

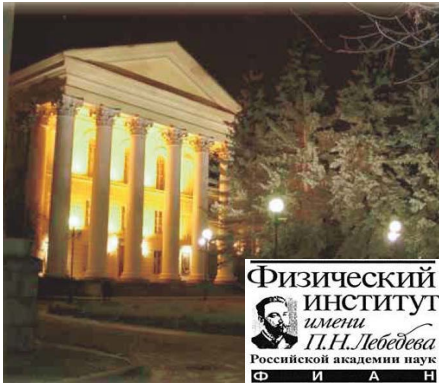
ОП

Физика сверхпроводимости и квантовых материалов

Руководитель: В.М. Пудалов, чл.-кор. РАН
(pudalov@lebedev.ru), 7(499)132-6780

База: Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга («Центр Гинзбурга»)
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

МФТИ, 22 февраля 2019г.



Два Нобелевских открытия 1980х: Квантовый эффект Холла (Целочисленный и **Дробный**)

В.М. Пудалов

<http://sites.lebedev.ru/ru/sces/3176.html>

- 3я презентация из 4х

Квантовый эффект Холла: целочисленный (1985) и дробный КЭХ (1998)



The Nobel Prize in Physics 1985

"for the discovery of the quantized Hall effect"



Klaus von Klitzing

Federal Republic of
Germany

Max-Planck-Institut für
Festkörperforschung
Stuttgart, Federal
Republic of Germany

b. 1943

Titles, data and places given above refer to the time of the award.
Photos: Copyright © The Nobel Foundation



The Nobel Prize in Physics 1998

"for their discovery of a new form of quantum fluid with fractionally
charged excitations"



Robert B. Laughlin

🕒 1/3 of the prize

USA

Stanford University
Stanford, CA, USA

b. 1950



Horst L. Störmer

🕒 1/3 of the prize

Federal Republic of
Germany

Columbia University
New York, NY, USA

b. 1949



Daniel C. Tsui

🕒 1/3 of the prize

USA

Princeton University
Princeton, NJ, USA

b. 1939
(in Henan, China)

Классический эффект Холла (Edwin Hall, 1879) - 3D

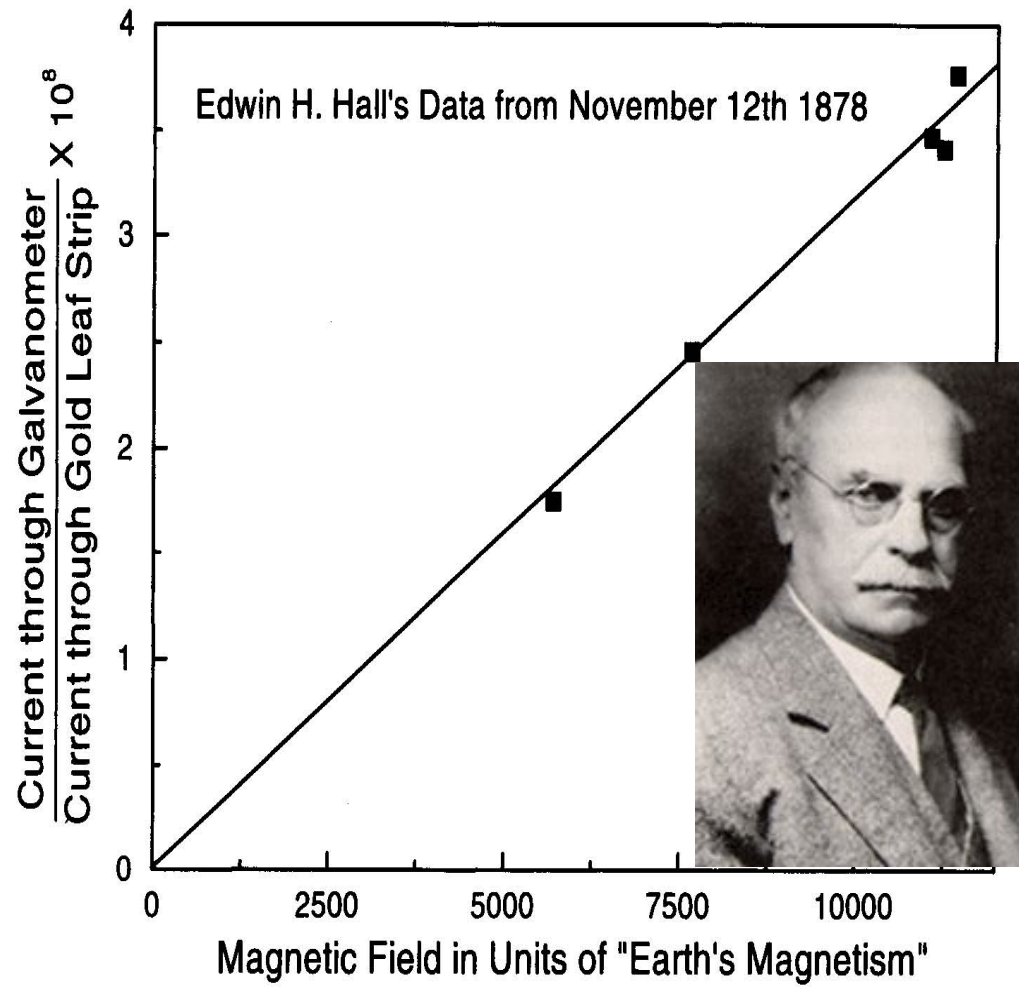
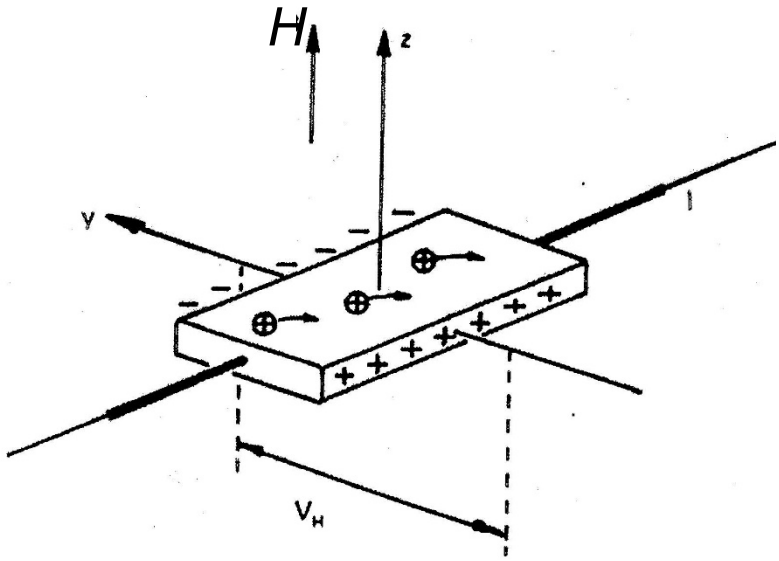
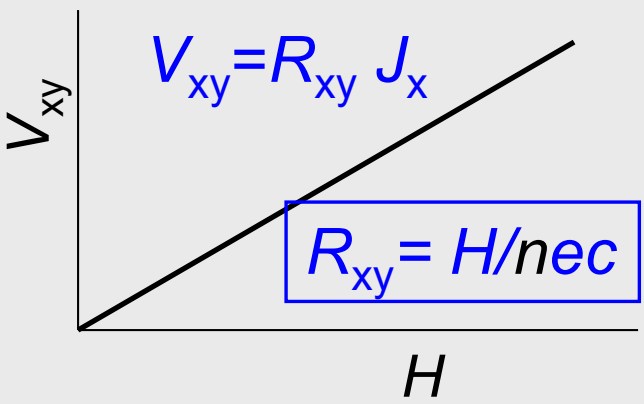


