

# Экспериментальные исследования волн зарядовой плотности



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



Дмитрий Иносов

Ин-т физики твёрдого тела им. Макса Планка



Рошино, 2011

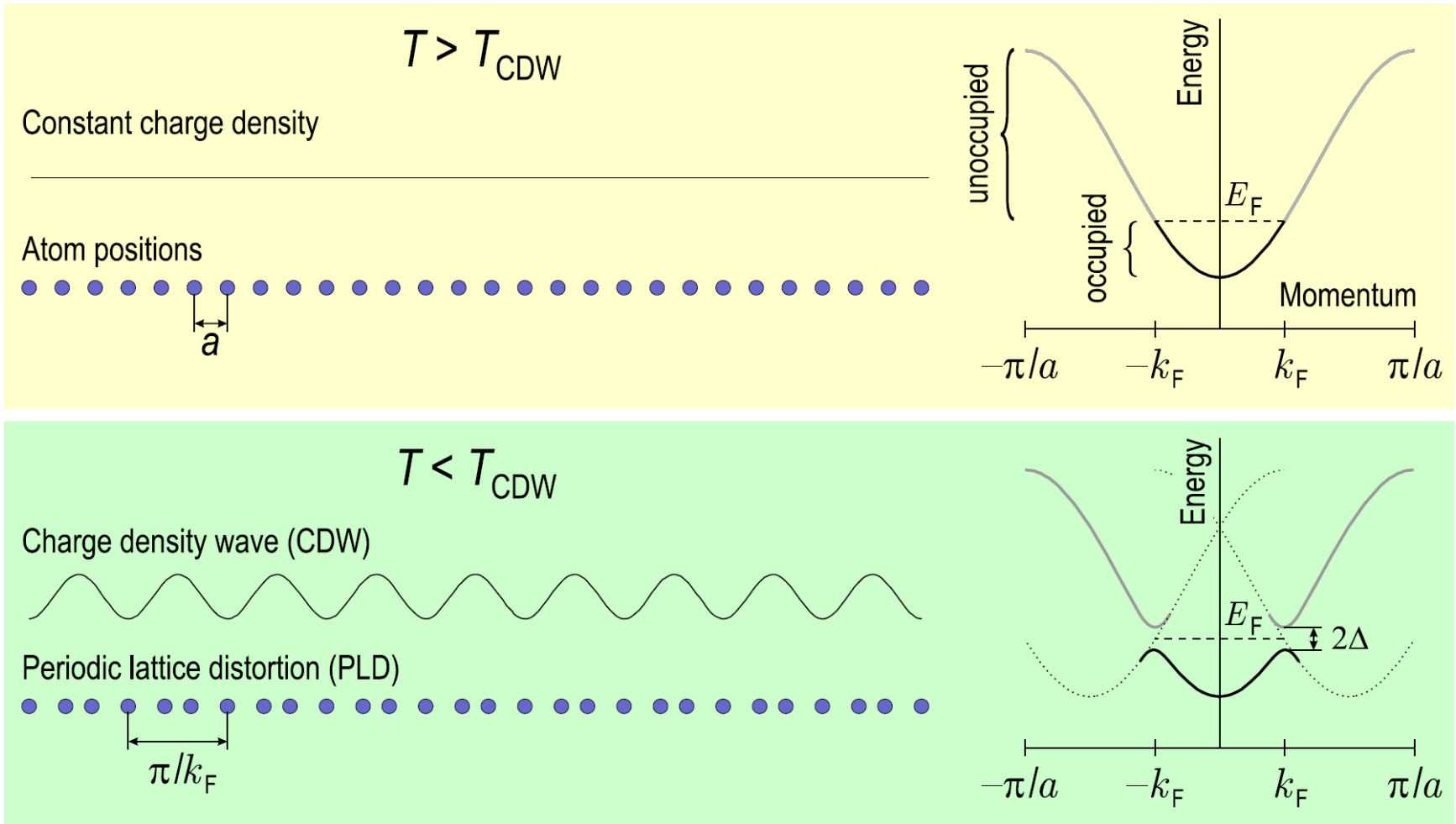


MPI-FKF

Штутгарт

# **Волны зарядовой плотности (ВЗП) в прямом и обратном пространствах**

# Одномерный пайерлсовский переход



Одномерные металлы обладают идеальным «нестингом». При фазовом переходе с возникновением ВЗП поверхность Ферми защеляется, что приводит к переходу металл-изолятор.

# Как определить силу «нестинга»?

Условие неустойчивости поверхности Ферми к формированию ВЗП:

$$4\bar{n}_q^2/\hbar\omega_q - 2\bar{U}_q + \bar{V}_q \geq 1/\chi_q$$

↑  
Электрон-фононное взаимодействие

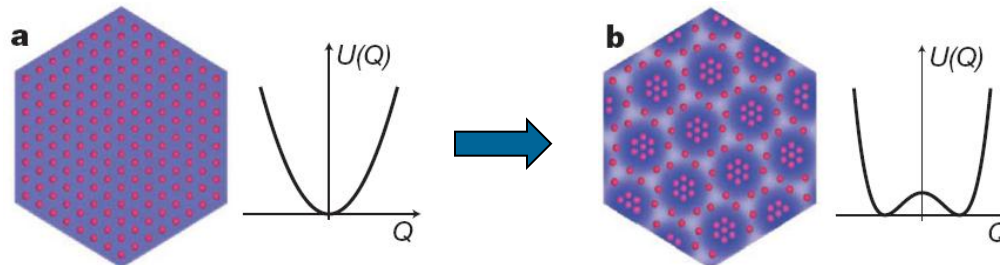
$$\bar{U}_q = \langle \mathbf{k} + \mathbf{q} \mathbf{k}' | \hat{U} | \mathbf{k}' + \mathbf{q} \mathbf{k} \rangle \leftarrow \text{усреднённые кулоновские взаимодействия}$$

(прямое и обменное)

$$\bar{V}_q = \langle \mathbf{k} + \mathbf{q} \mathbf{k}' | \hat{V} | \mathbf{k} \mathbf{k}' + \mathbf{q} \rangle$$

Функция Линдхарда (статический предел):

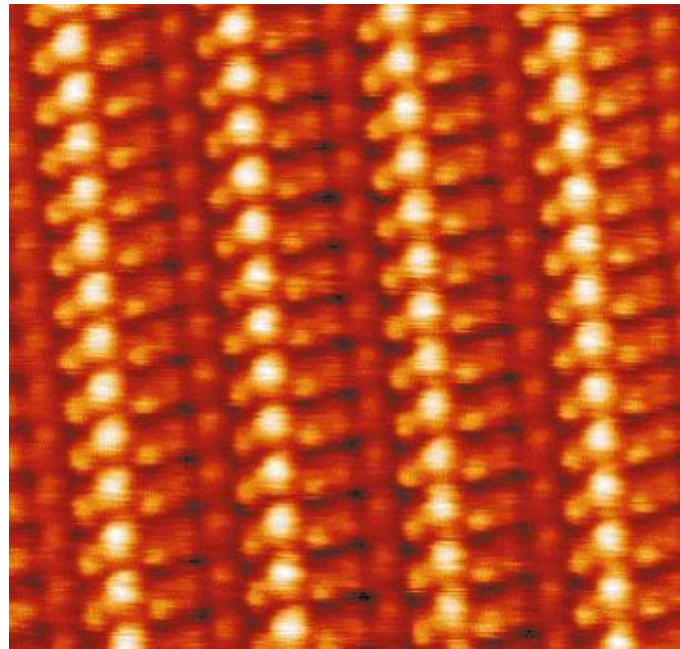
$$\chi_q = \sum_{\mathbf{k}} [n_F(\epsilon_{\mathbf{k}}) - n_F(\epsilon_{\mathbf{k}+\mathbf{q}})] / (\epsilon_{\mathbf{k}} - \epsilon_{\mathbf{k}+\mathbf{q}})$$



# Модуляция заряда в прямом пространстве

---

Одномерное органическое соединение TTF-TCNQ ниже пайерлсовского перехода (сканирующий туннельный микроскоп с атомным разрешением):



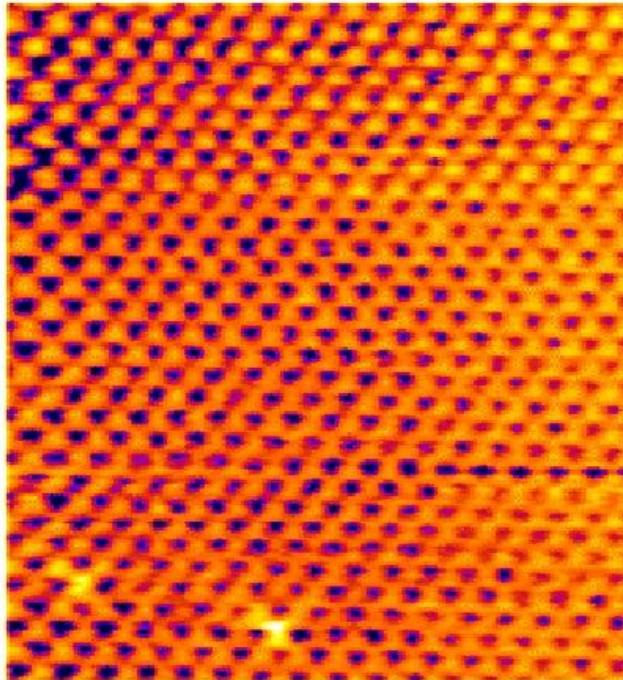
← ~5 нм →

Эксперимент: Z. Z. Wang *et al.*, Phys. Rev. B, **67**, 121401(R) (2003)

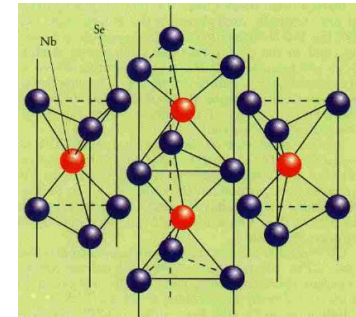
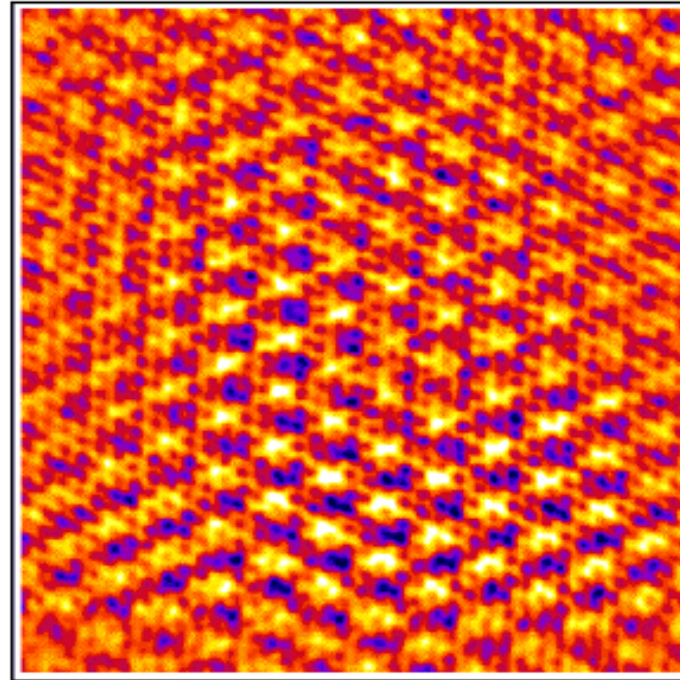
# Модуляция заряда в прямом пространстве

Визуализация поверхности квазидвумерного металла  $2H\text{-NbSe}_2$  с атомным разрешением при помощи сканирующего туннельного микроскопа

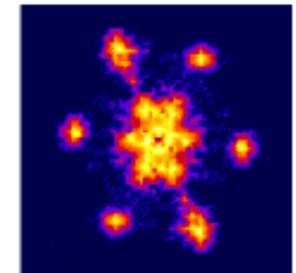
Комнатная температура:



Основное состояние ( $T = 4.2\text{ K}$ ):



Фурье-образ:

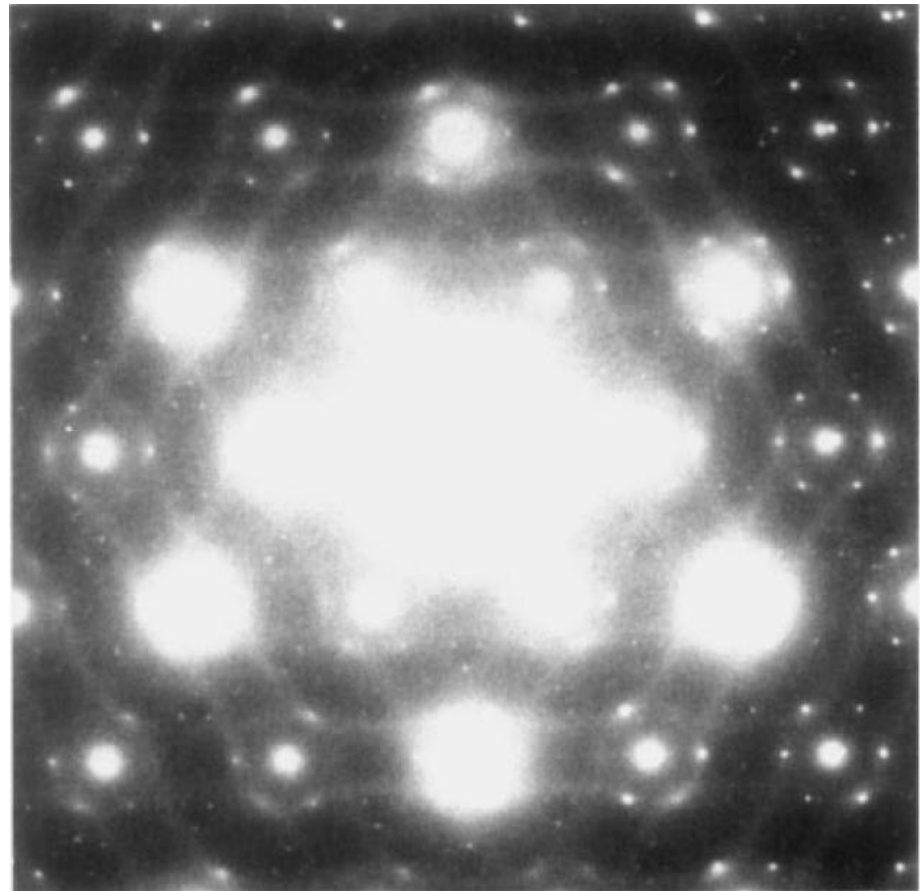
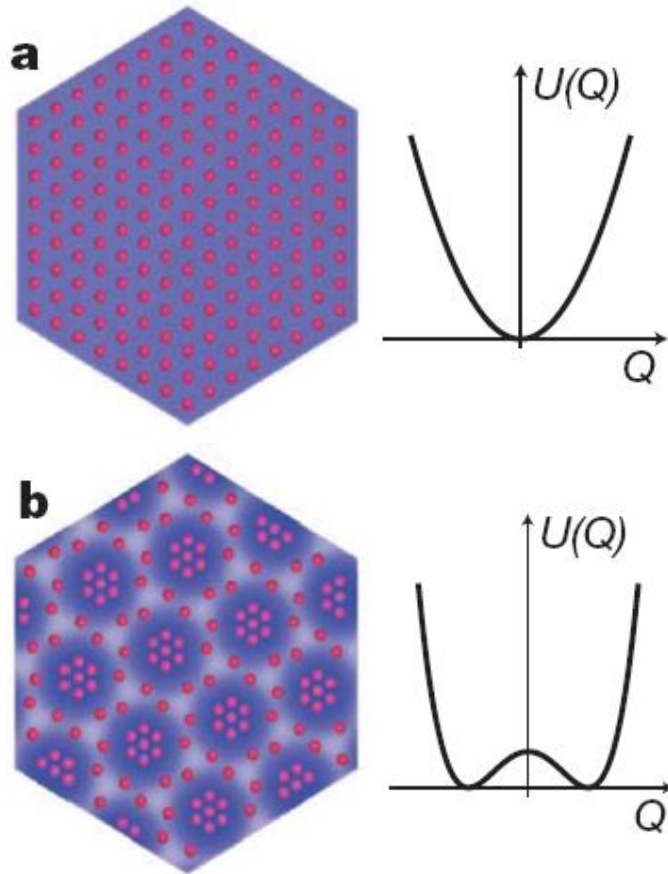


Эксперимент: P. Mallet *et al.*, J. Vac. Sci. and Technol., **B14** (2), 1070 (1996)



# Сверхструктура в обратном пространстве

Визуализация сверхструктуры в  $1T\text{-TaS}_2$  методом электронной дифракции



Обзор: R. L. Withers & J. A. Wilson, *J. Phys. C: Solid State Phys.*, **19**, 4809 (1986)  
Иллюстрация: M. Eichberger *et al.*, *Nature* **468**, 799 (2010)

# «Смягчение» фононных мод

Коновские аномалии в фононном спектре  $2H-TaSe_2$ , измеренные при помощи неупругого рассеяния нейтронов.

