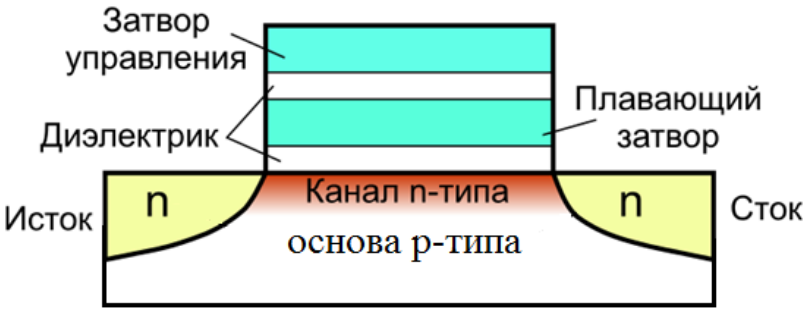
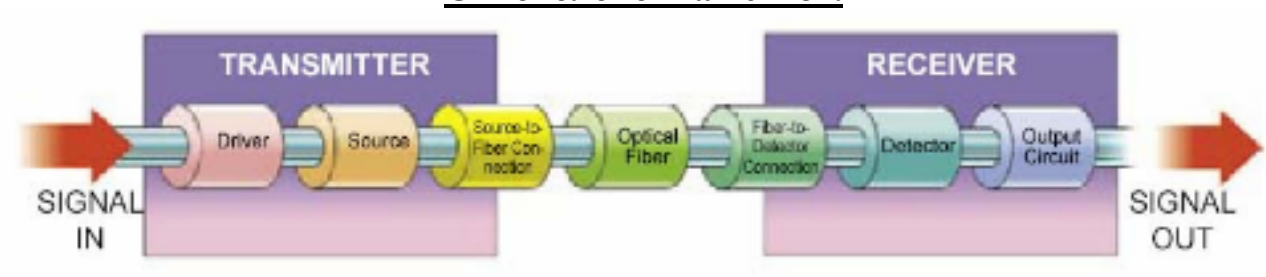
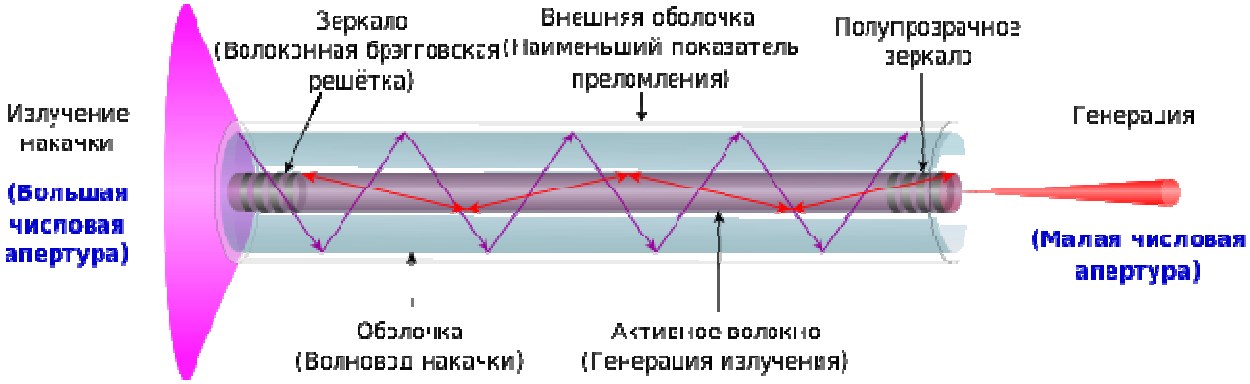
Флешка.

Транзистор с плавающим затвором.



Оптоволоконная связь.

