

*Новиков Н.Б.
Институт психологии РАН
Россия, г. Москва*

*Novikov N.B.
Institute of Psychology RAS
Russia, Moscow*

СИЛА АНАЛОГИЙ. ТВОРЧЕСТВО ЭРВИНА ШРЕДИНГЕРА

***Аннотация:** В летнем семестре 1921 г. молодой профессор Эрвин Шредингер приступил к чтению лекций в Физическом институте Бреслау. Однако через несколько недель он получил приглашение Цюрихского университета возглавить кафедру теоретической физики, которую до него занимали Альберт Эйнштейн и Макс фон Лауэ. Став действительным профессором одного из престижных университетов, Э.Шредингер получил возможность вести интенсивную научную работу, позволившую ему создать волновую механику. По словам Д.Хоффмана, волновая механика, разработанная Э.Шредингером, - это «подвиг, навсегда вошедший в анналы науки» [1]. Рассмотрим генезис научных идей Э.Шредингера (в том числе далеких от квантовой механики) и попытаемся описать роль аналогии в творческом мышлении выдающегося австрийского физика-теоретика.*

***Ключевые слова:** новые идеи, физические теории, обнаружение сходства, проведение аналогии.*

***Abstract:** In the summer semester of 1921, the young professor Erwin Schrödinger began lecturing at the Breslau Physical Institute. However, a few weeks later he received an invitation from the University of Zurich to head the Department of Theoretical Physics, which had previously been held by Albert Einstein and Max*

von Laue. Becoming a real professor at one of the prestigious universities, E. Schrödinger got the opportunity to conduct intensive scientific work, which allowed him to create wave mechanics. According to D. Hoffman, wave mechanics developed by E. Schrödinger is “a feat that has entered the annals of science forever” [1]. Let’s consider the genesis of E. Schrödinger’s scientific ideas (including those far from quantum mechanics) and try to describe the role of analogy in the creative thinking of the outstanding Austrian theoretical physicist.

***Key words:** new ideas, physical theories, discovery of similarities, drawing analogies.*

1. Аналогия первая: использование методов Штурма – Лиувилля в квантовой теории

В 1905 г. А.Эйнштейн выдвинул гипотезу о квантовой природе света (о существовании фотонов). Но поскольку явления интерференции и дифракции четко указывали на то, что свет – это волны, А.Эйнштейн пришел к выводу о необходимости синтезировать корпускулярные и волновые представления о свете. После 1905 г. создатель теории относительности неоднократно высказывался о том, что нужно достигнуть «примирения» корпускулярной концепции света, идущей от И.Ньютона, и ее соперницы - волновой теории, сформулированной Х.Гюйгенсом. Другими словами, А.Эйнштейн был уверен в двойственной природе света, в том, что фундаментальным аспектом этой природы является корпускулярно-волновой дуализм.

В 1923-1924 гг. французский физик Луи де Бройль обобщил эту точку зрения, предположив, что принцип корпускулярно-волнового дуализма должен относиться не только к излучению, но и к веществу. В нескольких статьях, опубликованных в 1923 г., Луи де Бройль изложил свою гипотезу о «волнах материи» и о том, что доказательством его теоретических построений могло бы послужить экспериментальное обнаружение дифракции электронов.

Кроме того, французский ученый предложил новую интерпретацию квантовых правил Бора – Зоммерфельда, позволяющих определить характер распределения стационарных атомных орбит электрона, на которых он не излучает (стационарных состояний атома). Год спустя эти статьи легли в основу докторской диссертации де Бройля, которую он защитил в Париже. Присутствовавший на защите в качестве оппонента П.Ланжевен был удивлен новизной идей де Бройля. Чтобы определить достоинства диссертационной работы, П.Ланжевен передал один из ее экземпляров А.Эйнштейну.

Результаты де Бройля произвели на А.Эйнштейна большое впечатление (скорее всего, он нашел в них реализацию своей идеи о необходимости синтеза конкурирующих представлений о свете). Зная о том, что у Луи де Бройля есть старший брат Морис де Бройль (1875-1960), активно исследовавший физику рентгеновского излучения, в декабре 1924 г. А.Эйнштейн написал Х.Лоренцу письмо, в котором отметил: «Младший брат де Бройля предпринял очень интересную попытку интерпретации квантовых правил Бора – Зоммерфельда (в диссертации, защищенной в Париже в 1924 г.). Мне кажется, что это первый робкий луч света, пролитый на самую темную из физических загадок. Я тоже обнаружил кое-что, свидетельствующее в пользу его построений» [2, с.417-418].

Вскоре нидерландский физик и химик, будущий лауреат Нобелевской премии по химии, Петер Дебай попросил Э.Шредингера проанализировать идеи де Бройля и рассказать о них на расширенном семинаре (коллоквиуме). 7 декабря 1925 г. Э.Шредингер выполнил просьбу П.Дебая. Все, кто посетил указанный коллоквиум, ознакомились с гипотезой о «волнах материи» и необходимостью поиска эффекта дифракции электронов. Однако П.Дебай не был удовлетворен. Когда Э.Шредингер закончил свой доклад на расширенном семинаре, П.Дебай напомнил ему: чтобы корректно говорить о волне, когда речь идет о вибрации гитарной струны или электромагнитном излучении,

нужно иметь волновое уравнение. П.Дебай поставил перед ним задачу найти это волновое уравнение.

К.Барли и его соавторы в статье «Открытие релятивистского уравнения Шредингера» [3] пишут: «Согласно Феликсу Блоху [1], в конце доклада Шредингера Дебай невзначай заметил, что способ рассуждения (де Бройля) выглядит по-детски и что кто-нибудь должен подумать об уравнении для этих (де бройлевых) «волн материи». Как студент Зоммерфельда в прошлом, Дебай знал, что для того чтобы описывать волнами состояния физических систем, необходимо волновое уравнение» [3, с.100-101].

Разговор, произошедший между П.Дебаем и Э.Шредингером после семинара, можно считать исходным пунктом (точкой отсчета) исследований, связанных с поиском волнового уравнения квантовой механики.

Основная аналогия, использованная Э.Шредингером (1926) при выводе указанного уравнения, заключалась в том, что он взглянул на атом как на колебательную систему. Это позволило ему отождествить устойчивые (стационарные) энергетические состояния атома с возможными собственными колебаниями системы. Поскольку характер этих колебаний изучает теория собственных значений (теория Штурма - Лиувилля), Э.Шредингер перенес эту теорию в область решения стоящей перед ним задачи – задачи вывода волнового уравнения квантовой механики. Отсюда название четырех его статей, посвященных волновой механике, - «Квантование как задача о собственных значениях». Существенную роль в освоении теории Штурма – Лиувилля сыграло то обстоятельство, что в свое время Э.Шредингер прослушал лекции Фридриха Хазенерля (1874-1915) и постоянно общался с Германом Вейлем (1885-1955), который внес значительный вклад в разработку методов решения задач на собственные значения.

Э.Шредингер также испытал влияние работы Г.Вейля «Электрон и гравитация» (1918), в которой предпринималась попытка объединить теорию тяготения с электродинамикой. Но эта работа Г.Вейля не имела отношения к

методам Штурма – Лиувилля; она подсказала Э.Шредингеру нечто совсем другое - способ интерпретации стационарных состояний атома Н.Бора.

О том, как Э.Шредингер обнаружил аналогию между теорией атома и математической задачей на собственные значения, пишут многие авторы. Д.Хоффман в книге [1] отмечает: «К созданию волновой механики Эрвин Шредингер пришел, рассматривая атом как колебательную систему и отождествляя возможные собственные колебания системы с устойчивыми энергетическими состояниями в атоме. Близкое знакомство с теорией колебаний помогло Шредингеру сформулировать основную физическую идею в рамках задачи о собственных значениях дифференциального уравнения. <...> Очень кстати здесь пришлось то, что еще со времени его обучения у Газенорля он был хорошо знаком с подобными задачами, а его друг и коллега по Цюрихскому политехникуму Герман Вейль стал для него неисчерпаемым кладом математической эрудиции. Шредингер всегда подчеркивал, что именно Вейлю принадлежит значительная доля заслуг в создании математического аппарата волновой механики» [1, с.40-41].

