

*Новиков Н.Б.,
Институт психологии РАН
Россия, г. Москва
Novikov N.B.,
Institute of Psychology RAS
Russia, Moscow*

СИЛА АНАЛОГИЙ. ТВОРЧЕСТВО ЯКОВА ИЛЬИЧА ФРЕНКЕЛЯ

***Аннотация:** Яков Ильич Френкель (1894-1952) – выдающийся отечественный физик-теоретик, оставивший яркий след во многих разделах физической науки. В 1913 г. юный Я.И. Френкель окончил гимназию с золотой медалью и в том же году поступил на математическое отделение физико-математического факультета Петербургского университета. В 1916 г. был оставлен при Петербургском университете для подготовки к профессорской и преподавательской деятельности. В 1925 г. Я.И. Френкель уезжает в годичную командировку в Германию, где общается с А. Эйнштейном, В. Паули, М. Борном в период становления квантовой механики. Отличаясь необычной широтой интересов, Я.И. Френкель обогатил физику большим количеством блестящих идей. В данной статье мы покажем, что многие из этих идей появились на свет благодаря аналогии – интеллектуальной процедуре, с помощью которой Яков Ильич смело переносил понятия и методы из одной научной области в другую.*

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

***Abstract:** Yakov Ilyich Frenkel (1894-1952) was an outstanding Russian theoretical physicist who left a bright mark on many areas of physical science. In 1913, young Ya. I. Frenkel graduated from high school with a gold medal and in the*

same year entered the mathematics department of the physics and mathematics faculty of St. Petersburg University. In 1916 he was left at St. Petersburg University to prepare for professorial and teaching activities. In 1925, Ya. I. Frenkel went on a year-long scientific trip to Germany, where he communicated with A. Einstein, W. Pauli, and M. Born during the period of the development of quantum mechanics. Distinguished by an unusual breadth of interests, Ya. I. Frenkel enriched physics with a large number of brilliant ideas. In this article, we will show that many of these ideas arose through analogy – an intellectual procedure by which Yakov Ilyich boldly transferred concepts and methods from one scientific field to another.

Key words: *new ideas, physical theories, similarity detection, use of analogy.*

1. Аналогия первая: разработка первого варианта теории металлов

Я.И. Френкель (1924) разработал первый вариант теории металлов по аналогии с концепцией атома, сформулированной в 1913 г. датским физиком-теоретиком, лауреатом Нобелевской премии, Нильсом Бором. Эта теория Я.И. Френкеля, вобравшая в себя результаты Н. Бора, сменила концепцию П. Друде и Г. Лоренца, в которой электроны проводимости рассматривались как свободные частицы, подобные молекулам газа. В теории Я.И. Френкеля утверждается, что валентные электроны в металле принадлежат всей его кристаллической решетке, не связаны с определенным атомом, а, попадая в сферу влияния атомов решетки, переходят от одного к другому, блуждая по металлу. Я.И. Френкель пришел к мысли о том, что валентный электрон очень далеко удаляется от своего атома и приближается при этом к атому-соседу, по аналогии с представлениями Н. Бора о роли валентных электронов в образовании молекулы водорода.

В.Я. Френкель в книге «Яков Ильич Френкель» [1] пишет: «Положение здесь аналогично тому, которое характерно для образования молекулы по Бору. Молекула водорода, например, состоит из двух ядер водорода –

протонов, которые окружают и одновременно сцепляют в единое целое два электрона. Каждый из них принадлежит при этом молекуле в целом и не имеет своего хозяина» [1, с.141].

Об этом же сообщает И.Е. Тамм в статье «Яков Ильич Френкель» [2]: «Применив к описанию электронов теорию Бора, Я.И. показал, что конденсация металлического пара в кристалле сопровождается «коллективизацией» валентных электронов, утрачивающих своего хозяина и обретающих возможность «блуждать» по металлу. Эти электроны и ответственны за характерную для металлов электропроводность. Я.И. показал, что из его теории вытекают все подтвержденные опытом результаты Друде (закон Видемана – Франца и т.д.) и вместе с тем устраняются внутренние противоречия классической теории, приводившие к известной «катастрофе с теплоемкостью» [2, с.413].

2. Аналогия вторая: формулировка идеи о подвижных электронных дырках в диэлектриках и полупроводниках

Я.И. Френкель (1930) развил концепцию подвижных электронных дырок в диэлектриках и полупроводниках по аналогии со своей же идеей о существовании ионных дырок в кристаллах. К мысли об ионных дырках, то есть вакантных узлах кристаллической решетки, Я.И. Френкель (1926) пришел индуктивно: эта мысль подсказывалась экспериментами А.Ф. Иоффе, в которых изучалась электропроводность ионных кристаллов. Другими словами, отечественный физик перенес понятие дырок с ионов на электроны (распространив это понятие на диэлектрики и полупроводники).

Я.И. Френкель в очерке «Автобиография» [3] пишет: «В соответствии с опытами Иоффе, относящимися к электропроводности ионных кристаллов, я ввел в 1926 г. концепцию подвижных ионных дырок, т.е. вакантных мест в кристаллической решетке, которые, помимо своего вклада в

электропроводность, играют существенную роль в большом количестве других явлений – тепловых (порядок - беспорядок) и оптических. Концепция подвижных дырок была впоследствии (в 1930 г.) **распространена мною** на случай электронных дырок в диэлектриках и электронных полупроводниках (атомы решетки, лишенные одного из своих электронов)» [3, с.470-471].

Аналогичное описание индуктивных посылок (оснований) концепции подвижных дырок можно найти в статье Я.И. Френкеля «Теоретическая физика в СССР за 30 лет» [4], где он указывает: «Понятие о подвижных дырках было впервые введено мной в 1926 г. в связи с изучением нарушений правильности в строении ионных (солеобразных) кристаллов при повышении температуры и обусловленной этими нарушениями электропроводности. Представление о том, что последняя объясняется тепловой диссоциацией части ионов, т.е. срывом их из узлов кристаллической решетки, было высказано Иоффе в 1924 г. Количественная же разработка теории электрических свойств гетерополярных диэлектрических кристаллов на основе этого представления, дополненного представлением о подвижных ионных дырках, была осуществлена мной» [4, с.321].

3. Аналогия третья: построение кинетической теории жидкости

Я.И. Френкель (1924, 1925) пришел к выводу о возможности перенести в теорию жидкости ряд идей и методов, заимствованных из теории твердых тел, когда обнаружил аналогию между жидкостями и твердыми (кристаллическими) телами. В дальнейшем отечественный ученый в полной мере реализовал указанную возможность. Показав ограниченность аналогии между жидкостями и газами, которую развивал голландский физик Йоханнес Дидерик Ван-дер-Ваальс (Нобелевская премия, 1910 г.), Я.И. Френкель описал множество параметров, сближающих жидкости с твердыми (конденсированными) телами. Отечественный ученый перенес на жидкости

понятие искажений в кристаллической решетке твердого тела, идею о наличии пустых узлов в этой решетке, то есть своеобразных дырок, которые создают дополнительные возможности для проявления теплового движения и определяют миграцию атомов или ионов с занятых узлов в соседние пустые. Я.И. Френкель постулировал, что жидкость обладает квази-кристаллической структурой, которая отличается от структуры твердых тел тем, что в жидкости имеется очень много вакантных узлов решетки, не занятых атомами.

