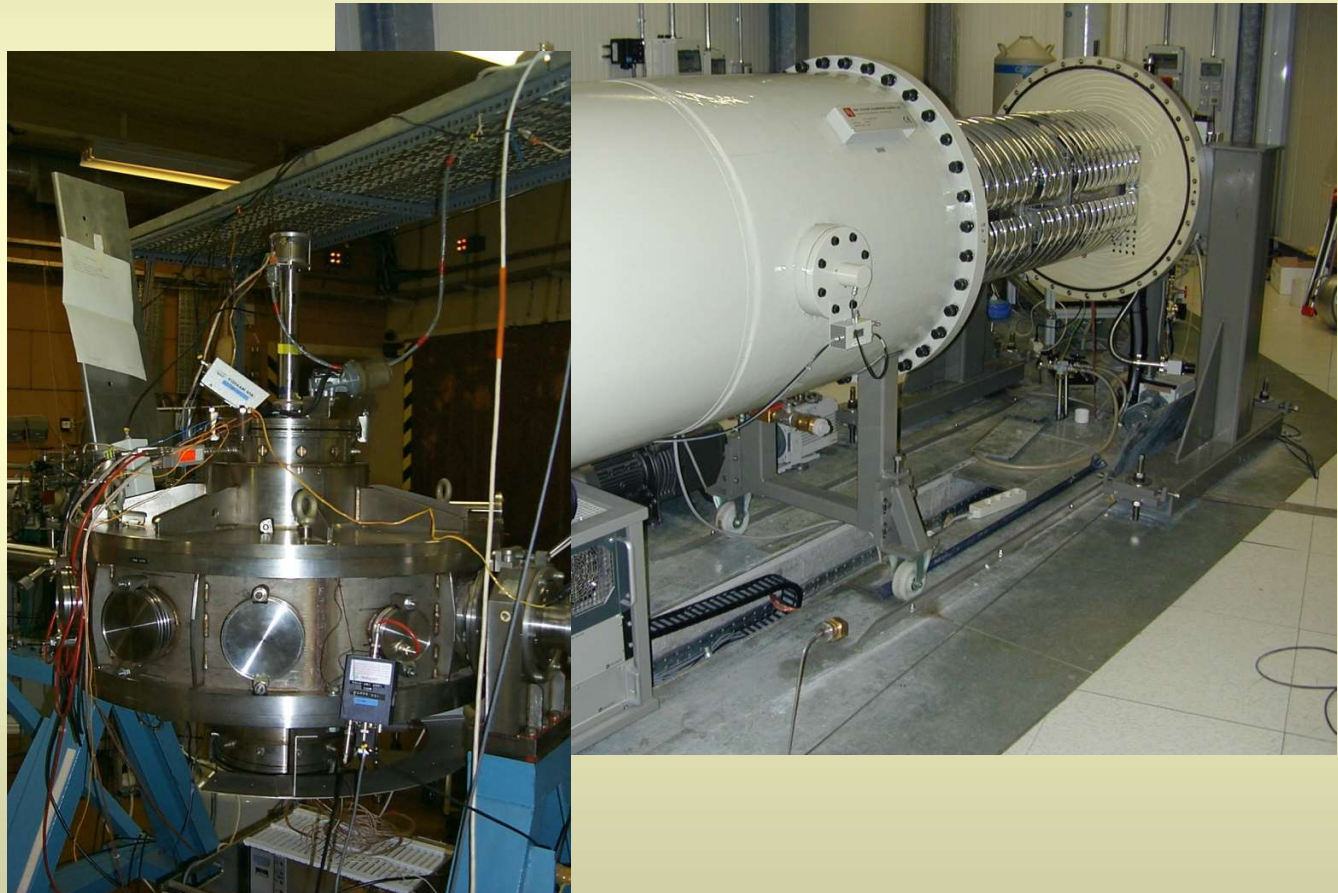
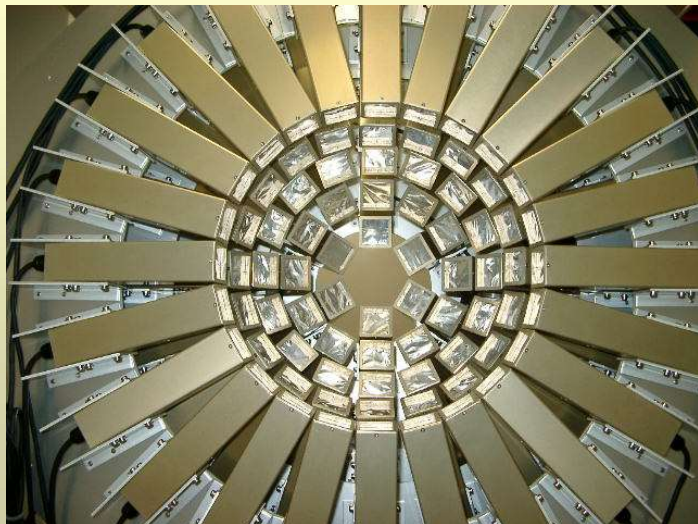


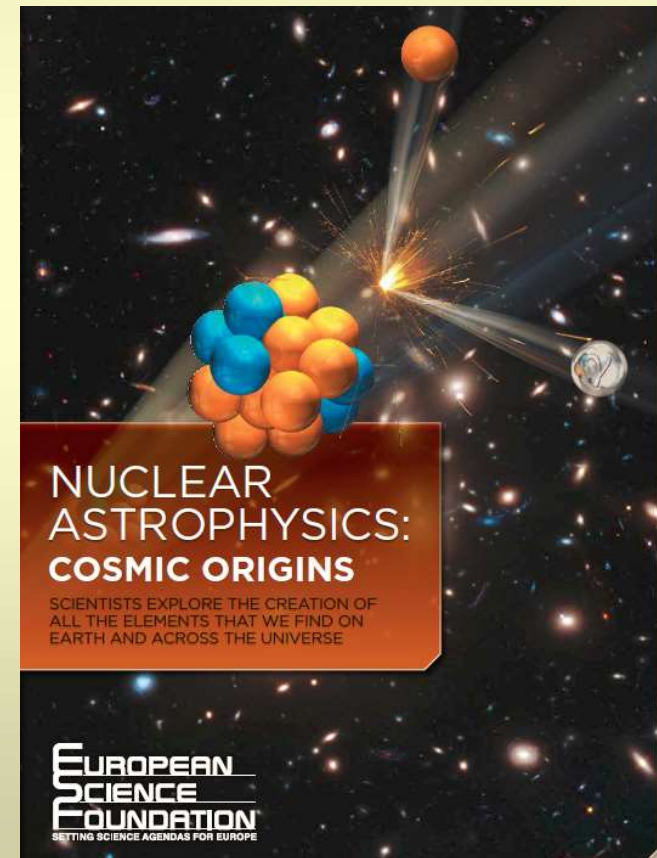
Az elemek keletkezése: magfizikai kihívások

Fülöp Zsolt
MTA Atomki
Debrecen



Nukleáris asztrofizika: célok

- Csillagászati észlelések értelmezése
- Anyag eredete, összetétele és fejlődése
- „Alkalmazott” magfizika:
 - Asztrofizikai témaválasztás domináns
 - Önálló magfizikai eredmények indukálása



Magfizikai kihívások

- Hőmérséklet – ütközési energia
- Időskála – radioaktív bomlások lefolyása
- Megkívánt pontosság

