

## Ядерные часы на основе тория-229.

### Ч. 1. История измерения времени

L. VON DER WENSE, B. SEIFERLE, P. G. THIROLF

Университет Людвиг-Максимилиана, Мюнхен, Германия,  
e-mail: L.Wense@physik.uni-muenchen.de

*Представлена история измерения времени и создания часов. Описаны основные характеристики часов. Изложены идеи и основные принципы ядерных часов.*

**Ключевые слова:** ядерные часы, торий-229.

*An overview over the history of time measurement and development of clocks is presented. The main clock characteristics are described. The idea and the basic principles of atomic clocks are stated.*

**Key words:** nuclear clock,  $^{229}\text{Th}$ .

В процессе эволюции устройств по измерению времени были разработаны различные приборы для хранения времени, которые, несмотря на различия, основаны на схожих принципах. Для всех часов требуется физическая оболочка, которая воспроизводит колебания или непрерывные изменения и действует как устройство, позволяющее оценить время. Кроме того, применяется некий механизм, который подсчитывает количество колебаний или измеряет изменения и переводит их в значение времени.

Измерение времени было важным инструментом для науки и общества, и любое улучшение способности измерения времени сопровождалось технологическими достижениями. В древние времена в основном использовались теневые и солнечные часы, в которых измерение времени основывалось преимущественно на высокостабильном вращении Земли, однако точность таких часов ограничивалась визуальным считыванием показаний [1]. Позже были разработаны водяные часы, применяемые параллельно солнечным часам. Постоянный поток воды являлся процессом, задающим ритм и позволяющим повысить точность, которая не зависит от движения небесных тел. Водяные часы оказались менее точны и стабильны, чем солнечные. В то же время в Китае использовались огненные часы, а в европейских монастырях – свечные часы. Первые механические часы с применением горизонтального маятника в сочетании со шпindelным анкером были разработаны в XIII в. Такие часы, как правило, устанавливали в церквях. Часы были неточными, ошибались не менее чем на 15 мин в день и требовали ежедневной настройки [1].

Первые точные механические маятниковые часы разработаны К. Гюйгенсом в 1656 г., они имели погрешность менее 1 мин в день, а позднее и менее 10 с в день [2, 3]. В 1675 г. Гюйгенс также разработал первые портативные карманные часы со спиральным пружинным механизмом. На протяжении веков маятниковые часы оставались самыми точными часами и постоянно совершенствовались. Значительные улучшения сделаны Дж. Харрисоном, который изобрёл маятниковые часы, достигающие точности в 1 с за 100 дней.

Дж. Харрисон также решил проблему определения долготы, создав самый точный морской хронометр [4]. Наиболее точные, когда-либо сконструированные электромеханические маятниковые часы Шорта со свободным маятником, созданы в 1921 г. [5]. Они достигали точности около 1 с в год.

В 1940-х гг. кварцевые часы опередили маятниковые. Первые кварцевые часы, сконструированные уже в 1927 г. Дж. Хортоном и У. Маррисоном, обеспечили точность  $10^{-7}$ , что соответствует расхождению за 4 мес. примерно в 1 с и, поэтому значительно меньшую, чем маятниковые часы Шорта [6]. Колебания кварцевых часов основаны на пьезоэлектрическом эффекте, и для измерения времени не требуется воспроизведение макроскопического механического движения, что является технологическим преимуществом по сравнению с механическими маятниковыми часами. В 1940-х гг. это привело к точностям, приближающимся к  $10^{-9}$  [6]. Такая точность была намного больше, чем точность лучших механических маятниковых часов. По этой причине механические маятниковые часы в основном были замещены часами на кристаллах кварца.

Эпоха атомных часов началась в 1949 г., когда Г. Лионс построил первый мазер на аммиаке в Национальном бюро стандартов в США [7]. Усовершенствованные атомные часы были предложены И. Раби на четыре года раньше [8]. В атомных часах измерения времени основаны на длине волны падающего света, соответствующей определённой энергетической разности между состояниями атомной оболочки. Первые атомные часы в то время были менее точными, чем кварцевые. В результате усовершенствований в 1955 г. в Национальной физической лаборатории Великобритании Л. Эссеном и Д. Пэрри разработан точный цезиевый стандарт, обеспечивающий точность  $10^{-9}$  [9]. Вследствие технических усовершенствований в середине 1960-х гг. точность атомных часов значительно увеличилась (приблизилась к  $10^{-13}$ ), что соответствует изменению на 1 с в 300 000 лет [10]. В 1967 г. это привело к решению о переопределении секунды как 9 192 231 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного

состояния атома  $^{133}\text{Cs}$ . Предыдущее определение секунды основывалось на вращении Земли. Ещё одно важное усовершенствование в измерении времени было сделано в конце 1980-х гг., когда лазерное охлаждение атомных пучков позволило создать атомные часы с фонтанным эффектом с точностями в диапазоне  $10^{-16}$  [11].

