

И-204

4 - 11484

ИВАНОВ
Михаил Алексеевич

СОБСТВЕННАЯ ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОНА
И МЕЗОННЫЕ РАСПАДЫ
В НЕЛОКАЛЬНОЙ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ

Специальность 01.04.02 -

теоретическая и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1978

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник Г.В.ЕФИМОВ.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Б.А.АРЕУЗОВ,
кандидат физико-математических наук А.Б.ГОВОРКОВ.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Физический институт АН СССР им. П.Н.Лебедева, Москва.

Автореферат разослан " " 1978 г.

Защита диссертации состоится " " 1978 г. на засе-
дении специализированного Ученого совета КО47.01.01 Лабора-
рии теоретической физики Объединенного института ядерных ис-
следований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

В.И.ЖУРАВЛЕВ

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. В диссертации исследованы следу-
ющие проблемы.

Первая проблема связана с выполнением принципа соответст-
вия в задаче о собственной энергии электрона. Основной труд-
ностью в рассматриваемой проблеме является то обстоятельство,
что современная как классическая, так и квантовая электроди-
намике имеет дело лишь с локальными взаимодействиями. Поэто-
му собственная энергия электрона бесконечна как в классическом,
так и в квантовом случае, и, следовательно, сама постановка
вопроса о выполнении принципа соответствия является бессмыс-
ленной. Поэтому справедливость принципа соответствия в пробле-
ме собственной энергии электрона может быть установлена лишь
в нелокальной теории, где может быть введен непротиворечивым
образом параметр размерности длины. Обычно при рассмотрении
данной проблемы^{/1/} используется регуляризация Паули-Виллерса,
которая состоит в том, что свободный пропагатор фотона заменя-
ется выражением

$$\frac{1}{-k^2 - i\epsilon} \rightarrow \frac{1}{-k^2 - i\epsilon} \cdot \frac{\Lambda^2}{\Lambda^2 - k^2 - i\epsilon}. \quad (1)$$

Здесь Λ - импульс обрезания, связанный с радиусом обрез-
ания соотношением

$$r_0 = \frac{\hbar}{\Lambda c}.$$

Если мы хотим рассматривать теорию при конечных Λ , то при
энергиях, превышающих Λ , унитарность S -матрицы нарушает-
ся, что соответствует рождению нефизических квантов с массой
 Λ . Поэтому параметр Λ можно считать конечным только

тогда, когда энергии электронов и фотонов, участвующих в тех или иных процессах, много меньше Λ . В рассматриваемом случае это означает, что

$$\Lambda \gg m, \quad \text{или} \quad r_0 \ll \frac{\hbar}{mc}. \quad (2)$$

Это условие запрещает переход к классическому пределу $\hbar \rightarrow 0$, поскольку при $r_0 \gg \frac{\hbar}{mc}$ S -матрица не удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к самосогласованной теории. На основе этого считалось^{/1,2/}, что собственная энергия электрона в классической и квантовой теории поля имеет совершенно различную природу.

Однако в рамках нелокальной квантовой электродинамики, построенной в работе^{/3/}, эта проблема может быть рассмотрена корректным образом. В этом подходе построена S -матрица, описывающая нелокальное взаимодействие электрона с фотоном и удовлетворяющая всем необходимым аксиомам (унитарности, причинности и т.д.) при любых соотношениях между параметром нелокальности ℓ и комптоновской длиной волны электрона $\lambda = \frac{\hbar}{mc}$. Классический предел $\hbar \rightarrow 0$ соответствует неравенству $\lambda \ll \ell$, а квантовый — неравенству $\lambda \gg \ell$.

Вторая проблема связана с описанием адронных взаимодействий с точки зрения кваркового подхода. В настоящее время успех кварковых моделей в объяснении спектра адронов, в описании их внутренних характеристик и в ряде других вопросов физики элементарных частиц заставляет думать, что кварки существуют в природе. Однако они до сих пор экспериментально не обнаружены. Поэтому возникло большое количество теоретических моделей^{/4/}, пытающихся объяснить "удержание" кварка. Общей чертой всех та-

ких моделей является предположение о том, что кварк является обычной дираковской частицей, но не рождается согласно какому-то механизму. К такого сорта моделям относятся прежде всего модели с феноменологическим "запирающим" потенциалом, модели типа "струн", "мешков", квантовая хромодинамика и т.п. Несмотря на некоторый прогресс в развитии этих моделей, следует отметить, что еще нет достаточно последовательной схемы, где проблема "удержания" кварка была бы полностью решена.

