

A szupernehéz atommagokban sok proton van, következőképpen erős a taszító Coulomb-kölcsönhatás. Extrem körülmények között alaposabban megismerhetjük a magerők sajátosságait és teljesen új jelenségek is felbukkanhatnak.

A folyadékcséppmodellre alapozott számítások szerint az atommagok stabilitása $Z = 100-106$ rendszámok körül megszűnik, mivel a Coulomb-taszítás felülmúlja a nukleonokat összetartó, rövid hatótávolságú erőket. Extra stabilitás származhat azonban hélezáródások miatt. Nyitott kérdés, hogy az atommagok milyen rend- és neutronszámokig lehetnek kötött állapotban.

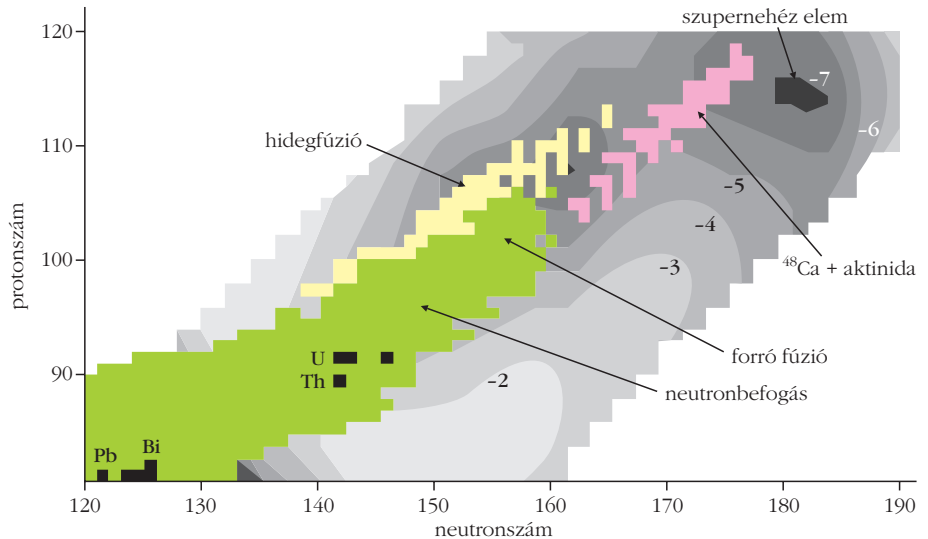
Mindezek indokoltá teszik a szupernehéz atommagokhoz vezető reakciók tanulmányozását és a nehéz atommagok magspektroszkópiai (kísérleti és elméleti) vizsgálatát.

Új elemek szintéziséhez alapvető érdekek fűződnek a kémia oldaláról is. Ha nagy mennyiségben sikerül előállítani szupernehéz elemeket, gyakorlati alkalmazások is lehetnek.

A szupernehéz atommagok előállítása

A ${}_{93}\text{Np}$ -tól a ${}_{98}\text{Cf}$ -ig terjedő transzurán elemek, valamint a ${}_{101}\text{Md}$ felfedezése (n, γ), illetve (α, n) reakciók segítségével történt. A vizsgálatokhoz nehéz-aktinida-céltárgyakat használtak, amelyek többségét reaktorokban, intenzív neutronbesugárással állították elő. Az ${}_{99}\text{Es}$ és ${}_{100}\text{Fm}$ elemeket először *termonukleáris robbanás maradványaiban* sikerült azonosítani.

A további szupernehéz elemek előállításához már nehézion-reakciókat kellett felhasználni. A ${}_{102}\text{No}$ -tól a ${}_{106}\text{Sg}$ -ig terjedő öt transzurán elemet „forró” fúziós



1. ábra. A nehéz atommagok előállításához vezető reakciók a rendszám és a neutronszám függvényében. A negatív számok a héjkorrekciók amplitúdóit jelzik a mag potenciális energiájának folyadékcsépp modell alapján történő számításánál. Oganessian [1] alapján.

reakcióval szintetizálták. Ezekben az azonosított atommag az erősen gerjesztett közbelső atommagból több neutron kibocsátása után állt elő, például a ${}^{163}\text{Sg}$ a ${}^{249}\text{Cf}$ (${}^{18}\text{O}, 4n$) ${}^{263}\text{Sg}$ reakcióból.

