



ДЕТИ СОЛНЦА

Среди заснеженных подмосковных просторов, вдали от столичной суеты находится Долгопрудненская научная станция ФИАН, носящая поэтическое название «Лаборатория физики Солнца и космических лучей». Путь сюда непрост: «Езжайте мимо новых корпусов МФТИ, потом по дорожке до зеленого забора, — предупреждает заведующий станцией доктор физико-математических наук **Владимир Салимгереевич Махмутов**. — Дальше ехать не надо, дорога занесена снегом». Мы нашли нужный забор, постучали... Трудно предположить, что в этих маленьких уютных домиках, где с крыш свисают огромные сосульки, проводятся уникальные научные эксперименты и рождаются важные открытия, имеющие планетарное значение. Но это правда.

— **Владимир Салимгереевич, давайте вспомним, как все начиналось.**

— Наша лаборатория носит имя академика С.Н. Вернова. Именно по его инициативе в 1946 г. была создана Долгопрудненская научная станция (ДНС) Физического института Академии наук СССР. Он стал ее первым директором.

История возникновения станции крайне интересна: как раз в эти годы в Советском Союзе были начаты работы по атомному проекту. Атомное оружие — это ядерные реакции, и нужно было получить определенные физические константы, характеристики взаимодействия. В этих целях 4 марта 1946 г. И.В. Сталин подписал решение Совета народного хозяйства о создании в городе Долгопрудном научной станции Физического института АН СССР для изучения космических лучей в атмосфере Земли. С этого момента станция начала свою жизнь. Несмотря на то что прошло уже много лет, наш коллектив успешно работает, и это здание у нас до сих пор «живое».

— **Умели строить!**

— Кроме главного корпуса у нас есть несколько небольших лабораторных и производственных построек, которые мы стараемся сохранить в рабочем состоянии. Здесь, на Долгопрудненской научной станции, более 70 лет назад начались экспериментальные работы по изучению физики ядерных взаимодействий. Были разработаны и созданы соответствующие экспериментальные установки, которые строились на счетчиках заряженных частиц. Основная задача включала в себя изучение состава и спектров космических лучей и характеристик их ядерных взаимодействий с ядрами воздуха в широком интервале энергий. Эксперименты проводились на шарах-зондах, а позднее — на высотных самолетах. Ученые поднимали свою аппаратуру вплоть до высот 25–30 км и получали необходимые экспериментальные данные о физических взаимодействиях заряженных частиц высоких энергий. Таким образом, во второй половине 1940-х гг. прошлого столетия были начаты

атмосферные исследования в области ядерной физики и физики космических лучей, которыми мы занимаемся и по сей день.

— Как связаны ядерные взаимодействия и космические лучи?

— Космические лучи, которые поставляет наша Галактика, состоят из заряженных частиц. В результате взаимодействия этих частиц высоких энергий с ядрами воздуха происходят ядерные реакции в атмосфере. Продукты таких реакций мы с вами видим начиная с поверхности Земли до высот 30–35 км, куда поднимаются наши приборы. Кроме запусков радиозондов мы проводим эксперименты с помощью наземных установок, которые регистрируют потоки заряженных и нейтральных частиц. Это установки типа «Ковер» — по-английски *CARPET*.

— Почему «Ковер»?

— Расположение счетчиков ковровое: сверху одна плоскость счетчика, внизу — другая. Две плоскости счетчиков разделены поглотителем. Он используется для того, чтобы разделить потоки заряженных частиц по энергии. Такая методика позволяет отделить частицы космических лучей от радиоактивности.

Другой тип детекторов регистрирует нейтронный компонент космических лучей. Но эти установки — лишь дополнение к нашему основному эксперименту.

— А что представляет собой основной эксперимент?

— Наша лаборатория была создана для исследования космических лучей и процессов их ядерных взаимодействий в атмосфере Земли. Поэтому с момента ее создания по настоящее время мы проводим запуски научной аппаратуры в атмосферу. До 1957 г. такие измерения были нечастыми (один-два раза в месяц), а начиная с середины 1957 г. стали проводиться чаще. Три раза в неделю осуществляются одновременные запуски шаровзондов в Антарктиде, в обсерватории «Мирный», в Мурманской области, совместно с сотрудниками Полярного геофизического института РАН, и здесь, на Долгопрудненской научной станции ФИАН. Прямо с этой площадки перед нашим зданием и происходит запуск научной аппаратуры — радиозондов космических лучей. Если завтра придете, станете свидетелями такого события.

