



# Алексей Алексеевич Абрикосов: физика и ЖИЗНЬ

25.06.1928-29.03.2017

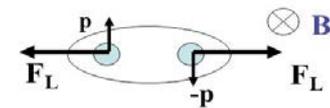


Нобелевская премия  
по физике 2003

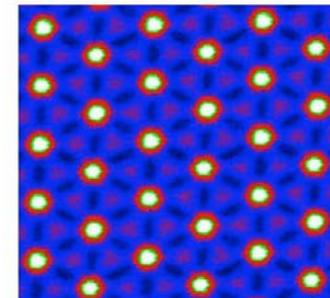
С.И. Мухин

Кафедра Теоретической физики и квантовых  
технологий НИТУ «МИСиС»

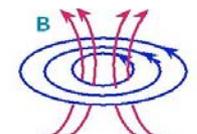
(благодарность А.А. Варламову  
за предоставленные материалы)



вихрь тока  
квант потока  
 $\Phi_0 = hc/2e$



вихревая решетка  
Абрикосова NbSe<sub>2</sub> (СТМ)



длина когерентности  $\xi$

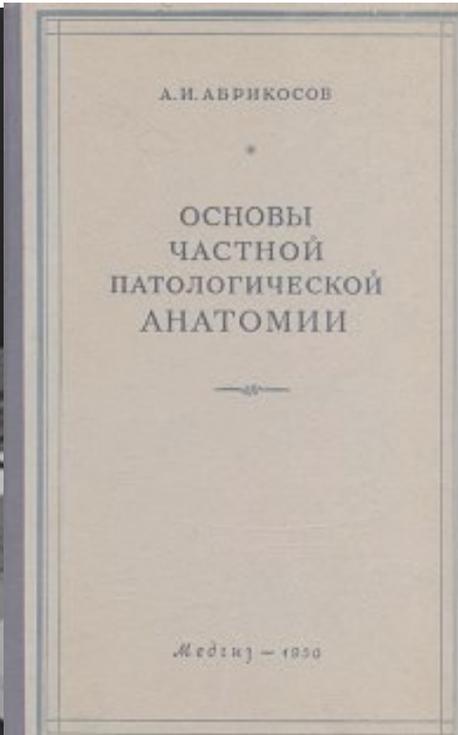
глубина проникновения поля  $\lambda$

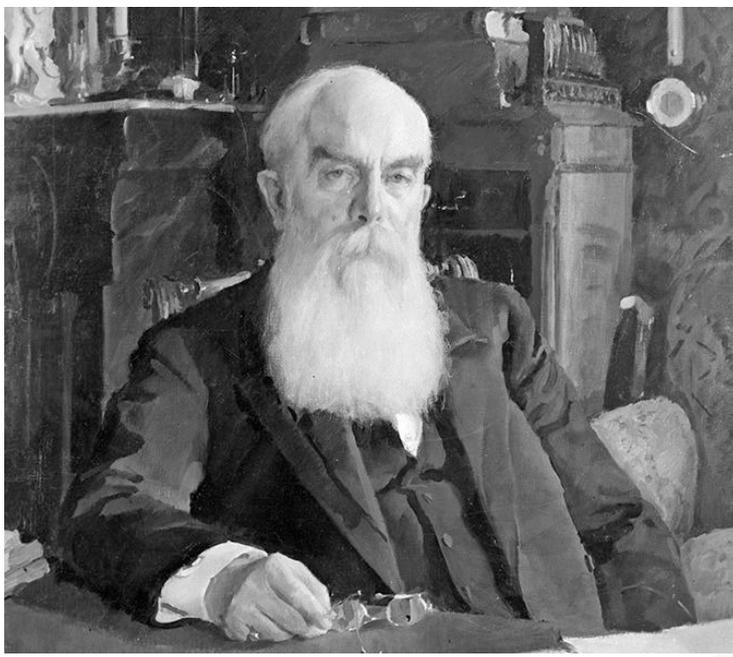
# I. Семья и детство

Алексей Абрикосов родился 25 июня 1928 в Москве в семье известных врачей: Алексея Ивановича Абрикосова и Фани Вульф



Алексей Иванович Абрикосов





Алексей Иванович Абрикосов-старший

Семья Абрикосовых стала известной в Российской империи с начала XIX века в качестве основателей кондитерской фабрики, получившей позднее титул «Поставщика двора его императорского величества».



Дмитрий Иванович Абрикосов (1876 - 1951 ), дядя А.А. Абрикосова,  
был последним (1917 - 1925 ) послом (Поверенным в делах)  
Российской империи в Японии



Дядя – Дмитрий Иванович  
Абрикосов



## Годы учебы

В 1943, в 15 лет, Алексей Абрикосов окончил школу и поступил в Московский энергетический институт. В 1945, он перевелся на Физфак МГУ им. Ломоносова

Похвальная грамота ученику 6-го класса  
Алексею Абрикосову

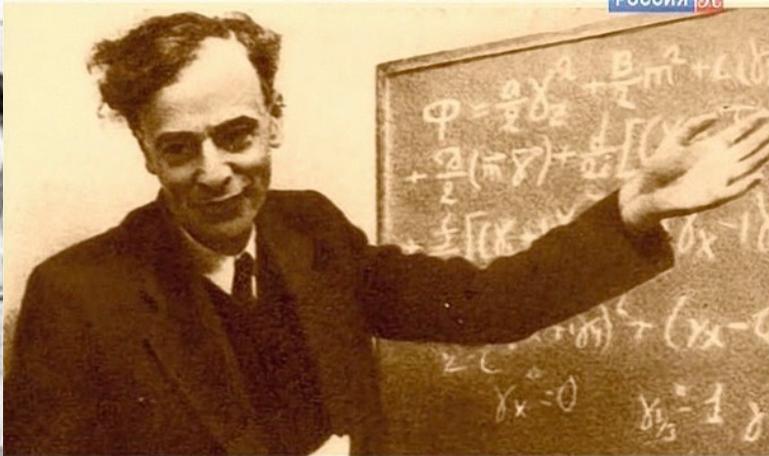


Старое здание МГУ



# Школа Теоретической Физики Ландау

1932-1937 гг. Лев Давидович Ландау – заведующим теоретическим отделом Украинского физико-технического института (Харьков) – зарождение Школы Ландау: начало создания курса «Курс теоретической физики» (Ландау и Лифшиц 10 томов); теорминимум Ландау. С 1937 года Ландау – зав. теоротделом Института физических проблем АН СССР П.Л. Капицы, Герой социалистического труда 1954, Лауреат Нобелевской премии 1962 «за пионерские исследования в теории конденсированного состояния, в особенности жидкого гелия».



## II. Любимый ученик Ландау

Научный рост Алексея Абрикосова происходил под непосредственным влиянием Льва Ландау. В 19 лет он сдал теорминимум Ландау, а через год окончил с отличием Физфак МГУ.



Теоретическая группа ИФП, 1956.

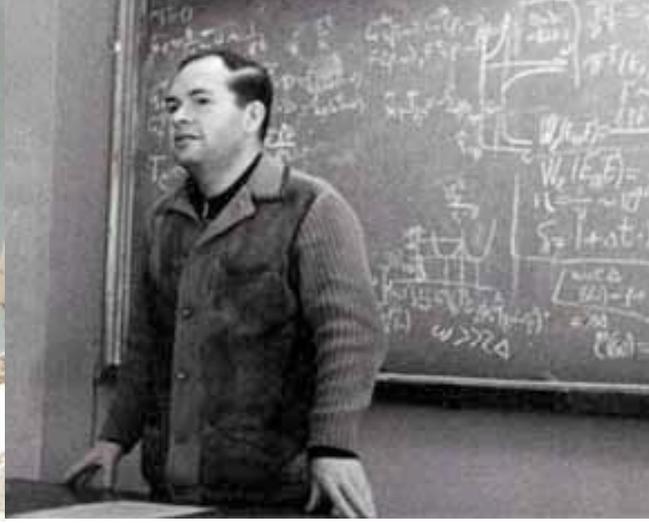
Стоят: С. Герштейн, Л. Питаевский., Л. Вайнштейн, Р. Архипов, И. Дзялошинский.  
Сидят: Л. Прозорова, А. Абрикосов, И. Халатников, Л. Ландау, Е. Лифшиц.

Список студентов сдавших теорминимум.  
написано Ландау от руки

|                    |        |                           |      |
|--------------------|--------|---------------------------|------|
| 3. Ахисер          | 35 (к) | 24 Михеев                 | 55   |
| 4. Пацранчук       | 35 зк  | 25 Пителевский            | 55   |
| 5. Мисса           | 35     | 26 Саидел                 | 55   |
| 6. Левин           | 37 зк  | 27 <sup>+</sup> Бекаревиц | 55 к |
| 7. Берестовский    | 39 д   | 28 Шлапник                | 56 к |
| 8. Спординский     | 40 д   | 29 Бодяк                  | 57 к |
| 9. Халатников      | 41 д   | 30 Шаповал                | 58   |
| 10. Хуцшвили       | д      | 31 Фальковский            | 59   |
| 11. Тер-Мартirosян | 47 д   | 32 Андреев                | 59   |
| 12. Абрикосов      | 47 д   | 33 Кокраменко             | 59   |
| 13. Цорфе          | 49 д   | 34 Русиль.                | 59   |
| 14. Исарки         | 50 к   | 35 Маринов                | 60   |
| 15. Лапидус        | 50 к   | 36 Берков                 | 60   |
| 16. Судачков       | 51 к   |                           |      |
| 17. Клан           | 51 к.  |                           |      |
| 18. Черштейн       | 52 к.  |                           |      |
| 19. Зорсков        | 53 д   |                           |      |
| 20. Дзюминский     | 53 к   |                           |      |
| 21. Архипов        | 54 к   |                           |      |



# Покорение вершин: горных и научных



А. Абрикосов и С. Герштейн

А. Абрикосов

В 1950, в возрасте 22, Алексей Абрикосов защитил кандидатскую диссертацию посвященную термодиффузии в частично ионизованной плазме.



# Почти двадцать последующих лет Алексея Абрикосова прошли в Институте Физических Проблем (ИФП) АН СССР П.Л. Капицы



Петр Капица



Институт физических проблем



Лев Ландау



И. Халатников, Л. Ландау, Е. Лифшиц



И. Дзялошинский



Горьков и Абрикосов



Ландау и Дзялошинский



М. Каганов, В. Фикс, Е. Канер



Р. Гуржи, Л. Питаевский, Е. Канер, Л. Горьков



Абрикосов и Пиппард, 1957

### III. Открытие сверхпроводников II рода



Гинзбург и Ландау

1950: Гинзбург-Ландау  
Феноменологическая  $\Psi$ -Теория  
Сверхпроводимости

$$\delta\mathcal{G} = \int dV \left\{ \alpha\tau|\Psi|^2 + \frac{b}{2}|\Psi|^4 + \frac{1}{4m} \left| \left( -i\hbar\nabla + \frac{2e}{c}\mathbf{A} \right) \Psi \right|^2 + \frac{H^2}{8\pi} \right\}$$

$$\frac{1}{\kappa^2} \frac{d^2\Psi}{dx^2} + \Psi(1 - A^2) - \Psi^3 = 0,$$

$$\left. \frac{d\Psi}{dx} \right|_b = 0,$$

$$\frac{d^2A}{dx^2} - \Psi^2 A = 0$$

$$\kappa = 3 \left( \frac{2}{7\zeta(3)} \right)^{1/2} \left( \frac{\pi\hbar}{v} \right)^{3/2} \frac{cT_c}{\hbar\rho_0}$$

Эксперименты в сверхпроводниках  
тех времен давали  $\kappa \ll 1$

# Большой успех теории ГЛ

1

**Критическое поле и намагниченность тонкой пленки. Переохлаждение и перегрев.**

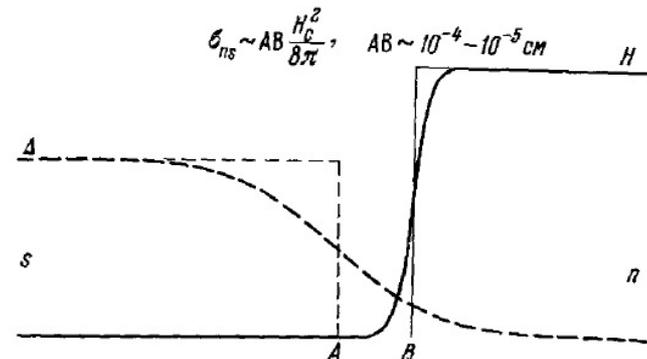
2 **Критический ток тонкой проволоки с  $\kappa \ll 1$**

3 **Квантование магнитного потока**

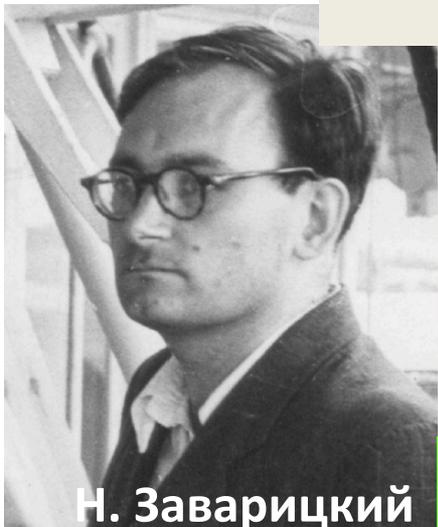
4

**Энергия границы раздела сверхпроводящей и нормальной фаз**

$$\kappa < 1/\sqrt{2}$$



## Экспериментальная верификация теории ГЛ



Н. Заварицкий

В 1951-1952гг. Абрикосов и Заварицкий, экспериментатор из ИФП, занимались проверкой предсказаний недавно созданной теории сверхпроводимости Гинзбурга и Ландау для величин критических магнитных полей тонких пленок.

### Из нобелевской речи Абрикосова:

“Николай Заварицкий начал измерять критическое поле тонких пленок. Теория и эксперимент совпадали идеально, в том числе по изменению характера перехода: первого рода при больших толщинах и второго рода при меньших. Вроде бы все было в порядке, но начальника Заварицкого Александра Шальникова это не удовлетворило. Он сказал, что пленки, которыми пользовался Заварицкий, плохи, так как приготовлены при комнатной температуре. Атомы металла, испаренные на стеклянную подложку, могли агломерироваться, и поэтому пленка фактически состояла из мелких капель.