+ **nagy hőmérséklet:**

gerjesztett atommagok

+ **atomfizikai effektusok:**

elektronárnyékolás

+ **nagy sűrűségű környezet**

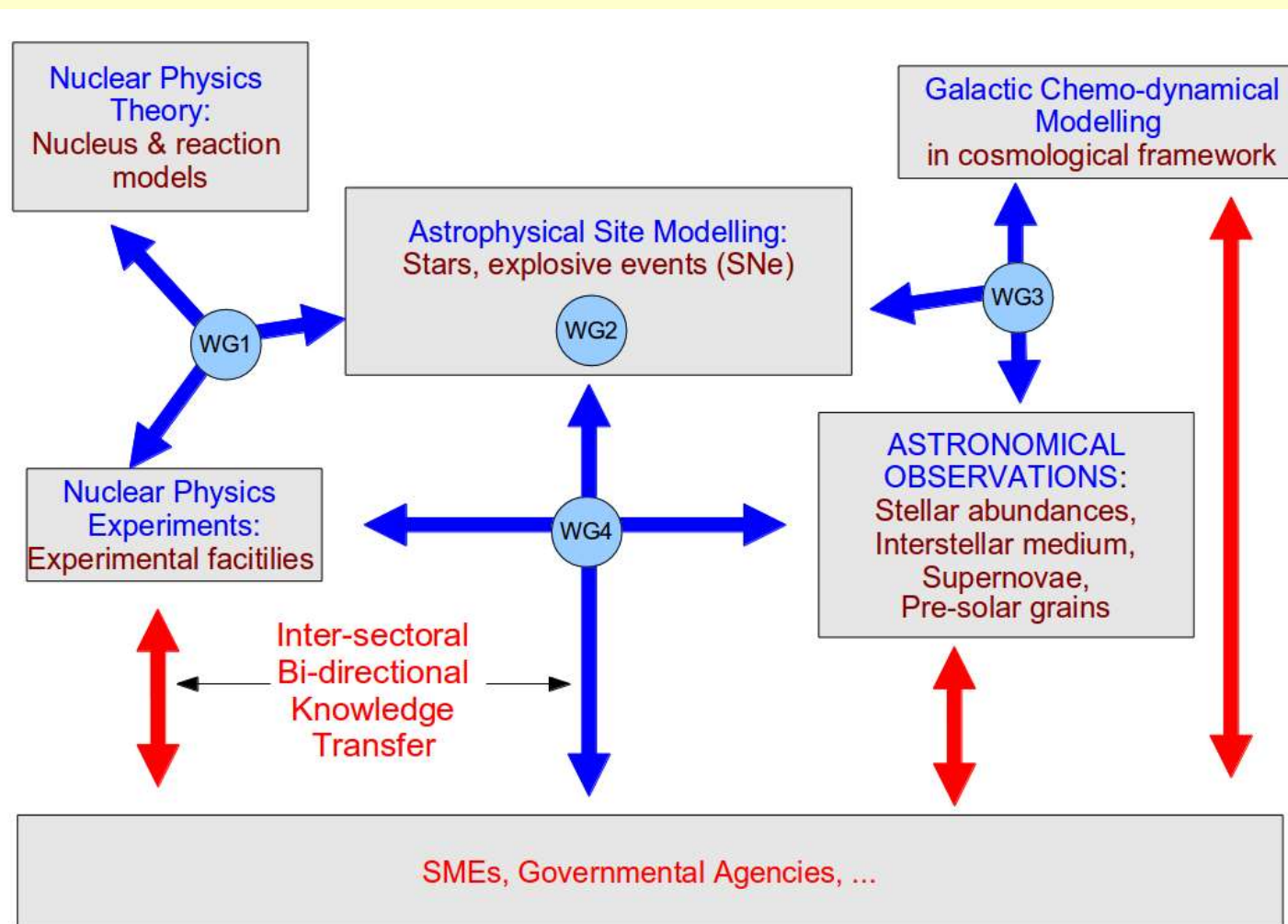
A kísérleti és elméleti magfizika
jelenleg nem tud kellő pontosságú
választ adni a kérdésekre

Nukleáris asztrofizika a „hétköznapiakban”

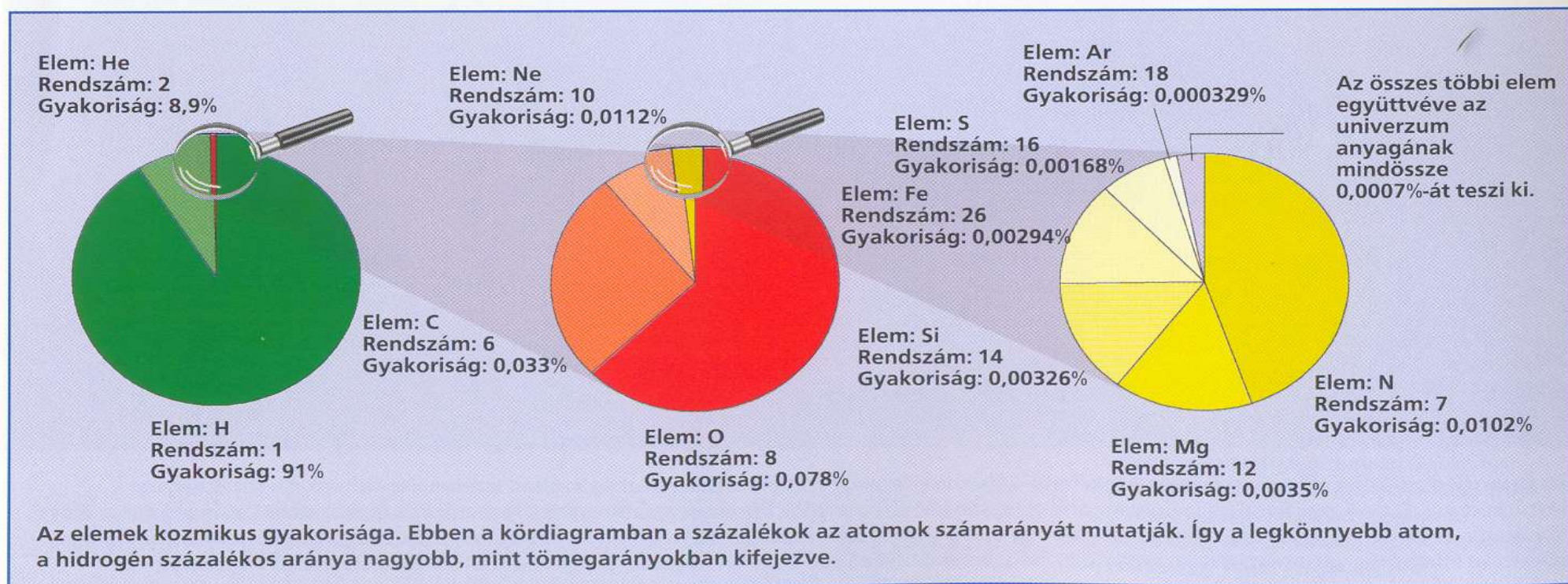
- Csillagok, mint erőművek
→ **fúzió**
- Csillagok, mint elemátalakítók
→ **radioaktív hulladékok transzmutációja**

- Minden magfizikai nagyberendezés egyik célja nukleáris asztrofizikai problémák megoldása
- A magfizika terveiben (Long Range Plan, White Paper) a nukleáris asztrofizika vezető szerepet játszik

