

Экспериментальные методы исследования плазмы, ч. 1

Электронный лекционный курс*

Судников А. В.

Лекция 9 Анализ продуктов термоядерных реакций

© Новосибирский государственный университет 2013 г. Редакция 2017 г.

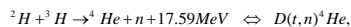
* Курс подготовлен в рамках реализации Программы развития НИУ НГУ на 2009–2018 годы

Анализ продуктов термоядерных реакций

- Основные реакции синтеза. Сечения и скорости реакций
- Полный нейтронный выход. Мгновенная интенсивность
 - Использование ядерных реакций
 - Сцинтилляционные детекторы
 - Нейтрон/гамма разделение
- Энергетический спектр нейтронов
 - Полупроводниковые и алмазные детекторы
 - Времяпролётные спектрометры

Реакции в горячей плазме (на примере JET)

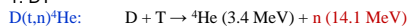
Обозначение:



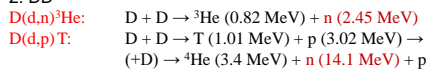
D(p, γ) ${}^3\text{He}$	5.5	${}^9\text{Be}(p, \gamma){}^{10}\text{B}$	6.586
D(d, p)T	4.033	${}^9\text{Be}(p, p'\gamma){}^9\text{Be}$	-2.429
D(d, n) ${}^3\text{He}$	3.269	${}^9\text{Be}(p, \alpha \gamma){}^6\text{Li}$	2.125
D(d, γ) ${}^4\text{He}$	23.84	${}^9\text{Be}(d, p\gamma){}^{10}\text{Be}$	4.587
D(t, n) ${}^4\text{He}$	17.59	${}^9\text{Be}(d, n\gamma){}^{10}\text{B}$	4.36
D(t, γ) ${}^5\text{He}$	16.63	${}^9\text{Be}(t, n\gamma){}^{11}\text{B}$	9.56
D(${}^3\text{He}, p$) ${}^4\text{He}$	18.354	${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, p\gamma){}^{11}\text{B}$	10.322
D(${}^3\text{He}, \gamma$) ${}^5\text{Li}$	16.38	${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, n\gamma){}^{11}\text{C}$	7.557
T(p, n) ${}^3\text{He}$	-0.7637	${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, d\gamma){}^{10}\text{B}$	1.09
T(p, γ) ${}^4\text{He}$	19.814	${}^9\text{Be}({}^4\text{He}, n\gamma){}^{12}\text{C}$	5.701
${}^{12}\text{C}(p, p'\gamma){}^{12}\text{C}$	-4.44	${}^{12}\text{C}(d, p\gamma){}^{13}\text{C}$	2.722
${}^{12}\text{C}(3\text{He}, p\gamma){}^{14}\text{N}$	4.779		

Основные реакции синтеза

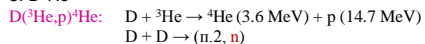
1. DT



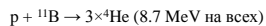
2. DD



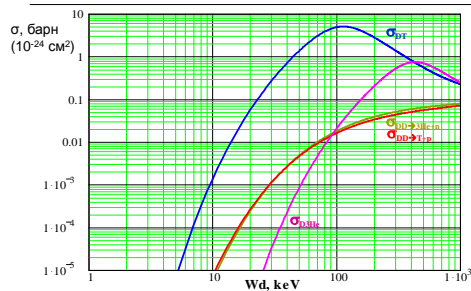
3. D³He



4. p¹¹B



Эффективные сечения реакций синтеза DD, DT и D³He



Эффективные сечения реакций синтеза DD, DT и D³He (справочно)

Эффективное сечение реакции (1 барн = 10^{-24} см^2) в зависимости от E (кэВ) дейтрона:

$$\sigma_T(E) = \frac{A_5 + [(A_4 - A_3 E)^2 + 1]^{-1} A_2}{E [\exp(A_1 E^{-1/2}) - 1]}$$

Где A_i – коэффициенты из таблицы:

