

Однако все предложенные варианты ядерной потенции не давали правильных значений магич. чисел. Они были получены лишь в 40—50-х гг. М. Гёпперт-Майер (M. Goepfert-Mayer) и Й. Х. Йенсенем (J. H. Jensen), включившими в это поле спин-орбитальное взаимодействие нуклонов.

Для объяснения прямых ядерных реакций, идущих с временами 10^{-23} — 10^{-22} с, была сформулирована *оптическая модель ядра*, описывающая рассеяние частиц на ядрах. При описании ядерных реакций, идущих через составное ядро, использовались теория *резонансных ядерных процессов* и статистическая теория ядра. Понимание роли ядерных реакций в *эволюции звёзд* привело к формированию *ядерной астрофизики*. В качестве осн. источника энергии звёзд рассматриваются реакции синтеза лёгких элементов, а образование тяжёлых элементов приводят разнообразные и длинные цепочки ядерных превращений (см. *Нуклеосинтез*).

Бурное развитие испытала Я. ф. в кон. 40-х и в 50-х гг. в связи с созданием и усовершенствованием ядерного оружия и возникновением *ядерной энергетики*. Появились новые типы *ускорителей заряженных частиц*, позволяющие получать потоки частиц всё более высоких энергий и имеющие хорошее энергетич. и угл. разрешение. Началось строительство *исследовательских реакторов* — источников мощных пучков нейтронов.

Интенсивное накопление эксперим. данных о свойствах ядер стимулировало их теоретич. осмысление. Изомеричная модель качественно объясняла наличие изомерии, магн. и квадрупольные моменты ядер и др. Однако обнаружился ряд низколежащих ядерных состояний, γ -переходы между к-рыми имеют интенсивности, во много раз превышающие предсказания теории. Для объяснения этой аномалии было введено представление о коллективных переходах и *коллективных возбуждениях ядер*, приведшее к созданию О. Бором (A. Bohr) и Б. Моттelsonом (B. R. Mottelson) в 1952 коллективной модели ядра. Они же (и независимо Дж. Рейнвотер, J. Rainwater) предположили существование несферич. *деформированных ядер*, что позволило успешно описать спектры и вероятности переходов в ядрах редкоземельных элементов ($150 \leq A \leq 180$) и актиноидов ($A \geq 220$). Успешной оказалась модифицированная модель Гёпперт-Майера — Йенсена для деформир. ядер (модель Нильссона).

Успех разл. феноменологич. моделей ядра делал важным их теоретич. обоснование. Так, было неясно происхождение оболочек в системе с сильным короткодействием, а также как сочетаются столь противоречивые по физ. картине капельная и оболочечная модели ядра. Коллективная модель Бора — Моттelsonа опиралась на капельную модель, однако вводимые в ней параметры — жёсткость ядра и т. н. массовый коэф., — извлекаемые из опыта, сильно отличались от предсказаний капельной модели. Лишь в кон. 50-х — нач. 60-х гг. развитие *квантовой теории многих частиц* привело к пониманию этих вопросов и к созданию совр. теории ядра. Большую роль в этом сыграли теория *ядерной материи* К. Бракнера (K. Brueckner) и теория конечных ферми-систем (ТКФС) А. Б. Мигдала. Теория Бракнера была одним из первых примеров практич. применения диаграммной техники (см. *Фейнмана диаграммы*) к реальным ядрам и позволила рассчитать объёмный член в энергии связи ядра и глубину ср. ядерного потенц. поля, исходя из известного потенциала взаимодействия свободных нуклонов. ТКФС близка к теории ферми-жидкости (см. *Квантовая жидкость*), основанной на концепции *квазичастиц* и оперирующей эфф. взаимодействием между ними (последнее задаётся с помощью неск. параметров, извлекаемых из опыта). Самосогласованная ТКФС и близкий к ней *Хартри—Фока метод* с эфф. силами позволяют путём введения неск. констант, универсальных для всех ядер (кроме самых лёгких), рассчитать большое число ядерных явлений с точностью, адекватной точности экспериментов.

