

ФИЛОСОФИЯ И НАУКА

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УСКОРИТЕЛЯХ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ*

А.И. Липкин

Кафедра философии
Факультет гуманитарных наук
Московский физико-технический институт
(государственный университет)
*Институтский переулок, 9, г. Долгопрудный,
Московская область, Россия, 141700*

В.С. Пронских

Объединенный институт ядерных исследований
ул. Жолио-Кюри, 6, Дубна, Московская область, 141980

Используя «теоретико-операционную» структурную схему эксперимента Фока-Липкина, разрабатывается язык описания структуры современного сложного эксперимента и проводится анализ его основных элементов: приборов, фона, анализа данных и их теоретических составляющих.

Ключевые слова: эксперимент, идентификация, теоретическая модель, гетерономная структура, математическое моделирование.

Введение

Вопрос о «теоретической нагруженности» эксперимента проходит красной нитью через всю постпозитивистскую философию науки. Аллан Франклин применяет понятие теоретических компонент («theoretical components») эксперимента, развивая мысль А. Пикеринга о том, что «...теория прибора и теория феномена совместно входят в получение значимого экспериментального результата...» [8]. Мы предлагаем более развитый понятийный язык, который, с одной стороны, позволяет точно указывать место конкретных теоретических компонент в эксперименте, а с другой — показывает, что осталась прежней возникшая в XVII в. принципиальная «теоретико-операционная» структура физического эксперимента:

$\langle P|ph/T|M \rangle$,

$\langle 1 \rangle$

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08-06-00229а.

где операции приготовления $\langle P \rangle$ и измерения $|M\rangle$ взяты из техники, они искусственны и принадлежат «второй природе», а естественное явление ph (и/или его теоретическое описание T) относится к естественным природным процессам, к «первой природе». Эта гетерогенная структура, в которой сочетаются теоретические и операциональные части, составляет одну из важнейших черт научной революции XVII в., в ходе которой произошло преобразование натурфилософии в естественную науку Нового времени [3] (1). К этому следует добавить классификацию теорий по трем уровням. К *первому уровню* относятся теории, задающие основания раздела физики (нерелятивистской квантовой механики, квантовой теории поля), где создаются новые первичные понятия и объекты этого раздела физики; *ко второму* — теории (модели) явлений внутри существующих разделов физики, теории, являющиеся следствием теории первого уровня (2); к *третьему* — теории, используемые в приборах при измерении или приготовлении физической системы.

Для того чтобы в схеме $\langle 1 \rangle$ теоретические компоненты различного уровня и характера были выписаны явно, включим в форму описания операций приготовления и измерения изучаемого явления приборы $d_p k((Tk) a; b)$ и $d_m k((Tk) a; b)$, где индексы «р» или «m» обозначают принадлежность прибора соответственно операциям приготовления и измерения, T — лежащая в его основе теория третьего уровня (теоретическая составляющая прибора), k — номер, отражающий последовательность операций, a — исходный материал; b — конечный продукт соответствующей операции. Под «прибором» (или «инструментом») здесь понимается некоторая функциональная единица экспериментальной установки (относящаяся к приготовлению $\langle P \rangle$ или измерению $|M\rangle$), которая является инвариантом в данном эксперименте, характеризуясь лишь связью между входом и выходом. При этом работа прибора может быть основана на сколь угодно сложных теориях, но эти теории «не проблематизированы», то есть не являются предметом исследования в данном эксперименте и принимаются за достоверные.

