



Идеи и методы физики конденсированного состояния

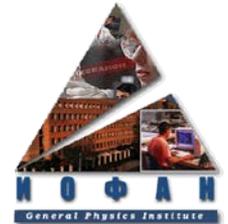
XIV Школа-конференция молодых ученых  
"Проблемы физики твердого тела и высоких давлений"

Сочи, 11-20 сентября 2015г.

# Зарядовый транспорт в системе с промежуточной валентностью $\text{SmV}_6$ : 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

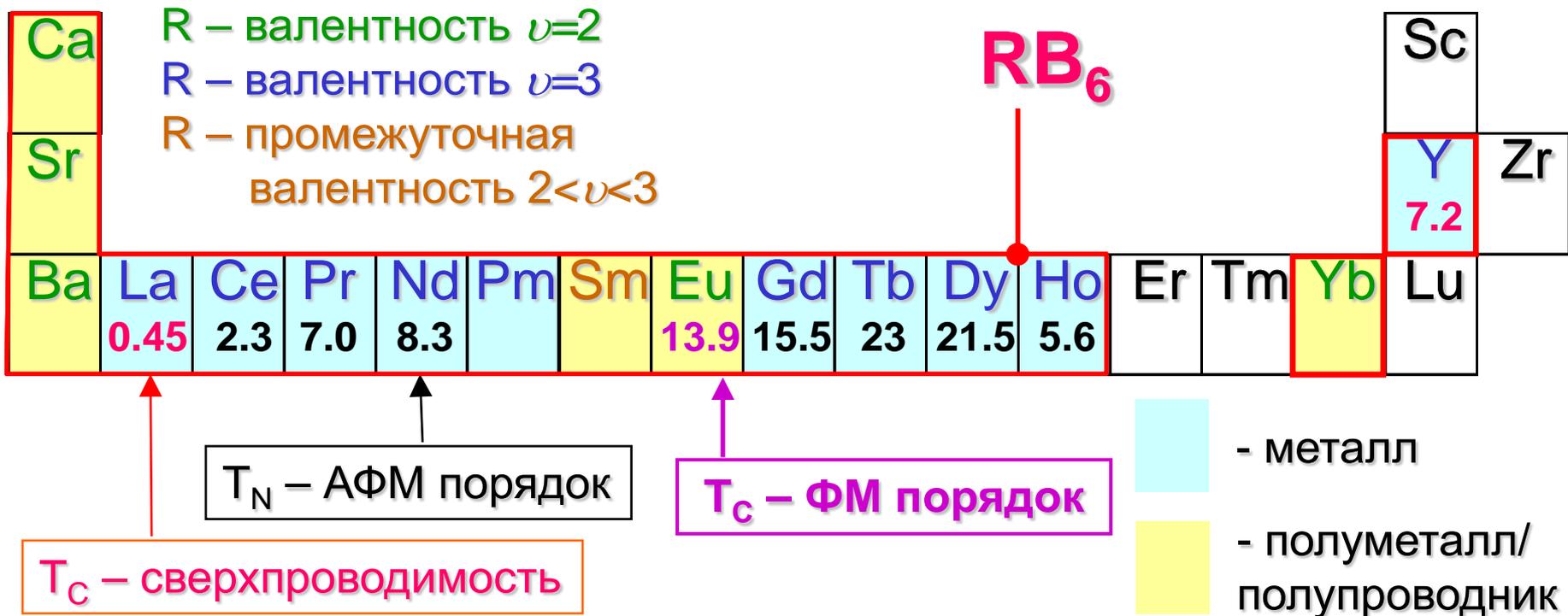
- *Введение*
- *3D: промежуточная валентность и переход металл-диэлектрик в  $\text{SmB}_6$*
- *2D: состояние коррелированного топологического изолятора в  $\text{SmB}_6$*
- *Зарядовый транспорт в  $\text{SmB}_6$ : 3D или 2D*
- *Выводы и перспективы*

- **Введение**
- *3D: промежуточная валентность и переход металл-диэлектрик в  $\text{SmB}_6$*
- *2D: состояние коррелированного топологического изолятора в  $\text{SmB}_6$*
- *Зарядовый транспорт в  $\text{SmB}_6$ : 3D или 2D*
- *Выводы и перспективы*



# Гексабориды $RB_6$

$RB_6$  - соединения на основе каркасных структур из кластеров бора  $B_6$

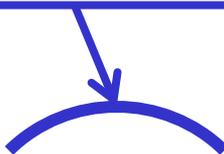


$Ce_{1-x}La_xB_6$  – А.В.Семенов  
 $Eu_{1-x}(Ca,Gd)_xB_6$  – А.Н.Самарин



## Сильно коррелированные электроны

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



**SmB<sub>6</sub>**

## 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

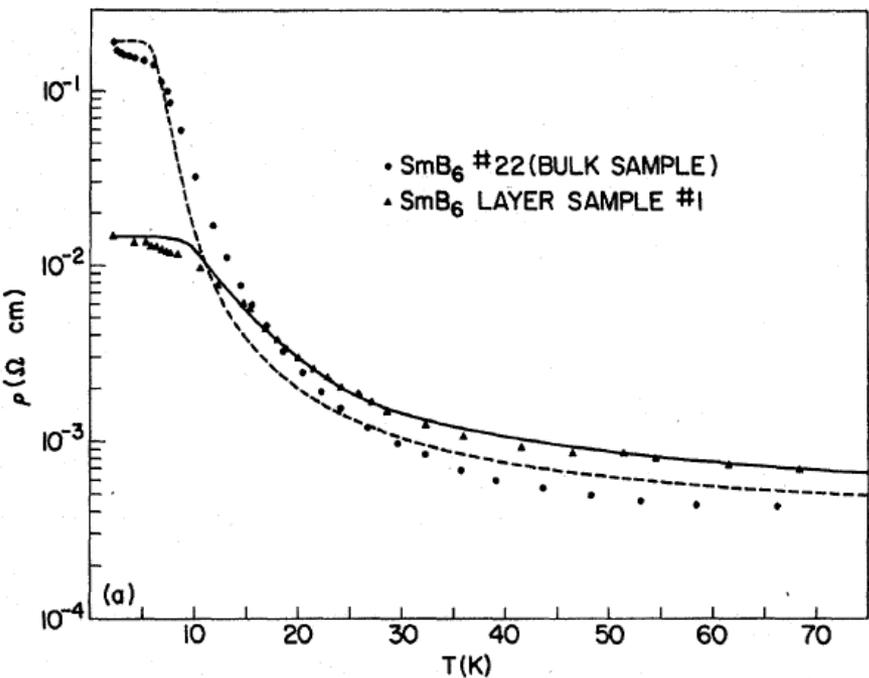




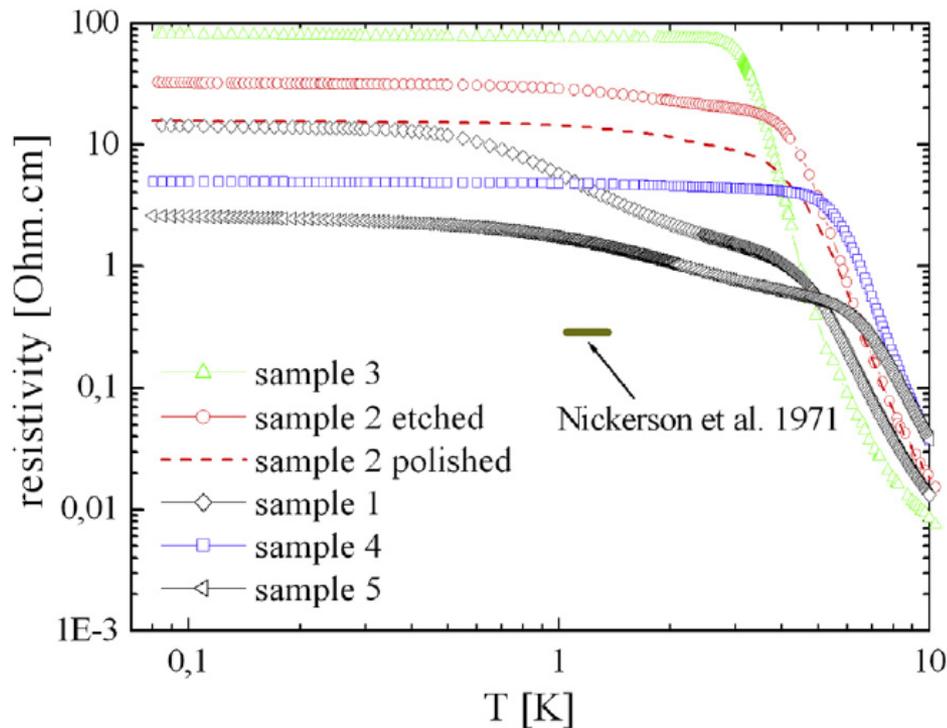
# Основное состояние в $\text{SmB}_6$

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

S. Gabáni et al., SSS 47, 17 (2015)



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



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

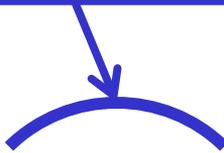
Основное состояние – металлическое:  $\rho \sim 1-100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$



# SmB<sub>6</sub>: 3D vs 2D

## Сильно коррелированные электроны

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



**SmB<sub>6</sub>**

## 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

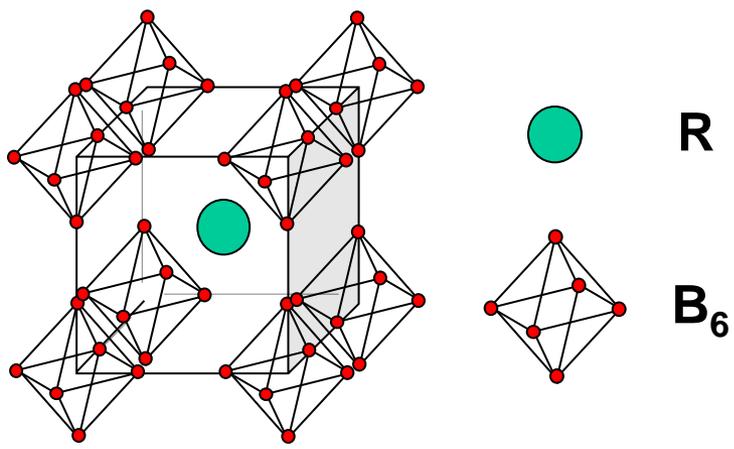


- *Введение*
- ***3D: промежуточная валентность и переход металл-диэлектрик в  $\text{SmB}_6$***
- *2D: состояние коррелированного топологического изолятора в  $\text{SmB}_6$*
- *Зарядовый транспорт в  $\text{SmB}_6$ : 3D или 2D*
- *Выводы и перспективы*



# Промежуточная валентность в $\text{SmB}_6$

## $\text{SmB}_6$

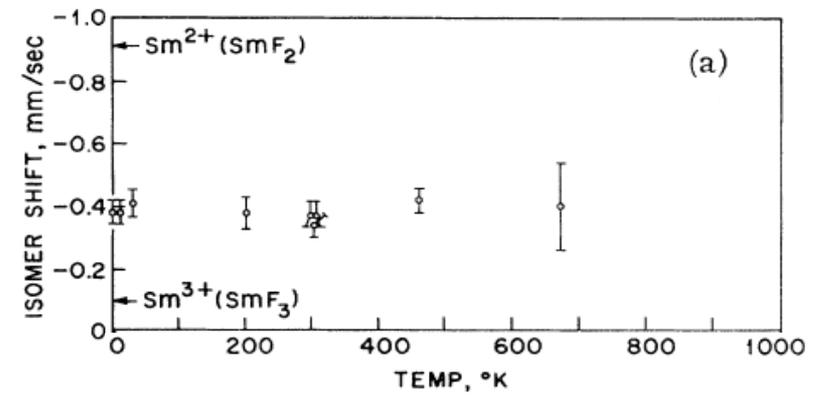


◆ **кубическая структура**  
 $\text{CaB}_6$ ,  $Pm\bar{3}m$ ,  $a=4.1332\text{\AA}$

