

19-21 ДЕКАБРЯ

16-я Всероссийская
научная конференция
с международным
участием

ФИЗИКА УЛЬТРАХОЛОДНЫХ АТОМОВ 2022

Бихроматическая модель глубокого лазерного охлаждения атомов ${}^6\text{Li}$

1

Ильенков Р.Я., Прудников О.Н., Кирпичникова А.А.

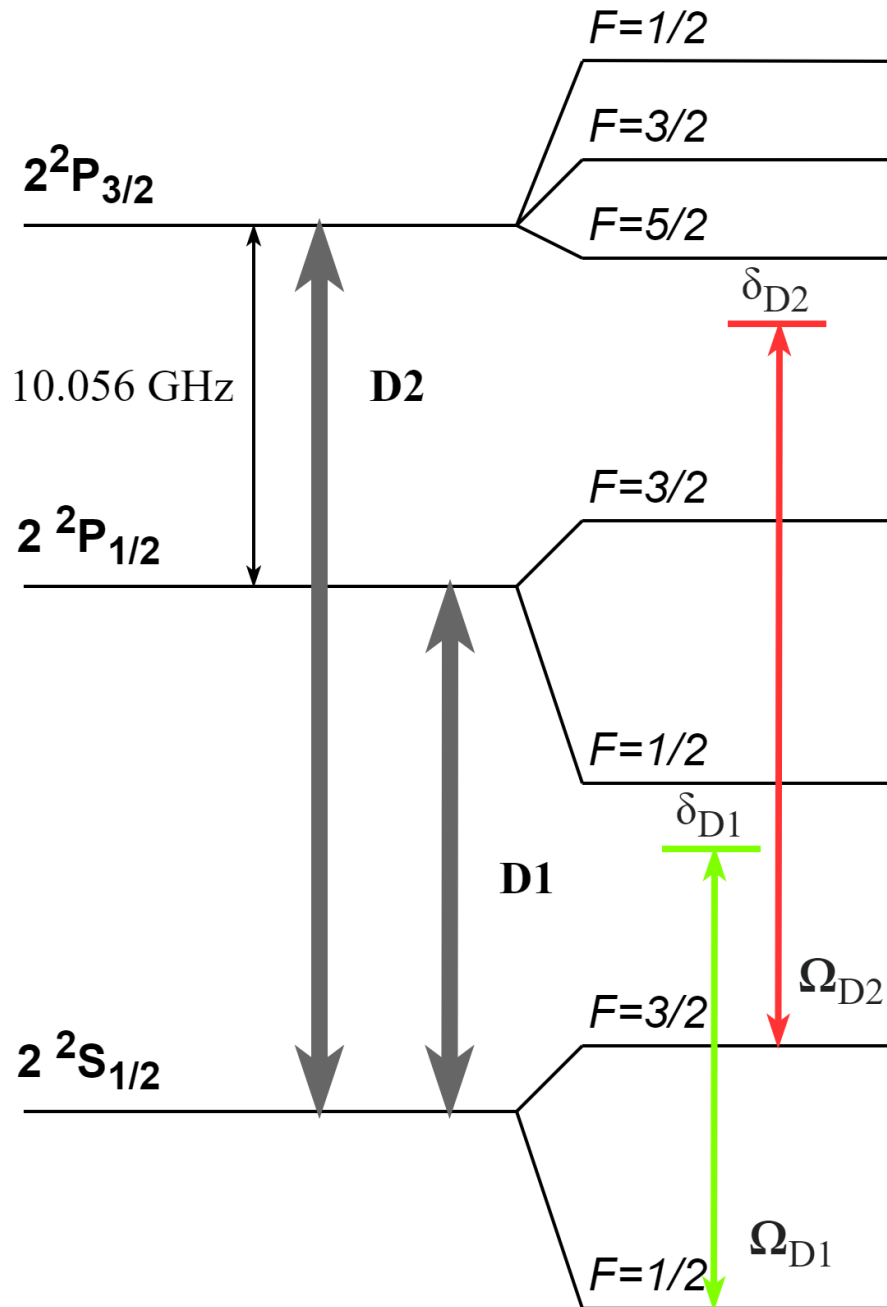
Институт лазерной физики СО РАН

Новосибирск
2022

e-mail: ilenkov.roman@gmail.com

Охлаждение атома ${}^6\text{Li}$

2



- ▶ Бозе и Ферми атомные газы;
- ▶ Атомная интерферометрия;
- ▶ Исследование межчастичных взаимодействий (квантовые смеси);
- ▶ Создание квантовых симуляторов;
- ▶ Создание систем пониженной мерности.

Квазиклассический подход

3

$$\varepsilon_R = \frac{(\hbar k)^2}{2M} \frac{1}{\hbar \gamma}$$

$$M = 40, \varepsilon_R \sim 10^{-2}$$

$\sim 10^{-3}$

1

Квазиклассический

Промежуточный квантовый

Ультра-квантовый

Приближения:

$$\varepsilon_R = \frac{E_R}{\hbar \gamma} \ll 1 \quad \hbar k / \Delta p \ll 1$$

$$\frac{\partial}{\partial t} W + \frac{p}{M} \frac{\partial}{\partial q} W = -\frac{\partial}{\partial p} (\vec{F} W) + \frac{\partial^2}{\partial p^2} (D_{sp} W) + \frac{\partial}{\partial p} \left(D_{ind} \frac{\partial}{\partial p} W \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \hat{\rho}(\vec{r}, \vec{p}) = \hat{\mathcal{L}}^{(0)} \{ \hat{\rho}(\vec{r}, \vec{p}) \} + \hbar k \sum_i \frac{\partial}{\partial p_i} \hat{\mathcal{L}}_i^{(1)} \{ \hat{\rho}(\vec{r}, \vec{p}) \} + (\hbar k)^2 \sum_{i,j} \frac{\partial^2}{\partial p_i \partial p_j} \hat{\mathcal{L}}_{ij}^{(2)} \{ \hat{\rho}(\vec{r}, \vec{p}) \} + \dots$$

