

ABSTRAK

Wenni Ramadanti

NIM: 201720024

Analisis Interaksi Atom-Foton pada Sistem Rongga Kopling Kuat dalam Elektrodinamika Kuantum dengan Model Jaynes-Cummings.

Penelitian ini membahas tentang interaksi atom-foton pada sistem rongga kopling kuat dalam kerangka elektrodinamika kuantum menggunakan model Jaynes-Cummings dengan menggambarkan interaksi antara satu atom yang terikat dalam suatu rongga optik dengan interaksi gelombang elektromagnetik. Rezim kopling kuat diperoleh jika konstanta kopling rongga dan pemancar melebihi laju prosesnya. Fokus penelitian ini adalah pada analisis sistem rongga kopling kuat memvariasikan persamaan Hamiltonian pada kasus resonan dan limit dispersif dalam pendekatan numerik *Master Equation* menggunakan aplikasi *Quantum Toolbox in Python* (QuTiP). Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengetahui analisis interaksi atom-foton dengan model Jaynes-Cummings pada sistem rongga dengan melihat pada kasus resonan, kasus limit dispersif dan kasus entropi. Metode yang digunakan yakni metode analitik dan numerik. Metode analitik dilakukan melalui penurunan rumus dari Hamiltonian Jaynes-Cummings RWA dan Hamiltonian limit dispersif, sementara metode numerik dilakukan dengan memanfaatkan perangkat QuTiP untuk menyelesaikan data yang diperoleh. Hasil penelitian menunjukkan bahwasanya interaksi atom-foton model Jaynes-Cummings pada sistem rongga terdiri dari tiga yakni interaksi kasus resonan menunjukkan fungsi Wigner pada keadaan klasik maupun non klasik serta menunjukkan tingkat energi level, dengan interaksi atom-foton menghasilkan degenerasi ataupun non degenerasi. Pada kasus limit dispersif menunjukkan interaksi atom-foton dalam keadaan non klasik. Pada kasus entropi menunjukkan karakteristik *entanglement* pada fungsi Wigner rentang $0 =$ tidak memiliki *entanglement*, rentang dibawah $0.5 =$ *entanglement* lemah, dan rentang diatas $0.5 =$ *maximally entanglement*.

Kata Kunci: Atom-Foton, Kopling Kuat, Model Jaynes-Cummings.

ABSTRACT

Wenni Ramadanti

NIM: 201720024

Analysis of Atom-Photon Interaction in Strong Coupling Cavity Systems in Quantum Electrodynamics Using the Jaynes-Cummings Model

This research discusses the atom-photon interaction in a strongly coupled cavity system within the framework of quantum electrodynamics using the Jaynes-Cummings model. It describes the interaction between a single atom confined in an optical cavity and electromagnetic waves. The strong coupling regime is achieved when the cavity and emitter coupling constant exceeds the rate of its processes. The focus of this study is on analyzing the strongly coupled cavity system by varying the Hamiltonian equation in resonant and dispersive limit cases through a numerical approach using the Master Equation in the Quantum Toolbox in Python (QuTiP) application. The primary goal of this research is to analyze atom-photon interaction with the Jaynes-Cummings model in the cavity system by examining the resonant case, the dispersive limit case, and the entropy case. The methods used are both analytical and numerical. The analytical method is carried out by deriving formulas from the Jaynes-Cummings RWA Hamiltonian and the dispersive limit Hamiltonian, while the numerical method is performed by utilizing QuTiP to solve the obtained data. The results indicate that the atom-photon interaction in the Jaynes-Cummings model within the cavity system consists of three types: the resonant case shows the Wigner function in both classical and non classical states and indicates the energy level, where the atom-photon interaction results in either degeneracy or non-degeneracy. In the dispersive limit case, the atom-photon interaction is in a non-classical state. In the entropy case, the interaction shows the characteristics of entanglement, where the Wigner function demonstrates $0 =$ no entanglement, a range below $0.5 =$ weak entanglement, and a range above $0.5 =$ maximally entangled..

Keywords: *Atom-Photon, Strong Coupling, Jaynes-Cummings Model.*

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Bersamaan dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains dan diajukan pada Program Studi Fisika Fakultas Sains Universitas Islam Negeri Sultan Maulana Hasanuddin Banten ini sepenuhnya asli merupakan hasil karya tulis ilmiah saya pribadi.

Adapun tulisan maupun pendapat orang lain yang terdapat dalam skripsi ini telah saya sebutkan kutipannya secara jelas dengan etika keilmuan yang berlaku di bidang penulisan karya ilmiah.

