

B 3665

EGYETEMI DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

NEMKLASSZIKUS ÁLLAPOTOK KELTÉSE ÉS
TULAJDONSÁGAIK VIZSGÁLATA

KIS ZSOLT



JÓZSEF ATTILA TUDOMÁNYEGYETEM

SZEGED

1999

Témavezető: Janszky József
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet

I. AZ ÉRTEKEZÉS TÁRGYA ÉS CÉLKITŰZÉSEI

A kvantummechanika olyan fizikai világképet tár a fizikusok szeme elé, mely a makroszkópikusan megszokott világtól gyökeresen eltér. A kvantummechanika axiómái lerögzítik azt a matematikai megközelítést, ahogy a mikroszkópikus világban a fizikai jelenségeket a tapasztalattal egyezően értelmezni lehet. A kvantummechanika alapjait e század első harminc évében rakták le. Az új elméleti modell sikeresen megmagyarázott olyan jelenségeket, amelyekkel szemben a klasszikus fizika eszköztára sikertelen maradt. Az elméleti modell felépítésénél elkerülhetetlenül be kellett vezetni olyan új fizikai fogalmakat, melyek létjogosultsága közvetlen megfigyeléssel akkor még nem volt igazolható, viszont az új fogalmak következetes alkalmazásával a kísérletekben megfigyelhető eredményekre vezettek az elméleti számítások. Néhány példát szeretnék csak kiemelni itt: az egyik alapvető szemléleti váltást a kvantummechanikai állapottér bevezetése jelentette, amelynek vektorai a fizikai rendszer egy állapotának felelnek meg. Az állapotvektorok tartalmazzák az összes megismerhető információt a rendszerről. A fizikai mennyiségek szerepét az állapottérben ható hermitikus, megfigyelhető operátorok vették át.

Az állapottérben megengedett művelet, hogy két állapotvektort összeadjunk egymással. Ez a kvantummechanikai szuperpozíció, melynek klasszikus analógiája nincs. Gondoljunk például Schrödinger szuperponált állapotban lévő macskájára, amely egyszerre élő és halott. A kvantummechanikai szuperpozíció közvetlen megfigyelésének egy lehetséges útját, kísérletileg ellenőrizhető körülmények között, a lézerek megjelenése tette lehetővé az 1960-as években. A lézerben jó közelítéssel koherens állapotban van a fény, amely a klasszikus elektromágneses tér kvantummechanikai megfelelője. A sugárzási tér két jól megkülönböztethető koherens állapotának szuperpozícióját

tekinthetjük úgy, mint Schrödinger-macskája optikai analógiáját. Az optikai Schrödinger-macska számos nemklasszikus tulajdonsággal rendelkezik, így annak előállítása és nemklasszikusságának megfigyelése elvi jelentőségű probléma. A kvantummechanikai szuperpozíció által olyan állapotai alakulhatnak ki egy rendszernek, amely különleges tulajdonságai miatt jelentős. A kvantumoptikában a fény kvadratúra összenyomott állapota egy fontos példa erre, amelyben például az elektromos térhez rendelt kvadratúra operátor szórása kisebb a vákuumállapotban felvett értéknél. A szuperpozíció mai alkalmazásaként megemlítjük, hogy a szuperponált állapotok szolgáltatók alapul a kvantumszámítógép elméleti modelljének kidolgozásához.

Több szabadsági fokú rendszerek szuperponált állapota összefonódott állapotot eredményezhet. Az összefonódott állapotok különös tulajdonságára Einstein, Podolsky és Rosen hívták fel a figyelmet híres dolgozatukban 1932-ben. Az összefonódott állapotok ma már fontos gyakorlati alkalmazást nyertek a kvantumtitkosításban és döntően hozzájárulnak a kvantumteleportáció megvalósításához is.

A dolgozatomban a fenn bemutatott elemi kvantummechanikai jelenségek vizsgálatát tűztem ki célul néhány egyszerű fizikai rendszerben. Egyszerűsége azt értem, hogy a rendszerben lehetséges csak annyi szabadsági fokot figyelembe venni, amennyit a tanulmányozni kívánt jelenség megkövetel, másrészt a környezettel való kölcsönhatásai közül azok befolyásolják számottevően a rendszer állapotát, amelyek a vizsgált jelenség szempontjából fontosak. Továbbá célszerű olyan rendszert választani, amelynek kvantummechanikai modelljét analitikusan tudjuk kezelni, ami rávezethet a jelenség mélyebb megértésére. Az is fontos szempont lehet, hogy a rendszert ne csak matematikailag, hanem kísérletileg, méréssel is tanulmányozni tudjuk.

