

# Introducción a la Física Nuclear 2024

Rodolfo M. Id Betan (Rolo)  
[idbetan@ifir-conicet.gov.ar](mailto:idbetan@ifir-conicet.gov.ar)  
Edificio Ifir, Of. 235 (Esmeralda y Ocampo)

## Resonancias

### Contenido:

Evidencia experimental de las resonancias en la sección eficaz y el cambio de fase. Parametrización de Breit-Wigner. Ejemplo de resonancia experimental. Tiempo de retardo. Interpretación física de las resonancias. Resonancias como polos de la matriz de dispersión.

# Sobre la interpretación física de la dispersión resonante

# Estado cuasiestacionario

Parámetros que caracterizan una resonancia:  $\gamma$

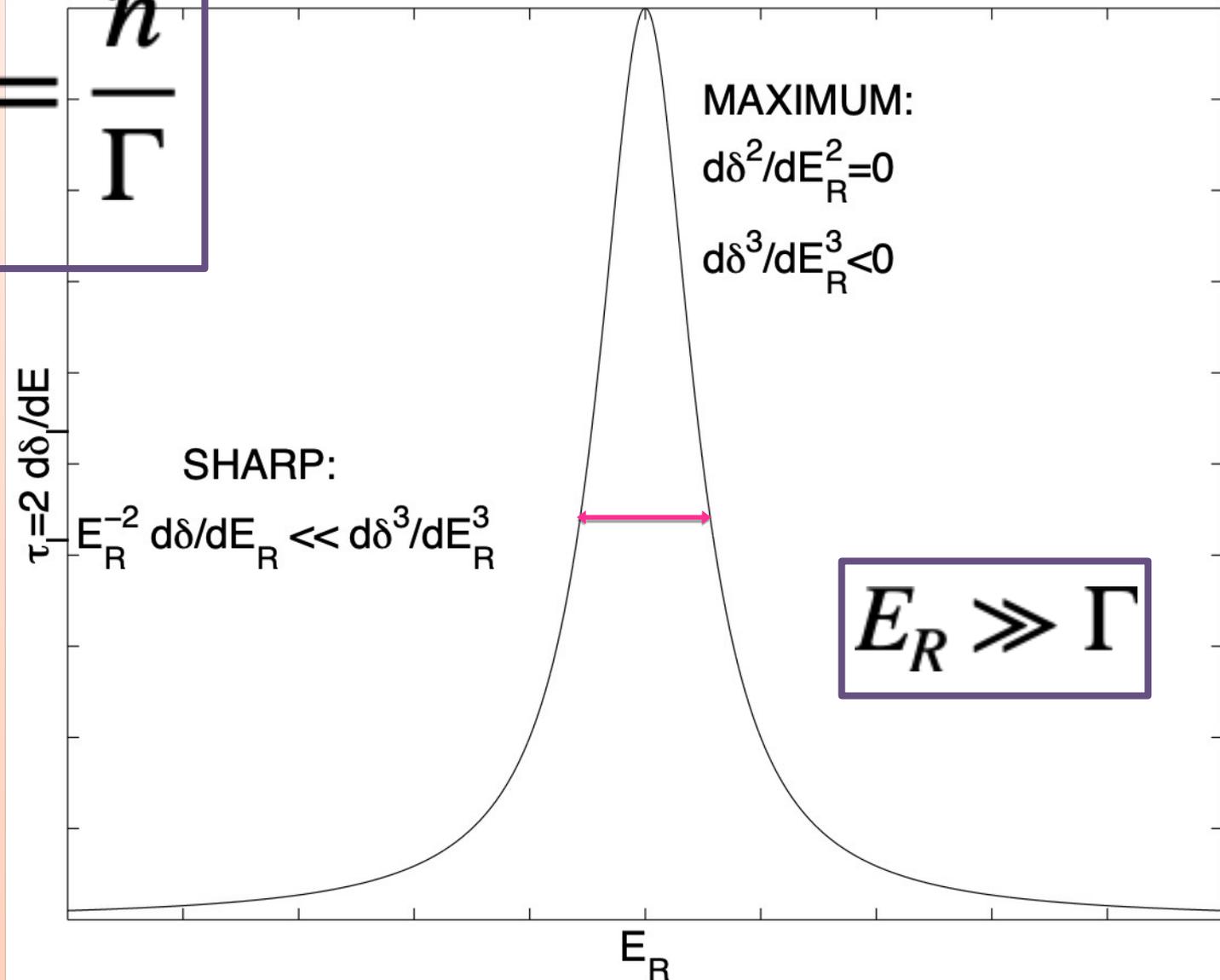
$$E_R \gg \Gamma$$



$$T_{1/2} = \ln 2 \frac{\hbar}{\Gamma}$$

# Tiempo de retardo

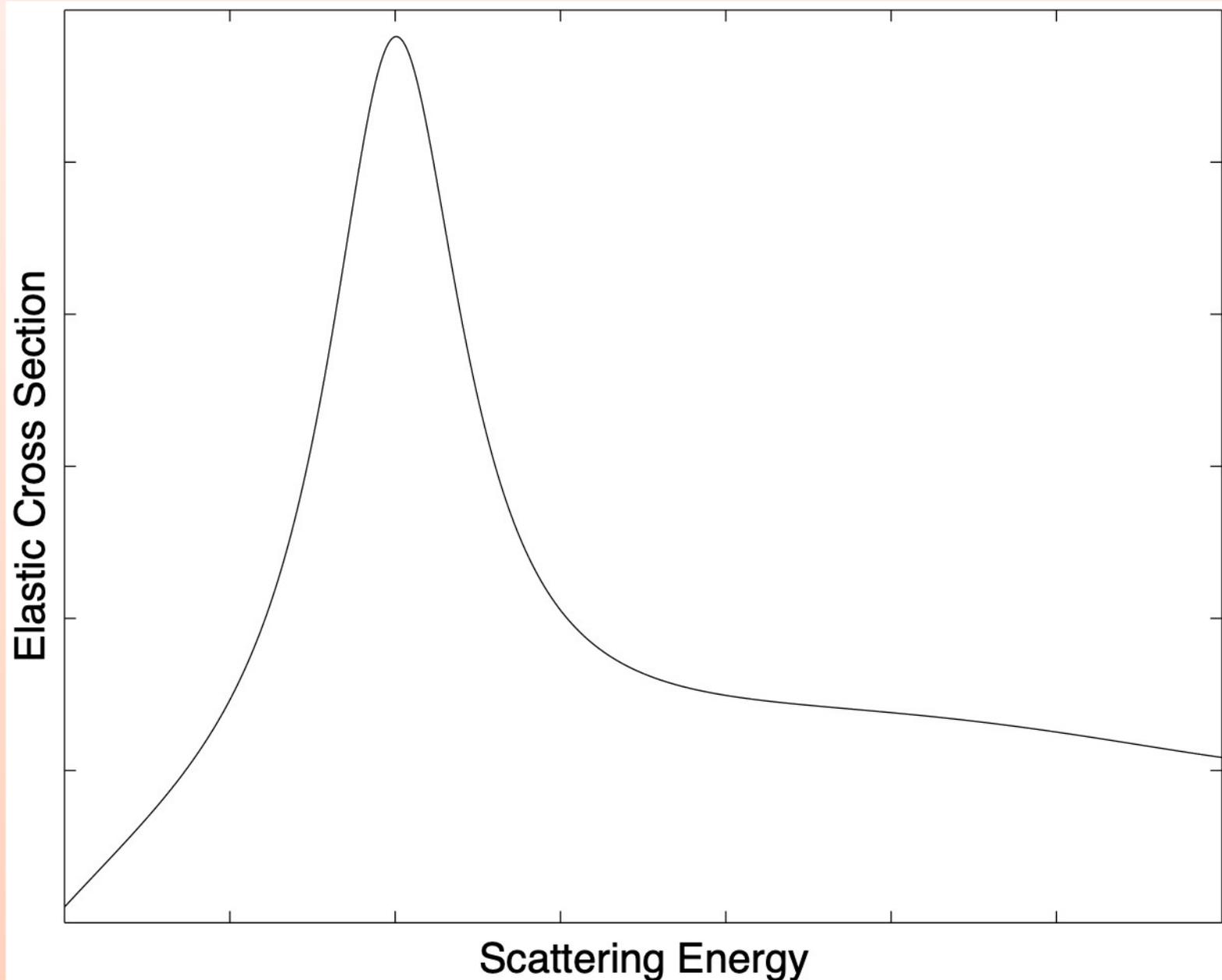
$$\tau = 2 \frac{d\delta}{dE} = \frac{\hbar}{\Gamma}$$



