$$P^{\mu}=\int_{t=\mathrm{const}}(\theta^{\mu 0}+t^{\mu 0})\,dV_t=\int_{S'_{\infty}}\eta^{\mu i 0}\,dS_i,$$

где S'_{∞} — бесконечно удалённая поверхность, сохраняется во времени и не зависит от выбора координат пространственно-временнóй «трубки», в к-рой сосредоточена материя. Т. о., псевдотензор (7) определяет разумное понятие полных энергии и импульса. Отметим, однако, что в теории гравитации использование нековариантных объектов типа (7) приносит мало пользы.

В квантовой теории поля ТЭИ становится оператором, генерирующим общекоординатные преобразования. При использовании общековариантной относительно преобразований координат регуляризации (напр., размерной или регуляризации по Паули — Вилларсу), в силу операторного аналога закона сохранения ТЭИ (3), одновременные *перестановочные соотношения* для компонент ТЭИ в квантовой теории не перенормируются (см. *Перенормировки* в КТП) и совпадают по форме с классическими *Пуассона скобками*. В частности, оператор $\theta^{\mu\nu}$ не приобретает аномальных размерностей. В нек-рых случаях, однако, оказывается необходимым использовать регуляризацию, нарушающую общую ковариантность, но сохраняющую другие симметрии теории, напр. киральную или дилатационную, поскольку одновременно сохранить все симметрии на квантовом уровне не удаётся. Примерами могут служить теории киральных фермионов (см. *Киральность*) со спинами 3/2 и 1/2 в пространствах $D=4k+2$ ($k=0, 1, 2, ...$) измерений, имеющие гравитац. аномалию (см. *Аномалии* в квантовой теории поля). В этих теориях на квантовом уровне закон сохранения (3) модифицируется, и в перестановочных соотношениях появляются дополнительные слагаемые. Так, для ТЭИ фермионов со спином $s=1/2$ в $D=2$ выполняются след. перестановочные соотношения, отличающиеся от классич. скобок Пуассона членом, содержащим производную третьего порядка:

$$[\theta_{++}(x),\theta_{++}(x')]=[\theta_{++}(x)+\theta_{++}(x')]\,\partial_{+}\delta(x-x')+ \\ +\frac{i}{48\pi}\,\partial_{+}^{3}\,\delta(x-x'), \qquad (8)$$

где $x_{\pm}=(x_1\pm x_2)/\sqrt{2}$ — координаты светового конуса в двумерном пространстве-времени и $\partial_{\pm}=(\partial_1\mp\partial_2)/\sqrt{2}$. В теориях, имеющих гравитац. аномалию, возникают трудности при описании их взаимодействия с гравитацией и обычно накладываются условия сокращения аномальных членов в перестановочных соотношениях (8) для полного ТЭИ.

Наиб. часто встречающейся аномалией, связанной с ТЭИ, является аномалия, отвечающая нарушению классич. *масштабной инвариантности*. В перенормированной теории масштабная инвариантность нарушается зависимостью констант связи от точки нормировки, определяемой *бета-функцией* (β). Имеется след. ф-ла для среднего от дивергенции дилатац. тока, равного следу ТЭИ:

$$\langle\partial^{\mu}D_{\mu}\rangle=\langle\theta^{\mu}_{\mu}\rangle=\sum_i\beta_i(g)\,\frac{\partial\log Z}{\partial g_i}, \qquad (9)$$

где Z — статистич. сумма теории, g_i — константы связи, $\langle\ \rangle$ — символ усреднения по вакууму.

В *квантовой хромодинамике* (9) сводится к утверждению о связи следа ТЭИ и глюонного конденсата:

$$\langle\theta^{\mu}_{\mu}\rangle=\frac{1}{2}\,\frac{\beta(g)}{g^2}\,\langle(G_{\lambda\nu})^a\,(G^{\lambda\nu})^a\rangle.$$

Используя изотропность распределения энергии и импульса, можно также связать плотность энергии вакуума в КХД с величиной глюонного конденсата:

$$\varepsilon=\langle\theta^{00}\rangle=\frac{\beta(g)}{8g^2}\,\langle(G_{\lambda\nu})^a(G^{\lambda\nu})^a\rangle.$$

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Теория поля, 7 изд., М., 1988; Волошин М. Б., Тер-Мартиросян К. А., Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц, М., 1984; Ициксон К., Зюбер Ж.-Б., Квантовая теория поля, пер. с англ., т. 1—2, М., 1984; Alvarez-Gaume L., Witten E., Gravitational anomalies, "Nucl. Phys. Ser. B.", 1984, v. 234, p. 269. *А. А. Герасимов.*

ТЕНЗОРЕЗИСТИ́ВНЫЙ ЭФФЕ́КТ (пьезосопротивление) — изменение сопротивления (проводимости σ) кристаллов под действием всестороннего сжатия (растяжения) или одноосной деформации. Особенно велик Т. э. в *полупроводниках* (открыт Ч. Смитом в 1947 в Ge и Si [1]), где он связан с изменением энергетич. спектра носителей заряда при деформации, в частности с изменением ширины запрещённой зоны и энергии ионизации *примесных уровней*; с относит. изменением энергии отд. долин в *многодолинных полупроводниках*; с расщеплением дырочных зон, к-рые в отсутствие деформации вырождены; с изменением *эффективной массы* носителей заряда (см. *Зонная теория*). Всё это приводит к изменению концентрации и *подвижности носителей заряда*.

