

ІНСТИТУТ МОНОКРИСТАЛІВ НАН УКРАЇНИ

На правах рукопису

Тугай Вадим Валерійович

**СУПЕРСИМЕТРИЯ
ТА РЕЛЯТИВІСТСЬКІ МОДЕЛІ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ
ЧАСТИНОК ЗІ СПІНОМ 1/2**

01.04.02 – теоретична фізика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації
на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків - 1997



Дисертація є рукописом.

Робота виконана у Науковому фізико-технологічному центрі
Міністерства освіти та НАН України (м. Харків).

- Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник
Желтухін О.О. (ХФТІ).
- Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Куліш Ю.В. (ХАРГАЖТ),
кандидат фізико-математичних наук, доцент
Зіма В.Г. (ХДУ).
- Провідна організація: Інститут теоретичної фізики
НАН України.

Захист відбудеться 2 липня 1997 р. о 14 г.
на засіданні Спеціалізованої ради Д.02.11.01
в Інституті монокристалів НАН України.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці
Інституту монокристалів НАН України.

Автореферат розісланий 30 травня 1997 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої ради Д.02.11.01
кандидат технічних наук

Атрошенко Л.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність теми.

Об'єднання загального принципу відносності і квантових постулатів теорії поля — актуальне завдання теперішнього етапу побудови єдиної теорії взаємодій полів та матерії. Важливу роль у розв'язанні цієї задачі відіграють суперсиметрія і концепція подовжених об'єктів — струн і мембран. У рамках теорії суперструн намітився новий механізм усунення сингулярностей в польових теоріях і сьогодні суперструни вважаються перспективною основою побудови єдиної перенормовної теорії поля. Застосування ідей теорії струн і суперсиметрії виявляється плідним і для розв'язання космологічних проблем. Одержання у рамках суперсиметричної Теорії великого об'єднання правильної ієрархії мас вказує на те, що суперсиметрія може проявлятися на доступних для сучасного експерименту масштабах енергії. З метою прямого експериментального підтвердження суперсиметрії плануються експерименти по виявленню суперпартнерів відомих елементарних частинок на ЛНС-колайдері у ЦЕРНі.

Актуальна також задача пошуку непрямих експериментальних зазначень існування суперсиметрії. Її розв'язання передбачає поглиблене вивчення відомих і побудову нових суперсиметричних моделей з метою планування низькоенергетичних експериментів, результати яких однозначно свідчили б на користь суперсиметрії. Суперсиметризація низькоенергетичних бозонних теорій приводить до моделей, в яких спінові ефекти у взаємодіях ферміонів між собою і з бозонами повністю контролюються суперсиметрією, а тому можуть використовуватися для планування критичних до передбачень суперсиметрії експериментів. Оскільки спінові ефекти у взаємодіях частинок і полів мусять бути тісно пов'язані з геометрією суперпростору, особливу цікавість являє суперсиметризація низькоенергетичних моделей, в яких структура взаємодії між частинками (і полями) визначається геометрією простору-часу.

Важливим прикладом вищенаведеного типу моделей є модель Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уілера - Фейнмана, в якій описується електромагнітна взаємодія заряджених скалярних частинок. Суперсиметричне узагальнення цієї моделі дозволить увести до неї спінові ступені свободи та дослідити спінові ефекти у електромагнітних взаємодіях частинок. Вищення суперсиметричних калібрувальних теорій з урахуванням результатів цього узагальнення є актуальним у зв'язку з проблемою побудови єдиної теорії взаємодій елементарних частинок.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Мета дисертації.

Узагальнення підходу Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уйлера - Фейнмана, на випадок частинок зі спіном $1/2$, і побудова нових суперсиметричних моделей електромагнітної взаємодії заряджених і нейтральних ферміонів з аномальним магнітним моментом.

Методика дослідження.

В роботі використовувався математичний апарат теорії калібрувальних полів, електродинаміки і суперсиметрії. Вірогідність результатів підтверджується їх збігом — у граничному випадку прямуючих до нуля грасманових координат — з відомими результатами класичної електродинаміки.

Наукова новизна.

1. Проведене суперсиметричне узагальнення моделі Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уйлера - Фейнмана, що описує електромагнітні взаємодії заряджених частинок. Запропонована суперсиметрична модель, яка дозволяє описувати спінові ефекти взаємодії заряджених ферміонів зі спіном $1/2$. Одержані інтегральні зображення фізичних полів максвелівського супермультиплету в термінах світових суперкоординат взаємодіючих заряджених ферміонів.
2. Суперсиметризована модель Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уйлера - Фейнмана розширена на випадок взаємодії заряджених і нейтральних ферміонів, що мають аномальний магнітний момент.
3. Показано, що суперпросторовий розгляд принципу мінімальності електромагнітної взаємодії допускає узагальнення суперсиметричної електродинаміки на випадок заряджених частинок з аномальним магнітним моментом. У рамках узагальненого суперпольового принципу мінімальності у єдиний спосіб описується мінімальна та немінимальна паулієвська взаємодія суперчастинок з полями супермультиплету Максвелла.
4. Запропоновано розширення узагальненого суперпольового принципу мінімальності електромагнітної взаємодії на випадок $N = 2$ суперсиметрії. Побудована суперсиметрична модель, яка описує взаємодію заряджених і нейтральних частинок, що мають аномальний магнітний момент з полями $N = 2$ розширеного супермультиплету Максвелла.

Теоретична і практична цінність.

Результати, що одержані у дисертації:

- допускають узагальнення на неабелеві суперсиметричні калібровочні теорії і можуть використовуватись для урахування ефективних взаємодій полів Янга-Мілса зі спіновими ступенями свободи матеріальних мультиплетів. У зв'язку з цим особливу цікавість викликає вивчення ролі узагальненого аномального магнітного моменту полів матерії при дослідженні дуально-симетричних теорій, які пов'язують слабкий і сильний режими за константами зв'язку взаємодіючих полів;
- являють інтерес для теорії суперсиметричних подовжених об'єктів у зв'язку з проблемою побудови моделей ефективної взаємодії струн і мембран, а також у зв'язку з дослідженням їх симетрій;
- показують складну структуру вищих релятивістських поправок, пов'язаних з урахуванням спінових ступенів свободи полів матерії, суперсиметрії та калібрувальної симетрії;
- вказують на виникнення струмової структури ефективного суперсиметричного лагранжиана суперчастинок, які взаємодіють з калібрувальними полями.

