаящие могут легко найти сканы разных изданий «Математических начал» в сети. Начать можно с соответствующей страницы в Википедии: [https://en.wikipedia.org/wiki/Philosophi%C3%A6\\_Naturalis\\_Principia\\_Mathematica](https://en.wikipedia.org/wiki/Philosophi%C3%A6_Naturalis_Principia_Mathematica)
35. Шарль-Эжен Делоне (Charles-Eugène Delaunay) был французским математиком и астрономом. Он внес огромный вклад в изучение движения Луны. Пример скана страницы из его книги можно увидеть по ссылке: <http://blog.stephenwolfram.com/data/uploads/2017/08/12-Delaunay1.png>. Также отрывки из книги можно найти здесь: <https://books.google.ru/books?id=NMdHAQAAMAAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
36. Заинтересовавшийся читатель может обратиться к статье Feynman Diagrams for Beginners, доступной в Архиве e-принтов: <https://arxiv.org/pdf/1602.04182.pdf>
37. Именно благодаря сверхновым типа Ia было открыто ускоренное расширение Вселенной, которое мы сегодня объясняем с помощью гипотезы темной энергии.
38. Это третий по массе кварк, он тяжелее u- и d-кварков, из которых состоят протоны и нейтроны. Он входит в состав таких частиц, как, например, гипероны.
39. С другой стороны, часто говорят о том, что алгебра, скорее всего, возникла позже в Индии и арабском мире, а соображения и построения пифагорейцев находились еще в слишком зачаточном состоянии, чтобы можно было говорить о рождении алгебры.
40. Представьте себе сюжет фантастического рассказа: на далекой планете космонавты находят книгу. Но оказывается, что выводы

- о наличии разумных обитателей преждевременны: книга является животным (или растением), возникшим в результате эволюции.
41. О некоторых применениях математических методов в современной жизни можно прочесть в книге Нелли Литвак и Андрея Райгородского «Кому нужна математика? Понятная книга о том, как устроен цифровой мир» (М.: Манн, Иванов и Фербер, 2017), а также в сборнике «Математическая составляющая» (М.: МЦНМО, 2015).
  42. Данная формула определяет темп испускания энергии и замедления вращения шара с дипольным магнитным полем, находящегося в вакууме.
  43. На тему эволюции органов зрения можно всячески рекомендовать книгу «Революция в зрении» Марка Чангизи (М.: Corpus, 2014).
  44. Использование статистических методов выявляет значимые различия и в других областях искусства. Недавно особенности эволюции музыкальных произведений были рассмотрены в работе: *E. Nakamura, K. Kaneko. Statistical Evolutionary Laws in Music Styles.* Она доступна в Архиве е-принтов arXiv: 1809.05832.
  45. Данный вопрос регулярно исследуется количественно с помощью разнообразных статистических методов. Так, например, в недавней статье: *H. Y. D. Sigaki et al. History of art paintings through the lens of entropy and complexity*, доступной в Архиве (arXiv: 1809.05760), проведен статистический анализ примерно 140 000 полотен и показано, что в терминах энтропии и сложности наблюдается эволюция произведений искусства, относящихся к разным эпохам и стилям.
  46. Совсем в другом контексте взаимоотношения науки и искусства рассматриваются в книге Евгения Фейнберга «Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке» (Фрязино: Век-2, 2004).
  47. Видеоролики, демонстрирующие формирование образов «Композиции VI» и «Композиции VII», можно посмотреть на YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=v9L4IB4WPmQ> и <https://www.youtube.com/watch?v=OJuBXEdXSrY>
  48. Ролик о Ланиакее доступен по адресу: <https://www.youtube.com/watch?v=rENyyRwxpHo>