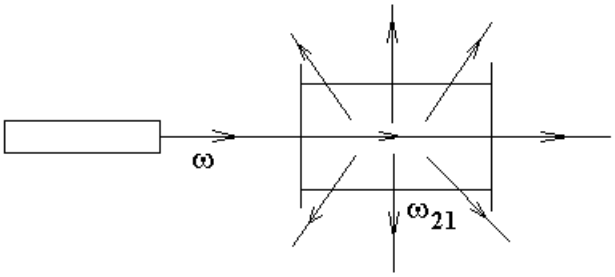




Лазерное охлаждение.

Радиационное давление.

Рассмотрим оптическую схему опыта.



Пусть частота излучения лазера ω меньше центральной частоты линии поглощения ω_{21}, но их разница не превышает доплеровскую ширину спектральной линии. Поглощенный средой свет частично переизлучается вдоль луча, и частично излучается спонтанно равновероятно во все стороны. Нас будет интересовать только спонтанное излучение во все стороны.

Для атомов резонансно поглощающих свет:

$$\begin{cases} \omega < \omega_{21} \\ \omega - kV_z = \omega_{21} \end{cases} \quad => \quad V_z = \frac{\omega - \omega_{21}}{k} < 0 .$$

То есть свет поглощают атомы, летящие навстречу лучу.

В этом случае происходит лазерное охлаждение газа.

Явление охлаждения можно объяснить двумя способами.

1). Объяснение лазерного охлаждения через рассмотрение импульса.

Свет поглощается атомами, летящими навстречу лучу. При поглощении света атомы испытывают отдачу и замедляются. То есть импульс фотона складывается с лучевой проекцией импульса атомы, и в результате лучевая проекция импульса уменьшается по модулю.

При излучении света атомы газа снова испытывают отдачу, но спонтанное излучение равновероятно по направлениям. Поэтому импульс атома при излучении фотона почти равновероятно уменьшается и увеличивается.

В результате двух актов, поглощения фотона и спонтанного излучения фотона, модуль импульса атома в среднем уменьшается. Уменьшение импульса — это уменьшение кинетической энергии атомов, а средняя кинетическая энергия связана с температурой соотношением $\langle E_{кин} \rangle = \frac{3}{2} k_Б T$. Уменьшение кинетической энергии атомов — это охлаждение газа.

2). Объяснение лазерного охлаждения через рассмотрение энергии.

Частота генерации лазера по условию эксперимента меньше частоты перехода $\omega < \omega_{21}$. Следовательно, $\hbar\omega < \hbar\omega_{21}$, где $\hbar\omega$ — энергия поглощенного фотона, а $\hbar\omega_{21}$ — средняя энергия излученного фотона, которая

имеет одинаковую величину в системе отсчета атома и в лабораторной системе отсчета.

И действительно. В системе отсчета атома поглощается и излучается одна и та же энергия $\hbar\omega_{21}$, но при переходе в лабораторную систему отсчета поглощаемый и излучаемый свет испытывают разный доплеровский сдвиг. Излучаемый атомом свет произвольным образом ориентирован относительно скорости атома, поэтому доплеровский сдвиг частоты излучения при переходе в лабораторную систему отсчета почти равновероятен в сторону уменьшения и в сторону увеличения частоты. Частота излучения, при этом, в системе отсчета атома равна ω_{21}, а в лабораторной системе отсчета частота излучения в среднем равна ω_{21}.

