

Большая наука и Большой адронный коллайдер

Джан Франческо Джудиче

Отдел теоретической физики, ЦЕРН, Женева, Швейцария
(перевод с английского М.И.Потапова)

Аннотация

Большой адронный коллайдер (LHC) – работающий сейчас в ЦЕРН ускоритель частиц – является, пожалуй, самым сложным и амбициозным научным проектом из когда-либо осуществлённых человечеством. При одном только взгляде на размах этого предприятия с точки зрения использованных финансовых и человеческих ресурсов возникает вполне естественный вопрос, должно ли общество оказывать поддержку столь затратным программам фундаментальных исследований. Изучению этого вопроса и посвящена данная работа. Вначале даётся обзор процессов, приведших к возникновению Большой науки, и роли крупных проектов в развитии науки и техники. Далее проводится сравнение методологий Малой науки и Большой науки с упором на их взаимосвязь. В заключение даётся оценка стоимости проектов Большой науки и приводятся некоторые общие моменты, характеризующие их полезность для общества.

(Статья будет опубликована в журнале *Physics in Perspective*, arXiv:1106.2443)

1. Введение

Работа Большого адронного коллайдера (LHC) [1] – ускорителя частиц, созданного в Европейской лаборатории ЦЕРН под Женевой (Швейцария), – уже дала замечательные результаты. 30 марта 2010 года впервые произошло столкновение протонных пучков при рекордно высокой энергии 3,5 ТэВ (что эквивалентно ускорению каждого протона напряжением 3500 миллиардов вольт). Затем с впечатляющей скоростью последовали и другие достижения, превосходящие самые оптимистичные ожидания. К концу октября 2010г. общее число протонных соударений (по-научному «полная светимость») определялось величиной почти 50 обратных пикобарн, что эквивалентно 5000 миллиардов столкновений протонов. Перевод LHC в режим, в котором сталкиваются пучки ионов свинца, а не протоны, прошёл быстро и гладко. Это позволило в течение четырёх недель собрать данные, из которых была получена новая информация о поведении материи при высокой плотности. Новый этап работы со встречными пучками протонов высокой интенсивности начался в

марте 2011 года, а 22 апреля этого же года на LHC был установлен новый рекорд интенсивности (прежний принадлежал Теватрону в Фермилабе, Батавия, Иллинойс) – $4,6 \times 10^{32}$ на квадратный сантиметр в секунду (что эквивалентно примерно 50 миллионам столкновений в секунду). Через несколько недель эта величина почти удвоилась. Детекторы LHC работали потрясающе, регистрируя с поразительной точностью и эффективностью горы данных из происходящих столкновений. В настоящее время работы на LHC вступили в стадию прямого исследования никогда прежде не изучавшихся явлений. Есть все основания полагать, что грядут новые открытия.

Накануне получения результатов из области новой физики я обращаюсь к вопросу, который хоть и не связан с ближайшими задачами исследований на LHC, но обязательно касается любого крупного научного проекта, требующего огромных финансовых, технических и интеллектуальных вложений. Речь идёт о феномене Большой науки [2]. Громадность, сложность и глубина задач проекта LHC вызывают восхищение и благоговейный трепет у большинства людей, узнавших о нём. Тем не менее, как вне научного сообщества, так и в нём самом время от времени возникают сомнения, опасения и даже страхи по поводу чего-либо, связанного с Большой наукой. Таким образом, вопрос стоит так: «Должно ли общество оказывать поддержку крупным научно-исследовательским проектам в области фундаментальных наук?»

2. Возникновение Большой науки

Началом Большой науки часто считают Манхэттенский проект, установивший новые и более тесные отношения между наукой и обществом и создавший новую методику научных исследований. Если оставить в стороне моральные соображения, нельзя отрицать, что Манхэттенский проект определил *modus operandi* (способ действия) Большой науки, некой торговой марки со следующими чёткими характеристиками. В проект вовлечено большое число учёных, его цели чётко определены, хотя он и требует выхода за пределы известного в науке и технике. На осуществление проекта выделены большие средства, но поставленные цели должны быть достигнуты в установленный период времени. Учёные должны приспособиться работать в междисциплинарных группах, которые, как в случае Манхэттенского проекта, включали физиков-теоретиков и физиков-экспериментаторов вперемешку с инженерами и математиками. Наконец, проект находится под прямым контролем административных органов, не являющихся частью научного окружения проекта.

В действительности Манхэттенский проект был лишь эпизодом, ускорившим неизбежный эволюционный процесс. Задолго до второй мировой войны быстрый научно-технический прогресс вытолкнул науку за академические границы. С одной стороны, наука всё больше оказывала серьёзное влияние на общество, а с другой стороны, наука требовала для своего финансирования таких средств, какие можно было найти только за пределами ограниченного мира университетов и научно-исследовательских учреждений. Создание всё более совершенных и дорогостоящих приборов становилось решающим фактором прогресса во многих областях науки.

В качестве примера можно привести астрономию звёзд, которая требовала для своих исследований всё более мощные телескопы. Неудержимое стремление к созданию самого передового оборудования привело к строительству легендарного 2,54-метрового телескопа Хукера в Маунт-Вильсоновской обсерватории, закончившегося в 1917. С помощью этого телескопа Эдвин Хаббл обнаружил, что туманность Андромеды находится гораздо дальше от нас, чем граница Млечного пути, и, таким образом, доказал, что наша галактика – лишь одна из множества галактик, разбросанных мерцающими точками по ночному небу. Это открытие навсегда изменило наше представление о вселенной. С помощью того же инструмента Хаббл сделал и свои знаменитые наблюдения рецессии галактики, тем самым доказав, что наша вселенная расширяется. Не будь этого планомерного движения, которое привело к созданию 2,54-метрового телескопа Хукера, не были бы возможны и эти революционные открытия. Хотя в астрономии применялись мощные и дорогие оптические телескопы, наблюдения на них проводили лишь небольшие группы учёных и потому они не имели всех характерных черт Большой науки. Всё изменилось позже, с возникновением радиоастрономии.