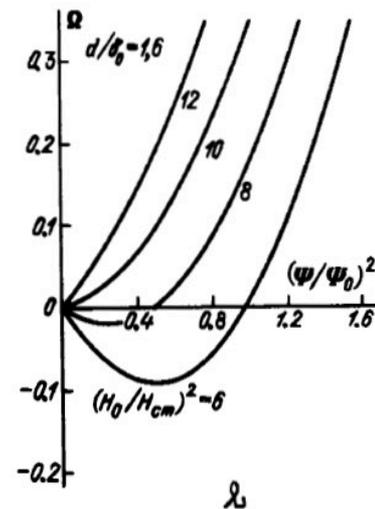
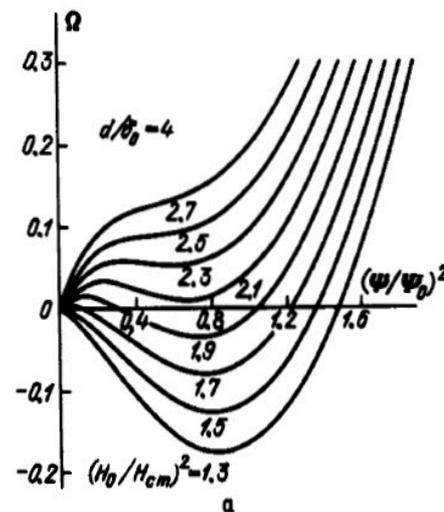


Fig. 109.

# Наблюденные противоречия



**А. Шальников**

Во избежание этого Шальников рекомендовал поддерживать стеклянную подложку при гелиевой температуре во время испарения и до окончания измерений. Заварицкий последовал этому совету, и результат оказался неожиданным: зависимость критического поля от толщины или температуры (в теории содержится отношение толщины к глубине проникновения, зависящее от температуры) не соответствовала предсказаниям теории Гинзбурга-Ландау. Обсуждая эти результаты с Заварицким, мы не могли поверить, что теория ошибочна: она была так красива и так хорошо соответствовала предыдущим данным. Поэтому мы попытались найти какое-то решение в рамках самой теории, и мы его нашли.

Уравнения теории, где все входящие величины выражались в соответствующих единицах, зависели только от безразмерной «материальной» постоянной,  $k$ , которую впоследствии назвали параметром Гинзбурга-Ландау. Его значение можно определить по поверхностной энергии между нормальной и сверхпроводящей фазами. Последняя, в свою очередь, может быть рассчитана по периоду структуры промежуточного состояния. Эти данные для обычных сверхпроводников привели к очень малым значениям  $k$  и поэтому расчеты в статье Гинзбурга и Ландау проводились для этого предельного случая. Также было установлено, что с увеличением значения  $k$  поверхностная энергия между сверхпроводящим и нормальным слоями станет отрицательной, а поскольку это противоречило существованию промежуточного состояния, такой случай не рассматривался.

## Открытие вихревой фазы Абрикосова

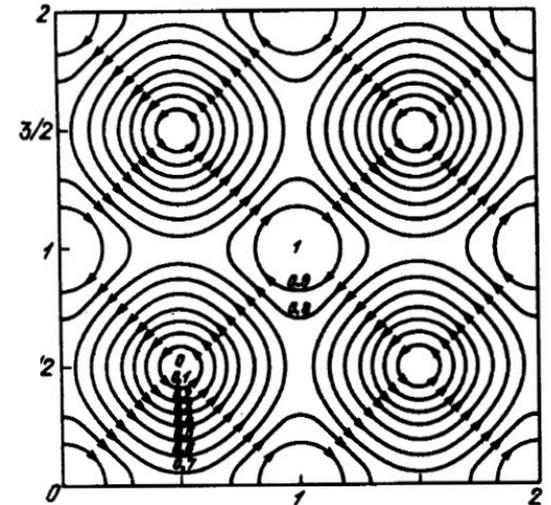
После этого Абрикосов перешел к изучению магнитных свойств массивных сверхпроводников второго рода. Ему удалось найти формальное решение уравнений ГЛ с  $\kappa > 1/\sqrt{2}$

$$(-i\kappa^{-1}\nabla + \kappa^{-1}\nabla\chi - \mathbf{A})^2|\Psi| - |\Psi| + |\Psi|^3 = 0.$$

$$\Psi = |\Psi| e^{i\chi}$$

$$\Psi = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \exp \left[ ikny - \frac{1}{2} \kappa^2 \left( x - \frac{kn}{\kappa^2} \right)^2 \right].$$

$$\Psi = C \exp \left( -\frac{1}{2} \kappa^2 x^2 \right) \vartheta_3 \left[ 1; (2\pi)^{1/2} \kappa i (x + iy) \right].$$



В результате Абрикосов пришел к выводу, что переход из сверхпроводящего состояния в нормальное с увеличением поля происходит постепенно, причем поле имеет два критических значения

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= \frac{1}{2} n_s \int_{\xi}^{\delta} \frac{2mv_s^2}{2} 2\pi\rho \, d\rho \\ &= \frac{\pi n_s \hbar^2}{4m} \int_{\xi}^{\delta} \frac{d\rho}{\rho} = \frac{\pi n_s \hbar^2}{4m} \ln\left(\frac{\delta}{\xi}\right) \\ &= \frac{\pi n_s \hbar^2}{4m} \ln \kappa \end{aligned}$$

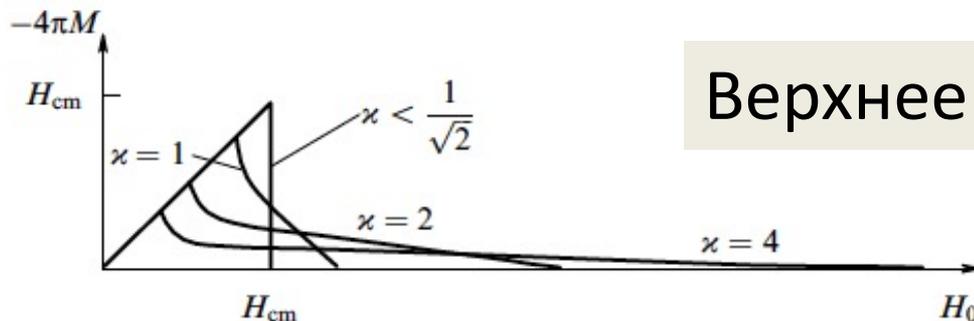
Нижнее критическое поле  $H_{c1}$

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{2} n_s \frac{2e}{c} \int_{\xi}^{\delta} \rho v_s 2\pi\rho \, d\rho = \pi \frac{e\hbar n_s}{mc} \int_{\xi}^{\delta} \rho \, d\rho \\ &\approx \frac{\pi e\hbar n_s}{2mc} \delta^2 \end{aligned}$$

In the presence of a magnetic field  $H$  the vortex acquires a magnetic energy  $-MH$ . The smallest field at which an elementary vortex can appear corresponds to  $\varepsilon_0 - MH = 0$  or

$$H_{c1} \sim \frac{H_{cm}}{\kappa} \ln \kappa.$$

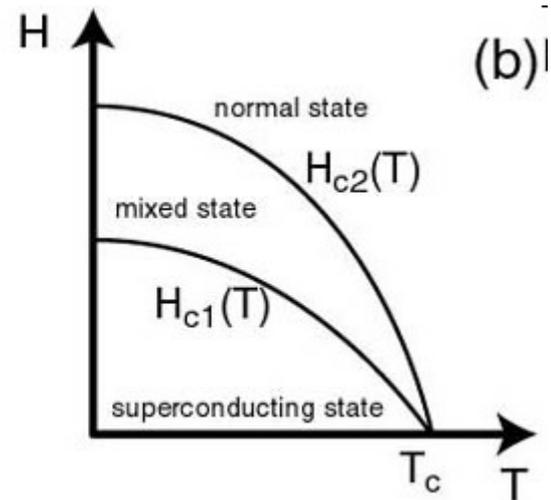
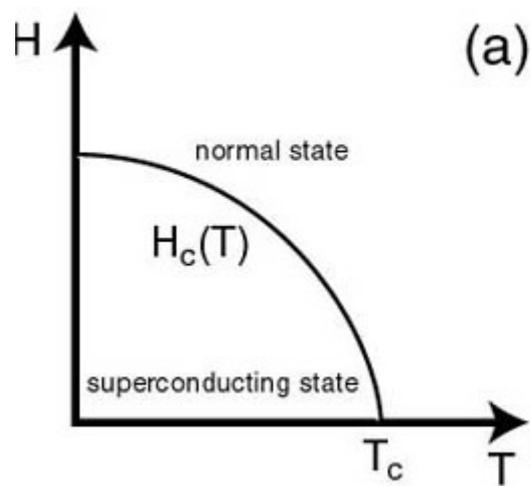
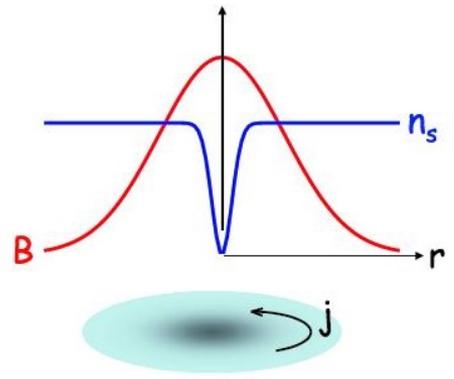
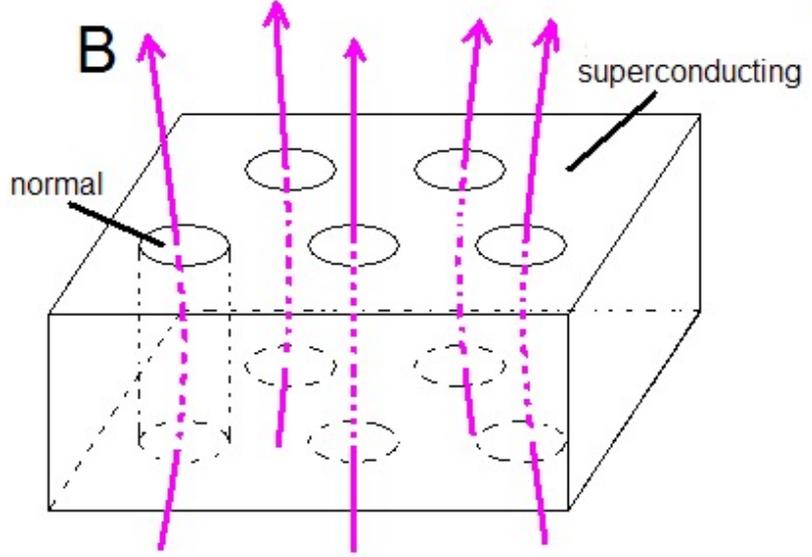
$$r_L \sim \frac{cp_{\perp}}{eH} > \xi.$$



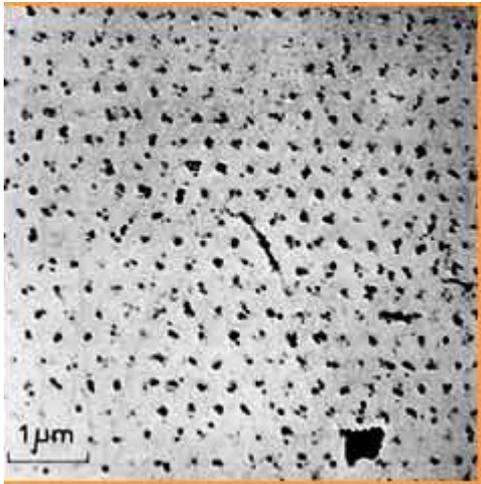
Верхнее критическое поле  $H_{c2}$ :

$$H_{c2} \sim \frac{ch}{e\xi} \frac{\Delta}{\hbar v} \sim H_{cm} \frac{\delta}{\xi} \sim H_{cm} \kappa$$

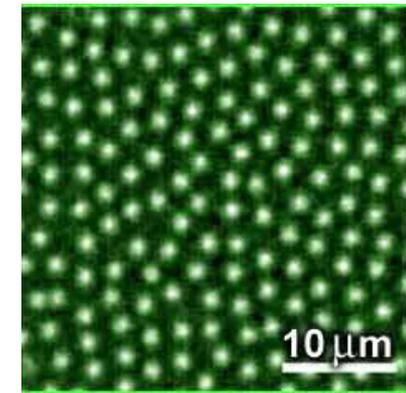
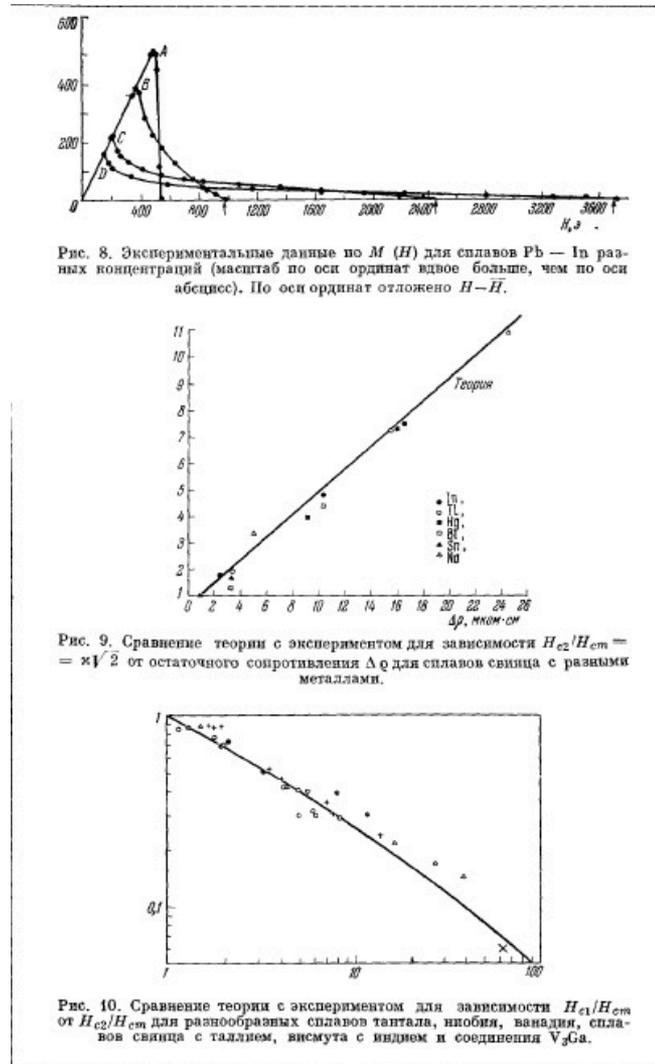
Между этими критическими значениями внешнее магнитное поле в виде тонких нитей магнитного потока, окруженных вихревыми токами, постепенно проникает в сверхпроводник. Эти квантовые вихри образуют регулярную структуру (теперь известную как вихревая решетка Абрикосова).



Работа Абрикосова, без которой сейчас невозможно представить физику и технику сверхпроводимости, появилась в 1957 г., но экспериментаторы поверили в вихревую решетку только через десять лет после непосредственных наблюдений методом магнитного декорирования.



