

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

## Проблемы измерений: современные дискуссии и модели

В.С. Пронских

*Обсуждаются основные представления о измерении, существовавшие с конца XIX в. до наших дней, такие как репрезентационная теория, реалистический, операционалистический, конвенционалистический, теоретико-информационный и теоретико-операциональный подходы к измерению, их достоинства и недостатки. Рассматриваются такие характеристики измерения, как точность, прецизионность, и различные аспекты их применения, связанные с согласием между результатами измерений, эталонными, "истинными", значениями, а также внутренняя и внешняя воспроизводимость измерений. Подробно с привлечением примера из физики элементарных частиц обсуждается теоретико-операциональный модельный подход к эксперименту (и измерению), основанный на трёхчастной схеме В.А. Фока, предложенной им для квантовой механики. Обсуждаются преимущества этого подхода над другими, а также его возможное применение к определению систематической погрешности измерений.*

**Ключевые слова:** измерение, точность, прецизионность, воспроизводимость, теоретико-операциональная модель

PACS numbers: **01.65. + g, 01.70. + w, 06.20.Dk, 07.05.Fb, 13.15. + g**

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.06.038583>

## Содержание

1. Введение (211).
  2. Точность измерений и её характеристики (211).
  3. Подходы к измерению (213).
    - 3.1. Репрезентационная теория. 3.2. Реалистическая трактовка измерений. 3.3. Операционализм Бриджмена. 3.4. Конвенционализм Маха и Пуанкаре. 3.5. Информационно-теоретический подход к измерениям. 3.6. Модельные подходы.
  4. Заключение (218).
- Список литературы (219).

## 1. Введение

Дискуссии о том, что следует считать измерением и каковы его основные особенности, ведутся с конца XIX в. по настоящее время [1–9]. Одной из фундаментальных величин, точность измерения которой различными методами давно привлекает пристальное внимание исследователей, является время [10, 11]. Отдельное множество проблем представляют собой измерение в квантово-механических системах [4, 12–14], а также измерение в сложных экспериментах в физике элементарных частиц [15, 16]. Определённый консенсус в большинстве работ был достигнут в понимании того, что измерение в простых системах может быть операционально сведено к сравнению некоторой характеристики объекта или процесса с однородной, принятой за эталон,

тогда как в сложных случаях в измерении требуется выделять различные этапы. Однако в настоящей статье будет показано, как в сложных измерениях частиц эталон может формироваться уже на этапе анализа измерительных данных. Проведён анализ современных дискуссий о измерении [9], в которых обсуждаются различные стороны (или смыслы) измерения, и на основе этого выделены основные аспекты измерения и определения его ключевой характеристики — точности. Обсуждены представления о измерении, существовавшие с конца XIX в., такие как репрезентационная теория, определяющая измерение как гомоморфизм между эмпирическими и числовыми системами, реалистическая трактовка измерения, основанная на представлении о существовании независимых от сознания "истинных" значений величин, операционализм Бриджмена (сведение измерения к набору операций), конвенционализм Маха и Пуанкаре (предопределённость результата измерений конвенциями учёных), информационно-теоретический подход (связывающий теорию измерений и информационную теорию), а также теоретико-операциональная модель. Наиболее подробно обсуждены с привлечением примера из области физики элементарных частиц теоретико-операциональная модель сложного эксперимента [15], её основания и способы применения для оценки точности измерения. Показано, что теоретико-операциональная модель преодолевает недостатки множества других моделей.

## 2. Точность измерений и её характеристики

В современной научной литературе о измерениях, как правило, различаются два аспекта, характеризующие достоверность измерения: его точность (accuracy) и прецизионность (precision). Результат измерения явля-

В.С. Пронских. Fermi National Accelerator Laboratory,  
PO Box 500, Batavia, Illinois, 60510-5011, USA  
E-mail: [vpromskikh@gmail.com](mailto:vpromskikh@gmail.com)

Статья поступила 12 февраля 2019 г.

ется точным, если он согласуется с некоторым "истинным" (если оно известно или установлено независимым способом) или реперным значением измеряемой величины; прецизионным измерение будет в том случае, когда несколько измерений одной и той же величины согласуются между собой. Примером может служить попадание нескольких стрел в мишень: точность отражает то, насколько близко стрелы ложатся к центру мишени (который задан заранее), а прецизионность — насколько кучно стрелы ложатся друг к другу. Очевидно, что точность и прецизионность — различные характеристики измерения, и прецизионное измерение не обязательно будет являться точным, например, тогда, когда имеется неизвестная систематическая погрешность, а "истинное" значение заранее неизвестно.

В современных дискуссиях о измерении часто выделяют пять значений, в которых в науке используется термин "точность измерения" [9]: метафизическое, эпистемическое, операциональное, сравнительное и прагматическое. Нам представляется, что более корректно в данном случае говорить не о значениях, а об аспектах точности, поскольку они являются весьма разнородными и могут характеризовать точность не только по отдельности, но и совместно, в связи с чем их список вряд ли может претендовать на классификацию точности. Рассмотрим роль и место этих аспектов при характеристике точности измерений.

1. Метафизический аспект: согласие между измерением и "истинным" значениями величины. Такое определение предполагает существование некоторого истинного значения, например, в корреспондентном понимании, т.е. как соответствия между величиной и некоторой "независимой от сознания" реальностью. Такая постановка вопроса требует придерживаться реализма в отношении измерений на уровне их интерпретации. Проблемы реалистического понимания измерений и их теоретической нагруженности проанализированы в разделе 3. Однако отметим, что этот аспект затрагивает этап интерпретации измерения, точнее интерпретации стандарта, эталона, с которым проводится сравнение измеренной величины: практически значение, полученное из измерения, сравнивается со значением, полученным другим способом (и принятым за "истинное").

2. Эпистемический аспект: согласие между значениями, обоснованно приписанными некоторой величине на основе их измерений. Такое понимание является в чём-то альтернативным изложенному в пункте 1. Здесь для интерпретации не требуется каких-либо предположений о существовании "истинных" значений, а принимается во внимание только то, что имеются основания (теоретические) ожидать, что показание используемого для измерения прибора соответствуют измеряемой величине, например, считается, что шкала термометра, его устройство и способ использования позволяют обоснованно приписать некоторый диапазон температур телу. Этот диапазон определяется разбросом, который соответствует неопределённости (или погрешности) измерения. Погрешность измерения учитывает как статистический, так и систематический компоненты; в том случае, если каждое измерение будет сопровождать одна и та же неучётная систематическая погрешность, разброс будет характеризовать не точность измерения (в её эпистемическом аспекте), а прецизионность (обсуждавшуюся выше). В случае эпистемической интерпретации измерения, в

отличие от того, как это делается согласно интерпретации, изложенной в пункте 1, операционально результаты измерений сравниваются между собой, а не с некоторым "истинным" значением, которое, очевидно, определяется другим способом, хотя в обоих случаях измерения можно охарактеризовать погрешностью.

