

ЛЕВ ШУБНИКОВ. СУДЬБА И ЖИЗНЬ В НАУКЕ

Н. Н. Барабанов, ЦРА МГТУ «СТАНКИН», г. Москва

В историю отечественной и мировой науки Лев Васильевич Шубников вошёл как ученый, творческое наследие которого впечатляет как по широте интересов, так и по результативности исследований. Блестящий физик-экспериментатор, внёсший весомый вклад в изучение сверхпроводимости и магнитных свойств вещества; человек, первым изучавший квантовые эффекты в твёрдых телах и получивший ценнейшие результаты в области атомной и ядерной физики; наконец, крупный подвижник науки, создавший первую в СССР лабораторию по изучению низкотемпературных процессов — всё это было осуществлено менее чем за 15 лет активной научной жизни, оборванной трагическими событиями конца тридцатых годов прошлого века.

Воздать дань уважения и благодарной памяти этой яркой личности ныне представляется крайне важным — и потому, что многое из сделанного Л. В. Шубниковым отнюдь не отошло исключительно в область истории физики, и потому, что многим нашим современникам об этом учёном не известно практически ничего, хотя об иных его работах вполне можно (а в ряде случаев и необходимо) рассказать уже при изучении физики в средней школе. О том, где и как это можно сделать, и пойдёт речь в нашей статье. Но сначала — о том, как рос и формировался учёный, ибо воспитание и образование во многом определили не только его научный кругозор, но и человеческие качества.

Л. В. Шубников родился в Петербурге 29 сентября 1901 г. Мать, Любовь Сергеевна, вела хозяйство, отец, Василий Васильевич, был бухгалтером и работал на одном из питерских заводов. Он был разносторонне образованным человеком с широким кругом интересов, которые были заложены ещё в годы учёбы в Московском коммерческом училище — первоклассном учебном заведении России, выпускниками которого в XIX веке были писатель И. А. Гончаров, а в XX веке — братья Николай Иванович и Сергей Иванович Вавиловы. Это же училище закончил и младший брат Василия Васильевича — Алексей Васильевич Шубников, ставший впоследствии крупнейшим советским кристаллографом, академиком, Героем Социалистического Труда. Когда Льву исполнилось десять лет, отец определил его в одну из лучших гимназий Петербурга — гимназию М. А. Лентовской, и о ней нужно сказать отдельно. В первые послереволюционные годы в этой гимназии, преобразованной в школу, учился будущий поэт А. И. Введенский, ставший позже членом литературной группы обэриутов,



■ 29.09.1901 — 10.11.1937

в состав которой входили также Д. Хармс, Н. Олейников, Н. Заболоцкий. Все они, за исключением Н. Заболоцкого, погибли в годы сталинских репрессий, а Н. Заболоцкий, пройдя через ГУЛАГ, выжил и умер в возрасте 55 лет в годы хрущёвской «оттепели». В этой же гимназии и в те же годы учился Д. С. Лихачёв. Он вспоминает: «Школа образовалась после революции 1905 года из числа преподавателей, изгнанных из казённых гимназий за революционную деятельность. Их собрал театральным антрепренёром Лентовская, дала денег и организовала частную гимназию, куда сразу стали отдавать своих детей левонастроенные интеллигенты. У директора (Владимира Кирилловича Иванова) в директорском его кабинете была библиотечка революционной марксистской литературы, из которой он секретно давал читать книги заслуживающим доверие ученикам старших классов.

Между учениками и преподавателями образовалась тесная связь, дружба, «общее дело». Учителям не надо было наводить дисциплину строгими мерами. Учителя могли постыдить ученика, и этого было достаточно, чтобы общественное мнение класса было против провинившегося и озорство не повторилось. Нам разрешалось курить, но ни один из аборигенов этим правом не воспользовался...

Были у нас умные педагоги. В школе Лентовской поощрялось собственное мнение учеников. В классе часто шли споры. С тех пор я стремлюсь сохранять в себе самостоятельность во вкусах и взглядах»¹.

Осенью 1918 года Лев Шубников стал студентом математического отделения физико-математического отделения Петроградского университета.