U. Essmann and H. Trauble  
 Max-Planck  
 Institute, Stuttgart  
[Physics Letters](#)  
[24A, 526 \(1967\)](#)



**Magneto-optical  
 image of Vortex  
 lattice, 2001**  
**P.E. Goa et al.**  
**University of Oslo**  
[Supercond. Sci. Technol. 14, 729 \(2001\)](#)



## 1958: Лев Горьков

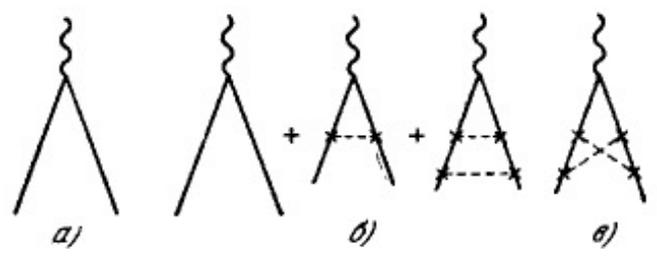
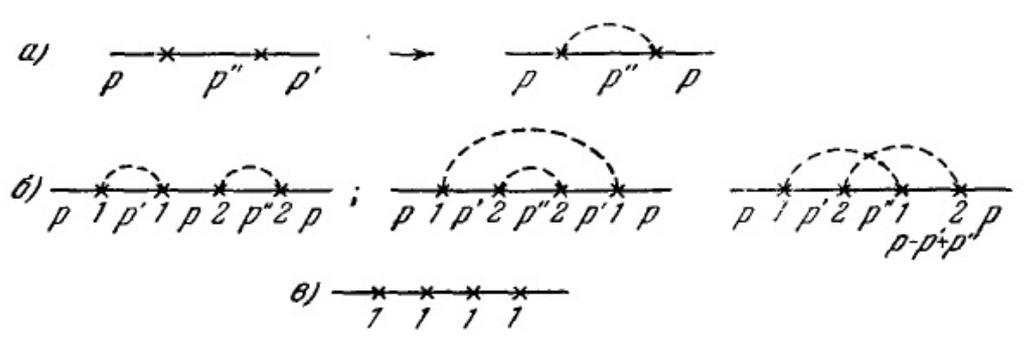
Формулирует элегантные уравнения микроскопической теории сверхпроводимости и демонстрирует эквивалентность микроскопической теории БКШ и феноменологической теории ГЛ в окрестности температуры сверхпроводящего перехода.

$$\begin{pmatrix} \left\{ -\frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{\nabla^2}{2m} + \mu \right\} & \Delta \\ -\Delta^* & \left\{ \frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{\nabla^2}{2m} + \mu \right\} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \mathfrak{G}(x-x') & \mathfrak{F}(x-x') \\ \mathfrak{F}^+(x-x') & -\mathfrak{G}(x'-x) \end{pmatrix} = \mathbf{i}. \quad (34.32)$$

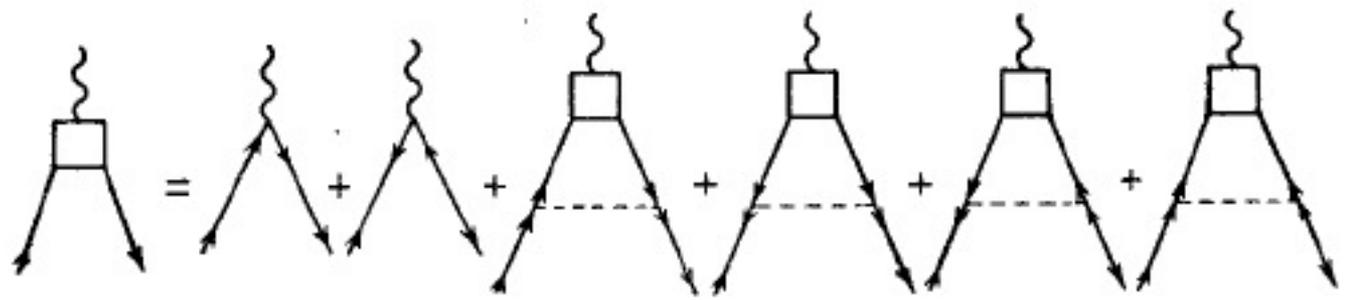
$$\mathfrak{G}_\omega(\mathbf{p}) = -\frac{i\omega + \xi}{\omega^2 + \xi^2 + \Delta^2}, \quad \mathfrak{F}_\omega^+(\mathbf{p}) = \frac{\Delta^*}{\omega^2 + \xi^2 + \Delta^2}.$$

Эти уравнения легли в основу изучения неоднородной сверхпроводимости.

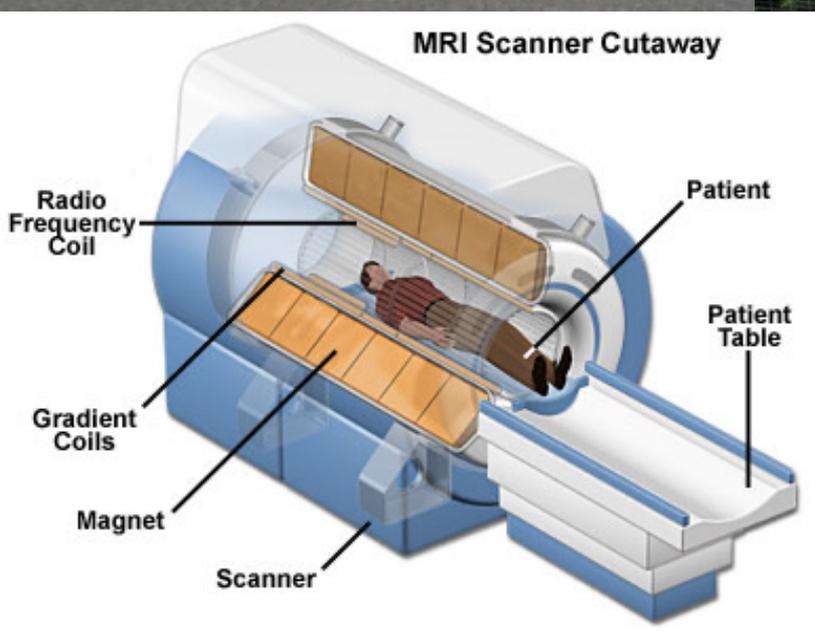
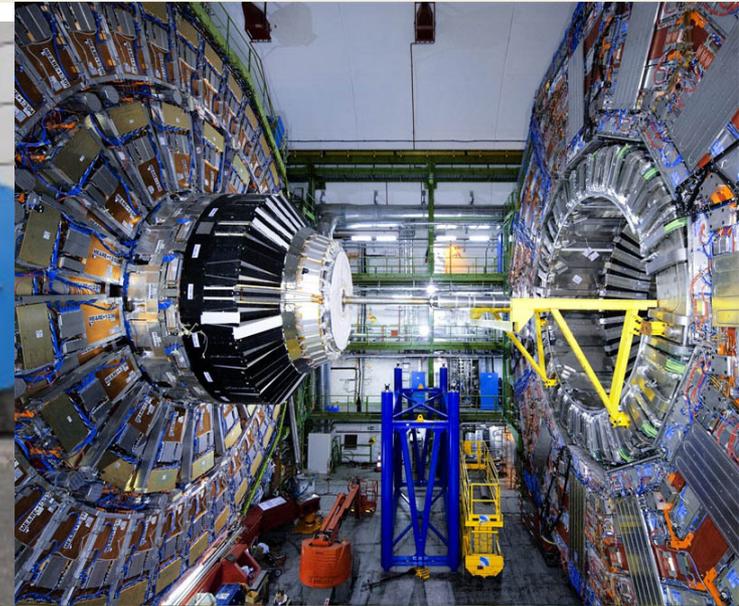
# IV. Абрикосов и Горьков, 1959: разработали диаграммные методы исследования рассеяния электронов на примесях в нормальных металлах и сверхпроводниках.



$$Q = \frac{Ne^2}{m} 2\pi T \Delta^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(\omega^2 + \Delta^2) \left( \sqrt{\omega^2 + \Delta^2} + \frac{1}{2\tau_{tr}} \right)}$$



# Применения сверхпроводников II-го рода

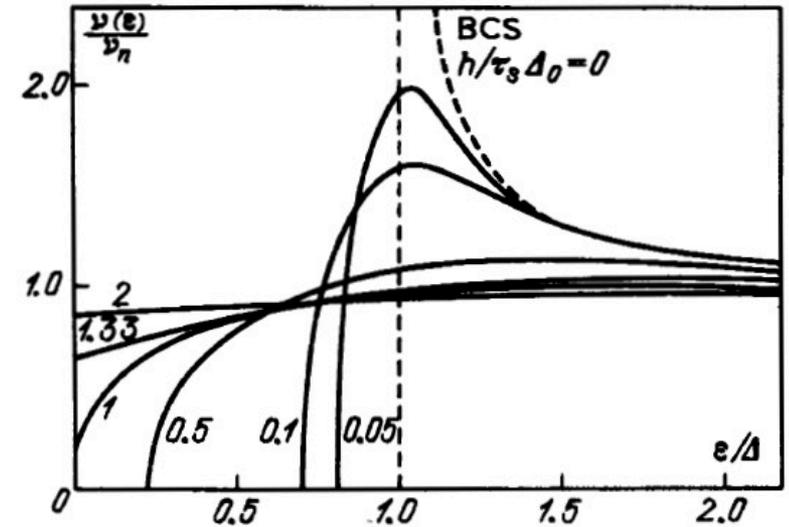


# V. Абрикосов и Горьков: исследовали свойства сверхпроводников с магнитными примесями и открыли явление бесщелевой сверхпроводимости

$$\ln\left(\frac{T_{c0}}{T_c}\right) = \psi\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\rho\right) - \psi\left(\frac{1}{2}\right),$$

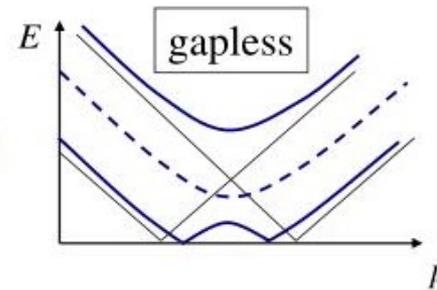
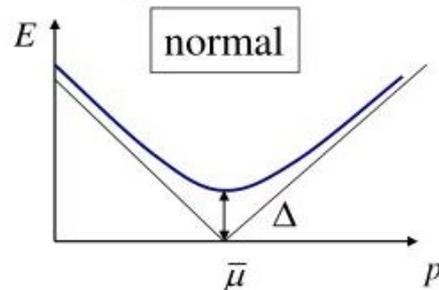
$$\rho = \hbar / (\pi T_c \tau_s)$$

$$0.91 n_{mc} < n_m < n_{mc}.$$



**Щели нет, но сверхток может течь!**

• fermion dispersion:



# VI. Дальнейшие исследования сверхпроводимости в новой микроскопической теории

## A SUPERCONDUCTOR IN A HIGH FREQUENCY FIELD

A. A. ABRIKOSOV, L. P. GOR' KOV, and I. M. KHALATNIKOV

Institute for Physical Problems, Academy of Sciences, U.S.S.R.

Submitted to JETP editor March 4, 1958

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 35, 265-275 (July, 1958)



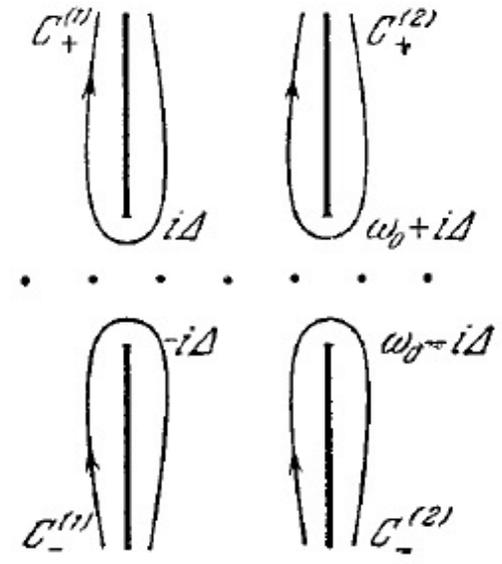
We derive an equation describing the behavior of superconductors in a high frequency field. With the aid of this equation the frequency and temperature dependence of the impedance of a bulk superconductor have been evaluated.

$$j(x) = - \int Q(x-y) A(y) d^4y$$

$$\bar{Q}(k, \omega_0) = \frac{3\pi T}{4} \sum_{\omega'} \int_{-1}^1 (1 - \mu^2) d\mu \times$$

$$\times \left\{ \frac{i(\omega_+ + V\sqrt{\omega_+^2 + \Delta^2}) [i(\omega_- + V\sqrt{\omega_+^2 + \Delta^2}) - v|k|\mu] + \Delta^2}{V\sqrt{\omega_+^2 + \Delta^2} [\omega_-^2 + \Delta^2 + (v|k|\mu - iV\sqrt{\omega_+^2 + \Delta^2})^2]} + \right.$$

$$\left. + \frac{i(\omega_- + V\sqrt{\omega_-^2 + \Delta^2}) [i(\omega_+ + V\sqrt{\omega_-^2 + \Delta^2}) + v|k|\mu] + \Delta^2}{V\sqrt{\omega_-^2 + \Delta^2} [\omega_+^2 + \Delta^2 + (v|k|\mu + iV\sqrt{\omega_-^2 + \Delta^2})^2]} \right\}. \quad (37.24)$$



# А.А. Абрикосов в соавторстве с Л.П. Горьковым объяснили сдвиг Найта в сверхпроводниках

## *SPIN-ORBIT INTERACTION AND THE KNIGHT SHIFT IN SUPERCONDUCTORS*

A. A. ABRIKOSOV and L. P. GOR'KOV

Institute for Physical Problems, Academy of Sciences, U.S.S.R.

Submitted to JETP editor November 4, 1961

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) **42**, 1088-1096 (April, 1962)

A theory of the Knight shift in superconductors is presented. It is shown that the effect can be completely explained if the spin-orbit part of the interaction in the scattering of electrons on the crystal boundaries is taken into account. The agreement between the theory and the experimental data<sup>[8]</sup> is found to be good.



