Tézisfüzet

Alfa-klaszter és szuperintenzív lézertér kölcsönhatásának elmélete

Szilvási Réka

Témavezető: Dr. Kis Dániel Péter
egyetemi docens
Nukleáris Technikai Intézet
Atomenergetika Tanszék

BME, Fizikai Tudományok Doktori Iskola

2024

1 Bevezetés

Az alfa-bomlás problémakörének elméleti vizsgálata napjainkban reneszánszát éli. Ez részben annak köszönhető, hogy a növekvő numerikus számítási kapacitás lehetővé teszi a magszerkezeti tulajdonságok és az atommagok stabilitásának pontosabb vizsgálatát, elősegítve a nukleonok közötti kölcsönhatások pontosabb megértését. Ezentúl az alfa-bomlás a kutatások kereszttüzébe került a szuperintenzív lézerek fejlesztésében tapasztalható előrelépések révén, amelyek új kapukat nyitnak meg a lézer-anyag kölcsönhatások vizsgálatában. A szuperlézer fejlesztések eredményeképpen a kísérletileg elérhető csúcsintenzitások (akár $I = 10^{24}$ W/cm^2) már olyan tartományban vannak, hogy a viszonylag alacsony fotonenergia mellett (1 keV-nél nem nagyobb értékek) akár az atommagfolyamatokra is hatást gyakorolhatnak, például a magreakciókra vagy a radioaktív bomlásokra. Ezek közül különösen érdekes kérdés az alfa-bomlás felezési idejének (bomlási szélességének) lehetséges módosulása az intenzív lézertér hatására, ugyanis a folyamat hasznosítható lehet a radioaktív hulladékok hosszútávú kezelésében.

Manapság egyre bővülő irodalom tárgyalja a lézer-asszisztált alfa-bomlás elméletét, azonban az alfa-bomlás alapvető folyamatának komplexitása (a nukleon-kölcsönhatások megértése, nukleáris párkorrelációk, klaszterizációs mechanizmusok és a Coulomb-gát okozta alagúteffektus) és az izotópok sokfélesége, valamint a kísérleti eredmények hiánya miatt az intenzív lézertérbeli alfa-bomlás leírására kidolgozott modellek alapvetően erősen közelítő jellegűek, érvényességük korlátozott. Mindezek alapján indokolt egy, a bomlási probléma jellegzetességeit közvetlenül tükröző és kvantummechanikai értelemben konzisztens alap modellkörnyezet kidolgozására.

Az alfa-bomlás egy összetett spontán atommag folyamat, melyet a nukleonok között ható magerő és az elektromágneses kölcsönhatás együttes hatása alakít ki. Gondolhatunk rá úgy is, mint egy kétlépcsős folyamat, mely az alfa-klaszter képződéséből (fürtösödés), illetve a már preformált alfa-klaszter és remanens mag közötti kölcsönhatásból tevődik össze; utóbbi eredményezi a Coulomb-gáton történő alagutazást. Megmutatható, hogy vezető rendben a lézertér leghangsúlyosabb hatása a Coulomb-gát változásában várható, mely elsősorban az alagutazási folyamatra hat; a magszerkezetben a magerő dominanciája miatt nem jelentős a hatás.

Mindezek értelmében ebben a disszertációban az alfa-bomlás alagutazási fázisát vizsgálom nagy tömegszámú alfa-bomló izotón atommagok esetében. A Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB) közelítésben érvényes demonstratív számítások után, a konvencionális alagutazási kép helyett egy alternatív, kvantummechanikailag konzisztens nem-hermitikus modellkörnyezetben határoztam meg a kvázi-stacionárius állapottal reprezentált, preformált alfa-klaszter bomlási szélességét (melyet a kvázi-stacionárius állapothoz rendelt komplex energia imaginárius része ad meg) és annak külső lézertér okozta módosulását a perturbáció számítás vezető rendjében. Részletesen megvizsgáltam a szuper-intenzív lézer és alfa-bomló atommag kölcsönhatásának leírása során felmerülő elektrodinamikai sajátosságokat, melyek a nem-hermitikus kvantummechanikai modellkörnyezetben és a nem-relativisztikus közelítésben éleződnek ki.