А.И. Ансельм в статье «Яков Ильич Френкель» [5] отмечает: «В 1925 г. Я.И. Френкель выдвинул плодотворную идею об аналогии между жидким и твердым (кристаллическим) состояниями. В самом деле, расстояния между соседними атомами в жидкостях и кристаллах одного и того же порядка. Это приводит к примерно одинаковому взаимодействию между атомами в твердых и жидких телах. Я.И. подчеркивал, что это обстоятельство должно сказаться не только на одинаковости некоторых макроскопических свойств обоих агрегатных состояний, но и на сходстве их внутренней молекулярной структуры» [5, с.470].

Об этом же сообщает Н. Мотт в сборнике «Я.И. Френкель. Воспоминания, письма, документы» [6]: «Френкель очень рано понял, что жидкости, подобно твердым телам, должны обладать высокой степенью ближнего порядка и что движение молекул в жидкостях носит такой же колебательный характер, как и в кристаллах, а потому их и не следует описывать в терминах длины свободного пробега, характерных для газа» [6, с.142].

Разумеется, у идеи Я.И. Френкеля об аналогии между жидкостями и твердыми телами были и индуктивные, то есть эмпирические свидетельства. Одни из них появились в науке до 1925 г. (когда отечественный ученый начал разрабатывать свою идею), другие – позже. Приведем некоторые из них. К счастью, Я.И. Френкель сам описывает эмпирические наблюдения, говорившие в пользу его концепции. В книге «Кинетическая теория

жидкостей» [7] он сообщает: «Опыт показывает, что теплоемкость тел почти не меняется при их плавлении, а если и меняется, то обычно в сторону небольшого увеличения. Отсюда следует, что характер теплового движения в жидкости, по крайней мере вблизи температуры плавления, остается практически таким же, как и в твердых телах, т.е. сводится в основных чертах к малым колебаниям частиц около некоторых положений равновесия, а в случае двухатомных или еще более сложных молекул, помимо этого, к вращательным качаниям около некоторых равновесных ориентаций» [7, с.122].

Далее Я.И. Френкель описывает еще одно эмпирическое наблюдение: «...Жидкости, подобно твердым телам, могут выдерживать без разрыва очень большие растягивающие усилия, если эти усилия сводятся к всестороннему отрицательному давлению, исключающему возможность течения. Такое отрицательное давление может быть осуществлено путем охлаждения жидкости (например, ртути) вместе с сосудом, который она совершенно заполняет при начальной – высокой – температуре (запаянная стеклянная пробирка), если коэффициент расширения жидкости больше коэффициента расширения твердого тела (стекла), из которого сделан сосуд. Еще в 1911 г. Майер показал, что ртуть может быть растянута таким образом на 1,4%» [7, с.123].

Наконец, Я.И. Френкель обращает внимание на эксперименты У.Г. Стюарта (W.G. Stewart), опубликованные в 1931 г. и показавшие справедливость представлений отечественного физика: «...Применение рентгенографических методов структурного анализа позволило обнаружить тот факт, что расположение частиц в жидкостях при температурах, близких к температуре кристаллизации, не является совершенно беспорядочным, как в газах, но оказывается, как правило, **весьма сходным** с тем правильным расположением, в которое оно переходит при кристаллизации этих жидкостей. Этот факт, установлением которого мы обязаны главным образом работам

американского физика Стюарта [7] и который обнаруживается особенно резко в случае органических веществ с сильно вытянутыми молекулами (у так называемых «жидких кристаллов») даже без помощи рентгеновых лучей, может быть интерпретирован **по аналогии** с явлениями разупорядочения и дезориентации, рассмотренными нами в предыдущей главе, как сохранение при плавлении кристаллических тел некоторой степени ближнего порядка в относительном расположении частиц...» [7, с.125-126].

В предисловии к своей книге [7] Я.И. Френкель подчеркивает, что ему удалось «перебросить мост» между жидкостью и твердыми (кристаллическими) телами: «Введение в кинетическую теорию реальных кристаллов представления о частичной диссоциации кристаллической решетки на атомы, находящиеся в междоузлиях (Иоффе), и подвижные «дырки»... проложило дорогу к правильному пониманию характера теплового движения частиц в жидких телах, а именно – этому движению оказывается необходимым приписать колебательно-диффузионный характер с гораздо более резко выраженной диффузионной компонентой, т.е. гораздо более быстрым перемещением положений равновесия, в связи с отсутствием правильности в их пространственном распределении» [7, с.5].

4. Аналогия четвертая: использование идей Луи де Бройля в теории металлов

Выше мы указывали, что Я.И. Френкель (1924) разработал первый вариант теории металлов благодаря тому, что по аналогии перенес в эту теорию основные положения концепции (модели) атома, предложенной Н. Бором в 1913 г. Теперь мы должны рассказать о результатах Я.И. Френкеля, полученных им в ходе дальнейшей работы в этой области. Как известно, в 1924 г. французский физик Луи де Бройль, исходя из двойственной (корпускулярно-волновой) природы света, предположил, что любые массивные частицы также

должны обладать корпускулярно-волновыми свойствами. Де Бройль предсказал явление дифракции электронов, которое было обнаружено экспериментально в 1927 г. Л. Джермером и К. Дэвиссоном (последний в 1937 г. удостоен Нобелевской премии). Следует отметить, что до экспериментального обнаружения дифракции электронов многие авторитетные физики, в том числе Пауль Эренфест (1880-1933), скептически относились к идеям де Бройля. Однако Я.И. Френкель сразу увидел плодотворность этих новых идей. Что сделал отечественный ученый? Понимая, что основными «действующими лицами» во всех металлах являются электроны и, кроме того, руководствуясь аналогией, Я.И. Френкель перенес представление о корпускулярно-волновом дуализме электронов в теорию металлов. Он показал, что в этом случае (в случае использования идей де Бройля) в упомянутой теории можно получить все основные результаты, включая аномально большой пробег электронов, ответственных за проведение электрического тока в металлах.

В.Я. Френкель в статье «О стиле научного творчества Я.И. Френкеля (к восьмидесятилетию со дня рождения)» [8] повествует: «...Я.И. Френкель полагал, что важнейшим критерием правильности новых теорий должно явиться именно успешное разрешение с их помощью старых и выдвижение новых задач. <...> Назовем в качестве примера концепцию волн де Бройля, выдвинутую в 1924 г. Неожиданная и парадоксальная, она на первых порах многим представлялась неприемлемой: как можно было совместить в одно целое представление об электронах (в «зернистости» которых никто не сомневался) и волнах? Комментируя в Ленинграде доложенную на теоретическом семинаре Френкеля в Физико-техническом институте работу де Бройля, Эренфест полушутя сказал: «Одно из двух: или сумасшедший – де Бройль, или - я». Яков Ильич, первый у нас в стране (как заметил И.Е. Тамм) оценивший плодотворность идеи де Бройля, **применил это соотношение** даже не к свободным электронам, а к описанию поведения электронов в

металле и вывел с помощью этого представления все положительные результаты теории электронного газа Друде – Лоренца. <...> Развитая Френкелем концепция позволила понять и влияние температуры на сопротивление (рассеяние электронных волн на возрастающих с температурой флуктуациях вещества), и роль искажений решетки или посторонних в нее включений - примесей» [8, с.541-542].

