

Introdução Física Nuclear 2021

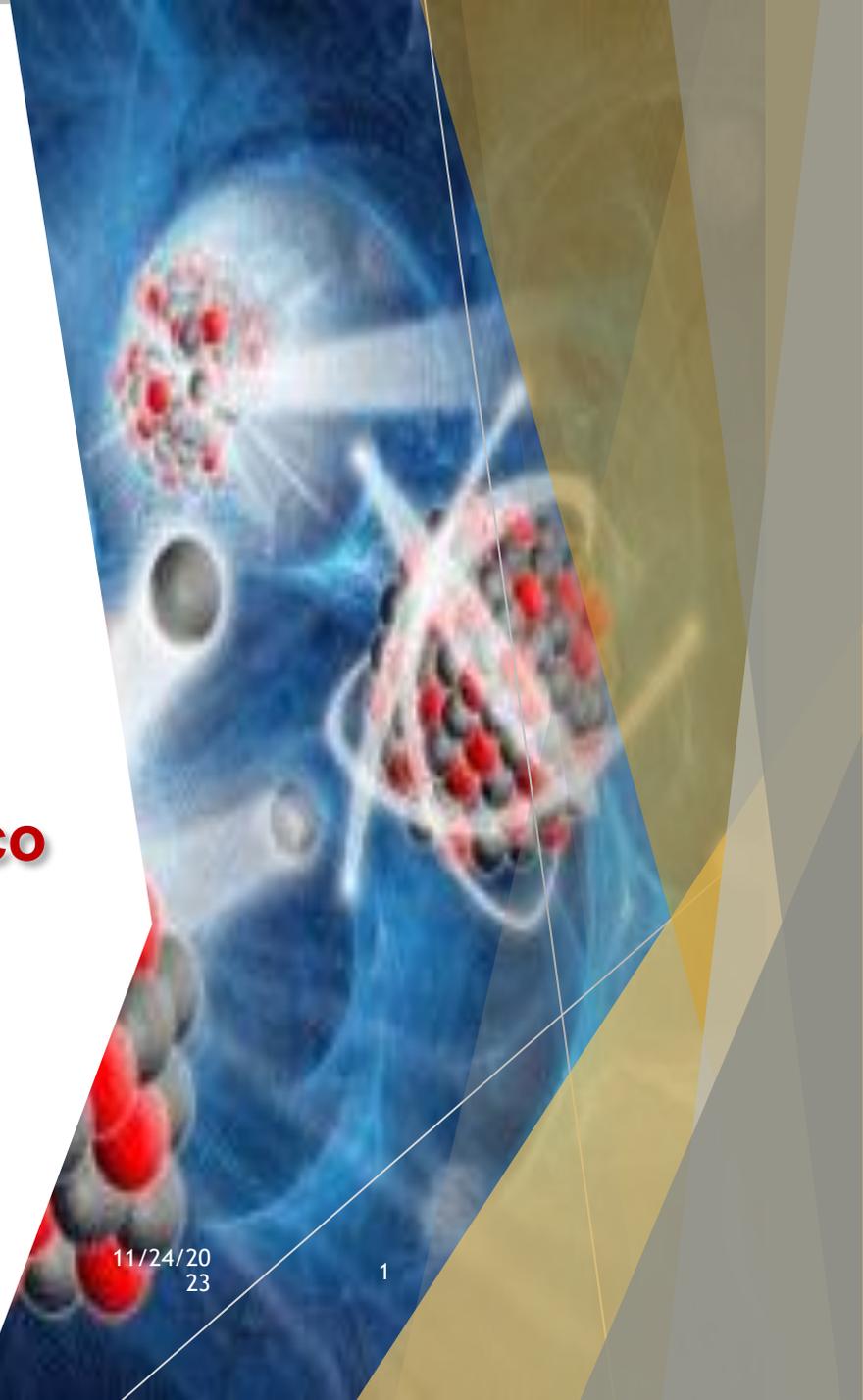
▶ Prof. Valdir Guimarães

▶ Instituto de Física

Aula 17 – Espalhamento elástico modelo ótico

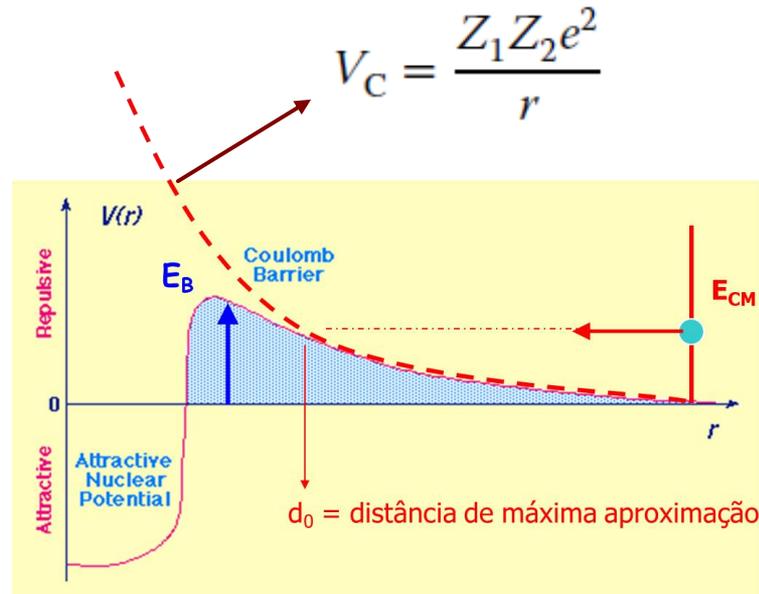
11/24/20
23

1



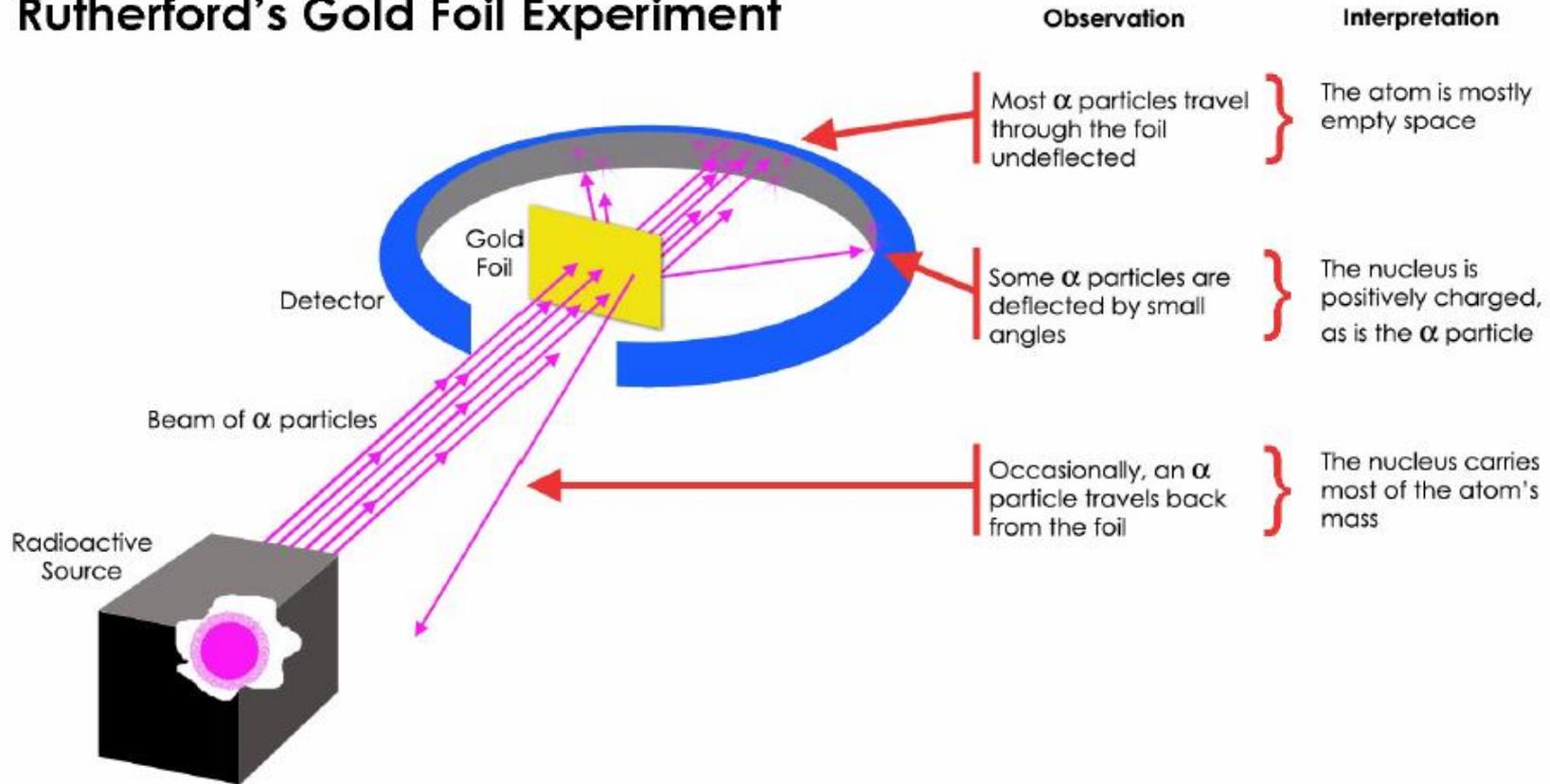
Espalhamento de Rutherford ou Coulombiano

Os núcleos projétil e alvo tem distribuição de carga elétrica. Portanto, quando um núcleo incide sobre o outro em energias baixas, esse será espalhado devido a interação Coulombiana. O espalhamento é então chamado “espalhamento Coulombiano” ou “espalhamento Rutherford”



Experimento de Rutherford

Rutherford's Gold Foil Experiment



Geiger e Marsden observaram partículas alfa espalhadas em ângulos muito traseiros, o que deu origem a ideia de um núcleo para o átomo.

Seção de choque Rutherford.

□ A seção de choque de partículas que são espalhadas em um ângulo sólido $\Delta\Omega$ é dado por:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4 T_P^{\text{CM}}} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

Importante: Energia e ângulo no CM

Distância de máxima aproximação

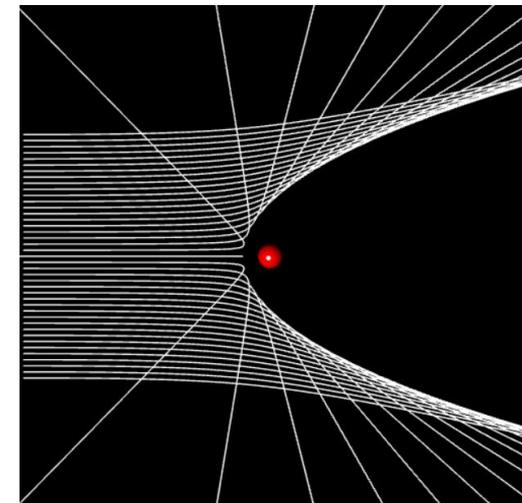
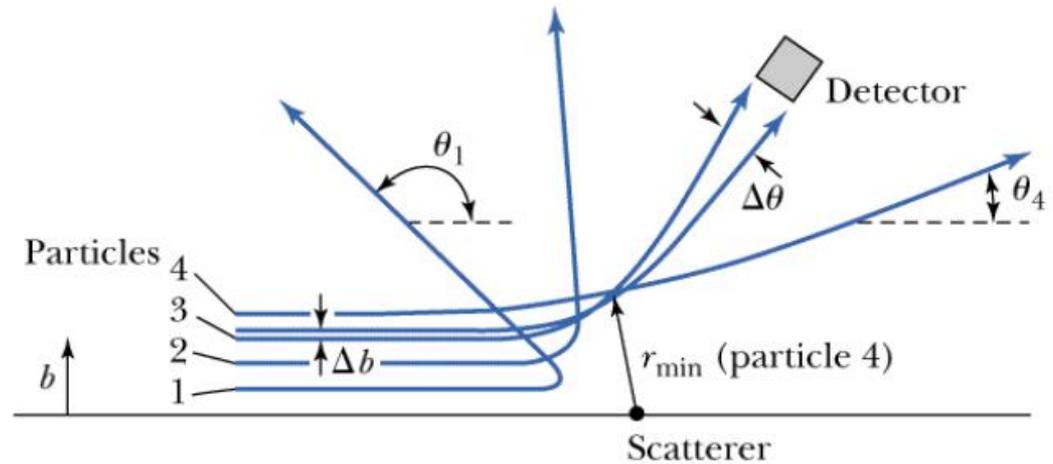
$$D = \frac{1}{2} D_0 \left(1 + \frac{1}{\sin(\theta_{c.m.}/2)} \right),$$

Depende do ângulo de espalhamento

$$D_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_P Z_T e^2}{E_{c.m.}} \quad \rightarrow \quad \text{colisão frontal } \theta_{c.m.}=0$$

□ Krane capítulo 11 p.g 389

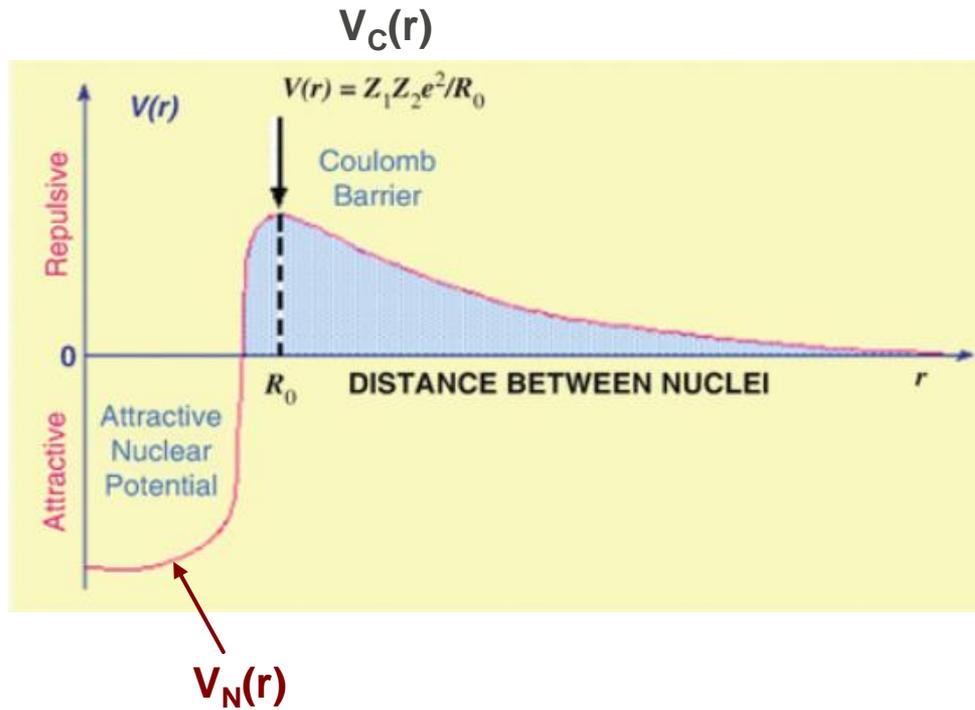
□ W. Loveland (Modern Nuclear Chemistry) cap. 10 pg. 275



<http://www.natural-science.or.jp/PHYSICS/example/RutherfordScattering.html>

E a força nuclear ?

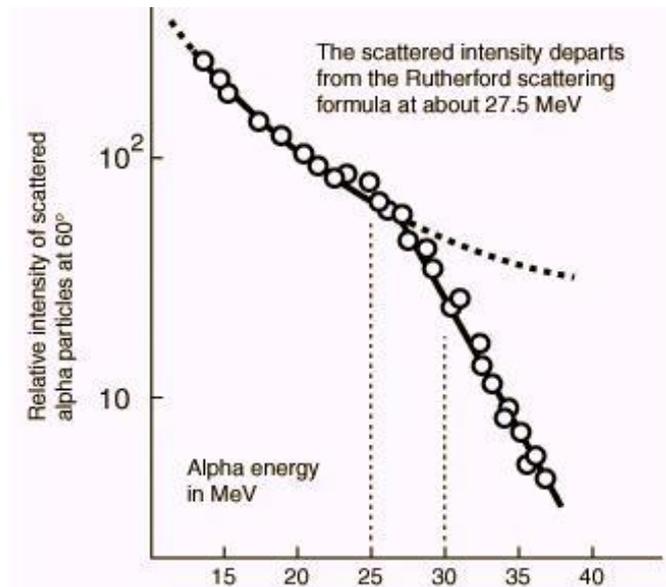
- ❑ Potencial Coulombiano repulsivo -> Potencial de longo alcance
- ❑ Potencial Nuclear atrativo -> Potencial de curto alcance



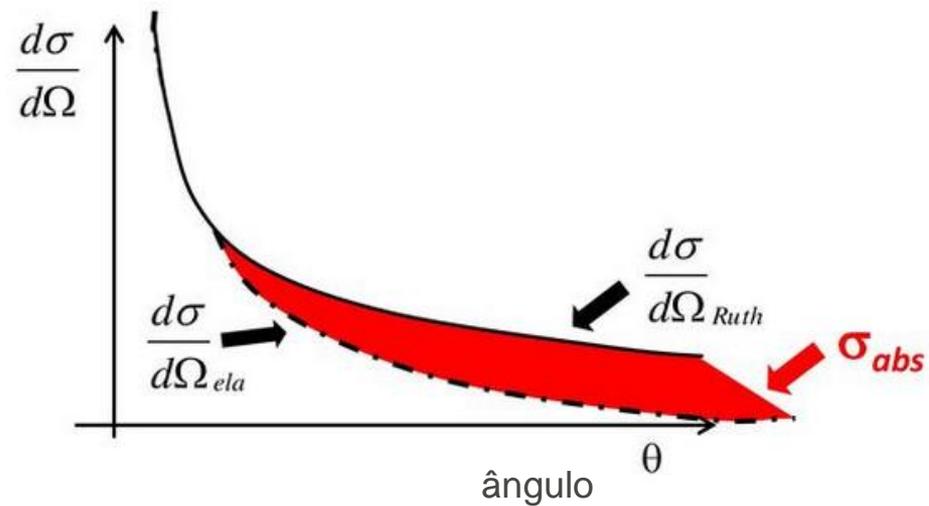
Absorção de fluxo

- ❑ Potencial Coulombiano repulsivo de longo alcance
- ❑ Potencial Nuclear atrativo de curto alcance
- ❑ A força nuclear absorve fluxo do espalhamento elástico