2 Célok

Az általános cél az volt, hogy adekvát és kvantummechanikailag konzisztens elméleti alap modellt alkossak a szuperintenzív lézer-asszisztált alfa-bomlás leírására. Ehhez mindenekelőtt egy demonstratív számítás elvégzése volt szükséges, mely során a konvencionális kvantummechanikai képben értelmezzük az alagutazás folyamatát, annak érdekében, hogy bemutassam, hogy erősen egyszerűsítő feltételek mellett - síkhullám lézert tekintve, nulla-

drendű közelítésben számolva a lézer-módosított bomlási szélességet - már várhatóan nem elhanyagolható a lézer hatása, tehát érdemes további, a jelenség lényegét részletesebben feltáró modellekkel vizsgálni a problémát.

Mivel a Henneberger-transzformáción alapuló modell csak periodikus időfüggésű lézertér esetében alkalmazható konzisztensen, szükség volt egy eltérő modellkörnyezetre, hogy a lézerpulzusok hatását is vizsgálni tudjuk. A fizika számos területén sikerrel alkalmazott (t,t') formalizmus egy megfelelő leírás az időben nem periodikus potenciálok analitikus és perturbatív vizsgálatára. A módszer azonban a rendszert jellemző hullámfüggvény ismeretén alapul, mely az általam vizsgált probléma esetében egy kvázi-stacionárius állapotként jelenik meg. Ennek jellegzetessége a hely koordinátát tartalmazó hullámfüggvény divergenciája, amit a számítások során kezelni kell. E probléma nem kezelhető a megszokott hermitikus kvantummechanika keretén belül, ezért a leírást ki kellett terjeszteni a nem-hermtikus kvantummechanika területére, mely a kvázi-stacionárius állapotok (bomló rendszerek) konzisztens leírásának a természetes környezete. Ennek megfelelően az alfa-bomlás alagutazásra vonatkozó konzisztens leírása a nem-hermitikus kvantummechanika formalizmusát igényli annak speciális eszköztárával (Complex-scaling). Ezek alapján kiemelt célként jelenik meg a rendszert leíró komplex-skálázott (Complex-scaled) Hamilton operátor komplex spektrumának analízise, illetve annak átlagtér magpotenciálok paramétereitől való függésének elemzése is.

Fontos kiemelni, hogy a kvázi-stacionárius állapotú alfa-klaszter bomlási szélességének komplex spektrum számítással történő meghatározása nem a teljes bomlási szélességet adja meg, csak az alagutazáshoz köthetőt, így fontos cél volt a számítások validálása, melyhez speciális izotón sorok kísérletileg ismert bomlási élettartamait használtam fel.

A legfőbb célom az elsőrendű, nem-relativisztikus (t,t')-perturbatív komplex energiakorrekció kiszámítása volt cirkulárisan és lineárisan polarizált lézerpulzusok esetében nagy tömegszámú alfa-bomló atommagokra, a nem-relativisztikus közelítés intenzitástól és fotonenergiától függő határának figyelembe vételével és elemzésével. Ehhez kapcsolódóan kiemelt célja a dolgozatomnak, hogy rávilágítson az intenzív koherens elektromágneses tér és anyag kölcsönhatásában jellemző mértékek (rE length-gauge és pA radiation-gauge) alkalmazásának korlátaira, amennyiben kvázi-stacionárius állapotokkal jellemzett rendszert vizsgálunk nem-hermitikus kvantummechanikai környezetben.

3 Módszerek

A munka első fázisában az intenzív lézertérbeli alagutazást a hagyományos nem-relativisztikus WKB-közelítésben vizsgáltam, mely során a külső lézertér időfüggését a *Henneberger-transzformáció*val tettem implicitté, mely periodikus vektorpotenciálok esetében lehetővé teszi a nulladrendű, lézer-módosított bomlási szélesség Gamow-faktoron keresztül érvényesülő meghatározását.

A következő fázisban a *nem-hermitikus kvantummechanika* eszköztárát alkalmaztam a kvázi-stacionárius állapottal leírt alfa-klaszter bomlási szélességének meghatározására. Legfőbb módszerként a *Complex Scaling transzformáció*t alkalmaztam a kvázi-stacionárius állapotra jellemző Gamow-Siegert függvények regularizációja érdekében. Az alfa-klaszter és remanens mag rendszert leíró, nem-hermitikus Hamilton operátor teljes komplex spektrumának előállításához és a komplex klaszter-energiák meghatározásához szimbolikus diagonalizációs módszert alkalmaztam.