Описание физических процессов в кварковых моделях представляет большую трудность, поскольку все еще нет достаточно хорошо разработанного аппарата для релятивистского описания составных систем. Обычно^{/5/} физические следствия извлекаются путем решения различных релятивистских уравнений на связанные состояния при достаточно сильных предположениях.

В работах^{/6/} был предложен оригинальный подход к проблеме "удержания" кварка. В рамках нелокальной квантовой теории поля были построены специфические объекты, названные виртонами, которые отсутствуют в свободном состоянии, но тем не менее могут находиться в виртуальном состоянии. Было предложено использовать виртон для описания "невывлетающего" кварка.

В связи с этим возник вопрос: нельзя ли на основе виртонного поля построить физическую модель "невывлетающих" кварков и применить ее к описанию физики адронных взаимодействий?

В свете всего вышеизложенного становится ясной актуальность следующих задач:

1) исследование вопроса о принципе соответствия в рамках нелокальной квантовой электродинамики;

2) построение физической модели, описывающей взаимодействия кварков-виртонов с полями физических частиц, и разработка техники вычислений матричных элементов физических процессов в этой модели;

3) применение этой модели к описанию физики адронных взаимодействий.

По этим трем направлениям проводились исследования, результаты которых представлены в диссертации.

Цель работы - 1) вычисление собственной энергии электрона и частицы с произвольным спином в нелокальной теории поля и исследование вопроса о классическом пределе; 2) построение на основе кварк-виртонного поля физической модели адронных взаимодействий - нелокальной модели кварков и получение в ее рамках физических следствий.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации впервые доказан принцип соответствия в задаче о собственной энергии электрона и частицы с произвольным спином в рамках теории с нелокальным взаимодействием, т.е. показано, что в пределе $\hbar \rightarrow 0$ электромагнитная поправка к массе совпадает с классическим выражением для собственной энергии заряженной частицы.

Впервые на основе виртонного поля в рамках релятивистской унитарной теории S -матрицы построена физическая модель адронных взаимодействий, позволяющая описывать эффекты сильных взаимодействий при низких энергиях. Развита техника вычислений в этой модели.

Впервые в рамках этой модели рассчитаны поправки к массам ширины ряда сильных, слабых и электромагнитных распадов векторных и псевдоскалярных мезонов. Получено хорошее согласие с экспериментом.

Рассматриваемая схема может быть применена к описанию низкоэнергетических процессов с участием барионов и новых частиц.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на Международном совещании в Алуште (1976 г.), на сессии ОЯФ АН СССР (1978 г.), на семинарах ЛТИ ОИЯИ, ФИАН СССР и ИФВЭ в г. Серпухове.

Публикации. По результатам диссертации опубликованы четыре статьи.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 97 страниц машинописного текста. Библиографический список состоит из 71 названия.

Содержание работы

Во введении кратко обсуждаются основные моменты построения теории нелокальных взаимодействий и ряд ее приложений.

Первая глава посвящена исследованию принципа соответствия в задаче о собственной энергии электрона и частицы с произвольным спином в рамках нелокальной квантовой теории.

В § I анализируется причина несоответствия собственной энергии электрона в классической и в квантовой теории поля с локальным взаимодействием. Обсуждаются различные подходы к этой проблеме.

В § 2 вычисляется собственная энергия электрона в классической теории поля с нелокальным взаимодействием:

$$\delta m_{\text{кл}} = \frac{e^2}{4\pi^2 \ell} \int_0^\infty dx V(x^2),$$

где $V(z)$ - нелокальный формфактор.

В § 3 вычисляется электромагнитная поправка к массе электрона в нелокальной квантовой электродинамике во втором порядке теории возмущений:

$$\delta m_2 = \frac{m}{(2\pi)^2} \frac{e^2}{\hbar} \int_0^\infty du V\left[4\left(\frac{\ell}{\lambda}\right)^2 u\right] M(u),$$

где $M(u) = 2u + (1-2u)\sqrt{\frac{1+u}{u}}$.
Показано, что в классическом пределе $\ell \gg \lambda$

$$\left(\lambda = \frac{\hbar}{mc} - \text{комптоновская длина волны электрона}\right)$$

получается классическое выражение, а при $\ell \ll \lambda$ - квантовое выражение для собственной энергии электрона.

