

**ФИЗИЧЕСКИЙ
ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИЙ
СЛОВАРЬ**



НАУЧНО-РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ИЗДАТЕЛЬСТВА
«СОВЕТСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ»

А. М. ПРОХОРОВ (председатель), И. В. АБАШИДЗЕ, П. А. АЗИМОВ, А. П. АЛЕКСАНДРОВ, В. А. АМЕАРИЦУМЯН, М. С. АСИМОВ, М. П. БАЖАН, Ю. Я. БАРАБАШ, Н. В. БАРАНОВ, А. Ф. БЕЛОВ, Н. Н. БОГОЛЮБОВ, Ю. В. БРОМЛЕЙ, П. П. ВАВИЛОВ, В. Х. ВАСИЛЕНКО, Л. М. ВОЛОДАРСКИЙ, В. В. ВОЛЬСКИЙ, Б. М. ВУЛ, М. С. ГИЛЯРОВ, В. П. ГЛУШКО, Д. Б. ГУЛИЕВ, А. А. ГУСЕВ (заместитель председателя), Н. А. ЕГОРОВА, В. П. ЕЛЮТИН, В. С. ЕМЕЛЬЯНОВ, Ю. А. ИЗРАЭЛЬ, А. А. ИМШЕНЕЦКИЙ, А. Ю. ИШЛИНСКИЙ, М. И. КАБАЧНИК, Г. А. КАРАВАЕВ, К. К. КАРАКЕЕВ, Б. М. КЕДРОВ, Г. В. КЕЛДЫШ, В. А. КИРИЛЛИН, И. Л. КНУНЯНЦ, Е. А. КОЗЛОВСКИЙ, М. К. КОЗЫБАЕВ, Ф. В. КОНСТАНТИНОВ, В. А. КОТЕЛЬНИКОВ, В. Н. КУДРЯВЦЕВ, М. И. КУЗНЕЦОВ (заместитель председателя), В. Г. КУЛИКОВ, И. А. КУТУЗОВ, П. П. ЛОБАНОВ, Г. И. МАРЧУК, Ю. Ю. МАТУЛИС, Г. И. НААН, И. С. НАЯШКОВ, Н. В. ОГАРКОВ, В. Г. ПАНОВ (первый заместитель председателя), Б. Е. ПАТОН, В. М. ПОЛЕВОЙ, М. А. ПРОКОФЬЕВ, Ю. В. ПРОХОРОВ, Н. Ф. РОСТОВЦЕВ, А. М. РУМЯНЦЕВ, Б. А. РЫБАКОВ, В. П. САМСОН, М. И. СЛАДКОВСКИЙ, В. И. СМЕРНОВ, Г. В. СТЕПАНОВ, В. Н. СТОЛЕТОВ, Б. И. СТУКАЛИН, М. Л. ТЕРЕНТЬЕВ, И. М. ТЕРЕХОВ, С. А. ТОКАРЕВ, В. А. ТРАПЕЗНИКОВ, П. Н. ФЕДОСЕЕВ, М. Б. ХРАПЧЕНКО, Е. И. ЧАЗОВ, И. П. ШАМЯКИН, Я. Е. ШМУШКИС, С. И. ЮТКЕВИЧ.

ФИЗИЧЕСКИЙ ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

Главный редактор

А. М. ПРОХОРОВ

Редакционная коллегия

Д. М. АЛЕКСЕЕВ (зам. гл. редактора),
А. М. БОНЧ-БРУЕВИЧ, А. С. БОРОВИК-РОМАНОВ,
Б. К. ВАЙНШТЕЙН, Б. М. ВУЛ,
А. В. ГАПОНОВ-ГРЕХОВ, И. П. ГОЛЯМИНА,
И. И. ГУРЕВИЧ, А. А. ГУСЕВ (зам. гл. редактора),
М. А. ЕЛЪЯШЕВИЧ, Б. Б. КАДОМЦЕВ,
В. В. МИГУЛИН, С. М. ТАРГ, И. С. ШАПИРО,
Д. В. ШИРКОВ.

МОСКВА
«СОВЕТСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ»
1983

НАУЧНЫЕ КОНСУЛЬТАНТЫ

С. А. АХМАНОВ, Э. Л. БУРШТЕЙН, Н. А. ВАЛЮС, С. Л. ВИШНЕВЕЦКИЙ,
М. Д. ГАЛАНИН, С. С. ГЕРШТЕЙН, В. И. ГРИГОРЬЕВ, А. В. ЕФРЕМОВ,
М. Е. ЖАБОТИНСКИЙ, Д. Н. ЗУБАРЕВ, М. И. КАГАНОВ, В. С. КАФТАНОВ,
В. С. ЛЕНСКИЙ, Т. М. ЛИФШИЦ, С. Ю. ЛУКЬЯНОВ, Г. Я. МЯКИШЕВ,
И. Д. НОВИКОВ, К. П. ШИРОКОВ.

РЕДАКЦИЯ ФИЗИКИ

Зав. редакцией Д. М. АЛЕКСЕЕВ, ст. научные редакторы: Ю. Н. ДРОЖЖИН-
ЛАБИНСКИЙ, В. И. ИВАНОВА, И. Б. НАЙДЕНОВА, Н. Г. СЕМАШКО,
С. М. ШАПИРО; научный редактор И. В. ПЕТРОВА; мл. редакторы:
Л. Н. ДВОРНИКОВА, Т. В. САМОЙЛОВА, Е. Л. ШИННИНА.

В подготовке Словаря принимали участие:

Редакция словника — зав. редакцией А. Л. ГРЕКУЛОВА, научный редактор Э. С. ЗАГОРУЙКО.

Литературно-контрольная редакция — зав. редакцией М. М. ПОЛЕТАЕВА, ст. редакторы Л. Д. МАКАРОВА, И. И. ПЕТРОВА, редактор Т. Б. ЗЕРЧАНИНОВА.

Группа библиографии — ст. научный редактор В. А. СТУЛОВ, ст. редактор М. М. ШИНКАРЕВА.

Группа транскрипции и этимологии — научный редактор Н. П. ДАНИЛОВА.

Редакция иллюстраций — зав. редакцией Г. В. СОБОЛЕВСКИЙ, ст. художественный редактор Ф. Н. БУДАНОВ.

Отдел комплектования — зав. отделом Р. Б. ИВАННИКОВА.

Техническая редакция — зав. редакцией А. В. РАДИШЕВСКАЯ, ст. технический редактор Р. Т. НИКИШИНА.

Корректорская — зав. М. В. АКимова и А. Ф. ПРОШКО.

Главный художник издательства — Л. Ф. ШКАНОВ.

Физический энциклопедический словарь/Гл. ред. А. М. Прохоров. Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. — М.: Сов. энциклопедия, 1983.—928 с., ил., 2 л. цв. ил.

Словарь знакомит читателя с классической и квантовой физикой и некоторыми вопросами пограничных с физикой областей науки: астрофизики, физической химии, электроники и др. Освещаются отдельные разделы физики (акустика, атомная физика, квантовая электроника и т. д.), важнейшие физические теории (квантовая механика, теория относительности и др.), физические законы, явления, понятия, методы исследования.

Книга рассчитана на физиков — научных сотрудников и инженеров, на преподавателей физики средней и высшей школы и студентов-физиков, а также специалистов смежных с физикой наук.

Ф 1704010000-002
007(01)-83 КБ—11—9—1983

53(03)

ИБ № 86

Сдано в набор 26.03.82. Подписано в печать 07.02.83. Т—03552. Формат 84×108/16. Бумага типографская № 1. Гарнитура обыкновенно-новая. Печать высокая. 97,86 усл.-печ. л., 170,75 уч.-изд. л., 99,54 усл. кр.-отт. Тираж 100 000 экз. Заказ № 890. Цена 11 руб. 50 коп.

Отпечатано с матриц, изготовленных в ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Первой Образцовой типографии им. А. А. Жданова.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Советская энциклопедия», 109817, Москва, Покровский бульвар, д. 8.

Ордена Трудового Красного Знамени Московская типография № 2 «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 129085, Москва, Проспект Мира, 105.

© Издательство «Советская энциклопедия», 1983

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Настоящий Физический энциклопедический словарь, содержащий примерно 3100 статей, предназначен прежде всего для физиков — научных сотрудников и инженеров, работающих в разных областях физики, а также для преподавателей физики, студентов-физиков; он может быть полезен для астрономов, химиков, биологов, математиков. Чтобы поместить в однотомное издание огромный объём информации, обусловленный бурным развитием физики, пришлось ограничиться в основном «чистой» физикой, из смежных областей физики имеются в небольшом количестве статьи по астрофизике и радиофизике; нет статей по химии, биофизике, геофизике, фотографии и т. д.

В Словаре читатель найдёт сравнительно краткие обзоры по общим проблемам физики и небольшие справочные

статьи по более специальным вопросам. Во многих статьях даются самые краткие исторические сведения: автор и даты открытий или результатов. Все крупные и многие средние статьи снабжены библиографическими справками, использование которых должно помочь читателю получить более полную информацию. При написании статей одной из задач было максимальное насыщение их конкретными сведениями, другой — доступность изложения материала для возможно более широкого круга читателей. К написанию статей были привлечены специалисты, работающие в данной конкретной области физики.

Издательство с благодарностью примет все замечания читателей, что позволит улучшить Словарь при его возможном переиздании.

КАК ПОЛЬЗОВАТЬСЯ ФИЗИЧЕСКИМ ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИМ СЛОВАРЁМ

1. Статьи расположены в алфавитном порядке. Если термин (чёрное слово) имеет несколько значений, то все они, как правило, объединены в одной статье, но каждое значение выделено цифрой со скобкой. Если после слова, набранного жирным прописным шрифтом, даётся другое (или другие) слово в скобках, то это означает, что существует синоним (синонимы) первого, например **КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ (импульс)**.

2. Название статьи во многих случаях состоит из двух и более слов. Такие составные термины даны в наиболее распространённом в литературе виде. Однако порядок слов иногда изменяется, если на первое место возможно вынести главное по смыслу слово. Если прилагательное и существительное образуют единое понятие, то статью нужно искать, как правило, на прилагательное. Когда название статьи включает имя собственное, оно выносится на первое место (например, **ВАВИЛОВА ЗАКОН**). Названия статей даются преимущественно в единственном числе, но иногда, в соответствии с принятой терминологией, — во множественном числе (например, **УСКОРИТЕЛИ** заряженных частиц).

3. К терминам, входящим в название статьи и представляющим собой заимствования из других языков, приводится краткая этимологическая справка.

4. Для исключения повторов в словаре широко используется система ссылок; ссылки выделяются *курсивом*.

5. Единицы физических величин и их сокращённые обозначения даны в соответствии с существующим ГОСТом.

6. С целью экономии места в Словаре применяется система сокращений. Наряду с общепринятыми сокращениями (например, т. е., и т. д., и т. п.) применяются также сокращения, установленные для данного издания (см. ниже — Основные сокращения). Слова, составляющие названия статей, в тексте статьи обозначаются начальными буквами (например, **АБЕРРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ** — А. о. с.).

7. Позиции на иллюстрациях объясняются или в подписях, или в тексте статьи.

8. При фамилиях учёных, упомянутых в статьях (кроме русских и советских), указывается их государственная или национальная принадлежность.

9. На переднем форзаце приведены значения некоторых физических и астрономических постоянных (взятых гл. обр. из таблиц стандартных справочных данных «Фундаментальные физические константы», ГСССД 1—76, М., 1976), на заднем форзаце — периодическая система элементов Д. И. Менделеева.

10. Среднеквадратичная ошибка для физических величин указывается в скобках и относится к последним значащим цифрам.