A külső időfüggő, nem-periodikus vektorpotenciállal jellemzett lézertér hatását a komplex energia perturbatív korrekcióján keresztül határoztam meg. Erre a célra szolgált a tipikusan nem-hermitikus, bomló rendszerek esetében alkalmazható (t,t')-formalizmus: származtattam egy analitikus formulát a komplex energia *elsőrendű (t,t')-perturbatív korrekció*jára.

4 Új tudományos eredmények

1. tézispont

Megvizsgáltam az intenzív lézer-asszisztált alfa-bomlás elméleti lehetőségét ($I \geq 10^{19}$ W/cm^2) síkhullámú lézerteret feltételezve. Nem-relativisztikus és hosszúhullámú közelítésben (LWA), átlagtér atommag-modelleket használva, Henneberger-képben kiszámoltam a ^{210}Po alfa-bomló izotóp esetében a Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB) közelítésben érvényes bomlási szélesség (Γ) relatív megváltozását $\mathcal{R} = \frac{\Gamma^{\text{las}}}{\Gamma}$. Megvizsgáltam az $\mathcal{R}$ arányt a külső lézertér ω körfrekvenciájának és I intenzitásának függvényében, cirkuláris és lineáris polarizációjú lézertér esetében is. Ez alapján megmutattam, hogy cirkulárisan polarizált lézer esetén a Woods-Saxon potenciál alak szabad paramétereitől függően, nulladrendben az $\mathcal{R}$ arány becsült értéke $\mathcal{R} = 30$ és $\mathcal{R} = 123$ közötti, tehát az intenzív lézertér hatása a bomlási szélességre már a Fourier-kifejtés nulladrendjében releváns.

Kapcsolódó publikáció: [1]

2. tézispont

Kidolgoztam egy általános módszert, mely alkalmas nem periodikus időfüggő potenciál jelenlétében meghatározni egy kvázi-kötött rendszer komplex spektrumának megváltozását a perturbációszámítás vezető rendjében. A (t,t')-formalizmus és a komplex energiaspektrum numerikus diszkretizációs módszerrel történő meghatározásának ötvözésével származtattam egy analitikus, zárt formulát a Floquet-típusú energiasajátérték-korrekcióra ($\epsilon^{(1)}$) a perturbációszámítás vezető rendjében, ami triviálisan leprojektálható a valódi energiakorrekcióra. A módszer eredményeként meghatároztam a képzetes energiának, úgyis mint az állapot élettartamának a különböző időfüggő Gauss-típusú perturbáló potenciálok okozta megváltozását.

Kapcsolódó publikáció: [2]

3. tézispont

Megvizsgáltam speciális Gauss-típusú potenciállal leírt kvázi-kötött rendszerhez minimálisan csatolt vektorpotenciállal jellemzett, Gauss-burkolóval korrigált intenzív lézerpulzus perturbáló hatását a bomló rendszer komplex energia-sajátértékére nézve. A (t,t')-perturbációszámítás módszerével az elsőrendű komplex-energia korrekcióra vonatkozóan levezettem egy általános analitikus formulát, mely érvényes analitikus, folytonos potenciállal jellemzett bomló rendszerek esetében, lineáris vagy cirkuláris polarizációjú lézerpulzus terében. Megállapítottam, hogy az elsőrendű, (t,t')-perturbatív komplex-energia korrekció számításában a nem-nulla mátrixelem-járulékot a vektorpotenciálban kvadratikus ($\mathbf{A}^2$) tag adja (az elektromágneses kölcsönhatásokban megszokott $\mathbf{pA}$-val arányos tag helyett).

Kapcsolódó publikáció: [3]

4. tézispont

Kimutattam, hogy a klasszikus vektorpotenciállal jellemzett intenzív lézertérrel kölcsönható kvázi-kötött állapotok hullámfüggvénnyel történő nem-hermitikus leírása és speciálisan a c-szorzat alkalmazása kizárja a speciális (pA) és (rE) mértékek érvényességét a problémára, továbbá fizikai mértéknek tekinthető a "velocity-gauge", mely összhangban van az intenzív lézertérrel kölcsönható rendszerek adott közelítésekben (LWA és nem-relativisztikus) általánosan érvényes leírásával. Bemutattam, hogy ennek matematikai oka a komplex skálázott rendszer által megkövetelt c-szorzat alkalmazása, mely által a hullámfüggvény fázis-szimmetriája sérül, ennek megfelelően a teljes mértékszimmetira által megkövetelt, hullámfüggvényre vonatkozó fázistranszformációk korlátozottan érvényesek.