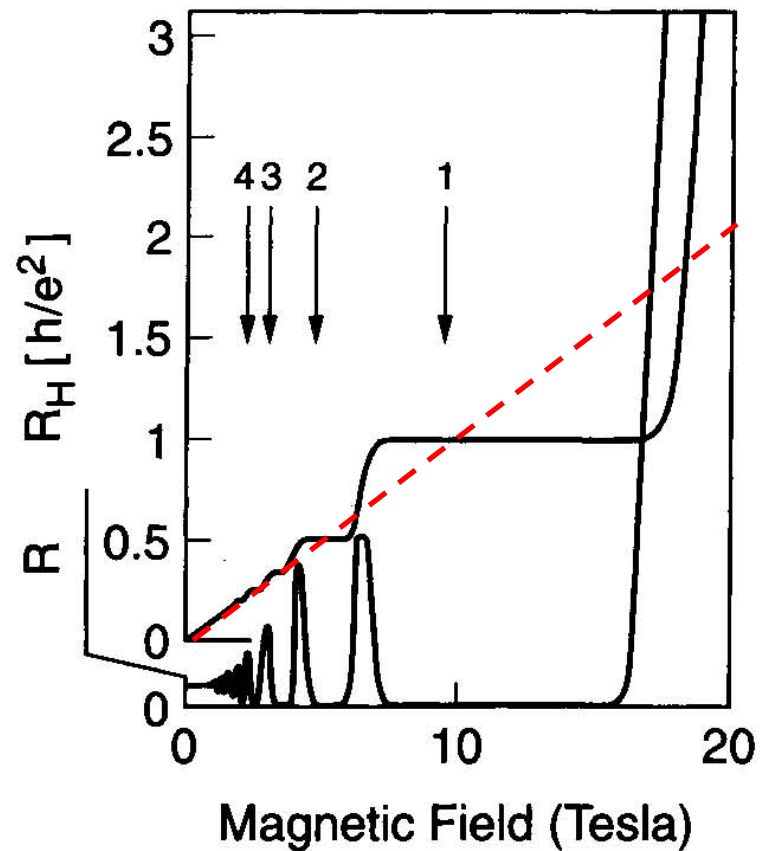
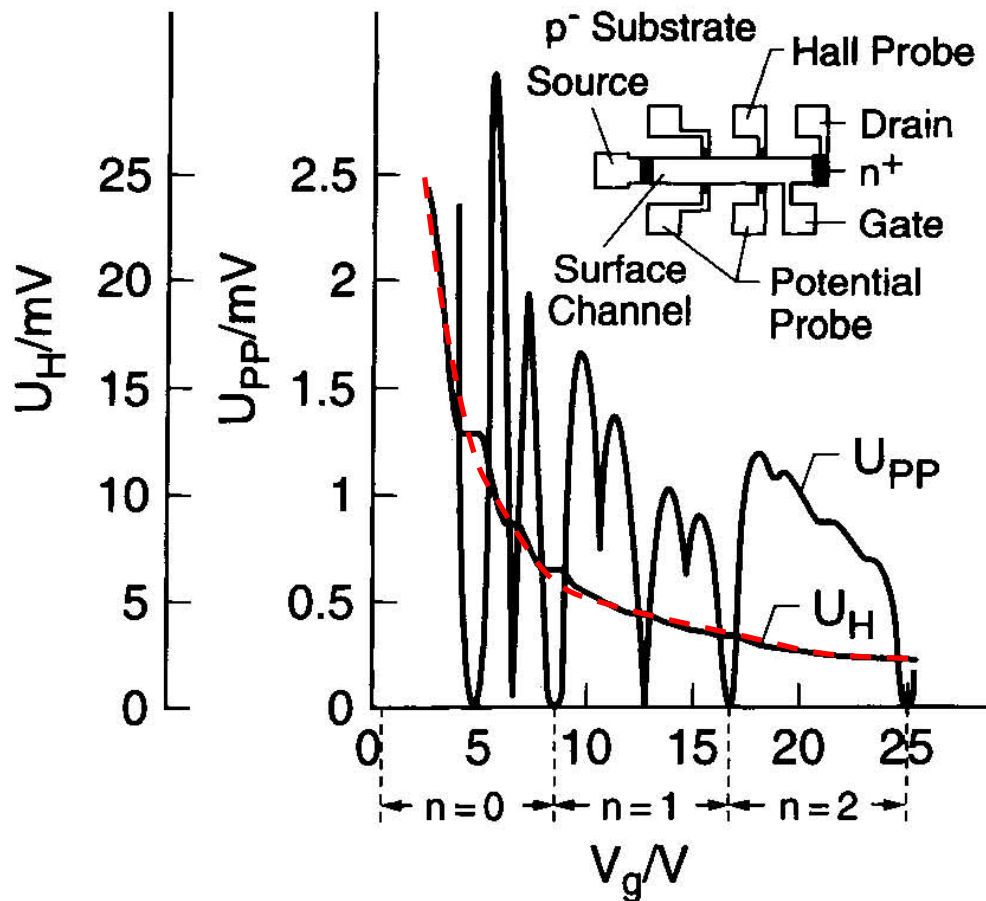
Figure 6. Edwin Hall's Hall data of 1878 as plotted from a table in his publication. The vertical axis is proportional to the Hall voltage, V_H of Fig. 5 and the horizontal axis is proportional to the magnetic field of Fig. 5. A linear relationship between V_H and B and hence between R_H and B is apparent. Since the days of Edwin Hall this strictly linear relationship has been confirmed by many, much more precise experiments.

$$\rho_{xy} = R_{xy} [L_y / (L_y L_z)]$$

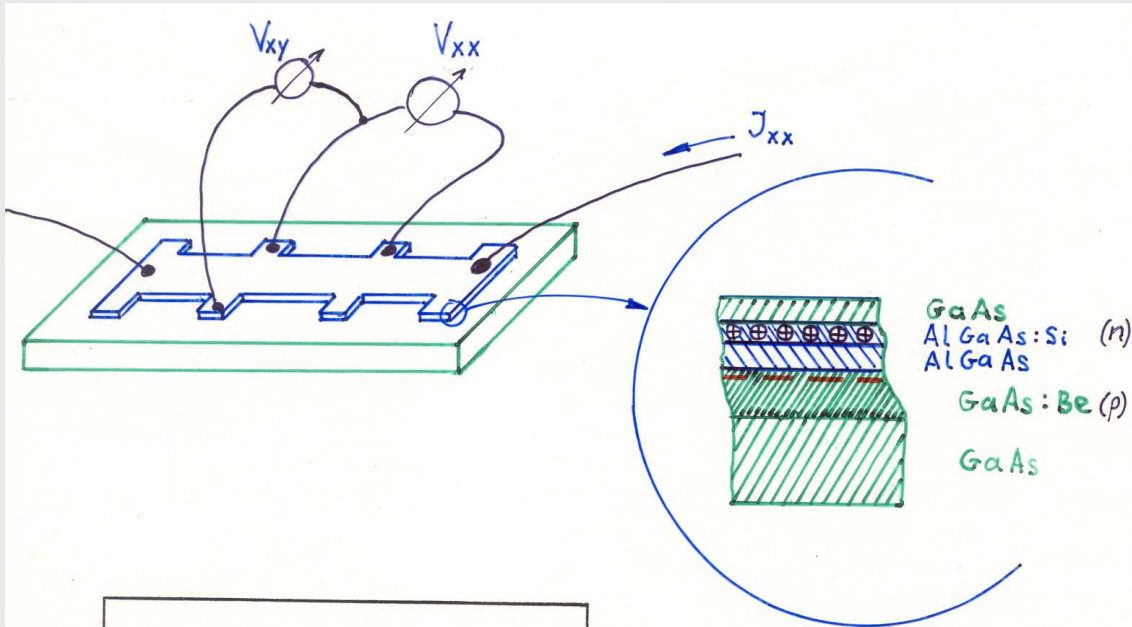
$$\rho_{xy} \equiv R_{xy}$$

В эксперименте можно изменять
 как n (при постоянном H)
 так и H (при постоянном n)

Важно лишь отношение $\nu = n/n_H$ - “заполнение уровней Ландау”

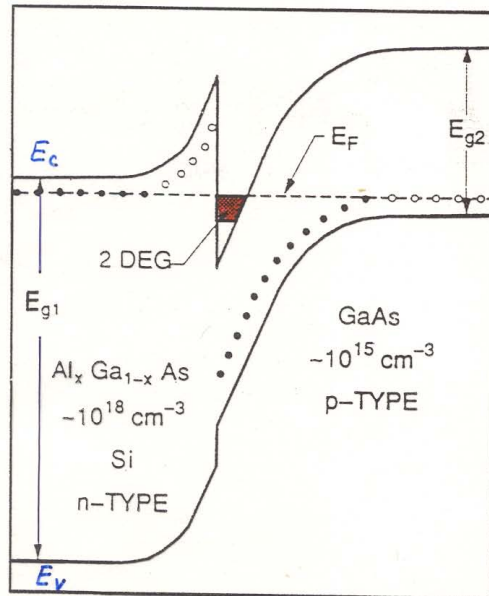


Как приготовить 2D электронную систему



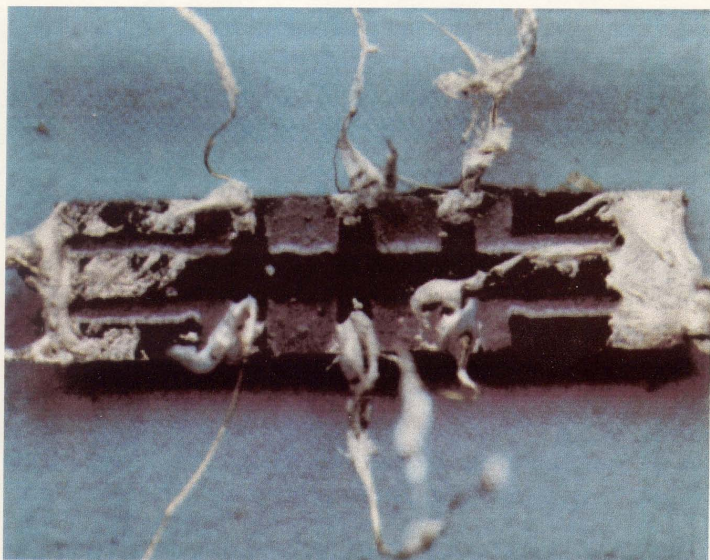
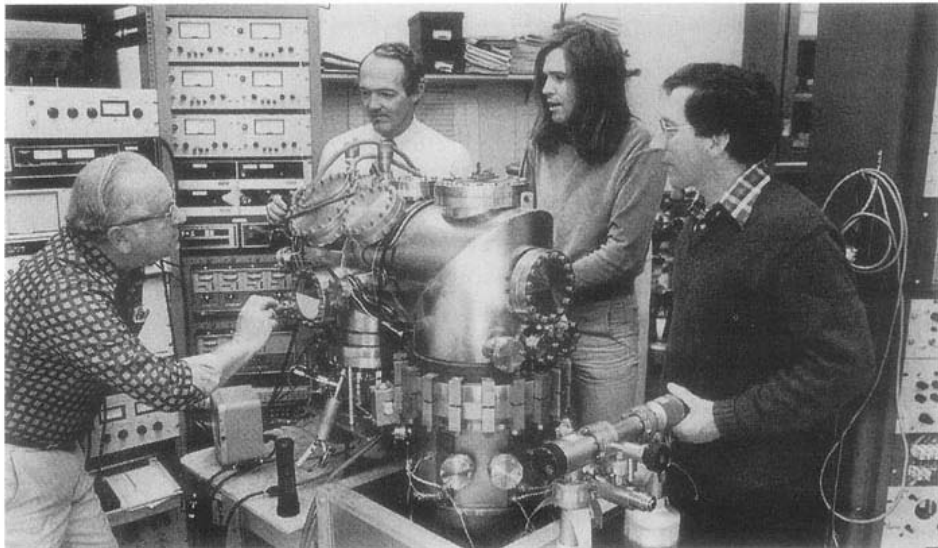
Гетероструктура

GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

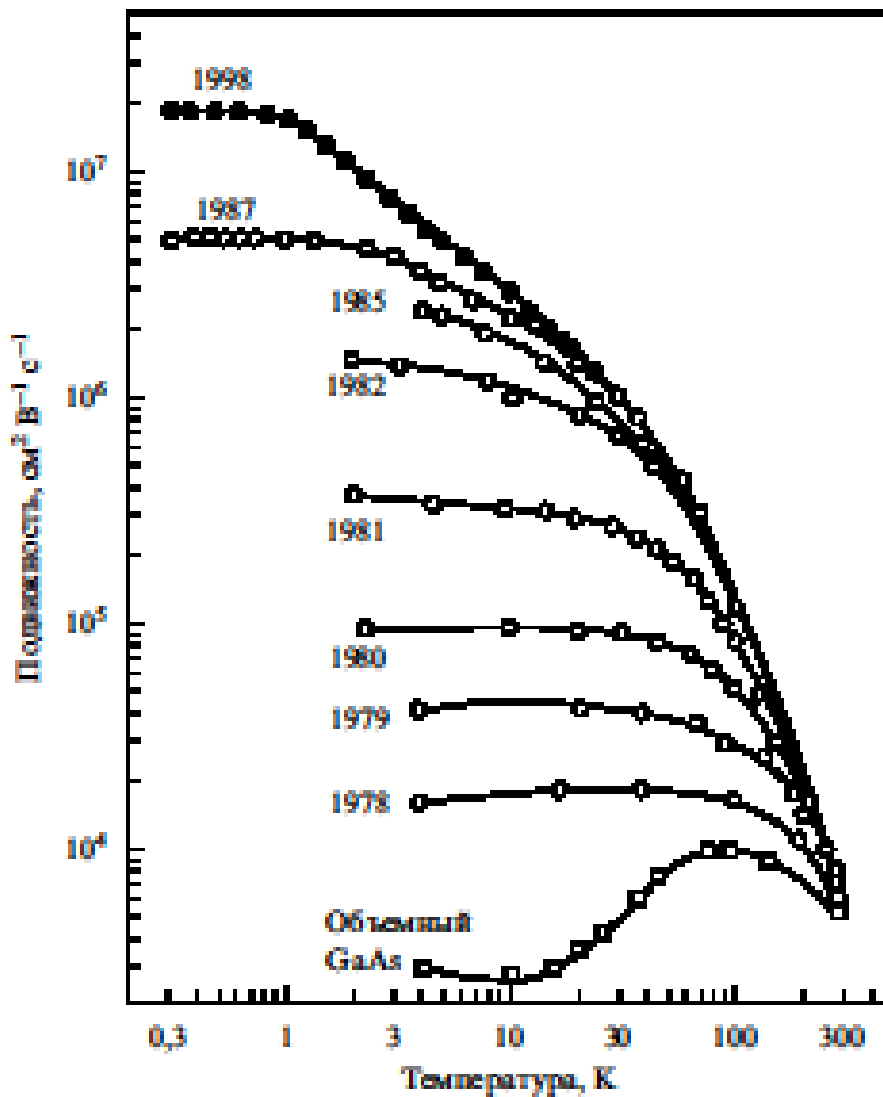
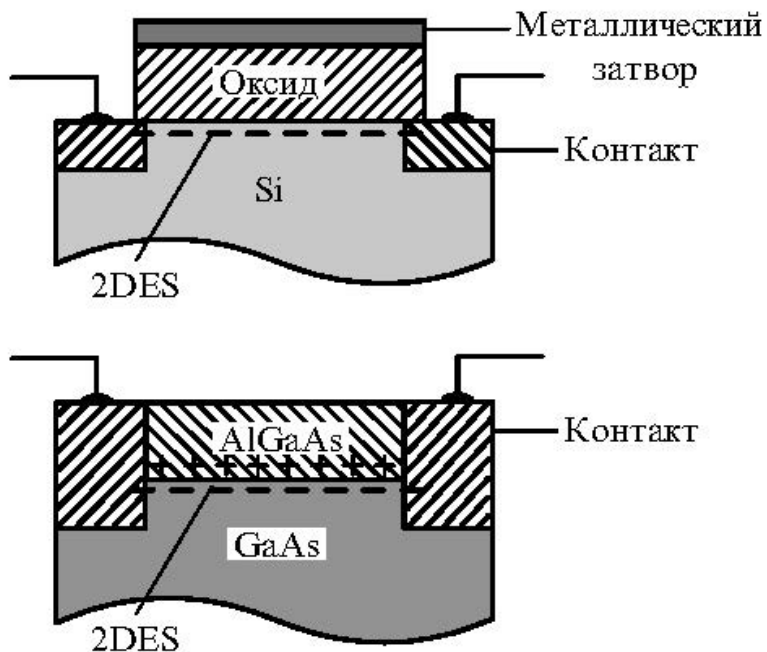


for $x = 0.3$
 $E_{g1} - E_{g2} \approx 400 \text{ meV}$

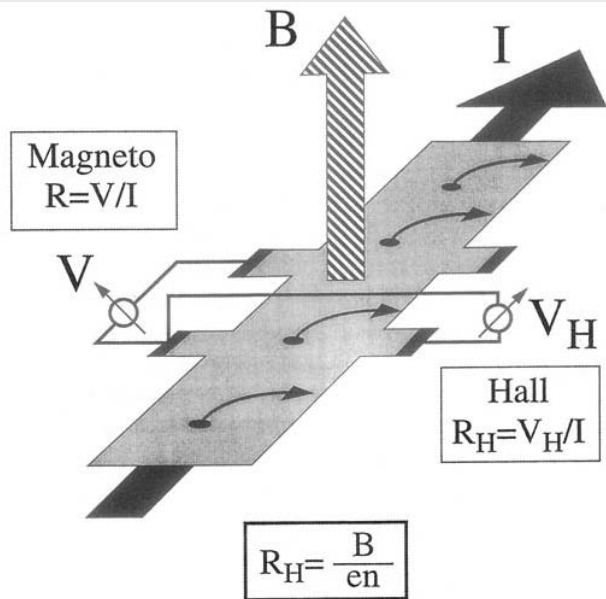
Дробный квантовый эффект Холла



Образцы – гетеропереходы GaAs-AlGaAs



Наблюдение плато R_{xy} при дробных заполнениях уровней Ландау



Кварки ??

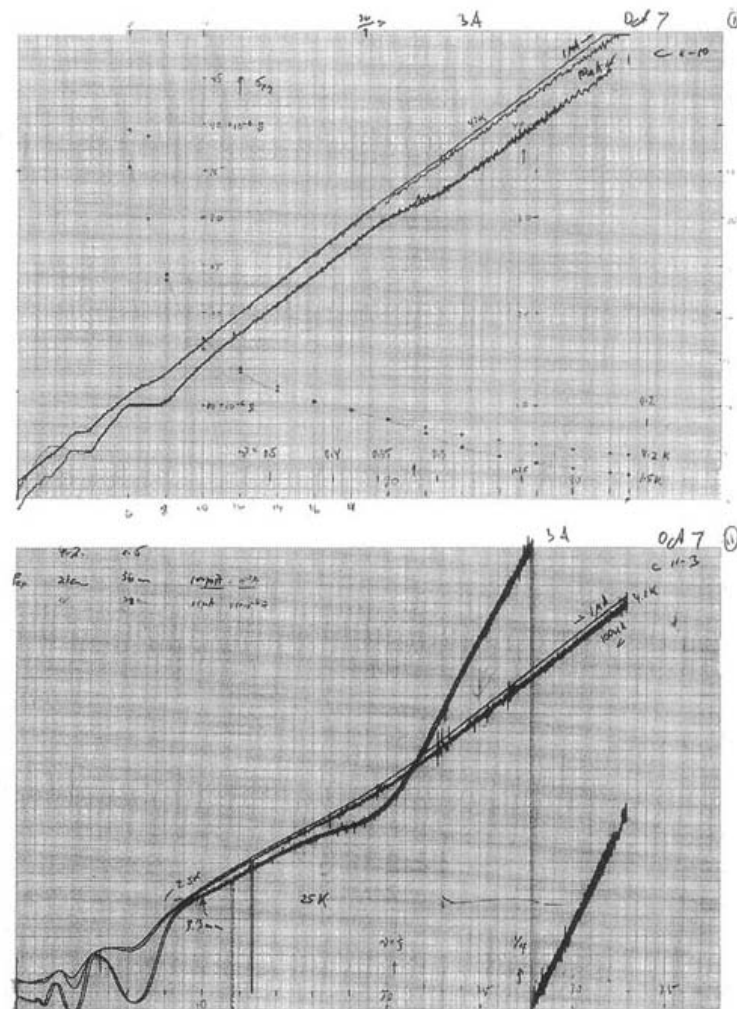


Figure 9. Data of Oct. 7, 1981 on the specimen # 6-19-81(3) (see Fig. 8) on millimeter paper. The top panel shows the Hall resistance, R_H , at temperatures 4.2 K and 1.5 K versus magnetic field, B. The bottom panel shows the magneto resistance, R, versus B at similar temperatures. 1T is equivalent to ~ 1.5 cm. Features at ~ 3 cm and ~ 7 cm are due to the IQHE. Weaker features at ~ 21 cm are due to the FQHE. The scribbles in the top panel are from reuse of the millimeter-paper for data reduction from other traces.

