Статистическая механика и термодинамика частиц с непрерывной спиральностью

В последние годы растёт интерес к киральным эффектам, классу макроскопических явлений связанных со взаимодействием спиновых степеней свободы и макроскопического вращения. Актуальность исследования объясняется тем, что киральные явления играют важную роль в описании свойств быстровращающейся материи в экстремальных условиях, например, при ядерных столкновениях или в быстровращающихся компактных астрофизических объектах, таких как нейтронные звезды.

Модель

Классический идеальный газ безмассовых частиц с непрерывной спиральностью в (1+2)-мерном пространстве Минковского, который находится при постоянной конечной температуре и вращается с постоянной угловой скоростью.
Для модели частицы с непрерывной спиральностью в (1+2)-мерном пространстве Минковского было использовано предложенное ранее [1] действие

$$S = \int d\tau \left[\left(p, \frac{dx}{d\tau}\right) - \frac{\sigma}{(p,\xi)}\frac{d\varphi}{d\tau} - \varrho \frac{(p, \partial_\varphi \xi)}{(p,\xi)}\frac{d\varphi}{d\tau} - \frac{\lambda}{2}(p,p) \right]$$

Фазовое пространство

Положение $\boldsymbol{x}$ спиновой частицы с непрерывной спиральностью σ не калибровочно-инвариантно, оно лежит на параболическом цилиндре с изотропной осью и фокальным радиусом σ. Новая калибровочно-инвариантная координата $\boldsymbol{y}$ [2]:

$$y = x - p(e,x) - \left[e, \frac{\sigma}{(p,\xi) - \varrho}\frac{(p,\partial_\varphi\xi)\xi - \partial_\varphi\xi(p,\xi)}{(p,\xi)} \right],$$

Состояние частицы задаётся пространственным импульсом $\boldsymbol{p} = p\boldsymbol{\beta}$ и координатой $\boldsymbol{y}$. Энергия частицы: $\varepsilon = pc$, полный угловой момент: $\mathcal{J} = [y,p] + \sigma e$. Элемент фазового объёма определяется задаётся в стандартной форме

$$d\Gamma = d\boldsymbol{y}d\boldsymbol{p}.$$

Одночастичная функция распределения

Распределение по импульсам в фиксированной точке пространства:

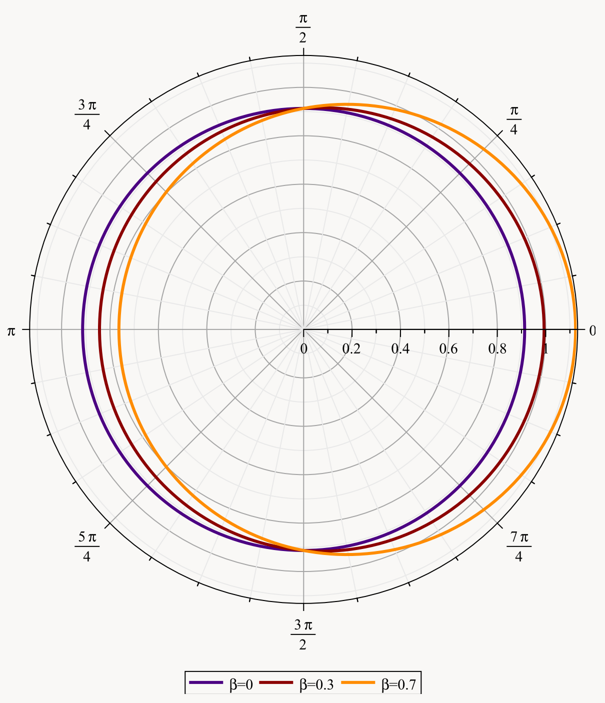
$$\rho_0(p, \alpha^\circ) = \frac{1}{Z_{0y}} \exp\left(-\frac{\tilde{p}^0 c}{\theta\hat{\gamma}} - \frac{\omega\hat{\gamma}\sigma(1 - \hat{\beta}\cos\alpha^\circ)}{2\theta\tilde{p}} \right),$$

где $\tilde{p}_\mu$ — импульс во вращающейся системе координат, $\hat{\gamma}$ и $\hat{\beta}$ — параметры перехода во вращающуюся систему координат, $\boldsymbol{\alpha}^\circ$ — угол между $\tilde{\boldsymbol{p}}$ и $\boldsymbol{y}$. При интегрировании по модулю импульса Z_{0y} расходится, если $\omega\sigma < 0$ — частичное невращение.

Распределение по углам:

$$\rho(\alpha^\circ) \sim K_2\left(2\sqrt{\frac{c\omega\sigma}{2\theta^2}\left(1 - \hat{\beta}\cos\alpha^\circ\right)} \right),$$

где K_2 — функция Бесселя второго рода. Наблюдается асимметрия в распределении: круги на графике смещаются от центра при увеличении $\hat{\beta} \sim \omega$.

