

# A csillagokbeli hidrogénfúzió kulcsreakcióinak kísérleti vizsgálata



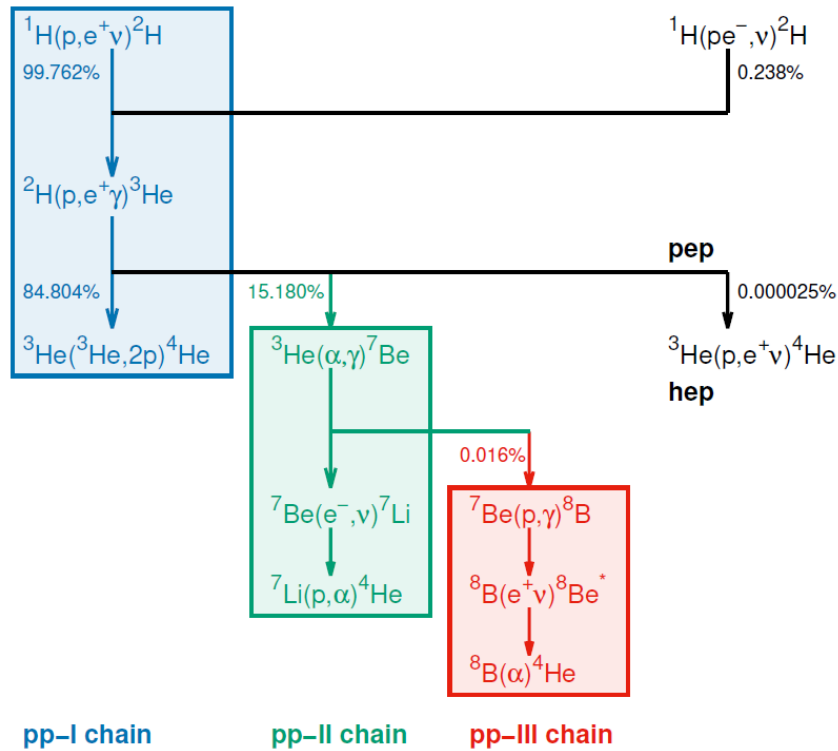
*Magyar Magfizikus Találkozó 2024,  
Debrecen, 2024. szeptember 3-5.*

**Szücs Tamás, HUN-REN Atomki,  
Nukleáris asztrofizika csoport**

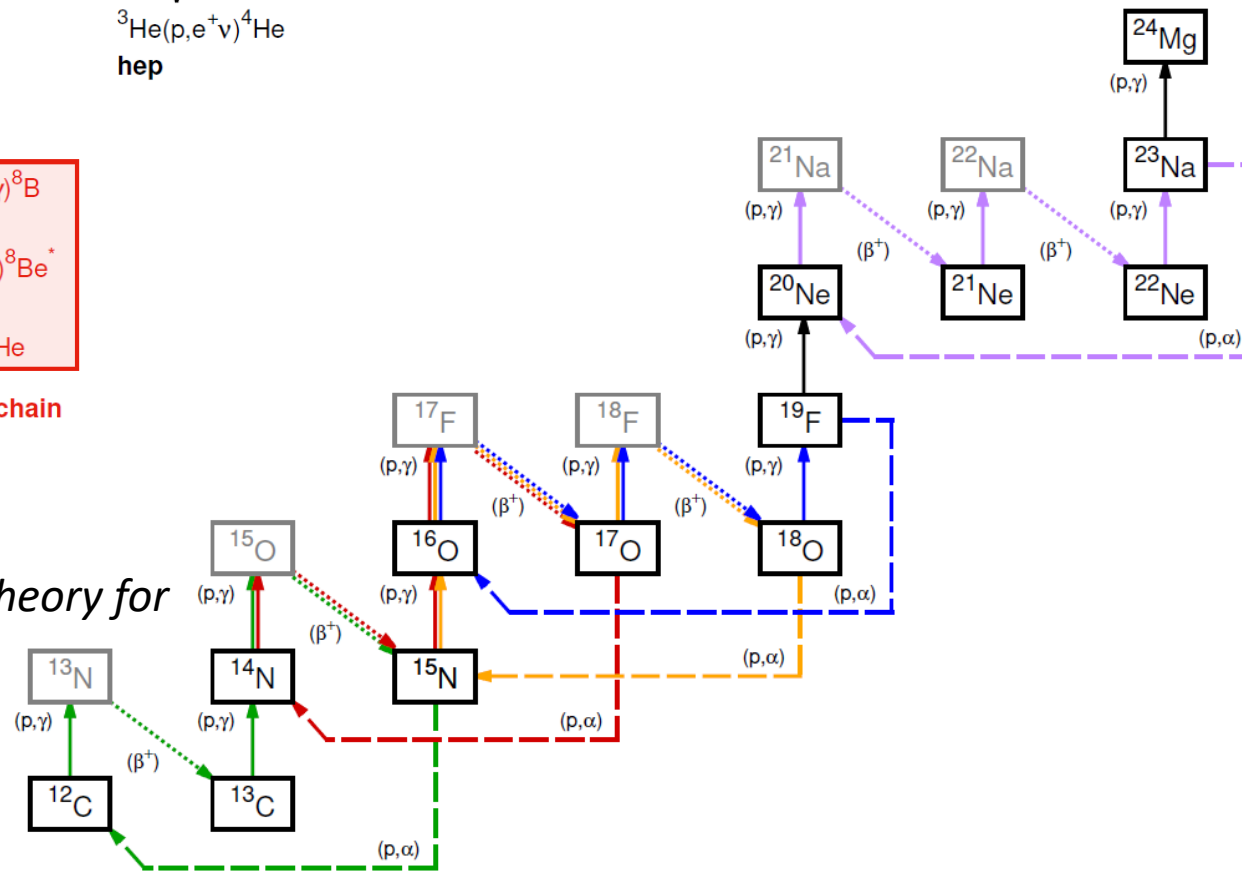
**HUN  
REN**



# pp láncok; CNO és magasabb rendű ciklusok



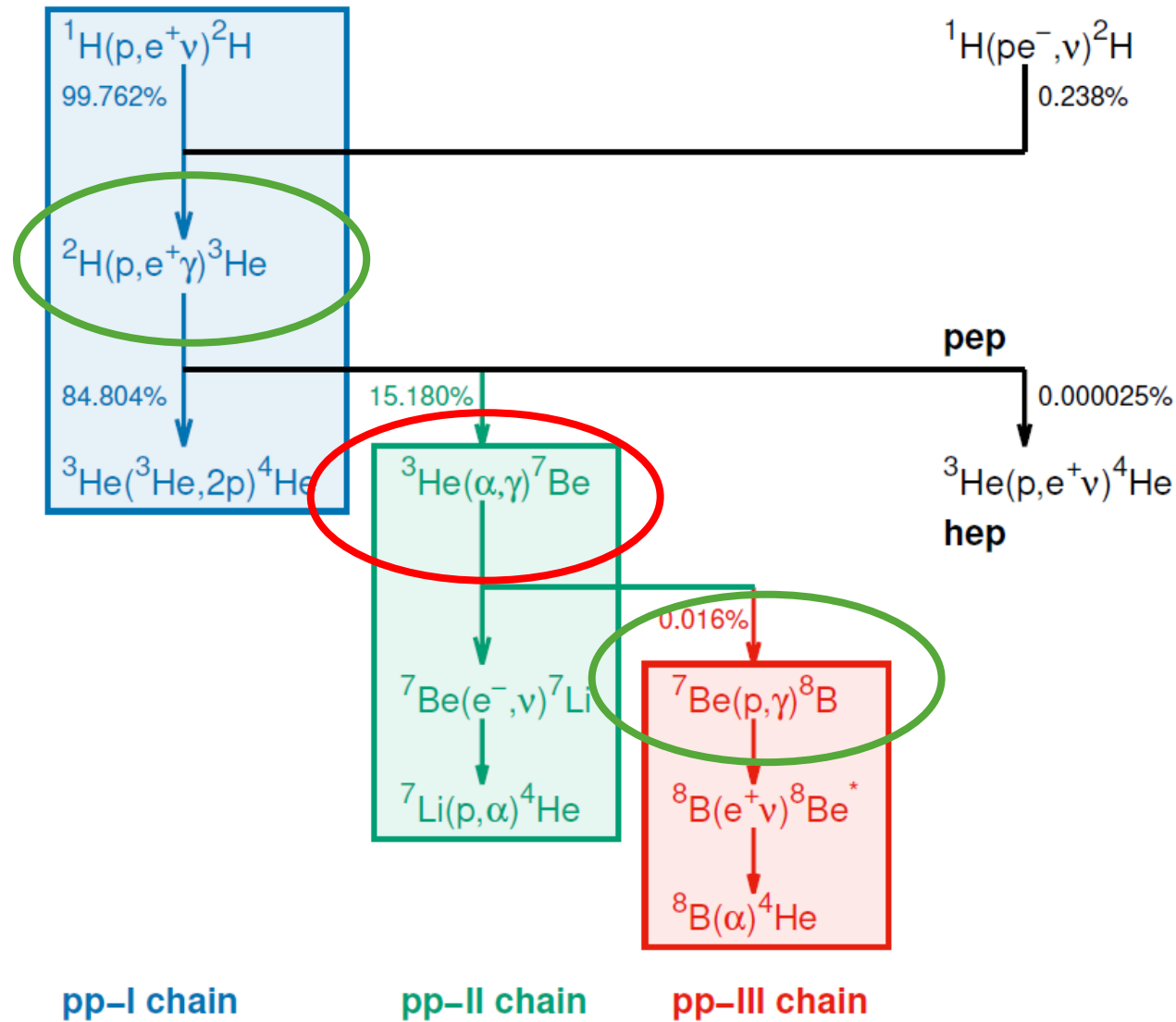
Solar Fusion Cross Sections III,  
(2022 július 26-29.) Berkeley, CA, USA