Прогресс в качестве (подвижности) образцов и понижении температуры

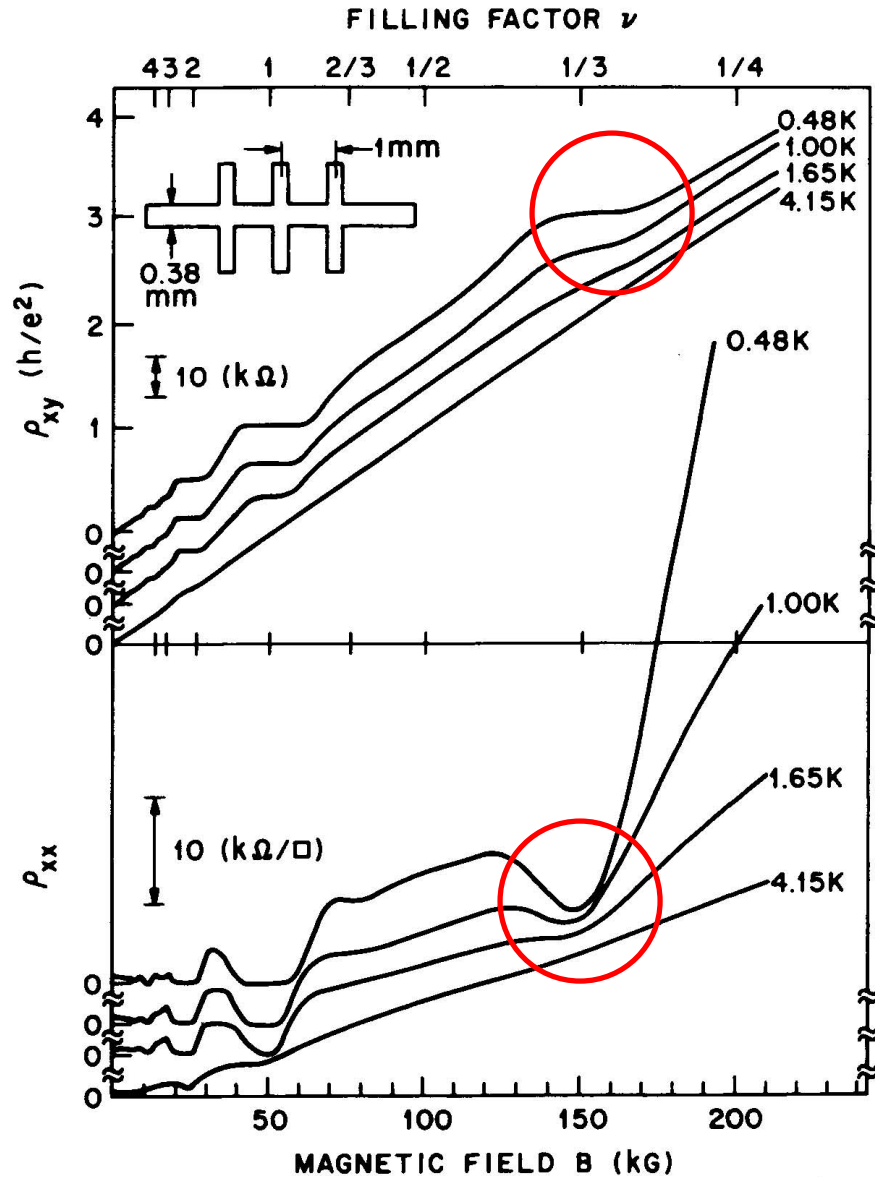


Figure 11. First successful operation of our dilution refrigerator in high-magnetic field. The sign reads: 85mK, 280kG, Feb. 16, 84. The proud operators are clockwise from upper left: Albert Chang, Peter Berglund (who was largely responsible for the design and implementation of the instrument), Greg Boebinger, Dan Tsui and Horst Störmer.

Теоретическое объяснение ДКЭХ

$$\Psi_m(z_1, \dots, z_N) = \prod_{j < k}^N (z_j - z_k)^m \exp \left[-\frac{1}{4\ell^2} \sum_j^N |z_j|^2 \right]$$

$$m = 3, 5, 7 \dots$$

$$z_j = x_j + iy_j$$

Эта ВФ была предложена как вариационная, но оказалась точной для $\nu=1/3$.



Ее свойства:

- 1) антисимметрична по перестановке любой пары частиц (при m -нечетном);
- (2) обеспечивает нахождение частиц далеко друг от друга, так что они имеют меньшую Кулоновскую энергию отталкивания;
- (3) в термодинамическом пределе она описывает систему электронов с плотностью $1/2\pi m a^2_H$, т.е. с фактором заполнения $\nu = 1/m$ - что соответствует эксперименту.

Теоретическое объяснение ДКЭХ

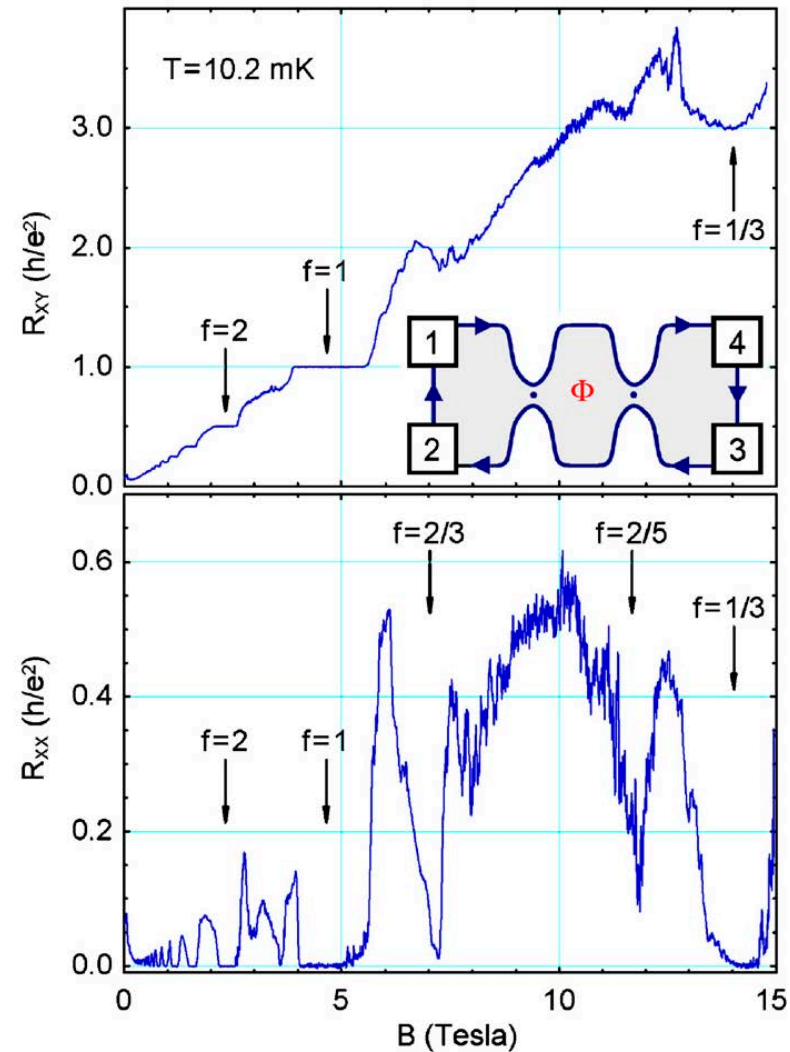
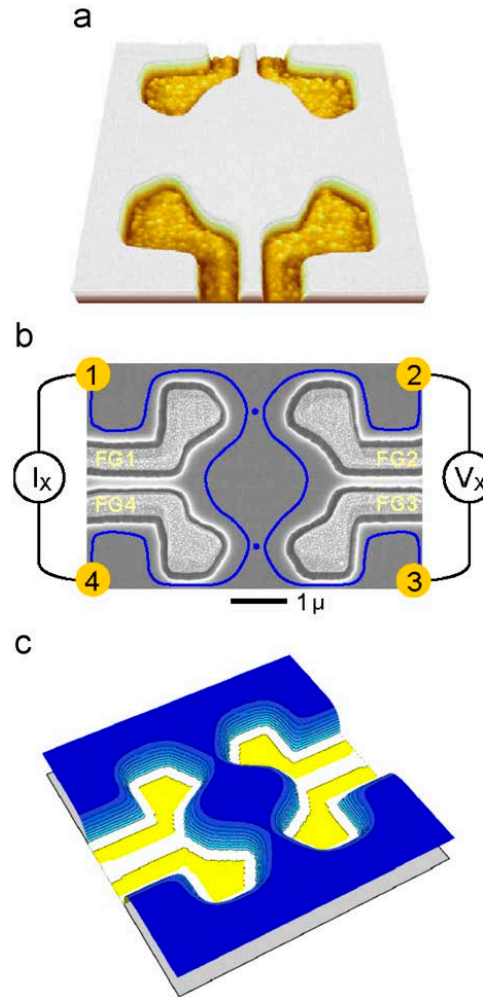
Laughlin предложил, что низкоэнергетическое возбуждение соответствует дробному заряду e/m

Возбужденное состояние отделено от основного состояния щелью Δ .

