СКАНИРУЮЩАЯ ДИАГНОСТИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОРМОЗНОГО И ЛИНЕЙЧАТОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕ Т-10

А.Р. Немец, В.А. Крупин, Л.А. Ключников, К.В. Коробов, М.Р. Нургалиев

Отделение токамаков, НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В статье представлено описание сканирующей спектроскопической диагностики, созданной для измерения хордового распределения излучения плазмы одновременно в двух спектральных диапазонах в видимой области спектра. Основной задачей данной системы является измерение профиля и абсолютной величины интенсивности тормозного континуума с высоким пространственным разрешением. Из абсолютной величины интенсивности тормозного континуума определяются величина и радиальное распределение эффективного ионного заряда плазмы $Z_{\text{эф}}(r)$ в разрядах Т-10. Актуальность измерения эффективного ионного заряда $Z_{\text{эф}}$ связана с его существенным влиянием на процессы нагрева, удержания и устойчивости плазмы. Одновременно проводятся измерения пространственного распределения свечения одной из выбранных спектральных линий. Пространственное разрешение измерений составляет ~ 1 см, временное — до 10 мс. В статье приведено описание используемого в эксперименте спектрального оборудования и способов его калибровки. Приведены примеры хордового распределения яркости излучения в «континуумном окне» 5236 ± 6 Å и яркости свечения линий C^{5+} (5291 Å), He^{1+} (4686 Å), D_{β} (4861 Å). Обнаружен эффект выполаживания профиля яркости тормозного континуума в центральной области шнура в некоторых разрядах Т-10 с пилообразными колебаниями. Измеренные профили эффективного ионного заряда в омических разрядах с высокой плотностью плазмы и малыми разрядными токами демонстрируют аккумуляцию лёгких примесей у оси шнура, вследствие чего в отдельных разрядах наблюдается прекращение пилообразных колебаний. Созданная диагностика обеспечивает получение необходимых данных для исследования процессов переноса тепла, частиц и тока в плазме Т-10. Следует отдельно отметить успешное использование получаемых данных о $Z_{\text{эф}}(r)$ в программе изучения физики геодезических акустических мод (ГАМ) плазменных колебаний на Т-10.

Ключевые слова: токамак Т-10, сканирующая спектроскопия, эффективный заряд $Z_{\text{эф}}$.

THE RADIAL SCANNING DIAGNOSTICS OF THE BREMSSTRAHLUNG AND LINE EMISSION IN T-10 PLASMA

A.R. Nemets, V.A. Krupin, L.A. Klyuchnikov, K.V. Korobov, M.R. Nurgaliev

Department of Tokamaks, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The paper describes the radial scanning spectroscopic diagnostics designed for the measurements of the plasma radiation line integrated distribution in two visible spectral ranges. The diagnostics is aimed at measuring the bremsstrahlung absolute values and profiles with high spatial resolution, which are used for $Z_{\text{eff}}(r)$ determination in T-10 discharges. The relevance of the effective charge Z_{eff} measurements is related to its significant influence on the processes of heating, confinement and stability of the plasma. Simultaneously with the bremsstrahlung the spatial distribution of the chosen line emission was determined. Spatial resolution of the diagnostics is about 1 cm, temporal — up to 10 ms. Spectral equipment and calibration technics are described in the paper. Line integrated brightness of bremsstrahlung in continuum window 5236 ± 6 Å and lines C^{5+} (5291 Å), He^{1+} (4686 Å), D_{β} (4861 Å) are shown. Flattening of the bremsstrahlung brightness profile in some discharges with sawtooth oscillations is observed. Measured profiles of Z_{eff} in ohmic discharges with high density and low current demonstrate effect of light nuclei accumulation near the axis, which results in sawtooth oscillations suppression in particular discharges. The developed diagnostics provides required data for investigation of the particle, heat, and current transport. Particularly measurement results of Z_{eff} obtained by diagnostics described in this paper is used in the geodesic acoustic modes (GAM) investigation on T-10.

Key words: tokamak T-10, scanning spectroscopy, effective charge Z_{eff} .