¹ Лихачёв Д. С. Книга беспокойств. — М.: Новости, 1991. — С. 73–74.

та — единственным студентом по специальности «Физика» набора того года. Поэтому лекции в университете ему пришлось слушать сначала со студентами, поступившими годом раньше, среди которых были будущие академики В. А. Фок и А. Н. Теренин, а также член-корреспондент АН СССР С. Э. Фриш — автор известнейшего университетского курса общей физики (написанного совместно с женой А. В. Тиморевой). А годом позже в числе студентов, окружавших Шубникова, оказалась О. Н. Трапезникова, ставшая в 1925 г. его женой и соавтором ряда исследований. Когда же в конце 1918 г. по инициативе выдающегося учёного-оптика (в советское время — академика) Д. С. Рождественского в Петрограде был создан Государственный оптический институт (ГОИ), его лаборантами стали многие студенты университета. В числе первых привлечённых на лаборантскую работу был и Л. В. Шубников — навыки работы экспериментатора он получил именно в это время.

А потом обучение в университете прервалось. Дело в том, что одним из сильнейших увлечений тех лет у студента Льва Шубникова был парусный спорт. Осенью 1921 г. яхта, на которую он устроился матросом, попала в шторм в Финском заливе. В итоге Л. В. Шубников оказался сначала в Финляндии, а потом в Германии. Скитания по зарубежью продолжались более года, выживать приходилось случайными заработками, и лишь после неожиданной встречи в Берлине с петроградским физиком М. М. Глаголевым, приехавшим в Германию для закупки научного оборудования и знавшим Л. В. Шубникова по университету, ему удалось вернуться в Советскую Россию.

Оказавшись снова в Петрограде, Лев Васильевич, однако, в университете восстанавливаться не стал. Он устроился сначала на работу лаборантом в созданный А. Ф. Иоффе Физико-технический институт, а позже был зачислен на третий курс также созданного и руководимого А. Ф. Иоффе физико-механического факультета Политехнического института, который окончил в июне 1926 года, защитив дипломную работу под названием «Оптический метод изучения упругих и остаточных деформаций в кристаллах». Руководителем этой работы был Иван Васильевич Обреимов, впоследствии академик, крупный учёный в области оптики, молекулярной спектроскопии, физики низких температур. Тематически к этой работе примыкает совместная статья И. В. Обреимова и Л. В. Шубникова «Оптический метод исследования пластических деформаций в каменной соли», в которой был предложен метод определения остаточных напряжений в зоне пластической деформации в прозрачных кристаллах по величине двойного лучепреломления. С помощью этого метода были исследованы кинетика пластической деформации, упругие свой-

ства кристалла, а также определено максимальное значение локального напряжения в кристалле. Последнее оказалось очень высоким (в системе СИ его значение составляло примерно 10^8 Па).

Что же касается самой первой научной работы Л. В. Шубникова, относящейся к 1924 году и выполненной также под руководством И. В. Обреимова по рекомендации А. Ф. Иоффе, то на ней следует остановиться особо. Более того: она вполне заслуживает упоминания на уроке физики в школе при изучении свойств кристаллов. Традиционно мы подчёркиваем на уроках, что металлы относятся к поликристаллическим структурам, чем, в частности, вызвана их изотропия в отличие от анизотропии монокристаллов. Но это верно лишь для кристаллических образцов металлов, встречающихся в обычных условиях. А могут ли существовать металлические монокристаллы? Л. В. Шубников экспериментально показал, что да, могут — выполненная им совместно с И. В. Обреимовым работа так и называлась: «Метод получения монокристаллов металлов». Практическое значение предложенного ими метода представляется важным по следующим причинам:

- Монокристаллы металлов отличаются исключительно высокой степенью однородности и анизотропии, которая в свою очередь обусловлена почти идеальной правильностью кристаллических решёток металлов.
- Результаты исследований свойств именно монокристаллических структур можно истолковать в атомно-молекулярном аспекте, тогда как в случае поликристаллов мы имеем дело со статистическими значениями многих их физических характеристик, усреднённых по всевозможным ориентациям микрокристаллических структур.