Об этом же пишет Л.С.Полак в очерке «Эрвин Шредингер и возникновение квантовой механики» [4]: «Исключительно важное значение для работы Шредингера в области волновой механики имел постоянный контакт с замечательным математиком и многогранным ученым Г.Вейлем, который в то время работал в Цюрихе. Недаром почти во всех основных статьях Шредингера этого времени (1926-1927 гг.) мы находим выражения его благодарности Вейлю за непосредственную помощь в разработке методов решения, указания на состояние соответствующих математических проблем и рекомендацию литературы. В этом плане помощь Вейля была, пожалуй, одним из существеннейших факторов, способствовавших столь необыкновенной вспышке творческой активности Шредингера» [4, с.371].

Рассматривая тот факт, что Э.Шредингер перенес в теорию атома математические методы Штурма – Лиувилля, Л.С.Полак подчеркивает:

«...Уравнение Шредингера есть уравнение типа Штурма - Лиувилля» [4, с.377].

Стимулирующее влияние Г.Вейля отмечает также В.П.Визгин в комментариях [5] к первой статье Э.Шредингера, посвященной волновой механике: «Вообще уместно отметить значительное влияние Г.Вейля на разработку Шредингером волновой механики, которое неоднократно подчеркивал и сам Шредингер. Контакт с Вейлем естественно возник после переезда Шредингера в 1920 г. в Цюрих, где в это время работал Вейль. Можно выделить два основных аспекта исследований Вейля, которые оказались существенными для Шредингера: во-первых, оригинальный и значительный вклад Вейля в разработку методов решения задач на собственные значения и глубокое знание соответствующего раздела математики...» [5, с.402]. Далее автор отмечает роль единой теории поля Г.Вейля, т.е. концепции, объединившей теорию гравитации с электродинамикой, в возникновении мысли Э.Шредингера о возможности по-новому истолковать стационарные состояния атома Н.Бора.

Интересен вопрос: каковы истоки теории собственных значений, т.е. как французские математики Жак Штурм (1803-1855) и Жозеф Лиувилль (1809-1882) создали эту теорию, нашедшую применение в квантовой механике? Оказывается, данная теория была создана ими в результате обобщения теории разложения в ряд Фурье. Е.Банг и его соавторы [6] указывают: «Общая теория разложения по функциям Штурма – Лиувилля была разработана давно [33, 34], она в принципе очень похожа на теорию разложения в ряд Фурье, и является ее **обобщением**. Первое ее успешное применение связано с определением общего движения колебательных систем; в частности, в одномерном случае рассматривалось колебание струны разложением его по нормальным модам» [6, с.294].

Аналогичные сведения можно найти в статье Г.Вейля «Старые и новые аспекты теории собственных значений» [7]: «Как известно, ряды Фурье были

обобщены Штурмом и Лиувиллем так, чтобы охватывать собственные значения λ и собственные функции $\varphi(s)$ самосопряженного дифференциального уравнения...» [7, с.363].

Итак, Э.Шредингер перенес в волновую механику теорию собственных значений, разработанную Ж.Штурмом (1835) и Ж.Лиувиллем (1846), но к какому уравнению он применил эту теорию? Где он взял дифференциальное уравнение, которое послужило основой для его знаменитого волнового уравнения? Этой основой явилось классическое дифференциальное уравнение Гамильтона – Якоби для частицы в центральном поле. Другими словами, австрийский физик получил свое волновое уравнение по аналогии с уравнением Гамильтона – Якоби.

Л.С.Полак в том же очерке «Эрвин Шредингер и возникновение квантовой механики» [4] констатирует: «Исходя из макроскопического волнового уравнения, можно получить уравнение Шредингера, воспользовавшись уравнением Гамильтона – Якоби и введя гипотезу о характере связи количества движения «электрона - частицы» и длины волны «электрона - волны» [4, с.383]. Автор добавляет: «...Шредингер осуществляет переход от макро- к микрофизике. Если говорить языком современной физики, то **аналогия** механики и геометрической оптики может быть обоснована тем, что при приближениях геометрической оптики движение группы волн выражается уравнениями, сходство которых с уравнениями теории Якоби чрезвычайно велико» [4, с.384].

Этот же факт рассматривает Э.М.Чудинов в монографии «Природа научной истины» [8]: «...Если постоянную Планка h приравнять нулю, то основное уравнение квантовой механики – уравнение Шредингера – переходит в классическое уравнение движения Гамильтона - Якоби» [8, с.280].

Мимо данного обстоятельства не прошел В.Э.Терехович, который в диссертации [9] пишет: «...Поскольку уравнение Шредингера было выведено из классической механики в форме Гамильтона – Якоби, не является

неожиданностью тот факт, что оно приводит к классическим уравнениям движения, когда постоянная Планка может рассматриваться как малая величина» [9, с.127].

2. Аналогия вторая: новая интерпретация стационарных электронных орбит в атоме

В диссертации Луи де Бройля (1924), получившей положительный отзыв А.Эйнштейна, содержалась оригинальная идея о том, как следует объяснять квантование электронных орбит в атоме и существование стационарных энергетических состояний, на которых электрон не излучает никаких квантов света. Поскольку электрон обладает волновыми свойствами, то этой частице (и любому другому микрообъекту) должен соответствовать волновой процесс с определенной длиной волны. Если применить данный факт к теории орбитального движения электрона в атоме водорода, то можно получить весьма интересный результат. Как показал де Бройль, длина волны электрона целое число раз укладывается на длине его стационарной круговой орбиты, т.е. стационарная орбита соответствует круговой стоячей волне на длине орбиты. Следовательно, устойчивыми будут лишь те орбиты, в которых укладывается целое число волн.

Как ни удивительно, в 1922 г. Э.Шредингер совершенно самостоятельно пришел к аналогичной идее – идее о возникновении стоячих волн на стационарных орбитах. Определенной подсказкой послужила работа Г.Вейля «Электрон и гравитация» (1918), где предпринималась попытка объединить тяготение и электромагнетизм. А.Н.Паршин [10] в комментариях к этой работе Г.Вейля пишет: «Первым, кто обнаружил связь теории Вейля с квантовыми представлениями, был Э.Шредингер. В 1922 г. он на ряде конкретных примеров показал, что правила квантования Бора выделяют те орбиты γ , на которых длина вектора умножается согласно (1) на целую степень

универсальной константы h (hc/e^2). <...> Как отметил Ф.Лондон, получаемое при этом выражение аналогично фазе соответствующей волны де Бройля, а условие Шредингера совпадает с резонансным условием де Бройля» [10, с.468]. Здесь (1) – формула Г.Вейля, показывающая, как при параллельном переносе вектора вдоль замкнутого пути меняется его длина.

Разумеется, и Луи де Бройль, и Эрвин Шредингер проводили аналогию между волновыми процессами, происходящими в классических механических системах, и теми же процессами, происходящими в атоме. Классическая механика утверждает, что в струне можно вызвать лишь такие колебания, когда на длине струны укладывается целое число длин волн. Де Бройль и Э.Шредингер перенесли эту закономерность в модель атома, разработанную Н.Бором.

А.А.Логунов и В.А.Петров в книге «Как устроен электрон?» [11] говорят о Шредингере: «...Он понимал дискретность уровней в атоме с близких ему волновых позиций. Представьте натянутую струну. Если дернуть за нее, образуется стоячая волна. Как известно, в струне можно вызвать лишь такие колебания, когда на длине струны укладывается целое число длин волн. Нечто подобное происходит и с атомом в теории Э.Шредингера: дискретность – это проявление волновых процессов в ограниченном пространстве атома» [11, с.51-52].

Сам Луи де Бройль, описывая свою идею о стоячих волнах, основанную на аналогии между классическими и квантовыми системами, отмечает [12]: «В применении к внутриатомным электронам волновая механика позволяет истолковать квантовые условия, определяющие стационарные орбиты Бора как аналог условиям резонанса, и выражает тот факт, что волна, связанная с электроном, является стоячей волной» [12, с.250].

3. Аналогия третья: обобщение результатов В.Гамильтона на волновую оптику

В 1696 г. швейцарский математик, учитель Л.Эйлера, Иоганн Бернулли, решая задачу о брахистохроне, т.е. задачу определения траектории наиболее быстрого падения материальной точки в поле силы тяжести, обнаружил интересный факт. Эта траектория оказалась эквивалентной пути распространения луча света в среде с непрерывно меняющимся показателем преломления. Восхищаясь полученным результатом, И.Бернулли писал: «Я укажу, что можно открыть удивительное совпадение между кривизной луча света в непрерывно изменяющейся среде и брахистохронной кривой» [13, с.199]. Таким образом, уже в конце XVII века была отмечена аналогия между механикой и оптикой.