Следующий технологический этап во многом обусловлен развитием технологии гребёнки частот в 1998 г., что позволило осуществлять прямое измерение частот в оптическом диапазоне, на пять порядков точнее, чем было возможно до этого [12]. Это усовершенствование было немедленно применено для разработки оптических часов на одном ионе. В 2001 г. представлены первые часы такого типа, они стали одноионными часами на  $^{199}\text{Hg}^+$ , обеспечивающими относительную стабильность частоты  $7 \cdot 10^{-15}$ , измеренной за 1 с усреднения [13]. В это же время разработано множество одноионных оптических часов, которые действуют в метрологических институтах по всему миру. В 2008 г. сличение двух одноионных оптических часов показало относительную неопределённость  $5,2 \cdot 10^{-17}$  [14], а в 2016 г. сообщено о функционировании одноионных оптических часов на основе  $\text{Yb}^+$  с неопределённостью  $3 \cdot 10^{-18}$  [15]. Также параллельно были разработаны часы с оптической решёткой. Преимущество часов, основанных на нейтральных атомах вместо ионов, в том, что отсутствует кулоновское взаимодействие между отдельными частицами, это приводит к высоким достижимым плотностям при сохранении атомов в оптической решётке. К настоящему времени часы с оптической решёткой являются самыми точными в мире, приближающиеся к общей неопределённости частоты  $10^{-18}$  [16, 17].

**Характеристики часов.** Независимо от точного процесса измерения времени необходим способ для сравнения качества (характеристик) различных часов. Качество часов будет зависеть от многих факторов, однако существуют две величины, которые играют важную роль: точность и стабильность. Точность определяет, насколько измеренное значение отличается от правильного значения. В контексте измерения времени следует различать две разные точности: точность фактического измерения времени и точность частоты часов. Точность времени (обычно называемая только «точностью») показывает, насколько часы отклоняются от фактического времени, и указывается в относительных единицах (например, если через 24 ч после синхронизации часы отклоняются на 1 с от правильного времени, то часы имеют точность 1 с в день или  $1,1 \cdot 10^{-5}$ ). Определение точности требует сравнения со значением времени, которое указано как «правильное». Напротив, точность частоты (обычно называемая как систематический сдвиг частоты) является мерой отклонения частоты реального осциллятора от идеального значения. Если идеальная частота осциллятора задана как  $\omega_0$ , то реальный осциллятор, скорее всего, проявит систематический сдвиг, ведущий к реальной частоте

$$\omega_p = \omega_0(1 + \epsilon),$$

где  $\epsilon$  – систематический сдвиг частоты.

При сравнении нескольких часов одного типа можно

ожидать, что каждые часы будут иметь несколько иной систематический сдвиг частоты, ведущий к распределению частотных сдвигов. Размер этого распределения будет тем больше, чем чувствительнее часы реагируют на внешние возмущения. По этой причине неопределённость, выраженная в  $\epsilon$  (называемая систематической неопределённостью частоты), является важным параметром качества часов. В случае, когда значение частоты  $\omega_0$  идеального осциллятора должно быть установлено в качестве стандарта, используемого для определения правильного времени, систематическая неопределённость частоты была бы мерой точности времени, которая в среднем могла бы быть достигнута с определённым типом генератора. В этом случае можно откорректировать систематический сдвиг частоты  $\epsilon$  до его неопределённости. Оставшееся значение приведёт к неизбежному отклонению частоты, используемой для измерения времени, от идеальной частоты и, следовательно, к постоянно растущей погрешности измерения времени. По этой причине общая систематическая неопределённость частоты часто упоминается как точность часов.

Стабильность часов – показатель статистических флуктуаций, которые происходят во время измерения частоты. Если идеальная частота обозначается через  $\omega_0$ , то измеренная частота будет в общем случае зависеть от времени в соответствии с формулой:

$$\omega_{\text{изм}}(t) = \omega_0(1 + \epsilon + y(t)),$$

где  $y(t)$  – частотный шум; дисперсия  $y(t)$  – мера стабильности часов.

