

Биения когерентного комбинационного рассеяния.

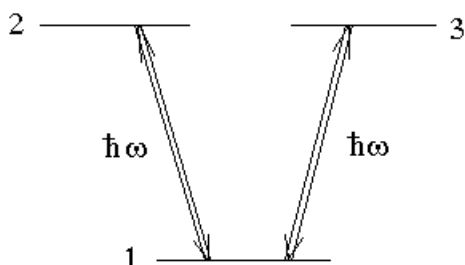
Рассмотрим оптическую схему опыта со штарковским переключением частоты:



Интересующий нас сигнал биений когерентного комбинационного рассеяния наблюдается в трехуровневой схеме с общим нижним или общим верхним уровнем энергии.

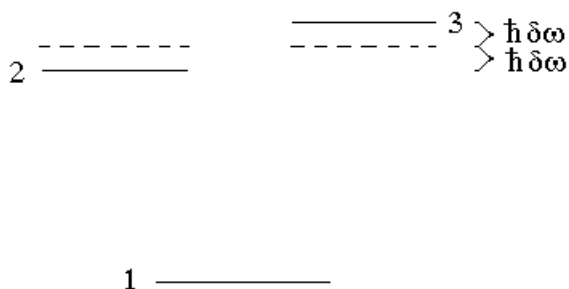
Рассмотрим схему с общим нижним уровнем энергии.

Пусть без штарковского поля два верхних уровня энергии вырождены:



Мощное лазерное излучение с частотой ω осуществляет оптическую накачку уровней энергии 2 и 3.

Пусть при штарковском переключении частоты уровни 2 и 3 сдвигаются в разные стороны на одинаковую величину $\hbar\delta\omega$, и пусть уровень 1 не сдвигается:



В интенсивности света на приемнике излучения после штарковского переключения частоты наблюдаются три сигнала разной природы.

1). Оптические нутации.

Обычно оптические нутации наблюдаются при включении светового поля.

Частоты переходов ω_{21} и ω_{31} изменяются при включении штарковского поля. До включения штарковского поля оба перехода взаимодействовали с набором молекул с одной лучевой скоростью V_z :

$$\Omega = 0 \quad \Rightarrow \quad \omega - kV_{z_{\text{старое}}} - \omega_{21_{\text{старое}}} = 0 \quad \Rightarrow$$

$$V_{z_{\text{старое}}} = \frac{\omega - \omega_{21_{\text{старое}}}}{k}.$$

После включения штарковского поля частоты переходов ω_{21} и ω_{31} сдвигаются в разные стороны, и со световым полем начинают взаимодействовать два новых набора молекул:

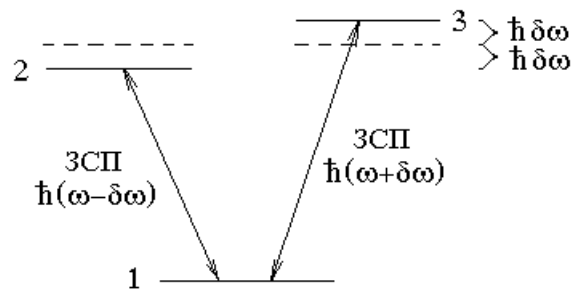
$$V_{z_{\text{новое}}} = \frac{\omega - \omega_{21_{\text{новое}}}}{k} \quad \text{и} \quad V_{z_{\text{новое}}} = \frac{\omega - \omega_{31_{\text{новое}}}}{k}.$$

Для этих двух наборов световое поле включается, следовательно, на этих наборах наблюдаются сигналы оптических нутаций.

2). Затухание свободной поляризации.

Для набора молекул с лучевой скоростью $V_{z_{\text{старое}}} = \frac{\omega - \omega_{21_{\text{старое}}}}{k}$ световое поле выключается. Следовательно, на этом наборе молекул должен наблюдаться сигнал ЗСП.

Для этого набора световое поле выключается, а раскачанные полем диполи молекул остаются и продолжают излучать. Только эти диполи излучают на новых частотах $\omega_{21_{\text{новое}}} = \omega - \delta\omega$ и $\omega_{31_{\text{новое}}} = \omega + \delta\omega$.



