

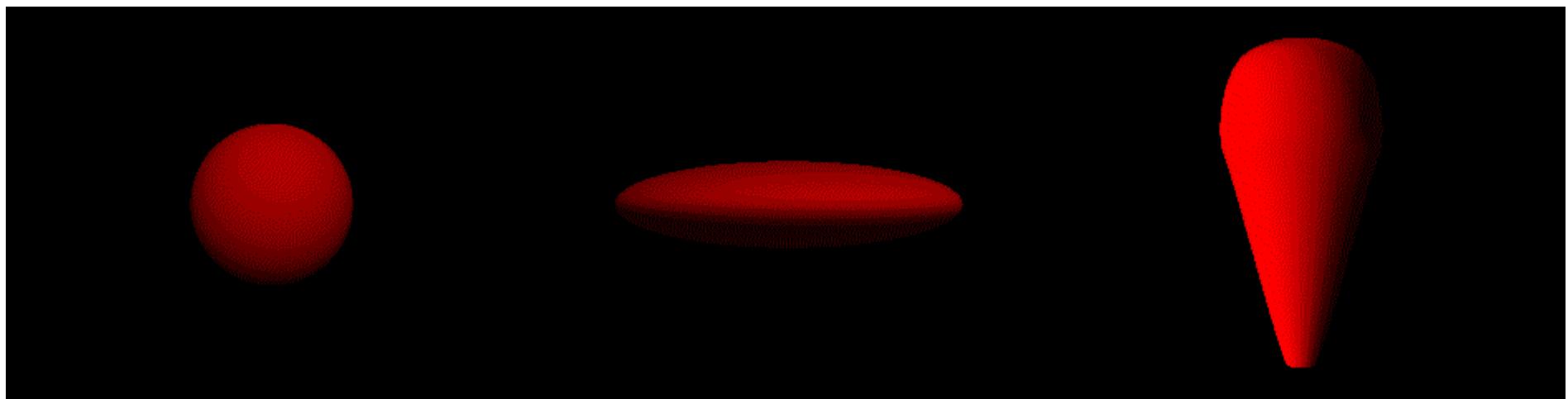
KOLEKTIVNI MODEL JEZGRE



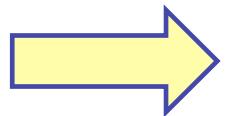
Kolektivna pobuđenja u jezgrama predstavljaju koherentno gibanje većeg broja nukleona. Kolektivno gibanje opisuje se Hamiltonijanom koji je funkcija makroskopskih koordinata sistema => masa, polumjer, volumen.

U prvoj aproksimaciji jezgra kao **nabijena kapljica nuklearne tekućine**

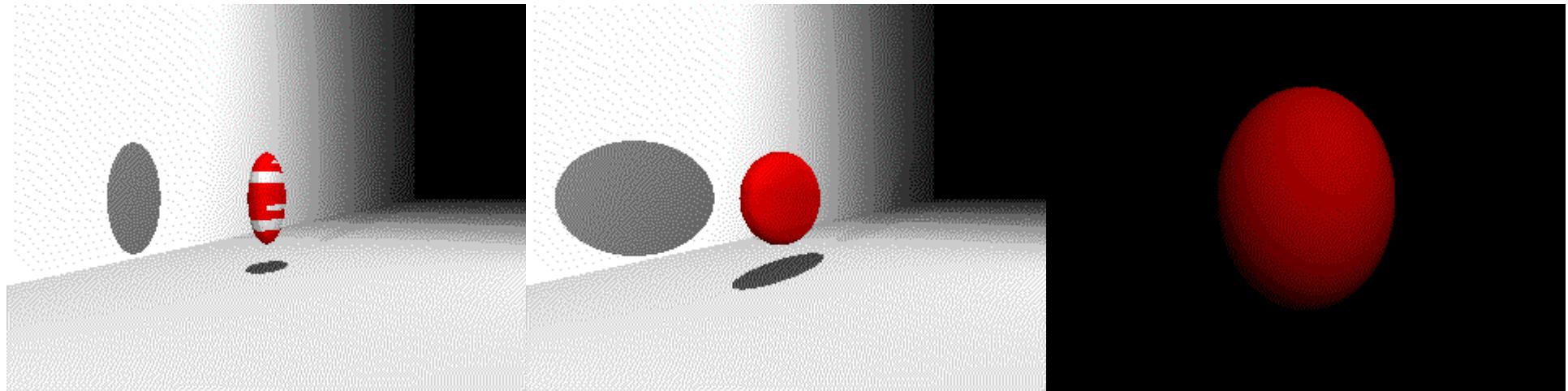
Ako prepostavimo da je jezgra sferična u ravnotežnom stanju, jedini modovi pobuđenja su **VIBRACIJE**:



DEFORMIRANE JEZGRE



ROTACIJE + VIBRACIJE



VIBRACIONI MODEL – u modelu kapljice, svojstva vibracionog gibanja se mogu opisati u međudjelovanju između površinske napetosti i volumne energije.