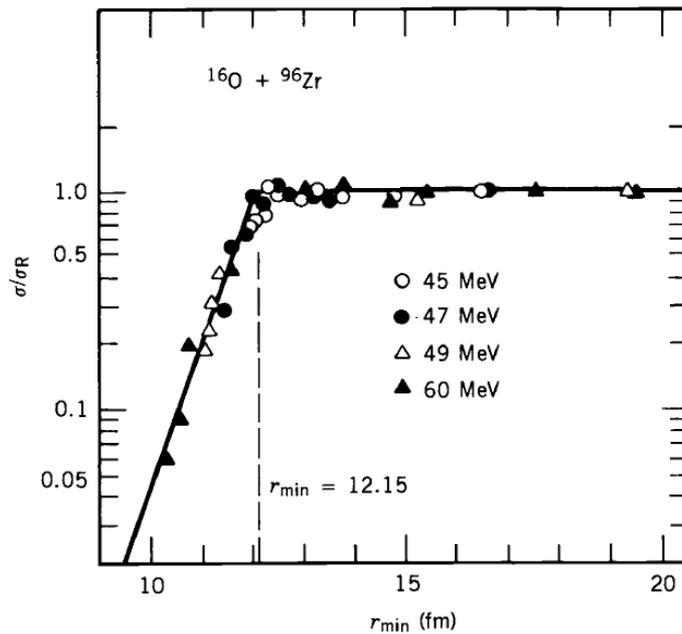
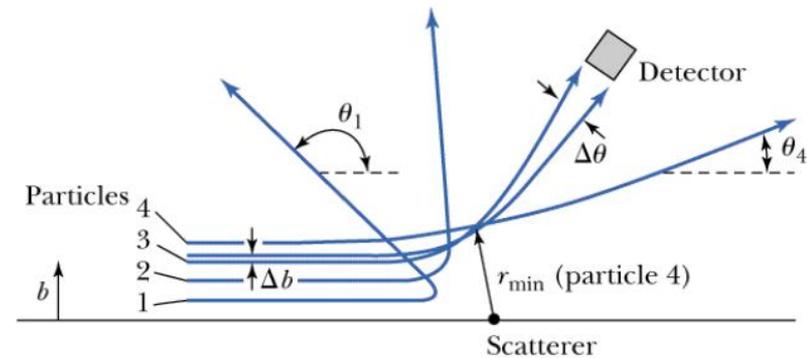
Aumentando a energia podemos nos aproximar o projétil do alvo e a partir de uma determinada energia o projétil começa a sentir a força nuclear.



energia



□ Em termos de distância de máxima aproximação:

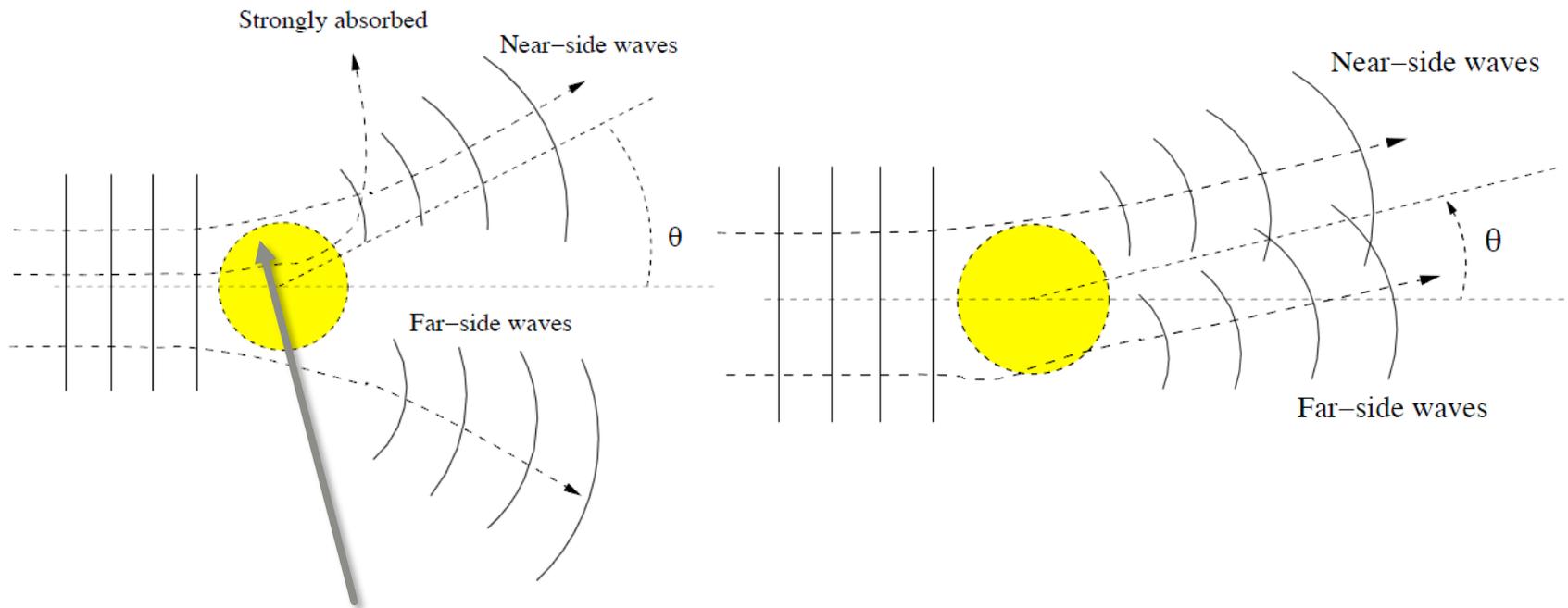


$\sigma/\sigma_{\text{Ruth}} = 1$ para grandes distâncias

Distância de máxima aproximação

Efeitos de interferência e difração

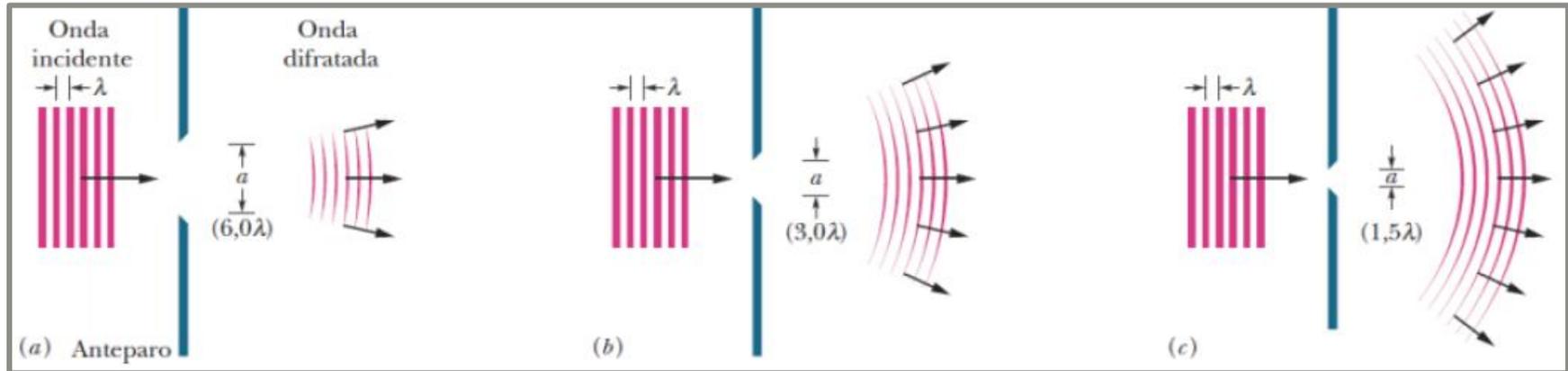
- ❑ Quanticamente as partículas são ondas que sofrem efeitos da ondulatória.
- ❑ Interferência, difração (Fresnel e Fraunhofer)



- ❑ efeitos da interferência entre potencial nuclear e coulombiano

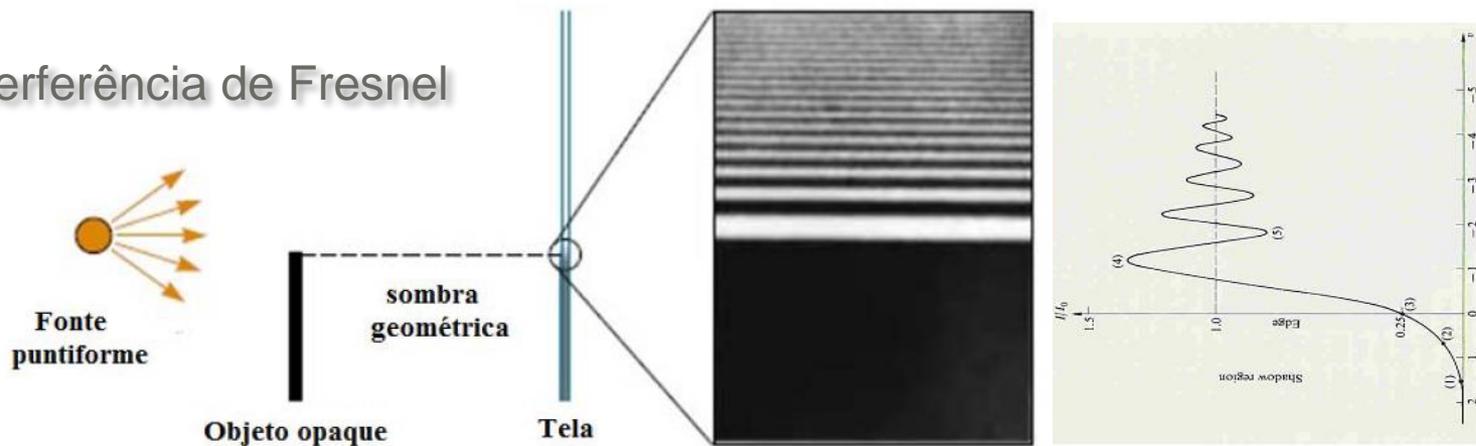
Difração de Fraunhofer abertura

Difração da luz é o fenômeno que ocorre quando a luz é distorcida devido a obstáculos (fendas e bordas) com dimensões comparáveis ao seu comprimento de onda.



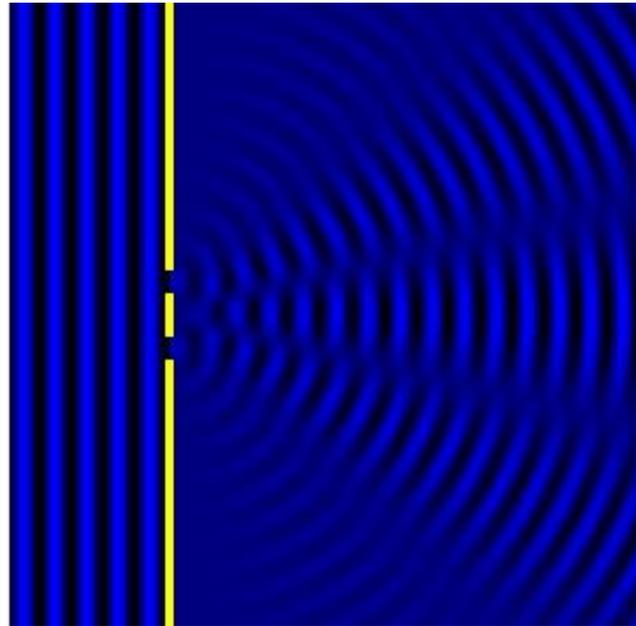
Para que ocorra difração:
 $\lambda \sim a$ (Comprimento de onda da ordem da abertura da fenda)

Interferência de Fresnel



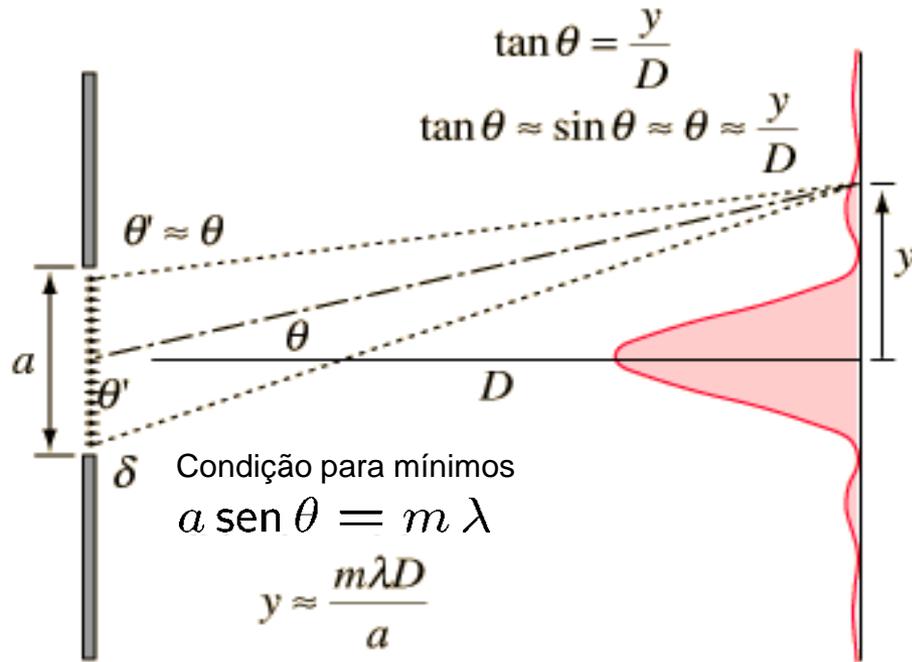
Combinação da difração e interferência por fenda dupla:

O efeito da difração se dá se o comprimento de onda for da ordem de grandeza da fenda.



<https://pt.wikipedia.org/wiki/Difração>

Difração de Fraunhofer abertura



$$y_m = m \cdot L \cdot \frac{\lambda}{a}$$

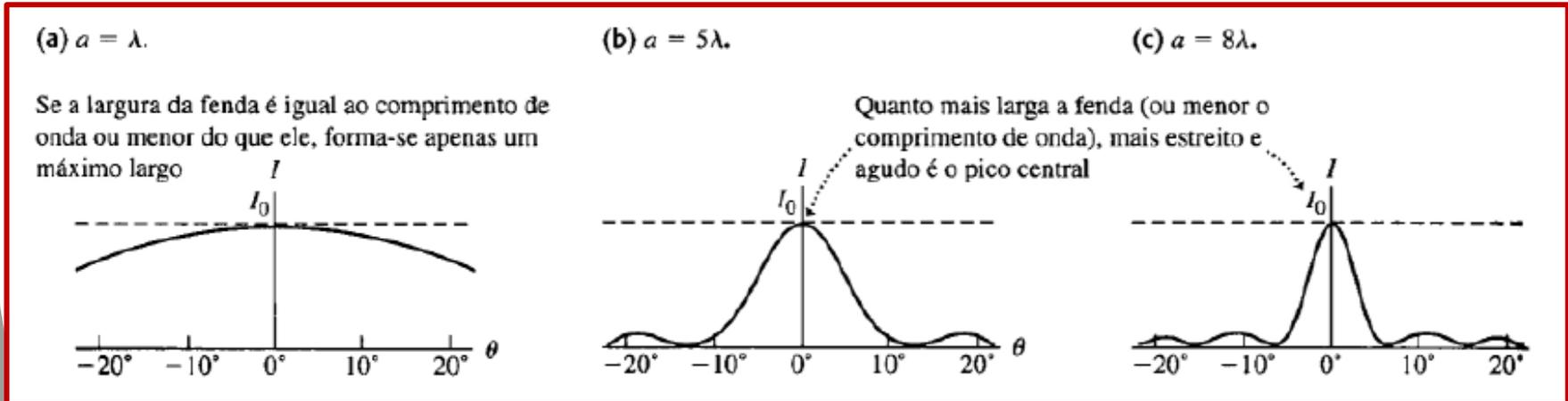
Difração de Fraunhofer – Largura da distribuição

$$\text{sen } \theta_m = \theta_m = m \frac{\lambda}{a} \quad \theta_1 = \frac{\lambda}{a}$$

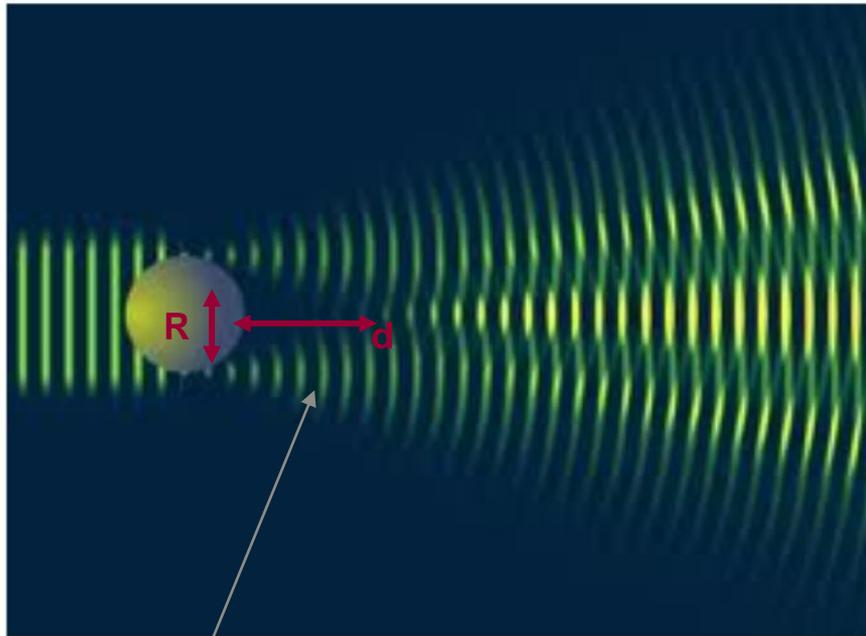
O valor de θ_1 determina a metade da largura do máximo central.

$a \gg \lambda$ Nesse caso o ângulo θ_1 é muito pequeno (praticamente zero). Raios de luz praticamente não se desviam. Podemos usar ótica geométrica. Ex. (portas e janelas)

$a \geq \lambda$ **Efeitos da difração:**
Diminuição da abertura causa alargamento do máximo central.

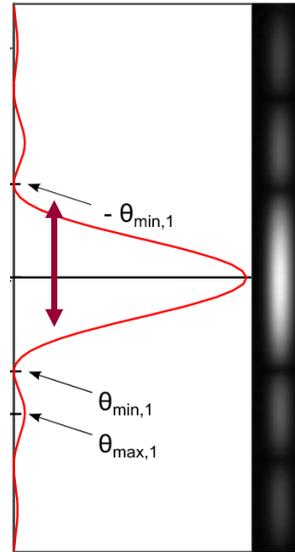


Difração de Fraunhofer para um disco



Sombra devido ao fenômeno de difração.

