

## Файл с ответом на вопрос 32 списка вопросов 2012 года.

### Эффект Зеемана. $\sigma^+$ , $\sigma^-$ , $\pi$ компоненты света.

Эффект Зеемана — расщепление спектральных линий в постоянном магнитном поле.

Согласно теореме Лармора в постоянном магнитном поле электронная оболочка атома, как целое, приобретает вращение с угловой скоростью  $\vec{\Omega} = \frac{e}{2m_e c} \vec{B}$ , где  $e$  — модуль заряда электрона,  $m_e$  — масса электрона,  $\vec{B}$  —

магнитная индукция (в системе СИ:  $\vec{\Omega} = \frac{e}{2m_e} \vec{B}$ ).

Доказательство теоремы Лармора основано на том, что во вращающейся с частотой  $\vec{\Omega}$  системе отсчета сила Лоренца со стороны магнитного поля компенсируется кориолисовой силой инерции:

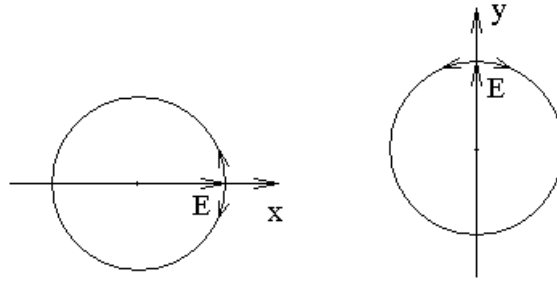
$$\frac{-e}{c} [\vec{V}, \vec{B}] - 2m_e [\vec{\Omega}, \vec{V}] \approx 0.$$

Здесь первое слагаемое — сила Лоренца, второе — сила Кориолиса. Силами, пропорциональными  $B^2$  или  $\Omega^2$  или более высоким степеням  $B$  можно пренебречь в слабых магнитных полях. В частности можно пренебречь центробежной силой инерции.

Взаимная компенсация сил Лоренца и Кориолиса означает, что во вращающейся системе отсчета электрон движется по тем же законам, что и в неподвижной системе без магнитного поля. Это и означает вращение электронной оболочки, как целого, с угловой скоростью  $\vec{\Omega} = \frac{e}{2m_e c} \vec{B}$ .

Рассмотрим излучение диполя, который гармонически осциллирует с частотой  $\omega_0$ . Это движение диполя можно разложить на сумму трех колебаний вдоль осей  $x, y, z$ . Движение в плоскости перпендикулярной оси  $z$  можно разложить не только на два колебания вдоль осей  $x$  и  $y$ , но и на два вращения во встречных направлениях с разными амплитудами и начальными фазами.

Возможность разложения на два вращения во встречных направлениях следует из возможности разложения на два ортогональных колебания и из того, что каждое из этих колебаний можно представить, как два вращения с начальным направлением обоих вращающихся векторов вдоль оси колебания.



Выберем ось  $z$  в направлении постоянного магнитного поля.

В магнитном поле к движению электрона добавляется вращение с частотой ларморовской прецессии  $\vec{\Omega} = \frac{e}{2m_e c} \vec{B}$ .

Если диполь колеблется вдоль магнитного поля, то прецессия Лармора не изменяет частоту  $\omega_0$  его колебаний. Свет, излучаемый диполем, который совершает колебания вдоль магнитного поля, назовем  $\pi$  компонентой света.

Вращения же диполя в плоскости перпендикулярной магнитному полю будут иметь частоты  $(\omega_0 - \Omega)$  и  $(\omega_0 + \Omega)$ , так как к этим вращениям с частотой  $\omega_0$  добавилось вращение с частотой Лармора  $\Omega$ . Свет, излучаемый этими вращающимися диполями, называют соответственно  $\sigma^-$  и  $\sigma^+$  компонентами света.

