

Válasz Dóra Balázs bírálataira

Mindenekelőtt köszönöm a bíráló befektetett munkáját és az értő olvasást. Egyetértek a szöveg nehézségére, további ábrák szükségességére, és a margójegyzetekre vonatkozó megjegyzéseivel, amelyeket későbbi munkáimban figyelembe fogok venni. Nagyra értékelem a bírálóban megfogalmazott méltatást az eredmények minőségére vonatkozóan. Méltatásnak tekintem azt is, miszerint a III. rész nélkül is teljes lett volna a dolgozat, de az itt megjelenő munkába annyi energiát fektettem közel két évtized során, hogy valamilyen módon meg kellett jelenítenem – jóllehet, egy utolsó fejezet a II. részben is megfeleltethetett volna.

Köszönöm továbbá az érdekes kérdéseket is.

1. Fény–anyag–kölcsonhatás a Dirac-egyenletből

Az alacsony energiás fény–anyag–kölcsonhatással foglalkozó kvantumoptikában szeretünk úgy gondolni az atomra, mint amely az elektromágneses térről leválasztva egy különálló kvantumrendszerként kezelhető (energiaszintjei pusztán a Coulomb–kölcsonhatás figyelembe vételével meghatározhatók). Ehhez mintegy perturbációként vesszük hozzá az elektromágneses vákuum kontinuumával való kölcsonhatásból származó Lamb-eltolódást és spontán emissziót. Az pedig, hogy ehhez hogyan csatoljuk a – gyakran csak néhány releváns móduval leírható – nem-vákuum részét az elektromágneses térnek, részben éppen az I. rész témája. Ezért az elemi modellek szintjén nem használjuk a teljesen relativisztikus Dirac-egyenletet, amely a párkeltés lehetősége miatt koncepcionálisan egy nagyon erős csatolást jelentene az elektron mint kvantummező és a kvantum elektromágneses mező között. (A kvantumkémiában ugyanakkor *ab initio* atom- és molekulafizikai számításokban rendszeresen használják a Dirac-egyenletet.)

Az A^2 -es tag a dipólok sűrűségével skálázódik, tehát nagy sűrűség esetén kapcsol be, mikor egy hullámhossznyi térfogaton belül több atom van. (A Dicke-modell eredeti megfogalmazásában ez eleve a modell alkalmazhatóságának feltétele, de egy rezonátoros szituációban ez nem szükségszerű, mert itt az atomok pozíciója csak *modulo* hullámhossz játszik szerepet. A modell alkalmazhatóságának valójában a homogén csatolás a feltétele.) Az A^4 -es tag még extrémebb sűrűségnél kapcsolna be, és feltehetően még tovább tolná felfelé a kritikus sűrűséget.

Ami a spin–pálya–kölcsonhatást illeti, ezt a Dirac-egyenlettől függetlenül is figyelembe lehet venni, ez az energiaszinteket és az átmeneti dipól mátrixelemet módosítja. Mind ez nem befolyásolja az elméletünket, hiszen a kvantumoptikában eleve a termekben gondolkodunk, amelyek már a spin–pálya-csatolással együtt létrejövő elektronállapotok. A kísérletekben leggyakrabban az alkáli elemek D-vonala jelenik meg, amely az egyik, ilyen termek közötti átmenet.

2. Az átlagtér-elmélet határai

A 4. fejezetben bemutatott modell a lehető legegyszerűbb módja a regularizált elektromosdipól-képben (RED) fennmaradó rövid hatótávolságú dipól-dipól-kölcsönhatás kritikus pontra gyakorolt hatása figyelembevételének. Itt már nem egyszerűen a Dicke-modellről van szó, hanem annak többmódusú változatáról, hiszen az RED-kép szerint az összes módus egyazon ponton válik kritikussá – ez az egyik érv az e képbeli Dicke-fázisátalakulás makroszkopikusként való értelmezése mellett.

Ehhez több szinten is bevezetünk közelítéseket, és maga az átlagtér-közelítés is két szinten van jelen: egyrészt kvantumos operátorok várható értékkel való helyettesítéseként, másrészt a cella-közelítésként. Az utóbbi azt jelenti, hogy az atomokat akkora cellákba tartozóknak tekintjük, amelyek *között* a közvetlen dipól-dipól-kölcsönhatás már elhanyagolható, és az csak a cellán *belül* játszik szerepet.