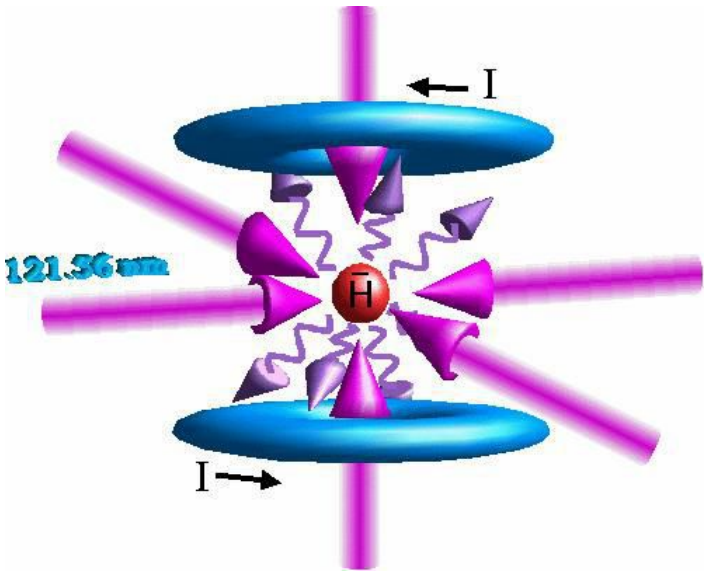
Поглощается свет лазера с частотой $\omega < \omega_{21}$, так как другой частоты в излучении лазера нет по условию. В результате на каждой паре процессов поглощения и излучения света атом в лабораторной системе отсчета получает энергию $\hbar\omega$ меньше, чем в среднем излучает $\hbar\omega_{21}$. Атом в среднем теряет энергию, и газ охлаждается.

<u>Оптическая патока.</u>

Назовем радиационным давлением ситуацию, когда свет поглощается атомом из одного направления, а излучается во всех направлениях равновероятно.

Другой метод охлаждения основан на использовании встречных световых волн одинаковой частоты и амплитуды. Пусть, как и раньше, выполняется неравенство $\omega < \omega_{21}$. Только в этом случае разность частот нужно сравнивать не с доплеровской, а с лоренцевской (однородной) шириной спектральной линии одиночного атома. Если атом покоится, то встречные волн оказывают одинаковое радиационное давление, и давление можно не учитывать. Если атом движется, то встречные волны имеют разный по знаку доплеровский сдвиг при переходе в систему отсчета атома. Встречная световая волна оказывается ближе по частоте к частоте перехода ω_{21}, и оказывает большее радиационное давление. То есть для атома возникает сила, направленная против скорости и пропорциональная скорости — это сила вязкого трения.

Три пары лазеров во взаимно ортогональных направлениях создают вязкое трение при движении атома в любом направлении. Атомы тормозятся, их скорость убывает, убывает кинетическая энергия, убывает температура газа.

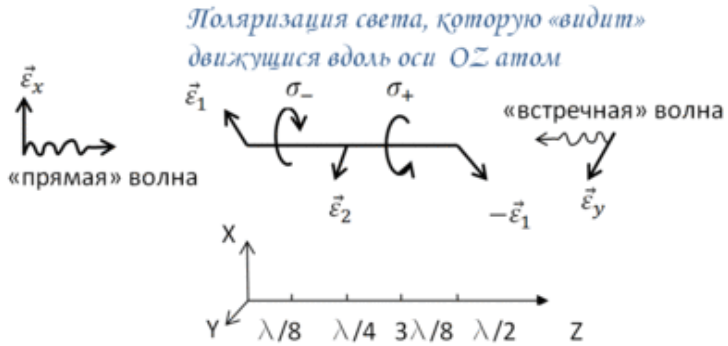


Доплеровскому трению неизбежно сопутствуют флуктуации излучения атома. Эти флуктуации определяют предел охлаждения примерно $T = 10^{-4} K$. Однако на самом деле удается охладить больше.

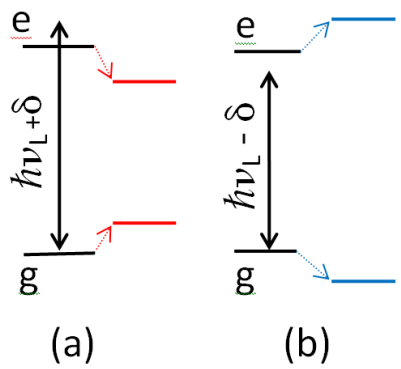
Можно сфокусировать встречные нерезонансные волны. Атом будет втягиваться в сильное поле. Это будет лазерная ловушка.