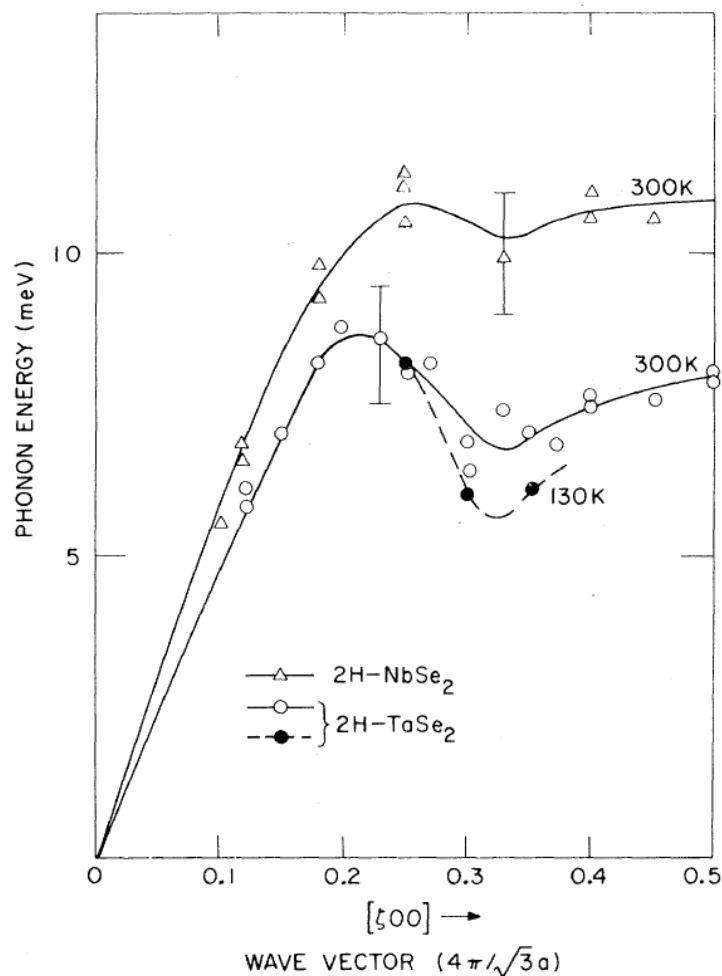


IMAGE OF THE FERMI SURFACE IN THE VIBRATION SPECTRUM OF A METAL\*

W. Kohn

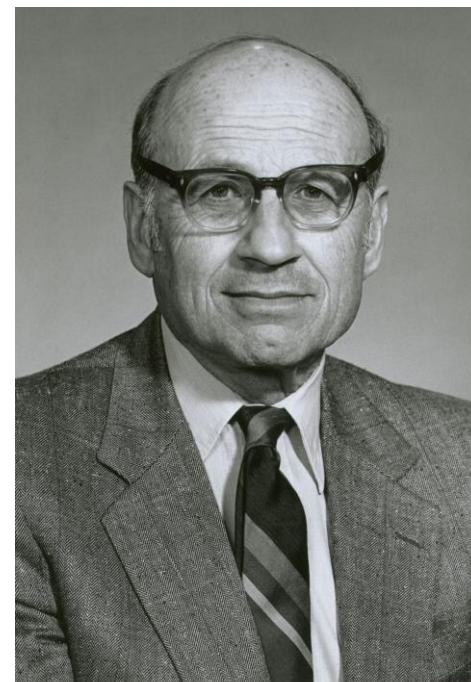
Department of Physics, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, Pennsylvania

(Received April 6, 1959)

Вальтер Кон (р. 1923)

физический факультет  
калифорнийского ун-та,  
Санта-Барбара.

нобелевская премия по  
химии 1998 г.



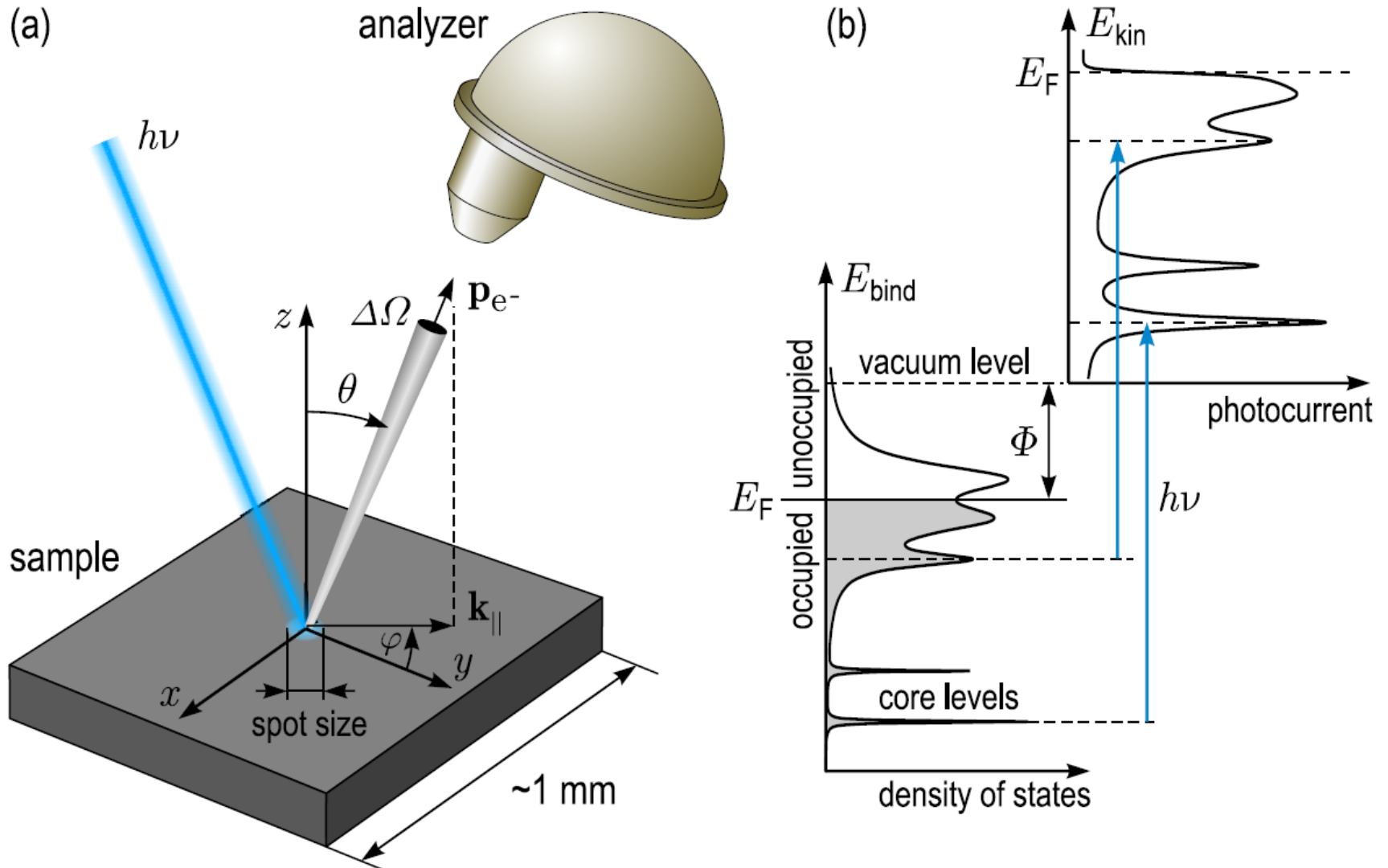
D. E. Moncton *et al.*, Phys. Rev. Lett. **34**, 734 (1975)  
Walter Kohn, Phys. Rev. Lett. **2**, 393 (1959)



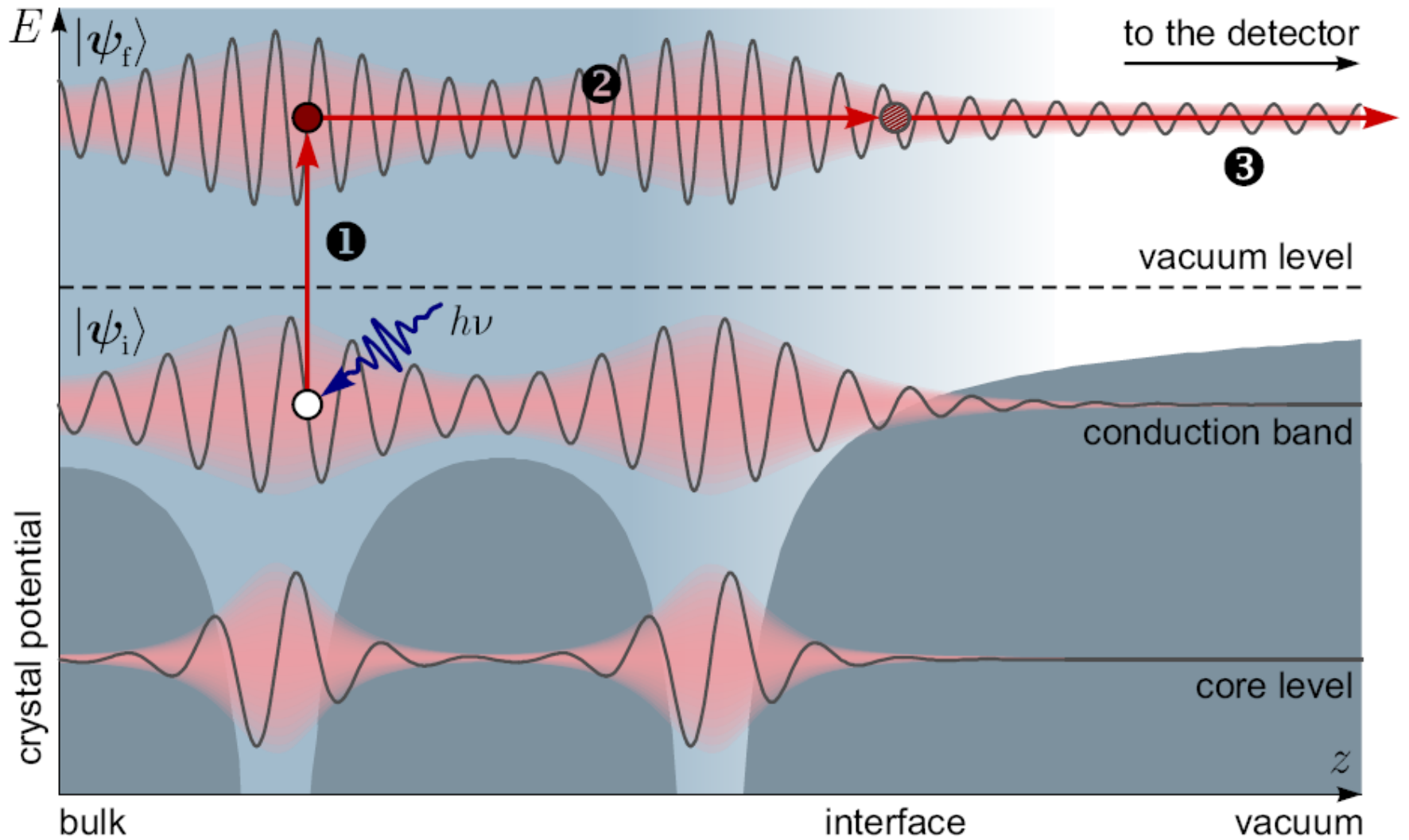
**Фотоэмиссионная спектроскопия  
с угловым разрешением**

**(ARPES)**

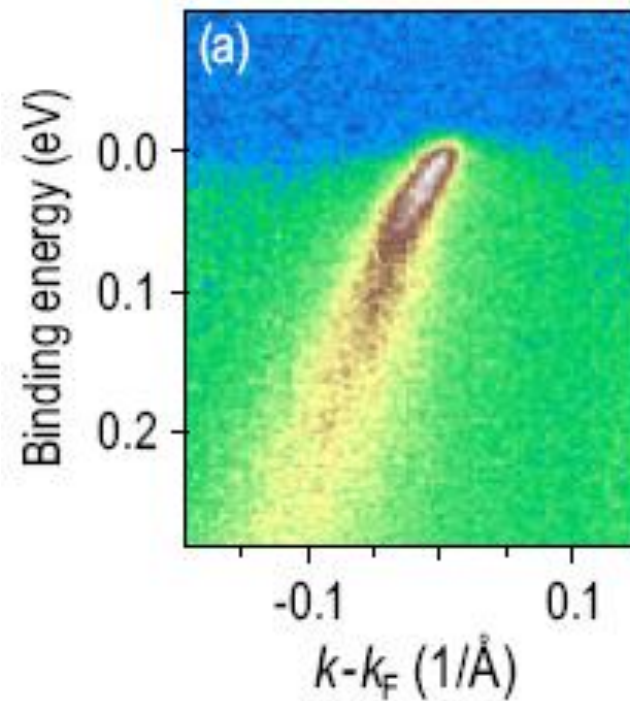
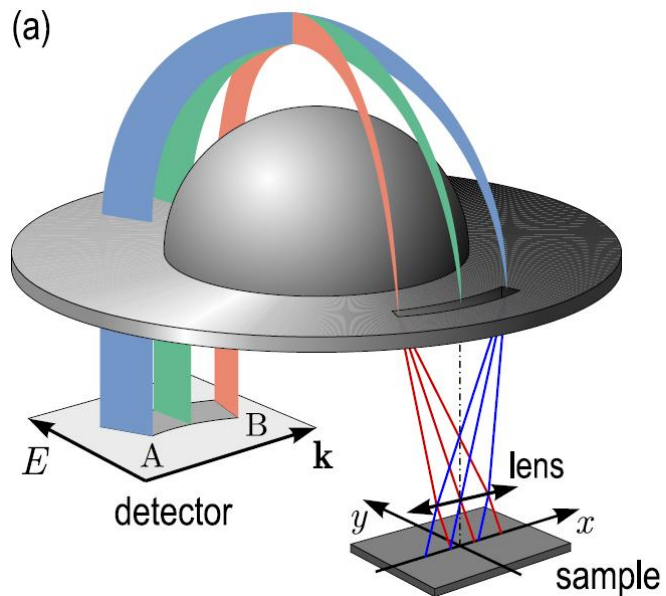
# Фотозффект