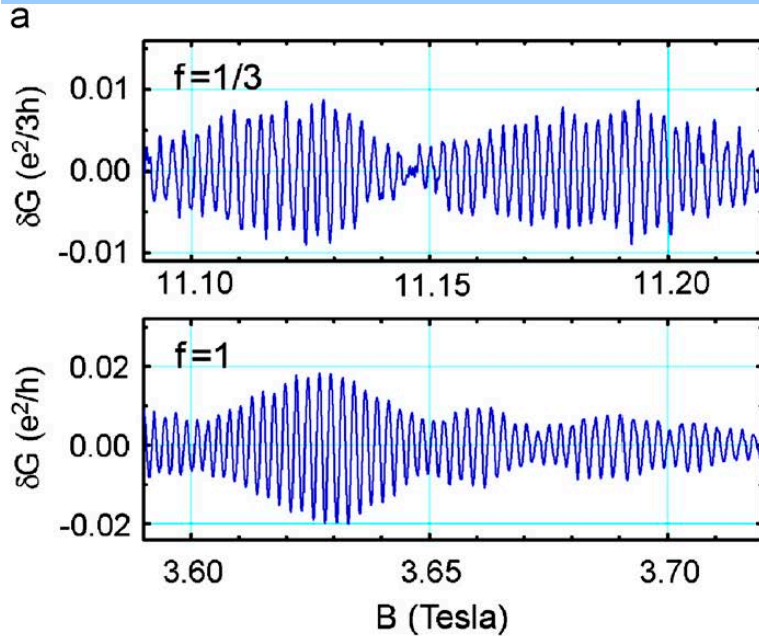


Т.о. основное состояние $\nu=p/m$ есть несжимаемая жидкость

Эксперименты по проверке концепции ДКЭХ

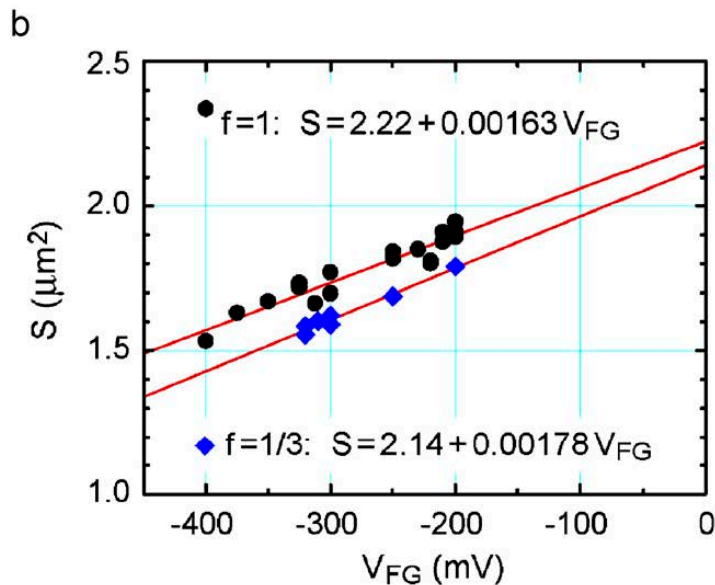


Эксперименты: осцилляции Ааронова-Бома

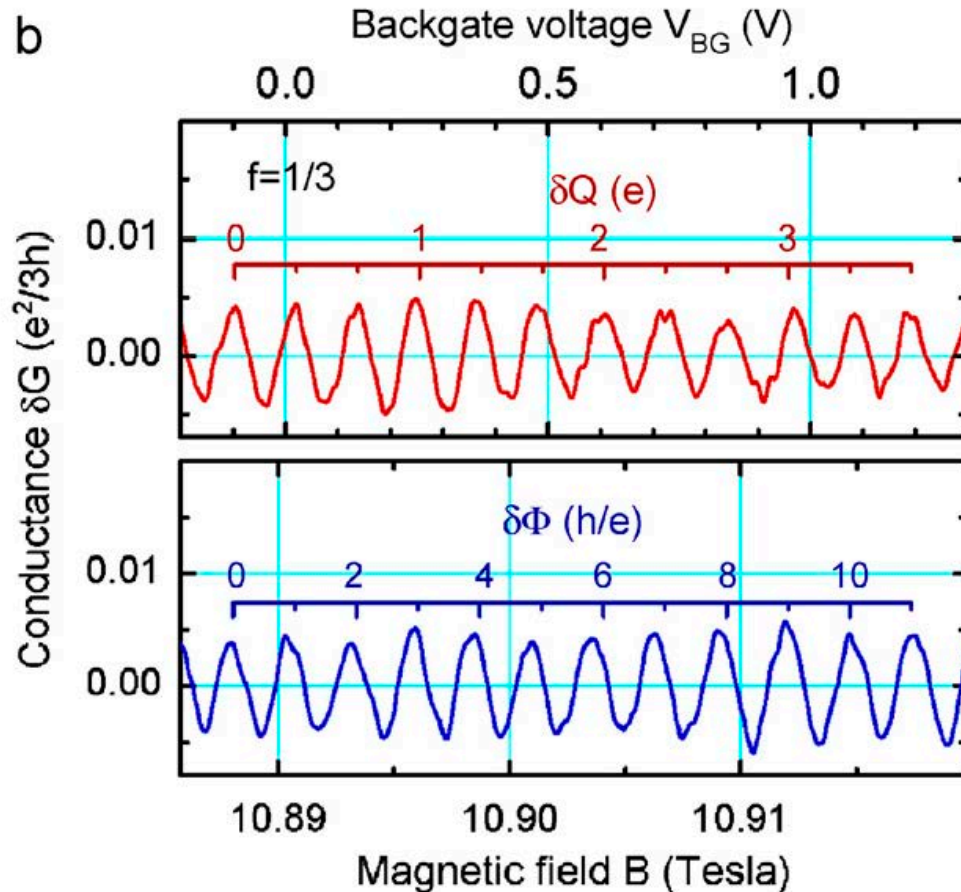


Площадь островка S одна и та же.
Если изменять поле, то период
осцилляций по полю отвечает
 $\Phi=BS = \Phi_0 = h/e$

S одно и тоже для $\nu=1$ и $1/3$

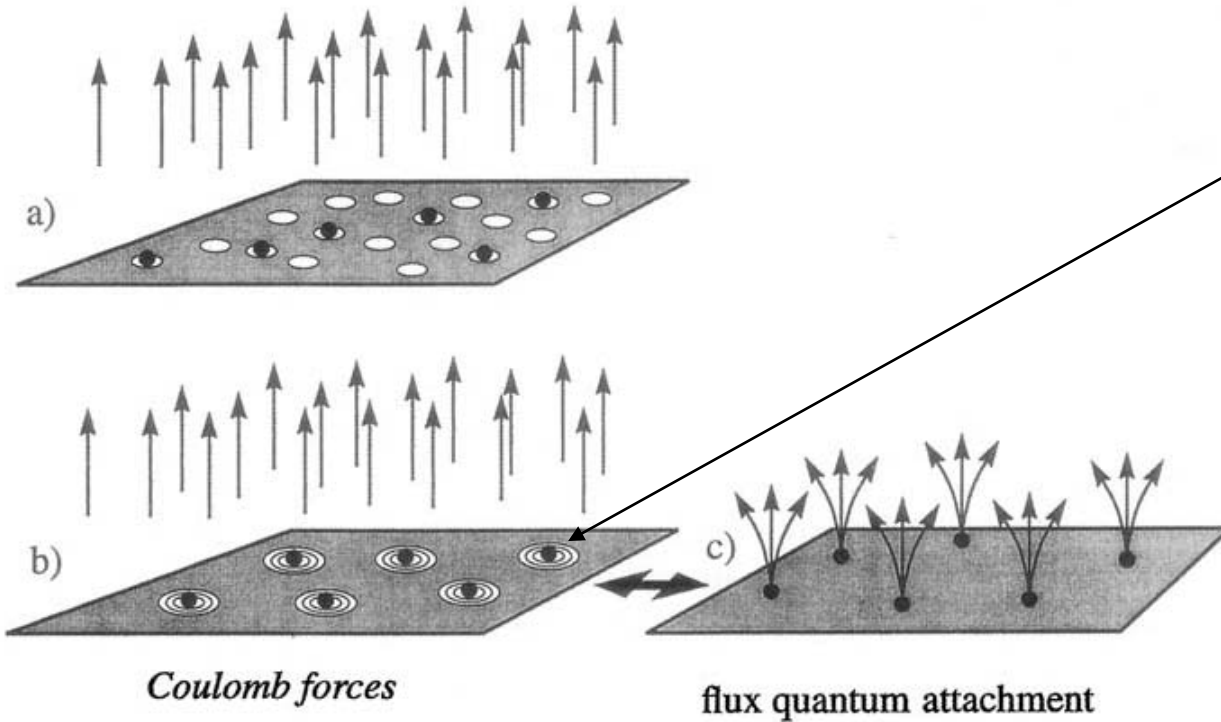


Эксперименты: осцилляции Ааронова-Бома



Если же изменять заряд с помощью нижнего затвора
То явно виден период $e/3$ по изменению заряда !

Новые композитные частицы (СР)



Присоединение
трех вихрей к
каждому электрону
минимизирует энергию

Композитная частица

$$e + 3\Phi_0$$

Figure 14. Schematic drawing of electron vortex attraction at fractional Landau level filling, $\nu=1/3$. Now there are three times as many vortices as there are electrons. The Pauli principle is satisfied by placing one vortex onto each electron (a). Placing three vortices onto each electron reduces electron-electron (Coulomb) repulsion (b). Vortex attachment can be viewed as the attachment of magnetic flux quanta to the electrons transforming them to composite particles (c).