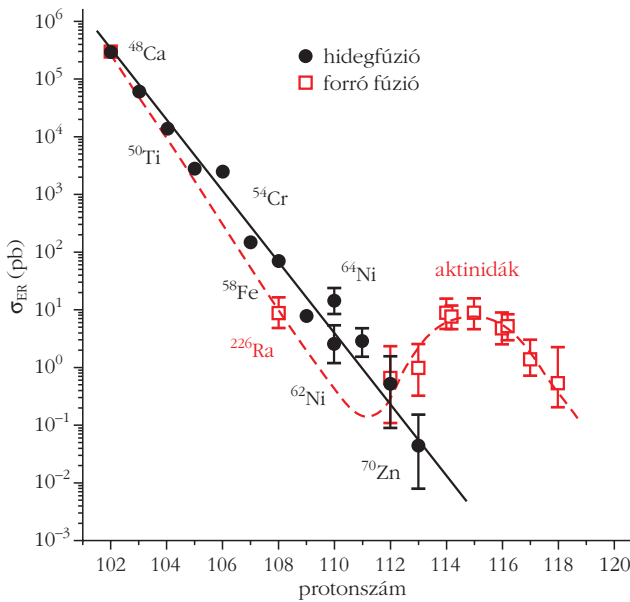
Mivel az erősen gerjesztett közbelső atommagban a hasadás valószínűsége nagy, a további elemek előállításához célszerű volt *hidegfúziós reakciókat* használni. Ezeknél zárt (vagy közel zárt) héjakkal rendelkező céltárgymagokból indultak ki (például a ${}^{126}\text{Pb}$, ${}^{126}\text{Bi}$, ${}^{152}\text{Bk}$ atommagokból), mivel így a nehézion-reakciók viszonylag kis gerjesztési energiájú közbelső atommagokhoz vezetnek. Neutronok kibocsátása után a végtermék α -emisszióval bomlik és az α -bomláslánc lehetőséget ad a termék azonosítására. Így sikerült azonosítani hat új elemet a ${}_{107}\text{Bh}$ -tól a ${}_{112}\text{Cn}$ -ig.

Japánban, a Tokió melletti RIKEN radioaktívizotópgyárban a ${}^{70}\text{Zn} + {}^{209}\text{Bi} \rightarrow {}^{278}113 + 1n$ hidegfúziós reakcióval sikerült a $Z = 113$ -as (Nh, nihonium) elem 278 tömegszámú izotópját előállítani. Az α -bomláslánc az ismert Bh- és Db-izotópokhoz vezetett.

A szupernehéz elemek előállításában áttörő sikert eredményezett a ${}^{48}\text{Ca}$ + aktinida céltárgy *forrófúziós reakció* használata. A ${}^{48}\text{Ca}$ erősen neutrontöbbletes és kétszeresen mágikus atommag, amelyben mind a protonoknál, mind a neutronoknál hélezáródás lép fel. Ezzel a ${}_{90}\text{Th} - {}_{98}\text{Cf}$ elemek hosszú felezési idejű izotópjait bombázva sikerült előállítani a $Z = 114$ (Fl), $Z = 115$ (Mc), $Z = 116$ (Lv), $Z = 117$ (Ts) és $Z = 118$ (Og) elemek különböző izotópjait. A felhasznált céltárgyak, például a ${}^{242}\text{Pu}$, ${}^{244}\text{Pu}$, ${}^{243}\text{Am}$, ${}^{245}\text{Cm}$, ${}^{248}\text{Cm}$, ${}^{249}\text{Cf}$ és ${}^{249}\text{Bk}$ izotópok világviszonylatban csak behatárolt mennyiségben, speciális technikákkal és kevés helyen állíthatók elő.



Fényes Tibor az MTA Eötvös-kosorús doktora, az Atomki professzor emeritusa. Hat évig dolgozott az Egyesített Atommagkutató Intézetben Dubnában és közel fél évig a Kentucky Egyetem tandem gyorsító laboratóriumában. Fő kutatási területei az atommag- és részecskefizika. Több mint 130 tudományos publikáció és 10 könyv szerzője, illetve társszerzője.



2. ábra. Maximális hatáskeresztmetszetek egy neutron párolgására hidegfúziós reakciónál, ^{208}Pb és ^{209}Bi céltárgyakon, különböző bombázó részecskéknél (az ábrán jelezve). Az ábrán a ^{48}Ca -mal aktinida céltárgyon létrehozott fúziós reakció hatáskeresztmetszetei is fel vannak tüntetve a 3 és 4 neutroncsatornákra az összetevő mag rendszáma függvényében.