Апробація роботи.

За матеріалами дисертації на протязі 1993-1997 р.р. опубліковано 7 друкованих робіт. Результати досліджень доповідались на Міжнародній конференції "Mathematical methods of theoretical physics" у рамках програми українсько-австрійського наукового співробітництва (Рахів, 1995); Міжнародній робочій школі "Supersymmetry and quantum group" (Дубна, 1995); Міжнародній робочій школі "Supersymmetry 96" (Дубна, 1996); Міжнародному семінарі "Supersymmetry and quantum field theory", присвяченому пам'яті Д.В. Волкова (Харків, 1997), Міжнародній робочій школі "Mathematical physics—today, priority technologies—for tomorrow" (Київ, 1997).

Публікації.

Основні результати дисертації опубліковано в шести роботах у міжнародних журналах, одна робота надрукована у вигляді препринта ХФТІ та прийнята до публікації в журналі "Ядерная Физика". Список робіт наведено в кінці автореферату.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертація складається з вступу, трьох глав, закінчення, додатку і списку літератури, який містить 85 найменувань. Обсяг роботи складає 87 сторінок.

Особистий внесок дисертанта.

Особистий внесок дисертанта полягає у наступному:

- У §1.2 спільно з Желтухіним О.О. запропоновано використання кіральних суперсиметричних інтервалів для побудови інтегральних зображень спінових потенціалів. Дисертантом у повному обсязі зроблені аналітичні обчислення і запропоновано проводити узгодження польових і струмових частин моделі за допомогою вибору констант в ядрі зазначених інтегральних зображень. У §1.3 одержані інтегральні зображення компонентних полів і струмів моделі. З суперсиметричного хвильового рівняння виведені рівняння Максвелла і Вейля для цих полів і струмів. Виконані розрахунки для перевірки того, що суперпольове хвильове рівняння є суперсиметричним узагальненням рівняння Клейна-Гордона. У §1.4 проведені аналітичні обчислення для одержання інтегрального зображення функціоналу дії системи заряджених суперчастинок і відповідних рівнянь руху;
- у §2.1 побудовані інваріантні конструкції ядра інтегрального зображення спінових потенціалів, що генеруються частинками з аномальним магнітним моментом. Проведені обчислення для одержання явного виду інтегральних зображень полів та струмів моделі на суперпольовому і компонентному рівнях. У §2.2 запропоновано будувати функціонал дії у вигляді згортки спінових швидкостей θ , $\dot{\theta}$ зі спіновими напруженостями W и \dot{W} . У §2.3 показана симетрія одержаного двочастинкового функціоналу дії частинок з зарядом та АММ відносно перестановки частинок;
- у §3.1 та 3.2 проведені обчислення необхідні для доведення того, що запропоноване суперсиметричне узагальнення принципу мінімальності електромагнітних взаємодій є несуперечливим і єдиним. У §3.3 пропонується явний вид калібрувально-інваріантного суперполя \tilde{W}_M , що подовжує коваріантні похідні $N = 2$ суперсиметричної електродинаміки. У §3.4 проведено узгодження позначень $N = 1$ і $N = 2$ моделей та обчислено компонентне розкладання функціоналу дії суперчастинки з аномальним магнітним моментом у зовнішньому полі $N = 2$ супермультиплету Максвелла.

Основні положення, які виносяться на захист.

1. Розв'язана проблема включення спінових ступенів свободи до моделі Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уілера - Фейнмана, яка описує електромагнітні взаємодії скалярних заряджених частинок. Побудовано релятивістськи інваріантний суперсиметричний інтеграл дії, що узагальнює дію Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уілера - Фейнмана на випадок взаємодіючих заряджених ферміонів зі спіном $1/2$. Одержані суперпольові рівняння електродинаміки максвелівського супермультиплету, побудованого з світових суперкоординат взаємодіючих заряджених ферміонів.
2. Показано, що суперсиметризована модель Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уілера - Фейнмана дозволяє розширення на випадок взаємодіючих нейтральних ферміонів, які мають аномальний магнітний момент. Побудовано суперсиметричне формулювання електродинаміки Максвела для системи нейтральних і заряджених ферміонів з аномальним магнітним моментом. Одержані суперпольові інтегральні зображення для полів максвелівського супермультиплету і струмів заряджених і нейтральних частинок, які мають аномальний магнітний момент.
3. Запропоновано суперпольове розширення принципу мінімальності електромагнітних взаємодій на заряджені частинки з аномальним магнітним моментом. Показано, що в рамках узагальненого суперпольового принципу мінімальності у єдиний спосіб описуються мінімальна і немінімальна паулівська взаємодія суперчастинок з полями $N = 1$ максвелівського супермультиплету.
4. Запропоновано $N = 2$ - узагальнення суперсиметричної електродинаміки заряджених і нейтральних частинок з АММ, взаємодіючих з полями розширеного супермультиплету Максвела.

ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі розглядається теперешній статус суперсиметрії у фізиці елементарних частинок і теорії поля. Підкреслюється важлива роль геометричних підходів у сучасній теорії уніфікації взаємодій.

У першій главі дисертації розв'язується проблема опису електромагнітних взаємодій частинок зі спіновими ступенями свободи у підході Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уілера - Фейнмана (ФШТУФ), що використовувався раніше для опису взаємодії скалярних заряджених частинок. Як механізм уведення спіну пропонується суперсиметризація моделі ФШТУФ.

У §1.1 розглядається оригінальне формулювання електродинаміки Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уілера - Фейнмана, що ґрунтується на функціоналі дії, збудованому з одних лише світових координат і швидкостей двох заряджених частинок $(e_1, m_1, x^\mu(\eta))$ і $(e_2, m_2, y^\mu(\tau))$. Встановлюється зв'язок цього функціоналу зі стандартною дією скалярної частинки у зовнішньому електромагнітному полі. Наводяться інтегральні зображення електромагнітних полів і струмів заряджених частинок у термінах їх світових координат і швидкостей. Показано, що ці інтегральні зображення є розв'язками польових рівнянь Максвелла.