49. Популярное изложение многих современных идей об устройстве сингулярности можно найти в книге К. Торна «Интерстеллар: наука за кадром» (М.: Манн, Иванов и Фербер, 2015).
50. О роли симметрии в физике, в первую очередь о квантовой механике, можно почитать в сборнике статей Ю. Вигнера «Этюды о симметрии» (М.: Мир, 1971).
51. В данном случае под словом «лед» подразумевается не только водяной лед, но и замерзший метан, аммиак, угарный газ и многие другие соединения с похожими свойствами.
52. Газовый диск рассеивается за несколько миллионов лет. В основном это происходит за счет ультрафиолетового излучения звезды, поэтому газовые гиганты должны формироваться относительно быстро. Железно-каменные планеты могут наращивать массу в течение десятков миллионов лет за счет столкновений друг с другом и с небольшими твердыми телами — планетезималиями.
53. Книга выходила в русском переводе в издательстве «Наука» в 1982 г. Сейчас можно легко найти ее в сети, например на сайте Московского центра непрерывного математического образования (см.: <http://ilib.mccme.ru/djvu/klassik/kepler-snow.htm>).
54. Документальная лента «В ожидании волн и частиц» была снята в 2015 г. Режиссер — Дмитрий Завильгельский. Фильм доступен на YouTube, в том числе и с английскими субтитрами. См.: <https://www.youtube.com/watch?v=WtqoXa1kA1o>
55. Наиболее детальное описание идеи антропного принципа можно найти в книге: *Barrow, John D.; Tipler, Frank J. The Anthropic Cosmological Principle.* — Oxford University Press, 1988. Также стоит отметить редакторский комментарий Джорджа Эллиса к классической статье Брендона Картера, доступный на сайте arXiv.org. См.: <https://arxiv.org/abs/1105.2462>. Статья Картера 1967 г. также была впоследствии размещена в Архиве: <https://arxiv.org/abs/0710.3543>. Другие важные статьи по этой теме, находящиеся в открытом доступе на сайте arXiv.org, можно найти по ключевому слову «антропный» у меня на сайте: [http://xray.sai.msu.ru/~polar/sci\\_rev/other.html](http://xray.sai.msu.ru/~polar/sci_rev/other.html)

56. Концепция бoльцмановского мозга получила популярность в начале нулевых. Идея состоит в том, что из-за флуктуаций вакуума могут возникать разумные наблюдатели. Можно порекомендовать статью Шона Кэррола на эту тему (см.: <https://arxiv.org/abs/1702.00850>).
57. Во многих современных теориях (в том числе в теории струн) существуют дополнительные пространственные измерения, однако их роль начинает проявляться лишь на очень малых масштабах, поскольку глобальная топология пространства такова, что дополнительные измерения оказываются «свернутыми» или, как говорят, «компактифицированными». Популярное изложение этих идей можно найти, например, в книге Лизы Рэндалл «Закрученные пассажи: проникая в тайны скрытых размерностей пространства» (М.: Либроком, 2011).
58. Тройная альфа-реакция происходит в ядрах достаточно массивных звезд после исчерпания водорода в качестве термоядерного горючего в их недрах. Наше Солнце примерно через 5–6 млрд лет (после своего превращения в красный гигант) перейдет на стадию горения гелия в ядре. Столкновение сразу трех частиц крайне маловероятно, поэтому для эффективного протекания реакции нужно согласование параметров ядер гелия, бериллия и углерода. Бериллий образуется на промежуточной стадии в результате слияния двух альфа-частиц. За счет того что вступающие в реакцию ядра бериллия и гелия имеют энергию, крайне близкую к энергии возбужденного ядра углерода, вероятность всей реакции резко повышается.
59. Другой интересный пример можно найти в статье Эндрю Гулда (см.: <https://arxiv.org/abs/1207.2149>). Речь идет о свойствах ядра трития в сравнении с гелием-3.
60. Критика антропного принципа содержится, например, в статье Ли Смолина (см.: <http://arxiv.org/abs/hep-th/0407213>).
61. Такой подход развивал, например, Джон Арчибальд Уилер. Им сформулирован так называемый антропный принцип участия (см. его статью *Genesis and Observership* в книге *Foundational Problems in the Special Sciences* — London, Ontario, Canada: Springer, 1975).