Az 1. ábra áttekintést ad a nehéz atommagok előállításához vezető magreakciókról a Z rendszám- és az N neutronszámsíkban.

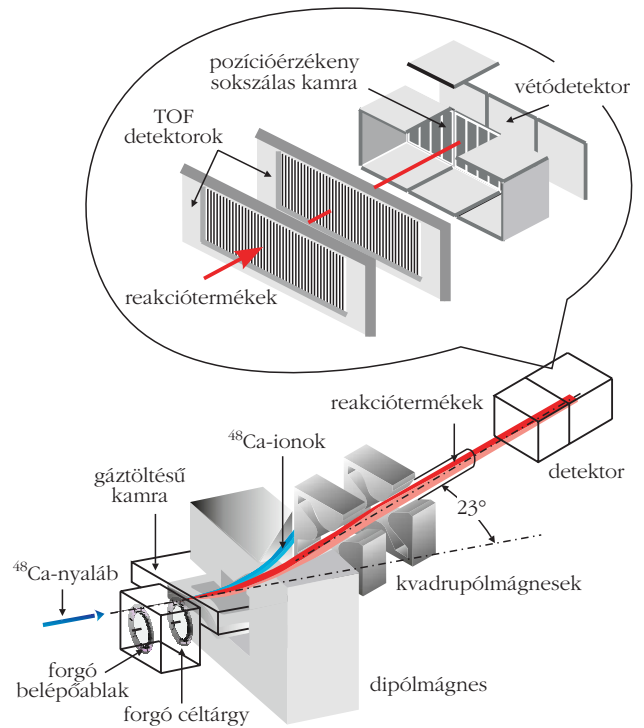
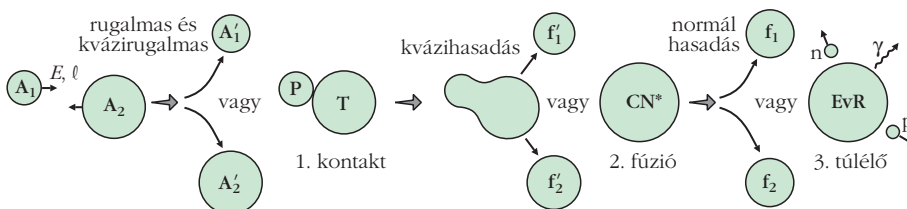
A 2. ábra tájékoztatást nyújt a hideg- és forrófúziós reakciók hatáskeresztmetszeteiről. Az előállítási hatáskeresztmetszetek a 114, 116 rendszámú elemekre pb nagyságrendben vannak; a 35–50 MeV-re gerjesztett atommagokból 3–5 neutron lép ki.

Míg a $^{249}\text{Bk}_{152} + ^{22}\text{Ne}_{12} \rightarrow ^{267}\text{Bh}_{160}$ hidegfúziós reakciónál elért hozam 2 atom/óra volt, a $^{48}\text{Ca}_{28} + ^{255}\text{Pu}_{150} \rightarrow ^{288,289}\text{Fl}_{114}$ reakciónál egy nagyságrenddel kevesebb, csak 5 atom/nap hozamot értek el.

A 3. ábrán a nehézion-fúziós reakciók folyamatai láthatók. Az ütközés első fázisában rugalmas és kvázirugalmas vagy kontakt ütközés; a másodikban kvázihasadás vagy összeolvadás (összetevő atommag) lép fel. A harmadik fázisban normál hasadás vagy párolgás után kialakul a maradék atommag (EvR, párolgási maradék, túlélő).

A hatáskeresztmetszetek ilyen felosztását az időskála is alátámasztja. A Coulomb-fal legyőzése mindössze $\sim 10^{-21}$ s alatt lezárul, míg a neutronemisszió az összetevő atommag gyengén gerjesztett állapotából legalább két nagyságrenddel több időt igényel.

3. ábra. Szupernehéz atommagok kialakulása nehézion-fúziós reakciókban. Zagrebaev és Greiner [2] alapján.



4. ábra. A dubnai gáztöltésű szeparátor és detektorrendszer vázlatrajza. A detektorrendszer helyzetérzékes és repülési időt is mér. Oganessian és Utyonkov [3] alapján.