Качественное усложнение приборов — одна из принципиальных новых черт физики второй половины XX в. (образцом такого усложнения является ускоритель элементарных частиц). Их выбор и разработка настолько усложнились и стали требовать столь большого объема исследовательских и расчетных работ, что часть сообщества экспериментаторов, занятых, например, созданием детекторов в физике частиц, выделяется в отдельное сообщество, именуемое Галисоном *инструменталистами* [7]. Работа *экспериментатора* в результате сводится, главным образом, к выбору типа приборов, заданию режимов их работы, соответствующих выполнению конкретного измерения, и анализу данных. Задача теоретика, как и в начале прошлого века, сводится к созданию теории, а также определению (в общем виде) наблюдаемых величин этой теории. Однако использование в теориях менее наглядных понятий и более сложных и абстрактных разделов математики ведет и с этой стороны к разделению труда теоретиков и экспериментаторов [Там же]. С бурным развитием вычислительной техники в конце прошлого века и усложнением математического аппарата теорий сформировалось промежуточ-

ное между теоретиками и экспериментаторами сообщество, занимающееся математическим моделированием экспериментально наблюдаемых величин применительно к конкретным экспериментальным условиям с использованием существующих теорий в пределах изменения свободных параметров этих теорий. В результате этого происходит специализация и разделение труда на экспериментаторов, инструменталистов, теоретиков, математиков с последующим сложным взаимодействием [Там же].

Описание эксперимента

Обсуждаемый эксперимент по изучению рассеяния нейтрино, в котором был обнаружен обмен нейтральными промежуточными частицами («нейтральные токи») — один из ряда экспериментов по проверке квантово-полевой теории электрослабого взаимодействия, являющейся в нашей классификации **теорией «первого уровня»**. В основе этого эксперимента лежит также **теоретическая модель**, включающая «нейтральные токи» — продукт **теории «второго уровня»**. Сложное переплетение теории, эксперимента и приборов возникает уже на стадии постановки эксперимента [4].

Схему ускорительного эксперимента, представленного в работе Галисона, можно изобразить следующим образом (рис.).

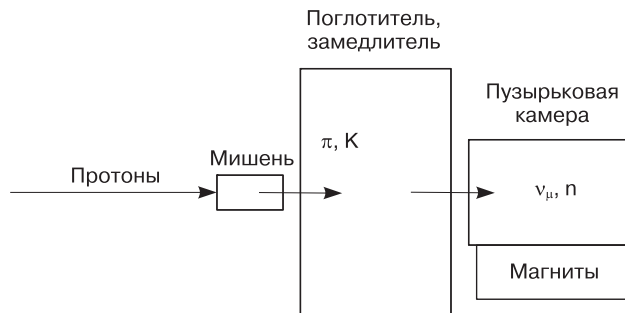


Рис. Блок-схема эксперимента на установке Гаргамель

Пучок протонов ускорителя попадает в мишень, и образующиеся в ней пионы и каоны, двигаясь через замедлитель, распадаются с образованием мюонных нейтрино, которые достигают пузырьковой камеры и вызывают в ней изучаемые взаимодействия, тогда как остальные частицы задерживаются замедлителем. Часть нейтрино попадает в материалы, окружающие камеру, такие как магниты и защита, и образуют в ней нейтроны фона. Эти фоновые нейтроны, также проникающие в камеру, могут вызывать в ней процессы, сходные с вызываемыми нейтрино.

Операция приготовления будет выглядеть так:

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

где знак «+» обозначает параллельность операций, а «*» — их последовательность

$$\langle P1 | = \langle P1 | \{ d_p 1((T1) p(E_1); p(E_2)) \}, \quad (2.2)$$

$$\text{где} \quad d_p1((T1)p(E_1);p(E_2)) \quad (2.3)$$

— прибор-ускоритель для приготовления первичного пучка протонов $p(E_2)$ необходимой энергии E_2 из исходных протонов с энергией E_1 ($p(E_1)$), базирующийся на физике и технике ускорителей, использующих теории $T1$,

$$\langle P2 | = \langle P2 \{ d_p2(T2) p(E_2), \text{Be, Al; } \pi, K \} |, \quad (2.4)$$

где $d_p2((T2) p(E_2), \text{Be, Al; } \pi, K)$ — прибор-мишень для протонов $p(E_2)$, содержащая ядра атомов Be и Al и обеспечивающая рождение достаточного количества необходимых пионов (π) и каонов (K), основываясь на теории $T2$, предсказывающей рождение таких частиц в реакции с протонами. Эти пионы и каоны затем пролетали некоторое расстояние, и в течение этого времени большая часть из них распалась на **мюоны** и **мюонные нейтрино**, что можно описать аналогичными формулами [4].

