

Энтропийная оценка процесса лазерного охлаждения

Ю.С. Курской, Ю.П. Мачехин, А.С. Гнатенко

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Науки, 14, 61166 Харьков, Украина

(Получено 12.07.2018; в отредактированной форме – 20.10.2018; опубликовано online 29.10.2018)

В работе рассмотрена задача лазерного охлаждения частиц (атомов, ионов, молекул). Исследована возможность оценки параметров ансамбля охлаждаемых частиц с применением энтропийного анализа. Процесс охлаждения рассматривается с позиций теории открытых систем и нелинейной метрологии. Показано, что лазерное охлаждение представляет собой процесс взаимодействия детерминированной системы лазерного излучения с хаотичной системой частиц, пребывающих в броуновском движении. Для оценки скорости и температуры ансамбля частиц и контроля процесса авторами предложено использовать информационно-энтропийный подход. Получено выражение для оценки энтропии ансамбля частиц, как функции частоты рассеянного излучения и предложена энтропийная шкала оценки температуры охлаждаемых частиц.

Ключевые слова: Лазерное охлаждение частиц, Энтропия Шеннона, Распределение Максвелла, Энтропийная шкала.

DOI: [10.21272/jnep.10\(5\).05030](https://doi.org/10.21272/jnep.10(5).05030)

PACS numbers: 42.55, 02.40.Xx,
65.40.gd, 89.70.Cf, 06.02. – f

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из ярких задач физики последней четверти XX века стало охлаждение газообразных веществ до температуры близкой к абсолютному нулю путём торможения броуновского движения частиц (атомов, ионов, молекул) лазерным излучением. Охлаждённые до остановки теплового движения частицы можно наблюдать в течении гораздо большего времени, чем движущиеся, что важно для спектроскопии высокого разрешения и стабилизации частоты лазеров. При достижении температур, близких к 0°K возможно получение состояния сверхтекучести и конденсата Бозе-Эйнштейна, который предлагается использовать для создания квантовой памяти. Развитие технологий охлаждения и удержания частиц открывает новые возможности по усовершенствованию эталонной базы, позволяет получить новые реперные точки стандартов частоты, повышать точность глобальных навигационных систем. К перспективным задачам относится создание оптических часов на охлажденных одиночных ионах в электромагнитных ловушках и на атомах, захваченных в оптическую решетку. Предполагается, что относительная неопределенность частоты в таких часах достигнет значений 10^{-17} - 10^{-18} .

Авторами разрабатывается теория стабилизации и управления характеристиками излучения нанолазеров [1]. Для стабилизации частоты излучения предлагается использовать наноразмерную фотонно-кристаллическую ячейку, в потенциальную яму которой помещены охлаждённые молекулы йода. Реализация этой комплексной задачи требует выполнить ряд исследований, связанных с получением, манипуляцией и удержанием «холодных» частиц в фотонном кристалле. Должны быть разработаны специальные методы оценки и контроля состояния частиц. Сейчас температуру ансамбля частиц определяют баллистическим методом. Облако «холодных» частиц подсвечивают тестовым лазерным излучением и при помощи ПЗС-камеры

фиксируют размеры разлетающегося облака через равные промежутки времени.

Определяя таким образом скорость разлёта частиц, оценивают температуру охлажденного облака. Заметим, что описанный метод позволяет оценить температуру по завершении процесса охлаждения. Авторы предлагают подход, позволяющий оценить температуру ансамбля частиц в процессе охлаждения, без тестовой подсветки охлажденного облака [2].

Целью работы является исследование возможности оценки параметров ансамбля охлаждаемых частиц с применением энтропийного анализа.

2. ЛАЗЕРНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЯ В ОТКРЫТЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Процесс лазерного охлаждения основан на квантово-механических представлениях о поглощении и излучении энергии частицами. Локализованные движущиеся частицы облучаются лазерным излучением с частотой, меньшей частоты атомного перехода на величину доплеровского сдвига. Частица, поглотив фотон, переходит из основного энергетического состояния в возбужденное. При этом её скорость меняется на величину скорости отдачи. Затем частица, возвращаясь в основное состояние, излучает фотон, но уже с частотой, большей частоты поглощённого фотона. Это приводит к потере энергии и замедлению частицы и, как следствие, к снижению температуры вещества. Таким образом, импульс фотона передаётся частице при стимулированном поглощении и последующем спонтанном излучении фотона, рис. 1. Для следующего цикла «возбуждение — спонтанное излучение фотона» частота лазерного излучения уменьшается, подстраивается под новую скорость движения частиц. За N циклов частица теряет импульс равный $\Delta p = N\hbar k$, где $\hbar k$ –

импульс фотона. Количество циклов и частота излучения определяются электронной конфигурацией и скоростью движения частиц [3].

