

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ 1970 ГОДА

533.9+523.22

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ*)

Х. Альвен

1. НАУКА И ПРИБОРЫ

Центр тяжести физических наук пребывает в непрерывном движении. Каждое новое открытие смещает интересы и устремления ученых. Не менее важно и то, что новые достижения техники открывают для научного исследования новые области. История науки показывает, что пути, которые избирает наука, в значительной степени зависят от конструирования новых приборов. Например, знамением новой эры, наступившей вслед за развитием в течение XIX века классической механики и теории электромагнетизма, было создание в начале нашего века весьма совершенных спектрографов. Для своего времени это были очень сложные и дорогие приборы. Они сделали возможным исследование внешних областей атома. Подобным же образом в тридцатые годы циклотрон — также очень сложный и дорогой для своего времени прибор — сыграл определяющую роль в исследовании ядра. Наконец, последнее десятилетие стало свидетелем создания еще более сложных и дорогих приборов — космических аппаратов, запускаемых при помощи весьма совершенной ракетной техники и оснащенных сложнейшей электроникой. Правомерно поэтому задать вопрос: какие же новые области для научного исследования открывают (и открывают ли) эти новые приборы? Справедливо ли и в этом случае, что большие приборы сдвигают центр тяжести физики?

2. НАУЧНЫЕ ЦЕЛИ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первое десятилетие космических исследований было посвящено главным образом изучению околоземного космического пространства: магнитосферы и межпланетного пространства. Ранее считалось, что эти области пусты и бесструктурны, но ныне нам известно, что они заполнены плазмой, рассечены оболочкообразными неоднородностями и пронизаны

*) Hannes Alfven, Plasma Physics, Space Research and the Origin of the Solar System. Nobel Lecture, December 11, 1970. Preprint. Перевод Ю. А. Гурьяна. Нобелевскую премию по физике за 1970 г. получили Х. Альвен и Л. Неель. К сожалению, редакция не располагает в настоящее время текстом лекции Л. Нееля, но надеется опубликовать ее перевод позже.

сложной системой электрических токов, электрических и магнитных полей. Полученные в этой области исследований сведения принципиально важны для нашего общего понимания плазмы, в особенности космической плазмы. Следовательно, они косвенно имеют значение для термоядерных исследований, изучения структуры Галактики и Метагалактики и для космологических проблем. Развитие наших знаний в космической электродинамике позволит подойти к этим областям исследования менее спекулятивно, чем до сих пор. Данные о космической плазме очень важны также для нашего понимания происхождения и эволюции Солнечной системы, так как имеются веские основания считать, что вещество, ныне образующее небесные тела, было некогда рассеяно в виде плазмы.

Похоже, что второе десятилетие космических исследований будет носить в какой-то мере иной характер. Поскольку многие фундаментальные проблемы магнитосферы и межпланетного пространства еще не решены, можно с уверенностью сказать, что эти области по-прежнему будут подчинять себе интересы многих. Однако экспедиции на Луну и дальние космические рейсы к Венере и Марсу приносят настолько много новых научных фактов, что основной упор в космических исследованиях начинает делаться на изучение Луны, планет и других небесных тел Солнечной системы.

Первая фаза этих исследований по необходимости носит характер, сходный с исследованием полярных и других труднодоступных районов Земли: подробное картографирование, совмещаемое с геологическими, сейсмическими, магнитными и гравиметрическими изысканиями и исследованиями атмосферных условий. Однако, применяя эту схему исследований к Луне и планетам, мы сталкиваемся и с другой проблемой, а именно: как эти тела первоначально образовались? Действительно, многие из последних работ по космическим исследованиям оканчиваются разного рода гипотезами об образовании и эволюции Солнечной системы. Похоже, что эта проблема по необходимости станет одной из главных проблем (если не самой главной), на которых будут концентрироваться космические исследования ближайшего будущего. Уже на заре своего существования НАСА заявило, что главной научной целью космических исследований должно стать выяснение вопроса, как образовалась Солнечная система. Это поистине одна из фундаментальных проблем науки. Мы попытаемся дать научную версию того, как некогда образовались Земля и ее соседи. С философской, скажем, точки зрения это не менее важно, чем выяснение строения вещества, так занимавшее умы ученых первые две трети нашего века.

3. ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Прежде чем приступить к главной нашей теме — как образовалась Солнечная система, — рассмотрим вкратце современное состояние физики плазмы. Как вам известно, она развивалась по двум параллельным направлениям. Первое направление — это насчитывающие уже сто лет исследования так называемого электрического разряда в газах. Этот подход был в высшей степени экспериментальным и феноменологическим и лишь очень медленно достиг некоторой степени теоретического обобщения. Большинство физиков-теоретиков смотрит на эту область презрительно, так как она сложна и неудобна. В плазме проявляются страты и двухслойности, электронное распределение в ней немаксвелловское, в ней присутствуют все виды осцилляций и нестабильностей. Короче говоря, эта область совершенно не приспособлена для построения математически элегантных теорий.

Другой подход возник на базе хорошо разработанной кинетической теории обычных газов. Предполагалось, что ценой небольшой дополнительной работы эту область удастся расширить, включив в нее также и ионизированные газы. Теории здесь были математически элегантны, и рассмотрение их следствий показало, что возможно получить очень горячую плазму и удержать ее магнитным полем. Это явилось отправной точкой термоядерных исследований.

Однако вначале эти теории имели очень мало точек соприкосновения с экспериментальной физикой плазмы, а все сложные и неясные явления, с которыми сталкивались при изучении газового разряда, ими просто игнорировались. В результате около 10 лет тому назад и произошел так называемый термоядерный кризис. Он показал нам, что физика плазмы — очень трудная отрасль физики, которая может развиваться только при тесном сотрудничестве между теорией и экспериментом. Как однажды сказал Месси (несколько в ином контексте), «человеческий ум не в состоянии один разработать детали и понять внутренние механизмы процессов, происходящих в природе. Без лабораторного эксперимента сегодня не могло бы быть физической науки».

На сегодня в физике космической плазмы достигнут гораздо меньший прогресс, чем в физике термоядерной. Это в значительной степени поле деятельности теоретиков, которые никогда не видели плазмы в лаборатории. Многие из них до сих пор верят в формулы, которые, как мы знаем из лабораторных опытов, являются неверными. Астрофизический аналог термоядерного кризиса еще не наступил.

Я думаю, теперь очевидно, что в определенных отношениях первый подход к физике космической плазмы потерпел неудачу. Оказывается, в некоторых принципиальных случаях этот подход не дал даже первого приближения к истине, а ввел в тупики, из которых нам теперь нужно искать выход. Причина состоит в том, что некоторые из основных концепций, на которых базируются теории, неприменимы к условиям, преобладающим в космосе. Они «общеприняты» большинством теоретиков, разработаны при помощи в высшей степени изощренных математических методов, но сама плазма «не понимает», сколь прекрасны теории, и решительно отказывается им подчиняться. Теперь уже очевидно, что нужно начинать новый подход с совершенно иных исходных позиций.

4. ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕРВОГО И ВТОРОГО ПОДХОДОВ К ФИЗИКЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ

Эти два различных подхода можно суммировать следующей таблицей.

Космическая электродинамика

Первый подход	Второй подход
Гомогенные модели	Космическая плазма часто имеет сложную негомогенную структуру
Проводимость $\sigma = \infty$ Электрическое поле $E_{\parallel} = 0$	σ зависит от тока и часто неожиданно делается нулевой, E_{\parallel} часто $\neq 0$
Магнитные линии «вморожены» и «двигутся» вместе с плазмой	Картина «вмороженных» линий часто совершенно не соответствует действительности

П р о д о л ж е н и е

Первый подход	Второй подход
Электромагнитные условия иллюстрируются картиной линий магнитного поля	Равным образом важно обрисовать картину линий тока и включать в рассмотрение образующиеся электрические цепи
Электростатической двухслойностью пренебрегают	Электростатическая двухслойность играет решающую роль в плазме низкой плотности
Нитевидными структурами и токовыми оболочками пренебрегают или они трактуются неадекватно	Токи образуют нити или текут в тонких оболочках
Теории математически элегантны и очень хорошо разработаны	Теории еще не очень хорошо разработаны, частично они феноменологические

