

КЕЛЬВИН В НОВОЙ СИСТЕМЕ ЕДИНИЦ СИ

Йоахим Фишер

Национальный метрологический институт Германии (ПТБ)

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Abbestr. 2-12, 10587, Berlin, Germany

АННОТАЦИЯ.

Единица температуры T , кельвин в настоящее время определена через температуру тройной точки воды. Так что, кельвин связан со свойством материи. Вместо этого, было бы целесообразно поступить так же, как с некоторыми другими единицами в Международной Системе Единиц, СИ: связать эту единицу с фундаментальной константой и зафиксировать её значение. Для кельвина, соответствующей константой является постоянная Больцмана k , поскольку в фундаментальных законах физики температура всегда выступает как тепловая энергия kT . В настоящее время осуществляется много проектов по независимому определению значения постоянной Больцмана, например, акустическая газовая термометрия с измерением скорости звука и термометрия газов по их диэлектрической проницаемости с использованием емкостных мостов переменного тока звуковой частоты. Другие многообещающие методы - это термометрия доплеровского уширения спектральных линий и термометрия, основанная на измерении тепловых шумов. Проанализированы успехи, достигнутые к моменту переопределения, и возможности методов. Значение k , принятое для нового определения, станет самым последним значением КОДАТА. Одно из последствий нового определения заключается в том, что относительная неопределенность определения k перейдет на термодинамическую температуру тройной точки воды, $T_{\text{трв}}$. Последующие изменения $T_{\text{трв}}$ с точки зрения нового определения кельвина могут привести к несколько иному значению $T_{\text{трв}}$, однако ожидается, что отличие от 273,16 К составит не более 0,25 мК.

Ключевые слова - фундаментальная константа, постоянная Больцмана, измерения температуры, температурная шкала, основные единицы, Международная система единиц.

1. ВВЕДЕНИЕ

Международная система единиц, СИ, является когерентной системой единиц для использования во всех областях науки и техники. Единицы СИ служат основой для измерения всех величин, которые встречаются в уравнениях, используемых в физических науках. Уравнения для величин не зависят от того, каким образом определены единицы. Значения всех фундаментальных констант являются естественными инвариантами, но их численные значения зависят от единиц, в которых они выражены. Закрепление числовых значений для ряда констант определяет конкретный набор единиц, каковым является СИ. Такое закрепление также оказывает влияние на закрепление числовых значений всех других констант, которые можно записать в виде произведений и отношений этих констант. Важно отметить, что для тех констант, численные значения которых не установлены, значения по-прежнему остаются естественными инвариантами, хотя их числовые значения должны быть определены экспериментально.

Существующее определение единицы термодинамической температуры было принято, по существу, на 10-й Генеральной конференции по мерам и весам в 1954 году, когда была выбрана тройная точка воды, $T_{\text{трв}}$, в качестве основной реперной точки: единица температуры кельвин равна 1/273,16-ой части термодинамической температуры тройной точки воды. Это

определение устанавливает единицу через произвольно выбранное свойство вещества. Поэтому влияние изотопного состава и чистоты используемой воды имеет большое значение для практической реализации единицы. В связи с этим, стабильность такой реализации в пространстве и времени находится под угрозой.

С момента принятия СИ в 1960 году были достигнуты значительные успехи в привязке единиц СИ к действительно неизменяемым величинам, таким как фундаментальные константы физики и свойства атомов. Признавая важность привязки единиц СИ к таким неизменяемым величинам, Международный комитет по мерам и весам (МКМВ), принял в 2005 году рекомендацию для подготовки к новым определениям килограмма, ампера, кельвина, моля на основе зафиксированных численных значений постоянной Планка, заряда электрона, постоянной Больцмана k и числа Авогадро.

МКМВ рекомендовал национальным метрологическим институтам представить реальные предложения по кельвину (также как и по килограмму, амперу и молю) чтобы подтвердить, что для этих четырех основных величин могут быть даны новые определения. Целью является определение в будущем основных величин через фундаментальные константы, чтобы таким образом сделать их независимыми от материальных эталонов, так называемых артефактов, или от соответствующих методов измерений. Поскольку термодинамическая температура T всегда рассматривается в комбинации kT как "тепловая энергия" во всех фундаментальных законах, именно постоянную Больцмана k следует зафиксировать как естественную константу. При определении её значения кельвин непосредственно выводится из единицы энергии "джоуля" (по аналогии с единицей длины "метра", выводимого из определения значения скорости света через единицу времени "секунду", как это делается с 1983 года.)

