

## ПРОБЛЕМА ТОЧНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА МЕТОДАМИ МИКРОСКОПИИ

Арутюнов П.А.

Московский государственный институт электроники и математики  
[root@nti.miem.msk.ru](mailto:root@nti.miem.msk.ru) {916-28-07}

В докладе формулируется проблема, являющаяся принципиальной при цифровой обработке измерительной информации при проведении исследований методами микроскопии. На практике замечено, что чем ближе мы подходим к нанообласти, тем труднее обеспечить воспроизводимость результатов макроскопического измерения, поскольку начинают влиять квантовые и размерные эффекты, проявляя себя как неточности и неопределенности результатов измерений.

Квантовая механика постулирует принципиальные ограничения точности при измерениях на малых расстояниях параметров микрообъектов, обладающих энергией порядка той, которая вносится в процессе измерения. Здесь возникает необходимость наличия двух дополняющих друг друга экспериментальных установок, которые в рамках теории формируют два *дополнительных* описания поведения микрообъектов: *пространственно-временное* и *импульсно-энергетическое*.

Любое повышение точности определения пространственно-временной локализации квантового объекта сопряжено с повышением неточности в определении его импульсно-энергетических характеристик. Неточности измеряемых физических параметров образуют *неопределенности соотношения Гейзенберга*:  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$ ,  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ , которые налагают фундаментальные ограничения на предельную точность измерения. При этом утверждается, что отдельная физическая величина может быть определена в принципе с любой степенью точности, однако две величины квантово-механические операторы которых не коммутируют, нельзя одновременно определить сколь угодно точно.

Тем не менее, есть немало физиков, разделяющих убеждение, что из величин  $\hbar$  и  $c$  нельзя построить комбинацию, которая бы имела размерность длины и времени. Это обстоятельство формально отражает тот факт, что в квантовой теории поля геометрия пространства-времени остается в принципе такой же, как и в "классической" физике. Другими словами, микроскопические расстояния качественно ничем не отличаются от макроскопических, а течение времени в ультракоротких интервалах такое же, как и в интервалах произвольно большой длительности. Однако есть немало физиков, которые, разделяющих убеждение, что описанная выше точка зрения слишком прямолинейна. На самом деле, говорят они, распространение релятивистских понятий на квантовые объекты обязательно должно приводить к радикальному пересмотру концепции пространства-времени в области малых масштабов. Размеры этой области характеризуются новой универсальной постоянной - элементарной длиной  $l$ . Современная же квантовая теория поля не содержит элементарной длины. Поэтому она может претендовать на корректное описание лишь таких физических явлений, в которых характерные расстояния и промежутки времени значительно превышают величины  $l$  и  $l/c$  соответственно, а импульсы и энергия частиц заметно меньше величин  $\hbar/l$  и  $\hbar c/l$ .

В литературе даны обоснование гипотезы об элементарной длине и видоизмененная формула Планка на случай больших частот и волновых векторов. Эта гипотеза сегодня экспериментально проверяется. Если это подтвердится, то элементарную длину можно будет рассматривать как эталон при цифровом представлении фрактальной и евклидовой геометрии.

Напомним, что содержание неопределенности представляет собой лишь частный случай более общего принципа дополненности, предложенного Бором. Напомним, что содержание концепции Бора в упрощенном виде можно представить посредством трех утверждений, имеющих принципиальное значение для метрологии поверхности. 1) Вся информация о микромире, т.е. в мире атомных и субатомных явлений, может быть получена лишь с помощью макроскопических приборов, подчиняющихся законам классической физики; (в частности, имеются в виду приборы, которые позволяют с неограниченной точностью определять положение или импульс частицы). Иными словами, все, происходящее в микромире, может быть воспринято лишь в терминах макромира. 2) Любое явление в микромире, которое мы исследуем, обязательно должно включать в себя взаимодействие с макроскопическим прибором. Иной "перевод" атомных явлений на несвойственный им язык понятий классической физики невозможен. 3) С помощью каждого конкретного макроскопического прибора можно изучать либо одну сторону данного процесса в микромире, либо другую; не может быть такого процесса, чтобы в нем присутствовали сразу оба типа "дополнительных" свойств. Это означало бы реальное внутреннее противоречие теории. Физическое явление не может быть выражено верным понятием, если не определена та экспериментальная установка, которая фиксирует это явление.

Таким образом, было бы неправильно полагать, что невозможность одновременного определения координаты и импульса (времени и энергии) частицы связана с несовершенством наших знаний или измерительной аппаратуры. Причина совсем иная. Сам по себе макроскопическая частица, как правило, не обладает никакой координатой или импульсом, т.е. траекторией, а имеет вероятностную природу и характеризуется величиной другого типа - волновой функцией. Тогда в результате измерения (физического контакта) - взаимодействие частицы с макроскопическим прибором появляется возможность говорить об ее положении или скорости. Поэтому нет ничего удивительного, что точность, с какой могут быть найдены эти или другие величины, зависят от вида макроскопического прибора. Соотношение неопределенности устанавливает общие ограничения на такую точность, которые вытекают из квантовой теории и лежащего в ее основе корпускулярно-волнового дуализма. При этом волновая функция характеризует вероятность любого результата измерения и эксперимента.