Основной параметр:

$$U_i = \frac{\hbar \delta_i}{3} \frac{\Omega_i^2}{\delta_i^2 + \gamma^2 / 2}$$

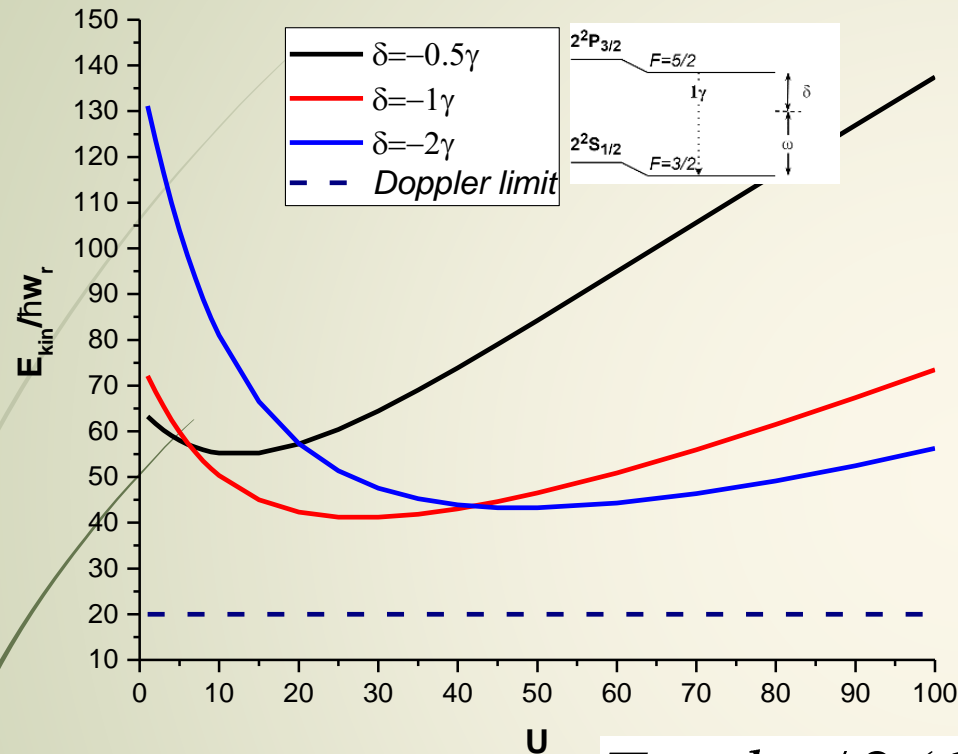
Laser cooling limits in fields with a polarisation gradient of atoms with different recoil energies A.A. Kirpichnikova, O.N. Prudnikov, R.Ya. Il'enkov, A.V. Taichenachev and V.I. Yudin 2020 *Quantum Electron.* **50** 939

Itô – Stratonovich dilemma in the problem of laser cooling of atoms: limits of applicability of the semiclassical approximation A.A. Kirpichnikova, O.N. Prudnikov, A.V. Taichenachev and V.I. Yudin 2022 *Quantum Electron.* **52** 130

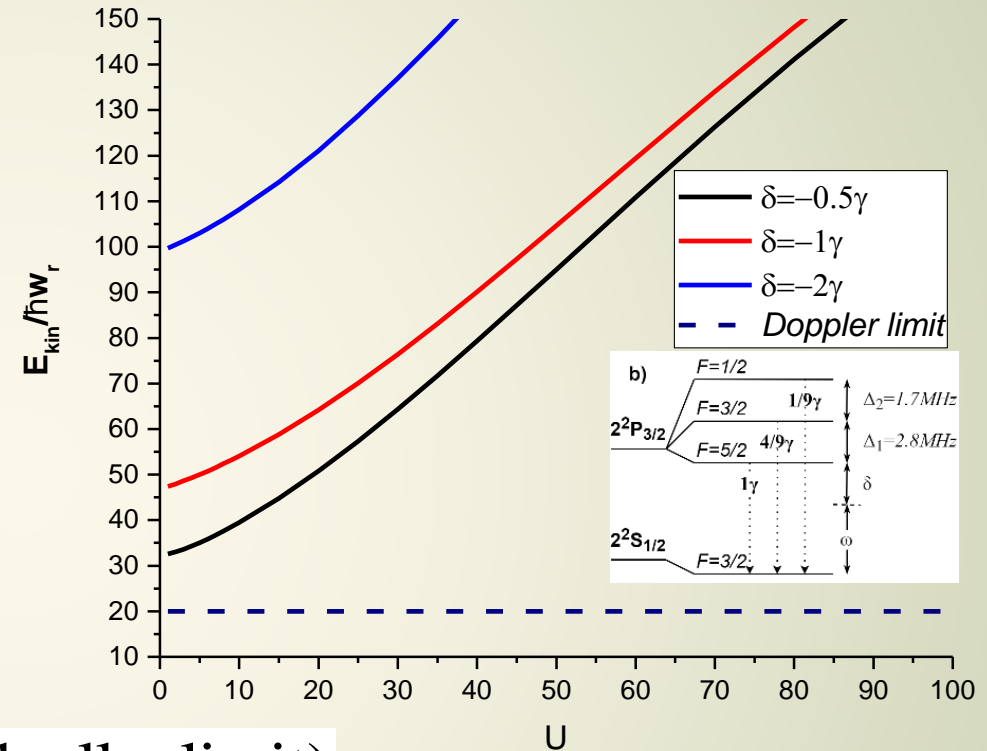
Сравнение моделей D2 линии: $\sigma^+ \rightarrow \sigma^-$ конфигурация

4

“Упрощенная” модель



“Б. Полная” модель



$$T_D = \hbar\gamma / 2 \text{ (doppler limit)}$$

“Упрощенная” и “Б. Полная” модели имеют качественные отличия. Оптимальное охлаждение достигается при различных глубинах оптического потенциала.

Субдоплеровское охлаждение не достигается!

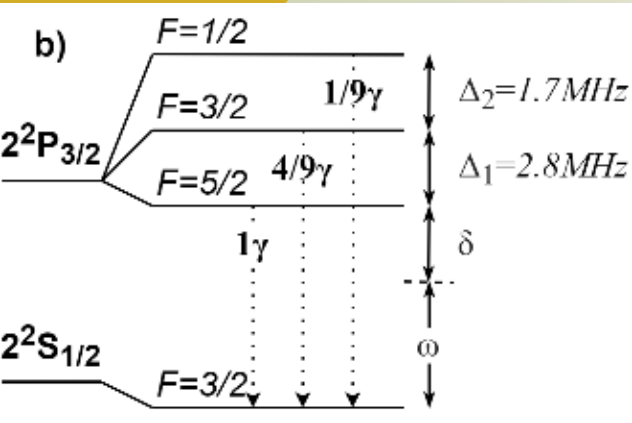
*Magneto-optical trap for ${}^6\text{Li}$ atoms formed by elliptically polarised light waves

