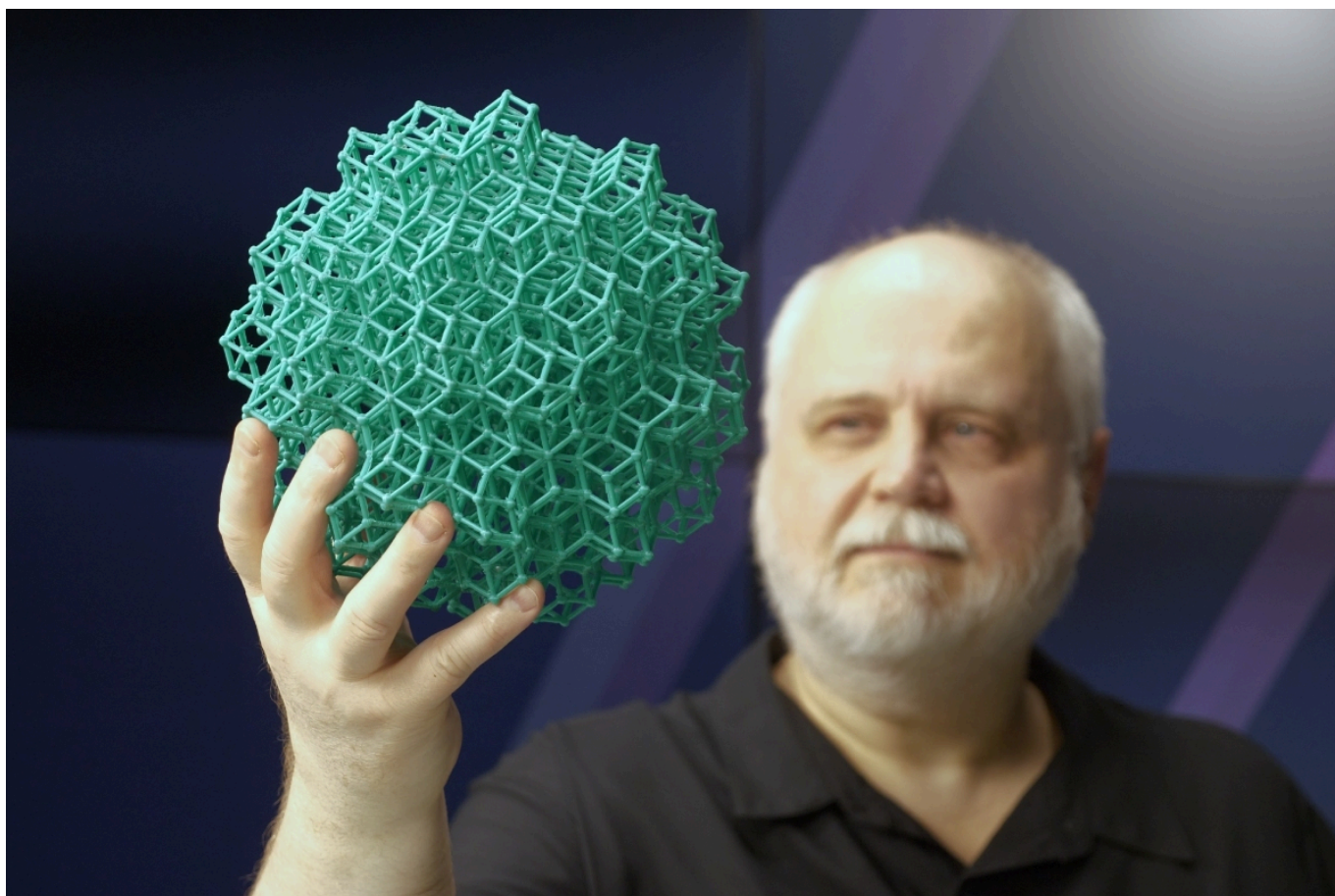
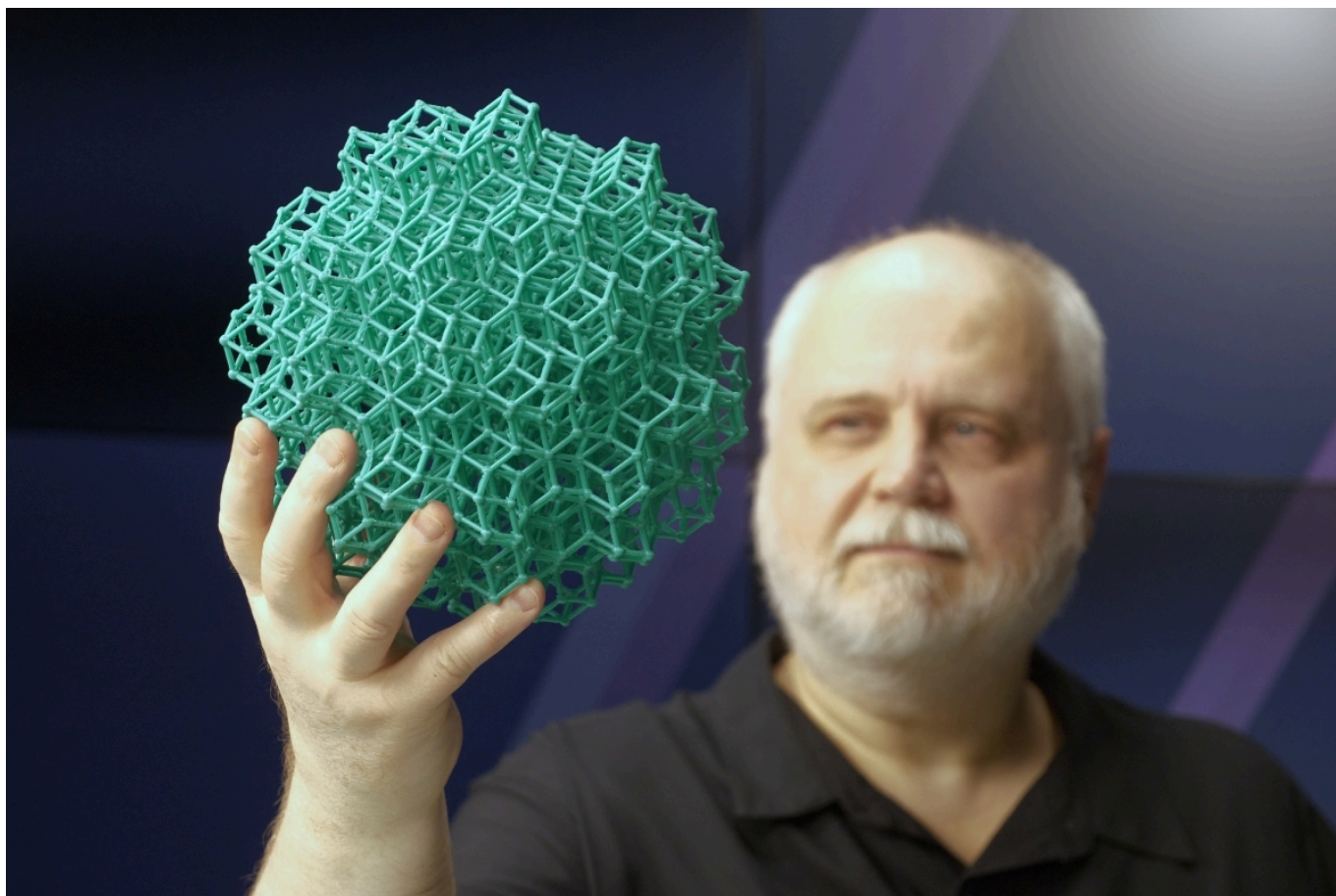