The Knight shift measures the relative shift in NMR frequency due to spin polarization in a magnetic field.

the nuclear spin is acted on by an extra magnetic field:

$$\frac{\chi_s(0)}{\chi_n} \approx \frac{1}{6} \pi^2 \frac{\xi_0}{l_{so}}, \quad \xi_0 \ll l_{so},$$

$$\frac{\chi_s(0)}{\chi_n} \approx 1 - \frac{3}{4} \frac{l_{so}}{\xi_0}, \quad \xi_0 \gg l_{so}$$

$$\Delta H = \frac{8}{3} \pi \chi \frac{|\psi_s(0)|^2}{n} H.$$

# Абрикосов в соавторстве с Л. Фальковским рассчитали интенсивность комбинационного рассеяния света во вновь сформулированной микроскопической теории сверхпроводимости

## *RAMAN SCATTERING OF LIGHT IN SUPERCONDUCTORS*

A. A. ABRIKOSOV and L. A. FAL'KOVSKIĬ

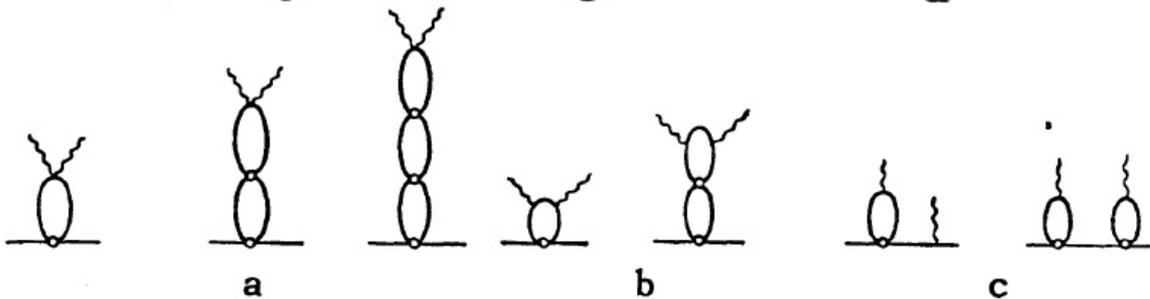
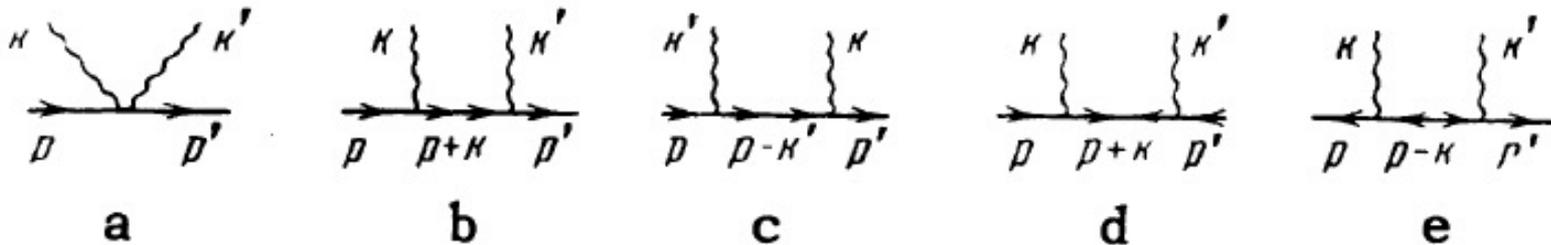
Institute for Physics Problems, Academy of Sciences, U.S.S.R.

Submitted to JETP editor July 25, 1960

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 40, 262-270 (January, 1961)



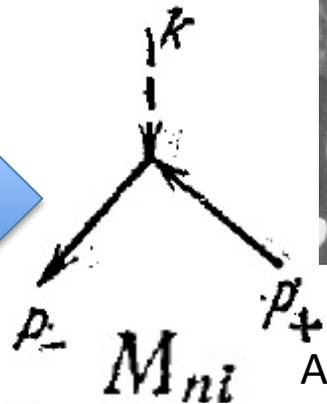
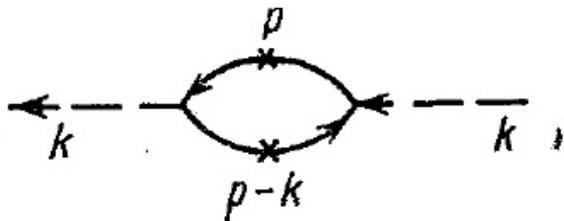
A computation is carried out of Raman scattering upon reflection of light from the surface of a superconductor. The distribution with angle and frequency of the scattered light and the absolute magnitude of the effect are found.



# VII. «Московский ноль» и развитие диаграммной техники

Рассчитаны функции Грина и эффективные сечения рассеяния для эффекта Комптона и взаимного рассеяния электронов и позитронов при высоких энергиях.

Дирак, Фейнман, Швингер



Абрикосов, Халатников, Ландау

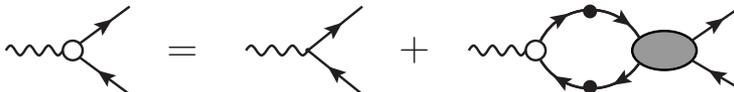
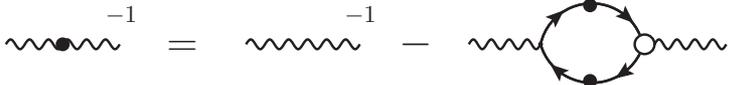
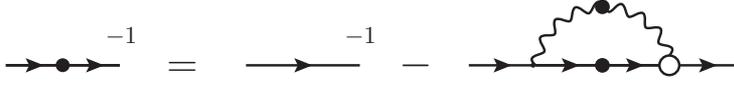
$$\mathcal{P}(k^2) = \frac{\alpha}{3\pi} k^2 \ln \frac{|k^2|}{m^2} \quad \frac{\alpha}{3\pi} \ln \frac{|k^2|}{m^2} \ll 1$$

КЭД страдала от проблем с расходимостью. Была предложена идея размазать заряд электрона в пространстве, но ответы зависели от «радиуса электрона»

# Асимптотическое поведение фотонного пропагатора при больших импульсах

A. A. Abrikosov, I. M. Khalatnikov and L. D. Landau, 1954

$$\mathcal{P}(k^2) = \frac{\alpha}{3\pi} k^2 \ln \frac{|k^2|}{m^2} \quad \text{Справедливо при} \quad \frac{\alpha}{3\pi} \ln \frac{|k^2|}{m^2} \leq 1.$$



Отбор диаграмм  $\alpha^n \ln^n (|k^2|/m^2)$

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{\alpha_0}{3\pi} \ln \frac{\Lambda^2}{m^2}}$$

ЛАХ решили уравнения Швингера-Дайсона

$$\mathcal{D}(k^2) = \frac{4\pi}{k^2} \frac{1}{1 - \frac{\alpha}{3\pi} \ln \frac{|k^2|}{m^2}} \quad \text{QED}$$

ЛАХ : Перенормированный фотонный пропагатор не зависит от размера электронного размытия

$$\mathcal{D}(k^2) = \frac{4\pi}{k^2} \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{3\pi} \ln \frac{|k^2|}{m^2}} \quad \text{QCD}$$

Gross, Wilczek, Politzer, 1973  
Asymptotic freedom

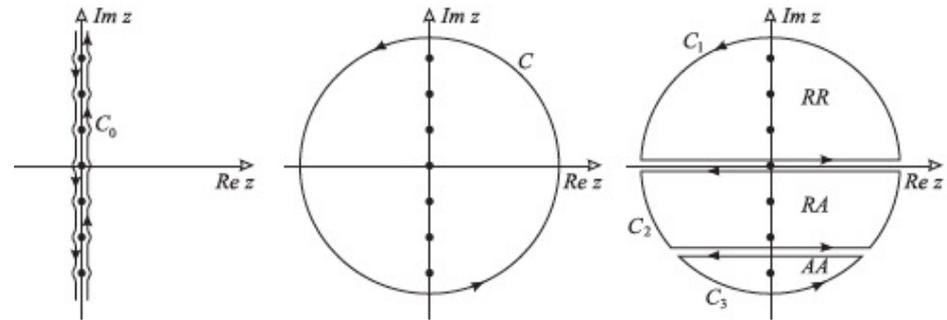
В 1959 г., вслед за работами Мацубары, Мигдала и Галицкого, Абрикосовым совместно с Горьковым и Дзялошинским была разработана новая температурная диаграммная техника. Она была основана на их достижениях в КЭД и некоторых других красивых идеях: методе аналитического продолжения диаграмм Фейнмана с мнимых частот на действительные и т.д.

On the application of quantum-field-theory methods to problems of quantum statistics at finite temperatures, Sov. Phys. JETP 9(3), 636-641 (1959)

$$\tilde{\psi}_\alpha(\mathbf{r}, \tau) = e^{\tau(\hat{H} - \mu\hat{N})} \psi_\alpha(\mathbf{r}) e^{-\tau(\hat{H} - \mu\hat{N})},$$

$$\tilde{\bar{\psi}}_\alpha(\mathbf{r}, \tau) = e^{\tau(\hat{H} - \mu\hat{N})} \psi_\alpha^\dagger(\mathbf{r}) e^{-\tau(\hat{H} - \mu\hat{N})},$$

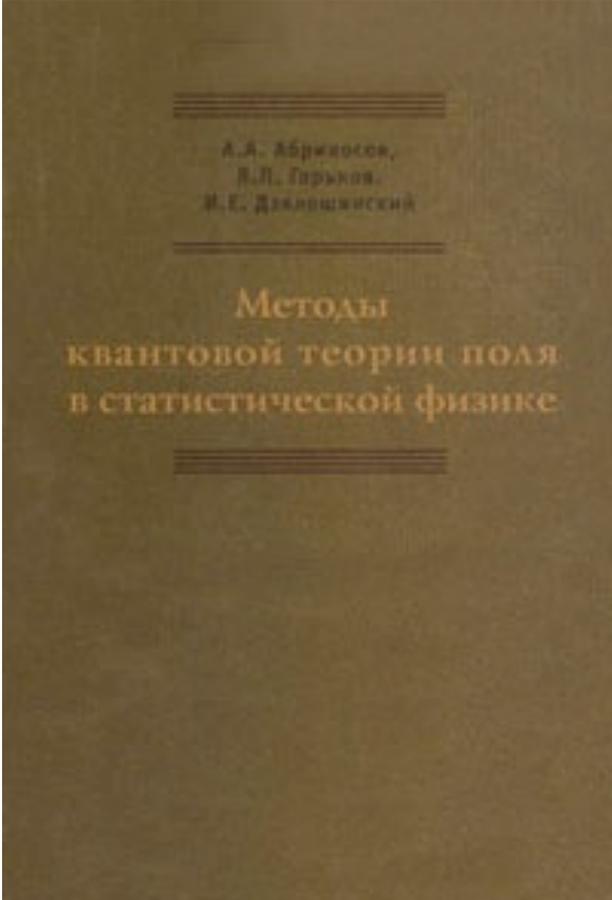
$$\tilde{\varphi}(\mathbf{r}, \tau) = e^{\tau\hat{H}} \varphi(\mathbf{r}) e^{-\tau\hat{H}}.$$



$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{\alpha\beta}(\mathbf{r}_1, \tau_1; \mathbf{r}_2, \tau_2) &= -\text{Sp} \left\{ e^{\frac{\Omega + \mu\hat{N} - \hat{H}}{T}} T_\tau(\tilde{\psi}_\alpha(\mathbf{r}_1, \tau_1) \tilde{\bar{\psi}}_\beta(\mathbf{r}_2, \tau_2)) \right\} \\ &\equiv -\langle T_\tau(\tilde{\psi}_\alpha(\mathbf{r}_1, \tau_1) \tilde{\bar{\psi}}_\beta(\mathbf{r}_2, \tau_2)) \rangle. \quad (11). \end{aligned}$$

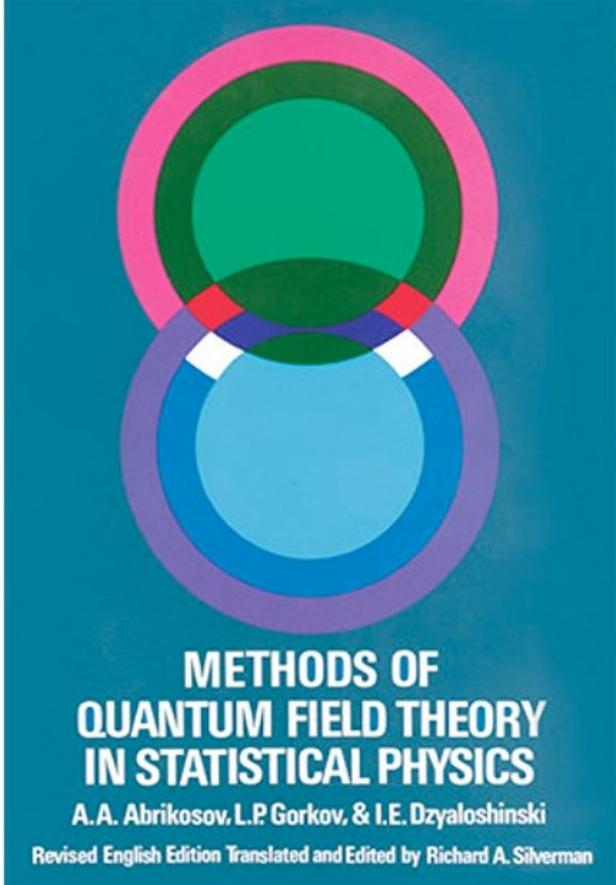
VIII. А.А. Абрикосов, Л.П. Горьков, И.Е. Дзялошинский, 1961 г.:  
**«Методы квантовой теории поля в статистической физике».**

Эта книга стала настольной книгой для физиков-теоретиков во многих странах, где она была переведена и издана.