В настоящее время нет необходимости изменять структуру Международной системы единиц и выбирать другие основные величины [2]. Поэтому кельвин не должен исчезнуть из этой системы. Новое определение должно быть пригодным как для повседневного применения в разработках и в производстве, так и для фундаментальных исследований. Чтобы избежать перекалибровок и пересчетов, не должно иметь места неконтролируемое нарушение размера единицы. Таким образом, неопределенность значения соответствующей фундаментальной константы должна быть сопоставима с неопределенностью воспроизведения единицы, осуществляемой до сих пор.

В 2006 году признанное в мире значение постоянной Больцмана, равное $1,3806504 \cdot 10^{-23}$ Дж / К, имеет относительную стандартную неопределенность $1,7 \cdot 10^{-6}$. Это значение и его неопределенность основаны, главным образом, на одном измерении, проведенном в Национальном институте стандартов и технологий США, НИСТ (NIST) в 1988 году методом акустической газовой термометрии. Однако одно измерение не может считаться достаточным основанием для фиксирования числового значения. Поэтому эта проблема обсуждалась экспертами всех основных метрологических институтов на двух семинарах в РТВ (ПТБ) в Берлине. В процессе этого был разработан график исследований для получения значения k , основанного на нескольких различных методах [4]. Ниже представлены обычные первичные термометрические методы для определения k с соответствующими полученными и ожидаемыми неопределенностями.

2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ БОЛЬЦМАНА.

Поскольку невозможно напрямую экспериментально определить среднюю тепловую энергию kT , для определения k в тройной точке воды должны быть измерены макроскопические величины, которые явным образом коррелируются с тепловой энергией [5]. В Таблице 1 дан

краткий обзор таких зависимостей, где T связана только с другими величинами, которые можно измерить, и с известными константами. Для идеальных газов, когда взаимодействие частиц незначительно, тепловая энергия пропорциональна средней кинетической энергии частиц газа. В замкнутом объеме эту энергию можно измерить через давление газа и число частиц. Давление p описывается с помощью уравнения состояния идеального газа. Термометр, основанный на этом законе – это традиционный газовый термометр, неопределенность которого, однако, слишком велика для абсолютных измерений. С другой стороны, плотность, изменяющаяся в зависимости от температуры при постоянном давлении, может быть определена через диэлектрическую постоянную или показатель преломления. Скорость звука в газе также служит показателем температуры (акустическая газовая термометрия). Если в качестве «измерительного вещества» вы используете электроны проводимости металлического резистора, для измерения температуры можно использовать электрический джонсоновский шум в соответствии с формулой Найквиста. С помощью лазерной спектроскопии можно определить кинетическую энергию поглощающих атомов через доплеровское уширение линий поглощения. В таблице 1 также приведены ожидаемые неопределенности при определении k . Краткое описание всех существующих методов можно найти в обзорной статье [5].

Таблица 1: Обзор первичных термометров, пригодных для определения постоянной Больцмана k с ожидаемой относительной неопределенностью (T – температура, u_0 – скорость звука в предельном случае стремящихся к нулю давления и частоты, $\gamma_0 = c_p/c_v$ – отношение удельных теплоемкостей, M – молярная масса газа, R – молярная газовая постоянная, p – давление, ε – диэлектрическая постоянная, ε_0 – электрическая постоянная, α_0 статическая электрополяризуемость, n - показатель преломления, $\langle U^2 \rangle$ – среднеквадратическое значение напряжения шума, R_{el} – электрическое сопротивление, ν – частота, $\Delta\nu_D$ – доплеровское уширение спектральной линии, имеющей частоту ν_0 , m – атомная масса, c_0 – скорость света в вакууме).

Исходный термометрический метод	Физический закон	Достигаемая относительная стандартная неопределенность
Акустический газовый термометр	$u_0 = \sqrt{\frac{\gamma_0 RT}{M}}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Газовый термометр по диэлектрической проницаемости	$p = kT \frac{(\varepsilon - \varepsilon_0)}{\alpha_0}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Газовый термометр по показателю преломления	$p = kT \frac{(n^2 - 1)\varepsilon_0}{\alpha_0}$	$10 \cdot 10^{-6}$
Шумовой термометр	$\langle U^2 \rangle = 4kTR_{el}\Delta\nu$	$5 \cdot 10^{-6}$
Термометр по доплеровскому уширению спектральных линий	$\Delta\nu_D = \sqrt{\frac{2kT}{mc_0^2}}\nu_0$	$10 \cdot 10^{-6}$

2.1 Акустический газовый термометр.

В газе ряд измеряемых величин зависит от температуры. Поскольку уравнения этой зависимости обычно выводятся для идеальных газов, а взаимодействие между частицами газа для определения k недостаточно известно, измерения проводятся путем экстраполяции к нулевому давлению так, что аппроксимация к идеальному газу оказывается достаточной. При определении k в НИСТ, скорость звука u_0 в инертном газе аргоне была определена с помощью сферического резонатора (Рис. 1) при температуре тройной точки воды, а k рассчитывалась по соответствующей формуле из таблицы 1, где газовая постоянная R заменена на kN_A (N_A - постоянная Авогадро).

