

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

0332

П-538

4 - 5116

Ю.С. Польш

**РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЯДРАХ
В ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ**

**Специальность 055 - физика атомного ядра
и космических лучей**

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата физико-математических наук

Дубна 1970

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук В.К. Лукьянов

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук С.И. Дроздов,
кандидат физико-математических наук Р.А. Эрамбян.

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Харьковский
ордена Ленина физико-технический институт АН УССР.

Автореферат разослан " " 1970 г.

Защита диссертации состоится " " 1970 г. на
заседании Ученого совета Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Мос-
ковской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

Р.А. Асанов

4 - 5116

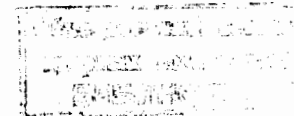
Ю.С. Поль

РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЯДРАХ
В ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Специальность 055 - физика атомного ядра
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата физико-математических наук

4520 69



В последние годы ведутся интенсивные экспериментальные исследования рассеяния электронов высокой энергии на ядрах, которые позволяют получать ценную информацию об их структуре ^{/1-10/}. Так, эксперименты Ховштадтера ^{/1-3/} с энергией электронов 750 Мэв обнаружили "тонкую структуру" в распределении электрического заряда изотопов Са и дали интересные сведения об их изотопической структуре. Начинается систематическое изучение неупругого рассеяния электронов с возбуждением дискретных ядерных состояний ^{/7-10/}, из которых можно получать сведения об энергии, мультипольности, приведенной вероятности перехода и так называемой плотности перехода.

Теоретическая интерпретация этих данных с целью извлечения информации о структуре ядер является в принципе более надежной, чем в случае их зондирования сильновзаимодействующими ядерными частицами, так как взаимодействие электрона с ядрами является электромагнитным и хорошо описывается уравнением Дирака ^{/11/}. Вторая важная особенность электронного рассеяния по сравнению с традиционными методами α , β и γ -спектроскопии состоит в возможности при фиксированной энергии электрона E изменять величину переданного ядру импульса q и получать, таким образом, сведения о динамических свойствах ядра.

Вместе с тем, теория и методы расчёта сечений рассеяния электронов на ядрах разработаны значительно хуже и базируются в большинстве случаев на так называемом методе фазового анализа ^{/12/}, то есть на прямом численном решении уравнения Ди-

рака. Очевидные трудности такого подхода, связанные в основном с его трудоемкостью и отсутствием прямой связи входных параметров электрон-ядерного взаимодействия с результатами расчета, не позволяют считать его надежным методом как для извлечения информации о структуре ядра из поступающих во все большем объеме экспериментальных данных, так и для проверки предсказаний различных моделей ядра.

На современном этапе анализа данных упругого и неупругого рассеяния электронов важно иметь явное выражение, связывающее сечение рассеяния с ядерной плотностью заряда (или перехода). Ясно, что в решении этих задач большое значение приобретает развитие теории с использованием приближенных методов, опирающихся на основные характерные черты данной проблемы.

Цель настоящей диссертации как раз и состоит в развитии наиболее адекватного для данной задачи высокоэнергетического подхода, всестороннего методического анализа полученных выражений для амплитуды рассеяния и иллюстрации его практических возможностей в качественном и количественном анализе современных экспериментальных данных.

В связи с этим в диссертации дан анализ высокоэнергетического приближения в применении к уравнению Дирака и получена в явном виде амплитуда потенциального рассеяния^{/13/}. Такое приближение, по-видимому, наиболее естественно в задаче рассеяния электронов на ядрах, где обычно хорошо выполняются основные условия подхода $E \gg V, kR \gg 1$. На этой основе разработан полюсной метод^{/14-15/} и получены выражения для амплитуды рассеяния электронов на ядрах в явном аналитическом виде при распределениях плотности заряда произвольного вида^{/16/}. Амплитуда найдена с точностью, которая позволяет проводить не только качественный, но и количественный анализ современных экспериментальных данных^{/1/}, что проверено путем методических сравнений с точным методом фазового анализа. Затем метод применяется для анализа экспериментальных данных с целью

выявления конкретных возможностей в использовании этого подхода к задачам упругого и неупругого рассеяния электронов на ядрах, а также для получения новой информации о структуре ядра^{/17,18,19/}.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений.

