

ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛИЧЕСТВА АТОМОВ ТУЛИЯ В МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ

Хоружий Кирилл

От: 6 мая 2023 г.

Содержание

1	Введение	3
1.1	Цели	3
2	Экспериментальная установка	4
2.1	Печь	4
2.2	Зеемановский замедлитель	5
2.3	Магнито-оптическая ловушка	7

Аннотация

1 Введение

1.1 Цели

Печь. На данный момент хочется провести калибровку по температуре для печи. Для этого смотрим на мощность флюоресценции на выходе из печи, как на функцию температуры. Сравниваем с исходной калибровкой и калибровкой, полученной по точкам плавления меди и алюминия.

Зееман. Варьируя параметры отстройки и мощности, добиться такой же загрузки МОЛ при сохранение количества атомов в МОЛ. Найти, как от параметров зеемана зависит v_{crit} , v_{cool} , N_{cool} .

2 Экспериментальная установка

2.1 Печь

Расход атомов. В печи нагревается тулий до температуры T , вылетает из сопла диаметра D_{ov} , площади $S_{\text{ov}} = \pi D_{\text{ov}}^2/4$, длины L_{ov} . Полный поток атомов тулия [1] может быть определён, как

$$\Phi_{\text{tot}} = \frac{1}{4} n_{\text{sat}} \bar{v} S_{\text{ov}},$$

где $\bar{v} = \sqrt{8k_{\text{B}}T/\pi m}$ – средняя тепловая скорость, $n_{\text{sat}} = P_{\text{sat}}/k_{\text{B}}T$ – концентрация атомов в печи, зависимость $P_{\text{sat}}(T)$ для тулия приведена в [2] (точность в пределах $\pm 5\%$ в диапазоне 300-1400 K):

$$P_{\text{sat}}(T)[\text{Па}] = 101325 \times 10^{8.882 - 12270 T^{-1} - 0.9564 \log_{10} T}.$$

Время работы печи тогда может найти, как $t_{\text{life}} = N_{\text{tm}}/\Phi_{\text{tot}}$.

Поток атомов на выходе. В соответствии с [3], вероятность вылететь из печи пропорциональна скорости v , поэтому максвелловское распределение модифицируется. Поток атомов со скоростью меньшей некоторой v_{crit} на выходе из печи может быть найден [1], как

$$\Phi_{\text{sol}} = \int_0^{\Omega_{\text{sol}}} d\Omega \frac{\cos \theta}{4\pi} \frac{1}{\mathcal{N}} \int_0^{v_{\text{crit}}} v^3 e^{-(v/\alpha)^2} dv \approx \frac{\Omega_{\text{sol}}}{4\pi} \frac{1}{\mathcal{N}} \int_0^{v_{\text{crit}}} v^3 e^{-(v/\alpha)^2} dv,$$

где $\alpha = \sqrt{2k_{\text{B}}T/m}$ – наиболее вероятная скорость, $\mathcal{N} = \int v^2 e^{-(v/\alpha)^2} dv = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \alpha^3$ – нормирующий множитель распределения по скоростям.

Распределение по скоростям. Считая, что из печи вылетают только атомы с $v_r/v_z < \varphi_{\text{ov}} \approx D_{\text{ov}}/L_{\text{ov}}$, можем оценить распределение по v_z

$$f(v_z) \propto \int_0^\infty v_r e^{-(v_r/\alpha)^2} v_z e^{-(v_z/\alpha)^2} \theta(\varphi_{\text{ov}} - v_r/v_z) dv_r \propto \frac{\varphi_{\text{ov}}^2}{\alpha^2} v_z^3 e^{-(v_z/\alpha)^2}.$$

Аналогично можем посмотреть на распределение в радиальном направлении

$$f(v_r) \propto \frac{2}{\alpha^2} \int_0^\infty v_r e^{-(v_r/\alpha)^2} v_z e^{-(v_z/\alpha)^2} \theta(\varphi_{\text{ov}} - v_r/v_z) dv_z \propto v_r e^{-(v_r/\alpha\varphi_{\text{ov}})^2}.$$

2.2 Зеемановский замедлитель

Магнитное поле. Для использующегося зеемановского замедлителя зависимость [4] магнитного поля B_{exp} от координаты z представлена на рис. 1. В соответствии с [5] магнитное поле эффективно замедляет атомы, при $B(z) \propto \sqrt{1 - z/z_0}$, на рисунке 1 видно, что эта зависимость достаточно хорошо приближает $B_{\text{exp}}(z)$. Параметры аппроксимации: $z_0 = (94 \pm 1)$ см, $\delta z = (15 \pm 1)$ см, $B_0 = (740 \pm 13)$ Гс, $B_1 = (260 \pm 12)$ см.

