

Válasz Rácz Zoltán bírálata

Mindenekelőtt köszönöm a bíráló befektetett munkáját és az értő olvasást. Nagyra értékelem a dolgozatomnak a kvantumoptika és az atom–foton-interfész tág kontextusában való elhelyezését. Külön örültem a dolgozat formátumára vonatkozó pozitív megjegyzéseknek, magam is megkedveltem ezt a formátumot a disszertáció szerkesztése közben, és szívesen ajánlom másoknak.

Köszönöm továbbá az érdekes kérdéseket is.

1. Az elsőrendű disszipatív fázisátalakulás (DPT) „új paradigmája”

Az „új paradigma” lényege nem a sűrűségoperátorban megnyilvánuló (fázistérbeli) bimodalitás, hanem az időbeli, a kvantumtrajektórián megnyilvánuló bistabilitás – amely idő- vagy sokaságátlagban visszaadná az előbbit, azonban az ellenkező irányba, a stacioner sűrűségoperátorból nem tudunk egyértelműen következtetni a trajektóriák időbeli lefutására. Márpedig éppen azt mutatjuk meg, hogy létezik egy olyan határeset, ahol egy karakterisztikus időskála – a kapcsolási idő – a trajektóriákon a végtelenbe tart.

Tudomásom szerint ilyen analízist eddig egyedül a fotonblokad-áttörés (PBB) esetében vittek végbe. Megjegyzendő, hogy a transzverz kvantum Ising-modell egy nyílt változatát Rydberg-atomokkal meg lehet valósítani, ezért ilyen modellekben intenzíven vizsgálták a fázisátalakulásokat (ld. pl. Ates, 2012; Jin, 2018). Nem tudok azonban arról, hogy egy ilyen rendszerben a folytonos gyenge mérés esetén megvalósuló kvantumtrajektóriákat vizsgálták volna.

Általánosságban elmondható, hogy az áramkör-kvantumelektrodinamikai rendszerekhez hasonlóan jól kontrollálható nyílt kvantumrendszerekben egyre inkább a kvantumtrajektória az elsődleges entitás, amely jól írja le az egyedi kísérleti futtatásokat. A 7.4(e-g) és 7.6(c) ábrákon látható görbék szinte közvetlenül megfeleltethetők egy-egy kvantumtrajektóriának, mert voltaképpen a rezonátormódus fotonkiszökési eseményeinek – melyek egyedi kvantumugrások – integráló szűrőn áteresztett időbeli hisztogramjai.

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

elektrodinamikai kísérletek adhatják meg a választ, és a kísérleti eredmények ilyen irányú kiértékelése jelenleg zajlik.

2. A $g/k \rightarrow \infty$ „termodinamikai határeset”

A kérdés megválaszolásához érdemes pontosítani az általunk használt terminológiát. Véges g/k esetén az időben két állapot között kapcsolható telegráf-jel – amit némileg pontatlanul a munkánkban bistabil jelnek nevezünk – valójában a *metastabilitás* megnyilvánulásának tekinthetjük.

Ez pl. víz-gőz-rendszerben azzal lenne analóg, hogy a keverék tartományában a víz és a gőz állapotok csak metastabilak lennének, közöttük az egyensúlyi keverékarányhoz képest nagy fluktuációk lépnének fel, ha az anyag mennyisége nem lenne makroszkopikus, vagyis nem lennének a termodinamikai határesetben. Ebből lesz két jól definiált fázis koegzisztenciája makroszkopikus rendszerben, vagyis bistabilitás.

A PBB esetében ezzel analóg, hogy a véges g/k esetén egymásba kapcsolható metastabil állapotokból valódi bistabilitás lesz a $g/k \rightarrow \infty$ határesetben a kapcsolási idő végtelenbe tartása miatt. Továbbá, az állapotok különbözősége is növekszik: míg a „halvány” állapot a vákuum közelében marad, addig a „fényes” állapotban a fotonszám várható értéke a végtelenbe tart a $g/k \rightarrow \infty$ határesetben. A növekvő stabilitás és makroszkopikus megkülönböztethetőség miatt beszélünk fázisokról, ez a szituáció pedig a $g/k \rightarrow \infty$ határesetben valósul meg a két metastabil állapot szituációjából, ezért beszélünk termodinamikai határesetről.

A kísérletben megközelíthető $\kappa \rightarrow 0$ határesetnek lehet olyan konnotációja, mintha a rendszer zárttá válna (bár az áramkör-kvantumelektrodinamikában még legalább két disszipációs ráta véges marad). A lényeges azonban nem egy disszipációs csatorna bezárulása, hanem az energiaszintek növekvő feloldottsága, amelyet a szintek energiakülönbségének – amely g -vel skálázik –, és a szintek kiszélesedésének – amely κ -val skálázik – aránya határoz meg.

