

[1]

Spontaneous emission

спонтанне випромінювання

[2]

- ▶ Spontaneous emission is the process by which a quantum system such as an [atom](#), [molecule](#), or [nucleus](#) in an [excited state](#) undergoes a [nanocrystal](#) transition to a state with a lower energy (e.g., the [ground state](#)) and emits quanta of energy. Light or luminescence from an atom is a fundamental process that plays an

□ спонтанного випромінювання процес, при якому квантова система, наприклад, атом, молекула, або ядра в [an excited](#) держави зазнає [nanocrystal](#) перехід в стан з меншою енергією (наприклад, стану) і випускає кванти енергії. Світло або люмінесценції з атома є фундаментальним процесом, який грає

[3]

- ▶ essential role in many phenomena in nature and forms the basis of many applications, such as fluorescent tubes, older television screens ([cathode ray tubes](#)), plasma display panels, [lasers](#), and [light emitting diodes](#). Lasers start by spontaneous emission, and then normal continuous operation works by

□ істотну роль у багатьох явищах у природі і є основою багатьох додатків, таких як люмінесцентні лампи, літніх телевізійних екранів (електронно-променеві трубки), плазмових панелей, лазерів і світловипромінювальних діодів. Лазери почати спонтанного випромінювання, а потім нормальний безперервної роботи працює

[4]

- ▶ If a light source ('the atom') is in the excited state with energy E_2 , it may spontaneously decay to a lower lying level (e.g., the ground state) with energy E_1 , releasing the difference in energy between the two states as a photon. The photon will have angular frequency ω and [energy](#) $E = \hbar\omega$ (= hf), where \hbar is the [Planck constant](#) and f is the [frequency](#):

▶

□ Якщо джерело світла («атом») знаходиться в збудженому стані з енергією E_2 , це може спонтанно розпадаються на більш низькому рівні, що лежить (наприклад, стан) з енергією E_1 , випустивши різницю в енергії між двома країнами, як фотон. Фотон матиме кутову частоту та енергію ($E = \hbar\omega$, де \hbar знаходиться constant and Планка частота):

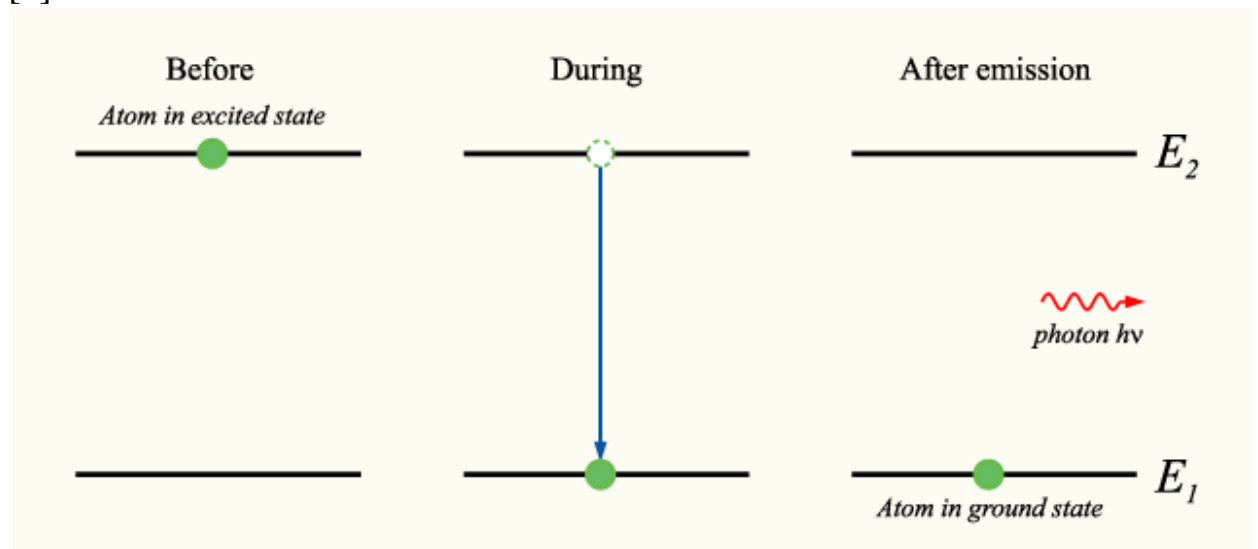
□

[5]