ВВЕДЕНИЕ

Для проведения программ по исследованию переноса примесей на установке Т-10 в 2014—2015 гг. был создан диагностический комплекс, предназначенный для измерений профиля и абсолютной величины эффективного заряда плазмы $Z_{\text{эф}}(r)$ из интенсивности свечения тормозного континуума (непрерывного спектра тормозного излучения) в видимой области спектра [1]. Такой метод определения эффективного заряда плазмы традиционно используется на различных плазменных установках с магнитным удержанием [2—6].

В состав комплекса диагностик $Z_{\text{эф}}$ на Т-10 входят несколько диагностических систем, одной из которых является сканирующая диагностика для измерений профилей тормозного и линейчатого излучения плазмы. Данная система дополняет результаты многохордовых измерительных систем, фиксированных по пространству, и, обладая высоким пространственным разрешением, позволяет исследовать характерные особенности формы профиля тормозного континуума.

Сканирование излучения по пространству производится в полоидальной плоскости одного из диагностических сечений установки Т-10 одновременно в двух выбранных спектральных диапазонах. Изме-

рения тормозного континуума ведутся в спектральных областях, свободных от линейчатого излучения атомов и ионов плазмы, — так называемых «континуумных окнах» [7]. Одновременно проводятся измерения пространственного распределения свечения выбранной спектральной линии, что обеспечивает необходимую информацию при исследовании транспортных процессов в плазме.

ОПИСАНИЕ ДИАГНОСТИКИ

Схема описываемой диагностики показана на рис. 1. Выбранная система сканирования излучения плазмы успешно применялась на многих плазменных установках [8—11] для измерения профилей интенсивности тормозного континуума и спектральных линий рабочего газа и примесей.

Рис. 1. Схема сканирующей хордовой диагностики: вращающийся барабан (1), отклоняющее зеркало (2), собирающая линза (3), полупрозрачное зеркало (4)

Технически система реализована на базе вращающегося с заданной скоростью барабана (1) с восемью зеркальными гранями, поочередно передающими излучение плазменного шнура через отклоняющее зеркало (2) на собирающую линзу (3) с отношением $d/f = 1/2$. Линза через полупрозрачное зеркало (4) проецирует излучение на торцы двух световодов, которые передают излучение на входные щели светосильных монохроматоров МДР-2 ($d/f = 1/2$), организуя два независимых канала регистрации профилей излучения в двух выделенных участках спектра плазмы по одной и той же хорде наблюдения.

При передаче излучения на входную щель монохроматора (А), применяемого для измерений континуума, используется упорядоченный стеклянный световод, собранный из волокон диаметром 20 мкм. Изображение плазменного шнура, передаваемое по данному световоду, повернуто на 90° относительно входной щели монохроматора, таким образом, свет собирается с участка плазмы размером поперёк шнура < 1 см, вытянутого вдоль тора на длину ~ 5 см, что обеспечивает высокое пространственное разрешение измерений континуума. Второй канал (Б) задействован для измерений пространственных профилей свечения различных ионов примесей и атомов рабочего газа.

На рис. 2 представлен пример сигналов, получаемых с помощью 2-канальной сканирующей диагностики. В данном случае на одном из каналов проводилась регистрация профилей яркости тормозного континуума, на другом — линии углерода C^{5+} (5291 Å).

Как видно на рис. 2, полный профиль яркости излучения измеряется за время ~ 15 мс при интервале между измерениями ~ 25 мс. Скважность измерений (1/2,5) определяется размерами зеркального барабана и системы сбора света, которые при конструировании оказались ограничены размерами диагностического патрубка и расположением соседних диагностик.

