

ЭЛЕКТРОННОЕ ИНИЦИРОВАНИЕ ГАММА-ПЕРЕХОДОВ В ПЛАЗМЕ

Р.В. Арутюнян, Л.А. Большов, Е.В. Ткаля

Рассмотрены процессы девозбуждения изомерных ядер с близко расположеными уровнями в плазме. Предложен альтернативный известным подход к накачке мессбауэровских переходов. Показана принципиальная возможность существования волны высвечивания в системе изомерных ядер.

1. Ядра, возбужденные на долгоживущие изомерные уровни с энергией 10 – 100 кэВ, девозбуждаются при спонтанном излучении гамма-квантов, электронной конверсии, или α (β) - распаде за длительное время (от секунд до сотен лет). Случайное совпадение ($\Delta E \lesssim 0,5$ кэВ) ядерных уровней можно использовать для резкого ускорения высвечивания за счет переброса с изомерного на близко расположенный короткоживущий уровень при электронном ударе. В литературе описано более двух десятков ядер, обладающих указанной структурой уровней, например, ^{73}Se , ^{183}W , ^{242}Am , ^{171}Lu и так далее.

Предположим, что в результате инициирования плазмы с помощью одной из известных схем (лазерный нагрев, з-пинчи, плазменный фокус, лайнерные схемы с обжатием плазмы полями или высокоскоростными ударниками, "взрывающиеся проволочки" и др.), произошел ее нагрев до температуры $T \sim \Delta E$, т.е. 10^2 – 10^3 эВ. Вследствие возбуждения короткоживущего ядерного уровня в процессах антиконверсии, резонансной передачи электронного возбуждения, или неупругого рассеяния электронов $^{1-3}$ в спектре излучения плазмы появятся линии, соответствующие квантам с энергиями близкими к энергии изомерного состояния. Доля ядер изомера, которые будут переброшены на близко расположенный уровень за характерное время существования плазмы τ в результате неупругого рассеяния электронов, можно оценить по формуле:

$$\alpha \approx n_e(T_0) \tau \exp(-\Delta E/T_0) \sigma_{ee'} \sqrt{\Delta E/m}, \quad (1)$$

где $n_e(T_0)$ – концентрация свободных электронов в плазме с температурой T_0 , m – их масса, $\sigma_{ee'}$ – характерное значение сечения электронного возбуждения ядерного перехода с энергией ΔE .

При электродипольном незаторможенном переходе между изомерным и близко расположенным к нему уровнем для электронов с энергией 10^3 эВ сечение неупругого рассеяния $\sigma_{ee'} \sim 10^{-25}$ см 2 , поэтому величина α будет сравнима с единицей для плазмы с $n_e \tau = 10^{16}$ – 10^{18} см $^{-3} \cdot \text{с}$ и температурой $T_e \leqslant 10^3$ эВ.

Изомерные ядра, внедренные в материал мишени в экспериментах по созданию высокотемпературной плазмы (ЛТС, взрывающиеся лайнеры и т.д.), могут служить для диагностики плазмы в трудноисследуемой экспериментально области параметров, а именно: плотности на уровне твердотельных, температуры на уровне сотен эВ. Диагностика такой плазмы возможна за счет регистрации запаздывающих конверсионных электронов или гамма-квантов с энергией 10^4 – 10^5 эВ, излучаемых ядрами переброшенными на короткоживущий уровень в результате неупругого рассеяния электронов в период существования плазмы. С точки зрения диагностики плазмы большой интерес представляют ядра с аномально низколежащими изомерными уровнями, например ^{235}U (73 эВ), ^{229}Th ($\leqslant 100$ эВ), ^{110}Ag (1,1 кэВ) и т.д.

2. Плазма, содержащая изомерные ядра с близко расположенным короткоживущим уровнем, может служить эффективным источником инвертированных мессбауэровских ядер. Из (1) видно, что процесс переброски ядер на короткоживущий уровень с точки зрения получения достаточного их количества для осуществления генерации в различных вариантах, рассмотренных в $^{4-6}$, возможен для электродипольных переходов с изомерного на короткоживущий уровень.

Отметим, что прямая накачка ядер тепловыми нейтронами на короткоживущий уровень на сегодняшний день не реалистична с точки зрения достижения условий генерации, а накачка на изомерный уровень с временем жизни $\sim 1\text{--}100$ с вполне осуществима, так как требует плотности потоков на 5-8 порядков ниже, и может быть реализована с использованием современных реакторных источников тепловых нейтронов.

Переброс на короткоживущий уровень за счет резонансного поглощения фотонов ⁷ налагает очень жесткие требования на спектральную яркость источника. Более эффективное использование мощности источника может быть связано с перекачкой энергии по спектру в линию резонансного поглощения за счет рассеяния.

3. Если интенсивность выделения энергии при переходе долгоживущего изомера через близко расположенный короткоживущий уровень в основное состояние будет достаточна для компенсации потерь плазмы на излучение и теплопроводность, то возможен самоподдерживающийся процесс высвечивания изомеров, аналогичный процессу химического горения.

Найдем характерный размер a -области, первоначальный разогрев которой до $T \sim \Delta E$ приведет к поджигу волны высвечивания в среде, содержащей изомерные ядра с плотностью n . Оценку на a_{min} получим из условия равенства потерь на лучистую теплопроводность энерговыделению за счет высвечивания изомерных ядер по рассмотренному выше механизму:

$$\sigma_{ee'} \sqrt{\Delta E/m} \frac{nE}{C(T)} \frac{a^2_{min}}{\chi} \approx 1, \quad (2)$$

где $\chi \approx (l_R c/3) (U'(T)/C(T))$, l_R – расселандов пробег квантов, c – скорость света, $C(T)$ – удельная теплоемкость плазмы, $U(T)$ – плотность энергии теплового излучения.

При написании (2) мы пренебрегли разгрузкой плазмы, что возможно, если фронт лучистой теплопроводности движется вместе с ударной волной.

Для системы изомерных ядер с плотностью $n = 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $\Delta E = 10^2 \text{ эВ}$, $E = 10^5 \text{ эВ}$ величина a_{min} оказывается порядка сантиметра для электродипольного незаторможенного перехода между близко расположенным уровнями. При этом выполнено и условие совместного движения фронта теплопроводности и ударной волны. Расширения указанного диапазона параметров можно добиться обжатием мишени, содержащей изомерные ядра, различными лайнерными системами, высокоскоростными ударниками, лазерным обжатием, или другими способами.

Электронное стимулирование переходов в изомерных ядрах в плотной плазме может представлять интерес также в качестве независимого способа измерения ядерно-физических констант.

Литература

1. Morita M. Progr. Theor. Phys., 1973, **49**, 1574.
2. Гольданский В.И., Намшот В.А. Письма в ЖЭТФ, 1976, **23**, 495.
3. Гречухин Д.П., Солдатов А.А. Препринт ИАЭ-2976, 1978.
4. Baldwin C.B., Solem J.C. Rev. Mod. Phys., 1981, **53**, 687.
5. Андреев А.В., Ахманов С.А. Изв. АН СССР, сер. физ., 1984, **48**, 215.
6. Андреев А.В., Арутюнян Р.В., Ильинский Ю.А. Вестник МГУ, сер. физ.; 1979, **20**, 47.
7. Collins C.B.; et al. J. Appl. Phys., 1982, **7**, 4645.