

ФИЛОСОФИЯ И НАУЧНОЕ ПОЗНАНИЕ

В.С. Пронских

ПОИСКИ БОЗОНА ХИГГСА: ПРОБЛЕМЫ ЭПИСТЕМИЧЕСКОЙ АВТОНОМИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Пронских Виталий Станиславович – кандидат философских наук, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник. Национальная Ускорительная Лаборатория им. Э. Ферми. США, 60555 IL, Батавия, Pine Str. & Kirk Rd.; e-mail: vpronskikh@gmail.com

В статье обсуждаются эксперименты в физике элементарных частиц по обнаружению последнего недостающего элемента Стандартной Модели взаимодействий – бозона Хиггса – и критически анализируются предложения позитивистского характера о необходимости признания этого эксперимента поисковым, решающим, а также о его относительной автономии от теории. Мы описываем роль механизма Хиггса как *ad hoc* гипотезы, введенной изначально для преодоления проблемы инвариантности теории. Анализируются теоретически нагруженные процессы приготовления и измерения бозона Хиггса в коллайдерных экспериментах; обсуждаются методы анализа экспериментальных данных и способы их теоретической интерпретации. Уделено внимание роли таких каналов нагруженности этапа анализа данных моделями явления, как экспериментальный фон и триггеры. Рассматриваются предложения считать данный эксперимент относительно независимым от теории, а также лежащее в основе такого подхода представление о сигнатурах (определенных признаках в интерпретированных данных), в которых теоретические модели функционируют как «черный ящик». В работе показывается, что роль и функции сигнатуры в эксперименте могут быть поняты семиотически только с учетом теории явления и ее определяющей роли в формировании сигнатур. Утверждается, что предлагаемые критерии решающего эксперимента характеризуют не столько эксперимент, сколько теорию, тогда как к эксперименту по-прежнему применим исторический критерий Лакатоса. Обосновывается вывод о том, что в основе убеждений о поисковом и решающем характере экспериментов с бозоном Хиггса – неучитывание нагруженности сигнатур теориями явления и недостаточная избирательность коллайдерных экспериментов относительно теоретических моделей.

Ключевые слова: бозон Хиггса, теоретическая нагруженность, поисковый эксперимент, решающий эксперимент, сигнатура

Для цитирования: *Пронских. В.С.* Поиски бозона Хиггса: проблемы эпистемической автономии эксперимента // Философский журнал / Philosophy Journal. 2020. Т. 13. № 3. С. 82–96.

Введение

Среди недавних событий в физике элементарных частиц, вызвавших широкий резонанс далеко за пределами научного сообщества, – открытие бозона Хиггса на коллайдере БАК¹ в ЦЕРН², которое завершило эмпирическое подтверждение Стандартной модели – теории взаимодействий частиц микромира³. Хотя Стандартная модель далека от того, чтобы считаться теорией всех взаимодействий (она не описывает гравитацию, темную материю, содержит множество подогнанных параметров), эта теория (точнее, взаимосвязанная группа теорий) совместима со всем множеством измерений объектов микромира. Измерение в микромире по сравнению с измерением макроскопических объектов обладает рядом особенностей, в частности, измерительный эталон может формироваться уже на этапе анализа данных⁴. Тем не менее свойства микрообъектов, таких как бозон Хиггса, не возникают в процессе измерения⁵, а только фиксируются в ходе такового, тогда как сами эти объекты приготавливаются в определенных состояниях операциями, основанными как на теориях приборов, так и теориях явления. В позитивизме было осознано, в том числе применительно к физике частиц, космологии и другим областям естествознания, что движущей силой научного познания является теория, которая как диктует операции приготовления и измерения явлений⁶, так и обеспечивает язык интерпретации эмпирических данных⁷. Однако для приготовления микрообъектов, предсказываемых современными теориями и обладающих большими массами, энергиями современных и создаваемых ускорителей становится недостаточно. В связи с этим активно ведется поиск новых, неэмпирических критериев оценки теории, таких как математическое обоснование, которые наталкиваются на известные ограничения теоремы Геделя⁸. На этом фоне обнаружение бозона Хиггса прервало длительный период ожидания новых эмпирических данных, важных для проверки теории элементарных частиц, и не только вселило надежды на развитие экспериментального метода, но и вызвало череду работ позитивистского характера, полемика с которыми послужила мотивацией для написания настоящей работы. Далее приводятся аргументы против позитивистской позиции в физике элементарных частиц, в том числе применительно к открытию бозона Хиггса.

¹ Большой адронный коллайдер (или Large Hadron Collider, LHC).

² Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN), Европейская организация по ядерным исследованиям, расположенная территориально во Франции и Швейцарии.

³ *ATLAS Collaboration. Measurements of Higgs boson properties in the diphoton decay channel with 36 fb⁻¹ of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector // Physical Review D. 2018. Vol. 98. P. 052005.*

⁴ *Липкин А.И., Пронских В.С. Теоретические компоненты в экспериментах на ускорителях элементарных частиц // Вестник РУДН. Сер.: Философия. 2010. № 3. С. 56–63.*

⁵ *Севальников А.Ю. Физика и философия: старые проблемы и новые решения // Философский журнал / Philosophy Journal. 2016. Т. 9. № 1. С. 42–60.*

⁶ *Липкин А.И., Пронских В.С. Указ. соч.*

⁷ *Мамчур Е.А. Как возможно эмпирическое обоснование теоретического естествознания (на примере современной космологии) // Философский журнал / Philosophy Journal. 2009. № 2 (3). С. 64–76.*

⁸ *Карпенко И.А. Физические теории в условиях множества возможных миров // Философский журнал / Philosophy Journal. 2017. Т. 10. № 2. С. 62–78.*

