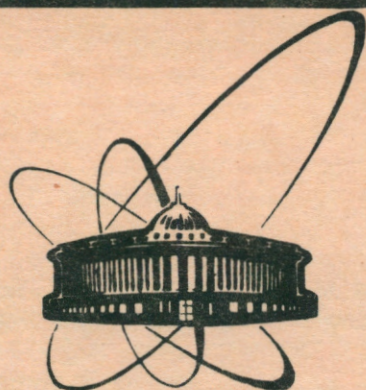


91-367



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

Д2-91-367

В. Н. Стрельцов

ОХЛАЖДАЕТСЯ ИЛИ НАГРЕВАЕТСЯ  
ДВИЖУЩЕЕСЯ ТЕЛО?

(О релятивистской термодинамике)

1991

## 1. ВВЕДЕНИЕ

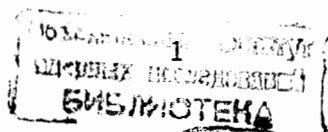
Ранее при обсуждении отличной от традиционной "локационной" формулировки теории относительности (см., например,<sup>/1,2/</sup>) речь шла, главным образом, о тех или иных аспектах электродинамики. Это, конечно, вполне объяснимо, если учесть, что именно электродинамике теория относительности обязана своим возникновением. С другой стороны, появление позднее ее альтернативной формулировки фактически было обусловлено так называемой проблемой 4/3 (определения энергии и импульса электромагнитного поля движущегося заряда, его электромагнитной массы).

Напомним, что альтернативная локационная формулировка основывается на пространственно-временной структуре (картине), которую составляют световые или запаздывающие, т.е. неодновременные пространственные расстояния\*. Введенная в ее рамках концепция релятивистской длины<sup>/3/</sup> непосредственно опирается на локационный метод измерения расстояний. При этом релятивистская, или "локационная", длина определяется суммой двух характерных запаздывающих расстояний<sup>/4/</sup>. Следствием данной концепции является рост продольных размеров релятивистских объектов (формула удлинения).

Если можно так выразиться, "математические контуры" альтернативной формулировки обозначились в 60-х годах в результате достаточно широкой дискуссии. Кроме упомянутой проблемы 4/3, в ней обсуждались вопросы релятивистской формулировки статики и термодинамики. В частности, в результате пересмотра прежнего решения фон Лауэ<sup>/5/</sup> известного парадокса прямоугольного рычага Льюиса-Толмена также пришли к формуле удлинения для продольного плеча рычага (см., например,<sup>/6/</sup>). В свою очередь, это должно было означать и изменение формулы преобразования для пространственного объема. А поскольку объем является, кроме того, важнейшей термодинамической характеристикой, то последнее, казалось бы, автоматически должно было вести к пересмотру прежних формул релятивистской термодинамики.

---

\*Сравните с общепринятым подходом, где мы фактически имеем дело с "одновременными" или "мгновенными" расстояниями.



Однако исходным пунктом альтернативной формулировки релятивистской термодинамики следует считать работу Отта<sup>/7/</sup>. Представленные в работе формулы преобразования для количества тепла и температуры существенно отличались от прежних, полученных еще Планком и Эйнштейном. Хотя при этом формула преобразования пространственного объема осталась неизменной.

Некоторые аспекты альтернативной формулировки релятивистской термодинамики и будут предметом последующего рассмотрения\*. В отличие от других работ на эту тему мы дадим физически наглядное обоснование формул Отта и будем непосредственно опираться на требования релятивистской ковариантности.

## 2. РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Вскоре после появления теории относительности Планк<sup>/9/</sup>, Эйнштейн<sup>/10/</sup> и другие сформулировали законы термодинамики в соответствии со специальным принципом относительности. При этом для формул преобразования термодинамических величин - количества тепла  $Q$ , температуры  $T$  и давления  $p$  - были получены следующие выражения:

$$Q = Q^* \sqrt{1 - v^2/c^2} = Q^* \gamma^{-1}, \quad (1)$$

$$T = T^* \gamma^{-1}, \quad (2)$$

$$p = p^*, \quad (3)$$

где  $-v(=-v_x)$  - скорость движущейся  $S$ -системы относительно покоящейся (собственной)  $S^*$ -системы.

Однако позднее Отт<sup>/7/</sup> и, независимо от него, Арзелье<sup>/11/</sup> показали, что старая формулировка не совсем удовлетворительна. При этом для формул преобразования  $Q$  и  $T$  вместо (1) и (2) ими были получены следующие выражения:

$$Q = Q^* \gamma, \quad (4)$$

$$T = T^* \gamma. \quad (5)$$

\*Следует отметить, что в отличие от других вопросов альтернативной формулировки теории относительности оттовская трактовка уже нашла свое отражение, например, в известной монографии Мёллера<sup>/8/</sup>.