<u>Сизифово охлаждение.</u>

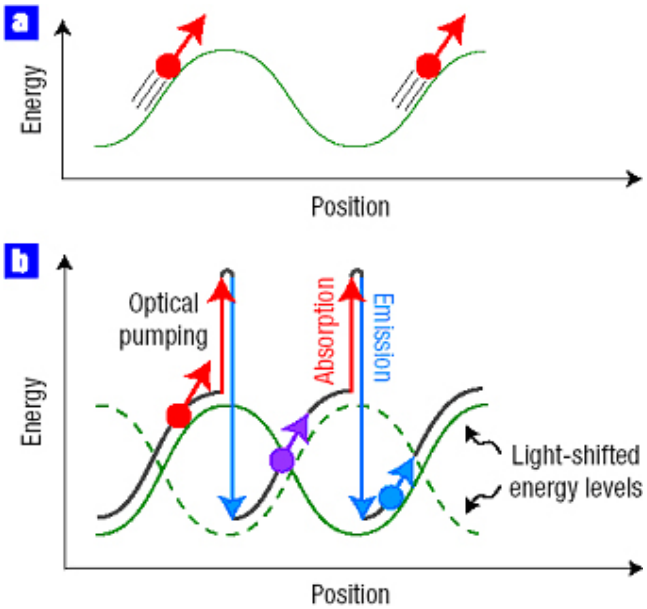
Рассмотрим две встречные световые волны с ортогональными линейными поляризациями. При их сложении в разных точках вдоль луча где-то возникает σ^+ компонента света, где-то — σ^-, а где-то линейная компонента.



Компоненты σ^+ и σ^- в разной мере сдвигают один и тот же магнитный подуровень за счет динамического эффекта Штарка (эффект Штарка в световом поле).



В результате для одного магнитного подуровня зависимость энергии нижнего уровня от координаты синусоидальна.



Для второго подуровня — тоже синусоидальна, но со сдвигом фазы. Частота света подобрана так, чтобы поглощение происходило с вершины синусоиды, а излучение иногда будет в яму синусоиды (оптическая накачка этой ямы). В результате атом все время двигается в потенциальную горку. Кинетическая энергия при этом убывает, убывает температура газа.

Сизифово охлаждение реализует гораздо более низкие температуры, чем оптическая патока.

Рассмотрим предел лазерного охлаждения.

Качественно предел охлаждения связан с тем, что при низкой температуре при поглощении фотона атом может совсем остановиться за счет отдачи. Тогда при излучении фотона атом снова приобретет прежний импульс, и температура газа не уменьшится.

В этом случае импульс фотона $\frac{h\nu}{c}$ равен импульсу атома p. Через средний импульс атома можно выразить кинетическую энергию атома $\frac{p^2}{2m}$, которая связана с температурой газа:

$$\frac{p^2}{2m} = \frac{3}{2} k_Б T .$$

Подставим сюда импульс фотона $p = \frac{h\nu}{c}$ и получим $T = \frac{h^2 \nu^2}{3 k_Б m c^2}$.

Подставим численные значения:

$mc^2 \approx A \cdot 10^9 \, эВ \approx A \cdot 1.6 \cdot 10^{-10} \, Дж$, где A — вес атома в атомных единицах. Например, для атома водорода $A = 1$.

$$h\nu \approx 6.6 \cdot 10^{-34} \cdot 6 \cdot 10^{14} \approx 4 \cdot 10^{-19} \, Дж ,$$