Открытие бозона Хиггса в ЦЕРН

В 2013 г., Нобелевский комитет присудил Нобелевскую премию по физике за открытие механизма Хиггса двум физикам-теоретикам, Франсуа Энгелеру и Питеру Хиггсу. О подтверждении теории, заключавшейся в экспериментальном измерении предсказанного теоретиками бозона Хиггса, было объявлено за год до этого, в июле 2012 г. Открытие бозона Хиггса было воспринято мировым научным сообществом с большим энтузиазмом, поскольку ознаменовало этап в пятидесятилетних усилиях по подтверждению важнейшего элемента теории элементарных частиц, каковым являлся механизм Хиггса. Механизм Хиггса использовался в теории для объяснения того, как элементарные частицы приобретают массу, и изначально предназначался для описания масс Z^0 и W^\pm бозонов, переносчиков электрослабого взаимодействия (открытие которых также ранее было удостоено Нобелевской премии). Идя по пути объединения существующих взаимодействий и пытаясь создать единую теорию электромагнитных взаимодействий, электрослабую теорию, теоретики применили калибровочную симметрию – подход, ранее хорошо себя зарекомендовавший при создании квантовой электродинамики⁹. Использование калибровочной симметрии позволяло создать теорию, инвариантную относительно пространственно-временных преобразований, которая после перенормировки не содержала «нефизичных» бесконечностей, т.е. позволяла теоретически согласованно описывать экспериментально измеримые величины. Проблема, однако, состояла в том, что возникавшие при этом в теории калибровочные бозоны-переносчики объединенного электрослабого взаимодействия, Z^0 и W^\pm бозоны¹⁰, обладали массами, что приводило к нарушению симметрии и связанным с этим теоретическим несогласованностям. Чтобы преодолеть эту проблему, теоретики применили спонтанное нарушение симметрии – технику, позволившую ввести массы калибровочных бозонов способом, не нарушавшим инвариантности относительно преобразований и тем самым позволявшим избежать несогласованностей в теории. Однако для этого им пришлось добавить в теорию еще одно скалярное поле *ad hoc* и новую скалярную (бесспиновую) частицу для описания взаимодействия электрослабых калибровочных бозонов с этим полем. Поскольку поле Хиггса требовало новой частицы, никаких эмпирических указаний на существование которой на тот момент не было, тогда как само поле требовалось только для решения проблемы инвариантности объединенной электрослабой теории, т.е. внутритеоретической проблемы, то такое поле в терминах Лакатоса¹¹ можно считать *ad hoc* гипотезой. Оно добавляло в Модель (которая использует множество свободных, подгоночных, параметров) только один новый параметр – массу бозона Хиггса, которую необходимо было измерить экспериментально.

⁹ Karaca K. The strong and weak senses of theory-ladenness of experimentation: Theory-driven versus exploratory experiments in the history of high-energy elementary particle physics // *Science in Context*. 2013. Vol. 26. P. 93–136.

¹⁰ В Стандартной Модели помимо Z^0 и W^\pm бозонов есть и другие калибровочные бозоны, фотоны (переносчики электромагнитного взаимодействия) и глюоны (переносчики сильного взаимодействия).

¹¹ Лакатос И. Фальсификация и методология научно-исследовательских программ. М., 1995.

Экспериментальное исследование бозона Хиггса можно условно разделить на два этапа. Первый – приготовление этой частицы в свободном состоянии – происходит на коллайдерах, ускорителях встречных пучков протонов. БАК – кольцевой ускоритель протонов, расположенный в туннеле длиной 27 километров, где разогнанные до скоростей, близких к скорости света, протоны с энергией 3.5 тераэлектронвольт (ТэВ) сталкиваются в нескольких местах кольца. В местах встречи пучков, где в столкновениях теория предсказывает рождение бозонов Хиггса, располагаются масштабные устройства-регистраторы вылетающих частиц, которые называются детекторами. Регистрация и измерение свойств частиц, рождающихся при распаде бозона Хиггса, – второй этап исследования частицы. В экспериментах ЦЕРН бозон Хиггса был измерен двумя независимыми¹² коллаборациями детекторов ATLAS¹³ и CMS¹⁴. Если с точки зрения теории приготовления явления доставка к месту столкновений определенного количества протонов в единицу времени означает, что там могут родиться бозоны Хиггса, то с точки зрения измерения детектор – большая емкость с чувствительными материалами и электроникой для регистрации – призван уловить частицы, вылетающие в различных направлениях при практически мгновенном¹⁵ после возникновения в свободном виде распаде частицы. Причинно подобная регистрация продуктов распада связывается с изучаемым явлением через теоретические механизмы, объясняющее порождение бозонов Хиггса в столкновениях.

Различные теоретические модели предсказывают образование различных частиц в распаде бозона Хиггса, например, на два фотона, два Z бозона (которые также практически сразу превращаются в четыре лептона, например, электроны или мюоны), два боттом-кварка, топ-кварк, множество других комбинаций бозонов, кварков и лептонов. Все эти варианты распада бозона Хиггса (так называемые каналы) неравноценны для экспериментаторов, поскольку некоторые из вышеперечисленных событий происходят редко (и их затруднительно зарегистрировать), а другие, хотя и могут происходить часто, сопровождаются мешающим их различить фоном, т.е. явлениями другой природы, которые, однако, проявляются в детекторе сходным образом (например, распад на пары кварков). Распад бозона Хиггса на два фотона – экспериментально наиболее удобный канал, сочетающий довольно высокую частоту событий и сравнительно низкий фон. Из соображений кинематики при подобном распаде два фотона должны вылететь в строго противоположных направлениях внутри детектора, который окружает место столкновения пучков со всех сторон, и физикам-детекторщикам необходимо зарегистрировать, куда попадут фотоны в детекторе и по времени прилета и месту регистрации установить, что это два фотона, испущенные из одной точки в направлениях, противоположных друг другу. Затем по их суммарной

¹² Оба детектора управляются различными группами ученых (коллаборациями), которые собирают информацию о процессах, происходящих в разных местах кольца ускорителя, независимо обрабатывают и интерпретируют ее. При этом они объединены технически одним ускорителем (общими данными об интенсивности столкновений, светимостью, используемой для нормировки результатов), а также институционально (общим менеджментом ЦЕРН).

