Хабаров М.В.

Дуальное калибровочно-инвариантное описание массивных полей произвольного спина

Научный руководитель
д.ф.-м.н. Зиновьев Ю.М.

Зачем нужна теория высших спинов?

1. Физика за пределами стандартной модели
2. Составные частицы при малых переданных импульсах
3. Теория суперструн

Метрический формализм

1. 1936-Основы теории (Dirac, 1936)
2. 1974-Лагранжианы для бозонов и фермионов (Singh & Hagen, 1974)
3. 1978-1980-Безмассовые поля + обобщение на dS (Fronsdal, 1978; Fang&Fronsdal, 1978, 1980)
4. 2001-2006-Калибровочно-инвариантное описание массивных частиц в (A)dS произвольной размерности (Zinoviev, 2001; Metsaev, 2006)
5. 2016-2017-Калибровочно-инвариантное описание частиц с бесконечным спином в (A)dS размерности d (Metsaev, 2016, 2017)

Реперный формализм

1. 1980-Впервые предложен (Vasiliev, 1980)
2. 1988-Обобщен на dS произвольной размерности (Lopatin&Vasiliev, 1988;Vasiliev, 1988)
3. 2008-2010-Обобщен для массивных частиц (Zinoviev, 2008;Ponomarev&Vasiliev, 2010)

Взаимодействие между полями

1. 1985-Показано, что не для любых полей возможно построить калибровочно-инвариантное взаимодействие (Berends&Burgers&van Dam,1985)
2. 1986-Построены вершины для некоторых наборов полей (Berends&Burgers&van Dam,1986)
3. 1987-Построены кубические вершины и гравитационное взаимодействие для безмассовых частиц в реперном формализме (Fradkin&Vasiliev,1987)

Постановка задачи

Построить калибровочно-инвариантное описание частиц с высшими спинами

1. Пространство -(A)dS_d.
2. Поля - массивные бозоны и фермионы с произвольным спином s
3. Метрический и реперный лагранжевый формализмы.
4. Случай бесконечного спина - $s = \infty$.

Метрический формализм - описание

Безмассовый бозон в плоском пространстве ($\tilde{\tilde{\Phi}} = 0$):

$$(-1)^s \mathcal{L}_0{}^{(s)} = \frac{1}{2}\partial_\mu \Phi_{\beta(s)} \partial^\mu \Phi^{\beta(s)} - \frac{s}{2}(\partial\Phi)_{\beta(s-1)}(\partial\Phi)^{\beta(s-1)} + \ldots$$

Инвариантен относительно:

$$\delta_0 \Phi_{\beta(k)} = \partial_\beta \xi_{\beta(k-1)}$$

Метрический формализм - описание

Безмассовый фермион в плоском пространстве $((\gamma\tilde{\Psi}) = 0)$:

$$
\begin{aligned}
& -i(-1)^s\mathcal{L}^{(s)} = \bar{\Psi}^{\mu(s)}\partial\!\!\!/\,\Psi_{\mu(s)} + s(\bar{\Psi}\gamma)^{\mu(s-1)}\partial\!\!\!/\,(\gamma\Psi)_{\mu(s-1)} \\
& - \dots
\end{aligned}
$$

Инвариантен относительно:

$$
\delta_0\Psi^{\mu(s)} = \partial^\mu\eta^{\mu(s-1)}
$$

Метрический формализм - описание

В (A)dS $\partial_\nu \to D_\nu$:

$$
\begin{aligned}
[D_\alpha, D_\beta]\xi_\mu =& R_{\alpha\beta\mu\nu}\xi^\nu \\
[D_\alpha, D_\beta]\psi =& \frac{\gamma^\mu\gamma^\nu R_{\alpha\beta\mu\nu}}{4}\psi \\
R_{\alpha\beta\mu\nu} =& -\kappa(g_{\alpha\nu}g_{\mu\beta} - g_{\alpha\mu}g_{\beta\nu})
\end{aligned}
$$

В (A)dS калибровочная инвариантность нарушается.