Об этом же пишет И.Е. Тамм в статье «Яков Ильич Френкель» [2]: «Менее чем через год по возвращении из Германии Я.И. принимает участие в конгрессе, посвященном памяти Вольты, собравшемся в Комо (Италия). На этом конгрессе он выступает с докладом, в котором впервые формулирует основные положения квантовой теории электропроводности. Я.И. указал, что аномально большой пробег электронов проводимости в металлах (по сравнению с постоянной решетки) находит свое объяснение в **волновой природе электрона**. Идеально правильная кристаллическая решетка оказывается прозрачной для электронных волн, которые рассеиваются только на неоднородностях решетки (в том числе неоднородностях, обусловленных ее тепловыми колебаниями). Эти положения легли в основу современной теории электропроводности, в дальнейшем развитой Ф. Блохом и другими» [2, с.412].

5. Аналогия пятая: построение качественной теории ферромагнетизма

Я.И. Френкель (1928) сформулировал качественную теорию ферромагнетизма следующим образом. Чтобы объяснить ферромагнетизм, нужно было использовать два ключевых ингредиента: статистику Ферми – Дирака и представление о спин-орбитальном взаимодействии электронов. Статистика Ферми – Дирака уже использовалась в теории конденсированных тел: Вольфганг Паули перенес ее в теорию парамагнитных веществ (чтобы

объяснить явление парамагнетизма). Представление о спин-орбитальном взаимодействии электронов ввел Вернер Гейзенберг, который, конечно, основывался на открытии спина электрона (С. Гюудсмит, Дж. Уленбек, 1924). В. Гейзенберг применил идею спин-орбитального взаимодействия при построении теории атома гелия. Я.И. Френкель предположил, что спин-орбитальное (обменное) взаимодействие электронов должно играть важную роль не только в атомах гелия или каких-либо других отдельных атомах, как это показал В. Гейзенберг, но и в явлении ферромагнетизма. Собственно говоря, упомянутое обменное взаимодействие и является причиной ферромагнетизма. В том же 1928 г. этот факт осознал и В. Гейзенберг, разработавший теорию ферромагнетизма независимо от Якова Ильича. Таким образом, Я.И. Френкель объяснил явление ферромагнетизма в результате того, что перенес в область описания данного явления представление об обменном взаимодействии электронов, которое к 1928 году уже появилось в физике.

В.Я. Френкель в книге «Яков Ильич Френкель» [1] пишет о своем отце: «Яков Ильич обратил внимание на то, что для электронного газа в металлах должен иметь место эффект, **аналогичный** спин-орбитальному взаимодействию в отдельных атомах. Но свободные электроны в металле не движутся по замкнутым орбитам, и взаимодействие, как отмечает Яков Ильич, происходит между собственным магнитным моментом электрона и суммарным магнитным моментом электронной оболочки иона в кристаллической решетке металла» [1, с.220].

Детализируя ход рассуждений Я.И. Френкеля, которые привели его к правильной теории ферромагнетизма, В.Я. Френкель указывает: «Второе обстоятельство, отмеченное Я.И. Френкелем, сводится к тому, что для объяснения ферромагнетизма следует привлечь не только статистику Паули-Ферми в том же духе, как это было сделано Паули на разобранный выше примере парамагнетизма электронного газа, но и представление о так называемом обменном взаимодействии между электронами. Это

представление было введено Гейзенбергом (при построении теории атома гелия), и Яков Ильич первый показал, что обменное взаимодействие и связанная с ним дополнительная энергия электронного газа играют **кардинальную роль** в явлении ферромагнетизма, которое и было им (качественным образом) объяснено на этой основе. Более подробно и независимо это же было несколько позднее сделано самим Гейзенбергом» [1, с.220].

Аналогичная информация представлена в статье И.Е. Тамма «Яков Ильич Френкель» [2], где автор отмечает: «...Очень важной идеей Я.И. (которая, как он отмечает, возникла в его дискуссиях с Я.Г. Дорфманом) было впервые предложенное им объяснение ферромагнетизма, сводящееся к тому, что ввиду обменного взаимодействия электронов соответствующая часть их электростатического взаимодействия зависит от взаимной ориентации спинов, т.е. от их результирующей намагниченности. Именно этой электрической энергией взаимодействия и обусловлена большая разница в энергиях намагниченного и не намагниченного состояний ферромагнетиков, необъяснимая вне квантовой теории. Классическая работа Гейзенберга, в которой та же идея была независимо развита более полно и строго, появилась через несколько месяцев после работы Я.И.» [2, с.413].

6. Аналогия шестая: формулировка идеи о существовании экситона

Я.И. Френкель (1931) предсказал существование экситонов – квазичастиц, образующихся в кристалле при определенных условиях, реализовав двойную аналогию. С одной стороны, идея экситонов по аналогии подсказывалась эффектом образования свободных электронов, которые появляются в кристалле, облучаемом потоком света. Если облучать атомы кристалла светом, то некоторые атомы теряют часть своих электронов, которые начинают свободно перемещаться внутри кристалла (либо вообще

покидают кристалл). Но что произойдет, если энергии света окажется недостаточно для того, чтобы выбить электрон из атома и сделать его «свободно перемещающимся»? Отвечая на этот вопрос, Я.И. Френкель понял, что в этом случае электрон перейдет в возбужденное состояние. Можно ли представить это возбужденное состояние в виде некой виртуальной частицы (квазичастицы)? Отечественный ученый утвердительно ответил на этот вопрос. Далее Я.И. Френкель вновь использовал аналогию: он пришел к выводу, что экситон (экситонное возбуждение) имеет квантовую природу, по аналогии с исследованиями А. Эйнштейна, который заявил о квантовой природе света, о существовании квантов света (фотонов). Конечно, определенное влияние на Я.И. Френкеля оказала работа И.Е. Тамма, в которой тот проквантовал звуковые колебания (именно Я.И. Френкель предложил назвать кванты звука «фононами»). Но ключевым в этой истории все-таки оказался вопрос: что произойдет, если энергии света окажется недостаточно для того, чтобы выбить электрон из атома (если эта энергия всего лишь инициирует возбуждение электрона)?

С.Е. Бреслер, Ю.Н. Образцов и К.А. Тер-Мартirosян в статье «Научное наследие Я.И. Френкеля» [9] отмечают: «Большое значение для физики полупроводников имеет понятие экситона, введенное Яковом Ильичем в 1930-1931 гг. До его работ считалось, что единственным результатом поглощения кванта света непроводящим электричество кристаллом может явиться отрыв одного из электронов от атома, в результате чего этот электрон перейдет в такое состояние, в котором он может относительно свободно перемещаться внутри кристалла и создавать в нем электрический ток (внутренний фотоэффект). Френкель заметил, что поглощение света может сопровождаться процессом другого типа: электрон, поглотивший свет, может возбудиться, и это возбуждение с некоторой скоростью будет передвигаться от атома к атому. Можно показать, что перемещение такого возбуждения совершенно

аналогично движению в кристалле своеобразной частицы – квазичастицы, которую Френкель предложил называть экситоном» [9, с.13].

Аналогичные сведения можно найти в книге В.Я. Френкеля «Яков Ильич Френкель» [1]: «В чем же, в кратких чертах, состояла идея Якова Ильича? Ко времени появления его работы 1931 г. были хорошо разработаны теории внешнего и внутреннего фотоэффектов. Первая из них (1905 г.) объясняла закономерности эмиссии электронов с поверхности металлов под действием света. Именно в этой работе Эйнштейн и ввел понятие фотонов (связав свою работу с работой Планка). Представления Эйнштейна были затем привлечены для объяснения явления фотопроводимости, возникающей под действием света в кристаллах полупроводников за счет выбивания электронов фотонами из атомов внутри кристаллов. Что произойдет, однако, если частота света ν будет меньше энергии ионизации атома? опыты показывали, что как внешний, так и внутренний фотоэффект при этом не наблюдается: эмиссии электронов нет, и фотопроводимость (как правило) отсутствует» [1, с.313].

