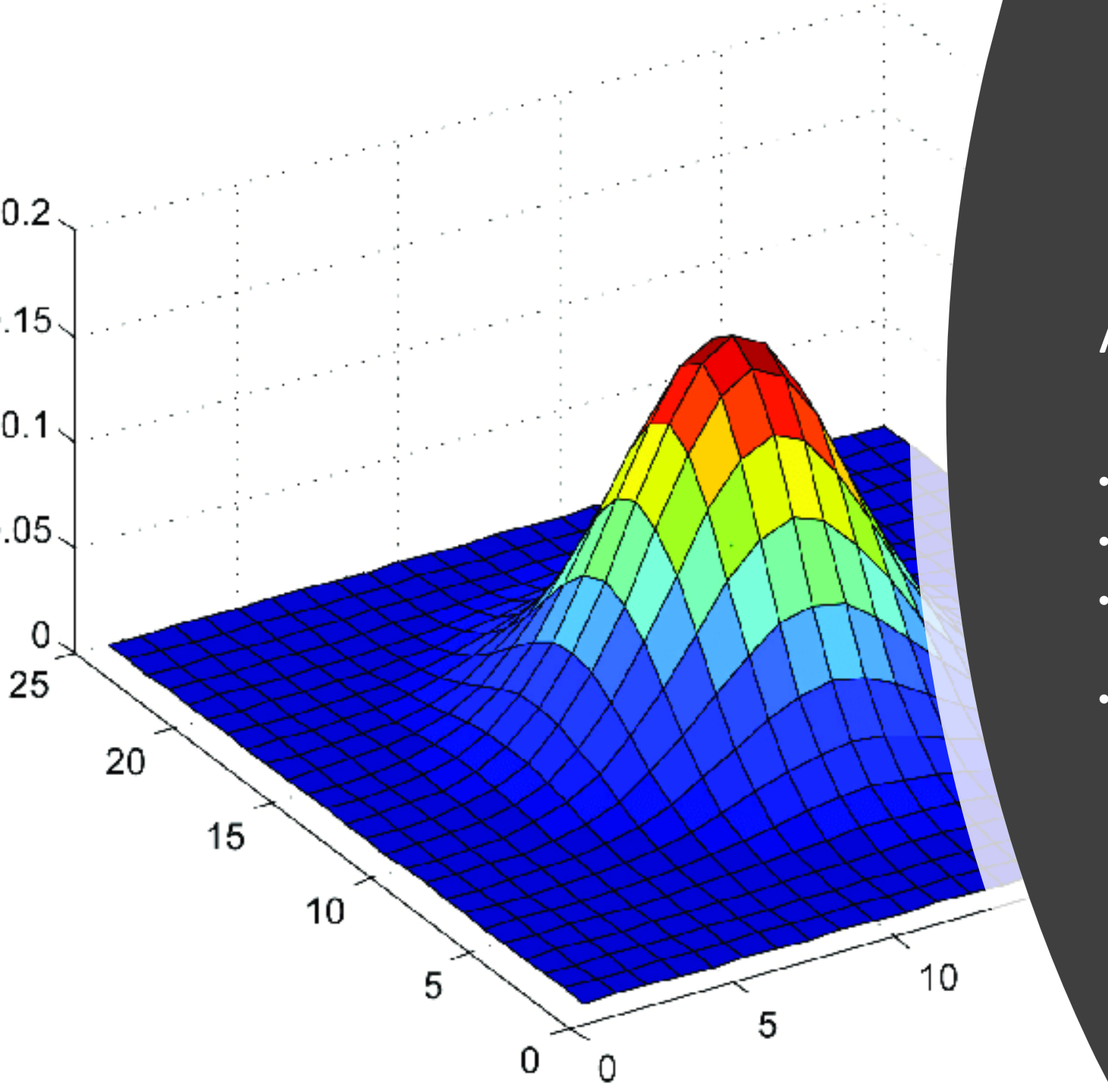


# Spin-pálya kölcsönhatás atommagokban

Magfizika szeminárium

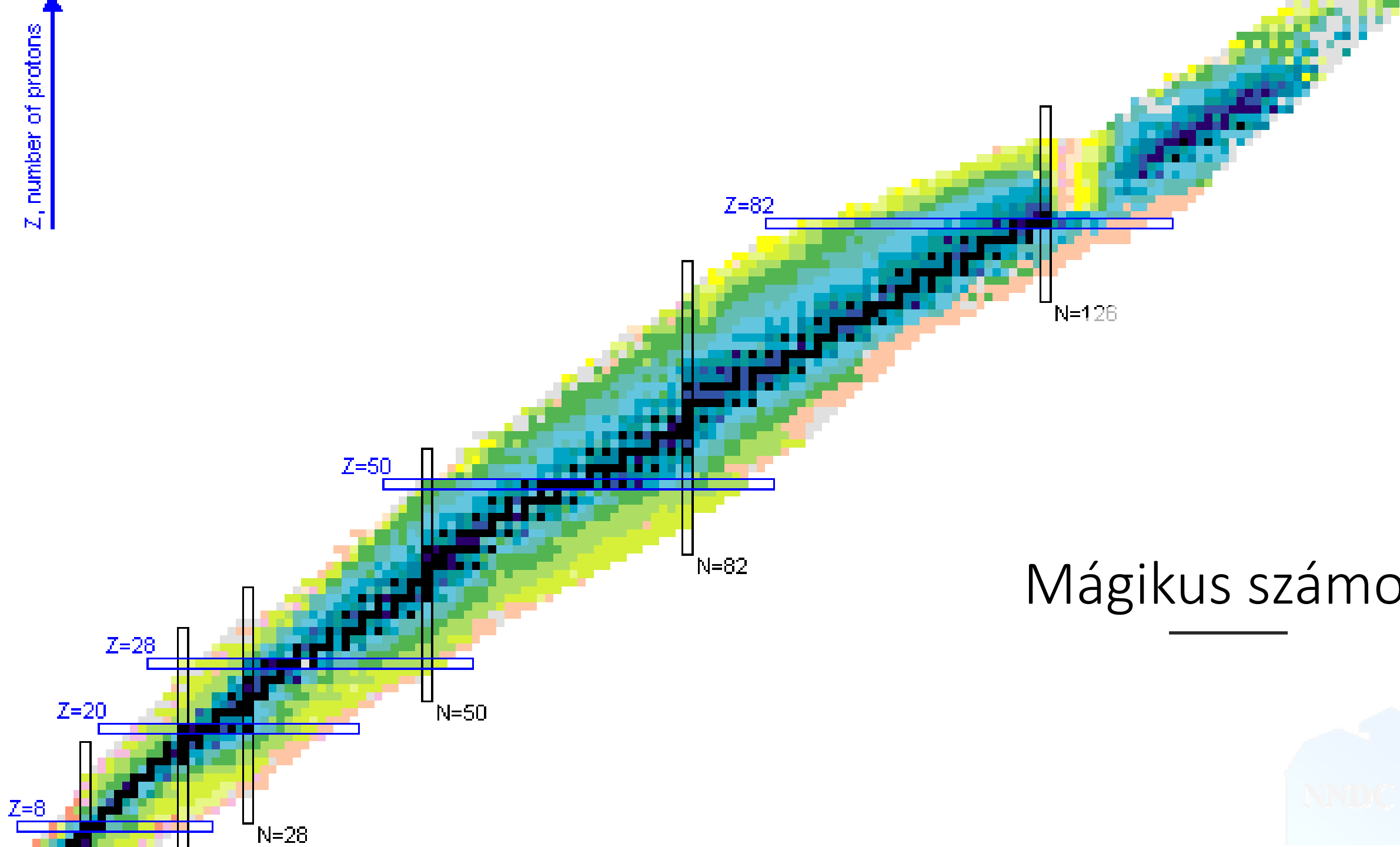
Karácsony Márton



# Áttekintés

- Motivációk
- Spin-pálya kölcsönhatás a héjmodellben
- Spin-pálya kölcsönhatás mikroszkopikus eredete
- Kísérleti eredmények