Если вы спросите, где сегодня проходит граница между первым и вторым подходом, на это в переносном смысле можно ответить так: повсюду, куда достигают космические аппараты. Это означает, что в любой области, где возможно исследовать состояние плазмы магнитометрами, электростатическими зондами и анализаторами частиц, обнаруживается, что, несмотря на всю свою элегантность, теории первого подхода почти ничего не могут поделать с реальностью. Похоже, что переход от первого ко второму подходу и является астрофизическим аналогом термоядерного кризиса.

5. ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Из высказанного очевидно, что астрофизика подвергается опасности стать слишком спекулятивной, если она не будет усиленно стремиться поддерживать связь с лабораторной физикой. Существенно подчеркнуть здесь, что астрофизика, конечно, в сущности является приложением к космическим явлениям законов природы, найденных в лаборатории. Из этого следует, что данная частная область астрофизики не созреет для научного подхода до тех пор, пока экспериментальная физика не достигнет нужного определенного уровня развития. Широко известен исторический пример: до успехов ядерной физики все попытки понять, откуда звезды берут свою энергию, не могли быть ничем большим, чем спекуляциями, не принесшими сколько-нибудь значительной пользы дальнейшему развитию науки.

Проблема происхождения Солнечной системы была предметом большого числа гипотез, весьма сильно отличающихся друг от друга. Причина этого — в недостаточной основательности физических знаний в областях, существенных для понимания явлений и для суждений о возможности тех или иных процессов.

Однако, прежде чем обсуждать детали теории происхождения и эволюции Солнечной системы, важно установить, каким должен быть общий характер такой теории.

В прошлом слишком много внимания уделялось образованию планет вокруг Солнца. Одним из отрицательных результатов этого явилось

то, что многие теории происхождения Солнечной системы базируются на теориях ранней истории Солнца. Это очень шаткая основа, так как образование Солнца (и других звезд) — проблема очень дискуссионная. Если же иметь в виду, что системы спутников Юпитера, Сатурна и Урана очень похожи на систему планет и по меньшей мере столь же правильны, как она, то ныне кажется более приемлемым ставить целью общую теорию образования вторичных тел вокруг центрального тела, рассматривая образование планетной системы лишь как одно из приложений такой общей теории.

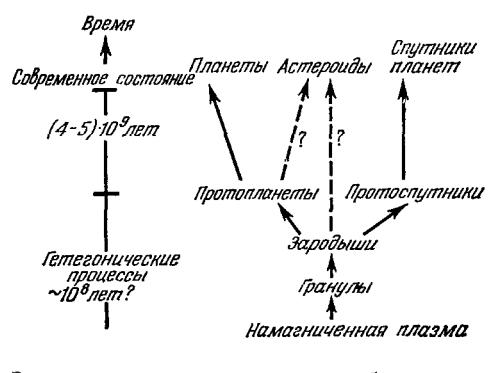
Изучение последовательности процессов, в которых образовалась Солнечная система, часто называют *космогонией*. Этот термин, однако, употребляют и во многих других значениях. Так как вопрос происхождения Солнечной системы есть, в сущности, вопрос повторяющегося образования вторичных тел вокруг первичного, был предложен новый термин *гетегония* (от греческого *έταιρος*, или *έτης* — товарищ).

Кажется вероятным (и на этом, в общем, сходятся все), что последовательность событий, приведших к образованию Солнечной системы, была примерно той, которая представлена на рисунке (мы следуем здесь так называемому «планетоидному» *) подходу). Первичная плазма концентрировалась в определенных областях вокруг центрального тела и конденсировалась в маленькие твердые гранулы (возможно, даже, что первичная плазма уже содержала гранулы). Гранулы слипались затем в так называемые зародыши, и при дальнейшей акреции образовывались большие тела: планеты, если центральным телом является Солнце, и спутники, если им является планета.