В § 4 исследуется предел $\hbar \rightarrow 0$ в высших порядках теории возмущений. Показано, что

$$\lim_{\hbar \rightarrow 0} \delta m_4 = \lim_{\hbar \rightarrow 0} \delta m_6 = 0.$$

В § 5 рассматривается классический предел $\hbar \rightarrow 0$ для электромагнитной поправки к массе частицы с произвольным спином. Показано, что в этом пределе поправка к массе частицы с произвольным спином не зависит от спина и массы этой частицы и совпадает с электростатической энергией заряженной частицы.

Во второй главе формулируется нелокальная модель кварков, основное предположение которой заключается в отождествлении кварка с виртонным полем. Считается, что физические частицы

описываются обычными квантованными полями, но взаимодействуют между собой только посредством кварков-виртонов.

В § 1 обсуждаются различные современные модели удержания кварка.

В § 2 кратко рассматривается построение виртонного поля, осуществленное в работах [6]. Обсуждается физический смысл параметров, характеризующих это поле, и возможные способы описания физических частиц и их взаимодействий с помощью виртонного поля.

В § 3 развита техника вычислений в данной модели на примере расчета поправки к массе псевдоскалярного мезона, возникающей за счет его взаимодействия с виртонным полем. Лагранжиан взаимодействия выбирается в виде

$$\mathcal{L}_I(x) = i\hbar \pi(x) (\bar{q}(x) \gamma_5 q(x)),$$

где

$$\pi(x) - \text{мезонное поле: } (\square - m^2)\pi(x) = 0,$$

$$q(x) - \text{виртонное поле: } Z(\hat{p})q(x) = 0.$$

Здесь

$$Z(\hat{p}) = -M \exp\left\{-\ell \hat{p} - \frac{\ell^2}{4} p^2\right\}.$$

В § 4 приближенно ряд теории возмущений и показано, что инвариантную амплитуду, описывающую физический процесс с участием E внешних мезонов, можно представить в виде

$$T(p_1, \dots, p_E) = L^{E-4} \lambda^{\frac{n_0}{2}} \sum_{n=0}^{\infty} \lambda^n T_n\left(\frac{p_L}{2}, \xi\right),$$

где $N = n_0 + 2n$ - порядок теории возмущений,

$$\lambda = \frac{L}{(ML)^2} \frac{\hbar^2}{(4\pi)^2}; \quad \xi = \frac{2\ell}{L}.$$

Из этого представления видно, что

- 1) λ - эффективная константа разложения в ряд по теории возмущений;
- 2) параметр M входит только в определение λ ;
- 3) параметр L характеризует область сильных взаимодействий;
- 4) параметр ξ - вторая характеристика сильных взаимодействий.

В § 5 с помощью "минимальной" замены введено взаимодействие виртонов с электромагнитным полем:

$$\mathcal{L}(x) = \bar{q}(x) Z(\hat{p}) q(x) \rightarrow \bar{q}(x) Z(\hat{p} + e\hat{A}) q(x).$$

Показано, что взаимодействие фотонов за счет обмена виртонами отсутствует.

В § 6 показано, что фотон-адронные взаимодействия с обменом виртонами не тривиальны. Развита техника вычислений матричных элементов физических процессов с участием фотонов и получены основные расчетные формулы.

В третьей главе в рамках нелокальной модели кварков вычислены поправки к массам, ширины ряда сильных, слабых и электромагнитных распадов псевдоскалярных и векторных мезонов.

В § I кратко обсуждается описание мезонных распадов в рамках SU_3 - феноменологического подхода и в кварковых моделях.

В § 2 на основе требования инвариантности относительно преобразований $SU_3 \times SU_3^c$ - группы и группы калибровочных преобразований построены простейшие лагранжианы взаимодействия физических частиц с кварками-виртонами:

$$\mathcal{L}_I = \mathcal{L}_H + \mathcal{L}_{em} + \mathcal{L}_W,$$

$$\mathcal{L}_H = i\hbar M^{ks} (\bar{q}_a^k \gamma_5 q_a^s) + g V_\mu^{ks} (\bar{q}_a^k \gamma_\mu q_a^s),$$

$$\mathcal{L}_{em} = \sum_{k=1}^3 e_k J_\mu^k A_\mu,$$

$$\mathcal{L}_W = \frac{G}{\sqrt{2}} (\bar{q}_a^1 \gamma_\mu (q_a^2 \cos \theta_c + q_a^3 \sin \theta_c)) (\bar{e} \gamma_\mu \nu) + h.c. + (e \rightarrow \mu).$$

Здесь M^{ks} - октетная матрица псевдоскалярных мезонов (считается, что η -мезон входит в октет); V^{ks} - нонетная матрица векторных мезонов (рассматривается идеальное φ - ω смешивание); $a = 1, 2, 3$ - цветные индексы (предполагается, что заряды кварков не зависят от цвета и являются дробными).

