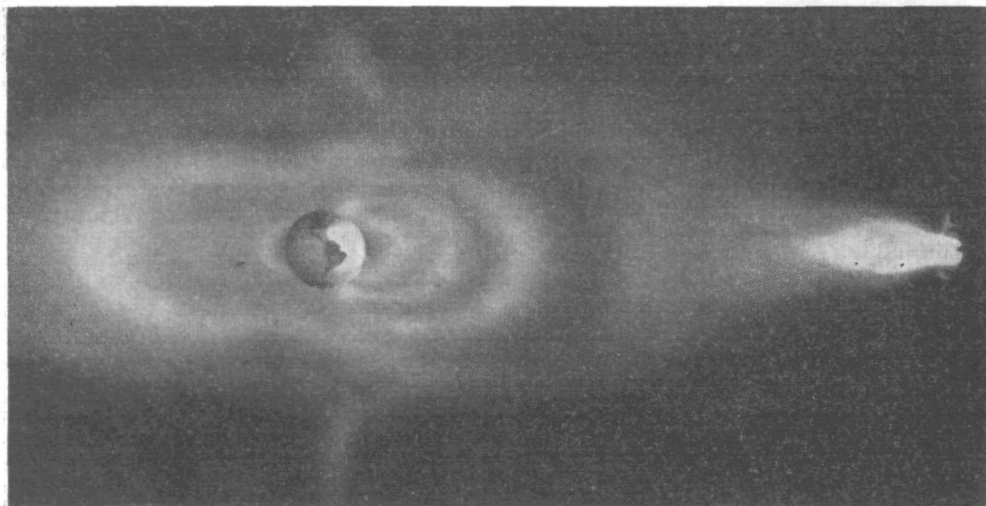


ПЛАЗМА *)

М. Готтлиб

Двадцать лет назад изучение плазмы играло в физике куда меньшую роль, чем сейчас, — просто было неизвестно широчайшее разнообразие плазменных явлений. Изучение плазмы началось в самом начале нашего столетия и касалось явлений газового разряда; в этих явлениях мы сталкиваемся с относительно плотной, слабо ионизованной плазмой, доминирующими эффектами в которой являются ионизация, рекомбинация и другие процессы, связанные с атомными соударениями. Основы



Имитация солнечного ветра, взаимодействующего с магнитным полем Земли. Воспроизводимая фотография получена в Льюисовском исследовательском центре, Кливленд, Огайо, в 4,6 × 20-метровой вакуумной камере с магнитоплазмойдинамическим инжектором (справа), моделирующим Солнце. Используемый инжектор подробно исследовался в Льюисовском центре; он позволяет достичь скоростей, близких к 28 км/сек. Радиационные пояса получаются в соответствующем масштабе.

физики плазмы были заложены Ирвингом Лэнгмюром, обнаружившим электростатические плазменные колебания; Лэнгмюр сумел понять, что эти колебания были определенным аспектом коллективного движения частиц. Именно эти коллективные движения, порождающие электрические и магнитные поля и взаимодействующие с ними, обуславливают все то богатство и разнообразие физических явлений, которое наблюдается в плазме, и делают ее столь непохожей на любую другую жидкость.

Астрофизические и геофизические исследования тоже внесли свой вклад на ранних стадиях изучения плазмы. Эпплтон в своих работах, посвященных ионосфере, совершенно правильно описал (это было в 30-х годах) распространение электромагнитных волн в плазме с учетом влияния постоянного магнитного поля. Чепман и Ферраро развили теорию взаимодействия плазменных пучков с магнитным полем Земли. В 1934 г. Беннет предсказал возможность пинч-эффекта, того самого явления, которому было посвящено так много усилий 25 лет спустя.

*) Melvin B. Gottlieb, *Plasmas*, Phys. Today, 21(5), 46 (1968). Перевод В. А. Угарова.

В 1941 г. Альвен, выпустивший в свет книгу «Космическая электродинамика», поставил на твердую почву рассмотрение коллективных эффектов и, в частности, впервые описал волновые процессы, известные в настоящее время под названием волны Альвена.