Ещё один пример – погоня за всё более низкими температурами, что с самого начала требовало всё более современного и сложного оборудования. Лидерами в э этой гонке были Джеймс Дьюар, который проводил свои эксперименты в Королевском институте в Лондоне, и Хейке Камерлинг-Оннес из Лейденского университета. Камерлинг-Оннес, великий экспериментатор и бесспорный прагматик по натуре, организовал свою лабораторию почти как производственное предприятие (в шутку называвшееся «пивоварней») и часть финансирования получал от холодильной промышленности. Организаторские способности этого учёного немало способствовали его успеху. 10 июля 1908 года он сжижил гелий – последний из элементов, известный на то время только в газообразном состоянии. Для получения небольшого объёма (600 мл) жидкого гелия ему пришлось довести температуру до рекордно низкого значения -270

градусов Цельсия, или 4 градуса выше абсолютного нуля. Этот результат проложил путь к последующему открытию сверхтекучести. Тем временем, в 1911 году Камерлинг-Оннес использовал жидкий гелий для охлаждения ртути и открыл поразительное явление сверхпроводимости, когда некоторые вещества полностью теряли электрическое сопротивление при температуре ниже чётко определённого критического значения.

Замечу по ходу дела, что физические явления, связанные со сверхпроводимостью и сверхтекучестью играют исключительно важную роль в работе ЛНС. В подземном туннеле этого ускорителя размещены 1200 тонн сверхпроводящих кабелей, по которым передаются токи крайне высокой интенсивности (до 12 800 ампер), создающие магнитные поля для управления движением протонных пучков. На всём протяжении туннеля (27 км) установлены дипольные магниты, охлаждаемые до температуры -271 градус Цельсия (1,9 градуса выше абсолютного нуля) с помощью сверхтекучего гелия. Без знаний о сверхпроводимости и сверхтекучести о такой установке как ЛНС нечего было бы и думать.

Третий пример – это поиск возможностей исследовать внутреннюю структуру атома, что потребовало ещё более дорогого оборудования и инструментов. В частности, после открытия радия Марией и Пьером Кюри в 1898 году его постоянно растущая стоимость резко ограничивала число университетов и лабораторий, которые могли позволить себе проводить исследования по структуре атома и ядра. Радий обычно использовался в качестве источника альфа-частиц для зондирования атома, но его стоимость достигала 160 000 долларов за грамм, делая его самым дорогим веществом в мире.

Как следствие всё увеличивающихся затрат возрастало и значение того, насколько учёные способны к административно-хозяйственной деятельности. В начале XX века средства на финансирование научных исследований поступали от промышленников, филантропов и других благотворителей, что было особенно характерно для англо-саксонских стран. Позже, когда возникла необходимость обращаться для таких целей и к общественному сектору, учёные оказались вынуждены информировать о своих исследованиях и полученных результатах широкую общественность, которую всё это нередко приводило в восторг. Бесспорным кумиром в культурной сфере был Альберт Эйнштейн, но даже и куда менее ослепительный Поль Дирак мог привлекать немалые толпы. Когда он читал лекцию на поле для крикета в индийском городе Барода, послушать его пришли тысячи людей, больше, чем мог вместить стадион, и для тех, кто не смог туда попасть, пришлось использовать киноэкран [3]. Гораздо более сложным делом оказалось найти поддержку у политиков и государственных

чиновников. В области исследования атомов и атомных ядер немало преуспели в обеспечении финансирования, как из частных, так и из государственных источников, Эрнест Резерфорд в Великобритании и Эрнест Орландо Лоуренс в США.

Однако первая мировая война привела к установлению ещё одного вида связи между наукой и государством – военное использование научных достижений. Химия играла ведущую роль в разработке и производстве химического оружия. В августе 1914 года французская армия впервые применила слезоточивый газ, а в боях у Ипра в апреле 1915 германская армия использовала отравляющие газы, включавшие хлор, фосген и иприт (названный по имени бельгийского город Ипра, но больше известный как горчичный газ). Первой реакцией Антанты было осуждение действий Германии, но потом союзники сами приступили к разработке программ исследований по созданию химического оружия, которое и было впервые применено в конце 1915 года. По оценкам, в результате боевых действий с применением химического оружия более миллиона военнослужащих с обеих сторон получили серьёзные, часто неизлечимые поражения, приведшие в конечном итоге к гибели 90 000 человек (из них 56 000 русские). Вкладом физики в войну стала беспроводная связь – новое средство управления действиями войск на поле боя и приборы для обнаружения подводных лодок акустическими методами – предшественники сонаров. Даже чистая математика не смогла остаться в стороне, став своего рода оружием в руках военных шифровальщиков. Более того, многие учёные и инженеры принимали участие в работе разного рода военных комиссий, оказываясь за одним столом с военными, политиками и промышленниками. Такое взаимодействие подготовило почву для новой роли, которую наука стала играть в обществе.

3. Новая научно-общественная среда

Во время второй мировой войны наука использовалась в двух серьёзных проектах – разработке радара, куда США вложили 3 миллиарда долларов, и Манхэттенском проекте [4], стоимость которого составила 2 миллиарда долларов. Манхэттенский проект – ужасающая и сложнейшая научная задача, рывок, подпитываемый страхом того, что Германия опередит союзников в создании атомной бомбы, – стал одним из решающих этапов в эволюции Большой науки, поскольку именно там появилась особая методика, весьма необычная по меркам традиционных научных исследований того времени.

По окончании всех боевых действий США очнулись от кошмара войны с непоколебимой верой в науку. Физики, на которых смотрели как на основную движущую силу в создании военного превосходства, пользовались особым вниманием, а физика частиц, на которую смотрели как на наследницу науки, приведшей к появлению Манхэттенского проекта, стала одним из крупнейших получателей государственных финансовых средств. Холодная война способствовала укреплению этого привилегированного положения, но многие физики, работавшие в этой области, считали такое расположение со стороны военных кругов наследством этически неудобным, хотя и выгодным. Физики, которые во время войны стали «учёными тем более успешными, чем ниже их моральные принципы» [5], теперь стремились совершить своего рода искупление, работая над проблемами мирного использования ядерной энергии или изучая тайны природы на субъядерном уровне.

Эта благоприятная послевоенная обстановка повлияла на всю науку в целом. В США наблюдался бурный рост научных проектов, финансируемых из государственных фондов. Многие американские экономисты, не без влияния теорий австро-американского экономиста и политолога Джозефа Шумпетера, считали научные исследования и технические инновации ключевыми факторами постоянного экономического подъёма, ведущего к увеличению рабочих мест и росту благосостояния, что подразумевало, как следствие, возможность решения социальных проблем малообеспеченных слоёв населения и принятие мер, предупреждающих возникновение политической нестабильности. Фундаментальная наука и научные исследования стали основными звеньями этой логической цепочки.