Далее В.Я. Френкель приводит цитату из работы Я.И. Френкеля 1949 года, где раскрывается суть идеи экситонов: «В этом случае (в случае недостаточности энергии света для выбивания электронов из кристаллов диэлектриков – Н.Н.Б.) поглощение света также оказывается, вообще говоря, возможным; однако результатом этого является не появление свободных друг от друга электрона и дырки, но возбужденного нейтрального атома. Это возникшее где-либо состояние не остается неподвижным, но может перемещаться прямолинейно и равномерно вдоль того или иного ряда атомов, как некая частица, которую я предложил называть экситоном («квантом возбуждения»). Движение экситона характеризуется волновой функцией того же типа, как и движение электрона или положительной дырки...» [1, с.313].

Отметим, что экспериментальное обнаружение экситонов – заслуга советского физика Евгения Федоровича Гросса (1897-1972), которому в 1951 г. удалось наблюдать водородоподобный спектр экситона в поглощении

кристалла закиси меди. В 1966 г. за открытие и изучение свойств экситона Е.Ф. Гроссу (и его сотрудникам) была присуждена Ленинская премия по физике.

7. Аналогия седьмая: предсказание антипротона и антинейтрона

Как известно, в 1930 г. британский физик-теоретик Поль Дирак предпринял попытку найти адекватное объяснение того, что выведенное им релятивистски-инвариантное волновое уравнение электрона, названное «уравнением Дирака», допускает состояния с отрицательной энергией. П. Дирак предположил, что эти состояния соответствуют новой частице, которая аналогична электрону, но имеет противоположный знак заряда. Другими словами, П. Дирак был близок к предсказанию позитрона (антиэлектрона). Однако из-за того, что в 1930 г. не были известны частицы, являющиеся зеркальным отражением электрона, П. Дирак заявил, что предсказываемая им частица – это все-таки протон. С этой точкой зрения не согласился немецкий математик и физик Герман Вейль (1885-1955), который отметил, что соображения симметрии требуют, чтобы еще не открытая частица была двойником электрона, но с положительным зарядом (а не протоном, как думал П. Дирак). В 1932 г. американский физик Карл Андерсон (1905-1991), не знакомый с теоретическими предсказаниями П. Дирака и Г. Вейля, экспериментально обнаружил позитрон – частицу, имеющую такую же массу, что и электрон, но положительный заряд.

Тот факт, что электрон имеет своего двойника, требовал теоретического осмысления. После открытия К. Андерсона возникла возможность (перспектива) обобщить факт существования пары «электрон - позитрон» на другие частицы. Иначе говоря, руководствуясь аналогией, можно было предположить, что протон также имеет своего двойника (свое зеркальное отражение). 12 декабря 1933 г. П. Дирак, получая Нобелевскую премию, прочитал лекцию под названием «Теория электронов и позитронов», в которой

предсказал существование антипротона. В указанной Нобелевской лекции [10] он говорит: «В любом случае, я думаю, что отрицательный протон может существовать, так как теорией уже определено, что имеется полная и совершенная симметрия между положительными и отрицательными зарядами. Если эта симметрия действительно по природе фундаментальна, всегда должен быть противоположный заряд у любых частиц. Само собой разумеется, что отрицательные протоны труднее получать экспериментально, так как требуемые энергетические затраты намного больше из-за большей массы протонов» [10, с.527].

Важно отметить, что похожее предсказание сделал Я.И. Френкель. Находясь под впечатлением от открытия Карла Андерсона, отечественный физик в 1933 г. пишет П. Дираку (еще не удостоенному Нобелевской премии) письмо, в котором, собственно говоря, выдвигает гипотезу о существовании антипротона и антинейтрона. Это письмо приводит В.Я. Френкель в очерке «К биографии Я.И. Френкеля» [11]: «Что вы думаете о протонах? Если их следует трактовать как элементарные частицы, то тогда мы должны предположить также и существование отрицательных протонов. <...> И, если, далее, нейтроны должны трактоваться как элементарные частицы, удовлетворяющие принципу Паули, должны быть также и «антинейтроны», которые соответствуют дыркам в почти заполненном (saturated) распределении нейтронов в состояниях с отрицательной энергией» [11, с.21].

Таким образом, используя принцип аналогии, основываясь на экспериментальном обнаружении факта существования позитрона (зеркального двойника электрона), Я.И. Френкель предположил существование аналогичных двойников у протона и нейтрона.

Антипротон был экспериментально открыт в 1955 г. Эмилио Сегре и Оуэном Чемберленом, которые установили, что эта частица рождается не отдельно, а в аннигилирующих парах протон-антипротон. В 1959 г. этот экспериментальный успех принес упомянутым ученым Нобелевскую премию

по физике. Следы антинейтрона были зарегистрированы в 1956 г. на том же ускорителе частиц – бэватроне в Беркли (США), на котором были обнаружены антипротоны. Это открытие сделали Брюс Корк, Вильям Венцель, Глен Ламбертсон, Оресте Пиччони, показавшие, что антинейтроны образуются в результате перезарядки при столкновении антипротонов с протонами.

Справедливости ради укажем, что Я.И. Френкель представлял антипротон как комбинацию протона и позитрона, но эта деталь – результат состояния физической науки начала 1930-х годов (многое оставалось неизвестным).

8. Аналогия восьмая: перенос понятий статистической физики в теорию атомного ядра

В 1936 г. Я.И. Френкель обогатил теорию атомного ядра понятиями, заимствованными из статистической физики. Отечественный ученый был хорошо знаком с принципами и методами статистической физики (включающей в себя термодинамику и молекулярно-кинетическую теорию), поскольку в течение длительного времени работал в этой области. Соответственно, рано или поздно он должен был прийти к мысли о переносе этих понятий в область описания атомного ядра. В частности, Я.И. Френкель (1936) предложил трактовать вылет нейтрона или альфа-частицы из атомного ядра как их «испарение» из этого ядра. Что касается противоположного физического процесса, то есть поглощения нейтрона ядром, то Яков Ильич нашел необходимым интерпретировать данный процесс как «конденсацию». В свою очередь, эти трактовки привели его к идее о том, чтобы использовать в теории атомного ядра (при описании тяжелых ядер) понятие температуры, относящееся к термодинамике. Базируясь на статистических представлениях, Я.И. Френкель нашел математическую формулу, выражающую вероятность вылета нейтрона из возбужденного ядра. Многие из этих идей Я.И. Френкеля

возникли после того, как Нильс Бор опубликовал в журнале «Nature» (1936) статью о компаунд-ядре, образующемся в процессе ядерной реакции.

В.Я. Френкель в статье «К биографии Я.И. Френкеля» [11] пишет о событиях 1936 года: «...Я.И. Френкель [26, стр.343] изложил свои соображения о возможности приложения к тяжелым ядрам, содержащим много десятков нуклонов, методов, характерных для статистической физики (занимающейся объектами, насчитывающими огромное количество атомов или молекул). Именно тогда впервые было предложено использовать понятие температуры для описания поведения тяжелых ядер, а испускание частиц из компаунд-ядра трактовать в терминах испарения (поглощение же налетающих частиц – в терминах адсорбции), **заимствованных** из кинетической теории конденсированных тел. Все эти вопросы Я.И. Френкель [1, стр.332, 333] еще до опубликования обсуждает в переписке с Бором, который всегда высоко оценивал его работы» (В.Я. Френкель, 1970, с.22).