В первой половине XIX столетия ирландский математик Вильям Гамильтон (1805-1865) разработал математический аппарат, позволивший подвести прочный фундамент под идею И.Бернулли о наличии связи между механикой и оптикой. В.Гамильтон установил, что в механике можно заменить траекторию движения частицы распространением фронта некоторой волны. Иначе говоря, уравнения движения механики можно записать в таком виде, что они полностью совпадут с уравнениями геометрической оптики, которые описывают распространение луча света без учета его волновых свойств. Тем самым В.Гамильтон доказал оптико-механическую аналогию: движение частицы по определенной траектории можно представить как распространение луча света без учета его волновых свойств.

Разрабатывая волновую механику, Э.Шредингер обобщил (распространил) оптико-механическую аналогию В.Гамильтона, доказанную для геометрической оптики, на волновую среду в целом, на волновые свойства света и вещества, рассмотренные в диссертации Луи де Бройля. Этому

обобщению посвящена вторая статья Э.Шредингера под названием «Квантование как задача о собственных значениях» (1926).

А.Н.Васильев в работе «Волновая механика Эрвина Шредингера» [14] пишет о В.Гамильтоне: «Еще в середине XIX века этот ирландский математик придал законченный вид теоретической механике и установил формальную связь между классической механикой и геометрической оптикой. Оптико-механическая **аналогия** позволила ему представить основные закономерности этих, на первый взгляд различных, дисциплин в одном и том же математическом виде. Так, в рамках оптико-механической **аналогии** закон движения материальной точки с заданной энергией в статическом силовом поле имеет тот же вид, что и закон распространения монохроматического светового пучка в среде с меняющимся показателем преломления. <...> Шредингер решил распространить математическую **аналогю** между оптикой и механикой на волновые свойства света и материи. Преодолев на этом пути многочисленные математические трудности, он получил знаменитое волновое уравнение для атома водорода $\Delta\psi + (2m/h^2)(E + e^2/r)\psi = 0...$ » [14, с.24].

Об этом же сообщает Л.И.Пономарев в книге «Под знаком кванта» [15]. Автор говорит о Э.Шредингере: «Ход его рассуждений легко понять, по крайней мере, теперь, более полувека спустя. Вначале он вспомнил оптико-механическую **аналогю** Гамильтона. Он знал, что она доказана лишь в пределе геометрической оптики – тогда, когда можно пренебречь волновыми свойствами света. Шредингер пошел дальше и предположил: оптико-механическая **аналогия** остается справедливой также и в случае волновой оптики. Это означает, что всегда любое движение частиц можно уподобить распространению волн» [15, с.130-131].

Приведем еще один источник. Луи де Бройль в книге «По тропам науки» [12] повествует: «В 1926 году, руководствуясь идеями, развитыми автором, Эрвин Шредингер в ряде замечательных статей сумел в значительной степени уточнить математические основы волновой механики и расширить область ее

применения. Углубляя **аналогию** между геометрической оптикой и аналитической механикой, сто лет назад установленную Гамильтоном, он смог получить общее уравнение распространения, верное в нерелятивистском приближении, для волны, связанной с частицей в данном поле...» [12, с.251].

4. Аналогия четвертая: открытие способа получения дискретного спектра при использовании уравнения Шредингера

Написав волновое уравнение, Э.Шредингер задался целью получить наблюдаемые в эксперименте спектры атомов. Однако спектр неизменно получался непрерывным, и австрийский физик не знал, как решить возникшую проблему. В конце концов, после ряда безуспешных попыток Э.Шредингер пришел к выводу, что для получения дискретного спектра атома водорода нужно наложить граничные условия на бесконечности и сделать кое-что еще. Как автор волнового уравнения пришел к этому выводу? По аналогии с исследованиями Г.Вейля, который, занимаясь теорией упругости, нашел верный способ получения дискретного спектра.

В.И.Арнольд в книге «Что такое математика?» [16] раскрывает исходные посылки идей Э.Шредингера: «Не все знают, как огромна была роль Г.Вейля в становлении квантовой механики. Шредингер рассказывает, что ему никак не удавалось получить наблюдаемые в эксперименте спектры атомов, исходя из уже известной двойственности волна – частица, так как, хотя он уже и написал «уравнение Шредингера», спектр неизменно получался непрерывным (как в интеграле, а не в ряде Фурье) из-за того, что область, где рассматривалось уравнение, простиралась, естественно, неограниченно далеко. Но Г.Вейль, которому Шредингер рассказал о своих трудностях, подсказал ему, что он, Вейль, уже один раз преодолел подобную же трудность в теории упругости, где он рассматривал колебания и волны в неограниченных областях: для получения дискретного спектра нужно наложить граничные

условия на бесконечности, например, потребовать, чтобы пси-функция была интегрируема с квадратом модуля. Шредингер немедленно последовал этому совету, получил требуемый спектр атома водорода, и волновая квантовая механика быстро сменила предшествующую ей матричную» [16, с.32].

5. Аналогия пятая: трактовка частиц как волновых пакетов

Чтобы связать волновую механику с обычной механикой частиц, Э.Шредингер (1926) использовал идею волнового пакета. Ученый предположил, что та или иная частица (например, электрон) представляет собой сгусток волн, волновой пакет, свойства которого могут объяснить существование частицы в качестве устойчивого образования. Каково происхождение этой гипотезы Э.Шредингера? Он пришел к ней по аналогии с работами П.Дебая и М.Лауэ, которые впервые применили понятие волнового пакета в оптике, в том числе для аналитического представления пучков световых лучей.

Л.С.Полак в очерке «Эрвин Шредингер и возникновение квантовой механики» [4] отмечает: «Понятие группы волн или волнового пакета впервые применил в оптике П.Дебай в 1909 г., а несколько позже, в 1914 г., М.Лауэ для точного аналитического представления пучков лучей. Это понятие впоследствии использовал Шредингер для того, чтобы связать волновую механику с обычной механикой материальной точки» [4, с.365].

Этот же факт рассматривает М.Джеммер в монографии «Эволюция понятий квантовой механики» [17]: «Понятие волновых групп или волновых пакетов, как их стали называть позже, было использовано в оптике еще в 1909 г. Дебаем [261] и несколькими годами позже фон Лауэ [262] для точного аналитического представления световых конусов. Теперь оно позволило Шредингеру связать его «ундуляторную» механику с обычной механикой частиц» [17, с.258].

В 1926 г. на теоретическом семинаре А.Зоммерфельда в Мюнхене создатель матричной механики В.Гейзенберг выступил с критикой идеи Э.Шредингера о волновых пакетах. В.Гейзенберг отметил, что волновые пакеты не могут быть устойчивыми образованиями, так как все они испытывают дисперсионное «расплывание» (уширение и распад со временем). Дискуссию, состоявшуюся на этом семинаре, подробно описывает Д.Данин в книге «Вероятностный мир» [18, с.161-162].

Кроме того, в 1949 г. советские физики Л.М.Биберман, Н.Г.Сушкин и В.А.Фабрикант поставили дифракционные эксперименты, которые свидетельствовали в пользу доводов В.Гейзенберга. Результаты этих экспериментов были изложены в их статье «Дифракция одиночных поочередно летящих электронов», опубликованной в «Докладах АН СССР» (1949, том 66, № 2). Казалось бы, гипотеза Э.Шредингера о волновых пакетах, не нашедшая подтверждения, должна отправиться в «пыльные» архивы истории.

Однако в 1960-х годах произошло, по меньшей мере, два события, вдохнувших в идею волновых пакетов новую жизнь. Во-первых, в 1962 г. отечественный исследователь Г.А.Аскарьян предсказал эффект самофокусировки лазерного света, обнаруженный спустя три года в опытах Н.Ф.Пилипецкого и А.Р.Рустамова. Во-вторых, в 1965 г. американцы Н.Забуски и М.Крускал установили, что решения уравнения Кортевега – де Фриса описывают распространение уединенных волн на мелкой воде – солитонов, которые обладают замечательными свойствами: сохраняют свою форму при столкновениях. Оказалось, что в эффекте самофокусировки света имеет место процесс подавления дисперсионного расплывания и дифракционной расходимости пучка света. При распространении солитонов также происходит подавление дисперсионного уширения. Солитоны, впервые обнаруженные в гидродинамике, впоследствии были описаны в физике твердого тела и в физике плазмы, в оптике и теории поля, в кинетике

химических реакций, в ядерной физике и теории гравитации. В настоящее время солитоны рассматриваются как пространственно-временные волновые пакеты, возникающие тогда, когда нелинейные, дисперсионные и дифракционные факторы компенсируют друг друга [19, 20].

