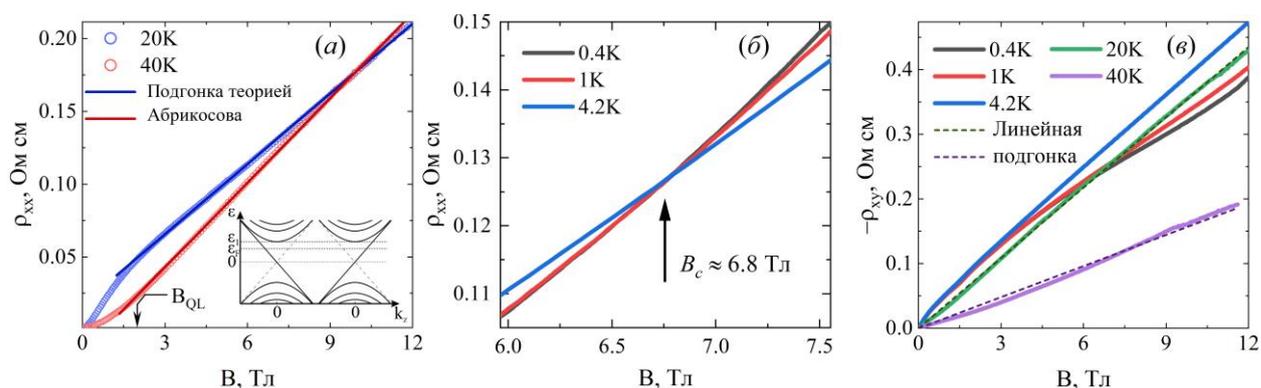


# Квантовое линейное магнитосопротивление и индуцированный магнитным полем переход металл-изолятор в ультрачистом монокристалле селенида ртути

А.Т. Лончаков, С.Б. Бобин

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

В ультрачистом монокристаллическом образце HgSe в диапазоне температур (20 – 40) К обнаружены линейное поперечное магнитосопротивление с рекордной для халькогенидов ртути величиной 15000 % и линейное холловское сопротивление в квантовом пределе при изменении поля от  $\approx 2$  до 12 Тл. Эти эффекты описаны теорией А.А. Абрикосова квантового линейного магнитосопротивления, обеспечив ее первое экспериментальное подтверждение. Тем самым впервые на примере кандидата в полуметаллы Вейля HgSe продемонстрирована возможность реализации квантового линейного магнитосопротивления Абрикосова в топологических материалах в квантовом пределе, в котором электроны имеют релятивистский закон дисперсии. С понижением температуры в системе с низкой электронной плотностью существенными становятся эффекты межэлектронного взаимодействия. Как следствие, в диапазоне температур (0.4 – 4.2) К в ультрачистом HgSe обнаружен переход металл-изолятор, магнитное поле которого (6.8 Тл) удовлетворяет критерию стабилизации вигнеровской фазы в квантовом пределе. Это дает основание полагать, что впервые в халькогенидах ртути выявлена вигнеровская кристаллизация электронного газа в магнитном поле.



(a) Зависимость поперечного магнитосопротивления  $\rho_{xx}$  от магнитного поля при температуре 20 К и 40 К. Стрелкой отмечено магнитное поле перехода к квантовому пределу  $B_{QL} = 1.8$  Тл. Сплошные прямые – подгонка экспериментальных данных формулой Абрикосова для квантового линейного магнитосопротивления. На вставке: схематическое представление спектра Ландау для полуметалла Вейля. Положение уровня Ферми  $\epsilon_F$  соответствует квантовому пределу;  $\epsilon_1$  - энергия уровня Ландау с  $N = 1$ . (б) Демонстрация перехода металл-изолятор в магнитном поле при низких температурах.  $B_c$  – критическое поле перехода. (в) Зависимость холловского сопротивления  $\rho_{xy}$  от магнитного поля при разных температурах. Пунктирные прямые – линейная подгонка экспериментальной зависимости  $\rho_{xy}(B)$  при температуре 20 К и 40 К.

