6. Rafatov, I. R. Modelling of a continuous optical discharge stabilized by a gas flow in quasi-optical approximation / I. R. Rafatov, B. Yedierler, E. B. Kulumbaev // Journal of Physics D: Applied Physics. - 2009. - Vol. 42. - Art. 055212.

7. Токтогонов, С. А. Определение параметров мощного непрерывного лазерного излучения / С. А. Токтогонов, А. С. Ганыева, И. Ч. Мурзакулова // Вестник КНУ им. Ж. Баласагына. - 2013. - № 3. - С. 77–79.

Рецензент: доктор физико-математических наук, профессор Касмамытов Н.К.

УДК 536.75:621.373.826:007.52
DOI 10.58649/1694-9099-2026-2-445-450

Токтогонов С.А.
Жусуп Баласагын атындагы КУУ
Токтогонов С.А.
КНУ имени Жусупа Баласагына
Toktogonov S.
KNU Jusup Balasagyn

ORCID 0009-0007-2851-5988

ЭНТРОПИЯНЫН КӨБӨЙҮҮ МЫЙЗАМЫНЫН УНИВЕРСАЛДУУЛУГУ ЖАНА КВАНТЫК ЭЛЕКТРОНИКА
УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ ЗАКОНА ВОЗРАСТАНИЯ ЭНТРОПИИ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
UNIVERSALITY OF THE LAW OF ENTROPY INCREASE AND QUANTUM ELECTRONICS

Кыскача мүнөздөмө: Макалада физиканын фундаменталдык мыйзамдарына таянып, реалдуу системалардын өнүгүү критерийлерин аныктоо аракети жасалат. Тактап айтканда, физикалык көз караштан алганда «жакшы» жана «жаман», «прогресс» жана «регресс» түшүнүктөрү кандайча чечмеленери каралат. Ошондой эле Ааламдын өнүгүшүндө белгилүү бир багыттуулук барбы же процесстер циклдик жана/же хаостук мүнөздө жүрөбү деген суроолор талданат. Термодинамиканын экинчи мыйзамына - энтропиянын өсүү мыйзамына таянып, реалдуу системалардын өнүгүү алгоритми сунушталат. Бул алгоритмдин иштеши лазердик нурлануунун пайда болушунун мисалында көрсөтүлөт. Системанын өнүгүү критерийи катары анын ички потенциалдык энергиясынын жогорулашы каралат. Алгоритмдин салыштырмалуу жөнөкөй физикалык системаларга гана эмес, татаал коомдук системаларга да колдонулушу мүмкүн экени белгиленет.

Аннотация: В статье на основе фундаментальных законов физики предпринята попытка определить критерии развития реальных систем. В частности, рассматривается, как с физической точки зрения могут быть интерпретированы понятия «хорошее» и «плохое», «прогресс» и «регресс». Также анализируется вопрос о том, существует ли в развитии мироздания определённая направленность или процессы имеют циклический и/или хаотический характер. На основе второго закона термодинамики - закона возрастания энтропии - предложен алгоритм развития реальных систем. Работа данного алгоритма показана на примере образования лазерного излучения. В качестве критерия развития системы рассматривается увеличение её внутренней потенциальной энергии. Отмечается возможность применения данного алгоритма не только к относительно простым физическим системам, но и к сложным общественным системам.

Abstract: The article attempts to define criteria for the development of real systems on the basis of the fundamental laws of physics. In particular, it examines how the concepts of “good” and “bad”, “progress” and “regression” can be interpreted from a physical point of view. The article also analyzes whether there is a certain direction in the development of the universe or whether processes are cyclic and/or chaotic in nature. Based on the second law of thermodynamics - the law of increasing entropy - an algorithm for the development of real systems is proposed. The operation of this algorithm is demonstrated using the example of laser radiation formation. An increase in the internal potential energy of a system is considered as a criterion of its development. The possibility of applying this algorithm not only to relatively simple physical systems but also to complex social systems is noted.

Негизги сөздөр: энтропия; маалымат; тартип; өзүн-өзү уюштуруу; туруктуу абал; өнүгүү алгоритми; кванттык система; лазердик нурлануу.

