

тового излучения. Для наиб. вероятной модели Вселенной, в к-рой плотность вещества равна критической (см. *Космология*), а давление вещества много меньше его плотности энергии, С. к. имела место $2/(3H) = 13 (H/50 \text{ км/с} \cdot \text{Мпк})^{-1}$ млрд. лет назад (H — *Хаббла постоянная*). При наличии положительной космологич. постоянной или в случае отрицательности кривизны трёхмерного пространства возраст Вселенной может быть больше.

Сингулярности пространства-времени вообще и С. к. в частности являются естеств. границей применимости классич. теории гравитации. Эволюция Вселенной до выхода из физ. С. к. (а также, возможно, некое время после) должна следовать из к.-л. квантового обобщения теории гравитации (см. *Квантовая теория гравитации*). В частности, в общей теории относительности начальные условия в момент матем. С. к. для малых неоднородных возмущений метрики пространства-времени модели Фридмана, описывающей однородную изотропную Вселенную, могут быть произвольными ф-циями пространственных координат. Более фундаментальная квантовая теория, позволяющая рассчитать структуру физ. С. к., должна давать конкретные предсказания для этих начальных условий, к-рые могут быть проверены с помощью наблюдательных данных о крупномасштабной структуре Вселенной, анизотропии температуры реликтового эл.-магн. излучения, спектре и статистике реликтового фона гравитационных волн в настоящее время. Напр., такого рода предсказания следуют из модели Вселенной с де-ситтеровской (инфляционной) стадией вблизи С. к. (см. *Первичные флуктуации в ранней Вселенной*). А. А. Старобинский.

СИНГУЛЯРНЫЕ ФУНКЦИИ в квантовой теории поля — релятивистски-инвариантные ф-ции, тесно связанные с квантованием волновых полей, имеющие сингулярное поведение в окрестности светового конуса и начала координат. В первую очередь к С. ф. относятся *перестановочные функции*, стоящие в правых частях коммутац. соотношений в x -представлении. Простейшей из них является перестановочная ф-ция скалярного поля ϕ

$$\phi(x)\phi(y) - \phi(y)\phi(x) = \frac{1}{i} D(x-y) -$$

т. н. ф-ция Паули — Йордана, к-рая явно выражается через ф-цию Бесселя J_1 (см. *Цилиндрические функции*), дельта-функцию Дирака δ и известные разрывные ф-ции

$$\theta(z) = \begin{cases} 1 & \text{при } z > 0; \\ 0 & \text{при } z < 0; \end{cases} \quad \varepsilon(z) = \begin{cases} 1 & \text{при } z > 0; \\ -1 & \text{при } z < 0; \end{cases}$$

следующим образом:

$$D(x) = \frac{1}{2\pi} \varepsilon(x^0) \delta(s^2) - \frac{m}{4\pi\sqrt{s^2}} \varepsilon(x^0) \theta(s^2) J_1(m\sqrt{s^2}). \quad (1)$$

Здесь $s^2 = x_0^2 - x^2$ — квадрат четырёхмерного интервала, $x = (x_0, \mathbf{x})$, $y = (y_0, \mathbf{y})$ — точки пространства-времени, m — масса кванта поля (используется система единиц, в к-рой $\hbar = c = 1$). Как видно, в окрестности светового конуса $D(x)$ имеет особенности $\varepsilon(x^0)\delta(s^2)$ и $\varepsilon(x^0)\theta(s^2)$.

Перестановочные ф-ции полей с ненулевым спином выражаются через линейные комбинации $D(x)$ и её производных. Напр., перестановочная ф-ция Дирака поля $S(x)$ связана с D соотношением

$$S(x) = (i\gamma^\nu \partial_\nu + m)D(x), \quad (2)$$

где $\partial_\nu = \partial/\partial x^\nu$ и γ^ν ($\nu = 0, 1, 2, 3$) — Дирака матрицы. Перестановочные ф-ции являются решениями соответствующих полевых ур-ний. Ф-ция Паули — Йордана удовлетворяет Клейна — Гордона уравнению (а также вытекающему из коммутац. соотношения ус-

ловию антисимметрии), а ф-ция $S(x)$ — Дирака уравнению.

