

# НАУКА ЗА РУБЕЖОМ

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ РАЗВИТИЯ НАУКИ РАН

## ПРОБЛЕМАТИКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

**Наука за рубежом**

№ 31, май 2014

Ежемесячное обозрение

Электронное издание:

[www.issras.ru/global\\_science\\_review](http://www.issras.ru/global_science_review)

Рубрика «**Исследования в области ядерной и квантовой физики**»

Обзор выполнил **Н. А. Трофимов**

Выпускающее подразделение: **Сектор анализа зарубежной науки**

Руководитель проекта **Л. К. Пипия**

Редактор **О. Е. Осипова**

Верстка: **Н. В. Шашкова**

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Введение .....	4
1. Сложные задачи на пути к термоядерной энергетике .....	5
2. Гравитационная «частица»: вопросы теоретической физики и предел сенсорного изучения микромира .....	7
3. Бозонные компьютеры: на пути к квантовым вычислениям .....	10
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ</b> .....	<b>13</b>
Рисунок. Прогресс в области кристаллографии .....	13

*Исследования в области ядерной и квантовой физики привлекают ученых невиданными перспективами, которые с позиции неискушенного наблюдателя порой граничат с магией. Однако на самом деле это скорее напоминает мираж, поскольку микромир крайне неохотно делится своими секретами. Это касается в том числе и таких фундаментальных проблем, как управляемые реакции термоядерного синтеза, изучение свойств бозона Хиггса, разработка квантовых компьютеров.*

## **Введение**

В последнее время опубликовано сразу несколько работ, свидетельствующих о том, что научный горизонт, который дает человечеству возможность рассчитывать на долгожданный прогресс в ядерной и квантовой физике, может быть не так отдален, как это раньше предполагалось. Сам факт того, что ученые смогли практически приоткрыть секреты микромира, уже заставляет многих задуматься о возможности скорой революции в научном познании мироустройства. Однако сдержанный оптимизм в этих вопросах все же представляется более правильным.

Во-первых, это касается исследований на пути создания первого прототипа термоядерного реактора. Несмотря на то что наибольшие надежды возлагаются на системы типа «токамак», в последнее время поступили обнадеживающие новости из Национального комплекса зажигания (NIF<sup>1</sup>), расположенного в Ливерморской лаборатории США [1, 2]. Во-вторых, в сообществе ученых продолжает обсуждаться громко прозвучавшее сообщение об экспериментальном подтверждении существования бозона Хиггса [3]. В-третьих, успехи квантовой физики постепенно подталкивают ученых-экспериментаторов к осознанию того, что альтернативные классическим компьютерам системы вычисления не только могут в действительности достичь сверхпроизводительности, но и способны решить задачи, которые ранее считались практически неразрешимыми [4].

<sup>1</sup> От англ. National Ignition Facility – Национальный комплекс зажигания, или Национальный комплекс лазерных термоядерных реакций, – научный комплекс для осуществления инерциального термоядерного синтеза с помощью лазеров, состоит из 192 лазеров, совокупная мощность которых 500 ТВт.

## 1. Сложные задачи на пути к термоядерной энергетике

Очевидно, что термоядерная энергетика обладает рядом преимуществ. Управляемый термоядерный синтез способен обеспечить человечество практически неограниченной энергией на многие столетия [5]. Согласно существующим теориям, подобные реакции протекают внутри Солнца. Проблема заключается в отсутствии у современных физиков точного представления о том, что именно происходит в недрах небесного светила и что поддерживает эту реакцию и делает ее максимально устойчивой.

Если в установках типа «токамак» функцию «удержания» реакции обеспечивает сильное управляемое магнитное поле, то при инерциальном зажигании используются возможности направленного импульсного свечения плазмы в рентгеновском диапазоне. Оба подхода в известной степени основываются на методе проб и ошибок. Это является следствием теоретических пробелов, погрешностей и допущений, не позволяющих предсказывать поведение системы до того, как она уже будет сконструирована.