Методы получения монокристаллов металлов существовали и ранее. Из газов их получали либо путём возгонки, когда формировались огранённые кристаллики ряда металлов (в частности, магния), либо путём наращивания монокристалла с помощью диссоциации из паров. Существовал также особый метод (т. н. «метод Чохральского» по имени его автора), когда в расплавленный металл погружали стеклянную палочку и потом вытягивали её с постоянной скоростью. При этом из расплава вытягивалась монокристаллическая нить — скорость вытягивания подбиралась в каждом конкретном случае индивидуально. При малой скорости вытягивания нить получалась поликристаллической, ибо в этом случае возникало большое число центров кристаллизации. При большой скорости нить обрывалась, поскольку скорость вытягивания превышала скорость кристаллизации и потому последняя являлась критической скоростью. Зная последнюю, можно было найти скорость кристаллизации

металла. Она составляла, в частности, $90 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}$ для олова, $100 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}$ для цинка, $140 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}$ для свинца. Но при таких методах выращивания кристаллов, во-первых, не удавалось получить желаемой формы с заданной ориентацией осей, а во-вторых, при механической обработке таких кристаллов в них образовывались глубоко проникающие остаточные деформации.

В методе Обреимова — Шубникова многие из указанных дефектов удалось преодолеть. Были получены цилиндрические монокристаллы олова, висмута, кадмия, алюминия, меди. Расплавление металла производилось в трубке с оттянутым в виде капилляра и запаянным концом. Когда металл полностью расплавлялся в специальной вертикальной печи, где температура поддерживалась немного большей, чем температура плавления металла, конец капилляра охлаждался струёй холодного воздуха. В этой малой области возникал единственный зародыш кристалла, и он являлся центром дальнейшей кристаллизации. (Предварительно нужно было добиться того, чтобы расплавляемый металл был максимально очищен от примесей.) Далее границу охлаждения смещали по трубке в направлении расплава, и в итоге в трубке формировался монокристалл металла. Образование новых центров кристаллизации в данном случае не происходило. Монокристаллы, полученные таким методом, были достаточно крупных размеров, но уязвимой стороной метода их получения было то, что исходный кристаллик-зародыш имел в капилляре случайную ориентацию. Отчасти её можно было менять, варьируя скорость охлаждения. Эту проблему удалось решить в методе, предложенном в те же годы П. Л. Капицей: после расплавления металла в него вносился затравочный кристаллик, которому заранее придавалась желаемая ориентация, и на нём начинала нарастать твёрдая фаза, сохраняющая ориентировку кристаллика-затравки.

Таким было начало. А по окончании института Л. В. Шубников по рекомендации А. Ф. Иоффе был откомандирован для продолжения научной работы в Голландию, в Лейден, где находилась первая в мире лаборатория физики низких температур, основанная Г. Камерлинг-Оннесом и где в 1908 г. был впервые получен жидкий гелий, а в 1911 г. впервые наблюдалось явление сверхпроводимости. Самого Г. Карелинг-Оннеса к тому времени уже не было в живых — лабораторией руководили его ученики В. Кеезом и В. де Гааз. Последний предложил молодому советскому учёному заняться исследованиями магнетосопротивления висмута при низких температурах. (Что это за величина, будет сказано ниже.) Первоначально зарубежная коман-

дировка Л. В. Шубникова планировалась на полгода, однако масштаб работы оказался таким, что Лев Васильевич был вынужден многократно продлевать сроки своего пребывания в Голландии, соответственно продлевая визу. Достаточно сказать, что год ушёл только на очистку сырья, из которого потом выращивались монокристаллы висмута, необходимые для продолжения экспериментов. Монокристаллы, полученные в Лейдене по методу Обреимова — Шубникова, были уникальными по степени чистоты: они имели заданную ориентацию кристаллографических осей и при этом были свободны от внутренних механических напряжений. На этих кристаллах и был открыт в 1930 г. эффект, который ныне именуется эффектом Шубникова — де Гааза, — первый в истории физики эффект квантовых осцилляций в металлах. О том, как и при каких условиях в металлах можно наблюдать колебания сопротивления под действием внешнего магнитного поля, каков механизм этого явления и какое оно имеет практическое значение, будет рассказано чуть позже. Пока же скажем несколько слов о той среде, в которой оказался Л. В. Шубников за границей.