Ключевые слова: энтропия; информация; порядок; самоорганизация; устойчивое состояние; алгоритм развития; квантовая система; лазерное излучение.

Keywords: entropy; information; order; self-organization; stable state; development algorithm; quantum system; laser radiation.

В современной науке сохраняет актуальность вопрос о направленности процессов развития в природе, обществе и мироздании. В связи с этим возникает необходимость определить, что следует считать прогрессом, а что - регрессом, а также существует ли в развитии мироздания определённая направленность или процессы имеют циклический и/или хаотический характер.

Для оценки степени развития системы необходимо определить соответствующие критерии. В данном контексте важное значение имеет понятие энтропии как меры беспорядка. Соответственно, обратная ей величина может рассматриваться как мера порядка, а следовательно, как один из возможных показателей степени развития системы. Система, предоставленная самой себе, то есть существующая без внешнего притока энергии и информации, стремится перейти в наименее энергетически затратное состояние из возможных. Это положение связано с законом возрастания энтропии.

Однако в природе абсолютно изолированные системы практически не встречаются. Поэтому в той или иной степени в любую реальную систему поступают энергия и информация. В качестве системы может рассматриваться любой физический объект: атом, молекула, кристалл, живой организм, коллектив, группа людей, общество и т. п. Кроме того, самоорганизация и усложнение систем происходят при поступлении энергии и её последующем «освоении» системой. Качество системы может возрастать при увеличении энергии, приходящейся на нормированный параметр состояния. В случае физических объектов, например газов, в качестве такого параметра может рассматриваться температура. Температура, в свою очередь, является одним из параметров, связанных с внутренней энергией системы.

Второе начало термодинамики вводит функцию состояния - энтропию *S*. В то время как внутренняя энергия изолированной системы остаётся неизменной, энтропия при всех самопроизвольных процессах увеличивается [1].

$S = Q / T$,

где Q - количество теплоты, T - температура.

Энтропия как параметр, характеризующий состояние системы и выступающий мерой беспорядка, может рассматриваться в связи с распределением энергии в данной системе при её устойчивом состоянии.

Под «освоением» системой энергии следует понимать сохранение определённой доли поступающей энергии и переход данной системы в новое устойчивое состояние с большей внутренней энергией. При этом новое состояние может качественно отличаться от первоначального: появляются эмерджентные свойства, отсутствовавшие в исходном состоянии. В качестве примеров можно

привести образование молекул из атомов, кристаллов из атомов и молекул, возникновение клеток, формирование лазерного излучения и другие процессы. Характеристики и свойства вновь сформированного объекта определяются параметрами, свойствами и взаимодействием составляющих его элементов.

Естественно различные уровни организации вещества и материи имеют разные процессы и характеристики развития. Чем сложнее система, тем больше параметров определяют её состояние и поведение.

Основная идея повышения внутреннего порядка – это поступление в систему упорядоченной энергии извне. Под упорядоченной энергией следует понимать энергию, обладающую определенному порядку или носящий определенную информацию. Поэтому под развитием системы следует понимать увеличение внутренней энергии в новом установившемся режиме. Тогда под энтропией следует понимать величину обратную энергии в установившемся режиме. Коэффициентом между этими величинами может выступать некоторый параметр характеризующий систему в данном состоянии. Для характеристики развития системы определяющее значение имеет энергия заключенная в ней. Чем больше потенциальная энергия в системе, тем ценность системы больше.

Наглядным примером может быть образование лазерного излучения. Как известно, лазерное излучение обладает рядом уникальных свойств таких, как когерентность, монохроматичность, направленность, высокая интенсивность и др. Это делает лазеры особым инструментом как в науке, так и в технике, производстве и медицине.

