1966 г. Сентябрь *Том 90, вып. 1*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

523.75

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

СОЛНЕЧНАЯ КОРОНА И МЕЖПЛАНЕТНОЕ ПРОСТРАНСТВО*)

Л. Бирман

Явление солнечной короны известно нам по многочисленным наблюдениям и снимкам во время полных солнечных затмений. Снимок, показанный на рис. 1, получен во время затмения 1918 г. Вид короны примерно соответствует тому, что непосредственно наблюдается глазом; он указывает на существование весьма протяженной атмосферы Солнца.

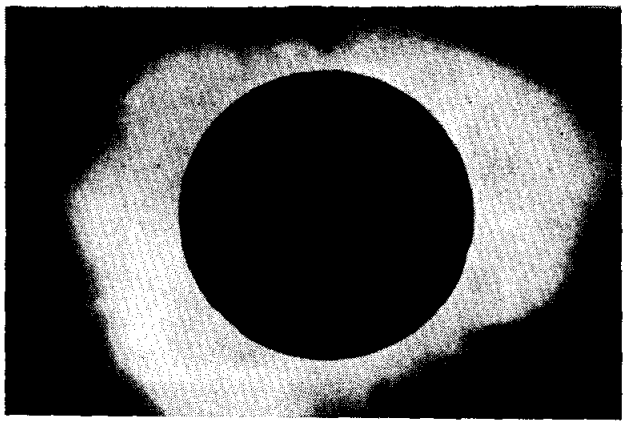


Рис. 1. Снимок солнечной короны во время затмения 1918 г.

Свет короны — в основном рассеянный свет Солнца, который мы видим на фоне темного неба, когда гораздо более яркий солнечный диск закрыт Луной (рис. 2).

Пространство между Солнцем и планетами — межпланетное пространство — заполнено весьма разреженным газом, текущим от Солнца подобно ветру. Это показали новейшие исследования, в частности теория кометных хвостов (рис. 3). Направление плазменных хвостов комет непосредственно показывает, подобно дымовой шашке, течение солнечного ветра. В последнее время выполненные на космических зондах измерения подтвердили и развили выводы, полученные из наблюдений комет.

*) Ludwig Bierman, Sonnenkorona und interplanetarer Raum, Sitzber. Bayerische Akad. Wissenschaften 37 (1965). Перевод Н. В. Щеглова.

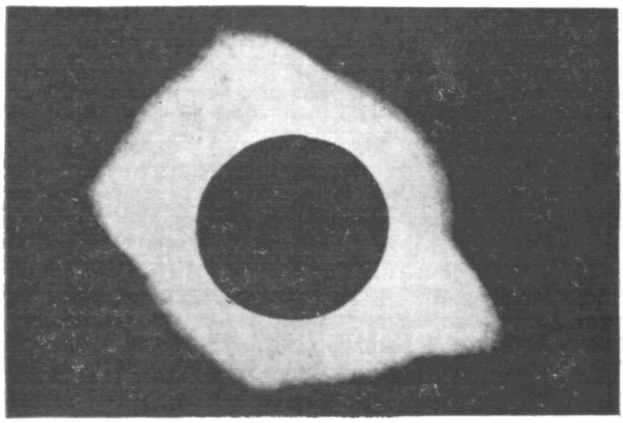


Рис. 2. Солнечная корона при небольшой активности Солнца (снимок 25.2.1952 г.).

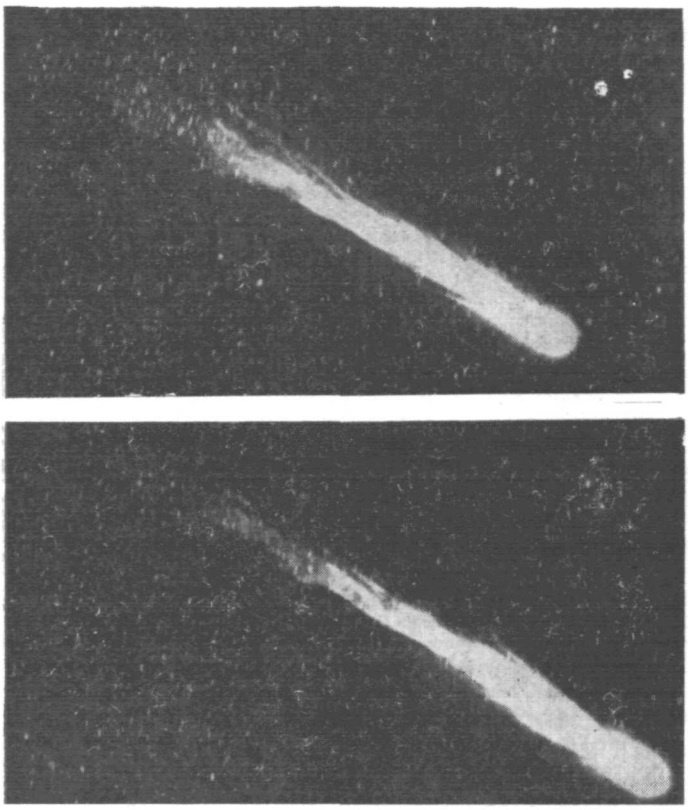


Рис. 3. Комета Морхауза (1908 г.) 20 и 21 ноября с плазменным хвостом, обращенным от Солнца.

Звезды выглядят черточками из-за собственного движения кометы во время фотографирования.

В обоих этих случаях газ настолько нагрет, что атомы распадаются на положительные ионы и электроны; газ ионизован, он находится, как говорят физики, в состоянии плазмы, характерные особенности которого определяются наличием легко подвижных отрицательно заряженных электронов.

Использованное здесь понятие плазмы возникло, собственно говоря, случайно. В 1928 г. американский физик Ирвин Лэнгмюр работал с дугами и разрядами в газах; он нашел, что внутри разряда ионы и электроны везде присутствуют в одинаковом количестве, вблизи же стенок и электродов это равновесие нарушается, и один из видов заряженных частиц, например положительные ионы, преобладает. Лэнгмюр счел нужным придумать новое обозначение для состояния газа во внутренней, свободной от пространственного заряда области, где электроны и ионы встречаются одинаково часто и где осуществляется обычное для ионизованного газа состояние. Выбор его оказался довольно трудным для Лэнгмюра и его молодого сотрудника Люи Тонкса, которому я обязан нижеследующим рассказом. Оба бились целые дни напролет, не находя ничего подходящего. Однажды утром Лэнгмюр ворвался в лабораторию и сказал Тонксу: «Хорошо, назовем-ка его „плазмой"». Здесь он воспользовался аналогией между однородной внутренней областью газового разряда и казавшейся биологам тех лет столь же однородной жидкой плазмой крови. Предложенное Лэнгмюром название быстро распространилось в научной литературе, а в последние годы и вне ее пределов.