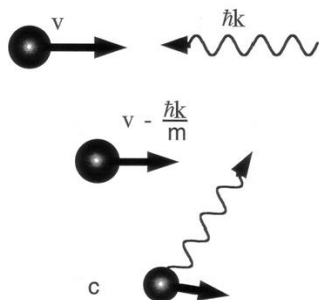


Рис. 1 – Процесс поглощения и переизлучения фотонов, ведущий к торможению частицы

Это первый этап (доплеровское охлаждение) позволяет достичь температуры в сотни мкК. После доплеровского охлаждения атомов щелочных металлов их температура составляет около 100 мкК. Для получения более низких температур применяются другие механизмы лазерного охлаждения: субдоплеровское и охлаждение ниже уровня отдачи. Минимальная температура при субдоплеровском охлаждении составляет около 1 мкК. Лазерное охлаждение ниже однофотонного уровня отдачи позволяет получить температуру около 100 нК.

Группа охлаждаемых частиц может быть описана как открытая диссипативная динамическая система. Понимание особенностей динамики таких систем привело авторов к созданию специальной теории измерений в открытых нелинейных динамических системах (нелинейная метрология). Теория рассматривается, как междисциплинарная, она построена на ключевых положениях теории открытых систем, динамического хаоса, теории информации, синергетики, методах топологического и фрактального анализа систем. Теория содержит принципиально новый подход к измерениям и оценке результатов измерений величин в системах со сложной, часто хаотической, динамикой, модели и математические инструменты анализа результатов измерения динамических переменных нелинейных динамических систем. Её задача заключается в исследовании сложных динамических диссипативных систем, измерении и анализе их динамических переменных. К таким задачам, к примеру, относится возникновение хаотических режимов и рассинхронизация мод в волоконных лазерах [4-5], а также исследование диссипативных солитонов. К инструментам нелинейной метрологии относится информационная энтропия Шеннона, как характеристика степени упорядоченности или хаотичности системы. Для оценки и управления параметрами сложных систем авторами предложены фрактально-энтропийный анализ и энтропийные шкалы.

Информационная энтропия Шеннона H , связана с плотностью распределения вероятности $p(X)$ исследуемой величины X :

$$H = -p(X) \log_2 p(X). \quad (1)$$

Энтропия H рассматривается как мера упорядоченности или, наоборот, хаотичности системы. Она зависит от интервала разброса значений исследуемой величины $[X_{min}, X_{max}]$ и закона распределения $p(X)$. При равных интервалах разброса значений наименьшее значение энтропия принимает в случае нормального распределения величины, наибольшее значение – в случае равномерного распределения величины. По мнению авторов, измерение энтропии (1) облака охлаждаемых частиц позволит оценивать температуру в процессе охлаждения после каждого цикла «поглощение – переизлучение фотонов».

3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ СИСТЕМ

Рассмотрим процесс лазерного охлаждения как взаимодействие двух систем. Первая система, это ансамбль локализованных частиц – система «атом», характеризуется средней скоростью движения $\langle v \rangle$ и температурой T :

$$T = \frac{\pi M}{8R} \langle v \rangle^2, \quad (2)$$

где M – молекулярная масса частиц; R – универсальная газовая постоянная.

Если система «атом» является равновесной, то распределение $p(v)$ частиц по скоростям v выражается законом распределения Максвелла:

$$p(v) = \frac{4v^2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right), \quad (3)$$

где m – масса частицы, k – постоянная Больцмана.

Броуновское движение частиц системы «атом», поглощение и излучение фотонов в процессе охлаждения позволяет отнести её к открытым, хаотичным, диссипативным системам.