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa sebagian atau seluruh isi skripsi ini merupakan hasil perbuatan plagiarisme atau mencontek karya tulis orang lain, saya bersedia untuk menerima sanksi berupa pencabutan gelar kesarjanaaan yang saya terima ataupun sanksi akademik lain sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Serang, 10 September 2024



Wenni Ramadanti

NIM. 201720024

Nomor : -
Lampiran : Satu (1) eks
Perihal : Pengajuan Munaqasah
a.n. Wenni Ramadanti
NIM. 201720024

Kepada Yth.
Dekan Fakultas
Sains
UIN SMH Banten
di-
Serang

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Dipermauklumkan dengan hormat, bahwa setelah membaca dan menganalisa serta mengadakan koreksi seperlunya, kami berpendapat bahwa skripsi saudari Wenni Ramadanti dengan NIM: 201720024 yang berjudul "Analisis Interaksi Atom-Foton pada Sistem Rongga Koping Kuat dalam Elektrodinamika Kuantum dengan Model Jaynes-Cummings", telah dapat diajukan sebagai salah satu syarat untuk melengkapi ujian munaqasah pada Fakultas Sains Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Sultan Maulana Hasanuddin Banten.

Demikian atas segala perhatian Bapak kami ucapkan terima kasih.
Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Serang, 10 September 2024

Pembimbing I



Beta Nur Pratiwi, M.Si
NIP. 199301022023212036

Pembimbing II



Dr. Ahmad Ridwan Tresna Nugraha
NIP. 198709202019021002



Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat dari BSR E, silahkan lakukan verifikasi pada dokumen elektronik yang dapat diunduh dengan melakukan scan QR Code

**Analisis Interaksi Atom-Foton pada Sistem Rongga Kopling Kuat dalam
Elektrodinamika Kuantum dengan Model Jaynes-Cummings**

Oleh:

Wenni Ramadanti

NIM: 201720024

Menyetujui,

Pembimbing I



Beta Nur Pratiwi, M.Si

NIP. 199301022023212036

Pembimbing II

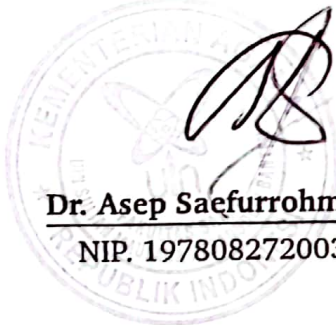



Dr. Ahmad Ridwan Tresna Nugraha

NIP. 198709202019021002

Mengetahui,

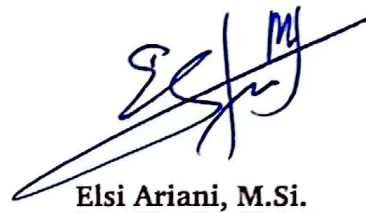
Dekan Fakultas Sains



Dr. Asep Saefurrohman, M.Si.

NIP. 197808272003121003

Ketua Program Studi



Elsi Ariani, M.Si.

NIP.198901232018012001

v



Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat dari BSR.E silahkan lakukan verifikasi pada dokumen elektronik yang dapat diunduh dengan melakukan scan QR Code

PENGESAHAN

Skripsi a.n Wenni Ramadanti, NIM : 201720024 yang berjudul "Analisis Interaksi Atom-Foton pada Sistem Rongga Kopling Kuat dalam Elektrodinamika Kuantum dengan Model Jaynes-Cummings" telah diujikan dalam Ujian Tugas Akhir Universitas Islam Negeri Sultan Maulana Hasanuddin Banten pada tanggal Juni 2024.

Skripsi tersebut telah disahkan dan diterima sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si.) pada Fakultas Sains Universitas Islam Negeri Sultan Maulana Hasanuddin Banten.

Serang, 10 September 2024

Pembimbing I



Beta Nur Pratiwi, M.Si
NIP. 199301022023212036

Pembimbing II



TT ELEKTRONIK

Dr. Ahmad Ridwan Tresna Nugraha
NIP. 198709202019021002

Penguji I




Subur Pramono, M.Si
NIP. 199006262020121002

Penguji II



Fina Fitratun Amaliyah, M.Sc
NIDN. 2010029003

Ketua Penguji



Elsi Ariani, M.Si
NIP. 198901232018012001



RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Serang pada tanggal 04 Desember 2001. Orang tua penulis Bapak Makrub dan Ibu Murniati memberi nama penulis “Wenni Ramadanti”.

Pendidik formal yang ditempuh penulis adalah sebagai berikut: SDN Tegal Jetak lulus tahun 2014, MTS Negeri 1 Serang lulus tahun 2017, MA Negeri 1 Serang lulus tahun 2020 dan pada tahun 2020 masuk perguruan tinggi Universitas Islam Negeri (UIN) Sultan Maulana Hasanuddin Banten, pada Fakultas Sains Prodi Fisika.

Selama menempuh perkuliahan, penulis banyak mengikuti kegiatan Himpunan yang ada di Fakultas Sains yakni dengan menjadi Ketua Bidang Litbang Himpunan Mahasiswa Fisika (HMPS Fisika) pada tahun 2021-2022.

