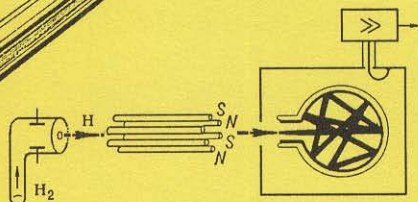
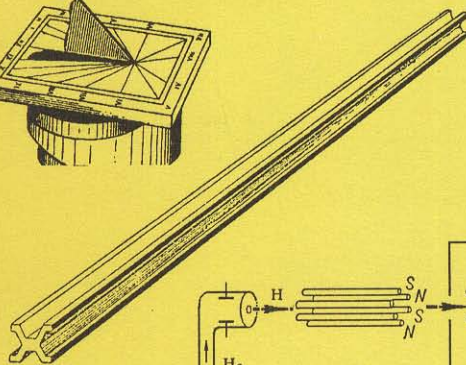
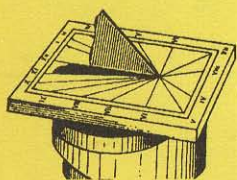


Е. И. Пальчиков

ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ,
ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ



У
Ч
Е
Б
Н
И
К

НСУ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Е. И. Пальчиков

ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

МЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МЕР.
ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ, ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ.
ЭТАЛОНЫ

Учебное пособие

Новосибирск
2001

ББК Ж101/102; Ж107.1/Ж107.7
УДК 389.1; 53.082.1+531.76

Пальчиков Е. И. Введение в технику физического эксперимента. Метрическая система мер. Измерение длины, времени и частоты. Эталоны: Учеб. пособие / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2001. 109 с.

ISBN 5-94356-028-9

В пособии изложен материал четырёх лекций курса введения в технику физического эксперимента, читаемого с 1989 г. для студентов первого курса физического факультета Новосибирского государственного университета. В сокращённом виде с 2000 г. курс читается также на факультете информационных технологий. Первые три лекции курса посвящены ошибкам измерений и статистической обработке результатов эксперимента. Эти темы изложены во многих известных монографиях и учебниках, поэтому в данном пособии они опущены. Следующие четыре лекции (№4 ÷ №7) представляют собой единый блок, посвящённый самым точным измерениям в экспериментальной физике (до 14 значимых десятичных разрядов). Информация по данной тематике рассеяна во множестве специальных публикаций и практически недоступна студенту.

Пособие рассчитано на научных работников, аспирантов и студентов естественнонаучных специальностей, интересующихся методами измерения времени, частоты, расстояний и координат. Материал лекций содержит большое количество справочной информации, по уровню изложения доступен школьникам старших классов.

Рецензент
к.ф.-м.н. Пивцов В. С.

Печатается по разрешению редакционно-издательского совета НГУ,
специальность «Физика»

© Интернет версия подготовлена для
сервера Физического факультета НГУ
<http://www.phys.nsu.ru>

ISBN 5-94356-028-9

© Новосибирский государственный
Университет, 2001

Введение

Знания об окружающем нас мире приобретаются посредством измерений. Чем точнее измерения, тем полнее наши знания.

Самыми первыми, примитивными, но регулярно проводимыми измерениями были измерения времени. Это диктовалось необходимостью правильной организации сельскохозяйственных работ и распределения рабочего времени в течение дня. Тогда же с развитием социальной структуры общества понадобилось всё более точное измерение площадей, расстояний, объёма и массы.

Важнейшей задачей экспериментальных научных исследований является обеспечение единства измерений, которое достигается путем точного воспроизведения, хранения и передачи единиц физических величин средствами измерений. Оно осуществляется с помощью поверочной схемы – метрологической цепи передачи размеров единиц, где высшим звеном являются эталоны (стандарты). Такие схемы должны существовать для каждого вида измерений.

Исторически, в начале создания системы эталонов наиболее востребованными являлись эталоны длины и массы. По-видимому, это было связано с потребностями торговли и производства. С развитием промышленности, естественных наук и точной навигации увеличилась потребность в более точном измерении времени. В настоящее время среди шести основных единиц физических величин в практической деятельности чаще используются единицы длины и частоты (времени). Эталоны этих единиц наиболее точны и воспроизводимы.

С 1960 г. действующей системой единиц является СИ (SI – Systeme International, Система Интернациональная). В неё входит шесть основных единиц:

- а) длины – метр;
- б) массы – килограмм;
- в) времени – секунда;
- г) силы электрического тока – ампер;
- д) термодинамической температуры – градус Кельвина;
- е) силы света – свеча

и две дополнительных единицы:

- ж) плоского угла – радиан;
- з) телесного угла – стерadian.

Первые три единицы системы служат для образования производных единиц в области механики и акустики. В дополнение к ним для образования электрических и магнитных единиц служит ампер, для образования тепловых единиц – градус Кельвина и световых – свеча. В настоящее время в метрологический ГОСТ России включено 27 производных единиц.

В данном учебном пособии рассмотрены два вида единиц, способы их измерения и эволюция их эталонов. Это длина и время (частота). Измерение именно этих величин даёт в настоящее время самую высокую точность результатов в экспериментальных исследованиях.

Лекции № 4 - 5

Измерение расстояний и эталоны длины

Ах, как опаздываю я – почти что на день целый.

За два кило пути я на два метра похудел...

(В. С. Высоцкий, песня Белого Кролика
к сказке «Алиса в стране чудес»)

Краткий исторический обзор

1. Метрическая система мер (МСМ) предложена во времена Французской революции 1791 г. (подробнее о введении МСМ см. приложение № 1 и книги [1, 2]).

Предлагаемая единица – 1 метр – должна была составить $1/40000000$ часть Парижского меридиана. Уже после изготовления эталона, в 1799 г. была обнаружена ошибка измерения длины меридиана, а также было показано, что размеры Земли являются ненадежной основой для единицы длины. Несмотря на это, изготовленный в Париже метр был рекомендован в 1867 году Международной геодезической конференцией в качестве прототипа для изготовления нового Европейского эталона метра.

2. В 1875 г. 17 стран (в том числе и Россия) подписали метрическую конвенцию.

3. МСМ в России допущена 4 июня 1899 г. Проект разрабатывал Д. И. Менделеев.

4. МСМ введена обязательной в России с 14 сентября 1918 г. (Декрет СНК РСФСР).

5. МСМ введена обязательной в СССР 21 июля 1925 г.

6. До введения метрической системы мер в России были приняты следующие единицы длины:

а) 1 вершок = 44,45 мм = $\frac{7}{4}$ дюйма;

б) 1 аршин = 16 вершков = 28 дюймов = 0,7112 м = $2\frac{1}{3}$ фута;

в) 1 сажень = 48 вершков = 3 аршина = 2,1336 м = 84 дюйма =
= 7 футов;

г) 1 верста = 500 саженей = 1066,8 м.

Легко видеть, что верста мало отличается от километра. Также десятина (квадрат со стороной в $1/10$ версты) мало отличается от гектара. Возможно это в какой-то мере снизило психологический барьер принятия метрической системы мер в России.

7. В 1889 г. был изготовлено 30 эталонов метра. России передали эталоны номер 11 и 28. Точность эталонов составляла $0,2 - 0,3$ мкм. С такой среднеквадратичной ошибкой можно измерять и сличать длины оптическими методами на штриховых эталонах.

8. До 1960 г. в России именно эталон номер 28 был эталоном метра. При этом в последние годы вторичные эталоны изготавливались в виде концевых мер, что позволяло увеличить точность по сравнению со штриховыми мерами. (Подробнее о концевых мерах см. приложение № 2).

9. Обращение к эталону неизбежно приводило к снижению его эталонных свойств. Предполагают также, что из-за перекристаллизации материала за полвека эталон укоротился на $0,5$ мкм. Вместе с тем росли требования к точности измерения длины, которые вынудили со временем искать естественный и неразрушимый эталон. Появление в начале XX века интерферометра Майкельсона (подробнее см. Приложение № 3 «Интерферометры») и практических работ по интерференции дало возможность выражать длину отрезка через число укладывающихся на нем длин волн. Точность измерений и значение длины, которую можно было измерить, определяли источники монохроматического излучения. Наибольшей длиной когерентности (200 мм) среди известных тогда источников излучения обладала линия кадмия $0,6438$ мкм, ставшая первым стандартом длин волн.

Для измерения и сравнения длин волн более популярным стал интерферометр Фабри – Перо (подробнее см. Приложение № 3 «Интерферометры»).

В 1895 г. был предложен, а с 1927 г. уточнен промежуточный эталон – «естественный свидетель прототипа метра» в виде длины волны красной линии кадмия $\lambda = 0,64384696$ микрона. Соответственно $1 \text{ м} = 1553164,13 \cdot \lambda$. Длина когерентности линии кадмия не позволяла непосредственно измерять длины, большие 200 мм.

10. Успехи в разделении изотопов позволили увеличить монохроматичность спектральных линий, а фотоэлектрические методы регистрации позволили считать большое число длин волн автома-

тически. Поэтому с 1960 года 11 Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение метра, связанное с квантовым переходом в атоме, точнее – с длиной волны излучения λ для квантового перехода $2p_{10} - 5d_5$ изотопов атомов криптона ^{86}Kr :

$$1 \text{ метр} = 1 \text{ м} = 1650763,73 \cdot \lambda \text{ в вакууме.}$$

Свет тлеющего разряда в изотопе криптона-86 обладает большей длиной когерентности (600 м) и интенсивностью излучения по сравнению с линией кадмия.

Точность воспроизведения единицы длины улучшилась примерно на порядок по сравнению с первым эталоном – среднеквадратичное отклонение $\leq 10^{-8}$ м, что составляет 1/10 длины световой волны $\lambda = 605,78021 \text{ нм} = 6057,8021 \text{ \AA}$.

Первичный эталон стало возможным воспроизводить независимо в любой лаборатории.

Сравнение эталонов

Наиболее точные измерения и сравнения эталонов производятся с помощью интерферометров. Для сравнения концевых мер применяются полосы равной толщины (пример

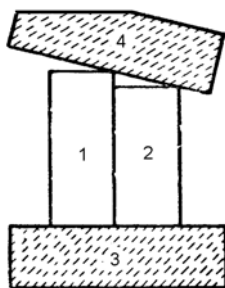


Рис.1. Сравнение концевых мер

таких полос – кольца Ньютона, радужные пленки на воде). Принцип сравнения показан на рис. 1. Нижние концы эталонных концевых мер 1, 2 притираются к очень ровной плоской поверхности стеклянной пластины 3, на верхние концы кладётся стеклянная пластина 4 и сверху освещается монохроматическим светом (например, отфильтрованным светом одной из линий ртутной лампы). Если концевые меры различаются в длине, то между торцами мер и стеклянной пластиной образуется клиновидный воздушный

зазор и непосредственно глазом видны интерференционные полосы, соединяющие участки поверхности с равной толщиной зазора. Каждая полоса соответствует разнице зазора, равной половине длины световой волны того света, который используется для наблюдения.

Верхняя пластина имеет сильно скошенный край, чтобы непосредственно на верхней пластине не возникали видимые паразитные интерференционные полосы, мешающие наблюдению, а также, чтобы имела возможность раздельно отстроиться от наблюдения бликов на гранях пластины. У верхней и нижней пластины качество поверхности должно быть достаточно высоким – отклонение от плоскостности должно быть в пределах $1/10$ длины световой волны.

Для сравнения длин эталонов, длин волн излучения для разных квантовых переходов и сверхточных измерений длины применяются полосы равного наклона. При этом наиболее часто используются интерферометры Майкельсона и Фабри – Перо (см. Приложение № 3 «Интерферометры», [3]).

Для абсолютного измерения и сравнения длин волн источников монохроматического света применяется спектро-интерферометр Фабри – Перо, показанный на рис. 2 а. Такой спектро-интерферометр входит в состав первичного эталона единицы длины – метра. Одно из зеркал интерферометра Фабри – Перо 5 перемещается с высокой точностью так, чтобы между зеркалами укладывалось целое число длин волн эталонного источника 1. После этого в интерферометр направляется излучение источника 2, длину волны которого следует измерить. Чтобы получить максимальную интенсивность излучения, падающего на фотоприемник, т. е. настроиться на максимум интерференционной картины, когда целое число волн укладывается на длине интерферометра, следует немного изменить длину интерферометра. Это изменение равно дробной части волны. Иначе говоря, сравнивая исследуемое излучение с излучением эталонного источника, определяют дробную часть порядка интерференции. Целое число порядков (длин волн) определяют с помощью нескольких линий излучения. При сильно различающихся длинах волн возможно одновременное освещение источниками 1, 2 интерферометра 5 через полупрозрачное зеркало 3 с одновременной (раздельной для каждого источника) регистрацией количества максимумов, наблюдаемых при изменении длины интерферометра. Многолучевой характер интерференции в интерферометре Фабри – Перо приводит к тому, что световые полосы становятся узкими и позволяют легко замечать разности хода порядка $1/100 \lambda$. Соответственно, плоскостность зеркал интерферометра должна быть не хуже указанной величины.

Интерферометр Майкельсона (см. рис. 2 б) применяется для особо точных измерений расстояний в пределах от 1 мкм до нескольких метров. Он состоит из излучателя света 1 (в измерительных комплексах, как правило, He-Ne лазера), двух непрозрачных (8, 9) и одного полупрозрачного (3) плоских зеркал. При точной настройке в удаленной зоне на экране вблизи фотоприёмника 6 наблюдаются полосы в виде концентрических колец (если освещающий пучок непараллельный). Для измерения перемещений зеркала 9 применяется фотоприемник 6, который измеряет количество пробегающих полос на краю интерференционной картины или число миганий светового пятна в центре картины. Число миганий света, подсчитанное электронным счетчиком, равно числу половинок длин волн,

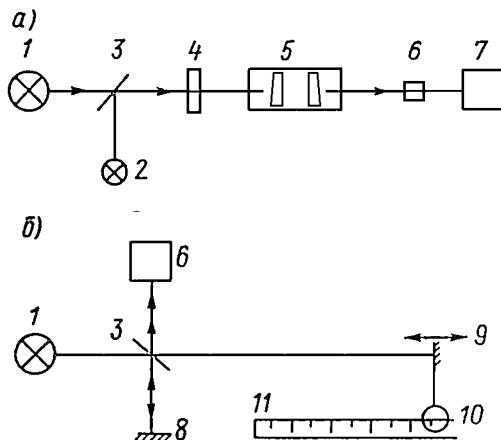


Рис. 2. а) схема измерения длины волны (отношения длин волн);

б) схема измерения длины (расстояния между штрихами):

1 и 2 – эталонный и проверяемый источники излучения; 3 – полупрозрачное зеркало; 4 – дифракционная решётка; 5 – интерферометр Фабри – Перо в вакуумной камере; 6 – фотоприёмник; 7 – индикатор; 8 – неподвижное зеркало; 9 – подвижное зеркало с микроскопом (10); 11 – штриховая мера

на которое сдвинулось зеркало 9. Измерение длины между штрихами штриховых мер производят следующим образом. Излучение источника света 1, длина волны которого измерена описанным ранее

спектро-интерферометром Фабри – Перо, подается в интерферометр Майкельсона. Подвижное зеркало 9 жёстко соединено с микроскопом 10. Последний наводится на штрих, затем зеркало перемещается и микроскоп наводится на следующий штрих. Расстояние между ними характеризуется числом интерференционных полос, пробежавших перед щелью фотоприемника при перемещении зеркала от одного штриха к другому. Возможен другой вариант: подвижное зеркало связано с мерой, а микроскоп неподвижен.

Точность данных методов зависит в первую очередь от стабильности и воспроизводимости длины волны источника света λ . Для He-Ne лазера без специальной стабилизации частоты она определяется шириной доплеровского контура спектральной линии $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-6}$, зависящей от скорости движения молекул в лазерной трубке.

Таким образом, в любой лаборатории можно с простейшим лазером измерять довольно точно длины от считанных микронов до размеров комнаты, взяв $\lambda = 0,63282$ мкм с учётом поправки на показатель преломления воздуха (соответственно в вакууме $\lambda = 0,63299$ мкм). Промышленные He-Ne лазеры со стабилизацией частоты методом привязки к симметричному по форме профилю доплеровского контура (такие, как ЛГН-303) имеют нестабильность частоты порядка 10^{-9} в интервале времени 1÷10 с.

Переход к лазерным источникам света

Согласно очередному (новому) определению метра эталонной величиной стала длина волны. По мере передачи размеров единицы средствами измерений, точность, естественно, падает, поэтому, чтобы иметь на производстве точные измерительные средства, следовало обеспечить точность эталона на несколько порядков выше. В связи с этим по мере совершенствования производства росли требования к эталонной базе.

В результате исследований воспроизводимости максимума указанной выше линии ^{86}Kr , излучаемой эталонными газоразрядными лампами, в 1973 г. на 5-й сессии Международного консультативного комитета по определению метра (МККМ) величина относительной погрешности воспроизведения длины волны была установлена равной $4 \cdot 10^{-9}$. Было отмечено, что дальнейшее повышение воспро-

изводимости единицы длины волны возможно путем перехода к длинам волн стабилизированных газоразрядных лазеров. На сессии было также отмечено, что длины волны HeNe лазера, стабилизи-

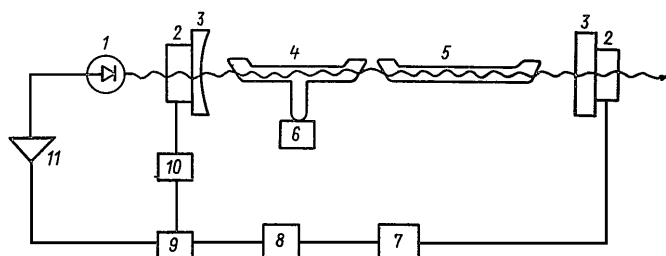


Рис. 3. Функциональная схема He-Ne/I₂ лазера:

1 – фотоприёмник; 2 – пьезоэлементы; 3 – зеркала; 4 – поглощающая ячейка с йодом; 5 – активный элемент; 6 – регулятор температуры отро-стка ячейки; 7 – опорный генератор; 8 – умножитель (утроитель) частоты; 9 – синхронный детектор; 10 – интегратор и УПТ; 11 – усилитель

рованного по насыщенному поглощению в молекулярном йоде $^{127}\text{I}_2$ ($R(127)$, полоса 11 – 5, i – компонента) – $\lambda = 0,632991399$ мкм и стабилизированного по насыщенному поглощению в метане CH_4 ($P(7)$, полоса ν_3) – $\lambda = 3,39223149$ мкм, воспроизводятся точнее, чем длина волны ^{86}Kr и необходим переход на новое определение метра на основе излучения этих лазеров.

В упомянутых лазерах внутри резонатора помещаются поглощающие ячейки с парами йода или метаном. Блок-схема таких ла-

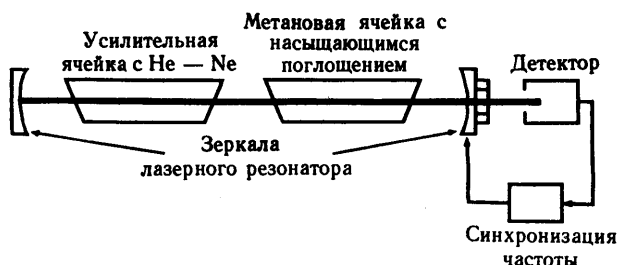


Рис. 4. Упрощенная функциональная схема He-Ne/CH₄ лазера

зеров показана на рис. 3 и 4. Инфракрасная линия на порядок точнее видимой. В настоящее время на ней достигнуты самая низкая в

оптическом диапазоне погрешность воспроизведения (10^{-14}) и нестабильность (10^{-15} , $\tau = 100$ с).

Новое определение метра

После появления стабилизированных газоразрядных лазеров метрологи различных стран в течение пятнадцати лет изучали возможность перехода на новое определение метра. В 1950-х гг. появились квантовые меры частоты (пассивные атомно-лучевые стандарты и генераторы линий – мазеры), в которых достигнутые значения стабильности и воспроизводимости частот были выше или одного порядка со стабильностью лазеров. В результате проведенных исследований с помощью квантовых мер времени и частоты были непосредственно измерены частоты оптических квантовых генераторов. Особо точное сопоставление длин волн (частот) источников света производилось измерением разностной частоты (биений) при смешивании двух близко расположенных спектральных линий (частот) на нелинейном элементе (аналоге полупроводникового диода в радиотехнике или нелинейной среды в оптике). Для возможности счета с помощью электронных частотомеров разница частот должна лежать в радиодиапазоне. С помощью *радиооптического частотного моста* стал возможен переход от атомных эталонов времени и частоты к частотам эталонных лазеров [4]. Более подробно о радиооптическом мосте рассказано в приложении № 4.

В октябре 1983 г. 17-я Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение метра: «Метр – это длина, проходимая светом в вакууме за $1/299792458$ долю секунды». Данное в 1960 г. определение не позволяло воспроизводить метр с достаточной точностью для всех, решаемых в эти годы, задач. Излучение стабилизированных газоразрядных лазеров лучше воспроизводится и более удобно для использования, чем спонтанное излучение криптона-86. Достижения в измерении частот и длин волн лазеров позволили определить скорость света $c = 299792458$ м/с, точность измерения которой ограничивается воспроизводимостью метра в прежнем определении. Таким образом, скорость света с 1983 г. была зафиксирована и более точное её определение потеряло смысл. Значения длин волн, полученные через измерение частоты и указанную скорость света, обладают меньшей погрешностью, чем та,

которая достигается сличением с длиной волны криптона – 86. В соответствии с новым определением метра приняты рекомендации по его практической реализации.

Данное определение позволяет измерить расстояние l с привязкой к эталону метра тремя различными способами:

1) измеряя **время** распространения электромагнитной волны по соотношению $l = ct$;

2) измеряя **частоту** электромагнитной волны, которая укладывается на измеряемой дистанции $l = \lambda = c/v$;

3) измеряя **число длин волн** одного из рекомендованных лазеров, которое укладывается на измеряемой дистанции $l = n\lambda = nc/v$.

Предложенное определение метра дало возможность по-новому взглянуть на то, что длина и частота не являются независимыми величинами. Длина волны зависит от оптического пути (а в него, как известно, входит показатель преломления среды), в то время как частота не зависит от него. Частота измеряется с точностью, на несколько порядков превосходящей точность измерения длины, поэтому предложено фактически отказаться от стандарта длины, определяя длину через частоту. При этом появляется возможность существенно повысить точность измерения длины. Единый эталон явится стандартом частоты, излучение которого может быть использовано для измерения длины.

В таблице 1 приведены параметры эталонных лазеров, рекомендованных 17-й Генеральной конференцией по мерам и весам для воспроизведения эталона метра. Погрешности воспроизведения частот и длин волн, приведенные в таблице 1, выше, чем это докладывалось в реально проводимых в то время работах. Международные сличения показали, что воспроизводимость от прибора к прибору различной конструкции заметно хуже, чем воспроизводимость от включения к включению одного прибора. Погрешности, указанные в таблице, в результате исследований ближайших лет уменьшились на несколько порядков.

Последнее определение метра принято в довольно общей форме, которое позволит ему просуществовать дольше, чем предыдущее.

Международные сличения эталонов должны проводиться раз в 25 лет. Несмотря на высокую воспроизводимость длины в каждом

конкретном эталоне и еще большую стабильность, при сличении разных эталонов часто обнаруживаются расхождения в 11÷12 знаке.

Таблица 1
Параметры эталонных лазеров (1983 г.)

Лазер	Частота, МГц	Длина волны, мкм	Погрешность
He-Ne / CH ₄ - лазер ν_3 , $P(7)$, F_2^2 - [компонента метана]	88376181,608	3,3922313970	$1,3 \cdot 10^{-10}$
He-Ne / $^{127}\text{I}_2$ - лазер линия R (127), 5-11, пик i йода	473612214,8	0,6329913981	$1,1 \cdot 10^{-9}$
He-Ne / $^{127}\text{I}_2$ - лазер линия R (47), 2-9, пик O йода	489880355,1	0.6119707698	$1,1 \cdot 10^{-9}$
Вторая гармоника He-Ne / $^{127}\text{I}_2$ - лазера линия P (62), 1-17, пик O йода	520206808,51	0,57629476027	$6 \cdot 10^{-10}$
Ar / $^{127}\text{I}_2$ - лазер линия P (13), 0-43, пик a_3 йода	582490603,6	0,5146734662	$1,3 \cdot 10^{-9}$

Шкала расстояний

Шкала расстояний, доступных для измерения различными методами, показана на развороте стр. 18 – 19 (рис. 5). Обычными концевыми мерами, щупами, линейками, рулетками, микрометрическими винтами, и рукоятками подачи обрабатывающих станков измеряются и отсчитываются дистанции от 1 мкм до 10 м. Их точность определяется оптическими методами сличения приборов с эталонами. В свою очередь, возможности оптических микроскопов и интерферо-

метров ограничены снизу длиной световой волны. Использование излучения с меньшей длиной волны – рентгеновских квантов и электронов – позволяет измерять и видеть объекты вплоть до ангстремных величин. Внесистемная единица 1 ангстрем равна $1\text{\AA} = 10^{-10}$ м. Кроме электронной микроскопии электронные пучки можно использовать для изготовления субмикронных деталей сложной формы (менее 0,1 мкм) методом электронной литографии. Если направить пучок электронов или рентгеновских квантов на кристалл и измерять углы дифракции отраженных или прошедших пучков, то можно измерять расстояния между кристаллическими плоскостями с точностью порядка 10^{-12} см или 0,0001 ангстрема.

Для измерения объектов еще меньшего размера необходимо уменьшать длину волны излучения, что собственно и делается в ускорителях, когда элементарные частицы разгоняются до высоких энергий. Например, энергии частицы $E = 1000$ ГэВ соответствует длина волны де Бройля $\lambda = h/P = hc/E \approx 1,2 \cdot 10^{-18}$ м, где h – постоянная Планка, c – скорость света, P – импульс частицы. Сильное взаимодействие, удерживающее протоны и нейтроны в ядре¹, действует на расстояниях, не превышающих по порядку величины 10^{-15} м. Слабое взаимодействие, ответственное за радиоактивный распад, действует на расстояниях, меньших 10^{-17} м. Соответственно энергии W - и Z -частиц, передающих слабое взаимодействие, равны 82 ГэВ и 92 ГэВ. Характерным для слабого взаимодействия считается расстояние $\sim 2 \cdot 10^{-18}$ м – комптоновская длина волны W - и Z -бозонов. Комптоновской длиной волны λ_0 частицы массы m называется величина $\lambda_0 = \hbar/mc$, определяющая изменение длины волны $\Delta\lambda$ электромагнитного излучения при рассеянии волны на частице. Комптоновскую длину волны можно определить также как расстояние, на которое может удалиться виртуальная частица массы m от места своего рождения. Для электрона комптоновская длина волны $\lambda_e = \hbar/m_e c \approx 3,9 \cdot 10^{-13}$ м. На расстояниях, меньших λ_e , возможно виртуальное рождение электрон-позитронных пар и экранировка заряда электрона за счёт эффекта поляризации вакуума. Радиус действия ядерных сил $\sim 10^{-15}$ м, определяемый самыми лёгкими из виртуаль-

¹ Радиус ядра описывается приближённой формулой $R = R_0 \cdot (N)^{1/3}$, где N – число нуклонов (протонов и нейтронов), а $R_0 = 1,2 \cdot 10^{-15}$ м = 1,2 ферми-метров = 1,2 Ферми.

ных адронов – π -мезонами, по порядку величины примерно равен комптоновской длине волны π -мезонов. С уменьшением расстояний между взаимодействующими частицами электрический заряд растёт (за счёт уменьшения экранировки вакуумом), а цветовой заряд, отвечающий за сильное взаимодействие – уменьшается. Это создаёт надежду, что на малых расстояниях, порядка 10^{-31} м, электрослабые и сильные взаимодействия могут иметь общую природу. Так как для экспериментальной проверки требуются ускорители с энергией частиц более 10^{14} ГэВ, то пока это является частью теоретической модели Великого Объединения всех калибровочных полей. Поэтому этот порядок величин на шкале не показан.