Место астероидов в гетегонической диаграмме спорно. Вначале их считали осколками разрушившейся планеты, но ныне накапливается все больше аргументов в пользу того, что они представляют собой промежуточную стадию в образовании планет или по крайней мере похожи на нее.

Даже если диаграмма, изображенная на рисунке, в целом общепринята, как и есть в действительности, это не означает, что включенные в нее процессы нам ясны. Они еще носят в большой степени гипотетический характер. До самого последнего времени иначе и не могло быть, так как процессы, лежащие в их основе, известны недостаточно хорошо. В какой-то мере мы находимся в той же ситуации, что и астрофизики, пытавшиеся разобраться в источниках энергии звезд до успехов ядерной физики.

Однако сейчас, похоже, ситуация меняется, и появилась твердая надежда перевести всю эту область исследований из стадии дискуссий по более или менее блестящим гипотезам к стадии систематического научного анализа.



Эволюционная диаграмма образования Солнечной системы.

*) «Planesimal».

6. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ, НУЖНЫЕ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ГЕТЕГОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Кроме физики плазмы, о которой мы уже говорили, для реконструкции гетегонических процессов важны и многие другие области исследований, а именно:

1) **Химия плазмы.** Это — область исследований, касающихся химических реакций в плазме. Они существенно отличаются от реакций в неионизированных газах. Кроме того, следует включать в рассмотрение таких реакций разделение различных элементов, которое имеет место в неоднородной плазме под влиянием, например, градиентов температуры и электрических токов. Кроме того, состояние ионизации оказывает очень большое влияние на взаимодействие между плазмой и сконденсировавшейся из нее твердой гранулой. Лабораторные результаты и их приложения к условиям космоса здесь имеют самое прямое отношение к пониманию различного химического состава небесных тел.

Для понимания следующего процесса в нашей эволюционной диаграмме, а именно акреции больших тел после первоначальной конденсации, существенно важны следующие области исследований.

2) **Столкновения твердых тел.** Гранулы, которые являются первичным результатом конденсации, будут двигаться вокруг центрального тела по кеплеровским орбитам, но их движение будет возмущаться различными эффектами. Один из них вызван взаимными столкновениями. Относительные скорости при этих столкновениях могут иметь любую величину от нуля до нескольких десятков $км/сек$. Это означает, что во многих случаях мы окажемся в области «сверхскоростных» соударений. Это еще не очень хорошо изученная область. Имеющиеся в настоящее время лабораторные результаты весьма скучны, а их приложение к космическим условиям неопределено из-за того, что нам мало что известно о структуре гранул. Столкновения между телами с рыхлым ударопоглощающим поверхностным слоем, очевидно, отличаются от столкновений между твердыми «шариками». Некоторую информацию дает нам изучение метеоритов. Другим важным источником сведений явились результаты «Аполлонов» по соударениям метеоритов с поверхностью Луны. Однако из этих данных мы не можем извлечь особенно много информации о структуре гранул в космосе, так как частицы, с которыми мы имеем дело, либо проходят сквозь земную атмосферу, либо разрушаются при ударе о лунную поверхность.

3) **Изучение кеплеровского движения вязкой среды** существенно для нашего понимания эволюции орбит, гранул и зародышей. С формальной точки зрения эта проблема подобна некоторым важным проблемам в физике плазмы, которая также имеет дело с большим числом взаимодействующих частиц. Оказывается, что в окрестности центрального тела сконденсировавшиеся гранулы имеют тенденцию двигаться по подобным орбитам, образуя в космосе так называемые «реактивные струи».

4) **Небесная механика** служит, разумеется, главной основой для всего гетегонического процесса. Эта область обрела сейчас вторую молодость благодаря использованию ЭВМ для решения многих проблем, с которыми прежде справиться было невозможно. Таким образом, была обнаружена важность резонансных явлений в нынешней структуре Солнечной системы. Вероятно, что и в гетегоническое время резонансы тоже играли принципиальную роль.