Вэнивар Буш особо выделил роль этих звеньев в своём исключительно важном докладе «Наука. Беспредельное движение вперёд», который он представил Президенту Гарри Трумэну 5 июля 1945 года: «Самый простой и эффективный способ, который правительство может использовать для укрепления прикладных исследований в промышленности, – это поддержка фундаментальных исследований и развитие научного таланта» [6]. Таким образом, Вэнивар Буш определил фундаментальные исследования как решающий фактор прогресса, заявив, что техника является неизбежным следствием продвижений в науке, а значит, правительство должно поддерживать и развивать самые передовые научно-исследовательские учреждения, не думая много о технических новациях. По мнению В.Буша, «фундаментальные исследования прокладывают путь техническому прогрессу» [7]. В этом докладе он также предложил создать то, что позже, в 1950 году, станет называться Национальным научным фондом.

Помощник Президента экономист Джон Стилмен высказал аналогичную точку зрения в отчете от 27 августа 1947 года о деятельности Президентского комитета по научным исследованиям, председателем которого он был: «Только исследования и ещё раз исследования [в области фундаментальных наук] могут дать нам возможность обеспечить базу для расширения экономики и постоянный высокий уровень занятости» [8]. Ответом Президента Трумэна стало обнародование 13 сентября 1948 года основных пунктов его программы научного развития: «Во-первых, необходимо удвоить общий объём частных и государственных средств, выделяемых на науку... Во-вторых, следует уделять больше внимания фундаментальным исследованиям и медицинским исследованиям. В-третьих, необходимо создать Национальный научный фонд. В-четвёртых, надо увеличить помощь университетам, как в плане студенческих стипендий, так и в плане исследовательского оборудования. В-пятых, необходимо лучше финансировать и координировать работу научно-исследовательских учреждений, находящихся в ведении федерального правительства» [9].

В этот период беспрецедентного размаха американской научно-исследовательской деятельности произошло событие, которое возбудило внимание общественности и подорвало убеждённость правительства в полном техническом превосходстве США. 12 апреля 1961 года человек впервые полетел в космос, и этим человеком стал Ю.А. Гагарин. США отреагировали немедленно. 25 мая 1961 года, обращаясь к Конгрессу США и всей стране, Президент Джон Кеннеди произнёс знаменитые слова: «Я считаю, что наша страна должна приложить все усилия для достижения следующей цели: до окончания текущего десятилетия высадить человека на Луну и благополучно вернуть его на Землю». Общественное мнение было безоговорочно на его стороне и Конгресс, нимало не колеблясь, почти единогласно одобрил этот грандиозный проект, затраты на который составляли по предварительным оценкам от 20 до 40 миллиардов долларов. Не входя в рассуждения по поводу научной ценности полётов по программе «Аполлон», укажем, что в них выразился характерный *modus operandi* Большой науки, хотя и в контексте очень не похожем на Манхэттенский проект. Более того, необходимо было как можно скорее закрыть якобы имеющуюся «ракетную брешь» (предполагаемое техническое отставание США от СССР). Для этого использовалась не только космическая гонка, но и фундаментальные исследования и образование, где, например, была расширена школьная программа по точным наукам и математике.

В этой атмосфере общей эйфории стали высказываться некоторые сомнения по поводу крупных научных проектов, финансируемых из государственных фондов, и звучали они не только в обществе, но и в научных кругах. Самые авторитетные голоса принадлежали физикам Мерле А. Туве, Элвину М. Вайнбергу, Филипу В. Андерсону и астрофизику Фреду Хойлу. В 1961 году Э. Вайнберг¹, который с 1955 года занимал пост директора Окриджской национальной лаборатории, поставившей обогащённый уран для Манхэттенского проекта, опубликовал весьма значимое эссе о влиянии крупных научных проектов, где он и ввёл термин «Большая наука» [11]. Он задался вопросом, не разрушает ли Большая наука науку вообще, и выделил несколько моментов, заслуживающих и сегодня внимательного рассмотрения. «Прежде всего, поскольку Большая наука нуждается в серьёзной поддержке общества, для своего успешного развития она ставит на рекламу. Это неизбежно ведёт к приданию её деятельности некоего газетного духа, что в корне противоречит научной методологии... Научной нормой становится не познание, а эффективность» [12]. Тогда Вайнберг имел в виду космическую программу, сегодня его слова заставляют вспомнить некоторые неудачные сообщения о LHC, поступающие время от времени из ЦЕРН.

Грандиозность проектов Большой науки требует контроля со стороны административных органов, что, по мнению Вайнберга, означает отказ от истинных научных мотивов: «К сожалению, наука, ведомая чиновниками, и воспринимается по-чиновничьи, а такая наука быстро становится поверхностной, если не вообще бессмысленной» [13]. Настоящую опасность представляет чрезмерная бюрократизация крупных научных проектов. Государственные органы, справедливо обязанные контролировать расход средств на крупные проекты, могут принимать решения на основании исключительно финансовых соображений, игнорируя при этом научно-технические аспекты. Чиновники привыкли работать совсем иначе, чем учёные, и могут даже непреднамеренно уничтожить ту особую деятельную энергию, которая стремительно развивается в научной среде.

1 Не надо путать Элвина Вайнберга и физика-теоретика Стивена Вайнберга, который как-то рассказывал следующую историю: «В 1961 году, когда я впервые приехал в Гарвард, я оказался на обеде в преподавательском клубе рядом с ныне покойным Джоном Ван Флеком... Ван Флек спросил меня, не имею ли я отношения к «тому» Вайнбергу. Меня это несколько задело, но я понял, что он имел в виду. Я в то время был ещё, в общем-то, недалеко продвинувшимся теоретиком, а Элвин был директором Окриджской национальной лаборатории. Я собрал всю свою наглость и ответил, что я и есть «тот» Вайнберг. Не думаю, что Ван Флек был впечатлён» [10].

Через тридцать с лишним лет после написания Вайнбергом этих слов Вольфганг К. Г. Панофски, блестящий физик, который в течение 23 лет, начиная с 1961 г., был директором, а затем почётным директором Стэнфордского центра линейного ускорителя (с 2008 г. Национальная ускорительная лаборатория SLAC – *прим. переводчика*), назвал бюрократизацию главной причиной прекращения строительства сверхпроводящего суперколлайдера (ССК) в октябре 1993 года. «Сам размах предприятия, микроуровень руководства со стороны Министерства энергетики, а также интенсивность и частота сторонних проверок – всё это привело к бюрократизации внутренней культуры в лаборатории. Во имя контроля над расходами не поощрялись технически необходимые изменения и компромиссы в конструкции. Решения по альтернативным техническим решениям переиначивались в угоду «политической приемлемости» и иногда принимались с запозданием или не принимались вообще... В цепочке принятия решений ключевым научным и инженерным работникам отводились места из последних» [14].