## Алексей МАДИСОН: «Массовое практическое применение квазикристаллов - пока еще задача будущего»



Алексей МАДИСОН: «Массовое практическое применение квазикристаллов - пока еще задача будущего»

В интервью с Алексеем МАДИСОНОМ, ведущим научным сотрудником Центра перспективных исследований СПбПУ, у нас появилась возможность для дискуссии о неочевидных и труднопрогнозируемых областях применения труднопредсказуемых открытий. Сегодня мы углубимся в природу квазикристаллов — этого важного, но малоизвестного широкой общественности феномена, которым и занимается Алексей Евгеньевич. Что собой представляют эти «почти кристаллы»? И почему с тех пор, как в 2011 году за их открытие израильскому ученому Дану ШЕХТМАНУ (Dan Shechtman) была присуждена Нобелевская премия по химии, они стали считаться одним из величайших открытий в химии и кристаллографии за последнее столетие? Алексей Евгеньевич пояснил, что такое квазикристаллы, оценил возможные перспективы их использования и высказал мнение о том, насколько сильна современная российская научная школа в этой области. Кстати, на фото вы видите 3D-модели квазикристаллов, которые появились благодаря сотрудничеству ученых-политехников с известным кристаллографом, профессором Сколковского института науки и технологий (Сколтех) Артемом Ромаевичем ОГАНОВЫМ.



- Алексей Евгеньевич, не могли бы вы пояснить для неспециалистов, в чем суть открытия Шехтмана?