11. Все буквенные обозначения в формулах объясняются в тексте статьи, за исключением обозначений, которые имеют постоянное значение по всему тексту Словаря (если это специально не оговаривается):

- c — скорость света
 - k — Больцмана постоянная
 - h и $\hbar$ — Планка постоянная
 - T — абсолютная температура
 - λ — длина волны,
- а также обозначения некоторых элементарных частиц:
- γ — фотон, гамма-квант
 - e, e^- — электрон
 - $\mu^\pm$ — мюоны
 - ν_e — электронное нейтрино
 - ν_μ — мюонное нейтрино
 - p — протон
 - n — нейтрон
 - N — нуклон
 - $\pi^\pm, \rho^0$ — пи-мезоны
 - $K^\pm, K^0$ — К-мезоны;

значок тильда ($\sim$) над символом частицы обозначает соответствующую античастицу (например, $\bar{p}$ — антипротон).

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

абс. — абсолютный
 астр. — астрономический
 ат. — атомный
 ат. м. — атомная масса
 ат. н. — атомный номер
 атм. — атмосферный
 б. или м. — более или менее
 б. ч. — большей частью, большая часть
 биол. — биологический
 быв. — бывший
 в осн. — в основном
 в ср. — в среднем
 в т. ч. — в том числе
 в-во — вещество
 верх. — верхний
 вз-ствие — взаимодействие
 вкл. — включительно
 внеш. — внешний
 внутр. — внутренний
 вод. — водяной, водный
 возд. — воздушный
 волн. — волновой
 ВЧ — высокая частота, высокочастотный
 геом. — геометрический
 гл. — главный
 гл. обр. — главным образом
 ДВ — длинные волны, длинноволновый
 диам. — диаметр
 дискр. — дискретный
 дифф. — дифференциальный
 др. — другой
 ед. — единица
 звук. — звуковой
 ИК — инфракрасный
 ИСЗ — искусственный спутник Земли
 кач-во — качество

КВ — короткие волны, коротковолновый
 квант. — квантовый
 к-л. — какой-либо
 к.-н. — какой-нибудь
 кол-во — количество
 кон. — конечный, конец
 косм. — космический
 коэфф. — коэффициент
 КПД — коэффициент полезного действия
 крист. — кристаллический
 к-рый — который
 лаб. — лабораторный
 лит. — литература
 магн. — магнитный
 макс. — максимальный
 матем. — математический
 МГД — магнитогидродинамический
 мин. — минимальный
 мн. — многие
 мол. — молекулярный
 мол. м. — молекулярная масса
 наз. — называемый, называется
 назв. — название
 наиб. — наиболее
 нач. — начальный, начало
 нек-рый — некоторый
 неск. — несколько
 неупр. — неупругий
 ниж. — нижний
 НЧ — низкая частота, низкочастотный
 одноврем. — одновременно
 одноим. — одноименный
 ок. — около
 ориг. — оригинальный
 осн. — основной
 отд. — отдельный
 пл. — площадь

плотн. — плотность
 посв. — посвящен
 пост. — постоянный
 ПП — полупроводник, полупроводниковый
 пр. — прочий, прочие
 пр-во — пространство
 преим. — преимущественно
 пригл. — приблизительно, приближительный
 пропорц. — пропорциональный, пропорционально
 прямоуг. — прямоугольный
 радиоакт. — радиоактивный
 разл. — различный (ые)
 релятив. — релятивистский
 рентг. — рентгеновский
 рис. — рисунок
 р-р — раствор
 СВ — средние волны, средневолновый
 св. — свыше
 св-ва — свойства
 СВЧ — сверхвысокие частоты, сверхвысокочастотный
 сер. — середина, серия
 след. — следующий
 см. — смотри
 совр. — современный
 сокр. — сокращенно, сокращение
 солн. — солнечный
 соотв. — соответственно
 спец. — специальный
 ср. — средний, сравни
 ст. — статья
 табл. — таблица
 тв. — твердость, твердый
 темп-ра — температура
 теор. — теоретический

техн. — технический
 УВЧ — ультравысокие частоты, ультравысокочастотный
 угл. — угловой
 уд. — удельный
 УЗ — ультразвук, ультразвуковой
 УКВ — ультракороткие волны, ультракоротковолновый
 упр. — упругий
 ур-ние — уравнение
 усл. — условно, условный
 устар. — устаревший
 УФ — ультрафиолетовый
 физ. — физический
 фла. — формула
 фотогр. — фотографический
 фундам. — фундаментальный
 фун-ция — функция
 ФЭУ — фотоэлектронный умножитель
 хар-ка — характеристика
 хар-р — характер
 хим. — химический
 ч.-л. — что-либо
 ч-ца — частица
 ЭВМ — электронная вычислительная машина
 эдс — электродвижущая сила
 эксперим. — экспериментальный
 элем. — элементарный
 эл.-магн. — электромагнитный
 эл.-н — электрон
 ЭПР — электронный парамагнитный резонанс
 эфф. — эффективный
 явл. — является
 яд. — ядерный
 ЯМР — ядерный магнитный резонанс
 ● — библиография

Применяется сокращение слов, обозначающих государственную, языковую или национальную принадлежность (например, «англ.» — английский, «итал.» — итальянский, «лат.» — латинский). В прилагательных и причастиях допускается отсечение частей слов «альный», «иальный», «ельный», «енный», «ионный», «ующий» и др.; например, «центр», «потенц», «значит», «естеств», «дистанц», «действ».

А

АБЕРРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ (от лат. aberratio — уклонение), искажения, погрешности изображений, формируемых оптич. системами. А. о. с. проявляются в том, что оптич. изображения не вполне отчётливы, не точно соответствуют объектам или оказываются окрашенными. Наиболее распространены след. виды А. о. с.: **сферическая абберация** — недостаток изображения, при к-ром испущенные одной точкой объекта световые лучи, прошедшие вблизи *оптической оси* системы, и лучи, прошедшие через отдалённые от оси части системы, не собираются в одну точку; **кома** — абберация, возникающая при косом прохождении световых лучей через оптич. систему. Если при прохождении оптич. системы сферич. световая волна деформируется так, что пучки лучей, исходящих из одной точки объекта, не пересекаются в одной точке, а располагаются в двух взаимно перпендикулярных отрезках на нек-ром расстоянии друг от друга, то такие пучки наз. астигматическими, а сама эта абберация — **астигматизмом**. Абберация, наз. **дисторсией**, приводит к нарушению геом. подобия между объектом и его изображением. К А. о. с. относится также **кривизна поля** изображения.

Оптич. системы могут обладать одновременно неск. видами аббераций. Их устранение производят в соответствии с назначением системы; часто оно представляет собой трудную задачу. Перечисленные выше А. о. с. наз. **геометрическими**. Существует ещё **хроматическая абберация**, связанная с зависимостью показателя преломления оптич. сред от длины волны света. Вследствие волн. природы света, несовершенства изображений в оптич. системах возникают также в результате **дифракции света** на **диафрагмах**, **оправах линз** и т. п. Они принципиально неустранимы (хотя и могут быть уменьшены), но обычно влияют на кач-во изображения меньше, чем геом. и хроматич. А. о. с.

● Борн М., Вольф Э., Основы оптики, пер. с англ., 2 изд., М., 1973; Герцбергер М., Современная геометрическая оптика, пер. с англ., М., 1962; Слюсарев Г. Г., Методы расчета оптических систем, 2 изд., Л., 1969.

АБЕРРАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛИНЗ, искажения электронно-оптич. изображений, возникающие вследствие разброса ч-ц по энергиям в пучке, наличия тепловых скоростей, дифракции ч-ц, а также из-за эффектов пространств. заряда. Классификацию А. э. л. см. в ст. **Электронная и ионная оптика**. Абберациями обладают и **электронные зеркала**.

АБЕРРАЦИЯ СВЕТА в астрономии, изменение видимого положения светила на небесной сфере, обусловленное

конечностью скорости света и движением наблюдателя вследствие вращения Земли (суточная А. с.), обращения Земли вокруг Солнца (годовая А. с.) и перемещения Солн. системы в пр-ве (вековая А. с.).

АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА (термодинамическая температура), **параметр состояния**, характеризующий макроскопич. систему в состоянии термодинамич. равновесия (при этом А. т. всех её макроскопич. подсистем одинакова). А. т. введена в 1848 англ. физиком Н. Томсоном (Кельвином) на основании **второго начала термодинамики**. А. т. обозначается символом T , выражается в кельвинах (К) и отсчитывается от **абсолютного нуля температуры**. А. т. измеряют по термодинамической и международной практическим **температурным шкалам**.

АБСОЛЮТНО НЕЙТРАЛЬНАЯ ЧАСТИЦА, то же, что **истинно нейтральная частица**.

АБСОЛЮТНО ЧЕРНОЕ ТЕЛО, термин, к-рым в теории теплового излучения наз. тело, полностью поглощающее весь падающий на него поток излучения. Коэфф. поглощения



А. ч. т. равен единице и не зависит от длины волны излучения. Наиболее близким приближением к А. ч. т. явл. непрозрачный сосуд с небольшим отверстием, стенки к-рого имеют одинаковую темп-ру (рис.). Луч, попавший в такой сосуд, испытывает многократные отражения, частично поглощаясь при каждом из них. Через нек-рое время стенки сосуда поглощают его полностью. Близким к единице коэфф. поглощения обладают сажа и платиновая чернь.

Интенсивность излучения А. ч. т. выше, чем всех остальных («нечёрных») тел при той же темп-ре (см. **Кирхгофа закон излучения**). Осн. особенность излучения А. ч. т.: его св-ва не зависят от природы в-ва и определяются лишь темп-рой стенок, т. е. излучение А. ч. т. находится в термодинамич. равновесии с в-вом и распределение плотности этого излучения по длинам волн даётся **Планка законом излучения**, а полная плотность излучения по всем длинам волн определяется **Стефана — Больцмана законом излучения**.

Закономерности, определяющие излучение А. ч. т., используют в оптич. пирометрии для измерения высоких темп-р; А. ч. т. используют также в кач-ве световых эталонов.

АБСОЛЮТНЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ, ом, вольт, ампер и др., установленные

для практич. электрич. измерений Г-м Междунар. конгрессом электриков (1881). Они заменили электрич. ед. **СГС системы единиц**, поскольку нек-рые из ед. были слишком малы или велики и поэтому неудобны для практич. применения. Ед. электрич. сопротивления (ом) и разности потенциалов (вольт) были установлены как кратные соответствующим ед. СГС ($1 \text{ Ом} = 10^9$ ед. СГС, $1 \text{ В} = 10^8$ ед. СГС). Остальные ед. — ампер, кулон, джоуль и др. выводились как производные от ома и вольты. В дальнейшем А. н. э. е. были включены в **МКСА систему единиц**, причём за основную ед. в ней был принят ампер. С установлением **Международной системы единиц** (СИ), охватывающей все области физ. и техн. измерений, А. н. э. е. вошли в СИ вместе с системой МКСА.

АБСОЛЮТНЫЕ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ, содержат ограничения. число основных ед. физ. величин, а остальные ед. системы определяются как производные от основных. При определении производной ед. к-л. физ. величины в А. с. е. исходят из ф-лы, выражающей зависимость между этой величиной и др. величинами, ед. к-рых явл. основными или выражены через основные. В 30-х гг. 19 в. нем. математиком К. Ф. Гауссом была введена А. с. е. с основными ед. миллиметр (ед. длины), миллиграмм (ед. массы) и секунда (ед. времени). Поэтому часто назв. «А. с. е.» применяют к системам, построенным на трёх основных ед. — длины, массы и времени, а иногда и в ещё более узком смысле — по отношению к **СГС системам единиц**, т. е. к системам, в к-рых за основные ед. приняты сантиметр, грамм и секунда. Термин «А. с. е.» следует считать устаревшим, поскольку системы ед. могут быть построены и на иной основе. ● См. при ст. **Система единиц**.