Кинетическая теория плазмы появилась и того раньше. В 1934 г. Ландау получил фоккер-планковское приближение для интеграла столкновений. Чепман и Каулинг в своей книге «Математическая теория неоднородных газов» показали, что уравнение Больцмана может быть довольно непосредственно применимо при исследовании плазмы. Классические работы Ландау 1945—1946 гг. по затуханию волны в плазме и Власова, записавшего так называемое бесстолкновительное уравнение Больцмана, уже давали необходимые основы теории, требующие, правда, более строгого обоснования.

Первым мощным стимулом для развития современной физики плазмы явилось осознание того факта (это произошло около 1950 г.), что контролируемое высвобождение энергии в реакциях слияния может быть успешно проведено в горячей плазме, взаимодействующей с магнитным полем. Не прошло и нескольких лет, как физика плазмы получила еще один мощный толчок: была обнаружена важная роль, которую играет в межпланетном пространстве плазма, создаваемая Солнцем. В последующие годы рост наших знаний о плазме происходил в очень бурном темпе.

ТЕОРИЯ ПЛАЗМЫ

По существу физика плазмы относится к проблеме многих тел, основное взаимодействие в которой (электромагнитное) достаточно хорошо изучено, причем зачастую квантовые эффекты для этого взаимодействия просто несущественны. Следовательно, равновесная статистическая механика таких систем не представляет затруднений, однако благодаря очень тонкой природе сил взаимодействия, простирающихся на значительные расстояния, динамические свойства таких систем оказываются чрезвычайно разнообразными — могут существовать многочисленные типы коллективных движений. Решающим успехом теории в последнее десятилетие был строгий вывод (из системы уравнений для многих тел) несколько видоизмененного по форме уравнения Больцмана или, быть может, Фоккера — Планка — именно это уравнение вместе с системой уравнений Максвелла и давало полное описание поведения плазмы. Таким образом, полная динамика систем определялась в шестимерном фазовом пространстве. Часто используются еще два значительных упрощения. На расстояниях, существенно превышающих дебаевскую длину, и при частотах, меньших $(4\pi n e^2 / m)^{1/2}$, т. е. меньше плазменной частоты, любое движение оставляет плазму квазинейтральной. На расстояниях, значительно больших радиуса гиротропического движения, и при частотах, меньших гирочастоты, можно использовать весьма простую форму уравнения движения частиц; и соответственно оказывается возможным использование приближения «ведущего центра» для уравнения Больцмана. На основе этого приближения можно указать необходимые условия, при которых законно использование уравнений магнитогидродинамики; из этих уравнений вытекает существование целого нового класса волн низкой частоты — дрейфовых волн, — которые были предсказаны теоретически, а затем обнаружены экспериментально.

Физическое содержание дрейфового приближения состоит в том, что частицы движутся поперек магнитного поля с дрейфовой скоростью $[\mathbf{E} \times \mathbf{B} / B^2]$, которая вместе с тем является и скоростью движения силовых линий. Следовательно, $\mathbf{E} + [\mathbf{V} \times \mathbf{B}] = 0$; электрическое поле обращается

в нуль в сопутствующей системе. В то же самое время частицы свободно ускоряются вдоль силовых линий поля за счет компоненты \mathbf{E} , направленной вдоль \mathbf{V} . Если такого движения вдоль силовых линий нет, частицы будут двигаться строго вместе с силовыми линиями, так что плазма и магнитное поле окажутся замороженными друг в друга; это обстоятельство является характерной особенностью магнитогидродинамики в случае бесконечной проводимости. С другой стороны, когда фазовая скорость волн, распространяющихся вдоль магнитного поля, меньше скорости частиц, поперечное движение усредняется. Когда это условие прилагается к электронам, существенное ограничение замороженности в магнитное поле отпадает и оказывается возможным обширный новый класс движений — особые дрейфовые волны. Таким образом, низкочастотные волны и вызываемые ими неустойчивости можно изучать в дрейфовом приближении; однако для высоких частот, где характерные расстояния очень малы, геометрические эффекты играют не очень существенную роль. Теория рассматривает в этом случае движение в пространстве скоростей, в котором анизотропия зачастую является тем источником энергии, за счет которого возникают различные неустойчивости.