¹³ ATLAS. A Toroidal LHC Apparatus. Тороидальная установка для БАК.

¹⁴ CMS. Compact Muon Solenoid, Компактный мюонный соленоид.

¹⁵ Время жизни бозона Хиггса $\sim 10^{-24}$ с.

энергии, опираясь на закон ее сохранения, им нужно определить массу исходного бозона, поскольку его масса покоя превратилась согласно соотношению $E=mc^2$ в энергию обоих фотонов. Именно таким образом (мы опускаем некоторые технические детали и дополнительные каналы) в 2012 г. в ЦЕРН была измерена масса бозона Хиггса. В 2016 г., на наборе данных с детектора большого объема, результат был воспроизведен при более высокой энергии сталкивающихся протонов (13 ТэВ в системе центра масс есть суммарная энергия обоих сталкивающихся протонов).

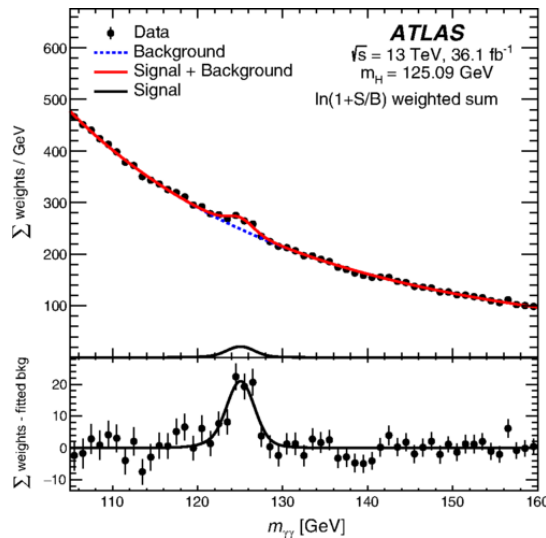


Рис. 1. График инвариантной массы в двухфотонном спектре¹⁶ – распределение энергий зарегистрированных детектором фотонных пар в единицах массы

Теоретическая нагруженность и поиски бозона Хиггса

Утверждение о распаде бозона с определенной энергией на два фотона – не просто результат некоторого «наблюдения» в детекторе, а продукт помимо сложного и многоэтапного приготовления частицы также не менее сложной процедуры измерения. Как отмечал П. Галисон¹⁷, «читая статью, можно было бы заключить, что эффект следует из экспериментальной установки с неотвратимостью логической импликации», что некорректно, поскольку только экспериментатор знает как особенности и характеристики использованного оборудования, так и суждений и допущений, заложенных в основу результата. Измерение, которое принципиально может быть сведено к сравнению величины некоторой характеристики с эталоном, в случае объектов микромира принимает особую форму, отличную от классической¹⁸.

¹⁶ ATLAS Collaboration. Measurements of Higgs boson properties in the diphoton decay channel with 36 fb^{-1} of pp collision data at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector. P. 052005–25. (Fig. 9). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.052005>.

¹⁷ Galison P.L. How experiments end. Chicago, 1987. P. 244.

¹⁸ Липкин А.И., Пронских В.С. Указ. соч.; Пронских В.С. Проблемы измерений: современные дискуссии и модели // Успехи физических наук. 2020. № 190. С. 211–219.

Его можно условно разделить на два этапа: индикацию и анализ данных. На этапе индикации вылетевшие из точки столкновений фотоны улавливаются элементом детектора – калориметром, где энергия фотонов поглощается и преобразуется в электрический сигнал, который усиливается, переводится в цифровую форму и записывается для дальнейшей обработки. На этапе анализа данных большие массивы записанных «событий» – наборов информации об энергиях, пространственных положениях, временах регистрации фотонов – сортируются, и в ходе подобной сортировки отбираются лишь некоторые события, т.е. события в интервалах энергий, положений и времен, интересующих аналитика. Таким образом, на Рис. 1 представлено не все, что зарегистрировано детектором, а результат отбора данных, удовлетворяющих множеству не только технических, но и теоретических условий. Как показал на материале большого числа экспериментов А. Франклин, отбор и исключение данных из анализа – стратегия, которой придерживаются все экспериментаторы, а первое задокументированное упоминание об отборе обнаруживается еще в лабораторном журнале Милликена, который, измеряя заряд электрона, использовал данные только о двадцати трех заряженных каплях масла из более чем ста исследованных¹⁹. В физике элементарных частиц отбор и исключение данных практикуются исключительно широко, однако это обостряет проблему теоретической нагруженности, поскольку отбор опирается на свойства конкретных моделей, например, предполагающих, что при распаде родится именно два фотона и что они будут испущены из точки распада противоположно друг другу. Есть и теоретическое ограничение по энергии, например, такое, что сумма энергий обоих фотонов не может превышать 800 мегаэлектронвольт (МэВ). Кроме того, во всех моделях частица, рождающаяся в столкновениях, должна обладать большим поперечным импульсом, т.е. вылетать под большим углом к линии, соединяющей направления сталкивающихся исходных протонов. Если поперечный импульс частицы невелик, она не записывается на диск и не попадает на стол аналитиков данных. Для этого в электронике установки присутствует устройство, называемое «триггер», роль которого состоит в записи «хороших» и отбраковке «плохих» данных. Он управляется специальной программируемой частью, называемой «меню триггера». В меню триггера записаны условия, которым должны удовлетворять «хорошие» данные, а условия, в свою очередь, задаются теоретическими моделями, которые эксперимент намеревается проверять. Как подчеркивает А. Франклин, в экспериментах утрачивается не просто значительная, а большая часть данных²⁰.

Еще один важный канал теоретической нагруженности данных экспериментов, причем нагруженности теорией явления, представляет собой фон²¹, т.е. такие явления, регистрируемые детектором, которые проявляются неотличимым от исследуемого явления образом. Иногда в литературе фон называют «шумом», что не вполне корректно: если шум – результат помех, возникающих в электронике и приводящих к искажению изучаемого сигнала, то фон – другие физические явления *в самой изучаемой системе*, которые

¹⁹ Franklin A. *Shifting Standards: Experiments in Particle Physics in the Twentieth Century*. Pittsburgh, 2013.