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirabbil Allamin, karya ini merupakan bentuk rasa syukur saya kepada Allah SWT karena telah memberikan nikmat karunia pertolongan yang tiada henti hingga saat ini.

Karya ini saya persembahkan sebagai tanda bukti sayang dan cinta yang tiada terhingga kepada kedua Orang Tua tercinta, Bapak Makrub dan teristimewa Ibu Murniati yang telah melahirkan, merawat, membimbing, dan melindungi dengan tulus serta penuh keikhlasan, mencurahkan segala kasih sayang dan cintanya, serta yang senantiasa mendoakan, dan memberikan semangat dan juga dukungan sepenuh hati.

Karya ini juga saya persembahkan kepada seluruh keluarga tercinta yaitu teteh dan sepupu yang selalu memberikan semangat dan mendukung baik moril maupun material. Tak lupa dipersembahkan kepada diri sendiri, terima kasih telah bertahan sejauh ini, dan tidak pernah berhenti berusaha dan berdoa untuk menyelesaikan skripsi ini.

MOTTO

”Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”.

(Q.s Al-Insyiroh:6).

”Keberhasilan bukanlah milik orang yang pintar. Keberhasilan adalah kepunyaan mereka yang senantiasa berusaha”.

(B.J.Habibie).

KATA PENGANTAR

Bismillaahirrahmaanirrahiim

Segala puji hanya bagi Allah SWT, yang telah memberikan segala nikmat-Nya dalam bentuk apapun sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Shalawat berangkaikan salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, kepada keluarganya, sahabatnya dan kita selaku umatnya hingga akhir zaman.

Tugas Akhir yang berjudul "Analisis Interaksi Atom-Foton pada Sistem Rongga Kopling Kuat dalam Elektrodinamika Kuantum dengan Model Jaynes-Cummings" merupakan tugas akhir yang diajukan sebagai syarat memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si.) pada Program Studi Fisika Fakultas Sains UIN Sultan Maulana Hasanuddin Banten. Penyelesaian Tugas Akhir ini tidak terlepas dari dukungan dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah Swt., yang telah memberikan kesempatan dan kesehatan kepada penulis untuk melaksanakan dan menyesuaikan proposal penelitian.
2. Bapak Prof. Dr. Wawan Wahyudin, M.Pd., selaku Rektor UIN Sultan Maulana Hasanuddin Banten yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk belajar dan merasakan dalamnya sumur keilmuan di Perguruan Tinggi tercinta.
3. Bapak Dr. Asep Saefurrohman, M.Si., selaku Dekan Fakultas Sains yang telah mendukung penyelesaian studi dengan lancar.
4. Ibu Elsi Ariani, M.Si., selaku Ketua Program Studi Fisika Fakultas Sains yang selalu memberikan saran yang baik selama studi.
5. Ibu Beta Nur Pratiwi, M.Si., dan Bapak Dr. Ahmad Ridwan Tresna Nugraha selaku Pembimbing I dan Pembimbing II yang dengan sabar mendampingi proses penyusunan tugas akhir ini hingga selesai.
6. Bapak Dr. Syaefudin Jaelani dan Kelompok Riset Fisika Energi Tinggi Eksperimen di Pusat Riset Fisika Kuantum BRIN yang berkenan menerima sebagai asisten riset dalam program Direktorat Manajemen Talenta BRIN sehingga membantu pendanaan pendidikan selama pelaksanaan skripsi ini.

7. Bapak dan Ibu Dosen dan seluruh sivitas akademika di lingkungan Fakultas Sains yang telah mengajar dan mendidik selama penulis menempuh studi di UIN Sultan Maulana Hasanuddin Banten.
8. Teristimewa untuk kedua orang tua tercinta, Bapak Makrub dan Ibu Murniati yang telah membesarkan saya hingga saat ini. Terima kasih selalu mendoakan yang terbaik dan memberikan dukungan moril maupun material.
9. Rekan-Rekan Mahasiswa/i Fisika angkatan 2020. Terima kasih atas kenangan dan pengalamannya.
10. Serta semua pihak yang telah membantu dan mendukung selama proses penyusunan tugas akhir ini.

Penulis juga menyadari bahwa tugas akhir ini masih memiliki kekurangan. Oleh karenanya, saran dan masukan sangat diterima untuk perbaikan selanjutnya. Akhir kata, hanya kepada Allah SWT penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua, aamiin.