- Первое сообщение о квазикристаллах датируется ноябрем 1984 года, когда израильский ученый Дан Шехтман с соавторами опубликовал результаты своих экспериментальных исследований в авторитетном научном журнале *Physical Review Letters*. Примечательный факт: открытие было совершено в 1982 году, но первая попытка его опубликования оказалась безуспешной. Статья, посланная в журнал *Journal of Applied Physics*, была практически сразу же отвергнута без детального рассмотрения, поскольку, по мнению редакции, рукопись «не представляла интереса». Итак, в статье Шехтмана сообщалось, что при изучении сплава алюминия и марганца были обнаружены совершенно необычные свойства. С одной стороны, материал имел все признаки кристалла (точечную картину электронной дифракции), а с другой — так называемую «пентагональную» симметрию — явление, которое в классической кристаллографии попросту запрещено. То есть исследованный Шехтманом материал сочетал два взаимоисключающих (с точки зрения традиционных представлений) свойства: у него была ось симметрии пятого порядка, и он имел дальний порядок! Мысль о том, что в новом материале реализуется иной тип порядка по сравнению с обычными кристаллами с огромным трудом пробивала себе путь среди мнений скептиков — порядок ничуть не менее строгий, каждый кирпичик строго на своем месте, просто отсутствует периодичность.

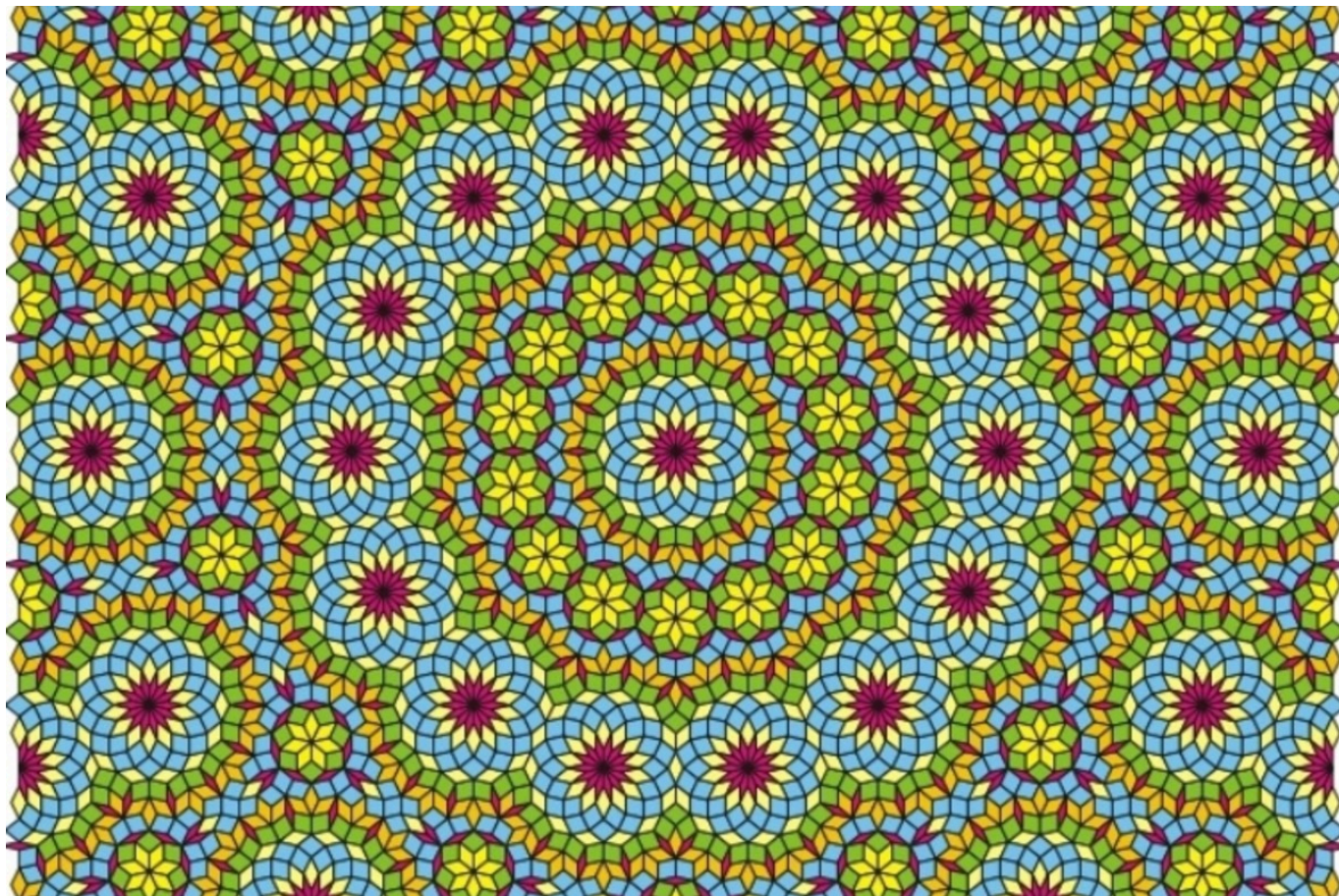
- Алексей Евгеньевич, поясните, пожалуйста: что такое квазикристаллы и чем они отличаются от обычных кристаллов?

