

## Глава 2

# Принципы измерения времени

### 2.1. Введение

Диапазон измерения времени огромен, от планковского времени  $10^{-43}$  с – наименьшей величины, которую мы можем констатировать в физике, до величин встречающихся в космологии, т.е. порядка десятка миллиардов лет или  $10^{17} - 10^{18}$  с.

Из всего этого диапазона мы будем иметь дело только с той очень малой частью, где могут проводиться точные измерения. Грубо говоря, наша область простирается от периодов порядка  $10^{-15}$  с, характерных для атомных переходов в видимом диапазоне, до периодов в несколько тысяч лет ( $\sim 10^{11}$  с), прошедших с начала астрономических наблюдений. Весь этот диапазон лежит в области типичных лабораторных экспериментов и динамической астрономии, которые, в свою очередь, либо обеспечены, либо должны быть обеспечены эталонами времени: поле деятельности метрологии времени.

Вплоть до рождения релятивистских теорий в начале 20-го столетия, время и пространство составляли заданный извне и неизменный каркас, в рамках которого могла осуществляться наша деятельность. Мы могли воспринимать этот каркас через присутствие и передвижение объектов. В то же время мы были убеждены, что он существовал независимо от своего содержания, и даже, что он мог бы существовать вообще без содержания. Сегодня считается, что пространство – время не может рассматриваться отдельно от массы и энергии и что не существует привилегированного времени, наподобие абсолютного времени. Такая концепция повергает нас в двойное унижение перед природой. Допустим, что мы не знаем что такое время. Мы знаем только, что нам нужны временная координата и три пространственных координаты, чтобы описать физические явления и придумать математические модели для них. Почему эти четыре независимых координаты, а не пять или больше? Просто потому, что четырех координат достаточно, чтобы в наших физических моделях не обнаруживалось никакого измеримого несоответствия.

Освободившись от абсолютного времени, легче принять прагматический подход к определению или даже к измерению времени. И действительно, время определяется таким способом, чтобы математические модели природы оставались простыми. Следует также заметить, что другие физические величины, такие как длина, масса и т.д. должны быть определены таким же путем. Это и есть то, что через проверочный критерий простоты мы способны понять как основы измерения времени, определить единицы времени и выбрать шкалу времени такую, которая могла бы быть принята как мировой эталон для датирования событий.

## **2.2. Время и воспроизводимость: понятие длительности**

Нет ничего проще, чем взять хорошо известную наблюдаемую особенность нашей связи с природой и обратить ее в постулат. Такой особенностью является воспроизводимость любого опыта во времени и пространстве. Именно Пуанкаре первым установил этот постулат в своей дискуссии об измерении времени [2.1] (Перевод): «Когда мы используем маятник чтобы измерить время, как постулат мы косвенно подразумеваем то, что длительность двух идентичных явлений одинакова; или по другому: одни и те же причины требуют одного и того же времени чтобы произвести одни и те же эффекты».

Однако эта простота иллюзорна. Ряд положений требуют более пристального внимания.

### **2.2.1. Хаос**

Опыт учит нас [2.1]: «что примерно одинаковые причины требуют такого же времени, что бы произвести примерно одинаковые эффекты».

Утверждение Пуанкаре здесь может быть до некоторой степени неожиданным. Он был одним из пионеров в изучении детерминистского хаоса, согласно которому примерно одинаковые причины могут привести к совершенно разным эффектам за одно и то же время.

Существование хаотических явлений не противоречит постулату воспроизводимости. Это только напоминает нам, что при его применении должна соблюдаться осторожность. Целью метрологии является обеспечение воспроизводимыми эталонами, и она основана на хорошо известных явлениях, для которых приблизительное применение постулата воспроизводимости остается возможным. И в действительности главная роль метролога состоит в распознавании и использовании таких явлений, которые мало зависят от плохо контролируемых возмущающих причин.