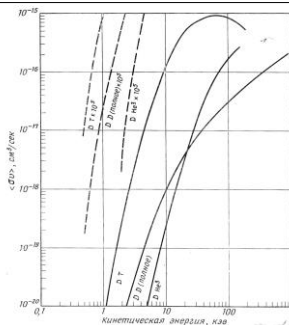
	D-D (1a)	D-D (1b)	D-T (2)	D-He ³ (3)
A_1	46.097	47.88	45.95	89.27
A_2	372	482	50200	25900
A_3	4.36×10^{-4}	3.08×10^{-4}	1.368×10^{-2}	3.98×10^{-3}
A_4	1.220	1.177	1.076	1.297
A_5	0	0	409	647

Скорости реакций DD, DT и D³He

Вероятность реакции определяется сечением и скоростью частиц.
Скорости реакции $\langle \sigma v \rangle$ ($\text{см}^3 \text{с}^{-1}$), усреднённые по скоростям термализованных ионов в зависимости от T (кэВ)

Temperature (keV)	D-D (1a + 1b)	D-T (2)	D-He ³ (3)
1.0	1.5×10^{-22}	5.5×10^{-21}	10^{-26}
2.0	5.4×10^{-21}	2.6×10^{-19}	1.4×10^{-23}
5.0	1.8×10^{-19}	1.3×10^{-17}	6.7×10^{-21}
10.0	1.2×10^{-18}	1.1×10^{-16}	2.3×10^{-19}
20.0	5.2×10^{-18}	4.2×10^{-16}	3.8×10^{-18}
50.0	2.1×10^{-17}	8.7×10^{-16}	5.4×10^{-17}
100.0	4.5×10^{-17}	8.5×10^{-16}	1.6×10^{-16}
200.0	8.8×10^{-17}	6.3×10^{-16}	2.4×10^{-16}
500.0	1.8×10^{-16}	3.7×10^{-16}	2.3×10^{-16}
1000.0	2.2×10^{-16}	2.7×10^{-16}	1.8×10^{-16}

Скорости реакций DD, DT и DHe³



Скорости реакции $\langle \sigma v \rangle$, усреднённые по скоростям термализованных ионов

Скорости реакций DD, DT и DHe³

Для низких энергий ($T \leq 25$ кэВ) скорости реакций можно представить как (T выражена в кэВ):

$$\langle \sigma v \rangle_{DD} = 2.33 \times 10^{-14} T^{-2/3} \exp(-18.76 T^{-1/3}) \text{ см}^3 \text{ сек}^{-1},$$

$$\langle \sigma v \rangle_{DT} = 3.68 \times 10^{-12} T^{-2/3} \exp(-19.94 T^{-1/3}) \text{ см}^3 \text{ сек}^{-1},$$

Интенсивность реакций синтеза является очень чувствительным индикатором температуры плазмы.



Для термализованной плазмы средней плотности практический порог регистрации для реакции DD составляет ~ 500 эВ.

Регистрируемые продукты реакций

В большинстве термоядерных топлив в прямых или побочных реакциях образуются **нейтроны**.

Нейтроны упруго и неупруго рассеиваются в элементах конструкции.

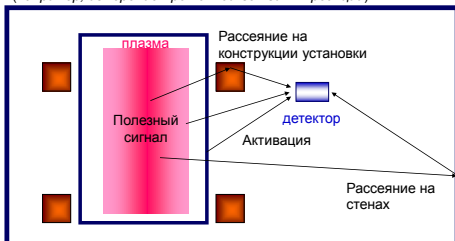
В побочных реакциях и при торможении нейтронов в конструкционных элементах генерируются **жёсткие гамма-кванты**.

Основные термоядерные топлива в прямых или побочных реакциях производят **альфа-частицы**.

В смесях с дейтерием генерируются **протоны**.