Таким образом, гипотеза Э.Шредингера о волновых пакетах, «забракованная» применительно к линейным средам, оказалась справедливой применительно к нелинейным средам, т.е. в области нелинейной физики.

6. Аналогия шестая: обнаружение эквивалентности волновой и матричной механики

В 1925 г. В.Гейзенберг заложил основы матричной механики – формализма, в котором вводится соответствие между свойствами матриц (математических объектов) и особенностями движения электронов в атоме. До его исследований ученые, исходя из уравнений электродинамики, пытались найти гипотетическую траекторию электрона в атоме, которая непрерывно зависит от времени и которую можно задать рядом чисел, отмечающих положение электрона в моменты времени t_1 , t_2 , t_3 и т.д. В.Гейзенберг заявил, что такой траектории в атоме нет, что «правила атомной игры» не требуют знания траектории. Он понял, что в физике микромира следует интересоваться не электронными орбитами (которые являются ненаблюдаемыми), а теми величинами, которые можно измерить, например, разностями частот излучения и интенсивностями спектральных линий. Создав математический аппарат, описывающий соотношения между этими наблюдаемыми величинами, В.Гейзенберг (совместно с М.Борном и П.Иорданом) сделал шаг, получивший высокую оценку крупных ученых. Как писал В.Паули, «механика Гейзенберга снова вернула мне радость жизни и надежду» [15, с.119].

Э.Шредингер как создатель альтернативного математического аппарата первоначально считал, что его волновая механика несовместима с матричным

подходом В.Гейзенберга. Автор волнового уравнения, оценивая творение В.Гейзенберга, признавался, что «кажущиеся очень сложными методы трансцендентной алгебры и недостаток наглядности отпугивали, чтобы не сказать отталкивали меня» [1, с.38]. Впрочем, В.Гейзенберг тоже не оставался в долгу, критикуя волновые представления своего коллеги.

Однако уже в марте 1926 г. Э.Шредингер установил математическую эквивалентность матричной и волновой механики. Стимулом для поиска этой эквивалентности послужила работа венгерского физика и математика Корнелия Ланцоша (1893-1974), опубликованная в январе 1926 г. В этой работе К.Ланцош, применяя теорию интегральных уравнений, показал, что методы В.Гейзенберга допускают континуальное (непрерывное) толкование. Л.С.Полак в очерке [4] пишет: «...К.Ланцош напечатал в январе 1926 г. важную работу, на которую ссылается и Шредингер. Как подчеркивает Шредингер, Ланцош, используя аппарат теории интегральных уравнений, сумел показать, что «гейзенберговская атомная динамика может быть истолкована также и в непрерывном духе». Шредингер детально изучал статью Ланцоша и едва ли можно сомневаться в ее плодотворном влиянии на него» [4, с.387]. «Идея Ланцоша о возможности более тесного объединения квантовой механики с электродинамикой, - продолжает автор, - нашла дальнейшее развитие в одной из работ Шредингера» [4, с.387-388].

Можно сказать, что публикация К.Ланцоша наводила на мысль о том, что между волновой и матричной механикой должна существовать аналогия. Ознакомившись с этой публикацией, Э.Шредингер отказался от прежней точки зрения о несовместимости двух разных теорий и стал искать эту аналогию. Его поиски увенчались успехом! Он заметил сходство между матричным перестановочным соотношением определенного вида и операторным равенством, используемым в волновой механике. Тот же Л.С.Полак [4] детализирует его счастливую находку: «В первой половине марта 1926 г. Шредингер нашел путь к установлению формально

математической эквивалентности матричной и волновой механики, исходя из сходства матричного перестановочного соотношения

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi} 1$$

и операторного равенства

$$\left(\frac{h}{2\pi i} \frac{d}{dq}\right) q - q \left(\frac{h}{2\pi i} \frac{d}{dq}\right) = \frac{h}{2\pi i}.$$

Развитое на этой основе доказательство эквивалентности подхода Гейзенберга, Борна, Иордана, с одной стороны, и де Бройля, Шредингера – с другой, без преувеличения может быть названо научным шедевром. Это был поразивший Шредингера результат, ставший для него триумфом: «установление математического тождества матричной и волновой механики» [4, с.388].

7. Аналогия седьмая: создание новой теории возмущений

В третьей статье, посвященной изложению волновой механики (1926), Э.Шредингер разработал новую теорию возмущений, отличную от астрономической теории возмущений, относящейся к классической механике. Австрийский физик применил свою теорию для описания эффекта Штарка – расщепления оптических (спектральных) линий атомов во внешнем электрическом поле. Этот эффект аналогичен эффекту Зеемана – расщеплению спектральных линий вещества во внешнем магнитном поле. Как известно, немецкий физик Иоганнес Штарк открыл эффект, названный его именем, в 1913 году, за что был удостоен Нобелевской премии. Эту награду он получил через 6 лет после указанного экспериментального открытия.

Как же Э.Шредингер создал свою новую теорию возмущений? Он взял уже имеющийся в науке метод Рэлея, использованный самим Рэлеем для изучения акустических колебаний, и обобщил его в двух направлениях. Во-первых, Э.Шредингер перенес упомянутый метод на дифференциальные

уравнения, коэффициенты которых являются переменными. Во-вторых, метод был перенесен на случай вырожденных систем. Таким образом, новая теория возмущений (возмущений, не зависящих от времени) была разработана автором волнового уравнения в результате того, что он распространил на новые виды дифференциальных уравнений метод Рэля (Джона Уильяма Стретта), ранее применявшийся для исследования колебаний струны с малыми неоднородностями.

А.Зоммерфельд [21] дал следующую характеристику этому исследованию Э.Шредингера: «Среди многих прекрасных результатов квантовой механики теория возмущений, развитая Шредингером, занимает выдающееся место. Она более проста, чем астрономическая теория возмущений классической механики, и в своих приложениях не ограничивается проблемой двух тел» [21, с.293].

Генезис (процесс создания) новой теории возмущений рассматривается в очерке Л.С.Полака «Эрвин Шредингер и возникновение квантовой механики» [4], где автор говорит о статье австрийского физика, опубликованной в 1926 году: «Третье сообщение содержит подробное изложение шредингеровской теории не зависящих от времени возмущений. Шредингер расширяет известный метод Рэля, примененный им для изучения акустических колебаний. Шредингер **обобщил** метод Рэля в двух направлениях: коэффициенты в дифференциальных уравнениях у него не являются обязательно постоянными, как это было у Рэля, и им рассмотрены случаи вырождения. Шредингер здесь же применил эту теорию возмущений к штарк-эффекту водородного атома (частоты и интенсивности линий) и получил результаты, хорошо согласующиеся с экспериментом» [4, с.388-389].

Об этом же пишет В.П.Визгин [5], анализирующий третью статью Э.Шредингера: «В этом сообщении Шредингер разрабатывает ставшую классической квантово-механическую теорию возмущений, так называемую теорию не зависящих от времени возмущений. Подход Шредингера является

обобщением известного метода приближенного расчета акустических колебаний, развитого Рэлеем...» [5, с.399]. Указывая, что метод Рэлея изложен в его книге «Теория звука», выдержавшей несколько изданий, В.П.Визгин поясняет: «Обобщение, предпринятое Шредингером, заключалось, прежде всего, в рассмотрении дифференциальных уравнений, коэффициенты которых могли быть и переменными, а также в распространении метода на «вырожденные» системы. Шредингеровская теория возмущений, не зависящих от времени, изложена во многих известных книгах по квантовой механике...» [5, с.400].

8. Аналогия восьмая: теоретическое описание эффекта Комптона

Эффект Комптона – это упругое рассеяние фотонов на электроне, сопровождающееся изменением длины волны фотонов. Эффект открыт американским физиком Артуром Комптоном в 1922 г. в экспериментах, в которых свободные заряженные частицы (электроны) сталкивались с квантами рентгеновского излучения. Открытие А.Комптона представляло собой первое эмпирическое доказательство гипотезы А.Эйнштейна о квантовой структуре света.

Анализируя эффект Комптона, Э.Шредингер дал его теоретическое объяснение, основанное на использовании двух аналогий. Во-первых, ученый провел аналогию между этим эффектом и рассеянием рентгеновских лучей на кристаллах, которое описывается формулой Брэгга - Вульфа. Во-вторых, австрийский физик обнаружил, что упругое рассеяние фотонов на свободном электроне – аналог рассеяния света на ультразвуковых волнах (акустических колебаниях), которое часто называется «эффектом Бриллюэна». Это физическое явление было предсказано французским ученым Леоном Бриллюэном в 1922 г., а открыто чуть позже П.Дебаем и другими специалистами. Кстати, П.Дебай (1923) дал теоретическое объяснение

эффекта Комптона раньше Э.Шредингера, но в этом объяснении не использовалась аналогия между открытием А.Комптона и эффектом Бриллюэна.