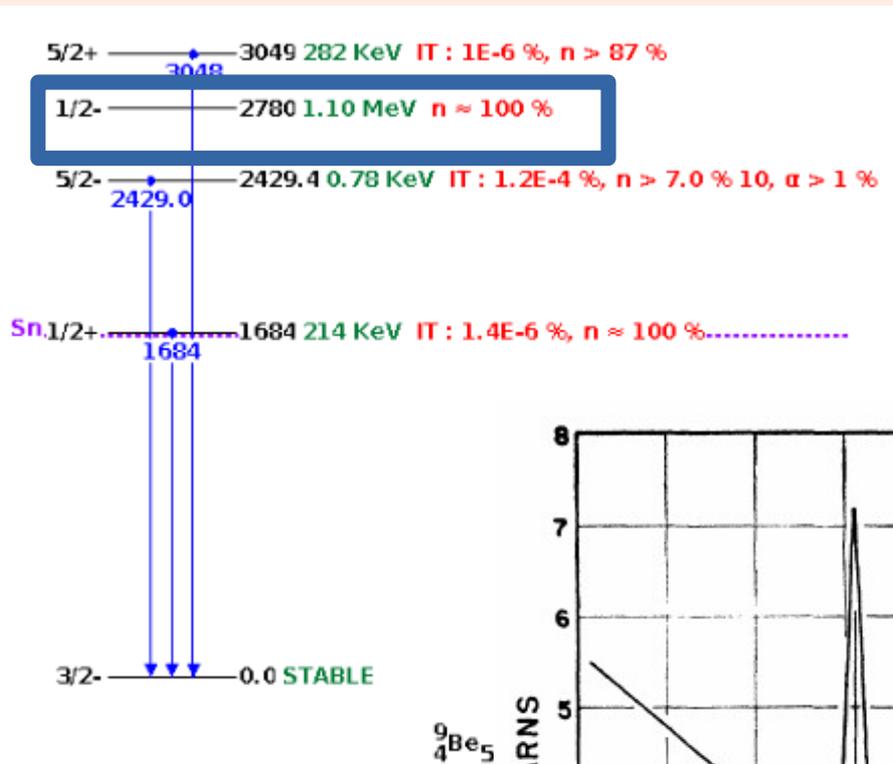
# Indicadores de dispersión resonante

**Sección eficaz**

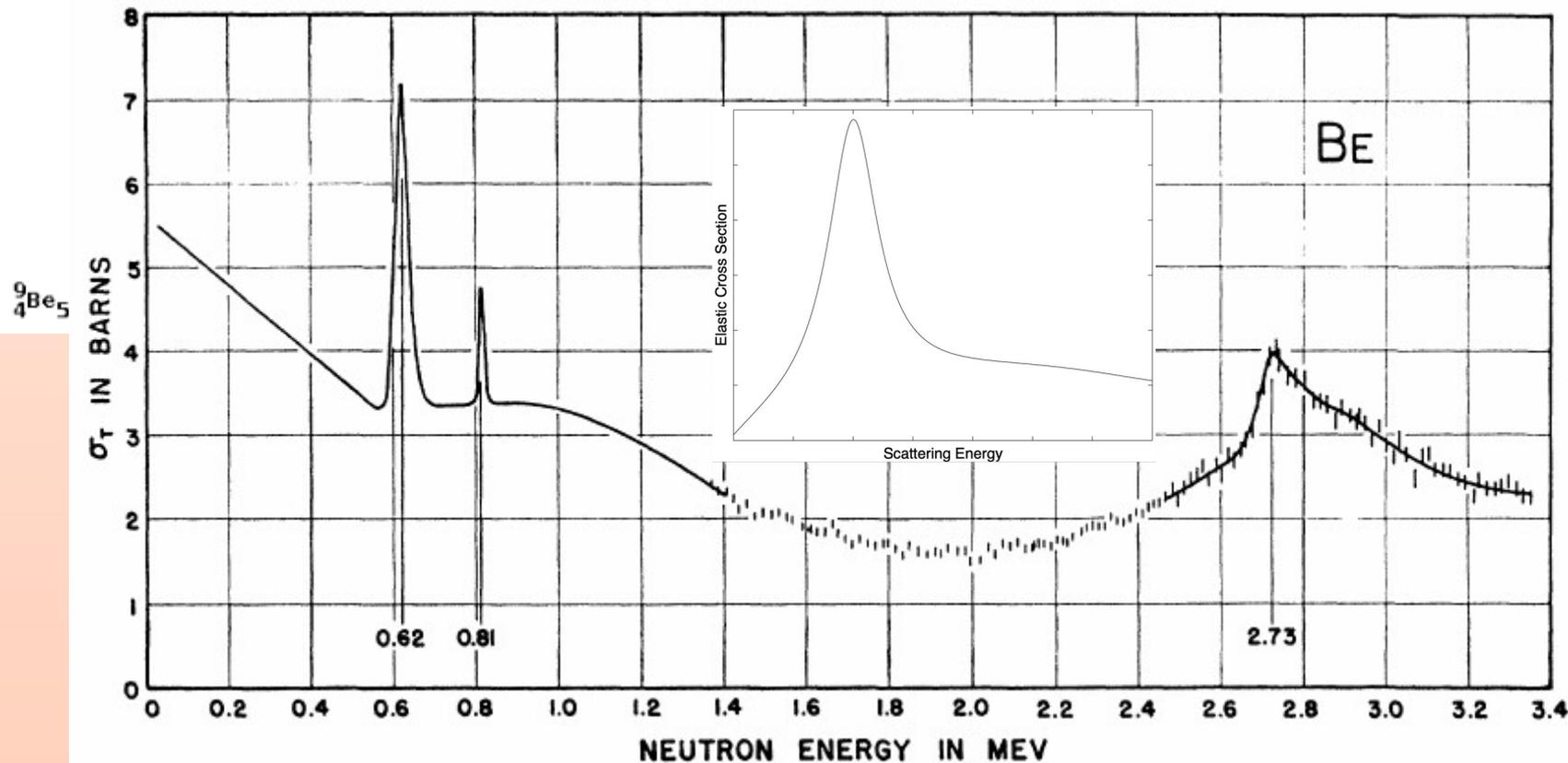
# Sección eficaz en reacciones resonantes



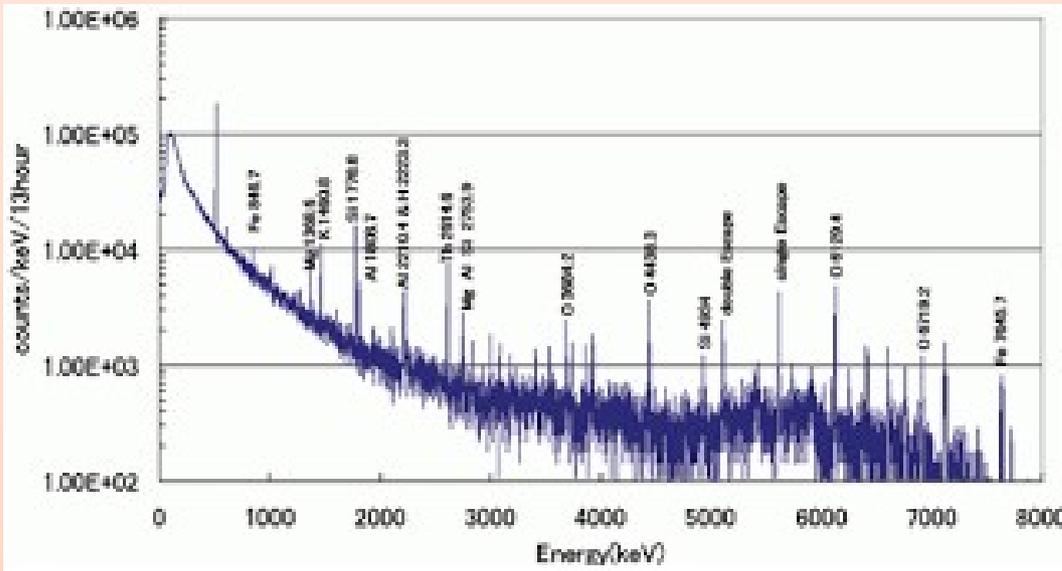
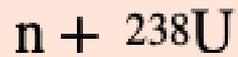
# Sección eficaz en reacciones resonantes



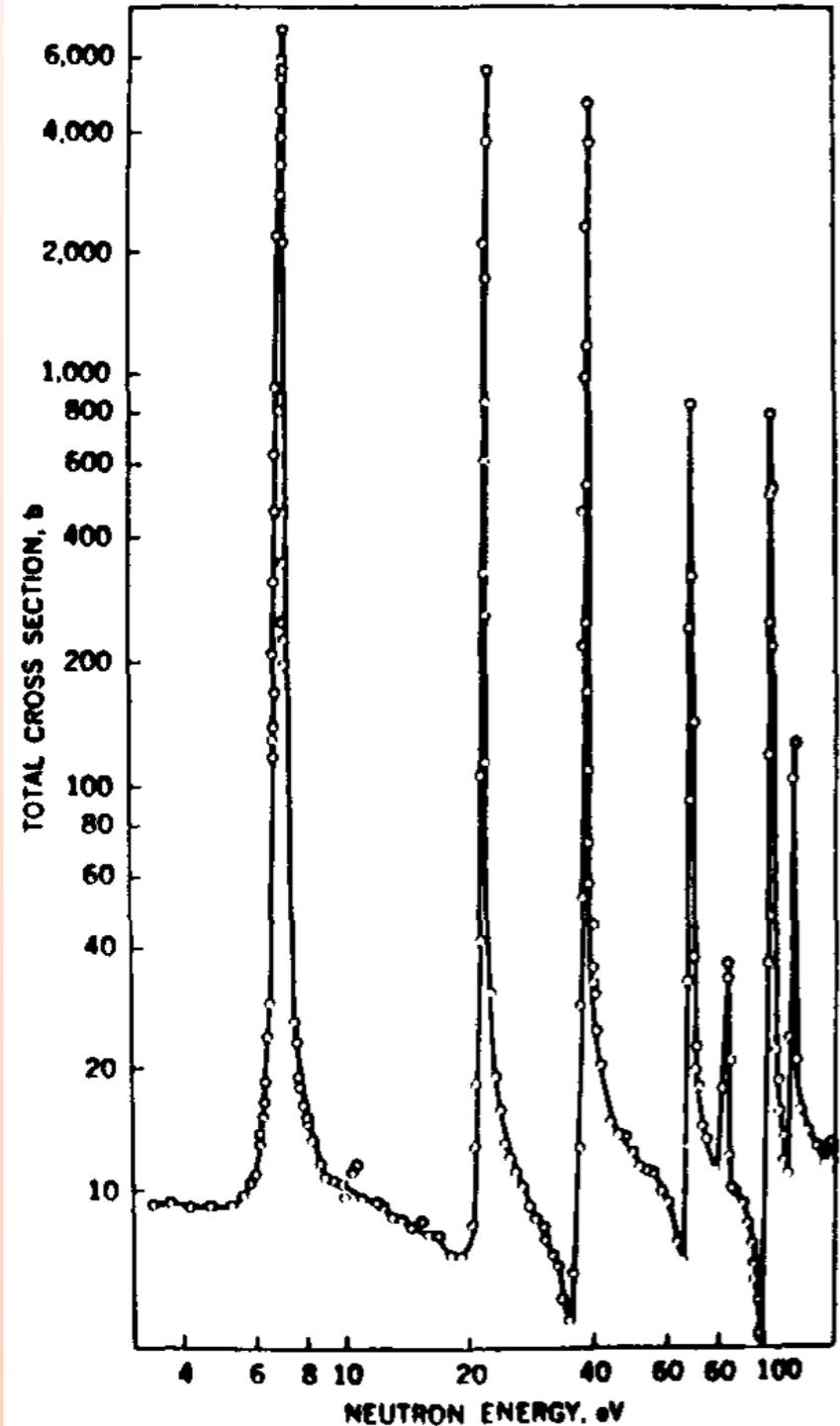
Crédito: C. K. Bockerman, et al. Phys. Rev. 84, 69 (1951)



