





# A PERIÓDUSOS RENDSZER ÉVE

|                    |                    |   |                    |                    |                   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                   |                    |
|--------------------|--------------------|---|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| 1<br>H<br>1,008    |                    |   |                    |                    |                   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                   | 18<br>He<br>4,003  |
| 3<br>Li<br>6,94    | 4<br>Be<br>9,01    |   |                    |                    |                   |                    |                    |                    |                    |                    |                    | 5<br>B<br>10,81    | 6<br>C<br>12,01    | 7<br>N<br>14,01    | 8<br>O<br>16,00    | 9<br>F<br>19,00   | 10<br>Ne<br>20,18  |
| 11<br>Na<br>22,99  | 12<br>Mg<br>24,30  |   |                    |                    |                   |                    |                    |                    |                    |                    |                    | 13<br>Al<br>26,98  | 14<br>Si<br>28,09  | 15<br>P<br>30,97   | 16<br>S<br>32,06   | 17<br>Cl<br>35,45 | 18<br>Ar<br>39,95  |
| 19<br>K<br>39,10   | 20<br>Ca<br>40,08  | 21<br>Sc<br>44,96   | 22<br>Ti<br>47,87  | 23<br>V<br>50,94   | 24<br>Cr<br>52,00 | 25<br>Mn<br>54,94  | 26<br>Fe<br>55,85  | 27<br>Co<br>58,93  | 28<br>Ni<br>58,69  | 29<br>Cu<br>63,55  | 30<br>Zn<br>65,38  | 31<br>Ga<br>69,72  | 32<br>Ge<br>72,63  | 33<br>As<br>74,92  | 34<br>Se<br>78,97  | 35<br>Br<br>79,90 | 36<br>Kr<br>83,80  |
| 37<br>Rb<br>85,47  | 38<br>Sr<br>87,62  | 39<br>Y<br>88,91  | 40<br>Zr<br>91,22  | 41<br>Nb<br>92,91  | 42<br>Mo<br>95,95 | 43<br>Tc<br>-      | 44<br>Ru<br>101,07 | 45<br>Rh<br>102,91 | 46<br>Pd<br>106,42 | 47<br>Ag<br>107,87 | 48<br>Cd<br>112,41 | 49<br>In<br>114,82 | 50<br>Sn<br>118,71 | 51<br>Sb<br>121,76 | 52<br>Te<br>127,60 | 53<br>I<br>126,90 | 54<br>Xe<br>131,29 |
| 55<br>Cs<br>132,91 | 56<br>Ba<br>137,33 | 57-71   | 72<br>Hf<br>178,49 | 73<br>Ta<br>180,95 | 74<br>W<br>183,84 | 75<br>Re<br>186,21 | 76<br>Os<br>190,23 | 77<br>Ir<br>192,22 | 78<br>Pt<br>195,08 | 79<br>Au<br>196,97 | 80<br>Hg<br>200,59 | 81<br>Tl<br>204,38 | 82<br>Pb<br>207,2  | 83<br>Bi<br>208,98 | 84<br>Po<br>-      | 85<br>At<br>-     | 86<br>Rn<br>-      |
| 87<br>Fr<br>-      | 88<br>Ra<br>-      | 89-103  | 104<br>Rf<br>-     | 105<br>Db<br>-     | 106<br>Sg<br>-    | 107<br>Bh<br>-     | 108<br>Hs<br>-     | 109<br>Mt<br>-     | 110<br>Ds<br>-     | 111<br>Rg<br>-     | 112<br>Cn<br>-     | 113<br>Nh<br>-     | 114<br>Fl<br>-     | 115<br>Mc<br>-     | 116<br>Lv<br>-     | 117<br>Ts<br>-    | 118<br>Og<br>-     |
| 119                | 120                | 121-  | 156                | 157                | 158               | 159                | 160                | 161                | 162                | 163                | 164                | 139                | 140                | 169                | 170                | 171               | 172                |
| 165                | 166                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• USA és Oroszország • USA</li> <li>• Szovjetunió/Oroszország</li> <li>• Japán</li> <li>• Németország</li> </ul> |                    |                    |                   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                   |                    |