### **2.2.2. Измерение времени через измерение других величин**

Когда Пуанкаре говорит о тех же причинах и тех же эффектах он предполагает, что мы уже имеем эталоны для их оценки. Измерение времени, т.е. в нашем случае длительности, может быть доступно нам только через измерение других величин.

Если мы хотим в его примере с маятником получить единицу длительности – секунду путем простого хода маятника туда и обратно, мы должны определить с большой точностью некоторую опорную точку, через которую этот маятник проходит, и получить сигнал в момент ее прохождения. На практике нет ничего мгновенного. Фотоэлектрический метод может дать сигнал длительностью свыше 0,001 секунды. Тогда секунда будет определена только с относительной точностью  $10^{-3}$ . Однако постулат воспроизводимости становится полезным, когда мы можем повторять эксперимент непрерывно. Хотя время отсчета остается неизменным, ошибка в измерении единицы в этом случае делится в среднем на число совершенных периодов. В примере с маятником она уменьшается до  $10^{-8}$  после одного дня измерений. В настоящее время секунда определена как длительность 9192631770 периодов, соответствующих определенному атомному переходу. Простой счет этих периодов в течение одного дня, при условии что мы ничего не пропустили, приведет к относительной неопределенности секунды  $10^{-15}$ .

В двух вышеприведенных примерах измерение времени обращается в измерение напряжения. Постулат воспроизводимости позволяет перевести это измерение к простой, почти качественной индикации напряжения так, что любая неопределенность в вольте не будет иметь какого бы то ни было влияния на воспроизведение секунды. Здесь также высвечивается преимущество использования явлений с очень короткой длительностью.

### **2.2.3. Локальная природа явлений**

Для того чтобы контролировать причины явлений в надежде, что они будут теми же самыми, когда бы мы их ни воспроизводили, эксперимент должен быть локальным, т.е. в непосредственной близости от экспериментатора.

Существуют ли какие-нибудь естественно воспроизводимые удаленные явления, которые являются достаточно быстрыми, чтобы отвечать нуждам точности? В настоящее время мы не знаем таковых. В течение

длительного времени вращение Земли, казалось бы, отвечало этим требованиям, пока во второй половине 20-го столетия не появилось доказательство его неравномерности. Быстро вращающиеся пульсары с периодом в диапазоне миллисекунд, впервые открытые в 1982 году, могли бы быть отличными эталонами для промежутков времени, если бы их вращение не замедлялось.

Если бы удаленное и хорошо воспроизводимое явление было бы открыто, мы могли бы основать определение единицы длительности на наблюдениях этого явления. Фактически мы бы конечно так и сделали, если бы в этом были какие-нибудь преимущества. Однако этот шаг потребовал бы обращения за помощью не только к теории распространения электромагнитных волн, но и к теории этого явления. Используемое в простейшем виде, без обращения к какой бы то ни было теории, явление однажды могло бы быть оспорено тем, что оно не адаптивно к локальным измерениям и поэтому постулат воспроизводимости заставляет нас опираться не на удаленные, а на локальные измерительные эталоны.

#### **2.2.4. Разное старение?**

Постулат Пуанкаре подразумевает причинные связи. Мы можем интересоваться, что случается, когда два явления происходят параллельно, независимо одно от другого. Если химическая реакция подойдет к окончанию, когда наши атомные часы отсчитают  $10^{10}$  периодов, можем ли мы быть уверены, что через миллионы лет та же самая реакция будет происходить за то же самое число периодов? Постулат позволяет нам утверждать, что это будет действительно то же самое число. Фактически нет причин, которые мешают нам установить причинную связь между двумя явлениями, например, путем запуска реакции после  $n$ -атомных периодов и рассмотрением такого объединенного объекта восприятия как «счет периодов и химическая реакция». Длительность этого объединенного явления должна быть неизменной. Постулат не оставляет места для разной скорости старения различных естественных явлений. Если спросить, а не стареют ли сами локальные явления и их законы глобально, то постановка такого вопроса предполагает существование какого-то фиктивного времени, посредством которого мы могли бы сделать наши оценки. Существование такого времени является безосновательной гипотезой.

