

метров), так и путём многолетнего слежения за флуктуациями времени прихода радиоимпульсов от пульсаров с миллисекундными периодами.

Лит.: Зельдович Я. Б., Новиков И. Д., Структура и эволюция Вселенной, М., 1975; Мошин А. С., Полубаринова-Кочина П. Я., Хлебников В. И., Космология, гидродинамика, турбулентность. А. А. Фридман и развитие его научного наследия, М., 1989. А. А. Старобинский.

ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ — закон сохранения энергии для термодинамич. системы, согласно к-рому работа может совершаться только за счёт теплоты или к.-л. др. формы энергии. Поэтому работу и кол-во теплоты можно измерять в одних единицах — Джоулях (1 Дж = 0,239 кал = 0,102 кгс/м). П. н. т. сформулировано как закон природы Ю. Р. Майером (J. R. Mayer) в 1842 и установлено экспериментально Дж. Джоулем (J. Joule) в 1843. П. н. т. можно формулировать как невозможность существования *вечного двигателя* 1-го рода, к-рый совершал бы работу, не черпая энергию из к.-л. источника.

Согласно П. н. т., теплота Q , сообщаемая системе, равна сумме приращения внутр. энергии U и работы, производимой системой против внеш. сил:

$$Q = U_2 - U_1 + A;$$

при бесконечно малом изменении состояния системы:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (1)$$

где δQ — бесконечно малое кол-во теплоты, передаваемой системе, δA — работа, совершаемая системой против внеш. сил, dU — изменение её внутр. энергии.

Ур-ние (1) является определенным величинами dU , т. к. δQ и δA — независимо измеримые величины. П. н. т. утверждает, что dU есть полный дифференциал нек-рой ф-ции U (величины δQ и δA , вообще говоря, не являются полными дифференциалами). Т. о., любая термодинамич. система обладает ф-цией состояния — энергией U , зависящей лишь от параметров, определяющих равновесное состояние системы, и не зависящей от процесса, к-рым система была приведена в это состояние. Передаваемое тепло Q и работа A зависят от пути, по к-рому совершается процесс, т. к. величины δQ и δA не есть полные дифференциалы. В системах, обменивающихся со средой веществом и энергией, в П. н. т. следует учитывать энергию Z , передаваемую при переносе массы: $Q = U_2 - U_1 + A + Z$.

Энергию U можно экспериментально определить, измеряя работу, совершаемую адиабатически замкнутой термодинамич. системой (т. е. при $Q = 0$), тогда $A_{ад} = U_2 - U_1$, что определяет U с точностью до аддитивной постоянной. Работу A можно определить по изменениям параметров системы. Напр., при бесконечно малом расширении однородной системы (жидкости или газа) при давлении P её работа $\delta A = PdV$ и, следовательно, $A = \int PdV$. Ур-ние (1) в этом случае имеет вид

$$\delta Q = dU + PdV.$$

В общем случае, если система характеризуется n экстенсивными параметрами a_1, \dots, a_n и обобщёнными силами X_1, \dots, X_n , элементарная работа

$$\delta A = \sum_{i=1}^n X_i da_i. \quad (2)$$

П. н. т. можно формулировать также с помощью *энтропии* $H = U + PV$, т. к.

$$\delta Q = dH - VdP.$$

Такая форма удобна для применения П. н. т. к стационарным процессам (см. *Джоуля — Томсона эффект*).

П. н. т. имеет многочисленные приложения, особенно эффективные при использовании также и *второго начала термодинамики*. Следствием П. н. т. является формула Майера для разности между теплоёмкостью при постоянном давлении и при постоянном объёме:

$$C_p - C_v = [P + (\partial U / \partial V)_T](\partial V / \partial T)_p,$$

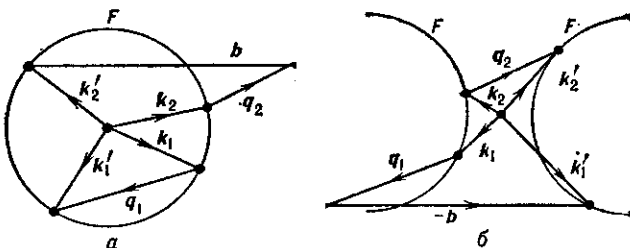
эта величина означает кол-во тепла, перешедшее в работу.