В точности так же, как и в других разделах физики, поведение линеаризованных волн достаточно хорошо исследовано; вместе с тем поведение нелинейных систем, с одной стороны, чрезвычайно сложно, а с другой — зачастую имеет решающее значение. Изучение этих вопросов в некотором смысле сходно с классическим подходом к турбулентности Навье — Стокса. На первый взгляд вся проблема кажется значительно сложнее, чем она есть на самом деле: ведь нужно учитывать нелинейное взаимодействие волн многих типов и распределение частиц в шестимерном фазовом пространстве. Однако оказывается, что часто существуют достаточные ограничения (например, теорема Лиувилля, сохранение адиабатических инвариантов и пр.), приводящие к тому, что полностью турбулентного движения ожидать нельзя; напротив, будет иметь место стабилизация при малых амплитудах, приводящая к таким эффектам, как аномальная диффузия поперек магнитного поля; существование этого эффекта было предположено Бомом в 1945 г.

Исследование «слабо турбулентного» режима является одной из основных задач теоретиков в настоящее время. Эта проблема связана с непрекращающимися поисками надежного решения ключевой проблемы термоядерного синтеза: возможно ли создать достаточно устойчивое равновесие в ограниченном объеме?

ЛАБОРАТОРНАЯ ПЛАЗМА

В период с 1948 по 1958 г. широкие исследования плазмы проводились в США, Англии и Советском Союзе. Простая магнитогидродинамическая теория плазмы использовалась для исследования динамики пинча и его основных неустойчивостей, а также для реализации объемных устойчивых тороидальных пинч-конфигураций в достаточно длительное время. На этот период приходится также изобретение других основных тороидальных магнитных бутылок (стетлараторов и токамаков) и подтверждение в общих чертах устойчивости тороидальных конфигураций, как это и предсказывала магнитогидродинамика.

Экспериментаторы обнаружили эффективное удержание горячей плазмы магнитными зеркалами и сумели подойти к физике вращающейся плазмы; были созданы плазменные ускорители и сгустки столкновительной плазмы. Изучение плазменных волн в лаборатории и их использование для нагрева плазмы также начались в этот период.

Упомянутые эксперименты по исследованию «жидкого» поведения плазмы проводились главным образом в интервале сравнительно низких температур 10^4 — 10^7 °К при плотностях 10^{14} — 10^{17} см⁻³. Плазма создавалась в принципе за счет омического нагрева и магнитного сжатия. Для эффективной диагностики плазмы применялись визуальная, ультрафиолетовая, рентгеновская спектроскопия, микроволновая интерферометрия и многозондовая техника.

Международное объединение усилий по созданию управляемой термоядерной реакции началось на Женевской конференции 1958 г. Как раз в это время аномалии по отношению к простой теории плазмы стали постепенно всплывать наверх. Десятилетия 1958—1968 гг. выдвинуло целую группу значительно более сложных теорий и экспериментов; некоторые из основных аномалий уже нашли за это время свое объяснение.

Изучение «не жидкостного» поведения горячей плазмы продвигалось главным образом в связи с зеркальными машинами. Длительное удержание одиночных частиц в магнитных полях сложной конфигурации было доказано экспериментально; теоретически его можно было обосновать на основе теории адиабатических инвариантов. Когда плазменный пучок инжектировался при температуре в пределах 10^7 — 10^9 °К, а его плотность доводилась до 10^8 — 10^{10} см⁻³, обнаруживалось возбуждение высокочастотных неустойчивостей; таким образом, было установлено ограничение удержания плазмы за счет неустойчивости, обусловленной диффузией в пространстве скоростей.

Подробное экспериментальное изучение проблем устойчивости в пространстве скоростей было на первых порах ограничено тем, что в простых зеркальных машинах всегда имели место «жидкостные» неустойчивости. Введение минимального магнитного поля **B** позволило не только выявить природу этих неустойчивостей, но и устранить их весьма эффективным способом. Когда была открыта лоренцева диссоциация пучка нейтральных атомов в магнитном поле, ее удалось использовать в качестве хорошо контролируемого метода захвата энергичных ионов; в связи с этим началось исследование детальной структуры и зависимости от параметров высокочастотных мод. С теоретической точки зрения был рассмотрен весь богатейший спектр высокочастотных мод, и теория неограниченной среды была обобщена таким образом, чтобы учитывать краевые эффекты. Уже имелись количественные согласия теории и эксперимента для достаточно заметного числа случаев.

