

551.510.536(048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ
АКАДЕМИИ НАУК СССР
(27—28 сентября 1978 г.)**

27 и 28 сентября 1978 г. в конференц-зале Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась совместная научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

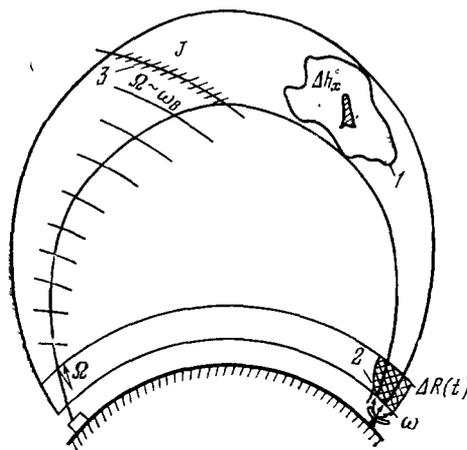
1. С. Н. Вернов. Радиационные пояса Земли (новые данные).
2. К. И. Грингауз. Малоэнергичная плазма магнитосферы: ее происхождение и роль в крупномасштабных магнитосферных процессах.
3. Б. А. Тверской. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие и механизмы ускорения заряженных частиц в околоземном пространстве.
4. Р. З. Сагдеев. Насколько сегодня мы понимаем магнитосферу.
5. В. Ю. Трахтенгерц. Магнитосфера как альвеновский мазер.
6. А. А. Галеев. Механизм магнитосферной суббури.

Ниже приводится краткое изложение двух докладов.

551.510.536(048)

В. Ю. Трахтенгерц. Магнитосфера как альвеновский мазер. Исследования последних лет показали, что динамика радиационных поясов (РП) Земли во многом определяется электромагнитным низкочастотным излучением в диа-

пазоне от 10^5 до долей μ . Своим происхождением это излучение обязано мазерному механизму, который реализуется в радиационных поясах Земли. Суть его в следующем. Магнитосфера как электродинамическая система представляет собой заполненный плазмой огромный резонатор, форма которого контролируется геометрией магнитного поля. Собственные колебания такого резонатора — альвеновские волны и вистлеры. Активным веществом в магнитосфере являются энергичные электроны и протоны РП, источником которых служат различные ускорительные механизмы, действующие в магнитосфере Земли. Перенаселенность уровней в альвеновском мазере (АМ) достигается благодаря наличию конуса потерь, обусловленного тем, что частицы с большими продольными (вдоль магнитного поля) скоростями достигают плотных слоев атмосферы



Активные эксперименты: изменение n_{xL} (1), модуляция R периодическим нагревом ионосферы (2), циклотронный нагрев РП (3).

и там поглощаются. В результате возникает поперечная анизотропия, которая служит причиной циклотронной неустойчивости (ЦН) РП. В процессе развития ЦН возбуждаются альвеновские волны (в случае протонов РП) и вистлеры (в случае электронной компоненты), приводящие к диффузии частиц РП по пичч-углам и высыпанию их в плотные слои атмосферы. Как известно, альвеновские волны обладают замечательным свойством — они жестко «привязаны» к силовым линиям, на которых расположен источник. Благодаря этому циклотронные волны могут многократно усиливаться в РП, переотражаясь от торцов геомагнитной ловушки. Таким же качеством, хотя и в меньшей мере, обладают вистлеры. Существенным является и то обстоятельство, что если ЦН реализуется в центре РП, то она имеет место и по всей длине ловушки. Все это делает ЦН довольно универсальной и часто наиболее опасной в космических условиях.

Уже такой беглый взгляд на магнитосферу обнаруживает ее большое сходство с мазерными системами. Согласно последним исследованиям¹ это сходство имеет

и глубокую физическую основу. В динамике ЦН удалось обнаружить самые разнообразные режимы: стационарный, периодический, стохастический и пиковый, т. е. практически все режимы, характерные для оптических квантовых генераторов.

Основы понимания работы АМ были заложены еще в 1960—1961 гг. в первых статьях по линейной и квазилинейной теории ЦН анизотропной бесстолкновительной плазмы^{2, 3}. Применительно к РП квазилинейные уравнения ЦН оказалось необходимым дополнить рядом существенных факторов, в частности учесть влияние холодной компоненты плазмы и неоднородности магнитного поля, а также ввести источники и сток частиц и волн⁴⁻⁹.

В настоящее время теория ЦН РП Земли получила надежное экспериментальное подтверждение и является общепризнанной.

