

Глава 1

Введение

Использование свойств атомов для применения времени зародилось в 1955 году, когда в Великобритании начал действовать на регулярной основе первый цезиевый стандарт частоты. Конечно к этому времени уже были испытаны другие атомные стандарты частоты. Однако они не были способны, как цезиевый стандарт частоты обеспечить более точную единицу времени и более равномерную шкалу времени по сравнению с этими величинами, основанными на движении небесных сил. Число цезиевых стандартов быстро возрастало, а их точность стремительно повышалась. Хорошее согласие между ними порождало уверенность и в 1967 году стало возможным принятие определения атомной секунды для замены прежнего астрономического определения. Несколько лет спустя существование адекватной атомной шкалы времени для применения в мировом масштабе было официально признано на 14 генеральной конференции по мерам и весам в 1971 году.

Несмотря на эти достижения более четверти века спустя измерения атомного времени все еще не стали привычными. Являлось ли это результатом глубоко укоренившейся привычки соизмерять нашу повседневную жизнь с движением небесных тел? Или это реакция на отсутствие романтичности в атомных часах и в их непостижимой точности? Может быть это и так. Но существуют и более объективные причины, которые делают трудным принятие атомного времени. Одна из этих причин заключается в необходимости формулирования измерений времени в рамках релятивистской теории относительности, а другая причина заключается в сложных соотношениях между атомным временем и временем, используемым астрономами в динамических теориях. Последняя проблема была предметом споров и дискуссий на протяжении более 10 лет и даже международный астрономический союз был не способен освободиться от призрачных надежд в своей резолюции, принятой в 1991 году. Недавно появились предположения, что открытие быстрых пульсаров, так называемых миллисекундных пульсаров, может вернуть измерения времени назад под юрисдикцию астрономии.

Тем временем в тиши своих лабораторий физики едва ли были восприимчивы к таким запросам. Последующий период относительного зстоя, который продолжался около 20 лет, внезапно завершился резким повышением точности стандартов частоты в 1994 году. Новая техника, позволившая получить такой рывок в точности, вселяет также надежды на прогресс в ближайшем будущем. С другой стороны мировая индустрия также не оказывается в стороне от прогресса. Производимые кварцевые генераторы и атомные стандарты частоты демонстрируют постоянное совершенствование. Наиболее популярными инструментами для фундаментальных метрологических исследований всегда были цезиевые часы и тысячи таких часов были произведены промышленностью. В 1994 году была создана промышленная модификация цезиевых часов имеющих десятикратное улучшение по всем эксплуатационным характеристикам по сравнению с предыдущими версиями часов.

Благодаря промышленным разработкам оборудования для измерения времени появились на свет очень важные применения техники время-частотных измерений. В качестве примера приведем систему определения положения GPS, которая начала функционировать в полном объеме в 1995 году. Эта система может удовлетворить нужды и представлять интерес для множества потенциальных пользователей от геодезистов, желающих представить всю планету с точностью до нескольких сантиметров, до праздношатающихся бродяг. Не забудем также и нужды военных, для которых эта система и была первоначально разработана.

Рассмотрение этих недавних достижений в уже хорошо испытанной технике атомного измерения времени и рассмотрение новых проблем, порождаемых таким стремительным улучшением качества, кажется совершенно подходящим моментом для представления основ измерения времени, а именно: основных принципов, конструкций лучших стандартов, способов сличения времени и частоты с предельно высокой точностью, способов оценки первичных стандартов, т.е. лучшей реализации секунды и международного атомного времени на наивысшем уровне точности. Кажется также полезным напомнить значение астрономических шкал времени, которые по ряду причин по-прежнему имеют важное значение.

Как мы уже упоминали фундаментальные измерения времени уже не могут быть представлены вне рамок релятивистской теории относительности. Вплоть до настоящего времени эйнштейновская теория относительности, простейшая из теорий относительности, всегда находилась в согласии с экспериментальными результатами. По этой причине мы примем ее в качестве нашей рабочей гипотезы. Однако в этом отношении мы должны оставить также некоторые оговорки. Вначале мы надеялись трак-

товать измерения времени в рамках классической физики, а затем указывать маленьким шрифтом, что было бы необходимо учесть в релятивистском истолковании. Но затем нам показалось, что этот метод рискован в том смысле, что обширный обзор общей теории относительности может рассматриваться как дополнение к классической теории, т.е. что релятивистская теория может рассматриваться как набор релятивистских поправок. В действительности релятивистская теория вместе с гравитационными эффектами является завершенной моделью структуры пространства и времени. Поэтому мы покажем полезные разработки непосредственно в контексте этой книги. Читатель, едва знакомый с этими вопросами, может тем не менее не волноваться, потому что для наибольшей простоты мы будем просто напоминать постулаты этой теории и их математические последствия.

Неизбежная линейность численных расчетов плохо подходит для множества взаимодействий между различными аспектами измерения времени. Представленное здесь краткое описание в различных частях книги направлено на ориентацию читателя в этих проблемах.

В главе 2 напоминаются основные принципы измерения времени в рассматриваемых здесь макроскопических явлениях. Вообще говоря это внимательный обзор и анализ постулатов Пуанкаре, важность которых простирается и на релятивистские аспекты.

В главе 3 показано, как измерения времени связаны с общей теорией относительности. В расширенном пространстве время является одним из элементов четырехмерной координатной системы и не может быть отделено от пространственных координат. Мы определим используемые координатные системы и установим некоторые уравнения, связывающие локальную физику с пространственно-временными координатами. Мы обсудим также соглашения по синхронизации и сличению разнесенных часов.