Более тонкое понимание «жидкостного» поведения ограниченной плазмы обернулось выявлением более сложной ее динамики. Возможность рассмотрения плазмы как жидкости, обладающей бесконечной проводимостью, для вопросов ее устойчивости была опровергнута впервые в опытах по пинч-эффекту с внутренними проводниками. Появилась теория устойчивости плазмы, обладающей конечной проводимостью; она представляла собой более реалистическое приближение к явлениям, которые наблюдаются как в лаборатории, так и при астрофизических исследованиях. Затем были предсказаны и экспериментально обнаружены гирвязкостные эффекты, которые в свою очередь привели к чрезвычайно важному открытию — дрейфовым волнам и связанным с ними неустойчивостям — из-за градиента плотности и температуры.

Эксперименты на стеллараторе открыли путь к измерению подробной параметрической зависимости аномальной диффузии в тороидальных системах и подтвердили эмпирически предложенную Бомом формулу ($D = ckT/16eV$) в условиях, когда средняя длина свободного пробега мала. Теоретически аномалии диффузии теперь стали вполне понятны на основе неустойчивостей дрейфового типа и типа конечной приводи-

мости; были получены также условия стабилизации плазмы с помощью техники создания магнитных полей особой формы («шир» и средний минимум B) и переходом к условию, когда средняя длина свободного пробега становится большой.

Эксперименты с осесимметричными торами с внутренними проводниками (мультиполи, левитроны) и в более позднее время со стеллараторами качественно подтвердили эти теоретические предсказания, и было получено существенное улучшение удержания по сравнению с диффузионной формулой Бома. В экспериментах на больших установках «Токамак» с плазмой при 10^6 — 10^7 °К и плотностью 10^{12} — 10^{13} см⁻³ был обнаружен поправочный множитель в 10—30 раз лучше, чем по формуле Бома для диффузии.

В некоторых из самых основных плазменных экспериментов была использована очень простая линейная геометрия, существенно отличающаяся от тех сложных конфигураций магнитного поля, которые должны характеризовать плазменные контейнеры, рассчитанные на длительное удержание. Плазма щелочных металлов (Q -машины) была использована для экспериментальной реализации дрейфовых и ионно-акустических волн. Эксперименты с электростатическим возбуждением волн в столбе водородной плазмы в устойчивом состоянии с низкой плотностью подтвердили все детали затухания Ландау, процессов возбуждения и существования волнового эха. Среди линейных экспериментов наиболее важным с точки зрения управляемых термоядерных реакций было кратковременное удержание (в θ -пинчах) плазмы при температурах 10^7 — 10^8 °К, плотностях 10^{16} — 10^{17} см⁻³ и давлениях плазмы, сравнимых с давлением магнитного поля. Простые «жидкостные» неустойчивости по существу контролируемы; что касается верхней границы аномальной диффузии, она не превышает предела, указанного Бомом. Геометрия θ -пинча используется также для генерации и изучения бесстолкновительных ударных волн, предоставляя тем самым возможность лабораторной проверки теории этого важнейшего для космического пространства явления.

Была показана возможность образования устойчивых, когерентных колец из релятивистских электронов, составляющих плазмopodobные образования. В то время как такие кольца требуют дальнейшего увеличения протекающего в них тока, чтобы стать замкнутыми магнитными бутылками для осуществления управляемых термоядерных реакций («Астрон»), их использование для коллективного ускорителя на высокие энергии оказалось уже сейчас многообещающим (см. УФН 96 (2), 377 (1968)).

Развитие лазерной технологии оказывает сильное влияние на исследование плазмы. Лазеры широко используются в диагностической технике, такой, например, как интерферометрия, фарадеевское вращение, томсоновское рассеяние. Мощные лазеры могут обеспечить практически мгновенно точечный источник высокоэнергичной плазмы путем полной ионизации небольших мишеней.