R. Ya. Il'enkov et al 2022 Quantum Electron. 52 137

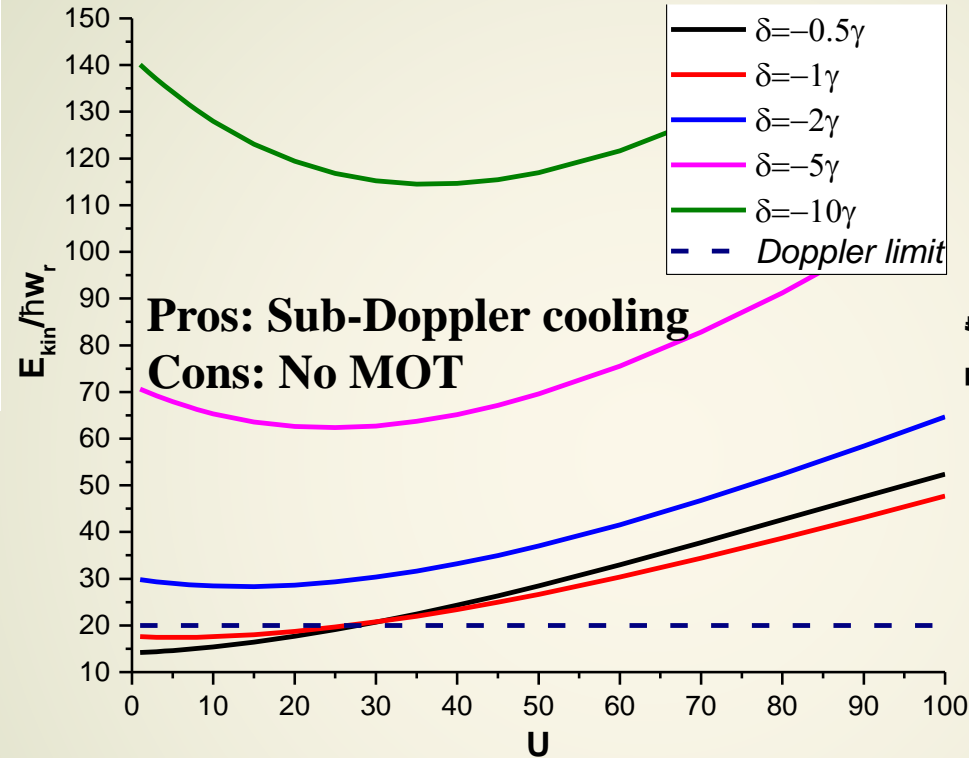
Сделанное ранее

Модель охлаждения на D2 линии

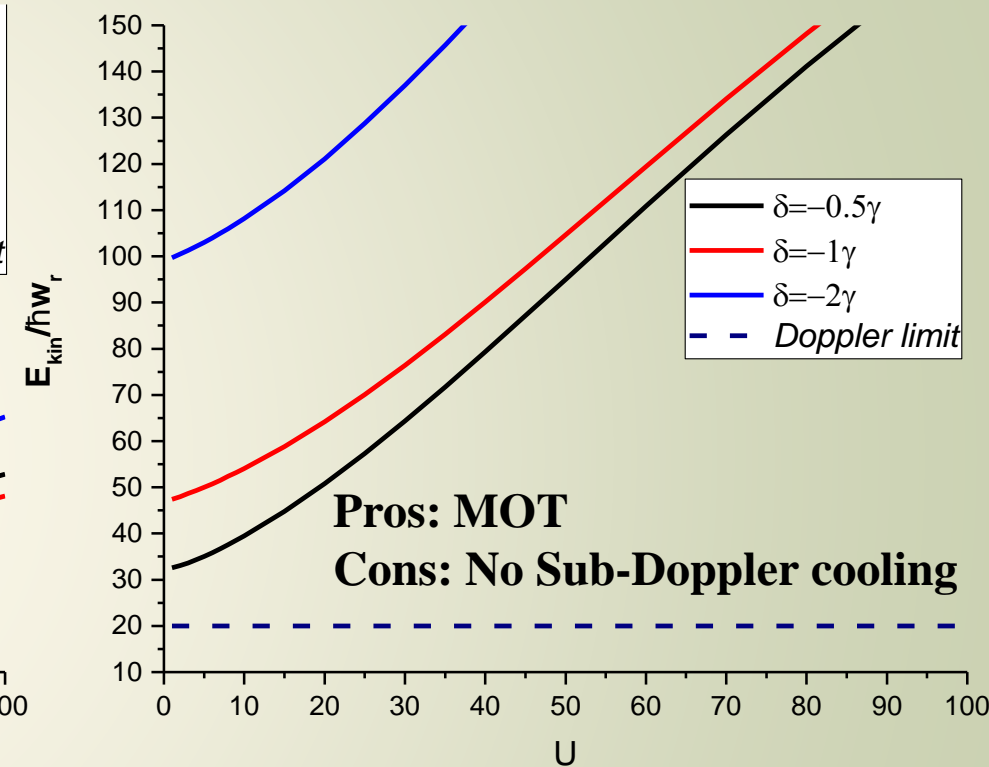
5



Lin \perp Lin



$\sigma^+ \rightarrow \sigma^-$



Достигается субдоплеровское охлаждение!

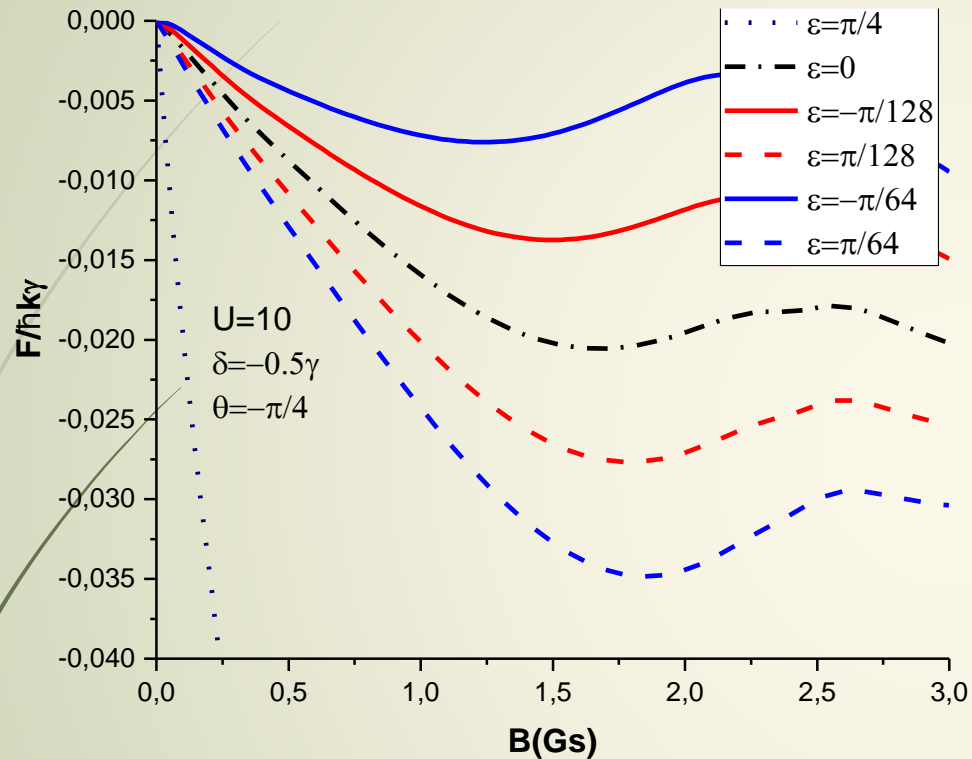
Но Lin \perp Lin конфигурация не может быть использована для создания МОЛ!