Magfizika + asztrofizika + kitekintés

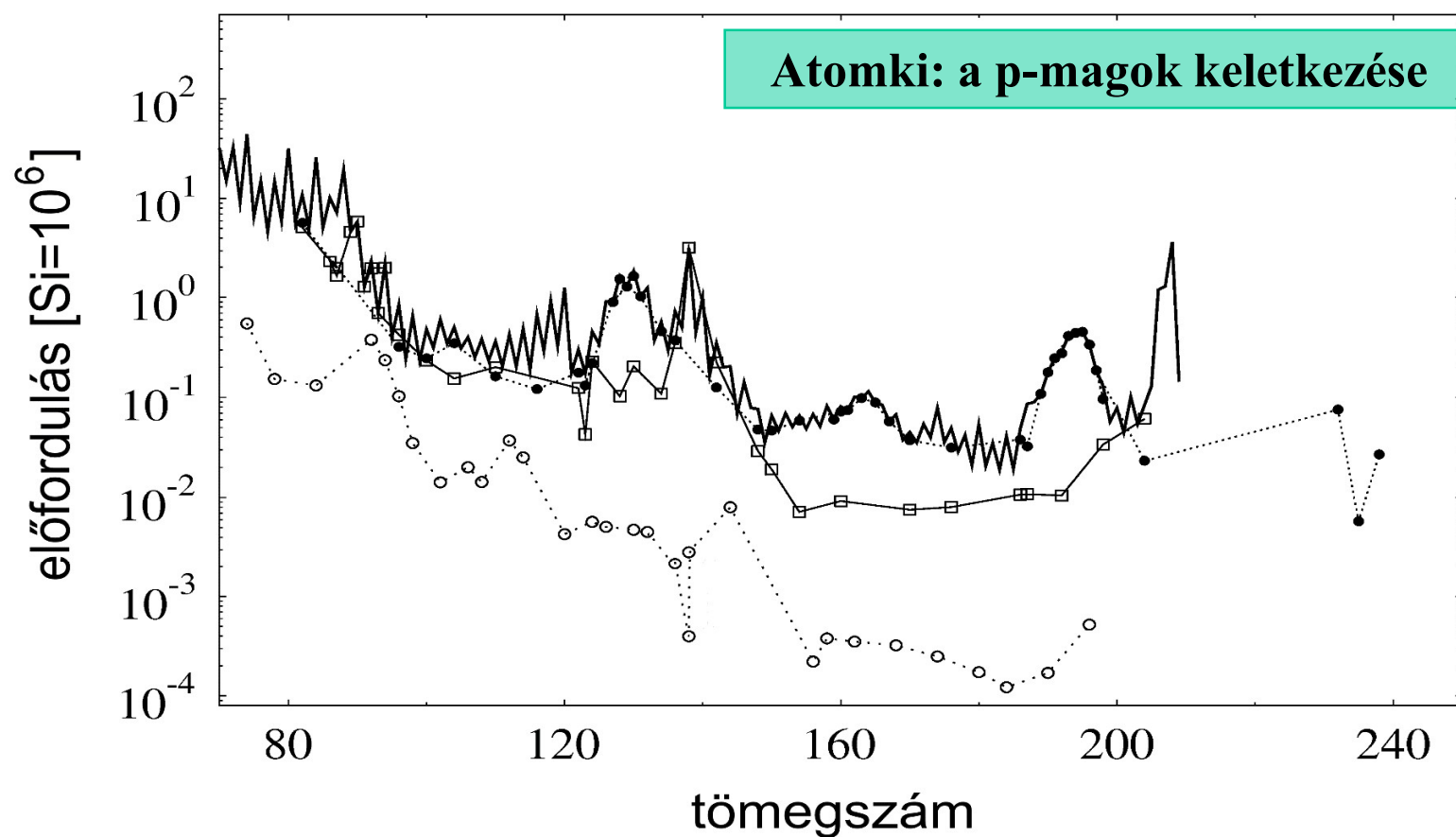


Az elemek gyakorisága



Izotópok fontossága!

Nehéz izotópok eloszlása



Molibdén izotópok keveredése



								
Mo92	Mo93 4.0E+3 y 5/2+ *	Mo94	Mo95	Mo96	Mo97	Mo98	Mo99 65.94 h 1/2+	Mo100 1.2E19 y 0+
0+		0+	5/2+	0+	5/2+	0+	1/2+	0+
14.84	EC	9.25	15.92	16.68	9.55	24.13	β ⁻	ββ ⁻ 9.63
p-folyamat			s-folyamat		r-folyamat			

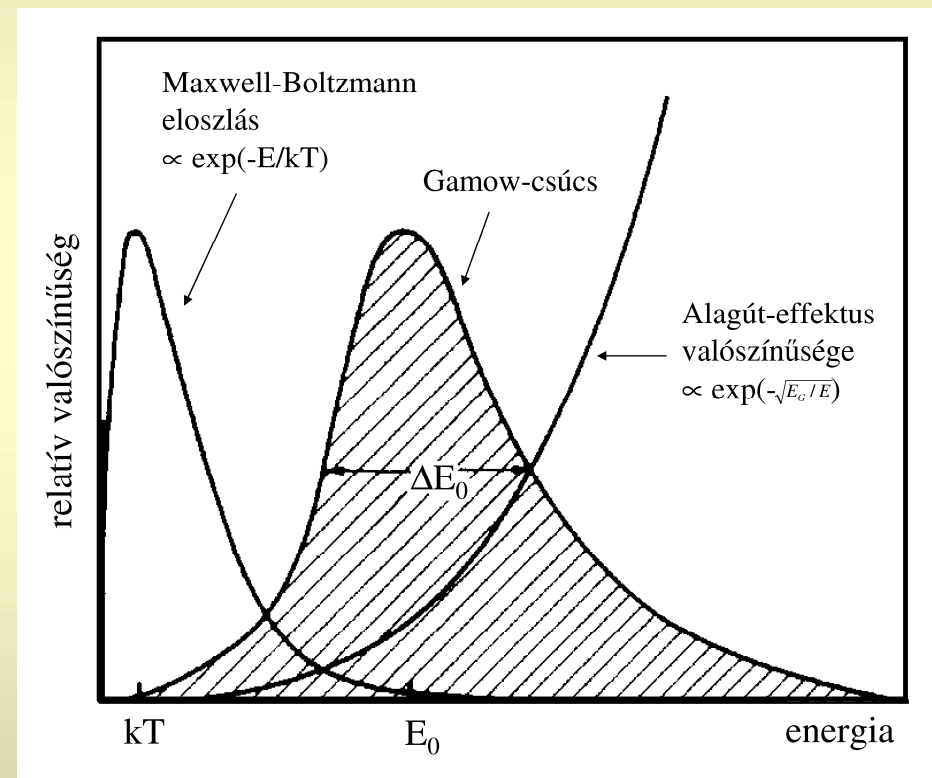
Csillaghőmérséklet-reakciósebesség

- **Sztatikus csillagok:**

- Alacsony energia
- Véges számú reakció
- Kis hatáskeresztmetszet (alagúteffektus)
- Extrapoláció szükséges (S-faktor)

- **Robbanásos folyamatok:**

- Magasabb energia
- Nagy hatáskeresztmetszet
- Bonyolult reakcióhálózat
- Egzotikus atommagok