А.А. Абрикосов,  
Л.П. Горьков,  
И.Е. Дзялошинский

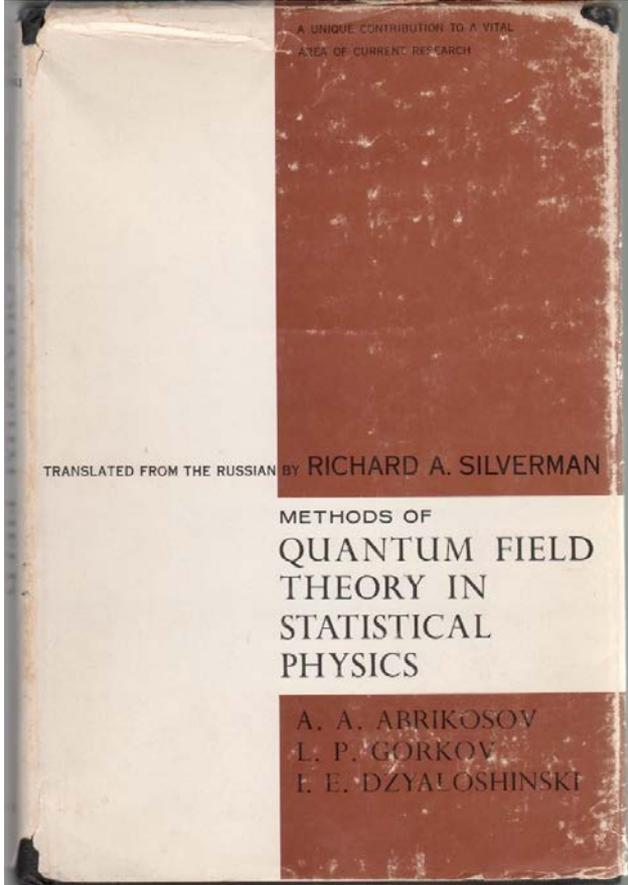
Методы  
квантовой теории поля  
в статистической физике



**METHODS OF  
QUANTUM FIELD THEORY  
IN STATISTICAL PHYSICS**

A.A. Abrikosov, L.P. Gorkov, & I.E. Dzyaloshinski

Revised English Edition Translated and Edited by Richard A. Silverman



TRANSLATED FROM THE RUSSIAN BY RICHARD A. SILVERMAN

A UNIQUE CONTRIBUTION TO A VITAL  
AREA OF CURRENT RESEARCH

METHODS OF  
QUANTUM FIELD  
THEORY IN  
STATISTICAL  
PHYSICS

A. A. ABRIKOSOV  
L. P. GORKOV  
I. E. DZYALOSHINSKI

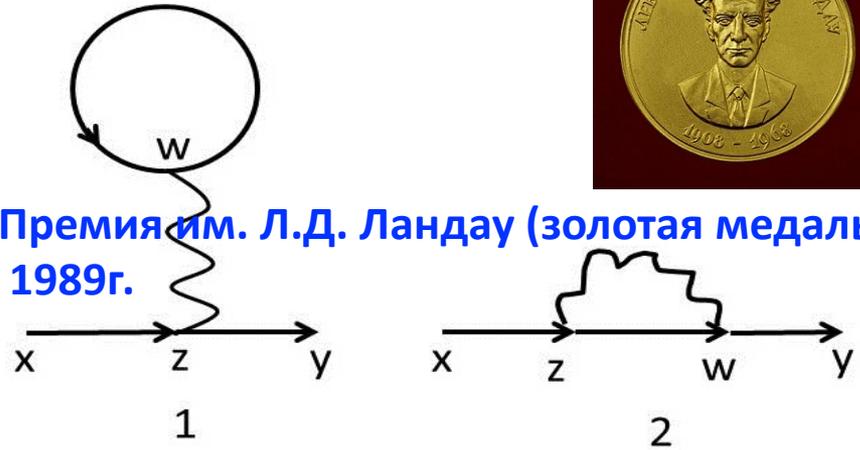
С 1964г. А.А. Абрикосов (36 лет) –  
член-корреспондент АН СССР  
Сооснователь Института теоретической  
физики им. Ландау АН СССР 1964г.  
Ленинская премия 1966г.



<http://ermcomp.chat.ru/>

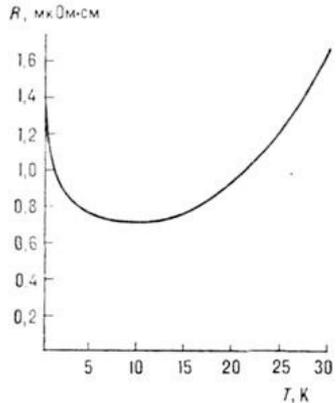


Премия им. Л.Д. Ландау (золотая медаль)  
1989г.

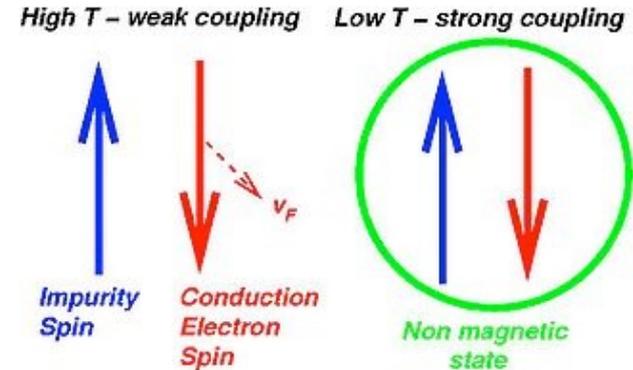


# IX. Эффект Кондо: резонанс Абрикосова-Сула

В 1960-е годы научные интересы Абрикосова сместились в сторону теории нормальных металлов, полуметаллов и полупроводников. Он занимался проблемой Кондо и обнаружил, что в зависимости от знака обменного взаимодействия эффективное рассеяние либо исчезает, либо сильно возрастает.



Резонанс Кондо формируется за счет когерентного многочастичного взаимодействия между электронами проводимости и локализованными магнитными моментами. Это признак формирования когерентного многочастичного состояния.



The Abrikosov pseudo-fermion representation for spin operators with spin  $S = 1/2$  is given by

$$\mathbf{S}_i = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} c_{i\uparrow}^\dagger & c_{i\downarrow}^\dagger \end{pmatrix} \boldsymbol{\sigma} \begin{pmatrix} c_{i\uparrow} \\ c_{i\downarrow} \end{pmatrix}, \quad c_{i\uparrow}^\dagger c_{i\uparrow} + c_{i\downarrow}^\dagger c_{i\downarrow} = 1,$$

where the operators  $c_{i\sigma}$  and  $c_{i\sigma}^\dagger$  are fermionic operators obeying the usual fermionic anticommutation relations, and  $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma^x, \sigma^y, \sigma^z)$  is the vector of the Pauli matrices



# XI. Полуметаллы и бесщелевые полупроводники.

## Прототип будущих дираковских материалов

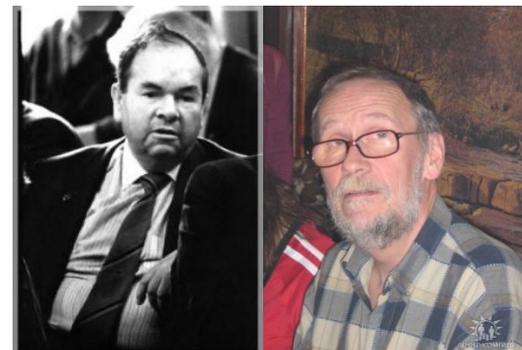
### *POSSIBLE EXISTENCE OF SUBSTANCES INTERMEDIATE BETWEEN METALS AND DIELECTRICS*

A. A. ABRIKOSOV and S. D. BENESLAVSKIĪ

L. D. Landau Institute of Theoretical Physics

Submitted April 13, 1970

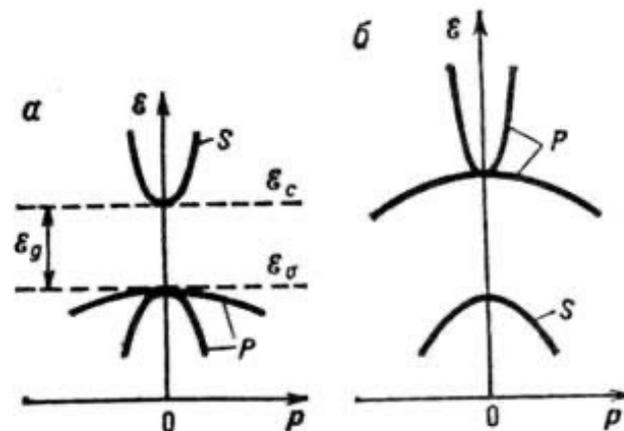
Zh. Eksp. Teor. Fiz. 59, 1280—1298 (October, 1970)



The question of the possible existence of substances having an electron spectrum without any energy gap and, at the same time, not possessing a Fermi surface is investigated. First of all the question of the possibility of contact of the conduction band and the valence band at a single point is investigated within the framework of the one-electron problem. It is shown that the symmetry conditions for the crystal admit of such a possibility. A complete investigation is carried out for points in reciprocal lattice space with a little group which is equivalent to a point group, and an example of a more complicated little group is considered. It is shown that in the neighborhood of the point of contact the spectrum may be linear as well as quadratic.



The types of symmetry allowing a gapless spectrum were found, the spectrum of carriers and its behavior under pressure were analyzed. This work is especially topical today in connection with the discovery of graphene and the related prospects of the development of nanoelectronics.



# Отображение задачи бесщелевого полупроводника на теорию фазовых переходов второго рода

## Calculation of critical indices for zero-gap semiconductors

A. A. Abrikosov

*L. D. Landau Theoretical Physics Institute, USSR Academy of Sciences*

(Submitted November 19, 1973)

Zh. Eksp. Teor. Fiz. **66**, 1443–1460 (April 1974)

The indices defining the exponents in the power laws in the Green functions and physical characteristics of zero-gap semiconductors of the second kind in the strong-coupling region (i.e., the region of energies  $\omega \ll \omega_0$ , where  $\omega_0 = m^* e^4 / 2\kappa_0^2$  is the exciton binding energy, and momenta  $k \ll k_0$ , where  $k_0 = m^* e^2 / \kappa_0$  is the inverse Bohr radius of the exciton) are calculated. Two methods are applied: expansion in  $\epsilon = 4 - d$  ( $d$  is the dimensionality of space) and expansion in the “large number of components,” i.e., in  $1/\Pi$ , where  $\Pi$  is the polarization operator. In the first approximation the two procedures give results that are numerically slightly different but qualitatively similar. It follows from the results that there are several energy and momentum regions: (1) the “free region,” (2) the region  $\omega_1 < \omega < \omega_0$ ,  $k_1 < k < k_0$  ( $\omega_1 \sim 2.5 \times 10^{-4} \omega_0$ ,  $k_1 \sim 1.6 \times 10^{-2} k_0$ ), in which the “random-phase approximation” is applicable, i.e., the interaction of the carriers is altered but their spectrum is conserved, and (3) the true strong-coupling region  $\omega < \omega_1$ ,  $k < k_1$ . In the regions (2) and (3) the results of Abrikosov and Beneslavskii are applicable, with  $\alpha = \nu = 2$  in region (2) and  $\alpha = 1.76$ ,  $\nu = 1.92$  in region (3).

## Excitonic instability of three-dimensional gapless semiconductors: Large-N theory

Lukas Janssen and Igor F. Herbut

Phys. Rev. B **93**, 165109 – Published 6 April 2016

In the limit of large  $N$ , Abrikosov and Beneslavskii found a scale-invariant semimetallic ground state with anomalous power laws—a 3D non-Fermi-liquid phase [8]. Recently, their analysis has been rediscovered and extended in the context of the pyrochlore iridates [7].

# Советские физики в отпуске: поход в тайгу(1970)



Юрий Гальперин

Вадим Гуревич

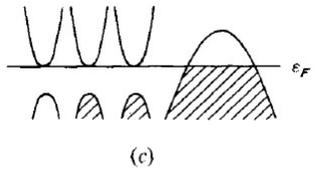
Алексей Абрикосов

# XII. Переход полуметалла типа висмута в ЭКСИТОННЫЙ ИЗОЛЯТОР В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Transition of a bismuth-type semimetal to an excitonic insulator in a strong magnetic field

A. A. Abrikosov, [Journal of Low Temperature Physics](#)

January 1973, Volume 10, [Issue 1-2](#), pp 3-34



$$G = \frac{1}{3} \left\{ \frac{(i\bar{\omega}_2 + \xi_h)}{[(i\bar{\omega}_1 - \xi_e)(i\bar{\omega}_2 + \xi_h) - 3|\bar{\Delta}_1|^2]} \right\} + \frac{2}{3} \frac{1}{i\bar{\omega}'_1 - \xi_e},$$

$$D = \frac{1}{3} \left\{ \frac{(i\bar{\omega}_2 + \xi_h)}{[(i\bar{\omega}_1 - \xi_e)(i\bar{\omega}_2 + \xi_h) - 3|\bar{\Delta}_1|^2]} \right\} - \frac{1}{3} \frac{1}{i\bar{\omega}'_1 - \xi_e},$$

$$\mathcal{L}(-\omega) = - \frac{(i\bar{\omega}_1 - \xi_e)}{[(i\bar{\omega}_1 - \xi_e)(i\bar{\omega}_2 + \xi_h) - 3|\bar{\Delta}_1|^2]},$$

$$F^+(\omega) = \frac{\bar{\Delta}_1^*}{[(i\bar{\omega}_1 - \xi_e)(i\bar{\omega}_2 + \xi_h) - 3|\bar{\Delta}_1|^2]} = -F(-\omega) \frac{\bar{\Delta}_1^*}{\bar{\Delta}_1},$$



Investigation of the Excitonic Insulator Phase in Bismuth-Antimony Alloys

N. B. Brandt and S. M. Chudinov

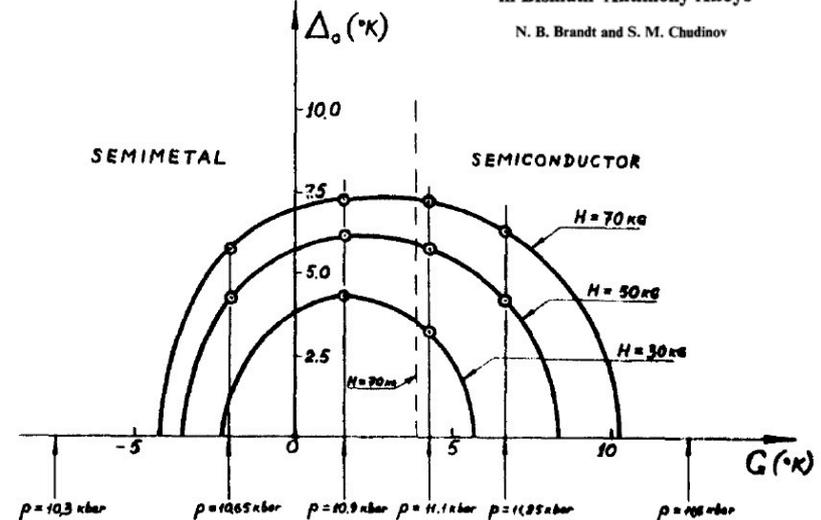


Fig. 10. Schematic diagram of the exciton insulator gap  $\Delta_0$  for various values of the magnetic field  $H$  vs. the "overlap-gap"  $G$  at  $H = 0$  in the unrearranged spectrum of the alloy  $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.049}$  ( $T = 2.0$  K). The circles indicate the values of  $\Delta_0$  calculated for  $p = 10.65, 10.9, 11.1, 11.3$  and  $11.3$  kbar. The dashed line corresponds to the metal-semiconductor transition ( $G = 0$ ) in the unrearranged system at  $H = 70$  kOe.



# XIII. Вклад в физику квазиодномерных систем

В 1970–1980-х годах Абрикосов строит оригинальный метод расчета проводимости квазиодномерного металла, позволяющий учитывать перескоки электронов между нитями и рассеяние электронов на фононах и примесях.

## Electrical properties of one-dimensional metals

A. A. Abrikosov and I. A. Ryzhkin

Instead of the interaction with the impurities we introduce random fields<sup>1)</sup>  $\eta(z)$  and  $\zeta(z)$ . The interaction with the field  $\eta(z)$  leaves an electron in the vicinity of  $p_0$  if it was there, i. e., this interaction is diagonal in the indices 1 and 2. We can assume this interaction to be real and to have the following properties:



$$\langle \eta(z) \rangle = 0, \quad \langle \eta(z) \eta(z') \rangle = \delta(z - z') v / \tau_1.$$

(5) A diagram showing a semi-circular arc drawn above a horizontal line. The horizontal line has five small 'x' marks along it, representing discrete sites or points in a lattice. The arc connects the first and fifth marks, with intermediate marks also under the curve.