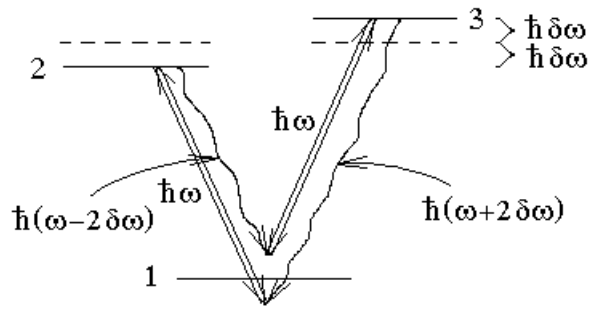
Вместе с излучением сигналов ЗСП на частотах $\omega - \delta\omega$ и $\omega + \delta\omega$ на приемник попадает лазерное излучение с частотой ω . Наличие лазерного излучения с частотой ω приводит к так называемому гетеродинному приему слабых сигналов ЗСП. В результате гетеродинного приема фототок приемника имеет полезный сигнал на частоте биений $\delta\omega$ слабого оптического сигнала ЗСП $\omega \pm \delta\omega$ и сильного опорного оптического сигнала лазерного поля ω .

Сигнал ЗСП быстро затухает примерно за то же время $\frac{1}{R}$, что и сигнал оптических нутаций.

3). Биения когерентного комбинационного рассеяния.

Это новый для нас сигнал, который затухает гораздо медленнее, чем ЗСП и оптические нутации.

Сильное лазерное поле разрешает двухфотонные переходы, в которых первый фотон — это фотон спонтанного излучения, а второй фотон — поглощение света из сильной лазерной волны. Эти двухфотонные переходы представлены на нижеследующем рисунке:



Как видно из рисунка, частоты фотонов спонтанных излучений, которые участвуют двухфотонных процессах равны $\omega - 2\delta\omega$ и $\omega + 2\delta\omega$.

Гетеродинный прием этого спонтанного излучения на частотах $\omega - 2\delta\omega$ и $\omega + 2\delta\omega$ с опорным излучением на частоте ω создает фототок приемника на частоте $2\delta\omega$.

Рассматриваемые двухфотонные переходы не уменьшают суммарной заселенности уровней 2 и 3, поэтому двухфотонные переходы продолжаются в течение всего времени затухания $\frac{1}{\gamma}$ уровней энергии 2 и 3. Это время гораздо больше времени $\frac{1}{R}$ затухания ЗСП и оптических нутаций.

Регистрируемый фототок называют сигналом биений когерентного комбинационного рассеяния. Фототок затухает, как

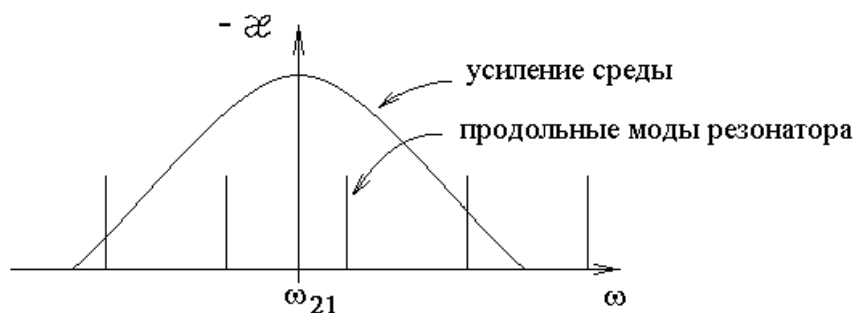
$$S \sim \left(e^{-\gamma_2 t} + e^{-\gamma_3 t} \right), \text{ где } \gamma_2 = \gamma_3.$$

Нелинейная комб-спектроскопия высокого разрешения.

1 Иванов В С , Пулькин С А , Фрадкин Э Е , Кузьмин А И Нелинейные резонансы в спектре поляризации и восприимчивости двухуровневой атомной системы в трехмодовом световом поле // Вестник СПбГУ Сер.4, 2007, Вып.3, С.125-129.