Рисунок 1 – Поперечные магнитотранспортные эффекты в ультрачистом монокристалле HgSe.

## Публикация:

[Quantum linear magnetoresistance and magnetic-field-induced metal–insulator transition in the Weyl semimetal candidate HgSe](#) / А.Т. Лончаков<sup>1</sup>, С.В. Бобин<sup>1</sup>. – Текст: непосредственный // Journal of Applied Physics. — 2024. — V. 135. — P. 235703—235708. *Статья опубликована с пометкой «Editor's Pick» (выбор редакции).*

Работа выполнена по теме шифр «Электрон» №. 122021000039-4.

*Актуальность* исследования: объемные материалы с нетривиальной топологией электронного спектра, являющиеся трехмерными аналогами графена, в настоящее время вызывают повышенный интерес исследователей, благодаря их возможному применению в сфере компьютерных и лазерных технологий, спинтроники и оптоэлектроники.

*Цель настоящего* исследования: выявление особенностей поперечного магнитотранспорта в квантовом пределе в ультрачистом HgSe, которые подтвердили бы наличие в селениде ртути топологической фазы полуметалла Вейля.

*Задача* исследования: объяснить особенности магнитолевой зависимости поперечного магнитосопротивления и холловского сопротивления с учетом релятивистского электронного спектра полуметалла Вейля в квантовом пределе.

*Объект* исследования: монокристаллический, специально неориентированный образец HgSe с рекордно низкой для халькогенидов ртути концентрацией электронов  $5.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и рекордной подвижностью  $3.4 \times 10^5 \text{ см}^2/\text{Вс}$ , что отражено в термине «ультрачистый».

*Метод* исследования: магнитотранспортный метод, включающий измерения поперечного магнитосопротивления и холловского сопротивления в интервале температур от 0.4 К до 40 К с приложением магнитного поля до 12 Тл.

### **1. Поперечное магнитосопротивление: величина и закон изменения с магнитным полем.**

Установлено, что для ультрачистого образца HgSe при температурах (20 – 40) К приведенное поперечное магнитосопротивление  $[\rho_{xx}(B) - \rho_0]/\rho_0$  возрастает с увеличением магнитного поля  $B$  без какой-либо тенденции к насыщению, достигая рекордно высокой для халькогенидов ртути величины  $\approx 15000 \%$  при  $B = 12$  Тл. Кроме большой величины магниторезистивного эффекта, при  $T = 20$  К и 40 К в ультрачистом HgSe выявлена нетривиальная особенность зависимости  $\rho_{xx}(B)$ : она является линейной при  $B \gtrsim 2$  Тл, что наглядно демонстрируют сплошные прямые на Рис. 1а. Линейное магнитосопротивление выявлено при аномально малой концентрации электронов в ультрачистом образце HgSe, что предполагает достижение квантового предела в сравнительно низком магнитном поле  $B_{QL}$ . Оценка из условия равенства магнитной длины фермиевской длине волны дает  $B_{QL} = 1.8$  Тл. Таким образом, показано, что линейное магнитосопротивление в ультрачистом HgSe наблюдается в экстремальных условиях квантового предела.

### **2. Зависимость холловского сопротивления от магнитного поля.**

Установлено, что зависимость холловского сопротивления  $\rho_{xy}(B)$  в интервале температур (20 – 40) К близка к линейной вплоть до 12 Тл (пунктирные прямые на Рис. 1б), коррелируя таким образом с зависимостью  $\rho_{xx}(B)$ . При чем с ростом температуры угол наклона прямой уменьшается. С понижением температуры до (0.4 – 4.2) К линейный закон для  $\rho_{xy}(B)$ , также как и для  $\rho_{xx}(B)$ , нарушается (Рис. 1б).