Автоионный микроскоп и сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) работают в интервале расстояний от 0,1 до 1000 ангстрем ($10^{-11} \div 10^{-7}$ м) и измеряют не столько расстояния между объектами, сколько пространственно-энергетическое распределение эмитированных ионов и туннелирующих электронов. Тем не менее, при работе СТМ с помощью пьезокерамики осуществляется прецизионное перемещение макроскопических объектов – измерительной головки с зондом. Ещё меньшие расстояния могут быть измерены при исследовании перемещений Δl такого крупного объекта, как зеркало лазера для малых интервалов времени τ . Точность в данном случае зависит от стабильности частоты лазера и квантово-механических ограничений

$$\Delta l \geq (2\pi\hbar\tau/m)^{1/2},$$

где m – масса зеркала, $\hbar$ – постоянная Планка. В работе [5] приводятся пример измерения l таким способом в интервале от $4 \cdot 10^{-18}$ м до 10^{-7} м. Установка достаточно сложна как идейно, так и конструктивно. Для контроля перемещения используется измерение частоты биений трех лазеров – двух измерительных и одного эталонного. Следует обратить внимание, что для пассивного интерферометра порог чувствительности к перемещениям гораздо хуже и составляет $10^{-13} \div 10^{-14}$ м при базе (расстоянии между зеркалами) порядка 1 м. Ограничение связано с шумами и минимальной энергией детектирования.

В случае газообразных, жидких сред и плазмы объекты (атомы, молекулы, частицы) постоянно находятся в движении. Поэтому расстояния измеряются косвенными методами – из количества частиц, объёма среды, давления среды на стенку и т. д. Расстояние, ко-

торое в нормальных условиях пробегает молекула воздуха до столкновения с другой молекулой воздуха $l_{np} \sim 10^{-7}$ м примерно в 100 раз больше среднего расстояния между молекулами $l_{атм} \sim 10^{-9}$ м. Длина свободного пробега электронов в металле определяется количеством кристаллических дефектов и составляет $l_{эл} \sim 10^{-8}$ м.

Некоторые расстояния, такие как разницы длин волн в спектроскопических измерениях, носят условный характер и их не стоит отождествлять с размерами конкретных физических объектов.

Для дистанций от 0,1 мм до сотен километров имеется ряд методов, основанных на использовании триангуляции и оптических приборов с точными угловыми и линейными шкалами – теодолитов, секстанов, катетометров, гониометров. Эти методы используются для геодезии, картографии, навигации и астрономии, при точном монтаже крупных технических объектов (таких, как самолёты, корабли, мосты, тоннели и т. д.). Триангуляцией называется нахождение длины одной из сторон треугольника, когда известны три других параметра того же треугольника, среди которых обязательно должна быть длина. При этом форма треугольника и углы выбираются таким образом, чтобы эту длину можно было измерить непосредственно эталонной мерой – линейкой, рулеткой или микровинтом, либо сравнить с размерами точно измеренного подобного треугольника. Процесс аэрофотосъемки и фотосъемки из космоса является также разновидностью триангуляционного метода. Методы радио- и оптической локации применяются для расстояний от 1 м до межпланетных. Законы небесной механики и астронавигации позволяют очень точно измерять расстояния между объектами в пределах Солнечной системы и даже делать оценки расстояний для гораздо более крупных объектов. Как мы увидим в следующих лекциях, точность астрономических измерений в первую очередь зависит от точности измерений времени.

Показанные на шкале пределы расстояний являются характерными – такими, какие чаще всего используются в повседневной практике. Многие пределы могут быть расширены, как это показано пунктиром для законов небесной механики и методов навигации и картографии. Широко применяемые в настоящее время спутниковые глобальные навигационные системы (GPS) являются синтезом астронавигации, радиолокации и геодезии. Они позволяют измерять расстояния в интервале от 1 м до размеров Земли. Область радиоло-

кационных измерений может быть расширена за счёт активной ретрансляции сигнала. Это обычно происходит при посылке межпланетных зондов. В сторону меньших размеров известны случаи применения оптической локации для измерения размеров объектов ~ 30 мкм. Данные параметры достигнуты при оптической когерентной локации фемтосекундными импульсами света, когда различаются отдельные слои клеток биологических тканей.

Чтобы не усложнять восприятие, некоторые методы не отражены на шкале. Например, акустическая локация должна занять интервал от 10^{-3} до 10^4 м. Интервал может быть расширен до размеров Земли, если включить в него методики сейсмического зондирования.

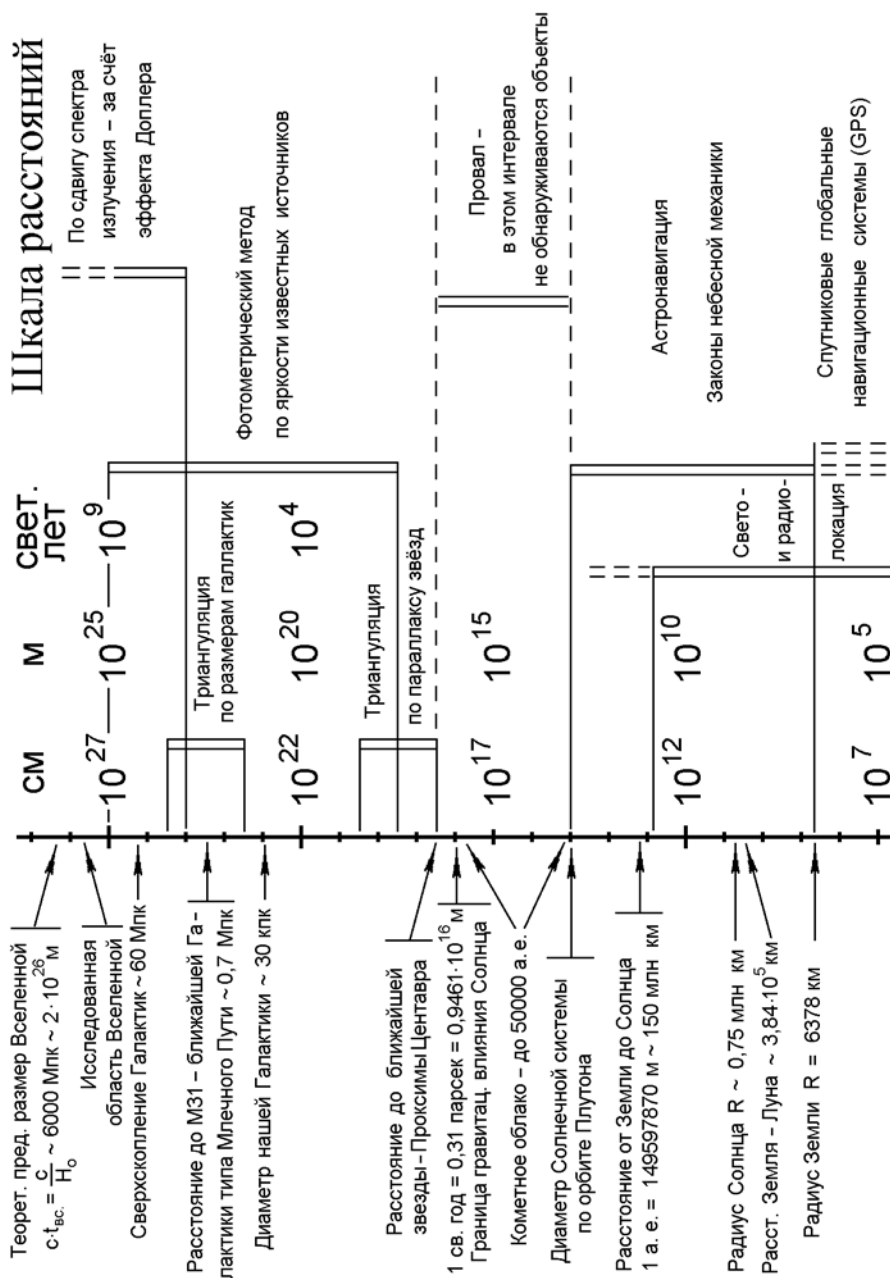
Следует отметить, что для областей активной повседневной и технологической деятельности человека в интервале от 10^{-10} м до 10^7 м число независимых методик для измерения расстояния больше, чем для остальных участков шкалы. На границах шкалы количество методов измерения уменьшается. При этом, как правило, применяются не прямые, косвенные методы – эффект Доплера и некая модель Вселенной, подсчёт координат, направлений и количества вылетевших элементарных частиц и т. д.

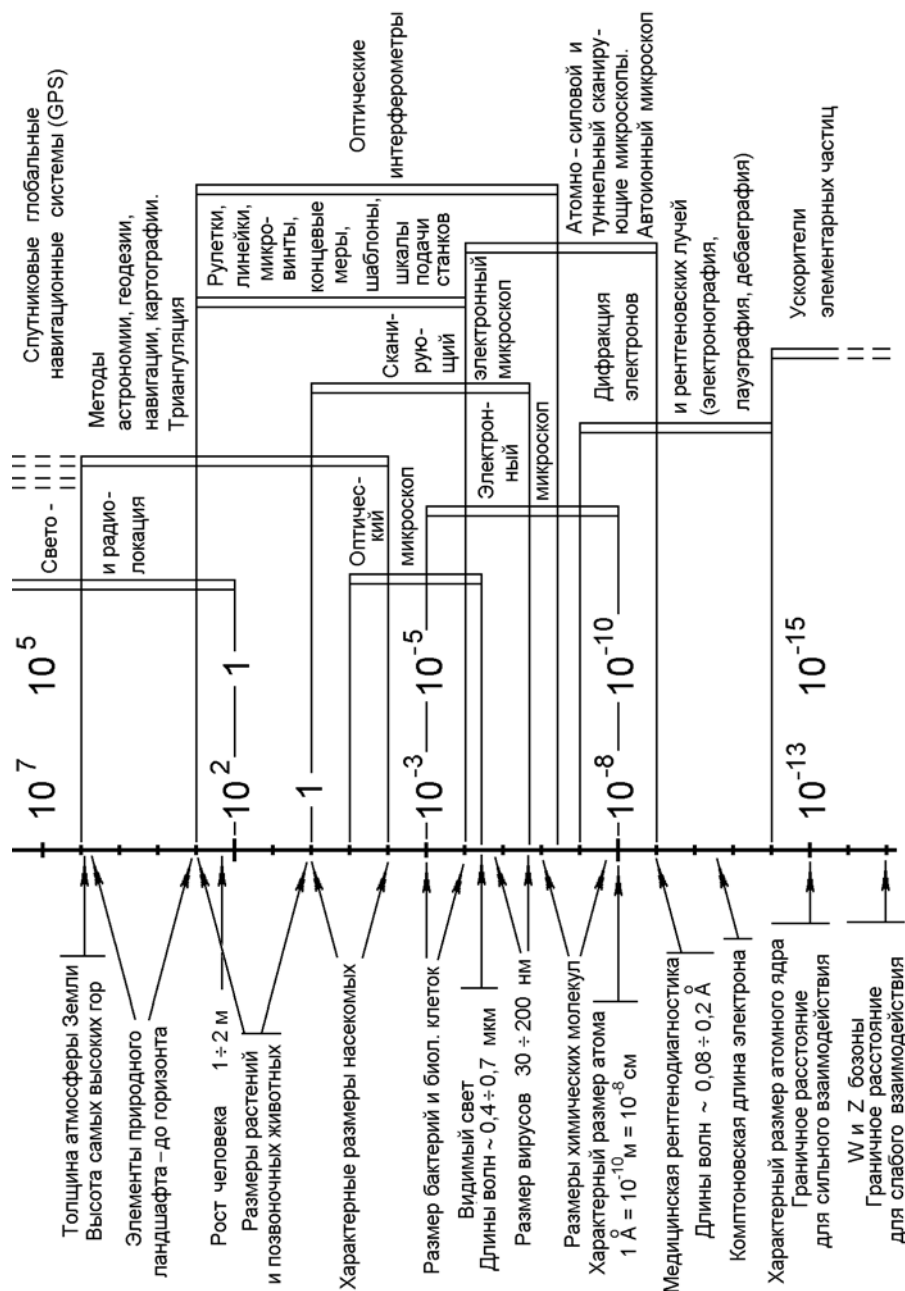
В шкале расстояний есть провал в четыре порядка. Начиная с орбиты Плутона (половина длины главной полуоси орбиты $5,9 \cdot 10^{12}$ м) и вплоть до ближайшей звезды Проксимы Центавра (4,3 световых лет $\approx 4 \cdot 10^{16}$ м), люди пока не могут регистрировать никаких объектов. Известно, что там есть кометы, но они не доступны для наблюдения. Облако комет формально может простираться до дистанции 50000 а. е. ~ 1 св. года. Как показывают оценки, предел влияния гравитационного поля Солнца примерно равен $1/3$ от расстояния до ближайшей звезды.

Расстояния до ближайших звезд измеряются методом триангуляции по параллаксу – смещению положения звезды относительно удаленных звезд при движении Земли по орбите. Это нашло отражение в названии внесистемной астрономической единицы длины – параллакс-секунде (парсек). Парсек – это расстояние на котором диаметр земной орбиты виден под углом 1 секунда:

$$1 \text{ парсек} = 3,26 \text{ световых лет} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м};$$

$$1 \text{ св. год} = 0,31 \text{ парсек} = 0,9461 \cdot 10^{16} \text{ м}.$$





Метод параллакса годится для расстояний от 1 до 100 парсек – для более удаленных звезд параллакс столь мал, что он меньше ошибок измерения углового положения звезд на небе оптическими методами.

Знание среднего размера для различных классов галактик дает возможность оценки расстояний до них по угловому размеру. Этот метод покрывает дистанции от 90 кпк до 10 Мпк.

При наблюдении удаленных галактик, на больших угловых увеличениях количество галактик превышает количество звезд, видимых на небе, а угловой размер является слишком малым для триангуляционных измерений.

Расстояния от нескольких десятков световых лет ($5 \cdot 10^{17}$ м) до десяти миллиардов световых лет (10^{26} м) (что соответствует диапазону 15 пк ÷ 3000 Мпк) измеряются фотометрическим методом. В нем используется знание светимости (мощности) известных астрономических объектов в зависимости от типа объекта. В качестве объектов выступают периодические звезды (цефеиды), планетарные туманности, новые и сверхновые звёзды, шаровые звёздные скопления, галактики. Для измерения расстояния применяется закон обратных квадратов убывания яркости с расстоянием.

Начиная с расстояний, больших 5 Мпк (10^{23} м), наиболее удобным способом определения расстояния до удаленных галактик становится использование эффекта Доплера (красного смещения) и модели равномерно расширяющейся Вселенной. Исследованная таким образом часть Вселенной составляет около 1500 мегапарсек, что в 4 раза меньше размера Вселенной $D_{\text{вс.}}$, полученного из предположения, что ее граница убегает от нас со скоростью света, и из значения постоянной Хаббла $H_0 = 25$ (15 ÷ 30) км/с на 1 миллион световых лет или 75 (50 ÷ 100) км/с на миллион парсек

$$D_{\text{вс.}} = c \cdot t_{\text{вс.}} = c/H_0 = 2 \cdot 10^{26} \text{ м.}$$

Наиболее удаленные объекты, доступные для наблюдения, – радиогалактики и квазары. Постоянная Хаббла до сих пор определена неточно – в разных источниках приводятся данные, отличающиеся в два раза. Поэтому приведённые размеры Вселенной и расстояний до особо удалённых объектов являются оценочными.

**Некоторые характерные размеры во Вселенной,
порядок которых стоит помнить физику**

10^{-17} м – на меньших расстояниях действует слабое взаимодействие.

10^{-15} м – размер ядра атома. Слабо зависит от числа нуклонов в ядре. Граничное расстояние для сильного взаимодействия.

$4 \cdot 10^{-13}$ м – комптоновская длина для электрона.

10^{-10} м – размер атома. Слабо зависит от числа электронов в оболочке атома. По порядку величины – примерно такое же расстояние между атомами в твёрдых и жидких телах.

10^{-9} м – среднее расстояние между молекулами в воздухе в нормальных условиях.

10^{-7} м – длина свободного пробега – расстояние, которое в нормальных условиях пробегает молекула воздуха до столкновения с другой молекулой воздуха.

$(0,4 \div 0,7) \cdot 10^{-6}$ м = $0,4 \div 0,7$ мкм – длина световой волны для видимого света.

Радиус Земли – 6378 км.

Диаметр Солнца $\sim 1,5$ млн км.

Расстояние до Солнца – одна астрономическая единица (а. е.) – 149671011 км ~ 150 млн км (таким образом, угол, под которым виден диск Солнца, примерно равен $1/100$ радиана $\sim 0,6$ градуса).

$4 \cdot 10^{16}$ м ~ 1 пк – расстояние до ближайшей звезды.

Расстояние от центра Млечного пути до Солнца ~ 10 кпк.

Средний диаметр диска средней Галактики ~ 30 кпк $\sim 10^{20}$ м.

Средний диаметр балджа средней Галактики ~ 4 кпк.

До ближайшей крупной Галактики – М31 (Туманности Андромеды) – $0,7$ Мпк.

$2 \div 5$ Мегапарсек – расстояния между группами Галактик.

60 Мегапарсек – диаметр нашего сверхскопления Галактик (около 20000 Галактик). Центр – скопление Галактик в созвездии Девы. Найдено около 50 сверхскоплений.

1500 Мегапарсек – исследованная область пространства. В ней находится несколько миллиардов Галактик.

6000 Мегапарсек $\sim 2 \cdot 10^{26}$ м – оценочный размер Вселенной.

Неметрические единицы длины

Неметрическая единица длины 1 морская миля = 1853 м связана с навигационной координатной сеткой и соответствует одной угловой минуте на поверхности Земли.

Некоторые неметрические единицы длины,
принятые в англоязычных странах

1 дюйм (inch) = 2,540 см.

1 фут = 12 дюймов = 30,48 см.

1 ярд = 3 фута = 36 дюймов = 91,44 см.

1 миля (сухопутная) = 1760 ярдов = 1,6093 км.

1 кварта = 0,9470 литра.

Для метрологических целей стоит знать, что английский научный (метрологический) дюйм равен 25,399956 мм, английский промышленный дюйм – 25,399978 мм, а американский дюйм – 25,400051 мм.

Приложение № 1

Возникновение и распространение метрических мер

Отсутствие каких-либо рациональных оснований и произвольность при выборе мер и единиц измерения приводили к большому разнообразию их не только в отдельных странах, но даже в областях и городах одной и той же страны. Это создавало большие неудобства и трудности, особенно в международных сношениях.

В некоторых государствах делались попытки упорядочить меры и установить их единообразие. Однако несмотря на это, даже для Европы в XVIII в. характерно большое разнообразие мер. Если в России и Англии к этому времени было достигнуто некоторое единство мер, то каждый немецкий город, каждая провинция в Италии, каждый кантон в Швейцарии имели свои особые меры. В пределах одной и той же области, в каждом городе, а иногда на различных рынках одного и того же города применялись меры, имеющие одинаковые названия, но различные размеры. Точные соотношения между этими мерами не были установлены, да и установить их было трудно ввиду их неопределенности. Особенно большой хаос в этом отношении царил во Франции, где, несмотря на наличие государственных мер (туаз $\approx 1,95$ м и фунт $\approx 367,1$ г), каждый феодал устанавливал в своих владениях собственные меры.

Развитие торговли требовало строгого упорядочения мер. Во второй половине XVII в. выдвигались предложения за основную единицу длины принять следующие «природные» величины: длину $1/4$ земного меридиана, длину $1/4$ экватора, длину секундного маятника и др.

В 1790 г. в Национальное собрание Франции было внесено предложение о создании новой системы мер, «основанной на неизменном прототипе, взятом из природы, с тем, чтобы ее могли принять все нации». Комиссия, созданная для этой цели Французской Академией наук, предложила считать единицей длины длину десяти-миллионной части четверти земного меридиана, проходящего через Париж. В 1791 г. Национальное собрание узаконило эту единицу и назвало ее метром.

В 1792 г. под руководством французских астрономов Делямбра и Мешена начались градусные измерения длины Парижского меридиана между Дюнкерком на севере Франции и испанским городом Барселоной; все работы по измерениям и по обработке их результатов были завершены в 1799 г.; механиком Ленуаром был изготовлен образец или эталон метра в виде концевой меры – платинового стержня прямоугольного сечения в виде линейки, шириной 25 мм и толщиной 3,5 мм (в некоторых источниках указана толщина 4,05 мм, но доподлинно это неизвестно, т. к. архивного метра в настоящее время не существует – он погиб во время пожара). Линейка заканчивалась поверхностями, перпендикулярными к её длине. Расстояние между этими поверхностями и являлась истинным метром. Для единицы массы была принята масса одного кубического дециметра чистой воды при температуре наибольшей ее плотности ($+4^{\circ}\text{C}$); эта единица была названа килограммом. Эталон килограмма был изготовлен в виде платинового цилиндра.

В 1799 г. образцы метра и килограмма были сданы на хранение в архив Французской республики; они получили название архивного метра и архивного килограмма.

За единицу измерения объема жидких и сыпучих тел был принят литр, равный объему куба, каждое ребро которого равно одному дециметру.

Кратные и дольные единицы находились в десятичных соотношениях с основными мерами, а кратные и дольные единицы площади и объема — в отношениях, пропорциональных соответственно квадратам и кубам линейных единиц.

Метрические меры начали постепенно распространяться в других странах. Представители точных наук раньше и больше других ощутили потребность в единых мерах, и поэтому в борьбе за внедрение и распространение метрических мер они всегда стояли в первых рядах.

Большим стимулом к внедрению метрических мер было развитие международных отношений и связей (торговых, промышленных, культурных, научных и др.). Особенно сильно ощущали такую потребность геодезисты и статистики, работы которых имели международное значение.

Формированию общественного мнения в пользу метрической системы способствовала Всемирная Парижская выставка 1867 г., на

которой была устроена витрина с образцами мер всех стран. На выставке был организован Международный комитет мер, весов и монет, на заседании которого российский академик Б. С. Якоби в своем докладе сформулировал все преимущества метрической системы мер.

Однако к практическому решению вопроса о внедрении метрических мер приблизился лишь в 1869 г., когда Петербургская Академия наук, взяв на себя инициативу, опубликовала доклад комиссии, состоявшей из академиков О. В. Струве, Г. И. Вильда и Б. С. Якоби. В докладе давались практические предложения по скорейшему принятию этих мер в качестве международных; в частности, было предложено создать международную комиссию, которой должно было быть поручено изготовление первичных эталонов единиц длины, ёмкости и массы.

Комиссия была создана и собиралась в 1870 и 1872 гг. Она постановила принять за единицу длины архивный метр, а за единицу массы – архивный килограмм, несмотря на то, что к этому времени уже было известно отличие этих единиц от теоретических метра и килограмма. Как показали последующие измерения, в одной четверти земного меридиана содержится не 10000000, а 10000856 м. Но и это число нельзя считать окончательным, так как последующие более точные измерения могут дать другое значение.

Работы по определению массы данного объема воды показали большие расхождения между архивным килограммом и его теоретическим значением (массой одного кубического дециметра воды). Кроме того, ученые того времени пришли к выводу, что единицы, основанные на материальных эталонах, надежнее «естественных», и естественная единица не может быть воспроизведена с такой точностью, с какой можно изготовить копию материального эталона и определить ее размер. Исходя из этих соображений, Международная метрическая комиссия отказалась от теоретических определений метра (как десятиmillionной части четверти земного меридиана) и килограмма (как массы кубического дециметра чистой воды) и предложила избрать архивный метр и архивный килограмм в качестве прототипов (исходных мер).

Метрическая конвенция 1875 г.

Международная метрическая комиссия высказала пожелание об учреждении Международного бюро мер и весов – научного учреждения, на которое должны быть возложены задачи хранения и сравнения международных и национальных эталонов.

1 марта 1875 г. была созвана дипломатическая конференция по вопросу создания Международного бюро мер и весов, на которой присутствовали представители 20 государств. 20 мая 1875 г. 17 государств подписали метрическую конвенцию. В конвенции они обязались содержать Международное бюро мер и весов, действующее под наблюдением и руководством Международного комитета мер и весов, который, в свою очередь, подчиняется Генеральной конференции по мерам и весам. Последняя состоит из представителей всех государств и созывается не реже одного раза в 6 лет. Международный комитет мер и весов состоит из 18 членов – ученых разных государств, избираемых на Генеральной конференции, и собирается каждые два года. Международному бюро мер и весов поручается хранение, сличение и поверка новых международных прототипов метра и килограмма, периодическое сличение национальных эталонов с международными; сличение с новыми прототипами основных эталонов неметрических мер, применяемых в разных странах, и т. п.

К 1889 г. были закончены работы по изготовлению образцов метра и килограмма. Работы французов Сен-Клер Девиля и Дебре по изучению свойств платины (в основном уральской) дали международной метрологической комиссии основание для выбора сплава платины и иридия при изготовлении эталонов. Исходные стержни с поперечным х-образным сечением были изготовлены Джонсон, Маттеи и К^о в Лондоне. Окончательное выравнивание, полировку и обрезку до длины 102 см провели братья Брунер в Париже. Штрихи были нанесены Треска, инженером при французской секции при метрологической комиссии. Был изготовлен временный прототип метра J_2 в виде штриховой меры, переходной от архивного метра (который был концевой мерой). В группе из 30 эталонов с предельной точностью были сделаны:

- 1) взаимное сличение эталонов в 11 группах (первый ряд сличений – 5 групп по 6 мер, второй ряд сличений – 6 групп по 5 мер);
- 2) сличение каждого эталона с временным прототипом J_2 ;

3) сличение временного прототипа с эталоном № 6 (наиболее точно совпадавшим с длиной архивного метра).

В конечном итоге длина каждого эталона была выведена на основании обработки результатов 784 отдельных сличений. Работы проводились французскими учёными – Бенуа и Гильомом.

В 1889 году в Париже собралась I Генеральная конференция по мерам и весам, утвердившая в качестве международных прототипов вновь изготовленные образцы, размеры которых совпадали с размерами архивных образцов.

Образцы метра были изготовлены из бруска платиноиридиевого сплава (90 % платины и 10 % иридия) и имели поперечное сечение в форме буквы X, вписанной в квадрат со стороной 20 мм (рис. 6). На

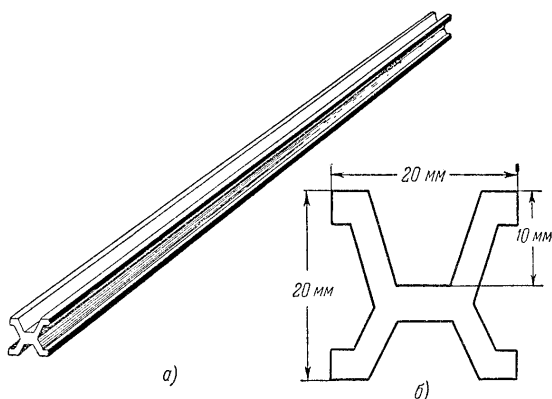


Рис. 6. Эталон метра

обоих концах бруска на отполированных участках на расстоянии 0,5 мм один от другого нанесены три штриха. Перпендикулярно к этим штрихам, вдоль оси нанесены два штриха с расстоянием между ними 0,2 мм. Поверхности, на которых нанесены штрихи, совпадают с нейтральной плоскостью бруска. X-образная форма оказывает большое сопротивление прогибу; при возможном изгибе бруска расстояние между штрихами, расположенными в нейтральной плоскости, подвергается наименьшему изменению. Образец метра №6, обозначенный готической буквой *m*, был признан международным прототипом метра. Метр был принят равным расстоянию между серединами средних штрихов при температуре тающего

льда. Подобных образцов метра было изготовлено 34 (только 30 из них было использовано в дальнейшем).

Международным прототипом килограмма признан платиноиридиевый цилиндр (рис. 7), высота и диаметр прототипа равны 39 мм. Образцов килограмма было изготовлено 43.

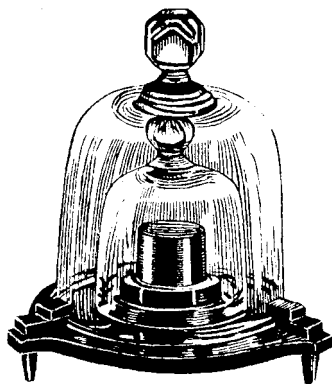


Рис. 7. Эталон килограмма

После установления международных прототипов метра и килограмма Генеральная конференция распределила остальные образцы по жребию между государствами, подписавшими метрическую конвенцию. Россия получила два метра (№ 11 и № 28) и два килограмма (№ 12 и № 26). Таким образом, в 1889 г. было завершено окончательное установление метрических мер и принятие их в качестве между-

дународных. С тех пор число государств, подписавших Метрическую конвенцию, все возрастает, в настоящее время их количество более сорока.

Введение метрических мер в России и СССР

Движение за принятие метрических мер встретило с самого начала благоприятный отклик в кругах научной общественности России. Однако несмотря на участие русских ученых в международных совещаниях по метрическим мерам, на подписание метрической конвенции 1875 г. и получение копий прототипов международного метра и килограмма, вопрос о введении в России метрических мер в то время не получил еще окончательного решения.