62. Здесь нельзя не упомянуть недавнюю книгу Фрэнка Вильчека «Красота физики» (М.: Альпина нон-фикшн, 2016).
63. Об антропном принципе в теории струн можно прочесть в статье А. Шеллекенса *The Emperor's Last Clothes?*, доступной в Архиве: <https://arxiv.org/pdf/0807.3249.pdf>
64. Этот обзор можно найти на сайте arXiv.org. Его номер 0905.1283.
65. О космологических горизонтах можно прочесть в моей статье, написанной в соавторстве с А. Топоренским, «За горизонтом вселенских событий». См.: «Вокруг света». 2006 г. №3. Статья доступна и в интернете (см.: <http://www.vokrugsveta.ru/vs/article/2557/>). Более детальное, но все равно популярное объяснение доступно в моей статье «Сверхсветовое разбегание галактик и горизонты вселенной: путаница в тонкостях» на сайте «Астронет» (см.: <http://www.astronet.ru/db/msg/1194830>)
66. По теории инфляции есть множество научно-популярных публикаций. Выделим статью Андрея Линде «Инфляция, квантовая космология и антропный принцип». Во-первых, она написана одним из создателей современной инфляционной модели. Во-вторых, доступна в сети на русском языке (см.: <http://www.astronet.ru/db/msg/1181211>). В-третьих, там также затронуты и тема мультивселенных, и антропный принцип.
67. О двух наиболее обсуждаемых интерпретациях квантовой механики можно прочесть в небольшой статье А. Гриба «К вопросу об интерпретации квантовой физики» в журнале «Успехи физических наук» за 2013 г., т. 183, с. 1337 (см.: <https://ufn.ru/ru/articles/2013/12/d/>). Также интересна статья Б. Менского «Квантовые измерения, феномен жизни и стрела времени: связи между “тремя великими проблемами” (по терминологии Гинзбурга)», опубликованная в том же журнале в 2007 г. (см.: <https://ufn.ru/ru/articles/2007/4/j/>).
68. См. статью Тегмарка *The mathematical Universe*, которую можно найти на сайте <https://arxiv.org/abs/0704.0646>
69. Познакомиться с современными достижениями в этих областях можно по книгам: Франс де Вааль «Истоки морали: в поисках



- человеческого у приматов» (М.: Альпина нон-фикшн, 2013) и Паскаль Буайе «Объясняя религию: природа религиозного мышления» (М.: Альпина нон-фикшн, 2017).
70. Дэвид Юм, английский философ XVIII века. Известен в первую очередь своим «Трактатом о человеческой природе», где, в частности, рассматривались и вопросы происхождения морали.
  71. О проверке закона обратных квадратов в теории гравитации на суб-миллиметровом масштабе с помощью лабораторных экспериментов можно почитать на сайте исследовательской группы в университете Вашингтона (см.: <https://www.npl.washington.edu/eotwash/publications>). Детальное описание методики содержится в статье Э. Адельбергера и его коллег Tests of the gravitational inverse-square law (см.: <https://arxiv.org/pdf/hep-ph/0307284.pdf>). Ускорительные эксперименты позволяют проверять этот закон и на масштабе нанометров (см.: <https://phys.org/news/2018-03-gravity-nanoscale-extra-dimensions.html>). Пока отклонений не обнаружено, следов дополнительных измерений нет.
  72. О пространстве Калаби — Яу и его применении в теории струн можно прочесть в книге «Теория струн и скрытые измерения вселенной» Ш. Яу и С. Надис (СПб.: Питер, 2012).
  73. Подчеркнем разницу между поисками решения и вычислениями. Обычно под решением уравнения понимают численный ответ. Но для физика решением может быть и функция, а конкретные численные значения будут вычисляться для конкретной ситуации. Например, анализируя систему дифференциальных уравнений, можно получить, что ее решением будет квадратичная функция. Это ответ, т. е. решение. Но это не конкретные числа. Их потом будет легко вычислить, подставляя в полученное решение значения коэффициентов и переменных.
  74. Интересно сравнить в этом отношении математику с литературой. По сути, роман тоже является моделью, где агенты действуют, исходя из некоторых начальных и граничных условий, согласно существующим закономерностям человеческого поведения.

Тем не менее зачастую автор не знает, что произойдет с героями в конце, как при анализе сложных уравнений, поскольку модель слишком сложна, и развитие сюжета может завести героев далеко от того, что предполагалось автором на стадии замысла. При этом психологи и философы постоянно апеллируют к словам и поведению литературных персонажей (вспомним Эдипа — а ведь это вымышленный персонаж!), как если бы эти «смоделированные люди» были реальны, доверяя в этом смысле «правилам вывода», применявшимся авторами книг.