В своей вышеупомянутой статье Вайнберг сделал расчёты, которые сегодня вызывают у нас улыбку (а, может, и хмурый настрой). Он экстраполировал темпы роста стоимости научных исследований с конца войны до 1961 года и пришёл к выводу, что в последующие двадцать лет наука финансово уничтожит США. Эта опасность, конечно же, была устранена, но эта его озабоченность ясно показывает нам меру исключительного участия США в финансировании научных исследований в послевоенный период. Обеспокоенность Вайнберга была также предвестником того крушения иллюзий в отношении науки, которое сопровождало социальные преобразования и политические и идеологические движения 60-х и 70-х годов прошлого века. Общество начало осознавать, что техника не только несёт прогресс, но может привести и к социальной несправедливости, и к ущербу для окружающей среды. Философ Герберт Маркузе, оказавший немалое влияние на поколение протестов 1968 г., утверждал, что наука по самой своей природе провоцирует негуманный образ мышления и что техника есть двигатель угнетения. Здесь мы сталкиваемся с типичным примером ограниченности, а именно, неспособности провести чёткое различие между наукой и техникой и соотнести и связать и то, и другое с войной. В то же время, война во Вьетнаме не только вызвала всеобщее недовольство, но и показала пределы возможностей передовой военной техники. Несмотря на новейшее вооружение американской армии, ей успешно противостояла плохо оснащённая, но решительно настроенная армия Северного Вьетнама. Более того, большие расходы государственных средств начали ложиться

бременем на внутренние бюджеты западных стран. Возможности и желания поддерживать крупные научные проекты стали таять.

Падение берлинской стены в ноябре 1989 г. и последующий распад Советского Союза в 1991 г. рассеяли призрак холодной войны, а с ним и актуальность национального престижа как побудительного мотива оказания политической поддержки крупным научным проектам. В 1993 году Конгресс США закрыл ССК – ускоритель, который был способен сталкивать протоны при энергиях в три раза выше, чем это может LHC, и проект которого был утверждён на шесть лет раньше. Есть много причин, которые привели к этому печальному закрытию ускорителя после того, как на его строительство уже было истрачено почти два миллиарда долларов [15], но я отмечу только одну, которая, может, и не является самой главной, но имеет непосредственное отношения к теме нашего обсуждения. Проект ССК был одобрен при администрации Рейгана, в период возобновления государственного финансирования, но тогда же вопросы национальной безопасности начали главенствовать над проблемами науки. В тот период Конгресс одобрил Стратегическую оборонную инициативу («Звёздные войны»), которая тогда оценивалась примерно в 60 миллиардов долларов, и создание космической станции «Фридом». Проект ССК был закрыт при администрации Клинтона после окончания холодной войны и, что более важно, в то время, когда Конгресс был решительно настроен сократить растущий дефицит госбюджета США. Следует заметить, что всего за два дня до голосования по вопросу о закрытия ССК Палата представителей Конгресса США высказалась в поддержку, хотя и большинством всего в один голос, продолжения работ по Международной космической станции (сочетание станции «Фридом» и аналогичных проектов, предложенных российским, европейским и японским космическими агентствами). В то же время стоимость Международной космической станции составляла по оценкам сумму в три раза большую, чем стоимость LHC, и эта стоимость постоянно росла, а научная мотивация её строительства была довольно слабой. Элемент международного участия и предварительные договорённости с зарубежными странами работали, конечно, на Международную космическую станцию.

Закрытие проекта ССК болезненно сказалось на мировом научном сообществе физики частиц. Оно знаменовало собой конец некоей эпохи, но отнюдь не конец крупных проектов в области фундаментальных исследований. Это стало важным шагом в эволюции Большой науки, ярко высветив необходимость в новых характеристиках у крупных научных проектов. Принципиально важными элементами их успеха стали широкое международное сотрудничество и умение не ограничиваться интересами

одной страны. LHC, созданный консорциумом европейских стран-участниц ЦЕРН при существенном участии почти всех основных стран мира, великолепно показал, как достигается такое умение.

4. Большая наука и Малая наука

Привлекательная сторона науки обычно представляется в виде гениальной идеи, рождающейся в тиши бессонной ночи и приобретающей конкретные черты через математические расчёты, сделанные в простом блокноте, – творение отдельной личности, потрясающее самые основы нашего миропонимания. Или мы представляем себе учёного, который в уединении лаборатории готовит и ставит выдающийся эксперимент, открывая новое и совершенно неожиданное явление. На первый взгляд Большая наука являет собой полную противоположность этим представлениям.

В действительности же это необязательно так. Как мы уже видели, развитие самых современных областей науки неотвратимо приводит к необходимости осуществления крупных инициатив и амбициозных проектов. Даже такие области, которые традиционно относили к Малой науке (например, молекулярная биология или климатология), сегодня требуют исследовательских программ с типичными чертами Большой науки (как, например, проект «Человеческий геном» или обработка данных на суперкомпьютерах для изучения климатических изменений). Такие масштабные проекты не обязательно находятся в противоречии с поэтичными и традиционными взглядами на науку, а скорее естественным образом дополняют и обогащают их. Тот и другой метод проведения исследований не противопоставляются, поскольку у них одна и та же научная этика и конечная цель. Они оба необходимы в науке для продвижения за существующие пределы знаний. Это как сравнивать живописное полотно мастера эпохи Возрождения и эпическое строение готического собора. Для развития искусства требуется и то, и другое.

Нравится нам это или нет, но Большая наука является незаменимым инструментом современной науки в целом. В любом из направлений, по которым развивается наука, рано или поздно возникает потребность в больших и дорогостоящих инструментах, организованных предприятиях для достижения конкретных целей, тесном сотрудничестве учёных – специалистов в различных областях. Учёные и финансирующие их организации обязаны с умом использовать такой особый инструмент как Большая наука для осуществления проектов бесспорно выдающихся с научной точки зрения, не нацеленных на какую-либо пропаганду или

демонстрацию национального престижа и не имеющих никакой военной направленности.

Большую науку обычно критикуют за то, что она якобы превращает исследование из метода научных изысканий в промышленный процесс и сводит на нет роль творчества. В действительности же Большая наука – это лишь техническая необходимость, а не отвержение традиционных научных целей, ценностей и побудительных мотивов. Изменились методы научных изысканий, но не принципы и страсти, движущие учёными. Прекрасным примером служит Энрико Ферми. Этот великий итальянский физик испробовал все возможные методы научной работы: индивидуально-мыслительный стиль теоретической физики (его статистика частиц с полуцелым спином и теория бета-распада), спонтанность и энтузиазм занятий Малой наукой (его эксперименты по медленным нейтронам, которые он проводил со своими «ребятами с улицы Панисперна» в пруду с золотыми рыбками в саду физического факультета) и целенаправленная и организованная структура Большой науки (Чикагский котёл и Манхэттенский проект). Успешное осуществление проектов Большой науки тоже требует индивидуального творчества, о чём с достаточной очевидностью свидетельствует ЛНС.

