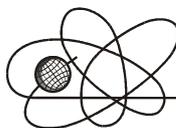




Российская Академия Наук

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



ИБРАЭ

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № ИBRAE-2011-05

Preprint IBRAE-2011-05

Е.В. Ахрамеев

МЕХАНИЗМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗОМЕРНЫХ ЯДЕР В ГОРЯЧЕЙ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ

Москва
2011

Moscow
2011

Е.В. Ахрамеев, МЕХАНИЗМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗОМЕРНЫХ ЯДЕР В ГОРЯЧЕЙ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ. Препринт № ИБРАЕ-2011-05. Москва: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2011, 52с.

Аннотация

В работе представлены аналитические выражения для сечений рассеяния нерелятивистских электронов на ядрах. Для ряда реальных ядер (с переходами E1 и M1) выполнены расчеты для:

- сечений возбуждения ядер через неупругое рассеяние электронов (для борновского, нерелятивистского приближений, а также с использованием метода самосогласованного поля Хартри-Фока-Слейтера);
- транспортных сечений возбуждения ядер через неупругое рассеяние электронов (для борновского приближения);
- эффективностей различных механизмов возбуждения (неупругого рассеяния электронов, обратной внутренней электронной конверсии, возбуждения собственным тепловым излучением плазмы).

Рассмотрена возможность возбуждения «волны горения».

©ИБРАЭ РАН, 2011

E.V. Ahrameev, MECHANISMS FOR THE EXCITATION OF ISOMER NUCLEI IN HOT DENSE PLASMA. Preprint IBRAE-2011-05. Moscow: Nuclear Safety Institute RAS, 2011, 52p.

Abstract

The paper presents analytical expressions for the scattering cross sections of nonrelativistic electrons on nuclei. For several real nuclei (with transitions E1 and M1) it contains calculations for:

- cross sections of excitation of nuclei by inelastic scattering of electrons (in the Born and nonrelativistic approximations, and using Hartree-Fock-Slater method of the self-consistent field);
- transport cross sections of excitation of nuclei by inelastic scattering of electrons (in the Born approximation);
- the efficiency of different mechanisms of excitation (inelastic scattering of electrons, the inverse internal electron conversion, excitation of the thermal radiation of the plasma).

Considered the possibility of excitation of the «combustion wave».

©Nuclear Safety Institute, 2011

Механизмы возбуждения изомерных ядер в горячей плотной плазме

Е.В.Ахrameев

Институт Проблем Безопасного Развития Атомной Энергетики РАН

113191 Москва, Большая Тульская 52

Э-почта: e.ahrameev@mail.ru

В работе рассмотрены различные механизмы возбуждения изомерных ядер в горячей плотной плазме. Представлен сравнительный анализ эффективностей возбуждения для различных ядер и параметров плазмы. Рассмотрены условия создания «волны горения» в плазме, содержащей изомерные ядра.

1. Введение

Ядра, возбужденные на долгоживущие изомерные состояния, являются потенциальным источником энергии, которая в обычных условиях медленно высвобождается при спонтанном распаде. Возбужденное состояние ядра проявляет себя как изомер, в случае, когда его распад значительно замедлен. Это происходит из-за сильного отличия волновых функций начального и конечного состояний ядра. Причиной этого явления служат правила отбора по квантовым числам углового момента, структурные запреты и различие по параметру коллективной деформации. Например, для статически деформированных ядер в дополнение к стандартным правилам отбора по спину и четности важную роль играет К-запрет [1]. Например, интенсивность К-запрещенного перехода 3 порядка в ядре Am-242: $5^- (48,6 \text{ кэВ}, K = 5^-) \rightarrow 3^- (52,7 \text{ кэВ}, K = 0^-)$ будет ослаблена в 10^6 раз относительно одночастичной модели Вайскопфа (каждая единица К-запрета дает подавление примерно в 100 раз).

Были проведены экспериментальные исследования по возбуждению низколежащих изомерных состояний в горячей плотной плазме для ядер ^{181}Ta [2-4] и ^{235}U [5-8]. Ряд теоретических работ [9-13] был посвящен изучению механизмов возбуждения ядер фотонами и электронами в горячей плотной плазме, детальное рассмотрение которых будет приведено ниже.

Также был предложен ряд идей для использования ядерных переходов по аналогии с атомными и молекулярными для создания квантового генератора, работающего в диапазоне коротковолнового γ -излучения [14]. Однако, детальное рассмотрение вопроса использования изомеров для различных прикладных задач выявило целый ряд ограничений, из-за которых, например, ядерный аналог лазера не создан до настоящего времени [15]. Одним из фундаментальных ограничений является малая величина сечений возбуждения ядерных уровней.

В случае если в спектре возбуждения ядра над долгоживущим изомерным уровнем находится близкорасположенный короткоживущий уровень, процесс девозбуждения может проходить через данный короткоживущий уровень. Естественно, при этом необходимо стимулирование в зоне реакции возбуждения на короткоживущий уровень. Такие переходы могут проходить, например, в горячей плотной плазме или при облучении зоны реакции с изомерными ядрами различными пучками частиц.

При некоторых условиях есть возможность резко ускорить процесс возбуждения короткоживущего уровня. В работах [13] и [16] рассмотрены механизмы стимулирования внутриядерных переходов в горячей плазме. Если при этом 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 в зоне реакции возможно возникновение самоподдерживающегося процесса, аналогичного процессу химического горения. Принципиальная возможность существования «волны горения» в системе изомерных ядер была показана в работах [17 - 19]. Также в работах [17 - 19] представлены требования к параметрам ядерных переходов, при которых возможна «переброска» ядер с долгоживущего на короткоживущий уровень за счет механизмов неупругого рассеяния электронов и возбуждения собственным тепловым излучением плазмы.

На рис.1 представлена трехуровневая система (обозначения согласно работе [20]): m - метастабильный уровень, t - короткоживущий триггерный уровень, g - основное состояние (низкорасположенный уровень).

Как было отмечено выше, одним из способов освобождения энергии, аккумулированной в возбужденных состояниях изомерных ядер может состоять в осуществлении антистоксовых переходов

Схема антистоксова перехода

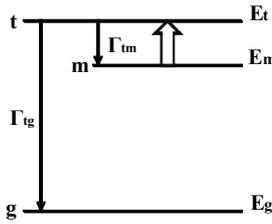


рис. 1

$m \rightarrow t \rightarrow g$ происходящих в обход сильно запрещенного перехода $m \rightarrow g$. Очевидно, что энергетический выигрыш такого перехода тем больше, чем сильнее неравенство:

$$|E_t - E_m| < |E_t - E_g|.$$

Основными каналами возбуждения ядерных переходов (перехода $m \rightarrow t$) в плазме являются:

- обратная внутренняя электронная конверсия [9, 10];
- возбуждение через неупругое рассеяние электронов [11];
- возбуждение собственным тепловым излучением плазмы [12, 13].

Процессы возбуждения ядер «тепловыми» протонами и ионами не рассматривались, т.к. при значениях температуры плазмы $kT < 5 \text{кэВ}$, сечения данных процессов имеют чрезвычайно малые значения. Рассмотрим подробнее каждый механизм возбуждения ядерных переходов.

Целями данной работы являлось:

- проведение сравнительного анализа указанных механизмов возбуждения на примере реальных ядер;
- рассмотрение различных методов расчетов для механизма возбуждения ядер через неупругое рассеяние электронов;
- рассмотрение возможности возбуждения «волны горения».

Проведем сравнительный анализ эффективностей различных механизмов возбуждения. Затем кратко рассмотрим условия возникновения «волны горения» и сделаем некоторые численные оценки для реальных ядер.

2. Возбуждение собственным тепловым излучением плазмы

В [2] и [4] было показано, что возбуждение собственным тепловым излучением плазмы является доминирующим механизмом в случае горячей плотной плазмы. Оценить эффективность фотовозбуждения ζ_γ , т.е. отношение числа возбужденных ядер N^* к общему количеству изомерных ядер в плазменном сгустке (в зоне реакции), можно по формуле (в предположении планковского спектра фотонов):

$$\zeta_\gamma = \frac{\tau \Gamma_{\text{rad}}}{e^{E_\gamma/T-1}} \quad (1)$$

где τ – время существования плазменного сгустка.

Выражения для естественной ширины электромагнитного перехода Γ_{rad} (в длинноволновом приближении $\lambda \gg R$ - радиус ядра) для электрических и магнитных переходов имеют вид (в кэВ):

$$\Gamma_{\text{rad}}(E\lambda) = \frac{8\pi(\lambda+1)}{[\lambda(2\lambda+1)]^2} \left(\frac{\Delta E}{\hbar c}\right)^{2\lambda+1} B_{\text{Wu}}(E\lambda; I \rightarrow F) \left(\frac{3}{3+\lambda}\right)^2 \frac{e^2}{4\pi} (1.2\sqrt[3]{A})^{2\lambda} \quad (2)$$

$$\Gamma_{\text{rad}}(M\lambda) = \frac{8\pi(\lambda+1)}{[\lambda(2\lambda+1)]^2} \left(\frac{\Delta E}{\hbar c}\right)^{2\lambda+1} B_{\text{Wu}}(M\lambda; I \rightarrow F) \left(\frac{3}{3+\lambda}\right)^2 \frac{e^2}{4\pi} (1.2\sqrt[3]{A})^{2\lambda} 10 \left(\frac{\hbar}{m c 1.2\sqrt[3]{A}}\right)^2 \quad (3)$$

где $B_{\text{Wu}}(E(M)\lambda; I \rightarrow F)$ - приведенная вероятность ядерного перехода мультипольности $E(M)\lambda$, выраженная в единицах Вайскопфа, из состояния со спином J_I в состояние со спином J_F . Подстановкой известных параметров для конкретных значений мультипольности перехода можно получить следующие выражения:

$$\Gamma_{\text{rad}}(E1) = 6,8 * 10^{-14} (\hbar\omega)^3 A^{2/3} B_{\text{Wu}}(E1; I \rightarrow F) \quad (4)$$

$$\Gamma_{\text{rad}}(M1) = 2.1 \cdot 10^{-14} (\hbar\omega)^3 B_{Wu}(M1; I \rightarrow F) \quad (5)$$

Число возбужденных по данному механизму ядер:

$$N^* = n_{is} V \zeta_{\gamma} \quad (6)$$

где n_{is} - концентрация изомерных ядер в зоне реакции, V - объем зоны реакции.

3. Обратная внутренняя электронная конверсия (ОВЭК)

Механизм ОВЭК [9, 10] является резонансным процессом возбуждения ядер электронами. Суть механизма заключается в том, что электроны плазмы, возвращаясь на атомные оболочки ионов, выделяют энергию, которой может оказаться достаточно для возбуждения ядра. Из всего спектра тепловых электронов плазмы резонансно возбуждают ядро лишь те электроны, энергия которых лежит в пределах конверсионной ширины изомерного уровня Γ_{conv} около резонансной энергии, определяемой выражением $E_{\text{res}} = E_{is} - |E_f|$, где E_f - энергия оболочки, на которую захватывается электрон непрерывного спектра ионом, E_{is} - энергия ядерного перехода. В расчетах в данной работе применялась оценка $|E_f| = E_{is}/2$, исходя из известного факта, что основной вклад в конверсию дают оболочки атома, энергия связи которых, составляет, примерно, половину энергии ядерного перехода [16]. Число возбужденных ядер, образующихся при захвате атомными ионами свободных электронов из сплошного спектра равно:

$$N^* = n_{re} \tau n_{is} V \sigma_r v_{res} \quad (7)$$

n_{re} - концентрация резонансных электронов, n_{is} - концентрация изомерных ядер в зоне реакции, σ_r - резонансное сечение возбуждения ядерного уровня такими электронами, v_{res} - скорость резонансных электронов.

Выражение для резонансного сечения имеет вид:

$$\sigma_r \approx \frac{\lambda_e^2}{2\pi} = 2\pi \left(\frac{\hbar}{m_e v_{res}} \right)^2 \quad (8)$$

где λ_e - дебройлевская длина волны резонансных электронов. Число резонансных электронов в плазме с температурой T определяется по формуле:

$$n_{re} \approx n_e f(E_{res}) \frac{\Gamma_{\text{conv}}}{T} \quad (9)$$

Здесь и далее в расчетах принималось, что электроны плазмы распределены по Максвелловскому закону, а функция распределения имеет вид:

$$f(E) = 2 \sqrt{\frac{E}{\pi T}} e^{-\frac{E}{T}} \quad (10)$$

Если ввести обозначение $\sigma_{\text{ОВЭК}} = \sigma_r f(E_{res}) \frac{\Gamma_{\text{conv}}}{T}$, то для числа возбужденных ядер и эффективности возбуждения можно записать следующие выражения:

$$N^* = n_e \tau n_{is} V \sigma_{\text{ОВЭК}} v_{res} \quad (11)$$

$$\zeta_{\text{ОВЭК}} = n_e \tau \sigma_{\text{ОВЭК}} v_{res} \quad (12)$$

4. Неупругое рассеяние электронов плазмы на ядрах

В [21] и [22] приведены общие формулы сечений неупругого рассеяния частиц на ядрах:

$$d\sigma(E\lambda) = \left(\frac{e}{\hbar v_i} \right)^2 \cdot \frac{4 k_i k_f B(E\lambda)}{(2\lambda+1)^3} \sum_m \left| \left\langle k_f \left| \frac{Y_{\lambda m}}{r^{\lambda+1}} \right| k_i \right\rangle \right|^2 d\Omega \quad (13)$$

$$d\sigma(M\lambda) = \left(\frac{e}{\hbar c} \right)^2 \cdot \frac{v_f}{v_i} \cdot \frac{4 B(M\lambda)}{(2\lambda+1)^3 \lambda^2} \cdot \sum_m \left| \left\langle k_f \left| L \nabla \left(\frac{Y_{\lambda m}}{r^{\lambda+1}} \right) \right| k_i \right\rangle \right|^2 d\Omega \quad (14)$$

Подстановкой в эти выражения в качестве волновых функций налетающего и рассеянного электронов плоских волн можно получить выражения для сечений рассеяния нерелятивистских электронов на ядрах:

$$\sigma(E1) = \frac{16 \pi^2 e^2 m}{9 \hbar^2 E_i} B(E1) \ln \left(\frac{\sqrt{E_i} + \sqrt{E_f}}{\sqrt{E_i} - \sqrt{E_f}} \right) \quad (15)$$

$$\sigma(E2) = \left(\frac{8\pi}{15}\right)^2 \frac{m^2 e^2}{\hbar^4} \cdot \sqrt{\frac{E_f}{E_i}} B(E2) \quad (16)$$

$$\sigma(E3) = 2 \left(\frac{8\pi}{105}\right)^2 \frac{e^2}{\hbar^2 c^2} \cdot \sqrt{\frac{E_f}{E_i}} B(E3) \frac{(mc^2)^3 (E_i + E_f)}{\hbar^4 c^4} \quad (17)$$

$$\sigma(M1) = \frac{32\pi^2}{9} \frac{e^2}{\hbar^2 c^2} B(M1) \ln \left(\frac{\sqrt{E_i + \sqrt{E_f}}}{\sqrt{E_i - \sqrt{E_f}}} \right) \quad (18)$$

Результаты расчетов по формулам (15) - (18) сравнивались с аналитическими выражениями для сечений возбуждения ядер рассеянием электронов в борновском приближении [21]:

$$d\sigma(E\lambda) = \left(\frac{e}{\hbar c}\right)^2 \frac{4\pi(\lambda+1)}{\lambda[(2\lambda+1)!!]^2} \frac{K^{2\lambda}}{k_i^2} \left(\frac{\lambda}{\lambda+1} B(C\lambda, K) V_L(\vartheta) + B(E\lambda, K) V_T(\vartheta) \right) d\Omega \quad (19)$$

$$d\sigma(M\lambda) = \left(\frac{e}{\hbar c}\right)^2 \frac{4\pi(\lambda+1)}{\lambda[(2\lambda+1)!!]^2} \frac{K^{2\lambda}}{k_i^2} B(M\lambda, K) V_T(\vartheta) d\Omega \quad (20)$$

где K и $k = \frac{\Delta E}{\hbar c}$ - абсолютное значение переданного импульса и энергии, k_i и k_f - абсолютные значения импульсов падающего и рассеянного электронов, факторы $V_L(\vartheta)$ и $V_T(\vartheta)$ задаются выражениями ($d\Omega = 2\pi \sin \vartheta d\vartheta$):

$$V_L(\vartheta) = \frac{4 \frac{m^2 c^2}{\hbar^2 k_i k_f} + \frac{k_i}{k_f} + \frac{k_f}{k_i} - \frac{\kappa^2}{k_i k_f} + 2 \cos \vartheta}{\left(\frac{k_i}{k_f} + \frac{k_f}{k_i} - 2 \cos \vartheta \right)^2} \quad (21)$$

$$V_T(\vartheta) = \frac{\left(\frac{k_i}{k_f} \right)^2 + \left(\frac{k_f}{k_i} \right)^2 + 4 \frac{\kappa^2}{k_i k_f} \left(\frac{k_i}{k_f} + \frac{k_f}{k_i} \right) - 2 \left(2 \frac{k_i}{k_f} + 2 \frac{k_f}{k_i} - \frac{\kappa^2}{k_i k_f} \right) \cos \vartheta + 2 (\cos \vartheta)^2}{\left(\frac{k_i}{k_f} + \frac{k_f}{k_i} - 2 \cos \vartheta \right) \left(\frac{k_i}{k_f} + \frac{k_f}{k_i} - \frac{\kappa^2}{k_i k_f} - 2 \cos \vartheta \right)^2} \quad (22)$$

Также был проведен расчет сечений неупругого рассеяния электронов с использованием метода Хартри-Фока-Слейтера [16] и [23]. Согласно алгоритму, подробно описанному в указанных источниках, сечение неупругого рассеяния электрона на ядре, которое в результате взаимодействия осуществляет переход $E/M\lambda$ имеет вид:

$$\sigma(E/M\lambda) = a_B^2 \left(\frac{R_0}{a_B} \right)^{2L} |\langle J_i || E/M\lambda || J_f \rangle|^2 \xi_e \quad (23)$$

где a_B - боровский радиус, R_0 - радиус ядра, ξ_e - «электронная» часть квадрата матричного элемента Гамильтониана взаимодействия, $\langle J_i || E/M\lambda || J_f \rangle$ - приведенный матричный элемент ядерного перехода, такой что:

$$B(E/M\lambda; J_i \rightarrow J_f) = e^2 R_0^{2L} |\langle J_i || E/M\lambda || J_f \rangle|^2 \quad (24)$$

Для вычисления электронного фактора предварительно рассчитывалось самосогласованное поле ядра и электронной оболочки с использованием метода Хартри-Фока-Слейтера, затем находились радиальные компоненты волновой функции свободного электрона в этом поле, и вычислялась электронная часть матричного элемента гамильтониана рассеяния.

В случае известного значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядре, выражение для эффективности возбуждения ядер через механизм неупругого рассеяния электронов $\zeta_{\text{inelastic electron}}$ можно представить следующим образом:

$$\zeta_{\text{inelastic electron}} = n_e \tau \langle \sigma v_e \rangle \quad (25)$$

где $\langle \sigma v_e \rangle = \int_{E_{is}}^{\infty} f(E) \sigma(E) v_e(E) dE / T$ - транспортное сечение, усредненное по спектру электронов,

n_e - концентрация электронов в плазме, τ - время существования сгустка плазмы, V - объем зоны реакции, n_{is} - концентрация изомерных ядер.

Число ядер, перешедших в возбужденное состояние, равно:

$$N^* = n_e \tau n_{is} V \langle \sigma v_e \rangle \quad (26)$$

Следует отметить, что формулы (6), (11), (26) справедливы при $N^* \ll N$, т.е. когда эффективность $\zeta \ll 1$. Данное замечание относится также к графикам эффективности, представленным в Приложении 1.

В Приложении 1 представлены результаты расчетов для реальных ядер сечений возбуждения ядерных переходов через механизм неупругого рассеяния электронов (расчеты проводились в борновском приближении, в нерелятивистском приближении, с использованием самосогласованного поля по методу ХФС).

Также в Приложении 1 представлены результаты расчетов транспортных сечений возбуждения ядер через неупругое рассеяние электронов (для борновского приближения).

5. Сравнение механизмов возбуждения

Соотношение эффективностей возбуждения ядер по различным механизмам сильно зависит от времени жизни возбуждаемого уровня и параметров перехода (энергии перехода и коэффициента внутренней конверсии). Как уже указывалось выше при больших значениях температуры плазмы доминирующим является механизм фотовозбуждения, при малых температурах механизм ОВЭК дает значительный вклад. При этом, при определенных условиях (например, при значении энергии ядерного перехода менее 1 кэВ) доминирующим механизмом может стать механизм неупругого рассеяния электронов.

Рассмотрим реальные ядра. В расчетах принимались следующие параметры:

n_e - концентрация электронов в плазме, $n_e = 3 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$,

τ - время существования сгустка плазмы, $\tau = 50 \text{ нс}$.

Ta-181 (E1)

На рис.2 приведены графики зависимостей эффективности возбуждения ядра Ta-181 по механизмам: неупругое рассеяние электронов (сплошная линия), обратная внутренняя электронная конверсия (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).

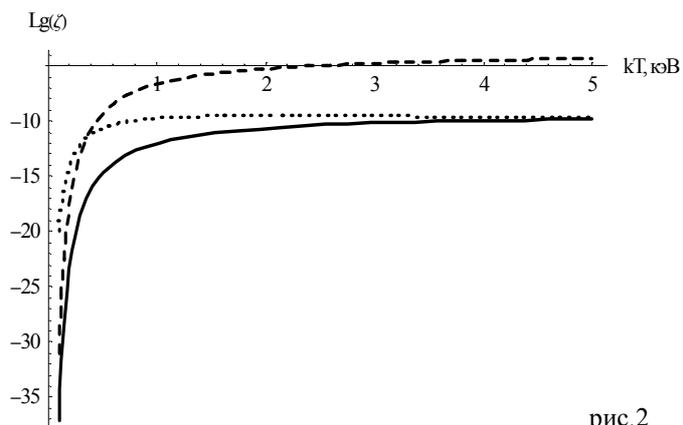
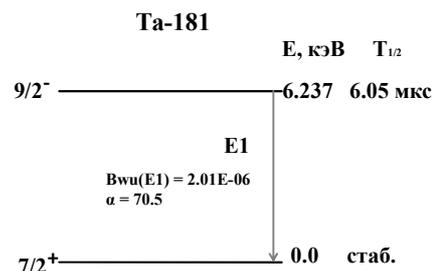


рис.2



Доминирующим процессом при сравнительно малых значениях kT ($< 0,3 \text{ кэВ}$) является возбуждение по механизму ОВЭК, при значениях $kT > 0,6 \text{ кэВ}$, главную роль играет процесс возбуждения собственным тепловым излучением плазмы.

Kr-79 (E1)

На рис.3 приведены графики зависимостей эффективности возбуждения ядра Kr-79 по механизмам: неупругое рассеяние электронов (сплошная линия), обратная внутренняя электронная конверсия (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).

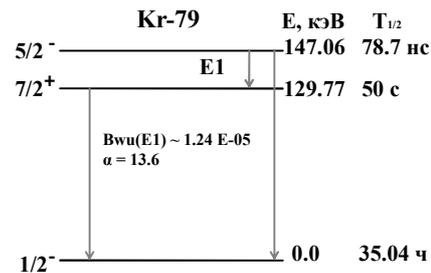
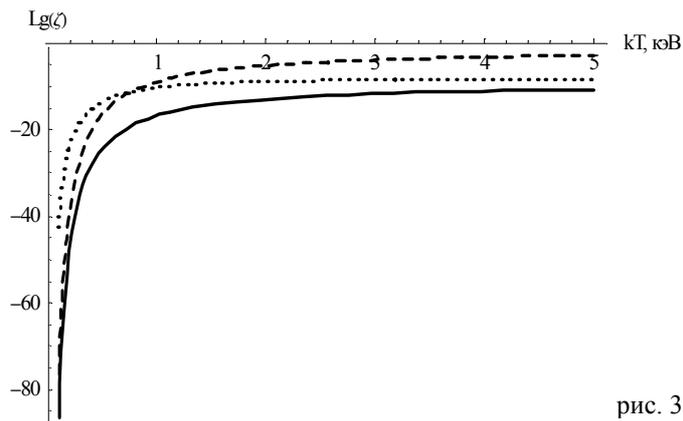


рис. 3

Доминирующим процессом при сравнительно малых значениях kT (< 1 кэВ) является возбуждение по механизму ОВЭК, при значениях kT > 1 кэВ, главную роль играет процесс возбуждения собственным тепловым излучением плазмы.

Hg-201 (M1)

На рис.4 приведены графики зависимостей эффективности возбуждения ядра Hg-201 по механизмам: неупругое рассеяние электронов (сплошная линия), обратная внутренняя электронная конверсия (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).

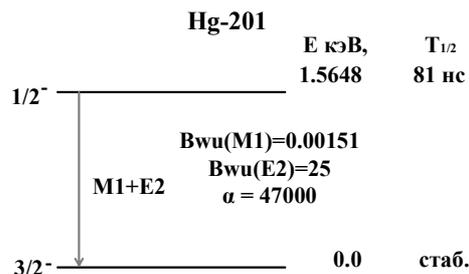
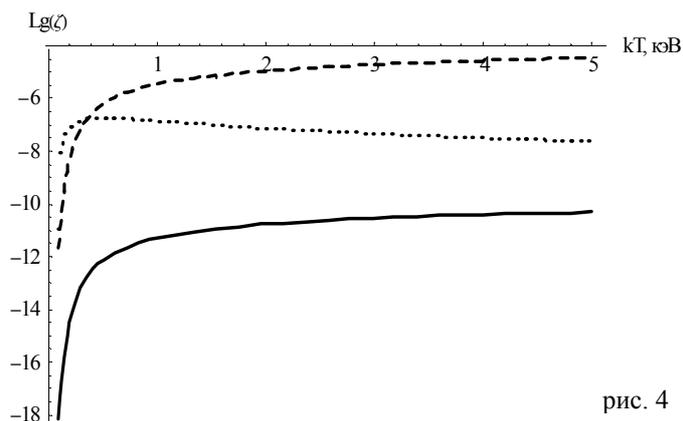


рис. 4

Доминирующим процессом при сравнительно малых значениях kT (< 0,3 кэВ) является возбуждение по механизму ОВЭК, при значениях kT > 0,5 кэВ, главную роль играет процесс возбуждения собственным тепловым излучением плазмы.

Rb-84 (M1)

На рис.5 приведены графики зависимостей эффективности возбуждения ядра Rb-84 по механизмам: неупругое рассеяние электронов (сплошная линия), обратная внутренняя электронная конверсия (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).

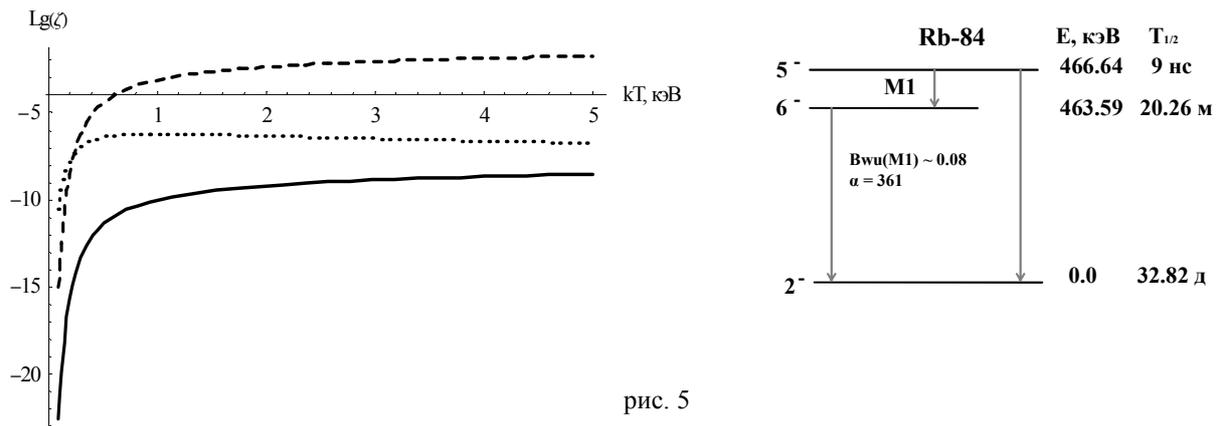


рис. 5

Доминирующим процессом при сравнительно малых значениях kT ($< 0,1$ кэВ) является возбуждение по механизму ОВЭК, при значениях $kT > 0,2$ кэВ, главную роль играет процесс возбуждения собственным тепловым излучением плазмы.