A harmonikus oszcillátor az egyik legegyszerűbb modell a kvantummechanika-

kában. Egyszerűsége ellenére mégis számos fizikai rendszer igen jó közelítéssel leírható vele. A fény az egyik legfontosabb példa az oszcillátor modell alkalmazására. Az oszcillátor modellel jellemzett rendszerek közös problémája a kvantumállapotuk reprezentációja. Egy alkalmasan választott bázisban kifejtve a rendszer állapotvektorát bizonyos problémák megoldása lényegesen egyszerűsödik. A kvantumoptikában kiemelkedően fontos bázisvektor rendszer az oszcillátor koherens állapotainak halmaza. A koherens állapotokat definiálhatjuk úgy, mint az oszcillátor eltüntető operátorának sajátállapotát. A sajátértékek halmaza kifeszíti a teljes komplex síkot, amelyet a koherens állapotok további speciális tulajdonságainak köszönhetően azonosíthatunk az oszcillátor kvantummechanikai fázisterével.

A koherens állapotok bár nem ortogonálisak egymásra, azonban túlteljes rendszert alkotnak. Ezért a koherens állapotok halmazának egy részhalmaza is képezhet teljes bázisvektor rendszert. Neumann János bebizonyította, hogy ha a komplex síkon kiválasztunk egy szabályos rácsot, amelynek elemi cellája π területű, akkor az így definiált megszámlálhatóan végtelen sok elemű halmaz épp teljes rendszert alkot. Ha az elemi cella területe nagyobb mint π akkor a halmaz nem teljes, ha pedig kisebb, akkor túlteljes.

Cahill tétele még ennél is többet állít: ha a komplex síkon van egy tetszőleges Cauchy sorozatunk, akkor a Cauchy sorozat tagjaival paraméterezett koherens állapotok halmaza teljes rendszert alkot. Azonban nem sikerült általánosan teljességi relációt találni egy-egy ilyen halmazra, s ezért nincs általános konstruktív eljárás egy állapot kifejtésére a Cahill féle bázisokban.

Janszky és Vinogradov megmutatták, hogy koherens állapotok páros függvény szerinti folytonos szuperpozíciója a komplex sík valós tengelye mentén kvadratúra-összenyomott (squeezed) állapotra vezet. Ha eloszlásfüggvényként Gauss-függvényt válasszunk, akkor az ideális, kvadratúra-összenyomott vá-

kuum állapotot kapjuk. Ennek az egy-dimenziós koherens állapot szuperpozíció-
ción alapuló reprezentációnak az a jelentősége, hogy ugyan csak egy speciális
állapotosztály esetében, de sikerült a koherens állapotok egy részhalmazán
kifejteni állapotokat a teljes halmazon értelmezett kifejtés helyett, ráadásul
most egyértelműen tudjuk, hogy a súlyfüggvény paramétereinek megváltozta-
tása milyen kvantumállapotra vezet.

Az egy-dimenziós reprezentációk területén továbblépést jelentett Ádám,
Földesi, Janszky eredménye, akik kimutatták, hogy a harmonikus oszcillátor
energia-operátorának kvadratúra-összenyomott sajátállapotai ugyancsak ki-
fejthetők koherens állapotok szuperpozíciójával a fázistér valós tengelye men-
tén. A kifejtési eljárásuk egyúttal konstruktív módszert kínál egy tetszőleges
állapot valós tengely menti koherens állapot szuperpozíció súlyfüggvényének
a megtalálására. Ugyanakkor felmerül egy elvi jelentőségű kérdés: vajon csak
a fázistér teljes valós egyenese mentén lehet konstruktív eljárást találni egy
állapot kifejtésére, vagy elég egy rövidebb szakasz is? Cahill tétele alapján
a komplex síkon bármilyen kis szakasz vagy görbe alkalmas arra, hogy rajta
koherens állapotok szerint kifejtünk egy tetszőleges állapotot, ezért fennáll a
lehetőség, hogy más görbékre is találjunk kifejtési eljárást. A dolgozatomban első
fejezetében ismertetek egy konstruktív eljárást, amellyel az oszcillátor bármely
állapota a fázistér elvileg tetszőleges görbéje mentén kifejthető.