У §1.2 проводиться суперсиметризація електродинаміки Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уілера - Фейнмана. Для цього у простір Мінковського вводяться додаткові грасманові координати частинок — вейлевські спінори θ^α і $\bar{\theta}_{\dot{\alpha}}$, які дають можливість сформулювати перетворення суперсиметрії, що діють на світові координати частинок. Вказується, що проблема побудови суперпольової електродинаміки в термінах інтегральних зображень для полів і струмів, які узагальнюють оригінальні формулювання моделі ФШТУФ, полягає, в першу чергу, у необхідності усунення з моделі нефізичних компонентних полів, які немінуче виникають в суперпросторових формулюваннях електродинаміки. У стандартній суперсиметричній електродинаміці це досягається накладанням інваріантних зв'язків на компоненти суперсиметричної напруженості $F_{MN}(x, \theta, \bar{\theta})$

$$F_{\alpha\beta} = F_{\dot{\alpha}\dot{\beta}} = 0, \quad (1)$$

$$F_{\alpha\dot{\beta}} = 0. \quad (2)$$

Для суперсиметризації моделі Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уілера - Фейнмана замість звичайних релятивістських інтервалів s_0^μ вводяться кіральні суперсиметричні інтервали

$$\begin{aligned} s_L^\mu &= x_L^\mu - y_R^\mu - 2i\theta\sigma^\mu\bar{\xi} = s^\mu + i\Delta\sigma^\mu\bar{\Delta}, \\ s_R^\mu &= x_R^\mu - y_L^\mu + 2i\xi\sigma^\mu\bar{\theta} = s^\mu - i\Delta\sigma^\mu\bar{\Delta}, \end{aligned} \quad (3)$$

З використанням кіральних інтервалів (3) будується суперсиметричне інтегральне зображення суперпольових спінових потенціалів

$$\begin{aligned} A_\alpha(x_R, \bar{\theta}) &= e \int d\tau (\omega_\tau \sigma_{\alpha\dot{\alpha}}^\mu \bar{\Delta}^{\dot{\alpha}} + 2i\xi_{\dot{\alpha}} \bar{\Delta} \bar{\Delta}) \delta(s_R^2), \\ \bar{A}_{\dot{\alpha}}(x_L, \theta) &= -e \int d\tau (\omega_\tau \Delta^\alpha \sigma_{\alpha\dot{\alpha}}^\mu \theta^{\dot{\alpha}} - 2i\bar{\xi}_{\dot{\alpha}} \Delta \Delta) \delta(s_L^2). \end{aligned} \quad (4)$$

Показується, що вибір відносних коефіцієнтів при інваріантах у зображенні спінових зв'язностей (4) дозволяє узгоджувати польові і струмові конструкції суперсиметричної моделі. За допомогою (4) виводиться інтегральне зображення суперпольової векторної зв'язності

$$A_\mu = -\frac{i}{4} \bar{\sigma}_\mu^{\dot{\alpha}\alpha} (D_\alpha \bar{A}_{\dot{\alpha}} + \bar{D}_{\dot{\alpha}} A_\alpha). \quad (5)$$

Доводиться, що суперполя (4) і (5) приводять до напруженостей, які задовольняють зв'язкам (2). Суперпольові інтегральні зображення (4) і (5) описують поля супермультиплету Максвелла, що генеруються суперчастинкою-джерелом. Супермультиплет Максвелла, як відомо, описується спірними суперполями W^α і \bar{W}_α , через які виражаються всі суперпольові напруженості F_{MN} . У запропонованому підході інтегральні зображення для суперполів W^α і \bar{W}_α виводяться з інтегральних зображень (4) і (5) і мають вигляд

$$W^\alpha \equiv \frac{i}{4} F_{\mu\alpha} \bar{\sigma}^{\mu\dot{\alpha}\alpha} = \frac{1}{8} \bar{D}_\beta \bar{D}^{\dot{\beta}} A^\alpha + \frac{i}{2} \partial^{\dot{\alpha}\alpha} \bar{A}_\alpha. \quad (6)$$

У §1.3 будується суперсиметричне інтегральне зображення для суперпольового електромагнітного струму. Виведено суперпольове хвильове рівняння, яке є суперсиметричним узагальненням рівняння Лапласа. Показано, що у компонентному формулюванні це рівняння розпадається на рівняння Максвелла і Дірака.

Суперпольовий електромагнітний струм будується з суперполів W^α і \bar{W}_α за допомогою калібрувально інваріантного означення

$$-4\pi \mathcal{J} = D^\alpha W_\alpha + \bar{D}_\alpha \bar{W}^{\dot{\alpha}} = i\partial^{\dot{\alpha}\alpha} (\bar{D}_\alpha A_\alpha - D_\alpha \bar{A}_\alpha). \quad (7)$$

Підстановка у праву частину (7) інтегральних зображень суперпотенціалів A^α і \bar{A}_α (4) дозволяє подати її у вигляді д'аламберіана $\square\Phi$ від скалярного суперполя $\Phi(x, \theta, \bar{\theta})$, що має фізичний зміст передпотенціалу. На основі фундаментальної властивості суперсиметричного інтервалу $s^\mu = s_0^\mu - i(\theta\sigma^\mu\bar{\xi} - \xi\sigma^\mu\bar{\theta})$,

$$\square\delta(s^2) = -4\pi\delta^{(4)}(s^\nu), \quad (8)$$

узагальнюючого відоме співвідношення Дірака, доведено еквівалентність зображення (7) суперпольовому хвильовому рівнянню

$$\square\Phi(x, \theta, \bar{\theta}) = -4\pi\mathcal{J}(x, \theta, \bar{\theta}) \quad (9)$$

з суперпольовим струмом $\mathcal{J}(x, \theta, \bar{\theta})$

$$\mathcal{J} = -4e \int d\tau \left[\omega_\tau^\mu (\Delta\sigma_\mu \bar{\Delta}) + i(\dot{\xi}\Delta)\bar{\Delta}\bar{\Delta} - i\Delta\Delta(\dot{\xi}\bar{\Delta}) \right] \delta^{(4)}(s^\nu), \quad (10)$$

узагальнюючим електромагнітний струм моделі ФШТУФ. Показано, що інтегрування (10) разом у суперсиметричною функцією Гріна

$$G(z, \zeta) \equiv G(x, \theta, \bar{\theta}, y, \xi, \bar{\xi}) = -\frac{1}{4\pi} \delta(s^2) \delta^{(2)}(\Delta^\alpha) \delta^{(2)}(\bar{\Delta}_\alpha) \quad (11)$$

приводить до інтегрального зображення передпотенціалу Φ . Тим самим доведено, що рівняння (9) є суперсиметричним узагальненням безмасового рівняння Клейна-Гордона.