2. Рустамаева Т.О., Савельева С.В., Уварова С.В., Калиничев А.А., Пулькин С.А. Метод бездоплеровской комб-спектроскопии на примере биомаркера окиси азота NO. IX Международная конференция молодых ученых и специалистов "Оптика – 2015", 12-16 октября 2015 года, Санкт-Петербург, Россия.

Идея состоит в том, чтобы использовать в спектроскопии насыщения поглощения встречные волны излучения импульсного лазера в режиме генерации периодических импульсов с частотой межмодового интервала продольных мод лазера. Периодические импульсы раскладываются в ряд Фурье в виде спектра равноотстоящих частотных линий с межмодовым частотным интервалом.

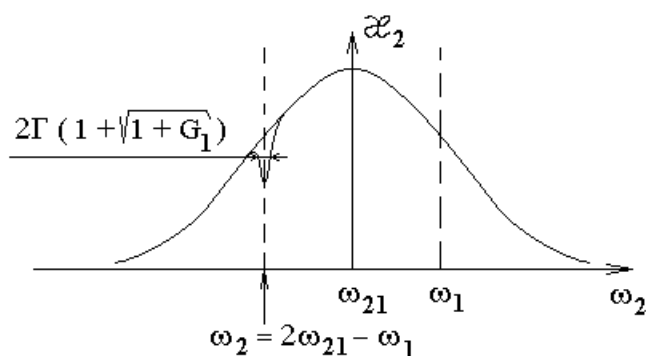


Для наблюдения спектрально узких резонансов насыщения поглощения световое поле не должно быть слишком сильным.

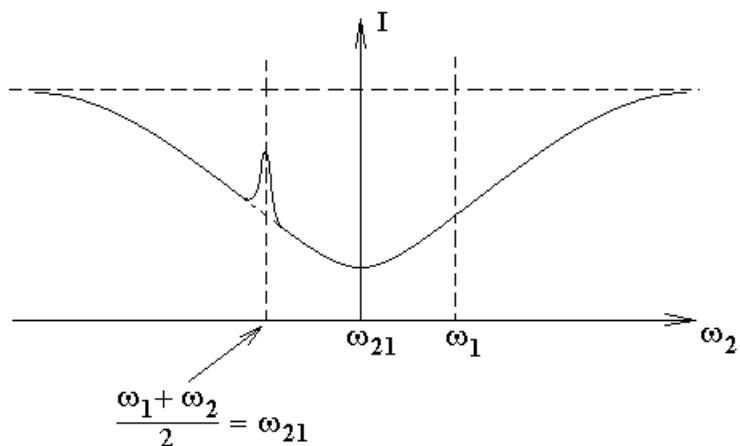
Можно считать, что излучение каждой частоты присутствует непрерывно. В таком случае резонанс насыщения поглощения будет наблюдаться в двух случаях.

1. Одна из мод лазера совпадает с центром линии поглощения.
2. Центр линии поглощения находится ровно посередине между двумя соседними продольными модами генерации лазера. В спектроскопии насыщения поглощения встречных световых волн разных частот резонанс образуется, когда полусумма частот встречных волн совпадает с центром линии поглощения газа.

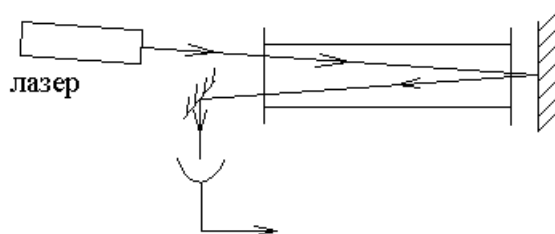
При фиксированной частоте одной из встречных волн ω_1 коэффициент поглощения второй волны, как функция ее частоты ω_2 имеет следующий вид.



Мощность второй волны на приемнике излучения после прохождения кюветы имеет следующий вид.