АБСОЛЮТНЫЙ НУЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ, начало отсчёта термодинамич. темп-ры; расположен на $273,16 \text{ К}$ ниже темп-ры тройной точки ($0,01^\circ\text{C}$) воды (на $273,15^\circ\text{C}$ ниже нуля темп-ры по шкале Цельсия, см. **Температурные шкалы**). Существование термодинамич. температурной шкалы и А. н. т. следует из **второго начала термодинамики**. С приближением темп-ры к А. н. т. стремятся к нулю тепловые хар-ки в-ва: **энтропия**, **теплотёмкость**, коэфф. теплового расширения и др. По представлениям классич. физики, при А. н. т. энергия теплового (хаотич.) движения молекул и атомов в-ва равна нулю. Согласно же квант. механике, при А. н. т. атомы и молекулы, расположенные в

улах крист. решётки, не находятся в полном покое, они совершают «нулевые» колебания и обладают т. н. нулевой энергией. Если масса атомов и энергия вз-ствия между ними очень малы, нулевые колебания могут воспрепятствовать образованию крист. решётки. Это имеет место у ^3He и ^4He , к-рые остаются жидкими при атм. давлении вплоть до самых низких достигнутых темп-р.

Получение темп-р, предельно приближающихся к А. н. т., представляет сложную эксперим. проблему (см. *Низкие температуры*), но уже получены темп-ры, лишь на миллионные доли градуса отстоящие от А. н. т.

● См. при ст. *Температурные шкалы и Низкие температуры*.

АБСОРБЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ, методы изучения энергетич. состояний квант. систем путём исследования их спектров поглощения. В А. с. излучение непрерывного спектра пропускают через слой исследуемого в-ва, в к-ром поглощается излучение характерных для данного в-ва длин волн. Детектор спектр. прибора фиксирует изменение интенсивности света в зависимости от длины волны, т. е. спектр поглощения в-ва. Получение спектров поглощения возможно во всех диапазонах длин волн, но особенно широко они применяются в радио-, ИК- и субмиллиметровом диапазонах. А. с. — основа абсорбционного спектрального анализа. См. также *Спектроскопия*.

АБСОРБЦИЯ (от лат. absorbeo — поглощаю), поглощение (извлечение) в-в из газовой смеси всем объёмом жидкости (абсорбента). А. — один из процессов растворения определ. газа в жидком растворителе; величина А. определяется растворимостью этого газа, а скорость — разностью его концентраций в газовой смеси и в жидкости. Если концентрация газа в жидкости выше, чем в газовой смеси, он выделяется из р-ра (десорбция). А. применяется для разделения газов, на ней основаны мн. важнейшие промышленные процессы (производство нек-рых кислот, соды и т. д.). Извлечение в-ва из р-ра всем объёмом жидкого абсорбента (экстракция) и из газовой смеси расплавами (окклюзия) — процессы, аналогичные А. Часто А. сопровождается образованием хим. соединений (хемосорбция) и поверхностным поглощением в-ва (адсорбция).

АБСОРБЦИЯ СВЕТА, то же, что *поглощение света*.

АВОГАДРО ЗАКОН, один из осн. законов идеального газа, согласно к-рому в равных объёмах V разл. газов при одинаковых давлении p и темп-ре T содержится одинаковое число молекул. Открыт в 1811 итал. учёным А. Авогадро (А. Avogadro). Согласно А. з., 1 кмоль любого идеального газа

при норм. условиях ($p = 101\,325\text{ Па} = 760\text{ мм рт. ст.}$ и $T = 0^\circ\text{C}$) занимает объём $22,4136\text{ м}^3$; число молекул в одном моле наз. *Авогадро постоянной*.

Согласно кинетич. теории газов, $pV = \frac{1}{3} N m \bar{v}^2$ (N — число, m — масса, $\bar{v}^2$ — ср. квадратичная скорость молекул), а $\frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} kT$. Отсюда видно, что для двух газов при условии $T_1 = T_2$, $p_1 = p_2$ и $v_1 = v_2$ должно быть и $N_1 = N_2$.

АВОГАДРО ПОСТОЯННАЯ (число Авогадро), число структурных элементов (атомов, молекул, ионов или др. ч-ц) в ед. кол-ва в-ва (в одном моле). Названа в честь А. Авогадро, обозначается N_A . А. п. — одна из фундаментальных физических констант, существующая для определения мн. других физ. констант (*Больцмана постоянной*, *Фарадея постоянной* и др.). Один из лучших эксперим. методов определения А. п. основан на измерениях электрич. заряда, необходимого для электролитич. разложения известного числа молей сложного в-ва, и заряда эл-на. Наиболее достоверное значение А. п. (на 1980) $N_A = 6,022045(31) \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$.

АВТОИОНИЗАЦИЯ (полевая ионизация), процесс ионизации атомов и молекул газа в сильных электрич. полях. Связанный эл-н в атоме можно представить находящимся в *потенциальной яме* (рис. 1, а). При включении электрич. поля напряжённостью E к начальной потенц. энергии эл-на $V_0(x)$, находящегося в точке x , добавляется потенц. энергия eEx , где e — заряд эл-на. Вследствие этого потенц. яма становится асимметричной — с одной её стороны образуется *потенциальный барьер* конечной ширины x_1x_2 (рис. 1, б), сквозь к-рый эл-н может «просочиться», т. е. будет иметь место *туннельный эффект* и будет возможна ионизация с ниж. уровня атома.

Вероятность $W(V, \mathcal{E})$ туннелирования эл-на сквозь потенц. барьер определяется ф-лой:

$$W(V, \mathcal{E}) = \exp \left\{ -\frac{4\pi}{h} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m[V(x) - \mathcal{E}]} dx \right\},$$

где $V(x) = V_0(x) + eEx$ и $\mathcal{E}$ — соотв. потенциальная и полная энергия эл-на, m — его масса. Вероятность $W(V, \mathcal{E})$ туннелирования резко увеличивается при уменьшении площади барьера над прямой x_1x_2 . Это происходит при увеличении напряжённости поля E или при повышении энергии $\mathcal{E}$ эл-на в атоме к-л. др. способами (напр., при туннелировании эл-нов с возбуждённых уровней). Так, вероятность А. атома водорода из осн. состояния достигает заметной величины лишь при $E \sim 10^8\text{ В/см}$, а из возбуждённых состояний — уже при $E \sim 10^6\text{ В/см}$. Экспериментально впервые обнаружена именно А. возбуждённых атомов: в спектре испускания атомов водорода, находящихся во

внеш. электрич. поле напряжённостью $\sim 10^6\text{ В/см}$, было обнаружено падение интенсивности линий, связанных с квант. переходами эл-нов из наиболее высоких возбуждённых состояний в основное. Явление было объяснено тем, что А. возбуждённых атомов становится более вероятным процессом, чем их излучат. переход в осн. состояние, и свечение этих линий затухает.

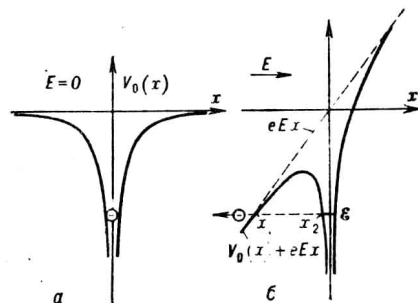


Рис. 1.

Наиболее полно исследована А. вблизи поверхности металла, т. к. она используется в автоионном микроскопе для получения увеличенного изображения поверхности (см. *Ионный проектор*).

Вероятность А. у поверхности металла оказывается значительно большей, чем в свободном пр-ве при той же напряжённости поля, что обусловлено действием сил «изображения», снижающих потенц. барьер (см. *Шотки эффект*). Однако А. возможна лишь в том случае, когда расстояние атома от поверхности превышает нек-рое критич. расстояние $x_{кр}$. Это связано с

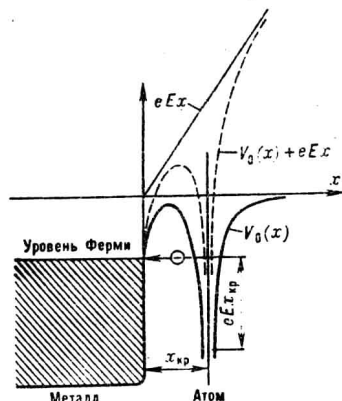


Рис. 2.

тем, что при обычных темп-рах для осуществления туннельного перехода эл-на в металл необходимо, чтобы осн. уровень энергии эл-на в атоме был поднят электрич. полем хотя бы до уровня Ферми (см. *Ферми энергия*) в металле (рис. 2). Если атом приблизится к поверхности на $x < x_{кр}$, то уровень энергии эл-на в атоме окажется ниже уровня Ферми в металле и W резко уменьшится. С другой стороны, удаление атома от поверхности металла

при $x > x_{кр}$ также приводит к резкому уменьшению W . Поэтому А. практически имеет место в пределах нек-рой зоны вблизи $x_{кр}$. В рабочем режиме автоионного микроскопа полуширина этой зоны составляет 0,2—0,4 Å.

Явление А. используется также при создании ионных источников для масс-спектрометров. Достоинством таких источников явл. отсутствие в них накаливаемых электродов, а также то, что в них удаётся избежать диссоциации анализируемых молекул. Кроме того, с помощью таких ионных источников можно наблюдать специфические хим. реакции, происходящие лишь в сильных электрич. полях.

● Мюллер Э. В., Тьен Т. цю Цюнг, Полевая ионная микроскопия, полевая ионизация и полевое испарение, пер. с англ., М., 1980; Физические основы полевой масс-спектрометрии, под ред. Э. Н. Короля, К., 1978. А. Г. Науменко.

АВТОИОННЫЙ МИКРОСКОП, то же, что ионный проектор.

АВТОКОЛЕБАНИЯ, незатухающие колебания, поддерживаемые внеш. источником энергии, в нелинейной диссипативной системе, вид и св-ва к-рых определяются самой системой. Термин «А.» введён в 1928 А. А. Андроновым.

А. принципиально отличаются от остальных колебат. процессов в диссипативной системе тем, что для их поддержания не требуется периодич. воздействий извне. Колебания скрипичной струны при равномерном движении смычка, тока в радиотехн. генераторе, воздуха в органной трубе, маятника в часах — примеры А. В простейших автоколебат. системах можно выделить колебат. систему с затуханием, усилитель колебаний, нелинейный ограничитель и звено обратной связи. Напр., в ламповом генераторе (генераторе Ван-дер-Поля — рис. 1) колебат. контур, состоящий из ёмкости C , индуктивности L и сопротивления R , представляет собой колебат. систему с затуханием, цепь катод—сетка и индуктивность L' образуют цепь обратной связи. Случайно возникшие в контуре LC малые собственные колебания через катушку L' управляют анодным током i_a лампы, к-рый усиливает колебания в контуре при соответствующем взаимном расположении катушек L и L' , — положительная обратная связь. Если потери в контуре меньше, чем вносимая таким образом в контур энергия, то амплитуда колебаний в нём нарастает. С увеличением амплитуды колебаний, вследствие нелинейной зависимости анодного тока i_a от напряжения U на сетке лампы, поступающая в контур энергия уменьшается и при нек-рой амплитуде колебаний сравнивается с потерями. В результате устанавливается режим стационарных периодич. колебаний, в к-ром все потери энергии компенсирует анодная батарея. Т. о., для установления А. важна нелинейность, приводящая к ограниченности колебаний, т. е.

нелинейность управляет поступлением и тратами энергии источника. Рассмотренный режим возникновения А., не требующий нач. толчка, наз. режимом мягкого возбуждения.

Встречаются системы с жёстким возбуждением А. Это такие системы, в к-рых колебания самопроизвольно нарастают только с нек-рой нач. амплитуды. Для перехода таких систем в режим стационарной генерации необходимо нач. возбуждение (толчок) с амплитудой, большей нек-рого критич. значения. Амплитуда и частота А. определяются только параметрами системы, что отличает их как от собств. колебаний, частота к-рых определяется параметрами системы, а амплитуда и фаза — нач. условиями, так и от вынужденных колебаний, амплитуда, фаза и частота к-рых определяются внеш. силой. Периодическому А. в фазовом пространстве соответствует замкнутая траектория, к к-рой стремятся все соседние траектории, — т. н. устойчивый предельный цикл.