- В переводе с древнегреческого κρύσταλλος означает «лед». Очевидно, так получилось потому, что именно его впервые начали изучать люди и удивляться необыкновенным свойствам. Впоследствии выяснилось, что почти все камни, почти все горные породы состоят из кристаллов, руды металлов и сами металлы, выплавляемые из этих руд. Соль, сахар, драгоценные камни и многое вокруг нас — это кристаллические вещества. Но позже возникли сомнения — а являются ли снежинки кристаллами, в классическом понимании этого слова? Форма снежинок демонстрирует иерархию и самоподобие.

Обычные кристаллы представляют собой твердые тела, в которых атомы или молекулы расположены закономерно, образуя трехмерную периодическую пространственную укладку — кристаллическую решетку. Любой кристаллической структуре присуща определенная симметрия. Из классической кристаллографии мы знаем, что существует ограниченный набор способов построения твердого тела из одинаковых ячеек — 230 Федоровских групп. То есть главное свойство кристаллов — периодичность и связанная с ней симметрия. Точнее — так длительное время считалось. Потому что фразы «атомы расположены закономерно» и «атомы расположены периодически» не тождественны друг другу.

Требование бесконечной периодичности ограничивает набор возможных осей симметрии. Так, в «настоящих» кристаллах могут присутствовать лишь оси второго, третьего, четвертого и шестого порядков, что соответствует поворотам на 180, 120, 90 и 60°. Это означает, что кристалл может совпасть с собой при вращении вокруг этой оси два, три, четыре или шесть раз. Чтобы это понять, достаточно взять в руки детскую мозаику или вспомнить тротуарную плитку. Кристалл — то же «мощение», только трехмерное, причем «плитки» должны прилегать друг к другу плотно, без щелей, но и не идти внахлест. Легко удастся «замостить» плоскость одинаковыми треугольниками, параллелограммами, квадратами и шестиугольниками — и только. В этом суть основной ограничительной теоремы кристаллографии. Мостить тротуар пятиугольниками, семиугольниками и восьмиугольниками не получится — они будут «налезать» друг на друга, либо между ними останутся большие щели. Точнее — так длительное время считалось. Роджер ПЕНРОУЗ, удостоенный в 2020 году Нобелевской премии по физике, смог решить эту задачу. Теперь его знаменитый паркет можно увидеть, например, в Оксфорде, в сквере рядом с Новым корпусом математического факультета. Решение очень изящно — достаточно взять два типа плиток.





-Так, с кристаллами вроде разобрались. А что в квазикристаллах происходит?

- В 2014 году журналом Nature был издан специальный выпуск Nature Milestones in Crystallography, приуроченный к празднованию 100-летнего юбилея открытия дифракции рентгеновских лучей в кристаллах. В этом выпуске открытие квазикристаллов отмечается как одна из основных вех в развитии современной кристаллографии. При этом подчеркивается ключевой вклад трех выдающихся ученых — Алана Маккея, Дана Шехтмана и Пола Стейнхардта. Алан Маккей исследовал дифракцию от паркета Пенроуза и сделал вывод, что химики могут интуитивно отвергать возможность существования некоторых неизвестных структур, основываясь лишь на догмах о невозможности их существования — порочный круг ошибочных логических рассуждений. Дан Шехтман был первым, кто обнаружил и исследовал фазу с икосаэдрической симметрией. Пол Стейнхардт с сотрудниками предложил первое теоретическое объяснение на основе многомерной кристаллографии и ввел в обиход сам термин «квазикристаллы».

