

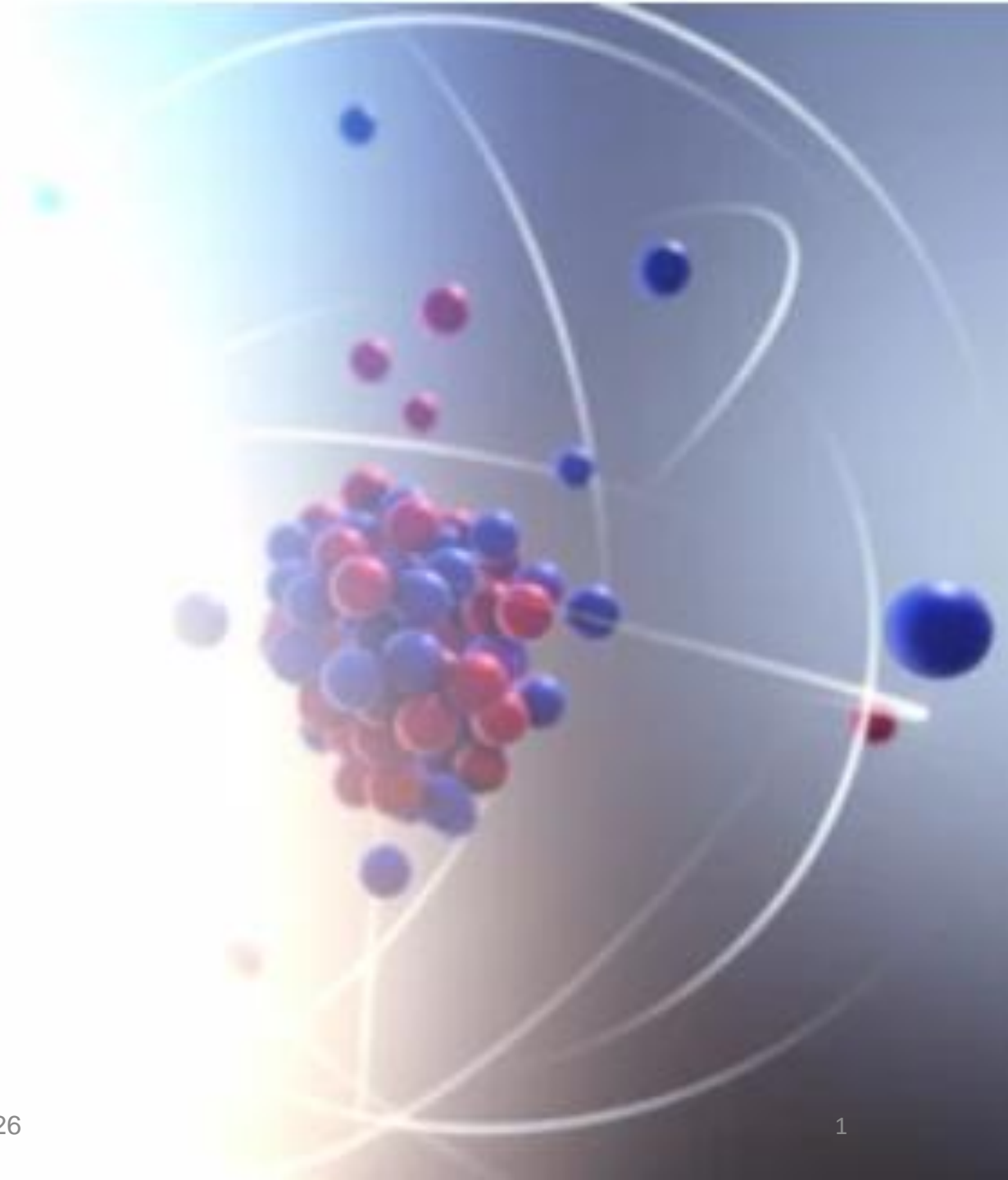
**24WS-1C021**

**Կին դեկավարների առաջխաղացման  
ուղղված ծրագիր 2024**

**ՀԱՐՍԱՑՎԱԾ ԱՆԱԳԻ ԹԻՐԱԽՆԵՐՈՒՄ  
ՊՐՈՏՈՆ-ՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ՌԵԱԿՑԻԱՆԵՐԻ  
ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ և ՏԵՍԱԿԱՆ  
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆ**

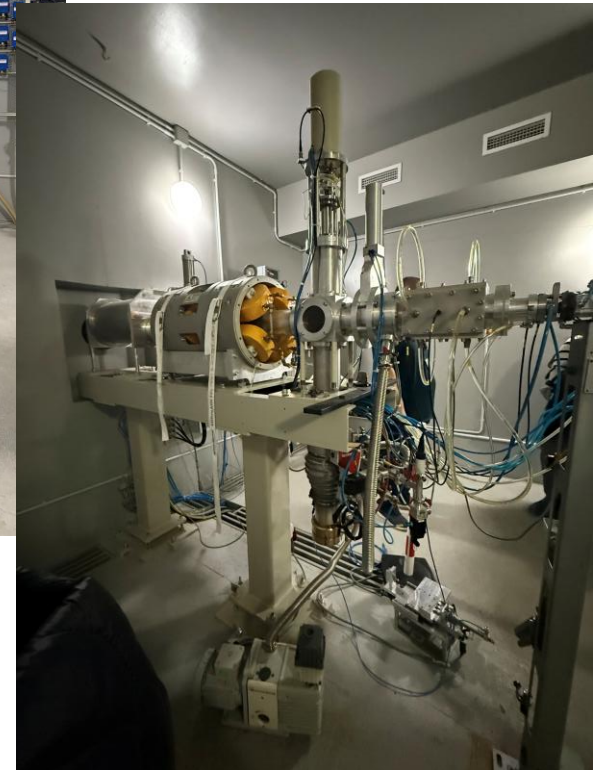
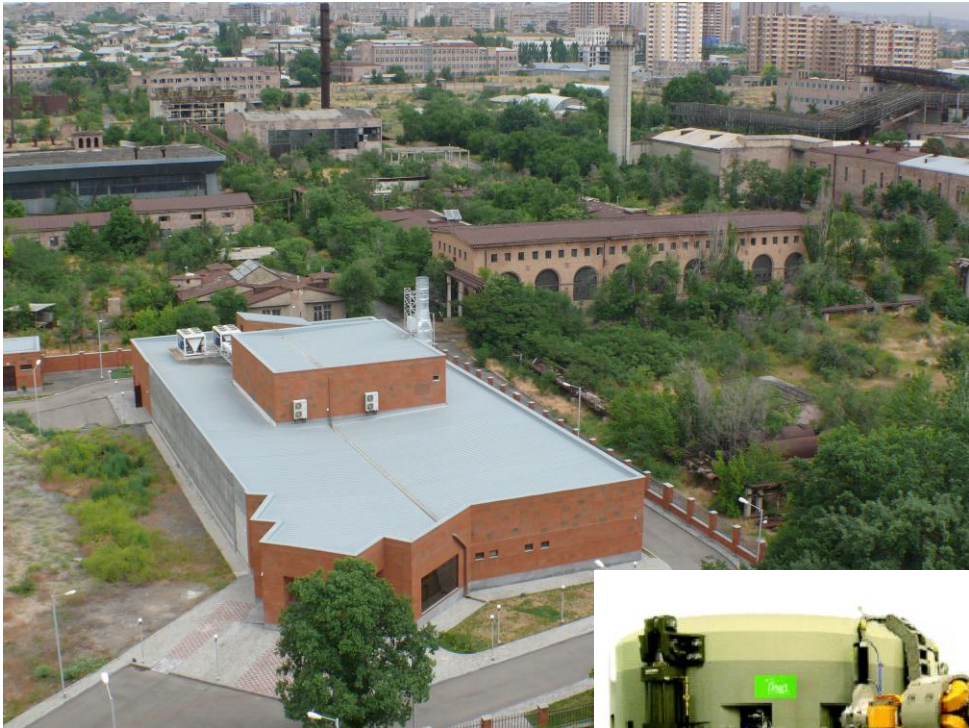
**Գոհար Հովհաննիսյան**