В Приложении 1 более подробно представлены данные сравнительного анализа эффективностей различных механизмов возбуждения (неупругого рассеяния электронов, обратной внутренней электронной конверсии, возбуждения собственным тепловым излучением плазмы).

Исследование различных механизмов возбуждения короткоживущего триггерного уровня ядра изомерного может быть использовано для исследования вопроса о возможности получения самоподдерживающейся реакции горения.

6. Самоподдерживающаяся реакция горения в зоне реакции

Уравнение стационарного равновесия в зоне реакции в упрощенном случае имеет вид:

$$\frac{dQ}{dt} = -\sigma(T^4 - T_0^4)S + \Delta E_{\text{ioniz}} + \Delta E_{\text{kin}} + n_e n_{\text{is}} V \langle \sigma v_e \rangle \Delta E = 0 \quad (27)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, T – температура излучения в зоне реакции, T_0 – температура наружной оболочки, окружающей зону реакции и воспринимающей, идущее из нее излучение, n_{is} – объемная концентрация метастабильных ядер, n_e – концентрация электронов в плазме, S и V – площадь поверхности и объем зоны реакции, $\langle \sigma v_e \rangle$ – транспортное сечение возбуждения короткоживущего триггерного уровня, ΔE – энергетический выход в результате антистоксова перехода.

В (27) первое слагаемое отвечает потерям сгустка плазмы на излучение (наиболее интенсивный канал энергетических потерь), второе слагаемое ΔE_{ioniz} – выражает энергетический баланс для процессов ионизации и рекомбинации (вклад данного слагаемого мал в сравнении с потерями на излучение), третье слагаемое ΔE_{kin} – выражает изменение кинетической энергии частиц в зоне реакции (вклад данного слагаемого также мал в сравнении с потерями на излучение), четвертое слагаемое отражает энергию поступающую в зону реакции в результате антистоксовых переходов изомерных ядер. Очевидно, что для распространения «волны горения» необходимо чтобы энергия, поступающую в зону реакции в единицу времени в результате антистоксовых переходов, была не меньше, чем сумма энергетических потерь за это время. В расчетах принималось, что основной вклад в энергетические потери в горячей плазме вносят потери на излучение.

Ядра с большим энергетическим выигрышем для антистоксова перехода ($E_{\text{tg}} \sim 1000$ кэВ, $E_{\text{tm}} \sim 1$ кэВ) практически всегда дают выход энергии больший, чем потери на излучение. В качестве примера ядер, для которых возможно возникновение «волны горения» рассмотрено модельное ядро ($A=200$, $Z=80$, переход $E1$, время жизни возбуждаемого уровня 10^{-10} с) с различными значениями коэффициента внутренней электронной конверсии. В Приложении 2 приведены графики высвобождаемой энергии и потерь на излучение от температуры плазмы для различных значений коэффициента внутренней электронной конверсии. Из графиков для каждого случая можно определить значение температуры плазмы, при котором возможна самоподдерживающаяся реакция. Предполагалось, что время существования реакции горения намного больше ($\sim 10^{-7}$ сек) времени жизни триггерного перехода.

Однако, подобрать реальное ядро с параметрами, удовлетворяющими необходимому условию возникновения «волны горения», рассмотренному выше, в настоящее время затруднительно. Данному вопросу посвящены многочисленные обзоры. Остановимся более детально на одном из них [20].

7. Возбуждение «волны горения» через механизм фотовозбуждения ядра.

Условия возникновения и поддержания реакции горения рассмотрены в работе [20]. Согласно допущениям данной работы, изомерные ядра были размещены в зоне реакции, представляющей собой полость черного тела. Излучение той спектральной составляющей черного тела, энергия которой совпадает с энергией $\hbar\omega_0$ тригерного перехода $m \rightarrow t$, возбуждает тригерное состояние t и приводит к спонтанному испусканию фотонов с энергией $E_t - E_g > \hbar\omega_0$ (см. рис.1). Высвобождаемая энергия, поглощается черным телом, что поддерживает его температуру необходимой для стимулирования новых тригерных переходов $m \rightarrow t$. В данной работе были получены следующие результаты:

1. выражение для вероятности антистоксова перехода:

$$W_{mtg} = \frac{\Gamma_{tg}\Gamma_{tm}}{4h\Gamma_t} \frac{1}{\left(\exp\left(\frac{\hbar\omega_0}{kT}\right)-1\right)} \quad (28)$$

где $\Gamma_t = \Gamma_{tm} + \Gamma_{tg} + \dots$ - полная ширина уровня t (с учетом всех возможных каналов распада).

2. выражение для среднего времени жизни долгоживущего метастабильного изомера (если $\Gamma_t = \Gamma_{tm} + \Gamma_{tg}$) в зоне реакции:

$$\Delta t_{mtg} = \frac{2}{\pi} (\tau_{tm} + \tau_{tg}) \left(\exp\left(\frac{\hbar\omega_0}{kT}\right) - 1 \right) \quad (29)$$

3. уравнение баланса в зоне реакции:

$$\frac{dQ}{dt} = -\sigma(T^4 - T_0^4)S + W_{mtg}\hbar\omega_{mg}n_{is} V \eta \quad (30)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, T - температура излучения в зоне реакции, T_0 - температура наружной оболочки, окружающей зону реакции и воспринимающей, идущее из нее излучение, n_{is} – объемная концентрация метастабильных ядер, S и V – площадь поверхности и объем зоны реакции, η - доля поглощаемых в зоне реакции фотонов. Условие стационарного равновесия имеет вид:

$$\frac{dQ}{dt} = 0 \quad (31)$$

Сделаем численную оценку для ядра Kr-79 (см. рис.3). Согласно данным [24] время жизни уровня 147.06 кэВ составляет 78.7 нс ($\alpha = 13.6$). Полная ширина тригерного уровня $\Gamma_t = 8.36 \times 10^{-12}$ кэВ, конверсионная ширина $\Gamma_{conv} = 7.78 \times 10^{-12}$ кэВ, радиационная ширина $\Gamma_{rad} = 5.72 \times 10^{-13}$ кэВ. Согласно данным [24] 2.1% радиационных распадов приходится на канал $t \rightarrow m$, следовательно:

$$\Gamma_{rad\ tm} = 1.2 \times 10^{-14} \text{ кэВ}$$

$$\Gamma_{rad\ tg} = 5.6 \times 10^{-13} \text{ кэВ}$$

На рис.6 Kr-79 для приведен график зависимости вероятности антистоксова перехода W_{mtg} от температуры плазмы T (логарифмический масштаб):

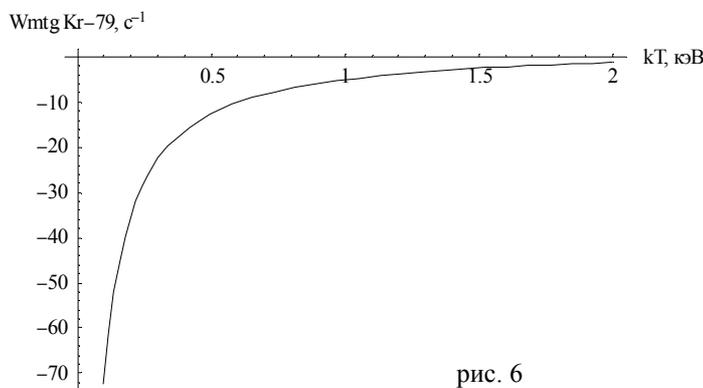
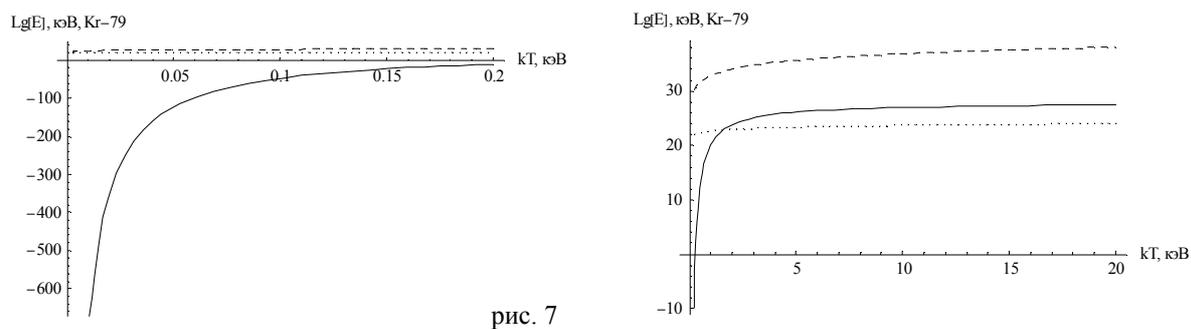


рис. 6

Тем не менее, несмотря на кажущийся энергетический выигрыш, зажечь «волну горения» в Kr-79 в современных условиях невозможно. Для расчетов использовались твердотельные концентрации изомерных ядер $n_{is} = 10^{22} \text{ см}^{-3}$ и электронов $n_e = 10^{23} \text{ см}^{-3}$, температура окружающей зону реакции оболочки принималась 0.0025 кэВ, доля поглощаемых в зоне реакции фотонов $\eta = 1$, объем зоны реакции $V = 10^{-1} \text{ см}^3$, время существования сгустка плазмы 50 нс. На рис.7 представлены (в логарифмическом масштабе) зависимости от температуры плазмы величины потерь на излучение (пунктирная линия) и величины потерь на кинетическую энергию частиц (в случае распространения «волны горения») - показано точечной линией. Также на рис.7 представлена зависимость энергии, выделяемой в результате антистоксова перехода, от температуры плазмы (показано сплошной линией). Из графиков очевидно, что во всем диапазоне значений температуры плазмы энергии, выделяемой в результате антистоксова перехода, не будет достаточно для компенсации потерь на излучение при данной температуре плазмы.



8. Заключение

Основными механизмами возбуждения ядерных переходов (перехода $m \rightarrow t$) в плазме являются: возбуждение собственным тепловым излучением плазмы и обратная внутренняя электронная конверсия. Первый механизм доминирует в горячей плазме ($kT > 1$ кэВ), второй при температурах плазмы $kT < 0.3$ кэВ. Возбуждение через неупругое рассеяние электронов может быть доминирующим процессом при малых значениях энергии перехода E_{mt} при условии малого времени жизни триггерного уровня.

В работе представлены аналитические выражения для сечений рассеяния нерелятивистских электронов на ядрах.

В работе для ряда реальных ядер (с переходами E1 и M1) представлены результаты расчетов для:

- сечений возбуждения ядер через неупругое рассеяние электронов (для борновского, нерелятивистского приближений, а также с использованием метода самосогласованного поля Хартри-Фока-Слейтера);
- транспортных сечений возбуждения ядер через неупругое рассеяние электронов (для борновского приближения);
- эффективностей различных механизмов возбуждения (неупругого рассеяния электронов, обратной внутренней электронной конверсии, возбуждения собственным тепловым излучением плазмы).

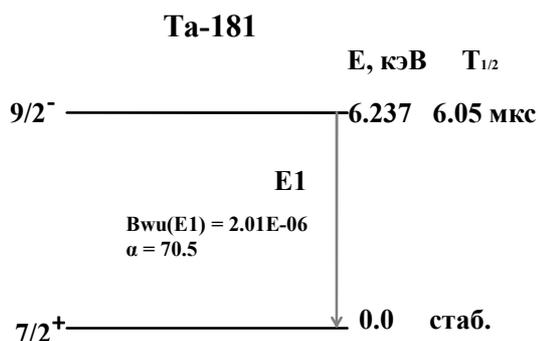
Создание «волны горения» за счет стимулирования в плазме антистоксовых переходов в настоящее время (с учетом возможных размеров плазменного сгустка) крайне затруднительно. Тем не менее, далеко не для всех ядер имеются экспериментальные данные о параметрах трехуровневой системы (например, для ядер Se-73 и Ir-186 нет экспериментальных данных о времени жизни триггерного уровня). Поэтому окончательный ответ о возможности создания самоподдерживающейся реакции горения могут дать только дальнейшие экспериментальные исследования параметров ядер с трехуровневой системой.

Автор выражает благодарность Е.В. Ткале, Р.В. Арутюняну и П.С. Кондратенко за неоценимую помощь при подготовке настоящей работы.

Список литературы

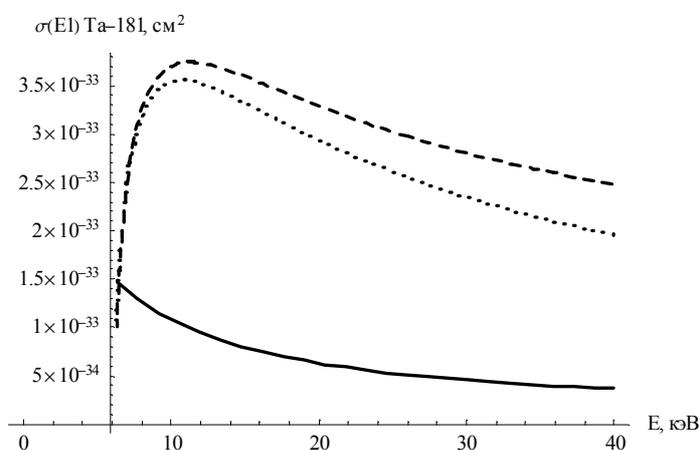
1. В. Г. Соловьев, Теория атомного ядра. Ядерные модели, М., 1981.
2. A. V. Andreev, R. V. Volkov, V. M. Gordienko, et al., JETP Lett. 69, 371 (1999).
3. A. V. Andreev, R. V. Volkov, and V. M. Gordienko, et al., Quantum Electron. 29, 191 (1999).
4. A. V. Andreev, R. V. Volkov, V. M. Gordienko et al., JETP 91 (2000), 1163;
5. Y. Izawa and C. Yamanaka, Phys. Lett. B 88, 59 (1979).
6. Y. Izawa, H. Otoni, and C. Yamanaka, in Laser Interaction and Related Plasma Phenomena, ed. by H. Schwartz and H. Hora (Plenum, New York, 1980), Vol. 5, p. 289.
7. R. V. Arutyunyan, V. A. Dolgov, S. A. Dorshakov, et al., Preprint No. IAE-4829/2 (Kurchatov Inst. of Atomic Energy, Moscow, 1989).
8. R. V. Arutyunyan, L. A. Bol'shov, V. D. Vikharev, et al., Sov. J. Nucl. Phys. 53, 23 (1991).
9. V. I. Gol'danskii and V. A. Namiot, Sov. J. Nucl. Phys. 33, 169 (1981).
10. V. I. Gol'danskii and V. A. Namiot, JETP Lett. 23, 451.
11. D. P. Grechukhin and A. A. Soldatov, Preprint No. IAE-2976 (Kurchatov Inst. of Atomic Energy, Moscow, 1978).
12. R. C. Haight and G. C. Baldwin, AIP Conf. Proc. 146, 58 (1986).
13. R. V. Arutyunyan and L. A. Bol'shov, Sov. Phys. Dokl. 34, 338 (1989).
14. Е.В. Бакланов, В.П. Чеботаев, Квантовая электроника, 3, 634 (1976).
15. Л.А. Ривлин, "Ядерный гамма-лазер: эволюция идеи", Квантовая электроника, т.37, №8, с.723-744, 2007.
16. E.V. Tkalya, Mechanisms for the Excitation of Atomic Nuclei in Hot Dense Plasma; Laser Physics, Vol. 14, No. 3, 2004, pp. 360-377.
17. Р.В. Арутюнян, Л.А. Большов, Препринт ИАЭ-4394. М., 1987.
18. Р.В. Арутюнян, Л.А. Большов, Е.В. Ткаля - Письма в ЖЭТФ, 1987, т. 46, вып. 9, с 354.
19. Р.В. Арутюнян, Л.А. Большов, "О механизмах стимулирования внутриядерных переходов в горячей плазме", доклады АН СССР, т. 305, №4, 1989 г.
20. Л.А. Ривлин «Самоподдерживающаяся экзотермическая реакция антистоксовых гамма-переходов, ч.1», Квантовая электроника, 30, №6 (2000), стр. 551-554.
21. K. Alder, A. Bohr, T. Huus, B. Mottelson, and A. Winther. Rev. Mod. Phys. 28 (1956), 432.
22. И. Айзенберг, В. Грайнер, Механизмы возбуждения ядра, М.: Атомиздат, 1973.
23. D. P. Grechukhin and A. A. Soldatov, Preprint No. IAE-3174 (Kurchatov Inst. of Atomic Energy, Moscow, 1979).
24. <http://www.nndc.bnl.gov>.

Та-181 (E1)

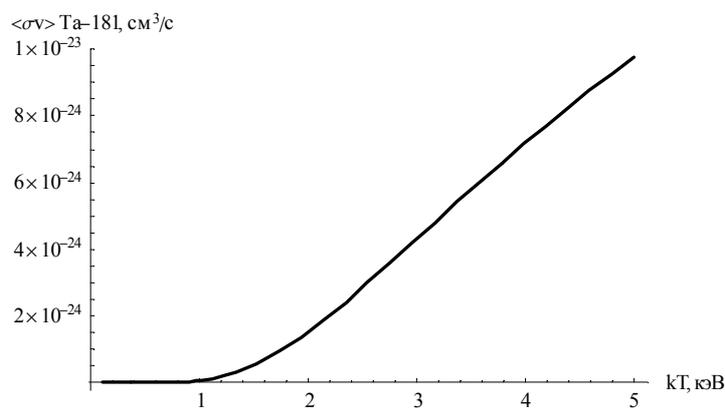


Γ _{rad}	1.52 10 ⁻¹⁵ кэВ
Bwu (E1)	2.01 10 ⁻⁶
α	70.5

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).



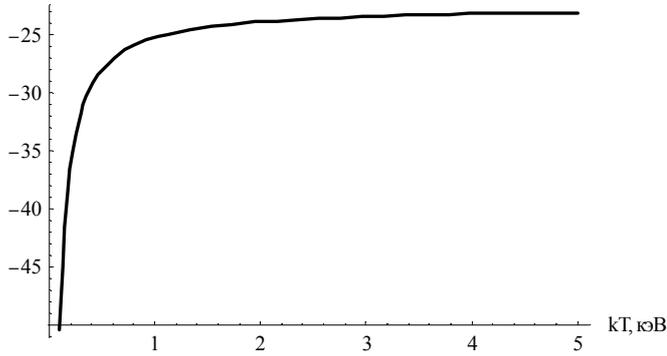
Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

Сечение σ(E1)		⟨σv⟩	
Энергия, кэВ	см ²	kT, кэВ	см ³ /с
1	-	0,3	2,26E-32
2	-	0,4	4,69E-30
3	-	0,5	1,14E-28
4	-	0,6	9,56E-28
5	-	0,7	4,35E-27
6	-	0,8	1,35E-26
7	2,48E-33	0,9	3,26E-26
8	3,25E-33	1	6,59E-26
9	3,57E-33	1,1	1,17E-25
10	3,7E-33	1,2	1,89E-25
11	3,74E-33	1,3	2,83E-25
12	3,73E-33	1,4	4E-25
13	3,7E-33	1,5	5,4E-25
14	3,65E-33	1,6	7,02E-25
15	3,6E-33	1,7	8,84E-25
16	3,53E-33	1,8	1,08E-24
17	3,47E-33	1,9	1,3E-24
18	3,41E-33	2	1,54E-24
19	3,35E-33	2,1	1,78E-24
20	3,29E-33	2,2	2,04E-24
21	3,23E-33	2,3	2,31E-24
22	3,17E-33	2,4	2,58E-24
23	3,12E-33	2,5	2,86E-24
24	3,07E-33	2,6	3,15E-24
25	3,02E-33	2,7	3,44E-24
26	2,97E-33	2,8	3,74E-24
27	2,93E-33	2,9	4,03E-24
28	2,88E-33	3	4,33E-24
29	2,84E-33	3,1	4,63E-24
30	2,8E-33	3,2	4,92E-24
31	2,76E-33	3,3	5,22E-24
32	2,73E-33	3,4	5,51E-24
33	2,69E-33	3,5	5,8E-24
34	2,66E-33	3,6	6,09E-24
35	2,63E-33	3,7	6,38E-24
36	2,6E-33	3,8	6,66E-24
37	2,57E-33	3,9	6,94E-24
38	2,54E-33	4	7,22E-24
39	2,51E-33	4,1	7,49E-24
40	2,48E-33	4,2	7,76E-24
		4,3	8,03E-24
		4,4	8,29E-24
		4,5	8,55E-24
		4,6	8,8E-24
		4,7	9,05E-24
		4,8	9,29E-24
		4,9	9,54E-24
		5	9,77E-24

Та-181 (E1)

Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).

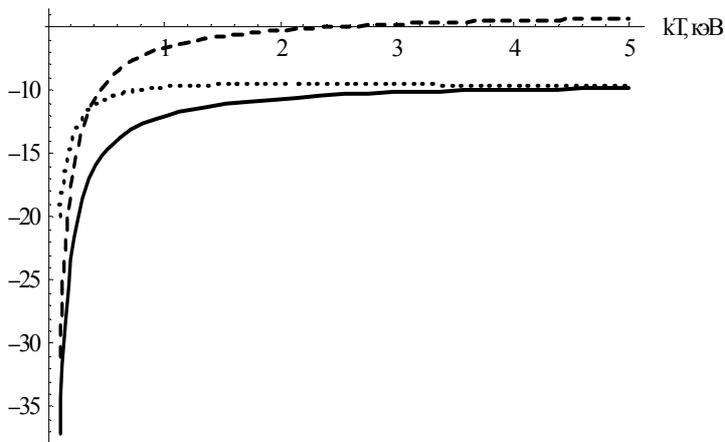
Lg< σv > Та-181, см³/с



2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).

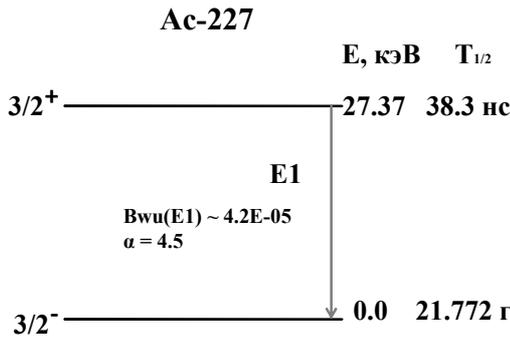
Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20}$ см⁻³,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50$ нс.

Lg(ζ)



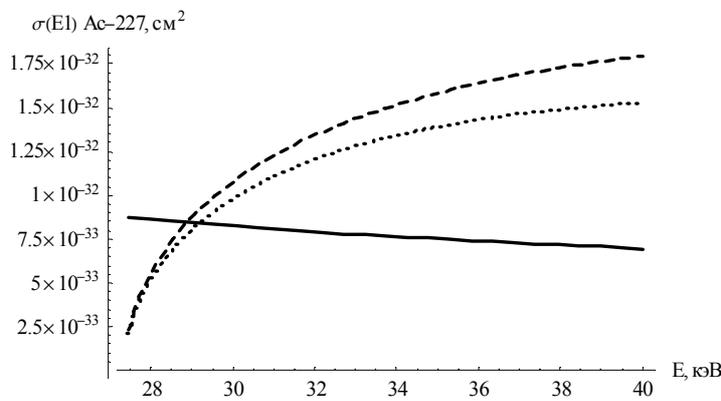
kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	9,36E-14	7,52E-13	3,39E-19
0,4	1,69E-11	6,57E-12	7,04E-17
0,5	3,83E-10	2,24E-11	1,71E-15
0,6	3,07E-09	4,81E-11	1,43E-14
0,7	1,35E-08	8,02E-11	6,52E-14
0,8	4,13E-08	1,15E-10	2,03E-13
0,9	9,82E-08	1,48E-10	4,89E-13
1	1,97E-07	1,79E-10	9,89E-13
1,1	3,47E-07	2,06E-10	1,76E-12
1,2	5,58E-07	2,29E-10	2,84E-12
1,3	8,34E-07	2,48E-10	4,25E-12
1,4	1,18E-06	2,63E-10	6E-12
1,5	1,59E-06	2,75E-10	8,1E-12
1,6	2,08E-06	2,85E-10	1,05E-11
1,7	2,63E-06	2,91E-10	1,33E-11
1,8	3,24E-06	2,96E-10	1,63E-11
1,9	3,91E-06	2,99E-10	1,95E-11
2	4,64E-06	3,01E-10	2,3E-11
2,1	5,43E-06	3,01E-10	2,67E-11
2,2	6,26E-06	3E-10	3,06E-11
2,3	7,14E-06	2,99E-10	3,46E-11
2,4	8,06E-06	2,97E-10	3,87E-11
2,5	9,03E-06	2,94E-10	4,3E-11
2,6	1E-05	2,91E-10	4,73E-11
2,7	1,11E-05	2,87E-10	5,16E-11
2,8	1,21E-05	2,83E-10	5,6E-11
2,9	1,32E-05	2,79E-10	6,05E-11
3	1,43E-05	2,75E-10	6,49E-11
3,1	1,55E-05	2,71E-10	6,94E-11
3,2	1,67E-05	2,67E-10	7,38E-11
3,3	1,79E-05	2,62E-10	7,83E-11
3,4	1,91E-05	2,58E-10	8,27E-11
3,5	2,03E-05	2,53E-10	8,7E-11
3,6	2,16E-05	2,49E-10	9,14E-11
3,7	2,28E-05	2,45E-10	9,57E-11
3,8	2,41E-05	2,4E-10	9,99E-11
3,9	2,54E-05	2,36E-10	1,04E-10
4	2,67E-05	2,32E-10	1,08E-10
4,1	2,81E-05	2,28E-10	1,12E-10
4,2	2,94E-05	2,24E-10	1,16E-10
4,3	3,07E-05	2,2E-10	1,2E-10
4,4	3,21E-05	2,16E-10	1,24E-10
4,5	3,35E-05	2,12E-10	1,28E-10
4,6	3,49E-05	2,08E-10	1,32E-10
4,7	3,62E-05	2,04E-10	1,36E-10
4,8	3,76E-05	2,01E-10	1,39E-10
4,9	3,9E-05	1,97E-10	1,43E-10
5	4,05E-05	1,94E-10	1,47E-10

Ac-227 (E1)

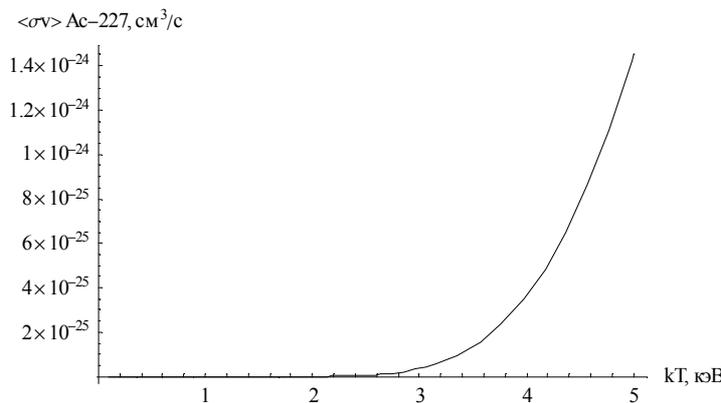


Γ _{rad}	3.12 * 10 ⁻¹² кэВ
Bwu (E1)	4.2 * 10 ⁻⁵
α	4.5

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).

