

ЛЕВ ВАСИЛЬЕВИЧ
ШУБНИКОВ
(1901—1945)

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ *)

53(092)

К 80-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Л. В. ШУБНИКОВА**ЛЕВ ВАСИЛЬЕВИЧ ШУБНИКОВ **)****Н. Е. Алексеевский**

Лев Васильевич Шубников является основоположником советской физики низких температур, развитие которой при его активном участии началось у нас в стране в начале 30-х годов.

Лев Васильевич Шубников родился 29 сентября 1901 г. В 1926 г. он окончил Ленинградский политехнический институт. Будучи студентом (1920—1922 гг.), работал лаборантом в Государственном оптическом институте у И. В. Обреимова. Затем он перешел в ЛФТИ на должность ассистента.

Для того чтобы оценить роль Льва Васильевича в развитии советской физики, стоит кратко напомнить, что представляла собой физика низких температур в те годы. После открытия Оннесом сверхпроводимости в 1911 г. (и прерванного первой мировой войной ее изучения) в начале 20-х годов вновь начинаются исследования сверхпроводимости. Все основные работы проводились в Лейденском университете, где в то время была единственная, созданная Оннесом лаборатория низких температур. Методы сжижения газов (гелия, водорода и даже воздуха) тогда были еще весьма примитивны, и соответственно используемые в эксперименте количества сжиженных газов невелики. В Советском Союзе в то время криогенных лабораторий вообще не было.

В 1926 г. по окончании Ленинградского политехнического института Лев Васильевич направляется Наркомпросом в Лейденскую лабораторию, где он работает до 1930 г. в отделении профессора де Гааза. Здесь следует отметить, что Лев Васильевич, еще будучи студентом, занимался физикой кристаллов. Так, в 1924 г. совместно с И. В. Обреимовым, у которого он работал, им был разработан метод получения монокристаллов металлов из расплава, известный в настоящее время как метод Обреимова — Шубникова. Затем им был разработан оптический метод изучения упругих и остаточных деформаций в кристаллах. В 1926 г. Л. В. Шубников вместе с И. В. Обреимовым успешно применил этот метод для исследования пластической деформации каменной соли и получил ряд весьма интересных результатов.

*) В этом разделе публикуются доклады, прочитанные 18 ноября 1981 г. на Научной сессии Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР.

**) В статье использованы следующие материалы: Балабекян О. И. — УФН, 1966, т. 89, с. 321; Развитие криогеники на Украине. — Киев: Наукова думка, 1978.

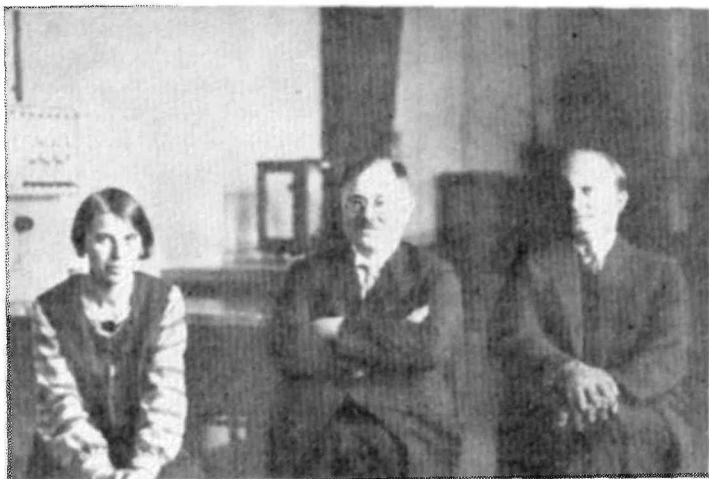
В лаборатории профессора де Гааза ему было предложено получить совершенные монокристаллы висмута. На этих монокристаллах при низких температурах надо было провести исследование электропроводности во внешнем магнитном поле, а также исследовать эффект Холла. Имея уже опыт работы в области физики кристаллов, Л. В. Шубников блестяще справился с этой задачей.