Отклонение определяется как дисперсия Аллана  $\sigma_y^2(\tau)$ , которая вычисляется при сравнении двух последовательных отклонений частоты за определённый период выборки  $\tau$ . Более точно имеем

$$\sigma_y^2(\tau) = (y_{n+1} - \bar{y}_n)^2 / 2,$$

где  $\bar{y}_n$  – средняя величина  $n$ -й дробной частоты за период выборки  $\tau$ .

Для современных атомных часов наилучшие отклонения Аллана  $\sigma_y^2(\tau)$ , которые могут быть достигнуты, ограничены квантовым проекционным шумом (КПШ) и заданы выражением [18]:

$$\sigma_y^2(\tau) \approx \sqrt{T/(N\tau)} / Q,$$

где  $Q = \omega/\Delta_\omega$  – показатель качества резонанса;  $T$  – время цикла опроса (который не может превышать  $1/\Delta_\omega$ );  $N$  – количество облучённых атомов;  $\tau$  – период выборки.

В [17] для наиболее стабильных часов с атомной решёткой приведены данные отклонения Аллана  $2,2 \cdot 10^{-18}/\sqrt{\tau}$  за односекундный цикл опроса и, таким образом, близкие к пределу КПШ. Достигнута общая неопределённость частоты  $2,1 \cdot 10^{-18}$ . Параметрами для этих часов с решёткой стронция являются  $Q = 2 \cdot 10^{14}$ ,  $N \sim 2000$ . Лучшие одноионные часы ( $^{171}\text{Yb}^{1+}$  E3), функционирующие в настоящее время, обе-

спечивают общую неопределённость частоты  $3 \cdot 10^{-18}$  и отклонение Алана  $5 \cdot 10^{-15}/\sqrt{\tau}$  ( $T=1$  с,  $Q \sim 10^{23}$ ,  $N=1$ ) [15]. Вычисленный предел КПШ составляет  $10^{-23}$ , что значительно ниже полученного значения. Расхождение возникает из-за чрезвычайно малой естественной ширины линии перехода в наногерцевой области, которая значительно меньше ширины полосы любого доступного для возбуждения лазера. По этой причине стабильность ограничивается не шириной линии перехода, а шириной полосы лазерного излучения, и достигается только ограниченное преимущество из-за чрезвычайно малой естественной ширины линии перехода.

**Идея ядерных часов и их преимущества.** Несмотря на то, что современные атомные часы обладают точностью, приближающейся к  $10^{-18}$ , что соответствует погрешности в 1 с в  $3 \cdot 10^{10}$  лет, т. е. периоду, значительно большему, чем возраст Вселенной, разумно задуматься о возможности перешагнуть этот предел. В настоящее время, производительность часов на основе оптической решётки ограничивается в основном внешними возмущениями, такими как электрические и магнитные поля. Естественным способом повышения производительности часов было бы использование ядерных переходов вместо переходов атомной оболочки. Теоретически ядерные переходы обладают тремя преимуществами [19]:

атомное ядро примерно в пять раз меньше, чем атомная оболочка, что приводит к значительному уменьшению магнитных дипольных и электрических квадрупольных моментов и, следовательно, к более высокой устойчивости к внешним воздействиям. Таким образом, обеспечивается ожидаемое повышение точности и стабильности часов;

частоты перехода больше, что в принципе допускает небольшие отклонения Алана;

ядро, как правило, не подвержено воздействию атомной оболочки, и поэтому возможна разработка твердотельных ядерных часов на основе мессбауэровской спектроскопии.

Такие твердотельные часы могут содержать высокую плотность ядер (около  $10^{14}$  мм<sup>-3</sup>), тем самым значительно улучшая статистические неопределённости по сравнению с часами на основе оптической решётки, для которых плотность составляет  $10^4$  атомов. Как правило, рассматриваются два вида ядерных часов: твердотельные ядерные часы на основе лазерной мессбауэровской спектроскопии и ядерные часы, сконструированные на одном-единственном ионе (одноионные ядерные часы). Преимуществом первых часов станет высокая плотность ядер и, как следствие, большая статистика, но недостатком может стать эффект уширения линий. Вторые часы обеспечивают гораздо более низкую статистику, однако для одноионных часов значительно проще контролировать условия окружающей среды. Принципы работы таких часов очень похожи на принципы работы одноионных атомных часов и часов на основе оптической решётки, за исключением того, что атомный переход заменяется ядерным переходом.