3. Divergáló bistabilitási idő kapcsolata az elsőrendű DPT-vel

A divergáló időskála a fázisátalakulással van kapcsolatban, ez tulajdonképpen a relaxációs idő végtelenbe tartását jelenti. A metastabilitás/bistabilitás tartományában a leghosszabb karakterisztikus időskála a két fázis állandósult állapotbeli aránya (amit a víz-gőz-rendszerben *minőségnek* nevezünk) beállításának időskálája, ami éppen a kvantumtrajektórián lévő telegráf-jel karakterisztikus kapcsolási ideje, vagyis a kapcsolási idő a relaxációs időnek felel meg.

Maga a bistabilitás van kapcsolatban azzal, hogy a DPT elsőrendű, mert a termodinamikai határesetben az elsőrendű fázisátalakulásokra jellemző fázis-koegzisztenciába megy át.

Megjegyzendő, hogy a DPT-knek létezik egy, a Liouville-szuperoperátor spektrumán alapuló elmélete (Minganti, 2018), amely a relaxációs időt ennek a spektrumnak az energiarésével hozza összefüggésbe, így a fázisátalakulást az energiarés eltűnése fémjelzi. Ez az elmélet publikált formájában azonban az elsőrendű DPT-k esetében csak akkor alkalmazható, ha a fázisátalakulás a rendparaméter diszkontinuitásaként jelentkezik, nem pedig a bistabil esetben. Ez ráerősít arra, hogy a PBB-ben talált elsőrendű DPT egy „új paradigma”.

4. A fotonblokádtörés mint aktiválási folyamat?

A PBB bistabilitás aktiválási folyamatként való értelmezése nagyon érdekes lehetőség, amelyet a kísérleti cikk egyik bírálója is felvetett a *PRX Quantum*-nál. Egy hasonló analízist végeztek a Kerr-parametrikus oszcillátor egyik modellje, a Duffing-oszcillátor esetében (Dykman, 2012), amely számos analógiát mutat a PBB fenomenológiával.

A PBB esetében a gerjesztések számának függvényében egy effektív potenciál vethető fel, amely a Jaynes–Cummings-spektrum nemlinearitásából származik (a szabad összetevők sajátfrekvenciáihoz képesti elhangolás effektív energiaként jelenik meg egy forgó koordinátarendszerben). A két metastabil állapot ennek az effektív potenciálnak két minimumában ül. (A kettő közötti potenciálgát pedig a végtelenbe tart a $g/k \rightarrow \infty$ termodinamikai határesetben.)

Ekkor a kapcsolási időket úgy lehetne kezelni, mint az ezekből a potenciálgödrökből való kiszökési rátákat, amelyek egy aktiválási energiától függenének.

Érdekes módon a halvány állapotból kiinduló aktiválási folyamat tisztán kvantum eredetű. Ez az állapot egy olyan kvantum superpozíció, amelyben nagy súllyal a vákuumállapot, mellette pedig egy nagyobb amplitúdójú állapot szerepel, ld. a (6.10) egyenletet. Ebből következően egy fotonkiszökés ugrásszerűen növeli a fotonszámot a módusban, ezzel aktiválva a fényes állapotba való átcsapást. Az ellenkező irányú folyamatot szintén egy fotonkiszökés indukálja.

A kísérletben egyelőre nem áll rendelkezésre olyan detektálási módszer, amellyel a rendszer állapotának olyan mikroszkopikus megváltozásait érzékelni lehetne, mint a kvantumugrások. A jövőben erre a célra a 7.6(b) ábrán bemutatotthoz hasonló spektroszkópiai módszert lehetne használni, amelynek időfelbontását azonban drasztikusan növelni kell.

Hivatkozások

Ates, Cenap, et al. "Dynamical phases and intermittency of the dissipative quantum Ising model." *Physical Review A* 85.4 (2012): 043620.

Dykman, Mark. "Periodically modulated quantum nonlinear oscillators". Chap. 7 in Dykman, Mark, ed. *Fluctuating nonlinear oscillators: from nanomechanics to quantum superconducting circuits*. Oxford University Press, 2012.

Jin, Jiasen, et al. "Phase diagram of the dissipative quantum Ising model on a square lattice." *Physical Review B* 98.24 (2018): 241108.

Minganti, Fabrizio, et al. "Spectral theory of Liouvillians for dissipative phase transitions." *Physical Review A* 98.4 (2018): 042118.

Budapest, 2024. február 12.

Vukics András