С **операциями измерения** дело обстоит следующим образом. Используя введенное выше описание прибора, имеем:

$$|M\rangle = |I\rangle * |s\rangle, \quad (2.8)$$

где

$$|I\rangle = |I \{ d_m6(T6) e^\pm, \mu^\pm, \text{заряженные адроны; } \{ \text{photo}_i \} \} \rangle, \quad (2.9)$$

— **операция индикации** посредством пузырьковой камеры, $d_m6((T6) e^\pm, \mu^\pm, \text{заряженные адроны; } \{ \text{photo}_i \})$ — основанный на теории «третьего уровня» $T6$ прибор-мишень (пузырьковая камера), в которой вдоль траекторий движения заряженных частиц происходило закипание рабочего вещества, находящегося в неоднородном электрическом и магнитном поле; в результате каждого акта измерения экспериментатор получает фотоснимок $\{ \text{photo}_i \}$ с изображением множества следов (треков) частиц (photo_i).

В обсуждаемом эксперименте одной из искомым характеристик было отношение вероятностей процессов, идущих с образованием промежуточных Z^0 -бозонов, к числу идущих с образованием W^\pm -бозонов. Определение отношения вероятностей, как и положено вероятностям, требует **множества актов измерения**. В данном случае каждому такому акту отвечает отдельный фотоснимок. Отметим, что здесь есть четкая граница между явлением и прибором, осуществляющим индикацию (3). Последний использует теории $T6$, но это уже теория прибора, никак не связанная с описываемым КТП явлением; это теории, описывающие взаимодействие частиц с классическими и квазиклассическими (ионизация) объектами (4). Однако фотоснимок — это не конечный этап измерения (5), за индикацией следуют обозначенные $|s\rangle$ операции «сравнения», суть которых — в измерении-идентификации полученных траекторий. Этот важный этап относится к «анализу данных» (6).

Анализ данных

«Анализ данных» состоит в «распознавании образа-следа» на фотографии, которое предполагает две части:

1) теоретическое «вычисление» эталонного образа-следа $I_m(T_i)$, полученного с помощью теории T_i , включающей в себя учет свойств данной установки

(геометрию пузырьковой камеры и распределение электрического и магнитного полей в ней);

2) его распознавание на фотоснимке ($I\{\text{photo}_i \Leftrightarrow \text{Im}_i(T_i)\}$). При выполнении весьма трудоемкой второй части работы часто оказывается возможным заложить в компьютер алгоритм поиска образа-следа, для которого служит эталоном $\text{Im}_i(T_i)$, учитывающего множество возникающих здесь эффектов.

Образ-след Im_i (изображение явления, т.н. «события») в описываемом эксперименте представляет собой совокупность следов соответствующего процесса разлета образовавшихся во взаимодействии частиц из некоторой точки (вершины). В зависимости от используемой теоретической модели T_i возможны самые разные интерпретации наблюдаемых в ходе такого эксперимента явлений, запечатленных на фотографии. С точки зрения разных теорий T_i один и тот же след в детекторе установки часто может быть объяснен посредством различных частиц, обладающих различными энергиями и иными физическими свойствами. При этом эталонный образ-след $\text{Im}_i(T_i)$ является зависящим от устройства и параметров конкретной установки.

Например, теория может предсказать, что след от частицы А должен быть искривлен в определенную сторону, и ее след шире, чем от частицы Б. Однако величина этой кривизны, как и абсолютная величина ширины следа, являются следствием режима работы установки, причем лишь в определенной экспериментальной ситуации, поэтому некоторые эталоны-образы $\text{Im}_i(T_i)$ создаются уже на этапе анализа данных.