— Как выглядит радиозонд космических лучей?

— Стандартный радиозонд космических лучей включает в себя детекторы заряженных частиц — газоразрядные счетчики, электронную схему с радиопередатчиком, датчик атмосферного давления и батареи питания. Все эти составные части помещены в пенопластовый корпус, чтобы обеспечить нормальный температурный режим для их работы. На высотах более 10 км температура

понижается до -60 – -80°C . После сборки и настройки радиозонд запускается в атмосферу на метеорологической оболочке. Вес современного радиозонда не превышает 600 г. Эта аппаратура должна быть достаточно легкой, чтобы подняться до высот 30–35 км. По радиоканалу мы ежеминутно получаем сигнал с нашего датчика.

— Где производят эту научную аппаратуру?

— С самого начала эксперимента ее собирают в этих стенах — ежегодно по 500 радиозондов. У нас сохранились старые образцы первых приборов, которые работали на ламповых элементах и весили 3 кг. Сейчас аппаратура стала значительно легче и одновременно усложнилась. Только детекторы заряженных частиц, которые покупаем на Саранском заводе, остались практически прежними. Электронные платы, позволяющие зарегистрировать и сформировать сигналы со счетчиков, мы собираем в нашей лаборатории. Своими силами изготавливаем датчики атмосферного давления и градуируем их на специальном стенде. Передатчик с разных высот атмосферы передает данные о потоках заряженных частиц. Очень важно, что эта информация идет сразу из трех пунктов наблюдений, так как потоки заряженных частиц в атмосфере зависят от геомагнитной широты.

— Что дают эти исследования?

— В первую очередь, они имеют фундаментальный характер. Главная задача заключается в том, чтобы исследовать потоки космических лучей в земной атмосфере и ответить на вопрос, насколько они стабильны, как они меняются со временем, каковы причины, вызывающие их модуляцию. Мы как земные наблюдатели видим потоки вторичных заряженных частиц в атмосфере, но породившие их первичные частицы приходят к нам издалека. Можно сказать, это отголоски галактических процессов — вспышек сверхновых звезд в нашей Галактике, которые поставляют космические заряженные частицы. Потом эти частицы приходят в Солнечную систему, где на них действует солнечный ветер, вызывающий модуляцию или временные изменения потоков частиц. Потоки заряженных частиц поставляют и Солнце, когда на нем происходят мощные вспышки. Во время таких процессов ускоряются протоны, ядра (вплоть до ядер железа) и электроны. Кроме того, нередко в земную атмосферу в полярных районах высыпаются из магнитосферы Земли потоки электронов. Нам необходимо дифференцировать все эти потоки, разобраться с их происхождением, различиями, влиянием на земную жизнь. Например, потоки космических лучей, которые модулируются Солнцем, поступают в нашу атмосферу и активно участвуют в образовании облачности. А от площади, покрытой облаками, зависят глобальная температура нижней атмосферы и климат на Земле.



Доктор физико-математических наук В.С. Махмутов

— Таким образом, фундаментальная наука оказывается близкой каждому из нас.

— Безусловно. Потoki космических лучей служат главным источником ионизации в атмосфере. А ионизация играет огромную роль в атмосферных и электрических процессах, происходящих в земной атмосфере. Как вы знаете, Земля обладает электрическим полем. Его напряженность в приземном слое — порядка 120 В/м. Чем оно обусловлено? Именно ионизацией, которую создают космические лучи в атмосфере. Поэтому, исследуя вариации космических лучей, атмосферное электричество, магнитные возмущения, мы можем получить новую информацию о глобальном электрическом поле, об атмосферных процессах, таких как, например, нуклеация в земной атмосфере. Этот термин необходим для описания процессов создания кластеров молекул, которые в дальнейшем перерастают в зародыши облаков. Наши наблюдения потоков заряженных частиц в атмосфере позволяют также осуществлять оперативный контроль уровня ее радиоактивности. Радиоактивные облака в атмосфере появляются после испытаний ядерного оружия или аварий на предприятиях, использующих радиоактивные материалы.

