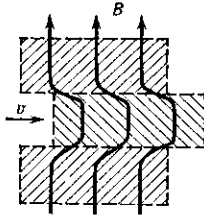


индукции приводит к постоянству магн. потока, пронизывающего контур (рис. 4). Эта *вмороженность* магнитного поля также относится к важнейшим свойствам плазмы. Ею обусловлена, в частности, возможность самовозбуждения (генерации) магн. поля за счёт увеличения длины магн. силовых линий при хаотич. турбулентном движении среды (см. *Гидромагнитное динамо*).

Рис. 4. Движение силовых линий магнитного поля B вместе с плазмой (свойство *вмороженности* силовых линий); v — скорость среды.



Напр., в космич. туманностях часто видна волокнистая структура, свидетельствующая о наличии возбуждённого таким способом магн. поля.

Движение частиц

Осн. методами теоретич. описания П. являются: исследование движения отд. частиц П.; магнитогидродин. описание П.; кинетич. рассмотрение частиц и волн в П.

В разреженной П., где можно пренебречь столкновениями, заряж. частица летит со скоростью $v_{||}$ вдоль магн. силовой линии, быстро вращаясь по ларморовской спирали (рис. 2). При наличии возмущающей силы F частица также медленно дрейфует в направлении, перпендикулярном как магн. полю, так и направлению силы F . Скорость поперечного дрейфа равна $v_d = c[FB]/eB^2$, и при этом сила, вызывающая дрейф, в общем случае содержит пять слагаемых:

$$F = mg + eE - \mu \nabla B - n_1 \left(mv_{||}^2 / R \right) - mv_{dL}$$

каждое из к-рых приводит к соответствующему виду дрейфа — гравитац., электрич., диамагнитному (в неоднородном поле), центробежному (в искривлённом поле, n_1 — нормаль к силовой линии) и поляризацонному (см. *Дрейф заряженных частиц*).

В случае $g = E = 0$ остающиеся диамагн. и центробежные члены в сумме дают «дрейф по бинормали» со скоростью $v_d = (v_{||}^2 + v_{\perp}^2/2) / R\omega_B$, где R — радиус кривизны силовой линии. В продольном направлении диамагн. сила тормозит частицу, приближающуюся к области более сильного магн. поля. При этом остаются неизменными полная энергия частицы $m(v_{||}^2 + v_{\perp}^2)/2$ и её магн. момент $\mu = mv_{\perp}^2/2B$, являющийся адиабатич. инвариантом. Таково, напр., движение в магн. поле Земли космич. частиц (рис. 5), к-рые отражаются от полярных областей, где поле сильнее, и вместе с тем дрейфуют вокруг Земли (протоны — на запад, электроны — на восток). Поле Земли является магн. ловушкой, оно удерживает захваченные им частицы в радиационных поясах. Аналогичными свойствами удержания плазмы обладают т. н. зеркальные магн. ловушки, применяемые в исследованиях по УТС (подробнее см. *Открытые ловушки*). В термоядерных исследованиях используется и другой, «замкнутый» тип магн. ловушки, напр. тороидальная установка токамак

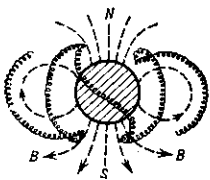
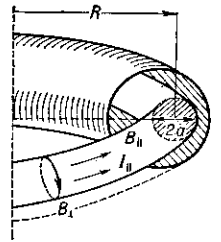


Рис. 5. Движение космических частиц, захваченных магнитным полем Земли.

(рис. 6). В этой установке силовые линии магн. поля имеют вид спиралей, навитых на торы, и такой же вид имеют траектории быстрых заряж. частиц. Однако медленные частицы, испытывая дрейф по бинормали,

Рис. 6. Токамак. Токи, текущие в проводящем кожухе, препятствуют смещению плазменного шнура.



двигаются по поверхностям, сечения к-рых имеют очертания бананов или серпов. Такой «банановый» режим разряда возможен в токамаке лишь при малой плотности П., когда столкновения не мешают движению частиц.

Магнитогидродин. описание

При описании П. с помощью ур-ний магн. гидродинамики (МГД), имеющих в идеальном случае вид

$$\dot{\rho} = -\rho \operatorname{div} v; \rho \dot{v} = -\nabla p + c^{-1}[jB]; p \sim \rho^{\gamma}$$

П. рассматривается как сплошная среда, в к-рой могут протекать токи j . Взаимодействие этих токов с магн. полем B создаёт объёмную силу Ампера и магн. давление $p_{\text{маг}} = B^2/8\pi$, к-рое может уравновешивать газодинамич. давление П. $p_{\text{газ}}$. Ур-ния МГД позволяют рассмотреть разл. течения плазмы, а также равновесные конфигурации П. и их устойчивость. В состоянии равновесия при $v = 0$ имеем ур-ние $[jB] = c \nabla p$, к-рое показывает, что магн. силовые линии и линии тока располагаются на поверхностях пост. давления. Для аксиально-симметричных конфигураций удобно пользоваться цилиндрич. координатами r, ϕ, z и ввести вертикальный (по оси z) магн. поток Φ , с помощью к-рого осн. ур-ние равновесия можно привести к виду

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = F_1 + r^2 F_2,$$

где ϕ -ции F_1, F_2 зависят лишь от потока Φ . Это ур-ние Грэда — Шафранова используется при расчётах равновесия тороидальных систем. В термоядерных исследованиях для *удержания плазмы* кроме токамаков применяют также много др. установок (стеллараторы, амбиполярные ловушки, винтовые торы и т. д.), в к-рых должны быть выполнены определённые критерии устойчивости П. Напр., простейший критерий $\delta B > 0$, к-рый выполняется в антипробкотронах (см. *Открытые ловушки*), означает общее требование возрастания магн. поля B к периферии системы. Это способствует устойчивости плазменного сгустка, т. к. сильное поле снаружи отталкивает П. внутрь в область с более слабым полем. В др. системах он не выполняется, но для систем с замкнутыми силовыми линиями достаточно оказывается более мягкое условие $\delta \phi dl/B < 0$, в к-ром интеграл берётся вдоль силовой линии магн. поля. Для систем с незамкнутыми линиями применяют критерий $d^2 V/d\Phi^2 < 0$ (наз. также условием магн. ямы): вторая производная объёма V по произывающему его продольному магн. потоку Φ должна быть < 0 . Др. критерии имеют более частное применение. Напр., для амбиполярных ловушек, где давление П. анизотропно ($p_{||} \neq p_{\perp}$), используют критерий устойчивости в виде требования

$$\int \delta B (p_{||} + p_{\perp}) B^{-2} dl > 0.$$

Для токамаков применяют критерий Крускала — Шафранова в виде $q = aB_{||}/RB_{\perp} > 1$, где R и a — большой и малый радиусы тороидального плазменного шнура. Величину q называют запасом устойчивости. Наиб. общим магнитогидродин. критерием устойчивости произвольного равновесного сгустка П. является т. н. энергетич. принцип, выражаемый условием $\dot{K} < 0$, к-рое содержит вторую производную по времени от полной кинетич. энергии П. $K = 1/2 \int \rho v^2 dV$. Предполагается, что в нач. момент времени $t = 0$ П. придётся нек-рый нач. «толчок», и если выполнен критерий $\dot{K} < 0$, то последующее движение замедляется, что и указывает на устойчивость (см. также *Неустойчивости*