Сделанное ранее:

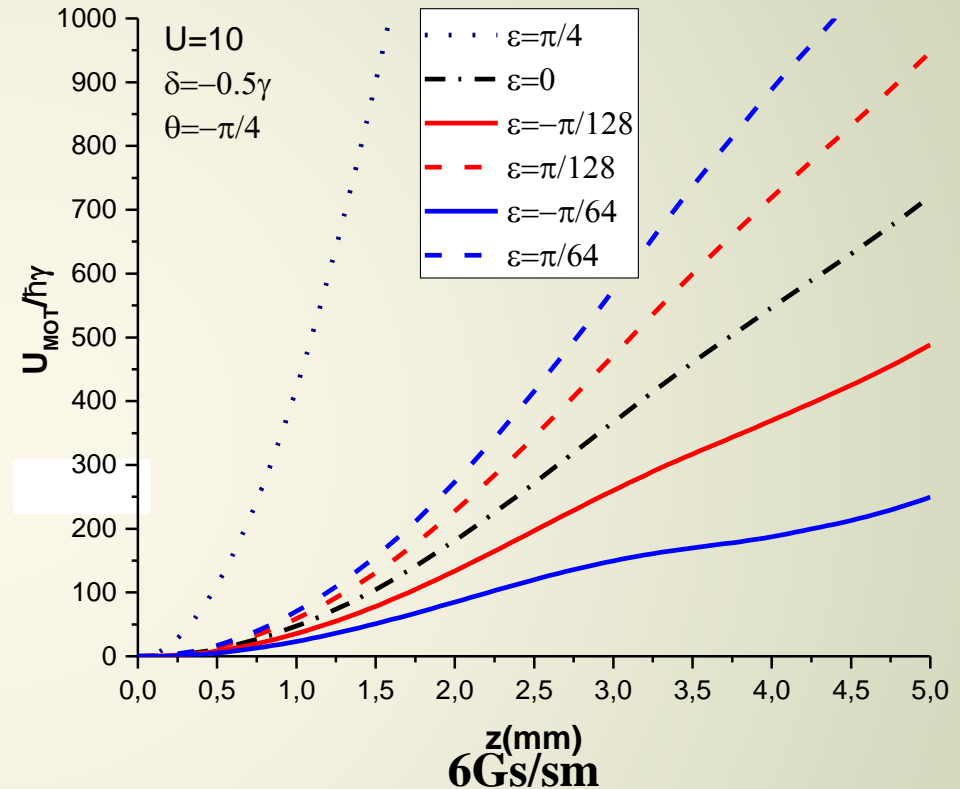
Магнитооптическая ловушка на D2 линии

6

Магнитооптическая сила



Глубина потенциала

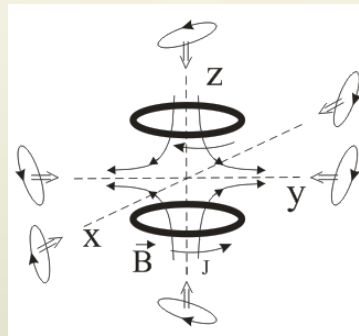


Наиболее глубокая ловушка получается для полей с круговой поляризацией. Однако, как мы помним, температуры в этом случае будут заметно выше, чем при линейной поляризации. Эллиптическая МОЛ (\mathcal{E} -МОЛ) дает температуру ниже $\sigma^+ \rightarrow \sigma^-$ поляризации и подходит для создания МОЛ достаточной глубины.

Сделанное ранее: Результаты

7

- Показана необходимость учета сверхтонкого расщепления уровней D2 линии, для корректного описания лазерного охлаждения атомов, особенно при $\sigma^+ \rightarrow \sigma^-$ поляризации
- **Lin \perp Lin** - конфигурация дает более низкие температуры (ниже доплеровского предела), чем $\sigma^+ \rightarrow \sigma^-$. Однако в этом режиме МОЛ невозможна
- Реализована модель, описывающая охлаждение атомов лития-6 в МОЛ с учетом структуры магнитных подуровней D2 линии.
- Глубина магнитооптического потенциала в поле с ε - θ - ε поляризацией для рассмотренных конфигураций светового поля, в ~ 6 - 10 раз меньше, чем глубина стандартной МОЛ, сформированной $\sigma^+ \rightarrow \sigma^-$ - конфигурацией световых полей, но тем не менее остается значительно больше температуры захваченных холодных атомов. Так например, в ε -МОЛ размером 0.5 мм и градиентом магнитного поля 6 Гс/см глубина магнитооптического потенциала соответствует температуре ~ 0.3 К, что более чем на три порядка больше доплеровского предела для атомов лития (~ 140 мкК). При этом, температура лазерного охлаждения в предлагаемой конфигурации ниже доплеровского предела

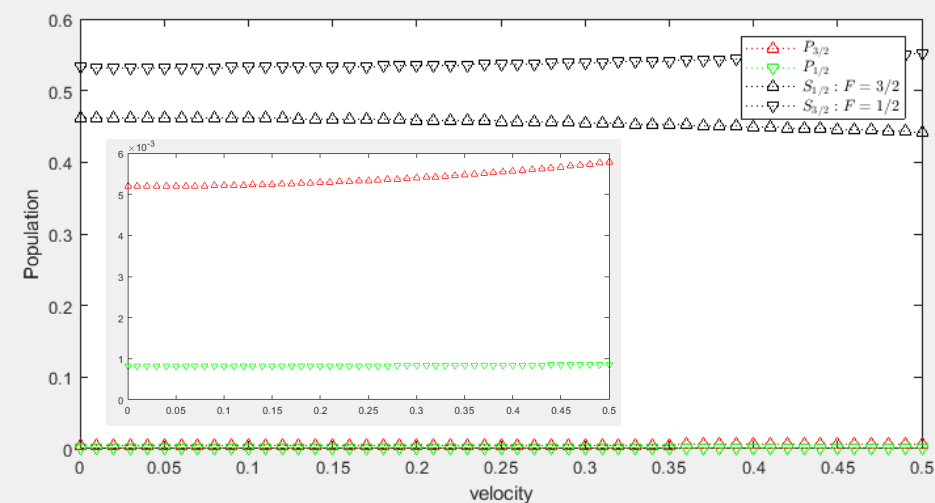


Сложности и преимущества бихроматического лазерного охлаждения Li^6

8

- 1) **Недостаточно малый отдачи:** Существует тенденция, что для атомов с недостаточно малым параметром отдачи, эффективность субдоплеровского охлаждения быстро падает. И если для атомов Rb и Cs (параметр квазиклассичности $\sim 10^{-3}$) достигаются температуры лазерного охлаждения $\sim 10\text{мкК}$, то для более легких щелочных атомов (Li, Mg) глубокое лазерное охлаждение представляет собой проблему.
- 2) **Сложная структура уровней с учетом сверхтонкого расщепления.** Более того, сверхтонкое расщепление уровней D2 линии мало ($\Delta < \Gamma$).
- 3) **Второе поле рассеивает фотоны со сравнимой скоростью,** и поэтому накачку и механическое воздействие полей необходимо рассматривать совместно.