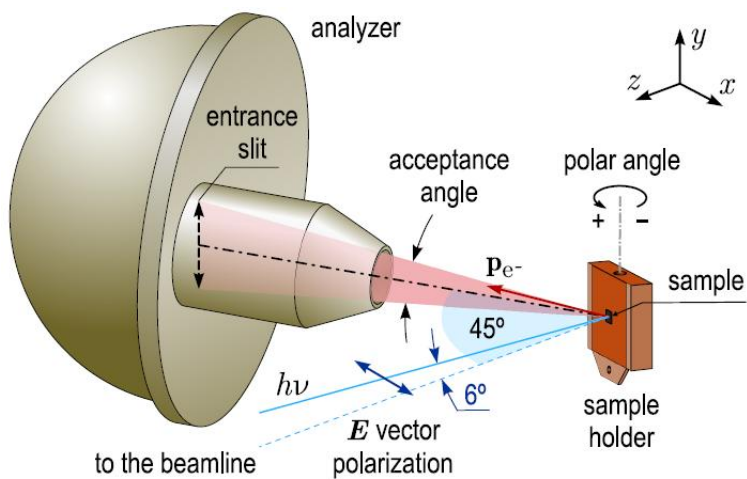
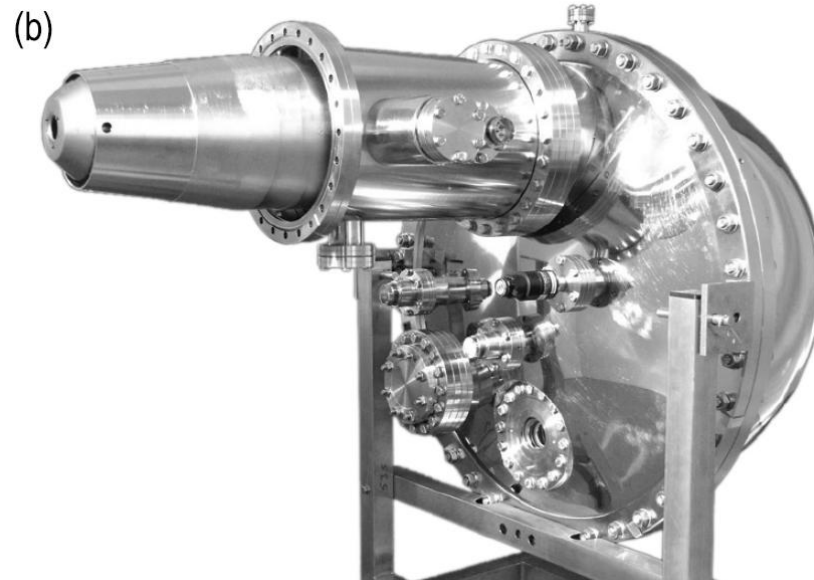
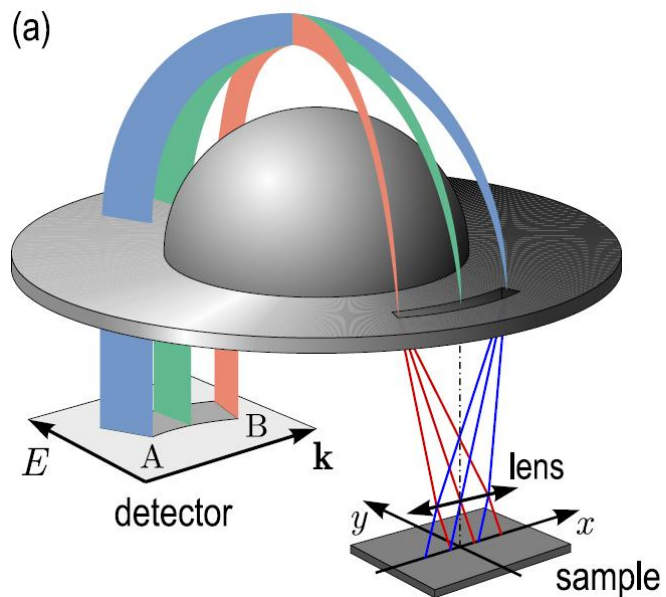
# Эффект поверхности



# Фотоэмиссия с угловым разрешением



# ФОТОЭМИССИЯ С УГЛОВЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ



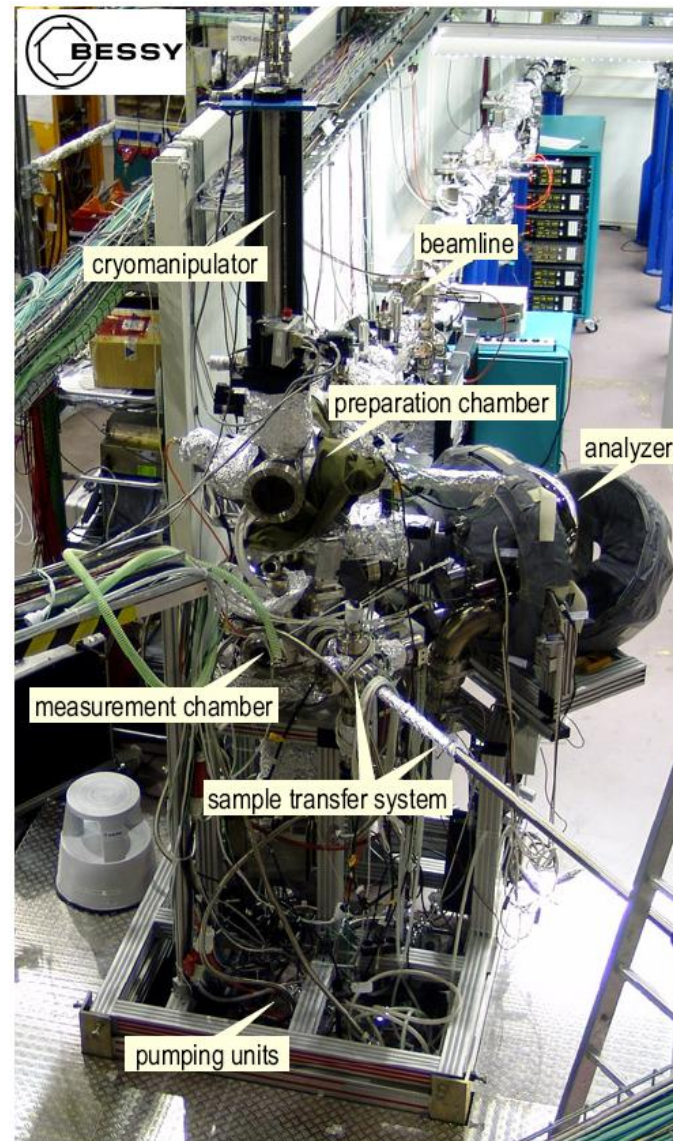
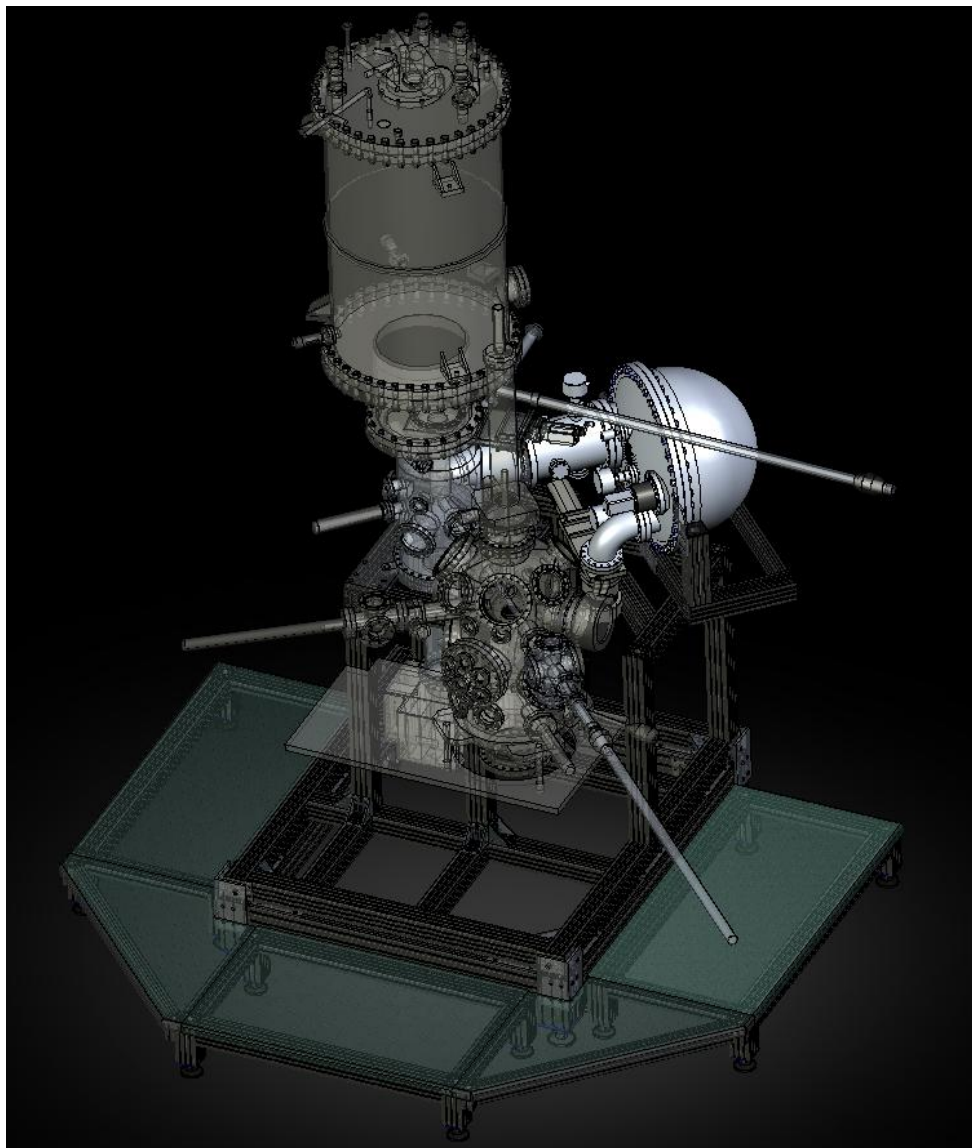


# Станция « $1^3$ ARPES» в Берлине (BESSY)

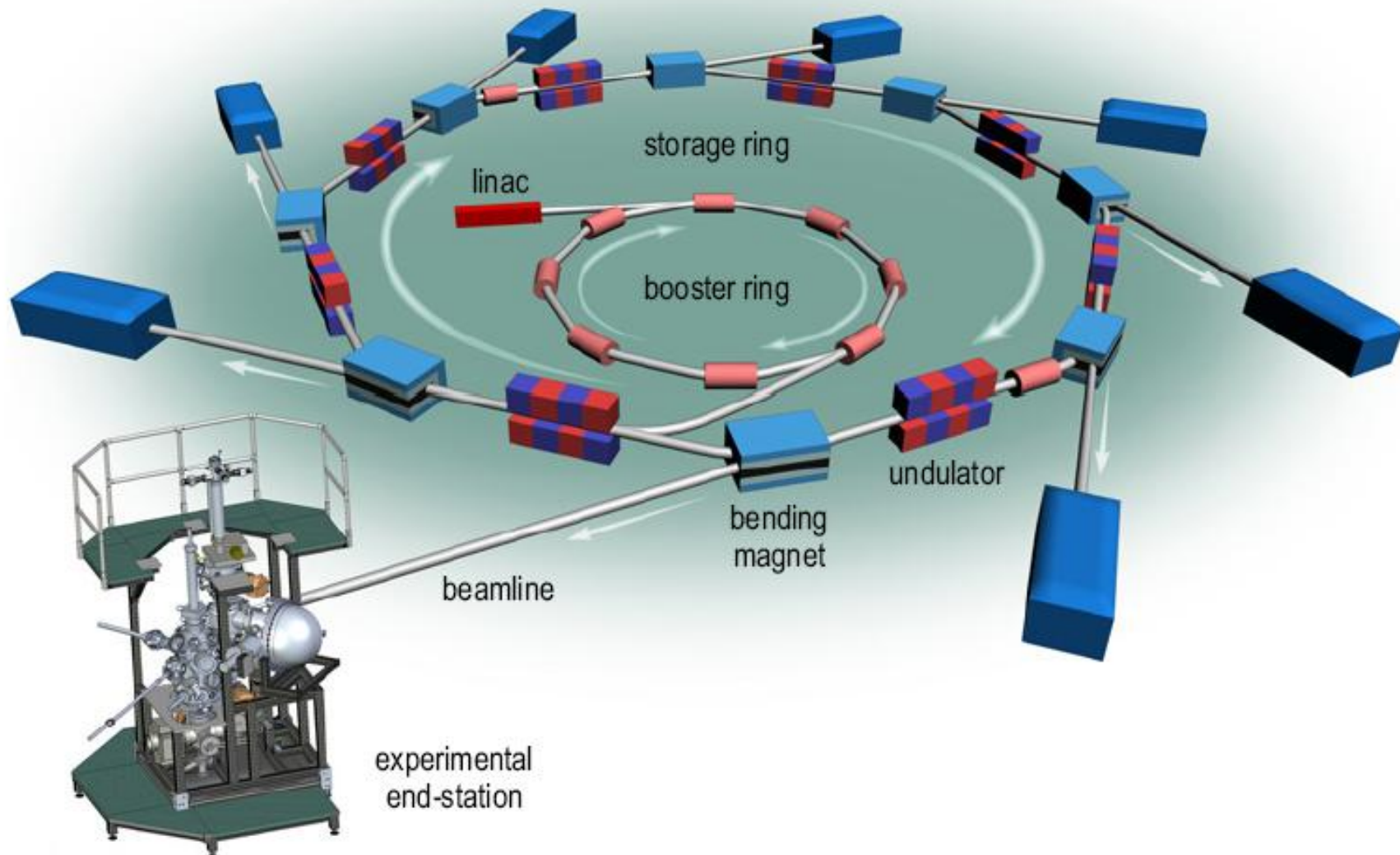




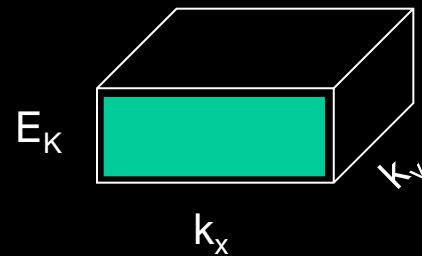
# Станция «1<sup>3</sup> ARPES» в Берлине (BESSY)