Figura de difração



$$\theta_1 = \frac{\lambda}{a}$$



$$p/\hbar = k = 1/\lambda$$



$$\Delta\theta = \hbar/pR$$



$$R/d = \Delta p/p$$

ou

$$d = R^2/\lambda$$

A limitação da absorção apenas para um círculo de raio R causa uma incerteza no momento transversal dado pelo princípio da incerteza:

$$\Delta p = \hbar/R$$

- ❑ Figura de difração para luz incidente em uma fenda circular.
- ❑ O comprimento de onda é 10 vezes maior que o diâmetro do disco.

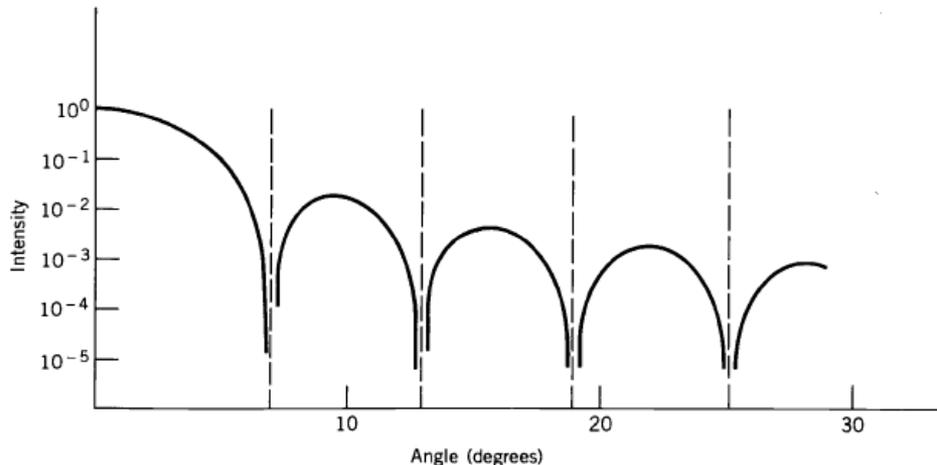


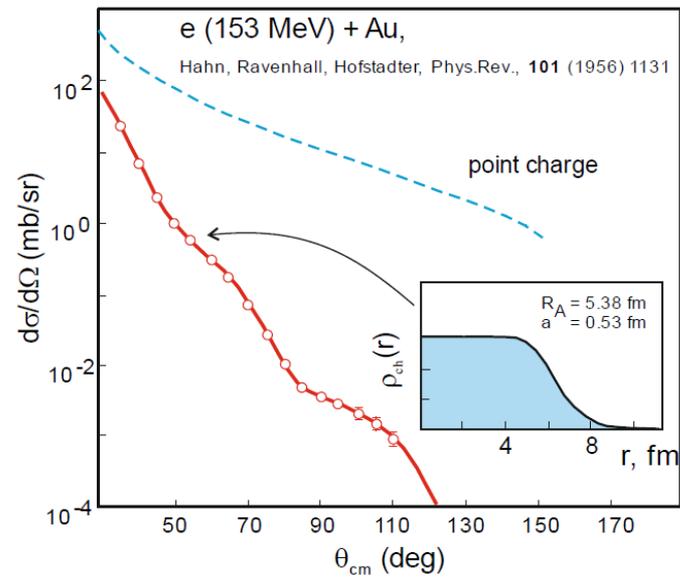
Figure 11.13 Diffraction pattern of light incident on a circular aperture; a circular disk gives a similar pattern. The minima have intensity of zero. The curve is drawn for a wavelength equal to ten times the diameter of the aperture or disk.

- ❑ **Podemos usar distribuição angular (seção de choque de espalhamento em função do ângulo) para estudar efeitos de estrutura dos núcleos).**

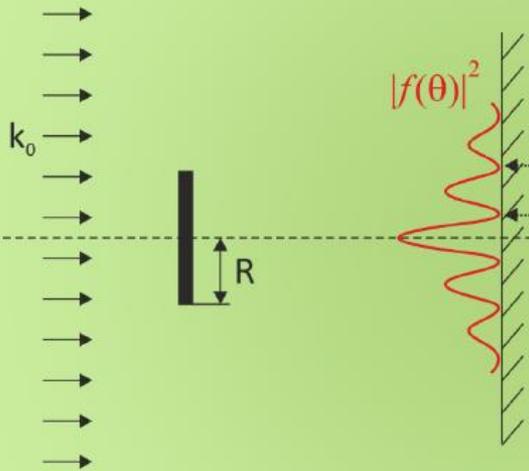
Espalhamento elástico de elétrons

Espalhamento elástico de elétrons pode ser útil para medir raios nucleares e determinar a densidade carga através da relação com o fator de forma.

nêutrons e prótons também podem ser utilizados



Black disk diffraction



Approximation for Scattering amplitude:

$$f(\theta) \sim k_0 R^2 \frac{J_1(2k_0 R \sin \frac{\theta}{2})}{2k_0 R \sin \frac{\theta}{2}}$$

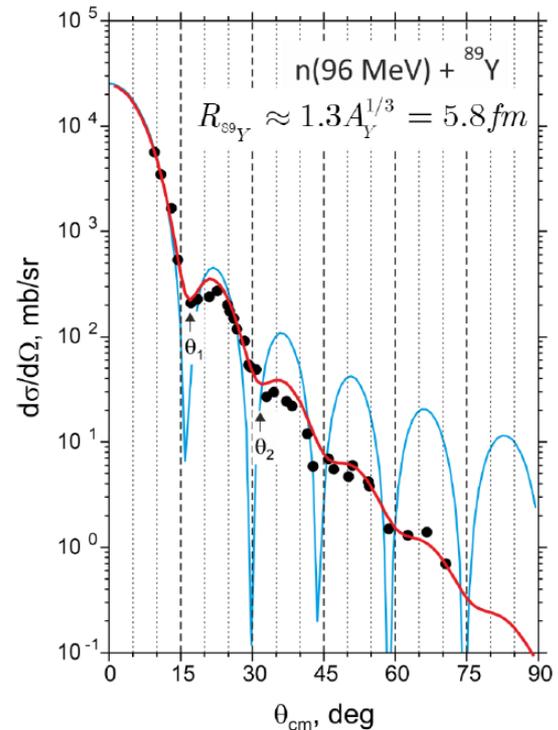
Zeros of Bessel function:

$$2k_0 R \sin \frac{\theta_1}{2} \approx 3.8317$$

$$2k_0 R \sin \frac{\theta_2}{2} \approx 7.0156$$

$$R_{89Y}(\theta_1) \approx 5.76 \text{ fm}; \quad R_{89Y}(\theta_2) \approx 5.98 \text{ fm}$$

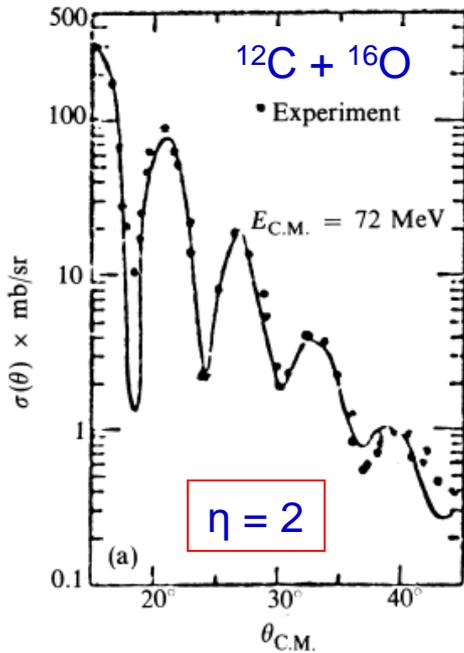
A.Oehm et al., Phys. Rev. **C77** (2008) 024605



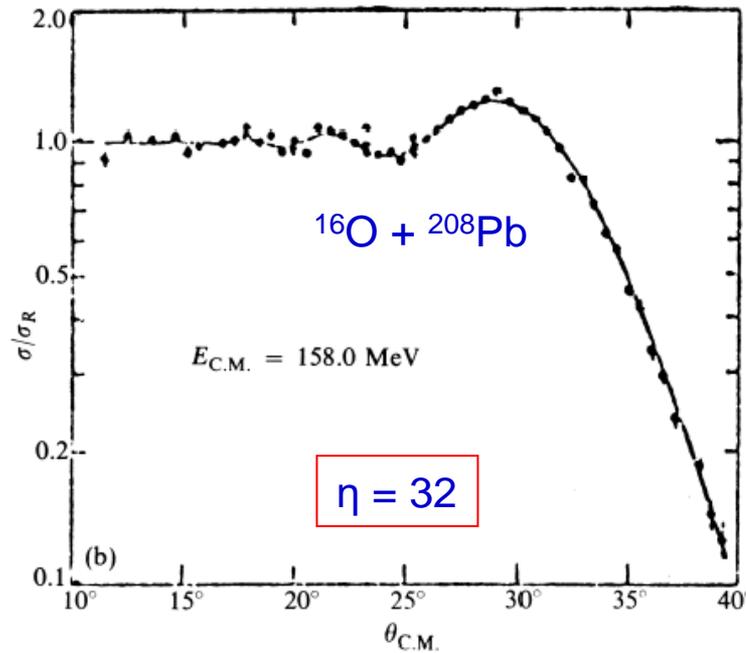
Espalhamento elástico entre núcleos

- Podemos observar no espalhamento elástico de núcleos o efeito de difração e interferência.
- O parâmetro importante é o parâmetro de Sommerfeld

Fraunhofer



Fresnel



**Penetrabilidade
barreira
Coulombiana**
 $P = \exp(-2\pi\eta)$

Parâmetro de Sommerfeld

$$\eta = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar v} = \alpha Z_1 Z_2 \sqrt{\frac{\mu c^2}{2E}}$$

Parâmetro de Sommerfeld

$$\eta = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar v} = \alpha Z_1 Z_2 \sqrt{\frac{\mu c^2}{2E}},$$

Rutherford scattering
 $\eta \gg 1$

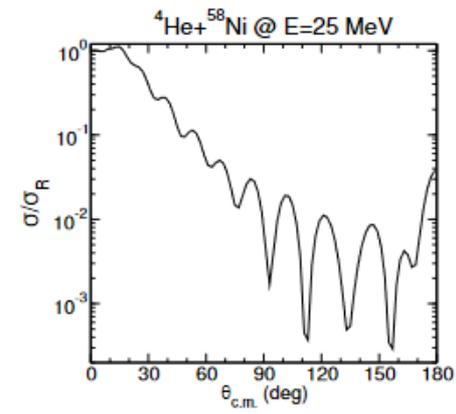
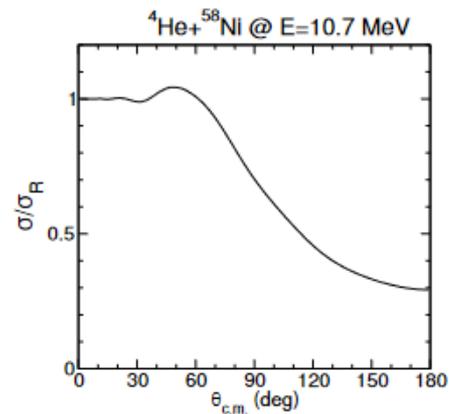
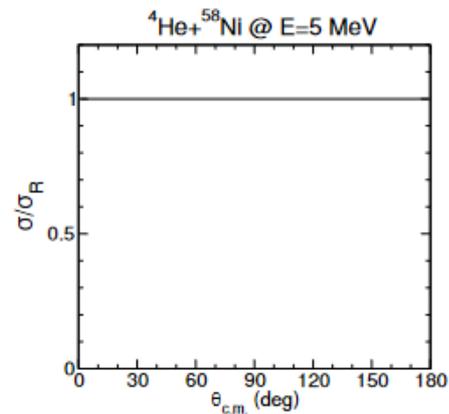
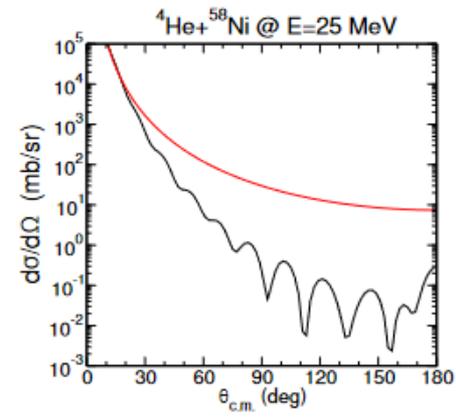
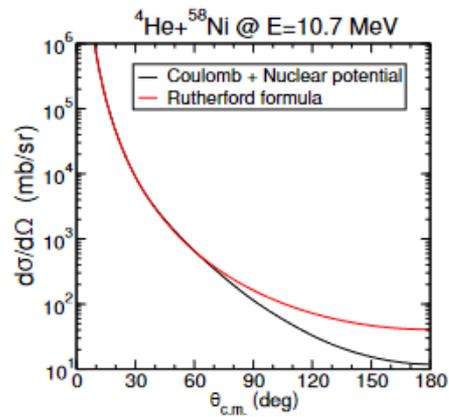
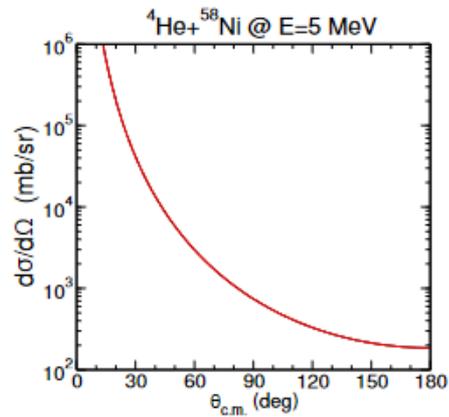
- ❑ Energia incidente E menor que a barreira coulombiana ($Z_1 Z_2$)

Fresnel scattering
 η grande

- ❑ Energia incidente da ordem da barreira coulombiana ($Z_1 Z_2$)

Fraunhofer scattering
 η pequeno

- ❑ Energia incidente muito maior que a barreira coulombiana ($Z_1 Z_2$)



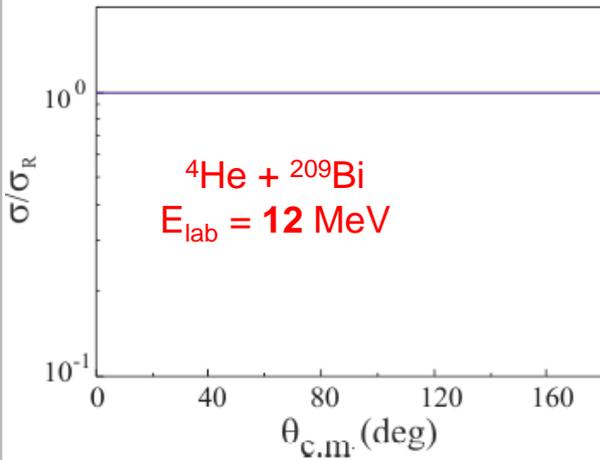
Rutherford scattering

Fresnel

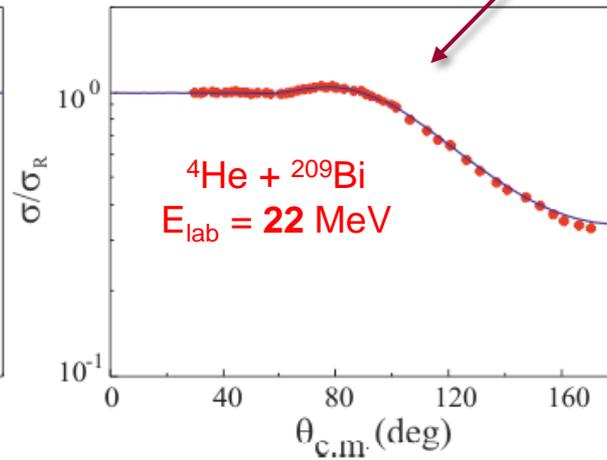
Fraunhofer

Absorção, difração e interferência

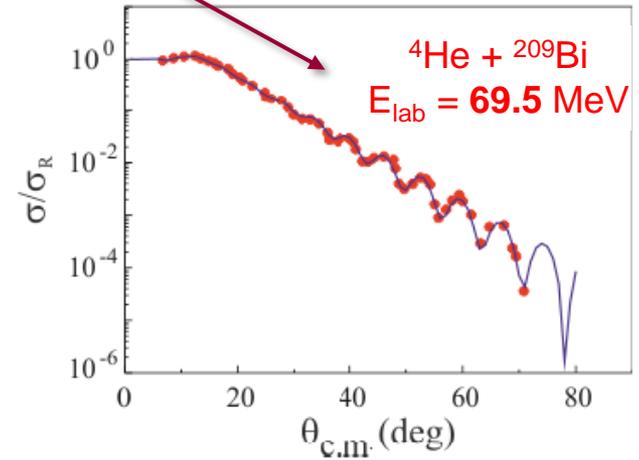
Absorção devido a outras reações
Efeitos de difração e interferência



Rutherford scattering
 $\eta = 15$



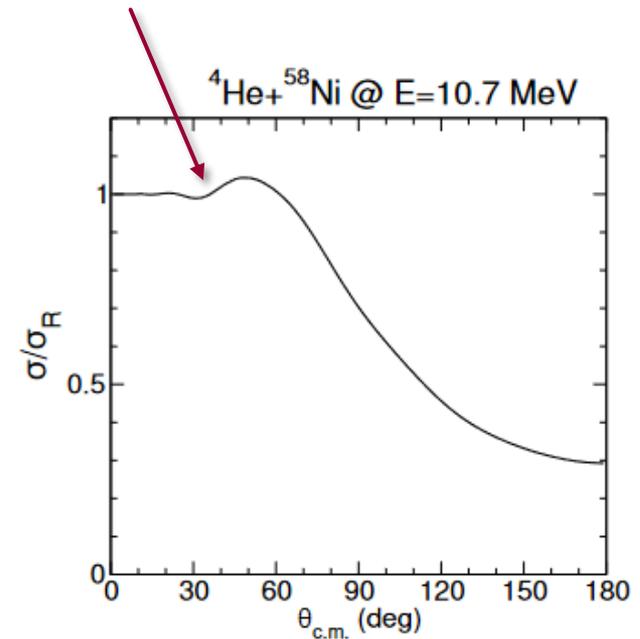
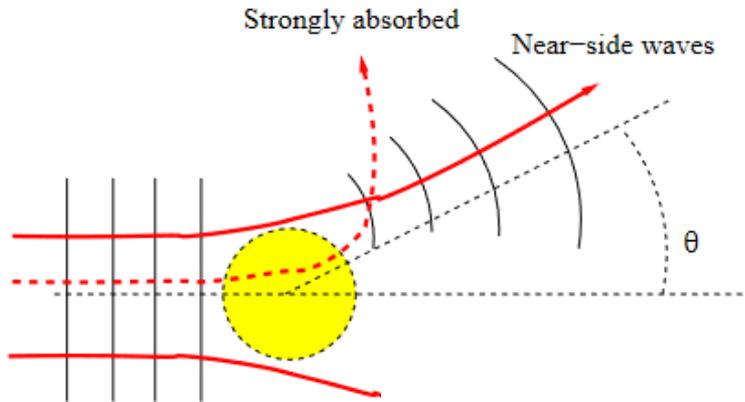
Fresnel scattering
 $\eta = 11$