Электроны с тремя присоединенными квантами потока двигаются свободно, почти не взаимодействуя с другими электронами –
Т.о., задача свелась к газу свободных **КОМПОЗИТНЫХ ЧАСТИЦ**

Статистика СР

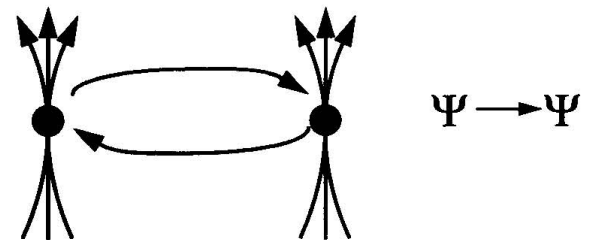
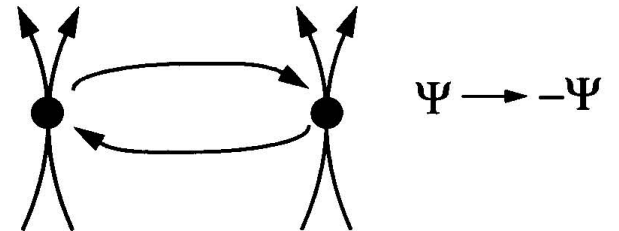
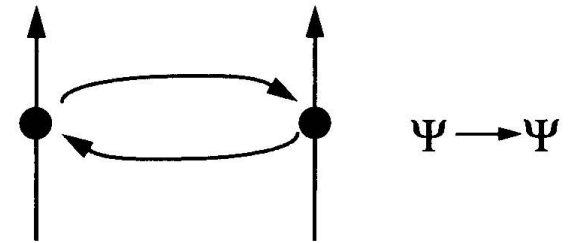
Чтобы выяснить статистику, будем делать перестановки частиц

$H=0$, фермионы

$\Phi=1\Phi_0$, бозоны

$\Phi=2\Phi_0$, фермионы

$\Phi=3\Phi_0$, бозоны



$m = \text{odd}$ \longrightarrow boson
 $m = \text{even}$ \longrightarrow fermion

Состояние $1/3$ – бозонная жидкость

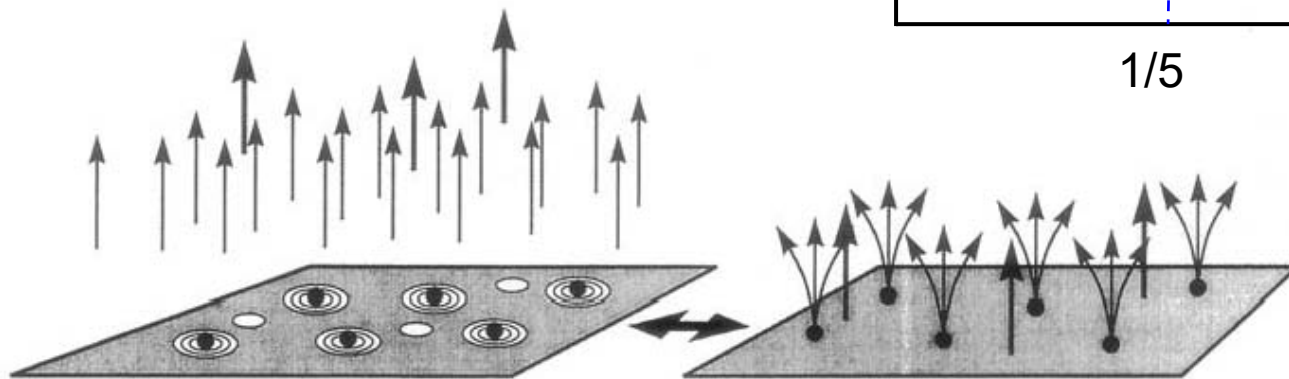
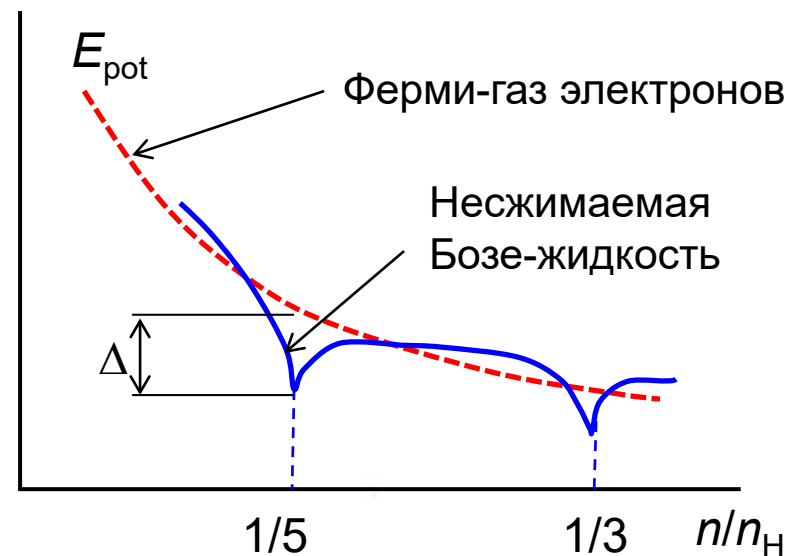


Figure 16. Schematic representation of $1/3$ charged quasiparticles. At slightly higher B fields than at $\nu=1/3$ additional vortices are created. They represent dimples in the electron lake. In the dimples exactly $1/3$ of an electron charge is missing. These are the fractionally charged quasiparticles of the FQHE.

ДКЭХ в образце со сверхвысокой подвижностью

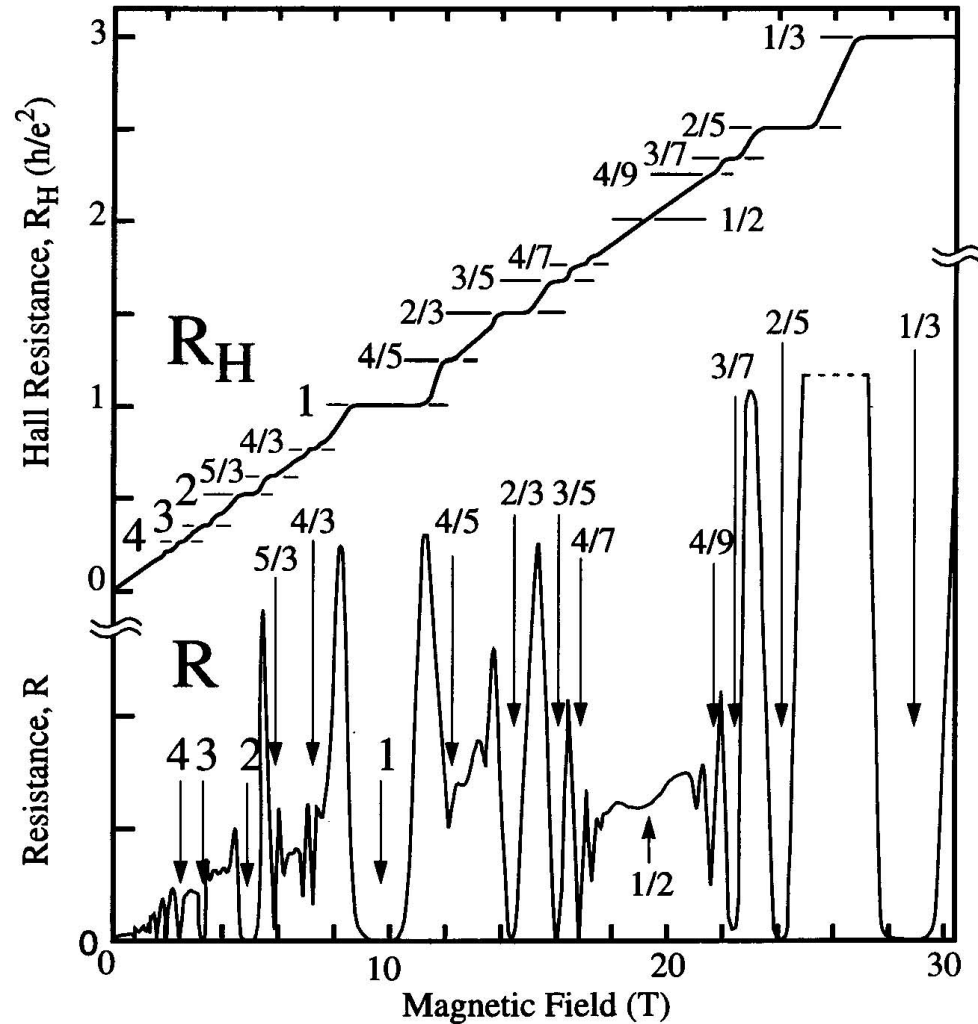
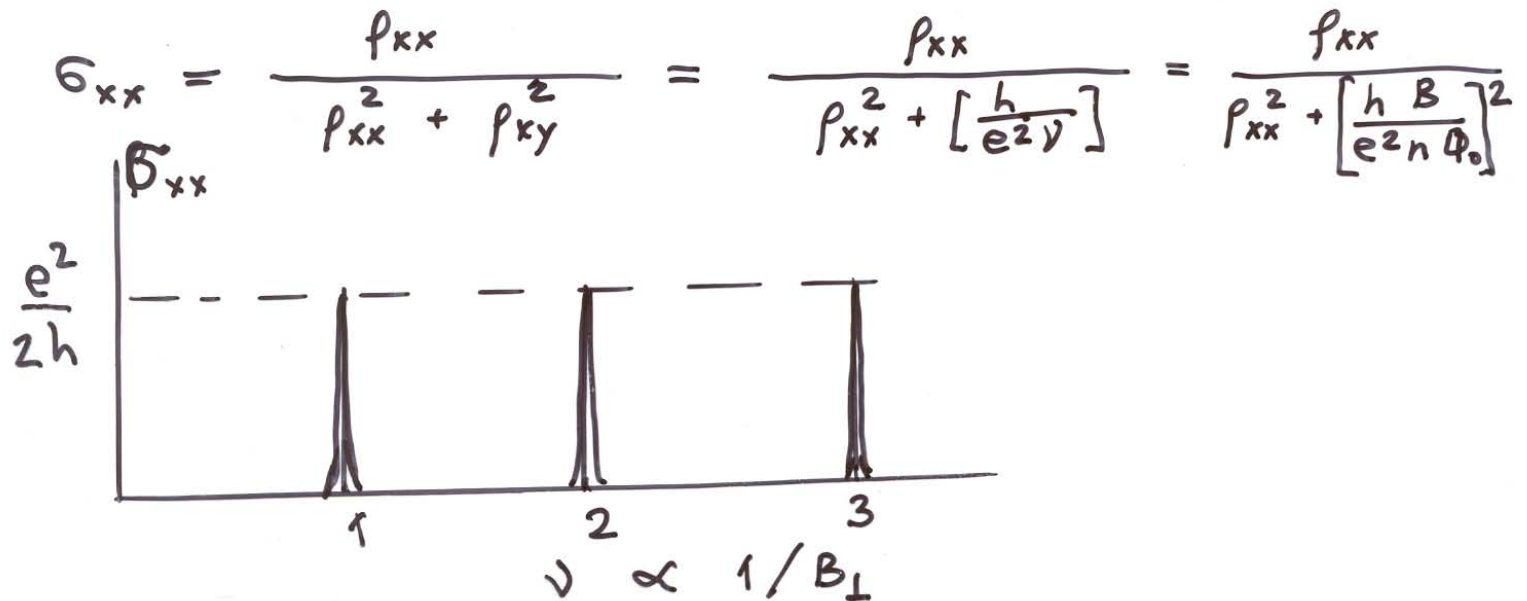


Figure 18. The FQHE as it appears today in ultra-high mobility modulation doped GaAs / AlGaAs 2DEs. Many fractions are visible. The most prominent sequence, $\nu = p/(2p \pm 1)$, converges toward $\nu = 1/2$ and is discussed in the text.