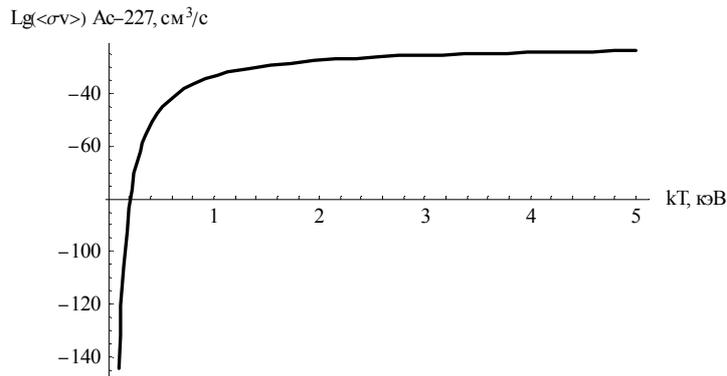


Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

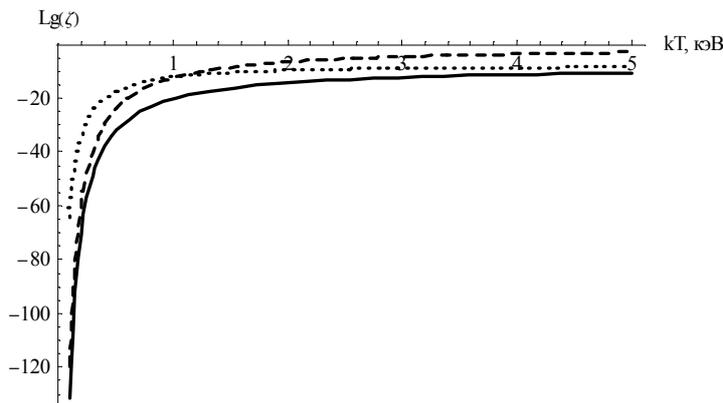
Сечение $\sigma(E1)$		$\langle \sigma v \rangle$	
Энергия, кэВ	см ²	кТ, кэВ	см ³ /с
1	-	0,3	-
2	-	0,4	-
3	-	0,5	-
4	-	0,6	2,51E-42
5	-	0,7	1,99E-39
6	-	0,8	2,95E-37
7	-	0,9	1,43E-35
8	-	1	3,19E-34
9	-	1,1	4,04E-33
10	-	1,2	3,34E-32
11	-	1,3	1,99E-31
12	-	1,4	9,2E-31
13	-	1,5	3,46E-30
14	-	1,6	1,1E-29
15	-	1,7	3,07E-29
16	-	1,8	7,6E-29
17	-	1,9	1,71E-28
18	-	2	3,56E-28
19	-	2,1	6,89E-28
20	-	2,2	1,26E-27
21	-	2,3	2,18E-27
22	-	2,4	3,6E-27
23	-	2,5	5,71E-27
24	-	2,6	8,75E-27
25	-	2,7	1,3E-26
26	-	2,8	1,87E-26
27	-	2,9	2,64E-26
28	5,64E-33	3	3,62E-26
29	8,77E-33	3,1	4,88E-26
30	1,08E-32	3,2	6,45E-26
31	1,23E-32	3,3	8,39E-26
32	1,34E-32	3,4	1,07E-25
33	1,44E-32	3,5	1,36E-25
34	1,52E-32	3,6	1,69E-25
35	1,58E-32	3,7	2,08E-25
36	1,64E-32	3,8	2,53E-25
37	1,69E-32	3,9	3,05E-25
38	1,73E-32	4	3,64E-25
39	1,76E-32	4,1	4,31E-25
40	1,8E-32	4,2	5,06E-25
		4,3	5,9E-25
		4,4	6,83E-25
		4,5	7,85E-25
		4,6	8,97E-25
		4,7	1,02E-24
		4,8	1,15E-24
		4,9	1,3E-24
		5	1,45E-24

Ac-227 (E1)

Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).

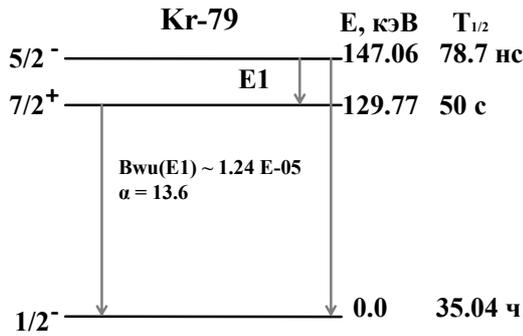


2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).
 Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ нс}$.



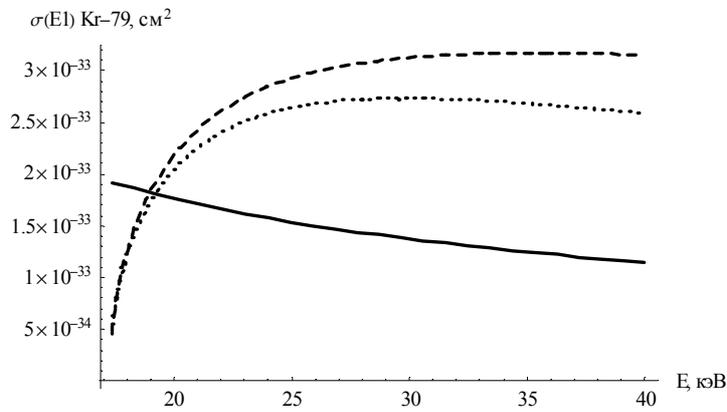
kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	-	-	-
0,4	-	2,86E-21	-
0,5	2,78E-25	1,92E-18	3,24E-33
0,6	2,55E-21	1,4E-16	3,77E-29
0,7	1,72E-18	2,88E-15	2,99E-26
0,8	2,28E-16	2,72E-14	4,43E-24
0,9	1,02E-14	1,52E-13	2,15E-22
1	2,14E-13	5,95E-13	4,79E-21
1,1	2,58E-12	1,79E-12	6,05E-20
1,2	2,05E-11	4,43E-12	5E-19
1,3	1,18E-10	9,44E-12	2,99E-18
1,4	5,33E-10	1,79E-11	1,38E-17
1,5	1,96E-09	3,1E-11	5,19E-17
1,6	6,14E-09	4,98E-11	1,65E-16
1,7	1,68E-08	7,52E-11	4,6E-16
1,8	4,11E-08	1,08E-10	1,14E-15
1,9	9,14E-08	1,48E-10	2,57E-15
2	1,88E-07	1,97E-10	5,34E-15
2,1	3,6E-07	2,54E-10	1,03E-14
2,2	6,52E-07	3,18E-10	1,89E-14
2,3	1,12E-06	3,9E-10	3,26E-14
2,4	1,84E-06	4,69E-10	5,39E-14
2,5	2,9E-06	5,54E-10	8,56E-14
2,6	4,42E-06	6,45E-10	1,31E-13
2,7	6,53E-06	7,41E-10	1,95E-13
2,8	9,37E-06	8,41E-10	2,81E-13
2,9	1,31E-05	9,44E-10	3,95E-13
3	1,8E-05	1,05E-09	5,44E-13
3,1	2,41E-05	1,16E-09	7,32E-13
3,2	3,18E-05	1,27E-09	9,68E-13
3,3	4,12E-05	1,38E-09	1,26E-12
3,4	5,26E-05	1,49E-09	1,61E-12
3,5	6,62E-05	1,6E-09	2,03E-12
3,6	8,23E-05	1,71E-09	2,53E-12
3,7	0,000101	1,82E-09	3,12E-12
3,8	0,000123	1,92E-09	3,79E-12
3,9	0,000148	2,03E-09	4,57E-12
4	0,000176	2,13E-09	5,46E-12
4,1	0,000208	2,23E-09	6,47E-12
4,2	0,000244	2,33E-09	7,59E-12
4,3	0,000284	2,43E-09	8,85E-12
4,4	0,000328	2,52E-09	1,02E-11
4,5	0,000377	2,61E-09	1,18E-11
4,6	0,000431	2,7E-09	1,35E-11
4,7	0,000489	2,79E-09	1,53E-11
4,8	0,000552	2,87E-09	1,73E-11
4,9	0,000621	2,95E-09	1,94E-11
5	0,000694	3,03E-09	2,18E-11

Kr-79 (E1)

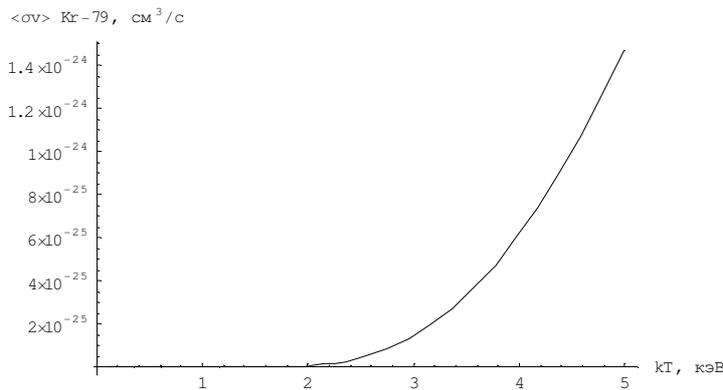


Γ_{rad}	$5.72 \cdot 10^{-13}$ кэВ
$B_{\text{wu}}(E1)$	$1.24 \cdot 10^{-5}$
α	13.6

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).

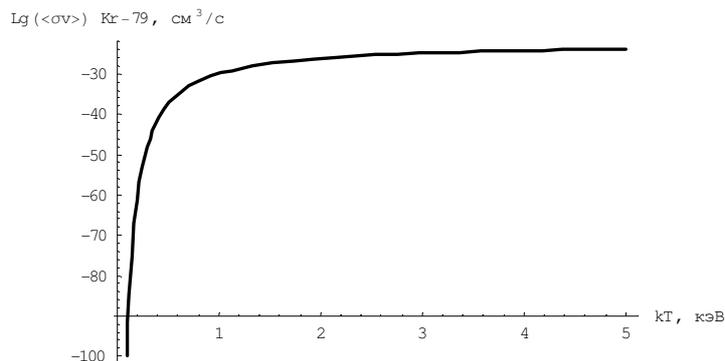


Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

Сечение $\sigma(E1)$		$\langle\sigma v\rangle$	
Энергия, кэВ	см^2	кТ, кэВ	$\text{см}^3/\text{с}$
1	-	0,3	-
2	-	0,4	-
3	-	0,5	2,6E-38
4	-	0,6	9,46E-36
5	-	0,7	6,34E-34
6	-	0,8	1,48E-32
7	-	0,9	1,71E-31
8	-	1	1,21E-30
9	-	1,1	5,98E-30
10	-	1,2	2,27E-29
11	-	1,3	6,99E-29
12	-	1,4	1,83E-28
13	-	1,5	4,23E-28
14	-	1,6	8,78E-28
15	-	1,7	1,67E-27
16	-	1,8	2,97E-27
17	-	1,9	4,95E-27
18	1,25E-33	2	7,85E-27
19	1,83E-33	2,1	1,19E-26
20	2,18E-33	2,2	1,74E-26
21	2,43E-33	2,3	2,46E-26
22	2,61E-33	2,4	3,37E-26
23	2,74E-33	2,5	4,51E-26
24	2,84E-33	2,6	5,9E-26
25	2,92E-33	2,7	7,57E-26
26	2,99E-33	2,8	9,54E-26
27	3,04E-33	2,9	1,18E-25
28	3,07E-33	3	1,45E-25
29	3,1E-33	3,1	1,74E-25
30	3,12E-33	3,2	2,08E-25
31	3,14E-33	3,3	2,45E-25
32	3,15E-33	3,4	2,87E-25
33	3,16E-33	3,5	3,32E-25
34	3,17E-33	3,6	3,81E-25
35	3,17E-33	3,7	4,34E-25
36	3,17E-33	3,8	4,92E-25
37	3,17E-33	3,9	5,53E-25
38	3,16E-33	4	6,18E-25
39	3,16E-33	4,1	6,87E-25
40	3,15E-33	4,2	7,61E-25
		4,3	8,38E-25
		4,4	9,18E-25
		4,5	1E-24
		4,6	1,09E-24
		4,7	1,18E-24
		4,8	1,28E-24
		4,9	1,37E-24
		5	1,48E-24

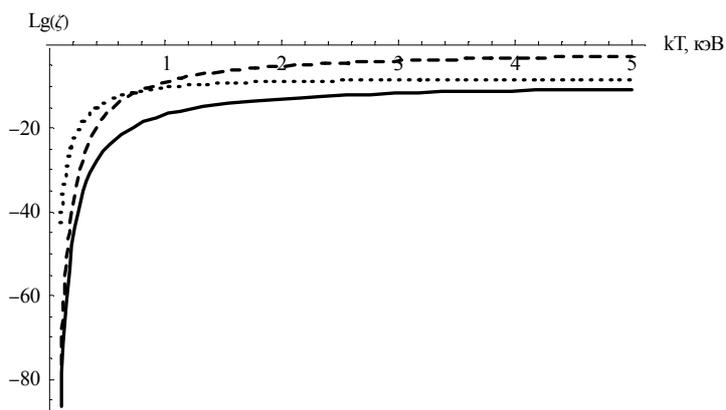
Kr-79 (E1)

Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).



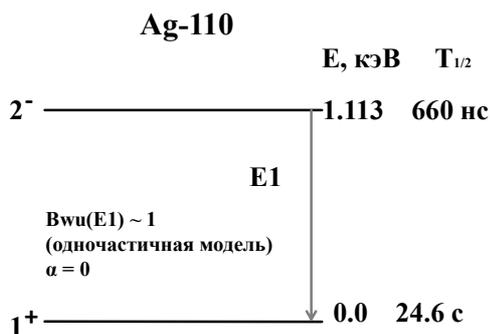
2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).

Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ нс}$.



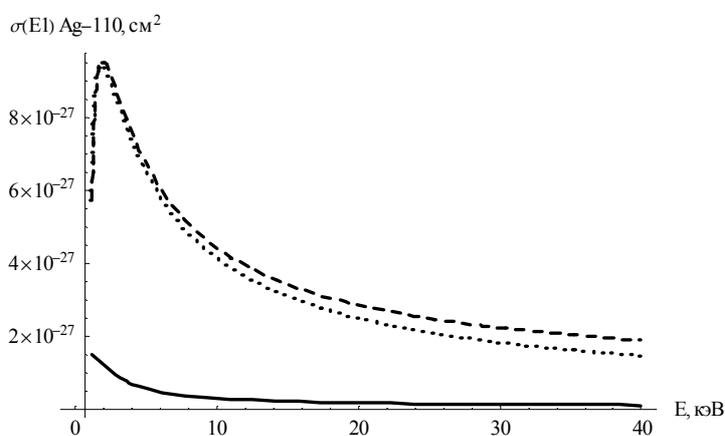
kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	-	-	-
0,4	7,69E-22	4,73E-16	-
0,5	4,37E-18	2,55E-14	3,9E-25
0,6	1,39E-15	3,47E-13	1,42E-22
0,7	8,54E-14	2,15E-12	9,51E-21
0,8	1,87E-12	8,26E-12	2,22E-19
0,9	2,07E-11	2,3E-11	2,57E-18
1	1,41E-10	5,13E-11	1,81E-17
1,1	6,79E-10	9,76E-11	8,98E-17
1,2	2,52E-09	1,65E-10	3,4E-16
1,3	7,62E-09	2,54E-10	1,05E-15
1,4	1,97E-08	3,66E-10	2,75E-15
1,5	4,49E-08	4,98E-10	6,34E-15
1,6	9,23E-08	6,48E-10	1,32E-14
1,7	1,74E-07	8,14E-10	2,51E-14
1,8	3,07E-07	9,91E-10	4,45E-14
1,9	5,09E-07	1,18E-09	7,43E-14
2	8,02E-07	1,37E-09	1,18E-13
2,1	1,21E-06	1,56E-09	1,79E-13
2,2	1,76E-06	1,76E-09	2,61E-13
2,3	2,48E-06	1,95E-09	3,68E-13
2,4	3,39E-06	2,14E-09	5,06E-13
2,5	4,52E-06	2,32E-09	6,77E-13
2,6	5,9E-06	2,5E-09	8,86E-13
2,7	7,55E-06	2,67E-09	1,14E-12
2,8	9,49E-06	2,84E-09	1,43E-12
2,9	1,18E-05	2,99E-09	1,77E-12
3	1,43E-05	3,14E-09	2,17E-12
3,1	1,73E-05	3,28E-09	2,62E-12
3,2	2,06E-05	3,42E-09	3,12E-12
3,3	2,43E-05	3,54E-09	3,68E-12
3,4	2,83E-05	3,66E-09	4,3E-12
3,5	3,28E-05	3,77E-09	4,98E-12
3,6	3,77E-05	3,87E-09	5,72E-12
3,7	4,3E-05	3,96E-09	6,51E-12
3,8	4,86E-05	4,04E-09	7,37E-12
3,9	5,47E-05	4,12E-09	8,29E-12
4	6,12E-05	4,2E-09	9,27E-12
4,1	6,81E-05	4,26E-09	1,03E-11
4,2	7,54E-05	4,32E-09	1,14E-11
4,3	8,32E-05	4,38E-09	1,26E-11
4,4	9,13E-05	4,43E-09	1,38E-11
4,5	9,98E-05	4,47E-09	1,5E-11
4,6	0,000109	4,51E-09	1,64E-11
4,7	0,000118	4,55E-09	1,77E-11
4,8	0,000128	4,58E-09	1,91E-11
4,9	0,000138	4,6E-09	2,06E-11
5	0,000148	4,63E-09	2,21E-11

Ag-110 (E1)

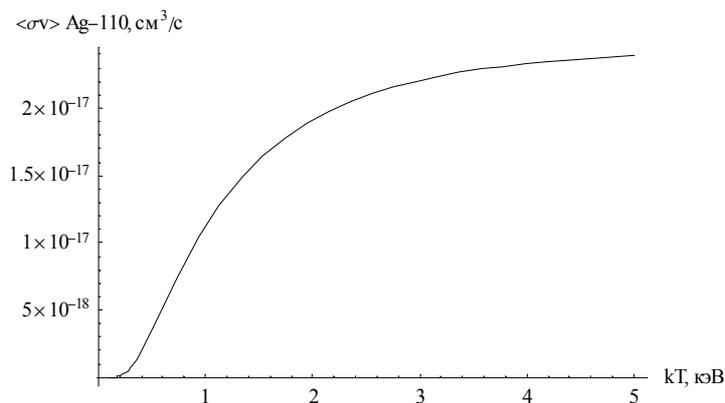


Γ_{rad}	$9.97 \cdot 10^{-13}$ кэВ
$B_{wu}(E1)$	1(одночастичная)
α	0 (нет данных)

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).



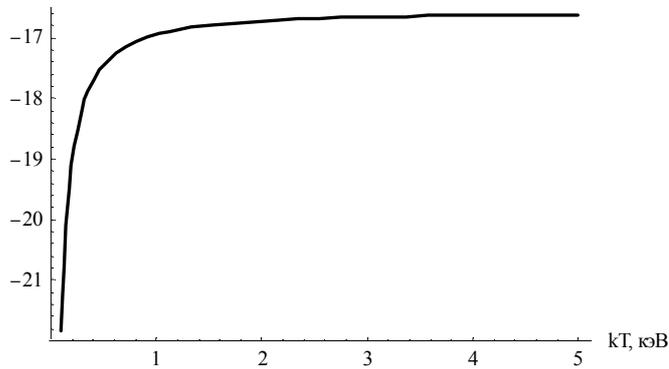
Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

Сечение $\sigma(E1)$		$\langle \sigma v \rangle$	
Энергия, кэВ	см ²	kT, кэВ	см ³ /с
1	-	0,3	6,95E-19
2	9,56E-27	0,4	1,93E-18
3	8,62E-27	0,5	3,53E-18
4	7,57E-27	0,6	5,25E-18
5	6,73E-27	0,7	6,93E-18
6	6,06E-27	0,8	8,52E-18
7	5,53E-27	0,9	9,98E-18
8	5,1E-27	1	1,13E-17
9	4,74E-27	1,1	1,25E-17
10	4,44E-27	1,2	1,36E-17
11	4,18E-27	1,3	1,45E-17
12	3,95E-27	1,4	1,54E-17
13	3,76E-27	1,5	1,62E-17
14	3,59E-27	1,6	1,69E-17
15	3,43E-27	1,7	1,75E-17
16	3,29E-27	1,8	1,81E-17
17	3,17E-27	1,9	1,86E-17
18	3,06E-27	2	1,91E-17
19	2,96E-27	2,1	1,95E-17
20	2,86E-27	2,2	1,99E-17
21	2,78E-27	2,3	2,03E-17
22	2,7E-27	2,4	2,06E-17
23	2,62E-27	2,5	2,09E-17
24	2,56E-27	2,6	2,12E-17
25	2,49E-27	2,7	2,14E-17
26	2,43E-27	2,8	2,16E-17
27	2,38E-27	2,9	2,18E-17
28	2,33E-27	3	2,2E-17
29	2,28E-27	3,1	2,22E-17
30	2,23E-27	3,2	2,24E-17
31	2,19E-27	3,3	2,25E-17
32	2,15E-27	3,4	2,27E-17
33	2,11E-27	3,5	2,28E-17
34	2,07E-27	3,6	2,29E-17
35	2,04E-27	3,7	2,3E-17
36	2,01E-27	3,8	2,31E-17
37	1,98E-27	3,9	2,32E-17
38	1,95E-27	4	2,33E-17
39	1,92E-27	4,1	2,34E-17
40	1,89E-27	4,2	2,35E-17
		4,3	2,35E-17
		4,4	2,36E-17
		4,5	2,37E-17
		4,6	2,37E-17
		4,7	2,38E-17
		4,8	2,38E-17
		4,9	2,39E-17
		5	2,39E-17

Ag-110 (E1)

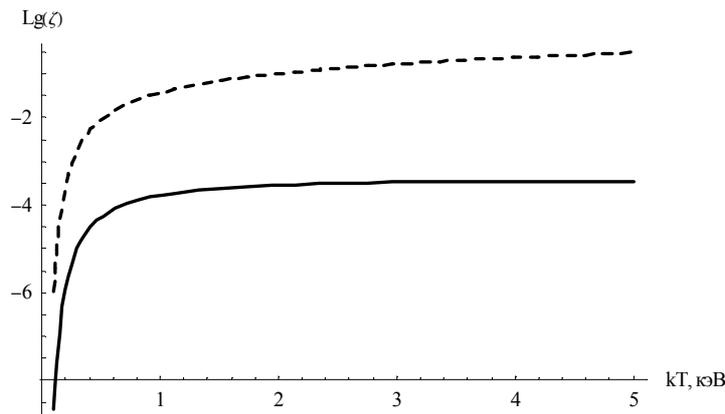
Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).

Lg(σv) Ag-110, см³/с



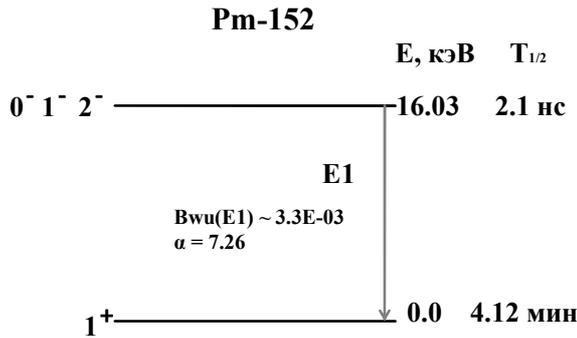
2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).

Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ нс}$.



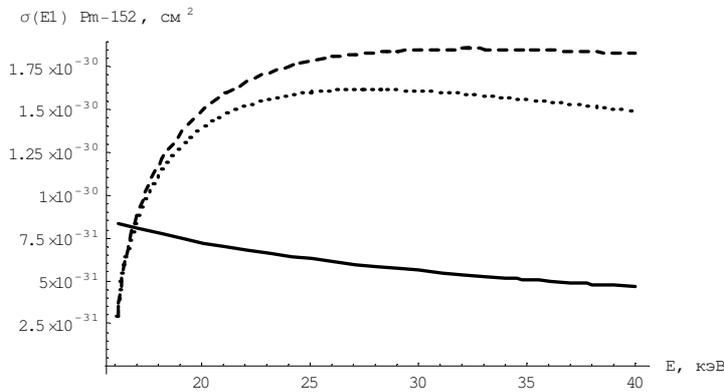
kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	0,006811	-	1,04E-05
0,4	0,017905	-	2,9E-05
0,5	0,03285	-	5,29E-05
0,6	0,050342	-	7,87E-05
0,7	0,06953	-	0,000104
0,8	0,089881	-	0,000128
0,9	0,111054	-	0,00015
1	0,132827	-	0,00017
1,1	0,155049	-	0,000188
1,2	0,177616	-	0,000204
1,3	0,200451	-	0,000218
1,4	0,223501	-	0,000231
1,5	0,246724	-	0,000243
1,6	0,270089	-	0,000253
1,7	0,293571	-	0,000263
1,8	0,317152	-	0,000271
1,9	0,340816	-	0,000279
2	0,364552	-	0,000286
2,1	0,388348	-	0,000293
2,2	0,412198	-	0,000299
2,3	0,436093	-	0,000304
2,4	0,460029	-	0,000309
2,5	0,484001	-	0,000313
2,6	0,508005	-	0,000317
2,7	0,532036	-	0,000321
2,8	0,556093	-	0,000325
2,9	0,580173	-	0,000328
3	0,604273	-	0,000331
3,1	0,628391	-	0,000333
3,2	0,652526	-	0,000336
3,3	0,676676	-	0,000338
3,4	0,70084	-	0,00034
3,5	0,725017	-	0,000342
3,6	0,749205	-	0,000344
3,7	0,773404	-	0,000346
3,8	0,797613	-	0,000347
3,9	0,821831	-	0,000349
4	0,846057	-	0,00035
4,1	0,870292	-	0,000351
4,2	0,894533	-	0,000352
4,3	0,918781	-	0,000353
4,4	0,943036	-	0,000354
4,5	0,967296	-	0,000355
4,6	0,991562	-	0,000356
4,7	1,015833	-	0,000357
4,8	1,040109	-	0,000357
4,9	1,064389	-	0,000358
5	1,088674	-	0,000358

Pm-152 (E1)

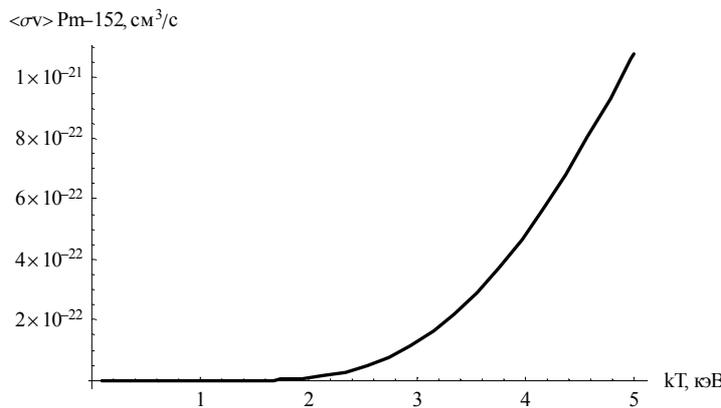


Γ_{rad}	$3.79 \cdot 10^{-11}$ кэВ
$B_{\text{wu}}(E1)$	$3.3 \cdot 10^{-3}$
α	7.26

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).

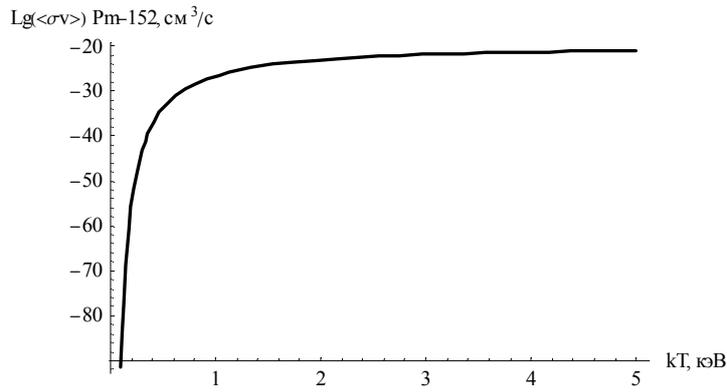


Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

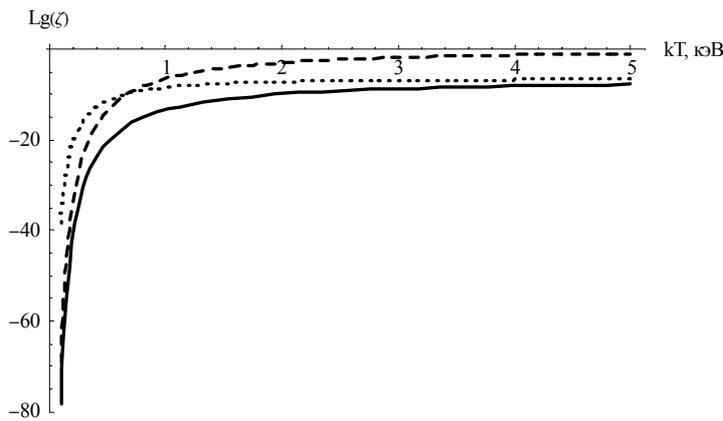
Сечение $\sigma(E1)$		$\langle\sigma v\rangle$	
Энергия, кэВ	см^2	кТ, кэВ	$\text{см}^3/\text{с}$
1	-	0,3	-
2	-	0,4	-
3	-	0,5	1,93E-34
4	-	0,6	4,57E-32
5	-	0,7	2,25E-30
6	-	0,8	4,17E-29
7	-	0,9	4,03E-28
8	-	1	2,47E-27
9	-	1,1	1,09E-26
10	-	1,2	3,73E-26
11	-	1,3	1,06E-25
12	-	1,4	2,59E-25
13	-	1,5	5,62E-25
14	-	1,6	1,11E-24
15	-	1,7	2,01E-24
16	-	1,8	3,42E-24
17	8,74E-31	1,9	5,5E-24
18	1,17E-30	2	8,43E-24
19	1,36E-30	2,1	1,24E-23
20	1,49E-30	2,2	1,76E-23
21	1,59E-30	2,3	2,43E-23
22	1,66E-30	2,4	3,25E-23
23	1,71E-30	2,5	4,26E-23
24	1,75E-30	2,6	5,47E-23
25	1,78E-30	2,7	6,89E-23
26	1,81E-30	2,8	8,53E-23
27	1,82E-30	2,9	1,04E-22
28	1,83E-30	3	1,25E-22
29	1,84E-30	3,1	1,49E-22
30	1,85E-30	3,2	1,76E-22
31	1,85E-30	3,3	2,05E-22
32	1,85E-30	3,4	2,36E-22
33	1,85E-30	3,5	2,71E-22
34	1,85E-30	3,6	3,08E-22
35	1,85E-30	3,7	3,47E-22
36	1,85E-30	3,8	3,9E-22
37	1,84E-30	3,9	4,34E-22
38	1,84E-30	4	4,82E-22
39	1,83E-30	4,1	5,31E-22
40	1,83E-30	4,2	5,84E-22
		4,3	6,38E-22
		4,4	6,95E-22
		4,5	7,54E-22
		4,6	8,15E-22
		4,7	8,78E-22
		4,8	9,43E-22
		4,9	1,01E-21
		5	1,08E-21

Pm-152 (E1)

Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).