При анализе ЦН РП в условиях действия интенсивного внешнего источника частиц был обнаружен интересный эффект «запирания» частиц в магнитной ловушке на собственной турбулентности¹⁰. В случае, когда характерное время диффузии частиц по пичч-углам на циклотронных волнах становилось меньше времени осцилляции частиц между магнитными пробками, возникала как бы аномальная вязкость в горячей плазме, замедлявшая ее выход через магнитные пробки. Указанный эффект в условиях магнитосферы может оказаться существенным в сильно турбулентных областях на границе с солнечным ветром, а также во время взрывной фазы магнитной суббури.

Для более глубокого понимания процессов, происходящих в РП, важную роль играют активные эксперименты (некоторые из них изображены на рисунке). Первый эксперимент, предложенный Брайсом в 1970 г.⁹, основан на зависимости ЦН от плотности холодной плазмы. Выпуск холодной плазмы в магнитосферу с борта ИСЗ позволяет инициировать ЦН за пределами плазмосферы, где неустойчивость в естественных условиях, как правило, не возбуждается. Модуляция добротности альвеновского резонатора с помощью периодического нагрева ионосферы составляет содержание второго эксперимента. При этом можно ожидать возбуждения периодических режимов ЦН. В основе третьего эксперимента лежит циклотронный нагрев электронов РП с помощью СДВ передатчиков, который можно рассматривать как искусственный источник частиц в РП. Различные режимы такого нагрева открывают возможности наиболее всестороннего изучения динамики альвеновского мазера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалов П. А., Трахтенгерц В. Ю.— Изв. вузов. Сер. «Радиофизика», 1976, т. 19, с. 801; Физ. плазмы, 1976, т. 2, с. 396; 1978, т. 4, с. 177.
2. Сагдеев Р. З., Шафранов В. Д.— ЖЭТФ, 1960, т. 39, с. 181.
3. Веденов А. А., Велихов П. Е., Сагдеев Р. З.— Яд. синтез, 1961, т. 1, с. 82.
4. Трахтенгерц В. Ю.— Геомагн. и аэроном., 1963, т. 3, с. 442, 1966, т. 6, с. 827; 1967, т. 7, с. 341.
5. Андронов А. А., Трахтенгерц В. Ю.— Ibid, 1964, т. 4, с. 181.
6. Kennel C. F., Petschek H. E.— J. Geophys. Res., 1966, v. 71, p. 1.
7. Тверской Б. А.— Геомагн. и аэроном., 1967, т. 7, с. 226.
8. Kennel C. F.— Rev. Geophys., 1969, v. 7, p. 379.
9. Voise N., Lucas G.— J. Geophys. Res., 1971, v. 76, p. 900.
10. Беспалов П. А., Трахтенгерц В. Ю.— Физ. плазмы, 1979.

551.510.536(048)

А. А. Галеев. Механизм магнитосферной суббури. Магнитосферная суббуря представляет собой сложный комплекс явлений, сопровождающих развитие глобальной неустойчивости магнитосферы, внутренне присущей ей как динамической системе. Основным источником энергии для этих процессов является энергия магнитного поля в протяженном магнитосферном хвосте.

Специалисты давно считают, что неравновесность хвоста магнитосферы заключается в наличии нейтрального слоя, по обе стороны от которого силовые линии магнитного поля имеют противоположное направление (к Земле в северной половине хвоста и от Земли — в южной). Поэтому Компи, Лаваль и Пелла, а затем Шиндлер предложили в качестве неустойчивости, ответственной за диссипацию свободной энергии хвоста, известную из исследований по управляемому термоядерному синтезу «тиринг»-неустойчивость. Физический механизм неустойчивости нетрудно уяснить, представив распределенный ток, ответственный за обращение магнитного поля в нейтральном слое, в виде набора токовых нитей. Такие токовые нити имеют тенденцию к «слипанию», так как сила притяжения между соседними нитями быстро растет при сближении нитей, а их связь с остальными нитями при этом ослабляется из-за взаимного удаления. При этом происходит изменение топологии магнитного поля: часть магнитного потока, ранее направленного вдоль плоского токового слоя, перезамыкается и образует силовые линии, замыкающиеся вокруг слипшейся пары токов. Ясно, однако, что перезамыкание возможно при наличии конечной диссипации, когда нарушается вмороженность силовых линий в плазму. В предложенных теориях диссипация обеспечивается черенковским взаимодействием «тиринг»-моды с частицами, движущимися в нейтральном слое, где магнитное поле мало и поэтому не препятствует резонансному взаимодействию.

