

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КВАДРУПОЛЬНОГО МОМЕНТА ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ

С.А.Казанцев

В настоящей работе впервые зарегистрирован физический эффект, обусловленный квадрупольным моментом функции распределения электронов в плазме. Эффект заключается в выстраивании полных угловых моментов ансамбля возбужденных частиц и приводит к частичной линейной поляризации спонтанного излучения.

В работе впервые обнаружено физическое проявление квадрупольной упорядоченности скоростей электронов в плазме, которая заключается в частичной линейной поляризации спонтанного излучения.

Кинетика электронов в плазме характеризуется функцией распределения по скоростям (ФРЭ) $f(\mathbf{v})$, для анализа которой используется разложение по сферическим функциям $Y_q^{(\kappa)}(\mathbf{n})$:

$$f(\mathbf{v}) = \sum_{\kappa=0}^{\infty} \sum_{q=-\kappa}^{\kappa} Y_q^{(\kappa)}(\mathbf{n}) f_q^{(\kappa)}(v), \quad (1)$$

где $\mathbf{n} = \mathbf{v}/|\mathbf{v}|$ – единичный вектор в направлении скорости электрона, $f_q^{(\kappa)}(v)$ – мультипольный момент ФРЭ. Момент нулевого ранга $f^{(0)}(v)$ характеризует изотропную часть

ФРЭ, учитывает зависимость от модуля скорости, т.е. энергетическое распределение электронов. Этим мультипольным моментом определяется возбуждение и ионизация частиц в плазме и, как следствие, — спектральные характеристики излучения. Мультипольный момент первого ранга $f^{(1)}(v)$ отражает наличие дипольной упорядоченности скоростей электронов в ансамбле, т.е. дрейфовое движение электронного газа. Мультипольные моменты более высоких рангов очень малы по величине, не наблюдались экспериментально и не учитывались в теоретическом описании. Момент ФРЭ второго ранга характеризует поток импульса электронов или давление.

В настоящей работе впервые экспериментально наблюдался физический эффект, обусловленный $f^{(2)}(v)$, указано на возможность определения этого момента ФРЭ и использования информации, заключающейся в квадрупольном моменте, в задачах диагностики лабораторной и астрофизической плазмы.

Поляризационные характеристики спонтанного излучения ансамбля возбужденных частиц описываются в представлении поляризационных моментов атомной матрицы плотности $\rho_q^{(\kappa)}$ 2:

$$I_{e_\lambda} = A \sum_{\kappa, q} (-1)^q \alpha_\kappa \rho_q^{(\kappa)} \Phi_{-q}^{(\kappa)}(e_\lambda) \quad (2)$$

I_{e_λ} — интенсивность спонтанного излучения выделенной спектральной линии с вектором поляризации e_λ . A — константа, характеризующая исследуемый переход, $\Phi_q^{(\kappa)}(e_\lambda)$ — тензор наблюдения, определяющий геометрические и поляризационные характеристики наблюдаемого линейно-поляризованного излучения, α_κ — константа. Линейно-поляризованное излучение ансамбля возбужденных частиц определяется тензором выстраивания $\rho_q^{(\kappa)}$, ($q = 0, \pm 1, \pm 2$).

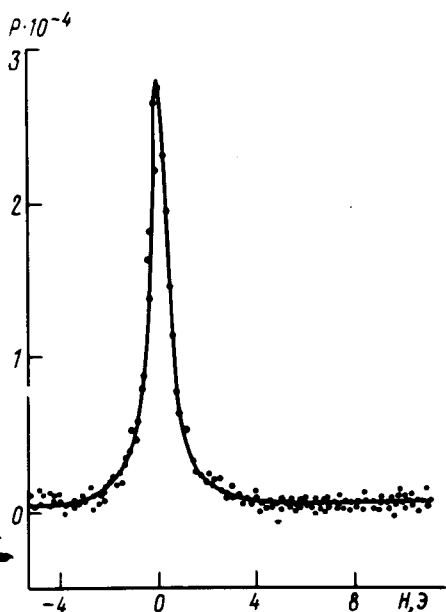
Пучок электронов приводит к выстраиванию полных моментов возбужденных атомов, которые излучают линейно-поляризованный свет с направлением поляризации параллельным вектору скорости v возбуждающих электронов 3. В системе координат с направлением оси OZ вдоль вектора скорости v возбуждение пучком неполяризованных электронов характеризуется цилиндрической симметрией и, согласно 4, поляризационные моменты представляются только тензором выстраивания, имеющим индекс $q = 0$. Его значение в этой системе координат $\rho_0^{(2)}(v)$ может быть получено теоретически или экспериментально. Используя преобразование поляризационных моментов при переходе к лабораторной системе координат и проведя усреднение по всем направлениям скоростей электронов с учетом ФРЭ в представлении мультипольных моментов (1), можно получить, что, если возбуждение частиц в плазме происходит прямым электронным ударом, тензор выстраивания, характеризующий ансамбль возбужденных частиц ($\rho_q^{(2)}$) выражается