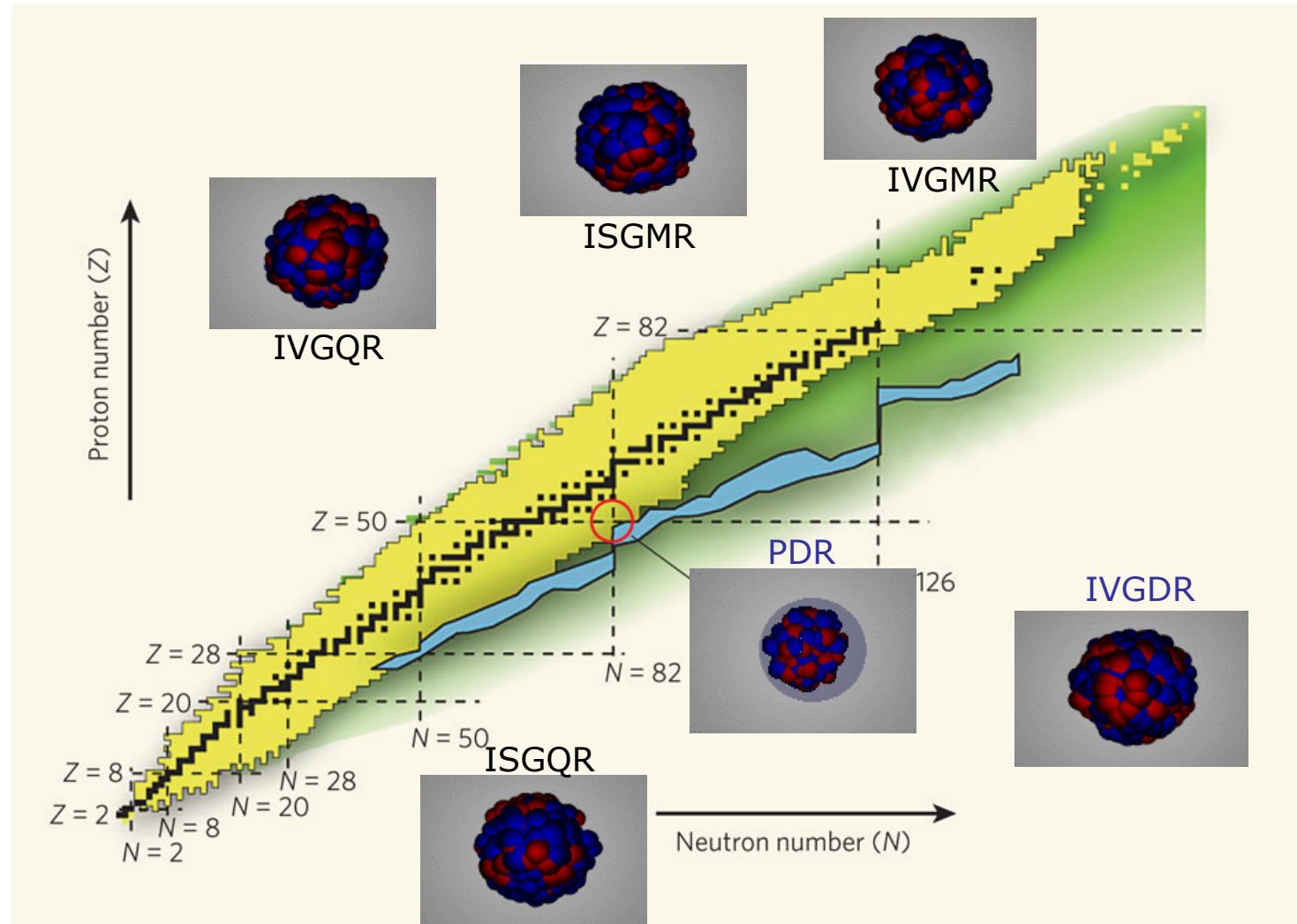
Pretp. da je jezgra u ravnotežnom stanju sferičnog oblika, nema rotacionih stupnjeva slobode.

Kada jezgra preuzme dodatnu energiju čestice koja proleti u blizini (npr. dolazi do Coulombovog pobuđenja), može početi oscilirati oko ravnotežnog oblika. Mogući su različiti vibracioni modovi pobuđenja.