Рис. 2. Экспериментальные данные, получаемые с помощью сканирующей диагностики: 1 — яркость в районе спектральной линии C^{5+} 5291 Å; 2 — яркость излучения в «континуумном окне» 5236 Å

Абсолютная калибровка обоих каналов системы производится с использованием сертифицированного источника Labsphere USS-600C. Полученные калибровочные коэффициенты позволяют учитывать вклад тормозного континуума в измеряемую яркость спектральной линии. При измерениях линий малой интенсивности, таких, как линия высокоионизованного иона углерода C^{5+} , значительную долю излучения может составлять тормозной континуум плазмы, как в случае, показанном на рис. 2. В этом случае профиль яркости линии определяется как разность сигналов по двум измерительным каналам с учётом их калибровочных коэффициентов. Изменение интенсивности тормозного излучения при смещении по спектру с длины волны $5236 \text{ \AA}$ на длину волны $5291 \text{ \AA}$ не превышает погрешность измерений.

Для точной пространственной привязки измерений перед началом экспериментов и после окончания экспериментальной кампании проводится пространственная калибровка системы с использованием перемещаемых в камере Т-10 локальных источников излучения.

Для определения эффективности регистрации сигнала по пространству проводилась калибровка системы на стенде с применением однородного ленточного источника излучения шириной 7 и длиной 120 см. Для данного источника предварительно были установлены однородность излучения и изотропность в пределах телесного угла 2π .

Для регистрации скорости вращения барабана и точного определения положения хорды наблюдения на оси барабана смонтирован оптический датчик угла поворота (ДУП). Его использование позволяет также регистрировать замедление вращения барабана (до 5—10% за время разряда), связанное с взаимодействием двигателя и проводящего барабана с магнитным полем тока установки, и учитывать данное замедление при обработке измерений. Программа обработки определяет положение хорды наблюдения по сигналам с ДУП с точностью $\sim 0,5 \text{ см}$ в каждый момент времени и позволяет построить из исходных данных хордовый профиль свечения плазмы с пространственной привязкой, учитывающей изменения скорости вращения барабана. Для улучшения соотношения сигнал—шум в программе обработки имеется возможность суммировать несколько пространственных профилей, измеренных на стационарной стадии разряда.

Отдельно оценивалась эффективность отражения света от задней стенки вакуумной камеры, где имеется ловушка света, состоящая из набора чернёных горизонтальных пластин. Для этого точечный источник излучения перемещался по вертикальной оси через центр камеры токамака. Яркость источника сравнивалась с яркостью его изображения, создаваемого задней стенкой, работающей как вогнутое сферическое зеркало. Измерения показали, что светом, отражённым от используемой ловушки света, можно пренебречь.

На рис. 3 представлены типичные хордовые распределения яркости тормозного излучения (а) и спектральных линий углерода C^{5+} ($5291 \text{ \AA}$) (б), гелия He^{1+} ($4686 \text{ \AA}$) (в), дейтерия D_{β} ($4861 \text{ \AA}$) в различных разрядах Т-10.

Рис. 3. Примеры измеренных в разрядах Т-10 хордовых распределений яркости тормозного излучения (а) и спектральных линий углерода C^{5+} ($5291 \text{ \AA}$) (б), гелия He^{1+} ($4686 \text{ \AA}$) (в), дейтерия D_{β} ($4861 \text{ \AA}$) (з)

Асимметрия свечения линий, в особенности линии дейтерия, скорее всего, связана с значительной пространственной неоднородностью поступления частиц в плазму. В частности, увеличение яркости свечения дейтерия в области +5 — +10 см (см. рис. 3, з) может быть связано с тем, что в наблюдаемый хордовый сигнал вносит вклад излучение, локализованное вблизи стенки токамака. В некоторых случаях значительный вклад в форму профилей излучения может внести свечение MARFE, возникающее на внутренней границе плазменного шнура в разрядах с высокой плотностью. В случае линий высокоионизованных ионов, таких, например, как линия 5291 Å иона C^{5+} , наличие пространственной асимметрии может определяться процессами дрейфа ионов.

Измерение распределения свечения водородоподобных ионов, таких, как C^{5+} , представляет значительный интерес для исследования переноса ядер лёгких примесей, поскольку несёт в себе информацию о величине ионизационного потока в эти ядра. Данная информация необходима для определения параметров переноса лёгких примесей с использованием транспортных кодов.

Преимуществом непрерывной развертки излучения с высоким пространственным разрешением можно считать то обстоятельство, что она позволяет обнаружить пространственные особенности на профилях свечения континуума, причиной возникновения которых могут являться процессы переноса ионов в плазме.