|                    |                    |                    |                    |               |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 57<br>La<br>138,91 | 58<br>Ce<br>140,12 | 59<br>Pr<br>140,91 | 60<br>Nd<br>144,24 | 61<br>Pm<br>- | 62<br>Sm<br>150,36 | 63<br>Eu<br>151,96 | 64<br>Gd<br>157,25 | 65<br>Tb<br>158,93 | 66<br>Dy<br>162,50 | 67<br>Ho<br>164,93 | 68<br>Er<br>167,26 | 69<br>Tm<br>168,93 | 70<br>Yb<br>173,05 | 71<br>Lu<br>174,97 |
| 89<br>Ac<br>-      | 90<br>Th<br>232,04 | 91<br>Pa<br>231,04 | 92<br>U<br>238,03  | 93<br>Np<br>- | 94<br>Pu<br>-      | 95<br>Am<br>-      | 96<br>Cm<br>-      | 97<br>Bk<br>-      | 98<br>Cf<br>-      | 99<br>Es<br>-      | 100<br>Fm<br>-     | 101<br>Md<br>-     | 102<br>No<br>-     | 103<br>Lr<br>-     |
| 141                | 142                | 143                | 144                | 145           | 146                | 147                | 148                | 149                | 150                | 151                | 152                | 153                | 154                | 155                |

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

|             |     | protonszám                |                          |                           |                          |                          |     |
|-------------|-----|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-----|
|             |     | 110                       | 111                      | 112                       | 113                      | 114                      | 115 |
| neutronszám | 157 | <sup>267</sup> Ds 3 μs    |                          |                           |                          |                          |     |
|             | 158 |                           |                          |                           |                          |                          |     |
|             | 159 | <sup>269</sup> Ds 0,23 ms |                          |                           |                          |                          |     |
|             | 160 | <sup>270m</sup> Ds 10 ms  |                          |                           |                          |                          |     |
|             | 161 | <sup>271</sup> Ds 0,21 s  | <sup>272</sup> Rg 2 ms   |                           |                          |                          |     |
|             | 162 |                           |                          |                           |                          |                          |     |
|             | 163 | <sup>273</sup> Ds 0,17 ms | <sup>274</sup> Rg 12 ms  |                           |                          |                          |     |
|             | 164 |                           |                          |                           |                          |                          |     |
|             | 165 |                           |                          | <sup>277</sup> Cn 0,69 ms | <sup>278</sup> Nh 1,4 ms |                          |     |
|             | 166 |                           |                          |                           |                          |                          |     |
|             | 167 | <sup>277</sup> Ds 3,5 ms  | <sup>278</sup> Rg 4 ms   |                           |                          |                          |     |
|             | 168 |                           | <sup>279</sup> Rg 0,09 s |                           |                          |                          |     |
|             | 169 | <sup>279</sup> Ds 0,18 ms | <sup>280</sup> Rg 4,6 s  | <sup>281</sup> Cn 0,18 s  | <sup>282</sup> Nh 73 ms  |                          |     |
|             | 170 | <sup>280</sup> Ds 6,7 ms  | <sup>281</sup> Rg 17 s   | <sup>282</sup> Cn 0,91 ms | <sup>283</sup> Nh 75 ms  | <sup>284</sup> Fl 2,5 ms |     |
|             | 171 | <sup>281</sup> Ds 9,6 s   | <sup>282</sup> Rg 100 s  | <sup>283</sup> Cn 4,2 s   | <sup>284</sup> Nh 0,91 s | <sup>285</sup> Fl 0,10 s |     |
| 172         |     | <sup>283</sup> Rg 5,1 min | <sup>284</sup> Cn 98 ms  | <sup>285</sup> Nh 4,2 s   | <sup>286</sup> Fl 0,12 s | <sup>287</sup> Mc 37 ms  |     |
| 173         |     |                           | <sup>285</sup> Cn 28 s   | <sup>286</sup> Nh 9,5 s   | <sup>287</sup> Fl 0,48 s | <sup>288</sup> Mc 0,16 s |     |
| 174         |     |                           | <sup>286</sup> Cn 8,5 s  | <sup>287</sup> Nh 5,5 s   | <sup>288</sup> Fl 0,66 s | <sup>289</sup> Mc 0,33 s |     |
| 175         |     | <sup>286</sup> Rg 11 min  |                          |                           | <sup>289</sup> Fl 1,9 s  | <sup>290</sup> Mc 0,65 s |     |
| 176         |     |                           |                          |                           | <sup>290</sup> Fl 19 s   |                          |     |
| 177         |     |                           |                          | <sup>290</sup> Nh 2 s     |                          |                          |     |

lassú, és alfa-bomlásuk felezési ideje is meghaladja az egy évet.

