



Идеи и методы физики конденсированного состояния

XIV Школа-конференция молодых ученых
"Проблемы физики твердого тела и высоких давлений"

Сочи, 11-20 сентября 2015г.

Зарядовый транспорт в системе с промежуточной валентностью SmV_6 : 3D vs 2D



Владимир Глушков



отдел низких температур и криогенной техники
ФГБУН *Институт общей физики им. А.М.Прохорова* РАН



Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН

М.А.Анисимов, А.В.Богач, Б.П.Горшунов,
С.В.Демишев, В.Ю.Иванов, А.А.Пронин,
Н.А.Самарин, А.В.Семенов, Н.Е.Случанко

Московский физико-технический институт

М.И.Игнатов

Московский инженерно-физический институт

А.В.Кузнецов, И.И.Санников, О.А.Чуркин

Институт физики высоких давлений РАН

М.В.Кондрин

Институт проблем материаловедения

им. И.Н.Францевича НАН Украины

А.В.Духненко, А.В.Левченко, В.Б.Филиппов,
Н.Ю.Шицевалова

Institute of Experimental Physics, Slovak Academy of Sciences

S.Gabani, K. Flachbart

Institute for Nanoscale Physics and Chemistry, KU Leuven

J.Vanacken, V.Moshchalkov

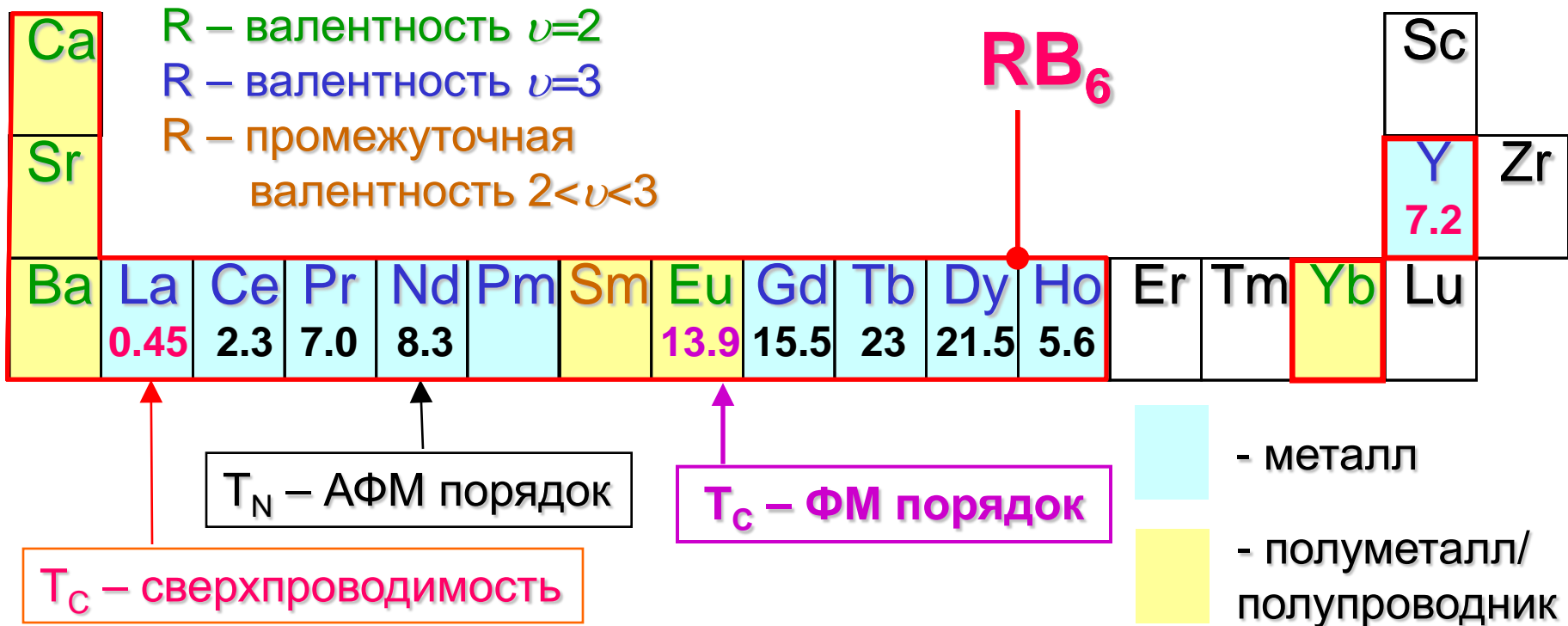
- *Введение*
- *3D: промежуточная валентность и переход металл-диэлектрик в SmB_6*
- *2D: состояние коррелированного топологического изолятора в SmB_6*
- *Зарядовый транспорт в SmB_6 : 3D или 2D*
- *Выводы и перспективы*

- **Введение**
- *3D: промежуточная валентность и переход металл-диэлектрик в SmB_6*
- *2D: состояние коррелированного топологического изолятора в SmB_6*
- *Зарядовый транспорт в SmB_6 : 3D или 2D*
- *Выводы и перспективы*



Гексабориды RB_6

RB_6 - соединения на основе каркасных структур из кластеров бора B_6

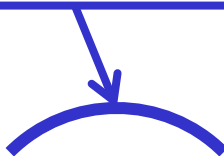


$Ce_{1-x}La_xB_6$ – А.В.Семенов
 $Eu_{1-x}(Ca,Gd)_xB_6$ – А.Н.Самарин



Сильно коррелированные электроны

- промежуточная валентность
 - 4f-5d гибридизация
 - тяжелые фермионы
- переход металл-диэлектрик



SmB₆

Полупроводники

- узкая запрещенная зона
- экситонные эффекты
- поляронные эффекты
- эффект поля (изгиб зон)

Топологические изоляторы

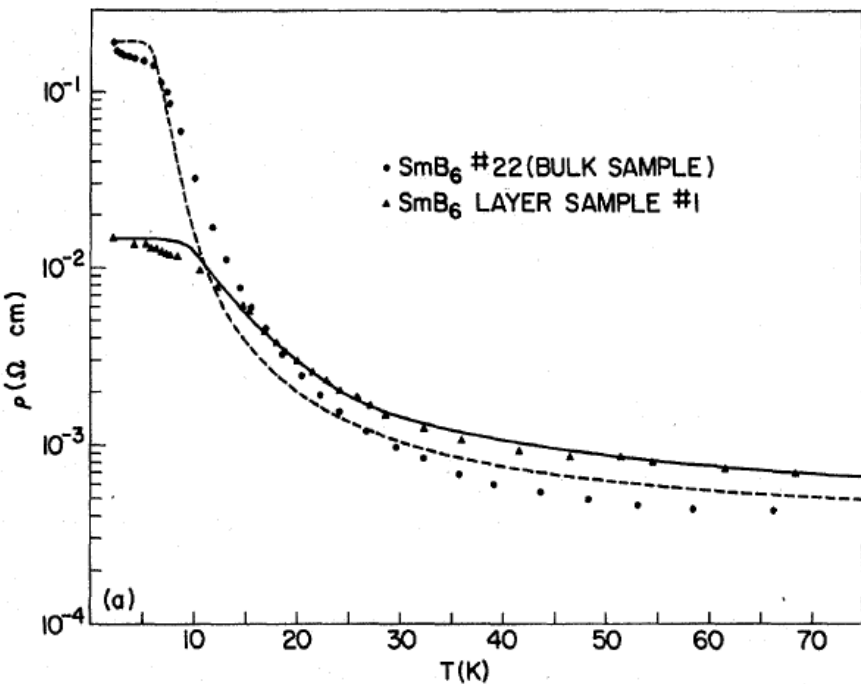
- инверсия 4f- и 5d-зон
- электроны с дираковским спектром
- киральность поверхностных состояний



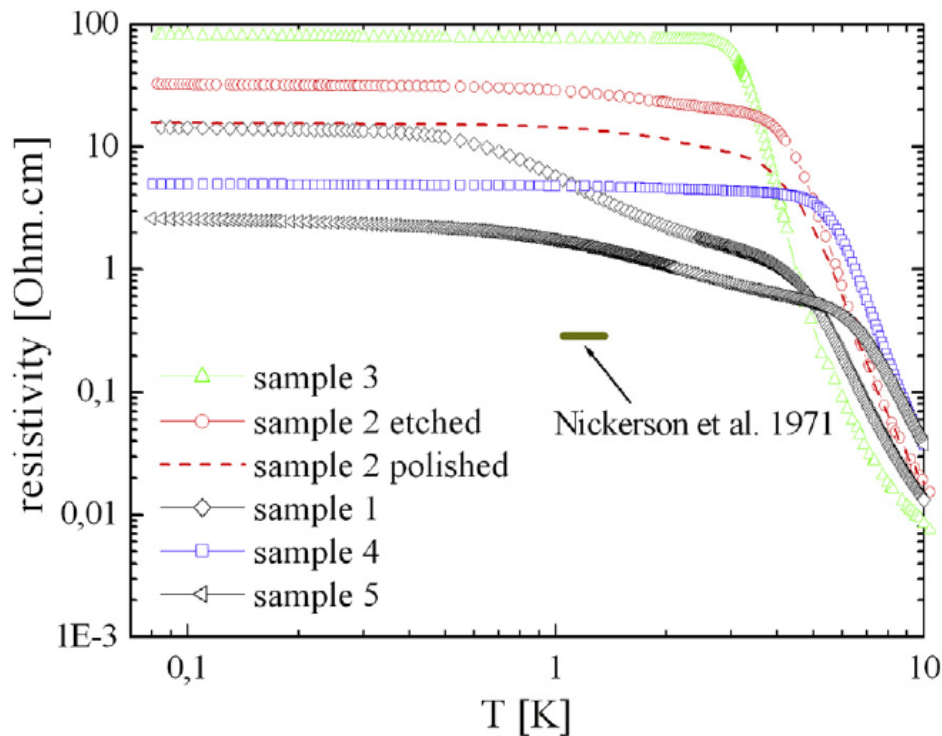
Основное состояние в SmB_6

J.C.Nickerson et al., PRB 3, 2030 (1971)

S. Gabáni et al., SSS 47, 17 (2015)



$$\text{RRR} = \rho(1\text{K}) / \rho(300\text{K}) \sim 10^3$$



$$\text{RRR} = \rho(1\text{K}) / \rho(300\text{K}) \sim 10^5$$

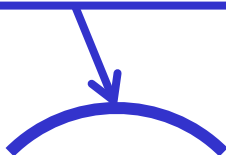
Основное состояние – металлическое: $\rho \sim 1-100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$



SmB₆: 3D vs 2D

Сильно коррелированные электроны

- промежуточная 3D валентность
- 4f-5d **3D** локализация
- тяжелые фермионы
- переход металл-диэлектрик



SmB₆

Полупроводники

- узкая запрещенная зона
- эк **3D+2D** экситы
- поперечные экситы
- эффект поля (изгиб зон)

Топологические изоляторы

- инверсия 4f и 5d-зон
- электроны с **2D** зонным спектром
- киральность поверхностных состояний

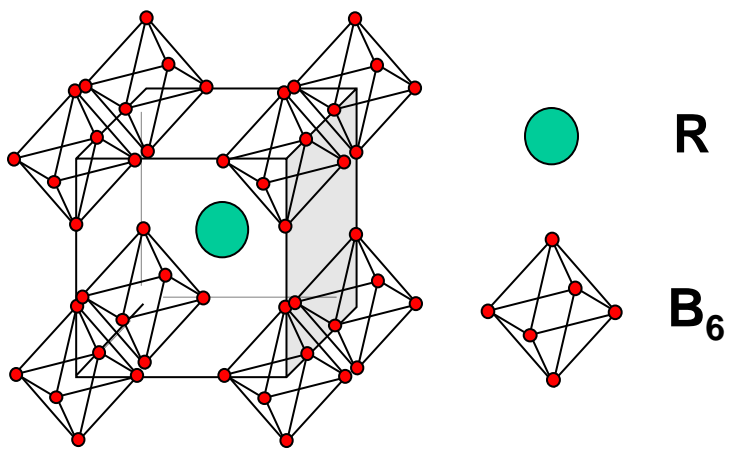


- *Введение*
- ***3D: промежуточная валентность и переход металл-диэлектрик в SmB_6***
- *2D: состояние коррелированного топологического изолятора в SmB_6*
- *Зарядовый транспорт в SmB_6 : 3D или 2D*
- *Выводы и перспективы*



Промежуточная валентность в SmB_6

SmB_6

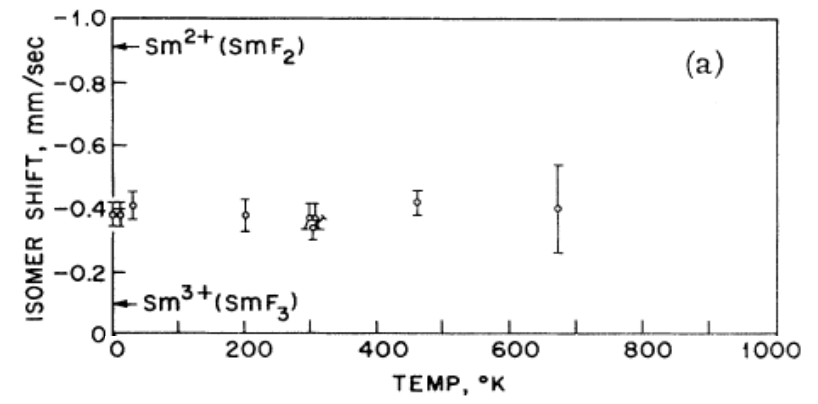


◆ кубическая структура
 CaB_6 , $Pm\bar{3}m$, $a=4.1332\text{\AA}$

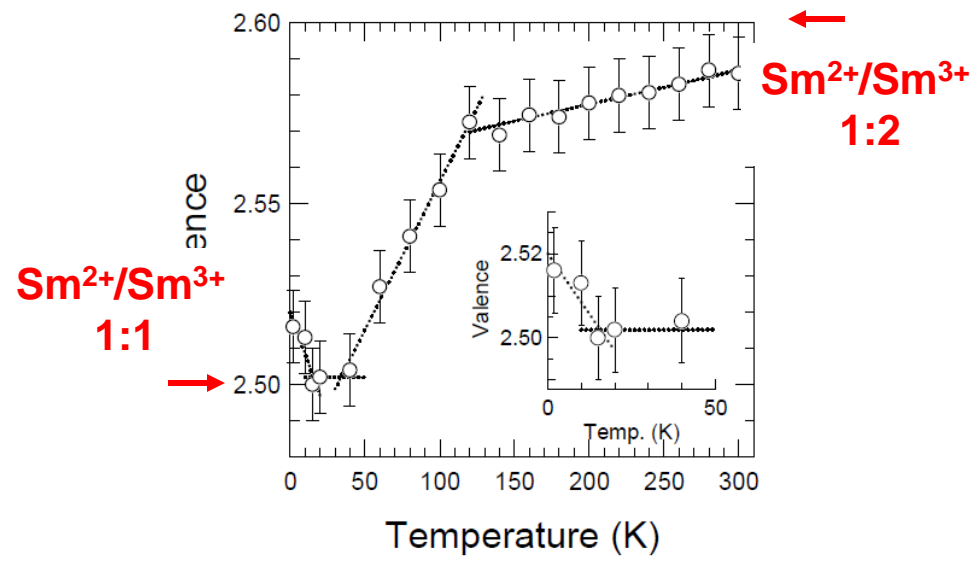
Э.Е.Вайнштейн и др., ФТТ, 6, 2909 (1965)