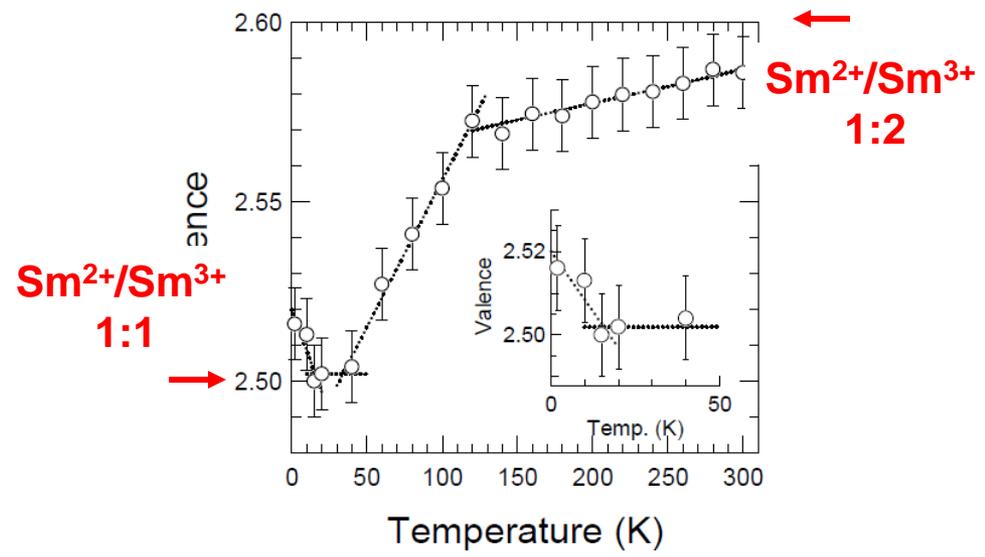
Э.Е.Вайнштейн и др., ФТТ, **6**, 2909 (1965)

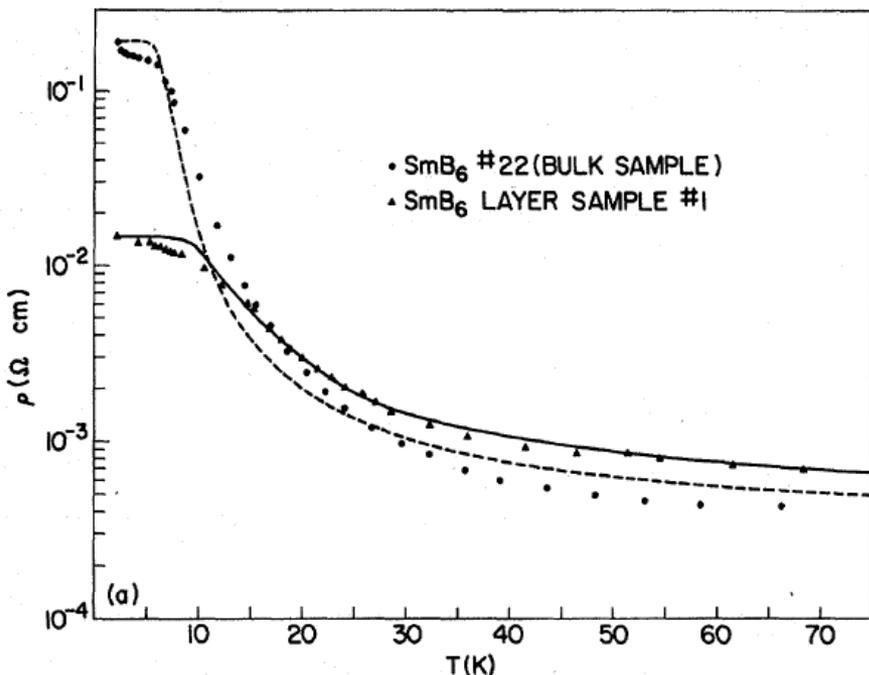
- ◆ Ионы Sm: состояние с промежуточной валентностью ( $\nu(\text{Sm}) \approx 2,5-2,6$ )
- ◆ Быстрые зарядовые и спиновые флуктуации между состояниями  $\text{Sm}^{2+}$  и  $\text{Sm}^{3+}$  (частоты  $10^{12}-10^{13} \text{ Hz}$ )  
 $4f^6 \leftrightarrow 4f^5 + 5d$

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:

SmB<sub>6</sub> – узкозонный полупроводник

разброс значений ширины запрещенной зоны в SmB<sub>6</sub> :

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 (**σ=const(T), T→0 K**)

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

оптическая проводимость:  
эффективная масса дырок

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

## Сильно коррелированные электроны

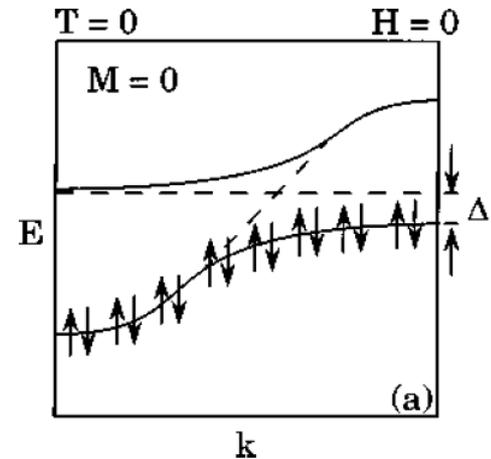
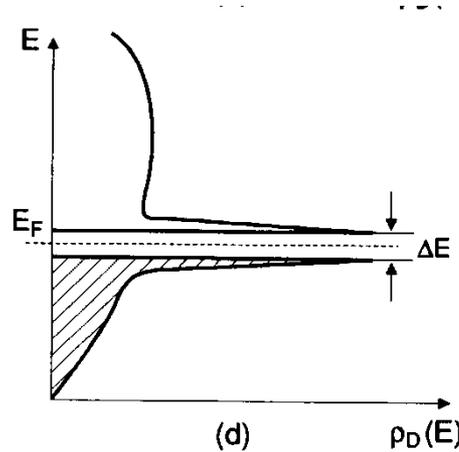
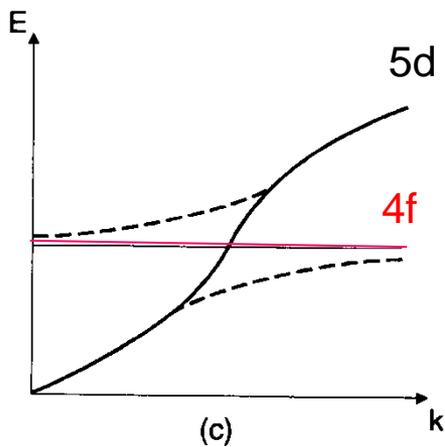
- промежуточная валентность
  - 4f-5d гибридизация
  - тяжелые фермионы
- переход металл-диэлектрик



# SmB<sub>6</sub>: 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, Ce<sub>3</sub>Bi<sub>4</sub>Pt<sub>3</sub>, **SmB<sub>6</sub>**, SmS, TmSe, YbB<sub>12</sub>, UFe<sub>4</sub>P<sub>12</sub>, 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

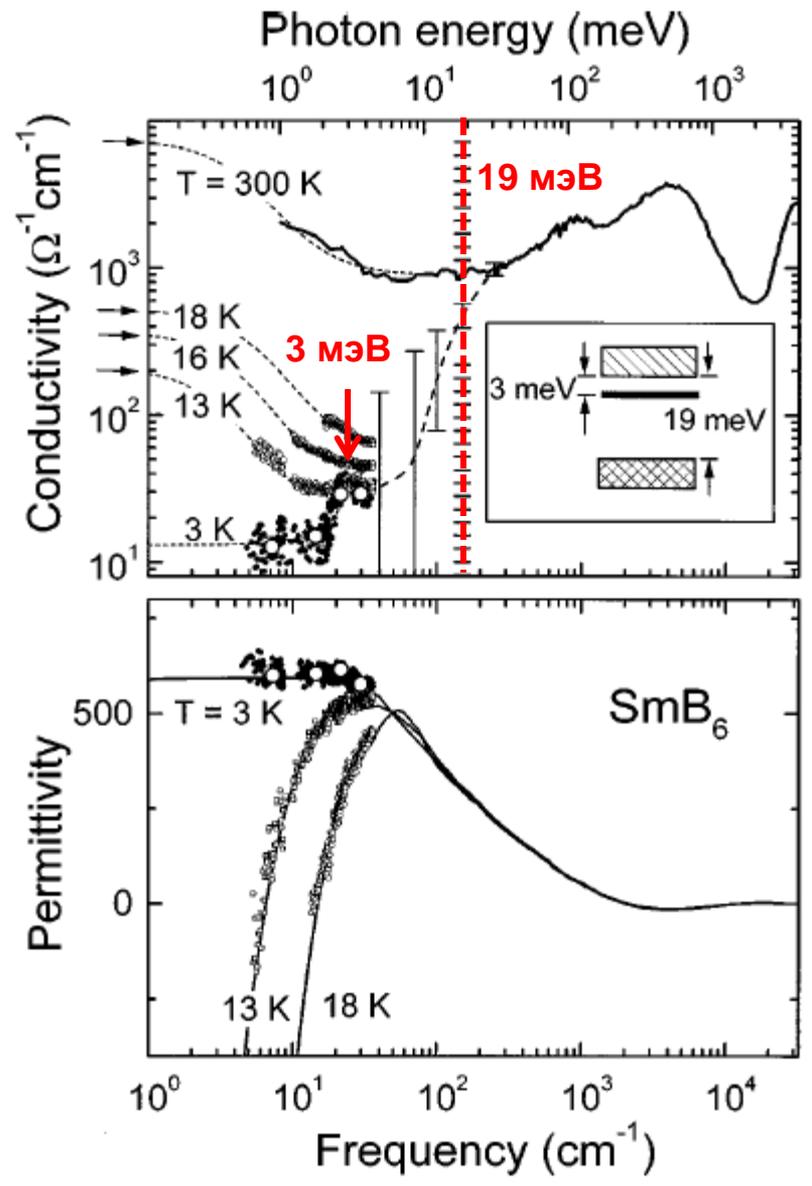
$$\psi_{m,g} = \cos \theta |f_m^6, ^7F_0\rangle + \sin \theta |f_m^5 B_m^{(f)}, ^7F_0\rangle$$

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

4f-5d плотность максимальна вдоль <111>  
(~2.4 Å от иона Sm): **валентные флуктуации**  
направлены к кластерам B<sub>6</sub>