**ԵՊՀ Միջուկային ֆիզիկայի ամբիոն**

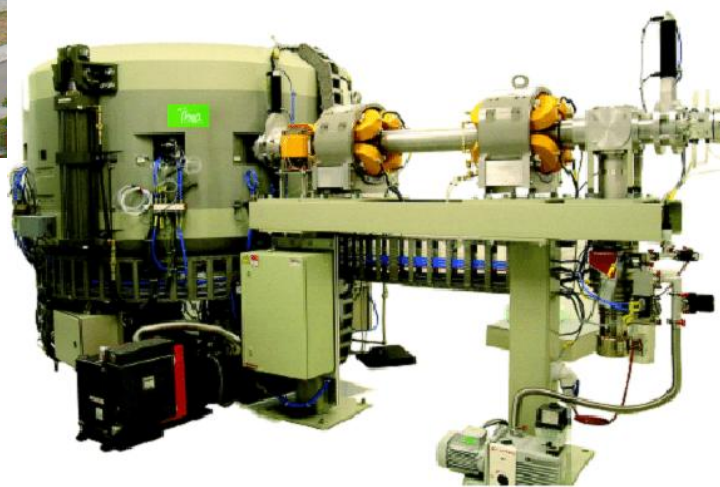




# Գիտափորձերը իրականացվում են «ՌԱԴԻՈԻՉՈՏՈՂՆԵՐԻ ԱՐՏԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ԿԵՆՏՐՈՆ» ՓԲԸ-ում



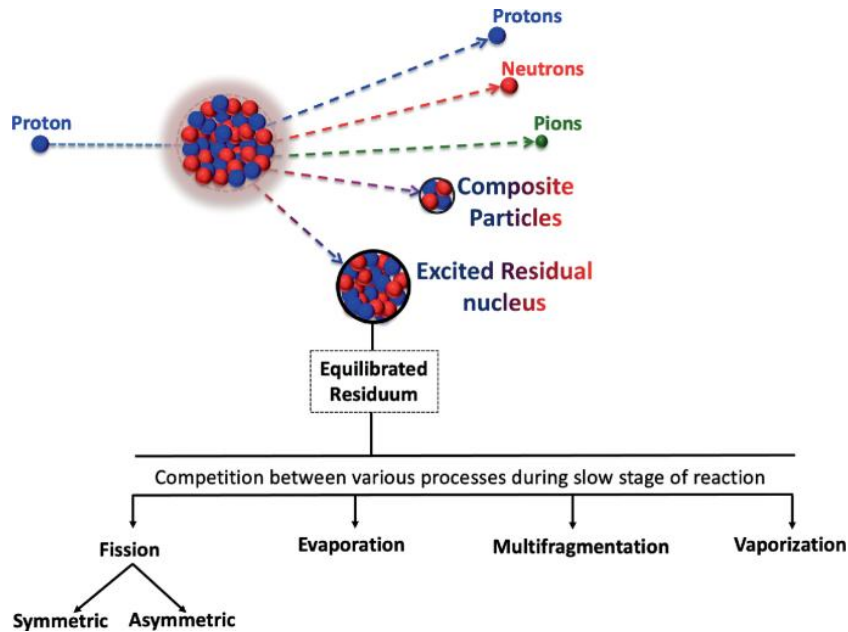
CYCLON 18/18



ԱԱԳ-2026



# Թիրախների ընտրության պատճառները



- Sn has 10 stable isotopes  $\Rightarrow$  the possibility of investigating the dependence on the nucleon composition

- $^{126}\text{Sn}$  is a long-lived radioisotope of tin that is one of the seven long-lived fission products produced in nuclear reactors.

- Medical isotope production

$^{112}\text{Sn}(p, x) ^{111}\text{In}$  - SPECT

$^{124}\text{Sn}(p, n) ^{124}\text{Sb}$  - Brachytherapy

$^{117}\text{Sn}(p, g) ^{117m}\text{Sn}$  –Theragnostic, palliative treatment

$^{119}\text{Sn}(p, n) ^{119}\text{Sb}$  - targeted radionuclide therapy / Auger-emitter

$^{118}\text{Sn}(p, n) ^{118}\text{Sb}$  - biodistribution and dosimetry assessments

Isotope	Main isotopes <sup>[1]</sup>		Decay	
	abundance	half-life ( $t_{1/2}$ )	mode	product
$^{112}\text{Sn}$	0.97%	stable		
$^{113}\text{Sn}$	synth	115.08 d	$\epsilon$	$^{113}\text{In}$
$^{114}\text{Sn}$	0.66%	stable		
$^{115}\text{Sn}$	0.34%	stable		
$^{116}\text{Sn}$	14.5%	stable		
$^{117}\text{Sn}$	7.68%	stable		
$^{118}\text{Sn}$	24.2%	stable		
$^{119}\text{Sn}$	8.59%	stable		
$^{120}\text{Sn}$	32.6%	stable		
$^{121m}\text{Sn}$	synth	43.9 y	$\text{IT} 77.6\%$ $\beta^- 22.4\%$	$^{121}\text{Sn}$ $^{121}\text{Sb}$
$^{122}\text{Sn}$	4.63%	stable		
$^{123}\text{Sn}$	synth	129.2 d	$\beta^-$	$^{123}\text{Sb}$
$^{124}\text{Sn}$	5.79%	stable		
$^{126}\text{Sn}$	trace	$2.3 \times 10^5$ y	$\beta^-$	$^{126}\text{Sb}$



# Մեր գիտափորձերի մթողաբանությունը

$^{112}\text{Sn}(p,x)$

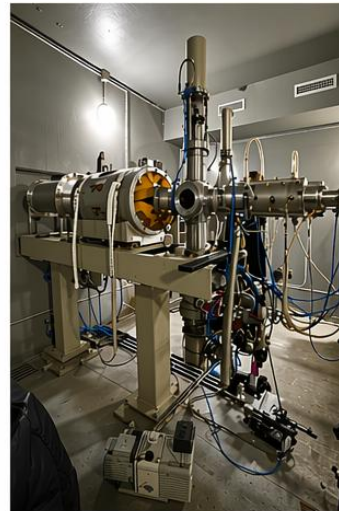
$^{118}\text{Sn}(p,x)$

$^{117}\text{Sn}(p,x)$

$^{120}\text{Sn}(p,x)$

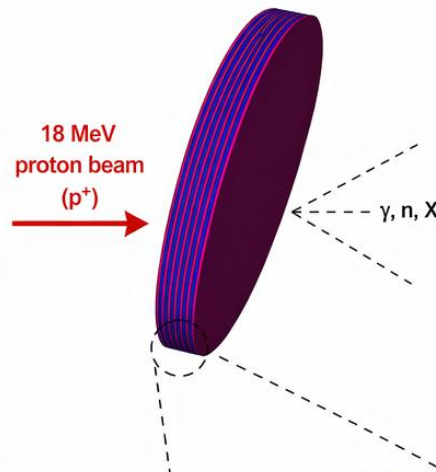
$^{124}\text{Sn}(p,x)$

Cyclotron



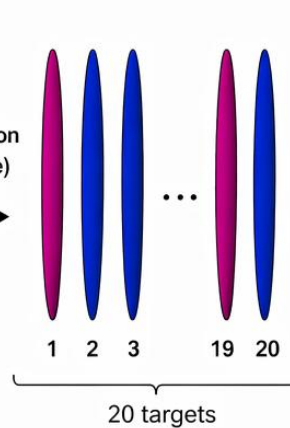
«Թիրախների շարք» «Stacked-target»  
ակտիվացիոն անալիզի մեթոդ

Irradiation of the layered target

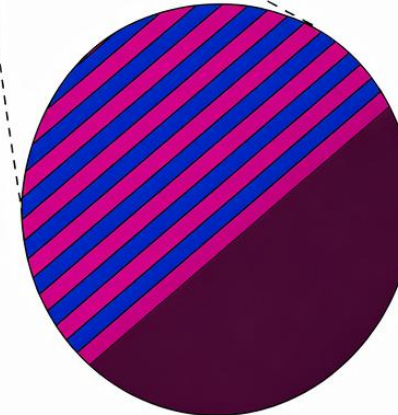
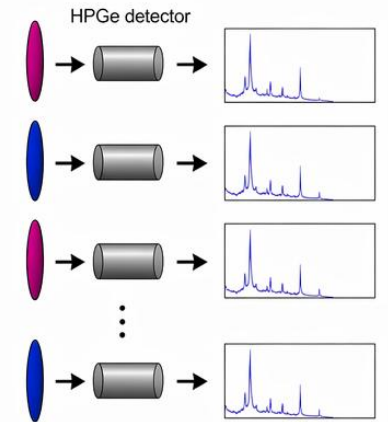


After irradiation  
(cooling time)

