

H/F_0 и не содержит производных от напряжённостей электрического (E) и магнитного (H) полей. Общее выражение для ГЭЛ достаточно громоздко. В предельном случае слабых полей ($E \sim H \ll F_0$) плотность ГЭЛ имеет вид

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} (E^2 - H^2) + \frac{\alpha}{90\pi F_0^2} [(E^2 - H^2)^2 + 7(EH)^2] + \dots$$

Для сильных полей ($E \sim H \gg F_0$)

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{3} \alpha (E^2 - H^2) \ln \frac{|E^2 - H^2|}{F_0^2}.$$

ГЭЛ получен В. Гейзенбергом и Г. Эйлером в 1936 [1]. В 1948 Ю. Швингер разработал эффективный общий метод вывода лагранжианов типа ГЭЛ с использованием т. н. формализма собственного времени [2].

Набор полей, входящих в Л. э., может и не совпадать с полями в исходном фундам. лагранжиане, а описывать, напр., связанные состояния исходных полей в огранич. интервале импульсов. Такая ситуация осуществляется, в частности, в киральном лагранжиане (см. *Киральная симметрия*), к-рый описывает низкоэнергетич. взаимодействие π -мезонов с нуклонами [3], а также в Л. э., являющимся феноменологич. реализацией нарушенной $U(1)$ -симметрии мезонных взаимодействий в КХД [4].

Лит.: 1) Heisenberg W., Euler H., *Folgerungen aus der Diracschen Theorie des Positrons*, «Z. Phys.», 1936, Bd 98, S. 714; 2) Schwinger J., *On gauge invariance and vacuum polarization*, «Phys. Rev.», 1951, v. 82, p. 664; 3) Weinberg S., *Nonlinear realizations of Chiral-Symmetry*, «Phys. Rev.», 1968, v. 166, p. 1568; 4) Arnowitz R., Nath P., *Effective Lagrangians with $U(1)$ axial anomaly*, «Nucl. Phys.», 1982, v. B 209, p. 234. М. В. Терентьев.

ЛАЗЕР (оптический квантовый генератор, аббревиатура слов англ. фразы: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, что означает «усиление света вынужденным излучением») — устройство, преобразующее разл. виды энергии (электрич., световую, хим., тепловую и т. д.) в энергию когерентного эл.-магн. излучения оптич. диапазона. Устройство Л. зависит от его назначения, режима работы, диапазона генерируемых длин волн λ , уровня генерируемой мощности или энергии. Оно во многом определяется также тем, какой вид энергии преобразуется Л. в когерентное излучение. Тем не менее любой Л., работающий как генератор когерентного излучения, должен состоять из трёх элементов: устройства, поставляющего энергию для переработки её в когерентное излучение; активной среды, к-рая «вбирает» в себя эту энергию и переизлучает её в виде когерентного излучения; устройства, осуществляющего обратную связь. Обратная связь не обязательна, если Л. работает как усилитель когерентного излучения (см. ниже).

В основе работы Л. лежит процесс вынужденного испускания фотонов возбуждёнными квантовыми системами — атомами, молекулами, жидкостями и твёрдыми телами (см. *Квантовая электроника*).

В простейшей форме энергетич. схема Л. выглядит след. образом: выбирается атом (молекула, ион), среди энергетич. состояний к-рого есть 2 энергетич. уровня, между к-рыми возможен излучат. переход. Атом, находящийся в энергетич. состоянии \mathcal{E}_2 , может уменьшить свою энергию и перейти в состояние \mathcal{E}_1 , а избыток энергии $\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1$ испустить в виде фотона, энергия к-рого $\hbar\omega_{21}$ и частота ω_{21} связаны с изменением энергетич. состояния атома соотношением $\hbar\omega_{21} \approx \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1$ (рис. 1). Приближённый знак равенства указывает на то, что в реальной системе атомов, молекул, находящихся в газообразном, жидком или твёрдом состоянии, энергетич. уровни не строго дискретны, а занимают нек-рый интервал значений $\Delta\mathcal{E}_2$ и $\Delta\mathcal{E}_1$, и испускаемый фотон может иметь любую частоту в пределах этого интервала. Чем уже интервалы $\Delta\mathcal{E}_1$, $\Delta\mathcal{E}_2$, тем точнее фиксирована энергия испускаемого фотона.