KOLEKTIVNE VIBRACIJE JEZGARA

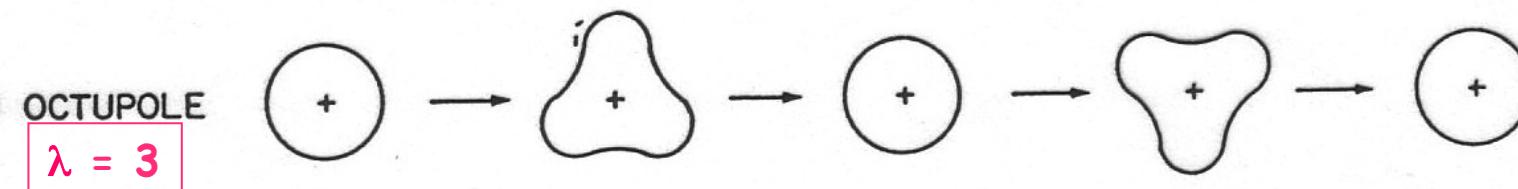
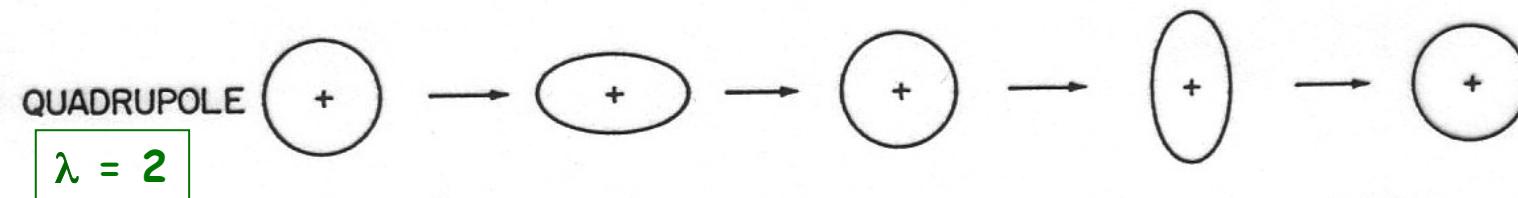
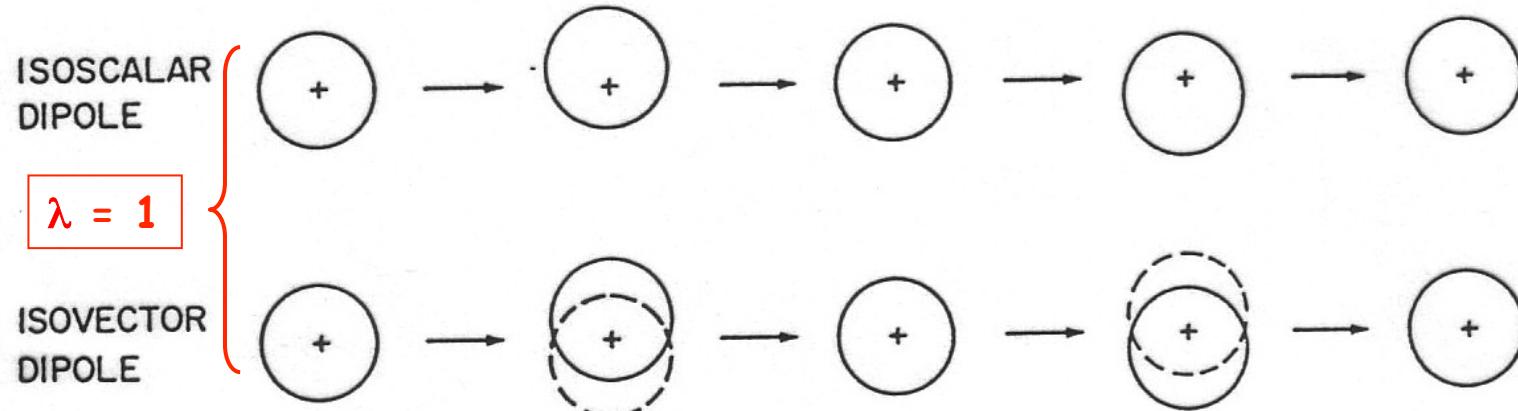
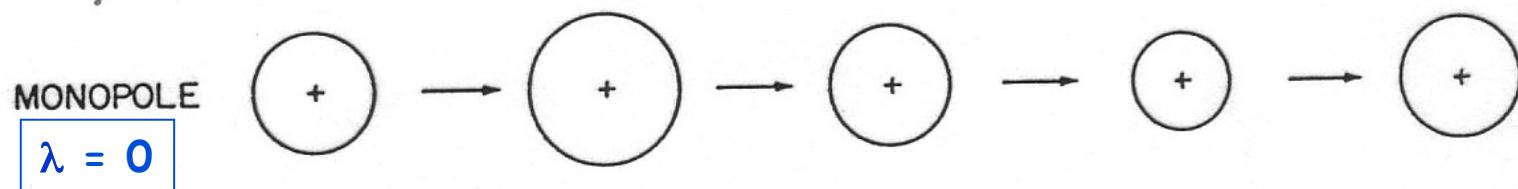
Gigantske rezonancije: GDR, GMR, GQR, GTR ...

Egzotični modovi: "Pygmy" rezonancije (PDR), toroidalni modovi,...



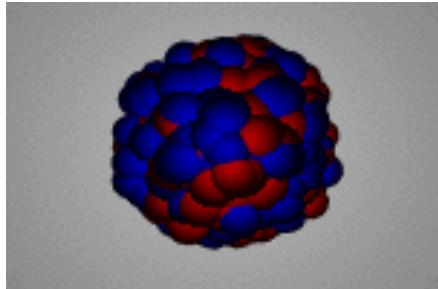
Animations:
T. Aumann et al.

VIBRACIONI MODOVI:



GIGANTSKE REZONANCIJE – kolektivna pobuđenja u jezgrama, ukupna prijelazna snaga i širina su znatno veće od pobuđenih stanja temeljenih na jednočestičnim pobuđenjima.

1. OSCILACIJE GUSTOĆE



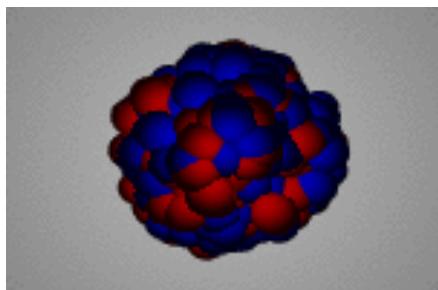
Isoskalarna gigantska monopolna rezonancija (ISGMR)

$\lambda=0$ mijenja se volumen jezgre, ali ne i njen oblik. Protoni i neutroni zajedno osciliraju u fazi.

Energija pobuđenja ovog moda omogućuje uvid u kompresibilnost nuklearne materije.

Nuklearna materija ima visok modul kompresibilnosti
K≈230 MeV

energije ovog moda vibracija su relativno visoke **≈80 A^{-1/3}**.



Izovektorska gigantska monopolna rezonancija (IVGMR)

Također se mijenja volumen jezgre, oblik ostaje isti, ali protoni i neutroni osciliraju u protufazi.

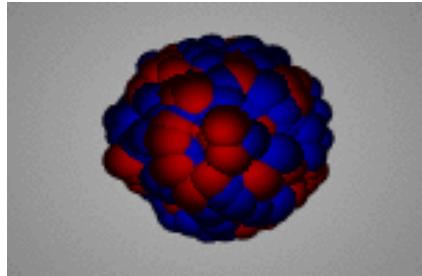
2. OSCILACIJE OBLIKA

Ako nema promjene gustoće, energija pobuđenja je mnogo niža ($\approx 1\text{-}2$ MeV za jednofononska stanja)

$\lambda=1$

T=0 izoskalani dipolni mod: oscilacije oko fiksne točke u laboratorijskom sustavu. Svi se nukleoni gibaju zajedno i nema promjene interne strukture jezgre => **OSCILACIJE CENTRA MASE**

$\lambda=1$



T=1 izovektorski dipolni mod: protoni i neutroni osciliraju u protufazi => **GIGANTSKE DIPOLNE REZONANCIJE**