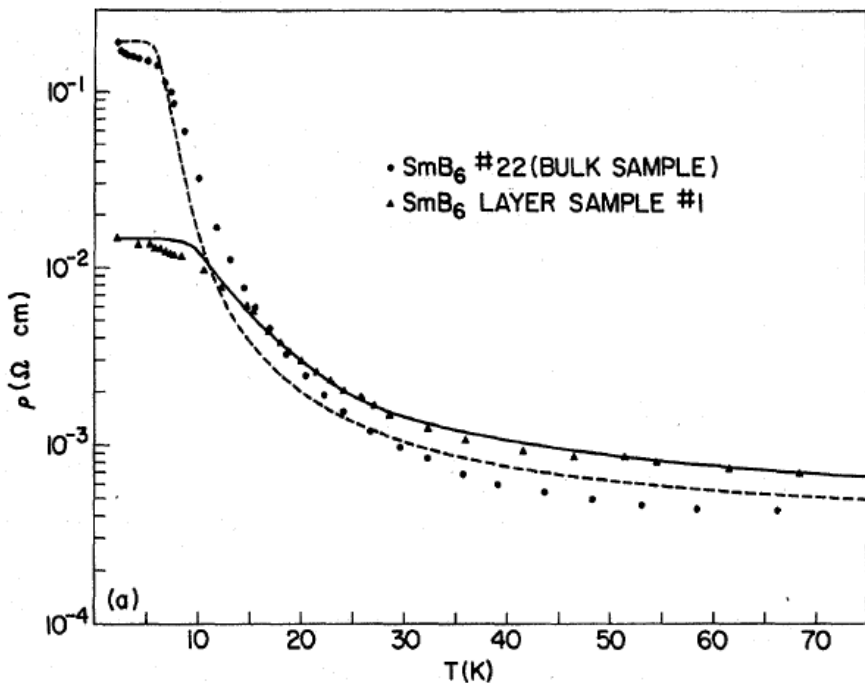
- ◆ Ионы Sm: состояние с промежуточной валентностью ($\nu(\text{Sm}) \approx 2,5-2,6$)
- ◆ Быстрые зарядовые и спиновые флуктуации между состояниями Sm^{2+} и Sm^{3+} (частоты $10^{12}-10^{13} \text{ Hz}$)
 $4f^6 \leftrightarrow 4f^5 + 5d$

R. L. Cohen et al.,
 Phys. Rev. Lett. 24, 383–386 (1970)



M. Mizumaki et al.,
 J. Phys.: Conf. Series, 176, 012034 (2009)





V.C. Nickerson et al., PRB **3**, 2030 (1971)

зарядовый транспорт:

SmB₆ – узкозонный полупроводник

разброс значений ширины запрещенной зоны в SmB₆ :

от **≤3÷5 мэВ** (“малая энергетическая щель”) до **~20 мэВ** (“большая щель”)

J.W. Allen et al., PRB **20**, 4807 (1979)

проводимость в основном состоянии отлична от нуля (**$\sigma = \text{const}(T)$, $T \rightarrow 0$ K**)

G.Travaglini, P. Wachter, PRB **29**, 893 (1984)

оптическая проводимость:

эффективная масса дырок

$m_h^* = 1000m_o (\pm 500)$

Сильно коррелированные электроны

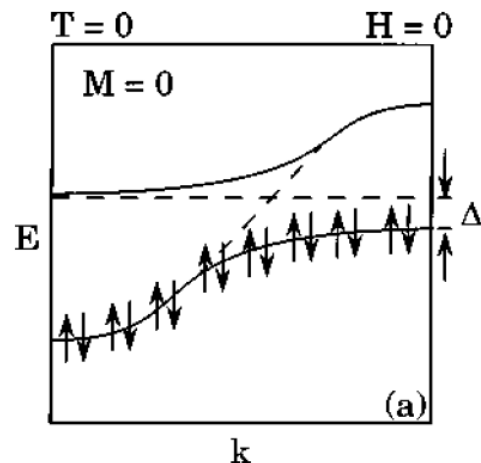
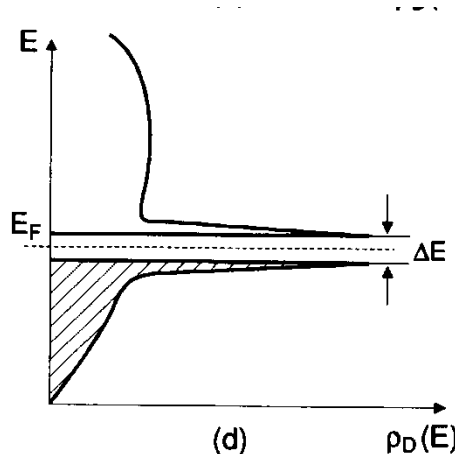
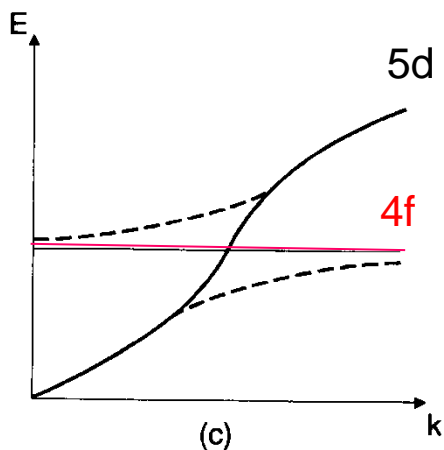
- промежуточная валентность
 - 4f-5d гибридизация
 - тяжелые фермионы
- переход металл-диэлектрик



SmB₆: теоретические модели

Aeppli G., Fisk Z. *Comm. Condens. Matter Phys.* **16** 155 (1992)

Кондо-изоляторы: узкозонные полупроводники с тяжелыми фермионами
малая энергетическая щель $\varepsilon_g \sim 10^{-1} \div 100$ мэВ, немагнитное основное состояние
CeNiSn, Ce₃Bi₄Pt₃, **SmB₆**, SmS, TmSe, YbB₁₂, UFe₄P₁₂, FeSi и др.



T. Kasuya, *Europhys. Lett.*, **26** (1994) 277

вигнеровская кристаллизация

K. Kikoin, A. Mishchenko, *J.Phys.Condens. Matter* **7** (1995) 307

экситонная модель промежуточного валентного состояния

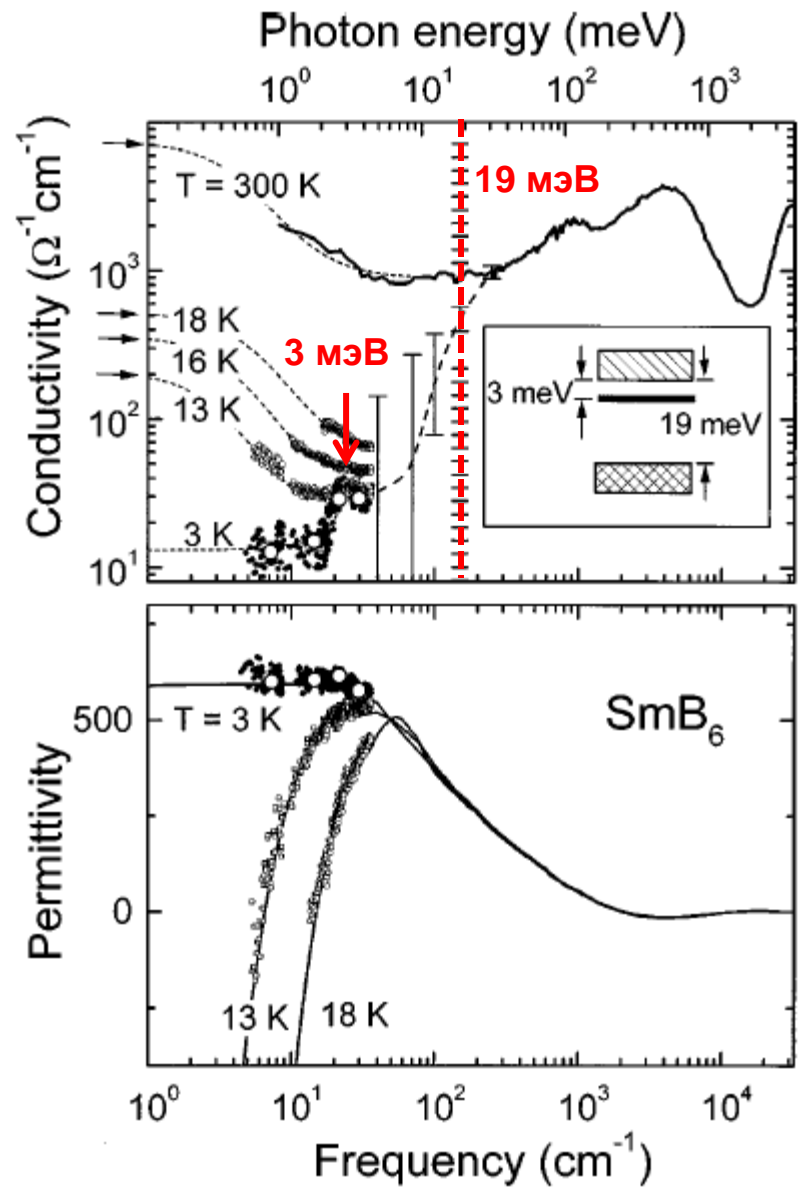
$$\psi_{m,g} = \cos \theta |f_m^6, {}^7F_0\rangle + \sin \theta |f_m^5 B_m^{(f)}, {}^7F_0\rangle$$

$$B_m^{(f)} = \sum_j F(j) b_{c,m+j}^+ b_{f,m} |f_m^6, {}^7F_0\rangle$$

4f-5d плотность максимальна вдоль <111>
(~2.4 Å от иона Sm): **валентные флуктуации**
направлены к кластерам B₆

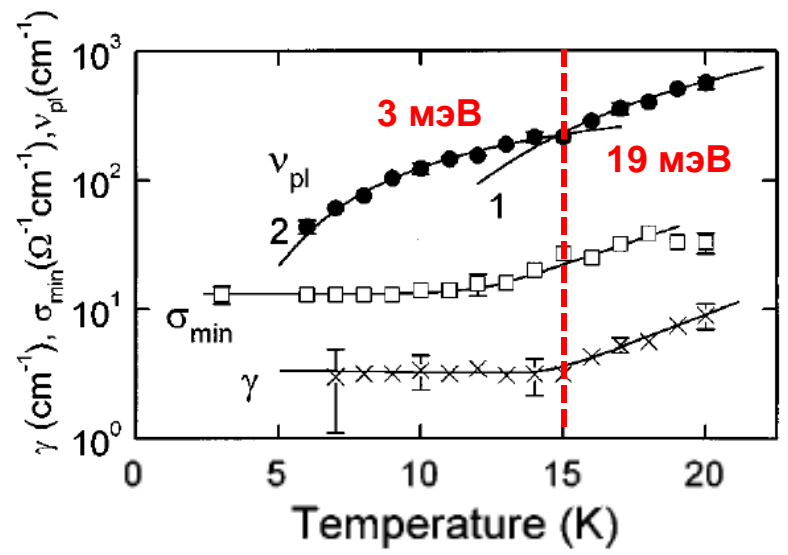


Оптическая проводимость SmB_6



V.P.Gorshunov et al.,
 Phys. Rev. B **59** (1999) 1808

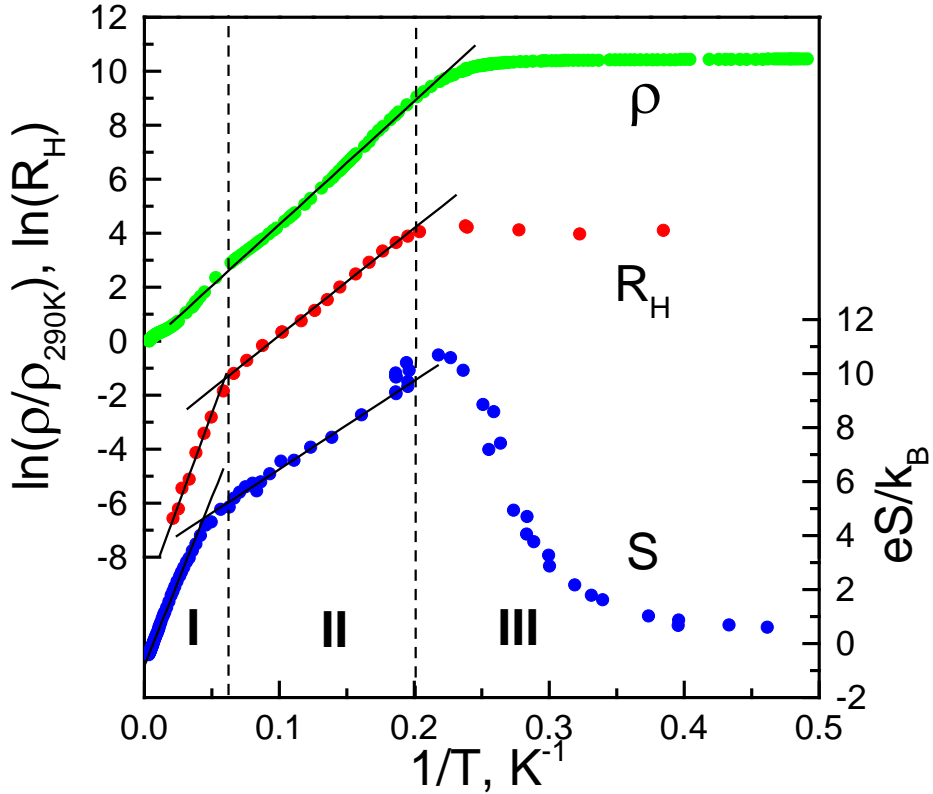
- прямые измерения $\sigma(\omega)$ и $\epsilon(\omega)$ на частотах 5-36 cm^{-1}
- открытие щели в спектре при $T < 100$ K
- запрещенная зона 19 мэВ
- полоса примесных состояний под зоной проводимости (3 мэВ)
- при $T < 5$ K проводимость не зависит от частоты и температуры





