

SILY TROCH TELIES

Dalibor Krupa

Fyzikálny ústav SAV Bratislava

Abstrakt: Riešenie problému troch telies priťahovaných prostredníctvom gravitačnej interakcie je matematicky zložitá úloha, ktorá má analytické riešenie iba v zjednodušených prípadoch. V prípade silnej interakcie troch častíc spôsobujúcej viazané stavy kvarkov a elementárnych častíc sa môžu prejavovať nielen dvojčasticové (párové) sily, ale aj sily trojčasticové. V príspevku sa zaoberáme príkladmi existencie a významu trojčasticových síl v jadrovej a subjadrovej fyzike.

Kľúčové slová: 2 a 3 - časticové sily, nukleosyntéza, borromeánske jadrá, baryóny, kvarky

Úvod

V nebeskej mechanike vieme vypočítať dráhy troch telies pomocou Newtonovho gravitačného zákona, ktorý vyjadruje veľkosť príťažlivých síl medzi jednotlivými dvojicami telies. V jadrovej a subjadrovej fyzike pôsobia medzi tromi časticami okrem párových síl aj trojčasticové sily. Aké sú to sily a čo o nich vieme?

Pri vyučovaní fyziky na základnej a strednej škole vystačíme s predstavou síl, ktoré pôsobia medzi dvomi telesami. O vzájomnom pôsobení dvoch telies, či hmotných bodov sa žiak stretáva napríklad pri treťom Newtonovom pohybovom zákone, zákone akcie a reakcie. Newtonov gravitačný zákon sa tak isto týka vzájomného pôsobenia gravitačnej sily medzi dvomi telesami. Ich pôsobenie sa dá vysvetliť ako interakcia, ktorou na seba pôsobia ľubovoľné dva hmotné objekty prostredníctvom gravitačného poľa [1].

Podobne na seba pôsobia dva elektrické náboje. Na rozdiel od gravitačného pôsobenia, ktoré je vždy príťažlivé, silové pôsobenie medzi dvomi elektricky nabitými telesami môže byť príťažlivé, ale aj odpudivé podľa toho, či sú nesúhlasne alebo súhlasne nabité. Veľkosť sily vyjadruje Coulombov zákon pre vzájomné silové pôsobenie medzi dvomi bodovými elektrickými nábojmi. Elektrické náboje vzájomne interagujú prostredníctvom elektromagnetického poľa [2].

Sily pôsobiace medzi 2 a 3 telesami

Gravitačná aj elektromagnetická interakcia popisuje ďalekodosahové sily, ich veľkosť sa znižuje s druhou mocninou vzdialenosti $\propto 1/r^2$ a potenciál poľa klesá úmerne so vzdialenosťou $V \approx 1/r$. Obidve interakcie sú ďalekodosahové, prejavujú sa aj na veľmi veľkých vzdialenostiach.

V klasickej mechanike vieme pomocou gravitačného zákona hravo vypočítať pohyb dvoch telies. Pohyb Zeme v gravitačnom poli Slnka, Mesiaca alebo umelej družice v gravitačnom poli Zeme. Problém nastáva ako vyriešiť pohyb sústavy zlozenej z troch telies, napríklad sústavy Slnko-Zem-Mesiac. Keď vezmeme do úvahy silové pôsobenie medzi každou dvojicou telies pomocou Newtonovho zákona, dostaneme pre ich polohové vektory takúto sústavu rovníc:

$$d^2\mathbf{r}_i/dt^2 = -G \sum_j m_j (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) / |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3 \quad (1)$$

kde indexy i a j nadobúdajú hodnoty 1,2,3, a sumácia na pravej strane rovnice prebieha cez tri možné dvojice vzájomných síl. Vyriešenie tejto vektorovej rovnice nie je vôbec jednoduché lebo ide o deväť viazaných nelineárnych diferenciálnych rovníc druhého rádu.

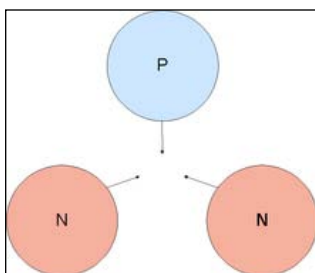
Gravitačný problém troch telies bol pokladaný za jeden z najstarších nevyriešených problémov matematickej fyziky. Na rozdiel od prípadu dvoch telies, neexistuje riešenie, ktoré by sa dalo jednoducho vyjadriť v analytickej forme a pre zistenie pohybu takéhoto systému telies je nutné použiť numerické metódy integrácie. Pre väčšinu konfigurácií troch telies nedávajú tieto metódy stabilné riešenia a vedú k rozpadu systému na samostatné tri telesá, ktoré sa rozlietajú do nekonečna, alebo v lepšom prípade opisujú napríklad binárny stav dvoch hviezd a tretiu samostatnú. Ale existujú aj niektoré stabilné konfigurácie troch telies, objavené matematickými fyzikmi v minulých dvoch storočiach. Pomocou výpočtovej techniky a vhodných aproximačných metód sa dnes dá spoľahlivo simulovať nielen vývoj trojčasticového systému, ale aj systémov pozostávajúcich z tisícov telies[3].

