НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ
БОГОЛЮБОВ

1969 г. Август *Том 98, вып. 4*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

PERSONALIA

92:530

НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ БОГОЛЮБОВ
(К шестидесятилетию со дня рождения)

21 августа 1969 г. исполняется шестьдесят лет выдающемуся советскому физику-теоретику академику Николаю Николаевичу Боголюбову.

К тому времени, как Николай Николаевич Боголюбов начал заниматься теоретической физикой, он был уже широко известным математиком, создавшим целые новые направления и получившим выдающиеся результаты в самых разных областях математики. Его огромный математический опыт — уникальный для физика-теоретика — отражается и в его физических исследованиях, составляет характерную индивидуальную особенность его научного творчества в физике.

Уже ранние исследования Н. Н. Боголюбова, в которых он разрабатывал прямые методы решения экстремальных задач, принесли ему широкую известность. В теории почти-периодических функций он показал, что основные теоремы этой теории следуют из одной общей теоремы о поведении произвольной ограниченной функции, и тем самым дал фактически новое построение этой теории.

Ряд интересных работ Н. Н. Боголюбова связан с применением разностного метода к вариационному исчислению. Эти результаты Н. Н. Боголюбов применил к разработке аппроксимационных методов в теории краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных.

В 1932 г. Н. Н. Боголюбов, совместно со своим учителем академиком Н. М. Крыловым, начал разрабатывать совершенно новое направление математической физики — теорию нелинейных колебаний (нелинейную механику). Здесь усилия Н. Н. Боголюбова были направлены в первую очередь на создание методов асимптотического интегрирования нелинейных уравнений, описывающих колебательные процессы. Асимптотическое интегрирование дифференциальных уравнений с малым параметром исследовалось, как известно, в небесной механике, однако там рассматривались только консервативные системы. Перенос разработанных там методов, и, в частности, теории возмущений, на исследования неконсервативных колебательных систем был сопряжен с большими принципиальными трудностями. Н. Н. Боголюбову удалось построить методы теории возмущений для общего случая неконсервативных систем и создать ряд новых методов нелинейной механики.

В последующих работах Н. Н. Боголюбов дал строгое обоснование асимптотических методов нелинейной механики. Опираясь на теорию Пуанкаре — Ляпунова и теорию Пуанкаре — Данжуа о траекториях на торе, он исследовал характер точного стационарного решения вблизи приближенного решения при малых значениях параметра нелинейности и доказал ряд теорем о существовании и об устойчивости квазипериодических решений.

Кроме того, Н. Н. Боголюбову принадлежит ряд работ в нелинейной механике, касающихся абстрактной теории динамических систем. В этих работах он установил существование инвариантной меры, ввел важное понятие эргодического множества и доказал ряд теорем относительно разбиения инвариантной меры на меры, локализованные в эргодических множествах.

Разработанные Н. Н. Боголюбовым в нелинейной механике регулярные методы теории возмущений оказались очень эффективными и в статистической механике. В монографии «О некоторых статистических методах в математической физике» им была рассмотрена задача о влиянии случайной силы на гармонический осциллятор и об установлении статистического равновесия в системе, связанной с термостатом (совокупностью большого числа гармонических осцилляторов). Н. Н. Боголюбов показал, что в зависимости от выбора масштаба времени один и тот же случайный процесс можно рассматривать как динамический, как марковский или как некоторый немарковский процесс. Тем самым впервые им была введена идея об иерархии времен

релаксации в статистической механике, которая определила все дальнейшее развитие статистической теории необратимых процессов.

В исследованиях по статистической механике классических систем, изложенных в монографии «Проблемы динамической теории в статистической физике» (1946 г.) Н. Н. Боголюбов разработал метод цепочек для функций распределения комплексов частиц. Этот наиболее эффективный метод в равновесной и неравновесной статистической механике в мировой литературе получил название метода ББГКИ (Боголюбова — Борна — Грина — Кирквуда — Ивона).