Мерой разброса результатов измерений является среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  получаемого распределения. В таком контексте эту величину и называют "неопределенностью  $\Delta$ ". Таким образом, неопределенность координаты равна  $\Delta x = \sigma_x$ . Но поскольку постоянная Планка чрезвычайно мала, то написанное выражение при макроскопических измерениях лишено практического смысла.

При измерениях макроскопических величин максимальная точность тоже ограничена статистическими флуктуациями возле среднего значения. Если эти флуктуации нельзя уменьшить при фиксированных внешних условиях, то их обычно называют *шумами*. Причины появления шумов можно разделить на три группы: тепловые колебания при ненулевой температуре; корпускулярная природа вещества и электричества; соотношение неопределенностей квантовой механике.

Заметим, что при проведении технических измерений нас обычно интересует точность измерения *только одной физической величины*, не связанной условиями эксперимента с упомянутым соотношением неопределенности. При этом физический эксперимент никогда не сводится к однократному измерению, так как фундаментальным принципом физических наук является требование многократной повторяемости эксперимента и убедительной воспроизводимости его результатов.

По современным представлениям выбирают в качестве концептуального ядра физики существующего и физической метрологии в целом *фундаментальную триаду "наблюдаемая - состояние - среднее значение"*, что обеспечивает целостное описание физики и метрологии измерений на микро- и макроуровнях.

Опираясь на такой выбор концептуального ядра ("клеточки") физики и метрологии в целом, сегодня формулируют саму современную физическую картину мира (ФКМ) как "квантово-физическую" в широком смысле слова, рассматривая в качестве нее совокупность концепций, понятий и структур, образующих триаду "физика наблюдаемых - физика состояний - физика средних значений".

В свою очередь, при рассмотрении состояния системы в "чистом" виде, необходимо выделить такие ситуации, когда состояние системы способны проявить себя как таковые. Это значит, что можно создать такие условия эксперимента, в которых данная наблюдаемая может с равной вероятностью принимать любые значения. Именно так в основном обстоит дело собственно в квантовой физике". Вследствие необходимости многократного повторения опыта мы всегда имеем дело лишь со средним значением ФВ, в котором на микроуровне в диалектическом единстве слиты составляющие ее элементы - физическая величина сама по себе, и наблюдаемая, и состояние физической системы, определяемое условиями эксперимента. Наблюдаемая характеризуется набором возможных опытных значений ФВ, а состояние - распределением вероятностей этих значений. *И здесь важно подчеркнуть, что при переходе на макроуровень понятие среднего значения ФВ в тепловом равновесии приобретает самостоятельную роль, не всегда сводимую к усреднению наблюдаемой. В этом и состоит проблема неопределенности в метрологии и микроскопии.* Другими словами, переход от микромира к макромиру означает переход от вероятностей к траекториям, т.е. к реализациям случайной величины, которая принимается нами при статистическом усреднении. В то время как, в микромире понятие реализации не существует. Природа сама "сделала" статистическое усреднение.

Следует учесть также, что понятие среднее значения ФВ в произвольном "смешанном" состоянии, или макропараметра, центральное в "статистической физике", по существу объединяет в себе два принципиально различных типа параметров. Макропараметры первого типа являются аналогами соответствующих микропараметров, встречающихся в динамике (например, внутренняя энергия, число частиц и т.п.). Макропараметры второго типа качественно отличных от первого типа - это величины, не имеющие аналогов среди микропараметров (энтропия, температура, твердость, вязкость, точность и т.п.). Фактически они представляют уже не средние от наблюдаемых, а само "смешанное" состояние физической системы, вынесенное на макроуровень. Это обстоятельство подчеркивает трудность метрологического обеспечения обеих уровней и сложность

---

взаимоотношений между микро- и макроуровнями в физике эксперимента и *самостоятельную нетривиальную роль понятия сред. значение в фундаментальной триаде*, и в самой “статистической физике”. В результате абстрактной “целостно-концептуальной” триаде физической картины мира адекватно соответствует эквивалентная конкретная *триада наук “физики существующего”*: “*Релятивистская классическая физика - Квантовая физика - Статистическая физика*”.

Данный вывод носит настолько фундаментальный характер, что требует переосмысливания метрологической науки, обслуживающей аналитическое приборостроение и современную физику и позволяют рассматривать современную физику и физическую метрологию как единую и целостную науку.