Fraunhofer scattering
 $\eta = 6$

Espalhamento Fresnel

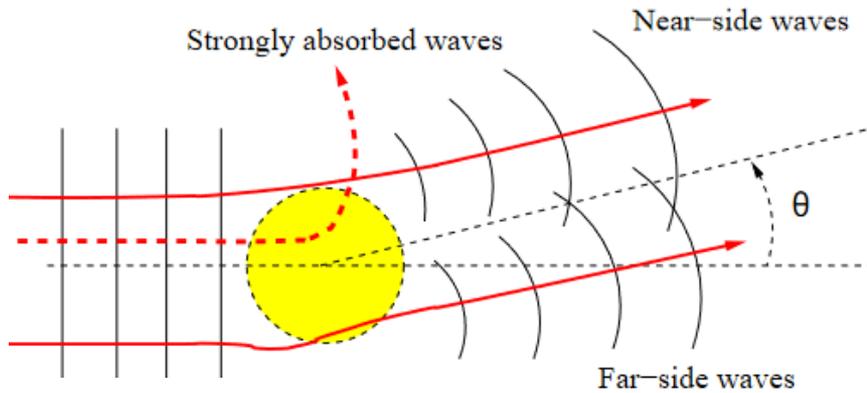
Pico de Fresnel



- ❑ Energia incidente E próximo (acima) da barreira coulombiana
- ❑ $\eta > 1$ (força coulombiana forte)
- ❑ Região “iluminada” trajetória coulombiana
- ❑ Região “sombra” absorção forte
- ❑ Pico de Fresnel = interferência entre efeito de potencial coulombiano e nuclear

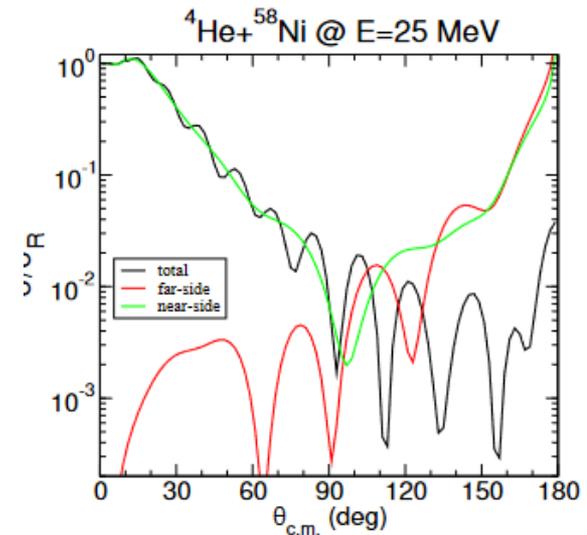
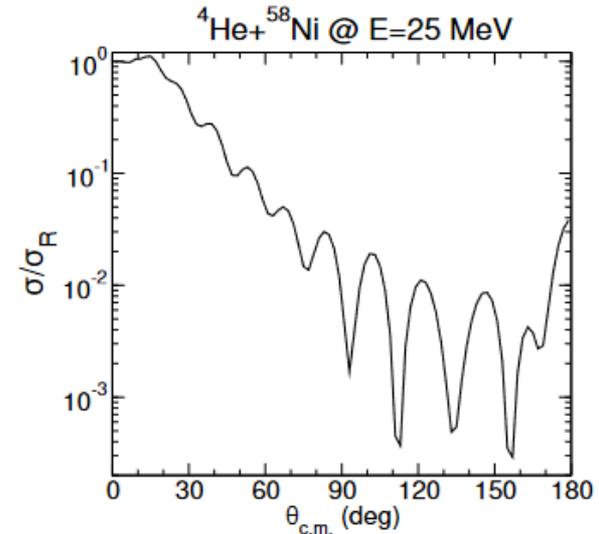
$$\eta = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar v} = \alpha Z_1 Z_2 \sqrt{\frac{\mu c^2}{2E}}$$

Espalhamento Fraunhofer



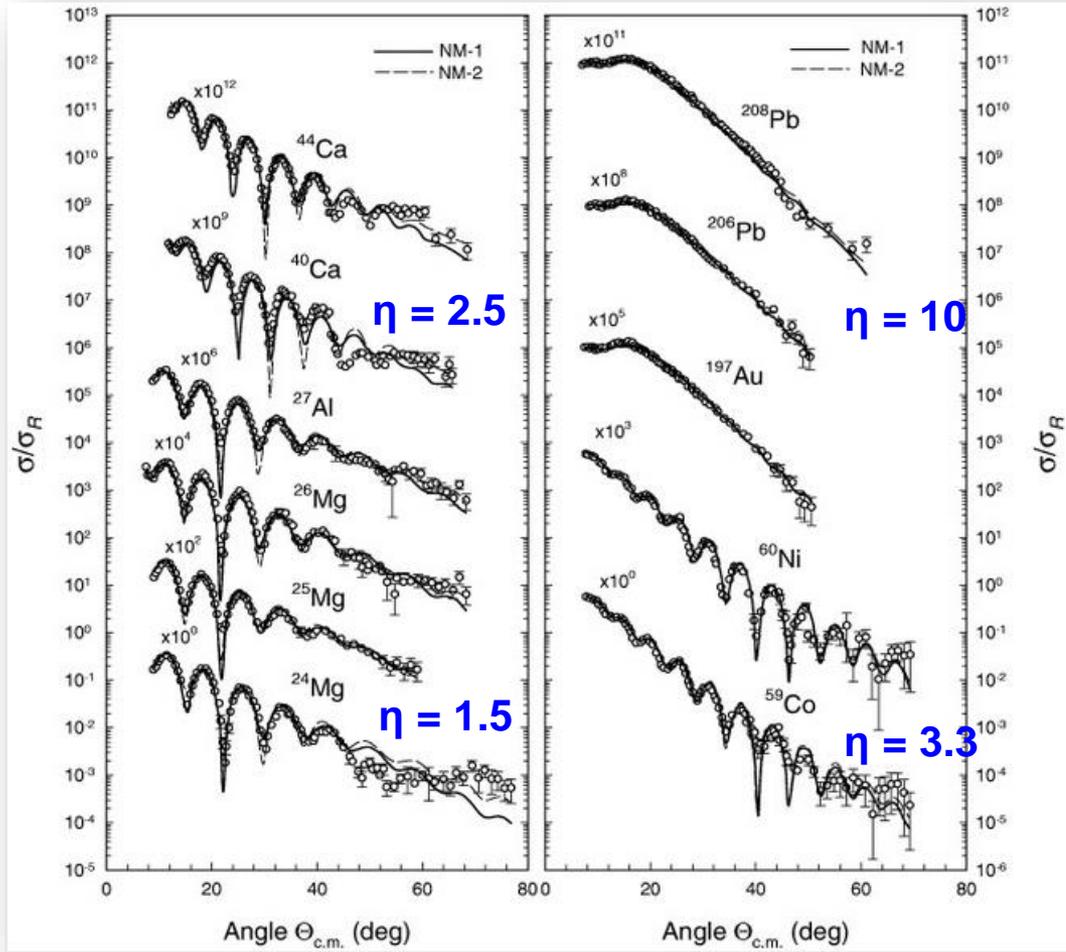
$$\eta = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar v} = \alpha Z_1 Z_2 \sqrt{\frac{\mu c^2}{2E}}$$

- Energia incidente E bem acima da barreira coulombiana
- η pequeno (força coulombiana fraca)
- Forte absorção devido força nuclear
- Forte interferência entre ondas espalhadas.
- Fortes oscilações



Parâmetro de Sommerfeld

${}^6\text{Li}$ espalhamento elástico @ 88 MeV



Parâmetro importante:

parâmetro de sommerfeld

$$\eta = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar v} = \alpha Z_1 Z_2 \sqrt{\frac{\mu c^2}{2E}}$$



Fresnel ($\eta \geq 10$)



Fraunhofer ($\eta < 10$)

Seção de choque em função das ondas parciais

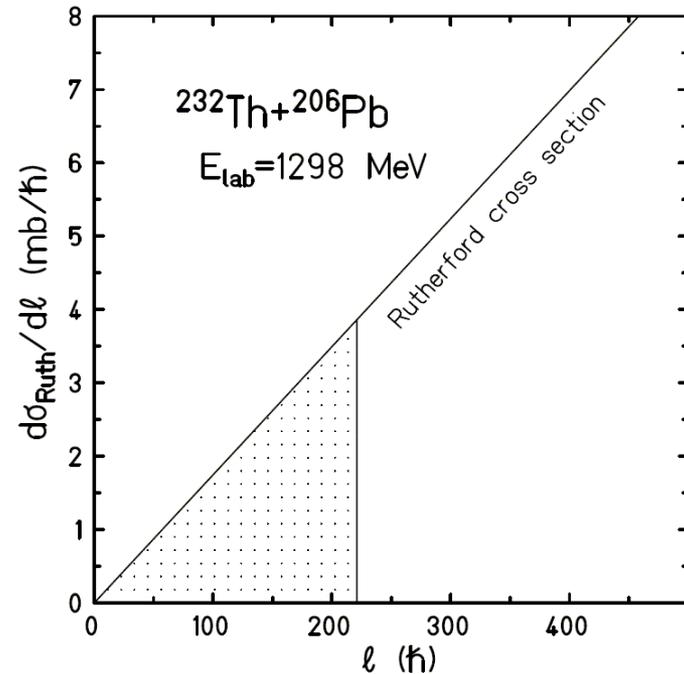
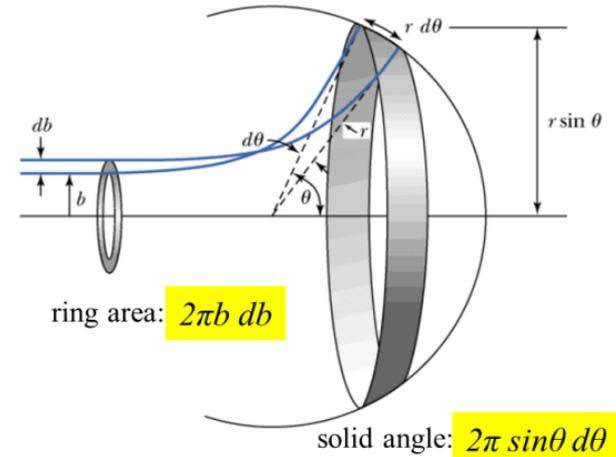
Seção de choque em função das ondas parciais

$$\frac{d\sigma}{d\ell} = \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \frac{d\Omega}{d\ell} = \frac{a^2}{4} \cdot \sin^{-4} \frac{\theta}{2} \cdot \frac{d\Omega}{d\ell}$$



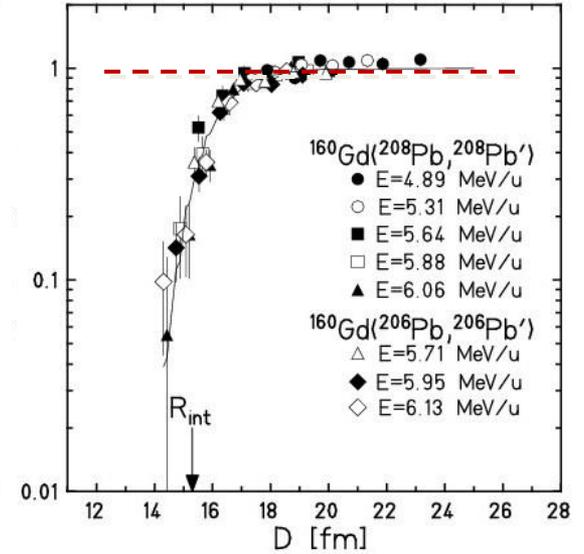
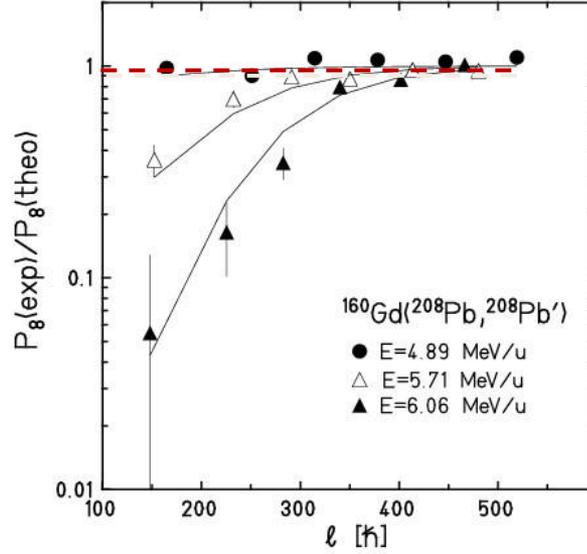
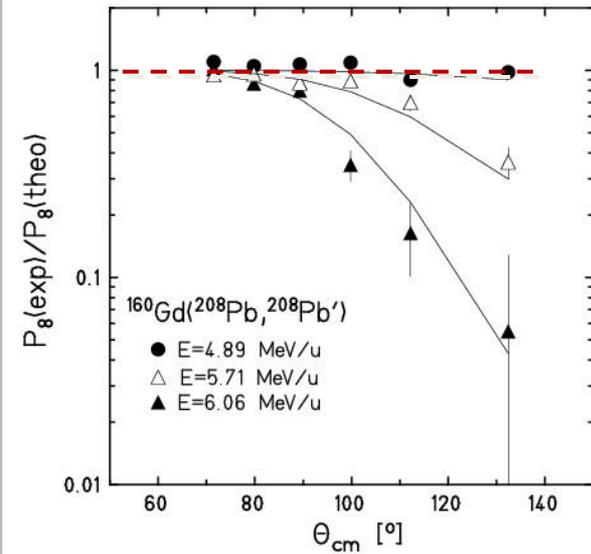
$$\frac{d\sigma}{d\ell} = \frac{2\pi}{k_\infty^2} \cdot \ell$$

É possível mostrar que a seção de choque diferencial em relação as ondas parciais é diretamente proporcional a onda parcial.



Razão da Seção de choque experimental pela seção de choque Rutherford.

