

**Darai Judit**  
**HUN-REN Atommagkutató Intézet**

**Atommagok deformációja és  
fürtösödése**

XVII. Magyar Magfizikus Találkozó  
2024. Szeptember 3-5.

# MUSY

Multikonfigurációs dinamikai szimmetria (**MUSY**)

*J. Cseh, Phys. Rev. C 103, 064322 (2021)*

Többszórási-probléma esetén az alapvető magszerkezeti modellek metszete  
→ **különböző jelenséges egységes leírása.**

# MUSY alkalmazások

**Alakizomérek** a szimmetria stabilitásából és konzisztenciájából.

Szerkezetileg megengedett **klaszterizációk** (megfelelő reakciócsatornák) megkeresése a szerkezetmodellek kapcsolata alapján.

**Spektrumok egységes leírása** különböző konfigurációkra, gerjesztési energia-tartományokban és deformációknál **közös Hamilton operátorral**.

**Sávon belüli  $B(E2)$  értékek** különböző konfigurációkra **közös  $T^{(2)}$  átmenet-operátorral**.

Összefoglalás

*J. Cseh, G. Riczu , and J. Darai, Symmetry 2023, 15, 115*

# Alapok: $U(3)$

Elliott 1958: könnyű magokban az  $U(3)$  szimmetria közelítőleg érvényes:

a magállapotoknak az

$U(3)$   $[n_1, n_2, n_3]$

$SU(3)$   $(\lambda, \mu)$

**kvantumszámok közelítőleg jó kvantumszámai**

$SU(3)$  kvantumszámok  $\leftrightarrow$  magalak, **kvadrupólus deformáció**

$(\lambda, \mu) \quad \leftrightarrow \quad (\beta, \gamma)$

(Könnyű magokban a harmonikus oszcillátor potenciálja a héjmodell-potenciálnak jó közelítése.)

# Alapok: $U(3)$

Erős szimmetriasértő kölcsönhatások (nagy gerjesztések, nehezebb atommagok): a valódi  $U(3)$  szimmetria letörik.

**Kvázidinamikai (effektív)  $U(3)$  szimmetria:**  
**effektív  $U(3)$  kvantumszámokkal** jellemezhetők a magállapotok.

*Rowe et al, JMP 29 (1988) 572*

**Módszer az effektív  $U(3)$  kvantumszámok meghatározására**

*Jarrio et al, Nucl. Phys. A 528 (1991) 409*

*P.O. Hess et al, EPJ A 15 (2002) 449*

kvadrupólus deformációból indulva Nilsson-héjmodell számolással.

Könnyű magok azon állapotaira, ahol a valódi  $U(3)$  szimmetria érvényes, a valódi és az effektív  $U(3)$  kvantumszámok jól egyeznek

# Stabil magalakok meghatározása

Az alakizomérek általában: energiafelületek minimumainak megkeresésével.

**Alternatív út stabil magalakok meghatározására:**

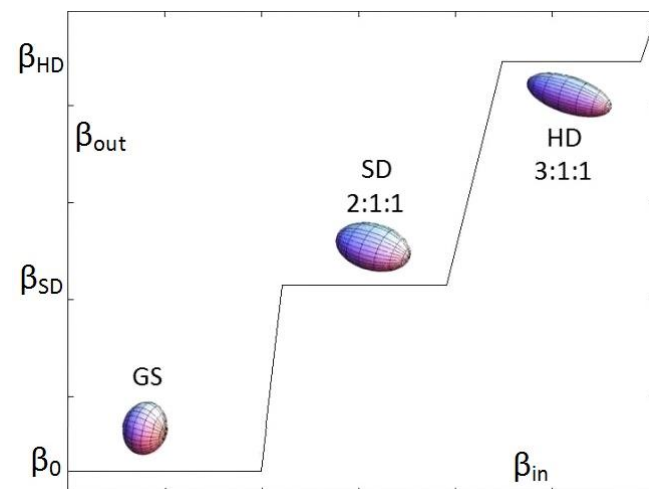
*J. Cseh, G. Riczu, J. Darai, Shape isomers of light nuclei from the stability and consistency of the SU(3) symmetry, Phys. Lett. B 795 (2019) 160.*