Kevésbé nyilvánvaló, hogy az atomok elektronszerkezetének leírásában egyáltalán van-e helyük jóslatoknak. A Nobel-díjas Glenn T. Seaborg 1996-ban megjelent, a periódusos rendszerről szóló cikkében [5] egyszerűen csak folytatta az eddig megismert elveket, és a nyolcadik periódusba így összesen 50 elemet helyezett egymás után. Az 5g és 6f pályák betöltésével keletkező 32 tagú elemcsoportot szuperaktinidáknak nevezte. Ezt a gondolatmenetet folytatva 2002-ben h, i, j és k pályák figyelembevételével olyan periódusos rendszer is született, amely az elemeket a 1138-as rendszámig tünteti fel, [6] ez látható a **2. ábrán**. Elméleti számításokból azonban meglehetősen nagy bizonyossággal kiderült, hogy már a hetedik periódus végén is figyelembe kell venni a relativisztikus hatásokat, mert az elektronok mozgási sebessége a fénysebességhez közelít; a nyolcadik periódusban pedig ez az effektus nagyon is lényeg-

**3. ábra.** A periódusos rendszer relativisztikus kvantummechanikai számítások alapján jóslott felépítése a 172-es rendszámú elemig. A már előállított transzurán elemeknél a mező színe az előállítás országára utal

gessé válik. Az ilyen számításokat a leg részletesebben Pekka Pyykkö finn kémikus végezte el. [7] Az eredmények szerint a p pályák degeneráltsága ilyen nagy rendszámok esetében megszűnik: az energiaszint az egy pályát tartalmazó  $p_{1/2}$  és a két pályát tartalmazó  $p_{3/2}$  csoportra hasad fel. Ilyen hatások következménye az, hogy a 114-es rendszámú flerovium kémiai tulajdonságai a jóslatok szerint inkább emlékeztetnek a nemesgázokéra, mint a fölötté lévő ólomra vagy az ónra. A 8p és 9p pályák esetében ez a felhasadás már olyan jelentős, hogy a 9s és a  $9p_{1/2}$  pályák energiája a  $8p_{3/2}$  szintje alá kerül, így a pályák energiabetöltési sorrendje a következőképpen alakul:

$$8s < 5g \leq 8p_{1/2} < 6f < 7d < 9s < 9p_{1/2} < 8p_{3/2}$$

Ennek a következménye az, hogy ha a periódusos rendszerben továbbra is az azonos vegyértékelektron-konfigurációjú elemeket akarjuk egy csoportba (vagyis egymás alá) írni, akkor a rendszámok már nem növekedhetnek monoton módon. A periódusos rendszer a megjósolt elektronkonfi-

**4. ábra.** Kísérletileg meghatározott felezési idők a stabilitási sziget környezetében



gurációkat tükröző, Pekka Pyykkö által javasolt kiterjesztését mutatja be a **3. ábra**. [7] A rendszámok monoton növekvésének megtörésével érdekes történeti párhuzam húzható: 1869-ben Mengyelejev az atomtömegek sorrendjébe állította az elemeket a periódusos rendszerben, de ezt a szabályt fel kellett rúgnia a tellúr és a jód között ahhoz, hogy a rendszer valóban a kémiai sajátságokat tükrözze. [1]

Az elektronszerkezet kvantummechanikai leírásának egyéb furcsaságai is vannak. A 118-as rendszám fölött például a szokásosan használt egyenletben megjelenik egy második megoldás, majd a 137-es rendszám környékén az energia értékére képzetes számok is lehetségesé válnak. A legelfogadottabb jelenlegi elméletek azt is jósolják, hogy a 172-es rendszám fölött a Schrödinger-egyenletnek még rövid időtartamra stabil megoldása sem lehet: ekkor az elektronok és az atommagban lévő protonok neutronná egyesülése dominánssá válik. Így könnyen előfordulhat, hogy a periódusos rendszer elvi végét nem a magstabilitás, hanem az elektronszerkezet sajátságai határozzák majd meg.