# Sección eficaz en reacciones resonantes



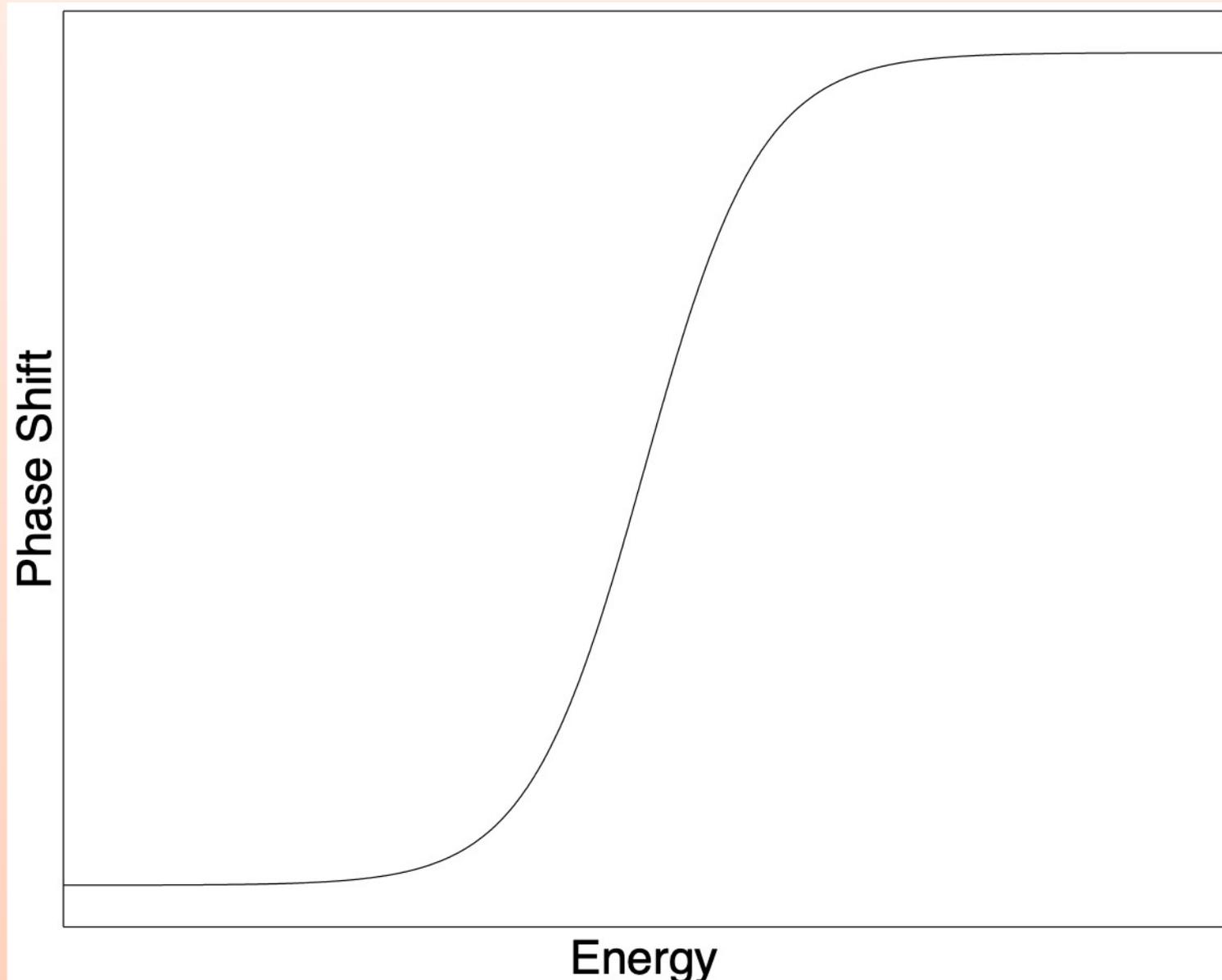
Crédito: Brookhaven National Laboratory Report BNL-325



# Cambio de fase

(clase pendiente de teoría de dispersión)

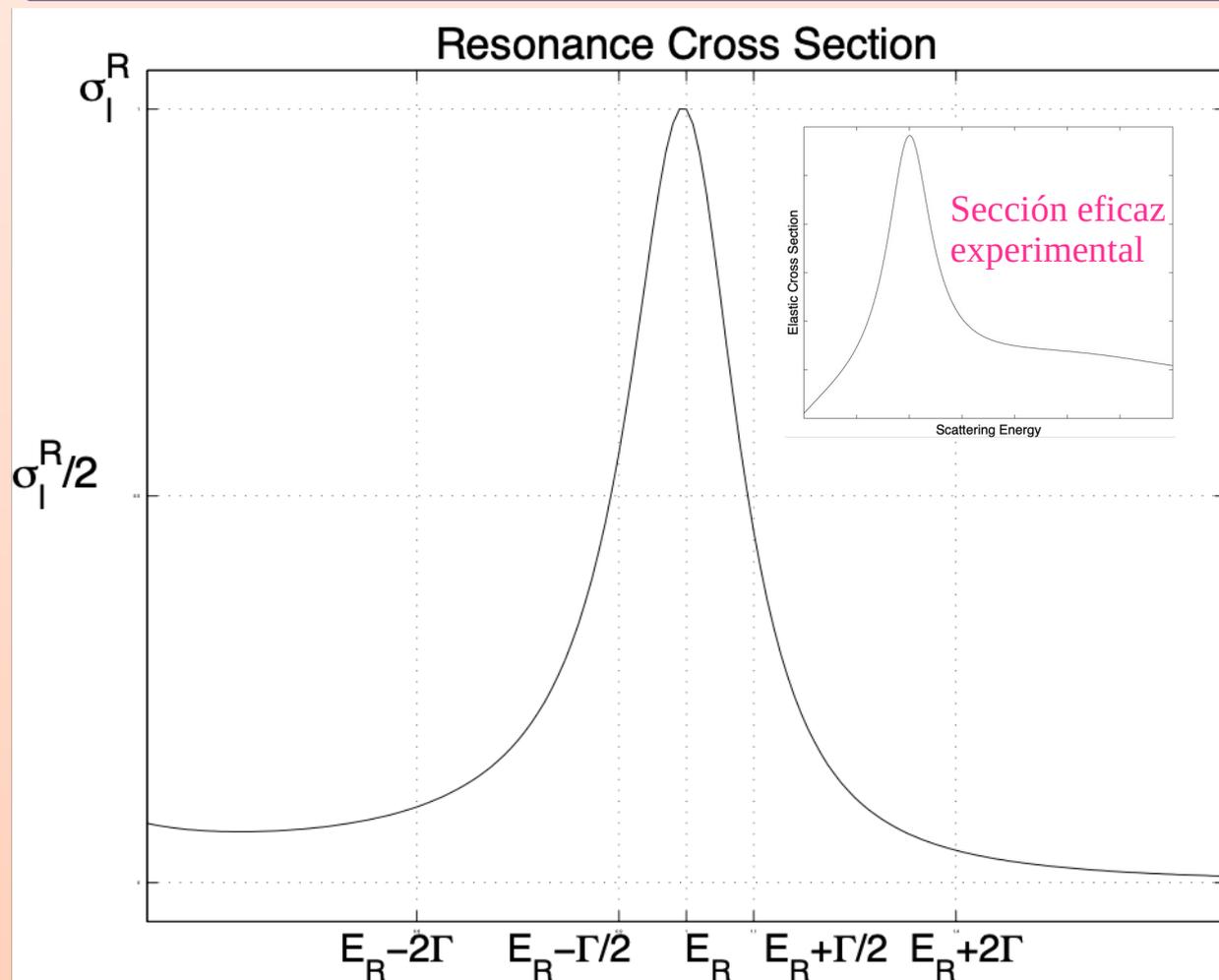
# Cambio de fase en reacciones resonantes



# **Parámetros de una resonancia**

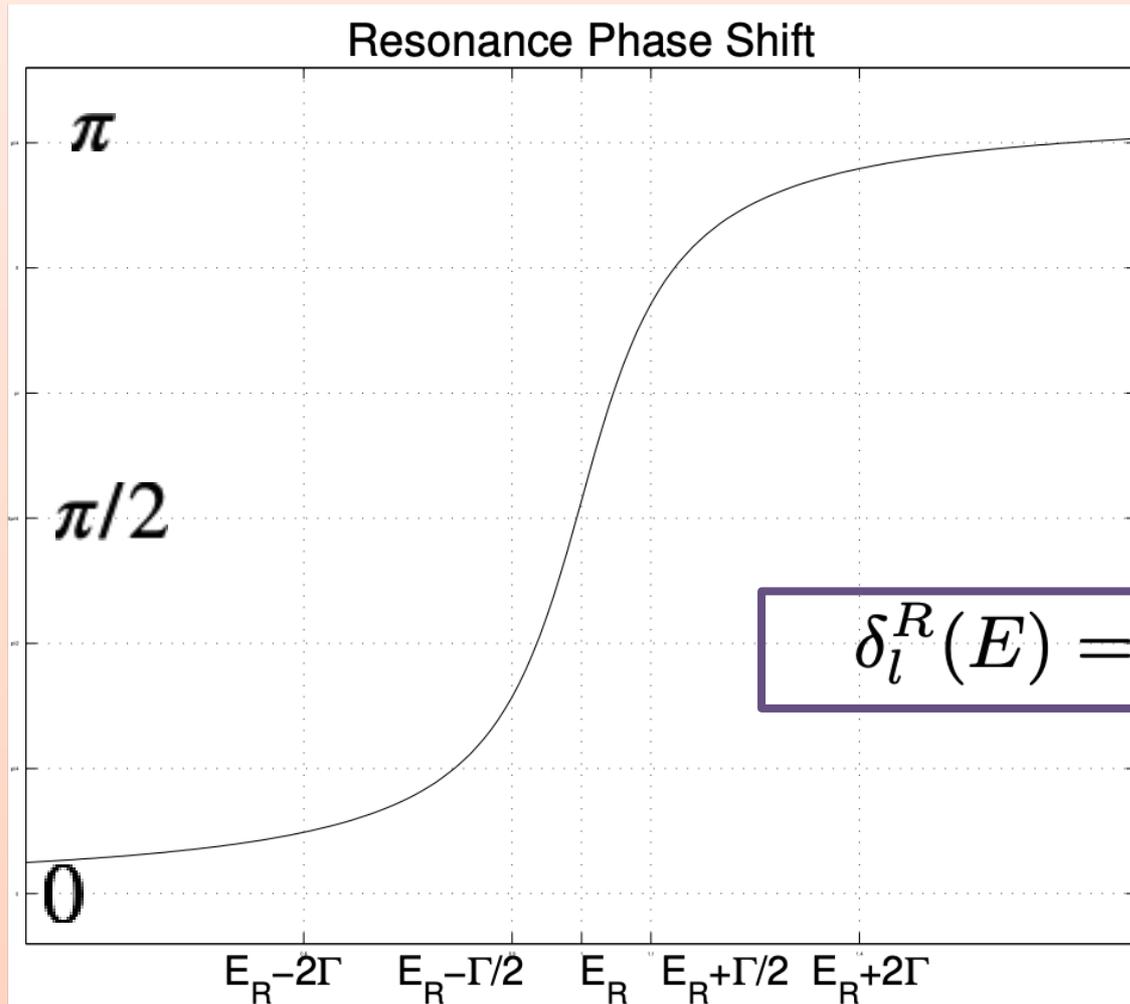
# Modelo reacciones resonantes: Breit-Wigner

$$\sigma_l^R(E) = \frac{4\pi}{k^2} (2l + 1) \frac{(\Gamma/2)^2}{(E - E_R)^2 + (\Gamma/2)^2}$$



