

ДОПЛЕРОВСКОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ИОНА ИТТЕРБИЯ-171 ПОЛЕМ ТРЕХ ЧАСТОТНЫХ КОМПОНЕНТ*

Д. С. Крысенко^{1,3}, ✉О. Н. Прудников^{2,3}

¹Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

✉oleg.prudnikov@gmail.com

На сегодняшний день оптические стандарты частоты на основе холодных ионов, имея характерный уровень точности $\Delta\nu/\nu < 10^{-18}$, применяются для проверки фундаментальных физических теорий, теста лоренц-инвариантности пространства [1], проверки постоянства физических констант, поиска темной материи [2, 3]. Одним из факторов, существенно ограничивающих дальнейший прогресс в области высокой точности стандартов частоты, является систематический частотный сдвиг, вызываемый квадратичным эффектом Зеемана. Основная трудность в минимизации магнитного поля заключается в том, что классическая схема лазерного охлаждения иона иттербия-171 предполагает использование по меньшей мере двух частотных компонент, резонансных переходам (рис. 1) $^2S_{1/2}(F=0) \rightarrow ^2P_{1/2}(F=1)$, $^2S_{1/2}(F=1) \rightarrow ^2P_{1/2}(F=0)$, а также внешнего магнитного поля величиной от 1–10 Гс, необходимого для устранения эффекта когерентного пленения населенности (КПН) на уровне $^2S_{1/2}(F=1)$. Поэтому поиск альтернативных методов лазерного охлаждения ионов является актуальной задачей.

В данной работе проводится детальное исследование возможности доплеровского охлаждения иона иттербия-171 с использованием поля трех частотных компонент, каждая из которых является резонансной соответствующему переходу и оказывает механическое воздействие на ион в ловушке.

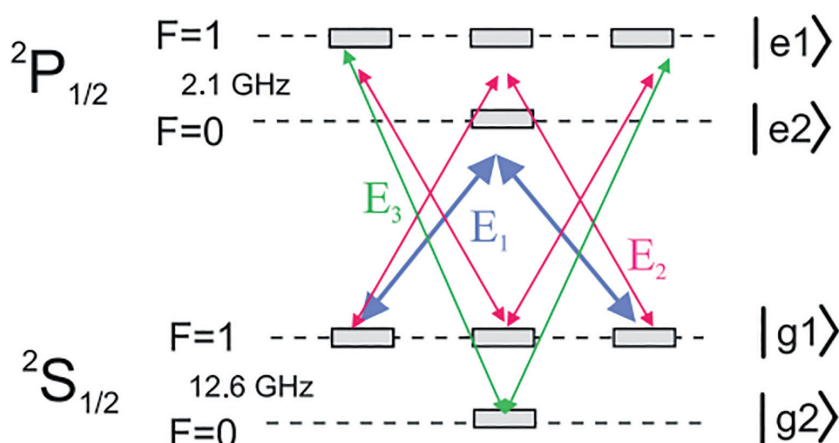


Рис. 1. Схема уровней сверхтонких компонент состояний $^2S_{1/2}$ и $^2P_{1/2}$, используемых для реализации лазерного охлаждения. Сплошными линиями указаны вынужденные резонансные переходы, вызванные действием каждой из частотных компонент

* Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-22-00198).

© Д. С. Крысенко, О. Н. Прудников, 2024

В результате работы было получено аналитическое выражение для температуры лазерного охлаждения (1), определяемой параметрами насыщения $s_i = |\Omega_i|^2 / (\gamma^2 + 4\delta_i^2) \ll 1$, $i = 1, 2, 3$ каждой из частотных компонент в пределе малой интенсивности светового поля. Здесь $\mu_i = \gamma\delta_i / (\delta_i^2 + \gamma^2 / 4)$, $i = 1, 2, 3$ — безразмерный параметр, Ω_i — частота Раби i -компоненты поля, а δ_i — отстройка i -компоненты от частоты соответствующего резонансного перехода.