Ezt követően a cellán belül a dipólsűrűséget homogénnek tekintjük – elhanyagolva ezzel az egyes dipólok közötti korrelációt, melynek az a feltétele, hogy minden dipól nagyon sok öt körülvevő dipóllal hasson kölcsön a cellán belül. (Ez voltaképpen a végtelen számú dimenzió feltétele, amely megszokott az átlagtér-elméleteknél.) Ha a cella mérete elég nagy, akkor ez a feltevés a belsejében jó közelítéssel fennáll, azonban a cella határa közelében mindenképpen sérülni fog.

Korrekción az elmélet ezen részéhez úgy lehetne bevezetni, hogy a cellák esetében nemcsak a dipólt, hanem multipól-momentumokat is figyelembe vennénk, amellyel kezelni lehetne a cella tömege és a felszíne közötti különbséget. Nem tudok azonban arról, hogy ilyen analízis történt volna.

3. Disszipatív fázisátalakulások (DPT) és a fázisátalakulások általános elmélete

DPT-k esetében az univerzalitási osztályt tudtommal elsőként a Dicke-modell példáján vizsgálták (Nagy et al., 2011), amikor is kimutatták, hogy az átlagtér exponensek csak enyhén, a (szingularitást mutató) fluktuációk exponensei azonban jelentősen változnak az alapállapot (zárt rendszerbeli) fázisátalakuláshoz képest.

Mikroszkopikus kvantumrendszerben bekövetkező DPT-re a fotonblokádtörésen (PBB) kívül két prominens példa ismert: a Rabi-modell nyílt változata (Hwang et al., 2018) és a nyílt kvantum Kerr-oszcillátor (Zhang & Baranger, 2021). Ezeknél a PBB-hez hasonlóan egy dinamikai paraméter végtelenbe tartása jelenti a termodinamikai határesetet. Amennyiben ezt a paramétert megfeleltetjük extenzív modellekben a részecskeszámnak, akkor kiderül, hogy a végesméret-skálázás exponensek ugyanazok, mint a Dicke-modellnél.

Elsőrendű DPT-ből jelenleg még csak néhány példa ismert, és ezeknél napjainkban még az is vitatott, hogy a termodinamikai határesetben egyáltalán maradhat-e bistabil tar-

tomány, vagy az elsőrendű DPT mindenképp diszkontinuitásban kell, hogy megnyilvánuljon (vagyis a bistabil tartomány egy diszkontinuitási vonallá zsugorodik-e a fázisdiagrammon). Jelenleg egyedül a PBB-ben van arra vonatkozó indikáció, hogy a termodinamikai határesetben véges bistabilitás-tartomány lehetséges. Ennek a tartománynak a határait szimulációval nagyon nehéz meghatározni, mert ezek közelében a nagyon kicsi kapcsolási ráták miatt nehéz elegendő statisztikát gyűjteni. Az áramkör-quantum-elektrodinamikai kísérletek adhatják meg a választ, és a kísérleti eredmények ilyen irányú kiértékelése jelenleg zajlik.

Ami konkrétan a betöltöttség végesméret-exponensét illeti, a (6.5) egyenletben megjelenő $N_{scale} \propto (g/\kappa)^2$ szerint ez 2-nek adódik, vagyis a Dicke-modellével egyezik meg (a g/κ -t a részecskeszámnak megfeleltetve). A relaxációs idő exponense azonban szokatlanul nagy (2.2, illetve a transzmonos kísérletnél még ennél is nagyobb), ami felveti, hogy a folyamatot aktiválási folyamatként értelmezzük (ld. Rácz Zoltán 4. kérdését).

4. A Lindblad-leírás határai

Valóban, a II. részben használt modell egyik alapfeltevése a markoviság, ezért az ettől való eltérést csak kísérletileg lehetne megfigyelni, pl. nem-exponenciális bomlási folyamatok formájában, amely a rezonancia spektrumában eltérést eredményezne a 7.5(b) ábrán bemutatott, szinte tökéletes Lorentz-görbéhez képest.