Зарядовый транспорт в SmB_6 : 3D

Н.Е.Случанко и др. ЖЭТФ **115** (1999) 970
 N.E.Sluchanko et al., PRB **61** (2000) 9906
 PRB **64** (2001) 153103
 Physica B **312** (2002) 331
 V.G. et al., Acta Phys. Pol. B **34** 1097 (2003)



Удельное сопротивление ρ , коэффициент Холла R_H и коэффициент Зеебека S для $I \parallel \langle 100 \rangle$

I. Собственная проводимость ($T > 15\text{K}$)

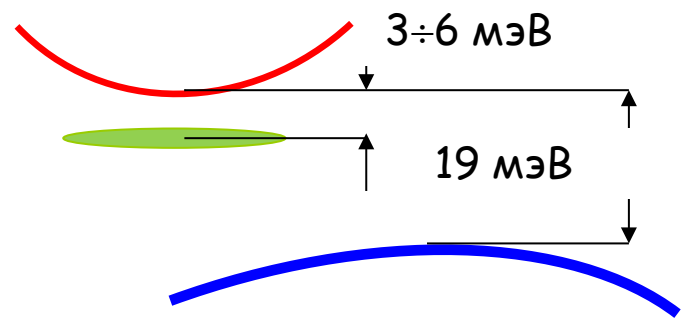
$$b = \mu_n / \mu_p \approx 50, E_g \approx 19 \text{ мэВ}, m_e^* \approx 30 m_0$$

II. Примесная проводимость ($5\text{K} < T < 15\text{K}$)

$$E_{ex}^S \approx 3 \text{ мэВ}, E_{ex}^H \approx E_{ex}^\rho \approx 3.5 \div 6 \text{ мэВ}$$

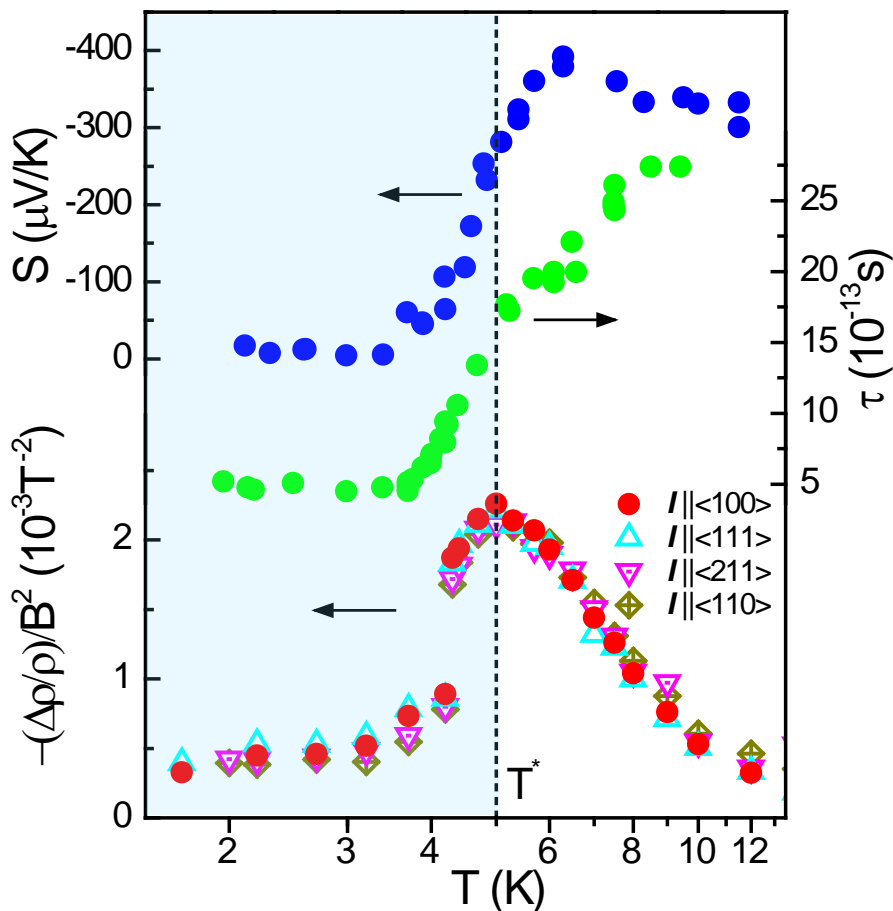
$$a^* = \hbar / \sqrt{2m_n^* E_{ex}} \leq 6 \text{ \AA}, n \sim 10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

Схема зонной структуры SmB_6





V. Glushkov et al., JSSC 179 (2006) 2871



III. Основное состояние ($T < 5\text{K}$)

- насыщение удельного сопротивления и эффекта Холла $\rho \approx 10 \Omega \cdot \text{см}$, $R_H \approx -100 \text{ см}^3/\text{C}$

- «зануление» термоэдс $S \approx 0 \text{ мкВ/К}$

- максимум отрицательного магнитосопротивления при 5К:
 $(-\Delta\rho/\rho B^2)_{\text{max}} \sim 2.2 \cdot 10^{-3} \text{ T}^{-2}$

- время релаксации носителей заряда уменьшается до значений $\tau \approx (2 \div 5) \cdot 10^{-13} \text{ с}$ – согласно с оценками времени валентных флуктуаций из **3D** экспериментов:

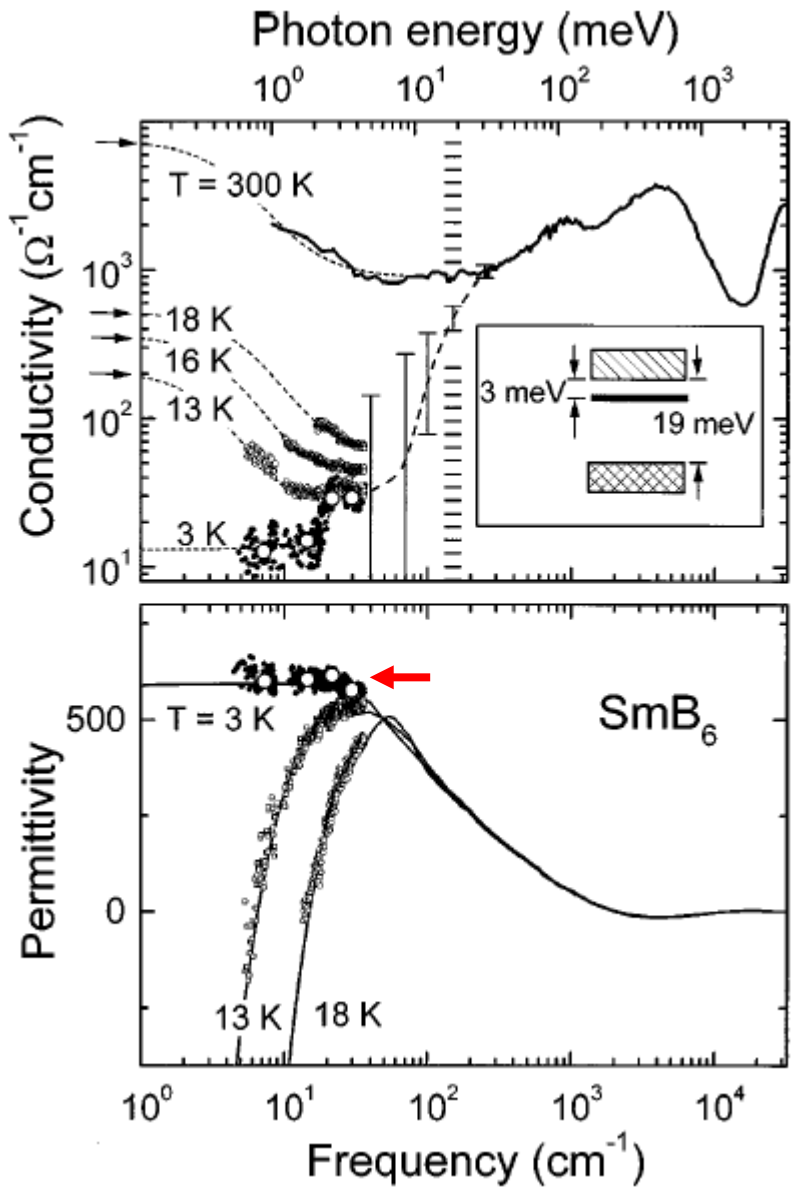
P. Alekseev et al., JPCM 7 (1995) 289
 квазиупругий пик в нейтронах $\tau \approx 3 \cdot 10^{-13} \text{ с}$

V. Gorshunov et al., PRB 59 (1999) 1808
 время релаксации $\sigma(24 \text{ см}^{-1})$ $\tau \approx 7 \cdot 10^{-13} \text{ с}$

O. Pena et al., JAP 52 (1981) 2152
 время спиновых флуктуаций в ЯМР
 $\tau \approx (0.8 \div 4) \cdot 10^{-13} \text{ с}$

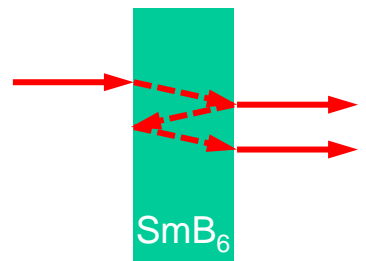


Основное состояние в SmB₆: оптика



B. Gorshunov et al., PRB **59** (1999) 1808

3D оптические свойства монокристалла (d=28 мкм) измерялись на пропускание



3D проводимость $\sigma(\omega)$ **не зависит** от частоты при $\omega < 20 \text{ cm}^{-1}$ и температуры при **T < 5K**

Большие значения **3D** диэлектрической проницаемости $\epsilon(\omega)$ при **T < 5K** и $\omega < 20 \text{ cm}^{-1}$

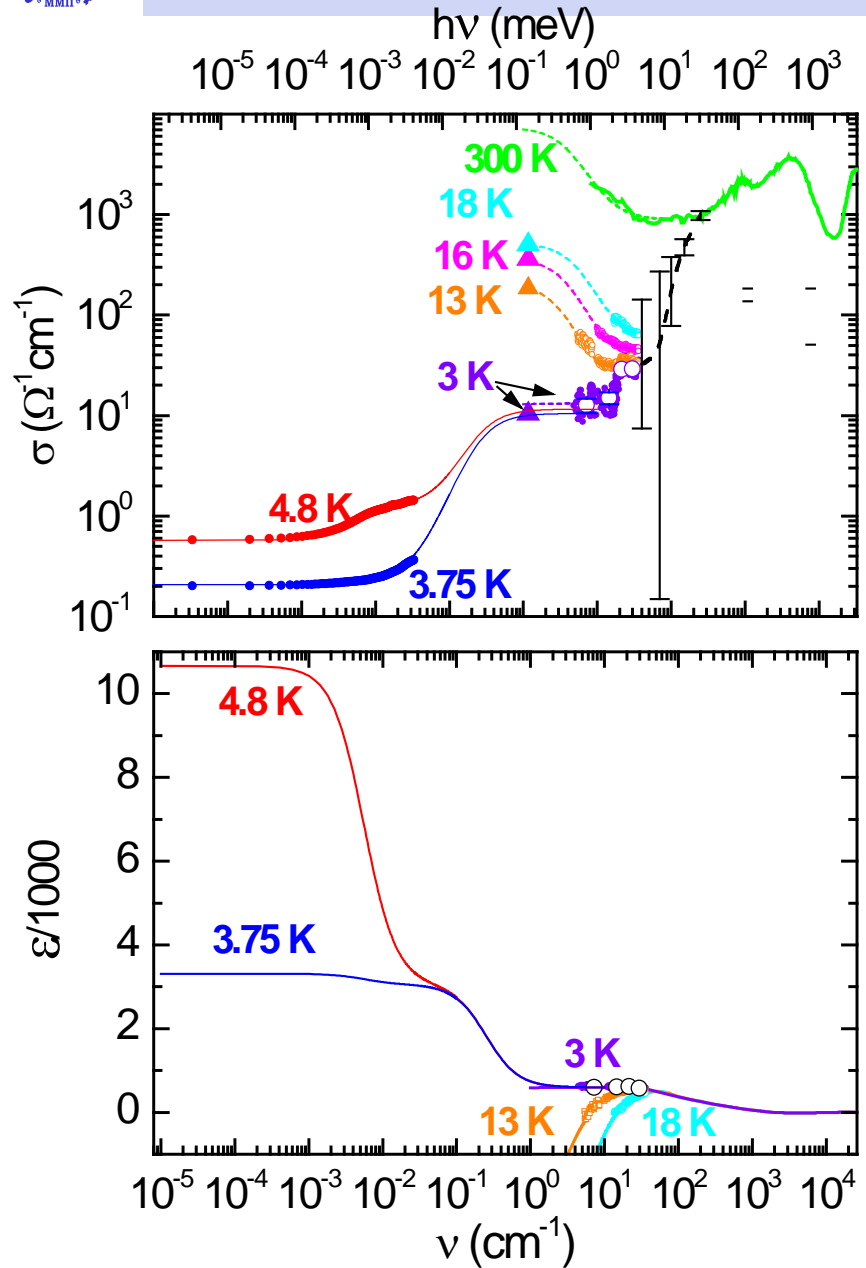
$\epsilon(\omega) \approx 600 \quad n = \epsilon^{0.5} \approx 24.5$



Наблюдаемые низкотемпературные аномалии **3D** транспортных, оптических, магнитных, упругих, термических и решеточных свойств, наблюдаемые для SmB_6 при $T \sim 5$ К, можно понять в рамках **электронного фазового перехода в 3D когерентное основное состояние** в режиме быстрых зарядовых флуктуаций между $4f^6$ и $4f^5+5d$ конфигурациями ионов самария



Когерентное основное состояние в SmB₆



N. Sluchanko et al., PRB 61 (2000) 9906

$T^* \sim 5\text{K}$ – переход в **3D когерентное основное состояние** в системе взаимодействующих экситон-поляронных комплексов (модель Кикоина-Мищенко).