The second field  $\zeta$  transfers an electron from the vicinity of  $p_0$  to the vicinity of  $-p_0$ . This field must be assumed to be complex

$$\langle \zeta(z) \zeta^*(z') \rangle = \delta(z - z') v / \tau_2, \quad \langle \zeta \rangle = 0,$$

as a “quantum” of such a field can be “emitted” only in the transition  $1 \rightarrow 2$  a

$$\langle \zeta(z) \zeta(z') \rangle = 0.$$

# XIV. Спиновые стекла с немагнитными примесями

В 1976-1980 гг., А.А. Абрикосов предложил точно решаемую (в пределе низких температур) перколяционную модель спиновых стекол с немагнитными примесями. Аппарат теории протекания (перколяций), ранее использовавшийся в теории прыжковой проводимости полупроводников (Эфрос, Шкловский 1975), был применен к случайному обменному взаимодействию спинов примесей магнитных атомов в немагнитной матрице с другими дефектами решетки.

## **Spin-Glass with Nonmagnetic Defects**

**A. A. Abrikosov and S. I. Moukhin**



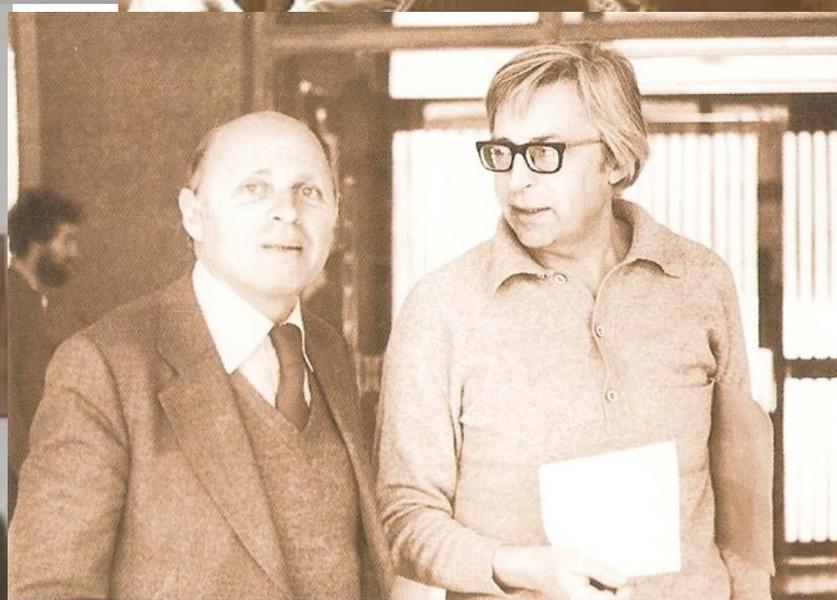
Представлена теория спиновых стекол, для которых выполняется условие  $n_m^{1/3}l \ll 1$ ,  $l$  - радиус взаимодействия между спинами и  $n_m$  - объемная концентрация спинов. Термодинамические и кинетические характеристики таких систем рассчитаны в области высоких и низких температур. Особое внимание уделяется переходной области; для её анализа применяются методы теории протекания. Построена теория нескольких типов одномерных спиновых стекол. Выведено «кинетическое» уравнение для функции распределения кластеров в переходной области и изучено поведение этой функции.

$$H_{12} = -\left(\frac{J}{n}\right)^2 (\mathbf{S}_1 \mathbf{S}_2) \frac{\rho_0 m \cos 2p_0 r}{4\pi^3 r^3} e^{-r/l}$$

XV. Абрикосов вел активную научную, организационную и учебную работу в Институте теоретической физики им. Л.Д. Ландау, будучи одним из основателей этого института, 1965г.



А.Б. Мигдал



А.А. Абрикосов

И.Е. Дзялошинский

И.М. Халатников

Л.П. Горьков

XVI. С 1976 по 1991 гг Абрикосов заведовал кафедрой теоретической физики Московского института стали и сплавов (МИСиС).



**2021: 60 лет кафедре  
Теоретической физики  
МИСиС**

**Заведующие:**

**(1961) Борис Финкельштейн  
(основатель)**

**(1962) Абба Кадышевич**

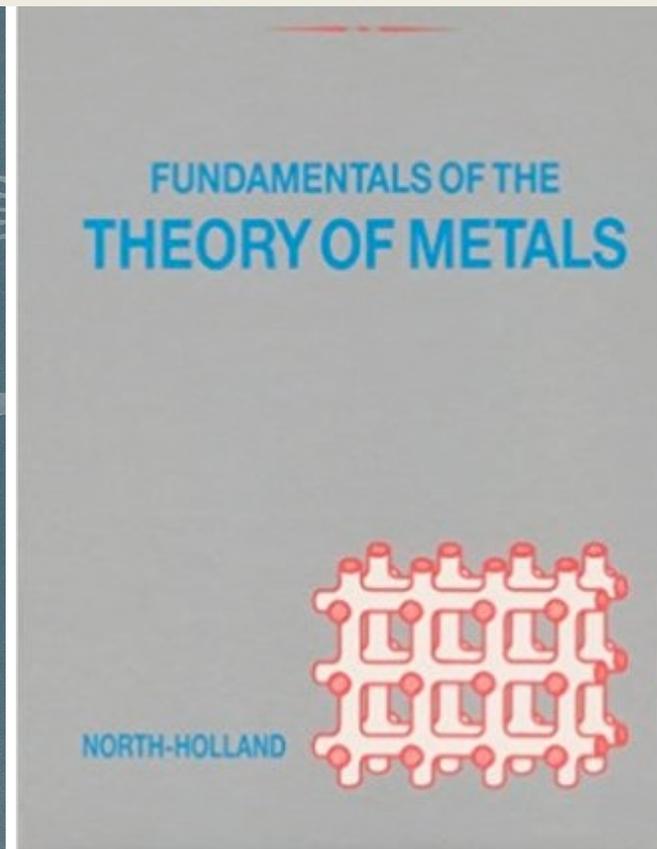
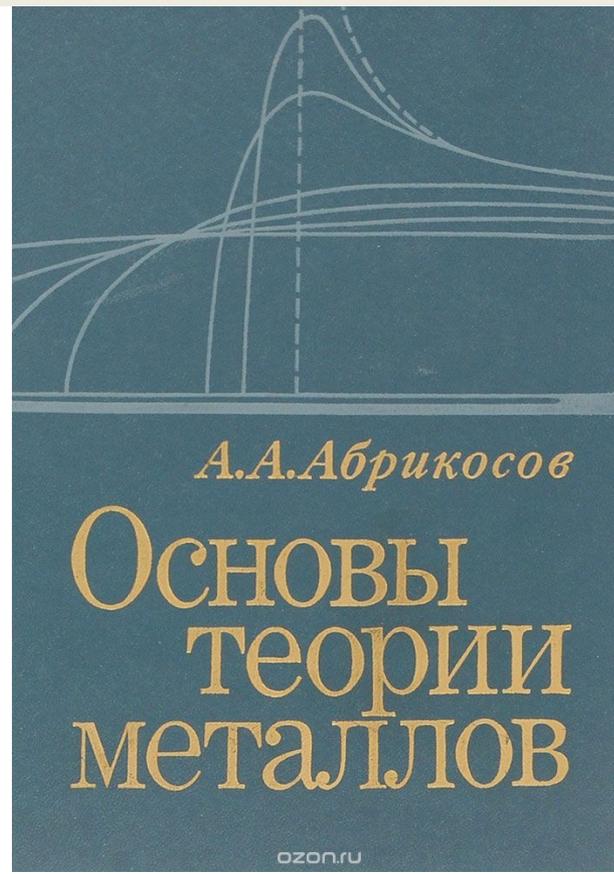
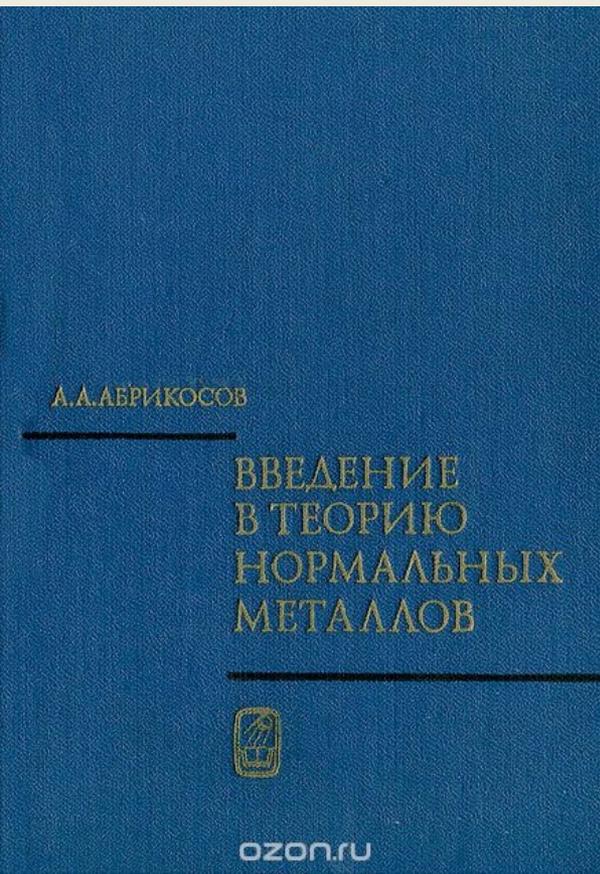
**(1976) Алексей Абрикосов**

**(1991) Юрий Векилов**

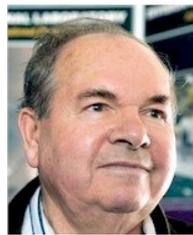
**(2009) Сергей Мухин**



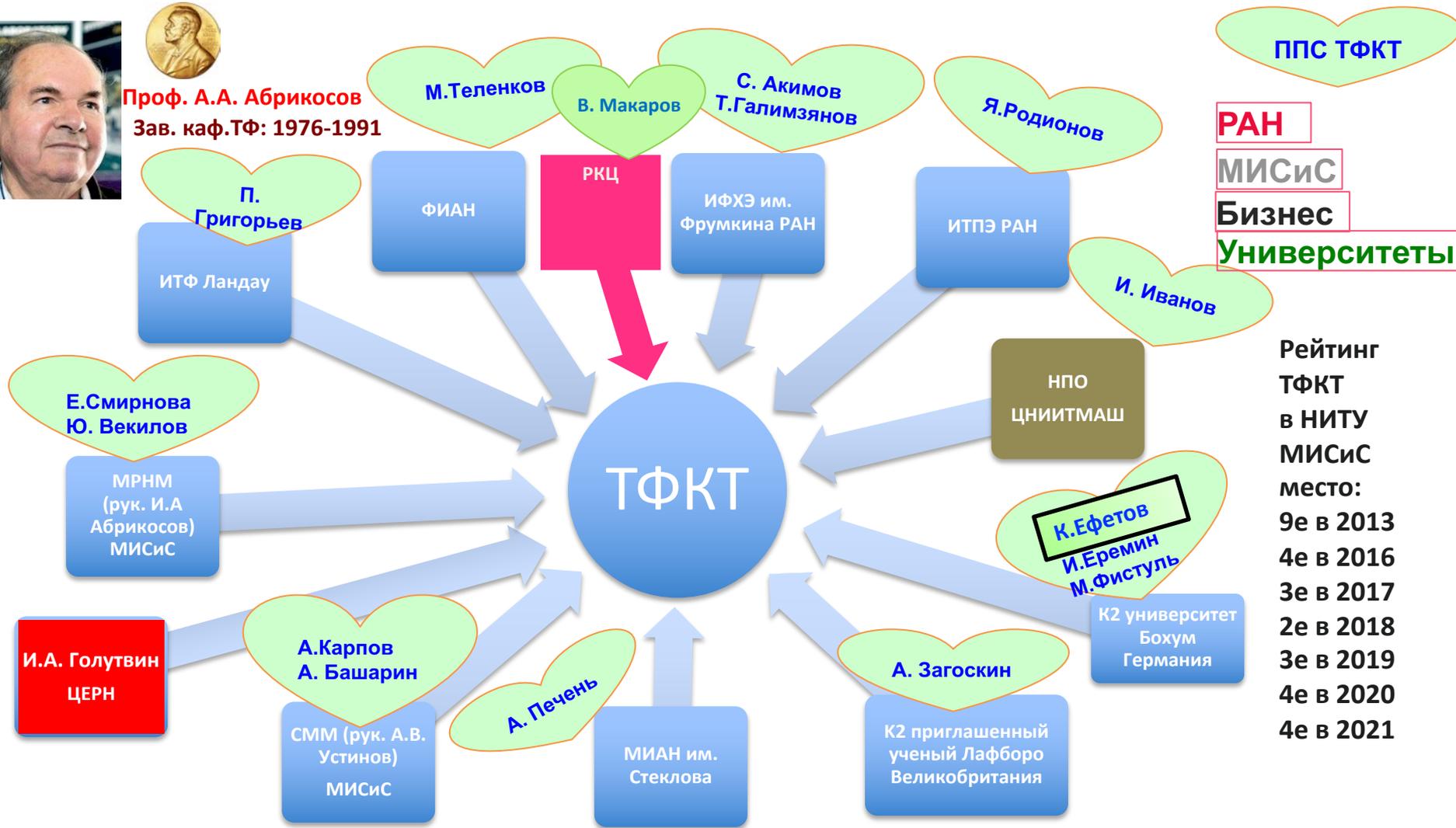
XVII. В 1987 году Абрикосов издал книгу «Основы теории металлов», в основу которой легли его блестящие курсы лекций, прочитанных в Московском физико-техническом институте (МФТИ) и Московском институте стали и сплавов (МИСиС). Эта книга стала энциклопедией электронной теории нормальных металлов и сверхпроводников.