B. Acharya, ..., T. Szücs, et al.,  
*Solar fusion III: New data and theory for  
hydrogen-burning stars*  
Reviews of Modern Physics  
arXiv:2405.06470



# pp láncok

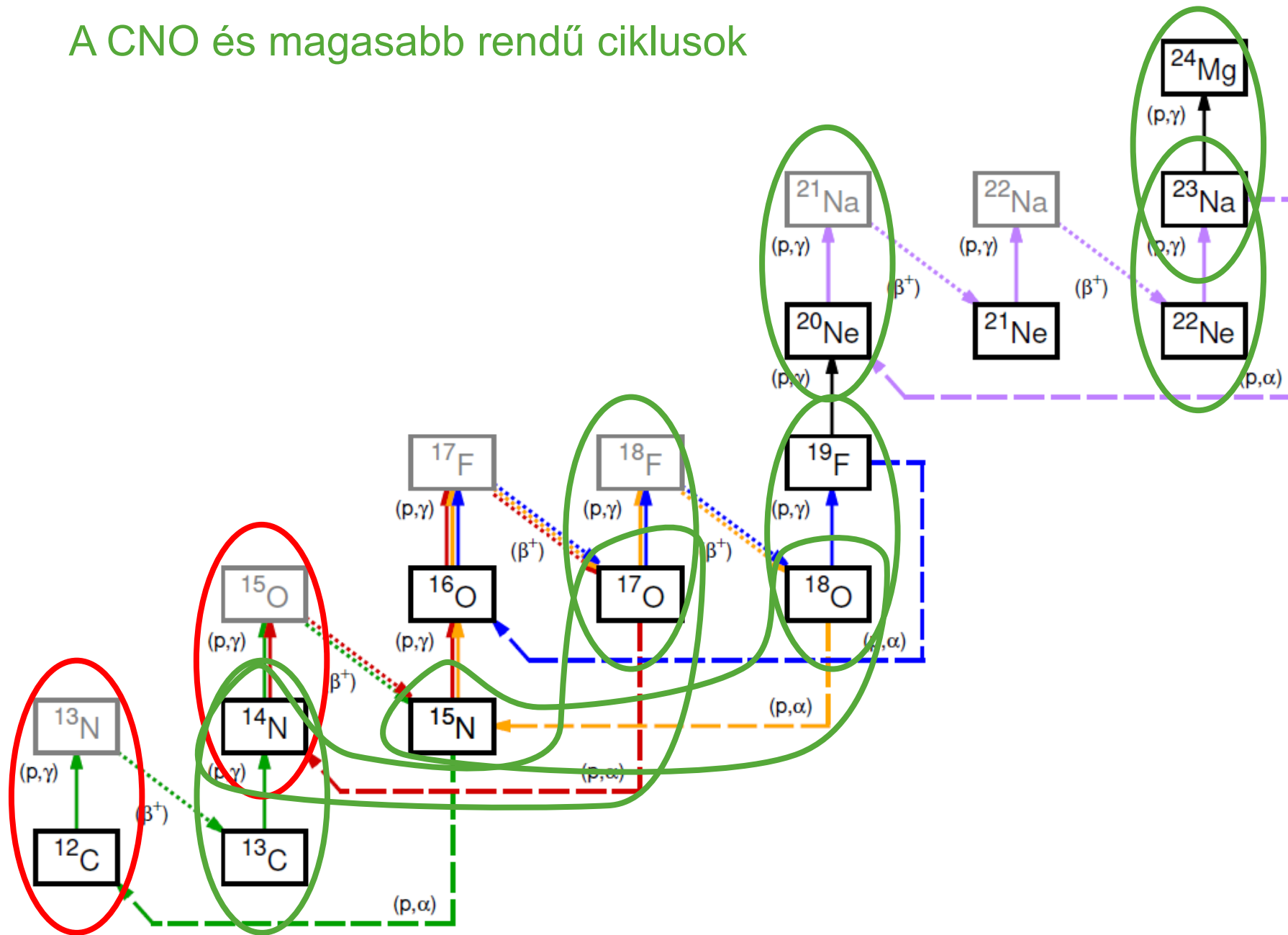


pp-I chain

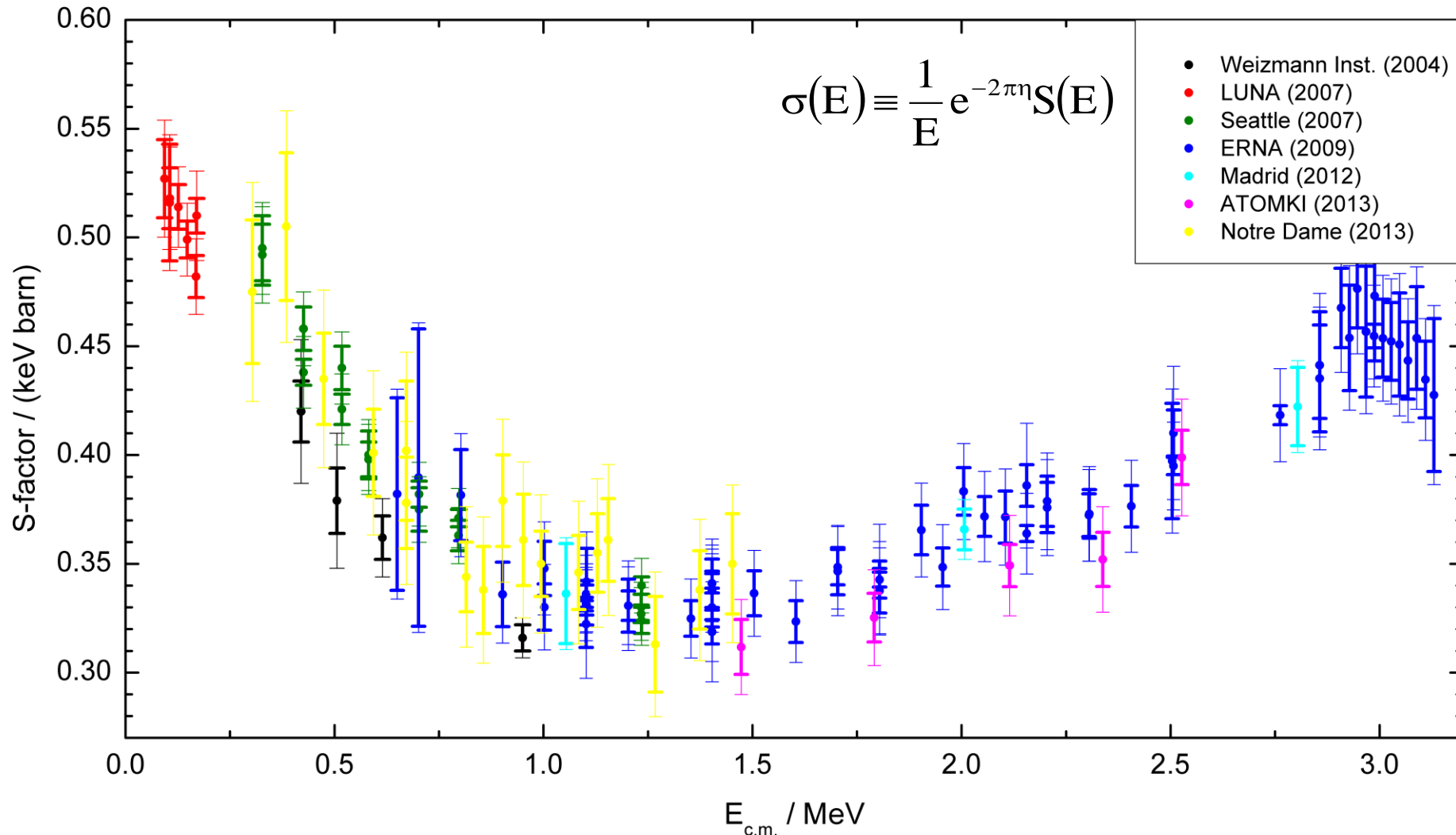
pp-II chain

pp-III chain

# A CNO és magasabb rendű ciklusok

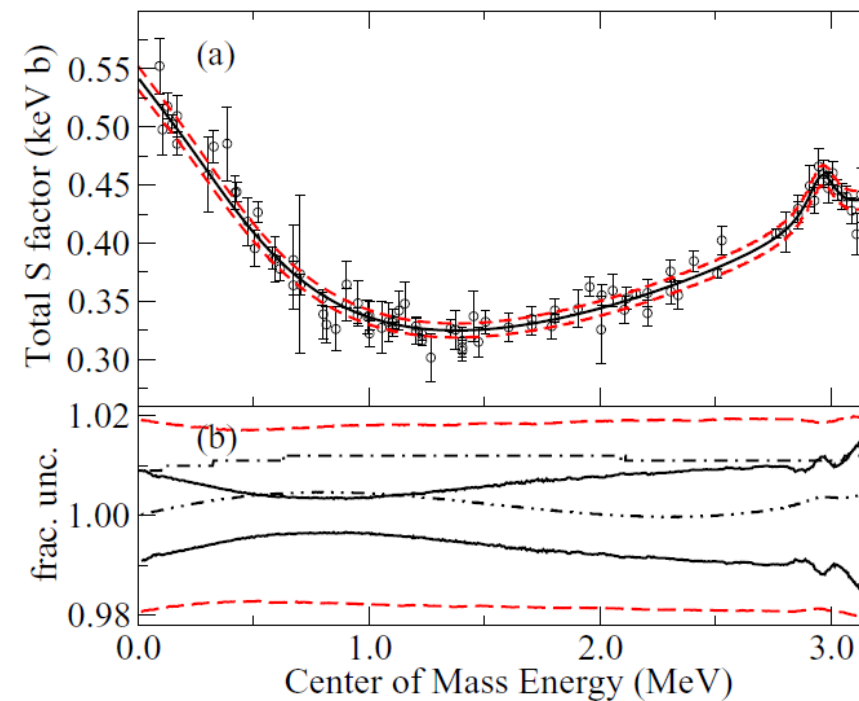
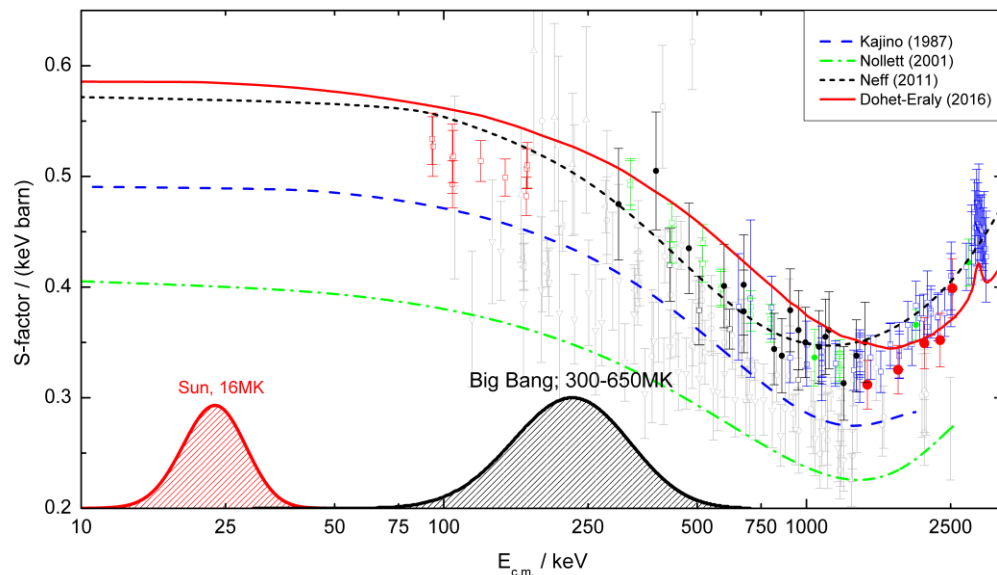


# ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ : modern kísérleti adatok



B. S. Nara Singh *et al*, PRL **93**, 262503 (2004); D. Bemmerer *et al*, PRL **97**, 122502 (2006);  
T. A. D. Brown *et al*, PRC **76**, 055801 (2007); A. Di Leva *et al*, PRL **102**, 232502 (2009);  
M. Carmona-Gallardo *et al*, PRC **86**, 032801(R) (2012); C. Bordeanu *et al*, NPA **908**, 1 (2013);  
A. Kontos *et al*, PRC **87**, 065804 (2013)

# Nap hőmérsékletének megfelelő energiára extrapoláció



T. Kajino *et al*, ApJ **319**, 531 (1987);  
K. M. Nollett, PRC **63**, 054002 (2001);  
