



Univerzita Komenského v Bratislave

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky



RNDr. Jozef Leja

Autoreferát dizertačnej práce

RELATIVISTICKÉ MODELY EXOTICKÝCH ATÓMOVÝCH JADIER

na získanie akademického titulu philosophiae doctor

v odbore doktorandského štúdia:

4.1.5. Jadrová a subjadrová fyzika

Bratislava 2018

**Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na
Fyzikálnom ústave Slovenskej akadémie vied**

Predkladateľ: RNDr. Jozef Leja
Encyklopedický ústav SAV
Bradáčová 7
Bratislava 851 02

Školiteľ: Ing. Štefan Gmuca, CSc.
Fyzikálny ústav SAV
Dúbravská cesta 9
Bratislava 845 11

Štúdijný odbor: 4.1.5. jadrová a subjadrová fyzika

Predseda odborovej komisie:

Prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK.
Mlynská dolina
Bratislava 842 48

1. Úvod

Jadrová fyzika sa rýchlo rozvíja po experimentálnej aj teoretickej stránke a prináša veľké množstvo aplikácií, ktoré výrazne ovplyvňujú tvár súčasnej vedy a techniky. Napriek obrovskému nárastu poznatkov o atómovom jadre sa však ani do dnešného dňa nepodarilo vytvoriť model atómového jadra, ktorý by presne a komplexne opísal všetky aspekty štruktúry a vlastností atómových jadier. Príčin, ktoré bránia vytvoreniu takéhoto modelu je veľa, tie najdôležitejšie sú [1]:

- V atómovom jadre hrajú rolu všetky známe interakcie v prírode, okrem silnej interakcie, ktorej je zodpovedná za formovanie atómových jadier, je to aj slabá interakcia, ktorá spôsobuje ich β -premenu, elektromagnetická interakcia, s ktorou súvisia všetky elektromagnetické javy v jadre a pri niektorých špeciálnych problémoch jadrovej astrofyziky je potrebné brať do úvahy aj gravitačnú interakciu.
- Do dnešného dňa nie je známy presný tvar efektívnej jadrovej interakcie medzi nukleónmi.
- Počet nukleónov v atómových jadrách s $A > 3$ je príliš vysoký na to, aby sme mohli exaktne riešiť sústavu pohybových rovníc pre každý nukleón a zároveň je príliš nízky na to, aby sme mohli použiť štatistické prístupy, tak ako to robíme napríklad v termodynamike.
- V jadre sa nachádzajú častice dvoch druhov, protóny a neutróny.
- Protóny aj neutróny majú ešte svoju vnútornú kvarkovú štruktúru.

Preto sa stále vytvárajú rozličné jadrové modely, ktoré vychádzajú z rôznych racionálnych fyzikálnych zjednodušení a zároveň sa snažia čo najpresnejšie opísať čo najširšiu škálu reálnych vlastností atómových jadier. Relativistický prístup ku štruktúre atómových jadier, ktorý vychádza už z myšlienok Edwarda Tellera z polovice 50. rokov 20. storočia, a ktorý bol formulovaný v polovici 70. rokov 20. storočia Johnom Dirkom Waleckom, stal dôležitou súčasťou modernej teórie atómového jadra. Je tomu tak najmä z nasledujúcich dôvodov [2]:

- Relativistický model je možné použiť aj pri opise hustej a horúcej jadrovej hmoty, kedy majú relativistické efekty veľký význam.
- Relativistická teória jadrovej hmoty úspešne vyriešila niektoré problémy, ktoré dlhú dobu pretrvávali pri nerelativistickom prístupe.
- Relativistické modely sú rovnako úspešné ako veľmi sofistikované nerelativistické modely, pri opise jednočasticových vlastností jadier ale navyše poskytujú prirodzené vysvetlenie spin-orbitálnej interakcie v jadre.
- Model atómového jadra v ktorom nukleóny vzájomne interagujú výmenou mezónov sa javí perspektívny pri prechode k fundamentálnejšiemu opisu a vysvetleniu jadrovej interakcie.

Predmetom dizertačnej práce sú relativistické modely atómového jadra a ich použitie v oblasti exotických jadier. V práci sú skúmané vlastnosti základného relativistického modelu aj možnosti vytvorenia komplexnejších modelov pre presnejší opis exotických jadier. Komplexnejšie modely boli vytvorené zahrnutím ω -mezónovej selfinterakcie a

ω - ρ -mezónovej crossinterakcie do pôvodného modelu a zavedením izospinovej alebo hustotnej závislosti nukleón-nukleónovej interakcie. Pre zavedenie hustotnej závislosti nukleón-nukleónovej interakcie bol použitý model jednobodovej interakcie a model mezónovej výmeny. Predpovede základného relativistického modelu aj rozšírených relativistických modelov boli porovnané s dostupnými experimentálnymi hodnotami väzbových energií a nábojových polomerov jadier v oblasti jadier od kyslíka po nikel. Na základe výpočtov dvojneutónových separačných energií sme spravili predpovede polohy neutónovej hranice stability. Na základe protónových a neutónových polomerov jadier sme predpovedali formovania protónovej alebo neutónovej kože v tejto oblasti. Predkladaná dizertačná práca je pokračovaním a rozvinutím diplomovej práce [3] a rigorózneho práce [4]. Dizertačná práca sa zaoberá rovnakou problematikou ako práce na ktoré naväzuje, jadrový model ktorý v nej používame sme však rozvinuli novým smerom a získali sme množstvo nových originálnych výsledkov, ktoré sú v dizertačnej práci prezentované.

2. Exotické atómové jadrá

V prírode existuje približne 290 stabilných alebo dlhožijúcich atómových jadier. Tieto jadrá vytvárajú údolie stability, ktoré sa pre ľahké jadrá nachádza v oblasti jadier s počtom protónov rovným počtu neutónov a pri ťažších jadrách sa v dôsledku odpudivej elektromagnetickej interakcie medzi protónmi posúva k jadrám s väčším prebytkom neutónov. Okrem stabilných jadier existuje asi 7000 nestabilných jadier, ktoré sa zväčša rozpadajú β -rozpadom v dôsledku slabej interakcie, alebo α -rozpadom, či spontánnym štiepením v prípade ťažších jadier, kde nadobúda na význame elektromagnetická interakcia. Tieto jadrá sa nachádzajú mimo údolia stability a pokrývajú širokú oblasť až po protónovú a neutónovú drip-čiaru. Protónovú drip-čiaru tvoria najľahšie izotopy prvkov, ktoré majú ešte kladnú protónovú separačnú energiu. Na druhej strane, neutónovú drip-čiaru tvoria najťažšie izotopy prvkov, ktoré majú ešte kladnú neutónovú separačnú energiu. Jadrá za drip-čiarou sa rozpadajú v časovej škále silnej interakcie, teda 10^{-22} s alebo ešte rýchlejšie emisiou nukleónu alebo nukleónov. Jednou z výziev pre modernú jadrovú fyziku je zmapovanie protónovej a neutónovej drip-čiar, teda nájdenie hraníc, v ktorých je silná interakcia schopná vytvoriť z protónov a neutónov jadro. Protónová drip-čiara sa v dôsledku odpudivej elektromagnetickej interakcie nachádza v porovnaní s neutónovou drip-čiarou bližšie k údoliu stability, preto je aj jej experimentálne dosiahnutie oveľa jednoduchšie. Výsledkom je, že protónová drip-čiara je dnes zmapovaná po $Z=83$, kde najľahším izotopom bizmutu je ^{184}Bi zatiaľ čo poloha neutónovej drip-čiar je známa len po $Z=9$, kde najťažším izotopom fluóru je ^{31}F . Jadrá extrémne vzdialené od línie stability, teda tie ktoré sa nachádzajú v blízkosti protónovej alebo neutónovej drip-čiar nazývame exotické. Ako sa ukázalo, ich pomenovanie je výstižné v dvoch smeroch. Jednak sú tieto jadrá exotické nezvyčajným pomerom medzi protónmi a neutónmi ktoré ich tvoria. Na druhej strane, predstavu o vlastnostiach a štruktúre atómových jadier sme si od počiatku jadrovej fyziky vytvárali na základe štúdia stabilných a dlhožijúcich izotopov. Preto poznatky o exotických jadrách, ktoré sú dostupné v posledných desaťročiach ukázali, že tieto jadrá sú exotické aj svojou nezvyčajnou štruktúrou a neočakávanými vlastnosťami [5]. Nové experimentálne poznatky o štruktúre a vlastnostiach jadier vzdialených od línie stability viedli k ďalšiemu rozvoju teoretických modelov pre opis atómového jadra. Cieľom tohto snaženia je vytvorenie modelov, ktoré budú presne opisovať nielen vlastnosti jadier na línii stability ale aj nové javy pozorované pri exotických jadrách. Tieto teoretické prístupy môžeme rozdeliť do štyroch základných typov:

- Ab-initio modely ktoré vychádzajú z daného nukleón-nukleónového potenciálu. Tento potenciál reprezentuje efektívnu interakciu pre opis nukleón-nukleónového rozptylu. Má

silnú odpudivú centrálnu časť, čo znamená, že jadrová hmota je opísaná ako silne korelovaná kvantová kvapalina. Takýto opis potom vyžaduje sofistikované mnohočasticové teórie ako napríklad relativistickú Brueckner-Hartree-Fockovú teóriu. Väčšina výpočtov pomocou ab-initio metód bola aplikovaná pre nekonečnú homogénnu jadrovú hmotu, len značný pokrok vo výpočtových kapacitách umožnil použitie aj pre konečné jadrá.