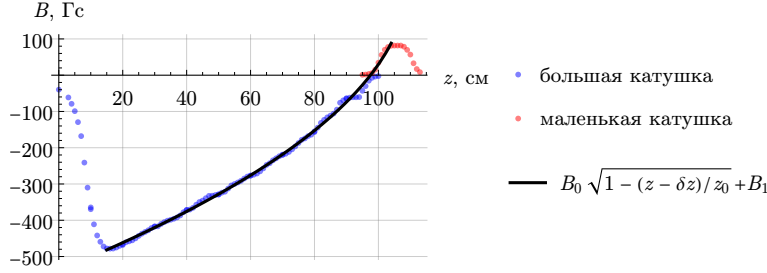


Рис. 1: Зависимость магнитного поля внутри зеемановского замедлителя от координаты

Тормозящая сила. Считая, что мы работаем с циклическим переходом (указать каким), в приближение двухуровневой системы, эффективное сила, действующая со стороны лазерного луча на атом, может быть записана в виде¹ (добавить ссылку)

$$F = \frac{\hbar k \Gamma}{2} \frac{s}{1 + s + 4(\delta + kv)^2 / \Gamma^2}$$

где $s = I/I_{\text{sat}}$ – параметр насыщения, I_{sat} – интенсивность насыщения, v – скорость атома, k – волновой вектор.

Уравнение движения запишется в виде

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m}, \quad v dt \stackrel{\leftrightarrow}{=} dz \quad \frac{dv(z)}{dz} = \frac{F(v, z)}{m v(z)},$$

где m – масса атома. Таким образом можем найти зависимость $v(z)$ для различных $v_0 \stackrel{\text{def}}{=} v(z=0)$, характерный вид приведен на рис. 2 для $\delta = -20\Gamma$, $s = 20$, $B(z) \approx B_{\text{exp}}(z)$.

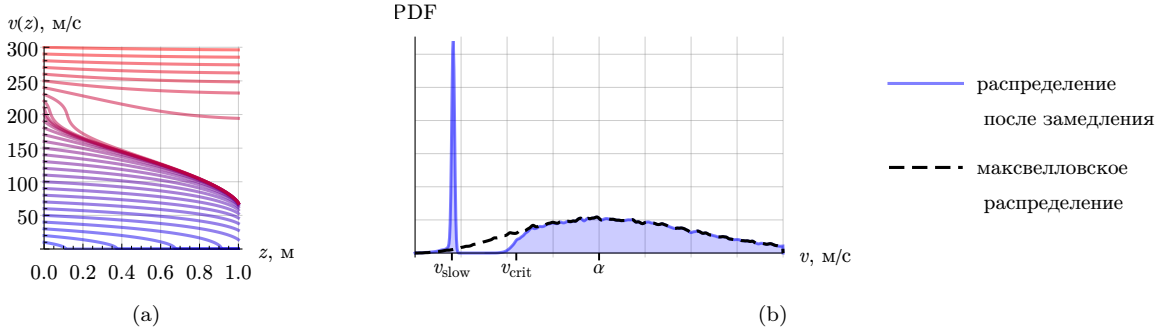


Рис. 2: а) Зависимость скорости атомов от координаты в зеемановском замедлителе. б) Характерное преобразование распределения атомов по скоростям после замедления

Для атомов со скоростями $v < v_{\text{crit}}$ замедлитель работает эффективно и замедляет до некоторой характерной v_{slow} , рядом с которой атомы распределены на масштабе (добавить ссылку) $\frac{1}{2}\Gamma\sqrt{1 + s/k}$, характерное преобразование распределения² атомов по скоростям приведено на рис. 2б, полученное в результате моделирования методом Монте-Карло для 10^5 частиц. Обычно для зеемановского замедлителя выполняется, что $v_{\text{crit}} < \alpha$.