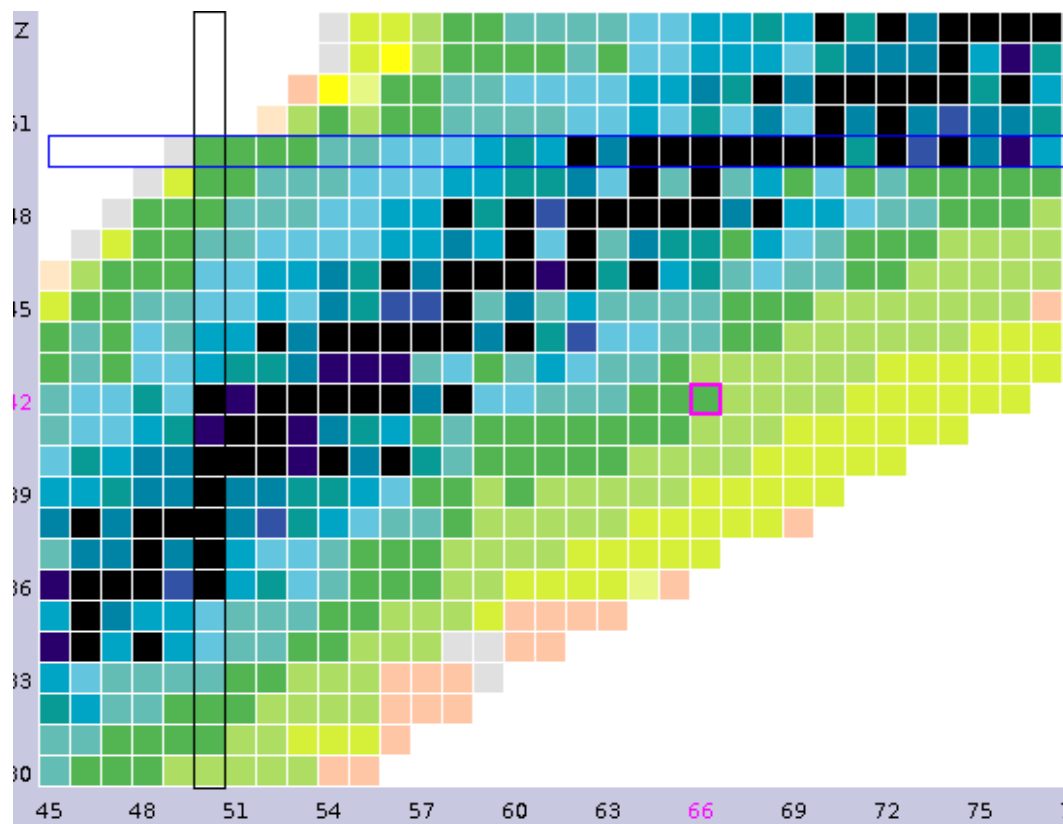
$Z$ , number of protons



Mágikus számok



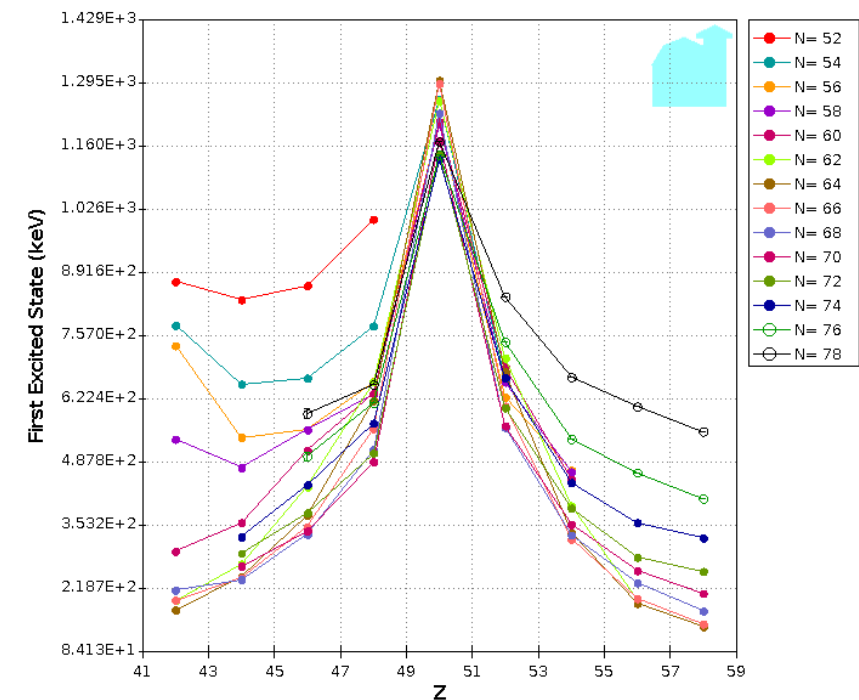
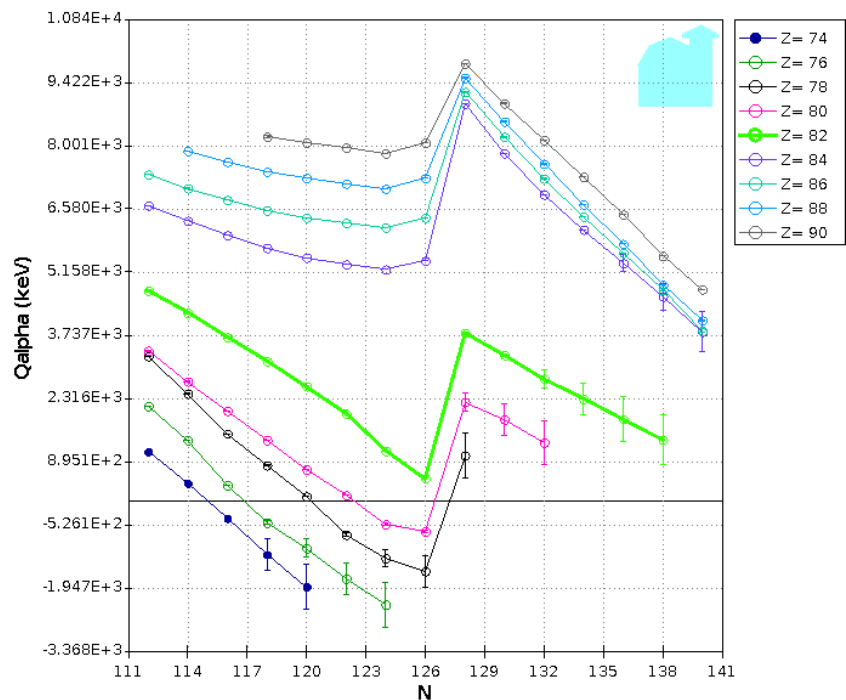
# Mágikus számok



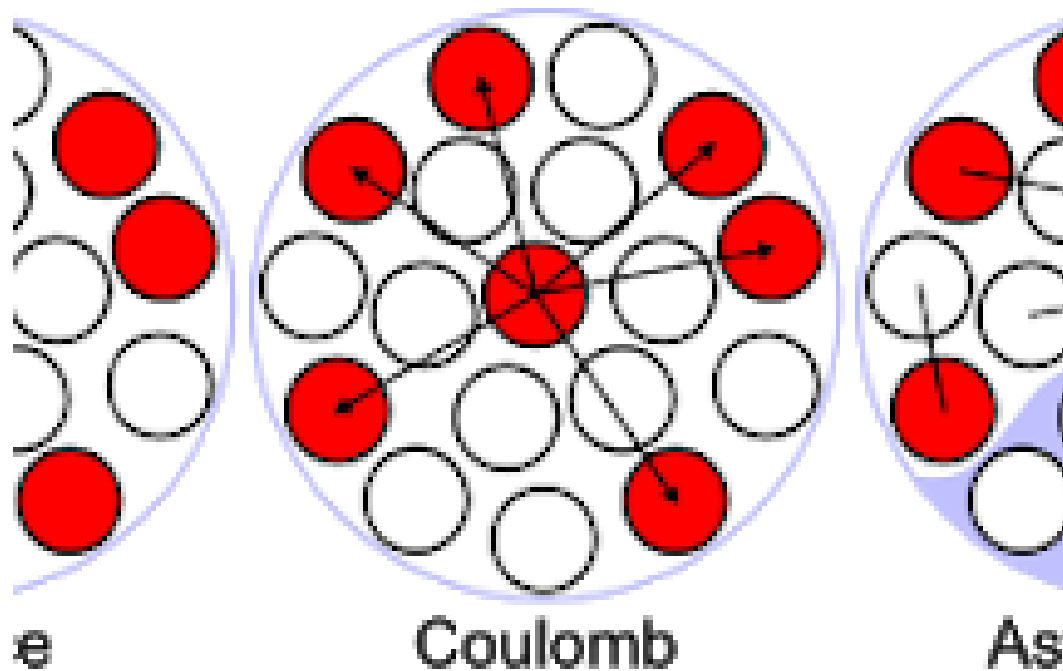
- 1933 Elsasser: különös stabilitás bizonyos neutron, proton számok esetében
- Mágikus szám esetén több stabil izotóp figyelhető meg

# Mágikus számok

- Nukleonok szorosan kötöttek, például  $\alpha$  bomlásban felszabaduló energia alacsony
- Első gerjesztett állapot energiája sokkal nagyobb mint a környezeté

