

**По материалам конференции** «Квантовая физика и природа реальности», 26-29 сентября 2010, Оксфорд. <http://www.physics.ox.ac.uk/polkinghorne2010/home.shtml>

**Оригинал статьи:** Briggs, G. A. D., J. N. Butterfield, and A. Zeilinger. "The Oxford Questions on the foundations of quantum physics." *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. Vol. 469. No. 2157. The Royal Society, 2013. <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/469/2157/20130299.full.pdf+html>

## **Оксфордские Вопросы об основаниях квантовой физики**

G. A. D. Briggs<sup>1</sup>, J. N. Butterfield<sup>2</sup> and A. Zeilinger<sup>3</sup>

1 Department of Materials, University of Oxford, Oxford OX1 3PH, UK

2 Trinity College, University of Cambridge, Cambridge CB2 1TQ, UK

3 Faculty of Physics, University of Vienna, Vienna, Austria

Двадцатый век ознаменовался двумя основными революциями в физике - релятивистской и квантовой. Но ежедневное использование этих теорий не может заглушить чувства удивления от их огромного эмпирического успеха. На чем покоится их инструментальная эффективность: на скале надежных концепций или на песке неопределенных оснований? Измерение квантовой системы исследует или даже создает реальность, или просто изменяет веру? Должны ли теория относительности и квантовая теория просто сосуществовать или мы могли бы найти новую теорию, которая их объединит? Чтобы уделить более пристальное внимание таким вопросам, мы созвали конференцию «Квантовая физика и природа реальности». Некоторые из названных вопросов, как и раньше, остаются спорными, а некоторые уже сейчас подталкиваются к решению тайным оружием теории - экспериментом.

### **1. Достижения физики XX века**

Большая часть истории физики XX века это история консолидации двух революций - релятивистской и квантовой, основные постулаты которых применяются все шире и шире. Не все помнят, каким случайным и даже удивительным образом основные постулаты теории относительности и квантовой теории оказались успешными в областях далеких от области их происхождения. Почему новая хроногеометрия, введенная для электромагнетизма специальной теорией относительности Эйнштейна в 1905 году [1], смогла быть расширена до механики, термодинамики и других областей физики? И почему квантовая теория, разработанная для систем атомных размеров ( $10^{-10}$  м), хорошо работает для масштабов гораздо меньших (в экспериментах с высокими энергиями в масштабах от  $10^{-17}$  до  $10^{-20}$  м) и значительно больших (сверхпроводимость и сверхтекучесть или даже нейтронный интерферометр на масштабах долей метра и более)? Есть ли верхний предел масштаба, на котором следует ожидать, что квантовая теория будет работать? Есть ощущение, что все свойства материи - квантово-механические. Такие

разные явления как фазовые изменения сплавов и проводимость полупроводников подчиняются квантовой теории. Новые квантово-механические модели разрабатываются для растущего круга сверхпроводников, магнитов, мультиферроиков и топологических изоляторов.

Также хорошо дела обстоят и за пределами земной физики. Общая теория относительности обладает замечательной историей: теория была создана в основном одним человеком, который руководствовался концептуальными, отчасти поистине философскими соображениями. Тем не менее, теория с экспериментальной точностью подтверждается для всех видов астрономических ситуаций. Эти ситуации варьируются от слабых гравитационных полей, возникающих в Солнечной системе, где теория дает знаменитое объяснение незначительной прецессии перигелия Меркурия (43 угловых секунд в столетие), что было необъяснимо в теории Ньютона, до полей в 10 000 раз сильнее для удаленных двойных пульсаров, которые за последние 30 лет дали нам убедительные доказательства явления (гравитационного излучения), предсказанного общей теорией относительности и которое долго искали.

Но общая теория относительности - это не единственная история успеха в описании современной физики внеземных явлений. Квантовая теория также чрезвычайно успешна в применении к астрономии. Очевидный пример - использование ядерной физики для развития очень точной и подробной теории строения и эволюции звезд.