Mérőberendezések

A szupernehéz atommagok vizsgálatára többféle berendezést is használtak. Itt most csak a dubnai gáztöltésű szeparátort ismertetjük. A párolgási reakció termékeit gáztöltésű szeparátorral (vagy sebességszűrő berendezéssel) választották el egymástól és a bombázó nyalábtól. A munka a dubnai Egyesített Atommagkutató Intézet – Lawrence Livermore Nemzeti Laboratórium, illetve Dubna – GSI (Darmstadt) együttműködésben folyt a dubnai U-400 nehézion-gyorsítón.

A dubnai gáztöltésű szeparátor vázlatrajza a 4. ábrán látható. A céltárgyból kilépő részecskék (céltárgyszerűek és a fúziós-párolgási reakció termékei) átlagtöltésre tesznek szert a fékező H_2 -gázban. A dipólmágnes eltéríti mind a bombázó részecskéket, mind a reakciótermékeket a

$$\langle Br \rangle = \frac{m v}{\langle q \rangle}$$

képlet szerint, ahol $\langle Br \rangle$ az átlagos mágneses merevség, m a részecske tömege, $\langle q \rangle$ az ion átlagos töltése.

A $\langle Br \rangle$ értékek H_2 -gázban különbözők lesznek a bombázó részecskékre, a céltárgyszerű és fúziós párolgási termékekre. Így $>10^{16}$ rendű háttérnyomás érhető el a bombázó nyalábra és $>10^5$ rendű a nem teljes fúziós reakciótermékekre. Repülési idő-mérésekkel meghatároz-

ták a részecskék v sebességét. A $\langle q \rangle$ átlagtöltés az ion Z rendszámával a következő összefüggésben van:

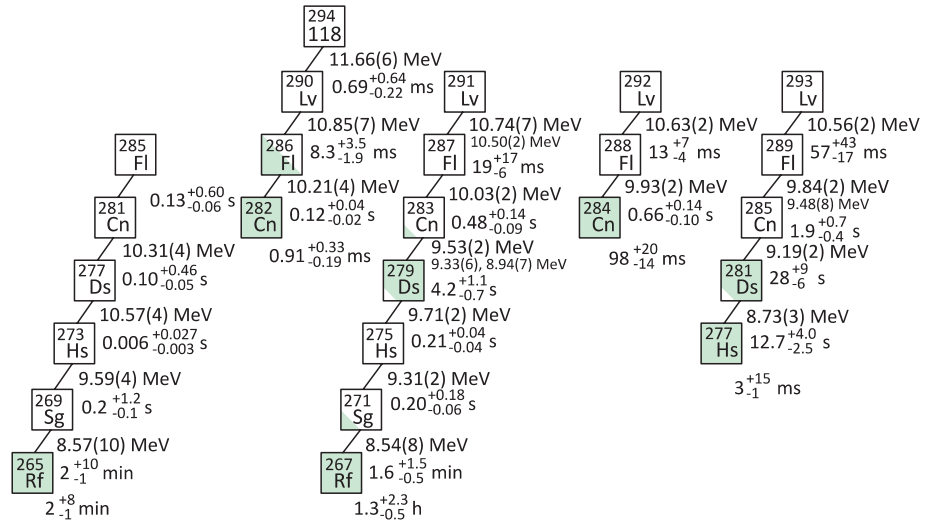
$$\langle q \rangle \approx v Z^\alpha,$$

ahol α kísérletileg meghatározható. (Ez az összefüggés a $\langle q \rangle / Z < 0,3$ tartományban érvényes, de más tartományokban is van ismert összefüggés.) A dE/dx specifikus energiavesztés mérése a rendszám meghatározásához szükséges. Méri a céltárgyból kilökött reakciótermékek teljes energiáját is. Így végső fokon meghatározható a reakciótermék tömege. A rendszer gyűjtési határfoka a reakciótermékekre nagy (elérheti a 30–40%-ot), a berendezés viszonylag egyszerű, hátránya viszont a közepes tömegszelektivitás.

Az észlelőrendszer több repülési idő mérő detektorból, az α -részecskék energiáját mérő helyérzékeny Si-detektorokból, valamint γ -detektorokból áll. Az új elemeket rendszám és neutronszám szerint például a hosszú α -bomláslánc alapján azonosíthatják, amelyek már ismert atommagokat tartalmaznak.

Eredmények

Az 5. ábra a páros rendszámú szupernehéz elemek izotópjainak bomlási sajátságait mutatja; az α -részecskék energiáját és a felezési időket.