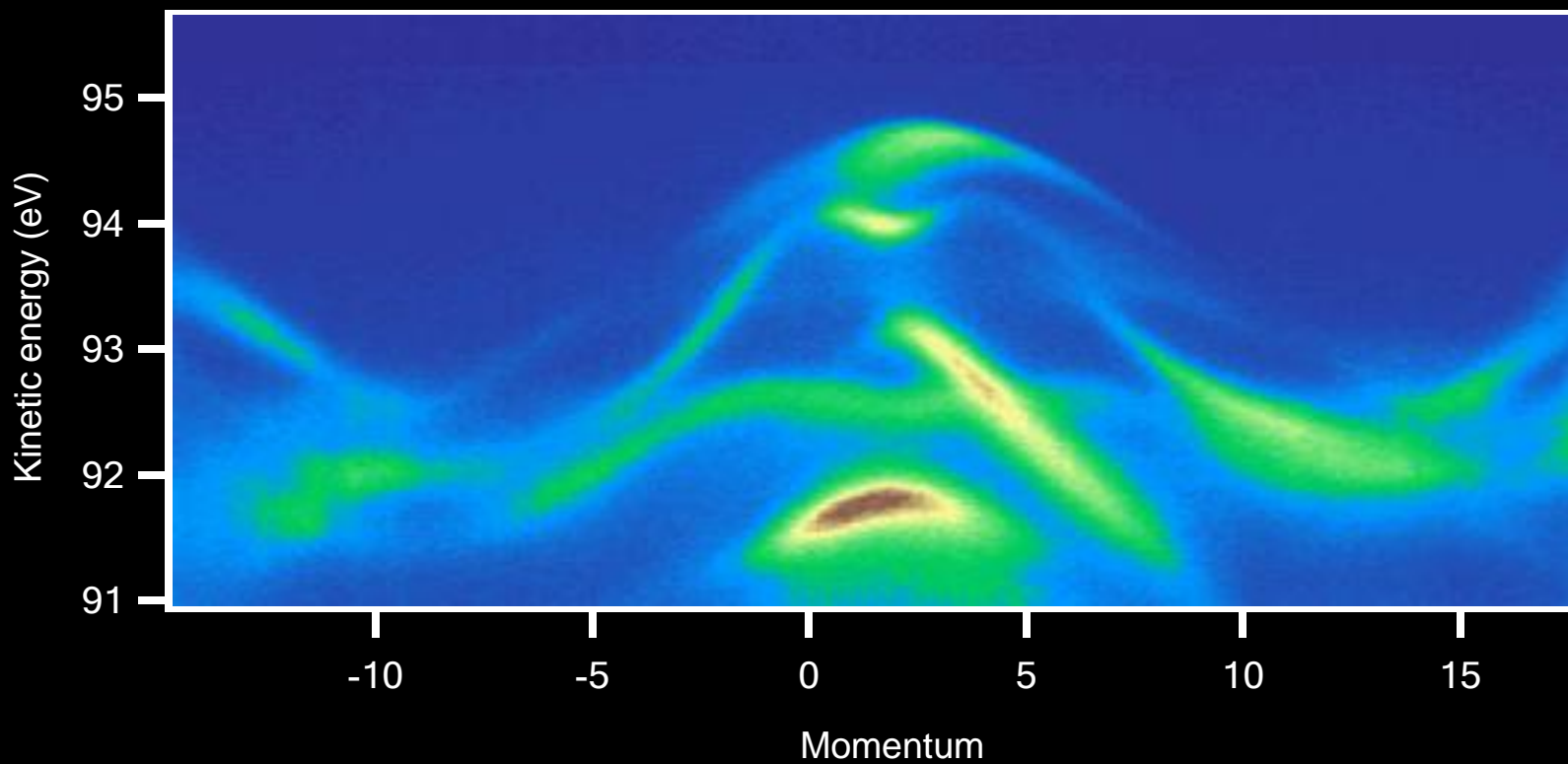
# Станция «1<sup>3</sup> ARPES» в Берлине (BESSY)



# Визуализация зонной структуры

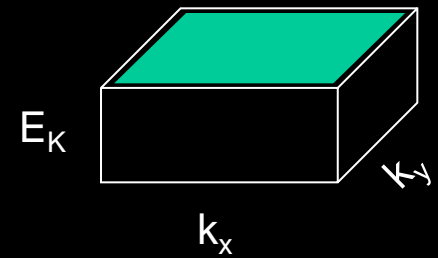
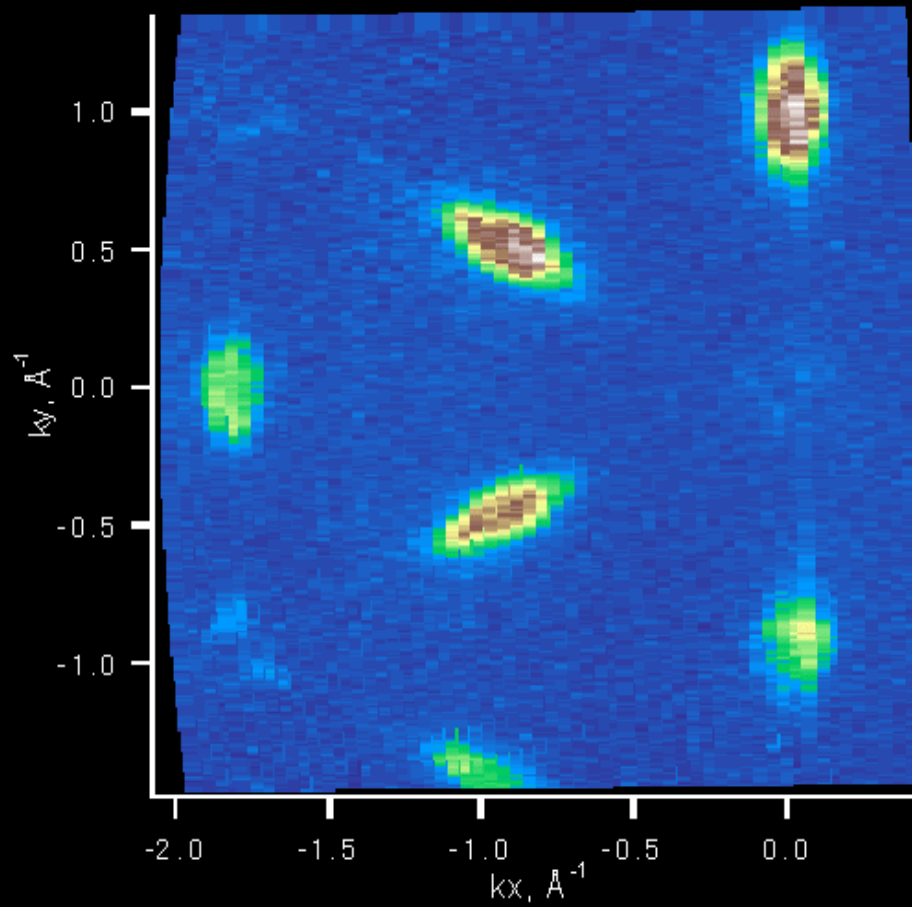


TiSe<sub>2</sub>



# Визуализация поверхности Ферми

TiSe<sub>2</sub>





# Какую информацию можно извлечь из зонной структуры металлов?

---

Зная электронную дисперсию, можно вычислить (или оценить):

- плазменную частоту;
- магнитную глубину проникновения (для сверхпроводников);
- электронную теплоёмкость;
- парамагнетизм Паули;
- константу Холла (в приближении изотропного времени жизни);
- проводимость (если известно время жизни,  $\tau$ );
- магнитосопротивление (если известно время жизни,  $\tau$ );
- термоэлектрические константы (например коэффициент Зеебека);
- спектры электронно-дырочных возбуждений (парамагнетонные, оптические).

Из эффектов ренормализации зонной структуры:

- силу взаимодействия с коллективными модами (фононы, магноны);
- эффективную электронную массу.

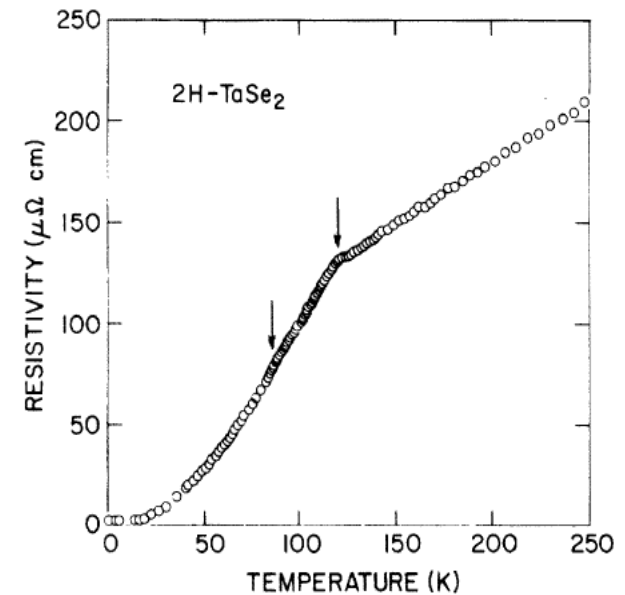
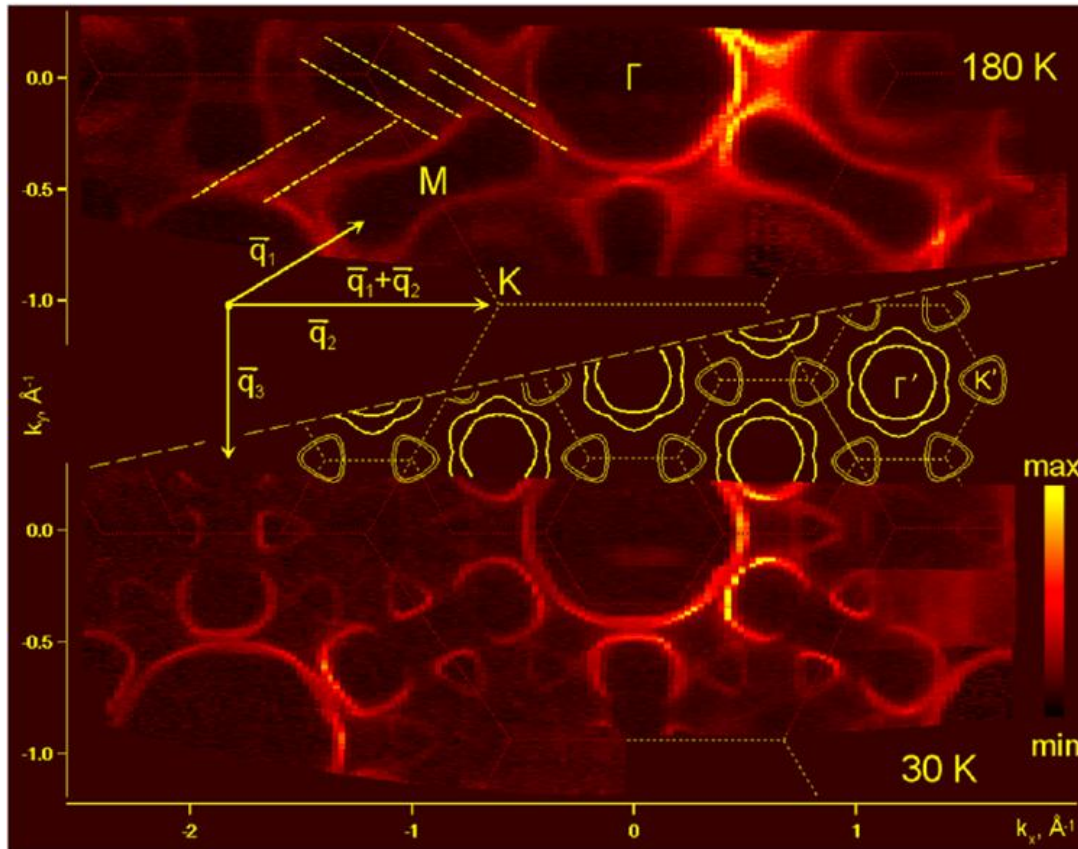
Из геометрических свойств Ферми поверхности («нестинг»):

- Тенденции к нарушению трансляционной и/или осевой симметрий в основном состоянии, формированию ВЗП и ВСП и других неустойчивостей.

# **Фотоэмиссионная спектроскопия в исследовании ВЗП-неустойчивостей**

# Пример: ВЗП-переход в $2H-TaSe_2$

S. V. Borisenko et al.,  
Phys. Rev. Lett. **100**, 196402

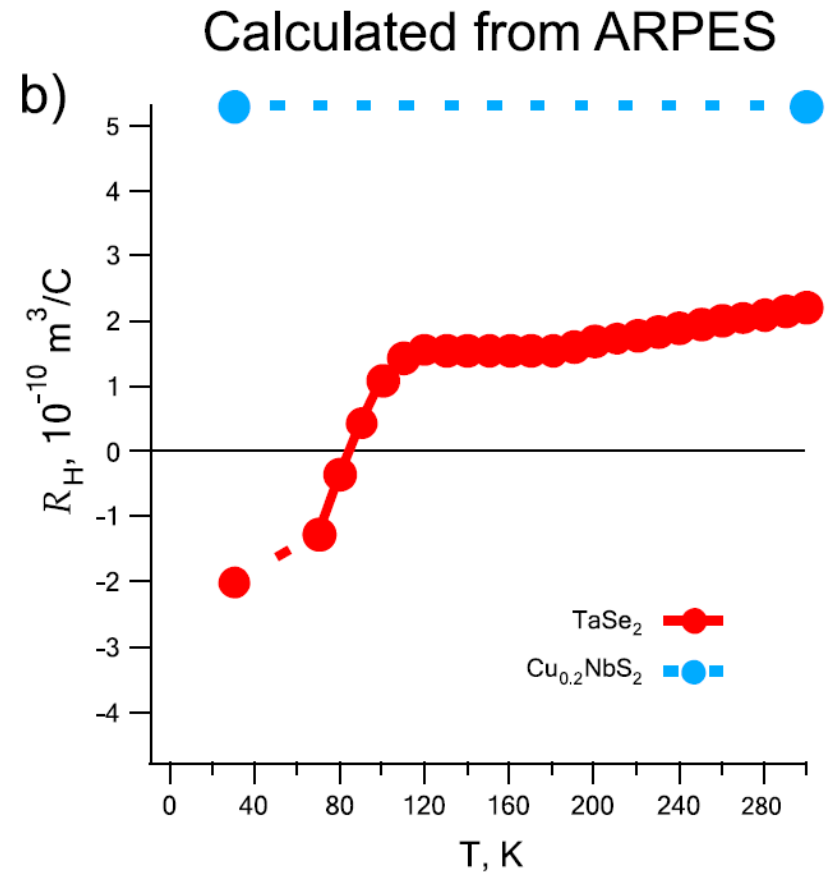
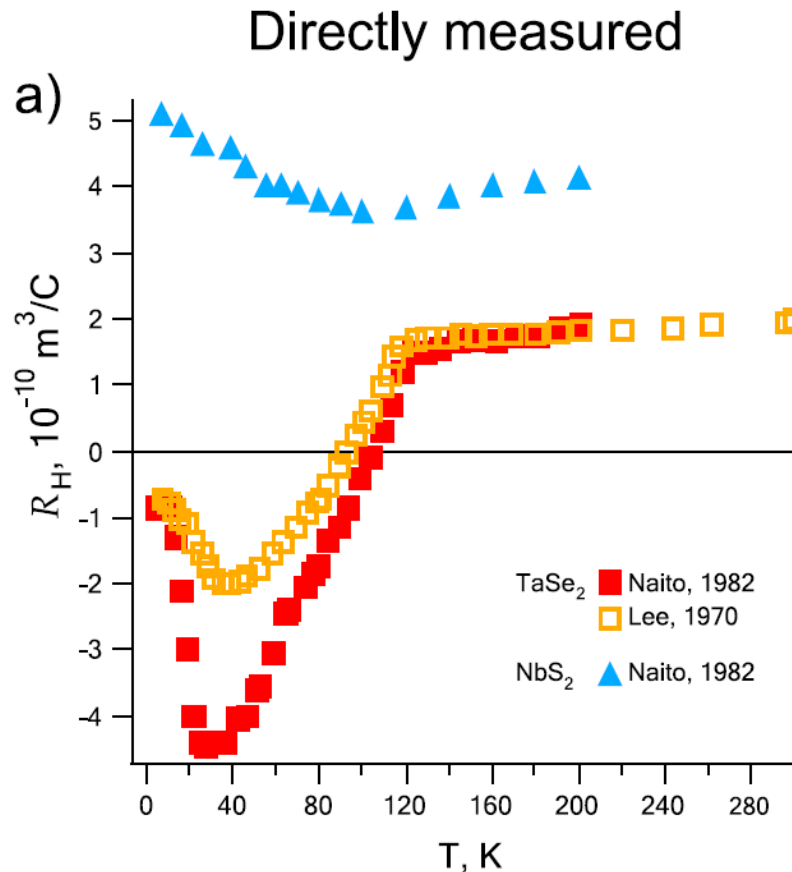