Тем временем понятие плазмы стало в физике весьма дифференцированным; мне кажется, что то же происходит и в биологии; и сейчас едва ли можно предположить, что первое родилось из гораздо более старого второго, если бы этого не подтверждал рассказ очевидца.

Но вернемся к астрофизике и сделаем несколько общих замечаний по поводу астрономической плазменной физики.

Почти все вещество Вселенной находится, насколько нам известно, в плазменном состоянии, которое является таким образом, самым обычным из его состояний.

Плазма в межпланетном пространстве является ближайшим к нам примером плазмы космических масштабов и единственным объектом такого рода, доступным для прямых измерений и даже опытов.

Особенность плазменной физики состоит в ее близости к электродинамике. Так как в плазме очень легко возникают электрические токи и, следовательно, магнитные поля и так как в космических условиях возникшие магнитные поля существуют очень долго, следует учитывать их заметное воздействие на любое движение. В предельном случае магнитные поля оказываются, как говорят, «вмороженными» в плазму. При этом быстрое изменение магнитного поля может легко ускорять заряженные частицы — электроны и ионы — до высоких энергий. Весьма вероятно, что это обстоятельство играет роль в происхождении космических лучей, состоящих из ускоренных до высоких энергий атомных ядер, и прежде всего α-частиц и протонов, для которых это сокращенное и слишком общее название уже недостаточно. Часть наших представлений о магнитных полях в межпланетном пространстве первоначально основывалась на выводах из наблюдений космических лучей.

Даже сколько-нибудь полный обзор этих явлений затронул бы существенную часть новейшей астрофизики. Однако сегодня я ограничусь лишь явлениями, происходящими в пространстве между поверхностью Солнца и планетами, т. е. в солнечной короне и межпланетном пространстве, показав на них некоторые общие черты космической плазменной физики.

Заметим попутно, что здесь имеется много точек соприкосновения с лабораторной плазменной физикой. Физические основы этих двух наук одни и те же; конечная же цель лабораторных опытов с очень горячей плазмой состоит в осуществлении реакции слияния легких ядер в контролируемых условиях. Часть исследований в этой области возникла из астрофизической постановки вопроса. И когда я в заключение еще раз кратко остановлюсь на работах по синтезу, это будет попыткой показать хотя бы на одном примере тесную связь земной физики плазмы и астрофизики.

Обратимся же к предмету нашего исследования и взглянем опять на снимок солнечной короны, на этот раз на короны 1952 г., когда активность Солнца была небольшой (1918 г., к которому относится рис. 1,

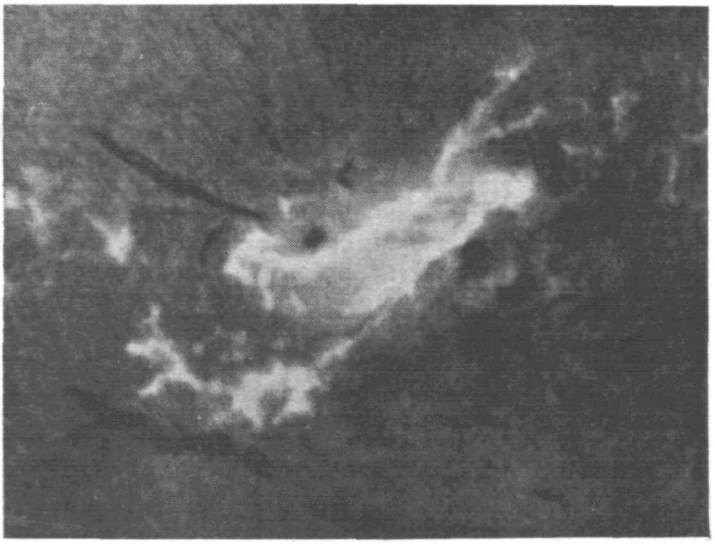


Рис. 4. Хромосферная вспышка (светлое образование) над активной группой пятен.
Темное волокно — протуберанец. Снимок в свете линии H_α 25.7.1946 г.

был годом максимальной активности). Большая часть видимого излучения короны — это солнечный свет, рассеянный на свободных электронах плазмы, из которой состоит солнечная корона. Небольшая доля света принадлежит излучению сильно ионизованных атомов железа и других ионов, присутствие которых говорит об очень высокой температуре плазмы. О ней говорят и другие факты, например излучение в радиодиапазоне: все измерения и расчеты дают для температуры короны значения между одним и двумя миллионами градусов.

Структура, которую мы видим на снимках, вызвана, по крайней мере частично, воздействием существующих на солнечной поверхности магнитных полей. Важную роль играют также активные области на поверхности Солнца, проявляющиеся вспышками и протуберанцами (рис. 4).

На краю Солнца часто можно видеть долгоживущие образования — протуберанцы или волокна, которые через монохроматор заметны и на солнечном диске. Эти волокна состоят из плазмы, которая гораздо плотнее и холоднее, чем вещество короны на этой же высоте. То, что

столь плотная плазма парит на такой большой высоте над поверхностью Солнца, обусловлено, по всей вероятности, действием магнитных полей в ее ближайших окрестностях (рис. 5). Измерения магнитного поля вблизи солнечной поверхности показывают, что вблизи протуберанца магнитные силовые линии идут почти горизонтально. Плотная плазма несколько сжимает их; возникающие при этом по законам электродинамики токи создают направленную наружу силу, которая поддерживает плазму спокойного протуберанца. В этой картине отражены не все черты,

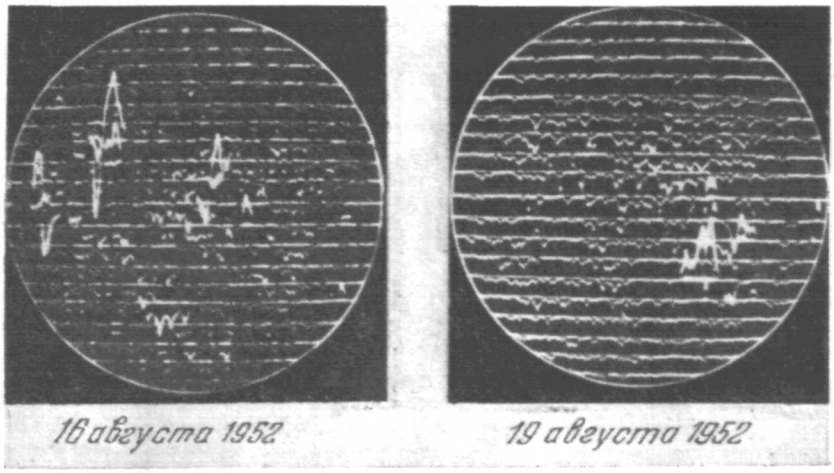


Рис. 5. Запись локальных магнитных полей на поверхности Солнца. Отклонение от прямых дает направление и силу поля; отклонение до следующей прямой соответствует 10 *гс*.

