

Vélemény
Vukics András
LIGHT–MATTER INTERACTION
towards
ULTRASTRONG COUPLING
című MTA doktori dolgozatáról

Vukics András dolgozatának témája a fény-anyag kölcsönhatás egy – bizonyos értelemben speciális, ugyanakkor kiemelkedően fontos – területe, a kvantumoptika, amely már ezidáig is sok, a fizikai képünket formáló, fundamentális eredményt szolgáltatott. Ugyanakkor a tágabb értelemben vett kvantumtechnológia szempontjából is érdekes az atomi rendszerek és a fény teljesen kvantumos (fotonképet használó) leírása, a lassan kézbe fogható eszközökké érő alkalmazások jelentős része is kvantumoptikai modelleken alapul.

A fentiekkel összhangban a doktori mű erős kísérleti motivációval rendelkező elméleti eredményeket foglal össze. A 2012-ben Nobel-díjjal jutalmazott, „üreg-quantum-elektrodinamikával” (cavity QED) kapcsolatos eredmények rámutattak, hogy lehetséges akár egyetlen atom és egyetlen optikai módus kölcsönhatását is kísérleti úton vizsgálni, sőt, kontrollálni. Ezeknek az alapvető kísérleteknek az elvégzése óta eltelt időben a technológia tovább fejlődött, olyan, nem feltétlenül tisztán optikai rendszerek váltak elérhetővé, amelyekben korábban nem vizsgálható modellek és paramétertartományok is tanulmányozhatók. A kvantumoptika szükségszerűen leegyszerűsített, alapvető modelljei szintjén mindez azt jelenti, hogy (többek között) Haroche és Wineland munkássága alapján már tudjuk, hogy az egyetlen kétállapotú rendszerre vonatkozó modellek (Rabi, illetve Jaynes-Cummings) fizikailag realizálhatók. Természetes módon merül fel a kérdés, hogy a több ilyen atomot hasonló módon leíró (Dicke) modell esetén elmondható-e ugyanez. Ennek a modellnek a legfontosabb eleme az N atom kollektív viselkedésének a lehetősége, ami az általuk kibocsájtott sugárzás intenzitásának N négyzetével való skálázódásában is tetten érhető (szuperradiancia, szupersugárzás). Dolgozatának első felében ezzel a kérdéssel foglalkozik a jelölt.

Kicsit más nézőpontból, a kollektív viselkedés megjelenése fázisátalakulásnak is tekinthető, akár a hagyományos (termikus) értelemben, akár nulla hőmérsékleten, kvantum-fázisátmenetként. Az elméleti jóslatok szerint a szupersugárzó fázis megjelenése elvben pusztán a kvantálási térfogat csökkentése útján is bekövetkezhet, de mindenképpen erős csatolás szükséges az atomok és a módus között. Ugyanakkor, távolabbról ránézve a problémára, kétséges, hogy a Dicke-modell felírásakor nem történnek-e olyan közelítések, amelyek miatt fizikailag eleve nem jöhet létre a szuperradiáns fázisátmenet. Ezzel a kérdéssel kapcsolatban a 70-es évek közepétől jelentek meg olyan cikkek, amelyek negatív választ adtak, azaz lehetetlennek tartották az átmenet létrejöttét. Vukics András munkája arra világít rá, hogy visszatérve a fény-anyag kölcsönhatás leírásának alapjaihoz, a Dicke-modell konzisztens módon levezethető, ami természetesen azt is jelenti, hogy a modell által jóslott fázisátmenet fizikailag is létrejöhet. Technikailag ehhez az ismert Power-Zienau-Woolley transzformáció általánosítására volt szükség, arra az esetre, amikor a peremfeltétel nem feltétlenül egyszeresen összefüggő felületként jelenik meg (mivel a gyakorlatban előforduló rezonátorok ritkán teljesen zártak.) Ezt felhasználva a fény-anyag kölcsönhatás egy általános, sokrétűen használható közelítő modellje kapható meg, amelyből „mellékesen” a Dicke-modell is természetes módon adódik. Vukics András első 4 tézispontja ehhez a „regularizált elektromos dipól” képhez és

alkalmazásaihoz kapcsolódik. Ezekben a tézispontokban megfogalmazott állításokat a jelölt önálló, új tudományos eredményeinek fogadom el.

A fázisátmenetek kérdéskörét tovább vizsgálva, dolgozatának második részében a jelölt egy nyílt kvantum(optikai) rendszert, a gerjesztett („hajtott”) és egyúttal veszteséges Jaynes-Cummings modellt tanulmányozza. Itt egyetlen kétállapotú atomról és egyetlen módusról van szó, a termodinamikai limeszt pedig a köztük lévő csatolás végtelenbe tartása jelenti. A feltett és megválaszolt kérdések a fotonblokádjelenségéhez kapcsolódnak, amikor az erős csatolás miatt az atomi átmenet annyira elhangolódik az önálló atomra jellemző frekvenciától, hogy ez utóbbival rezonáns módon nem is gerjeszthető, kivéve, ha a gerjesztés elegendően erős ennek a blokádnak az „áttöréséhez”. Véges erősgű csatolás esetén a rendszer sűrűségoperátora az „áttört” és az „érintetlen” fotonblokádkhoz tartozó állapotok keveréke. Ezzel a témával kapcsolatosak Vukics András V-VII számú tézispontjai, amelyeket önálló tudományos eredményként fogadok el, hasonlóan a VIII. ponthoz, amely szorosan kötődik egy, a fotonblokádk-áttöréssel kapcsolódó kísérleti eredményhez.