3. Операциональный аспект: согласие между результатом измерений величины и её эталонным значением. Сравнение с эталоном, как правило, в физике и технике считается определением измерения; для измерения величин их сравнивают либо непосредственно с эталонами (длины, времени), либо со шкалами, калиброванными с использованием эталонов (для этого используется калибровка, т.е. приведение в соответствие шкал приборов и эталонов измеряемых величин). Очевидно, что, в отличие от классификации [9], данное представление отражает не одно из значений термина "измерение", альтернативное обсуждавшимся в пунктах 1 и 2, а является определением измерения, которое входит составным элементом в процедуры 1 и 2. Например, температура тела сначала измеряется сравнением высоты ртутного столбика термометра со шкалой температуры, прокалиброванной эталоном, а затем полученные таким образом результаты сравниваются с определением погрешности либо между собой (как в пункте 2), либо со значением, полученным другим, например расчётным, способом (как в пункте 1).

4. Сравнительный аспект: согласие между результатами измерений одной и той же величины, полученными разными методами (воспроизводимость). Наличие воспроизводимости должно проверяться при контролируемых вариациях условий и методов измерения, поскольку именно подобные вариации позволяют выявить и учесть систематические погрешности; учёт систематических погрешностей позволяет оценить именно точность измерения, а не его прецизионность. При этом, особенно в измерениях сложными приборами и на установках (комплексах приборов), важно различать следующие виды воспроизводимости: 1) калибровку как воспроизводимость измерений эталонных явлений прибором; 2) воспроизводимость результата измерений других известных явлений (как разновидность дополнительной калибровки); 3) воспроизводимость при измерениях приборами одного и того же принципа действия (одним и тем же методом); 4) воспроизводимость результатов измерений величины при её измерениях приборами различного принципа действия (различными методами). Такие подходы к контролю воспроизводимости (не только измерения, но и эксперимента в целом как единства приготовления и измерения явлений) содержатся, в частности, в работах Я. Хакинга [17] (по существу, изложенное в пункте 2 представляет собой интерпретацию его "манипулятивной стратегии") и А. Франклина [18, 19] (см. обзор и обсуждение этих подходов в [20]). Воспроизводимость измерения величины можно разделить на внутреннюю (согласие повторяющихся измерений в рамках одной и той же экспериментальной системы) и внешнюю (согласие между измерениями одной и той же величины приборами, основанными на разных принципах действия, т.е. на различных приборных теориях). Воспроизводимость измерения должна выполняться независимо от того, с чем именно проводится сравнение величины: с независимо полученным "истинным" значением (как в пункте 1) или с другим измерением (как в пункте 2).

5. Прагматический аспект: точность измерения должна быть достаточной для приложений, в которых используется измеренная величина. Здесь формулируется требование к точности измерения, независимо от того, каким образом она была определена, с точки зрения того, какой она должна быть, чтобы удовлетворять практическим требованиям. Например, точность измерения температуры медицинским термометром должна быть достаточной для того, чтобы отличить здорового человека от больного.

Несмотря на то что вышеперечисленные аспекты точности измерения вряд ли могут быть названы смыслами точности, тем не менее они верно выделяют те черты, которыми должна обладать точность, и согласуются с определением как собственно измерения, так и его точности. На основании вышеизложенного мы можем сказать, что с операциональной точки зрения измерение (в простых случаях) — это процедура сравнения величины (или некоторой характеристики тела или процесса) с однородной ей величиной, принятой за эталон. Измерение в сложных экспериментальных системах обсуждается в разделе 3.5. Измерение характеризуется точностью, которая представляет собой меру согласия между результатом измерения и либо результатами других измерений той же величины, либо принятым за "истинное" значением той же величины, полученным другим способом. Измерение величины должно обладать как внутренней, так и внешней воспроизводимостью, т.е. её значения, полученные с помощью как того же метода, так и других методов измерений, должны согласовываться между собой. Точность измерения должна быть достаточной для практических применений результатов измерений. Выше мы дали операциональное определение измерения, однако существует несколько подходов к тому, как понимать измерение; в разделе 3 рассмотрим основные из этих подходов.

### 3. Подходы к измерению

#### 3.1. Репрезентационная теория

Одной из наиболее долго развивающихся теорий измерения является репрезентационная теория [3, 5, 9], цель которой состоит в изучении математических свойств измерительных шкал и условий их применения. Эта теория следует из так называемого семантического подхода к теориям, развитого П. Суппесом [21]. Согласно Суппесу научная теория может быть представлена как иерархия моделей, т.е. структур, удовлетворяющих определённым аксиомам. С точки зрения репрезентационной теории измерение представляет собой конструирование морфизмов, отображений между эмпирической и математической (числовой) реляционными системами. Эмпирическая реляционная система может быть представлена как множество эмпирических объектов, например металлических стержней, и качественных связей между ними, например упорядочения и соединения. Числовая реляционная система, по Суппесу, может представлять собой множество вещественных чисел с операциями отношения между ними, такими как, например, "больше", "меньше" или "равно". Измерительная шкала в этой теории представляет собой гомоморфизм, т.е. отображение множества элементов в единственный (множества эмпирических объектов в один числовой,

например множества тел одинаковой длины в одно показание шкалы длины).

#### 3.2. Реалистическая трактовка измерений

Наиболее распространённая среди научных работников и инженеров реалистическая трактовка измерений предполагает, что измерение позволяет установить эмпирически (опытным путём) некоторые объективные свойства тел или процессов либо их отношения. Под объективностью понимается, что эти свойства не зависят ни от взглядов и убеждений человека, осуществляющего измерения, ни от используемых методов. Такой подход подразумевает, что существуют некоторые истинные величины, а в ходе измерения оцениваются их приближительные значения [9, 22]. Подобное понимание неявно опирается на представления логических позитивистов и эмпиристов о том, что опыт является нейтральным поставщиком фактов, на основе которых строятся теоретические конструкции, а также на положения научного реализма, гласящие, что объекты, процессы, их свойства, описываемые научными теориями, существуют объективно, независимо от нашего сознания. Комбинация вышеизложенных представлений приводит к ожиданиям, что, с одной стороны, в измерении могут быть получены значения величин, независимые от теорий явлений (которые развиваются на основе использования измеренных величин), а с другой — что измеренные величины имеют своим референтом некоторые объективные сущности и указывают на их приближительные значения.