Для получения монокристаллов Л. В. Шубников использовал метод П. Л. Капицы с применением разборной изложницы. Применяя чистый исходный висмут, полученный им химической очисткой и многократной перекристаллизацией, Лев Васильевич получил монокристаллы исключительно высокого качества с малым содержанием примесей и дефектов. На этих монокристаллах Лев Васильевич исследовал изменения электросопротивления в магнитном поле при низких температурах. В отличие от наблюдавшегося ранее плавного изменения сопротивления при изменении магнитного поля, им были обнаружены (при увеличении магнитного поля) отчетливые осцилляции сопротивления (эффект Шубникова — де Гааза).

Впоследствии на таких же совершенных монокристаллах, полученных Львом Васильевичем, де Гааз и ван Альфен наблюдали осциллирующие изменения магнитной восприимчивости — эффект де Гааза — ван Аальфена. Как оказалось, осцилляции сопротивления в эффекте Шубникова — де Гааза периодичны в обратном поле. Этот период не зависит от внешнего поля и температуры и определяется свойствами металла, а также ориентацией внешнего магнитного поля относительно кристаллографических осей монокристаллического образца. При повышении температуры амплитуда осцилляций уменьшается. Как было показано в дальнейшем, эффект Шубникова — де Гааза, так же как и эффект де Гааза — ван Альфена, является чисто квантовым эффектом. Он возникает вследствие квантования энергетических уровней электронов проводимости в магнитном поле. Открытие эффекта Шубникова — де Гааза можно рассматривать как начало квантовой физики нормальных металлов. В течение долгого времени эффект Шубникова — де Гааза наблюдался только на висмуте. Однако развитие методов очистки металлов и получение совершенных монокристаллов позволяет в настоящее время наблюдать осцилляции сопротивления в магнитном поле на большинстве металлов и многих полупроводниках. Как известно, период осцилляций сопротивления в обратном магнитном поле определяется площадью сечения поверхности Ферми плоскостью, перпендикулярной к направлению внешнего магнитного поля $\Delta(1/H) = eh/cS$, где S — площадь сечения поверхности Ферми. Таким образом, измерения осцилляций сопротивления в магнитном поле позволяют определить S и найти форму поверхности Ферми. Измеряя зависимость амплитуды осцилляций от температуры, можно определить эффективную массу носителей тока m^* . В настоящее время эффект Шубникова — де Гааза наряду с эффектом де Гааза — ван Альфена является одним из основных методов изучения электронных свойств металлов и полупроводников.

После возвращения из Лейдена на родину в 1930 г. Лев Васильевич Шубников переходит работать в Украинский физико-технический институт (УФТИ). В это время по инициативе тогдашнего директора института И. В. Обреимова там создавалась криогенная лаборатория. В 1931 г. Л. В. Шубников становится научным руководителем этой лаборатории. В короткий срок под его руководством в лаборатории была освоена криогенная техника, установлены машины для сжижения воздуха и водорода, организовано изготовление металлических сосудов Дьюара для жидкого воздуха емкостью до 50 л, построены установки для работы с жидким гелием и начаты первые эксперименты в гелиевой области температур.

Для того чтобы правильно оценить масштаб работ, сделанных Львом Васильевичем, стоит отметить, что в то время в физических институтах, например в Ленинградском физико-техническом институте, жидкий воздух отпускался примерно по 2 л в день на лабораторию, имевшийся там ожижитель давал менее 5 л жидкого воздуха в час, а жидкого водорода и жидкого гелия не было вообще. В УФТИ уже в 1933 г. ожижитель водорода давал в час 14 л жидкого водорода, а жидкий воздух получался от промышленной установки, дававшей 25 л в час. Жидкий гелий, правда, вначале получали непосредственно в экспериментальной установке, используя



Лейден, 1929—1930 гг.

Слева — направо: Ольга Николаевна Трапезникова, профессор де Гааз, Лев Васильевич Шубников.

экспансионный метод Симона, и лишь с 1935 г. жидкий гелий стали получать на отдельном гелиевом ожижителе, а затем переливать в дьюаровские сосуды экспериментальных установок.