A dolgozatban ismertetett tudományos munka erősen támaszkodik numerikus számításokra, főként olyanokra, amikor az alkalmazott módszert is a szerző fejlesztette. Ez a tevékenység nem kimondottan hálás munka, mert időigényes és nem feltétlenül vezet azonnal fizikailag fontos eredményekre. MTA doktori dolgozata bizonyítja, hogy Vukics András esetében a türelmes módszerfejlesztés meghozta a gyümölcsét, végül nemzetközi szinten is jelentős fizikai eredményeket szolgáltatva. A szűken vett szakmai eredmények mellett a jelölt két tézispontban (IX, X) a numerikus módszerek fejlesztése terén elért eredményeit foglalja össze, amelyeket szintén önálló tudományos eredményeknek tekintek.

Általánosan is igaz, hogy a Vukics András munkáján érződik az odafigyelés, a türelem (hiszen például a regularizált elektromosdipól-kép kidolgozása sem egyik napról a másikra elvégezhető, azonnali eredményt szolgáltató munka), ami a doktori mű igényességén is érződik. Az angolul írt dolgozat jól szerkesztett, nagy odafigyeléssel készült munka, elírásokat alig találtam. A magyar összefoglalóban egy-két mondat talán kicsit döcögős, de ez semmiképpen sem értelemzavaró.

Összefoglalva, Vukics András dolgozatában hangsúlyos, értékes tudományos munkát mutat be. Tézispontjait önálló tudományos eredményként fogadom el. Alapvetően elméleti munkájának egyik komoly erőssége a szoros kapcsolódás a legújabb kísérleti eredményekhez. Szubjektív szempontból a legnagyobb hatású (illetve a jövőben potenciálisan azzá váló) eredményének a regularizált elektromosdipól-kép kidolgozását tartom.

A fentiek alapján javaslom Vukics András dolgozatának nyilvános vitára bocsájtását.

Kérdéseim a jelölthöz:

1. A dolgozat 3. fejezetében a regularizált elektromos dipól kép kapcsán bevezetésre kerül az atomok körül egy-egy térbeli tartomány, amelyen belül a szokásos elektrosztatikus kép (\sim a mag Coulomb terében mozgó elektronok) érvényes. Ennek az „intimitási zónának” a méretére vonatkozóan a jelölt fizikai alapon nyugvó alsó és felső becslést ad, úgy, hogy egy tág

frekvenciatartományban az előbbi sokkal kisebb az utóbbinál. Felmerül a kérdés, hogy egy konkrét számítás esetén fontos-e, hogy ebben az intervallumban hol választjuk meg az „intimitási zóna” határát? Más szóval, van-e valami praktikus vagy fizikai szempont, ami alapján ezt a zónát kisebbre, vagy nagyobbra érdemes választani? A kondenzációhoz közeli esetben pl. azt érzi az ember, hogy a modell adta kereteken belül a lehetséges legkisebb sugarú zónát érdemes használni a folyamatok leírásakor. Igaz ez?

2. A dolgozat első részében szereplő regularizált elektromos dipól kép ismertetése során az anyagi rendszert a jelölt jellemzően atomoknak vagy molekuláknak nevezi, és hangsúlyozza azt is is, hogy a kémiai kötések létrejötte és a szilárdtestté alakulás (érthető módon) túlmutat a leírás keretein. A kérdésem az, hogy meddig általánosítható ez a módszer, milyen feltételek szabják meg, hogy pl. kisebb atomi klaszterek, esetleg a nanométeres tartományba eső részecskék beleférnek-e még a modell kereteibe? Az nyilvánvaló, hogy túl nagy objektumok esetén az „intimitászóna” nem is definiálható, de a belső struktúrára (azon túl, hogy a magasrendű multipólusok elhanyagolhatók legyenek) van-e valamilyen megszorítás?

3. A fotonblokad-áttörés problémaköre kapcsán a jelölt egy sztochasztikus differenciálegyenleteken alapuló módszert, a „kvantumugrás Monte-Carlo” (QJMC) eljárást alkalmazta. A dolgozatban rámutat, hogy vannak olyan problémák, amikor lényegében nincs is más módszer, hiszen a számítógépek memóriakapacitásának korlátai miatt már egyetlen, a rendszert leíró sűrűségoperátor sem tárolható el. Emellett a nyílt kvantumrendszerek modellezése kapcsán hivatkozik Breuer, H.-P., W. Huber, & F. Petruccione 1997-es cikkére (Comp. Phys. Comm. 104(1), 46 – 58.), amelynek fő állítása az, hogy a markovi esetben, ha mind a sűrűségoperátorra vonatkozó (master-)egyenlet, mind pedig a Monte-Carlo alapú módszer alkalmazható, akkor az utóbbi a hatékonyabb. Kérdésem a jelölthöz, hogy munkája során hasonlította-e össze a két módszer hatékonyságát, illetve a fenti cikk megjelenése után több mint 25 évvel továbbra is ennyire egyértelmű-e ez a kérdés?

4. Az egyetlen módussal kölcsönható kétállapotú atom („hajtott-veszteséges” Jaynes-Cummings modell) esetén a (6.1) Hamilton operátor a forgóhullámú közelítés (RWA) alkalmazásával került felírásra. (Ennek a közelítésnek az érvényességi tartományára utal is jelölt az 53. oldalon található 2. széljegyzetben.) A probléma diszkutálása után a (6.2) dinamikai egyenlet megoldása végső soron numerikus, ezért azt érzi az ember, hogy az RWA mellőzése nem növelné érdemben a probléma számítási bonyolultságát. Igaz ez? Ha igen, akkor mi indokolta az RWA alkalmazását? Esteleg a (6.2) egyenlet bal oldalán a két utolsó tag természetes fizikai interpretációja, illetve az egész modell mögött meghúzódó fizikai kép szemléletes értelmezhetőségének az igénye az indok?



Szeged, 2023. december 10.

Földi Péter