Sajnos igen valószínűtlen, hogy a periódusos rendszerhez kapcsolódó modern jóslatokat az elkövetkező két-három évtizedben kísérleti adatokkal lehetne összevetni.

A szupernehéz elemekből rendszerint néhány atomot állítanak elő, ebből spektroszkópiai módszerekkel az elektronszerkezetre következtetni reménytelen vállalkozás, kémiai sajátságokat meghatározni pedig még inkább az. A stabilitási sziget kísérleti megtalálására sincsenek reális elképzelések. Noha a flerovium elemet előállították már, a sziget várható középpontja a <sup>298</sup>Fl-izotóp lenne, a legnehezebb ténylegesen előállított izotóp tömegszáma viszont csak 289. A stabilitási sziget körüli ismert izotópok felezési időit foglalja össze a **4. ábra**. Látható, hogy a meglévő adatok extrapolálásába könnyen beleképzelhető a stabilitási sziget létezése: a Fl jelenleg ismert izotópjainak felezési ideje például monoton növekszik a tömegszámmal.

A szigethez tartozó izotópok előállítását az akadályozza, hogy a stabilis atommagokhoz a rendszám növekedésével egyre nagyobb relatív neutronfelesleg szükséges. [8] A jelenlegi kísérletekben két kisebb atommag hideg fúziójával állítják elő a szupernehéz elemeket – ilyen módon a kívánatos neutron/proton arányt lehetetlen elérni. A magfizika egyik kedvenc atommagja a <sup>48</sup>Ca-izotóp, amely stabil, a természetes kalcium 0,187%-a, és a protonok számához képest meglepően sok neutron van benne. A <sup>297</sup>Og-izotópot (oganeszon) például

<sup>249</sup>Cf (kalifornium) és <sup>48</sup>Ca (kalcium) ütköztetésével állították elő. A 119-es rendszámú elem (Uue) előállításához a kalifornium helyett egy einsteinium-izotópot kellene ugyanilyen kísérletben céltárgyként használni, de ehhez semelyik laboratóriumban nem sikerült még elég nagy mennyiség einsteiniumot előállítani. A dubnai Flerov Laboratórium 2019 elején kezdődtek el a próbálkozások arra, hogy <sup>48</sup>Ca helyett az 5,18% természetes gyakoriságú, ugyancsak stabil <sup>50</sup>Ti-izotópot használják. [9] Sajnos ennek az atommagnak az elméletek szerint kedvezőtlenebbek a magfizikai tulajdonságai, így a <sup>48</sup>Ca-nál jóval kisebb valószínűséggel vesz részt hideg fúzióban, de azért van remény arra, hogy néhány éven belül beszámoljanak majd a 119-es (Uue, ununennium) és a 120-as (Ubn, unbinillium) elemek előállításáról is. ●●●

IRODALOM

- [1] G. Lente, ChemTexts (2019) 5, 10.1007/s40828-019-0092-5.
- [2] R. Swinne, Naturwiss. (1919) 7, 529.
- [3] V. S. Okunev, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. (2018) 468, 012012.
- [4] P. de Marcellis, N. Coron, G. Dambier, J. Leblanc, J. P. Nature (2003) 422, 876.
- [5] G. T. Seaborg, J. Chem. Soc., Dalton Trans. (1996) 3899.
- [6] P. J. Karol, J. Chem. Educ. (2002) 79, 60.
- [7] P. Pyykkö, Chem. Rev. (2012) 112, 371.
- [8] Y. T. Oganessian, K. P. Rykaczewski, Phys. Today (2015) 68, 10.1063/PT.3.2880.
- [9] S. Kean, Science (2019) 363, 466.