$$D2 : S_{1/2}(3/2) \rightarrow P_{3/2} : \Omega_e = 0.2 \sigma_e = \pi / \text{Inf } \theta_e = \pi / \text{Inf } \delta_e = -2$$
$$D1 : S_{1/2}(1/2) \rightarrow P_{1/2} : \Omega_m = 0.4 \sigma_m = \pi / \text{Inf } \theta_m = \pi / \text{Inf } \delta_m = -5$$



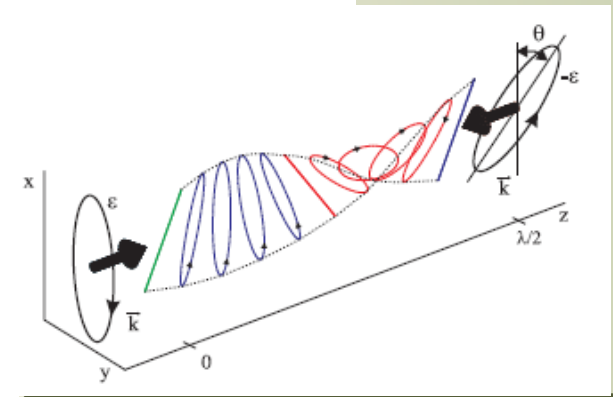
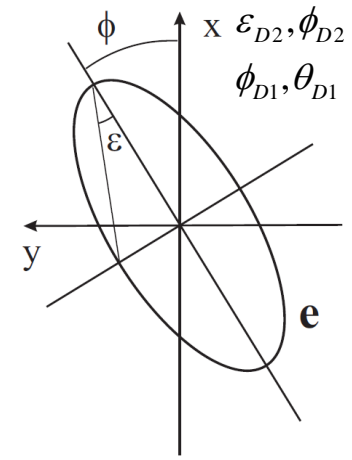
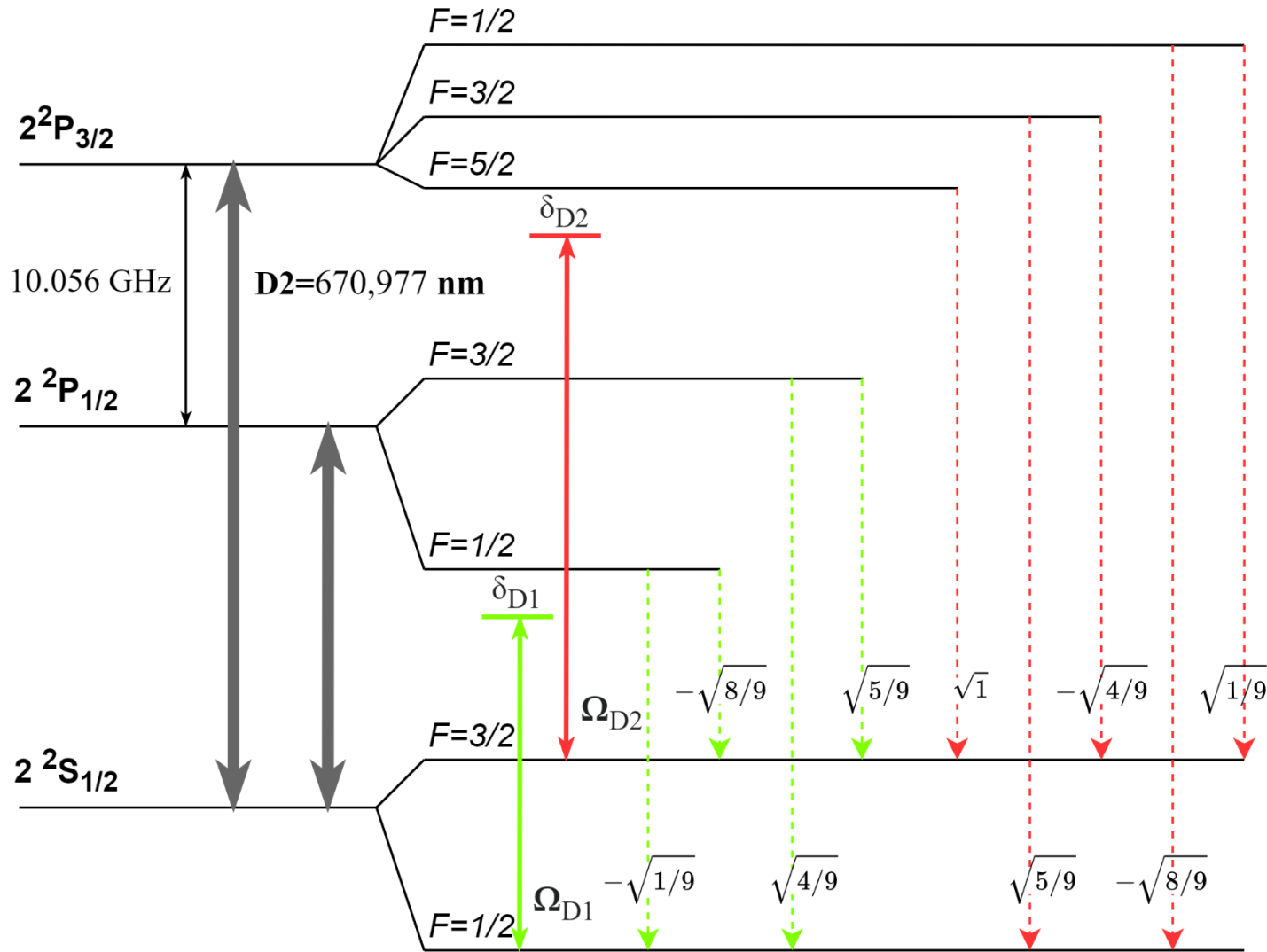
Новые возможности:

Используя поляризационные конфигурации бихроматических световых волн одновременно на D1 и D2 линиях можно достичь, как глубокого лазерного охлаждения атомов, так надежного захвата в МОЛ.

Представленная модель позволяет исследовать различные поляризационные конфигурации и определить наиболее оптимальные параметры.