*J. Cseh, G. Riczu, J. Darai, A Symmetry In-between the Shapes, Shells, and Clusters of Nuclei, Symmetry 2023, 15, 115.*

# Stabil magalakok meghatározása

A mag **U(3)** szimmetriájának (a kvadrupólus deformációnak) a **stabilitását és önkonzisztenciáját** vizsgáljuk.

- kis lépésekben változtatjuk a bemenő  $\beta$ ,  $\gamma$  kvadrupólus deformációs paramétereket
- a Nilsson-modell alkalmazásával effektív U(3) kvantumszámokat számolunk, ezekből kimenő kvadrupólus deformációt határozunk meg (a köztük lévő egyértelmű kapcsolat alapján).

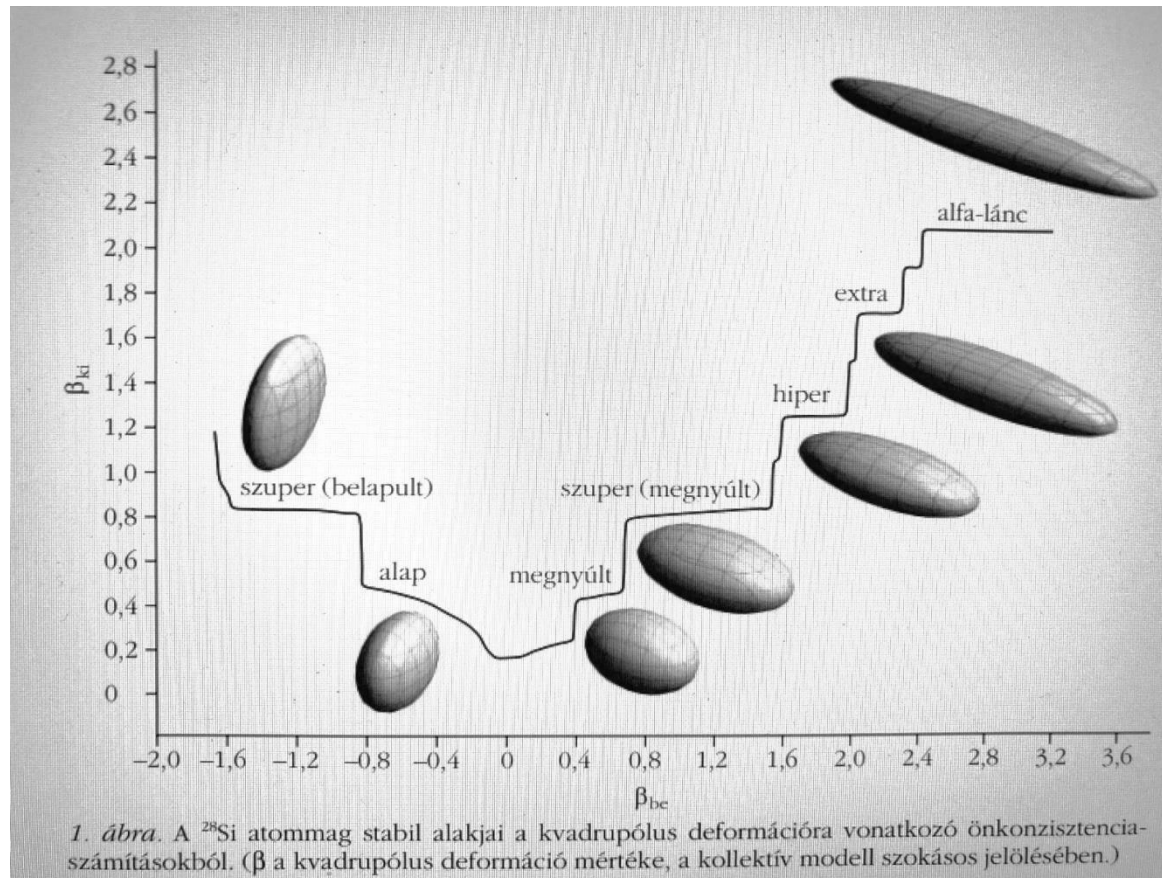