²⁰ Ibid. P. 224.

²¹ Пронских В.С. Эпистемическая роль экспериментального фона в философии научного эксперимента // *Философия науки*. 2015. № 65 (2). С. 41–57.

в силу ограничений детектора не всегда можно однозначно отличить от искомого эффекта. Хороший пример фона приведен на Рис. 1: в верхней части выпуклость, соответствующая двухфотонному пику, показана на наклонной кривой, соответствующей фону, т.е. также зарегистрированным фотонам, но других, близких энергий, которые могли возникнуть, например, в других распадах бозона Хиггса или распадах других частиц, возникающих в столкновениях протонов. Для того же, чтобы определить число искомым двухфотонных распадов бозона Хиггса (площадь под пиком в нижней части Рис. 1), нужно из верхней кривой вычесть кривую фона, которую необходимо получить из дополнительных теорий. Даже если ее форму определять по той же верхней кривой из Рис. 1, требуется интерполировать ее в область изучаемого пика, т.е. сделать априорные допущения о ее поведении в неизвестной области. Сделать это можно исключительно на основе теоретико-модельных соображений, объяснив поведение кривой фона. Особенность теоретической нагруженности в этом случае состоит в том, что процессы, приводящие к образованию фона фотонов (как и других частиц) так же, как и собственно бозон Хиггса, описываются Стандартной моделью, частью которой является механизм Хиггса, т.е. является фоном Стандартной модели. Иначе говоря, чтобы подтвердить механизм Хиггса и определить его параметры, нужно в основу поиска заложить саму Стандартную модель, основанную на этом же теоретическом механизме. Таким образом, проверяемая теория используется для экспериментальной проверки самой этой теории. Тем самым наше понимание теоретической нагруженности противоречит ее интерпретации, предложенной Е.А. Мамчур²².

Как мы видим, теория явления – механизм Хиггса – совместно с инструментальными (приборными) теориями довольно жестко, прямо и косвенно, задает алгоритм поиска и язык интерпретации измерений бозона Хиггса. При этом ряд современных философов науки и философски мотивированных физиков отстаивают ту точку зрения, что в физике элементарных частиц возможны так называемые поисковые эксперименты, обладающие определенной автономией от теории, и что эксперименты по поиску бозона Хиггса можно отнести к поисковым экспериментам. Отметим, что появляются и примеры современных работ другой направленности, в которых опытные экспериментаторы выявляют каналы теоретической нагруженности, в частности эксперимента ATLAS на БАК, и подчеркивают, что граница между теорией и экспериментом становится размытой²³; также в ряде работ акцент делается на неустраимости роли теорий даже в случае так называемых поисковых экспериментов²⁴.

Решающие эксперименты и бозон Хиггса

В работе «Новый Органон», опубликованной в 1620 г., Фрэнсис Бэкон²⁵ ввел понятие *experimentum crucis*, т.е. решающего эксперимента, который может помочь осуществить выбор между двумя конкурирующими гипотезами.

²² Мамчур Е.А. Указ. соч.

²³ Beauchemin P.-H. Autopsy of measurements with the ATLAS detector at the LHC // Synthese. 2017. Vol. 194. P. 275–312.

²⁴ Feest U. Exploratory Experiments, Concept Formation and Theory Construction in Psychology // Scientific Concepts and Investigative Practice. Berlin, 2012. P. 167–189.

²⁵ Bacon F. The New Organon. Cambridge, 2000.

Это предложение в полной мере опиралось на его последовательные эмпирические воззрения. Однако уже П. Дюгем²⁶ сделал вывод о недоопределенности теорий наблюдением и о теоретической нагруженности наблюдения, а Томас Кун²⁷ предположил, что фундаментальность присуща не эмпирическим данным, а физическим теориям. Положение о теоретической нагруженности наблюдения является основополагающим для постпозитивизма, и представления о решающем эксперименте не получали достаточной поддержки у представителей этого направления. Важные выводы делает Лакатос, говоря о том, что эксперимент может быть признан решающим только в контексте более широкой исследовательской программы при ее исторической реконструкции, тогда как «никакой эксперимент не является решающим во время его проведения (кроме как, может быть, психологически)»²⁸. Таким образом, Лакатос подчеркивает, что эксперимент может быть признан решающим только ретроспективно, а исследователи признают, что даже в биологии²⁹ эксперименты могут длиться десятилетиями, притом что когда при ретроспективной реконструкции программы некоторый эксперимент признается решающим, то подобная характеристика приписывается отдельному эпизоду или отдельному набору данных из всей многолетней серии исследований. Иначе говоря, в постпозитивизме доминирующей точкой зрения на решающие эксперименты является представление о их историческом и психологическом характере.

В недавней работе группы немецких физиков и философов из проекта “Epistemology at LHC” (Эпистемология на БАК) была предпринята попытка пересмотреть критерии признания эксперимента решающим таким образом, чтобы они были «ближе к экспериментальной практике и меньше зависели от краткосрочных изменений в физической теории»³⁰. Авторы предложили следующие признаки решающего эксперимента. Он должен быть:

- (1) новаторским или определяющим для дальнейшего развития области науки,
- (2) удовлетворяющим одному из нижеследующих условий:
 - a) добавлять новую концепцию к сумме физических знаний или
 - b) из него следует опровержение одного или нескольких теоретических решений значительной проблемы или концепции.

Как полагают авторы предложения, в случае открытия бозона Хиггса выполняются все вышеперечисленные условия. В качестве подтверждения выполнения критерия 1 приводятся данные многочисленных социологических опросов, проводившихся проектом, в ходе которых было установлено, что большинство физиков, вовлеченных в эксперименты ЦЕРН, считают бозон Хиггса ключевым концептом, представляющим наибольший интерес для его исследования на БАК с точки зрения дальнейшего развития физики элементарных частиц. Пункт b выполняется, поскольку обнаружение бозона

²⁶ Duhem P.M.M. *The Aim and Structure of Physical Theory*. Princeton (NJ), 1991.