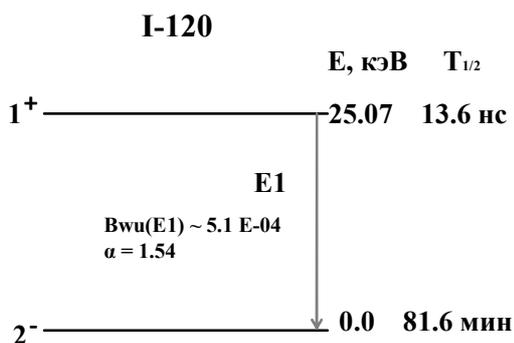


2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).
 Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ нс}$.



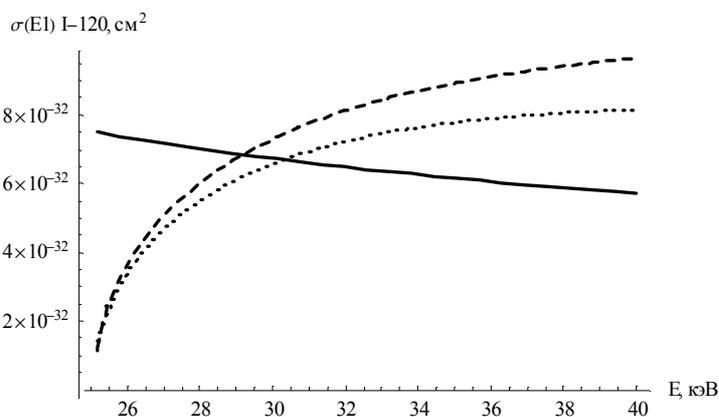
kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	-	1,57E-16	-
0,4	7,85E-18	8,1E-14	-
0,5	2,38E-14	3,19E-12	2,9E-21
0,6	4,97E-12	3,51E-11	6,85E-19
0,7	2,26E-10	1,88E-10	3,37E-17
0,8	3,95E-09	6,42E-10	6,25E-16
0,9	3,66E-08	1,64E-09	6,04E-15
1	2,18E-07	3,41E-09	3,7E-14
1,1	9,34E-07	6,12E-09	1,63E-13
1,2	3,15E-06	9,86E-09	5,6E-13
1,3	8,79E-06	1,46E-08	1,59E-12
1,4	2,12E-05	2,03E-08	3,89E-12
1,5	4,55E-05	2,68E-08	8,44E-12
1,6	8,88E-05	3,4E-08	1,66E-11
1,7	0,00016	4,17E-08	3,02E-11
1,8	0,00027	4,97E-08	5,13E-11
1,9	0,000432	5,8E-08	8,25E-11
2	0,000658	6,63E-08	1,26E-10
2,1	0,000965	7,46E-08	1,86E-10
2,2	0,001365	8,27E-08	2,64E-10
2,3	0,001874	9,07E-08	3,64E-10
2,4	0,002507	9,84E-08	4,88E-10
2,5	0,003276	1,06E-07	6,39E-10
2,6	0,004194	1,13E-07	8,2E-10
2,7	0,005272	1,19E-07	1,03E-09
2,8	0,006522	1,26E-07	1,28E-09
2,9	0,007951	1,32E-07	1,56E-09
3	0,009567	1,37E-07	1,88E-09
3,1	0,011377	1,42E-07	2,24E-09
3,2	0,013386	1,47E-07	2,63E-09
3,3	0,015597	1,52E-07	3,07E-09
3,4	0,018014	1,56E-07	3,54E-09
3,5	0,020639	1,6E-07	4,06E-09
3,6	0,023472	1,63E-07	4,61E-09
3,7	0,026513	1,66E-07	5,21E-09
3,8	0,029763	1,69E-07	5,84E-09
3,9	0,033219	1,72E-07	6,52E-09
4	0,036881	1,74E-07	7,23E-09
4,1	0,040745	1,76E-07	7,97E-09
4,2	0,04481	1,78E-07	8,75E-09
4,3	0,049072	1,79E-07	9,57E-09
4,4	0,053527	1,81E-07	1,04E-08
4,5	0,058173	1,82E-07	1,13E-08
4,6	0,063005	1,83E-07	1,22E-08
4,7	0,068019	1,84E-07	1,32E-08
4,8	0,073212	1,85E-07	1,41E-08
4,9	0,07858	1,85E-07	1,51E-08
5	0,084117	1,86E-07	1,62E-08

I-120 (E1)

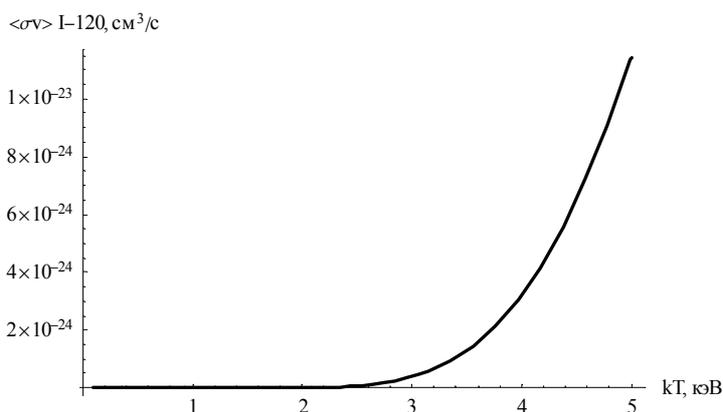


Γ _{rad}	1.9 * 10 ⁻¹¹ кэВ
B _{wu} (E1)	5.1 * 10 ⁻⁴
α	1.54

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).

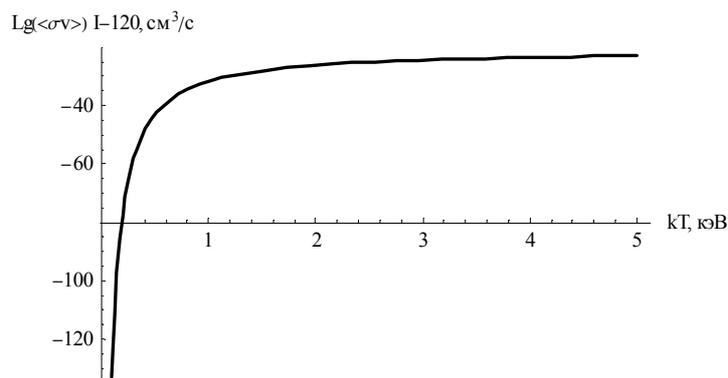


Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

Сечение $\sigma(E1)$		$\langle \sigma v \rangle$	
Энергия, кэВ	см ²	kT, кэВ	см ³ /с
1	-	0,3	-
2	-	0,4	-
3	-	0,5	1,19E-43
4	-	0,6	6,26E-40
5	-	0,7	2,82E-37
6	-	0,8	2,74E-35
7	-	0,9	9,58E-34
8	-	1	1,64E-32
9	-	1,1	1,67E-31
10	-	1,2	1,16E-30
11	-	1,3	5,94E-30
12	-	1,4	2,41E-29
13	-	1,5	8,12E-29
14	-	1,6	2,35E-28
15	-	1,7	5,98E-28
16	-	1,8	1,37E-27
17	-	1,9	2,89E-27
18	-	2	5,65E-27
19	-	2,1	1,03E-26
20	-	2,2	1,79E-26
21	-	2,3	2,96E-26
22	-	2,4	4,69E-26
23	-	2,5	7,17E-26
24	-	2,6	1,06E-25
25	-	2,7	1,52E-25
26	3,65E-32	2,8	2,13E-25
27	5,06E-32	2,9	2,91E-25
28	6,02E-32	3	3,89E-25
29	6,74E-32	3,1	5,11E-25
30	7,3E-32	3,2	6,6E-25
31	7,75E-32	3,3	8,39E-25
32	8,13E-32	3,4	1,05E-24
33	8,44E-32	3,5	1,3E-24
34	8,7E-32	3,6	1,59E-24
35	8,92E-32	3,7	1,93E-24
36	9,12E-32	3,8	2,31E-24
37	9,28E-32	3,9	2,74E-24
38	9,42E-32	4	3,22E-24
39	9,54E-32	4,1	3,76E-24
40	9,65E-32	4,2	4,35E-24
		4,3	5,01E-24
		4,4	5,72E-24
		4,5	6,5E-24
		4,6	7,35E-24
		4,7	8,26E-24
		4,8	9,24E-24
		4,9	1,03E-23
		5	1,14E-23

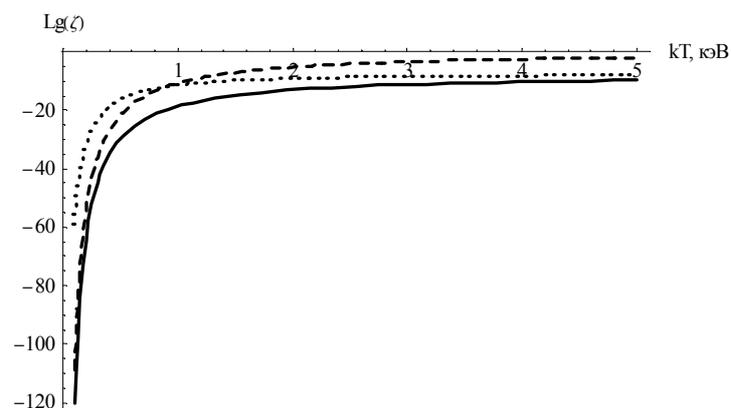
I-120 (E1)

Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).



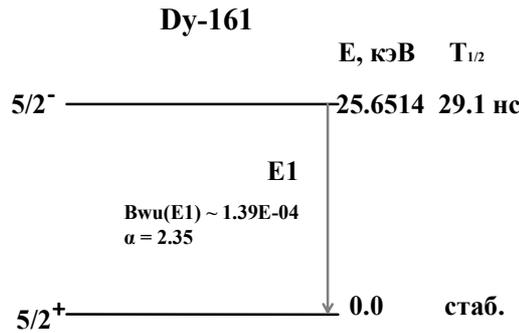
2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).

Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ нс}$.



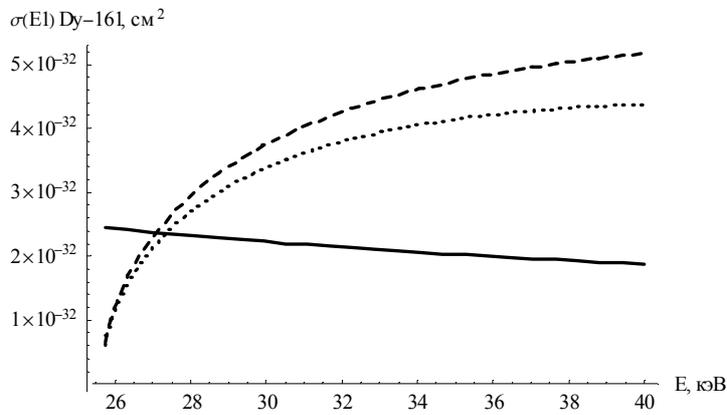
kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	-	-	-
0,4	-	1,06E-19	-
0,5	1,01E-22	4E-17	1,78E-30
0,6	4,31E-19	1,98E-15	9,39E-27
0,7	1,69E-16	3,12E-14	4,23E-24
0,8	1,48E-14	2,39E-13	4,11E-22
0,9	4,82E-13	1,14E-12	1,44E-20
1	7,82E-12	3,93E-12	2,46E-19
1,1	7,63E-11	1,06E-11	2,51E-18
1,2	5,1E-10	2,41E-11	1,74E-17
1,3	2,54E-09	4,78E-11	8,92E-17
1,4	1,01E-08	8,52E-11	3,62E-16
1,5	3,33E-08	1,4E-10	1,22E-15
1,6	9,46E-08	2,14E-10	3,52E-15
1,7	2,38E-07	3,09E-10	8,98E-15
1,8	5,39E-07	4,27E-10	2,06E-14
1,9	1,12E-06	5,69E-10	4,34E-14
2	2,17E-06	7,32E-10	8,47E-14
2,1	3,95E-06	9,17E-10	1,55E-13
2,2	6,79E-06	1,12E-09	2,69E-13
2,3	1,11E-05	1,34E-09	4,44E-13
2,4	1,75E-05	1,58E-09	7,04E-13
2,5	2,66E-05	1,84E-09	1,08E-12
2,6	3,92E-05	2,1E-09	1,59E-12
2,7	5,6E-05	2,37E-09	2,28E-12
2,8	7,8E-05	2,65E-09	3,19E-12
2,9	0,000106	2,93E-09	4,36E-12
3	0,000142	3,22E-09	5,84E-12
3,1	0,000186	3,51E-09	7,67E-12
3,2	0,000239	3,79E-09	9,9E-12
3,3	0,000303	4,08E-09	1,26E-11
3,4	0,000379	4,36E-09	1,58E-11
3,5	0,000468	4,64E-09	1,95E-11
3,6	0,000571	4,91E-09	2,39E-11
3,7	0,00069	5,18E-09	2,89E-11
3,8	0,000824	5,44E-09	3,46E-11
3,9	0,000976	5,7E-09	4,1E-11
4	0,001147	5,94E-09	4,83E-11
4,1	0,001337	6,18E-09	5,63E-11
4,2	0,001547	6,41E-09	6,53E-11
4,3	0,001778	6,64E-09	7,51E-11
4,4	0,002031	6,85E-09	8,58E-11
4,5	0,002306	7,06E-09	9,75E-11
4,6	0,002604	7,25E-09	1,1E-10
4,7	0,002926	7,44E-09	1,24E-10
4,8	0,003272	7,62E-09	1,39E-10
4,9	0,003642	7,79E-09	1,54E-10
5	0,004037	7,96E-09	1,71E-10

Ду-161 (E1)

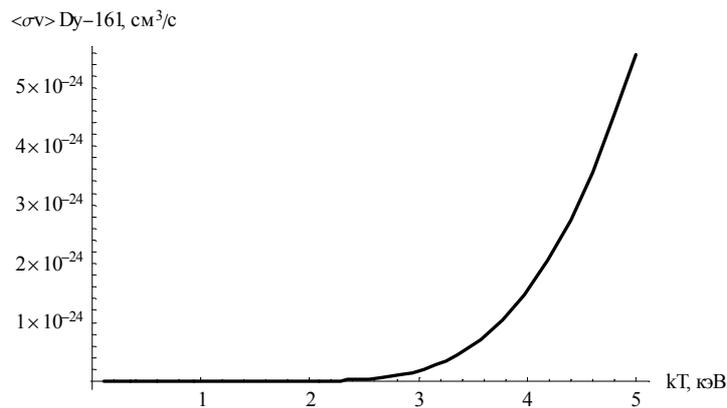


Γ _{rad}	6.75 10 ⁻¹² кэВ
B _{wu} (E1)	1.39 * 10 ⁻⁴
α	2.35

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).



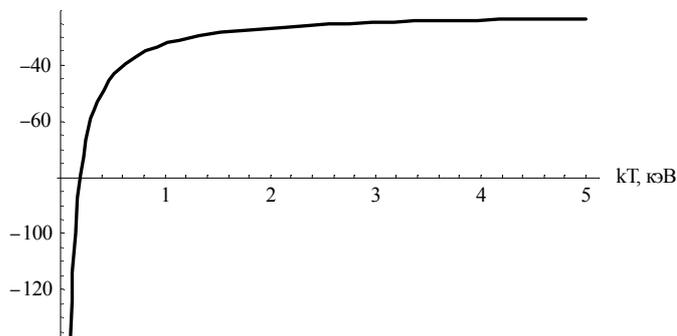
Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

Сечение σ(E1)		⟨σv⟩	
Энергия, кэВ	см ²	kT, кэВ	см ³ /с
1	-	0,3	-
2	-	0,4	-
3	-	0,5	-
4	-	0,6	1,28E-40
5	-	0,7	6,64E-38
6	-	0,8	7,17E-36
7	-	0,9	2,72E-34
8	-	1	4,98E-33
9	-	1,1	5,37E-32
10	-	1,2	3,88E-31
11	-	1,3	2,07E-30
12	-	1,4	8,68E-30
13	-	1,5	3E-29
14	-	1,6	8,9E-29
15	-	1,7	2,32E-28
16	-	1,8	5,43E-28
17	-	1,9	1,16E-27
18	-	2	2,3E-27
19	-	2,1	4,28E-27
20	-	2,2	7,52E-27
21	-	2,3	1,26E-26
22	-	2,4	2,01E-26
23	-	2,5	3,1E-26
24	-	2,6	4,63E-26
25	-	2,7	6,7E-26
26	1,22E-32	2,8	9,44E-26
27	2,32E-32	2,9	1,3E-25
28	2,95E-32	3	1,75E-25
29	3,4E-32	3,1	2,32E-25
30	3,75E-32	3,2	3,01E-25
31	4,03E-32	3,3	3,85E-25
32	4,26E-32	3,4	4,85E-25
33	4,45E-32	3,5	6,03E-25
34	4,61E-32	3,6	7,4E-25
35	4,74E-32	3,7	9E-25
36	4,86E-32	3,8	1,08E-24
37	4,95E-32	3,9	1,29E-24
38	5,04E-32	4	1,52E-24
39	5,11E-32	4,1	1,78E-24
40	5,18E-32	4,2	2,07E-24
		4,3	2,39E-24
		4,4	2,74E-24
		4,5	3,13E-24
		4,6	3,54E-24
		4,7	3,99E-24
		4,8	4,48E-24
		4,9	5E-24
		5	5,56E-24

Dy-161 (E1)

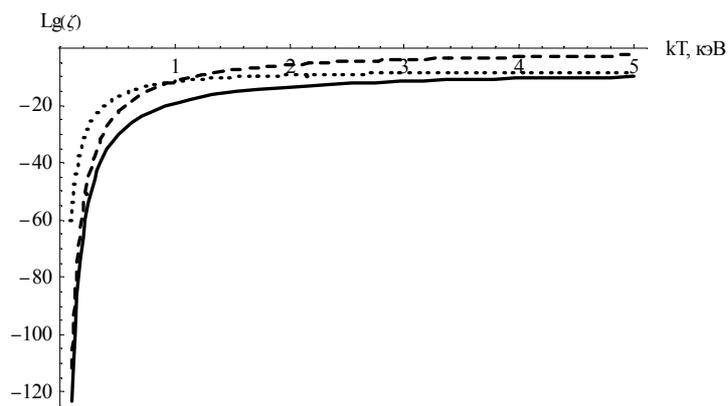
Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).

Lg(σv) Dy-161, см³/с



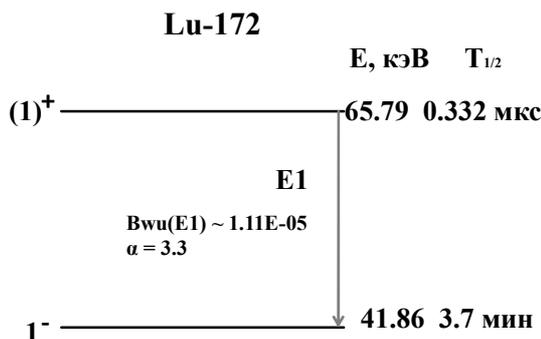
2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).

Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20}$ см⁻³,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50$ нс.



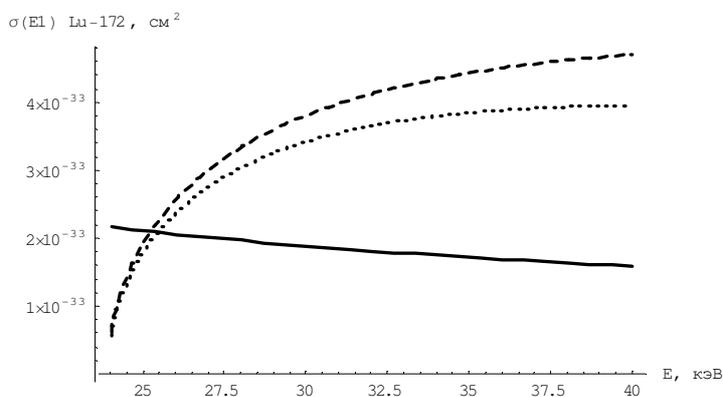
kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	-	-	-
0,4	-	-	-
0,5	1,88E-23	1,21E-17	2,99E-31
0,6	9,7E-20	6,62E-16	1,92E-27
0,7	4,36E-17	1,11E-14	9,96E-25
0,8	4,25E-15	8,99E-14	1,08E-22
0,9	1,5E-13	4,48E-13	4,09E-21
1	2,59E-12	1,59E-12	7,48E-20
1,1	2,67E-11	4,42E-12	8,05E-19
1,2	1,86E-10	1,02E-11	5,82E-18
1,3	9,64E-10	2,07E-11	3,1E-17
1,4	3,94E-09	3,74E-11	1,3E-16
1,5	1,34E-08	6,22E-11	4,5E-16
1,6	3,9E-08	9,63E-11	1,33E-15
1,7	1E-07	1,41E-10	3,48E-15
1,8	2,31E-07	1,97E-10	8,14E-15
1,9	4,9E-07	2,64E-10	1,74E-14
2	9,62E-07	3,42E-10	3,46E-14
2,1	1,77E-06	4,32E-10	6,42E-14
2,2	3,09E-06	5,32E-10	1,13E-13
2,3	5,12E-06	6,41E-10	1,88E-13
2,4	8,15E-06	7,58E-10	3,02E-13
2,5	1,25E-05	8,83E-10	4,65E-13
2,6	1,86E-05	1,01E-09	6,94E-13
2,7	2,67E-05	1,15E-09	1E-12
2,8	3,75E-05	1,29E-09	1,42E-12
2,9	5,15E-05	1,43E-09	1,95E-12
3	6,91E-05	1,58E-09	2,63E-12
3,1	9,11E-05	1,73E-09	3,47E-12
3,2	0,000118	1,87E-09	4,51E-12
3,3	0,00015	2,02E-09	5,77E-12
3,4	0,000189	2,17E-09	7,27E-12
3,5	0,000235	2,31E-09	9,04E-12
3,6	0,000288	2,45E-09	1,11E-11
3,7	0,000349	2,59E-09	1,35E-11
3,8	0,000419	2,73E-09	1,62E-11
3,9	0,000498	2,86E-09	1,93E-11
4	0,000587	2,99E-09	2,28E-11
4,1	0,000687	3,11E-09	2,67E-11
4,2	0,000797	3,24E-09	3,11E-11
4,3	0,000919	3,35E-09	3,59E-11
4,4	0,001053	3,47E-09	4,11E-11
4,5	0,001199	3,58E-09	4,69E-11
4,6	0,001358	3,68E-09	5,31E-11
4,7	0,00153	3,78E-09	5,99E-11
4,8	0,001715	3,88E-09	6,72E-11
4,9	0,001913	3,97E-09	7,5E-11
5	0,002126	4,06E-09	8,34E-11

Lu-172 (E1)

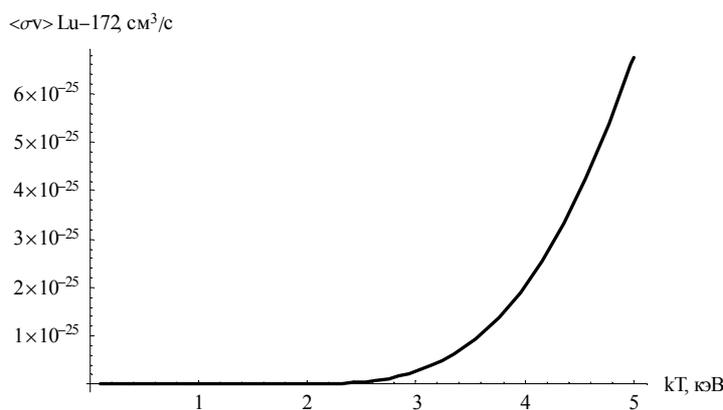


Γ_{rad}	$4.61 * 10^{-13}$ кэВ
$B_{wu}(E1)$	$1.11 * 10^{-5}$
α	3.3

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).

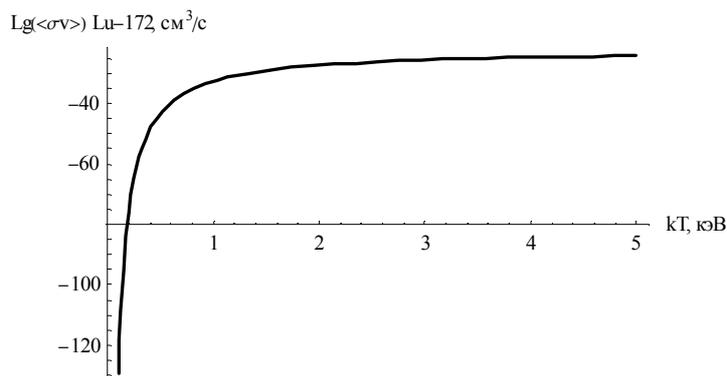


Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

Сечение $\sigma(E1)$		$\langle\sigma v\rangle$	
Энергия, кэВ	cm^2	кТ, кэВ	cm^3/c
1	-	0,3	-
2	-	0,4	-
3	-	0,5	5,79E-44
4	-	0,6	2,06E-40
5	-	0,7	7E-38
6	-	0,8	5,51E-36
7	-	0,9	1,64E-34
8	-	1	2,47E-33
9	-	1,1	2,26E-32
10	-	1,2	1,43E-31
11	-	1,3	6,82E-31
12	-	1,4	2,6E-30
13	-	1,5	8,27E-30
14	-	1,6	2,28E-29
15	-	1,7	5,56E-29
16	-	1,8	1,23E-28
17	-	1,9	2,5E-28
18	-	2	4,74E-28
19	-	2,1	8,44E-28
20	-	2,2	1,43E-27
21	-	2,3	2,3E-27
22	-	2,4	3,57E-27
23	-	2,5	5,35E-27
24	5,1E-34	2,6	7,77E-27
25	1,91E-33	2,7	1,1E-26
26	2,56E-33	2,8	1,51E-26
27	3E-33	2,9	2,04E-26
28	3,34E-33	3	2,69E-26
29	3,6E-33	3,1	3,49E-26
30	3,81E-33	3,2	4,45E-26
31	3,98E-33	3,3	5,6E-26
32	4,12E-33	3,4	6,95E-26
33	4,24E-33	3,5	8,51E-26
34	4,34E-33	3,6	1,03E-25
35	4,43E-33	3,7	1,24E-25
36	4,5E-33	3,8	1,47E-25
37	4,56E-33	3,9	1,73E-25
38	4,62E-33	4	2,02E-25
39	4,66E-33	4,1	2,34E-25
40	4,7E-33	4,2	2,69E-25
		4,3	3,08E-25
		4,4	3,5E-25
		4,5	3,95E-25
		4,6	4,44E-25
		4,7	4,96E-25
		4,8	5,53E-25
		4,9	6,12E-25
		5	6,76E-25

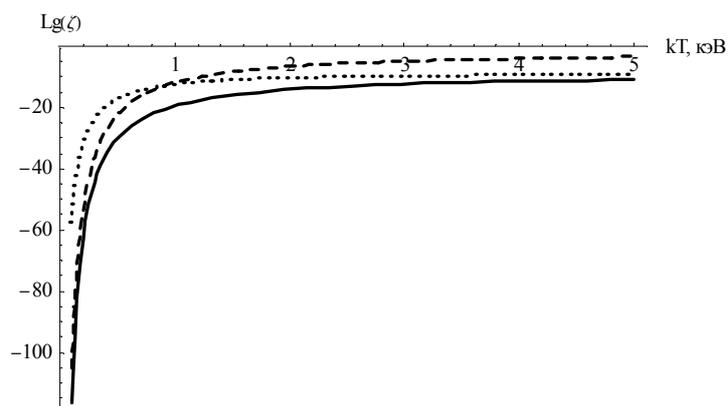
Lu-172 (E1)

Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).



2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).