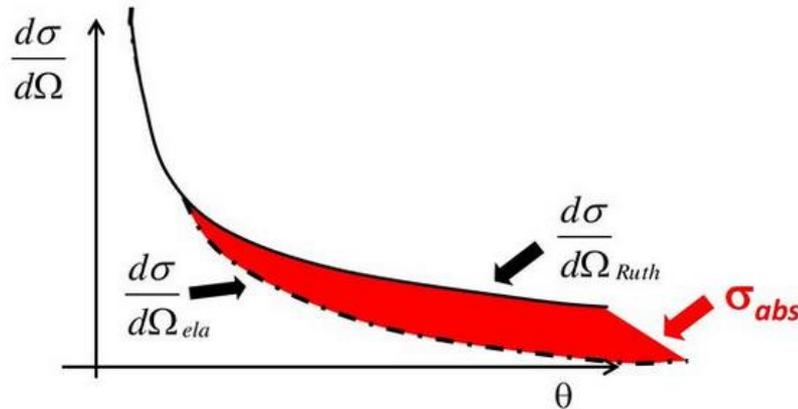
σ/σ_{Ruth}



ângulo de espalhamento

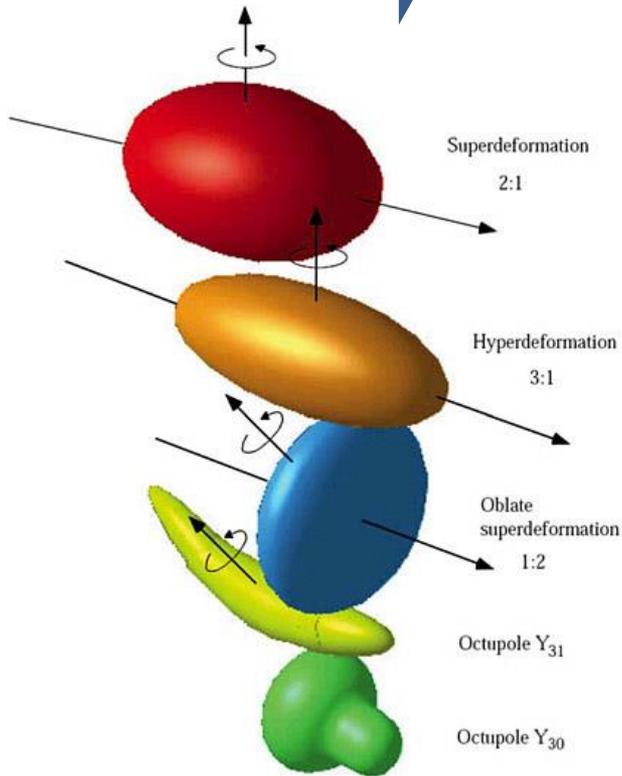
momento angular

distância de máxima aproximação

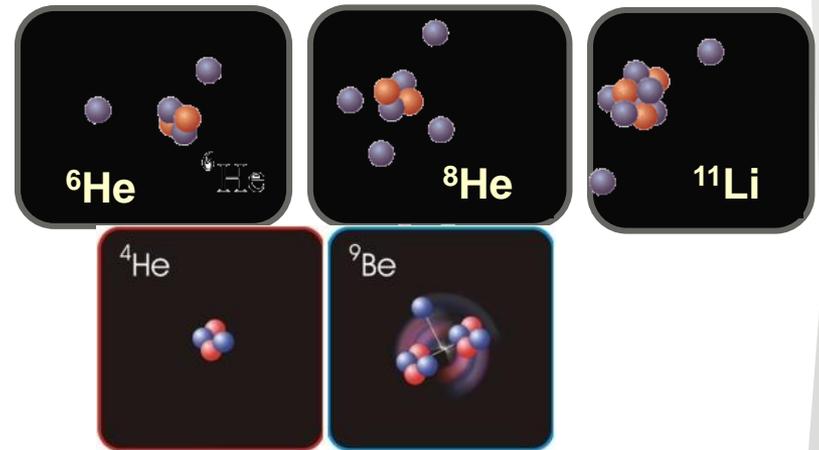


- Podemos usar espalhamento elástico para estudar estrutura de núcleos

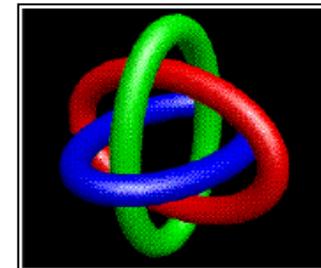
Núcleos estáveis  deformação



Alguns núcleos leves tem forte estrutura de cluster

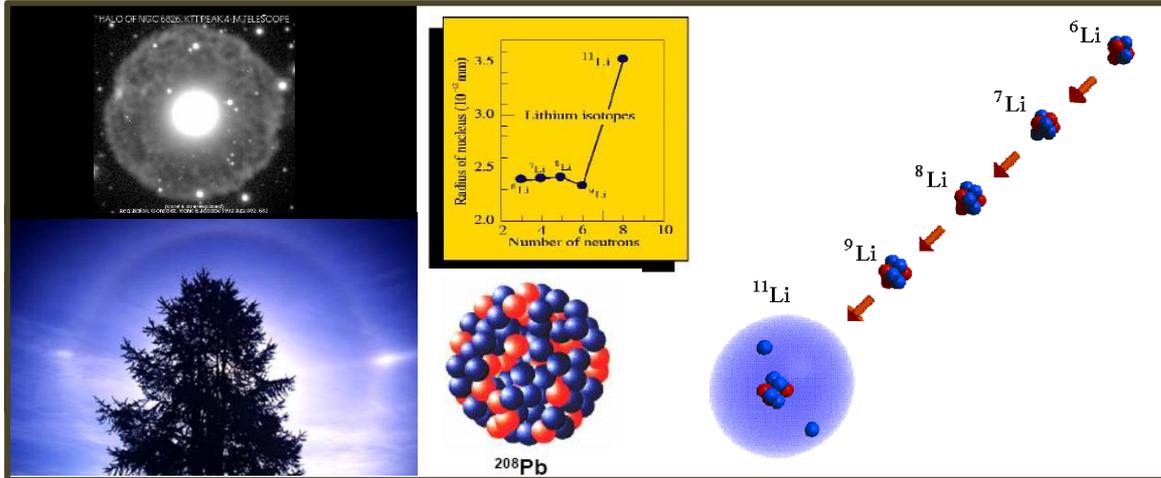


Núcleos exóticos tem estruturas exóticas



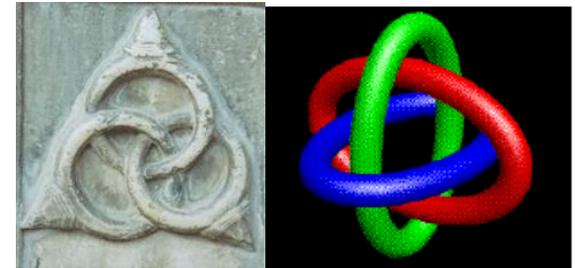
Núcleos exóticos – efeitos estáticos

Estrutura halo



Estrutura Borromeana

Anel borromeo =
Símbolo da Família Italiana
Lago Maggiore.



Baixa energia de ligação para os nêutrons

$${}^6\text{He} = {}^4\text{He} + 2n \quad \text{B.E.} = 0.315 \text{ MeV}$$

$${}^{11}\text{Li} = {}^9\text{Li} + 2n \quad \text{B.E.} = 0.973 \text{ MeV}$$

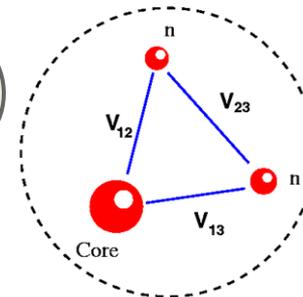
$${}^8\text{He} = {}^6\text{He} + 2n \quad \text{B.E.} = 2.140 \text{ MeV}$$

$$2n$$

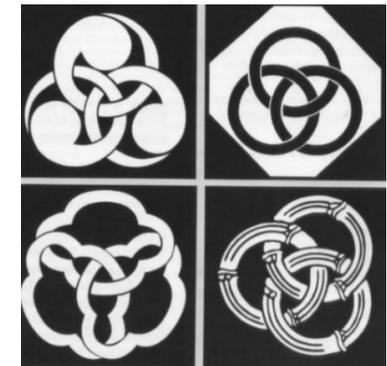
$${}^5\text{He} = {}^4\text{He} + n$$

$${}^{10}\text{Li} = {}^9\text{Li} + n$$

$${}^7\text{He} = {}^6\text{He} + n$$



Família japonesas

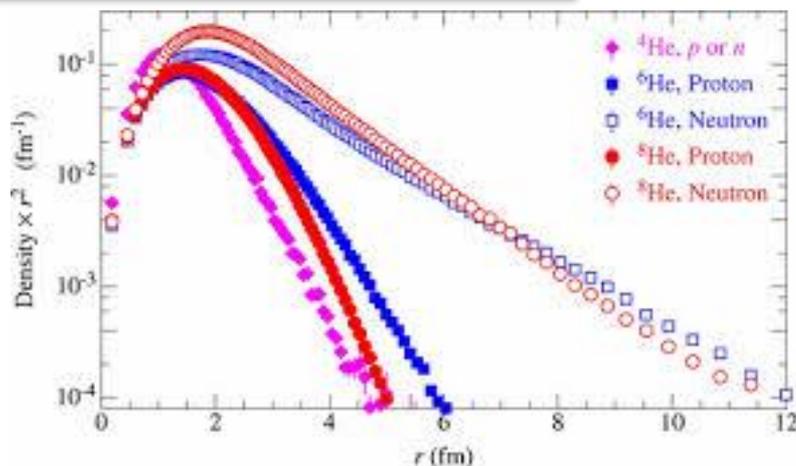


Não são ligados

Núcleos exóticos - efeitos estáticos

Baixa energia de ligação para estrutura de cluster

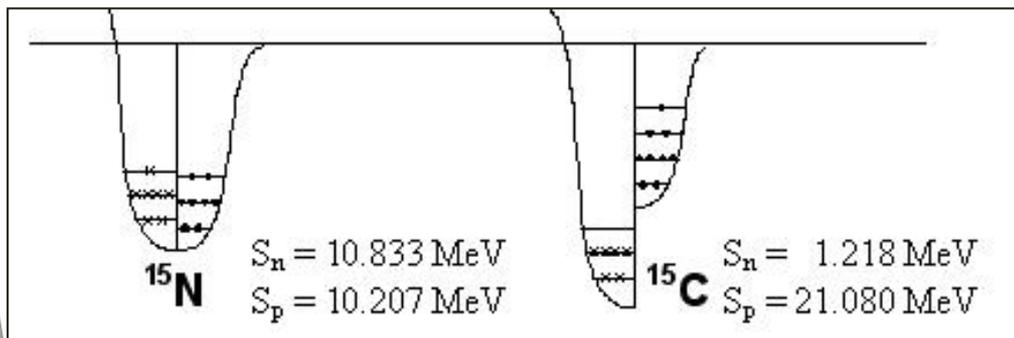
Distribuição de matéria estendida



Distribuição de nucleons

^{15}N estável

^{15}C exótico rico em nêutrons



Núcleos exóticos

$${}^8\text{B} = {}^7\text{Be} + p \quad (0.137 \text{ MeV})$$

$${}^6\text{He} = {}^4\text{He} + 2n \quad (0.973 \text{ MeV})$$

$${}^{11}\text{Li} = {}^9\text{Li} + 2n \quad (0.369 \text{ MeV})$$

$${}^{11}\text{Be} = {}^{10}\text{Be} + n \quad (0.502 \text{ MeV})$$

$${}^{15}\text{C} = {}^{14}\text{C} + n \quad (1.218 \text{ MeV})$$

Núcleos fracamente ligados

$${}^7\text{Be} = {}^4\text{He} + {}^3\text{He} \quad (1.587 \text{ MeV})$$

$${}^8\text{He} = {}^6\text{He} + 2n \quad (2.140 \text{ MeV})$$

$${}^9\text{Be} = {}^8\text{Be} + n \quad (1.665 \text{ MeV})$$

$${}^6\text{Li} = {}^4\text{He} + d \quad (1.474 \text{ MeV})$$

$${}^7\text{Li} = {}^4\text{He} + t \quad (2.467 \text{ MeV})$$

$${}^8\text{Li} = {}^7\text{Li} + n \quad (2.032 \text{ MeV})$$

Núcleos fortemente ligados

$${}^{16}\text{O} = {}^{12}\text{C} + \alpha \quad (7.192 \text{ MeV})$$

$${}^{10}\text{B} = {}^6\text{Li} + \alpha \quad (4.461 \text{ MeV})$$

$${}^{11}\text{B} = {}^7\text{Li} + \alpha \quad (8.664 \text{ MeV})$$

$${}^{10}\text{C} = {}^8\text{Be} + 2p \quad (3.821 \text{ MeV})$$

Novos números mágicos

Novos numeros mágicos

Observation of new neutron and proton magic numbers

Rituparna Kanungo, I. Tanihata, A. Ozawa

The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), 2-1, Hirosawa, Wako-shi, Saitama 351-0198, Japan

Physics Letters B 528 (2002) 58–64

6, 16
Novos números
mágicos !!

Exotic dripline nuclei

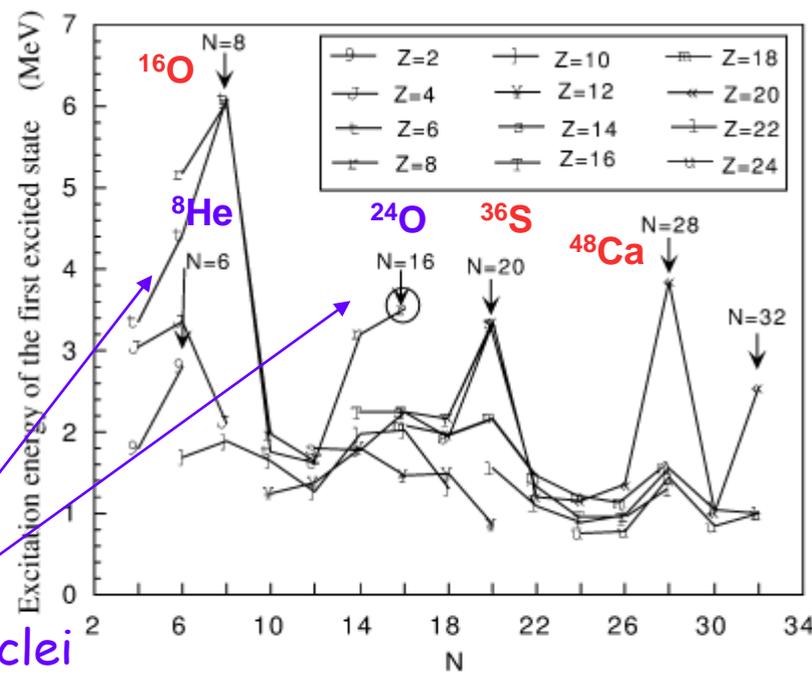
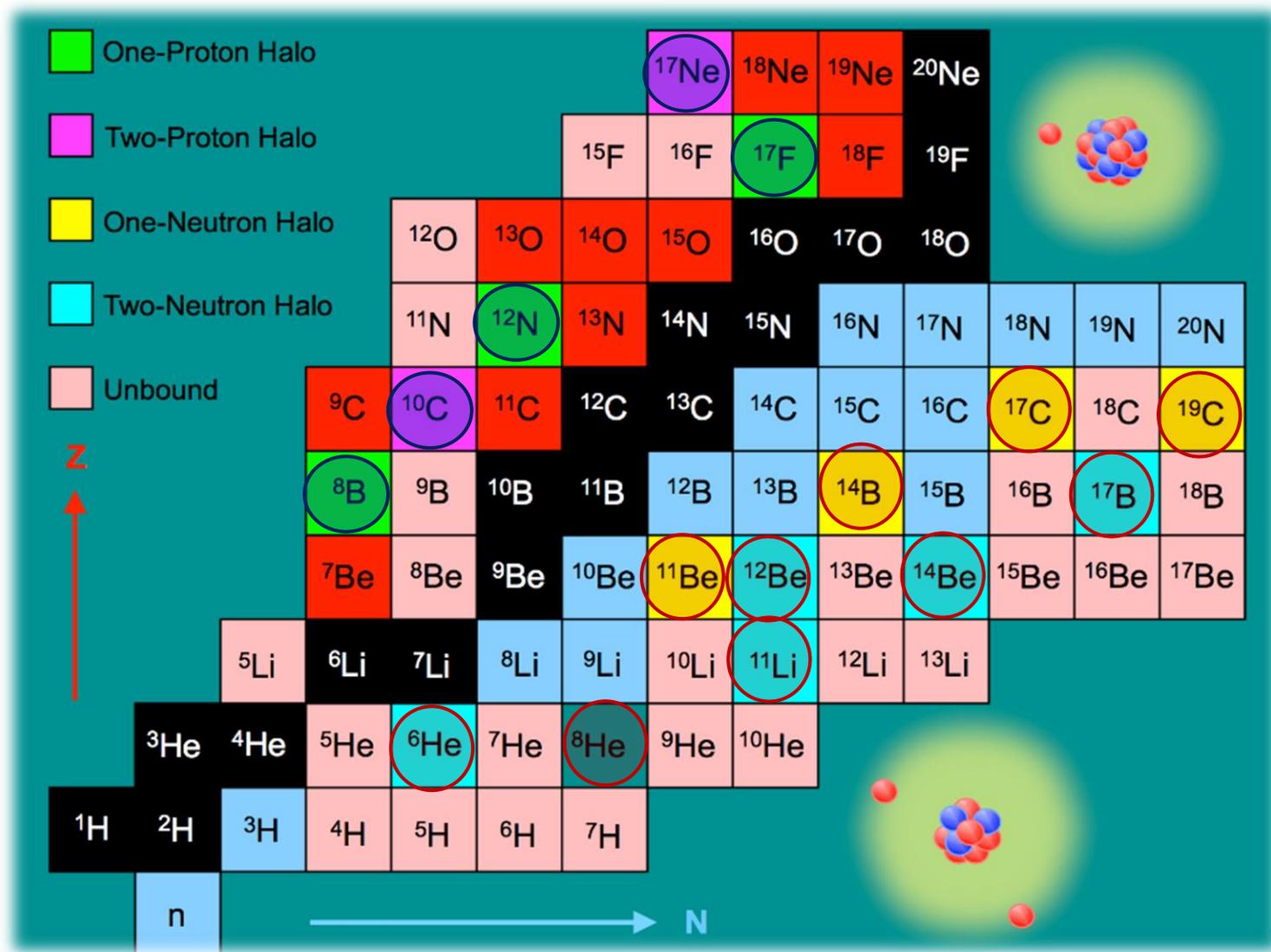
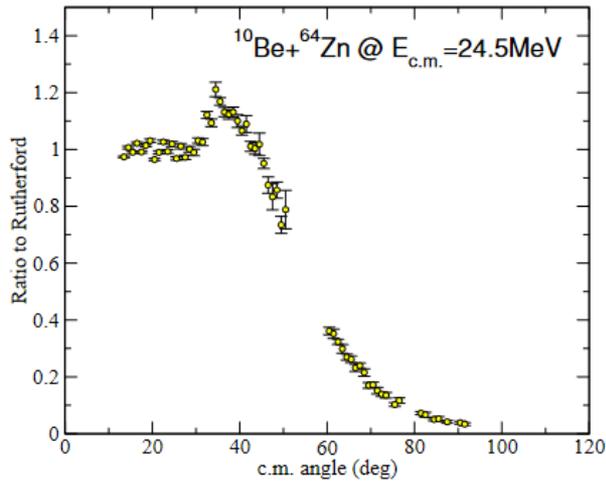


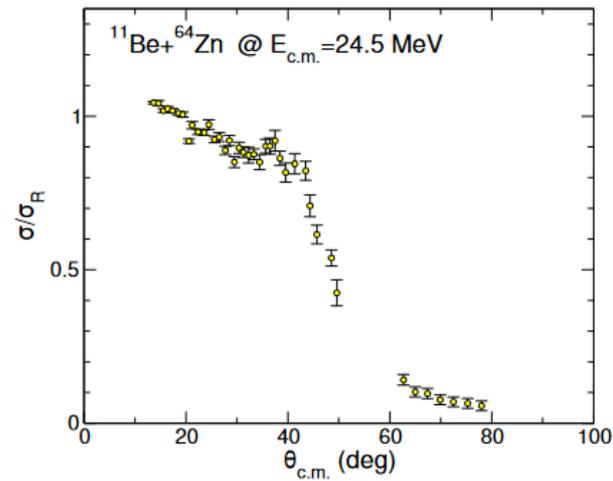
Fig. 3. The excitation energies of the first excited state for even-even nuclei plotted as a function of neutron number. The lines connect the nuclei with same Z. The symbols represent nuclei with different Z numbers. The circled symbol indicates non-measured value.



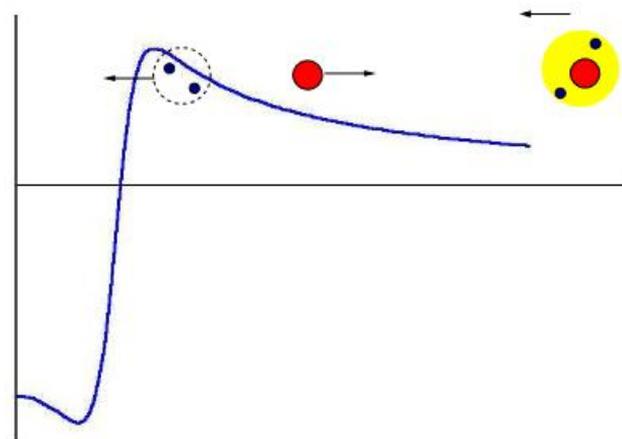
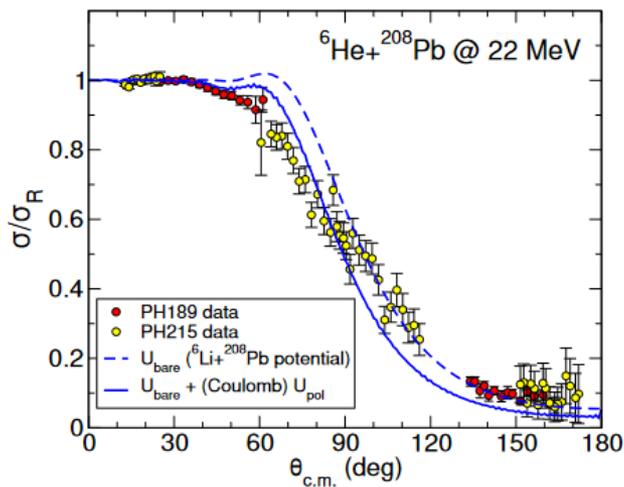
❑ Efeito no espalhamento elástico -> reduzir pico de Fresnel devido absorção forte.