О двух аналогиях, использованных Э.Шредингером при описании эффекта Комптона, пишет В.П.Визгин [5] в комментариях к его статье «О комптон-эффекте», опубликованной в 1927 году: «Значение этой работы Шредингера заключается, прежде всего, в разработке простой и наглядной картины комптон-эффекта на основе представления о дебройлевских волнах, а также в установлении глубокого **родства** этого явления с рассеянием рентгеновских лучей на кристаллах, описываемым известной формулой Брэгга – Вульфа. Эффект был открыт А.Комптоном в 1922 г. Затем Комpton и Дебай почти одновременно (1923 г.) дали теоретическое объяснение ему...» [5, с.404]. Далее В.П.Визгин раскрывает исходные посылки рассуждений Э.Шредингера, посредством которых тот дал «простое и наглядное» описание эффекта Комптона: «...**Аналогия** комптоновского эффекта с рассеянием света на звуковой волне, рассчитанным Бриллюэном, является, таким образом, основной идеей, лежащей в основе работы Шредингера» [5, с.404].

Можно обратиться непосредственно к статье Э.Шредингера «О комптон-эффекте» [22], которая содержится в его «Избранных трудах». В данной статье ученый пишет: «Если в прозрачной однородной среде, показатель преломления которой зависит от ее плотности, световой луч с длиной волны λ пересекает волну сжатия (звуковую волну) с длиной волны Λ , то, как указал, основываясь на чисто классическом вычислении, Л.Бриллюэн, этот световой луч частично испытывает правильное отражение от плоскостей звуковой волны. Между обеими длинами волн и углом отражения θ при этом имеет место следующее хорошо известное из теории отражения рентгеновских лучей соотношение Брэгга: $2\Lambda \sin \theta = \lambda$ для отражения первого порядка...» [22, с.140]. Далее ученый аргументирует: «Мы покажем, что, опираясь на упомянутый выше результат Бриллюэна, можно получить квантово-

механическое истолкование соотношения Комптона, которое является столь же простым, как и квантовое рассмотрение с помощью понятий энергии и импульса» [22, с.140].

9. Аналогия девятая: изобретение парадокса, названного парадоксом «кота Шредингера»

Э.Шредингер, как и некоторые другие ученые, не был уверен в справедливости копенгагенской версии квантовой механики, сформулированной Нильсом Бором (1927) и его соратниками. Автор волнового уравнения сомневался в принципе неопределенности В.Гейзенберга, согласно которому нельзя одновременно точно измерить положение и скорость частицы (например, электрона). Э.Шредингер также скептически относился к вероятностной трактовке волновой функции, которую предложил М.Борн. Будучи оппонентом этих ключевых идей квантовой теории, Э.Шредингер пытался придумать парадоксы, которые окажутся неразрешимыми в рамках данной теории. Наибольшую известность приобрел придуманный им парадокс, в котором кот – участник эксперимента – должен быть одновременно мертвым и живым.

Как же австрийский физик изобрел этот парадокс, главный герой которого – «кот Шредингера» - до сих пор является предметом многочисленных дискуссий и не сходит со страниц научных журналов и монографий? По аналогии с парадоксом А.Эйнштейна (1935) о взрывающемся бочонке с порохом. 8 августа 1935 г. А.Эйнштейн направил Э.Шредингеру письмо, в котором описал парадоксальную ситуацию с порохом. Порох, будучи горючим, либо уже взорвался, либо еще не взорвался. Но если применить уравнение Шредингера к волновой функции, описывающей бочку пороха, то окажется, что через некоторое время эта бочка будет представлять собой странную комбинацию из этих двух возможностей. Она должна

взорваться и не взорваться одновременно. Этот парадокс, изложенный А.Эйнштейном, по аналогии натолкнул Э.Шредингера на мысль о том, что можно представить кота, который должен быть одновременно мертвым и живым после того, как разбивается ампула с синильной кислотой, воздействующей на организм кошки. Другой предпосылкой парадокса Шредингера был мысленный опыт Эйнштейна, называющийся «мяч в коробке», но «бочонок с порохом» все-таки доминировал в числе наводящих соображений.

Пол Хэлперн в книге «Играют ли коты в кости?» [23] говорит о письме Эйнштейна от 8 августа 1935 года: «В том же письме Эйнштейн описал парадоксальную ситуацию с порохом. Опыт подсказывает нам, что порох, будучи горючим, либо уже взорвался, либо еще не взорвался. Но, как отмечает Эйнштейн, если применить уравнение Шрёдингера к волновой функции, описывающей бочку пороха, окажется, что через некоторое время эта бочка придет в состояние странной смеси из этих двух возможностей. Она бы взорвалась и не взорвалась одновременно. Таким образом, в концепции Эйнштейна макроскопические, знакомые нам системы, описанные на языке квантовой механики, вполне могут стать чудовищными гибридами, которые сочетают в себе противоречивые, логически не согласованные утверждения о реальности» [23].

Далее автор указывает: «Частично основываясь на эйнштейновской идее с порохом, а также помня о мысленном эксперименте Эйнштейна с мячом в коробке, Шрёдингер смоделировал свой мысленный эксперимент с котом так, чтобы подчеркнуть неоднозначность квантовых измерений. Он признал свой долг перед Эйнштейном в письме от 19 августа, в котором рассказал, что придумал квантовый парадокс, который «похож на Ваш эксперимент со взрывающейся пороховой бочкой» [23].

Об этой же аналогии Э.Шредингера сообщает Манжит Кумар в книге «Квант. Эйнштейн, Бор и великий спор о природе реальности» [24]: «Вслед за

рассуждением о мяче Эйнштейн, чтобы продемонстрировать Шредингеру неполноту квантовой механики, 8 августа 1935 года предложил новый план действий. Он попросил Шредингера рассмотреть бочонок с сыпучим порохом, который когда-нибудь в будущем году спонтанно воспламенится. Сначала волновая функция описывает строго определенное состояние — бочонок с невзорвавшимся порохом. Но через год волновая функция «описывает некую смесь еще не и уже взорвавшихся систем». «Никакая самая искусная интерпретация не позволит с помощью этой волновой функции описать реальное положение дел, - доказывал Эйнштейн Шредингеру, - поскольку в действительности нет переходного состояния между взорвавшимся и не взорвавшимся порохом». Бочонок либо взорвался, либо нет. Этот, писал Эйнштейн, «грубый макроскопический пример», выявляет те же «трудности», с которыми сталкиваешься в мысленном эксперименте ЭПР» [24].

Аналогичные сведения относительно происхождения парадокса Шредингера можно найти в книге У.Айзексона «Альберт Эйнштейн» [25].

10. Аналогия десятая: идея о том, что живые организмы питаются отрицательной энтропией

В 1944 г., занимая должность профессора теоретической физики Дублинского университета (Ирландия), Э.Шредингер опубликовал книгу под названием «Что такое жизнь?». В ней он сформулировал ряд важных биологических идей, оказавших значительное влияние на исследования в области генетики и теории открытых (неравновесных) термодинамических систем. В частности, анализируя связь между жизнью и энтропией, под которой часто понимают процесс рассеяния энергии, способной совершать работу, австрийский физик выдвинул интересную гипотезу. Он предположил, что живой организм избегает термодинамического состояния, соответствующего смерти, за счет того, что постоянно извлекает из

окружающей среды отрицательную энтропию. Под этой отрицательной энтропией Э.Шредингер понимал параметр, противоположный обычной энтропии, связанной с уменьшением порядка, нарастанием хаоса, установлением термодинамического равновесия. Австрийский физик постулировал, что отрицательная энтропия – это то, чем питается любой живой организм.

М.В.Волькенштейн в монографии «Энтропия и информация» [26] анализирует рассуждения Э.Шредингера, представленные в его книге «Что такое жизнь?»: «...В книге рассмотрены основные положения термодинамики живых, т.е. открытых систем. Чем питается организм? Мы привычно говорим о числе калорий, потребляемых с пищей. Значит ли это, что мы питаемся калориями, добавляем непрерывно энергию к уже содержащейся в организме? Нет, конечно» [26, с.118-119]. Далее автор приводит слова Э.Шредингера: «...Живой организм непрерывно увеличивает свою энтропию – или, говоря иначе, производит положительную энтропию и таким образом приближается к опасному состоянию максимальной энтропии, которое представляет собой смерть. Он может избежать этого состояния, т.е. оставаться живым, только путем постоянного извлечения из окружающей среды отрицательной энтропии, которая представляет собой нечто весьма положительное, как мы сейчас увидим. Отрицательная энтропия – вот то, чем организм питается» [26, с.119].