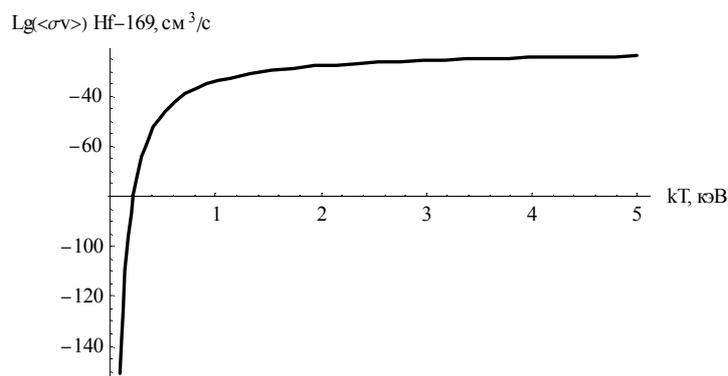
Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ нс}$.



kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	-	-	-
0,4	-	-	-
0,5	3,97E-23	6,49E-18	8,68E-31
0,6	1,16E-19	2,66E-16	3,09E-27
0,7	3,45E-17	3,65E-15	1,05E-24
0,8	2,47E-15	2,53E-14	8,27E-23
0,9	6,86E-14	1,12E-13	2,46E-21
1	9,8E-13	3,6E-13	3,7E-20
1,1	8,63E-12	9,27E-13	3,39E-19
1,2	5,29E-11	2,01E-12	2,15E-18
1,3	2,45E-10	3,85E-12	1,02E-17
1,4	9,13E-10	6,64E-12	3,9E-17
1,5	2,85E-09	1,06E-11	1,24E-16
1,6	7,74E-09	1,58E-11	3,41E-16
1,7	1,86E-08	2,24E-11	8,34E-16
1,8	4,08E-08	3,04E-11	1,84E-15
1,9	8,2E-08	3,98E-11	3,75E-15
2	1,54E-07	5,05E-11	7,1E-15
2,1	2,72E-07	6,24E-11	1,27E-14
2,2	4,57E-07	7,54E-11	2,14E-14
2,3	7,33E-07	8,94E-11	3,46E-14
2,4	1,13E-06	1,04E-10	5,36E-14
2,5	1,69E-06	1,2E-10	8,03E-14
2,6	2,44E-06	1,36E-10	1,17E-13
2,7	3,43E-06	1,52E-10	1,65E-13
2,8	4,7E-06	1,69E-10	2,27E-13
2,9	6,31E-06	1,85E-10	3,05E-13
3	8,31E-06	2,02E-10	4,03E-13
3,1	1,08E-05	2,19E-10	5,23E-13
3,2	1,37E-05	2,35E-10	6,68E-13
3,3	1,72E-05	2,52E-10	8,4E-13
3,4	2,13E-05	2,68E-10	1,04E-12
3,5	2,6E-05	2,83E-10	1,28E-12
3,6	3,14E-05	2,99E-10	1,55E-12
3,7	3,76E-05	3,14E-10	1,86E-12
3,8	4,46E-05	3,28E-10	2,2E-12
3,9	5,25E-05	3,42E-10	2,59E-12
4	6,12E-05	3,56E-10	3,03E-12
4,1	7,09E-05	3,69E-10	3,51E-12
4,2	8,15E-05	3,81E-10	4,04E-12
4,3	9,3E-05	3,93E-10	4,62E-12
4,4	0,000106	4,05E-10	5,25E-12
4,5	0,000119	4,16E-10	5,93E-12
4,6	0,000134	4,26E-10	6,66E-12
4,7	0,00015	4,36E-10	7,45E-12
4,8	0,000167	4,45E-10	8,29E-12
4,9	0,000185	4,54E-10	9,18E-12
5	0,000204	4,63E-10	1,01E-11

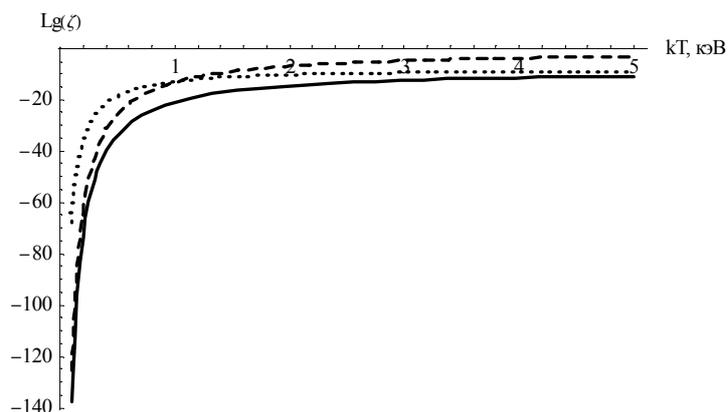
Hf-169 (E1)

Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).



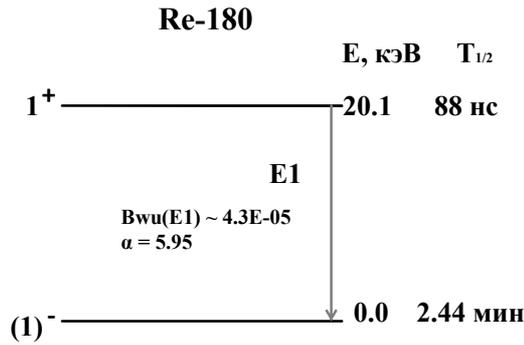
2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).

Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ нс}$.



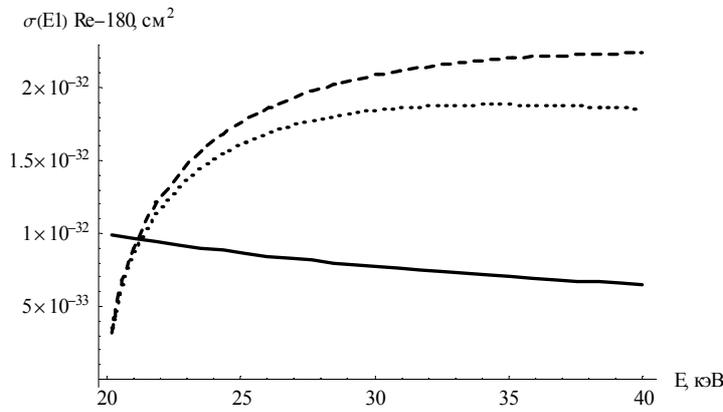
kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	-	-	-
0,4	-	1,82E-22	-
0,5	1,79E-26	1,74E-19	1,64E-34
0,6	2,64E-22	1,61E-17	3,11E-30
0,7	2,51E-19	3,95E-16	3,5E-27
0,8	4,3E-17	4,23E-15	6,75E-25
0,9	2,35E-15	2,62E-14	4,02E-23
1	5,76E-14	1,11E-13	1,05E-21
1,1	7,89E-13	3,55E-13	1,52E-20
1,2	7E-12	9,28E-13	1,41E-19
1,3	4,43E-11	2,07E-12	9,22E-19
1,4	2,16E-10	4,09E-12	4,61E-18
1,5	8,5E-10	7,32E-12	1,86E-17
1,6	2,82E-09	1,21E-11	6,31E-17
1,7	8,14E-09	1,88E-11	1,85E-16
1,8	2,09E-08	2,76E-11	4,81E-16
1,9	4,84E-08	3,87E-11	1,13E-15
2	1,03E-07	5,24E-11	2,44E-15
2,1	2,05E-07	6,86E-11	4,9E-15
2,2	3,83E-07	8,74E-11	9,22E-15
2,3	6,76E-07	1,09E-10	1,64E-14
2,4	1,14E-06	1,32E-10	2,79E-14
2,5	1,84E-06	1,58E-10	4,53E-14
2,6	2,87E-06	1,86E-10	7,1E-14
2,7	4,32E-06	2,16E-10	1,08E-13
2,8	6,32E-06	2,48E-10	1,58E-13
2,9	9,02E-06	2,8E-10	2,27E-13
3	1,26E-05	3,14E-10	3,17E-13
3,1	1,71E-05	3,5E-10	4,34E-13
3,2	2,29E-05	3,85E-10	5,82E-13
3,3	3E-05	4,22E-10	7,67E-13
3,4	3,88E-05	4,58E-10	9,94E-13
3,5	4,95E-05	4,95E-10	1,27E-12
3,6	6,22E-05	5,32E-10	1,6E-12
3,7	7,72E-05	5,69E-10	1,99E-12
3,8	9,48E-05	6,06E-10	2,45E-12
3,9	0,000115	6,42E-10	2,98E-12
4	0,000138	6,78E-10	3,59E-12
4,1	0,000165	7,13E-10	4,29E-12
4,2	0,000195	7,48E-10	5,08E-12
4,3	0,000229	7,82E-10	5,97E-12
4,4	0,000267	8,15E-10	6,97E-12
4,5	0,000308	8,48E-10	8,07E-12
4,6	0,000355	8,79E-10	9,29E-12
4,7	0,000405	9,1E-10	1,06E-11
4,8	0,000461	9,4E-10	1,21E-11
4,9	0,000521	9,69E-10	1,37E-11
5	0,000586	9,97E-10	1,54E-11

Re-180 (E1)

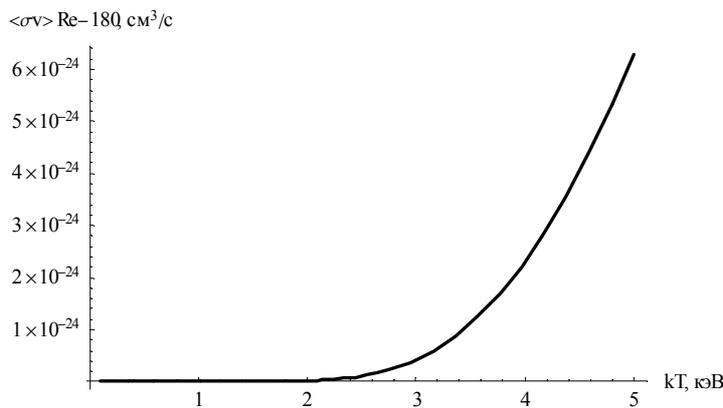


Γ_{rad}	$1.08 * 10^{-12}$ кэВ
Bwu (E1)	$4.3 * 10^{-5}$
α	5.95

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).

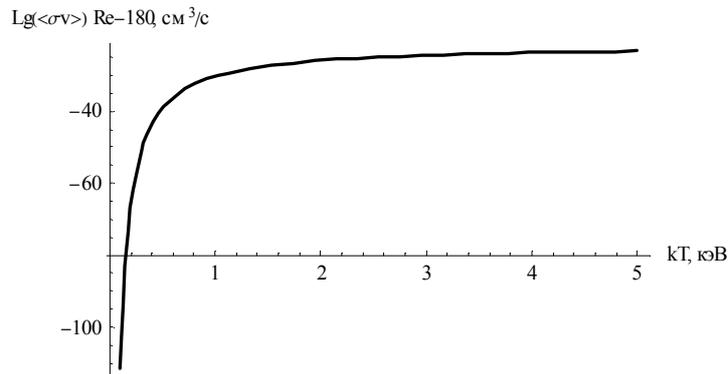


Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

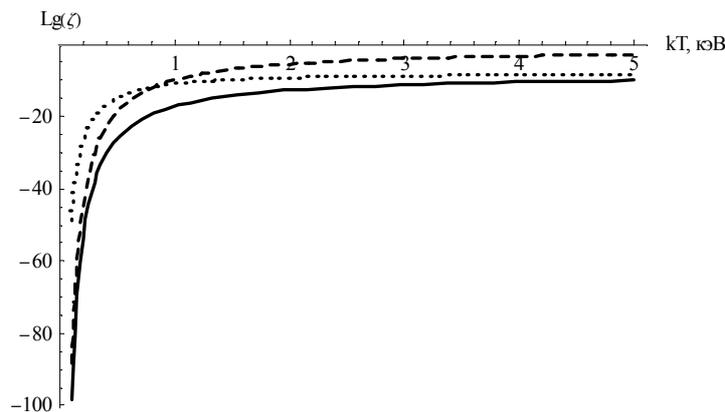
Сечение $\sigma(E1)$		$\langle \sigma v \rangle$	
Энергия, кэВ	cm^2	кТ, кэВ	cm^3/c
1	-	0,3	2,26E-32
2	-	0,4	4,69E-30
3	-	0,5	1,14E-28
4	-	0,6	9,56E-28
5	-	0,7	4,35E-27
6	-	0,8	1,35E-26
7	-	0,9	3,26E-26
8	-	1	6,59E-26
9	-	1,1	1,17E-25
10	-	1,2	1,89E-25
11	-	1,3	2,83E-25
12	-	1,4	4E-25
13	-	1,5	5,4E-25
14	-	1,6	7,02E-25
15	-	1,7	8,84E-25
16	-	1,8	1,08E-24
17	-	1,9	1,3E-24
18	-	2	1,54E-24
19	-	2,1	1,78E-24
20	-	2,2	2,04E-24
21	9E-33	2,3	2,31E-24
22	1,25E-32	2,4	2,58E-24
23	1,47E-32	2,5	2,86E-24
24	1,64E-32	2,6	3,15E-24
25	1,76E-32	2,7	3,44E-24
26	1,86E-32	2,8	3,74E-24
27	1,93E-32	2,9	4,03E-24
28	1,99E-32	3	4,33E-24
29	2,04E-32	3,1	4,63E-24
30	2,08E-32	3,2	4,92E-24
31	2,12E-32	3,3	5,22E-24
32	2,14E-32	3,4	5,51E-24
33	2,17E-32	3,5	5,8E-24
34	2,18E-32	3,6	6,09E-24
35	2,2E-32	3,7	6,38E-24
36	2,21E-32	3,8	6,66E-24
37	2,22E-32	3,9	6,94E-24
38	2,23E-32	4	7,22E-24
39	2,23E-32	4,1	7,49E-24
40	2,24E-32	4,2	7,76E-24
		4,3	8,03E-24
		4,4	8,29E-24
		4,5	8,55E-24
		4,6	8,8E-24
		4,7	9,05E-24
		4,8	9,29E-24
		4,9	9,54E-24
		5	9,77E-24

Re-180 (E1)

Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).

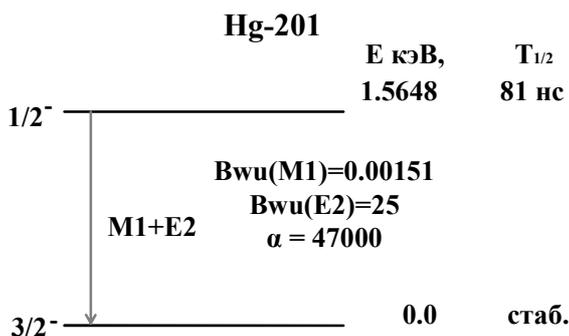


2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).
 Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ нс}$.



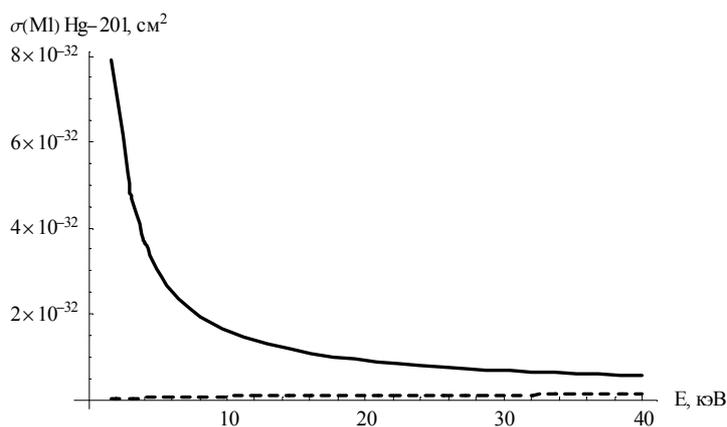
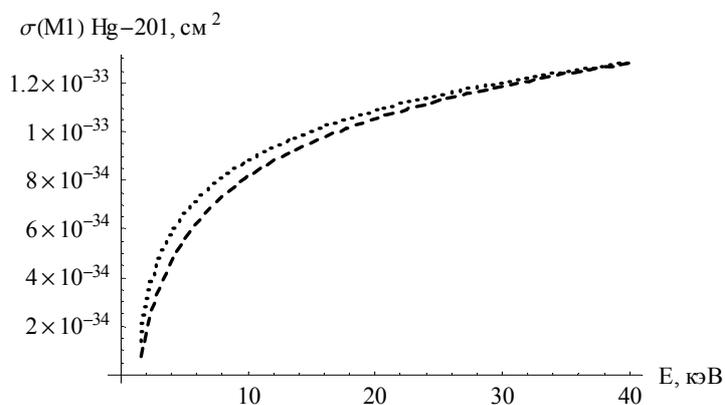
kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	-	-	-
0,4	8,6E-24	1,16E-17	3,12E-31
0,5	1,99E-19	1,26E-15	9,41E-27
0,6	1,62E-16	2,73E-14	8,97E-24
0,7	1,94E-14	2,38E-13	1,2E-21
0,8	7,02E-13	1,17E-12	4,67E-20
0,9	1,14E-11	3,96E-12	8,04E-19
1	1,07E-10	1,03E-11	7,83E-18
1,1	6,64E-10	2,23E-11	5,03E-17
1,2	3,04E-09	4,19E-11	2,37E-16
1,3	1,1E-08	7,08E-11	8,77E-16
1,4	3,33E-08	1,1E-10	2,69E-15
1,5	8,68E-08	1,6E-10	7,12E-15
1,6	2,01E-07	2,21E-10	1,67E-14
1,7	4,2E-07	2,92E-10	3,53E-14
1,8	8,1E-07	3,72E-10	6,86E-14
1,9	1,46E-06	4,6E-10	1,25E-13
2	2,47E-06	5,55E-10	2,13E-13
2,1	3,99E-06	6,56E-10	3,46E-13
2,2	6,17E-06	7,6E-10	5,37E-13
2,3	9,18E-06	8,68E-10	8,03E-13
2,4	1,32E-05	9,76E-10	1,16E-12
2,5	1,85E-05	1,09E-09	1,63E-12
2,6	2,52E-05	1,2E-09	2,23E-12
2,7	3,35E-05	1,3E-09	2,97E-12
2,8	4,37E-05	1,41E-09	3,89E-12
2,9	5,6E-05	1,51E-09	5E-12
3	7,06E-05	1,61E-09	6,31E-12
3,1	8,76E-05	1,71E-09	7,85E-12
3,2	0,000107	1,81E-09	9,64E-12
3,3	0,00013	1,9E-09	1,17E-11
3,4	0,000155	1,98E-09	1,4E-11
3,5	0,000184	2,07E-09	1,66E-11
3,6	0,000216	2,15E-09	1,95E-11
3,7	0,000252	2,22E-09	2,27E-11
3,8	0,00029	2,29E-09	2,62E-11
3,9	0,000333	2,36E-09	3,01E-11
4	0,000379	2,42E-09	3,43E-11
4,1	0,000429	2,48E-09	3,88E-11
4,2	0,000482	2,54E-09	4,36E-11
4,3	0,000539	2,59E-09	4,88E-11
4,4	0,000601	2,64E-09	5,43E-11
4,5	0,000665	2,68E-09	6,02E-11
4,6	0,000734	2,73E-09	6,63E-11
4,7	0,000807	2,77E-09	7,29E-11
4,8	0,000883	2,8E-09	7,97E-11
4,9	0,000963	2,83E-09	8,69E-11
5	0,001047	2,87E-09	9,44E-11

Hg-201 (M1)



Γ_{rad}	$1.73 \cdot 10^{-16}$ кэВ
Bwu (M1)	$1.51 \cdot 10^{-3}$
α	47000

1. Неупругое рассеяние электронов



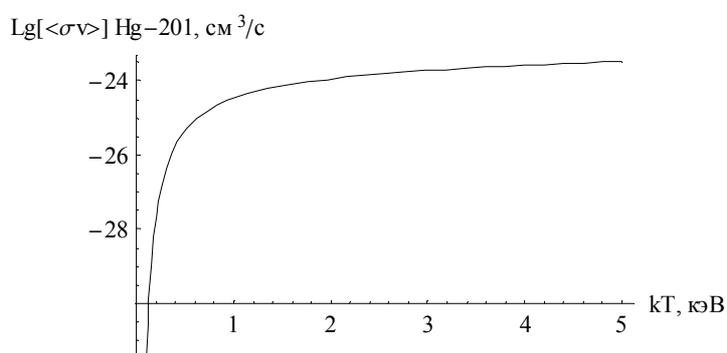
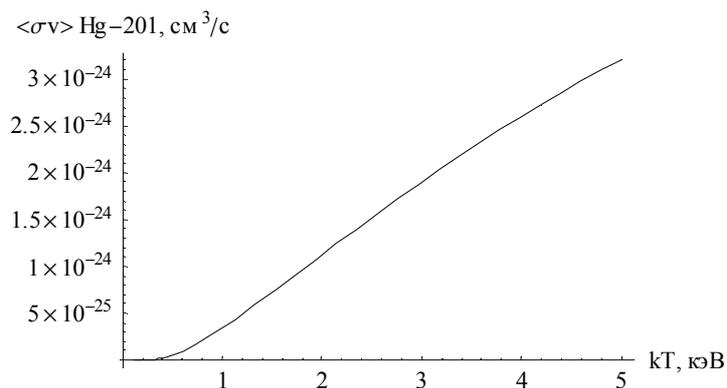
Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).

Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

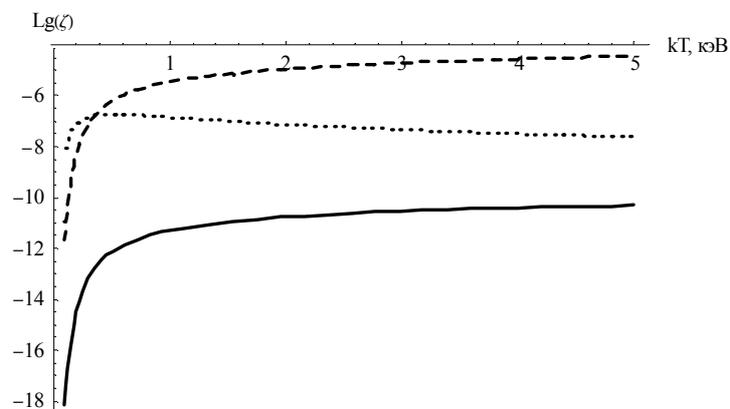
Сечение $\sigma(M1)$		$\langle \sigma v \rangle$	
Энергия, кэВ	см ²	кТ, кэВ	см ³ /с
1	-	0,3	4,4E-27
2	1,72E-34	0,4	1,93E-26
3	3,52E-34	0,5	4,78E-26
4	4,7E-34	0,6	8,9E-26
5	5,59E-34	0,7	1,41E-25
6	6,29E-34	0,8	2,01E-25
7	6,87E-34	0,9	2,66E-25
8	7,36E-34	1	3,37E-25
9	7,78E-34	1,1	4,11E-25
10	8,16E-34	1,2	4,87E-25
11	8,5E-34	1,3	5,65E-25
12	8,8E-34	1,4	6,44E-25
13	9,08E-34	1,5	7,23E-25
14	9,33E-34	1,6	8,04E-25
15	9,57E-34	1,7	8,84E-25
16	9,78E-34	1,8	9,64E-25
17	9,99E-34	1,9	1,04E-24
18	1,02E-33	2	1,12E-24
19	1,04E-33	2,1	1,2E-24
20	1,05E-33	2,2	1,28E-24
21	1,07E-33	2,3	1,36E-24
22	1,08E-33	2,4	1,44E-24
23	1,1E-33	2,5	1,52E-24
24	1,11E-33	2,6	1,6E-24
25	1,13E-33	2,7	1,67E-24
26	1,14E-33	2,8	1,75E-24
27	1,15E-33	2,9	1,82E-24
28	1,16E-33	3	1,9E-24
29	1,18E-33	3,1	1,97E-24
30	1,19E-33	3,2	2,05E-24
31	1,2E-33	3,3	2,12E-24
32	1,21E-33	3,4	2,19E-24
33	1,22E-33	3,5	2,26E-24
34	1,23E-33	3,6	2,33E-24
35	1,24E-33	3,7	2,4E-24
36	1,25E-33	3,8	2,47E-24
37	1,26E-33	3,9	2,53E-24
38	1,26E-33	4	2,6E-24
39	1,27E-33	4,1	2,67E-24
40	1,28E-33	4,2	2,73E-24
		4,3	2,79E-24
		4,4	2,86E-24
		4,5	2,92E-24
		4,6	2,98E-24
		4,7	3,03E-24
		4,8	3,09E-24
		4,9	3,15E-24
		5	3,2E-24

Hg-201 (M1)

Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (обычный и логарифмический масштаб).

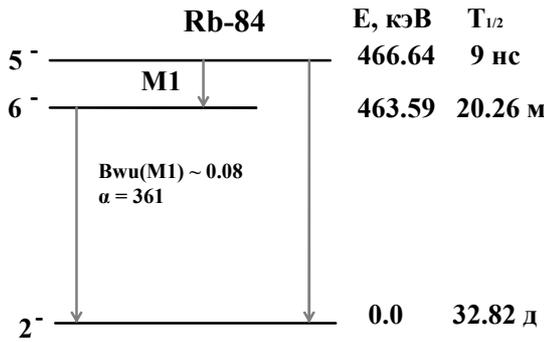


2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия). Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ ns}$.



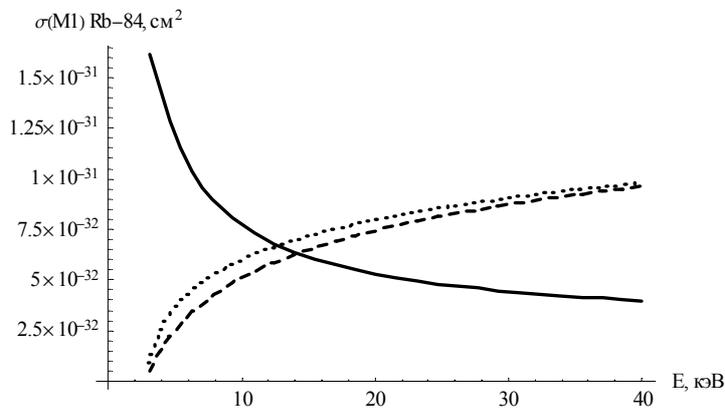
kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	7,17E-08	1,38E-07	6,6E-14
0,4	2,68E-07	1,72E-07	2,89E-13
0,5	6,01E-07	1,82E-07	7,16E-13
0,6	1,04E-06	1,8E-07	1,33E-12
0,7	1,57E-06	1,72E-07	2,11E-12
0,8	2,16E-06	1,62E-07	3,01E-12
0,9	2,8E-06	1,51E-07	4E-12
1	3,47E-06	1,41E-07	5,05E-12
1,1	4,17E-06	1,31E-07	6,16E-12
1,2	4,89E-06	1,22E-07	7,3E-12
1,3	5,63E-06	1,14E-07	8,47E-12
1,4	6,38E-06	1,06E-07	9,65E-12
1,5	7,14E-06	9,94E-08	1,09E-11
1,6	7,92E-06	9,32E-08	1,21E-11
1,7	8,69E-06	8,76E-08	1,33E-11
1,8	9,48E-06	8,24E-08	1,45E-11
1,9	1,03E-05	7,78E-08	1,57E-11
2	1,11E-05	7,35E-08	1,69E-11
2,1	1,19E-05	6,96E-08	1,81E-11
2,2	1,27E-05	6,6E-08	1,93E-11
2,3	1,35E-05	6,27E-08	2,04E-11
2,4	1,43E-05	5,97E-08	2,16E-11
2,5	1,51E-05	5,69E-08	2,28E-11
2,6	1,59E-05	5,43E-08	2,39E-11
2,7	1,67E-05	5,19E-08	2,51E-11
2,8	1,75E-05	4,96E-08	2,62E-11
2,9	1,84E-05	4,75E-08	2,74E-11
3	1,92E-05	4,56E-08	2,85E-11
3,1	2E-05	4,38E-08	2,96E-11
3,2	2,08E-05	4,21E-08	3,07E-11
3,3	2,16E-05	4,05E-08	3,18E-11
3,4	2,25E-05	3,9E-08	3,28E-11
3,5	2,33E-05	3,76E-08	3,39E-11
3,6	2,41E-05	3,62E-08	3,5E-11
3,7	2,49E-05	3,5E-08	3,6E-11
3,8	2,58E-05	3,38E-08	3,7E-11
3,9	2,66E-05	3,27E-08	3,8E-11
4	2,74E-05	3,16E-08	3,9E-11
4,1	2,83E-05	3,06E-08	4E-11
4,2	2,91E-05	2,97E-08	4,1E-11
4,3	2,99E-05	2,87E-08	4,19E-11
4,4	3,08E-05	2,79E-08	4,28E-11
4,5	3,16E-05	2,71E-08	4,37E-11
4,6	3,24E-05	2,63E-08	4,46E-11
4,7	3,32E-05	2,56E-08	4,55E-11
4,8	3,41E-05	2,48E-08	4,64E-11
4,9	3,49E-05	2,42E-08	4,72E-11
5	3,57E-05	2,35E-08	4,81E-11

Rb-84 (M1)

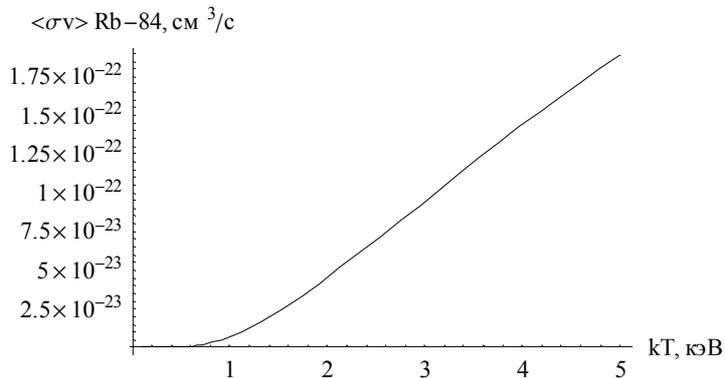


Γ_{rad}	$7.31 \cdot 10^{-11}$ кэВ
$B_{\text{wu}}(M1)$	0,08
α	361

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).