Научное окружение молодого физика было уникальным по степени благоприятности для его дальнейшего развития. В годы своего пребывания в Лейдене Л. В. Шубников регулярно посещал теоретические семинары, которые проводил П. С. Эренфест и на которых выступали А. Эйнштейн и М. Планк, В. Паули и П. Дирак, А. Зоммерфельд и Э. Шрёдингер. В Лейден наезжали в командировки А. Ф. Иоффе, П. Л. Капица, И. Е. Тамм, некоторое время там жил и работал И. В. Обреимов, а в 1929 г. там оказался молодой Л. Д. Ландау (ему был тогда 21 год), и знакомство с ним Л. В. Шубникова переросло не только в личную дружбу, но и — что особенно важно — в тесное научное сотрудничество в тридцатые годы, когда Л. Д. Ландау и Л. В. Шубников вместе оказались в Харькове, в Украинском физико-техническом институте. Результатом их сотрудничества стали важнейшие работы Л. В. Шубникова по исследованию антиферромагнетизма и сверхпроводимости. Наконец, теоретическое обоснование эффекта Шубникова — де Гааза в значительной степени можно найти в ставшей ныне классической работе Л. Д. Ландау по исследованию диамагнетизма. К рассмотрению этого эффекта мы и переходим.

Магнетосопротивлением, о котором упоминалось выше, называется отношение изменения удельного сопротивления $\Delta\rho$ во внешнем магнитном поле к его удельному сопротивлению ρ_0 в отсутствие этого поля. Поле может быть либо продольным, когда ток в проводнике течёт вдоль поля, либо поперечным, когда поле и ток взаимно перпендикулярны по направлению. Само явление измене-

ния сопротивления в магнитном поле называется магниторезистивным эффектом. При комнатных температурах поперечное магнетосопротивление большинства металлов мало и составляет примерно 10^{-4} при внешнем поле порядка 10^4 эрстед². Висмут — исключение: его поперечное магнетосопротивление для поля $H = 3 \cdot 10^4$ Э равно 2.

К тому времени, когда Л. В. Шубников приступил к исследованию поведения висмута в магнитном поле, об этом веществе, в частности, было известно следующее. Висмут и сурьма являются ярко выраженными диамагнетиками; при плавлении у этих металлов (а у висмута — в особенности) уменьшаются сопротивление и объём. В 1895 г. Пьер Кюри обнаружил исчезновение у висмута диамагнетизма при температуре, несколько меньшей точки плавления. Также было известно, что магнетосопротивление висмута с ростом внешнего магнитного поля растёт сильнее, чем у других металлов, и этот рост для монокристаллов металла зависит от ориентации магнитного поля относительно кристаллографических осей. Ещё было известно, что магнетосопротивление висмута быстро растёт по мере снижения температуры.

В 1927 г. магнетосопротивление висмута исследовал П. Л. Капица, используя свой метод получения сверхсильных магнитных полей — в его опытах они достигали сотен тысяч эрстед³. Он экспериментально установил, что в слабых полях сопротивление растёт пропорционально квадрату напряжённости внешнего магнитного поля, а в сильных полях этот рост происходит по линейному закону — этот опытный факт вошёл в физику, как закон Капицы. Однако П. Л. Капица проводил опыты при температурах в области жидкого азота, имеющего температуру ожигения $-195,8$ °С. Когда же Л. В. Шубников провёл измерения магнетосопротивления висмута при температурах ожигения уровня жидкого гелия (эта температура равна $-268,9$ °С), то оказалось, что уже при наложении внешнего поля напряжённостью до 10–15 килоэрстед сопротивление висмута растёт нелинейно, по достаточно сложной осциллирующей зависимости, и амплитуда осцилляций экспоненциально убывает по мере роста температуры. Было также установлено, что при гелиевых температурах магнетосопротивление висмута крайне чувствительно к механическим напряжениям и к наличию крайне малых примесей (порядка 10^{-4} %). Отметим попутно, что именно Л. В. Шубников и В. де Гааз предложили

² Напоминаем, что эрстед есть единица напряжённости магнитного поля в системе СГСМ. Связь с системой СИ: $1 \text{ Э} = \frac{1}{4\pi} \cdot 10^3 \frac{\text{А}}{\text{м}}$.