определяющие появление спокойного протуберанца, но она описывает наблюдаемое стационарное состояние, по существу, правильно.

Высокая по сравнению с температурой солнечной поверхности (5000°) температура короны $(1 \div 2) \cdot 10^6$ °) говорит о том, что состояние вещества в ней весьма сильно отличается от термодинамического равновесия. Картина здесь в некотором смысле обратна той, которую мы видим в холодной комнате, сидя у пылающего камина. Температура, которую можно приписать излучению огня, здесь сравнительно высока; она гораздо выше температуры воздуха, которая всего на несколько градусов выше нуля. Поэтому мы чувствуем себя зимой хорошо вблизи камина или на солнце. В солнечной короне осуществляется противоположный случай — температура газа, соответствующего воздуху, здесь гораздо выше той, которую мы приписываем общему полю излучения.

Так как эти соотношения имеют большое значение и для физических условий в межпланетном пространстве, следует вкратце остановиться еще на том, каким образом можно себе представить поддержание столь высокой температуры. Согласно представлениям, предложенным около двадцати лет тому назад, энергия, необходимая для поддержания этого состояния (равная, быть может, одной миллионной доле тепловой энергии Солнца), возникает в турбулирующих слоях поверхности Солнца и переносится наружу в виде механической энергии — своего рода звуковых или гравитационных волн. Эти процессы захватывают местные магнитные поля и, распространяясь наружу, превращаются в тепловую энергию. В результате происходит нагревание короны. Следствием этого

обстоятельства является то, что в обычных условиях корональная плазма постепенно уходит в межпланетное пространство с увеличивающейся в наружных слоях скоростью таким образом, что за несколько дней

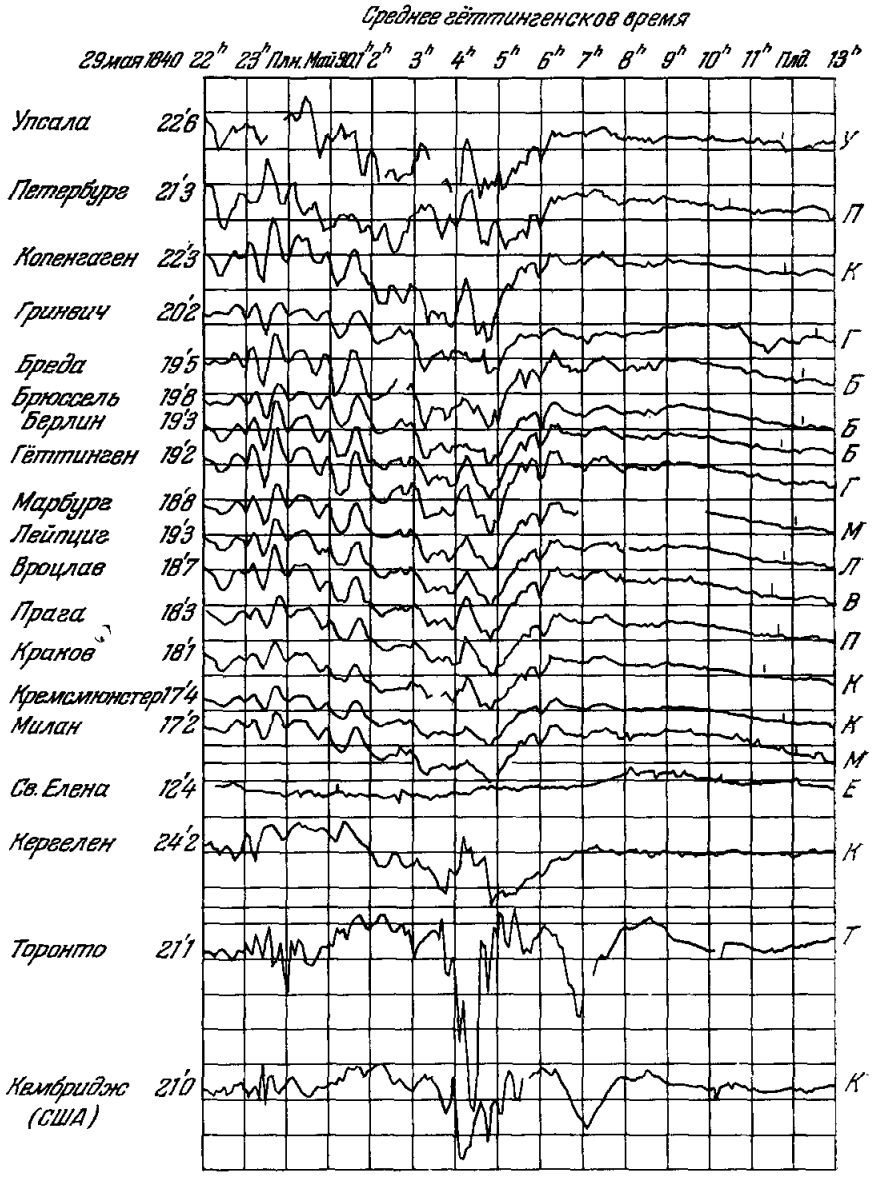


Рис. 6. Магнитная буря 29/30 мая 1840 г. по записям напряженности магнитного поля на 19 станциях.

вещество короны полностью обновляется снизу. На некотором расстоянии скорость оттока должна достигать нескольких сот километров в секунду.

Обратимся теперь к наблюдениям и измерениям, говорящим об условиях в межпланетной среде. Первое указание на то, что солнечная плазма может хотя бы иногда попадать в окрестности Земли, было получено из теории магнитных бурь. Явление этих бурь — здесь приведены наблю-

дения колебаний земного магнитного поля 1840 г. (рис. 6) — известно уже более 100 лет, но лишь в 1930 г. английские физики Чепмен и Ферраро показали, что эти бури являются следствием воздействия летящих со скоростью около 1000 *км/сек* от Солнца облаков плазмы. Даже на большом расстоянии от Земли они вступают во взаимодействие с ее магнитным полем. На поверхности Земли при этом появляются характерные глобальные изменения магнитного поля, подобные показанным на рисунке.

Магнитные возмущения говорят лишь о плазме, испускаемой вблизи плоскости эклиптики, составляющей с экваториальной плоскостью Солнца угол в 7°.

Особый вид плазмы можно наблюдать в межпланетном пространстве и вдали от этих плоскостей. Речь идет о хвостах многих ярких комет.