Для автоколебат. систем с неск. степенями свободы характерны такие явления, как синхронизация колебаний и конкуренция колебаний. Внеш. синхронизация А., или «захватывание частоты» (т. е. установление А. с частотой и фазой, соответствующими частоте и фазе внеш. периодич. воздействия), широко используется для управления и стабилизации частоты мощных мало-стабильных генераторов с помощью высокостабильных маломощных (напр., в лазерах). Полоса захватывания — область расстройек между частотами собств. колебаний и внеш. сигнала, внутри к-рой устанавливается режим синхронизации, — расширяется при увеличении амплитуды внеш. воздействия. Вне границы захватывания устойчивый режим генерации с частотой внеш. силы сменяется режимом биений. Взаимная синхронизация колебаний используется, напр., при работе неск. генераторов на общую нагрузку.

Конкуренция колебаний (мод), т. е. подавление одних колебаний другими, в автоколебат. системе возможна, когда эти колебания черпают энергию из общего источника. При этом одна из нарастающих мод «организуется» дополнительное нелинейное затухание для других. При очень слабой связи между автоколебат. модами они сосуществуют, не подавляя друг друга. При достаточно сильной связи выживает одна из них. При изменении соответствующих параметров в системах с конкуренцией мод переход от режима генерации одной из мод к режиму генерации другой моды происходит скачком и характеризуется эффектом затягивания. Благодаря эффекту конкуренции оказывается возможным, в частности, создание на базе многомодовых резонаторов генераторов монохроматич. колебаний (см. Лазер).

Эффекты конкуренции и синхронизации во мн. случаях определяют возникновение в диссипативных неравновесных средах (распределённых системах) сложных, хорошо организованных (детерминированных) структур, напр. периодич. нелинейных волн, ячеистых структур (см. Синергетика).

В автоколебат. системах с одной степенью свободы возможны только про-

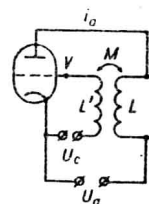


Рис. 1. Принципиальная схема лампы генератора: M — коэф. взаимной индукции; U_c — напряжение смещения на сетке; U_a — напряжение анодной батареи.

стые периодич. А. В автоколебат. системах с неск. степенями свободы А. могут быть сложными периодическими и даже стохастическими. Стохастич. автоколебат. системы (или генераторы шума) — это диссипативные системы, совершающие незатухающие хаотич. колебания (колебания со сплошным спектром) за счёт регулярных источников энергии. Примером такого генератора шума может служить лампо-

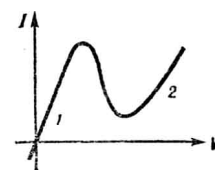


Рис. 2. Зависимость тока от напряжения элемента с невязанно однозначной вольт-амперной характеристикой (напр., туннельного диода) — одно значение тока может соответствовать трём разл. значениям напряжения.

вый генератор (рис. 1), если в контур последовательно с индуктивностью добавить нелинейный элемент с невязанно однозначной вольт-амперной характеристикой (рис. 2). Получившийся генератор при определ. параметрах будет создавать колебания, неотличимые от случайных (стохастических). Примером стохастич. А. в распределённых системах служит гидродинамич. турбулентность, возникающая при течении жидкости с достаточно большими скоростями.

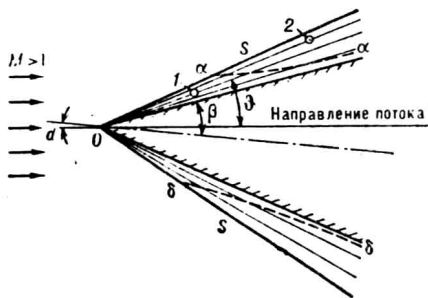
● Харкевич А. А., Автоколебания, М., 1953; Горелик Г. С., Колебания и волны, М., 1959; Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э., Теория колебаний, 2 изд., М., 1959; Рабинович М. И., Стохастические автоколебания и турбулентность, «УФН», 1978, т. 125, № 1, с. 123.

М. И. Рабинович.
АВТОКОЛЛИМАТОР, оптико-механич. прибор для точных угл. измерений (см. Автоколлимация).

АВТОКОЛЛИМАЦИЯ [от греч. autós — сам и collimo (искажение правильного лат. collineo) — направляю прямо], ход световых лучей, при к-ром они, выйдя параллельным пучком из коллиматора, входящего в состав оптич. системы, отражаются от плоского зеркала и проходят систему в

обратном направлении. Если зеркало перпендикулярно *оптической оси* системы, то излучающая точка, лежащая в фокальной плоскости на этой оси, совмещается с её изображением в отражённых лучах; поворот зеркала приводит к смещению изображения. А. пользуются в оптич. приборах для выверки параллельности оптич. деталей (напр., зеркал в оптич. квант. генераторах), контроля параллельности перемещений и т. д.

АВТОМОДЕЛЬНОЕ ТЕЧЕНИЕ (от греч. *autós* — сам и франц. *modèle* — образец), течение жидкости (газа), к-рое остаётся механически подобным самому себе при изменении одного или неск. параметров, определяющих это течение. В механически подобных явлениях наряду с пропорциональностью геом. размеров соблюдается пропорциональность механич. величин — скоростей, давлений, сил и др. (см. *Подобия теория*). Условием автомодельности явл. отсутствие в рассматриваемой стационарной или нестационарной задаче характерных линейных размеров. Ста-



Картина обтекания бесконечного конуса сверхзвук. потоком идеального газа: OS — ударная волна; αα, ββ — линии тока.

ционарное А. т. образуется, напр., при обтекании кругового бесконечного конуса сверхзвук. потоком идеального газа, а нестационарное А. т. — в случае сильного точечного взрыва в среде, давление в к-рой много меньше давления, возникающего при взрыве. При обтекании бесконечного конуса (рис.) нельзя выделить характерный линейный размер. При растяжении или сжатии картины течения относительно вершины конуса O в произвольное число раз она не изменяется: все точки передвигаются вдоль лучей, выходящих из O, и вновь полученная картина течения ничем не отличается от исходной. Обтекание конуса является А. т. относительно изменения линейных размеров: все безразмерные хар-ки течения, напр. отношения давлений p_2/p_1 , темп-р T_2/T_1 , скоростей v_2/v_1 , для двух произвольных точек 1 и 2 останутся неизменными при изменении линейных размеров путём растяжения или сжатия. Един-

ственной геом. перем. величиной, определяющей параметры течения в любой меридиональной плоскости при заданном угле конуса 2β , угле атаки d и Маха числе M набегающего потока, явл. полярный угол θ между нек-рым лучом и направлением скорости потока.

К А. т. относятся обтекание сверхзвук. потоком плоского клина, непрерывное расширение газа при обтекании сверхзвук. потоком тупого угла (см. *Сверхзвук. течение*) и ряд др. течений. В этих случаях, как и при обтекании конуса, все параметры газа постоянны на лучах, выходящих из угл. точки, и изменяются лишь при изменении угл. координаты.

Все А. т. характеризуются тем, что их исследование можно свести к задаче с одной независимой переменной. Для нестационарных А. т. жидкостей и газов, когда параметры течения изменяются со временем, состояние течения в нек-рый момент времени t , характеризующее распределением давлений, скоростей, темп-р в пр-ве, механически подобно состоянию течения при любом другом значении t ; примером явл. распространение плоских, цилиндрич. и сферич. ударных волн в неогранич. пр-ве, когда единственной независимой переменной явл. отношение пространств. координаты (x или r) к времени t .

К А. т. вязкого газа относятся нек-рые течения в пограничном слое и в свободной турбулентной струе, когда профили безразмерной скорости, темп-ры, концентрации изменяются подобным образом при изменении безразмерной геом. координаты.

В широком смысле под автомодельностью течения понимают независимость безразмерных параметров, характеризующих течение, от подобия критериев. Так, коэфф. лобового аэродинамич. сопротивления C_x (см. *Аэродинамические коэффициенты*) можно считать автомодельными по числу Маха M и Рейнольдса числу Re , если в нек-ром диапазоне изменения этих критериев C_x от них не зависит. Автомодельность коэфф. C_x по числам M и Re существует для большинства тел, обтекаемых газом при очень больших значениях M (>8) или Re ($>10^7$) — см. рис. 1 и 2 в ст. *Аэродинамические коэффициенты*.

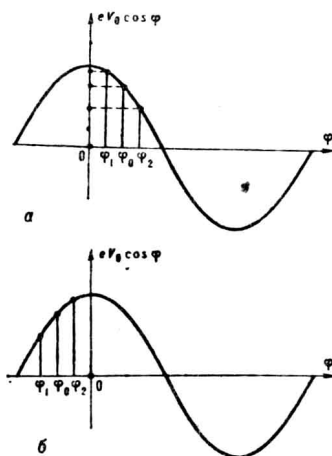
● Седов Л. И., Методы подобия и размерности в механике, 9 изд., М., 1981; Хейз У.-Д., Пробстия Р.-Ф., Теория гиперзвуковых течений, пер. с англ., М., 1962. С. Л. Вишневский.

АВТОРАДИОГРАФИЯ (радиоавтография), метод измерения распределения радиоакт. в-в в исследуемом объекте (по их собств. излучению), состоящий в нанесении на него слоя ядерной фотграфической эмульсии. Распределение определяют по плотности почернения проявленной фотозульсии (макро-радиография) или по кол-ву треков (следов), образуемых в фотозульсии α -частицами, эл-нами, позитронами (микро-радиография).

ф и я). А. используется при исследованиях с изотопными индикаторами. В сочетании А. с электронным микроскопом достигается разрешающая способность в 0,1 мкм.

● Роджерс Э., Авторадиография, пер. с англ., М., 1972; Электронно-микроскопическая авторадиография в металловедении, М., 1978; Коробков В. И., Метод макро-авторадиографии, М., 1967.

АВТОФАЗИРОВКА (фазовая устойчивость), явление устойчивости движения заряд. ч-ц относительно фазы ускоряющего их электрич. поля в резонансных ускорителях (открыто в 1944—45 независимо друг от друга В. И. Векслером и амер. физиком Э. Макмилланом); лежит в основе действия большинства совр. резонансных ускорителей заряд. ч-ц. А. обусловлена зависимостью от энергии ч-ц промежуток времени T между двумя следующими друг за другом ускорениями. Рассмотрим случай, когда T растёт с увеличением энергии ε ч-цы ($dT/d\varepsilon > 0$). Пусть φ_0 — фаза поля в ускоряющем зазоре («равновесная фаза»), попадая в к-рую ч-ца будет точно двигаться в резонанс с ускоряющим полем (рис., а). Если



ч-ца попадёт в фазу $\varphi_2 > \varphi_0 > 0$, то она приобретёт энергию $eV_0 \cos \varphi_2$ (e — электрич. заряд ч-цы, V_0 — амплитуда ускоряющего напряжения) меньше равновесной, T уменьшится, она придёт раньше к ускоряющему промежутку, т. е. фаза её прихода приблизится к равновесной фазе φ_0 . Наоборот, отставшая ч-ца ($\varphi_1 < \varphi_0$) приобретёт избыточную энергию, T увеличится, она позже придёт в ускоряющий промежуток и тоже приблизится к равновесной фазе. Т. о., ч-цы, находящиеся в нек-рой области около фазы φ_0 («область захвата»), будут совершать колебания около φ_0 . Благодаря такому механизму устойчивости все ч-цы, находящиеся в области захвата, будут, колеблясь около этой точки, набирать в ср. такую же энергию, что и «равновесная ч-ца», попавшая в фазу φ_0 , т. е. будут ускоряться. Аналогично можно убедиться, что вторая равновесная фаза — φ_0 (рис., б), также обеспечивающая тре-

буемый резонансный прирост энергии, явл. неустойчивой — малые отклонения от неё приводят к дальнейшему уходу ч-ц от этой фазы. Если, наоборот, период T уменьшается с увеличением энергии, то устойчивой оказывается левая фаза — Φ_0 , а правая фаза $+\Phi_0$ — неустойчивой.

