

Reakcijos keturių dalelių sistemose: nuo šaltųjų atomų iki didelės energijos branduolių

Reactions in four-particle systems: From cold atoms to high-energy nuclei

Arnoldas Deltuva¹

¹Vilniaus Universitetas, Fizikos fakultetas, Teorinės fizikos ir astronomijos institutas, Saulėtekio al. 3,
LT-10257 Vilnius

arnoldas.deltuva@tfai.vu.lt

Bus aptariami kvantinių dalelių susidūrimai ir reakcijos, itin aktualios fundamentiniam kvantinių sistemų ir jų savybių tyrimui, ypač sistemose su ribotu surišusių būsenų skaičiumi. Būtent tokia situacija yra lengvųjų branduolių atveju: dviejų, trijų ir keturių nukleonų sistemose yra tik keletas surišusių būsenų ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$ ir ${}^4\text{He}$, be to, jos visos pasižymi maža sukinio verte. Esant didesnei sistemos kampinio momento vertei arba didesnei protonų (p) ir neutronų (n) skaičiaus asimetrijai, pvz., $3p + 1n$ arba $1p + 3n$, lengvųjų branduolių sistemose įmanomos tik tolydžios spektro dalies būsenos, dar vadinamos sklaidos būsenomis, kurios yra realizuojamos jas sudarančių posistemų susidūrimuose ir reakcijose esant atitinkamai energijai. Dėl žymiai aukštesnės fazinės erdvės dimensijos, kinematinų konfigūracijų ir sukinių stebimųjų dydžių (analizavimo gebos, poliarizacijos, sukinių koreliacijos bei perdavimo koeficientai) gausos, sklaidos procesų tyrimai itin įvairiapusiškai atskleidžia nagrinėjamų sistemų savybes. Tačiau, palyginus su lokalizuotomis surišusių būsenų banginėmis funkcijomis, keturių dalelių sklaidos būsenų funkcijų asimptotinės savybės yra daug sudėtingesnės, ypač sistemose su daug kanalų ir/arba toliveike elektrine (Kulono) sąveika. Tai labai komplikuoja teorinį reakcijų modeliavimą. Be to, stipriai sąveikaujančių dalelių sistemose artutinių trikdžių teorijos metodų pritaikymas yra ribotas, dažniausiai yra būtinas tikslus kvantmechaninis sklaidos uždavinio formulavimas ir sprendimas [1].

Pranešime bus aptariamos sėkmingai išspręstos svarbios keturių dalelių susidūrimų modeliavimo problemos bei plačiame energijos intervale (nuo nulio iki keleto šimtų MeV masių centro sistemoje) ištirtos įvairios branduolinės reakcijos, o taip pat ir tam tikri procesai šaltųjų atomų sistemose. “Atramos taškas” šiems tyrimams buvo standartinės sklaidos teorijos, išvystytos Fadejevo, Jakubovskio, Alto, Grasbergerio ir Sandhaso darbuose, integralinė versija, formuluojama ne banginėms funkcijoms, o šuolio operatoriams. Detaliau bus apžvelgiami šie uždaviniai ir jų sprendimas:

1. Integralinių sklaidos lygčių singularumai. Sistemoje su artiveikėmis sąveikomis integralinė sklaidos teorijos versija sklaidos būsenų funkcijų asimptotikos problemą transformuoja į integruojamus singularumus integralinių lygčių branduoliuose, kurių sudėtingumas labai priklauso nuo atvirų reakcijos kanalų skaičiaus ir tipo. Specialūs integravimo impulsų erdvėje metodai buvo išvystyti ir pritaikyti šios problemos

sprendimui. Sudėtingiausių nagrinėtų atveju, t.y., keturių nukleonų sistemoje energijai viršijant suskaldymo slenkstį, buvo pasiūlytas ir praktiškai realizuotas kompleksinės energijos metodas su specialiais kompleksiniais integravimo svoriais, absorbuojančiais kvazisinguliaras pointegralines funkcijas.

2. Reakcijos keturių nukleonų sistemoje. Diferencialiniai skerspjūviai, analizavimo gebos, sukinių koreliacijos ir perdavimo koeficientai buvo ištirti ne tik tampriojoje $n + {}^3\text{H}$, $p + {}^3\text{He}$, $p + {}^3\text{H}$, $n + {}^3\text{He}$ ir $d + d$ sklaidoje, bet ir visose persigrupavimo reakcijose, pvz., krūvio pernašos reakcijoje $p + 3\text{H} \rightarrow n + 3\text{He}$ ir nukleono perkėlimo reakcijose $d + d \rightarrow p + {}^3\text{H}$ ir $d + d \rightarrow n + {}^3\text{He}$, kurios yra aktualios ir termobranduolinei sintezei. Be to, apskaičiuoti ir pilni suskaldymo į tris ir keturis klasterius reakcijų skerspjūviai bei $n + n + d \rightarrow n + {}^3\text{H}$ rekombinacijos reakcijos greitis. Ištirtas stebimųjų dydžių jautrumas realistiniams sąveikos modeliams bei Kulono, Δ rezonanso ir efektinės keturnukleoninės sąveikos svarba reakcijose bei ${}^4\text{He}$ branduolyje.

3. Šaltųjų atomų sistemos ir universali fizika. Išvystyta reakcijų modeliavimo metodika nėra apribota vien branduoline fizika, ji buvo išplėsta ir pritaikyta tiriant šaltųjų atomų susidūrimus, pvz., ${}^4\text{He}$ atomų sklaida ${}^4\text{He}_2$ molekulemis esant milikelvinų temperatūrai. Manoma, kad rezonansinė dviejų šaltųjų atomų sąveika sąlygoja daugiadalelinių sistemų universalias kvantines savybes, pvz., Efimovo efektą trijų atomų sistemoje, tačiau apie keturių dalelių sistemas žinoma žymiai mažiau. Pritaikius metodiką buvo nuodugnai ištirtos universalios keturių identiškų fermionų ir bozonų kontinuumo savybės, t.y., nestabilių keturatomų Efimovo molekulių energijos lygmenys ir pločiai, atomų ir triatomų molekulių bei dviejų dviatomų molekulių reakcijos, keturių atomų arba atomų ir molekulių rekombinacijos procesai, prognozuoti itin egzotiški keturatomų molekulių virsmas iš nestabilių į virtualias būsenas ir atvirkščiai. Nors specifinis šių reakcijų modeliavimo sunkumas yra daug kanalų su labai skirtingomis (iki 10^{13} kartų) ryšio energijomis, išvysčius specialią sprendimo metodiką gauti itin aukšto tikslumo rezultatai.

Reikšminiai žodžiai: sklaidos teorija, šuolio operatoriai, keturių nukleonų sistema, Efimovo fizika.

Literatūra

[1] A. Deltuva, A.C. Fonseca, Phys.Rev.Lett. 113, 102502 (2014).