### **3. Сравнение экспериментальных данных $\rho_{xx}(B)$ и $\rho_{xy}(B)$ с теорией Абрикосова.**

Известно, что электронный спектр полуметалла Вейля в квантовом пределе является чисто релятивистским (вставка к Рис. 1а). Поэтому линейное магнитосопротивление в ультрачистом HgSe хорошо вписывается в концепцию квантового линейного магнитосопротивления, теория которого была развита Абрикосовым применительно к полуметаллам с малыми закрытыми поверхностями Ферми. Согласно этой теории в квантовом пределе в случае линейного закона дисперсии

$$\rho_{xx} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{e^2}{\varepsilon \hbar v_F} \right)^2 \frac{\gamma \ln(\varepsilon)}{en_e} B, \quad (1)$$

а  $\rho_{xy} = B/en_e$ . Здесь  $v_F$  – скорость Ферми,  $n_e$  – концентрация электронов,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $e$  – заряд электрона,  $\hbar$  – постоянная Планка, параметр  $\gamma = N_i/n_e$ ,  $N_i$  – концентрация рассеивающих центров. По физическому смыслу в HgSe должен быть  $\gamma \sim 1$ . Подгонка линейного магнитосопротивления  $\rho_{xx}(B)$  формулой (1) с использованием  $\gamma$  в качестве подгоночного параметра (сплошные прямые на рис. 1а) дает  $\gamma = 0.6$  и  $0.7$  для температур 20К и 40 К, соответственно. Таким образом, линейное магнитосопротивление в HgSe с точностью до множителя порядка единицы описано теорией квантового линейного сопротивления Абрикосова. Также в рамках теории Абрикосова с использованием линейной подгонки для  $\rho_{xy}(B)$  при 20 К (пунктирная прямая на рис. 1б) по углу наклона прямой оценена  $n_e \approx 1.6 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , что по порядку величины согласуется с  $n_e = 5.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , полученной из осцилляций Шубникова-де-Гааза.

#### 4. Наблюдение перехода металл-изолятор в магнитном поле.

Установлено, что при низких температурах, кривые  $\rho_{xx}(B)$  для образца HgSe имеют точку пересечения в магнитном поле  $B_c \approx 6.8$  Тл (Рис. 1б). При  $B > B_c$   $\rho_{xx}(B)$  с ростом  $T$  уменьшается (состояние изолятора), а при  $B < B_c$  – увеличивается (металлическое состояние). Таким образом,  $B_c$  можно определить как критическое поле перехода металл-изолятор в квантовом пределе. Показано, что при  $B \gtrsim B_c$  магнитная длина меньше или порядка среднего межэлектронного расстояния, что является условием кристаллизации газа свободных электронов в магнитном поле. Поэтому сделано заключение, что переход металл-изолятор в квантовом пределе в ультрачистом HgSe связан с пространственной модуляцией электронной плотности по типу вигнеровской кристаллизации.

#### Выводы:

В ультрачистом монокристаллическом образце HgSe в интервале температур (20 – 40) К в квантовом пределе выявлены линейное поперечное магнитосопротивление, имеющее рекордную для халькогенидов ртути величину 15000 % в поле 12 Тл, а также линейная зависимость холловского сопротивления от магнитного поля.

Оба магнитотранспортных эффекта описаны подходящей для полуметаллов Вейля в квантовом пределе теорией квантового линейного магнитосопротивления и эффекта Холла, развитой А.А. Абрикосовым для релятивистских электронов в конце 90-х годов 20-го века. Тем самым получено её первое экспериментальное подтверждение.

Квантовое линейное магнитосопротивление Абрикосова предложено в качестве одного из признаков наличия в HgSe с низкой электронной плотностью топологической фазы полуметалла Вейля, поскольку только в нем электронный спектр в квантовом пределе является чисто релятивистским.

Большое линейное магнитосопротивление квантовой природы делает чистый HgSe перспективным материалом для магнитных сенсоров, элементов магнитной оперативной памяти и других устройств спинтроники.

В интервале температур (0.4 – 4.2) К в ультрачистом образце HgSe выявлен электронный фазовый переход металл-изолятор, обусловленный вигнеровской кристаллизацией в магнитном поле электронного газа низкой плотности, что препятствует наблюдению эффекта Абрикосова в области низких температур.