A nukleoszintézisben fontos töltött részecske-reakciók mérése rendkívül nehéz

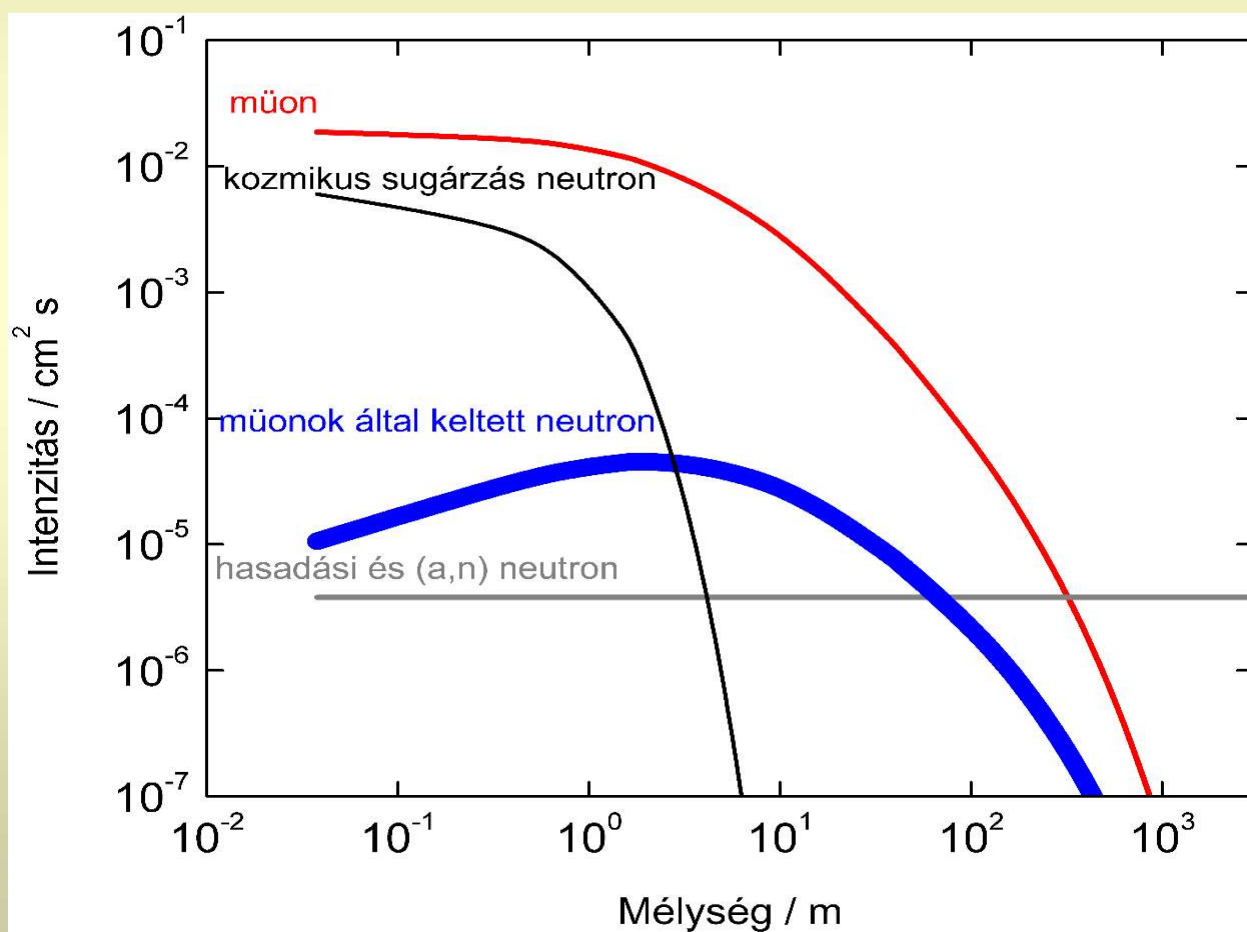
Mérési idők csillaghőmérsékleten

Környezet	Reakció	E_G [keV]	$\sim \sigma$ [barn]	1000 beütéshez szükséges idő [év]
Nap (16 MK)	$^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$	23	10^{-17}	1 millió
	$^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$	28	10^{-19}	100 millió
AGB csillagok (80 MK)	$^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$	81	10^{-12}	10
Ősrobbanásbeli atommag keletkezés (300 MK)	$^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$	160	10^{-9}	0,01
	$^2\text{H}(\alpha, \gamma)^6\text{Li}$	96	10^{-11}	1

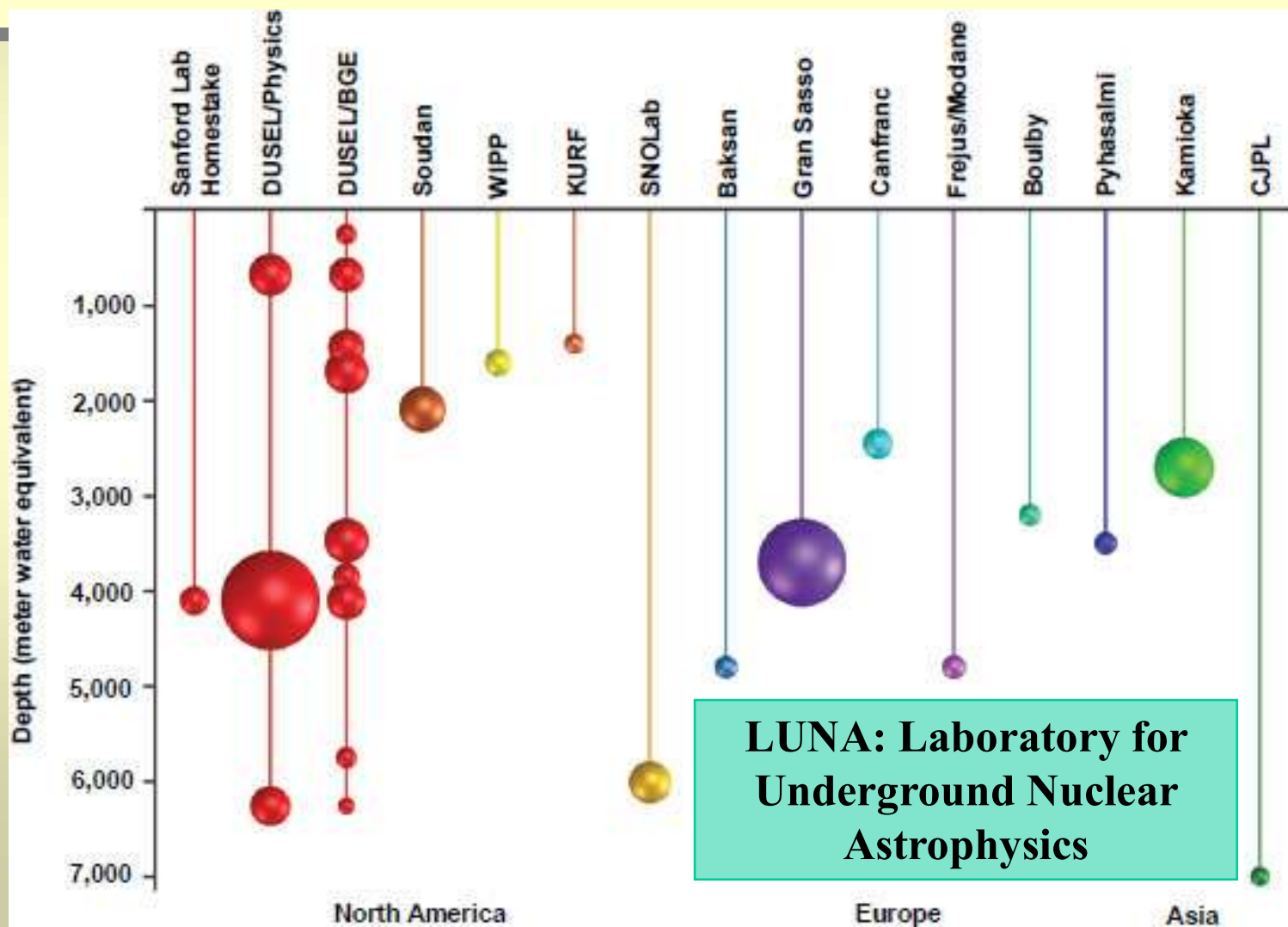
Háttér jelentősége

Háttér (esemény / nap)	~3% pontossághoz szükséges idő (napok)	Háttér nélküli méréshez képest mennyi többletidő szükséges?
0	100	0
0.1	102	2%
0.5	110	10%
1	120	20%
5	200	2
10	300	3
20	500	5
50	1100	11
100	2100	21
1000	20100	200
10000	200100	2000