Проблемы регистрации нейтронов

Для определения пространственной локализации источников нейтронов $N(r,t)$ необходимо использовать коллимационные системы (например, из парафина) или специальные методики (например, измерение протонной ветви DD реакции)

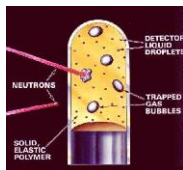


Регистрация нейтронов. Пузырьковые камеры

Диагностируется полный флюенс или нейтронный поток с экстремально низким временным разрешением

Перегретая жидкость закипает с образованием видимых пузырьков при прохождении частицы. Использование эластомерной матрицы позволяет зафиксировать пузырьки до регенерации детектора.

Чувствительность: ~ 1 пузырёк / 500 (n/cm²)



Регистрация потока нейтронов. Основные требования

Диагностика мгновенного нейтронного потока.

$$\frac{dN}{dt} = \int_V n_i^2 \langle \sigma v \rangle d^3 r$$

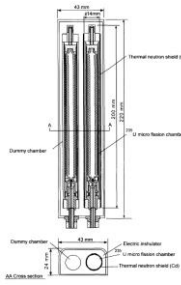
Требуется малое время реакции датчика на излучение.

Требуется возможность разделения нейтронов и гамма-квантов

Возможна работа в счётном (регистрация отдельных частиц, зачастую позволяет анализировать энергию) и токовом (регистрация многократно наложенных событий, требуется одинаковый уровень единичного сигнала).

Fast Detectors	Interaction Probability	
	1-MeV Neutron	1-MeV Gamma Ray
⁴ He (5.0 cm diam, 18 atm)	0.01	0.001
Al tube wall (0.8 mm)	0.0	0.014
Scintillator (5.0 cm thick)	0.78	0.26

Камеры деления



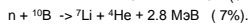
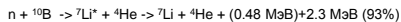
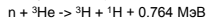
Ионизационными счётчиками детектируются продукты реакции деления активных ядер (²³⁵U и ²³⁸U, Pt, Am) быстрыми термоядерными нейтронами.

Эффект от гамма-излучения может быть компенсирован второй газовой трубкой без делящегося материала.

Fig. 1-1. Schematic view of the neutron-fission chamber with the high power operation with a dummy chamber for the gamma-ray effect compensation.

Пропорциональные счетчики

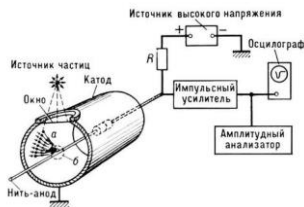
При регистрации нейтронов пропорциональные счетчики заполняются газами ³He или ¹⁰BF₃. Используются реакции:



Нейтроны регистрируются с помощью заряженных частиц, возникающих в результате этих реакций и вызывающих ионизацию в счетчике.

Амплитуда импульса тока (или полный собранный заряд) остаётся пропорциональной энергии, затраченной заряженной частицей на первичную ионизацию среды детектора. Таким образом, пропорциональный счётчик способен выполнять функции спектрометра.

Энергетическое разрешение пропорциональных счетчиков лучше, чем у **сцинтилляционных**, но хуже, чем у **полупроводниковых**.



Пропорциональные счётчики

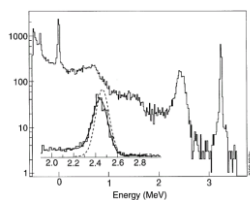


Fig. 3. Shows the full-energy spectrum recorded with a ³He ionization chamber for four (aggregated) ohmic discharges in deuterium (12 s of data-taking). The inset shows the folded energy spectrum and the unfolded spectrum for the incident neutrons. The ion temperature is 3.4 ± 0.2 keV, in good agreement with the averaged result obtained from ³He⁺ X-ray spectroscopy.