# Consecuencia de Breit-Wigner en el cambio de fase

$$u_l(r) \xrightarrow{r \rightarrow \infty} a_l \sin\left(kr - \frac{\pi}{2}l + \delta_l\right)$$



$$\delta_l^R(E) = \arctan \frac{\Gamma/2}{E_R - E} \text{ mod. } \pi$$

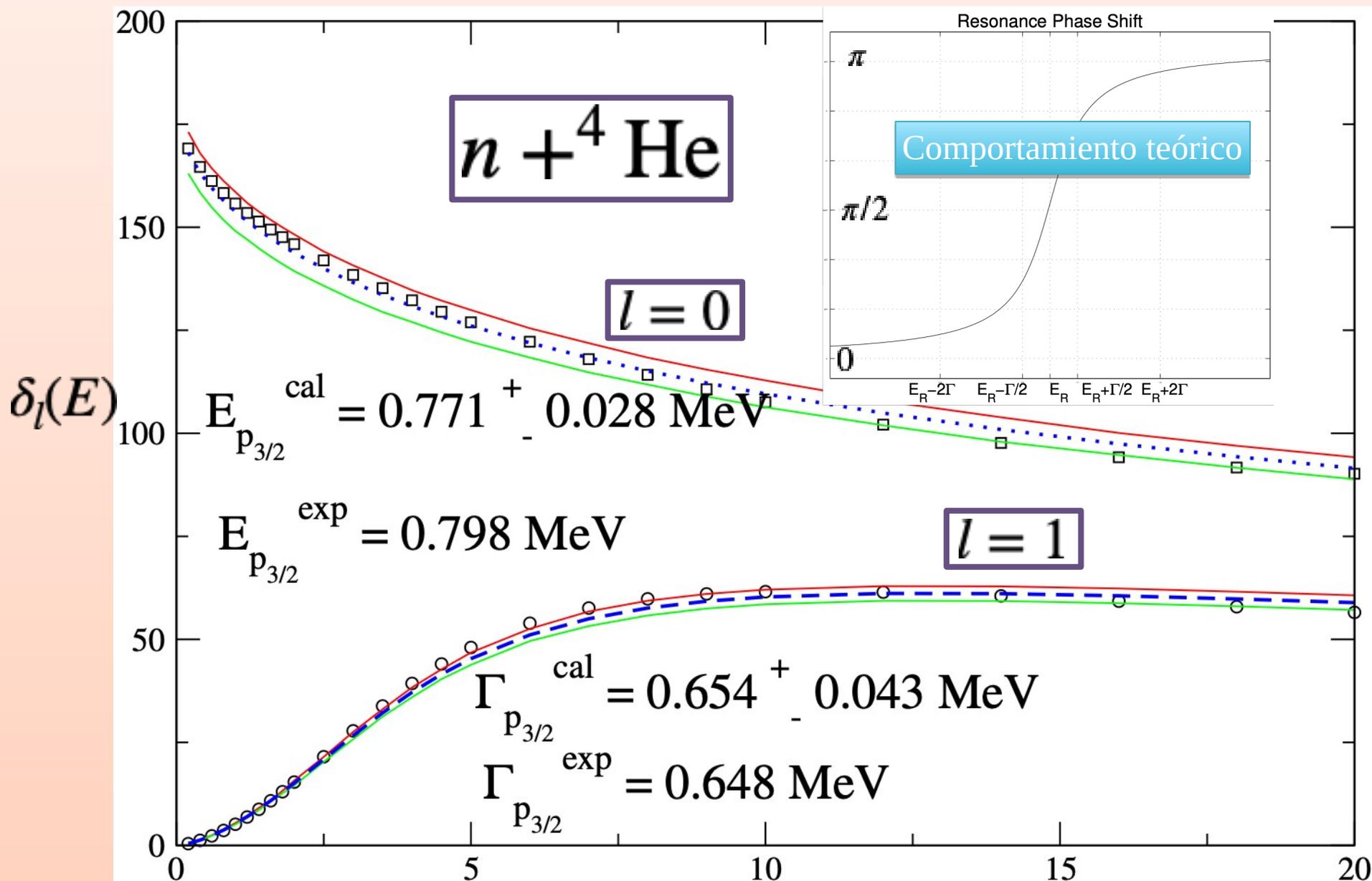
# Ejemplos reales

# 5He

$$S_n(^5\text{He}) = -0.735 \text{ MeV}$$

<b>3He</b> STABLE 0.000134%	<b>4He</b> STABLE 99.999866%	<b>5He</b> 0.60 MeV N: 100.00% α: 100.00%	<b>6He</b> 806.7 MS β-: 100.00%
<b>2H</b> STABLE 0.0115%	<b>3H</b> 12.32 Y β-: 100.00%	<b>3H</b> N: 100.00%	<b>5H</b> 5.7 MeV 2N: 100.00%
<b>Neutron</b>			

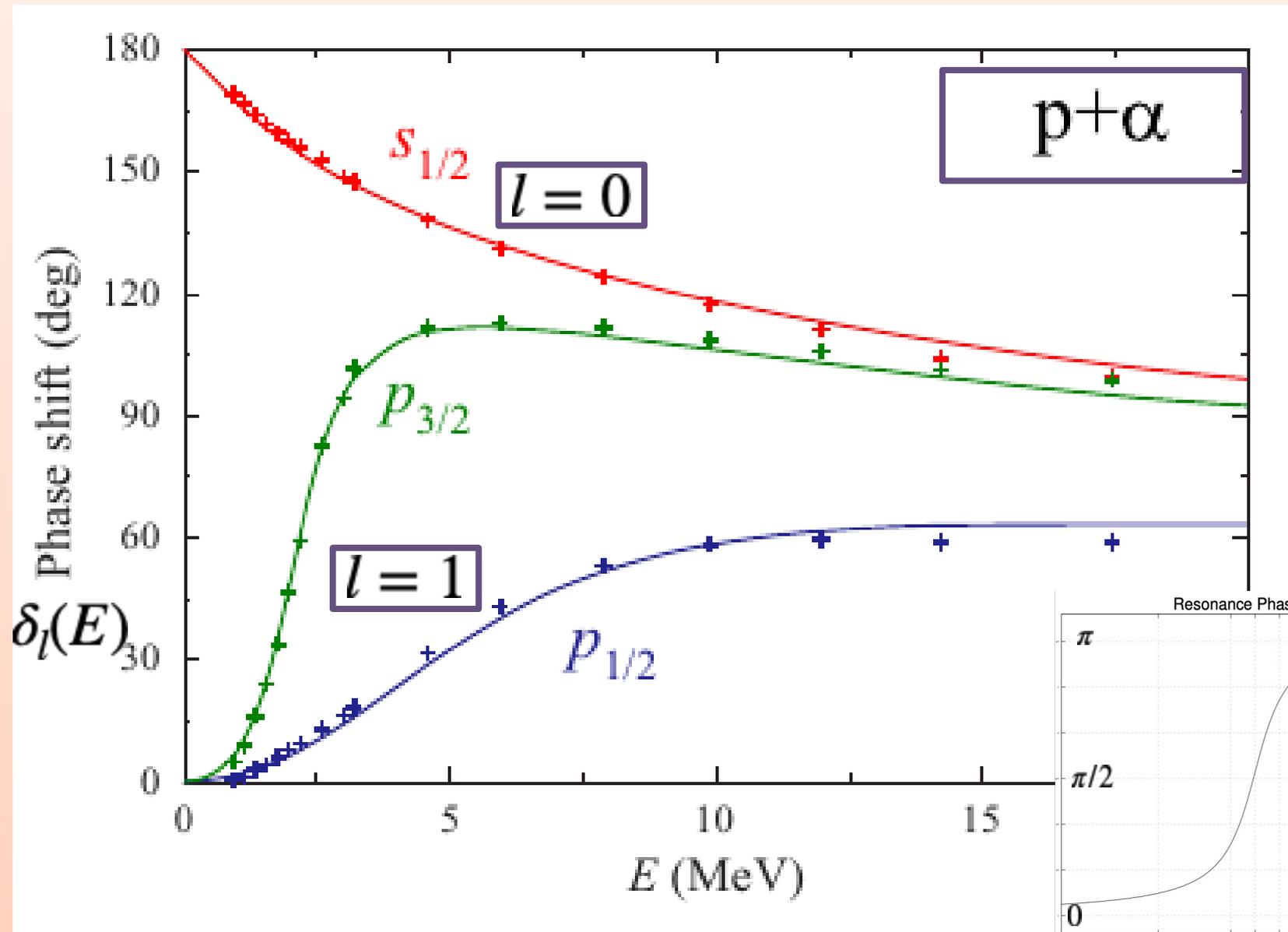
# Ejemplo cambio de fase experimental



# 5Li

<b>4Li</b> 5 mev  p=100%	<b>5Li</b> 1.23 mev  p=100%	<b>6Li</b> STABLE 1.9-7.8%	<b>7Li</b> STABLE 92.2-98.1%	
<b>3He</b> STABLE	<b>4He</b> STABLE	<b>5He</b> 719 kev	<b>6He</b> 807 12 ms	