Еще одна сложная задача — различение следов электрически заряженных частиц, образовавшихся в изучаемом процессе (рассеянии нейтрино), от следов таких же заряженных частиц, но образовавшихся в фоновом процессе (рассеянии фоновых нейтронов). Различия в характеристиках следов, по которым такое различение могло бы быть проведено, во-первых, малы по величине, а во-вторых, зависят от теорий, используемых для описания их возникновения. По этой причине, проверяя основную теорию (электрослабого взаимодействия), экспериментаторы вынужденно использовали и другие теории, описывавшие рождение фоновых нейтронов в окружающих установку материалах (7).

Идентификация фона состоит в поиске всех возможных в данной экспериментальной ситуации явлений, сходных с исследуемым явлением, и предполагает построение **количественной теоретической модели** каждого из источников фона. Этот процесс настолько сложен и трудоемок, что требует затрат времени больших, чем собственно накопление измерительных данных, т.е. того, что до середины XX в. было принято считать экспериментом.

Подтверждение изучаемого варианта электрослабой теории состояло (в данном эксперименте) в приписывании снимков тому или иному процессу (вылету заряженной частицы при распаде нейтрального Z^0 или заряженного W^\pm -бозона) и последующему статистическому анализу. Затем вычислялись отношения количеств снимков, приписанных различным процессам, которые характеризовали их относительные вероятности.

Эти вероятности непосредственно вычисляются в рамках моделей изучаемой теории. Среди снимков, полученных в вышеописанном эксперименте, нужно было выделить события с появлением:

- 1) одиночного электрона, являющегося проявлением нейтрального тока (обмен Z^0),
- 2) вылета нескольких адронов (нейтральный ток, обмен Z^0),
- 3) вылета нескольких адронов и одного мюона (заряженный ток, обмен W^\pm).

Таким образом, анализ снимков можно представить как поиск на фотографических снимках изображения какого-либо из описанных выше процессов, каждому из которых отвечает некоторый уникальный эталон-образ Im_i , и в отделении изображений этих процессов от изображений, вызванных фоновыми процессами (bg), которым отвечает некоторое множество эталонов-образов фона Im_{bg} .

Включенность теоретической составляющей T_i в операции «распознавания образов», составляющих ядро анализа данных, приводит к тому, что решающее значение в формировании результата играет не только технологическая (развитие техники эксперимента и методов анализа данных), но и теоретическая составляющая анализа. Вследствие этого [7. Р. 174] различные подходы к анализу данных (т.е. использование различных основных и дополнительных теорий) могут приводить к заметным различиям в результатах, например, восприятию следов как фона при использовании теорий, предсказывавших пренебрежимо малые вероятности рассеяния нейтрино на электроны, и восприятию их как следов электрона, родившегося при распаде нейтрального Z^0 -бозона, после появления теории Глэшоу—Вайнберга—Салама.

Нечто похожее можно найти уже в классическом эксперименте. Так, в обсуждаемых экспериментах по измерению гиромагнитного соотношения выявилось, что неучет магнитного поля Земли вводил систематическую ошибку и приводил Эйнштейна и де Гааза к неверному заключению относительно величины эффекта. Такое изменение восприятия сходно с известным из психологии переключением гештальта, индуцированного выбором теорий T_i при формировании эталонов-образов $Im_i(T_i)$ (Галисон не разделяет такую точку зрения).

Итак, основные черты классического физического эксперимента, зафиксированные на «теоретико-операциональной» схеме № 1 эксперимента Фока—Липкина, остаются и в современном сложном эксперименте. Однако последний обладает рядом дополнительных характерных черт, для описания которых потребовалось развить структуру <1> до более сложной структуры <2> (т.е. <2.1>—<2.9>). Схема <2> дает язык, учитывающий переход от «простого» классического эксперимента (приблизительно до середины XX в.) к сложному современному эксперименту, характерный признак которого — принципиальное усложнение приборов, математического аппарата теорий; углубление специализации экспериментального, теоретического и инструментального сообществ; увеличение роли анализа данных, оказывающегося в центре экспериментальной деятельности; дополнительные теоретические компоненты многообразных источников фона. Схема <2> позволяет проводить более конкретное, детальное и систематическое рассмотрение многообразных составляющих современного сложного эксперимента.