— Удалось ли вам выявить закономерности в свойствах космических лучей?

— Да, детально исследованы 11-летний и 22-летний циклы в космических лучах, вызываемые соответствующими циклами на Солнце. Получены новые данные о связи потоков космических лучей

с электрическими явлениями в атмосфере. Например, молниевые разряды, которые видит каждый житель Земли, возникают благодаря космическим лучам, попадающим в нашу атмосферу. Изучены характеристики солнечных космических лучей, которые представляют серьезную опасность для космонавтов. В 2009 г. и в настоящее время потоки галактических космических лучей выросли более чем на 10%. Причина этого роста связана с уменьшением модуляции галактических потоков частиц, на которые очень сильно влияет солнечная активность.

— То есть солнечная активность тоже растет?

— Здесь как раз наоборот. Чем Солнце активнее, чем больше на нем пятен, или так называемых активных областей, тем больше возмущений выбрасывается в межпланетную среду. И, соответственно, эти межпланетные возмущения «выметают», как метлой, часть галактических космических лучей. И тогда потоки, которые приходят в межпланетное пространство и на Землю, уменьшаются.

— Получается, что активность Солнца в последние 60 лет уменьшается? А мы все время слышим, что увеличивается, что там происходят аномальные вспышки...

— Это не так. На основании экспериментальных данных, полученных в России и за рубежом, можно констатировать, что на протяжении последних 10–15 лет уровень солнечной активности уменьшается. Если говорить о временном ряде солнечных пятен, то он показывает все меньшие значения в максимуме солнечной активности. Сейчас мы переживаем эпоху глобального уменьшения солнечной активности.

— Но ведь это не означает, что Солнце затухает?

— Нет, речь идет лишь о продолжительном минимуме солнечной активности. Такие минимумы наблюдались на Солнце и в прошлом. Они происходят примерно раз в 150–200 лет. И мы видим этот процесс в нашем стратосферном эксперименте. Хотя и в этот период спада солнечной активности светило преподнесло нам сюрприз: 6–10 сентября 2017 г., на фазе спада активности, вблизи ее минимума вдруг появилась активная область, которая произвела серию солнечных вспышек высокого класса и огромный выброс коронального вещества. Ускоренные заряженные частицы вторглись в атмосферу Земли и достигли ее поверхности. Мы зарегистрировали эти потоки частиц в Антарктиде, а также измерили их на севере.

— Наверняка все это влияет на работу космических станций, спутников?

— Конечно, влияет, поскольку эти потоки увеличивают радиационную нагрузку на космонавтов, на все объекты, которые находятся либо в космическом пространстве, либо даже в атмосфере Земли.

— Как это отражается на земной жизни?

— Увеличивается ионизация в земной атмосфере, а это влияет на процессы, происходящие в ней, в том числе и на образование облачности. Люди, находящиеся на Земле, тоже могут почувствовать этот эффект, но благодаря тому, что существует атмосфера, эти потоки сильно уменьшаются.

— Это с точки зрения биологии. А с точки зрения техники проблемы могут быть куда серьезнее?

— Да, это так. Уже есть случаи выхода из строя земной техники из-за подобных процессов. Магнитные возмущения, которые приходят извне и взаимодействуют с магнитосферой Земли, вызывают значительные колебания геомагнитного поля, а это, в свою очередь, приводит к возникновению индукционных токов и полей в линиях электропередач и газопроводах. Сама ионизирующая радиация приводит к повреждениям и поломкам в аппаратуре спутников. В результате происходит усиленная деградация солнечных батарей, нарушения в системах связи, мобильной сети, GPS-систем.

— Можете ли вы все это предсказать и предупредить о возможных проблемах?

— В принципе да, и это одна из наших задач. Уже есть случаи, когда благодаря подобным предсказаниям космонавты, находящиеся на МКС, перемещались в специальные отсеки, чтобы защититься от таких потоков.