# Ejemplo cambio de fase experimental



Comportamiento teórico

# Decaimiento radiactivo

# Parámetro en el decaimiento radiactivo

## Ley de decaimiento

$$dN = -\lambda N dt$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

## Constante de decaimiento

$$\lambda$$

## Tiempo de semi-desintegración

$$N(T_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$$

## Vida media: promedio

$$\langle t \rangle = \tau = \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt}{\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

# Parámetro en el decaimiento radiactivo

## Ley de decaimiento

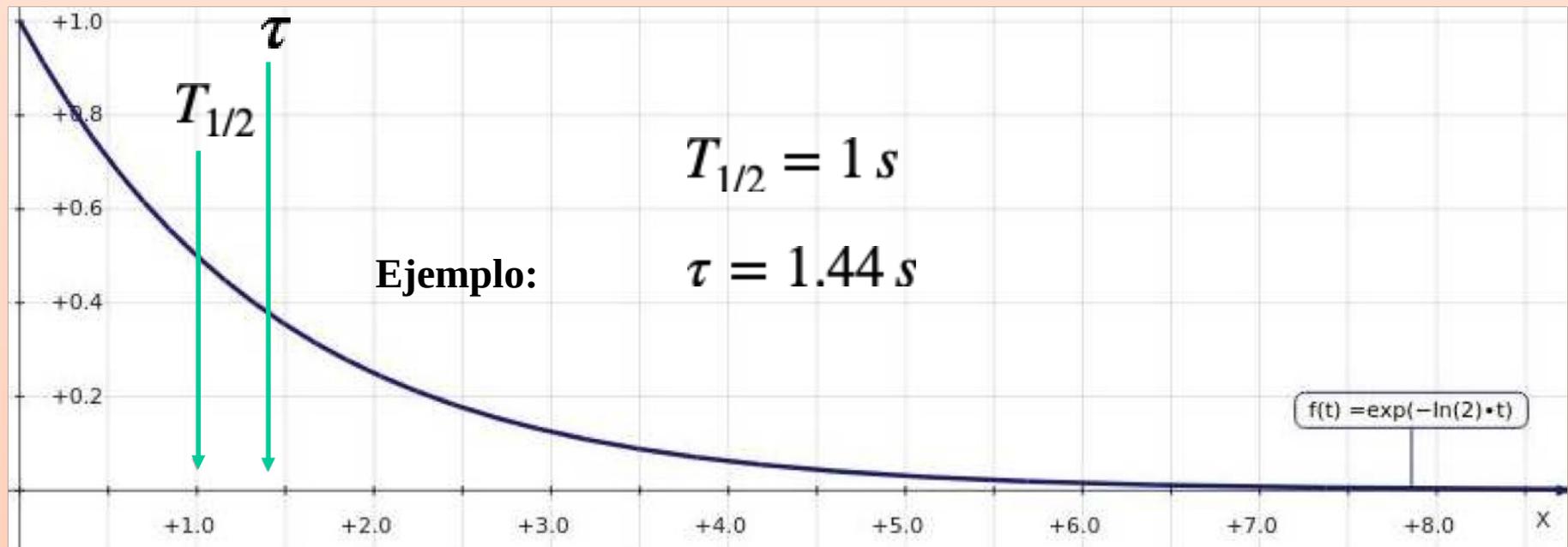
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

$$N(\tau) = N_0 e^{-\lambda \tau} = \frac{N_0}{e}$$

$$N(T_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$$

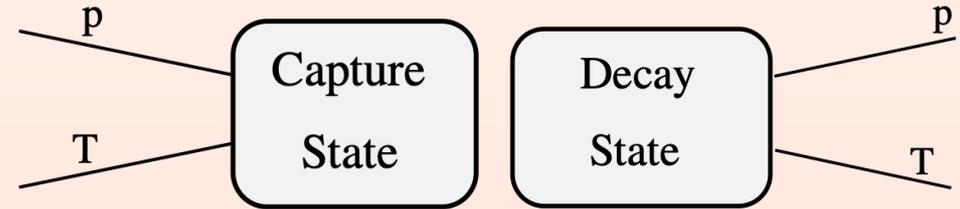
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2 = 0.69315 \tau$$



# Sobre la medición de tiempos de vida media

# Medición experimental

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$$



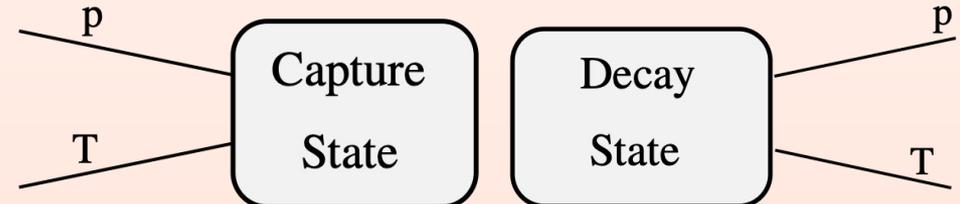
$$T_{1/2} < 10^{-9} \text{ s}$$

- : se mide el espectro y se ajusta con una Lorentziana. El ajuste da la energía y el ancho de la resonancia

$$T_{1/2} = \frac{\hbar \ln 2}{\Gamma}$$

# Medición experimental

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$$



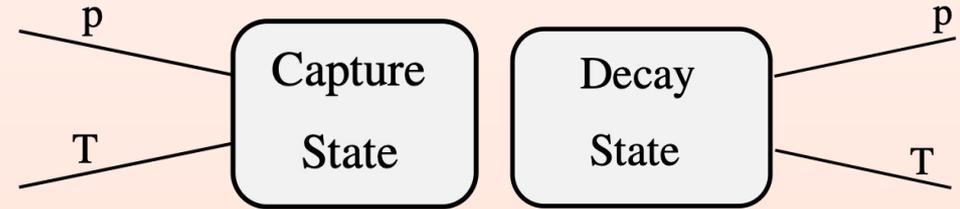
$$T_{1/2} = \frac{\hbar \ln 2}{\Gamma}$$

$$10^{-9} \text{ s} < T_{1/2} < 1 \text{ s} \quad \frac{\# \text{ cuentas}}{\# \text{ activacion}} = 1 - e^{-t/\tau}$$

- : se usan métodos electrónicos contando eventos.  
Luego se calcula la razón . Finalmente se ajusta

# Medición experimental

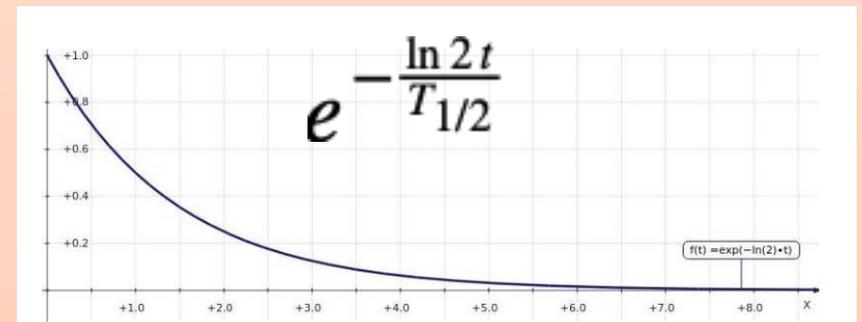
$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$$



$$T_{1/2} = \frac{\hbar \ln 2}{\Gamma}$$

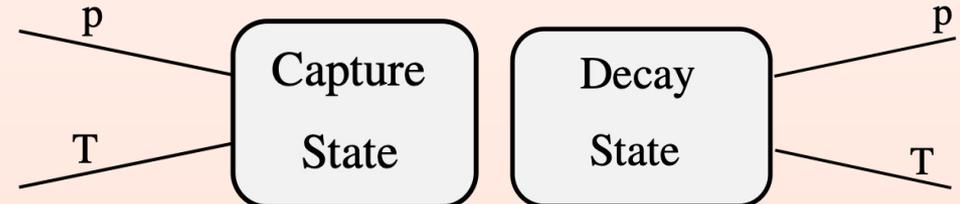
$$1 \text{ s} < T_{1/2} < 1 \text{ año}$$

- se mide el número de decaimiento versus  $t$  y se ajusta en la curva



# Medición experimental

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$$



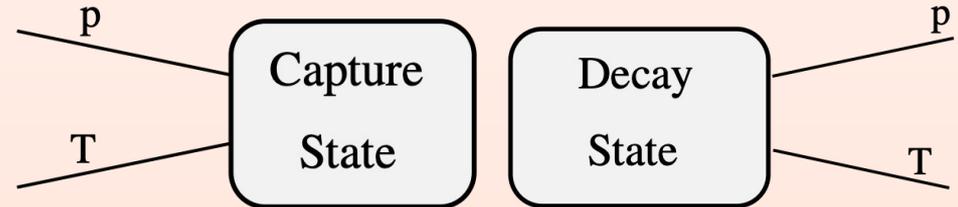
$$T_{1/2} = \frac{\hbar \ln 2}{\Gamma}$$

$T_{1/2}$

- del orden de miles de años, se usa datación, la cual se explica en la clase sobre aplicaciones

# Medición experimental

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$$



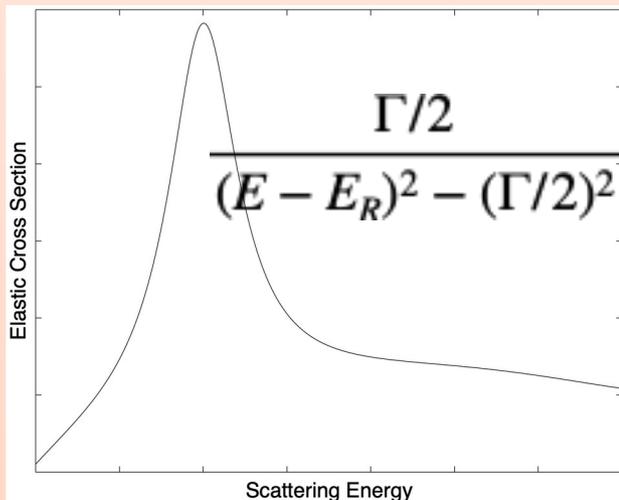
$$T_{1/2} < 10^{-9} \text{ s}$$

- : se mide el espectro y se ajusta con una Lorentziana. El ajuste da la energía y el ancho de la resonancia

$$T_{1/2} = \frac{\hbar \ln 2}{\Gamma}$$

$$10^{-9} \text{ s} < T_{1/2} < 1 \text{ s} \quad \frac{\# \text{ cuentas}}{\# \text{ activacion}} = 1 - e^{-t/\tau}$$