R. A. Craven & S. F. Meyer,  
Phys. Rev. B **16**, 4583 (1977)

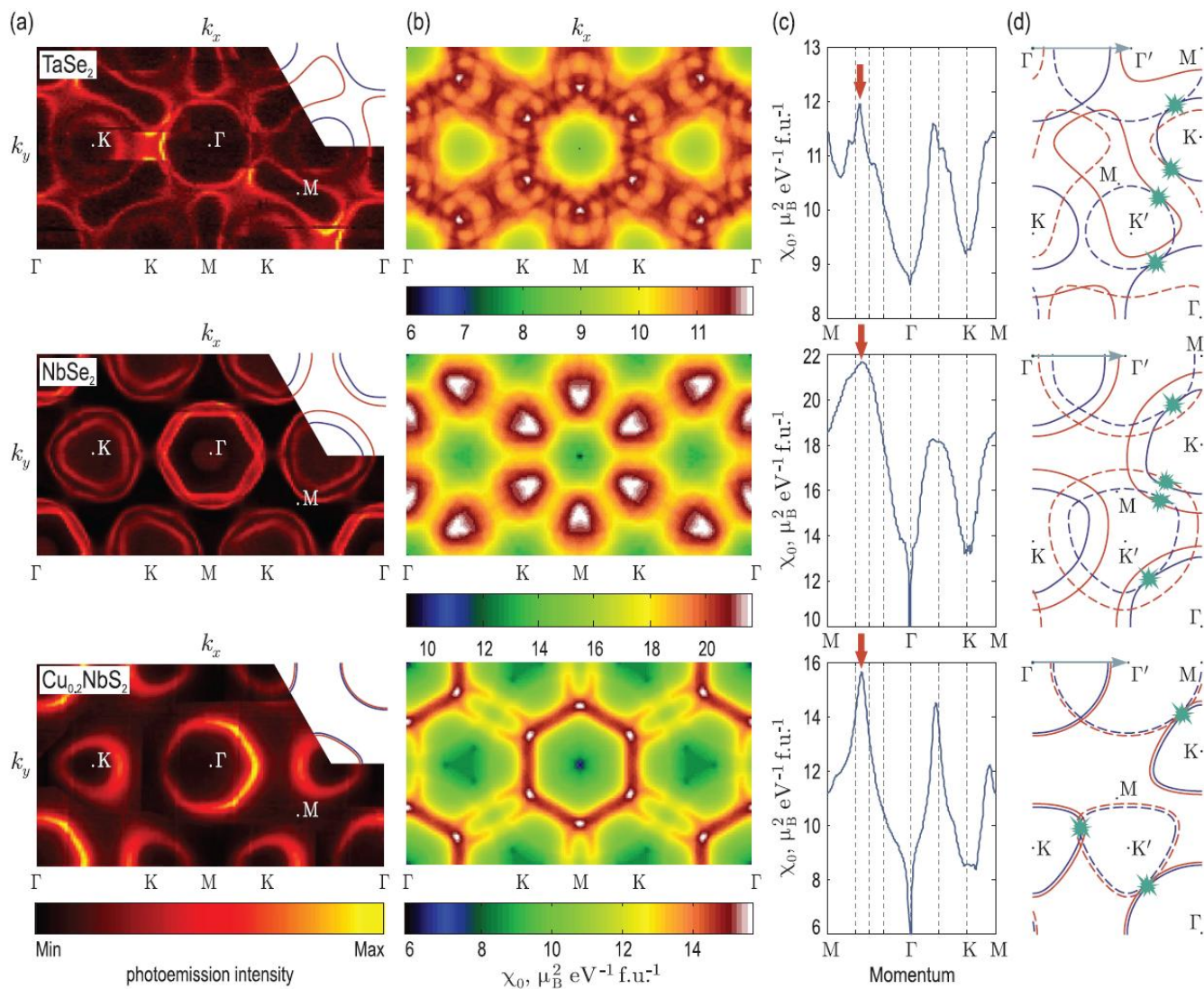
В двумерном пространстве щель открывается лишь на некоторых участках поверхности Ферми. Проводимость улучшается!

# Температурная зависимость константы Холла

$$R_H = \frac{4\pi^2 L_c}{e} \frac{\int D(\mathbf{k}) v_F^2(\mathbf{k}) / \rho(\mathbf{k}) dk}{(\int D(\mathbf{k}) v_F(\mathbf{k}) dk)^2}$$



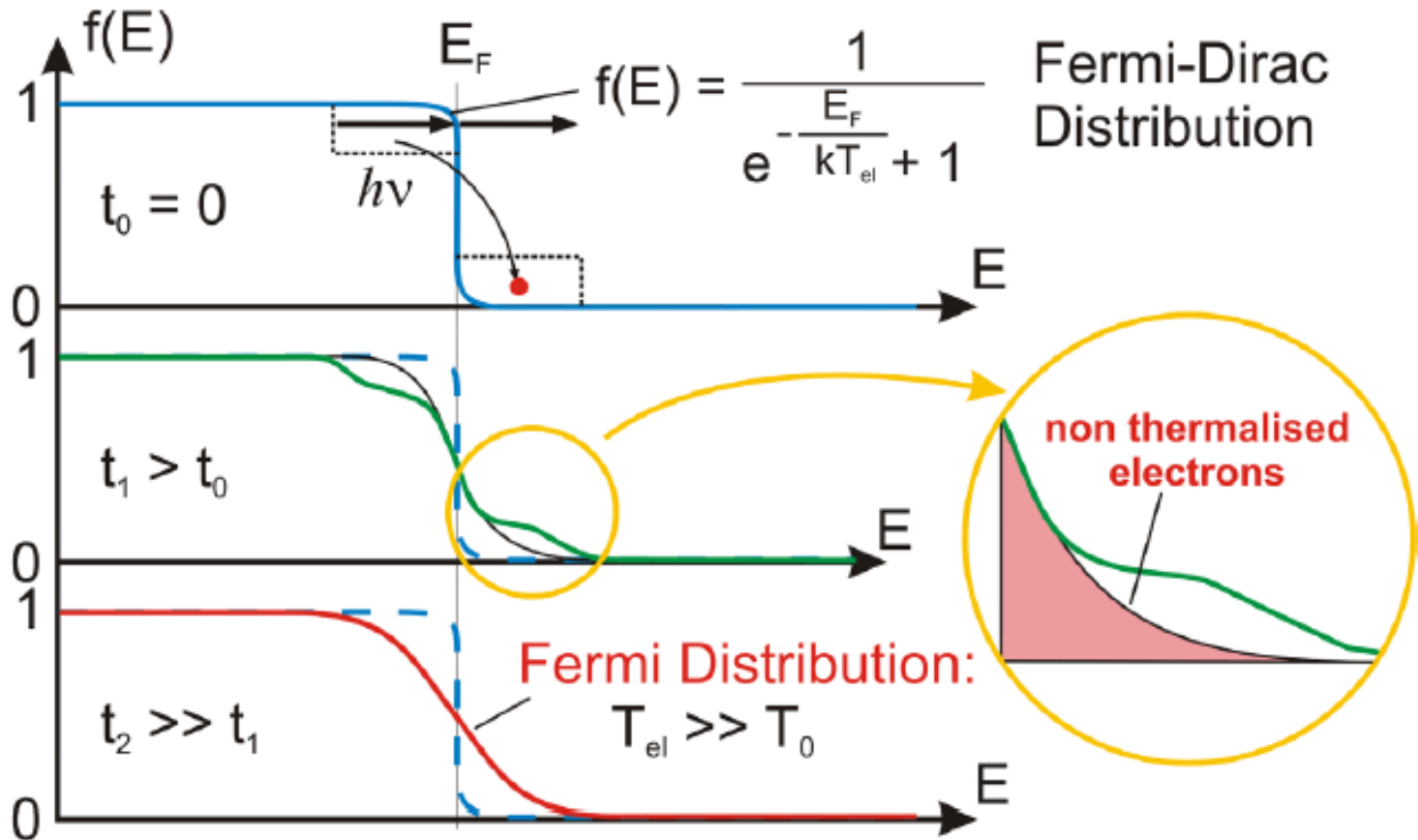
# Функция Линдхарда





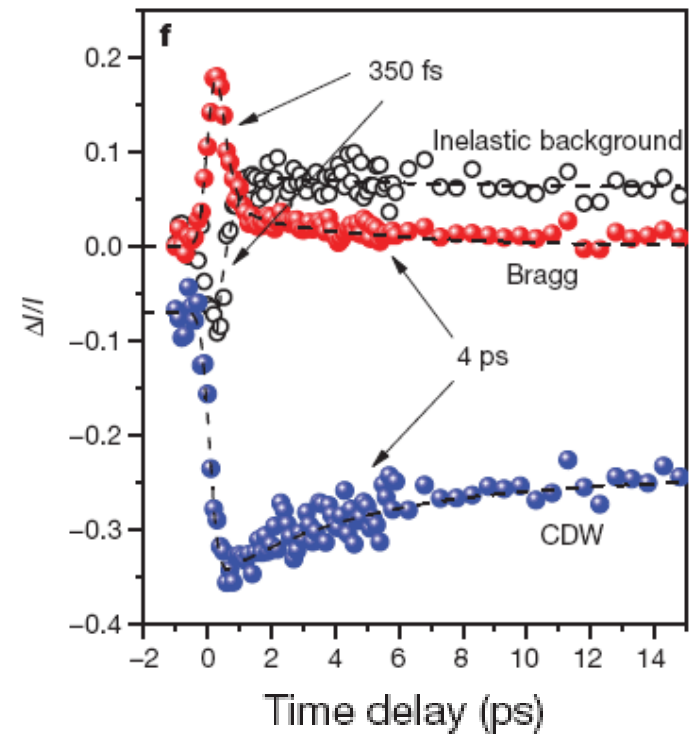
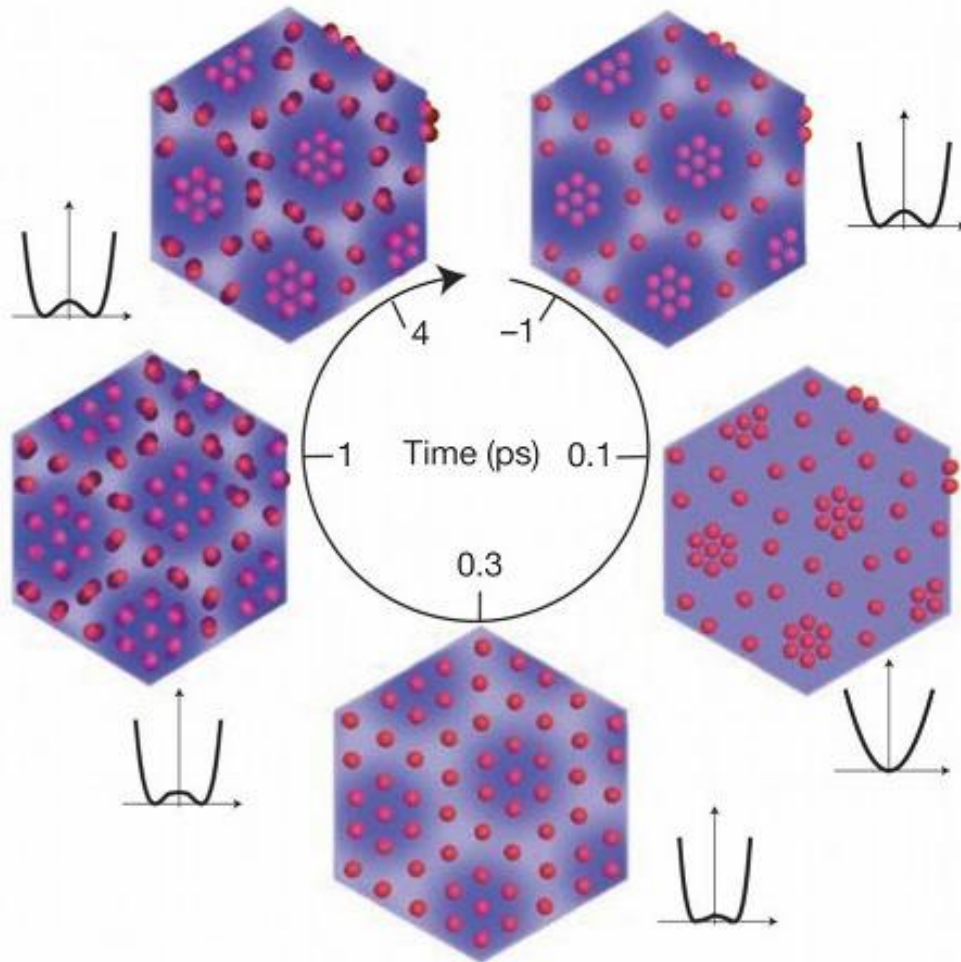
# Двухимпульсные эксперименты «накачка-зондирование»