Недостатком данного метода является его незащищённость от возможных изменений профиля континуума за время сканирования, что усложняет измерение профилей свечения, форма которых определяется нерегулярными быстрыми процессами, протекающими за время, сравнимое с длительностью развёртки. Влияние на измеряемый профиль регулярных процессов, таких, как пилообразные колебания, оказывается усреднённым по их периоду.

Предельно короткое время сканирования, достижимое для данной системы, составляет ~1 мс, что позволяет проводить измерения эволюции профилей свечения ярких спектральных линий в случае исследования быстрых динамических процессов. При малой длительности сканирования континуума с низкой интенсивностью определение формы его профиля с приемлемой статистической ошибкой обычно требует суммирования более 10 развёрток, что нивелирует преимущество использования быстрого сканирования для измерений профиля $Z_{эф}(r)$.

ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ТОРМОЗНОГО КОНТИНУУМА

По сравнению с дискретными измерениями по отдельным хордам профилей тормозного континуума [12] преимуществами измерений профилей с помощью сканирующей системы являются их непрерывность и высокое (≤ 1 см) пространственное разрешение. Проблемой является отсутствие в том же диагностическом сечении измерений спектра континуума с высоким спектральным разрешением, позволяющим провести точный учёт молекулярного излучения при определении профиля континуума. Поскольку распределение молекулярного излучения, измеренное в другом диагностическом сечении, отнесённом по тороидальному обходу на 180° [12], может отличаться, то для сканирующей системы потребовалось отладить другие методы оценки вклада молекулярных линий.

Для построения скейлинга профилей молекулярного свечения была исследована их форма в разрядах с малой плотностью, где практически всё излучение в «континуумном окне» 5236 ± 6 Å составляет свечение молекулярных линий, а также зависимость формы профиля молекулярного излучения от величины тока плазмы. Максимум интенсивности излучения молекул сосредоточен на радиусе токовой диафрагмы a_L , минимальная величина приходится на центральную хорду наблюдения. В разрядах с высокой плотностью плазмы из профиля развёртки вычитался профиль континуума, измеряемый с высоким спектральным разрешением дискретно по отдельным хордам в сечении, отнесённом по тороидальному обходу на 180° , что позволило построить скейлинг для профилей молекулярного излучения при всех плотностях плазмы. Измеренное отношение интенсивностей профилей излучения молекулярных линий и тормозного континуума падает с ростом плотности плазмы, при этом наименьший вклад свечения молекул в суммарный профиль свечения «окна» наблюдается в омических разрядах Т-10 с предельными

Рис. 4. Распределение яркости свечения тормозного континуума плазмы и молекулярного излучения в разряде № 66 123 в интервале 600—700 мс: 1 — экспериментальные данные; 2 — расчётный профиль тормозного излучения; 3 — профиль молекулярного излучения

Рис. 5. Эволюция электронной плотности и интенсивности SXR-излучения в омическом разряде № 66 122 с током 180 кА (а); хордовые профили тормозного континуума во временных интервалах, отмеченных на рис. 5, а, как t_1 и t_2 (б)

становление локальных значений из хордовых измерений (абелизация). Такой способ определения $n_e(r)$ не позволяет рассчитывать на обнаружение каких-либо контрастных особенностей на профилях плотности

величинами $\bar{n}_e$. Типичное соотношение профилей излучения континуума и молекул демонстрирует рис. 4. Кривая 1 на рисунке — измеренный хордовый профиль излучения в «континуумном окне» $5236 \pm 6 \text{ \AA}$, линия 3 — вклад молекулярного излучения для разряда с данными параметрами, линия 2 — распределение яркости свечения тормозного континуума плазмы, рассчитанное в модели с учётом экспериментально измеренных распределений электронной температуры и плотности плазмы в данном разряде в предположении $Z_{\text{эф}}(r) = \text{const}$.