Az ábra:  $\beta_{out}$  ( $\beta_{in}$ ) függvény egy konstans  $\gamma$ -ra. Tipikusan egy lépcsős függvény, amelyben a platók felelnek meg a stabil alakizoméreknek:

Ezekon a helyeken **a kvadrupólus önkonzisztencia feltétel teljesül:**

$\beta_{out} \approx \beta_{in}$ , és a kimenő kvadrupólus-deformáció stabil (a bemenő paraméter kis változtatásával szemben).

# Stabil magalakok meghatározása



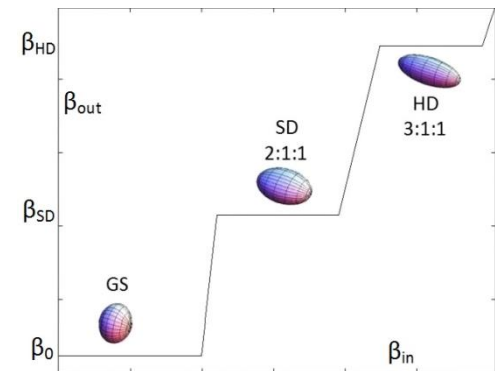
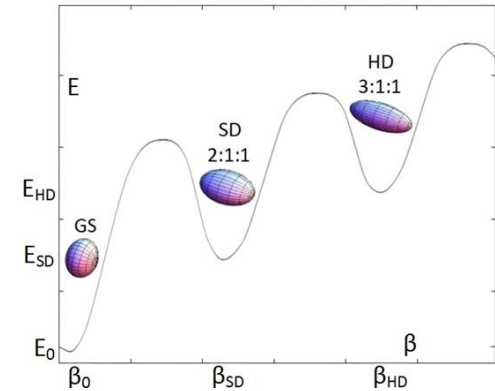


# Stabil magalakok meghatározása

Energiafelület-számítások:  
Nilsson-modell  
Block-Brink alfablaszter- modell

Eredményeink összehasonlítása  
ezekkel:  
deformációs paraméterek,  
gerjesztési kvantumok száma