³ Подробнее: Капица П. Л. Сильные магнитные поля. Их получение и эксперименты с ними // Эксперимент, теория, практика. — М.: Наука, 1981.

считать отношение сопротивлений при комнатной и гелиевых температурах в качестве критерия чистоты исследуемого металла.

Подчеркнём: работа Л. В. Шубникова и В. де Гааза была прежде всего работой экспериментальной и природа обнаруженных ими осцилляций практически не выяснялась. Однако уже тогда было ясно, что поскольку речь шла о крайне низкотемпературном эффекте, постольку эта природа должна была быть квантовой. Многие в этом плане прояснила ставшая ныне классической работа Л. Д. Ландау 1930 г. по исследованию диамагнетизма. Исследуя в ней влияние внешнего магнитного поля на электроны проводимости в металлах и полупроводниках, Л. Д. Ландау показал, что искривление траекторий электронов под действием силы Лоренца даёт диамагнитный эффект (выталкивание металла из внешнего поля), при котором электроны проводимости движутся по спиральным квантованным орбитам. Это особенно заметно в тех случаях, когда орбиты охватывают много атомов, но именно это характерно для висмута и графита. Данный эффект, именуемый диамагнетизмом Л. Д. Ландау, крайне слаб — он втрое слабее парамагнетизма, вызываемого собственными магнитными моментами электронов. Но вот что предсказывал Л. Д. Ландау в своей работе. При крайне низких температурах и в сильных магнитных полях «могла бы возникнуть сложная нелинейная зависимость магнитного момента от поля, которая к тому же имела бы сильную периодичность по полю. Однако именно благодаря периодичности наблюдение нелинейных эффектов вряд ли будет возможно экспериментально, поскольку из-за неоднородности реальных полей всегда будет происходить усреднение»⁴.

Как раз это — сильная периодичность по полю — и наблюдалась в эффекте Шубникова — де Гааза. Более того: в том же 1930 г. на монокристалле сверхчистого висмута, кубика со стороной 5 мм, изготовленного Л. В. Шубниковым, В. де Гаазом и П. М. ван Альфеном, были обнаружены осцилляции магнитной восприимчивости⁵ от внешнего магнитного поля, природа которых была аналогична тому, что наблюдалось в эффекте Шубникова — де Гааза.

Что касается энергетического аспекта протекания рассматриваемого эффекта, то представляется необходимым отметить следующее. Из квантовой теории известно, что одной из основных характеристик электрона является его элементарный магнитный момент, именуемый магнетонном Бора, который в системе СИ вычисляется по формуле $\mu = \frac{e\hbar}{2m_e}$ —

⁴ Ландау Л. Д. Собрание трудов в двух томах. — М.: Наука, 1969. — Т. 1. — С. 52.

⁵ Напоминаем, что магнитной восприимчивостью называется величина $\chi = \mu - 1$, где μ — известная из школьного курса физики магнитная проницаемость среды.

в числителе дроби записано произведение заряда электрона на постоянную Планка, уменьшенную в 2π раз, а в знаменателе — удвоенная масса электрона. Знания школьного курса физики вполне достаточно для того, чтобы найти единицу измерения магнетона Бора, и она оказывается в системе СИ равной $\frac{Дж}{Тл}$, в чём читатель может убедиться самостоятельно⁶. В этом смысле можно считать, что речь идёт об элементарном кванте магнитной энергии. Но движение электрона проводимости в кристалле под действием совокупности внешних для электрона сил (ускоряющей и действующей на электрон со стороны кристаллической решётки) можно описывать как движение свободного электрона только под действием ньютоновской ускоряющей силы \vec{F} , но с некоторой массой m^* , которая называется эффективной массой частицы, вернее квазичастицы, поскольку электрон здесь заменён частицей с иной массой. Для такой квазичастицы можно ввести в качестве характеристики «эффективный магнетон», заменив массу электрона на эффективную массу в формуле магнетона Бора. Методами квантовой механики установлено, что эффект Шубникова — де Гааза протекает при выполнении условия $\frac{e\hbar}{m^*} > kT$, или, что одно и то же, $\mu^* > \frac{1}{2}kT$ (в правой части неравенства записана тепловая энергия квазиэлектрона проводимости, приходящаяся на одну степень свободы этой частицы).