В 1933 г. Коллегия Наркомтяжпрома поручила УФТИ организовать опытную станцию глубокого охлаждения (ОСГО), куда должны были перенести разработки всех технических задач, связанных с применением низких температур, в частности разработку криогенных методов разделения газов. Работы по созданию этой станции возглавил Л. В. Шубников (в дальнейшем активное участие в работе ОСГО принимал профессор М. Руэман). Усилиями Льва Васильевича в короткое время в ОСГО был создан квалифицированный коллектив, приступивший к решению важных для техники задач. Там проводились измерения теплопроводности и механических свойств конструкционных материалов. Изучались равновесия жидкость — газ для двойных и тройных систем. Была создана полужаводская установка для разделения коксового газа. Работы ОСГО оказали существенное влияние на развитие криогенной техники в нашей стране.

С первых дней создания криогенной лаборатории УФТИ, одной из основных тем исследований, проводившихся в ней Львом Васильевичем, была сверхпроводимость. После открытия в 1911 г. Оннесом сверхпроводимости долгое время считалось, что это явление заключается в исчезновении при низких температурах электросопротивления, т. е. что сверхпроводник является идеальным проводником. Магнитные свойства такого

идеального проводника должны были бы зависеть от того, как проводился эксперимент: при охлаждении сверхпроводника до $T < T_c$ в отсутствие магнитного поля включение магнитного поля не приводило бы к проникновению его в объем сверхпроводника, в то время как при охлаждении сверхпроводника во внешнем магнитном поле оно должно было бы «замораживаться» в сверхпроводнике. Стремление выяснить, что же в действительности происходит со сверхпроводником, стимулировало изучение его магнитных свойств в немногочисленных в то время криогенных лабораториях мира. Исследованию магнитных свойств сверхпроводников были посвящены и работы Л. В. Шубникова, которые он проводил совместно со своими сотрудниками. В 1934 г. Лев Васильевич завершил первый этап исследования магнитных свойств сверхпроводников, которые им проводились совместно с Ю. Н. Рябиным. В этих экспериментах были исследованы зависимости индукции B и магнитного момента M от внешнего магнитного поля в ряде сверхпроводников. Для измерений использовались как поликристаллические образцы, так и монокристаллы, приготовлявшиеся в криогенной лаборатории УФТИ. Результаты этих измерений показали, что при приближении внешнего поля к его критическому значению происходит резкое изменение индукции B , как при возрастании, так и при уменьшении поля. Таким образом, эти эксперименты подтвердили результаты Мейсснера и Оксенфельда. Следует подчеркнуть, что хотя Мейсснер и Оксенфельд получили свои результаты несколько раньше (эффект Мейсснера), работа Л. В. Шубникова и Ю. Н. Рябина была проведена независимо. К тому же ими были получены более подробные данные. После исследования магнитных свойств чистых сверхпроводников Лев Васильевич провел со своими сотрудниками подробные исследования магнитных свойств сверхпроводящих сплавов. Результаты этих исследований были опубликованы в 1937 г. Шубниковым, Хоткевичем, Шепелевым и Рябиным. Стимулом к проведению этих работ послужили в основном два фактора: небольшой гистерезис, наблюдавшийся в опытах на чистых сверхпроводниках, который можно было приписать несовершенству образцов, и отсутствие большого скачка теплоемкости у сплава $Pb_{85}Bi_{15}$, имевшего большую величину критического поля, при котором появлялось сопротивление. (Величина скачка теплоемкости, как было показано Гортером, пропорциональна $(dH_c/dT)^2$.) Это критическое поле существенно превышало H_c^0 чистого свинца, и, таким образом, можно было ожидать, что скачок теплоемкости у этого сплава будет существенно больше, чем у чистого свинца. Измерения теплоемкости были проведены Шубниковым и Хоткевичем в 1934 г. *)

Исследования магнитных свойств сверхпроводящих сплавов показали, что, в отличие от чистых сверхпроводящих металлов, имеющих только одно значение критического поля H_c , при котором индукция и сопротивление резко возрастают и достигают их значений в нормальном состоянии, у сверхпроводящих сплавов при небольшом внешнем поле H_{c1} происходит резкое изменение индукции, которая затем постепенно возрастает. Однако при этом сопротивление образца остается равным нулю, и лишь при существенно большем значении внешнего магнитного поля H_{c2} происходит восстановление сопротивления до его значения в нормальном состоянии. При этом значении поля индукция становится практически равной внешнему полю. Подробные исследования магнитных свойств сплавов, проведенные при разных температурах на образцах различной концентрации, показали, что область магнитного поля, в которой индукция отлична от нуля,

*) Как известно, в дальнейшем было показано, что величина скачка теплоемкости сплава определяется не полем H_{c2} , при котором появляется сопротивление, а термодинамическим критическим полем H_c , величина которого в сплаве относительно невелика.