Во введении приведен краткий обзор существующих экспериментальных данных по упругому и неупругому рассеянию электронов на средних и тяжелых ядрах. Анализируются современные теоретические методы, которые используются при обработке этих данных. Формулируются задачи диссертации и дано резюме полученных результатов.

В первой главе изучается высокоэнергетическое приближение для рассеяния дираковских частиц на ядрах, причем рассмотрение проводится в общем виде, когда массой частицы нельзя пренебречь по сравнению с ее энергией, и учитывается возможность поглощения ядерных частиц. В высокоэнергетическом приближении ($E \gg |v|, kR \gg 1$) решается уравнение Дирака с оптическим потенциалом и в явном виде находятся квазиклассические волновые функции рассеяния. Они отличаются от полученных ранее^{/20,21/} спинорным предэкспоненциальным фактором, который содержит члены порядка V/E , и, как оказывается, играет большую роль при детальном описании дифференциальных сечений рассеяния. На базе этих функций даны выражения для амплитуды рассеяния при некоторых дополнительных приближениях и выявляется их связь с известными результатами, полученными в ряде других работ^{/20-23/}. В общем оказывается, что в высокоэнергетическом приближении амплитуду потенциального рассеяния можно записать в виде:

$$f(\theta) = \frac{E}{2\pi} \int v_r^+ g(\vec{r}, \vec{k}_i, \vec{k}_f, \vec{\sigma}) v_l e^{i\vec{q}\vec{r} + i\Phi(\vec{r}, \vec{k}_i, \vec{k}_f)} V(\vec{r}) d\vec{r}, \quad (1)$$

где амплитудная g и фазовая Φ функции учитывают искажение плоской волны частицы в поле потенциала $V(\vec{r})$.

Далее рассчитываются дифференциальные сечения рассеяния в области малых углов рассеяния $\Theta < (kR)^{-1}$ и в наиболее интересной области больших углов $\Theta > (kR)^{-1}$, где наблюдается дифракционная картина. В частном случае, когда поглощение отсутствует и массой частицы можно пренебречь, получаются известные результаты работы /23/.

Вторая глава диссертации посвящена разработке высокоэнергетического приближения для упругого и неупругого рассеяния электронов на ядрах. Задачу удается разбить на две части: расчёт в рамках выбранной модели ядра радиальной функции распределения плотности заряда (перехода) $\rho_L(x)$ и вычисление кинематических интегралов, учитывающих искажение волны электрона в кулоновском поле ядра - $F_{LM}(\Theta)$:

$$\sigma_{if}(\Theta) = \sigma_M(\Theta) \frac{2J_f + 1}{2J_i + 1} \sum_{LM} \frac{1}{2L+1} |F_{LM}(\Theta)|^2 \quad (2)$$

$$F_{LM}(\Theta) = 2\pi i q \sum_{\epsilon=\pm 1} \epsilon \int_0^{\infty} \frac{G_{LM}(x, \epsilon)}{q_{ef}^2(x, \epsilon)} e^{iqx\epsilon + i\Phi(x, \epsilon)} \rho_L(x) x dx, \quad (3)$$

где функции G_{LM} , q_{ef} , Φ удается найти в явном виде. Затем излагается полюсной метод /13/ расчёта кинематических интегралов $F_{00}(\Theta)$ для случая упругого рассеяния электронов на ядрах с фермиевским распределением плотности заряда

$$\rho_0(x) = \rho_\phi(x) = \rho_0 \phi^{(0)}(x; R, b) = \rho_0 \frac{1}{1+e^z}; \quad z = \frac{x-R}{b}, \quad (4)$$

который состоит в переходе на комплексную плоскость по переменной интегрирования x и использовании полюсных особенностей ферми-плотности (4), имеющей простые полюса в точках

$x_s^\epsilon = R + i\epsilon(2s+1)\pi b$. В качестве первой иллюстрации дан пример борновского приближения ($G_{00}=1$, $q_{ef}^2=q^2$, $\Phi=0$), где получается точное выражение:

$$F_{00}^B(\Theta) = \frac{8\pi}{q} \rho_0 R b \left[\cos qR - \frac{\pi b}{R} \sin qR \operatorname{cth} q\pi b \right] \frac{1}{2 \operatorname{sh} q\pi b}, \quad (5)$$