Установление Д. И. Менделеевым точных соотношений между русскими и метрическими мерами дало основание для введения в России метрических мер. Однако они были допущены только факультативно. «Положением о мерах и весах» 1899 г. разрешалось применять метрические меры наравне с основными российскими мерами в торговле и иных сделках только по распоряжению мини-

стра, однако частные лица имели право не пользоваться метрическими мерами.

Вследствие таких ограничений метрическая система распространялась в России очень медленно; она нашла применение лишь в научно-технических работах, в аптекарском деле, в электротехнической и некоторых других отраслях промышленности. В 1905 г. было открыто 5 поверочных палаток, в 1902 г. – 10 палаток и в 1906 г. – ещё 5 палаток, тогда как Д. И. Менделеев считал необходимым довести их число до 150.

Метрические меры были введены как обязательные лишь декретом Совета Народных Комиссаров РСФСР от 14 сентября 1918 г. За образцы основных единиц были приняты копия международного метра № 28 и копия международного килограмма № 12. С 1 января 1922 г. декретом запрещалось изготовление русских мер и гирь, а с 1 января 1923 г. – их продажа. С 1 января 1924 г. запрещалось применение любых мер и весов, кроме метрических.

Введение новых мер не было осуществлено к указанному сроку вследствие разрухи, вызванной войной и иностранной интервенцией. Советское правительство продлило срок введения метрических мер до 1 января 1927 г. К этому времени все основные мероприятия по переходу на метрические меры были проведены; измерительное хозяйство было обновлено по всей стране. Метрические меры прочно вошли в жизнь и быт народов на всей территории Советского Союза. Число периферийных поверительных организаций в середине 60-х годов превышало 290.

Несмотря на выход из СССР, смену денежных знаков, замену алфавитов на латинский, ни одна из бывших республик СССР не собирается вернуться к старым мерам или принять англо-американскую систему единиц.

Приложение № 2

Концевые меры

Требования повышения точности изготовления деталей в машиностроении вызвали к жизни большое количество точных мер длины, но не штриховых, а концевых. Размеры деталей или отдельных их частей определяются не метками и штрихами на них, а контурами: от грани до грани, от одного конца до другого и т. п.

До революции промышленность России не изготавливала концевых мер длины и они ввозились из-за границы, главным образом из Швеции. Их поставляла известная фирма Иогансон; концевые меры длины так и называли плитками Иогансона. Это название удерживалось много лет после того, как отечественная промышленность освоила производство концевых мер длины.

Такая плитка, или, как её теперь называют, плоскопараллельная концевая мера длины, – это стальной брусок, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда, одна из пар параллельных граней которого воспроизводит размер, указываемый на плитке.

Параллельность рабочих плоскостей плиток

Прежде всего, необходимо уметь проверять параллельность плоскостей. Эту проверку производят, измеряя расстояние между плоскостями по перпендикулярному к ним направлению в нескольких точках.

Измерения в разных точках дают, как правило, разные результаты; разность между наибольшим и наименьшим результатом принимают за характеристику отклонения от параллельности.

Можно ли добиться идеальной параллельности плоскостей плитки? Нет, и прежде всего потому, что нет способа убедиться в такой параллельности. Кроме того, она необходима далеко не всегда. Плитки изготавливают, различая их по классам. Всего классов 5, начиная с самого высокого – нулевого и кончая 4. Для плиток разных

размеров и разных классов допускаются различные отклонения от параллельности.

Например, для плиток класса 0 размером до 30 мм допускается отклонение от параллельности не более 0,1 микрона, а для таких же плиток класса 4 – 0,4 микрона. Для больших плиток допускаемые отклонения от параллельности соответственно увеличиваются. Например, для плитки 1000 мм класса 4 допустимое отклонение равно 1,2 микрона.

Притираемость плиток

Рабочие поверхности плиток шлифуют, полируют и доводят до зеркального блеска. Если взять две плитки, сложить их, как показано на рис. 8, и надвинуть скользящим движением одна на другую, то плитки окажутся крепко сцепленными. Оторвать руками одну от другой трудно. Разъединить плитки можно только сдвинув одну из них по другой.

Причиной столь большой силы сцепления не может быть атмосферное давление, как предполагали вначале.

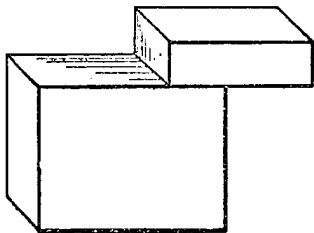


Рис. 8. Притирка плиток

Было высказано предположение, что между плоскостями плиток действуют силы атомного сцепления металлов, т. е. силы взаимного притяжения их атомов. Но это предположение было быстро опровергнуто простым опытом: плитки, тщательно промытые эфиром, сразу после высыхания поверхностей теряли способность притираться. Правильное

объяснение заключается в следующем: металлические поверхности, находящиеся в воздухе, быстро покрываются тонкой пленкой влаги. Толщина ее не превышает 0,005 микрона. При соприкосновении этих жидкостных молекулярных пленок без воздушной прослойки, которая «выжимается» при надвигании плитки на плитку, и возникает сила сцепления между плитками.

Набор плиток

Притираемость плиток дает возможность при помощи сравнительно небольшого их количества воспроизводить любые размеры (не выше, конечно, определенного предела). Несколько плиток, притертых одна к другой, называют блоком. Составлять блок более чем из пяти плиток не рекомендуется, так как сумма толщин молекулярных слоев влаги между плитками может оказаться заметной. При блоке из пяти притертых плиток эта сумма еще меньше возможной погрешности суммы размеров плиток.

Состав набора плиток на первый взгляд кажется очень странным. Вот, например, какие размеры имеют плитки набора, состоящего из 83 плиток:

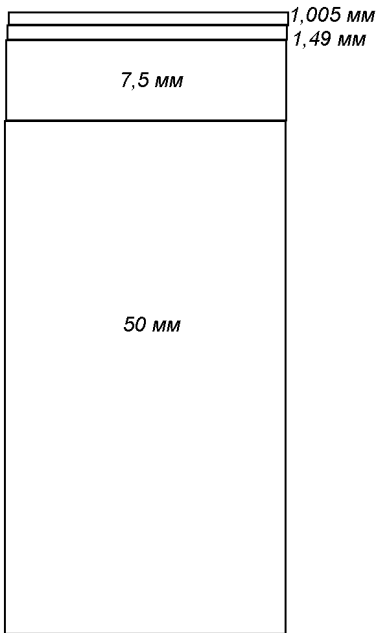


Рис. 9. Блок плиток

1 плитка 1,005 мм; 49 плиток (через каждую 0,01 мм) 1,02; 1,03 и т. д. до 1,49 мм; 4 плитки (через каждую 0,1 мм) 1,6; 1,7; 1,8; 1,9 мм; 19 плиток (через каждые 0,5 мм) 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 и т. д. до 9,5 мм; 10 плиток (через каждые 10 мм) 10; 20; 30 и т. д. до 100 мм.

Сразу невозможно уловить закономерность в размерах плиток, скажем, такую, как в разновесе. Видно только, что ни один размер не повторяется.

Познакомимся с тем, как составляется блок (рис. 9). Зададимся для примера размером 59,995 мм. Первую плитку выбирают так, чтобы последняя цифра совпадала с последней цифрой заданного числа. Единственной в наборе, содержащей

0,005 мм, является плитка 1,005 мм. Ее мы и берем в качестве первой плитки. Остается набрать $59,995 - 1,005 = 58,99$ мм. Придерживаясь того же принципа, выбираем в качестве второй плитки с раз-

мером 1,49 мм. Теперь остается $58,99 - 1,49 = 57,5$ мм. Третьей, очевидно, будет плитка 7,5 мм. Остается $57,5 - 7,5 = 50$ мм. Для этого размера мы имеем отдельную плитку.

Выпускается пять классов плиток. Признаком класса, наряду с отклонением от параллельности, является отклонение длины плитки от указанной на плитке и называемой номинальной.

Для плиток малых размеров (до 30 мм) нулевого класса допустимые отклонения от номинальной длины и от параллельности одинаковы и равны 0,1 микрона. Для других классов и для плиток больших размеров отклонения от номинальной длины допускаются значительно большие, чем отклонения от параллельности, и достигают 16 микрон для плиток 1000 мм класса 4.

Представляют ли приведенные допустимые отклонения для плиток предел точности, которую можно получить при измерениях с их помощью? Нет, эти значения характеризуют только точность изготовления плиток, а измерить их действительную длину мы можем точнее. Определяя суммарную длину блока плиток, можно складывать действительные значения размеров плиток, что будет значительно точнее, чем сложение номинальных их размеров.

При помощи плиток четвертого класса, зная их действительные размеры, можно измерять много точнее, чем при помощи плиток нулевого класса и по их номинальным размерам.

Зачем же тогда вообще изготавливают нулевой, первый, второй, третий классы плиток? Для того чтобы достичь при помощи плиток класса 4 такой же точности, какую дают плитки нулевого класса или даже класса 3, необходимо учитывать действительные размеры каждой плитки, а это намного усложняет процесс измерения. Кроме того, может случиться так, что при учете действительных размеров плиток составить блок нужного размера окажется невозможным.

Выше мы говорили, что рабочие поверхности плиток должны быть параллельными друг другу. Но параллельности еще мало: параллельными могут быть и кривые поверхности. Поэтому дополнительным требованием является то, что рабочие поверхности плиток должны быть плоскими. Степень приближения поверхности к идеальной плоскости называется плоскостностью.

Для измерения размеров и плоскостности плиток используется явление интерференции света.

Приложение № 3

Интерферометры

Оптические интерферометры применяются для измерения оптических длин волн спектральных линий, показателей преломления прозрачных сред, абсолютной и относительной длин объектов, угловых размеров звёзд, для контроля качества оптических деталей и их поверхностей и т. д.

Принцип действия всех интерферометров одинаков, и различаются они лишь методами получения когерентных волн и тем, какая величина непосредственно измеряется. Пучок света с помощью того или иного устройства пространственно разделяется на два или большее число когерентных (одинаковых по частоте и фазе, т. е. в пространстве и времени) пучков, которые проходят различные оптические пути, а затем сводятся вместе, и наблюдается результат их интерференции (сложения). В результате сложения когерентных пучков складываются не квадраты амплитуд пучков (интенсивности света), а амплитуды. Таким образом, в результате сложения двух пучков в противофазе может получиться темнота, а в результате сложения в фазе – яркость в 4 раза большая нежели яркость исходных пучков. Это не противоречит закону сохранения энергии, т. к. в среднем энергия ярких и тёмных мест остаётся равной сумме энергий исходных пучков.

По числу интерферирующих пучков света интерферометры можно разделить на многолучевые и двухлучевые. Многолучевые интерферометры применяются главным образом как интерференционные спектральные приборы для исследования спектрального состава света. Двухлучевые интерферометры используются и как спектральные приборы, и как приборы для физических и технических измерений.

Интерферометр Майкельсона

Примером двухлучевого интерферометра может служить интерферометр Майкельсона (рис. 10). Параллельный пучок света источ-

ника L , проходя через объектив O_1 и попадая на полупрозрачную пластинку P_1 , разделяется на два когерентных пучка 1 и 2. После

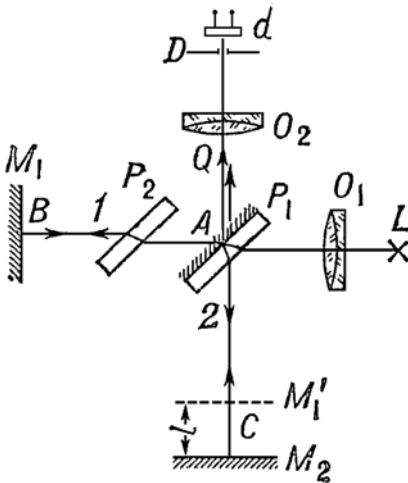


Рис. 10. Схема интерферометра Майкельсона

отражения от зеркал M_1 и M_2 и повторного прохождения луча 2 через пластинку P_1 оба пучка проходят в направлении AO через объектив O_2 и интерferируют в его фокальной плоскости D . P_2 — пластинка, компенсирующая дополнительную разность хода, появляющуюся за счёт того, что луч 1 проходит только один раз через пластинку P_1 (нужна для света с малой длиной когерентности); D — диафрагма, d — детектор. Наблюдаемая интерференционная картина соответствует ин-

терференции в воздушном слое, образованном зеркалом M_2 и мнимым изображением M_1' зеркала M_1 в пластинке P_1 . Оптическая разность хода при этом равна: $\Delta = 2(AC - AB) = 2l$, где l — расстояние между M_2 и M_1' . Если зеркало M_1 расположено так, что M_1' и M_2 параллельны, то образуются *полосы равного наклона*, локализованные в фокальной плоскости объектива O_2 и имеющие форму концентрических колец. Каждому кольцу соответствует одинаковый наклон пучка света относительно оптической оси устройства. Вся картина колец видна только в расходящемся (или сходящемся) пучке света, в котором одновременно представлены разные наклоны пучков света. В случае освещения параллельным пучком света в фокальной плоскости D наблюдается результат в виде единственного тёмного или светлого пятна (в зависимости от оптической разности хода Δ).

Если же M_2 и M_1' образуют воздушный клин, то возникают *полосы равной толщины*, локализованные в плоскости клина $M_2 M_1'$ и

представляющие собой параллельные линии. Каждой линии в изображении соответствует одинаковая толщина клина M_2 и M_1' .

Полосы равной толщины гораздо проще могут быть получены без интерферометра Майкельсона при непосредственном контакте плоской поверхности с неплоской (например, линзы и плоской поверхности – т. н. Кольца Ньютона), на мыльных плёнках или на любых гладких прозрачных плёнках неоднородных по толщине.

Интерферометр Майкельсона широко используются в физических измерениях и в технических приборах. С его помощью впервые была измерена абсолютная величина длины волны света, доказана независимость скорости света от движения источника. Он используется и как спектральный прибор, позволяющий анализировать спектры излучения с высоким разрешением, достигающим до $\sim 0,005 \text{ см}^{-1}$. Интерферометр Майкельсона применяется в технике для абсолютных и относительных измерений длин эталонных пластинок с точностью до $0,005 \text{ мкм}$. В сочетании с микроскопом он позволяет по виду интерференционной картины измерять величину отступлений от плоскости и форму микронеровностей металлических и стеклянных поверхностей.

Интерферометр Фабри – Перо

Многолучевой интерферометр Фабри – Перо (рис. 11) состоит из двух стеклянных или кварцевых пластинок P_1 и P_2 , на обращённые друг к другу и параллельные между собой поверхности которых

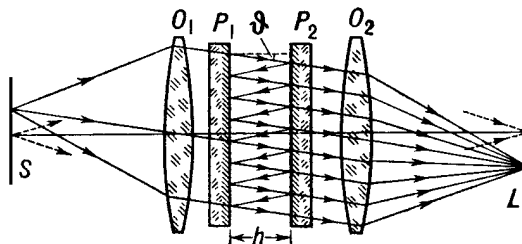


Рис. 11. Схема интерферометра Фабри – Перо

нанесены зеркальные покрытия с высоким (85 – 98 %) коэффициентом отражения. Параллельный пучок света, падающий из объектива O_1 в результате многократного отражения от зеркал, образует большое число параллельных когерентных пучков с постоянной

разностью хода $\Delta = 2nh \cdot \cos \theta$ между соседними пучками, но различной интенсивности. В результате многолучевой интерференции в фокальной плоскости L объектива O_2 образуется интерференционная картина, имеющая форму концентрических колец с резкими интенсивными максимумами, положение которых определяется из условия $\Delta = m\lambda$ (m – целое число), т. е. зависит от длины волны. Поэтому интерферометр Фабри – Перо разлагает сложное излучение в спектр. Наблюдаемая картина является *полосами равного наклона*, т. е. при освещении монохроматическим светом каждому кольцу соответствует одинаковый угол наклона пучка света относительно оптической оси прибора.

Распределение интенсивности света по радиусу в кольце зависит от величины коэффициента отражения ρ (чем ρ больше, тем кольцо тоньше) и от степени монохроматичности падающего света (чем спектр шире, тем кольцо шире). Вся картина колец видна только в расходящемся (или сходящемся) пучке света, в котором одновременно представлены разные наклоны пучков света. Вид колец показан на рис. 12 а, профиль полос – на рис. 12 б. В случае освещения параллельным пучком света в фокальной плоскости L наблюдается

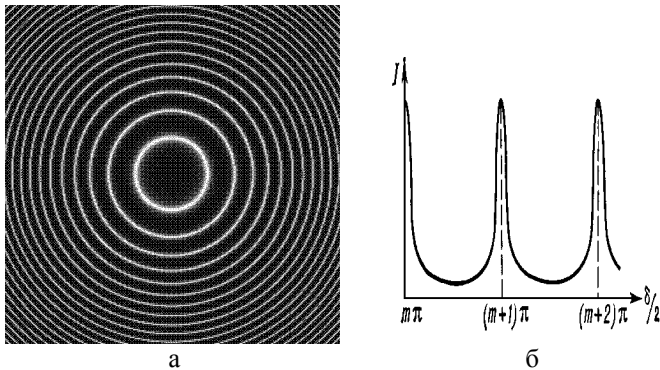


Рис. 12. а) картина колец, наблюдаемых на экране L за интерферометром Фабри – Перо (на бесконечном расстоянии, если объектив O_2 отсутствует); б) профиль интенсивности в полосах, δ – разность хода, выраженная в фазе

результат в виде единственного тёмного или светлого пятна (в зависимости от оптической разности хода Δ). Интерферометр Фабри –

Перо применяется как интерференционный спектральный прибор высокой разрешающей силы, которая зависит от коэффициента отражения зеркал ρ и от расстояния h между пластинками, возрастая с их увеличением. Так, при $\rho = 0,9$, $h = 100$ мм, $\lambda = 5000$ Å минимальный разрешаемый интервал длин волн $\delta\lambda = 5 \cdot 10^{-4}$ Å. Столь высокая разрешающая сила бывает необходима для исследования в очень узком диапазоне спектра (например, исследования тонкой структуры профиля спектральной линии). Как правило, при работе в широком диапазоне спектра интерферометр Фабри – Перо используется совместно с обычными спектральными приборами – призмными или решёточными монохроматорами и спектроскопами.

В реальных устройствах, чтобы не создавать систему из трёх связанных интерферометров Фабри – Перо, используются клиновидные подложки для зеркал P_1 и P_2 . Чтобы полосы равной толщины от клина были частыми и не портили вид многолучевой интерференции, угол клина выбирается достаточно большим. Специальные сканирующие интерферометры Фабри – Перо с перемещением зеркал (например пьезоэлементом) и фотоэлектрической регистрацией используются для исследования спектров в видимой, ИК и в сантиметровой области длин волн. Интерферометр Фабри – Перо идеально подходит для сравнения длин волн узких спектральных линий.

Разновидностью интерферометров Фабри – Перо являются *оптические резонаторы* лазеров, излучающая среда которых располагается между зеркалами интерферометра. Разность частот $\Delta\nu$ между соседними продольными модами в излучении лазеров зависит от расстояния между зеркалами резонатора l : $\Delta\nu = c/2l$. Перемещение одного из зеркал на величину δl приводит к изменению разностной частоты на $\delta(\Delta\nu) = c\delta l/2l^2$, которое может быть измерено с помощью фотоприёмника радиотехническими методами. Это используется в лазерных интерферометрах, предназначенных для измерения длин объектов и их перемещений.

Приложение № 4

Непосредственное измерение частоты оптических переходов в атоме

До недавнего времени оптические частоты (в видимом диапазоне) определялись из измеренной длины волны и последующего пересчета через скорость света. В 1979 г. проведены абсолютные измерения частоты видимого диапазона [6]. Существовавшие способы измерения частоты в радиодиапазоне обеспечивали на много порядков более высокую точность, чем измерения длины.

Стандарты частоты микроволнового диапазона

Эволюция службы времени и частоты насчитывает несколько этапов, последний из которых характеризуется появлением в 1950-х гг. квантовых мер частоты (КМЧ). Наиболее совершенные из них работают в диапазоне 10^{10} Гц: мазер на аммиаке (23870129 кГц), водородный мазер (1420405,7518 кГц), атомно-лучевые трубки на таллии (2131083,394 кГц), рубидии-87 (6834682 кГц), цезии-133 (9192631,770 кГц). Используют также двойной оптический резонанс в рубидии на указанной частоте. В генераторах линии излучения уже, чем в пассивных атомно-лучевых стандартах, но в последних частота излучения практически не отличается от невозмущенного значения перехода. С наименьшей погрешностью частоту воспроизводит стандарт на основе пучка атомов цезия. Наибольшей стабильностью характеризуется водородный мазер с длиной волны в области 21 см, поэтому в состав первичного эталона единиц времени и частоты в 1976 г. вошел комплекс цезиевого и водородных реперов [8], обеспечивающий погрешность воспроизведения частоты, равную $1 \cdot 10^{-13}$. Успехи, достигнутые позднее с водородными генераторами, позволяют рассчитывать на погрешность воспроизведения частоты, равную $1 \cdot 10^{-14}$.

Радиооптический частотный мост

Предложение авторов [7] о стабилизации частоты излучения по пикам поглощения открыло возможность повышения воспроизводимости частоты лазеров на несколько порядков. Стабильность лазерных генераторов частоты стала сравнимой со стандартами частоты микроволнового диапазона. По существу стандартами частоты на основе газоразрядных лазеров являются те же лазеры, стабилизированные по насыщенному поглощению, которые предполагается использовать и в качестве эталонов длины.

Для передачи единицы частоты от первичного эталона в оптический диапазон создано несколько вариантов радиооптического частотного моста (РОЧМ). В нем осуществляется синтез частот микроволнового и оптического диапазонов. Два варианта РОЧМ представлены на рис. 13. На рис. 13 *а* передача единицы частоты происходит следующим образом. Частоту клистрона измеряют частотомером, калибруемым цезиевым или рубидиевым стандартом частоты. Двенадцатая гармоника частоты клистрона смешивается с излучением HCN-лазера (337 мкм, 890670 МГц). Умножителем и смесителем является МОП-диод (металл – окисел – полупроводник). Разностную частоту измеряют для определения частоты излучения HCN-лазера. При необходимости ее используют для подстройки частоты HCN-лазера до требуемого значения. Если HCN-лазер стабилизирован, например, по поглощению в дифторэтилене, такой необходимости нет. На втором этапе данной цепи четвертая гармоника частоты излучения HCN-лазера смешивается с излучением H₂O-лазера (84 мкм, 3557143 МГц), в парах воды находится дейтерий. Умножителем и смесителем является МОМ-диод (металл – окисел – металл). Снова измеряют разностную частоту и определяют частоту излучения H₂O-лазера. Далее восьмая гармоника излучения H₂O-лазера смешивается с излучением CO₂-лазера (10,53 мкм, 28457144 МГц), измеряется частота этого CO₂-лазера, стабилизированного по поглощению OsO₄. На следующем этапе смешиваются частоты двух стабилизированных CO₂-лазеров, у второго длина волны 10,18 мкм (29442483 МГц). После измерения частоты второго CO₂/OsO₄-лазера, третья гармоника его излучения смешивается с излучением He-Ne/CH₄-лазера (3,3913 мкм, 88376181 МГц). Таким образом, единица частоты (Гц) передана в ИК-диапазон – от первичного эталона до He-Ne/CH₄-лазера [9].

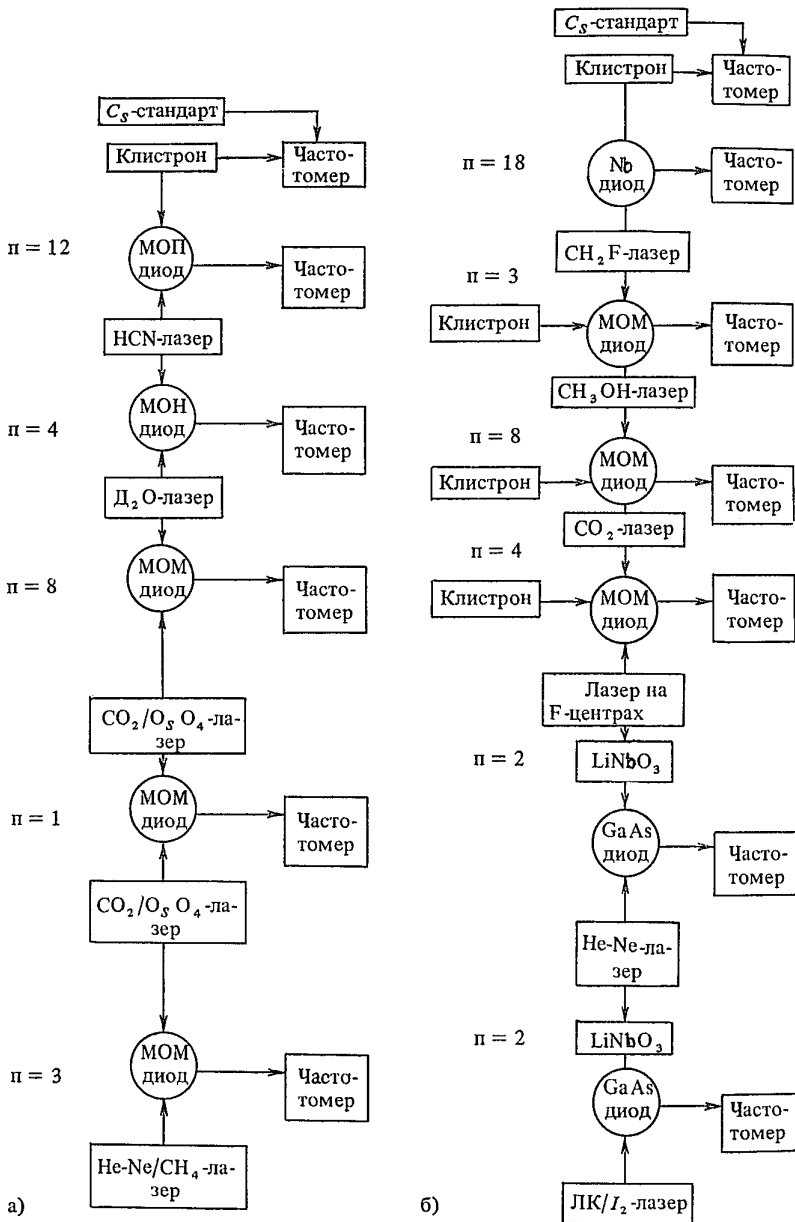


Рис. 13. Схемы РОЧМ: а) передача частоты в область 3,39 мкм; б) передача единицы частоты в видимую область спектра

Рассмотренный вариант РОЧМ до 3,39 мкм не является единственным. Лучший из них обеспечивает передачу единицы частоты с погрешностью не хуже $1 \cdot 10^{-11}$. Длительное время не удавалось перейти от РОЧМ для инфракрасной длины волны 3,39 мкм к аналогичному устройству, но для длины волны видимого диапазона.

В течение ряда лет единица частоты передавалась в видимый диапазон с помощью отношения длины волны 3,39 мкм и длины волны видимого диапазона, которое измерялось интерференционным способом [10]. Авторы работы [6] провели прямые измерения частоты He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ - лазера: пику g линии R(127) 5(X) – 11 (B) соответствует 473612340492 кГц, пику i – 473612214789 кГц. Последнее значение примерно на 11 кГц отличается от рекомендованного при переходе на новое определение метра.

Позднее был найден другой путь передачи единицы частоты в видимый диапазон, минуя 3,39 мкм (рис. 13 б). Частота клистрона измеряется частотомером, калибруемым, как в первом варианте, по цезиевому или рубидиевому стандарту частоты. Восемнадцатая гармоника клистрона смешивается с излучением CH_2F -лазера (215 мкм, 1,4 ТГц). Умножение и смешивание частот происходит на точечном ниобий-ниобиевом диоде. Измерение разностной частоты позволяет точно определить частоту излучения CH_2F -лазера. На втором этапе излучение CH_3OH -лазера (70,5 мкм, 4,25 ТГц) смешивается с суммой третьей гармоники излучения CH_2F -лазера и частоты клистрона 30,2 ГГц. Смесителем и умножителем является МОМ-диод. По разностной частоте определяется частота излучения CH_3OH -лазера. На третьем этапе частота излучения CO_2 -лазера (9,22 мкм, 32,5 ТГц) смешивается с частотой CH_2F -лазера, восьмой гармоникой частоты излучения CH_3OH -лазера и частотой клистрона 99,7 ГГц (или седьмой гармоникой CH_3OH -лазера и частотой клистрона 39,4 ГГц). Умножение и смешивание частот происходит на МОМ-диоде. По разностной частоте измеряется частота излучения CO_2 -лазера. На четвертом этапе частота лазера на F -центрах окраски аддитивно окрашенного монокристалла КС (2,3 мкм, 130 ТГц) смешивается с частотой, полученной суммированием четвертой гармоники CO_2 -лазера и частоты клистрона 15 ГГц. Умножителем и смесителем служит МОМ-диод, частоту излучения лазера на F -центрах определяют по частоте биений. На пятом этапе частота излучения He-Ne-лазера (1,15 мкм, 260 ТГц)

смешивается с удвоенной частотой лазера на F -центрах. Удвоение частоты происходит на кристалле ниобата лития, смесителем служит фотодиод на арсениде галлия, измеряется частота He-Ne-лазера. На последнем этапе удвоенная частота He-Ne-лазера смешивается с частотой лазера на красителях, стабилизированного по поглощению в йоде (0,576 мкм, 520 ТГц). Данный вариант РОЧМ позволяет измерить частоту в видимом диапазоне (520 ТГц) с относительной погрешностью $1 \cdot 10^{-10}$.

