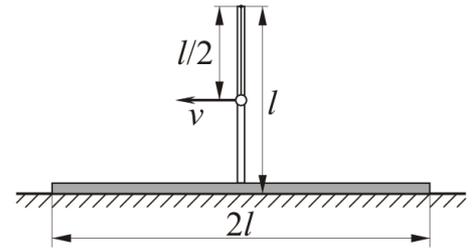


**Задача 1.**

Тонкая прямоугольная подставка ширины  $2l$  лежит на горизонтальном столе. В центре подставки на ней вертикально закреплена палочка длины  $l$ . К верхнему концу палочки на легком стержне длиной  $l/2$  подвешен маленький шарик массы  $m$ .



- а Шарик в нижней точке сообщает скорость  $v \gg \sqrt{gl}$ . При какой минимальной массе подставки она не будет качаться при дальнейшем движении шарика?
- б Шарик начинают запускать, постепенно увеличивая его скорость в нижней точке. При некоторой начальной скорости край подставки начинает отрываться от стола. Оказалось, что это происходит в тот момент, когда стержень горизонтален. Найдите массу подставки и начальную скорость шарика, при которой начинается покачивание.

Подставка однородна и при движении шарика по столу не скользит. Массами палочки и стержня можно пренебречь.

**Задача 2. Газ Ван-дер-Ваальса.**

Для описания отклонений поведения реальных газов от модели идеального газа было предложено большое число полуэмпирических уравнений. Самое известное из них — уравнение Ван-дер-Ваальса. Для одного моля газа это уравнение имеет вид:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

Здесь  $p$  — давление газа,  $V$  — его объем,  $T$  — абсолютная температура,  $R \approx 8,31$  Дж/(моль\*К) — универсальная газовая постоянная. Уравнение Ван-дер-Ваальса можно рассматривать как уравнение Менделеева – Клайперона, в которое введены поправки, учитывающие притяжение молекул на больших расстояниях ( $a/V^2$ ) и конечный размер молекул ( $b$ ). Вид этих поправок определен из теоретических соображений, а константы  $a$  и  $b$  для каждого газа определяются из экспериментов. Можно показать, что внутренняя энергия одного моля одноатомного газа Ван-дер-Ваальса при некоторых предположениях может считаться равной

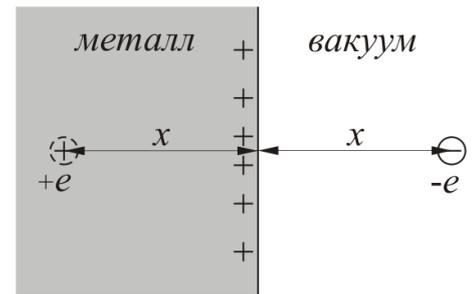
$$U = \frac{3}{2}RT - \frac{a}{V}$$

В отличие от идеального газа, она зависит не только от температуры, но и от объема. Первое слагаемое представляет собой кинетическую энергию теплового движения молекул, второе (отрицательное) — потенциальную энергию их взаимодействия.

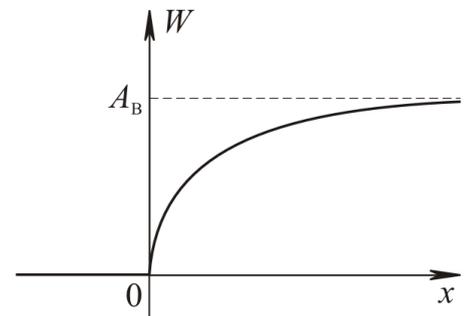
- а Сосуд объемом 100 л разделен перегородкой на две части. В первую из них, объем которой 1 л, помещен один моль аргона. Во второй части вакуум. В некоторый момент перегородку убирают и газ заполняет весь сосуд. Допустим, в этом процессе можно пренебречь теплообменом газа с окружающими телами. Найдите, на сколько изменится температура аргона, если этот газ подчиняется уравнению Ван-дер-Ваальса. Нагреется он или остынет? Константа  $a$  для аргона приближенно равна 0,135 [в единицах СИ].
- б Найдите изменение температуры аргона, если в сосуде его было 2 моля.