T. Neff, PRL **106**, 042502 (2011);  
J. Dohet-Eraly *et al*, PLB **757**, 430 (2016)

R. J. deBoer *et al*, PRC **90**, 035804 (2014)

# Magasabb energián csak egy kísérleti adatsor

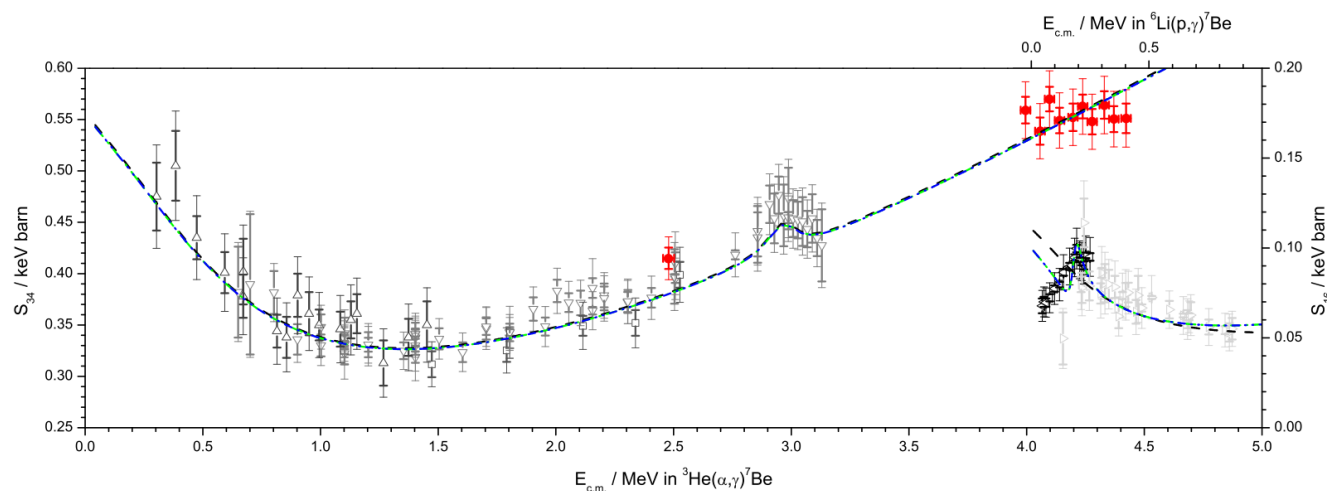
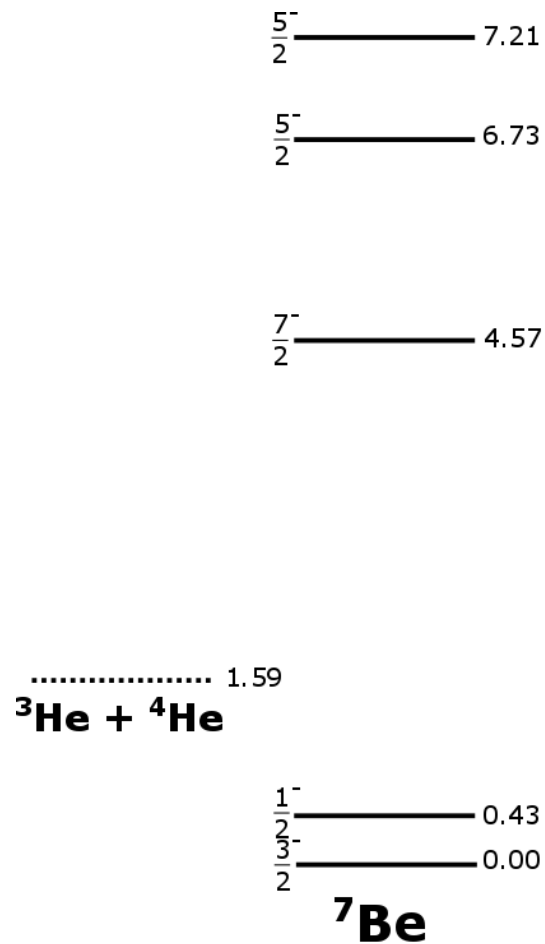
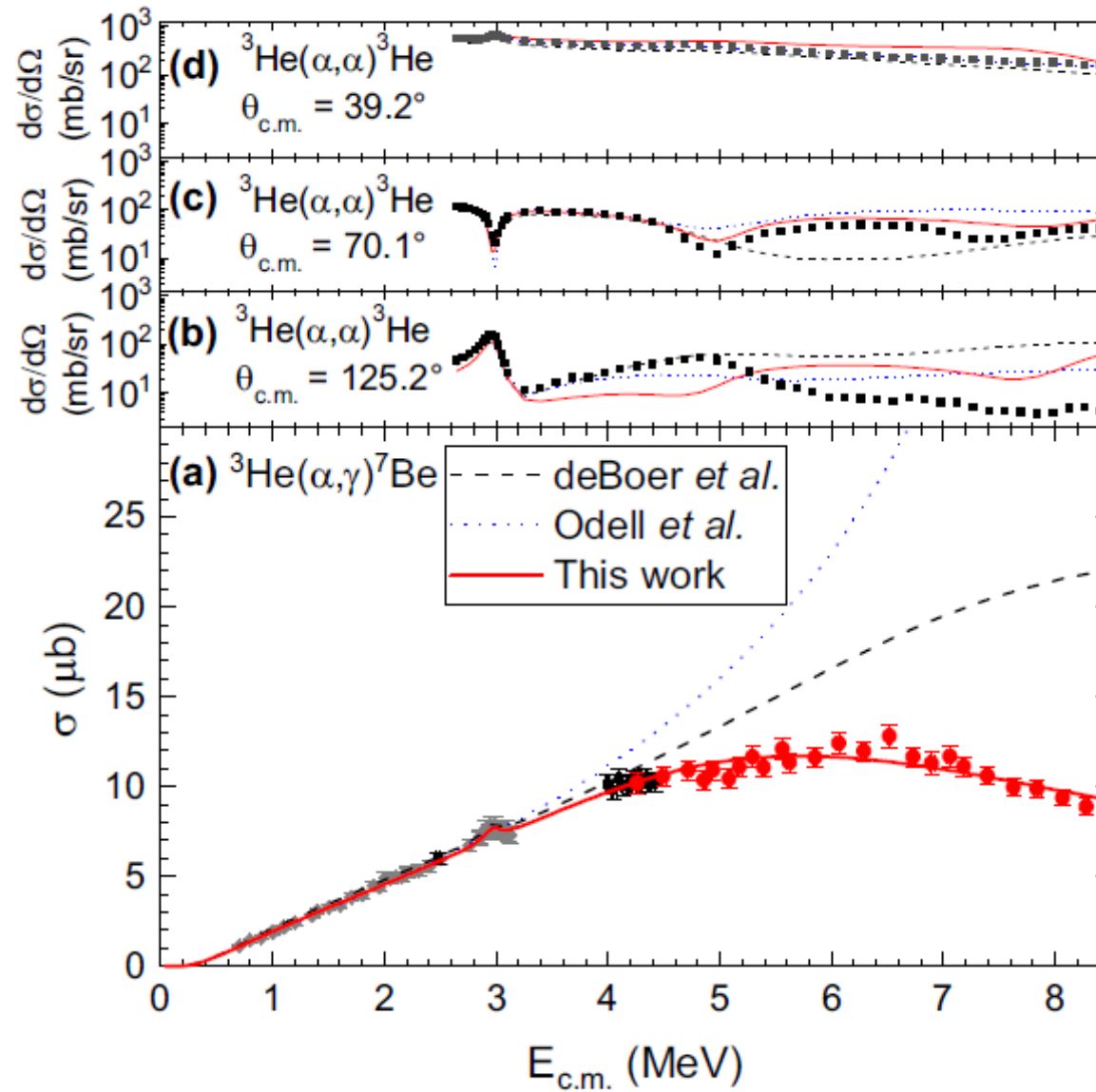


FIG. 6. S-factor data from [11,13,14,18,26] shown as gray symbols and the present data shown as red dots. The thick error bars are statistical uncertainties used for the fits, while thin ones represent the total uncertainty of a given dataset. Black dashed, green dot-dashed, and blue dot-dot-dashed lines are the constrained R-matrix fits assuming no extra level or a  $J_\pi = 1/2^+$  or  $3/2^+$  level, respectively. On the left axis the scale of the S factor for the  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reaction is shown, and on the right axis that for the  ${}^6\text{Li}(p, \gamma){}^7\text{Be}$  reaction is shown. See text for details.