— А ваша техника не ломается от таких космических потоков?

— Нет. Дело в том, что у нас выбран специальный тип газоразрядных счетчиков, которые могут регистрировать потоки заряженных частиц при их увеличении в 10–20 раз. Мы знаем, что потоки, которые придут к нам, будут успешно зарегистрированы, а наша аппаратура при этом из строя не выйдет.

— Насколько исключительны ваши исследования?

— Они уникальны. Наш эксперимент давно вышел за рамки камерного, имеющего значение только для нашей лаборатории или нашего института. Речь идет об исследованиях, важных для всего человечества, поскольку мы охватываем и северные полярные зоны, и Антарктиду, и среднюю полосу. Эти исследования имеют планетарный характер. Однородный ряд экспериментальных данных о потоках заряженных частиц на разных высотах в атмосфере — единственный в мировой науке. Кстати, за исследования модуляционных эффектов в космических лучах и вспышек солнечных космических лучей в 1976 г. ряд сотрудников Долгопрудненской научной станции были удостоены Ленинской премии.

Кроме того, из стратосферного эксперимента вырос другой, не менее крупный и амбициозный эксперимент — *CLOUD* (англ. *Cosmics Leaving Outdoor*

Droplets, «Космические причины, вызывающие образование водных капель»), который проводится в швейцарском *CERN*. В его подготовке участвовало большое число специалистов по атмосферной физике и химии из известных европейских институтов и США. Он начался 2006 г. и продолжается в настоящее время. Один из важнейших результатов проекта *CLOUD* — всестороннее исследование процесса нуклеации в земной атмосфере. Были разработаны и созданы экспериментальные установки. В частности, наша лаборатория создала годоскоп — набор сцинтилляционных детекторов, систему типа матрицы, которая позволяет получить изображение пучка частиц от ускорителя и измерить его величину. Для регистрации потоков космических лучей и оценки ионизации нами также был разработан и создан детектор космических лучей. Оба детектора до сих пор успешно работают. Ежегодно наши сотрудники выезжают в Швейцарию для проведения запланированных исследований и профилактических работ. Участники проекта регулярно отчитываются перед научным директором *CERN*, причем с точки зрения не только научной работы, но и подготовки молодых научных кадров. Очень важно, что в любом научном проекте, который проводится в *CERN*, должна участвовать молодежь. Для ребят это мотивация, и неудивительно, что многие из них потом остаются в проекте. Наши студенты, к сожалению, не попадают туда по формальным признакам. Хотя талантливых ребят среди наших студентов тоже хватает. Надеюсь, мы к этому тоже потихонечку придем.

— Что нового удалось узнать о нуклеации?

— Одна из химических составляющих, очень важных в земной атмосфере, — серная кислота, которую поставляет сама природа, в том числе антропогенная деятельность. Эти молекулы H_2SO_4 в соединении с молекулами воды дают либо двухкомпонентную нуклеацию частиц, либо, в присутствии других элементов, так называемую многокомпонентную нуклеацию. Один из важных результатов нашего эксперимента показал, что поток заряженных частиц, который поступает в камеру установки *CLOUD*, может в десятки раз увеличить скорость этого процесса. Таким образом, показан эффект влияния заряженных частиц на процесс многокомпонентной нуклеации в земной атмосфере. Чем выше поток заряженных частиц, тем выше скорость нуклеации. Эти работы были представлены на многих высокорейтинговых конференциях, опубликованы в журналах *Nature*, *Science* и др.

— Дают ли ваши исследования дополнительные сведения о возникновении жизни на Земле?

— Это очень интересный вопрос. Напрямую он нами не ставился, но в принципе мы можем ответить, какие существовали потоки частиц в ту или

иную эпоху, какая была ионизация, каковы эффект от этой ионизации и ее влияние на создание условий облачности на Земле, выпадение осадков и т.д. Все это, конечно, могло влиять на возникновение и развитие жизни на нашей планете.

Другой важный международный эксперимент — космический проект *PAMELA* (англ. *Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*) по исследованию антиматерии и астрофизики легких ядер. Его основная задача — получение экспериментальных данных о потоках заряженных частиц: электронов, протонов, различных ядер вплоть до углерода, а также позитронов и антипротонов. В стенах нашей лаборатории был разработан и создан нейтронный детектор, вошедший в состав спектрометра *PAMELA*.

