

ная *позитрон*, была обнаружена в 1932 в составе космич. лучей, что явилось блестящим подтверждением всей схемы КЭД.

За годы, прошедшие после открытия позитрона, аппарат КЭД был усовершенствован введением техники *перенормировки*, позволившей учитывать в теории более высокие порядки, и предсказания КЭД подверглись сравнению с экспериментом со всё возрастающей точностью. Во всех случаях расхождений обнаружено не было. В частности, с рекордной точностью были рассчитаны и измерены т. н. *лабровский сдвиг* уровней в атоме водорода и магн. момент Э. С учётом высших поправок теории магн. момент Э.  $\mu_e = 1,00116 \mu_B$ .

Один из важных выводов, вытекающий из проверок КЭД, связан с размерами Э. КЭД предполагает Э. точечным. Ни в одном эффекте расхождения с этим допущением обнаружено не было. Физически это означает, что размеры Э. меньше  $10^{-16}$  см. Наилучшая точность проверки была достигнута в чисто электродинамич. процессе  $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ .

*Слабое взаимодействие* Э. при энергиях, меньших 100 ГэВ в системе центра масс, описывается феноменологич. четырёхфермионной теорией; при энергиях, больших 100 ГэВ в системе центра масс, — теорией *электрослабого взаимодействия*. Характерные примеры слабого взаимодействия с участием Э.:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$K^- \rightarrow \pi^0 + e^- + \bar{\nu}_e$$

При рассмотрении слабого взаимодействия Э. следует приписать дополнительную сохраняющуюся величину — электронное *лептонное число*. Такое же лептонное число имеет электронное нейтрино  $\nu_e$ . В рамках точности совр. эксперимента электронное лептонное число сохраняется. Это означает, что допустим, напр., процесс  $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$ , но невозможен процесс  $e^- + p \rightarrow \mu^- + p$  или процесс  $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$ . Природа сохранения электронного лептонного числа пока не понята и является предметом дальнейших исследований. Наиб. вероятно, что указанный закон сохранения не является строгим, но характер и степень его нарушения предстоит ещё выяснить. Возможно, это прольёт новый свет на свойства Э.

А. А. Комар.

**ЭЛЕКТРОНВÓЛЬТ** (эВ, eV) — внесистемная единица энергии. Применяется чаще всего для измерения энергии в физике микромира. 1 эВ — энергия, к-рую приобретает электрон при прохождении разности потенциала в 1 В.  $1 \text{ эВ} = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,60219 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$ . 1 эВ на одну частицу соответствует 23,0 ккал/моль. Значению  $kT = 1 \text{ эВ}$  соответствует  $T = 11600 \text{ К}$ . Часто в эВ выражают массу микрочастиц на основе установленного А. Эйнштейном (А. Einstein) соотношения  $\epsilon = mc^2$  между массой  $m$  и энергией  $\epsilon$ . 1 *атомная единица массы* = 931,49432(28) МэВ.

**ЭЛЕКТРОН-ИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** — в твёрдых телах (металлах и полупроводниках) взаимодействие между подвижными внешними (валентными) электронами и ионами (ионными остовами), расположенными в узлах кристаллической решётки. Осн. вклад в Э.-и. в. даёт притягивающий потенциал кулоновского типа, к-рый в значит. мере компенсируется за счёт отталкивающего потенциала электронов внутр. оболочек (остовных электронов). Поэтому Э.-и. в. принято описывать с помощью т. н. псевдопотенциалов разл. вида, существенно более сглаженных и слабых по сравнению с исходным потенциалом Э.-и. в. Параметры псевдопотенциала обычно выбираются с помощью подгоночной процедуры, опирающейся на эксперим. данные и учитывающей конкретную структуру твёрдого тела, в т. ч. положение и тип атома в элементарной ячейке. Построение псевдопотенциала неоднородно, т. к. оно обусловлено лишь дополнительным «кинематическим» требованием ортогонализации волновых ф-ций внеш. и внутр. электронов; это условие фактически приводит к нек-рому эфф. «динамическому» вкладу в исходный потенциал, существенно ослабляющему последний.