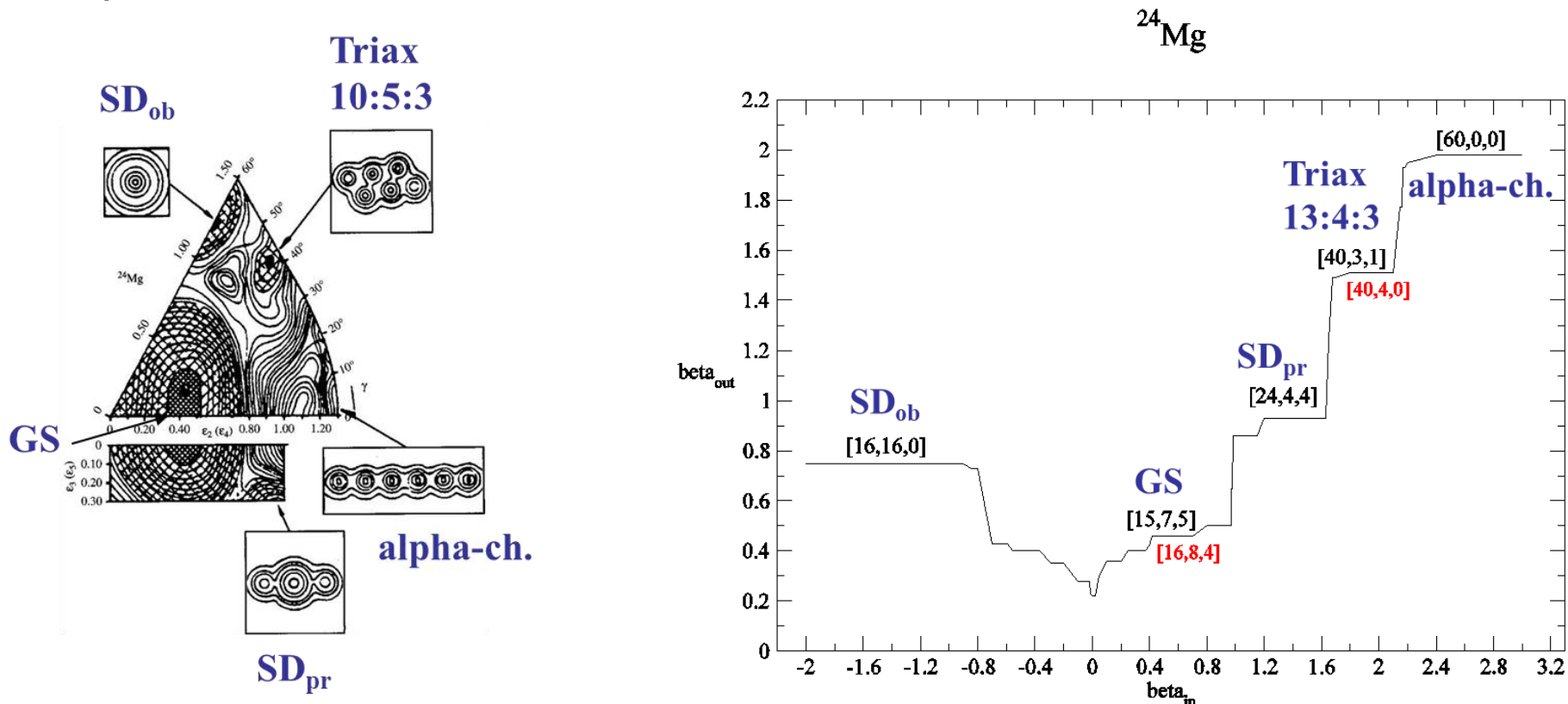
Könnyű magokra **jó egyezés.**



# Stabil magalakok meghatározása

Eredmények  ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ -ra ( $\gamma = 0$ ): összehasonlítás Nilsson modellen alapuló energiefelszín számításokkal és alfa-klaszter számításokkal.

Ábra közepe: Nilsson-számolásból energiefelszín.  
Kis képeken az alakok: alfa-klaszter cikkekből.



# Felbukkanó szimmetria

„Felbukkanó szimmetria” (emergent symmetry):

Szimmetria feltevéseket nem tartalmazó modellszámolásokból (nem szimmetria-alapon szerkesztett modelltér, tetszőleges, nem szimmetrikus nukleon-nukleon modell- vagy realisztikus kölcsönhatás)

→ **U(3) szimmetriával rendelkező sajátfüggvény-megoldásokat** is kaphatunk.

*Johnson C V 2015 Spin-orbit decomposition of ab initio nuclear wave functions Phys. Rev.C91 034313*

*Johnson C V 2019 Shadows of symmetries Nucl. Phys. News 29 18–21*

*Dytrych T et al 2020 Physics of nuclei: Key role of an emergent symmetry Phys. Rev. Lett. 124 042501*

*Launey K D, Dytrych T, Sargsyan G H, Baker R B and Draayer J P 2020 Emergent symplectic symmetry in atomic nuclei Eur. Phys. J.*

*Spec. Top. 229 2429–41*

# Felbukkanó szimmetria

Kvázidinamikai  $U(3)$  kvantumszámok **Nilsson modellszámításból** (nem  $U(3)$  szimmetrikus kölcsönhatás).

→ Az alapállapot mellett **az  $U(3)$  stabil és önkonzisztens a szuperdeformált, hiperdeformált és egyéb alakizoméerekre is.**

A eredmények a „**felbukkanó szimmetria**” megjelenésének tekinthetők.

