

02; 04; 12

© 1991

# ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ РЕЗОНАНСНОГО РАДИАЦИОННОГО ЗАХВАТА И ДИАГНОСТИКА БЫСТРОЙ ИОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ПРИ РАДИОЧАСТОТНОМ НАГРЕВЕ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

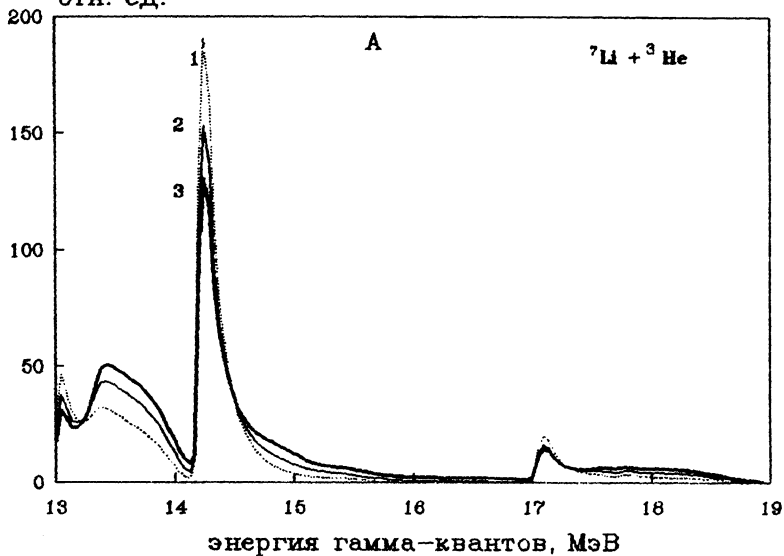
В.Г. К и п т и л ы й, И.А. П о л у н о в с к и й

Информация о поведении быстрых заряженных частиц в плазме с магнитным удержанием имеет фундаментальное значение для проектирования следующего поколения термоядерных установок, где 3.5-МэВ  $\alpha$ -частицы из реакции  $D(T, n)^4He$  будут поддерживать горение. Хотя быстрые частицы в токамаке в основном подчиняются классическому закону торможения, необходимо исследовать эффекты, связанные с различного рода нестабильностями в плазме, которые влияют на их удержание.

Последние эксперименты по мощному ионно-циклотронному нагреву (ИЦН) плазмы токамака JET [1, 2] показали, что в плазме образуется быстрая ионная компонента: H с энергией более 7.5 МэВ, D - более 1.8 МэВ и  $^3He$  - более 2.8 МэВ. Это позволило измерить интенсивности  $\gamma$ -квантов, образующиеся в результате пороговых ядерных реакций быстрых частиц с ионами присутствовавшей в плазме примеси:  $^{12}C(^3He, p\gamma)^{14}N$ ,  $^9Be(d, n\gamma)^{10}B$  и других. Из анализа временной зависимости отношений интенсивностей  $\gamma$ -линий была получена важная информация о процессе термализации ионов при ИЦН. Однако этот метод не позволяет исследовать функцию распределения ионов по скоростям.

К настоящему времени уже предложен ряд способов диагностики быстрых протонов и  $\alpha$ -частиц, в том числе и основанных на применении ядерных реакций [3-6]. В данной работе показано, что для исследования энергетической функции распределения быстрых компонент D и  $^3He$  можно использовать свойства реакций резонансного радиационного захвата на легких элементах:  $^7Li$ ,  $^9Be$ ,  $^{11}B$ ,  $^{13}C$ ,  $^{14}N$ , аналогично методу диагностики протонов и  $\alpha$ -частиц [4-6]. В последнем случае в плазму инжектируют соответствующую примесь и измеряют интенсивности  $\gamma$ -линий, которые будут пропорциональны концентрации быстрых частиц с резонансными энергиями, характерными для данной ядерной реакции. Особенность  $(d, \gamma)$ - и  $(^3He, \gamma)$ -реакций состоит в том, что имеющие место резонансы, как правило, не являются изолированными и информация о функции распределения частиц может быть получена только путем анализа формы спектра, который возникает за счет суперпозиции широких  $\gamma$ -линий, соответствующих этим резонансам.

отн. ед.



отн. ед.