Непосредственное измерение частоты оптических переходов в атоме с помощью эталона времени являлось ещё одним способом определения скорости света, основанном на одновременном определении частоты света f и длины волны света λ , связанных соотношением $c = f \cdot \lambda$. По сравнению с предыдущими методами это улучшило точность измерения скорости света на два порядка. Причём точность измерения ограничивалась точностью криптонового эталона метра (который оказался хуже лазерного). Вследствие асимметрии контура линии криптона эталонный метр имел неопределённость. Это и привело к принятию единого эталона времени – частоты.

Достигнутые в настоящее время значения стабильности и воспроизводимости частот излучения лазеров и мазеров одного порядка, а потенциальные возможности лазеров – выше. Это дало основание автору работ [11, 12] считать, что первичным эталоном единицы частоты со временем станет стабилизированный лазер и передача значения единицы частоты будет осуществляться в обратном направлении – из оптического диапазона в микроволновый.

В связи с созданием лазеров, у которых излучение состоит из периодически повторяющихся очень коротких импульсов фемтосекундной длительности, появилась возможность упростить процедуру сличения частот в оптическом и радиодиапазонах. Период повторения импульсов этого лазера T лежит в радиодиапазоне и связан с оптической длиной $L \cdot n$ резонатора:

$$T = \frac{2 \cdot L \cdot n}{c}, \text{ где } n - \text{показатель преломления среды в резонаторе, } c - \text{скорость света в вакууме.}$$

Период может быть синхронизован с известным квантовым стандартом частоты (например, цезиевым). Спектр гармоник такого сигнала простирается на чрезвычайно большое число порядков и создаёт равномерную «гребёнку» калиброванных частот [13].

Список литературы

1. Маликов С. Ф., Тюрин Н. И. Введение в метрологию. М: Издательство комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете министров СССР, 1964. 248 с.
2. Тюрин Н. И. В поисках точности. М.: Государственное издательство физ.-мат. литературы, 1960. 246 с.
3. Физический энциклопедический словарь./ Гл. ред. А. М. Прохоров. М.: Сов. энциклопедия, 1983. 928 с.
4. Привалов В. Е. Газоразрядные лазеры в измерительных комплексах. Л.: Судостроение, 1989. 264 с.
5. Багаев С. Н., Дычков А. С., Чеботаев В. П. Применение узких оптических резонансов для измерения малых смещений // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33. С. 85 – 89.
6. Jennings D. Extention of absolute frequency measurement to the visible // NBS Spec. Publ. 1980, № 572. P. 13 – 18; Optics Letters. 1983. P. 136 – 139.
7. Летохов В. С., Чеботаев В. П. Принципы нелинейной лазерной спектроскопии. М.: Наука, 1975. 279 с.
8. Коробов В. К., Ильин В. Г., Пушкин С. Б. Новый государственный эталон времени и частоты и пути реализации его точности // Измерит. техника. 1976. № 10. С. 40 – 43.
9. Домнин Ю. С, Кошляевский Н. Б., Татаренков В. М. и др. Измерение частоты He-Ne/ CH_4 лазера // Письма в ЖЭТФ. 1981, т.34. С. 175 – 178.
10. Капралов В.П., Малышев Г.М., Павлов П.А. Измерение отношения длин волн лазеров, стабилизированных по насыщенному поглощению в иоде и в метане. // Оптика и спектроскопия. 1981. Т.50. С. 67 – 73.
11. Чеботаев В. П. Единый эталон длины и времени // Квантовая электроника 1982. Т. 9. С. 453 – 470.
12. Чеботаев В. П. ИК и оптические стандарты частоты / Препринт 42 – 79, Институт теплофизики СО АН СССР. Новосибирск, 1979.
13. Багаев С. Н., Захарьяш В. Ф., Клементьев В. М., Пивцов В. С., Чепуров С. В. Стабилизация частоты следования фемтосекундных импульсов $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Ti}$ - лазера // Квантовая электроника. 1997. 24. № 4. С 327 – 328.

Лекции № 6 – 7

Измерение времени и частоты

Всё врут календари!

(А.С. Грибоедов, комедия «Горе от ума»)

Краткая историческая справка, касающаяся аппаратуры для измерения времени

До XVI – XVII вв. наиболее распространенными были солнечные часы.

В XIII – XIV вв. были изобретены механические часы. В XVI в. на них появилась минутная стрелка, в XVIII в. – секундная.

В 1927 г. Морриссон и Хорт изобрели кварцевые часы.

1953 г. – Г. Лионс разработал молекулярные аммиачные часы.

1950 – 1960 гг. – изобретены и изготовлены атомно-лучевые цезиевые часы.

1955 г. Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, Гордон, Цайгер, Таунс изобрели лазер.

1960 – 1965 гг. – Г. М. Гольденберг, Д. Клеппнер, Н. Ф. Рамезей разработали и построили водородный квантовый генератор.

Заметим, что до сих пор люди часто пользуются песочными и механическими часами, хотя они являются древним изобретением и казалось бы должны давно устареть.

Методы измерения времени

Исторически сложилось так, что Солнце, Луна и звезды использовались людьми для счета времени и ведения календаря. Наиболее естественный интервал, принятый всеми народами во все времена, были солнечные сутки. До сих пор остался принцип деления суток по Халдейскому исчислению – в шестидесятеричной и двенадцатеричной системе. Несмотря на кажущуюся грубость измерений, многолетние наблюдения и запись астрономических событий позволили людям создать довольно точный календарь. Сложность заключалась в том, что Земля делает один оборот вокруг Солнца за 365,24220 средних солнечных суток (365 суток 5 часов 48 минут

46,1 секунды), а цикл фаз Луны составляет 29,5306 средних солнечных суток (синодический лунный месяц). В системе отсчета, связанной со звездами, Земля совершает один оборот вокруг своей оси за 0,997269567 средних солнечных суток, а Луна совершает один оборот вокруг Земли за 27,3217 средних солнечных суток (сидерический лунный месяц). Неделя, состоящая из 7 целых суток, исторически сложившаяся как четверть лунного месяца, реально не соответствует четверти месяца. Приведённые числа являются необходимой и достаточной основой всех календарей. Более подробно об устройстве календарей и сложившихся способах счёта времени можно узнать из приложения №1 «Календари и хронология».

Термин «средние солнечные сутки» означает следующее: орбита Земли вокруг Солнца не является окружностью, поэтому в разные времена года на разных участках орбиты Земля делает один оборот вокруг своей оси **относительно Солнца** за разное время. На рис. 1 изображен график, показывающий разницу (в минутах) между средним и истинным солнечным временем (график уравнения времени). Значение поправки, взятое из графика, нужно прибавить к измеренному истинному солнечному времени и в результате полу-

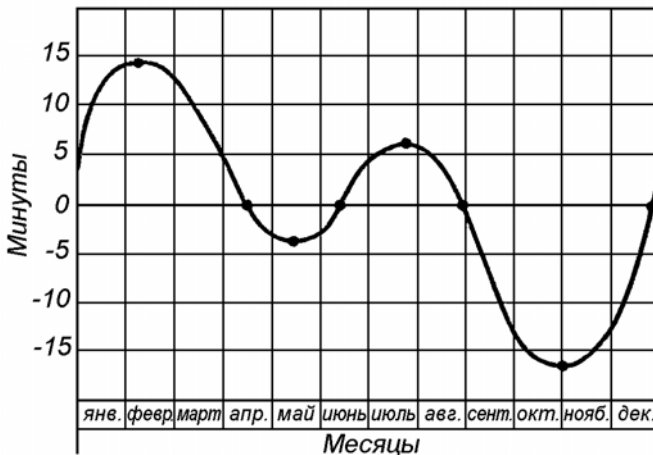


Рис. 1. Разница между средним солнечным временем и истинным солнечным временем

чится среднее солнечное время в данный момент. Из графика видно, что четыре раза в году – 15 апреля, 14 июня, 1 сентября и 24 декабря среднее солнечное время совпадает с истинным. Иногда нако-

пившаяся разница времени может составлять более 16 минут. Таким образом, угловое положение Солнца относительно горизонта и сторон света не является идеальным объектом для точного отсчета времени. Кроме того, Солнце – не точечный объект и сложно определить его точное угловое положение на небе.

Гораздо точнее можно отсчитывать время, если пользоваться звездными сутками – временем, за которое Земля делает один оборот относительно окружающих её удаленных звезд. Неудобство заключается в том, что звездные сутки короче солнечных суток на 3 минуты 56 секунд. Иными словами, Земля за один оборот по орбите вокруг Солнца делает на один оборот (вокруг своей оси) больше в системе отсчета, связанной со звёздами. В результате один год состоит из 366,24220 звёздных суток. Непосредственно наблюдаемое время может быть измерено с точностью $10 \div 15$ миллисекунд с помощью специальных астрономических инструментов за $1 \div 2$ часа наблюдений. Прохождение звезды через меридиан обычно наблюдается с помощью фотографической зенитной трубки, призмной астролябии Данжона или специального небольшого телескопа с фотоэлектронным умножителем (см. Приложение №2 «Пассажные инструменты»). Шкале непосредственно наблюдаемого по положению звезд в конкретной точке Земли астрономического времени присвоено название UT0 (Universal time 0).

Обратим внимание на то, что при измерении времени может быть введено два понятия: интервал времени и абсолютная дата. Если физиков чаще всего интересует как можно более точное определение из эксперимента интервала времени, то астрономов, навигаторов, геодезистов и военных – абсолютная датировка событий, привязанная к вращению Земли (и к координатам объектов на ее поверхности).

Но, как оказалось, шкала UT0 имеет принципиальную погрешность даже при абсолютно неизменной скорости вращения Земли. Изменение направления оси вращения в теле Земли (иными словами движение полюса) приводит к изменению момента прохода звёзд через меридиан, причём в разных точках Земли поправка будет разной (до 30 миллисекунд). Если вычесть поправку на текущее положение полюса, то шкала времени будет одинакова во всех точках на поверхности Земли. Именно эта шкала, называемая UT1, более всего подходит для практической астрономии и навигации. Бо-

лее подробно о движении полюса, фигуре Земли и точной навигации см. Приложение № 3.

История введения и эволюция различных шкал времени и эталонов времени - частоты

В 1884 г. международной конференцией в Вашингтоне принят отсчётный меридиан Гринвича для измерения долготы и времени. Введено среднее солнечное время по Гринвичу – GMT (Greenwich Mean Time), деление Земного шара на 15-градусные часовые пояса с дискретными скачками времени от пояса к поясу. В это время отсчет 24-часовых суток гражданские потребители вели с полуночи, а астрономы и мореплаватели – с полудня. Астрономические сутки начинались на 12 часов позже гражданских. Если кому-то это покажется не существенным, то обратите внимание, что в 50 % случаев любое событие может быть отнесено к разным суткам в разных шкалах.

В 1904 – 1912 гг. Парижская обсерватория, министерство ВМС США и Гринвичская обсерватория начали передачу сигналов точного времени по радио.

1912 г. – в Париже собралась первая международная конференция, создавшая исполнительный орган слежения за временем и унификацией шкал и сигналов – Международное Бюро Времени (МБВ).

1920 г. – Пулковская обсерватория организовала регулярную радиотрансляцию сигналов точного времени.

1928 г. – Лейден, Нидерланды. Международный Астрономический Союз (МАС) рекомендовал применить термин «UT» для обозначения среднего солнечного времени по Гринвичу с отсчетом от полуночи. С этого момента гражданские сутки и астрономические сутки по шкале UT стали начинаться одновременно.

1955 г. – на IX генеральной ассамблее МАС были предложены шкалы:

UT0 – непосредственно наблюдаемое время;

UT1 – время UT0 с поправкой на движение полюса;

UT2 – время UT1 с поправкой на сезонное изменение скорости вращения Земли (из-за перемещения воздуха и изменения её момента инерции расхождение с линейной шкалой времени может со-

ставлять до 30 мс). Весной Земля вращается быстрее, осенью – медленней.

Было отмечено, что введение дополнительных поправок всё равно не позволяет использовать шкалу UT2 в качестве эталона для определения секунды и точных физических измерений, т. к. все системы UT зависят от нерегулярных и непредсказуемых длительных изменений вращения Земли, показанных на рис. 2. Таким образом, до 1956 г. секунда была переменной величиной.

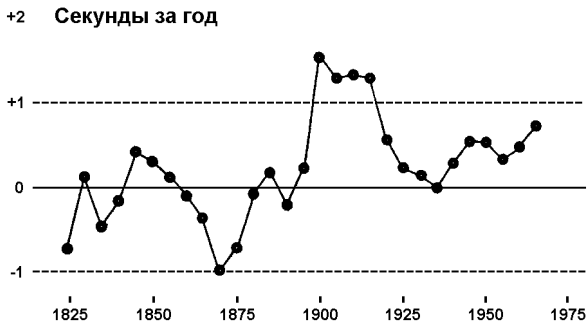


Рис. 2. Годовые изменения UT, усреднённые внутри 5-летних интервалов

Это не означает, что все проводившиеся до этого астрономические измерения страдают ошибками. Составляемые позиционной астрономией эфемеридные таблицы, основанные на строгой гравитационной теории, регистрирующие и предсказывающие положение небесных тел, обладают гораздо большей точностью. Наглядным примером этому служит рис. 2, показывающий годовые изменения UT, усредненные за интервалы величиной в 5 лет. По измеренным отклонениям и невязкам можно построить график разности между шкалой UT0 и шкалой эфемеридного времени ET (рис. 3). Чтобы получить шкалу ET нужно к шкале UT0 прибавить поправку, показанную на рис. 3.

Шкала эфемеридного времени ET была официально предложена, введена и узаконена в 1948 – 1952 годах.

Поэтому в 1956 г. Международный Комитет Мер и Весов (МКМВ) одобрил использование эфемеридной секунды в качестве узаконенной единицы времени: «одна секунда есть часть $1/31556925,9747$ тропического года для 1900 г. января 0 в 12 часов

эфемеридного времени». В результате эталон секунды приобрел стабильность, но утратил быструю воспроизводимость для любой лаборатории. Для воспроизведения были необходимы длительные астрономические наблюдения (около 2 – 3 лет). То есть такая секунда была «вечно вчерашняя». Так как в это время уже существовали атомно-лучевые цезиевые часы примерно такой же точности, то ученые предпочитали использовать их для прецизионных лабораторных измерений.

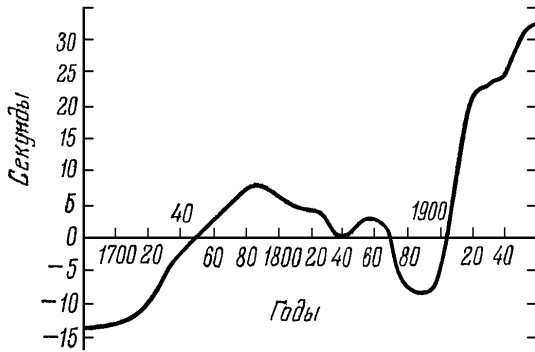


Рис. 3. Разница между эфемеридным временем ET и временем UT0, привязанным к вращению Земли

В 1967 г. на 13-ой Генеральной конференции по мерам и весам отменено определение секунды через ET. Принят цезиевый атомный стандарт времени. Частота квантового перехода атомно-лучевых цезиевых часов была выражена через эфемеридную секунду с точностью порядка $2 \cdot 10^{-9}$. В результате была определена шкала Международного Атомного Времени (International Atom Time, IAT) и принято новое определение секунды: «одна секунда – это 9192631770 периодов излучения между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома ^{133}Cs ». Воспроизводимость цезиевого эталона в это время составляла $\pm 1 \cdot 10^{-11}$.

Подробнее о шкалах времени, истории введения эталонов времени – частоты, их поддержания, сличении и применении для разных целей можно прочесть в [1].

Проблемы потребителей эталонов времени – частоты

Введение всех упомянутых выше шкал времени создает противоречие.

С одной стороны, для текущих астрономических наблюдений и навигации (наземной и космической) не нужна абсолютно точная линейная шкала времени IAT. Нужна шкала, наиболее точно привязанная к неравномерному и непредсказуемому вращению Земли. Более всего на эту роль подходит UT1;

С другой стороны, для физических измерений, для точного хранения и проверки всех других астрономических шкал времени более всего подходит равномерная шкала атомного времени.

После такого предисловия, я думаю, большинство из вас не ответит на простой вопрос: какую шкалу точного времени передают по радио, предлагая проверить часы?

Введение шкалы UTC

Данное противоречие было разрешено введением с 00:00 часов 1 января 1972 г. новой шкалы времени – UTC (Universal Time Coordinated) или Всемирного координированного времени. Ширина секундных интервалов в шкале UTC задается точно такой, как в IAT: на основе определения цезиевого атомного эталона секунды. Как только между этой равномерной шкалой секунд и шкалой UT1 накапливается разница, равная 0,7 секунды, производится коррекция: одним скачком добавляется или отнимается 1 секунда. В результате разница между шкалой UTC и шкалой UT1 никогда не бывает больше 0,7 секунд. Введение положительной или отрицательной секунды производится по решению МБВ обычно 31 декабря или 30 июня с предварительным уведомлением за 8 недель. Таким образом, однажды посмотрев на точные кварцевые часы и отметив, что они «скакнули» за ночь на одну секунду, не спешите думать, что они начали портиться. Проверьте – какая дата была вчера.

Для потребителей, которых не устраивает шкала UT1 с точностью 0,7 секунды, одновременно с сигналами UTC передаются поправки, показывающие уклонение (Deviation) UT1 от UTC:

$$DUT1 = UT1 - UTC.$$

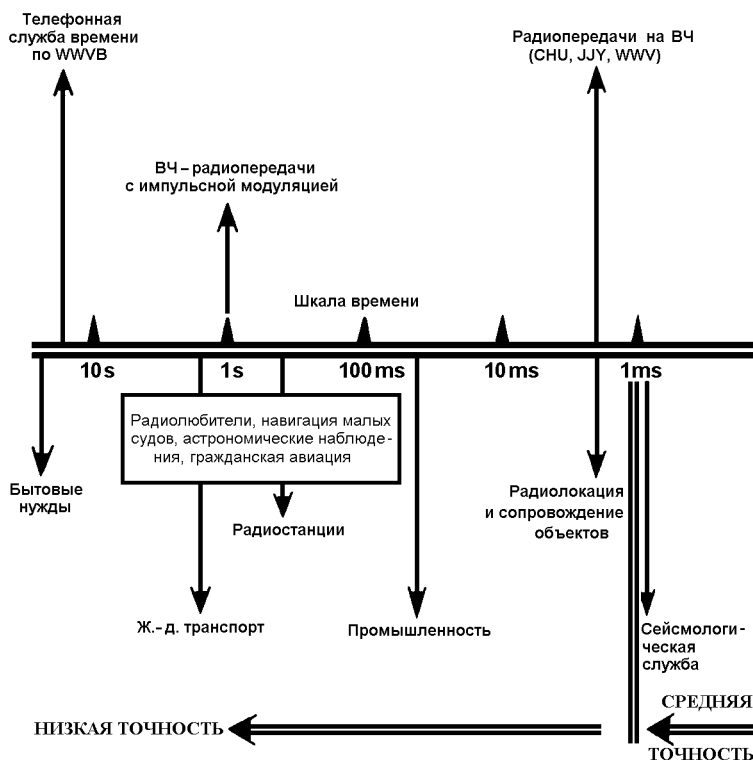
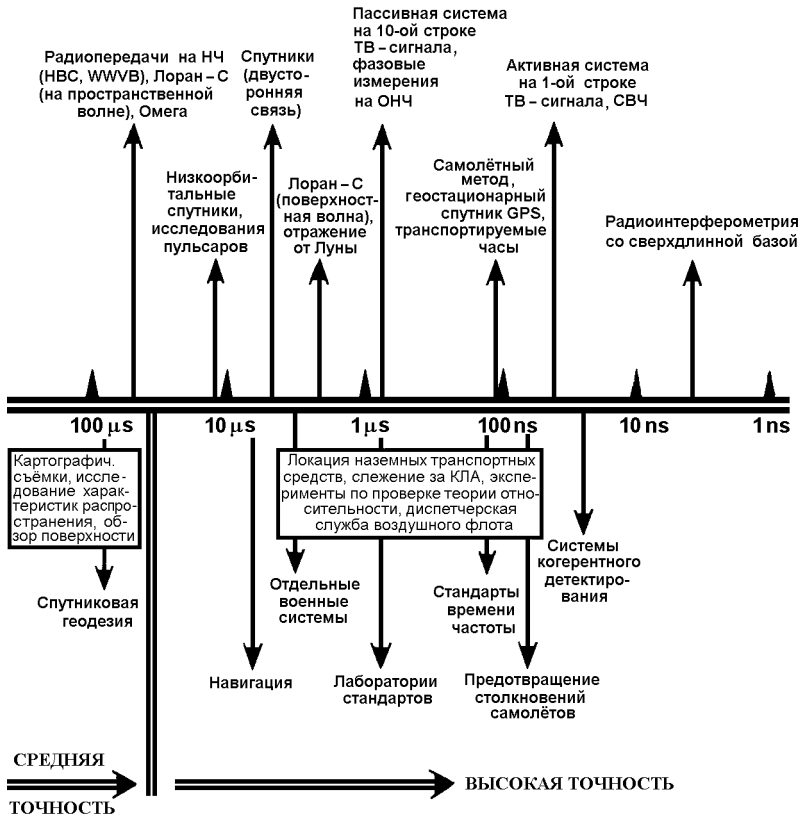


Рис. 4. Требования к точности измерения сигналов времени.
Стрелки, обращённые вниз – потребителей,

Специальные радиостанции (WWVB, Боулдер, Колорадо – в США, RWM/RES – в России, и др.), постоянно передающие сигналы точного времени на частотах 5 МГц, 10 МГц, 15 МГц, указывают значение DUT1 числом выделенных внутри минутного интервала сигналов (сдвоенных или окрашенных), а знак DUT1 – положением этих сигналов внутри минутного интервала (в первой или второй половине минуты). Данные DUT1 могут также передаваться голосом или кодом Морзе. Учёт поправок позволяет с помощью обыч-



Стрелки, обращенные вверх, показывают метод передачи сигнала, которым требуется данная точность.

ного коротковолнового приёмника всегда знать UT1 с точностью не хуже 0,1 секунды. Этого чаще всего достаточно для абсолютной датировки событий или определения координат по звёздам (25 метров для широты Новосибирска).

На рис. 4 показаны потребители сигналов точного времени и частоты. По требованиям к точности измерения сигналов времени их можно условно разделить на три группы. Стрелки, обращённые вверх от шкалы порядков величин, показывают метод передачи

сигнала. Стрелки, обращённые вниз, показывают каким потребителям нужна данная точность.

Небольшие добавления

Во всех странах согласно постановлениям МБВ при вычислении поправки для разницы между UT0 и UT1 пользуются положением полюса 1900 – 1905 г. В СССР и в России отсчёт поправок всегда вёлся от интеграла среднего положения полюса за всё время наблюдения за полюсом (такая система отсчёта даёт примерно в 2 раза лучшую точность). Разница незначительная, но она существует во всех таблицах наблюдений и не стоит про это забывать.

Радиостанции службы времени России (СССР) передают ту же информацию, что и иностранные координатные станции, и, кроме того, дополнительную информацию, уточняющую поправку DUT1 до 0,02 с за счет дополнительных сигналов с 21-й до 24-й секунды (положительная поправка) и с 31-й до 34-й секунды (отрицательная поправка).

Кроме отмеченных выше изменений скорости вращения Земли существует вековое замедление порядка 0,002 с за 100 лет, скорее всего связанное с океанскими приливами. Приливы в атмосфере вызывают ускорение вращения Земли, но их влияние меньше океанских.

Во многих случаях пользуются следующими франкоязычными аббревиатурами для шкал времени: TU0 (Temps Universelles), TUA (Temps Universelles Atomique), TUC (Temps Universelles Coordonne).

Устройство и сравнение характеристик различных часов, эталонов времени и частоты

Солнечные часы являются древнейшим прибором для измерения времени. Правильно установленные часы показывают местное истинное солнечное время с точностью около 2 минут. Точность определяется угловым размером Солнца 30' (что задаёт резкость теневой кромки) и скоростью вращения Земли 15°/час. В экваториальных солнечных часах, показанных на рис. 5, доска с циферблатом устанавливается наклонно к горизонту под углом $90^\circ - \varphi$, где φ – географическая широта данной местности. Для Новосибирска (район Дома учёных в Академгородке) широта $\varphi \approx 54^\circ 50'$, а угол

наклона доски $90^\circ - 54^\circ 50' = 35^\circ 10'$. Указатель экваториальных часов имеет вид стержня, установленного перпендикулярно доске и параллельно земной оси. Стержень пронзает доску – часть его находится сверху, а часть снизу доски. Это делается потому, что летом тень от стержня падает на циферблат сверху доски, а зимой – снизу. Достоинством экваториальных солнечных часов является то, что часовые деления расположены на равных расстояниях друг от друга, недостатком –

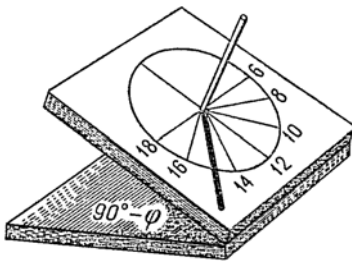


Рис. 5. Экваториальные солнечные часы

то, что часть года тень падает на циферблат снизу, затрудняя наблюдения. В какой-то мере недостаток можно исправить, взяв в качестве доски с циферблатом прозрачную матовую поверхность.

Горизонтальные солнечные часы, показанные на рис. 6, состоят из горизонтально расположенной доски с нанесённым на неё циферблатом и расположенного перпендикулярно доске указателя в виде треугольника. Острый угол треугольника, совмещённый с центром циферблата, делается равным географической широте φ данной местности, так что наклонная сторона треугольника получается параллельной земной оси, а основание треугольника расположено по линии север – юг ¹. Недостатком

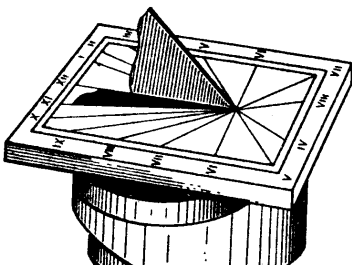


Рис. 6. Горизонтальные солнечные часы

горизонтальных часов является неравномерная шкала – часовые отметки на циферблате расположены под разными, неравными уг-

¹ При ориентировании часов следует помнить, что магнитное направление север – юг отличается от астрономического (для Академгородка склонение восточное, примерно на 9°). Направление на Полюс Мира находится примерно в $0,8^\circ$ от Полярной звезды в сторону ковша Малой медведицы.

лами, достоинством – то, что тень падает на циферблат сверху в любое время года.

Чтобы сравнивать показания солнечных часов с обычными часами (у которых шкала времени равномерная), необходимо перейти от истинного солнечного к среднему солнечному времени, введя добавку, зависящую от времени года (добавка показана на рис. 1.).

Обычные механические часы имеют точность $\Delta t / t$ порядка 10^{-4} . Специальными приёмами (вакуумирование, электронный способ возбуждения и контроля, термостатирование) точность маятниковых астрономических часов может быть доведена до $2 \cdot 10^{-8}$ (часы Шорта). Абсолютный мировой рекорд – $3 \cdot 10^{-9}$ (часы Федченко). На точность хода таких маятниковых часов влияют даже слабые сейсмические колебания. Регистрируются также изменения сил тяготения, связанные с лунными и солнечными приливами. Хронометры с колесом – балансиrom и спиральной пружиной уступают в точности маятниковым часам, имеют ошибку, связанную со старением и рекристаллизацией материала пружины и требуют регулярной поверки.