Аналогичные сведения можно найти в статье В.Я. Френкеля «О стиле научного творчества Я.И. Френкеля» [8], где автор отмечает: «Если продолжить с рассматриваемой точки зрения обсуждение работ Френкеля по ядерной физике, то научной метафорой можно считать и введенное им представление о температуре ядер – в работе 1936 г., возникшей непосредственно вслед за появлением известной статьи Н. Бора о компаунд-ядре. Поглощение нейтрона ядром Френкель рассматривал как конденсацию его (причем энергия порядка 8 Мэв, которую вносит в ядро медленный нейтрон, трактовалась им как энергия конденсации), вылет же ядерной частицы – как ее «испарение» из ядра, в процессе которого затрачивается энергия испарения» [8, с.540]. «Можно, однако, утверждать, - продолжает автор, - что в последних двух случаях мы уже не столько имеем дело с характерным для Френкеля образным описанием явлений (особенности слога его статей), сколько сталкиваемся с отличающим его стилем мышления,

проявляющимся в широком использовании **метода аналогий** в процессе решения физических проблем и задач» [8, с.540].

Приведем еще один источник. Н.Н. Барабанов в статье «Я.И. Френкель и его роль в развитии физики XX века» [12] говорит о Я.И. Френкеле: «Прежде всего, он выдвинул идею описания процессов, происходящих с тяжелыми ядрами, методами статистической физики. К самим ядрам предлагалось применять понятие температуры; испускание же частицы из ядра, возбужденного налетевшим нейтроном, рассматривалось как **аналогия** испарения жидкости или твердого тела при низких температурах, а поглощение нейтрона ядром – как **аналог** адсорбции. На основе такого подхода Я.И. Френкель нашел формулу для вероятности вылета нейтрона для возбужденного ядра...» [12, с.2-3].

9. Аналогия девятая: разработка электрокапиллярной теории деления тяжелых атомных ядер

В 1938 г. О. Ганн и Ф. Штрассман обнаружили эффект деления атомных ядер урана медленными нейтронами. За год до этого события Лиза Мейтнер (1878-1968) и Отто Фриш (1904-1979) сформулировали идею о колебаниях ядерной жидкости. Под влиянием этих результатов Я.И. Френкель (1939) построил электрокапиллярную теорию деления тяжелых атомных ядер. Это была количественная теория, в основу которой отечественный ученый положил аналогию между делением тяжелых ядер и делением заряженных капелек ртути. Другими словами, количественно описывая колебания заряженной ядерной жидкости, Я.И. Френкель уподоблял эти колебания поведению заряженных капелек ртути. В рамках своей теории Яков Ильич предсказал спонтанный распад атомного ядра (распад ядра, происходящий без внешнего налетающего нейтрона). Источником (мотивом) этого предсказания

вновь послужила аналогия: спонтанный распад тяжелого атомного ядра подсказывался возможностью самопроизвольного распада капли жидкости.

В.Я. Френкель в статье «К биографии Я.И. Френкеля» [11] повествует: «Столь же плодотворной оказалась и теория электрокапиллярного деления тяжелых ядер медленными нейтронами, развитая Френкелем в 1939 г. [27]. <...> После исторических работ Гана и Штрассмана, установивших факт деления ядер урана медленными нейтронами, Лиза Мейтнер и Отто Фриш в развитие работы Бора (1937 г. [28]) выдвинули представление о колебаниях ядерной жидкости [29]. Френкель был первым, кто дал этим идеям количественное оформление с учетом того обстоятельства, что колеблется в этом случае заряженная жидкость. Теорию этих колебаний он строит, исходя из **прозрачной аналогии** с поведением капелек заряженной ртути. Тенденция к слиянию незаряженных капель ртути в капли больших размеров сменяется на противоположную в случае, когда капля заряжается до определенного потенциала. При достижении этого значения потенциала (заряда) капля данного размера, напротив, разлетается на две капли примерно равных размеров. В работе Френкеля указывается, что такой распад может происходить и без привнесения в систему энергии активации (налетающим нейтроном, например), приводящей к аperiodическому нарастанию колебаний, а самопроизвольно – спонтанно. Таким образом, впервые предсказывается (для урана и тория) спонтанный распад тяжелых ядер» [11, с.23].

Об этом же сообщает Н.Н. Барабанов в статье «Я.И. Френкель и его роль в развитии физики XX века» [12]: «Теперь об электрокапиллярной теории деления атомного ядра, предложенной Я.И. Френкелем в 1939 году (и независимо от него в том же году Н. Бором и Дж. Уилером). Основой для этой теории, помимо капельной модели ядра, стали идеи Л. Мейтнер и О. Фриша (1937 г.) о колебаниях ядерной жидкости, а также открытое О. Ганом и Ф. Штрассманом деление ядра урана медленными нейтронами (1938 г.). Я.И.

Френкель же идею о колебаниях ядерной жидкости обосновал количественно, исходя из того, что имеют место колебания заряженной жидкости. Конкретно эти колебания **уподоблялись поведению** заряженных капелек ртути. Капельки ртути небольшого размера могут слиться в большую каплю, если они не заряжены, однако, если капля ртути заряжена до определенного потенциала, то она распадается на две капли примерно равного размера. При этом Я.И. Френкель подчеркивал, что, **подобно** самопроизвольному распаду капли жидкости, атомное ядро также может распадаться произвольно, без внешнего налетающего нейтрона. Именно этим обстоятельством Я.И. Френкель объясняет нестабильность трансурановых элементов, начинающихся с порядкового номера 93» [12, с.4].

Приведем также воспоминания Я.Е. Гегузина о том, как Я.И. Френкель описал ключевые моменты своей аналогии в лекции, прочитанной студентам Харьковского университета сразу после разработки электрокапиллярной теории деления ядер. В книге «Капля» [13] Я.Е. Гегузин пишет: «Формул профессор почти не писал. Нарисовав мелом на доске водопроводный кран с набухающей каплей на конце, он начал рассказывать **об аналогии** между каплей воды и каплей ядерной жидкости – атомным ядром. До достижения некоторого размера капля на кончике крана устойчива: по крану можно щелкнуть, и капля не оборвется (он щелкнул по нарисованному крану). Когда же, набухая, капля достигнет определенного размера, она сама оборвется. И неожиданно заключил: периодическая система потому и оканчивается на уране, что тяжелая капля ядерной жидкости – ядро урана – велика и находится на пределе устойчивости, подобно той капле воды на кончике крана, которая вот-вот оторвется от него. Когда после этого, как само собой разумеющееся, он предсказал возможность спонтанного деления ядра урана, возникло ощущение провидения» [13, с.13]. «Термин «деление» применительно к ядру, - замечает автор, - впервые использовала Лизе Майтнер – выдающийся немецкий физик. Она, однако, имела в виду аналогию не с каплей, а с амебой.

Аналогия со сферической каплей, которая не деформируется тяжестью, оказалась значительно более глубокой и содержательной» [13, с.13].

Отметим, что предсказанный Я.И. Френкелем спонтанный распад ядра урана экспериментально обнаружили в 1940 г. отечественные физики Г.Н. Флеров и К.А. Петржак, проводившие свои опыты в Московском метро, а именно на станции-метро «Динамо», на глубине 60 метров. Эти условия проведения эксперимента диктовались стремлением снизить фон космических лучей, мешавших исследованию спонтанного распада.