Далі проводиться компонентний аналіз лівої і правої частин суперпольового хвильового рівняння (9). В результаті показано, що компонентні поля v і λ задовольняють рівнянням Максвела і Вейля

$$\begin{aligned}\square v^\mu(x) &= -4\pi j^{(2)\mu}(x), \quad \partial^\mu v_\mu(x) = 0, \\ \partial_{\alpha\dot{\alpha}} \bar{\lambda}^{\dot{\alpha}}(x) &= -4\pi j_\alpha^{(1)}(x), \quad \partial^{\dot{\alpha}\alpha} \lambda_\alpha(x) = -4\pi \bar{j}^{(1)\dot{\alpha}}(x).\end{aligned}\quad (12)$$

У §1.4 побудовано функціонал дії системи взаємодіючих заряджених суперчастинок у термінах їх світових координат і швидкостей

$$\begin{aligned}S_{int} &= ie_1 e_2 \int d\eta \int d\tau \left\{ \dot{\theta}^\alpha [\omega_{\tau\mu}(\sigma^\mu \bar{\Delta})]_\alpha (1 - i\Delta\partial\bar{\Delta}) + 2i\dot{\xi}_\alpha \bar{\Delta}\bar{\Delta} \right\} \\ &+ [\omega_{\tau\mu}(\Delta\sigma^\mu)_{\dot{\alpha}} (-1 - i\Delta\partial\bar{\Delta}) + 2i\dot{\xi}_{\dot{\alpha}} \Delta\bar{\Delta}] \dot{\theta}^{\dot{\alpha}} \\ &+ \omega_\tau^\mu \left[\omega_\tau^\nu \left(-i\eta_{\mu\nu} + i\epsilon_{\mu\nu\rho\lambda} (\Delta\sigma^\rho \bar{\Delta}) \partial^\lambda - \frac{1}{4} \Delta\Delta\bar{\Delta}\bar{\Delta} \eta_{\mu\nu} \square \right) \right. \\ &\left. - \dot{\xi}_\sigma \bar{\Delta} + \Delta\sigma_\mu \dot{\xi}^\mu + i \left(\dot{\xi}_\sigma \bar{\Delta} + \Delta\sigma_\mu \dot{\xi}^\mu \right) \Delta\partial\bar{\Delta} \right] \delta(s^2).\end{aligned}\quad (13)$$

Показана інваріантність дії (13) відносно перестановок частинок, що дає можливість переписати його на випадок системи довільного числа заряджених частинок. Варіюванням цієї дії одержані рівняння руху зарядженої суперчастинки у електромагнітному полі, створеному системою заряджених суперчастинок. Відзначена симетрія є нетривіальним наслідком вибору інтегральних зображень спінових потенціалів (4). Разом з результатами попередніх параграфів вона завершує доведення того, що у главі 1 одержано суперсиметричне узагальнення моделі Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уілера - Фейнмана.

У другій главі поставлене завдання розширення моделі Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уілера - Фейнмана на випадок електромагнітних частинок зі спіном 1/2, що мають аномальний магнітний момент (АММ). Показано, що це завдання знаходить свій розв'язок у рамках суперсиметризованого підходу, розробленого у главі 1.

У §2.1 запропоновано опис електромагнітної взаємодії нейтральних частинок з аномальним магнітним моментом у термінах світових координат і швидкостей взаємодіючих частинок зі спіном 1/2. Як відомо, у стандартній електродинаміці така взаємодія описується паулієвським механізмом. Тому, в запропонованій моделі замість безвимірної (у системі $\hbar = c = 1$) константи —

електричного заряду вводиться константа вимірності довжини, що має фізичний смисл величини аномального магнітного моменту частинки. Присутність цієї вимірної константи не дозволяє використовувати інтегральні зображення суперпотенціалів, виведені у главі 1. Тому, будуються нові інтегральні зображення спінових кіральных потенціалів, які мають вигляд

$$\begin{aligned} A_\alpha &= \mu \int d\tau \left[\dot{\xi}_\alpha - i\dot{\xi}^{\dot{\alpha}} \bar{\Delta} \bar{\Delta} \partial_{\alpha\dot{\alpha}} \right] \delta(s_R^2), \\ \bar{A}_{\dot{\alpha}} &= -\mu \int d\tau \left[\dot{\bar{\xi}}_{\dot{\alpha}} + i\dot{\bar{\xi}}^{\alpha} \Delta \Delta \partial_{\alpha\dot{\alpha}} \right] \delta(s_L^2), \end{aligned} \quad (14)$$

і приводять до напруженостей F_{MN} , що задовольняють зв'язкам (1). Відповідне зображення для векторної компоненти зв'язності A_μ виходить з рівнянь зв'язку (2)

$$\begin{aligned} A_\mu &= \mu \int d\tau \left[2 \left(\dot{\xi} \sigma_{\nu\mu} \Delta - \bar{\Delta} \bar{\sigma}_{\mu\nu} \dot{\bar{\xi}} \right) \partial^\nu \right. \\ &\quad \left. - \frac{i}{2} \left(\Delta \Delta \dot{\xi} \sigma^\rho \bar{\Delta} + \bar{\Delta} \bar{\Delta} \Delta \sigma^\rho \dot{\bar{\xi}} \right) \left(\partial_\rho \partial_\mu - \eta_{\rho\mu} \square \right) \right] \delta(s^2). \end{aligned} \quad (15)$$