Ещё один аспект критики в адрес Большой науки имеет в основе конфликт двух эпистемологически разных подходов, называемых в зависимости от контекста «интенсивные исследования» и «экстенсивные исследования» [16], или «редукционизм» и «конструкционизм» [17], или «фундаменталистическая» и «генералистическая» физика [18]. То, что в природе царит упорядоченность, по крайней мере, на расстояниях, исследованных к настоящему времени, – это эмпирический факт, а не философское утверждение. На меньших расстояниях возникают более простые элементы. При этом физические законы, управляющие простейшими элементами, дают представление о фундаментальных и универсальных свойствах. Эти физические законы позволяют нам не только понять мир частиц, но и описать крупномасштабную структуру вселенной и воссоздать её историю с самых первых мгновений. Редукционизм ставит своей задачей открывать эти законы, и в основе его лежит человеческая любознательность, жажда познать внутренний механизм природы до мельчайших деталей.

Однако для практического и качественного описания многих природных явлений во всей их сложности часто недостаточно просто знать фундаментальные физические законы. Другими словами, если известно уравнение, это ещё не значит, что можно получить решение, пригодное для описания конкретного явления. Математическое описание появляющихся

новых свойств сложной системы требует использования физических законов совершенно отличных от законов фундаментальной теории. И тут появляется конструкционизм, призванный как раз открывать эти вновь возникающие законы.

Обе программы, редукционистская и конструкционистская, обоснованы с научной точки зрения и интересны с точки зрения интеллектуальной. Само существование этих двух разных подходов демонстрирует богатство и разнообразие палитры науки. Было бы опасно заявлять, что все научные исследования должны идти одним-единственным путём.

Разница между исследованиями в областях редукционистских (физика высоких энергий, космология) и конструкционистских (физика твёрдого тела, астрономия, молекулярная биология) уже не соответствует разнице между наукой Большой и Малой, поскольку в обоих этих секторах научных исследований разработаны крупные проекты. Более того, различие между редукционизмом и конструкционизмом связано, по-видимому, с представлением о конкретной области исследований в конкретный исторический момент, а никак не с основными побудительными мотивами учёных, занятых такими исследованиями. Например, в прошлом ядерная физика считалась наукой редукционистского типа, сегодня же она таковой больше не считается, а в астрономии редукционистские исследования наблюдательной космологии сосуществуют с конструкционистской сущностью. Это, похоже, указывает на то, что таковые различия имеют большее значение для историков науки, чем для самих учёных.

Данный семантический вопрос во многом перестаёт быть отвлечённо-формальным, когда различные секторы научных исследований начинают конкурировать за государственное финансирование. Наиболее часто высказывается опасение, что проекты Большой науки отвлекут на себя все доступные ресурсы, подавляя исследовательскую работу малых и менее организованных секторов. В принципе для этой обеспокоенности есть основания, поскольку диверсификация исследований крайне важна для успешного развития науки. На практике же государственное финансирование науки никогда не было простой антагонистической игрой. Механизмы принятия решения намного сложнее, а утверждение крупных проектов не обязательно противоречит продуманной программе научной диверсификации. На самом деле, в прошлом взлёты и падения сказывались на больших и малых проектах совместно. Например, нет никаких свидетельств того, что после закрытия ССК те области науки, представители которых открыто выступали против продолжения проекта, что-либо выиграли в финансовом плане.

Если уж и проводить различие, то между теми проектами и направлениями исследований, которые действительно обеспечивают продвижение вперёд в приобретении новых знаний, и теми, которые ведут в тупик или предлагают однообразные эксперименты, практически не имеющие научной ценности. Одну из своих речей против ССК Фримен Дайсон закончил утверждением, что «нет заблуждения более опасного, чем уверенность в том, что можно предсказать путь научного прогресса. Если искать разгадку тайн природы, двигаясь только в одном направлении, легко пройти мимо наиболее важных тайн, тех, на предсказание которых просто не хватило воображения» [19]. Однако пронизательные слова Дайсона отнюдь не ослабляли аргументацию в пользу крупных научных инициатив. Даже такой непоколебимый защитник Малой науки и критик Большой науки как Дайсон соглашается, что выдающиеся достижения в астрономии и физике частиц за последние 60 лет стали возможны только благодаря разумному сочетанию крупных и малых проектов. Как в Большой, так и в Малой науке были грандиозные достижения и неожиданные открытия, были провалы и ошибки, но окончательный успех так и не был бы достигнут без сосуществования крупных и малых проектов. Для поддержания устойчивости экосистемы требуется наличие животных разных размеров, но размер отдельной особи не обеспечивает её выживаемости, которая на самом деле определяется взаимоотношениями больших и малых существ. Так и в науке: долгосрочное развитие невозможно ни там, где крупные проекты забирают все ресурсы без остатка, ни там, где против крупных проектов выдвигаются предвзятые возражения.

5. Стоимость проектов Большой науки

Являются ли крупные проекты для проведения фундаментальных исследований слишком дорогостоящими или даже бесполезными? В 1992 году конгрессмен-республиканец от штата Нью-Йорк Шерри Болерт, непримиримый противник ССК, в своём выступлении перед Палатой представителей во время обсуждения этого проекта заявил, что «ССК не избавит от рака, не решит проблемы андрогенетической алопеции (*m.e. облысения*) и не гарантирует клубу «Чикаго кабс» победу в мировой серии» [20]. Не могу с этим не согласиться. Но для того, чтобы разобраться в том, нужны ли обществу крупные проекты по фундаментальным наукам или нет, уместнее всё же было бы обратиться к иным аргументам.

