Физика элементарных частиц и теория поля

УДК 524.834; 531.19+536.75 DOI: 10.17223/00213411/68/8/3

Среда типа Грюнайзена для темной энергии и квинтэссенции

С.Э. Коренблит[1,2], Э.Г. Аман[1], А.Д. Москаленко[1]

[1] *Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*
[2] *Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия*

Связь вида $P = \lambda u$ в равновесной однокомпонентной среде с заданной $\lambda = \mathrm{const}$ возможна и при наличии взаимодействия, а при $\lambda(V)$, $\lambda(u)$, $\lambda(P)$ также определяет все ее функции состояния, например, на различных стадиях эволюции Вселенной, в терминах одной, задаваемой химпотенциалом, функции одной переменной, выделяя значения $\lambda = -1,\ 0,\ 1/3$. Условия равновесия и устойчивости исключают такую среду для $-1 < \lambda(\cdot) < 0$.

Ключевые слова: *уравнение состояния, термодинамическое равновесие, темная энергия, квинтэссенция.*

Введение

Под средой типа Грюнайзена будем понимать среду, для которой общее размерное соотношение $P \equiv \lambda u$ при заданной безразмерной функции $\lambda(\cdot,\cdot)$ имеет неформальный смысл как независимое дополнительное уравнение состояния этой среды. Здесь P – равновесное давление среды, а

$$\frac{PV}{\lambda} = U(T,V,N)\,,\ u(T,\upsilon) = \frac{U}{V}\,,\ \sigma(T,\upsilon) = \frac{S}{V}\,, \tag{1}$$

$$\text{а также } \upsilon = \frac{V}{N}\,,\ \overline{\varepsilon}(T,\upsilon) = \frac{U}{N} = \upsilon u(T,\upsilon)\,,\ \overline{s}(T,\upsilon) = \frac{S}{N} = \upsilon\sigma(T,\upsilon) \tag{2}$$

есть зависящие от ее температуры T, выделяемого ее объема V и числа N частиц в нем, соответственно: полная внутренняя энергия, объемные плотности этой энергии и энтропии, а также удельные объем, энергия и энтропия. Для однокомпонентной среды зависящий, вообще говоря, от двух интенсивных переменных безразмерный параметр $\lambda(\cdot,\cdot)$ назван параметром Грюнайзена [1]. Например, для гиббсовского d-мерного газа с однородными функциями полных кинетической $K(\{\mathbf{p}\})$ и потенциальной $\Pi(\{\mathbf{x}\})$ энергий взаимодействия частиц степеней однородности ℓ и $-\ell$ найдем $\lambda = \ell/\mathrm{d}$. Действительно, масштабное преобразование N-частичной статсуммы такого газа [2], сперва при $\Pi(\{\eta\mathbf{x}\}) = \eta^n\Pi(\{\mathbf{x}\})$ с $\{\mathbf{x}\} \equiv \{\mathbf{x}_1 \ldots \mathbf{x}_N\}$, $K(\{\eta\mathbf{p}\}) = \eta^\ell K(\{\mathbf{p}\})$ с $\{\mathbf{p}\} \equiv \{\mathbf{p}_1 \ldots \mathbf{p}_N\}$, и

$$Z_N(T,V) = \frac{1}{N!h^{N\mathrm{d}}}\prod_{j=1}^{N}\left\{\int_{V_\mathrm{d}} d^\mathrm{d}x_j \int d^\mathrm{d}p_j\right\}\exp\left\{-\frac{K(\{\mathbf{p}\}) + \Pi(\{\mathbf{x}\})}{k_\mathrm{B}T}\right\},\ (k_\mathrm{B} \text{ – константа Больцмана})$$

вида $\mathbf{x} \to \eta\mathbf{x}$, т.е. $V_\mathrm{d} \to \eta^\mathrm{d} V_\mathrm{d}$, и $\mathbf{p} \to \eta^{n/\ell}\mathbf{p}$, $T \to \eta^n T$ дает для нее функциональное уравнение $Z_N\left(\eta^n T, \eta^\mathrm{d} V_\mathrm{d}\right) = \eta^{[1+n/\ell]N\mathrm{d}} Z_N(T,V)$ с решением $Z_N(T,V) = [T/\Theta]^{[\mathrm{d}/n+\mathrm{d}/\ell]N}\left(\exp[\omega(q)]\right)^N$ для нее и для аддитивной свободной энергии F [2]. Здесь Θ – константа размерности температуры; $\omega(q)$ – некоторая безразмерная функция одной инвариантной интенсивной переменной $q = T\upsilon^{-n/\mathrm{d}}$,
$F(T,V,N) \equiv -k_\mathrm{B}T\ln Z_N(T,V) = -Nk_\mathrm{B}T\left\{\left(\frac{\mathrm{d}}{n} + \frac{\mathrm{d}}{\ell}\right)\ln\left(\frac{T}{\Theta}\right) + \omega(q)\right\} \to -Nk_\mathrm{B}T\omega(q)$ при $n \to -\ell$, что при $F \equiv N\overline{\vartheta}(T,\upsilon)$, $q \to T\upsilon^\lambda$ и дает (1) с $\lambda = \ell/\mathrm{d}$ для давления и внутренней энергии [3] как

$$P = -\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_{T,N} = -\left(\frac{\partial\overline{\vartheta}}{\partial\upsilon}\right)_T \to \frac{\lambda}{\upsilon}k_\mathrm{B}Tq\omega'(q) \text{ и } U = -T^2\left(\frac{\partial}{\partial T}\frac{F}{T}\right)_{V,N} \to Nk_\mathrm{B}Tq\omega'(q)\,. \tag{3}$$

Таким образом, даже $\lambda = \mathrm{const}$ отнюдь не означает идеальности среды [1]. Но с тем же $\lambda = \ell/\mathrm{d}$ связь (1) хорошо известна [1–3] для идеального газа, т.е. с $\Pi(\{\mathbf{x}\}) \equiv 0$ (как с любой желаемой степенью однородности) и с суммой одночастичных кинетических спектров вида