Н. Н. Боголюбов предложил регулярные методы решения цепочек уравнений для функций распределения для различных систем, как в равновесном, так и в неравновесном случаях. Он отметил, что по прошествии некоторого малого промежутка времени (порядка времени столкновения) происходит «синхронизация» функций распределения — все высшие функции распределения полностью определяются одночастичной функцией, и для этой стадии могут быть построены кинетические уравнения. Вместо больцмановской гипотезы молекулярного хаоса при построении кинетических уравнений Н. Н. Боголюбов использует граничные условия ослабления корреляции. С единой точки зрения ему удалось получить различные типы кинетических уравнений для систем с короткодействующими или далекими, но слабыми силами. Если метод Больцмана основан на полном пренебрежении динамической корреляцией между сталкивающимися молекулами и пригоден лишь для разреженных газов, то метод Н. Н. Боголюбова дает возможность учитывать в кинетическом уравнении высшие члены разложения по степеням плотности. Не менее важные результаты были получены Н. Н. Боголюбовым и в квантовой статистике. Метод построения кинетических уравнений был обобщен им для неидеальных квантовых газов.

Ряд работ Н. Н. Боголюбова посвящен исследованию спектра элементарных возбуждений квантовых систем. Ему принадлежит создание последовательных методов в микроскопической теории сверхтекучести и сверхпроводимости.

Н. Н. Боголюбову удалось рассчитать спектр элементарных возбуждений слабонеидеального вырожденного бозе-газа и показать, что такой газ должен обладать свойством сверхтекучести. Тем самым была создана теоретическая модель для сверхтекучести гелия-II, спектр которого оказался той же формы, как было предсказано Н. Н. Боголюбовым. Элементарные возбуждения в неидеальном бозе-газе, получившие в мировой литературе название «боголюбонов», представляют собой суперпозицию операторов порождения и уничтожения частиц с противоположно направленными импульсами.

Подобные же элементарные возбуждения в неидеальном ферми-газе, связывающие операторы рождения и уничтожения частиц с противоположно направленными импульсами и спинами, дают теоретическое объяснение явления сверхпроводимости. Физическая причина появления подобных связанных пар в металле — взаимодействие электронов с колебаниями решетки. Работами Н. Н. Боголюбова показано, что сверхпроводимость можно рассматривать как сверхтекучесть электронного газа в металле. Для изучения сверхпроводящих и сверхтекучих систем Н. Н. Боголюбов разработал так называемый обобщенный метод Хартри — Фока (1958—1959 гг.), в котором учитывается существование коррелированных пар частиц. Для исследования спектров элементарных возбуждений ферромагнитных и антиферромагнитных кристаллов Н. Н. Боголюбов создал метод приближенного вторичного квантования, который исходит из квазиклассического описания основного состояния системы по методу Фока. Элементарные возбуждения соответствуют малым отклонениям от этого состояния.

Большое влияние на развитие статистической физики оказали идеи Н. Н. Боголюбова о квазисредних в задачах статистической механики. Во многих статистических системах основное состояние оказывается неустойчивым относительно малых возмущений, например в изотропном ферромагнетике — относительно включения малого магнитного поля, в сверхпроводнике — относительно бесконечно малого источника пар и т. д. Н. Н. Боголюбов показал, что теоретическое исследование подобных систем возможно с помощью метода квазисредних, позволяющего «снять» квазивырождение основного состояния. После этого в системе можно применять регулярные методы теории возмущений. С методом квазисредних связана теорема Н. Н. Боголюбова о $1/q^2$, согласно которой для сверхтекучих бозе- или ферми-систем плотность непрерывного распределения частиц по импульсам q при $q \to \infty$ стремится к бесконечности медленнее, чем $1/q^2$.

Идеи Н. Н. Боголюбова о квазисредних, имеющие глубокую связь с теоремой Голдстоуна о нарушенной симметрии,— основные руководящие идеи в современной теории фазовых переходов. Например, неравенство Н. Н. Боголюбова приводит к поразительно простым, но строгим доказательствам отсутствия ферромагнетизма или антиферромагнетизма в одно- и двумерных изотропных моделях Гейзенберга и отсутствия сверхтекучести и сверхпроводимости в одно- и двумерном случаях.

Последовательная разработка аппарата вторичного квантования в статистической физике естественно привлекла с начала 50-х годов внимание Н. Н. Боголюбова к задачам квантовой теории поля. В действительности в своих работах он всегда

отмечает глубокое физическое и методическое родство нерелятивистской задачи многих тел и квантовой теории поля. Занимаясь обеими областями, он с успехом использует это родство для взаимного плодотворного переноса идей и методов между теорией поля и статистической физикой. Как известно, одна из основных трудностей квантовой теории поля состоит в том, что в разложениях теории возмущений по константе связи (в случае квантовой электродинамики — по величине $e^2 = 1/137$) коэффициенты разложения выражаются через интегралы, расходящиеся в области больших значений виртуальных импульсов. Предложенный для устранения этих так называемых ультрафиолетовых расходимостей вычитательный формализм, основанный на идее перенормировки массы и заряда, имел в значительной мере формально рецептурный характер. Для его обоснования потребовалось критически пересмотреть все основные положения квантовой теории поля и тщательно проанализировать физическую и математическую природу возникающих при этом трудностей.