Таким образом, согласно (5) движущееся тело горячее, а не холоднее покоящегося, как это считали ранее.

Наш вариант-ответа на вопрос о преобразовании тепловой энергии мы дадим с помощью следующего простого примера.

Пусть некоторое (покоящееся) материальное тело теряет тепло в результате излучения. При этом один импульс излучения величины  $p^* = Q^*/c$  направлен вдоль оси  $X^*$ , а другой - в противоположном направлении. Так что и после излучения тело остается в покое. Очевидно, что суммарная потеря энергии в  $S^*$ -системе составит  $2Q^*$ . По наблюдениям из  $S$ -системы первый импульс унесет энергию

$$Q_1 = [Q^* + v(Q^*/c)] \gamma, \quad (6a)$$

а второй

$$Q_2 = [Q^* + v(-Q^*/c)] \gamma. \quad (6b)$$

Таким образом, суммарная потеря тепла составит

$$Q = Q_1 + Q_2 = Q^* \gamma. \quad (7)$$

что совпадает, очевидно, с формулой Отта (4).

Обратимся теперь к другому простому примеру. Рассмотрим покоящийся ящик с газом. Возьмем сначала те молекулы, которые движутся по (или против) направлению оси  $X^*$ . С точки зрения  $S$ -системы, их энергии будут соответственно равны

$$E_1 = (E^* + v p_x^*) \gamma, \quad (8a)$$

$$E_2 = [E^* + v(-p_x^*)] \gamma, \quad (8b)$$

т.е. средняя энергия составит

$$E = E^* \gamma. \quad (9)$$

Нетрудно показать, что таким же образом возрастает и энергия молекул, движущихся в плоскости  $y^*z^*$ . Отсюда следует, что сделанный вывод будет справедлив и для молекул, движущихся в произвольном направлении. Но поскольку, как мы знаем, температура пропорциональна средней кинетической энергии молекул газа, то, по крайней мере качественно, очевидно, что увеличение энергии должно приводить к росту температуры в полном соответствии с (5).

При строгом выводе формулы (5) обычно опираются на второй закон термодинамики (термодинамическое определение температуры), который в собственной системе отсчета описывается выражением

$$\delta S^* \geq \frac{\delta Q^*}{T^*}, \quad (10)$$

где  $\delta S^*$  - изменение энтропии между двумя близкими равновесными состояниями, а равенство выполняется лишь для обратимых процессов. Принимая во внимание, что энтропия, будучи функцией числа состояний, является инвариантной величиной, на основании (4) действительно приходим к (5).

Здесь, однако, уместно сделать замечание общего порядка. Поскольку температура преобразуется при переходе от одной системы отсчета к другой, то очевидно, что она есть компонента, как и энергия, 4-вектора. С другой стороны, как мы знаем, классическая температура - это скалярная ("однокомпонентная") величина. Но ведь, по сути дела, "классику" представляет собственная система отсчета  $S^*$ . Учет этого факта означает, что  $T^*$  - временная компонента 4-вектора температуры ( $T^* \equiv T^{0*}$ ). Отсюда прямо следует, что при переходе к любой другой движущейся системе отсчета величина  $T^0$  будет преобразовываться именно по формуле (5). В общем случае будем иметь /11/:

$$T^i = \frac{u^i}{c} T^*, \quad (11)$$

где  $u^i$  - 4-скорость.

Следующая важная термодинамическая величина, которую мы рассмотрим, это пространственный объем. Напомним, что на языке четырехмерного представления он определяется временной компонентой 4-вектора объема

$$V_i = -\epsilon_{iklm} a^k b^\ell c^m, \quad (12)$$

где  $\epsilon_{iklm}$  - тензор Леви-Чивиты,  $a^k, b^\ell, c^m$  - образующие его 4-вектора,  $\epsilon^{0123} = 1$ . В полном соответствии с предыдущими рассуждениями в рамках альтернативного подхода имеем  $V_\alpha^* = 0$ . Отсюда следует

$$V_0 = V_0^* \gamma, \quad (13)$$

т.е. возрастание (а не сокращение) пространственного объема при движении, что, очевидно, отвечает духу формул (4) и (5). Особенно, если учесть, что уравнение состояния идеального газа прямо связывает объем и температуру, а следовательно, и их формулы преобразования /12/. Правда, в уравнении, кроме того, фигурирует величина давления, которая в случае общепринятого подхода полагается инвариантом. Здесь следует также отметить, что в рамках 4-представления давление определяется как раз с помощью 4-вектора объема. Так, давление в направлении оси  $X$  задается как компонента  $T^{11}$  тензора энергии-импульса выражением

$$p = T^{11} = \frac{\partial p^1}{\partial V_1}, \quad (14)$$

т.е. действительно представляет собой изменение импульса на единицу нормальной площади в единицу времени. При этом, в частности, компонента  $T^{00} = \partial p^0 / \partial V_0 = \epsilon$  будет, очевидно, описывать плотность энергии в единице пространственного объема и т.д. На основании (14) легко получить формулу преобразования давления. Например, в сосуде с газом давление на стенку в направлении движения (сосуда) составит

