551.510.535.4(049.3)

ДИНАМИКА ЧАСТИЦ В РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСАХ

M. Schulz, L. J. Lanzerotti. Particle Diffusion in the Radiation Belts. Berlin—Heidelberg—New York, Springer-Verlag, 1974, 215 p.

В 1970 г. началось издание серии монографии «Физика и химия космического пространства», выпускаемой под общей редакцией Дж. Рёдерера. В первые четыре года вышли шесть книг: «Геомагнитные микропульсации», «Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем», «Геохимия Луны и планет», «Оптические явления в полярных сияниях», «Расширение короны и солнечный ветер», «Физика планетных ионосфер». Первые выпуски этой серии, небольшого объема в 170—250 стр., показали ее актуальность. Монография «Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем», написанная Рёдерером, вышла в переводе на русский язык («Мир», 1972 г.), а один из выпусков, связанный с проблемами солнечного ветра, уже обсуждался на страницах УФН (111, 199 (1973)).

В 1974 г. эта серия пополнилась седьмым томом, посвященным динамике частиц в радиационных поясах. Открытие радиационных поясов Земли при запусках первых искусственных спутников сразу привлекло внимание многочисленных специалистов по космофизике и физике плазмы, а широкий диапазон физических процессов в радиационных поясах стимулировал бурный рост исследований. Однако построение содержательной модели таких процессов затрудняется характерным для геофизики обстоятельством — необходимостью одновременного учета ряда эффектов, обусловливающих движение частиц в радиационных поясах. Сравнивая работы разных авторов по этому кругу задач, следует приветствовать издание рецензируемой книги.

В первых трех главах книги делается попытка феноменологического описания динамических процессов в поясах с помощью теории адиабатических инвариантов и уравнения Фоккера — Планка. Здесь развивается замкнутый метод описания, причем построение метода ведется чрезвычайно элегантно. В главе первой вводятся три основные характеристики периодичности движения частиц в поясах, соответствующие идеализированной модели консервативного движения. Эти характеристики связаны с гирацией частиц вокруг силовой линии, их отражением от запрещенных областей и с дрейфом; в соответствии с этим для описания функции распределения частиц вводится шестимерное фазовое пространство, а в нем — канонические переменные: действие—угол. При этом «переменными действия» частиц служат значения адиабатических инвариантов частицы — ее магнитного момента, периода движения между точками отражения и магнитного потока, связанного с дрейфом частицы. При таком построении существенно, что с самого начала учитывается релятивистский характер кинематики частиц. Интересно, что ряд вопросов адиабатического движения частиц в космофизических условиях обсуждается в выпуске серии, посвященном солнечному ветру. Однако методический успех рецензируемой книги связан именно с использованием гамильтонова формализма. Дальнейшее изложение показывает значительную адэкватность гамильтонова описания движению частиц в радиационных поясах.

Цикл интересных явлений, связанных с нарушением адиабатической инвариантности в реальных магнитосферных условиях, обсуждается в главах второй и третьей. Возмущение значений инвариантов представляется как диффузия частиц в пространстве канонических переменных. При этом диффузия описывается уравнением Фоккера — Планка и ставится задача нахождения входящих в это уравнение кинетических коэффициентов. Для определения этих коэффициентов в ряде случаев требуются специальные космические эксперименты, например наблюдение за искусственно созданными потоками быстрых частиц. Аналитическое вычисление этих коэффициентов требует тщательного анализа конкретного физического механизма, возмущающего адиабатические инварианты. Так, во второй главе, посвященной диффузии по питч-углам, рассматриваются диффузионные коэффициенты, связанные с взаимодействием электромагнитных волн и частиц, с различными типами циклотронного резонанса, с влиянием микропульсаций границ области отражения.

Радиальная диффузия обсуждается в третьей главе; здесь также исследуется влияние циклотронных резонансов и колебаний плазмы вблизи области отражения

на соответствующие кинетические коэффициенты; кроме того, находятся значения этих коэффициентов, связанные и с другими эффектами, например с возмущением функции распределения электростатическими или магнитными импульсами. Следует отметить подробное обсуждение неочевидного вопроса о возможной роли бомовской диффузии в магнитосфере, особенно в периоды магнитных бурь.

Построенная авторами классификация возмущений, создающих диффузионные потоки в пространстве канонических переменных, в сочетании с аппаратом уравнения Фоккера — Планка представляется очень удобной схемой изучения широкого класса явлений в радиационных поясах. При этом достигается единообразное описание ряда явлений, а специфика физических ситуаций учитывается конкретным видом коэффициентов диффузии. Именно с нахождением этих коэффициентов связан, в рамках рассматриваемого подхода, источник трудностей. Авторы обсуждают и расширение такого подхода, позволяющее учесть два класса процессов, не охватываемых уравнением диффузии в фазовом пространстве: 1) процессы, изменяющие идентификацию частиц,— перезарядка, рекомбинация, β-распад; 2) постепенное уменьшение энергии частиц в плазме за счет столкновений

Короткий заключительный раздел книги, намечающий перспективы дальнейших работ, носит выразительное латинское наименование « Quo vadimus?». Перекликаясь с названием известного романа Г. Сенкевича, такая фраза символизирует ситуацию, сложившуюся в этой области космофизики. В качестве одного из возможных путей развития авторы указывают на спектральный анализ электромагнитных полей в радиационных поясах. Полученные отсюда спектры могут быть полезны при анализе кинетики диффузии. Другая перспектива работ связана с согласованием спектральных исследований в радиационных поясах и на наземных станциях. Результатом таких работ должно стать однозначное толкование поведения поясов и умение предсказать их эволюцию. Такие результаты были бы чрезвычайно полезны для рассмотрения всего комплекса электромагнитных явлений в ближнем космосе, для понимания плазменных эффектов в широком диапазоне параметров и для ряда практических целей космонавтики.

Выход энциклопедической серии монографий, посвященной физике и химии космического пространства, является еще одним удачным примером изданий, продолжающих традицию математической энциклопедии Бурбаки и десятков шпрингеровских «Трактатов по современной физике». Весьма целесообразно было бы продолжить вслед за вышедшей книгой Редерера перевод и других книг «космической» серии на русский язык.

А. Б. Шварцбург