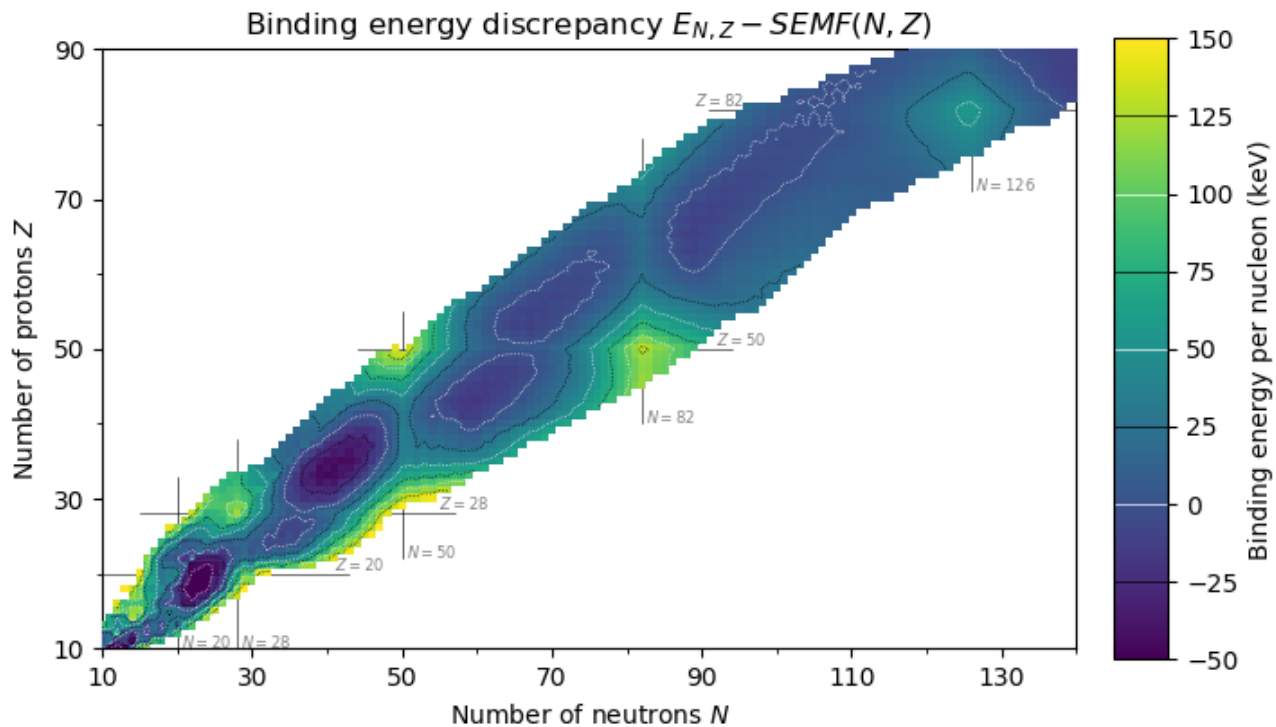


# Mágikus számok



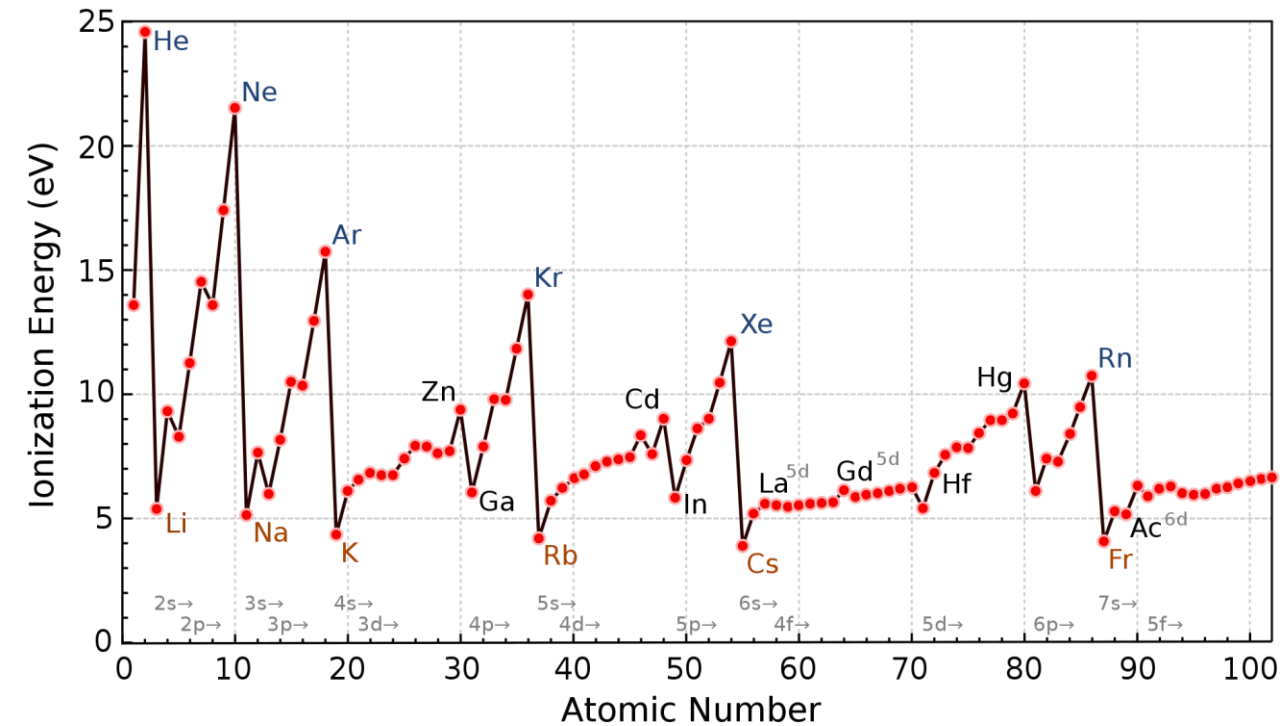
- 1940-es években még nem volt magyarázat a mágikus számokra
- A nukleáris struktúrát legjobban leíró modell akkoriban a csepp modell
- A csepp modellből a mágikus számok nem származtathatók

# Mágikus számok



- A csepp modell szisztematikusan alul becsüli a nukleonra jutó kötésienergiákat mágikus számok esetén

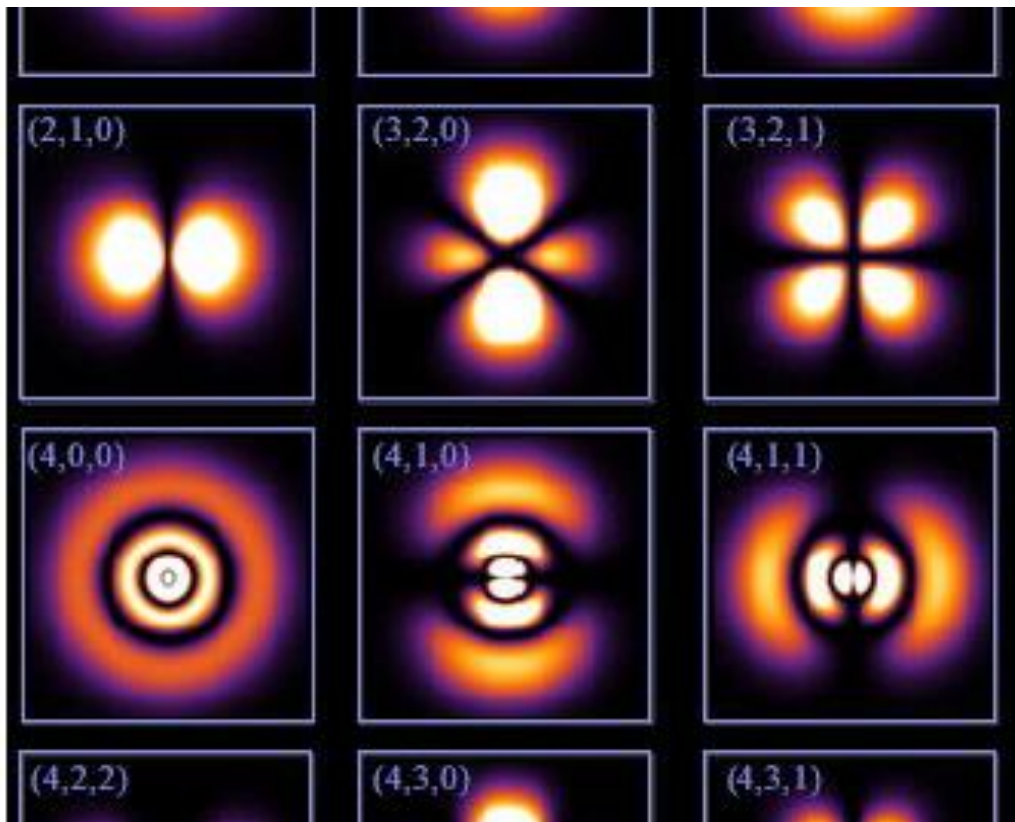
# Analógia az atomok elektronszerkezetével