5. ábra. A páros rendszámú szupernehéz elemek izotópjainak bomlási sajátságai: az átlagos α -részecskeenergiák és felezési idők. A színezett négyzetek spontán hasadást jelölnek. Az atommagokat ^{48}Ca bombázó nyalábokkal állították elő úgy, hogy ^{238}U , $^{242,244}\text{Pu}$, $^{245,248}\text{Cm}$ és ^{249}Cf céltárgyakat bombáztak.

A legnehezebb ismert szupernehéz atommagok bomlási adatai az 1. táblázatban láthatók. Az atommagok főleg α -bomlással bomlanak, így a táblázatban az E_α α -részecskeenergiák és az α -bomlási Q_α^{exp} teljes energiák is fel vannak tüntetve. A nyert adatok különböző kutatólaboratóriumok eredményei. További szupernehéz atommagok adatai, valamint a hivatkozások *Oganessian* és *Utyonkov* [3] munkájában megtalálhatók.

Az észlelt bomlások száma nagyon kevés, mivel a 3. ábra szerint a lejátszódó reakcióknak csak rendkívül csekély hányada vezet szupernehéz atommagok keletkezéséhez.

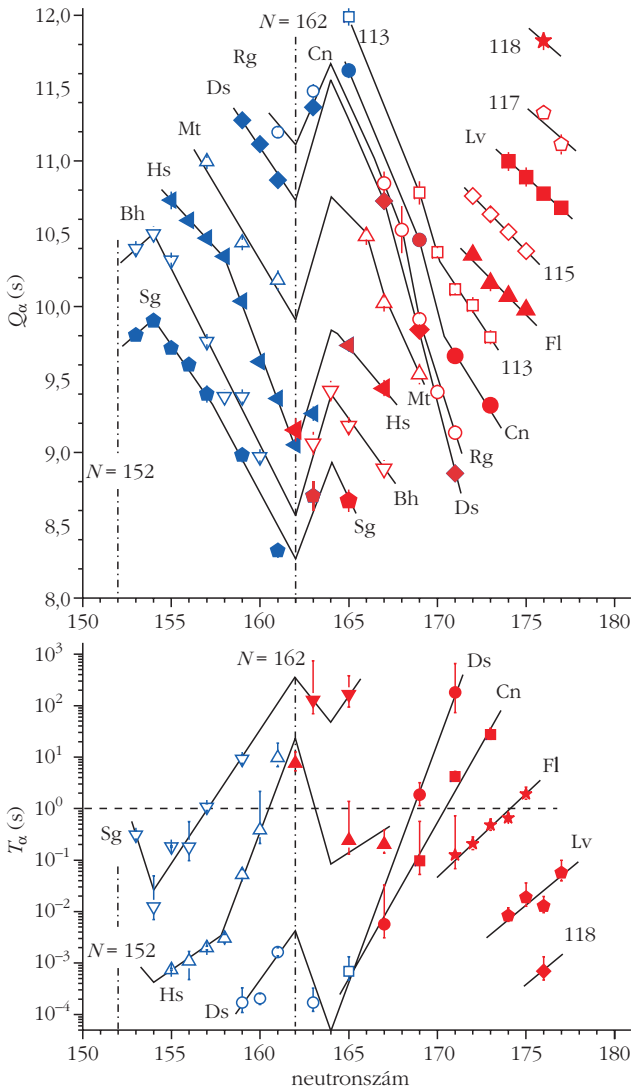
A 6. ábra a neutronszám függvényében mutatja a Q_α α -bomlási energiákat és a T_α felezési időket.

A 7. ábra a parciális elektronbefogási vagy β^+ -bomlási felezési időket mutatja a Q_β β -bomlási energia függvényében. Az észlelt adatok megfelelnek a várható tendenciának: a T_β felezési idő csökken a β -bomlási energia növekedésével. Az ábrán alul a spontán hasadási felezési idők vannak feltüntetve a neutronszám függvényében. Jól látható a héjszerkezet hatása a régóta ismert $N = 152$ -nél, valamint a szupernehéz atommagoknál a 162 és 184 neutronszámoknál.