Можно видеть, что на периферии шнура, начиная с $\rho \approx 0,8\text{--}0,9$, расчётный профиль тормозного континуума лежит ниже, чем измеренный профиль непрерывного излучения. Анализ природы такого дополнительного излучения проводился в работе [12] с использованием приборов, имеющих спектральное разрешение $\sim 0,2 \text{ \AA}$.

В отдельных омических разрядах с высоким соотношением $\bar{n}_e/I_p$ ($\bar{n}_e \sim 3,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ для тока 180 кА) и большим содержанием примесей ($Z_{\text{эф}} \sim 3$) наблюдается внезапное прекращение пилообразных колебаний без каких-либо внешних воздействий на разряд, таких, например, как дополнительный нагрев плазмы, генерация токов или значительное изменение газонапуска. Прекращению пилообразных колебаний предшествует участок разряда с интенсивным ростом SXR-сигнала (t_1 на рис. 5, а), на котором также наблюдается накопление лёгких примесей — увеличение величины $Z_{\text{эф}}$. Период пилообразных колебаний на данном участке разряда остаётся практически таким же, что и на предыдущей стадии разряда (отдельно показан SXR-сигнал на участке 600—690 мс, рис. 5, а). Это может свидетельствовать об отсутствии сильных изменений профиля тока на указанном участке накопления примесей. Профиль тормозного излучения на данном участке демонстрирует негладкую трапецевидную форму (кривая 2 на рис. 5, б) с широкой плоской вершиной, что может быть связано с соответствующей негладкой формой радиальных профилей плотности электронов и ядер примесей. Измерения профиля плотности электронов $n_e(r)$ на Т-10 ведутся с помощью 16-канальной интерферометрической диагностики. При обработке интерферометрических данных учитывается шафрановское смещение плазменного шнура, проводятся сглаживание результатов измерений и восстановление

электронов. Таким образом, отсутствие на Т-10 локальных измерений $n_e(r)$ затрудняет выяснение причины наблюдаемых деформаций профилей тормозного континуума. Накопление лёгких примесей завершается быстрым обострением их профиля [13] и, возможно, связанным с ним прекращением пилообразных колебаний. После исчезновения пилообразных колебаний (см. рис. 5, а, 770 мс) наблюдается также исчезновение трапецевидной формы свечения континуума (1 на рис. 5, б).

В большинстве исследованных разрядов распределение лёгких примесей оказывается подобным профилю $n_e(r)$, что соответствует однородному распределению $Z_{эф}(r)$ в шнуре. Тем не менее, как показано в работе [13], в плазме с предельным отношением параметров $\bar{n}_e/I_p$ существенную роль может играть неоклассический перенос ионов, приводящий к аккумуляции примесей у оси шнура. Наблюдаемая аккумуляция примесей должна приводить к увеличению излучения тяжёлых примесей из центральных областей шнура и охлаждению центра плазмы, а также к пикированию профиля $Z_{эф}(r)$ за счёт аккумуляции лёгких примесей у оси шнура. Оба эти процесса способны привести к вытеснению тока из центральных областей плазменного шнура и вызвать наблюдаемое подавление пилообразных колебаний. Детальное изучение процессов, приводящих к прекращению пилообразных колебаний в омическом разряде, является предметом дальнейших исследований.

Экспериментальные данные об абсолютной величине и радиальном распределении $Z_{эф}(r)$ необходимы во многих исследовательских программах, в том числе для исследований физики геодезических акустических мод (ГАМ) плазменных колебаний, которые в настоящее время активно развиваются на Т-10 [14]. В экспериментальных и теоретических работах показана существенная зависимость свойств ГАМ-колебаний от состава плазмы и уровня загрязнённости различными примесями [15, 16]. Учёт влияния примесей на такие процессы особенно актуален в условиях Т-10, где характерные значения эффективного ионного заряда могут достигать $Z_{эф} \approx 3$. В будущих экспериментах на Т-10 ожидается существенное понижение уровня примесей благодаря установке литиевой диафрагмы, что позволит сопоставить экспериментальные результаты, полученные при различных величинах $Z_{эф}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На токамаке Т-10 создана диагностика, позволяющая измерять распределение яркости тормозного и линейчатого излучения плазмы в видимой области спектра. Диагностика обладает высоким пространственным разрешением <1 см, при этом временное разрешение составляет ~ 1 мс при измерениях линейчатого излучения и 10—15 мс при измерениях тормозного континуума. Основной задачей данной диагностики, входящей в состав комплекса диагностик $Z_{эф}(r)$, является измерение профиля интенсивности тормозного континуума плазмы с высоким пространственным разрешением. Преимуществом данной диагностики в сравнении с измерением профилей свечения плазмы по фиксированным хордам является также непрерывность измерения хордовых профилей.