- Mic-Mac modely, týmto pojmom sú označované makroskopické modely s pridanými mikroskopickými korekciami. Ako príklad môže slúžiť kvapkový model s vrstvomými korekciami. Kvapkový model vychádza z makroskopických veličín ako objemová energia, povrchová energia, energia asymetrie atď. Parametre týchto fenomenologických členov sú získané fitovaním na experimentálne dáta. Ku kvapkovému modelu je potom pridaná energetická korekcia na vrstvomú štruktúru ktorá aproximuje mikroskopické vrstvomé efekty. Táto vrstvomá korekcia je vypočítaná z jedočasticového spektra získaného použitím fenomenologického jedočasticového potenciálu. Týmto spôsobom vznikajú veľmi sofistikované modely s množstvom nastaviteľných parametrov, ktoré dosahujú veľmi vysokú presnosť v predpovedaní makroskopických vlastností jadier.
- Vrstvomý model ktorý bol veľmi úspešný pri opise rozličných aspektov jadrovej štruktúry. Jeho úspech je čiastočne založený na tom, že vychádza len z minimálneho počtu základných predpokladov a čiastočne na tom, že všetky ďalšie korelácie, ktoré nezahŕňa teória stredného poľa môžu byť do modelu pomerne jednoducho pridané. Výpočty pomocou vrstvomého modelu však vyžadujú diagonalizáciu matice Hamiltoniánu v Hilbertovom priestore valenčných nukleónov, ktorého dimenzia je vo väčšine prípadov príliš veľká, a tak výpočty presahujú dostupné počítačové kapacity. Význačný pokrok v tomto smere bol dosiahnutý až použitím kvantových Monte Carlo metód, ktoré umožnili tieto výpočty uskutočňovať aj pre ťažšie jadrá. Takýto prístup je potom zvyčajne označovaný ako Monte Carlo vrstvomý model.
- Self-konzistentné modely stredného poľa ktoré môžeme rozdeliť na nerelativistické Hartree-Fockové výpočty, ktoré využívajú buď interakciu Gognyho typu alebo Skyrmeho typu. Druhým prístupom je relativistický model stredného poľa, ktorý vychádza z efektívneho relativistického Lagrangiánu. Efekt párovania je do týchto modelov zvyčajne zahrnutý v rámci BCS aproximácie alebo využitím Bogoliubovovej transformácie. Tieto modely síce tiež vyžadujú nastavenie niekoľkých voľných parametrov, stredné pole je však dané požiadavkou self-konzistentnosti výpočtov, a tak nevyžadujú v tomto smere žiadne predpoklady. Z toho vyplýva, že sa tieto modely ukazujú ako perspektívne pri extrapolácii do oblasti exotických jadier.

3. Relativistický jadrový model

Relativistický jadrový model [6] je model atómového jadra, ktorý vychádza z kvantovej hadrodynamiky. Kvantová hadrodynamika je relativistická kvantová teória poľa založená na hadrónových stupňoch voľnosti. Vznik kvantovej hadrodynamiky motivovali experimenty s ultrarelativistickými zrážkami ťažkých iónov, pri ktorých sa dosahuje jadrová hustota až desaťnásobne vyššia ako je rovnovážna jadrová hustota a teplota niekoľko sto MeV. Za takýchto extrémnych podmienok zohrávajú dôležitú úlohu efekty ako relativistický pohyb baryónov, dynamická mezónová výmena, modifikácia hadrónovej štruktúry či dynamika kvantového vákua. Pre opis týchto efektov je nevyhnutné vytvoriť relativistický model atómového jadra. Takýto jadrový model opisuje atómové jadro ako systém relativistických

nukleónov, ktoré sú opísané Diracovou rovnicou a vzájomne interagujú výmenou mezonov. Polia, ktorých zahrnutie do modelu je všeobecne akceptované sú:

- Nukleónové pole ktoré reprezentuje protóny a neutróny.
- σ -mezonové pole, izoskalárne-skalárne pole, ktoré vytvára príťažlivú zložku v jadrovej interakcii.
- ω -mezonové pole, izoskalárne-vektorové pole, ktoré vytvára odpudivú zložku v jadrovej interakcii.
- ρ -mezonové pole, izovektorové-vektorové pole, potrebné pre opis izospinových efektov v jadre.
- Fotónové pole ktoré reprezentuje elektromagnetickú interakciu v jadre.

Základom modelu je hustota Lagrangiánu, ktorá je zložená z členov, ktoré reprezentujú voľné nukleónové pole, voľné mezonové polia, voľné fotónové pole a interakčné členy ktoré opisujú interakciu nukleónového poľa s ostatnými poliami. Do modelu je zahrnutá aj kubická a kvartická selfinterakcia σ -mezonového poľa, ktorá bola zavedená pre zlešenie koeficientu stlačiteľnosti jadrovej hmoty a dnes je všeobecne akceptovaná.

$$\begin{aligned}
 L = & \bar{\psi} \left[i \gamma_{\mu} \partial^{\mu} - M + g_{\sigma} \sigma - g_{\omega} \gamma_{\mu} \omega^{\mu} - g_{\rho} \gamma_{\mu} \vec{\tau} \vec{\rho}^{\mu} - e \gamma_{\mu} \frac{(1 - \tau_3)}{2} A^{\mu} \right] + \\
 & + \frac{1}{2} \partial_{\mu} \sigma \partial^{\mu} \sigma - \frac{1}{2} m_{\sigma}^2 \sigma^2 - \frac{1}{4} O_{\mu\nu} O^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_{\omega}^2 \omega_{\mu} \omega^{\mu} - \frac{1}{4} \vec{R}_{\mu\nu} \vec{R}^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_{\rho}^2 \vec{\rho}_{\mu} \vec{\rho}^{\mu} + \\
 & - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \frac{1}{3} b_{\sigma} \sigma^3 - \frac{1}{4} c_{\sigma} \sigma^4
 \end{aligned} \tag{1}$$

ψ označuje nukleónové pole, σ , ω , ρ označujú jednotlivé mezonové polia, A označuje elektromagnetické pole. Tenzory ω -mezonového, ρ -mezonového a elektromagnetického poľa sú označené O , R , F . Voľnými parametrami modelu sú hmotnosť nukleónov (M), hmotnosti mezonov (m_{σ} , m_{ω} , m_{ρ}), väzbové konštanty (g_{σ} , g_{ω} , g_{ρ}) a selfinterakčné konštanty (b_{σ} , c_{σ}), ktoré sa získavajú porovnaním predpovedí modelu s experimentálnymi údajmi. Pohybové rovnice pre jednotlivé polia vyplývajú z celkovej hustoty lagrangiánu, dosadením do Euler-Lagrangeových rovníc. Pre nukleónové pole je pohybovou rovnicou Diracová rovnica, pre σ -mezonové pole Klein-Gordonova rovnica, pre ω -mezonové pole a ρ -mezonové pole Proca rovnica a pre elektromagnetické pole Maxwellova rovnica. Sústavu pohybových rovníc je možné po aproximácii stredným poľom riešiť iteratívnym postupom.

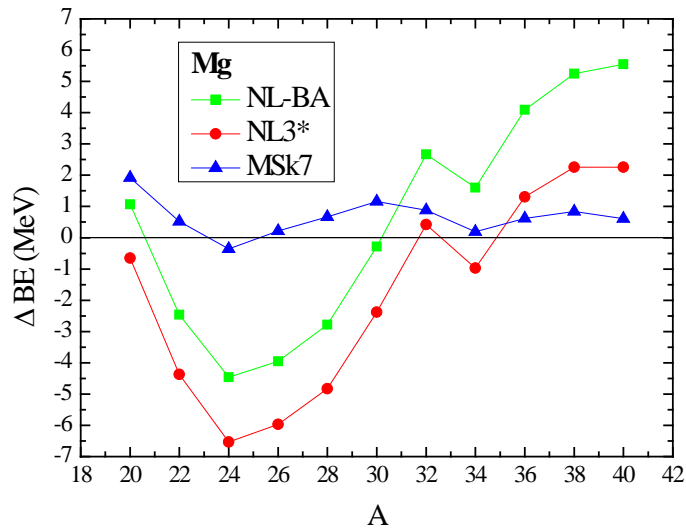
4. Ciele práce

Ciele dizertačnej práce môžeme rozdeliť do troch častí, ktoré spoločne vytvárajú postupnosť troch naväzujúcich krokov.

