2.2 Ионизация и возбуждение атома

Полные потери энергии частицы при ее движении в среде определяются двумя процессами: возбуждение атомов мишени и их ионизация.

Для расчета потерь на возбуждение обычно (модель Урбана) делается упрощающее предположение: атом мишени представляется как система только с двумя возбужденными состояниями, энергии которых равны соответственно E_1 и E_2, относительно основного состояния. Взаимодействие частицы с атомом в этом случае может приводить **к возбуждению** с потерей энергии E_1 или E_2, или **к ионизации**, с потерей энергии распределенной в соответствии с функцией $g(E) \sim \frac{1}{E^2}$:

$$g(E) = \frac{(E_{\max} + I)I}{E_{\max}} \frac{1}{E^2} \tag{5}$$

Макроскопическое сечение возбуждения (i = 1, 2) может быть оценено как

$$\Sigma_i = \frac{\Delta E_{BB}}{\Delta x}(1-r)\frac{f_i}{E_i}\frac{\ln\frac{E_{\max}}{E_i} - \beta^2}{\ln\frac{E_{\max}}{I} - \beta^2}, \tag{6а}$$

а макроскопическое сечение ионизации есть

$$\Sigma_3 = \frac{\Delta E_{BB}}{\Delta x} r \frac{E_{\max}}{I(E_{\max} + I)\ln\left(\frac{E_{\max} + I}{I}\right)}. \tag{6б}$$

$E_{\max}$ – максимальная энергия которая может быть передана электрону частицей:

$$E_{\max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma\frac{m_e}{M} + \left(\frac{m_e}{M}\right)^2}, \tag{7}$$

где m_e масса электрона, а M – масса налетающей частицы. I – средняя энергия возбуждения, которая может быть оценена как $I = 16 \cdot Z^{0.9}\ eV$, E_i – уровни энергии атома, f_i – энергия осциллятора, ΔE_{BB} – средние потери энергии после пересечения мишени, вычисляемые в соответствии с уравнением Бете-Блоха (см. ниже), и Δx – толщина мишени.

Максимальная энергия, которая может быть передана в одном акте взаимодействия тяжелой частицей, движущейся со скоростью v<<c, неподвижному электрону, примерно равна

$$E_{макс} = 2m_e v^2. \tag{8}$$

Количество элементарных событий n_i после однократного пересечения частицей мишени равно

$$n_i = \Sigma_i \Delta x. \tag{9}$$

r ($0 \le r \le 1$) является параметром модели и определяет относительный вклад процессов возбуждения и ионизации в полные потери энергии. При высокой энергии налетающих частиц должны преобладать потери на ионизацию и $r = 1$.

Параметры f_i, E_i удовлетворяют условиям

$f_1 + f_2 = 1$

$f_1 \ln E_1 + f_2 \ln E_2 = \ln I$

и в модели Урбана они определены так:

$$f_2 = \begin{cases} 0, if\ \ Z \le 2 \\ 2/Z, if\ \ Z > 2 \end{cases}, f_1 = 1 - f_2 \tag{10}$$

$$E_2 = 10 \cdot Z^2\ eV,\ E_1 = \left(\frac{I}{E_2^{f_2}}\right)^{1/f_1}. \tag{11}$$

При таких значениях уровень атома E_2 соответствует примерно энергии K-оболочки, а Zf_2 – количество электронов в ней.

Потери энергии на возбуждение равны

$$\Delta E_e = n_1 E_1 + n_2 E_2, \tag{12}$$

где n_1 и n_2 – целые числа случайные числа, распределенные в соответствии с законом Пуассона.

Потери энергии на ионизацию вычисляются как

$$\Delta E_{ion} = \sum_{i=1}^{n_3} \frac{I}{1 - g\xi_i} \tag{13}$$

n_3 - целое случайное число, распределенные в соответствии с законом Пуассона, ξ_i – случайные числа, равномерно распределенные от 0 до 1, $g = \dfrac{E_{\max}}{E_{\max} + I}$.

Полные потери энергии ΔE_{total} вычисляются как сумма потерь на возбуждение (12) и ионизацию (13).