откуда, в частности, при $b \rightarrow 0$ следует известный результат для ступенчатого распределения плотности заряда /24/. С помощью полюсного метода получено аналитическое выражение для фактора упругого рассеяния в общем случае с учётом искажения электронной волны:

$$F_{00}(\Theta) = 4\pi^2 q \rho_0 b \frac{\sum_{\epsilon} G_{00}(x_0^\epsilon, \epsilon)}{q_{ef}^2(x_0^\epsilon, \epsilon)} (R + i\epsilon\pi b \operatorname{cth} q\pi b) \frac{\exp[iqR\epsilon + \Phi(x_0^\epsilon, \epsilon)]}{2 \operatorname{sh} q\pi b}. \quad (6)$$

В рамках исходных приближений ($E \gg V$, $kR \gg 1$, $\Theta > (kR)^{-1}$) оно хорошо согласуется с точными расчётами сечений по методу фазового анализа и удобно для анализа экспериментальных данных с помощью χ^2 -метода.

В третьей главе диссертации рассматривается задача вычисления сечения упругого рассеяния электронов на ядрах, распределение плотности заряда которых может иметь произвольную ферми-подобную (то есть имеющую фермиевский спад на границе ядра) форму. Такое обобщение оказывается необходимым как при проведении анализа экспериментальных данных /1/, так и при апробировании в упругом рассеянии электронов плотностей заряда, рассчитанных в рамках тех или иных моделей ядра. Распределение плотности заряда с радиальными вариациями во внутриядерной области представляется в виде разложения по базису, образованному из производных ферми-плотности (4)

$$\rho(x) = \rho_0 \sum_{m=0}^N a_m \phi^{(m)}(x; R, b) \quad (7)$$

$$\phi^{(m)}(x; R, b) = \frac{\partial^m}{\partial z^m} \phi^{(0)}(x; R, b), \quad (8)$$

где m -ю производную (8) удается записать в явном виде /16/. Такое представление хорошо передает экспоненциальный спад на границе ядра и радиальные вариации в центральной области, в то же время оно позволяет представить амплитуду рассеяния аналитически, в виде ряда по известным функциям, с теми же коэффициентами a_m , которые определяют разложение плотности заряда (7), а именно /16/:

$$F_{00}(\Theta) = \sum_{m=0}^N a_m F_{00}^{(m)}(\Theta) \quad (9)$$

$$F_{00}^{(m)}(\Theta) = -4\pi^2 q b^2 \rho_0 (-i)^{m-1} \sum_{\epsilon} \frac{G_{00}(x_0^{\epsilon}, \epsilon)}{q^2(x_0^{\epsilon}, \epsilon)} [b q_{ef}(x_0^{\epsilon}, \epsilon)]^{m-1} \times \\ \times [m + i q_{ef}(x_0^{\epsilon}, \epsilon)(R + i \epsilon \pi b \operatorname{cth} q \pi b)] \frac{\exp i[\epsilon q R + i \Phi(x_0^{\epsilon}, \epsilon)]}{2 \operatorname{sh} q \pi b}. \quad (10)$$

Методические расчёты приводят к хорошему согласию с известными точными расчётами для рассеяния электронов с энергией 750 МэВ /1/. Явная зависимость сечения рассеяния от коэффициентов разложения плотности заряда a_m позволяет поставить ряд задач, не доступных ранее из-за трудоёмкости метода фазового анализа.

В четвертой главе диссертации разработан метод прямого анализа экспериментальных данных упругого рассеяния электронов с целью извлечения модельно-независимой ("экспериментальной") информации о распределении плотности заряда /17/. Он состоит в применении метода наименьших квадратов к коэффициентам разложения плотности заряда (7), которые в сечении рассеяния

$$\sigma(\Theta, k; a_1, \dots, a_N) = \sigma_M(\Theta) \left| \sum_{m=0}^N a_m F_{00}^{(m)}(\Theta) \right|^2 \quad (11)$$