Pohyb elektrónov okolo jadier atómov spôsobuje elektromagnetická interakcia, preto vieme pomerne ľahko vypočítať dvojčasticový problém, napríklad energetické hladiny atómu vodíka, čiže hladiny elektrónu v elektrickom poli protónu. Vypočítať energetické hladiny ťažších atómov s viacerými elektrónmi na základe dvojčasticových coulombických síl už nie je také jednoduché ale vhodnými aproximačnými metódami sa dajú vypočítať [4].

Jadrové sily

Na rozdiel od gravitačnej, alebo elektromagnetickej interakcie, jadrové sily, sily zodpovedné za existenciu viazaných nukleónov v jadrách atómov sa so vzrastajúcou vzdialenosťou rýchlo strácajú, sú krátkodosahové. Potenciál ich poľa má tvar $V \approx e^{-kr}/r$, čiže na krátkych vzdialenostiach klesá exponenciálne a mimo atómového jadra sa už takmer neprejavuje.

Prvé zložitejšie jadra ako je jadro vodíka H, ktoré je tvorené jediným protónom, sú jadrá izotopov vodíka – deutérium, trícium a jadrá izotopov hélia He. Jadro deutéria ${}^2\text{H}_1$ má jeden protón a jeden neutrón, trícium má protón a dva neutróny. Na jadro trícia ${}^3\text{H}_1$ sa podobá stabilné jadro izotopu hélia ${}^3\text{He}_2$ s dvomi protónmi a jedným neutrónom. Stabilné jadro hélia ${}^4\text{He}_2$, čo je častica rádioaktívneho žiarenia α , má 4 nukleóny - 2 protóny a 2 neutróny.



Obr.1: jadro trícia ${}^3\text{H}$ a trojčasticová sila

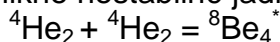
Väzbová energiu jadier trícia ${}^3\text{H}_1$ a hélia-3 ${}^3\text{He}_2$ sa dá v kvantovej mechanike počítať pomocou Faddejevových rovníc, čo je vlastne zovšeobecnenie Schrödingerovej rovnice na 3-časticový problém. Vstupnou informáciou pri výpočte sú potenciály krátkodosahových síl pôsobiacich medzi nukleónmi. Výpočty, ktoré brali do úvahy párové sily, sily pôsobiace medzi dvojicami nukleónov nedávali správne výsledky. Väzbová energia na nukleón E_B bola o 0,5 MeV menšia v porovnaní s experimentálnou hodnotou[5]. Výpočet potvrdil, že zahrátie iba dvojčasticových síl nie je dostatočné a naznačil, že pri silných interakciách viacerých častíc bude treba počítať aj s pôsobením 3-časticovej sily, ako je to naznačené na Obr. 1. Trojčasticové sily sa sú také sily, ktoré neexistujú medzi dvomi časticami no pôsobia medzi tromi časticami.

Výpočet s dvojčasticovými silami spolu s trojčasticovými dal správne výsledky, čím potvrdil existenciu trojčasticových síl [6]. Vznikla otázka, či pri jadre ${}^4\text{He}_2$, helia-4, nebude nutné počítať okrem 2 a 3-časticových síl aj s vplyvom 4-časticovej sily. Výsledky ukázali, že

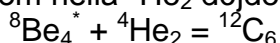
zarátanie 2 a 3-časticových síl je dostatočné a dáva výsledky zhodné s experimentom. Navyše ukázali že 4-časticové interakcie nie sú potrebné [7].

2 a 3 – časticové rezonancie

Okrem stabilných viazaných stavov častíc sú krátkodosahové silné interakcie zodpovedné aj za vznik krátko žijúcich nestabilných viazaných stavov – rezonancií. Napríklad zrážkou dvoch jadier hélia ${}^4\text{He}_2$ vznikne nestabilné jadro berýlia ${}^8\text{Be}_4^*$:



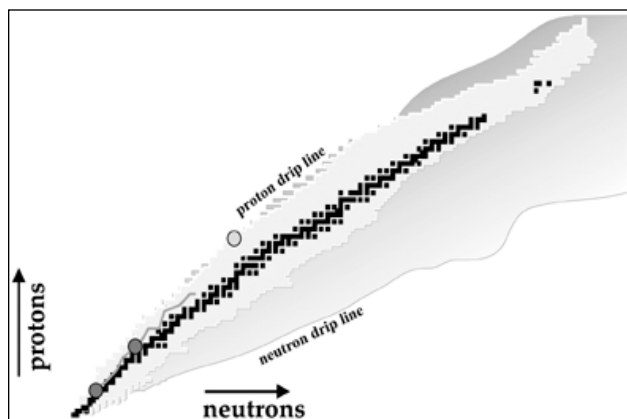
Prejaví sa to rezonančným chovaním účinného prierezu v závislosti od energie zrážky. V práci [8] sme ukázali, že pri zrážke dvojčasticovej rezonancie s ďalšou časticou dochádza pri vhodnej energii zrážky k vzniku trojčasticových rezonancií, takže pri zrážke berýlia ${}^8\text{Be}_4^*$ s ďalším jadrom hélia ${}^4\text{He}_2$ dôjde k vzniku existovaného jadra uhlíka ${}^{12}\text{C}_6$:



Bolo to dôležité potvrdenie hypotézy o vzniku jadier ťažších atómov nukleosyntézou ľahkých jadier, ktorú r. 1946 formuloval britský fyzik Fred Hoyle (1915-2001). Roku 1950 ako silný zástanca predstavy statického vesmíru pejoratívne nazval model rozpínajúceho sa vesmíru „Big Bangom“, no neskôr ho akceptoval, čo malo silný vplyv na zmenu jeho svetonázoru. Za ďalšie rozpracovanie nukleosyntézy ťažších jadier dostal W.A.Fowler r. 1983 Nobelovu cenu.

3 – časticové sily a neutrónmi presýtené izotopy

Pridávaním protónov do ľahších jadier vznikajú jadrá ťažších chemických prvkov. Aby odpudivé elektromagnetické interakcie medzi protónmi nezabránili ich existencii, musia im byť pridané ďalšie neutróny. Bez pridávania neutrónov by tieto jadrá nevznikli. Pridávaním, alebo uberaním neutrónov do jadra daného chemického prvku vznikajú jeho izotopy. Hoci sú neutróny elektricky neutrálne väzbová energia pridávaných neutrónov sa s ich počtom znižuje, takže existuje istá hranica presýtenia jadier neutrónmi, alebo tiež línia odkvapkávania neutrónov, ako to vidno na Obr. 2. [9]



Obr. 2: Línia presýtenia neutrónmi (neutrón drip line)

Pridávaním neutrónov sa jadro zväčšuje, slabšie viazané neutróny vytvárajú okolo neho neutrónový oblak. Mení sa aj jeho geometrický tvar.

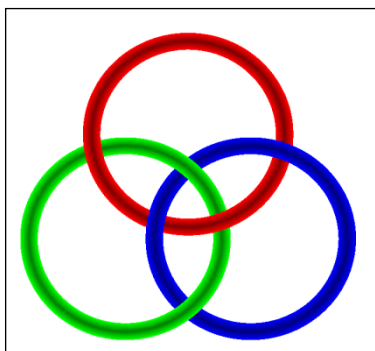
Prvé jadro s neutrónovým oblakom dvoch neutrónov bolo objavené r. 1987 na urýchľovači ťažkých iónov BEVALAC v Lawrence Berkeley Lab [10]. Je to jadro lítia ${}^{11}\text{Li}_3$. Väzbová energia takéhoto neutrónu je slabá, dosahuje iba 300 keV.

Deformácia (nafúknutie) jadra je zrejímavá. Polomer kompaktných jadier súvisí s počtom nukleónov v jadre vzťahom

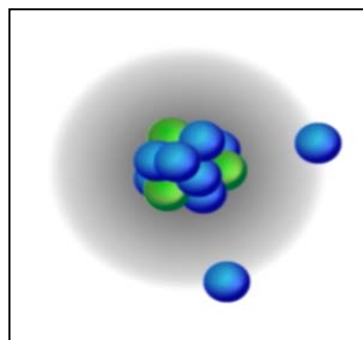
$$R = (1.2 \text{ fm}) A^{1/3} \quad (2)$$

Pre lítium $^{11}\text{Li}_3$ ($A=11$) to je 2,7 fm a pozoruje sa až $3,53 \pm 0.10$ fm ! Jadro sa skladá z troch častí: dvoch neutrónov a z jadra $^9\text{Li}_3$, nakoľko $^{10}\text{Li}_3$ nevytvára viazaný stav. To, že $^{10}\text{Li}_3$ nevytvára viazaný stav znamená, že po uvoľnení jedného z neutrónov druhý neutrón sa tam neudrží a odletí z jadra.

Je to kvantový systém, skladajúci sa z 3 častí, kde musia byť všetky 3 jeho časti prítomné. Takýto systém sa nazýva BORROMEÁNSKYM v analógii s erbom rodiny Borromeo zo severného Talianska. Skladá sa z troch spojených kruhov Obr.3. Sú tak spojené, že keď sa jeden kruh zruší, zvyšné dva sa rozpadnú [11].



