

**28 мая 2024 года**  
**Секция II, стендовый доклад 45**

**ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОУГЛОВОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ  
В ТЕОРИИ ПРОХОЖДЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО**

**А. И. Толмачев<sup>1)</sup>, Л. Форлано<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> Российский новый университет, Москва, Россия

<sup>2)</sup> Университет Калабрии, Козенца, Италия

Малоугловое приближение связано с предположением о том, что при упругом столкновении между налетающим ионом и неподвижным атомом мишени рассеяние иона происходит преимущественно на небольшие углы. Малоугловое приближение позволяет упростить интегро-дифференциальное транспортное уравнение, свести его к дифференциальному уравнению в частных производных и получить решение ряда задач в аналитическом виде /1–5/. В работе /2/ найдено распределение по пробегам электронов, достигших некоторой глубины  $D$  полубесконечной фольги. Однако, интегрирование распределения по пройденным расстояниям приводит к бесконечному среднему пробегу. Это связано с тем, что в полубесконечной мишени частица может многократно пересекать плоскость  $x = D$ , и средний пробег нарастает в то время, как координата частицы не меняется. Если же толщина мишени конечна и равна  $D$ , то частица может пересекать плоскость  $x = D$  только один раз – в момент выхода из мишени, и средний пробег становится конечным. В настоящей работе малоугловое приближение применено для решения задач об отражении и прохождении заряженных частиц через мишень конечной толщины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rossi B., Greisen K. // Reviews of Modern Physics, 1941, vol. 13, p. 240.
2. Yang G. N. // Physical Review, 1951, vol. 84, p. 599.
3. Фирсов О. Б. // Доклады АН СССР, 1966, т. 169, с. 1311.
4. Ремизович В. С., Рязанов М. И., Тилинин И. С. // ЖЭТФ, 1980, т. 79, с. 448.
5. Толмачев А. И. // ЖТФ, 1986, т. 56, с. 1297.

## The small angle approximation in the theory of ion multiple scattering in the matter

The small angle approximation is valid in two cases:  
= scattering of heavy ions of arbitrary energy;  
= scattering of high energy ions.

The one-velocity equation of transfer in the general case of ion–solid interaction represents an integro-differential equation containing the collision integral and it takes a form:

$$\cos \theta \frac{\partial f(x, \theta)}{\partial x} = \textit{collision integral} \quad (1)$$

$$\textit{collision integral} = \int_0^{2\pi} \sigma(\theta, \theta') [f(x, \theta') - f(x, \theta)] d\theta'$$

The distribution function  $f(x, \theta)$  depends on the depth  $x$  and the angle  $\theta$  between ion velocity and target normal.

$$\cos \theta \frac{\partial f(x, \theta)}{\partial x} = \frac{\partial^2 f(x, \theta)}{\partial \theta^2} \quad (2)$$

### Firsov theory [3] -----

$$\theta \rightarrow 90^\circ - \theta \quad \cos \theta \rightarrow \sin \theta \quad \sin \theta \approx \theta$$

$$\theta \frac{\partial f(x, \theta)}{\partial x} = \frac{\partial^2 f(x, \theta)}{\partial \theta^2} \quad (3)$$