Поразительную устойчивость хвоста магнитосферы в течение многих часов между суббуриями удалось объяснить при таком подходе, учтя, что в магнитосферном хвосте часть потока магнитных силовых линий все же пересекает нейтральный слой (и в этом смысле он перестает, строго говоря, быть нейтральным). Стабильность реальной конфигурации объясняется при этом тем, что при сближении токовых нитей приходится тратить энергию на сжатие электронной компоненты плазмы, вмороженной в магнитные силовые линии, пересекающие нейтральный слой¹. Поскольку возмущение электронной плотности n_{1e} , обратно пропорционально величине нормальной к слою компоненты магнитного поля $B_{\perp 0}$ ($n_{1e}/n_0 = B_{\perp 1}/B_{\perp 0}$), то стабильность хвоста падает с увеличением этой компоненты. Дальнейшие экспериментальные исследования² показали, что в магнитосферном хвосте в активные периоды действительно развиваются флуктуации магнитного поля с характерным размером порядка длины волны «тиринг»-моды (эта длина порядка толщины плазменного слоя в хвосте магнитосферы, составляющей 0,5—2 радиуса Земли). Кроме того, подтверждается вывод работы¹ о том, что возмущение магнитного поля конечной величины может служить «спусковым крючком» для развития неустойчивости хвоста магнитосферы³.

Однако последние экспериментальные исследования поставили перед теорией новые вопросы. Дело в том, что возникновение высокоскоростных плазменных потоков из-за этой неустойчивости происходит с характерным временем порядка десятков минут⁴. Энергичные же частицы появляются в хвосте за время порядка нескольких минут⁵. Поэтому если считать, что глобальная динамика плазмы в хвосте имеет характерные времена порядка обратного инкремента линейной неустойчивости (что подтверждается простыми оценками), то время ускорения частиц до высоких энергий должно соответствовать более быстрым («взрывным») процессам. Теоретическое исследование нелинейной стадии «тиринг»-моды⁶ показали, что она действительно приобре-

тает взрывной характер. Физически это объясняется тем, что на нелинейной стадии размер магнитных островков, окружающих слипшиеся токовые нити, становится значительно больше ларморовского радиуса ионов. В этом случае магнитное поле препятствует резонансному обмену энергией между частицами и «тиринг»-модой везде, кроме малой окрестности нейтральных линий. Поскольку размер этой окрестности падает с ростом амплитуды, то величина вихревого электрического поля ($E_1 \sim \partial V_1 / \partial t$) в «тиринг»-моды должна увеличиться, чтобы обеспечить нужную диссипацию свободной энергии. Это соответствует взрывному нарастанию амплитуды «тиринг»-моды. Решение задачи об ускорении частиц электрическим полем «тиринг»-моды в окрестности нейтральных линий способно объяснить наблюдаемые характеристики магнитосферных всплесков энергичных частиц (спектр, порог обрезания по энергии, эволюцию во времени) ⁷.

Построение теории суббурь, кроме описанных выше процессов, должно включать в себя исследование электродинамической связи процессов в хвосте магнитосферы с процессами в авроральной ионосфере (полярные сияния, авроральные токи, радиоизлучения и др.), изучение нелинейной динамики плазменных конфигураций, образующихся в результате развития «тиринг»-моды (природа быстрых плазменных потоков — «файрболов», инжекция частиц в кольцевой ток и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Галеев А. А., Зеленый Л. М.— ЖЭТФ, 1976, т. 70, с. 2133.
2. Coroniti F. V., Scarf F. L., Frank L. A., Lepping R. P.— Geophys. Res. Lett., 1977, v. 4, p. 219.
3. Saan M. N., McPherron R. L., Russell C. T.— J. Geophys. Res., 1977, v. 82, p. 4837.
4. Coroniti F. V., Frank L. A. et al. Plasma Flow Pulsations in Earth's Magnetic Tail.— Geophys. Res. Lett. (in press).
5. Sarris E. T., Krimigis S. M., Armstrong T. P.— J. Geophys. Res., 1976, v. 81, p. 2341.
6. Galeev A. A., Coroniti F. V., Ashour-Abdalla M.— Explosive Tearing Mode Reconnection in the Magnetospheric Tail.— Geophys. Res. Lett. (in press).
7. Galeev A. A. Reconnection in the Geomagnetic Tail: Report M.6.4 at STP Symposium. Innsbruck, Austria. May 29 — June 3, 1978.