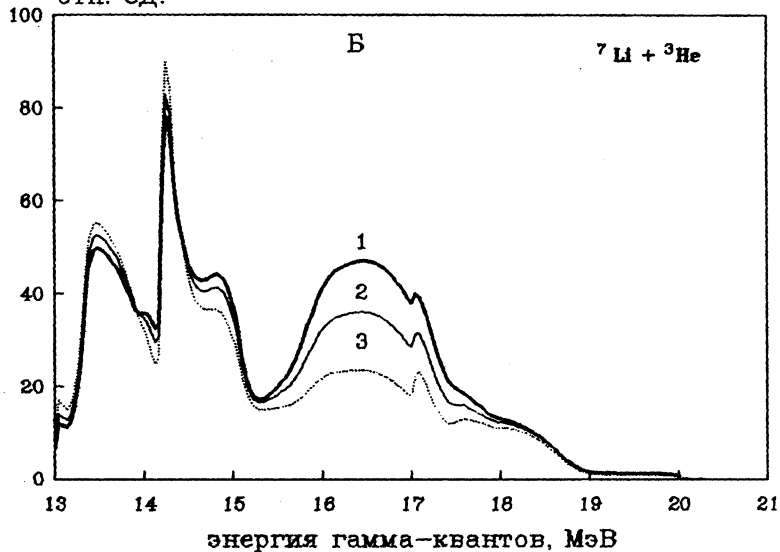


Рис. 1. Расчетные  $\gamma$ -спектры из реакции  ${}^{14}\text{N}(d, \gamma){}^{18}\text{B}$  в предположении, что средняя энергия ионов гелия (А): 1 - 0.3 МэВ, 2 - 0.4 МэВ, 3 - 0.5 МэВ; (Б): 1 - 1.0 МэВ, 2 - 1.25 МэВ, 3 - 1.5 МэВ.

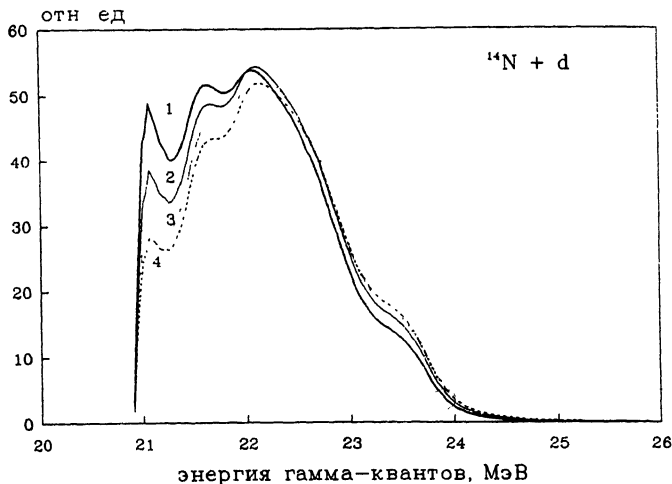


Рис. 2. Расчетные  $\gamma$ -спектры из реакции  $^{14}\text{N}(d, \gamma)^{16}\text{O}$  в предположении, что средняя энергия дейтронов: 1 - 1.5 МэВ, 2 - 2.0 МэВ, 3 - 2.5 МэВ, 4 - 3.0 МэВ.

На рис. 1 представлены  $\gamma$ -спектры из реакции  $^7\text{Li}(^3\text{He}, \gamma)^{10}\text{B}$  (энергия реакции  $Q=17.79$  МэВ), вычисленные в предположении различных функций распределения ионов гелия в плазме:

$$f(E) \sim \exp(-E/\langle E \rangle),$$

где  $\langle E \rangle$  - средняя энергия ионов гелия. Исходные ядерные данные о резонансах реакции приведены в работе [7], таблица 10.10. Видно, что эта реакция имеет высокую чувствительность к функции распределения ионов, когда величина  $\langle E \rangle$  меняется в пределах от 0.1 МэВ до 3 МэВ. Скорость реакции в плазме с плотностью  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ , концентрацией лития  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  и 10%-й добавкой  $^3\text{He}$  составляет  $R_\gamma \sim 2-5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ . Однако она может быть успешно использована только в случае водородной плазмы. В дейтериевой плазме имеет место важная диагностическая реакция  $\text{D}(^3\text{He}, \gamma)^5\text{Li}$ , в результате которой испускаются  $\gamma$ -кванты с энергией 16.6 МэВ, т.е. том же диапазоне, что и в реакции с  $^7\text{Li}$ . Поэтому перекрытие энергетических диапазонов приведет к искажению и потере полезной информации. Для дейтериевой плазмы могут оказаться полезными реакции с  $^9\text{Be}$  ( $Q=26.28$  МэВ),  $^{11}\text{B}$  ( $Q=20.74$  МэВ) и  $^{13}\text{C}$  ( $Q=22.79$  МэВ).