## analytical solution

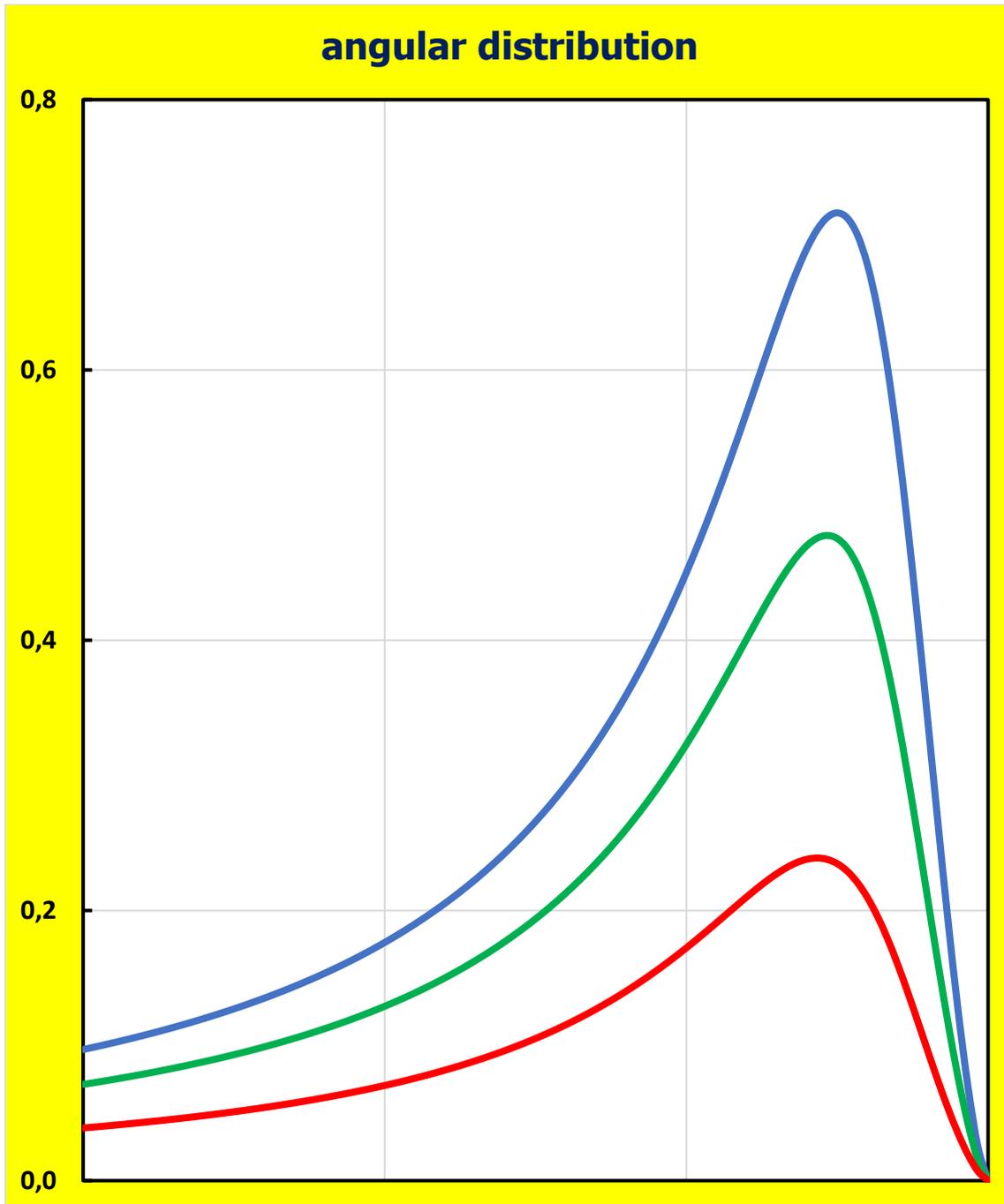
$$R(\theta) d\theta = \frac{3}{2\pi} \frac{\theta_0^{3/2} \theta^{3/2}}{\theta_0^3 + \theta^3} d\theta \quad (4)$$

