

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Interaksi atom-foton merupakan salah satu pengembangan teori modern kuantum yang dibahas dalam bidang elektrodinamika kuantum. Elektrodinamika kuantum adalah teori umum yang menggabungkan elektrodinamika klasik dengan mekanika kuantum. Berbeda dengan teori semiklasik yang menggambarkan radiasi elektromagnetik sebagai gelombang klasik, dalam teori elektrodinamika kuantum, cahaya benar-benar dipandang sebagai gelombang partikel foton (Sun and Chen, 2018).

Model interaksi atom-foton yang komprehensif dalam kerangka elektrodinamika kuantum pertama kali diusulkan oleh Jaynes-Cummings pada tahun 1962 (Jaynes and Cummings, 1962). Model Jaynes-Cummings menggambarkan interaksi antara satu atom yang terikat dalam suatu rongga optik dengan interaksi gelombang elektromagnetik. Model atom-foton saling mempengaruhi dalam suatu sistem terkait. Rezim kopling kuat diperoleh jika konstanta kopling rongga dan pemancar melebihi laju prosesnya. Dalam kondisi ini, keadaan energi rongga dan pemancar mengalami keadaan baru. Dua keadaan ini terpisah satu sama lain dengan sebesar energi yang disebut sebagai "Pemisahan vakum Rabi" (*vacuum Rabi splitting*), yang sebanding dengan konstanta kopling. Di antara interaksi atom-foton yang penting dan dapat dianalisis dengan model Jaynes-Cummings adalah interaksi antara rangkaian superkonduktor nonlinier dan medan elektromagnetik yang terkuantisasi dalam frekuensi gelombang mikro. Bidang penelitian ini telah memberikan kemajuan dalam pemrosesan informasi kuantum dan interaksi atom-foton. Elektrodinamika kuantum juga dapat digunakan untuk mengkaji kopling superkonduktor dengan lingkungan, yang sifatnya koheren (Hartmann, 2016).

Dalam beberapa dekade terakhir, telah diintensifkan penggunaan sirkuit elektrodinamika kuantum menggunakan sistem qubit (misalnya atom dua level) dalam pengolahan informasi kuantum. Dengan berkembangnya cabang ilmu informasi kuantum, penelitian bidang ini telah meningkatkan penggunaan qubit dalam pemrosesan informasi kuantum, sehingga qubit superkonduktor dapat diubah menjadi kopling yang kuat dan berinteraksi secara terkendali dengan

foton gelombang mikro yang tersimpan pada medan elektromagnetik terkuantisasi dalam elemen superkonduktor.

Dalam elektrodinamika kuantum, partikel bermuatan seperti elektron berinteraksi dengan cahaya, yang terdiri dari foton. Interaksi dengan partikel bermuatan akan menyebabkan partikel mengalami pancaran dan penyerapan antar partikel yang bermuatan. Hasil interaksi ini adalah pemancaran dan penyerapan foton. Foton ini bersifat virtual, yakni foton tidak dapat dilihat atau dideteksi dengan cara apapun karena keberadaan kekekalan energi dan momentum. Interaksi dua partikel bermuatan terjadi dalam serangkaian proses yang kompleks.

Keuntungan dan Kerugian Model Jaynes-Cummings Keuntungan utama dari model Jaynes-Cummings adalah bahwa model ini sepenuhnya kuantum (*fully quantum*), yang memungkinkan baik atom (qubit) maupun foton diperlakukan dengan mekanika kuantum. Hal ini memungkinkan deskripsi fenomena kuantum penting seperti superposisi, entanglement, dan vacuum Rabi oscillations, yang tidak dapat dijelaskan oleh model semiklasik. Model ini juga sangat efektif dalam menggambarkan sistem dengan kopling kuat, di mana qubit dan foton dapat saling mempengaruhi secara signifikan. Hal ini berperan penting dalam berbagai aplikasi, termasuk quantum optics dan quantum information processing, terutama dalam pemrosesan informasi kuantum menggunakan qubit superkonduktor dan medan foton.

Namun, model Jaynes-Cummings memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, model ini hanya berlaku untuk sistem sederhana yang terdiri dari satu atom dan satu mode foton, sehingga tidak dapat menangani sistem multi-atom atau multi-mode foton yang lebih kompleks. Kedua, model ini mengasumsikan kopling resonansi, sehingga menjadi tidak efektif ketika frekuensi atom dan foton sangat berbeda. Dalam kasus di mana terjadi detuning yang besar, diperlukan modifikasi seperti Hamiltonian dispersif. Selain itu, model ini tidak memadai untuk menangkap fenomena kuantum yang lebih kompleks seperti collapses dan revivals dalam dinamika sistem, terutama dalam interaksi yang sangat kuat (Blais, 2021).