З інтегральних зображень (14) і (15) побудовані суперпольові зображення спінових фізичних суперполів W і \bar{W}

$$W^\alpha = -\mu \int d\tau \left[i\dot{\bar{\xi}}_{\dot{\alpha}} \partial^{\dot{\alpha}\alpha} \delta(s_L^2) + \dot{\xi}^\alpha \Delta \Delta \square \delta(s_R^2) \right], \quad (16)$$

передпотенціалу Φ

$$\Phi = 4V = -4\mu \int d\tau \left[\dot{\xi} \Delta \delta(s_R^2) + \dot{\bar{\xi}} \bar{\Delta} \delta(s_L^2) \right] \quad (17)$$

і суперпольового струму \mathcal{J}

$$\mathcal{J}(x, \theta, \bar{\theta}) = -4\mu \int d\tau \left[\dot{\xi} \Delta \delta^{(4)}(s_R) + \dot{\bar{\xi}} \bar{\Delta} \delta^{(4)}(s_L) \right]. \quad (18)$$

Проведене компонентне розкладання цих суперполів і виведені інтегральні зображення напруженостей поля фотона $v_{\mu\nu}$, фотіно λ_α і допоміжного поля D . Показано, що рівняння Максвелла і Дірака для цих полів, як і у випадку заряджених частинок, впливають з суперпольового хвильового рівняння (9), яке узагальнює рівняння Лапласа.

У §2.2 пропонується формулювання функціоналу дії системи взаємодіючих нейтральних суперчастинок з ДММ. Обговорюється можливість розгляду дії (21) як польової дії, що описує частинки з аномальним магнітним моментом

у зовнішньому електромагнітному полі. Для компактного запису рівнянь руху суперчастинки з аномальним магнітним моментом у формі рівнянь Лоренца вводяться двокомпонентний "заряд" $e_{(q)}$ і "зв'язність" $A_M^{(q)}$

$$e_{(q)} = (e, i\mu), \quad A_M^{(q)} = \begin{pmatrix} A_M \\ W_M \end{pmatrix}, \quad W_M \equiv (0, W_\alpha, \bar{W}^{\dot{\alpha}}), \quad (19)$$

в термінах, яких запропонований функціонал дії $S_{int}^{(e,\mu)}$

$$S_{int}^{(e,\mu)} = i \int d\tau \omega_\tau^M e_{(q)} A_M^{(q)}. \quad (20)$$

узагальнює відому дію суперсиметричної електродинаміки частинок.

Для випадку взаємодіючих нейтральних частинок дія (20) вибирається у вигляді

$$S_{int} = -\mu_1 \int d\eta (\dot{\theta}^\alpha W_\alpha + \dot{\bar{\theta}}_{\dot{\alpha}} \bar{W}^{\dot{\alpha}}) \quad (21)$$

і після підстановки до неї інтегральних зображень напруженостей W^α і $\bar{W}_{\dot{\alpha}}$ виводиться інтеграл дії системи двох взаємодіючих нейтральних суперчастинок, залежний від їх світлових координат і швидкостей

$$S_{int\ 12} = \mu_1 \mu_2 \int d\eta \int d\tau \left[(\dot{\theta} \dot{\xi} \Delta \Delta + \dot{\bar{\theta}} \dot{\bar{\xi}} \bar{\Delta} \bar{\Delta}) \square + (\dot{\xi} \dot{\theta} \dot{\theta} + \dot{\bar{\theta}} \dot{\bar{\xi}} \dot{\xi}) \Delta \partial \bar{\Delta} + i (\dot{\xi} \dot{\theta} \dot{\theta} - \dot{\bar{\theta}} \dot{\bar{\xi}} \dot{\xi}) \left(1 + \frac{1}{4} \Delta \Delta \bar{\Delta} \bar{\Delta} \square \right) \right] \delta(s^2). \quad (22)$$

Зазначимо, що інтеграл (22) перетворюється на нуль за нульових значень грасманових змінних. Це вказує на серйозні труднощі узагальнення стандартної моделі ФШТУФ на випадок електромагнітних взаємодій нейтральних частинок з ААМ без її попередньої суперсиметризації.

У §2.3 розглядається загальний випадок, який відповідає взаємодії ферміонів, що несуть як електричний заряд, так і аномальний магнітний момент. Пропонується функціонал дії пробної частинки з зарядом і аномальним магнітним моментом, який є суперпозицією одержаних раніше інтегралів дії і має вигляд

$$\begin{aligned} S_{int} &= i \int d\eta \left[e_1 \omega_\eta^N A_N + i\mu_1 (\dot{\theta}^\alpha W_\alpha + \dot{\bar{\theta}}_{\dot{\alpha}} \bar{W}^{\dot{\alpha}}) \right] \\ &= i \int d\eta \left[e_1 \omega_\eta^\nu A_\nu + \dot{\theta}^\alpha (e_1 A_\alpha + i\mu_1 W_\alpha) + \dot{\bar{\theta}}_{\dot{\alpha}} (e_1 \bar{A}^{\dot{\alpha}} + i\mu_1 \bar{W}^{\dot{\alpha}}) \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

Присутні в цьому виразі ефективні електромагнітні поля генеруються частинкою-джерелом з зарядом і аномальним магнітним моментом. Інтегральне