Kozmikus háttér



Földalatti laboratóriumok



Gran Sasso: erős passzív árnyékolás

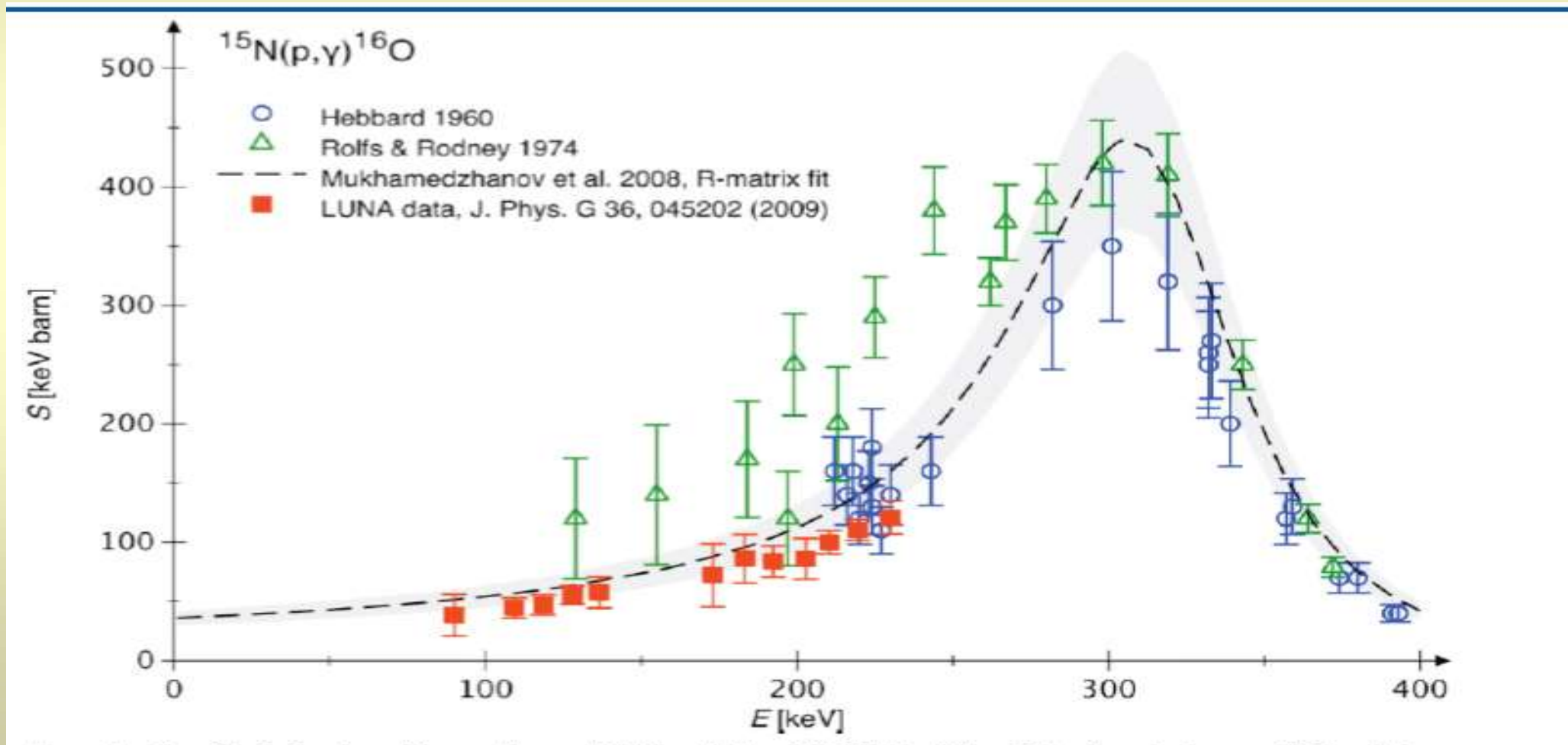


Földalatti labor tipikus kutatásai

- Egzotikus bomlások
- Neutrínódetektálás
- Sötét anyag keresése

+ gyorsítófizika

Mennyit ér a jó háttér?

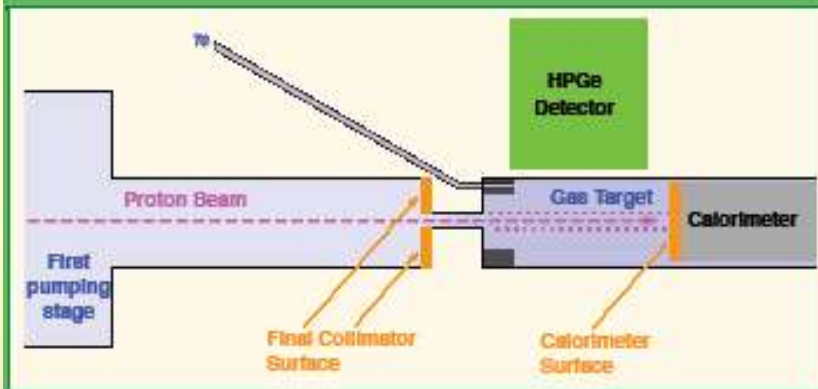


Háttérvizsgálatok fontossága részecskegyorsító környezetben

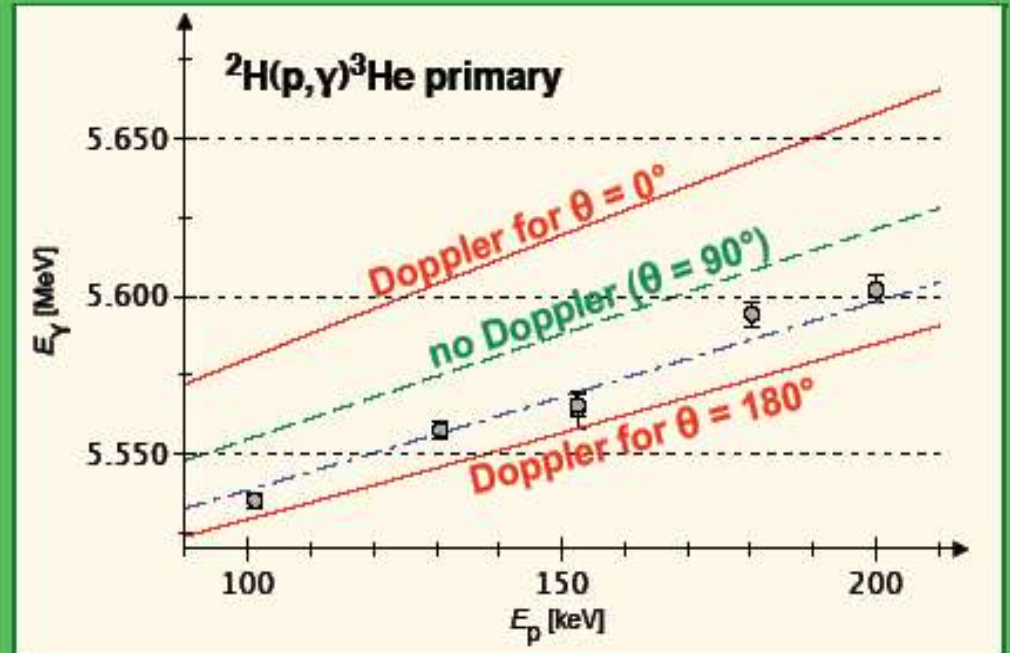
Cél: a gyorsítók által keltett ritka események detektálása

- Study of proton induced gamma background in metallic backings
- Proton induced gamma background in gas target systems
- ${}^7\text{Be}$ decay detection for the ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ reaction rate
- Investigation of ${}^4\text{He}$ beam induced gamma background underground
- Study of the performance of a segmented clover/BGO anti-Compton system at LNGS