Obr. 3: Borromeánske kruhy



Obr.4: Borromeánske jadrá

Vo februári tohto roku bol zverejnený objav ďalšieho „boromeánskeho“ jadra [12]. Je ním jadro uhlíka $^{22}\text{C}_6$. Oblak tvoria dva neutróny. Väzbová energia každého je okolo 420 keV. Priemerná stredná hodnota polomeru je $5,4 \pm 0.9$ fm namiesto 3,3 fm podľa vzťahu (2).

Podľa [13] nejde iba o kuriozitu. Je to evidentný príklad existencie trojčasticových síl a očakáva sa, že štúdium jadier v blízkosti línie presýtenia neutrónmi bude znamenať prielom vo výskume stavby atómových jadier a povedie k ich lepšiemu pochopeniu. Vyskytujú sa tam náhle skoky línie odkvapkávania neutrónov medzi susednými jadrami. Napríklad u jadra fluóru, iba o jeden protón vyššie ako izotop kyslíka $^{24}\text{O}_8$, sa hranica odkvapkávania zrazu zvýši zo 16 neutrónov na 22. Najťažší izotop kyslíka má 16 neutrónov a najťažší izotop fluóru $^{31}\text{F}_9$ ich má 22.

Záver

V dôležitosti trojčasticových síl vidne istú gradáciu. Videli sme, že pre ďalekodosahové interakcie, na úrovni od rozmeru atómu po galaxie, sú podstatné dvojčasticové sily bez nutnosti uvažovania o trojčasticových silách. Pre krátkodosahové sily na úrovni atómových jadier sú popri dvojčasticových interakciách dôležité už aj trojčasticové sily.

Význam trojčasticových síl v prírode je ešte markantnejší pri silných interakciách pôsobiacich na subatomárnej úrovni medzi kvarkami a gluónmi. Vieme, že jadrové sily sú prejavom existencie silnej interakcie medzi kvarkami vďaka gluónom, ktoré túto interakciu sprostredkujú. Trojčasticové sily medzi nukleónmi sú principiálne možné, lebo na rozdiel od fotónov, gluóny sa môžu viazať sami k sebe.

Baryóny, medzi ktoré patria aj protóny a neutróny sú viazané stavy troch kvarkov. Každý z troch kvarkov má inú farbu takže spolu vytvárajú bielu farbu - bezfarebný stav. Ako náhle by prestali pôsobiť trojčasticové sily a jeden z kvarkov by sa uvoľnil, rozleteli by sa aj zvyšné dva, lebo bezfarebný stav sa nedá vytvoriť z dvoch farieb a všetky baryóny sú navonok bezfarebné. Takže pre existenciu vesmíru je rozhodujúcou existencia trojčasticových síl.

PodĎakovanie

Autor vyjadruje svoju vďaku za podporu z grantov Vega č 2/0009/10 a APVV č. LPP-0223-09

Literatúra

1. Odborná skupina pre terminológiu FPS JČMSF 1988, *Slovník školskej fyziky*, 1.vyd. Praha: SPN 1988, 14-646-88
2. Jozef Garaj a kolektív 1987, *Fyzikálna terminológia*, 1. vyd. Bratislava: Slovenské pedagogické nakladateľstvo v Bratislave 1987, 067-476-87 FTE
3. Piet Hut homepage <http://www.sns.ias.edu/~piet/index.html>
4. P. Fulde. *Electron Correlations in Molecules and Solids* (Springer, 1995) ISBN-13: 978-3540593645.
5. R. Machleidt, F. Sammarruca, and Y. Song, Phys. Rev. C **53**, R1483(1996).
6. A. Nogga, A. Kievsky, H. Kamada, W. Glöckle, L.E.Marcucci, S. Rosati, and M. Viviani, Phys. Rev. C **67**, 034004 (2003).
7. A. Nogga, H. Kamada, W. Glöckle, and B.R. Barrett, Phys. Rev. C **65**, 054003 (2002)
8. I.J.R. Atchison and D. Krupa, Nuclear Physics A182 (1972) 449-67
9. ORNL Report <http://www.ornl.gov/info/reporter/no52/oct03.htm>
10. P. G. Hansen and B. Jonson, Europhys. Lett. **4**, 409 (1987).
11. http://en.wikipedia.org/wiki/Borromean_rings
12. K. Tanaka et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 062701 (2010).
13. K.W. Kemper and P.D. Cottle, Physics **3**, 13 (2010)

Adresa autora

RNDr. Dalibor Krupa, CSc., D.Phil.
Fyzikálny ústav SAV
Dúbravská cesta 9
845 11 Bratislava,
e-mail: krupa@savba.sk