тике Бозе — Эйнштейна. В случае фермионов выражение в скобках имеет вид $\bar{a}^{+}_{\mathbf{k},s} a^{-}_{\mathbf{k},s} - \bar{a}^{-}_{\mathbf{k},s} a^{+}_{\mathbf{k},s}$ (s — спиновая переменная), и для получения правильного оператора N, суммирующего все фермионные состояния, операторы рождения (a^+) и уничтожения (a^-) фермионов должны антикоммутировать под знаком Н. п. (черта над оператором означает дираковское сопряжение). Это — утверждение теоремы о связи спина и статистики (*Паули теорема*), вытекающей из принципа соответствия и формализма Н. п.

Для вычислений в квантовой теории поля необходимо установить связь Н. п. с обычным произведением и *хронологическим произведением*. Эту связь устанавливают *Вика теоремы*. Определим спаривание двух линейных по операторам рождения и уничтожения операторов (соответственно хронологич. спаривание), обозначаемое $\overline{A_1 A_2}$, как вакуумное среднее от обычного произведения (хронологич. произведения). Спаривание даётся соответствующей *перестановочной функцией*. Для Н. п. двух линейных операторов получим

$$A_1(x)A_2(y) = \,:A_1(x)A_2(y):\, + \overline{A_1(x)A_2(y)}$$

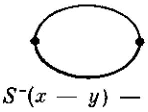
(x, y — точки пространства-времени). В общем случае справедлива след. теорема Вика: обычное (хронологическое) произведение n линейных операторов равно сумме Н. п. со всеми возможными спариваниями (хронологич. спариваниями), включая и Н. п. без спариваний. Линейность Н. п. гарантирует то, что спаривание выносится за знак Н. п.

При разложении действия в ряд теории возмущений возникает задача представить в виде Н. п. произведение операторов (напр., лагранжианов взаимодействия), к-рые сами уже приведены к форме Н. п. Соответствующая теорема Вика утверждает, что такое произведение равно сумме всех соответствующих Н. п. со спариваниями, из числа к-рых исключены спаривания между линейными операторами, находившимися в первонач. произведении под знаком одного Н. п.

Представляя процедуру нормального упорядочения графически, получим фейнмановскую диаграммную технику, сопоставив каждому спариванию $\overline{A(x)A(y)}$ линию, соединяющую точки x и y. Найдём, напр., в квантовой электродинамике вакуумное среднее от произведения двух операторов *электромагнитного тока*:

$$\langle 0|\,:\bar{\psi}(x)\gamma^{\mu}\psi(x):\,:\bar{\psi}(y)\gamma^{\nu}\psi(y):\,|0\rangle = \bar{\psi}(x)\gamma^{\mu}\psi(x)\bar{\psi}(y)\gamma^{\nu}\psi(y);$$

все остальные слагаемые дают нулевой вклад [здесь ψ — оператор спинорного поля, γ^{μ} ($\mu = 0, 1, 2, 3$) — *Дирака матрицы*]. Графически последнее выражение даётся диаграммой

x, μ  $y, \nu = -\,\mathrm{Tr}(S^-(x-y)\gamma^{\mu}S^-(y-x)\gamma^{\nu})$,

где $S^-(x-y)$ — перестановочная ф-ция для поля электрона.

Понятие Н. п. позволяет установить связь между операторным формализмом и формализмом функционального интеграла. Для системы с одной степенью свободы каждому вектору Фока пространства $f(a^+)\,|0\rangle$ ставится в соответствие *аналитическая функция* $f(a^*)$ числового аргумента a^* ($*$ — знак комплексного сопряжения). Оператор уничтожения в таком голоморфном представлении есть оператор дифференцирования по a^*, а произвольному оператору A соответствует интегральный оператор с ядром $A\,(a^*, a)$. Действие оператора A на вектор f, скалярное произведение двух векторов, произведение операторов $A_1 \cdot A_2$ описываются соответствующими свёртками с гауссовой мерой интегрирования:

$$d\mu_{\alpha} = \exp(-\alpha^*\alpha)(2\pi i)^{-1}d\alpha^* d\alpha.$$

Для ядра произведения двух операторов имеем

$$(A_1 \cdot A_2)(a^*, a) = \int A_1(a^*, \alpha)A_2(\alpha^*, a)d\mu_{\alpha}.$$