75. Вспомним легендарное утверждение о том, что размер космических ракет связан с размером лошадиного крупа. Цепочка рассуждений такова. Размеры ракет-носителей определялись во многом шириной железнодорожной колеи. Она, в свою очередь, связана с традиционной шириной дорог. Этот параметр ведет свою историю с древнеримских дорог, ширина которых определялась размером лошадей.
76. Бариогенезис — процесс объединения кварков (и антикварков) в барионы (и антибарионы), в результате которого получился наблюдаемый перевес вещества над антивеществом. Барионы — тяжелые частицы, состоящие из трех кварков. Среди барионов для нас наиболее важны протоны и нейтроны (их вместе еще называют нуклонами, так как из них состоят ядра атомов). Другие барионы в природе встречаются редко, однако некоторые из них могут существовать в большом количестве в центральных частях ядер нейтронных звезд.
77. Лептоны — легкие элементарные частицы, входящие в Стандартную модель. К ним относятся электрон, мюон, тау-лептон и их античастицы. Каждому лептону соответствует свой сорт нейтрино.
78. Нарушение CP-инвариантности соответствует тому, что законы физики изменяются при замене частиц на античастицы с одновременным их «зеркальным отражением».
79. Здесь хочется привести цитату из книги Юрия Манина «Математика как метафора»: «Дальнейшее понимание блокируется, пока

мы не отказались от идеи пространства-времени как основы физики» (М.: МЦНМО, 2010. С. 204). Похоже, что в будущем от такой идеи могут отказаться.

80. Эта статья под названием *A Precipice Below Which Lies Absurdity? Theories without a Spacetime and Scientific Understanding* доступна в Архиве (см.: <https://arxiv.org/abs/1807.02639>).
81. Изложение этой точки зрения приводится в статье *Computability and Physical Theories* (см.: <https://arxiv.org/abs/1806.09237>).
82. В моем детстве важным источником информации о физических и химических процессах, стоящих за привычными природными или бытовыми явлениями, была книга «Физический фейерверк» Джирла Уокера (М.: Мир, 1979). Сейчас можно добавить очень объемную книжищу Луиса Блумфилда «Как все работает: законы физики в нашей жизни» (М.: АСТ, Corpus, 2016).
83. Помню, что я впервые услышал эту мысль на одной из лекций в Московском планетарии где-то в середине 1980-х гг., и она показалась мне очень вдохновляющей, а отнюдь не пугающей.
84. *Попов С.Б.* Сверхсветовое разбегание галактик и горизонты Вселенной: путаница в тонкостях (см.: <http://www.astronet.ru/db/msg/1194830>); *С.Б. Попов, А.В. Топоренский.* Не боги расширение вселенной наблюдают (см.: <http://www.astronet.ru/db/msg/1307314>); *Они же.* Куда смещается красное смещение (см.: <http://www.astronet.ru/db/msg/1320286>).
85. Впервые я познакомился с этим методом по замечательной книге Бориса Иванова «Законы физики» (М.: Высш. шк., 1986), которая очень мне нравилась в старших классах. Отмечу еще две известные книги, посвященные методу размерностей. Во-первых, это известная монография Леонида Седова «Методы подобия и размерности в механике» (М.: Наука, 1987). Во-вторых, множество применений метода в астрономии рассмотрено в книге Самуила Каплана и Эдуарда Дибая «Размерности и подобие астрофизических величин» (М.: Наука, 1976). Эта книга также доступна в сети (см.: <http://www.astronet.ru/db/msg/1252779/>).

86. О проблеме определения понятия *черная дыра* см. статью Эрика Кьюриэла (Eric Curiel) в журнале *Nature Astronomy* (т. 3, с. 27–34). Эта работа также доступна в Архиве электронных препринтов под номером 1808.01507. В этой публикации представлены точки зрения множества физиков и астрономов на то, как следует правильно формулировать ключевые свойства черных дыр. Разумеется, разные ученые (работающие в разных областях) дают сильно отличающиеся определения, что в первую очередь отражает различные подходы к проблеме.
87. Эта функция масс была предложена Эдом Солпитером (Ed Salpeter) в 1953 г. и является наиболее популярным простым способом описать так называемую начальную функцию масс звезд.
88. Одним из первых аккрецию вещества межзвездной среды на компактные объекты начал рассматривать в конце 1960-х — начале 1970-х гг. Викторий Шварцман, работавший вначале в Москве, а затем в Специальной астрофизической обсерватории на Северном Кавказе.
89. Сделаем важное уточнение. Если под пролетающим объектом иметь в виду, например, метеорное тело, то оно не будет захвачено, даже попав под радиус гравитационного захвата, поскольку изначально его полная энергия была положительной, и такой она и останется, поскольку объект *постоянно* будет разгоняться под действием гравитационного притяжения центрального тела. Радиус гравитационного захвата важен для нашего рассмотрения, поскольку мы обсуждаем захват газа межзвездной среды. В случае движения черной дыры или нейтронной звезды в межзвездной среде мы можем считать, что относительная скорость вещества и компактного объекта определяется только движением последнего.
90. Здесь, правда, возникает противоречие с принципом Ферма. Я благодарен за это уточнение Эмилю Ахмедову.
91. Недавно добавился еще один поразительный пример. Мэнди Чен (Mandy Chen) и ее соавторы представили линзированное изображение галактики, на котором видно, что некоторые детали