Спонтанные и вынужденные переходы. Возбуждённый атом из состояния \mathcal{E}_2 может перейти в состояние \mathcal{E}_1 с испусканием фотона как самопроизвольно (спонтанное испускание), так и под действием эл.-магн. излучения (индуцированное, или вынужденное, испускание).

При спонтанном испускании частота фотона может быть произвольной в пределах контура спектральной линии (рис. 2). Произвольно также его направление распространения и фаза. Ширина контура $\Delta\omega$ определяется шириной энергетич. уровней

$$\hbar\Delta\omega = \Delta\mathcal{E}_2 + \Delta\mathcal{E}_1. \quad (1)$$

Значение ординаты $S(\omega, \omega_{21})$ — относит. вероятность испускания фотона частоты ω . Она максимальна при $\omega = \omega_{21}$.

При вынужденном испускании испущенные фотоны полностью тождественны фотонам, действующим на систему атомов. Напр., если действующая эл.-магн. волна монохроматична, то индуцированное испускаемая волна будет тоже монохроматической, имеющей ту же частоту и те же направления распространения и поляризации.

Вероятность индуцированного испускания пропорц. интенсивности действующей волны и зависит от её частоты. Вероятность индуцированного испускания максимальна, если частота ω действующей волны совпадает с ω_{21} . При отклонении ω от ω_{21} вероятность индуцированного испускания убывает по закону, описываемому ф-цией $S(\omega, \omega_{21})$.

Если атом находится в состоянии \mathcal{E}_1 , то под действием внеш. эл.-магн. волны может происходить резонансное поглощение фотонов, сопровождающееся переходом $\mathcal{E}_1 \rightarrow \mathcal{E}_2$. При индуцированном испускании энергия действующей волны увеличивается, а при резонансном поглощении уменьшается. Вероятности резонансного поглощения в точности равны вероятности индуцированного испускания. Поэтому будет ли преобладать в реальной системе атомов процесс вынужденного испускания или процесс резонансного поглощения, зависит от населённости энергетич. уровней N_1 и N_2 . Преобладание вынужденного испускания над поглощением возможно лишь при выполнении условия

$$\frac{N_2}{g_2} - \frac{N_1}{g_1} > 0, \quad (2)$$

где g_1, g_2 — статистич. веса состояний. В условиях термодинамич. равновесия $N_2/g_2 - N_1/g_1 < 0$ и преобладает поглощение. Условие (2), наз. *инверсией населённости*, может быть достигнуто лишь в неравновесной системе путём подвода к ней энергии. Процесс создания инверсной населённости наз. *накачкой*, а подводимая энергия — энергией накачки.

Особенности вынужденного испускания позволяют генерировать когерентное излучение. Первоисточником является процесс спонтанного испускания, причём наиб. число фотонов будет испущено на резонансной частоте ω_{21} , далее вступает в действие индуцированный процесс. Т. к. число спонтанно испущенных фотонов больше на частоте ω_{21} и вероятность индуцированных переходов на этой частоте тоже имеет максимум, то постепенно фотоны на частоте ω_{21} будут доминировать над всеми остальными фотонами. Но для того, чтобы этот процесс развивался, необходима преемственность между поколениями фотонов, т. е. необходима обратная связь.

Обратная связь в Л. осуществляется при помощи оптич. резонатора. В простейшей форме он образован двумя зеркалами, между к-рыми помещается рабочее вещество. Излучаемая волна отражается от зеркал и

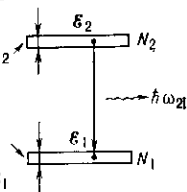


Рис. 1.

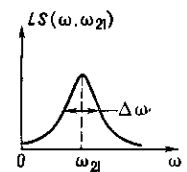


Рис. 2. Спектральная линия спонтанного излучения.