По имеющимся расчетам, для инерциальной реакции слияния требуется достичь исходной плотности дейтерий-тритиевого (DT) топлива порядка  $10^3$  г/см<sup>3</sup> и температуры  $T_{\text{ion}} \sim 10$  кэВ. Для максимально эффективного использования энергии лазерного импульса данная реакция предполагает удержание DT-топлива в состоянии низкой энтропии в пространстве «плотность – давление», характеризующемся низкими значениями адиабаты.

При поддержании низкого показателя адиабаты в лучшем случае удастся достичь показателя  $\rho R$ , равного приблизительно 1,3 г/см<sup>2</sup>. Однако энергетический выход, т. е. соотношение поглощенной полым цилиндром энергии и энергии термоядерного синтеза, оказывался незначительным – лишь несколько процентов.

В ходе одного из рекордных «выстрелов» с высокоадиабатной траекторией, проведенных в NIF в конце 2013 г., суммарный лазерный импульс 1,8 МДж при пиковой мощности 350 ТВт длительностью порядка  $2 \times 10^{-8}$  секунд обеспечил радиационную температуру полого цилиндра около 300 эВ и энергетический выход реакции слияния на уровне 8 кДж, из которых около трети пришлось на саморазогрев топлива альфа-частицами.

Положительным результатом данного эксперимента стало достижение почти 100%-ного энергетического выхода в соотношении с поглощенным цилиндром импульсом. В качестве побочного эффекта было зафиксировано понижение показателя  $\rho R$  (до 0,86 г/см<sup>2</sup>) из-за повышения показателя адиабаты. Таким образом, для достижения приемлемого энергетического баланса необходимо увеличить энерговыделение на несколько порядков.

Для обоих путей развития термоядерной энергетики (системы токамака и системы инерциального синтеза) остаются три основных категории сложных задач: экономические аспекты, задачи технического характера (в том числе связанные с разрозненностью теоретических построений и сложным математическим аппаратом), обеспечение безопасности.

С экономической точки зрения эксперименты чрезвычайно дороги. Например, стоимость всего цикла проекта ИТЭР<sup>2</sup> может составить несколько десятков миллиардов долларов США.

Помимо общих проблем, связанных с достижением и поддержанием параметров управляемой термоядерной реакции (плотность, давление, температура), технические задачи различны для подходов с магнитным и инерционным удержанием плазмы. Для токамаков к числу сложных проблем относятся, например, вопросы управления «зашнуровкой»<sup>3</sup> плазмы, способы соблюдения режима «высокого удержания»<sup>4</sup> плазмы, подтверждение возможности «непрерывного»<sup>5</sup> функционирования реактора, устойчивость материалов конструкций к бомбардировке интенсивным потоком нейтронов, разработка специальных материалов для blankets реактора, который со временем станет радиоактивным под воздействием плазмы.

---

<sup>2</sup> От англ. ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor – Международный экспериментальный термоядерный реактор.

<sup>3</sup> Плазма подвержена влиянию самогенерируемых вихревых токов, управление которыми могло бы в разы сократить требующуюся для работы установки типа «токамак» силу тока. В настоящее время эти токи и их природа еще недостаточно изучены.

<sup>4</sup> Управлять сильными магнитными полями очень сложно, однако предполагается, что можно найти режимы «высокого удержания» плазмы с помощью специально настроенного магнитного поля, в котором возможно достигнуть на порядки большего давления топлива.

<sup>5</sup> Под непрерывным функционированием понимается работа реактора без сбоев на протяжении заданного цикла.



Для инерциальных систем с теоретической точки зрения трудно решаемой задачей остается преодоление неустойчивостей Релея – Тейлора и Рихтмайера – Мешкова, ведущих к искажениям и деформации цилиндра с топливом. Неясно, можно ли решить эту задачу только при помощи арсенала средств, которым располагает сейчас NIF. Это касается настроек параметров частоты, спектра, длительности, интенсивности импульсов, синхронизации работы лазеров и изменения формы полого цилиндра для более равномерного облучения топливного шарика.

