



Рис. 3. Зависимость амплитуды генерации поверхностной ультразвуковой волны в поликристалле железа от  $H_0$ . В слабых полях доминирует магнитоупругий механизм ЭМАП (штриховая линия), наличие двух пиков связано с обращением в нуль магнитострикции при некотором значении поля. В сильных полях преобладает индукционный механизм (пунктир).

эл.-магн. волнами наблюдается в металлах и полупроводниках, в сверхпроводящих и магнитоупорядоченных средах. Для изучения упругих свойств диэлектриков этим методом на их поверхность наносит тонкий проводящий слой («искусственный» скин-слой). На основе ЭМАП созданы скоростной контроль однотипных металл. изделий, толщинометрия горячего проката, контроль адгезии непроводящих покрытий и сварных соединений.

Лит.: Конторович В. М., Глущук А. М., Преобразование звуковых и электромагнитных волн на границе проводника в магнитном поле, «ЖЭТФ», 1961, т. 41, с. 1195; Каганов М. И., Фикс В. Б., Возбуждение звука током в металлических пленках, «ФММ», 1965, т. 19, с. 489; Dobbs E. R., Electromagnetic generation of ultrasonic waves, «Phys. Acoustics. Principles and Methods», 1973, v. 10, p. 127; Frost H. M., Electromagneticultrasound transducers: principles, practice and applications, ibid, 1979, v. 14, p. 179; Бучельников В. Д., Васильев А. Н., Электромагнитное возбуждение ультразвука в ферромагнетиках, «УФН», 1992, т. 162, № 3, с. 89. А. Н. Васильев.

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** — одно из фундам. взаимодействий элементарных частиц (наряду с гравитационным, слабым и сильным), характеризующееся участием в нём эл.-магн. поля.

«Сила» Э. в. элементарных частиц определяется их электр. зарядом, к-рый кратен элементарному электр. заряду  $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$  единиц заряда СГСЭ (абс. величина заряда электрона).

Вследствие равенства нулю массы фотона Э. в. является дальнедействующим (см. *Взаимодействие*), в частности сила притяжения между заряж. покоящимися частицами изменяется с расстоянием как  $1/r^2$  (*Кулона закон*).

С помощью Э. в. осуществляется взаимодействие положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов в атомах и молекулах. Тем самым Э. в. определяет (на основе законов квантовой механики) возможность устойчивого состояния таких микроскопич. систем. Размеры их существ. образом определяются величиной электр. заряда электрона (так, *Бора радиус* равен  $\hbar^2/m_e e^2$ , где  $m_e$  — масса электрона). Эл.-магн. природу имеют фотоэффект, явления ионизации и возбуждения атомов среды быстро движущимися заряж. частицами, процессы расщепления ядер фотонами, реакции фоторождения мезонов, радиационные (с испусканием фотонов) распады элементарных частиц и возбуждённых состояний ядер, упругое и неупругое рассеяние электронов и мюонов на ядерных мишенях и т. п.

В силу дальнедействия Э. в. может заметно проявляться и на макроскопич. уровне. К Э. в. фактически сводится большинство наблюдаемых физ. сил: силы упругости в твёрдых телах, силы трения, силы поверхностного натяжения в жидкостях и др. Свойства разл. агрегатных состояний веществ, хим. превращения веществ также определяются Э. в. Это взаимодействие лежит в основе всех наблюдаемых макроскопически электр., магн. и оптич. явлений. Разл. проявления Э. в. широко используются в электротехнике, радиотехнике, электронике.

Эл.-магн. явления, в к-рых участвуют слабые, медленно меняющиеся эл.-магн. поля, определяются законами классич. электродинамики, описываемыми *Максвелла уравнениями*. Для сильных или быстро меняющихся полей гл. роль играют квантовые явления. Кванты эл.-магн. поля —

фотоны — подчиняются *Бозе—Эйнштейна статистике*, вследствие чего в одном и том же состоянии может находиться любое число фотонов. Это обуславливает возможность описания Э. в. с участием большого числа фотонов в рамках классич. физики. Большое число фотонов и создаёт классич. *электромагнитное поле*.