- : se usan métodos electrónicos contando eventos. Luego se calcula la razón . Finalmente se ajusta

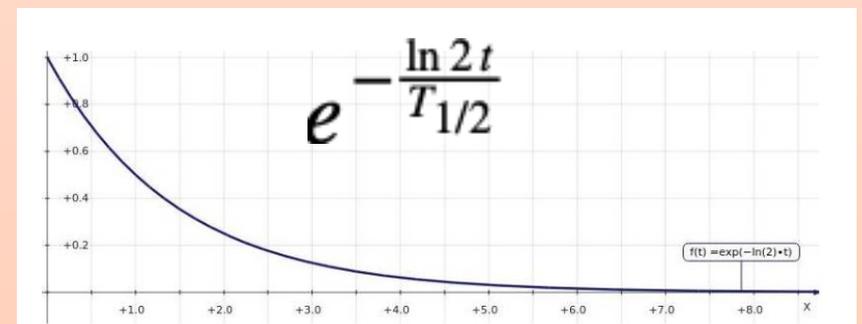


$$1 \text{ s} < T_{1/2} < 1 \text{ año}$$

- se mide el número de decaimiento versus y se ajusta en la curva

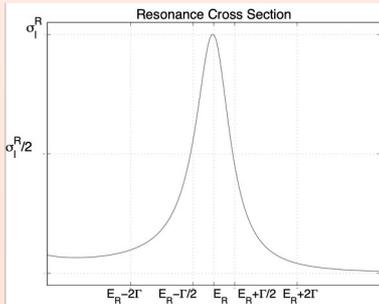
$$T_{1/2}$$

- del orden de miles de años, se usa datación, la cual se explica en la clase sobre aplicaciones

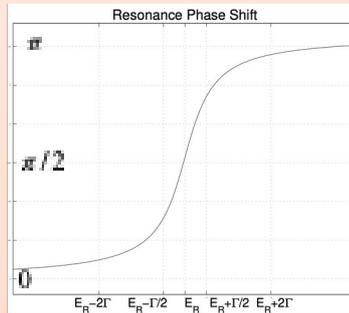


# Sobre los polos de la matriz de dispersión

# Consecuencia de Breit-Wigner en la Matriz de dispersión



$$\sigma_l^R(E) = \frac{4\pi}{k^2} (2l + 1) \frac{(\Gamma/2)^2}{(E - E_R)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

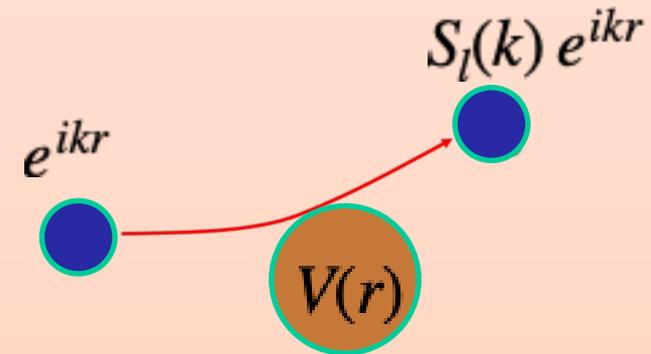


$$\delta_l^R(E) = \arctan \frac{\Gamma/2}{E_R - E} \text{ mod. } \pi$$

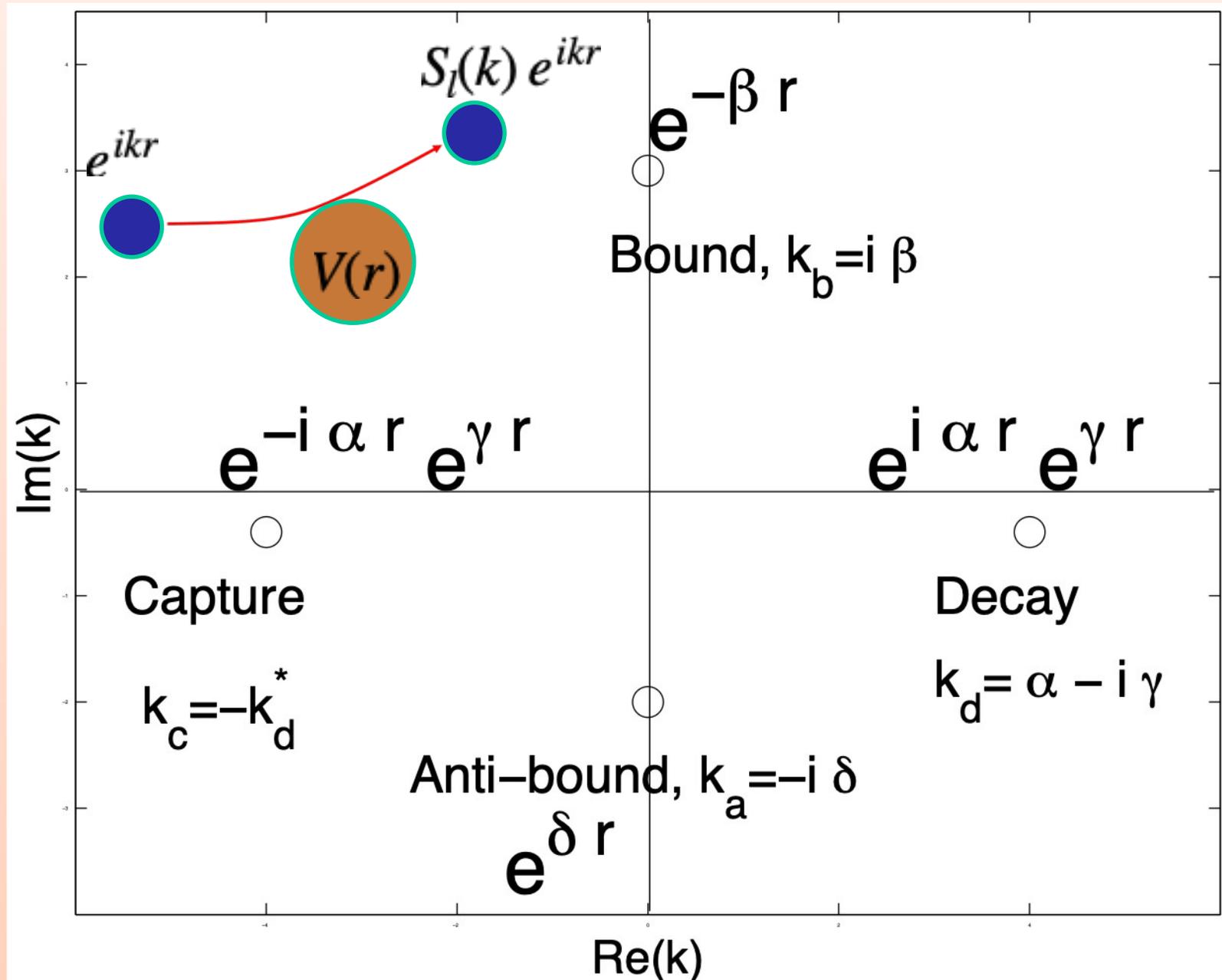
$$S_l^R(E) = e^{i2\delta_l^R(E)} = 1 - \frac{i\Gamma}{E - (E_R - i\Gamma/2)}$$

Polos

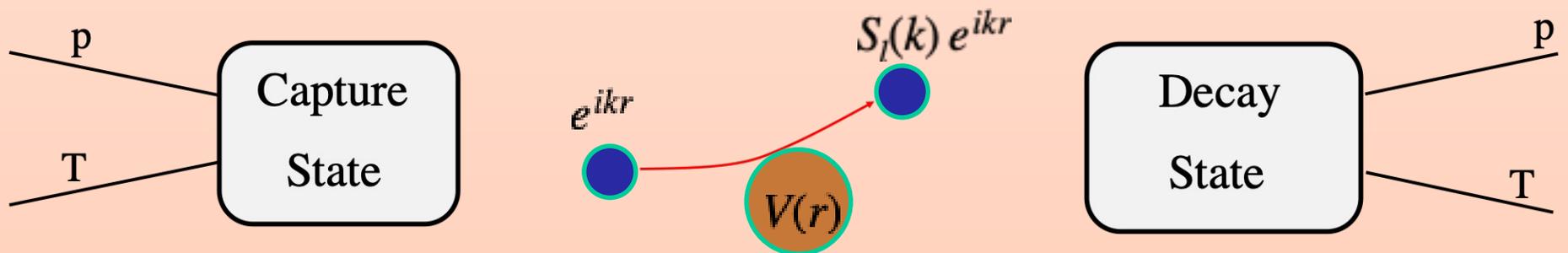
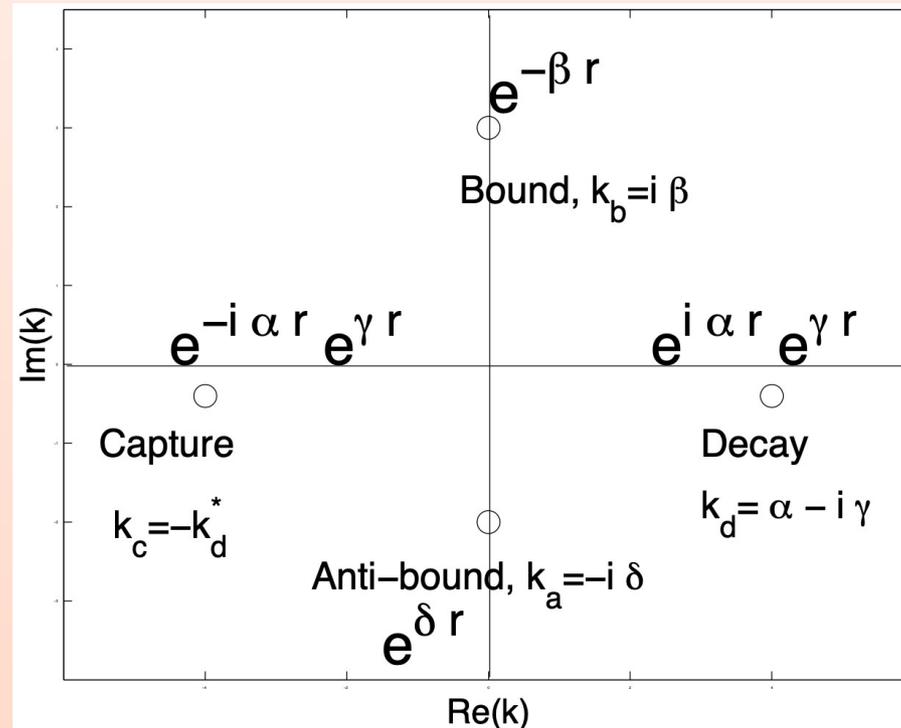
$$|S_L^R(E)| = 1$$