► where \hbar is the reduced Planck constant. The phase of the photon in spontaneous emission is random as is the direction in which the photon propagates. This is not true for stimulated emission. An energy level diagram illustrating the process of spontaneous emission is shown below:

□ де наведена постійна Планка. Фаза фотона в спонтанного випромінювання є випадковим, як це напрям, в якому фотон поширюється. Це не відноситься до вимушеного випромінювання. Рівень енергії схема, що ілюструє процес спонтанного випромінювання показаний нижче:

[6]



[7]

► If the number of light sources in the excited state at time t is given by $N(t)$, the rate at which $N(t)$ decays is:

$$\frac{\partial N(t)}{\partial t} = -A_{21} N(t),$$

Where A_{21} is the rate of spontaneous emission. In the rate-equation

Якщо число джерел світла в збудженому стані в момент часу задається швидкістю, з якою розпадає:

Де швидкість спонтанного випромінювання. У вартість-рівняння [8]

- ▶ A_{21} is a proportionality constant for this particular transition in this particular light source. The constant is referred to as the [Einstein A coefficient](#), and has units s^{-1} . The above equation can be solved to give:

$$N(t) = N(0)e^{-A_{21}t} = N(0)e^{-\Gamma_{rad}t},$$

- ▶ Where $N(0)$ is the initial number of light sources in the excited state, A_{21} є коефіцієнт пропорційності для цього конкретного переходу в даному джерелі світла. Постійним, називається коефіцієнтом Ейнштейна А, і має одиниці s^{-1} . Вище рівняння може бути вирішено, щоб дати:

A_{21} є коефіцієнт пропорційності для цього конкретного переходу в даному джерелі світла. Постійним, називається коефіцієнтом Ейнштейна А, і має одиниці s^{-1} . Вище рівняння може бути вирішено, щоб дати:

- ▶ Де початкове число джерел світла в збудженому стані,

[9]

- ▶ τ is the time and Γ_{rad} is the radiative decay rate of the transition. The number of excited states $N(t)$ thus decays exponentially with time, similar to [radioactive decay](#). After one lifetime, the number of excited states decays to 36.8% of its original value (e^{-1} -time). The radiative decay rate Γ_{rad} is inversely proportional to the lifetime

τ час і швидкість радіаційного розпаду переходу. Кількість порушених станів, таким чином, експоненціально затухає з часом, подібно радіоактивного розпаду. Після одного життя, число збуджених станів розпадається на 36,8% від свого початкового значення (e^{-1} -time). Швидкість радіаційного розпаду обернено пропорційна часу життя

[10]

- ▶ Spontaneous transitions were not explainable within the framework of the [old quantum theory](#), in which the atomic levels were quantized, but the

electromagnetic field was not. Given that the eigenstates of an atom are properly diagonalized, the overlap of the wavefunctions between the excited state and the ground state of the atom is zero. Thus, in the absence of a quantized electromagnetic field, the excited state atom can not decay to the ground state. In order to explain spontaneous transitions, quantum mechanics must be extended to a [quantum field theory](#), wherein the electromagnetic field is quantized at every point in space. The quantum field theory of electrons and electromagnetic fields is known as [quantum](#)

□ Спонтанні переходи не пояснили в рамках старої квантової теорії, в яких атомні рівні квантується, але електромагнітне поле не було. Враховуючи, що власні стану атома правильно до діагонального, перекриття хвильових функцій між збудженому стані і перший стані атома дорівнює нулю. Таким чином, за відсутності квантованого електромагнітного поля, збуджений атом держава не може розпадатися в основний стан. Для того, щоб пояснити спонтанні переходи, квантова механіка повинна бути розширена до квантової теорії поля, в якому електромагнітне поле квантується в кожній точці простору. Квантова теорія поля електронів і електромагнітних полів відомий як квантово

[11]

[electrodynamics](#).

► In quantum electrodynamics (or QED), the electromagnetic field has a [ground state](#), the [QED vacuum](#), which can mix with the excited stationary states of the atom (for more information, see Ref. [2]). As a result of this interaction, the "stationary state" of the atom is no longer a true [eigenstate](#) of the combined system of the atom plus electromagnetic field. In particular, the electron transition from the excited state to the electronic ground state mixes with the transition of the electromagnetic field from the ground state to an excited state, a field state with one photon in it. Spontaneous emission in free space depends upon [vacuum fluctuations](#) to get started.