Nyalábindukált háttér vizsgálata Doppler eltolódással



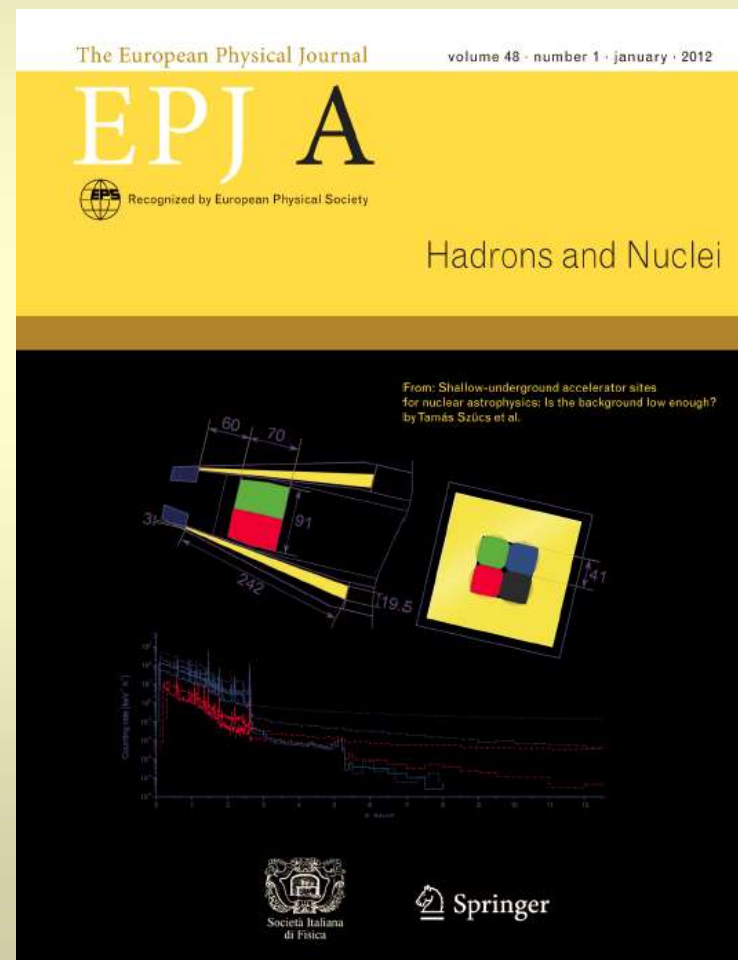
$$E_{\gamma} = Q + \frac{M}{M+m} E_p - E_x - \Delta E_{\text{Recoil}} - \Delta E_{\text{Doppler}}$$



Aktív és passzív árnyékolás

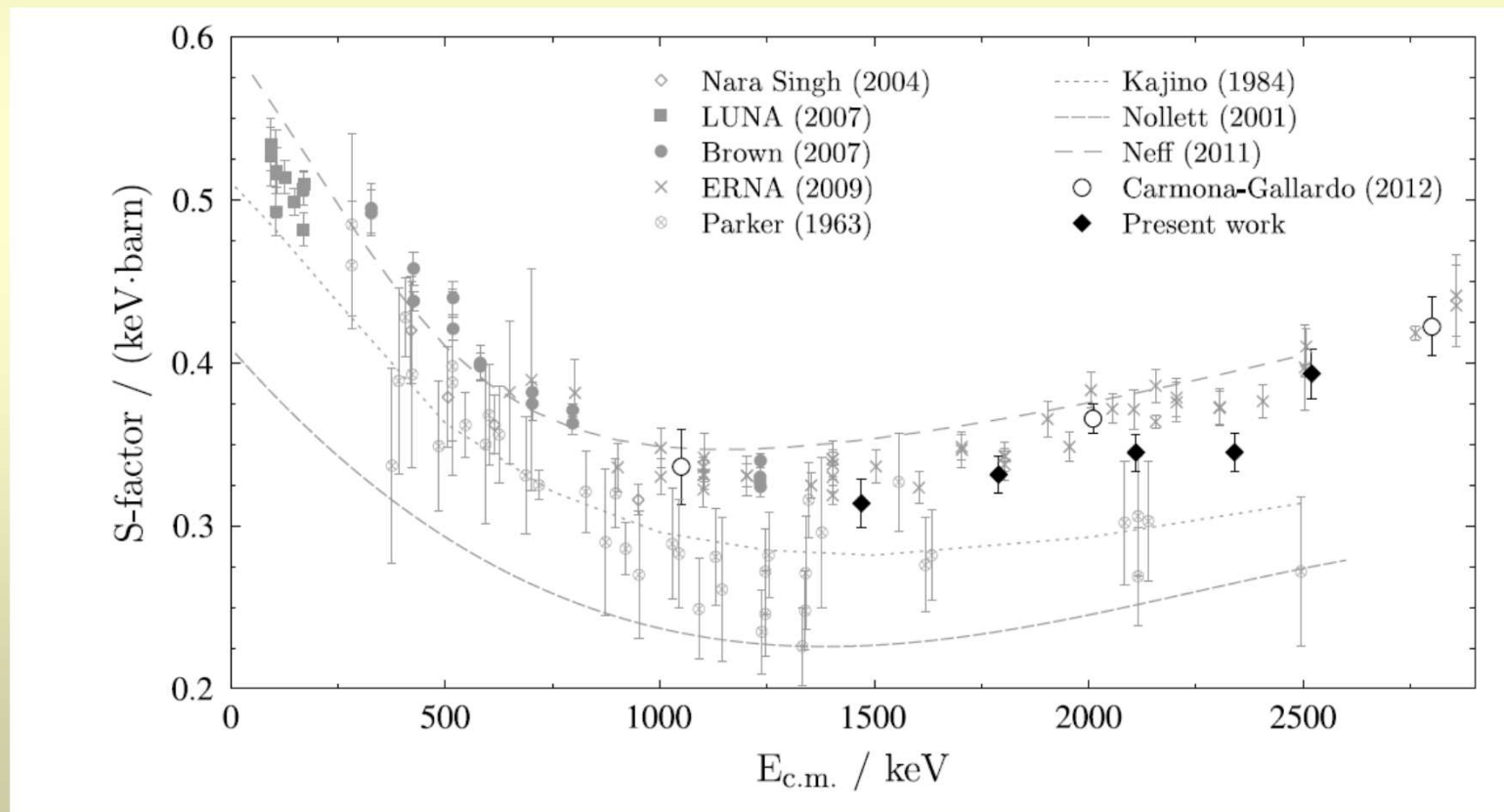
mérések az Atomki clover + BGO detektorával

- mély földalatti labor
 - aktív árnyékolás nem hatásos
- földfelszín
 - aktív árnyékolás nem elegendő
- sekély mélységű labor
 - aktív + passzív árnyékolás kombinációja