## **2. Гравитационная «частица»: вопросы теоретической физики и предел сенсорного изучения микромира**

Что могут изменить в повседневной жизни открытие новых явлений в области гравитации и лучшее понимание устройства Вселенной и протекающих в ней энергетических процессов? Возможно, это позволит воссоздать пресловутый электромобиль Николы Теслы, двигатель которого помещался на ладони<sup>6</sup>. Пилоты и пассажиры летательных аппаратов избавятся от неудобств, связанных с гравитацией. Возможными станут новые способы получения неограниченной энергии из так называемого вакуума<sup>7</sup>, в разных физических концепциях также связанного с образованием антивещества, «эфира», темной энергии и других не изученных пока проявлений реальности. Однако, по всей видимости, предстоит еще очень долгий путь. Причины заключаются в серьезных теоретических проблемах, а также в достижении предела восприятия микромира.

В 2014 г. отмечается 100-летие кристаллографии – отрасли прикладной науки, позволившей заглянуть за грани микромира [6]. Успехи кристаллографии, результаты научных экспериментов наглядно представлены на рисунке. Несмотря на сравнительно быстрое развитие технологий «визуализации» современной прикладной науки, фундаментальная наука развивается не столь быстро, как это может показаться. Например, за последние 40 лет средняя разрешающая способность аппаратуры

---

<sup>6</sup> Существует неподтвержденная легенда о том, что знаменитый сербский физик однажды привел в движение автомобиль при помощи некоего таинственного электродвигателя размером с маленькую коробочку.

<sup>7</sup> Сегодня зафиксированы несколько видов воздействия вакуума на элементарные частицы, например лэмбовский сдвиг или эффект Казимира.

повысилась приблизительно на  $1 \text{ \AA}$  и сейчас составляет чуть меньше  $1 \text{ \AA}$ , что достаточно для визуального различения единичных атомов.

К тому же для специалистов становится очевидным, что приближается предел дальнейшего расширения потенциала «визуализации». В теории струн (суперструн) топологические нормы микромира предполагаются на уровне  $10^{-35} \text{ м}$ <sup>8</sup>. Это означает, что ученые, использующие самое современное оборудование, по-прежнему способны заниматься лишь такими «макроскопическими» объектами, как протоны и электроны, в то же время более тонкая материя и фундаментальные «частицы» этой материи остаются неизученными и практически недостижимыми.

В трудах по философии науки А. Пуанкаре утверждает, что все положения современных научных теорий не являются синтетическими или эмпирическими истинами, а представляют собой соглашения (конвенции), единственным условием которых является непротиворечивость в рамках одной теоретической модели. К конвенциям также должны применяться требования практичности, т. е. максимальной простоты теоретических конструктов и способности успешного применения теории для решения практических задач.

С позиции конвенционализма<sup>9</sup> открытие бозона Хиггса может быть расценено как пример случая, когда теоретические конструкты опережают практику. В таком случае существует вероятность умозрительного описания действительности, т. е. некоего математического истолкования полученных экспериментальных данных на ускорителе LHC<sup>10</sup> в ЦЕРН. Сопряженным моментом такого положения вещей может стать утрата или же упущение присущих реальности внутренних связей между физическими явлениями. Этот подход чреват также тем, что он может привести к открытию неких производных явлений, тогда как исходные явления останутся за чертой восприятия, а сами открытия при всей их сложности окажутся занимательными математическими упражнениями.

---

<sup>8</sup> Именно на таком уровне располагаются так называемые струны, имеющие нематериальную природу.

<sup>9</sup> Конвенционализм – философское течение в науковедении, сформировавшееся под влиянием идей многих известных ученых, включая Э. Маха и А. Пуанкаре.

<sup>10</sup> От англ. Large Hadron Collider – Большой адронный коллайдер.