Два возможных сценария:

- **электрон-дырочная жидкость** формируется из отдельных экситон-поляронных комплексов:

$$n \sim 10^{22} \text{ см}^{-3} > n_c \sim (a^*)^{-3} \sim 5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$$

- **бозе-эйнштейновская конденсация** экситонов из-за внутренней когерентности 5d- и 4f- состояний в SmB₆:

модель **электронного сегнетоэлектрика** (T.Portengen et al., PRB 54 (1996) 17452) объясняет рост статической диэлектрической проницаемости $\epsilon(\nu \rightarrow 0)$



Сильно коррелированные электроны

- промежуточная 3D валентность
- 4f-5d 3D изоляция
- тяжелые фермионы
- переход металл-диэлектрик

экситон-поляронные комплексы:

- электрон-дырочная жидкость
- бозе-эйнштейновская конденсация

SmB₆

Топологические изоляторы

- инверсия 4f- и 5d-зон
- электроны с дираковским спектром
- киральность поверхностных состояний

Полупроводники

- узкая запрещенная зона
- экситонные 3D эффекты
- поляритонные эффекты
- эффект поля (изгиб зон)

- *Введение*
- *3D: промежуточная валентность и переход металл-диэлектрик в SmB_6*
- ***2D: состояние коррелированного топологического изолятора в SmB_6***
- *Зарядовый транспорт в SmB_6 : 3D или 2D*
- *Выводы и перспективы*

E.S. Reich, Nature **492** (2012) 165

JOHN PIERRE PAGLIONE



Despite being insulators inside, samarium hexaboride crystals can conduct electricity on their surface.

CONDENSED-MATTER PHYSICS

Hopes surface for exotic insulator

Findings by three teams may solve a 40-year-old mystery.

XIII Конференция «Проблемы физики твердого тела и высоких давлений», 12-21/09/2014

В.В.Еналдиев «Всегда ли в запрещенной зоне топологических изоляторов должны существовать поверхностные состояния?»

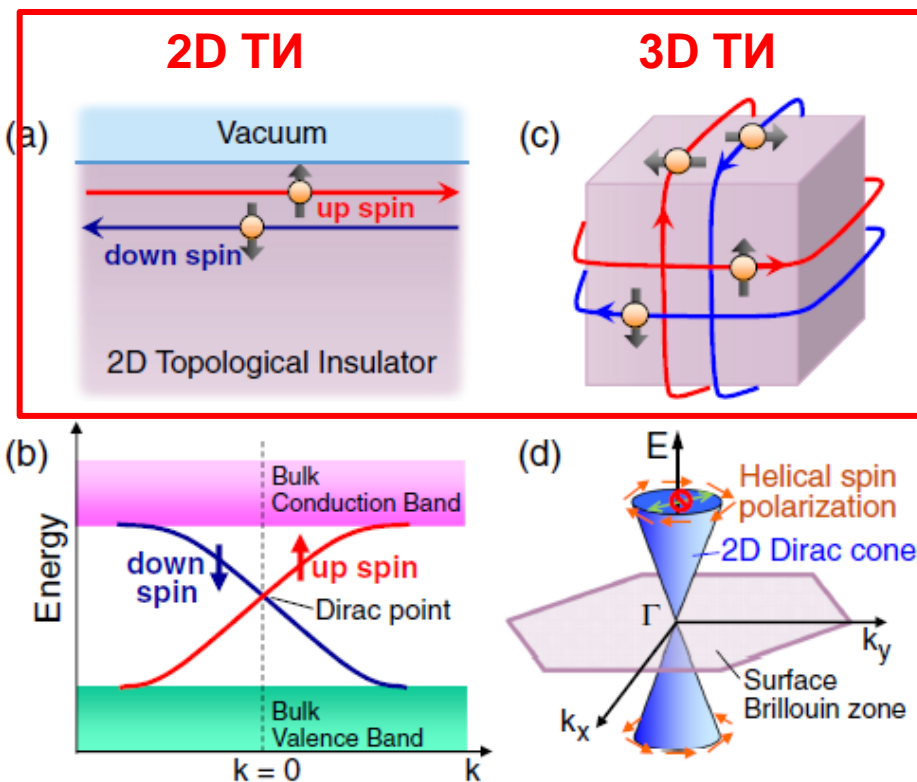
https://ru.wikipedia.org/wiki/Топологический_изолятор

Y.Ando, JPSJ **82** (2013) 102001

Топологический изолятор — особый тип материала, который внутри объёма является диэлектриком (изолятором), а на поверхности проводит электрический ток.

Поверхностное состояние трёхмерного топологического изолятора является новым типом двумерного электронного газа, где спин электрона связан с импульсом, то есть спин зависит от собственного движения электрона.

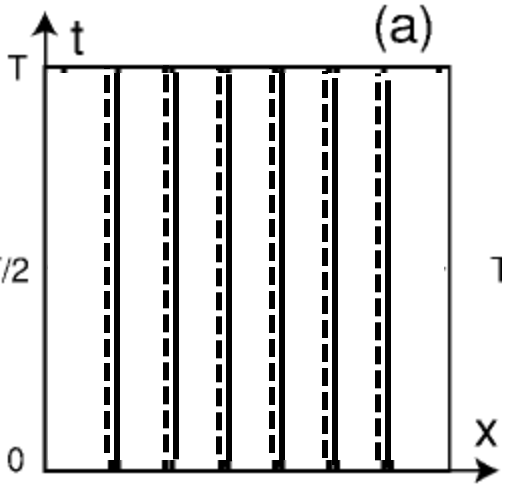
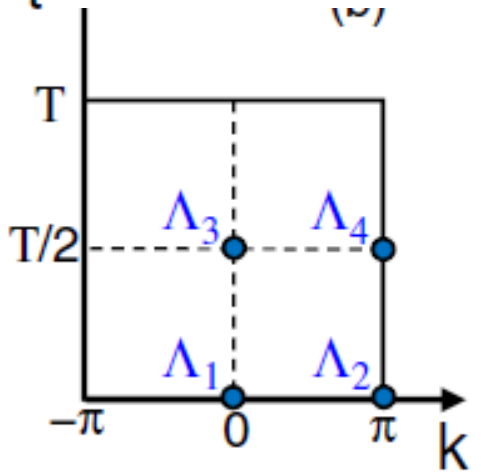
Предполагается нарушение симметрии относительно времени при описании эффектов, производимых внутри топологического изолятора.





Топологическая неэквивалентность

L.Fu, C.L.Kane,
PRB 74 (2006) 195312



$\Delta=0$

1D система, длина L, a=1
 Две зоны (крамерсовский дублет)
 Периодичность
 и временная симметрия

$$|u_1(k)\rangle \uparrow \quad |u_2(k)\rangle \downarrow$$

$$H[t + T] = H[t],$$

$$H[-t] = \Theta H[t] \Theta^{-1}.$$

При t=0 и t=T/2

$$\Theta |u_2(k)\rangle = e^{-i\chi(k)} |u_1(-k)\rangle,$$

$$\Theta |u_1(k)\rangle = -e^{-i\chi(-k)} |u_2(-k)\rangle.$$

В матричном представлении

$$w_{\alpha\beta}(\mathbf{k}) = \langle u_{\alpha,-\mathbf{k}} | \Theta | u_{\beta,\mathbf{k}} \rangle. \quad w(k) = \begin{pmatrix} 0 & e^{-i\chi(k)} \\ -e^{-i\chi(-k)} & 0 \end{pmatrix}.$$

Поляризация

$$P_\rho = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{dk}{2\pi} A(k)$$

$$A(k) = -i \langle u_1(k) | \nabla_k | u_1(k) \rangle - i \langle u_2(k) | \nabla_k | u_2(k) \rangle$$

Разность вкладов от двух зон

$$P_\theta = P_1 - P_2 = \frac{1}{i\pi} \log \left(\frac{\sqrt{w_{12}(0)^2}}{w_{12}(0)} \cdot \frac{w_{12}(\pi)}{\sqrt{w_{12}(\pi)^2}} \right)$$

Два варианта: $\log(+1)=0$ и $\log(-1)=i\pi$
 и, соответственно, $P_\Theta=0$ и $P_\Theta=1$

Калибровочный инвариант

$$\Delta = P_\theta(T/2) - P_\theta(0)$$

$\Delta=(0;1) - \mathbb{Z}_2$ топологический инвариант



Топологическая неэквивалентность

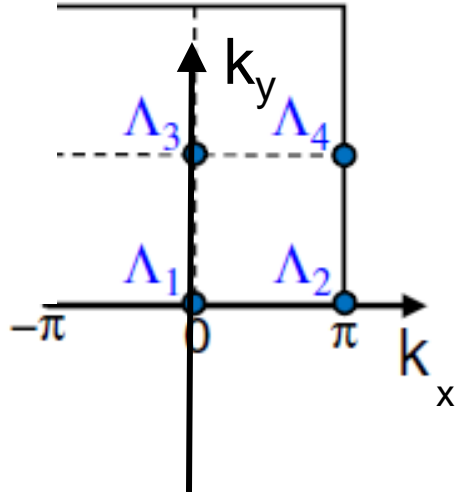
L.Fu, C.L.Kane,
PRB 74 (2006) 195312

1D система, длина L, a=1
 Две зоны (крамерсовский дублет)
 Периодичность
 и временная симметрия

$$|u_1(k)\rangle \uparrow \quad |u_2(k)\rangle \downarrow$$

$$H[t + T] = H[t],$$

$$H[-t] = \Theta H[t] \Theta^{-1}.$$



При t=0 и t=T/2

$$\Theta |u_2(k)\rangle = e^{-i\chi(k)} |u_1(-k)\rangle,$$

$$\Theta |u_1(k)\rangle = -e^{-i\chi(-k)} |u_2(-k)\rangle.$$

В матричном представлении

$$w_{\alpha\beta}(\mathbf{k}) = \langle u_{\alpha,-\mathbf{k}} | \Theta | u_{\beta,\mathbf{k}} \rangle. \quad w(k) = \begin{pmatrix} 0 & e^{-i\chi(k)} \\ -e^{-i\chi(-k)} & 0 \end{pmatrix}.$$

Поляризация

$$P_\rho = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{dk}{2\pi} A(k) \quad A(k) = -i \langle u_1(k) | \nabla_k | u_1(k) \rangle - i \langle u_2(k) | \nabla_k | u_2(k) \rangle$$

Разность вкладов от двух зон

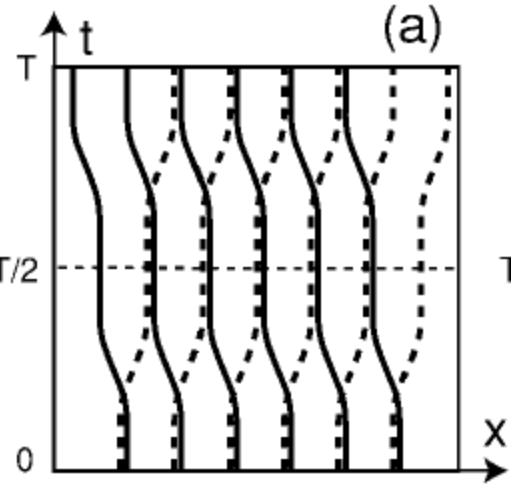
$$P_\theta = P_1 - P_2 = \frac{1}{i\pi} \log \left(\frac{\sqrt{w_{12}(0)^2}}{w_{12}(0)} \cdot \frac{w_{12}(\pi)}{\sqrt{w_{12}(\pi)^2}} \right)$$

Два варианта: log(+1)=0 и log(-1)=iπ
 и, соответственно, $P_\Theta=0$ и $P_\Theta=1$

Калибровочный инвариант

$$\Delta = P_\theta(T/2) - P_\theta(0)$$

$\Delta=(0;1)$ – Z_2 топологический инвариант

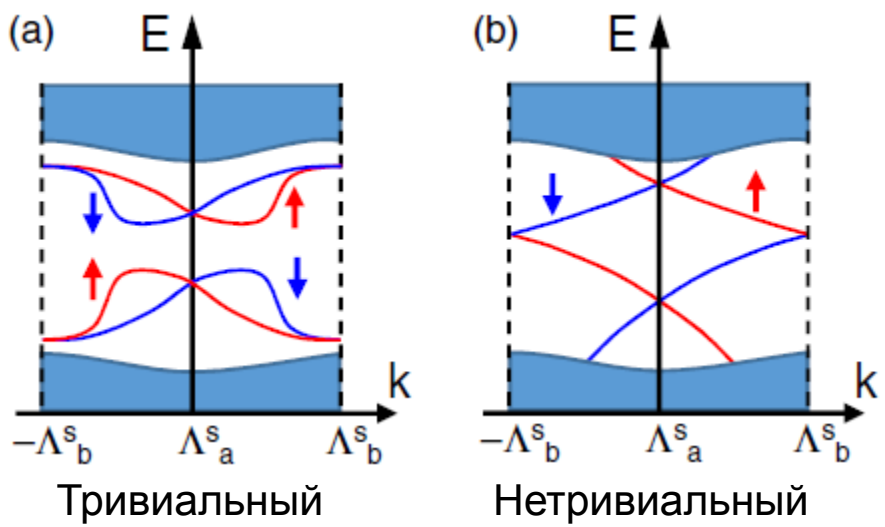


$\Delta=1$

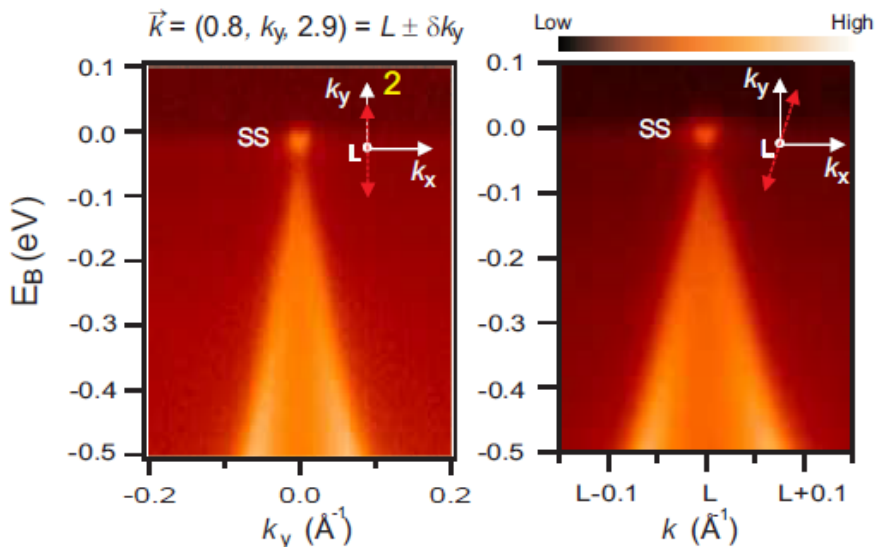
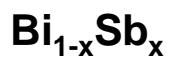