(Fresnel)



(?)



O caso do $^{11}\text{Li} + ^{208}\text{Pb}$

PRL 109, 262701 (2012)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
28 DECEMBER 2012

Do Halo Nuclei Follow Rutherford Elastic Scattering at Energies Below the Barrier? The Case of ^{11}Li

M. Cubero,^{1,2} J.P. Fernández-García,^{3,4} M. Rodríguez-Gallardo,³ L. Acosta,⁵ M. Alcorta,¹ M. A. G. Alvarez,^{3,4}
M. J. G. Borge,^{6,*} L. Buchmann,⁷ C. A. Díez,⁸ H. Al Falou,⁹ B. R. Fulton,⁸ H. O. U. Fynbo,¹⁰ D. Galaviz,¹¹
J. Gómez-Camacho,^{3,4} R. Kanungo,⁹ J. A. Lay,³ M. Madurga,⁶ I. Martel,⁵ A. M. Moro,³ I. Mukha,⁴ T. Nilsson,¹²
A. M. Sánchez-Benítez,⁵ A. Shotton,^{7,13} O. Tengblad,⁶ and P. Walden⁷

Forward angles pure Rutherford

$$\frac{\sigma}{\sigma_{Ruth}} = 1$$

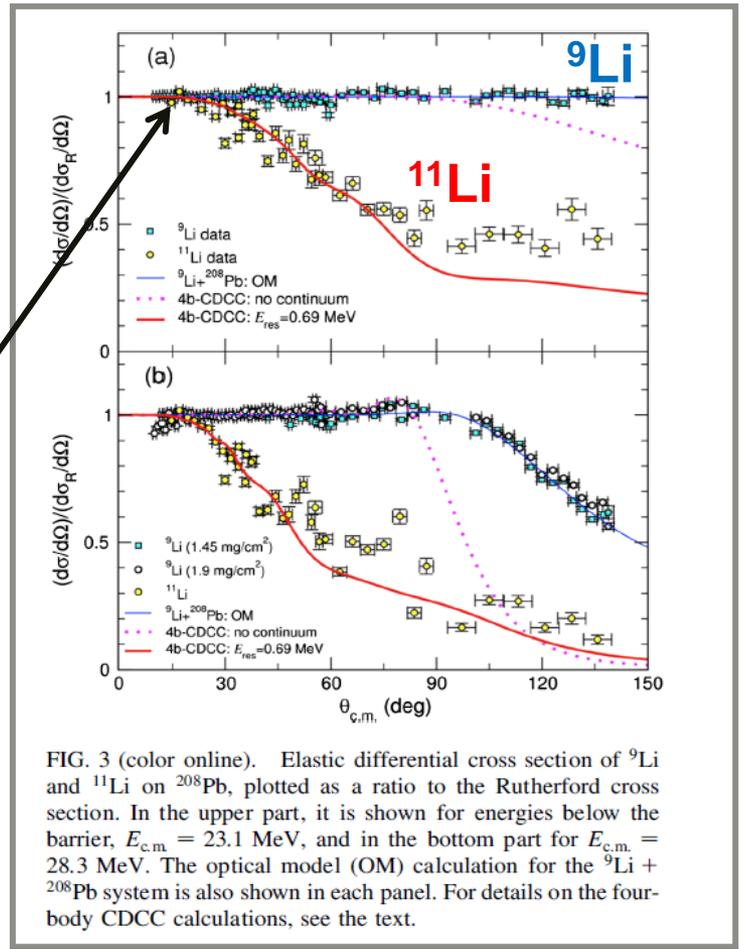
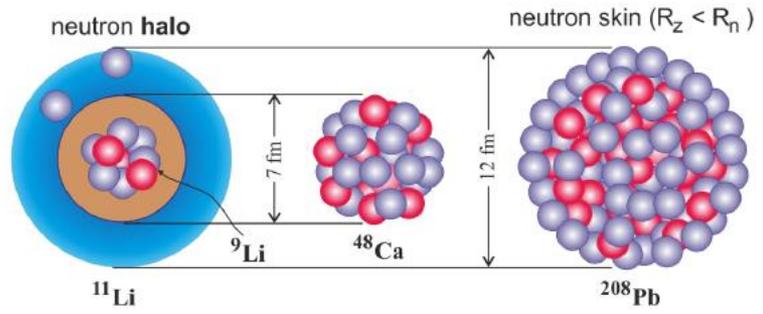
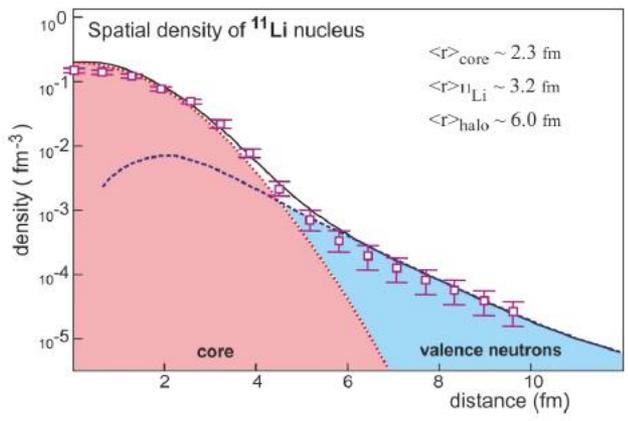


FIG. 3 (color online). Elastic differential cross section of ^9Li and ^{11}Li on ^{208}Pb , plotted as a ratio to the Rutherford cross section. In the upper part, it is shown for energies below the barrier, $E_{c.m.} = 23.1$ MeV, and in the bottom part for $E_{c.m.} = 28.3$ MeV. The optical model (OM) calculation for the $^9\text{Li} + ^{208}\text{Pb}$ system is also shown in each panel. For details on the four-body CDCC calculations, see the text.



Espalhamento elástico pode ser útil para se estudar efeitos estáticos e dinâmicos da interação nuclear.

Eur. Phys. J. A (2018) 54: 223
DOI 10.1140/epja/i2018-12662-7

THE EUROPEAN
PHYSICAL JOURNAL A

Regular Article – Experimental Physics

Phenomenological critical interaction distance from elastic scattering measurements on a ^{208}Pb target

V. Guimarães^{1,a}, J. Lubian², J.J. Kolata³, E.F. Aguilera⁴, M. Assunção⁵, and V. Morcelle⁶

distância de máxima aproximação

$$D = \frac{1}{2}D_0 \left[1 + \frac{1}{\sin(\theta_{\text{c.m.}}/2)} \right]$$

$$D_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_P Z_T e^2}{E_{\text{c.m.}}}$$

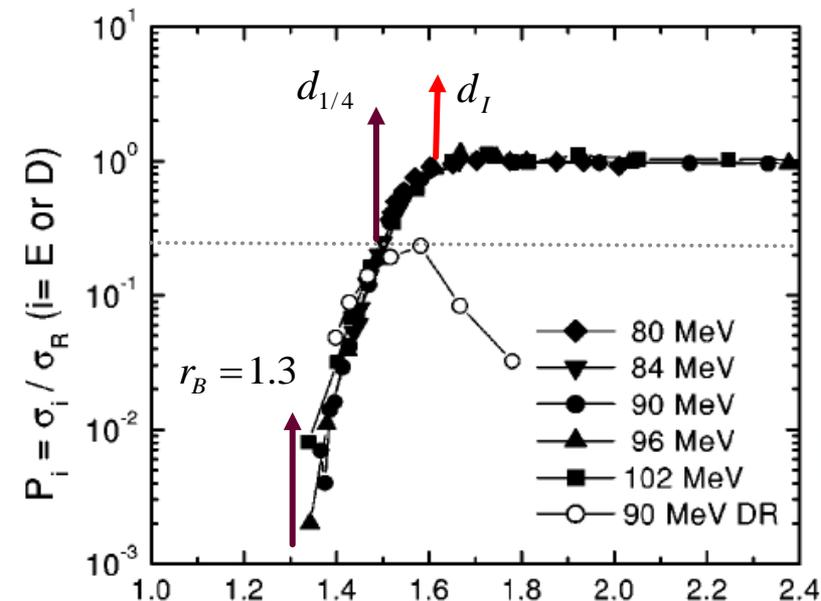
$$d = D / \left(A_P^{1/3} + A_T^{1/3} \right)$$



distância de máxima aproximação reduzida.

Eliminamos o efeito do tamanho do núcleo já que $R=r_0A^{1/3}$

$^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ system



$$d = D_{closest} / (A_p^{1/3} + A_t^{1/3})$$

r_B = Raio da barreira (raio do topo da barreira para L=0)

$d_{1/4}$ = absorção forte $\sigma/\sigma_{RUTH} = 0.25$

d_I = Distância de interação critica $\sigma/\sigma_{RUTH} = 0.98$

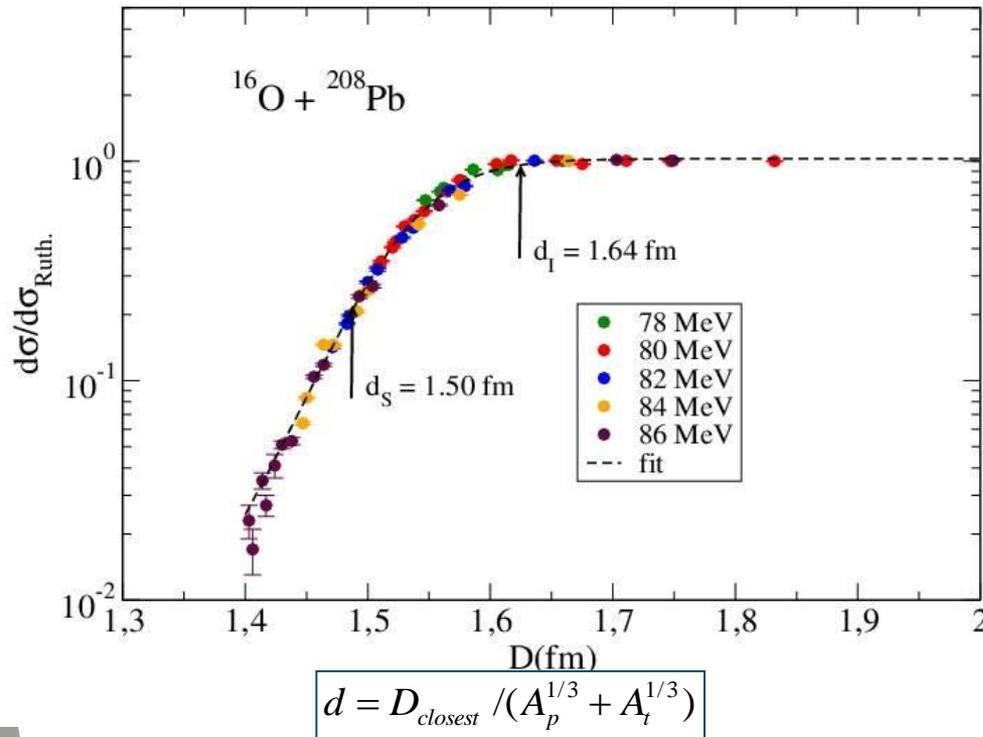
$d < d_I$ Reações diretas se tornam importantes

$d < d_{1/4}$ Fusão de torna importante.
Queda exponencial devido forte absorção.

$d < r_B = 1.3$ Fluxo é totalmente absorvido

$d_I =$ Distância de interação crítica $\sigma/\sigma_{RUTH} = 0.98$

$d_S =$ Distância de interação $\sigma/\sigma_{RUTH} = 0.25$



Boltzmann-type exponential function:

$$y = \frac{p_1 - p_2}{1 + e^{p_3 \cdot (d - d_0)}} + p_2$$

d is the reduced distance of closest approach.

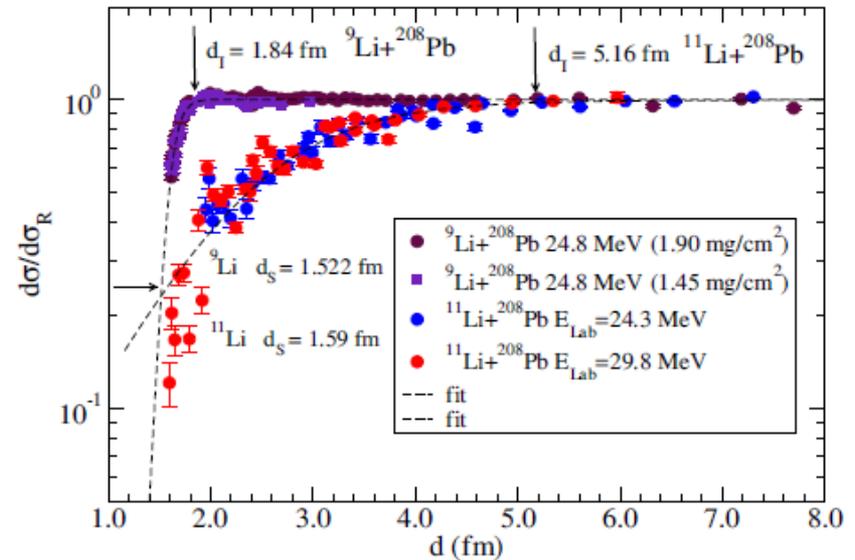
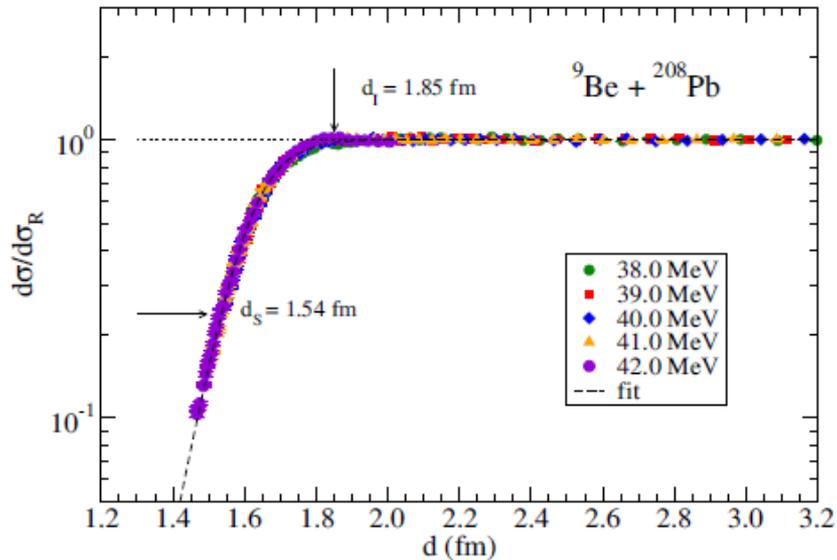
y is the σ/σ_{Ruth} ratio

p_1, p_2, p_3 and d_0 are adjustable parameters

Razão da seção de choque diferencial experimental e seção de choque diferencial Rutherford para projéteis estáveis e fortemente ligados em função da distância.

Seção de choque em função da distância

Razão da seção de choque diferencial experimental e seção de choque diferencial Rutherford em função da distância (núcleos exóticos).



Núcleos exóticos

$${}^8\text{B} = {}^7\text{Be} + \text{p} \quad (0.137 \text{ MeV})$$

$${}^6\text{He} = {}^4\text{He} + 2\text{n} \quad (0.973 \text{ MeV})$$

$${}^{11}\text{Li} = {}^9\text{Li} + 2\text{n} \quad (0.369 \text{ MeV})$$

$${}^{11}\text{Be} = {}^{10}\text{Be} + \text{n} \quad (0.502 \text{ MeV})$$

$${}^{15}\text{C} = {}^{14}\text{C} + \text{n} \quad (1.218 \text{ MeV})$$

Núcleos fracamente ligados

$${}^7\text{Be} = {}^4\text{He} + {}^3\text{He} \quad (1.587 \text{ MeV})$$

$${}^8\text{He} = {}^6\text{He} + 2\text{n} \quad (2.140 \text{ MeV})$$

$${}^9\text{Be} = {}^8\text{Be} + \text{n} \quad (1.665 \text{ MeV})$$

$${}^6\text{Li} = {}^4\text{He} + \text{d} \quad (1.474 \text{ MeV})$$

$${}^7\text{Li} = {}^4\text{He} + \text{t} \quad (2.467 \text{ MeV})$$

$${}^8\text{Li} = {}^7\text{Li} + \text{n} \quad (2.032 \text{ MeV})$$

Núcleos fortemente ligados

$${}^{16}\text{O} = {}^{12}\text{C} + \alpha \quad (7.192 \text{ MeV})$$

$${}^{10}\text{B} = {}^6\text{Li} + \alpha \quad (4.461 \text{ MeV})$$

$${}^{11}\text{B} = {}^7\text{Li} + \alpha \quad (8.664 \text{ MeV})$$

$${}^{10}\text{C} = {}^8\text{Be} + 2\text{p} \quad (3.821 \text{ MeV})$$

Razão da seção de choque diferencial experimental e seção de choque diferencial Rutherford em função da distância (núcleos exóticos e/ou fracamente ligados)

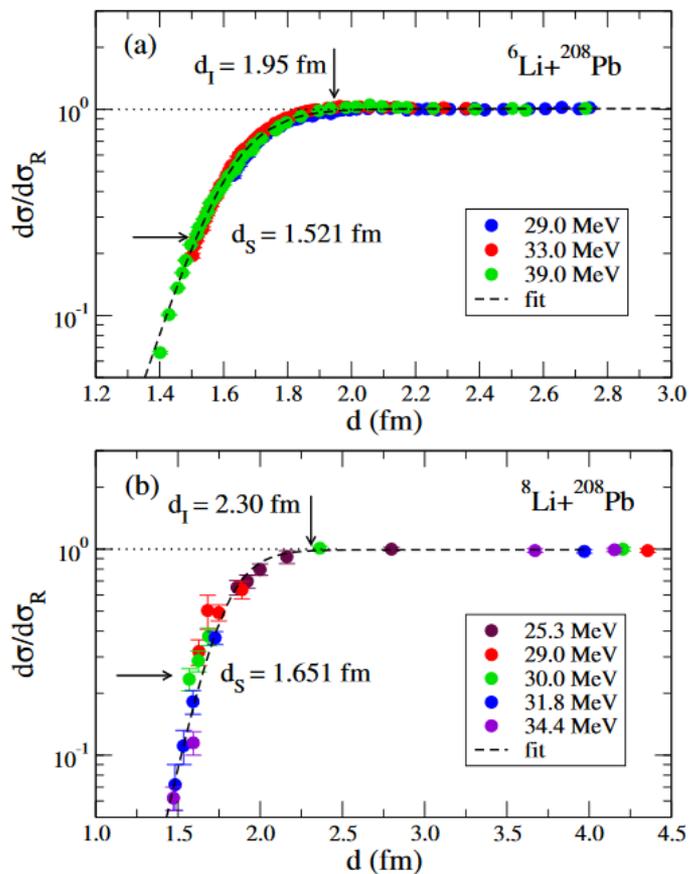


Fig. 4. Ratio of elastic cross section to the Rutherford value, $d\sigma/d\sigma_R$, as a function of the reduced distance of closest approach d for the (a) ${}^6\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ [32] and (b) ${}^8\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$ [25] systems, at the energies indicated.