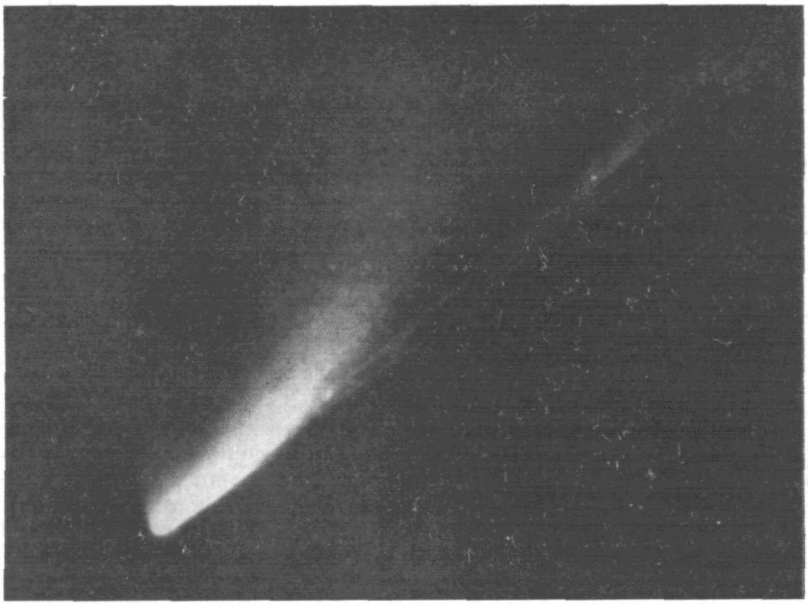


Рис. 7. Комета Мркоса 1956 г. с плазменным (почти прямой со структурой) и пылевым (размытый, искривленный) хвостами.

Эти плазменные хвосты отличаются от также имеющихся у комет пылевых хвостов тем, что они направлены почти точно в противоположную от Солнца сторону, тогда как пылевые хвосты более или менее сильно искривлены (рис. 7). Уверенное суждение о том, с каким хвостом мы имеем дело, может быть составлено лишь после изучения спектра. Пылевые частицы рассеивают солнечный свет подобно твердым телам и дают поэтому непрерывный спектр, т. е. равномерное распределение света по всем цветам. Молекулярные ионы плазменных хвостов, напротив, излучают в определенных длинах волн, положение которых дает возможность произвести химический анализ. Спектральный анализ кометного вещества до настоящего времени ограничен тем, что важнейшие излучения лежат в коротковолновой области спектра, поглощаемой земной атмосферой. В ближайшем будущем спектральные снимки с ракет или спутников принесут нам сведения о не наблюдавшихся до сих пор составных частях этих образований.

Другой признак, часто достаточный для уверенного распознавания типа хвоста состоит в наличии богатой структуры и сильной изменчивости

плазменных хвостов, а также в больших скоростях и ускорениях, определяемых по следующим друг за другом фотографическим снимкам (рис. 8, см. также рис. 3). В пылевых хвостах подобные явления не наблюдаются.

Примерно десять лет тому назад было показано, что особенности плазменных хвостов, особенно их большие скорости, направленность и переменность, объяснимы воздействием солнечной плазмы, распространяющейся радиально в межпланетном пространстве со скоростью от нескольких сот до тысячи *км/сек*. Поэтому межпланетная плазма

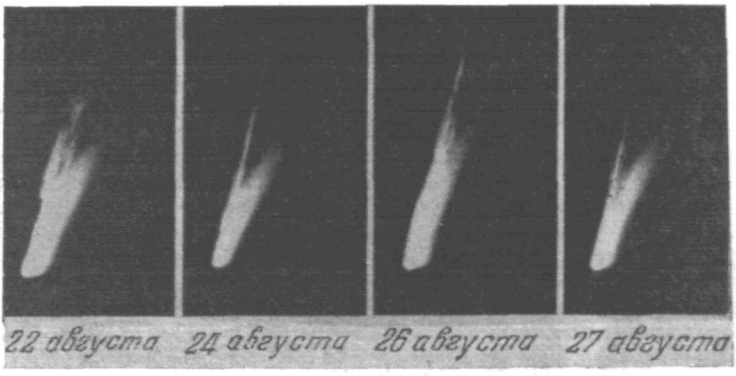


Рис. 8. Изменения в плазменном хвосте кометы Мркоса в период с 22 по 27 августа 1957 г.

Небольшие изменения искривленного пылевого хвоста обусловлены техникой получения снимков.

должна быть тождественна с солнечным корпускулярным излучением, т. е. с испускаемой Солнцем плазмой. Таким образом, можно рассматривать кометы с плазменными хвостами как естественные зонды, говорящие нам о присутствии и движении возникающей на Солнце межпланетной плазмы.

Выводы о свойствах межпланетной плазмы, полученные из наблюдений комет, таковы: на тех расстояниях от Солнца, где наблюдаются кометы, т. е. вне орбиты Меркурия, плазма течет в первом приближении радиально, хотя иногда наблюдаются случайные отклонения. Более подробный анализ направлений кометных хвостов говорит о средней скорости плазмы в 400—500 *км/сек*. Кометы с плазменными хвостами наблюдаются не только вблизи эклиптики, но и на высоких широтах. Поток плазмы заполняет, по-видимому, все межпланетное пространство. И, наконец, наблюдения комет не показывают заметного различия между периодами малой активности Солнца, когда на нем мало пятен, и эпохой большой активности. Лишь события, проявляющиеся на Земле в виде сильных магнитных возмущений и бурь и влияющие на хвосты комет, происходят в эпоху малой активности Солнца реже. Вообще же говоря, направленный во все стороны поток плазмы от Солнца всегда существует. Этот вывод вызвал точку зрения, отождествляющую межпланетную плазму с солнечным ветром. Иными словами, находящаяся обычно в межпланетном пространстве плазма имеет солнечное происхождение — это показали наблюдения комет,— и ее происхождение, как мы видели, связано с гидродинамикой внешних слоев солнечной атмосферы.

Так как в последние годы появилась возможность непосредственно измерять солнечный ветер по крайней мере в плоскости эклиптики, я

не буду останавливаться на других косвенных методах его наблюдения. Я остановлюсь лишь на обсуждении основных результатов прямых измерений.

Большей частью ставших в настоящее время известными данных мы обязаны направленной к Венере установке «Маринер-II» (рис. 9). На этом космическом зонде был установлен прибор, непосредственно измеряющий поток летящих от Солнца частиц. Кроме того, передавались данные о распределении этих частиц по скоростям, из которого последующий анализ позволял определить среднюю скорость, температуру и плотность ионов (измерялись лишь эти последние) (рис. 10). Измерения велись около 100 дней. С приближением к Венере температура космического зонда возросла настолько, что вскоре после встречи с планетой основные измерительные и контрольные приборы на борту ракеты вышли из строя.