Изоляторы с Z_2 инвариантом

Y.Ando, JPSJ 82 (2013) 102001



D.Hsieh et al. Nature 452 (2008) 970



2D: один Z_2 инвариант ν

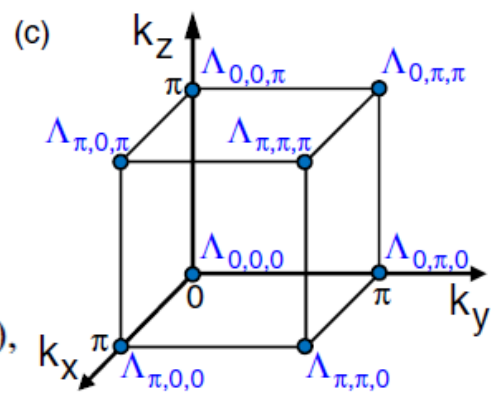
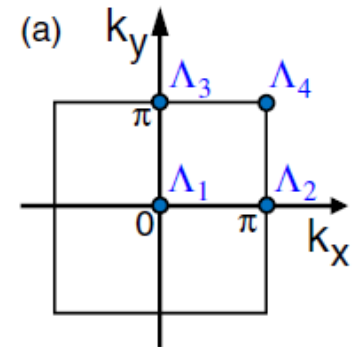
$$(-1)^\nu = \prod_{i=1}^4 \frac{\text{Pf}[w(\Lambda_i)]}{\sqrt{\det[w(\Lambda_i)]}}$$

3D: четыре Z_2 инварианта $\nu_0, \nu_1, \nu_2, \nu_3$

$$\delta(\Lambda_i) \equiv \frac{\text{Pf}[w(\Lambda_i)]}{\sqrt{\det[w(\Lambda_i)]}}$$

$$(-1)^{\nu_0} = \prod_{n_j=0,\pi} \delta(\Lambda_{n_1, n_2, n_3})$$

$$(-1)^{\nu_i} = \prod_{n_{j \neq i}=0,\pi; n_i=\pi} \delta(\Lambda_{n_1, n_2, n_3}) \quad (i = 1, 2, 3).$$



L.Fu, C.L.Kane, PRB 74 (2006) 195312

ν МОЖНО ВЫЧИСЛИТЬ ПО ЧЕТНОСТИ ЗОН В Λ_i

$$\delta(\Lambda_i) = \frac{\text{Pf}[w(\Lambda_i)]}{\sqrt{\det[w(\Lambda_i)]}} = \prod_{n=1}^N \xi_{2n}(\Lambda_i).$$

M.Dzero et al, PRL **104** (2010) 106408
 SmB₆ – кондо-изолятор – сильный
 топологический изолятор (1;111):
 4f- уровень должен быть вблизи 5d-зоны

F.Lu et al, PRL **110** (2013) 096401
 LDA + Gutzwiller расчеты: $\nu \approx 2,5$

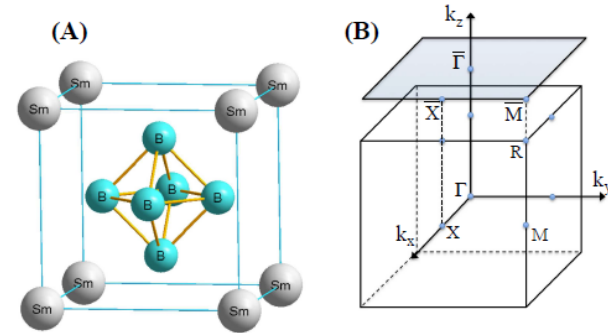
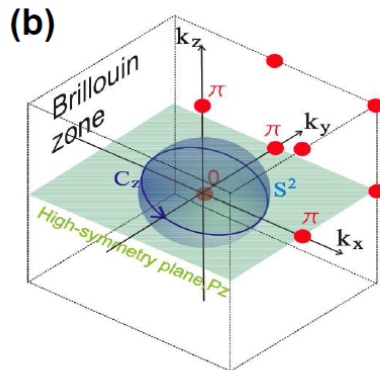
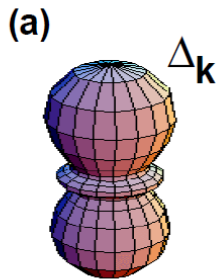
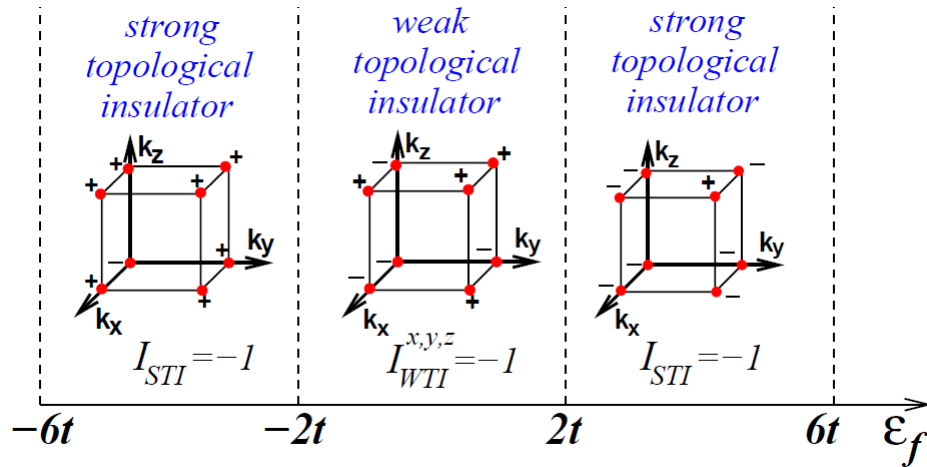
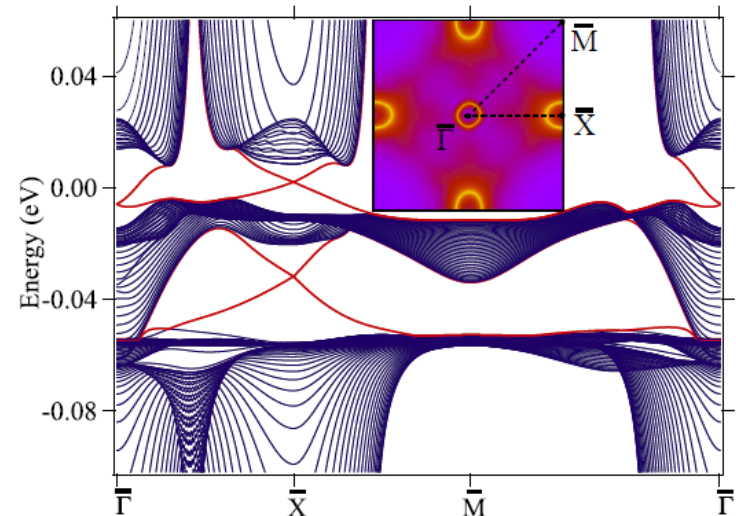
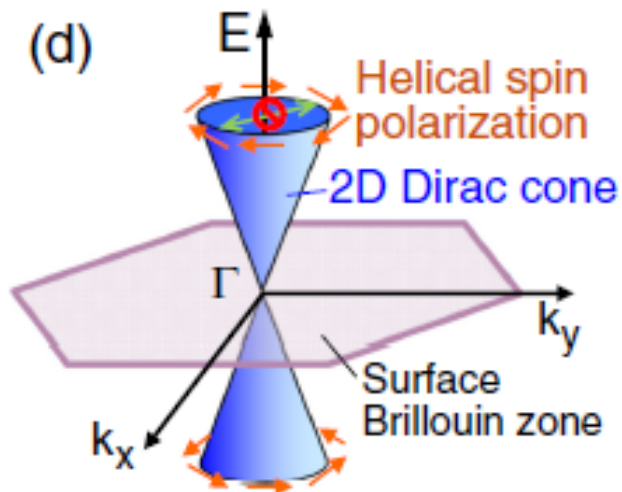
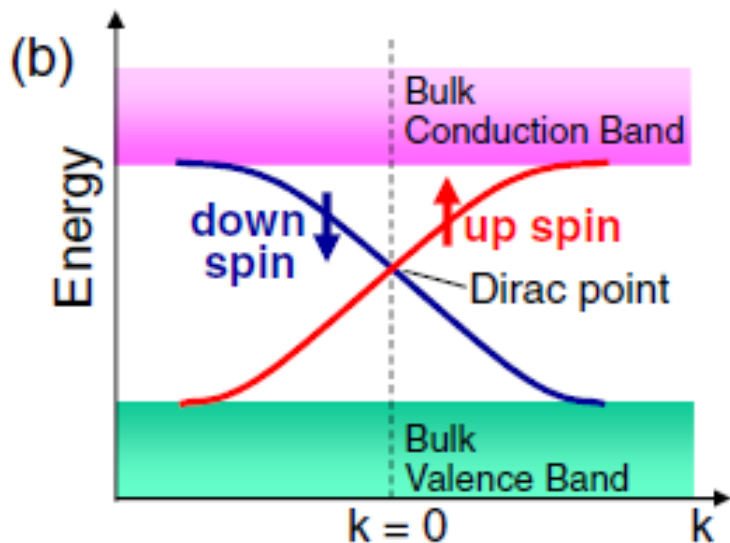


TABLE I: The products of parity eigenvalues of the occupied states for TRIM points, Γ , X , R and M in the BZ.

Γ	$3X$	R	$3M$
+	-	+	+



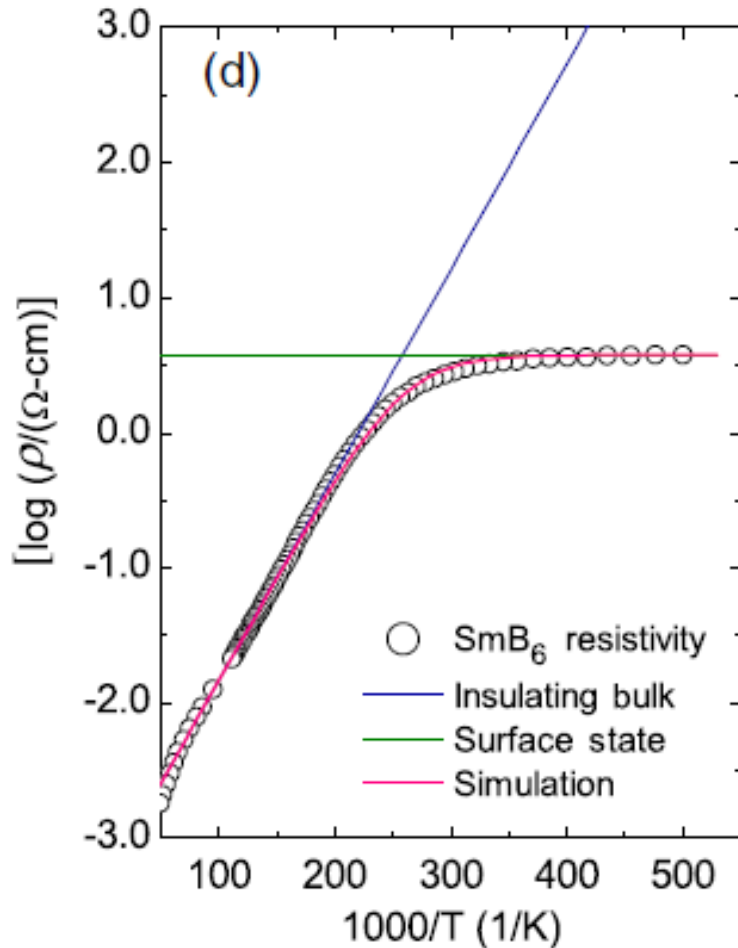
Свойства ТКИ



- 1) Проводимость по поверхностным состояниям при $T \rightarrow 0$:
электронный транспорт
- 2) Дираковский спектр состояний в запрещенной зоне:
ARPES (зонная структура), туннельная микроскопия (интерференционные эффекты)
- 3) Жесткая связь между направлением импульса и спином электрона:
ARPES (магнитный круговой дихроизм)
- 4) Подавление поверхностной проводимости магнитными примесями:
электронный транспорт
- 5) Высокая подвижность поверхностных состояний:
квантовые осцилляционные эффекты и прочее, прочее, прочее...