Я начну с рассмотрения такого аспекта проблемы расходов, как руководство крупными научными проектами людьми, не имеющими отношения к науке, – вопрос, который поднимал ещё Элвин Вайнберг в

своей статье 1961 года. Финансирование в жёстко заданных рамках, не учитывающее изучение альтернативных решений и не предусматривающее непредвиденных расходов, – это опасная политика. Не менее опасно и упрямо держаться первоначальной схемы проекта, невзирая на последние достижения науки и техники. Такой курс ради контроля над расходами может обернуться куда большими финансовыми потерями для проекта или даже его полным научным крахом. По мнению Дайсона, причиной неудачи проекта «Спейс шаттл» стал непродуманный выбор, навязанный инженерам НАСА. «Непродуманный выбор – это когда вы ставите все свои деньги на одну лошадь, не выяснив предварительно, не хрома ли она. Политики и чиновники, ответственные за крупные проекты, часто просто одержимы идеей избежать неэкономного расходования сил и средств. И чтобы избежать этой неэкономности, они считают целесообразным как можно скорее выбрать одну схему и свернуть финансирование альтернативных работ. Так было и с шаттлом... Эволюция науки и техники – это дарвиновский процесс выживания наиболее приспособленных. В науке и технике, как и в биологической эволюции, неэкономность несёт в себе секрет эффективности. Без такой неэкономности невозможно определить, какая лошадь в наилучшей форме. И этот урок даётся политикам и чиновникам труднее всего» [21].

Для того, чтобы понять, какие варианты выбора должно рассматривать общество, когда речь идёт о крупных научных инициативах, полезно будет ознакомиться с затратами на их осуществление. В таблице 1 приводится стоимость некоторых крупных проектов. К указанным цифрам следует относиться с большой осторожностью, поскольку методы оценки стоимости значительно разнятся от проекта к проекту, а в некоторых случаях одна программа включает в себя столько различных научных и технических проблем, что надёжный подсчёт всех затрат становится практически невозможным. Следует заметить, что затраты на Манхэттенский проект (которые составили 0,6% от военных расходов США за всю вторую мировую войну) включали в основном оплату работ по разделению изотопов урана на соответствующих заводах и на производство плутония в Окридже и Ханфорде. На Лос-Аламосскую лабораторию, где работало большинство физиков, приходилось всего 4% от всех затрат на Манхэттенский проект.

Таблица 1. Оценки первоначальной стоимости некоторых проектов Большой науки (млрд долл.) и их эквиваленты в млрд долл. 2011 г. [22]. Используются следующие переводные коэффициенты: 1 евро = 1,4 долл. = 1,5 швейц. фр. Я решил взять не сегодняшний курс швейцарского франка, а его среднюю стоимость во время строительства LHC.

| Проект | Первоначальная стоимость ×10 ⁹ долл. | Расчётная стоимость ×10 ⁹ долл. |
|---|--|---|
| Манхэттенский проект [23] Расчётная стоимость при утверждении (1942): 3 года 1942–1944 Общая стоимость: 5 лет 1942–1946 | 0,148 2,2 | 27 |
| Программа Аполлон [24] Расчётная стоимость (1966): 13 лет Общая стоимость: 14 лет 1960–1973 | 22,7 19,4 | 120 |
| Космический телескоп «Хаббл» [25] Первоначальная расчётная стоимость Стоимость строительства Общая расчётная стоимость: 25 лет 1990–2014 | 0,5 1,5 6,0 | 8 |
| Сверхпроводящий суперколлайдер (ССК) [26] Расчётная стоимость при утверждении (1987) Расчётная стоимость при отмене (1993) | 4,4 11,8 | 18 |
| Международная космическая станция (МКС) [27] Начальная расчётная стоимость Расчётная стоимость разработки, сборки и эксплуатации (1998) | 17,4 96 | 120 |
| Проект «Геном человека» [28] Общая стоимость научной программы по геномике: 14 лет 1990–2003 | 3 | 4 |
| Международный термоядерный экспериментальный реактор (ИТЭР) [29] Расчётная стоимость строительства (2010): 10 лет 2008–2017 | 17,9 | 18 |
| Большой адронный коллайдер (LHC) Материалы для строительства ускорителя и детекторов | 5,4 | 6 |

В таблице 2 даются затраты на LHC согласно бюджету ЦЕРН. Хочу отметить, что в графу «Персонал» включены только те, кто непосредственно занят в работах на LHC, хотя к этим работам так или

иначе причастна довольно значительная часть персонала ЦЕРН. Более того, приведённые данные не включают расходы на эксплуатацию и взносы различных университетов и лабораторий за пределами ЦЕРН на строительство и работу детекторов частиц. Например, стоимость материалов для самого большого детектора (АТЛАС) составила 540 млн швейцарских франков, а доля ЦЕРН в расходах на различные детекторы колебалась в пределах от 14% до 20% от полной стоимости.

Таблица 2. Расходы на LHC в млрд швейцарских франков в соответствии с бюджетом ЦЕРН [30].

| | Персонал ×10 ⁹ швейц. фр. | Материалы ×10 ⁹ швейц. фр. | Итого ×10 ⁹ швейц. фр. |
|--|--|---|---|
| Ускоритель LHC и экспериментальные помещения (включая НИОКР, испытания и подготовку к эксплуатации) | 1,224 | 3,756 | 4,980 |
| Доля ЦЕРН в создании детекторов (включая НИОКР, испытания и подготовку к эксплуатации) | 0,869 | 0,493 | 1,362 |
| Доля ЦЕРН в компьютерной обработке данных LHC | 0,085 | 0,083 | 0,168 |
| Общие расходы ЦЕРН | 2,178 | 4,332 | 6,510 |

Замечу просто для сравнения, что LHC стоит приблизительно столько же, сколько и крупные объекты гражданского строительства. Например, 8-километровый Эресуннский мост, соединивший Данию и Швецию и законченный в 2000 г., стоил около 4 млрд евро, а 40-километровый мост через Мессинский пролив, который в один прекрасный день может соединить Сицилию с остальной Италией, оценивается сегодня примерно в 6 млн евро, но эта сумма предположительно ещё увеличится. Сметная стоимость Олимпийских игр 2012г. в Лондоне уже перешагнула 10 млрд евро.

6. Вместо заключения

Трудно установить точную и имеющую смысл цену познанию, культурному воздействию научных открытий, стремлению человека постичь

организуемые принципы природы и разгадать тайны вселенной. Гораздо легче, однако, определить взаимопричинную связь между прогрессом в познании и экономическим, социальным и промышленным развитием. Одно усиливает другое в своего рода симбиотическом партнёрстве, как это произошло в Великобритании в конце XIX века, в Германии в начале XX века и в США после второй мировой войны. Достижения фундаментальных наук редко оказывали немедленное воздействие на технику; их значимость для общества оценивалась лишь со временем. Нынешние технические отрасли были когда-то предметом фундаментальных исследований.