Измерения показали, что существует поток частиц порядка нескольких сот миллионов ионов через квадратный сантиметр в секунду (рис. 11). Средняя скорость была в это время почти точно равна 500 *км/сек*, а ее изменения коррелировали с магнитными возмущениями на Земле таким образом, что более сильные возмущения соответствовали большей скорости солнечного ветра. Температура колебалась между несколькими десятками тысяч градусов и значениями, превышающими 10^5 °,— эти величины следует считать верхней границей. Концентрация, определяемая по плотности потоков ионов и средней их скорости, составляет по крайней мере несколько ионов в кубическом сантиметре. Эти значения, однако, недостаточно точные; новые измерения дают бо́льшие величины. Как и предполагали, за время измерений был зарегистрирован один идущий от Солнца корпускулярный поток.

Для гидродинамиков можно заметить, что так называемое число Маха, получаемое по этим данным, т. е. отношение скорости потока к скорости звука, находится для спокойных условий между 5 и 10; таким образом, для солнечного ветра речь идет о безусловно сверхзвуковом течении.

Несколько месяцев тому назад американцы запустили искусственный спутник с аналогичными приборами. Наибольшее удаление его орбиты от Земли было равно половине лунного расстояния. Там мы находимся уже в свободном межпланетном пространстве; первые измерения подтвердили данные, полученные в результате полета «Маринера»; лишь плотность частиц оказалась выше. Однако измерения еще не обработаны и о них больше нельзя ничего сказать.

Другие приборы на борту направленной к Венере межпланетной станции измеряли направление и напряженность магнитного поля в межпланетном пространстве. Результаты говорят о том, что там почти всегда имеются поля в несколько гамм; гамма — это используемая в геофизике единица, равная 10^{-5} *гс* (на средних широтах земное магнитное поле имеет напряженность около 0,2 *гс*). Эти поля могут заметно изменяться в течение нескольких часов. Если же собрать данные для целого дня, то для 40% времени мы видим признаки крупномасштабной спиральной структуры, именно такой, которую можно ожидать из теории от наложения осевого вращения Солнца на радиальное течение плазмы, так как магнитные поля, по-видимому, вморожены в нее. Период вращения Солнца равен 25 дням, что соответствует повороту на 14° в сутки. На расстоянии Земли движение плазмы вдоль ее орбиты со скоростью 14° в сутки соответствует 14-кратной скорости Земли, т. е. примерно 440 *км/сек*. Так как эта величина близка к средней скорости солнечного ветра, угол, образующийся в результате сложения этих двух движений, оказывается примерно равным 45°.

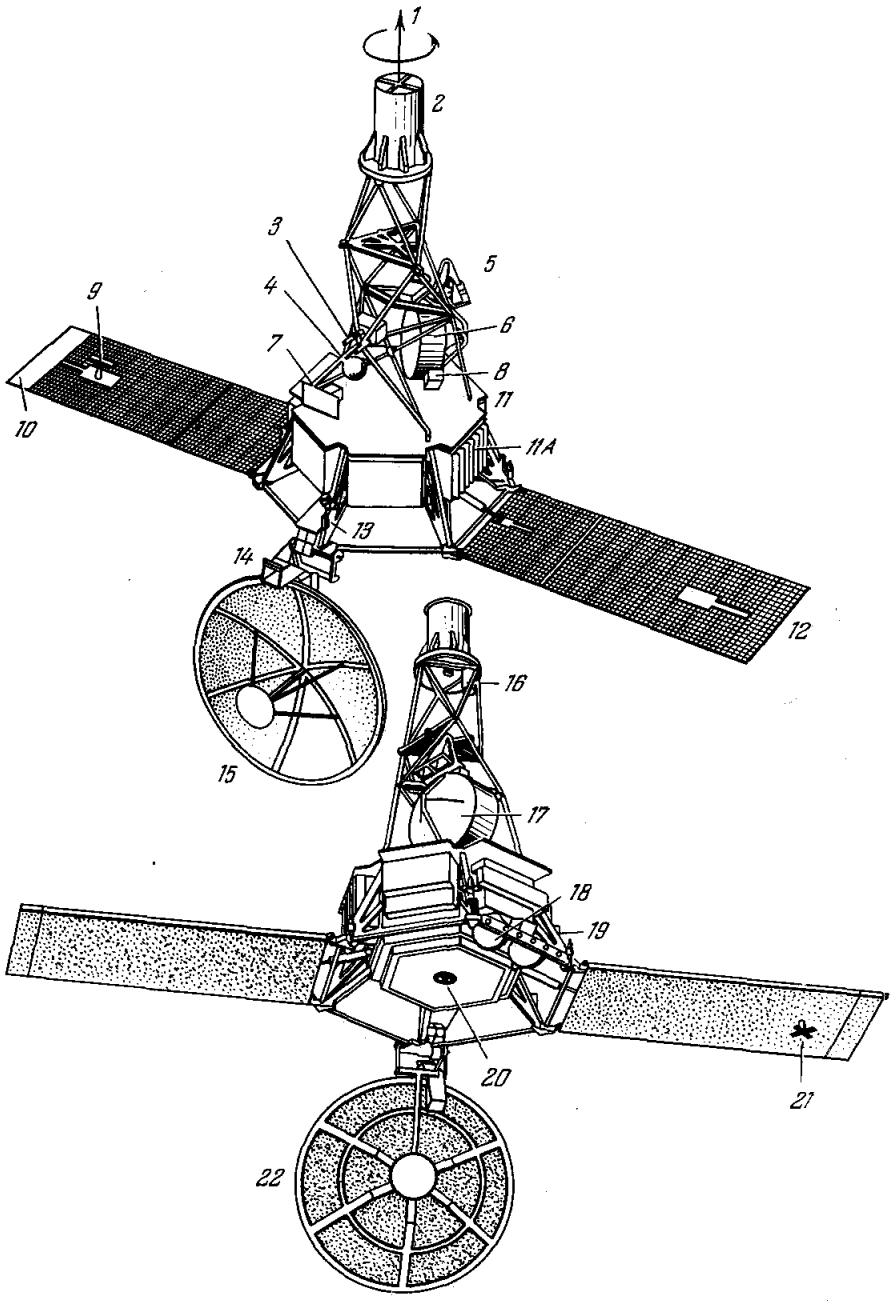


Рис. 9. Космическая ракета «Маринер-II».