²⁷ Kuhn T. *The Structure of Scientific Revolutions*. 50th Anniversary Edition. 4th ed. Chicago, 2012.

²⁸ Lakatos I. *The role of crucial experiments in science* // *Studies in History and Philosophy of Science*. 1974. Vol. 4. P. 320.

²⁹ Baetu T. *On the Possibility of Crucial Experiments in Biology* // *The British Journal for the Philosophy of Science*. 2019. Vol. 70. Issue 2. P. 407–429.

³⁰ Mättig P, Stöltzner M. *Model choice and crucial tests. On the empirical epistemology of the Higgs discovery* // *Studies in History and Philosophy of Science. Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*. 2019. Vol. 65. P. 91.

Хиггса и измерение его массы позволило отказаться от большого числа альтернативных моделей.

При анализе предлагаемых модификаций критерия нам представляется, что авторы совершают старую позитивистскую ошибку: новая, даже определяющая концепция была добавлена к сумме знания не экспериментом, а развитием теории задолго до него. Подробно рассмотренная в предыдущем параграфе теоретическая нагруженность, в том числе самой теорией явления, не оставляет сомнений в том, что новая концепция (механизм Хиггса) вошла в практику благодаря теоретической работе. Эта концепция, как мы отмечали вначале, была введена в теорию *ad hoc* для решения внутритеоретической проблемы инвариантности. Она действительно являлась важной для обоснования применения Стандартной модели, однако широкое применение (в том числе сделав немало важных предсказаний) Стандартная модель с этим механизмом нашла задолго до экспериментального измерения массы бозона Хиггса. Более того, за годы, прошедшие после эксперимента 2012 г., широта применения ни бозона Хиггса, ни Стандартной модели в целом не изменилась, таким образом, не сделав его поворотным в принятии модели сообществом. Это произошло много ранее.

Действительно, множество альтернативных теории Хиггса моделей было отвергнуто вскоре после успеха эксперимента, однако, во-первых, отвергнутые и оставшиеся альтернативные модели невозможно сопоставлять количественно и, во-вторых, как признают авторы в другой своей работе³¹, даже после экспериментального открытия бозона Хиггса альтернативные модели отчасти сохраняют свои ядра, а отчасти адаптируются к новым измерительным данным, таким образом демонстрируя все признаки лакатосовских исследовательских программ (а поскольку адаптируются группы моделей, то авторы применяют к ним название «модельно-групповых» программ). Среди таких альтернативных моделей, продолжающих свое развитие, например, модели композитного (составного) Хиггса, утверждающие, что частица в измеренной массой в 125 ГэВ – не фундаментальная (как требуется механизмом, предложенным Питером Хиггсом), а составная частица, не являющаяся скаляром и возникающая из-за динамического нарушения электрослабой симметрии. В связи с тем, что поток подобных альтернативных работ не уменьшился, полагаем, что критерий *b* не может считаться сколь-нибудь существенным при установлении того, является ли эксперимент решающим.

Таким образом, новые предложения³² по поводу решающих экспериментов, во-первых, относятся к теории в большей степени, чем эксперименту, во-вторых, неприменимы на данном историческом этапе к экспериментам с бозоном Хиггса, поскольку на данный момент отсутствуют какие-либо указания на судьбоносность (и, вообще, радикальное влияние) именно этого эксперимента (а не собственно теоретического механизма) на прогресс в данной области. Представляется, что только опора на исторический критерий Лакатоса сможет помочь установить, являлся ли обсуждаемый эксперимент решающим. Важно, что не только механизм Хиггса, но и альтернативные модели

³¹ *Chall C., King M., Mättig P., Stöltzner M.* From a boson to the standard model Higgs: a case study in confirmation and model dynamics // *Synthese*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11229-019-02216-7>.

³² *Mättig P., Stöltzner M.* Model choice and crucial tests. P. 91.

опираются на одну и ту же эмпирическую базу, что делает данный эксперимент неизбирательным. Подобную неизбирательность экспериментаторы считают достоинством данной постановки эксперимента, поскольку, учитывая множественность моделей, некоторые измеримые признаки позволяют в одном анализе данных проверить одновременно несколько теоретических моделей. Такие универсальные качественные признаки (например, выпуклость в массовом распределении пар фотонов при энергии 125 ГэВ, см. Рис. 1) среди экспериментаторов принято называть «сигнатурами». Для понимания их роли и функции в эксперименте требуется более детальное рассмотрение того, что представляют собой сигнатуры.

Понятие сигнатуры и их роль в физике элементарных частиц

Подчеркивая, что работа экспериментаторов в определенной степени сохраняет автономию от теории, авторы³³ указывают, что поиск экспериментаторов направляется не непосредственно теоретическими моделями, а так называемыми сигнатурами. Они определяют сигнатуры следующим образом: «сигнатура события задается: а) тем, сколько сигнатур отдельных частиц наблюдается в событии (сколько электронов, сколько кварков/глюонов и т.д.) и б) как эти сигнатуры отдельных частиц, например, диапазоны углов вылета, энергий или инвариантных масс, соотносятся друг с другом. В качестве примера можно привести бозон Хиггса, который был обнаружен по инвариантной массе двух фотонов, то есть одна из сигнатур, попросту говоря, составлена из двух фотонов, имеющих инвариантную массу 125 ГэВ»³⁴. Таким образом, сигнатура определяется ими как некий качественный признак, усматриваемый в распределениях, являющихся результатом интерпретации данных эксперимента и указывающий на какие-либо теоретические модели. Соотношение между моделями и сигнатурами выглядит как отношение многих к многим, т.е. как каждой сигнатуре может соответствовать более одной модели, так и одна и та же модель может предсказывать более одной сигнатуры.