¹ Нагрев, связанный с изотропным излучением фотона, приводящий во время движения к случайным блужданиям в пространстве поперечных скоростей в данной работе не рассматривается, потери связанные с этим эффектом обычно ограничиваются 10% (добавить ссылку).

² Забавный факт. Впервые данный способ охлаждения атомов применялся [6] для охлаждения Na до 1.5 К в продольном направлении в 1981 году.

Эффективность замедлителя. Рассмотрим поток частиц, долетающих до замедлителя с учётом геометрии системы: $v_r/v_z < \varphi_{\text{in}} \sim 1/40$. Частицы распределены в соответствии с [\(добавить ссылку\)](#)

$$f(v_z, v_r) \propto v_r e^{-(v_r/\alpha)^2} v_z e^{-(v_z/\alpha)^2} \theta(\varphi_{\text{in}} - v_r/v_z). \quad (2.1)$$

В дальнейшем в моделировании будет использоваться 10^6 частиц из распределения (2.1) для $\alpha = 300$ м/с.

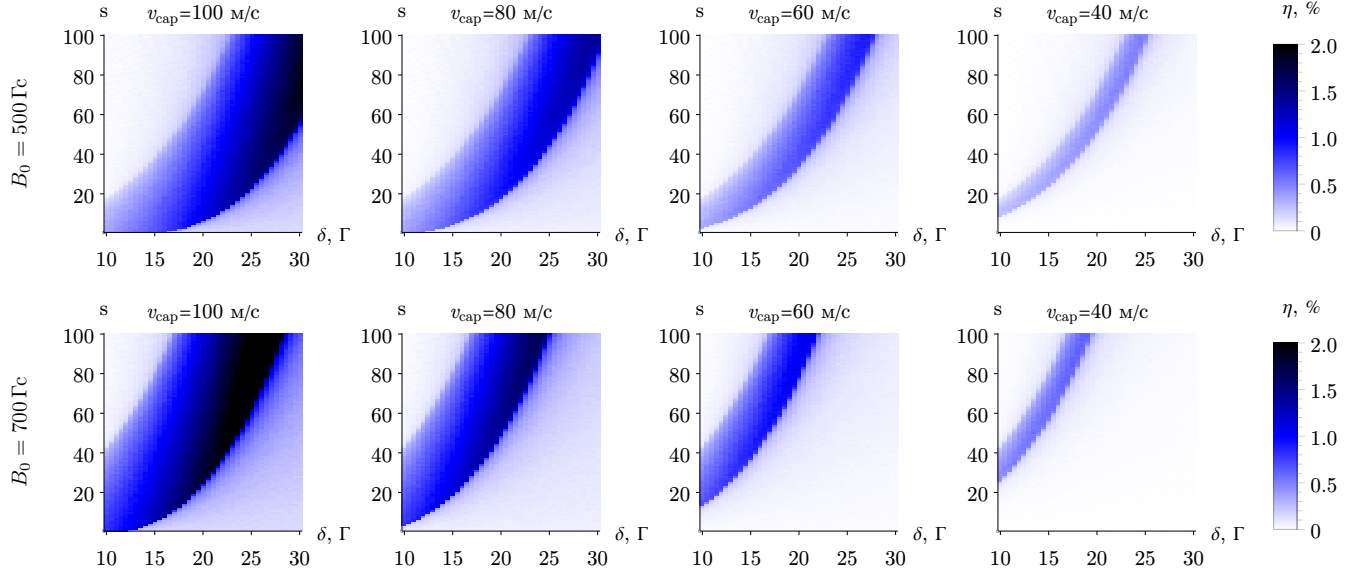


Рис. 3: Эффективность работы замедлителя

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

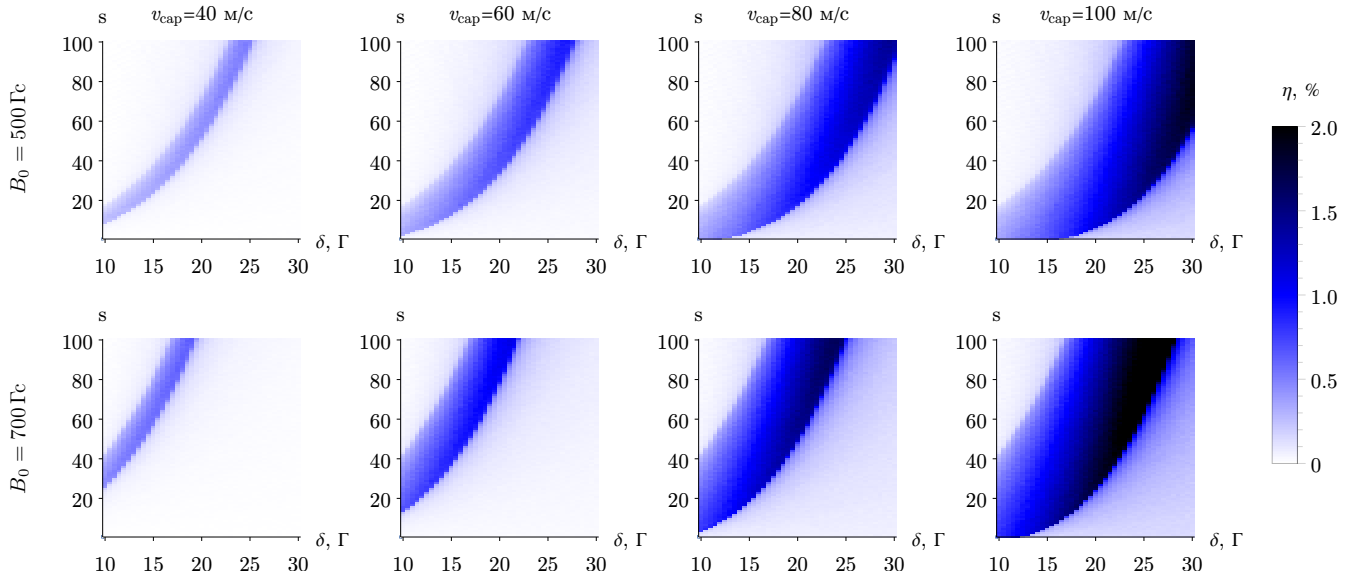


Рис. 4: Эффективность работы замедлителя

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

2.3 Магнито-оптическая ловушка

- Посмотреть, как связаны η и $N_{\text{МОТ}}(t_{\text{load}})$.

Динамика количества атомов в МОЛ