Принцип действия кварцевых часов основан на пьезоэффекте и обычных механических колебаниях кристалла, подвешенного чаще всего на тонких подводящих электричество проволочках. На пластину, вырезанную из монокристалла кварца, наносятся тонкие проводящие (обычно серебряные) электроды. Подача напряжения на электроды вызывает механическую деформацию кристалла. Имеет место и обратный эффект – деформация кристалла порождает напряжение на электродах. Провода, идущие от кристалла, включают между входом и выходом усилителя электрических сигналов (в цепь положительной обратной связи). В результате в электрической схеме и в механической системе возникают незатухающие колебания. Потери энергии колебаний через подвес и окружающий газ в первую очередь определяют добротность резонатора и точность поддержания частоты. От температуры и ориентации среза кристалла также зависит уход частоты. Точность наручных кварцевых часов $10^{-5} \div 10^{-6}$. Точность стандартного (рядового) частотомера с термостатированным вакуумированным кварцем $\sim 10^{-8}$. Именно с такой точностью можно без особого труда проводить измерения времени и частоты практически в любой лаборатории. Но необходимо помнить, что кварцевые часы имеют ошибку, связанную с многолетним старением (изменением физических свойств) кристал-

ла. Эффект старения частично связан со снятием деформаций и приводит к снижению частоты $\Delta f/f \sim 10^{-10} \div 10^{-11}$ в сутки.

Атомные лучевые цезиевые часы используют квантовый переход в атоме и поэтому не подвержены старению, как кварцевые. Для создания эталона необходимо выдерживать однородный изотопный состав ^{133}Cs . Схема часов показана на рис. 7. Главной частью квантового стандарта частоты является т. н. атомно-лучевая трубка,

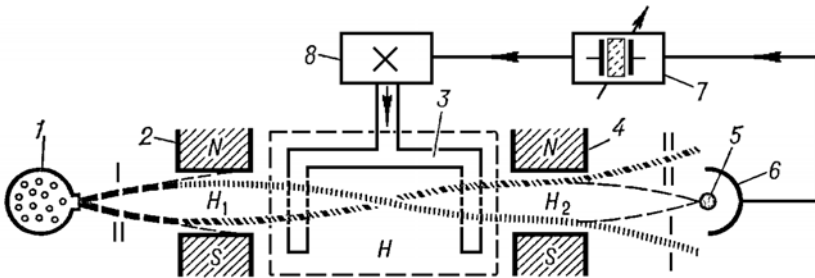


Рис. 7. Схема атомно-лучевых цезиевых часов

на одном конце которой расположена полость, наполненная жидким цезием при температуре около 100°C . Пучок атомов цезия, вышедший из печи-испарителя 1, сортируется селектором состояний 2 (подробнее показан на рис. 8), который с помощью неоднородного магнитного поля H_1 расщепляет пучок на 16 пучков. За счёт эффекта Зеемана основной энергетический уровень ^{133}Cs расщепляется на 16 подуровней. Для семи из них энергия атома возрастает с увеличением поля, для других семи – убывает, а для двух почти не зависит от поля. При этом семь пучков отклоняются в сторону большего поля (в сторону N), семь – в сторону меньшего поля (в сторону S), а два пучка с энергиями ϵ_1 и ϵ_2 – летят почти не отклоняясь и попадают в поле H_2 селектора состояний 4. В промежутке между полями H_1 и H_2 атомы дважды пролетают через резонатор Π – образной формы 3, в котором возбуждаются электромагнитные колебания частоты, отвечающей переходам между уровнями с энергиями ϵ_1 и ϵ_2 . Если под влиянием электромагнитного поля атомы цезия с энергией ϵ_1 перейдут в состояние с энергией ϵ_2 или атомы с энергией ϵ_2 перейдут в состояние с энергией ϵ_1 , то поле H_2 направит их мимо детектора и ток детектора уменьшится на величину, пропорциональную числу атомов, совершивших переход. Детектор атомов

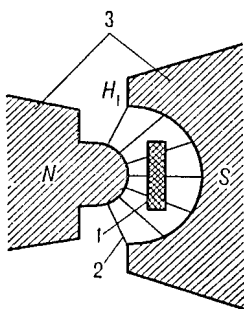


Рис. 8. Селектор состояний: 1 – пучок атомов цезия, 2 – силовые линии магнитного поля, 3 – полюса магнита

цезия состоит из раскалённой вольфрамовой проволоочки 5 и коллектора 6. Как только атом цезия касается проволоочки, он отдаёт ей электрон и в виде иона притягивается к коллектору. В цепи между коллектором и проволоочкой возникает ток, пропорциональный интенсивности цезиевого пучка. Ионный ток очень слабый, поэтому он обычно усиливается умножителем вторичных электронов. В описанном пассивном квантовом стандарте частоты используются переходы атома цезия между магнитными подуровнями. Переходы такого типа могут наблюдаться только в присутствии постоянного однородного магнитного поля. Поэтому резонатор помещён в однородное постоянное поле H . П – образная форма резонатора позволяет увеличить время воздействия высокочастотного поля на атомы и сделать резонансный пик узким. Сигнал с детектора атомов цезия управляет частотой вторичного кварцевого генератора 7, который через схему умножения частоты 8 управляет частотой электромагнитного поля, подаваемого в резонатор П – образной формы 3. Обратная связь настроена таким образом, чтобы число возбуждённых атомов с переходами между уровнями с энергиями ϵ_1 и ϵ_2 было максимальным. Это соответствует центру спектральной линии (центру резонансного пика).

Часы имеют систематическую ошибку, связанную с ориентацией слабого внешнего магнитного поля (например, Земли) и доплеровским эффектом второго порядка (первый порядок отсутствует из-за перпендикулярности скорости молекул и вектора поля в СВЧ-резонаторе). Относительная точность цезиевых часов составляет величину порядка 10^{-13} . Преимущество описанного устройства состоит в том, что вторичные цезиевые стандарты серийного производства не уступают по точности эталонным. Даже малогабаритные цезиевые трубки для лабораторной практики и на подвижных объектах работают с относительной погрешностью $\sim 10^{-11} \div 10^{-12}$.

Водородный мазер (см. рис. 9) является активным квантовым стандартом частоты и отличается от цезиевых часов принципом действия. В нём излучение возбужденных атомов водорода, находящихся в верхнем сверхтонком состоянии, порождает электромагнитные колебания в СВЧ-резонаторе. Название MASER является аббревиатурой используемого физического процесса – Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (усиление микроволн путем вынужденного испускания излучения). Атомарный во-

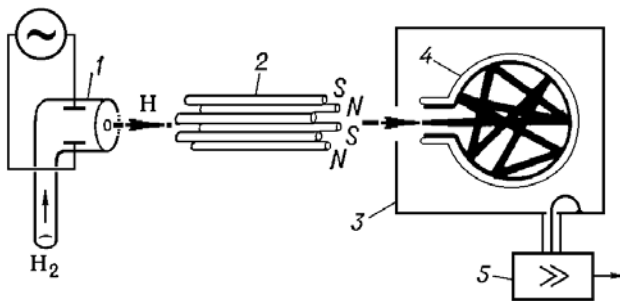


Рис. 9. Схема водородного квантового генератора частоты (мазера).

дород создается с помощью высокочастотного разряда в капилляре 1. При низком давлении под влиянием электрического поля разряда молекулы водорода расщепляются на атомы и поступают в установку в виде узкого пучка. Далее атомы пролетают через мультипольный (многополюсный) магнит 2, который их сортирует и фокусирует в накопительную колбу 4. Неоднородное магнитное поле фокусирует к оси пучка атомы, находящиеся в возбужденном состоянии, и разбрасывает в стороны атомы, находящиеся в основном состоянии. Возбужденные атомы влетают через отверстие в кварцевую колбу 4, находящуюся внутри объемного резонатора 3, и возбуждают в нём электромагнитное поле с частотой, соответствующей переходу атомов из возбужденного состояния в основное. Фотоны, излучаемые атомами водорода при переходе в основное состояние, в течение длительного времени, определяемого добротностью резонатора, остаются внутри него, что создаёт обратную связь для самовозбуждения квантового генератора. Однако достижимые добротности резонаторов и интенсивности пучков атомов водорода

всё же недостаточны для самовозбуждения генератора. Поэтому стенки кварцевой колбы покрывают изнутри тонким слоем фторопласта (тефлона). Атомы водорода могут упруго ударяться о плёнку фторопласта $\sim 10^4$ раз. В колбе скапливаются возбуждённые атомы водорода – среднее время пребывания каждого из них в резонаторе увеличивается примерно до 1 с. Этого достаточно для возбуждения генерации. Колба, размеры которой выбираются меньшими, чем генерируемая длина волны $\lambda \approx 21$ см, играет ещё одну важную роль. Хаотическое движение атомов водорода внутри колбы должно было бы привести к уширению спектральной линии из-за эффекта Доплера. Однако если движение атомов ограничено объёмом, размеры которого меньше длины волны λ , спектральная линия приобретает вид узкого пика, возвышающегося над широким низким пьедесталом. В результате ширина спектральной линии примерно равна 1 Гц. Мощность генератора крайне мала ($\sim 10^{-12}$ Вт), поэтому сигнал усиливается чувствительным приёмником 5.

Частота излучения водородного генератора, измеренная цезиевым эталоном, равна $1420405751,7860 \pm 0,0046$ Гц.

Несмотря на большую стабильность и отсутствие систематического дрейфа (по сравнению с цезиевым эталоном) водородный мазер и в настоящее время остается вторичным эталоном. Если первые образцы мазера уступали в точности цезиевому стандарту, то современные конструкции практически не уступают цезиевому эталону. С другой стороны, цезиевые эталоны в специально контролируемой окружающей среде могут приближаться по стабильности к водородным мазерам. Как правило, в крупных метрологических центрах имеется набор из нескольких эталонов – как цезиевых, так и водородных, обычно не менее трёх для каждого типа. Например, в Новосибирском институте метрологии кроме цезиевых эталонов имеется пять водородных мазеров. Для повышения точности первичного цезиевого эталона в центральной метрологической службе России применяется конструкция на встречных пучках (три установки).

Сравнение стабильности и точности различных эталонов времени и частоты (см рис. 10) показывает, что для различных интервалов времени стабильность и точность приборов сильно изменяются. Например, стабильность кварцевого генератора для интервалов времени $0,1 \div 10$ с не уступает стабильности цезиевого стандарта, в то время как абсолютная точность частоты кварцевого генератора, конечно, ниже. Во временной области от 10^2 до 10^6 с стабильность водородных мазеров превышает стабильность других источников частоты. В том же интервале точность цезиевого стандарта выше водородного (хотя стабильность ниже на $1 \div 2$ порядка). В интервале от 10^{-3} до 1 с лазерный He-Ne стандарт частоты с метановой ячейкой является самым стабильным (последние достижения в области создания данного эталона частоты: стабильность $\sim 5 \cdot 10^{-15}$,

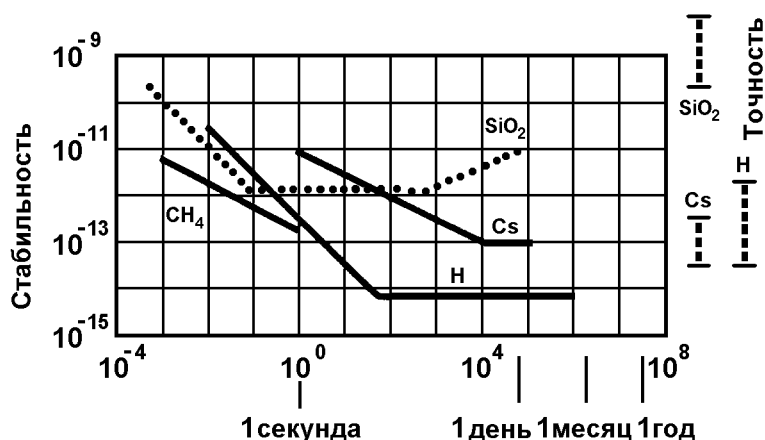


Рис. 10. Сравнение стабильности и точности (воспроизводимости) различных эталонов времени – частоты

воспроизводимость частоты $\sim 10^{-13}$ для приборов, производимых мелкими сериями). Подробно о конструкции различных часов и об истории их создания написано в книгах [1, 2].

Весьма многообещающими являются работы по захвату и лазерному охлаждению отдельных атомов либо ионов. Разберёмся более подробно с удержанием иона. Ион проще заставить (с помощью электрических и магнитных полей) находиться в заданном ограниченном объёме пространства и с малой амплитудой скорости, нежели нейтральный атом. С помощью пучков света смещение захва-

ченного иона по координатам ограничивается ещё сильнее, чем с помощью полей квадрупольной ловушки ($\Delta x < 1$ мкм). В результате доплеровские сдвиги частоты, влияние соударения со стенками и с соседними атомами практически отсутствуют. Схема установки показана на рис. 11. Квадрупольная ловушка состоит из трёх электродов – одного тороидального и двух сферических. На тороидальный электрод подаётся постоянный потенциал, на сферические электроды – радиочастотный сигнал. Размеры электродов $0,5 \div 1$ мм. Два

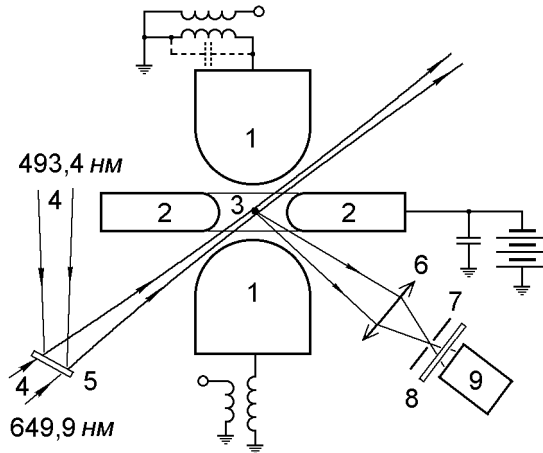


Рис.11. Схема установки для удержания и оптического охлаждения одиночного иона в квадрупольной ловушке: 1 – сферические электроды, 2 – тороидальный электрод, 3 – ион Ba^+ , 4 – координатные лазерные пучки, 5 – полупрозрачное зеркало, 6 – объектив, 7 – диафрагма, 8 – интерференционный светофильтр, 9 – ФЭУ

координатных когерентных пучка света с частотами, соответствующими переходам между уровнями в электронных оболочках иона проходят примерно под углом 45° к оси ловушки. С помощью двух катушек вдоль пучков света в ловушке создаётся магнитное поле для воздействия на магнитные подуровни иона. В направлении под углом 90° к пучкам когерентного света изучается люминесценция иона. Ловушка находится в высоком вакууме $\sim 10^{-11}$ мм. рт. ст. Авторам работ [3, 4] удалось наблюдать переход между уровнями $6^2S_{1/2}$ и $5^2D_{5/2}$ иона бария с частотой $\sim 10^{15}$ Гц и с временем жизни на метастабильном уровне $5^2D_{5/2}$, большем, чем 30 с. То есть осуществить спектроскопию сверхвысокого разрешения с точностью $\sim 10^{-17}$

и создать оптический квантовый усилитель сигнала с коэффициентом $\sim 10^6$ на ионе бария. В упомянутых экспериментах ² используется излучение квантового перехода одного иона, а не группы атомов, как в используемых сейчас стандартах времени. Эксперименты с использованием оптически охлаждённых ионов и атомов дают предпосылку создания стандарта частоты с точностью порядка 10^{-17} . Более подробно о создании новых оптических стандартов времени и частоты рассказано в обзорной статье [5].

Измерение больших интервалов времени.

Изотопная хронология

Для измерения больших промежутков времени применяется группа методов, в которых используется явление радиоактивного распада ядер различных изотопов.

Для решения задач археологии, палеогеографии и геологии применяется метод радиоуглеродного датирования. Метод был предложен в 1949 г. В. Ф. Либби. Естественный углерод представляет собой смесь нескольких изотопов, в том числе двух стабильных: ^{12}C (98,9 %) и ^{13}C (1,1 %), а также очень малого, равного $1,07 \cdot 10^{-10}$ % количества нестабильного изотопа ^{14}C . Период полураспада изотопа ^{14}C равен 5730 годам, поэтому совершенно невероятным является предположение, что он образовался вместе с Землёй. Даже если бы вся Земля состояла вначале из изотопа углерода ^{14}C , то через 4,5 миллиарда лет его осталось бы меньше, чем есть сейчас. Механизм образования изотопа ^{14}C заключается в следующем. На Землю непрерывным потоком приходит космическое излучение, в составе которого есть нейтроны. При прохождении через атмосферу нейтроны взаимодействуют с ядрами атмосферного азота. Происходит ядерная реакция, схема которой показана на рис. 12. Нейтрон, сталкиваясь с ядром азота, образует с ним промежуточную неустойчивую систему, которая спустя короткое время выбрасывает протон и, таким образом, превращается в ядро углерода ^{14}C . За перестройкой ядра быстро происходит перестройка электронной оболочки и по-

² С помощью удержания одиночного электрона (позитрона) в квадрупольной ловушке удалось сделать новую экспериментальную оценку для радиуса электрона (менее, чем 10^{-20} см), что в 10000 раз меньше значения, полученного в экспериментах на ускорителях.

лучается атом углерода, в химическом отношении идентичный любым другим углеродным атомам. Вступая в соединение с атомами кислорода, он окисляется до углекислого газа. Далее углекислый газ поглощается растениями, входит в состав углекислых солей в океане и таким образом включается в биохимический круговорот жизни Земли.

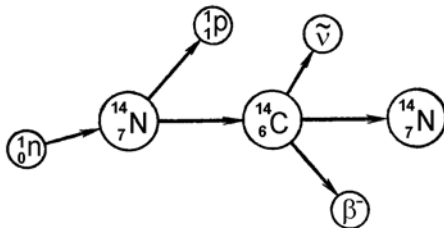


Рис. 12. Реакция образования и распада радиоуглерода ^{14}C

После умирания организма (растения) его углеродный обмен с внешней средой прекращается. При распаде ядра атома углерода ^{14}C испускается бета-частица (электрон) и антинейтрино, а ядро ^{14}C превращается в ядро стабильного азота ^{14}N .

При этом концентрация радиоактивного углерода в образце организма (растения) падает. В первоначальном состоянии удельная активность на 1 грамм углерода составляет $n_0 = 15,3$ распадов в минуту. При измерении возраста образца его излучение за счёт распада ^{14}C сравнивается с первоначальным (равновесным). При этом считается, что закон убывания радиоактивности образца экспоненциально зависит от времени:

$n(t) = n_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$, или иначе

$n(t) = n_0 \cdot 2^{-\frac{t}{\tau_{1/2}}}$, где τ – среднее время жизни атома. Время полураспада вещества $\tau_{1/2}$ и среднее время жизни атома τ связаны соотношением $\tau_{1/2} = \tau \cdot \ln 2$, где $\ln 2 \approx 0,6931$. Максимальный срок датировок с помощью радиоуглеродного метода – 50÷70 тысяч лет. Точность метода падает с увеличением интервала времени. Метод требует ряда предположений относительно стабильности фона космического облучения Земли и отсутствия изменения концентрации углерода в образце после его отмирания. На самом деле концентрацию радиоуглерода в окружающей среде при точных измерениях времени нельзя считать постоянной во времени, а образец не обязательно является закрытой системой и может обмениваться веществом с окружающей средой. На рис. 13 показана зависимость от времени одного из факторов, влияющих на точность радиоуглеродного

метода – удельной активности углерода. Кривая 1 связана с солнечной активностью, 2 – с ядерными испытаниями, 3 – с промышленными выбросами углекислоты (стабильных изотопов) в атмосферу.

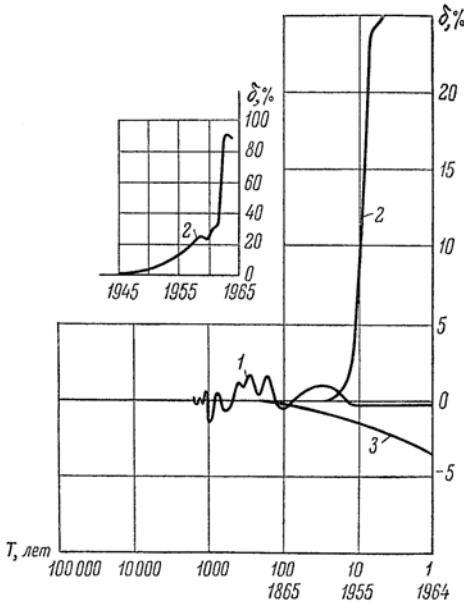


Рис. 13. Удельная активность углерода ^{14}C от времени в результате: 1 – изменения солнечной активности, 2 – ядерных испытаний, 3 – выброса CO_2 в атмосферу

Видно, что испытания оружия в атмосфере, в космосе и под водой привели к увеличению доли излучения от ^{14}C примерно в два раза. В настоящее время в связи с запретом ядерных испытаний данный эффект имеет тенденцию к уменьшению. Для датирования образцов старше 55 лет он не имеет значения.

Для решения задач геологии, палеогеографии и астрофизики необходимо измерять интервалы в миллионы и миллиарды лет. Для этих целей используется исследование количества долгоживущих изотопов и парных им стабильных

изотопов, получающихся в образце в конце процесса распада: $^{238}\text{U} - ^{206}\text{Pb}$, $^{235}\text{U} - ^{207}\text{Pb}$, $^{40}\text{K} - ^{40}\text{Ar}$, $^{232}\text{Th} - ^{208}\text{Pb}$, $^{87}\text{Rb} - ^{87}\text{Sr}$. Все перечисленные изотопы не являются редкими элементами. Например, любая вулканическая порода (такая, как гранит) содержит от 2 до 20 граммов урана. Для первой пары изотопов $^{238}\text{U} - ^{206}\text{Pb}$ схема процесса распада показана на рис.14. Шаг влево означает испускание α -частицы (ядра гелия), шаг вправо – испускание β -частицы (электрона). Как видно из схемы, гелий также является стабильным продуктом распада, однако гелий легко диффундирует через все материалы, покидает образец, и поэтому трудно определить сколько его выделилось в процессе реакции распада изотопа урана. Использо-

его определения. Чем ближе точка лежит к конкордии, тем достоверность выше. Времена полураспада ^{238}U и ^{235}U (4,51 и 0,71 миллиарда лет соответственно) определяют границы применения метода.

Аргон-калиевый метод основан на том, что калий достаточно широко распространён в природе и состоит из двух стабильных изотопов ^{39}K (93,08 %), ^{41}K (6,91 %) и одного нестабильного ^{40}K (0,0119 %) с временем полураспада 1,31 миллиарда лет. Распад ^{40}K происходит по разветвлённой схеме, показанной на рис. 16, и приводит к образованию двух стабильных изотопов. В результате β -распада образуется кальций-40, а в результате К-захвата – аргон-40. Находящийся в природе первозданный ^{40}Ca составляет 99,6 % и часто находится в образце вместе с калием в больших количествах. Поэтому использование ^{40}Ar для определения возраста образца даёт лучшую точность. В

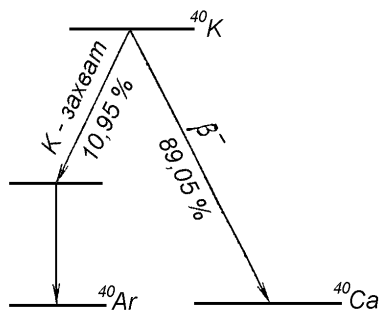


Рис. 16. Схема распада ^{40}K

воздухе имеется довольно много аргона (около 1 %). Чтобы исключить из расчётов аргон, попавший в образец из воздуха, используют тот факт, что атмосферный аргон имеет вполне определённый изотопный состав: ^{36}Ar (0,337 %), ^{38}Ar (0,063 %) и ^{40}Ar (99,6 %). Определив содержание в образце ^{36}Ar , можно сказать, сколько проникло в него воздушного аргона, в том числе ^{40}Ar . Погрешности измерений аргон-калиевого метода удалось снизить до столь малой величины, что это позволило датировать «молодые» образцы в интервале 100 тыс. лет – 1 миллион лет и, таким образом, почти состыковать границы его применения с границами радиоуглеродного метода. Верхняя временная граница аргон-калиевого метода позволяет измерять возраст древнейших горных пород Земли.

Многочисленные исследования показали, что в отношении рубидия и стронция большинство горных пород ведёт себя как закрытые системы, начиная с момента переплавления породы. Природный рубидий состоит из двух изотопов: стабильного ^{85}Rb (72,15 %) и радиоактивного ^{87}Rb (27,85 %). Период полураспада ^{87}Rb равен 47 миллиардам лет. При распаде ^{87}Rb испускает β -частицу и пре-

вращается в стабильный стронций-87. Для того чтобы учесть содержание в исследуемом минерале стронция-87 нерадиогенного происхождения, нужно измерить количество других его изотопов (^{86}Sr , ^{88}Sr). По содержанию этих изотопов вычисляют количество нерадиогенного стронция-87 и затем в расчёты вводят соответствующую поправку. Рубидий-стронциевый метод удобен для измерения очень больших промежутков времени.

Наиболее надёжные результаты получаются при определении возраста одного и того же образца разными методами. Например: рубидий-стронциевым, калий-аргоновым и уран-свинцовым. Более подробно о радиоизотопных методах хронологии можно прочитать в монографии [2].

Шкала порядков величин для времени

Шкала интервалов времени, доступных для измерения различными методами экспериментальных исследований, показана на стр. 72 – 73 (рис. 17). Слева от оси шкалы написаны названия некоторых известных природных процессов и отмечены их характерные времена. Например, полный цикл лунных и солнечных затмений в масштабе всей Земли называется Саросом и длится 18 лет 11 дней 7 часов 42 минуты. Если же наблюдатель будет сидеть в одной точке Земли, то полный цикл лунных и солнечных затмений будет наблюдаться через 1244,1 года.

С помощью механических часов обычно измеряют интервалы времени от 0,1 с до 100 лет ($3,1 \cdot 10^9$ с). Нижняя граница определяется периодом колебаний применяемых маятников (балансиров), верхняя – износом механизма часов и старением механизмов подвеса маятника.

Электронные часы, частотомеры, счётчики импульсов применяются для интервалов времени от 10^{-9} с до $10^8 \div 10^9$ с. В данную группу входят кварцевые часы, атомные квантовые стандарты частоты. Нижняя граница определяется максимальной рабочей частотой электронных схем, применяемых для счёта, деления и умножения частоты эталонного генератора. С помощью электронных схем частоту сигнала синусоидальной формы возможно умножать и делить в целое число раз даже в диапазоне 30 ГГц. Но уверенный цифровой счёт каждого импульса с помощью логических микросхем обычно легко доступен только начиная с временного интерва-

ла $\tau \sim 10^{-9}$ с. В случае меньших интервалов приходится точно учитывать время прохождения сигналов по проводам и/или делать всю установку размером $l < c/\tau$, где c – скорость света. Как правило, точности 10^{-9} с бывает достаточно, но при необходимости возможно использовать специальную (и более дорогостоящую) аппаратуру с разрешением в лучших случаях до десятков пикосекунд ($\sim 10^{-11}$ с). Для кварцевых часов частота генератора обычно $\sim 10^7$ Гц. Это связано с размерами кристалла, необходимой точностью его изготовления и скоростью звука в кварце. Поэтому для счёта малых интервалов времени цифровому счётчику приходится пользоваться опорной частотой, полученной умножением частоты кварцевого генератора в целое число раз. Для эталонов оптического диапазона частот приходится наоборот, делить частоту колебаний генератора (или уменьшать её за счёт вычитания с помощью гетеродинирования – смешивания с близкой оптической частотой), чтобы перейти в диапазон частот, доступных для счёта цифровыми схемами. Верхняя граница диапазона $\sim 10 \div 50$ лет – определяется максимальным сроком надёжной эксплуатации электронных схем (100000 часов ≈ 10 лет) и возрастом самого метода измерений (~ 50 лет).

Изучая положение объектов на небе, методами астрометрии (см. подробнее [6]) можно измерять временные интервалы от 10^{-2} до 10^{12} с. Нижний предел связан с неточностью наблюдаемых объектов – как за счёт их реальных размеров, так и за счёт размытия изображения атмосферой. Верхний – с временем существования цивилизации и сохранившимися упоминаниями астрономических событий. Верхний предел может быть увеличен за счёт экстраполяции с помощью измеренных констант и применения законов механики для вычисления движения объектов в прошлом и будущем. Например, достаточно хорошо прогнозируется положение планет и изменение положения земной оси в пространстве за счёт прецессии. Полученные в результате экстраполяции интервалы времени тем не менее не являются результатами прямых измерений.