Анализ утверждения о существовании независимых от сознания объектов и процессов приводит к метафизическому пониманию измерения (обсуждавшемуся в разделе 2 в пункте 1) и представлению о точности измерения в терминах согласия его результата с "истинным" значением. При реалистическом подходе именно в таком смысле понимается и погрешность измерения. В качестве аргументов в пользу своей позиции реалисты часто указывают на то, что с улучшением измерительной техники точность измерений повышается, а также на то, что различные процедуры измерения одной и той же величины приводят к согласованным результатам (в наших терминах — достигается внешняя воспроизводимость) [6]. Также доводом служит утверждение о том, что теории, на которых основано действие приборов, допускают наличие причинной связи между величинами, из чего делается вывод о том, что существование самих величин предшествует измерительным процедурам. Из наследия логического позитивизма часто заимствуется утверждение о различии теоретических и наблюдательных (эмпирических) утверждений. Аргументы в пользу реализма в измерении нами критически проанализированы в разделе 3.6.1.

#### 3.3. Операционализм Бриджмена

Одной из более ранних концепций измерений, появление которой связано с работами П. Бриджмена, является операционализм [23]. Бриджмен утверждал, что за любым концептом или научным термином стоит набор операций, а сам концепт есть не что иное, как последовательность операций. Например, измерения длины одного и того же стержня линейкой и оптическим рефлектометром дают две различающиеся величины, поскольку они соответствуют различным наборам опе-

раций. Бриджмен также считал, что в конкретных приложениях разные измерительные операции накладываются друг на друга, образуя места соединения, и результатам измерений при таких наложениях нельзя слепо доверять, а всегда надо их перепроверять экспериментально, особенно когда методы измерения переносятся в новую область применения. При этом Бриджмен отмечал, что в той мере, в которой результаты измерений одной и той же величины согласуются в пределах погрешности, различие между измерениями, полученными разными наборами операций, не является необходимым.

Операционализм неявно опирается на эмпиристское допущение о том, что операции, лежащие в основе измерений, независимы от теорий и, таким образом, делают измерение поставщиком некоторых измерительных фактов, предшествующих формулировке теории, а также поддерживает убеждения логических позитивистов о возможности независимой проверки (верификации) теорий опытом. Если связь измерения с наборами операций выявлена Бриджменом вполне корректно, то надёжно обоснованный тезис о теоретической нагруженности (см. раздел 3.2) требует поставить операционализм "с головы на ноги", что было нами сделано в [15] и продемонстрировано в разделе 3.6.2. При этом можно согласиться с [24], что для множества важных теоретических терминов отсутствуют какие-либо операциональные определения.

### 3.4. Конвенционализм Маха и Пуанкаре

Другим влиятельным течением в описании измерений является конвенционализм [1, 2, 9]. Конвенционалисты утверждали, что, хотя результат измерения и не может быть полностью сведён к последовательности операций, любое использование количественных измерительных величин содержит элемент конвенции, договорённости между участниками. Утверждения конвенционалистов следует понимать так, что не только очевидные аспекты измерения, такие как выбор единиц измерения, например, метрической или имперской систем, но и более глубокие, содержательные элементы измерения определяются договорённостями (различные участники этого течения считали различные содержательные аспекты зависящими от конвенций).

Одним из примеров, который обсуждал Мах, являлось использование жидкостных термометров, принцип действия которых основан на тепловом расширении. Мах указывал, что не только разные жидкости, используемые в термометрах, по-разному расширяются, но и нелинейности расширения различных жидкостей неодинаковы. В связи с этим выбор типа термометра определяет результат измерения температуры. Пуанкаре обращал внимание на то, что выбор геометрии, евклидовой или неевклидовой, для описания той или иной системы учёные делают из соображений удобства и иногда даже несознательно, руководствуясь, например, представлениями о простоте описания, а не свойствами природных явлений. Конвенционализм, так же как и операционализм Бриджмена, был поддержан логическими позитивистами, которые предложили использовать конвенциональные правила соответствия между теоретическими и наблюдательными терминами, особенно в тех случаях, когда, по их представлениям, утверждения не могли быть эмпирически проверены: например, постоянство длины стержня при его транспортировке [25]; в

последнем случае такое постоянство должно просто постулироваться из конвенциональных соображений.

Благодаря наличию конвенций измерительные понятия не исчерпывались последовательностями операций, что было шагом вперёд по сравнению с операционализмом. Тем не менее, как становится очевидным при учёте теоретической нагруженности, разделения логическими позитивистами терминов на термины теории и наблюдения не требуется, а довод Маха о разном расширении жидкостей в термометрах можно свести к тому, что использование термометров должно опираться на развитые теории приборов, учитывающие различия в расширении. Приборы должны быть калиброваны так, чтобы даже различные термометры давали согласующиеся между собой результаты измерений (использование приборов, основанных на хорошо проверенных и развитых приборных теориях, — одна из стратегий, которых должны придерживаться экспериментаторы [18]).

### 3.5. Информационно-теоретический подход к измерениям

В основе информационно-теоретического подхода к измерениям лежит уподобление измерительного прибора информационно-коммуникационной системе, в которой сообщение кодируется в сигнал, передаваемый приёмнику и там декодируемый. В этом подходе измерительный прибор взаимодействует с объектом в определённом состоянии и в закодированном виде передаёт сигнал в приёмник, а точность измерения зависит как от конструкции измерительного прибора, так и от уровня шума (или фона) [7, 27]. Такое представление об измерении позволяет применить к анализу измерений концептуальный аппарат информационной теории [26] или даже осуществить синтез теории измерений и информационной теории [8, 27].

Одним из ограничений применения информационной теории является то, что энтропия и её неопределённость оказываются недостаточными, чтобы охарактеризовать погрешность численных значений случайных величин, а информационная теория в этом отношении недостаточно универсальна [7]. Как и в случае репрезентационной теории, описанной в разделе 3.1, информационно-теоретический подход опирается на идею отображений; только, в отличие от информационной теории, которая изучает отображения между символами на входе и на выходе, теория измерения исследует отображения между объектами и процессами и числами, характеризующими их свойства. Одно из ограничений информационно-теоретического подхода состоит в том, что если в позиций информационной теории отправленное сообщение (переданная информация о измерении) может быть известно независимо от его передачи с произвольной точностью, то состояние измеряемого объекта или процесса не может быть известно с произвольной точностью и будет определяться характеристиками измерительного прибора [8].