Вторая система представляет собой лазерный импульс, характеризующийся частотой f_0 и уширением линии излучения Δf_0 – система «лазер». При этом распределение интенсивности излучения по частотам f подчиняется нормальному закону распределения Гаусса:

$$p(f) = \frac{1}{\Delta f_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(f - f_0)^2}{2\Delta f_0^2}\right). \quad (4)$$

Стабилизированное по частоте одномодовое лазерное излучение характеризуется высокой степенью когерентности $\Delta f_0 / f_0 \ll 1$ (в научных лабораториях значения $\Delta f_0 / f_0$ достигают 10^{-15} – 10^{-17}). Систему «лазер», можно отнести к детерминированным системам, Её параметры остаются в прогнозируемых границах в течение времени наблюдения.

Рассмотрим взаимодействие систем с позиций информационной теории. Предположим, что на

процесс взаимодействия двух систем не влияют другие системы. Система «атом плюс лазер» в рамках одного цикла «поглощение – переизлучение фотонов» является изолированной. Для контроля состояния систем введём информационную энтропию Шеннона H (1). Энтропия одномодового лазерного излучения при $\Delta f_0 \rightarrow 0, H \rightarrow 0$. Энтропия ансамбля частиц определяется распределением Максвелла. Её значение занимает промежуточное место между значениями энтропии для нормального и равномерного распределений при $T \rightarrow 0, H \rightarrow 0$, рис. 2.

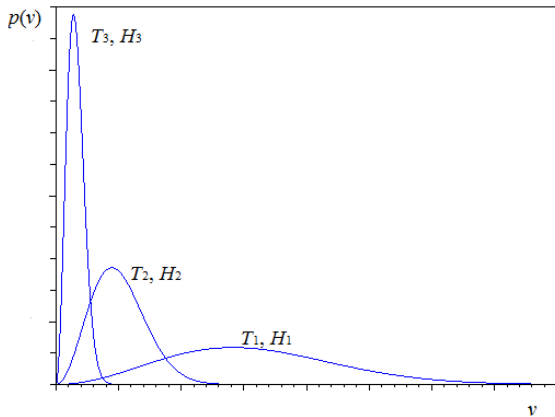


Рис. 2 – Распределение охлаждаемых частиц по скоростям: $T_1 > T_2 > T_3, H_1 > H_2 > H_3$

В начальный момент времени t_0 (до взаимодействия лазерного импульса с частицами) система «атом» характеризуется средней скоростью движения частиц v_0 , температурой T_0 , и энтропией $H_A(f_0, t_0)$. Система «лазер» характеризуется частотой излучения $f_0 \pm \Delta f_0$, и энтропией $H_L(f_0, t_0)$, рис. 3а. После прекращения взаимодействия (поглощение и переизлучение фотонов) в момент времени $t = \tau$ параметры систем меняются. Скорость движения молекул уменьшается, а частота спонтанного излучения f по сравнению с частотой f_0 возрастает, уширяется спектральная линия излучения Δf . Система «атом» приобретает характеристики: $v, T, H_A(v, t)$ система «лазер» характеристики: $f \pm \Delta f, H_L(f, \tau)$, рис. 3б.

Такое взаимодействие продолжается количество циклов, необходимое для достижения необходимой температуры вещества. Для системы «атом» и системы «лазер» выражения для энтропии Шеннона в моменты времени t_0 и τ имеют вид:

$$\begin{cases} H_A(v, t_0) = -p(v_0) \ln p(v_0) \\ H_L(f, t_0) = -p(f_0) \ln p(f_0) \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} H_A(v, \tau) = -p(v) \ln p(v) \\ H_L(f, \tau) = -p(f) \ln p(f) \end{cases}. \quad (6)$$

При этом: $H_A(v, \tau) < H_A(v, t_0)$ и система «атом» становится более упорядоченной; $H_L(f, \tau) > H_L(f, t_0)$ система «лазер» становится более хаотичной.

Это объясняется зависимостью энтропии Шеннона от вида плотности распределения функции и интервала значений величин.