Поставим в соответствие оператору $\boldsymbol{A}$, заданному в виде Н. п.: $\boldsymbol{A} = \sum_{n,m} K_{n\,m}(a^+)^n(a^-)^m$, функцию $K(a^*, a) = \sum_{n,m} K_{n\,m}(a^*)^n a^m$. Тогда ядро оператора $\boldsymbol{A}$ связано с $K(a^*, a)$ соотношением

$$A(a^*, a) = \exp(a^*a)K(a^*, a).$$

Рассмотрим оператор эволюции $U(\Delta t) = \exp(-iH\Delta t)$, где $H = \,:h(a^+, a^-):$. Его ядро для малых Δt

$$U(\Delta t; a^*, a) = \exp\{a^*a - ih(a^*, a)\Delta t\};$$

для конечного интервала $t' - t'' = N\Delta t$ следует взять свёртку N таких ядер. При этом из первого члена и меры интегрирования возникнет сумма

$$\sum_{i=1}^{N-1}\left(a^*_{i+1} - a^*_i\right)a_i + a^*_1 a_0,$$

и после симметризации по $a^* = a_N$ и $a = a_0$ в формальном пределе $\Delta t \to 0$, $N \to \infty$ получим

$$U(t'' - t'; a^*, a) = \int \exp\Big\{\tfrac{1}{2}[a^*(t'')a(t'') + a^*(t')a(t')] + {}$$
$$+ i\int_{t'}^{t''}\Big[\tfrac{1}{2i}(\dot{a}^*a - a^*\dot{a}) - h(a^*, a)\Big]dt\Big\}\prod_t \frac{da^*da}{2\pi i}.$$

Это выражение и есть ф-ла для оператора эволюции, возникающая в методе функционального интеграла.

Лит.: Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В., Введение в теорию квантованных полей, 4 изд., М., 1984; Березин Ф. А., Метод вторичного квантования, 2 изд., М., 1986; Славнов А. А., Фаддеев Л. Д., Введение в квантовую теорию калибровочных полей, 2 изд., М., 1988; Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В., Квантовые поля, 2 изд., М., 1990; Глимм Д., Джаффе А., Математические методы квантовой физики. Подход с использованием функциональных интегралов, пер. с англ., М., 1984. *Л. О. Чехов.*

НОРМА́ЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕ́НИЕ — то же, что *Гаусса распределение.*

НОРМА́ЛЬНОЕ УСКОРЕ́НИЕ (центростремительное ускорение) — составляющая ускорения точки при криволинейном движении, направленная по гл. нормали к траектории в сторону центра кривизны. Численно Н. у. равно v^2/ρ, где v — скорость точки, ρ — радиус кривизны траектории. При движении по окружности Н. у. может вычисляться по ф-ле $R\omega^2$, где R — радиус окружности, ω — угл. скорость вращения этого радиуса. При прямолинейном движении Н. у. равно нулю.

НОРМА́ЛЬНЫЕ ВО́ЛНЫ (собственные волны) — бегущие гармонич. волны в линейной *динамической системе* с пост. параметрами, в к-рой можно пренебречь поглощением и рассеянием энергии. Н. в. являются обобщением понятия *нормальных колебаний* на открытые области пространства и незамкнутые волноводные системы, в т. ч. на однородные и неоднородные безграничные среды, разл. типы волноводов и волновых каналов, струны, стержни, замедляющие системы, цепочки связанных осцилляторов и др.

Совокупность Н. в. обладает след. свойствами. 1. Каждая Н. в. является свободным (без стороннего воздействия) движением системы и может быть возбуждена независимо от других Н. в. спец. выбором нач. условий. 2. Произвольный волновой процесс в системе без источников может быть однозначно представлен в виде суперпозиции Н. в. 3. Спектр частот Н. в. является сплошным, реальные процессы могут быть представлены в виде интегральных сумм Н. в.

Понятие Н. в. применяется и к системам конечной протяжённости, где, однако, их следует рассматривать как вынужденные движения, возбуждаемые гармонич. источниками, распределёнными вне области наблюдения, а совокупность Н. в. должна быть дополнена спа-