Az atommagoknak van néhány egyensúlyi alakjuk a hozzájuk kapcsolódó forgási és vibrációs szabadsági fokokkal, és ez „nem kollektív modellfeltevésből” is kijön.

# Az alakizomérek fűrtösödése

## Megengedett klaszterizációk megkeresése

Pauli-elv: **U(3) kiválasztási szabály**  
(alap: a szerkezetmodellek kapcsolata)

Bináris klaszterkonfigurációra :

$$[n_1, n_2, n_3] = [n_1^{(1)}, n_2^{(1)}, n_3^{(1)}] \times [n_1^{(2)}, n_2^{(2)}, n_3^{(2)}] \times [n^{(R)}, 0, 0]$$

szülőmag                      klaszterek                      relatív mozgás

Spin-izospin szabadsági fokokra hasonló ( $U^{ST}(4)$ ) kiválasztási szabály.

A megengedett konfigurációk  $\rightarrow$  **reakciócsatornák**, amiben az adott alakizomér előállhat.

# Stabil magalakok meghatározása, az alakizomérek fűrtösödése

Szisztematikus vizsgálatok N=Z=páros magokra  $^{12}\text{C}$ -tól  $^{44}\text{Ti}$ -ig mind alakizomérek meghatározására, mind megengedett klaszterizációk megkeresésére:

*Phong Dang, Gábor Riczu and József Cseh, Shape isomers of  $\alpha$ -like nuclei in terms of the multiconfigurational dynamical symmetry, PHYSICAL REVIEW C 107, 044315 (2023)*

Kísérleti megerősítés:  $^{36}\text{Ar}$  HD,  $^{28}\text{Si}$  SD

# Kísérleti megerősítés

$^{36}\text{Ar}$

Lehetséges alakizomérek:

*J. Cseh, J. Darai, et al. Phys Rev. C 80 (2009) 034320*

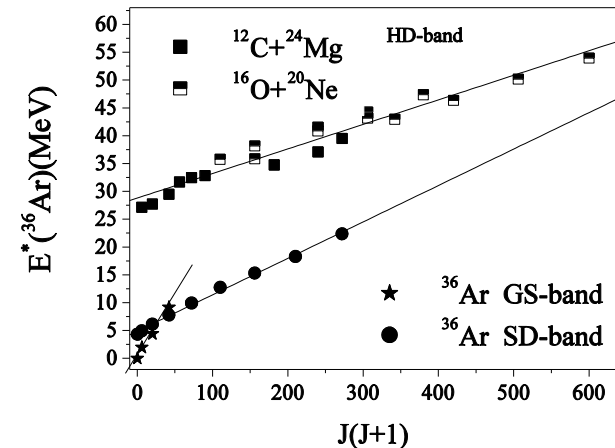
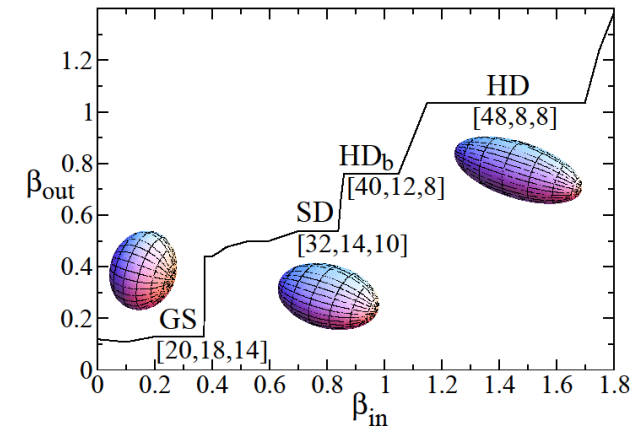
**Hiperdeformált állapotban megengedett klaszterizációk:**  
 $^{24}\text{Mg} + ^{12}\text{C}$  és  $^{20}\text{Ne} + ^{16}\text{O}$ .