Метрический формализм - описание

1. Для массивных полей - введем дополнительно $s-1$ поле. Итоговый лагранжиан - сумма свободных полей и всевозможных перекрестных и массовых членов, коэффициенты при которых неизвестны.

$$\mathcal{L} = \sum_{k=0}^{s} \mathcal{L}_0^{(s)} \oplus \sum_{k=1}^{s} \left[a_k \Phi^{\beta(k)} D_\beta \Phi_{\beta(k-1)} + \dots \right] \oplus \sum_{k=0}^{s} \left[d_k \Phi^{\beta(k)} \Phi_{\beta(k)} + \dots \right] \quad (1)$$

2. Для полей с бесконечным спином - в лагранжиане следует положить $s = \infty$

Метрический формализм - результаты

1. Решения зависят от двух параметров (не считая κ). В случае конечного спина в работе выбраны спин s и "масса" m.
2. Из условия унитарности в AdS и плоском пространстве $m^2 \geq 0$
3. В dS $m^2 \geq \kappa(s-1)(s+d-4)$ $(m^2 \geq \kappa(s-1)(s+d-3))$
4. Существуют также поля с массой $m^2 = \kappa(s-k)(s+k+d-5)$ $(m^2 = \kappa(s-k)(s+k+d-4))$, $k \in \overline{2,s}$, при которых лагранжиан разбивается на унитарное и неунитарное слагаемые ("частично безмассовый предел")

Метрический формализм - результаты

1. Решения бесконечного спина были выражены через коэффициенты лагранжиана при скалярном поле (при поле с $s = 1/2$) и при перекрестном члене "скалярное поле"-"векторное поле" (1/2-3/2)
2. Возможен только в AdS и плоском пространстве
3. Реализуются ситуации, аналогичные частично безмассовым пределам

Реперный формализм - описание

1. Вводятся ортонормированные репер $\mathbf{e}_a$ и корепер $\hat{\mathbf{e}}^a$
2. У поля все индексы, кроме одного преобразуются к локальным
3. Для бозонов вводятся $\Phi_\mu{}^{a(s-1)}$, симметричное и бесследовое по локальным индексам, и вспомогательное поле $\Omega_\mu{}^{b(s-1),a}$, бесследовое, симметричное по $b(s-1)$ и такое, что $\Omega_\mu{}^{b(s-1),b} = 0$
4. Для фермионов - только симметричные спин-тензоры $\Psi_\mu{}^{a(s-1)}$, $\gamma\Psi = 0$
5. Калибровочно-инвариантное описание для массивных полей и полей с бесконечным спином строится так же, как и в метрическом формализме

Реперный формализм - описание

Лагранжиан для безмассовых бозонов:

$$(-1)^s \mathcal{L}_0 = \frac{1}{2} \hat{E}_{a[2]} \left[\Omega^{ab(s-2),c} \Omega^a{}_{b(s-2),c} + \dots \right] + \hat{E}_{a[3]} \Omega^a{}_{b(s-2)}{}^a D\Phi^{ab(s-2)}$$

Лагранжиан для безмассовых фермионов:

$$(-1)^s \mathcal{L}_0 = i \hat{E}_{a[3]} \left[\bar{\Psi}^{b(s-1)} \Gamma^{a[3]} D\Psi_{b(s-1)} - \dots \right]$$

Реперный формализм - результаты

То же, что и в метрическом, т.к. свойства частицы не зависят от формализма

Заключение I

1. Получено 4 калибровочно-инвариантных лагранжиана: в метрическом и реперном формализме для бозонов и фермионов
2. Во всех случаях также получено описание для частиц с бесконечным спином
3. Исследована унитарность лагранжиана
4. Выражение для фермионного лагранжиана в произвольной размерности $d \geq 4$ и для бозонов и фермионов с бесконечным спином в реперном формализме получены впервые
5. Остальные результаты совпали с полученными ранее.

Заключение II

6. В случае $d = 4$ все представления можно описать симметричными тензорами.
7. В случае $d > 4$ необходимо использовать тензоры со смешанными симметриями.