В представлении³⁴ сигнатура не тождественна собственно данным эксперимента, так как в этом смысле они различают три уровня: теоретические модели, сигнатуры и данные. Для обоснования различения сигнатур и данных³⁵ апеллируют к известной работе Богена и Вудварда³⁶, в которой те дифференцируют данные и явления. С их точки зрения, данные (например, показания термометра в разных положениях в объеме нагреваемой жидкости) не тождественны собственно феномену, температуре жидкости, поскольку показания отдельных термометров подвержены различным локальным искажением, скажем, в силу неравномерности нагрева в объеме. При этом получаемое в результате статистической интерпретации множественных измерений значение температуры отличается от этих показаний и не тождественно им.

³³ Mättig P., Stöltzner M. Model landscapes and event signatures in elementary particle physics // Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics. 2019. Vol. 69. P. 12–25.

³⁴ Ibid. P. 7.

³⁵ Ibid. P. 8.

³⁶ Bogen J., Woodward J. Saving the phenomena // The Philosophical Review. 1988. Vol. XCVII. No. 3. P. 303–352.

Здесь неявно присутствует позитивистская отсылка к неким исходным данным, которые якобы теоретически независимы, и усредненной температуре как результату применения модели к этим данным. В нашем понимании, интерпретации данных «снизу вверх», от данных к явлениям (на чем настаивают Боген и Вудвард), предшествовал этап приготовления явления «сверху вниз», т.е. от теории явления к данным. Например, в случае экспериментов с бозоном Хиггса, интерпретации от срабатываний детектора к сигнатурам («снизу вверх») предшествовал этап приготовления искомым бозонам в столкновениях протонов, а затем приготовления срабатываний детектора в распаде бозонов, причем оба этих этапа основывались на модели явления, т.е. «сверху вниз».

Попробуем, однако, развернуть и детализировать понимание сигнатуры, обратившись к семиотике. В определении сигнатур, даваемых экспериментаторами, явно и неявно прочитывается отсылка к знаковой природе сигнатуры. С точки зрения теории знака сигнатура в физике элементарных частиц была детально проанализирована в работах Арпиты Рой³⁷. Рой акцентирует внимание на парадоксальном характере сигнатуры, поскольку она является одновременно и вещью, и знаком. «Рассмотрение пары фотонов как неоспоримого сигнала частицы Хиггса или высокоэнергетических мюонов как сигнатуры темной материи представляет собой способ распознавания, включающий два элемента – вещь и знак, которые настолько связаны друг с другом, что, хотя они могут быть идентифицированы по-разному в рефлексии, по сути действуют вместе. В отличие от всего остального, что может описать наука, роль сигнатуры в физике заключается в том, чтобы быть одновременно самой собой (вещью) и чем-то другим, чем она сама (знак), и эта биполярная ориентация переводит современную метафизику на совершенно новый уровень», – пишет Рой³⁸. Автор обращает внимание, что сигнатура в физике обосновывается статистически, т.е. как многократная повторяемость одних и тех же признаков в распределениях, а в понимании Деррида³⁹, хотя без итеративности или повторяемости сигнатура и была бы менее достоверной, повторение еще не является условием для ее появления. Нам представляется, что в этом и состоит одно из важных сходств сигнатуры как знака с сигнатурой в физике, что не любой признак, проявляющийся статистически значимо в данных, еще может служить сигнатурой (например, фон). Таким образом, для усмотрения в данных сигнатуры собственно данных еще недостаточно, для этого необходима предшествующая теория явления или его модель. Только модель явления обращает одни вещи (двухфотонный пик) в сигнатуры и не обращает в них другие (плавные распределения фоновых данных).

В случае соответствия сигнатуры нескольким моделям, в особенности в случае обсуждавшихся выше «безмодельных поисков» (т.е. поиска любых сигналов о несохраняющейся в столкновении массе), можно говорить не о независимости от теории (зависимость от множества теорий не тождественна независимости ни от одной), а о слабой избирательности коллайдерных экспериментов, что является, скорее, их недостатком, чем достоинством.

³⁷ Roy A. *Ethnography and Theory of the Signature in Physics* // *Cultural Anthropology*. 2014. Vol. 29 (3). P. 479–502; Roy A. *Signatura Rerum: Semiotics of the Subnuclear* // *Signs and Society*. 2017. Vol. 5 (S1). P. 77–99.

³⁸ Roy A. *Ethnography and Theory of the Signature in Physics*. P. 480.

³⁹ *Derrida J. Signature Event Context* // *Derrida J. Margins of Philosophy*. Chicago, 1982. P. 310–316.

Заключение

Открытие в ЦЕРН в 2012 г. бозона Хиггса, частицы, ответственной за массы частиц, отмеченное Нобелевской премией 2013 г., широко обсуждается как мировым научным, так и философским сообществом. Несмотря на то что сам теоретический механизм был предложен за пятьдесят лет до обнаружения бозона в опытах на БАК, в научном и философском сообществе по-прежнему предпринимаются активные попытки отстоять (хотя бы частичную) теоретическую автономию этого эксперимента. В духе позитивизма и эмпиризма звучат предложения рассматривать этот эксперимент как решающий (вводящий новую концепцию) и поисковый (модельно-неспецифичный). Для этой цели вводится понятие сигнатуры как признака в экспериментальных данных, модельная зависимость которого непрояснена и функционирует как «черный ящик».

В настоящей работе демонстрируется, что критерии, предлагаемые рядом современных авторов для того, чтобы считать эксперимент решающим, характеризуют не эксперимент, а теорию, которую он проверяет, а решающий характер эксперимента может обсуждаться только в русле лакатосовского исторического критерия. Мы обнаруживаем, что функционирование концепта сигнатуры невозможно без отсылки к теориям явления как их источнику, а допущение экспериментаторов о теоретической автономии сигнатуры основывается на неучитывании теоретической зависимости приготовления явлений и данных. Сосредоточенность экспериментаторов на операциональной стороне сигнатур и игнорирование их модельной природы связывается нами с культурными и языковыми различиями между экспериментаторами и теоретиками. Утверждения о возможности считать эксперимент по поиску бозона Хиггса не направляемым теорией, отнесены нами к позитивистским ошибкам, связанным как с неучетом теоретической нагруженности приготовления, так и неизбежностью коллайдерных экспериментов в отношении теоретических моделей. Нам представляется, что усилия по возврату к позитивистским идеям для обоснования теоретической автономии экспериментирования в физике элементарных частиц носят более прагматический, чем эпистемологический характер.