Serang, 10 September 2024

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iii
NOTA DINAS	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
PERSEMBAHAN.....	viii
MOTTO	ix
KATA PENGANTAR	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Batasan Masalah	5
1.3 Rumusan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	6

1.5.1	Manfaat Teoretis	6
1.5.2	Manfaat Praktis	6
BAB II	TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1	Kajian Teori	7
2.1.1	Sistem Atom-Foton.....	7
2.1.2	Model Jaynes Cummings	9
2.1.3	Kopling Kuat	10
2.1.4	Limit Dispersif.....	11
2.1.5	Fungsi Wigner	14
2.1.6	Entropi.....	15
2.1.7	<i>Quantum Toolbox in Python</i> (QuTiP)	16
2.1.8	Aplikasi yang Digunakan pada Area Kopling Kuat dan Limit Dispersif.....	16
2.2	Referensi Terdahulu yang Relevan.....	17
2.3	Kerangka Berpikir	27
BAB III	METODE PENELITIAN	30
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	30
3.2	Alat dan Bahan	30
3.3	Jenis Metode Penelitian	30
3.4	Teknik Pengumpulan Data	30
3.4.1	Kasus resonan (RWA).....	31
3.5	Pengolahan data untuk kasus resonan pada fungsi Wigner $g = 0$	31
3.5.1	Pengolahan data untuk kasus resonan pada fungsi Wigner variasi kopling kuat (g)	31
3.5.2	Pengumpulan data untuk kasus dispersif pada kopling kuat ($g=0$)	32
3.5.3	Limit dispersif pada <i>detunings</i> negatif dan <i>detunings</i> positif	32
3.5.4	Pengumpulan data untuk kasus entropi	33
3.6	Teknik Analisis Data	33
BAB IV	Hasil dan Pembahasan	34
4.1	Visualisasi Tingkat Energi dalam Model Jaynes-Cummings Pada Kasus Resonan	34

4.2 Hasil Identifikasi Fungsi Wigner Model Jaynes-Cummings Pada Kasus Resonan	36
4.3 Hasil Identifikasi Fungsi Wigner Model Jaynes-Cummings Pada Kasus Dispersif	39
4.4 Entropi Pada Fungsi Wigner dan Limit Dispersif	45
BAB V Kesimpulan dan Saran	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran	56
DAFTAR PUSTAKA	56

DAFTAR TABEL

4.1	Tabel entropi pada kasus resonan.....	47
4.2	Tabel entropi pada kasus dispersif negatif	50
4.3	Entropi pada kasus dispersif positif.....	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Interaksi sistem atom-foton Yang dimodelkan oleh sistem dua level (atom) dan resonator atau osilator (foton).....	4
Gambar 2.1	Skema rongga sistem atom-foton	8
Gambar 2.2	Diagram sistem qubit-osilator	11
Gambar 2.3	Diagram fase untuk rongga elektrodinamika kuantum	13
Gambar 2.4	Plot energi dari sepuluh level terendah.....	18
Gambar 2.5	Fungsi Wigner efek kuantum	19
Gambar 2.6	Diagram implementasi digital analog kuantum Rabi hamiltonian	20
Gambar 2.7	Fungsi Wigner medan rongga dalam keadaan stabil	22
Gambar 2.8	Fungsi Wigner dalam model Jaynes-Cummings	23
Gambar 2.9	<i>Entanglement</i> entropi.....	25
Gambar 2.10	Entropi von neumann	26
Gambar 2.11	Diagram Alir Penelitian.....	29
Gambar 4.1	Plot energi dari sepuluh level terendah.....	34
Gambar 4.2	Fungsi Wigner untuk kasus resonan $g=0$	37
Gambar 4.3	Kasus resonan untuk fungsi Wigner dengan berbagai variasi nilai g	38
Gambar 4.4	Kasus limit dispersif pada $g=0$	40
Gambar 4.5	Kasus limit dispersif pada <i>detunings</i> negatif	41
Gambar 4.6	Kasus limit dispersif pada <i>detunings</i> positif	43
Gambar 4.7	Entropi pada kasus resonan	46
Gambar 4.8	Entropi pada kasus limit dispersif <i>detunings</i> negatif	49
Gambar 4.9	Entropi pada kasus limit dispersif <i>detunings</i> positif	52

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Kodingan Program Penelitian	59
A.1	Energi Dari Sepuluh Level Terendah.....	59
A.2	Kasus Resonan untuk Fungsi Wigner $g = 0$	65
A.3	Kasus Resonan untuk Fungsi Wigner dengan Berbagai Variasi Nilai g	66
A.4	Limit Dispersif pada <i>Detunings</i> Negatif.	68
A.5	Limit Dispersif pada <i>Detunings</i> Positif.....	70
A.6	Entropi Pada Kasus Resonan	72
A.7	Entropi Pada Kasus Dispersif <i>Detunings</i> Negatif.....	73
A.8	Entropi Pada Kasus Dispersif <i>Detunings</i> Positif.....	75
Lampiran B	Penurunan Rumus Hamiltonian Jaynes-Cummings	76
Lampiran C	Penurunan Rumus Hamiltonian Limit Dispersif	77