Az előző szakaszban vázolt reprezentáció-elméleti problémával kísérleti szem-
pontból analóg egy rendszer kvantumállapotának mérés útján történő teljes
meghatározása, amelyet kvantumállapot rekonstrukciónak neveznek. Az első
jelentős, pozitív eredményt K. Vogel és H. Risken érte el ezen a területen.
Bebizonyították azt, hogy fény esetében a fázisforgatott kvadratúra-operátor
eloszlása kifejezhető kvázi-valószínűségeloszlás függvényekkel, mint például P ,
 Q és Wigner, és megfordítva, ha a fázisforgatott kvadratúra-operátor eloszlása

ismert, akkor a kvázi-valószínűségeloszlás függvények megkaphatók.

A Vogel és Risken által javasolt rekonstrukciós eljárást először Smithey, Beck, Raymer, és Faridani valósította meg kísérletileg 1993-ban. Kísérletükben a vákuum és a kvadratúra összenyomott vákuum állapotú fény Wigner függvényét rekonstruálták a fázisforgatott kvadratúra-operátor eloszlásfüggvényének mérési adataiból az inverz Radon transzformáció alkalmazásával. Az eloszlásfüggvények meghatározására az úgynevezett szimmetrikus homodin mérési elrendezést használták.

A kvázi-valószínűségeloszlás függvények ismeretében egy lineáris integráltranszformáció segítségével meg lehet kapni a sűrűségmátrix elemeit is. Mivel a mért kvadratúra-eloszlásokból ugyancsak lineáris transzformációval nyerjük a Wigner függvényt, ezért a két transzformáció összekapcsolásával egy olyan transzformációt kapunk, amely a mért kvadratúra-eloszlásokból közvetlenül megadja a sűrűségmátrix elemeit. Ebben az új transzformációban megjelennek az úgynevezett minta-függvények, amelyek Fock bázisban egy tisztán helyfüggő és tisztán szögfüggő függvény szorzataként fejezhetők ki. A rekonstrukciós eljárás során a sűrűségmátrix elemeit a mért fázisforgatott kvadratúra-eloszlásokból úgy kapjuk meg, hogy statisztikusan átlagoljuk velük a minta-függvényeket.

Az eddig ismertetett rekonstrukciós eljárások mind a kvázi-valószínűségeloszlás függvények mind a sűrűségmátrix esetében az objektumot egységes egészként állítja elő. Wallentowitz és Vogel kidolgozott egy aszimmetrikus homodin mérési elrendezést, amely a fény kvázi-valószínűségeloszlás függvényeit lokálisan, pontról pontra rekonstruálja. A rekonstrukciós eljárásuk alkalmazásához olyan fotodetektorra van szükség, amely egyrészt nagy kvantumhatásfokú, másrészt különbséget tud tenni különböző fotonszámú állapotok között. Ilyen detektort nem könnyű megvalósítani. A dolgozatom második fejezetében a

probléma egy lehetséges megoldását mutatom be, amely kísérleti szempontból is realizitkussá teszi a lokális rekonstrukciós eljárást.

Nevezetes kvantumállapotok előállítása egy-egy fizikai rendszerben napjainkban fontos, aktuális probléma. E téren az egyik legeredményesebb vizsgálati terület a két- és sokatomos molekulák rezgési állapotának lézerrimpusokkal történő kontrollált befolyásolása. A gerjesztési folyamatok elméleti tárgyalásánál számos közelítést kell alkalmaznunk, ha analitikusan kívánjuk meghatározni a molekula rezgési kvantumállapotának változását. A magok és elektronok mozgásának szokásos szétválasztása mellett, amelyet Born-Oppenheimer közelítésnek neveznek, kis amplitúdójú rezgésekre és gyenge gerjesztő fényimpulzusokra kell szorítkozni. Ekkor azt az effektív potenciált, amelyekben a magok mozognak közelíthetjük harmonikus potenciálokkal, és a rezgési állapotok meghatározásánál elegendő a perturbáció számítás első rendjét figyelembe venni.

Az oszcilláció frekvenciája az elektronhéj kvantumállapotától erősen függ. Az elektronhéj különböző gerjesztett állapotaihoz más egyensúlyi magtávolság és más harmonikus erőállandó tartozik. Ez az alapja a molekulák rezgési állapota egy lehetséges külső befolyásolásának: megfelelően választott fényimpulzussal gerjesztve az elektronhéjat, a magok rezgési állapota előre meghatározott módon változtatható. Ezt a rezgési állapot változást is magával vonó elektronhéj gerjesztést Franck-Condon átmenetnek nevezik: pontosabban fogalmazva, Franck-Condon átmenet során az elektronhéj állapotának pillanatszerű megváltozását a jóval nehezebb magok nem tudják követni, s így a távolságuk nem változik meg az elektronátmenet alatt. Azonban az a potenciál, amelyben mozognak megváltozik, s az új potenciálban már más rezgési állapotnak felel meg az elektronátmenet előtti rezgési állapotuk. A molekulák rezgési állapota kontrollálható megfelelően választott frekvenciájú

és burkológörbájű fényimpulzusokkal, amely a szelektív lézerkémia alapja.

