

Характеризация временной зависимости лазерного охлаждения ионов в радиочастотной Пауля

Прудников Олег Николаевич, ИЛФ СО РАН, НГУ, 19.05.2023

Состав коллектива:

- Прудников Олег Николаевич, д.ф.-м.н., г.н.с. ИЛФ СО РАН, доцент НГУ

Аннотация:

Лазерное охлаждение ионов в радиочастотных ловушках лежат в основе множества современных исследований, направленных на создание нового поколения сверхточных атомных часов, а также при исследовании и реализации элементов квантовой логики в ионных кристаллах. Кроме того, холодные ионы являются перспективными для реализации современных экспериментов по проверки фундаментальных законов природы в том числе теста фундаментальных констант, работ в области релятивистской геодезии, теста фундаментальных принципов, таких как локальная Лоренцева инвариантность пространства, а также поиска темной материи. Реализация методов эффективного, т.е. быстрого и одновременно глубокого лазерного охлаждения ионов является актуальной задачей для данных исследований.

1. Современное состояние

Для реализации лазерного охлаждения ионов в радиочастотной ловушке Пауля выделяют замкнутый оптический переход. Резонансное световое поля лазерного излучения приводит к вынужденным переходам между основным и возбужденными состояниями выделенного оптического перехода. При выборе отстройки частоты светового поля равной частоте колебательного кванта ω_{osc} иона в ловушке, реализуется так называемый режим лазерного охлаждения – режим боковых полос, когда при каждом акте взаимодействия иона с полем излучаются преимущественно фотоны с частотой ω_0 (равной частоте оптического перехода), а поглощаются фотоны с частотой $\omega_0 - \omega_{\text{osc}}$. Данный дисбаланс в энергии определяет процесс лазерного охлаждения иона в ловушке. Стоит отметить, что теория лазерного охлаждения ионов в радиочастотной ловушке Пауля была предложена на зале работ по лазерному охлаждению. В частности описаны пределы лазерного охлаждения ионов и кинетика процессов в рамках упрощенной модели применимой для малых

интенсивностей светового поля (см. например [1,2]. В частности в данных работах было показано, что скорость лазерного охлаждения возрастает пропорционально интенсивности лазерного поля, а при этом достижимая температура лазерного охлаждения иона также растет с ростом интенсивности поля. При этом условия достижения минимальных температур в представленной теории несовместимы с условиями быстрого охлаждения ионов.

2. Реализация режимов «эффективного охлаждения» иона в радиочастотной ловушке Пауля

В рассматриваемом в рамках проекта исследовании мы уделили внимание построению более полной теории, позволяющей описать как пределы лазерного охлаждения, так и скорость вне рамок ранее рассматриваемого приближения малых интенсивностей светового поля. Интерес к данному вопросу прежде всего связан с поиском режимов быстрого и одновременно глубокого лазерного охлаждения ионов. Такая задача является актуальной при реализации глубокого лазерного охлаждения ионов с использованием узких линий. Например, ион $^{115}\text{In}^+$ где для лазерного охлаждения может быть использован оптический переход интеркомбинационный оптический переход $^1S_0 - ^3P_1$ ($\gamma = 360\text{kHz}$, $\lambda = 230\text{nm}$), или квадрупольный переход иона иттербия $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$ ($\gamma = 24.3\text{s}^{-1}$, $\lambda = 411\text{nm}$) уширенный полем на переходе $^2D_{5/2} - ^2P_{3/2}$ ($\lambda = 1650\text{nm}$). Здесь эффективная ширина также может достигать сотен кГц.

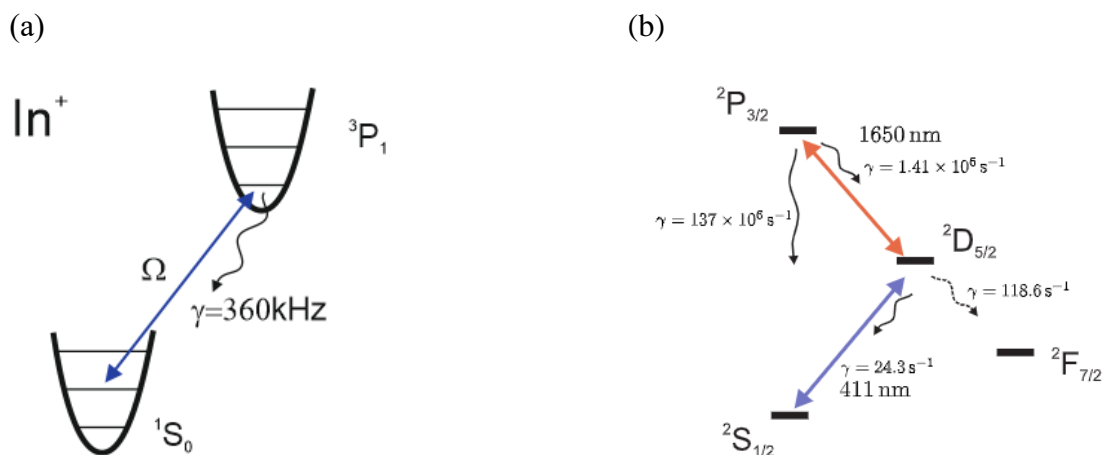


Рис.1. Схема низлежащих уровней иона $^{115}\text{In}^+$ (a) и иона $^{172}\text{Yb}^+$ (b) для реализации глубокого лазерного охлаждения, т.е. до температур ниже доплеровского предела.