Electron dynamics in metals following optical excitation



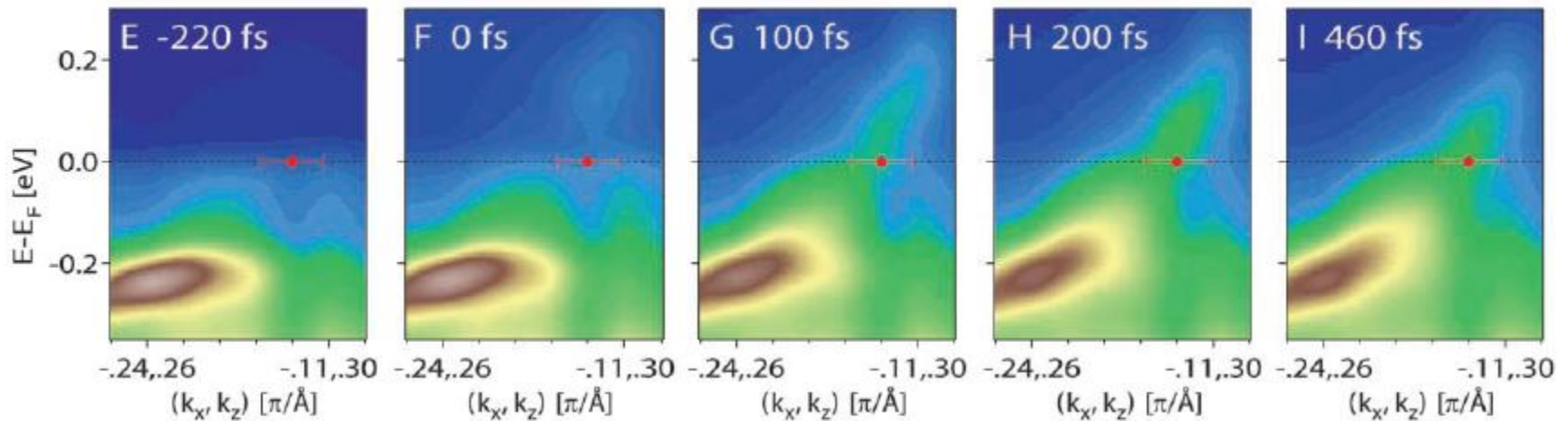
# Две временные шкалы формирования ВЗП

Электронная дифракция с разрешением по времени на примере  $1T\text{-TaS}_2$

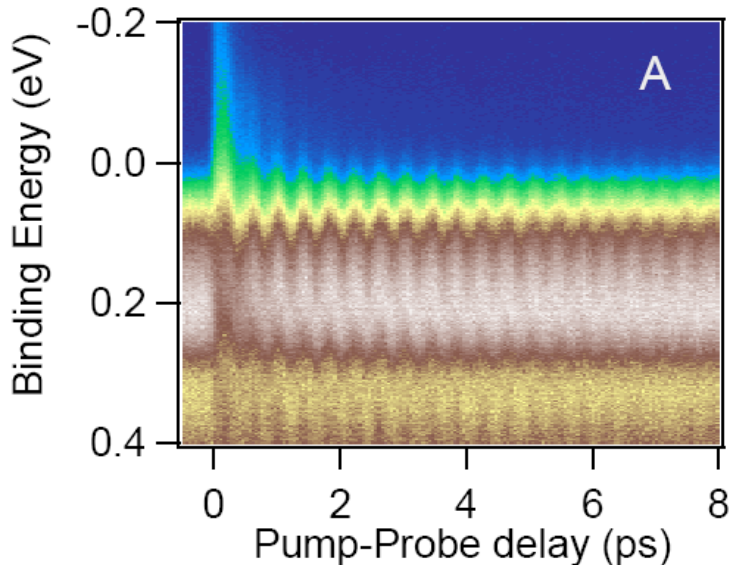


# tr-ARPES: фотоэлектронная спектроскопия с разрешением по углу и времени

«Плавление» ВЗП в TbTe<sub>3</sub>



F. Schmitt *et al.*, Science **321**, 1649 (2008)

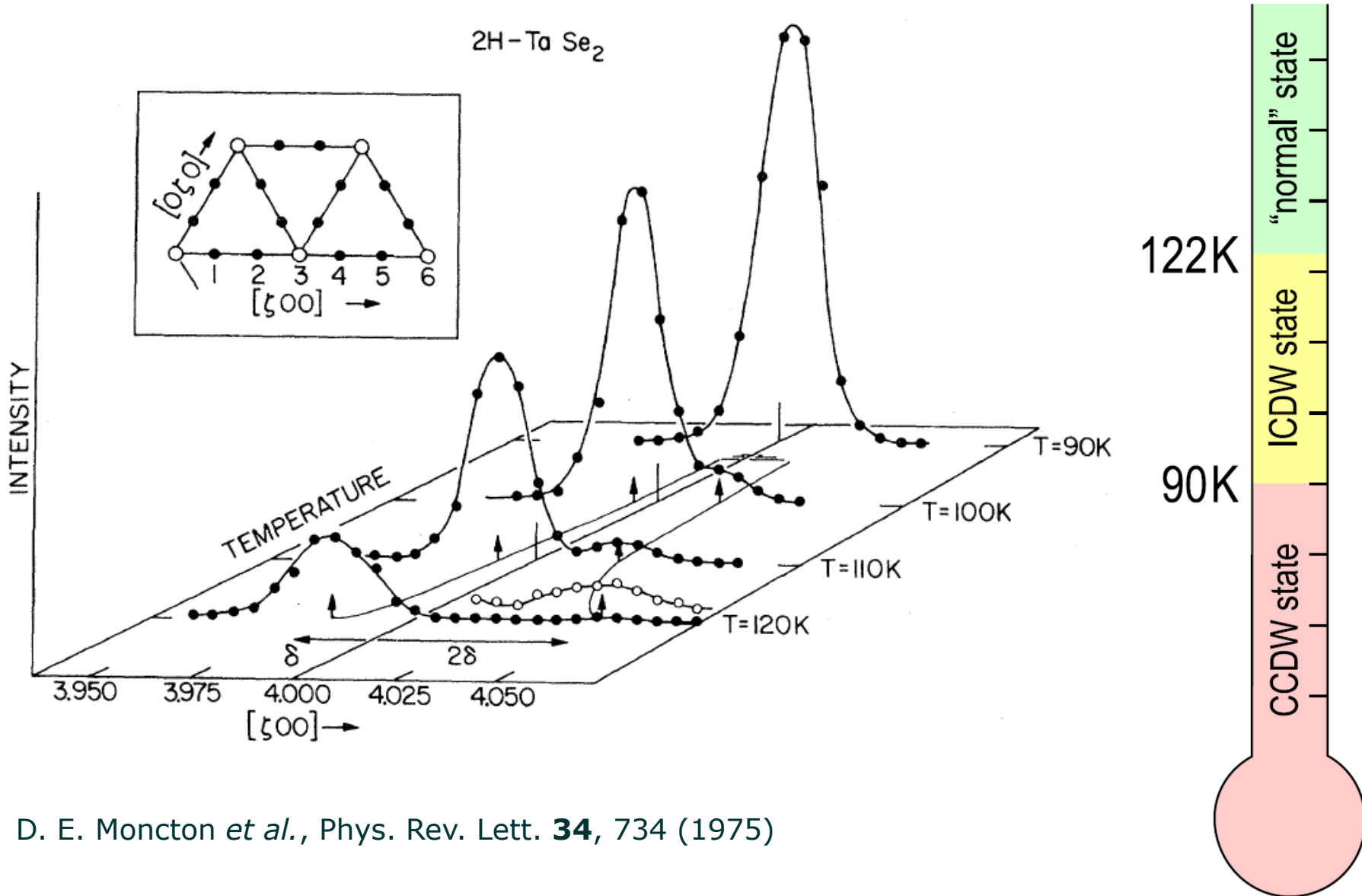


Осцилляции электронного спектра в 1T-TaS<sub>2</sub>, совпадающие по частоте с одной из фононных мод.

L. Perfetti *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 067402 (2006)

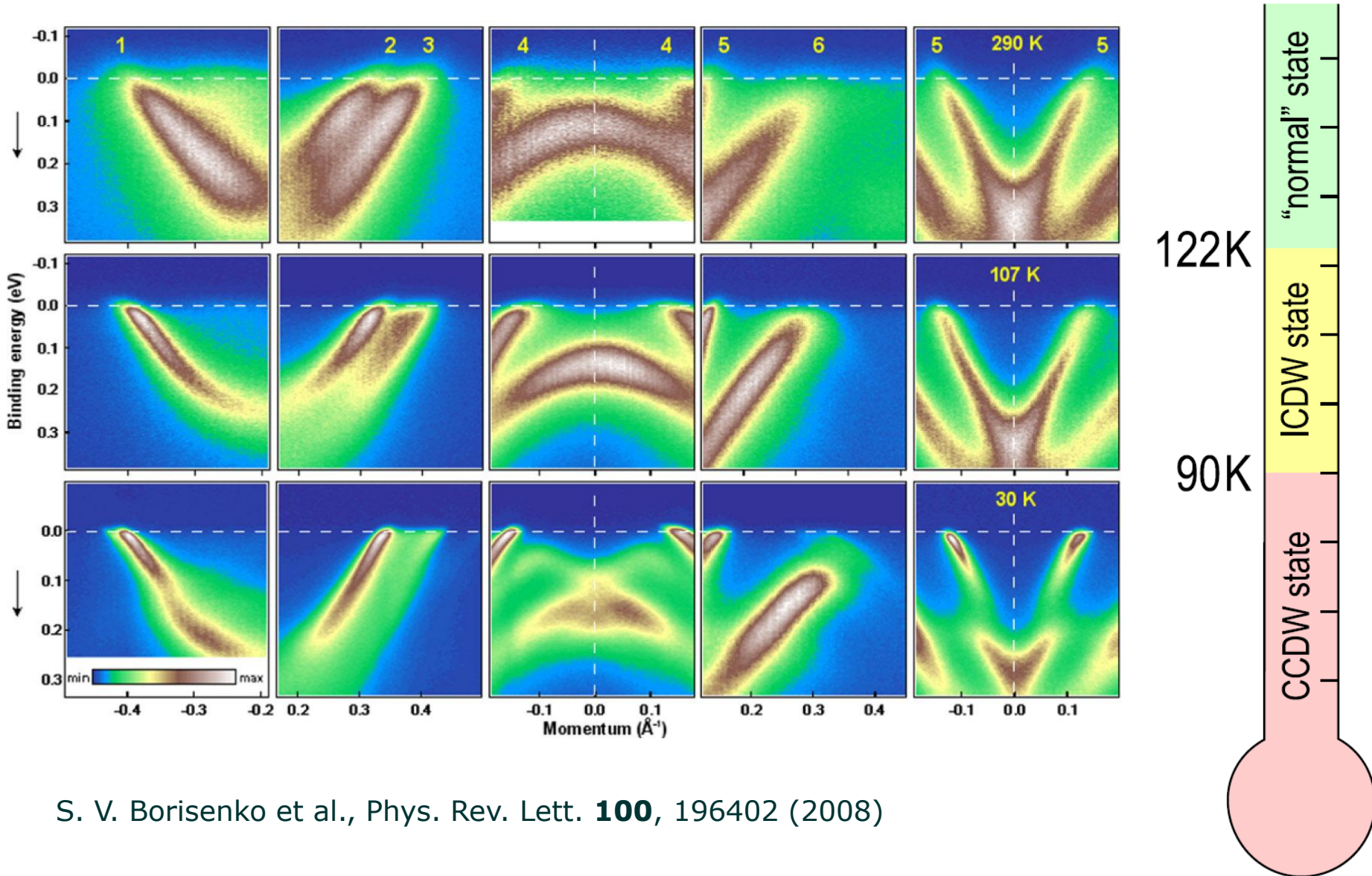
# **Соизмеримые и несоизмеримые ВЗП**

# Несоизмеримый ВЗП-переход



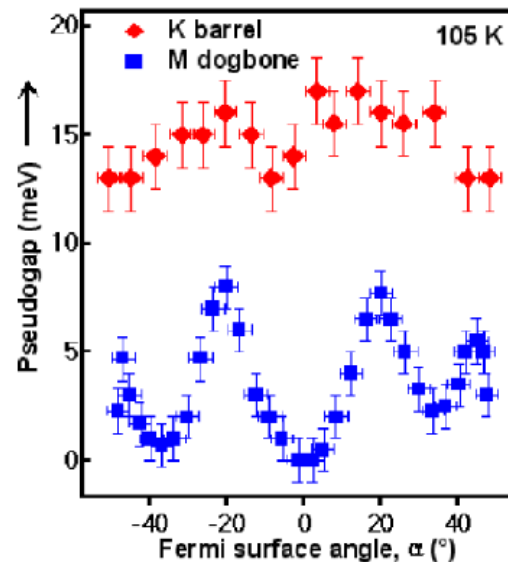
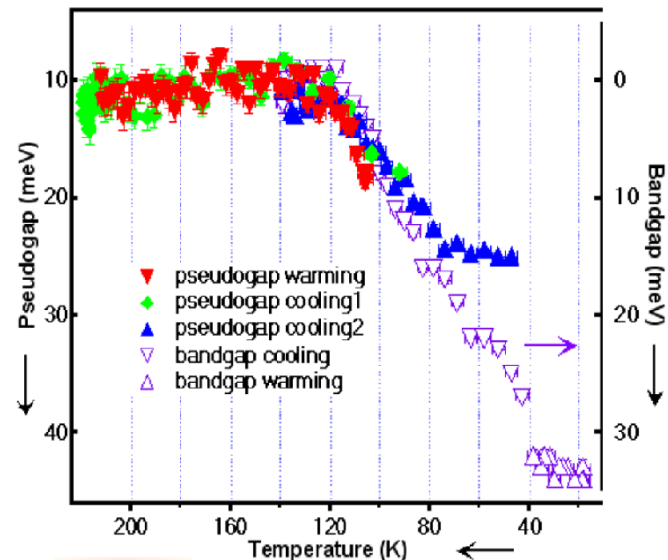
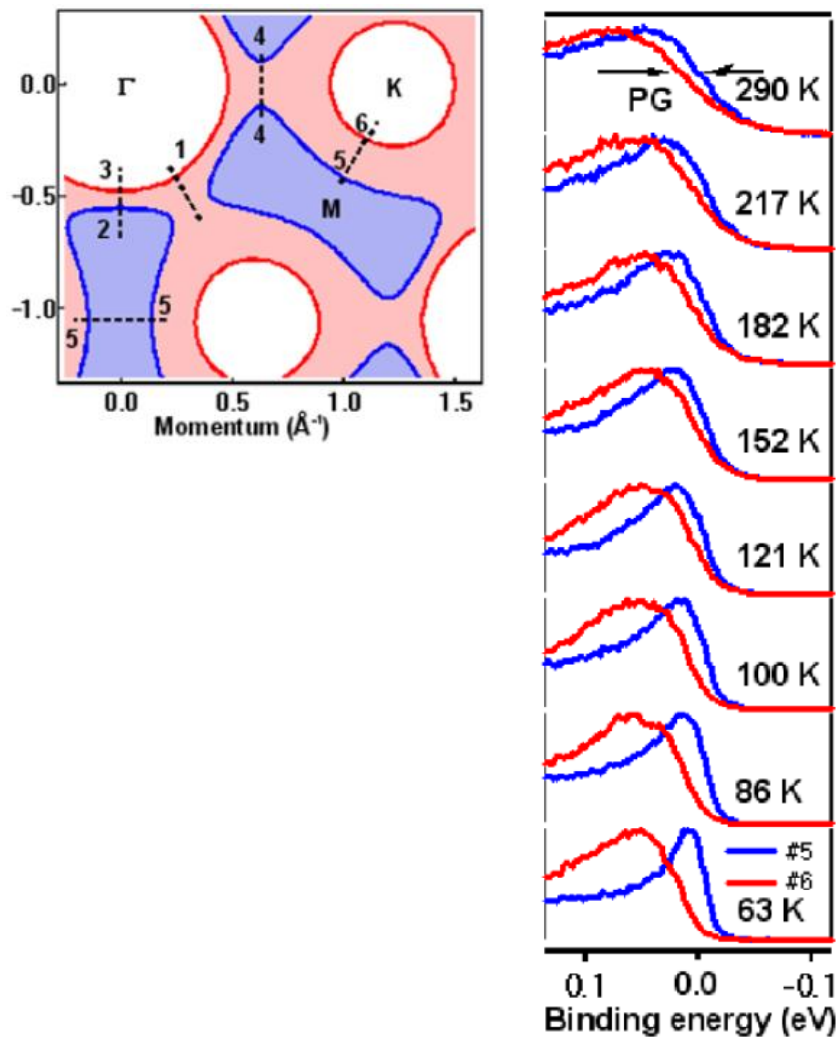