зображення для функціоналу дії у термінах світових координат і швидкостей частинки одержується в результаті застосування принципу суперпозиції до потенціалів і напруженостей, виведених у §1.2 і §2.1. Особливу цікавість викликають доданки функціоналу дії, які описують електромагнітну взаємодію зарядженої суперчастинки без АММ з нейтральною частинкою, що має АММ

$$S_{int}^{(e\mu)} = e_1\mu_2 \int d\eta \int d\tau \left[2i\omega_{\eta\mu}(\dot{\xi}\sigma^{\nu\mu}\Delta - \bar{\Delta}\bar{\sigma}^{\mu\nu}\dot{\bar{\xi}})\partial_\nu + \frac{1}{2}\omega_\eta^\mu(\Delta\Delta\dot{\xi}\sigma^\rho\bar{\Delta} + \bar{\Delta}\bar{\Delta}\Delta\sigma^\rho\dot{\bar{\xi}})(\partial_\rho\partial_\mu - \eta_{\rho\mu}\square) + i(\dot{\theta}\dot{\xi} + \dot{\bar{\theta}}\dot{\bar{\xi}})\Delta\partial\bar{\Delta} + \frac{i}{4}(\dot{\theta}\dot{\xi} - \dot{\bar{\theta}}\dot{\bar{\xi}})\Delta\Delta\bar{\Delta}\bar{\Delta}\square + \bar{\Delta}\bar{\Delta}\dot{\theta}\dot{\bar{\xi}} + \Delta\Delta\dot{\xi}\dot{\theta} \right] \delta(s^2),$$

$$S_{int}^{(\mu e)} = \mu_1 e_2 \int d\eta \int d\tau \left[2i\omega_{\eta\mu}(\Delta\sigma^{\nu\mu}\dot{\theta} + \dot{\bar{\theta}}\bar{\sigma}^{\mu\nu}\bar{\Delta})\partial_\nu + \frac{1}{2}\omega_\eta^\mu(\Delta\Delta\bar{\Delta}\bar{\sigma}^\rho\dot{\theta} + \bar{\Delta}\bar{\Delta}\dot{\bar{\theta}}\bar{\sigma}^\rho\Delta)(\partial_\mu\partial_\rho - \eta_{\mu\rho}\square) + i(\dot{\theta}\dot{\xi} - \dot{\bar{\theta}}\dot{\bar{\xi}})\Delta\partial\bar{\Delta} + i(\dot{\theta}\dot{\xi} - \dot{\bar{\theta}}\dot{\bar{\xi}})(1 + \frac{1}{4}\Delta\Delta\bar{\Delta}\bar{\Delta}\square) + \Delta\Delta\dot{\xi}\dot{\theta} + \bar{\Delta}\bar{\Delta}\dot{\bar{\theta}}\dot{\bar{\xi}} \right] \delta(s^2),$$

Сума цих виразів симетрична відносно перестановки частинки 1 і 2, що дозволяє узагальнити зображення (23) на будь-яке число взаємодіючих суперчастинки. Вказана симетрія підтверджує правильність вибору функціоналу дії для опису взаємодії частинки з АММ у вигляді (20).

Третя глава дисертації присвячена суперсиметричній польовій електродинаміці заряджених і нейтральних частинки зі спіном і аномальним магнітним моментом, що взаємодіють із зовнішнім електромагнітним полем. Показано, що уведення суперсиметрії відкриває додаткові можливості для розширення відомого принципу мінімальності електромагнітних взаємодій.

У §3.1 запропонована процедура переходу до узагальнених формулювань принципу мінімальності, яка заснована на "додатковому подовженні" стандартних "довгих" похідних суперсиметричної електродинаміки \mathcal{D}_M , тобто за допомогою зсуву

$$\mathcal{D}_M = D_M + eA_M \rightarrow \nabla_M = \mathcal{D}_M + i\mu\bar{W}_M \equiv D_M + e_{(q)}A_M^{(q)}, \quad (24)$$

де додаткове суперполе $\bar{W}_M(z)$ — інваріант калібрувальної $U(1)$ -групти електромагнітних взаємодій, $e_{(q)}A_M^{(q)} \equiv eA_M + i\mu\bar{W}_M$ — нова узагальнена зв'язність, а константа μ з вимірністю довжини має фізичний зміст аномального магнітного моменту суперчастинки. Відповідна зображенню (24) узагальнена суперпольова напруженість має вигляд

$$e_{(q)}F_{MN}^{(q)} \equiv eF_{MN} + i\mu F_{MN}^{(\mu)},$$

$$\begin{aligned} F_{MN} &\equiv D_M A_N - (-1)^{MN} D_N A_M - T_{MN}{}^R A_R, \\ F_{MN}^{(\mu)} &\equiv D_M \tilde{W}_N - (-1)^{MN} D_N \tilde{W}_M - T_{MN}{}^R \tilde{W}_R. \end{aligned} \quad (25)$$

У випадку $N = 1$ суперсиметрії для суперполя \tilde{W}_M (24) пропонується вираз

$$\tilde{W}_M(z) = (0, a\sigma_{\mu\alpha\dot{\alpha}} F^{\mu\dot{\alpha}}, \bar{a}\bar{\sigma}^{\mu\dot{\alpha}\alpha} F_{\mu\alpha}). \quad (26)$$

Доведено, що цей вираз єдиний у класі функцій, залежних лише від компонент суперпольової напруженості $F_{MN}(z)$ і лінійних відносно цих компонент. Доводиться, що двічі подовжені похідні ∇_M задовольняють суперсиметричним тождествам Якобі

$$\text{Cycl}_{MNR}(-1)^{MNR} \{\nabla_M, [\nabla_N, \nabla_R]\} = 0 \quad (27)$$

і, що запропоноване формулювання узагальненого принципу мінімальності електромагнітних взаємодій є математично коректним.

В §3.2 проводиться аналіз запропонованої схеми опису частинки зі спіном $1/2$ і аномальним магнітним моментом у зовнішніх полях $N = 1$ суперсиметричної електродинаміки. Запропонований опис спирається на функціонал дії (21), проте тепер він розглядається у рамках опису суперчастинки у зовнішньому полі. Варіюванням вказаної дії одержані рівняння руху, які узагальнюють рівняння Лоренца на випадок зарядженої частинки зі спіном $1/2$ і АММ.