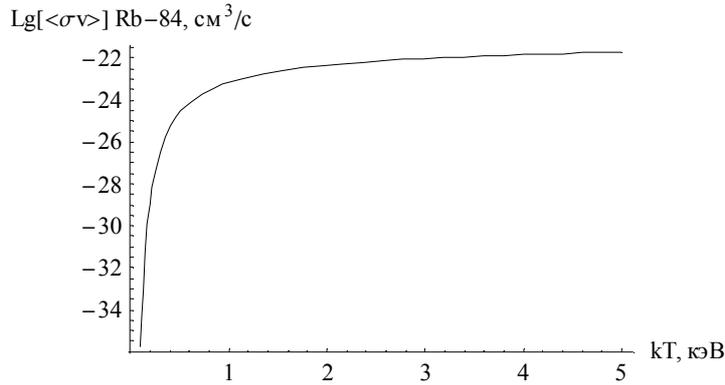


Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

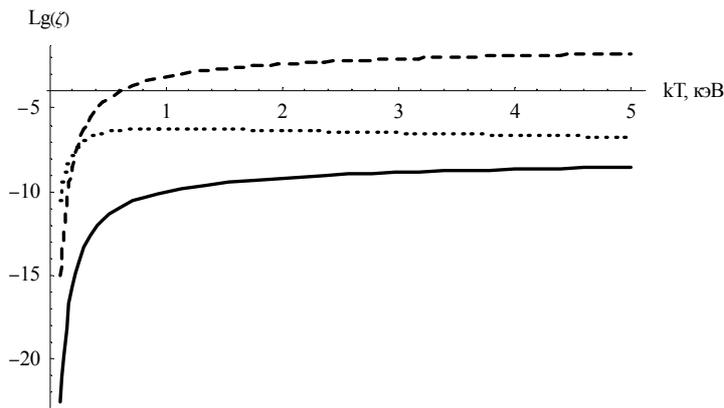
Сечение $\sigma(M1)$		$\langle\sigma v\rangle$	
Энергия, кэВ	см^2	кТ, кэВ	$\text{см}^3/\text{с}$
1	-	0,3	3,21E-27
2	-	0,4	4,7E-26
3	-	0,5	2,39E-25
4	1,65E-32	0,6	7,16E-25
5	2,55E-32	0,7	1,58E-24
6	3,26E-32	0,8	2,9E-24
7	3,83E-32	0,9	4,66E-24
8	4,32E-32	1	6,87E-24
9	4,75E-32	1,1	9,49E-24
10	5,12E-32	1,2	1,25E-23
11	5,45E-32	1,3	1,58E-23
12	5,75E-32	1,4	1,94E-23
13	6,02E-32	1,5	2,32E-23
14	6,27E-32	1,6	2,73E-23
15	6,5E-32	1,7	3,15E-23
16	6,71E-32	1,8	3,59E-23
17	6,91E-32	1,9	4,04E-23
18	7,1E-32	2	4,5E-23
19	7,27E-32	2,1	4,98E-23
20	7,44E-32	2,2	5,46E-23
21	7,6E-32	2,3	5,94E-23
22	7,75E-32	2,4	6,44E-23
23	7,89E-32	2,5	6,93E-23
24	8,02E-32	2,6	7,43E-23
25	8,15E-32	2,7	7,94E-23
26	8,28E-32	2,8	8,44E-23
27	8,39E-32	2,9	8,95E-23
28	8,51E-32	3	9,45E-23
29	8,62E-32	3,1	9,96E-23
30	8,72E-32	3,2	1,05E-22
31	8,83E-32	3,3	1,1E-22
32	8,93E-32	3,4	1,15E-22
33	9,02E-32	3,5	1,2E-22
34	9,12E-32	3,6	1,25E-22
35	9,21E-32	3,7	1,3E-22
36	9,29E-32	3,8	1,34E-22
37	9,38E-32	3,9	1,39E-22
38	9,46E-32	4	1,44E-22
39	9,54E-32	4,1	1,49E-22
40	9,62E-32	4,2	1,54E-22
		4,3	1,58E-22
		4,4	1,63E-22
		4,5	1,67E-22
		4,6	1,72E-22
		4,7	1,76E-22
		4,8	1,8E-22
		4,9	1,84E-22
		5	1,89E-22

Rb-84 (M1)

Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).

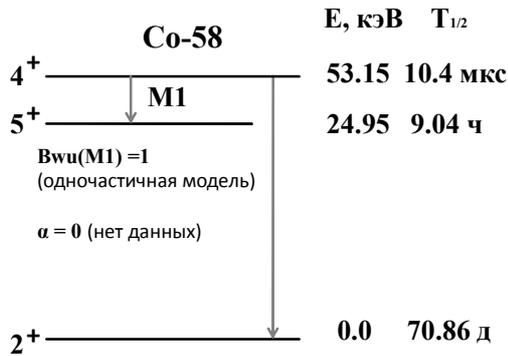


2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).
 Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ нс}$.



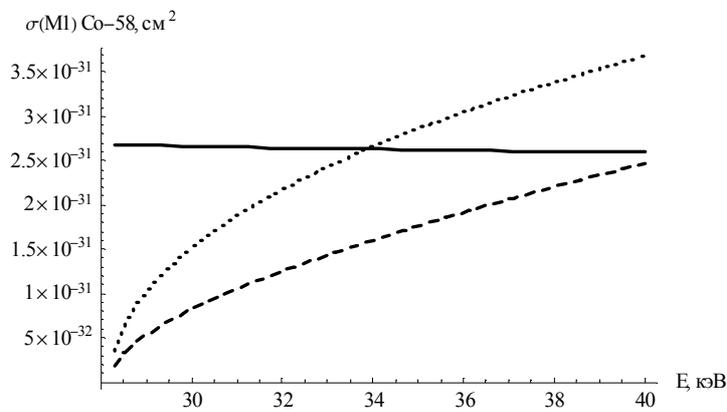
kT, КэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	5,9E-07	1,04E-07	4,82E-14
0,4	7,49E-06	2,41E-07	7,06E-13
0,5	3,45E-05	3,69E-07	3,59E-12
0,6	9,57E-05	4,67E-07	1,07E-11
0,7	0,000199	5,33E-07	2,37E-11
0,8	0,000347	5,73E-07	4,34E-11
0,9	0,000536	5,93E-07	7E-11
1	0,000763	6E-07	1,03E-10
1,1	0,001023	5,97E-07	1,42E-10
1,2	0,001312	5,88E-07	1,87E-10
1,3	0,001625	5,75E-07	2,37E-10
1,4	0,001959	5,6E-07	2,91E-10
1,5	0,002311	5,43E-07	3,48E-10
1,6	0,002679	5,25E-07	4,09E-10
1,7	0,003061	5,07E-07	4,72E-10
1,8	0,003454	4,89E-07	5,38E-10
1,9	0,003857	4,72E-07	6,06E-10
2	0,004269	4,55E-07	6,75E-10
2,1	0,004689	4,38E-07	7,46E-10
2,2	0,005115	4,22E-07	8,18E-10
2,3	0,005548	4,07E-07	8,91E-10
2,4	0,005986	3,93E-07	9,65E-10
2,5	0,006429	3,79E-07	1,04E-09
2,6	0,006876	3,66E-07	1,12E-09
2,7	0,007327	3,53E-07	1,19E-09
2,8	0,007782	3,41E-07	1,27E-09
2,9	0,00824	3,3E-07	1,34E-09
3	0,0087	3,19E-07	1,42E-09
3,1	0,009163	3,09E-07	1,49E-09
3,2	0,009629	2,99E-07	1,57E-09
3,3	0,010097	2,9E-07	1,65E-09
3,4	0,010567	2,81E-07	1,72E-09
3,5	0,011038	2,72E-07	1,8E-09
3,6	0,011512	2,64E-07	1,87E-09
3,7	0,011987	2,57E-07	1,94E-09
3,8	0,012463	2,49E-07	2,02E-09
3,9	0,012941	2,42E-07	2,09E-09
4	0,013419	2,35E-07	2,16E-09
4,1	0,013899	2,29E-07	2,23E-09
4,2	0,014381	2,23E-07	2,3E-09
4,3	0,014863	2,17E-07	2,37E-09
4,4	0,015346	2,11E-07	2,44E-09
4,5	0,01583	2,06E-07	2,51E-09
4,6	0,016314	2,01E-07	2,57E-09
4,7	0,0168	1,96E-07	2,64E-09
4,8	0,017286	1,91E-07	2,7E-09
4,9	0,017773	1,86E-07	2,77E-09
5	0,018261	1,82E-07	2,83E-09

Co-58 (M1)

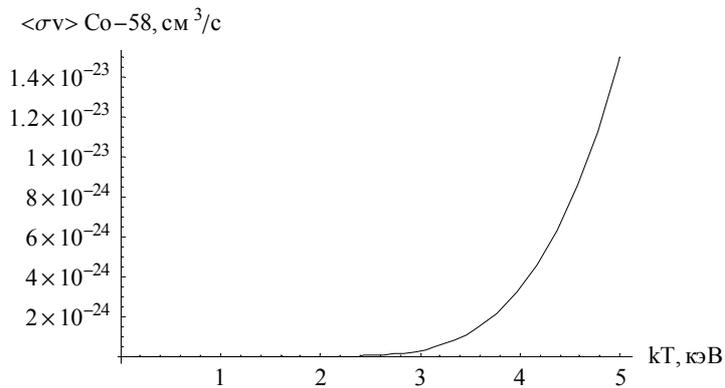


Γ_{rad}	$6.33 \cdot 10^{-14}$ кэВ
$B_{\text{wu}}(M1)$	1(одночастичная)
α	0 (нет данных)

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).

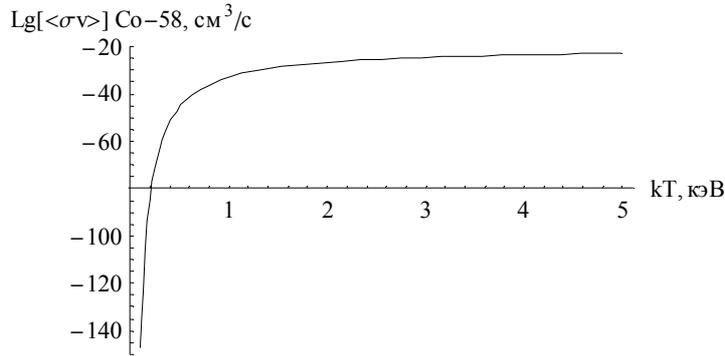


Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

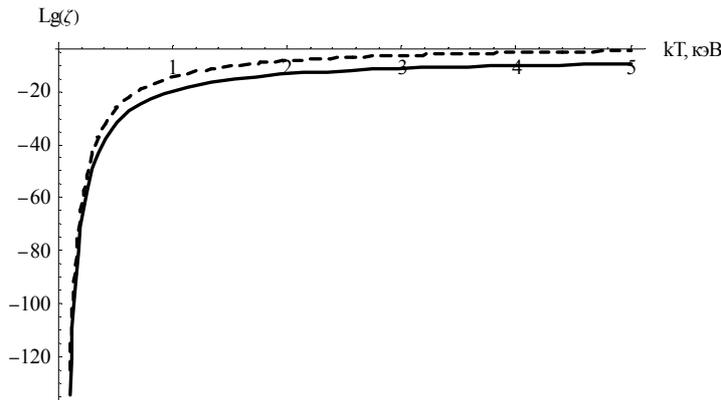
Сечение $\sigma(M1)$		$\langle\sigma v\rangle$	
Энергия, кэВ	см^2	кТ, кэВ	$\text{см}^3/\text{с}$
1	-	0,3	-
2	-	0,4	-
3	-	0,5	3,6E-46
4	-	0,6	5,6E-42
5	-	0,7	5,46E-39
6	-	0,8	9,49E-37
7	-	0,9	5,22E-35
8	-	1	1,29E-33
9	-	1,1	1,77E-32
10	-	1,2	1,57E-31
11	-	1,3	9,98E-31
12	-	1,4	4,86E-30
13	-	1,5	1,92E-29
14	-	1,6	6,38E-29
15	-	1,7	1,84E-28
16	-	1,8	4,73E-28
17	-	1,9	1,1E-27
18	-	2	2,35E-27
19	-	2,1	4,69E-27
20	-	2,2	8,77E-27
21	-	2,3	1,55E-26
22	-	2,4	2,63E-26
23	-	2,5	4,26E-26
24	-	2,6	6,65E-26
25	-	2,7	1,01E-25
26	-	2,8	1,48E-25
27	-	2,9	2,11E-25
28	-	3	2,96E-25
29	5,35E-32	3,1	4,04E-25
30	8,24E-32	3,2	5,43E-25
31	1,05E-31	3,3	7,16E-25
32	1,25E-31	3,4	9,29E-25
33	1,43E-31	3,5	1,19E-24
34	1,6E-31	3,6	1,5E-24
35	1,76E-31	3,7	1,87E-24
36	1,92E-31	3,8	2,3E-24
37	2,06E-31	3,9	2,81E-24
38	2,2E-31	4	3,39E-24
39	2,34E-31	4,1	4,06E-24
40	2,47E-31	4,2	4,82E-24
		4,3	5,68E-24
		4,4	6,65E-24
		4,5	7,72E-24
		4,6	8,91E-24
		4,7	1,02E-23
		4,8	1,17E-23
		4,9	1,33E-23
		5	1,5E-23

Co-58 (M1)

Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).

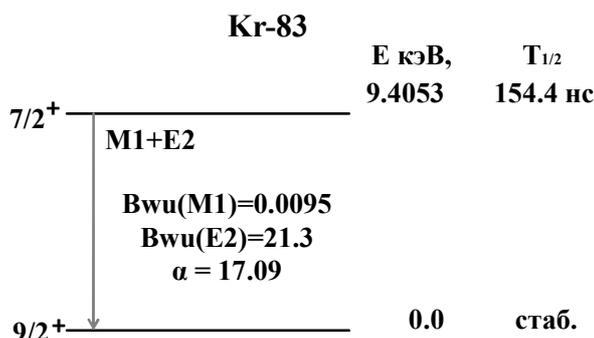


2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).
 Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ нс}$.



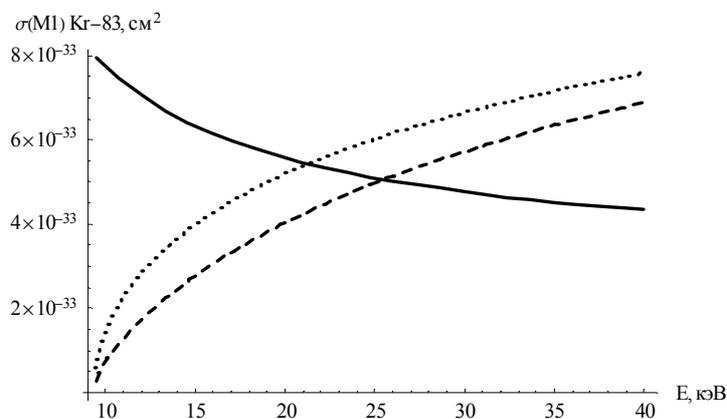
kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	-	-	-
0,4	-	-	-
0,5	1,54E-27	-	5,39E-33
0,6	1,86E-23	-	8,39E-29
0,7	1,53E-20	-	8,2E-26
0,8	2,36E-18	-	1,42E-23
0,9	1,19E-16	-	7,84E-22
1	2,72E-15	-	1,93E-20
1,1	3,53E-14	-	2,66E-19
1,2	2,99E-13	-	2,36E-18
1,3	1,82E-12	-	1,5E-17
1,4	8,59E-12	-	7,29E-17
1,5	3,29E-11	-	2,88E-16
1,6	1,07E-10	-	9,57E-16
1,7	3E-10	-	2,76E-15
1,8	7,55E-10	-	7,1E-15
1,9	1,72E-09	-	1,65E-14
2	3,62E-09	-	3,53E-14
2,1	7,08E-09	-	7,03E-14
2,2	1,3E-08	-	1,31E-13
2,3	2,28E-08	-	2,33E-13
2,4	3,79E-08	-	3,94E-13
2,5	6,07E-08	-	6,38E-13
2,6	9,37E-08	-	9,98E-13
2,7	1,4E-07	-	1,51E-12
2,8	2,03E-07	-	2,22E-12
2,9	2,88E-07	-	3,17E-12
3	3,98E-07	-	4,43E-12
3,1	5,39E-07	-	6,07E-12
3,2	7,16E-07	-	8,14E-12
3,3	9,35E-07	-	1,07E-11
3,4	1,2E-06	-	1,39E-11
3,5	1,52E-06	-	1,78E-11
3,6	1,91E-06	-	2,25E-11
3,7	2,36E-06	-	2,8E-11
3,8	2,88E-06	-	3,46E-11
3,9	3,48E-06	-	4,21E-11
4	4,17E-06	-	5,09E-11
4,1	4,96E-06	-	6,1E-11
4,2	5,84E-06	-	7,24E-11
4,3	6,83E-06	-	8,52E-11
4,4	7,93E-06	-	9,97E-11
4,5	9,14E-06	-	1,16E-10
4,6	1,05E-05	-	1,34E-10
4,7	1,19E-05	-	1,53E-10
4,8	1,35E-05	-	1,75E-10
4,9	1,53E-05	-	1,99E-10
5	1,71E-05	-	2,25E-10

Kr-83 (M1)

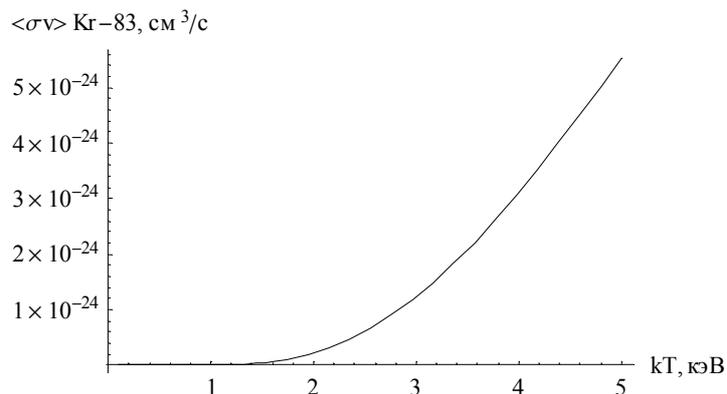


Γ_{rad}	$2.36 \cdot 10^{-13}$ кэВ
$B_{\text{wu}}(M1)$	0,0095
α	17.09

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).

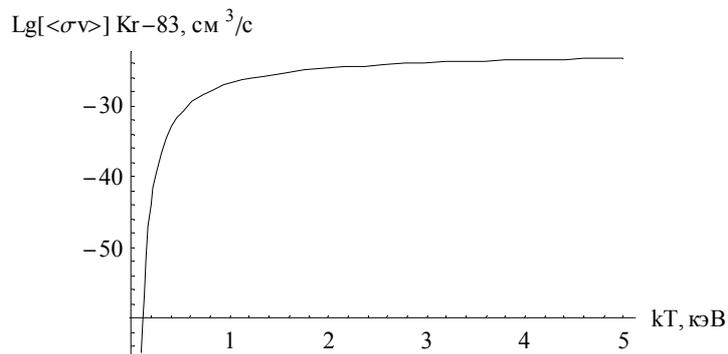


Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

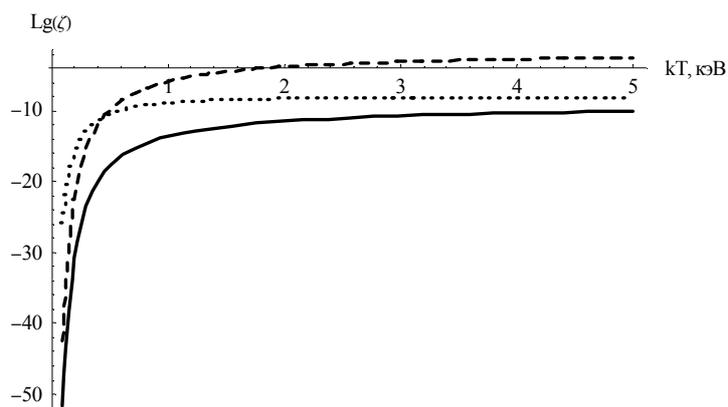
Сечение $\sigma(M1)$		$\langle\sigma v\rangle$	
Энергия, кэВ	см ²	кТ, кэВ	см ³ /с
1	-	0,3	-
2	-	0,4	7,56E-34
3	-	0,5	9,51E-32
4	-	0,6	2,39E-30
5	-	0,7	2,4E-29
6	-	0,8	1,36E-28
7	-	0,9	5,24E-28
8	-	1	1,55E-27
9	-	1,1	3,77E-27
10	7,47E-34	1,2	7,93E-27
11	1,3E-33	1,3	1,49E-26
12	1,74E-33	1,4	2,56E-26
13	2,12E-33	1,5	4,11E-26
14	2,46E-33	1,6	6,23E-26
15	2,77E-33	1,7	9E-26
16	3,06E-33	1,8	1,25E-25
17	3,33E-33	1,9	1,68E-25
18	3,57E-33	2	2,19E-25
19	3,81E-33	2,1	2,8E-25
20	4,03E-33	2,2	3,49E-25
21	4,24E-33	2,3	4,28E-25
22	4,43E-33	2,4	5,16E-25
23	4,62E-33	2,5	6,14E-25
24	4,8E-33	2,6	7,21E-25
25	4,97E-33	2,7	8,37E-25
26	5,13E-33	2,8	9,63E-25
27	5,29E-33	2,9	1,1E-24
28	5,44E-33	3	1,24E-24
29	5,58E-33	3,1	1,39E-24
30	5,72E-33	3,2	1,55E-24
31	5,85E-33	3,3	1,72E-24
32	5,98E-33	3,4	1,9E-24
33	6,11E-33	3,5	2,08E-24
34	6,23E-33	3,6	2,27E-24
35	6,34E-33	3,7	2,47E-24
36	6,46E-33	3,8	2,67E-24
37	6,57E-33	3,9	2,88E-24
38	6,67E-33	4	3,1E-24
39	6,78E-33	4,1	3,32E-24
40	6,88E-33	4,2	3,55E-24
		4,3	3,78E-24
		4,4	4,02E-24
		4,5	4,26E-24
		4,6	4,51E-24
		4,7	4,76E-24
		4,8	5,01E-24
		4,9	5,27E-24
		5	5,54E-24

Kr-83 (M1)

Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).

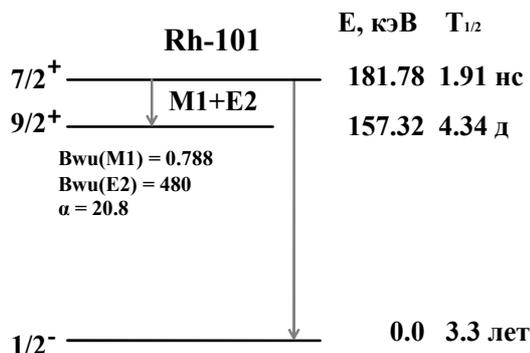


2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).
 Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ нс}$.



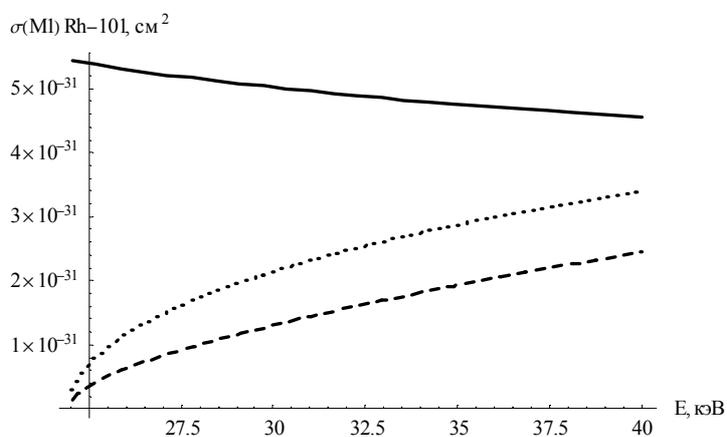
kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	-	1,44E-13	-
0,4	1,1E-12	4,69E-12	1,13E-20
0,5	1,21E-10	3,53E-11	1,43E-18
0,6	2,79E-09	1,29E-10	3,59E-17
0,7	2,62E-08	3,13E-10	3,6E-16
0,8	1,4E-07	5,93E-10	2,04E-15
0,9	5,18E-07	9,55E-10	7,87E-15
1	1,47E-06	1,37E-09	2,32E-14
1,1	3,46E-06	1,83E-09	5,65E-14
1,2	7,07E-06	2,29E-09	1,19E-13
1,3	1,29E-05	2,75E-09	2,23E-13
1,4	2,17E-05	3,18E-09	3,85E-13
1,5	3,39E-05	3,59E-09	6,17E-13
1,6	5,03E-05	3,96E-09	9,34E-13
1,7	7,11E-05	4,3E-09	1,35E-12
1,8	9,68E-05	4,6E-09	1,87E-12
1,9	0,000128	4,87E-09	2,52E-12
2	0,000164	5,1E-09	3,29E-12
2,1	0,000205	5,3E-09	4,19E-12
2,2	0,000253	5,48E-09	5,23E-12
2,3	0,000305	5,62E-09	6,42E-12
2,4	0,000363	5,74E-09	7,74E-12
2,5	0,000426	5,84E-09	9,2E-12
2,6	0,000494	5,92E-09	1,08E-11
2,7	0,000567	5,98E-09	1,26E-11
2,8	0,000645	6,03E-09	1,44E-11
2,9	0,000727	6,06E-09	1,65E-11
3	0,000814	6,08E-09	1,86E-11
3,1	0,000905	6,09E-09	2,09E-11
3,2	0,001	6,09E-09	2,33E-11
3,3	0,001099	6,08E-09	2,58E-11
3,4	0,001201	6,06E-09	2,84E-11
3,5	0,001308	6,04E-09	3,12E-11
3,6	0,001417	6,01E-09	3,4E-11
3,7	0,001529	5,97E-09	3,7E-11
3,8	0,001645	5,93E-09	4,01E-11
3,9	0,001763	5,89E-09	4,32E-11
4	0,001884	5,85E-09	4,65E-11
4,1	0,002008	5,8E-09	4,98E-11
4,2	0,002134	5,75E-09	5,32E-11
4,3	0,002263	5,69E-09	5,67E-11
4,4	0,002394	5,64E-09	6,03E-11
4,5	0,002526	5,58E-09	6,39E-11
4,6	0,002661	5,53E-09	6,76E-11
4,7	0,002798	5,47E-09	7,14E-11
4,8	0,002937	5,41E-09	7,52E-11
4,9	0,003077	5,35E-09	7,91E-11
5	0,003219	5,29E-09	8,3E-11

Rh-101 (M1)

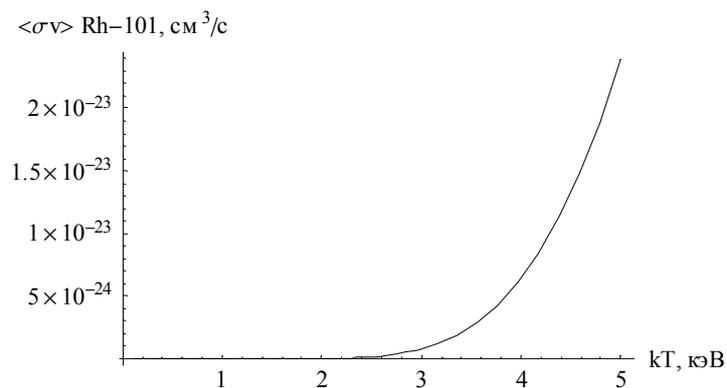


Γ_{rad}	$1.58 \cdot 10^{-11}$ кэВ
$B_{\text{wu}}(M1)$	0,788
α	20.8

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).