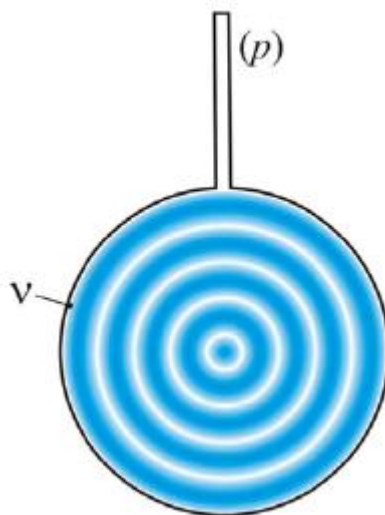


Рисунок 1: Принцип работы акустического газового термометра со сферическим резонатором. Скорость звука u_0 получают, исходя из резонансных частот ν и объема резонатора. Влияние давления p второстепенно.

Сферические резонаторы сейчас используются также и в других институтах. Размеры резонатора были определены НИСТ с помощью заливки ртути с известной плотностью. В настоящее время размер резонатора определяется через измерение резонанса микроволн. Источником существенных составляющих неопределенности помимо определения размеров и температуры тройной точки являются чистота измерительного газа, зависимость молярной массы от изотопного состава, экстраполяция к нулевому давлению и положение акустических датчиков. При нынешней технике измерения с использованием этого метода достижима неопределенность $1 \cdot 10^{-6}$.

2.2 Газовый термометр с диэлектрической постоянной

Определение диэлектрической постоянной гелия уже давно используется в низкотемпературной термометрии и является - по сравнению с измерением показателя преломления - более прогрессивной и более перспективной техникой, обеспечивающей гораздо меньшую неопределенность. Для идеального газа, диэлектрическая постоянная имеет вид $\epsilon = \epsilon_0 + a_0 \cdot N/V$ (N/V - плотность числа частиц). Если объединить это выражение с уравнением состояния, получим связь между p и ϵ , указанную в таблице 1. Значительный прогресс, достигнутый после первоначального расчета поляризуемости гелия, неопределенность которой в последние несколько лет удалось уменьшить до значения менее,

чем $1 \cdot 10^{-6}$, обеспечил конкурентоспособность данного метода. Для измерения ε , измерительный газ подается в соответствующие конденсаторы. Из-за очень низкой поляризуемости гелия, абсолютные измерения невозможны. Поэтому измерительный конденсатор поочередно то заполняется гелием, то откачивается, а ε получают из относительного изменения емкости (Рис. 2).

Из линейной составляющей функции $\varepsilon(p)$ окончательно определяется k . Значительным источником неопределенности при использовании этого метода является деформация измерительного конденсатора из-за давления газа. Измерения давления и емкости также должны быть максимально усовершенствованы. Оценка всех вкладов в неопределенность позволяет ожидать возможности достичь суммарной неопределенности сравнимой с неопределенностью в акустической газовой термометрии - порядка $2 \cdot 10^{-6}$. Эта оценка подтверждается результатами, которые недавно были получены при измерениях в области низких температур от 2,5 до 36 К, а также в тройной точке воды [7].

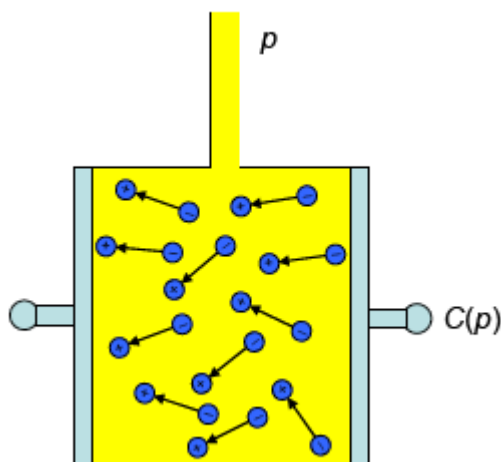


Рисунок 2: Центральный элемент газового термометра с диэлектрической постоянной - заполненный газом с давлением p измерительный конденсатор, у которого измеряется относительное изменение емкости $(C(p)-C(0))/C(0)$.

2.3 Джонсоновский шумовой термометр

Температура объекта может быть также определена путем наблюдения статистических или квантовых эффектов. Измерение тепловых шумов на протяжении многих лет использовалось в термометрии. Термометрия, основанная на измерении тепловых шумов, определяет температуру с помощью формулы Найквиста (табл. 1) через среднеквадратичное значение падения напряжения шума на электрическом сопротивлении. При этом значение электрического сопротивления резистора в тройной точке воды, наряду с усилением и полосой пропускания электронной измерительной системы, должны быть точно определены в качестве параметров.