S. Paolo-i kísérleti csoport,  $^{24}\text{Mg}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C})^{24}\text{Mg}$  rugalmas szórás: a hatáskeresztmetszetek csak úgy értelmezhetők, ha a potenciálszórásra ráülő rezonanciákkal írják le az eredményeket.

*W. Sciani, Y. Otani, A. Lépine-Szily, E. A. Benjamim, L. C. Chamon, R. Lichtenthaler Filho, J. Darai, J. Cseh, Phys. Rev. C 80 (2009) 034319*

Ez a **rezonancia-spektrum** a  $^{20}\text{Ne} + ^{16}\text{O}$  reakcióban korábban talált rezonanciákkal együtt egy **rotációs sávot** alkot. A tehetetlenségi nyomaték nagyon jól egyezik az általunk számolt hiperdeformált alakizomér tehetetlenségi nyomatékával.

Feltételezhetjük, hogy hogy ezen rezonanciák sorozata igen jó jelölt az  $^{36}\text{Ar}$  hiperdeformált állapotára. (Többszörös gamma-koincidencia mérésekben ellenőrizni!?)



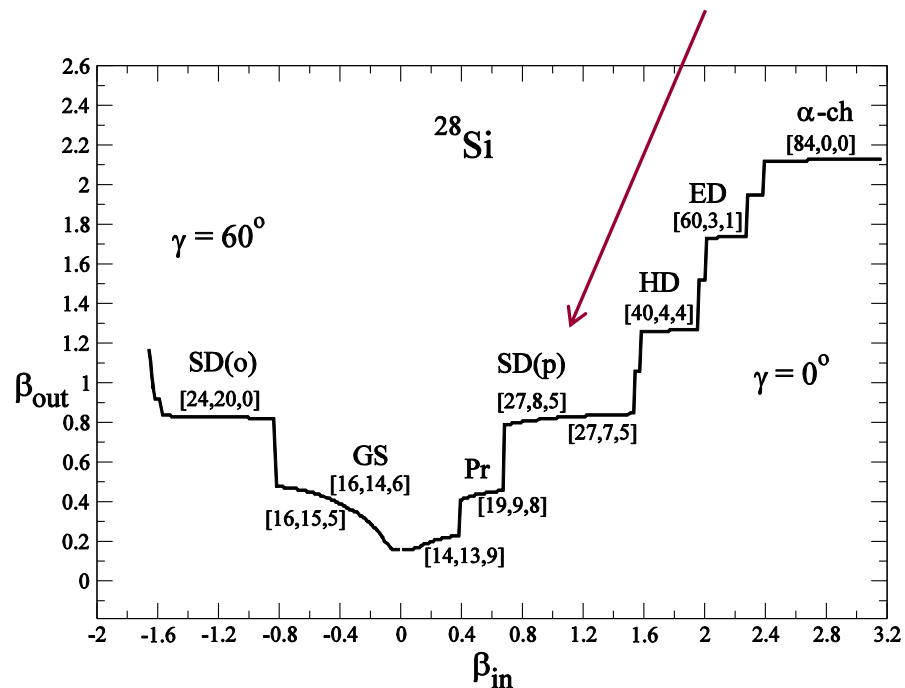
# Kísérleti megerősítés

**$^{28}\text{Si}$**

Jó egyezésben  $\alpha$ -klaszter és ún. AMD számolásokkal a  $^{28}\text{Si}$  szuperdeformált állapota.

*J. Darai, J. Cseh, D. Jenkins, Phys. Rev. C 86 (2012) 064309*

**Szuperdeformált állapotban a  $^4\text{He}+^{24}\text{Mg}$  és  $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$  fűrtösödések a legvalószínűbbek.**



Korábbi mérések újraértékelésével és azok újabb (Gammasphere) adatokkal való kiegészítésével szuperdeformált alakizomér-jelöltet találtak az általunk favorizált reakciócsatornáknak, amelynek tehetetlenségi nyomatéka jól egyezett a mi előrejelzésünkkel.