Этот эксперимент успешно выполнялся в околоземном космическом пространстве на борту российского спутника «Ресурс-ДК1» в период с 2006 по 2016 г., то есть в течение десяти лет вместо ожидаемых трех. Спектрометр *PAMELA* все это время находился в космическом пространстве и получил массу уникальной информации о потоках космических лучей, их составе и спектрах. Среди участников этого проекта — научные организации из Италии, Германии, Швеции и других стран. С российской стороны участниками этого эксперимента были Московский инженерно-физический институт (МИФИ), ФИАН и Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург).

— **Какие результаты были получены?**

— Результатов очень много, обо всех рассказать сложно. Но среди самых важных и существенных — впервые в 2009 г. открыт эффект увеличения отношения потока позитронов к потоку электронов с ростом энергии этих частиц (эффект *PAMELA*), впервые в широком интервале энергий измерены энергетические спектры позитронов и антипротонов, спектры протонов, ядер гелия, электронов, а также легких ядер, вплоть до ядер углерода. Спектры частиц, в том числе антипротонов, были измерены с беспрецедентной точностью. Этот эксперимент стал необходимой базой для ряда теоретических работ, объяснения происхождения космических лучей.

Недавно наши результаты были подтверждены экспериментом АМС-02 на Международной космической станции. Вопреки ожидаемому классическому спаду отношения потоков позитронов к электронам с ростом их энергий впервые был обнаружен устойчивый рост этого отношения. До сих пор не имеется удовлетворительного объяснения этого феномена. Одна из возможных интерпретаций связана с темной материей.

Запуск метеозонда с территории
Долгопрудненской научной станции



— **Вы обнаружили темную материю?**

— К сожалению, нет. Вопросы о происхождении «дополнительных позитронов», как и о сущности темной материи, до сих пор остаются дискуссионными.

— **Но если это не темная материя, необходимо другое объяснение?**

— Теоретики пытаются это сделать. В мире выполняется несколько крупных экспериментов по поиску частиц темной материи, но пока безрезультатно.

— **Научная коллаборация PAMELA продолжает свое существование?**

— Да, продолжается обработка данных, полученных в эксперименте за десятилетие, организуются встречи участников эксперимента в России и за рубежом — в Италии, Германии, Швеции. Ученые анализируют данные, готовят материалы для совместных статей. Поток публикаций на эту тему не прекращается.

Следующий крайне важный эксперимент, который также зародился в нашей лаборатории, — так называемый проект «Солнце — Терагерц», который сейчас получил финансирование в виде договора с РКК «Энергия». Основная задача на данном этапе — создать необходимый экспериментальный комплекс для проведения длительных измерений на борту МКС солнечного терагерцевого