Тем не менее, стоило бы воздержаться от неоправданной самоуверенности, уповая на постулат воспроизводимости. Хотя он еще никогда и не

нарушался, может однажды случиться так, что при дальнейшем прогрессе в экспериментах справедливость постулата может быть поставлена под сомнение.

### **2.2.5. Воспроизводимость и измерительные эталоны**

Принимая во внимание вышеуказанное обсуждение, мы можем прийти к заключению, что определение единицы измерения для локальной физики может основываться на воспроизводимости локальных экспериментов. Проверка определения семи основных единиц системы СИ (Международной Системы Единиц), а именно метра, килограмма, секунды, ампера, кельвина, моля и канделы (определения даны в приложении 3), выявила, что постоянно воспроизводится пять единиц. Килограмм и кельвин являются исключениями. Определение килограмма как массы уникального предмета требует предположения о непрерывности и постоянстве свойств этого предмета, которые, возможно, являются формой воспроизводимости. Что касается Кельвина (температура), то его определение относится к более сложным моделям, а именно к законам термодинамики, основанным на дополнительных постулатах.

Единица длительности секунда, обычно рассматривается нами как единица времени и в ее настоящем определении является единицей, устанавливаемой локально, так же, как и все другие единицы. Это приводит к тем последствиям, что когда мы должны рассматривать измерения в моделях, опирающихся на общую теорию относительности, то часто это необходимо делать с достаточно высокой точностью, т.к. с очень высокой точностью мы можем определить секунду.

## **2.3. Время, эволюция и шкалы времени**

Вернемся теперь к происходящим во времени явлениям, которые мы беспричинно считаем воспроизводимыми. Так как такие явления имеются в большом количестве, то мы выберем те явления, которые относятся к динамике звездных тел, т.к. существуют высококачественные математические модели, разработанные для их описания, а также возможно потому, что в прошлом время всегда связывалось с движением таких небесных объектов.

Для того, чтобы описать эти движения нам нужна только шкала координат времени, т.е. шкала времени, главным качеством которой является то, что каждый может ее принять и что она должна быть доступна всем. (Это сразу же приводит к постановке вопроса о синх-

ронизации часов удаленных наблюдателей? Обсуждение мы отложим до части 3. Представим только на время, что мы можем синхронизировать часы). Однако если мы хотим установить модель для тех движений, которые позволяют нам представить их как астрономические эфемериды, временной аргумент в такой теории должен удовлетворять и другим критериям. Что это за критерии? Давайте еще раз обратимся к собственному суждению Пуанкаре, а не к попыткам его изложения.

*«Они (астрономы) определяют длительность следующим образом: время должно быть определено таким способом, чтобы сохранялись и Ньютоновский закон гравитации, и второй закон движения. Закон гравитации является наблюдаемой истиной и как таковой он не точный. Это показывает, что опять мы имеем только приблизительное определение. Если мы предположим, что мы приняли бы другое средство измерений времени, то эксперименты, основанные на Ньютоновском законе гравитации, имели бы то же самое значение. Это только предположение того, что закон изменился бы, на самом деле он бы просто трактовался на другом языке. Он, очевидно, был бы менее простой. Определение, одобренное астрономами, может быть обобщено в следующем виде: время должно быть определено таким способом, чтобы уравнения механики стали как можно проще. Другими словами нет наиболее правильного способа измерения времени по сравнению со всеми другими способами. То, что общепринято, просто наиболее удобно.*

Таким образом, мы имеем дело с двумя определениями для измерения времени, а именно: время, исходящее из воспроизводимости локальных явлений; и время, исходящее из классической динамики. Являются ли эти два определения эквивалентными?