Описание полной модели ${}^6\text{Li}$

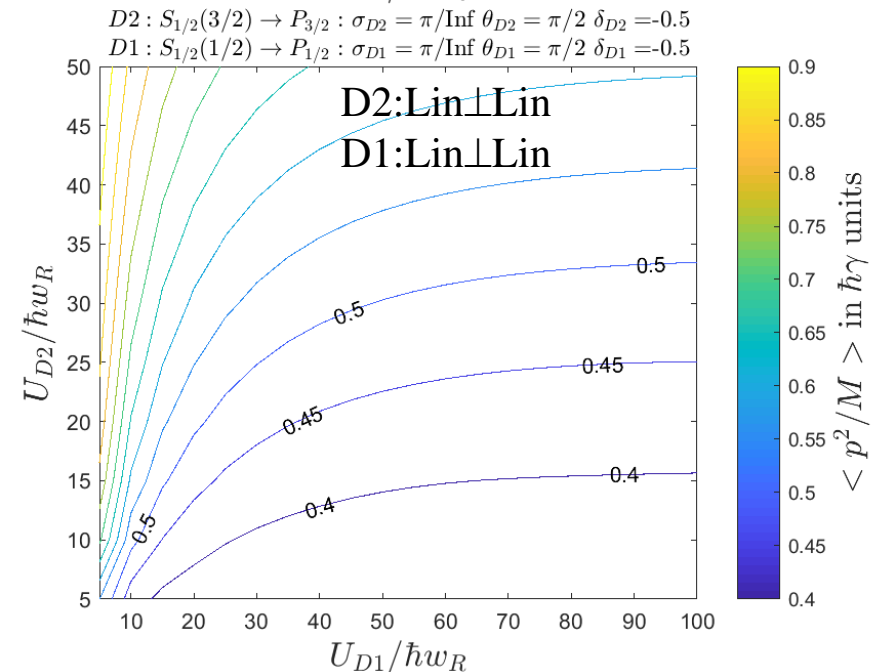
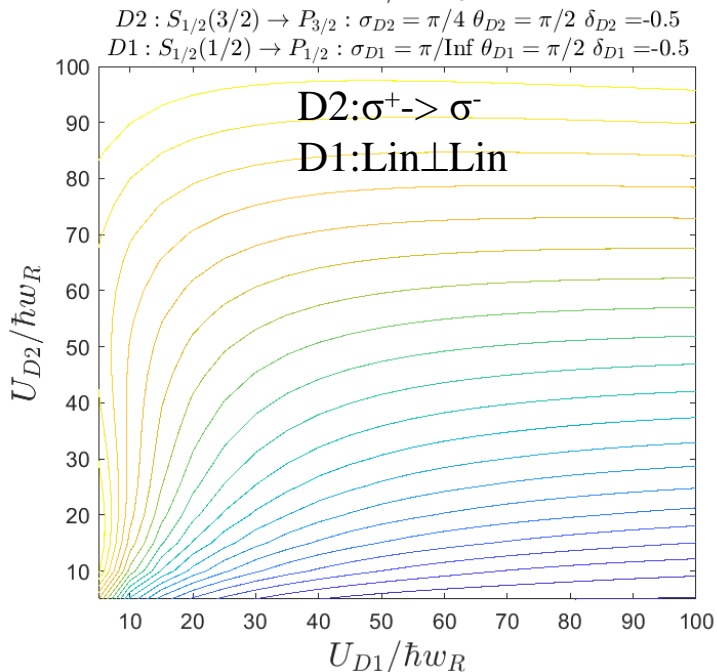
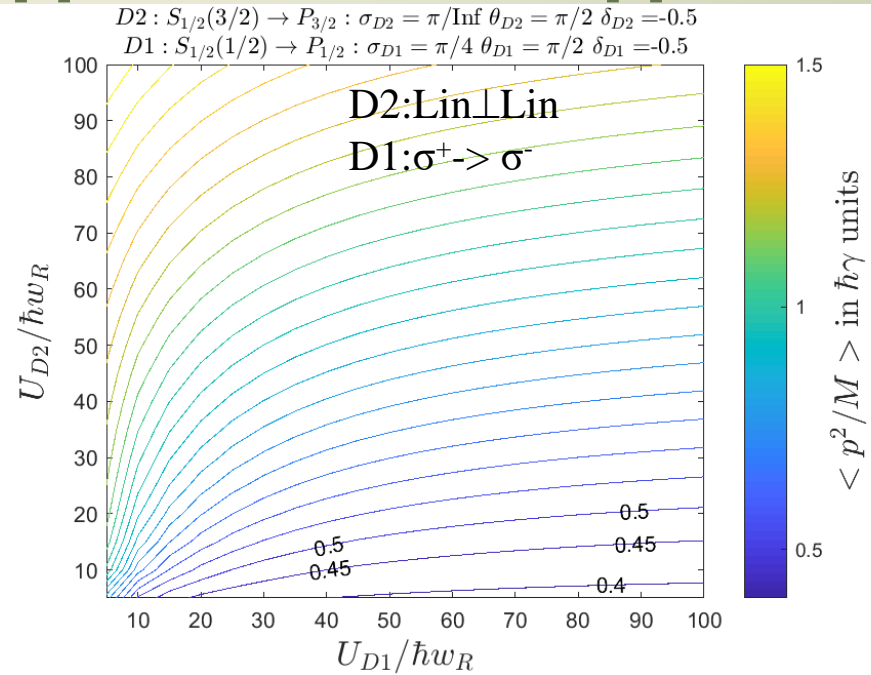
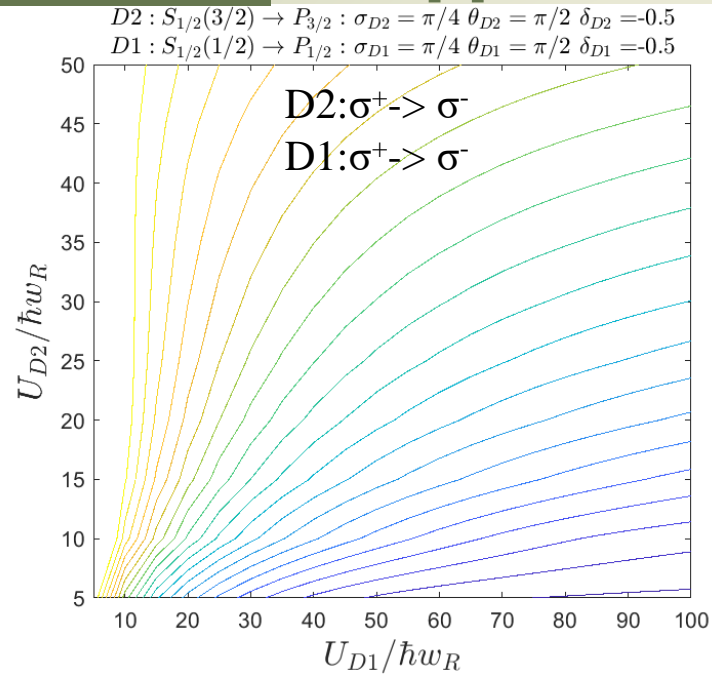
9



Φ_{21} – пространственная сдвигка между полями
 Φ_{rot} – глобальный поворот одного поля вокруг оси распространения относительно другого