Количество атомов в ловушке N после загрузки описывается уравнением [4]

$$\frac{dN}{dt} = -\gamma N - \beta \int_V n(\mathbf{r}, t)^2 d^3\mathbf{r},$$

где γ – коэффициент линейных потерь, обусловленных столкновениями с буферным газом, β – скорость неэластичных бинарных столкновений, $n(\mathbf{r}, t)$ – концентрация атомов, V – объем атомного облака.

Список литературы

- [1] T. G. Tiecke, S. D. Gensemer, A. Ludewig, and J. T. M. Walraven. High-flux two-dimensional magneto-optical-trap source for cold lithium atoms. *Physical Review A*, 80(1), 2009.
- [2] C B Alcock, V P Itkin, and M K Horrigan. Vapour Pressure Equations for the Metallic Elements: 298–2500K. 1983.
- [3] N. Ramsey. *Molecular Beams*. International series of monographs on physics. OUP Oxford, 1985.
- [4] В. В. Цыганок. *Глубокое лазерное охлаждение атомов туля в оптической дипольной ловушке*. PhD thesis, МФТИ, 2020.
- [5] Jacob Oliver Stack. *An Ultra-Cold Lithium Source For Investigating Cold Dipolar Gases*. PhD thesis, University of London, 2010.
- [6] С. В. Андреев, В. И. Балыкин, В. С. Летохов, and В. Г. Миногин. Радиационное замедление и монохроматизация пучка атомов натрия до 1,5 К во встречном лазерном луче. 34(8):463–467, 1981. Первое наблюдение охлаждения в продольном направлении.