Линейный Т. э. (малые деформации) описывается т. н. тензорами эластосопротивления $m_{\alpha\beta\gamma\delta}$ или пьезосопротивления $\pi_{\alpha\beta\gamma\delta}$, связывающими относит. изменение проводимости $\Delta\sigma/\sigma_0$ (σ_0 — проводимость в отсутствие деформаций) с тензором деформации $u_{\gamma\delta}$ или тензором упругого напряжения $P_{\gamma\delta}$:

$$\frac{\Delta\sigma_{\alpha\beta}}{\sigma_0}=\sum_{\gamma,\delta}m_{\alpha\beta\gamma\delta}\,u_{\gamma\delta}=\sum_{\gamma,\delta}\pi_{\alpha\beta\gamma\delta}\,P_{\gamma\delta}.$$

Учитывая симметрию относительно перестановки индексов σ и u (P), обычно используют матричные обозначения, вводя вместо двух пар индексов α, β и γ, δ соответственно два индекса n и m, пробегающие значения от 1 до 6. Тензорным обозначениям α, β или γ, δ, равным 11, 22, 33, 23, 13, 12, соответствуют матричные обозначения m или n: 1, 2, 3, 4, 5, 6 (см. [6]). При этом $\sigma_{\alpha\beta}=\sigma_n$ ($n=1-6$); $m_{\alpha\beta\gamma\delta}=m_{mn}$ ($m, n=1$—6), $\pi_{\alpha\beta\gamma\delta}=\pi_{mn}$ ($m=1$—6, $n=1$—3), $\pi_{\alpha\beta\gamma\delta}=(1/2)\,\pi_{mn}$ ($\gamma\neq\delta$, $m=1$—6, $n=4$—6), $u_{\alpha\alpha}=u_m$ ($m=1-3$), $u_{\alpha\beta}=(1/2)\,u_m$ ($\alpha\neq\beta$, $m=4-6$), $P_{\alpha\beta}=P_m$ ($m=1-6$). В кубич. кристаллах отличны от 0 три компоненты эластосопротивления m и пьезосопротивления π, связанные друг с другом соотношениями

$$\pi_{11}+2\pi_{12}=(m_{11}+2m_{12})\,(S_{11}+2S_{12}), \\ \pi_{11}-\pi_{12}=(m_{11}-m_{12})\,(S_{11}-S_{12}), \qquad (1) \\ \pi_{44}=m_{44}S_{44},$$

где S_{mn} — компоненты тензора коэф. упругости.

В собств. полупроводниках осн. механизмом, ответственным за Т. э., является изменение концентрации носителей заряда, вызываемое изменением ширины запрещённой зоны. В примесных полупроводниках Т. э. обычно вызываются изменением спектра носителей заряда в результате расщепления вырожденной зоны при одноосных деформациях, изменяющих симметрию кристалла.

В многодолинных полупроводниках вырождение снимается в результате смещения долин (изоэнергетич. поверхностей — эллипсоидов) относительно друг друга при деформациях, нарушающих их эквивалентность. Соответственно в n-Ge, где эллипсоиды в импульсном пространстве расположены на осях [111], большой является компонента m_{44} (π_{44}); в n-Si они расположены на осях [100] и большая компонента $m_{11}-m_{12}$ ($\pi_{11}-\pi_{12}$). Эти компоненты определяются значениями константы деформац. потенциала Ξ_u и соответственно равны [2, 3]:

$$m_{44}=-\frac{1}{3}\,\frac{1-k}{1+2k}\,\Xi_u/kT \quad (n\text{-Ge}), \qquad (2)$$

$$\frac{m_{11}-m_{12}}{2}=-\frac{1}{2}\,\frac{1-k}{1+2k}\,\Xi_u/kT \quad (n\text{-Si}).$$

где $k=\mu_{\perp}/\mu_{\parallel}$ — коэф. анизотропии подвижности носителей заряда для одного экстремума (долины) зоны ($\mu_{\parallel}$ — подвижность вдоль оси вращения эллипсоида, $\mu_{\perp}$ — поперёк).