В действительности, во всем этом есть более глубокий смысл, выходящий за рамки успехов теории относительности и квантовой теории. Мы склонны привыкать к различным проявлениям единства в природе, которые обнаруживает наука, забывая насколько эти проявления относительно случайны и удивительны. Конечно, это тенденция не только нашей эпохи. Например, физика девятнадцатого века подтвердила, что закон тяготения Ньютона применяется за пределами Солнечной системы, обнаружив в звездах земные элементы (благодаря спектроскопии). Эти открытия изначально были удивительными, но вскоре стали само собой разумеющимися и теперь включены в «здоровый смысл» образованного человека. Аналогично и в настоящее время: в последние несколько десятилетий разнообразные успехи физики в очень точном моделировании явлений, которые значительно удалены в пространстве и во времени и/или очень отличаются от наших обычных "лабораторных шкал" (в значениях таких величин, как энергия, температура, давление и т.д.), выявили в природе удивительное единство. В качестве современного конкретного (и буквально захватывающего) примера приведем точность и детальность наших моделей сверхновых, что подтверждается замечательной способностью современных телескопов, благодаря которым мы видим и анализируем отдельные сверхновые, даже в других галактиках.

В некоторых случаях, теоретическое предсказание было первичным и стимулировало экспериментальное подтверждение; иногда, было наоборот. Прошло почти полвека после экспериментального открытия сверхпроводимости, когда для нее была разработана удовлетворительная квантовая теория. Однако предсказание перехода Джозефсона предшествовало его экспериментальной реализации. Долгое

время стремились обнаружить высокотемпературные сверхпроводники, но их замечательное открытие стало довольно неожиданным.

И еще: о самоуспокоенности и, тем более, о триумфе не может быть и речи! Не только физика полна незавершенных дел: это всегда будет верно в любом человеческом исследовании. Мы считаем, что большинство физиков согласились бы с тем, что на горизонте есть облака, которые могут оказаться такой же большой угрозой для развития успеха физики XX века, в частности квантовой физики, как и аномалии, противостоящие классической физике в конце девятнадцатого века. Но физики могут сильно разойтись во мнениях, что собой представляют эти облака, как в широком смысле, так и в деталях.

Полагая, что в 2010 году настало время для более точного определения этих облаков, мы организовали конференцию под названием «Квантовая физика и природа реальности». В § 2 мы описываем, что привело к разработке перечня основных открытых вопросов об основаниях квантовой физики. В § 3 мы обсудим прогресс в этих вопросах; а в § 4 мы возвратимся к более общему обсуждению нынешней ситуации в физике.

## **2. Оксфордская конференция по квантовой физике и природе реальности**

Конференция была посвящена празднованию 80-летия преподобного д-ра Джона Полкингхорна, в знак признания его обширных исследований глубокого смысла квантовой физики, опирающихся на его выдающуюся карьеру в математической квантовой теории. Среди участников присутствовали примерно в равных пропорциях: экспериментаторы, теоретики и философы физики. Конференция была тщательно спланирована так, чтобы сформулировать список вопросов, объединяющий мудрость всех трех дисциплин в форме, которая одновременно была бы и глобальной и поддавалась бы изучению. Этот список будет называться *Оксфордские Вопросы*.

Вставка 1. Оксфордские вопросы.

(1) Время, необратимость, энтропия и информация

- (а) Фундаментальна ли необратимость для описания классического мира?
- (б) Как необратимость участвует в квантовом измерении?
- (с) Что мы можем узнать о квантовой физике, используя понятие информации?

(2) Квантово-классические отношения

- (а) Возникает ли классический мир из квантового, и если да, то какие концепции нужны для описания этого возникновения?
- (б) Как нам следует понимать переход от наблюдения к информации о том, что действительно происходит?

- (с) Как одномировая реалистическая интерпретация квантовой теории может быть совместима с нелокальностью и специальной теорией относительности?

(3) Эксперименты, исследующие основы квантовой физики

- (а) Какие эксперименты могут исследовать макроскопические суперпозиции, в том числе проверку неравенства Леггета-Гарга?
- (б) Какие эксперименты необходимы для больших сложных систем, в том числе для технологических и биологических?
- (с) Как можно экспериментально наблюдать процесс коллапса волновой функции?

(4) Квантовая физика среди теорий

- (а) Что нового можно получить от категориально-теоретического, информационного, геометрического и практического подходов к формулировке квантовой теории?
- (б) Какие существуют эффективные эвристические правила для переосмысления квантовой теории?
- (с) Как квантовая физика согласуется с пространством-временем и массой-энергией?