Астрономическими и астрофизическими методами, изучая внешний вид объектов, характеристики их излучения и делая предположения об эволюции объектов, пользуясь известными нам законами природы, можно делать заключения о возрасте объектов и о длительности происходящих в них процессов. Некоторые из этих процессов можно использовать для измерения времени. Нижняя

граница $0,001 \div 0,01$ с соответствует периоду вращения быстрых пульсаров (нейтронных звёзд). Солнечная активность с периодами 27 суток (один оборот Солнца вокруг его оси) и 11 лет (цикл, связанный с количеством пятен на Солнце) влияет на биологические и климатические процессы на Земле. Верхняя граница $(11 \div 13) \cdot 10^9$ лет соответствует возрасту Вселенной, определённом из предположения, что в момент Большого Взрыва все разбегающиеся сейчас объекты Вселенной находились в одной точке. Действительно, величина, обратная постоянной Хаббла, имеет размерность времени и даёт по порядку величины значение возраста Вселенной, близкое к величинам, полученным из других, более сложных астрофизических моделей. Как и в случае с размерами Вселенной, возраст Вселенной точно не определён и в некоторых моделях допускается его значение до 15 млрд лет (что, впрочем, не меняет порядка величины и практически не заметно в масштабах нашей шкалы). О характерных временах процессов в астрономических объектах можно узнать подробнее из книг [7, 8, 9].

Если в астрометрии можно в какой-то мере использовать воздействие на объекты со стороны экспериментатора (например, запускать искусственные спутники и межпланетные станции), то в астрономии и астрофизике измерения времени носят скорее наблюдательный характер.

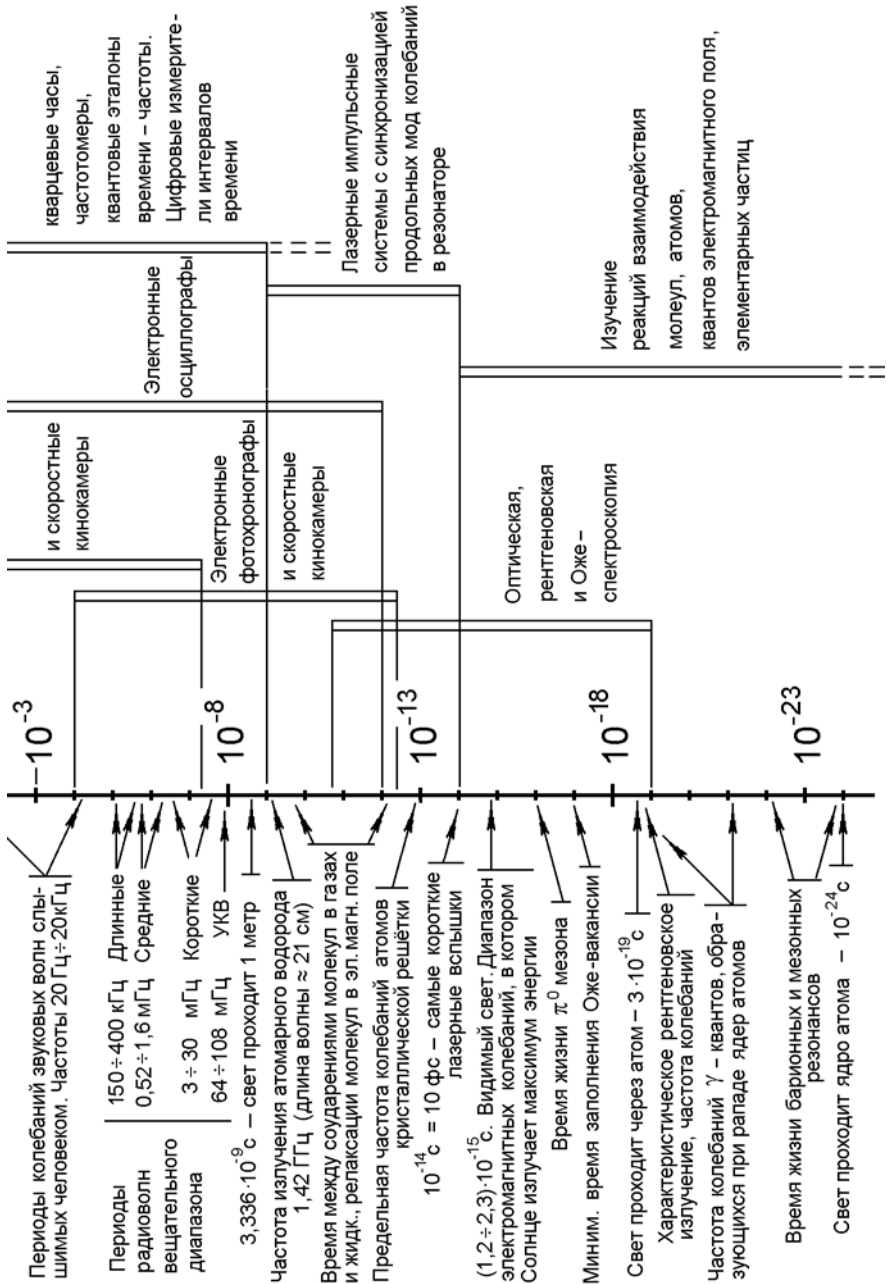
Методами радиоизотопной хронологии можно измерять интервалы времени от сотен до миллиардов лет. Средний возраст пород земной коры составляет около 1,5 миллиардов лет. Максимальный возраст, обнаруженный у некоторых пород Земли, составляет около 4 миллиардов лет. Самые древние образцы метеоритов и лунных пород имеют несколько больший возраст. Учёт времени на образование минералов позволяет оценить значение возраста Земли и Солнечной системы в 4,6 и 4,7 миллиардов лет соответственно. Известно, что Вселенная в основном состоит из водорода и существенно меньшего количества гелия. Количество тяжёлых элементов (из которых состоит Земля) во Вселенной ничтожно мало. Полагая, что значительная часть тяжёлых элементов была синтезирована в недрах новых и сверхновых звёзд, можно определить процентный состав прародительских изотопов, из которых после взрыва звёзд произошла конденсация Солнечной системы. Проведённый таким образом расчёт промежутка времени от начала синтеза тяжёлых

элементов до периода образования Солнечной системы (по урановому и по ториевому методам) даёт 7,7 миллиардов лет. Отсюда можно получить возраст для начала синтеза тяжёлых элементов в нашей Галактике – $7,7 + 4,7 = 12,4$ миллиардов лет.

В окружающей нас природе происходит много явлений, характерные времена которых доступны для непосредственной оценки органами чувств человека. Эти явления из-за их большого количества и известности не изображены на шкале. Более подробно обозначены временные характеристики самих органов чувств, биологических процессов в организме и близких к ним по периодичности природных явлений. Можно привести следующий пример: для длинных радиоволн поверхность и объём Земли представляется проводящим электрический ток шаром. Время, в течение которого радиоволна, распространяясь вдоль поверхности Земли, делает один виток, равна длине экватора поделённой на скорость света $T_0 \approx 0,133$ с. Полученная в результате данной оценки частота $f_0 \approx 7,5$ Гц является самой низкочастотной резонансной модой колебаний земного шара в электромагнитном поле. Интересно отметить, что это значение находится в диапазоне характерных частот энцефалограмм мозга человека между α и θ ритмами. Диапазон $8 \div 13$ Гц называется α -ритмом и соответствует бодрствованию и покою, а $4 \div 7$ Гц называется θ -ритмом и соответствует утомлённому состоянию.

Для интервалов времени существенно меньших одной секунды широко применяются электронные и механические хронографические устройства. Механические фотохронографы и скоростные кинокамеры позволяют измерить интервалы времени и засечь положение объекта в пространстве в различные моменты времени в диапазоне от 10^{-2} до 10^{-7} с. Ограничение быстродействия связано с конечной прочностью механических деталей, которые не могут выдержать высоких ускорений при работе с малыми интервалами времени. Электронные фотохронографы построены на электронно-оптических преобразователях и усилителях изображения. При развёртке электронного изображения с помощью электрических и магнитных полей искривляются траектории электронов. Малая инерционность электронов позволяет продвинуться до фемтосекундного диапазона – к измерению интервалов времени несколько меньших 10^{-12} с и к наблюдению кадров изображения с экспозицией $< 10^{-12}$ с.





Устройство и принцип действия приборов для скоростной оптической съёмки подробно описаны в книге [10]. В монографии [11] рассмотрено применение различных методик и приборов для скоростной оптической съёмки в физическом эксперименте.

Электронные осциллографы используются для измерения зависимости выбранного экспериментатором параметра от времени. Обычные осциллографы, построенные на электронно-лучевых трубках, и цифровые осциллографы, построенные на аналого-цифровых преобразователях, используются для интервалов времени в пределах $10 \div 10^{-9}$ с. Ухудшение диапазона в области малых времён регистрации (по сравнению с электронными фотохронографами) объясняется высокими требованиями к линейности измеряемого сигнала (параметра). В специальных электронно-лучевых осциллографах для регистрации однократных быстротекущих процессов применяются трубки с отклоняющими пластинами бегущей волны и увеличением размера изображения на экране за счёт квадрупольных электронных линз, что позволяет расширить диапазон регистрируемых частот до 10 ГГц. Если изучаемый процесс не является однократным, повторяется во времени, и есть сигнал, точно привязанный к началу процесса, то можно производить кратковременные замеры напряжения (параметра) с увеличивающейся задержкой в каждом следующем повторении процесса. Осциллографы, использующие такой принцип измерений, называются стробоскопическими. Они позволяют измерять форму электрических сигналов до частот ~ 10 ГГц.

С помощью введения в резонатор лазера устройств, периодически изменяющих характеристики резонатора с частотой, кратной частоте полного цикла прохода света вдоль резонатора между зеркалами, можно заставить фотоны сбиваться в короткие сгустки, двигающиеся вдоль оптической оси. Этот режим, называемый режимом синхронизации продольных мод (колебаний внутри резонатора), приводит к модуляции (миганию) света с периодом, зависящим от длины резонатора и с длительностями вспышек от 10^{-9} до 10^{-14} секунды. Самые короткие вспышки в настоящее время получены в режиме самосинхронизации мод для лазера на ионах титана Ti^{3+} в сапфировой матрице (Al_2O_3). Столь короткие вспышки света могут быть использованы для подсветки изучаемых объектов и, следовательно, для измерения интервалов времени. По-видимому, величи-

ны $\sim 10^{-14}$ с – это самые короткие интервалы времени, которые измеряются для макроскопических объектов непосредственно в эксперименте (в частности, при оптической когерентной томографии живых биологических объектов). В качестве рекордных времён длительностей иногда называется $5\div 6$ фемтосекунд. Не стоит забывать, что для титан-сапфирового лазера это всего два периода колебаний световой волны, а 10 фемтосекунд – три периода. Для нашей шкалы временных интервалов разница несущественная. Но и с точки зрения принципа неопределённости указать точную длину для столь короткого волнового пакета затруднительно.

Времена ориентации и поляризации молекул во внешних электрических и магнитных полях могут составлять от наносекунд до десятых долей пикосекунд ($10^{-9} \div 10^{-13}$ с) и измеряться непосредственно. Для промежутков времени, меньших 10 фемтосекунд (10^{-14} с) обычно применяются косвенные методы измерений. Размеры изучаемых объектов при этом не превышают $l \sim c/\tau \sim 3$ микрон. То есть речь идёт о микрообъектах. С помощью оптической и рентгеновской спектроскопии, изучая времена возбуждения и релаксации молекул и атомов, из ширины спектральных линий и из энергии возбуждения можно оценить времена поглощения и излучения квантов, а также периоды колебаний электромагнитных волн для оптического и рентгеновского характеристического ³ излучения. Эти процессы связаны с энергетическими переходами в электронных оболочках атомов (молекул). Оптические переходы затрагивают внешние оболочки с перепадами энергий $\Delta E \sim 0,1\div 10$ эВ. Такие энергии квантов соответствуют колебаниям с периодами $T \sim h / \Delta E \sim 4 \cdot 10^{-14} \div 4 \cdot 10^{-16}$ с. Здесь h – постоянная Планка. Периоды колебаний электромагнитных квантов (оптических и рентгеновских) можно также получить, измеряя с помощью явлений интерференции и дифракции длину волны $\lambda = c \cdot T$. Для уровней в глубоких электронных оболочках (K и L) перепады энергий составляют десятки тысяч электроновольт. При таких энергиях период колебаний в полученных рентгеновских квантах в десять тысяч раз меньше, чем в опти-

³ Характеристическим (в отличие от тормозного) называется рентгеновское излучение, связанное с переходами в электронных оболочках атома.

ческих квантах и сравним с временем распространения света через атом $\tau \sim c / l \sim 3 \cdot 10^{-19}$ с.

Среди характерных времён и частот весьма кратковременных процессов следует отметить:

$3 \cdot 10^{-10}$ с – среднее время между двумя соударениями молекулы воздуха при атмосферном давлении;

$10^{10} \div 10^{11}$ Гц – собственные частоты механических колебаний глобул белка и акустоэлектрических колебаний липидных мембран клеток, определяемые косвенно по воздействию СВЧ-излучения миллиметрового диапазона на биологические объекты;

10^{13} Гц – максимальная частота механических колебаний атомов в кристаллической решётке;

$10^{-13} \div 10^{-14}$ с – время релаксации электронов в металлах;

10^{13} Гц, 10^{15} Гц – собственные частоты колебаний ядер в молекуле и электронов в молекуле, соответственно;

$10^{-14} \div 10^{-17}$ с – время заполнения вакансии в глубоком электронном уровне атома при выбивании электрона рентгеновским квантом, другим электроном или ионом. В данном случае время процесса измеряется косвенно по ширине спектральных линий в энергетическом спектре электронов, покинувших атом (Оже-электронов);

$0,4 \cdot 10^{-18} \div 10^{-21}$ с – периоды электромагнитных колебаний γ -квантов, образующихся при радиоактивном распаде атомных ядер (соответствующая характерная энергия квантов $10 \text{ кэВ} \div 5 \text{ МэВ}$).

Времена протекания ядерных реакций можно вычислять, изучая длины треков, которые оставляют частицы в ядерных эмульсиях. Так как обычно известны скорости частиц (которые мало отличаются от скорости света), то в каком-то смысле такое измерение можно считать непосредственным. Наименьшим из непосредственно измеренных является время жизни для нейтрального мезона π^0 , которое составляет $0,8 \cdot 10^{-16}$ с. Данное время получается из наблюдения зависимости выхода продуктов распада (фотонов) при прохождении частицей металлических фольг разной толщины.

В ядерной физике и физике элементарных частиц скорость (время) протекания реакции зависит от начальных и конечных продуктов, а также от их энергий. Можно определить из эксперимента ширину энергетического интервала ΔE , в котором идёт реакция образования частицы – т. н. «резонанса», а затем из принципа неопреде-

лённости найти среднее время жизни τ этой частицы (протекания реакции): $\tau = \frac{h}{2\pi \cdot \Delta E}$, где h – постоянная Планка. Для большинст-

ва барионных резонансов ширина энергетического интервала находится в пределах $\Delta E \sim 100 \div 400$ МэВ, откуда минимальное время жизни резонанса 10^{-24} с, что примерно равно времени распространения света через ядро атома. В данном случае речь идёт о косвенном способе измерения времени.

В завершение картины стоит сказать про характерные времена, которые следуют из предсказаний теорий объединения электромагнитного, слабого, сильного и гравитационного полей и модели развития Вселенной после Большого Взрыва. Согласно этим моделям (см. [7, 9, 12]), до времени 10^{-43} с после Большого Взрыва ⁴ температура Вселенной составляла более 10^{32} °К и все поля представлялись единым полем. Позднее 10^{-43} с из единого поля выделилось гравитационное поле. В период времени последовавшим за 10^{-35} с после Большого Взрыва (при температуре $\sim 10^{27}$ °К) из единого поля выделилось сильное взаимодействие. В этот же период (после 10^{-35} с), когда видимый радиус Вселенной составлял ~ 1 см, произошло спонтанное нарушение симметрии Вселенной, в результате чего она почти не содержит антивещества. Разделение электрослабого взаимодействия на электромагнитное и слабое произошло по прошествии границы $10^{-12} \div 10^{-10}$ с после Большого Взрыва (при температуре $\sim 10^{15}$ °К). Если эти предсказания верны, протон не является стабильной частицей, а имеет время полураспада $10^{30} \div 10^{32}$ с. Хотя данные цифры значительно расширяют пределы шкалы временных интервалов, они на ней не изображены, т. к. до настоящего времени (за исключением единой теории электрослабого взаимодействия) пока не подтверждены экспериментом.

⁴ Время $t_{pl} = (\hbar G/c^5)^{1/2} \approx 5,391 \cdot 10^{-44}$ с, составленное из постоянной Планка $\hbar$, гравитационной постоянной G и скорости света c , называют планковским временем, а расстояние $c \cdot t_{pl} \approx 1,616 \cdot 10^{-35}$ м – планковским расстоянием.

Некоторые характерные интервалы времени и значения частот, порядок которых стоит помнить физику

10^{-24} с – свет проходит ядро атома. Характерное время протекания реакции в ядерной физике и физике элементарных частиц.

$3 \cdot 10^{-19}$ с – время распространения света через атом. Самые быстрые процессы, связанные с энергетическими переходами в глубоких электронных оболочках атомов.

$(1,2 \div 2,3) \cdot 10^{-15}$ с – периоды колебаний для оптических электромагнитных волн видимого глазом диапазона. Соответствующий диапазон частот – $(8,3 \div 4,3) \cdot 10^{14}$ Гц. Данные величины характеризуют не только глаз, но и Солнце – на этих частотах Солнцем излучается максимум энергии.

10^{-14} с – самые короткие вспышки света, которые в настоящее время удаётся получать с помощью лазеров.

$3,3 \cdot 10^{-9}$ с = 3,3 наносекунды – время, за которое свет и радиоволны проходят в вакууме (воздухе) расстояние 1 метр.

$5 \cdot 10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-5}$ с – периоды звуковых колебаний, доступных уху человека (соответственно интервал частот 20 Гц $\div$ 20 кГц).

15 мин – среднее время жизни свободного нейтрона.

$3,1 \cdot 10^7$ с – количество секунд в году.

18 лет 11дней 7 часов 42 минуты – полный цикл лунных и солнечных затмений в масштабе всей Земли (сарос).

400 лет (примерно) – период телескопической астрономии.

5÷6 тыс. лет – существование науки астрономии, период полураспада ^{14}C .

26000 лет – период прецессии оси Земли.

25÷50 тыс. лет – эпоха грубой обработки камня человеком.

275 тыс. лет – один галактический год – время одного оборота Солнца вокруг центра Галлактики.

50 млн лет – вымерли ящеры. На 15 млн лет ранее закончился тёплый мезозойский период.

Более 1 млрд лет – появление жизни на земле в виде простейших организмов.

1,5 млрд лет – средний возраст пород земной коры.

4,6 млрд лет – возраст Земли, период полураспада ^{238}U .

4,7 млрд лет – возраст Солнечной системы.

$11 \div 15$ млрд лет = $(3,4 \div 4,7) \cdot 10^{17}$ с – возраст Вселенной.

Различные системы служб точного времени и частоты для поддержания шкал UTC и навигации

Лоран-С⁵ – глобальная навигационная система стран НАТО. Состоит из 30 – 40 передающих станций мощностью $\sim 0,5$ МВт, 99 % энергии которых излучается в полосе $90 \div 110$ кГц. Система является гиперболической, т. е. координаты определяются по разнице дистанций (времени задержки сигнала) от различных станций. Точность шкалы времени для поверхностной радиоволны – 1 мкс (ночью до 8 мкс), для пространственной – менее 50 мкс. Точность определения координаты – около 50 м. Кроме целей навигации станции используются для непрерывной передачи и сличения эталонов времени и частоты. Точность сличения эталонов времени и частоты с помощью системы Лоран-С составляет несколько единиц от 10^{-13} за сутки.

Тропик – отечественная глобальная навигационная система, аналогичная по параметрам системе Лоран-С, работающая в том же диапазоне (100 кГц).

Омега – глобальная навигационная система стран НАТО, работающая в диапазоне особо низких частот (ОНЧ – русская аббревиатура, VLF – английская) – $10 \div 30$ кГц. Сеть состоит из 8 станций мощностью порядка 10 кВт. За счёт волноводного эффекта между поверхностью Земли и ионосферой она охватывает сигналом весь земной шар. Низкочастотные волны имеют большую толщину скин-слоя. Поэтому подводные лодки могут принимать сигналы станций, не всплывая на поверхность, а наземные командные пункты – на закопанную в землю антенну. Диапазон $10 \div 14$ кГц используется для навигации (сигналы длительностью 1 с, период повторения 10 с), $14 \div 30$ кГц – для связи, 20 кГц – для сигналов стандартной частоты. Фаза сигнала поддерживается с точностью 3 мкс, частота – 10^{-12} . Точность сличения эталонов времени и частоты с помощью системы Омега составляет $\sim 10^{-11}$ за сутки.

Маршрут – отечественная глобальная навигационная система, аналогичная по параметрам системе Омега, работающая в том же диапазоне ($10 \div 30$ кГц).

⁵ Английская транскрипция «Loran-C».

Навстар – глобальная спутниковая навигационная система стран НАТО, использующая группировку геостационарных спутников (передающих станций) с бортовыми эталонами времени. Применяются цезиевые эталоны времени фирмы Hewlett – Packard. Рабочий диапазон передатчиков $\sim 1,2$ ГГц позволяет сделать антенну и приёмный блок портативными (размер $\sim 5 \div 10$ см). Система позволяет определять текущее время с точностью $10 \div 20$ нс и трёхмерные координаты объекта (т. е. широту, долготу и высоту) с точностью до $2 \div 5$ метров. Эти параметры всегда доступны только для военных пользователей, имеющих коды дешифровки сигнала. Кроме военного предназначения система нашла применение во множестве гражданских устройств GPS (Global Positioning System), которые могут принимать сигналы со специально внесёнными искажениями и без поправок на задержку сигнала в ионосфере, что снижает точность определения координат до $50 \div 100$ метров. Как считают военные, это не позволит террористам создавать «разумное оружие» типа ракеты, которая точно попадает в вентиляционную шахту бомбоубежища. Такое оружие применялось США в Ираке и Югославии. В качестве основы Навстар используется система координат WGS-84 (Мировая Геодезическая Система 1984) на основе эллипсоида GRS-80, который имеет большую полуось, равную 6378137 метров и малую полуось, равную 6356752,3 метра.⁶

ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система. Отечественная навигационная система, аналогичная по характеристикам и диапазону рабочих частот системе Навстар. Всего было запущено более 60 спутников, значительная часть которых вырабатала свой ресурс. В настоящее время из-за отсутствия средств группировка спутников возобновляется медленно и насчитывает 6 работающих спутников. В качестве основы Глонасс используется отечественная общеземная геодезическая система ПЗ-90 (Параметры Земли 1990 г.).

⁶ Если используются несколько приёмников GPS и координаты одного из них задаются как базовые (реперные), то с помощью сигнала от группировки спутников могут быть определены дифференциальные (разностные) координаты приёмников с точностями ~ 1 см на дистанциях $1 \div 10$ км.

Телевизионный сигнал. Для целей передачи сигналов шкал точного времени и частоты используется участок телевизионного сигнала в котором нет передачи изображения, а именно первые 10 строк, в течение которых происходит передача сигналов синхронизации кадров и строк и которые отведены для времени обратного хода луча из правого нижнего края экрана в левый верхний. За рубежом используются 1-я и 10-я строка, в России (ранее в СССР) используется 6-я строка. При передаче в строке используется цифровой код и синусоидальный сигнал эталонной частоты. В настоящее время, в связи с беспорядком в телекомпаниях, в России необходимо следить – не передаётся ли сигнал в видеозаписи вместе с врезанными в него синхрои импульсами и вчерашними эталонными сигналами? Конечно, ценность сигнала в таком случае будет нулевая.

Астрономические объекты. Для синхронизации часов, находящихся в разных частях земного шара, можно использовать удалённые объекты, излучающие переменные во времени сигналы. Для этого обычно применяются сигналы пульсара, который одновременно наблюдается с помощью двух (и более) радиотелескопов. Такой метод удобен для настройки астрономических радиоинтерферометров со сверхдлинной базой ⁷. Применяются также активные методы синхронизации – например, через радиолокацию Луны.

Самолётный метод. Можно взять портативный рубидиевый или цезиевый вторичный эталон частоты, синхронизовать его с первичным, после чего сравнительно быстро, чтобы не успела накопиться ошибка, перевезти его в другую точку земного шара к другому первичному эталону. Там, на месте, можно сравнить – насколько отличаются показания первичных эталонов.

⁷ Угловая разрешающая способность этих интерферометров определяется отношением длины волны к расстоянию между зеркалами и для телескопов, разделённых расстоянием много тысяч километров, превышает разрешающую способность оптических телескопов.

Приложение № 1

Календари и хронология

Трудности, возникающие при разработке календаря, обусловлены тем, что продолжительность суток, синодического месяца и тропического года несоизмеримы между собой. Неудивительно поэтому, что в далеком прошлом каждое племя, каждый город, государство создавали свои собственные календари, по-разному составляя из суток месяцы и годы. В одних местах люди считали время единицами, близкими к продолжительности синодического месяца, принимая в году определенное (например, двенадцать) число месяцев и не считаясь с изменением времен года. Так появились *лунные календари*. Другие измеряли время такими же месяцами, но продолжительность года стремились согласовать с изменениями времен года (лунно-солнечный календарь). Наконец, третьи за основу счета дней брали смену времен года, а смену фаз Луны вообще не принимали во внимание (солнечный календарь).

Таким образом, задача о построении календаря состоит из двух частей. Во-первых, на основании многолетних астрономических наблюдений необходимо как можно точнее установить продолжительность периодического процесса (тропического года, синодического месяца), который принимается за основу календаря. Во-вторых, необходимо подобрать календарные единицы счета целых (!) суток, месяцев, лет различной продолжительности и установить правила их чередования таким образом, чтобы за достаточно большие промежутки времени средняя продолжительность календарного года (а также календарного месяца в лунных и лунно-солнечных календарях) была близкой к тропическому году (соответственно — синодическому месяцу).

К сожалению, иногда эти две совершенно различные стороны проблемы смешиваются. Так, можно встретить утверждение, что календарь народа майя был точнее нашего. Этот вывод делается на том основании, что астрономы майя установили продолжительность тропического года в три раза точнее, чем она принимается в нашем современном календаре. Между тем, рассматривая достоинства того или другого календаря, следует говорить о его системе *високосов*, т.

е. о том, как составителям календаря удавалось, чередуя в определенном порядке календарные годы, имеющие различную продолжительность (различное число дней), приблизить среднюю продолжительность календарного года к продолжительности года тропического. Если же посмотреть на календарь майя с этой точки зрения, то, по всем имеющимся данным, приходится констатировать, что он был значительно хуже нашего, так как никаких определенных свидетельств о том, что у майя были какие-то правила введения високосных годов, не имеется.

В своей практической деятельности люди не могли обходиться и без определенной *эры* – системы счета (летосчисления). В далеком прошлом каждое племя, каждое поселение создавало свою собственную календарную систему и свою эру. При этом в одних местах счет лет велся от какого-то реального события (например, от прихода к власти того или другого правителя, от опустошительной войны, наводнения или землетрясения), в других – от события вымышленного, мифического, часто связанного с религиозными представлениями людей. Начальную точку отсчета той или другой эры принято называть ее *эпохой*.

Тропический год и семидневная неделя

Рассмотрим движения Солнца по эклиптике. 20 (или 21) марта центр диска Солнца пересекает небесный экватор, переходя из южного полушария небесной сферы в северное. Точка пересечения небесного экватора с эклиптикой, точка весеннего равноденствия γ , находится в наше время в созвездии Рыб. На небе она не «отмечена» какой-либо яркой звездой, ее местонахождение на небесной сфере астрономы устанавливают с весьма высокой точностью по наблюдениям близких к ней «опорных» звезд.

Промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра диска Солнца через точку весеннего равноденствия называется *истинным*, или *тропическим годом*. Продолжительность его равна 365,2421988 суток или 365 дней 5 часов 48 минут и 46 секунд.

Продолжительность тропического года на 20 минут 24 секунды короче звездного года. Это связано с тем, что точка весеннего равноденствия со скоростью $50'',2$ в год перемещается по эклиптике навстречу годичному движению Солнца. Это явление было открыто

еще древнегреческим астрономом Гиппархом во II в. до н. э. и названо *прецессией*, или *предварением* равноденствий. За 72 года точка весеннего равноденствия смещается по эклиптике на 1° , за 1000 лет – примерно на 14° и т. д. Поэтому примерно 4000 лет назад точка весеннего равноденствия находилась в созвездии Тельца недалеко от звездного скопления Плеяд, летнее же солнцестояние в это время наступало в момент прохождения Солнца через созвездие Льва недалеко от звезды Регул.