выступают теперь как подгоночные параметры. Нефизические решения, приводящие к знакопеременным функциям распределения плотности заряда (7), исключаются введением дополнительного условия, которое требует, чтобы оптимальный к экспериментальным данным набор a_1, \dots, a_N определял распределение плотности заряда в заданном коридоре $\rho_1 \pm \delta_1$ (практически оказывается достаточным задать несколько ограничивающих точек в области поверхностного спада). Метод применялся для анализа экспериментальных данных по рассеянию электронов с энергией 250 и 750 МэВ на ядрах ^{40}Ca и ^{48}Ca (результаты анализа даны, например, на рис. 1 и 2 для случая рассеяния электронов с энергией 750 МэВ). Показано, что полученные таким образом "экспериментальные" плотности (штрих-пунктирные кривые на рис. 1 и 2) содержат известную неопределенность в центральной области ядра. Именно, различный ход плотности заряда в центральной части ядра никак не отражается на сечениях рассеяния в данной (изученной пока экспериментально) области углов рассеяния. Для ядра ^{48}Ca прямой анализ приводит к распределению плотности заряда, отличающимся от найденного в работе /1/. В последнем параграфе 4 главы дан пример анализа экспериментальных данных по упругому рассеянию электронов с энергией < 250 МэВ, на ряде ядер, распределение плотности заряда которых рассчитывалось в рамках модели независимых частиц с потенциалом Вудса-Саксона. Анализируются значения полученных таким образом среднеквадратичных зарядовых радиусов /18/.

Пятая глава посвящена неупругому рассеянию электронов на ядрах с возбуждением в них низколежащих состояний, которые можно описывать в рамках любой (макро- и микро-) модели

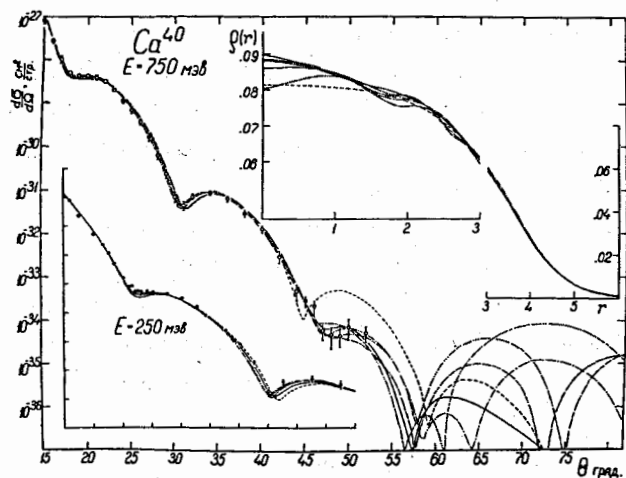


Рис. 1. Анализ данных упругого рассеяния электронов с энергией 750 Мэв на ядре ^{40}Ca /1/. Вверху изображены сплошной кривой р.п.э., полученное в работе /1/, пунктирной - ферми-плотность с параметрами $c = 3,602$, $z = 0,576$, штрих-пунктирной - р.п.э., полученные в нашем анализе. Внизу соответствующими кривыми изображены дифференциальные сечения, рассчитанные при энергии электронов 750 и 250 Мэв.

ядра /14, 19/. Построена теория неупругого рассеяния электронов с использованием адиабатического приближения, которое требует, чтобы энергия возбуждения ядра ΔE была мала по сравнению с кинетической энергией электронов $E (E \gg \Delta E)$. В этом случае сечение неупругого рассеяния также удается записать в виде ряда по известным в аналитическом виде функциям, где, однако, коэффициенты разложения определяют уже радиальную плотность перехода