# Несоизмеримый ВЗП-переход



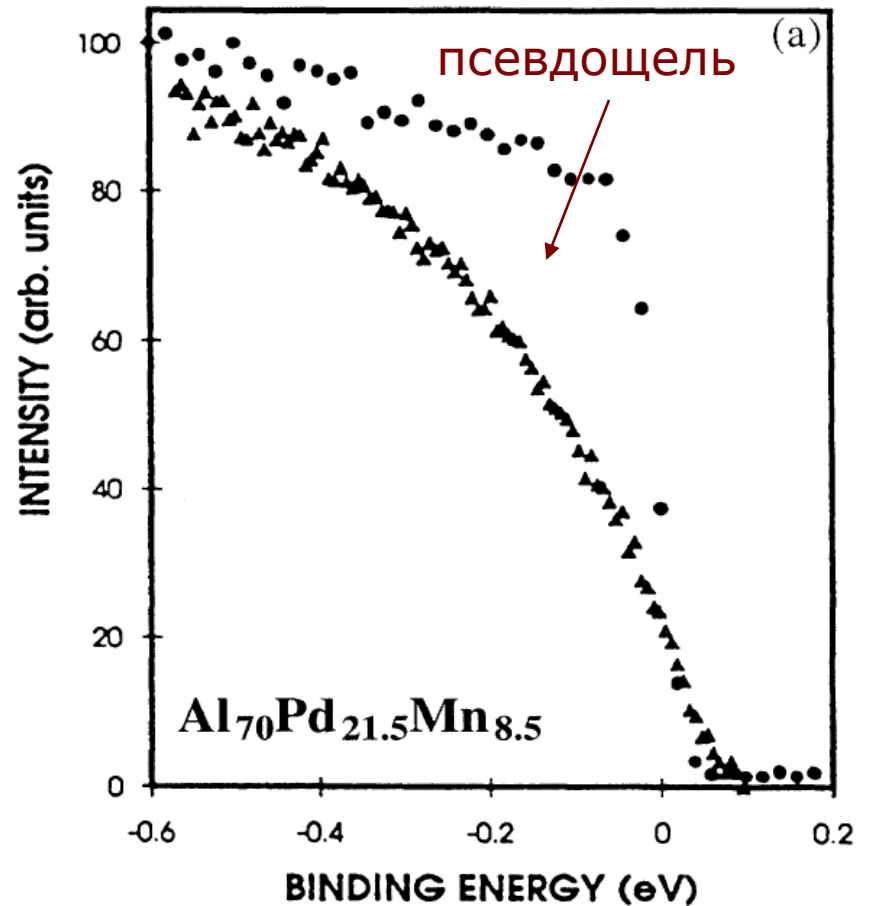
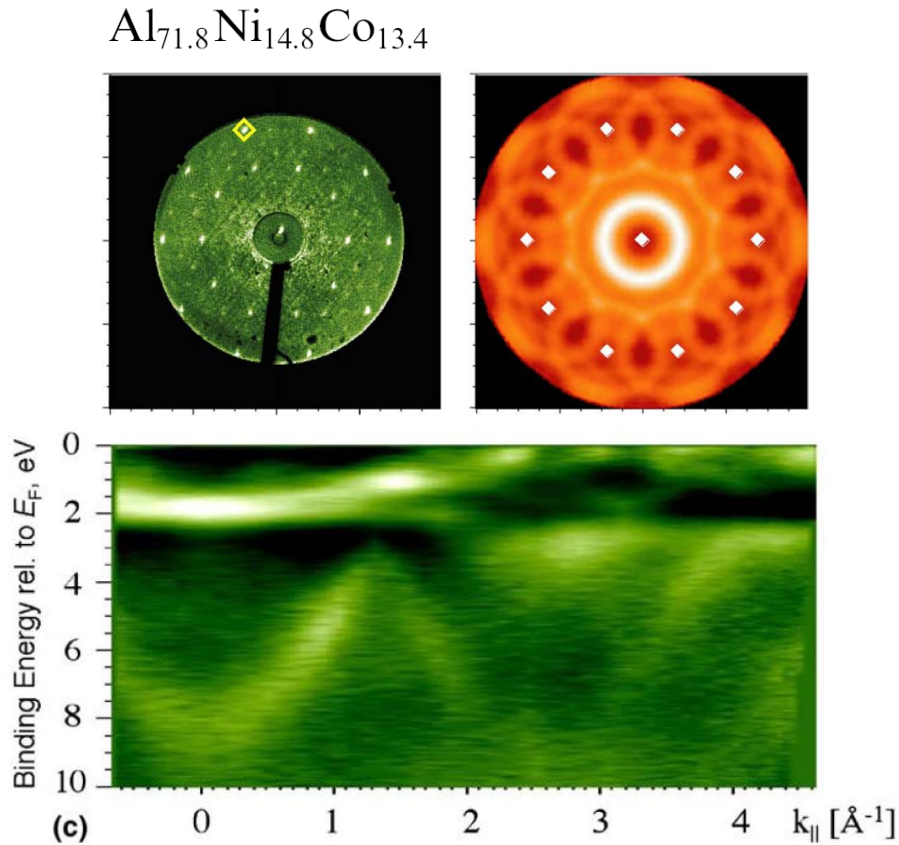
S. V. Borisenko et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 196402 (2008)

# Псевдощель



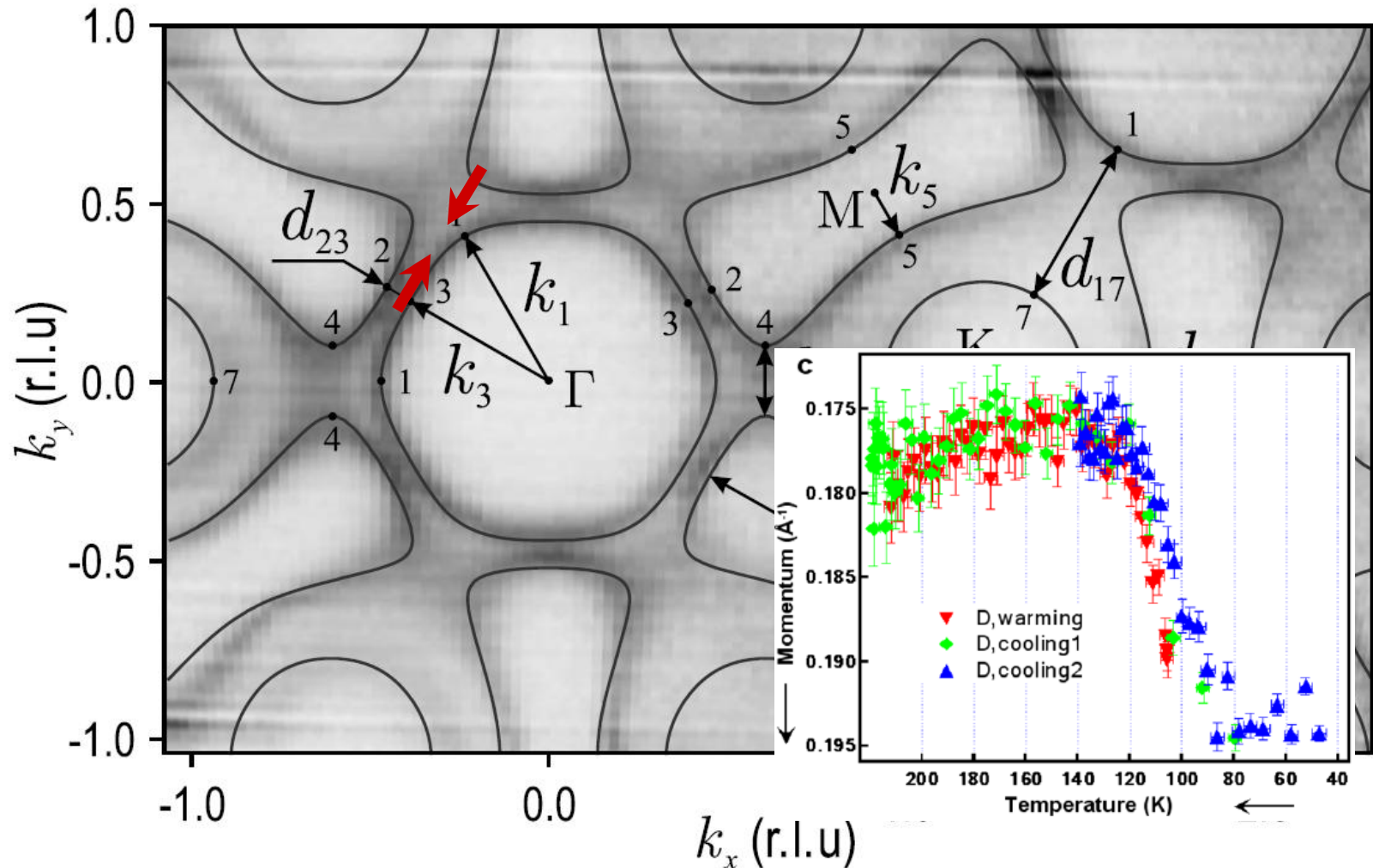
# Общее свойство аперриодических систем

Псевдощель в квазикристаллах:



# **Динамические эффекты, связанные с флуктуациями зарядовой плотности**

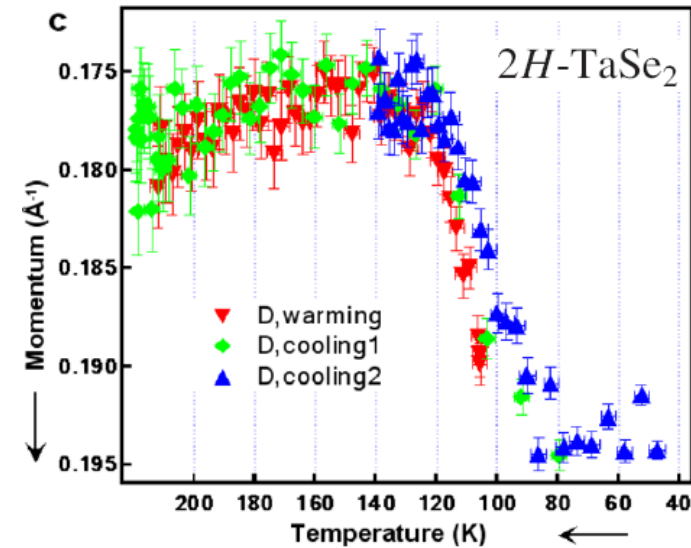
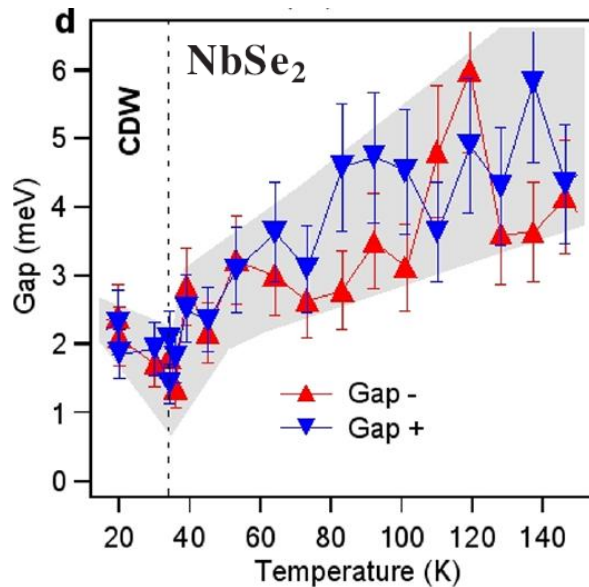
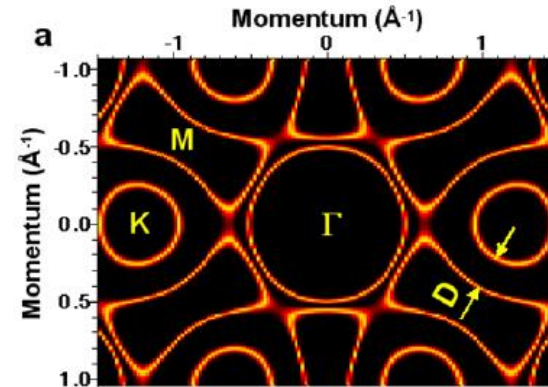
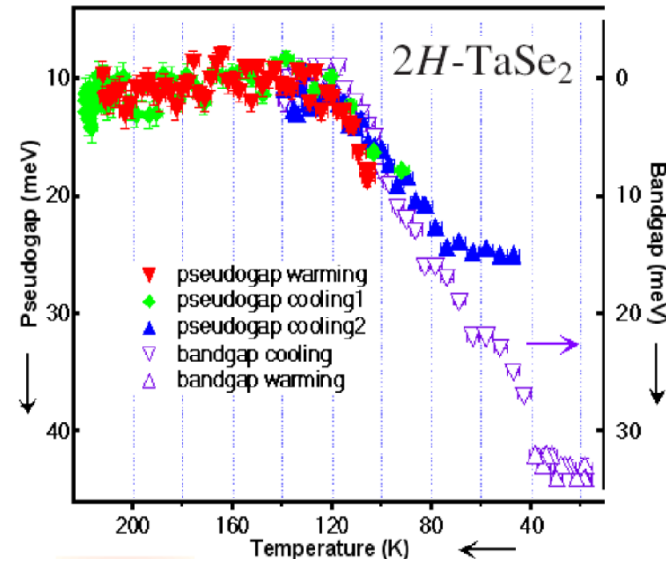
# Температурная зависимость поверхности Ферми



S. V. Borisenko et al., PRL **102**, 166402 (2009);  
S. V. Borisenko et al., PRL **100**, 196402

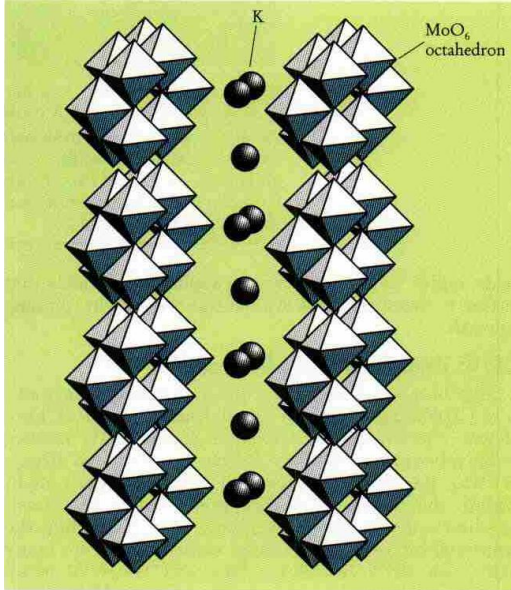


# Температурная зависимость псевдощели

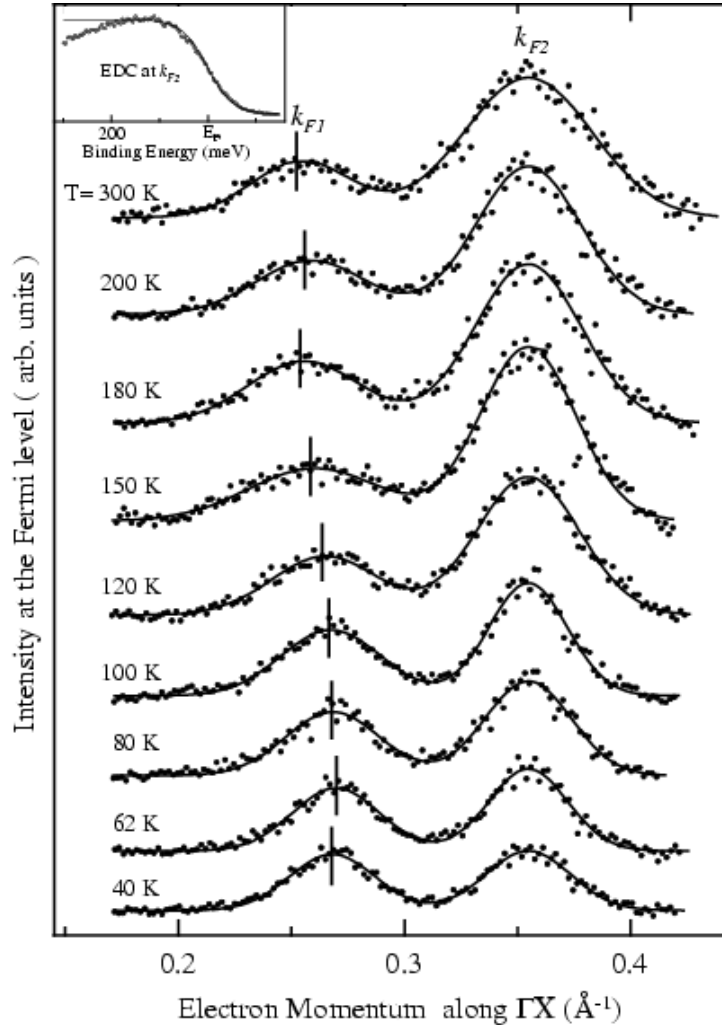
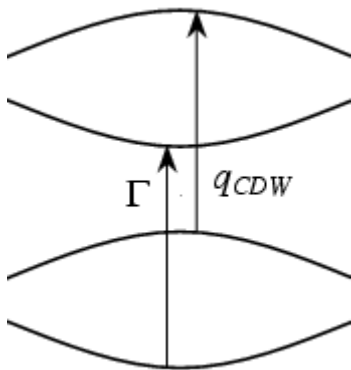