Фундаментальная статья П. Хиггса<sup>11</sup>, предсказавшая возможность существования кванта скалярного поля Хиггса, которое отвечает за инертную массу материи, была опубликована в 1964 г. [7]. В ней содержалось теоретическое предположение о том, что данный квант относится к массивным бозонам с нулевым спином. О долгожданном экспериментальном открытии бозона Хиггса было впервые заявлено в 2012 г. Однако де факто это открытие не позволило выйти за пределы весьма ограниченной Стандартной модели и, следовательно, продвинулось в поиске ответа на вопрос о происхождении массы во Вселенной. Природа открытия бозона Хиггса в некоторой степени – рекуррентная. Этим открытием дословно подтверждается в пределах существующей модели интерпретации эмпирических данных одна из гипотез, сформированных ранее в рамках этой же модели.

Одна из важнейших проблем Стандартной модели – перегруженность математического аппарата, что является следствием многократных итераций по исправлению разнообразных «погрешностей» этой модели, выявлявшихся в ходе экспериментов. Причем зачастую речь шла об экспериментах, проводимых физиками за гранью Стандартной модели. Это не стало исключением и в случае с бозоном Хиггса, поскольку механизмы появления масс у частиц в физике конденсированных сред были зафиксированы задолго до Хиггса рядом физиков-теоретиков, включая Ф.У. Андерсона и Л.Д. Ландау, которые специализировались на разделах теоретической физики, лишь опосредованно связанных с построением Стандартной модели<sup>12</sup>. Вероятно, зарождение «новой физики» ознаменует закат Стандартной модели в физике элементарных частиц уже в обозримом будущем. Это может привести в том числе и к созданию более стройного математического аппарата современной физики.

---

<sup>11</sup> Здесь и далее при описании бозона Хиггса используется терминология Стандартной модели релятивистской физики.

<sup>12</sup> Ф.У. Андерсон известен как один из выдающихся теоретиков в области высокотемпературной сверхпроводимости, а релятивистская квантовая механика, теоретический вклад в развитие которой внес Л.Д. Ландау, до сих пор остается одним из возможных путей к «новой физике». Следует также отметить, что теория Гинзбурга – Ландау значительно старше теории Энглера – Браута – Хиггса, хотя она описывает не имманентные свойства микромира, а лишь некоторые внешние его проявления.

Существующее разнообразие концепций в теоретической физике накладывает отпечаток также и на астрофизические представления ученых о развитии Вселенной. До сих пор астрофизика остается областью знания, в которой многие концепции основаны на различных моделях или, выражаясь языком А. Пуанкаре, конвенциях, каждая из которых может быть с легкостью изменена или даже опровергнута путем внесения изменений в ряд исходных допущений.

Например, недавно появились первые подтверждения того, что существующие допущения о нагреве первичного газа Вселенной следует подвергнуть сомнению. Ученые полагают, что в этом контексте нужно быть готовыми к рассмотрению всевозможных альтернативных путей развития Вселенной. Вероятно, что первичный водород нагревался значительно медленнее и более равномерно, чем это предполагала концепция «быстрого нагрева» [8].

Следует отметить, что каждое, даже малейшее, изменение в исходных допущениях может по цепочке привести к серии существенных исправлений в теоретических построениях, особенно если эти построения опираются на сложный математический аппарат. Серьезные трудности в астрофизике по-прежнему связаны с пониманием феноменов антиматерии и степени ее симметричности, а также так называемой темной энергии и темной материи.

### **3. Бозонные компьютеры: на пути к квантовым вычислениям**

Модели алгоритмов квантовых вычислений продолжают постепенно совершенствоваться, хотя это происходит и не слишком быстрыми темпами. В случае с квантовой криптографией открытие слабых измерений поставило под вопрос возможность достоверного квантового обнаружения взлома систем шифрования. Тем не менее теоретические концепции, которые лежат в основе квантовых вычислений, по-прежнему позволяют надеяться на преодоление границ возможностей классических компьютеров. Явление запутанных квантовых состояний (entangled quantum states) бозонов может стать ключом к «отслеживанию» множества синхронных состояний систем элементарных частиц.