Единственным правомерным мериллом важности исследовательских проектов в области фундаментальных наук является их воздействие на саму науку. Экономическая и техническая значимость не всегда подсказывает наилучший выбор с точки зрения науки и поэтому не всегда оправдывает сделанные инвестиции. Тем не менее, огромные затраты на крупные научные проекты обосновывают тщательные исследования, проводимые финансирующими организациями по поводу возможных сопутствующих результатов, применимых в экономике и технике. Эти оценки зависят от конкретного рассматриваемого случая, но у проектов Большой науки есть некоторые общие черты, которые часто превращаются в особые возможности. Независимо от научных целей проекта, которые являются его истинным и единственным *raison d'être* (разумное основание), я могу выделить некоторые общие аспекты Большой науки, которые могут оказаться выгодными для общества. Само собой разумеется, можно привести ничуть не меньше аргументов и в пользу общественных выгод подходов Малой науки.

1. Большая концентрация не только финансовых, но и особенно интеллектуальных ресурсов в одном научно-исследовательском центре создаёт условия, которые вряд ли можно достичь в научном учреждении. А это, в свою очередь, создаёт благодатную почву для получения новаторских решений, выходящих далеко за рамки поставленных в проекте задач. Например, отнюдь не случайно всемирная «паутина» появилась в ЦЕРН, хотя её создание и не входило в число непосредственных задач лаборатории.

2. С точки зрения практического использования, плоды фундаментальных исследований зреют медленно. Естественным мостом, перекрывающим этот временной разрыв между научным открытием и возникновением технических новинок на основе его результатов, становится методология Большой науки, поскольку предвидеть прикладное значение конечных целей крупных проектов почти невозможно, в то время как техническая значимость проекта заложена в самом научном исследовании,

разработанном для достижения этих целей. LHC – прекрасный тому пример. Сегодня никто не может определённо сказать, создаст ли, и как, открытие бозона Хиггса или любой другой экзотической частицы задел для какого-либо практического использования. Однако научные исследования, которые привели к созданию LHC, уже позволили получить немало полезного на побочных направлениях: разработка ускорителя дала адронотерапию для лечения онкологических заболеваний и синхротронное излучение, широко используемое в так называемом рентгеновском микроскопе; разработка детекторов частиц дала различные методы проведения медицинской диагностики и анализа в реальном времени; информационные разработки дали всемирную «паутину» и систему сетевых вычислений Grid.

3. Необходимость в передовых технологиях и вытекающие отсюда тесные связи с частными компаниями предоставляют промышленному сектору выгоды, которые выходят за рамки простой прибыли, определяемой контрактами. Заявки учёных на изготовление опытных образцов самой современной аппаратуры заставляют промышленность разрабатывать новые производственные технологии, тогда как такие разработки для рынка вообще были бы слишком рискованным предприятием.

4. Будучи универсальными по характеру и не связанными с экономическими или военными интересами, фундаментальные исследования представляют собой особенно благоприятную область для развития международного сотрудничества, а крупные проекты являются наилучшим двигателем такого сотрудничества. Эти проекты дают разным странам возможность участвовать в решении серьёзнейших научных проблем, которые они не могли бы решить самостоятельно из-за нехватки ресурсов. Более того, крупные научные инициативы могут способствовать усилению мирных связей между странами и даже открывать возможности для научного сотрудничества между враждующими государствами, тем самым создавая предпосылки для политического сближения. В обстановке холодной войны Элвин Вайнберг, несмотря на свою неприязнь к Большой науке, сумел понять её особую роль в этом: «Если бы физику высоких энергий можно было бы сделать средством установления международного сотрудничества ... между Востоком и Западом, ... то затраты на физику высоких энергий стали бы её достоинством» [31]. Нынешний похвальный пример – проект SESAME (Synchrotron light for Experimental Science and Applications in the Middle East = Синхротронное излучение для научных экспериментов и практического использования на Ближнем Востоке), осуществляемый в Иордании коллаборацией, включающей в себя Израиль, Иран и другие ближневосточные государства, а также Палестинскую национальную администрацию.

5. Крупные научные проекты дают уникальную возможность для обучения и подготовки студентов и молодых исследователей. Молодёжь, к примеру, играет очень важную роль на LHC. Примерно половина физиков, занятых в эксперименте ATLAS, моложе 35 лет (и почти треть моложе 30). Эти молодые учёные учатся решать сложные задачи, осваивать передовые технологии и работать в междисциплинарных коллективах. Не все из них останутся в науке, но они принесут свои уникальные навыки и опыт в другие сферы общества. Вложения в крупные научные проекты – это вложения в будущее поколения умелых и знающих членов общества.

6. Крупные проекты часто незаменимы для обеспечения развития фундаментальной науки. Отказ от них означает отказ от драгоценных знаний, обладающих значимостью, которая не ограничивается рамками одной лишь науки, а оказывает воздействие на всё общество. Знания обладают имманентной значимостью, из которой проистекает наша осведомлённость о смысле природы и той роли, которую мы играем в нашей физической вселенной. Эта осведомлённость влияет на наш образ мысли и действий как отдельной личности и как сообщества, тем самым способствуя интеллектуальному росту общества. В этом смысле значение фундаментальной науки не отличается от значения искусства. Крупные научные проекты, как и одухотворённые произведения искусства, захватывают общественное воображение и наиболее действенным образом распространяют знания по всем слоям общества.

Каждая цивилизация, каждая историческая эпоха оставляет что-то в наследство будущим поколениям. Я думаю, что наследие нашего общества останется в революционных научных открытиях, которые делались и делаются, и в быстром развитии техники, которое обеспечивалось и обеспечивается ими, что кардинально изменило не только наш образ жизни, но в особенности наш образ мысли и постижения вселенной. В этих глубоких переменах крупные научные проекты сыграли роль катализатора, и LHC обладает всеми теми характеристиками, которые тоже сделают его таковым. Не следует удивляться всё возрастающему возбуждению, как среди физиков, так и в широкой общественности, по поводу грядущих результатов на LHC, знаменующих проникновение в мир материи, который, по всей видимости, разительно отличается от всего уже известного нам, но который таит в себе всю суть физических законов, управляющих вселенной.

Благодарности

Эта статья написана по материалам коллоквиума, который я проводил в институте Scuola Normale Superiore в Пизе (Италия) пятого мая

2010 г. Идеи, составившие содержание статьи, сложились во многом под влиянием вопроса, заданного Джованни Биньями во время публичной презентации физической программы LHC, с которой я выступал в институте Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti в Венеции. Я также благодарен Гвидо Альтарелли, Риккардо Барбьери, Микеланджело Мангано, Марко Марторелли, Маркусу Нордбергу, Эмме Сандерс, Андерсу Уннервику, Габриеле Венециано и Джеймсу Уэллсу за полезные замечания и обсуждения. В заключение я выражаю глубокую благодарность Роджеру Х. Стойверу за вдумчивое и тщательное редактирование текста, что значительно улучшило статью.