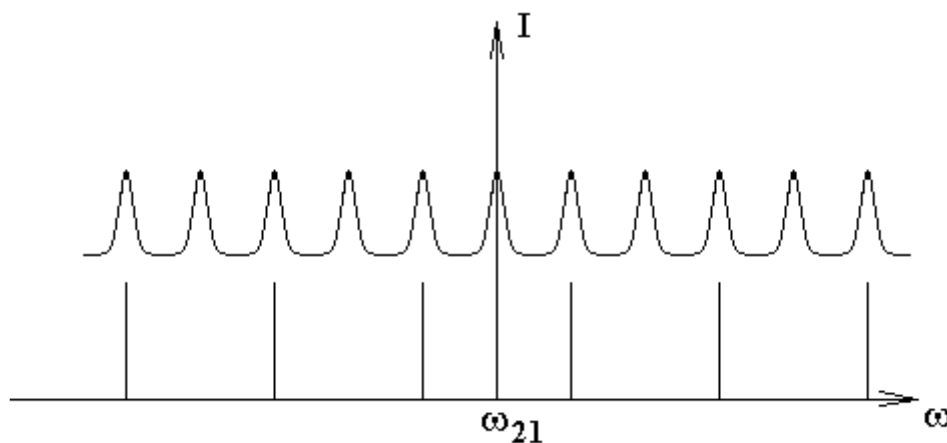
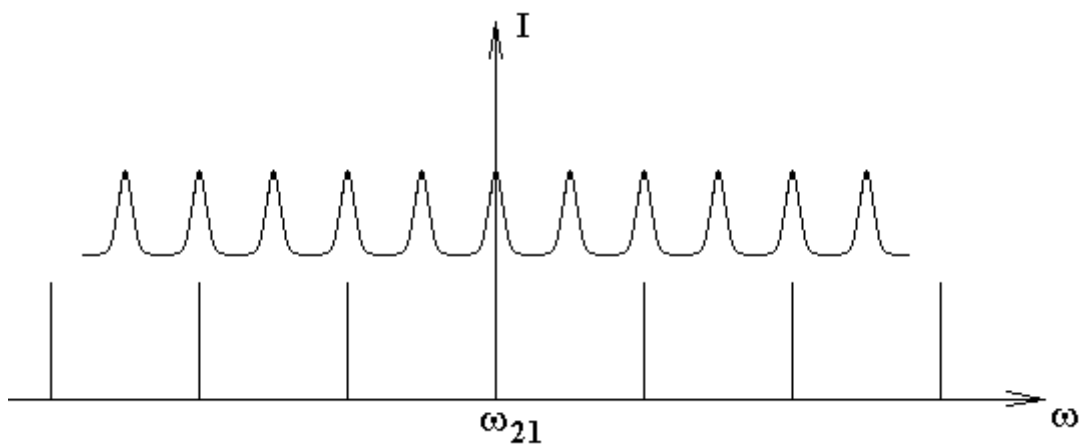
Рассмотрим традиционную схему спектроскопии насыщения поглощения, в которой излучение лазера проходит кювету с газом низкого давления, отражается зеркалом, проходит кювету с газом во встречном направлении и попадает на приемник излучения. Только рассматривается излучение импульсного лазера. Регистрируется резонансное увеличение мощности на приемнике при изменении несущей частоты лазерных импульсов.



В многомодовом случае каждая пара симметрично расположенных относительно центра линии поглощения мод генерации будет участвовать в формировании одного и того же резонанса во встречных световых волнах.

Поскольку в формировании сигнала участвуют все моды, при изменении несущей частоты импульса сигнал на приемнике будет меняться периодически с периодом равным межмодовому интервалу.