*D. Jenkins et al. Phys. Rev. C 86 (2012) 064308*



# Kísérleti megerősítés

2017-ben újonnan azonosított  $0+$  állapot: erős jelölt ennek a korábban azonosított, eddig  $2+$  -ről induló szuperdeformált sávnak a sávfejére.

*P. Adsley, D. G. Jenkins, J. Cseh et al, Phys. Rev. C 95, 024319 (2017)*

Újabb módszerrel átmeneterősségek mérése:

*L. Morris, D. G. Jenkins et al, Phys. Rev. C 104, 054323 (2021)*

$4+ \rightarrow 2+$  B(E2) átmenet erősség egy AMD elméleti jóslathoz képest kicsi  $\rightarrow$

???

# B(E2) átmenet erősségek szuperdeformált sávokban

Kísérleti oldalról: a sávon belüli átmeneterősség erős jele a nagy deformációnak. Az elméletileg megjósolt értékekhez való viszonya bizonyítéknak tekinthető pl. a szuperdeformált alak mellett vagy ellen.

*G Riczu, J Darai and J Cseh, Superdeformation and dynamical symmetry, Phys. Scr. 99 045306 (2024)*

$^{28}\text{Si}$  -  $^{44}\text{Ti}$  tartományban az irodalomban **szuperdeformáltak** tekintett sávok szisztematikus áttekintése:

**B(E2) átmenet erősségek** meghatározása néhány, a 2000-es években **kísérletileg vizsgált** könnyű atommag szuperdeformált sávjában.

# B(E2) átmenet erősségek szuperdeformált sávokban

1. Alakizomérek meghatározása, SD jelöltek kiválasztása.
2. B(E2) átmeneterősség-értékek meghatározása:

## 4. In-band transitions

The in-band B(E2) value is given as

$$B(E2, I_i \rightarrow I_f) = \frac{2I_f + 1}{2I_i + 1} \alpha^2 |\langle (\lambda, \mu) KI_i, (11)2 | (\lambda, \mu) KI_f \rangle|^2 C_{SU(3)}^{(2)} \quad (10)$$

where  $\langle (\lambda, \mu) KI_i, (11)2 | (\lambda, \mu) KI_f \rangle$  is a  $SU(3) \supset SO(3)$  Wigner coefficient [53],  $\alpha^2$  (measured in W.u.) is a parameter (table 1), and  $C_{SU(3)}^{(2)} = \lambda^2 + \mu^2 + \lambda\mu + 3(\lambda + \mu)$  is the second order invariant of the  $SU(3)$ . These values are the matrix elements of the transition operator  $T^{(2)}$ , which is the product of the quadrupole operator and the effective charge:  $T^{(2)} = e^{(eff)} Q^{(2)}$ .

Különböző konfigurációkra ugyanazt az átmenet-operátort használhattuk (MUSY).

# B(E2) átmenet erősségek szuperdeformált sávokban

Számolt B(E2) értékek: **jól közelítik a kísérletileg ismert értékeket.**

Konkrétan a  $^{28}\text{Si}$  esetében pl. a **szuperdeformált sáv** jelöltjét a már említett cikkben

- *L. Morris, D. G. Jenkins et al, Phys. Rev. C 104, 054323 (2021)* –

elutasították, mert AMD számolások a  $4+ \rightarrow 2+$  átmenetre nagy B(E2) értéket (188,1 W.u.) jósoltak, a kísérlet pedig  $< 43$  W.u. értéket adott. A mi U(3) eredményünk sokkal kisebb: 56,8 W.u., ez „megengedi”, hogy a sáv tényleg a szuperdeformált sáv legyen.

Modellszámításokon alapuló következtetések: óvatos körültekintés kell 😊.

# Kitekintés

Ilyen típusú leírásokat több más magra is tervezünk elvégezni.

Újabb eredményeink kísérleti megerősítésére is együttműködés van kilátásban.

**Köszönöm a figyelmet!**