- Prvým cieľom a teda prvým krokom je preskúmať schopnosť relativistického modelu atómového jadra správne a presne predpovedať vlastnosti reálnych atómových jadier. Pre tento účel sme sa rozhodli uskutočniť výpočty pre páрно-párne atómové jadrá s protónovým číslom od 8 po 28. Ide teda o izotopické reťazce O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Ti, Cr, Fe, Ni. Obmedzenie na páрно-párne jadrá je zapríčinené vlastnosťami modelu, pretože len pre systémy s párnym počtom nukleónov stačí do modelu zahrnúť nukleónové hustoty a netreba v ňom počítať s nukleónovými prúdmi, čo výpočty výrazne zjednodušuje. Výpočty budú uskutočnené v širokom rozsahu izospinu, od protónovej hranice stability až po neutrónovú hranicu stability. Porovnanie výsledkov získaných výpočtom s experimentálnymi údajmi spravíme s hodnotami väzbových energií a nábojových polomerov jadier. Tieto vlastnosti jadier sme si zvolili z dvoch dôvodov. Prvým dôvodom je, že nám umožňujú posúdiť schopnosť modelu predpovedať separačné energie jadier ako aj rozmery jadier. Druhý dôvod je, že tieto experimentálne údaje sú dostupné s dostatočnou presnosťou a spoľahlivosťou pre veľké množstvo jadier zo skúmanej oblasti. Okrem porovnania našich výsledkov s experimentálnymi údajmi spravíme v tomto kroku aj porovnanie s výsledkami získanými pomocou iného jadrového modelu. Pre toto porovnanie sme sa rozhodli použiť výsledky získané pomocou Skyrmeho-Hartreeho-Fockovho modelu, ktoré boli publikované v literatúre. Ide o nerelativistický mnohočasticový model založený na Hartreeho-Fockových výpočtoch s interakciou Skyrmeho typu, je to teda nerelativistický protipól modelu, ktorý používame.
- Druhým krokom je preskúmať možnosti rozšírenia relativistického modelu atómového jadra. Rozšíriť relativistický model sme sa rozhodli dvomi smermi. Prvým smerom je zahrnúť ω -mezónovú selfinterakcie a ω - ρ -mezónovú crossinterakcie do modelu. Tieto členy reprezentujú vzájomnú interakciu mezónových polí a sú ďalšími, detailnejšími korekciami tohto modelu. Motiváciou je, že sa tieto členy ukázali dôležité pri riešení niektorých konkrétnych problémov, ako sú vlastnosti supert ťažkých jadier, predpovedanie polohy hranice stability alebo hodnoty energie symetrie jadrovej hmoty. Druhým smerom, akým je možné model rozšíriť, je zaviesť do modelu izospinovú alebo hustotnú závislosť nukleón-nukleónovej interakcie. V prípade hustotnej závislosti použijeme dva rôzne prístupy, model jednobodovej interakcie a model mezónovej výmeny. Motiváciou je, že tieto rozšírenia môžu v sebe zahrnúť efekty, ktoré sa v teórii stredného poľa nenachádzajú a javia sa ako prirodzenejšie a perspektívnejšie pre prechod ku fundamentálnejšiemu opisu atómového jadra. Následne je našim cieľom uskutočniť výpočty s rozšíreným modelom a spraviť analýzu výsledkov väzbových energií a nábojových polomerov jadier rovnako ako v predchádzajúcom kroku.
- Tretím krokom a teda aj posledným cieľom je použiť rozšírený a otestovaný model na výpočty vlastností jadier, ktoré nie sú zatiaľ v týchto jadrách experimentálne preskúmané. V tomto kroku sa sústredíme na výpočty dvojneutrónových separačných energií jadier a protónových a neutrónových polomerov jadier. Na základe našich výpočtov potom môžeme predpovedať polohu neutrónovej hranice stability ako aj formovanie protónovej alebo neutrónovej kože v exotických jadrách.

5. Výsledky práce

Prvú časť výsledkov tvoria výpočty pomocou relativistického jadrového modelu v jeho základnej, teda nemodifikovanej forme. Všetky výpočty sme uskutočnili s dvoma parametrizáciami modelu, pre ktoré používame označenie NL3* a NL-BA. Pre posúdenie schopnosti modelu predpovedať vlastnosti reálnych atómových jadier sme sa rozhodli uskutočniť výpočty s oboma parametrizáciami a porovnať vypočítané väzbové energie a nábojové polomery jadier s experimentálnymi údajmi. Väzbové energie jadier sú určené z meraní hmotností jadier a nábojové polomery z rozptylových experimentov. Pri obidvoch veličinách máme v súčasnosti k dispozícii veľké množstvo experimentálnych údajov, ktoré sú namerané s dostatočnou presnosťou. Porovnanie teoretických hodnôt s experimentálnymi sme spravili výpočtom rozdielov medzi teoretickými hodnotami a experimentálnymi údajmi a ich grafickým zobrazením pre jednotlivé izotopické reťazce. Výsledky pre väzbové energie izotopov horčíka sú graficky zobrazené na obr. 5.1. Na zobrazených rozdieloch väzbových energií môžeme pozorovať, že parametrizácia NL-BA predpovedá vo všetkých izotopických reťazcoch vyššie hodnoty väzbových energií ako parametrizácia NL3*. Rozdiely väzbových energií vykazujú dve systematické odchýlky, ktoré sa objavujú pre obidve parametrizácie vo väčšine izotopických reťazcoch. Prvou odchýlkou je, že model predpovedá príliš veľké hodnoty väzbových energií v oblasti jadier s vysokým prebytkom neutrónov. Tento efekt napríklad v prípade izotopov O dosahuje pri parametrizácii NL-BA až 12 MeV a pri parametrizácii NL3* až 9 MeV. Výrazný je aj pri izotopoch Ne, Ca alebo Ti, kde sa pohybuje v rozmedzí 5 MeV až 8 MeV pre parametrizáciu NL-BA a 2 MeV až 5 MeV pre parametrizáciu NL3*. Táto odchýlka je približne úmerná prebytku neutrónov v jadrách. Druhou systematickou odchýlkou je predpovedanie nízkych hodnôt väzbových energií v oblasti okolo $N=Z$ jadra. Táto odchýlka je najväčšia pri izotopoch Ne, kde sa pri parametrizácii NL3* blíži ku 9 MeV a pri parametrizácii NL-BA ku 6 MeV. Rovnaký trend je v iditeľný aj pri izotopoch Mg, Si, S alebo Ar. Pri parametrizácii NL-BA má táto odchýlka hodnotu od 3 MeV do 5 MeV a pri parametrizácii NL3* od 5 MeV do 8 MeV. Táto odchýlka má tvar symetrického vrcholu okolo $N=Z$ jadra. Oblasť protónovo bohatých jadier je opísaná pomerne dobre, v tejto oblasti sú odchýlky medzi vypočítanými a nameranými hodnotami podstatne menšie ako pri neutrónovo bohatých jadrách. Porovnanie nábojových polomerov s experimentálnymi údajmi ukazuje, že parametrizácia NL3* predpovedá väčšie nábojové polomery jadier ako parametrizácia NL-BA pre všetky skúmané jadrá. Obidve parametrizácie ale predpovedajú pri väčšine prvkov menšie hodnoty nábojových polomerov ako sú experimentálne hodnoty. Rozdiel je pri izotopickom reťazci Ne, kedy sú nábojové polomery získané s obidvomi parametrizáciami väčšie ako experimentálne dáta. Pri izotopoch Ne sú aj odchýlky od experimentálnych hodnôt najväčšie a dosahujú 0,09 fm pre parametrizáciu NL-BA až 0,11 fm pre parametrizáciu NL-BA. Porovnanie s výsledkami nerelativistického Skyrmeho-Hartreeho-Fockovho modelu pre väzbové energie aj nábojové polomery vyznieva v neprospech relativistického jadrového modelu a indikuje tak potrebu zlepšiť schopnosť relativistického modelu predpovedať vlastnosti reálnych atómových jadier. Odchýlky vznikajúce v oblasti neutrónovo prebytočných jadier sa preto pokúsime potlačiť zlepšením ďalším rozšírením relativistického modelu zahrnutím nových členov do lagrangiánu a zavedením izospinovo alebo hustotnej závislej nukleón-nukleónovej interakcie. Odchýlky v oblasti okolo $N=Z$ sú prekvapujúce, ich pôvod nie je celkom jasný. Predpokladáme, že ide buď o tvorbu klastrov v týchto jadrách, alebo o chýbajúcu Wignerovu energiu, ktorá pochádza z Wignerovej teórie supermultipletov, čo je kombinovaná spin-izospinová symetria jadrového hamiltoniánu.