**Сравнение  $\gamma$ -распада и внутренней конверсии.** Сравнить ядерные часы с атомными часами сложно: если для атомных переходов речь идет только об одном канале распада возбужденных состояний, а именно – радиационном распа-

де через фотонное излучение, то ядерные переходы могут демонстрировать более подходящие каналы распада. Самыми важными из них являются радиационный  $\gamma$ -распад и внутренняя конверсия (ВК). В процессе ВК ядро взаимодействует с атомной оболочкой, передавая энергию возбужденного состояния электрону. Конверсионный электрон переходит в континуум. Отношение вероятностей ВК и  $\gamma$ -излучения называется коэффициентом внутренней конверсии  $\alpha_{ВК}$ . Как правило, ВК является доминирующим каналом распада возбужденных ядерных состояний с малой энергией, большим временем жизни и большим атомным номером. Вероятность возникновения ВК означает сокращение времени жизни возбужденного состояния и, тем самым, приводит к уширению спектральной линии, что нежелательно при проектировании часов. Следует обратить внимание на то, что в расчет вероятностей возбуждения ядер входит только ширина линии, соответствующая скорости радиационного распада. Таким образом, ядерные состояния, которые, казалось бы, имеют довольно короткое время жизни, по-прежнему могут иметь незначительную вероятность возбуждения при большом значении коэффициента  $\alpha_{ВК}$ .

Одним из способов подавления канала ВК ядерного перехода является увеличение зарядового состояния рассматриваемого иона. Для возбужденных ядерных состояний с малой энергией существует определенное зарядовое состояние, при котором ионизационный потенциал иона начинает превышать энергию ядерного состояния. В этом случае распад возбужденного состояния не обеспечивает достаточно энергии для дальнейшей ионизации, и ВК энергетически невозможна. Отметим, что это приводит к увеличению времени жизни ядерного состояния и, соответственно, к уменьшению ширины линии перехода, однако не приводит к повышению вероятности возбуждения ядерного состояния, связанной со скоростью радиационного распада, которая остается неизменной при уменьшении скорости ВК. Даже при малой энергии ядерных состояний подавление канала ВК, как правило, требует использования высокозарядных ионов. Одним из примеров является низкоэнергетическое состояние  $^{205\text{m}}\text{Pb}$  (2,3 кэВ, 24,2 мкс, E2), при котором время жизни 24,2 мкс является довольно низким, учитывая потенциальное применение ядерных часов. Коэффициент  $\alpha_{ВК} \approx 4,4 \cdot 10^8$  и, начиная с  $\text{Pb}^{46+}$ , можно ожидать, что канал ВК будет энергетически подавлен, в результате чего увеличится время жизни до  $10^4$  с. В этом случае ион станет подходящим кандидатом для создания ядерных часов с высокозарядными ионами. Для твердотельных ядерных часов ионизационный потенциал должен быть заменен шириной запрещенной зоны материала, при этом практически нет перекрытия диапазонов энергии, отвечающих ширинам запрещенных зон и энергиям ядерных переходов. Поэтому в концепции твердотельных ядерных часов подавление канала ВК невозможно (в этом контексте  $^{229\text{m}}\text{Th}$  является исключением). Первое возбужденное состояние  $^{229}\text{Th}$  обозначается как  $^{229\text{m}}\text{Th}$ , где индекс  $m$  – это метастабильность, выражающая ожидаемую сравнительно длинную продолжительность жизни этого состояния.

**Уникальность  $^{229\text{m}}\text{Th}$ .** На сегодняшний день существует

серьезное препятствие для создания широкого спектра ядерных часов. Это связано с тем, что даже энергии в несколько килоэлектронвольт, соответствующие длине волны от 1 нм и меньше, в масштабе ядерной энергии рассматриваются как низкоэнергетические переходы, а технология частотной гребёнки еще недостаточно широко распространена в области рентгеновского излучения для управления большинством ядерных переходов. Поскольку технология частотной гребёнки является новой и быстро развивающейся областью техники, можно предположить, что наличие частотных гребенок в диапазоне энергий в несколько килоэлектронвольт с достаточной интенсивностью для возбуждения ядерных переходов и, как следствие, для использования высокоточной мессбауэровской спектроскопии – просто вопрос времени. Тем не менее, исследования с целью разработки ядерных часов должны сосредоточиться на одном ядерном состоянии с очень низкой энергией – лишь на 7,8 эВ выше энергии основного ядерного состояния. Известно только одно другое ядерное состояние с энергией менее 1 кэВ выше основного состояния –  $^{235\text{m}}\text{U}$  с энергией около 76 эВ, что демонстрирует недостаток ядерных состояний с такой низкой энергией. Данное изомерное состояние не подходит для разработки ядерных часов из-за его чрезвычайно долгого излучательного времени жизни, которое составляет  $3,8 \cdot 10^{22}$  с, что примерно в 100 000 раз превышает возраст Вселенной. По этой причине на сегодняшний день  $^{229\text{m}}\text{Th}$  является единственным вариантом для разработки ядерного эталона частоты. Во второй части статьи будет описан только  $^{229\text{m}}\text{Th}$ . В заключении будут рассматриваться другие потенциальные кандидаты для разработки ядерных часов.