*maximum at  $\theta = \theta_0$*

## Our results -----

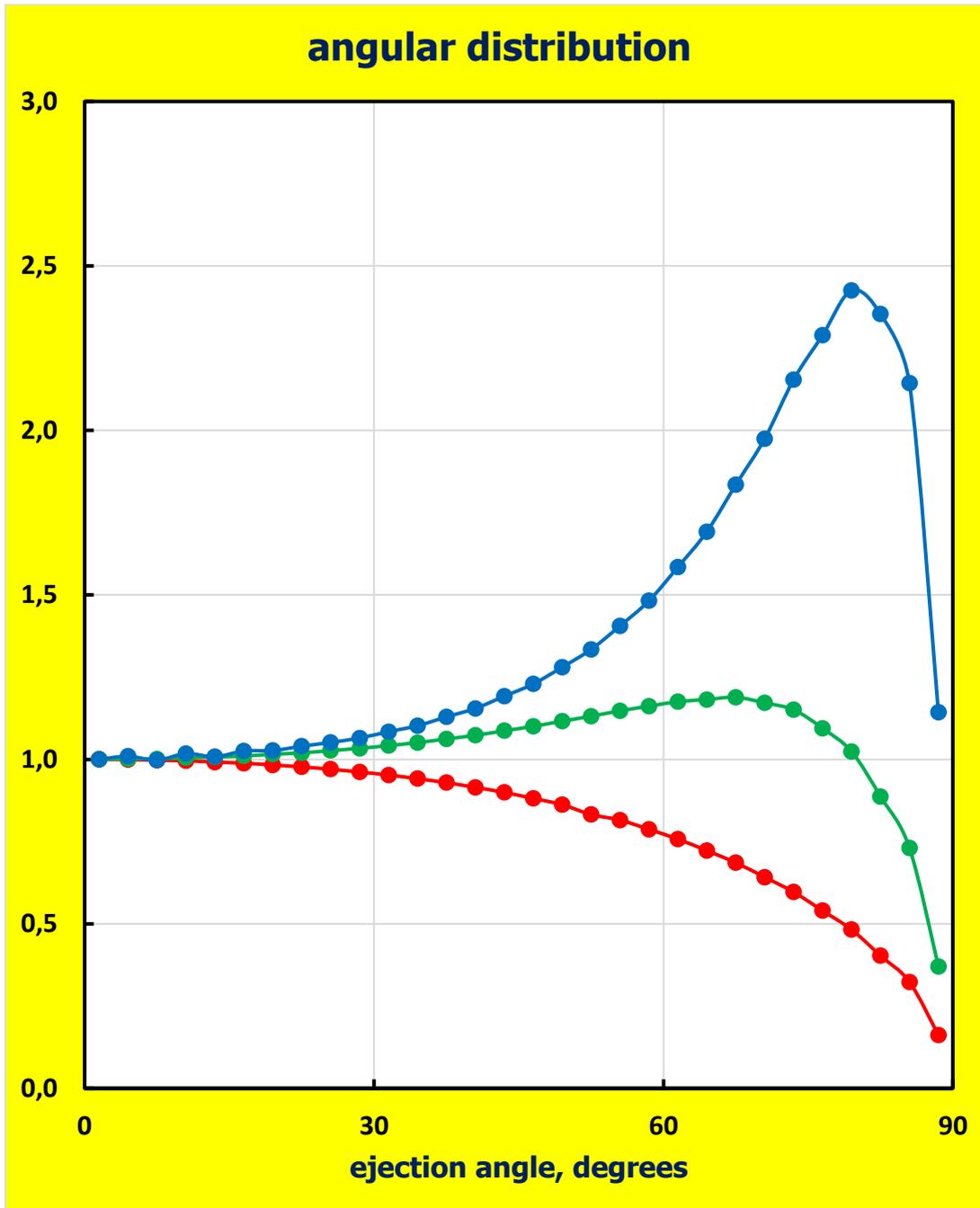
We used the small angle approximation and started from equation (2) without simplifying assumption about grazing angles of ion incidence. We got the integral equation for the reflection function. We obtained solution of the integral equation in a form of series. The reflection functions for different incidence angles are presented in Figure 2. Therefore, the results of theory [3] are generalized for the case of arbitrary angles of ion incidence, from  $\theta_0 = 0^0$  (normal incidence) to  $\theta_0 = 90^0$  (maximal oblique incidence).

-----



**Figure 1**

Angular distribution of reflected ions obtained from the Firsov theory, see equation (4), for different grazing incidence angles of bombarding ions.



**Figure 2**

Angular distribution of reflected ions obtained from eq. (2). Incidence angles are equal to  $0^\circ$  (normal incidence, red line),  $60^\circ$  (green line) and  $75^\circ$  (blue line).