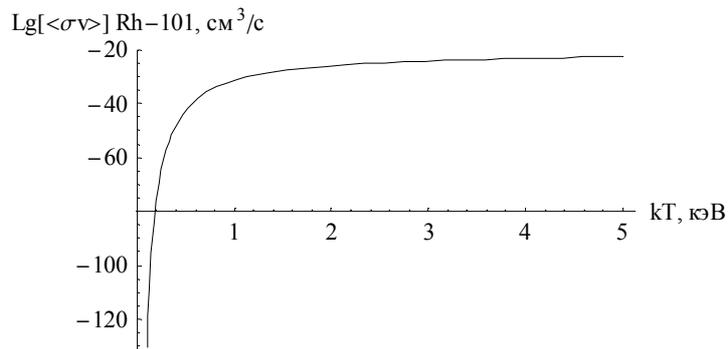


Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

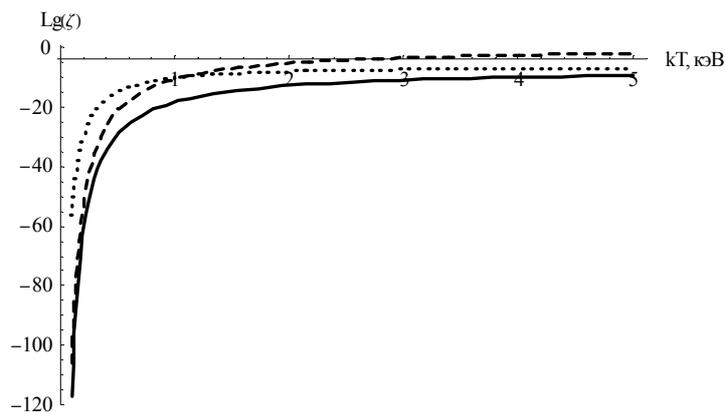
Сечение $\sigma(M1)$		$\langle\sigma v\rangle$	
Энергия, кэВ	см^2	кТ, кэВ	$\text{см}^3/\text{с}$
1	-	0,3	-
2	-	0,4	1,9E-48
3	-	0,5	5,48E-43
4	-	0,6	2,36E-39
5	-	0,7	9,21E-37
6	-	0,8	8,06E-35
7	-	0,9	2,6E-33
8	-	1	4,2E-32
9	-	1,1	4,08E-31
10	-	1,2	2,71E-30
11	-	1,3	1,35E-29
12	-	1,4	5,34E-29
13	-	1,5	1,76E-28
14	-	1,6	4,99E-28
15	-	1,7	1,25E-27
16	-	1,8	2,85E-27
17	-	1,9	5,93E-27
18	-	2	1,15E-26
19	-	2,1	2,09E-26
20	-	2,2	3,6E-26
21	-	2,3	5,93E-26
22	-	2,4	9,36E-26
23	-	2,5	1,43E-25
24	-	2,6	2,1E-25
25	3,61E-32	2,7	3,02E-25
26	6,28E-32	2,8	4,22E-25
27	8,28E-32	2,9	5,76E-25
28	1E-31	3	7,72E-25
29	1,16E-31	3,1	1,01E-24
30	1,3E-31	3,2	1,31E-24
31	1,44E-31	3,3	1,67E-24
32	1,57E-31	3,4	2,1E-24
33	1,69E-31	3,5	2,6E-24
34	1,81E-31	3,6	3,18E-24
35	1,93E-31	3,7	3,86E-24
36	2,04E-31	3,8	4,64E-24
37	2,14E-31	3,9	5,52E-24
38	2,25E-31	4	6,51E-24
39	2,35E-31	4,1	7,62E-24
40	2,44E-31	4,2	8,85E-24
		4,3	1,02E-23
		4,4	1,17E-23
		4,5	1,34E-23
		4,6	1,52E-23
		4,7	1,71E-23
		4,8	1,92E-23
		4,9	2,15E-23
		5	2,39E-23

Rh-101 (M1)

Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).

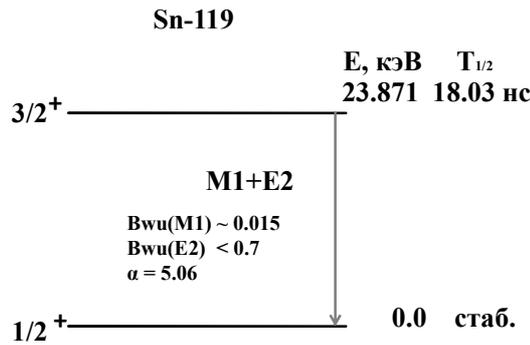


2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).
 Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ нс}$.



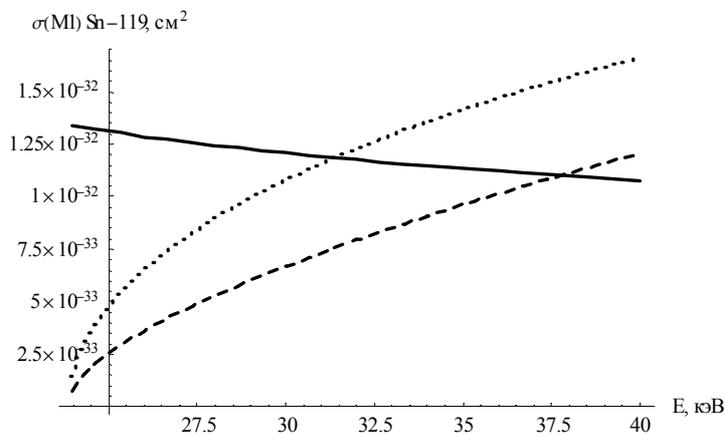
kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	-	-	-
0,4	3,33E-27	2,55E-18	2,85E-35
0,5	6,82E-22	8,25E-16	8,22E-30
0,6	2,37E-18	3,7E-14	3,54E-26
0,7	8,02E-16	5,4E-13	1,38E-23
0,8	6,32E-14	3,92E-12	1,21E-21
0,9	1,89E-12	1,8E-11	3,91E-20
1	2,86E-11	5,97E-11	6,3E-19
1,1	2,64E-10	1,57E-10	6,12E-18
1,2	1,69E-09	3,49E-10	4,07E-17
1,3	8,09E-09	6,78E-10	2,02E-16
1,4	3,1E-08	1,19E-09	8,01E-16
1,5	9,94E-08	1,92E-09	2,64E-15
1,6	2,76E-07	2,9E-09	7,49E-15
1,7	6,77E-07	4,15E-09	1,88E-14
1,8	1,51E-06	5,68E-09	4,27E-14
1,9	3,08E-06	7,48E-09	8,9E-14
2	5,86E-06	9,56E-09	1,72E-13
2,1	1,05E-05	1,19E-08	3,14E-13
2,2	1,78E-05	1,44E-08	5,4E-13
2,3	2,89E-05	1,72E-08	8,89E-13
2,4	4,5E-05	2,02E-08	1,4E-12
2,5	6,77E-05	2,32E-08	2,14E-12
2,6	9,86E-05	2,64E-08	3,15E-12
2,7	0,00014	2,97E-08	4,52E-12
2,8	0,000193	3,31E-08	6,32E-12
2,9	0,000261	3,65E-08	8,64E-12
3	0,000346	4E-08	1,16E-11
3,1	0,00045	4,34E-08	1,52E-11
3,2	0,000576	4,68E-08	1,97E-11
3,3	0,000726	5,02E-08	2,5E-11
3,4	0,000902	5,35E-08	3,14E-11
3,5	0,001109	5,68E-08	3,9E-11
3,6	0,001346	6E-08	4,78E-11
3,7	0,001618	6,31E-08	5,79E-11
3,8	0,001926	6,61E-08	6,95E-11
3,9	0,002272	6,91E-08	8,27E-11
4	0,002659	7,19E-08	9,76E-11
4,1	0,003088	7,47E-08	1,14E-10
4,2	0,003561	7,73E-08	1,33E-10
4,3	0,004079	7,99E-08	1,53E-10
4,4	0,004644	8,23E-08	1,76E-10
4,5	0,005257	8,46E-08	2E-10
4,6	0,00592	8,69E-08	2,27E-10
4,7	0,006633	8,9E-08	2,56E-10
4,8	0,007397	9,11E-08	2,88E-10
4,9	0,008213	9,3E-08	3,22E-10
5	0,009082	9,48E-08	3,58E-10

Sn-119 (M1)

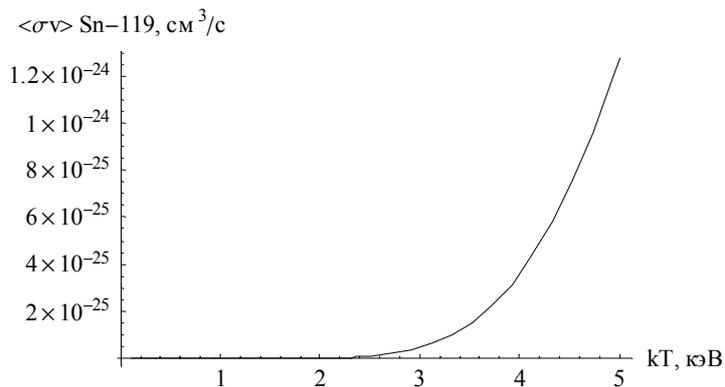


Γ_{rad}	$6,02 * 10^{-12}$ кэВ
$B_{\text{wu}}(M1)$	0,015
α	5.06

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).

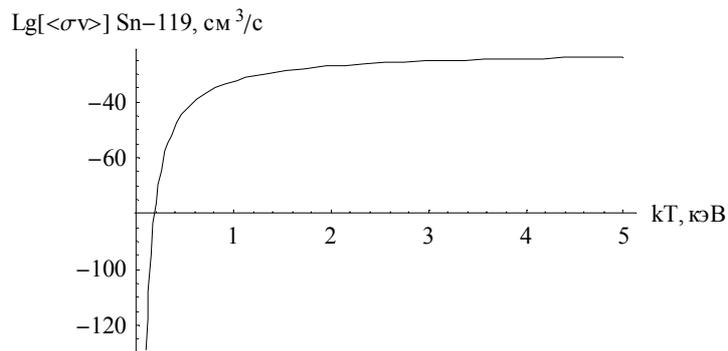


Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

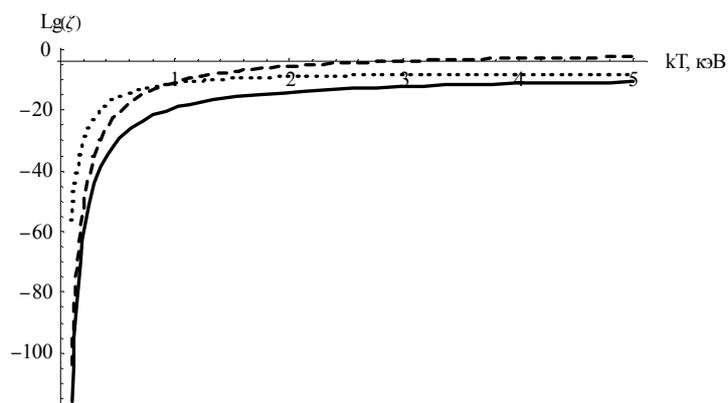
Сечение $\sigma(M1)$		$\langle\sigma v\rangle$	
Энергия, кэВ	см ²	кТ, кэВ	см ³ /с
1	-	0,3	-
2	-	0,4	-
3	-	0,5	8,61E-44
4	-	0,6	3,02E-40
5	-	0,7	1,02E-37
6	-	0,8	8,03E-36
7	-	0,9	2,39E-34
8	-	1	3,6E-33
9	-	1,1	3,31E-32
10	-	1,2	2,11E-31
11	-	1,3	1,01E-30
12	-	1,4	3,86E-30
13	-	1,5	1,23E-29
14	-	1,6	3,42E-29
15	-	1,7	8,41E-29
16	-	1,8	1,87E-28
17	-	1,9	3,83E-28
18	-	2	7,31E-28
19	-	2,1	1,31E-27
20	-	2,2	2,23E-27
21	-	2,3	3,63E-27
22	-	2,4	5,67E-27
23	-	2,5	8,55E-27
24	8,37E-34	2,6	1,25E-26
25	2,56E-33	2,7	1,78E-26
26	3,62E-33	2,8	2,47E-26
27	4,5E-33	2,9	3,34E-26
28	5,28E-33	3	4,45E-26
29	6E-33	3,1	5,81E-26
30	6,68E-33	3,2	7,47E-26
31	7,32E-33	3,3	9,46E-26
32	7,93E-33	3,4	1,18E-25
33	8,51E-33	3,5	1,46E-25
34	9,08E-33	3,6	1,78E-25
35	9,62E-33	3,7	2,15E-25
36	1,01E-32	3,8	2,57E-25
37	1,06E-32	3,9	3,04E-25
38	1,11E-32	4	3,57E-25
39	1,16E-32	4,1	4,17E-25
40	1,21E-32	4,2	4,83E-25
		4,3	5,56E-25
		4,4	6,35E-25
		4,5	7,22E-25
		4,6	8,17E-25
		4,7	9,19E-25
		4,8	1,03E-24
		4,9	1,15E-24
		5	1,27E-24

Sn-119 (M1)

Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).

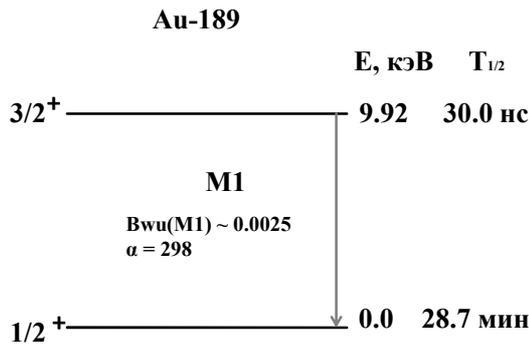


2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).
 Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ нс}$.



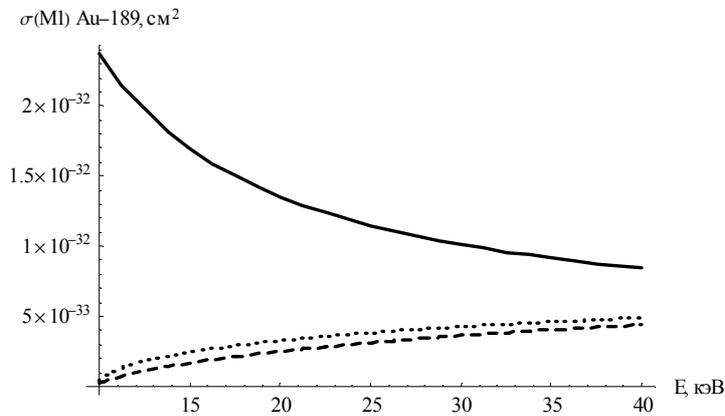
kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	-	-	-
0,4	5,53E-27	4,93E-19	6,07E-36
0,5	8,44E-22	1,38E-16	1,29E-30
0,6	2,41E-18	5,61E-15	4,54E-27
0,7	7,09E-16	7,63E-14	1,53E-24
0,8	5,03E-14	5,26E-13	1,21E-22
0,9	1,39E-12	2,31E-12	3,58E-21
1	1,97E-11	7,44E-12	5,4E-20
1,1	1,72E-10	1,91E-11	4,97E-19
1,2	1,05E-09	4,14E-11	3,16E-18
1,3	4,85E-09	7,88E-11	1,51E-17
1,4	1,8E-08	1,36E-10	5,79E-17
1,5	5,61E-08	2,16E-10	1,85E-16
1,6	1,52E-07	3,23E-10	5,13E-16
1,7	3,65E-07	4,57E-10	1,26E-15
1,8	7,96E-07	6,2E-10	2,81E-15
1,9	1,6E-06	8,1E-10	5,75E-15
2	3E-06	1,03E-09	1,1E-14
2,1	5,29E-06	1,27E-09	1,97E-14
2,2	8,88E-06	1,53E-09	3,35E-14
2,3	1,42E-05	1,81E-09	5,44E-14
2,4	2,19E-05	2,11E-09	8,5E-14
2,5	3,26E-05	2,42E-09	1,28E-13
2,6	4,71E-05	2,75E-09	1,87E-13
2,7	6,62E-05	3,08E-09	2,67E-13
2,8	9,08E-05	3,41E-09	3,7E-13
2,9	0,000122	3,75E-09	5,02E-13
3	0,00016	4,09E-09	6,67E-13
3,1	0,000207	4,42E-09	8,72E-13
3,2	0,000264	4,76E-09	1,12E-12
3,3	0,000331	5,09E-09	1,42E-12
3,4	0,000409	5,41E-09	1,77E-12
3,5	0,0005	5,73E-09	2,19E-12
3,6	0,000604	6,04E-09	2,67E-12
3,7	0,000723	6,34E-09	3,22E-12
3,8	0,000857	6,63E-09	3,85E-12
3,9	0,001007	6,91E-09	4,56E-12
4	0,001175	7,18E-09	5,36E-12
4,1	0,001359	7,44E-09	6,25E-12
4,2	0,001562	7,69E-09	7,24E-12
4,3	0,001783	7,93E-09	8,33E-12
4,4	0,002024	8,16E-09	9,53E-12
4,5	0,002285	8,38E-09	1,08E-11
4,6	0,002566	8,59E-09	1,23E-11
4,7	0,002867	8,79E-09	1,38E-11
4,8	0,003189	8,98E-09	1,54E-11
4,9	0,003533	9,16E-09	1,72E-11
5	0,003897	9,33E-09	1,91E-11

Au-189 (M1)

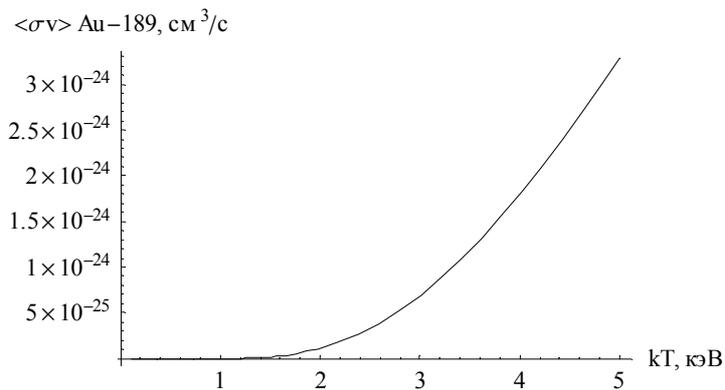


Γ _{rad}	7.34 * 10 ⁻¹⁴ кэВ
Bwu (M1)	0,0025
α	298

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).



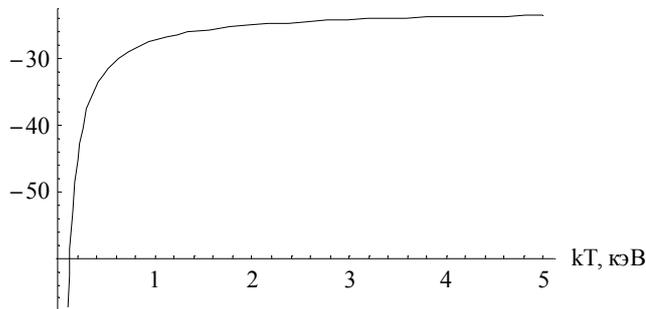
Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

Сечение σ(M1)		⟨σv⟩	
Энергия, кэВ	см ²	кТ, кэВ	см ³ /с
1	-	0,3	-
2	-	0,4	1,37E-34
3	-	0,5	2,25E-32
4	-	0,6	6,72E-31
5	-	0,7	7,64E-30
6	-	0,8	4,74E-29
7	-	0,9	1,97E-28
8	-	1	6,15E-28
9	-	1,1	1,57E-27
10	1,69E-34	1,2	3,43E-27
11	6,64E-34	1,3	6,66E-27
12	9,71E-34	1,4	1,18E-26
13	1,23E-33	1,5	1,94E-26
14	1,46E-33	1,6	3E-26
15	1,67E-33	1,7	4,41E-26
16	1,86E-33	1,8	6,23E-26
17	2,03E-33	1,9	8,49E-26
18	2,2E-33	2	1,12E-25
19	2,36E-33	2,1	1,45E-25
20	2,5E-33	2,2	1,83E-25
21	2,64E-33	2,3	2,26E-25
22	2,77E-33	2,4	2,75E-25
23	2,9E-33	2,5	3,3E-25
24	3,01E-33	2,6	3,91E-25
25	3,13E-33	2,7	4,57E-25
26	3,23E-33	2,8	5,29E-25
27	3,34E-33	2,9	6,07E-25
28	3,44E-33	3	6,9E-25
29	3,53E-33	3,1	7,78E-25
30	3,62E-33	3,2	8,72E-25
31	3,71E-33	3,3	9,71E-25
32	3,8E-33	3,4	1,08E-24
33	3,88E-33	3,5	1,18E-24
34	3,96E-33	3,6	1,3E-24
35	4,04E-33	3,7	1,41E-24
36	4,11E-33	3,8	1,54E-24
37	4,19E-33	3,9	1,66E-24
38	4,26E-33	4	1,79E-24
39	4,33E-33	4,1	1,93E-24
40	4,39E-33	4,2	2,07E-24
		4,3	2,21E-24
		4,4	2,35E-24
		4,5	2,5E-24
		4,6	2,65E-24
		4,7	2,8E-24
		4,8	2,96E-24
		4,9	3,12E-24
		5	3,28E-24

Au-189 (M1)

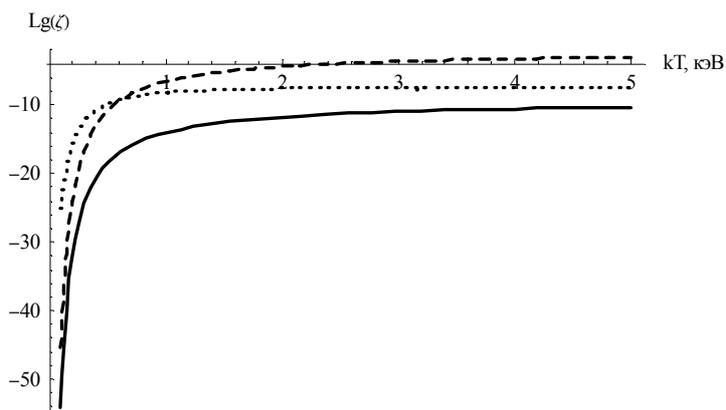
Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).

$Lg[\langle\sigma v\rangle] \text{ Au-189, см}^3/\text{с}$



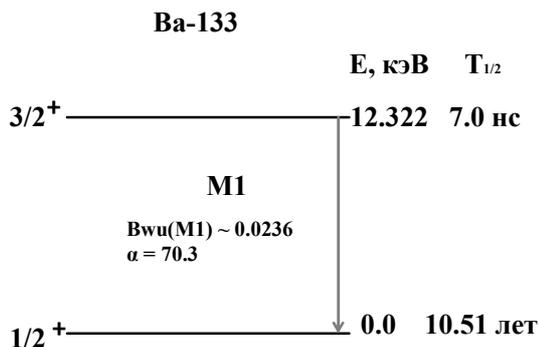
2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).

Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ нс}$.



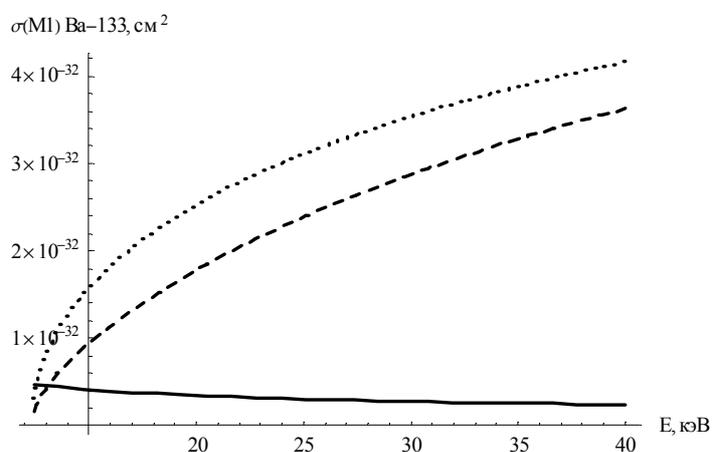
kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	-	3,3E-13	-
0,4	9,46E-14	1,34E-11	2,06E-21
0,5	1,35E-11	1,14E-10	3,37E-19
0,6	3,68E-10	4,55E-10	1,01E-17
0,7	3,9E-09	1,18E-09	1,15E-16
0,8	2,3E-08	2,33E-09	7,11E-16
0,9	9,11E-08	3,89E-09	2,95E-15
1	2,74E-07	5,77E-09	9,23E-15
1,1	6,76E-07	7,85E-09	2,35E-14
1,2	1,43E-06	1E-08	5,14E-14
1,3	2,71E-06	1,22E-08	9,99E-14
1,4	4,67E-06	1,44E-08	1,77E-13
1,5	7,49E-06	1,64E-08	2,91E-13
1,6	1,13E-05	1,83E-08	4,49E-13
1,7	1,63E-05	2,01E-08	6,61E-13
1,8	2,26E-05	2,17E-08	9,34E-13
1,9	3,03E-05	2,31E-08	1,27E-12
2	3,94E-05	2,44E-08	1,68E-12
2,1	4,99E-05	2,55E-08	2,17E-12
2,2	6,2E-05	2,64E-08	2,74E-12
2,3	7,57E-05	2,73E-08	3,39E-12
2,4	9,08E-05	2,8E-08	4,13E-12
2,5	0,000107	2,86E-08	4,95E-12
2,6	0,000126	2,91E-08	5,86E-12
2,7	0,000145	2,95E-08	6,86E-12
2,8	0,000166	2,99E-08	7,94E-12
2,9	0,000188	3,01E-08	9,1E-12
3	0,000212	3,03E-08	1,03E-11
3,1	0,000237	3,04E-08	1,17E-11
3,2	0,000263	3,05E-08	1,31E-11
3,3	0,00029	3,05E-08	1,46E-11
3,4	0,000319	3,05E-08	1,61E-11
3,5	0,000348	3,04E-08	1,78E-11
3,6	0,000378	3,04E-08	1,95E-11
3,7	0,00041	3,02E-08	2,12E-11
3,8	0,000442	3,01E-08	2,31E-11
3,9	0,000475	2,99E-08	2,5E-11
4	0,000509	2,98E-08	2,69E-11
4,1	0,000544	2,95E-08	2,89E-11
4,2	0,00058	2,93E-08	3,1E-11
4,3	0,000616	2,91E-08	3,31E-11
4,4	0,000653	2,89E-08	3,53E-11
4,5	0,000691	2,86E-08	3,75E-11
4,6	0,00073	2,84E-08	3,98E-11
4,7	0,000768	2,81E-08	4,21E-11
4,8	0,000808	2,78E-08	4,44E-11
4,9	0,000848	2,76E-08	4,68E-11
5	0,000889	2,73E-08	4,92E-11

Ва-133 (M1)

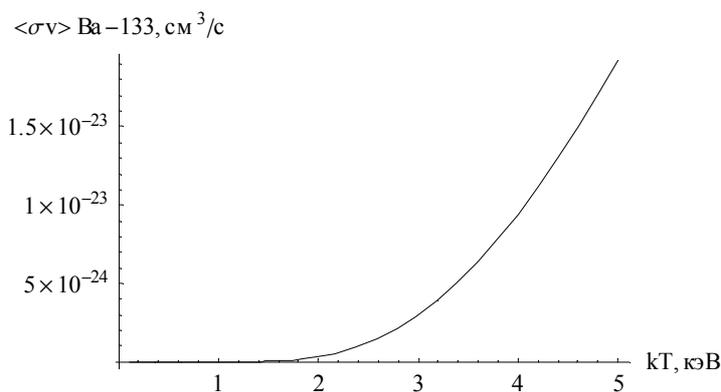


Γ_{rad}	$1.32 * 10^{-12}$ кэВ
$B_{wu}(M1)$	0,0236
α	70.3

1. Неупругое рассеяние электронов



Сечения электронного рассеяния в борновском приближении (пунктирная линия), в нерелятивистском приближении (точечная линия), по методу ХФС (сплошная линия).