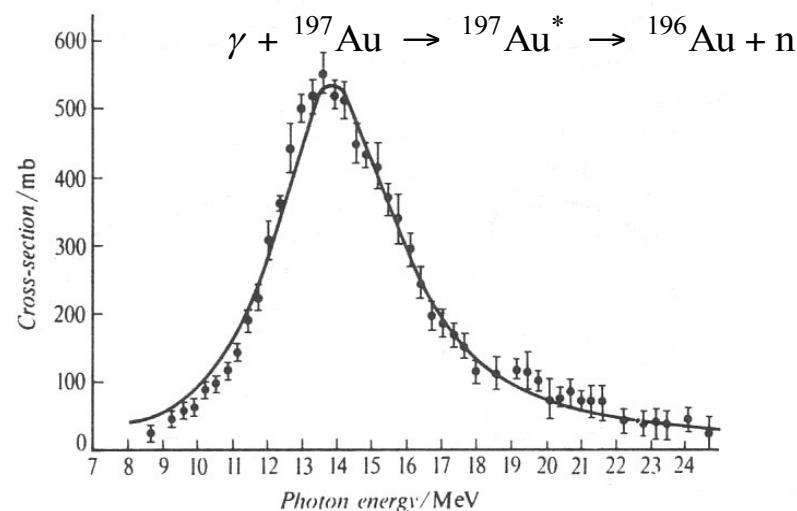
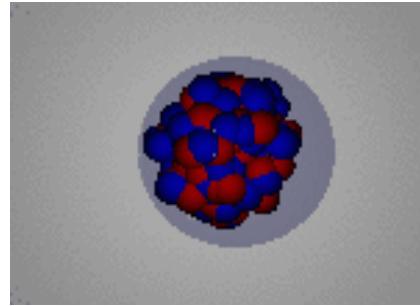
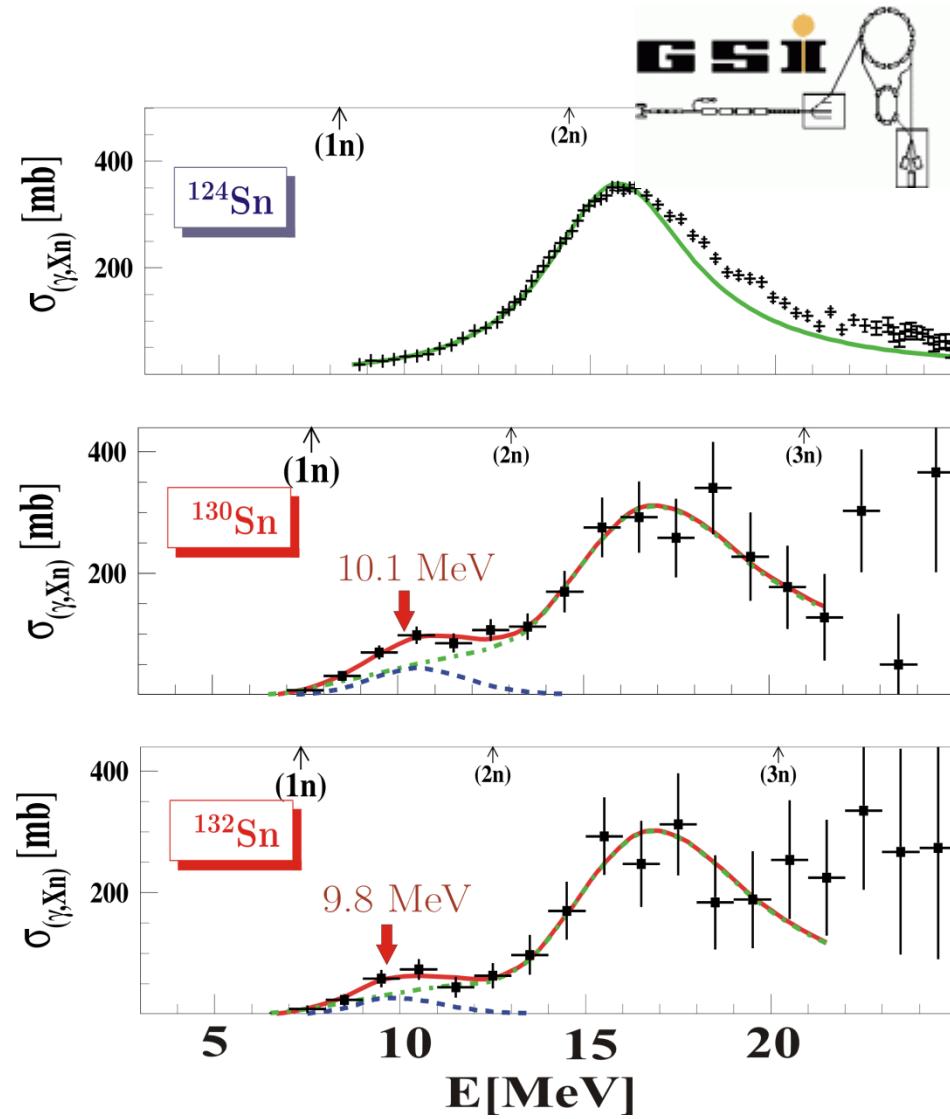


Fig. 8.10 Giant resonance of photodisintegration in ^{197}Au . The yield of neutrons is shown as a function of the energy of the monochromatic photons used to produce the reaction (Fultz, S. C. et al., *Phys. Rev.*, **127**, 1273, 1963).

Egzotični modovi pobuđenja u nestabilnim jezgrama
=> "PYGMY" DIPOLE REZONANCIJE

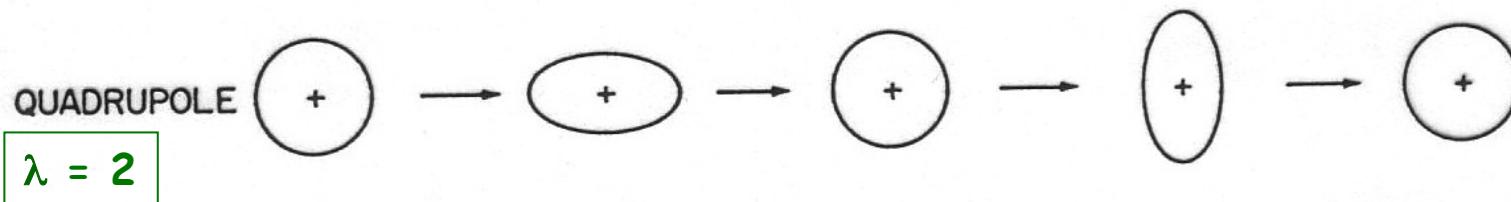


Slabo vezani neutroni
osciliraju oko sredice jezgre.