$$p_{\parallel} = T^{11} = (p^* + \beta^2 \epsilon^*) \gamma^2 \quad (15a)$$

и

$$\epsilon = T^{00} = (\epsilon^* + \beta^2 p^*) \gamma^2. \quad (15b)$$

Здесь мы учли, что в системе покоя сосуда  $T_*^{11} = T_*^{22} = T_*^{33} = p^*$  (закон Паскаля), а  $T^{0\alpha} = T^{\alpha 0} = 0$ ,  $\alpha = 1, 2, 3$ . При этом очевидно, что  $p_{\perp} = p_{\perp}^*$ .

### 3. ЧЕРНОЕ ТЕЛО

Кажется, что термодинамика (во всяком случае, ее макроскопическое описание) стоит достаточно обособленно от электродинамики, которой, как мы знаем, обязана своим возникновением локационная формулировка теории относительности. Однако между этими двумя разделами физики существует все же достаточно прямая связь. Примером тому может служить модель черного тела.

Рассмотрим термически равновесное электромагнитное излучение, заключенное внутри замкнутой полости. В системе покоя полости ( $S^*$ ) поток электромагнитного излучения равен нулю

в каждой точке и в соответствии с законом Стефана - Больцмана плотность энергии  $\epsilon^*$  определяется формулой

$$\epsilon^* = a T^{*4}, \quad (16)$$

где  $a$  - постоянная. Излучение обуславливает нормальное давление, которое в соответствии с равенством

$$T^{00} - T^{aa} = 0 \quad (17)$$

составляет

$$p^* = \frac{1}{3} a T^{*4}. \quad (18)$$

Опираясь на 4-вектор температуры, запишем (16) в ковариантном виде

$$\epsilon = T^{00} = a T^0 T^0 T^i T_i. \quad (19)$$

Привлекая 4-вектор объема, для полной энергии и энтропии будем иметь соответственно

$$E = p^0 = a T^0 T^i T_i T^k V_k \quad (20)$$

и

$$S = \frac{4}{3} a T^i T_i T^k V_k. \quad (21)$$

В рамках нашего подхода импульс и энергия движущейся полости с учетом (20) будут определяться (как и в случае электромагнитного поля движущегося заряда) формулами:

$$G^1 = \frac{\beta}{c} E^{*,\gamma} = \frac{\beta}{c} a T^{*4} V^{*,\gamma} = \frac{\beta}{c} a T^4 V_{,\gamma}^{-4}, \quad (22a)$$

$$E = E^{*,\gamma} = a T^{*4} V^{*,\gamma} = a T^4 V_{,\gamma}^{-4}. \quad (22b)$$

Как видно, (22) отличаются от соответствующих общеизвестных выражений (см., например, <sup>13</sup>), при выводе которых используется формула лоренцева сокращения объема.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оттовская формулировка релятивистской термодинамики кажется совершенно несвязанной с локационным подходом, затрагиваю-

щим пространственно-временную структуру теории относительно-сти. Однако, как известно, уравнение состояния идеального газа в релятивистском случае обуславливает тесную зависимость формул преобразований пространственного объема и температуры. При этом формула увеличения продольных размеров релятивистских объектов как раз соответствует формуле Отта возрастания температуры движущегося тела. Последнее, очевидно, должно быть связано с увеличением его тепловой энергии.

Проведенное рассмотрение можно считать еще одним свидетельством в пользу нетрадиционной (локационной) формулировки теории относительности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стрельцов В.Н. - Сообщение ОИЯИ P2-90-484, Дубна, 1990.
2. Strel'tsov V.N. - JINR Communication D2-90-596, Dubna, 1990.
3. Idem - Found. Phys. 1976, 6, p.293.
4. Стрельцов В.Н. - Сообщение ОИЯИ P2-89-772, Дубна, 1989.
5. Von Laue M. - Ann. Phys. (Leipzig), 1907, 22, p.867.
6. Arzelies H. - Nuovo Cim., 1965, 35, p.783.
7. Ott H. - Z. Phys., 1963, 175, p.70.
8. Møller C. - The Theory of Relativity (Clarendon Press, Oxford, 1972) § 7.10.
9. Plank M. - Berl. Ber. 1907, p.542.
10. Einstein A. - Jahrb. Radioakt. Electronik, 1907, 4, p.411.
11. Arzelies H. - Nuovo Cim., 1965, 35, p.792.
12. Strel'tsov V.N. - Found Phys., 1977, 7, p.325.
13. Pauli W. - Theory of Relativity (Pergamon Press, 1958) § 49.

Рукопись поступила в издательский отдел  
2 августа 1991 года.