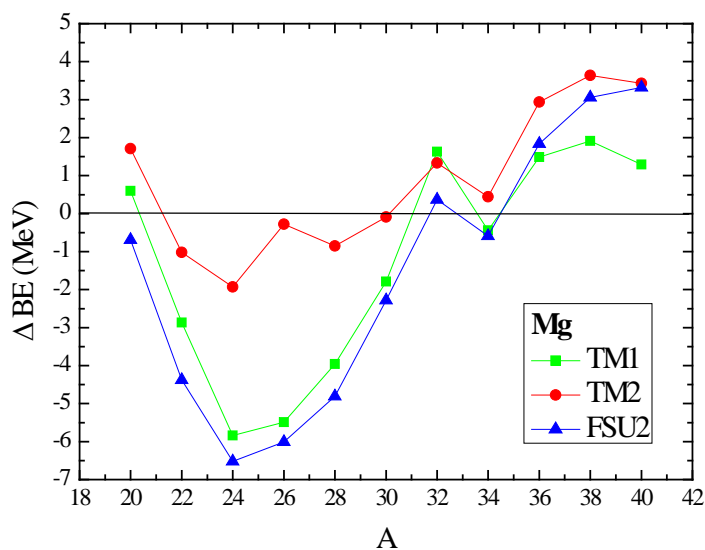


Obr. 5.1 Rozdiely medzi väzbovými energiami pre izotopy horčíka.

Tretou možnosťou je, že ide o protón-neutrónové párovanie, keďže v týchto jadrách sú protónové a neutrónové hladiny veľmi blízke, čo vedie ku veľkému prekrytiu protónových a neutrónových vlnových funkcií a tak ku vzniku párovania medzi protónmi a neutrónmi. Túto možnosť považujeme za najpravdepodobnejšiu, nakoľko ju potvrdzuje aj to, že pri jadrách s uzavrenou protónovou šupkou, teda pri izotopoch kyslíka, vápnika a niklu sa táto systematická odchýlka v oblasti okolo $N=Z$ nevyskytuje. Jednou z možností ako ďalej rozšíriť relativistický jadrový model podľa je zahrnúť do Lagrangiánu selfinterakčné členy aj pre ďalšie mezonové polia. My sme sa rozhodli zahrnúť do modelu kvartickú selfinterakciu ω -mezonového poľa. Potreba tohto člena vyplýva z Dirac-Brueckner-Hartree-Fockovej teórie jadrovej hmoty, navyše sa tento člen ukázal ako dôležitý napríklad pri opise vrstvomých efektov, alebo supert ťažkých jadier. Zahrnutie kvartickej selfinterakcia ω -mezonového spravíme tak, že do celkovej hustoty Lagrangiánu pridáme člen, ktorý reprezentuje ω -mezonovú selfinterakciu

$$L_{\omega-self} = \frac{1}{4} c_{\omega} (\omega_{\mu} \omega^{\mu}) \quad (2)$$

výsledkom je, že dôjde k modifikácii Procovej rovnice pre ω -mezonové pole. Výpočty s modelom rozšíreným ω -selfinterakciu sme uskutočnili s dvomi parametrizáciami modelu, ktoré označujeme TM1 a TM2. Tieto parametrizácie sa okrem ω -selfinterakčného člena líši od parametrizácií NL-BA a NL3* tým, že nejde o globálne parametrizácie, teda o parametrizácie určené pre celú periodickú sústavu prvkov. Pri ich získaní totiž boli jadrá rozdelené do dvoch skupín. Prvú skupinu tvorili ťažké jadrá s protónovým číslom $Z > 20$, druhú skupinu tvorili ľahké jadrá s protónovým číslom $Z < 20$. Odôvodnenie rozdelenia jadier do dvoch skupín spočíva v tom, že pri ľahších jadrách majú väčší vplyv povrchové efekty a tie vplyvajú na väzbové konštanty v efektívnej teórii. Druhou možnosťou ako rozšíriť relativistický jadrový model je zahrnúť do modelu aj crossinterakciu medzi ω -mezonovým poľom a ρ -mezonovým poľom. Na význam tohto člena v relativistickom modeli jadra bolo v uplynulých rokoch poukázané v súvislosti s opisom neutrónovo bohatých jadier, supert ťažkých jadier alebo neutrónových hviezd.



Obr. 5.2 Rozdiely medzi väzbovými energiami pre izotopy horčíka.

Pre zahrnutie ω - ρ -mezónovej crossinterakcie je potrebné do celkovej hustoty Lagrangiánu pridať člen

$$L_{\omega\rho\text{-cross}} = \frac{1}{4} c_{\omega\rho} \omega_{\mu} \omega^{\mu} \vec{\rho}_{\mu} \vec{\rho}^{\mu} \quad (3)$$

čo vedie k modifikácii Procových rovníc pre ω -mezónové a ρ -mezónové pole. Pre výpočty s ω - ρ -mezónovou crossinterakciou sme použili parametrizáciu modelu FSU2, ktorá vznikla ďalším zdokonalením parametrizácie FSU. Obidve parametrizácie boli fitované na vlastnosti rovnakých jadier, ako boli použité pri nájdení parametrizácie NL3. Porovnanie predpovedí rozšíreného modelu s ω -selfinterakciou a ω - ρ -crossinterakciou sme spravili rovnako ako v prípade základného modelu. Vypočítali sme rozdiely medzi väzbovými energiami jadier, ktoré predpovedajú jednotlivé modely a experimentálnymi hodnotami. Výsledky pre izotopický reťazec horčíka je graficky zobrazený na obr. 5.2. Na zobrazených výsledkoch je vidieť, že výraznejšie zlepšenie predpovedí relativistického jadrového modelu je možné dosiahnuť skôr vytvorením lokálnej parametrizácie, ako zavedením nových selfinterakčných alebo crossinterakčných členov do modelu. Systematická odchýlka v oblasti okolo jadra $N=Z$ sa napríklad pri izotopoch horčíka, kremíka a síry podarila potlačiť použitím parametrizácie TM2, ktorá je špecifická pre túto oblasť jadier. Vo výpočtoch s parametrizáciami TM1 aj FSU2 táto systematická odchýlka naďalej pretrváva. Zlepšenie predpovedí modelu v oblasti neutrónovo bohatých jadier sme tiež dosiahli vo väčšej miere použitím lokálnej parametrizácie ako novými členmi lagrariánu. Napríklad izotopy železa alebo niklu sú aj v oblasti extrémne neutrónovo bohatých jadier predpovedané s veľkou presnosťou práve parametrizáciou TM1. Rozšírenie modelu o nové členy síce v niektorých izotopických reťazcoch priniesli zlepšenie predpovedí modelu na druhej strane sa ale v inej oblasti predpovede modelu výraznejšie nezmenili alebo sa dokonca sa zhoršili. Jediným zreteľným prínosom zavedenia ω - ρ -mezónovej crossinterakcie je zlepšenie súladu relativistického jadrového modelu s experimentálnymi dátami v oblasti neutrónovo bohatých jadier. Rovnako aj pre nábojové polomery je zreteľné, že lepší súhlas s experimentálnymi hodnotami je možné dosiahnuť skôr zavedením lokálnej parametrizácie ako novými členmi do lagrangiánu. Použitie dvoch odlišných parametrizácií, TM1 pre ťažšie jadrá a TM2 pre ľahšie jadrá sa na

základe predchádzajúcich výsledkov javí ako perspektívny smer, ktorým je možné zlepšiť schopnosť relativistického jadrového modelu predpovedať vlastnosti reálnych atómových jadier. Na základe toho sme sa rozhodli pri ďalších výpočtoch použiť model s izospinovo závislou interakciou. Túto izospinovo závislosť sme do modelu zaviedli tak, že interakčné a selfinterakčné konštanty sme nahradili funkčnou závislosťou na hmotnostnom čísle. Funkčná závislosť TMA, ktorú sme sa rozhodli pre tieto výpočty použiť, bola získaná interpoláciou parametrizácií TM1 a TM2 a vysvetľuje sa ako vplyv efektov za rámcom teórie stredného poľa ako sú kvantové fluktuácie, párovanie alebo tvorba klastrov v jadre. Inou metódou ako rozšíriť relativistický jadrový model a prejsť tak ku komplexnejšiemu modelu predstavuje zavedenie hustotnej závislosti do nukleón-mezónovej interakcie. Táto hustotná závislosť je pre σ -mezónové a ω -mezónové pole zavedená fenomenologickým spôsobom, keď namiesto interakčných konštant g_σ a g_ω použijeme funkčnú závislosť na nukleónovej hustote v tvare