Преобразования симметрии в КЭХ

1. Симметрия по добавлению целого числа уровней Ландау

$$\nu \iff \nu \pm 1$$

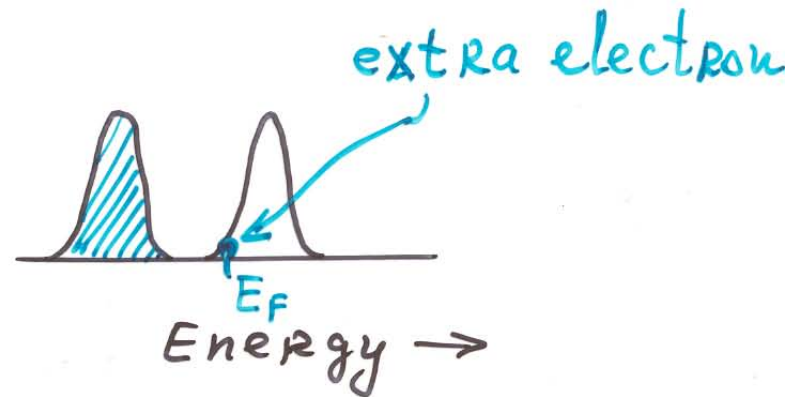
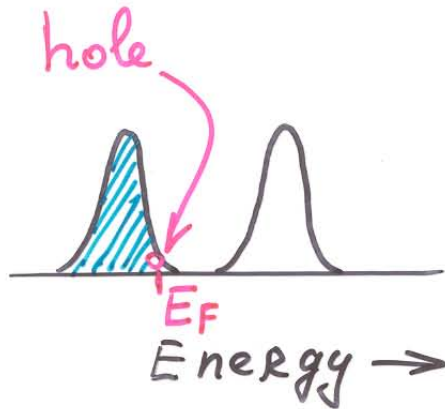


Преобразования симметрии в КЭХ

2. Электронно-дырочная симметрия

#2 Symmetry property: $e \leftrightarrow h$

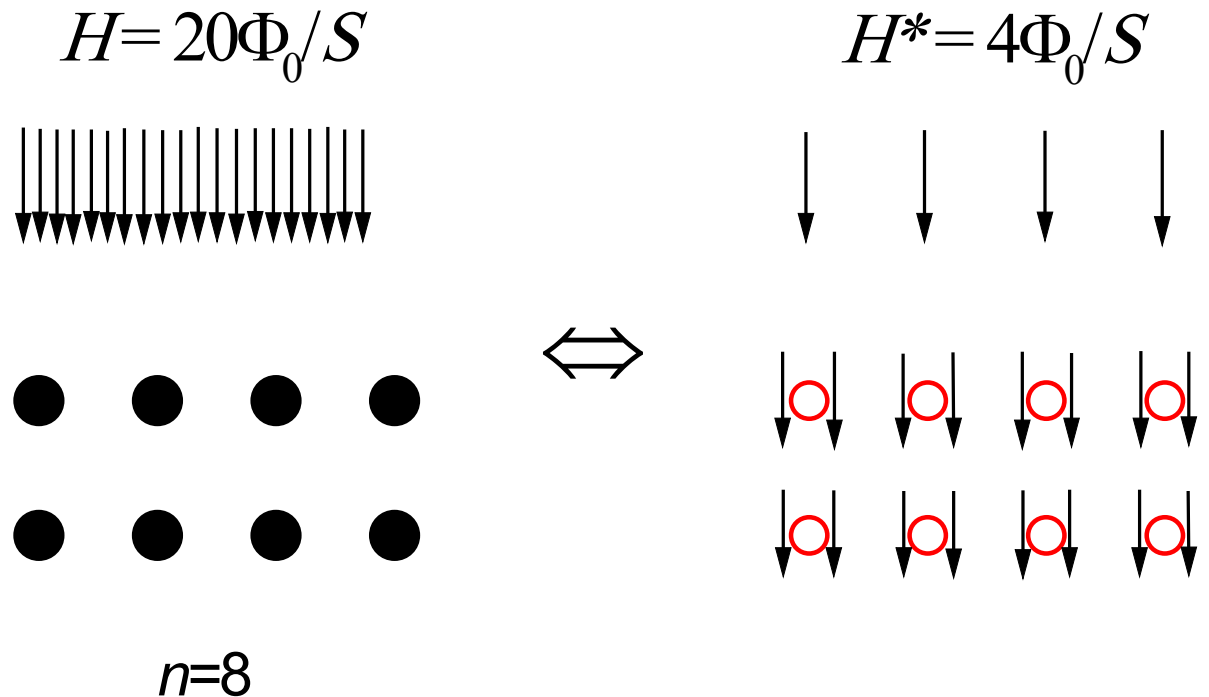
$$\nu - \epsilon \leftrightarrow \nu + \epsilon$$



Преобразования симметрии в КЭХ

3. Симметрия по присоединению 2х квантов потока

Модельный эксперимент Аронова-Бома



3.4. Дуальность квантов потока и зарядов (преобразование с присоединением квантов потока)

$$\textcircled{e} \Leftrightarrow \textcircled{e} + 2\Phi_0$$

$$\left. \begin{array}{l} n \text{ электроны} \\ B \text{ поле} \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} n + 2n\Phi_0 = n \times \textcircled{e} \\ B - 2n\Phi_0 = B^* \end{array} \right. \quad \text{CF}$$

Разделим последнюю строку на $n\Phi_0$:

$$\frac{1}{\nu} = \frac{\Phi}{\Phi_0 n} \Leftrightarrow \frac{\Phi}{\Phi_0 n} - 2 \equiv \frac{1}{\nu'}$$

$$\frac{1}{\nu} \Leftrightarrow \frac{1}{\nu'} - 2$$

Примеры:

$$B=0: \quad 1/\nu_{\text{CF}} = 0, \nu = \infty \quad \Leftrightarrow \quad \nu_e = 1/2$$

$$1/(\nu_{\text{CF}} = 1) \quad \Leftrightarrow \quad \nu_e = 1/3$$

$$1/(\nu_{\text{CF}} = 2) \quad \Leftrightarrow \quad \nu_e = 2/5$$

Дробный квантовый эффект Холла

Иерархия
состояний

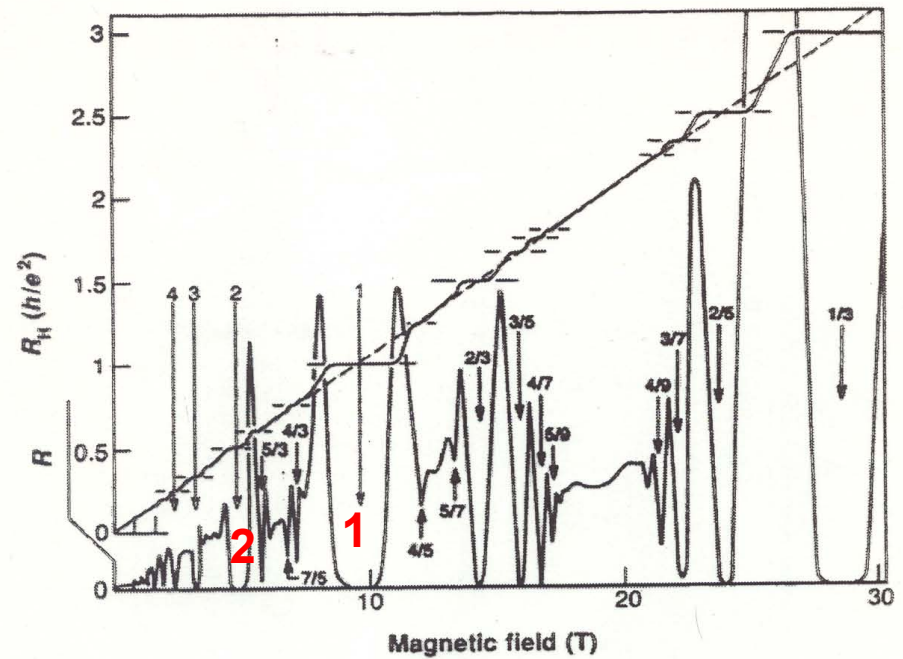


Fig. 3. The dashed diagonal line represents the classical Hall resistance and the full drawn diagonal stepped curve the experimental results. The magnetic fields causing the steps are