Вернемся к обсуждению результатов Шехтмана. Полученный и исследованный им материал сочетал два, казалось бы, взаимоисключающих свойства: у него была ось симметрии пятого порядка, и он имел дальний порядок! Получился парадокс. В 2011 году Нобелевский комитет в своем представлении особо подчеркивал, что идеи Шехтмана на момент совершения открытия воспринимались как в экстремальной

степени противоречивые и спорные. Придерживавшиеся традиционных взглядов ученые категорически отказывались верить в существование квазикристаллов. В частности, двукратный Нобелевский лауреат Лайнус ПОЛИНГ считал, что симметрия пятого порядка появляется в результате циклического двойникования обычных кубических кристаллов, а все разговоры о квазикристаллах — результат некорректной интерпретации эксперимента. Ему принадлежит едкое замечание: «Не бывает квазикристаллов, бывают только квази-ученые».

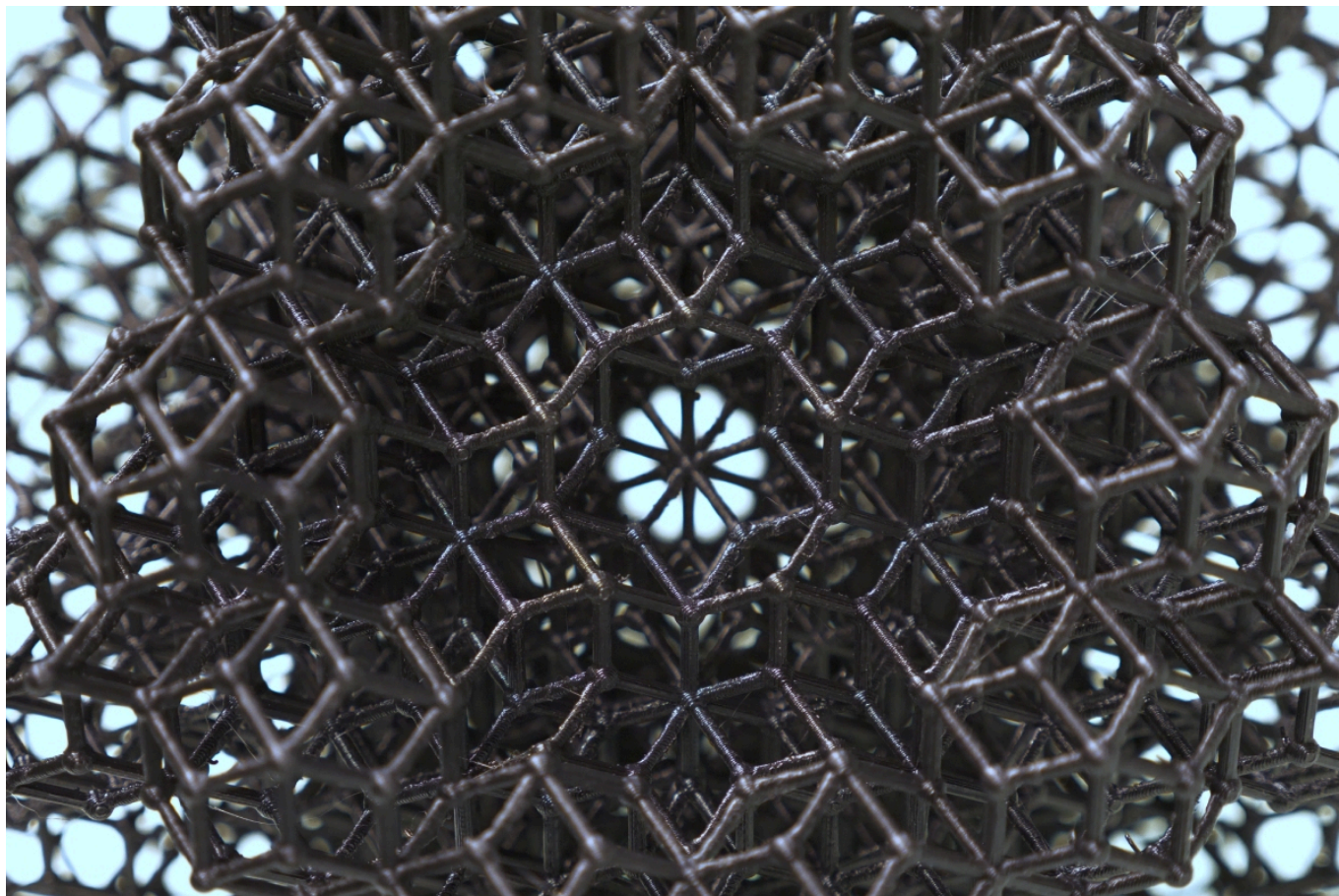
- Все-таки, почему такое необычайное внимание к квазикристаллам?