До начала 20 века не предполагали, что любое из этих определений приведет к представлению об одинаковом абсолютном времени, и будет отличаться только уровнем качества. Однако потом на сцене появилась эйнштейновская теория относительности. Согласно этой теории только локальное время может быть непосредственно измерено часами. Другими словами, это и есть *собственное время* этих часов или наблюдателя, находящегося в непосредственной близости от них. Время, которое теперь представляет уравнения движения простыми (или, по крайней мере, менее сложными), в расширенной области пространства, включая, например, Солнечную Систему, является просто координатой, выбранной свободно за те ее достоинства, что она просто под руками и никакая

физическая реальность ей не приписывается. Это есть *координатное время* в произвольно выбранной системе пространственно-временных координат. Мы вернемся к этим вопросам в главе 3. Их возрастающая практическая важность связана с прогрессом в развитии времени. Давайте просто иметь ввиду то, что для наших общих целей существуют теоретические соотношения между собственным временем наблюдателя и временем в различных системах координат, которые он должен определить.

Следовательно, метрология времени состоит в обеспечении практически приемлемыми представлениями:

- для единицы собственного времени, используемой любым наблюдателем для локальных экспериментов и наблюдений (даже если они относятся к удаленным объектам);
- для различных координатных времен, полезных астрономам, геодезистам, инженерам, занятым определением орбит спутников или, говоря короче, всем тем, кому требуются точные модели в пространстве, гораздо большем, чем лаборатория.

Коль скоро мы приняли теоретическую динамическую модель, удовлетворительную в том смысле, что еще не было получено успешных экспериментов, доказывающих ее неправильность, то метрология времени может быть основана или на экспериментальных определениях координированного времени, или на локальных измерениях. Хотя оба метода теоретически эквивалентны, они отличаются по своим результатам до такой степени, что в 1960 г. был поднят вопрос, а не лучше ли основать единицу времени на атомных свойствах (наблюдаемых локально), а определение шкалы времени оставить астрономии. Это есть тот практический аспект, к которому мы сейчас вернемся.

## 2.4. Два способа измерения времени

Мы больше не будем отличать локальные эксперименты от экспериментов в больших масштабах пространства, т.к. мы приняли, что существует подходящая, всеохватывающая теоретическая канва. Следующее обсуждение должно быть понятно в знакомом контексте классической физики и динамики. В духе этой работы оно относится к основам метрологии: как определить секунду и как определить шкалу времени, используемую в качестве первичного эталона времени. В этой части мы исследуем два способа метрологии времени в зависимости от того или мы начнем с явления, которое каждый может воспроизвести в своей лаборатории, или от шкалы времени, данной нам истинным движением небесных тел.

### 2.4.1. Использование воспроизводимости

Явление, принятое за эталон, должно быть определено таким способом, чтобы его длительность могла бы рассматриваться как идеальная константа. Это значит, что мы должны быть способны оговорить строго одни и те же условия, иначе мы окажемся в положении, заставляющем нас исключить любую причину, которая может рассматриваться как возмущение. Секунда, определенная как оговоренное число эталонных периодов, является в этом случае идеальным эталоном промежутка времени. Естественно, секунды фактически реализуемые, отличаются от идеальных секунд. Эти отличия могут быть предельно уменьшены путем усреднения во времени. Но так как они не независимы для последующих секунд и они не усредняются к нулю, то существует оптимальный период усреднения, за пределами которого ничего не может быть улучшено. (Мы вернемся к этим статистическим проблемам, когда будем обсуждать стабильность осцилляторов в главе 5). Возможно так же усреднение секунд, реализованных в разных лабораториях.

Как только такие усреднения были приняты, так сразу же в итоговой секунде появились неопределенности от двух источников:

- экспериментальные неопределенности каждой лаборатории, с которыми обычно ничего нельзя поделать потому, что сам по себе эксперимент был в прошлом, и, что единственно возможные поправки связаны с обработкой, ошибки которой были выявлены позже, что случается редко;
- неопределенности из-за примененного способа усреднения, включая неопределенности из-за алгоритмов и сличений эталонов (например, проблема статистических весов).