Стоит отметить, что при использовании узких оптических переходов поиск эффективных режимов для быстрого и одновременно глубокого лазерного охлаждения является весьма

актуальной задачей. Действительно, следуя стандартной теории при выборе малых интенсивностей светового поля, время лазерного охлаждения может достигать неприемлемо больших значений, что фактически не позволит достичь предсказываемого теорией результата.

Для построения полной теории лазерного охлаждения иона в радиочастотной ловушке Пауля мы воспользовались предложенным нами подходом «матрицы временных характеристик», позволяющей свести сложную динамическую задачу к более простому уравнению для «матрицы временных характеристик» описывающую динамические характеристики квантовой системы. В частности можно выделить временные характеристики, описывающие кинетический этап эволюции – т.е. характерное время лазерного охлаждения. Проведенный анализ динамической задачи позволил выделить основные закономерности временной задачи лазерного охлаждения.

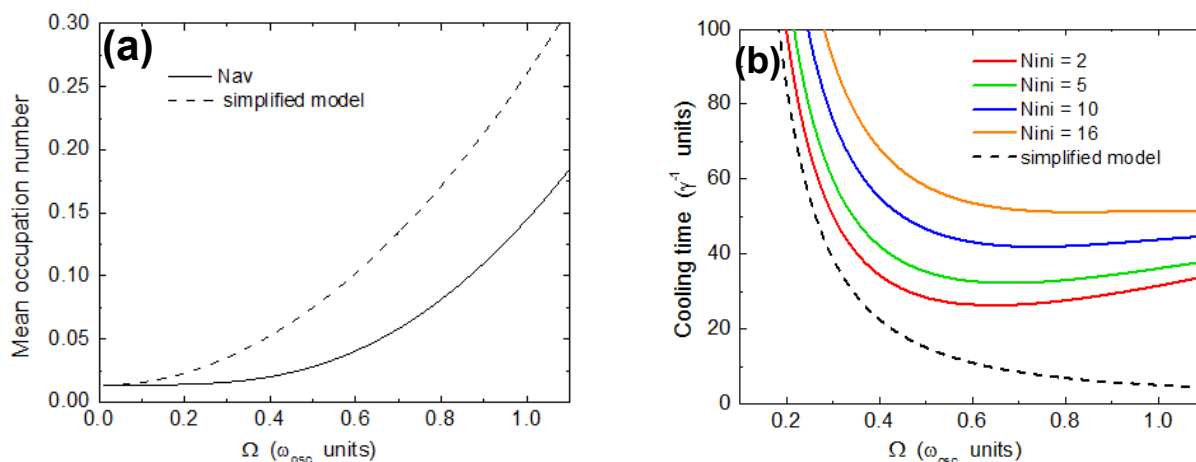


Рис.2 Достижимая при лазерном охлаждении средняя населенность колебательных состояний иона $^{115}\text{In}^+$ в ловушке (a) и время лазерного охлаждения (b) для различных начальных средней населенности колебательных состояний N_{ini} . Пунктирной линией указаны результаты получаемые в рамках упрощенной модели [2]. Параметры для иона $^{115}\text{In}^+$ (параметр Лэмба-Дике $\eta = 0.16$, $\omega_{osc}/2\pi = 1200\text{kHz}$, $\gamma/2\pi = 360\text{kHz}$).

В частности показано, что в отличие от предсказаний ранней упрощенной модели [J. Javanainen, S. Stenholm Appl. Phys. v. 24,151-162 (1981)], время лазерного охлаждения имеет минимум при некоторых умеренных интенсивностях лазерного поля. Также при данных интенсивностях температура несколько возрастает, по сравнению с минимальными значениями достижимыми в пределе малых интенсивностях, но не так сильно, как это предсказывалось упрощенной теорией. Таким образом можно выделить условия для «эффективного лазерного охлаждения», т.е. одновременно быстрого и глубокого. Действительно при указанных условиях «эффективного лазерного охлаждения» время

охлаждения существенно уменьшается, а температура лишь на несколько процентов выше достижимого минимального предела. Также показано, что время лазерного охлаждения пропорционально средней начальной населенности колебательных состояний.