а сопротивление равно нулю, т. е. область между H_{c1} и H_{c2} , расширяется при понижении температуры и при увеличении концентрации сплава. Состояние, в котором сверхпроводящий сплав находится в области полей между H_{c1} и H_{c2} , в настоящее время принято называть «фазой Шубникова».

Значение полученных Шубниковым и его сотрудниками результатов в полной мере оказалось возможным оценить лишь через двадцать лет после опубликования их работы, когда началось бурное исследование сверхпроводящих сплавов на основе переходных металлов в связи с началом использования этих сплавов в технике. Кроме того, к этому времени была создана теория Гинзбурга — Ландау, на базе которой Абрикосов развил теорию сверхпроводников II рода.

В настоящее время, когда сверхпроводящие сплавы все шире применяются для практических целей, термин «фаза Шубникова» стал одним из необходимых терминов при описании их свойств. Как известно, в теоретических работах было показано, что появление фазы Шубникова является следствием особенностей поведения сверхпроводников II рода, когда глубина проникновения магнитного поля становится больше длины когерентности λ , следовательно, поверхностная энергия на границе между фазами будет отрицательной; в свою очередь отрицательная поверхностная энергия будет приводить к увеличению границы между фазами, т. е. к переходу сплава в смешанное состояние.

Кроме подробного исследования магнитных свойств сверхпроводящих сплавов Лев Васильевич со своими сотрудниками изучал особенности разрушения сверхпроводимости металлов и сплавов током. Им было обнаружено промежуточное состояние при разрушении сверхпроводимости током. Эти измерения проводились на цилиндрических монокристаллах олова при $T \approx 2$ К. Совместно с В. И. Хоткевичем им были проведены подробные исследования особенностей поведения сверхпроводящего кольца с током.

Лев Васильевич также занимался изучением ряда других вопросов физики низких температур. Измеряя совместно с Лазаревым магнитную восприимчивость жидкого водорода, он определил магнитный момент протона. Эта работа была интересна не только тем, что в ней была измерена величина магнитного момента протона, оказавшаяся равной $2,3 \pm 0,2$ ядерного магнетона, но и тем, что время ориентации ядерного спина в магнитном поле и, следовательно, время передачи энергии, равной $2\mu H$, от спина к решетке не превышало одной секунды. Этот результат опровергал данные теоретической работы Гайтлера и Теллера, в которой утверждалось, что для передачи энергии от ядерного спина к решетке необходимо время, составляющее 10^{12} с. В опубликованной в том же 1936 г. Фрелихом и Гайтлером заметке на основании данных Лазарева и Шубникова была проведена новая оценка этого времени и было показано, что если учесть влияние электронного магнитного момента молекулы ортоводорода, то это время будет примерно равно $0,1$ с*).

Совместно с О. Н. Трапезниковой Лев Васильевич исследовал теплоемкость безводных хлоридов переходных металлов. Эти измерения, а также измерения магнитных свойств безводных хлоридов, проведенные Львом Васильевичем совместно с С. С. Шалытом, обнаружили их переход из парамагнитного состояния в новое, антиферромагнитное состояние, теоретически рассмотренное в 1933 г. Ландау.

Лев Васильевич был исключительно энергичным и работоспособным человеком. Он всегда находился в хорошем и бодром расположении духа

*) Использувавшийся водород имел нормальный состав: 75% ортоводорода и 25% параводорода.

и при этом был человеком решительным. Эти его качества, а также доброжелательное отношение к людям способствовали тому, что в руководимой им лаборатории была хорошая дружеская атмосфера. Сотрудники лаборатории много и дружно работали и охотно помогали друг другу. Все, кому довелось работать под руководством Льва Васильевича, с удовольствием вспоминают это время. Кроме научной работы, Лев Васильевич вел также большую педагогическую работу. В период с 1934 по 1937 гг. он был профессором Харьковского университета и заведовал кафедрой общей физики.