- Открытие квазикристаллов распахнуло перед учеными новые горизонты в области строения вещества и произвело революцию в наших взглядах на возможное взаимное расположение атомов и молекул. Главное, была показана возможность существования этих завораживающе красивых структур в мире реальных объектов. С тех пор уже найдены и изучены сотни квазикристаллов — не только металлических сплавов, но и некоторых полимеров. Изучение квазикристаллов — истинно междисциплинарная наука будущего, соединяющая в себе химию, физику, математику и науки о материалах. Сейчас десятки групп по всему миру изучают уникальные свойства квазикристаллов, интересные как для фундаментальной, так и для прикладной науки.

Можно сказать, что это стало новой парадигмой в химии. Международный союз кристаллографов был вынужден пересмотреть само название «кристалл». На тот момент комиссию по аперриодическим кристаллам возглавлял Рон ЛИВШИЦ. Кстати, он приезжал к нам в 2008-м, когда Политехнический университет организовывал конференцию NanoBio-08. Директор Центра перспективных исследований Сергей Васильевич КОЗЫРЕВ приложил тогда немало усилий для общего успеха того форума. Так вот, Рон пояснил, что комиссия тогда так и не смогла четко сформулировать, что следует понимать под различными способами упорядочения атомов в кристаллах, и приняла временное определение, которое остается актуальным до сих пор. Сейчас под кристаллом понимают любое твердое тело, обладающее существенно-дискретной дифракционной картиной.

Однажды мне довелось послушать и Шехтмана. Очень яркий человек! Это было в 2004-м году, когда он приезжал в Санкт-Петербург как участник российско-израильского семинара. Я тогда работал в Институте химии силикатов, меня в числе прочих сотрудников ему представили, кажется, сделали коллективную фотографию. Лично для меня это было запоминающимся событием. Все-таки люди такого калибра встречаются в моей жизни гораздо реже, чем люди моего уровня в его.





- А насколько, по вашему мнению, сильна российская научная школа в области квазикристаллов?

- Есть ученые очень хорошего уровня. В первую очередь называю тех, с кем контактировал сам и имел продуктивный результат от общения. Владимир Евгеньевич ДМИТРИЕНКО из Института кристаллографии, долгое время он был региональным редактором "Acta Crystallographica A", входил в состав комиссии по аперiodическим кристаллам Международного союза кристаллографов (IUCr). Александр Леонидович ТАЛИС, сейчас он работает в Институте элементоорганических соединений имени Несмеянова (ИНЭОС РАН). Он — ученик Владимира Александровича КОПЦИКА, видного отечественного кристаллографа, долгое время работал у Людвиг ДАНЦЕРА в Университете Билефельда (крупный научно-исследовательский центр Германии. — Примеч. Ред.). К сожалению, «иных уж нет, а те далече»... Считалось, что существует разбиение Стейнхарда на «золотые» зоноэдры, и каноническое разбиение Данцера на тетраэдры. В совместной работе ДАНЦЕРА и ТАЛИСА была показана полная эквивалентность подходов. Еще могу назвать Валентина Сидоровича КРАПОШИНА. В свое время он рассказывал про квазикристаллы в программе «Наука 2.0» на телеканале «Россия 24». Кстати, есть специальная международная премия «За выдающиеся достижения в области квазикристаллов» — "Jean Marie Dubois Award for Excellence in Quasicrystal Research". Так вот, у КРАПОШИНА и ТАЛИСА была работа в соавторстве с ДЮБУА (Жан Мари ДЮБУА был первым, кто обратил внимание на широчайшие перспективы применения квазикристаллов, когда само

их существование еще ставилось под сомнение). Можно назвать еще Владислава Анатольевича БЛАТОВА из Самарского университета — лауреата премии "Russian Highly Cited Researchers Award". В общем, немало у нас сильных ученых. Из целых научных групп хотел бы отметить успехи ученых из Томского политехнического университета — они сотрудничают непосредственно с самим Даном Шехтманом.

Нельзя не назвать академика Владимира Ярославовича ШЕВЧЕНКО, у него целая серия совместных работ с Аланом Маккеем. В двух из них соавтором был и ваш покорный слуга. Мне тогда довелось в течении семи лет поработать под его руководством. Очень неординарный, сложный и жесткий человек. Помню, на его рабочем столе была фотография, подаренная ему лично — «Маршалы Победы»... А еще он коллекционирует фигурки бегемотов. У него их целое стадо! Три бегемотика в его стаде появились благодаря моим стараниям.

Еще раз оговорюсь — я упомянул только тех, с кем имел удовольствие общаться лично. Так что, по моей оценке, потенциал отечественных ученых в этой области весьма высок, и российская научная школа обладает всеми необходимыми компетенциями.