ПЛАЗМА КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

В течение последних двадцати лет физика плазмы играла все возрастающую роль в астрофизике и почти доминирующую роль в физике космического пространства*).

В 1958 г. первый космический корабль США «Эксплорер-Х» имел на борту приборы, которые обнаружили высокоэнергичные заряженные

*) С результатами советских исследований плазмы космического пространства можно познакомиться в статье М. В. Келдыша «Космические исследования», опубликованной в сб. «Октябрь и научный прогресс», книга 1-я, М., Изд-во АН СССР, 1967, стр. 87. (Прим. ред.)

частицы, захваченные магнитными ловушками, образованными магнитным полем Земли. Такие частицы совершают колебательное движение взад и вперед вдоль магнитного поля, отражаясь возрастающим магнитным полем вблизи Земли; кроме того, эти частицы дрейфуют вокруг Земли, благодаря неоднородности магнитного поля и вращению Земли. Исчерпывающее понимание движения частиц было достигнуто весьма просто, благодаря использованию представления об адиабатических инвариантах; эти результаты получили довольно драматическое подтверждение в эксперименте «Аргус», когда был произведен взрыв атомной бомбы над атмосферой Земли и образовался искусственный пояс заряженных частиц; его развитие со временем можно было проследить во всех деталях.

В начале 60-х годов с помощью спутников было обнаружено, что Солнце непрерывно испускает плазму, движущуюся с большой скоростью, — солнечный ветер. Такое иссушение было предсказано ранее теоретически на основе теорий солнечной короны для объяснения возникновения хвостов комет. Поскольку солнечный ветер образован сильно проводящим газом, он не может преодолеть магнитное поле Земли и должен обтекать Землю, создавая геомагнитную полость, называемую магнитосферой; именно в этой области и находятся радиационные пояса Земли. Границы этой полости весьма точно были определены в 1961 г.; ее форма и расположение по отношению к Солнцу соответствуют простой теории, основанной на равновесии давления солнечного ветра и магнитного давления. С помощью спутника «IMP-1» в 1965 г. было установлено, что эта полость представляет собой цилиндр, вытянутый на несколько сотен земных радиусов от Земли (в антисолнечном направлении), образуя магнитный хвост. В этом хвосте поле параллельно цилиндру и имеет одно направление в северной части, другое — в южной; между ними лежит нейтральная полоса. Плазменные неустойчивости в этой полосе могут быть ответственными за мощные сияния и магнитные бури. Происхождение магнитного хвоста все еще не очень ясно.

Солнечный ветер несет с собой слабое магнитное поле, возникающее вместе с магнитными силовыми линиями, испускаемыми фотосферой. Из-за вращения Солнца эти линии, надо думать, закручиваются в архимедовы спирали, поскольку солнечный ветер имеет радиальное направление. Измерение угла, которое магнитное поле может составлять с Землей (по расчетам этот угол должен быть равен 45° относительно линии, соединяющей Землю и Солнце), подтвердило идею о том, что линии переносятся проводящей жидкостью. Это обстоятельство получило дальнейшее подтверждение корреляцией полярности поля с областями фотосферы соответствующей полярности.

В 1963 г. на спутнике «Алурт» впервые наблюдалась в ионосфере электростатические моды, перпендикулярные **В**; они возбуждались радиочастотным импульсом и наблюдались вблизи предсказанной частоты. Радиолокационные эксперименты в Аресибо обнаружили коллективные эффекты при обратном рассеянии микроволн из ионосферы. В этих наблюдениях главную роль играли доплеровские частоты ионов, а не электронные доплеровские частоты, как это и должно было быть согласно кинетической теории плазмы. Рассеяние на колебаниях с плазменной частотой, возбужденных фотоэлектронами, также было обнаружено в полном соответствии с теорией.

Если последующие двадцать лет будут столь же плодотворными, как и прошедшие двадцать, мы можем надеяться на очень глубокое понимание плазменного состояния вещества — насколько мы знаем, самого распространенного состояния вещества во Вселенной.

Пристев, США