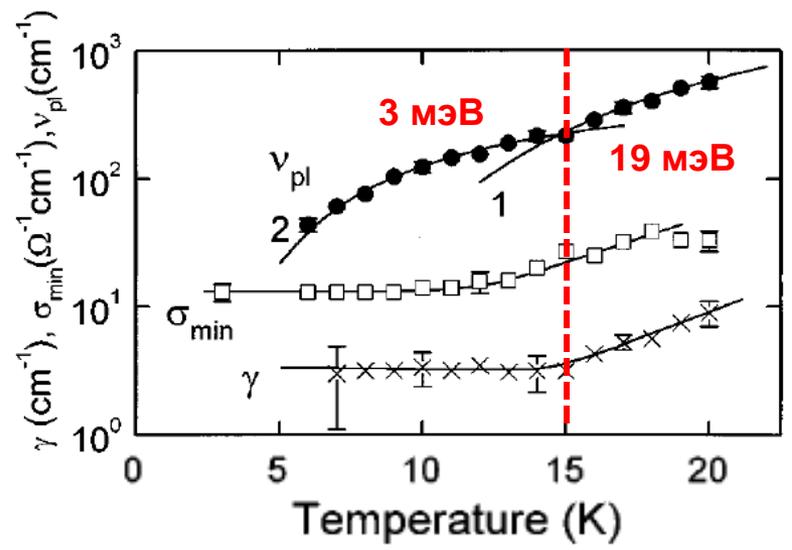


# Оптическая проводимость $\text{SmB}_6$



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

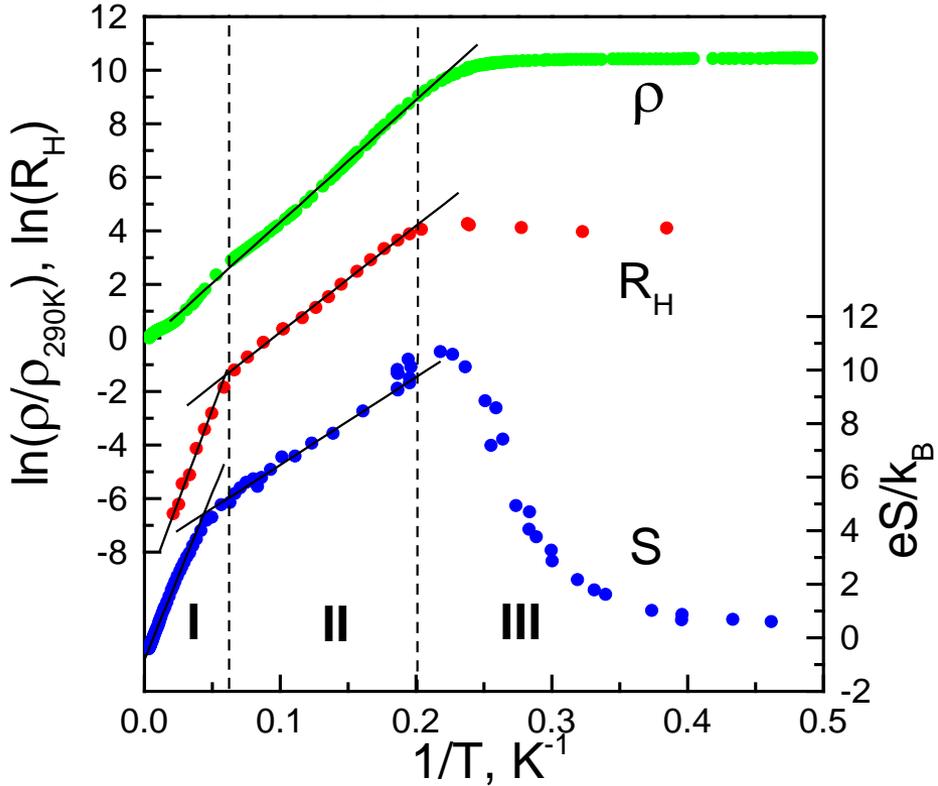
- прямые измерения  $\sigma(\omega)$  и  $\epsilon(\omega)$  на частотах 5-36  $\text{cm}^{-1}$
- открытие щели в спектре при  $T < 100$  K
- запрещенная зона 19 мэВ
- полоса примесных состояний под зоной проводимости (3 мэВ)
- при  $T < 5$  K проводимость не зависит от частоты и температуры





# Зарядовый транспорт в $\text{SmB}_6$ : 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  $\rho$ ,  
 коэффициент Холла  $R_H$   
 и коэффициент Зеебека  $S$   
 для  $I(\nabla T) \parallel \langle 100 \rangle$

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

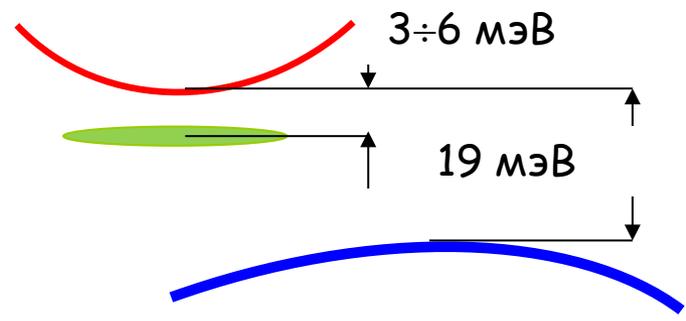
$$b = \mu_n / \mu_p \approx 50, E_g \approx 19 \text{ мэВ}, m_e^* \approx 30 m_0$$

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

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

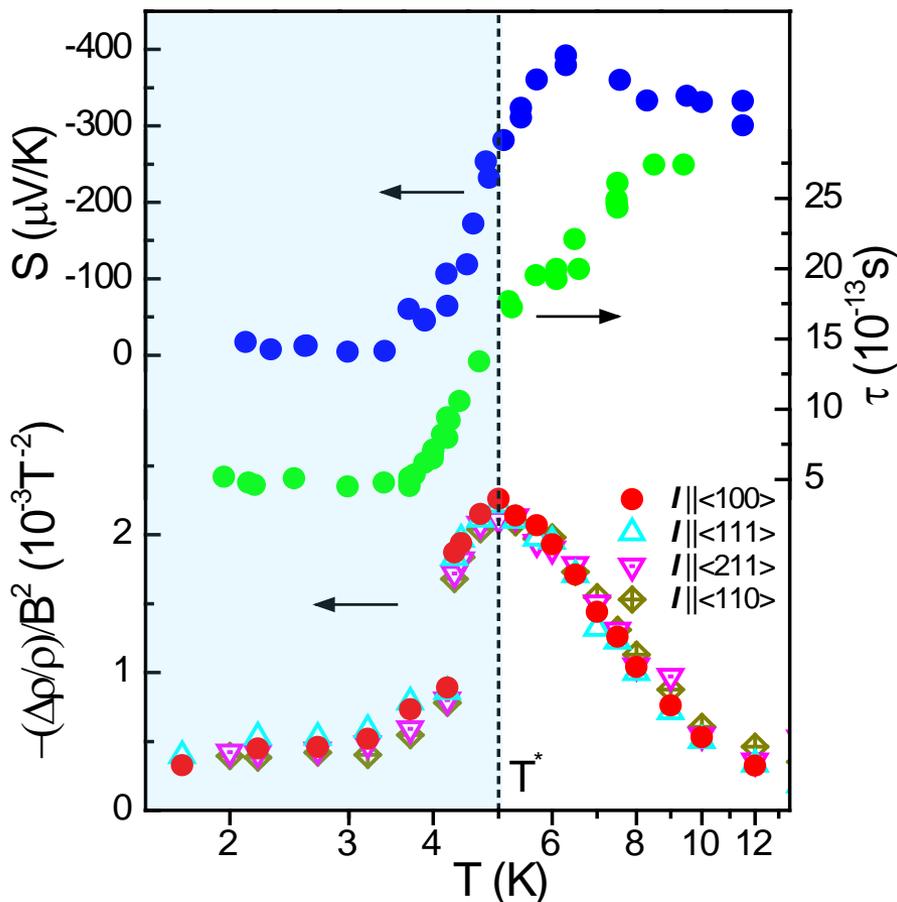
$$a^* = \hbar / \sqrt{2m_n^* E_{ex}} \leq 6 \text{ \AA}, n \sim 10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

Схема зонной структуры  $\text{SmB}_6$





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  $\tau \approx (2 \div 5) \cdot 10^{-13} \text{ с}$  – согласие с оценками времени валентных флуктуаций из **3D** экспериментов:

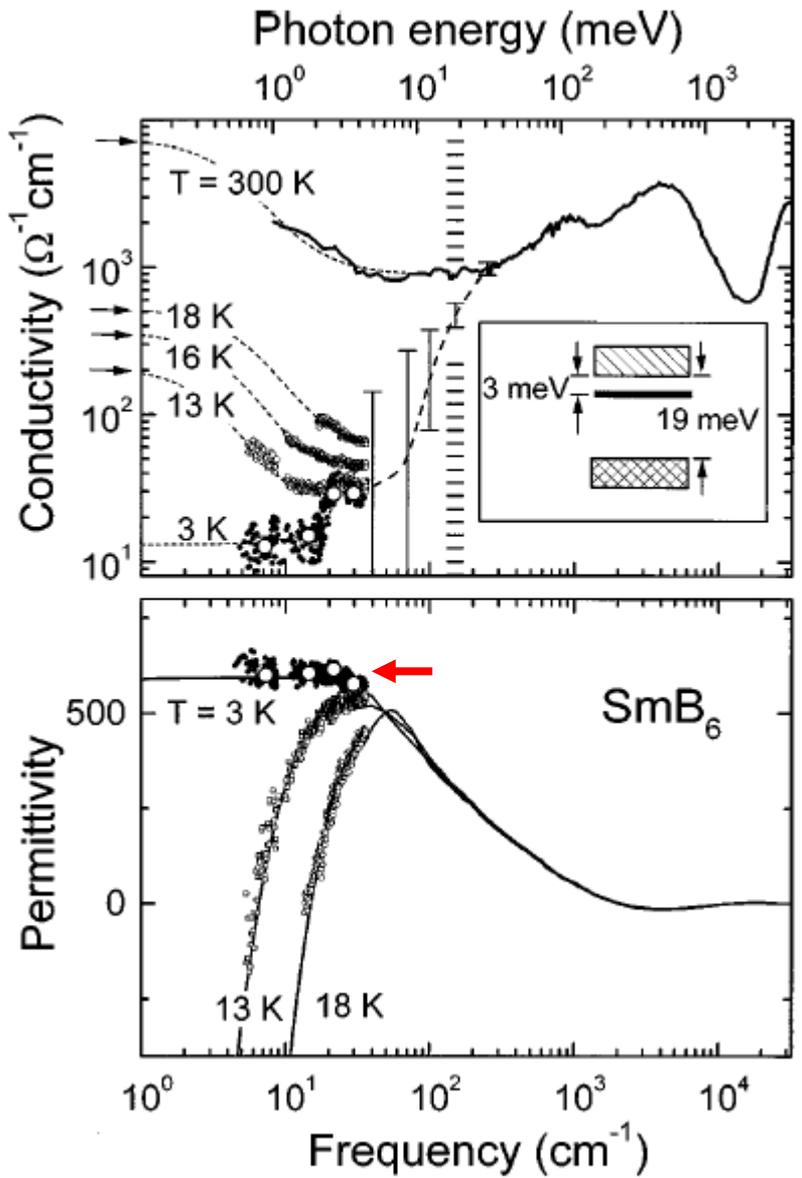
P. Alekseev et al., JPCM 7 (1995) 289  
 квазиупругий пик в нейтронах  $\tau \approx 3 \cdot 10^{-13} \text{ с}$

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  
 $\tau \approx (0.8 \div 4) \cdot 10^{-13} \text{ с}$

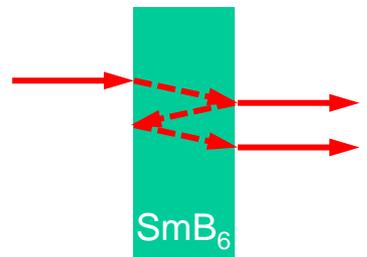


# Основное состояние в SmB<sub>6</sub>: оптика



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  $\omega < 20 \text{ cm}^{-1}$

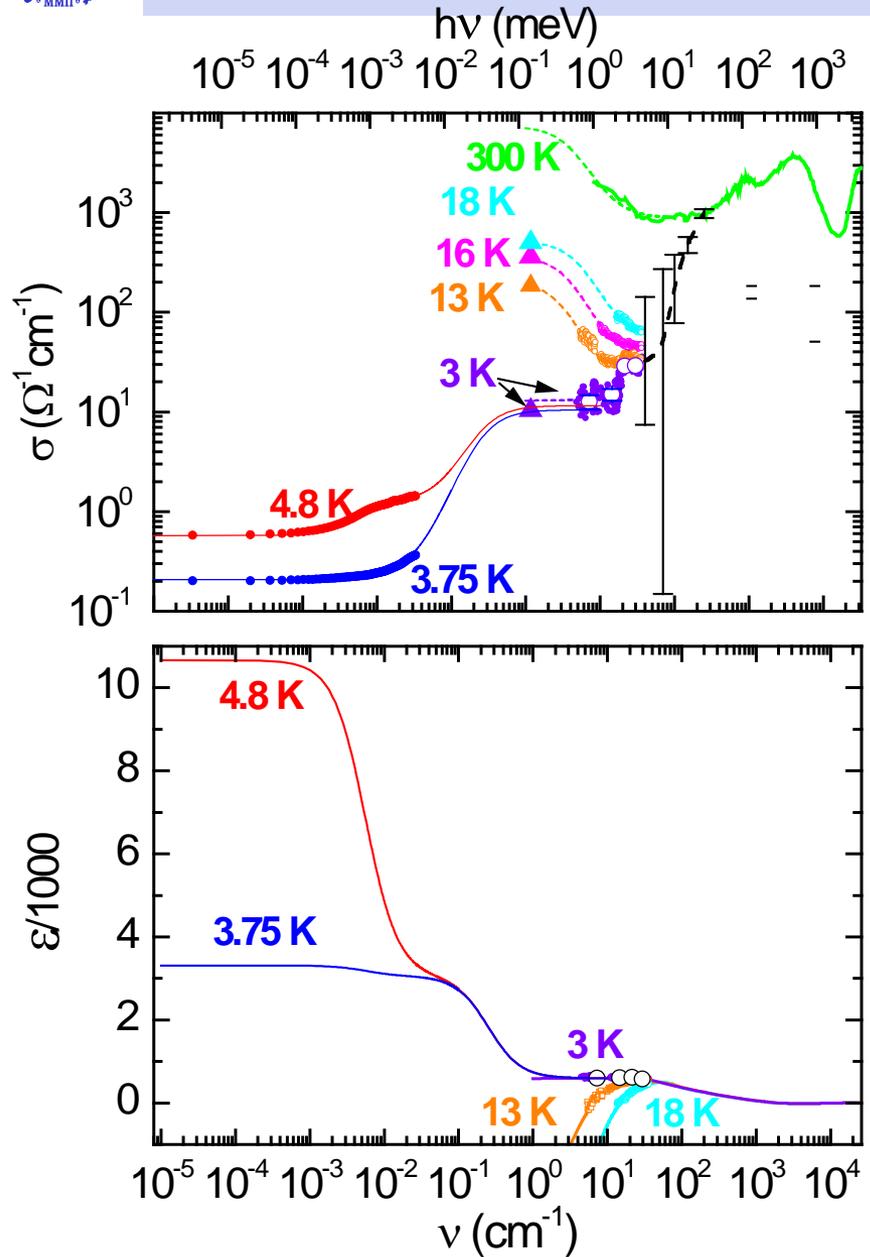
$\epsilon(\omega) \approx 600$      $n = \epsilon^{0.5} \approx 24.5$



Наблюдаемые низкотемпературные аномалии **3D** транспортных, оптических, магнитных, упругих, термических и решеточных свойств, наблюдаемые для  $\text{SmB}_6$  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 $\text{SmB}_6$



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  $\text{SmB}_6$ :

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

SmB<sub>6</sub>

## 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  $\text{SmB}_6$*
- ***2D: состояние коррелированного топологического изолятора в  $\text{SmB}_6$***
- *Зарядовый транспорт в  $\text{SmB}_6$ : 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?»