► електродинаміки.

► □ У квантовій електродинаміці (або КЕД), електромагнітне поле має основний стан, вакуум і треба було довести, що можете змішати з порушеними стаціонарних станів атома (для отримання додаткової інформації, див. [2]). Не в результаті цієї взаємодії, "стаціонарний стан" атом вже не вірно власний стан комбінованої системи атома плюс електромагнітного поля. Зокрема, перехід електрона із збудженого стану в основний електронний стан змішується з переходом електромагнітного поля з основного стану в збуджений стан, у стан поля з одного фотона в ньому. Спонтанне випромінювання у вільному просторі залежить від флуктуації вакууму, щоб почати.

►

[12]

- ▶ Although there is only one electronic transition from the excited state to ground state, there are many ways in which the electromagnetic field may go from the ground state to a one-photon state. That is, the electromagnetic field has infinitely more degrees of freedom, corresponding to the different directions in which the photon can be emitted. Equivalently, one might say that the [phase space](#) offered by the electromagnetic field is infinitely larger than that offered by the atom. This infinite degrees of freedom for the emission of the photon results in the apparent irreversible decay, i.e., spontaneous emission.

□ Хоча є тільки один електронний перехід із збудженого стану в основний стан, є багато способів, в яких електромагнітне поле може піти від стану до стану однофотонні. Тобто, електромагнітне поле має нескінченно більше ступенів свободи, що відповідають різним напрямкам, в яких фотон може випромінюватися. Рівнозначно тому, що можна було б сказати, що фаза space offered електромагнітним полем нескінченно більше, ніж той, що надається атома. Це нескінченним числом ступенів свободи для емісії результатів фотонів у видимій незворотного розпаду, тобто спонтанного випромінювання.

[13]

- ▶ In presence of the electromagnetic vacuum modes, the combined atom-vacuum system is explained by the superposition of the wavefunctions of the excited state atom with no photon and the ground state atom with a single emitted photon:

$$|\psi(t)\rangle = a(t)e^{-i\omega_0 t}|e; 0\rangle + \sum_{k,s} b_{ks}(t)e^{-i\omega_k t}|g; 1_{ks}\rangle$$

□ У присутності електромагнітних коливань вакууму, в поєднанні атом-вакуумна система пояснюється накладенням хвильових функцій порушеної атома стані і без фотона і перший атома держава з єдиним випромінюваного фотона:

[14]

- ▶ Where $a(t)$ and $|e; 0\rangle$ are the excited state atom-vacuum wavefunction and its probability amplitude and
- ▶ $|g; 1_{ks}\rangle$ are the ground state atom with photon on mode $\{ks\}$ wavefunction and its probability amplitude, ω_0 is the atomic transition frequency and
- ▶ ω_k is the frequency of the photon. To calculate the probability of the atom at the ground state ($|g\rangle$), one needs to solve the time evolution of the wavefunction with an appropriate Hamiltonian (see external link 1 for the detail calculations). To solve for the transition

[15]

- ▶ amplitude, one needs to average (integrate) over all the vacuum modes, since one must consider probabilities that the emitted photon occupies all of phase space equally. The "spontaneously" emitted photon has infinite

different modes to propagate into, thus the probability of the atom re-absorbing the photon and returning to the original state is negligible, making the atomic decay practically irreversible. Such irreversible time evolution of the atom-vacuum system is responsible for the

□ амплітуда, потрібно в середньому (інтегрувати) по всіх вакуумних мод, так як необхідно враховувати ймовірності того, що випромінюється фотон займає всього фазового простору в рівній мірі. "Спонтанно", що випускається фотон має нескінченні різні режими поширюються в, таким чином, вірогідність того, що атом Re поглинає фотон і повернутися до вихідним станом є незначним, що робить атомного розпаду практично незворотнім. Така необоротна еволюція час атом-вакуумної системи несе відповідальність за

[16]

► apparent spontaneous decay of an excited atom. If one were to keep track of all the vacuum modes, the combined atom-vacuum system would undergo through the unitary time evolution, making the decay reversible process. [Cavity quantum electrodynamics](#) is one such system where the vacuum modes are modified resulting in the reversible decay process, see also [Quantum revival](#). The theory of the spontaneous emission under the QED framework was first calculated by Weisskopf and Wigner.