Специалисты указывают, что идея Э.Шредингера об отрицательной энтропии, которой питаются живые организмы, чтобы противодействовать распаду и деградации, произвела большое впечатление на И.Пригожина, который под влиянием этой идеи стал разрабатывать теорию открытых термодинамических систем. Исследования И.Пригожина в этом направлении получили высокую оценку научного сообщества и были удостоены в 1977 г. Нобелевской премии по химии. Вернер Эбелинг в книге «Об истории синергетики» [27] повествует: «Эрвин Шредингер (1887-1961) в своей

знаменитой книге «Что такое жизнь с точки зрения физики?» выработал и ясно изложил физические основы процессов образования упорядоченных структур в биологических системах. Спустя некоторое время Пригожин развивает его исходные концепции и на их основе создает обоснованную естественно-научную теорию. Ему мы обязаны важными научными результатами, касающимися термодинамических условий самоорганизации» [27, с.158].

Как же Э.Шредингер пришел к мысли о существовании отрицательной энтропии, которая должна постоянно поступать в организм, пока он живет? Каким образом у него возникла гипотеза, подтолкнувшая И.Пригожина к построению теории диссипативных структур (теории самоорганизации)? Эта гипотеза возникла по аналогии с рассуждениями австрийского физика Людвига Больцмана, который утверждал, что борьба за существование, описываемая в теории эволюции Ч.Дарвина, - это борьба организмов за энтропию. Э.Шредингер был хорошо знаком с работами Л.Больцмана. Достаточно было заменить термин «энтропия» термином «отрицательная энтропия» (который является синонимом понятия «самоорганизации»), после чего легко понять, что живые организмы должны потреблять нечто противоположное обычной энтропии.

Об аргументах Л.Больцмана, которые использовал Э.Шредингер, пишет Л.С.Полак в книге «Людвиг Больцман» [28]: «Эволюционистские взгляды Больцмана нашли отражение и в лекциях, которые он читал в 1903 г. в Вене как преемник Э.Маха по кафедре, объединенных общим названием «Метод и общая теория науки». С позиций эволюционной теории Дарвина он рассматривал процесс фотосинтеза в растениях как проявление общей борьбы организмов за энтропию, которая делается доступной при переходе энергии от горячего Солнца к холодной Земле» [28, с.40].

Об этом же сообщает Я.М.Гельфер [29]: «Ни Клаузиус, ни В.Томсон не рассматривали непосредственно биологические проблемы с точки зрения термодинамики. <...> На возникавшие в этой связи сложные чисто физические

и методологические проблемы никто не обратил внимания. Лишь у Больцмана в одной из его речей, произнесенных в Венской Академии наук в 1886 г., была высказана мысль о взаимосвязи энтропии с явлением жизни: «Всеобщая борьба за существование, охватывающая весь органический мир, не есть борьба за вещество: химические элементы органического вещества находятся в избытке в воздухе, воде и земле; это также не борьба за энергию... это борьба за энтропию, становящуюся доступной при переходе от пылающего солнца к холодной земле» [29, с.255].

11. Аналогия одиннадцатая: формулировка гипотезы о существовании генетического кода

В книге Э.Шредингера «Что такое жизнь?» (1944) содержится также идея о существовании генетического кода, с помощью которого информация о различных признаках организма передается из поколения в поколение. Автор волнового уравнения называл этот код шифровальным, отмечая, что в хромосомах записан весь план будущего индивидуума и способ его функционирования в зрелом состоянии. Э.Шредингер восхищался совершенством этого кода, который, во-первых, записан в пределах минимального пространства (в структуре небольших полимерных молекул), а, во-вторых, отличается длительностью (надежностью) хранения информации. О минимальном пространстве, в котором сосредоточен наследственный код, свидетельствовало то, что единицей изменения гена является участок молекулы, состоящий из единиц (а не миллиона) атомов. А доказательством длительности хранения наследственной информации служил пример, упоминаемый Э.Шредингером в его книге: в роду Габсбургов из поколения в поколение переходила характерная форма губы. Таким образом, Э.Шредингер сформулировал, по меньшей мере, три положения, которые оказались чрезвычайно важными в биологии: 1) должен существовать генетический код,

который следует расшифровать; 2) этот код представлен в минимальном пространстве; 3) наследственная информация хранится в течение длительного времени.

Анализ исходных посылок идеи Э.Шредингера о существовании генетического кода показывает, что он пришел к ней по аналогии с исследованиями трех ученых, которые изложили результаты своих экспериментов в 1935 г. в статье под названием «О природе генных мутаций и структуре гена». Первый автор статьи – советский биолог Николай Владимирович Тимофеев-Ресовский (1900-1981), длительное время работавший в Германии, возглавлявший отдел генетики и биофизики в Институте исследований мозга в пригороде Берлина. Второй автор – немецкий биофизик, специалист по радиобиологии Карл Циммер (1911-1988). Наконец, третий автор – американский биофизик немецкого происхождения Макс Дельбрюк (1906-1981), получивший в 1969 г. Нобелевскую премию по физиологии и медицине «за открытия, касающиеся механизма репликации и генетической структуры вирусов». Отметим, что в начале 1950-х годов Н.В.Тимофеев-Ресовский также выдвигался на Нобелевскую премию за исследование мутаций.

В 1935 г. перечисленные ученые, воздействуя на мух-дрозофил рентгеновским излучением, смогли определить физический размер гена. Эта задача была решена при сопоставлении двух величин: а) дозы облучения, измеряемой числом пар ионов в кубическом сантиметре, и б) числа мутаций, возникающих после облучения в определенном объеме мишени. Об этом как раз и сообщалось в их статье «О природе генных мутаций и структуре гена».

Кроме того, Н.В.Тимофеев-Ресовский еще до публикации указанной работы знал, что «габсбургская губа» - пример надежности (долговечности) хранения и передачи наследственной информации. Многие монархи австрийско-испанской династии Габсбургов легко опознаются на портретах благодаря характерной форме лица с выпяченной нижней губой и

подбородком. М.Франк-Каменецкий в книге «Самая главная молекула» [30] приводит слова М.Дельбрюка, обращенные к Н.В.Тимофееву-Ресовскому: «Ты же сам рассказывал нам, как в роду Габсбургов из поколения в поколение переходила характерная форма губы. Что делает возможным столь точное копирование генов в течение веков? Каков механизм?» [30, с.15].

В статье [31] рассматривается генезис предположения Э.Шредингера о том, что генетический код записан в пределах минимального пространства: «На самом деле единица изменения гена, мутация - это вопрос не миллиона атомов, а единиц. Эрвин Шредингер понял это, когда читал работы Николая Тимофеева-Ресовского о влиянии радиации на мутагенез у мушек-дрозофил. Тимофеев-Ресовский еще в 1930-е годы подошел к изучению биологических организмов с физических позиций, и его работы позволили оценить, сколько ионизированных частиц нужно на единицу пространства, чтобы вызвать мутацию» [31].

Н.В.Тимофеев-Ресовский догадывался о существовании генетического кода, поскольку ему была известна гипотеза его учителя Н.К.Кольцова о том, что передача наследственной информации осуществляется посредством матричного копирования молекул (генов). С этой идеей Николай Владимирович ознакомил своих коллег К.Циммера и М.Дельбрюка. Таким образом, идеи генетического кода, матричного копирования молекул, надежности наследственной информации и минимального объема, занимаемого этой информацией, - все эти положения, сформулированные Э.Шредингером в книге «Что такое жизнь?», - были известны Н.В.Тимофееву-Ресовскому. Многие автор волновой механики почерпнул из упомянутой статьи «О природе генных мутаций и структуре гена» (1935), которая часто называется «TZD» - аббревиатурой из первых букв фамилий авторов.

В.В.Бабков и Е.С.Саканян в книге «Николай Владимирович Тимофеев-Ресовский» [32] пишут: «В начале 1940-х годов, когда Эрвин Шредингер был профессором в Дублине, он однажды встретил другого немецкого физика-

теоретика, в то время профессора в университете Белфаста, П.П.Эвальда, который дал ему статью Тимофеева-Ресовского, Циммера, Дельбрюка 1935 г. Шредингер уже некоторое время интересовался этим кругом вопросов, но TZD настолько поразила его, что он прочел ряд лекций в Тринити Колледже Дублина в феврале 1943 г. и напечатал их в виде книги под названием «Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки» [32, с.158].