Широкий диапазон различных экспериментальных методик, весьма высокое качество проводимых измерений и ряд исключительно интересных результатов сделали криогенную лабораторию УФТИ, созданную и руководимую Львом Васильевичем Шубниковым, одним из крупных криогенных центров. Блестящие работы Л. В. Шубников давно уже стали классическими, а его имя приобрело широкую мировую известность наряду с именами других пионеров физики низких температур.

Считаю своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность О. Н. Трапезниковой за большую помощь, оказанную при написании этой статьи.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ Л. В. ШУБНИКОВА

1. Eine Methode zur Herstellung einkristalliger Metalle. *Zs. Phys.*, 1924, Bd. 25, S. 31.
2. Über eine optische Methode der Untersuchung von plastischen Deformation in Steinsalz.— *Zs. Phys.*, 1927, Bd. 41, S. 907.
3. Magnetische Widerstandsvergrößerung in Einkristallen von Wismut bei tiefen Temperaturen.— *Leiden Comm.*, 1930, Nr. 207a; *Proc. Koninkl. Akad. von Wetensch. te Amsterdam*, 1930, Bd. 33.
4. Über die Herstellung von Wismuteinkristallen.— *Leiden Comm.*, 1930, Nr. 207b; *Proc. Koninkl. Akad. von Wetensch. te Amsterdam*, 1930, Bd. 33, Nr. 3.
5. Die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes Wismuteinkristalle von der Reinheit des Metalls.— *Leiden Comm.*, 1930, Nr. 207c; *Proc. Koninkl. Akad. von Wetensch. te Amsterdam*, 1930, Bd. 33, Nr. 4.
6. Neue Erscheinungen bei der Widerstandsänderung von Wismuteinkristallen im Magnetfeld bei der Temperatur von flüssigen Wasserstoff. I.— *Leiden Comm.*, 1930, Nr. 207d; *Proc. Koninkl. Akad. von Wetensch. te Amsterdam*, 1930, Bd. 33, Nr. 4.
7. Neue Erscheinungen bei der Widerstandsänderung von Wismuteinkristallen im Magnetfeld bei der Temperatur von flüssigen Wasserstoff.— *Leiden Comm.*, 1930, Nr. 210a; *Proc. Koninkl. Akad. von Wetensch. te Amsterdam*, 1930, Bd. 33, Nr. 5.
8. Die Widerstandsänderung von Wismuteinkristalle im Magnetfeld bei der Temperatur vom flüssigen Stickstoff.— *Leiden Comm.*, 1930, Nr. 210b.
9. A New Phenomenon in the Change of Resistance in a Magnetic Field of Single Crystals of Bismuth.— *Nature*, October 1930, v. 134.
10. Исследование условий равновесия газообразной и жидкой фазы смеси кислорода и азота.— *ЖТФ*, 1934, т. 4, с. 949.
11. Dependence on Magnetic Induction of the Magnetic Field in Supraconduction Lead.— *Nature*, 1934, v. 256.
12. Anomali in the Specific Heat of Ferrous Chlorid at the Curie Point.— *Ibid.*, v. 134, p. 378.
13. Verhalten eines Supraleiters im magnetischen Feld.— *Phys. Sowjetunion*, 1934, Bd. 5, S. 641.
14. Die Viskosität von Flüssigen Stickstoff, Kohlenoxyd, Argon und Sauerstoff in Abhängigkeit von der Temperatur.— *Ibid.*, 1934, Bd. 6, S. 470.
15. Вязкость и зависимость ее от температуры для жидкого азота, окиси углерода, аргона, кислорода.— *ЖЭТФ*, 1934, т. 4, с. 1049.
16. Über die Abhängigkeit der magnetischen Induktion des supraleitenden Blei von Feld.— *Phys. Sowjetunion* 1934, Bd. 6, S. 557.
17. Spezifische Wärme von supraleitenden Legierungen.— *Ibid.*, 1934, Bd. 6, S. 605.
18. Зависимость магнитной индукции сверхпроводящего свинца от поля.— *ЖЭТФ*, 1935, т. 5, с. 140.
19. Magnetic Induction in a Supraconducting Lead Crystal.— *Nature*, 1935, v. 135, c. 109.
20. Über die Anomalie der spezifischen Wärme von wasserfreiem Eisenchlorid.— *Phys. Sowjetunion*, 1935, Bd. 7, S. 66.