A 8. ábra egy egyszerű, centrális magkölcsonhatási Woods–Saxon-potenciállal számolt α -bomlási energiákat mutatja az N neutronszám függvényében. Jól átható az $N = 184$ -nél fellépő atommag-

1. táblázat							
A szupernehéz atommagok bomlási sajátságai							
Z	N	A	észlelés*	bomlás	felezési idő	E_α (MeV)	Q_α^{exp} (MeV)
118	176	294	d:4	α	$0,69^{+0,64}_{-0,22}$ ms	$11,66 \pm 0,06$	$11,82 \pm 0,06$
117	177	294	d:3, f:2	α	51^{+38}_{-16} ms	10,81–11,07	$11,18 \pm 0,04$
	176	293	d:15	α	22^{+8}_{-4} ms	10,60–11,20	$11,32 \pm 0,05$
116	177	293	d:4, g:1	α	57^{+43}_{-17} ms	$10,56 \pm 0,02$	$10,71 \pm 0,02$
	176	292	d:5, g:4	α	13^{+7}_{-4} ms	$10,63 \pm 0,02$	$10,78 \pm 0,02$
	175	291	d:3, g:1	α	19^{+17}_{-6} ms	$10,74 \pm 0,07$ $10,50 \pm 0,02$	$10,89 \pm 0,07$
	174	290	d:11	α	$8,3^{+3,5}_{-1,9}$ ms	$10,85 \pm 0,07$	$11,00 \pm 0,07$
115	175	290	d:4, f:2	α	650^{+490}_{-200} ms	9,78–10,31	$10,41 \pm 0,04$
	174	289	d:16	α	330^{+120}_{-80} ms	10,15–10,54	$10,49 \pm 0,05$
	173	288	d:27, f:19	α	164^{+30}_{-21} ms	10,29–10,58	$10,63 \pm 0,01$ $\approx 10,7$
	172	287	d:2, f:1	α	37^{+44}_{-13} ms	$10,61 \pm 0,05$	$10,76 \pm 0,05$

* d: FLNR, Dubna; g: GSI, Darmstadt; f: fókuszszík-detektor, GSI; számok: észlelések száma.



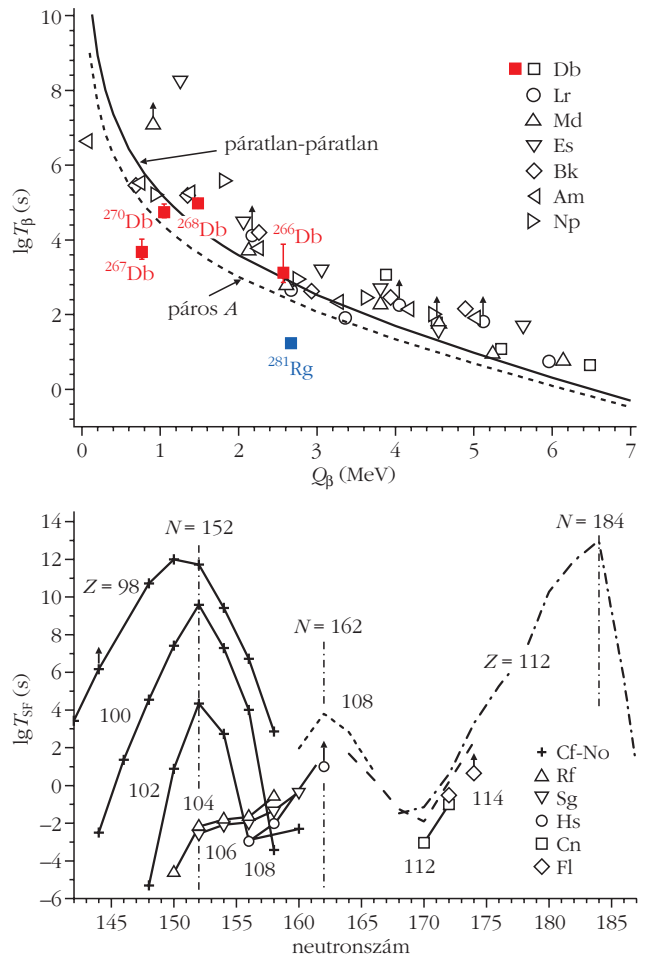
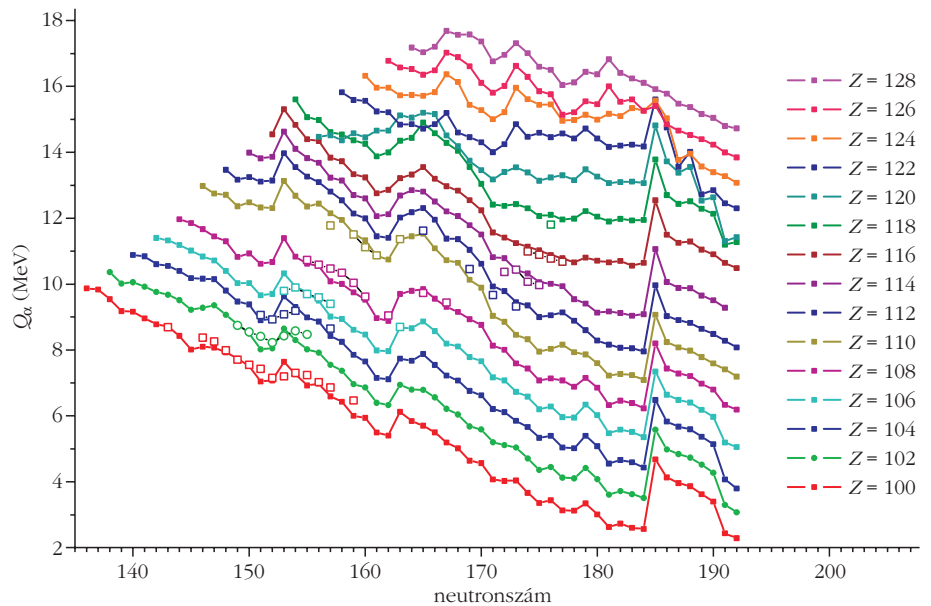
6. ábra. Fölül a $Z = 106\text{--}118$ elemek izotópjainál mért Q_α α -bomlási energiák az N neutronszám függvényében. Alul a $Z = 106\text{--}118$ elemek páros Z -jú izotópjainak α -bomlási T_α felezési idejei a neutronszám függvényében. A vonalak csak az eligazodást segítik.