5) Гетегонические процессы происходили 4—5 миллиардов лет назад. Эволюция первичного продукта этих процессов в нашу нынеш-

нюю Солнечную систему состояла из большого числа относительно медленных изменений: геологические силы преображали структуру планет, приливные эффекты затормаживали вращение некоторых тел (особенно спутников), в поясе астероидов происходили столкновения, а поверхности планет претерпевали соударения с метеоритами и т. д. Все эти эффекты важны для реконструкции состояния системы немедленно после окончания гетегонических процессов. Только после «корректирования» с учетом этих процессов данные о Солнечной системе, как мы ее сегодня наблюдаем, будут иметь ценность для реконструкции гетегонических процессов.

7. КОСМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ, ИМЕЮЩИЕ ОТНОШЕНИЕ К ГЕТЕГОНИЧЕСКОЙ ПРОБЛЕМЕ

Из проведенного выше анализа видно, что объем основных сведений, необходимых для понимания гетегонических процессов, быстро растет вследствие прогресса в нескольких различных областях исследований. Обсудим теперь вопрос о том, какого рода космические эксперименты имеют особую ценность для изучения гетегонической проблемы.

Прежде всего нужно констатировать, что многие из космических экспериментов, выполненных сегодня или планируемых на будущее, вносят весьма ценный вклад. Все больше сведений о поведении космической плазмы дают космические аппараты, на которых производятся измерения плазмы и частиц в магнитосфере и межпланетном пространстве. Далее, соударения метеоритов с космическими аппаратами дают нам информацию о мельчайших телах нашего окружения, которые, возможно, имеют отношение к тем малым телам, из которых когда-то образовались наши теперешние планеты. В частности, важно изучение соударений метеоритов с Луной (и Марсом). Следовательно, эти и другие исследования «автоматически» вносят вклад в сведения, необходимые для решения гетегонической проблемы. Но, хотя и это уже хорошо, все же имеется много крайне важных проблем, которые нельзя разрешить без космических исследований, специально направленных на их решение. Давайте обсудим теперь, как это можно сделать.

8. БОЛЬШИЕ ТЕЛА ПРОТИВ МАЛЫХ ТЕЛ

Обычно считают, что после высадки на Луну самыми важными будут полеты к Венере, Марсу и другим планетам. На самом деле это совсем не обязательно так, потому что полеты к астероидам и кометам были бы с научной точки зрения по меньшей мере столь же интересны. А так как некоторые астероиды являются ближайшими соседями системы Земля — Луна, это было бы также и наиболее легким с точки зрения техники.

Наш анализ показал, какие области исследований должны внести вклад в уяснение различных фаз гетегонических процессов. Физика и химия плазмы важны для первой их фазы, включающей конденсацию мелких гранул. Изучение тел метеоритных и астероидных размеров будет иметь отношение к процессам акреции. Как общее правило, можно констатировать, что чем меньше тело, тем дальше назад во времени будет уводить нас его изучение. Таким образом, малые тела будут иметь большее отношение к ранним периодам истории, чем большие тела. Это означает, что в изучении свойств малых тел в космосе существенно то, что можно надеяться понять решающую фазу в образовании Солнечной системы, когда большая часть материи, которая позднее образовала планеты, еще была рассеяна.

Имеются свидетельства того, что во время образования планет и их спутников в них накапливалась значительная информация о процессах их формирования. Однако эта информация в значительной мере либо уже уничтожена, либо недостижима. Вероятно, планеты образовались путем акреции из «планетоидов». Самая ранняя фаза этой акреции давала малые тела, вещества которых сейчас, по-видимому, находится в ядрах планет; это значит, что оно будет недостижимым, даже когда пилотируемый корабль приземлится на поверхности планеты. Возможно также, что, например, конвекция во внутренних частях планеты более или менее полно уничтожила информацию, некогда накопленную в них. Что же касается поверхностных слоев, то геологические процессы, в том числе атмосферные эффекты, полностью стерли следы гетегонических процессов на поверхности Земли и, вероятно, Венеры. На других телах: Луне, Марсе, возможно на Меркурии — по-видимому, осталась значительная информация, но относящаяся только к очень поздней фазе гетегонических процессов.