Литература

[1] For a general account of the LHC and its scientific goals, see Gian Francesco Giudice, *A Zeptospace Odyssey: A Journey into the Physics of the LHC* (Oxford and New York: Oxford University Press, 2010).

[2] For essays on the birth of Big Science, see Derek J. de Solla Price, *Little Science, Big Science ... And Beyond* (New York: Columbia University Press, 1986); Peter Galison and Bruce Hevly, ed., *Big Science: The Growth of Large-Scale Research* (Stanford: Stanford University Press, 1992).

[3] Graham Farmelo, *The Strangest Man: The Hidden Life of Paul Dirac, Mystic of the Atom* (New York: Basic Books and London: Faber and Faber, 2009), p. 353.

[4] For the relationship between the Manhattan Project and Big Science, see Richard Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb* (New York: Simon and Schuster, 1986), especially pp. 279-317; Jeff Hughes, *The Manhattan Project: Big Science and the Atomic Bomb* (New York: Columbia University Press and Cambridge: Icon Books, 2002), especially pp. 45-54.

[5] Silvan Schweber, "A Historical Perspective on the Rise of the Standard Model", in Lillian Hoddeson, Laurie Brown, Michael Riordan, and Max Dresden, ed., *The Rise of the Standard Model: Particle Physics in the 1960s and 1970s* (Cambridge, New York, and Melbourne: Cambridge University Press, 1997), pp. 645-684, on p. 657.

[6] Vannevar Bush, *Science: The Endless Frontier*. A Report to the President (Washington, D.C.: United States Government Printing Office, 1945; reprinted Washington, D.C.: National Science Foundation, 1990), p. 16.

[7] *Ibid.*, p. 14.

[8] John R. Steelman, *Science and Public Policy*. Vol. 1. *A Program for the Nation* (Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, August 27, 1947; reprinted New York: Arno Press, 1980), p. 4. For an analysis, see William A. Blanpied, "Science and Public Policy: The Steelman Report and the Politics of Post-World War II Science Policy", in *AAAS Science and Technology Policy Yearbook* (Washington, D.C.: AAAS, 1999), <www.aaas.org/spp/yearbook/chap29.htm>.

[9] [Harry S. Truman], "Address of the President of the United States [at the Centennial Celebration of the AAAS, September 13, 1948]", *Science* **108** (1948), pp. 313-314, on p. 313.

[10] Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (New York: Pantheon Books, 1992), p. 60.

- [11] Alvin M. Weinberg, "Impact of Large-Scale Science on the United States", *Science* **134** (1961), pp. 161-164; see also Alvin M. Weinberg, *Reflections on Big Science* (Cambridge, Mass. and London: The MIT Press, 1967).
- [12] Weinberg, "Impact..." (ref. [10]), p. 161.
- [13] *Ibid.*, p. 162.
- [14] Wolfgang K.H. Panofsky, "The SSC's End: What Happened? And What Now?" *Physics Today* **47** (March 1994), pp. 13, 15, 88, on p. 15.
- [15] For an analysis of the events that led to the cancellation of the SSC, see Michael Riordan, "The Demise of the Superconducting Super Collider", *Physics in Perspective* **2** (2000), pp. 411-425; Michael Riordan, Lillian Hoddeson, Adrienne Kolb, and Glenn Sandiford, *Tunnel Visions: The Rise and Fall of the Superconducting Super Collider*, in preparation.
- [16] Victor F. Weisskopf, "In Defense of High Energy Physics", in Luke C.L. Yuan, ed., *Nature of Matter: Purposes of High Energy Physics* ([Upton, N.Y.]: Brookhaven National Laboratory, 1965), pp. 24-27.
- [17] Philip W. Anderson, "More is Different", *Science* **177** (1972), pp. 393-396.
- [18] Simon D.M. White, "Fundamental physics: why Dark Energy is bad for astronomy", *Reports on Progress in Physics* **70** (2007), pp. 883-897; Rocky Kolb, "A thousand invisible cords binding astronomy and high-energy physics", *ibid.*, pp. 1583-1595.
- [19] Freeman Dyson, "Six Cautionary Tales for Scientists [1988]", in *From Eros to Gaia* (New York: Pantheon Books, 1992), pp. 11-28, on p. 28.
- [20] Sherry Boehlert, *Congressional Record*, Vol. 138, No. 87 (June 17, 1992), p. H4829.
- [21] Freeman Dyson, "Sixty Years of Space Science, 1958-2018 [1988]", in *From Eros to Gaia* (ref. [18]), pp. 47-66, on p. 56.
- [22] Robert Sahr, "The 2011 conversion factors revision", <<http://oregonstate.edu/clapolisci/sahr/>> sahr>; Bureau of Economic Affairs, National Income and Product Accounts, Table 1.1.4, <<http://www.bea.gov/national/nipaweb/index.asp>>.
- [23] Stephen I. Schwartz, ed., *Atomic Audit: The Costs and Consequences of U.S. Nuclear Weapons since 1940* (Washington, D.C.: Brookings Institution Press, 1998), pp. 55 n. 39, 58-64.
- [24] Deborah D. Stine, *The Manhattan Project, the Apollo Program, and Federal Energy Technology R&D Programs: A Comparative Analysis* (Washington, D.C.: Congressional Research Service 7-5700, 2009), p. 2.
- [25] Eric J. Chaisson, *The Hubble Wars: Astrophysics Meets Astropolitics in the Two-Billion-Dollar Struggle over the Hubble Space Telescope* (New York: HarperCollins, 1994), pp. 114-115.
- [26] Riordan, "The Demise..." (ref. [14]), pp. 415-417.
- [27] United States General Accounting Office (GAO), Testimony Before the Committee on Science, House of Representatives, Space Station: U.S. Life-Cycle Funding Requirements, GAO/TNSIAD-98-212 (Washington, D.C.: 1998).
- [28] Human Genome Project Information, U.S. Department of Energy, <<http://genomics.energy.gov>>.
- [29] International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) <<http://www.iter.org/factsfigures>>.
- [30] Anders Unnervik, "Lessons in Big Science Management and Contracting", in Lyndon Evans, ed., *The Large Hadron Collider: a Marvel of Technology* (Lausanne: EPFL Press, 2009), pp. 38-55, on p. 40.
- [31] Alvin M. Weinberg, "Criteria for Scientific Choice", *Minerva* **1**, No. 2 (1963), pp. 159-171, on p. 168.