Separation of targets



Individual  $\gamma$ -ray spectra measurement

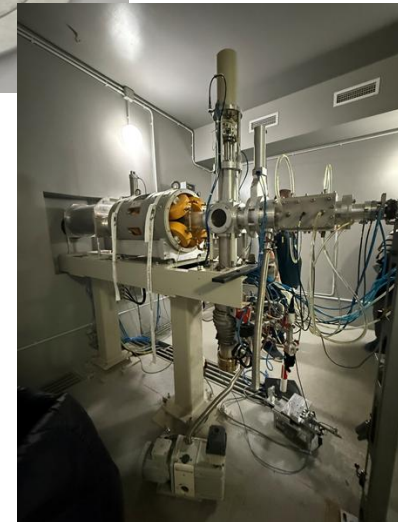


■ Cu (natural copper)  
■ Sn<sup>124</sup> (tin-124)



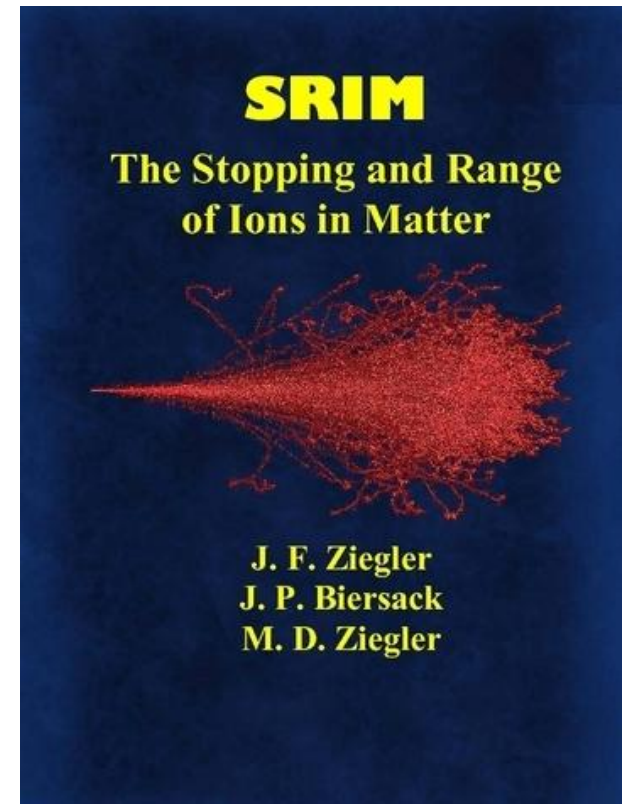
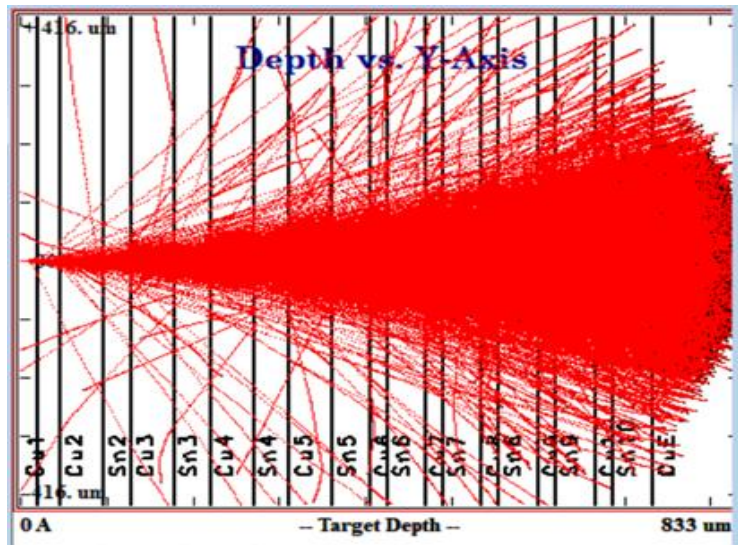
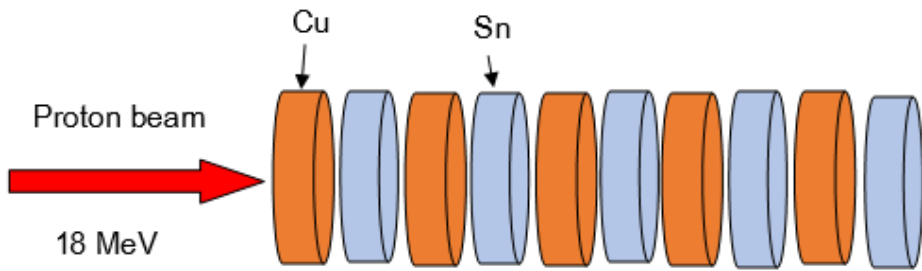
# «Թիրախների շարք» «Stacked-target» ակտիվացիոն անալիզի մեթոդ

- Գիտափորձերում թիրախը բաղկացած է լինում  $^{nat}\text{Cu}-^{enr}\text{Sn}$  շերտերի 8-12 թիթեղներից (20-50մկմ):
- Թիրախը ճառագայթվում է պրոտոնային փնջով ~5 բոպե 1 մԱ հոսանքի պայմաններում:
- Պրոտոնային փնջի տրամագիծը համապատասխանում է թիրախների տրամագծին և հավասար է 1.1 սմ-ի





# Պրոտոնային փնջի տարածումը թիրախում





# Պրոտոնային փնջի էներգիայի նվազման հաշվարկում

$$\sigma_{mean,i} = \frac{\int_0^{\infty} \sigma_i(E)P(E)dE}{\int_0^{\infty} P(E)dE}$$

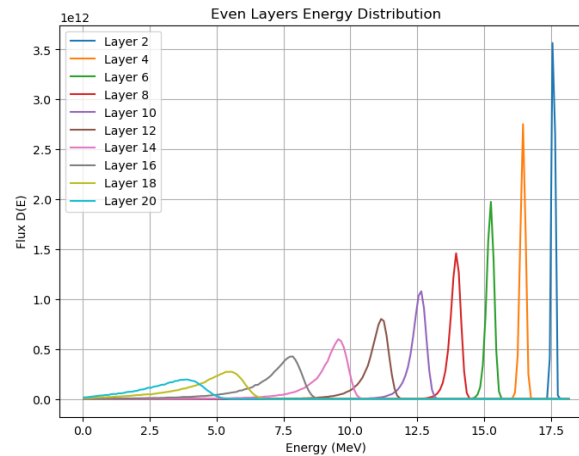
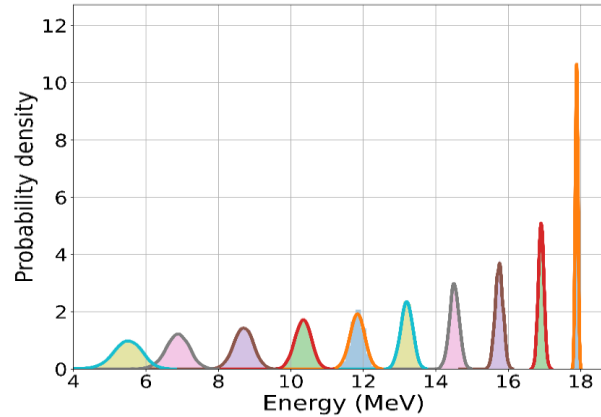
$P(E)$  – տվյալ շերտում պրոտոնի ( $E$ ) էներգիա ունենալու հավանականությունն է,

$\sigma(E)$  – էներգիայից կախված ռեակցիայի կտրվածքը:

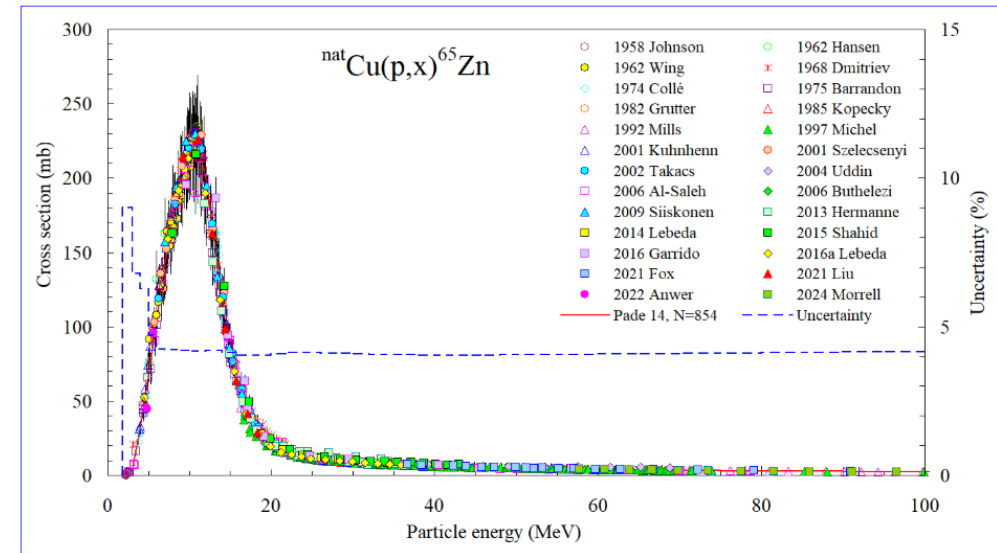
$$E_{av} = \frac{\sum_i P_i E_i}{\sum_i P_i}$$

$$E_{eff} = \frac{\int_0^{\infty} E \sigma(E) P(E) dE}{\int_0^{\infty} \sigma(E) P(E) dE}$$

## SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter)



Pade fit of selected experimental data of the  $^{nat}\text{Cu}(p,x)^{65}\text{Zn}$  reaction



[Link to article](#)

Updated: December, 2025.