До сих пор шумовая термометрия широко применялась при очень низких и очень высоких температурах. При высоких температурах используются более сильные измерительные сигналы и, поэтому, схема менее чувствительна к помехам. При низких температурах возможно использование более чувствительных сверхпроводящих детекторов, а слабые сигналы могут быть выявлены адекватным соотношением сигнал-шум. В области тройной точки воды должны применяться особые электронные схемы, например, цифровые

корреляторы с попеременным переключением, а для поддержания стабильности усиления и полосы пропускания, для устранения влияния дрейфа и шумов детектора и электрической цепи измерения должны проводиться путем сравнения с известными источниками шума. Такой проект в настоящее время осуществляется НИСТ и Лабораторией Измерений и Эталонов Новой Зеландии (Measurement and Standards Laboratory). Основной проблемой является длительное время измерения, которое требуется для достижения малой неопределённости. Для достижения неопределённости порядка $1 \cdot 10^{-5}$ в полосе пропускания 20 кГц, необходимое время измерения составляет около пяти недель. В этом случае, точность определения постоянной Больцмана, несомненно, достигнет своего предела.

2.4 Термометр по доплеровскому уширению линий

Совсем недавно был предложен ещё один метод для определения k с помощью лазерной спектроскопии. Он основан на измерении доплеровского уширения линии поглощения движущимися частицами газа в ампуле с однородной температурой, см. Рис. 3. Информация о температуре получается из ширины профиля поглощения, который сканируется с помощью излучения перестраиваемого лазера (Таблица 1).

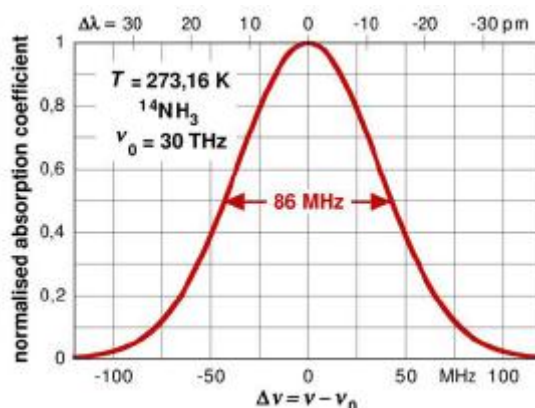


Рисунок 3: Линия поглощения аммиака $^{14}\text{NH}_3$ с доплеровским уширением для T_{TPW} при допущении, что центральная частота $\nu_0 = 30$ ТГц.

В Северном Университете Парижа были проведены эксперименты с CO_2 -лазером на линии аммиака при частоте 30 ТГц. Относительная стандартная неопределённость k была приблизительно оценена на уровне $3,8 \cdot 10^{-5}$. В рамках другого проекта, Второй университет Неаполя и Политехнический институт Милана использовали спектроскопию высокого разрешения на линии CO_2 с помощью лазерного диода в ближнем инфракрасном диапазоне. В настоящее время относительная неопределённость составляет $1,6 \cdot 10^{-4}$ [9]. Третий эксперимент в настоящее время разворачивается в Датском Институте Фундаментальной метрологии. Из-за огромных проблем, связанных с разделением доплеровского уширения и других изменений формы линии, обусловленных взаимодействием частиц, снижение неопределённости до уровня ниже $1 \cdot 10^{-5}$ маловероятно.

3. ПОСЛЕДСТВИЯ ПРИНЯТИЯ НОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Формулировка нового определения кельвина может быть следующей [2]: кельвин это изменение термодинамической температуры T , которое соответствует изменению тепловой энергии kT на величину, точно равную $1,38065XX \cdot 10^{23}$ Дж. Эта формулировка аналогична определению метра, принятому в 1983 году, и может рассматриваться как явное определение самой единицы. В качестве альтернативы возможна формулировка, явным образом связанная с фундаментальной константой: кельвин это единица термодинамической температуры T , определённая таким образом, что постоянная Больцмана имеет точное значение равное $1,38065XX \cdot 10^{23}$ J/K. Обе формулировки практически эквивалентны.