Поперечный размер — около 5 *м* (по Scientific American 209(3), 70 (1963)). *1* — ось вращения; *2* — всенаправленная антенна; *3* — счетчики Гейгера — Мюллера; *4* — ионизационная камера; *5* — рупор сравнения; *6* — микроволновый радиометр; *7* — датчик микрометеоритов; *8* — инфракрасные радиометры; *9* — командная антенна; *10* — солнечный парус; *11* — шестиугольная рама; *11А* — жалюзи; *12* — солнечная панель; *13* — солнечный датчик; *14* — земной датчик; *15* — антенна с большим усилением; *16* — магнитометр; *17* — микроволновый радиометр; *18* — баллоны со сжатым газом; *19* — датчик солнечного ветра; *20* — сопло реактивного мотора; *21* — командная антенна; *22* — антенна с большим усилением.

С учетом довольно большой неточности магнитных измерений эта картина соответствует описанной выше, но не для всего периода измерений. Как использовать измерения для других интервалов времени,

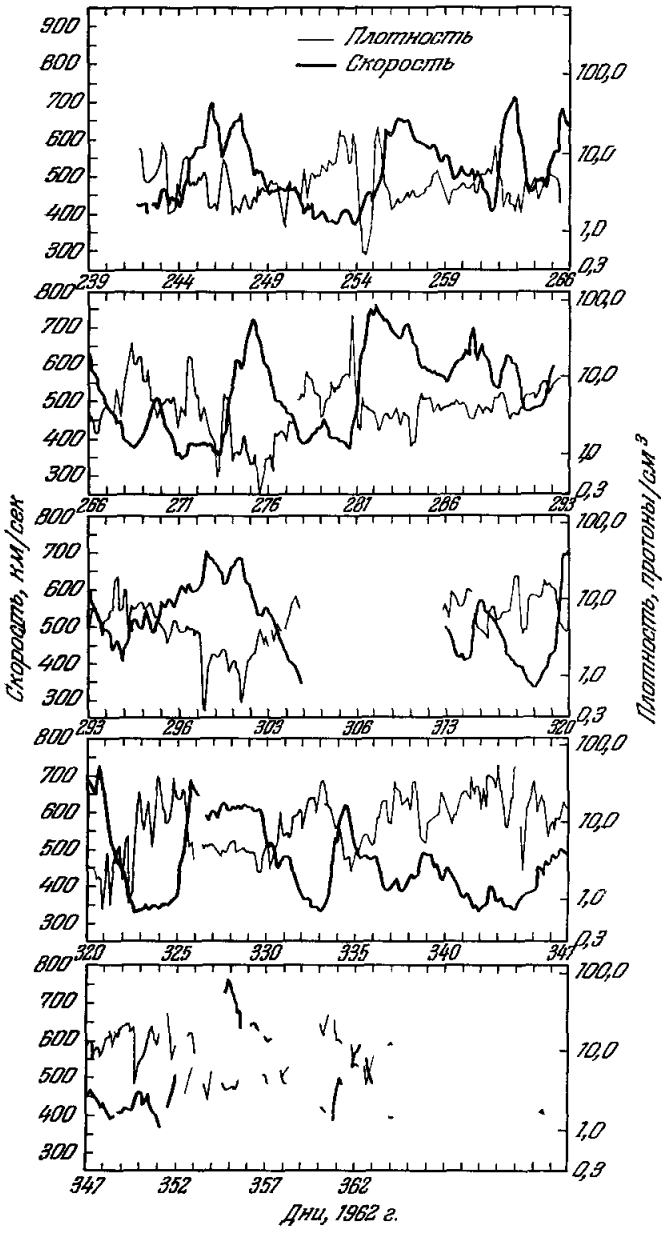


Рис. 10. Плотность (правая шкала, тонкая кривая) и скорость (левая шкала) солнечного ветра во время полета к Венере (сентябрь — декабрь 1962 г.).

еще не ясно. Другие данные с запущенных ранее космических ракет относятся к космическим лучам в межпланетном пространстве и их зависимости от солнечной активности.

Что касается плотности частиц и напряженности магнитного поля, условия в межпланетном пространстве примерно таковы же, как в пространстве между звездами нашего Млечного Пути. В этой среде, по составу вряд ли тождественной межпланетной, и сейчас возникают звезды вследствие конденсации межзвездного вещества. Следует также учитывать взаимодействие между плазмой, частицами космических лучей и магнитными полями, связывающими их друг с другом. Значение имеющихся

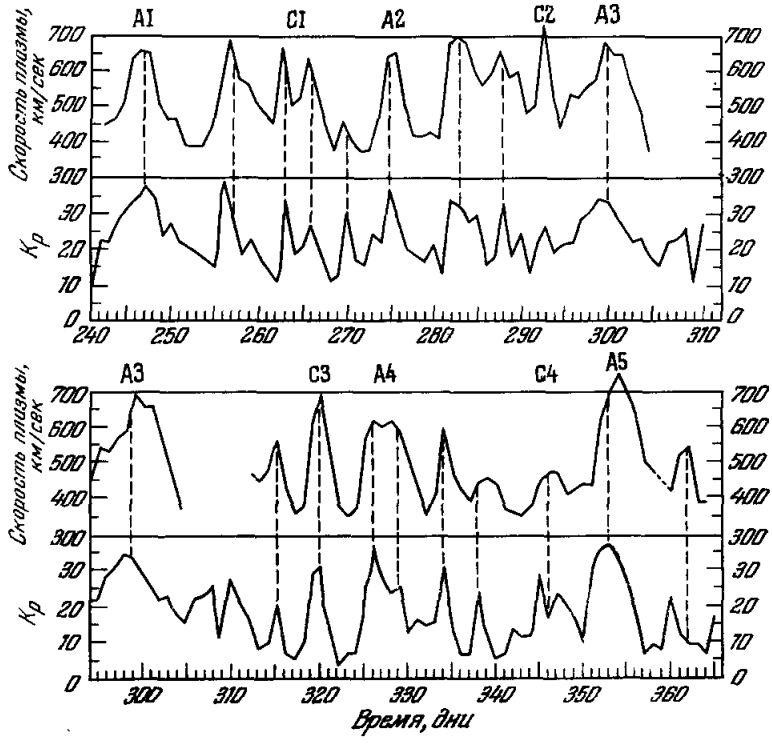


Рис. 11. Корреляция скорости плазмы (суточные средние) и K-индекса геомагнитной активности за тот же период.

сейчас результатов измерений в межпланетном пространстве состоит в том, что они позволяют проверить модель, построенную для интерпретации наблюдений межзвездной среды и еще более далеких областей.