Kétatomos molekulákban a rezgési periódusidővel összemérhető hosszúságú, kis intenzitású, transzformáció-limitált impulzusokkal történő gerjesztési folyamatok tárgyalásában úttörő munkát végzett Vinogradov és Janszky. Eredményüket a következő képpen foglalhatjuk össze: (i) nagyon rövid gerjesztő impulzus esetén rezgési koherens állapot, vagy kvadratúra-összenyomott állapot; (ii) hosszú impulzus esetén rezgési energia sajátállapot; (iii) a rezgési periódusidővel összemérhető impulzus hatására pedig a kettő közötti amplitúdó-összenyomott állapot alakul ki. Dolgozatom harmadik fejezetében további nemklasszikus molekularezgési állapotok keltésével foglalkozom. Megmutatom azt, hogy egy kétatomos molekulában két rövid, transzformáció-limitált fényimpulzussal rezgési Schrödinger-macska állapotot lehet generálni.

Sokatomos molekulákban lényegesen összetettebb rezgési állapotok jöhetnek létre, mint kétatomos molekulákban, a nagyszámú rezgési szabadsági fokuk miatt. A Franck-Condon átmenet során kialakuló rezgési állapotok meghatározásánál általában a rezgési frekvenciák és egyensúlyi magtávolságok megváltozása mellett a potenciálfelületek elfordulását is figyelembe kell venni. Pillanatszerű elektronátmenet hatására létrejövő rezgési állapotokat számos cikkben tárgyalták már az 1930-as évektől kezdve. A dolgozatom negyedik fejezetében megvizsgálom azt, hogy véges hosszúságú, transzformáció-limitált impulzussal gerjesztve egy sokatomos molekula elektronhéját milyen rezgési állapotok alakulhatnak ki.

A kvantummechanika alapvető kijelentéseinek kísérleti vizsgálatában a fény kiemelkedő helyet foglal el. Egyrészt számos eszköz áll rendelkezésre a fény kvantumállapotának manipulálására, másrészt több eljárást is kidolgoztak a kvantumállapota mérésére, amelyek közül a legfontosabbak alap gondolatát a második fejezetben ismertetem. A fény ugyanakkor arra is alkalmas, hogy

atomi rendszerek kvantumállapotát kontrollálható módon befolyásoljuk illetve az állapotról információt szerezzünk. Egy fontos alkalmazási terület a sokfoton abszorpció, amelynek során az elektronhéj gerjesztéséhez nem elegendő egyetlen fénkvantum elnyelése, hanem több foton együttes elnyelésére van szükség. Sokfotonos abszorpciós folyamatokban az átmeneti valószínűség nem csak a fény intenzitásától, hanem a fotonstatisztikájától is erősen függ. Általában n fotonos abszorpcióban az átmeneti valószínűség arányos az indukáló fény $G^{(n,n)}$ normál rendezett korrelációs-függvényével. Ha a fény I intenzitású, akkor koherens állapotú tér esetén a normál rendezett korrelációs-függvény I^n , termikus állapotú térre $n!I^n$, és erősen kvadratúra összenyomott, intenzív mezőre $(2n - 1)!!I^n$.

Az előző bekezdés alapján látható, hogyha növelni szeretnénk egy sokfoton abszorpciós folyamat valószínűségét akkor célszerű olyan fényforrást választanunk, amely fényének normál rendezett korrelációs-függvénye minél nagyobb értéket vesz fel. A fény fotonstatisztikájának egy lehetséges befolyásolására a nemlineáris optikai folyamatok adnak lehetőséget. A kétfotonos lekonverziós folyamatban keletkező kvadratúra összenyomott állapotú fényről láttuk, hogy sokfotonos abszorpciós folyamatokban kiemelkedő hatékonysággal vesz részt. Dolgozatom utolsó, ötödik fejezetében a magasabbrendű lekonverziós folyamatokban keletkező fény sokfotonos abszorpcióban való alkalmazhatóságát vizsgálom meg.

II. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Kidolgoztam egy konstruktív eljárást a harmonikus oszcillátor tetszőleges állapotának reprezentálására a fázistér valamely folytonos egydimenziós görbéje mentén. A módszer lényege, hogy a reprezentáció

súlyfüggvényét valamely teljes ortogonális polinomhalmaz elemei szerint kifejttem, és a kifejtési együtthatókat az állapot Fock együtthatóinak a felhasználásával fejezem ki. A módszert alkalmaztam a koherens és a fázisoptimalizált állapotok reprezentálására a fázistér valós tengelyének különböző szakaszain. Levezettem egy összefüggést a folytonos koherens állapot reprezentáció és a vákuumállapot körüli Bargmann állapot reprezentáció között. Megmutattam azt is, hogy az egy-dimenziós, folytonos koherens állapot reprezentáció kiindulási pontul szolgálhat egy állapot diszkrét koherens állapot reprezentációjának megtalálásához [VI].

2. Új mérési elrendezést javasoltam a fény kvantumállapotához rendelt kvázi-valószínűségeloszlás függvény rekonstruálására. A kaszkád homodin mérésben a szimmetrikus és az aszimmetrikus homodin mérés összekapcsolása egy olyan mérési elrendezést eredményez, amelyben az állapot s -paraméterezett kvázi-valószínűségeloszlás függvénye lokálisan rekonstruálható egy kísérleti szempontból is reális méréssel. A módszer mellékeredménye, hogy megtaláltam a generátorfüggvényét azoknak a mintafüggvényeknek, amelyek a szimmetrikus homodin mérésben a sűrűségmátrix diagonális elemeit szolgáltatják Fock reprezentációban [VIII].
3. Megmutattam azt, hogy egy kétatomos molekulában két rövid, transzformáció-limitált fényimpulzussal rezgési Schrödinger-macska állapotot lehet kelteni a gerjesztett elektronállapothoz tartozó rezgési potenciálfelületen. Ilyenkor a molekula két nukleonjának a távolsága két különböző távolság szuperpozíciója [I,II,III].
4. Meghatároztam sokatomos molekulák rezgési állapotát, amely egy gyenge, transzformáció-limitált fényimpulzus hatására alakul ki Franck-Condon átmenet során. Kimutattam, hogy a gerjesztés hatására két rezgési mó-

dus összefonódott állapotba kerülhet, ha a normálrezgési frekvenciák aránya kifejezhető kis egész számok hányadosával. Az összefonódottság mérésére a von Neumann-féle statisztikus entrópiát használtam [IV,V].

5. Kimutattam, hogy egy nemlineáris optikai kristályban, k -fotonos lekonverziós folyamatban kialakuló fény (csillag állapot) kiemelkedő hatékonysággal indukál sokfotonos abszorpciót. Megmutattam, hogy a csillag állapotú fény erősíthető parametrikus erősítőben anélkül, hogy a sokfotonos abszorpcióban mutatott nagy hatékonysága jelentősen lecsökkenne. Ismertettem egy kaszkád elrendezésű fényforrást, amelyben két 2-fotonos lekonverziós folyamat követi egymást, és az így kialakuló csillag állapotról megmutattam, hogy ugyancsak kiemelkedő hatékonysággal vesz részt sokfotonos abszorpciók folyamatban [VII].

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

- [I] J. Janszky, A. V. Vinogradov, T. Kobayashi, Z. Kis, *Vibrational Schroedinger-cat states*, Phys. Rev. A **50**, 1777-1784 (1994).
- [II] Z. Kis, J. Janszky, A. V. Vinogradov, P. Adam, *Unusual vibrational states*, Proceedings II. Central-European Workshop on Quantum Optics, Budapest, pp. 27-30 (1994).
- [III] Z. Kis, J. Janszky, A. Vinogradov, T. Kobayashi, *Vibrational Schrödinger Cats*, Proc. 4. ICSSUR, NASA Conf. Publ. **3322**, pp. 109-114 (1996).
- [IV] Z. Kis, J. Janszky, P. Adam, A. Vinogradov, T. Kobayashi, *Entangled vibrational states in polyatomic molecules*, Phys. Rev. A **54**, 5110-5117 (1996).
- [V] J. Janszky, Z. Kis, P. Adam, *Correlated and squeezed vibrational states in polyatomic molecules*, Acta Phys. Slov. **47**, 217-224 (1997).
- [VI] Z. Kis, J. Janszky, P. Adam, *Generalized one-dimensional representation in quantum optics*, Acta Phys. Slov. **47**, 299-302 (1997).
- [VII] J. Janszky, Z. Kis, and P. Adam, *Star States*, Progress of Physics **46**, 829-836 (1998).
- [VIII] Z. Kis, T. Kiss, J. Janszky, P. Adam, S. Wallentowitz, and W. Vogel, *Local Sampling of Phase-Space Distributions by Cascaded Optical Homodyning*, Phys. Rev. A. **59**, R39-R42 (1999).