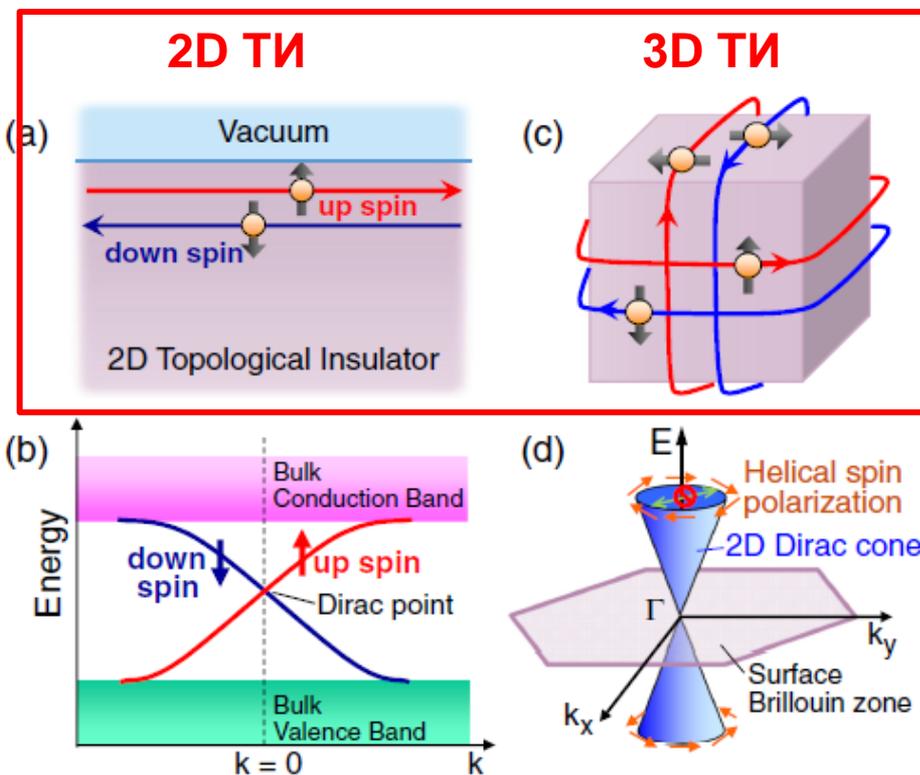
[https://ru.wikipedia.org/wiki/Топологический\\_изолятор](https://ru.wikipedia.org/wiki/Топологический_изолятор)

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.

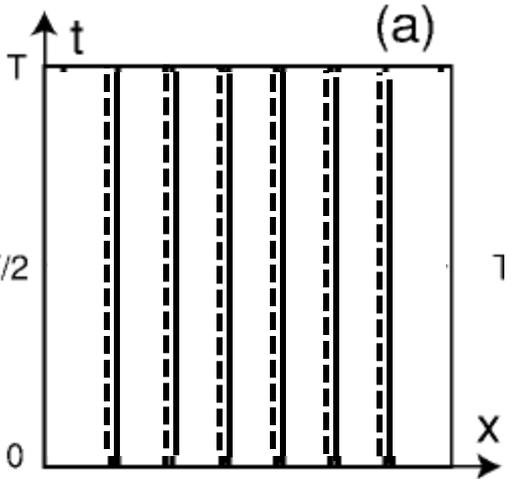
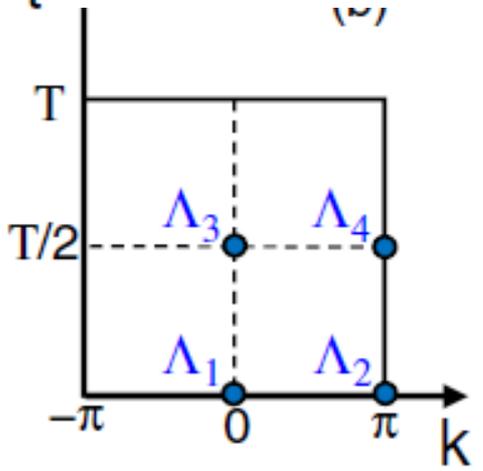
Предполагается нарушение симметрии относительно времени при описании эффектов, производимых внутри топологического изолятора.





# 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

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

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

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

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

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

При t=0 и t=T/2

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

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

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



# Топологическая неэквивалентность

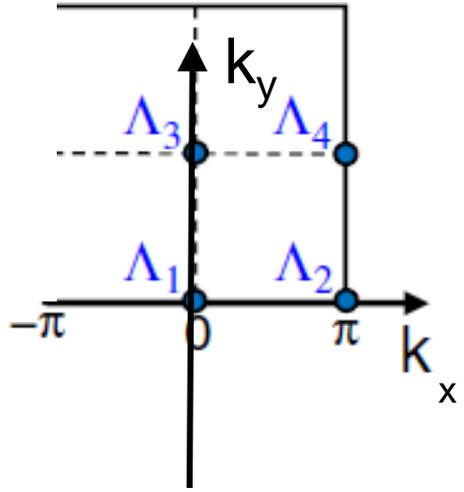
L.Fu, C.L.Kane,  
PRB 74 (2006) 195312

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

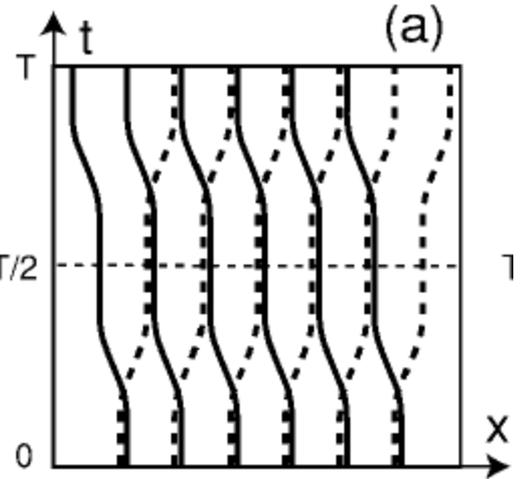
$$P_\theta = P_1 - P_2 = \frac{1}{i\pi} \log \left( \frac{\sqrt{w_{12}(0)^2}}{w_{12}(0)} \cdot \frac{w_{12}(\pi)}{\sqrt{w_{12}(\pi)^2}} \right)$$

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

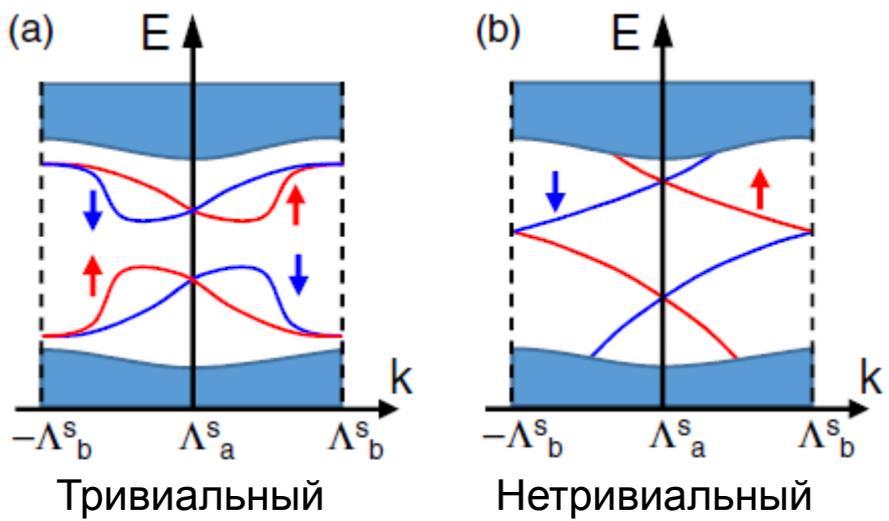


$\Delta=1$

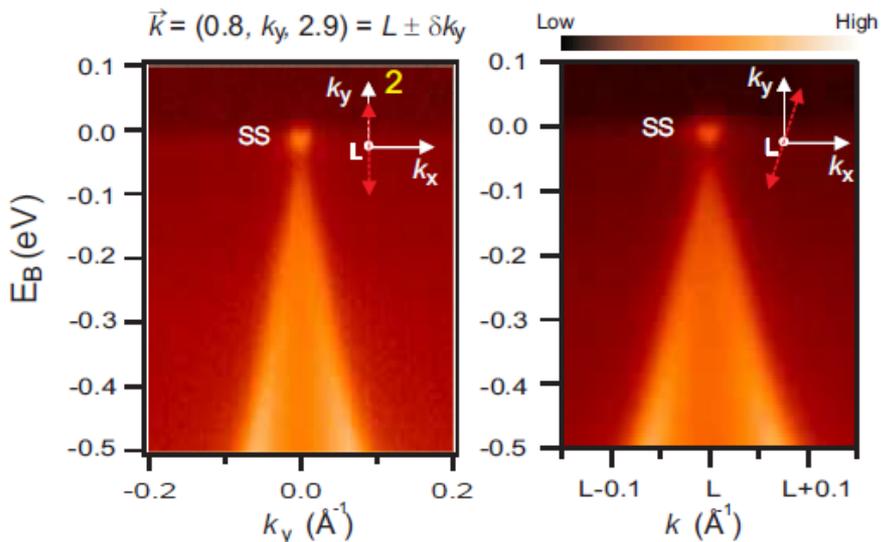


# Изоляторы с $Z_2$ инвариантом

Y.Ando, JPSJ 82 (2013) 102001



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



2D: один  $Z_2$  инвариант  $\nu$

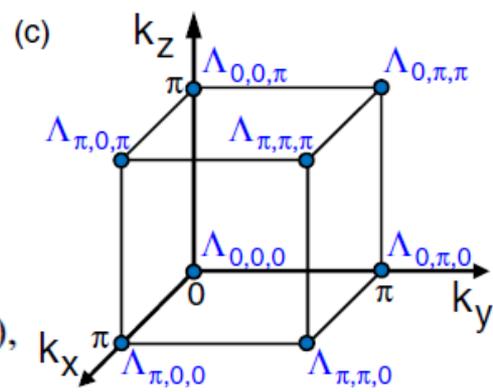
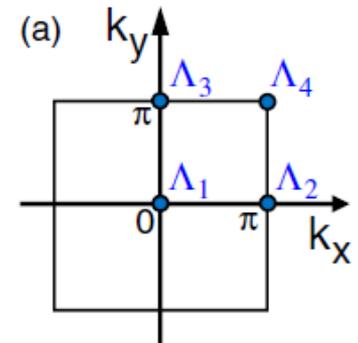
$$(-1)^\nu = \prod_{i=1}^4 \frac{\text{Pf}[w(\Lambda_i)]}{\sqrt{\det[w(\Lambda_i)]}}$$

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

$\nu$  МОЖНО ВЫЧИСЛИТЬ ПО ЧЕТНОСТИ ЗОН В  $\Lambda_i$

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

M.Dzero et al, PRL **104** (2010) 106408  
 SmB<sub>6</sub> – 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:  $\nu \approx 2,5$