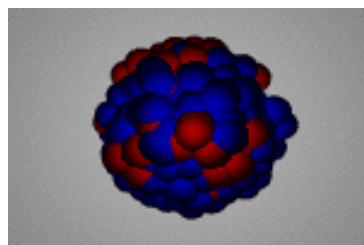


P.Adrich et al., Phys. Rev. Lett. 95, 132501(2005)

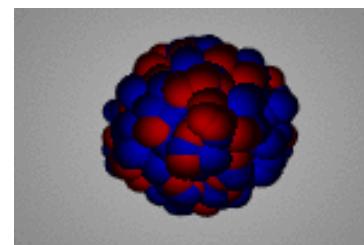
$\lambda=2$ KVADRUPOLNE OSCILACIJE: jezgra kontinuirano mijenja oblik iz sferičnog u oblik izduženog i spljoštenog elipsoida.



GIGANTSKE KVADRUPOLNE REZONANCIJE



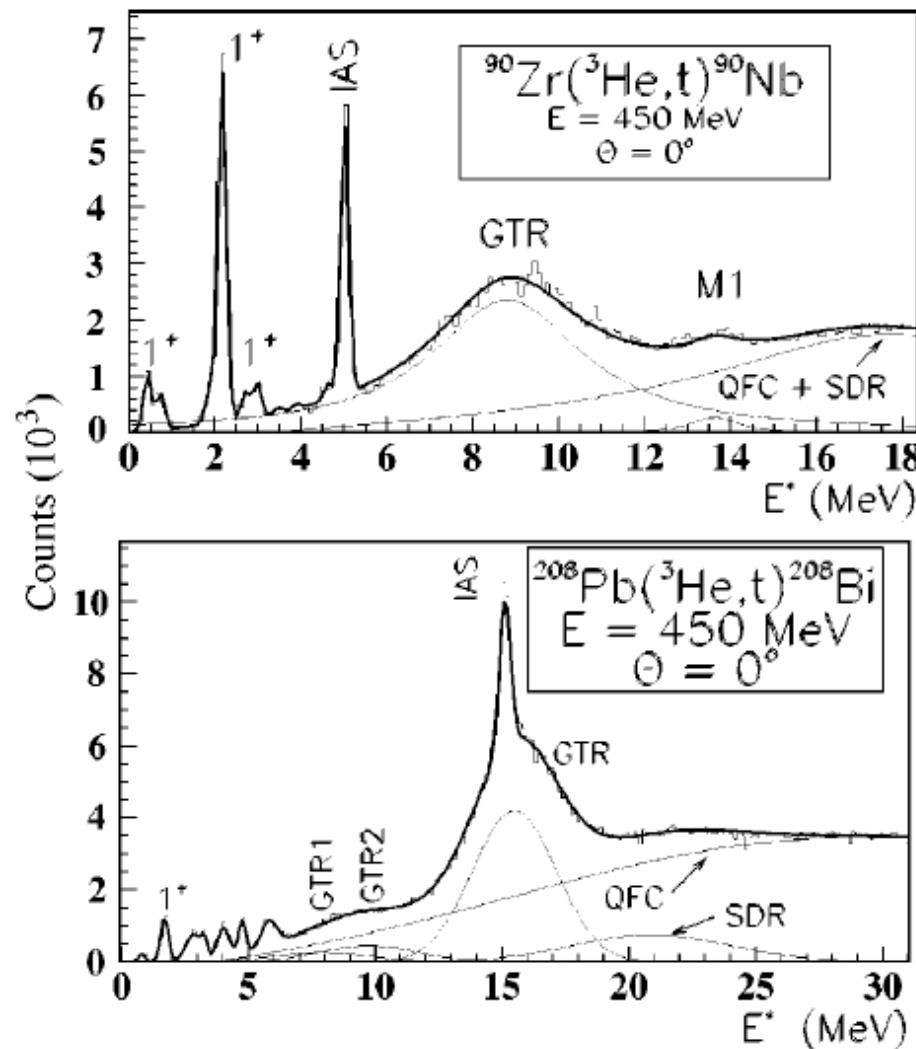
Izoskalarne (protoni i neutroni osciliraju u fazi)



Izovektorske (protoni i neutroni osciliraju u protufazi)

3. OSCILACIJE SA IZMJENOM NABOJA (GAMOW-TELLER REZONANCIJE)

Rezonancije koje se pobuđuju u reakcijama s izmjenom naboja, npr. (p,n), (3He,t).



Operator prijelaza za Gamow-Teller pobuđenja:

$$\hat{O}_{GT}^{\pm} = G_A \sum_{k=1}^A \vec{\sigma}(k) \vec{\tau}_{\mp}(k)$$

Parametrizacija površine jezgre: odstupanje od sferičnog oblika se može izraziti preko parametara površine $\alpha_{\lambda\mu}(t)$ definiranih na sljedeći način:

$$R(\theta, \phi, t) = R_0 \left[1 + \sum_{\lambda\mu} \alpha_{\lambda\mu}(t) Y_{\lambda\mu}(\theta, \phi) \right]$$

polumjer sferične jezgre

parametri površine dinamičke varijable

HAMILTONIJAN koji opisuje oscilacije površine:

1. KINETIČKA ENERGIJA (u granici malih amplituda)

Kada jezgra mijenja oblik, nukleoni se gibaju s jedne na drugu lokaciju, što doprinosi kinetičkoj energiji. Dakle, možemo je izraziti preko parametara koji definiraju oblik jezgre, tj. promjenom parametara površine u vremenu:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{\lambda\mu} D_\lambda \left| \frac{d\alpha_{\lambda\mu}}{dt} \right|^2$$

D λ -> PARAMETAR INERCIJE (MASE) MULTIPOLA λ .