Вследствие прецессии вид звездного неба на определенный день года медленно, но непрерывно меняется. Так, 4000 лет назад центральное место в южной части вечернего неба в момент весеннего равноденствия занимало созвездие Льва, созвездие Близнецов находилось тогда низко над горизонтом неподалеку от точки захода Солнца. В наше же время весной созвездие Льва лишь поднимается над горизонтом в восточной части неба, а созвездие Близнецов находится на юге.

В заключение отметим, что вращение Земли вокруг своей оси постепенно замедляется и поэтому продолжительность суток со временем увеличивается. Соответственно их количество, укладываемое в тропическом году, медленно, но непрерывно уменьшается в соответствии с приближенной формулой:

1 тропический год = $(365,242199 - 0,000013 \cdot T)$ суток, где T – время (в столетиях) измерено от 1900 г. н. э.

Таким образом, например, в 300 г. н. э. тропический год состоял из 365,24199 суток.

Обычай измерять время семидневной неделей пришел из древнего Вавилона и, по-видимому, связан с изменением фаз Луны. В самом деле, продолжительность синодического месяца составляет 29,53 суток, причем люди видели Луну на небе около 28 суток: семь дней продолжается увеличение фазы Луны от узкого серпа до первой четверти, примерно столько же – от первой четверти до полнолуния и т. д.

Поясное, декретное, местное, сезонное время

Каждой точке земного шара, географическая долгота которой λ , соответствует свое собственное («местное») время, которое будет одинаковым лишь для пунктов, находящихся на одном и том же географическом меридиане.

В конце прошлого века земной шар был разбит через каждые 15° по географической долготе на 24 часовых пояса с тем, чтобы внутри каждого пояса, имеющего номер N (N изменяется от 0 до 23), часы указывали одно и то же *поясное* время – время географического меридиана, проходящего через середину этого пояса. При переходе от пояса к поясу в направлении с запада на восток время на границе пояса скачком увеличивается ровно на один час. В качестве нулевого принят пояс, расположенный (по долготе) в полосе $\pm 7^\circ,5$ от гринвичского меридиана. Время этого пояса, обозначаемое T_0 , называется гринвичским или всемирным. Западная европейская часть России, включающая Москву, находится во втором часовом поясе ($N = 2$), центральный меридиан которого, соответствующий восточной географической долготе 30° , проходит вблизи Санкт-Петербурга. (Вообще границы часовых поясов в густонаселенных районах не проходят строго по меридианам, а проводятся по границам административно-территориальных единиц стран, автономных республик, областей. Город Новосибирск с большой точностью находится на границе 5-го и 6-го часовых поясов.)

Очевидно, что кульминации Солнца на центральном меридиане 2-го пояса происходят на 2 часа раньше, чем на гринвичском меридиане, на 2 часа раньше здесь начинаются и сутки.

Во многих странах мира в летние месяцы года практикуется переход на время соседнего, расположенного к востоку, часового пояса. В СССР стрелки часов, переведенные декретом Совнаркома от 16 июня 1930 г. на один час вперед, и сегодня («впредь до отмены») отсчитывают вместо поясного *декретное* время T_d . Связь этого времени с поясным T_n , местным T_m и всемирным T_0 определяется соотношениями

$$\begin{aligned} T_d &= T_n + 1^h, & T_d &= T_m - \lambda + (N^h + 1^h), \\ T_d &= T_0 + (N^h + 1^h), & T_m &= T_0 + \lambda. \end{aligned}$$

Итак, на вопрос: «По какому времени вы живете?» студент Новосибирского Государственного университета ($N = 5$) ответит: «По декретному времени пятого часового пояса».

Предположим, что когда ему был задан этот вопрос, его часы показывали $T_d = 12$ ч 32 мин. Следовательно, в этот момент его поясное время $T_n = 12$ ч 32 мин $- 1$ ч = 11 ч 32 мин, всемирное время $T_0 = 12$ ч 32 мин $- 6$ ч = 6 ч 32 мин. Так как географическая долго-

та ⁸ главного корпуса НГУ $\lambda = 83^{\circ}05'35'' = 5 \text{ ч } 32 \text{ мин } 22,3 \text{ с}$, то местное среднее солнечное время в этот момент $T_m = 6 \text{ ч } 32 \text{ мин } + 5 \text{ ч } 32 \text{ мин } 22,3 \text{ с} = 12 \text{ ч } 04 \text{ мин } 22,3 \text{ с}$. Это отнюдь не означает, что 4 мин 22,3 с назад Солнце прошло верхнюю точку на небосводе. Чтобы узнать истинное солнечное время в данный момент, необходимо из среднего солнечного времени вычесть поправку, показанную на рис. 1. Для этого нужно знать дату – в какой день года был задан вопрос. Допустим дата, когда задавался вопрос – 31 марта. Тогда поправка будет равна 5 минутам, а истинное солнечное время $12 \text{ ч } 04 \text{ мин } 22,3 \text{ с} - 5 \text{ мин} = 11 \text{ ч } 59 \text{ мин } 22,3 \text{ с}$. Откуда следует, что истинный полдень наступит через 37,7 секунд.

С 1981 г. в нашей стране также введено *летнее* время: 1 апреля стрелки часов переводятся на один час вперед по сравнению с декретным временем, а 30 сентября возвращаются обратно ⁹. Это вторая причина, почему нужно знать дату – в какой день года был задан вопрос. Если дата 1 апреля, то истинный солнечный полдень наступит на 1 час позже, а именно, через 1 час 37,7 секунд.

Замена Юлианского календаря на Григорианский

В I веке до н. э. император Юлий Цезарь приказал упорядочить существовавший в то время в Древнем Риме календарь. По предложению египетского астронома Созигена в 46 г. до н. э. был принят новый, более прогрессивный солнечный календарь. Календарь был основан на прохождении центра Солнца через точку весеннего равноденствия (т. е. на тропическом годе) и назван Юлианским. Однако система високосов данного календаря (каждый четвёртый год - високосный) всё равно давала расхождение длительности календарного и реального года в 1 сутки за 128 лет. В XVI веке накопившаяся ошибка составляла 10 суток.

Булла папы Григория XIII, основанная на проекте итальянского врача и математика Луиджи Лилио, обязывала католиков считать после четверга, 4 октября 1582 г. пятницу не 5, а 15 октября. Так весеннее равноденствие было передвинуто на 21 марта, «на свое

⁸ Географическая широта главного корпуса НГУ $\varphi = 54^{\circ}50'35''$.

⁹ Обычно смену времени проводят в ближайшие выходные дни. В Европе смену времени с летнего на зимнее проводят в последний уик-энд октября.

место». А чтобы ошибка в дальнейшем не накапливалась, было решено из каждых 400 лет выбрасывать трое суток. Принято считать простыми те столетия, число сотен которых не делится без остатка на 4. Был приведен в соответствие с фазами Луны и 19-летний лунный цикл¹⁰, определены правила его регулярного (в каждом столетии) исправления.

Такая календарная система получила название григорианской, или «нового стиля». В противовес ей за юлианским календарем укрепились название «старого стиля» (обозначаются соответственно «н. ст.» и «ст. ст.»).

Уместно отметить, что в ответ на папскую буллу появился целый поток памфлетов, анонимных писем, слухов о близком «конце мира». Их особенно ретиво распространяли протестанты, считавшие, что «лучше разойтись с Солнцем, чем сойтись с папой». Однако выдающийся ученый И. Кеплер (1571 – 1630), хотя и был протестантом, выступил за реформу календаря, которая в протестантских странах была проведена с опозданием на 50 – 100 лет. Католические страны Европы перешли на новый стиль практически сразу.

Православная церковь отказалась принять григорианскую календарную систему, хотя еще в 1583 г. на Константинопольском соборе признала неточность юлианского календаря. В итоге, придерживаясь упомянутых «Апостольских правил», она в 1983, 1986, 1989, 1994 и 1997 гг. (а в общем – в каждом 5-м, 8-м, 11-м, 16-м и 19-м году 19-летнего цикла) отмечает пасху не после первого весеннего полнолуния, а после второго; кроме того, за счет несоответствия метонова цикла юлианскому календарю – в 1983, 1986 и в 1989 гг. – не в первое, а во второе воскресенье после полнолуния.

Вопрос о реформе календаря в России поднимался неоднократно, в частности, в XIX в. Однако из-за противодействия церкви и боязни «нежелательных волнений и смущения умов» он так и не был решен в положительном смысле. Переход на новый стиль в России был осуществлен только в советское время, в соответствии с декретом Совнаркома в феврале 1918 г.

Отметим, что в XVI в. разница между юлианским и григорианским календарями составляла 10 дней. 1600 год в обоих календарях

¹⁰ Метонов цикл: 19 тропических лет $\approx$ 235 синодических месяцев, с точностью 2,09 часа. Ошибка в 1 сутки накапливается за 219 лет.

был високосным. Но 1700 г. в юлианском календаре был високосным, а в григорианском простым, так как число сотен (17) не делится без остатка на 4. Поэтому в XVIII в. разница между старым и новым стилями увеличилась до 11 суток. 1800 и 1900 годы также невисокосные, поэтому в наше время юлианский календарь отстает от григорианского на 13 дней. И так будет до 2100 г.

Чтобы отметить годовщину какого-нибудь события, имевшего место до введения григорианского календаря, делают пересчет даты. При этом пользуются данными таблицы 1.

Таблица 1.

Расхождение между юлианским и григорианским календарями

Век	Периоды, гг. юлианского календаря		Разница в сутках	Век	Периоды, гг. юлианского календаря		Разница в сутках
	от 29/II	До 28/II			от 29/II	до 28/II	
I	1	100	—2	XII	1100	1200	7
II	100	200	1	XIII	1200	1300	7
III	200	300	0	XIV	1300	1400	8
IV	300	400	1	XV	1400	1500	9
V	400	500	1	XVI	1500	1600	10
VI	500	600	2	XVII	1600	1700	10
VII	600	700	3	XVIII	1700	1800	11
VIII	700	800	4	XIX	1800	1900	12
IX	800	900	4	XX	1900	2000	13
X	900	1000	5	XXI	2000	2100	13
XI	1000	1100	6	XXII	2100	2200	14

Например, выдающийся польский ученый Н. Коперник родился 19 февраля 1473 г. по юлианскому календарю. В XV в. разность между двумя календарными системами составляла 9 суток. Поэтому день рождения Н. Коперника следует отмечать $19 + 9 = 28$ февраля по григорианскому календарю.

Точность григорианского календаря.

Как известно, в григорианском календаре простой год имеет 365 дней, високосный 366. Високосным является каждый четвертый год – тот, порядковый номер которого в нашем летосчислении делится на 4 без остатка. При этом, однако, те вековые годы календаря, число сотен которых не делится без остатка на 4, считаются простыми (например, 1500, 1700, 1800, 1900 и т. д.). Таким образом, полный цикл григорианского календаря состоит из 400 лет, причем в нем содержится 303 года по 365 дней и 97 лет по 366 дней. Всего дней в 400-летнем периоде насчитывается

$$303 \times 365 + 97 \times 366 = 146097.$$

Средняя продолжительность календарного года равна $146097 / 400 = 365,24250$ – она больше продолжительности тропического года на 0,00030 суток, т. е. всего на 26 секунд. Ошибка этого календаря в одни сутки набегают за 3300 лет. Следовательно, по точности и четкости системы високосов (облегчающей ее запоминание) этот календарь следует признать весьма удачным.

Однако если присмотреться внимательнее к распределению високосных годов внутри 400-летнего цикла, то окажется, что ситуация не так уж благополучна, а сам календарь выглядит менее привлекательным. Возьмем к примеру 400-летний цикл, начавшийся в 1600 г. Продолжительность первых 96 лет в нем в среднем составляет 365,25 суток. Но 1700-й год был простым, високосным же был лишь 1704-й год. Таким образом, средняя продолжительность каждого из этих восьми лет (от 1697 до 1704) равна всего $365 \frac{1}{8}$ суток. То же самое можно сказать и о годах 1797 – 1804 и 1887 – 1904. Поэтому календарная ошибка (которая должна исправляться вставкой дополнительного дня в високосном году) распределяется от года к году неравномерно. А это приводит, в частности, к тому, что начало весны (момент прохождения центра диска Солнца через точку весеннего равноденствия) в каждом 400-летию смещается на 1,5 суток и падает то на 20, то на 21 марта.

В самом деле, средняя длина календарного года 365,2425 суток. Первый год 400-летнего цикла – простой. Поэтому в нем по сравнению с исходным моментом равноденствие передвинется на 0,2425 суток вперед, за три года это составит 0,7275 суток. Четвертый год високосный, он содержит 366 дней, и равноденствие отодвигается на $365^d,2425 - 366^d = -0^d,7575$, т. е. на 0,7575 суток назад. В целом

за четыре года равноденствие по сравнению с исходным моментом отодвигается назад на 0,03 суток. За 96 лет это даст $0^d,7200$. Но так как четыре последующих года будут простыми, а в каждом году событие передвигается на $0^d,2425$ вперед, то к концу 100-го года имеем ошибку уже $+0^d,2500$, 200-го года $+0^d,5000$, 300-го года (конкретно 1900-го) $+0^d,7500$. Но первые три года следующего столетия также являются простыми, следовательно, равноденствие в каждом из этих лет уходит вперед на $0^d,2425$ по сравнению с предыдущим годом. В 1901 г. оно уже впереди на $0^d,75000 + 0^d,24250 = 0^d,9925$ суток, в 1902 г. – на $0^d,9925 + 0^d,2425 = 1,2350$ суток, в 1903 г. – на $1^d,2350 + 0^d,2425 = 1,4775$ суток. Так как 304-й год цикла (т. е. 1904 г.) високосный, то ошибка уменьшается на $0^d,7575$ и составит уже $0^d,7200$. Далее с каждым четырехлетием равноденствие отодвигается назад на $0^d,0300$ и к 2000 году (400-му году цикла) оно возвращается к исходному моменту – к 20,36 марта, где оно было в 1600 г.

Конечно, столь большая ошибка (1,5 суток!) в установлении начала весны и других сезонов в календаре была бы невозможной, если бы в его основу был положен, скажем, период в 128 или даже 33 года, поскольку у них високосные годы можно распределить так, чтобы отклонение от среднего положения не превышало половины суток.

Очевидно также, что на самом деле к исходному моменту григорианского календаря равноденствие не возвращается. Ведь средний за 400 лет год этого календаря на 0,0003 суток длиннее тропического года. За 400 лет это составит 0,12 суток или 2 ч 52 мин 48 с. На такой интервал времени весеннее равноденствие в 2000 г. наступило раньше, чем в 1600 г.

Проблемы реформы календаря

Сегодня наш календарь с астрономической точки зрения является достаточно точным и, по существу, не требует никаких изменений. И все же о реформе его говорят уже десятилетиями. При этом имеют в виду не изменение типа календаря, не введение новых приемов счета високосных годов. Нет, речь идет исключительно о перегруппировании дней в году с тем, чтобы уравнивать длину месяцев, кварталов, полугодий, ввести такой порядок счета дней в году,

при котором новый год приходился бы на один и тот же день недели, например, на воскресенье.

В самом деле, календарный месяц может иметь 28, 29, 30 и 31 день, длина квартала меняется от 90 до 92 дней, а первое полугодие на три-четыре дня короче второго. Вследствие этого усложняется работа плановых и финансовых органов. Неудобным является и то, что неделя начинается в одном месяце или квартале, а заканчивается в другом. Поскольку же год содержит 365 дней, то он заканчивается тем же днем, с которого он начался, а каждый новый год начинается с другого дня. Поэтому каждое государство тратит ежегодно крупные суммы на печатание новых календарей.

Реформы календаря в России

В России вплоть до XVIII века была в ходу византийская эра «от сотворения мира». Указом Петра I от 20 декабря 1699 г. в России была введена эра «от рождества Христова» и 1 января 7208 г. византийской эры было приказано считать 1 января 1700 г. «от рождества Христова». Счёт дней в году и високосов продолжался по юлианскому календарю.

В царской России введение нового стиля (григорианского календаря) задержалось в связи с тем, что православная церковь опасалась могущего при этом произойти «повреждения пасхалий» – совпадения дня празднования христианской пасхи с еврейской. Новый стиль был введён только после Октябрьской революции. В декрете Совета народных комиссаров от 25 января 1918 г., подписанном В. И. Лениным, предписывалось день, следующий после 31 января 1918 г., считать днём 14 февраля того же года. Таким образом накопившееся к этому времени расхождение в 13 дней было исправлено.

Между 1929 и 1940 годами в Советском Союзе календарная реформа проводилась трижды. В 1930 г. декретом правительства СССР в стране был осуществлён переход на непрерывную производственную неделю, состоящую из четырёх рабочих дней и одного дня отдыха. Предприятия работали непрерывно, а рабочие и служащие, распределённые по пяти группам, попеременно отдыхали. С 1 декабря 1931 г. в СССР пятидневная неделя была заменена шестидневной так, что все рабочие и служащие отдыхали в одни и те же дни. 26 июня 1940 г. указом Президиума Верховного Совета СССР в Советском Союзе семидневная неделя была восстановлена.

В настоящее время РПЦ сохраняет счёт времени и всех церковных праздничных дней согласно юлианскому календарю.

Астрономический счет лет и суток

В XVIII в. эра, введенная Дионисием, была расширена и для счета лет до «рождества Христова» (а. D. – ante Deum – «до Господа»). Впервые способ обратного счета лет был предложен в 1627 г. Д. Петавиусом. При этом было принято, что 1-й год до н. э. непосредственно примыкает к 1-му году н. э. Было также принято, что число лет до н. э. возрастает по мере удаления в прошлое, однако месяцы, числа в них и дни недели считаются вперед, точно так же, как и в годах н. э. Следовательно, границей между 1-м годом до н. э. и 1-м годом н. э. является «мгновение», разделяющее 31 декабря 1 г. до н. э. и 1 января 1 г. н. э. Високосными являются те годы до н. э., число которых при делении на 4 дает в остатке 1: 9-й, 13-й и т. д. Этот счет лет называется *историческим* или *хронологическим*. Отсутствие «нулевого года» часто приводит к ошибкам при расчетах интервала времени между двумя событиями, одно из которых произошло до, другое – после начала счета лет по н. э. Например, в 1937 г. в Италии и Германии отмечалось 2000-летие со дня рождения императора Августа. Между тем Август родился в 63 г. до н. э., следовательно, к 1-му году н. э. ему исполнилось 62 (а не 63) года, а 2000-летие этого события имело место в 1938 г. Аналогично, в 1945 г. вместо 1946 г. в нашей стране отмечалось 2000-летие со дня смерти выдающегося древнеримского поэта и философа Лукреция, который умер в 55 г. до н. э.

Определяя моменты наступления в прошлом солнечных и лунных затмений, появлений комет и др., астрономы выработали собственную *астрономическую* систему счета, которая впервые была использована в 1740 г. французским ученым Жаком Кассини (1677—1756) в двух его произведениях: «Элементы астрономии» и «Астрономические таблицы». Было принято год, предшествующий 1-му году н. э., называть нулевым, предшествующим нулевому – минус первым:

Астрономический счет лет	Исторический счет лет
2-й год	2-й г. н. э.
1-й год	1-й г. н. э.
0 (нулевой) год	1-й г. до н. э.
минус 1-й год	2-й г. до н. э.
минус 2-й год	3-й г. до н. э.

Так появилось «правило Кассини»: для определения отрезка времени между двумя событиями, разделенными эпохой нашей эры, число года до н. э. при вычитании необходимо уменьшать на единицу.

Таким образом, 63 год до н. э. это «минус 62 год», поэтому промежуток времени, разделяющий 63 г. до н. э. и 1937 г. н. э., равен: $1937 - (-62) = 1937 + 62 = 1999$. То же самое имеем и во втором случае: $1945 - (-54) = 1999$.

И в астрономическом счете лет месяцы и дни, как и в положительных годах, считаются вперед. Например, астрономы установили, что комету Галлея было видно на небе в $-1161,3$ г. Переведем эту дату в историческое счисление. Прежде всего $-0,3$ года – это $0,7$ предыдущего, «минус 1162» года, причем $0,7$ года соответствует дате, близкой к 14 сентября. В свою очередь «минус 1162» год – это 1163 г. до н. э. Следовательно, $-1161,3 = 14$ сентября минус 1162 года = 14 сентября 1163 г. до н. э.

Как в астрономических, так и в хронологических расчётах часто используется непрерывный счет дней, начиная от 1 января 4713 г. до н. э. Этот так называемый юлианский период ввел в 1583 г. французский ученый Жозеф Скалигер (1540 – 1609). За начало юлианской даты принимается средний полдень на нулевом (гринвичском) меридиане. Юлианские дни сокращенно обозначаются JD или Ю. Д. и указываются сегодня во всех астрономических календарях. Так, на 1-е января 1980 г. приходится 2 444 240 день юлианского периода, на 1-е января 1981 г. – 2 444 606 JD и т. д. Христианской эре (1 января 1 г. н. э.) соответствует 1 721 058 JD, эре Диоклетиана (29 августа 284 г. н. э.) – 1 825 030 JD. Юлианский период очень

удобен для различных расчетов, и он часто применяется специалистами в астрономии.

Проблемы, связанные с разной датой начала года (нового года)

Большая осторожность необходима и при хронологическом упорядочении событий, имевших место в различных странах средневековой Европы всего каких-нибудь 600 или 1000 лет назад. Дело в том, что в них в различное (а иногда в одно и то же) время использовались различные календарные стили. Начало года могло отсчитываться с 25 декабря, 1 января, 1 марта, 25 марта, со дня пасхи и с 1 сентября.

Счет дней в году от праздника «рождества Христова» (от 25 декабря) велся в Риме с IV в. н. э., во Франции – с VIII и до конца X в., в Германии – с IX в., причем в масштабах всей страны начало года было перенесено здесь на 25 декабря в 1310 г.

Начало года с 1 марта, использовавшееся уже в III в. н. э. вычислителями даты христианской пасхи, постепенно распространилось на многие страны Европы; с VI в. оно использовалось во Франции, Венеции и в ряде других государств.

Весьма популярным был в Европе благовещенский стиль (от «воплощения Господа» – с 25 марта), который к тому же использовался в двух вариантах. Так, во Флоренции год начинался 25 марта после того как год с тем же обозначением был начат в других городах и областях, использовавших другие стили. В Пизе обозначение года также меняли 25 марта, но на 12 месяцев раньше, чем во Флоренции. Папская канцелярия в Риме в XII и начале XIII в. следовала благовещенскому стилю флорентийского типа, хотя в ее документах того времени встречается и рождественский стиль, которого она придерживалась раньше примерно до середины X в. В первые десятилетия XII в. в папских документах встречается благовещенский стиль пизанского типа. Затем примерно в конце второго десятилетия XIII в. – снова рождественский стиль. А вот папская булла о реформе календаря 1582 г. датирована по-флорентийски 1581 годом.

Благовещенский стиль использовался в Англии вплоть до 1753 г., во Франции – в IX – X вв., но во второй половине XI в. здесь он был заменен пасхальным (начало года – с «предпасхальной» субботы), и этот последний стиль постепенно стал господ-

ствующим в этой стране, хотя в одних областях Франции еще долгое время сохранялся благовещенский, тогда как в других появился рождественский стиль. Пасхальный стиль в XIV в. широко использовался во многих городах Германии (в Кельне, Мюнстере и др.).

В южной части Италии (например, в Неаполе) еще с византийских времен начало года отсчитывалось от 1 сентября. В России этот стиль использовался с 1493 по 1700 г.

Начало года с 1 января отмечается в документах Священной Римской империи с XIII – XIV вв., в Испании с 1556 г., в Дании и Швеции – с 1559 г., во Франции – с 1563 г., в Нидерландах – с 1575 г., в Шотландии – с 1600 г., в Германии – с 1691 г., в Венеции – с 1797 г. В документах папской канцелярии начало года совмещено с 1 января, начиная с 1691 г.

Подробно о календарях, хронологии и различных методах счёта времени написано в монографии [13].

Хронология введения григорианского календаря в некоторых странах мира

Страна	Дата последнего дня юлианского календаря	Дата первого дня григорианского календаря
Италия	4 октября 1582 г.	15 октября 1582 г.
Испания	4 октября 1582 г.	15 октября 1582 г.
Португалия	4 октября 1582 г.	15 октября 1582 г.
Польша	4 октября 1582 г.	15 октября 1582 г.
Франция	9 декабря 1582 г.	20 декабря 1582 г.
Люксембург	21 декабря 1582 г.	1 января 1583 г.
Голландия	21 декабря 1582 г.	1 января 1583 г.
Бавария	5 октября 1583 г.	16 октября 1883 г.
Австрия	6 января 1584 г.	17 января 1584 г.
Швейцарии	11 января 1584 г.	22 января 1584 г.
Венгрия	21 октября 1587 г.	1 ноября 1587 г.
Пруссия	22 августа 1610 г.	2 сентября 1610 г.
Германия (протестантская) *	18 февраля 1700 г.	1 марта 1700 г.
Норвегия	18 февраля 1700 г.	1 марта 1700 г.
Дания	18 февраля 1700 г.	1 марта 1700 г.
Великобритания	2 сентября 1752 г.	14 сентября 1752 г.
Швеция	17 февраля 1753 г.	1 марта 1753 г.
Финляндия	17 февраля 1753 г.	1 марта 1753 г.
Япония	—	1 января 1873 г.
Китай	—	20 ноября 1911 г.
Болгария	31 марта 1916 г.	14 апреля 1916 г.
Советская Россия	31 января 1918 г.	14 февраля 1918 г.
Сербия	18 января 1919 г.	1 февраля 1919 г.
Румыния	18 января 1919 г.	1 февраля 1919 г.
Греция	9 марта 1924 г.	23 марта 1924 г.
Турция	18 декабря 1925 г.	1 января 1926 г.
Египет	17 сентября 1928 г.	1 октября 1928 г.
* В некоторых княжествах и городах (Вестфалия, Вюрцбург, Кельн, Майнц, Фрейбург и др.), в которых преобладало влияние католицизма, новый календарь был введен в разные месяцы 1583 – 1584 гг.		

Эпохи важнейших календарных эр

1 сентября 5509 г. до н. э. – византийская эра от «сотворения мира».

1 марта 5508 г. до н. э. – древнерусская эра от «сотворения мира».

29 августа 5493 г. до н. э. – александрийская эра от «сотворения мира».

1 января 4713 г. до н. э. – эра Скалигера, используемая при астрономических и хронологических расчетах. От эпохи этой эры ведется непрерывный счет суток (Юлианских дней).

7 октября 3761 г. до н. э. – еврейская эра от «сотворения мира».

18 февраля 3102 г. до н. э. – эра Калиюга (по индийской мифологии этот «железный век» является одним из мелких подразделов Эона, или Кальпы, периодом в 4 320 000 000 лет, по истечению которого всё живое в мире погибает, а затем возрождается вновь).

2397 г. до н. э. – китайская циклическая эра.

950 г. до н. э. – буддийская эра, имевшая распространение в Китае, Японии и Монголии.

1 июля 776 г. до н. э. – эра от первых олимпийских игр; введена около 264 г. до н. э., летосчисление по олимпиадам велось до 394 г. н. э.

21 апреля 753 г. до н. э. – эра от предполагаемой даты основания Рима. Применялась западноевропейскими историками до конца XVII в.

26 февраля 747 г. до н. э. – эра Набонассара, названная по имени основателя Ново-Вавилонского царства. Широко использовалась при астрономических расчетах вплоть до времен Н. Коперника.

1 октября 312 г. до н. э. – эра Селевкидов, связанная с именем Селевка – основателя царской династии в Сирии, одного из полководцев Александра Македонского. Использовалась на протяжении более тысячи лет в Вавилонии, Сирии и Палестине.

1 января 1 г. н. э. – христианская эра от «рождения Христова», введенная в 525 г. Дионисием Малым.

29 августа 284 г. н. э. – эра Диоклетиана. Применялась в древнем Египте и в восточной части Римской империи, до сих пор сохранилась в коптском и эфиопском церковных календарях.

16 июля 622 г. н. э. – мусульманская эра «хиджра». Начало эры совпадает с переселением пророка Магомета из Мекки в Медину.

22 сентября 1792 г. н. э. – 31 декабря 1805 г. – эра французской буржуазной революции.

7 ноября 1917 г. н. э. – эра Великой Октябрьской социалистической революции.