Adopted from [IAEA Nuclear Data Services Charged-particle cross section database for medical radioisotope production](https://nds.iaea.org/medical/index.html)

## PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)



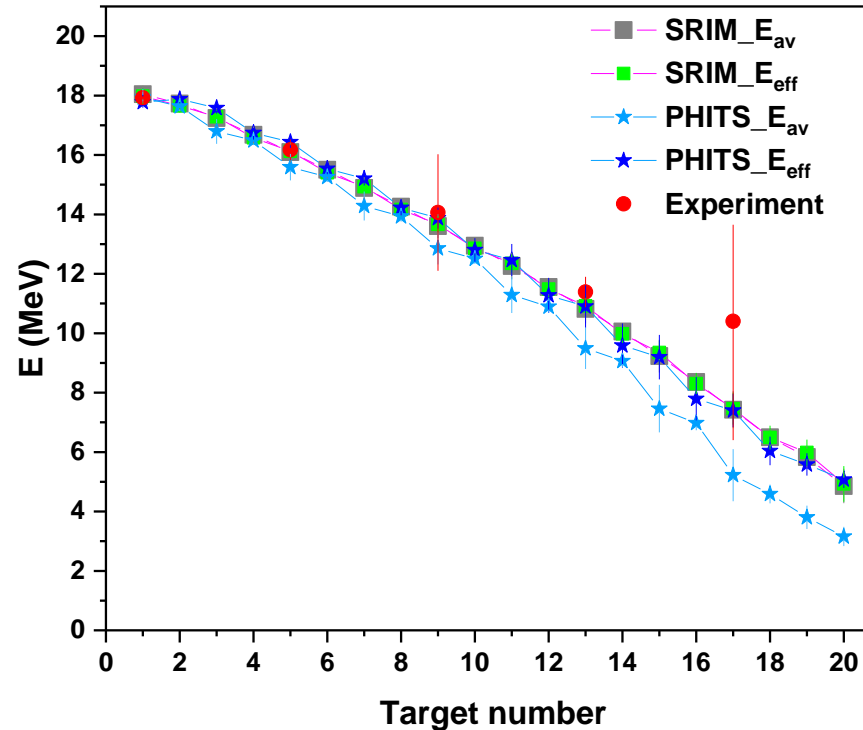
# Պրոտոնային փնջի էներգիայի նվազման հաշվարկում

$$E_{av} = \frac{\sum_i P_i E_i}{\sum_i P_i}$$

$$E_{eff} = \frac{\int_0^\infty E \sigma(E) P(E) dE}{\int_0^\infty \sigma(E) P(E) dE}$$

$P(E)$  – տվյալ շերտում պրոտոնի ( $E$ ) էներգիա ունենալու հավանականությունն է,

$\sigma(E)$  – էներգիայից կախված ռեակցիայի կտրվածքը:





# Պրոտոնային փնջի էներգիայի նվազման հաշվարկում

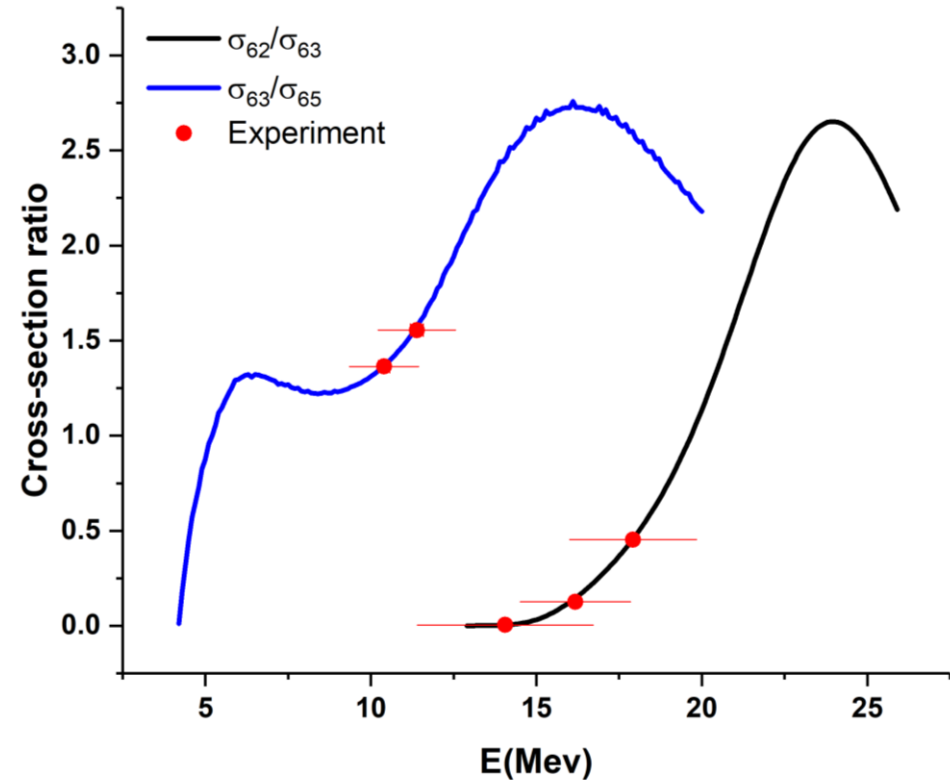
$$\sigma[\text{natCu}(p,x)^{62}\text{Zn}] / \sigma[\text{natCu}(p,x)^{63}\text{Zn}]$$

$$\sigma[\text{natCu}(p,x)^{63}\text{Zn}] / \sigma[\text{natCu}(p,x)^{65}\text{Zn}]$$

$$\frac{\sigma_{62\text{Zn}}}{\sigma_{63\text{Zn}}} = \frac{A_{62\text{Zn}} \left(1 - e^{-\lambda_{63\text{Zn}} t_1}\right)}{A_{63\text{Zn}} \left(1 - e^{-\lambda_{62\text{Zn}} t_1}\right)}$$

որտեղ  $A_{62\text{Zn}}$ ,  $\lambda_{63\text{Zn}}$  և  $A_{63\text{Zn}}$ ,  $\lambda_{62\text{Zn}}$  ակտիվություններն ու տրոհման հաստատուններն են համապատասխանաբար  $^{62}\text{Zn}$  և  $^{63}\text{Zn}$  միջուկների ստացման ռեակցիաների համար:

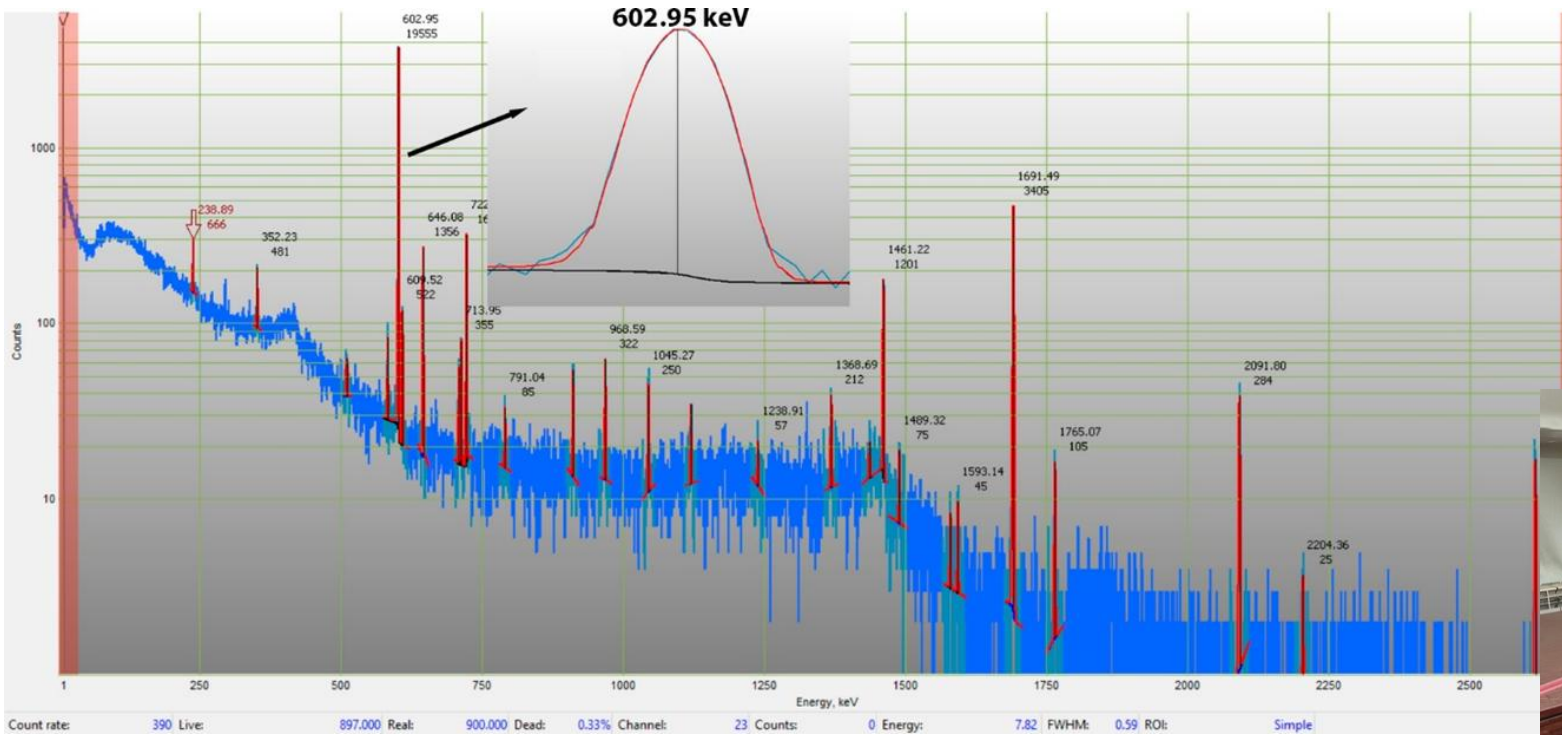
$$E_0 = (18.1 \pm 0.2) \text{ ՄԷՎ}$$



Էքսպերիմենտալ որոշված և մոնիտոր ռեակցիաների առաջարկվող՝  $(\sigma_{62}/\sigma_{63})$  և  $(\sigma_{63}/\sigma_{65})$ , կտրվածքների հարաբերության կախվածությունը՝ թիրախում պրոտոնային փնջի էներգիայից:

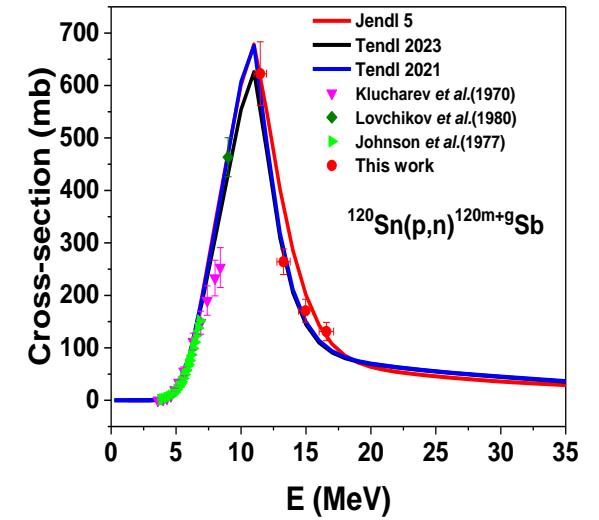
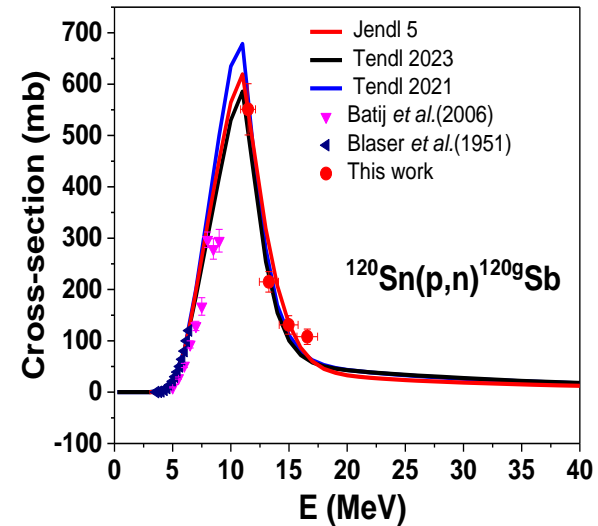
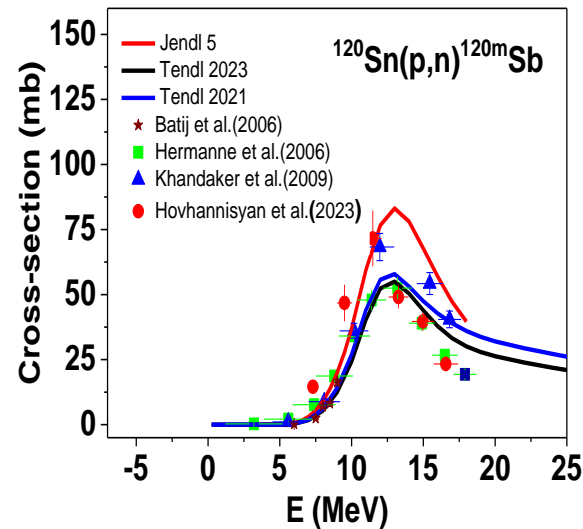
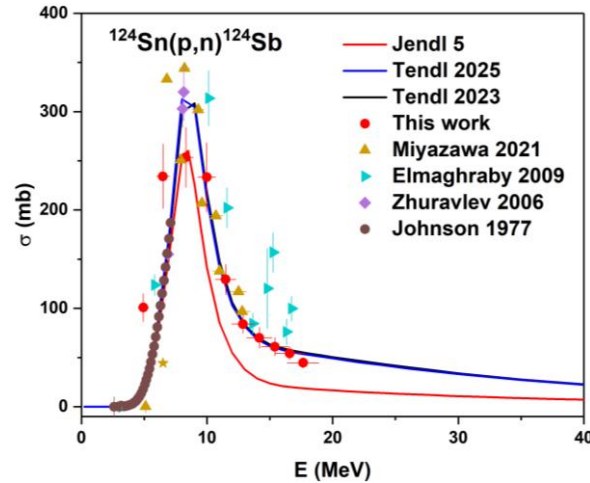
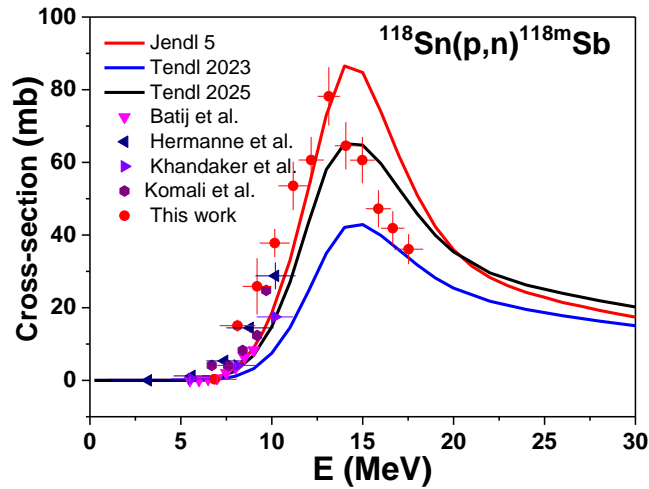