Tudomásom szerint az áramkör-quantumelektrodinamikában legfeljebb elméleti felfedések szintjén jelenik meg a nem-markoviság (ld. pl. Cárdenas et al., 2015), hiszen itt egy makroszkopikus környezetbe ágyazott makroszkopikus rendszer mutat kvantumviselkedést, amelyben a természetes zajfolyamatok (hőmérséklet, elektrosztatikus töltésfluktuáció) dominálnak. Ezeket teljesen le kellene nullázni, és mesterségesen valamilyen „kis” környezetet csatolni a transzmon-rezonátor-rendszerhez a nem-markovi viselkedéshez.

A kvantumtudomány egészét nézve azonban a nem-markoviság egy nagyon is kurrens téma, amely főleg a kvantumállapot-preparálás vonalán terjesztheti ki a képességeket számos elméleti javaslat szerint. Kísérletileg is több platformon sikerült már nem-markovi jelenségeket megfigyelni, pl. nem-csapdázott atomi állapothoz csatolt Bose-kondenzátumban illetve fotonikus kristályokhoz csatolt atomi rendszerekben.

5. Termikusság nyílt kvantumrendszerekben

A részletes egyensúlyt általában feltételezzük a nyílt kvantumrendszerek modellezésekor, más kérdés, hogy gyakran nulla hőmérsékletű környezetre törekszünk. Az optikai tartományban sok alkalmazás szempontjából még szobahőmérsékleten is nullának tekinthető a termikus fotonok száma. A mikrohullámban működő áramkör-quantum-

elektrodinamikai rendszereknél pedig ugyanerre törekszenek a hélium-keveréses hűtés alkalmazásával, amely millikelvin nagyságrendű hőmérsékleteket eredményez.

A részletes termikus egyensúly ellenére azonban az erős gerjesztés kiviheti az állandósult állapotot a termikus állapotból. A II. részben például a Jaynes–Cummings-modellben egy olyan periodikus gerjesztés, amit az optikai tartományban egy lézerrel, a mikrohullámban egy jelgenerátorral lehet bevinni, a termikus állapottól – ami ebben az esetben az alapállapot lenne, hiszen nulla hőmérsékletű környezetet feltételezünk – nagyon eltérő állandósult állapotot eredményez, amely a fázistérben akár két csúccsal is rendelkezhet (ld. 7.4(d) ábra).

Olyanra mindazonáltal van példa áramkör-kvantumelektrodinamikában (Tan et al., 2017; Partanen et al. 2018), amikor valamilyen segéd-rendszerhez való erős csatolás révén sikerül valamilyen jól definiált szabadsági foknak a termalizációját módosítani. Ez főleg olyankor érdekes, ha az alapállapotba való visszatérést (0 hőmérséklethez való relaxációt) fel lehet gyorsítani, amelynek kvantuminformaticai alkalmazások szempontjából lehet nagy jelentősége. E felvetések szerint egy kvantumregiszter „reset” műveletét lehetne ezzel hatékonyabbá tenni.

Hivatkozások

Cárdenas, P. C., M. Paternostro, and F. L. Semião. "Non-Markovian qubit dynamics in a circuit-QED setup." *Physical Review A* 91.2 (2015): 022122.

Hwang, Myung-Joong, Peter Rabl, and Martin B. Plenio. "Dissipative phase transition in the open quantum Rabi model." *Physical Review A* 97.1 (2018): 013825.

Nagy, D., G. Szirmai, and P. Domokos. "Critical exponent of a quantum-noise-driven phase transition: The open-system Dicke model." *Physical Review A* 84.4 (2011): 043637.

Partanen, Matti, et al. "Flux-tunable heat sink for quantum electric circuits." *Scientific Reports* 8.1 (2018): 6325.

Tan, Kuan Yen, et al. "Quantum-circuit refrigerator." *Nature Communications* 8.1 (2017): 15189.

Zhang, Xin HH, and Harold U. Baranger. "Driven-dissipative phase transition in a Kerr oscillator: From semiclassical PT symmetry to quantum fluctuations." *Physical Review A* 103.3 (2021): 033711.

Budapest, 2024. február 12.