- Az elektronszerkezetnek szintén vannak mágikus számai
- Ezek a mágikus számok jól láthatók az ionizációs energia grafikonon
- 2, 10, 18, 36, 54, 86
- Adja magát az atommag analóg leírása

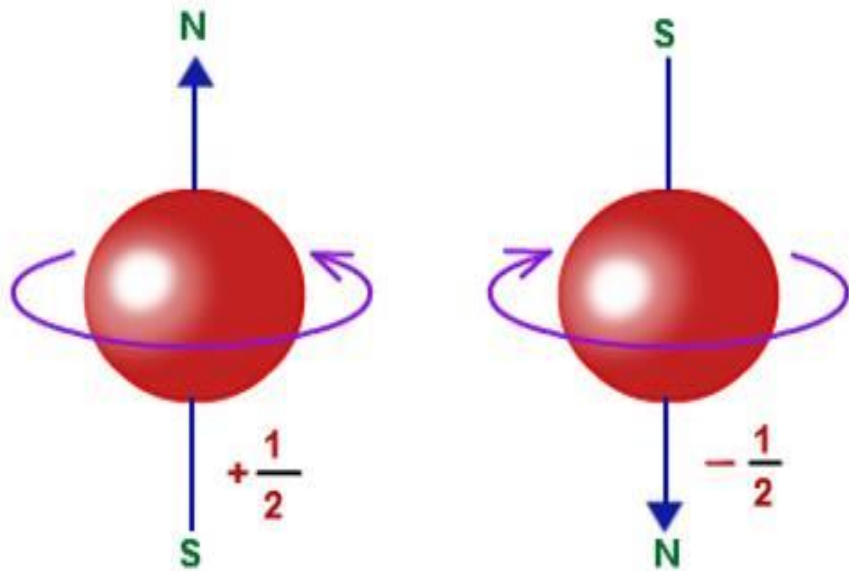


# Analógia az atomok elektronszerkezetével



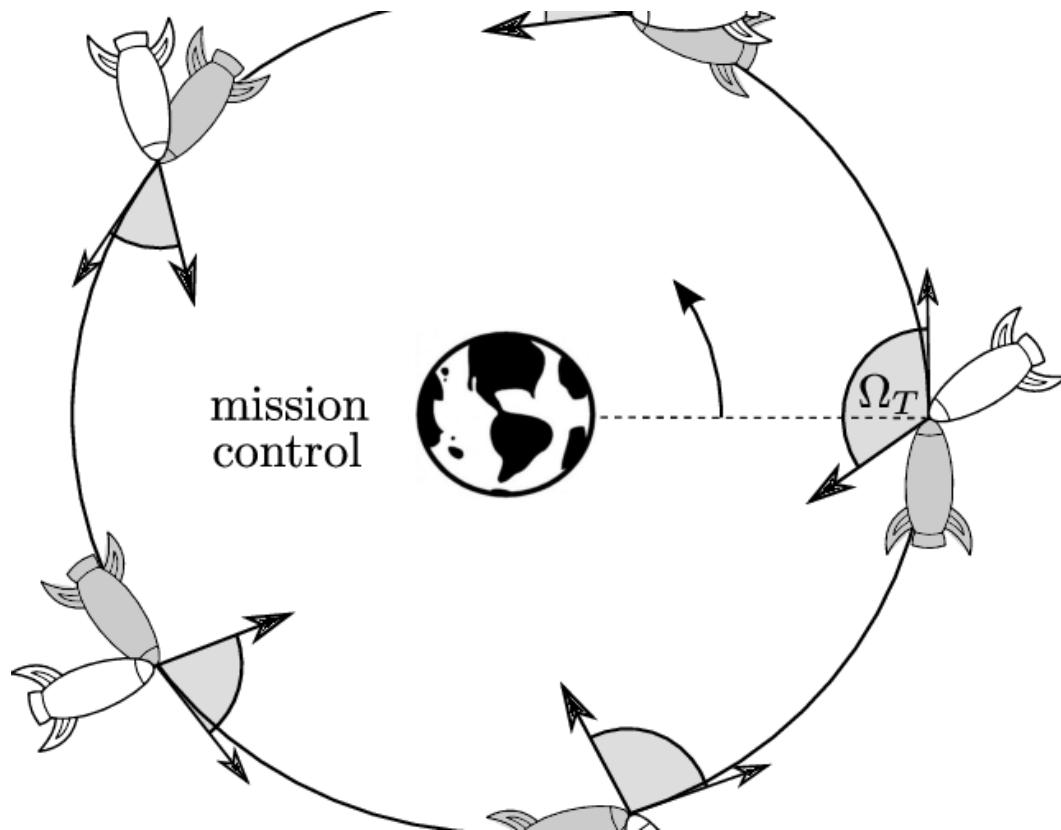
- Az atomi elektronszerkezetet jól leírja a Schrödinger-egyenlet
- Azonban a Coulomb-potenciál nem elég a finom spektrum leírásához
- Például az energia szintek felhasadnak spin szerint