Здесь следует сделать два замечания. Первое, что все величины, с которыми имеет дело квантовая механика, являются, строго говоря, ненаблюдаемыми. Однако, несмотря на это, все же существует класс явлений, который легко выводится из микроскопических данных и может считаться наблюдаемым в широком смысле слова. Сюда относятся явления, фиксируемые счетчиком Гейгера, фотографическими пластинками, камерами Вильсона и т.д. Но в квантовой механике имеются события, которые ненаблюдаемы принципиально. К ним относятся все события, происходящие между эмпирически фиксируемыми явлениями, например, движение электрона от источника до столкновения с фотографической пластиной. Второе замечание касается объективной истины, которая является целью, как физики, так и метрологии и любой другой науки, т.е. знания, которое соответствует объективному миру, и которое добывается метрологическими средствами. Но объективный мир может быть описан различными способами. Поэтому возникает проблема “эквивалентного описания” “эквивалентного метрологического обеспечения”. Физика, как и другая наука, стремится не просто к описанию и регистрации эмпирических данных, а познанию объективной структуры материального мира. В этом отношении весьма показателен подход к данной проблеме, как уже отмечалось, со стороны Бора, нашедший выражение в его принципе дополненности. Но не все эквивалентные описания дают полноту физического смысла. Например, уравнения измерения могут быть записаны в двух, математически эквивалентных формах. Первая, следует из аксиомы Архимеда  $\{G\} [G] > G$ ,  $G = \{G\} [G] + G_R$ , где  $G$ - измеряемая физическая величина,  $[G]$  - мера (единица измерения),  $\{G\}$ - коэффициент, учитывающий количество (целое число раз) единиц измерения на числовой,  $G_R$ - величина остатка. Другая форма уравнения измерения следует из Китайской Теоремы об Остатках  $G \equiv G_{Ri} \text{ mod } [G_i]$   $i = 1, N$ . Как видно, это уравнение не содержит коэффициента  $\{G\}$ , но требует обязательно иметь не менее двух эталонов. Какова природа этого различия? Реальный смысл имеют оба представления, в упомянутых уравнениях, но каждое из них выражает разные аспекты измерения.

Литература

1. Физическая энциклопедия. том 4, стр. 156, Москва, Научное изд-во. "Большая Российская энциклопедия" 1994.
2. Садбери А. Квантовая механика и физика элементарных частиц.// 1989, Москва, МИР
3. Шпольский Э.В. Атомная физика. // 1974, Часть I, II, Москва, Наука
4. Борн М. Атомная физика.// 1970, Москва, МИР
5. Соколов А.А., Тернов И.М. Квантовая механика и атомная физика.// 1970, Москва, Просвещение.
6. Бройль Л. Соотношения неопределенностей Гейзенберга.// 1986, Москва, МИР.
7. Суханов А.Д. Физика и естествознание: вчера, сегодня, завтра.// 1995, Журнал Московского Физического Общества, "Физическое образование в вузах".
8. Пригожин И. Конец определенности. Время, Хаос и Новые Законы
9. Завельский В.В. Время и его измерение.// 1987, Москва, Наука.
10. Кадышевский В.Г. Существует ли элементарная длина?// 1975/9, Проблемы физики микромира.
11. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры, надежды и реальность.// 2001, Москва-Ижевск.
12. Арутюнов П.А. Актуальные проблемы развития теоретической метрологии.// Закон. и приклад. метрология, 1994, №5, С.26, 1995, №1, С.36.
13. Арутюнов П.А. Неархимедовы исчисления в задачах теоретической метрологии.// 2001, Москва, Метрология. Приложение к журн. "Измерительная техника", С.3.
14. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного.// 1990, Москва, МИР
15. Шелепин Л.А. В дали от равновесия. // 1987/8, Знание, Физика.
16. Бэр Г.Д. Техническая термодинамика.// 1977, МИР, Москва.
17. Осипов А.И. Самоорганизация и хаос.// 1986/7, Знание, Физика
18. Хакен Г. Информация и самоорганизация.// 1991, Москва, МИР.
19. Арутюнов П.А., Демидов В.Н. Метрология поверхности.// 2000, Москва, Тр. семинара "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах", С.102.
20. Гласс, Мэки М. От часов к хаосу. Ритмы жизни.// 1991, Москва, МИР
21. Берже П., Помо И., Видадь К. Порядок в хаосе.// 1991, Москва, МИР
22. Кунин С. Вычислительная физика.// 1992, Москва, МИР
23. Арутюнов П.А., Демидов В.Н. Система параметров для анализа шероховатости и микрорельефа в сканирующей зондовой микроскопии.// 1999, Заводская лаборатория, Т.65, С.31-41.
24. Арутюнов П.А. Новый взгляд для выражения неопределенности в измерении.// 1994, Зак. и приклад. метрология, №2. С.29-34.
25. Арутюнов П.А. Теория и применение алгоритмических измерений.// 1991, Москва, Энергоатомиздат.
26. Чудинов Э.М. Эквивалентные описания и проблема истины в физике.// 1981, "знание", сер. "физика", №1.
27. Арутюнов П.А. Косвенные измерения в конечных полях// Измерительная техника, 1999, №4, С.11-16.