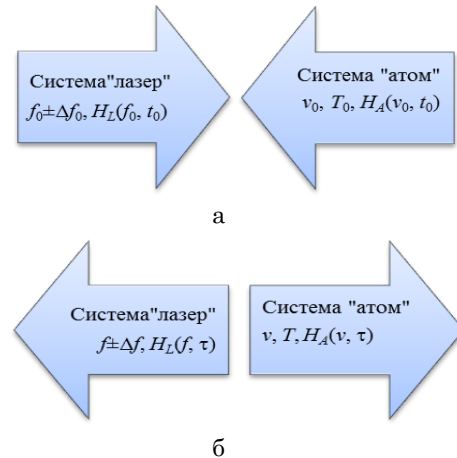


Рис. 3 – Схема взаимодействия системы «лазер» и системы «атом»: а) системы в момент начала взаимодействия $t = t_0$; б) системы в момент окончания взаимодействия $t = \tau$.

Так, после испускания частицами фотонов с большей частотой, чем частота поглощённых фотонов, скорость движения частиц уменьшается, пик функции распределения Максвелла (3) возрастает и смещается в сторону уменьшения скоростей. Энтропия системы «атом» уменьшается. Пик функции распределения интенсивности лазерного излучения смещается в сторону более высоких частот и соответствует резонансной частоте перехода для данного типа частиц. При этом происходит увеличение значения Δf_0 вследствие доплеровского уширения, значение уширения линии излучения растёт.

Изменение состояния систем можно выразить через количество информации, которое приобретается (информация о системе «атом» I_A) или теряется (информация о системе «лазер» I_L) в процессе взаимодействия систем:

$$\begin{cases} I_A = H_A(v, t_0) - H_A(v, \tau) = \Delta H_A \\ I_L = H_L(f, t_0) - H_L(f, \tau) = \Delta H_L \end{cases}. \quad (7)$$

Воспользовавшись законом сохранения информации, согласно которому «количество информации в закрытой системе остаётся неизменной», из выражений (7) получим равенство:

$$|\Delta H_A| = |\Delta H_L|. \quad (8)$$

Согласно выражению (8) изменение энтропии системы «лазер» по модулю равно изменению энтропии системы «атом». Это равенство позволяет, анализируя изменение параметров системы «лазер»,

оценивать параметры системы «атом».

Минимальное значение энтропия системы «атом» $H_A(\nu) = 0$, принимает при отсутствии теплового движения частиц. Выражение (8) в любой момент времени можно представить в виде:

$$|\Delta H_A(\Delta T)| = |\Delta H_L(\Delta f)|. \quad (9)$$

Равенство (9) с учётом (3), (4), (7) позволит определить связь между изменением энтропии системы «лазер», энтропии и температуры системы «атом»:

$$\Delta T = \Delta T \left[|\Delta H_L(\Delta f)| \right]. \quad (10)$$

Выражения (4) - (10) позволяют определить изменения энтропии и температуры системы «атом» в моменты времени t_0 и τ , а также выражение для разности энтропии (7) ΔH_L :

$$\begin{cases} H_L(f, t_0) = \ln(\Delta f_0 \sqrt{2\pi e}) \\ H_L(f, \tau) = \ln(\Delta f \sqrt{2\pi e}) \\ |\Delta H_L(\Delta f)| = \left| \ln \frac{\Delta f_0}{\Delta f} \right| \end{cases} \quad (11)$$

Таким образом, на значение энтропии системы «лазер» влияет изменение значения уширения линии излучения Δf . Измеряя частоту спонтанного излучения и оценивая изменение его энтропии (11), имеется возможность оценки изменения энтропии и температуры системы охлаждённых частиц после любого количества циклов «поглощение – спонтанное излучение фотона», что открывает возможности контроля процесса охлаждения и оценки температур с малыми дискретными значениями ΔT .

Для реализации этой задачи авторами предлагается энтропийная шкала оценки температуры охлаждаемых частиц. Опираясь на

выражение плотности распределения частиц по скоростям $p(\nu)$ (3) и выражение для энтропии Шеннона $H_A[p(\nu)]$ составляется непрерывная двумерная шкала значений в пространстве «температура-энтропия» (T, H_A) . Реперная точка шкалы $H_A = 0$ при $T = 0$.