# Otros polos de la matriz de dispersión



# Vínculo entre resonancias y polos de la matriz de dispersión

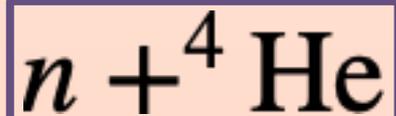


# Funciones de onda de las resonancias

# Resonancias de un neutrón $^5\text{He}$

$$S_n(^5\text{He}) = -0.735 \text{ MeV}$$

$^3\text{He}$ STABLE 0.000134%	$^4\text{He}$ STABLE 99.999866%	$^5\text{He}$ 0.60 MeV N: 100.00% $\alpha$ : 100.00%	$^6\text{He}$ 806.7 MS $\beta^-$ : 100.00%
$^2\text{H}$ STABLE 0.0115%	$^3\text{H}$ 12.32 Y $\beta^-$ : 100.00%	$^4\text{H}$ N: 100.00%	$^5\text{H}$ 5.7 MeV 2N: 100.00%
Neutron			



## Parámetros Campo Medio

$$V_0 = 47.7 \text{ MeV}$$

$$V_{so} = 10.0 \text{ MeV fm}$$

$$r_0 = 1.26 \text{ fm} \quad a = 0.65 \text{ fm}$$

## Resonancias Experimentales

$$\epsilon_{p3/2}^{Exp} = (0.890, -0.324) \text{ MeV}$$

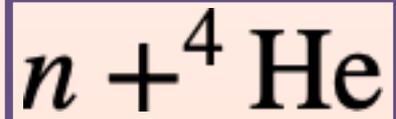
$$\epsilon_{p1/2}^{Exp} = (2.160, -2.785) \text{ MeV}$$

## Resonancias Calculadas

$$\epsilon_{p3/2}^{Cal} = (0.891, -0.431) \text{ MeV}$$

$$\epsilon_{p1/2}^{Cal} = (1.945, -2.048) \text{ MeV}$$

# Resonancias de un neutrón



$$\varepsilon_{p3/2}^{Exp} = (0.890, -0.324) \text{ MeV}$$

$$\varepsilon_{p1/2}^{Exp} = (2.160, -2.785) \text{ MeV}$$

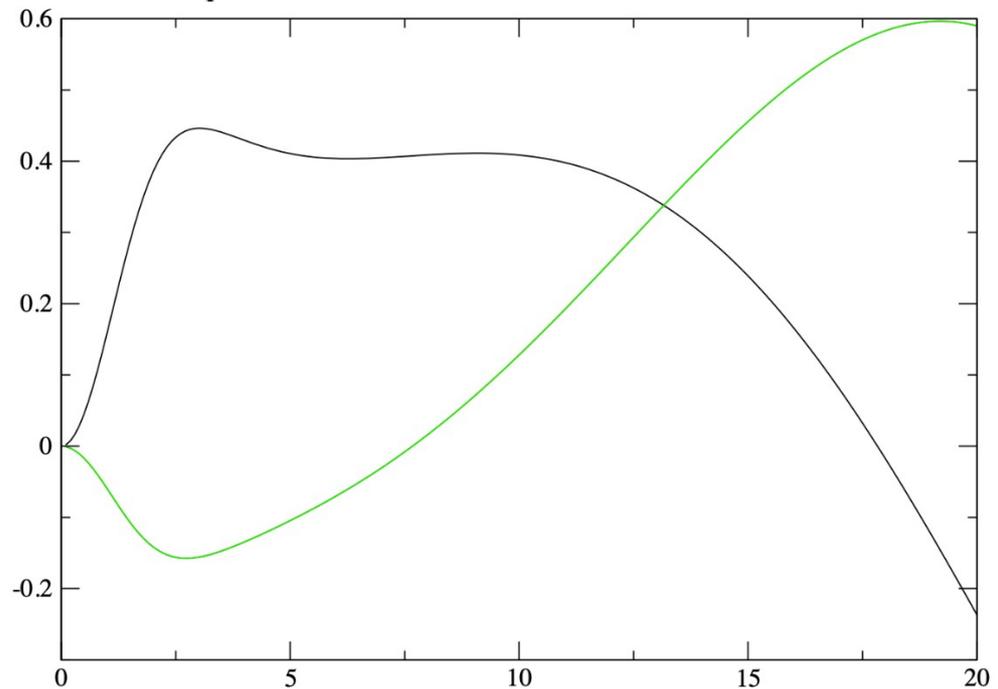
## Parámetros Campo Medio

$$V_0 = 47.7 \text{ MeV}$$

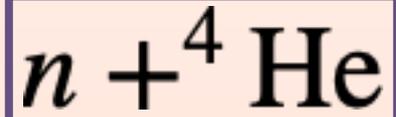
$$V_{so} = 10.0 \text{ MeV fm}$$

$$r_0 = 1.26 \text{ fm} \quad a = 0.65 \text{ fm}$$

$$\varepsilon_{p3/2}^{Cal} = (0.891, -0.431) \text{ MeV}$$



# Resonancias de un neutrón



$$\varepsilon_{p3/2}^{Exp} = (0.890, -0.324) \text{ MeV}$$

$$\varepsilon_{p1/2}^{Exp} = (2.160, -2.785) \text{ MeV}$$

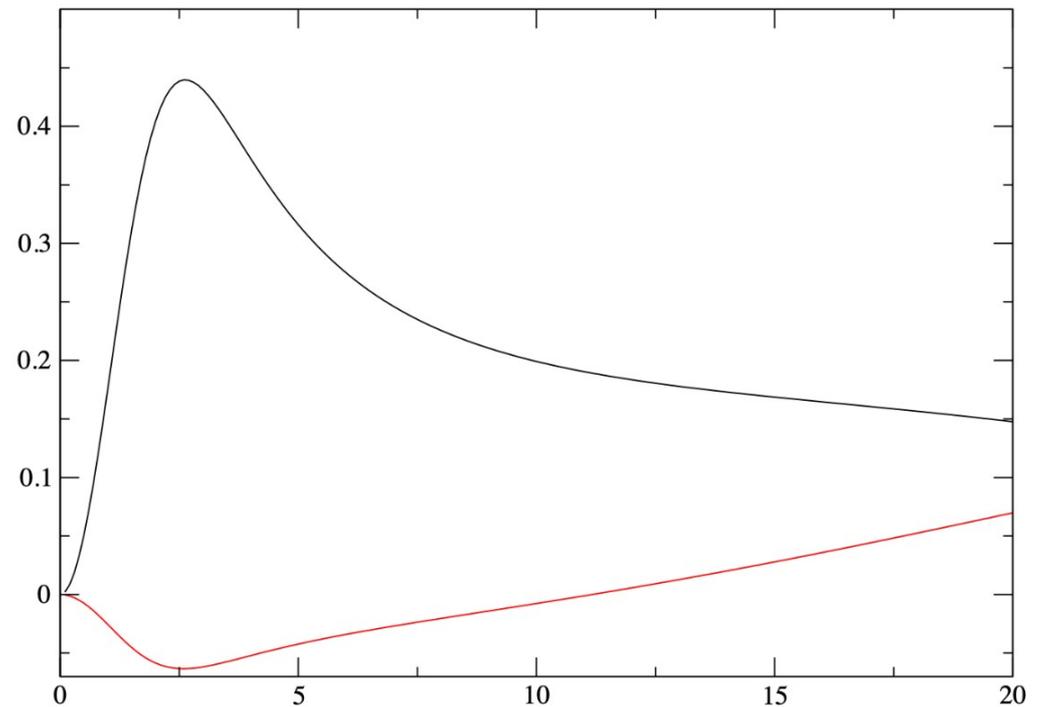
## Parámetros Campo Medio

$$V_0 = 53. \text{ MeV}$$

$$V_{so} = 10.0 \text{ MeV fm}$$

$$r_0 = 1.26 \text{ fm} \quad a = 0.65 \text{ fm}$$

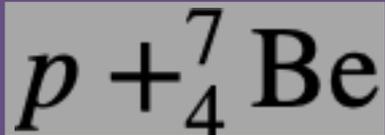
$$\varepsilon_{p3/2}^{Cal} = (0.184, -0.035) \text{ MeV}$$



# Resonancias de un protón ${}^8\text{B}$

$$S_p({}^8\text{B}) = 0.136 \text{ MeV}$$

7B 1.4 MeV P α	<b>8B 770 MS α: 100.00% ε: 100.00%</b>	9B 0.54 KeV α: 100.00% P: 100.00%	10B STABLE 10.0%	11B STABLE 80.1%
6Be 92 KeV α: 100.00% P: 100.00%	7Be 53.22 D ε: 100.00%	8Be 5.57 eV α: 100.00%	9Be STABLE 100%	10Be 1.51 MeV β-: 100%
5Li ≈1.5 MeV α: 100.00%	6Li STABLE 7.50%	7Li STABLE 92.41%	8Li 839.9 MS β-α: 100.00%	9Li 1780 MS β-: 100%