# Spin-pálya kölcsönhatás klasszikusan



- Mozgó  $\mu$  mágneses dipólra elektromostérben erő hat
- A dipól koordináta rendszerében
$$B = -\frac{v \times E}{c^2}$$
- $\Delta H_L = -\mu \cdot B$ , Larmor interakciós energia
- Elektron esetében  $\Delta H_L = \frac{2\mu_B}{\hbar m_e c^2} \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} L \cdot S$

# Spin-pálya kölcsönhatás klasszikusan



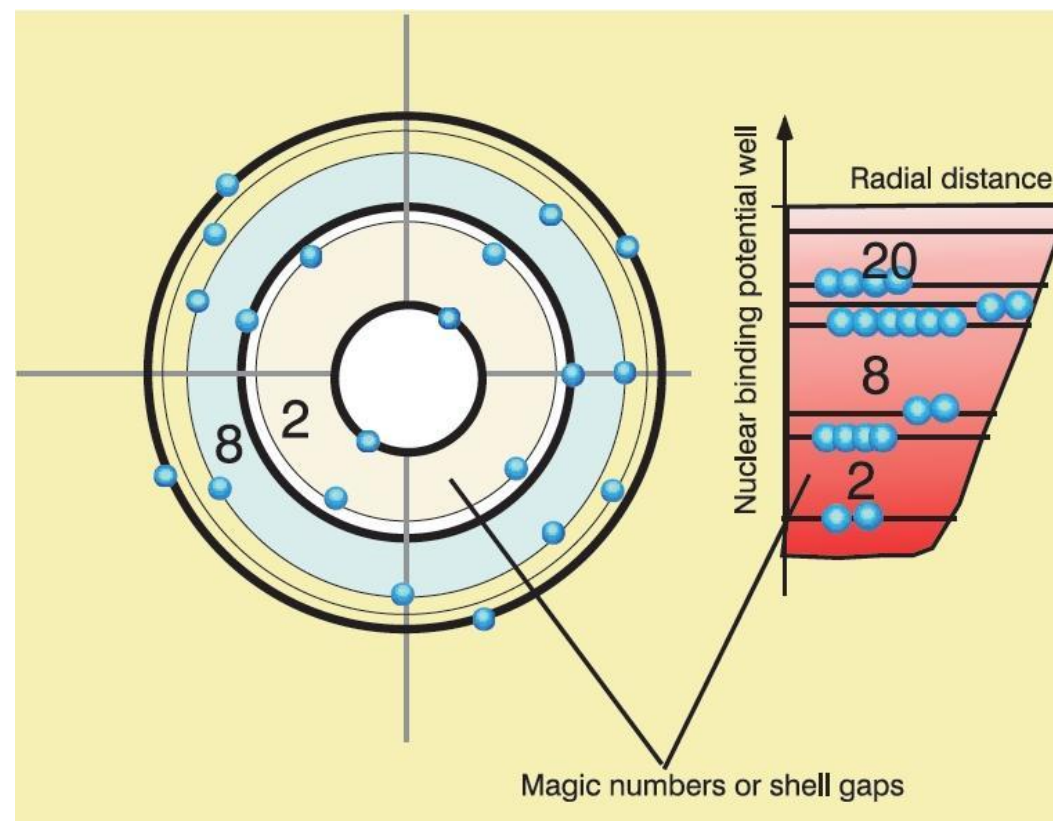
- Thomas-precesszió relativisztikus kinematikai effektus, nem párhuzamos Lorentz-boostok egymásutánja egy Lorentz-boost és egy forgatás
- Körpályán mozgó test koordináta rendszere precesszál

$$\omega_T = \frac{1}{c^2} \frac{\gamma^2}{\gamma + 1} a \times v$$

- $\frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial t} + \omega_T \times S = \mu \times \left( B - \frac{\omega_T}{2\mu_B} \right) = S \times B'$ , azaz  $\Delta H_T = \omega_T \cdot S$
- $\Delta H = \Delta H_L + \Delta H_T = \frac{\mu_B}{\hbar m_e c^2} \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} L \cdot S$ , Thomas fél

# Héjmodell próbálkozások

- Próbáljuk az atommagot is a Schrödinger-egyenlettel leírni
- Soktest rendszer, nehéz kezelni
- Tegyük fel, hogy a nukleonok egymástól függetlenül egy átlag potenciálban vannak
- Sok potenciállal foglalkoztak, de egyik sem tudta önmagában reprodukálni a helyes mágikus számokat

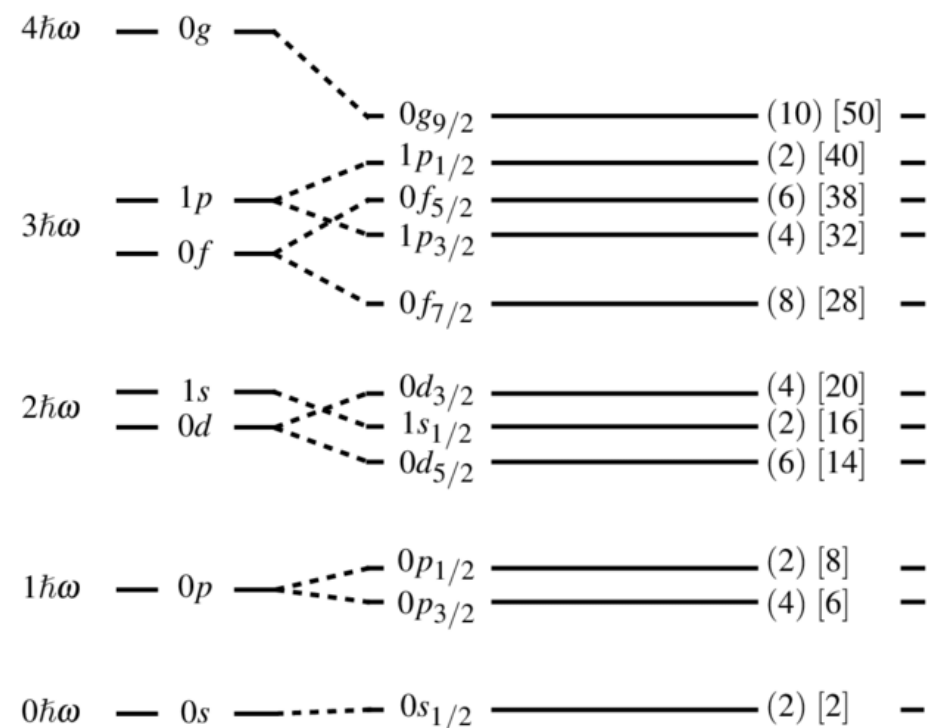


# Spin-pálya kölcsönhatás a héjmodellben

- 1948 Mayer: feltételezzünk erős spin-pálya kölcsönhatást a nukleonok között + HO