$k_Б \approx 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$, тогда

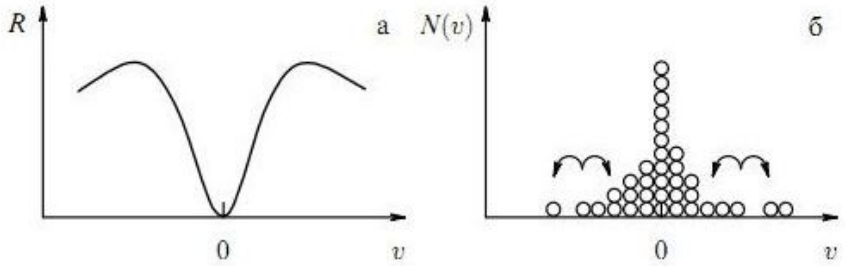
$$T \approx \frac{1}{3} \cdot \frac{1.6 \cdot 10^{-38}}{A \cdot 1.6 \cdot 10^{-10} \cdot 1.38 \cdot 10^{-23}} \approx \frac{1}{40000 A} (K).$$

Найдем, какая скорость атомов соответствует этой температуре:

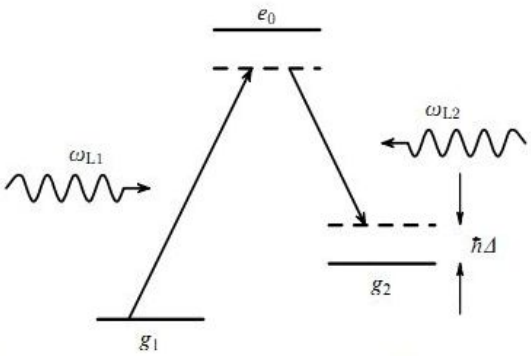
$$U = \sqrt{\frac{2 k_Б T}{m}} \approx \frac{0.6}{\sqrt{A}} \left(\frac{м}{с} \right).$$

<u>Селективное по скоростям когерентное пленение населенностей.</u>

Если в трубе с песком создать стоячую звуковую волну, то песчинки собираются в узлы этой волны.



Аналогично с атомами в световом поле. Если создать условия такие, что при нулевой скорости атомов не будет взаимодействия со световым полем, то атомы, случайно попадая в это состояние, будут в нем накапливаться.



Результаты экспериментов: $T \approx T_{\min} / 800$.

Еще одна идея охлаждения.

Дальнейшее охлаждение газа возможно по принципу охлаждения открытого стакана с водой. С поверхности воды вылетают преимущественно молекулы, которые случайно получили бóльшую энергию, чем средняя энергия молекул воды. В таком случае средняя энергия оставшихся молекул уменьшается, и температура воды в стакане оказывается меньше температуры окружающего воздуха.

Роль стакана при лазерном охлаждении играет потенциальная яма. Объемная решетка из таких потенциальных ям создается в пространстве шестью лазерами, которые парами светят навстречу друг другу, формируя три взаимно ортогональных стоячих волны. Атомы втягиваются в пучности светового поля, так как энергия наведенного диполя в электрическом поле равна $W = -\frac{1}{2}\left(\vec{p}, \vec{E}\right)$. Наведенный световым полем диполь пропорционален полю $\vec{p} = \alpha \vec{E}$. Тогда энергия наведенного диполя в световом поле $W = -\frac{1}{2}\alpha p^2$. Сила равна минус градиенту потенциальной энергии $\vec{F} = -\vec{\nabla} W = \frac{1}{2}\alpha \cdot \vec{\nabla}\left(E^2\right)$. Градиент E^2 направлен в сторону увеличения электрического поля, то есть атом втягивается в поле световой волны.

Таким образом, шесть лазеров формируют систему потенциальных ям, в которых скапливаются атомы охлажденного лазером газа.

Излучение лазеров при этом далеко отстоит по частоте от линии поглощения газа. То есть обсуждаемое выше лазерное охлаждение газа прекращено.

В каждой пучности светового поля собирается много атомов газа. Атомы, находясь в потенциальной яме, толкают друг друга. Получая случайным образом в результате столкновений достаточную энергию, атом вылетает из

потенциальной ямы, унося с собой энергию выше среднего уровня энергии атома в яме.

Тогда у атомов, оставшихся в потенциальной яме, уменьшается средняя энергия, и газ в этой потенциальной яме испытывает дальнейшее охлаждение. Лишние атомы откачиваются насосом.