# Ռադիոակտիվ միջուկների նույնականացում





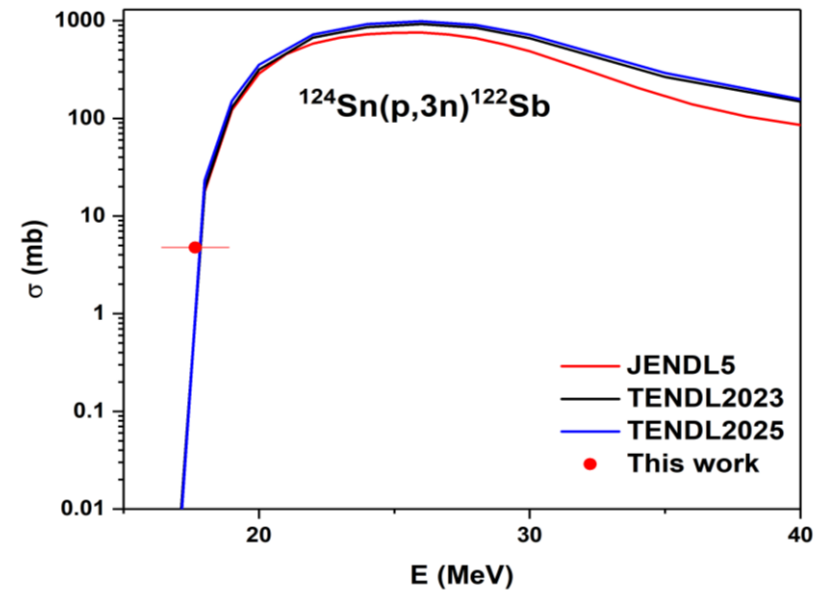
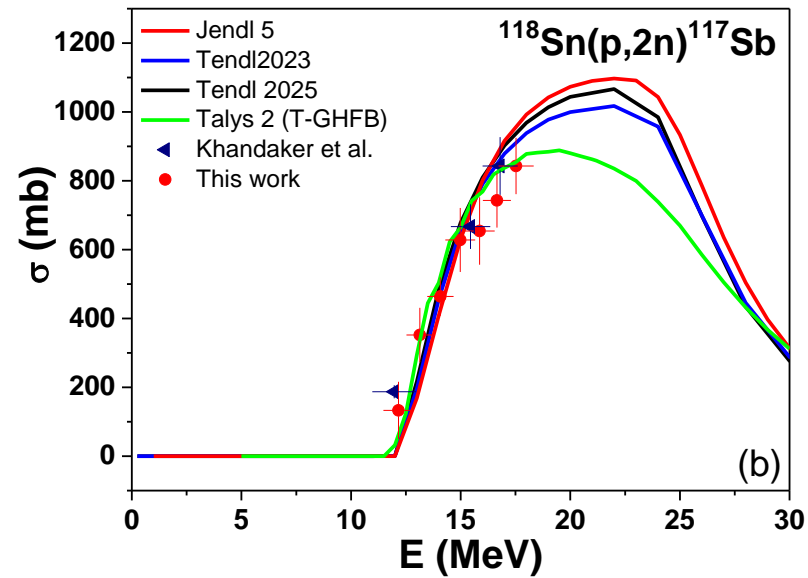
# (p,n) տիպի ռեակցիաներ



- $^{112}\text{Sn}(p,x)$
- $^{118}\text{Sn}(p,x)$
- $^{117}\text{Sn}(p,x)$
- $^{120}\text{Sn}(p,x)$
- $^{124}\text{Sn}(p,x)$

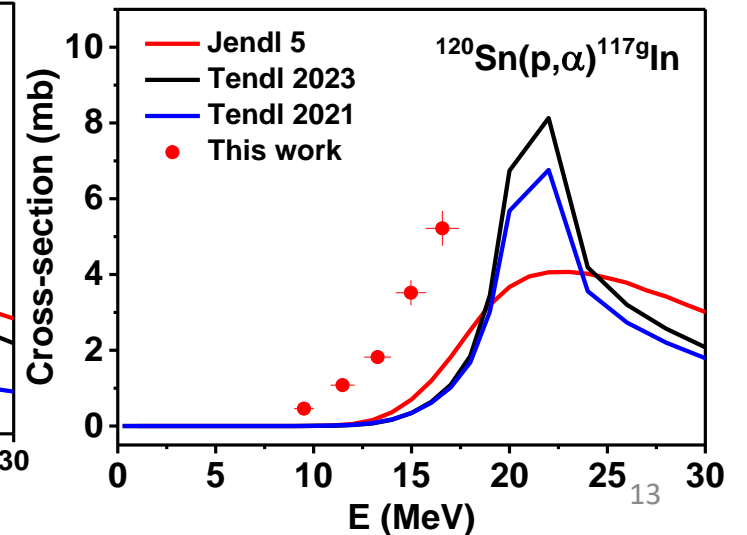
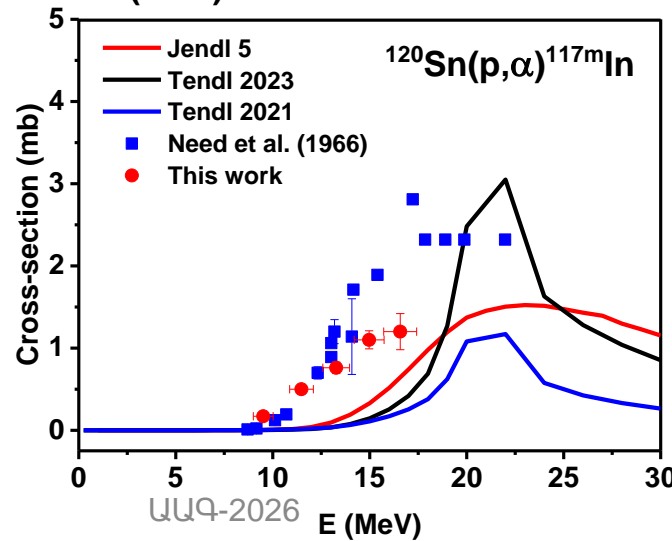
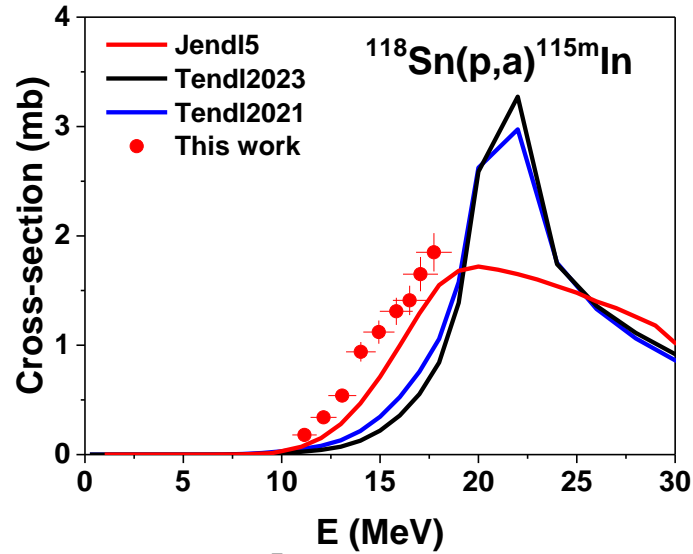
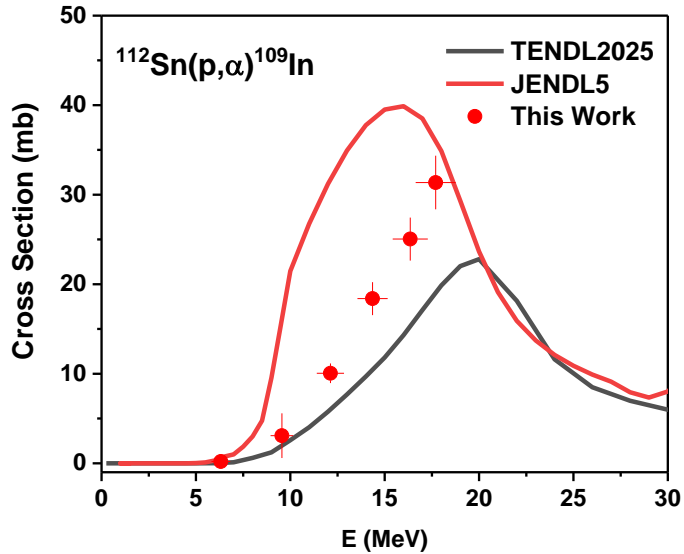


# $(p,2n)$ , $(p,3n)$ տիպի ռեակցիաներ





# $(p,\alpha)$ տիպի ռեակցիաներ





# (p,α) տիպի ռեակցիաներ

Nuclear Science and Techniques (2024) 35:216  
<https://doi.org/10.1007/s41365-024-01588-x>