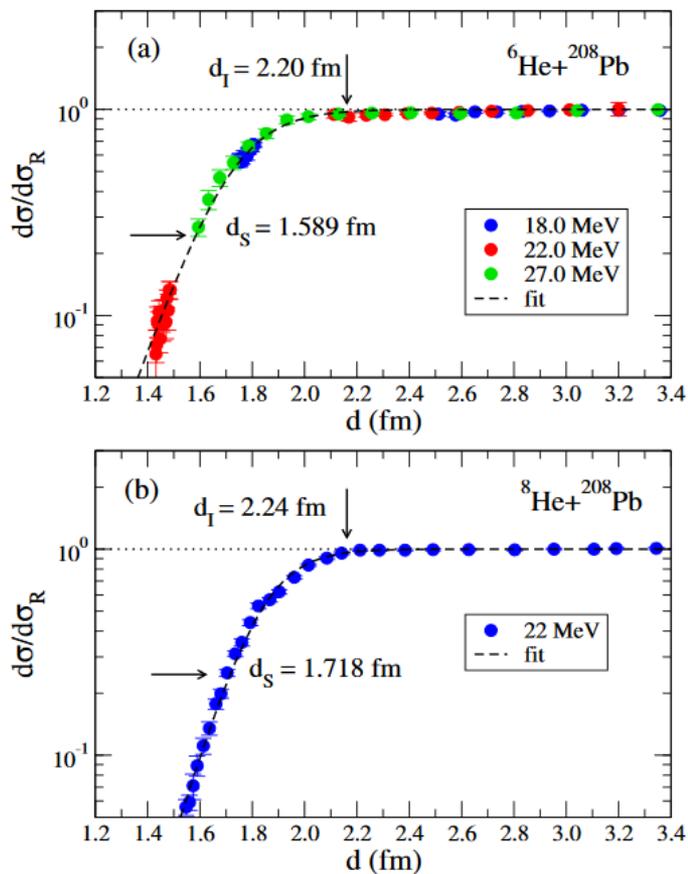


Fig. 5. Ratio of elastic cross section to the Rutherford value, $d\sigma/d\sigma_R$, as a function of the reduced distance of closest approach d for the (a) ${}^6\text{He} + {}^{208}\text{Pb}$ [33,34] and (b) ${}^8\text{He} + {}^{208}\text{Pb}$ [35] systems, at the energies indicated.

	Reference	B.E. (MeV)	V_B (MeV)	d_I (fm)	p_1	d_S (fm)
${}^6\text{He}$	S.-Benitez-05 [33] ^(a) Kakuee-06 [34] ^(a)	0.973 (${}^4\text{He} + 2n$)	19.1	2.20(5)	0.999(1)	1.589(7)
${}^8\text{He}$	M.-Duran-16 [35] ^(a)	2.140 (${}^6\text{He} + 2n$)	18.6	2.24(7)	1.000(3)	1.718(6)
${}^6\text{Li}$	Keeley-94 [32] ^(a)	1.474 (${}^4\text{He} + d$)	29.4	1.95(4)	1.007(1)	1.521(5)
${}^7\text{Li}$	Keeley-94 [32] ^(a)	2.467 (${}^4\text{He} + t$)	29.0	1.74(2)	1.019(1)	1.491(3)
${}^8\text{Li}$	Kolata-02 [25] ^(a)	2.032 (${}^7\text{Li} + n$)	28.7	2.30(7)	0.993(6)	1.651(7)
${}^9\text{Li}$	Cubero-12 [13] ^(c)	4.064 (${}^8\text{Li} + n$)	28.3	1.84(3)	1.003(1)	1.522(3)
${}^{11}\text{Li}$	Cubero-12 [13] ^(a)	0.369 (${}^9\text{Li} + 2n$)	27.8	5.16(44)	0.999(2)	1.59(4)
${}^7\text{Be}$	Mazzocco-17 [26] ^(c)	1.587 (${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$)	39.4	1.86(5)	0.996(3)	1.509(4)
${}^9\text{Be}$	Yu-10 [29] ^(a)	1.655 (${}^8\text{Be} + n$)	38.9			
${}^{10}\text{Be}$	Kolata-04 [27] ^(a)	6.812 (${}^9\text{Be} + n$)	38.1			
${}^{12}\text{C}$	Santra-01 [20] ^(a)	7.367 (${}^8\text{Be} + \alpha$)	57.6			
${}^{16}\text{O}$	Vulgaris-86 [17] ^(c)	7.162 (${}^{12}\text{C} + \alpha$)	76.0			
${}^{17}\text{F}$	Liang-03 [28] ^(a)	0.601 (${}^{16}\text{O} + p$)	85.5			
${}^{19}\text{F}$	Lin-01 [36] ^(b)	4.014 (${}^{15}\text{N} + \alpha$)	84.5			

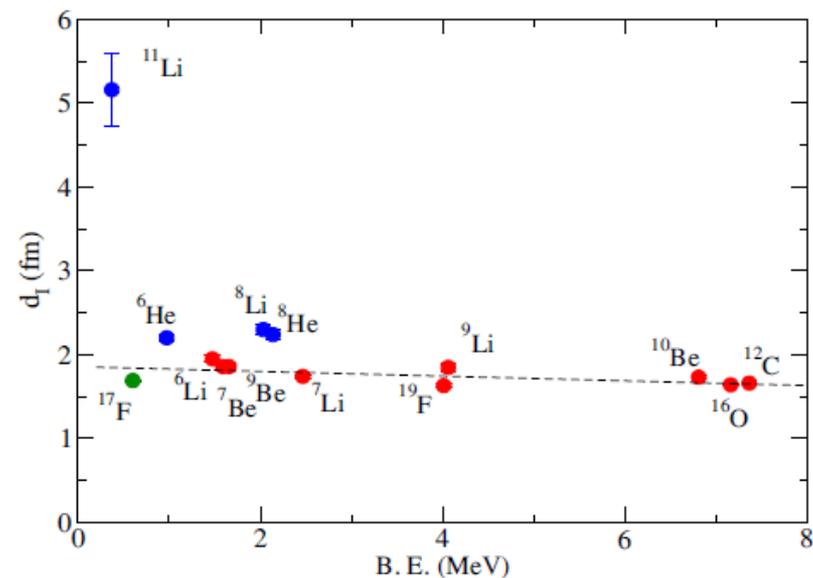


Fig. 8. Reduced critical distance of interaction as a function of the binding energy for the nuclei indicated. The dashed curve indicates the trend of the data for the weakly and tightly bound nuclei in red.

Modelo Óptico

- ❑ A forma para se determinar a absorção do fluxo do espalhamento devido ao potencial nuclear é com o modelo óptico
- ❑ Absorção devido a um potencial que descreva a interação nucleo-nucleo.

Potencial núcleo-núcleo

$$\left[\frac{\hbar^2}{2\mu} \frac{d^2}{dr^2} + \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\mu r^2} + \boxed{V(r)} - E \right] u^l(r) = 0$$

- ❑ Um modelo para o potencial que leva em conta a absorção e características gerais do espalhamento elástico é o modelo óptico.
- ❑ Ele é assim chamado devido a semelhança de tratamento com a luz sendo absorvida por um disco opaco.
- ❑ O potencial deve ser a soma do potencial coulombiano e nuclear $V(r) = V_C(r) + V_N(r)$
- ❑ O Potencial Nuclear deve ser complexo.
- ❑ A parte imaginária é responsável pela absorção, assim como na luz.

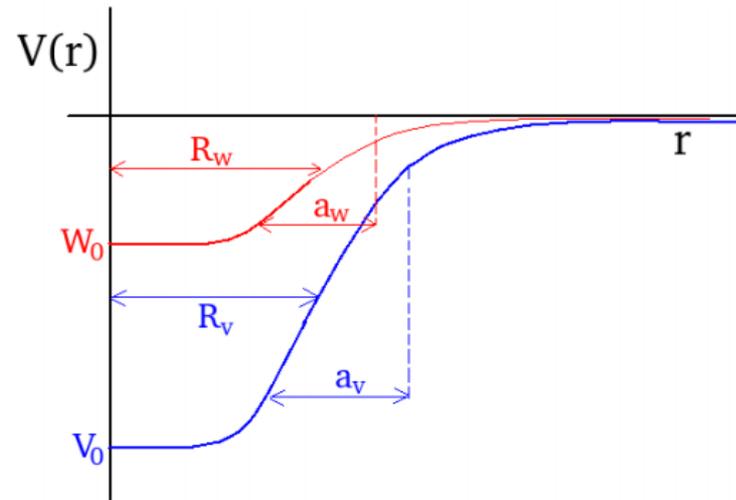
Potencial de Woods-Saxon

Um dos potenciais nuclear utilizado é o Potencial Woods-Saxon complexo (real e imaginário).

$$U(r) = V(r) + iW(r)$$

com
$$U(r) = -V_0 - iW_0 \quad r < R$$

$$= 0 \quad r > R$$



6 parametros livres

$$U = V_C + V + iW,$$

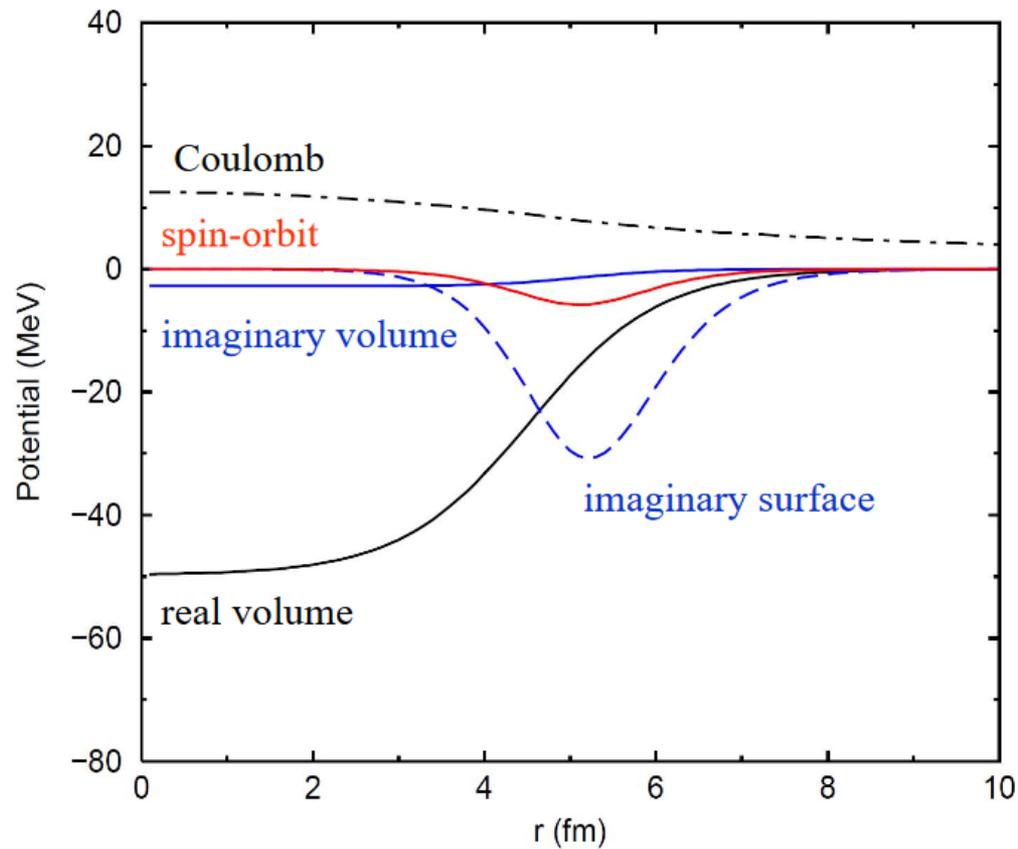
$$V = V_0 \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_v}{a_v}\right) \right]^{-1}$$

$$W = W_0 \left[1 + \exp\left(\frac{r - R_w}{a_w}\right) \right]^{-1}$$

$$V(r) = - \frac{V_0}{\underbrace{\left(1 + e^{\frac{r - R_v}{a_v}}\right)}_{\text{Real}}}$$

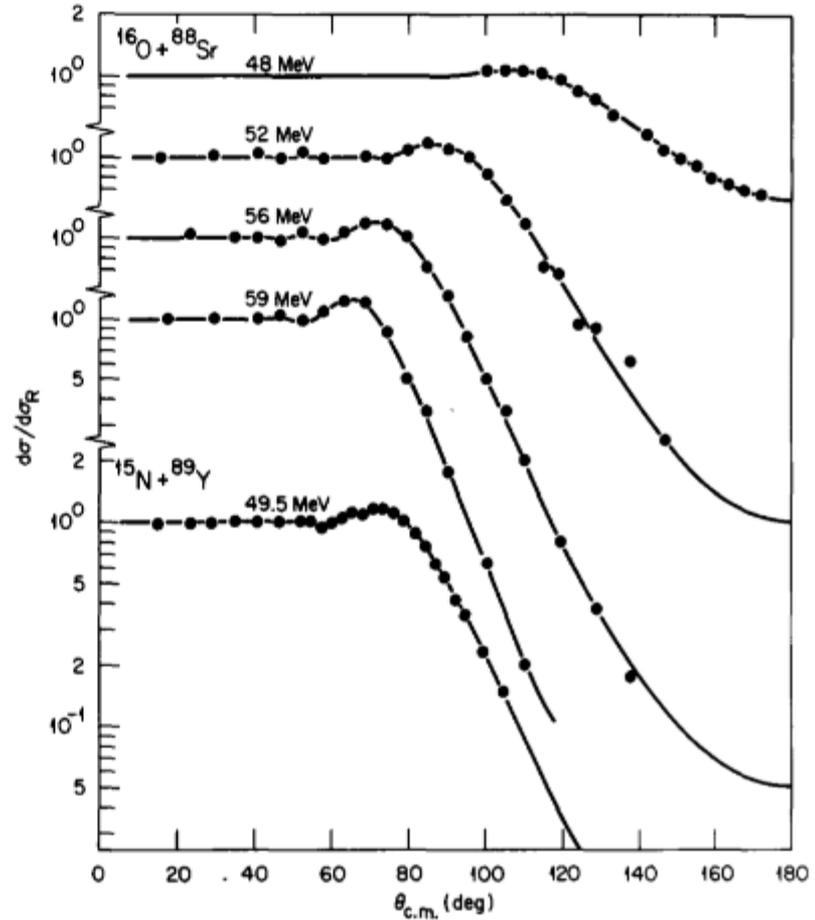
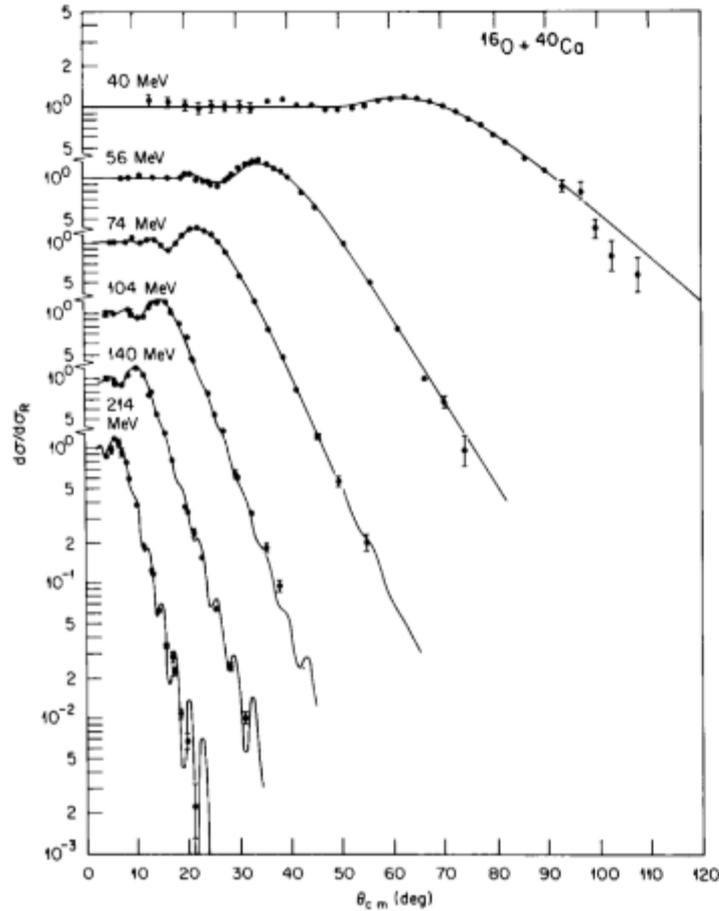
$$W(r) = - \frac{W_0}{\underbrace{\left(1 + e^{\frac{r - R_w}{a_w}}\right)}_{\text{imaginário}}}$$

- ❑ A interação se dá pela combinação de potenciais
- ❑ Coulombiano + Nuclear
- ❑ Nuclear com uma componente real e imaginária.
- ❑ Podemos ainda adicionar termos extras como de superfície, spin-orbita etc.