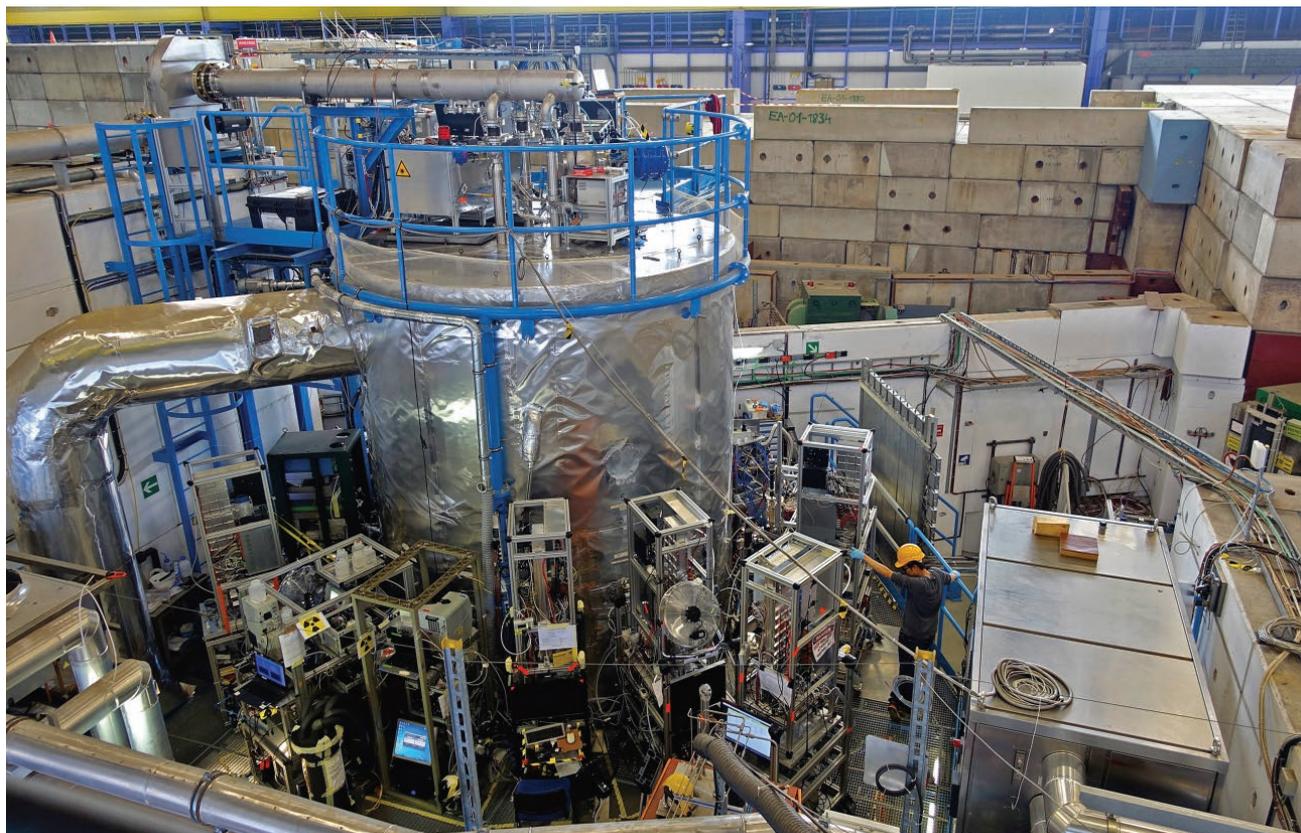
излучения. По сути дела, это будет первый эксперимент, который позволит получить уникальную информацию об излучении Солнца в терагерцевом диапазоне электромагнитных волн, то есть в диапазоне частот от 10^{12} до 10^{14} Гц.

— **Как он будет осуществляться?**

— Мы планируем провести на борту МКС первые исследования радиоизлучения солнечных вспышек в терагерцевом диапазоне. С точки зрения фундаментальной физики это очень интересно, в первую очередь потому, что раньше жизнь нашего светила и солнечных вспышек изучалась в области микроволновых частот, в рентгеновском и гамма-излучении. Спектр микроволнового излучения Солнца известен, он хорошо промеряется современными радиотелескопами, которые находятся на Земле. Практически по каждой вспышке у нас имеется информация в этой области излучения. Однако область излучения выше одного и до десятков терагерц остается покрытой мраком.

— **Почему же нет такой информации?**

— Потому что радиоизлучение в этой области частот очень эффективно поглощается земной атмосферой и не доходит до наземного наблюдателя. Наша физическая фундаментальная задача — получить первую уникальную информацию об излучении Солнца в спокойные периоды



Научный комплекс эксперимента CLOUD в CERN

и во время вспышек, то есть ликвидировать экспериментальный пробел, который сейчас существует в мире. Проект должен быть запущен в 2022 г., а до этого нам нужно подготовить всю научную аппаратуру.

— Подобные исследования будете проводить только вы? Или в мире есть что-то аналогичное?

— Могу сказать однозначно: в этом направлении не работает ни одна научная аппаратура ни на Земле, ни в космосе. Мы, думаю, станем первыми.

— Но ведь это будет совершенно новая картина мира!