$$k_B T_D = \hbar\gamma \frac{1}{24} \frac{[4s_1 s_2 s_3 (s_1 + s_3) - 53s_2^2 (s_1^2 + s_3^2) + 2s_1 s_3 (19s_2^2 - 34s_1 s_3)]}{(s_1 s_2 + s_2 s_3 + 2s_1 s_3)(s_1 s_2 \mu_3 + s_2 s_3 \mu_1 + 2s_1 s_3 \mu_2)} \quad (1)$$

Также в результате работы была решена задача оптимизации параметров лазерного охлаждения: найдена минимальная температура лазерного охлаждения, достигаемая при значениях отстроек и частот Раби, соответствующих (2).

$$\begin{aligned} \Omega_1 = \Omega_2 = \Omega_3 = \Omega \\ \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = -\gamma / 2 \end{aligned} \quad (2)$$

Показано, что минимальная температура доплеровского охлаждения достигается при равенстве частот Раби и отстроек от резонанса всех частотных компонент (рис. 2). Минимум температуры охлаждения иона иттербия соответствует доплеровскому пределу $k_B T_{\min} = \frac{1}{3} \hbar\gamma$.

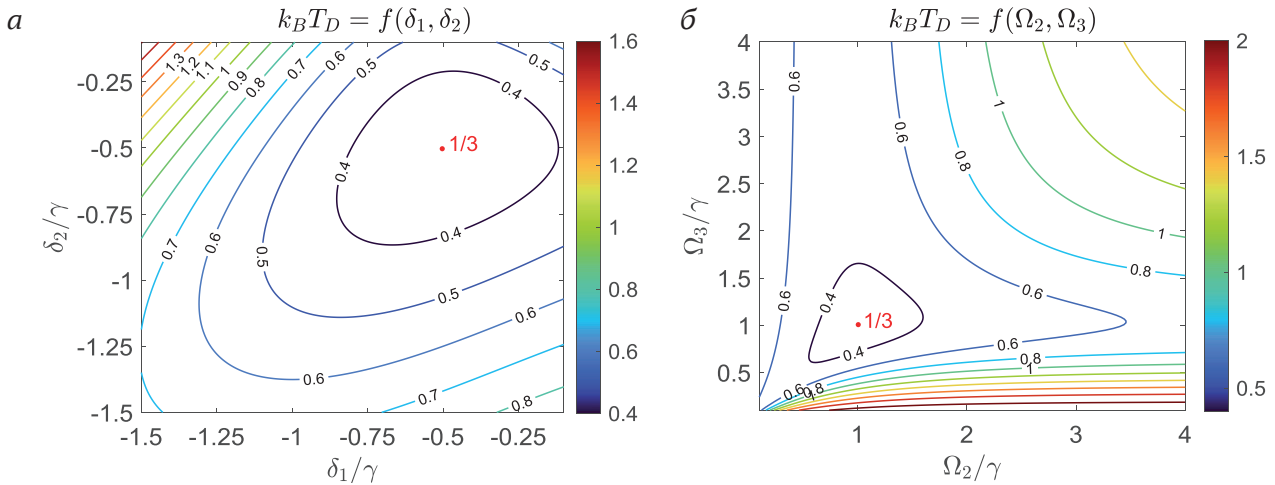


Рис. 2. Зависимость температуры охлаждения в единицах $\hbar\gamma/k_B$:
 а — от отстроек частотных компонент при $\delta_3 = -\gamma / 2$, $\Omega = \gamma$, частоты Раби удовлетворяют условию (2); б — от частот Раби при $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = -\gamma / 2$, $\Omega_1 = \gamma$

Литература

1. Dzuba V., Flambaum V. V. et al. // Nature Phys. 2016. Vol. 12. P. 465.
2. Arvanitaki A., Huang J., Tilburg K. V. // Phys. Rev. D. 2015. Vol. 91. P. 015015.
3. Stadnik Y. V., Flambaum V. V. // Phys. Rev. Lett. 2015. Vol. 115. P. 201301.