10. Аналогия десятая: создание теории спекания пористых тел

Я.И. Френкель (1944) разработал физическую теорию спекания пористых тел, которая стала теоретической основой порошковой металлургии, по аналогии с физическим описанием процесса слияния двух жидких капель. Отечественный ученый обратил внимание на то, что в обоих случаях – при слиянии кристаллических крупинок и слиянии жидких капель – уменьшается поверхностная энергия, то есть слияние (спекание) становится энергетически выгодным.

Я.Е. Гегузин в книге «Очерки о диффузии в кристаллах» [14] рассказывает о работе Я.И. Френкеля, опубликованной в 1944 году: «В статье Я.И. Френкеля, в которой предлагалась идея физической теории спекания, была сформулирована и решена задача о слиянии двух соприкасающихся жидких капель. Слиться соприкасающимся жидким каплям выгодно, потому что при неизменном объеме их поверхность уменьшится. Соприкасающиеся капли всегда сливаются – в этом легко убедиться экспериментально. Я.И. Френкель получил связь между шириной перешейка, соединяющего сливающиеся капли, и временем, в течение которого перешеек увеличивался, а затем обратил внимание на то, что сказанное о жидких каплях **справедливо и применительно** к соприкасающимся кристаллическим крупинкам.

Разумеется, механизм «слияния» в этом случае будет иной, чем в случае жидких капель, но это уже, так сказать, деталь, главное же утверждение остается справедливым: кристаллические крупинки, **подобно жидким каплям**, должны и будут «сливаться» [14, с.203-204].

Об этом же сообщается в статье Я.Е. Гегузина «Глазами ученого и художника» [15]: «У Я.И. Френкеля есть работа, которой суждено было стать основой современной физической теории спекания пористых тел, т.е. теоретической основой порошковой металлургии и технологии производства огнеупорных материалов. Немало, правда? Между тем в этой статье физическая идея столь проста и красива, что без всякой вульгаризации ее можно рассказать каждому, кому известно, что у твердых и жидких тел существует поверхностная энергия и что при слиянии двух жидких капель связанная с ними поверхностная энергия уменьшается – потому, собственно, они и сливаются. И твердые порошинки сливаются потому же. Их слияние и есть спекание. Вот и всё! Эта статья – классика и по той роли, которую она сыграла в развитии одной из глав физики твердого тела, и по отраженному в ней блестящему мастерству Френкеля, умеющего **увидеть общие черты** в явлениях, которые иному покажутся не находящимися даже в отдаленном родстве» [15, с.115].

11. Аналогия одиннадцатая: формулировка гипотезы о причинах появления магнитного поля у нашей планеты

Пожалуй, ученые пытались понять механизм возникновения земного магнетизма с тех самых пор, когда английский физик и медик, придворный врач Елизаветы I, Вильям Гильберт (1544-1603) предположил, что наша планета является гигантским магнитом. К этому заключению он пришел на основании достаточно простых опытов. Взяв кусок магнита, обработанный так, что он имел форму шара, В. Гильберт поместил на него компас и

обнаружил, что магнитная стрелка компаса ведет себя на этом шаре точно так же, как стрелка компаса, используемая моряками при ориентации на море.

Впоследствии специалисты отказались от предположения В. Гильберта, поскольку на научной сцене появилась гипотеза французского физика Андре-Мари Ампера (1775-1836). Изучая эффекты электрического тока, А.М. Ампер открыл магнитный эффект соленоида (катушки с током), откуда следовала идея эквивалентности соленоида и постоянного магнита. А.М. Ампер высказал предположение, что магнетизм нашей планеты обусловлен «молекулярными токами», постоянно бегущими в земных недрах. Эта идея ближе к истине, чем упомянутая гипотеза В. Гильберта, но в ней не хватает деталей (а в деталях, как известно, и скрывается решение проблемы).

Для разгадки тайны земного магнетизма нужно было найти в теории электричества физический эффект, который мог бы работать в глубинах Земли. Благодаря активным поискам такой эффект (принцип) был найден в первой половине XX века. Им оказался принцип динамо-механизма. Суть этого принципа легко объяснить, если рассмотреть функционирование динамо-машины с самовозбуждением. Пусть катушка проводов вращается во внешнем магнитном поле. Тогда за счет электромагнитной индукции в катушке возникает электрический ток. Электрический ток создает магнитное поле, которое может усилить внешнее магнитное поле, что, в свою очередь, усилит ток в катушке, и т.д. В 1919 г. ирландский физик и математик Джозеф Лармор (1857-1942) предположил, что принцип динамо мог бы работать в недрах Солнца и объяснить магнитное поле нашего светила. Если бы Дж. Лармор, развивая свою догадку, перешел от Солнца к нашей планете, он мог бы разгадать секрет земного магнетизма. Но этого почему-то не произошло.

Заслуга решения данной проблемы принадлежит Я.И. Френкелю (1944). Как сообщают специалисты, независимо от него к решению проблемы близко подошел немецкий физик Вальтер Эльзассер (1904-1991). Что сделал Я.И. Френкель? Вновь руководствуясь аналогией, он перенес принцип динамо-

машины в область описания механизма возникновения магнитного поля Земли. Отечественный ученый предположил, что в глубинах нашей планеты работает тот же физический механизм, который хорошо известен электротехникам.

И.Е. Тамм в статье «Яков Ильич Френкель» [2] отмечает: «Вопрос о происхождении земного магнетизма столь долгое время находился в безнадежном состоянии, столь велико было число неудачных попыток разрешить эту проблему, что среди ученых вошло в привычку ссылаться на него, как на типичный пример безнадежной научной путаницы. Я.И. заинтересовался земным магнетизмом с юных лет, еще гимназистом разработал некую новую теорию его происхождения, а в зрелом возрасте, через 30 с лишним лет, ему удалось предложить новую идею – так называемый **«принцип динамо»**, - согласно которой земной магнетизм возбуждается токами, возникающими под влиянием униполярной индукции при вращении жидкого проводящего ядра Земли относительно внешних ее слоев. Уже после смерти Я.И. известный английский ученый Э. Буллард возродил его гипотезу, разработал ее количественно, математически, и в настоящее время есть все основания полагать, что гипотеза Я.И. окончательно разрешила эту сложную проблему» [2, с.397-398].

Об этом же сообщает В.Я. Френкель в книге «Яков Ильич Френкель» [1]: «Я.И. Френкель, прежде всего, показывает, что при наличии в ядре Земли очень небольших источников тепла (ими могут быть имеющиеся там радиоактивные элементы) в нем могут возникать конвективные токи. Если ядро находится во внешнем магнитном поле, то при определенном направлении (типе) этого конвективного движения связанное с ним вторичное магнитное поле приведет к усилению внешнего поля. Именно таким путем земное магнитное поле и может вырасти до наблюдаемых значений. Соответствующий механизм подобен самовозбуждению **динамо-машины**. Яков Ильич трактует металлическое ядро Земли как своеобразный

турбогенератор с самовозбуждением и свою теорию так и называет: «турбогенераторная» теория земного магнетизма» [1, с.444-445].

Приведем также фрагмент из книги В.Н. Жаркова «Внутреннее строение Земли и планет» [16], где автор указывает: «Теория геомагнитного поля, основанная на изложенном выше принципе (принципе динамо – Н.Н.Б.), называется теорией гидромагнитного динамо (ГД). Впервые идея ГД была предложена в 1919 г. Лармором в Англии для объяснения магнетизма Солнца. В геофизике эта идея не находила применения до середины сороковых годов, когда Я.И. Френкель в СССР и В. Эльзассер в США высказали идею о том, что тепловая конвекция в земном ядре является именно той причиной, которая приводит в действие ГД земного ядра. С тех пор теория ГД получила широкое развитие, и сейчас большинство специалистов полагают, что теория ГД достаточно гибка, чтобы объяснить всё многообразие явлений, связанных с геомагнетизмом» [16, с.109].