В некоторых разрядах с пилообразными колебаниями созданная диагностика позволила обнаружить выполаживание яркости тормозного континуума в центральной области шнура. Такое выполаживание может являться результатом возникновения в зоне $q = 1$ особенностей на профилях плотности электронов и ионов, для исследования которых требуются локальные измерения электронной плотности. Измерения показывают, что при исчезновении пилообразных колебаний в омическом разряде указанные особенности распределения яркости континуума исчезают.

В омических разрядах с низким током и высокой плотностью плазмы в условиях высокого содержания ядер лёгких примесей измеренные профили тормозного континуума демонстрируют аккумуляцию лёгких примесей у оси шнура, что подтверждается независимыми данными CXRS-измерений [13]. При этом в отдельных разрядах процессы аккумуляции примесей способны приводить к прекращению пилообразных колебаний.

Созданная диагностика обеспечивает данные о распределении и динамике эффективного заряда плазмы, необходимые для решения многих физических задач, таких, как исследование эффективности нагрева плазмы, её устойчивости, переноса тепла, частиц, тока, и, в частности, для изучения геодезических акустических мод (ГАМ) плазменных колебаний, которые проводятся в настоящее время на Т-10.

Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00193)

REFERENCES

1. **Nemets A.R. et al.** — In coll. : XLII International (Zvenigorod) conference on plasma physics and CTF, Zvenigorod, Russia, 9—13 February 2015 (in Russian).
2. **Meister H. et al.** — Rev. Sci. Instr., 2004, vol. 75, pp. 4097—4099.
3. **Rathgeber S.K. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2010, vol. 52, pp. 95008—95023.
4. **Patel A. et al.** — Rev. Sci. Instrum., 2004, vol. 75, pp. 4944—4950.
5. **Chen Y. et al.** — Fusion Engineering and Design, 2013, vol. 88, pp. 2825—2829.
6. **Zhou H.Y. et al.** — J. Appl. Phys., 2010, vol. 107, p. 053306.
7. **Kadota K., Otsuka M., Fujita J.** — Nucl. Fusion, 1980, vol. 20, p. 209.
8. **Suckewer S. et al.** — Phys. Rev. Letters, 1979, vol. 43, p. 207.
9. **Gegechkori N.M., Zhidkov A.G., Pimenov A.B.** Preprint IAE-3464/7. — M.: NRC “Kurchatov Institute”, 1981 (in Russian).
10. **Vershkov V.A., Krupin V.A. et al.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 1984, vol. 10, p. 901 (in Russian).
11. **Zhou Q. et al.** — Plasma Science and Technology, 2007, vol. 9, p. 23.
12. **Klyuchnikov L.A. et al.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 4, pp. 34—40 (in Russian).
13. **Nurgaliev M.R. et al.** — In coll.: XLII International (Zvenigorod) conference on plasma physics and CTF, Zvenigorod, Russia, 9—13 February 2015 (in Russian).
14. **Melnikov A.V. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2006, vol. 48, S87.
15. **Gusakov E.Z. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2013, vol. 55, p. 124034.
16. **Yang Sh.Ch. et al.** — Physics of Plasmas, 2015, vol. 22, p. 044502.

AUTHORS

Nemets A.R. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Nemets_AR@nrcki.ru

Krupin V.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Klyuchnikov L.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; lklyuchnikov@list.ru

Korobov K.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Nurgaliev M.R. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Received 10 August 2015
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2015, vol. 38, issue 4, pp. 96—102.