Дочерние состояния в дробном квантовом эффекте Холла

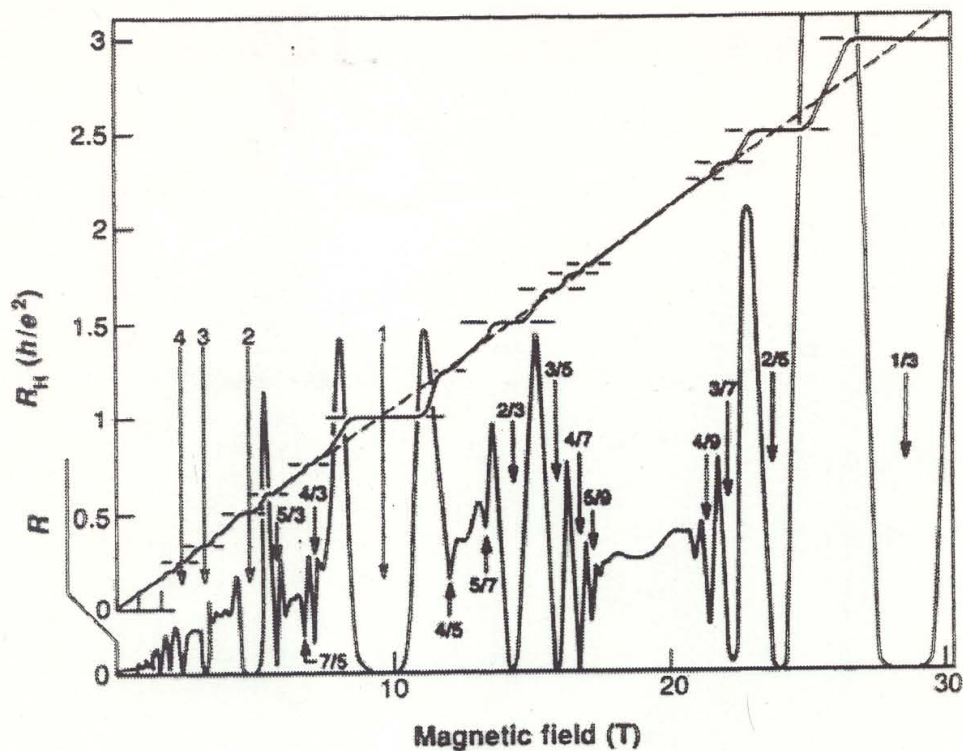
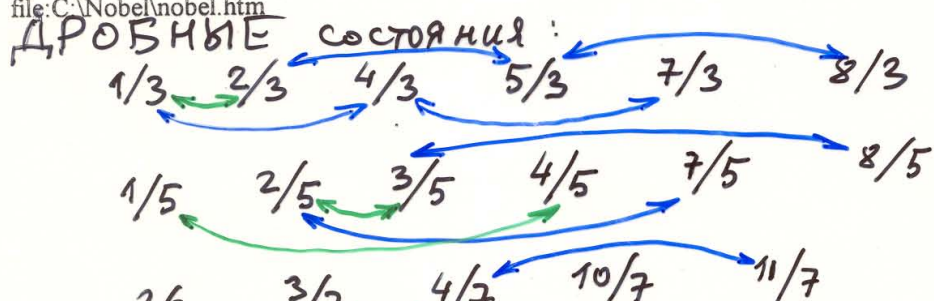


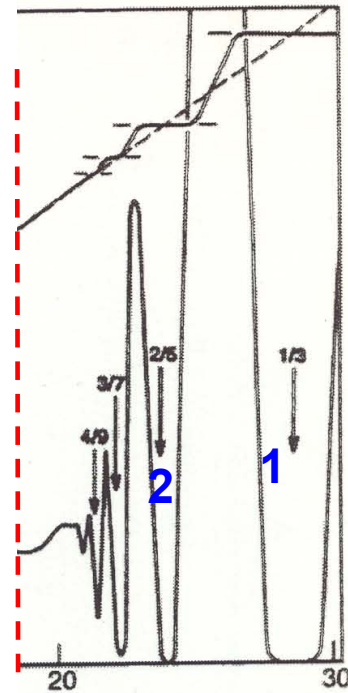
Fig. 3. The dashed diagonal line represents the classical Hall resistance and the full drawn diagonal stepped curve the experimental results. The magnetic fields causing the steps are

file: C:\Nobel\nobel.htm

23.10.98



ДКЭХ для электронов
есть ЦКЭХ для CF в
фиктивном магнитном
поле B^*



Состояние $\nu=1/2$ есть состояние в $B^*=0$ для CF

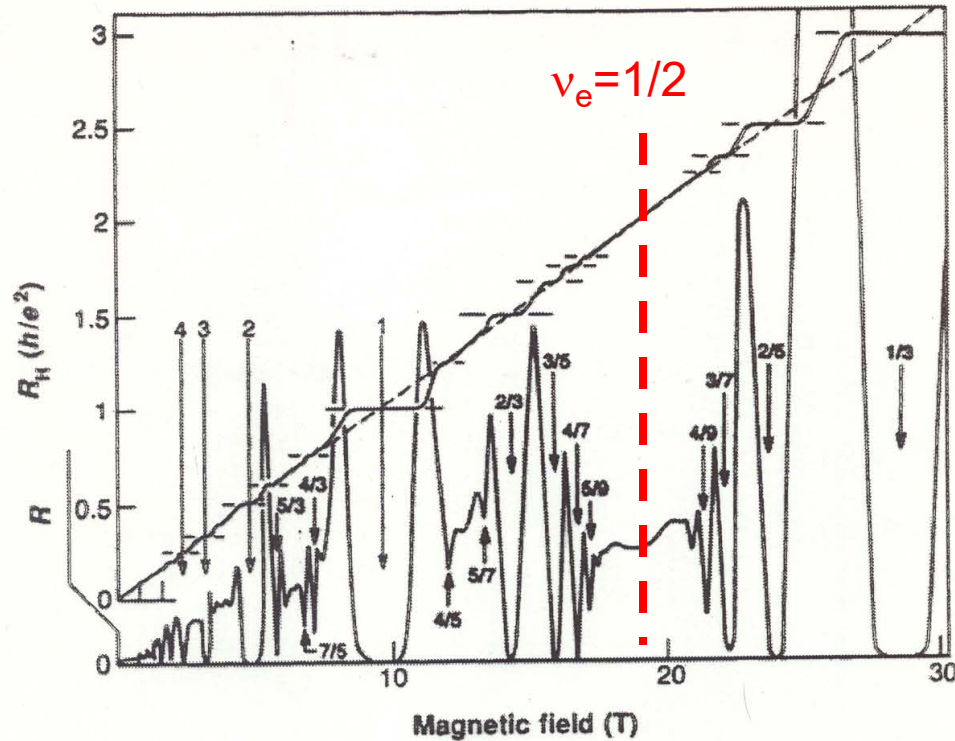


Fig. 3. The dashed diagonal line represents the classical Hall resistance and the full drawn diagonal stepped curve the experimental results. The magnetic fields causing the steps are

Исключение: аномальное состояние $5/2$ есть результат остаточного взаимодействия CF посредством флуктуаций фиктивного поля V^*

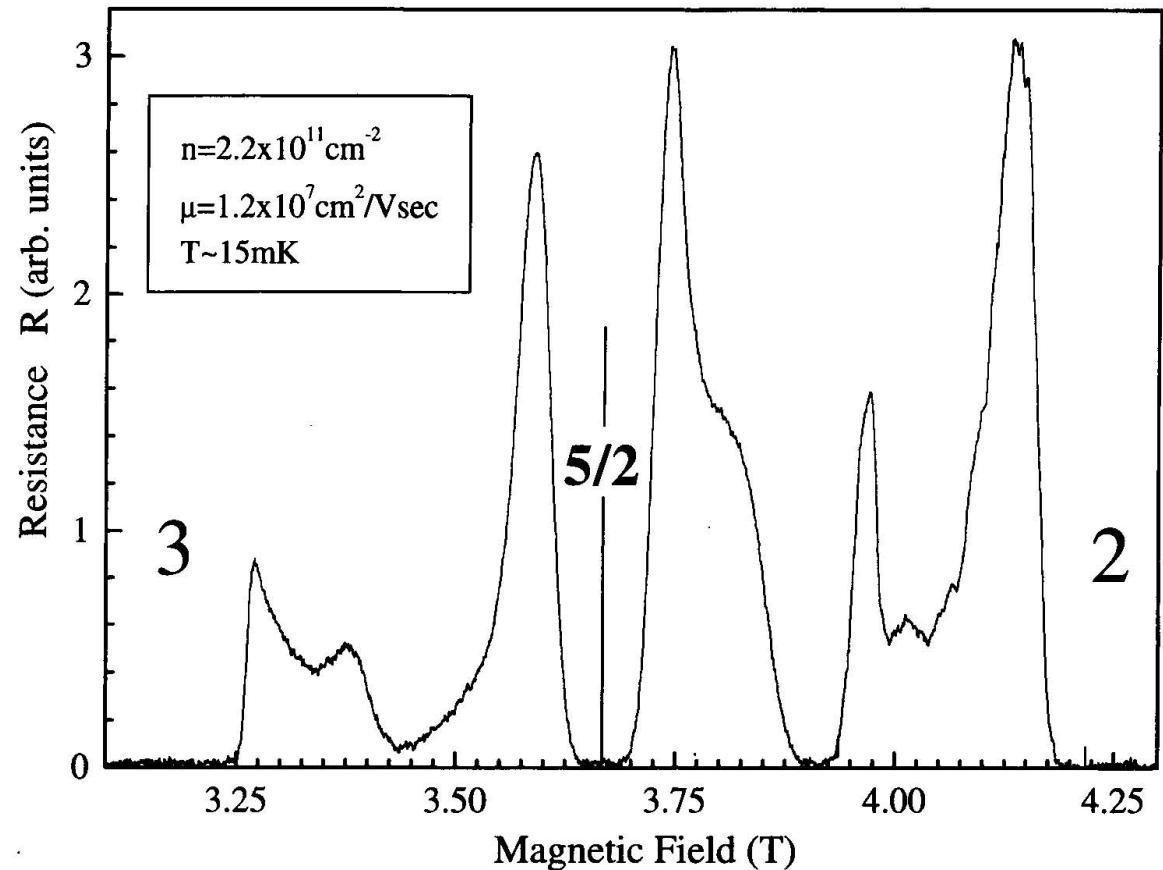


Figure 20. FQHE at $\nu=5/2$. A FQHE state at such an even denominator fraction should not be allowed. The origin of the state remains unclear. An exciting possibility for the origin of this state is the formation of composite fermion pairs. These unpublished data were taken by J.-S. Xia and Wei Pan at the NHMFL in Gainesville, FL.

Спасибо за внимание!

**Добро пожаловать в Центр
сверхпроводимости и квантовых
материалов ФИАН !**