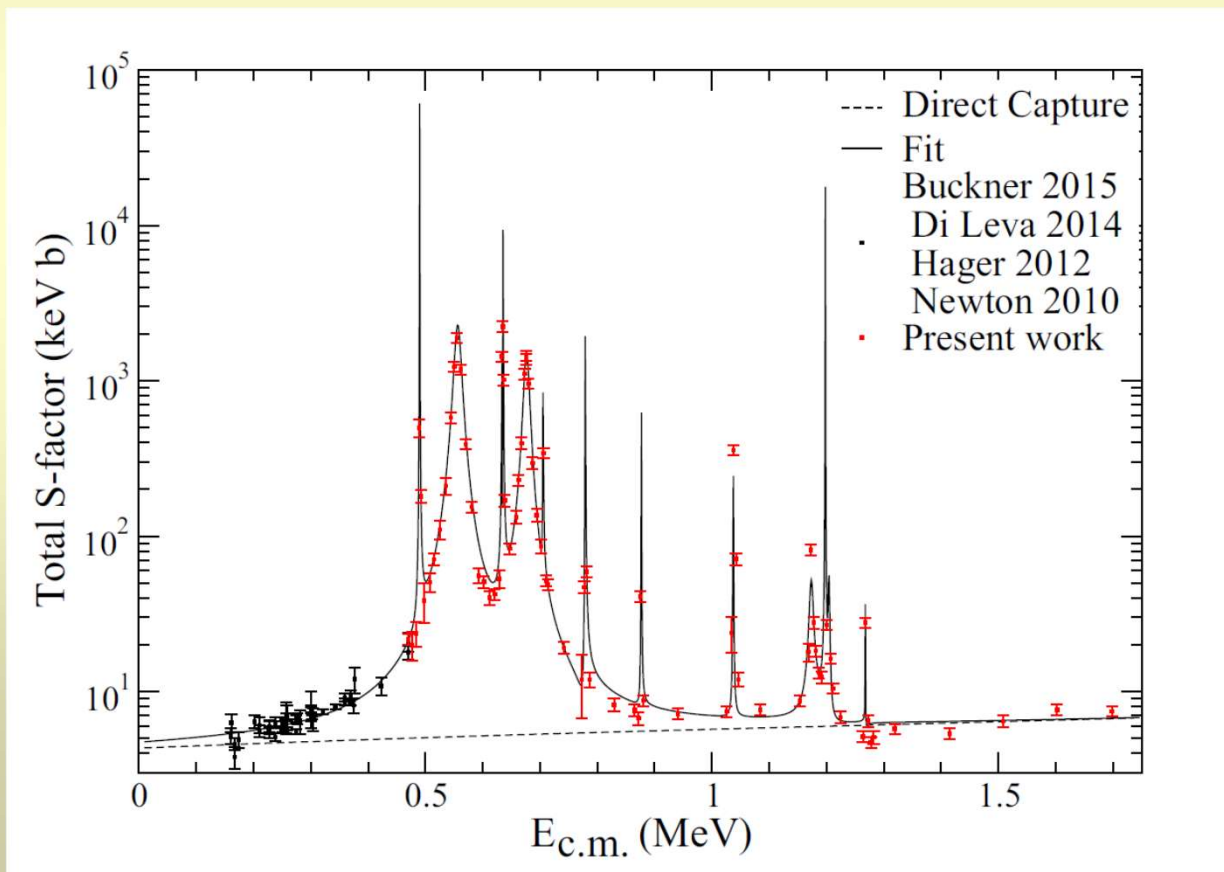
LUNA + ATOMKI eredmények 1

- $^3\text{He}(\alpha, \gamma)$, pp-lánc és BBN



LUNA + ATOMKI eredmények 2

- $^{17}\text{O}(p,\gamma)$, Nóva nukleoszintézis



A Napban lejátszódó reakciók hibamérlege

1998

Reaction	$S(0)$ (keV b)
$^1\text{H}(p, e^+ \nu_e)^2\text{H}$	$4.00(1 \pm 0.007^{+0.020}_{-0.011}) \times 10^{-22}$
$^1\text{H}(pe^-, \nu_e)^2\text{H}$	Eq. (19)
$^3\text{He}(^3\text{He}, 2p)^4\text{He}$	$(5.4 \pm 0.4)^a \times 10^{-3}$
$^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$	0.53 ± 0.05
$^3\text{He}(p, e^+ \nu_e)^4\text{He}$	2.3×10^{-20}
$^7\text{Be}(e^-, \nu_e)^7\text{Li}$	Eq. (26)
$^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$	$0.019^{+0.004}_{-0.002}$
$^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$	$3.5^{+0.4}_{-1.6}$

Adelberger et al, Rev.Mod.Phys.

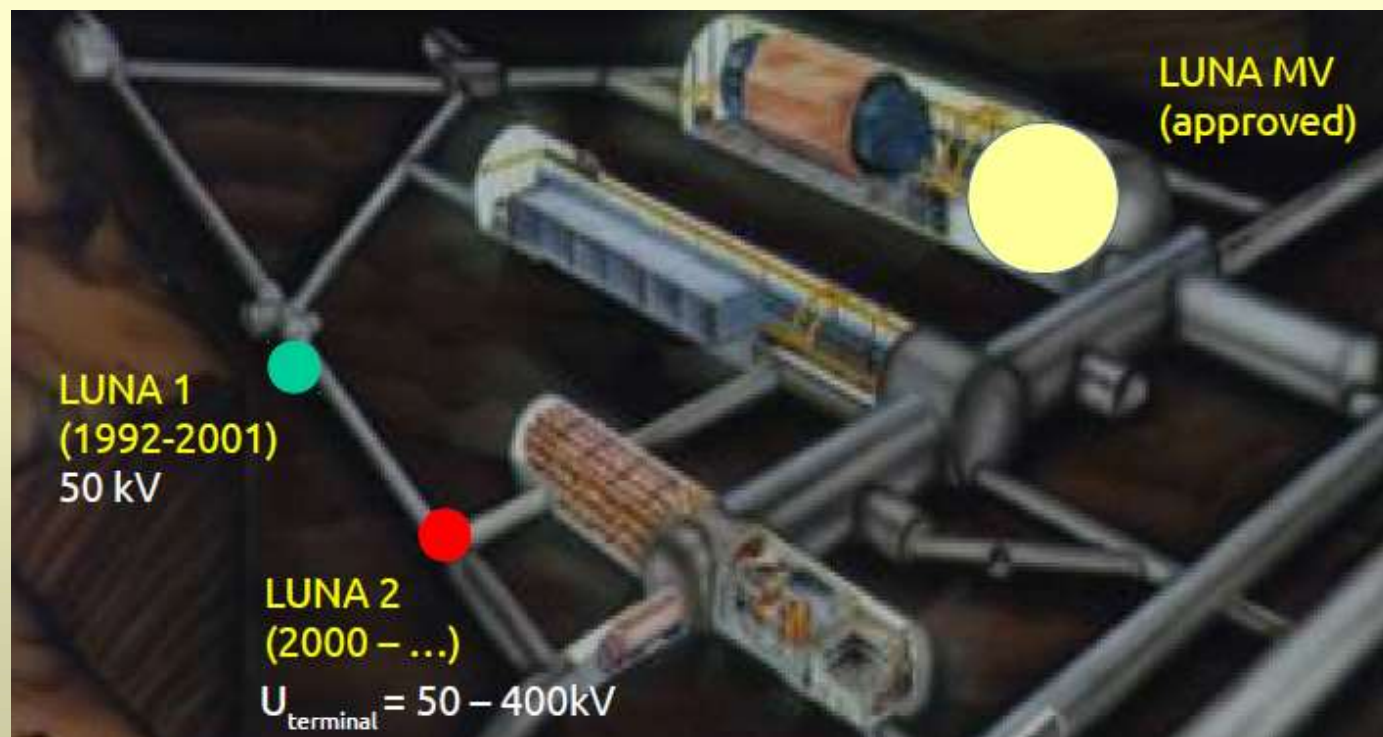
2011

Reaction	Section	$S(0)$ (keV b)
$p(p, e^+ \nu_e)d$	III	$(4.01 \pm 0.04) \times 10^{-22}$
$d(p, \gamma)^3\text{He}$	IV	$(2.14^{+0.17}_{-0.16}) \times 10^{-4}$
$^3\text{He}(^3\text{He}, 2p)^4\text{He}$	V	$(5.21 \pm 0.27) \times 10^3$
$^3\text{He}(^4\text{He}, \gamma)^7\text{Be}$	VI	0.56 ± 0.03
$^3\text{He}(p, e^+ \nu_e)^4\text{He}$	VII	$(8.6 \pm 2.6) \times 10^{-20}$
$^7\text{Be}(e^-, \nu_e)^7\text{Li}$	VIII	See Eq. (40)
$p(pe^-, \nu_e)d$	VIII	See Eq. (46)
$^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$	IX	$(2.08 \pm 0.16) \times 10^{-2} \text{ e}$
$^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$	XI.A	1.66 ± 0.12

9.5% → 5.3% hiba

Új berendezés: 2018 - LUNA

- Cél: magasabb energia + nehezebb ion
- 0.35-3.5 MV elektrosztatikus gyorsító
- H, He, C
- Nagy áram
- n-árnyékolás
- $^{13}\text{C}(\alpha, n)$
- $^{14}\text{N}(p, \gamma)$
- $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)$



