

Пондеромоторная сила

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

Пондеромоторная сила — нелинейная сила, действующая на заряженную частицу в неоднородном осциллирующем электромагнитном поле.

Выражение для пондеромоторной силы **F**_p имеет вид

$$\mathbf{F}_p = -\frac{e^2}{4m\omega^2}\nabla(E^2),$$

в системе единиц СИ сила измеряется в Ньютонах; *e* — электрический заряд частицы, *m* — её масса, *ω* — угловая частота колебаний поля, *E* — амплитуда электрического поля. При достаточно малых амплитудах магнитное поле создаёт очень малую силу.

Данное равенство означает, что заряженная частица в неоднородном осциллирующем поле не только испытывает колебания с частотой *ω*, но и испытывает ускорение вследствие силы **F**_p, направленной в сторону более слабого поля. Это редкий случай, когда знак заряда частицы не влияет на направление силы: ((-e)²=(+e)²).

Механизм пондеромоторной силы можно понять, рассмотрев движение заряда в осциллирующем электрическом поле. В случае однородного поля заряд возвращается к изначальному положению после одного цикла колебания. В случае неоднородного поля сила, действующая на заряд в течение половины цикла, которую заряд проводит в области с более высокой амплитудой, направлена в сторону более слабого поля. Эта сила больше, чем сила, действующая в течение половины цикла, в течение которой заряд находится в области с меньшей амплитудой поля, причём сила направлена в сторону более сильного поля. При усреднении по циклу получается сила, действующая в сторону более слабого поля.

Содержание

- Теоретические основы
- Усреднённая по времени плотность
- Обобщение пондеромоторной силы
- Применение
- Примечания
- Ссылки

Теоретические основы

Вывод формулы пондеромоторной силы осуществляется следующим образом.

Рассмотрим частицу в неоднородном электрическом поле, колеблющемся с частотой *ω* в направлении оси *x*. Уравнение движения имеет вид

$$\ddot{x} = g(x) \cos(\omega t).$$

Здесь мы пренебрегаем влиянием колебаний магнитного поля.

Если масштаб вариаций $g(x)$ достаточно велик, то траекторию частицы можно разделить на два компонента, отвечающих разным временным масштабам:^[1]

$$x = x_0 + x_1,$$

где x_0 является дрейфовым движением, x_1 показывает быстрое колебательное движение. Предположим, что $x_1 \ll x_0$. В рамках данного предположения воспользуемся разложением в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned}\ddot{x}_0 + \ddot{x}_1 &= [g(x_0) + x_1 g'(x_0)] \cos(\omega t), \\ \ddot{x}_0 &\ll \ddot{x}_1, \text{ поскольку } x_1 \text{ мало, } g(x_0) \gg x_1 g'(x_0), \text{ то} \\ \ddot{x}_1 &= g(x_0) \cos(\omega t).\end{aligned}$$

На масштабах времени осцилляции x_1 величина x_0 практически постоянна. Следовательно, последнее уравнение можно проинтегрировать:

$$x_1 = -\frac{g(x_0)}{\omega^2} \cos(\omega t).$$

При подстановке данного выражения в уравнение для силы и после усреднения по времени $2\pi/\omega$ получаем

$$\begin{aligned}\ddot{x}_0 &= -\frac{g(x_0)g'(x_0)}{2\omega^2} \\ \Rightarrow \ddot{x}_0 &= -\frac{1}{4\omega^2} \frac{d}{dx} [g(x)^2] \Big|_{x=x_0}.\end{aligned}$$

Таким образом, мы получили выражение для дрейфового движения заряженной частицы под действием неоднородного осциллирующего поля.