$$\hat{\rho}_q^{(2)} = (-1)^q c \int_0^\infty dv v^2 \rho_0^{(2)}(v) f_{-q}^{(2)}(v). \quad (3)$$

Отсюда следует, что выстраивание моментов ансамбля возбужденных частиц в плазме $\rho_q^{(2)}$ и, как следствие, наличие линейной поляризации спонтанного излучения I_{e_λ} определяется квадрупольным моментом функции распределения $f_q^{(2)}(v)$.

Экспериментально это явление было зарегистрировано на высоковозбужденных состояниях атомов инертных газов в низкотемпературной газоразрядной плазме при давлениях порядка десятков милитор. При этих условиях основным механизмом возбуждения этих состояний в положительном столбе разряда постоянного тока являются удары первого рода электронами. Наблюдение явления выстраивания в плазме проводилось методом эффекта Ханле: тензор выстраивания разрушался слабым магнитным полем, и регистрировалась деполаризация излучения плазмы, которая и составляла экспериментальный сигнал. Для приме-

ра на рисунке приведен типичный вид такого сигнала на $7d \left[\frac{5}{2} \right]_3^0$ — уровне ксенона. Степень линейной поляризации излучения, соответствующая этому эффекту была порядка 10^{-4} , которая отражает соотношение мультипольных моментов $f^{(2)} / f^{(0)}$ в плазме.



Экспериментальный сигнал выстраивания $7d \left[\frac{5}{2} \right]_3^0$ -состояния ксенона, зарегистрированный в низкотемпературной плазме положительного столба разряда на переходе $6p \left[\frac{3}{2} \right]_2 - 7d \left[\frac{5}{2} \right]_3^0$ ($\lambda = 7393 \text{ \AA}$) при давлении 14 мТор и токе разряда 50 мА. Точки отражают экспериментальную величину степени линейной поляризации, полученную методом накопления сигнала в численном виде при определенном значении напряженности внешнего магнитного поля. Время накопления сигнала равно 1 часу

Обращаясь к выражениям (2), (3), можно проанализировать возможности поляризационной спектроскопии плазмы. Решая обратную задачу: по величине и пространственному распределению степени линейной поляризации спонтанного излучения плазмы для ряда атомарных и ионных спектральных линий, характеризующихся различными потенциалами возбуждения, можно получить информацию о квадрупольном моменте ФРЭ, которая лежит за пределами возможностей известных методов диагностики плазмы.

Рассматриваемое явление может иметь важные астрофизические приложения. Исследуя закономерности выстраивания возбужденных атомов и ионов в астрофизических объектах⁵, которое проявляется как линейная поляризация оптического излучения, можно восстанавливать характеристики поля скоростей возбуждающих частиц в рассматриваемых объектах, например — в атмосфере Солнца.

Литература

1. Давыдов Б.И. ЖЭТФ, 1937, 7, 1069.
2. Дьяконов М.И. ЖЭТФ, 1964, 47, 2213.
3. Skinner H.W. Proc. Roy. Soc., 1926, A112, 642.
4. Fano U. Macek J.H. Rev. Mod. Phys., 1973, 45, 553.
5. Казанцев С.А. УФН, 1983, 139, вып.4.