X. Zhang et al, PRX 3 (2013) 011011



Выход на постоянные значения ρ ниже 3К связывается с переходом от объемной (3D)

$$\rho_{3D} = \rho_0 \exp(-\Delta/k_B T)$$

к поверхностной (2D) проводимости

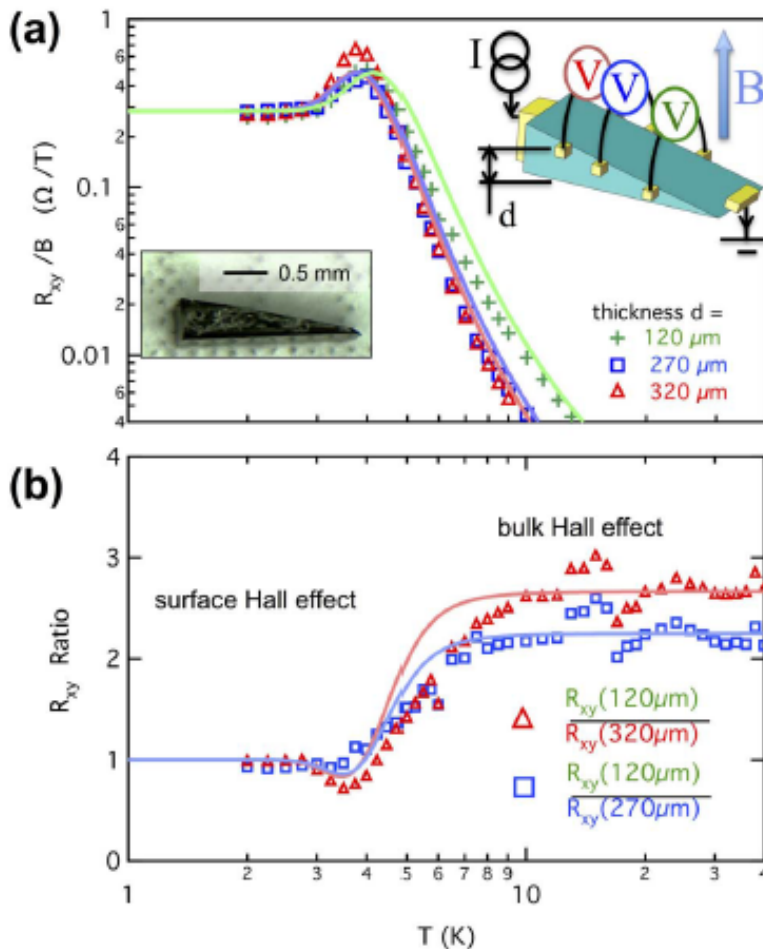
$$\rho_{2D} = \text{const}(T)$$

Однако:

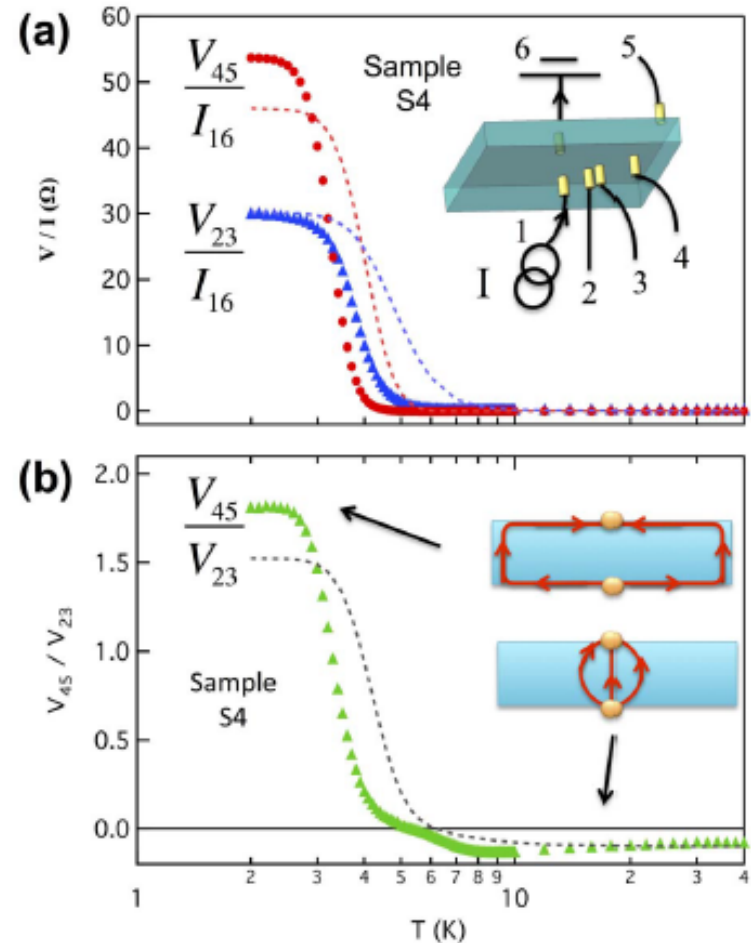
обсуждается гибридная щель $\Delta = 19$ мэВ, а используется для анализа значение $\Delta = 3$ мэВ.

D.J. Kim et al, Sci Rep 3 (2013) 3150

2D эффект Холла

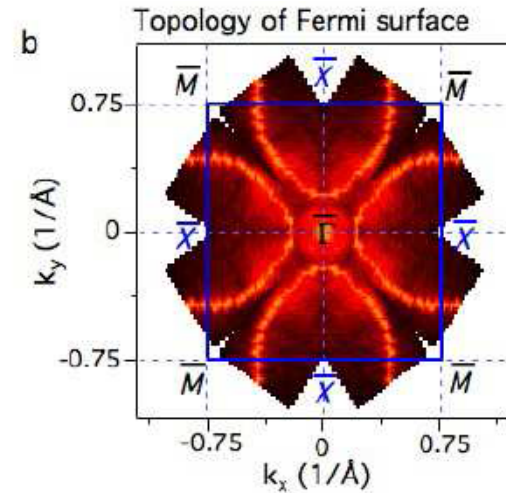
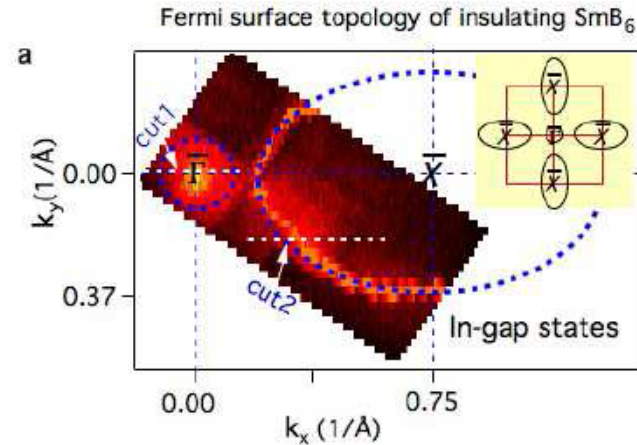
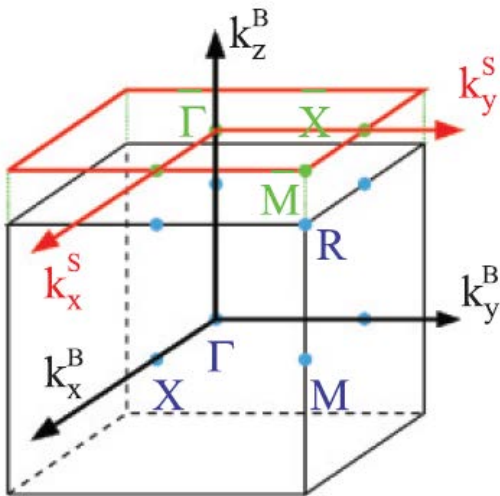


нелокальная проводимость

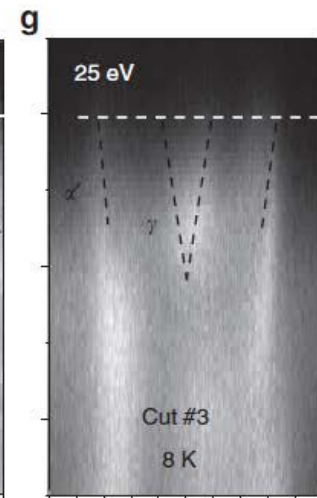
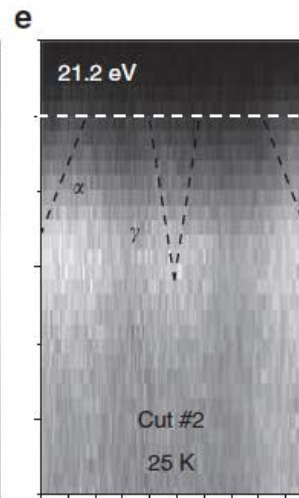
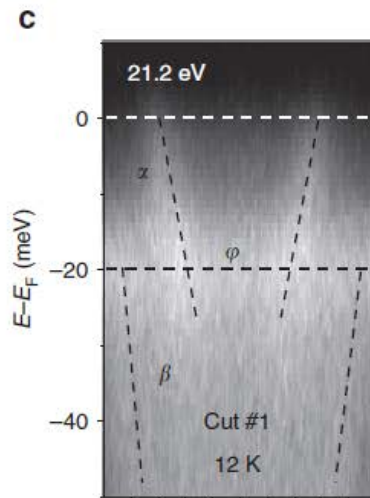
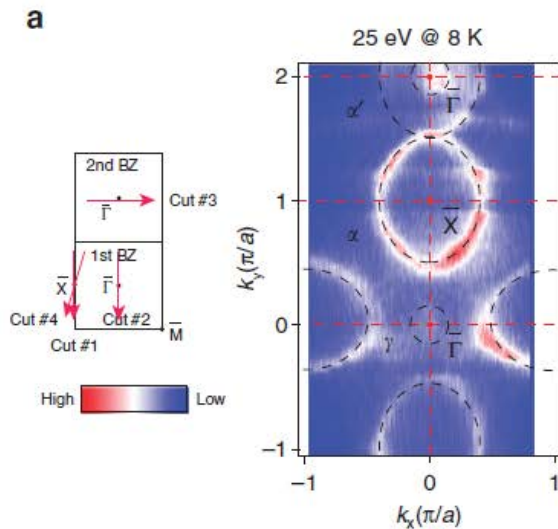


Обнаружен поверхностный вклад в проводимость ниже 5K

M. Neupane et al, Nature Comm 4 (2013) 2991

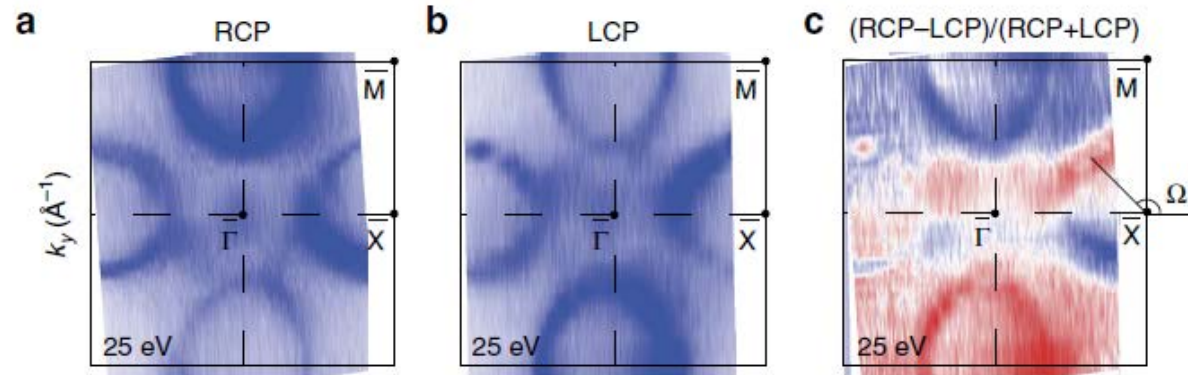


J. Jiang et al, Nature Comm 4 (2013) 3010

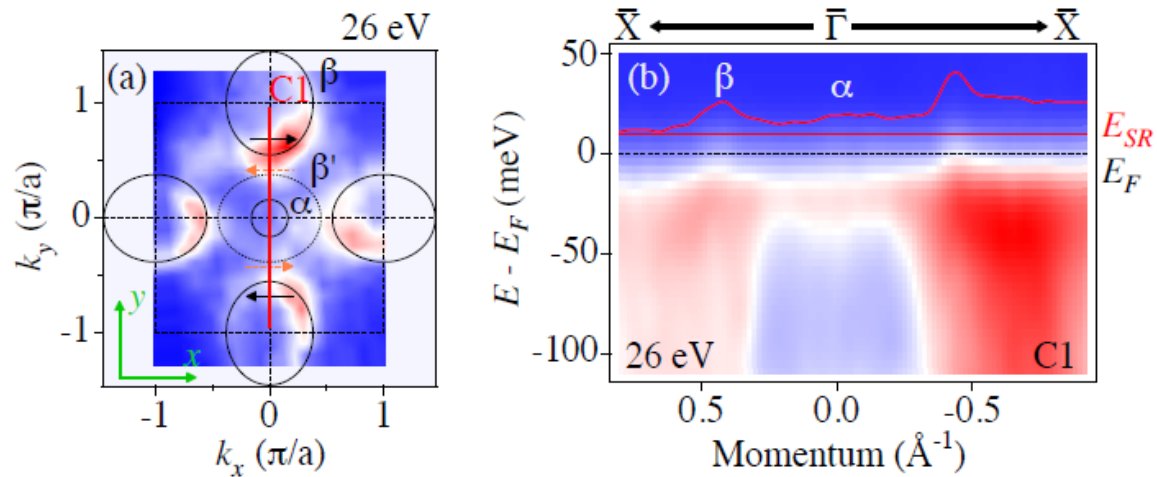


Участки с линейным законом дисперсии в щели ($T < 50$ K)

J.Jiang et al, Nature Comm 4 (2013) 3010



N.Xu et al, Nature Comm 5 (2014) 4566

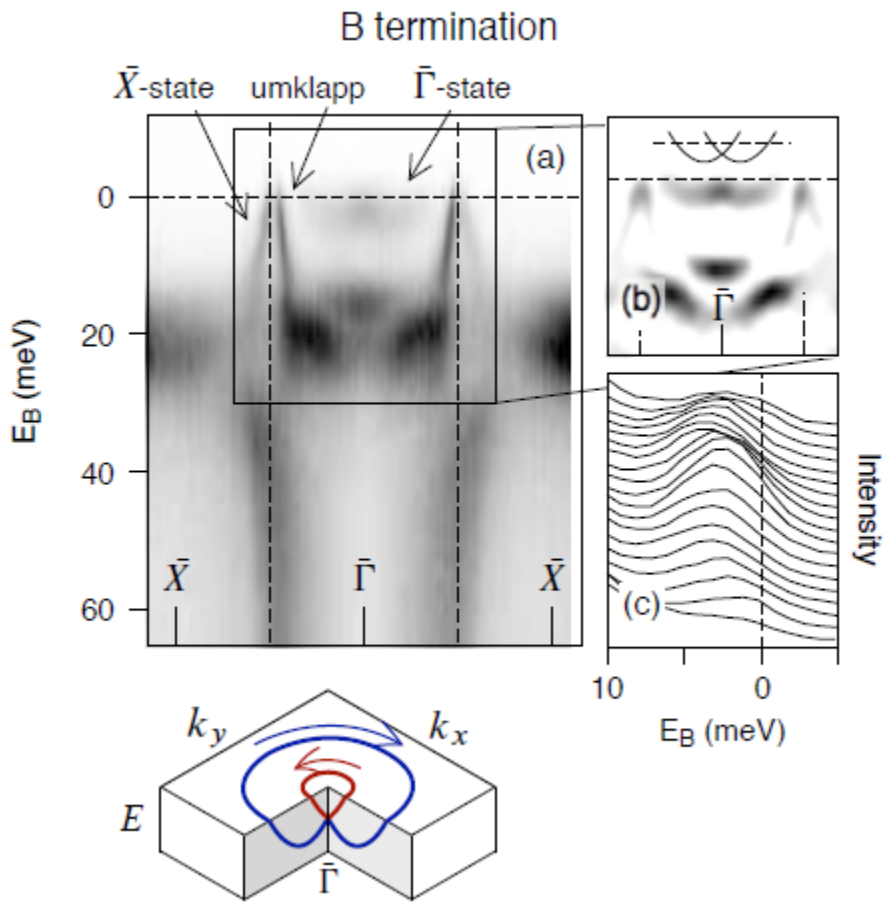


Киральный характер состояний в щели



ARPES: альтернативное описание

P.Hlawenka et al., arXiv:1502.01542v1



Состояния в $\bar{\Gamma}$:

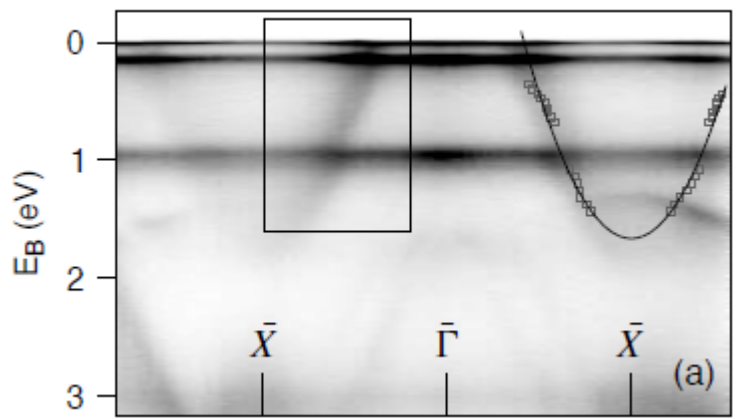
Большая эффективная масса $m_{\text{eff}} \sim 35m_0$
 Расщепление Рашбы $\Delta k_{\parallel} = \alpha_R m_{\text{eff}} / \hbar^2$
 $\alpha_R = 2 \cdot 10^{-12}$ эВ·м

Состояния в \bar{X} :

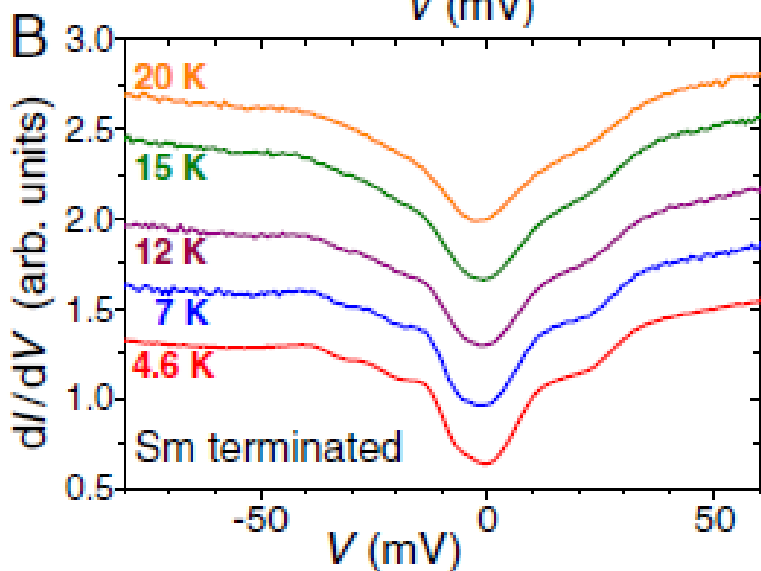
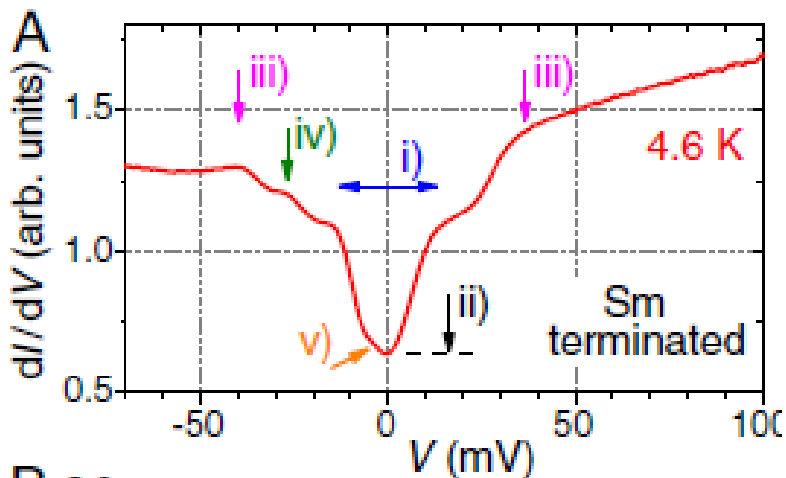
Поверхностные, но возникают от d-зоны (~1,7 эВ ниже E_F), гибридованной с 4f-состояниями

Вывод: SmB_6 – обычный полупроводник (согласуется с выводами

[E.Frantzeskakis et al., PRX 3 \(2013\) 041024](#)
 и с [Z.-H.Zhu et al., PRL 111 \(2013\) 216402](#))



Интерпретация ARPES данных не требует топологической нетривиальности



X. Zhang et al, PRX **3** (2013) 011011

Корреляционные эффекты искажают форму спектров при $T < 30$ K – резонанс Кондо $\Delta_K = 7.6$ мэВ формируется одновременно с гибридной щелью $\Delta = 18$ мэВ

W. Ruan et al., PRL **112** (2014) 136401

Спектры с (001) поверхности дают резонанс внутри щели при $T < 40$ K, однако нет интерференционных эффектов, специфичных для ТИ (Bi_2Se_3)

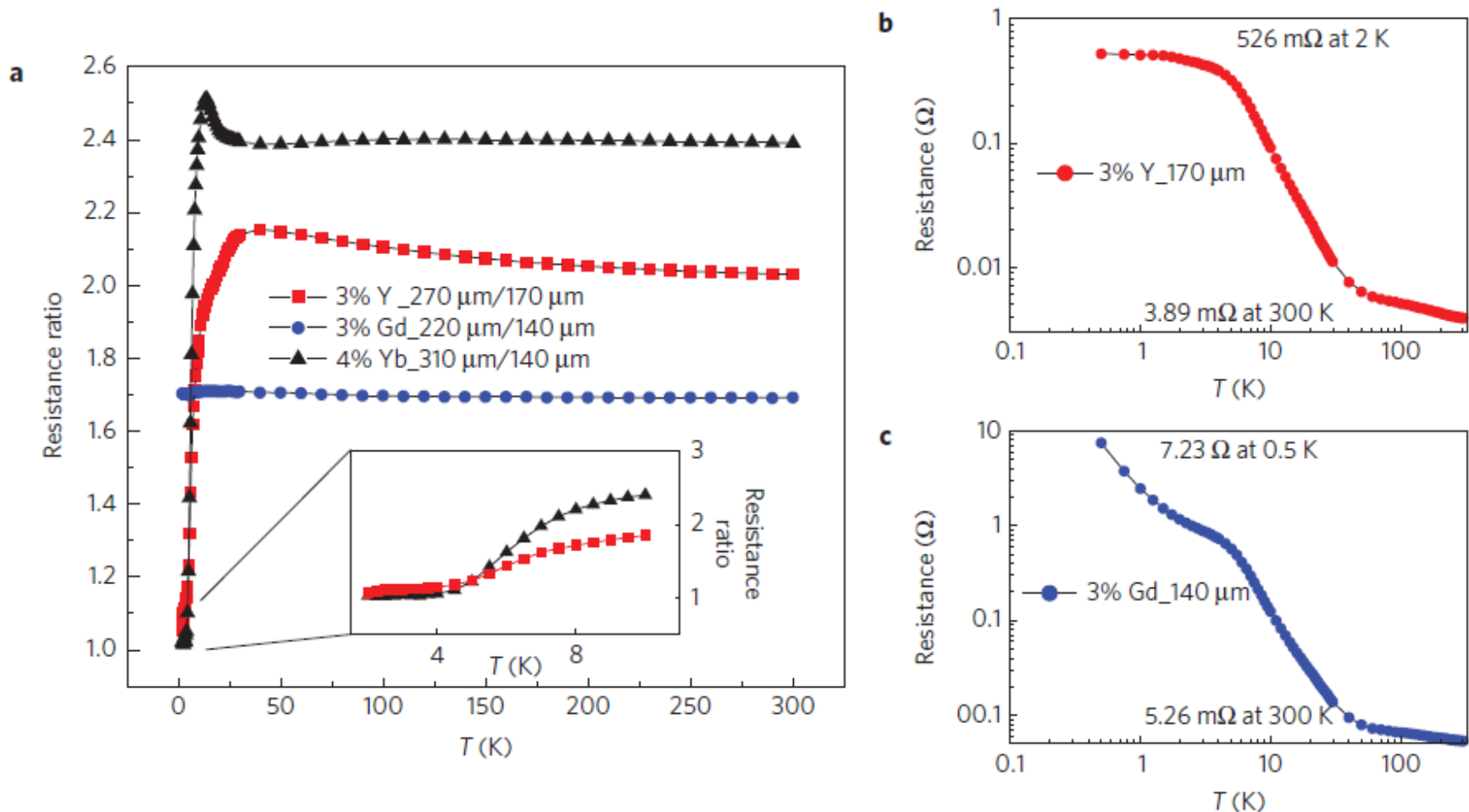
S. Rößler et al., PNAS **111** (2014) 4798

Для всех исследуемых поверхностей обнаружена конечная проводимость (ii) Из спектров на поверхностях Sm оценена гибридная щель $\Delta \sim 16$ мэВ (i) При $T < 15$ K обнаружена особенность при $V = -3$ мэВ, отвечающая состояниям в щели.

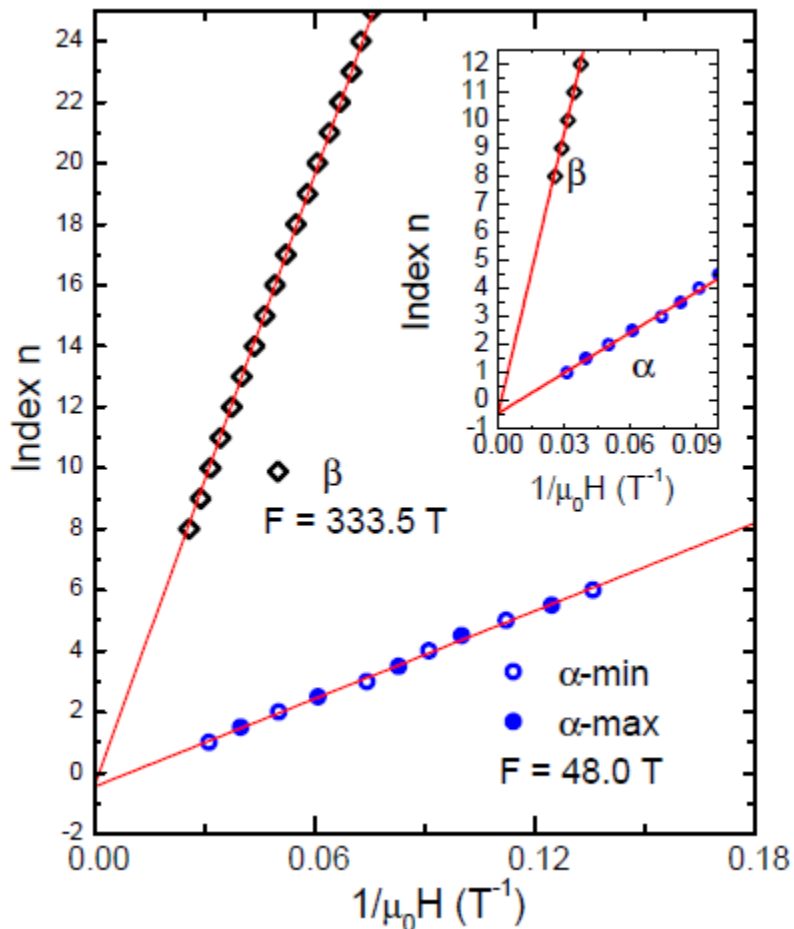
Нет подтверждения топологической нетривиальности зонного спектра

D.J. Kim et al, Nature Mater 3 (2013) 3150

Поверхностная проводимость подавляется магнитными примесями Gd (3%)



Исследованные образцы низкого качества: $\text{RRR} = \rho(1\text{K})/\rho(300\text{K}) < 10^3 \ll 10^5$



Осцилляций проводимости (эффект Шубникова-де Гааза) для монокристаллов SmB_6 **не наблюдалось** при температурах до 300 мК в полях до 45 Тл.