При решении ур-ния Шрёдингера с использованием псевдопотенциала для расчёта энергий и волновых ф-ций внеш. электронов в одноэлектронном приближении (в рамках приближений слабой или сильной связи, см. *Зонная теория*) применима *возмущений теория*; при этом кристаллич. решётка считается неподвижной (т. н. приближение статической решётки). Учёт тепловых колебаний ионов вблизи положений равновесия в узлах кристаллич. решётки благодаря Э.-и. в. приводит к *электрон-фононному взаимодействию* (об Э.-и. в. в атомах, молекулах и плазме см. в ст. *Атом, Молекула, Плазма, а также Рекомбинация ионов и электронов в плазме и Ридберговские состояния*).

*Лит.*: Займан Дж., Принципы теории твёрдого тела, пер. с англ., 2 изд., М., 1974; Хейне В., Козн М., Уэйр Д., Теория псевдопотенциала, пер. с англ., М., 1973; Ашкрофт Н., Мермин Н., Физика твёрдого тела, пер. с англ., т. 1, М., 1979; Брандт Н. Б., Чудинов С. М., Электроны и фононы в металлах, 2 изд., М., 1990; Анималу А., Квантовая теория кристаллических твёрдых тел, пер. с англ., М., 1981; Кацнельсон А. А., Введение в физику твёрдого тела, М., 1984.

Ю. Г. Рудой.

**ЭЛЕКТРОННАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАШИНА**, см. в ст. ЭВМ.

**ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ ОПТИКА** — раздел физики, в к-ром изучают законы распространения пучков заряж. частиц — электронов и ионов — в макроscopic. магн. и электрич. полях и вопросы их фокусировки, отклонения и формирования изображений. Развитие электронной оптики (ЭО) началось с изучения катодных лучей, при помощи к-рых было получено теньевое изображение объекта, свидетельствовавшее, что характер их распространения подобен распространению световых лучей в *геометрической оптике*. Смещение изображения под действием магн. поля показало, что катодные лучи представляют собой поток заряж. частиц [У. Крукс (W. Crookes), 1879]. Попытки по отклонению заряж. частиц совмещёнными электрич. и магн. полями привели к открытию электрона [Дж. Дж. Томсон (J. J. Thomson), 1897]. Одним из первых электронно-лучевых приборов стала осциллография. электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) [К. Ф. Браун (K. F. Braun), 1897]. В ходе совершенствования ЭЛТ была осуществлена фокусировка электронного пучка магн. полем катушки с током [И. Е. Вихерт (I. E. Vichert), 1899]. Теоретич. и эксперим. исследования движения электронов в осесимметричном магн. поле катушки с током показали, что она пригодна для формирования электронно-оптич. изображений и, следовательно, является *электронной линзой* [Х. Буш (H. Busch), 1926]. Создание панцирных линз, магнито-проводы к-рых концентрируют поле катушки, а также электростатич. линз и др. устройств открыло путь к созданию *электронных микроскопов, электронно-оптических преобразователей*, технологич. электронно-лучевых установок и др. Конструирование спец. ЭЛТ для телевизионной и радиокац. аппаратуры, для записи, хранения и воспроизведения информации и т. п. привело к дальнейшему развитию разделов ЭО, связанных с управлением пучками заряж. частиц. Ионная оптика (ИО) стала развиваться в связи с разработкой *масс-спектрометров, фокусирующих систем для ускорителей заряженных частиц*, технологич. установок *ионного травления и эпитаксии, ионных микроскопов* и др. устройств.

По аналогии со световой оптикой Э. и и. о. делится на геометрическую и волновую. В геометрической Э. и и. о. предполагают, что длина волны электронов и ионов мала и не влияет на их траектории. В волновой оптике изучают вопросы, учитывающие дифракцию электронов и ионов, такие как разрешающая способность электронных микроскопов, формирование электронных и ионных зондов предельно малых размеров и т. п. В рамках геом. Э. и и. о. пучок состоит из семейства траекторий заряж. частиц, в световой геом. оптике рассматривают пучок световых лучей. Однако между световой оптикой и Э. и и. о. существует более глубокая аналогия, на к-рую впервые указал У. Гамильтон (W. R. Hamilton, 1827).

Законы геом. световой оптики являются следствием фундаментального *Ферма принципа* (P. Fermat, 1660), согласно