(5) Взаимодействие с вопросами философии

- (а) Как различные аспекты понятия реальности влияют на нашу оценку различных интерпретаций квантовой теории?
- (б) Как разные понятия вероятности проявляются в интерпретации квантовой теории?

Со всех трех точек зрения - экспериментальной, теоретической и философской - основания квантовой физики это процветающая, живая и во многом противоречивая область исследований. Во всем мире, множество активных групп исследователей занимаются изучением природы квантовой теории и природы реальности, которая описывается квантовой теорией. Эта работа, в равной и в значительной степени, синергически опирается на экспертизу этих трех сообществ. Таким образом, организуя конференцию, мы были заинтересованы пригласить широкий круг докладчиков из различных областей. Но мы также хотели избежать пережевывания различных аспектов текущей ситуации в дебатах об основаниях квантовой физики. Вместо этого мы стремились определить (достаточно придирчиво) набор центральных открытых проблем о природе квантовой реальности, чтобы стимулировать и направить будущие исследования и гранты. Для этого, мы

- (i) пригласили участников (в том числе экспериментаторов, теоретиков и философов), чтобы написать короткий документ, который был распространен заранее;

- (ii) попросили докладчиков не вдаваться в детали их последних исследований и сделать очень короткие сообщения; и
- (iii) попросили докладчиков во время дискуссий и кофе-брейков встретиться с нами, чтобы помочь сформулировать открытые проблемы, которые мы совместно в конце конференции утвердили бы как *Оксфордские вопросы* (см. вставку 1).

### 3. Вопросы в игре

Для всех трех сообществ, изучающих основания квантовой механики - экспериментаторов, теоретиков и философов - последние 20 лет, или около того, были особенно плодотворными благодаря развитию квантовой информатики (включающей квантовые вычисления и квантовую криптографию). Все это стимулировало и стимулируется выдающимся экспериментальным прогрессом во многих областях физики: в оптике, захваченных ионах и атомных решетках, в трех направлениях изучения сверхпроводников (а именно фазы, потока и куперовской пары в коробке), в атомных и электронных спинах в молекулах, полупроводниках и алмазах.

Другой основной темой для всех трех сообществ на протяжении последних 20 лет была декогеренция: крайне быстрый и всеобщий процесс, при котором информация о квантовой системе распространяется в окружающую среду, так что теряется возможность для квантовой интерференции. Взаимодействие между системой и окружающей средой, как правило, таково, что система переходит в несобственную смесь, матрица плотности которой почти диагональная; например, положение центра масс, которое мы интуитивно хотели бы определить количественно.

Далее следует краткое общее описание деятельности для каждого из трех сообществ за последние десятилетия.

#### (a) Теория

Начиная с момента создания квантовой теории, теоретики последовательно углубляли наше понимание ее концептуальной и математической структуры. Если ограничиться фундаментальными исследованиями с 1960 года, любой список достижений, безусловно, должен включать в себя:

- (i) открытие различных неравенств Белла, теоремы Белла-Кохена-Спекера, неравенств Леггетта-Гарга;
- (ii) глубокий анализ квантования, соотношений неопределенностей, структуры выпуклого множества пространства квантовых состояний, положительных операторо-значных мер (известных также как операторная квантовая физика);
- (iii) разработка альтернативных квантовых теорий, например, динамических моделей редукции таких авторов, как Жирарди, Перла, Пенроуза и Адлера, отличия которых от общепринятой квантовой теории могут быть в обозримом будущем подвергнуты экспериментальной проверке;

- (iv) одновременно с квантовой теории информации возникновение: анализа, использующего идеи из таких разных областей, как теория информации, теория сложности (применительно к связи, вычислениям и криптографии) и теория категорий.