Впервые идею создания лазеров высказал Эйнштейн. По теории Эйнштейна излучение квантовой системы может происходит двумя путями: спонтанное излучение и вынужденное излучение. Суть которой заключается в следующем [2; 3]:

Если рассмотрим два неких произвольных энергетических состояний квантовой системы E_1 и E_2 и будем считать, что уровень два является более энергетическим состоянием по сравнению с уровнем один, то есть $E_2 > E_1$. Обозначим число частиц, которое в данный момент времени в том или ином состоянии через N_1 и N_2. Эта величина называется населённостью уровня. Предположим, что частица, находящаяся на более энергетическом уровне 2 имеет возможность перейти в менее энергетическое состояние 1. Это обусловлено тем обстоятельством, что квантовая система (атом, молекула, ион) стремится прийти к наименее энергетическому состоянию соответствующей температуре среды и описываемая распределением электронов по уровням Больцмана. Одним из возможных переходов в менее энергетическое состояние, является переход сопровождаемое со спонтанным излучением, когда частица уменьшает свою энергию за счёт излучения фотона. Очевидно следующее соотношение:

$h\nu = E_2 - E_1$

Вероятность спонтанного излучения определяется простым соотношением:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right) = -A_{21} N_2 ;$$

где $\left(\frac{dN_2}{dt}\right)$ - скорость уменьшения населённости уровня 2 за счёт спонтанных переходов. A_{21} - характеризует вероятность спонтанных переходов, и называется коэффициентом Эйнштейна для спонтанных переходов. Величина обратная коэффициенту Эйнштейна характеризует среднее время жизни частиц в более энергетическом состоянии 2 до момента их перехода в менее энергетическое состояние 1 за счёт спонтанного излучения:

$$\tau_{ср} \sim A_{21}^{-1} \sim \frac{1}{A_{21}} ;$$

Кроме выше указанного существует и возможный другой путь перехода частиц из более энергетического состояния в менее энергетическое, когда он осуществляется под действием внешнего фактора. Как показывает теория, этим внешним воздействующим фактором может быть только один, а

именно, электромагнитная волна (фотон), энергия этого фотона должна быть в точности равна разности энергий уровней, между которыми совершается переход $h\nu_{вын} = E_2-E_1$:

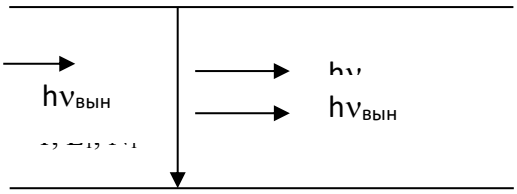


Рис.1. Схема вынужденного излучения

Данный переход называется вынужденным излучением. Скорость вынужденного излучения, по аналогии с предыдущим случаем, можно описать простой формулой:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{вын} = -B_{21}N_2$$

где B_{21} - вероятность вынужденного излучения; N_2 – населенность электронов на уровне 2.

Однако в отличие от спонтанного излучения, здесь коэффициент B_{21} уже зависит от силы внешнего воздействия, в частности, от плотности потока F внешних фотонов.

$B_{21}= F\ \sigma_{21}$,

где σ_{21} - называется сечением вынужденного излучения и является квантово-механической величиной.

В процессе вынужденного излучения, как отмечалось выше, внешний фотон является только возмущающим фактором и к нему добавляется новый фотон, энергия которого тоже равняется $E_2 – E_1$, причём эти два фотона полностью эквивалентны друг другу, и имеют одну и ту же энергию, направление распространения, плоскость поляризации и разность фаз остается постоянной. Этот фактор является принципиальным отличием вынужденного излучения от спонтанного: первое условие – наличие возмущающей электромагнитной волны; второе условие – вторичный фотон полностью идентичен первичному фотону.

Если в рассматриваемой нами двухуровневой квантовой системе в некотором направлении Z распространяется поток фотонов с плотностью F и энергией $h\nu =E_2 -E_1$, то изменение плотности потока фотонов dF на расстоянии dZ , очевидно равно:

$dF= \sigma F(N_2 – N_1)\ dZ$

Как видно из этой формулы знак dF зависит от величины разности $(N_2 - N_1)$. Если $(N_2 - N_1)>0$, то dF положительно, то есть поток фотонов будет усиливаться при прохождении через среду. В противном случае dF отрицательное, число фотонов будет уменьшаться. В первых случаях мы имеем дело с усиливающей средой, а во втором с поглощающим.