T. Szücs et al., Phys. Rev. C **99**, 055804 (2019)



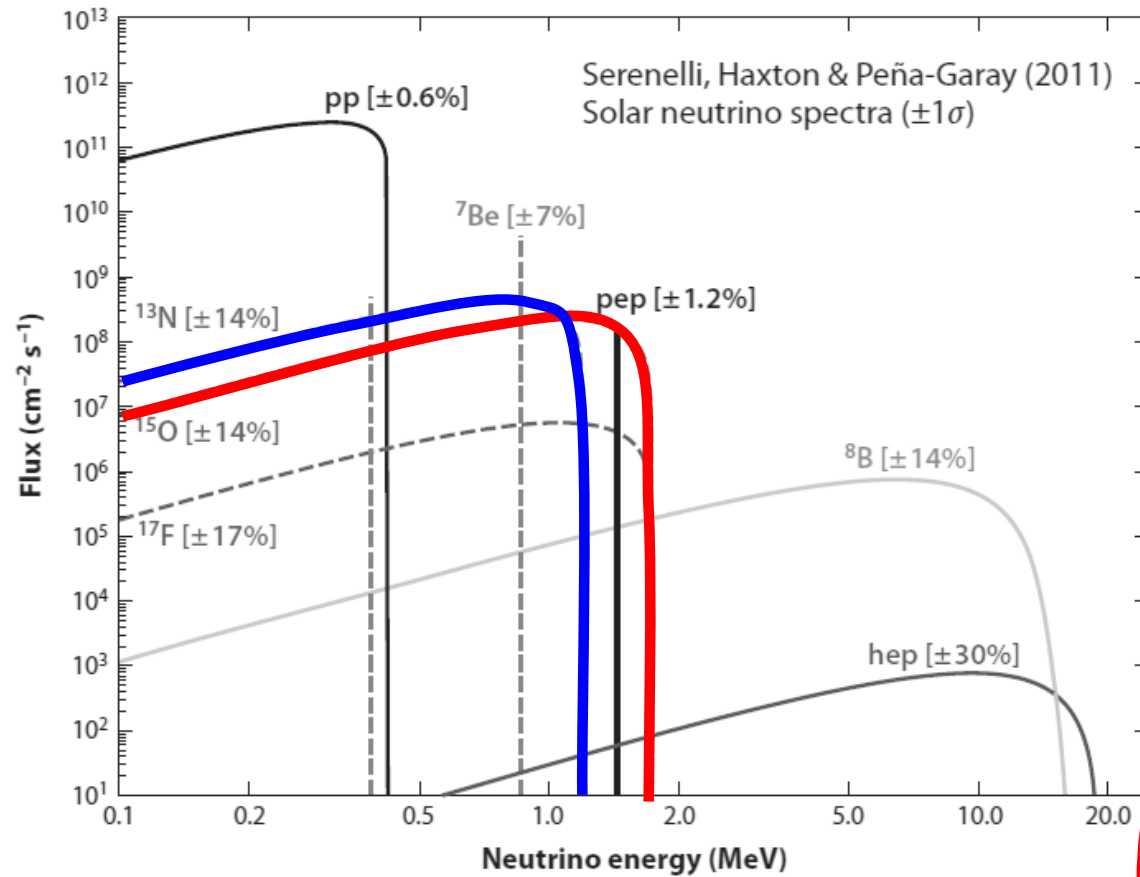
# Korábban kísérletileg nem vizsgált tartomány



Á. Tóth, T. Szücs et al., Phys. Rev. C **108**, 025802 (2023)

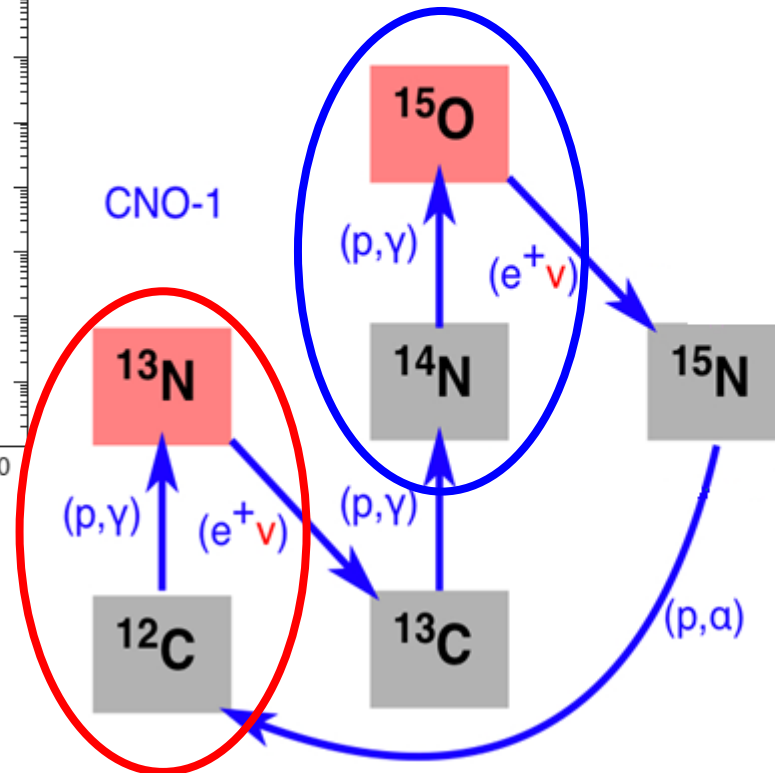


# Nap neutrínók a CNO ciklusból



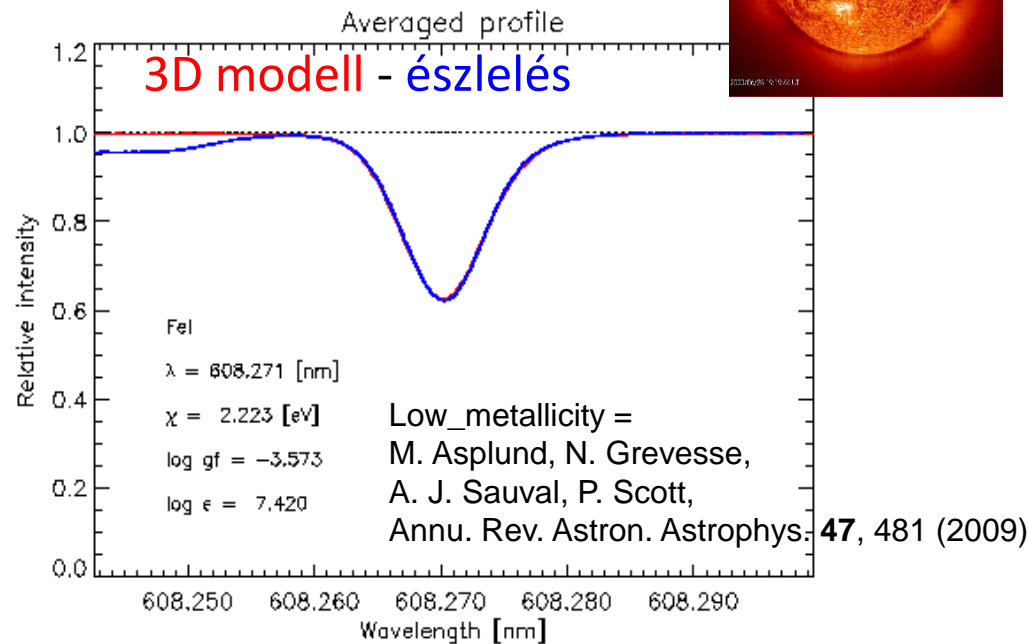
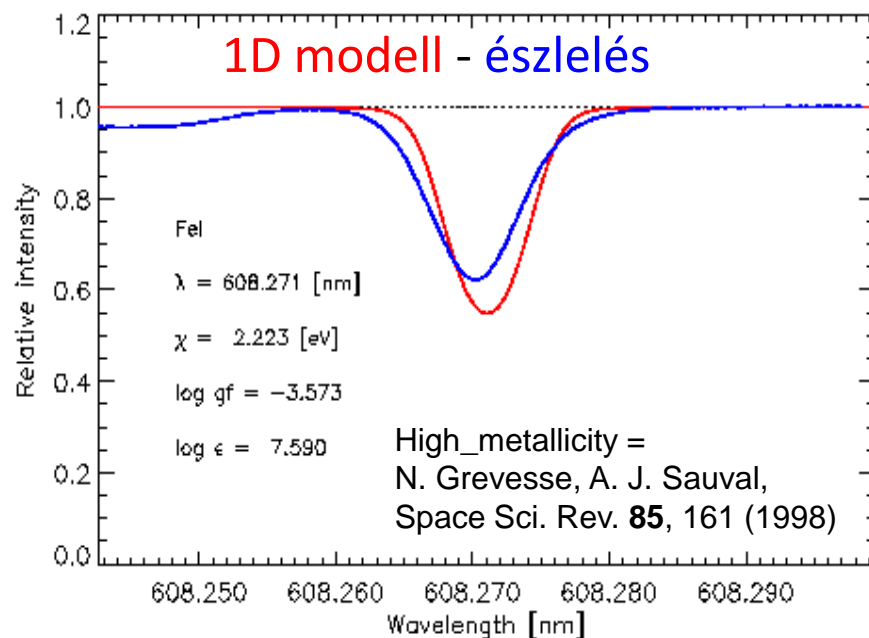
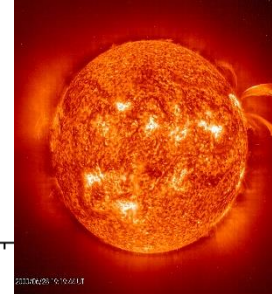
Energia termelés csupán 1%-a