Важно также следующее. Дальнейшее исследование магнетосопротивления металлов показало, что эффект, первоначально изученный на висмуте, элементе достаточно специфичном, наблюдается для всех металлов. Уже в 1939 г. этот эффект был обнаружен в монокристаллах цинка, а в 1947 г. для цинка был обнаружен эффект де Гааза — ван Альфена. То, что ныне он известен для любых металлов, закономерно: основой эффекта так или иначе является диамагнетизм, а он, будучи частным случаем электромагнитной индукции на внутриатомном уровне, возникает во всяком металле, оказавшемся во внешнем электромагнитном поле. Необходимо лишь, чтобы само поле было достаточно сильным и чтобы в металлических монокристаллах полностью отсутствовали примеси.

Ныне эффект Шубникова — де Гааза применяется для изучения магнитного пробоя, продолжительных по времени процессов в полупроводниках, если эти процессы не являются равновесными. В физике твёрдого тела с его помощью исследуются электронные свойства твёрдых тел; с помощью этого эффекта можно оценивать степень чистоты кри-

сталлических образцов металлов и изучать свойства материалов, имеющих высокие механические напряжения.

После возвращения в СССР в 1930 г. научная деятельность Л. В. Шубникова продолжалась в Харькове, в стенах Украинского физико-технического института (УФТИ). В 1932 г., как уже упоминалось, в этом институте начал работать Л. Д. Ландау, что сыграло немаловажную роль как в становлении института в целом, так и в научных исследованиях самого Л. В. Шубникова. Круг проблем, над которыми Лев Васильевич работал в эти годы, был очень широк, однако в огромной степени был связан с явлениями в области физики низких температур. Наиболее существенными по степени результативности его работы в тридцатые годы представляются следующие направления деятельности учёного.

1. АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Здесь необходимо отметить две работы. Первая — исследование в 1936 г. (совместно с А. И. Лейпунским, И. В. Курчатовым и др.) взаимодействия медленных нейтронов с веществом, в частности исследование зависимости эффективного сечения от скорости нейтронов. Под эффективным сечением частицы понимается площадь, описанная вокруг данной частицы, при всяком попадании в которую другой частицы имеет место тот или иной физический процесс. Деление атомного ядра в то время ещё открыто не было. Предполагалось, что сечение процесса захвата нейтрона ядром должно быть обратно пропорционально скорости самого нейтрона. На деле же оказалось, что это верно лишь для т. н. «холодных нейтронов» с энергией, меньшей 0,025 эВ — при такой энергии скорость нейтрона равна примерно $2 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. В целом же зависимость эффективного сечения нейтронов оказалась достаточно сложной. Отметим, что исследования, которые провели Л. В. Шубников и его коллеги, способствовали в дальнейшем построению общепринятой ныне теории взаимодействия теории нейтронов с атомными ядрами — в создании этой теории участвовали Э. Ферми, Н. Бор, О. Фриш⁷.

Второй важнейшей работой Л. В. Шубникова в данной области является экспериментальное измерение магнитного момента протона. Речь в данном случае идёт о величине, похожей на магнетон Бора, имеющей, однако, гораздо меньшее значение. В формуле магнетона Бора массу электрона нужно заменить на массу протона, которая больше, чем масса электрона, в 1846 раз. В главном идея экспе-

⁷ Конкретно группа Л. В. Шубникова исследовала взаимодействие нейтронов с ядрами водорода, серебра, бора и кадмия.