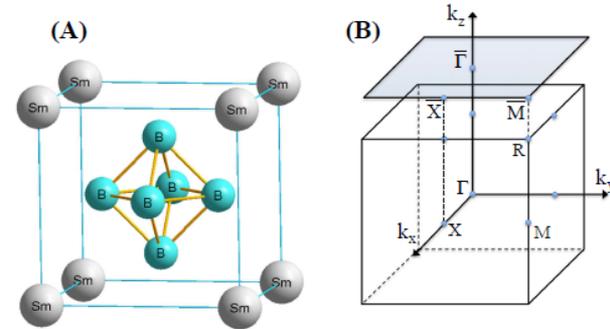
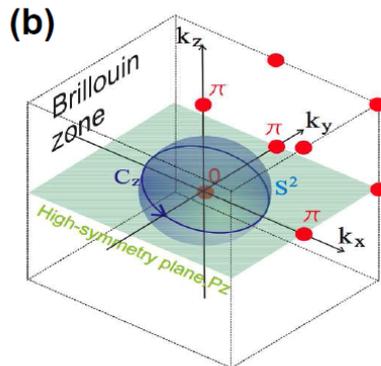
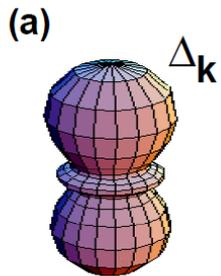
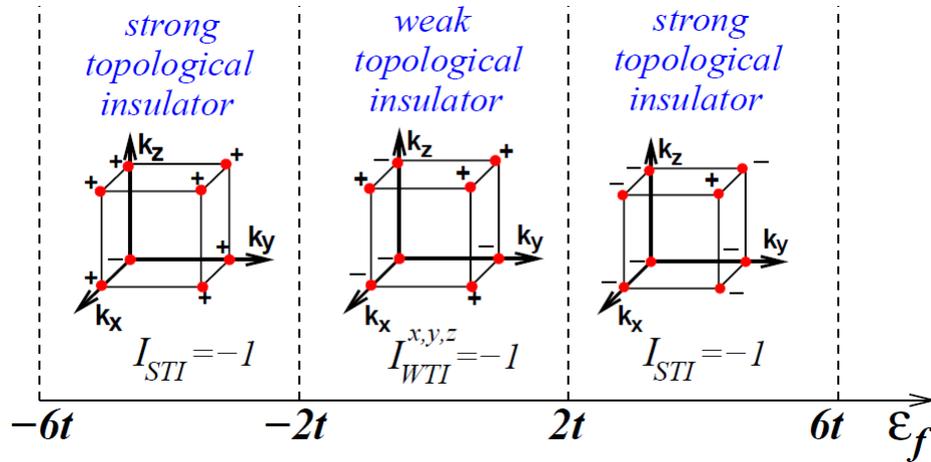
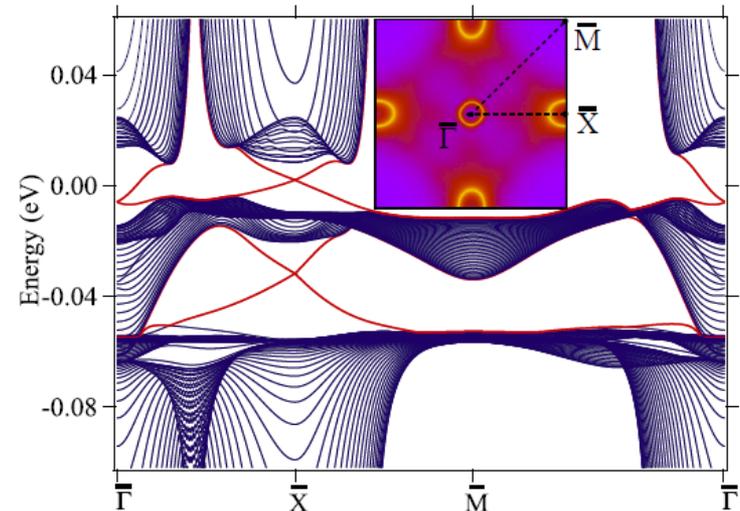
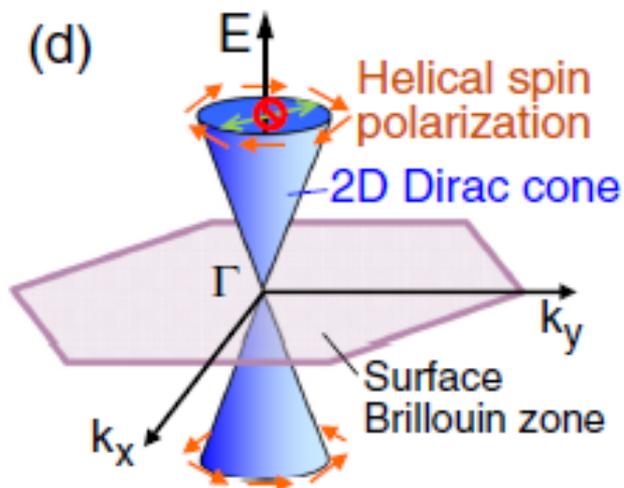
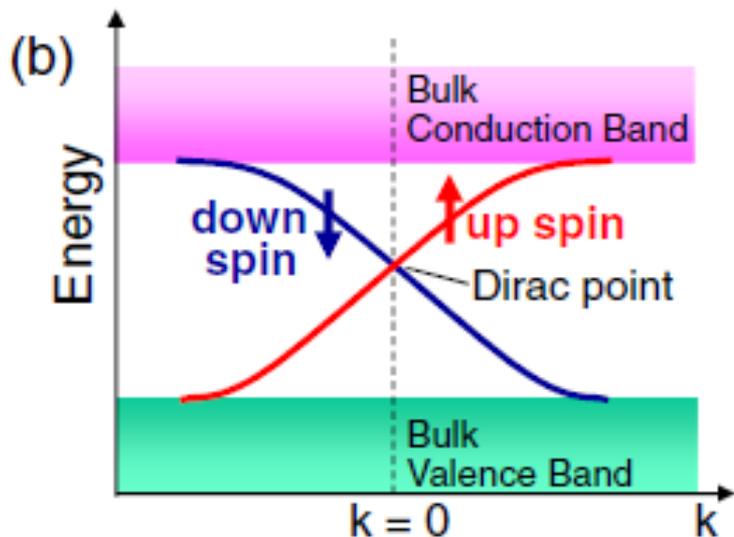


TABLE I: The products of parity eigenvalues of the occupied states for TRIM points,  $\Gamma$ ,  $X$ ,  $R$  and  $M$  in the BZ.

$\Gamma$	$3X$	$R$	$3M$
+	-	+	+



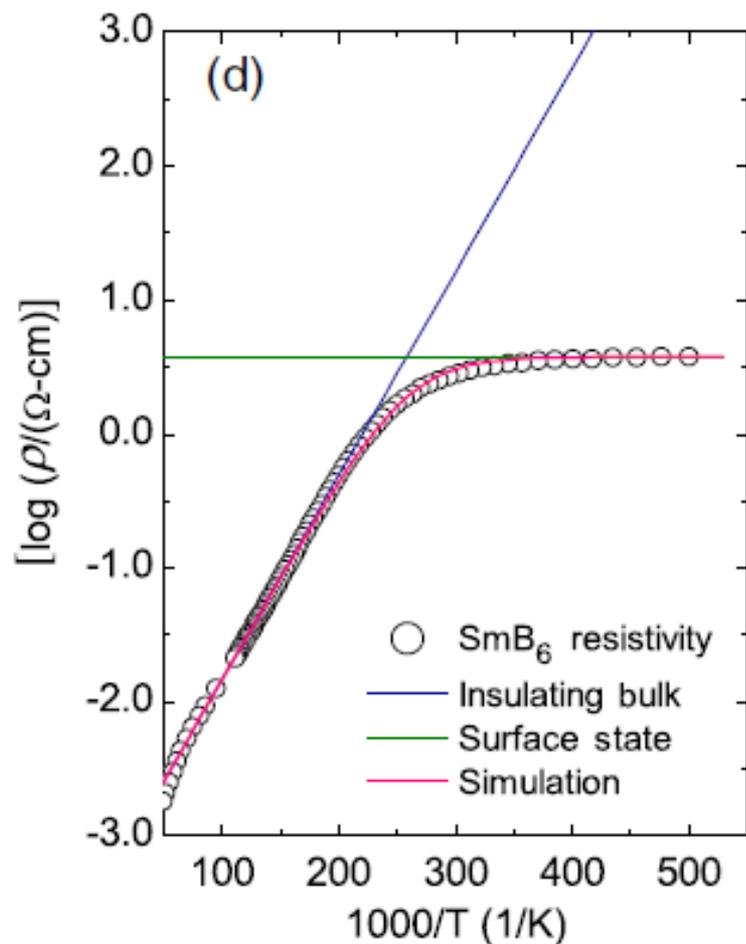
## Свойства ТКИ



- 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  $\rho$  ниже 3К связывается с переходом от объемной (3D)

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

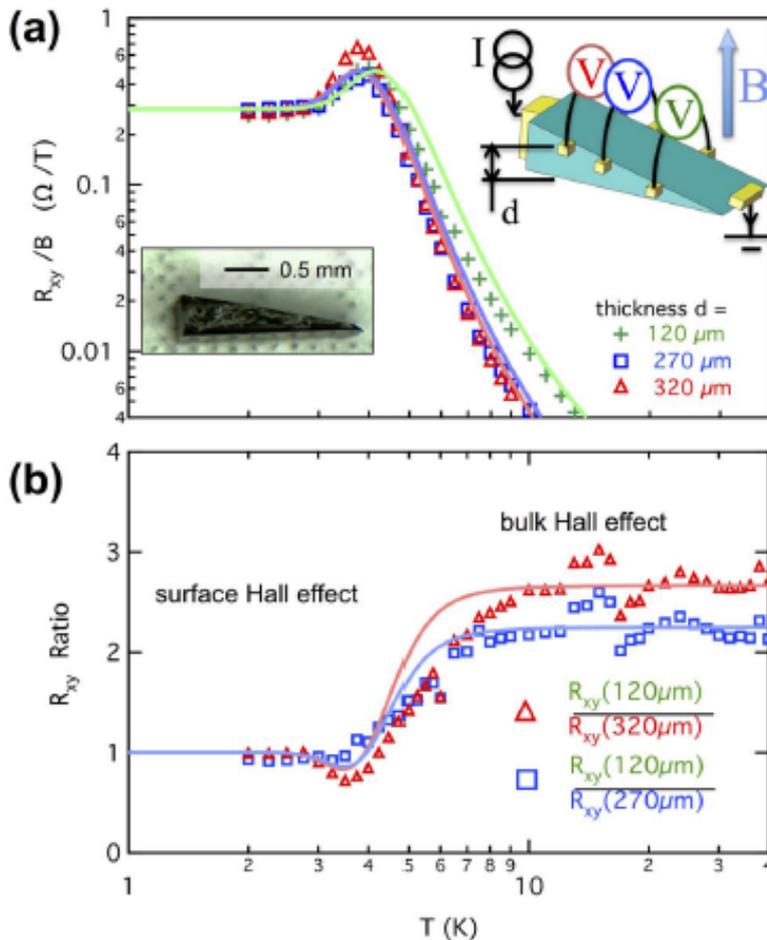
к поверхностной (2D) проводимости

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

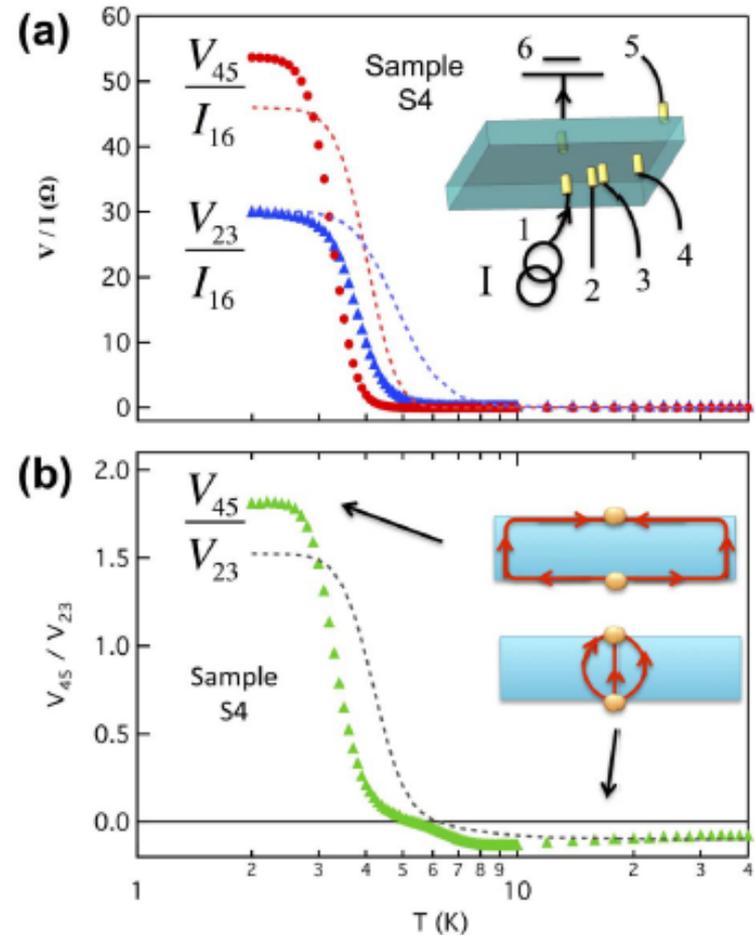
Однако:  
обсуждается гибридная щель  $\Delta = 19$  мэВ, а используется для анализа значение  $\Delta = 3$  мэВ.