2. POTENCIJALNA ENERGIJA:

-Pretp. sferičan ravnotežni oblik jezgre - minimalna potencijalna energija odgovara $\alpha_{\lambda\mu}(t)=0 \rightarrow$ vodeći član potencijalne energije oko minimuma je kvadratičan u $\alpha_{\lambda\mu}$

-u granici malih amplituda oscilacija zanemaruju se članovi s višim potencijama $\alpha_{\lambda\mu}$.

$$V = \frac{1}{2} \sum_{\lambda\mu} C_\lambda |\alpha_{\lambda\mu}|^2$$

Potencijalnoj energiji doprinose:

- 1) energija napetosti površine nabijene kapljice nuklearne tekućine
- 2) elektrostatska energija protona

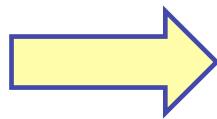
$$C_\lambda = \frac{1}{4\pi} (\lambda - 1)(\lambda + 2) \alpha_2 A^{2/3} - \frac{5}{2\pi} \frac{\lambda - 1}{2\lambda + 1} \alpha_3 \frac{Z(Z - 1)}{A^{1/3}}$$

parametri površinske i Coulomb energije u formuli mase

HAMILTONIJAN VIBRACIJA ZA MULTIPOLNI MOD λ

$$H_\lambda = \frac{1}{2} C_\lambda \sum_\mu |\alpha_{\lambda\mu}|^2 + \frac{1}{2} D_\lambda \sum_\mu \left| \frac{d\alpha_{\lambda\mu}}{dt} \right|^2$$

Ako različiti modovi vibracija nisu međusobno vezani i ako nisu vezani s drugim stupnjevima slobode:



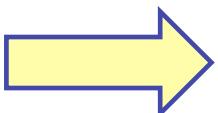
$H_\lambda, C_\lambda, D_\lambda$ konstante gibanja.

Ako su modovi razvezani, nema transfera energije iz jednog moda u drugi:

$$\frac{dH_\lambda}{dt} = 0 \quad \rightarrow$$

Jednadžba gibanja:

$$D_\lambda \frac{d^2\alpha_{\lambda\mu}}{dt^2} + C_\lambda \alpha_{\lambda\mu} = 0$$



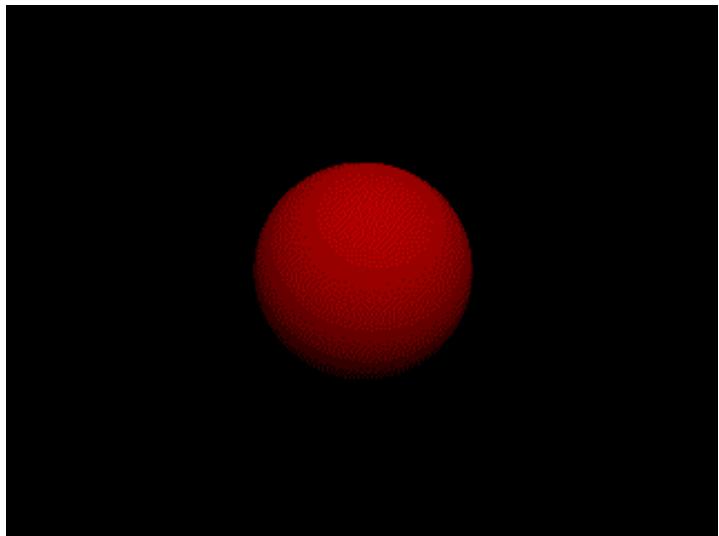
Frekvencija oscilacija: $\omega_\lambda = \left(\frac{C_\lambda}{D_\lambda}\right)^{1/2}$

KVANTIZACIJA NUKLEARNIH VIBRACIJA:

FONON -> vibracioni kvant energije $\hbar\omega_\lambda$. Bozon ang. momenta $\hbar\lambda$ i pariteta $(-1)^\lambda$.

Oscilacije oblika: za svaki λ imamo harmonički spektar pobuđenih stanja.

PRIMJER: KVADRUPOLNE VIBRACIJE



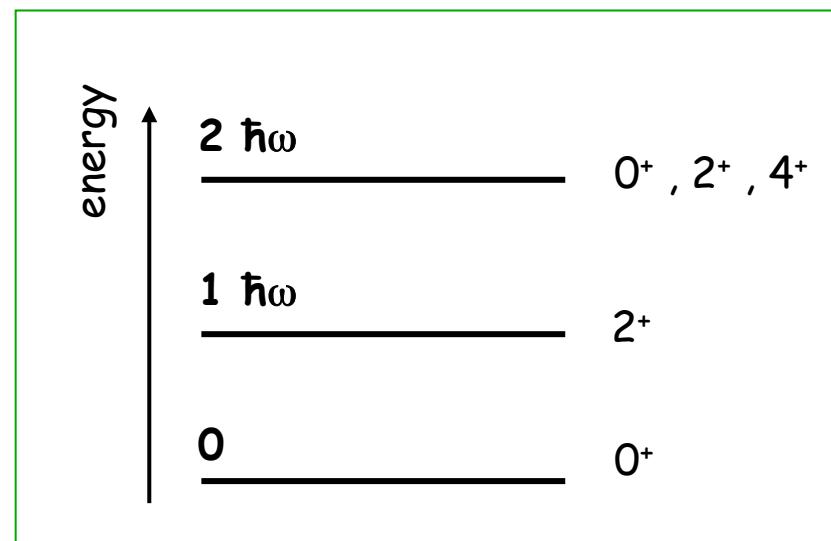
Moguća su i više-fononska pobuđena stanja:
npr. superpozicija dva kvadrupolna bozona ($\lambda=2$)
daje tri kombinacije angularnog momenta :
 $J^{\pi}=0^+, 2^+, 4^+$

$$|n = 2; JM\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \langle 2\mu_1, 2\mu_2 | JM \rangle b_{2\mu_1}^+ b_{2\mu_2}^+ |0\rangle$$