Благодарности

Fermi National Accelerator Laboratory is operated by the Fermi Research Alliance, LLC under Contract No. DE-AC02-07CH11359 with the U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of High Energy Physics.

Список литературы

- Карпенко И.А. Физические теории в условиях множества возможных миров // Философский журнал / Philosophy Journal. 2017. № 2 (10). С. 62–78.
- Лакатос И. Фальсификация и методология научно-исследовательских программ / Пер. с англ. В.Н. Поруса. М.: Медиум, 1995. 236 с.
- Липкин А.И., Пронских В.С. Теоретические компоненты в экспериментах на ускорителях элементарных частиц // Вестник РУДН. Сер.: Философия. 2010. № 3. С. 56–63.

- Мамчур Е.А. Как возможно эмпирическое обоснование теоретического естествознания (на примере современной космологии) // *Философский журнал / Philosophy Journal*. 2009. № 2 (3). С. 64–76.
- Пронских В.С. Эпистемическая роль экспериментального фона в философии научного эксперимента // *Философия науки*. 2015. № 65 (2). С. 41–57.
- Пронских В.С. Проблемы измерений: современные дискуссии и модели // *Успехи физических наук*. 2020. № 190. С. 211–219.
- Севальников А.Ю. Физика и философия: старые проблемы и новые решения // *Философский журнал / Philosophy Journal*. 2016. № 1 (9). С. 42–60.
- ATLAS Collaboration. Measurements of Higgs boson properties in the diphoton decay channel with 36 fb⁻¹ of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector // *Physical Review D*. 2018. Vol. 98. P. 052005–25. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.052005>.
- Bacon F. *The New Organon* / Ed. by L. Jardine and M. Silverthorne. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 252 p.
- Baetu T. On the Possibility of Crucial Experiments in Biology // *The British Journal for the Philosophy of Science*. 2019. Vol. 70. Issue 2. P. 407–429.
- Beauchemin P.-H. Autopsy of measurements with the ATLAS detector at the LHC // *Synthese*. 2017. Vol. 194. P. 275–312.
- Bogen J., Woodward J. Saving the phenomena // *The Philosophical Review*. 1988. Vol. XCVII. No. 3. P. 303–352.
- Chall C., King M., Mättig P., Stöltzner M. From a boson to the standard model Higgs: a case study in confirmation and model dynamics // *Synthese*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11229-019-02216-7>.
- Derrida J. Signature Event Context // *Derrida J. Margins of Philosophy* / Trans. by A. Bass. Chicago: University of Chicago Press, 1982. P. 310–316.
- Duhem P.M.M. *The Aim and Structure of Physical Theory* / Trans. by P.P. Wiener. Princeton (NJ): Princeton University Press, 1991. 344 p.
- Feest U. Exploratory Experiments, Concept Formation and Theory Construction in Psychology // *Scientific Concepts and Investigative Practice* / Ed. by U. Feest and F. Steinle. Berlin: De Gruyter, 2012. P. 167–189.
- Franklin A. *Shifting Standards: Experiments in Particle Physics in the Twentieth Century*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2013. 302 p.
- Galison P.L. *How experiments end*. Chicago: The University of Chicago Press, 1987. 244 p.
- Karaca K. The strong and weak senses of theory-ladenness of experimentation: Theory-driven versus exploratory experiments in the history of high-energy elementary particle physics // *Science in Context*. 2013. Vol. 26. P. 93–136.
- Kuhn T. *The Structure of Scientific Revolutions*. 50th Anniversary Edition. 4th ed. Chicago: University of Chicago Press, 2012. 264 p.
- Lakatos I. The role of crucial experiments in science // *Studies in History and Philosophy of Science*. 1974. Vol. 4. P. 309–325.
- Mättig P., Stöltzner M. Model choice and crucial tests. On the empirical epistemology of the Higgs discovery // *Studies in History and Philosophy of Science. Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*. 2019. Vol. 65. P. 73–96.
- Mättig P., Stöltzner M. Model landscapes and event signatures in elementary particle physics // *Studies in History and Philosophy of Science. Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*. 2019. Vol. 69. P. 12–25.
- Roy A. *Ethnography and Theory of the Signature in Physics* // *Cultural Anthropology*. 2014. Vol. 29 (3). P. 479–502.
- Roy A. *Signatura Rerum: Semiotics of the Subnuclear* // *Signs and Society*. 2017. Vol. 5 (S1). P. 77–99.

Search for the Higgs boson: the problem of epistemic autonomy of experiment

Vitaly S. Pronskikh

Fermi National Accelerator Laboratory. Pine Str & Kirk Rd, Batavia, 60555 IL, USA; e-mail: vpronskikh@gmail.com

The article discusses experiments in particle physics that attempt to detect the last missing element of the Standard Model of particle interactions, the Higgs boson. It critically analyzes the positivistic proposals according to which such experiments must be recognized as exploratory and crucial on the one hand and as relatively autonomous from the theory on the other. The author examines the role of the Higgs mechanism as an *ad hoc* hypothesis introduced initially to overcome the problem of the invariance of the theory. Theory-laden operations of preparation and measurement of Higgs boson in collider experiments are analyzed; methods for analysis of experimental data and methods of their theoretical interpretation are discussed. A special consideration is given to the role of such routes of theory-ladenness as the experimental background and triggers. The suggestions to view this experiment as relatively independent of the theory, as well as the underlying concept of signatures (certain features in the interpreted data), in which theoretical models are “blackboxed”, are scrutinized. The paper shows that the role and functions of the signature in the experiment can be understood semiotically only taking into account the phenomenal theory and its determinant role in the formation of signatures. The author argues that the proposed criteria for the crucial experiment characterize not so much the experiment as the theory, while the experiment itself remains subject to the historical criterion of Lakatos. The author proposes that the beliefs about the critical and exploratory character of the Higgs Boson experiments are elicited by the neglect of the fact of ladenness of signatures by the phenomenal theories and the insufficient selectivity of the collider experiments in relation to the theoretical models.