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

2D эффект Холла

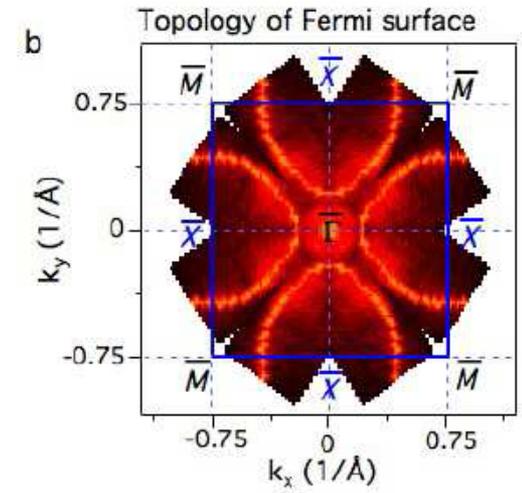
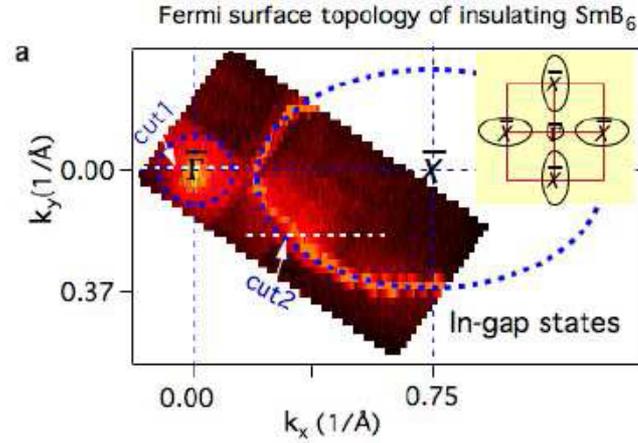
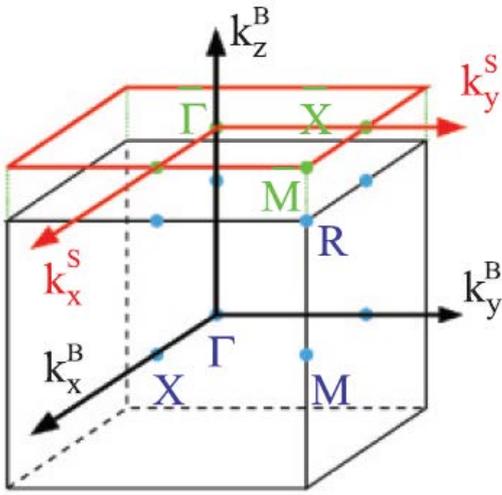


нелокальная проводимость

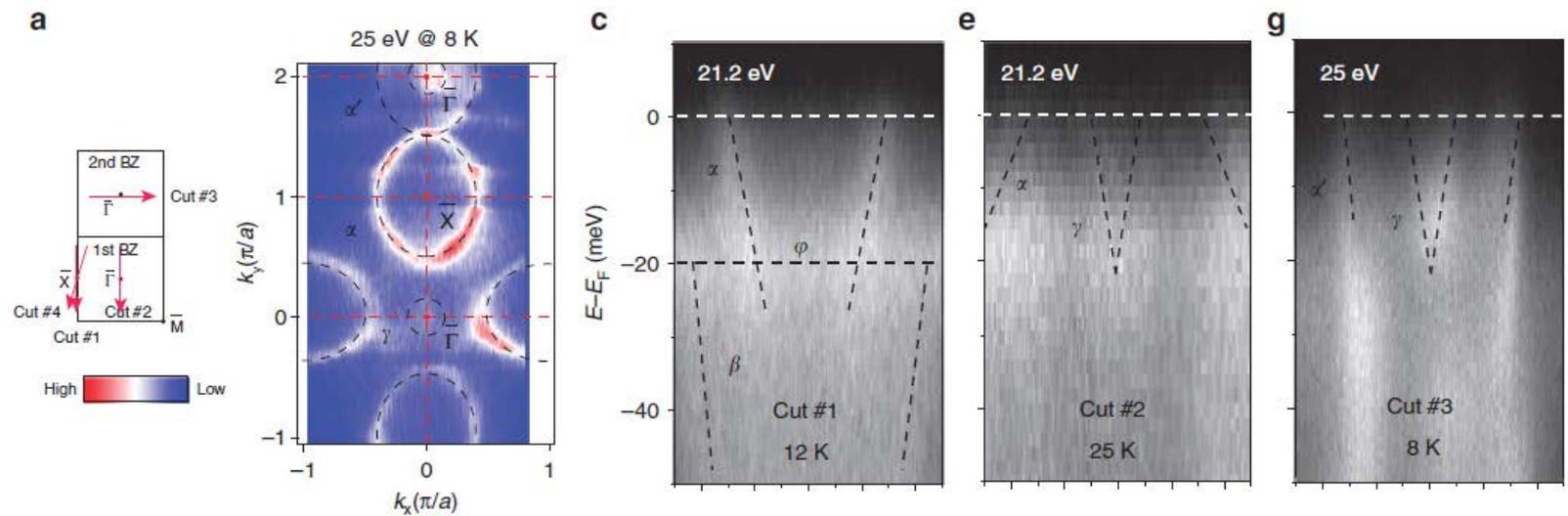


Обнаружен поверхностный вклад в проводимость ниже 5K

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

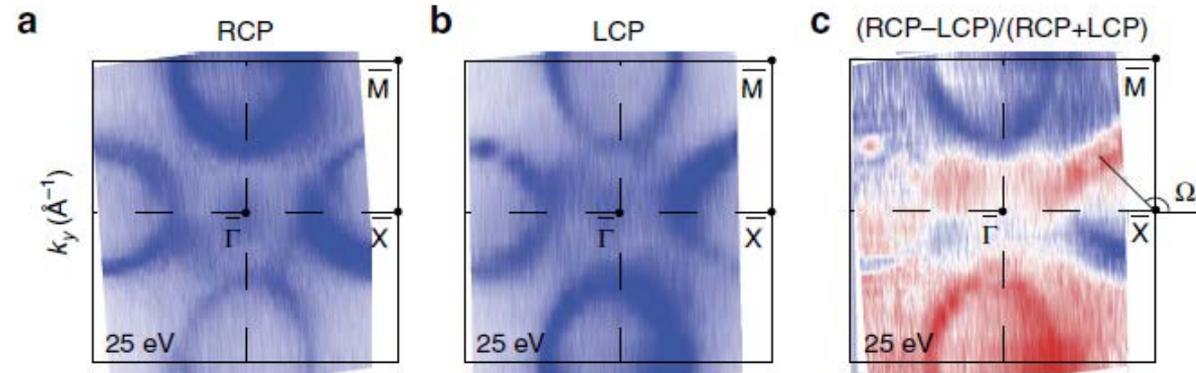


J.Jiang et al, Nature Comm 4 (2013) 3010

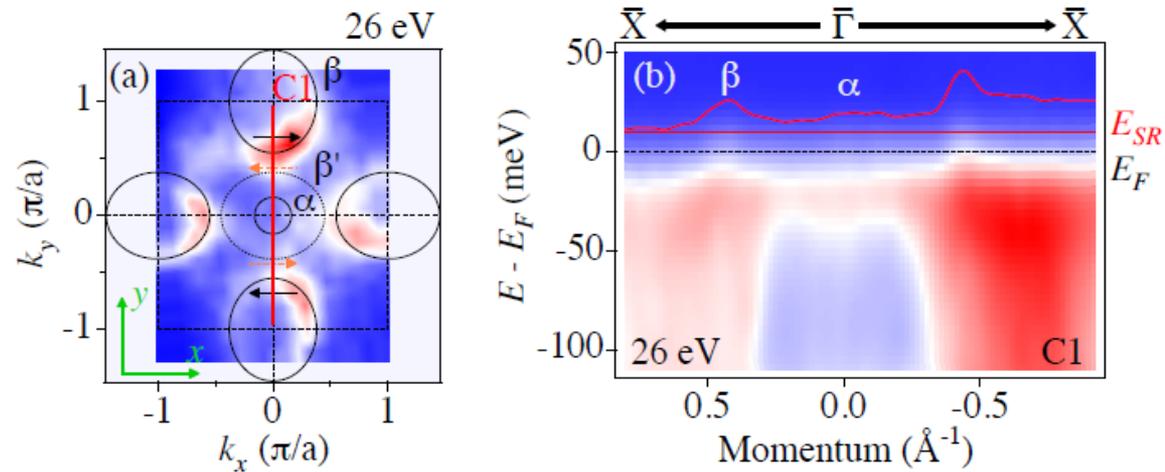


Участки с линейным законом дисперсии в щели ( $T < 50$  K)

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



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

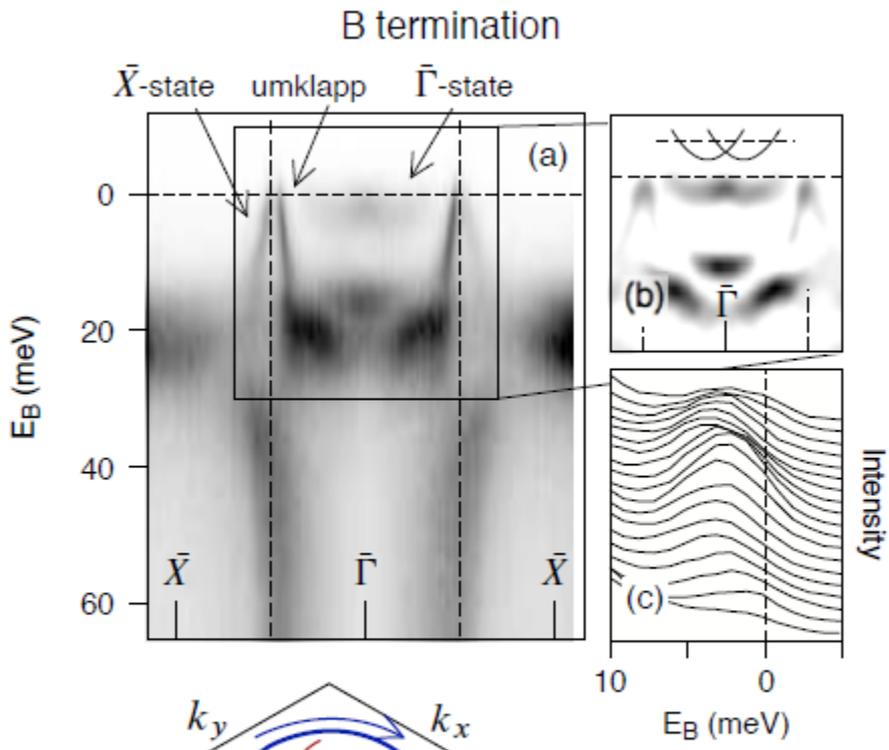


Киральный характер состояний в щели



# ARPES: альтернативное описание

P.Hlawenka et al., arXiv:1502.01542v1



### Состояния в $\bar{\Gamma}$ :

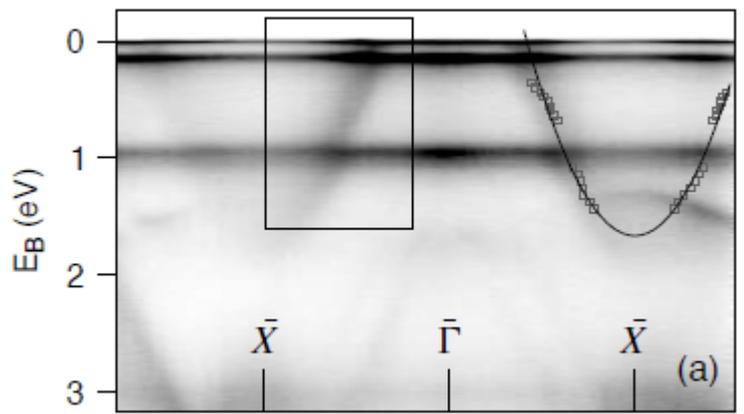
Большая эффективная масса  $m_{\text{eff}} \sim 35m_0$   
 Расщепление Рашбы  $\Delta k_{\parallel} = \alpha_R m_{\text{eff}} / \hbar^2$   
 $\alpha_R = 2 \cdot 10^{-12}$  эВ·м