Stanja sa $J=1,3$ iščezavaju zbog svojstva
Clebsch-Gordan koeficijenta:

$$\langle 2\mu_1 2\mu_2 | JM \rangle = (-1)^J \langle 2\mu_2 2\mu_1 | JM \rangle$$

U mnogo parno-parnih sferičnih jezgara
(npr. Cd, Sn), prvo pobuđeno stanje
je 2^+ , a na \approx dvostrukoj energiji
pobuđenja nalazimo triplet $0^+, 2^+, 4^+$
(dvo-fononska stanja) .



ELEKTROMAGNETSKI PRIJELAZI

Osim spektra pobuđenih stanja, model vibracija opisuje i elektromagnetske prijelaze između stanja karakteriziranih različitim brojem fonona

Stanja harmoničkog oscilatora => prijelaz iz n-fononskog stanja u (n-1)-fononsko stanje odvija se uz emisiju jednog kvanta energije $\hbar\omega_\lambda$. U modelu vibracija jezgre aproksimiranih harmoničkim oscilacijama => operator električnih prijelaza je

$$\mathcal{O}_{\lambda\mu}(E\lambda) \sim b_{\lambda\mu}$$

Operator anihilacije fonona multipolariteta (λ,μ)

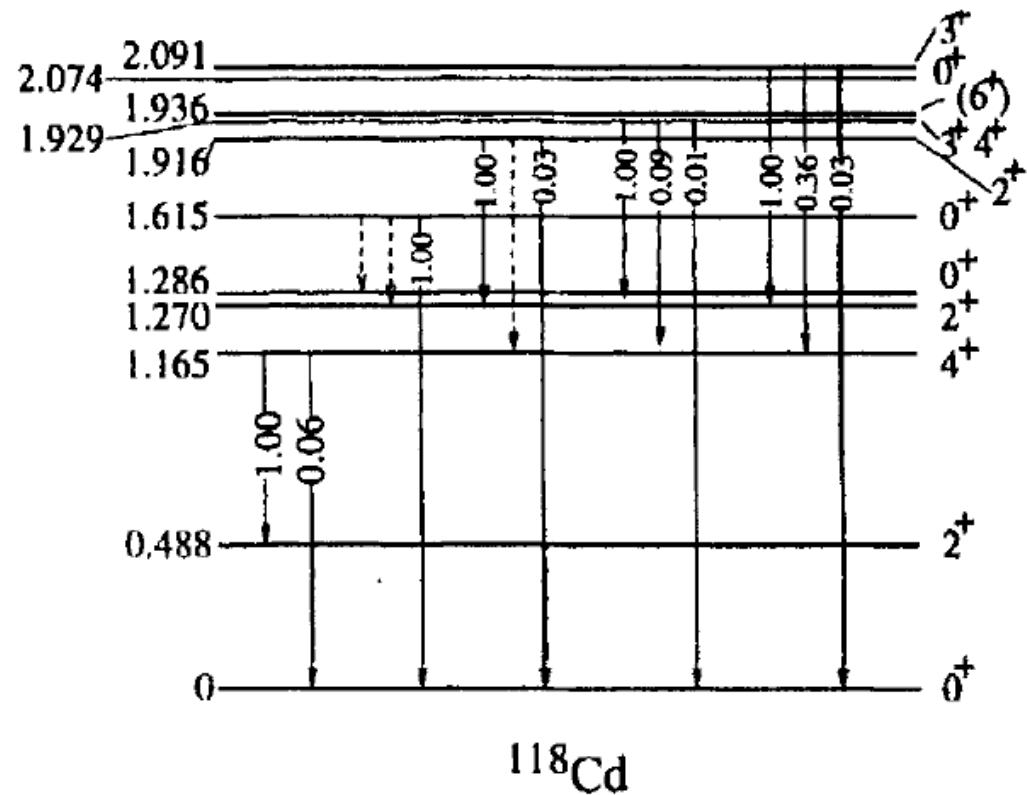
Matrični element u bazi harmoničkog oscilatora:

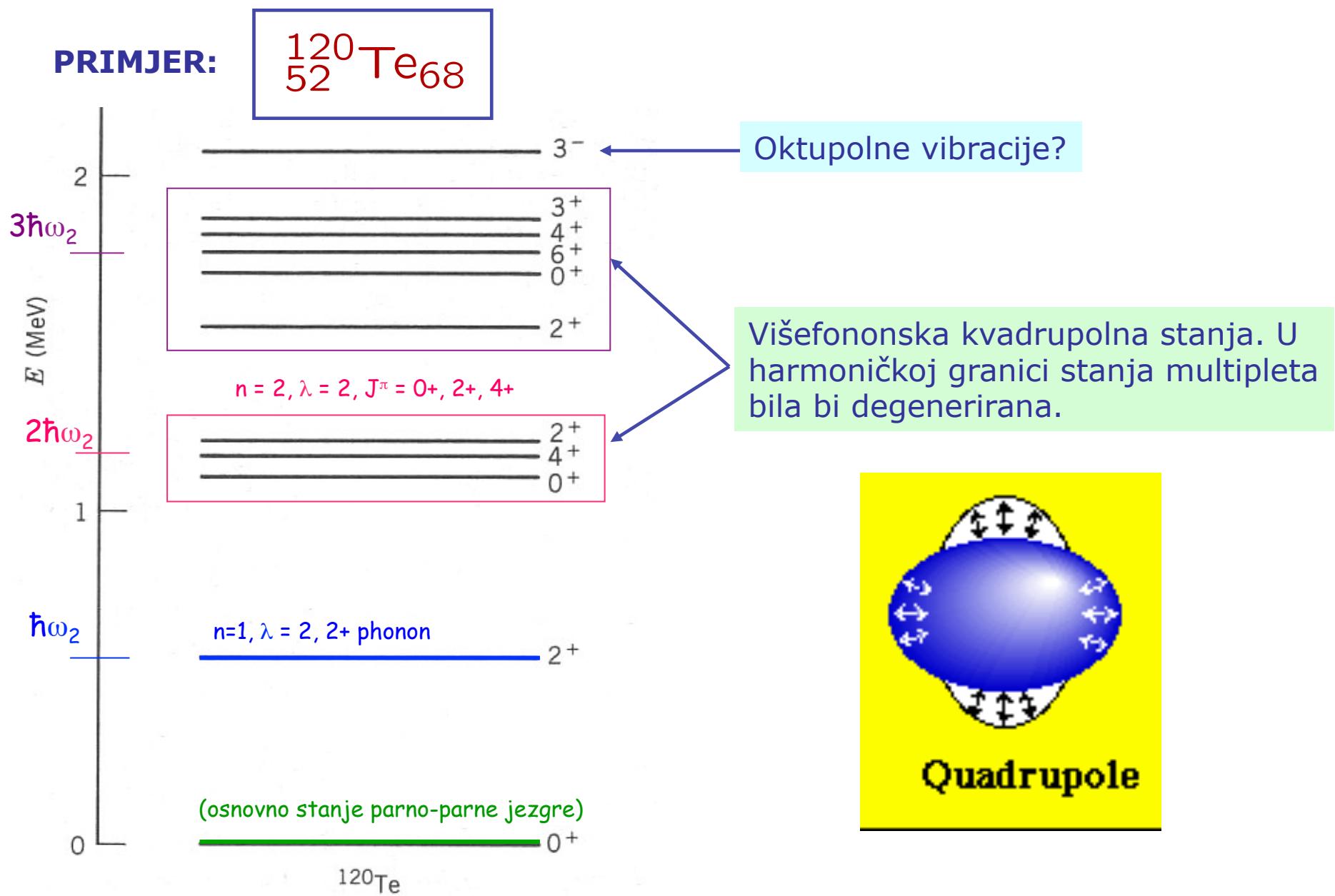
$$\langle n' | b_{\lambda\mu} | n \rangle = \sqrt{n} \delta_{n',n-1}$$

Reducirana vjerojatnost prijelaza:

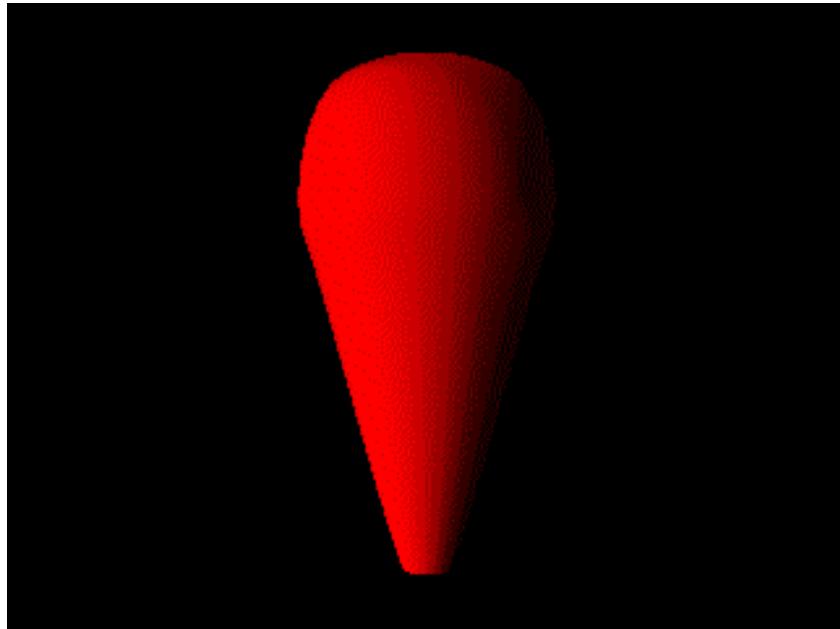
$$B(E\lambda, n \rightarrow n-1) \sim n$$

Vjerojatnost prijelaza iz dvo-fononskog stanja u jedno-fononsko stanje je veća od jednočestičnih prijelaza i dvostruko veća od prijelaza iz jedno-fononskog stanja. Vjerojatnost prijelaza višeg reda (razlikuju se za više od jednog fonona) je mala.





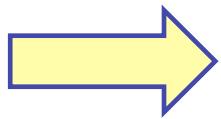
PRIMJER: jednofononska oktupolna stanja 3^-



U mikroskopskoj slici jezgre gdje nukleoni zauzimaju jednočestična stanja: pobuđena stanja dobivaju se prijelazima nukleona iz zauzete orbite ispod Fermijeve plohe u prazno stanje iznad (čestica – šupljina (1p-1h) pobuđenje).

→ stanje negativnog pariteta 3^- odgovara 1p-1h pobuđenju energije $\approx 41 A^{-1/3}$ (da bi izgradili stanje negativnog pariteta, nukleon treba pobuditi u slijedeću nepotpunjenu oscilatorsku ljusku). To znači ≈ 16 MeV u ^{16}O , ≈ 7 MeV u ^{208}Pb .

EKSPERIMENTALNE ENERGIJE POBUĐENJA JEDNOFONONSKIH STANJA 3^- :



| | | |
|-------------------|---------------|----------|
| ^{16}O | \rightarrow | 8.13 MeV |
| ^{40}Ca | \rightarrow | 3.74 MeV |
| ^{90}Zr | \rightarrow | 2.75 MeV |
| ^{208}Pb | \rightarrow | 2.61 MeV |

Eksperimentalne energije pobuđenja mnogo su niže od $41A^{-1/3}$ => evidencija da se radi o kolektivnim jednofononskim stanjima.