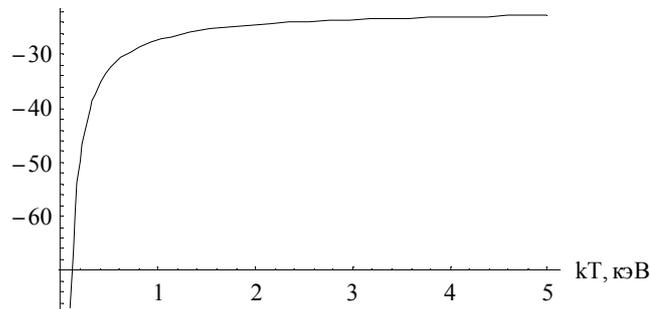
Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы. Справа приведены значения сечения неупругого рассеяния электронов на ядрах и транспортного сечения для расчета в борновском приближении.

Сечение $\sigma(M1)$		$\langle\sigma v\rangle$	
Энергия, кэВ	$см^2$	кТ, кэВ	$см^3/с$
1	-	0,3	-
2	-	0,4	3,13E-36
3	-	0,5	1,75E-33
4	-	0,6	1,18E-31
5	-	0,7	2,4E-30
6	-	0,8	2,3E-29
7	-	0,9	1,33E-28
8	-	1	5,46E-28
9	-	1,1	1,73E-27
10	-	1,2	4,55E-27
11	-	1,3	1,03E-26
12	-	1,4	2,08E-26
13	4,32E-33	1,5	3,83E-26
14	7,14E-33	1,6	6,53E-26
15	9,39E-33	1,7	1,05E-25
16	1,14E-32	1,8	1,6E-25
17	1,31E-32	1,9	2,34E-25
18	1,48E-32	2	3,29E-25
19	1,63E-32	2,1	4,49E-25
20	1,78E-32	2,2	5,96E-25
21	1,91E-32	2,3	7,73E-25
22	2,04E-32	2,4	9,81E-25
23	2,16E-32	2,5	1,22E-24
24	2,28E-32	2,6	1,5E-24
25	2,39E-32	2,7	1,81E-24
26	2,49E-32	2,8	2,16E-24
27	2,6E-32	2,9	2,55E-24
28	2,69E-32	3	2,98E-24
29	2,79E-32	3,1	3,45E-24
30	2,87E-32	3,2	3,95E-24
31	2,96E-32	3,3	4,5E-24
32	3,04E-32	3,4	5,08E-24
33	3,13E-32	3,5	5,7E-24
34	3,2E-32	3,6	6,37E-24
35	3,28E-32	3,7	7,06E-24
36	3,35E-32	3,8	7,8E-24
37	3,42E-32	3,9	8,57E-24
38	3,49E-32	4	9,37E-24
39	3,56E-32	4,1	1,02E-23
40	3,62E-32	4,2	1,11E-23
		4,3	1,2E-23
		4,4	1,29E-23
		4,5	1,39E-23
		4,6	1,49E-23
		4,7	1,59E-23
		4,8	1,7E-23
		4,9	1,81E-23
		5	1,92E-23

Ba-133 (M1)

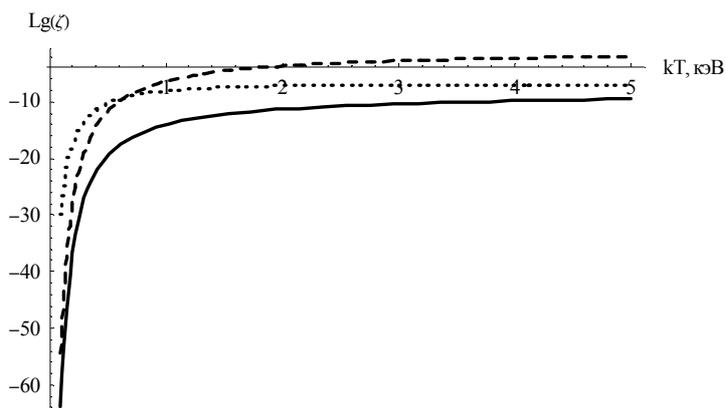
Зависимость транспортного сечения (в борновском приближении) от температуры плазмы (логарифмический масштаб).

$Lg[\langle\sigma v\rangle] \text{ Ba-133, см}^3/\text{с}$



2. Сравнение механизмов неупругого рассеяния электронов (сплошная линия), обратной внутренней электронной конверсии (точечная линия), возбуждения собственным тепловым излучением плазмы (пунктирная линия).

Концентрация электронов $n_e = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$,
 Время существования сгустка плазмы $\tau = 50 \text{ нс}$.



kT, кэВ	Эффективность возбуждения		
	Фото возбужд.	ОВЭК	Рассеяние электронов
0,3	-	-	-
0,4	4,19E-15	2,81E-12	4,7E-23
0,5	1,99E-12	4,38E-11	2,62E-20
0,6	1,21E-10	2,6E-10	1,77E-18
0,7	2,27E-09	8,95E-10	3,6E-17
0,8	2,05E-08	2,2E-09	3,45E-16
0,9	1,13E-07	4,34E-09	2E-15
1	4,46E-07	7,35E-09	8,19E-15
1,1	1,37E-06	1,11E-08	2,6E-14
1,2	3,48E-06	1,56E-08	6,82E-14
1,3	7,66E-06	2,05E-08	1,54E-13
1,4	1,51E-05	2,58E-08	3,12E-13
1,5	2,71E-05	3,12E-08	5,74E-13
1,6	4,53E-05	3,66E-08	9,8E-13
1,7	7,13E-05	4,19E-08	1,57E-12
1,8	0,000107	4,7E-08	2,4E-12
1,9	0,000153	5,19E-08	3,51E-12
2	0,000212	5,65E-08	4,94E-12
2,1	0,000284	6,08E-08	6,74E-12
2,2	0,000371	6,48E-08	8,94E-12
2,3	0,000474	6,85E-08	1,16E-11
2,4	0,000594	7,19E-08	1,47E-11
2,5	0,00073	7,49E-08	1,83E-11
2,6	0,000884	7,76E-08	2,25E-11
2,7	0,001055	8,01E-08	2,72E-11
2,8	0,001244	8,23E-08	3,25E-11
2,9	0,001451	8,42E-08	3,83E-11
3	0,001676	8,59E-08	4,47E-11
3,1	0,001918	8,74E-08	5,17E-11
3,2	0,002177	8,87E-08	5,93E-11
3,3	0,002453	8,98E-08	6,75E-11
3,4	0,002745	9,07E-08	7,62E-11
3,5	0,003054	9,14E-08	8,56E-11
3,6	0,003378	9,2E-08	9,55E-11
3,7	0,003718	9,25E-08	1,06E-10
3,8	0,004072	9,29E-08	1,17E-10
3,9	0,004441	9,31E-08	1,29E-10
4	0,004823	9,33E-08	1,41E-10
4,1	0,005219	9,33E-08	1,53E-10
4,2	0,005628	9,33E-08	1,66E-10
4,3	0,00605	9,32E-08	1,8E-10
4,4	0,006483	9,3E-08	1,94E-10
4,5	0,006928	9,27E-08	2,09E-10
4,6	0,007385	9,24E-08	2,24E-10
4,7	0,007852	9,21E-08	2,39E-10
4,8	0,008329	9,17E-08	2,55E-10
4,9	0,008816	9,13E-08	2,71E-10
5	0,009314	9,08E-08	2,88E-10

Графики высвобождаемой энергии и потерь на излучение от температуры плазмы (на примере модельных ядер с различными коэффициентами внутренней электронной конверсии α)

Модельное ядро 1.

n_e – концентрация электронов в плазме, $n_e = 10^{24} \text{ см}^{-3}$

τ – время существования сгустка плазмы, $\tau = 10^{-7} \text{ с}$

V – объем зоны реакции, $V = 10^{-6} \text{ см}^3$

n_{is} – концентрация изомерных ядер, $n_{is} \approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$

Модельное ядро

$A=200$

$Z=80$

$m \rightarrow t$, переход E1

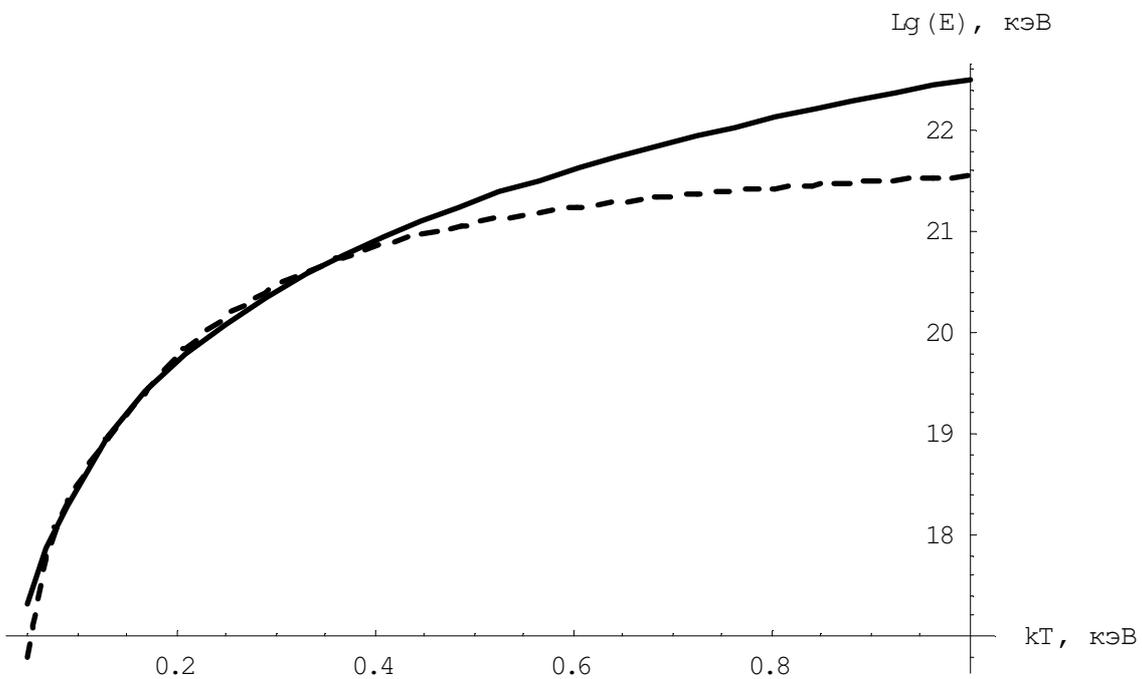
lifetime = 10^{-10}

$E_{mt} = 1 \text{ кэВ}$

$E_{tg} = 1000 \text{ кэВ}$

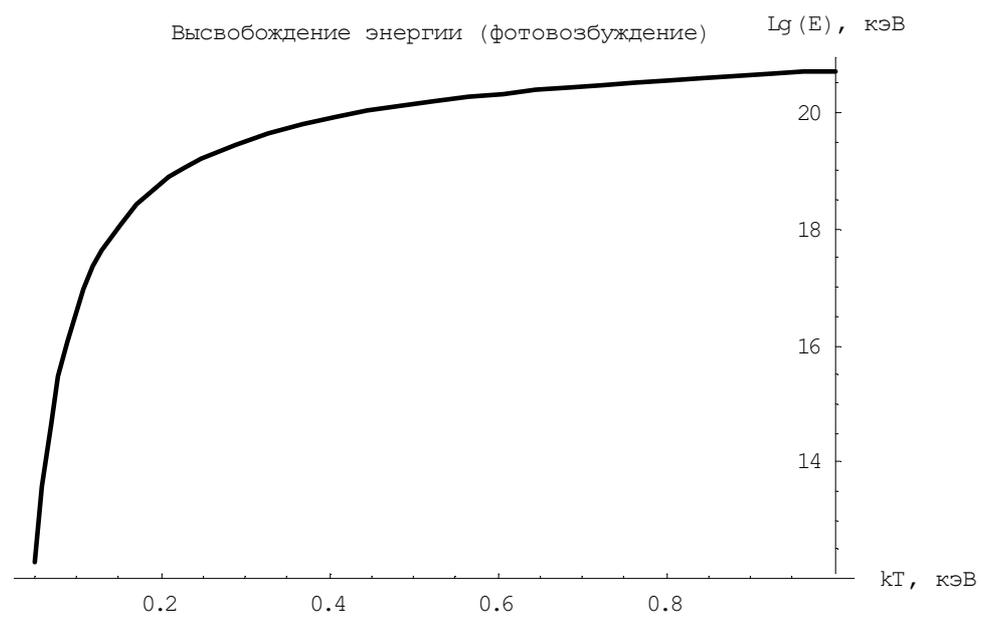
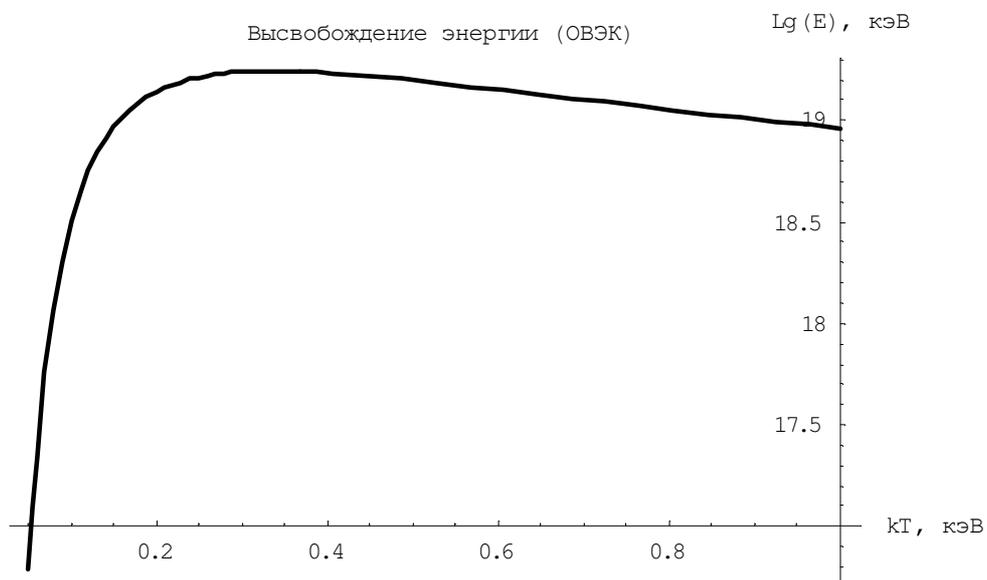
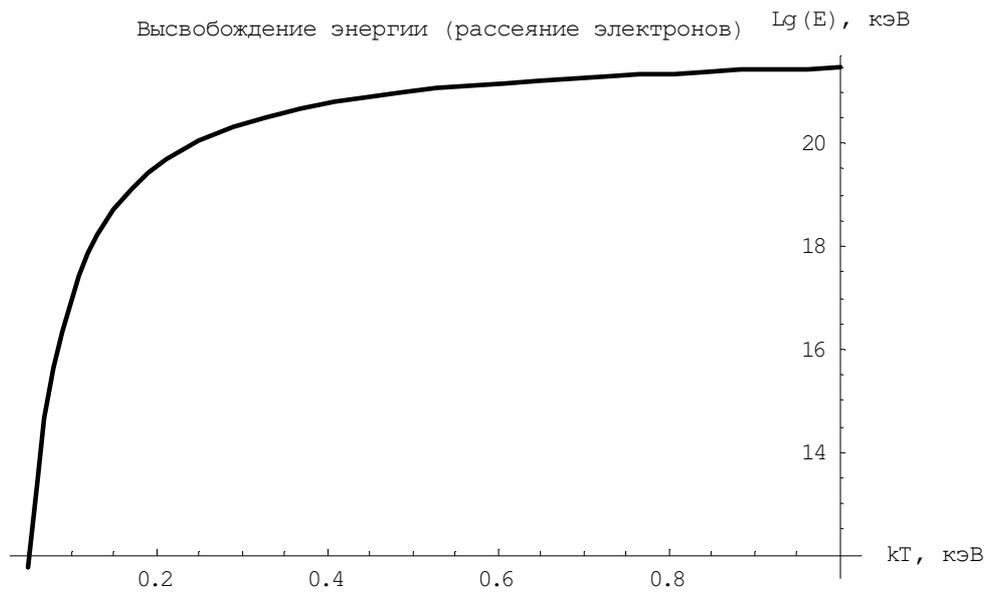
$\alpha = 10$

Γ_{wi} рассчитывается через выражение для Γ_{rad} (коэффициент внутренней электронной конверсии и время жизни уровня считаются заданными).



Потери на излучение (сплошная линия) высвобождение энергии - сумма по трем механизмам (пунктирная линия)

Высвобождение энергии больше потерь на излучение в диапазоне температур плазмы 0.10 - 0.35 кэВ.



Модельное ядро 2.

n_e – концентрация электронов в плазме, $n_e = 10^{24} \text{ см}^{-3}$

τ – время существования сгустка плазмы, $\tau = 10^{-7} \text{ с}$

V – объем зоны реакции, $V = 10^{-6} \text{ см}^3$

n_{is} – концентрация изомерных ядер, $n_{is} \approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$

Модельное ядро

$A=200$

$Z=80$

$m \rightarrow t$, переход E1

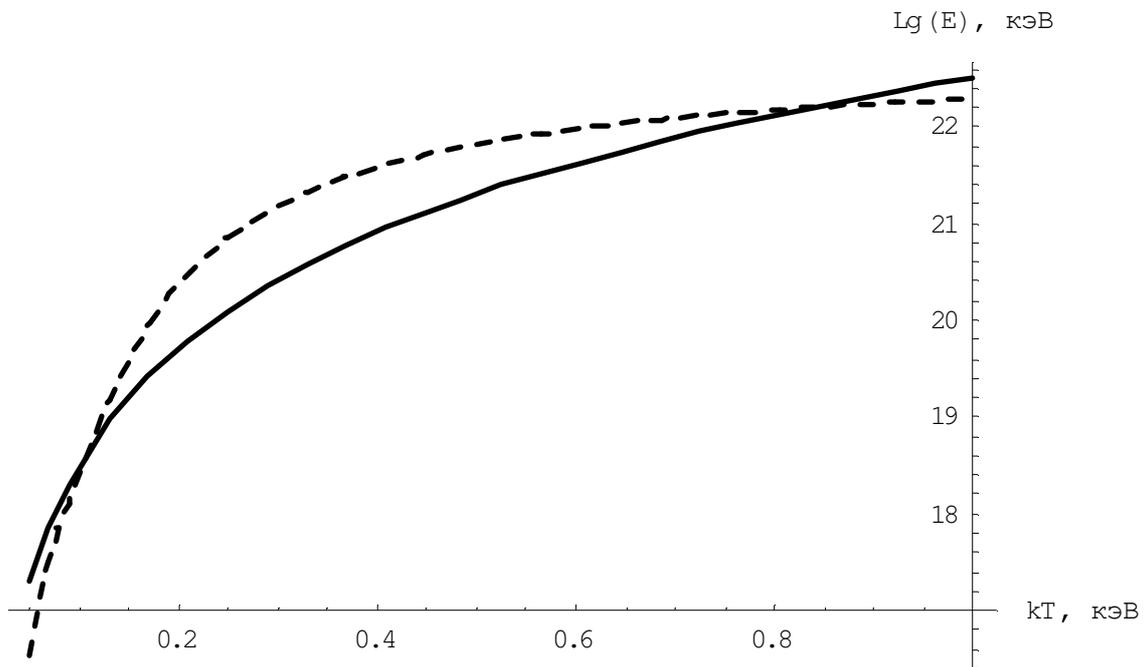
lifetime = 10^{-10}

$E_{mt} = 1 \text{ кэВ}$

$E_{tg} = 1000 \text{ кэВ}$

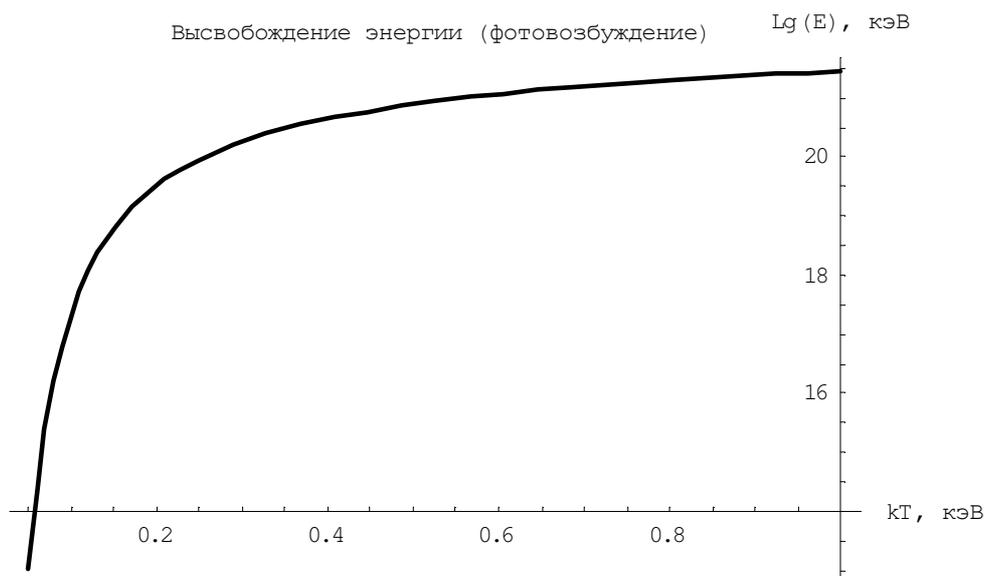
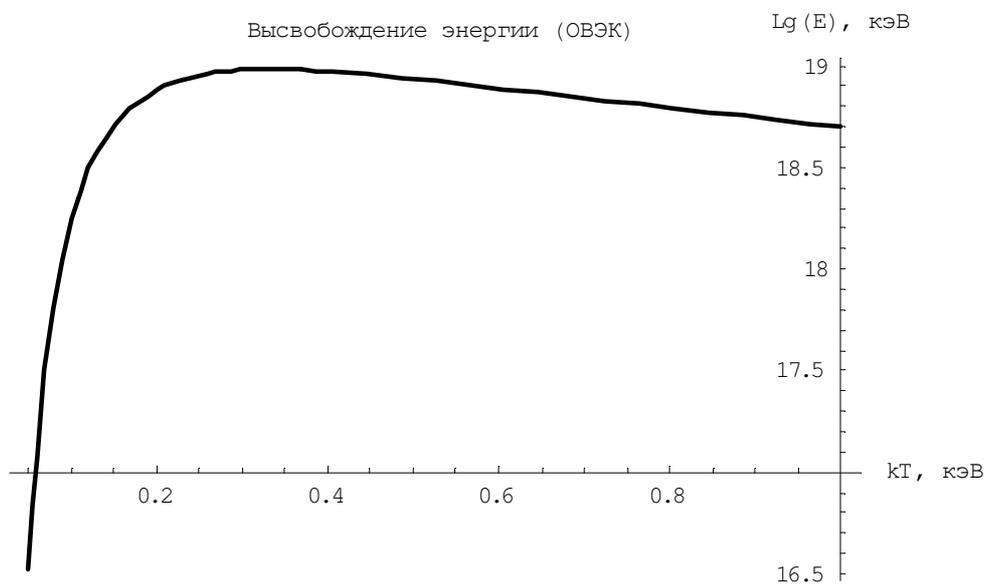
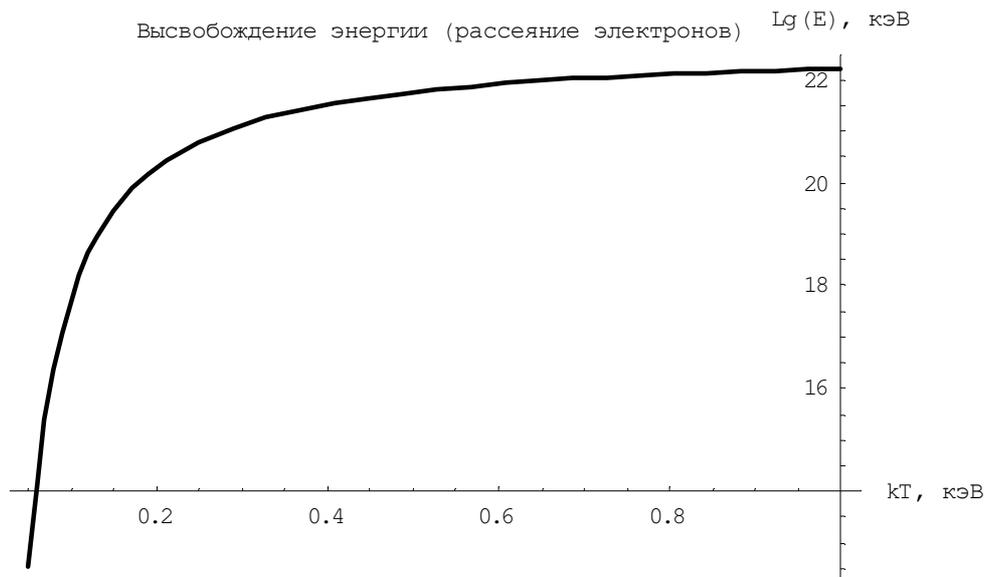
$\alpha = 1$

B_{wi} рассчитывается через выражение для Γ_{ad} (коэффициент внутренней электронной конверсии и время жизни уровня считаются заданными).



Потери на излучение (сплошная линия) высвобождение энергии - сумма по трем механизмам (пунктирная линия)

Высвобождение энергии больше потерь на излучение в диапазоне температур плазмы 0.1 - 0.8 кэВ.



Модельное ядро 3.

n_e – концентрация электронов в плазме, $n_e = 10^{24} \text{ см}^{-3}$

τ – время существования сгустка плазмы, $\tau = 10^{-7} \text{ с}$

V – объем зоны реакции, $V = 10^{-6} \text{ см}^3$

n_{is} – концентрация изомерных ядер, $n_{is} \approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$

Модельное ядро

$A=200$

$Z=80$

$m \rightarrow t$, переход E1

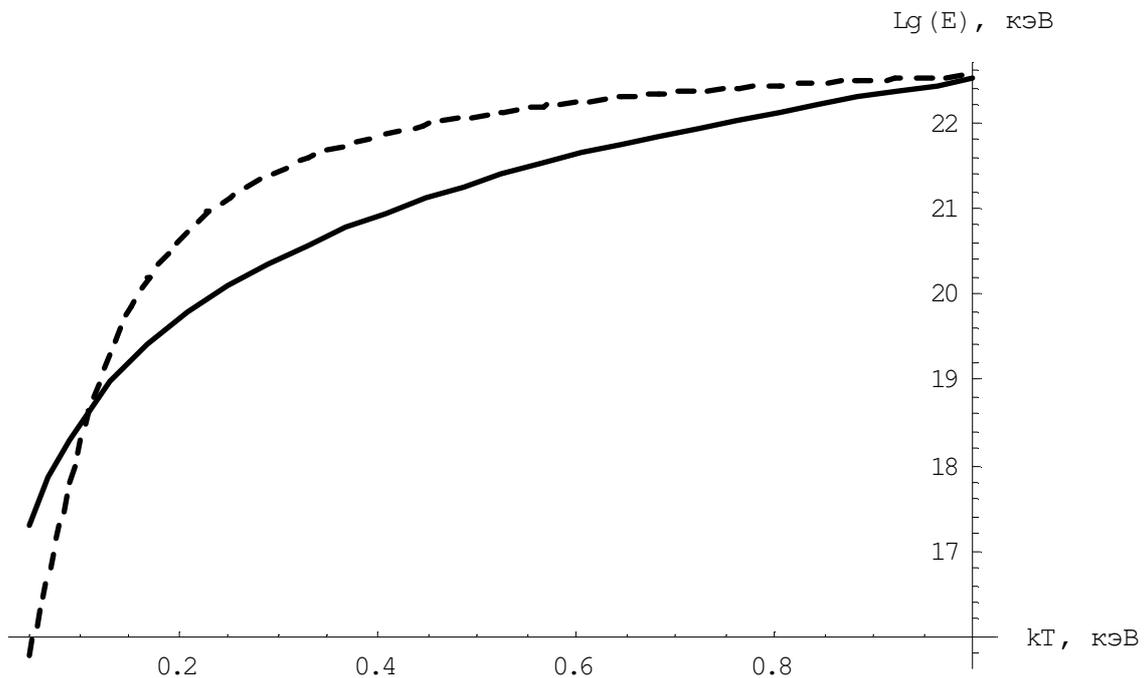
lifetime = 10^{-10}

$E_{mt} = 1 \text{ кэВ}$

$E_{tg} = 1000 \text{ кэВ}$

$\alpha = 0.1$

Γ_{wi} рассчитывается через выражение для Γ_{rad} (коэффициент внутренней электронной конверсии и время жизни уровня считаются заданными).



Потери на излучение (сплошная линия) высвобождение энергии - сумма по трем механизмам (пунктирная линия)

Высвобождение энергии больше потерь на излучение в диапазоне температур плазмы 0.1 - 1 КэВ.