### Состояния в $\bar{X}$ :

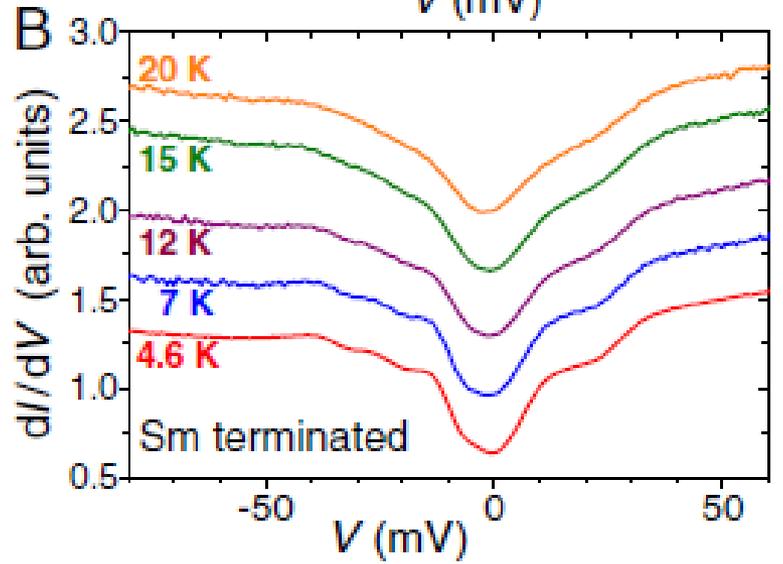
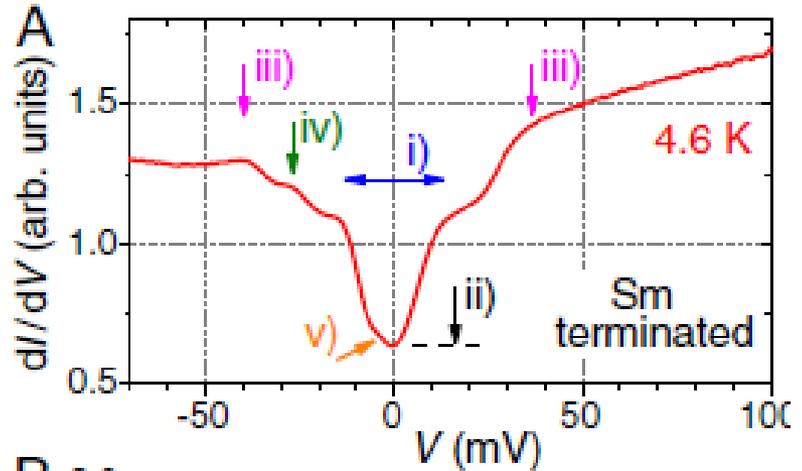
Поверхностные, но возникают от d-зоны (~1,7 эВ ниже  $E_F$ ), гибридованной с 4f-состояниями

**Вывод:**  $\text{SmB}_6$  – 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

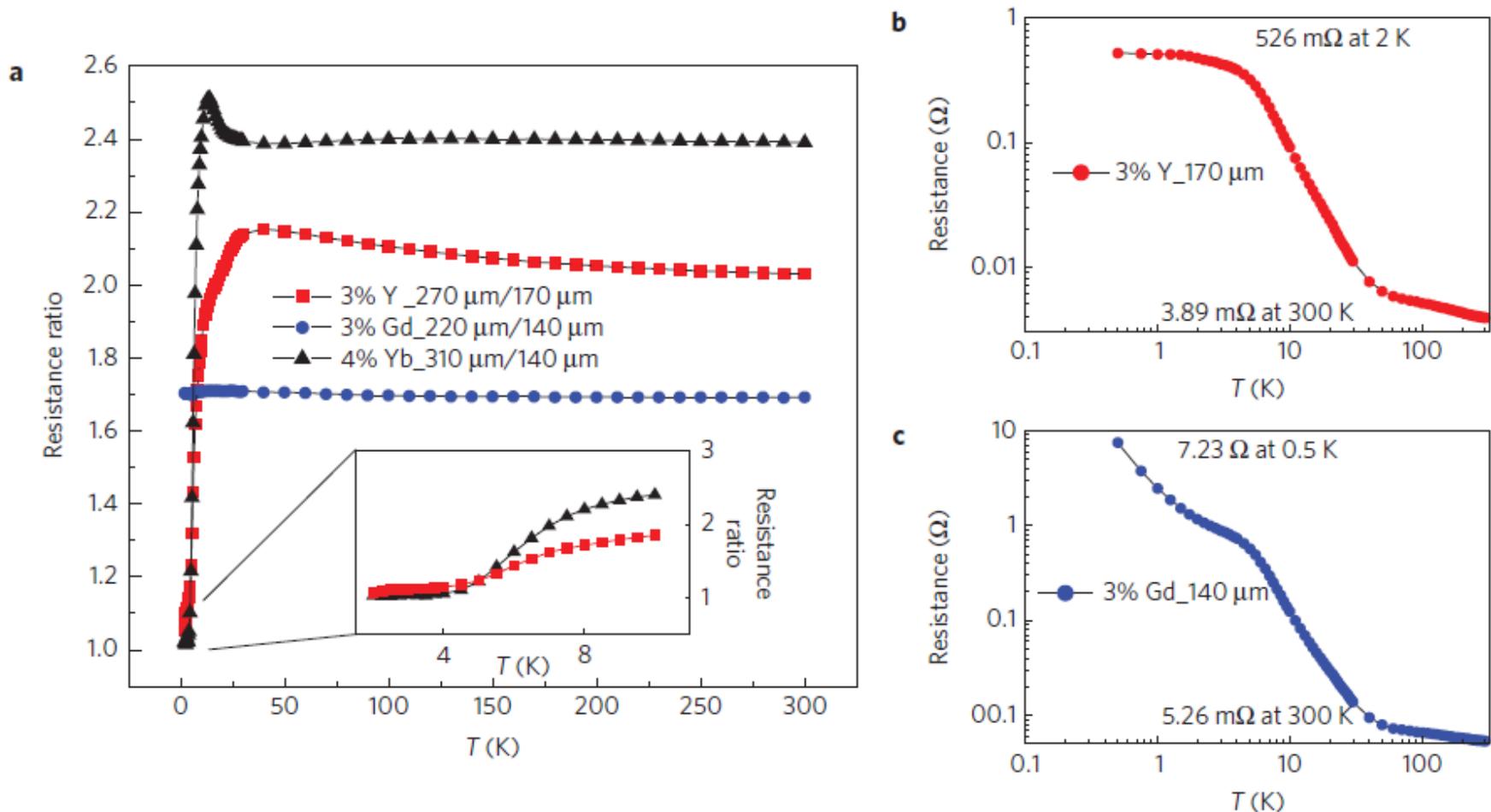
W. Ruan et al., PRL **112** (2014) 136401  
 Спектры с (001) поверхности дают резонанс внутри щели при  $T < 40$  K, однако нет интерференционных эффектов, специфичных для ТИ ( $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ )

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.

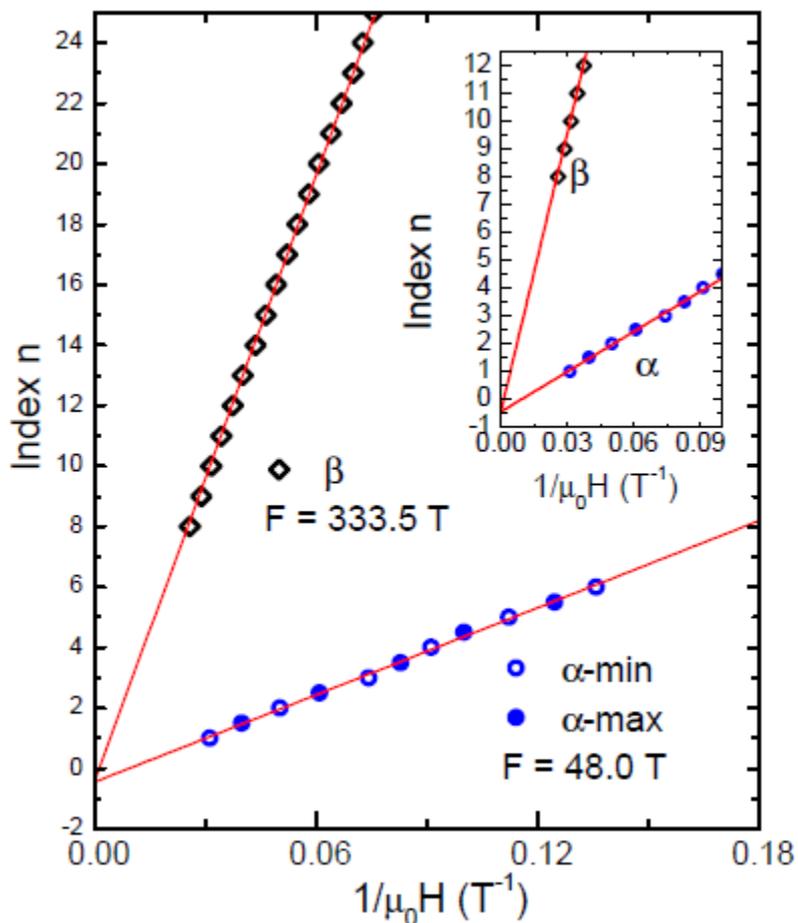
Нет подтверждения топологической нетривиальности зонного спектра

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  $\text{SmB}_6$  **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