ПРИМЕЧАНИЯ

- (1) Такую трехчастную структуру эксперимента в квантовой механике предложил В.А. Фок (в рамках полемики с Н. Бором) [5]. Но подобная структура появляется уже в теории падения тел в «Беседах...» Г. Галилея [2; 3].
- (2) Этим уровням отвечают уровни «первичных» и «вторичных» идеальных объектов [2; 3]. Последние представляют собой теоретические модели явлений. Нам представляется, что именно их фиксирует Галисон, говоря о частом опосредовании теории моделью [7. Р. 131].
- (3) Т.е. нет боровской «проблемы» размежевания исследуемого объекта и измерительного прибора в едином «явлении».
- (4) Т.е., как и в нерелятивистской квантовой механике [3], ничего типа «редукции волновой функции» здесь нет и не требуется.
- (5) Использование фотоснимка приводит к тому, что между получением фотоснимка и получением экспериментального результата может пройти много времени.
- (6) До середины XX в. он не привлекал к себе внимания, поскольку практически сводился к съему показаний измерительных приборов установки. Посторонние явления, которые могли исказить показания приборов (фон), считались пренебрежимо малыми, поскольку удавалось создать такие условия эксперимента, чтобы их влиянием на результат можно было пренебречь.
- (7) Нейтрино (или антинейтрино) из исходного пучка неизбежно порождает большое, но точно неизвестное, число нейтронов в окружающих установку магнитах, полуконструкционных материалах, которые попадают затем в пузырьковую камеру. Если один из этих вторичных нейтронов сталкивается с нейтроном или протоном в пузырьковой камере, то может возникнуть поток адронов, который выглядит аналогично безмюонному нейтринному «событию» (проявлению нейтральных Z^0 -токов). Другим источником фона являлись так называемые «ассоциативные события»: нейтроны, испускавшиеся наряду с другими адронами в нейтринных событиях, могли в дальнейшем вызывать в других местах рабочего объема камеры потоки вторичных адронов, неотличимые от безмюонных нейтринных событий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Кун Т.* Структура научных революций. — М., 2001.
- [2] *Липкин А.И.* Объектная теоретико-операциональная модель структуры научного знания // *Философия науки*. — М., 2007.
- [3] *Липкин А.И.* Основания современного естествознания. Модельный взгляд на физику, синергетику, химию. — М., 2001.
- [4] *Липкин А.И., Пронских В.С.* Переплетение теоретических, экспериментальных и приборных компонент в ускорительных экспериментах: «теоретико-операциональная» модель // *Электронный научный журнал «Исследовано в России»*. — 2009. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2009/044.pdf>
- [5] *Фок В.А.* Критика взглядов Бора на квантовую механику // *Успехи физических наук*. — 1951. — XLV. — 1.
- [6] *Хакинг Я.* Представление и вмешательство. Введение в философию естественных наук. — М., 1998.
- [7] *Galison P.L.* How experiments end. — Chicago and London, 1987.
- [8] *Franklin A.* «Experiment in Physics» // *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2007 Edition), Edward N. Zalta (ed.) // <http://plato.stanford.edu/archives/fall2007/entries/physics-experiment>.

THEORETICAL COMPONENTS IN PARTICLE ACCELERATOR-BASED EXPERIMENTS

A.I. Lipkin

Department of Philosophy
Moscow Institute of Physics & Technology (State University)
Institutskii Per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia, 141700

V.S. Pronskikh

Joint Institute for Nuclear Research
Joliot-Curie str., 6, Dubna, Moscow Region, Russia, 141980

In accordance with the «theoretical-operational» structure of experiment of Fock-Lipkin, a symbolic language is developed for the description of structure of a contemporary complex experiment, and the analysis of its essential features (instrument, background, data analysis, and their theoretical components) is performed.

Key words: experiment, identification, theoretical model, heteronomous structure, mathematical modeling.