1 января 2000 г. н. э. – новая стандартная эпоха 2000,0. Принята решением Международного астрономического союза в 1976 г. Определяется датой 2000, январь 1,5 (Юлианский день JD 2 451 545,0).

Приложение № 2

Пассажные инструменты

Методы определения времени из астрономических наблюдений сводятся к установлению момента прохождения избранной звезды через меридиан либо через некоторый круг равных высот. Для этой цели служат пассажные инструменты. Познакомимся с некоторыми из них.

Схема фотографической зенитной трубы представлена на рис.18. Инструмент представляет собой вертикальную трубу с объективом

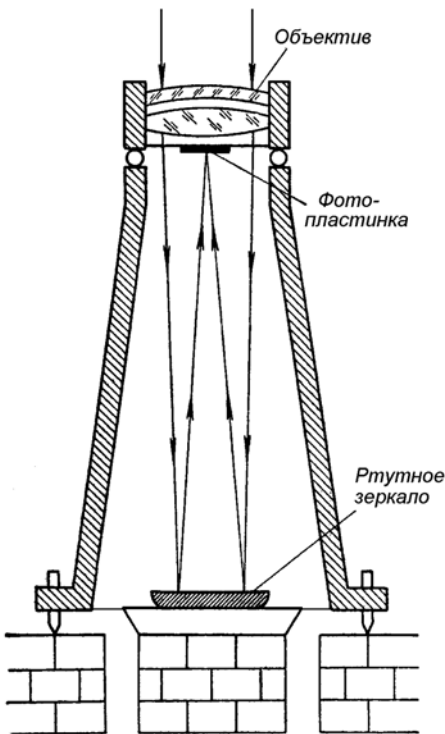


Рис. 18. Схема фотографической зенитной трубы

в верхней части и ртутным горизонтом (зеркалом), расположенным на половине фокусного расстояния в нижней части. Фотопластинка располагается сразу за объективом таким образом, что его наклон не влияет на положение изображения звезды, находящейся вблизи зенита. В процессе съёмки каретка с пластинкой перемещается перпендикулярно плоскости меридиана, компенсируя сдвиг изображения за счёт вращения Земли. Экспозиции чередуются с поворотом блока объектива вместе с фотопластинкой на 180° вокруг вертикальной оси («перекладкой») и замером моментов времени поворота с помощью хронографа. Обработка

полученных на фотопластинке изображений и данных хронографа позволяет определить по одному наблюдению широту с точностью $\pm 0'',15$, а поправку часов с точностью $\pm 0^s,020$.

Призменная астролябия Данжона (схема которой показана на рис. 19 а) состоит из горизонтально расположенной трубы с объективом и окуляром. Перед трубой расположены равнобедренная стеклянная призма и ртутный горизонт. Свет от звезды находящейся на зенитном расстоянии 30° попадает в трубу двумя путями: во-первых, после полного внутреннего отражения от боковой грани призмы, во-вторых, после отражения от ртутного горизонта и по-

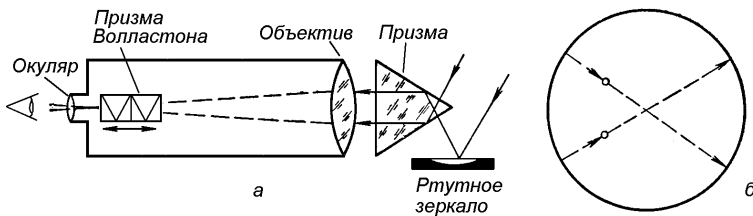


Рис. 19 а, б. Схема призменной астролябии Данжона

следующего внутреннего отражения от другой боковой грани призмы. Эти лучи по выходе из призмы параллельны, поэтому в фокальной плоскости объектива получается одно изображение звезды. Когда зенитное расстояние не равно 30° (рис. 19 б), в поле зрения будут наблюдаться два изображения, движущиеся друг к другу, которые сольются в момент прохождения звезды через альмукатарат¹¹ 60° и далее вновь разойдутся. В районе фокуса объектива расположена двойная призма Волластона, которая позволяет компенсировать расхождение лучей, даже когда звезда не находится в альмукатарате 60° . Привод призмы Волластона связан с хронографом. Таким образом, регулируя скорость перемещения призмы вдоль оси трубы, можно замерить момент совпадения изображений для одной и той же звезды много раз. Из-за небольшого диаметра объектива и сложной оптической схемы ошибка наблюдения на астролябии довольно велика (до $\pm 0'',30$) и можно наблюдать только яркие звёзды (до 6-ой звёздной величины). Зато за один час работы можно про-

¹¹ Альмукантарат – малый круг небесной сферы, параллельный математическому горизонту.

вести наблюдение до трёх десятков звёзд. Усреднение полученных результатов позволяет за одну ночь определить широту и поправку часов с точностью, не уступающей точности фотографической зенитной трубы.

Схема фотоэлектрического пассажного инструмента показана на рис. 20. Центральным узлом инструмента является т. н. куб – связующая деталь для горизонтальной оси и перпендикулярной ей трубы инструмента. Концы горизонтальных полуосей, сделанные в виде правильного цилиндра из твёрдого металла, лежат в лагерах – V-образных опорах, размещённых на фундаменте. Горизонтальная

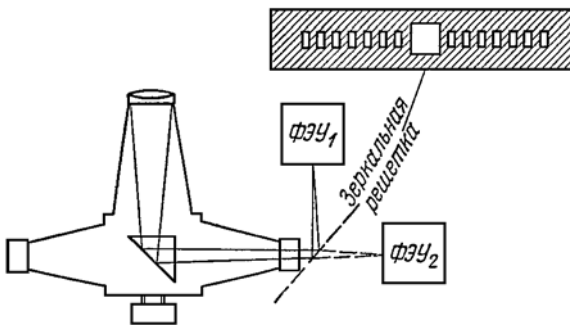


Рис. 20. Фотоэлектрический пассажный инструмент

ось делается полый внутри. После отражения от зеркальной призмы, в фокальной плоскости объектива свет попадает на зеркальную визирную решётку и далее на фотоэлектрические умножители (ФЭУ), связанные с хронографом. Для удобства отыскания звезды в центре поля зрения делают окно размером больше периода решётки. Лагеры устанавливаются так, чтобы ось лежала горизонтально в плоскости первого вертикала в направлении восток – запад. Конструкция пассажного инструмента сделана таким образом, чтобы с помощью специального подъёмного механизма можно было сделать перекладку инструмента – развернуть его вокруг вертикальной оси на 180° и обратно опустить в лагеры. Этот приём позволяет исключить ошибки, связанные с неточностью изготовления инструмента или его подвески.

Приложение №3

Точная трёхмерная навигация на поверхности Земли и в её окрестностях. Фигура Земли. Движение полюса

Свет далёких небесных объектов несёт на Землю информацию, служащую исходным материалом для развития астрономии. Астрофизика изучает состояние вещества во Вселенной, измеряя характеристики пришедшего света. Наблюдение направлений, по которым приходит свет, входит в компетенцию астрометрии. Таким образом, астрометрия – наука, создающая опорную инерциальную систему координат в пространстве и согласованный комплекс фундаментальных астрономических постоянных на основе получения координат небесных объектов и изучения вращения Земли, понимаемого в широком смысле.

За динамическую форму Земли принимается одна из уровенных поверхностей потенциала земного притяжения U . Заметим, что потенциал V , выводимый по измерениям ускорения силы тяжести g на поверхности Земли, содержит влияние вращения Земли:

$$V = U + \frac{1}{2} \omega^2 R^2 \cos^2 \varphi, \text{ а система, в которой проводятся наблю-}$$

дения, не является инерциальной. Ускорение силы тяжести направлено по нормали к поверхности и связано с потенциалом соотношением $g = \text{grad } V$. Известный факт неоднородности Земли и наличие значительных неровностей на её поверхности приводят к тому, что уровенные поверхности, которые служили в качестве опорных при проведении геодезических съёмок, описываются гораздо более сложной фигурой, чем эллипсоид вращения. Волнистость этих поверхностей вызывается особенностями местного рельефа и различной плотностью слагающих пород. Уровенная (эквипотенциальная) поверхность, соответствующая среднему уровню моря, называется геоидом. Геоид более точно аппроксимирует действительные размеры и форму Земли, чем эллипсоид, но неудобен для математической обработки. Поэтому геодезисты при расчётах пользуются референц-эллипсоидом (эллипсоидом относимости), т. е. вводят

поправки на уклонение геоида от эллипсоида. На рис.21 схематиче-

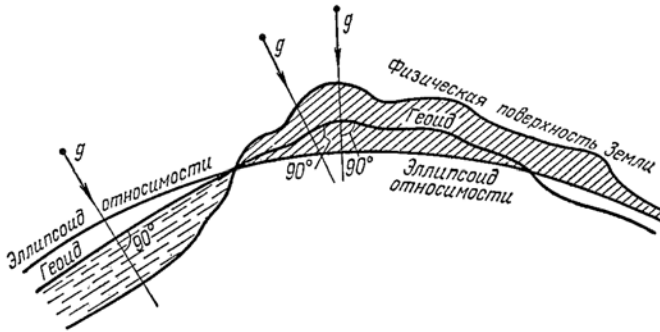


Рис. 21. Физическая поверхность Земли, эллипсоид и геоид

ски показаны физическая поверхность Земли, эллипсоид и геоид, а на рис.22 - глобальная карта превышения геоида над референц-эллипсоидом. Выведенные по измерениям траекторий спутников параметры эллипсоида GRS – 80 следующие: сжатие у полюсов

$$\alpha = \frac{a_e - a_p}{a_e} = \frac{1}{298,257}, \text{ экваториальный радиус } a_e = 6378137 \text{ м.}$$

Таким образом, полярный радиус Земли a_p на 21 км меньше экваториального. Для реальной Земли угол уклонения оси вращения от

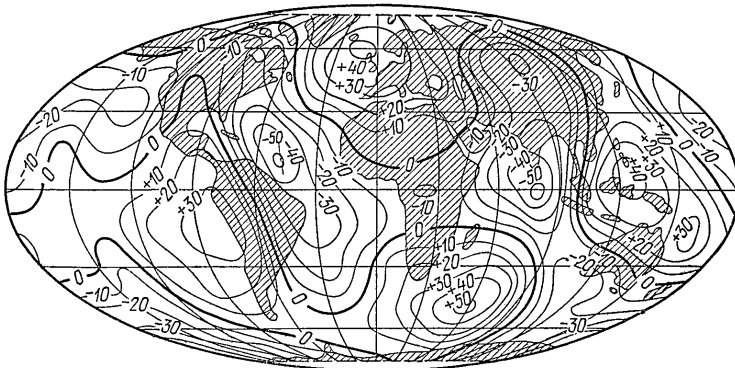


Рис. 22. Превышение геоида над эллипсоидом относимости

оси фигуры, связанный с асимметрией в распределении масс Земли относительно оси вращения, составляет $\gamma \approx 0'',5$.

Положение точки на земной поверхности определяется тремя координатами: широтой, долготой и радиусом-вектором. Методами астрометрии определяется астрономическая широта и долгота, связанные с направлением отвесной линии в данной точке на Земле. Кроме того, для отсчёта азимутов нужно знать направление земного меридиана в точке наблюдения. Астрономическая широта φ есть угол между направлением отвесной линии в точке наблюдения и плоскостью экватора. Уклонение отвесной линии от нормали к принятому земному эллипсоиду относимости и от геоцентрического радиуса-вектора вызывает отличие астрономической широты от географической и геоцентрической. Астрономическая долгота λ есть угол между плоскостью земного меридиана точки наблюдения и плоскостью нулевого меридиана. Плоскость земного меридиана определяется плоскостью, проходящей через отвесную линию данной точки на земной поверхности параллельно оси вращения Земли. Астрономическая долгота, как и широта, также отличается от географической и геоцентрической. Радиус-вектор R есть расстояние от центра масс Земли до точки наблюдения.

Несовпадение отвесной линии с нормалью к эллипсоиду (т.е. несовпадение астрономической широты с геодезической), как правило, меньше 3". Разность между геоцентрической и астрономической широтами не превышает 12', она равна нулю на полюсах и экваторе.

Параметры референц-эллипсоида и всей геодезической системы могут быть выбраны различными, исходя из удобства пользования в одной или нескольких областях Земли или в пределах всего Земного шара, а также исходя из наилучшей привязки к уже существующим, полученным ранее геодезическим и картографическим данным.

Все пользователи зарубежной спутниковой технологии, эксплуатирующие коммерчески распространяемые приёмники GPS, автоматически применяют американскую геодезическую систему координат WGS-84, основанную на спутниковой навигационной системе НАВСТАР.

Минобороны России, Российское космическое агентство, ведомства и службы оборонного комплекса с 1989 г. применяют для координатных определений Геодезическую систему ПЗ-90 («Параметры Земли 1990 г.»), которая поддерживает спутниковую навигационную систему ГЛОНАСС.

Роскартография пользуется своей собственной референцной системой координат СК-95, которая применяется при построении всех отечественных карт поверхности Земли (по крайней мере на всем пространстве России). Положение центра эллипсоида в СК-95 получено засечкой пучком из более чем 160 тыс. радиус-векторов построенных из пунктов, расположенных на площади 22 млн км².

Разница в координатах, отсчитанных в разных геодезических системах координат, может быть 10 м и более. Несмотря на то, что вопрос о Российской общегосударственной геодезической системе координат (ОГГСК) может быть формально решен на уровне приказа правительства, это не снимет проблемы множественного определения координат одной и той же точки разными способами.

При расчёте движения космических аппаратов в поле Земли нет необходимости знать детальный профиль её поверхности. Необходимо знать профиль гравитационного потенциала U на высоте полёта и его изменение для каждого момента времени пролёта по орбите. Поэтому для расчёта формы орбиты, её прецессии, движения точки перигея, резонансных характеристик и устойчивости орбиты удобнее пользоваться мультипольным разложением гравитационного потенциала Земли. В таком разложении потенциал представляется в виде ряда сферических функций (полиномов и функций Лежандра) с весовыми коэффициентами. Для расчёта траекторий низколетящих спутников с точностью до $10 \div 20$ метров обычно используется разложение потенциала до 14-го – 15-го порядка.

Для грамотного пользования спутниковыми системами глобального позиционирования (GPS) и точными картами следует знать про вышеназванные подходы к определению координат наземных объектов и космических аппаратов.

Положение оси вращения Земли в пространстве изменяется за счёт прецессии и нутации. Среднее наклонение экватора к эклиптике в эпоху 1900 г. – $23^{\circ}27'08'',26$. Период лунно-солнечной прецессии – 26000 лет, что даёт сдвиг оси вращения Земли $50'',26$ за год. Нутационные колебания содержат гармоники с периодами от 19 лет до часов и минут. Главный член нутации с периодом 18,6 лет имеет амплитуду $\approx 9''$. Имеются заметные нутации с периодом полгода амплитудой $\approx 0'',5$ и полмесяца с амплитудой $\approx 0'',09$.

Неправильности вращения Земли разделяют на неравномерность вращения и на движения полюса (перемещение оси вращения в теле Земли).

Неравномерности вращения Земли вокруг оси с характерными временами порядка месяца связывают с земными приливами, порядка года – с сезонными изменениями (перемещение воздуха, воды, рост листьев на деревьях, выпадение снега и т. д.), порядка десятилетия – с движениями вещества в ядре, порядка 100 лет – с изменением уровня моря.

Ось вращения перемещается в теле Земли. Движение полюса с периодом 1/2 и 1 год связывается с сезонными изменениями, порядка 10 лет – с движениями вещества в ядре и с изменением уровня

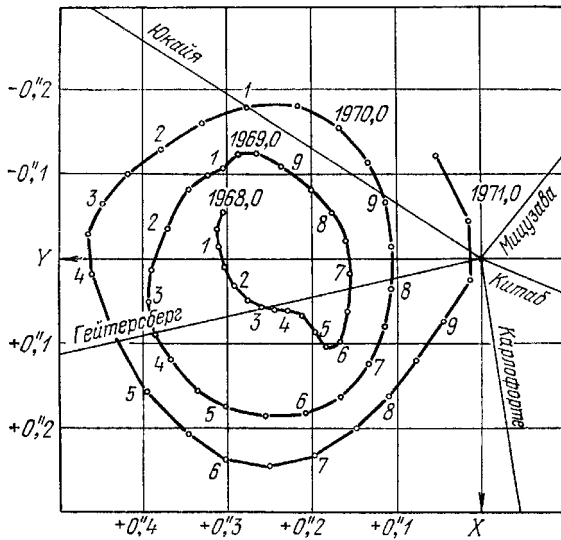


Рис.23. Траектория движения полюса Земли с 1968 по 1971 г.

моря. Однако основной вклад в периодическое движение полюса дают несовпадение оси инерции с осью вращения и влияние внешних возмущающих сил со стороны Луны и Солнца. Если бы Земля была твёрдым абсолютно недеформируемым телом, то, согласно решению динамического уравнения Эйлера, для известной фигуры Земли (геоида) период колебаний полюса составлял бы 305 суток. Однако учёт упругости Земли, её деформации под влиянием по-

верхностных нагрузок, приливных и центробежных сил приводит к реально наблюдаемому периоду $1,13 \div 1,21$ года – т. н. Чандлеровскому периоду. Этот период хорошо заметен на рис. 23, показывающем движение полюса за три года. Видно, что средняя амплитуда колебаний – $0'',12 \div 0'',25$, и вся траектория не выходит за пределы квадрата со стороной ≈ 30 м.

Длительные наблюдения, результаты которых представлены на рис. 24, показывают вековое движение полюса со скоростью $0'',002 \div 0'',004$ в год в направлении $65^\circ \div 85^\circ$ к западу от Гринвича.

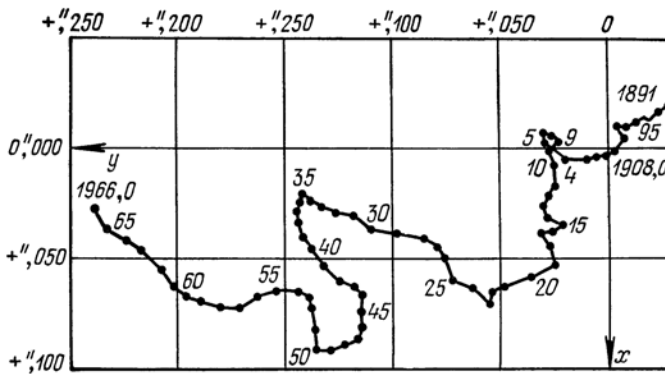


Рис. 24. Траектория векового движения полюса

Неравномерности вращения приводят к изменению масштаба шкалы времени, движение полюса – к изменению широты и долготы места наблюдения, а также азимутов на местности. Все перечисленные параметры влияют на точное определение координат точки на поверхности Земли и на поправки к шкалам времени UT1, UT2, UTC.

За счёт преломления световых лучей и радиоволн при их наклонном прохождении в атмосфере Земли наблюдается смещение изображений астрономических объектов на угол β к линии горизонта. Это явление называется астрономической рефракцией. Угол β увеличивается с ростом угла γ между направлением на зенит и направлением на объект. В диапазоне углов γ от 0° до 70° рефракция описывается приближённым уравнением $\beta = 58'',2 \cdot \operatorname{tg} \gamma$. Вблизи направления на горизонт для нормальной атмосферы рефракция составляет $35'$. Это примерно равно видимому угловому диаметру Солнца или Луны.

Длина оптического пути l зависит от коэффициента преломления среды n и расстояния l_0 : $l = l_0 \cdot n$. Поэтому от угла наблюдения и плотности атмосферы зависит длина оптического пути сигнала в атмосфере и, следовательно, время задержки сигнала. В случае синхронизации часов по сигналу пульсара или по сигналу с геостационарного спутника для разных точек земного шара поправка может составлять $\sim 10^{-8}$ с (или ~ 3 м пути, в случае определения координаты). Также имеет место ионосферная задержка радиосигнала, зависящая от активности Солнца и географического положения места наблюдения. Значение ионосферной задержки в зависимости от частоты сигнала может достигать величины ~ 7 м.

Не смотря на отмену 1 мая 2000 г. предварительно вносимых искусственных искажений в сигналы Навстар, гражданским приёмникам GPS недоступны поправки на ионосферную задержку, что с учётом наклонных траекторий прихода сигнала от разных спутников даёт неточность определения координат $\sim 10 \div 20$ м.

Любой, кто смотрел на линию горизонта через подзорную трубу, знает, как дрожат и размываются границы наблюдаемых объектов. Толщина атмосферы примерно соответствует видимому расстоянию до горизонта. Именно флуктуации плотности атмосферы не позволяют получить при съёмке из космоса изображения с разрешением лучше, чем 0,3 м (увидеть «звёзды на погонах» и «номера автомобилей» — как это любят описывать корреспонденты газет и показывать создатели кинофильмов)¹². Эта же причина принципиально ограничивает точность определения по сигналам со спутников: координат ~ 30 см, времени ~ 1 нс. Накопление сигналов в течение длительного времени, их обработка и усреднение позволяет заметить дрейф материков величиной порядка нескольких сантиметров в год. В случае наблюдения со специально выбранных площадок на поверхности Земли (обсерватории обычно строят на высоких местах с пониженной турбулентностью атмосферы) точность определения координат звёзды за один сеанс наблюдений, ограниченная турбулентностью, составляет около $0'',1 \div 0'',2$. Улучшить результат можно накоплением и обработкой данных. Существует также возможность улучшения результата с помощью адаптивной оптики,

¹² Цифровая фильтрация изображения может улучшить разрешение примерно в два раза, но не стоит считать данный метод всемогущим.

когда форму зеркала телескопа подстраивают в такт с изменениями атмосферы вдоль луча наблюдения, частично вычитая ошибки, связанные с флуктуациями плотности.

Есть ещё один источник искажений видимых направлений на объекты. Движущийся наблюдатель видит астрономический объект смещённым на некоторый угол α в направлении своего движения. Это явление называется аберрацией и связано с конечностью скорости света. Угол α зависит от угла θ между направлением на объект и направлением движения наблюдателя, а также от величины скорости наблюдателя V , согласно выражению $\sin \alpha = \frac{V}{c} \sin \theta$, где c –

скорость света. Откуда получено это выражение видно из рис. 25. За время τ свет от звезды B проходит расстояние $OE = c \cdot \tau$, а наблюдатель проходит расстояние $DE = V \cdot \tau$.

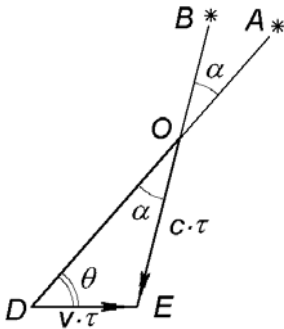


Рис. 25. искажение направления на объект в связи с аберрацией

Истинное направление на звезду – OB , а полученное из наблюдений – OA . Суточная аберрация задаётся движением наблюдателя вокруг оси Земли. Она зависит от широты. На экваторе она максимальна и составляет $0'',319$. Годичная аберрация задаётся скоростью движения Земли по орбите вокруг Солнца $V_{\text{ср}} = 29,765 \text{ км/с}$. Для этой скорости $\alpha = 20'',496 \sin \theta$.

Направление вектора V при движении наблюдателя по окружности постоянно меняется. Поэтому звёзды описывают на небе эллипсы с периодом 1 сутки и 1

Как следует из приведённого краткого обзора, создание опорной инерциальной системы координат в пространстве и согласованного комплекса фундаментальных астрономических и геодезических постоянных, необходимых для точной навигации на Земле и в космосе, невозможно без введения и учёта десятков (иногда сотен) поправок к непосредственно наблюдаемым приборным данным. Более подробно с темами данного раздела можно ознакомиться в книгах [1, 6, 8].

Список литературы

1. Время и частота / Ред. Дж. Джесперсон, Б. Блейлер, Л. Геттерпер / Пер. с англ. М.: Мир, 1973. 212 с.
2. Завельский Ф. С. Время и его измерение. М.: Наука, 1987. 254 с.
3. Doppler-free optical spectroscopy on the Ba^+ mono-ion oscillator. G. Janik, W. Nagourney, and H Dehmelt. // J. Opt. Soc. Am. B. Vol. 2. № 8. August 1985. P. 1251 – 1257.
4. Shelved Optical Electron Amplifier: Observation of Quantum Jumps. W. Nagourney, J. Sandberg, and H Dehmelt. // Physical Review Letters. Vol. 56. № 26. 30 June 1986. P. 2797 – 2799.
5. A New Era of Frequency Standards and Optical Frequency Measurement. J. L. Hall and J. Ye. // Optics & Photonic News / Opt. Soc. Am. February 2001. P. 45 – 50.
6. Подобед В. В., Нестеров В. В. Общая астрометрия. М.: Наука, 1975. 552 с.
7. Физика космоса: Маленькая энциклопедия / Редкол.: Р. А. Сюняев и др. М.: Сов. Энциклопедия, 1986. 783 с.
8. Астрономический календарь: Постоянная часть / Под ред. В. К. Абалкина. М.: Наука, 1981. 704 с.
9. Abel G., Morrison D., Wolf S. Realm of the Universe. Saunders College Publishing, 1992. 543 p.
10. Дубовик А. С. Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. М.: Наука, 1984. 320 с.
11. Климкин В. Ф., Папырин А. Н., Солоухин Р. И. Оптические методы регистрации быстропротекающих процессов. Новосибирск: Наука, 1980. 208 с.
12. Halliday D., Resnick R., Walker J. Fundamentals of Physics: Extended Chapters 43 – 49. N. Y., Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, Inc., 1993. P. 1131 – 1306.
13. Климишин И. А. Календарь и хронология. М.: Наука, 1981. 192 с.

Содержание

Введение.....	3
Лекции № 4 – 5	
Измерение расстояний и эталоны длины.....	4
Краткий исторический обзор.....	4
Сравнение эталонов.....	6
Переход к лазерным источникам света.....	9
Новое определение метра.....	11
Шкала расстояний.....	13
Некоторые характерные размеры во Вселенной, порядок которых стоит помнить физику	21
Неметрические единицы длины.....	22
Приложение №1	
Возникновение и распространение метрических мер....	23
Метрическая конвенция 1875 г.....	26
Введение метрических мер в России и СССР.....	28
Приложение № 2	
Концевые меры.....	30
Параллельность рабочих плоскостей плиток.....	30
Притираемость плиток.....	31
Набор плиток.....	32
Приложение № 3	
Интерферометры.....	34
Интерферометр Майкельсона.....	34
Интерферометр Фабри – Перо.....	36
Приложение № 4	
Непосредственное измерение частоты	
оптических переходов в атоме.....	39
Стандарты частоты микроволнового диапазона.....	39
Радиооптический частотный мост.....	40
Список литературы	44
Лекции № 6 – 7	
Измерение времени и частоты.....	45
Краткая историческая справка, касающаяся аппаратуры для измерения времени.....	45

Методы измерения времени.....	45
История введения и эволюция различных шкал времени и эталонов времени – частоты.....	48
Проблемы потребителей эталонов времени – частоты.....	51
Введение шкалы UTC.....	51
Небольшие добавления.....	54
Устройство и сравнение характеристик различных часов, эталонов времени и частоты.....	54
Измерение больших интервалов времени. Изотопная хронология.....	63
Шкала порядков величин для времени.....	68
Некоторые характерные интервалы времени и значения частот, порядок которых стоит помнить физику.....	78
Различные системы служб точного времени и частоты для поддержания шкал UTC и навигации.....	79
Приложение №1	
Календари и хронология.....	82
Тропический год и семидневная неделя.....	83
Поясное, декретное, местное, сезонное время.....	84
Замена Юлианского календаря на Григорианский.....	86
Точность Григорианского календаря.....	89
Проблемы реформы календаря.....	90
Реформы календаря в России.....	91
Астрономический счет лет и суток.....	92
Проблемы, связанные с разной датой начала года (нового года).....	94
Хронология введения Григорианского календаря в некоторых странах мира.....	96
Эпохи важнейших календарных эр.....	97
Приложение № 2	
Пассажные инструменты.....	98
Приложение № 3	
Точная трёхмерная навигация на поверхности Земли и в её окрестностях. Фигура Земли. Движение полюса...101	
Список литературы109	

Евгений Иванович Пальчиков

ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ
ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Метрическая система мер
Измерение длины, времени и частоты
Эталоны

Учебное пособие

© Интернет версия подготовлена для
сервера Физического факультета НГУ
<http://www.phys.nsu.ru>

Подписано в печать 31 октября 2001г.

Уч.-изд. л. 7. Офсетная печать

Формат 60×84 1/16

Тираж 370

Заказ №

Лицензия ЛРН№021285 от 6 мая 1998г.

Издательский центр НГУ,
630090, Новосибирск – 90, ул. Пирогова, 2.