В любом случае эти неопределенности остаются ограниченными. С годами они постепенно уменьшаются благодаря техническому прогрессу в приборостроении и лучшему пониманию основ явлений, позволяющих избавиться от причин, вызывающих возмущение.

Давайте рассмотрим, как можно сделать шкалу времени. Такая шкала получается путем сложения секунд в то, что иногда называется *интегрированная шкала времени*. Но коль скоро накапливаются секунды, также накапливаются и их ошибки. Потенциальное расхождение между реализованной шкалой и идеальной шкалой, созданной накоплениями идеальных секунд, непрерывно возрастает. В действительности расхождение вскоре принимает перекошенные пропорции. Например, в секунде, кото-



рая была получена в 2000 г. с неопределенностью порядка  $1 \times 10^{-15}$  с, расхождение может казаться совершенно ничтожным. Однако отсюда следует, что интегрированная шкала времени может отклониться на 1 микросекунду за 30 лет по сравнению с идеальной шкалой, которая была бы получена путем накопления строго точных (идеальных) секунд. Например, мы увидим позже, что прибытие импульсов от пульсара может колебаться в пределах 0,3 мкс. Расхождение между практической шкалой времени и идеальной шкалой времени может ограничить применение шкал времени, основанных на вращении этих объектов.

Давайте так же отметим два последствия выбора интегрированной шкалы времени как мирового эталона:

- Для того чтобы убедиться в долговечности шкалы и выбрать наилучшие из существующих эталонов для интервалов времени должно быть предпринято усреднение. Другими словами, используя техническую терминологию, мы должны установить алгоритмы для шкал времени. Различные алгоритмы, обеспечивают нас взаимно расходящимися шкалами времени и нет реального способа указать какой из алгоритмов лучше, а т.к. эталонная шкала времени должна быть единой, то результаты полученные различными институтами, должны быть согласованы.
- Людям свойственно ошибаться и ошибки эти тоже интегрируются. Они могут происходить из-за экспериментальных возмущений и сличений эталонов и влиять на передачу или централизованную обработку данных. В качестве практической меры запрещается изменять шкалу эталонов задним числом (все данные, приписанные прошлым событиям, могут быть фальсифицированы и такие подделки могут быть навсегда вписаны в историю).

И именно это явилось веской причиной того, что интегрированная шкала была непопулярна в 60-х годах, когда только начали устанавливаться первые экспериментальные шкалы, основанные на постулате воспроизводимости, примененном к частотам атомных переходов. Но преимущества атомного времени над астрономическим были подавляющими. И в 1971 г. атомная шкала, спустя 16 лет после создания первого цезиевого атомного стандарта, стала официальным временем, а цезиевый стандарт стал рабочим эталоном. Несмотря на нетерпение хранителей атомного времени, эти 16 лет, как все считают, были действительно коротким периодом для такого важного события.

### 2.4.2. Использование динамической модели

Основное движение небесных тел при их ежедневном прохождении по небу обусловлено вращением Земли. Однако период вращения Земли, хотя и очень слабо, но все же изменяется и поэтому не является строго воспроизводимым. И хотя количественно причины изменения периода известны, это не значит, что мы способны установить удовлетворительную динамическую модель этого явления. Мы вернемся к этому в главе 8, когда будем обсуждать Всемирное Время. А в настоящий момент рассмотрим динамику Солнечной Системы.

То, чего достигла теория – это эфемериды, дающие пространственные координаты небесных тел (планет и их спутников) как функции независимой переменной – времени, координированного времени теории. Для наших настоящих целей пространственные координаты должны быть геоцентрическими, в невращающейся системе, такой чтобы наблюдатель мог использовать только небольшие поправки на свое положение и скорость, чтобы учесть орбитальное движение и вращение Земли.