héj-lezáródás hatása. Figyelemre méltó, hogy az elméleti számítás még elő nem állított elemekre ($Z > 118$) is tartalmaz előrejelzéseket.

Összegzés

A 2. táblázat Düllmann [5] alapján összegzi a legnehezebb elemek elnevezéseit, a felfedezések éveit és a felfedezők neveit.

8. ábra. A Woods–Saxon-moddal számolt α -bomlási energiák (görbék) összehasonlításban a kísérleti adatokkal (nyitott szimbólumok). Heenen és munkatársai [4] alapján.



7. ábra. Felül parciális elektronbefogási és β^+ felezési idők a Q_β β -bomlási energia függvényében a ${}_{93}\text{Np} - {}_{105}\text{Db}$ ismert páratlan-páratlan izotópjaira. A szisztematikából várható vonalak segítik az eligazodást. Alul a $Z = 98\text{--}114$ rendszámú elemek páros-páros izotópjainak T_{SF} parciális spontán hasadási felezési ideje a neutronszám függvényében. A pontozott, szaggatott és szaggatott-pontozott görbék az elméleti T_{sp} értékeket mutatják a $Z = 108, 110$ és 112 izotópokra. Mindkét ábra Oganessian és Utyonkov [3] alapján.

További igen részletes információ áll rendelkezésre a szupernehéz elemekről a Düllmann és munkatársai által szerkesztett [6] anyagban. A magfizikai alapokra lásd például a *Fényes Tibor* által szerkesztett kötetet [7].

Irodalom

1. Y. Oganessian: Heaviest nuclei. *Nucl. Phys. News* 23/1 (2013) 15–21.
2. V. I. Zagrebaev, W. Greiner: Cross sections for the production of superheavy nuclei. *Nucl. Phys. A* 944 (2015) 257–307.
3. Yu. Ts. Oganessian, Y. K. Utyonkov: Superheavy nuclei from ^{48}Ca -induced reactions. *Nucl. Phys. A* 944 (2015) 62.
4. P.-H. Heenen, J. Skalski, A. Staszczak, D. Vretenar: Shapes and α - and β -decays of superheavy nuclei. *Nucl. Phys. A* 944 (2015) 415–441.
5. Ch. E. Düllmann: Studying chemical properties of the heaviest elements: one atom at a time. *Nucl. Phys. News* 27/2 (2017) 14–20.
6. Ch. Düllmann (szerk.), *Special Issue on Superheavy Elements*, *Nucl. Phys. A* 944/3–4 (2015) 1–470.
7. T. Fényes (szerk.): *Atommagfizika*. 2. korszerűsített kiadás. (2009) Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen.