**Задача 3.**

**Работой выхода** называется минимальная энергия, которую нужно сообщить электрону в металле для его удаления в вакуум на большое расстояние. Величина этой энергии определяется несколькими физическими явлениями, из которых на больших расстояниях от поверхности существенным оказывается только одно. Оно состоит в притяжении покинувшего металл электрона к положительным электрическим зарядам, индуцированным им на его поверхности (см. первый рисунок). Сила этого притяжения, как известно, может быть найдена как сила притяжения к воображаемому «заряду-изображению», также показанному на рисунке. Учет работы, совершаемой против этой силы при удалении, приводит к показанной на втором рисунке зависимости полной потенциальной энергии электрона  $W$  от расстояния до поверхности  $x$ .



Подчеркнем, что эта картина не работает на малых (сравнимых с межатомными) расстояниях до поверхности — там притяжение электрона к металлу определяется другими факторами.



а Найдите аналитический вид функции  $W(x)$  на больших расстояниях. Заряд электрона  $e$ , работу выхода  $A_v$  считайте известной.

б В окружающем металл пространстве создали однородное электрическое поле напряженности  $E$ , перпендикулярное поверхности (поле отталкивает электроны от металла).

Найдите, на сколько изменилась из-за этого работа выхода.

с Найдите численное значение  $\Delta A_v$  для  $E = 10^4 \text{ В/см}$ , ответ дайте в электронвольтах. Как вы считаете, работает ли в таких полях описанная выше модель, или нужно учитывать явления, происходящие на малых расстояниях от поверхности? Дайте аргументированный ответ.

Значение электрической постоянной  $\epsilon_0 \approx 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$ .

#### Задача 4.

**Камера Вильсона** — устройство для регистрации процессов, происходящих с элементарными частицами. Представляет собой сосуд, наполненный переохлажденным паром какой-либо жидкости. Заряженная элементарная частица достаточно большой энергии, пролетая сквозь этот сосуд, ионизирует молекулы вещества, образуя вдоль своего пути центры конденсации. На каждом из таких центров пар начинает конденсироваться и образуется маленькая капля жидкости. Вдоль траектории частицы, таким образом, образуется цепочка таких капель (трек), который можно сфотографировать. Если поместить камеру в сильное магнитное поле, искривляющее траектории частиц, то по радиусу кривизны трека можно определить различные количественные характеристики частицы (массу, заряд, скорость и т.п.). Для этого, правда, понадобится использовать дополнительные соображения, например, законы сохранения энергии и импульса, выполняющиеся при столкновении частиц.

На рисунке, сделанном с фотографии камеры Вильсона, видна траектория  $\alpha$ -частицы с начальной энергией 50 МэВ (трек 1). В точке *A* эта частица испытала упругое столкновение с изначально покоившейся неизвестной частицей. Трек 2 — траектория  $\alpha$ -частицы после столкновения, трек 3 принадлежит отскочившей неизвестной частице. Камера помещена в однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости рисунка. Найдите:

- а кинетическую энергию, приобретенную неизвестной частицей (в МэВ);
- б ее заряд (в единицах заряда протона);
- с ее массу (в единицах массы протона).

$\alpha$ -частица состоит из двух протонов и двух нейтронов. Ее масса, таким образом, близка к 4 массам протона, заряд равен 2 зарядам протона. Рисунок сделан в масштабе (неизвестном), на нем можно делать любые построения и измерения циркулем и линейкой.

Для выполнения построений и решения задачи используйте отдельно выданный лист. Не забудьте вложить его в работу по физике.