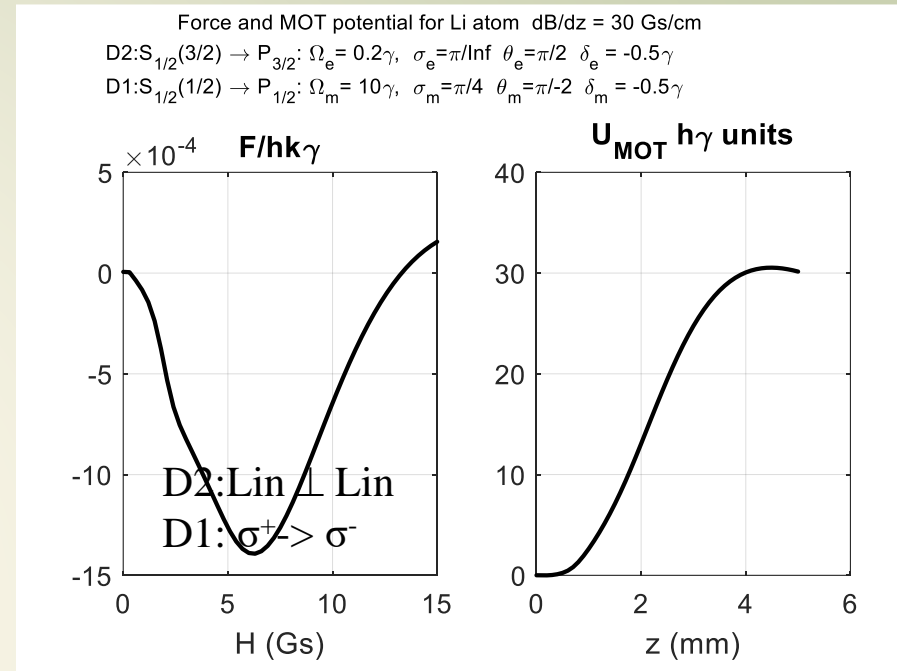
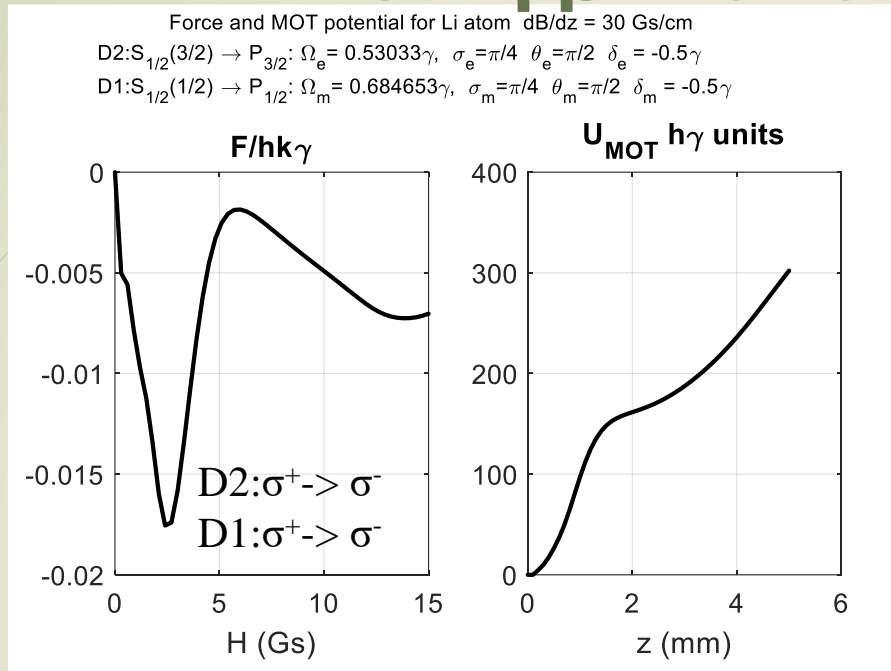
Полная модель: Пределы охлаждения