## **(б) Эксперимент**

Экспериментаторы в последние 30 лет, или около того, реализовали в лабораториях множество мысленных экспериментов с одиночными квантовыми системами, которые были впервые предложены отцами-создателями квантовой теории. Эти эксперименты, вместе со многими другими основополагающими экспериментами, например, по многофотонной запутанности, или те, которые проверили неравенства Белла, Белла-Кохена-Спекера или Леггетта, послужили для того, чтобы сделать проблемы интерпретации теории более отчетливыми [2]. Более того, с возникновением квантовой теории информации:

- (i) неравенство Белла было экспериментально нарушено в ряде случаев [3], таким образом, экспериментально продемонстрировав запутанность и показав, что квантовая механика не является неполной в том смысле, о котором говорил Эйнштейн и др. [4] в 1935 году. Были проведены различные эксперименты с отложенным выбором, последовательно исключаящие любое примирение принципа дополнительности Бора с концепцией Эйнштейна о локальности в физической реальности [5]. Эксперименты были расширены для увеличивающейся степени сложности для случаев многих частиц [6].
- (ii) Квантовая интерференция была продемонстрирована в дифракционных экспериментах с молекулами все большего размера, недавно с молекулами, содержащими до 430 атомов [7]. Это еще не достаточно много, чтобы проверить непрерывные модели спонтанной локализации, но это показывает, что до такого масштаба не найдено никаких отклонений от предсказаний квантовой теории.
- (iii) неравенство Леггетта-Гарга было протестировано для различных фотонных, сверхпроводящих и спиновых приложений. Некоторые из них требуют слабых измерений или предположения о стационарности, при этом возможно нарушать неравенство с правдоподобно отрицательным результатом измерений, с учётом возможной неопределенности из-за несовершенства инициализации [8]. Тест был расширен до высокоразмерного гильбертова пространства, с проективными измерениями, которые никогда не обнаруживаются в протоколе [9].
- (iv) теорема Кохена-Спекера была непосредственно проверена в эксперименте с однофотонными кутритами, чтобы показать, что никакая не-контекстуальная теория не может существовать [10]. Квантовая телепортация была продемонстрирована на расстоянии более 143 км [11]. При этом используется запутанность и демонстрируется, как методы, необходимые для изучения оснований квантовой теории и для создания квантовых технологий в значительной степени совпадают. Возможно, это и не удивительно: для этих

очень разных целей степень "квантовости" требует, чтобы ее экспериментально расширили.

### **(с) Философия**

Философия квантовой физики достигла совершеннолетия благодаря росту фундаментальных исследований начиная с 1960 года. Естественно, что она сосредоточена на «парадоксах» нелокальности и измерения. Помимо переоценки и углубления некоторых существующих интерпретаций, в частности Копенгагенской и Эвереттовской, с концептуальной точки зрения проведена оценка: неортодоксальных теорий, таких как теория волны-пилота и динамических моделей редукции, а также различных событий в квантовой теории информации.

- (i) За последнее десятилетие был достигнут прогресс в сдерживании интерпретаций квантовой теории со скрытыми параметрами, т.е. интерпретаций, которые постулируют физические состояния, лежащие в основе квантовых состояний. Такие пси-эпистемологические теории направлены на объяснение случайности в результатах измерений с точки зрения лежащих в их основе статистических распределений этих постулированных физических состояний. В то время как пси-онтическая теория позволяет каждому физическому состоянию соответствовать только одному квантовому состоянию. В концепции макрореализма Леггетта-Гарга различие может быть сделано между измерениями, которые не разрушают квантовое состояние, и измерениями, которые не влияют на физическое состояние. Пси-эпистемологические модели становятся предметом растущих ограничений. Было высказано предположение, что при определенных условиях пси-эпистемологические модели могут быть исключены или ограничены [12].
- (ii) Отмечен прогресс в разработке и оценке Эвереттовской интерпретации квантовой механики. В частности, эвереттовцы сконцентрировали свое внимание на: (а) декогеренции, чтобы описать "расщепление миров" в качестве действительного процесса, который не противоречит теории относительности; (б) теории принятия решений, чтобы оправдать применение идеи вероятности, более того, правила Борна, в мультивселенной, в которой «все происходит» [13]. Что касается оценки Эвереттовской интерпретации, в том числе (а) и (б), описание существующего состояния дел можно найти в недавнем сборнике по итогам другой Оксфордской конференции [14].
- (iii) Идея о том, что квантовая физика включает в себя новые логические и алгебраические структуры восходит к 1930 году, особенно к статье 1936 года Биркгофа и фон Неймана «Логика квантовой механики» [15]. Но в последние годы были обнаружены и изучены новые структуры, часто с использованием теории категорий и ее подмножества - теории топосов (которую математики разработали только после 1950). Одно из главных направлений исследований использовало теорию категорий, чтобы обеспечить новый графический формализм для квантовой физики, особенно связанный с протоколами квантовой информации, такими как телепортация. Эти области теперь

достаточно развиты, чтобы обеспечить хорошее сравнение с предложением Биркгофа и фон Неймана [16]. Другое важное развитие состоит в использовании топосов для того, чтобы дать еще одну - третью квази-логическую формулировку квантовой теории [17].