Помимо перестановочных С. ф. важную роль играют Грина функции, т. е. решения соответствующих неоднородных ур-ний, в правой части к-рых стоит 4-мерная δ -функция. К ним принадлежат запаздывающие, опережающие, а также занимающие центр. место в квадрупольных расчётах причинные ф-ции Грина (*пропагаторы*). Напр., причинная С. ф. скалярного поля D^c , определённая через вакуумное среднее от хронологического произведения операторов

$$D^c(x-y) = i \langle T\phi(x)\phi(y) \rangle_0,$$

удовлетворяет неоднородному ур-нию

$$(\square - m^2)D^c(x) = -\delta^4(x),$$

может быть представлена в виде 4-мерного интеграла Фурье

$$D^c(x) = (2\pi)^{-4} \int \frac{\exp ikx}{m^2 - k^2 - i\epsilon} d^4k, \quad \epsilon \rightarrow +0$$

и в явном виде выражена через ф-ции Бесселя J_1 , N_1 , K_1 , а также $\theta(s^2)$ и $\delta(s^2)$. В окрестности светового конуса она имеет следующее поведение:

$$D^c(x) \approx \frac{1}{4\pi} \delta(s^2) + \frac{1}{4\pi^2 s^2} + \frac{im^2}{8\pi^2} \ln \frac{m\sqrt{s^2}}{2} - \frac{m^2}{16\pi} \theta(s^2). \quad (3)$$

Причинные ф-ции полей со спином выражаются через D^c и её производные линейными соотношениями, подобными (2).

В квантово-полевых расчётах приходится иметь дело с произведениями и степенями пропагаторов разл. полей. Напр., однопетлевой диаграмме поляризации вакуума в x -представлении соответствует произведение двух причинных ф-ций поля Дирака:

$$\gamma^\nu S^c(x-y) \gamma_\nu S^c(y-x),$$

а в окрестности светового конуса при $(x-y)^2 \approx 0$ — произведение выражений (3) и их первых производных. С матем. точки зрения входящие в (3) сингулярные объекты представляют собой *обобщённые функции*.

Теория С. ф. квантовой теории поля была разработана Н. Н. Боголюбовым в нач. 1950-х гг. Она явилась основой оригинальной схемы устранения УФ-расходимостей, не использующей контрчленов и перенормировок.

Лит.: Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В., Введение в теорию квантованных полей, 4 изд., М., 1984, гл. 3; и х же, Квантовые поля, М., 1980.

СИНЕРГЕТИКА (от греч. synergētikós — совместный, согласованно действующий) — направление в науке, связанное с изучением закономерностей пространственно-временного упорядочения в разнообразных системах. Термин «С.», введённый Г. Хакеном (Н. Haken) в нач. 1970-х гг., отражает тот факт, что процессы упорядочения в макроскопич. системе возникают благодаря взаимодействию большого числа элементарных подсистем. Возникновение С. как самостоят. направления связано с тем, что поведение разнообразных физ., хим., биол. и др. систем описывается сходными матем. моделями и для таких систем характерны одни и те же явления *самоорганизации*. Это позволяет широко использовать результаты исследования одних объектов при анализе других. Напр., модель А. Н. Колмогорова, И. Г. Петровского, Н. С. Пискунова, исследованная в 1937 в связи с биол. проблемой распространения популяций на нек-рой территории, была использована при анализе закономерностей фронта горения, распространения возбуждения в сердечной ткани и др.

Осн. понятия С.: *диссипативная структура* (пространственно упорядоченное состояние системы, обычно с симметрией, более низкой, чем симметрия исходного состояния), *волна переключения* (бегущий фронт фазового перехода), *ведущий центр* (локализованный автогенератор бегущих импульсов), *вра-*