Работа выполнена в рамках исследований «Горизонты Европейского союза 2020 г.» и инновационной программы (соглашение № 664732 «Ядерные часы, nuClock», грант DFG Th956/3-1). Работа выполнена в отделении медицинской физики университета Людвиг-Максимилиана (LMU) и лаборатории Майера-Лейбница.

#### Л и т е р а т у р а

1. **Higgins K., Miner D., Smith C. N., Sullivan D. B.** A walk through time (version 1.2.1). [Электрон. версия] <http://physics.nist.gov/time> (дата обращения: 12.07.2010).
2. **Bennet M., Schatz M.F., Rockwood H., Wiesenfeld K.** Huygens' clocks // *Proceedings of the Royal Society of London A*. 2002. V. 458. P. 563–579.
3. **Sorge F., Cammalleri M., Genchi G.** On the birth and growth of pendulum clocks in the early modern era // *Essays on the history of mechanical engineering*. 2016. P. 273–290.

4. **Gould R. T.** The marine chronometer: its history and development, J.D. Potter (1923).

5. **Bosschieter J. E.** Shortt's free pendulum, A History of the Evolution of Electric Clocks. [Электрон. версия] <http://www.electric-clocks.eu/clocks/en/page10.htm> (дата обращения: 03.09.2017).

6. **Marrison W. A.** The evolution of the quartz crystal clock // *The Bell System Technical Journal*. 1948. V. 27. P. 510–588.

7. **Lyons H.** The atomic clock // *Instruments*. 1949. V. 22. P. 133–135 (1949).

8. **Forman P.** Atomichron: The atomic clock from concept to commercial product // *IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Society*. 1985. P. 1181–1204.

9. **Essen L., Parry J. V. L.** An atomic standard of frequency and time interval: A caesium resonator // *Nature*. 1955. V. 176. P. 280–282.

10. **Ramsey N. F.** History of Atomic clocks // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1983. V. 88. P. 301–318.

11. **Wynands R., Weyers S.** Atomic fountain clocks // *Metrologia*. 2005. V. 42. P. 64–79.

12. **Udem Th., Holzwarth R., T. W. Hansch.** Optical frequency metrology // *Nature*. 2002. V. 416. P. 233–237.

13. **Diddams S. A., Udem T., Vogel K. R., Oates C. W., Curtis E. A., Lee W. D., Itano W. M., Drullinger R. E., Bergquist J. C., Hollberg L. W.** An optical clock based on a single trapped  $^{199}\text{Hg}^+$  ion // *Science*. 2001. V. 293. P. 825–828.

14. **Rosenband T., Hume D., Schmidt P. e. a.** Frequency Ratio of  $\text{Al}^+$  and  $\text{Hg}^+$  Single-ion optical clocks; Metrology at the 17th decimal place // *Science*. 2008. V. 319. P. 1808–1811.

15. **Huntemann N., Sanner C., Lipphardt B.** Single-ion atomic clock with  $3 \cdot 10^{-18}$  systematic uncertainty // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116. P. 063001.

16. **Bloom B. J., Nicholson T. L., Williams J. R., Campbell S. L., Bishof M., Zhang X., Zhang W., Bromley S. L., Ye J.** An optical lattice clock with accuracy and stability at the  $10^{-18}$  level // *Nature*. 2014. V. 506. P. 71–75.

17. **Nicholson T. L., Campbell S. L., Hutson R. B.,** Systematic evaluation of an atomic clock at  $2 \cdot 10^{-18}$  total uncertainty // *Nature Communications*. 2015. V. 6. P. 6896.

18. **Ludlow A. D., Boyd M. M., Ye J., Peik E., Schmidt P.** Optical Atomic clocks // *Rev. Mod. Phys.* 2015. V. 87. P. 637–699.

19. **Peik E., Okhapkin M.** Nuclear clocks based on resonant excitation of  $\gamma$ -transitions // *Comptes Rendus Physique*. 2015. V. 16. P. 516–523.

Дата принятия: 03.10.2017.