$$V = V(r) + V_{SO}(r)L \cdot S$$

- Kijönnek a mágikus számok
- 1963 Nobel díj Mayer, Jensen és Wigner

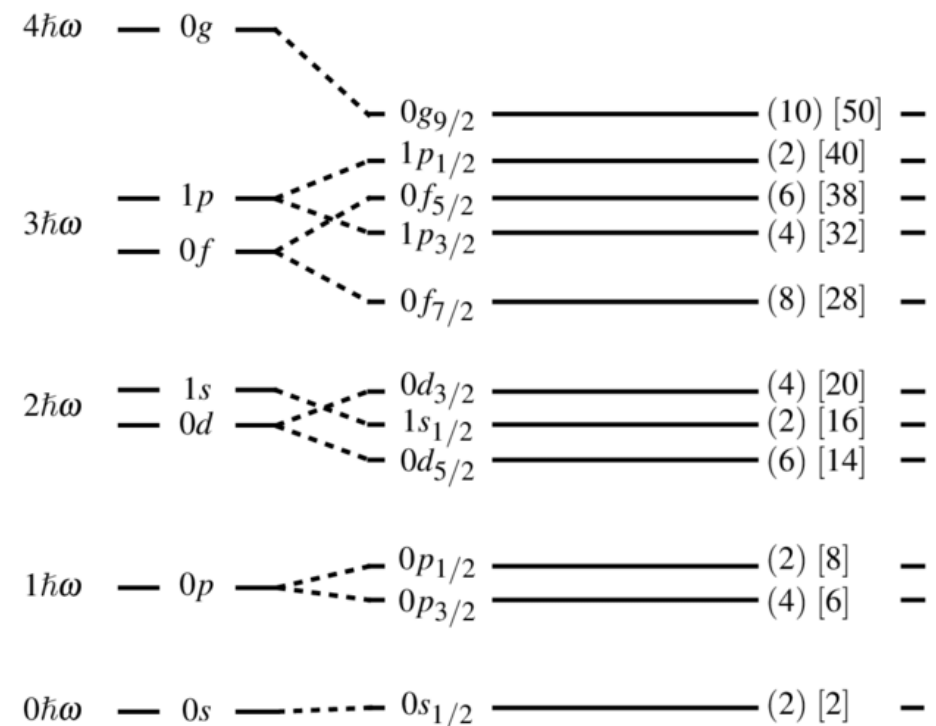


# Felhasadások energiája

- Centrális potenciál energia sajátállapotai  $\psi_{nlm} = R_n Y_{lm}$  alakúak
- A felhasadások energiáját megkaphatjuk a potenciál perturbációjával

$$\Delta E_{nlm} = \langle \psi_{nlm} | V_{SO}(r) L \cdot S | \psi_{nlm} \rangle$$

- Mivel  $L \cdot S = \frac{1}{2} (J^2 - L^2 - S^2)$
- $\Delta E_{nlm} = \frac{\hbar^2}{2} (j(j+1) - l(l+1) - s(s+1)) \langle V_{SO} \rangle$
- Felhasadás energiája  $\Delta E = \frac{\hbar^2}{2} (2l+1) \langle V_{SO} \rangle$

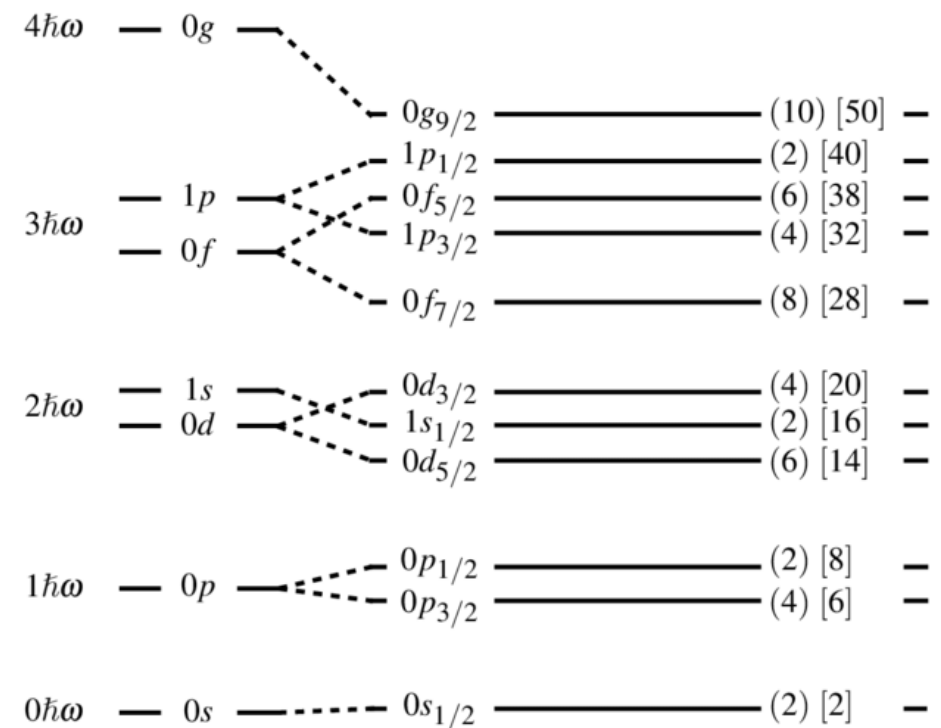


# Felhasadások energiája

- Ha  $j = l + \frac{1}{2}$  akkor  

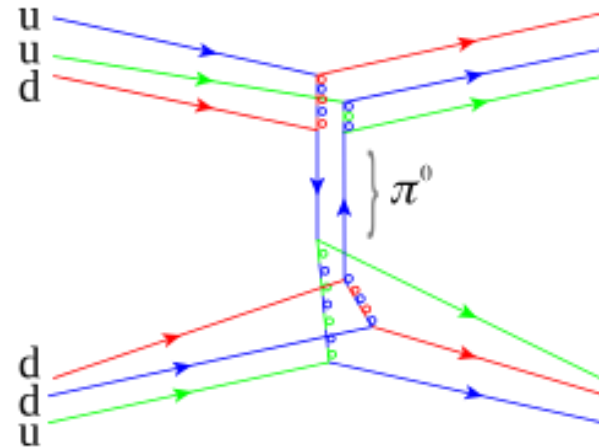
$$\Delta E = \frac{\hbar^2}{2} l \langle V_{SO} \rangle < 0$$
- Ha  $j = l - \frac{1}{2}$  akkor  