³He(n,p)³H, 0.76MeВ
Уширение нейтронного спектра связано с температурой реагирующих ионов.

$$\Delta E_{\beta D}^{fwhm} = 82.5 \sqrt{T_i} [keV]$$

$$\Delta E_{\beta T}^{fwhm} = 177 \sqrt{T_i} [keV]$$

Neutron spectrometry — historical review and present status
F. D. Brueckel*, D. Kikvidze*

*Fusion Research Institute of Leningrad State University, St. Petersburg, Russia
*Fusion Research Institute of Leningrad State University, St. Petersburg, Russia

Сцинтилляционные детекторы

Сцинтиллятор — вещество, обладающее способностью излучать свет при поглощении ионизирующего излучения (нейтронов, гамма-квантов, электронов, альфа-частиц и т. д.)

Люминесценция возникает за счёт поглощения энергии вторичной заряженной частицы (ядра отдачи либо комптоновского электрона).



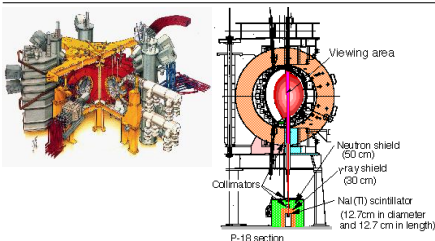
Детектирование осуществляется ФЭУ либо МКП.

Коэффициенты A_i зависят от типа частиц.

Сцинтилляционные детекторы

Сцинтиллятор	Состав	ρ	Относит. выход	$\lambda, \text{Å}$	$\tau, \text{сек}$	Примечание
Антрацен	C ₁₄ H ₁₀	1.25	1.00	4400	3.2x10 ⁻⁸	Универсален
Стильбен	C ₁₄ H ₁₀	1.16	0.60	4100	6.4x10 ⁻⁹	n, γ; разделение сигналов от p и e
	NaI(Ta)	3.67	2.1	4100	2.5x10 ⁻⁷	X- и γ- излучение
	LiI(Eu)	4.06	0.70	4400	2x10 ⁻⁶	Медленные n
	ZnS(Ag)	4.1	3.0	4500	~10 ⁻⁵	Универсален. Порошок
	CdWO ₄	7.8	0.2	5300	6x10 ⁻⁶	Зонды
Пластический сцинтиллятор	Полистирол +2.5% p-терфинил	1.09	0.38	4800	4.6x10 ⁻⁹	n, i, e; используются добавки для захвата n
Жидкий сцинтиллятор	Толуол +0.5% терфинил	0.87	0.42	~4150	<3x10 ⁻⁹	n, содержит соединения Cd, B ¹⁰ , Li ⁶

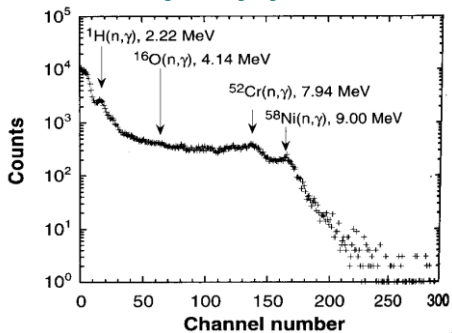
Регистрация гамма-излучения на JT-60U



REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS VOLUME 7, NUMBER 1 JANUARY 2005
 Fusion gamma-ray measurements for D-He experiments at JT-60U
 T. MISHINA,* K. TODA, and Y. KUSAMA
 Japan Atomic Energy Research Institute, Naka-works, Naka-gun,
 Ibaraki 311-0192, Japan
 *Y. Shibata
 Nagoya University, Nagoya, 464-8602, Japan

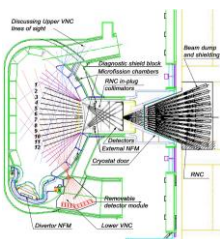
JT-60U

Гамма-спектр в DD разряде на JT-60U



Номер канала - амплитуда вспышки в сцинтилляторе, она пропорциональна потере энергии налетающего γ -кванта

Нейтронные диагностики на ИТЭР



- VNC, RNC (вертикальные и радиальные нейтронные камеры) — сцинтилляционные детекторы
- DFNM (диверторный монитор нейтронного потока), microfission chambers — камеры деления