Kapcsolódó publikáció: [3]

5. tézispont

Elvégeztem az alfa-klaszter és remanens mag rendszerben, a különböző átlagtér magpotenciálokban - Coulomb-gáthoz csatolt Woods-Saxon, illetve Woods-Saxonnal korrigált harmonikus oszcillátor tipusú nukleáris potenciálokban - kialakuló kvázi-kötött állapotú alfa-klaszter Hamilton-mátrixának komplex eneriga-spektrum közelítését. Harmonikus oszcillátor típusú bázisfüggvények, valamint a nukleáris potenciálok paramétereinek alapos analízisével, megtaláltam a ^{212}Po alfa-bomló izotóp alfa-energiáját (E_α) 1% nagyságrendű numerikus pontosság mellett és a kvázi-kötött állapotot jellemző bomlási szélességet, melynek bemutattam a kapcsolatát az alfa-bomlás teljes bomlási szélességéhez.

Kapcsolódó publikáció: [4]

6. tézispont

Alkalmaztam a lézerpulzus alakokra származtatott, analitikus, komplex Floquet-típusú, első rendű, perturbatív, nem-relativisztikus energia-korrekció formulát ^{212}Po,^{214} Rn,^{216} Ra,^{218} Th alfa-bomló izotónok esetében. Megvizsgáltam, hogy az élettartam relatív megváltozása, milyen módon függ a lézerpulzus kontroll-paramétereitől (csúcsintenzitás, fotonenergia, pulzushossz és fázistolás), mely során azt találtam, hogy a pulzushossz domináns hatással van a képzetes energia megváltozására, amely a ciklusszám növelésével csökken, továbbá a csúcsintenzitás és fotonenergia párok együttese határozza meg a változás mértékét. Becslést adtam az alfa-klaszter és a szuperintenzív lézerpulzus kölcsönhatásában a nem-relativisztikus közelítés csúcsintenzitás és fotonenergia által meghatározott tartományának határára. A számítások során kimutattam, hogy az alkalmazott közelítések érvényessége mellett a 100 eV fotonenergia-érték esetében a 10^{24} W/cm^2 csúcsintenzitás még biztosan megengedett és az élettartam relatív megváltozásának számított értéke a négy izotón közül a ^{212}Po esetében a legnagyobb.

Kapcsolódó publikáció: [4]

7. tézispont

Az általam kidolgozott nem-Hermitikus modellkörnyezetben meghatároztam a komplex energiasajátértéket, azon belül is kiemelve a Γ képzetes energiát az N=128, 130 és 132 izotónsorok rövid felezési idejű atommagjaira. Megmutattam, hogy az N=128-as izotón sor esetében a számolt Γ értékek és a kísérletileg ismert totális bomlási szélességek (Γ^{decay}) aránya 4% pontosságon belül konstans, mely igazolja azt a feltételezésemet, hogy ezen izotón atommagok esetében az alfa-klaszter és remanens mag rendszerében a különbség domináns részét a protonok által létrehozott Coulomb-gát változása jelenti. Ez alapján becslést adtam a még kísérletileg nem kimutatott A=220 urán atommag felezési idejére, mely $T = 141.7 \pm 5.3$ ns-nak adódott. Megállapítottam, hogy alfa-bomló izotónok esetében az empírikus Geiger-Nuttal törvény jellege egyetlen, nem-perturbatív módon számított mennyiséggel, az alfa-klasztert leíró kvázi-kötött állapot komplex energiájával megfelelően leképezhető.

Kapcsolódó publikáció: [5]

5 Publikációk

[1] D. Kis and R. Szilvasi, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **45, 045103** (2018)

[2] Réka Szilvási and Dániel P Kis, *J. Phys. A: Math. Theor.* **55, 275301** (2022)

[3] R. Szilvasi, D. P. Kis, *Results in Physics*, **Volume 54 107080** (2023)

[4] Réka Szilvási and Dániel P Kis: *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys* **51, 055101** (2024)

[5] Réka Szilvási, István Andorfi and Dániel P Kis *Nucl. Phys. A* **1053 122968** (2025) online megjelent, 2024 október