$^{13}\text{N}$ ,  $Q(\beta^+) = 2.220 \text{ MeV}$   
 $^{15}\text{O}$ ,  $Q(\beta^+) = 2.754 \text{ MeV}$



# A Nap elemösszetétele

## Fraunhofer vonalak modellfüggő elemzéséből

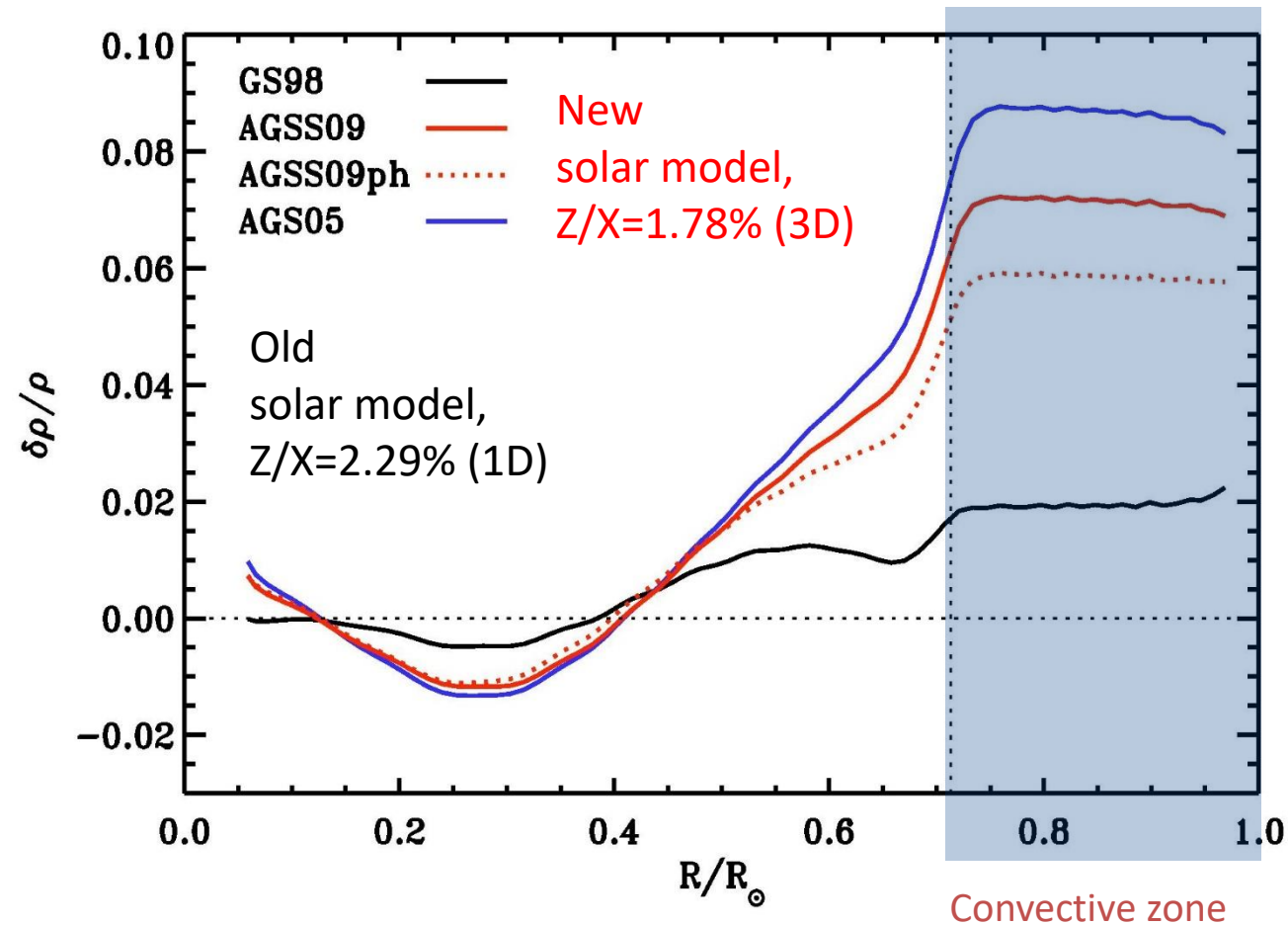


A fotoszféra 3D-s modellje jobb leírást ad, és jóval kisebb „fém” mennyiséget ad:

**1D:** A Nap 2.29% (tömegszázalék) „fém” (Li...U)

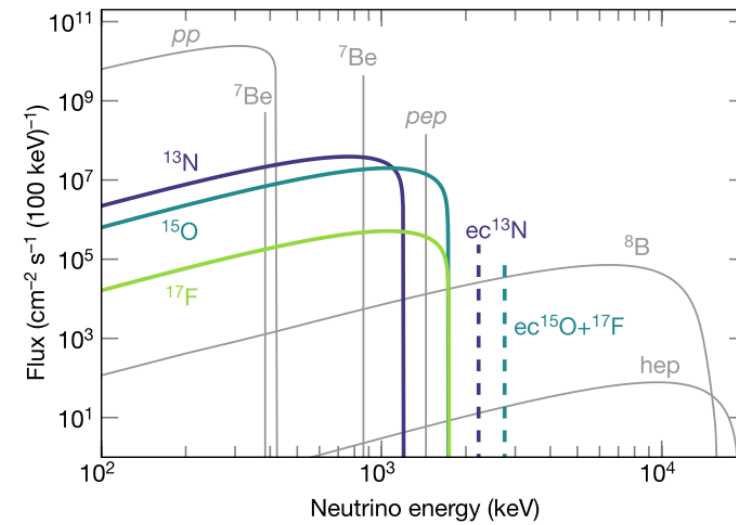
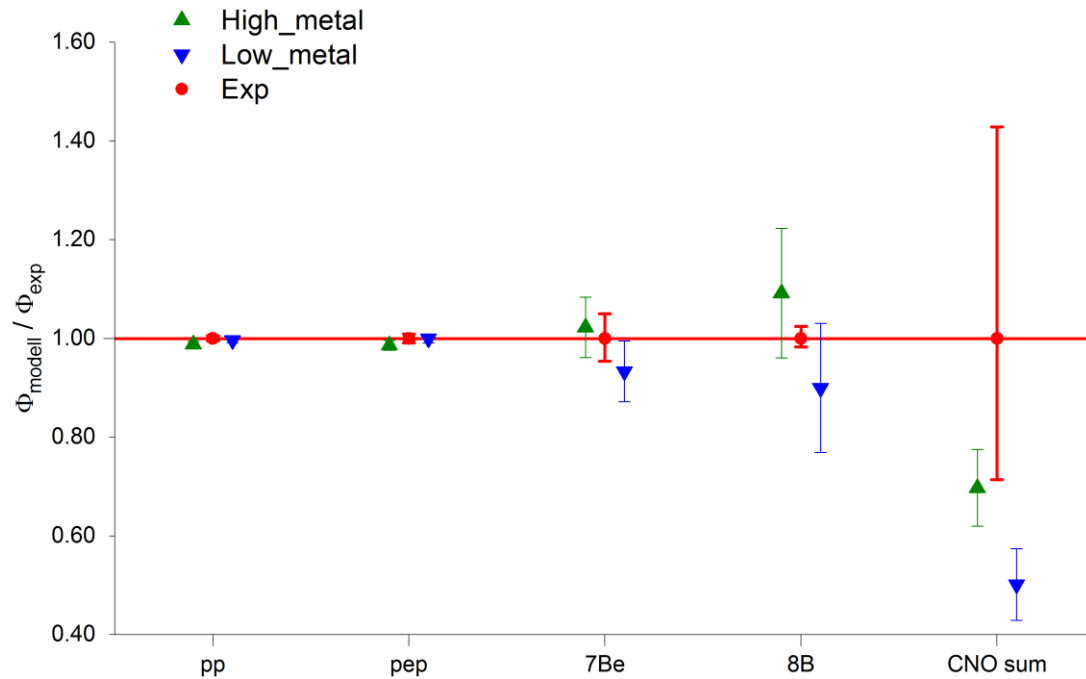
**3D:** A Nap 1.78% (tömegszázalék) „fém” (Li...U)