Каковы последствия такого нового определения? Во-первых, практические последствия будут неочевидными, они даже не почувствуются, так что международная метрология по-прежнему сможет функционировать без каких-либо потрясений, и на международное разделение труда и производства изменение определения не повлияет. Что-либо еще потребует огромных затрат. Консультативный комитет МКМВ по термометрии (ККТ) уже работает над руководством по применению нового определения "Внедрение в практику", содержащим не только рекомендации по прямому измерению термодинамической температуры T и определяющие тексты по-прежнему действующей Международной температурной шкалы 1990 года (МТШ-90) и Временной низкотемпературной шкалы 2000 года (ВНТШ-2000) [10, 11], но также обсуждаются различия $T - T_{90}$ и $T - T_{2000}$ и их неопределённости. T_{90} и T_{2000} - это значения температуры, которые определяются в соответствии с конкретными характеристиками соответствующих шкал. Такая процедура позволит проводить непосредственные измерения термодинамической температуры далеко от тройной точки воды, например, при высоких температурах, когда в качестве инструмента интерполяции МТШ-90 и в качестве первичного термометра может быть использован радиационный термометр. В будущем это поможет существенно сократить неопределённости, которые, например, в самой верхней реперной точке МТШ-90 при 1358 К, почти в тысячу раз больше, чем воспроизводимость тройной точки воды.

В то время как новое определение кельвина не влияет непосредственно на статус МТШ-90 или ВНТШ-2000, имеются значительные преимущества для измерения термодинамической температуры, особенно – ниже ~ 20 К и выше ~ 1300 К, где первичные термометры могут обеспечить более низкую неопределённость, чем доступную в настоящее время по МТШ-90. Тем не менее, в обозримом будущем МТШ-90 и ВНТШ-2000 по-прежнему будут использоваться как точные, воспроизводимые и удобные аппроксимации термодинамической температуры. В частности, наиболее точные измерения температуры в основном диапазоне – приблизительно от 13 до 1235 К – будут по-прежнему прослеживаться к эталону единицы температуры через платиновые термометры сопротивления, откалиброванные по МТШ-90. Поскольку МТШ-90 не изменится и сохранит определенные значения T_{90} для всех реперных точек, неопределённости T_{90} останутся такими же: они по-прежнему будут определяться неопределённостями реализаций реперных точек (см. Таблицу 2, столбец 3 [12]) и неединственностью характеристики платиновых термометров сопротивления, в сумме составляя, как правило, менее 1 мК.

Тем не менее, тройная точка воды, которая в настоящее время по определению отражает точную температуру, потеряет свой особый статус. Она просто станет реперной температурной точкой, как и любая другая, которая имеет точно такую же неопределённость, как и постоянная Больцмана в момент её определения. Относительная неопределённость константы Больцмана $1 \cdot 10^{-6}$ соответствует неопределённости температуры в тройной точке воды 0,27 мК. Поскольку все термодинамические измерения в настоящее время

определяются по отношению к тройной точке воды, неопределенность 0,27 мК распространяется на все исторически сложившиеся измерения термодинамической температуры. На практике изменения в определении будут влиять только на измерения вблизи 273 К, так как неопределённости значений термодинамической температуры, отстоящих далеко от этого значения, намного превышают 0,27 мК. Для иллюстрации этого утверждения, графы 4 и 5 таблицы 2 показывают текущие значения неопределённости термодинамической температуры $u(T)$ определяющих реперных точек МТШ-90 [2] и неопределённости $u(T_{k\ fixed})$ при фиксировании значения постоянной Больцмана.

Таблица 2: Определяющие реперные точки МТШ-90 с неопределённостями $u(T_{90})$ наилучшей практической реализации МТШ-90 и неопределённости $u(T)$ термодинамической температуры; $u(T_{k\ fixed})$ – неопределённость термодинамической температуры перечисленных фазовых переходов (которые служат в качестве реперных точек МТШ-90) в предположении, что принято новое определение кельвина с фиксированным значением постоянной Больцмана. Все значения приведены как стандартные неопределённости. Значения в колонках 3 и 4 были взяты из таблицы 1.2 «Дополнительной информации к МТШ-90» [12].

1	2	3	4	5
Fixed Point	T_{90} (K)	$u(T_{90})$ (mK)	$u(T)$ (mK)	$u(T_{k\ fixed})$ (mK)
Cu	1357.77	15	60	60.0
Au	1337.33	10	50	50.0
Ag	1234.93	1	40	40.0
Al	933.473	0.3	25	25.0
Zn	692.677	0.1	13	13.0
Sn	505.078	0.1	5	5.03
In	429.7485	0.1	3	3.04
Ga	302.9146	0.05	1	1.05
H ₂ O	273.16	0.02	0	0.27
Hg	234.3156	0.05	1.5	1.52
Ar	83.8058	0.1	1.5	1.50
O ₂	54.3584	0.1	1	1.00
Ne	24.5561	0.2	0.5	0.50
e-H ₂	≈20.3	0.2	0.5	0.50
e-H ₂	≈17.0	0.2	0.5	0.50
e-H ₂	13.8033	0.1	0.5	0.50
⁴ He	4.2221	0.1	0.3	0.30

Специалисты ККТ не смогли указать на возможность какого-либо эксперимента, где слегка увеличенная неопределённость термодинамической температуры $u(T_{k\ fixed})$ могла бы

представлять проблему для метрологов или для более широкой научной общественности. Кроме того, ожидается, что любые будущие изменения температурной шкалы будут намного меньше, чем допуски указываемые в современных стандартах на термометры и промышленные платиновые термометры сопротивления. Поэтому не ожидается, что будут вноситься какие-либо новые требования в эти стандарты при любых будущих изменениях в температурных шкалах. ККТ не ожидает появления никаких новых способов для первичных термометров, обеспечивающих достижение значительно меньшей неопределённости $u(T_{TPW})$, когда постоянная Больцмана будет зафиксирована, Следовательно, в обозримом будущем никаких изменений приписанного значения T_{TPW} не произойдёт.