12. Аналогия двенадцатая: перенос статистики Ферми – Дирака в теорию внутреннего строения звезд

Позволим себе немного нарушить хронологию и вернемся в тот период времени, когда Я.И. Френкель (1928) активно изучал новые идеи и открытия, появившиеся в квантовой механике, и строил качественную теорию ферромагнетизма, используя статистику Ферми – Дирака и идею В. Гейзенберга о спин-орбитальном взаимодействии электронов. Дело в том, что Я.И. Френкель применил статистику Ферми – Дирака не только в теории металлов, но и в той области, которая первоначально была далека от его основных интересов. В частности, отечественный ученый применил результаты Ферми (итальянского физика Энрико Ферми) в теории внутреннего строения звезд.

Как известно, статистика Ферми – Дирака включает представление Э. Ферми о вырожденном электронном газе, который в силу принципа запрета Паули способен противодействовать внешнему давлению (например, давлению, оказываемому силами гравитации). Если электроны в этом вырожденном газе движутся со скоростями, близкими к скорости света, т.е. если мы имеем дело с релятивистским вырожденным электронным газом, то такая электронная система способна противостоять очень большой силе тяготения. До 1926 г. в астрофизике, а именно в теории белых карликов, оставался нерешенным парадокс Эддингтона, а именно сформулированный английским астрофизиком Артуром Эддингтоном (1882-1944) вопрос: почему звезды типа белых карликов в процессе эволюции не подвергаются гравитационному коллапсу, т.е. неограниченному гравитационному сжатию?

Решение этого парадокса нашел соотечественник А. Эддингтона, физик-теоретик и астрофизик Ральф Говард Фаулер (1889-1944). Ознакомившись со статистикой Ферми – Дирака и, прежде всего, с тем фактом, что вырожденный электронный газ способен эффективно противостоять внешнему давлению, Р. Фаулер (1926) по аналогии перенес данную статистику в теорию белых карликов. Он постулировал, что сердцевина этих звезд состоит из вырожденного электронного газа, который сопротивляется давлению (воздействию) сил тяготения, позволяя звезде избегать гравитационного коллапса. Однако Р. Фаулер не рассмотрел вариант, при котором масса звезды и, соответственно, силы гравитации окажутся столь большими, что электронный газ (даже при релятивистских скоростях движения электронов) уже не сможет противостоять этим силам.

Я.И. Френкель хорошо знал статистику Ферми – Дирака, поскольку уже использовал ее при описании поведения электронов в металле. Астрофизическая задача, стоявшая перед ним, представляла собой вопрос: при какой массе звезды возникает равновесие между давлением вырожденного электронного газа и силами гравитации, стремящимися сжать звезду до очень

малых размеров? При каких условиях звезда может превратиться в белый карлик, где существует это равновесие? Используя принцип аналогии и перенося концепцию Э. Ферми о вырожденном электронном газе в теорию внутреннего строения звезд, а также произведя необходимые расчеты, Я.И. Френкель получил замечательный результат. Он установил, что не каждая звезда может превратиться в белый карлик, а лишь та, масса которой превышает солнечную массу не больше, чем на 40 процентов.

И.Е. Тамм в статье «Яков Ильич Френкель» [2] пишет: «Яков Ильич развил теорию вырожденного релятивистского газа и применил ее результаты к проблеме внутреннего строения звезд. При этом он показал, что масса стабильной звезды, находящейся в вырожденном состоянии, не может превосходить определенного максимального значения, ненамного превышающего массу Солнца» [2, с.413].

Аналогичная информация представлена в очерке Я.И. Френкеля «Автобиография» [3], где отечественный ученый поясняет: «Я также разработал в 1928 г. качественную теорию ферромагнетизма, а в 1930 г., совместно с Я.Г. Дорфманом – теорию вейссовских доменов в ферромагнитных телах, указав на зависимость размеров этих доменов от полных размеров соответствующего тела. В том же 1928 г. я **пытался приложить** электронную теорию к проблеме внутреннего строения звезд, развивая теорию Ферми на случай электронного газа с релятивистскими энергиями. Таким путем мне удалось прийти к выводу о том, что масса стабильной звезды не может превосходить определенного максимального значения, ненамного превосходящего массу Солнца» [3, с.471].

К сожалению, работа Я.И. Френкеля (1928), посвященная изучению внутреннего строения звезд на основе теории Э. Ферми о вырожденном электронном газе, была неизвестна многим специалистам в области астрофизики. Например, до определенного момента об этой работе под названием «Применение теории электронного газа Паули – Ферми к вопросу

о силах сцепления» не знал отечественный физик и астрофизик Яков Борисович Зельдович (1914-1987). В начале 1960-х годов Я.Б. Зельдович выступил с докладом о физике звезд, в том числе о теории белых карликов, в Физико-техническом институте (Ленинград). При этом он отметил заслуги Л.Д. Ландау в определении массы звезды, позволяющей ей стать белым карликом, совершенно не упоминая Я.И. Френкеля. К счастью, среди слушателей доклада находился В.Я. Френкель, который рассказал Я.Б. Зельдовичу об астрофизической работе Я.И. Френкеля (1928). Этот случай описан в [17].

Чтобы устранить несправедливость, связанную с тем, что указанная астрофизическая работа Я.И. Френкеля (1928) ускользнула от внимания крупных специалистов в области теории строения звезд, Д.Г. Яковлев опубликовал статью, где проводится подробный анализ этой работы выдающегося отечественного физика-теоретика. В частности, в статье «Работа Я.И. Френкеля о «силах сцепления» и теория белых карликов» [18] Д.Г. Яковлев подчеркивает: «Таким образом, работа Я.И. Френкеля, опубликованная в 1928 г., содержала в себе почти все основные элементы теории белых карликов и заметно опередила классические работы других авторов, широко цитируемые в современной астрофизической литературе. Я.И. Френкель предсказал два типа сверхплотных звезд, состоящих из вырожденного нерелятивистского и релятивистского электронного газа, и правильно указал, что звезды второго типа имеют массу $M \geq M_{\text{Солнца}}$. Автором было получено уравнение состояния вырожденного электронного газа с произвольной степенью релятивизма электронов, которое является основным элементом для построения количественно точных моделей белых карликов» [18, с.656]. «Так или иначе, - продолжает автор, - в 1928 г. Я.И. Френкель первым разработал многие аспекты теории белых карликов. Замечательная работа Я.И. Френкеля не должна быть забыта: ей принадлежит

достойное место среди классических работ по теории белых карликов» [18, с.656].

13. Заключение

Многие современные философы, разделяющие концепцию Карла Поппера (1902-1994) о том, что индуктивный метод не играет существенной роли в развитии научного знания, часто утверждают, что между теорией и эмпирическими фактами нет прямой связи, что никакая научная теория не может быть выведена из фактов (наблюдений и экспериментов) путем индукции. В числе ученых, исповедующих данную точку зрения, можно найти и отечественных философов. Так, например, Владимир Семенович Степин (1934-2018) в книге «Научное познание в социальном контексте» [19] пишет: «...Теорию нельзя получить путем простого индуктивного обобщения эмпирических фактов. Оказалось, что теория хотя и обусловлена опытом, но непосредственно не может быть получена из индуктивного обобщения опытных данных» [19, с.19]. Аналогичную мысль В.С. Степин высказывает в книге «Философия науки. Общие проблемы» [20]: «Сколько бы мы ни проделывали опытов и ни обобщали их, простое индуктивное обобщение опытных результатов не ведет к теоретическому знанию. Теория не строится путем индуктивного обобщения опыта» [20, с.163].