$$g_\sigma = g_\sigma(\rho_{\text{sat}}) \frac{1 + b_\sigma(x + d_\sigma)^2}{1 + c_\sigma(x + d_\sigma)^2} \quad (4)$$

$$g_\omega = g_\omega(\rho_{\text{sat}}) \frac{1 + b_\omega(x + d_\omega)^2}{1 + c_\omega(x + d_\omega)^2} \quad (5)$$

kde $x = \rho / \rho_{\text{sat}}$ a ρ_{sat} je saturačná nukleónová hustota. Pre interakciu ρ -mezónového poľa je použitá iná forma funkčnej závislosti, ktorá bola odvodená z Diracovej-Bruecknerovej teórie asymetrickej jadrovej hmoty a má tvar

$$g_\rho = g_\rho(\rho_{\text{sat}}) e^{-a_\rho(x-1)} \quad (6)$$

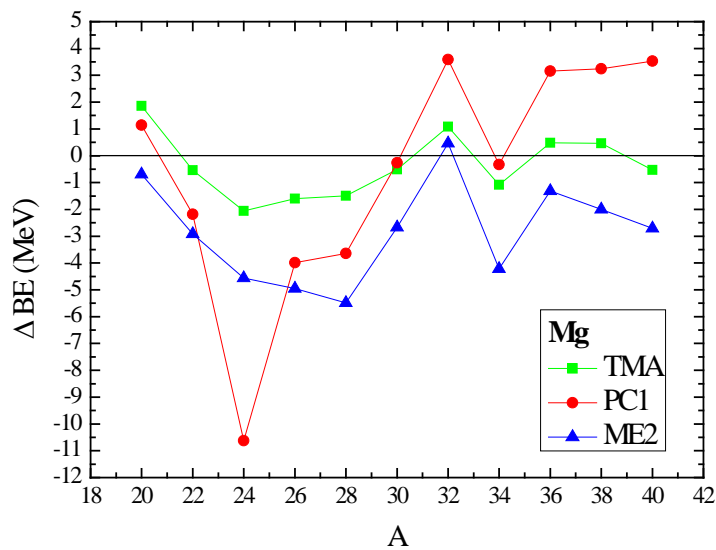
Takýto model označujeme ako model hustotne závislej mezónovej výmeny a hodnoty jeho parametrov, označované ako parametrizácia ME2. Tieto parametre boli získané fitovaním na experimentálne hodnoty väzbových energií, nábojových polomerov a neutrónových polomerov tých istých jadier ako v prípade parametrizácie NL3*. Alternatívny spôsob zavedenia hustotne závislej interakcie, predstavuje model jednobodovej interakcie. Funkčná závislosť väzbových konštant modelu má pri modeli jednobodovej interakcie tvar

$$g_\sigma = a_\sigma + (b_\sigma + c_\sigma x) e^{-d_\sigma x} \quad (7)$$

$$g_\sigma = a_\sigma + (b_\sigma + c_\sigma x) e^{-d_\sigma x} \quad (8)$$

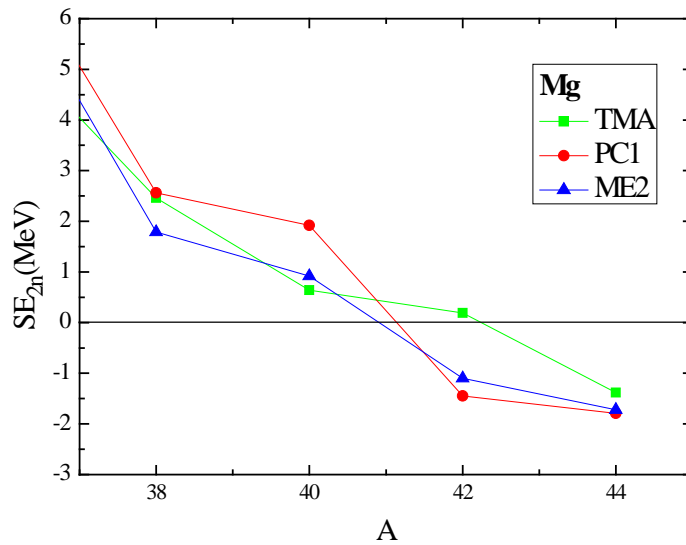
$$g_\sigma = a_\sigma + (b_\sigma + c_\sigma x) e^{-d_\sigma x} \quad (9)$$

Sada parametrov PC1, ktorú sme použili na výpočty pomocou modelu jednobodovej interakcie, bola získaná fitovaním na experimentálne vlastnosti až 64 jadier. Porovnanie predpovedí modelu s izospinovo a hustotne závislou interakciou sme spravili rovnako ako v prípade základného modelu a predchádzajúceho rozšíreného modelu. Vypočítali sme rozdiely medzi väzbovými energiami jadier, ktoré predpovedajú jednotlivé modely a experimentálnymi hodnotami. Výsledky pre izotopický reťazec horčíka sú graficky zobrazené na obr. 5.3. Vo všetkých izotopických reťazcoch pozorujeme zlepšenie súladu predpovedí modelu v oblasti neutrónovo bohatých jadier. V tejto oblasti sa ku experimentálnym hodnotám najviac približujú výsledky získané parametrizáciami TMA a ME2.



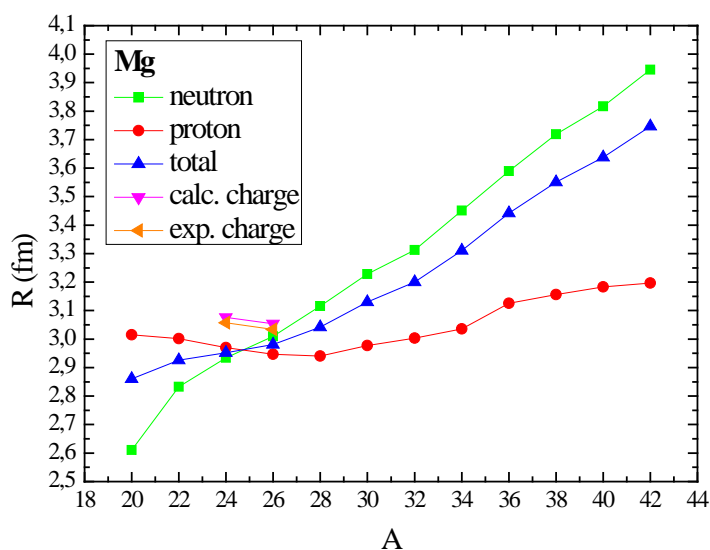
Obr. 5.3 Rozdiely medzi väzbovými energiami pre izotopy horčička.

Parametrizácia PC1, ktorá v tejto oblasti predpovedá najväčšie hodnoty väzbových energií, síce tiež zlepšuje predpovede modelu, nie však tak výrazne ako parametrizácie TMA a ME2. V oblasti okolo $N=Z$ jadra sa síce predpovede izospinovo a hustotne závislých modelov zlepšili len mierne, najlepší súlad vo väčšine izotopických reťazcov pozorujeme pre parametrizáciu TMA. Z predchádzajúcich výsledkov je zrejmé, že v schopnosti relativistického jadrového modelu predpovedať vlastnosti neutrónovo bohatých jadier, sme dosiahli najvýraznejší pokrok zavedením izospinovej a hustotne závislej interakcie do modelu. Preto sme sa tieto dva rozvinuté modely rozhodli použiť na predpovedanie polohy neutrónovej hranice stability v skúmaných izotopických reťazcoch. Za týmto účelom sme uskutočnili výpočty väzbových energií jadier s izospinovo závislou interakciou a parametrizáciou TMA a výpočty s hustotne závislou interakciou a parametrizáciami PC1 a ME2 pre ďalšie neutrónovo bohaté jadrá. Z hodnôt ich väzbových energií sme pre každé jadro vypočítali jeho dvojneutrónovú separačnú energiu. V izotopickom reťazci kyslíka sa predpovede všetkých troch modelov zhodujú. Všetky predpovedajú kladnú dvojneutrónovú separačnú energiu pre izotop ^{28}O a zápornú dvojneutrónovú separačnú energiu pre izotop ^{30}O . V kyslíkovom reťazci je však experimentálne potvrdené, že najťažším viazaným izotopom kyslíka je ^{24}O . V tomto prípade teda musíme konštatovať nesúlad predpovedanej hranice stability s experimentálnymi výsledkami. Situácia pri izotopoch neónu je zložitejšia. Modely s hustotne závislou interakciou s parametrizáciami PC1 a ME2 predpovedajú zápornú dvojneutrónovú separačnú pre izotopy ^{32}Ne a ^{34}Ne . Kládne tak neutrónovú hranicu stability na izotop ^{30}Ne . Prekvapujúce je ale zistenie, že dvojneutrónová separačná hodnota ^{36}Ne znova nadobúda kladnú hodnotu. Indikuje to teda zaujímavý efekt, kedy v extrémne neutrónovo bohatej oblasti sú izotopy ^{30}Ne a ^{36}Ne viazané, zatiaľ čo izotopy medzi nimi sú neviazané. Predpoveď modelu s parametrizáciou TMA kládne hranicu stability na jadro ^{34}Ne , čiže pre jadrá neónu sa predpovede týchto dvoch prístupov líšia. Rovnako aj pri jadrách horčička predpovedá parametrizácia TMA polohu neutrónovej hranice stability ďalej ako parametrizácie PC1 a ME2. Pri výpočtoch s TMA parametrizáciou je posledným izotopom s kladnou dvojneutrónovou separačnou energiou ^{42}Mg , zatiaľ čo pri parametrizáciach PC1 a ME2 je to izotop ^{44}Mg .