При изучении ускоренных ионов дейтерия представляется возможным, среди прочих, использовать реакцию  $^{14}\text{N}(d, \gamma)^{16}\text{O}$  ( $Q=20.74$  МэВ). По данным [8], в области низких энергий имеют место два резонанса: при  $E_d=1.7$  и 2.4 МэВ, ширины которых

равны  $\Gamma_{с.т.} = 730$  и  $600$  кэВ, соответственно. При равных значениях  $\gamma$ -ширин спектр будет иметь вид, близкий к расчетному, который представлен в качестве примера на рис. 2 и отражает функцию распределения дейтронов с  $\langle E_d \rangle$  в диапазоне 1.5–3.0 МэВ. Видно, что и в случае ( $d, \gamma$ )-реакций чувствительность к функции распределения частиц достаточна для диагностических целей.

Необходимо заметить, что помимо реакций резонансного радиационного захвата, могут оказаться полезными для изучения поведения быстрых ионов гелия две сопутствующие реакции с высоким сечением:

$${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, \alpha\gamma){}^8\text{Be} \quad E_\gamma = 17.64 \text{ МэВ},$$

$${}^{13}\text{C}({}^3\text{He}, \alpha\gamma){}^{12}\text{C} \quad E_\gamma = 15.11 \text{ МэВ}.$$

Гамма-излучение, сопровождающее эти реакции, возникает в результате распада высоковозбужденных состояний, времена жизни которых меньше  $10^{-15}$  с. Оценки показывают, что из-за высоких скоростей ядер отдачи, форма линии в  $\gamma$ -спектре будет значительно искажена эффектом Доплера и будет зависеть от распределения по скоростям ионов гелия.

В заключение необходимо отметить, что рассмотренный способ диагностики быстрых компонент  $D$  и  ${}^3\text{He}$ , образующихся при ИЦН, достаточно прост и имеет необходимую чувствительность к функции распределения ионов по энергии. Однако для адекватного моделирования  $\gamma$ -спектров и определения скорости протекания в плазме рассмотренных выше реакций (в конечном счете, для выбора оптимальной диагностической реакции) имеющейся экспериментальной информации не достаточно, поэтому требуются специальные исследования на ускорителе.

## С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Sadler G., Jarvis O.N., P.van Belle, Adams J.M.. Proc. 15th European Conf. Controlled Fusion and Plasma Heating, Dubrovnic, Yugoslavia. // Europhysics Conference Abstracts. 1988. V. 1. P. 131-134.
- [2] Sadler G., Conroy S.W., Jarvis O.N., P.van Belle, Adams J.M., Hone M.A. // Fusion Technology. 1990. V. 18. No. 4. P. 556-572.
- [3] Post D., Webber S.J., Gresham L. Proceedings of the Course Basic and Advanced Diagnostic Techniques for Fusion Plasmas, Varenna, 1986. P. 721-741.

- [4] К и п т и л ы й В.Г. Способ диагностики  $\alpha$ -частиц высокотемпературной дейтерий-третиевой плазмы. Авт. свид. № 1414189, 30.07.1986. Препринт ФТИ № 1176, 1987.
- [5] C e c i l F.E., Z w e b e n S.J., M e d - l e y S.S. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Rev. 1986. V. 245. P. 547-556.
- [6] К и п т и л ы й В.Г. // Физика плазмы. 1989. В. 6. Т. 15. С. 761-764.
- [7] A j z e n b e r g - S e l o v e. // Nucl. Physics. 1984. V. A413. P. 1-214.
- [8] A j z e n b e r g - S e l o v e. // Nucl. Physics. 1982. V. A375. P. 1-168.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе  
АН СССР,  
С.-Петербург

Поступило в Редакцию  
26 ноября 1991 г.