И, конечно же, очень рад назвать известного российского ученого, кристаллографа-теоретика, профессора Сколковского института науки и технологий Артема ОГАНОВА. Проработав более 15 лет на Западе, он вернулся в Россию. Среди прочего, он известен тем, что предложил метод предсказания новых кристаллических структур USPEX — это особенно полезно при разработке материалов для экстремальных условий, где эксперименты делать тяжело и дорого, а иногда и вовсе невозможно. Если кто-либо впервые приступает к изучению квазикристаллов, я бы советовал начать ознакомление с его видео-лекции на YouTube. К слову, наши 3D-модели квазикристаллов были распечатаны в Сколково благодаря сотрудничеству с Артемом Ромаевичем. Верю, что этим наша совместная работа не ограничится.





- А где могут использоваться квазикристаллы?

- Как только были обнаружены их необычные свойства, эти материалы начали интенсивно изучать. Сразу же, начиная с 1980-х, исследования квазикристаллов — изучение их свойств, методов получения и способов применения — пошли очень активно по всему миру. С тех пор ученые получили около 200 подобных веществ. Возможности практического применения квазикристаллов на данный момент определяются их прочностью, низким коэффициентом трения, низкой теплопроводностью и необычными электропроводящими свойствами. Например, если порошок из квазикристалла добавить в металл, можно существенно добавить ему прочности. У них практически все свойства «необычные»! Но, несмотря на интереснейшие свойства квазикристаллов, их массовое практическое применение — это пока по-прежнему задача будущего. Потому что фундаментальные проблемы расшифровки структур синтезированных квазикристаллов, как и предсказания структур еще не синтезированных, пока еще решены не полностью. Промышленное внедрение тормозит ряд технических проблем: производство значительных количеств квазикристаллов — непростая, хотя и решаемая задача, а цена их пока чрезвычайно высока.

- И все же, если бы спросили именно вас, то какие возможности практического применения квазикристаллов вы назвали бы в первую очередь?

- Чтобы уберечься от скоропалительных заключений, я бы посоветовал перечитать



Нобелевскую лекцию Герберта КРЕМЕРА. Вы помните, ему была присуждена Нобелевская премия совместно с Жоресом Ивановичем АЛФЕРОВЫМ? Он описывает ситуацию, когда вся их исследовательская лаборатория была лишена финансирования на том основании, что этот их полупроводниковый инжекционный лазер на двойной гетероструктуре, по-видимому, не будет иметь каких-либо существенных применений в обозримом будущем. Понимаете? Открытие, удостоенное Нобелевской премии, по мнению экспертов, было бесперспективным! Кстати, первоначальный вариант статьи Кремера с описанием полупроводникового лазера, посланный в журнал "Applied Physics Letters", также был отклонен.

Так вот, Герберт Кремер писал, что абсолютно неприемлемо мотивировать научное исследование вероятными многообещающими мифическими усовершенствованиями в уже существующих областях. В конечном счете, прогресс в прикладной науке не предопределен, а имеет случайный характер, используя для новых применений все достижения, которые появились в науке и технологии. Ошибочно оценивать принципиально новую технологию не с той позиции, какие новые области она может породить, а только лишь с точки зрения полезности для уже существующих приложений. Это в высшей степени ошибочный подход! Это означает, что следует быть дальновидным при оценке потенциальных возможностей новой технологии. Ее нельзя оценивать только по тому, как она может встроиться в уже существующие области. Не всегда можно реалистически предсказать, какие новые применения возникнут, но можно создать способствующую прогрессу атмосферу, не спрашивая немедленно, а где это новое может быть полезно.

Если вернуться к квазикристаллам, то они показали, что «порядок» — это не то же самое, что «ходить строем». Порядок не обязательно означает стенку, выложенную из одинаковых кирпичей. Это — разрыв шаблона. Еще раз подчеркиваю — не зря за них Нобелевскую премию присудили! Это ведь имеет отношение не только к физике или химии, но и к обществу, к экономике. Это коренным образом меняет ход мыслей человека. На мой взгляд, это самое важное. Вспоминая студенческие годы и аспирантуру, скажу, что иногда мне казалось, что людей тогда рассматривали как неотесанные булыжники, которым следует придать «правильную» форму и полученные символические «кирпичи» встроить в общий миропорядок, где все равны. И такое общество будет гармоничным. Над такими «строителями» подсознательно довлеет самоограничение, что понятие порядка не изменилось за две тысячи лет. Они подсознательно вкладывают в это понятие тот же смысл, который вкладывал средневековый каменщик. Да и сейчас, наверное, многие так считают. Вспоминается евангельская притча — «камень, отвергнутый строителями, ставится во главу угла». Понимаете, если бы средневековому каменщику попал в руки набор

плиток Пенроуза, он бы их отверг! Потому что для привычной каменной кладки они не годятся.