Keywords: Higgs boson, theory-ladenness, exploratory experiments, crucial tests, signature

For citation: Pronskikh, V.S. “Poiski bozona Khiggsa: problemy epistemicheskoi avtonomii eksperimenta” [Search for the Higgs boson: the problem of epistemic autonomy of experiment], *Filosofskii zhurnal / Philosophy Journal*, 2020, Vol. 13, No. 3, pp. 82–96. (In Russian)

References

- Karpenko, I.A. “Fizicheskie teorii v usloviyakh mnozhestva vozmozhnykh mirov” [Physical theories in a multiple possible-worlds environment], *Filosofskii zhurnal / Philosophy Journal*, 2017, No. 2 (10), pp. 62–78. (In Russian)
- Lipkin, A.I. & Pronskikh, V.S. “Teoreticheskie komponenty v eksperimentakh na uskoritelyakh elementarnykh chastits” [Theoretical components in experiments on accelerators of elementary particles], *Vestnik RUDN, Seriya: Filosofiya*, 2010, No. 3, pp. 56–63. (In Russian)
- Lakatos, I. *Fal'sifikatsiya i metodologiya nauchno-issledovatel'skikh program* [Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes], trans. by V.N. Porus Moscow: Medium Publ., 1995. 326 pp. (In Russian)
- Mamchur, E.A. “Kak vozmozhno empiricheskoe obosnovanie teoreticheskogo estestvoznaniya (na primere sovremennoi kosmologii)” [How the empirical justification of theoretical natural science is possible (on the example of modern cosmology)], *Filosofskii zhurnal / Philosophy Journal*, 2009, No. 2 (3), pp. 64–76. (In Russian)
- Pronskikh, V.S. “Epistemicheskaya rol' eksperimental'nogo fona v filosofii nauchnogo eksperimenta” [The epistemic role of experimental background in philosophy of scientific experiment], *Filosofiya nauki*, 2015, No. 65 (2), pp. 41–57. (In Russian)

- Pronskikh, V.S. "Problemy izmerenii: sovremennye diskussii i modeli" [Measurement problems: contemporary models and discussions], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2020, No. 190, pp. 211–219. (In Russian)
- Sevalnikov, A.Y. "Fizika i filosofiya: starye problemy i novye resheniya" [Physics and philosophy: old problems and new solution], *Filosofskii zhurnal / Philosophy Journal*, 2016, No. 1 (9), pp. 42–60. (In Russian)
- ATLAS Collaboration, "Measurements of Higgs boson properties in the diphoton decay channel with 36 fb⁻¹ of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector", *Physical Review D*, 2018, Vol. 98, pp. 052005–25. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.052005>.
- Bacon, F. *The New Organon*, ed. by L. Jardine and M. Silverthorne. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 252 pp.
- Baetu, T. "On the Possibility of Crucial Experiments in Biology", *The British Journal for the Philosophy of Science*, 2019, Vol. 70, Issue 2, pp. 407–429.
- Beauchemin, P.-H. "Autopsy of measurements with the ATLAS detector at the LHC", *Synthese*, 2017, Vol. 194, pp. 275–312.
- Bogen, J. & Woodward, J. "Saving the phenomena", *The Philosophical Review*, 1988, Vol. XCVII, No. 3, pp. 303–352.
- Chall, C., King, M., Mättig, P. & Stöltzner, M. "From a boson to the standard model Higgs: a case study in confirmation and model dynamics", *Synthese*, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11229-019-02216-7>.
- Derrida, J. "Signature Event Context", in: J. Derrida, *Margins of Philosophy*, trans. by A. Bass. Chicago: University of Chicago Press, 1982, pp. 310–316.
- Duhem, P.M.M. *The Aim and Structure of Physical Theory*, trans. by P.P. Wiener. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1991. 344 pp.
- Feest, U. "Exploratory Experiments, Concept Formation and Theory Construction in Psychology", *Scientific Concepts and Investigative Practice*, ed. by U. Feest and F. Steinle. Berlin: De Gruyter, 2012, pp. 167–189.
- Franklin, A. *Shifting Standards: Experiments in Particle Physics in the Twentieth Century*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2013. 302 pp.
- Galison, P.L. *How experiments end*. Chicago: The University of Chicago Press, 1987. 244 pp.
- Karaca, K. "The strong and weak senses of theory-ladenness of experimentation: Theory-driven versus exploratory experiments in the history of high-energy elementary particle physics", *Science in Context*, 2013, Vol. 26, pp. 93–136.
- Kuhn, T. *The Structure of Scientific Revolutions. 50th Anniversary Edition*, 4th ed. Chicago: University of Chicago Press, 2012. 264 pp.
- Lakatos, I. "The role of crucial experiments in science", *Studies in History and Philosophy of Science*, 1974, No. 4, pp. 309–325.
- Mättig, P. & Stöltzner, M. "Model choice and crucial tests. On the empirical epistemology of the Higgs discovery", *Studies in History and Philosophy of Science. Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2019, Vol. 65, pp. 73–96.
- Mättig, P. & Stöltzner, M. "Model landscapes and event signatures in elementary particle physics", *Studies in History and Philosophy of Science. Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2019, Vol. 69, pp. 12–25.
- Roy, A. "Ethnography and Theory of the Signature in Physics", *Cultural Anthropology*, 2014, No. 29 (3), pp. 479–502.
- Roy, A. "Signatura Rerum: Semiotics of the Subnuclear", *Signs and Society*, 2017, No. 5 (S1), pp. 77–99.