10



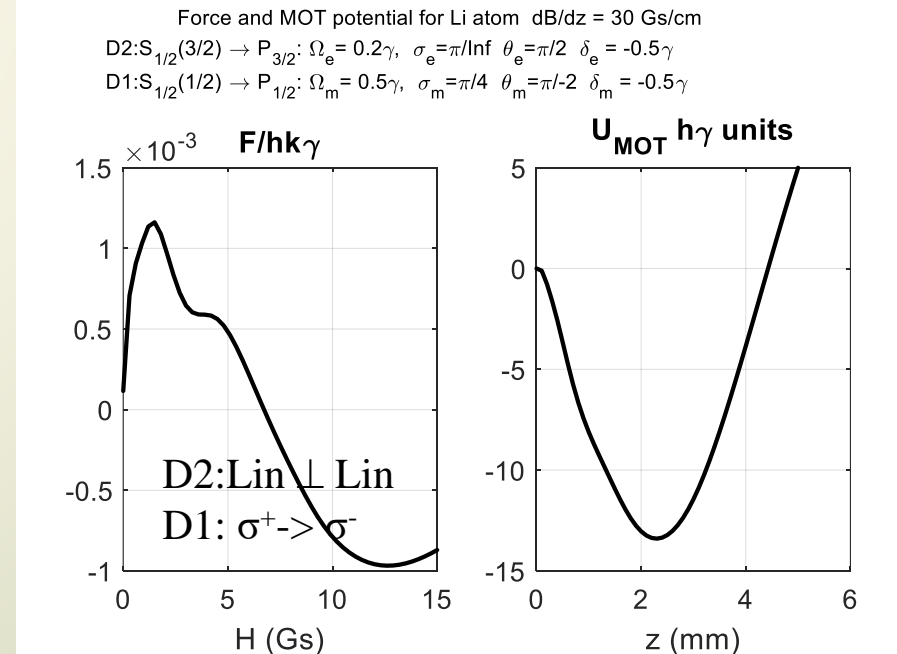
МОЛ для атомов ${}^6\text{Li}$

11



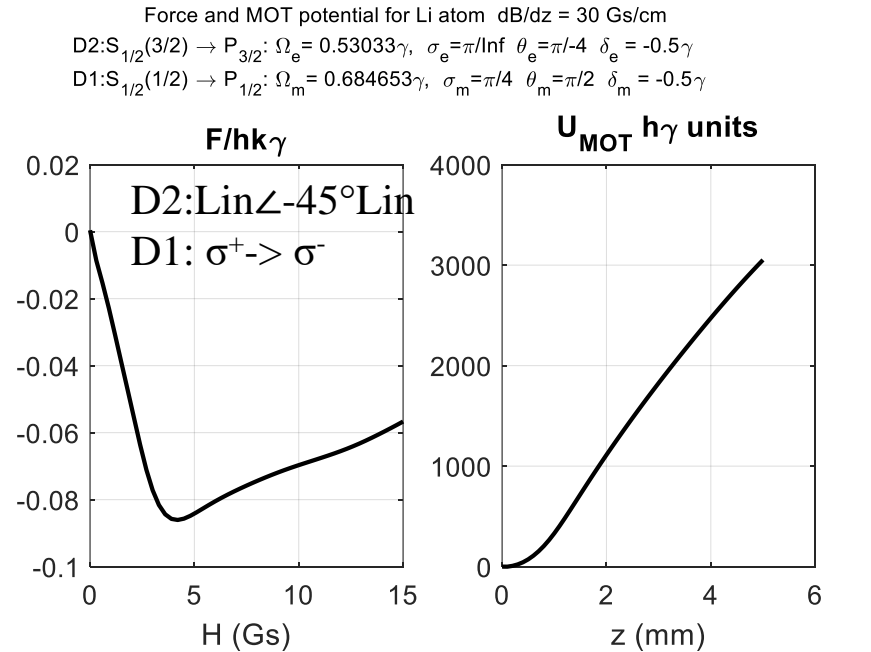
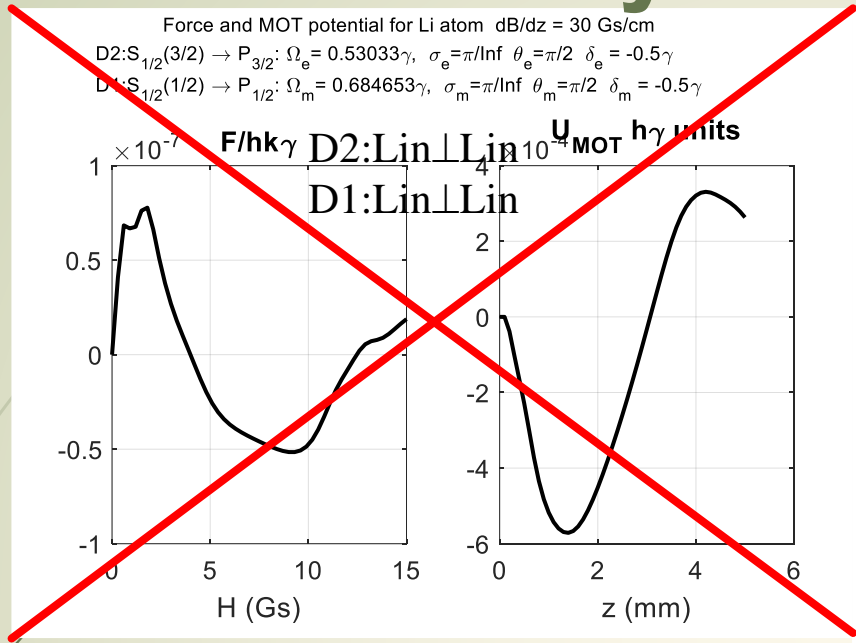
Существенная нелинейность по магнитному полю учтена. Использование конфигурации с двумя циркулярно-поляризованными световыми полями позволяет получить достаточно глубокую МОЛ.

Комбинированная МОЛ сформированная Lin \perp Lin на D2 линии и $\sigma^+ \rightarrow \sigma^-$ D1 линии оказывается не глубокой, хотя, ее все еще достаточно для захвата атомов охлажденных до единиц гамма. Форма и глубина такой ловушки оказывается чувствительна к соотношению интенсивностей световых полей.



Действительно глубокая МОЛ для атомов ${}^6\text{Li}$

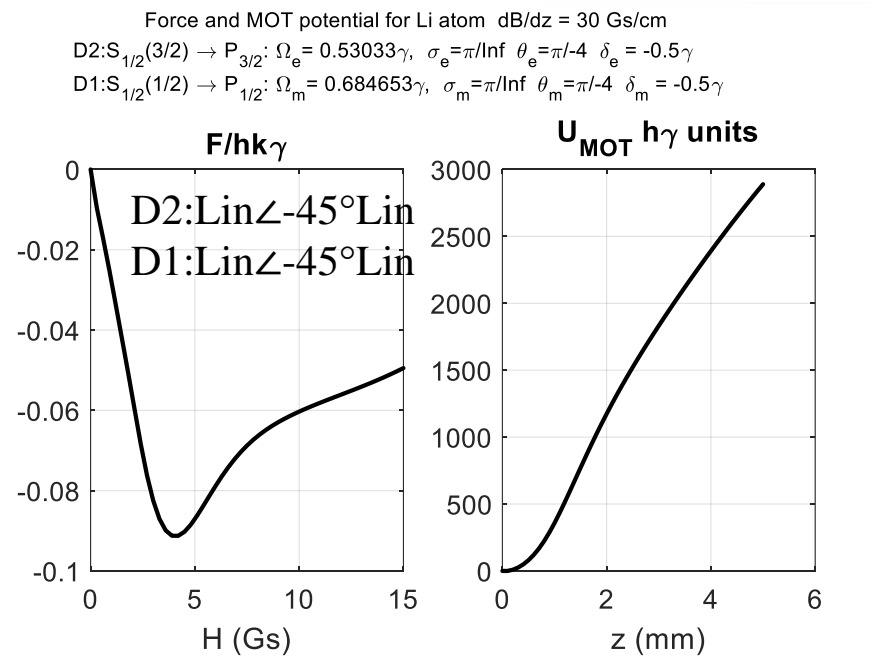
12



Можно сделать гораздо глубже!
 Нужно использовать линейные поляризации под углом -45° на D2 линии.

При этом, поляризация поля на D1 линии не вносит значительного вклада.

В таком случае мы получаем и охлаждение около доплеровского предела и глубокую МОЛ.



Результаты

13

1. Разработана и реализована численная модель бихроматического лазерного охлаждения атомов лития-6 с полным учетом сверхтонкого расщепления всех уровней.
2. Проведен анализ температуры достижимый для различных поляризационных конфигураций световых полей, резонансных D2 и D1 линиям.
3. Показано, что основное влияние на процесс диссипации в условиях достижения малых температур, оказывает поле резонансное D2 линии, а D1 в большей степени работает как накачка. Так при $\text{Lin} \perp \text{Lin}$ конфигурации поля на D2 линии возможно достижение температур ниже доплеровского предела, вне зависимости от выбранной конфигурации поля на D1 линии.
4. Разработана и реализована модель, описывающая охлаждение атомов лития в МОЛ с учетом сложной структуры магнитных подуровней. Показано, что бихроматическая МОЛ принципиально отличается от монохроматической МОЛ на D2 линии. Наличие дополнительных степеней свободы открывает новые возможно для реализации глубоких и одновременно холодных МОЛ.
5. Продемонстрирован пример реализации глубокой бихроматической МОЛ способной захватывать атомы из паров (т.е. глубиной $> 1000\hbar\gamma$), а так же охлаждать до температур сравнимых с доплеровским пределом $\sim 140\text{мк}$.

Дальнейшие планы и приложения

14

- ▶ Бихроматические поля открывают новые возможности в реализации МОЛ для одноэтапного глубокого лазерного известных щелочных элементов (Cs, Rb). Здесь возможны варианты когда оба поля работают совместно, или когда функции между ними существенно разделяется (одно поле охлаждающее, другое используется для создания ловушки).
- ▶ Развитие идеи бихроматических МОЛ для атомов второй группы (Mg, Yb, Ca) для реализации одноэтапного быстрого и глубокого лазерного охлаждения различных атомов.
- ▶ Создание теории плотных монохроматических и бихроматических магнитооптических ловушек.

Спасибо за внимание

Работа поддержана Грантом Президента
РФ (МК-6295.2021.1.2)