Опираясь на равенство приращения энтропий $|\Delta H_A(\Delta T)| = |\Delta H_L(\Delta f)|$ (9) и результат измерения частоты рассеянного излучения Δf (11), используя энтропийную шкалу, становится возможным оценить изменение средней скорости $\Delta \langle \nu \rangle$ и температуры ΔT (2) ансамбля охлаждаемых частиц. Таким образом, применение информационно-энтропийного подхода и энтропийной шкалы позволяет оценить температуру ансамбля частиц в процессе лазерного охлаждения в любой момент времени.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами исследована возможность оценки параметров ансамбля охлаждаемых лазерным способом частиц (атомов, ионов, молекул) с применением энтропийного анализа.

Задача лазерного охлаждения рассматривается с позиций теории открытых систем и нелинейной метрологии. Показано, что лазерное охлаждение представляет собой процесс взаимодействия детерминированной системы лазерного излучения с хаотичной системой частиц.

Для оценки параметров охлаждённых частиц и контроля процесса охлаждения предложено использовать информационно-энтропийный подход. Получено выражение для оценки энтропии ансамбля частиц, как функции частоты рассеянного лазерного излучения.

Авторами предложена энтропийная шкала оценки температуры охлаждаемых частиц. Её применение позволяют оценивать температуру ансамбля частиц в процессе охлаждения.

Entropy Evaluation of the Laser Cooling Process

Yu.S. Kurskoy, Yu.P. Machekhin, A.S. Gnatenko

Kharkiv National University of Radio Electronics, 14, Nauka Ave, 61166 Kharkiv, Ukraine

The paper deals with the problem of laser cooling of particles (atoms, ions, molecules). The possibility of estimating the parameters of the ensemble of cooled particles with the use of entropy analysis is investigated. The cooling process is considered from the standpoint of the open systems theory and nonlinear metrology theory. It is shown that laser cooling is a process of interaction of a deterministic system of laser radiation with a chaotic system of particles in the Brownian motion. The authors suggest to use the information-entropy approach to estimate the velocity and temperature of an ensemble of particles and process control. It is obtained the formula for estimation of entropy of an ensemble of particles as a function of a frequency of scattered radiation and an entropy scale for evaluating the temperature of the cooled particles is proposed too.

Key words: Laser cooling of particles, Shannon entropy, Maxwell distribution, Entropy scale.

Ентропійна оцінка процесу лазерного охолодження

Ю.С. Курський, Ю.П. Мачехін, О.С. Гнатенко

Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, 61166 Харків, Україна

В роботі розглядається задача лазерного охолодження частинок (атомів, іонів, молекул). Досліджено можливість оцінки параметрів ансамблів частинок із застосуванням ентропійного аналізу. Процес охолодження розглядається з позицій теорії відкритих систем і нелінійної метрології. Показано, що лазерне охолодження представляє собою процес взаємодії детермінованої системи лазерного випромінювання з хаотичною системою частинок, що перебувають у броунівському русі. Для оцінки швидкості та температури ансамблю частинок, та контролю процесу авторам пропонується використовувати інформаційно-ентрологічний підхід. Отримано вираз для оцінки ентропії ансамблів частинок, як функції частоти розсіяного випромінювання, та запропонована ентропійна шкала оцінки температури охолоджуваних частинок.

Ключові слова: Лазерне охолодження частинок, Ентропія Шеннона, Розподіл Максвелла, Ентропійна шкала.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Yu.P. Machehkin, A.S. Gnatenko, Y.S. Kurskoy, *Telecommunications and Radio Engineering* **77** No 13, 1169 (2018).
2. Д.Д. Сукачев, А.В. Соколов, Н.Н. Колачевский, Е.С. Калганова, А.В. Акимов, В.Н. Сорокин, *Наносистемы: физика, химия, математика* **3**, No 1, 125 (2012) (D.D. Sukshev, A.V. Sokolov, N.N. Kolachevskiy, E.S. Kalganjva, A.V. Akimov, V.N. Sorokin, *Nonosistemy: fizika, himija, matematika*, **3** No 1, 2012) [In Russian].
3. D.W. Philips, *Laser colling and trapping of neutral atoms, Nobel lecture* (1997).
4. A.S. Gnatenko, Yu.P. Machehkin, Yu.S. Kurskoy, V.P. Obozna, *J. Nano- Electron. Phys.* **10** No 2, 02033 (2018).
5. A.S. Gnatenko, Y.P. Machechin, *Telecommunications and Radio Engineering* **74** No 7, 641 (2015).