В равновесных средах, где заселённость в возбуждённом состоянии подчиняется статистике Больцмана:

$$\frac{N_2}{N_1} = exp\left[-\frac{E_2 - E_1}{KT}\right]$$

N_2 всегда меньше N_1, то есть $(N_2 - N_1)<0$ мы имеем дело с поглощающей средой. Создать усиливающую среду можно только в том случае, если каким-либо образом, путём внешнего воздействия на среду нам удастся создать такую ситуацию, когда между хотя бы двумя уровнями будет нарушено равновесие – статистика Больцмана, то есть $N_2 > N_1$, $(N_2 - N_1) > 0$ среда будет усиливать поток фотонов. Подобная ситуация, когда $(N_2 - N_1) > 0$ называется инверсной населённостью (инверсия -

наоборот). Среда, в которой создано инверсия, называется активной. Инверсия – необходимое условие усиления когерентного электромагнитного излучения, т.е. получения лазерного излучения. Если в усилители ввести обратную положительную связь, то получится генератор. Активная среда является усилителем по сути дела и для того, чтобы превратить её в генератор надо ввести в него сильную обратную положительную связь. Обратной связью называется воздействие сигнала с вывода усилителя на его вход. Если это воздействие в фазе с усиливаемыми колебаниями, то обратная связь называется положительной.

В лазерах обратная связь создаётся путём размещения активной среды внутри так называемого оптического резонатора. Простейший оптический резонатор будет зеркальным. В простейшем случае оптический резонатор образуется двумя зеркалами, обращёнными друг к другу отражающими поверхностями.

Для получения инверсной населенности используются специальные схемы накачки в активных средах. Расмотрим трехуровневую схему накачки актвной среды.

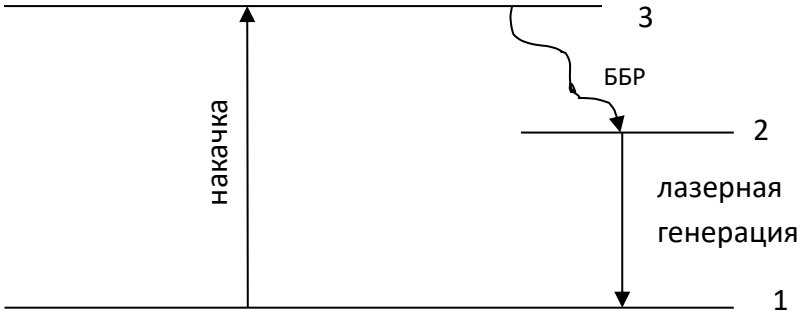


Рис.2. Трехуровневая схема накачки.

Уровни, между которыми создаётся инверсия называются лазерными уровнями. Более энергетический уровень называются верхним лазерным уровнем, менее энергетический – нижний лазерный уровень. В этом случае, для создания инверсии между уровнями 1 и 2 используется вспомогательный уровень 3 (уровень накачки) с большей энергией (см. рис.2). Также видно, что нижний лазерный уровень является основным состоянием системы. Основным состоянием квантовой системы называется энергетический уровень частиц, время жизни на котором бесконечно большое, то есть все менее энергетические уровни уже полностью заполнены частицами, и они не могут уменьшать свою энергию. В основном состоянии в нормальных условиях находятся все частицы среды.

Инверсия создаётся следующим образом: вначале частицы путём внешнего воздействия переводятся из основного состояния на уровень накачки (3) этот процесс называется накачкой активной среды. Если частица с уровня накачки будет быстро переходить на верхний лазерный уровень, то в принципе возможно создание инверсии между уровнями 1 и 2 (2 – верхний лазерный уровень). Для того чтобы по данной схеме создать инверсию в среде её квантовая система должна отвечать следующим требованиям:

a) переход с 1 → 3 должен иметь очень большое сечение возбуждения, то есть большую скорость. При малейшем внешнем воздействии, частицы должны эффективно возбуждаться на требуемый нами уровень накачки, а не на другие уровни квантовой системы, которые не принимают участие в создании инверсии.

b) на переходе 3 → 2 должен существовать механизм ББР (быстрая безизлучательная релаксация), только благодаря этому механизму, мы можем переводить быстро частицы с 3 → 2.

c) верхний лазерный уровень должен являться метастабильным состоянием квантовой системы.