#### 4. Физика сегодня и завтра

Мы закончим, сформулировав *Оксфордские Вопросы* в контексте обсуждения, начатого в §1. Во-первых, мы будем соотносить их с двумя облаками (§4a). Во-вторых, (в §4b) мы примем еще более широкий взгляд, сравнив нынешнюю ситуацию в физике с научной революцией шестнадцатого века.

##### (a) Два облака на горизонте

Наше первое облако это проблема квантового измерения, то есть трудности полного объяснения, как с точки зрения квантовой теории появляется классический мир, т.е. мир, который так точно описывается классической физикой с ее определенными значениями—мира, свободного от суперпозиции и запутанности.

Это облако становится лучше определяемым с помощью нескольких *Оксфордских Вопросов*. Это выглядит следующим образом:

- вопрос, является ли "коллапс волнового пакета" физическим процессом, поддерживается несколькими *Оксфордскими Вопросами*: в частности, 1b, 2a, 2в, 3a, 3в и 5a;
- вопрос, могут ли идеи теории информации прояснить нашу концепцию реальности, поддерживается вопросами: 1c, 4a, 5a и 5б;
- рассмотрение неортодоксальных альтернатив квантовой теории поддерживается вопросами: 1a, 2a, 3a и 4b.

Наше второе облако - это поиск квантовой теории гравитации. При обсуждении оснований квантовой теории это, конечно, пресловутый слон в комнате (с одинаково пресловутым котом, представленным первым облаком!). Он сформулировал Оксфордским Вопросом 4c: как квантовая физика согласуется с пространством-временем и массой-энергией?

Общая теория относительности и квантовая теория пока еще не примирились. В то время как мы разработали успешные квантовые теории других фундаментальных сил природы (электромагнитных, слабых и сильных), у нас нет такой же успешной квантовой теории гравитации. Соответственно, поиск такого примирения и возможно объединения, стал глобальной целью теоретической физики.

Существуют концептуальные причины, почему эта цель так неуловима. Противоположные концептуальные структуры из «частных» теорий и продолжающиеся споры об их интерпретации вызывают конфликт между основными подходами к квантовой гравитации. В то время как теория относительности основывается на принципах, которые являются разумными с



физической точки зрения, таких как принципы относительности и эквивалентности, остается открытым вопрос о том, может ли квантовая теория быть основана на аналогичных принципах. В частности, наша первая туча - проблема квантового измерения, или "коллапса волнового пакета" - появляется здесь в космологическом контексте. Как квантовые флуктуации в ранней Вселенной, считающиеся источником гравитационных возмущений и которые породили крупномасштабные структуры, стали классическими?

Но мы хотим подчеркнуть здесь еще одну причину, а именно: острую нехватку экспериментальных данных! Есть общие основания полагать, что данные, характеризующие квантовую гравитацию, возникают только для энергий столь высоких (соответственно, для расстояний и времени столь коротких), что они полностью недоступны для нас. Чтобы прояснить это в терминах длины, напомним, что значение Планковской длины, которая, как мы ожидаем, характерна для квантовой гравитации, составляет около  $10^{-35}$  м. Это действительно очень мало: диаметры атомов, ядер, протонов и кварков составляет соответственно около  $10^{-10}$ ,  $10^{-14}$ ,  $10^{-15}$  и  $10^{-18}$  м. Таким образом, Планковская длина на столько порядков меньше (верхнего предела) диаметра кварка, на сколько этот диаметр меньше нашего известного сантиметрового масштаба!