## Parámetros Campo Medio

$$V_0 = 44.658 \text{ MeV}$$

$$V_{so} = 9.961 \text{ MeV fm}$$

$$r_0 = r_{Coul} = 1.25 \text{ fm} \quad a = 0.52 \text{ fm}$$

## Estado ligado Experimental

$$\epsilon_{p3/2}^{Exp} = -0.136 \text{ MeV}$$

## Resonancia Experimental

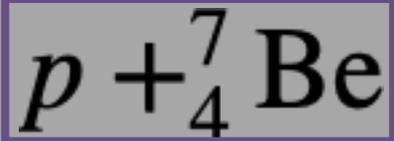
$$\epsilon_{p1/2}^{Exp} = ???$$

## Estados Calculados

$$\epsilon_{p3/2}^{Cal} = -0.136 \text{ MeV}$$

$$\epsilon_{p1/2}^{Cal} = (2.290, -0.753) \text{ MeV}$$

# Resonancias ancha de un protón en ${}^8\text{B}$



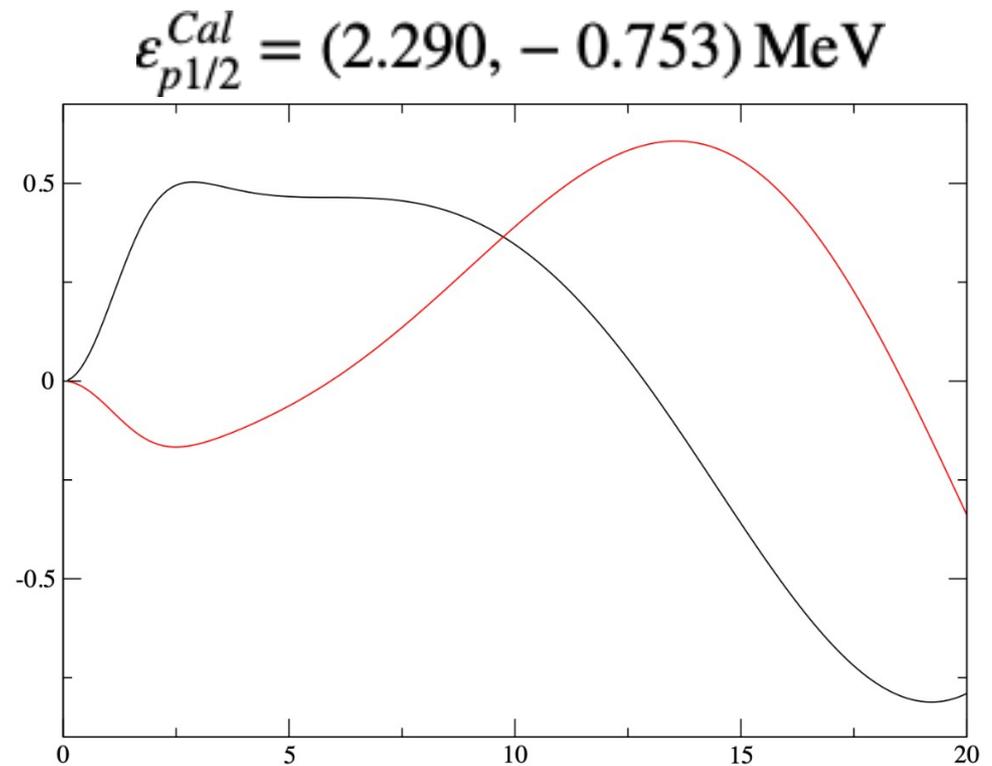
## Parámetros Campo Medio

$$V_0 = 44.658 \text{ MeV}$$

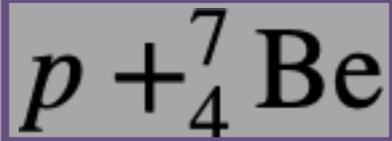
$$V_{so} = 9.961 \text{ MeV fm}$$

$$r_0 = r_{Coul} = 1.25 \text{ fm}$$

$$a = 0.52 \text{ fm}$$



# Función de onda de una resonancia angosta en ${}^8\text{B}$



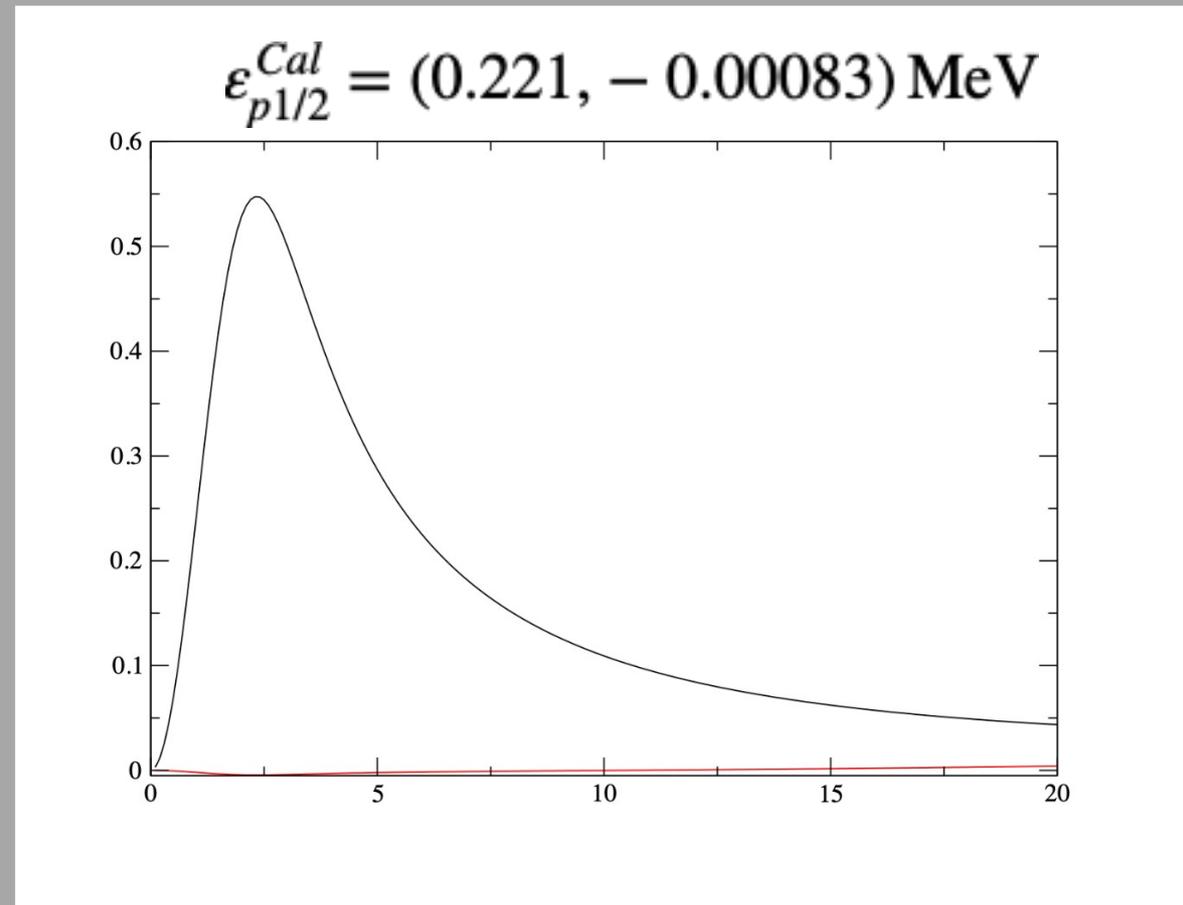
## Parámetros Campo Medio

$$V_0 = 53.0 \text{ MeV}$$

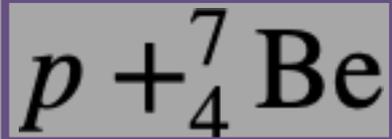
$$V_{so} = 9.961 \text{ MeV fm}$$

$$r_0 = r_{Coul} = 1.25 \text{ fm}$$

$$a = 0.52 \text{ fm}$$



# Misma que la anterior extendiendo el la distancia radial



## Parámetros Campo Medio

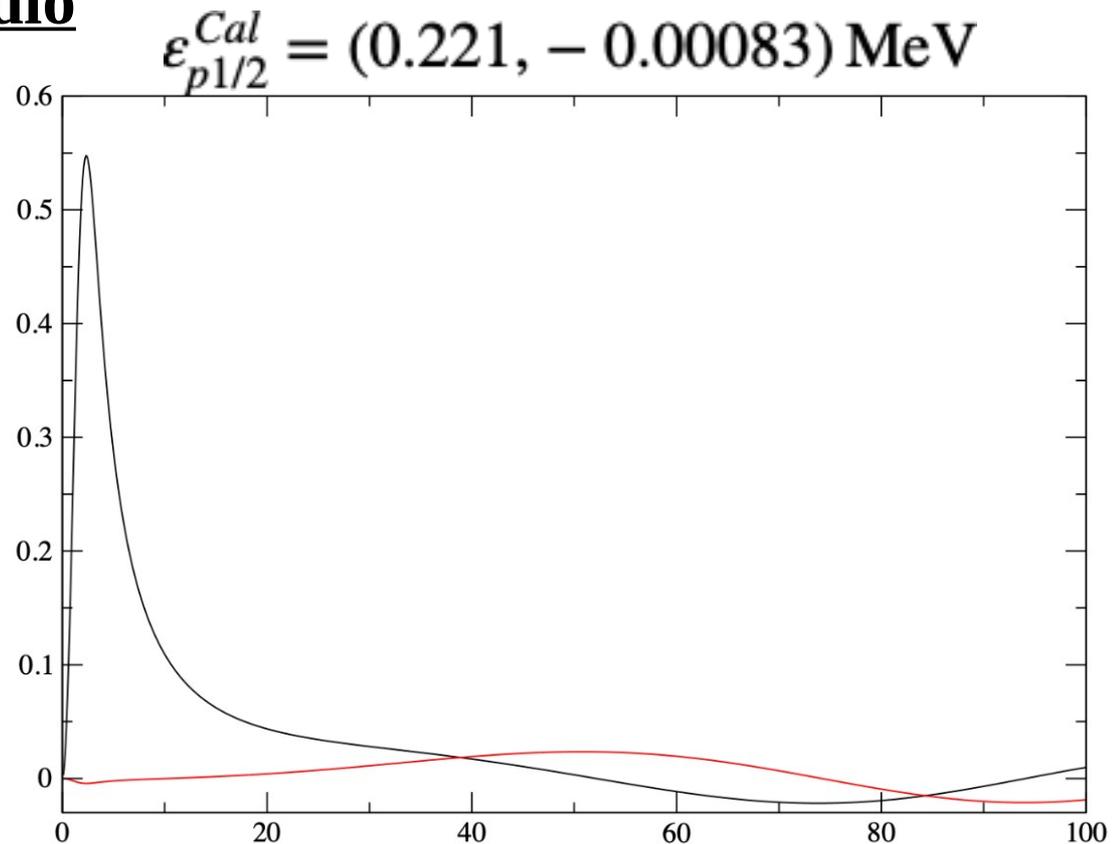
$$V_0 = 53.0 \text{ MeV}$$

$$V_{so} = 9.961 \text{ MeV fm}$$

$$r_0 = r_{Coul} = 1.25 \text{ fm}$$

$$a = 0.52 \text{ fm}$$

$$r_{Max} = 100 \text{ fm}$$



**Preguntas + Fin**