Возбуждённые состояния бывают двух видов: обычные и стабильные. Если оптический переход с возбуждённого состояния разрешён правилами отбора квантовой системы, то мы имеем дело с обычными возбуждёнными уровнями (время жизни частицы на них в плазме $t < 10^{-6}$ сек., для конденсированных сред $t < 10^{-7}$сек.). Если же переход с возбуждённого состояния в обычное запрещён

правилами отбора, то мы имеем дело с метастабильными уровнями, где время жизни $t \approx 10^{-3}$ сек. Оптическим переходам с метастабильных уровней в спектре излучения любых элементов соответствует наиболее ярким линиям, которые называются резонансными. Таким образом, для создания инверсии по трёхуровневой системе, квантовая система должна полностью удовлетворять всем трём требованиям [2; 3].

Как отсюда видно, для образования лазерного излучения необходимо созданit инверсии населенности концентрации электронов на лазерных уровнях. Если при нормальных условиях по Больцмановскому распределению на верхних уровнях концентрация электронов всегда меньше, чем на нижних уровнях, при инверсной населенности, наоборот, на верхних уровнях концентрация электронов больше, чем на нижних уровнях. Для достижения этого условия используется запрещенный переход правилами отбора, что дает возможность увеличивать концентрацию электронов на верхнем лазерном уровне. В активной среде лазеров, это обстоятельство, дает возможность накоплению энергии и величина инверсной населенности определяет мощность лазерного излучения. Иначе говоря, для получения лазерного излучения, обладающего высокой организованностью, необходимо использование нетривиального условия – условия инверсной населенности, которая базируется на использовании запрещенного правилами отбора перехода с уровня накачки на метастабильный уровень. Этот уровень является верхним лазерным уровнем, где время жизни электронов на 3 - 4 порядка превышает время жизни электронов на обычных уровнях, что обеспечивает накопление электронов на нем и создание инверсной населенности.

В процессе накачки участвуют только фотоны энергия которых равна $E_3 – E_1$. Т.е. поступающая энергия должна удовлетворять определенным условиям или говоря языком синергетики, обладать определенной информацией, соответствующей параметрам самой системы.

Как мы отмечали ранее, аналогичный принцип оценки добротности системы можно привести для различных практических случаях. Например, при оценке качества научных трудов используются такие параметры, как индекс Хирша, оригинальность, циитруемость и т.п. Для оценки рейтинга вузов используется комплексным критериев: академическая репутация, качество образования и преподавательского состава, соотношение студентов и преподавателей, научно-исследовательская деятельность, материально-техническая база и ресурсы, международная, социальная среда и инновации, трудоустройство выпускников [4; 5].

Как следует из вышеизложенного анализа, для развития системы необходимы следующие условия:

1. Поступление энергии в данную систему.
2. Поступающая в систему энергия должна подчиняться определённому порядку или нести определённую информацию. При этом данный порядок или информация определяются параметрами и свойствами самой принимающей системы.
3. Новое состояние системы с улучшенными параметрами и большим энергетическим потенциалом должно обладать устойчивостью.
4. В результате поступления и освоения энергии параметры системы улучшаются или могут качественно изменяться.
5. Критерием развития системы выступает увеличение её внутренней потенциальной энергии.

Список использованной литературы

1. Барышева Т. Б. Второе начало термодинамики и энтропия: методическое пособие / Т. Б. Барышева; под ред. А. И. Черноуцана. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2017. – 32 с.
2. Учебно-методическое пособие по квантовой электронике / сост. С. А. Токтогонов, Н. О. Таштанбаев, Т. М. Акбеков. – Бишкек: КНУ им. Ж. Баласагына, 2006. – 41 с.
3. Карлов Р. В. Лекции по квантовой электронике. – М.: Высшая школа, 1984.

Рецензент: доктор технических наук, профессор Татыбеков А.