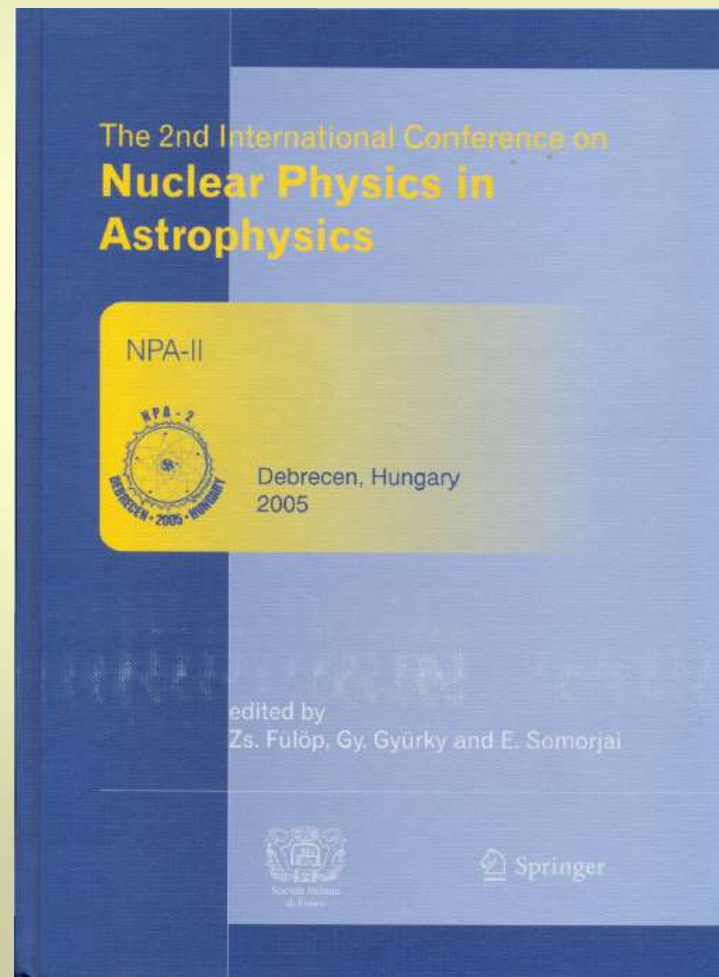
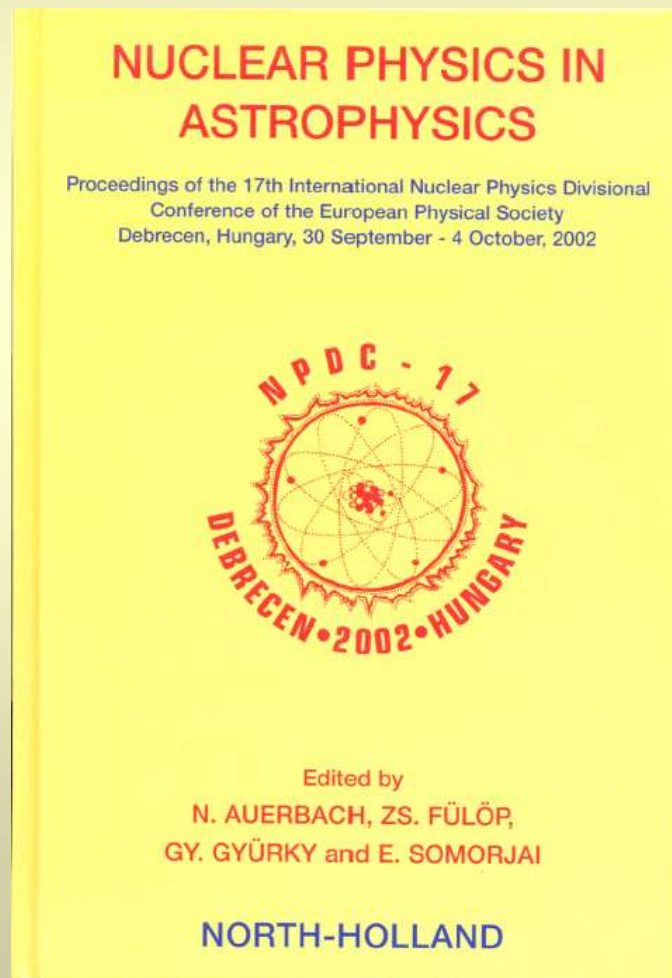
Új berendezés: 2015 – ATOMKI

- Cél: magasabb energia + nehezebb ion
- 2 MV tandem gyorsító
- H, He, HI
- Nagy áram
- $^{14}\text{N}(p, \gamma)$
- $^{17}\text{O}(p, \gamma)$



- H2020 TWINNING (LNGS+ETHZ)
- H2020 TNA

Nuclear Physics in Astrophysics



NPA-1. Debrecen

NPA-2. Debrecen

NPA-3. Drezda

NPA-4. Frascati

NPA-5. Eilat

NPA-6. Lisszabon

NPA-7. York

NPA-8. Catania

NPA-9. Frankfurt

Nuclei in the Cosmos



XVI / 2020 / Chengdu (China)
XV / 2018 / LNGS (I)
XIV / 2016 / Niigata (J)
XIII / 2014 / Debrecen (H)
XII / 2012 / Cairns (AU)
XI / 2010 / Heidelberg (D)
X / 2008 / Michigan (USA)
IX / 2006 / CERN (CH/F)
VIII / 2004 / Vancouver (CAN)
VII / 2002 / Fuji-Yoshida (J)
VI / 2000 / Aarhus (DK)
V / 1998 / Volos, (GR)
IV / 1996 / Notre Dame, (US)
III / 1994 / Gran Sasso, (I)
II / 1992 / Karlsruhe, (D)
I / 1990 / Baden/Vienna, (A)

Nuclear Physics in Stellar Explosions Atomki, Debrecen, 2018 Sep.12-14

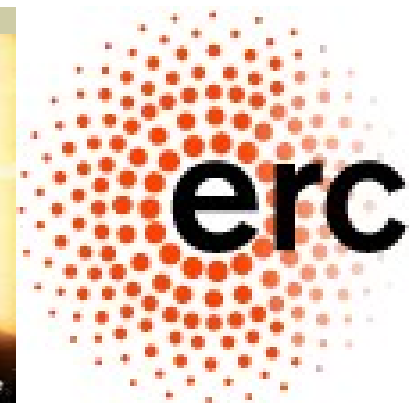
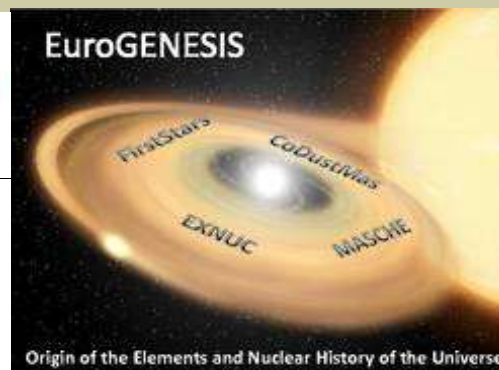
An ENSAR2-NUSPRASEN supported event

Topics:

- Evidences of explosive nucleosynthesis
- Nuclear theory in astrophysics
- Modeling of the nucleosynthesis processes
- Recent r-, rp-, and γ -process related experiments
- New facilities, detectors and experimental approaches



<http://atomki.hu/astro2018/>



ATOMKI nukleáris asztrofizika:

Csedreki László
Elekes Zoltán
Fülöp Zsolt
Gyürky György
Halász Zoltán
Kiss Gábor
Somorjai Endre
Szegedi Norbert
Szűcs Tamás

Vendégkutatók (min. 6 hónap):

Daniel Galaviz (DFG/SFB)
Caner Yalcin (ERASMUS/TUBITAK)
Rastrepina Ganna (VISEGRÁD)
Peter Mohr (ESF + OTKA)
André Ornelas (ERASMUS)
Zeren Korkulu (ERASMUS)
Cristina Bordeanu (MC/OTKA)
Thomas Rauscher (MTA vendégkutató)
Kai Zuber (MTA vendégkutató)
Giovanni Ciani (LUNA posztdok)

Összefoglalás

- A csillagokban lejátszódó magfizikai folyamatokat nem ismerjük kellő pontossággal
- A csillagászati észlelések rohamosan fejlődnek
- Elemek helyett izotópok a meghatározók
- A részecskegyorsítók kulcsszerepet játszanak ezekben a vizsgálatokban
- Az Atomki nukleáris asztrofizikai eredményei jelentősen hozzájárulnak a nukleoszintézis megértéséhez