- линзируются на сверхмассивной черной дыре в галактике-линзе. Это позволяет, в частности, определить массу черной дыры. Номер статьи в Архиве — 1805.05051.
92. Познакомиться с гораздо более детальными расчетами можно в статье Николо Карторе и Альдо Тревеса Probing isolated compact remnants with microlensing, опубликованной в журнале *Astronomy and Astrophysics*, 523, id. A33 (2010), и статье Хироко Нииккура с соавторами Constraints on Earth-mass primordial black holes from OGLE 5-year microlensing events, опубликованной в журнале *Physical Review D*, 99, id. 083503.
  93. Заметим, что существуют разные варианты механизмов формирования первичных черных дыр. В некоторых из них, например связанных с топологическими дефектами, история выглядит несколько иначе, и свойства черных дыр, в первую очередь их распределение по массам, будут иными.
  94. Популярное изложение хокинговского испарения можно найти в книге Эмиля Ахмедова «О рождении и смерти черных дыр» (М.: МЦНМО, 2015). Также см. хорошее объяснение в заметке Игоря Иванова на сайте «Элементы»: [://elementy.ru/novosti\\_nauki/432819/Nakonets\\_to\\_obnaruzhen\\_analog\\_izlucheniya\\_Khokinga\\_v\\_kholodnom\\_kvantovom\\_gaze](http://elementy.ru/novosti_nauki/432819/Nakonets_to_obnaruzhen_analog_izlucheniya_Khokinga_v_kholodnom_kvantovom_gaze). Важно заметить, что традиционное популярное описание этого процесса содержит неоправданные упрощения, а потому отчасти может запутать. Так что настоятельно рекомендую прочитать оба упомянутых в этой сноске источника.
  95. Статья с результатами этих исследований была опубликована в 2018 г. в *Astrophysical Journal* и доступна в архиве е-принтов на сайте arXiv.org под номером 1802.00100.
  96. Статья опубликована в 2019 г. в *Physical Review Letters* и доступна в Архиве под номером 1807.03075.
  97. Упомянем и еще один способ. После регистрации на установках LIGO первых гравитационно-волновых всплесков от сливающихся черных дыр была высказана гипотеза, что это могут быть первичные

объекты, поскольку некоторые из их параметров не слишком типичны для пар черных дыр, возникающих в результате эволюции массивных двойных звезд. Соответственно, гравитационно-волновые наблюдения также потенциально могут внести вклад в поиски первичных черных дыр. Хотя лично мне не верится.

98. Эта работа опубликована в 2019 г. в журнале *Physical Review D* и доступна в Архиве под номером 1901.07120.
99. Подробнее о нейтронных звездах можно прочесть в моей книге «Суперобъекты. Звезды размером с город» (М.: Альпина нон-фикшн, 2016).
100. Здесь мы для простоты пренебрегаем возможностью возникновения неустойчивостей и диффузией.
101. Подробнее об истории обнаружения всплесков, о данных наблюдений и о рассматриваемых теоретических моделях можно прочесть в обзоре «Быстрые радиовсплески», опубликованном в октябре 2018 г. в журнале «Успехи физических наук», 188, 1063 (онлайн: <https://ufn.ru/ru/articles/2019/6/>).
102. Строго говоря, можно было бы предположить, что источник находится в нашей Галактике, но окружен плотной оболочкой. Такая гипотеза рассматривалась. Она не подходит, так как при столь большом энерговыделении, которое необходимо для объяснения свойств быстрых радиовсплесков, оболочка сама должна была бы стать заметным источником, чего не наблюдалось.
103. Эти источники были обнаружены в самом начале нового тысячелетия (М. А. McLaughlin et al. *Nature*, 439, 817 2006) благодаря появлению новых технических возможностей для идентификации отдельных коротких импульсов в радиодиапазоне. Довольно быстро выяснилось, что источниками импульсов являются молодые нейтронные звезды в нашей Галактике.
104. Подробнее о популяционном синтезе в астрофизике можно прочесть в нашей с Михаилом Прохоровым статье в журнале «Успехи физических наук», 177, 1179 (2007). Этот обзор доступен онлайн на сайте <https://ufn.ru/ru/articles/2007/11/b/>.