$$\rho_L(x) = \sum_{n=0}^N a_n^{(L)} \phi_n^{(n)}(x; R, b). \quad (12)$$

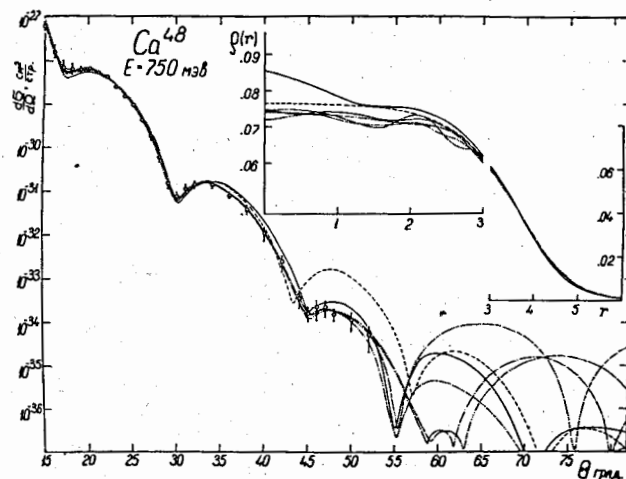


Рис. 2. Анализ данных упругого рассеяния электронов с энергией 750 Мэв на ядре ^{48}Ca /1/. Вверху изображены р.п.э., внизу - соответствующие дифференциальные сечения, рассчитанные для энергии 750 Мэв и экспериментальные точки. Сплошная кривая - р.п.э., полученное в работе /1/, пунктирная - ферми-плотность с параметрами $c = 3,7369$, $z = 0,5245$; штрих-пунктирная - р.п.э., полученные в нашем анализе.

Сравнение с точными численными расчетами убеждает в хорошей точности использованных приближений. Метод применяется для анализа экспериментальных данных на ядре ^{58}Ni /10/. Показано, что использование макро- и микро-моделей ядра для описания низколежащего квадрупольного состояния приводит к расхождению теоретических и экспериментальных формфакторов неупругого рассеяния в районе первого дифракционного минимума. Поскольку в данном рассмотрении учтены эффекты искажения плоской волны электрона в кулоновском поле ядра, а дисперсион-

ные поправки в этой области переданных импульсов для ядра ^{58}Ni малы $^{25/}$, то причины такого расхождения можно отнести за счёт недостатков существующих моделей ядра, использованных для описания вибрационных состояний в круглых ядрах.

С другой стороны, явная зависимость сечения от коэффициентов разложения переходной плотности (12) позволяет проводить прямой анализ также и для экспериментальных данных неупругого рассеяния с целью извлечения "экспериментальной" информации о переходной плотности ядра и величине $B(EL)$. Модельно-независимый прямой анализ данных для ^{58}Ni $^{10/}$ (см. рис. 3, штрих-пунктирная кривая) дает плотность перехода $\rho_2(x)$, значительно отличающуюся от предсказаний модели $^{26/}$, что, возможно, указывает на выделенную роль внешних нуклонов при возбуждении ядра.

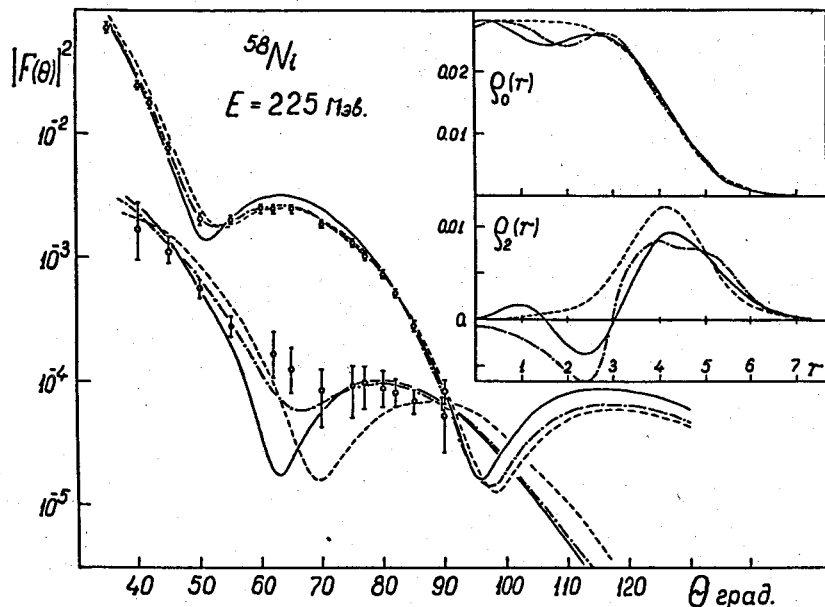


Рис. 3. Анализ упругого и неупругого рассеяния электронов с возбуждением первого 2^+ уровня $^{58}\text{Ni}/10/$. Пунктирные кривые - расчёты на базе гидродинамической модели с ферми-плотностью, сплошные - с помощью плотностей заряда и перехода, полученных в микромодеи $^{26/}$ Штрих-пунктирные кривые - один из вариантов плотности заряда ρ_0 и перехода ρ_2 , восстановленных из прямого независимого анализа экспериментальных данных.