Нами проведен подробный анализ условий эффективного лазерного охлаждения для различных параметров ионной ловушки и ионной системы. Получены общие закономерности для оптимальных условий, которые можно выразить в виде следующих соотношений.

Минимальное время лазерного охлаждения достигается при отстройке лазерного поля $\delta = -\omega_{osc}$ и для частот Раби светового поля

$$\Omega_{\tau} = \sqrt{1.24 \gamma \omega_{osc}} \quad (1)$$

где γ - ширина оптического перехода, ω_{osc} - частота колебания иона в ловушке. При этом время лазерного охлаждения

$$\tau_{min} = \frac{1.2 + 2\bar{N}_{ini}}{\gamma} + \frac{1.9}{\eta^2 \omega_{osc}} \quad (2)$$

определяется средним начальным колебательным числом \bar{N}_{ini} (начальной температурой) и зависит от параметра Лэмба-Дике $\eta = \sqrt{\omega_R / \omega_{osc}}$, где $\hbar\omega_R = \hbar^2 k^2 / 2M$ - энергия отдачи, получаемая неподвижным ионом при излучении единичного фотона поля.

Отметим, что оптимальная частота Раби не зависит от параметра Лэмба-Дике при его малых значениях Рис.3.

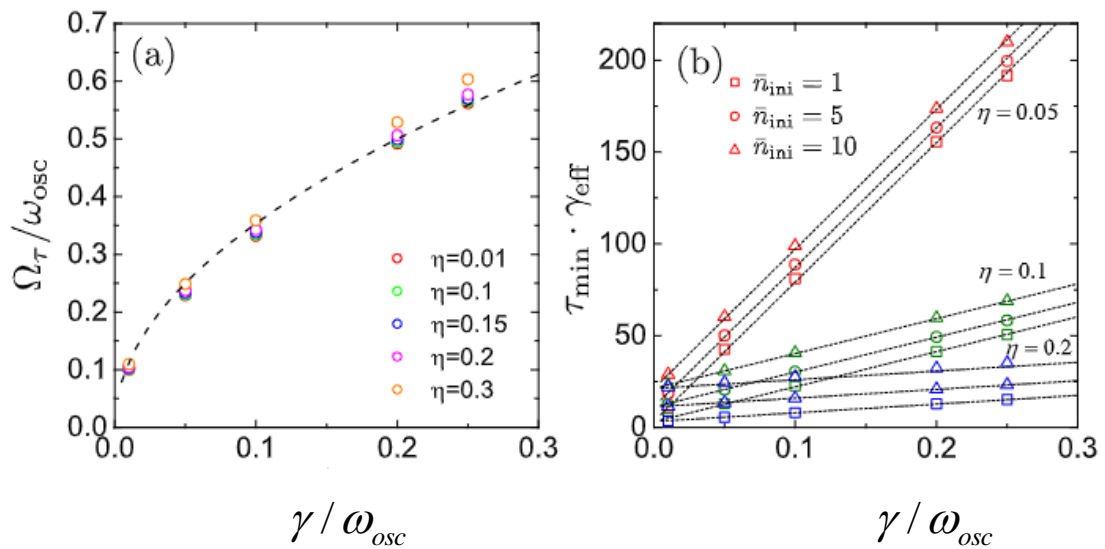


Рис. 3 Оптимальная частота Раби охлаждающего поля (а) и минимальное время лазерного охлаждения (б) для охлаждения иона в режиме Лэмба Дике ($\eta \ll 1$) при отстройке $\delta = -\omega_{osc}$. Символами обозначены значения, полученные в результате непосредственных

вычислений, пунктирными линиями – результаты вычислений на основе представленных аппроксимированных выражений (1) и (2).

3 Заключение

Представленные аппроксимированные выражения для оптимальных условий лазерного охлаждения представляют важную практическую ценность поскольку позволяют для любого иона в ловушке Пауля в условиях Лэмба-Дике определить условия для наиболее быстрого и глубокого лазерного охлаждения. Представленные результаты существенно расширяют теорию лазерного охлаждения иона в радиочастотной ловушке.

4 Результаты работы опубликованы:

A. P. Kulosa, O. N. Prudnikov, D. Vadlejch, H. A. Fürst, A. A. Kirpichnikova, A. V. Taichenachev, V. I. Yudin, and T. E. Mehlstäubler, “Systematic study of tunable laser cooling for trapped-ion experiments”, *New J. Phys.* v.25, 053008 (2023) DOI 10.1088/1367-2630/acd13b

Цитируемая литература

1. D. J. Wineland W.M. Itano ‘Laser cooling of atoms’, *PRA* v. 20, 1521 (1979);
2. J. Javanainen, S. Stenholm, *Appl. Phys.* v.24 151 (1981)