Названия компонент связаны с тем, что значок  $\pi$  напоминает значок параллельности  $\parallel$  и соответствует свету колебания диполя параллельно магнитному полю. Значок  $\sigma$  напоминает круг. Диполь, вращающийся в плоскости перпендикулярной магнитному полю, излучает круговую поляризацию света вдоль магнитного поля.

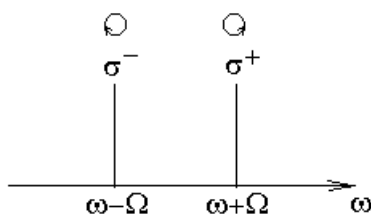
Из курса электричества мы знаем излучение диполя, колеблющегося вдоль оси  $z$ :

$$E_\theta = B_\varphi = \frac{\sin(\theta)}{cr} \cdot \frac{\partial^2 p_z \left( t - \frac{r}{c} \right)}{\partial t^2}.$$

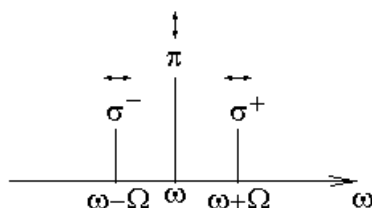
Вращение диполя можно представить, как два ортогональных колебания со сдвигом фаз  $\frac{\pi}{2}$ . Это позволяет найти излучение вращающегося диполя в любом направлении.

С учетом этих соображений спектр излучения произвольно осциллирующего диполя будет зависеть от направления излучения.

При наблюдении вдоль магнитного поля наблюдаются две компоненты  $\sigma^-$  и  $\sigma^+$  с круговой поляризацией света с частотами  $(\omega_0 - \Omega)$  и  $(\omega_0 + \Omega)$ .  $\pi$ -компонента в этом направлении не излучается.



При наблюдении перпендикулярно магнитному полю наблюдаются три компоненты линейно поляризованного света  $\sigma^-$ ,  $\pi$ ,  $\sigma^+$  с частотами соответственно  $(\omega_0 - \Omega)$ ,  $\omega_0$ ,  $(\omega_0 + \Omega)$ .



Если постоянного магнитного поля нет, то колебания диполя все равно можно разложить на  $\sigma^-$ ,  $\pi$  и  $\sigma^+$  компоненты относительно любой оси, так называемой оси квантования.

С учетом спина электрона возможен аномальный эффект Зеемана с расщеплением спектральной линии на большее число компонент.

Заметим, что исторически  $\sigma^+$  компонентой называлась компонента света не с большей частотой, как в нашем рассмотрении, а с большей длиной волны.

### Эффект Штарка.

Эффект Штарка — это расщепление и сдвиг спектральных линий атома в постоянном электрическом поле.

Во внешнем электрическом поле  $\vec{E}$  электронная оболочка атома смещается против поля, а ядро атома — по полю, но очень мало.

При этом изменяется энергия электрона, она же энергия атома.

В возбужденном состоянии электрон слабее связан с атомом, и его оболочка сдвигается сильнее.

Если возбужденный уровень энергии сдвигается сильнее, чем не возбужденный, то сдвигается частота перехода

$$\omega_{21} = \frac{E_2 - E_1}{\hbar}.$$

Кроме сдвига уровней энергии в электрическом поле происходит расщепление вырожденных уровней энергии.

Вырожденные уровни энергии — это разные уровни с одинаковой энергией. Так, например, в атоме водорода есть состояния с разной вытянутостью эллиптических орбит и одинаковой энергией.

Орбиты с разной вытянутостью по-разному смещаются в электрическом поле. В результате уровень энергии расщепляется.

Если верхний и нижний уровни энергии расщепляются по-разному, то расщепляется и спектральная линия.

Нужно заметить, что приведенная здесь попытка объяснения эффекта Штарка очень поверхностна. При строгом квантовом рассмотрении эффекта Штарка расщепление вырожденных уровней возникает и в том случае, когда приведенные выше рассуждения не предсказывают расщепления.