В феноменологич. термодинамике внутр. энергию $U = \bar{U}(V, T)$ рассматривают как экспериментально измеряемую ф-цию (калорическое уравнение состояния). Статистич. физика позволяет теоретически рассчитать ур-ние состояния исходя из законов взаимодействия между молекулами и вывести соотношение (2). При этом одновременно получается статистич. обоснование как П. н. т., так и 2-го начала термодинамики.

Лит.: Ван-дер-Ваальс И. Д., Констант Ф., Курс термостатики, Пер. с нем. I, ч. 1, М., 1936; Эпштейн П. С., Курс термодинамики, пер. с англ., М.—Л., 1948; Зоммерфельд А., Термодинамика и статистическая физика, пер. с нем., М., 1955; Кубо Р., Термодинамика, пер. с англ., М., 1970; Леонтович М. А., Введение в термодинамику. Статистическая физика, М., 1983; Новиков И. И., Термодинамика, М., 1984. Д. Н. Зубарев.

ПЕРЕБРОСА ПРОЦЕССЫ (U -процессы, от нем. Umklapp — переброс) — акты рассеяния *квазичастиц*, в частности электронов проводимости и дырок, при к-рых полный *квазиимпульс* (измеренный в единицах \hbar) всех квазичастиц после рассеяния отличается от полного квазиимпульса до рассеяния на вектор b *обратной решётки*. Причиной несохранения квазиимпульса является периодич. потенциал в кристалле, на фоне к-рого «разыгрывается» рассеяние. Акты рассеяния, в к-рых полный квазиимпульс сохраняется, наз. *нормальными* (N -процессы).

Разбиение всех актов рассеяния на U - и N -процессы зависит от того, как выбрана элементарная ячейка *импульсного пространства*. Рис. иллюстрирует рас-



сеяние электрона вблизи поверхности Ферми F при поглощении фонона. Если в качестве элементарной ячейки выбрана первая *Бриллюэна зона* (рис. а), то при переходе электрона из состояния с импульсом k_1 в состояние с импульсом k_1' с поглощением фонона с квазиимпульсом q_1 полный нач. квазиимпульс $k_1 + q_1$ лежит внутри этой зоны, и поэтому он равен конечному $k_1' = k_1 + q_1$. Т. о., $k_1 \rightarrow k_1'$ есть N -процесс. При переходе $k_2 \rightarrow k_2'$ с поглощением фонона с импульсом q_2 вектор $k_2 + q_2$ лежит вне зоны Бриллюэна, и поэтому $k_2' = (k_2 + q_2) + b$, т. е. U -процесс. На рис. (б) элементарная ячейка пространства получена из зоны Бриллюэна сдвигом на $-b/2$. При этом $k_1 \rightarrow k_1'$ является U -процессом, а $k_2 \rightarrow k_2'$ — N -процессом. Хотя относительно каждого конкретного акта рассеяния нельзя сказать, нормальный он или с перебросом, но при любом выборе элементарной ячейки существуют процессы обоих типов.

Наличие П. п. означает, что при рассеянии квазичастиц происходит не только обмен квазиимпульсом между ними (напр., внутри электронно-фононной системы), но и передача импульса кристаллу как целому, т. е. тем его степеням свободы, к-рые ответственны за движение «жесткого» кристалла. По этой причине П. п. приводят к диссипации импульса системы квазичастиц и могут быть причиной тепло- и электросопротивления (в отличие от N -процессов; см. *Межэлектронное рассеяние*). Результат вычисления таких макроскопич. характеристик не зависит от выбора элементарной ячей-