Новое определение кельвина через постоянную Больцмана не требует замены МТШ-90 или ВНТШ-2000 какой-либо улучшенной температурной шкалой, но и не препятствует такой замене. В будущем, по мере развития основных методов, способствующих уменьшению неопределённости, они будут использоваться всё шире и смогут, в некоторых диапазонах, постепенно заменить Международные температурные шкалы в качестве основы температурных измерений.

4. ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Рис. 4 показывает совокупность опубликованных данных экспериментов по определению постоянной Больцмана с 1988 года. Определение с помощью акустической газовой термометрии (AGT) в NIST [13] даёт основу для значения, принятого в 2006 году. В соответствии с рекомендацией МКМВ 2005 года были проведены новые многочисленные эксперименты. В 2007 году эксперимент на основе рефрактивной газовой термометрии (RIGT) в НИСТ [14] дал численное значение с относительной стандартной неопределённостью $9,1 \cdot 10^{-6}$. В РТВ был проведён эксперимент с использованием непригодной низкотемпературной модели газового термометра для измерения диэлектрической постоянной (DCGT). Из этих измерений можно получить предварительное значение постоянной Больцмана с относительной неопределённостью $3,0 \cdot 10^{-5}$. Как уже упоминалось ранее, первоначальные измерения термометром с использованием эффекта доплеровского уширения (DBT) итальянской группой (UniNa) позволили получить неопределённость порядка $1,6 \cdot 10^{-4}$. Доплеровские кривые поглощения (DBT-LPL) в Северном Университете Парижа были поочерёдно проанализированы по двум профилям линий, и результаты были опубликованы в 2009 и 2010 годах [8]. Относительная разница в значениях постоянной Больцмана, равная $3,7 \cdot 10^{-5}$ свидетельствует о значительных проблемах в понимании формы линии для одних и тех же исходных данных. Полный бюджет неопределённости опубликован не был, но его можно приблизительно оценить в $3,8 \cdot 10^{-5}$.

Наиболее точные новые значения постоянной Больцмана, опубликованные в 2009 и 2010 годах, были получены на аппаратуре похожих акустических газовых термометров (AGT) во Французском национальном институте LNE [15, 16], в Итальянском – INRiM [17] и Британской Национальной физической лаборатории NPL [18]. Относительные стандартные неопределённости достигают значений $2,7 \cdot 10^{-6}$, существенно меньшей величины $1,2 \cdot 10^{-6}$, $7,5 \cdot 10^{-6}$ и $3,1 \cdot 10^{-6}$, соответственно. Первые эксперименты на основе джонсоновской шумовой термометрии были сделаны в NIST [19], совсем недавно на основе акустической газовой термометрии – в Китайском государственном институте NIM, и новый эксперимент в РТВ с помощью термометрии по диэлектрической газовой постоянной [7]. Относительные неопределённости составляют $12,1 \cdot 10^{-6}$, $7,9 \cdot 10^{-6}$ и $7,9 \cdot 10^{-6}$, соответственно.