#### Задача 5.

Изучите выданный вам текст «Жидкий гелий». Используя приведенный на листе для построений график, выполните задания:

- а Квазичастица, энергия которой равна удвоенной ротонной щели, распадается на два ротона. Найдите угол, под которым разлетаются эти ротонны (угол между их импульсами).
- б Покажите, что если скорость тела, движущегося в жидком гелии не превышает некоторое критическое значение, то это тело не может породить ни одной квазичастицы, а значит, будет двигаться не испытывая силы сопротивления. По графику спектра квазичастиц найдите численное значение критической скорости.

**Примечание.** На графике по оси ординат отложена, на самом деле, не энергия квазичастицы, а соответствующая этой энергии температура (в Кельвинах). Энергия, соответствующая температуре  $T$ , равна  $\epsilon = kT$ , где  $k \approx 1,38 \times 10^{-23}$  Дж $\times$ К — постоянная Больцмана. Аналогично, по оси абсцисс отложен не импульс, а т.н. волновое число. Эта величина имеет размерность обратной длины, на графике она отложена в единицах  $\text{Å}^{-1}$  ( $1 \text{ Å} = 10^{-10}$  м). Чтобы получить импульс, волновое число нужно умножить на постоянную Планка  $\hbar \approx 1,05 \times 10^{-34}$  Дж $\times$ с. Использование подобных единиц является традиционным в этой области науки.

Для выполнения построений и решения задачи используйте отдельно выданный лист. Не забудьте вложить его в работу по физике.

## ЖИДКИЙ ГЕЛИЙ

Изучение физической системы из большого числа элементов, например, вещества, является крайне сложной задачей, так как нет возможности описывать поведение каждого элемента в отдельности. К тому же во всех реальных веществах неизвестны не только положение и скорость каждого атома, но еще и его свойства — как именно он взаимодействует с другими атомами.

Один из способов описывать такие системы при низких температурах заключается в следующем: известно, что у любой термодинамической системы при абсолютном нуле достигается минимальная возможная энергия. Теперь попробуем немного ее возбудить, и посмотрим, какие состояния с энергией, очень близкой к минимальной, она может принимать. Например, можно запустить в вещество пучок нейтронов и посмотреть, насколько изменяются энергия и импульс каждого вылетающего нейтрона, то есть узнать, какие энергии и импульс можно передать нашему веществу. Результат этого измерения — зависимость поглощаемой энергии от поглощаемого импульса — называется спектром системы. Для удобства акт передачи энергии и импульса нейтроном веществу отождествляют с рождением в нем некой воображаемой частицы («квазичастицы») с такими энергией и импульсом, которые передал системе нейтрон.

На рисунке изображен спектр жидкого гелия при температуре  $1,12 \text{ K}^1$ . Квазичастицы, соответствующие начальному линейному участку этого графика называют фононами, а участку вблизи минимума — ротонами.

Интересная особенность спектра — его окончание в некоторой точке, а именно — там, где энергия квазичастицы становится равна удвоенной энергии в минимуме (ротонной щели). Для такой квазичастицы становится возможен распад на два ротона с выполнением законов сохранения энергии и импульса. Если в гелии появляется квазичастица с большей энергией — она тут же распадается. Отметим, что квазичастица — объект условный. Ее энергия — просто суммарная кинетическая энергия всех атомов гелия в системе отсчета, где он покоится, а импульс — соответственно, суммарный импульс атомов в этой системе отсчета. Представим себе, что в покоящемся гелии с постоянной скоростью движется какое-то тело. В системе отсчета, связанной с этим телом, оно не может совершить работу над гелием. Следовательно, это тело может передать гелию импульс только через рождение таких квазичастиц, возникновение которых понижает энергию системы в этой системе отсчета.

---

<sup>1</sup>Источник: D.G.Henshaw and A.D.B.Woods, Modes of atomic motions in liquid helium by inelastic scattering of neutrons., Physical Review, 121, 1266 (1961)