В заключении приведена сводка полученных результатов. Приложения А и В содержат выводы выражений для функций $G_{LM}(x, \epsilon)$, $q_{el}(x, \epsilon)$ и $\Phi(x, \epsilon)$, учитывающих искажение электронной волны в кулоновском поле ядра.

Основные результаты диссертации содержатся в работах $^{13-19/}$ и докладывались на XIX ежегодном совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра.

Л и т е р а т у р а

1. J.B. Bellicard, P. Bounin, R.F. Frosch, R. Hofstadter et al., Phys.Rev.Lett., 19, 527 (1967).
2. R.F. Frosch, R. Hofstadter, J.S. McCarthy et al., Phys.Rev., 174, 1380 (1968).
3. M. Croissiaux, R. Hofstadter, A.E. Walker et al., Phys. Rev., 137, B865 (1965).
4. В.М. Хвастунов, Н.Г. Афанасьев, В.Д. Афанасьев и др. ЯФ, 10, 217, 1969.
5. Н.Г. Афанасьев, Н.Г. Шевченко, Г.А. Савицкий и др. ЯФ, 8, 1112, 1969.
6. Н.Г. Шевченко, Н.Г. Афанасьев, Г.А. Савицкий и др., ЯФ, 5, 948, 1967.
7. H. Crannell, R. Helm, H. Kendall et al. Phys.Rev., 123, 923 (1961).
8. J.B. Bellicard, P. Barreau, D. Blum. Nucl.Phys., 60, 319 (1964).
9. P. Barreau, J.B. Bellicard. Phys.Lett., 25B, 470 (1967).
10. В.Д. Афанасьев, Н.Г. Афанасьев, И.С. Гулькаров и др. ЯФ, 10, 33, 1969.
11. R. Hofstadter. Rev.Mod.Phys., 28, 214 (1956).
12. D.R. Yennie, D.G. Ravenhall, R.N. Wilson. Phys.Rev., 95, 500 (1954).
13. Ю.С. Поль, В.К. Лукьянов, И.Ж. Петков. Acta. Phys.Pol. 34, 49 (1968). Препринт ОИЯИ, Р4-3568, Дубна, 1967.

14. И.Ж. Петков, В.К. Лукьянов, Ю.С. Поль, ЯФ, 4, 57, 1966.
Препринт ОИЯИ, Р-2370, Дубна, 1965.
15. И.Ж. Петков, В.К. Лукьянов, Ю.С. Поль, ЯФ, 4, 556, 1966.
16. В.К. Лукьянов, И.Ж. Петков, Ю.С. Поль. ЯФ, 9, 349, 1969.
Препринт ОИЯИ, Р4-3941, Дубна, 1968.
Программа и тезисы докладов 19 ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра в Ереване, стр. 125., Ленинград, 1969.
17. Ю.С. Поль, ЯФ, 10, 771, 1969. Препринт ОИЯИ, Р4-4353, Дубна, 1969. Программа и тезисы докладов 19 ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра в Ереване, стр. 97, Ленинград, 1969.
18. Ю.С. Поль, Программа и тезисы 19 ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, в Ереване, стр. 126, Ленинград, 1969 г.
19. В.К. Лукьянов, Ю.С. Поль. ЯФ, 11, 556, 1970. Препринт ОИЯИ, Р4-4570, Дубна, 1969. Программа и тезисы докладов 19 ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра в Ереване, стр. 125, Ленинград, 1969.
20. L.I. Schiff. Phys.Rev., 103, 443 (1956).
21. R.J. Glauber. Lectures in Theoret. Phys., vol.I, 315, NY, 1959.
22. A. Baker. Phys.Rev., 134, B240 (1964).
23. D.R. Yennie, F.L. Boos, D.G. Ravenhall. Phys.Rev., 137, B882 (1965).
24. T. De Forest. Jr., J.D. Walecka. Advances in Phys., 15, 1, (1966).
25. C. Toepffer, W. Greiner. Phys.Rev., 186, 1044 (1969).
26. J.T.Reynolds, D.S. Onley. Nucl.Phys., 66, 1 (1965).

Рукопись поступила в издательский отдел

13 мая 1970 года.