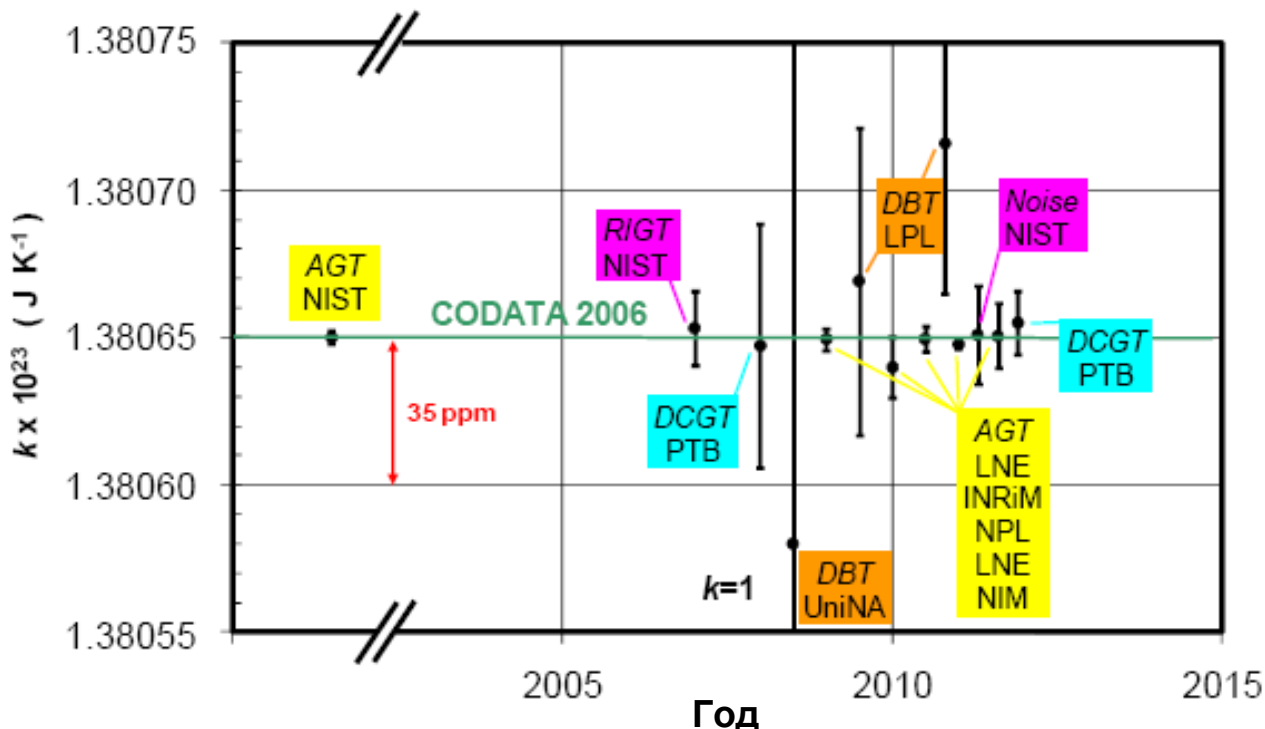


Рисунок 4: Обзор экспериментов по определению постоянной Больцмана k или универсальной газовой постоянной $R = k \cdot N_A$ с 1988 года. Объяснения сокращений можно найти в разделе 4. Черные полосы показывают стандартные неопределённости. Зеленая линия показывает числовое значение k , рекомендованное CODATA в 2006 году.

График показывает, что до сих пор не существует *независимого* метода, который мог бы подтвердить измерения AGT в НИСТ на требуемом уровне неопределённости. Поэтому, международный ККТ в 2010 году рекомендовал МКМВ дожидаться, по крайней мере, еще двух результатов, полученных независимыми методами, прежде чем давать новое определение кельвину. МКМВ последовал этой рекомендации также и из-за расхождений, которые имели место с определением постоянной Планка для переопределения килограмма, и, соответственно, только в принципе одобрил новые определения для килограмма, ампера, моля и кельвина. Тем не менее, они не могут быть реализованы, пока не будут проведены согласующиеся между собой измерения.

Теперь ККТ ожидает получения в 2013 году усредненного значения k с относительной стандартной неопределённостью ниже, чем 10^{-6} , которая будет получена в результате различных экспериментов, по крайней мере, двумя различными методами (акустической газовой термометрии и термометрии с использованием диэлектрической постоянной газа). Кроме того, возможно, дополнительное подтверждение может дать шумовой термометр, и, возможно, также термометр с доплеровским уширением, хотя и с большей неопределённостью. Таким образом, имеется достаточно времени для того, чтобы воспользоваться перспективными возможностями различных методов измерения.

В связи со значительным прогрессом, достигнутым благодаря развитию описанных первичных термометров, постоянная Больцмана может быть определена с такой точностью, что дать новое определение кельвина будет возможно посредством простого фиксирования её численного значения. Существенным следствием нового определения кельвина является его долгосрочный характер, так как теперь вместо свойства материи в основе шкалы становится

фундаментальная константа. Система единиц, таким образом, будет безгранично устойчивой. Эта цель стоит усилий, прилагаемых всем миром.

5. REFERENCES

- [1] Recommendation 1 (CI-2005) of the CIPM, Sevres, BIPM (2005) (english version: www.bipm.org/cc/CIPM/Allowed/94/CIPM-Recom1CI-2005-EN.pdf)
- [2] I.M. Mills, P.J. Mohr, T.J. Quinn, B.N. Taylor, E.R. Williams, “Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI -2005)”, *Metrologia* **43** pp. 227-246 (2006)
- [3] P.J. Mohr, B.N. Taylor, D.B. Newell, “CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2006”, *Rev. Mod. Phys.* **80** pp. 633-730 (2008)
- [4] B. Fellmuth, J. Fischer (editors), Talks of the 221. PTB Seminar “Workshop on Progress in Determining the Boltzmann Constant”, Bericht PTB-Th-3, Braunschweig, ISBN 978-3-86509-684-5 (2007)
- [5] B. Fellmuth, Ch. Gaiser, J. Fischer “Determination of the Boltzmann Constant – status and prospects”, *Meas. Sci. Technol.* **17** pp. R145-R159 (2006)
- [6] C. Gaiser, B. Fellmuth, N. Haft, “Dielectric-constant gas-thermometry scale from 2.5 K to 36 K with ^3He , ^4He and neon”, *Int. J. Thermophys.* **31** pp. 1428–1437 (2010)
- [7] B. Fellmuth, J. Fischer, C. Gaiser, O. Jusko, T. Priruenrom, W. Sabuga, T. Zandt, “Determination of the Boltzmann constant by dielectric-constant gas thermometry”, *Metrologia* (2011) accepted
- [8] C. Lemarchand, K. Djerroud, B. Darquie, O. Lopez, A. Amy-Klein, C. Chardonnet, Ch.J. Borde, S. Briaudeau, C. Daussy, “Determination of the Boltzmann Constant by Laser Spectroscopy as a Basis for Future Measurements of the Thermodynamic Temperature”, *Int. J. Thermophys.* **31** pp. 1347-1359 (2010)
- [9] G. Casa, A. Castrillo, G. Galzerano, R. Wehr, A. Merlone, D. Di Serafino, P. Laporta and L. Gianfrani, “Primary Gas Thermometry by Means of Laser-Absorption Spectroscopy: Determination of the Boltzmann Constant”, *Phys. Rev. Lett.* **100** 200801 (2008)
- [10] Mise en pratique for the definition of the kelvin, Sevres, BIPM (2006) (http://www.bipm.org/utis/en/pdf/MeP_K.pdf)
- [11] D.C. Ripple, R. Davis, B. Fellmuth, J. Fischer, G. Machin, T. Quinn, P. Steur, O. Tamura, D.R. White, “The Roles of the Mise en Pratique for the Definition of the Kelvin”, *Int. J. Thermophys.* **31** pp. 1795–1808 (2010)
- [12] H. Preston-Thomas, P. Bloembergen, and T. J. Quinn, “Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990”, Reprint of first edition, Sevres, BIPM (1997) (http://www.bipm.org/en/publications/its-90_supplementary.html)
- [13] M.R. Moldover, J.P.M. Trusler, T.J. Edwards, T.J. Mehl and R.S. Davis, “Measurement of the universal gas constant R using a spherical acoustic resonator”, *J. Res. Natl. Bur. Stand.* **93** pp. 85-114 (1988)

- [14] J.W. Schmidt, R.M. Gavioso, E.F. May, and M.R. Moldover, "Polarizability of Helium and Gas Metrology", *Phys. Rev. Lett.* **98** 254504 (2007)
- [15] L. Pitre, C. Guianvarc'h, F. Sparasci, A. Guillou, D. Truong, Y. Hermier, M. Himbert, "An improved acoustic method for the determination of the Boltzmann constant at LNE-INM/CNAM", *C. R. Physique* **10** pp.835-848 (2009)
- [16] L. Pitre, F. Sparasci, D. Truong, A. Guillou, L. Risegari, M. E. Himbert, "Measurement of the Boltzmann Constant k_B using a Quasi-Spherical Acoustic Resonator", *Int. J. Thermophys.* (2011) in press
- [17] R.M. Gavioso, G. Benedetto, P.A. Giuliano Albo, D. Madonna Ripa, A. Merlone, C. Guianvarc'h, F. Moro, and R. Cuccaro, "A determination of the Boltzmann constant from speed of sound measurements in helium at a single thermodynamic state", *Metrologia* **47** pp. 387-409 (2010)
- [18] G. Sutton, R. Underwood, L. Pitre, M. de Podesta, S. Valkiers, "Acoustic Resonator Experiments at the Triple Point of Water: First Results for the Boltzmann Constant and Remaining Challenges", *Int. J. Thermophys.* **31** pp. 1310-1346 (2010)
- [19] S.P. Benz, A. Pollarolo, J. Qu, H. Rogalla, C. Urano, W.L. Tew, P.D. Dresselhaus, D.R. White, "An electronic measurement of the Boltzmann constant", *Metrologia* **48** pp. 142-153 (2011)
- [20] J.T. Zhang, H. Lin, X.J. Feng, J. P. Sun, K.A. Gillis, M.R. Moldover, Y.Y. Duan, "Progress toward redetermining the Boltzmann constant with a fixed-path-length cylindrical resonator", *Int. J. Thermophys.* DOI 10.1007/s10765-011-1001-3 (2011)