

15. Introduction to Quantum Optics and Circuit QED

a. Strong Interaction of a Two-state atom with a single mode of a Cavity (Jaynes-Cummings Model)

(az utolsó dia 7. oldaltól a képleteket túl bonyolultnak találtam ezért nem raktam be csak 1et :D)

A Jaynes-Cummings modell leírja a kölcsönhatást egy atom és az elektromágneses mező között, amik egy zárt üregben vannak tökéletesen elhatárolva.

The Jaynes-Cummings model

$$\hat{H}_{JC} = \hat{H}_A + \hat{H}_C + \hat{H}_{Int} = \frac{\hbar\omega_A}{2}\hat{\sigma}_z + \hbar\omega_C\left(\frac{1}{2} + \hat{a}^\dagger\hat{a}\right) + \hbar g(\hat{a}\hat{\sigma}_+ + \hat{a}^\dagger\hat{\sigma}_-)$$

The Jaynes-Cummings model :

The Jaynes – Cummings Model The Jaynes–Cummings model approximately describes the interaction between an atom and the electromagnetic field enclosed in a cavity bounded by perfectly conducting walls. The Jaynes–Cummings model approximation consists in assuming that the atom can be described as a two–level system with a ground and an excited state, and that the cavity can be represented by a single oscillator, i.e. by a single mode. The approximation is perfectly acceptable if one of the proper frequencies of the cavity is close enough to that of the atom (i.e. to the difference between the energies of the excited and the ground state divided by $\hbar$), while all other proper frequencies of the cavity are different enough from those of the atom.

In the earlier semi-classical theory of field-atom interaction, only the atom is quantized and the field is treated as a definite function of time rather than as an operator. In the earlier semi-classical theory of field-atom interaction, only the atom is quantized and the field is treated as a definite function of time rather than as an operator. The semi-classical theory can explain many phenomena, for example the existence of Rabi oscillations in atomic excitation probabilities for radiation fields with sharply defined energy (narrow bandwidth). The JCM serves to find out how quantization of the radiation field affects the predictions for the evolution of the state of a twolevel system.

The revival of the atomic population inversion after its collapse is a direct consequence of discreteness of field states (photons). This is a pure quantum effect that can be described by the JCM but not with the semi-classical theory. Experimentally, the quality factor of the cavity must be high enough to consider the dynamics of the system as equivalent to the dynamics of a single mode field. With the advent of one-atom masers it was possible to study the interaction of a single atom with a single resonant mode of the electromagnetic field in a cavity from an experimental point of view.

During the quiescent intervals of collapsed Rabi oscillations the atom and field exist in a macroscopic superposition state (a «Schrödinger cat»). This discovery offers the opportunity to use the JCM to elucidate the basic properties of quantum correlation (entanglement).

b. Engineering Spontaneous Emission:

Mi is először is a spontán emisszió:

Egy atom fotonkibocsátása, miközben gerjesztett állapotából alapállapotába jut vissza. A spontán emisszió bármilyen külső elektromágneses sugárzás jelenléte nélkül megfigyelhető: az átmenetet a kvantált elektromágneses tér vákuumfluktuációi és az atomok közötti kölcsönhatás okozza. A spontán emisszió jelenségéről a nemrelativisztikus [kvantummechanika](#) – amelyet

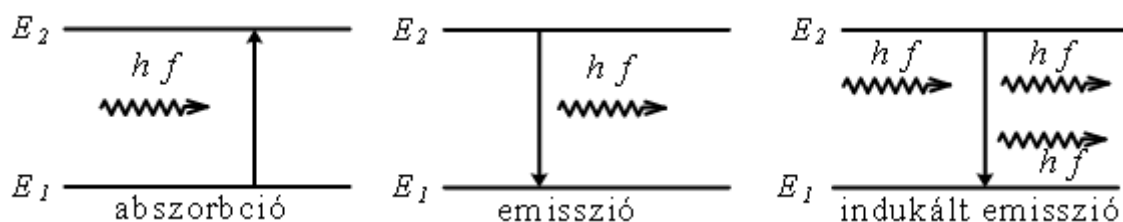
például a [Schrödinger-egyenlettel](#) tárgyalhatunk – nem képes számot adni. Ez a folyamat felelős azért, hogy az atom gerjesztett állapotban csak korlátozott ideig létezhet.

$E_2 - E_1 = h \cdot f$, ahol E_2 a gerjesztett atom energiája, E_1 az alapállapotú atom energiája, h a Planck-állandó és f a kisugárzott foton frekvenciája.

Mi is az abszorpció?

Abszorpció során az atom elnyel egy fotont, és egy elektronja egy alacsonyabb energiájú állapotból egy magasabb állapotba kerül.

DE **Einstein** 1916-ban megjósolt egy harmadik folyamatot, az **indukált emissziót**. Ilyenkor az atom gerjesztett állapotban van, és elhalad mellette egy olyan energiájú foton, amit ő maga is ki tudna bocsátani. Ez a foton indukálhatja, hogy az atom gerjesztettsége megszűnjön emisszió révén.



A keletkező foton:

- eredetivel megegyező frekvenciájú,
- vele azonos irányban halad,
- polarizációs síkjuk megegyezik,
- fázisuk azonos.

-----> ilyen fotonokat koherensnek nevezzük

Ez pedig azért fontos mert: Az indukált emisszió segítségével lehetővé válik a fényerősítés.

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, ami azt jelenti, hogy fényerősítés indukált emisszió révén, az első betűkből származik a LASER, magyarul már lézer. Mind 3 jelenség lejátszódik a laserben. Amikor több gerjesztett atom van a gázunkban, mint ahány alapállapotú atom, akkor a spontán emisszióban keletkezett fotonok nagyobb eséllyel idéznek elő indukált emissziót, és az indukált emisszióban keletkezett fotonok nagyobb eséllyel idéznek elő újabb indukált emissziót. Éppen ezért ez az állapot elengedhetetlen a lézerünk működéséhez, és ez annyira fontos, hogy külön nevet is kapott. Tehát amikor több gerjesztett állapotban lévő atom van a közegünkben, mint alapállapotban lévő atom, akkor azt mondjuk, hogy megvalósítottuk a közegben a **populáció inverziót**. Azt a közeget, amiben megvalósítottuk a populáció inverziót, **aktív közegnek** vagy **erősítő közegnek** nevezzük.

Egyéb felhasználása ennek a jelenségnek:

Az egyes anyagok gerjesztés hatására rájuk jellemző hullámhosszokon emittálnak fotonokat, ezt a spektroszkópiában használják ki.

Rudi hintje :D : elvileg a katodsugarcsoves tv is ezen az elven alapszik sőt bizonyos LED is

c. Cavity and Circuit QED

Cavity quantum electrodynamics: is the study of the interaction between light confined in a reflective cavity and atoms or other particles, under conditions where the quantum nature of light **photons** is significant. It could in principle be used to construct a **quantum computer**.

Circuit quantum electrodynamics (circuit QED): provides a means of studying the fundamental interaction between light and matter. As in the field of **cavity quantum electrodynamics**, a single photon within a single mode **cavity** coherently couples to a quantum object (atom). In contrast to cavity QED, the photon is stored in a one-dimensional on-chip resonator and the quantum object is no natural atom but an artificial one. These **artificial atoms** usually are mesoscopic devices which exhibit an atom-like energy spectrum. The field of circuit QED is a prominent example for **quantum information processing** and a promising candidate for future **quantum computation**.