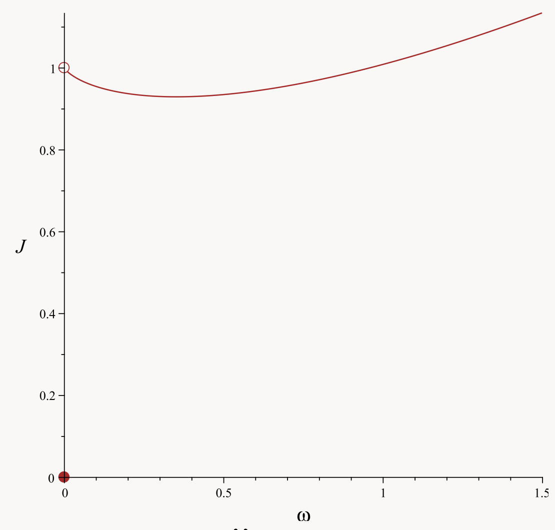


Термодинамика

Уравнение состояния «угловой момент — угловая скорость» для ненулевых значений ω:

$$\mathcal{J} = \frac{c\sigma}{2\theta}\left[1 + \frac{\omega c\sigma}{2\theta^2}\left(2\gamma + \ln\frac{\omega c\sigma}{2\theta^2} + \left(\frac{2R\theta^2}{c^2\sigma}\right)^2 \right) \right]$$

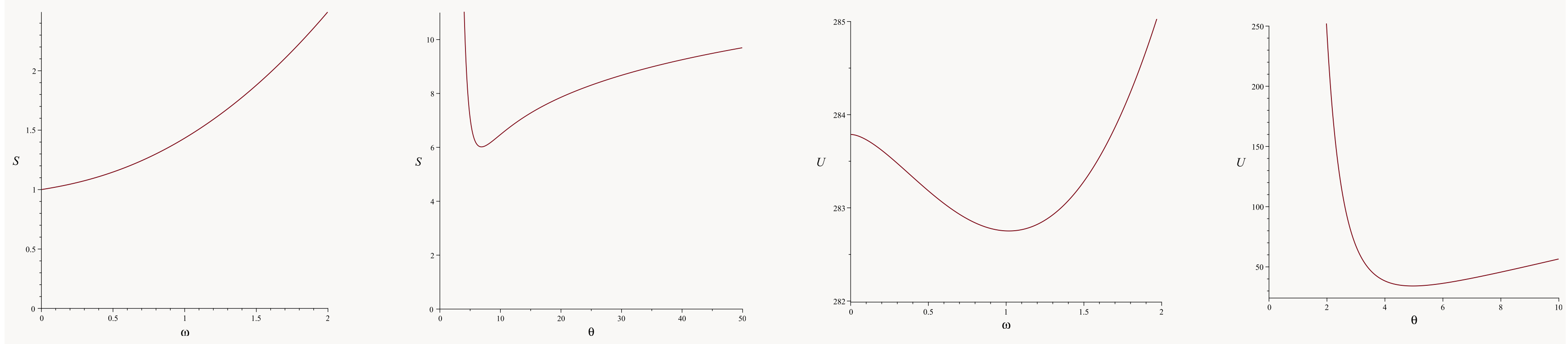
При этом $\mathcal{J}(0) = 0$.



Аналогичные зависимости для энтропии и внутренней энергии:

$$S = 2 + \ln\frac{2\pi V\theta^2}{\hbar^2 c^2} + \frac{c\omega\sigma}{2\theta^2} + \left[\frac{3c^2\sigma^2}{4\theta^4}\left(\frac{1}{2}\ln\frac{c\omega\sigma}{2\theta^2} + \gamma + \frac{1}{12} \right) - \frac{R^2}{2c^2} \right]\omega^2,$$

$$U = \theta\left[2 + 2\ln(2\pi) + \frac{c^2\omega^2\sigma^2}{4\theta^4}\left(\ln\frac{c\omega\sigma}{2\theta^2} + 2\gamma \right) - \frac{R^2\omega^2}{c^2} \right].$$



Литература

1. Gorbunov I. V., Kuzenko S. M., Lyakhovich S. L. On the Minimal Model of Anyons // Int. J. Mod. Phys. A. — 1997. — Sept. — Vol. 12, no. 23. — P. 4199–4215.
2. Kaparulin D. S., Lyakhovich S. L., Retuntsev I. A. Worldsheet of a continuous helicity particle // Phys. Rev. D. — 2022. — Mar. — Vol. 105, issue 6. — P. 065004.

Михаил Малев, Димтрий Капарулин

mmalev@cern.ch, dsc@t-sk.ru

НИ ТГУ

Национальный исследовательский Томский государственный университет