Промежуточным этапом на пути к первым разработкам в области квантовых вычислений являются так называемые бозонные компьютеры. Есть основания полагать, что разработка таких компьютеров может уже в ближайшем будущем опровергнуть расширенный тезис Черча – Тьюринга и дополнить теорию вычислительной сложности [4]. Примером квантовых вычислений, которые уже поставили под сомнение тезис Черча – Тьюринга, является алгоритм Шора. При помощи этого алгоритма возможно взламывать криптографические системы с открытым ключом. При этом неизвестно, можно ли отнести эту задачу к категории сложных<sup>13</sup>, так как не исключена вероятность ее решения с помощью классических вычислительных алгоритмов.

Необычным может стать использование в качестве вычислителя своеобразного вида бозонов – фононов. В основе предложенного механизма лежат фононные колебания ионов, захваченных в радиочастотной ловушке. Система фононов несет в себе ряд потенциальных преимуществ. Кодирование исходных бозонов осуществляется с использованием поперечных колебательных мод. Далее система иницируется путем сравнительно простой технологии доплеровского лазерного охлаждения. Детекция числа фононов происходит за счет измерения спин-фононных взаимодействий, ведущих к колебанию спинов захваченных ионов. Когерентное смешение различных фононных мод осуществляется с использованием все той же технологии захваченных ионов на базе кулоновых взаимодействий и индуцированных лазерными импульсами фазовых сдвигов.

Ученые предполагают, что бозонные компьютеры способны превзойти достигнутое и посредством новых способов решить многие в принципе неразрешимые для классических компьютеров задачи. Это может произойти, если удастся построить систему бозонной «выборки», синхронно отслеживающую в лабиринте событий «траектории» – на самом деле вероятности квантовых состояний – десятков бозонов. Предполагается, что прототип такой вычислительной системы смог бы не только испытать на прочность тезис Черча – Тьюринга, но и решить задачи класса Sharp-P<sup>14</sup>.

---

<sup>13</sup> Сложными для современных вычислительных систем называются задачи, классическое решение которых связано с экспоненциальным возрастанием времени, т. е. вычислительных ресурсов.

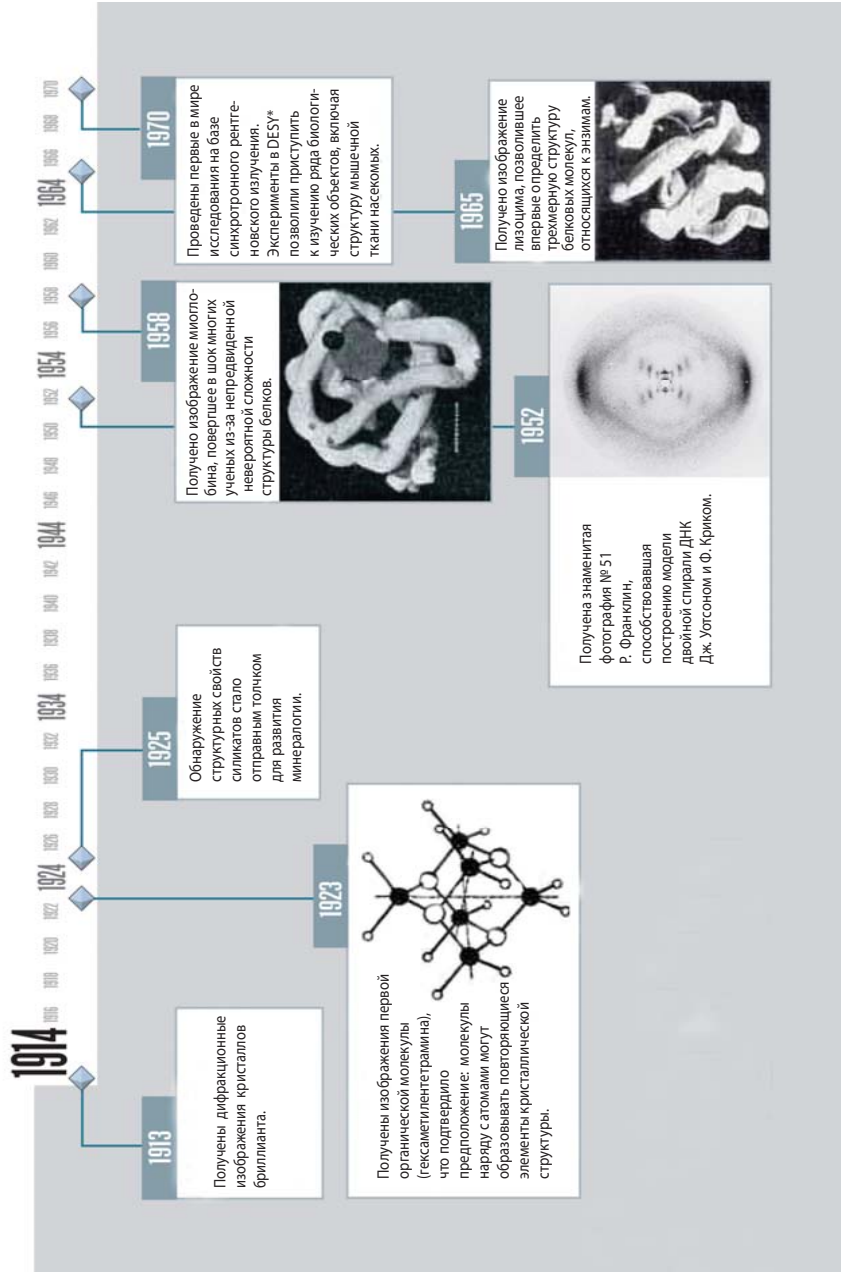
<sup>14</sup> Sharp-P, или #P, – категория сложных математических задач, к числу которых относится, например, вычисление вариаций гамильтоновых циклов в теории графов.