□ очевидно, що спонтанний розпад порушеної атома. Якби можна було відстежувати всіх вакуумних мод, об'єданого атома-вакуумна система буде проходити через унітарної еволюції часу, що робить оборотний процес розпаду. Порожнина квантова електродинаміка є одним з таких систем, де вакуумних мод змінюються в результаті процесу оборотного розпаду, також див Quantum відродження. Теорія спонтанного випромінювання в рамках структури QED вперше обчислив Вайськопф і Вигнера.

[17]

► In spectroscopy one can frequently find that atoms or molecules in the excited states dissipate their energy in the absence of any external source of photons. This is not spontaneous emission, but is actually nonradiative relaxation of the atoms or molecules caused by the fluctuation of the surrounding molecules present inside the bulk.

□ У спектроскопії часто можна виявити, що атоми або молекули в збуджених станах розсіюють свою енергію в відсутність будь-якого зовнішнього джерела фотонів. Це не спонтанне випромінювання, але насправді безвипромінювальної релаксації атомів або молекул, викликаних коливаннями оточуючих молекул, присутніх у обсязі.

[18]

Rate of spontaneous emission

► The rate of spontaneous emission (i.e., the radiative rate) can be described by [Fermi's golden rule](#). The rate of emission depends on two factors: an 'atomic part', which describes the internal structure of the light source and a

'field part', which describes the density of electromagnetic modes of the environment. The atomic part describes the strength of a transition between two states in terms of transition moments. In a homogeneous medium, such as [free space](#), the rate of spontaneous emission in the dipole approximation is given by:

$$\Gamma_{rad}(\omega) = \frac{\omega^3 n |\mu_{12}|^2}{3\pi\epsilon_0 \hbar c_0^3} = \frac{4\alpha\omega^3 n |\langle 1|\mathbf{r}|2\rangle|^2}{3c_0^2}$$

Курси спонтанного випромінювання

□ швидкість спонтанного випромінювання (тобто, швидкість радіаційного) може бути описана золотий швидкості rule. The Фермі випромінювання залежить від двох факторів: "Atomic частина", яка описує внутрішню структуру джерела світла і поля »частини ', який описує щільність електромагнітних коливань навколишнього середовища. Атомно частина описує силу переходу між двома державами в умовах перехідних моментів. В однорідному середовищі, такий як вільному просторі, швидкість спонтанного випромінювання в дипольному наближенні визначається за формулою:

[19]

► where ω is the emission frequency, n is the index of refraction, μ_{12} is the transition dipole moment, ϵ_0 is the vacuum permittivity, \hbar is the reduced Planck constant, c_0 is the vacuum speed of light, and α is the fine structure constant. (This approximation breaks down in the case of inner shell electrons in high-Z atoms.) Clearly, the rate of spontaneous emission in free space increases with ω^3 . In contrast with atoms, which have a discrete emission spectrum, quantum dots can be tuned continuously by changing their size. This property has been used to check the frequency dependence of the spontaneous emission rate as described by Fermi's golden rule.

□ де частота випромінювання, ϵ індекс заломлення, дипольний момент переходу, ϵ_0 електрична постійна, наведена постійна Планка, у вакуумній швидкості світла, \hbar постійна тонкої структури. (Це наближення порушується у випадку внутрішніх електронів оболонки в атомах з високим атомним.) Ясно, що швидкість спонтанного випромінювання у вільному просторі зростає с. На відміну від атомів, які мають дискретний спектр випромінювання, квантові точки можуть бути налаштовані постійно, змінюючи їх розмір. Ця властивість використовується для перевірки - frequency залежність швидкості спонтанного випромінювання, як описано золотому правилу Фермі.