## Взаимодействие науки и образования на кафедре



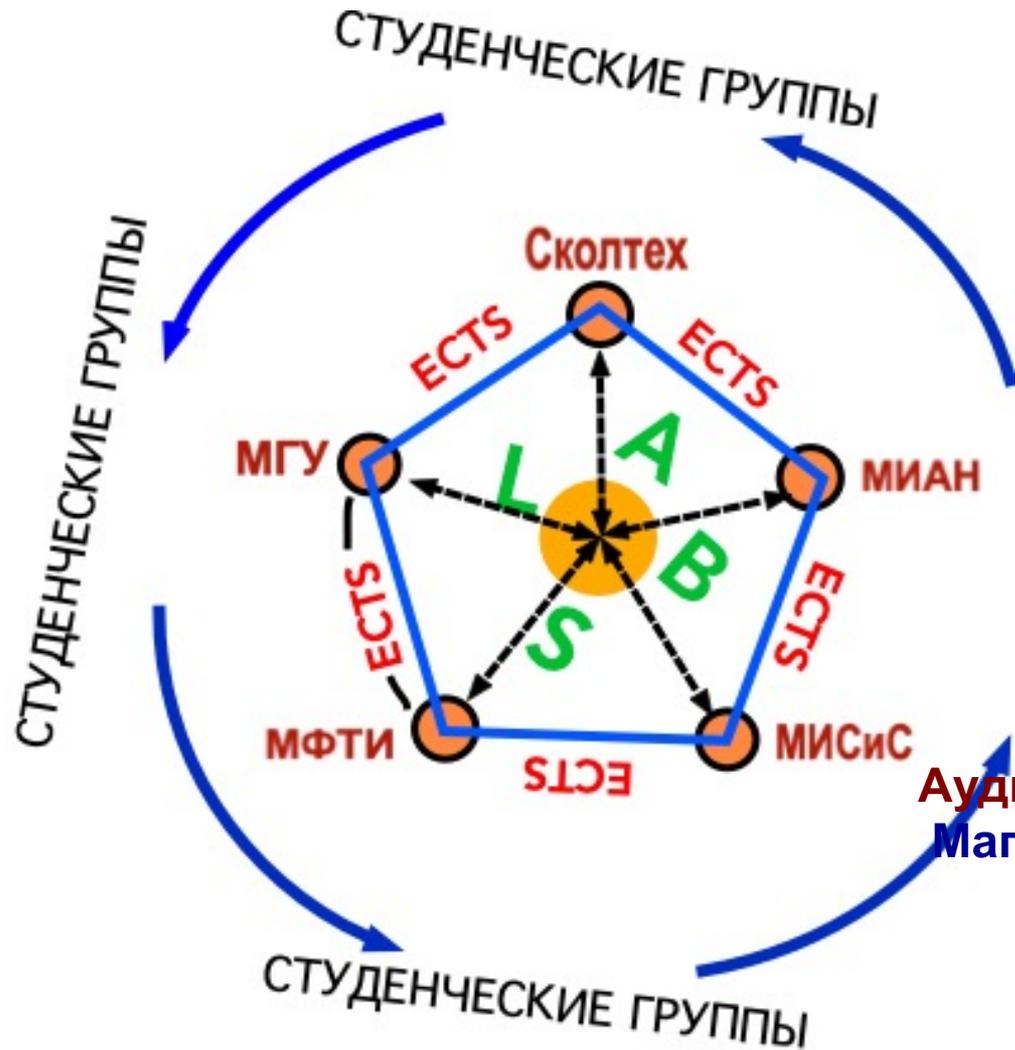
**Проф. А.А. Абрикосов**  
Зав. каф.ТФ: 1976-1991



Выпускники магистратуры кафедры ТФКТ защитили кандидатские диссертации в МИСиС и получили позиции постдоков в Германии: Институт Макса Планка, Дрезден - П.И. Карпов; Университете Карлсруэ - Н.А. Малеева; в РФ : Лаб. Криоэлектронных систем МИСиС – С.С. Сеидов; Газпромбанк – М.А. Ионцев, в Дании, Швеции и Австралии

# Кафедра теоретической физики и квантовых технологий НИТУ «МИСиС»: XXI век

## Аудитория академических программ и СЕТЕВОЕ ОБРАЗОВАНИЕ



### Организации-партнеры

#### Лаборатории МИСиС:

- Сверхпроводящие метаматериалы (А. Устинов)
- Моделирование и разработка новых материалов (И. Абрикосов)

#### Лаборатории в РКЦ:

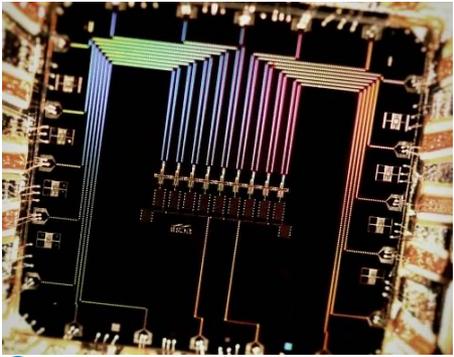
- Квантовые коммуникации (Ю. Курочкин)
- Квантовая оптика (А. Львовский)
- Квантовый взлом (В. Макаров)

#### НОЦ МИАН им. Стеклова :

- Теория в квантовой криптографии (А. Печень, Д. Кронберг)

Аудитория академических программ:  
Магистранты консорциума вузов

Квантовый компьютер



Сверхпроводниковые кубиты



Квантовая криптография и интернет

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad NOT = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

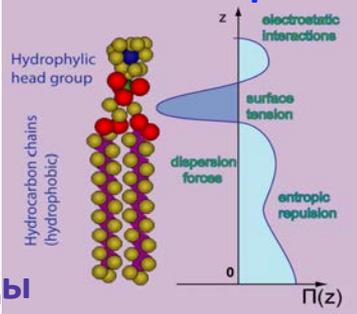
Программирование квантовых машин

$$CNOT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

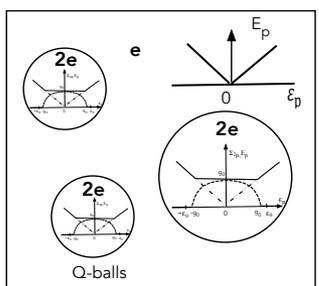


Физика липидных биомембран

Резонансные туннельные p-i-n терагерцовые переходы



Q-шаровой механизм ВТСП



Промышленный интернет вещей (IoT)

# Абрикосов с учениками (А. Цвелик, 1978)



## Абрикосова всегда окружали коллеги и ученики



Дмитрий Ливанов, министр Науки и  
Образования РФ, выпускник кафедры  
теоретической физики МИСиС, визит к А.А.  
Абрикосову, 2013г.

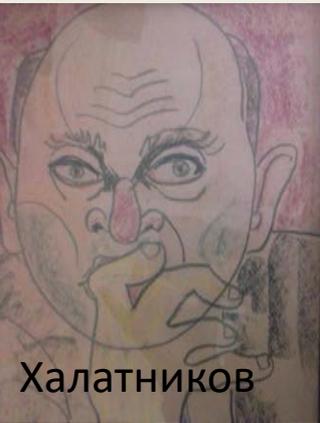


С.И. Мухин, зав. кафедрой ТФКТ, в  
гостях у А.А. Абрикосова в 2010г.



А.А. Варламов, проф. кафедры ТФ, в  
рабочий полдень в Аргонне 1993 г.

# XVII. Одесские симпозиумы по теоретической физике Института теоретической физики им. Ландау, организуемые Абрикосовым и Халатниковым с 1961 г. до конца 80-х гг.



Халатников



Абрикосов



Одесса, Аркадия

Всем, кому доводилось встречаться с Абрикосовым, работать с ним, участвовать в организуемых им регулярных симпозиумах по теоретической физике, помнит его эрудицию и принципиальность, дар рассказчика.



Лёня Фальковский



Лев Асламазов

# Школа Абрикосова и Хайкина, "Физика Металлов", Казань, 1976



на сайте <http://rustik68.narod.ru>

Казань. Библиотека имени В.И.Ленина, о.м.Тонкина

# Школа Абрикосова и Хайкина, "Физика Металлов", Таджикистан, 1987



М. Гершензон . Р. Шехтер, Б. Альтшулер,  
А. Варламов, В. Шатерник, А. Шпигель

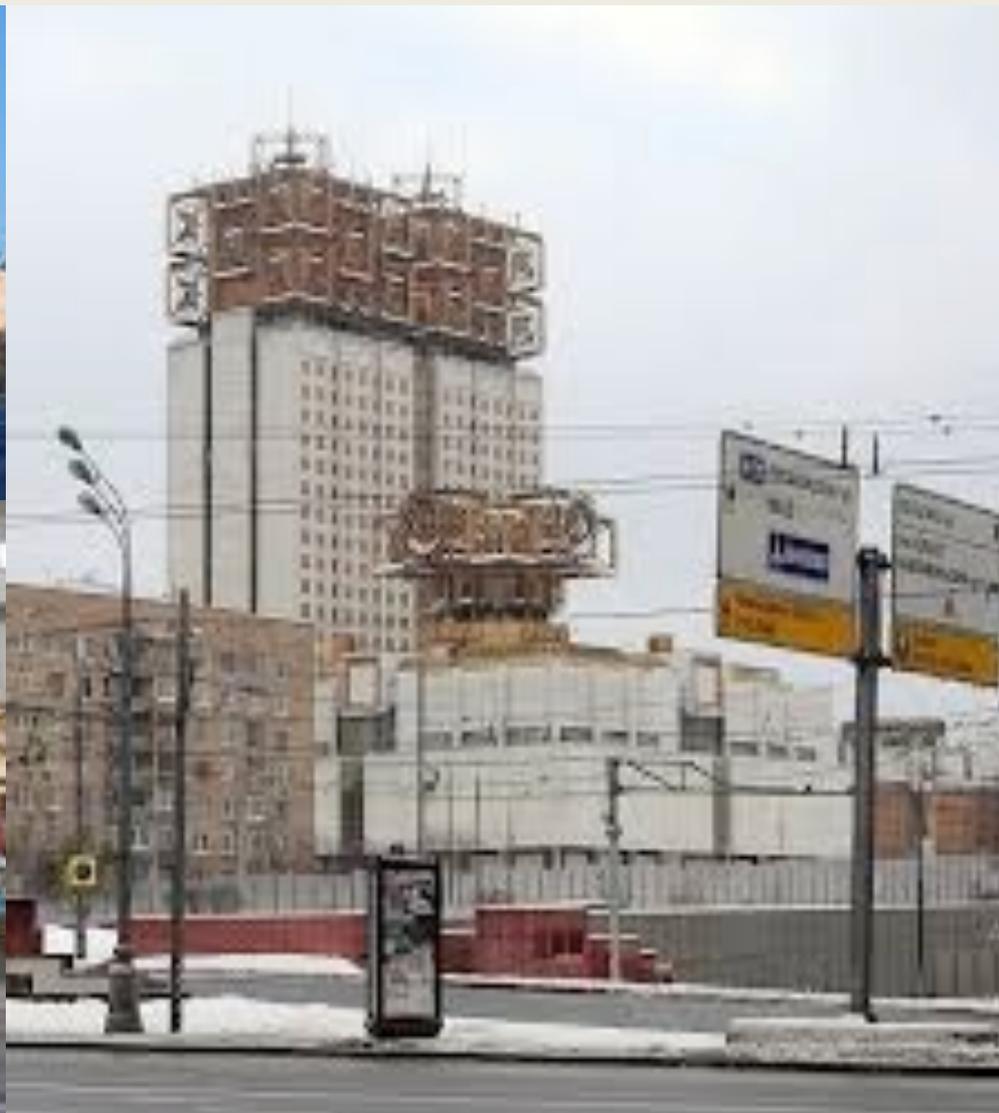


# XIII-я Школа ИТФ им. Ландау, Одесса, 1989

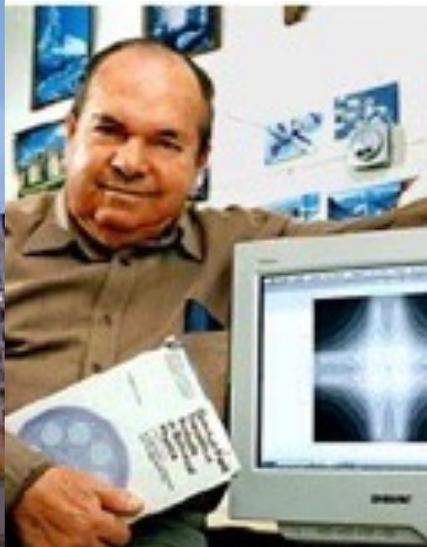


Ю. Векилов, М. Фистуль,  
А. Абрикосов, С. Мухин

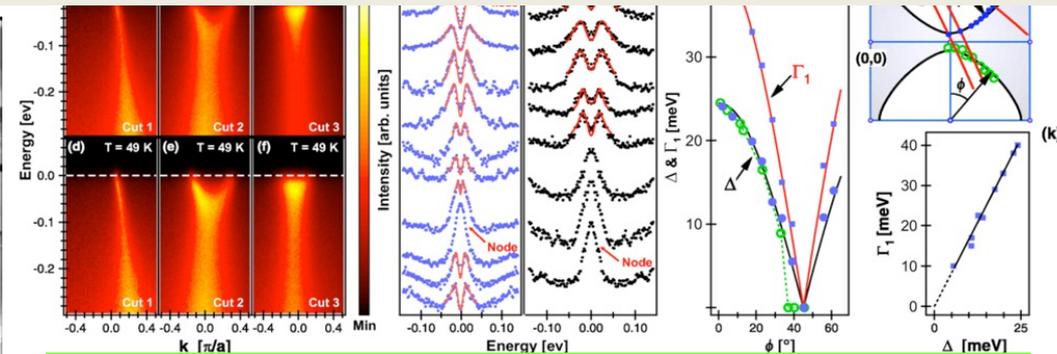
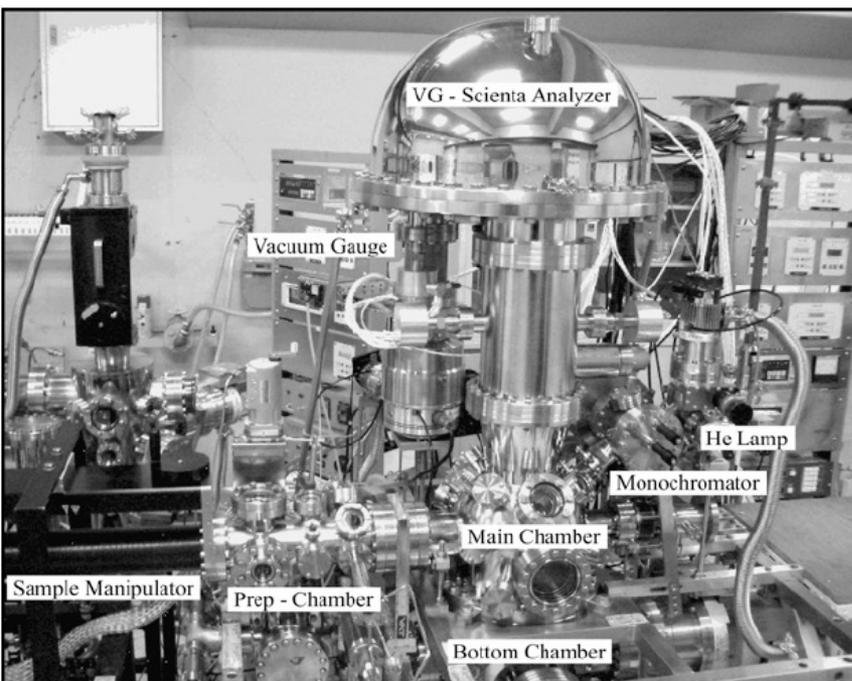
# Академии наук СССР. С 1988 по 1991 – директор Института физики высоких давлений РАН



XIX. В начале 1990-х Абрикосов принял предложение возглавить теоретическую группу в Аргоннской национальной лаборатории в США.