Другая версия информационно-теоретического подхода предложена Ван Фраасеном [28]. Ван Фраасен различает физический уровень измерения, на котором прибор в ходе измерения взаимодействует с объектом и производит показания, и абстрактный уровень, на котором теория явления представляет набор возможных состояний объекта в пространстве состояний. Измерение, таким образом, ограничивает область допустимых параметров теории и в связи с этим может быть уподоблено сбору информации о системе. Несмотря на то что подход Ван Фраасена не требует обращения к концепции

информации [26], тем не менее в нём, как и в остальных версиях информационно-теоретического подхода, можно выделить некоторый эмпиристский остаток. Все эти теории не полностью опираются на концепцию теоретической нагруженности и, тем или иным образом разделяя уровни, на которых формируется показание измерительного прибора или исходный сигнал и уровень приёмника, на котором происходит теоретическая интерпретация сигнала, считают уровень прибора независимым от интерпретационного. Такие недостатки информационно-теоретического подхода преодолены в теоретико-операциональной модели.

### 3.6. Модельные подходы

Модельные подходы к измерению, а именно подходы, в которых задачей измерения считается присвоение численных значений параметрам моделей, как правило, различают уровень конкретных взаимодействий изучаемых объектов или процессов с измерительным прибором и уровень теоретических или статистических моделей этих объектов или процессов. Моделями в этом случае считаются абстрактные и локальные репрезентации этих объектов или процессов, математические структуры, сконструированные с помощью упрощающих предположений [9]. Достоинство модельных подходов заключается в том, что они, в отличие от вышеизложенных подходов, репрезентационного или информационного, не ограничиваются только одним аспектом измерения, как, например, свойствами шкал или передачи информации, а исследуют процесс измерения в комплексе, описывая дизайн и калибровку приборов, приготовление образцов, обработку погрешностей и многое другое [29]. К недостаткам существующих модельных подходов можно отнести отсутствие чётких представлений о иерархии уровней объектов и теорий, которое, очевидно, является наследием логического позитивизма. Данные недостатки преодолеваются в теоретико-операциональной модели.

**3.6.1. Теоретическая нагруженность измерения.** При обсуждении основания изложенного в разделе 3.2 реалистического подхода к пониманию измерения представляется важным отметить, что основные аргументы эмпиризма и опиравшегося на него логического позитивизма были преодолены постпозитивизмом, одним из краеугольных камней которого является представление о теоретической нагруженности наблюдения (измерения). Несмотря на то что с начала XX в. теория и эксперимент (одним из ключевых элементов которого является измерение) развиваются раздельно [30], эволюция теории и измерений происходит итеративно, последовательно проходя через стадии взаимных влияний и усовершенствований того и другого [31]. На то обстоятельство, что без предварительных (теоретических) допущений о характере и свойствах измеряемой величины ни измерение, ни интерпретация его результата были бы невозможны, указывал ещё П. Дюгем [32]. Важным историческим аргументом служит сделанное Т. Куном наблюдение, что научные теории часто принимаются научным сообществом задолго до того, как они преодолевают проблемы с эмпирическим подтверждением их постулатов, а измерение в физике служит не проверке теории, а, напротив, более широкому её применению и распространению до тех пор, пока не накопится достаточно большого количества не объяснённых ею отклонений, что приведёт к кризису теории, за которым последует новая научная революция [33].

Во множестве работ, последовавших с 1960-х годов, идея теоретической нагруженности была развита на обширном историческом материале. Например, А. Франклин провёл большую работу с источниками, показав, в частности, что, измеряя заряд электрона, Милликен из 175 капель масла, изученных в экспериментах, для определения величины заряда использовал только 23, отбросив остальные исходя из различных теоретических соображений. Кроме того, в современных экспериментах по физике элементарных частиц отбор и исключение данных из теоретической необходимости применяются непосредственно ещё на этапе накопления данных и до их поступления на анализ (измерения свойств частиц) [18, 30, 34].

Таким образом, богатая история экспериментальных измерений в физике убедительно свидетельствует в пользу того, что теоретические соображения предшествуют измерениям, более того, предлагают язык, в терминах которого измерительные результаты выражаются и интерпретируются; тем самым результаты измерений оказываются теоретически нагруженными, т.е. опирающимися на язык и концептуальный аппарат теорий, которые предшествуют измерениям. С этой точки зрения аргументы реалистов, изложенные в разделе 3.2, оказываются несостоятельными. То, что измерения с развитием методов и техники измерения становятся более точными, может быть объяснено использованием одной и той же теории явления (подробнее это иллюстрируется в разделе 3.6.2). Причинная связь между величинами определяется теорией, которая не только предшествует измерению, но и определяет его. Кроме того, становится очевидным, что используемое реалистами разделение, принятое логическими позитивистами, на теоретические и эмпирические языки и термины оказывается неадекватным: язык и термины являются только теоретическими. Схематический способ записи эксперимента (и измерения как одного из этапов эксперимента) представлен в разделе 3.6.2.

Концепция теоретической нагруженности вначале встретила настороженное отношение в связи с тем, что она подрывала представления о независимости опыта от теории и связанного с этим убеждения о первичности и самоценности опыта. Однако здесь требуется разделить теории двух типов, которыми может быть нагружено измерение. Это, во-первых, теории изучаемого явления и, во-вторых, теории приборов (которые также называют инструментальными теориями, т.е. теориями измерительного инструмента). Если нагруженность первого типа, т.е. теориями явления, действительно указывает на познавательный приоритет теории, то нагруженность второго типа не только не является проблематичной, но и даже, как было недавно показано, при её правильном применении позволяет повысить точность измерений. Например, автор [11], называя процесс детального описания измерения в терминах инструментальных теорий, на которых оно основано (наподобие предложенного нами в [15, 16] и проанализированного в разделе 3.6.2), "деидеализацией" измерения, указывает, что осознание теоретических допущений, сделанных при измерении, позволяет корректировать ошибки измерения и оценивать их точность и погрешности более аккуратно.

Возможная проблема, которая может возникнуть при измерениях по причине их теоретической нагруженности приборными теориями, состоит в том, что если задача измерения заключается в проверке теоретической гипотезы, то необходима определённая независимость измерения от теории. В таком случае лучше, на что может

претендовать измерение, — это уточнение (или определение) параметров теории. Ещё большей свободой будет обладать измерение, если проверяется не фундаментальная теория, а теоретическая модель; в последнем случае задан только язык интерпретации измерения. Однако ценность измерения значительно снижена, если проверяемая теория не отделена от приборной, а входит в неё. Это серьёзная проблема для современного большого эксперимента в физике частиц [35], но в некоторых более простых случаях она может быть разрешена. Например, такая же проблема "порочного круга" может возникнуть, если термометр, принцип действия которого основан на расширении тел (скажем, ртутный термометр), используется для измерения температуры тел в эксперименте по проверке гипотезы о тепловом расширении тел [36]. Как показывает [36], в подобном измерении "порочного круга" не возникнет (или из него можно выйти), если ртутный термометр в этом измерении прокалибровать, например, газовым термометром постоянного объёма (принцип действия которого основан на увеличении давления газа постоянного объёма при нагревании). Таким образом, нагруженность измерения приборными теориями не всегда является непреодолимой проблемой, более того, она нередко может быть использована для повышения точности измерений, например, в рамках теоретико-операциональной модели.

**3.6.2. Теоретико-операциональная модель эксперимента.** В основе теоретико-операциональной модели эксперимента лежит трёхчастная схема эксперимента в квантовой механике, предложенная В.А. Фоком в его полемике с Н. Бором [4, 37]. В [38, 39] было обнаружено, что близкая к фоковской трёхчастная структура возникает уже в классических экспериментах Галилея с падающими телами. Затем в [15, 16] эта схема была развита и применена к описанию сложного эксперимента в физике элементарных частиц и было продемонстрировано, что сколь угодно сложное и разветвлённое описание эксперимента в физике может опираться на трёхчастную фоковскую структуру. Трёхчастная структура эксперимента, по Фоку, может быть схематически представлена следующим образом:

$$\langle P|X(T)|M \rangle, \quad (1)$$

где в центре расположено изучаемое явление  $X(T)$ ,  $T$  — теория явления,  $\langle P|$  — операция приготовления явления (исходного состояния системы для измерения),  $|M \rangle$  — операция измерения характеристики явления. Схема предполагает определённую иерархию: теория явления находится в центре и определяет операции приготовления и измерения. Особенно важным в подходе Фока представляется то, что в нём впервые было явно указано, что приготовление явления предшествует измерению: "...собственно измерение составляет лишь последнюю стадию постановки опыта, а этой последней стадии должно предшествовать приготовление самого явления по возможности в чистом виде, т.е. в точно определённых условиях..." [4, с. 11].

В отдельных случаях теория явления вначале может отсутствовать (хотя её место будет обязательно занимать модель или гипотеза), однако впоследствии теория будет развита, и такое развитие является целью эксперимента. Если  $X(T)$  — явления природы, то операциональные части, приготовление  $\langle P|$  и измерение  $|M \rangle$ , являются техническими, искусственными частями. Фок говорит об этих частях следующим образом: в структуре экспери-

мента (не только в квантовой механике, но и в предлагаемой модели и в произвольном эксперименте) следует различать три стадии: "приготовление объекта, поведение объекта в фиксированных внешних условиях и собственно измерение. Сообразно этому в приборе можно различить приготовляющую часть, рабочую часть и регистрирующую часть" [37, с. 468]. Так как технические процедуры приготовления  $\langle P|$  и измерения  $|M \rangle$  реализуются в приборах и их комплексах (установках), каждая из них может быть представлена как комбинация параллельных и последовательных операций, а в основе каждой из операций лежит соответствующая приборная (инструментальная) теория (или их множество). Трёхчастная схема эксперимента (1) может служить и формой записи эксперимента по Хакингу, так как его "представление" и "вмешательство" близки по смыслу к нашим теоретической (Т) и операциональным (в первую очередь,  $\langle P|$ ) частям схемы. Кроме того, схема (1) позволяет уточнить различие Хакингом "наблюдения" и "эксперимента", так как основное их различие состоит в том, что эксперимент обязательно включает в себя этап приготовления явлений (систем в определённых состояниях), тогда как в наблюдении (например, небесных тел) приготовление систем экспериментатором отсутствует (оно происходит в природе без участия человека) и может быть сведено к измерению, направляемому теорией (схему наблюдения, таким образом, можно упростить до  $X(T)|M \rangle$ ).

Измерение является частью, этапом, эксперимента, который в свою очередь представляет собой единство трёх составляющих: теории явления и теоретически нагруженных операций приготовления и измерения. Если измерение в простом случае (измерение длины стержня) может быть представлено как сравнение величины с её эталоном (см. раздел 2), то в более сложном случае, например при измерении энергии и определении типа элементарной частицы, измерение необходимо представить более сложным образом.

В [15] мы представляем такое сложное измерение как последовательность операций индикации  $|I \rangle$  и анализа данных  $|A \rangle$ , а само измерение  $|M \rangle$  как  $|I \rangle * |A \rangle$ ; знак  $*$  обозначает последовательность операций. Аналогом такого различия операций в составе измерения является различие Максвеллом "индикаторов" и "шкал" (таких как термометры, динамометры, вольтметры и т.д.). Таким образом, сравнению с эталоном предшествует индикация, т.е. выделение измеряемого объекта из окружающей среды. В теоретико-операциональной модели очевидно, что само выделение измеряемого объекта или процесса из его окружения требует предшествующей им теории (или теоретической модели). Например, в случае элементарной частицы её след необходимо сначала визуализировать (в случае, если анализ-измерение будет осуществляться визуально), т.е. выделить в пузырьковой камере детектора и сфотографировать. Результатом такой индикации является фотоснимок следа частицы в камере. Следующий за индикацией этап сравнения с эталоном в сложном измерении представляет собой анализ данных.

Анализ в случае фотоснимков следов частиц в камере сводится к выбору или созданию модели следа возможных частиц в камере (учитывающей свойства вещества в камере, конфигурации в нём электрических и магнитных полей) и распознаванию следа с помощью подбора параметров модели с целью наилучшего описания конкретного следа. Часто при этом требуется и модель фона, т.е. явлений природы, отличной от природы изучаемых

частиц, которые также способны оставлять внешне сходные следы в камере. Важно отметить, что анализ треков частиц представляет собой полностью теоретически нагруженный этап и не допускает эмпиристской трактовки (как, например, утверждение в [40] о том, что пример является "теоретически нейтральным") и не является чем-либо независимым от теоретического уровня, как предлагается в обсуждавшихся выше подходах к измерению, в том числе в большинстве модельных; при этом следует согласиться с [40], что нагруженность при её правильном учёте не представляет технической проблемы, напротив, как обсуждается ниже, она может использоваться для повышения точности измерений. Причиной является то, что измерение (и анализ данных как его этап) может быть представлено элементом фоковской трёхчастной схемы, согласно которой теория явления (например, Стандартная модель), задаёт, во-первых, теории приготовления частиц, которые попадают в камеру детектора или образуются в ней, а во-вторых, определяет выбор инструментальных теорий (индикации и анализа данных), которые могут быть применены в измерении. Поэтому трек на фотопластинке уже определён теориями явления и приготовления, а при идентификации, когда частица задаётся теоретическими соображениями, параметры модели могут быть вычислены подгонкой модели к следу. Например, так могут быть установлены тип частицы (из предсказанного теорией набора) и значение её энергии (из предсказанного теорией диапазона).

Иначе говоря, при идентификации (распознавании) частицы эталон отчасти задан теориями прибора (модель следа в камере конкретного детектора), а частично *формируется в ходе процесса* идентификации при определении параметров модели её подгонкой к конкретному следу. Такая интерпретация измерения совместима с вышеизложенными идеями [28] о том, что в измерении происходит ограничение множества параметров из допускаемого теорией пространства параметров, однако существенное отличие состоит в том, что у нас нет разделения на физический и абстрактный уровни; в теоретико-операциональной модели есть уровень теорий явления и уровень операций (приготовления и измерения), определяемый как инструментальными теориями, так и теориями явления.

В дополнение к [15, 16] авторы стандартов и недавних работ [41–43] также пришли к необходимости различения в составе измерения индикации (или отсчётов), которые являются свойствами измерительного прибора в конечном состоянии и результатов, т.е. утверждений о численных значениях измеряемых величин, включающих в себя погрешности измерений; теоретико-операциональная модель, как показано выше, не только различает эти понятия, но и позволяет записать схемы включённости теоретических компонентов на этапах, где эти понятия определяются. В разделе 3.6.3 обсуждаются практическое использование и методологические преимущества таких схем.

**3.6.3. Пример применения теоретико-операциональной модели. Схема эксперимента "Гаргамель".** Эксперимент "Гаргамель" (Gargamelle) [30, 44] — ускорительный эксперимент по физике элементарных частиц, выполненный в ЦЕРНе, подтвердил электрослабую теорию Глэшоу–Вайнберга–Салама, обнаружив слабые нейтральные токи, а именно процесс рассеяния антинейтрино на электроны, который в проверяемой теории осуществлялся посредством обмена  $Z^0$ -бозоном. Постановка эксперимента в упрощённом описании сводилась к

следующим операциям: ускоренные протоны сталкивались с алюминиевой (бериллиевой) мишенью, образуя заряженные адроны; пионы двигались через замедлитель-поглотитель, распадаясь с образованием мюонных антинейтрино (или нейтрино); нейтрино и антинейтрино проникали внутрь камеры-детектора и взаимодействовали с её рабочим веществом, вступая во взаимодействия, которые предсказывала теория. Как и во всех остальных ускорительных экспериментах, проблемой являлся учёт фона, т.е. явлений природы, отличной от изучаемой, но в условиях экспериментальной установки неотличимых (или трудноотличимых) от изучаемых. Основным источником нейтронного фона в пузырьковой камере эксперимента "Гаргамель" являлись нейтроны, образовывавшиеся в магнитах и бетонных стенах, окружавших камеру, под действием тех же антинейтрино (или нейтрино).

В рамках теоретико-операциональной модели, основанной на трёхчастной фоковской схеме, теоретические компоненты операций приготовления  $\langle P \rangle$  и измерения  $\langle M \rangle$  могут быть детализированы следующим образом [15].

Приготовление изучаемого явления (рассеяния антинейтрино на электроны):

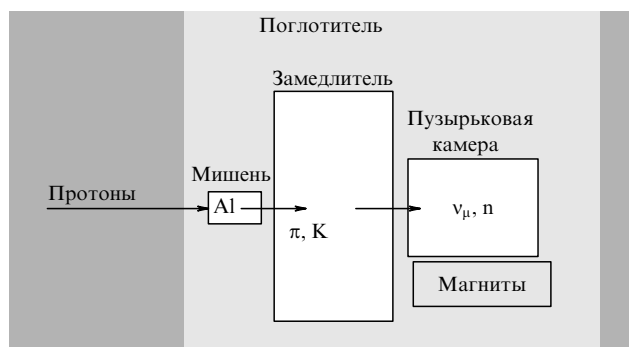
$$\langle P \rangle = \{ \langle P1 \rangle * \langle P2 \rangle * (\langle P3, 1 \rangle + \langle P3, 2 \rangle) * (\langle P4 \rangle + \langle P5 \rangle) \}, \quad (2.1)$$

где знаки  $*$  обозначают последовательность, а знак  $+$  — параллельность операций;  $\langle P1 \rangle$  — приготовление пучка протонов заданной энергии в ускорителе,  $\langle P2 \rangle$  — приготовление потока пионов и каонов в ходе ядерных реакций под действием пучка протонов на мишень, содержащую ядра Al и Be,  $\langle P3, 1 \rangle$  и  $\langle P3, 2 \rangle$  — приготовление потока мюонных антинейтрино при распаде пионов и мюонов соответственно,  $\langle P4 \rangle$  — приготовление  $Z^0$ - и  $W^\pm$ -бозонов в пузырьковой камере при действии мюонных антинейтрино на рабочее вещество камеры,  $\langle P5 \rangle$  — приготовление нейтронного фона при действии пучка антинейтрино на окружающие камеру материалы.

Приготовление пучка протонов  $\langle P1 \rangle$  может быть представлено более детально как

$$\langle P1 \rangle = \langle P1 \{ dp1((T1) p(E1); p(E2)) \} \rangle, \quad (2.2)$$

где  $dp1((T1) p(E1); p(E2))$  — прибор-ускоритель. Принцип действия этого прибора, который преобразует исходный поток протонов с энергией  $p(E1)$  в пучок с энергией  $p(E2)$ , основан на множестве теорий T1 (в частности, электродинамике).



**Рис. 1.** Упрощённая схема эксперимента "Гаргамель" (см. рисунок в [16]).

Схематические формы записи операций приготовления с  $\langle P2 \rangle$  по  $\langle P5 \rangle$  приведены в [15]. В операции измерения  $|M\rangle = |I\rangle * |A\rangle$  индикация  $|I\rangle$  схематически может быть представлена как

$$|I\rangle = |I\{\text{dm6}((T6)e^{\pm}, \mu^{\pm}, \text{заряженные адроны}; \{\text{фото}_i\})\}\rangle, \quad (2.3)$$

где  $\text{dm6}((T6)e^{\pm}, \mu^{\pm}, \text{заряженные адроны}; \{\text{фото}_i\})$  — прибор — пузырьковая камера, в которой происходит индикация явлений. Множество теорий  $T6$ , на которых основаны принципы работы камеры, — термодинамика, механика, электродинамика, атомная физика, описывающие формирование следов из пузырьков перегретой жидкости вдоль траектории движения заряженной частицы (электрона, мюона или адрона). Результатом индикации является фотоснимок следа.

Однако, как указывалось выше, фотоснимок ещё не является результатом измерения, так как для получения результата измерения требуется анализ данных. В первых, в квантовой теории поля (на которой основаны проверяемые в эксперименте "Гаргамель" теоретические модели) состояние задаётся распределением вероятностей измеряемых величин, которые в теории связываются с частицами с определёнными свойствами. Поскольку измеряемой величиной в эксперименте являлось отношение числа рассеяний, происходивших благодаря обмену  $Z^0$ -бозоном, к числу происходивших с обменом  $W^{\pm}$ -бозоном, однократное измерение не могло быть достаточным, а требовалось проанализировать множество таких событий, т.е. множество актов измерения.

Дополнительно отметим, что схема исключает холистическую неразличимость явления и измерения, и отсутствует боровская "тотальность явлений", которая препятствовала бы их различению [4, 45], хотя в тех случаях, когда прибор (и его теория) не обладают достаточной избирательностью в отношении фона, теория явления может входить как компонент фона, возможность выделения явления из фона становится проблематичной [35], особенно в случае недостаточной статистики. В ходе анализа данных заданная модель следа частиц применяется к фотоснимкам, с тем чтобы определить параметры модели. В частности, следы частиц одного типа могут быть более широкими, чем другого, а кривизна следа зависит от энергии частицы; подчеркнём, однако, что множество частиц, которые могут быть обнаружены, и область пространства их допустимых параметров жёстко ограничены теориями изучаемых явлений, а следовательно, способами приготовления и измерения (индикации и анализа данных).

Таким образом, теоретико-операционная модель не только наиболее последовательно учитывает теоретическую нагруженность приготовления и измерения явлений, но и позволяет записать схему теоретической нагруженности для произвольного сколь угодно сложного эксперимента. Одним из достоинств такой схематичной записи является то, что она позволяет определить факторы, влияющие на точность измерения. В отрыве от схематичной записи эксперимента, в явном виде показывающей теории, входящие в отдельные этапы приготовления и измерения, по причине конвейерной организации больших экспериментов, например, интенсивность пучка протонов, измеренная некоторым способом на выходе из  $\langle P1 \rangle$ , передаётся далее в виде "чёрного ящика" в  $\langle P2 \rangle$ . Однако если в  $\langle P1 \rangle$  используется только набор теорий  $T1$ , то есть большая вероятность, что определённая на этапе  $\langle P1 \rangle$  точность измерения интенсивности будет учитывать только статистическую погрешность, а не систематиче-

скую (т.е. измерение будет прецизионным, но не точным). К числу известных способов оценки систематической погрешности относится использование измерительных приборов, основанных на других принципах действия (инструментальных теориях) [18]. Таким образом, стратегией определения уменьшения систематической погрешности измерения, которую можно получить из теоретико-операционной модели, может быть следующая:

- 1) записать теоретико-операционную схему эксперимента (или отдельного измерения);
- 2) определить для каждой  $T_n$ , входящей в схему,  $T1 \dots T_m$ , которые могут быть использованы для реализации тех же  $\langle Pn \rangle$  или  $|Mn\rangle$ ;
- 3) заменить последовательно приборы и узлы,  $dp$  и  $dm$ , основанные на  $T_n$ , узлами и приборами  $dp1 (dm1) \dots dp (dm)$ , основанными на  $T1 \dots T_m$ ;
- 4) повторить эксперимент или измерение с заменёнными приборами и узлами;
- 5) совместно проанализировать результаты измерений, определив точность, которая будет включать в себя систематическую погрешность.

Теоретико-операционная модель может предложить для произвольного сложного эксперимента или измерения методологию оценки его систематической погрешности и точности в целом.

## 4. Заключение

В настоящей статье сформулированы понятия измерения, его точности и прецизионности, которые различаются учётом или неучётом систематической погрешности. Проанализированы свойства, которыми должны обладать измерения, в частности воспроизводимость их результатов (в которой мы выделяем внутреннюю и внешнюю). Сделан обзор основных аспектов измерения, таких как репрезентационный, реалистический, операциональный (по Бриджмену), конвенциональный, информационно-теоретический и теоретико-операционный. Все рассмотренные подходы не обязательно альтернативны друг другу, в некоторых случаях они могут быть взаимодополняющими; например, рассмотрение измерения как отображения (гомоморфизма) эмпирических систем на математические (характерное для репрезентационной теории) может опираться на свойственное реалистическому подходу представление о существовании независимых от сознания (и теорий) "истинных" объектов и характеризующих их величин.

Показано, что существенным недостатком большинства подходов является неучёт (или недостаточный учёт) теоретической нагруженности измерений, что, как правило, тем или иным способом приводит к свойственным логическому позитивизму утверждениям о независимости теоретического и эмпирического уровней. Этого недостатка лишена теоретико-операционная модель, которая рассмотрена выше более подробно.

Теоретико-операционная модель описывает структуру теоретической нагруженности эксперимента, который представлен как единство теорий явления и операциональных частей, приготовления и измерения. Измерение представлено как составленный из индикации явлений и анализа данных этап эксперимента (или наблюдения), в ходе которого происходит частичное формирование эталона. В основе модели лежит трёхчастная схема эксперимента в квантовой механике В.А. Фока, которая была нами развита для анализа ускорительного эксперимента в физике нейтрино и которая предполагает чёткое



различение явления и измерительного прибора. Модель позволяет записывать схему теоретической нагруженности произвольного эксперимента как теориями явления, так и инструментальными (приборными) теориями; приведён пример её применения к описанию эксперимента "Гаргамель" в физике элементарных частиц. Как и в [46], в измерении нет места для особой роли сознания наблюдателя.

На основе теоретико-операциональной модели обсуждается методология определения систематической погрешности измерения в сложном эксперименте и повышения точности измерений, которая основана на выделении инструментальных теоретических компонент эксперимента и последовательной замене нагруженных ими элементов таковыми, опирающимися на другие теоретические компоненты, с последующим совместным анализом результатов выполненных измерений.

**Благодарности.** Национальная лаборатория им. Э. Ферми (Fermi National Accelerator Laboratory) находится в ведении Исследовательской группы Ферми (Fermi Research Alliance), действующей по контракту No. DE-AC02-07CH11359 с Министерством энергетики США, отдел науки, отдел физики высоких энергий (U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of High Energy Physics).

## Список литературы

- Poincaré H "The measure of time" *The Value of Science* (New York: Dover Publ., 1958)
- Mach E *Principles of the Theory of Heat. Historically and Critically Elucidated* (Dordrecht: D. Reidel, 1986)
- Suppes P *Portug. Math.* **10** (4) 163 (1951)
- Фок В А *УФН* **45** 3 (1951); Фок В А, Эйштейн А, Подольский Б, Розен Н, Бор Н *УФН* **16** 436 (1936)
- Krantz D H et al. *Foundations of Measurement Vol. 1 Additive and Polynomial Representations* (New York: Academic Press, 1971)
- Swoyer C "The metaphysics of measurement", in *Measurement, Realism, and Objectivity. Essays on Measurement in the Social and Physical Sciences* (Australasian Studies in History and Philosophy of Science, Vol. 5, Ed. J Forge) (Dordrecht: D. Reidel, 1987)
- Кирпатовский С И *Измерительная техника* (5) 11 (1974); Kirpatovskii S I *Meas. Tech.* **17** 655 (1974)
- Mari E *Measurement* **25** 183 (1999)
- Tal E "Measurement in science", in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Ed. E N Zalta) (Stanford, CA: Metaphysics Research Lab., Stanford Univ., 2015); <https://plato.stanford.edu/archives/sum2015/entries/measurement-science/>
- Шейбе А *УФН* **18** 79 (1937)
- Tal E *Philos. Sci.* **78** 1082 (2011)
- Менский М Б *УФН* **171** 459 (2001); Menskii M B *Phys. Usp.* **44** 438 (2001)
- Белинский А В, Лапшин В Б *УФН* **187** 349 (2017); Belinsky A V, Lapshin V B *Sov. Phys. Usp.* **60** 325 (2017)
- Белинский А В *УФН* **173** 905 (2003); Belinskii A V *Phys. Usp.* **46** 877 (2003)
- Lipkin A I, Pronskikh V S *Investigated in Russia* 511 (2009); <https://philpapers.org/archive/LIP10T.pdf>
- Липкин А И, Пронских В С *Вестник РУДН. Сер. Философия* (3) 56 (2010)
- Hacking I *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1983); Пер. на русск. яз.: Хакинг Я *Представление и вмешательство. Введение в философию естественных наук* (М.: Логос, 1998)
- Franklin A *Shifting Standards: Experiments in Particle Physics in the Twentieth Century* (Pittsburgh, PA: Univ. of Pittsburgh Press, 2013) <https://doi.org/10.2307/j.ctv80c9p7>
- Franklin A *What Makes a Good Experiment? Reasons and Roles in Science* (Pittsburgh, PA: Univ. of Pittsburgh Press, 2016)
- Липкин А И, Пронских В С "Философия естественнонаучного эксперимента", в сб. *Философия науки: учебник для магистратуры* (Под ред. А И Липкина) 2-е изд. (М.: Юрайт, 2015) с. 235
- Suppes P *Synthese* **12** 287 (1960)
- Trout J D *Measuring the Intentional World: Realism, Naturalism, and Quantitative Methods in the Behavioral Sciences* (New York: Oxford Univ. Press, 1998)
- Bridgman P W *The Logic of Modern Physics* (New York: Macmillan, 1927)
- Chang H "Operationalism", in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* 2009 ed. (Stanford, CA: Stanford Univ., 2009); <https://plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/operationalism/>
- Reichenbach H *The Philosophy of Space and Time* (New York: Dover Publ., 1958)
- Shannon C E, Weaver W *The Mathematical Theory of Communication* (Urbana: The Univ. of Illinois Press, 1949)
- Finkelstein L *Kybernetes* **4** (4) 215 (1975)
- van Fraassen B C *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective* (New York: Oxford Univ. Press, 2008)
- Frigerio A, Giordani A, Mari L *Synthese* **175** 123 (2010)
- Galison P *How Experiments End* (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1987)
- Chang H *Inventing Temperature: Measurement and Scientific Progress* (Oxford: Oxford Univ. Press, 2004)
- Duhem P M M *The Aim and Structure of Physical Theory* (New York: Atheneum, 1962); Пер. на русск. яз.: Дюгем П *Физическая теория. Её цель и строение* (М.: КомКнига, 2007)
- Kuhn T S *Isis* **52** (2) 161 (1961)
- Пронских В С *Философия науки* **66** (3) 147 (2015)
- Пронских В С *Философия науки* **65** (2) 41 (2015)
- Franklin A et al. *British J. Philos. Sci.* **40** (2) 229 (1989)
- Фок В А *УФН* **62** 461 (1957); Fock V A *Czech. J. Phys.* **7** 643 (1957)
- Клышко Д Н, Липкин А И *Электронный журнал. Исследования в России* (53) 736 (2000); <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2000/053.pdf>
- Липкин А И *УФН* **171** 437 (2001); Lipkin A I *Phys. Usp.* **44** 417 (2001)
- Franklin A *J. Gen. Philos. Sci.* **46** 155 (2015)
- Joint Committee for Guides in Metrology, International Vocabulary of Metrology — Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM) (Sèvres: JCGM, 2012)
- Giordani A, Mari L *IEEE Trans. Instrum. Measur.* **61** 2144 (2012)
- Tal E *Philos. Compass* **8** 1159 (2013)
- Cundy D, Sutton C *CERN Courier* (2017)
- Bohr N *Atomic Physics and Human Knowledge* (New York: Wiley, 1958)
- Жёлтиков А М *УФН* **188** 1119 (2018); Zheltikov A M *Phys. Usp.* **61** 1016 (2018)

## Measurement problems: contemporary discussions and models

V.S. Pronskikh. Fermi National Accelerator Laboratory, PO Box 500, Batavia, Illinois, 60510-5011, USA  
E-mail: [vpronskikh@gmail.com](mailto:vpronskikh@gmail.com)

The review discusses the basic concepts of measurement that existed from the end of the 19th century to the present day, such as representational theory, realistic, operationalist, conventionalist, theoretical-informational and theoretical-operational model approaches to measurement, their advantages and weaknesses. Such characteristics of measurement as accuracy, precision, and various aspects of their application, related to agreement between measurement results, measurement and standard, measurement and 'true' values, as well as internal and external reproducibility of measurements, are considered. The theoretical-operational model approach to experiment (and measurement), based on V.A. Fock's three-part scheme, proposed by him for quantum mechanics, is discussed in detail using an example from the physics of elementary particles. Advantages of the latter approach to the others as well as its possible applications to the determination of systematic uncertainty are examined.

**Keywords:** measurement, accuracy, precision, reproducibility, theoretical-operational model

PACS numbers: **01.65. + g, 01.70. + w, 06.20.Dk, 07.05.Fb, 13.15. + g**

Bibliography — 46 references  
Uspekhi Fizicheskikh Nauk **190** (2) 211–219 (2020)  
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.06.038583>

Received 12 February 2019  
Physics — Uspekhi **63** (2) (2020)  
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.06.038583>