# Ellentmondás az egyéb mérésekkel: Helioszeizmológia



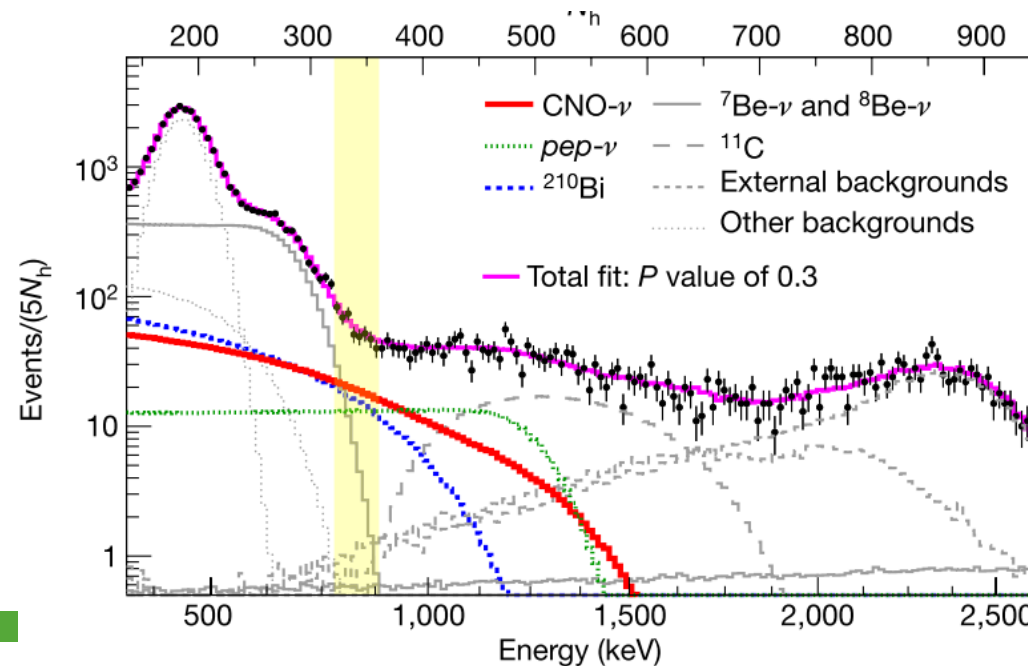
N. Vinyoles et al., *Astrophys. Jour.* **835**, 202 (2017)

# A Nap neutrínók mérése

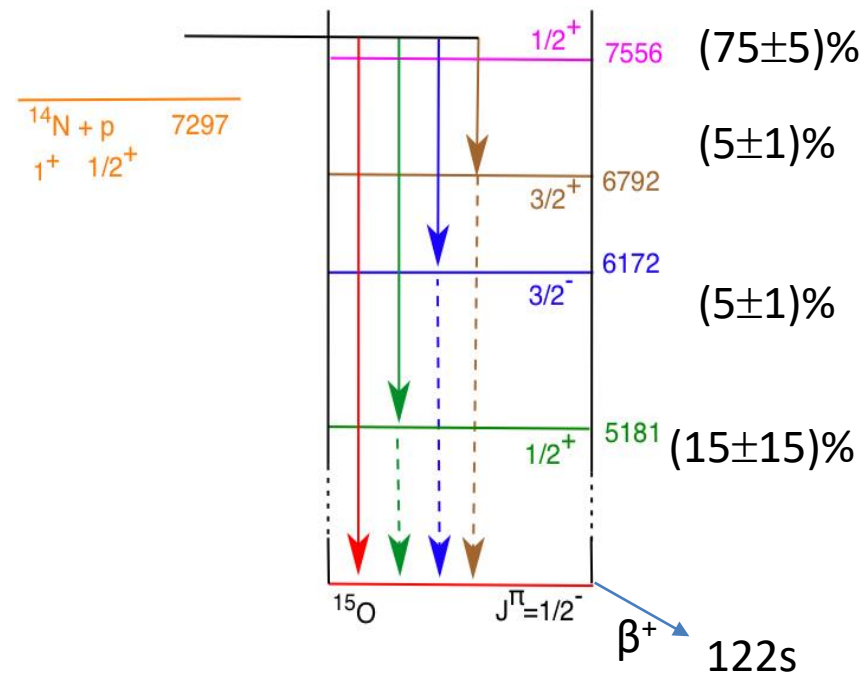
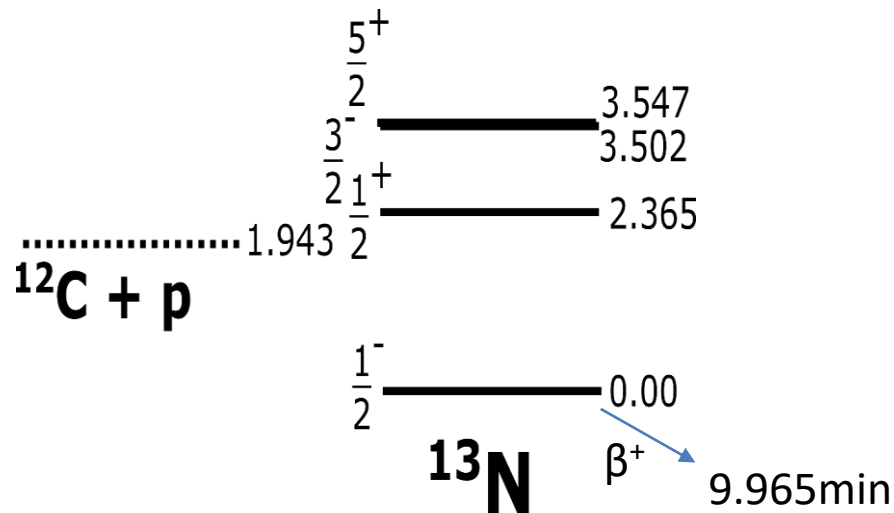


BOREXINO Collaboration,  
Nature **587**, 577 (2020)

- ◆ A nagyobb „fém” arány támogatja
- ◆ →→ De sokkal precízebb adatsor kellene

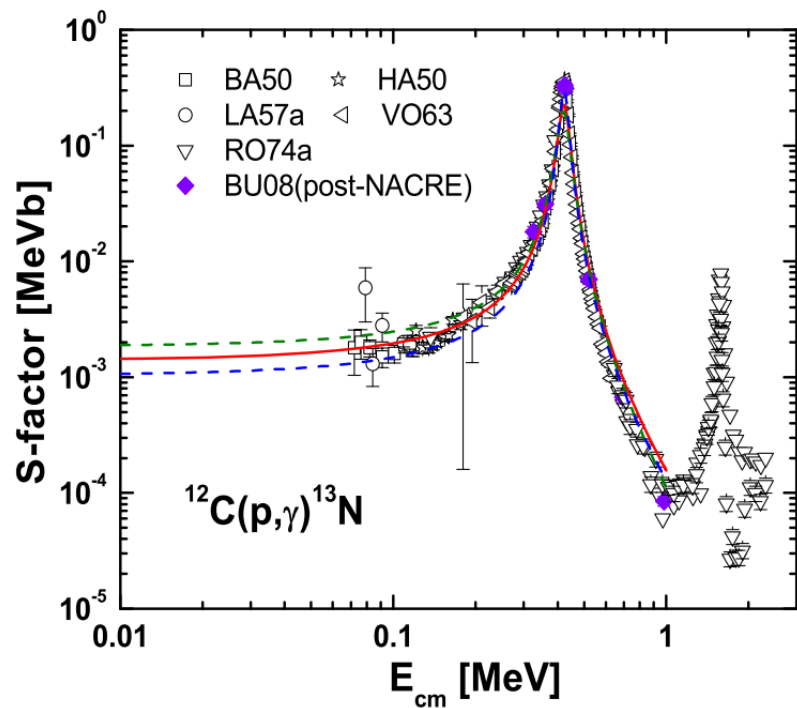


# $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$ és $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$

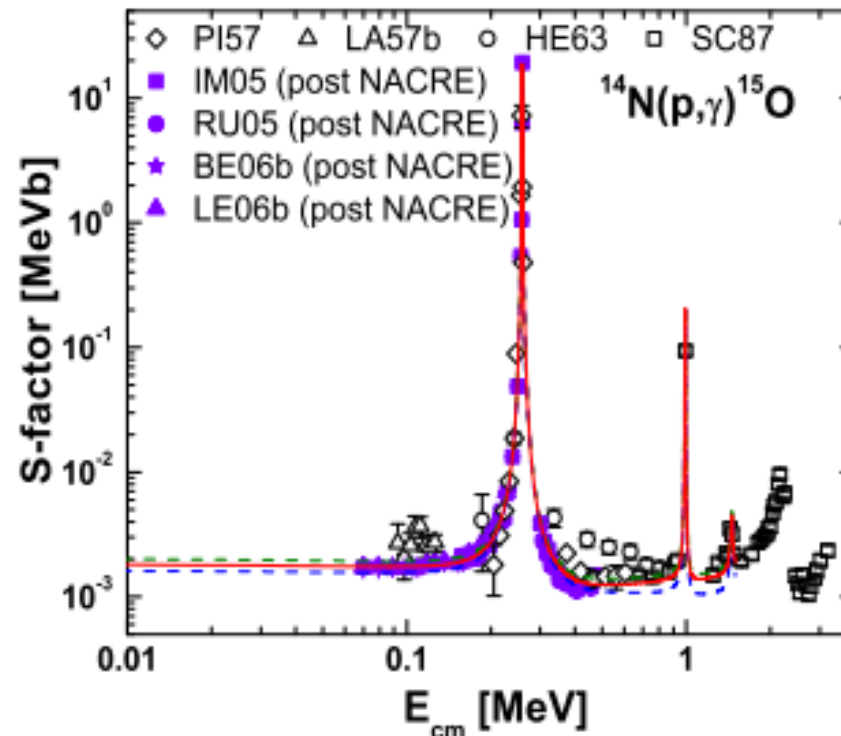


1. In-beam gamma spektroszkópia a reakcióban keletkezett prompt-gamma detektálásával
2. Ciklikus aktiváció, ahol a keletkezett  $^{13}\text{N}$  vagy  $^{15}\text{O}$  bomlását detektáljuk