### **(б) На полпути через лес**

Для завершения «картины» текущего состояния физики, мы хотели бы поддержать аналогию Ровелли [18]. Он полагает, что наша нынешняя ситуация похожа на ситуацию философов механики, таких, как Галилей и Кеплер в начале XVII века. Так же как они боролись с подсказками, полученных благодаря данным Коперника и Браге, на пути к синтезу, позднее данному Ньютоном, так и мы находимся «на полпути через лес». Конечно, мы должны быть осторожны в слишком грубом упрощении периодизации научной революции и, тем более, в поспешных аналогиях между различными историческими ситуациями. Тем не менее, с точки зрения последующего синтеза бросается в глаза «смешанный багаж» доктрин таких фигур, как Галилей и Кеплер. При всей своей гениальности, они предстают перед нами (задним числом наделенными преимуществом анахронизма) как «переходные фигуры». Можно предположить, что какому-то будущему читателю физики XX века, просвещенному будущим синтезом общей теории относительности и квантовой теории, усилия последних десятилетий в квантовой гравитации покажутся странными: достойными и разумными с точки зрения авторов (будем надеяться), но мешаниной прозрений и заблуждений с точки зрения читателя!

### **Ссылки**

1. Einstein A. 1905 On the electrodynamics of moving bodies. Ann. Phys. 17, 891–921.
2. Pan J-W, Zeilinger A, Aukowski M. 2012 Multiphoton entanglement and interferometry. Rev. Mod. Phys. 84, 777–838. (doi:10.1103/RevModPhys.84.777)

3. Aspect A. 1999 Bell's inequality test: more ideal than ever. *Nature* 398, 189–190. (doi:10.1038/18296)
4. Einstein A, Podolsky B, Rosen N. 1935 Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* 47, 777–780. (doi:10.1103/PhysRev.47.777)
5. Jacques V, Wu E, Grosshans F, Treussart F, Grangier P, Aspect A, Roch J-F. 2007 Experimental realization of Wheeler's delayed-choice Gedanken experiment. *Science* 315, 966–968. (doi:10.1126/science.1136303)
6. Pan JW, Bouwmeester D, Daniell M, Weinfurter H, Zeilinger A. 2000 Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger–Horne–Zeilinger entanglement. *Nature* 403, 515–519. (doi:10.1038/35000514)
7. Gerlich S, Eibenberger S, Tomandl M, Nimmrichter S, Hornberger K, Fagan PJ, Tuxen J, Mayor M, Arndt M. 2011 Quantum interference of large organic molecules. *Nat. Commun.* 2, 263. (doi:10.1038/ncomms1263)
8. Knee GC et al. 2012 Violation of a Leggett–Garg inequality with ideal non-invasive measurements. *Nat. Commun.* 3, 606. (doi:10.1038/ncomms1614)
9. George RE et al. 2013 Opening up the three quantum boxes causes classically undetectable wavefunction collapse. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 110, 3777–3781. (doi:10.1073/pnas.1208374110)
10. Lapkiewicz R, Li P, Schaeff C, Langford NK, Ramelow S, Wiesniak M, Zeilinger A. 2011 Experimental non-classicality of an indivisible quantum system. *Nature* 474, 490–493. (doi:10.1038/nature10119)
11. Ma X-S et al. 2012 Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward. *Nature* 489, 269–273. (doi:10.1038/nature11472)
12. Pusey MF, Barrett J, Rudolph T. 2012 On the reality of the quantum state. *Nat. Phys.* 8, 474–477. (doi:10.1038/nphys2309)
13. Wallace D. 2012 *The emergent universe*. Oxford, UK: Oxford University Press
14. Saunders SW, Barrett J, Kent A, Wallace D (eds) 2011 *Many worlds? Everett, quantum theory and reality*. Oxford, UK: Oxford University Press.
15. Birkhoff G, von Neumann J. 1936 The logic of quantum mechanics. *Ann. Math.* 37, 823–843.
16. Coecke B. 2013 The logic of quantum mechanics: take II. In *Logic and algebraic structures in quantum computing and information* (eds J Chubb, A Eskandarian, V Harizanov). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
17. Isham C. 2011 Topos methods in the foundations of physics. In *Deep beauty: understanding the quantum world through mathematical innovation* (ed. H Halvorson), pp. 187–206. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
18. Rovelli C. 1997 Halfway through the woods: contemporary research on space and time. In *The cosmos of science: essays of exploration* (eds J Earman, J Norton), pp. 180–223. Pittsburgh, PA: University of Pittsburgh Press.