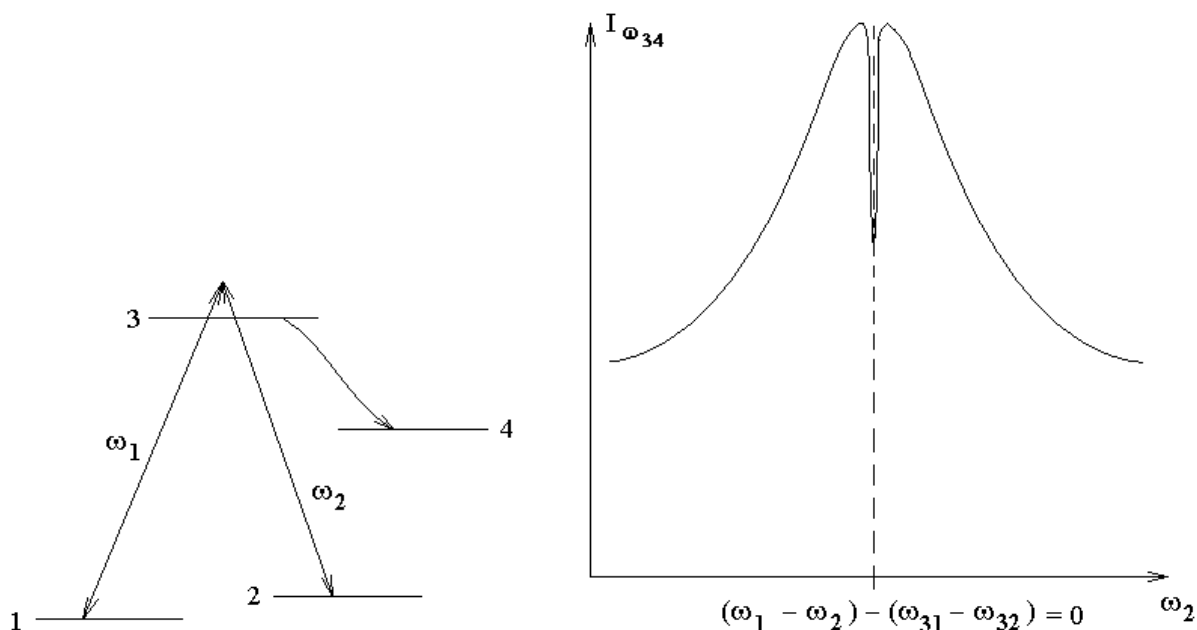
Если учесть оба механизма формирования резонанса насыщения поглощения встречных волн, то при изменении несущей частоты лазерного импульса резонансы будут регистрироваться вдвое чаще частотного расположения продольных мод.



На рисунках приведена зависимость мощности на приемнике света, как функция несущей частоты спектрального комба — гребенки разрешенных продольных мод импульсного лазера. Гребенка двигается по горизонтальной оси вместе с графиком зависимости мощности на приемнике. Максимумы мощности на приемнике соответствуют симметричным расположениям мод, как это изображено на двух графиках.

Лазеры без инверсии.

Механизм усиления света в лазерах без инверсии похож на механизм формирования СРТ-резонанса (КПН — когерентного пленения населенности).

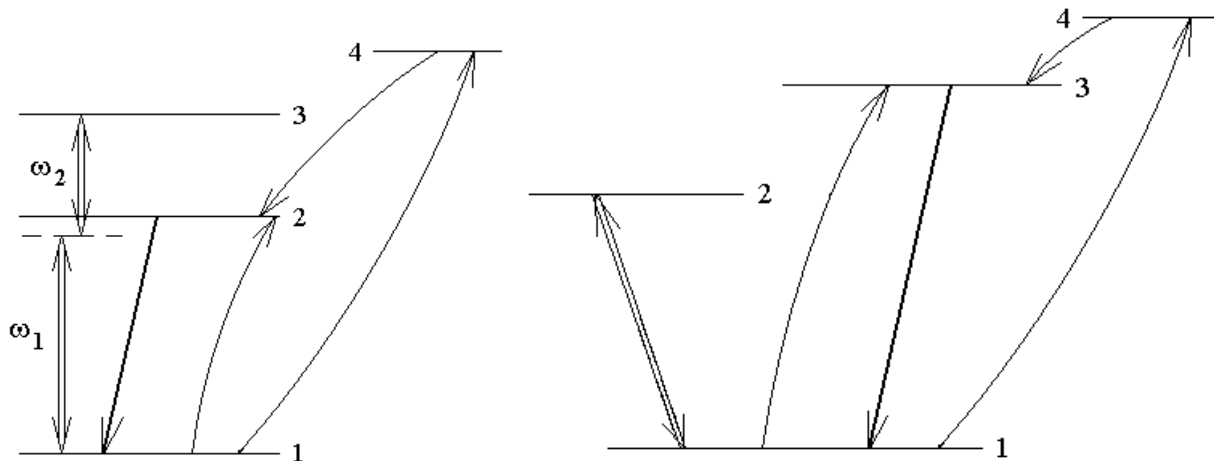


В условиях резонанса $\omega_1 - \omega_2 = \omega_{21}$ двухфотонные переходы между уровнями 1-3-2 (и обратно) создают когерентность уровней 1 и 2, то есть создают отличный от нуля недиагональный матричный элемент ρ_{21} между уровнями 1 и 2. Наличие этого недиагонального элемента матрицы плотности затрудняет поглощение света на переходе 1-3 и на переходе 2-3. В результате в условиях резонанса населенность верхнего уровня 3 резко уменьшается, и уменьшается излучение среды с этого уровня на переходе ω_{34} .