В своих исследованиях начала 50-х годов Н. Н. Боголюбов проделал эту работу и пришел к новой законченной формулировке квантовой теории поля. Прежде всего он отказался от обычного гамильтонова формализма и принял за основу теории матрицу рассеяния S, введенную Гейзенбергом. Чтобы в такой постановке аккуратно ввести гипотезу адиабатического включения взаимодействия, необходимую для определения исходного приближения — теории свободного поля, он стал рассматривать S-матрицу как функционал на функциях включения взаимодействия $g(x)$ со значениями $0 \leqslant g(x) \leqslant 1$, причем $S[g] \to 1$ при $g(x) \to 0$ (свободное поле), $[g] \to S$ при $g(x) \to 1$ (физическая S-матрица). Для определения S-матрицы во всех порядках теории возмущений Н. Н. Боголюбов воспользовался основными физическими требованиями, которым она должна удовлетворять, — требованиями релятивистской инвариантности, унитарности и причинности.

Разработка новой формы последнего условия сыграла в работах Н. Н. Боголюбова по квантовой теории поля особую роль. Дело в том, что в теории S-матрицы локальные операторы изначально вообще отсутствуют, поэтому формулировка пространственно-временны́х отношений, и, в частности, требования причинности, не является тривиальной. Он ввел для этой цели локальные гейзенберговские операторы как вариационные производные S-матрицы по функции включения $g(x)$: $H(x) = i\dfrac{\delta S}{\delta g(x)} S^+$, и сформулировал условие причинности — ныне широко известное как условие причинности Боголюбова — в форме $\dfrac{\delta}{\delta g(x)}\left\{\dfrac{\delta S}{\delta g(y)} S^+\right\} = 0$ при $x \lessgtr y$. Обычное требование локальной коммутативности гейзенберговских операторов $[H(x), H(y)] = 0$ при $x \sim y$ получается из этого условия как частное следствие.

Доказанная Н. Н. Боголюбовым теорема о том, что матрица рассеяния во всех порядках теории возмущений последовательно определяется из указанных выше требований с точностью до квазилокальных операторов, указывает источник ультрафиолетовых расходимостей — сингулярную природу коэффициентных функций S-матрицы и дает последовательный рецепт их устранения, получивший название R-операции. В этой связи следует специально отметить, что введение функции $g(x)$ в качестве функционального аргумента матрицы рассеяния — а следовательно, и всех гейзенберговских операторов — естественно привело Н. Н. Боголюбова к установлению той общепринятой теперь точки зрения, что физические величины квантовой теории поля с математической точки зрения следует рассматривать не как обычные, а как (операторнозначные) обобщенные функции, интегрируемые в некоторых классах «основных» функций $g(x)$. (При этом используются данные С. Л. Соболевым определения классов основных функций, что позволяет достигать максимальной «экономии» в выборе степеней произвольных полиномов.)

Из числа других результатов Н. Н. Боголюбова в теории возмущений упомянем метод ренормализационной группы. Суть этого метода состоит в наблюдении, что мультипликативные перенормировки в квантовой теории поля образуют группу. Это позволяет улучшить формулы теории возмущений в ультрафиолетовой области, где эффективным параметром разложения является не e^2, а $e^2 \ln(k^2/m^2)$ путем восстановления инвариантной по отношению к этой группе формы.

В своих работах тех лет Н. Н. Боголюбов один из первых начал развивать направление, которое позже стали называть аксиоматическим методом построения квантовой теории поля. Преимущества этого метода полностью проявились в цикле его работ, связанном с методом дисперсионных соотношений для амплитуд, описывающих различные процессы рассеяния и рождения частиц.

Значение этого метода определяется тем, что он не требует явных предположений о форме взаимодействия и не опирается на теорию возмущений. Это особенно важно для сильных взаимодействий, где теория возмущений совершенно не применима.