Есть еще одна нездоровая тенденция, касающаяся революционных открытий. Яркий пример приводит все тот же Шехтман. Он пишет, что уже после церемонии награждения Нобелевской премией ему позвонил один его старый знакомый профессор и сказал, что, перебирая свои архивные данные, он обнаружил практически точно такие же электронограммы. Причем результаты были получены на несколько лет раньше Шехтмана. Профессор связался со своим тогдашним аспирантом и поинтересовался у него, почему он не обратил внимания на симметрию пятого порядка, почему же он не пришел к своему научному руководителю, не заострил внимания и не стал заниматься потенциально Нобелевской тематикой вплотную? Ответ был обескураживающим — да, он сразу обратил внимание на неожиданный результат, но... У него шел последний год аспирантуры, и, если бы он занялся этой тематикой, он не смог бы защитить свою диссертацию в срок. А на тот момент его как раз рассматривали как наиболее достойного кандидата на занятие достаточно привлекательной административной должности в индустрии. Поэтому он вполне осознанно отверг работу над экстремально парадоксальными и многообещающими предварительными результатами в пользу благополучной карьеры и обеспеченности. Возведение подобного жизненного принципа в систему — это серьезнейшая проблема современного общества.

Так что, если вернуться к разговору о потенциальных областях применения, то кардинально новое научное открытие само открывает для себя кардинально новые области. Причем зачастую революционное открытие вынужденно ждать развития смежных областей знания, пока эта самая долгожданная «область применения» возникнет. Например, открытие жидких кристаллов произошло в 1888 году, а основная их область применения сегодня — это жидкокристаллические мониторы для персональных компьютеров. Область «первого обнаружения» и область будущего использования кардинально нового научного открытия очень далеко отстоят друг от друга и во времени, и с точки зрения детального понимания лежащих в его основе физических принципов, и с точки зрения технологической реализации.

Жидкокристаллические мониторы были немыслимы на момент открытия жидких кристаллов. Также и область будущего применения квазикристаллов вряд ли будет областью применения легких многокомпонентных металлических сплавов. Даже наоборот — уверен, область основного будущего применения квазикристаллов гарантированно не будет той областью, в которой они были первоначально обнаружены.

Этот новый вид порядка можно попробовать реализовать на разных масштабах. Если

говорить о структуре из атомов, то сегодня это легкие металлические сплавы с уникальными свойствами. Если упаковывать коллоидные частицы под воздействием облучения несколькими симметричными лучами лазеров, то реализуется такой же порядок, но на другом уровне масштабов, и свойства другие. Следующий масштаб — получаем фотонные квазикристаллы. Следующий — собираем композиционный материал, но не как керамику, а строго упорядоченным образом располагаем «волоски», «иголочки», «палочки», «шашечки», и прочее из разных веществ, а потом «испечем пирог с начинкой» — и получится метаматериал. Уже сейчас продемонстрирована возможность создания искусственных метаматериалов, обладающих отрицательным или нулевым коэффициентом преломления. Это приводит к тому, что излучение от них будет отражаться по другим законам, и это может стать основой для создания невидимых предметов. Также подобные материалы могут применяться для изготовления оптических ключей. Или создания «эффекта шапки-невидимки» — это если бы я пояснял вам так, как будто вам четыре года. Если аналогичным образом управлять акустическим импедансом, то подобный материал может стать невидимым для ультразвукового сонара. Я бы не исключал возможности, что квазикристаллические метаматериалы в недалеком будущем лягут в основу нового поколения стелс-технологий. Кстати, на эту тему появилось несколько очень серьезных публикаций в "Nature". Однако мое личное мнение, что успех здесь может быть достигнут только параллельно с прогрессом в еще одной революционной области — это изучение закрученных состояний и оптических вихрей (optical vortices).

Повторюсь, не всегда можно реалистически предсказать, какие новые применения возникнут, и где именно новое открытие может стать полезным. Помню, в студенческие времена я изучал физику твердого тела по замечательному учебнику Нейла АШКРОФТА и Дэвида МЕРМИНА. Мермину принадлежит мудрое высказывание: «Я жду того дня, когда люди поймут, что открытие совершается не потому, что кто-то захотел его сделать — и сделал». Мое мнение — просто каждый на своем месте должен относиться ответственно к своей работе, объединять усилия с коллегами, расширять свой личный кругозор, способствовать преемственности знаний и не путать научный результат с сиюминутным успехом.