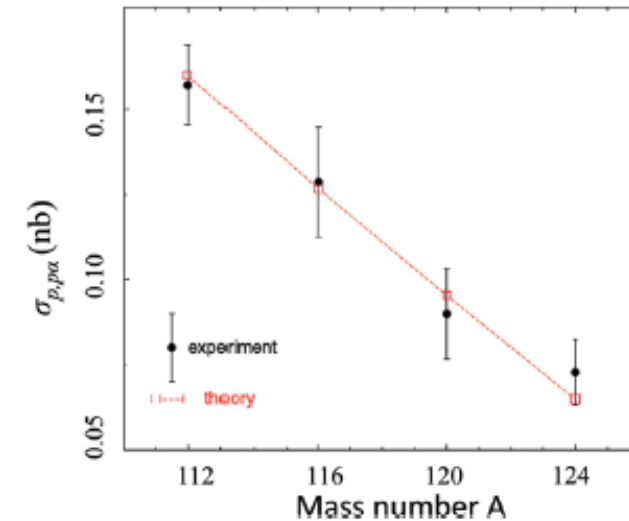
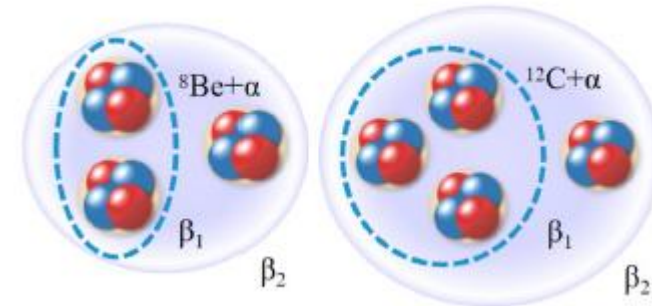
## Clustering in nuclei: progress and perspectives

Kang Wei<sup>1</sup> · Yan-Lin Ye<sup>1</sup> · Zai-Hong Yang<sup>1</sup>

Received: 29 July 2024 / Revised: 29 September 2024 / Accepted: 30 September 2024 / Published online: 28 November 2024  
© The Author(s) 2024

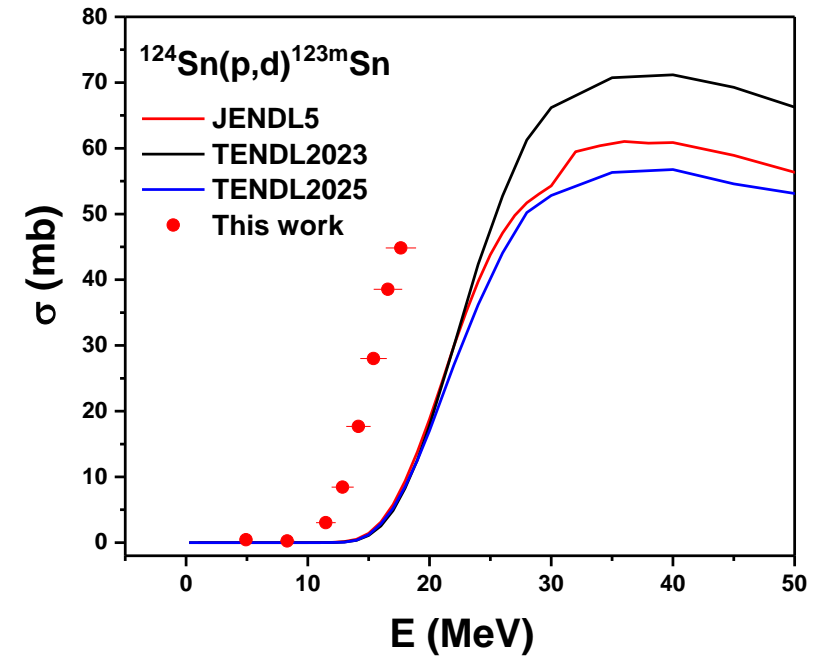
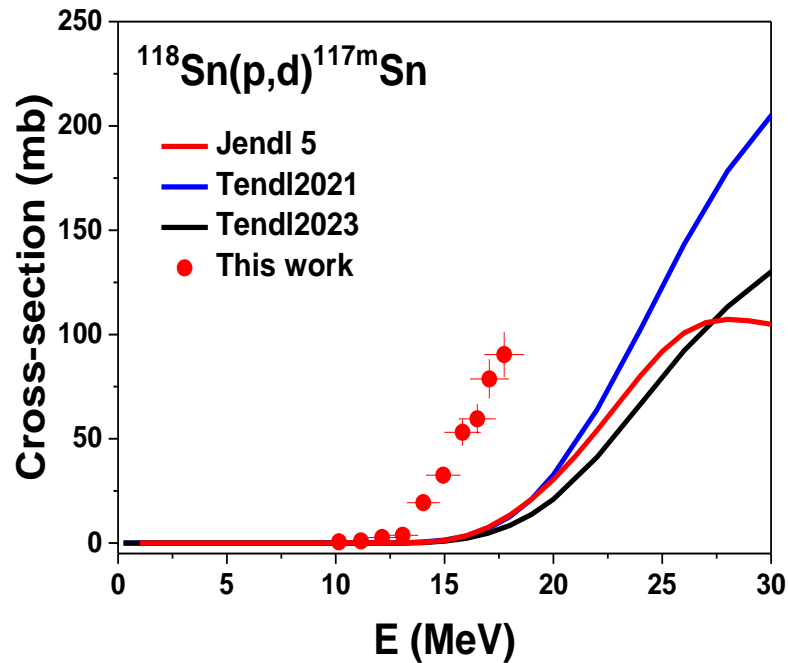
### Abstract

Nucleus is essentially composed of protons and neutrons, which are commonly known as nucleons. Interestingly, some of nucleons may group together and exhibit collective behavior inside a nucleus. Such clustering effects have been known since the early stages of nuclear physics because of the observation and description of  $\alpha$ -cluster decay from many heavy nuclei. Subsequent studies demonstrated that cluster structures exist in many nuclear systems, especially in weakly bound or excited states, and are complementary to the shell-like structures. In this review article, we provide a brief historical recall of the field, and follow it with a conceptual and logical description of the major theoretical models that have been frequently applied in the literature to describe nuclear clustering. Experimental methods and progress are outlined, recent outcomes are emphasized, and perspectives relevant to future studies of heavy neutron-rich systems are discussed.





# $(p,pn)+(p,d)$ տիպի ռեակցիաներ





# ԹԵՄԱՅԻՆ ՎԵՐԱԲԵՐՎՈՂ ԽԱՎԱԳՐՎԱԾ ԱՉԽԱՏՈՒՄՆԵՐԸ

Eur. Phys. J. A (2026) 62:81  
<https://doi.org/10.1140/epja/s10050-026-01849-w>

THE EUROPEAN  
PHYSICAL JOURNAL A



Regular Article - Experimental Physics

## Proton induced reactions on $^{118}\text{Sn}$ target at energies up to 18 MeV

G. H. Hovhannisyan<sup>1,✉</sup>, N. S. Gharibyan<sup>1</sup>, T. M. Bakhshiyani<sup>1</sup>, A. R. Balabekyan<sup>1</sup>, S. V. Gaginyan<sup>1</sup>, G. V. Martirosyan<sup>1</sup>, A. Manukyan<sup>2</sup>, R. K. Dallakyan<sup>2</sup>, A. Aprahamian<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Yerevan State University, 0025 Yerevan, Armenia  
<sup>2</sup> A. Alikhanyan National Science Laboratory, 0036 Yerevan, Armenia  
<sup>3</sup> University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556, USA

Received: 14 October 2025 / Accepted: 31 March 2026  
© The Author(s), under exclusive licence to Società Italiana di Fisica and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2026  
Communicated by A. Di Pietro.

**Abstract** Proton-induced reactions on enriched  $^{118}\text{Sn}$  up to 18 MeV have been investigated. Using the stacked-foil activation technique, the excitation functions of the reactions  $^{118}\text{Sn}(p,n)^{118}\text{Sb}$ ,  $^{118}\text{Sn}(p,2n)^{117}\text{Sb}$ ,  $^{118}\text{Sn}(p,\alpha)^{115\text{m}}\text{In}$ , and  $^{118}\text{Sn}(p,x)^{117\text{m}}\text{Sn}$  were measured. The available experimental data show good agreement with our measurements. The cross sections for the  $^{118}\text{Sn}(p,x)^{117\text{m}}\text{Sn}$  and  $^{118}\text{Sn}(p,\alpha)^{115\text{m}}\text{In}$  reactions are reported for the first time. The measured cross sections were compared not only with previously published experimental results, but also with theoretical predictions from the TENDL-2023 (TALYS-based evaluated nuclear data library), TENDL-2025 and JENDL-5 (Japanese Evaluated Nuclear Data Library) libraries. Discrepancies between experimental and theoretical data were observed for reactions involving composite-particle emission, such as alpha particles and deuterons. These differences suggest that while current models adequately describe simple two-nucleon emission channels, further refinements are needed, particularly for modeling composite-particle emission at lower proton energies.

nuclear data libraries, in particular nuclear reaction cross-section databases.