21. Аномалия теплоемкости безводного хлористого железа.— ЖЭТФ, 1935, т. 5, с. 281.
22. Magnetic properties and Critical Current of Supraconducting Alloys.— Phys. Sowjetunion, 1935, Bd. 7, S. 122.
23. Über die Anomalie der spezifischen Wärme von wasserfreiem CrCl_3 .— Ibid., S. 255.
24. Über die Widerstandung von Wismuteinkristallen im Magnetfeld bei tiefen Temperaturen.— Physica, 1935, v. 11, c. 9.
25. Über die Anomalie der spezifischen Wärme von wasserfreien CrCl_3 , CoCl_2 , NiCl_2 .— Phys. Sowjetunion, 1936, Bd. 9, S. 237.
26. Аномалия теплоемкости безводных CrCl_3 , CoCl_3 , NiCl_3 .— ЖЭТФ, 1935, т. 6, с. 421.
27. Viskosität des Flüssigen Methans und Athylens in Abhängigkeit von der Temperatur. Phys. Sowjetunion, 1935, Bd. 8, S. 179.
28. Вязкость жидкого метана и этилена в зависимости от температуры.— ЖЭТФ, 1935, т. 5, с. 826.
29. Optische Untersuchungen am Flüssigen Helim II.— Phys. Sowjetunion, 1936, Bd. 10, S. 119.
30. Anomale spezifische Wärmen der wasserfrei Salze FeCl_2 , CrCl_3 , NiCl_2 .— In: Berichte des VII. Intern. Kältekongresses.— 1936.
31. Kritische Werte des Feldes und des Stromes für die Supraleitfähigkeit des Zinns.— Phys. Sowjetunion, 1936, Bd. 10, S. 231.
32. Критические значения поля тока для сверхпроводящего олова.— ЖТФ, 1936, т. 6, с. 1937.
33. Über das magnetische Moment des Protons.— Phys. Sowjetunion., 1936, Bd. 10, S. 117.
34. Die magnetische Suszeptibilität von metallischen Cerium.— Phys. Sowjetunion, Juni 1936, S. 105, Sondernummer.
35. Magnetische Eigenschaften supraleitenden Metalle und Legierungen.— Ibid., S. 39.
36. Magnetische Eigenschaften Metalle und Legierungen.— Ibid., 1936, Bd. 10, S. 165.
37. Destruction of Supraconductivity by an Electric Current and Magnetic Field.— Nature, 1936, v. 138, p. 545.
38. Transition Cure for the Destruction Supraconductivity by an Electric Current.— Ibid., p. 804.
39. Optical Experiments of Liquid Helium II.— Nature, 1936, v. 138.
40. Electrical Conductivity of a supraconducting Sphere in the Intermediate State.— Nature, 1936.
41. Slowing Boron Neutrons in Liquid in Hydrogen.— Phys. Sowjetunion, 1936, Bd. 9, S. 696.
42. Über die Absorption thermischen Neutronen in Silber bei niedrigen Temperaturen.— Ibid., 1936, Bd. 10, S. 103.
43. Über die magnetische Suszeptibilität des metallischen Cerium und Proseodym.— Ibid., S. 618.
44. Das Kältelaboratorium.— Phys. Sowjetunion, Somdernummer, Juni I, 1936.
45. Das magnetische Moment des Protons.— Phys. Sowjetunion, 1937, Bd. 11, S. 455.
46. Ferromagnetische Eigenschaften einiger paramagnetischen Salze Ibid., S. 566.
47. Кривая перехода при разрушении сверхпроводимости электрическим током.— ЖЭТФ, 1937, т. 6, с. 1200.
48. Электропроводность сверхпроводящего шара в промежуточном состоянии.— ЖЭТФ, 1937, т. 7, с. 566.