Предполагается, что основное расщепление масс в октете происходит за счет нарушения SU_3 - симметрии на основе гипотезы Гелл-Манна-Окубо. Нарушение SU_3 - симметрии за счет утяжеления странного кварка приводит лишь к малым добавкам.

При фитировании по экспериментальным данным параметры модели оказались следующими:

1. Слабая константа и угол Каббобо - обычными;

$$G = G_F = 1,02 \frac{10^{-5}}{m_p^2},$$

$$\sin \theta_c = 0,24.$$

2. Эффективные константы

$$\lambda_h = \frac{1}{(4\pi)^2} \frac{\hbar^2}{(ML)^2}, \quad \lambda_g = \frac{1}{(4\pi)^2} \frac{g^2}{(ML)^2}$$

и $\lambda_h = \lambda_g = \lambda = 0,13$, - одинаковыми и меньше

единицы:

$$\lambda_h = \lambda_g = \lambda = 0,13,$$

т.е. в данной модели эффекты сильных взаимодействий можно описать теорией возмущений.

3. Параметры L , характеризующий область сильных взаимодействий, и ξ — соответственно равными

$$L = 3,12 \text{ ГэВ}^{-1} = 1/320 \text{ МэВ},$$

$$\xi = 1,4-1,5.$$

4. Параметр нарушения SU_3 -симметрии ρ — равным 0,9. Таким образом, в модели фактически имеется 4 независимых

параметра: λ, L, ξ, ρ .

В § 3 при таком выборе параметров были рассмотрены:

1. Поправки к массам псевдоскалярных и векторных мезонов.

2. Сильные распады:

$$V \rightarrow PP, \\ \omega \rightarrow 3\pi.$$

3. Радиационные распады:

$$V \rightarrow P\gamma, \\ V \rightarrow e^+e^-, \\ P \rightarrow \gamma\gamma.$$

4. Слабые распады:

$$P \rightarrow \mu\nu, \\ P \rightarrow P\ell\nu, \\ \pi^- \rightarrow e\nu.$$

Результаты вычислений приведены в таблицах 1-3.

Были рассмотрены две модификации лагранжианов взаимодействия.

1. "Неминимальное" включение электромагнитного поля.

Результаты приведены в таблице 2 в столбце "неминимальное взаимодействие".

2. Включение слабых взаимодействий по аналогии с электромагнитными. Результаты приведены в таблице 3, в последнем столбце.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Основные результаты, полученные в диссертации

1. В рамках квантовой электродинамики с нелокальным взаимодействием показано, что принцип соответствия выполнен в задаче о собственной массе электрона и частиц с произвольным спином. Оказалось, что второй порядок теории возмущений в пределе $\hbar \rightarrow c$ дает точно пластическое выражение для собственной энергии электрона, а все высшие поправки обращаются в нуль.

2. На основе виртонного поля сформулирована нелокальная модель кварков, описывающая взаимодействия физических частиц посредством кварков-виртонов. Разработана техника вычислений в этой модели и получены основные расчетные формулы.

3. В нелокальной модели кварков на основе простейшего выбора лагранжианов взаимодействия физических частиц с кварками-виртонами вычислены поправки к массам, ширины ряда сильных, слабых и электромагнитных распадов псевдоскалярных и векторных мезонов. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с экспериментом.

Таблица 1. Поправки к массам и сильные распады

Processes		Experiment Γ (MeV)	Theory	
			$\xi = 1.4$	$\xi = 1.5$
$R_{ij} = \frac{\delta m_i^2 - \delta m_j^2}{m_i^2 - m_j^2}$ $i, j = \text{VorP}$	$R_{K\pi}$	—	-0.13	-0.13
	$R_{\Lambda\pi}$	—	-0.18	-0.18
	R_{K^*p}	—	-0.10	-0.10
	$R_{\psi s}$	—	-0.09	-0.09
$V \rightarrow PP$	$\rho \rightarrow \pi\pi$	152 ± 5	145	150
	$k^* \rightarrow k\pi$	49.4 ± 1.8	43	44
	$\psi \rightarrow k^*k^*$	1.91 ± 0.18	1.97	2.02
	$\psi \rightarrow k^*k^0$	1.44 ± 0.15	1.29	1.32
$V \rightarrow PPP$	$\omega \rightarrow 3\pi$	8.99 ± 0.42	6.7	9.1