Измерение времени в этом случае очень простое, по крайней мере, в принципе. Координаты любого тела Солнечной Системы измеряются в некоторые моменты, которые мы засекаем с помощью часов. Тогда эфемериды дают данные, соответствующие этим координатам и выраженные через независимую переменную – время. Таким образом, из теории мы получаем время в форме поправок к показаниям часов. Операция повторяется столько раз, сколько надо (или возможно), а часы используются только для интерполяции между астрономическими наблюдениями.

Первичные данные таким образом образуют шкалу времени. Единица времени может быть определена как текущий интервал градуировки этой шкалы. Для возможности уточнения эфемерид мы можем также определить единицу времени как единичный временной интервал между двумя специфическими астрономическими событиями. В таком случае это есть просто одна из двух констант интегрирования уравнения движения (другая фиксирует момент начала отсчета времени) и эфемериды обеспечивают единственную физическую реализацию. Однако нечего и говорить, что это долгий путь от принципа до практики. Если мы действительно хотим получить единственную шкалу времени, мы должны учесть множество условий. Измерения должны относиться к одиночному астрономическому объекту, например Солнцу, Луне или чему-нибудь еще. Одна

из частных эфемерид должна служить в качестве опорной по соглашению. Различные измерения, относящиеся к единственным часам, должны быть проанализированы и обработаны организацией, которая отвечает за выдачу официального времени.

Учитывая все эти предосторожности, мы должны поднять вопрос об ошибках, влияющих на произведенную шкалу, т.е. ее отклонение от шкалы теоретического, идеального времени, за исключением линейной функции от времени, которая соответствует произвольному выбору единицы и начала отсчета времени.

- Наблюдательные ошибки, связанные с данными, ограничены (в противоположность с тем, что случается с интегрированным временем). Они могут быть уменьшены при дальнейшем техническом прогрессе. Отметим, что предпочтительнее выбирать небесные тела с быстрым истинным движением.
- Динамическая модель, в настоящее время – общая теория относительности, может быть поставлена под сомнение.
- Применение математической модели навлекает на себя ошибки, связанные с ограничением в количестве членов математических рядов или выполнением численного интегрирования. Однако следует заметить, что, так как наблюдения непрерывно выполняются, то существует возможность улучшения теории и применения ее таким способом, чтобы получить обновленную шкалу.
- И, наконец, наиболее важно то, что эфемериды подвержены ошибкам из-за начальных условий интегрирования, т.е. ошибкам, связанным с начальными положением и скоростью.

Последней в этом списке возникает логика. Как мы можем получить скорости, если мы не знаем, как сначала установить способ измерения времени? Именно этот вопрос занимал умы выдающихся астрономов, установивших *Эфемеридное Время* в первой половине двадцатого столетия. Не вникая в сложности их работы, мы можем сказать, что главная причина их успеха состоит в том счастливом обстоятельстве, что период вращения Земли вовсе не такой уж плохой эталон для интервала времени (включая относительные вариации на уровне от  $10^{-7}$  до  $10^{-8}$ ). Благодаря этому счастливому обстоятельству стало возможным установить уравнения движения и довольно точно измерить начальные скорости. Более того, так как орбитальные движения почти периодические или что-то в этом роде, то как только возникают вопросы по измерению времени, в теории привлекаются члены следующего порядка малости, неточность которых оказывает незначительный эффект на конечный результат.

В любом случае динамическое измерение времени покоится на части прошлых измерений, а их неопределенности затем скажутся в будущем. Преимущества обеспечения единственной шкалы, для которой была выбрана опорная эфемерида, до некоторой степени смазываются необходимостью ревизии эфемерид при накоплении прошлых наблюдений. Мы увидим в разделе 4.3 «Эфемеридное Время», что и другие проблемы препятствуют принятию этой меры времени в качестве практического мирового эталона.

Тем не менее, реализации времени, основанные на динамике и их долговременные сличения с часами, основанными на атомных свойствах, дают возможность проверки как динамической, так и атомной теорий. Например, спрашивается, действительно ли гравитационная постоянная является константой.