— Совершенно новая. По крайней мере, мы увидим важные моменты, которые прольют свет на многое из того, что сегодня непонятно или неизвестно. В частности, модель солнечной вспышки до сих пор не закончена. Там есть вопросы, которые пока трудно понять. Появление новых данных позволит посмотреть по-другому на механизм ускорения заряженных частиц, ответить на вопрос, на каких высотах в атмосфере Солнца какие процессы разыгрываются, каков основной физический механизм разогрева солнечной короны и т.д.

— Какую аппаратуру вы создаете в рамках этого проекта?

— Сейчас мы создаем прибор с восемью детекторами, которые позволят промерить эту терагерцевую область. Для его создания необходима разработка механической модели, которую мы должны просчитать с точки зрения реальных тепловых нагрузок. Вы знаете, что Солнце светит и греет, соответственно, прибор должен у нас не сильно нагреваться и не сильно остывать. Он должен быть механически устойчив для перегрузок, выдерживая ускорения до 20 g. Это учитывается при разработке и моделировании научной аппаратуры во избежание ее разрушения по мере подъема на орбиту. Это непростая инженерная задача, над которой мы работаем. Наш прибор будет установлен снаружи МКС на служебном модуле, чтобы смотреть на Солнце. Мы должны его подготовить, провести контрольные испытания перед взлетом, дальше прибор должен быть доставлен на МКС, где космонавты его примут, проверят, включают, после чего аккуратно вынесут со станции, установят на определенной лабораторной платформе и подключат информационные кабели. Тогда мы будем иметь данные в непрерывном режиме. Эта информация будет передана на Землю, и мы приступим к экспресс-анализу. С нетерпением ждем этого момента. Если мы все это успешно сделаем, то в дальнейшем получим возможность создания терагерцевых матриц, которые будут смотреть не только на Солнце, но и на все галактические объекты, например на остатки сверхновых звезд, с которыми также связано немало загадок.

— Знаю, этим ваши проекты не исчерпываются.

— Да, если говорить о международных проектах и коллаборациях, у нас существуют экспериментальные работы, которые мы проводим в рамках прямых соглашений. Это, например, Пресвитерианский университет Маккензи в Бразилии, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева в Казахстане, Национальный научно-технологический центр в Саудовской Аравии, который также заинтересовался нашими исследованиями и научными приборами. Мы готовим совместные статьи для публикаций и представления на научных конференциях.

Есть также проекты, которые проводятся в рамках Международного института космических исследований (ISSI) в Швейцарии. Основная задача этого института — создать международные группы, чтобы они смогли вместе поработать в рамках определенной научной задачи. В течение последних лет мы работаем над двумя проектами, которые были приняты и утверждены этим институтом. Первый проект — исследования процесса высыпания магнитосферных электронов, то есть того самого эффекта, который мы видим в нашем стратосферном эксперименте. Второй проект посвящен изучению солнечных вспышек. Участники этих проектов кроме ФИАН, СПбГУ и НИИЯФ МГУ — ученые из Германии, Швейцарии, Финляндии, США, КНР и др. Здесь мы также используем свои экспериментальные данные, которые получили в стратосфере, и тоже ждем интересных результатов.

— Владимир Салимгереевич, как вы успеваете участвовать в таком количестве экспериментов? Как я понимаю, станция у вас небольшая, сотрудников не так много...

— Это не просто. Вероятно, вы не поверите, если я скажу, что мы работаем без выходных и праздников, но это правда. Похвастаться отличным базовым финансированием тоже не могу. Наверное, секрет в том, что у нас собрались большие энтузиасты, по-настоящему влюбленные в свое дело. Три сотрудника нашей лаборатории, в том числе я, преподаем в МФТИ (Физтехе), расположенном по соседству. Проводим занятия и заодно стараемся подобрать толковых ребят, которые заинтересованы наукой. Сейчас у нас работают три студента, один уже окончил аспирантуру и скоро должен защищать свою научную работу.

Нам интересно то, чем мы занимаемся. Мы верим в то, что наука — это главный двигатель развития человечества. Вслед за создателем гелиобиологии А.Л. Чижевским считаем себя детьми не только планеты Земля, но и Солнца, и всего космоса, который терпеливо ждет своих исследователей. ■

Беседовала Наталья Лескова