Проведено компонентний аналіз фотонної частини дії (21)

$$\begin{aligned} S_{int}^{(\epsilon, \mu)} \Big|_{\substack{\epsilon=0, \\ \text{фотон}}} &= i\mu \int d\tau \left[(\dot{\theta}\sigma^{\mu\nu}\theta) - (\bar{\theta}\bar{\sigma}^{\mu\nu}\bar{\theta}) \right] v_{\nu} \\ &+ \frac{1}{2}\mu \int d\tau \left[\theta\theta(\dot{\theta}\sigma^{\mu}\bar{\theta}) + \bar{\theta}\bar{\theta}(\theta\sigma^{\mu}\dot{\bar{\theta}}) \right] \partial^{\rho} v_{\rho}. \end{aligned} \quad (28)$$

Показано, що перший доданок виразу (28) є псевдокласичною границею паулієвського члену, який описує взаємодію нейтральних або заряджених діраківських іолів з електромагнітним полем за допомогою аномального магнітного моменту, що дорівнює μ . Другий доданок дії (28) описує спін-орбітальну та інші релятивістські взаємодії, відповідні наступним членам у розкладанні за степенями $1/c$.

У §3.3 запропоновано розширення результатів узагальненої $N = 1$ суперсиметричної електродинаміки частинок з АММ на випадок $N = 2$ розширеної суперсиметрії. Показано, що вибір узагальнених зв'язностей A залежить від числа суперсиметрій N . Для $N = 2$ суперпростору запропоновано подовжувати калібрувальну-коваріантні похідні теорії на $U(1)$ -інваріантне суперполе, для

якого вибрано зображення у вигляді

$$\bar{W}_M = (0, -\frac{1}{4}D_\alpha^i W_i, -\frac{1}{4}\bar{D}^{\dot{\alpha}i}\bar{W}). \quad (29)$$

Одержано відповідний суперпольовий лагранжян і виведені рівняння руху $N = 2$ -суперчастинки.

У §3.4 проведено компонентний аналіз запропонованої моделі взаємодії суперчастинки з АММ з полями зовнішнього $N = 2$ супермультиплету Максвела.

Вивчено розкладення суперполя \bar{W}_α^i у ряд за степенями θ_α^i у термінах компонентних полів $N = 2$ суперелектродинаміки $w, \lambda_\alpha^i, C^{ij}, f_{\alpha\beta}, \chi_\alpha^i, d$, виражених через координати кірального базису.

$$\begin{aligned} \bar{W}_\alpha^i(z_L) = & \frac{i}{4}\lambda_\alpha^i(x_L) + \frac{1}{8}\theta_{\alpha k}C^{ki}(x_L) - \frac{1}{8}\theta^{\beta i}f_{\beta\alpha}(x_L) - \frac{i}{2}(\hat{\partial}\bar{\theta}^i)_\alpha w(x_L) \\ & - \frac{1}{2}(\hat{\partial}\bar{\theta}^i)_\alpha(\theta_j\lambda^j(x_L)) \\ & - \frac{1}{4}\Xi^{(2,0)ij}(\hat{\partial}\bar{\lambda}_j(x_L))_\alpha - \frac{1}{4}\Xi^{(2,0)\beta}{}_\alpha(\hat{\partial}\bar{\lambda}^i(x_L))_\beta \\ & + \frac{i}{8}\Xi^{(2,0)jk}(\hat{\partial}\bar{\theta}^i)_\alpha C_{jk}(x_L) - \frac{i}{8}\Xi^{(2,0)\beta\gamma}(\hat{\partial}\bar{\theta}^i)_\alpha f_{\beta\gamma}(x_L) \\ & + \frac{1}{3}\theta_\alpha^i\Xi^{(2,0)}{}_j{}^i\bar{\square}w(x_L) + \frac{i}{3}\Xi^{(2,0)\gamma}{}_\beta\theta^\beta{}_j(\hat{\partial}\bar{\theta}^i)_\alpha(\hat{\partial}\bar{\lambda}^j(x_L))_\gamma \\ & + \frac{i}{6}\Xi^{(4,0)}(\hat{\partial}\bar{\theta}^i)_\alpha\bar{\square}w(x_L). \end{aligned} \quad (30)$$

Результати для фотонної частинки лагранжiana, аналіз фізичного змісту яких являє особливий інтерес, переписані у центральному базисі. Повний компонентний розклад суперполя \bar{W}_α^i і означення уведених позначень $\Xi^{(m,n)}$ винесені у Додаток.

Члени компонентного розкладення фотонного і фотінного лагранжіанів переписані у термінах $N = 2$ діраківських біспінорів. Показано, що ці розкладення є рядами за степенями $1/c$ і включають члени, що є псевдокласичними аналогами паулієвської взаємодії ферміонних полів.

У Закінченні сформульовані основні результати, подані у дисертаційній роботі.

У Додатку для зручності наведені відомості з спінорної алгебри і суперсиметричної калібрувальної теорії (для $N = 1$ і $N = 2$ суперпросторів), які використовувалися у роботі. Наведені також складні проміжні результати для $N = 2$ моделі.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.

1. У дисертаційній роботі доведено сумісність принципу дії на відстані, що лежить в основі моделі Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уйлера - Фейнмана, з принципом суперсиметрії. У результаті розв'язано проблему уведення до зазначеної моделі спінових ступенів свободи взаємодіючих заряджених частинок.
2. Побудовано інтегральні зображення полів і струмів суперсиметричної електродинаміки у термінах суперпросторових координат частинок-джерел. Одержано відповідні суперпольові рівняння електродинаміки максвелівського супермультиплету. Побудовано релятивістськи інваріантний суперсиметричний функціонал дії, що узагальнює дію Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уйлера - Фейнмана на випадок системи взаємодіючих заряджених ферміонів зі спіном $1/2$.
3. Методи, які розроблені при побудові інтегральних зображень полів і струмів суперсиметричної моделі можуть знайти застосування у опису об'єктів зі спіном у космології, зокрема, у сучасній теорії керівських чорних дір.
4. Суперсиметризовану модель Фокера - Шварцшильда - Тетроде - Уйлера - Фейнмана узагальнено на випадок взаємодіючих нейтральних ферміонів, які мають аномальний магнітний момент. Побудовано суперсиметричне формулювання електродинаміки Максвела для системи нейтральних і заряджених ферміонів з аномальним магнітним моментом. Одержано суперпольові, інтегральні зображення для полів максвелівського супермультиплету і струмів заряджених і нейтральних частинок, які мають аномальний магнітний момент.
5. У дисертації запропоновано суперсиметричну модель, що описує взаємодію зарядженої частинки з аномальним магнітним моментом з зовнішніми полями супермультиплету Максвела. Показано, що ця модель відповідає розширенню принципу мінімальності електромагнітних взаємодій у суперпросторі і дозволяє у єдиний спосіб описувати мінімальну і немінімальну паулієвську взаємодію суперчастинок з полями $N = 1$ максвелівського супермультиплету.
6. Доведено, що побудоване узагальнення взаємодії суперчастинки з аномальним магнітним моментом з зовнішніми полями розширеного супермультиплету Максвела допускає узагальнення на випадок розширених суперсиметрій. Запропоновано $N = 2$ - узагальнення суперсиметричної електродинаміки заряджених і нейтральних частинок з АММ у зовнішніх полях розширеного $N = 2$ супермультиплету Максвела.