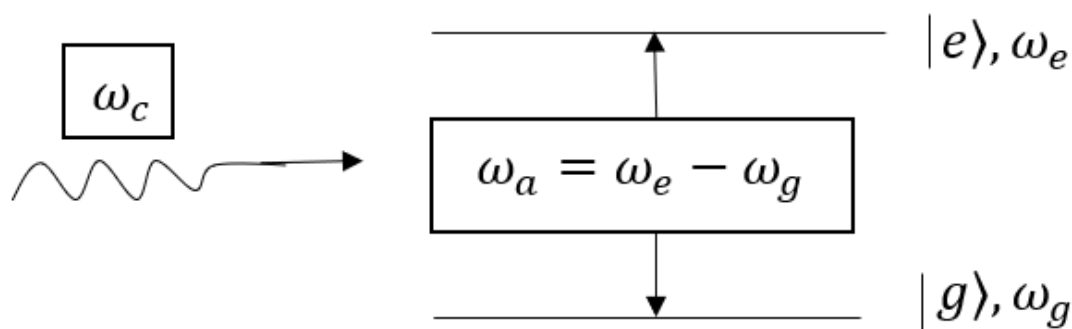
Teori elektrodinamika kuantum menyatakan bahwa semakin kompleks suatu proses, yaitu semakin besar jumlah foton yang dipertukarkan selama proses tersebut, maka semakin kecil kemungkinan terjadi. Beberapa eksperimen elektrodinamika kuantum yang paling tepat adalah eksperimen yang mempelajari sifat-sifat partikel subatom yang disebut sebagai muon, seperti tersirat dalam Surat Yunus ayat ke-61.

وَمَا تَكُونُ فِي شَأْنٍ وَمَا تَتْلُوا مِنْهُ مِنْ قُرْآنٍ وَلَا تَعْمَلُونَ مِنْ عَمَلٍ إِلَّا كُنَّا عَلَيْكُمْ شُهُودًا إِذْ تُفِيضُونَ فِيهِ وَمَا يَعْزُبُ عَنْ رَبِّكَ مِنْ مِثْقَالِ ذَرَّةٍ فِي الْأَرْضِ وَلَا فِي السَّمَاءِ وَلَا أَصْغَرَ مِنْ ذَلِكَ وَلَا أَكْبَرَ إِلَّا فِي كِتَابٍ مُبِينٍ

artinya: "Dan tidakkah engkau (Muhammad) berada dalam suatu urusan, dan tidak membaca suatu ayat Al-Qur'an serta tidak pula kamu melakukan suatu pekerjaan, melainkan Kami menjadi saksi atasmu ketika kamu melakukannya. Tidak lengah sedikit pun dari pengetahuan Tuhanmu biarpun sebesar zarah (atom), baik di bumi ataupun di langit. Tidak ada sesuatu yang lebih kecil dan yang lebih besar daripada itu, melainkan semua tercatat dalam Kitab yang nyata (Lauh Mahfuzh)".

Interaksi antara sistem dua tingkat (qubit) dan osilator harmonik (resonator) adalah salah satu sistem paling sederhana untuk mempelajari interaksi cahaya materi dan untuk pemrosesan informasi kuantum. Qubit dapat berada dalam keadaan kuantum 1 atau 0, atau dalam superposisi dari keadaan 1 dan 0. Pada dasarnya untuk menyelidiki rezim kopling kuat menggunakan spektroskopi.

Interaksi antara atom dan foton merupakan salah satu fenomena fundamental dalam fisika kuantum. Salah satu model yang sering digunakan untuk menggambarkan interaksi ini adalah sistem dua tingkat, pada sebuah atom dapat berada dalam salah satu dari dua keadaan energi (Li *et al.*, 2013).



Gambar 1.1. Interaksi sistem atom-foton Yang dimodelkan oleh sistem dua level (atom) dan resonator atau osilator (foton)

Gambar 1.1 menunjukkan interaksi antara sistem atom dua level dengan foton, yang dikaitkan dengan fenomena osilasi Rabi dalam konteks optik kuantum. Sistem atom dua level terdiri dari keadaan dasar $|g\rangle$ dengan energi ω_g dan keadaan tereksitasi $|e\rangle$ dengan energi ω_e .