На левом нижеследующем рисунке представлена каскадная схема уровней лазера без инверсии. Два сильных световых поля с частотами ω_1 и ω_2 в условиях резонанса в результате двух фотонных переходов создают когерентность уровней 1 и 3 (отличный от нуля недиагональный матричный элемент ρ_{31}). Наличие этого матричного элемента затрудняет поглощение света с уровня 1 на уровень 2. В результате, если каким-либо некогерентным образом заселить уровень 2, например, электрическим разрядом в газе, то переходы с уровня 2 на уровень 1 с усилением света на этом переходе ничем не будут затруднены, а поглощение света на переходе 1-2 затруднено наличием матричного элемента ρ_{31} . В таком случае даже при значительном превышении населенности уровня 1 над населенностью уровня 2 свет на переходе 2-1 будет

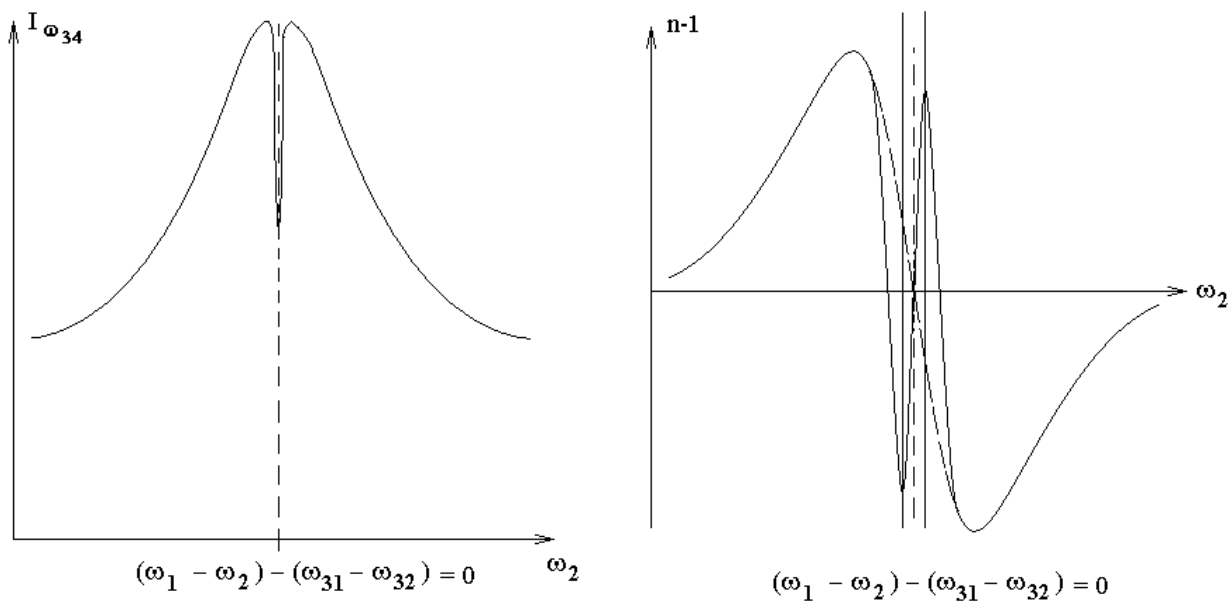
усиливаться. Это усиление света и позволяет сделать лазер без инверсии с излучением на переходе 2-1.

На правом нижеследующем рисунке приведена схема V уровней энергии лазера без инверсии. Сильное световое поле на переходе 1-2 создает недиагональный матричный элемент ρ_{21} , наличие которого затрудняет поглощение света с уровня 1 на уровень 3. В результате некогерентное заселение уровня 3 позволяет получить усиление света (и лазерную генерацию без инверсии) на переходе 3-1.



Остановка света.