Основой для вывода дисперсионных соотношений послужила та же система физических требований, что и в теории возмущений. Н. Н. Боголюбов лишь отчасти модифицировал ее, добавив такие требования, как, например, условие стабильности

вакуума и одночастичных состояний, которые не были явно включены в систему, используемую в теории возмущений, и переформулировал условие причинности. Поскольку в отсутствие разложения по степеням заряда введение специальной функции $g(x)$ не сулило уже никаких преимуществ, он ввел в качестве функционального аргумента S-матрицы классические добавки к асимптотическим полям, выполняя тем самым такое расширение матрицы рассеяния за поверхность энергии, которое позволило постулировать редукционные формулы в физически наиболее прозрачной форме. Наконец, Н. Н. Боголюбов первым указал на связь между классом интегрируемости элементов матрицы рассеяния и причинными свойствами теории, включив в число условий, выделяющих локальные теории, требование интегрируемости в каком-либо из классов $C(q, r)$ с конечными показателями. Исследования последних лет показали, что именно этот критерий может играть ведущую роль в классификации степени нарушений локальности взаимодействия элементарных частиц.

Главная трудность собственно доказательства дисперсионных соотношений состояла в том, что приходилось рассматривать физические величины в так называемой нефизической области, где импульсы частиц становятся комплексными. Н. Н. Боголюбову удалось обойти эту трудность, воспользовавшись приемом двойного аналитического продолжения. Сначала дисперсионные соотношения выводились и доказывались для мнимых значений параметра — массы частицы, и при этом указанная трудность не возникала, а затем полученное окончательное выражение аналитически продолжалось до физического значения параметра.

Построенное Н. Н. Боголюбовым доказательство дисперсионных соотношений потребовало развития специального математического аппарата аналитического продолжения обобщенных функций многих переменных. Доказанные им в этой области теоремы нашли широкое применение во всем дальнейшем развитии теории дисперсионных соотношений и в ряде других разделов квантовой теории поля.

Трудно переоценить влияние этой работы на весь математический стиль теоретической физики последнего десятилетия. Физикам пришлось изучить новые математические методы, пришлось отдать себе отчет в том, что они работают с неограниченными операторами, понять, что физические требования могут приводить к важным свойствам голоморфности некоторых привычных физических объектов и что из этого в свою очередь можно извлечь вполне конкретную физическую информацию. В результате в теории квантованных полей (и в статистической механике) выработался новый стандарт необходимых математических средств и повышенных требований к доказательной силе построений. В работах Н. Н. Боголюбова и его учеников были намечены самые разные и широкие применения метода дисперсионных соотношений, такие, как общее построение аксиоматического подхода, асимптотические оценки при высоких энергиях, описание низкоэнергетических областей с привлечением условия унитарности и т. д.

Перечисленными здесь направлениями далеко не исчерпывается все поле научной деятельности Н. Н. Боголюбова. Ему принадлежит ряд идей и исследований в других областях релятивистской динамики частиц. Так, он указал на важное понятие «квазисредних», которое играет чрезвычайно существенную роль не только в статистической механике, но и в квантовой теории поля во всех случаях, где имеется вырождение. Н. Н. Боголюбов уделяет много внимания также моделям симметрии элементарных частиц. В своих лекциях в Московском университете в 1965—1966 гг. он дал изящное и простое изложение идей $SU(3)$- и $SU(6)$-симметрии. Он предложил также модель целочисленно-заряженных кварков (модель трех триплетов) и дал простое объяснение увеличения магнитного момента частицы в кварковой модели.

Н. Н. Боголюбов является создателем трех больших научных школ — в нелинейной механике и математической физике, в статистической механике и в квантовой теории поля. Он воспитал целое поколение советских математиков и физиков-теоретиков. Многие ученые с уважением и гордостью называют его своим учителем. Под его идейным руководством развивается ряд научных коллективов в Киеве, Москве, Дубне, Новосибирске, Кишиневе, Серпухове и др.

Много внимания уделяет Н. Н. Боголюбов организации науки. В настоящее время он является академиком-секретарем Отделения математики АН СССР и директором Объединенного института ядерных исследований в Дубне.

Николай Николаевич Боголюбов — депутат Верховного Совета СССР VII созыва, участник Пагуошского движения ученых за мир.

Родина высоко оценила научную и общественную деятельность Н. Н. Боголюбова: ему присвоено звание Героя Социалистического Труда, он награжден многими орденами и медалями, в том числе четырьмя орденами Ленина. Его труды отмечены рядом премий, в том числе Ленинской премией и двумя Государственными премиями. Многие иностранные ученые общества, университеты и академии избрали Н. Н. Боголюбова своим членом в знак признания его личного вклада в развитие науки, его высокого научного и общественного авторитета.

Д. Н. Зубарев, Б. В. Медведев, Ю. А. Митропольский, М. К. Поливанов