В циклич. резонансных ускорителях между частотой ускоряющего поля ω_y , ср. значением магн. индукции $\langle B \rangle$ и полной релятив. энергией $\mathcal{E}$ ч-цы должно при резонансе соблюдаться соотношение:

$$\mathcal{E}_{\text{рез}} = \frac{ce \langle B \rangle q}{\omega_y},$$

где q — целое число (кратность частоты), показывающее во сколько раз ω_y больше частоты обращения ч-цы ω . Механизм А. приводит к тому, что при достаточно медленном изменении во времени ω_y и $\langle B \rangle$ энергия ч-ц, находящихся внутри области захвата, автоматически принимает значение, близкое к резонансному, т. е. все эти ч-цы ускоряются.

Аналогично действует механизм А. и в линейных резонансных ускорителях, в к-рых всегда $\Phi_0 < 0$. А. отсутствует в тех случаях, когда T не зависит от $\mathcal{E}$. В циклич. резонансных ускорителях это имеет место в изохронном циклотроне, а в линейных резонансных ускорителях — при релятив. скоростях, когда скорость ч-ц перестаёт практически зависеть от энергии.

● См. при ст. Ускорители.

АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ (туннельная эмиссия, полевая эмиссия), испускание эл-нов проводящими твёрдыми и жидкими телами под действием внеш. электр. поля высокой напряжённости E ($\sim 10^7$ В/см) у их поверхности. Механизм А. э. — туннельное прохождение эл-нов сквозь потенц. барьер на границе проводник — непроводящая среда (см. *Туннельный эффект*). Наиболее полно изучена А. э. *металлов* в вакуум. Плотность тока А. э. в этом случае определяется приближённой ф-лой:

$$j = 1,4 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\Phi} \cdot 10^{4,39/1/\Phi} \times 10^{-2,82 \cdot 10^7 \Phi^{3/2}/E}, \quad (*)$$

к-рая хорошо описывает А. э. в интервале j от 10^{-5} до 10^7 А/см². Здесь $\Phi = e\varphi$ — работа выхода эмиттера (φ — потенциал работы выхода, e — заряд эл-на). Характерные св-ва А. э.: высокие j (до 10^{10} А/см²) и экспоненциальная зависимость j от E и Φ . При $j > 10^6$ А/см² могут наблюдаться отклонения зависимости $\lg j = f(1/E)$ от линейной, что связывают с влиянием объёмного заряда или же с особенностями формы потенц. барьера. При $j \sim 10^8 - 10^{10}$ А/см² А. э. может перейти в *вакуумный пробой* с разрушением эмиттера. Этот переход сопровождается интенсификацией, т. н. *вспыхивающей электронной эмиссией*. А. э.

слабо зависит от темп-ры T , малые отклонения от зависимости (*) с ростом T пропорц. T^2 . С дальнейшим ростом T и понижением E т. н. *термоавтоэлектронная эмиссия* переходит в *термоэлектронную эмиссию*, усиленную полем за счёт *Шоттки эффекта*.

Энергетич. спектр эл-нов, вылетающих из металла в случае А. э., весьма узок (полуширина $\sim 0,1$ эВ). Форма спектра чувствительна к распределению эл-нов по энергиям внутри эмиттера, а также к наличию примесей на его поверхности. Для А. э. *полупроводников* характерны внутр. ограничения j , связанные с меньшей концентрацией эл-нов, дополнит. влияние поля на j из-за проникновения поля в ПП, а также термо- и фоточувствительность ПП, влияющая на j .

Автоэммиттеры (холодные катоды) имеют большую кривизну поверхности (острия, лезвия, выступы и т. п.). Анод, совмещённый с люминесцирующим экраном, превращает одноэлектронный автоэмиссионный диод в эмиссионный безлинейный электронный *микроскоп* (проектор).

● Фишер Р., Нойман Х., Автоэлектронная эмиссия полупроводников, пер. с нем., М., 1971; Ненакалимые катоды, под ред. М. И. Елинсона, М., 1974, гл. 6—7.

В. Н. Шредник,

АВТОЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП, то же, что *электронный проектор*. **АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ** вещества (от лат. aggrego — присоединяю, связываю), состояния одного и того же в-ва, переходы между к-рыми сопровождаются скачкообразным изменением его *свободной энергии*, *энтропии*, *плотности* и др. физ. св-в. Все в-ва (за нек-рым исключением) могут существовать в трёх А. с. — твёрдом, жидком и газообразном. Так, вода при норм. давлении $p = 101\,325$ Па = 760 мм рт. ст. и при темп-ре $T = 0^\circ\text{C}$ кристаллизуется в лёд, а при 100°C кипит и превращается в пар. Четвёртым А. с. в-ва часто считают *плазму*.

А. с. в-ва зависит от физ. условий, в к-рых оно находится, гл. обр. от T и p . Определяющей величиной явл. отношение $\epsilon(T, p)$ ср. потенц. энергии вз-ствия молекул к их ср. кинетич. энергии. Так, для тв. тел $\epsilon(T, p) \gg 1$, для газов $\epsilon(T, p) \ll 1$, а для жидкостей $\epsilon(T, p) \sim 1$. Переход из одного А. с. в другое сопровождается скачкообразным изменением $\epsilon(T, p)$, связанным со скачкообразным изменением межмол. расстояний и межмол. вз-ствий. В газах межмол. расстояния велики, молекулы почти не взаимодействуют друг с другом и движутся практически свободно, заполняя весь объём. В жидкостях и тв. телах — конденсированных средах — молекулы (атомы) расположены значительно ближе друг к другу и взаимодействуют сильнее. Это приводит к сохранению жидкостями и тв. телами своего объёма. Однако хар-р движения молекул в тв. телах и жидкостях различен, чем и объясня-

ется различие их структуры и св-в. У тв. тел в крист. состоянии атомы совершают лишь колебания вблизи узлов крист. решётки; структура этих тел характеризуется высокой степенью упорядоченности — *дальним и ближним порядком*. Тепловое движение молекул (атомов) жидкости представляет собой сочетание малых колебаний около положений равновесия и частых перескоков из одного положения равновесия в другое. Последние и обуславливают существование в жидкостях лишь ближнего порядка в расположении ч-ц, а также свойственные им подвижность и *текучесть*. В отличие от др. А. с. *плазма* представляет собой газ заряж. ч-ц (ионов, эл-нов), к-рые электрически взаимодействуют друг с другом на больших расстояниях. Это определяет ряд своеобразных св-в плазмы.

Переходы из более упорядоченного по структуре А. с. в менее упорядоченное могут происходить не только при определенных темп-ре и давлении (см. *Плавление*, *Кипение*), но и непрерывно (см. *Фазовый переход*). Возможность непрерывных переходов указывает на нек-рую условность выделения А. с. в-ва. Это подтверждается существованием аморфных тв. тел, сохраняющих структуру жидкости (см. *Аморфное состояние*), неск. видов крист. состояния у нек-рых в-в (см. *Полиморфизм*), жидких кристаллов, существовании у полимеров особого высокоэластич. состояния, промежуточного между стеклообразным и жидким, и др. В связи с этим в совр. физике вместо понятия А. с. пользуются более широким понятием — *фазы*.

АДАПТАЦИЯ глаза (от позднелат. adaptatio — прилаживание, приспособление), приспособление чувствительности глаза к изменяющимся условиям освещения. При переходе от яркого света к темноте чувствительность глаза возрастает, т. н. *темновая А.*, при переходе от темноты к свету чувствительность уменьшается — *световая А.* При изменении цвета освещения меняется *спектральная чувствительность* глаза (см. *Цветовая адаптация*).

АДГЕЗИЯ (от лат. adhesio — прилипание), возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных (твёрдых или жидких) тел (фаз), приведённых в соприкосновение. Является результатом *межмолекулярного взаимодействия*, ионной или металлич. связей. Частный случай А. — *когезия* — вз-ствие соприкасающихся одинаковых тел. Предельный случай А. — хим. вз-ствие на поверхности раздела (*гемосорбция*) с образованием слоя хим. соединения. А. измеряется силой или работой отрыва на ед. площади контакта поверхностей (адгезионного шва) и становится предельно большой при пол-

ном контакте по всей площади соприкосновения тел (напр., при наведении жидкости (лака, клея) на поверхность тв. тела в условиях полного смачивания; образовании одного тела как новой фазы другого; образовании гальванопокрытий и т. д.).

В процессе А. уменьшается свободная поверхностная энергия тела. Уменьшение этой энергии, приходящееся на 1 см^2 адгезионного шва, наз. свободной энергией А. f_A , к-рая равна работе адгезионного отрыва W_A (с обратным знаком) в условиях обратимого изотермич. процесса и выражается через поверхностные натяжения на границах раздела первое тело — внеш. среда (в к-рой находятся тела) σ_{10} , второе тело — среда σ_{20} , первое тело — второе тело σ_{12} :

$$-f_A = W_A = \sigma_{12} - \sigma_{10} - \sigma_{20}.$$

В случае А. жидкости к тв. телу (при смачивании) работа адгезионного отрыва выражается через поверхностное натяжение жидкости и краевой угол θ :

$$W_A = \sigma_{10}(1 + \cos \theta).$$

При полном смачивании $\theta = 0$ и $W = 2\sigma_{10}$.

Совокупность методов измерения силы отрыва или скалывания при А. наз. адгезиометрией. А. может сопровождаться взаимной диффузией в-в, что ведёт к размытию адгезионного шва.

АДИАБАТА (от греч. *adiábatos* — непреходимый), линия на термодинамич. диаграмме состояния, изображающая равновесный адиабатический процесс. А. имеет простейший вид для идеальных газов:



$p v^\gamma = \text{const}$, где p — давление газа, v — его уд. объём, γ — показатель А., равный отношению уд. теплоёмкостей газа c_p и c_v , опре-

деляемых при постоянных давлении и объёме. Для одноат. газов (Ar, Ne и др.) при комнатной темп-ре $\gamma = 1,67$, для двухатомных (H_2 , N_2 , O_2 и др.) $\gamma = 1,4$. На рисунке показан ход А. при $\gamma = 1,4$. Вблизи абс. нуля темп-ры и при высоких темп-рах (св. 1000°C) хар-р кривой несколько иной, т. к. γ зависит от темп-ры и давления (см. *Теплоёмкость*). А. для данного газа не могут пересекаться, пересечение А. противоречило бы второму началу термодинамики. В равновесных адиабатич. процессах постоянна энтропия, поэтому А. наз. также и *изоэнтропией*.

АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС (адиабатич. процесс), процесс, при к-ром физ. система не получает теплоты извне и не отдаёт её. А. п. протекают в системах, окружённых теплоизолирующей (адиабатной) оболочкой, но их

можно реализовать и при отсутствии такой оболочки. Для этого процесс должен протекать настолько быстро, чтобы за время его осуществления не произошло теплообмена между системой и окружающей средой. Так, при адиабатич. сжатии газа ударной волной газ не успевает отдать выделившуюся теплоту и сильно нагревается. В то же время адиабатич. расширение газа с совершением работы против внеш. сил и сил взаимного притяжения молекул вызывает его охлаждение. Такое охлаждение лежит в основе процесса сжижения газов. А. п. размагничивания парамагн. солей позволяет получить темп-ры, близкие к абс. нулю (см. *Магнитное охлаждение*).

А. п. может протекать обратимо (см. *Обратимый процесс*) и необратимо. В случае обратимого А. п. энтропия системы остаётся постоянной, в необратимых — возрастает. Поэтому обратимый А. п. наз. также и *изоэнтропич. процессом*.

АДИАБАТИЧЕСКОЕ РАЗМАГНИЧИВАНИЕ (адиабатное размагничивание), метод охлаждения, применяемый гл. обр. для получения темп-ры ниже 1 К . См. *Магнитное охлаждение*.

АДИАБАТНАЯ ОБОЛОЧКА, оболочка, не допускающая теплообмена между рассматриваемой системой (физ. телом) и внеш. средой. Абсолютной А. о., полностью теплоизолирующей тела, не существует. Для теплоизоляции применяют обычно в-ва с низкой теплопроводностью (асбест, пеностекло и др.), сосуды Дьюара или пользуются спец. методами (напр., в плазм. установках контакту высокотемпературной плазмы со стенками установки препятствует сильное магн. поле).