$$\Delta E = -\frac{\hbar^2}{2} (l + 1) \langle V_{SO} \rangle > 0$$
- Fordítva mint az atomokban
- $V_{SO}$  nem a klasszikus spin-pálya potenciál, előjele fordított és sokkal erősebb mint várnánk
- Elektromágneses dipólhatás kicsi
- Thomas tag nem elegendő



# Spin-pálya kölcsönhatás eredete

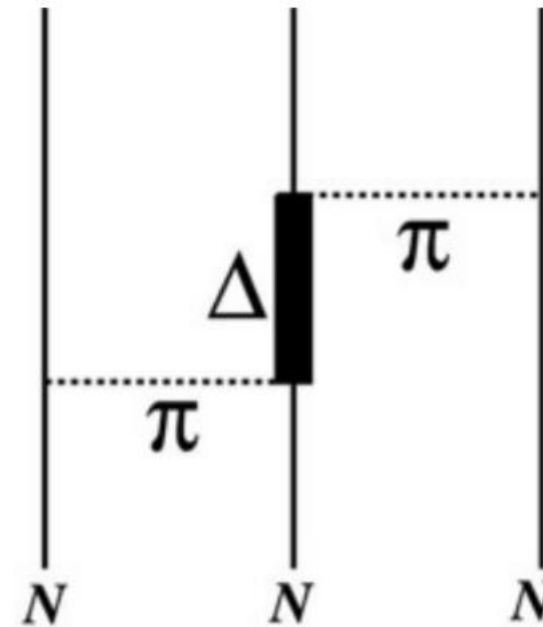
- Még most sem létezik olyan elméleti modell, ami megadná a helyes felhasadásokat konzisztensen
- Összetett effektusról van szó, több oka is van, hogy nagyon erős a spin-pálya kölcsönhatás
- Legnagyobb járulékot az erős kölcsönhatásból származó effektusok adják



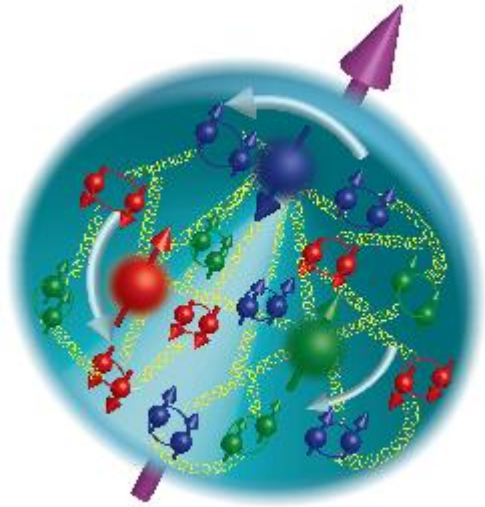


# Három test erők

- 1957 Fujita és Miyazawa: Három nukleon kölcsönhatásoknak jelentős szerepe van a spin-pálya kölcsönhatásban
- Az atommag belsejében két nukleon között más a potenciál alakja kb. 10%-os eltérés a potenciál mélységében



# Egyéb effektusok



- Nukleon-Nukleon spin kölcsönhatások
- Átlagtér effektusok
- $V_{SO} \sim \frac{1}{r} \frac{\partial \rho}{\partial r}$
- Relativisztikus effektusok, Thomas-tag
- Tensor-erők

# Kísérletek

---

- 1954 E. Fermi: Protonok rugalmas szórása atommagokon
- Szóródott protonok polarizációja alátámasztja a héjmodellhez szükséges erős spin-pálya kölcsönhatást
- 2014 G. Burgunder *et al.*: (d, p) transzferreakciók  ${}_{14}^{35}\text{Si}$  magokkal
- A mért felhasadásokat megegyeztek az elméleti számolásokkal

# Irodalom

- 
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic\\_nucleus](https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_nucleus)
  - <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>
  - [https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/PHYS136/%CE%94%CE%99%CE%91%CE%A6%CE%9F%CE%A1%CE%91/Mayer\\_Nobel\\_Lecture.pdf](https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/PHYS136/%CE%94%CE%99%CE%91%CE%A6%CE%9F%CE%A1%CE%91/Mayer_Nobel_Lecture.pdf)
  - [https://en.wikipedia.org/wiki/Semi-empirical\\_mass\\_formula](https://en.wikipedia.org/wiki/Semi-empirical_mass_formula)
  - [https://en.wikipedia.org/wiki/Ionization\\_energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Ionization_energy)
  - [https://en.wikipedia.org/wiki/Spin%E2%80%93orbit\\_interaction](https://en.wikipedia.org/wiki/Spin%E2%80%93orbit_interaction)
  - [https://www.researchgate.net/figure/Some-wavefunctions-of-the-hydrogen-atom-predicted-by-Schroedinger-equation-5\\_fig1\\_261288036](https://www.researchgate.net/figure/Some-wavefunctions-of-the-hydrogen-atom-predicted-by-Schroedinger-equation-5_fig1_261288036)
  - [https://www.researchgate.net/figure/The-rate-of-change-of-the-Wigner-rotation-gives-the-Thomas-precession-rate-dO-dt-The\\_fig2\\_48205023](https://www.researchgate.net/figure/The-rate-of-change-of-the-Wigner-rotation-gives-the-Thomas-precession-rate-dO-dt-The_fig2_48205023)
  - <https://agenda.infn.it/event/8712/contributions/74980/attachments/54587/64382/ExoticNuclei-Uesaka.pdf>
  - <https://cds.cern.ch/record/692814/files/0312058.pdf>
  - <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.70.2541>
  - <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.112.042502>

Köszönöm a figyelmet!