Как фундаментальное, Э. в. проявляется на малых расстояниях (обычно порядка или меньше атомных), где существенны квантовые эффекты. При этом описание взаимодействия между фотонами и заряж. лептонами дается ур-ниями *квантовой электродинамики*. При описании Э. в. адронов и ядер необходимо учитывать также *сильное взаимодействие*.

Интенсивность (или эфф. сечение) эл.-магн. процессов в микромире определяется безразмерным параметром  $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$ , наз. *тонкой структуры постоянной*. Среди др. типов взаимодействий элементарных частиц Э. в. занимает промежуточное положение как по «силе», так и по числу законов сохранения, к-рые выполняются при Э. в. Так, характерные времена радиац. распадов элементарных частиц и возбуждённых состояний ядер ( $10^{-12} - 10^{-20}$  с) значительно превосходят «ядерные» времена ( $10^{-23}$  с) и много меньше времён распадов, обусловленных *слабым взаимодействием* ( $10^3 - 10^{13}$  с). При Э. в., в отличие от слабого взаимодействия, сохраняются пространственная чётность (*P-чётность*), *зарядовая чётность*, *странность*, *очарование*, *красота*. С хорошей степенью точности установлено, что Э. в. инвариантно по отношению к *обращению времени*. В то же время при Э. в. *адронов* нарушаются присущие сильному взаимодействию законы сохранения *изотопического спина* и *G-чётности*, при этом изотопий. спин адронов может изменяться при испускании или поглощении фотона лишь на  $\pm 1$  или 0.

Законы сохранения и свойства фотонов в значит. степени определяют специфич. черты Э. в. Так, вследствие того что спин фотона равен 1, появляются определ. *отбора правила* в процессах испускания фотонов (напр., запрещены переходы с испусканием одного фотона между состояниями системы, имеющими нулевой момент кол-ва движения). Сохранение зарядовой чётности приводит к тому, что система с положительной зарядовой чётностью *C* может распадаться только на чётное число фотонов, а с отрицательной — на нечётное. Напр., *парапозитроний* (см. *Позитроний*) ( $C = +1$ ) распадается на два фотона, а *ортопозитроний* ( $C = -1$ ) — на три фотона.

Из-за малости  $\alpha$  вероятности эл.-магн. процессов малы по сравнению с вероятностями аналогичных процессов, протекающих за счёт сильного взаимодействия. Напр., сечение рассеяния фотонов с энергией 1 ГэВ на протоне составляет ок.  $10^{-30}$  см<sup>2</sup>, что примерно в  $10^4$  раз меньше сечения рассеяния пионов на протоне при соответствующей полной энергии в системе центра масс (с. ц. м.).

При матем. описании Э. в. эл.-магн. поле в пространственно-временной точке  $x$  характеризуется 4-потенциалом  $A_\mu(x)$ ,  $\mu = 0, 1, 2, 3$ ;  $A = (\phi, A)$ , где  $\phi$  — скалярный потенциал,  $A$  — векторный потенциал. Лагранжиан взаимодействия  $\mathcal{L}$  поля с зарядом записывается в виде скалярного произведения:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{c} \sum_{\mu=0}^3 j_\mu A_\mu = -\rho\phi + \frac{1}{c} \mathbf{j} \cdot \mathbf{A},$$

где  $j_\mu(x)$  — 4-вектор плотности электр. тока:  $j = (c\rho, \mathbf{j})$ ,  $\rho$  — плотность заряда,  $\mathbf{j}$  — плотность электр. тока. В квантовой физике  $j_\mu$  и  $A_\mu$  становятся операторами, при этом ток, образованный движущимися заряж. частицами со спином 1/2 (напр., электронами), описывается выражением  $j_\mu(x) = e\psi(x)\gamma_\mu\psi(x)$ . Здесь  $\psi(x)$  — оператор уничтожения исходного электрона,  $\psi(x)$  — оператор рождения электрона в конечном (после взаимодействия с фотоном) состоянии,  $\gamma_\mu$  — матрица Дирака. Аналогичные выражения имеют место и для др. фермионов со спином 1/2. (Матрицы введены для того, чтобы из операторов  $\psi$  и  $\bar{\psi}$ , к-рые являются четырёхмерными спинорами относительно преобразований Лоренца, сконструировать 4-вектор — *лек-*