While extensive experimental data exist for neutron-induced reactions, information on charged-particle-induced reactions remain limited. In the absence of measurements, theoretical model calculations are commonly used to provide cross-section data. Among the most widely employed sources are the TALYS-based TENDL library [1] and the Japanese evaluated nuclear data library JENDL-5 [2].

Proton-induced reactions on enriched tin isotopes are of particular interest due to their relevance for both nuclear fuel cycle studies and medical isotope production. Tin isotopes are produced as fission products of uranium and are present in spent nuclear fuel. Reactions leading to the transmutation of tin isotopes, especially  $^{126}\text{Sn}$ , are important for nuclear waste management, while medically relevant isotopes, such as  $^{117}\text{Sb}$ ,  $^{119}\text{Sb}$ , and  $^{124}\text{Sb}$  can be generated via proton-induced reactions on stable tin isotopes.

Experimental cross-section data for proton-induced reactions on enriched tin targets are available; however, they are largely limited to proton energies below 9 MeV [3–22], leav-

1. G. H. Hovhannisyan, N. S. Gharibyan, T. M. Bakhshiyani, A. R. Balabekyan, S. V. Gaginyan, G. V. Martirosyan, A. Manukyan, R. K. Dallakyan, A. Aprahamian, **Proton induced reactions on  $^{118}\text{Sn}$  target at energies up to 18 MeV**, The European Physical Journal A (2026) 62:81

<https://doi.org/10.1140/epja/s10050-026-01849-w>

2. H. Hovhannisyan, T. M. Bakhshiyani, G. Tikharyan, N., Gharibyan, G. V. Martirosyan, **Proton-induced reactions on enriched  $^{120}\text{Sn}$ : comprehensive analyses via stacked-foil target technique**, The European Physical Journal Special Topics, 2025, 11734-025, 01740-7

<https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-025-01740-7>

# Շնորհակալություն ուշադրության համար



Ուսումնասիրվող ռեակցիաների կտրվածքները որոշվել են օգտագործելով հետևյալ բանաձևը

$$\sigma = \frac{A_{obs} \lambda \frac{t_{3r}}{t_{3l}}}{\Phi N_{nucl} \varepsilon I_{\gamma} (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_{3r}})} \quad (1)$$

որտեղ  $A_{obs}$ -ը ֆոտոպիկի մակերեսն է,  $\lambda$  -ն՝ տրոհման հաստատունը,  
 $\varepsilon$  -ը՝ դետեկտորի էֆֆեկտիվությունն է որոշակի հեռավորության վրա,  
 $N_{nucl}$ -ը՝ թիրախում միավոր մակերեսի վրա միջուկների թիվը,  
 $N_p$ -ն՝ թիրախը ռմբակոծող պրոտոնների թիվը,  
 $\Phi$ -ն՝ պրոտոնների հոսքը,  $I_{\gamma}$ -ն՝ տվյալ գամմա գծի ինտենսիվությունը,  
 $t_1$ -ը՝ թիրախի ճառագայթման ժամանակահատվածը,  
 $t_2$ -ը՝ ճառագայթման ավարտից մինչև չափման սկիզբ ընկած ժամանակահատվածն է,  
 $t_{3r}$ -ը՝ չափման իրական ժամանակը,  
 $t_{3l}$ -ը՝ չափման իրական ժամանակը՝ հաշվի չառնելով մեռյալ ժամանակը:

Reaction channel	Residual nucleus	Q value (MeV)	$E_{th}$ (MeV)	$T_{1/2}$ of residual nucleus	$E_{\gamma}$ (keV)	$I_{\gamma}$ (%)
$^{118}\text{Sn}(p,n)$	$^{118m}\text{Sb}$	- 4.44	4.48	5 h	253.678	99
					1050.65	97
					1229.69	100
$^{118}\text{Sn}(p,2n)$	$^{117}\text{Sb}$	- 11.87	11.97	2.8 h	861.35	0.31
					1004.51	0.21
$^{118}\text{Sn}(p,\alpha)$	$^{115m}\text{In}$	2.75	0	4.486 h	336.24	45.9
$^{118}\text{Sn}(p,pn)$	$^{117m}\text{Sn}$	- 9.33	9.41	13.6 d	158.56	86
$^{118}\text{Sn}(p,d)$		- 7.10	7.16			

Threshold energies were calculated using the NNDC Q-value Calculator [31], while decay data were adopted from NuDat 3.0 [32]

Protons Energy (MeV)	Reaction cross-section (mb)			
	$^{118}\text{Sn}(p,n)^{118m}\text{Sb}$	$^{118}\text{Sn}(p,2n)^{117}\text{Sb}$	$^{118}\text{Sn}(p,\alpha)^{115m}\text{In}$	$^{118}\text{Sn}(p,x)^{117m}\text{Sn}$
$17.53 \pm 0.80$	$36.12 \pm 4.11$	$843 \pm 82$	$1.85 \pm 0.2$	$90.33 \pm 10.84$
$16.65 \pm 0.64$	$41.87 \pm 4.73$	$743 \pm 79$	$1.65 \pm 0.17$	$78.69 \pm 9.4$
$15.86 \pm 0.69$	$47.25 \pm 5.11$	$654 \pm 98$	$1.42 \pm 0.15$	$59.53 \pm 7.14$
$14.98 \pm 0.68$	$60.62 \pm 6.36$	$628 \pm 93$	$1.36 \pm 0.14$	$53.14 \pm 6.38$
$14.07 \pm 0.60$	$64.59 \pm 6.51$	$464 \pm 56$	$1.12 \pm 0.12$	$32.58 \pm 3.90$
$13.14 \pm 0.61$	$78.17 \pm 8.03$	$352 \pm 79$	$0.96 \pm 0.10$	$19.39 \pm 2.33$
$12.17 \pm 0.69$	$60.64 \pm 6.36$	$133 \pm 83$	$0.54 \pm 0.06$	$3.76 \pm 0.45$
$11.18 \pm 0.81$	$53.55 \pm 6.66$	-	$0.34 \pm 0.04$	$2.69 \pm 0.32$
$10.16 \pm 0.83$	$37.79 \pm 3.89$	-	$0.18 \pm 0.02$	$1.052 \pm 0.13$
$9.19 \pm 0.79$	$25.87 \pm 2.76$	-	-	$0.598 \pm 0.07$
$8.11 \pm 0.98$	$15.05 \pm 1.65$	-	-	-
$6.86 \pm 1.21$	$0.28 \pm 0.03$	-	-	-

**Table 1** List of the identified residues in the proton-induced reactions on  $^{120}\text{Sn}$  targets and their spectroscopic characteristics

Reaction	Q value (MeV)	$E_{th}$ (MeV)	$T_{1/2}$	$E_{\gamma}$ (keV)	$I_{\gamma}$ (%)
$^{120}\text{Sn}(p,n)^{120m}\text{Sb}$	- 3.64	3.49	5.76 d	197.3	87
				1023.3	99.4
$^{120}\text{Sn}(p,n)^{120g}\text{Sb}$	- 3.64	3.49	15.89 min	703.8	0.149
				988.6	0.063
$^{120}\text{Sn}(p,\alpha)^{117m}\text{In}$	2.71	0	116.2 min	315.3	19.1
$^{120}\text{Sn}(p,\alpha)^{117g}\text{In}$	2.71	0	43.2 min	552.9	100

Reaction channel	Residual nucleus	Q value (MeV)	$E_{th}$ (MeV)	$T_{1/2}$	$E_{\gamma}$ (keV)
$^{124}\text{Sn}(p,n)$	$^{124}\text{Sb}$	-1.39	1.41	60.2d	602.72
					645.85
					722.78
$^{124}\text{Sn}(p,pn)$	$^{123m}\text{Sn}$	-6.28	6.31	40.06min	160.34
$^{124}\text{Sn}(p, 3n)$	$^{122}\text{Sb}$	-1.68	16.96	2.72d	564.2
					692.6