АДРОННЫЕ СТРУИ, направленные пучки адронов, образующиеся при соударении ч-ц высокой энергии (напр., при аннигиляции пары e^+e^- в адроны) в глубоко неупругих процессах или при столкновении двух адронов; характеризуются малыми ($< 500 \text{ МэВ/с}$) перпендикулярными (к оси пучка) составляющими импульсов входящих в струю ч-ц и большими ($> 1 \text{ ГэВ/с}$) продольными составляющими импульсов. А. с. возникают в процессе превращения в «бесцветные» адроны «цветных» кварков и глюонов путём рождения из вакуума большого числа виртуальных пар кварк-антикварк. См. *Квантовая хромодинамика*.

А. В. Ефремов.

АДРОННЫЙ АТОМ, мезоатом с отрицательно заряж. адроном (π^- , K^- -мезоны, антипротон и др.).

АДРОНЫ (от греч. *hadrón* — большой, сильный), класс элем. ч-ц, участвующих в сильном взаимодействии. К А. относятся все барионы и мезоны, включая резонансы.

АДСОРБЦИЯ (от лат. *ad* — на, при и *sorbeo* — поглощаю), процесс, приводящий к аномально высокой концентрации в-ва (адсорбата) из газообразной или жидкой среды на поверхности её раздела с жидкостью

или тв. телом (адсорбентом). Частный случай сорбции. А. происходит под действием некомпенсируемых сил межмолекул. вз-ствия в поверхностном слое адсорбента, что вызывает притяжение молекул адсорбата из приповерхностной области; А. приводит к уменьшению поверхностной энергии.

В зависимости от хар-ра вз-ствия молекул адсорбента и адсорбата различают физ. А. и хемосорбцию. Физ. А. не сопровождается хим. изменениями молекул. При такой А. молекулы могут образовывать не только мономолекулярный, но и адсорбироваться многослойно, а также мигрировать по поверхности. Процессы хемосорбции сопровождаются образованием связи между молекулами адсорбента и адсорбата.

Адсорбиров. молекулы через нек-рое время (время А.) покидают поверхность адсорбата — десорбируются. Кол-во молекул, адсорбирующихся (десорбирующихся) в ед. времени на ед. поверхности (с ед. поверхности), наз. скоростью А. (скоростью десорбции). При равенстве скорости А. и десорбции имеет место адсорбционное равновесие. С ростом темп-ры время физ. А. и кол-во адсорбиров. молекул уменьшается, в то время как скорость хемосорбции обычно возрастает. Скорость А. повышается с увеличением концентрации и, следовательно, давления адсорбата в объёме.

Зависимость равновесной А. от концентрации (давления) адсорбата при пост. темп-ре наз. изотермами А. Для описания монослойного покрытия поверхности адсорбента в системе газ — тв. тело существует несколько осн. типов изотерм А.; наиб. общая — изотерма Ленгмюра:

$$\theta = \frac{k p}{1 + k p},$$

где p — давление, θ — относит. степень заполнения поверхности адсорбиров. молекулами, k — константа, зависящая от темп-ры и характера вз-ствия между ч-цами адсорбента и адсорбата. Изотерма Ленгмюра может служить для описания как физ. А., так и хемосорбции, однако область её применения ограничена, как правило, низкими степенями заполнения, при к-рых молекулы адсорбата не взаимодействуют между собой. При более высоких значениях θ молекулы адсорбата притягиваются не только молекулами адсорбента, но и друг к другу, поэтому по мере заполнения поверхности условия для А. становятся всё более благоприятными и θ резко возрастает с повышением p , но при степенях заполнения, близких к единице, рост А. резко замедляется. При дальнейшем увеличении давления происходит заполнение 2-го, 3-го и т. д. слоёв молекулами адсорбата (полимолекулярная А.). Если адсорбент имеет пористую структуру и его по-

верхность явл. смачиваемой по отношению к адсорбату, то происходит *капиллярная конденсация*.

Процесс А. сопровождается выделением тепла, наз. *теплотой А.*, к-рая тем больше, чем прочнее связь между молекулами адсорбента и адсорбата. Теплота физ. А. составляет, как правило, 8—25 кДж/моль, теплота хемосорбции превышает 80 кДж/моль. По мере заполнения однородной поверхности теплота А. обычно уменьшается. При переходе к полимол. А. теплота А. понижается до величин, близкой к теплоте конденсации адсорбата.

А. играет важную роль в процессах теплообмена, разделения газовых и жидких смесей, в биохим. системах. Она явл. важнейшей стадией образования гетерогенных систем и гл. фактором в стабилизации дисперсных систем. А. проявляется во всех процессах, где существуют поверхностные св-ва в-в (см. *Поверхностные явления*).

● Адамсон А. Физическая химия поверхностей, пер. с англ., М., 1979.

А. Х. Керогул.

АККОМОДАЦИЯ ГЛАЗА (от лат. *accommodatio* — приспособление), приспособление глаза к ясному видению предметов, находящихся на разных расстояниях. При А. г. меняется преломляющая сила хрусталика глаза, в результате чего изображение фокусируется на сетчатке.

АККРЕЦИЯ (от лат. *accrescio* — приращение, увеличение), падение в-ва на косм. тело (напр., *звезду*) из окружающего пр-ва. Особенно значительна роль А. для таких тесных двойных звёзд, где одна звезда (красный гигант) интенсивно отдаёт в-во другой звезде (*белому карлику*, *нейтронной звезде*) или, возможно, чёрной дыре. А. на белые карлики рассматривают как наиболее вероятную причину вспышек новых звёзд. В перетекающем в-ве обычно преобладает водород. В самих же белых карликах водород отсутствует (он превратился в гелий в результате *термоядерных реакций* при образовании белого карлика). Падающий на поверхность звезды водород накапливается и нагревается до температур, достаточной для начала термояд. горения водорода. Если скорость выделения теплоты реакции превысит скорость теплоотвода, произойдёт тепловой взрыв, наблюдаемый как вспышка новой звезды.

А. на нейтронную звезду или чёрную дыру была предложена в кач-ве механизма, объясняющего природу импульсных источников космического рентг. излучения — рентгеновских *бастардов*. Молодые нейтронные звёзды — *пульсары* явл. мощными источниками ч-ц с высокими энергиями, поэтому А. на них затруднена. Со временем истечение в-ва из пульсаров ослабевает, и для нейтронных звёзд, возраст к-рых превышает 10^6 — 10^7 лет, А. может стать значительной и обеспечить наблюдаемую светимость

косм. источников рентг. излучения. Для этого необходим относительно небольшой приток массы ($\sim 10^{-9} M_{\odot}$ /год), но даже такой приток возможен лишь в тесной двойной системе. В тесных двойных системах в-во, падающее на компактную звезду, обладает моментом вращения, поэтому оно образует диск, медленно оседающий к центру из-за трения. Трение разогревает в-во до 10^6 К, и оно становится источником теплового рентг. излучения. Такие же диски должны образовываться при А. на чёрные дыры; именно по излучению в-ва диска чёрная дыра может быть обнаружена.

● Происхождение и эволюция галактик и звезд, под ред. С. Б. Пикельнера, М., 1976.

АКСИАЛЬНОГО ТОКА ЧАСТИЧНОЕ СОХРАНЕНИЕ в слабом взаимодействии, св-во аксиального слабого тока адронов. В отличие от константы слабого векторного вз-ствия (см. *Векторного тока сохранение*), константа аксиального слабого вз-ствия меняется (перенормируется) под действием сильного вз-ствия. Это изменение не слишком велико (напр., в β -распаде нейтрона оно составляет ок. 20%). Перенормировку этой константы в процессах слабого вз-ствия без изменения странности можно связать с эффектами пион-нуклонного вз-ствия, причём изменение константы характеризуется величиной массы пиона. Поскольку масса пиона аномально мала по сравнению с массой др. адронов, реализуется А. т. ч. с. В гипотетическом теор. пределе, когда масса пиона полагается стремящейся к нулю (т. н. *мягкопионное приближение*), сохранение аксиального тока становится не частичным, а точным. В этом приближении реализуется *киральная симметрия*, и поэтому пион можно рассматривать как *голдстоуновский бозон*. В таком подходе соотношения А. т. ч. с. используют для оценки массы участвующих в слабом вз-ствии (т. н. *токовых*) *кварков*. Эти соотношения позволяют связать амплитуды процессов с испусканием разл. числа пионов, выразить перенормированную аксиальную константу β -распада через сечения пион-нуклонного вз-ствия и т. д. Обобщение А. т. ч. с. на аксиальные токи с изменением странности требует учета эффектов нарушения *унитарной симметрии*, связанных с различием масс странного (s) и не-странных (u, d) кварков.

А. т. ч. с. наряду с сохранением слабого векторного тока адронов явл. основой формализма т. н. алгебры токов, позволяющей устанавливать связи между амплитудами разл. процессов. ● Бернштейн Дж., *Элементарные частицы и их токи*, пер. с англ., М., 1970; Окунь Л. Б., *Лептоны и кварки*, М., 1981.

М. Ю. Хлопов.

АКСИОМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ, квантовая теория поля (КТП), к-рая строится т. о., чтобы все её результаты выступали как строгие матем. следствия единой системы не-

большого числа предположений — аксиом. К числу таких аксиом относятся: а) *релятивистская инвариантность*, т. е. независимость физ. законов (в соответствии с *относительности принципом*) от выбора системы координат и её равномерного прямолинейного движения; б) *причинность* (или *локальность вз-ствия*), к-рая требует, чтобы событие, происшедшее в одной точке пространства-времени (r, t), не могло повлиять на событие в другой точке (r', t'), если до неё не успевают дойти сигнал, движущийся со скоростью света (это означает утверждение об отсутствии в природе сигналов, распространяющихся быстрее скорости света); в) *спектральность*, к-рая требует, чтобы энергия любого допустимого состояния системы была положительна (энергия вакуума принимается за нулевую).

Одна из причин развития А. т. п. — желание получить непосредств. следствия из системы аксиом, аккумулирующих осн. представления о мире, с тем чтобы подвергнуть их эксперим. проверке. К таким результатам А. т. п. относятся *теорема СРТ* и строгий матем. вывод связи спина со статистикой (см. *Квантовая теория поля*). Важнейший результат А. т. п. — доказательство *дисперсионных соотношений*, связывающих две измеримые на опыте хар-ки рассеяния ч-ц: полное эфф. сечение рассеяния и веществ. часть амплитуды рассеяния. Эксперим. проверка этой связи показала, что вплоть до расстояний $5 \cdot 10^{-16}$ см сомнений в правильности исходных аксиом не возникает.

С нач. 70-х гг. в А. т. п. развивается т. н. конструктивное направление, в к-ром в дополнение к аксиомам предполагается определить механизм вз-ствия ч-ц. Цель этого направления — математически корректное осмысливание теории возмущений, являющейся осн. методом расчётов в КТП.

● Боголюбов Н. Н., Логунов А. А., Тодоров И. Т., *Основы аксиоматического подхода в квантовой теории поля*, М., 1969; Хэгедорн Р., *Причинность и дисперсионные соотношения*, «УФН», 1967, т. 91, в. 1, с. 151.

В. П. Павлов, С. С. Хоружий.

АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ, метод определения состава в-ва, заключающийся в облучении его потоками нейтронов, γ -квантов и заряд. ч-ц (α -частиц, протонов и др.) и измерении наведённой активности: интенсивности и энергетич. спектра вторичного излучения, сопровождающего распад образовавшихся радиоакт. нуклидов, а также периодов полураспада $T_{1/2}$ этих нуклидов. Зная $T_{1/2}$, вид радиоакт. превращения и энергию, по табл. можно однозначно определить порядковый номер Z исходного ядра и его массовое число A . Число распадов в ед. времени про-

порц. числу исходных ядер, что позволяет осуществить количеств. анализ. Наиболее распространены нейтронный А. а. (напр., содержание Au определяется с точностью $\sim 10^{-10}\%$, Pt $\sim 10^{-6}\%$), используются также *фотоядерные реакции* (гамма-активационный анализ, содержание Au определяется с точностью $\sim 10^{-4}\%$ и протонный А. а. ($10^{-7}\%$ В в Si, $10^{-3}\%$ Nb в Ta и т. д.).