Отсюда мы делаем вывод, что изучение больших тел, подобных планетам, имеет лишь ограниченную ценность для изучения происхождения Солнечной системы.

Астероиды, кометы и метеориты в этом отношении — совсем иное дело. Даже если некоторые из этих тел представляют собой фрагменты, образовавшиеся при столкновениях в космосе, то и эти фрагменты, весьма вероятно, содержат значительную информацию о процессах конденсации и акреции. Вследствие малости этих тел в их внутренних частях не происходит разогревания или конвекции, которые могут уничтожать накопленную в них информацию о времени, когда они образовались, и по крайней мере в очень маленьких и фрагментированных телах их «внутренние области» легко достижимы. Кроме того, их изучение должно дать нам сведения о поведении малых тел в космосе, что важно для уяснения гетегонических процессов в общем. В них мы изучаем «промежуточный продукт» в «изготовлении» планет. Они дают нам, так сказать, моментальные снимки, изображающие последовательность событий при образовании таких планет, как Земля.

9. СТАРЫЕ И НОВЫЕ ОБЛАСТИ НАУКИ

Возвратимся теперь из нашей одиссеи во времени и пространстве к нашей исходной точке: как новая техника смещает центр тяжести физических наук? Великая революция в физике, произшедшая в начале нашего столетия, означала, что классическая механика и классическая электродинамика стали считаться более или менее исчерпанными как области исследования. Интересы стали привлекать новые области: теория относительности и квантовая механика, а экспериментальная работа в основном стала концентрироваться на изучении электронных оболочек атома. Успехи ядерной физики явились новым шагом в том же направлении.

Новая тенденция, обозначенная ростом исследований в физике плазмы и космоса, в некотором смысле противоположна. В этих областях квантовая механика и теория относительности не играют существенной роли. Взамен этого вновь обрела молодость классическая механика, оказавшаяся важной не только для расчета траекторий космических кораблей, но также и для изучения движения естественных небесных тел в течение их эволюционной истории. Классический электромагнетизм, в свою очередь, играет решающую роль в теории намагниченной плазмы, которая является основой как для термоядерных исследований, так и для астрофизики

в целом. Это не означает, что мы должны впадать в ошибку, подобную сделанной 50 лет назад: объявлять, что атомная и ядерная физика исчерпаны. Отнюдь нет. Они обладают огромной инерцией, которая увлекает их вперед, и они будут давать много новых и интересных результатов. Но они получили очень серьезных конкурентов, и достаточно примечательно, что ими явились области исследований, которые ранее были объявлены умершими, но ныне воскресают.

Возможно, что эта новая эра означает также частичный возврат к более понятной физике. Для неспециалиста четырехмерная теория относительности и индетерминизм атомной структуры всегда были мистичными и трудными для понимания. Я считаю, что легче разъяснить 33 нестабильности в физике плазмы или резонансную структуру Солнечной системы. Возрастание значения новых областей означает определенную демистификацию физики. В спиральном или трохоидальном движении, которое совершает наука в течение столетий, его направляющая вновь обращается к тем областям, откуда она исходила вначале. Именно индийские, шумерские и египетские наблюдения явлений ночного неба положили несколько тысячелетий назад начало науке. Вопрос о том, почему «блуждающие звезды» — планеты — движутся так, а не иначе, инициировал лавину научных открытий несколько столетий назад. Те же самые объекты ныне вновь находятся в центре научных интересов; только вопросы, которые мы теперь задаем, иные. Теперь мы задаем вопрос, как добраться до них; теперь мы спрашиваем также, как эти тела некогда образовались. И если ночное небо, на котором мы их наблюдаем, — это небо высоких широт, например, небо над этим залом, над одним из маленьких островов архипелага Стокгольма, — мы, возможно, увидим в небесах и полярное сияние, которое суть космическая плазма, напоминающая нам о времени, когда наш мир родился из плазмы. Ибо вначале была плазма.