Ketika sebuah foton dengan frekuensi ω_c berinteraksi dengan sistem atom, transisi energi dapat terjadi antara kedua level atom tersebut. Frekuensi atom ω_a yang merupakan selisih energi antara keadaan tereksitasi dan keadaan dasar, dirumuskan sebagai $\omega_a = \omega_e - \omega_g$. Dalam konteks ini, foton berperan dalam memicu osilasi antara keadaan dasar dan keadaan tereksitasi, menciptakan dinamika transisi yang berosilasi dalam sistem atom dua-level tersebut. Fenomena ini sering kali digunakan untuk menggambarkan proses interaksi radiasi elektromagnetik dengan materi dalam skala kuantum, yang sangat relevan dalam pengembangan teknologi optik kuantum dan superkonduktor.

Kopling kuat ini penting dalam komputasi kuantum yang memanfaatkan atom buatan superkonduktor dan resonator gelombang mikro. Resonator digunakan untuk mengisolasi qubit dari sebagian besar gelombang elektromagnetik yang berada pada saat yang sama memanipulasi qubit. Di antara keuntungan lainnya keberadaan kopling kuat ini adalah untuk menggabungkan qubit spin pada kuantum dot dengan resonator gelombang mikro dengan munculnya perubahan parameter hamiltonian serta proses akibat atom-foton (Müller, 2020).

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan di atas, menarik untuk melakukan penelitian tentang elektrodinamika kuantum dengan menggunakan model Jaynes-Cummings, sehingga peneliti dapat memberikan judul "Analisis

Interaksi Atom-Foton pada Sistem Rongga Kopling Kuat dalam Elektrodinamika Kuantum dengan Model Jaynes-Cummings”. Adapun penelitian ini memberikan pembaruan yakni pada fungsi Wigner (suatu fungsi yang mendeskripsikan distribusi probabilitas quasi sepanjang ruang fase) dengan memvariasikan parameter g (koefisien yang menggambarkan qubit (atom) dan menggambarkan osilator (foton) serta variasi *detunings* yang didefinisikan sebagai selisih energi frekuensi qubit (atom) dan energi frekuensi osilator (foton), yakni $\Delta = \omega_a - \omega_c$. Dengan menggunakan hamiltonian Jaynes-Cummings dalam pendekatan *rotating wave approximation* (RWA), hamiltonian dalam limit dispersif, dan entropi yang dengan menggunakan program coding *Quantum Toolbox in Python* (QuTiP), penelitian skripsi ini menghasilkan data serta analisis interaksi atom-foton pada kasus resonan dan kasus limit dispersif. Dengan adanya pembaruan tersebut, analisis interaksi atom-foton, khususnya pada sistem rongga kopling kuat dalam model Jaynes-Cummings, dapat lebih dikembangkan.

1.2 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Penelitian ini menggunakan model Jaynes-Cummings.
2. Parameter interaksi atom-foton yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi yaitu pada parameter kekuatan kopling (g) dan parameter *detunings* (Δ) digunakan pada kasus resonan dan dispersif.
3. Besaran-besaran fisis yang dihitung dalam penelitian ini adalah tingkat energi level, fungsi Wigner, limit dispersif dan entropi.

1.3 Rumusan Masalah

Merujuk pada latar belakang pada penelitian ini, maka rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu bagaimana analisis interaksi atom-foton model Jaynes-Cummings pada sistem rongga dengan melihat pada kasus resonan, pada kasus limit dispersif dan kasus entropi?

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui analisis interaksi atom-foton dengan

model Jaynes-Cummings pada sistem rongga dengan melihat pada kasus resonan, pada kasus limit dispersif dan kasus entropi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian, di antaranya:

1.5.1 Manfaat Teoretis

Manfaat secara teoretis adalah memberikan referensi dan pengembangan teori terkait interaksi antara atom dan foton dalam konteks elektrodinamika kuantum, serta memperkaya pemahaman tentang dinamika sistem kuantum yang kompleks. Penelitian ini dapat memberikan wawasan baru mengenai fenomena transisi energi dalam sistem atomik yang tereksitasi, yang berkontribusi pada penyempurnaan teori kuantum yang sudah ada. Hasil dari penelitian ini juga berpotensi menginspirasi terobosan teknologi di bidang kuantum, seperti komputer kuantum dan teleportasi kuantum.

1.5.2 Manfaat Praktis

Manfaat praktis terbagi kedalam tiga kelompok di antaranya:

1. Bagi penulis dimanfaatkan untuk menerapkan pengetahuan.
2. Bagi dunia pendidikan dimanfaatkan untuk literatur selanjutnya
3. Bagi dunia teknologi dimanfaatkan untuk pengembangan qubit (atom-foton) dalam komputasi kuantum dan dapat diandalkan untuk pengolahan informasi kuantum.