● Кузнецов Р. А., Активационный анализ, М., 1967; Самасюк В. Н., Гамма-активационный анализ, «Природа», 1977, № 12, с. 90.

АКТИВНАЯ СРЕДА, вещество, в к-ром распределение ч-ц (атомов, молекул, ионов) по энергетич. состояниям не явл. равновесным и хотя бы для одной пары уровней энергии осуществляется *инверсия населённости*. А. с. — необходимый элемент большинства устройств *квантовой электроники*.

АКТИВНОСТЬ радиоактивного источника, число радиоакт. распадов в ед. времени. Единице А. в системе СИ — беккерелю (Бк) — соответствует 1 распад в 1 с. Внесистемная ед. кюри (Ки) равна $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк. А., приходящаяся на ед. массы в-ва источника, наз. *удельной А.*

АКУСТИКА (от греч. akustikós — слуховой, слушающий), область физики, исследующая упругие колебания и волны от самых низких частот (условно от 0 Гц) до предельно высоких частот (10^{11} – 10^{13} Гц), их вз-ствия с в-вом и разнообразные применения.

А. — одна из самых древних областей знания. Она возникла как учение о звуке, т. е. об упругих волнах, воспринимаемых человеческим ухом. Ещё Пифагор (6 в. до н. э.) обнаружил связь между высотой слышимого тона и длиной струны или трубы. Аристотель (4 в. до н. э.) понимал, что звучащее тело вызывает сжатия и разрежения воздуха, и объяснил эхо отражением звука от препятствий. Леонардо да Винчи (15–16 вв.) исследовал отражение звука, сформулировал принцип независимости распространения звук. волн от разных источников. В кон. 17 — нач. 18 вв. Г. Галлей обнаружил, что звучащее тело испытывает колебания и что высота звука зависит от частоты, а интенсивность — от их амплитуды; скорость звука в воздухе впервые измерил франц. учёный М. Мерсенн.

С кон. 17 до нач. 20 вв. А. развивается как раздел механики. На базе основ механики Ньютона, осн. закона теории упругости Гука и принципа волн. движения Гюйгенса (см. Волны) создаётся общая теория механич. колебаний, излучения и распространения звуковых (упругих) волн в среде, разрабатываются методы измерения хар-к звука (звук. давления в среде, импульса, энергии и потока энергии звук. волн, скорости распространения

звука). Диапазон звук. волн расширяется и охватывает как область *инфразвука* (до 16 Гц), так и *ультразвука* (св. 20 кГц). Выясняется физ. сущность тембра звука (его «окраски»). Разрабатывается теория колебаний струн, стержней и пластинок, объясняется происхождение обертонов. Англ. учёный Т. Юнг и франц. учёный О. Френель создают теорию интерференции и дифракции волн, австр. учёный Х. Доплер устанавливает закон изменения частоты волны при движении источника звука относительно наблюдателя (*Доплера эффект*). Создание методов разложения сложного колебат. процесса на простые составляющие (метод Фурье) заложило основы анализа звука и синтеза сложного звука из гармонич. составляющих. Весь этот этап развития А. подытожен англ. учёным Рэлеем (Дж. Стретт) в его классич. труде «Теория звука» (1877–78).

С 20-х гг. 20 в. начался новый этап развития А., связанный прежде всего с развитием радиотехники, в частности радиовещания. Возникла необходимость преобразования звук. сигналов в электромагнитные и обратно, их усиления и неискажённого воспроизведения. Появляются новые области применения А., связанные с запросами техники; звук. локация самолётов в воздухе, гидролокация и акустич. навигация, определение места, времени и хар-ра взрывов, глушение шумов в авиации, в пром-сти, на транспорте. Все эти проблемы требовали более глубокого изучения механизма образования и поглощения звука, распространения звуковых (в частности, УЗ) волн в сложных условиях. Особый интерес вызвал вопрос о распространении звук. волн большой интенсивности (напр., взрывных волн), что послужило толчком для развития т. н. нелинейной акустики, значит. вклад в развитие к-рой внесли работы А. А. Эйхенвальда и Н. Н. Андреева. Англ. учёный М. Лайтхилл (1952) дал общую теорию аэродинамич. генерации звука, возникающего в движущейся среде за счёт неустойчивости потока газа. Изучение влияния структуры среды на распространение звука создало возможность применения звук. волн для зондирования возд. и вод. среды, что привело к развитию гидроакустики и атмосферной акустики. Проблемы городского строительства привели к развитию архитектурной и строит. акустики.

Примерно с сер. 20 в. чрезвычайно большое значение приобрели исследования УЗ. Ещё в 20-х гг. было положено начало применению УЗ для дефектоскопии материалов и изделий. После обнаружения сильного поглощения и дисперсии звука в многоат. газах, а затем и в жидкостях возникло новое направление в А. — исследование структуры в-ва УЗ методами (молекулярная А.). Значит. роль в его становлении сыграла релаксац. те-

ория Л. И. Мандельштама и М. А. Леоновича (1937), а также теория рассеяния света на УЗ волнах в жидкостях и тв. телах (см. Мандельштам — Бриллюэн рассеяние). Мощный УЗ оказался не только средством исследования, но и орудием воздействия на в-во, что послужило основой развития УЗ технологий. В 60–70-х гг. важное значение приобрели исследования гиперзвука (частоты выше 1 ГГц), а также исследования вз-ствия ультразвука и гиперзвук. волн с эл-нами проводимости в металлах и ПП и др. вз-ствий акустич. волн с элем. возбуждениями (квазичастицами) в тв. теле. На базе этих исследований возникли *акустоэлектроника* и *акустооптика*.

В сер. 20 в. начинается быстрое развитие психофизиол. А., вызванное необходимостью разработки методов неискажённой передачи и воспроизведения множества звук. сигналов — речи и музыки по огранич. числу каналов связи. Исследуется слуховое восприятие звука человеком и животными, создаются теории слуха, развивается применение акустич. методов в биологии и медицине.

Совр. А. охватывает широкий круг вопросов и смыкается с рядом областей человеческого знания. В ней можно выделить ряд разделов. Общие закономерности излучения, распространения и приёма упругих колебаний и волн изучает теория звука, где широко используются общие методы *колебаний и волн теории*. Спец. вопросами теории звука занимаются статистич. А., *акустика движущихся сред*, *кристаллоакустика*, *нелинейная акустика*. Физическая акустика изучает особенности распространения акустич. волн в жидких, твёрдых и газообразных в-вах, вз-ствие их с в-вом, и в частности с электронами, фононами и др. квазичастицами. Подразделами физ. А. можно считать *молекулярную акустику*, квант. акустику, тесно связанные с мол. физикой и физикой *твёрдого тела*. Распространение акустич. волн в естеств. средах — атмосфере, вод. среде, земной коре — изучается в *атмосферной акустике*, *геоакустике* и *гидроакустике*; к последней примыкает важная прикладная область — *гидролокация*. На базе *электроакустики*, занимающейся вопросами электроакустич. преобразования, возникла прикладная область — *звукотехника*, связанная с разработкой аппаратуры для передачи, записи, воспроизведения речи и музыки. С электроакустикой тесно связана и область акустич. измерений. К прикладным областям А. можно отнести *архитектурную акустику* и *строительную акустику*, а также весьма большой раздел, связанный с изучением шумов и вибраций и борьбой с ними. Огромное прикладное значение имеют УЗ и гиперзвук, используемые в УЗ технике, акустоэлектронике и акустооптике. Особый раздел А. —

биологическая А., занимается изучением звукоизлучающих и звукопринимательных органов человека и животных, проблемами речеобразования, передачи и восприятия речи, воздействия акустич. волн на биол. объекты. К её подразделам относятся психологическая и физиологическая акустика. Результаты биол. А. используются в электроакустике, архитектурной А., системах передачи речи, теории информации и связи, в музыке, медицине, биофизике и т. п.

● Стретт Дж. В. (лорд Рэлей), Теория звука, пер. с англ., т. 1—2, М., 1955; Скучик Е., Основы акустики, пер. с англ., т. 1—2, М., 1976; Исакович М. А., Общая акустика, М., 1973; Зарембо Л. К., Красильников В. А., Введение в нелинейную акустику, М., 1966; Физическая акустика, под ред. У. Мэсона, пер. с англ., т. 1—7, М., 1966—74; Михайлов И. Г., Соловьев В. А., Сырников Ю. П., Основы молекулярной акустики, М., 1964; Физика и техника мощного ультразвука, под ред. Л. Д. Розенберга, [кн. 1—3], М., 1967—70; Урик Р. Д., Основы гидроакустики, пер. с англ., Л., 1978; Тайлор Р. Шум, пер. с англ., М., 1978; Эльпинер И. Е., Биофизика ультразвука, М., 1973.

АКУСТИКА ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД, раздел акустики, в к-ром изучаются хар-р распространения звук. волн, их излучение и приём в движущейся среде или при движении источника или приёмника звука. Атмосфера, а также вода в морях и океанах, находящаяся в непрерывном движении, — всё это область применения А. д. с.

Под влиянием течений среды звук. лучи искривляются. Так, напр., в приземном слое атмосферы скорость ветра возрастает с высотой (рис.). Поэтому при распространении звука против ветра лучи изгибаются вверх и могут пройти выше стоящего на земле наблюдателя, а при распространении по ветру звук. лучи изгибаются вниз; этим объясняется лучшая слышимость с подветренной стороны. Определение звук. поля в движущейся

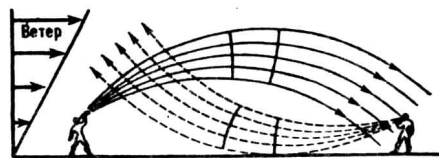


Схема распространения звука при возрастании ветра с высотой.

среде в А. д. с. основывается на Галилеевском принципе относительности, согласно к-рому движение среды относительно источника звука равносильно движению (с той же скоростью) источника относительно среды. На основе этого принципа решаются мн. задачи, напр. отражение звука на границе ветра, излучение звука вибрирующей плоскостью, обтекаемой потоком.

В атмосфере и океане имеют место также беспорядочные турбулентные течения, вызывающие рассеяние звук. волн и флуктуации их амплитуд и фаз. Задача о рассеянии звука решается с учётом неоднородности турбулентно-

го потока, а также вязкости и теплопроводности среды.

Развитие техники сверхзвук. скоростей выдвигает на первый план исследования звук. поля быстродвижущихся источников и приёмников звука, скорость к-рых близка к скорости звука в среде или превосходит её. ● Блохинцев Д. И., Акустика неоднородной движущейся среды, 2 изд., М., 1981; Чернов Л. А., Акустика движущейся среды. Обзор, «Акуст. ж.», 1958, т. 4, в. 4, с. 299.

АКУСТИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ (акустический, или звуковой, ветер), регулярные течения среды в звук. поле большой интенсивности. Могут возникать как в свободном неоднородном звук. поле, так и (особенно) вблизи разл. рода препятствий, помещённых в звук. поле. А. т. всегда имеют вихревой хар-р и обычно возникают в результате того, что кол-во движения, связанное с колебаниями ч-ц среды в волне и переносимое ею, при поглощении волны передаётся среде, вызывая регулярное движение последней. Поэтому скорость А. т. пропорц. коэфф. поглощения звука и его интенсивности, но обычно не превосходит величины колеб. скорости ч-ц в звук. волне. После включения источника звука А. т. устанавливается не

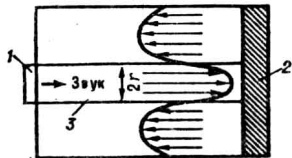


Схема течения, вызванного ограниченным пучком звука: 1 — излучатель; 2 — поглотитель звука; 3 — звук. пучок.

сразу, а «разгоняется» постепенно до тех пор, пока торможение за счёт вязкости среды не компенсирует увеличение его скорости под действием звука.