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

$\beta$ :  $F = 333,5$  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



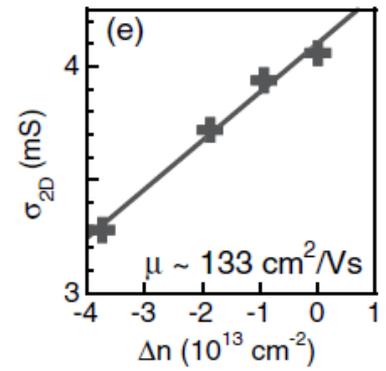
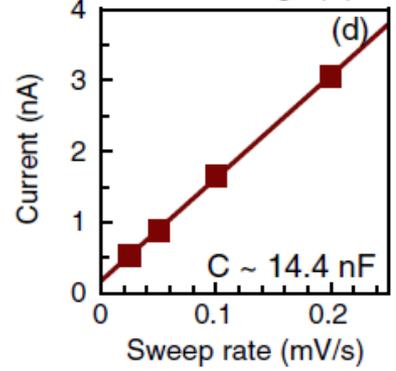
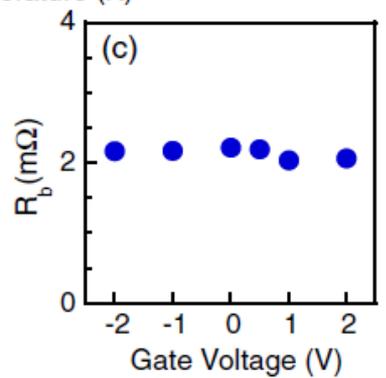
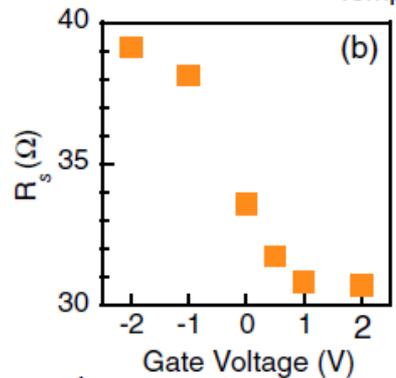
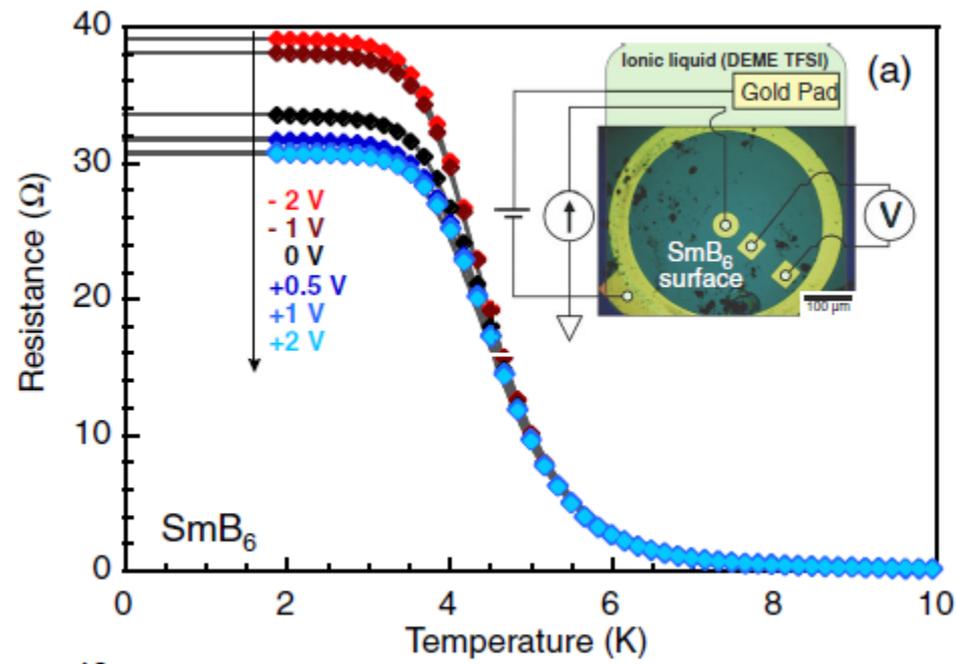
# Эффект поля в $\text{SmB}_6$

P. Syers et al., PRL 114 (2015) 096601

Исследован эффект поля в геометрии диска Корбино

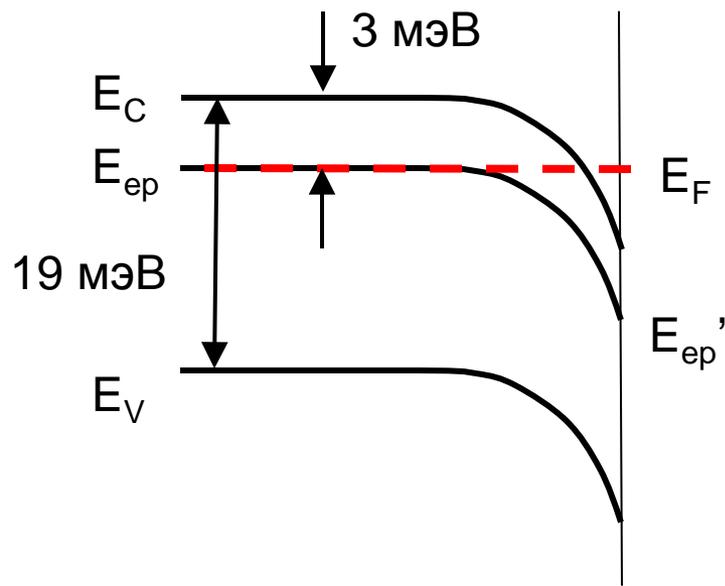
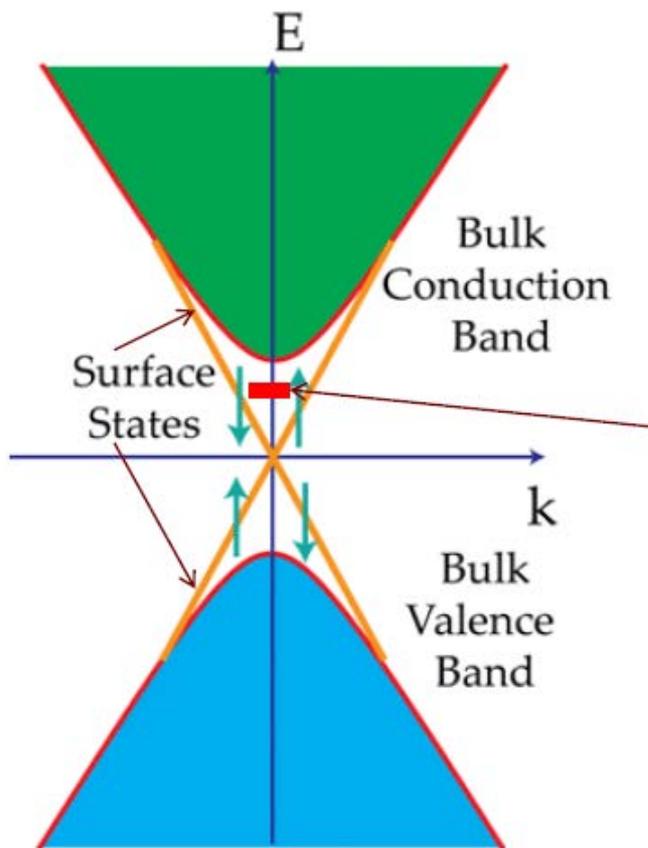
Определены:

- энергия активации в  $\rho(T)$ :  $\Delta=3,8$  мэВ
- концентрация и подвижность поверхностных электронов  $n_{2D}=2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> (1/3e на 2D эл.яч.)
- $\mu=133$  см<sup>2</sup>/(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 обогатненном 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  $\text{SmB}_6$*
- *2D: состояние коррелированного топологического изолятора в  $\text{SmB}_6$*
- ***Зарядовый транспорт в  $\text{SmB}_6$ : 3D или 2D***
- *Выводы и перспективы*



# Зарядовый транспорт в $\text{SmB}_6$ : 3D или 2D

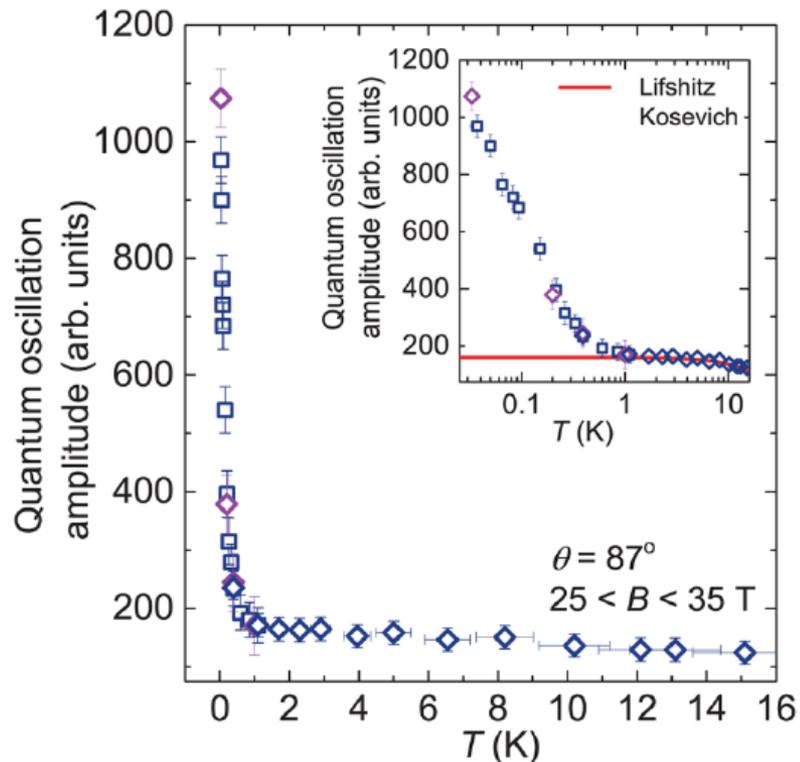
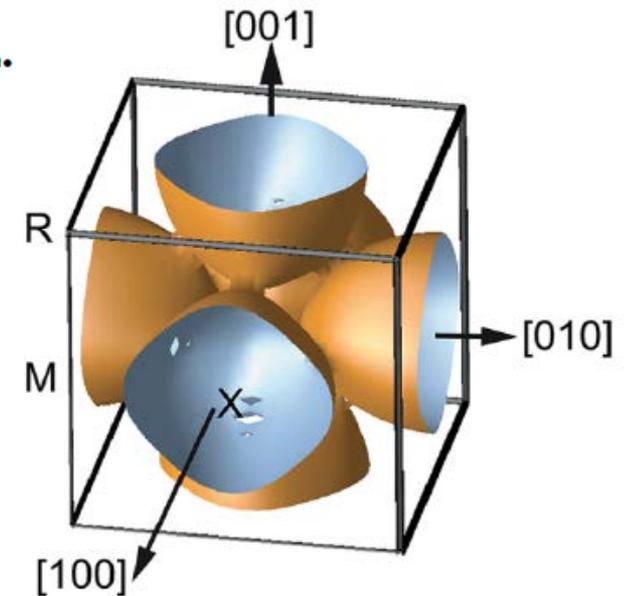
	<b>СКЭС</b>	<b>ТКИ</b>	<b>ПП</b>
Два масштаба щели	<b>+</b>	<b>-</b>	<b>+</b>
Анизотропия малой щели	<b>+</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
Основное состояние	<b>3D</b>	<b>2D</b>	<b>2D</b>
	ЭДЖ/БЭК	дираковские электроны	изгиб зон
ARPES аномалии	<b>+</b>	<b>+</b>	<b>+</b>
Туннельные спектры	<b>+</b>	<b>-</b>	<b>-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

- *Введение*
- *3D: промежуточная валентность и переход металл-диэлектрик в  $\text{SmB}_6$*
- *2D: состояние коррелированного топологического изолятора в  $\text{SmB}_6$*
- *Зарядовый транспорт в  $\text{SmB}_6$ : 3D или 2D*
- ***Выводы и перспективы***

## Unconventional Fermi surface in an insulating state

Science 349 (2015) 6245

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



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



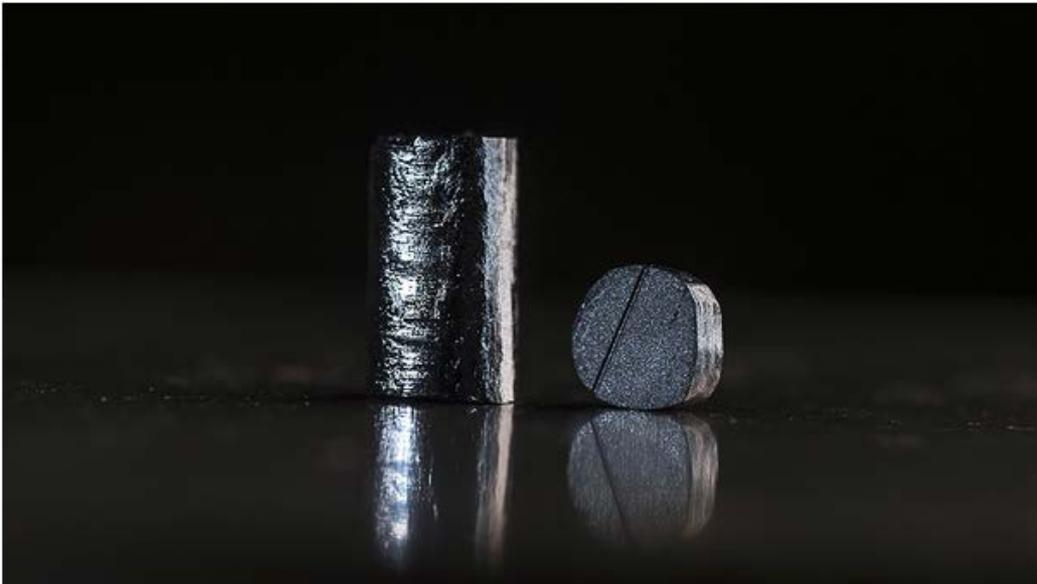
N. Wolchover, QM July 2, 2015

## 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!*