105. Желаящие глубже погрузиться в эту тематику могут начать с обзоров Кристофа Мордасини, Яна Алиберта и их коллег. Например, *W. Benz et al. Planet population synthesis* (см.: <https://arxiv.org/abs/1402.7086>).
106. Планетезимали — небольшие тела в протопланетном диске. Их размер может достигать примерно до размера Марса. Минимальный составляет приблизительно 1 км. Эта величина соответствует достаточно большой массе, чтобы гравитация стала существенной для роста массы объекта и его внутренней структуры. Поглощение планетезималей приводит к росту массы планет. Оставшиеся планетезимали можно наблюдать в виде астероидов и комет.
107. Желаящие могут заглянуть в Википедию ([https://en.wikipedia.org/wiki/Free\\_fall](https://en.wikipedia.org/wiki/Free_fall)), где приводится значение предельной скорости — около 200 км/ч.
108. «Чайник Рассела» — вымышленный объект, придуманный философом Бертраном Расселом для демонстрации абсурдности некоторых предметов веры. «Чайник» вращается между Землей и Марсом, и он слишком мал, чтобы его можно было обнаружить имеющимися средствами наблюдений. При повышении чувствительности наблюдений делается заявление о еще меньшем размере чайника.
109. Большой круг на сфере лежит в плоскости, проходящей через ее центр. Например, меридианы являются большими кругами, а круги параллелей (кроме экватора) — нет.
110. Первой важной публикацией стала статья Джузеппе Коккони и Филиппа Моррисона *Searching for Interstellar Communications* в журнале *Nature* в сентябре 1959 г.
111. Во-первых, это статья: *Yuan Y.-F., Narayan R., Rees M.J. Constraining Alternate Models of Black Holes: Type I X-Ray Bursts on Accreting Fermion-Fermion and Boson-Fermion Stars // Astrophysical Journal*, 606, 1112 (2004), она также доступна в Архиве: [astro-ph/0401549](http://astro-ph/0401549). Во-вторых, статья: *Narayan R., McClintock J.E. Observational Evidence for Black Holes*, опубликованная в сборнике *General Relativity and*

- Gravitation: A Centennial Perspective. Cambridge University Press, 2015. Она также есть в Архиве (arXiv: 1312.6698).
112. Это работа: *Broderick A. E., Loeb A., Narayan R.* The Event Horizon of Sagittarius A\* // *Astrophysical Journal*, 701, 1357 (2009). В Архиве ее номер 0903.1105.
  113. *Lu W., Kumar P., Narayan R.* Stellar disruption events support the existence of the black hole event horizon // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 468, 910 (2017). Номер в Архиве 1703.00023.
  114. Серия работ Милгрота появилась в 1983 г. См.: *Milgrom M.* A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis // *Astrophysical Journal*, 270, 365 (1983); *Milgrom M.* A modification of the Newtonian dynamics — Implications for galaxies // *Astrophysical Journal*, 270, 371 (1983); *Milgrom M.* A modification of the Newtonian dynamics — Implications for galaxy systems // *Astrophysical Journal*, 270, 384 (1983).
  115. *Bekenstein J. D.* Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm // *Physical Review D*, 70, 3509 (2004). В Архиве: astro-ph/0403694.
  116. О том, как регистрируют нейтрино, можно почитать в книге Рэя Джаявардхана «Охотники за нейтрино: захватывающая погоня за призрачной элементарной частицей». (М., Альпина нон-фикшн, 2015).
  117. См. статью: *Markevitch M. et al.* Direct constraints on the dark matter self-interaction cross-section from the merging galaxy cluster 1E0657–56 // *Astrophysical Journal*. 606, 819 (2004). В Архиве: astro-ph/0309303.
  118. Хочу заметить, что, на мой взгляд, неразумно требовать от каждого ученого популярно рассказывать о его работе. Такое требование можно применять лишь к научному сообществу в целом.
  119. Однако из-за движения вещества в джете все-таки происходит небольшое изменение положения радиоисточника.