В зависимости от соотношения характерного масштаба течения l и длины звук. волны $\lambda = 2\pi/k$ (k — волн. число) различают 3 типа А. т.: течение в свободном неоднородном звук. поле, где масштаб течения определяется размером неоднородности, напр. радиусом звук. пучка (рис.), при этом $kl \gg 1$; течение в стоячих волнах, где масштаб течения определяется длиной стоячей волны ($kl \sim 1$); течения в пограничном слое вблизи препятствий, помещённых в акустич. поле; в этом случае масштаб течения определяется толщиной акустического пограничного слоя $\delta = \sqrt{\nu/\omega}$ (ν — коэфф. кинетич. вязкости, ω — круговая частота звука), а $kl \ll 1$. При измерении звук. полей с помощью радиометра и Рэлея диска А. т. явл. помехой. А. т. имеют полезные применения в технике и технологии; напр., возникновение А. т. у поверхности препятствий, помещённых в звук. поле, может увеличить процессы массо- и теплопередачи через их поверхность.

А. т. — один из существенных факторов, обуславливающих УЗ очистку разл. деталей.

● Зарембо Л. К., Красильников В. А., Введение в нелинейную акустику, М., 1966; Мощные ультразвуковые поля, под ред. Л. Д. Розенберга, М., 1968; Иваницкий А. И., Теоретическое и экспериментальное изучение потоков, вызванных звуком, М., 1959.

К. А. Наувальных.
АКУСТИЧЕСКИЙ ВЕТЕР, то же, что акустические течения.

АКУСТИЧЕСКИЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС электронный (АПР), избирательное поглощение энергии упругих волн (фононов) определ. частоты в парамагн. кристаллах, помещённых в пост. магн. поле. АПР тесно связан с обычным электронным парамагнитным резонансом (ЭПР). Передача акустич. энергии парамагн. ч-цам при АПР происходит посредством спин-фононного взаимодействия, к-рое осуществляется путём модуляции акустич. колебаниями внутрискристаллических полей (электрич. или магнитных). Возбуждение в парамагн. кристалле, помещённом во внешнее магн. поле акустич. колебаний с частотой ν , удовлетворяющей условию $\epsilon_2 - \epsilon_1 = h\nu$, вызывает квант. переходы эл-нов между магн. подуровнями ϵ_2 и ϵ_1 . Переход $\epsilon_1 \rightarrow \epsilon_2$ ($\epsilon_1 < \epsilon_2$) сопровождается поглощением фононов с энергией $h\nu$, переход $\epsilon_2 \rightarrow \epsilon_1$ — излучением фононов с энергией $h\nu$.

При АПР могут наблюдаться переходы, удовлетворяющие правилу отбора, при к-ром магн. квантовое число $m = \pm 1, \pm 2$, в то время как в обычном ЭПР разрешены переходы только с $m = \pm 1$. АПР наблюдаются в области гиперзвук. частот $10^9 - 10^{11}$ Гц (см. Гиперзвук). В реальных кристаллах излучение или поглощение фононов происходит в конечной полосе частот, поэтому наблюдается резонансная линия с характерной для неё шириной и формой, к-рая зависит как от природы парамагн. иона, так и от хар-ра внутрискристаллич. полей и может существенно отличаться от ширины и формы линии ЭПР.

Экспериментально АПР можно наблюдать методом акустич. насыщения линий ЭПР и методом дополнит. затухания звука. В первом случае возбуждение в исследуемом кристалле акустич. колебаний с той же частотой, на к-рой наблюдается ЭПР, приводит к уменьшению сигнала ЭПР, т. е. к насыщению резонансной линии; во втором — меняют напряжённость магн. поля, и при его значениях, соответствующем резонансному, измеряют дополнит. поглощение звука.

Тепловое движение атомов, дефекты крист. структуры и ряд др. факторов по-разному влияют на форму линий АПР и ЭПР, поэтому из спектров АПР можно получить дополнит. информацию о симметрии локального внутрискристаллич. поля парамагн. кри-

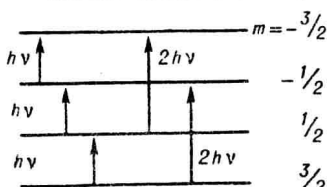
сталла, оценить влияние нарушения симметрии крист. поля в результате наличия дислокаций и случайных деформаций решётки, непосредственно измерить параметры спин-фононного вз-ствия. АЯР используется также для исследования металлов и ПП, в к-рых применение метода ЭПР затруднено из-за *скин-эффекта*.

● Альтшулер С. А., Козырев Б. М., Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп, 2 изд., М., 1972; Такер Дж., Рэмpton В., Гиперзвук в физике твёрдого тела, пер. с англ., М., 1975; Физическая акустика, под ред. У. Мэсона, пер. с англ., т. 4, ч. А, М., 1969, гл. 2.

В. Г. Бадалаян.

АКУСТИЧЕСКИЙ ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС (АЯМР), избирательное поглощение энергии акустич. колебаний (фононов), обусловленное переориентацией магн. моментов ат. ядер в тв. теле, помещённом в постоянное магн. поле. Для большинства ядер резонансное поглощение наблюдается в области УЗ частот от 1 до 100 МГц. АЯМР аналогичен *ядерному магнитному резонансу* (ЯМР).

Природа резонансного поглощения фононов связана с передачей энергии упругой волны системе яд. спинов вследствие модуляции акустич. колебаниями разл. внутр. вз-ствий (см. *Спин-фононное взаимодействие*). Акустические колебания с частотой ν , распространяясь в в-ве, могут вызвать квант. переход ядра между магн. подуровнями, характеризующимися разными направлениями спина, если энергия фонона равна разности между уровнями энергий. Переход с нижнего уровня ε_1 на верхний ε_2 сопровождается поглощением фонона,



Уровни энергии для ядра со спином $I = 3/2$ в постоянном магн. поле. Стрелками изображены возможные переходы для АЯМР с $m = \pm 1$ и с $m = \pm 2$.

а переход с верхнего уровня на нижний — его излучением. Поскольку при термодинамич. равновесии число ядер N_2 на уровне с энергией ε_2 меньше, чем число спинов N_1 на уровне ε_1 , при акустич. колебаниях число актов поглощения превышает число актов излучения, и в результате происходит резонансное поглощение фононов — АЯМР и наблюдается резонансная линия с характерной для неё шириной и формой. При АЯМР разрешены переходы с магнитными квантовыми числами $m = \pm 1, \pm 2$ (рис.), в то время как в обычном ЯМР разрешены переходы только с $m = \pm 1$.

Экспериментально АЯМР наблюдается, как и *акустический парамагнитный резонанс*, в виде добавочного поглощения УЗ (метод прямого акустич. резонанса) или регистрацией насыщения линий ЯМР (метод акустич. насыщения ЯМР).

Применение АЯМР позволяет расширить возможности ЯМР и получить дополнительную информацию о структуре тв. тел. АЯМР широко используется при исследованиях металлов и низкотемпературных ПП (напр., InSb), когда применение методов ЯМР затруднительно вследствие *скин-эффекта*, не позволяющего эл.-магн. полю проникнуть внутрь образца. АЯМР — метод исследования яд. спин-фононного вз-ствия; он позволяет изучать при комнатных температурах однофононные процессы, к-рые в ЯМР проявляются только при очень низких темп-рах, получать информацию о дислокациях и др. дефектах кристалла, о величине и природе внутренних магн. полей, а также о процессах тепловой релаксации в магн. материалах, в частности о роли вз-ствия фононов со *спиновыми волнами* (см. *Магнитоупругие волны*). АЯМР можно использовать для регистрации нелинейных фонон-фононных вз-ствий в тв. телах (см. *Нелинейное взаимодействие акустических волн*).

● Кессель А. Р., Ядерный акустический резонанс, М., 1969; Физическая акустика, под ред. У. Мэсона, пер. с англ., т. 4, ч. А, М., 1969, гл. 3; Магнитная квантовая акустика, М., 1977.

В. Г. Бадалаян.

АКУСТИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, см. *Импеданс акустический*.

АКУСТООПТИКА, изучает вз-ствие эл.-магн. волн со звуковыми в тв. телах и жидкостях. На основе этих явлений в технике создаются разл. приборы. Вз-ствие света со звуком широко используется в оптике, электронике, лазерной технике для управления когерентным световым излучением. Акустоопт. устройства (дефлекторы, сканеры, модуляторы, фильтры и др.) позволяют управлять амплитудой, поляризацией, спектр. составом светового сигнала и направлением распространения светового луча. Акустоопт. приборы отличаются универсальностью, быстродействием, простотой конструкции, кроме того, позволяют вести обработку информации в реальном масштабе времени.

Работа подавляющего большинства акустоопт. устройств основана на явлении *дифракции света на ультразвуке*. Поскольку угол отклонения дифрагиров. света определяется длиной звук. волны, им можно управлять, изменяя частоту вводимого звука. Этот принцип управления направлением светового луча в пр-ве положен в основу работы акустоопт. дефлекторов и сканеров, предназначенных для отклонения луча в заданном направлении и для непрерывной развёртки луча. Распределение энергии между основным лучом и дифрагированным регулируется изменением интенсивности звука. Этот эффект исполь-

зуется в *акустических модуляторах*, управляющих интенсивностью световых пучков. На периодич. структуре, создаваемой монохроматич. звук. волной, эффективно дифрагирует свет лишь определ. длины волны. Это позволяет выделить из спектра падающего оптич. излучения узкий спектр. интервал. С изменением частоты звука меняется в широких пределах и длина волны дифрагиров. света. На этом явлении основывается работа быстродействующих перестраиваемых акустоопт. фильтров светового излучения.

● Ультразвук, М., 1979 (Маленькая энциклопедия); Гуляев Ю. В., Проклов В. В., Шкердин Г. Н., Дифракция света на звуке в твёрдых телах, «УФН», 1978, т. 124, в. 1, с. 61; Ребри Ю. К., Управление оптическим лучом в пространстве, М., 1977.

В. М. Левин.
АКУСТООПТИЧЕСКАЯ ДИФРАКЦИЯ, то же, что *дифракция света на ультразвуке*.

АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ, возникновение пост. тока или эдс в проводящей среде (*металл, полупроводник*) под действием бегущей УЗ волны. А. э. — одно из проявлений *акустоэлектронного взаимодействия*. Появление тока связано с передачей импульса (и соотв. энергии) от УЗ волны эл-нам проводимости. Это приводит к направленному движению носителей — электрич. току в направлении распространения звука. А. э. явл. нелинейным эффектом и аналогичен нек-рым другим нелинейным *увелечениям эффектам*, напр. *акустическим течениям*. Локальные электр. поля, возникающие в проводящей среде под действием УЗ волны, захватывают носители заряда, что приводит к «увлечению» их волной — возникновению акустоэлектр. тока.

При вз-ствии акустич. волн с эл-нами проводимости каждый *фонон*, взаимодействующий с эл-ном, передаёт ему импульс $\hbar\omega/c$ (ω и c — частота и скорость звука соотвественно). При этом эл-н получает дополнит. скорость $\Delta v = \hbar\omega/cm$ в направлении распространения звука (m — масса эл-на) и возникает электр. ток, плотность к-рого

$$J_{ae} = en_e \Delta v = \frac{en_e \hbar \omega}{mc}, \quad (1)$$

где e — заряд эл-на, n_e — число эл-нов проводимости в ед. объёма. Если учесть, что $\mu = te/m$ — подвижность эл-нов (см. *Подвижность носителей тока*), t — время между столкновениями, а $I = \hbar\omega\mu\phi_s$ — интенсивность УЗ волны (ϕ_s — число фононов в ед. объёма)

и положить, что $\alpha_s = \frac{n_e}{\phi_s} \frac{1}{ct}$ — коэфф. электронного поглощения в проводящей среде, то из (1) получается универсальное соотношение для акустоэлектр. тока (соотношение Вайнрайха):

$$J_{ae} = \alpha_s \mu I / c. \quad (2)$$

В замкнутой цепи, состоящей из кристалла CdS с металлич. электродами, перпендикулярными направле-