# Kísérleti adatok az SFIII előtti legújabb összefoglaló műben



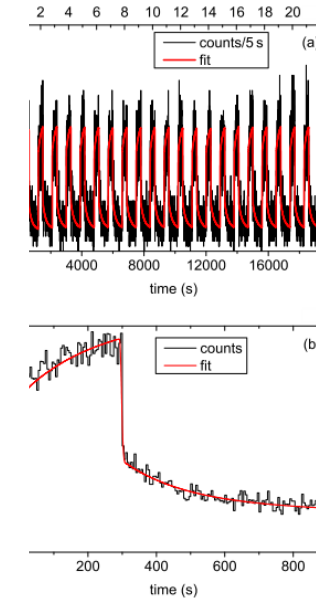
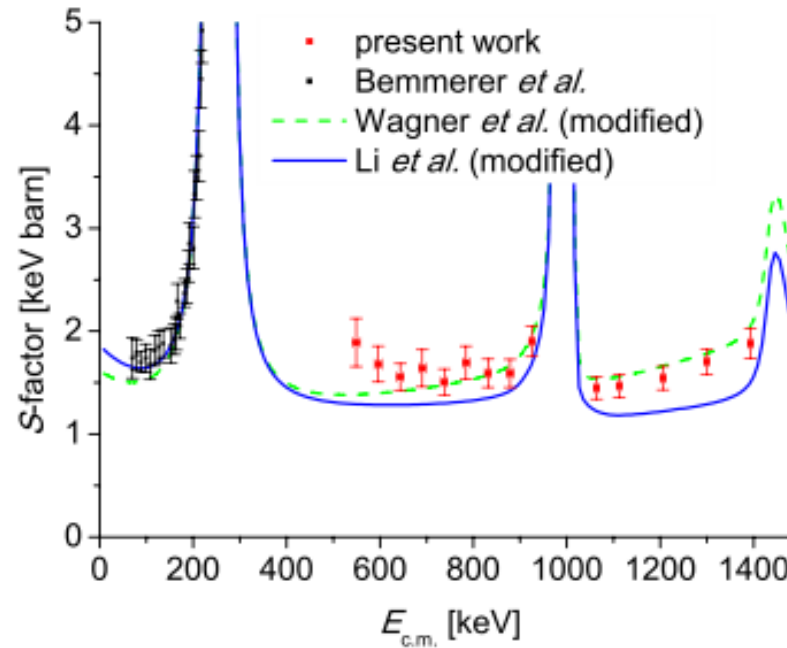
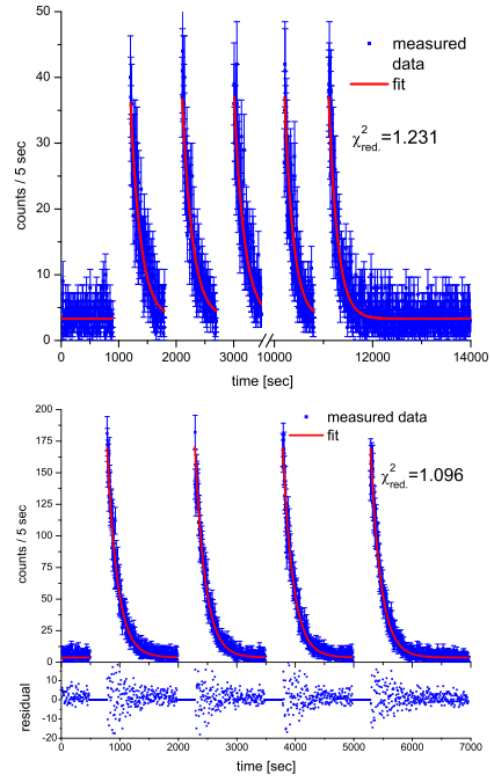
$$S(0) = 1.4 \pm 0.5 \text{ keV b.}$$



$$\text{The present } S(0) = 1.8 \pm 0.2 \text{ keV b.}$$

Y. Xu *et al.*, Nucl. Phys. A **918**, 61 (2013) /NACRE II compilation/

# ATOMKI hozzájárulás a közelmúltban: $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$



Gy. Gyürky *et al.*, Phys. Rev. C **100**, 015805 (2019)

$$\omega\gamma_{278} = (13.4 \pm 0.8) \text{ meV}$$

Rezonancia erősség mérés  
Proof-of-concept

Gy. Gyürky *et al.*, Phys. Rev. C **105**, L022801 (2022)

# SFIII következtetése

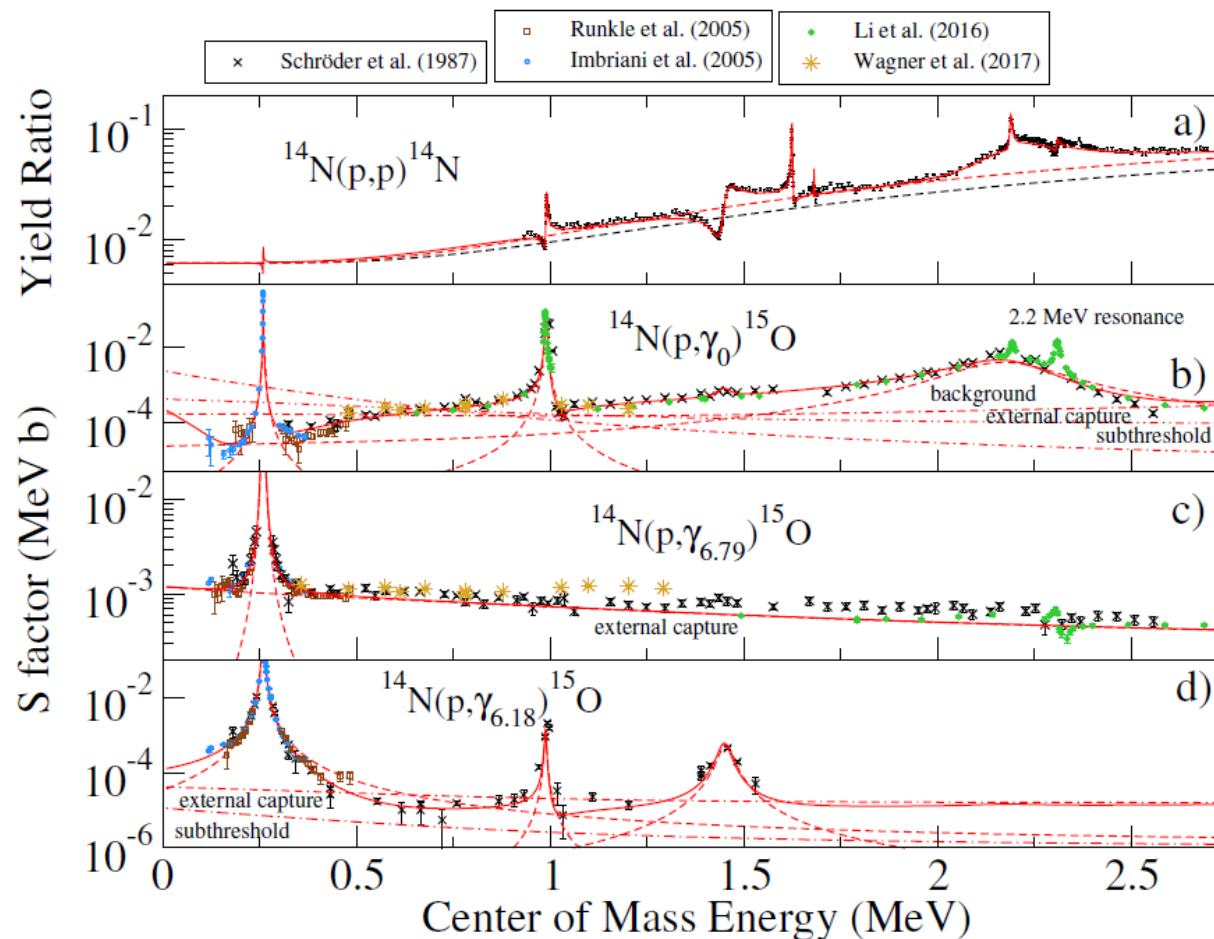


FIG. 9 Low energy  $S$  factors for the three strongest transitions in the  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  reaction to the ground b), 6.79 MeV c), and 6.18 MeV d) final states (Imbriani *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2016; Runkle *et al.*, 2005; Schröder *et al.*, 1987; Wagner *et al.*, 2018). A representative yield ratio for the scattering cross section (deBoer *et al.*, 2015) is also shown a). An example R-matrix fit is shown using the code AZURE2 (Azuma *et al.*, 2010) where individual resonance contributions are indicated by dashed lines, external capture by dotted-dashed lines, and cross sections indicated by the solid lines.

TABLE IX  $S_{114}(0)$  as the sum of the different transitions.