Усреднённая по времени плотность

Вместо одной частицы можно рассмотреть газ из заряженных частиц, испытывающий действие подобной силы. Такой газ из заряженных частиц называется плазмой. Функция распределения и плотность плазмы испытывают колебания, для получения точно решения требуется решить уравнение Власова. Обычно предполагается, что усреднённая по времени плотность плазмы можно получить из выражения для силы и для дрейфового движения отдельных частиц:^[2]

$$\bar{n}(x) = n_0 \exp\left[-\frac{e}{\kappa T} \Phi_P(x)\right],$$

где Φ_P является пондеромоторным потенциалом, задаваемым выражением

$$\Phi_P(x) = \frac{m}{4\omega^2} [g(x)]^2.$$

Обобщение пондеромоторной силы

Помимо только осциллирующего поля может также присутствовать постоянное поле. В подобной ситуации уравнение для силы, действующей на заряженную частицу, имеет вид

$$\ddot{x} = h(x) + g(x) \cos(\omega t).$$

Для решения такого уравнения можно сделать такое же предположение, как в случае с $h(x) = 0$. Тогда обобщённое выражение для дрейфового движения имеет вид

$$\ddot{x}_0 = h(x_0) - \frac{g(x_0)g'(x_0)}{2\omega^2}.$$

Применение

Идея описания движения частиц под действием пондеромоторной силы в изменяющемся со временем поле имеет приложения в ряде областей, таких как ускорение частиц в плазме, квадрупольный ионный захват, создание плазменного ракетного двигателя.

Примечания

- Introduction to Plasma Theory*, second edition, by Nicholson, Dwight R., Wiley Publications (1983), ISBN 0-471-09045-X
- V. B. Krapchev, *Kinetic Theory of the Ponderomotive Effects in a Plasma*, Phys. Rev. Lett. 42, 497 (1979), http://prola.aps.org/abstract/PRL/v42/i8/p497_1

Ссылки

- Schmidt, George*. Physics of High Temperature Plasmas, second edition (англ.). — Academic Press, 1979. — P. 47. — ISBN 0-12-626660-3.
- Cary, J. R.; Kaufman, A. N.* Ponderomotive effects in collisionless plasma: A Lie transform approach (англ.) // Phys. Fluids : journal. — 1981. — Vol. 24. — P. 1238. — doi:10.1063/1.863527 (<https://dx.doi.org/10.1063%2F1.863527>) .
- Grebogi, C.; Littlejohn, R. G.* Relativistic ponderomotive Hamiltonian (англ.) // Phys. Fluids : journal. — 1984. — Vol. 27. — P. 1996. — doi:10.1063/1.864855 (<https://dx.doi.org/10.1063%2F1.864855>) .
- Morales, G. J.; Lee, Y. C.* Ponderomotive-Force Effects in a Nonuniform Plasma (http://prola.aps.org/abstract/PRL/v33/i17/p1016_1) (англ.) // Phys. Rev. Lett. : journal. — 1974. — Vol. 33. — P. 1016—1019. — doi:10.1103/physrevlett.33.1016 (<https://dx.doi.org/10.1103%2Fphysrevlett.33.1016>) .
- Lamb, B. M.; Morales, G. J.* Ponderomotive effects in nonneutral plasmas (англ.) // Phys. Fluids : journal. — 1983. — Vol. 26. — P. 3488. — doi:10.1063/1.864132 (<https://dx.doi.org/10.1063%2F1.864132>) .
- Shah, K.; Ramachandran, H.* Analytic, nonlinearly exact solutions for an rf confined plasma (<http://link.aip.org/link/?PHPAEN/15/062303/1>) (англ.) // Phys. Plasmas : journal. — 2008. — Vol. 15. — P. 062303. — doi:10.1063/1.2926632 (<https://dx.doi.org/10.1063%2F1.2926632>) . Архивировано (<https://archive.is/20130223075038/http://link.aip.org/link/?PHPAEN/15/062303/1>) 23 февраля 2013 года.
- Bucksbaum, P. H.; Freeman, R. R.; Bashkansky, M.; McIlrath, T. J.* Role of the ponderomotive potential in above-threshold ionization (<http://www.opticsinfobase.org/josab/abstract.cfm?uri=josab-4-5-760>) (англ.) // Jour. Opt. Soc. B : journal. — 1987. — Vol. 4. — P. 760. — doi:10.1364/josab.4.000760 (<https://dx.doi.org/10.1364%2Fjosab.4.000760>) .

Источник — https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Пондеромоторная_сила&oldid=104243027

Эта страница в последний раз была отредактирована 30 декабря 2019 в 04:44.

Текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike; в отдельных случаях могут действовать дополнительные условия.

Wikipedia® — зарегистрированный товарный знак некоммерческой организации Wikimedia Foundation, Inc.