Тесные связи между Я. ф. и физикой *твёрдого тела* возникли неоднократно. Так, созданная в 1958 Дж. Барди-

ном (J. Bardeen), Л. Купером (L. Cooper) и Дж. Шриффером (J. Schrieffer) теория *сверхпроводимости* в металлах подтолкнула Бора и Моттelsonа, а также (независимо) Дж. Валатина (J. Valatin) выдвинуть гипотезу о *сверхтекучести атомных ядер*. Созданный в это же время Н. Н. Боголюбовым для описания сверхпроводимости метод u — v -преобразования послужил основой *сверхтекучей модели ядра* (В. Г. Соловьёв, С. Т. Беляев). Важную роль в понимании значения сверхтекучести и взаимодействия между квазичастицами в коллективных свойствах ядер сыграла микроскопич. теория квадрупольных ядерных возбуждений (С. Т. Беляев, 1959). Коллективная модель интерпретировала эти возбуждения как поверхностные колебания, в то время как микроскопич. теория приводила к объёмным колебаниям — аналогу нулевого звука в ферми-жидкости. Это противоречие было устранено в 1972 В. А. Ходелем, показавшим, что согласование между ср. полем ядра и эфф. взаимодействием квазичастиц приводит к тому, что решения микроскопич. ур-ний для коллективных возбуждений имеют вид «квантовых капиллярных волн» — квантовых аналогов классич. колебаний жидкой капли. Их волновая ф-ция сосредоточена в осн. на поверхности ядра, но имеет и большие объёмные компоненты. Эта теория позволяет также правильно рассчитать параметры феноменологич. коллективной модели.

Развитие диаграммной техники сыграло большую роль и в теории прямых ядерных реакций; оно привело к созданию т. н. диаграммного дисперсионного метода (И. С. Шапиро). В статистич. теории ядра и в теории резонансных реакций большую роль сыграл подход, развитый Г. Фешбахом (H. Feshbach) и названный единой теорией ядерных реакций.

Существенно отличается по физ. идеям и методам физика легчайших ядер — малонуклонных систем ($A < 4$). В этих случаях пытаются точно решить уравнение Шрёдингера для A нуклонов, взаимодействующих посредством известного NN-потенциала (см. *Ядерные силы*). Теория одного из простейших ядер — *дейтрона* — была построена ещё в 30-х гг. В 60-х гг. были развиты методы точного решения проблемы 3 тел: ур-ния Фаддеева, метод гиперсферич. ф-ций и др., позволившие построить нерелятивистскую теорию *тритона* ^3H и ядра ^3He . Незначительные (порядка 5%) отличия расчётной энергии связи этих ядер от экспериментальной позволили оценить величину 3-частичных ядерных сил. Их вклад в энергию связи более тяжёлых (более плотных) ядер должен быть больше и, по оценкам, может достигать 10—15%. Применение аналогичных методов для более тяжёлых ядер (обобщение ур-ния Фаддеева для систем с $A > 3$ наз. ур-нием Фаддеева — Якубовского) практически осуществлено лишь для α -частицы (ядра ^4He).

Новый этап в теории ядра связан с развитием в 70—80-х гг. *квантовой хромодинамики* (КХД) как теории сильных взаимодействий. Согласно этой теории, нуклоны и мезоны не являются истинно элементарными частицами, а состоят из более фундаментальных частиц: *кварков* (фермионов) и *глюонов* (бозонов), взаимодействующих между собой. Последовательная теория КХД нуклона пока не построена. Поэтому рано говорить о теории ядра, основанной на КХД. Однако мн. представления КХД и *кварковые модели* адронов позволили описать ядерные реакции под воздействием частиц высоких энергий, сопровождающиеся большой передачей энергии и импульса. При этом ожидалось, что ядро должно вести себя как система свободных нуклонов и что трудно найти специфически ядерные эффекты КХД. Но такой эффект был обнаружен в 1982 Европ. мюонной коллаборацией (эффект EMC). Он заключается в значительном (до 15%) отличии сечения *глубоко неупругого процесса* рассеяния мюонов с энергиями порядка 100 ГэВ на ядре Fe (в расчёте на нуклон) от сечения на свободном нуклоне. До сих пор нет однозначной интерпретации этого явления, однако во всех существующих объяснениях решающую роль играют чисто ядерные эффекты. Эффект EMC оказался важным тестом для КХД моделей нуклона: оказалось, что нек-рые модели не могут описать