При наблюдении СРТ-резонанса зависимость коэффициента поглощения света с уровня 2 на частоте ω_2 пропорциональна зависимости мощности излучения на переходе 3-4 от ω_2 . Дисперсионные соотношения Крамера — Кронига определяют частотную зависимость показателя преломления среды соответствующую частотной зависимости коэффициента поглощения.



В результате в частотной области очень узкого резонанса производная $\frac{dn}{d\omega}$ оказывается очень большой положительной величиной. Эта производная

определяет групповую скорость света $V_{gp} = \frac{c}{n + \frac{dn}{d\omega} \omega}$, которая в узкой полосе

частот СРТ-резонанса становится очень малой величиной, достигая десятков метров в секунду. Это явление и называют остановкой света.

Гравитационные волны.

Гравитационные волны во многом похожи на электромагнитные волны.

Напряженность электрического поля — сила, деленная на пробный заряд. Можно ввести напряженность гравитационного поля — сила, деленная на пробную массу. Электрическое поле заряда спадает с расстоянием пропорционально $\frac{1}{r^2}$, и гравитационное поле массы спадает, как $\frac{1}{r^2}$. Для

электрического поля спадание $\sim \frac{1}{r^2}$ означает, что поток поля через замкнутую поверхность $\Phi = 4\pi Q$, где Q — сумма зарядов внутри замкнутой поверхности.

Для гравитационного поля, аналогично, спадание $\sim \frac{1}{r^2}$ означает, что поток поля через замкнутую поверхность $\Phi = 4\pi \gamma m$, где γ — гравитационная постоянная в законе всемирного тяготения $F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$, m — сумма масс внутри замкнутой поверхности. Поперечность гравитационных волн.

Излучение электрического поля в основном создают осциллирующие электрические диполи. Электрический дипольный момент $\vec{p} = \sum_i q_i \vec{r}_i$.

Осциллирующий гравитационный дипольный момент $\vec{p}_m = \sum_i m_i \vec{r}_i$ невозможен, так как в системе отсчета центра масс $\vec{p}_m = 0$. И действительно, радиус-вектор

центра масс $\vec{r}_c = \frac{\sum_i m_i \vec{r}_i}{\sum_i m_i}$ не может изменяться под действием внутренних сил,

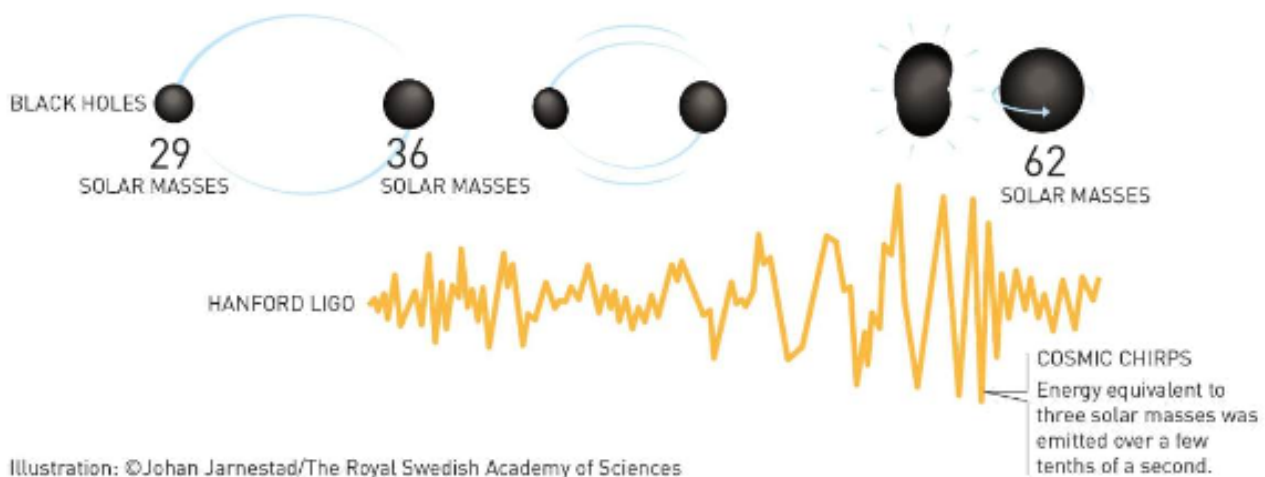
следовательно, дипольный момент (числитель) остается постоянным.