В главе 4 представлены исторические аспекты. В ней показано развитие измерений времени, в частности, развитие в двадцатом столетии. Мы обсудим идеи, которые стимулировали развитие техники и решение проблем, появившихся в результате перехода от астрономического к атомному измерению времени.

В главе 5 описаны инструменты и методы, привлекаемые в атомных стандартах и, в частности, методы представления метрологических характеристик и их сличений. Представление стабильности частоты привело к новым разработкам в статистике. Оно подводит к понятием серий измерений во времени и к определению вариаций, что позволяет многим производителям стандартов частоты и их пользователям говорить на общем языке. Представление точности частоты является также специфич-

ческой проблемой в измерениях времени хотя оно может быть расширено и на любые физические величины, единицы измерения которых основаны непосредственно на естественных явлениях, которые рассматриваются в качестве воспроизводимых явлений. Касаясь вопросов сличения частот и шкал времени на расстояниях мы увидим важность этого вопроса в том смысле, что здесь мы часто приходим к большим неопределенностям, чем неопределенности сличаемых величин.

В главе 6 объясняются принципы действия стандартов времени и частоты, называемых также атомными часами. Мы начнем с обзора на элементарном уровне основных идей атомной физики и спектроскопии, необходимых для понимания принципов работы этих стандартов и их основных особенностей. Существует несколько типов атомных часов, использующих некоторые переходы между атомными уровнями одного и того же типа, но в разных атомах, таких как цезий, рубидий или водород. Используются даже ионы, такие, например, как ион рутити. Именно разработанные цезиевые часы используются в метрологических лабораториях, в которых достигнута лучшая реализация определения секунды. Они являются первичными стандартами времени и частоты. Их главная особенность это точность. Промышленные цезиевые часы используются в относительно недорогом способе передачи и распространения времени, а следовательно, и самого атомного времени. Будут также представлены и другие типы атомных часов. Они были разработаны и созданы для применения в тех областях, где они подходят наилучшим образом. Некоторые из них громоздкие, но исключительно стабильные, в то время как другие менее стабильные, но очень компактные. В этой главе мы обратимся к принципам управления атомами с помощью лазерного излучения. Появившаяся недавно экспериментальная техника с помощью лазерного излучения позволяет замедлить и поймать атомы, прежде чем осуществить их запуск с очень низкой скоростью и очень хорошим управлением их траекторией. В 1996 году с помощью этой техники на новом типе стандарта была достигнута точность, превосходящая точность любых других первичных стандартов частоты и времени. Потенциал этого метода управления атомами в сочетании с исключительным международным сотрудничеством, к которому он привел, является надежной гарантией будущего улучшения характеристик атомных часов.

Глава 7 посвящена главным образом созданию единственной атомной шкалы времени, принятой по соглашению в качестве международного стандарта, а именно международного атомного времени (обозначаемого на всех языках как TAI от французского названия Temps atomic international). Мы рассмотрим, как с помощью международной кооперации стало возможным установить и поддерживать такую шкалу времени и исследо-

вать ее качество и способы ее распространения. Но мы также увидим, насколько был необходим компромисс при принятии в качестве практического стандарта шкалы времени, основанной на TAI и шкалы, изобретательно приспособленной к поддержанию связи с всемирным временем UT, определяемым вращением Земли. Этот гибрид известен как всемирное координированное время (официально обозначаемое акронимом UTC). Мы покажем, как так называемую собственную секунду, необходимую для работы лабораторий, можно получить из TAI или UTC.

В главе 8 даны определения различных астрономических времен для общего применения. Эти шкалы времени были постепенно разработаны путем наблюдения небесных тел на протяжении долгого периода истории. Их обычные определения несут в себе отпечаток исторического развития и соответственно что-то непонятное для тех, кто не знаком с астрономией. Таким образом мы приложили все усилия для того, чтобы показать основные концепции, на которых основаны астрономические рабочие определения. Мы исследуем назначения этих шкал времени. В частности, свидетельствующее о вращении Земли всемирное время, является очень важной величиной, требующей постоянных измерений. В действительности, усилия посвященные измерениям всемирного времени соизмеримы с усилиями, направленными на поддержание атомного времени. Что касается пульсаров, то хотя они и не обеспечивают хорошую меру времени, тем не менее их изучению препятствуют неопределенности атомного времени. Изучение пульсаров это одно из наиболее востребованных применений атомного времени.

В главе 9 представлены некоторые применения атомного времени, выбранные за их высочайший уровень требований к стандартам времени и частоты. Естественно что эти применения принадлежат к области фундаментальных исследований. Применение атомных стандартов в более утилитарных программах сопровождается определенной долей жертвенности в вопросах их предельных качеств в пользу повышения надежности и уменьшения стоимости. Однако более практичные инструменты иногда отстают совершенно незначительно от лабораторных приборов в тех случаях, когда необходима точность и стабильность. Хорошей иллюстрацией этому является система GPS. Так как все мы являемся прямыми или косвенными пользователями этих систем, то мы в какой-то степени коснемся деталей этих систем. Мы покажем также в качестве примера как соотносится измерение времени с космической океанографической миссией TOPEX/POSEIDON. В действительности мы увидим, что это подчеркивает многие аспекты этой миссии, основанные на высочайшем уровне качества.

И наконец глава 10 добавлена как практический пример применения измерений времени и частоты в навигационной системе GPS, которая стремительно развивается в направлении массового применения. Здесь даны более подробно физические основы и принципы действия системы GPS и рассмотрены некоторые области применения системы GPS.