Obr. 5.4 Poloha neutrónovej hranice stability pre izotopy horčička.

Treba však poznamenať, že dvojneutrová separačná energia ^{42}Mg má síce kladnú ale veľmi malú hodnotu iba 0,19 MeV. V oblasti kremíka sú predpovede všetkých troch prístupov rovnaké a kladú neutrónovú hranicu stability na jadro ^{48}Si . Pri jadrách síry sú tiež predpovede všetkých troch modelov rovnaké a jednoznačne predpovedajú, že najťažším viazaným jadrom je ^{56}S . Pri argónových izotopoch je kladná vypočítaná dvojneutrová separačná energia až po jadro ^{58}Ar . Znova ale treba poznamenať, že záporná hodnota pri parametrizácii TMA je len -0,17 MeV takže aj v tomto prípade môžeme polohu hranice stability považovať len za približnú. Veľmi odlišná situácia je pri izotopoch vápnika, kde parametrizácia ME2 predpovedá najťažšie viazané jadro ^{60}Ca , parametrizácia TMA ^{62}Ca ale parametrizácia PC1 jasne predpovedá kladné hodnoty dvojneutrovéj separačnej energie až po ^{68}Ca . Aj v tomto prípade si treba všimnúť, že hodnoty získané s parametrizáciou TMA pre ^{64}Ca , ^{66}Ca a ^{68}Ca sú veľmi blízke nule, preto predpovede s touto parametrizáciou nie sú celkom jednoznačné. Pri jadrách titánu sa znova potvrdzuje, že parametrizácia TMA predpovedá hranicu stability výrazne ďalej ako parametrizácie PC1 a ME2. Najťažším jadrom s kladnou dvojneutrovou separačnou energiou pri výpočtoch s TMA parametrizáciou je izotop ^{78}Ti zatiaľ čo pri výpočtoch s parametrizáciami PC1 a ME2 je to izotop ^{72}Ti . Pri predpovedaní hranice stability pri jadrách chrómu modely s parametrizáciami TMA a ME2 predpovedajú, že posledný izotop s kladnou dvojneutrovou separačnou energiou je ^{82}Cr zatiaľ čo model s parametrizáciou PC1 predpovedá ľahšie jadro ^{80}Cr . Situácia pri jadrách železa znova potvrdzuje, že model s izospinovo závislou interakciou predpovedá kladné dvojneutrové separačné energie až po izotop ^{96}Cr , zatiaľ čo modely s hustotne závislou interakciou predpovedajú kladnú dvojneutrovú separačnú energiou pri parametrizácii PC1 po izotop ^{84}Fe a pri parametrizácii ME2 po izotop ^{86}Fe . V prípade izotopického reťazca niklu sú dvojneutrové separačné energie kladné až po ^{98}Ni s výnimkou parametrizácie ME2, kde je to jadro ^{69}Ni . Aj v tomto prípade je ale záporná hodnota v ^{98}Ni len -0,15 MeV takže ja tu sa dá predpovedať, že pravdepodobnejšie bude neutrónová hranica stability na izotope ^{98}Ni . Predpovede vytvárania protónovej a neutrónovej kože v exotických jadrách sme uskutočnili na základe výpočtov protónových a neutrónových stredných kvadratických polomerov jadier. Všetky výpočty sme uskutočnili modelom s izospinovo závislou interakciou s parametrizáciou TMA a modelom s hustotne závislou interakciou s parametrizáciami PC1 a ME2.



Obr. 5.5 Polomery izotopov horčíka vypočítané s parametrizáciou ME2

Pri izotopickom reťazci kyslíka je vidno, že pri jadre ^{12}O je protónový polomer jadra podstatne väčší ako neutrónový polomer jadra, čo indikuje vytvorenie protónovej kože s hrúbkou 0,4 fm až 0,5 fm v závislosti od použitého modelu. Pri tomto jadre treba vziať do úvahy, že jestvuje len vo forme rezonancie. Ničmenej experimentálne už boli určené viaceré energetické vlastnosti tohto jadra. Pre neutrónovo bohaté jadrá ich neutrónový polomer rýchlo narastá, zatiaľ čo protónový polomer je prakticky stále rovnaký. Výsledkom je formovanie neutrónovej kože, ktorá pre ^{28}O dosahuje 0,6 fm až 0,8 fm. Podobné výsledky boli získané aj pre izotopy neónu, kde pre ^{16}Ne pozorujeme formovanie protónovej kože s hrúbkou približne 0,6 fm zatiaľ čo neutrónová koža v jadrách s extrémnym prebytkom neutrónov dosahuje pri izotope ^{34}Ne až hodnotu 0,9 fm. Izotopy horčíka vykazujú rovnaký trend a rozdiel medzi protónovým a neutrónovým polomerom naznačuje formovanie protónovej kože pre ^{20}Mg s hrúbkou približne 0,6 fm a neutrónovej kože, ktorej hrúbka je úmerná prebytku neutrónov a dosahuje 1,0 fm v jadre ^{42}Mg . Pri izotopoch kremíka rozdiel medzi protónovým a neutrónovým polomerom jadra ^{22}Si je od 0,6 fm po 0,8 fm, zatiaľ čo na neutrónovo bohatej strane rastie rozdiel medzi neutrónovým a protónovým polomerom na hodnotu 0,9 fm až 1,1 fm v jadre ^{48}Si . Analogický priebeh vidíme aj pri izotopoch síry, kde hrúbka protónovej kože v jadre ^{26}S dosahuje 0,4 fm až 0,6 fm a hrúbka neutrónovej kože postupne rastie až po 1,1 fm pri ^{56}S . Pri izotopoch argónu je v jadre ^{30}Ar protónový polomer v porovnaní s neutrónovým polomerom väčší o 0,4 fm až 0,5 fm. Priebeh neutrónových polomerov jadier argónu sa po zaplnení neutrónovej šupky 28 začne výrazne zväčšovať a vytvára vrstvu neutrónovej kože, ktorá dosahuje 1,0 fm ^{58}Ar . Pri izotopickom reťazci vápnika je protónový polomer jadra väčší ako neutrónový pri ^{34}Ca o 0,3 fm až 0,4 fm. Na neutrónovo bohatej strane je po zaplnení šupky 28 možné pozorovať prudký nárast rozdielu medzi neutrónovým a protónovým polomerom, ktorý dosahuje 0,7 fm až 0,8 fm v jadre ^{66}Ca . Titánové izotopy sa na protónovo bohatej strane vyznačujú pri jadre ^{38}Ti protónovým polomerom o 0,4 fm až 0,5 fm väčším ako neutrónový polomer. Polomer neutrónovo bohatých jadier titánu prudko stúpa s dvoma výraznými zlomami, ktoré možno pozorovať pri zaplnení neutrónových šupiek 28 a 50. V jadre ^{76}Ti rozdiel medzi neutrónovým a protónovým polomerom dosahuje hodnotu 0,7 fm až 0,8 fm. Pre izotopy chrómu rozdiel medzi protónovým a neutrónovým polomerom jadra ^{42}Cr dosahuje hodnotu 0,3 fm až 0,4 fm a v blízkosti neutrónovej hranice stability dosahuje hrúbka neutrónovej kože v jadre ^{82}Cr hodnotu 0,7 fm až 0,8 fm. Aj v izotopickom reťazci chrómu je

vidno zlom v neutrónových polomeroch pri zaplnení neutrónových šupiek 28 a 50. Priebeh polomerov jadier železa predpovedá formovanie protónovej kože s hrúbkou 0,3 fm až 0,4 fm v jadre ^{46}Fe na protónovej hranici stability a nárast rozdielov medzi neutrónovými a protónovými polomermi jadier v oblasti neutrónovo bohatých jadier, ktorý dosahuje v jadre ^{94}Fe hrúbku 0,9 fm až 1,0 fm. Posledným skúmaným reťazcom sú izotopy niklu, kde rozdiel 0,3 fm až 0,4 fm medzi protónovým polomerom a neutrónovým polomerom na protónovej hranici stability v jadre ^{48}Ni indikuje formovanie protónovej kože. Nárast rozdielu medzi neutrónovým a protónovým polomerom jadier s pribúdajúcim počtom neutrónov dosahuje až 0,8 až 0,9 fm v jadre ^{98}Ni . Zaujímavou črtou neutrónových aj totálnych polomerov exotických jadier je, že pri takmer všetkých parametrizáciach pozorujeme zlomy v celkovom trende závislosti polomerov od A pri zaplnení magických vrstiev ($1f_{7/2}$ pre $N=28$ a $1g_{9/2}$ pre $N=50$).