Я уже упоминал о том, что с помощью ракет можно проводить эксперименты в межпланетной среде. Среди различных возможностей, о которых можно думать, я вкратце остановлюсь на одной, являющейся следствием наших работ о кометах. Плотность хвоста кометы невероятно мала; поэтому можно спросить, какое количество искусственно созданной в межпланетном пространстве плазмы может быть наблюдаемо с Земли. Расчет показывает, что при использовании подходящих методов на расстоянии в 100 000 *км* будут наблюдаться количества вещества порядка нескольких килограммов. Подобный эксперимент создаст искусственный кометный хвост; в настоящее время мы выясняем возможности метода путем проб на ионосферных высотах (рис. 13).

Измерения с помощью космических ракет и спутников вблизи Земли дали весьма ценные для геофизики данные. Эти измерения относятся, в частности, к взаимодействию между земным магнитным полем и солнечным ветром. Согласно теории земного магнитного поля, которое соот-

ветствует у земной поверхности полю однородно намагниченного шара, это взаимодействие должно уменьшиться на расстоянии 10 земных радиусов до примерно 1/1000 своего значения у поверхности Земли. Из этого легко рассчитать, что на таком расстоянии от Земли плотность энергии земного магнитного поля примерно равна плотности энергии солнечного ветра, точнее, плотности его кинетической энергии. Поэтому сильное взаимодействие между движущейся плазмой и данным магнитным полем, следующее из законов магнитогидродинамики и физики плазмы, позволяет ожидать отодвигания земного магнитного поля солнечным ветром на расстояниях, больших 10 земных радиусов. И действительно, измерения показывают, что на этом расстоянии условия полностью меняются в том смысле, что вне этой границы солнечный ветер выглядит как непосредственно измеряемый поток плазмы, а магнитные поля, на которые он влияет, не могут быть отнесены к магнитному полю Земли.

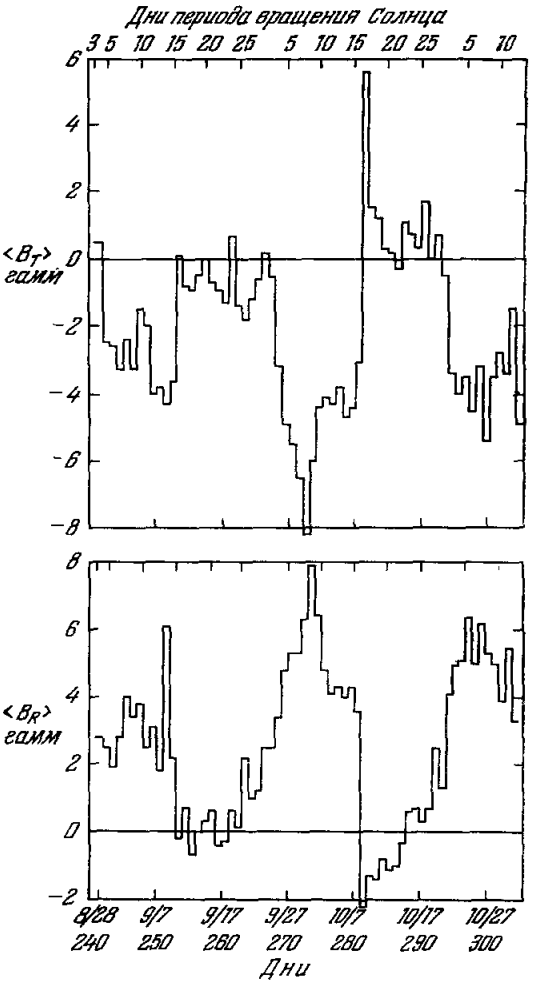


Рис. 12. Азимутальная (в плоскости эклиптики) и радиальная (параллельная линии ракета — Солнце) компоненты межпланетного магнитного поля в сентябре и октябре 1962 г.

Измерения с космических ракет и спутников показывают следующее строение пограничного слоя, о котором мы говорили (рис. 14). Магнитосфера, т. е. область верхней атмосферы, занимаемая магнитным полем Земли, имеет яйцеобразную форму; еще нельзя сказать, имеет ли Земля обращенный от Солнца хвост — своего рода тень магнитосферы в солнечном ветре *).

Некоторые наблюдения говорят о том, что Луна оказывает мешающее воздействие на течение солнечного ветра, если измерять его недалеко за Луной (если смотреть с Солнца).

Из упомянутого выше факта о сверхзвуковом течении солнечного ветра следует, что на несколько большем расстоянии в направлении Солнца, примерно на 14 земных радиусах, должна существовать еще одна поверхность разрыва или, выражаясь языком гидродинамики, ударный фронт. Это — граница, за которой начинается свободное межпланетное пространство, на которое не влияет близость Земли.

*) Измерения с американского спутника подтвердили существование магнитного хвоста Земли, тянущегося в межпланетном пространстве по крайней мере на 100 000 *км* (январь 1965 г.).

Получены первые указания, которые еще нуждаются в подтверждении, на существование и этой поверхности. Течение солнечного ветра вокруг Земли, по-видимому, связано с переносом энергии, приводящим к изменениям магнитного поля во внешней магнитосфере и к ускорению ионов и электронов до высоких энергий. Часть энергичных частиц в так называемых

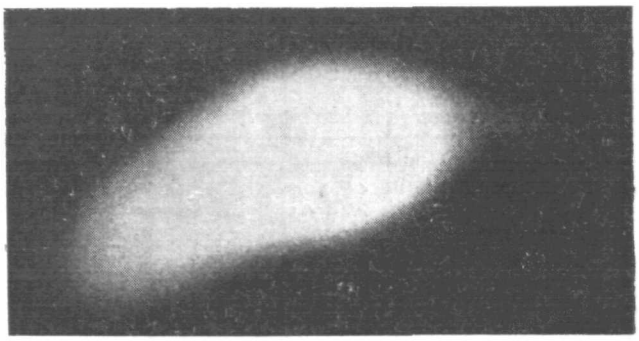


Рис. 13. Стронциевое облако в ионосфере (186 *км*), выпущенное из высотной ракеты.

Снимок получен в Сахаре 14.2.1964 г. через интерференционный фильтр $\lambda = 4607$ Å рабочей группой Института космической физики Физического и астрофизического института имени Макса Планка.