Далее авторы приводят точку зрения Нобелевского лауреата Макса Перутца по поводу указанной книги Э.Шредингера: «Перутц аргументирует утверждение, что основной заслугой книги стало извлечение из забвения и популяризация ранней статьи Тимофеева-Ресовского, Циммера и Дельбрюка» [32, с.159].

Об этом же сообщает М.В.Волькенштейн в работе «Дополнительность, физика и биология» [33]: «Впервые физические основания теоретической биологии были сформулированы сорок лет назад Шредингером. В недавней статье Макс Перутц, удостоенный Нобелевской премии за исследование структуры гемоглобина, показал, что идеи Шредингера были стимулированы работой крупнейшего биолога Н.В.Тимофеева-Ресовского, сделанной совместно с Дельбрюком и Циммером» [33, с.296].

Книга Э.Шредингера «Что такое жизнь?» оказала значительное влияние на Джеймса Уотсона и Френсиса Крика, на их исследования, завершившиеся открытием того факта, что носителем генетической информации является молекула ДНК, имеющая форму двойной спирали. Концепция «кодовой записи», предложенная австрийским физиком, поразила их. Они задались целью понять, как загадочные молекулярные коды Э.Шредингера передаются от генов к генам, сохраняя наследственную информацию и определяя структуру белка.

Джеймс Уотсон в книге «ДНК. История генетической революции» [34] отмечает: «Эрвин Шредингер писал, что жизнь можно трактовать как систему хранения и передачи биологической информации. Соответственно,

хромосомы считались просто носителями такой информации. Поскольку в каждой клетке приходится укладывать множество информации, она должна архивироваться в виде так называемого зашифрованного наследственного кода, внедренного в молекулярную структуру хромосом. Таким образом, чтобы понять жизнь, нужно выделить эти молекулы и взломать их код. <...> Книга Шредингера оказала на нас большое влияние. Многие из тех, кто затем сыграл роли в первом акте великой драмы под названием «молекулярная биология» (в том числе Френсис Крик, сам когда-то изучавший физику), прочли книгу «Что такое жизнь?» и были ею впечатлены. Книга Эрвина Шредингера вызвала у меня самый живой интерес, поскольку я также был заинтригован сущностью жизни» [34].

12. Ценность идей Э.Шредингера

Рассмотрим вкратце работы, в которых волновое уравнение Шредингера (наиболее известный его вклад в науку) применялось в областях знания, порой весьма далеких от той области, где оно впервые было сформулировано.

Отечественные ученые Лев Ландау и Виталий Гинзбург (1950) построили феноменологическую теорию сверхпроводимости благодаря тому, что перенесли уравнение Шредингера в эту теорию, где оно описывает поведение сверхпроводящих электронов [35]. Л.Ландау и В.Гинзбург использовали нелинейное уравнение Шредингера. Примечательно, что в 1958 г. их коллега Лев Петрович Горьков переформулировал теорию сверхпроводимости в координатном пространстве и вывел уравнения Шредингера для двух гриновских функций, описывающих сверхпроводник [36].

А.А.Логунов и А.Н.Тавхелидзе (1963), используя уравнение Шредингера, получили математическое уравнение, описывающее упругое рассеяние адронов. Данные ученые предварительно модифицировали уравнение

Шредингера с учетом быстрого движения частиц, участвующих в сильном (ядерном) взаимодействии [37, 38].

С.Ф.Эдвардс (1965), занимаясь статистической теорией полимеров, обнаружил аналогию между колебаниями гибкой полимерной цепи, изменяющими ее конформацию, и траекториями нерелятивистской частицы. В результате С.Ф.Эдвардс понял, что колебательные процессы, которым подвержена указанная полимерная цепь, можно описывать уравнением Шредингера [39]. Другими словами, уравнение Шредингера нашло применение в статистической теории полимеров.

В.И.Таланов (1964), а также В.Е.Захаров (1972) разработали математическую теорию самофокусировки лазерного света – явления, предсказанного Г.А.Аскарьяном в 1962 г., используя в качестве основы данной концепции нелинейное уравнение Шредингера. В теории самофокусировки это уравнение получило название «уравнения для комплексной огибающей волны» [40]. Годом ранее В.Е.Захаров и А.Б.Шабат разработали метод решения задачи Коши для нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) по аналогии с методом решения задачи Коши для уравнения Кортевега – де Фриса, которое описывает распространение уединенных волн (солитонов) [41].

А.М.Михайловский, В.И.Петвиашвили и А.М.Фридман (1977) перенесли нелинейное уравнение Шредингера в астрофизику. Основываясь на результате Шредингера, они вывели математическое уравнение, описывающее нелинейную динамику газового галактического диска на границе гравитационной неустойчивости [42]. Данные исследователи учитывали также тот факт, что нелинейное уравнение Шредингера адекватно описывает ленгмюровские волны в электрон-ионной плазме.

Американские физики Джон Уилер и Брайс Девиэт (1960-е годы) сочли возможным распространить волновое уравнение Шредингера в космологию, для описания волновой функции Вселенной. В результате они вывели в

космологии математическое уравнение, названное «уравнением Уилера - Девитта», которое в действительности представляет собой исходное волновое уравнение австрийского физика, модифицированное с учетом гипотезы о нулевом значении полной энергии Вселенной [43, 44].

Рассмотрим (завершая данный параграф) еще одну идею, возникшую на основе исследований Э.Шредингера. Как ни удивительно, выдающийся американский ученый, лауреат Нобелевской премии по химии за 1954 год, Лайнус Полинг пришел к идее о том, что химическое взаимодействие атомов и молекул сопровождается перекрыванием (гибридизацией) электронных орбит этих молекул, по аналогии с теорией эффекта Штарка, предложенной Э.Шредингером. Как мы уже отмечали, эффект Штарка – это расщепление спектральных линий вещества в сильном электрическом поле. Э.Шредингер объяснил это явление перемешиванием (перекрыванием) оптических частот атомов, подвергающихся действию электрического поля. В результате взаимодействия электрического поля атомов с внешним электрическим полем, полагал Э.Шредингер, происходит взаимное наложение электронных орбит, что и вызывает спектральное расщепление. Руководствуясь аналогией, Л.Полинг предположил, что при химическом взаимодействии атомов и молекул также происходит взаимное наложение их электронных орбит. Так возникла концепция гибридизации, в свое время наделавшая много шума в химической науке.

И.С.Дмитриев и С.Г.Семенов в книге «Квантовая химия – ее прошлое и настоящее» [45] сообщают: «В Копенгагене, в Архиве Н.Бора, хранится тетрадь с черновыми записями Полинга, относящимися к 1927-1929 гг., то есть ко времени его стажировки в Европе. На обложке тетради надпись: «Статья Лондона. Общие идеи о связях», - и далее приписка, относящаяся, по видимому, к более позднему времени: «Здесь мы имеем первое обсуждение гибридизации». Анализ этого документа показывает, что толчком к созданию Полингом концепции гибридизации послужило изучение им теории эффекта

Штарка на атоме водорода, разработанной Шредингером в 1926 г. Эффектом Штарка называют изменение энергетических уровней атомов, молекул и твердых тел под действием электрического поля, обнаруживаемое по сдвигу и расщеплению спектральных линий. Это явление, открытое в 1913 г., было затем интерпретировано Шредингером на основе теории возмущений» [45].

«С исторической точки зрения, - продолжают авторы, - необходимость введения концепции гибридизации была обусловлена потребностью объяснить в терминах метода ВС (валентных связей – Н.Н.Б.) такие явления, как локализованный характер химических связей во многих соединениях, их направленность в пространстве, аддитивность и трансферабельность ассоциируемых с отдельными связями молекулярных свойств, а также геометрию молекул. При этом геометрическим аспектам придавалось особое значение. По мнению Полинга и многих других химиков, именно гибридизация атомных орбиталей является фактором, определяющим симметрию молекулы, а отчасти и ее геометрические параметры. К сожалению, при этом произошло обращение причинно-следственных связей между гибридизацией и симметрией» [45].