G. Li et al., *Science* **346** (2014) 1208

Обнаружен эффект де Гааза – ван Альфвена

1) Две гармоники

α : $F = 48$ Тл $m_{eff}^* = 0.074m_o$, $T_D = 22$ К

β : $F = 333,5$ Тл $m_{eff}^* = 0.101m_o$, $T_D = 24$ К

2) Двумерная ПФ: $F \sim 1/(\cos\varphi)$

3) $\gamma \approx -1/2$ указывает на дираковский спектр

Однако:

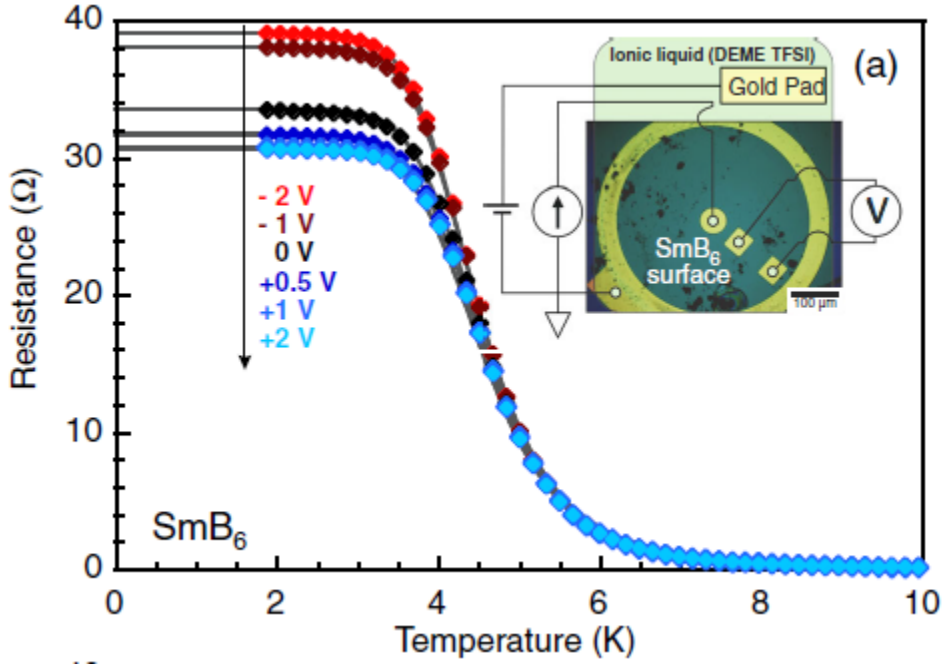
1) Нет согласия с данными ARPES

2) После химической или механической обработки поверхности квантовые осцилляции исчезают

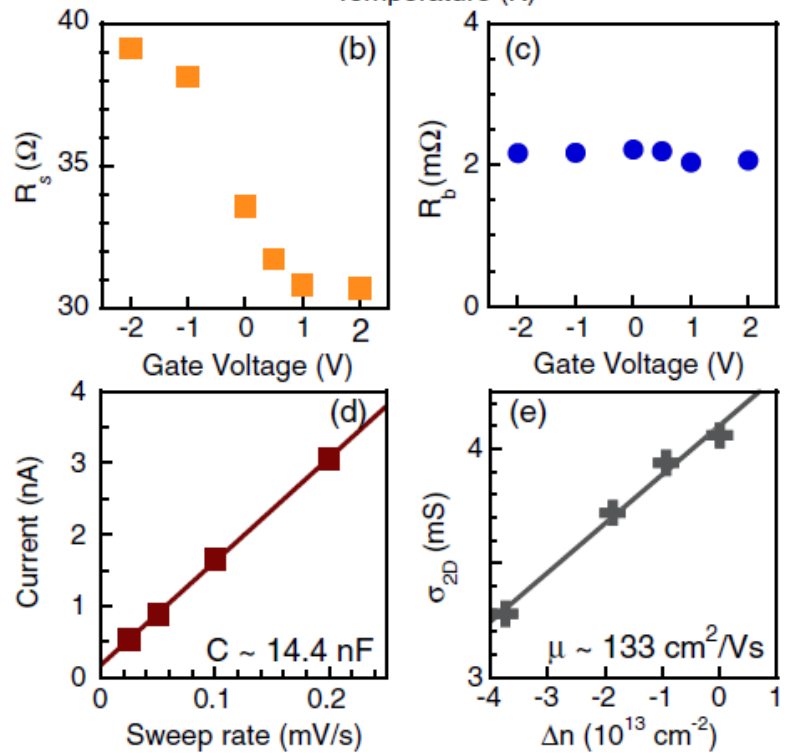


Эффект поля в SmB_6

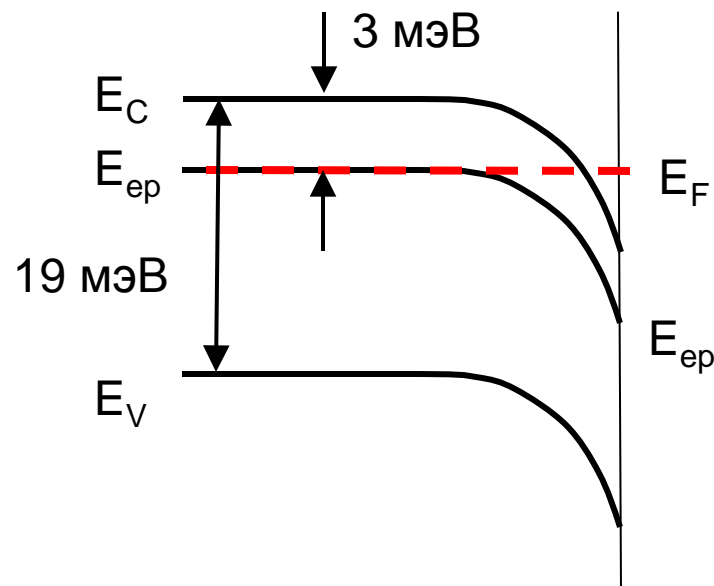
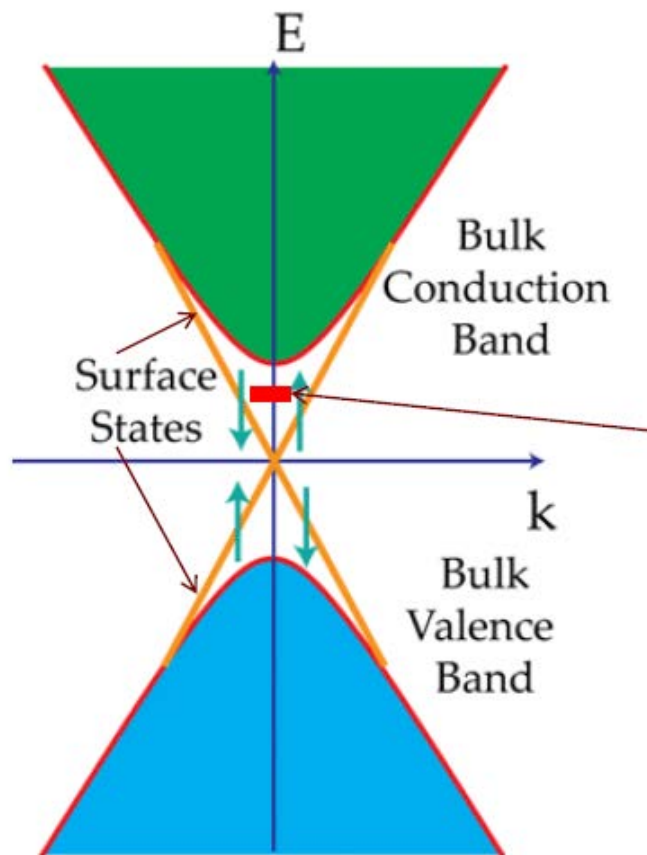
P. Syers et al., PRL 114 (2015) 096601
 Исследован эффект поля в геометрии диска Корбино
 Определены:
 - энергия активации в $\rho(T)$: $\Delta=3,8$ мэВ
 - концентрация и подвижность поверхностных электронов $n_{2D}=2 \cdot 10^{14}$ см⁻² (1/3e на 2D эл.яч.)
 $\mu=133$ см²/(В·с)



- 1) Подвижность носителей заряда совпадает с 3D данными для $5\text{K} < T < 15\text{K}$
- 2) Двойное насыщение R_S не характерно для дираковского спектра



K. Flachbart et al., ISBB 2014



Топологический кондо-изолятор:
 сильное взаимодействие дираковских
 электронов с состояниями внутри щели
 (4f-5d гибридизация) ?!!!!

Поверхностная проводимость возникает в
 обогащенном электронами слое при изгибе
 зон вниз. Оценка характерного размера

$$x_0 = (\epsilon k_b T / 2\pi e^2 n_0)^{1/2}$$

для $T=10\text{K}$, $\epsilon=600$ и $n_0=10^{18}\text{ см}^{-3}$ дает $x_0 \approx 8\text{ нм}$

Эффекты пространственного квантования!!!

- *Введение*
- *3D: промежуточная валентность и переход металл-диэлектрик в SmB_6*
- *2D: состояние коррелированного топологического изолятора в SmB_6*
- ***Зарядовый транспорт в SmB_6 : 3D или 2D***
- *Выводы и перспективы*



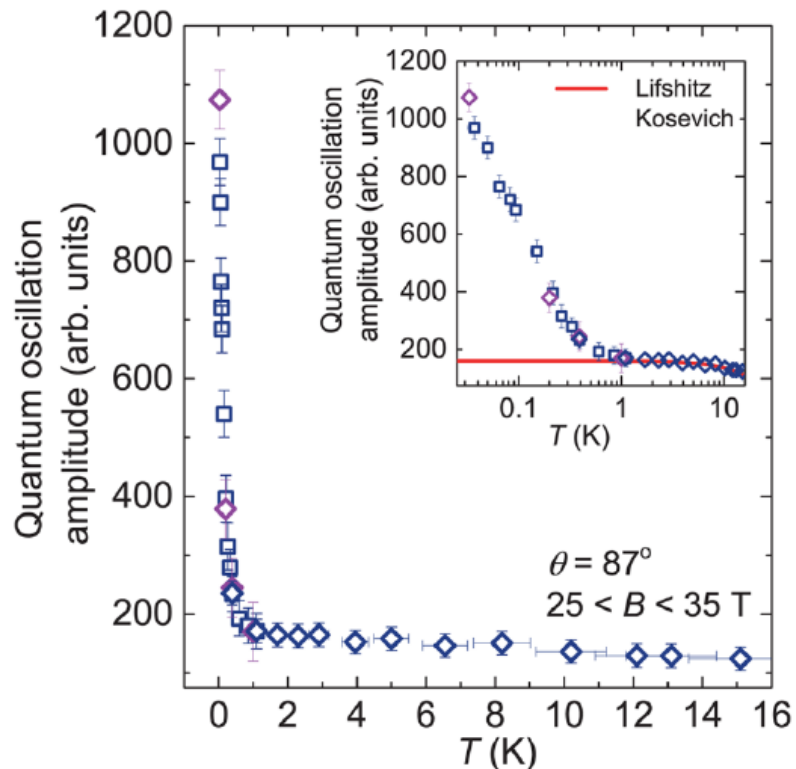
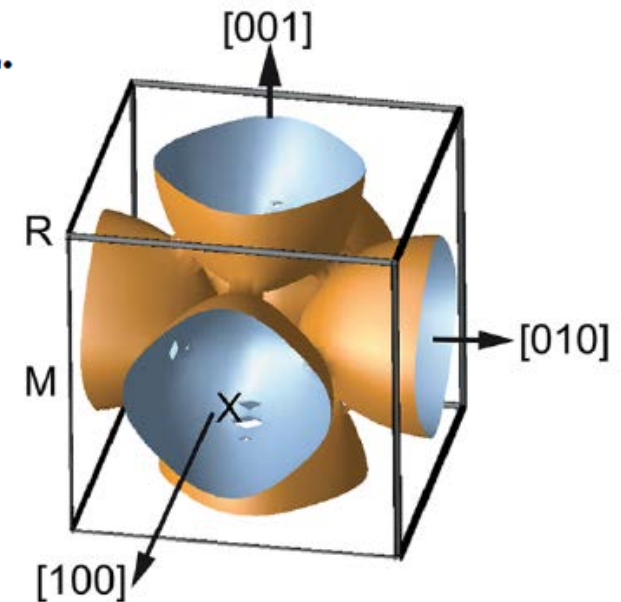
	СКЭС	ТКИ	ПП
Два масштаба щели	+	-	+
Анизотропия малой щели	+	-	-
Основное состояние	3D	2D	2D
	ЭДЖ/БЭК	дираковские электроны	изгиб зон
ARPES аномалии	+	+	+
Туннельные спектры	+	-	-
Квантовые осцилляции	нет	+	нет
Эффект поля	нет	+	+
Термоэдс $S(T < 5\text{K}) = 0$ мкВ/К	-	-	-

- *Введение*
- *3D: промежуточная валентность и переход металл-диэлектрик в SmB_6*
- *2D: состояние коррелированного топологического изолятора в SmB_6*
- *Зарядовый транспорт в SmB_6 : 3D или 2D*
- ***Выводы и перспективы***

Unconventional Fermi surface in an insulating state

Science 349 (2015) 6245

B. S. Tan,¹ Y.-T. Hsu,¹ B. Zeng,² M. Ciomaga Hatnean,³ N. Harrison,⁴ Z. Zhu,⁴ M. Hartstein,¹ M. Kiourlappou,¹ A. Srivastava,¹ M. D. Johannes,⁵ T. P. Murphy,² J.-H. Park,² L. Balicas,² G. G. Lonzarich,¹ G. Balakrishnan,³ Suchitra E. Sebastian^{1*}



По данным квантовых осцилляций восстановлена поверхность Ферми и обнаружено отклонение амплитуды осцилляций от поведения, предсказанного Лифшицем и Косевичем



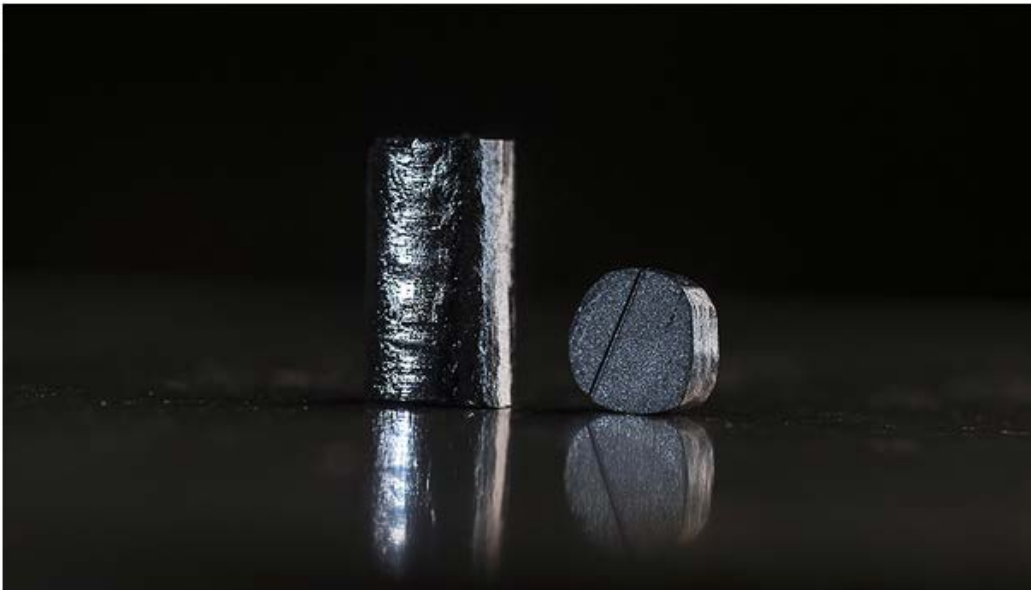
N. Wolchover, QM July 2, 2015

QUANTA MAGAZINE illuminating science

CONDENSED MATTER PHYSICS

Paradoxical Crystal Baffles Physicists

At super-low temperatures, a crystal called samarium hexaboride behaves in an unexplained, imagination-stretching way.



Andrew Testa for Quanta Magazine

...the observed deviation from the Lifshitz-Kosevich formula was presaged in 2010 by Sean Hartnoll and Diego Hofman, ..., in a paper that recast strongly correlated materials as higher-dimensional black holes...

In their paper, Hartnoll and Hofman investigated the effect of strong correlations in metals by calculating corresponding properties of their simpler black hole model — specifically, how long an electron could orbit the black hole before falling in.

Спасибо за внимание!