Resultado de ajustes com modelo óptico

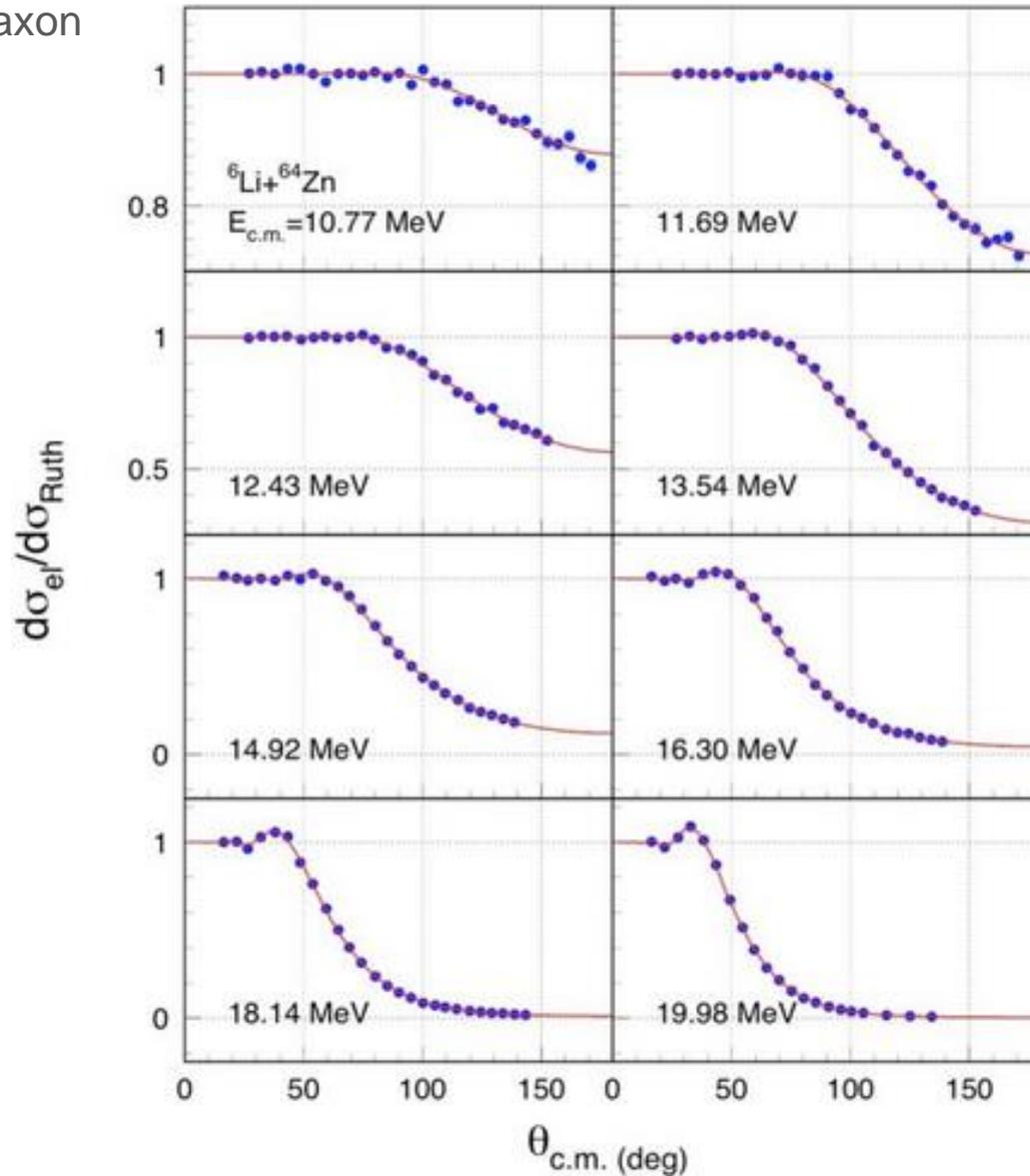
□ Potencial de Woods-Saxon



G.R. Satchler and W.G. Love, Phys. Rep. 55, 183 (1979)

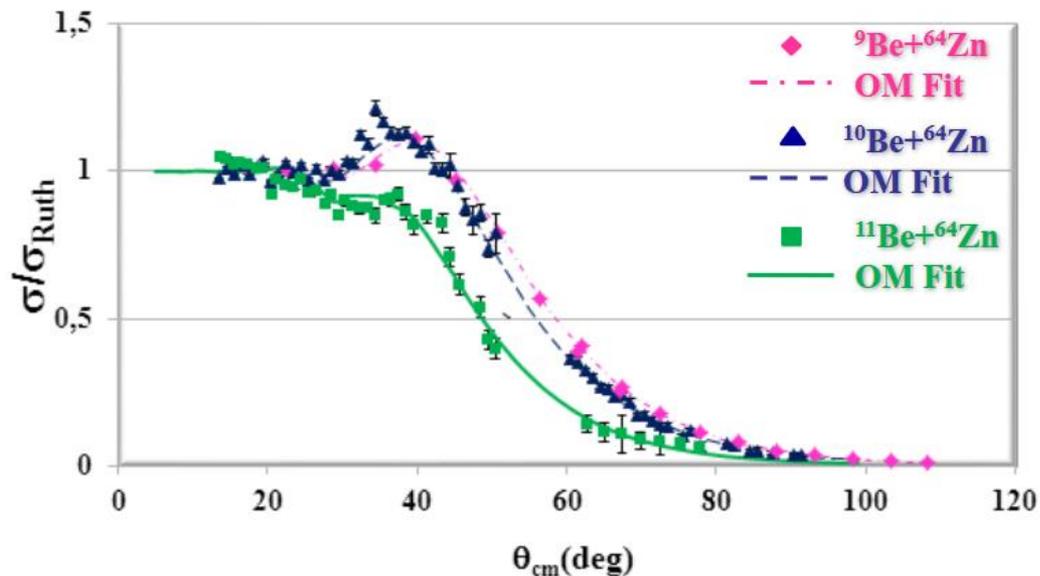
Resultado de ajustes com modelo óptico

- Potencial de Woods-Saxon



Resultado de ajustes com modelo óptico

${}^{9,10,11}\text{Be} + {}^{64}\text{Zn}$ elastic scattering angular distributions



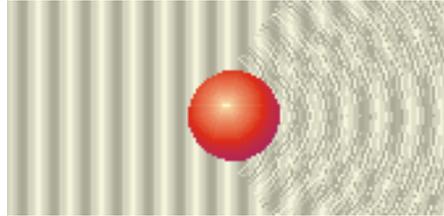
Potencial real

Potencial imaginário

Potencial superficial

Reaction	V(MeV)	a(fm)	R_0 (fm)	V_i (MeV)	a_i (fm)	R_{i0} (fm)	V_{Si} (MeV)	a_{Si} (fm)	R_{Si} (fm)
${}^9\text{Be}+{}^{64}\text{Zn}$	126	0.6	1.1	17.3	0.75	1.2			
${}^{10}\text{Be}+{}^{64}\text{Zn}$	86.2	0.7	1.1	43.4	0.6	1.2			
${}^{11}\text{Be}+{}^{64}\text{Zn}$	86.2	0.7	1.1	43.4	0.6	1.2	0.151	3.5	1.3

- ❑ Cálculos de seção de choque utilizando códigos, onde diferentes potenciais podem ser incluídos



<http://nrv.jinr.ru/nrv/>



<http://www.fresco.org.uk/>



Potencial de deconvolução

- ❑ Potencial Woods-Saxon tem muitos parâmetros.
- ❑ Podemos diminuir o numero de parâmetros adicionando alguma física

Exemplo: Potencial de São Paulo Potencial de dupla convolução

L.C. Chamon, et al. PRC 66,014610 (2002)

$$V_{LE}(r, E) \approx V_{fold}(r) e^{-[4v^2/c^2]}$$

Dependência com energia

$$V_{fold}(r) = \int d\vec{r}_p \int d\vec{r}_a \rho_p(\vec{r}_p) \rho_a(\vec{r}_a) v(\vec{r}_{pa})$$

$v(r_{pa})$: effective zero-range
nucleon-nucleon interaction

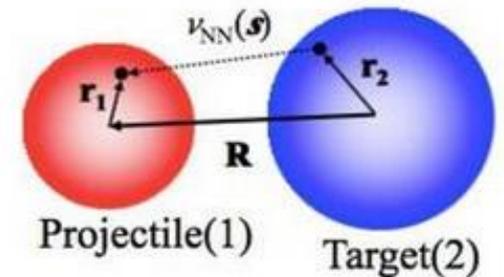
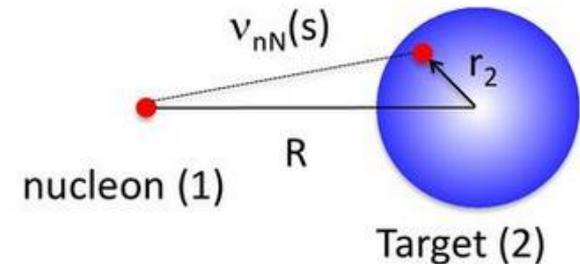
Sao Paulo Potential

$$V_{SPP}(r, E) = N_R V_{LE} + i N_I V_{LE}$$

Sem parâmetros livres se fixarmos os parâmetros obtidos de uma grande análise sistemática para projeteis estáveis

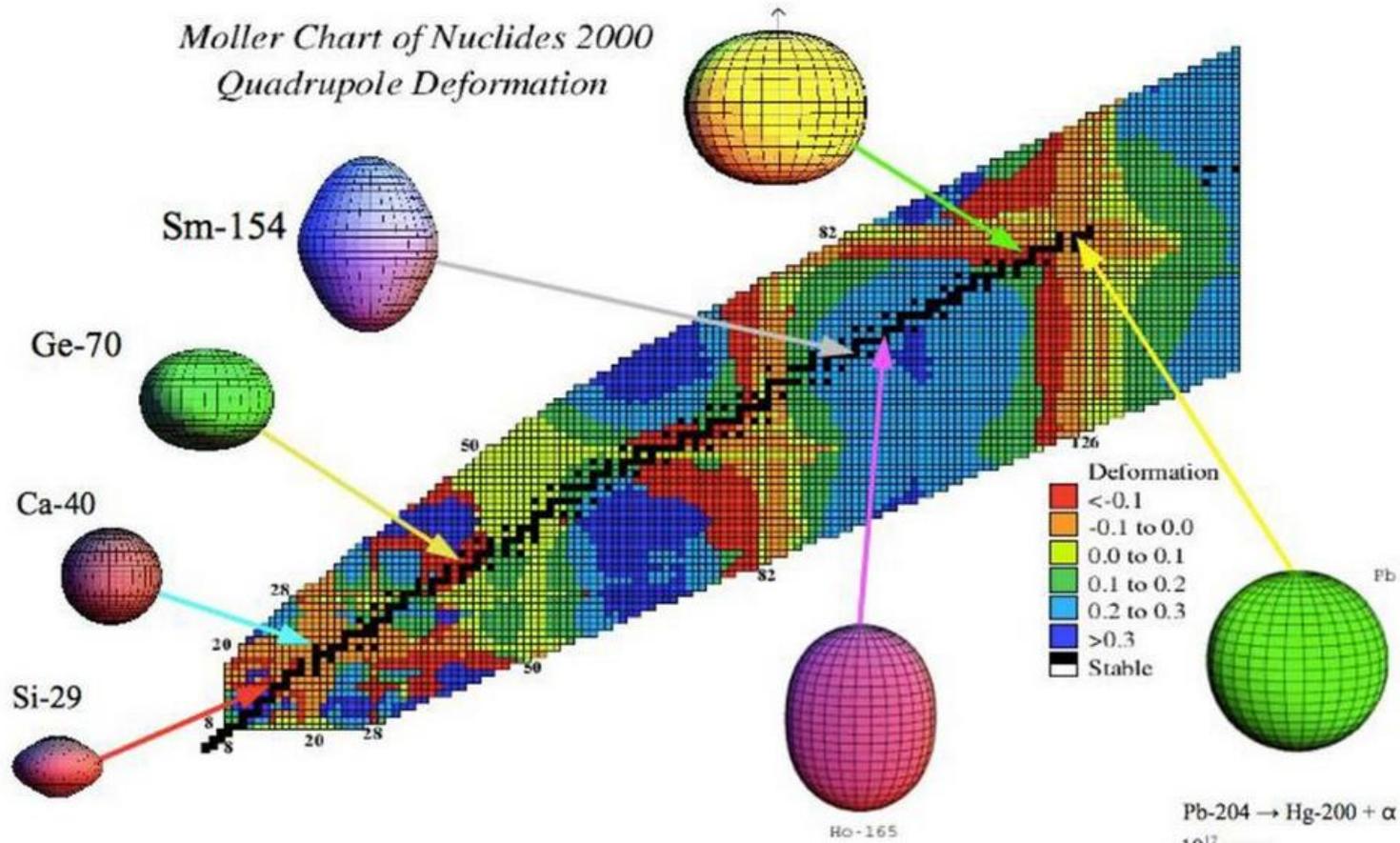
$$N_R = 1.00$$

$$N_I = 0.78$$

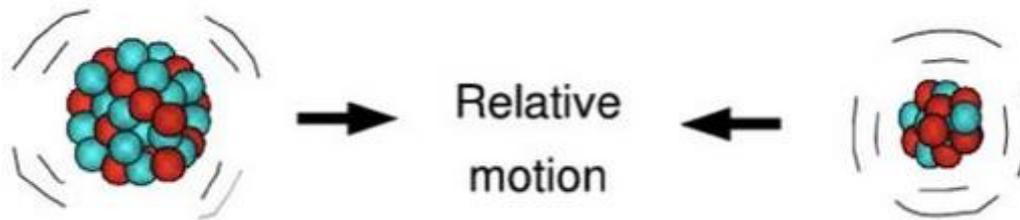


Núcleos deformados -> Espalhamento inelástico

- ❑ Para núcleos deformados parte da energia é absorvida para movimentos coletivos.
- ❑ Temos que adicionar a deformação dos projéteis e/ou alvos para descrever o espalhamento elástico (e inelástico).



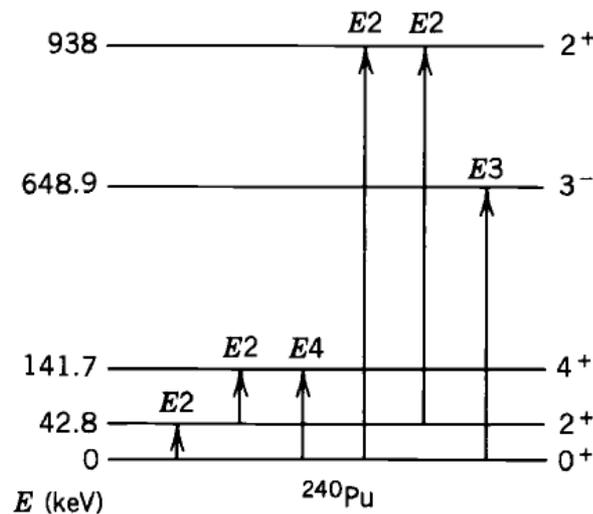
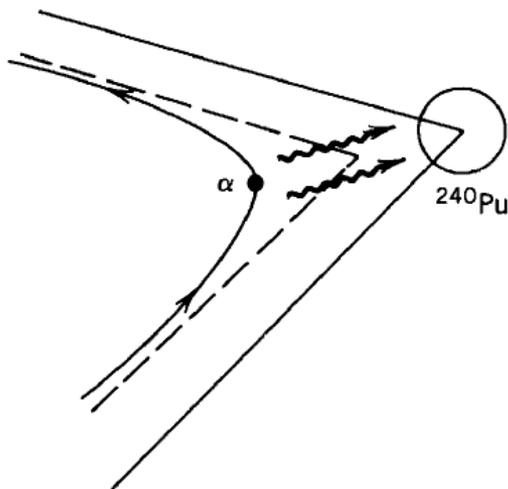
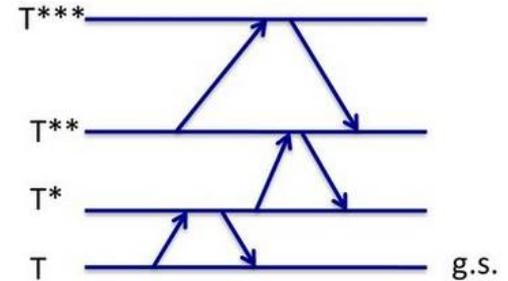
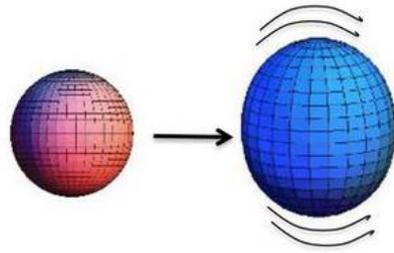
- ❑ Espalhamento elástico pode ser utilizado para estudar deformação.

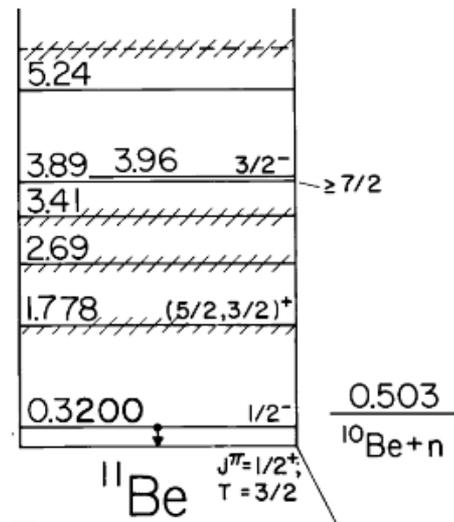
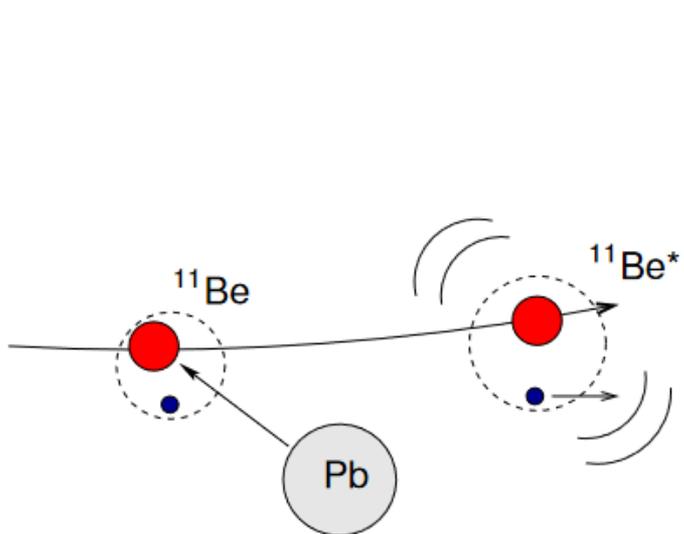


- ❑ Podemos determinar as transições (quadrupolar, octopolar) com o estudo do espalhamento elástico.

Excitação Coulombiana (espalhamento inelástico)

- ❑ Excitação que pode ocorrer quando um projétil se aproxima do campo elétrico do alvo.
- ❑ As partículas que interagem (interação Coulombiana) com o alvo e podem trocar fótons
- ❑ A interação Coulombiana é de longo alcance.
- ❑ Essa troca de fótons pode excitar o alvo ou o projétil
- ❑ E2 = excitação quadrupolar
- ❑ E3 = excitação octopolar.





- Efeito da deformação no espalhamento elástico.

Effects of channel coupling in elastic scattering