2. táblázat

Az aktinidákon túli elemek				
Z	név	jel	felfedezés éve	felfedező
104	Rutherfordium	Rf	1969	Ghiorso és mtsai. (LBNL Berkeley)
105	Dubnium	Db	1970	Ghiorso és mtsai. (LBNL Berkeley)
106	Seaborgium	Sg	1974	Ghiorso és mtsai. (LBNL Berkeley)
107	Bohrium	Bh	1981	Münzenberg és mtsai. (GSI Darmstadt)
108	Hassium	Hs	1984	Münzenberg és mtsai. (GSI Darmstadt)
109	Meitnerium	Mt	1982	Münzenberg és mtsai. (GSI Darmstadt)
110	Darmstadtium	Ds	1995	Hofmann és mtsai. (GSI Darmstadt)
111	Roentgenium	Rg	1995	Hofmann és mtsai. (GSI Darmstadt)
112	Copernicium	Cn	1996	Hofmann és mtsai. (GSI Darmstadt)
113	Nihonium	Nh	2004	Morita és mtsai. (RIKEN Wako-shi)
114	Flerovium	Fl	2004	Oganessian és mtsai. (FLNR Dubna)
115	Moscovium	Mc	2010	Oganessian és mtsai. (FLNR Dubna)
116	Livermorium	Lv	2004	Oganessian és mtsai. (FLNR Dubna)
117	Tennessine	Ts	2010	Oganessian és mtsai. (FLNR Dubna)
118	Oganesson	Og	2006	Oganessian és mtsai. (FLNR Dubna)

TUDOMÁNY AZ INNOVÁCIÓ SZOLGÁLATÁBAN: NEUTRONOS ANYAGVIZSGÁLATI MÓDSZEREK IPARI ALKALMAZÁSAI A BUDAPESTI NEUTRON CENTRUMBAN

Szentmiklósi László,¹ Kis Zoltán,¹ Maróti Boglárka,¹ Szilágyi Veronika,¹ Gméling Katalin,¹ Len Adél,² Rosta László,² Kun Tibor,² Baranyai Rózsa,¹ Fábíán Margit,¹ Bottyán László,² Janik József¹

¹Budapesti Neutron Centrum, MTA Energiatudományi Kutatóközpont

²Budapesti Neutron Centrum, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

2019. március 28-án az MTA dísztermében ünnepelhattük a Budapesti Kutatóreaktor fennállásának 60. évfordulóját, hiszen az akkor még csak 2 MW-os reaktor 1959. március 25-én lépett először működésbe. Jelenleg a Budapesti Neutron Centrum (BNC) [1], az MTA Energiatudományi Kutatóközpont és az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont konzorciuma koordi-



A szerzők a Budapesti Neutron Centrum munkatársai, ahol interdiszciplináris alap- és alkalmazott kutatásokat folytatnak roncsolásmentes elemanalitikai, szerkezetvizsgálati és képalkotási technikák felhasználásával. A BNC műszerparkjában több unikális berendezés is található, így

máshol nem megvalósítható kísérleteket is végezhetünk, jellemzően nemzetközi együttműködések, EU-támogatott projektek, illetve ipari kutatás-fejlesztési feladatok formájában.

nálja a Budapesti Kutatóreaktor körül folyó tudományos és ipari K+F tevékenységeket. A Kutatóreaktor a köré települt mérőhelyekkel, tágabb értelemben pedig az MTA csillebérci kampusza az egyik legjelentősebb technikai és tudásközpontnak számít hazánkban. A neutronközpont a hazai és nemzetközi tudományos közösség, valamint az ipari szereplők számára is elérhető nyílt kutatási infrastruktúra, azaz a mérőhelyek kiválóság alapú felhasználói programok, illetve kétoldali megállapodások révén az érdekeltek számára hozzáférhető (CERIC-ERIC, IPERION CH,

A felsorolt eredmények a SINE 2020 (EU H2020 Grant No. 654000), a V4-Korea RADCON (NKFIH NN17 127102), az NKFIH K17 124068 és a CAK (NVKP_16-1-2016-0014) projektek, továbbá az MTA Bolyai János Kutatói Ösztöndíj anyagi támogatásával jöttek létre. Köszönjük továbbá a Rogante Engineering Office, *Horváth László*, *Benyács Gábor* és *Gadó János* közreműködését.