Можно ли согласиться с этим утверждением отечественного философа? Верна ли мысль о невозможности вывести теорию из совокупности определенных фактов с помощью индуктивного метода? Нет, неверна. Творчество Я.И. Френкеля – прекрасная иллюстрация плодотворности индуктивных процедур (аналогия – важный компонент индуктивной логики). Проанализированные нами физические идеи Я.И. Френкеля, возникшие на основе аналогии, показывают ошибочность тезиса о том, что теория – здание, которое нельзя построить путем применения операций правдоподобной

логики (напомним, что понятие правдоподобных рассуждений ввел Д. Поппер [21]).

Когда Я.И. Френкель создавал первый вариант теории металлов, он переносил в нее (на основе аналогии – индуктивного приема) основные положения модели атома, разработанной Н. Бором (1913).

Когда отечественный физик разрабатывал теорию диэлектриков и полупроводников, он переносил в нее (на основе аналогии) идею о существовании ионных дырок в солевых кристаллах. При этом осуществлялся переход от ионных подвижных дырок к электронным дыркам. В свою очередь, идея ионных дырок в таких кристаллах была индуктивно подсказана экспериментами А.Ф. Иоффе по исследованию электропроводности ионных кристаллов.

Работая над усовершенствованием теории металлов, Я.И. Френкель переносил в нее (на основе аналогии – индуктивной процедуры) идею Луи де Бройля о корпускулярно-волновой двойственности электронов. В свою очередь, сам де Бройль пришел к мысли об этой двойственной природе электронов по аналогии с корпускулярно-волновым дуализмом света (этот дуализм впервые описал А. Эйнштейн).

Предсказывая существование новых частиц – антипротонов и антинейтронов, Я.И. Френкель основывался на экспериментальном открытии позитрона (Карл Андерсон, 1932 г.). Отечественный физик рассуждал: если электрон имеет двойника в виде позитрона (антиэлектрона), то, руководствуясь аналогией, следует предположить наличие подобных двойников у протона и нейтрона. То есть аналогия (составной элемент индуктивной логики) диктовала гипотезу об указанных античастицах.

Формулируя статистическую теорию атомного ядра, Я.И. Френкель переносил в нее (на основе аналогии) понятия, заимствованные из статистической физики. Траектуя вылет нейтрона из атомного ядра как процесс его «испарения», а поглощение нейтрона ядром – как явление «конденсации»

и, наконец, перенося в область описания тяжелых ядер понятие температуры, Я.И. Френкель, с одной стороны, демонстрировал свои познания в области термодинамики и статистической физики, а во-вторых, осознавал плодотворность такого подхода к развитию одного из разделов ядерной физики.

Электрокапиллярная теория деления тяжелых атомных ядер – результат смелого применения индуктивных процедур в ситуации, когда эксперимент уже показал возможность деления атомов урана (опыты О. Ганна и Ф. Штрассмана, 1938 г.). Принцип аналогии подсказал Я.И. Френкелю, что деление тяжелых ядер можно уподобить делению заряженных капелек ртути. Возможность самопроизвольного распада капли жидкости, а также тот факт, что уран замыкает таблицу химических элементов, натолкнули на мысль о спонтанном распаде тяжелых ядер, что впоследствии было обнаружено экспериментально (Г.Н. Флеров, К.А. Петржак, 1940 г.).

Рассмотренные историко-научные факты показывают ошибочность концепции В.С. Степина и других философов, согласно которой индуктивный метод не является инструментом, посредством которого теории выводятся из эмпирической информации, полученной в эксперименте. Данный метод включает в себя не только процесс перехода от единичных фактов к общему заключению, но и процедуру аналогии (переход от частного к частному).

Читатель найдет описание множества примеров плодотворного применения аналогии в книге автора этих строк [22].

Литература:

1. Френкель В.Я. Яков Ильич Френкель. – Москва-Ленинград: «Наука», 1966. – 473 с.
2. Тамм И.Е. Яков Ильич Френкель // Успехи физических наук. – 1962. - Том 76. - № 3. – С.397-430.

3. Френкель Я.И. Автобиография // сборник «Я.И. Френкель. Воспоминания, письма, документы». – Ленинград: «Наука», 1986. - С.466-472.
4. Френкель Я.И. Теоретическая физика в СССР за 30 лет // Френкель Я.И. На заре новой физики. Сборник избранных научно-популярных работ. – Ленинград: «Наука», 1970. - С.306-337.
5. Ансельм А.И. Яков Ильич Френкель // Успехи физических наук. – 1952. - Том 47. - № 3. – С.470-476.
6. Мотт Н. Воспоминания // сборник «Я.И. Френкель. Воспоминания, письма, документы». – Ленинград: «Наука», 1986. – С.141-143.
7. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. – Ленинград: «Наука», 1975. – 592 с.
8. Френкель В.Я. О стиле научного творчества Я.И. Френкеля (к восьмидесятилетию со дня рождения) // Успехи физических наук. – 1974. - Том 113. - № 3. – С.535-547.
9. Бреслер С.Е., Образцов Ю.Н., Тер-Мартirosян К.А. Научное наследие Я.И. Френкеля // сборник «Я.И. Френкель. Воспоминания, письма, документы». – Ленинград: «Наука», 1986. – С.7-16.
10. Дирак П. Теория электронов и позитронов (Нобелевская лекция) // Лауреаты Нобелевской премии по физике. Биографии, лекции, выступления. – СПб.: «Наука», 2005. - С.523-527.
11. Френкель В.Я. К биографии Я.И. Френкеля // Френкель Я.И. На заре новой физики. Сборник избранных научно-популярных работ. – Ленинград: «Наука», 1970. - С.5-26.
12. Барабанов Н.Н. Я.И. Френкель и его роль в развитии физики XX века // Физика. Всё для учителя! – 2014. - № 4 (40). - С.2-7.
13. Гегузин Я.Е. Капля. – М.: «Наука», 1973. – 160 с.
14. Гегузин Я.Е. Очерки о диффузии в кристаллах. – М.: «Наука», 1974. – 254 с.

15. Гегузин Я.Е. Глазами ученого и художника // Природа. – 1971. - № 3. - С.113-115.
16. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. – М.: «Наука», 1983. – 416 с.
17. Френкель В.Я. Он, как живой, стоит перед глазами // сборник «Яков Борисович Зельдович. Воспоминания, письма, документы». – М.: «Физматлит», 2008. - С.26-38.
18. Яковлев Д.Г. Работа Я.И. Френкеля о «силах сцепления» и теория белых карликов // Успехи физических наук. – 1994. - Том 164. - № 6. – С.653-656.
19. Степин В.С. Научное познание в социальном контексте. Избранные труды. – Минск: БГУ, 2012. – 416 с.
20. Степин В.С. Философия науки. Общие проблемы. – М.: изд-во «Гардарики», 2006. – 384 с.
21. Пойа Д. Математика и правдоподобные рассуждения. – М.: «Наука», 1975. – 464 с.
22. Новиков Н.Б. 1000 аналогий, изменивших науку. Новый взгляд на гениальность. – Lambert Academic Publishing, 2022. – 690 с.