

в определении кол-ва теплоты. Передаваемую теплоту можно определить либо при пост. импульсе [как предложили Планк и Эйнштейн и что ведёт к ф-ле (7)], или при пост. скорости. Но т. к. в теории относительности импульс и скорость не пропорциональны, то второе определение  $\delta Q$ , связанное с передачей энергии при пост. импульсе, приводит к иному, чем (7), закону преобразования темп-ры в движущейся системе:

$$T = T_0 / (1 - \beta^2)^{1/2}. \quad (8)$$

Это не вызывает к.-л. затруднений и противоречий, т. к. термодинамич. процесс рассматривается в системе покоя (см. [2], с. 165).

Неравновесная Р. т. была разработана К. Эккартом [3] для однокомпонентной жидкости или газа и обобщена в 1953 для смеси Г. Клотенбергом, С. де Гроотом и П. Мазуром [4]. Здесь также теплота и её поток определяются неоднозначно, а имеют две возможности — Эккарта [3] и Ландау и Лифшица [5].

Второе начало термодинамики можно сначала представить в релятивистской форме в галилеевых координатах [2]:

$$\frac{\partial}{\partial x^\mu} \left( \varphi_0 \frac{dx^\mu}{ds} \right) \delta x \delta y \delta z \delta t \geq \frac{\delta Q_0}{T_0}, \quad (9)$$

где знак «больше» относится к неравновесным процессам,  $\varphi_0$  — собств. плотность энтропии в заданной точке в заданный момент времени, измеряемая локальным наблюдателем, покоящимся относительно жидкости или рабочего вещества,  $dx^\mu/ds$  — компоненты макроскопич. «скорости» жидкости в заданной точке в используемых координатах,  $\delta Q_0$  — собств. теплота, измеряемая локальным наблюдателем, к-рая поступает в изучаемый элемент жидкости при собств. темп-ре  $T_0$  за интервал времени наблюдения  $\delta t$ , входящий в ф-лу для четырёхмерного объёма  $\delta x \delta y \delta z \delta t$ .

Для того чтобы получить формулировку второго закона термодинамики с учётом общей теории относительности, нужно привлечь принцип ковариантности и эквивалентности принципов (см. [2], гл. 9).

Р. т. позволяет исследовать условия термодинамич. равновесия с учётом хим. и ядерных реакций, а также гравитац. поля. Одна из областей применения Р. т. — космологич. модели (см. *Космология*). Для разреженных газов Р. т. может быть разработана на основе релятивистской кинетич. теории и применении к системам лептонов, адронов, фотонов и электронов [6].

Лит.: 1) Паули В. Теория относительности, пер. с нем., 2 изд., М., 1983, гл. 3; 2) Толмен Р., Относительность, термодинамика и космология, пер. с англ., М., 1974; 3) Эккарт С., The thermodynamics of irreversible processes. 3. Relativistic theory of the simple fluids, «Phys. Rev.», 1940, v. 58, p. 919; 4) Kluitenberg G. A., de Groot S. R., Mazur P., Relativistic thermodynamics of irreversible processes. 1—2, «Physica», 1953, v. 19, p. 689, 1079; 5) Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Гидродинамика, 4 изд., М., 1988, гл. 15; 6) де Гроот С., ван Леувен В., ван Верт Х., Релятивистская кинетическая теория, пер. с англ., М., 1983.

**РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЧАСТИЦА** — частица, кинетич. энергия к-рой  $\mathcal{E}$  сравнима с энергией покоя  $mc^2$  или больше её ( $m$  — масса частицы,  $c$  — скорость света). Скорость Р. ч. близка к скорости света. Если  $\mathcal{E} \gg mc^2$ , частица наз. ультрарелятивистской. Р. ч. получают в ускорителях заряженных частиц.

**РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА** — раздел высокочастотной электроники, посвящённый использованию релятивистских электронных пучков (РЭП) и (или) релятивистских эффектов для усиления, генерирования и преобразования эл.-магн. колебаний и волн. Релятивистские эффекты проявляются, как правило, при скоростях электронов  $v$ , соизмеримых со скоростью света  $c$  ( $v \sim c$ ), когда энергия электронов

$$\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \mathcal{E}_0 \gamma = \mathcal{E}_0 + eU$$

коряющий потенциал; однако роль этих эффектов может быть определяющей и в устройствах со слабoreлятивистскими  $v^2 \ll c^2$  электронными пучками (напр., в лазерах на циклотронном резонансе — МЦР). Поскольку повышение ускоряющего потенциала является наиб. действенным способом увеличения мощности электронных пучков [макс. ток в вакуумном канале возрастает в нерелятивистском случае по закону «трёх вторых»:  $I_{\text{макс}} = AU^{3/2}$ , а в ультрарелятивистском ( $\gamma \gg 1$ ) — пропорц. ускоряющему потенциалу  $I_{\text{макс}} = BU$ ], то Р. э. представляет собой прежде всего область электроники больших мощностей. Вместе с тем ряд релятивистских эффектов позволяет получать когерентное эл.-магн. излучение с очень высокими частотами, недоступными для обычной нерелятивистской вакуумной электроники [см. *Лазеры на свободных электронах* (ЛСЭ)].

В Р. э. используются те же синхронизмы между электронами и эл.-магн. волнами (или, в общем случае, между спектральными компонентами ВЧ-полей), т. е. те же типы индуциров. излучения электронов, что и в нерелятивистской классической электронике (табл.); однако особенности релятивистской кинематики в динамике релятивистского электрона приводят к радикальным различиям между законами, определяющими работу релятивистских и соответствующих нерелятивистских приборов, а также создают возможности реализации высокоэфф. приборов, не имеющих близких нерелятивистских аналогов. К числу важнейших эффектов, используемых Р. э., можно отнести следующие.

1. Поскольку при  $\gamma \rightarrow \infty$  зависимость скорости электронов от их энергии становится всё более слабой:

$$\frac{dv}{d\mathcal{E}} = \frac{v}{\mathcal{E}} \cdot \frac{1}{\gamma^2},$$

то в системах с прямолинейными и слабоискривлёнными электронными пучками [напр., в генераторах, основанных на индуцированных Черенкова — Вавилова излучении и переходном излучении, — лампе бегущей волны (ЛБВ), лампе обратной волны (ЛОБ), твистроне, оротроне] группировка пучка электронов, модулированного ВЧ-полем, происходит на всё больших пространственных масштабах. В результате оптим. длина пространства взаимодействия  $L$  растёт пропорц. квадрату энергии электронов:  $L/\lambda \sim \gamma^2$ , а продольную составляющую элтрич. поля синхронной волны нужно

ВЧ-приборы с релятивистскими электронными пучками

Тип индуцированного излучения	Синхронизмы	Тип генератора (усилителя)
Черенкова — Вавилова	$\omega = k_{\parallel} v$	ЛБВ ЛОБ Оротрон Магнетрон
Переходное	$\omega \approx k_{\parallel} v$	Клистрон Моноотрон Твистрон
Тормозное	$\omega = k_{\parallel} v + \omega_H$ $\omega = (k_{\parallel} + k)v$	Гиротрон МЦАР Убитрон (ЛСЭ)
Рассеяние волн (параметрическое)	$\omega - \omega_i = (k_{\parallel} + k_i)v$	Скаттрон

Примечание:  $\omega$  и  $k_{\parallel}$  — частота волны и продольное волновое число,  $\omega_H$  — циклотронная частота,  $\omega_i$  и  $k_i$  — частота волны и продольное волновое число накачки.