13. Заключение

На протяжении длительного времени в работах, посвященных анализу творческой деятельности, подчеркивалась роль интуиции. Предполагалось, что с помощью интуиции (инсайта) истина открывается разуму человека путем «прямого усмотрения», без использования логических определений и доказательств как промежуточных звеньев познания. В ней – интуиции - видели некое божественное знание (Платон), чувство ясности и самоочевидности (Р.Декарт), биологический инстинкт (А.Бергсон), образное мышление (Р.Арнхейм), личностное знание, связанное с ценностными ориентирами человека (М.Полани). Интуицию трактовали как средство

познания априорных истин (И.Кант), как чувственное созерцание (Г.Гегель), как дологическую стадию развития детей (Ж.Пиаже), как неосознанную умственную деятельность, т.е. неосознанный опыт (И.Павлов).

На наш взгляд, правильная интерпретация интуиции была предложена советским физиком Яковом Ильичем Френкелем (1894-1952), который отметил, что интуиция – это способность выявлять и использовать аналогии между разными идеями. Это неудивительно, поскольку Я.И.Френкель был крупным ученым («генератором идей», как его называли современники), и ему было хорошо известно, как рождаются новые гипотезы и концепции. Достаточно указать на то, что капельная модель ядра, предложенная Я.И.Френкелем (1936), мотивировалась аналогией между распадом атомного ядра и делением (фрагментацией) капли жидкости. В рамках этой модели ученый объяснил, что периодическая система химических элементов заканчивается на уране, поскольку «капля ядерной жидкости» - ядро урана – находится на пределе своей устойчивости. Базируясь на указанной аналогии, Я.И.Френкель также предсказал возможность спонтанного деления ядра урана, которое было экспериментально открыто Г.Н.Флеровым и К.А.Петржаком в 1940 г.

Как подчеркивал Я.И.Френкель, «интуиция предпочитает следовать по пути аналогий, перескакивая с полным пренебрежением логики (дедукции – Н.Н.Б.) через препятствия, если эти пути заводят в тупик. Именно эти скачки и означают переход на более высокую ступень знаний» [46, с.303]. «Аналогия, если обращаться с ней с должной осторожностью, - говорил он, - представляет собой наиболее простой и понятный путь от старого к новому; не следует только забывать, что всякая аналогия, если только она не является фактическим тождеством, имеет определенные границы» [46, с.305].

Проанализированное нами творчество Эрвина Шредингера – дополнительный довод в пользу справедливости точки зрения Я.И.Френкеля.

Литература:

1. Хоффман Д. Эрвин Шредингер. – М.: «Мир», 1987. – 96 с.
2. Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. – М.: «Наука», 1989. – 568 с.
3. Барли К., Вега-Гузман Х., Руффинг А., Суслов С.К. Открытие релятивистского уравнения Шредингера // Успехи физических наук. – 2022. - Том 192. - № 1. - С.100-114.
4. Полак Л.С. Эрвин Шредингер и возникновение квантовой механики // Шредингер Э. Избранные труды по квантовой механике. – М.: «Наука», 1976. – С.347-392.
5. Визгин В.П. Комментарии // Шредингер Э. Избранные работы по квантовой механике. – М.: «Наука», 1976. – С.393-412.
6. Банг Е., Гареев Ф.А., Иванова С.П. Метод разложения по функциям Штурма – Лиувилля в задачах ядерной физики // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1978. - Том 9. - № 2. - С.286-326.
7. Вейль Г. Старые и новые аспекты теории собственных значений // Вейль Г. Избранные труды. – М.: «Наука», 1984. – С.361-382.
8. Чудинов Э.М. Природа научной истины. – М.: изд-во политической литературы, 1977. – 312 с.
9. Терехович В.Э. Философско-методологические проблемы принципа наименьшего действия // Диссертация на соискание ученой степени кандидата философских наук. - Санкт-Петербург: СПбГУ, 2013. – 224 с.
10. Паршин А.Н. Комментарии к статье Г.Вейля «Электрон и гравитация» // Вейль Г. Избранные труды. – М.: «Наука», 1984. – С.467-471.
11. Логунов А.А., Петров В.А. Как устроен электрон? – М.: «Педагогика», 1988. – 112 с.
12. Де Бройль Л. По тропам науки. – М.: изд-во иностранной литературы, 1962. – 408 с.

13. Спасский Б.И. История физики. Часть 1. – М.: «Высшая школа», 1977. – 320 с.
14. Васильев А.Н. Волновая механика Эрвина Шредингера // Квант. – 2000. - № 3. – С.23-24.
15. Пономарев Л.И. Под знаком кванта. – М.: «Физматлит», 2005. – 416 с.
16. Арнольд В.И. Что такое математика? – М.: МЦНМО, 2008. – 104 с.
17. Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики. – М.: «Наука», 1985. – 384 с.
18. Данин Д. Вероятностный мир. – М.: «Знание», 1981. – 208 с.
19. Кудряшов Н.А. Нелинейные волны и солитоны // Соросовский образовательный журнал. – 1997. - № 2. – С.85-91.
20. Маймистов А.И. Оптические солитоны // Соросовский образовательный журнал. – 1999. - № 11. – С.97-102.
21. Зоммерфельд А. Строение атома и спектры. Том 2. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 695 с.
22. Шредингер Э. О комптон-эффекте // Шредингер Э. Избранные труды по квантовой механике. – М.: «Наука», 1976. – С.139-144.
23. Хэлперн П. Играют ли коты в кости? Эйнштейн и Шредингер в поисках единой теории мироздания. - Санкт-Петербург: изд-во «Питер», 2016. – 320 с.
24. Кумар М. Квант. Эйнштейн, Бор и великий спор о природе реальности. – М.: изд-во «АСТ», 2013. – 592 с.
25. Айзексон У. Альберт Эйнштейн. Его жизнь и его Вселенная. – М.: изд-во «АСТ», 2015. – 832 с.
26. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. – М.: «Наука», 1986. – 192 с.
27. Хакен Г., Плат П., Эбелинг В., Романовский Ю. Об истории синергетики. Общие принципы самоорганизации в природе и в обществе. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2017. – 428 с.
28. Полак Л.С. Людвиг Больцман. – М.: «Наука», 1987. – 208 с.

29. Гельфер Я.М. История и методология термодинамики и статистической физики. – М.: «Высшая школа», 1981. – 536 с.
30. Франк-Каменецкий М. Самая главная молекула: от структуры ДНК к биомедицине XXI века. – М.: «Альпина нон-фикшн», 2017. – 336 с.
31. Как небольшая книга Шредингера повлияла на современную науку // Российская газета, 30.11.2020 г.
32. Бабков В.В., Саканян Е.С. Николай Владимирович Тимофеев-Ресовский. – М.: изд-во «Памятники исторической мысли», 2002. – 672 с.
33. Волькенштейн М.В. Дополнительность, физика и биология // Успехи физических наук. – 1988. – Том 154. - № 2. – С.279-297.
34. Уотсон Дж., Берри Э., Дэвис К. ДНК. История генетической революции. – Санкт-Петербург: изд-во «Питер», 2019. – 512 с.
35. Максимов Е.Г. О Гинзбурге – Ландау и немного о других // Успехи физических наук. – 2010. – Том 180. - № 11. – С.1231-1237.
36. Халатников И.М. Дау, кентавр и другие. – М.: «Физматлит», 2008. – 192 с.
37. Потупа А. Бег за бесконечностью. – М.: «Молодая гвардия», 1977. – 224 с.
38. Владимиров В.С., Герштейн С.С., Кадышевский В.Г. и др. Анатолий Алексеевич Логунов (к 80-летию со дня рождения) // Успехи физических наук. – 2007. – Том 177. - № 1. – С.117-118.
39. Де Жен П. Мягкие вещества (Нобелевская лекция) // Успехи физических наук. – 1992. – Том 162. - № 9. – С.125-132.
40. Захаров В.Е. Теория самофокусировки // Успехи физических наук. – 1972. – Том 107. - № 3. – С.509-510.
41. Кудряшов Н.А. Свойство Пенлеве в теории дифференциальных уравнений // Соросовский образовательный журнал. – 1999. - № 9. – С.118-122.
42. Фридман А.М., Хоперсков А.В. Физика галактических дисков. – М.: «Физматлит», 2011. – 640 с.
43. Линде А.Д. Физика элементарных частиц и инфляционная космология. – М.: «Наука», 1990. – 280 с.

44. Стенджер В. Бог и мультивселенная. Расширенное понятие космоса. – Санкт-Петербург: изд-во «Питер», 2016. – 432 с.
45. Дмитриев И.С., Семенов С.Г. Квантовая химия – ее прошлое и настоящее. – М.: «Атомиздат», 1980. – 160 с.
46. Френкель В.Я. Яков Ильич Френкель. – Москва-Ленинград: «Наука», 1966. – 473 с.