S. V. Borisenko et al., PRL **102**, 166402 (2009);  
 S. V. Borisenko et al., PRL **100**, 196402

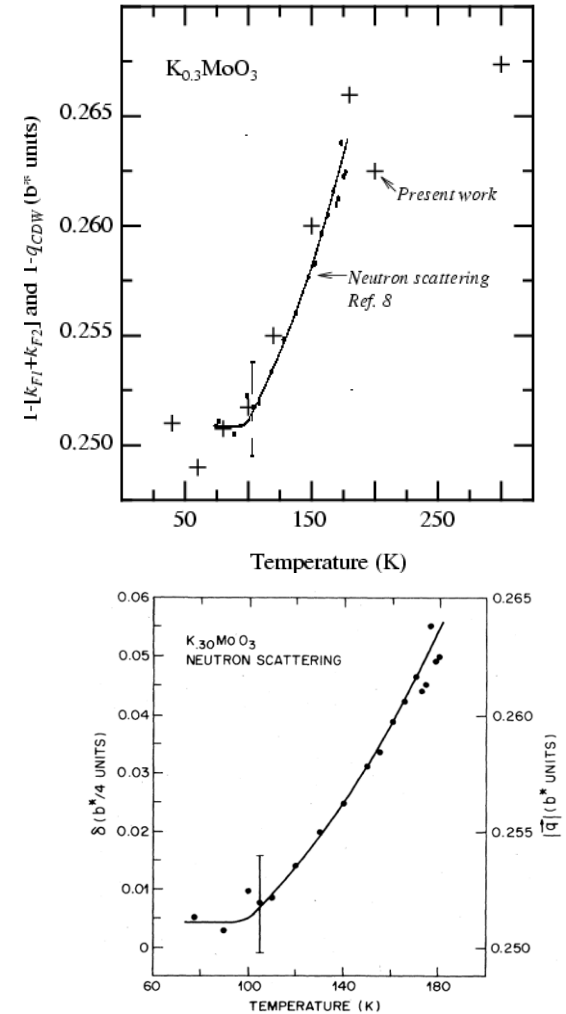
# Квазиодномерный металл $K_{0.3}MoO_3$ («голубая бронза»)



Поверхность Ферми:

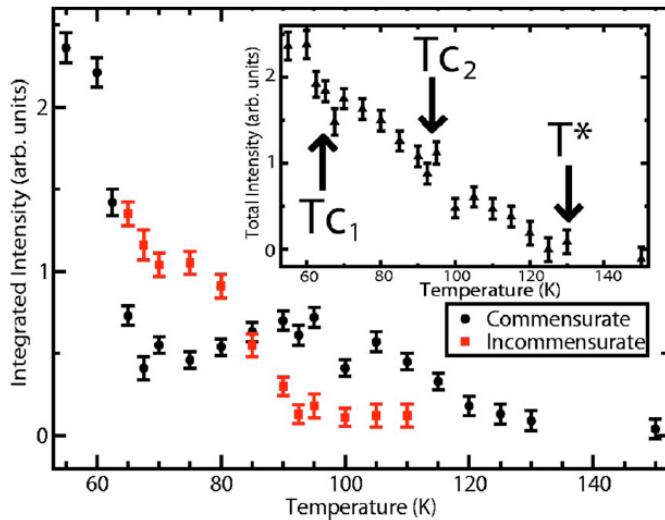
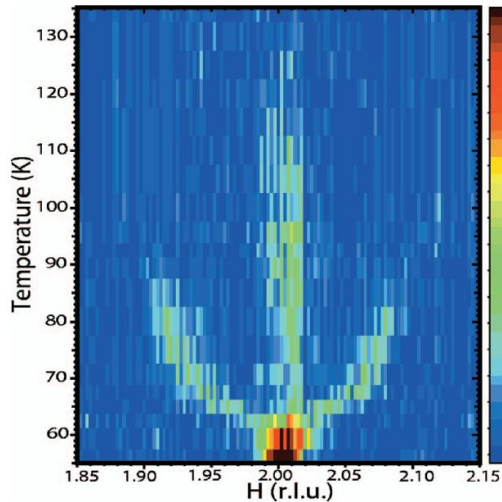


Несоизмеримость:

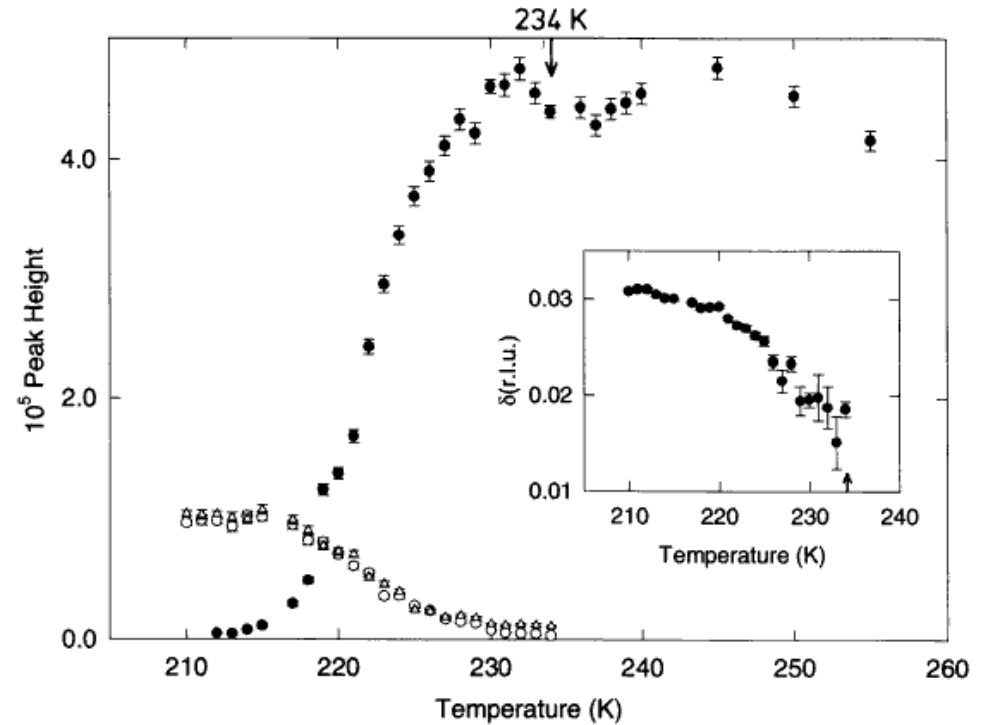


# Флуктуации двух параметров порядка?

Одномерный металл:  $\text{TiOCl}$



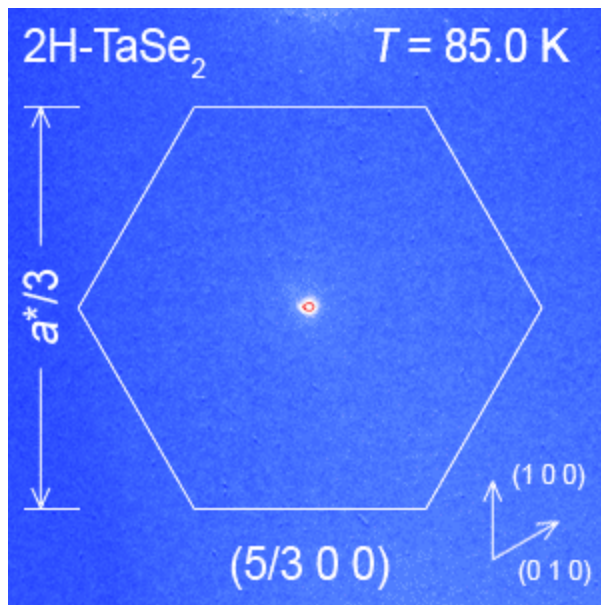
Трехмерный металл:  
сплав  $\text{Cr}+0.3 \text{ at.}\% \text{ Ru}$



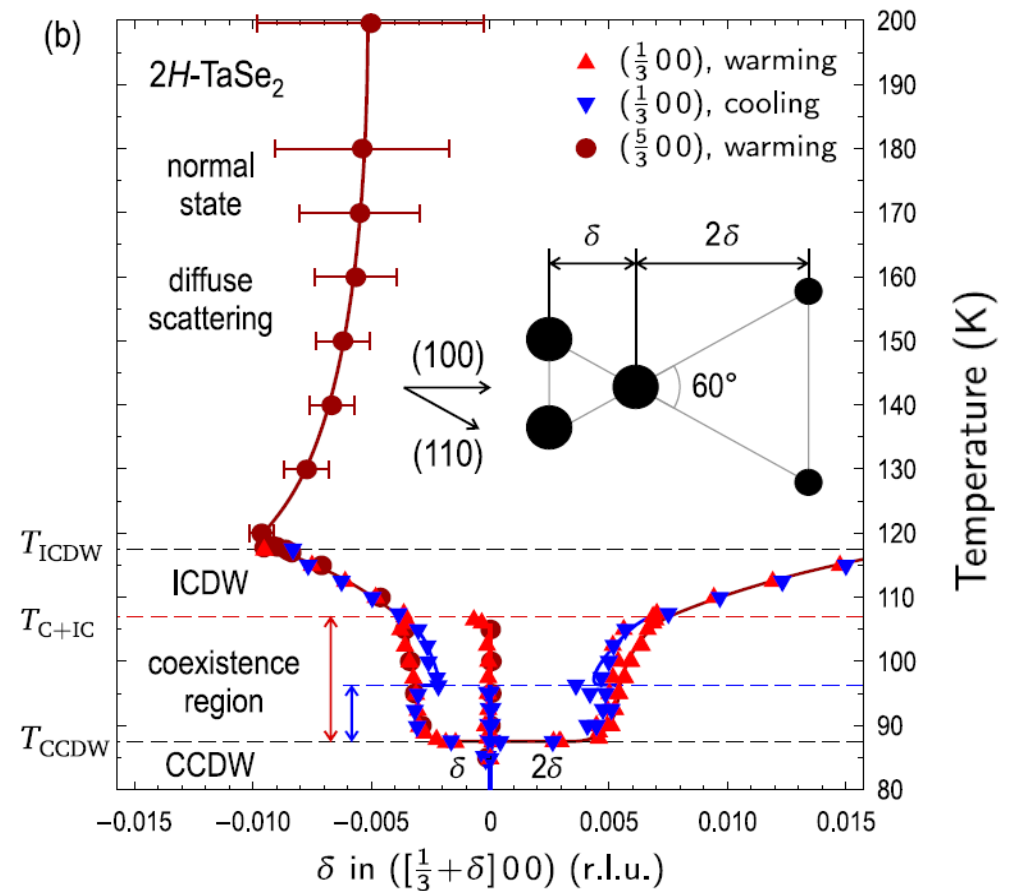
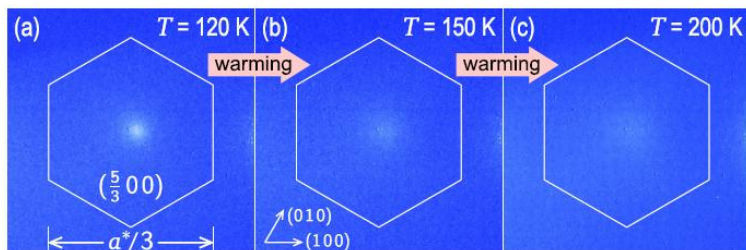
R. S. Eccleston et al., *J. Phys.: Cond. Matter* **8**, 7837

# Температурная зависимость нестинг-вектора

Переход между соизмеримой и несоизмеримой ВЗП-фазами в  $2H-TaSe_2$ :



Диффузное рассеяние рентгеновского излучения (17.7 кэВ):



Эксперимент: Ph. Leininger, D. Chernyshov, D. Inosov *et al.*, arXiv:1101.3516 (2011).





# Welcome to Keimer's department

## Keimer's department

[MPI-FKF homepage](#) > Keimer's department

## Research

- Superconductivity >
- Low-dimensional magnetism
- Orbital physics
- Oxide heterostructures

## Department members

### Groups

- FRM-II group
- Inelastic photon scattering
- Neutron spectroscopy
- Neutron & x-ray reflectometry
- Optical spectroscopy
- Resonant x-ray diffraction
- Theory group

## Publications

### Highlights

### Seminars

### Teaching

### Open positions

## Physics of strongly correlated electron systems

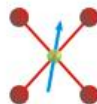
Our department uses neutron and x-ray diffraction and spectroscopy, optical spectroscopy, and Raman scattering, supported by various supplementary methods, to explore the structure and dynamics of materials with strong electron correlations. Topics of particular current interest include the interplay between spin, charge, and orbital degrees of freedom in transition metal oxides; mechanisms of unconventional superconductivity in solids; and quantum many-body physics at oxide interfaces. We strongly believe that close collaboration between experimentalists and theorists is essential for progress in this field. To facilitate this interaction, a small theory group operates within the department. We also have a strong effort in the development of new spectroscopic methods, especially [spectral ellipsometry with synchrotron radiation](#) and [neutron resonance spin-echo spectroscopy](#). To this end, we operate experimental facilities at the ANKA synchrotron in Karlsruhe and at the FRM-II research reactor in Garching, in addition to our in-house laboratories. The recently commissioned TRISP spectrometer at the FRM-II allows the determination of the lifetimes of collective excitations in solids with unprecedented accuracy.

## Our research projects



### Unconventional superconductivity

The microscopic description of superconductivity in complex materials such as layered [cuprates](#), [cobaltates](#), or the recently discovered [iron pnictides](#), is one of the most important challenges in current solid-state physics. Our group uses high-quality single crystals and state-of-the-art experimental methods to derive accurate spectra of spin and charge excitations in these materials. Such data are essential to motivate and test new theoretical concepts for the correlated electron systems that support unconventional superconductivity.



### Low-dimensional magnetism

The discovery of high-temperature superconductivity has stimulated a tremendous upsurge of interest in the quantitative understanding of low-dimensional quantum magnets. Experiments performed in our group elucidate the magnetic structure and dynamics of one- and two-dimensional magnets and their influence on charge transport. Novel compounds synthesized by chemists at our institute are of particular importance.



### Orbital physics

The exceptionally rich phase behavior observed in transition metal oxides originates in a competition between many-body states with different spin, orbital, and charge ordering patterns. Work in our group seeks to unravel the microscopic mechanisms underlying this competition. To this end, spectroscopic data on orbitally degenerate transition metal oxides obtained in our group are analyzed and interpreted in close collaboration with theorists.

## Recent highlights



### Leibniz Prize 2011

Department director Bernhard Keimer is laureate of the Leibniz Prize 2011 and is endowed with a €2.5 Million research grant. The German Science Foundation (DFG) honors his outstanding contributions to the resolution of complex problems in solid state physics, like the mechanism of high- $T_c$  superconductivity.

[DFG press release](#)



### Superconductivity-induced optical anomaly in an iron arsenide

Spectroscopic ellipsometry reveals that excitations with energies up to two orders of magnitude greater than the energy gap are affected by the superconducting transition in the multiband metal  $\text{Ba}_{0.68}\text{K}_{0.32}\text{Fe}_2\text{As}_2$ .

[A. Charnukha et al., Nature Communications, 2011](#)



### Orbital reflectometry

We introduce a [new experimental method](#) that yields quantitative, depth-resolved orbital polarization profiles of metal-oxide multilayers with a resolution of one atomic unit cell. That is, it can tell within an accuracy of a few percent which  $d$ -orbitals are occupied in which atomic layer.

[E. Benckiser et al., Nature Materials, 2011](#)



### Asymmetry of magnetic excitations in ferropnictides explained

Agreement between [inelastic neutron scattering data](#) and first-principles theoretical calculations suggests that the anisotropic shape of spin-excitation spectra in [iron arsenide](#) superconductors stems from Fermi surface nesting, not from an electronic nematic state.

[J. T. Park et al., Phys. Rev. B, 2010](#)

<http://www.fkf.mpg.de/keimer/>



MAX-PLANCK-GESellschaft