⁶ $\frac{\text{Кл} \cdot \text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{кг}} = \frac{\text{А} \cdot \text{Дж} \cdot \text{с}^2}{\text{кг}} = \frac{\text{Дж}}{\frac{\text{м} \cdot \text{кг}}{\text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{с}^2}} = \frac{\text{Дж}}{\frac{\text{Н} \cdot \text{А}}{\text{м}}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Тл}}$

римента, проведённого Л. В. Шубниковым совместно с Б. Г. Лазаревым⁸ в начале 1936 г., восходила к классическим опытам О. Штерна и В. Герлаха 1921 г., в которых измерялись магнитные моменты различных атомов и в которых было, в частности, установлено, что для щелочных металлов эта величина равна магнетону Бора. В обоих случаях измерялась сила, действующая на атом в сильно неоднородном магнитном поле, и через неё — искомый магнитный момент, поскольку проекция этой силы на заданную ось координат, например на ось

OZ , находилась так: $F_z = p_{mz} \frac{\Delta B}{\Delta Z}$ — в правой части равенства проекция магнитного момента на заданную координатную ось умножается на изменение индукции магнитного поля вдоль этой оси⁹. Однако в опытах Шубникова — Лазарева измерялся магнитный момент самого лёгкого элемента — водорода, и потому в их эксперименте была своя специфика. Во-первых, для измерения отклоняющей силы пришлось изготавливать специальные высокоточные прецизионные весы — они были сделаны в Ленинградском физико-техническом институте. Во-вторых, для гашения в атоме водорода магнитного момента электрона, много большего, чем измерявшийся магнитный момент, использовался твёрдый водород. Температура перехода жидкого водорода в твёрдое состояние равна $-259,2^\circ\text{C}$ и, таким образом, эксперимент был низкотемпературным. В-третьих, для получения твёрдого мономолекулярного водорода, который является прозрачным кристаллом, было необходимо провести тщательную очистку водорода от примесей — в основном от кислорода. Жидкий водород после такой очистки — напоминаем, что его температура ожигения равна $-252,8^\circ\text{C}$, — затвердевал в специальной кварцевой ампуле, и уже из неё отдельные атомы выводились в магнитное поле.

Результат оказался неожиданным. Казалось бы, в эксперименте должно было получиться значение магнитного момента атома водорода, равное $\frac{e\hbar}{2m_p}$, т. е. ядерный магнетон. А получалась величина, большая в 2,79 раза. Погрешностью эксперимента, ставившегося с исключительно высокой точностью, это быть не могло. Значит, имел место какой-то ранее неизвестный эффект и объяснить его можно было лишь свойствами самого протона, характеристика которого измерялась. Уже в третьем томе пятитомного «Физического словаря», изданного в СССР в 1937 г., в статье «Магнетон» (с. 390), было прямо написано: опыт показывает, что данное

⁸ Впоследствии академик АН УССР.

⁹ Посильное для восприятия учителя физики опыта Штерна — Герлаха имеется в двухтомнике Б. М. Яворского и А. А. Пинского «Основы физики» (М. : Наука, 1974, т. 1, с. 428–429).

расхождение теории и эксперимента, по-видимому, указывает на сложное строение протона. Таким образом, в опытах Шубникова — Лазарева уже в середине тридцатых годов была поставлена проблема структуры элементарных частиц.