Таблица 2. Радиационные распады

Decays	Experiment Γ (keV)	Theory				
		Minimal interaction		Nonminimal interaction		
		$\xi = 1.4$	$\xi = 1.5$	$\xi = 1.4$	$\xi = 1.5$	
$V \rightarrow P\gamma$	$\omega \rightarrow \pi^+\gamma$	870 ± 61	922	1000	1270	1580
	$\omega \rightarrow \gamma\gamma$	<50	4.9	5.3		
	$\rho \rightarrow \pi^+\gamma$	35 ± 10	98	106		
	$\rho^0 \rightarrow \gamma\gamma$	<160	39	43		
	$k^* \rightarrow k^+\gamma$	75 ± 35	216	232		
	$k^* \rightarrow k^-\gamma$	<80	68	74		
$V \rightarrow \ell^+\ell^-$	$\psi \rightarrow \gamma\gamma$	65 ± 15	227	246		
	$\rho^+ \rightarrow e^+e^-$	6.44 ± 0.89	4.7	5.0	9.6	9.9
	$\omega \rightarrow e^+e^-$	0.76 ± 0.47	0.53	0.56		
$P \rightarrow \ell\ell$	$\psi \rightarrow e^+e^-$	1.31 ± 0.15	1.30	1.35		
	$\pi^+ \rightarrow \mu^+\gamma$	$(7.92 \pm 0.42) \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$5.1 \cdot 10^{-3}$	$6.1 \cdot 10^{-3}$
	$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$	$(324 \pm 46) \cdot 10^{-8}$	$43 \cdot 10^{-8}$	$43 \cdot 10^{-8}$		

Таблица 3. Слабые распады

Decays	Experiment (GeV)	Theory				
		Weak interaction (2.3)		Weak interaction (3.2)		
		$\xi = 1.4$	$\xi = 1.5$	$\xi = 1.4$	$\xi = 1.5$	
$P \rightarrow \mu\nu$	$k^+ \rightarrow \mu^+\nu$	$3.383 \pm 0.016 \cdot 10^{-17}$	$2.81 \cdot 10^{-17}$	$2.66 \cdot 10^{-17}$		
	$\pi^+ \rightarrow \mu^+\nu$	$2.528 \pm 0.002 \cdot 10^{-17}$	$2.5 \cdot 10^{-17}$	$2.37 \cdot 10^{-17}$	$2.2 \cdot 10^{-17}$	$1.3 \cdot 10^{-17}$
$P \rightarrow \ell^0 e \nu$	$k^+ \rightarrow \pi^0 e^+\nu$	$2.564 \pm 0.032 \cdot 10^{-18}$	$2.42 \cdot 10^{-18}$	$2.49 \cdot 10^{-18}$		
	$\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+\nu$	$2.579 \pm 0.177 \cdot 10^{-25}$	$2.39 \cdot 10^{-25}$	$2.48 \cdot 10^{-25}$	$2.6 \cdot 10^{-25}$	$8.3 \cdot 10^{-25}$

Результаты диссертации опубликованы в работах:

G.V.Efimov, M.A.Ivanov, O.A.Mogilevski.

Ann. of Phys. 103, 169, 1977.

А.З.Дубничкова, Г.В.Ефимов, М.А.Иванов.

ОИЯИ, P2-10734, Дубна, 1977.

Г.В.Ефимов, М.А.Иванов. ОИЯИ, P2-10740, Дубна, 1977.

G.V.Efimov, M.A.Ivanov. JINR, E2-11065, Dubna, 1977.

Л и т е р а т у р а

1. V.Wesskopf, Phys. Rev. 56, 72 (1939).

R.Feynman. Phys. Rev. 76, 769 (1949).

2. С.Швебер. Введение в релятивистскую квантовую теорию поля. ИЛ, 1963.

3. Г.В.Ефимов. Нелокальные взаимодействия квантовых полей. "Наука", Москва, 1977.

4. H.Joos. Quark Confinement. DESY 76/36, July, 1976.

5. А.Т.Филиппов. Доклад на XV Международной конференции по физике высоких энергий, Тбилиси, 1976.

6. А.З.Дубничкова, Г.В.Ефимов. ОИЯИ, P2-10035, Дубна, 1976.

A.Z.Dubnickova, G.V.Efimov. JINR, E2-11065, Dubna, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 апреля 1978 года.