6. Záver

Na základe výsledkov, ktoré sme získali v rámci dizertačnej práce, môžeme vyvodit' nasledujúce závery:

- Predpovede relativistického jadrového modelu v jeho základnom tvare sa vyznačujú systematickými odchýlkami od experimentálnych údajov. Model v oblasti neutrónovo bohatých jadier predpovedá príliš vysoké hodnoty väzbových energií, zatiaľ čo v oblasti okolo jadra $N=Z$ sú predpovede pre väzbové energie príliš nízke. Podobné výsledky priniesli obidve parametrizácie modelu NL3* aj NL-BA z čoho vyplýva, že fitovanie novej sady parametrov pre model nevedie ku výraznému zlepšeniu predpovedí modelu. Zároveň porovnanie s výsledkami Skyrmeho-Hartreeho-Fockovho modelu poukazuje na potrebu vylepšiť relativistický jadrový model vytvorením komplexnejšieho modelu.
- Rozšírenie modelu zahrnutím ω -mezónovej selfinterakcie neprinieslo vylepšenie súladu výsledkov modelu s experimentálnymi dátami.
- Rozšírenie modelu zahrnutím ω - ρ -mezónovej crossinterakcie prinieslo zlepšenie predpovedí modelu v oblasti neutrónovo bohatých jadier, tento pokrok však nie je veľmi výrazný a odchýlky v oblasti okolo $N=Z$ zavedenie ω - ρ -mezónovej crossinterakcie nevyriešilo.
- Zlepšenie predpovedí modelu je možné dosiahnuť vytvorením lokálnej parametrizácie modelu. Výsledky získané v oblasti od kyslíka po vápnik s parametrizáciou TM2 rovnako ako výsledky získané s parametrizáciou TM1 v oblasti od vápnika po nikel sa vyznačujú lepším súhlasom s experimentálnymi údajmi ako globálne parametrizácie NL3*, NL-BA alebo FSU2.
- Zavedenie izospinovej závislosti do relativistického jadrového modelu zlepšilo súlad výsledkov modelu s experimentálnymi dátami v oblasti okolo $N=Z$ jadra len mierne, zato v oblasti neutrónovo bohatých jadier došlo k výraznému zlepšeniu predpovedí modelu.

- Zavedenie hustotnej závislosti do relativistického jadrového modelu v rámci oboch prístupov, aj modelu mezonovej výmeny aj modelu jednobodovej interakcie zlepšilo súlad výsledkov modelu s experimentálnymi dátami. V oblasti okolo $N=Z$ jadra je toto zlepšenie len mierne, zato v oblasti neutrónovo bohatých jadier došlo k veľmi výraznému zlepšeniu predpovedí modelu. Pri vzájomnom porovnaní výsledkov parametrizácií ME2 a PC1, môžeme povedať, že v neutrónovo bohatej oblasti sú výsledky s parametrizáciou ME2 väčšinou bližšie experimentálnym hodnotám ako výsledky s parametrizáciou PC1.
- Výpočty dvojneutrónových väzbových energií s izospinovo závislou interakciou s parametrizácie TMA predpovedajú, že neutrónová hranica stability leží na jadrách ^{28}O , ^{34}Ne , ^{42}Mg , ^{48}Si , ^{56}S , ^{58}Ar , ^{62}Ca , ^{78}Ti , ^{82}Cr , ^{96}Fe a ^{98}Ni .
- Výpočty dvojneutrónových väzbových energií hustotne závislou interakciou s parametrizácie PC1 predpovedajú, že neutrónová hranica stability leží na jadrách ^{28}O , ^{30}Ne , ^{40}Mg , ^{48}Si , ^{56}S , ^{58}Ar , ^{68}Ca , ^{72}Ti , ^{80}Cr , ^{84}Fe a ^{98}Ni .
- Výpočty dvojneutrónových väzbových energií hustotne závislou interakciou s parametrizácie ME2 predpovedajú, že neutrónová hranica stability leží na jadrách ^{28}O , ^{30}Ne , ^{40}Mg , ^{48}Si , ^{56}S , ^{58}Ar , ^{60}Ca , ^{72}Ti , ^{82}Cr , ^{86}Fe a ^{98}Ni .
- Aj keď vo väčšine prvkov je poloha neutrónovej hranice stability určená pomocou jednotlivých modelov rovnaká, v niektorých sa odlišuje a tu môžeme pozorovať, že modely s hustotne závislou interakciou predpovedajú polohu neutrónovej línie stability bližšie ku hranici stability ako model s izospinovo závislou interakciou.
- Všetky modely zhodne predpovedajú výrazne väčší protónový polomer ako neutrónový polomer v jadrách v blízkosti protónovej hranice stability. Tento rozdiel závisí od prvku a od použitého modelu a indikuje vytváranie protónovej kože v týchto jadrách s hrúbkou 0,3 fm až 0,6 fm.
- Všetky modely zhodne predpovedajú výrazne väčší neutrónový polomer ako protónový polomer v jadrách v blízkosti neutrónovej hranice stability. Tento rozdiel závisí od prvku a od použitého modelu a indikuje vytváranie neutrónovej kože v týchto jadrách s hrúbkou 0,7 fm až 1,1 fm.
- U väčšiny parametrizácií môžeme v predpovediach neutrónových polomerov pozorovať zlomy pri zaplnení magických vrstiev ($1f_{7/2}$ pre $N=28$ a $1g_{9/2}$ pre $N=50$).
- Aj keď sú výsledky výpočtov pre polomery jadier s jednotlivými modelmi podobné, môžeme pozorovať, že modely s hustotne závislou interakciou systematicky predpovedajú menšie polomery jadier ako model s izospinovo závislou interakciou.

7. Zoznam literatúry

- [1] GREINER, W – MARUHN, J. A.: Nuclear Models, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1996
- [2] WALECKA, J. D.: Theoretical Nuclear Physics, Imperial College Press, London 2004

- [3] LEJA, J.: Teoretické štúdium jadrového halo pre izotopy kyslíka, Diplomová práca, Matematicko-fyzikálna fakulta UK, Bratislava 1998
- [4] LEJA, J.: Teoretické štúdium jadrového halo pre izotopy kyslíka, Rigorózna práca, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK, Bratislava 2011
- [5] SUZUKI, J. – LOVAS, R. G., - YABANA, K. – VARGA, K.: Structure and Reactions of Light Exotic Nuclei, Taylor & Francis, London 2003
- [6] L. N. SAVUSHKIN, H. TOKI: The Atomic Nucleus as a Relativistic System, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2004

8. Zoznam publikovaných prác

1. LEJA, J. – GMUCA, Š.: Structure of Exotic Oxygen Isotopes in the Relativistic Mean-Field Theory, Proceedings of the 5th International Workshop Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds MeV to TeV, JINR, Dubna 2001, s.250-260, ISBN 5-85165-599-2.
2. LEJA, J.: Teoretické štúdium exotických jadier, Zborník príspevkov z 11. konferencie slovenských fyzikov, SFS, Košice 2000, s.20.
3. LEJA, J. – GMUCA, Š.: Relativistic Mean-Field Study of Even-Even Oxygen Isotopes, Acta Physica Slovaca Vol. 51, No. 3, June 2001, s. 201-210. ISBN 0323-0465.
4. LEJA, J.: Opis atómového jadra v rámci relativistického modelu stredného poľa, Zborník príspevkov z 12. konferencie slovenských fyzikov, SFS, Košice 2002, s.77, ISBN 80-968655-5-2
5. LEJA, J.: Rozmery exotických jadier. Zborník príspevkov z 6. medzinárodnej konferencie Strojné inžinierstvo, STU, Bratislava 2002, ISBN 80-227-1783-5.
6. GMUCA, Š. – LEJA, J.: On Structure of Even-Even O isotopes in Relativistic Mean-Field Framework, Proceedings of the International Symposium on Exotic Nuclei, World Scientific, Syngapore 2002, p. 495-505. ISBN 981-238-025-6.
7. GMUCA, Š. - LEJA, J.: On Particle Stability of Neutron Rich O Isotopes. Proceedings of the 5th International conference Dynamical Aspects of Nuclear Fission, World Scientific, Syngapore 2002, s.434-444. ISBN 978-981-283-129-5.
8. LEJA, J. - GMUCA, Š.: Štúdium exotických jadier horčíka. Sborník příspěvků z 14. konference českých a slovenských fyziků, Zapadočeská univerzita, Plzeň 2002, s.199-201, ISBN 80-7082-907-9
9. LEJA, J.: Relativistic Mean-Field Description of Deformed Nuclei. Proceedings of the 7th International Workshop Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds MeV to TeV, JINR, Dubna 2003, s.264-267. ISBN 5-9530-0038-3
10. LEJA, J. - GMUCA, Š.: Relativistic Mean-Field Study of Even-Even Z= 8-20 Nuclei, Proceedings of the 15th Conference of Slovak and Czech Physicists, SFS, Košice 2006, s.25-26. ISBN 80-969124-2-9.