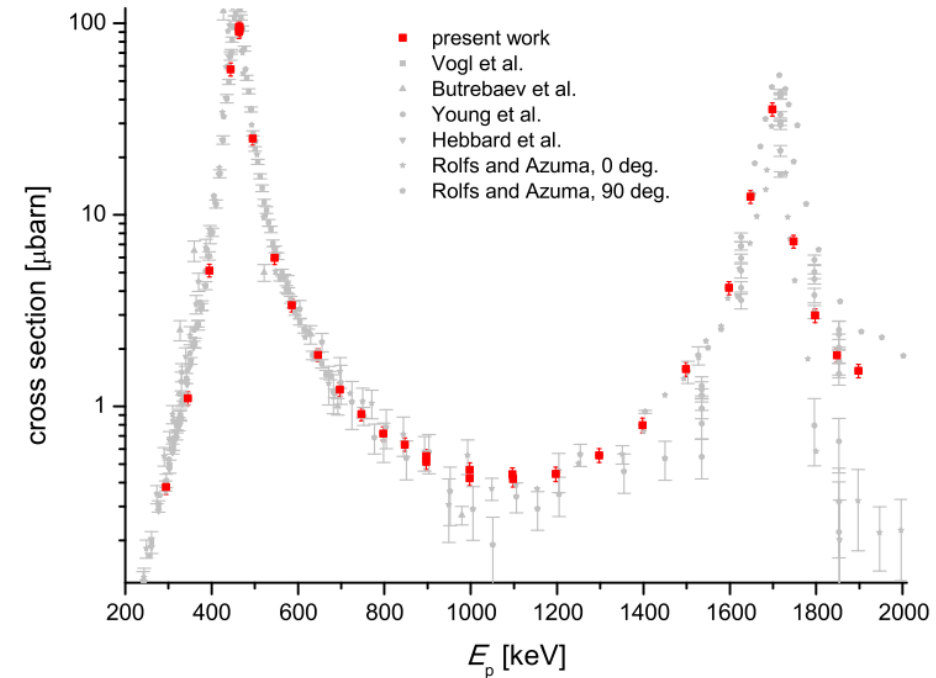
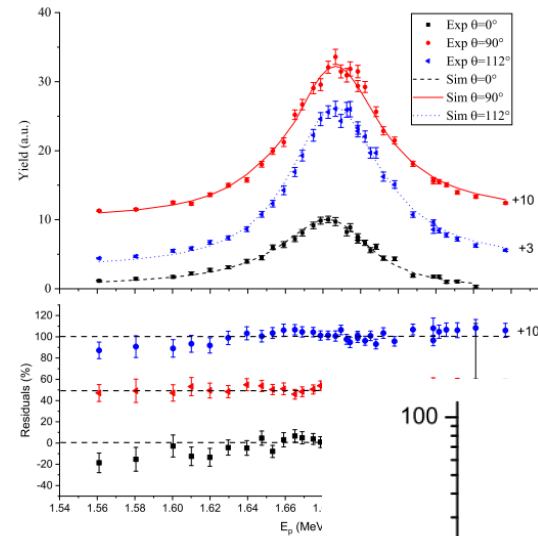
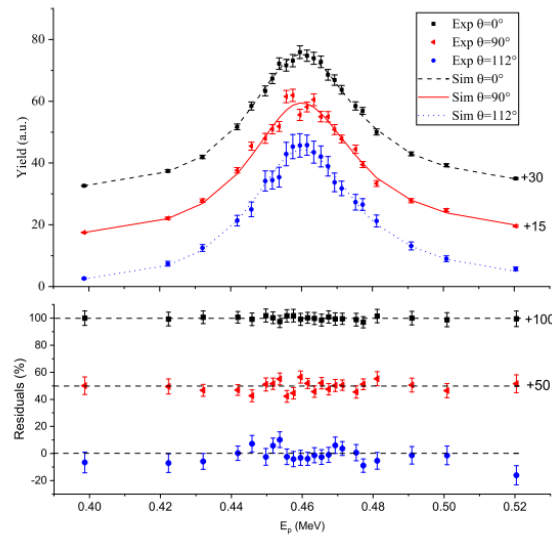
Transition	$S_{114}(0)$ (keV b)	$\Delta S_{114}(0)$	Reference
tr $\rightarrow$ 0	$0.30 \pm 0.11$	37%	Present
tr $\rightarrow$ 6.79	$1.17 \pm 0.03$	2.9%	Present
tr $\rightarrow$ 6.17	$0.13 \pm 0.05$	38%	SF II
tr $\rightarrow$ 5.18	$0.010 \pm 0.003$	30%	SF II
tr(5.24) $\rightarrow$ 0	$0.068 \pm 0.020$	30%	SF II
R-matrix sum	$1.68 \pm 0.13$	7.6%	
Additional syst. uncert.		3.5%	
Total	$1.68 \pm 0.14$	8.4%	

In addition, the new total capture cross section of Gyürky *et al.* (2022), performed using the activation technique over the energy range from 0.55 to 1.4 MeV, is larger than the sum of the partial R-matrix cross sections by  $\approx 25\%$ , a significant margin compared to the systematic uncertainties of the different data sets. However, it should be emphasized that for several of the transitions the only data available are those of Schröder *et al.* (1987), which often give only upper limits. For example, the capture to the 7.56 MeV level in this energy range may be significant.

B. Acharya, ..., T. Szücs, et al., Reviews of Modern Physics /SFIII compilation/



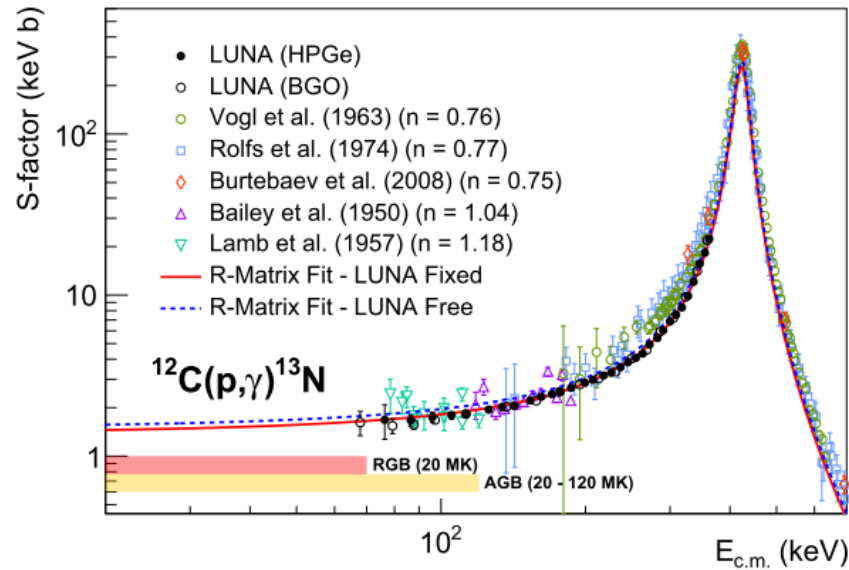
# ATOMKI hozzájárulás a közelmúltban: $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$ (itthon)



L. Csedreki, Gy. Gyürky, T. Szücs,  
Nucl. Phys. A **1037**, 122705 (2023)

Gy. Gyürky, L. Csedreki, T. Szücs, et al.,  
Eur. Phys. J. A **59**, 59 (2023)

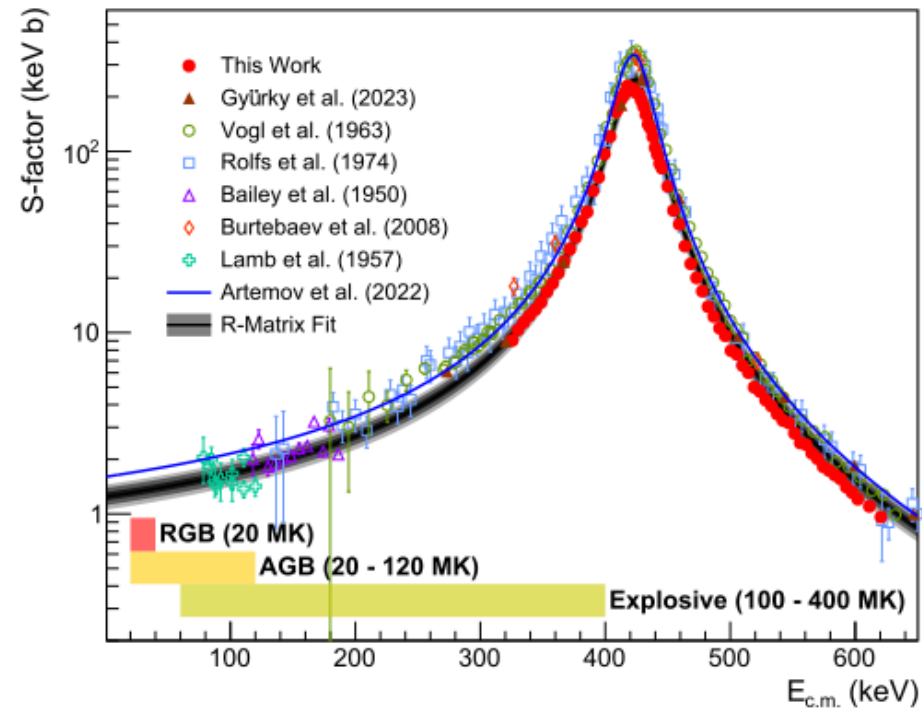
# ATOMKI hozzájárulás a közelmúltban: $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$ (külföldön)



LUNA collaboráció  
 Mély földalatti mérés (1400m)  
 LNGS, Olaszország  
 In-beam és aktivációs mérések

J. Skowronski, ..., T. Szücs, et al.,  
 Phys. Rev. Lett. **131**, 162701 (2023)

Földalatti labor (45m) + aktív árnyékolás  
 Drezda, Németország  
 In-beam gamma spektroszkópia



J. Skowronski, ..., T. Szücs, et al.,  
 Phys. Rev. C **107**, L062801 (2023)

## További tervek (külföldön):

## További reakciók tanulmányozása földalatti laborokban

- Alfa befogási reakciók
- Magasabbrendű égési fázisok reakciói (pl  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ )
- Neutron kibocsátási reakciók  $^{13}\text{C}(\alpha,n)$ ;  $^{22}\text{Ne}(\alpha,n)$
- A helyszínek miatt minden másnál alacsonyabb háttér
- In-beam gamma spektroszkópai vizsgálatok illetve részecskedetektálás
- Nagy áramú gyorsítók a detektálható reakcióráták eléréséhez

## További tervek (itthon):

### Protonbefogási reakciók további tanulmányozása inverz kinematikában

- Alacsonyabb nyaláb okozta háttér
- Mind aktivációs mind in-beam gamma spektroszkópai vizsgálatok
- Az Atomki Tandetron gyorsítója ideális a megcélzott energia tartományhoz
- A korábbiaktól nagyban eltérő szisztematikus bizonytalanságok
- Végső extrapoláció precizitásának számottevő növekedése, még egy rosszabb statisztikájú méréssel is!