7. Запропонований у дисертації механізм побудови полів з координат може бути використаний у теорії суперсиметричних подовжених об'єктів. Задача узагальнення одержаних у дисертації моделей взаємодії на випадок струн і мембран може виявитись актуальною у зв'язку з проблемою побудови моделей ефективної взаємодії струн і мембран, а також у зв'язку з дослідженням їх симетрій.
8. Результати, які одержано у дисертації допускають узагальнення на неабелеві суперсиметричні калібровочні теорії, що може бути використане для урахування ефективних взаємодій полів Янга-Мілса зі спіновими ступенями свободи матеріальних мультиплетів. У зв'язку з цим особливу цікавість викликає вивчення ролі узагальненого аномального магнітного моменту полів матерії при дослідженні дуально-симетричних теорій, які пов'язують слабкий і сильний режими за константами зв'язку взаємодіючих полів;
9. Одержані у дисертації компонентні розклади полів і токів зарядженої суперчастинки з аномальним магнітним моментом відтворюють складну структуру вищих релятивістських поправок, пов'язаних з урахуванням спінових ступенів свободи полів матерії, суперсиметрії та калібрувальної симетрії. Співвідношення, що фіксують відносні константи при цих поправках можуть виявитись корисними для редукування кількості вільних констант взаємодії у суперсиметричних єдиних теоріях.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.

1. Желтухин А.А., Тугай В.В. Суперсимметрия и принцип действия на расстоянии // Письма в ЖЭТФ.- 1993. Т.58.- С.246-250.
2. Желтухин А.А., Тугай В.В. Супермультиплет Максвелла в подходе Уилера-Фейнмана // Письма в ЖЭТФ.- 1994. Т.60.- С.305-310.
3. Желтухин А.А., Тугай В.В. О минимальной природе неминимального электромагнитного взаимодействия // Письма в ЖЭТФ.- 1995. Т.61.- С.532-536.
4. Tugai V.V., Zheltukhin A.A. Superfield generalization of the classical action-at-a-distance theory // Phys. Rev.- 1995. V. D51.- P.R3997-R4000.
5. Tugai V.V., Zheltukhin A.A. Neutral particles with spin 1/2 and action-at-a-distance theory // Phys. Rev.- 1996. V.D54.- P.4160-4168.
6. Желтухин А.А., Тугай В.В. Классическое действие заряженных и нейтральных частиц со спином 1/2 и суперсимметричная электродинамика // ТМФ.- 1996. Т.108.- С. 393-405.
7. Желтухин А.А., Тугай В.В. Суперсимметрия и принцип минимальности электромагнитных взаимодействий // Препринт ХФТИ. КРТИ-97-6.- 1997. N.6.- 18 С.

ТУГАЙ В.В. "Суперсимметрия и релятивистские модели электромагнитного взаимодействия частиц со спином $1/2$ ". Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика. Институт монокристаллов НАН Украины, Харьков, Украина, 1997.

В диссертации предложено суперсимметричное обобщение электродинамики Фоккера - Шварцшильда - Тетроде - Уилера - Фейнмана, которое дает возможность описания спиновых эффектов в электромагнитном взаимодействии заряженных фермионов. В рамках предложенного обобщения изучена возможность описания фермионов с произвольным аномальным магнитным моментом. Сформулирован новый полевой принцип минимальности электромагнитных взаимодействий частиц в суперпространстве, позволяющий единым образом описать стандартное минимальное и неминимальное паулиевское взаимодействие фермионов с электромагнитным полем. Показано, что этот новый принцип минимальности допускает обобщение на случай расширенных суперсимметрий. Построено $N = 2$ обобщение суперсимметричной электродинамики заряженных и нейтральных частиц с АММ, взаимодействующих с полями расширенного супермультиплета Максвелла.

Ключевые слова: суперсимметрия, действие на расстоянии, аномальный магнитный момент, электродинамика, спин, калибровочные поля.

Tugai V.V. "Supersymmetry and relativistic models of electromagnetic interactions of particles with spin $1/2$ ". Manuscript. Ph. D. on the speciality 01.04.02. - Theoretical physics. Institute for Single Crystals of National Academy of Sciences, Kharkov, Ukraine, 1997.

A supersymmetric generalization of Fokker-Schwarzschild-Tetrad-Wheeler-Feynman electrodynamics was proposed. Within this generalization spin effects in electromagnetic interaction of charged fermions was described. The possibility of description of fermions with arbitrary anomalous magnetic moment is under investigation in the frameworks of offered generalization. A new field principle of minimality of electromagnetic interactions of particles in superspace was formulated. This principle provides a possibility of the uniform description of the standard minimal and nonminimal Pauli interactions of fermions with electromagnetic field. This new principle was shown to allow the generalization on the case of extended supersymmetries. $N = 2$ generalization of supersymmetric electrodynamics of charged and neutral particles with AMM, interacting with fields of extended Maxwell's supermultiplet was suggested.

Keywords: supersymmetry, action at a distance, anomalous magnetic moment, spin, gauge fields.

Пілляно до друку 27.05.97 р. Формат 60 x 84 I/16.

I, 0 ум.-друк.арк., I, 0 обл.-вид.арк. Тираж 100. Зам. 122.

П'яльниця оперативного друку ХДАУ. ЗІІІІІ, м.Харків,
п/в "КомунІст-І", учб. мІстечко.

432478

AB 38.123