11. LEJA, J. - GMUCA, Š.: Light Nuclei in the Relativistic Mean-Field Theory, Proceedings of the 9th International Workshop Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV, JINR, Dubna 2006, s.143-147. ISBN 5-9530-0131-2.
12. LEJA, J.: Výpočty vlastností a štruktúry atómových jadier. Zborník z vedeckej konferencie Výskumné a edukačné aktivity na katedrách fyziky technických univerzít na Slovensku, STU, Bratislava 2006, s.146-149. ISBN 80-227-2430-0.
13. LEJA, J. – GMUCA: Š.: Calculations of the Binding Energies of Exotic Atomic Nuclei, Proceedings of the Conference New Trends in Physics, VUT, Brno 2007, s.259-261. ISBN 978-80-7355-078-3.
14. LEJA, J.. Štúdium izotopov Na,Mg,Si,S a Ar v rámci relativistického modelu stredného poľa. Zborník príspevkov z medzinárodnej konferencie Strojné inžinierstvo, STU, Bratislava 2004, s.S2- 53-56, ISBN 80-227-2105-0.
15. LEJA, J. - GMUCA, Š.: Relativistic Mean-Field Description of Light Nuclei, Proceedings of the 6th International Conference Dynamical Aspects of Nuclear Fission, World Scientific, Syngapore 2008, s.331-336. ISBN 978-981-283-752-3.
16. LEJA, J. - GMUCA, Š.: Calculations of the Binding Energies of Light Atomic Nuclei, Proceedings of the 16th Conference of Slovak Physicist, SFS, Košice 2008, s.47-48. ISBN 978-80-969124-5-2.
17. LEJA, J.: Kvantová hadrodynamika, Zborník príspevkov z konferencie Výskumné a edukačné aktivity na katedrách fyziky technických univerzít, STU, Bratislava 2008, s.86-88. ISBN 978-80-227-2887-4.
18. LEJA, J. - GMUCA, Š.. Calculations of the Properties of Silicon Isotopes in the Relativistic Mean-Field Framework, Proceedings of the 16th Conference of Czech and Slovak Physicists, MAFY, Hradec Králové 2008, s.112-117. ISBN 80-86148-93-9.
19. LEJA, J. - GMUCA, Š.: Theoretical Study of Light Atomic Nuclei. Proceedings of the 10th International Workshop Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds MeV to TeV, JINR, Dubna 2010, s.102-108. ISBN 978-5-9530-0241-7.
20. LEJA, J. - GMUCA, Š.: Calculations of the Binding Energies of Magnesium Isotopes in the Framework of the Relativistic Mean-Field Theory, Proceedings of the 17th Conference of Slovak Physicists, SFS, Bratislava 2009, s.111-112. ISBN 978-80-969124-7-6.
21. LEJA, J. - GMUCA, Š.: The Parameterizations of the Relativistic Mean-Field Theory with Various Symmetry Energy of Nuclear Matter, Proceedings of the 17th Conference of Czech and Slovak Physicists : SFS, Košice 2012, s.51-52. ISBN 978-80-970625-4-5.
22. LEJA, J. - GMUCA, Š.: The Calculations of the Properties of Exotic Atomic Nuclei., Proceedings of the 20th Conference of Slovak Physicists, SFS, Bratislava 2014, s. 63-64. ISBN 978-80-971450-2-6.

23. LEJA, J. - GMUCA, Š.: The Relativistic Mean-Field Calculations of the Properties of Light Atomic Nuclei, Proceedings of the 18th Conference of Czech and Slovak Physicists, Universita Palackého, Olomouc 2015, s. 63-64, ISBN 978-80-244-4725-4.
24. LEJA, J. - GMUCA, Š.: The Description of the Oxygen Isotopes in the Relativistic Mean-Field Framework, Proceedings of the 12th International Workshop Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV, JINR, Dubna 2014, s. 28-31. ISBN 978-5-9530-0399-5.
25. LEJA, J. - GMUCA, Š.: Calculations of the Properties of Atomic Nuclei. Proceedings of the 15th Conference on Applied Mathematics, STU, Bratislava 2016, s. 748-754, ISBN 978-80-227-4531-4.
26. LEJA, J. - GMUCA, Š.: The Properties and Structure of Atomic Nuclei in the Relativistic Mean-Field Theory, Proceedings of the 21st Conference of Slovak physicists, SFS, Košice 2015, s. 33-34, ISBN 978-80-971450-7-1.

9. Odozva na publikované práce

LEJA, Jozef – GMUCA, Štefan. Relativistic Mean-Field Study of Even-Even Oxygen Isotopes, Acta Physica Slovaca Vol. 51, No. 3, June 2001, s. 201-210. ISBN 0323-0465.

Citované v prácach:

1. LIU, B. – GRECO, V. – BARAN, V. – COLONNA, M. – DI TORO, M.: Asymmetric Nuclear Matter: The Role of the Isovector Scalar Channel, Physical Review C 65, 2002, 045201
2. LI, Q. – LI, Z. – ZHAO, E.: Density and Temperature Dependence of Nucleon-Nucleon Elastic Cross Section, Physical Review C 69, 2004, 017601
3. YADAV, H. L. – KAUSHIK, M. – TOKI, H: Description of Drip-Line Nuclei within the Relativistic Mean Field Plus BCS Approach, International Journal of Modern Physics E 13, 2004, p. 647 – 696
4. KAUSHIK, M. – SINGH, D – YADAV, H. L.: Halo Formation in Neutron Rich Ca Nuclei, Acta Physica Slovaca 55, 2005, p. 181 – 196
5. LÜTZ, E. – RAZEIRA, M. – BODMAN, B. E. – VASCONCELLOS, C. A. Z.: Signatures of Isovector Components of a Light Scalar Meson in Pulsars, International Journal of Modern Physics D 16, 2007, p. 373 – 380
6. VASCONCELLOS, C. A. Z. - LÜTZ, E. – RAZEIRA, M. – BODMAN, B. E., DILLIG, M.: Isovector Components of Light Scalar Meson and Nuclear Matter Properties, International Journal of Modern Physics D 9, 2007, p. 2867 – 2871
7. PHAT, T.H. – ANH, N.T. – LONG, N.V. – HOA, L.V: Phase Transitions of Asymmetric Nuclear Matter Beyond the 4-Nucleon Model, The Annual Report for 2009, Vietnam Atomic Energy Institute, p. 15 – 20

8. ROCA-MAZA, X. – VINAS, X. CENTELLES, M. – RING, P. -. SCHUCK, P.: Relativistic Mean Field Interaction with Density Dependent Meson-Nucleon Vertices Based on Microscopic Calculations, *Physical Review C* 84, 2011, 054309
9. SINGH, S. K. – BISWAL, S. K. - BHUYAN, M. – PATRA, S.: Effect of Isospin Asymmetry in Nuclear System, *Journal of Physics G* 41, 2014, 055201
10. SINGH, S. K. – BISWAL, S. K. - BHUYAN, M. – PATRA, S.: Effect of δ Meson in Relativistic Mean Field Theory, *Physical Review C* 89, 2014, 044001
11. KELLEY, J. H. – PURCELL, J. E. – SHEU, C. G.: Energy Levels of Light Nuclei A=12, *Nuclear Physics A* 968, 2017, p. 71-253

Summary

This thesis deals with the relativistic models of atomic nucleus and their application for theoretical study of exotic nuclei. The properties of the fundamental relativistic model and the possibilities to develop more sophisticated models for better description of exotic nuclei were studied. More sophisticated models have been developed by the incorporation of the ω -meson selfinteraction and ω - ρ -meson crossinteraction into the model and by the introducing isospin and density dependence of nucleon-nucleon interaction. The density dependence of interaction has been introduced by the point coupling model and the meson exchange model. Predictions of fundamental relativistic model and the extended relativistic models have been compared with the experimental results of binding energies and charge radii from oxygen to nickel. The position of the neutron dripline in this region based on the two neutron separation energies has been predicted. The calculated proton and neutron radii have been used for predicting of proton skin and neutron skin in these nuclei.