радиационных поясах Земли, обнаруженных с помощью первых искусственных спутников Земли около 5 лет тому назад, могла появиться

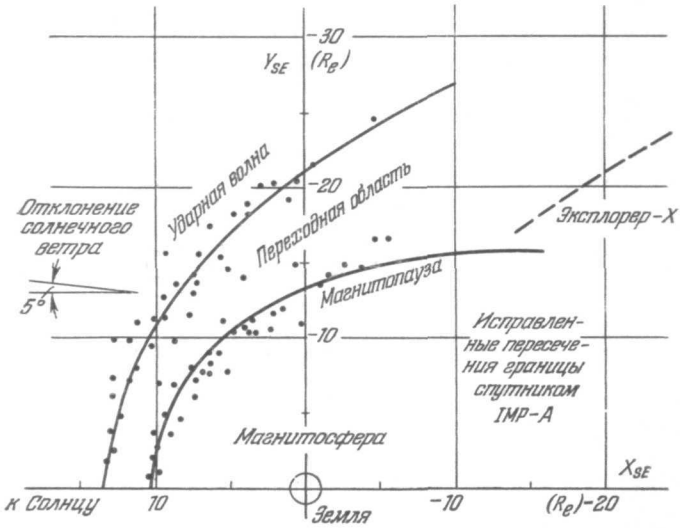
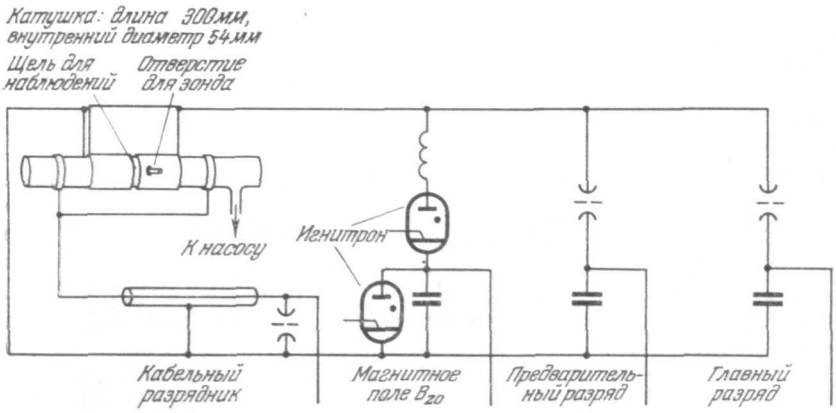


Рис. 14. Граница между магнитосферой и межпланетной плазмой.

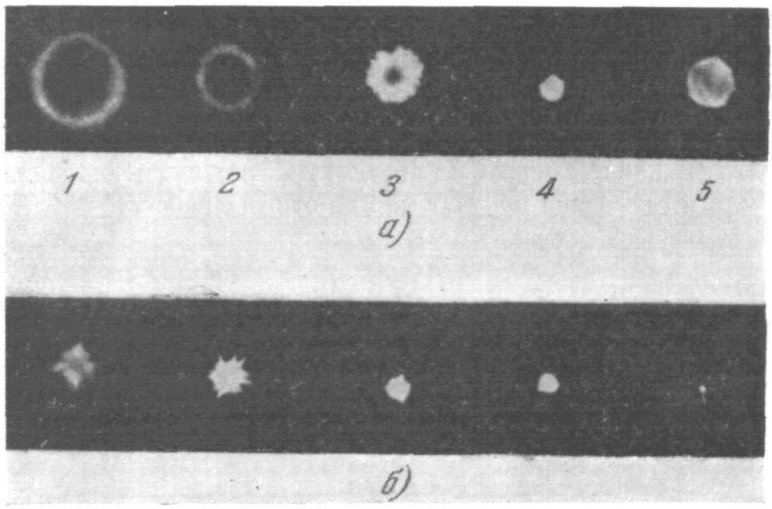
таким образом. Эти измерения открывают новые точки зрения на интерпретацию многих геофизических явлений, например полярных сияний.

На этом мы оставим область космической плазменной физики, чтобы коротко остановиться на лабораторных опытах с высокотемпературной плазмой.



Напряжение	40 кв	≤2,5 кв	24 кв	40 кв
Емкость	1200 пкф	≤2600 мкф	1 мкф	33 мкф
Время половины цикла	0,05 мксек	140 мксек	1 мксек	3,1 мксек
Энергия	10^{-3} кдж	≤8,3 кдж	0,3 кдж	26 кдж
Время срабатывания	0 мксек	0 мксек	10 мксек	20 мксек

Рис. 15. Схема создания электрического разряда для получения очень горячей плазмы (так называемый тэта-пинч, см. текст).



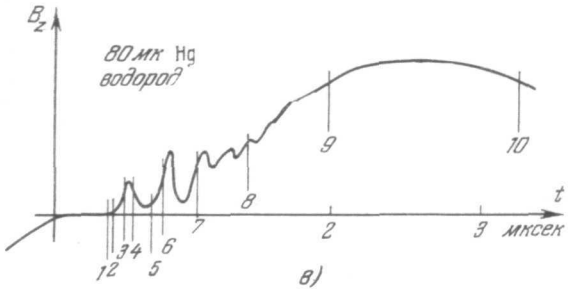


Рис. 16. Снимки разных стадий разряда в направлении оси трубки.
B_z — магнитное поле, параллельное оси; t — время в микросекундах.

Удержать высокотемпературную плазму в удалении от стенок сосуда можно с помощью сильных магнитных полей. Их действие качественно соответствует влиянию земного магнитного поля, мешающего солнечной плазме приблизиться к нам на расстояние, меньшее 10 земных радиусов, или солнечным магнитным полям, поддерживающим протуберанцы. При этом в лаборатории должно иметься магнитное поле, давление которого по крайней мере столь же сильно, как давление плазмы, им переносимой или удерживаемой.

В качестве примера подобных экспериментов я приведу своего рода разряд, принцип которого ясен из рис. 15. Очень сильный электрический ток, длящийся ничтожную долю секунды, идет вокруг цилиндрического сосуда таким образом, что внутри него возникает параллельное оси магнитное поле B. Плотность магнитной энергии соответствует в этом опыте давлению около 100 *атм*. При этом удается так сильно сжать созданную ранее в сосуде плазму, что ее температура достигает 10^7 ° (температура, царящая в недрах Солнца) (рис. 16). Так как эта температура в 10^4 раз выше температуры воздуха, плотность составляет лишь долю атмосферной. Подобные опыты позволили поддерживать упомянутую выше температуру плазмы до 1/50 *мсек* — примерно в 10 раз дольше, чем время, за которое плазма рассеялась бы из-за теплового движения. В будущих опытах изменением условий предполагается достичь более высоких температур в течение большего времени.

Основной целью этих исследований является освоение физики плазмы при температурах 10^7—10^8 °, позволяющее поддерживать высокую плотность сравнительно долгое время. Современный прогресс позволяет думать, что в области покорения высоких температур и плотностей будет достигнуто гораздо больше, чем сейчас. Мы не можем сейчас дать ответа на вопрос о достижении интересующих практику возможностей, например о контроле над реакцией синтеза; еще много лет на переднем плане будут стоять вопросы чистой физики. Но не оставляет сомнения то, что астрономия и геофизика получат многое от этих работ.