Гравитационный квадрупольный момент похож на электрический квадрупольный момент. Двойная черная дыра излучает мощные гравитационные волны. Потеря энергии на излучение — падение черных дыр друг на друга. Форма сигнала — чирк. Интерферометр Майкельсона, сторона — 4 км. Интерферометр Фабри — Перо увеличивает эффективную длину плеча в 30 раз. Чувствительность установки $\frac{\delta v}{v} = 10^{-21}$ соответствует изменению

длины плеча на десятую долю радиуса атомного ядра, а, казалось бы, должна

быть $\frac{\lambda}{2}$. Свет на приемнике в противофазе, чувствительный приемник. Лазер 20 Вт. Подвеска зеркал. Подавление сейсмических шумов на высоких частотах. Дробовой шум. 200 Гц — оптимальная частота сигнала, откуда две черных дыры с массой в 30 раз больше Солнца каждая. Гравитационный радиус Солнца равен 3 км. При увеличении чувствительности в 3 раза частота регистрации сигналов должна возрасти в 27 раз. Ложные сигналы, порванная струна, вертолеты. Испарение черных дыр.

GRAVITATIONAL WAVES FROM COLLIDING BLACK HOLES



Вопросы к экзамену 2018-2019 учебного года для качественного рассмотрения без математических выкладок.

1. Провал и пик Беннетта. Что по осям? Светоиндуцированный дрейф и разделение изотопов.
2. Резонанс насыщения поглощения. Оптическая схема эксперимента. При каких условиях ширина резонанса много меньше доплеровской ширины линии поглощения? Оптическая развязка.
3. Лазерное охлаждение. Доплеровское охлаждение и его предел. Радиационное давление, оптическая патока. Охлаждение методом боковой полосы.
4. Резонанс плотности возбужденных частиц. Оптическая схема. Что по осям? Почему резонансно уменьшается плотность возбужденных частиц? Оптогальванический метод регистрации.
5. Фемтосекундный (титан-сапфировый) лазер. Синхронизация мод, наведенная светом линза, изменение длительности импульса диафрагмированием луча. Измерение длительности импульса. Чирпирование импульса.
6. Резонанс двухфотонного поглощения без доплеровского уширения. Оптическая схема. Объяснить форму сигнала в виде суммы широкого и узкого контуров. В чем разница между каскадным и двухфотонным возбуждением? Когда каскадным возбуждением можно пренебречь по сравнению с двухфотонным возбуждением?

7. СРТ-резонанс (КПН — резонанс когерентного пленения населенности). В зависимости чего от чего наблюдается резонанс. Почему СРТ-резонансы очень узкие.

8. Физический смысл компонент вектора Блоха. Два смысла первых двух компонент.

9. Динамический эффект Штарка или эффект Штарка в световом поле. Объяснить расщепление уровней. Характер сдвига уровней в слабом поле. Расщепление уровней и правила отбора в сильном поле.

10. Оптические нутации. Частота нутаций, характерное время затухания нутаций. Объяснить причину быстрого спада амплитуды пульсаций интенсивности.

11. Затухание свободной поляризации. Характерное время затухания. Почему сигнал затухает быстрее, чем затухает излучение одной молекулы? Сверхизлучение.

12. Площадь светового импульса. Пи-пополам, пи, 2-пи импульсы. Самоиндуцированная прозрачность.

13. Двухимпульсное фотонное эхо. Объяснить возникновение сигнала эха.

14. Трехимпульсное фотонное эхо. Объяснить эхо эха и индуцированное эхо.

15. Цуг эха Карра-Парселла. Соотношение площадей импульсов и задержек между импульсами.

16. Быстрое адиабатическое прохождение. Отличие и сходство с пи-импульсом. Что наблюдается в эксперименте?

17. Запаздывающая оптическая нутация (двухимпульсная и одноимпульсная).

18. Биения когерентного комбинационного рассеяния. Рассмотреть три сигнала в реальной схеме эксперимента. Форма сигналов на приемнике света.