В этой связи представляется необходимым особо отметить следующее. Несколькими годами ранее вопросами, близкими к тому, о чём только что шла речь, занимался (правда, в плане теории) И. Е. Тамм. Конкретно — проблемой магнитного момента нейтрона. Тогда это воспринималось по меньшей мере как заблуждение, если не сказать — как ересь: у нейтрона нет электрического заряда, а значит, не может быть и магнитного момента. Так считали многие крупнейшие учёные тех лет, в том числе такие, как Нильс Бор, который с И. Е. Таммом по этому поводу достаточно остро полемизировал. Существо же дела сводилось к следующему. В 1931 г. П. Дирак высказал гипотезу о существовании магнитного монополя — особой элементарной частицы с единственным магнитным полюсом. Существование такой частицы отвергается представлениями классической физики (магнитных полюсов непременно должно быть два), но допускается представлениями физики квантовой. Первоначально И. Е. Тамм предположил, что нейтрон является комбинацией из двух магнитных монополей с зарядами противоположных знаков. Однако в космических лучах следов такой частицы, как магнитный монополь, найдено не было. Несколько позже, в конце 1933 года, научной сенсацией стали результаты, полученные О. Штерном и О. Фришем по изменению магнитного момента протона. И в этих опытах, и в опытах, которые несколько позже по иной методике проводил Л. В. Шубников, оказалось, что магнитный момент протона почти в три раза больше того, что предсказывала теория — выше об этом уже говорилось. Тогда И. Е. Тамм предложил своему аспиранту С. А. Альтшулеру (впоследствии член-корреспонденту АН СССР) объяснить известные тогда магнитные моменты атомных ядер с нечётным количеством нейтронов фактом наличия у нейтрона магнитного момента. С. А. Альтшулер вспоминает: «Через пару недель стало ясно: сделать это можно, если приписать нейтрону отрицательный магнитный момент, по величине равный половине ядерного магнетона. Отрицательный знак магнитного момента означает, что он направлен противоположно спиновому угловому моменту нейтрона. Очень просто удалось объяснить, почему у ядер рассматриваемого типа встречаются моменты обоих знаков. Это особенно понравилось Игорю Евгеньевичу. Наша статья о магнитном моменте нейтрона была представлена в «Доклады Академии наук СССР» Л. И. Мандельштамом»¹⁰.

¹⁰ Воспоминания о И. Е. Тамме. — М. : ИздАТ, 1995. — С. 22–23.

Многое прояснилось лишь в послевоенный период, когда были открыты новые элементарные частицы, прежде неизвестные. По современным представлениям протоны и нейтроны примерно 80 % времени своего существования находятся в «истинно» протонном и нейтронном состояниях, а 20 % времени занимают их виртуальные превращения по схемам ${}^1_1p \rightleftharpoons {}^1_0n + \pi^+$ и ${}^1_0n \rightleftharpoons {}^1_1p + \pi^-$, где π^+ и π^- суть частицы, известные ныне как π -мезоны. И у протона, и у нейтрона в результате диссоциации возникает π -мезонное облако (иногда говорят — «пионная шуба»), создающее дополнительный по отношению к самой частице магнитный момент. У протона он положительный, а у нейтрона — отрицательный, направленный против внешнего поля. Поэтому нейтрон, не имея электрического заряда, имеет магнитное поле, характеризующее отрица-

тельным моментом. Измерения показали, что он равен $-1,9$ протонного магнетона; для самого протона, как было указано выше, пишется множитель $+2,79$.



■ 1933 год. В криогенной лаборатории Украинского физико-технического института (г. Харьков). Л. В. Шубников — третий справа. Четвёртый справа — Л. В. Верещагин, впоследствии академик. Рядом с ним П. Л. Капица. За ним (в глубине кадра) — О. Н. Трапезникова. Крайние слева — Ю. Н. Рябинин, А. И. Лейпунский, Л. Д. Ландау

Продолжение следует... ❄

Уважаемые подписчики!

Чтобы не потерялись ваши личные номера журналов, сообщаем график выхода и примерные сроки доставки в почтовые отделения изданий на ближайшие три месяца.



Номер журнала	Месяц	Дата выхода	Ожидайте в своем почтовом отделении
№ 8	Август	07.08.2014	21.08.2014
№ 9	Сентябрь	08.09.2014	22.09.2014
№ 10	Октябрь	09.10.2014	23.10.2014

Напоминаем, что все журналы выходят и поступают в рассылку точно в срок. Доставка осуществляется через почтовые отделения «Почты России». Если вы не получили высланные журналы до конца месяца, обязательно обратитесь с претензией в почтовое отделение, где вы оформляли подписку. Если подписка была оформлена через редакцию, напишите, пожалуйста, нам о неполучении журнала на почтовый адрес info@e-osc.ru и укажите ФИО, название журнала, дату подписки и точный адрес доставки журнала с индексом.