[20]

Radiative and nonradiative decay: the quantum efficiency

- In the rate-equation above, it is assumed that decay of the number of excited states only occurs under emission of light. In this case one speaks of full radiative decay and this means that the quantum efficiency is 100%. Besides radiative decay, which occurs under the emission of light, there is a second decay mechanism; nonradiative decay. To determine the total decay rate radiative and nonradiative rates should be summed:

$$\Gamma_{tot} = \Gamma_{rad} + \Gamma_{nrad}$$

І безвипромінювальних розпаду: квантова ефективність

□ у вартість-рівняння вище, передбачається, що розпад числа збуджених станів відбувається тільки при випускненні світла. У цьому випадку говорять про повне радіаційного розпаду, і це означає, що квантова ефективність 100%. Крім того радіаційного розпаду, яка відбувається під випромінюванням світла, є другий механізм розпаду; безвипромінювальної розпаду. Щоб визначити загальний швидкості радіаційного розпаду і безвипромінювальної ставки повинні бути підведені:

[21]

- Where is the total decay rate, is the radiative decay rate and the nonradiative decay rate. The quantum efficiency (QE) is defined as the fraction of emission processes in which emission of light is involved:

$$QE = \frac{\Gamma_{rad}}{\Gamma_{nrad} + \Gamma_{rad}}$$

□ Де Загальний коефіцієнт загасання, швидкості радіаційного розпаду і швидкості безвипромінювальної розпаду. Квантовий вихід (QE) визначається як частина процесів випромінювання, в якому випромінювання світла, що беруть участь:

[22]

- In nonradiative relaxation, the energy is released as [phonons](#), more commonly known as [heat](#). Nonradiative relaxation occurs when the energy difference between the levels is very small, and these typically occur on a

much faster time scale than radiative transitions. For many materials (for instance, [semiconductors](#)), electrons move quickly from a high energy level to a meta-stable level via small nonradiative transitions and then make the

□ У безвипромінювальної релаксації, енергія вивільняється аспнофна, більш відомий як тепло. Безвипромінювальної релаксації відбувається, коли різниця енергій між рівнями дуже мало, і вони, як правило, відбуваються на набагато більш швидкими масштабі часу, ніж радіаційних переходів. Для багатьох матеріалів (наприклад, напівпровідників), електрони швидко переміщатися від високого рівня енергії в метастабільному рівні за допомогою невеликих безвипромінювальних переходів, а потім зробити

[23]

- ▶ final move down to the bottom level via an optical or radiative transition. This final transition is the transition over the [bandgap](#) in semiconductors. Large nonradiative transitions do not occur frequently because the [crystal structure](#) generally can not support large vibrations without destroying bonds (which generally doesn't happen for relaxation). Meta-stable states form a very important feature that is exploited in the construction of [lasers](#). Specifically, since electrons decay slowly from them, they can be piled up in this state without too much loss and then [stimulated emission](#) can be used to boost an optical signal.

□ остаточний крок вниз на нижній рівень за допомогою оптичного або радіаційного переходу. Цей останній перехід перехід на забороненої зони в напівпровідниках. Великі Безвипромінювальні переходи не відбуваються часто, тому що кристалічна структура в цілому не можуть підтримувати великі коливання без руйнування зв'язків (які, як правило не буває для відпочинку). Мета-стійких станів утворюють дуже важлива особливість, яка експлуатують у будівництві лазерів. Зокрема, оскільки електронів розпаду повільно з них, вони можуть бути складені в цьому стані без особливих втрат, а потім вимушене випромінювання може бути використане для підвищення оптичного сигналу.

[24]

References

- ▶ R. Loudon, *The Quantum Theory of Light*, 3rd ed. (Oxford University Press Inc., New York, 2001).
- ▶ Hiroyuki Yokoyama & Ujihara K (1995). [Spontaneous emission and laser oscillation in microcavities](#). Boca Raton: CRC Press. p. 6. [ISBN 0-8493-3786-0](#).
- ▶ Marian O Scully & M. Suhail Zubairy (1997). [Quantum optics](#). Cambridge UK: Cambridge University Press. p. §1.5.2 pp. 22–23. [ISBN 0-521-43595-1](#).

[25]

- ▶ B. Henderson and G. Imbusch, Optical Spectroscopy of Inorganic Solids (Clarendon Press, Oxford, UK, 1989).
- ▶ A. F. van Driel, G. Allan, C. Delerue, P. Lodahl, W. L. Vos and D. Vanmaekelbergh, Frequency-dependent spontaneous emission rate from CdSe and CdTe nanocrystals: Influence of dark states, Physical Review Letters, 95, 236804 (2005). [http://cops.tnw.utwente.nl/pdf/05/PHYSICAL%20REVIEW%20LETTERS%2095%20236804%20\(2005\).pdf](http://cops.tnw.utwente.nl/pdf/05/PHYSICAL%20REVIEW%20LETTERS%2095%20236804%20(2005).pdf)