Очевидно, что вероятность дальнейших прорывных достижений в квантовой физике достаточно высока. Этому можно содействовать, ориентируя национальную научную политику на подготовку ученых-изобретателей. По всей видимости, ценность и востребованность квалифицированных специалистов – физиков будет возрастать. Те страны, которые окажутся в состоянии обеспечить ученым наиболее благоприятные условия, способствующие прорывным достижениям в фундаментальной науке, станут безоговорочными лидерами технологического прогресса.

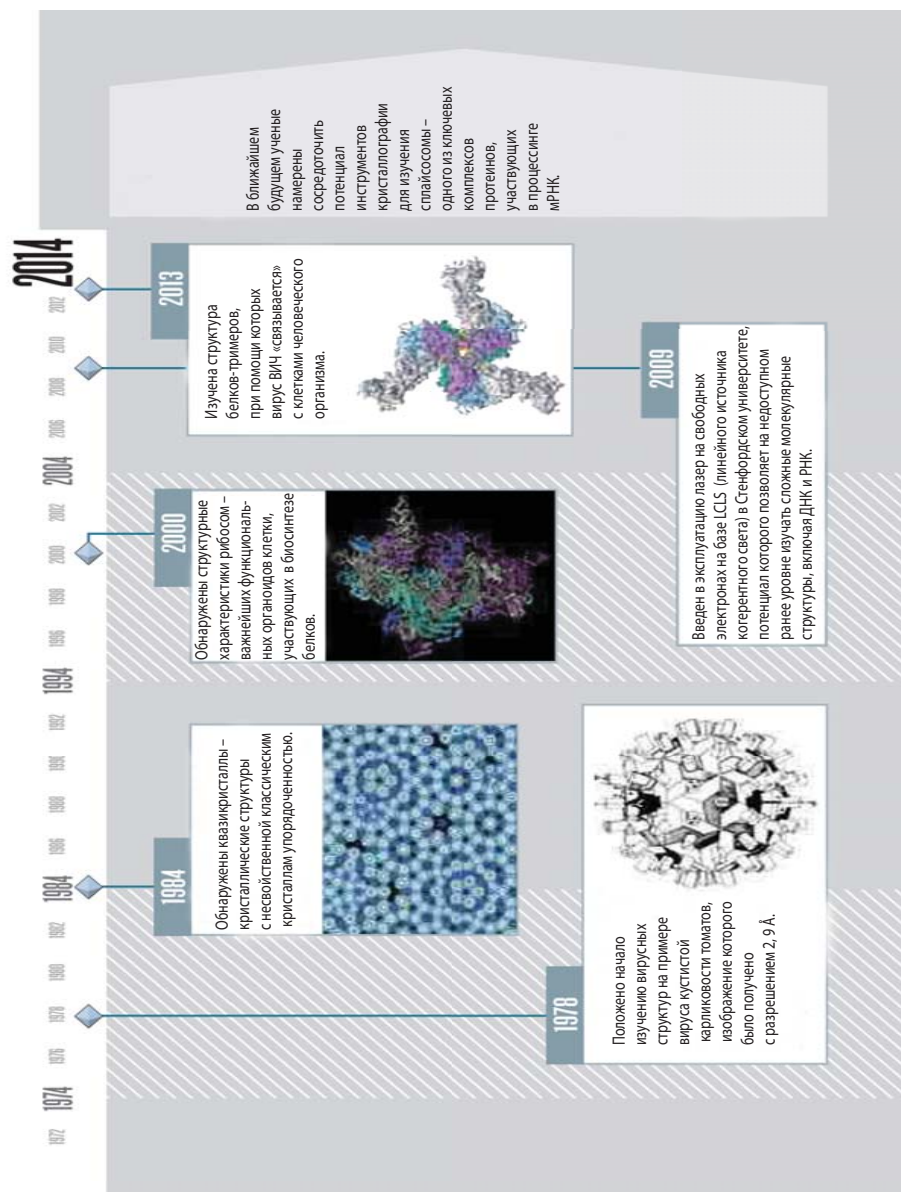
Это особенно важно в условиях, когда возрастает стоимость экспериментальной инфраструктуры, оцениваемой в размере многих десятков миллиардов долларов США. Экономическая цена ошибки как в случае выбора неверного пути технологического развития, так и в случае неэффективных исследований вследствие дефицита ученых, возрастает по экспоненте, отдаляя человечество от, казалось бы, столь реального прогресса.

Приложение

Рисунок. Прогресс в области кристаллографии



(окончание рисунка)



\* Немецкий электронный синхротрон в Гамбурге.



Обзор выполнен на основе следующих публикаций:

1. Park H.-S., Hurricane O.A., Callahan D.A. et al. High-Adiabatic High-Foot Inertial Confinement Fusion Implosion Experiments on the National Ignition Facility // Physical Review Letters. 2014. V. 112, 055001.
2. Hurricane O.A., Callahan D.A., Casey D.T. et al. Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion // Nature. 2014. V. 506. P. 343–349.
3. Рубаков В. Долгожданное открытие: бозон Хиггса // Наука и жизнь. 2012. № 10. С. 3–17.
4. Shen C., Zhang Z., Duan L.-M. Scalable Implementation of Boson Sampling with Trapped Ions // Physical Review Letters. 2014. V. 112, 050504.
5. <http://elementy.ru/lib/430807>
6. Jones N. Atomic secrets 100 years of crystallography // Nature. 2014. V. 505. P. 602–603.
7. Higgs P.W. Broken symmetries and the masses of gauge bosons // Physical Review Letters. 1964. V. 13. № 16. P. 508–509.
8. Fialkov A., Barkana R., Visbal E. The observable signature of late heating of the Universe during cosmic reionization // Nature. 2014. V. 506. P. 197–199.  
<http://dx.doi.org/10.1038/nature12999>

## **Тематические рубрики ежемесячного обзора**

Аэронавтика и космос

Биотехнологии и генетика. Сельское хозяйство,  
пищевая и химическая промышленность

Информационные и телекоммуникационные технологии  
и вычислительная техника

***Исследования в области ядерной и квантовой физики***

Медицинские технологии и оборудование

Нанотехнологии и новые материалы, микроэлектроника

Социальные и экономические науки и статистика

Энергетика и транспорт