XX. Наиболее интригующей проблемой физики конденсированного состояния в те времена было объяснение явления высокотемпературной сверхпроводимости, и Абрикосов в тесном контакте с экспериментаторами лаборатории посвятил себя исследованиям в этой области. Они выявили наличие специфической особенности в спектре купратных сверхпроводников, после чего Абрикосов предложил свой вариант теории высокотемпературной сверхпроводимости, объяснявшей многообразие имевшихся на то время экспериментальных данных.



## Основные составляющие Абрикосовской теории ВТСП

- Природа БКШ
- Квази-двумерность
- Особенность Ван Хова
- Резонансное туннелирование вдоль оси c

# Последнее предвидение... Quantum magnetoresistance

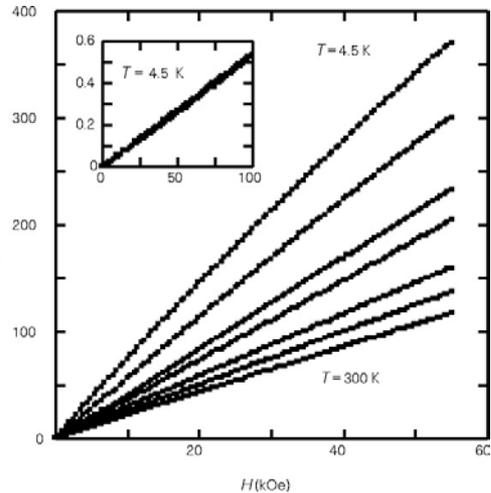


A. A. Abrikosov

Materials Science Division, Argonne National Laboratory, 9700 South Cass Avenue, Argonne, Illinois 60439

(Received 26 September 1997; revised manuscript received 9 March 1998)

An explanation is proposed of the unusual magnetoresistance, linear in magnetic field and positive, observed recently in nonstoichiometric silver chalcogenides. The idea is based on the assumption that these substances are basically gapless semiconductors with a linear energy spectrum. Most of the excess silver atoms form metallic clusters which are doping the remaining material to a very small carrier concentration, so that even in a magnetic field as low as 10 Oe, only one Landau band participates in the conductivity.



$$H = \int \psi^\dagger v \left[ \sigma \left( \mathbf{p} - \frac{e}{c} \mathbf{A} \right) \right] \psi dV,$$

$$-i \frac{\partial}{\partial z} \psi_1 + \left( -i \frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} + i \frac{eH}{c} x \right) \psi_2 = \frac{\epsilon}{v} \psi_1,$$

$$\left( -i \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} - i \frac{eH}{c} x \right) \psi_1 + i \frac{\partial}{\partial z} \psi_2 = \frac{\epsilon}{v} \psi_2.$$

$$G_{\alpha\beta}^{(0)}(p_z, p_y, x, x', \omega_m)$$

$$= \sum_n \frac{\psi_{n\alpha}(x - cp_y/eH) \psi_{n\beta}^*(x' - cp_y/eH)}{i\omega_m + \mu - \epsilon_n(p_z)},$$

$$Q_{ik}(i\omega_0) = \frac{2e^2 v^2}{c} T \sum_m \int \frac{dp_y}{2\pi} \int \frac{dp_z}{2\pi} \int dx' \times \text{Tr}[\sigma_i G(p_y, p_z, x, x', \omega_m + \omega_0) \times \sigma_k G(p_y, p_z, x', x, \omega_m)],$$

**Large magnetoresistance in non-magnetic silver chalcogenides**, R. Xu, A. Husmann, T. F. Rosenbaum, M.-L. Saboungi, J. E. Enderby and P. B. Littlewood, Nature 390, 57, 1997

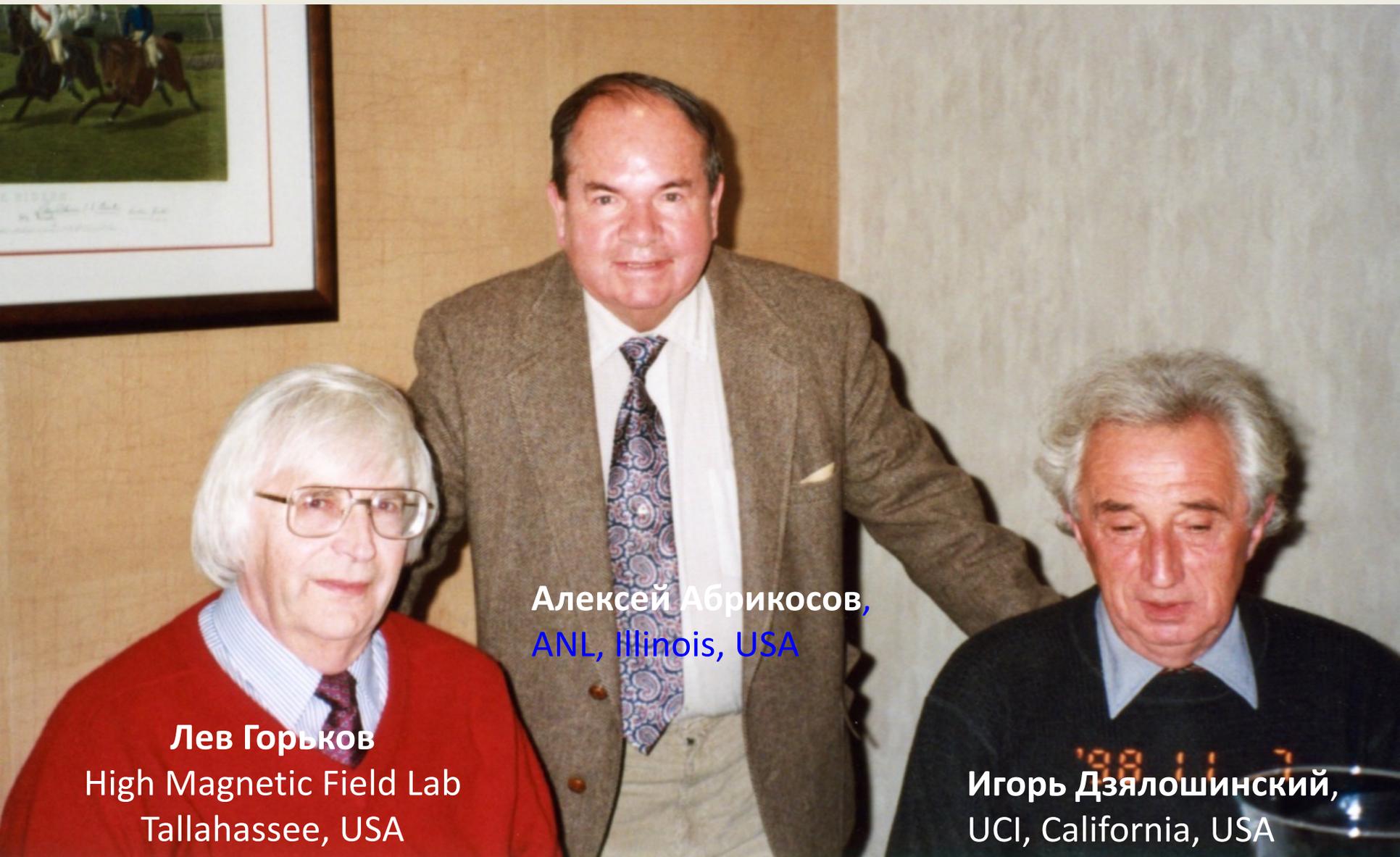
$$\rho_{xx} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{e^2}{\epsilon_\infty v} \right)^2 \ln \epsilon_\infty \frac{N_i}{ec n_0^2} H.$$

|                     |                     |                        |                     |                     |                         |                    |                    |                        |
|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| Richard<br>Klemm    | George<br>Crabtree  | Ernst Helmut<br>Brandt | Lev<br>Gor'kov      | David<br>Bishop     | David<br>Nelson         | Michael<br>Tinkham | Valerii<br>Vinokur | David<br>Khmel'nitskii |
| Grigorii<br>Volovik | Boris<br>Shklovskii | Boris<br>Altshuler     | Alexei<br>Abrikosov | Phil W.<br>Anderson | Igor'<br>Dzyaloshinskii |                    |                    |                        |

Abrikosov's 70th Birthday Symposium, 6 Nov 1998 in Argonne



# Встреча трех соавторов через сорок лет, 1998 г., Аргон, США



Алексей Абрикосов,  
ANL, Illinois, USA

Лев Горьков  
High Magnetic Field Lab  
Tallahassee, USA

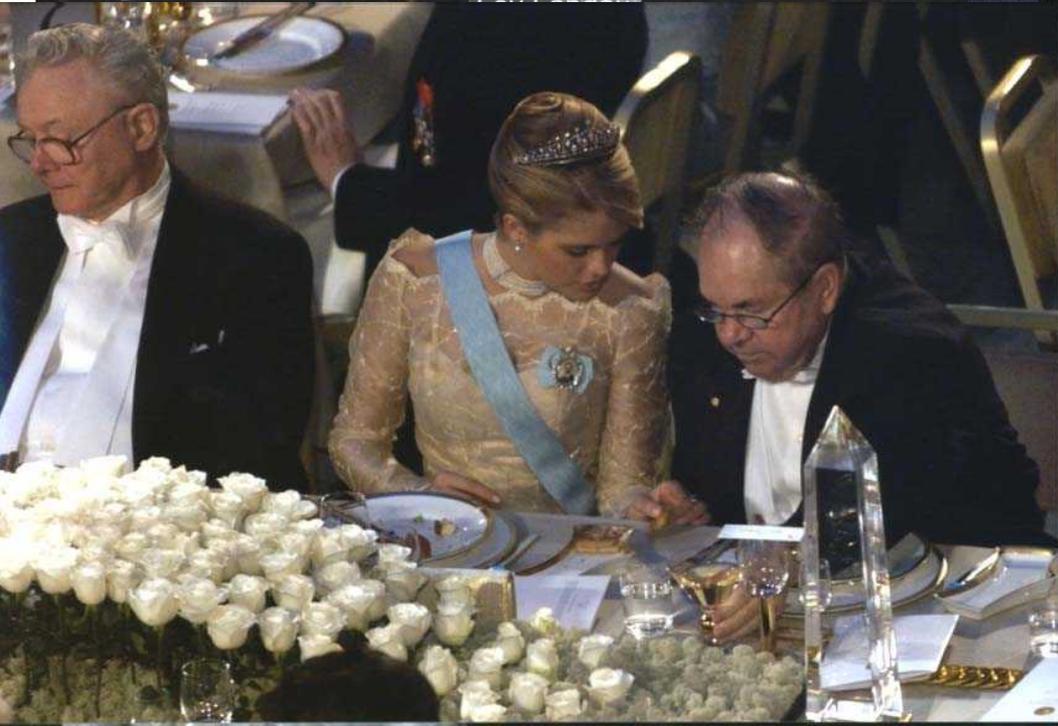
Игорь Дзялошинский,  
UCI, California, USA

# Аргон, 5 октября 2003 г., на следующий день после объявления Нобелевского комитета.



10 Dec 2003 Stockholm

Physics Nobel Prize 2003



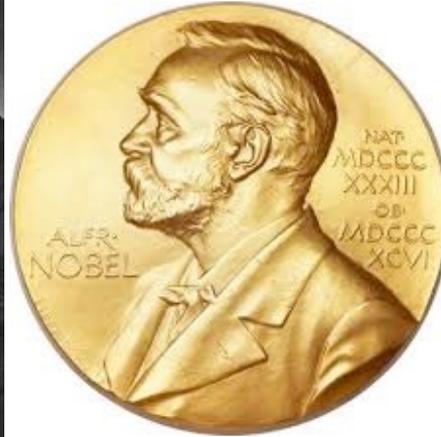


# Нобелевский лауреат третьего поколения

The Nobel Prize in Physics 1922



The Nobel Prize in Physics 1922 was awarded to **Niels Bohr** *"for his services in the investigation of the structure of atoms and of the radiation emanating from them"*.



The Nobel Prize in Physics 1962



The Nobel Prize in Physics 1962 was awarded to **Lev Landau** *"for his pioneering theories for condensed matter, especially liquid helium"*.



The Nobel Prize in Physics 2003 was awarded to **Alexei Abrikosov, Vitaly L. Ginzburg, Anthony J. Leggett** *"за пионерские вклады в теорию сверхпроводников и сверхтекучих жидкостей"*

Abrikosov's 80th Birthday Symposium, 8 Nov 2008 in Argonne



Tony Leggett  
Alexei Abrikosov

# Последняя премия в его жизни: Золотая медаль Вернадского



## Abrikosov receives Ukrainian Gold Medal

By [Lynn Tefft Hoff](#) • July 28, 2015

**Alexei Abrikosov**, a distinguished scientist at the U.S. Department of Energy's Argonne National Laboratory and a Nobel Prize recipient, has been recognized again for his groundbreaking work. Abrikosov has received the Gold Medal of Vernadsky of the National Academy of Sciences of the Ukraine.

As part of the medal presentation, **Director Peter Littlewood** read from a letter to Abrikosov from **Ukrainian National Academy President Boris Paton**. "The National Academy of Sciences values your outstanding contributions in the development of the theory of normal and superconducting metals and your long, active cooperation with Ukrainian scientists," Paton wrote.



The Academy has awarded its Vernadsky Gold Medal annually since 2004 to the most distinguished academicians.

2003 Borys Paton

...

2010 Mikhail Lisitsa and Manuel Cardona

2011 Borys Oliynyk and Blaže Ristovski

2013 Oleksandr Huz and Herbert Mang

2014 Vadim M. Loktev

**2015 Alexei Abrikosov**



9 ноября 2015 г.

Президенту Национальной Академии Наук Украины  
Академику Б. Е. Патону

Глубокоуважаемый Борис Евгеньевич!

Прежде всего, я хочу выразить мою благодарность Академии Наук Украины и Вам лично за оказанную честь – присуждение мне высшей награды Национальной академии наук Украины – Золотой медали имени В. И. Вернадского. Диплом и медаль были вручены мне директором Аргонской Национальной лаборатории Питером Литтлвудом, что стало праздником и для меня, и для моих многочисленных коллег.

Dr. Alexei Abrikosov  
Distinguished Scientist  
[abrikosov@anl.gov](mailto:abrikosov@anl.gov)

Materials Science Division  
Argonne National Laboratory  
9700 South Cass Avenue, Bldg. 223  
Argonne, IL 60439

+1-630-252- 3518 phone  
+1-630-252-7777 fax



Алексея Алексеевича Абрикосова будут помнить как великого ученого, чьи работы повлияли на многие области физики и проложили путь к новому пониманию сверхпроводимости. Он был очень светлым человеком с блестящим чувством юмора, что помогало ему преодолевать трудные периоды столь насыщенной событиями жизни.

**БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ**