

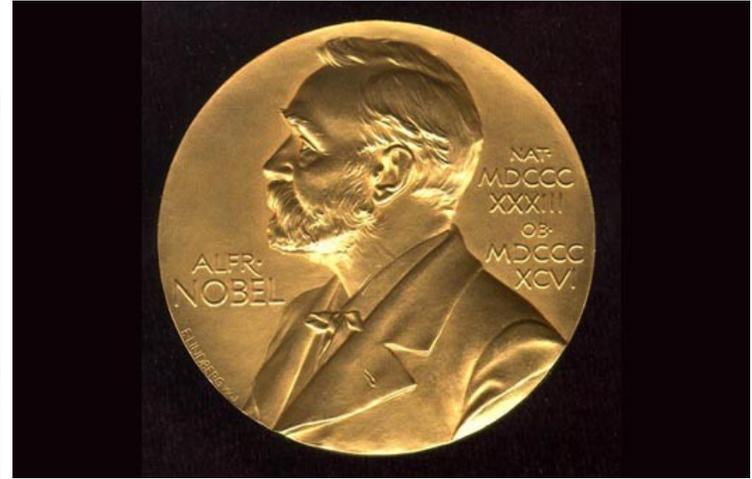


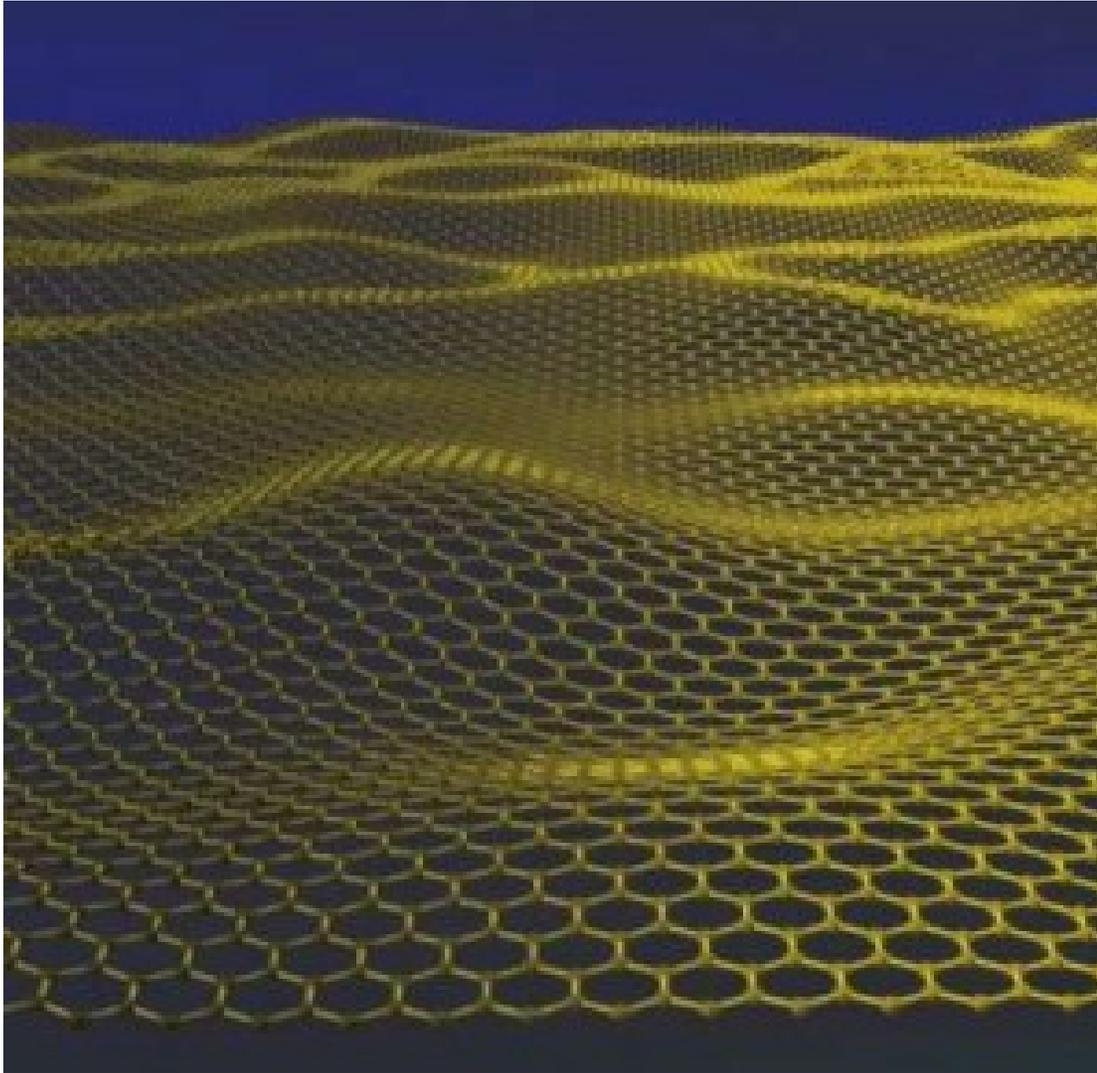
PHYSICS
NOBEL
PRIZE
2010



of the University of Manchester, United Kingdom
“for groundbreaking experiments regarding the
two-dimensional material graphene”

(«за новаторские эксперименты по исследованию
двумерного материала графена»)





Графен

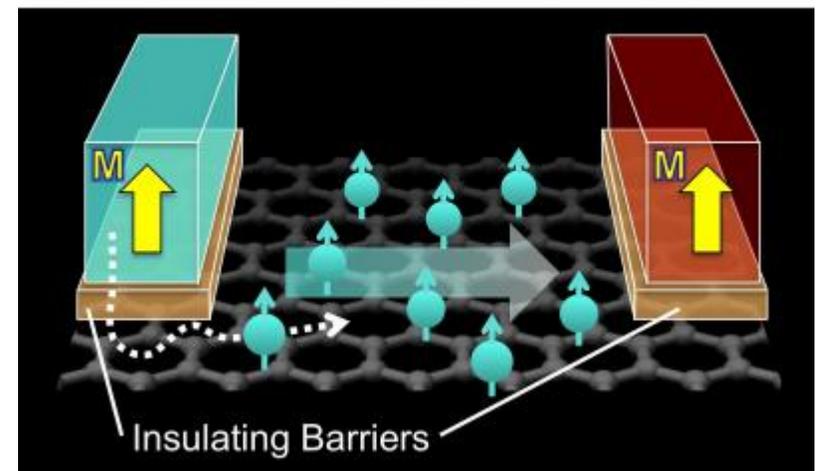
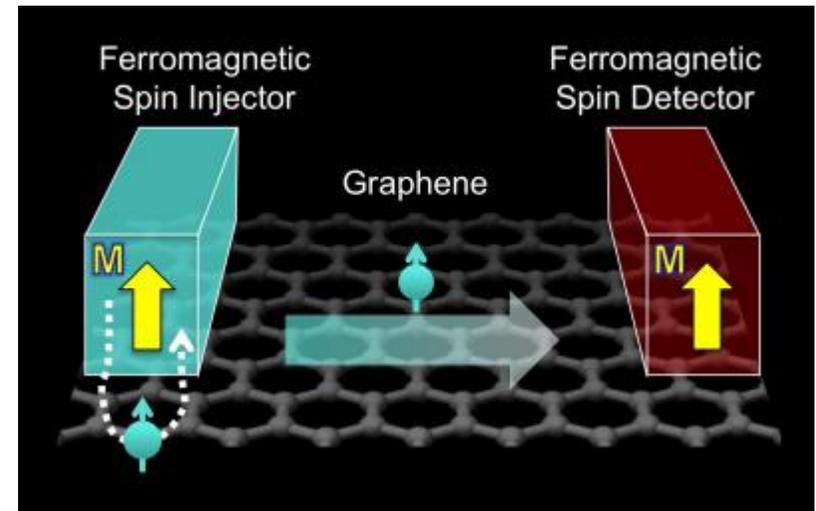


C

Физики университета Калифорнии прокладывают путь к спиновому компьютеру на основе графена

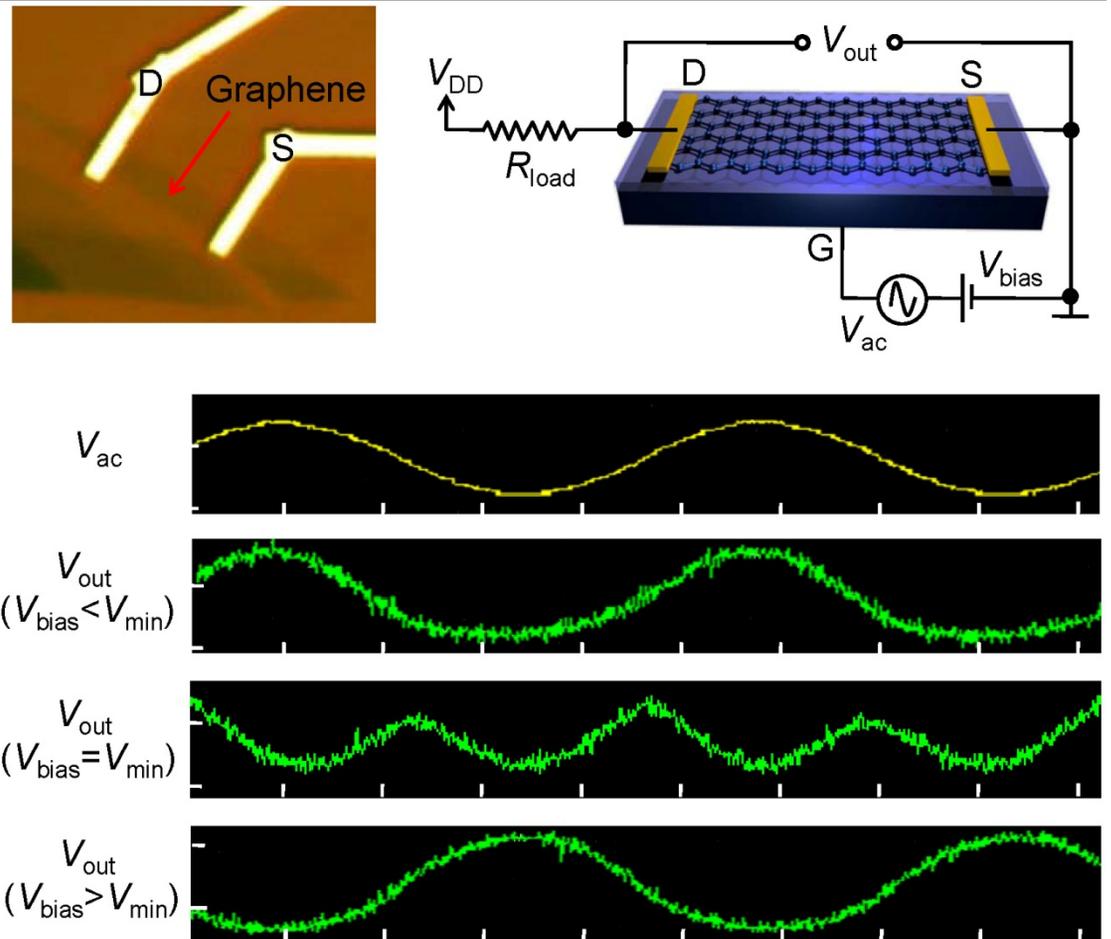
(Октябрь 14, 2010)

Введение слоя изолятора драматически (30-кратно) улучшило эффективность спиновой инжекции в графен



Rice Researchers Introduce Graphene-Based Amplifiers

(Октябрь 13, 2010)

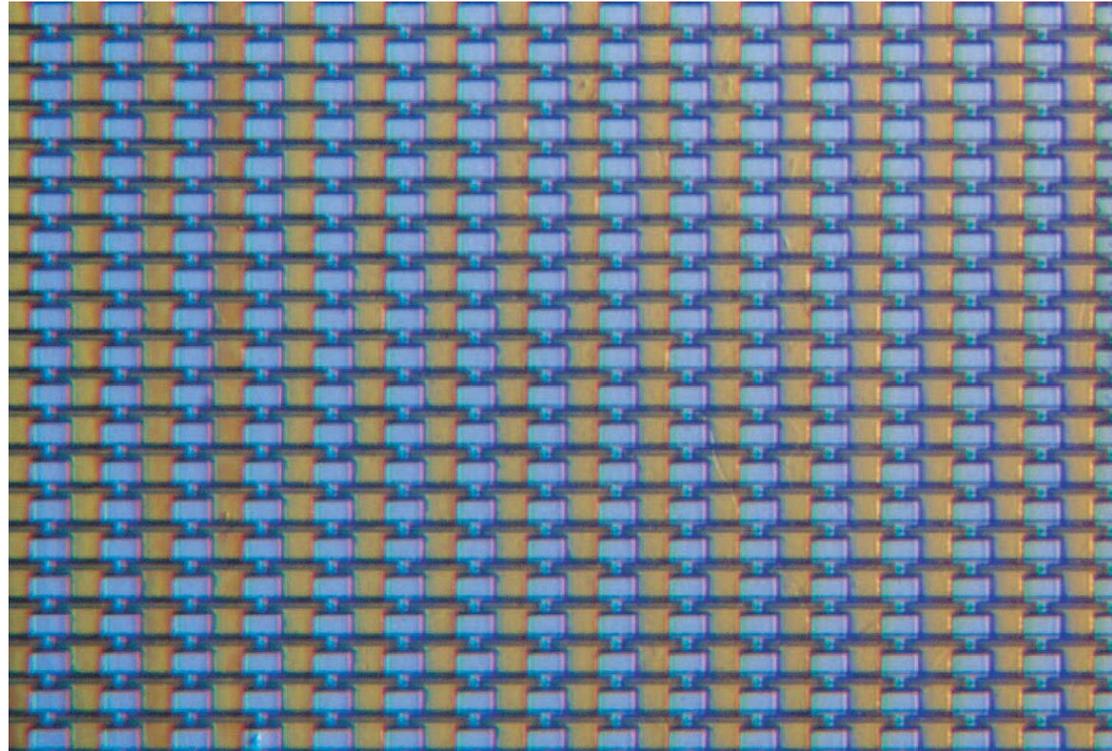


Новый метод изготовления графена использует шаблоны из карбида кремния

(Октябрь 6, 2010)

Технологический институт Джорджии (США):

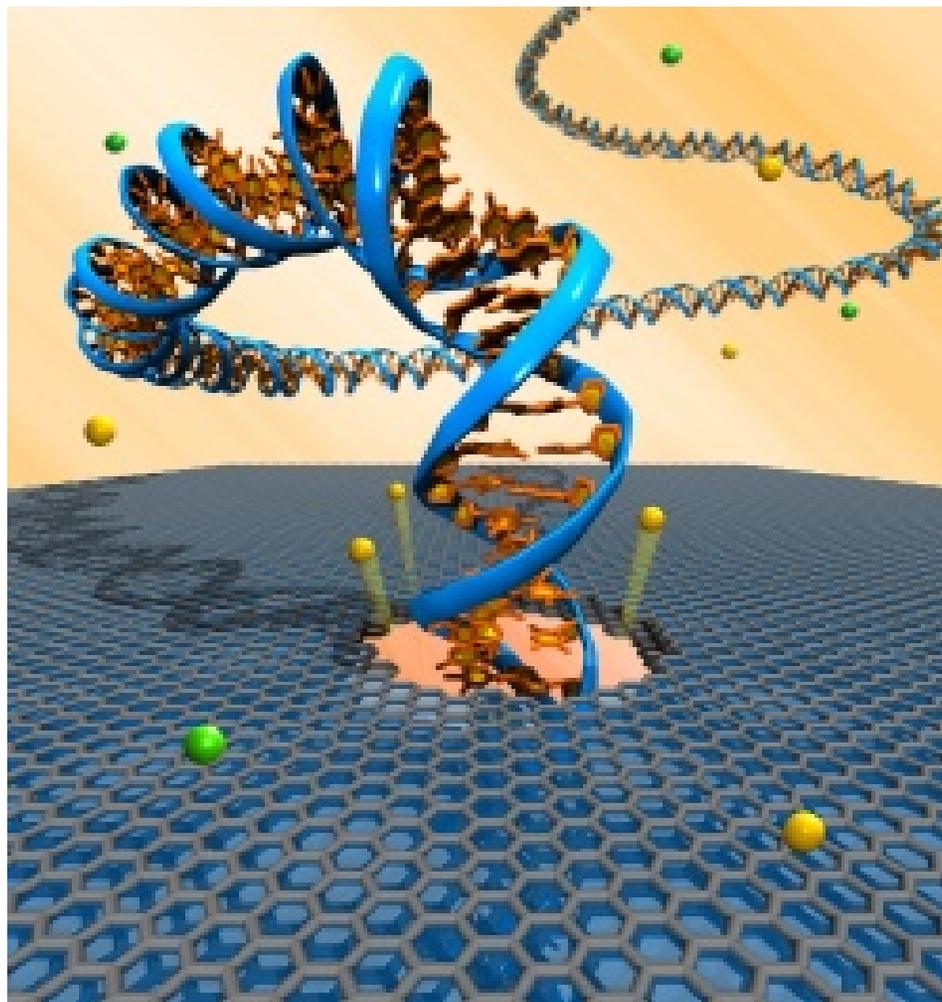
С использованием новой техники выращивания на шаблоне ученые изготовили массив из 10000 графеновых транзисторов на чипе размером 0.24 кв. см.



Первый шаг к электронному анализу последовательности ДНК: перемещение через нанопоры в графене

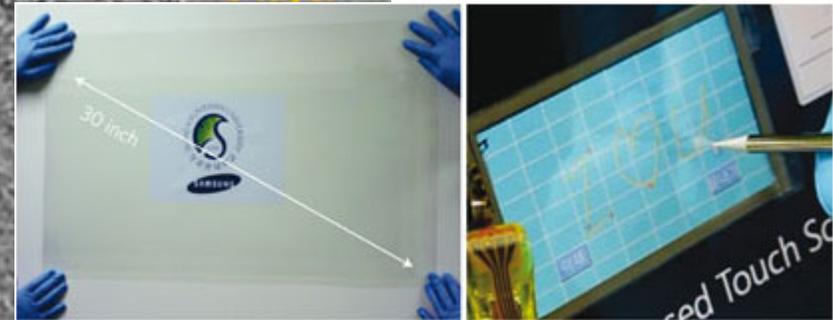
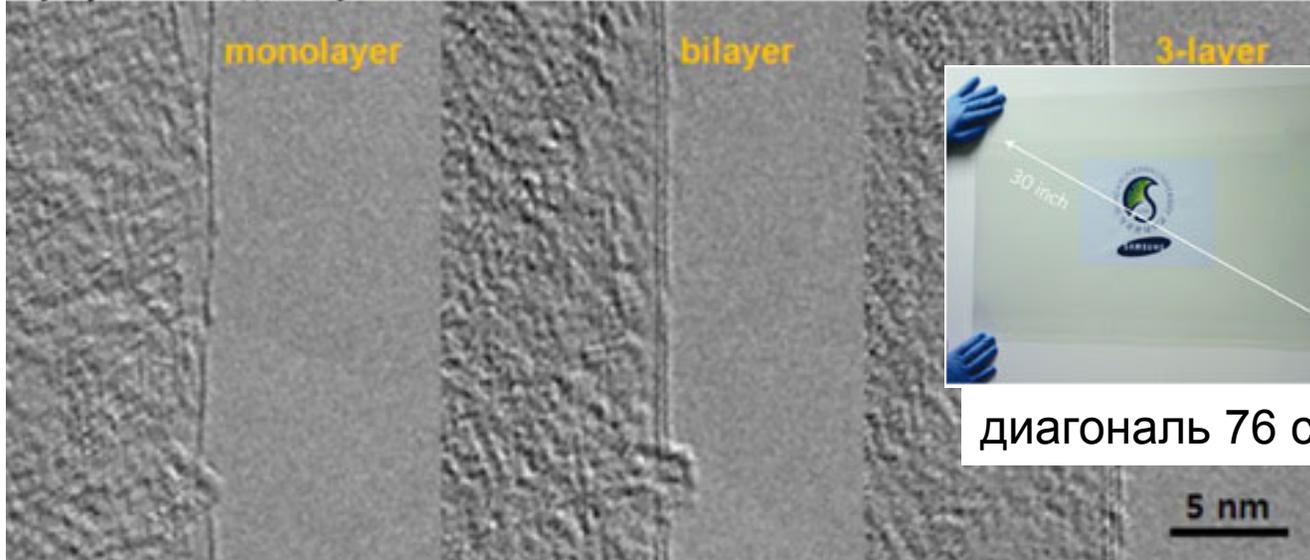
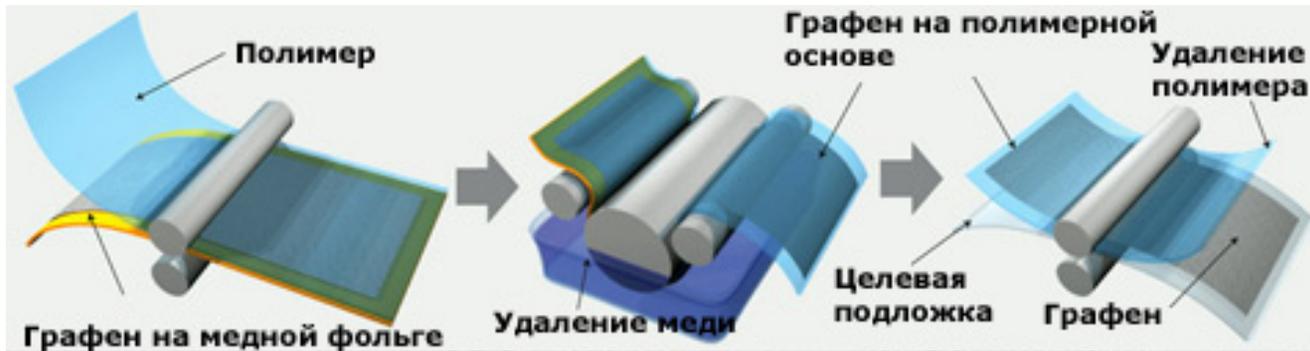
(Июль 23, 2010)

(Pennsylvania University,
Philadelphia, USA)



Производство пластика (не обязательно) с графеновым покрытием

с помощью стандартной роликовой технологии (Samsung)



диагональ 76 см

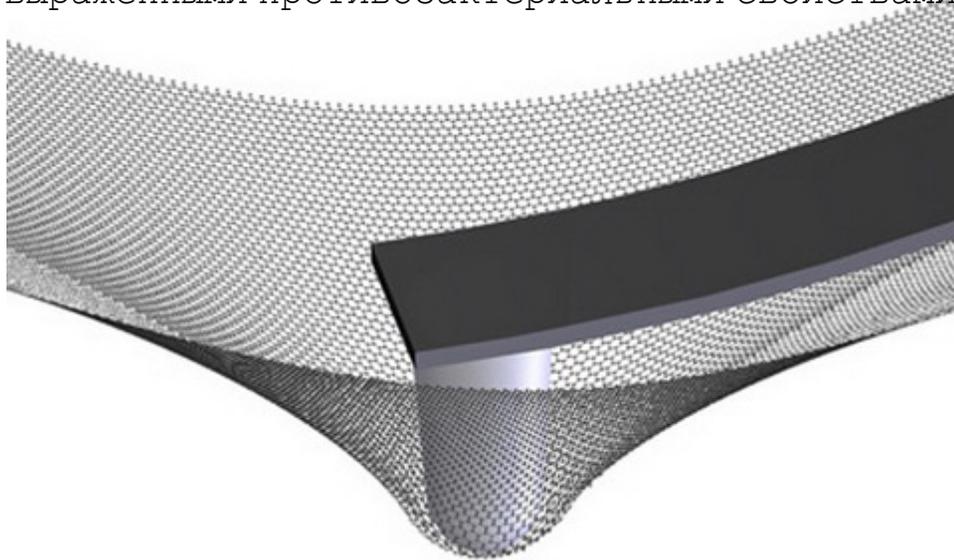
сенсорный экран
на графене

1. Углеродное сырьё осаживается на гладкую пластину из меди методом реакционного химического осаждения
2. Сверху наносят покрытие из клейкого полимера.
3. Медная подложка вытравливается, а графен переклеивают на листы пластика или другую поверхность.
4. Таким способом можно наносить даже несколько слоёв графена один на другой — и мы получаем пластик с графеновым покрытием, который можно разрезать на тачскрины любого размера.

Листы из оксида графена могут стать бактерицидным пластырем

(Июль 27, 2010)

Ученые из Шанхайского института прикладной физики обнаружили, что бумага из оксида графена обладает выраженными противобактериальными свойствами.



Оксид графена представляет собой лист оксида графита толщиной в одну молекулу. Этот наноматериал напоминает тонкую бумагу и обладает высокой прочностью. Ученые разработали метод получения листов графена при помощи вакуумной фильтрации его суспензии. После чего они попытались вырастить на нем бактериальные клетки (кишечная палочка) и клетки человека. В ходе эксперимента оказалось, что бактерии не могут размножаться на среде с оксидом графена. А вот на клетки человека это соединение никак не влияет. Исследователи предполагают, что эти свойства бумаги из оксида графена позволят применять ее в качестве бактерицидных пластырей, упаковки пищевых продуктов, дезодорирующей выстилки обуви и многого другого.

Открытие графеном не ограничивается

Сообщения о последующих 2D кристаллических материалах: нитрид бора, дисульфид молибдена, ... :

BN, MoS₂, NbSe₂, Bi₂Sr₂CaCu₂O_x

Science, **306**, 666 (2004)

Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films

K. S. Novoselov,¹ A. K. Geim,^{1*} S. V. Morozov,² D. Jiang,¹
Y. Zhang,¹ S. V. Dubonos,² I. V. Grigorieva,¹ A. A. Firsov²

We describe monocrystalline graphitic films, which are a few atoms thick but are nonetheless stable under ambient conditions, metallic, and of remarkably high quality. The films are found to be a two-dimensional semimetal with a tiny overlap between valence and conductance bands, and they exhibit a strong ambipolar electric field effect such that electrons and holes in concentrations up to 10^{13} per square centimeter and with room-temperature mobilities of $\sim 10,000$ square centimeters per volt-second can be induced by applying gate voltage.

¹Department of Physics, University of Manchester, Manchester M13 9PL, UK. ²Institute for Microelectronics Technology, 142432 Chernogolovka, Russia.

*To whom correspondence should be addressed.
E-mail: geim@man.ac.uk



Andre Geim

Андрей Константинович Гейм – голландский физик.

Р. 1958, Сочи;

Окончил МФТИ в 1982 и аспирантуру, кфмн 1987,
н.с. ИФТТ АН СССР.

Стипендия Английского королевского об-ва 1990 г.

С 1990 г. работал за рубежом:

Ноттингемский ун-т, ун-т Бата, Копенгагенский ун-т, ун-т Неймегена,
с 2001 г. – проф. Манчестерского ун-та.

Konstantin Novoselov

Константин Сергеевич Новоселов – российский и британский физик.

Р. 1974, г. Нижний Тагил;

Окончил МФТИ в 1997. До 1999 в аспирантуре ИПТМ (Ин-т проблем
технологии микроэлектроники) РАН (Черноголовка).

С 1999 г. в ун-те Неймегена (рук. А.Гейм), с 2001 г. в Манчестере,
PhD в 2004 г., в н/вр проф. Манчестерского ун-та.

*For research that first make
people laugh and then think*

2000. PHYSICS

Andre Geim of the University of Nijmegen (the Netherlands) and Sir Michael Berry of Bristol University (UK), for using magnets to levitate a frog.



Eur. J. Phys. 18 (1997) 307–313. Printed in the UK

PII: S0143-0807(97)84689-2

Of flying frogs and levitrons

M V Berry† and A K Geim‡

† H H Wills Physics Laboratory, Tyndall Avenue, Bristol BS8 1TL, UK

‡ High Field Magnet Laboratory, Department of Physics, University of Nijmegen, Toernooiveld, 6525 ED Nijmegen, The Netherlands

Received 4 June 1997



Figure 4(b). Frog levitated in the stable region.

Теорема Ирншоу (обобщенная):

Объект, состоящий из зарядов, магнитов и масс в фиксированной конфигурации не может поддерживаться в устойчивом равновесии комбинацией статических электрических, магнитных и гравитационных сил, т.е. любых сил с потенциалом, подчиняющимся ур-ю Лапласа.



Figure 4(b). Frog levitated in the stable region.

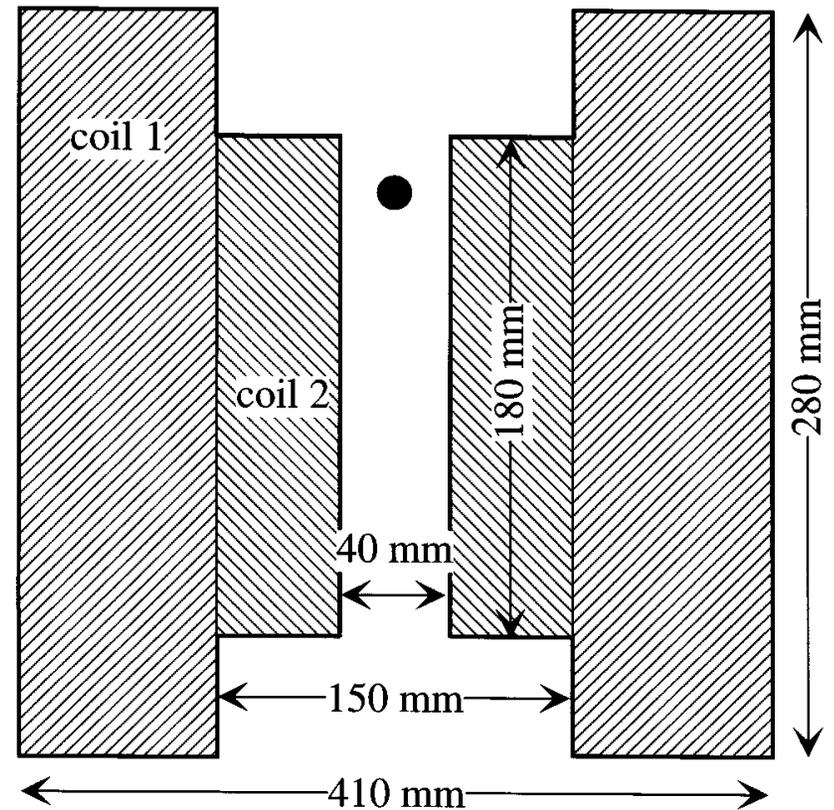


Figure 4(a). Geometry of coils in Bitter magnet used for levitating diamagnetic objects. The currents in the two coils were equal. The region of stable levitation is near the top of coil 1, and marked with a dot.

Из представления Нобелевского комитета:

“Первые, кто выделил, идентифицировал и охарактеризовал одиночный слой атомов углерода, называемый графеном .”
(Science, October 2004)

Первый истинно двухмерный кристаллический материал:

Тонкий

Прочный

Легкий

Прозрачный и, в то же время, проводящий

Из представления Нобелевского комитета:

“Первые, кто выделил, идентифицировал и охарактеризовал одиночный слой атомов углерода, называемый графеном .”
(Science, October 2004)

Первый истинно двухмерный кристаллический материал:

Тонкий

Прочный

Легкий

Прозрачный и, в то же время, проводящий

Модуль Юнга $\sim 1100 \text{ GPa}$ (сравним с C-нанотрубками)

(алюминий ~ 70 , сталь ~ 210 , хром ~ 300 , вольфрам ~ 350 , иридий ~ 520)

Теплопроводность $\sim 5000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

(сталь ~ 47 , алюминий ~ 209 , медь ~ 384 , серебро ~ 407)

Подвижность носителей заряда до $\sim 200000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$

(кремний $\sim 10^3$)

Из представления Нобелевского комитета:

Возможные приложения:

Сенсорные экраны, дисплеи

Солнечные батареи

Гибкая (деформируемая) электроника

Композитные материалы

Газовые сенсоры для одиночных молекул

Расшифровка последовательностей ДНК

... ..

Из представления Нобелевского комитета:

Если сделать из графена (один слой атомов углерода) гамак для кошки размером 1м x 1м, то он выдержит 4 кг, а сам и будет весить как один кошкин ус.



TRIXIE

PHYSICAL REVIEW VOLUME 71, NUMBER 9 MAY 1, 1947

The Band Theory of Graphite

P. R. WALLACE*

National Research Council of Canada, Chalk River Laboratory, Chalk River, Ontario

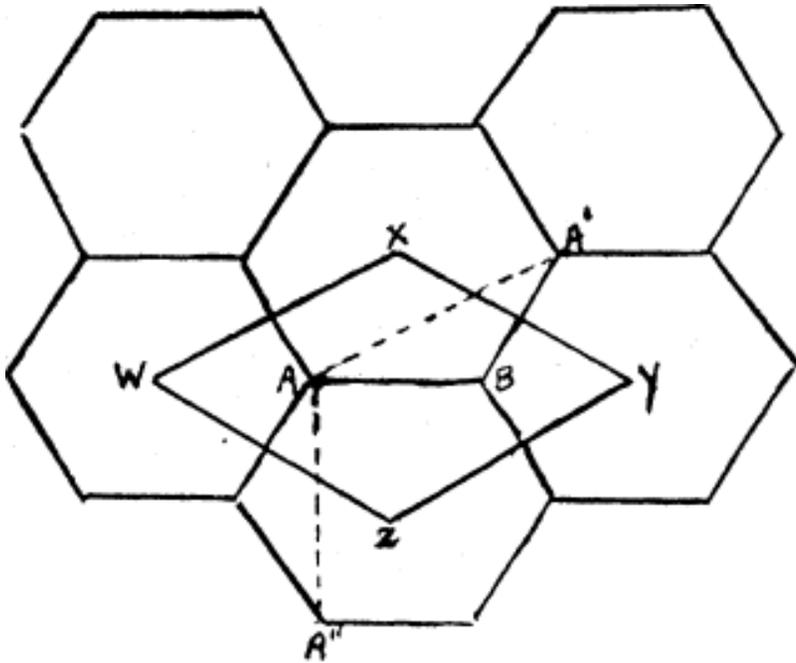
(Received December 19, 1946)

The structure of the electronic energy bands and Brillouin zones for graphite is developed using the "tight binding" approximation. Graphite is found to be a semi-conductor with zero activation energy, i.e., there are no free electrons at zero temperature, but they are created at higher temperatures by excitation to a band contiguous to the highest one which is normally filled. The electrical conductivity is treated with assumptions about the mean free path. It is

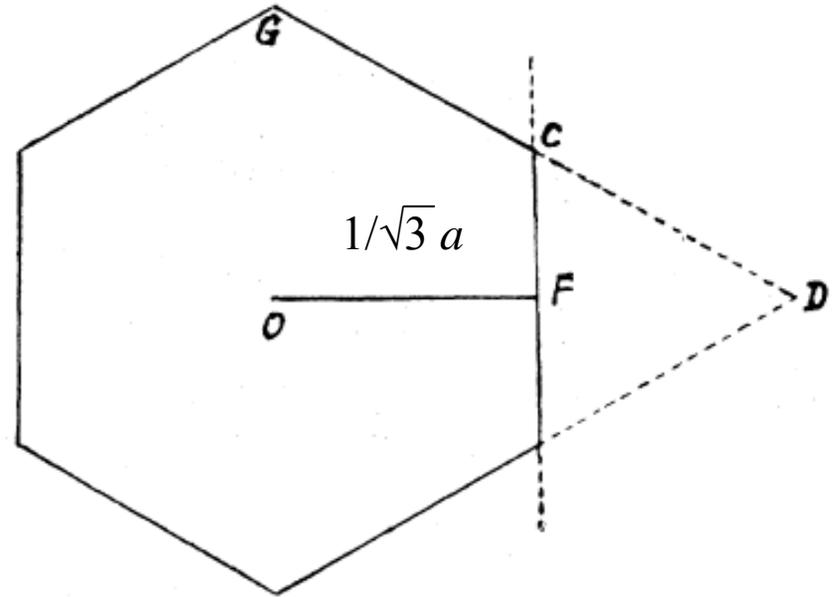
2. ZONE STRUCTURE OF A SINGLE HEXAGONAL LAYER

Since the spacing of the lattice planes of graphite is large (3.37\AA) compared with the hexagonal spacing in the layer (1.42\AA), a first approximation in the treatment of graphite may be obtained by neglecting the interactions between planes, and supposing that conduction takes place only in layers.

0.142 nm



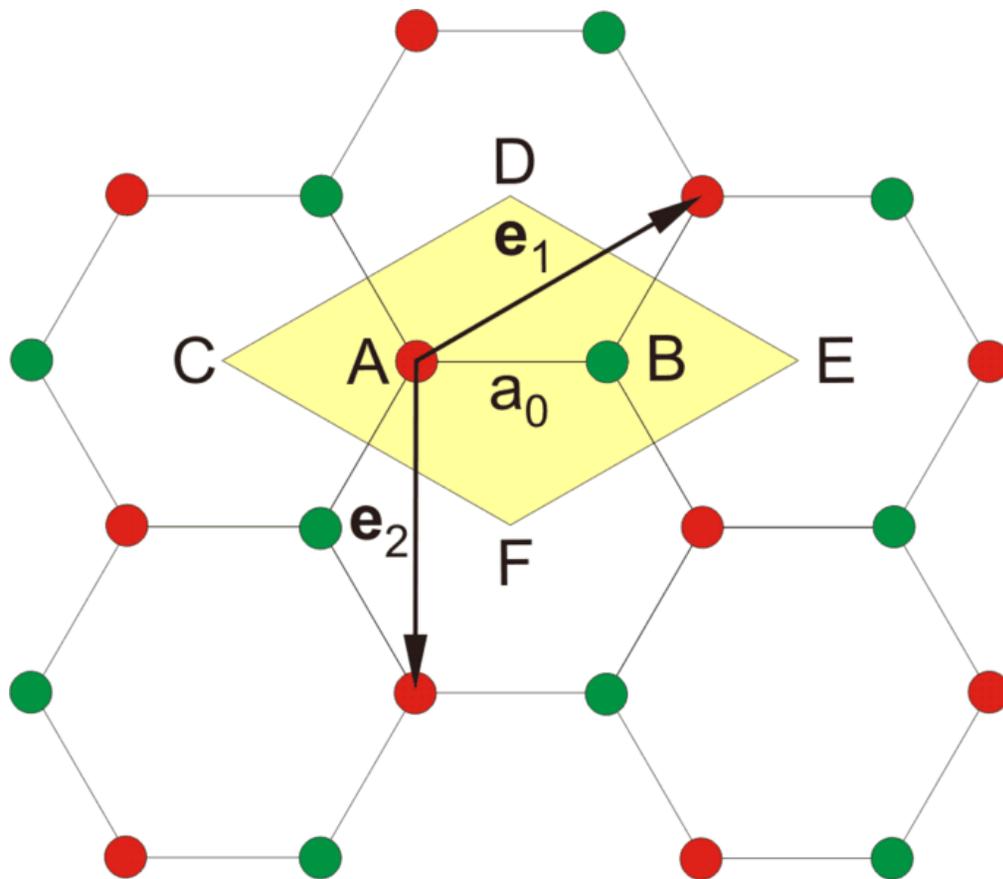
Элементарная ячейка WXYZ.
AA' и AA'' – векторы основных трансляций ($a = 0.246$ nm)



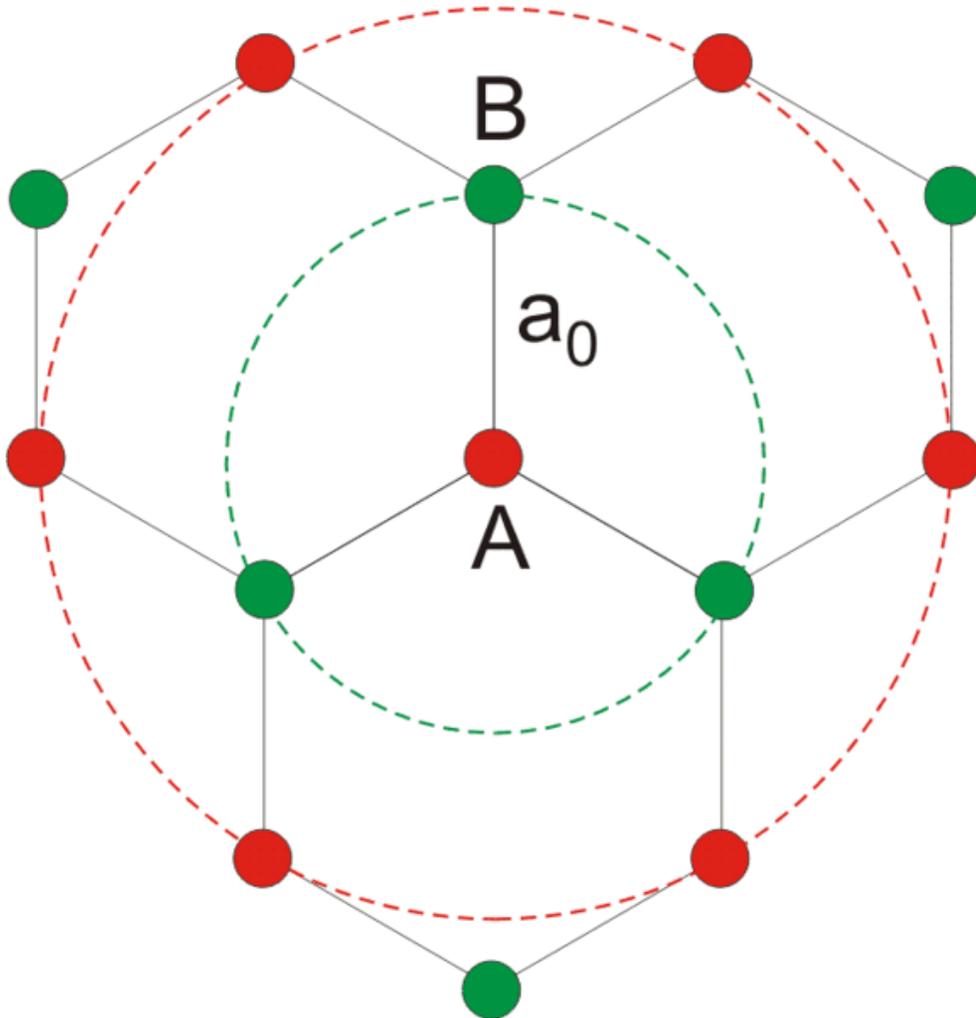
Зона Бриллюэна

(ячейка обратной решетки; область допустимых неэквивалентных значений квазиимпульса \mathbf{k})

Элементарная ячейка графена



Гексагональная решётка графена



Ближайшие атомы в окружении центрального узла (А) решётки. Красная пунктирная окружность соответствует ближайшим соседям из той же самой подрешётки кристалла (А), а зелёная окружность соответствует атомам из второй подрешётки кристалла (В).

Электронный гамильтониан

$$H = -t \sum_{\langle i,j \rangle, \sigma} (a_{\sigma,i}^\dagger b_{\sigma,j} + \text{H.c.}) - t' \sum_{\langle\langle i,j \rangle\rangle, \sigma} (a_{\sigma,i}^\dagger a_{\sigma,j} + b_{\sigma,i}^\dagger b_{\sigma,j} + \text{H.c.})$$

$a_{i,\sigma}$ ($a_{i,\sigma}^\dagger$) - операторы уничтожения (рождения) электронов на центре R_i в спиновом состоянии σ ($\sigma = \uparrow, \downarrow$)

$t \approx 2.8 \text{ eV}$ - «взаимодействие» между электронами ближайшего круга

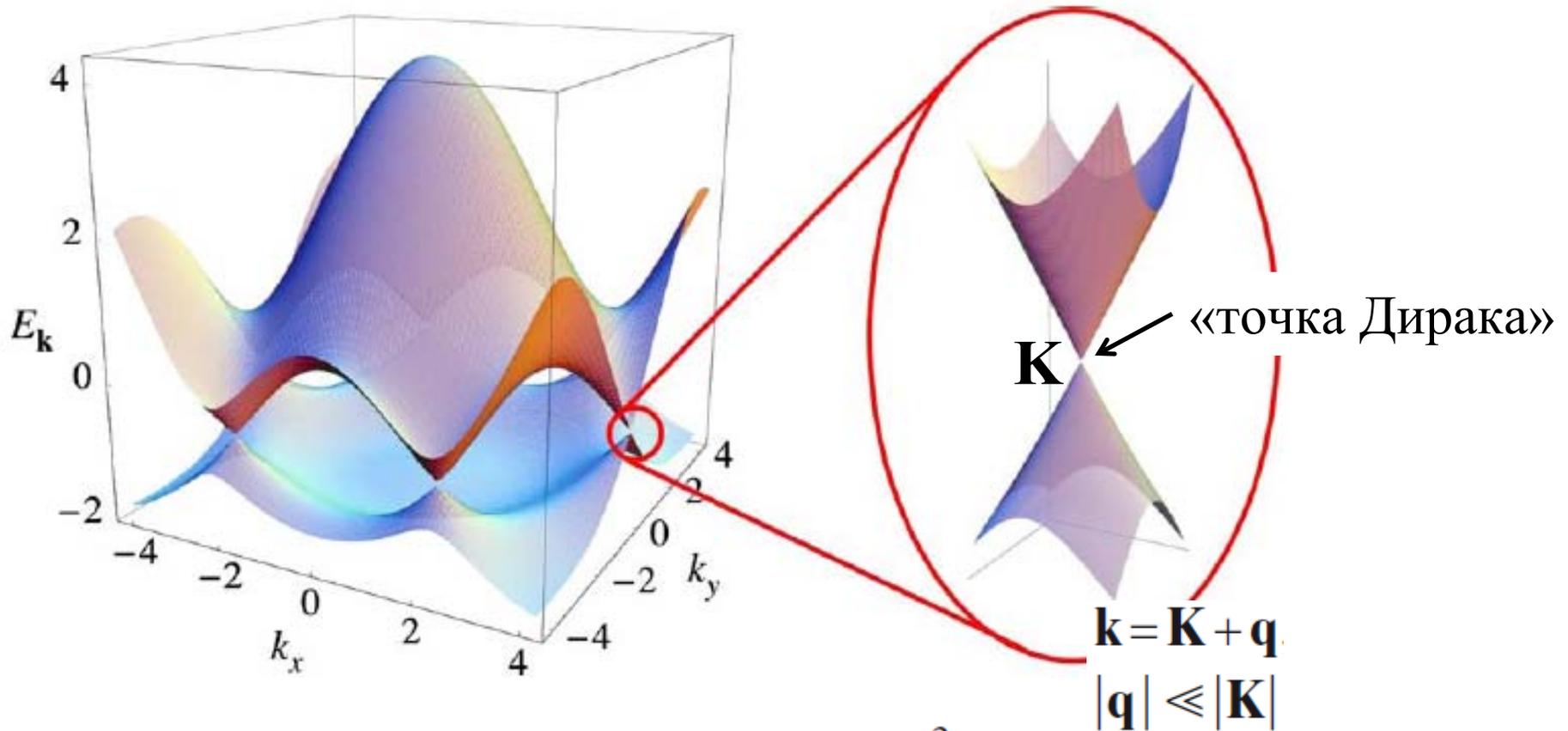
$0.02t \leq t' \leq 0.2t$ - «взаимодействие» -- " -- следующего круга

Дисперсия в поле типа «медовые соты»

$$E_{\pm}(\mathbf{k}) = \pm t \sqrt{3 + f(\mathbf{k})} - t' f(\mathbf{k})$$

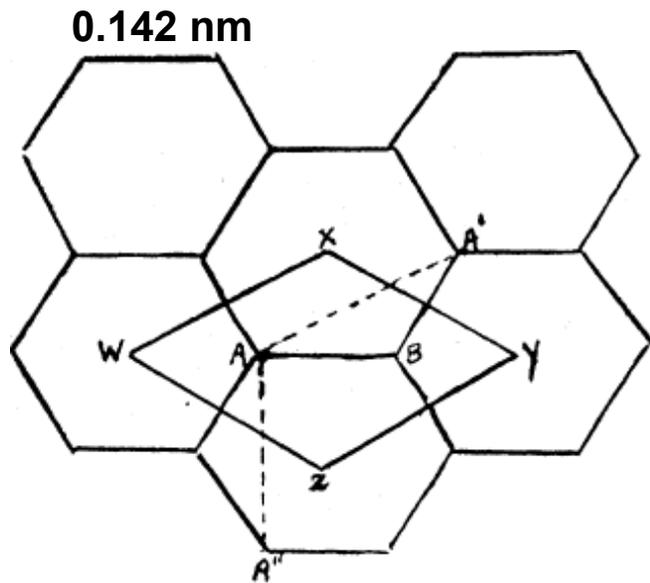
$$f(\mathbf{k}) = 2 \cos(\sqrt{3}k_y a) + 4 \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}k_y a\right) \cos\left(\frac{3}{2}k_x a\right)$$

Электронная дисперсия в решетке типа медовых сот

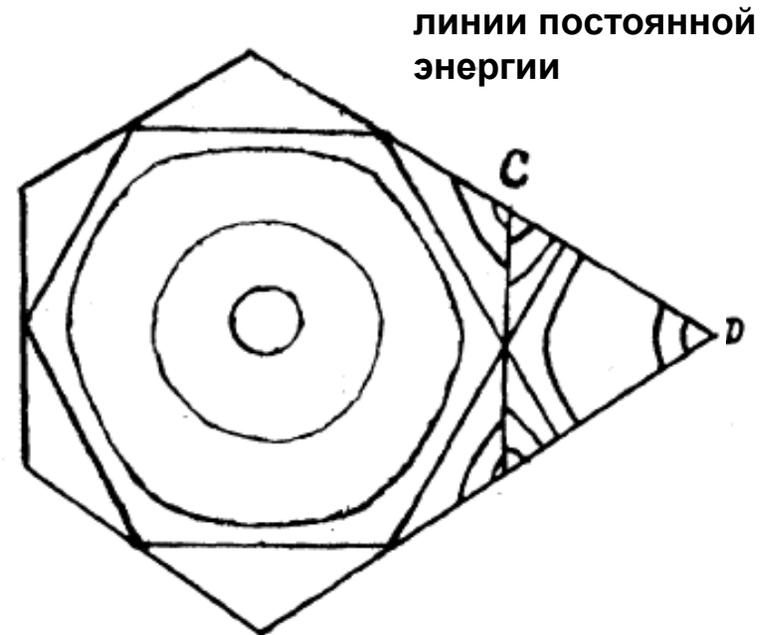


$$E_{\pm}(\mathbf{q}) \approx \pm v_F |\mathbf{q}| + O[(q/K)^2]$$

$$v_F = 3ta/2 \cong 1 \cdot 10^6 \text{ m/sec}$$

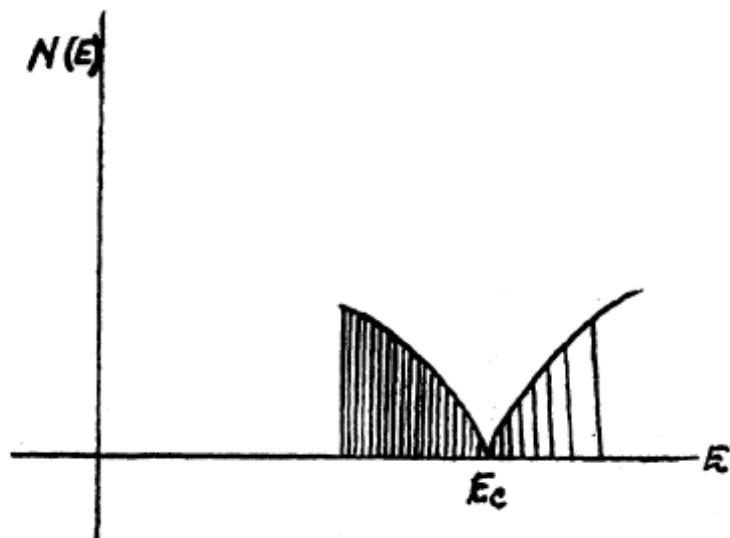


Элементарная ячейка WXYZ.
 AA' и AA'' – векторы основных трансляций ($a = 0.246 \text{ nm}$)



Зона Бриллюэна
 (ячейка обратной решетки; область допустимых неэквивалентных значений квазиимпульса \mathbf{k})

$$E = \pm \sqrt{\gamma_0^2 \left(1 + 4 \cos^2 \pi k_y a + 4 \cos \pi k_y a \cos \pi k_x \sqrt{3} a \right)}$$



Плотность электронных состояний
в окрестности точки С при конечных
температурах

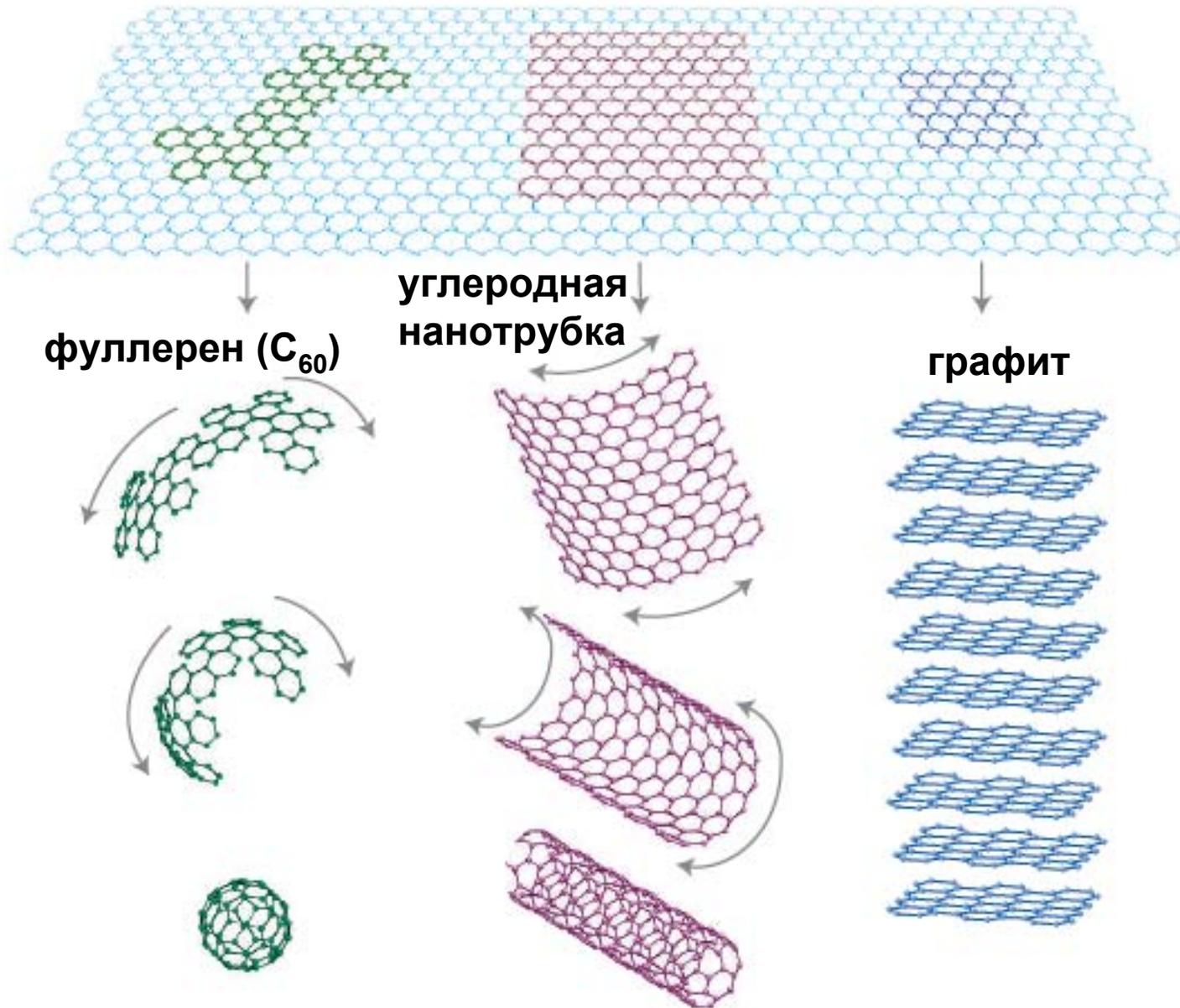
P.R. Wallace Phys. Rev. 71, 622 (1947)

В пренебрежении перекрыванием между p_z орбиталями со всеми атомами, кроме 3-х ближайших, и при нулевой температуре, валентная зона полностью заполнена, а зона проводимости полностью пуста.

**Графен – двумерный полупроводник
с нулевой запрещенной зоной**

А ЧТО В ОПЫТЕ?

Родственники графена



536.75

ЭНТРОПИЯ, БЕСПОРЯДОК, ПЛАВЛЕНИЕ

С. М. Стишов

Со времени работ Р. Пайерлса⁶⁴ и Л. Д. Ландау⁶³ известно, что среднеквадратичные отклонения атомов от положения равновесия в двумерном кристалле неограниченно (логарифмически) растут с увеличением размера системы (логарифмический рост среднеквадратичных смещений атомов в действительности является весьма слабым и для наблюдения смещений порядка межатомного расстояния необходим кристалл астрономических размеров⁶⁵). Это означает, что дальний позиционный порядок в двумерном кристалле отсутствует, и, следовательно, **двумерный кристалл в строгом смысле этого слова не существует.**

Из статьи и интервью журналу “Forbes”, номер за октябрь 2009 г.



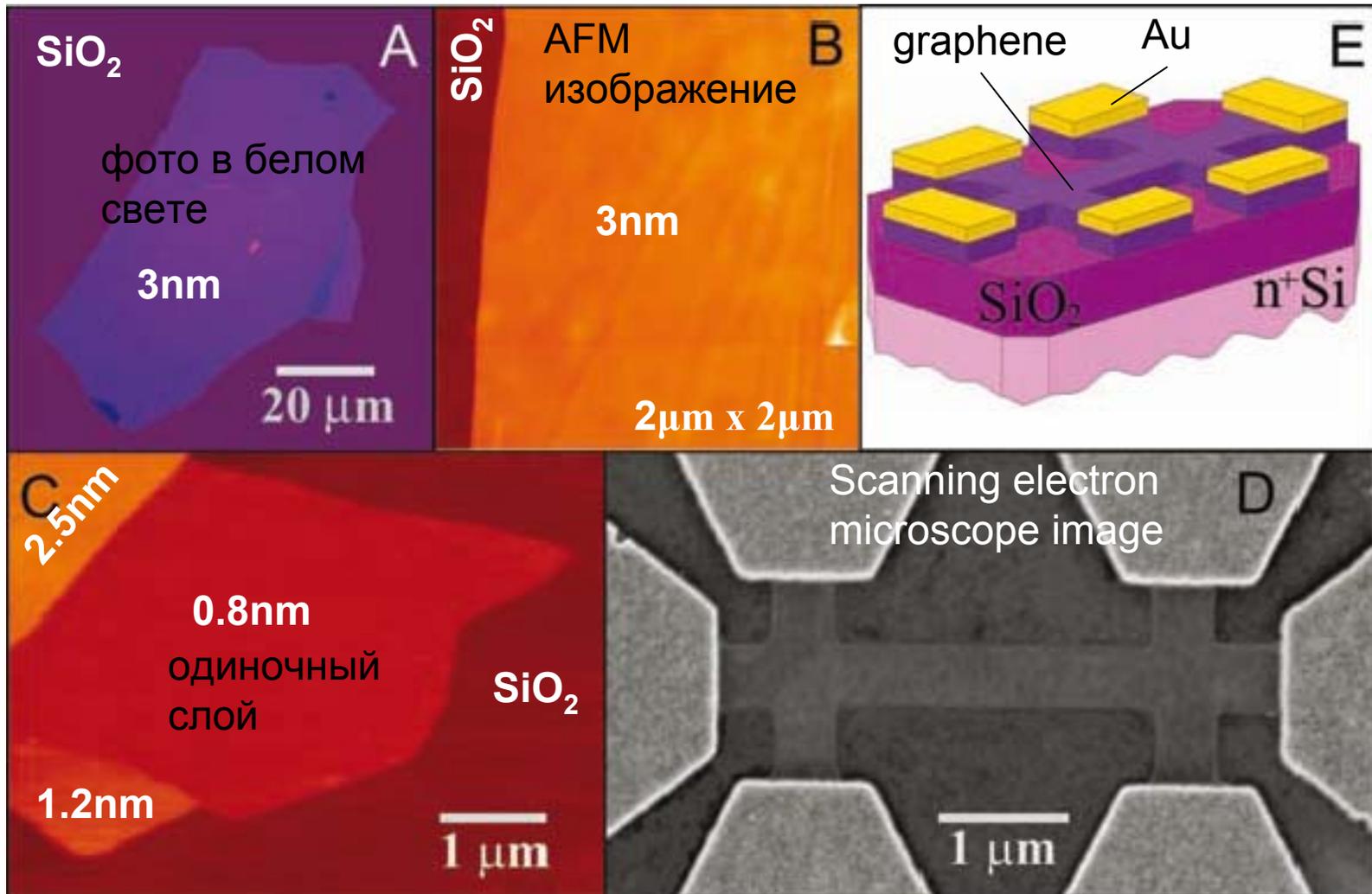
Константин Новоселов демонстрирует как ему удалось получить графен с помощью обычного скотча

«... с помощью обычного скотча готовят образцы графита для работы на сканирующем туннельном микроскопе. Скотч отрывает графитные слои, оставляя абсолютно гладкую поверхность. Ленту выбрасывают вместе с тем, что к ней прилипло. «За то, что мы ее выбрали и исследовали, нас обозвали garbage scientists — мусорными учеными», — смеется Новоселов. Склеивая и разлепляя ленту с хлопьями графита несколько раз, Новоселов получил то, что считалось невозможным, — слои графита толщиной в один атом. Их площадь достигала одного квадратного миллиметра: этого более чем достаточно, чтобы перенести графен на подложку и исследовать механические и электронные свойства.»

Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films

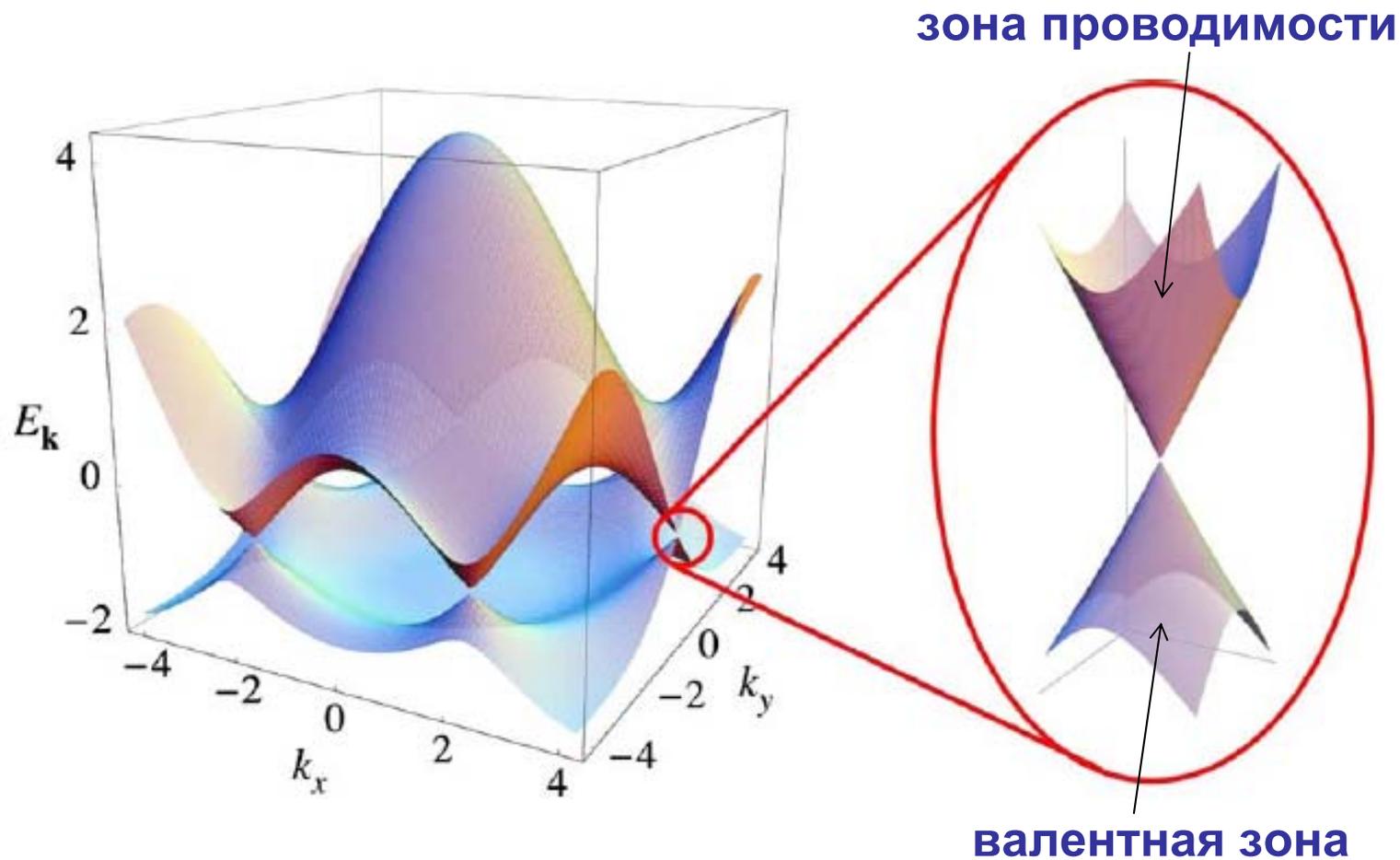
K. S. Novoselov,¹ A. K. Geim,^{1*} S. V. Morozov,² D. Jiang,¹
Y. Zhang,¹ S. V. Dubonos,² I. V. Grigorieva,¹ A. A. Firsov²

Science, **306**, 666 (2004)



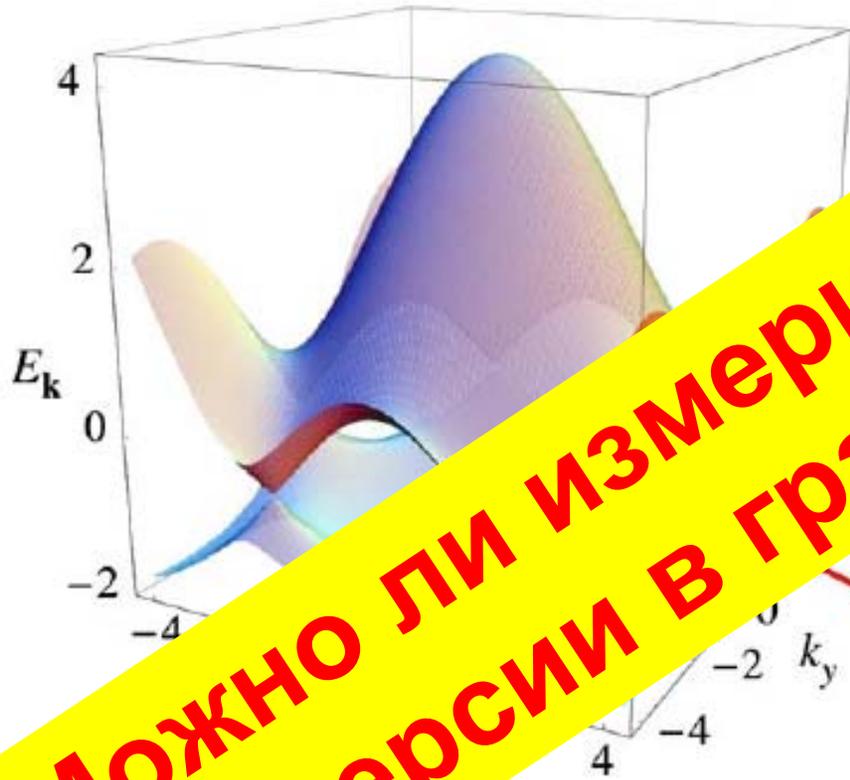
«Критическая составляющая успеха – наблюдение, что графен становится видимым в оптический микроскоп благодаря интерференционному контрасту по сравнению с пустой подложкой, если поместить графен поверх подложки из Si с тщательно подобранной толщиной SiO₂. Если бы не этот простой, но эффективный способ сканирования субстратов в поисках кристалликов графена, они бы вероятно до сих пор не были открыты. Даже зная рецепт, требуется особая осторожность и настойчивость, чтобы найти графен. Например, 5% разница в толщине SiO₂ (315 нм вместо стандартных 300 нм) может сделать графен полностью невидимым.»

“A **fresh surface** of a layered crystal was rubbed against another surface (virtually any solid surface is suitable), which left a variety of flakes attached to it (the rubbing process can be described as similar to “drawing by chalk on a blackboard”). Unexpectedly, among the resulting flakes we always found single layers. Their preliminary identification amid thicker flakes and other residue was done in an optical microscope. 2D crystallites become visible on top of an **oxidized Si wafer** (Fig. 1d), *because even a monolayer adds up sufficiently* to the optical path of reflected light so that the interference color changes with respect to the one of an empty substrate (phase contrast). The whole procedure takes literally **half an hour** to implement and identify probable 2D crystallites.” **Novoselov et al., PNAS (2005)**



Закон дисперсии $E(\mathbf{k})$ возле дна зоны проводимости – линейный, т.е. такой же, как у безмассовых частиц.

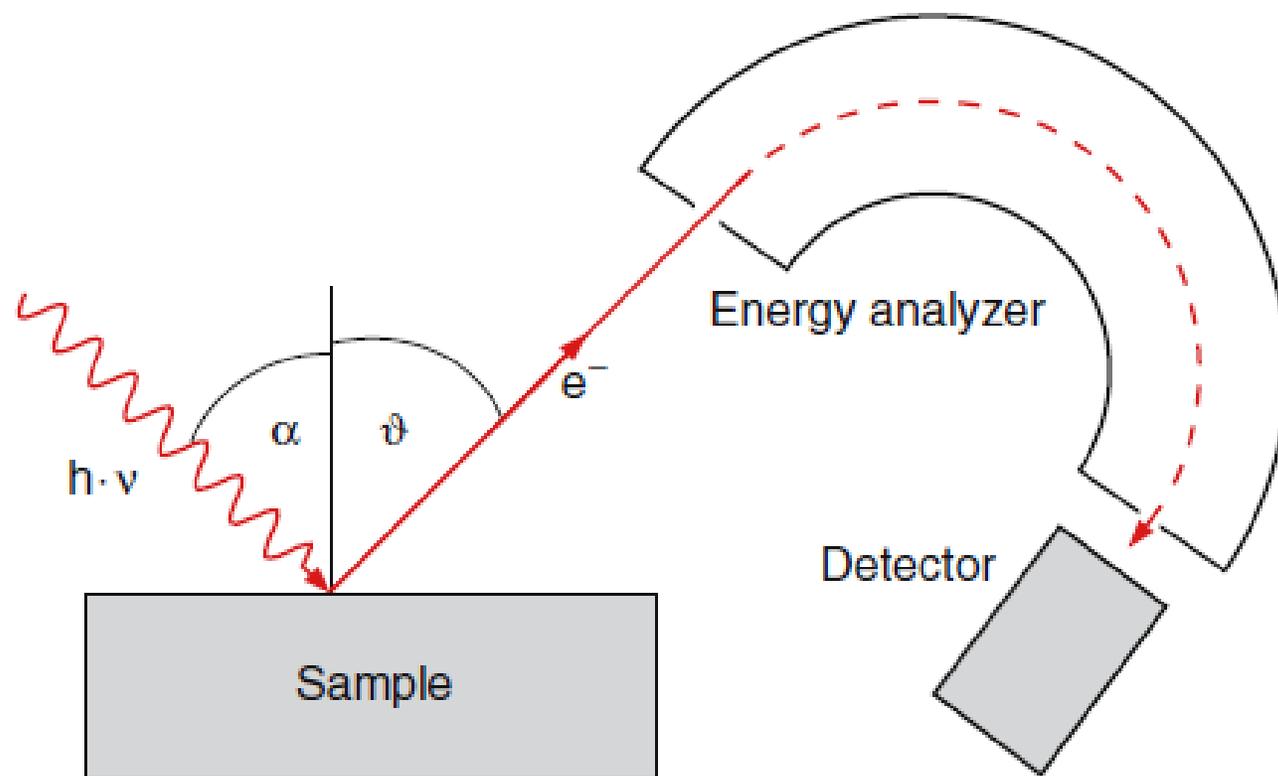
зона проводимости



валентная зона

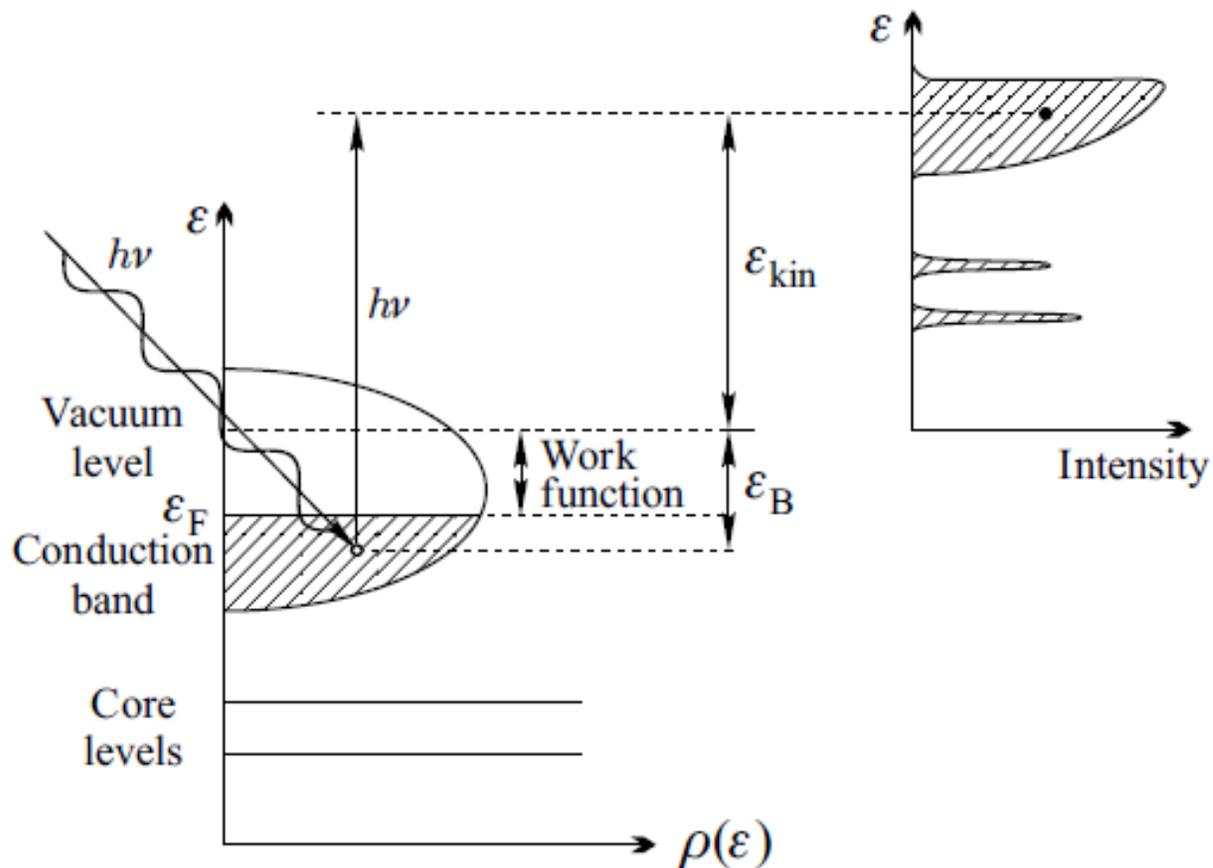
Можно ли измерить закон дисперсии в графене?

Закон дисперсии $E(\mathbf{k})$ возле дна зоны проводимости – линейный, т.е. такой же, как у безмассовых частиц.



Общая схема эксперимента по фотоэлектронной спектроскопии твердого тела

Связь зонной структуры спектра со спектром фотоэлектронов

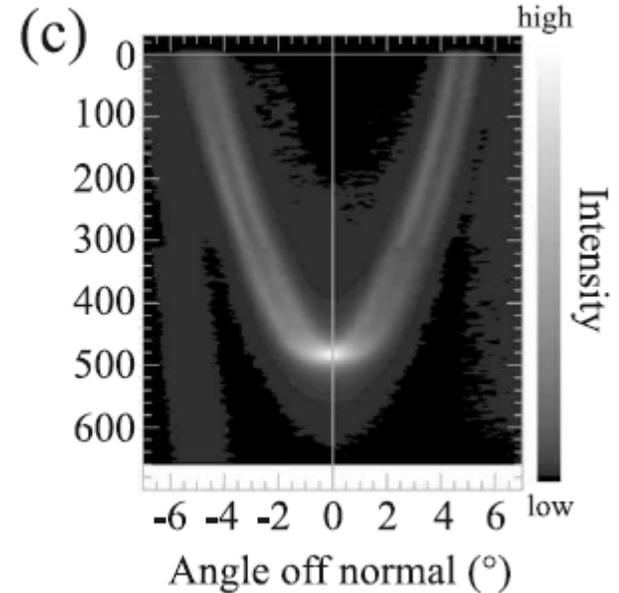
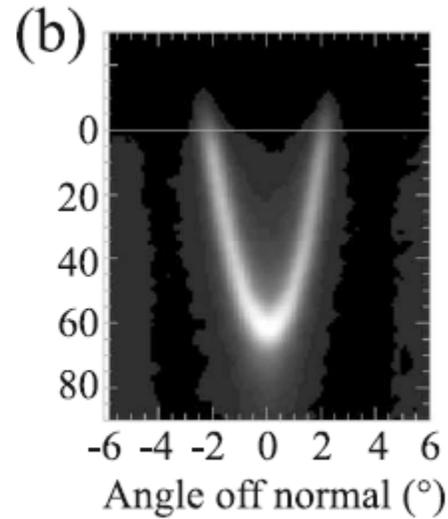
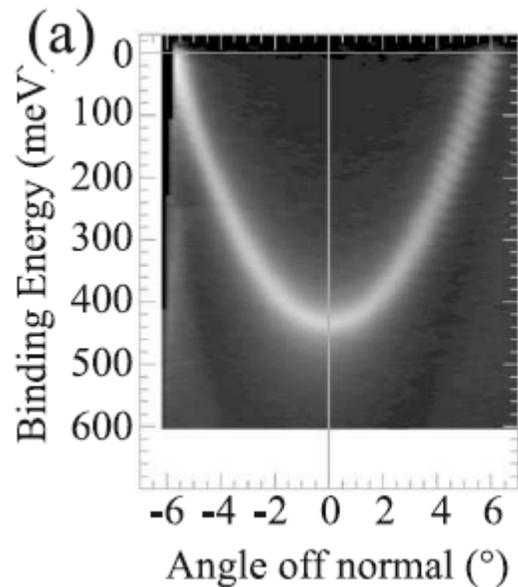


Кривые дисперсии для некоторых металлов

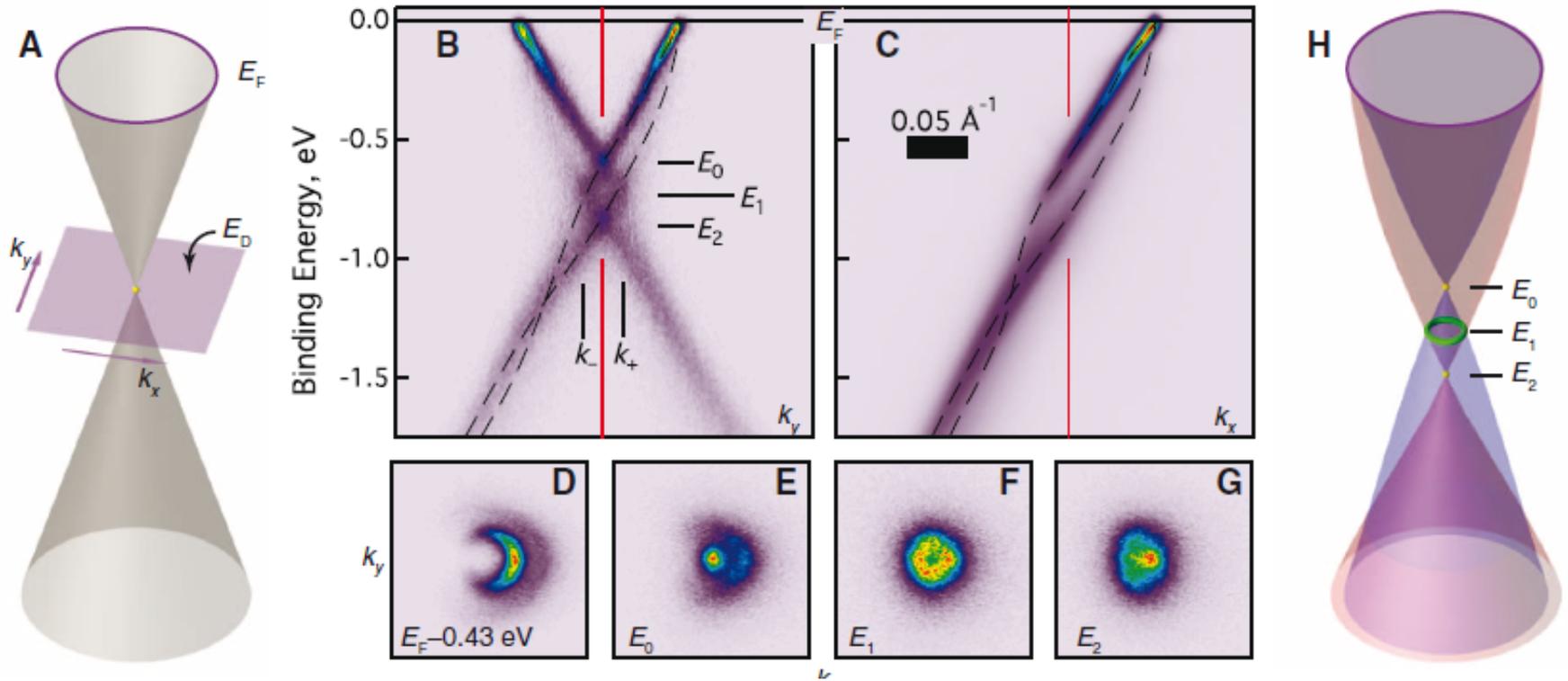
Cu

Ag

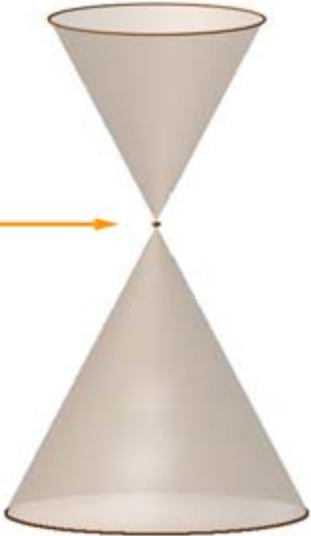
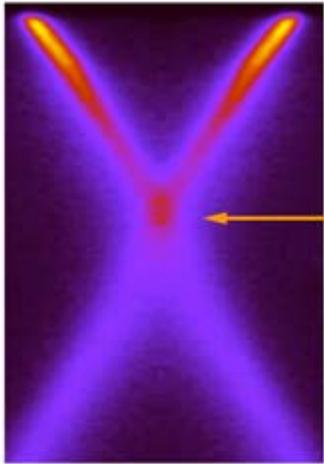
Au



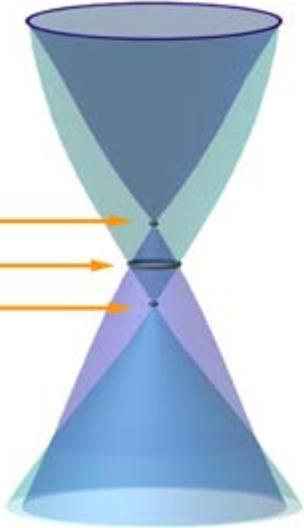
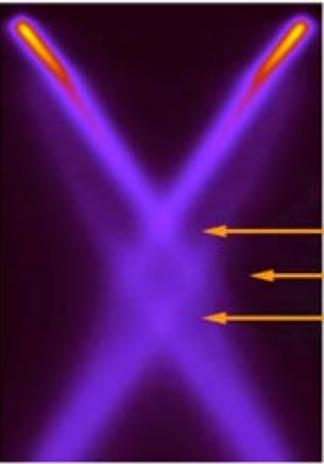
Фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением (ARPES) графена (Advanced Light Source, Berkley, USA)



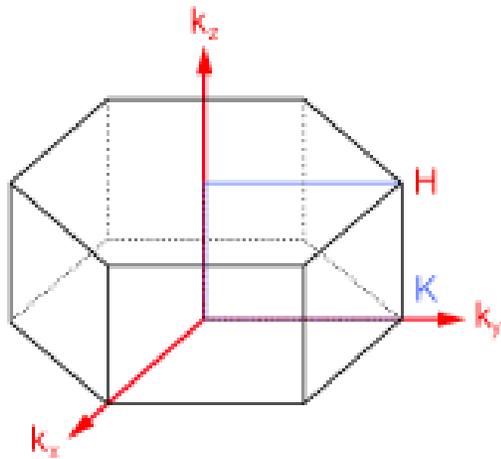
Влияние плазмонов



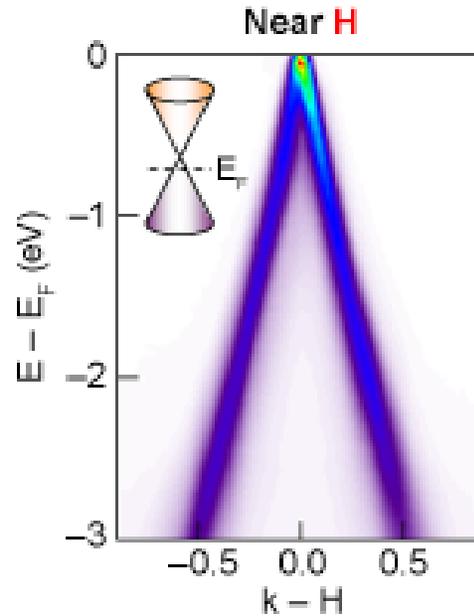
ALSNews Vol. 310, June 30, 2010



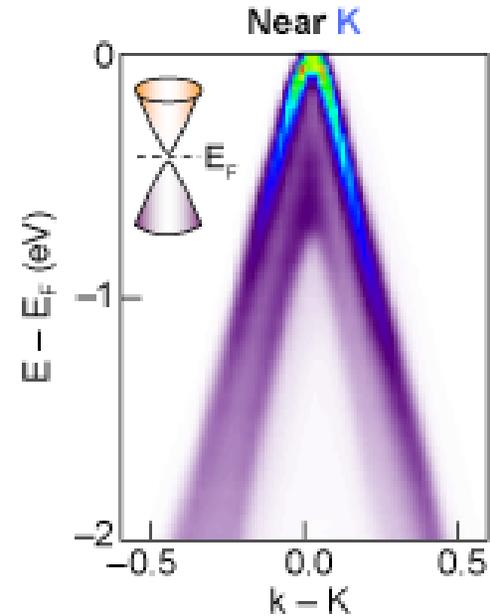
ARPES графита



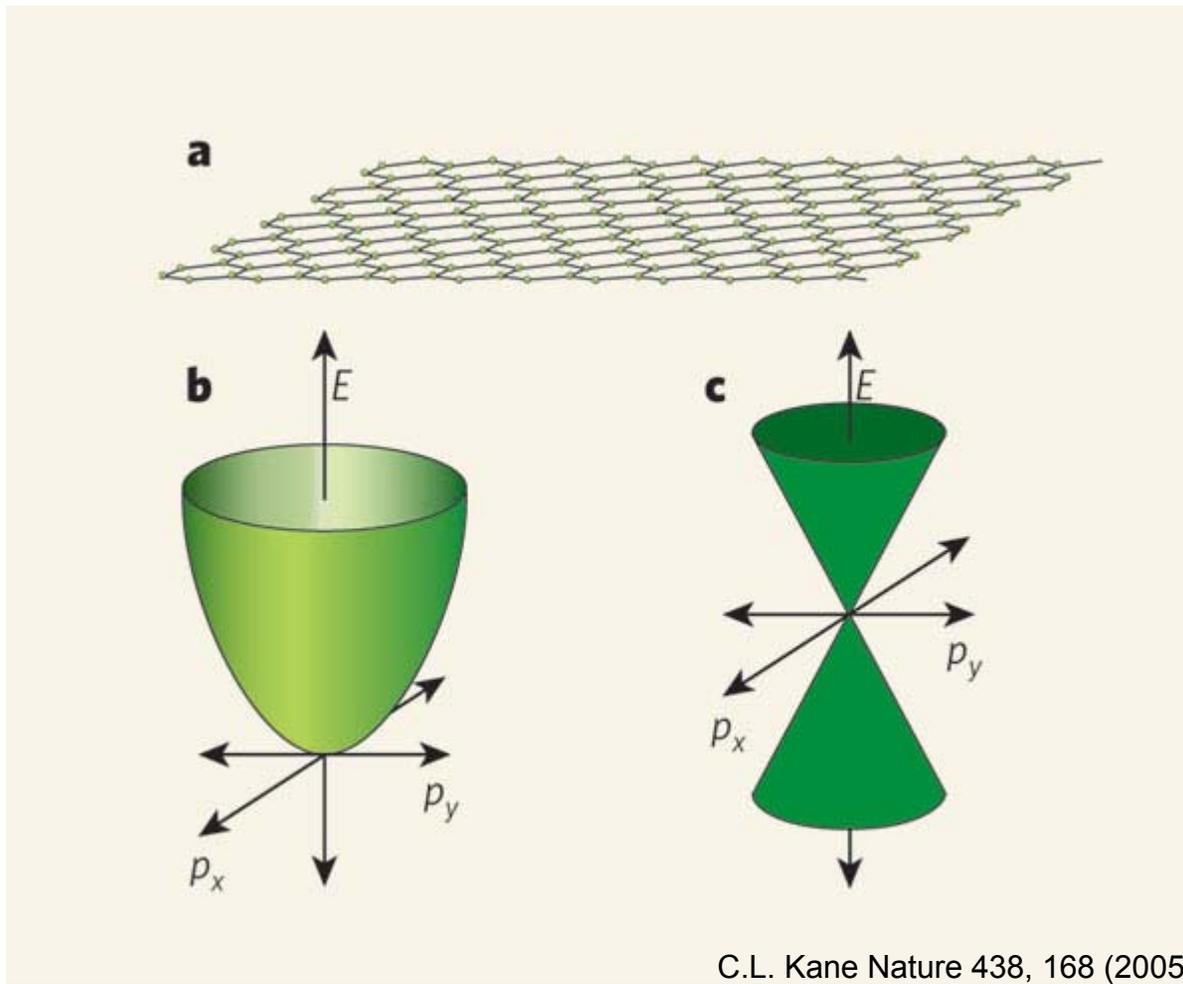
Зона Бриллюэна



Похоже на графен



Парабола указывает на квазичастицы с конечной массой, чья энергия квадратично зависит от импульса



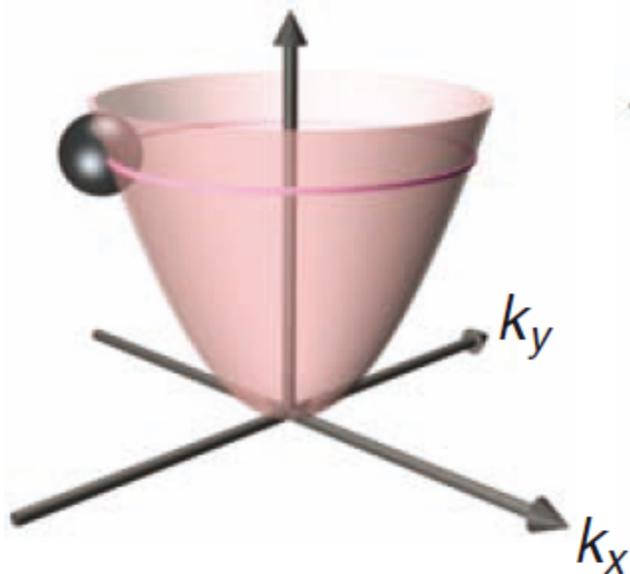
Квазичастицы в полупроводнике
 $E=p^2/2m^*$

Квазичастицы в графене
 $E=v|p|$

Носители заряда в графене имитируют поведение безмассовых релятивистских частиц.

«Зоопарк» квазичастиц

«Фермионы Шредингера» :



$$\hat{H} = \hat{p}^2 / 2m^*$$

m^* – эффективная масса

ультрарелятивистские частицы Дирака



$$\hat{H} = c \vec{\sigma} \cdot \hat{p}$$

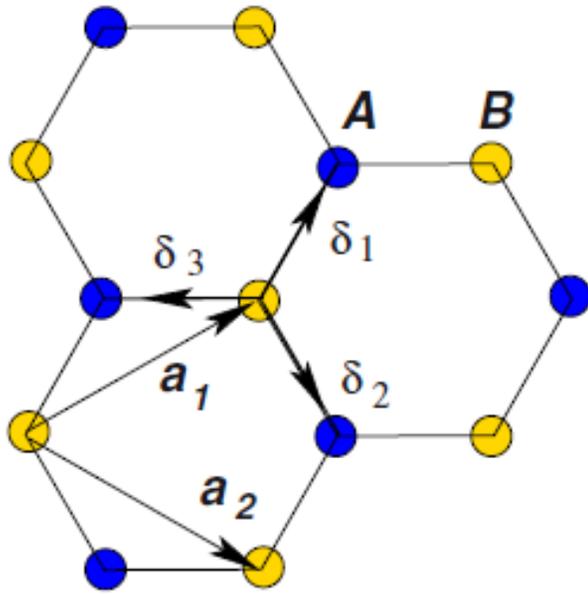
c – скорость света;
 σ – матрица Паули

дираковские безмассовые фермионы

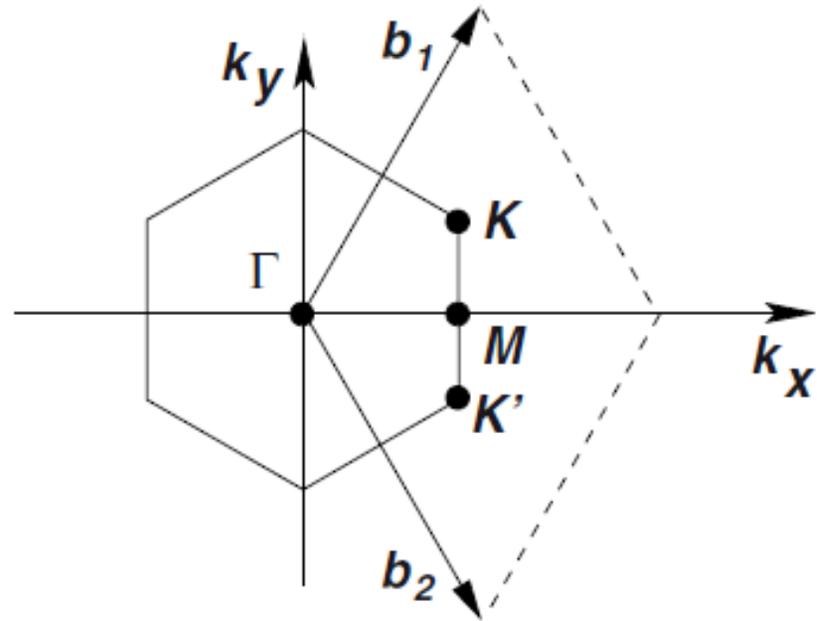


$$\hat{H} = v_F \vec{\sigma} \cdot \hat{p}$$

v_F – скорость Ферми,
 σ – матрица псевдоспина, соответствующего двум подрешеткам графена.



Кристаллическая решетка графена, состоящая из двух взаимно проникающих треугольных решеток



1-я зона Бриллюэна; K, K' – точки расположения конусов Дирака

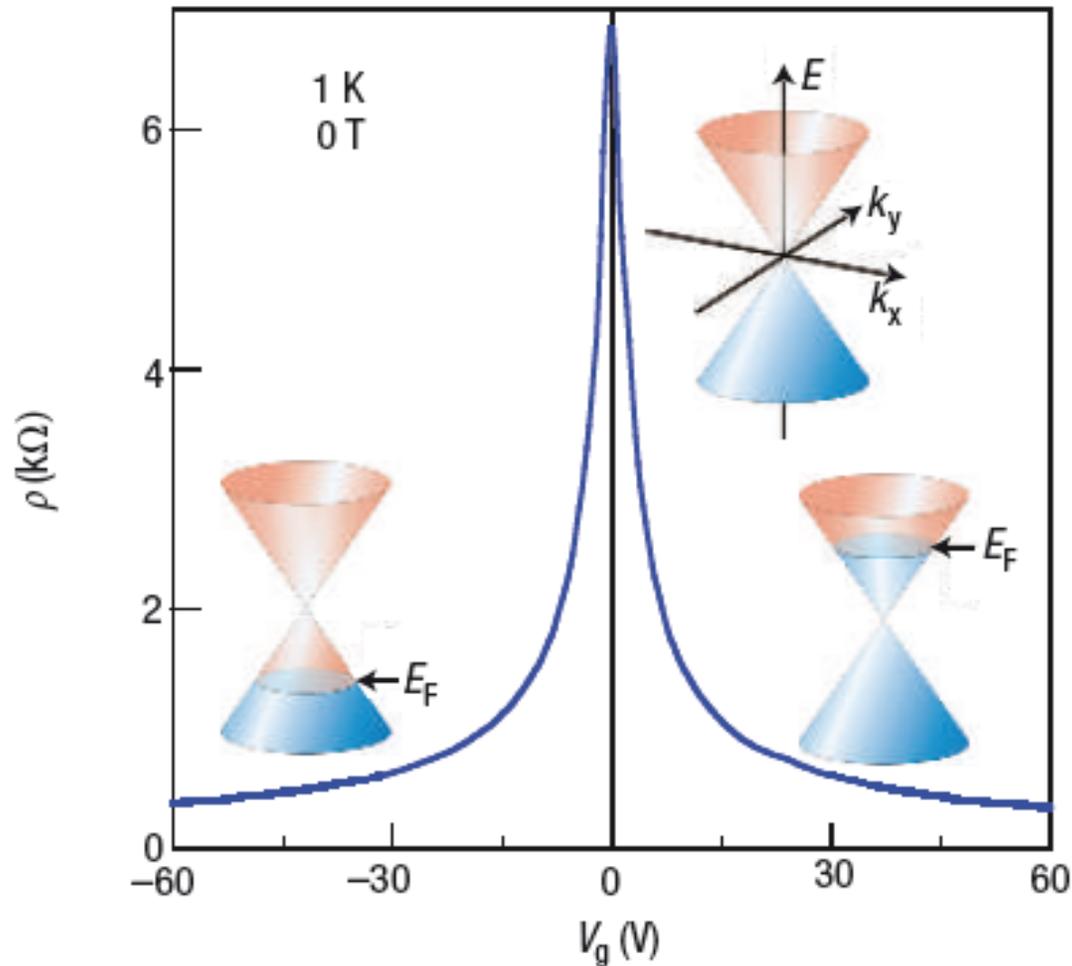
Поведение квазичастиц в графене вблизи точек Дирака описывается гамильтонианом

$$\hat{H} = \hbar v_F \begin{pmatrix} 0 & k_x - ik_y \\ k_x + ik_y & 0 \end{pmatrix} = \hbar v_F \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{k}$$

но при этом имеет заряд (в отличие от нейтрино), на который могут действовать внешние электромагнитные поля

**Некоторые из
«новаторских экспериментов»**

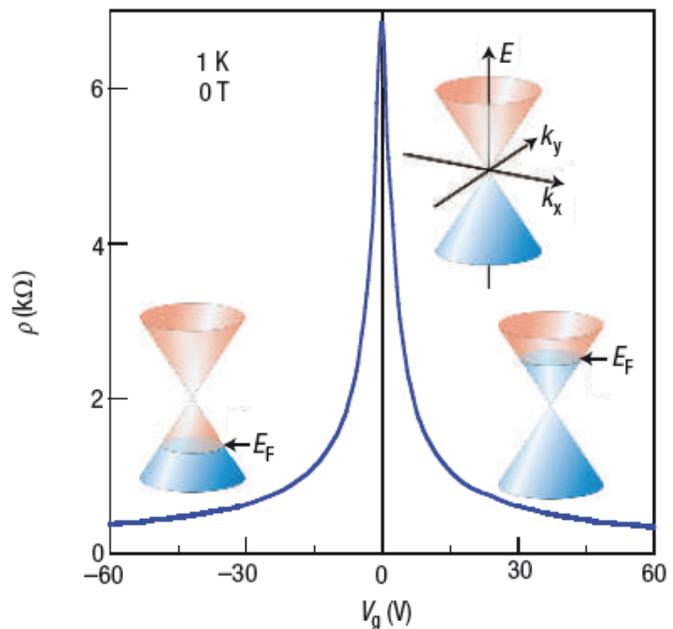
Полевой эффект в графене



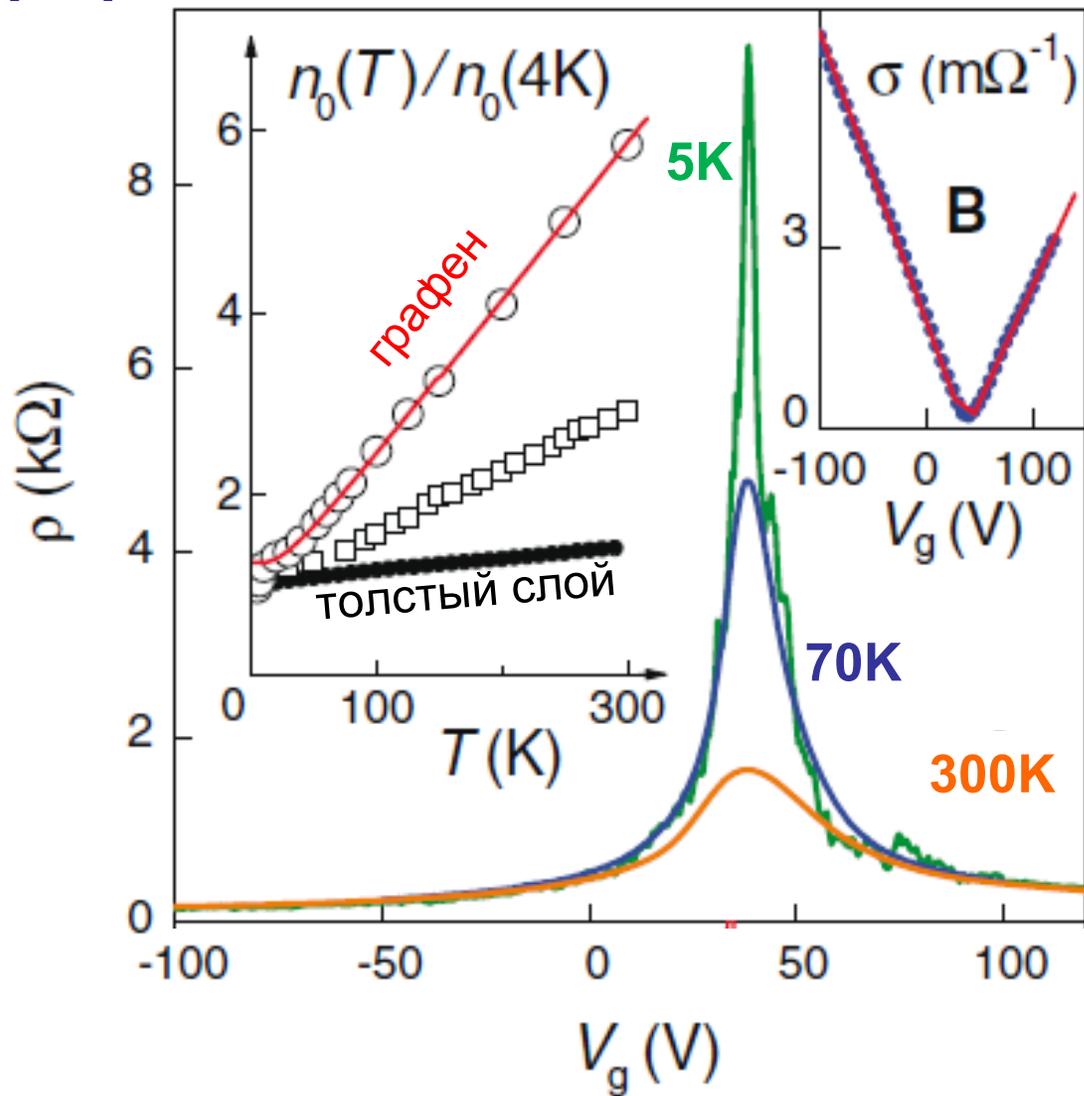
**Зависимость сопротивления
от напряжения на затворе** (предсказание)

A.Geim and K.Novoselov,
Nature Mat., 6, 183 (2007)

Полевой эффект в графене



$$n \cong 7.3 \cdot 10^{10} (\text{cm}^{-2} \text{V}^{-1}) V_g$$



Эксперимент: концентрация носителей заряда, сопротивление и проводимость
K.Novoselov et al, Science, **306**, 666 (2004)

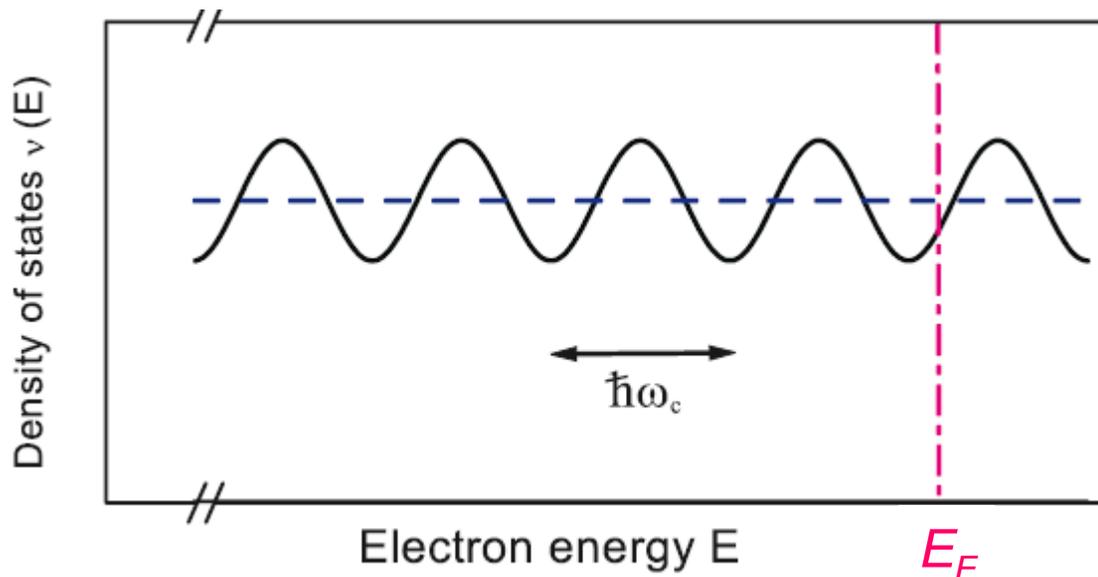
Эффект Шубникова-де Гааза

осциллирующая зависимость сопротивления проводника
от магнитного поля

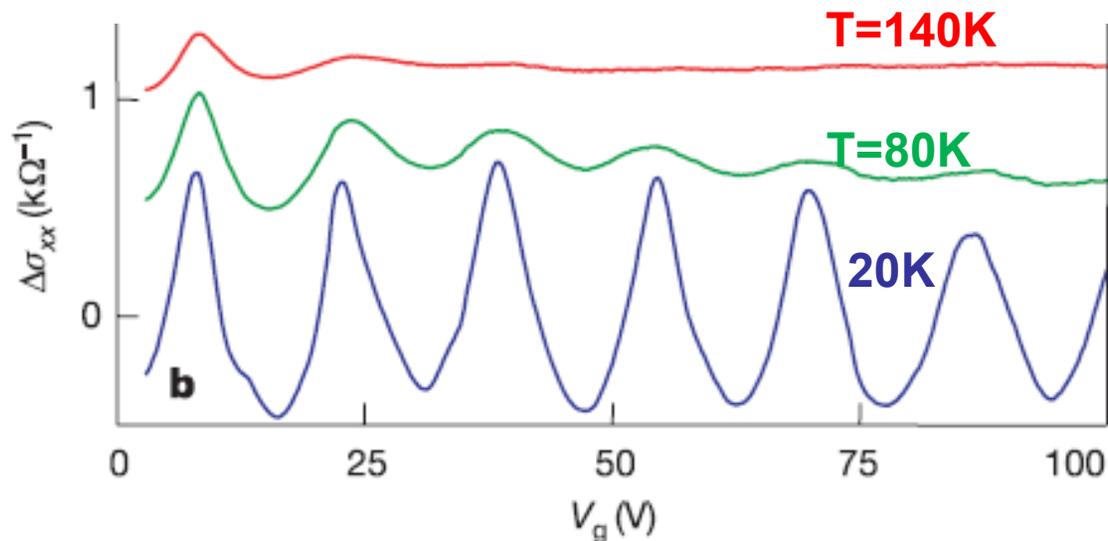
Уровни Ландау: $E_{N,p_z} = \hbar\omega_c \left(N + \frac{1}{2} \right) + \frac{p_z^2}{2m} - \frac{\mu\sigma}{s} H$

3D \rightarrow 2D
 \longrightarrow $E_N = \hbar\omega_c \left(N + \frac{1}{2} \right) - \frac{\mu\sigma}{s} H$

$\omega_c = eH / mc$ - циклотронная частота



Осцилляции Шубникова-де Гааза в графене



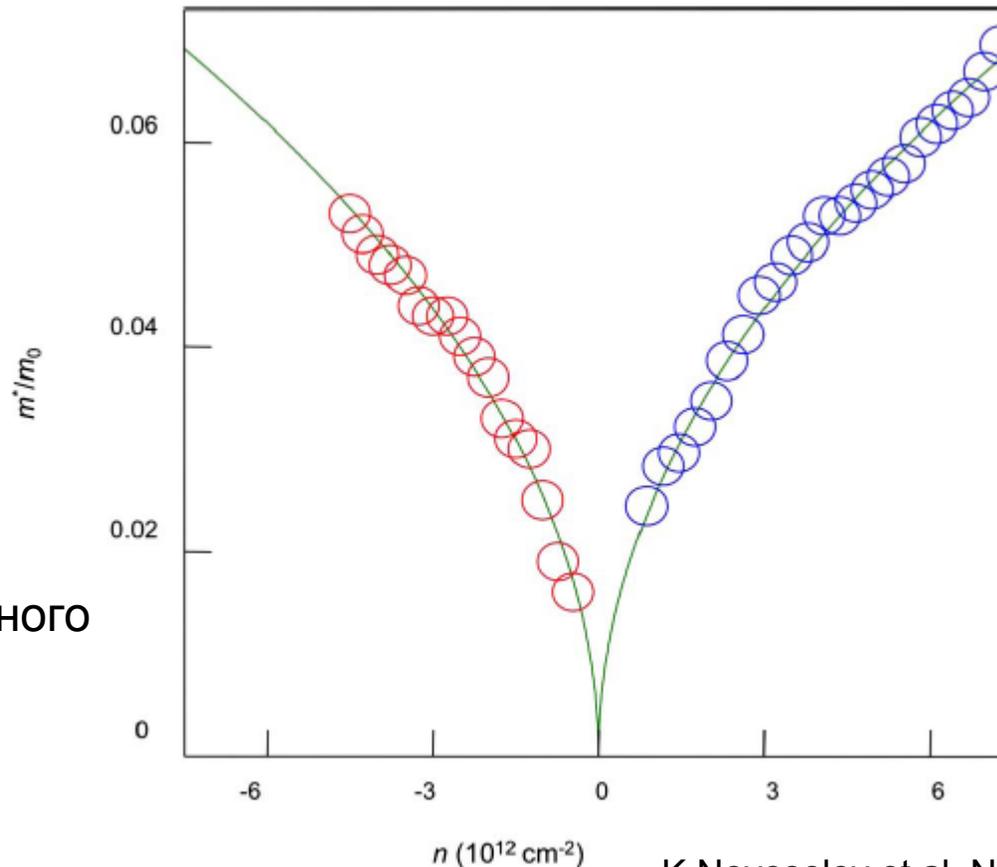
Проводимость графена в постоянном магнитном поле $B = 12$ Т как функция напряжения на затворе при разных температурах

Осцилляции Шубникова-де Гааза в графене

Циклотронная масса конечна; она следует из закона дисперсии, заряда электрона и V_F

$$m^* = \frac{\sqrt{\pi}}{v_F} \sqrt{n}$$

(корень из концентрации носителей, в отличие от «шредингеровской» частицы, где m^* не зависит от n)



m_0 – масса свободного электрона

Эффект Холла

возникновение поперечной разности потенциалов при помещении проводника с постоянным током в магнитное поле (Холл, 1879)

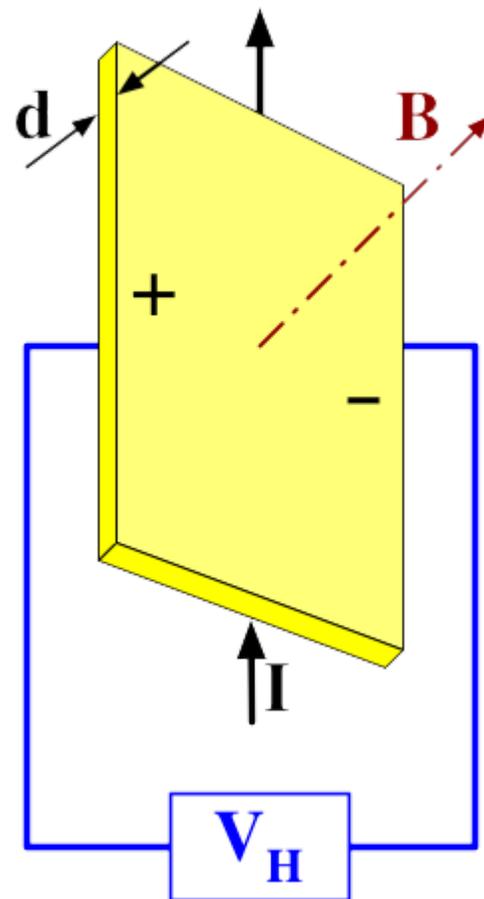
$$V_H = R_H \cdot I$$

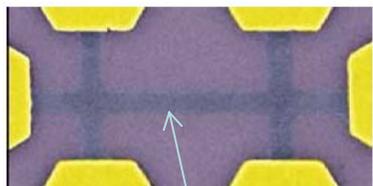
сопротивление Холла

$$R_H = \frac{B}{n \cdot e}$$

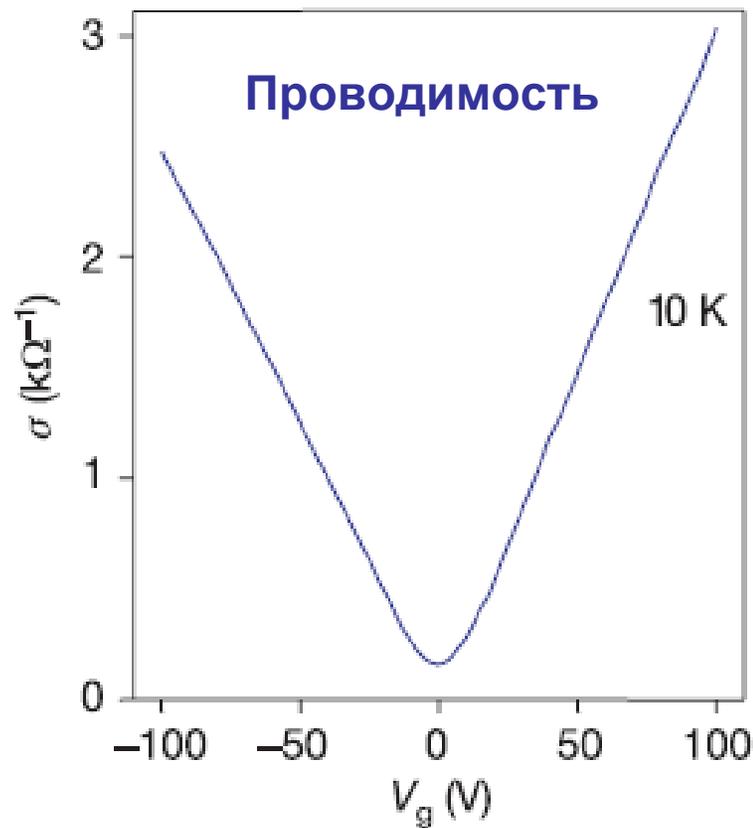
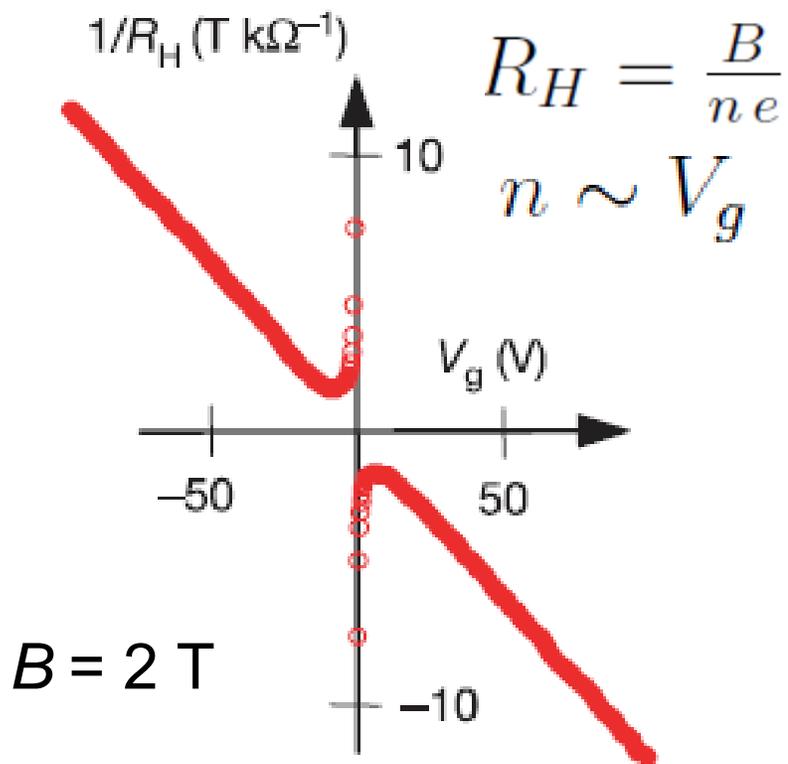
концентрация
носителей заряда

заряд носителя

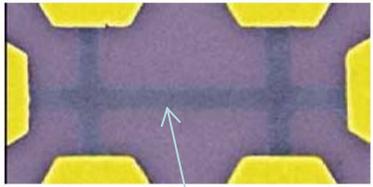




0.2 μm

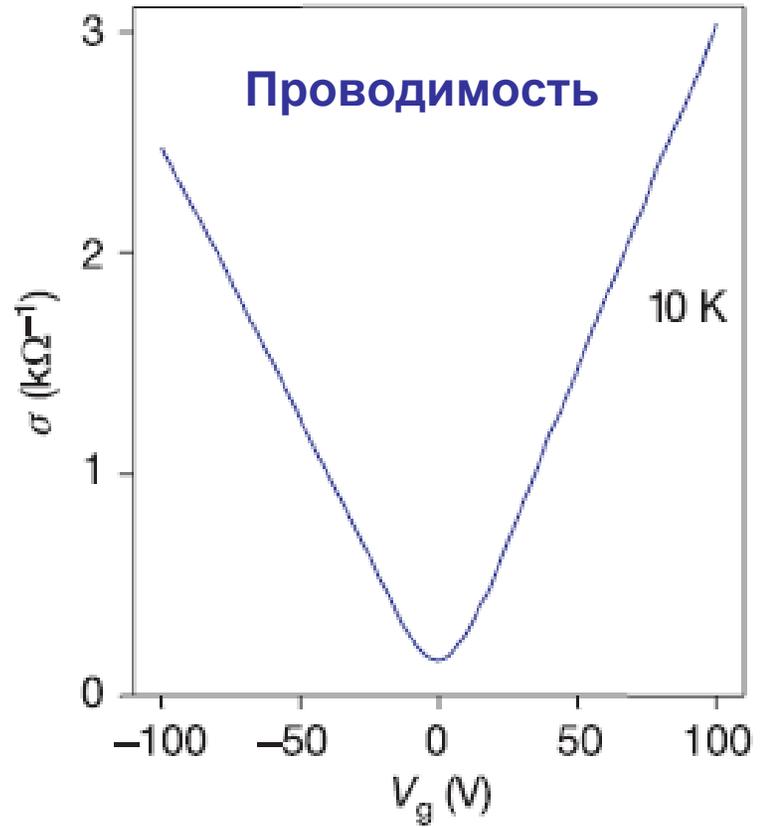
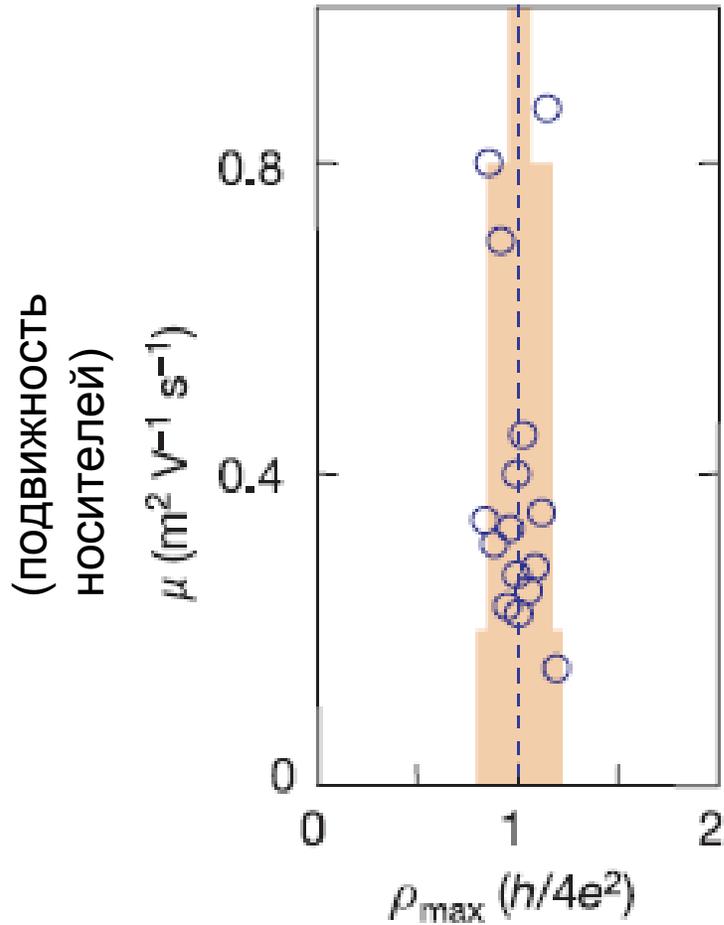


$$n \cong 7.3 \cdot 10^{10} (\text{cm}^{-2} \text{V}^{-1}) V_g$$



0.2 μm

наблюдение «кванта проводимости»



Квантовый эффект Холла:

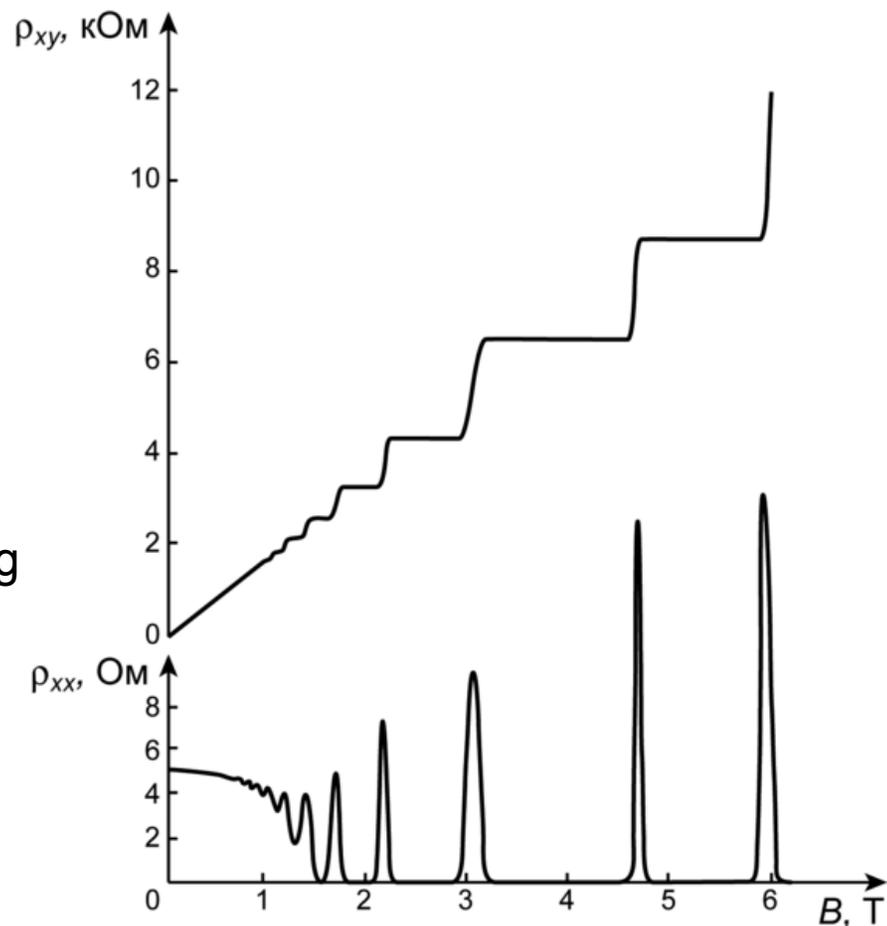
квантование сопротивления Холла

Наблюдался в двумерном электронном газе при сильных магнитных полях и низкой температуре



Klaus von Klitzing

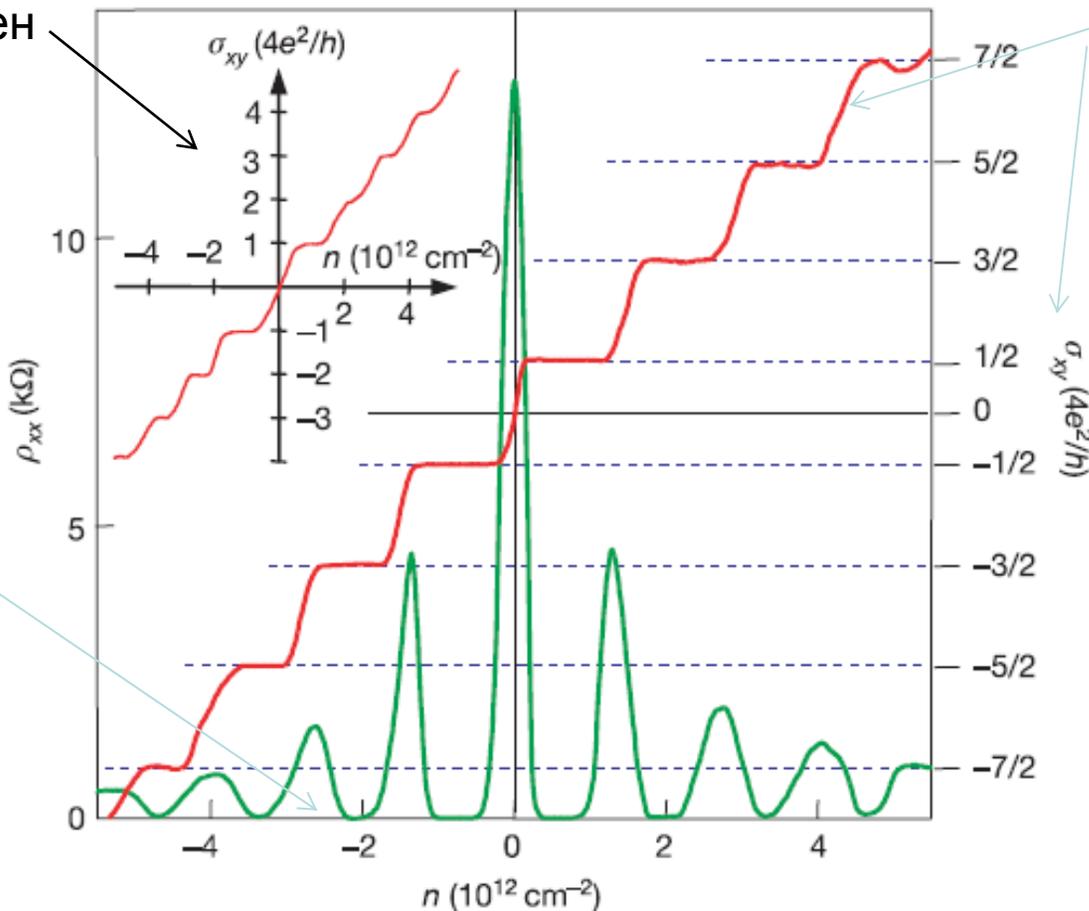
The Nobel Prize in Physics 1985 was awarded to Klaus von Klitzing "for the discovery of the quantized Hall effect"



Квантовый эффект Холла в графене

2-слойный графен

продольное сопротивление



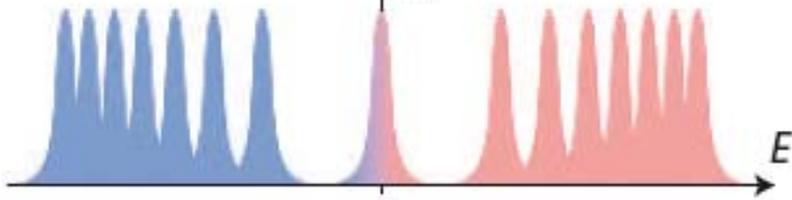
проводимость Холла

Плато при полуцелых квантах проводимости – «клеймо» безмассовых дираковских фермионов

Двухслойный графен теряет это свойство – в нем плато при целых значениях с пропущенным плато при $n=0$

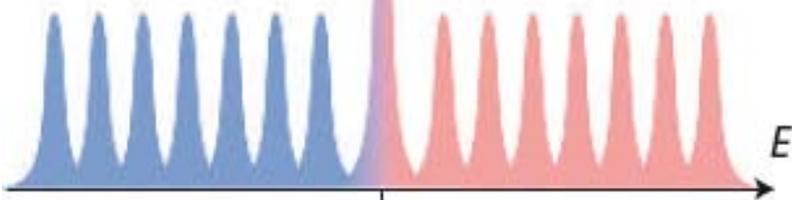
Квантование Ландау в графене:

(плотность состояний) $\uparrow D$



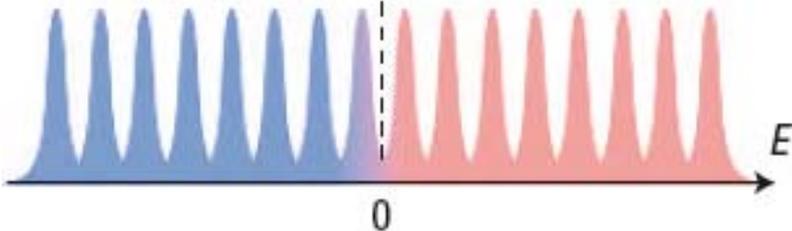
$$E_N \sim \sqrt{N}$$

безмассовый дираковский фермион (однослойный графен)



$$E_N \sim \sqrt{N(N-1)}$$

массивный дираковский фермион (двухслойный графен)

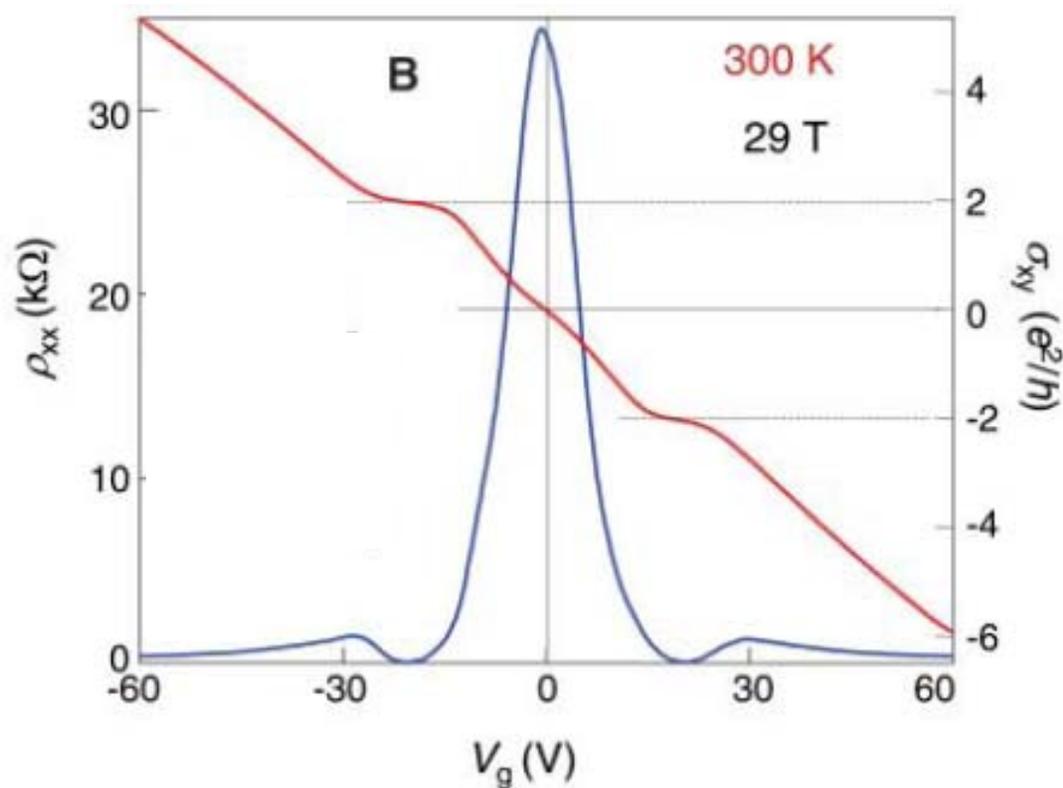


$$E_N \sim N + 1/2$$

шредингеровская частица

Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene

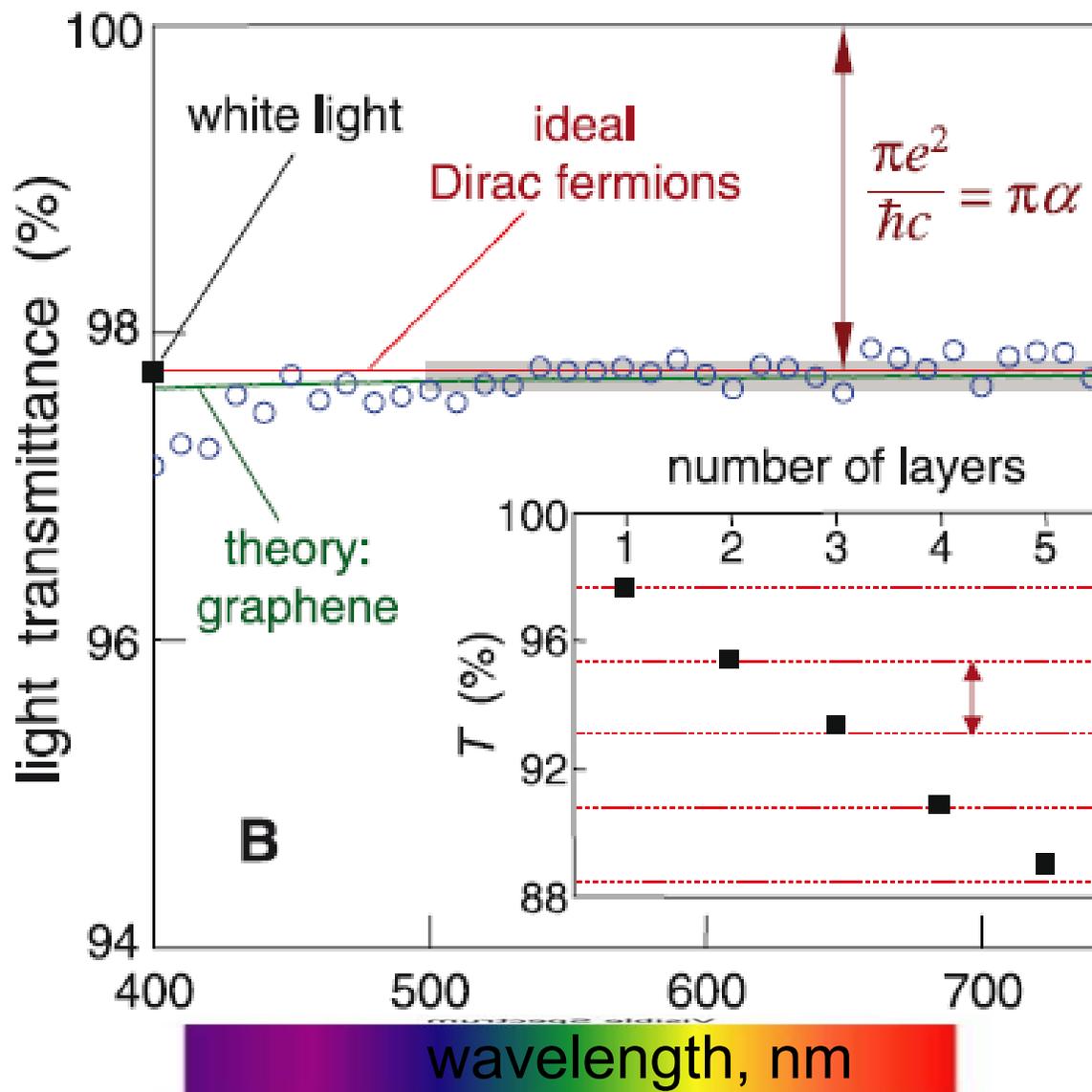
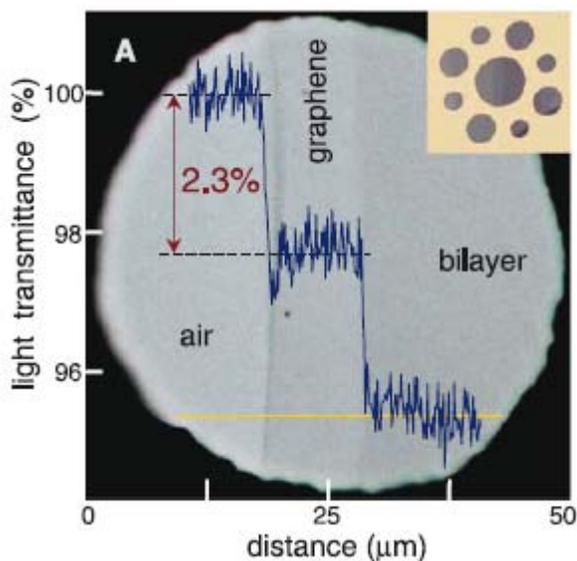
K. S. Novoselov,¹ Z. Jiang,^{2,3} Y. Zhang,² S. V. Morozov,¹ H. L. Stormer,² U. Zeitler,⁴ J. C. Maan,⁴
G. S. Boebinger,³ P. Kim,^{2*} A. K. Geim^{1*}



Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene

R. R. Nair,¹ P. Blake,¹ A. N. Grigorenko,¹ K. S. Novoselov,¹ T. J. Booth,¹ T. Stauber,²
N. M. R. Peres,² A. K. Geim^{1*}

1308 6 JUNE 2008 VOL 320 SCIENCE



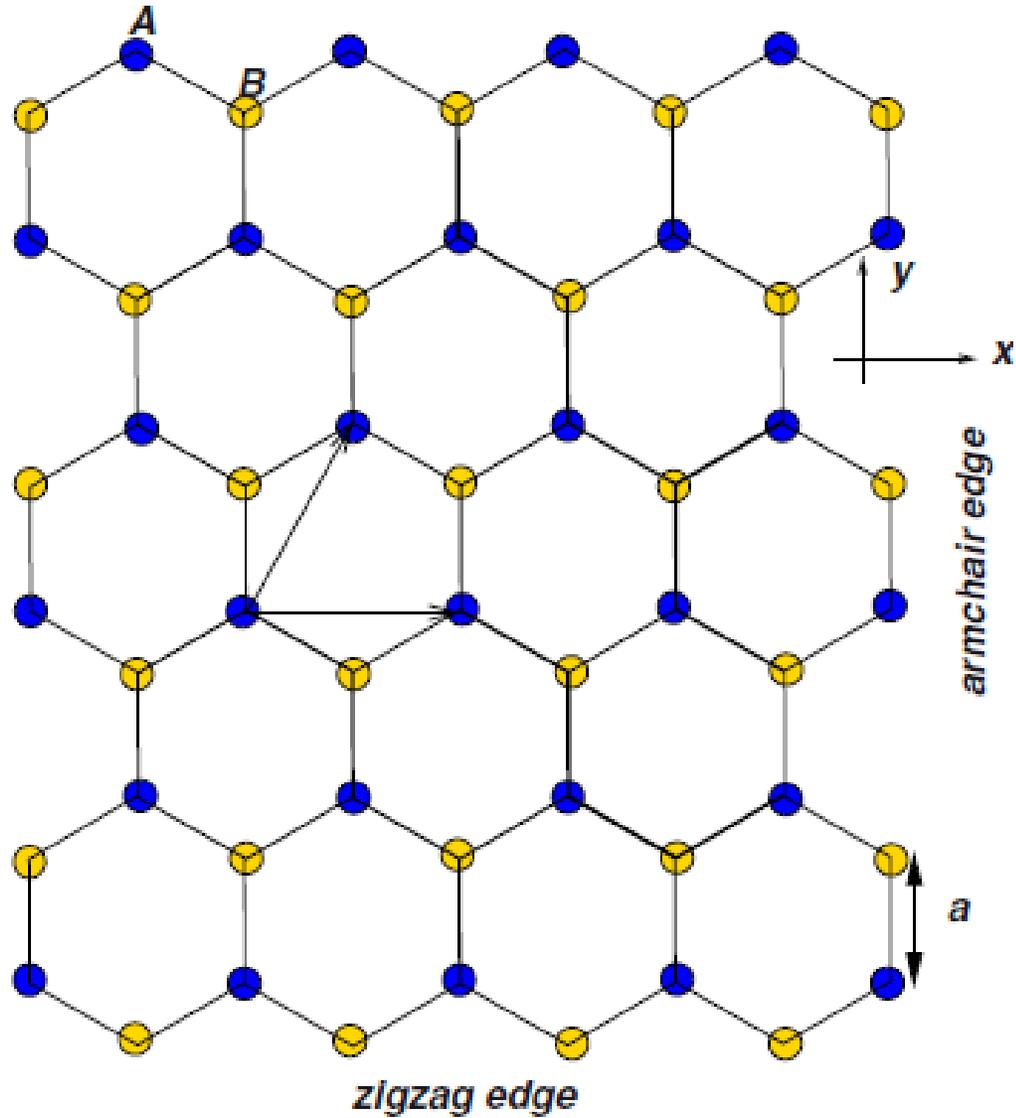
К наноэлектронике на графене

Для изготовления графенового транзистора необходимо сделать «запрещенную зону»

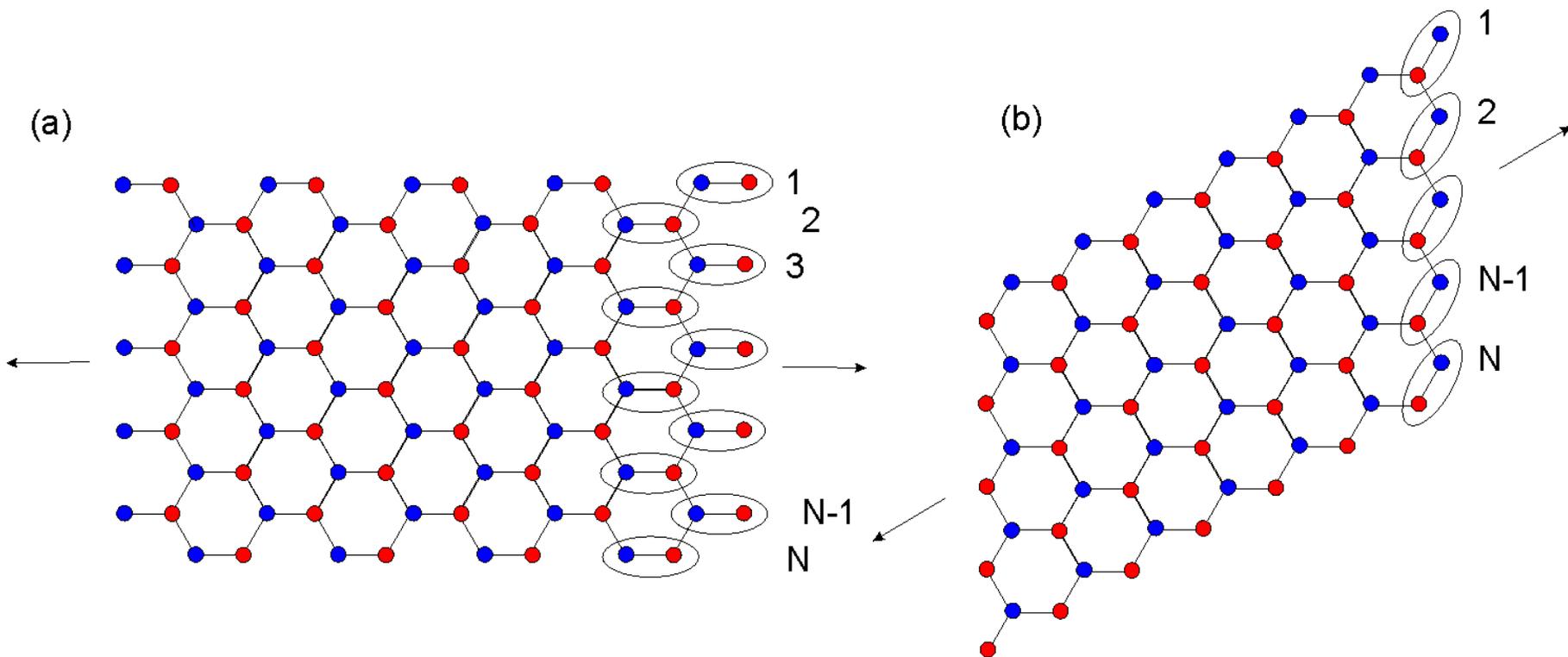
Как?

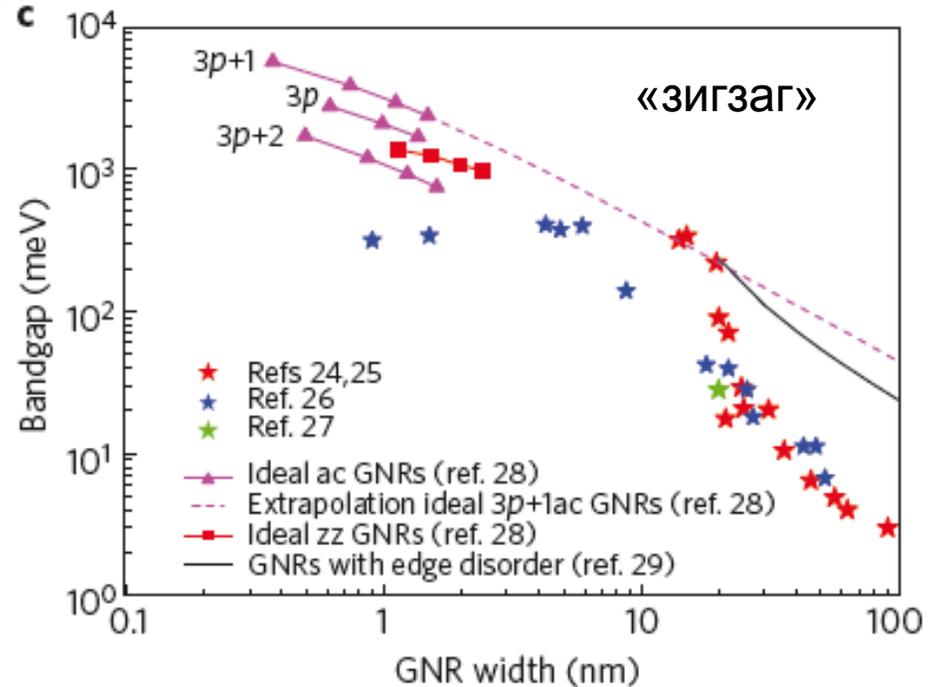
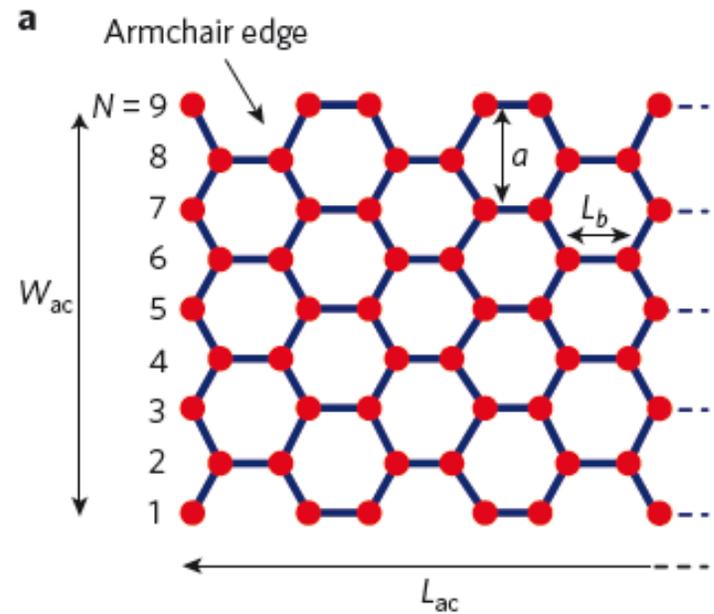
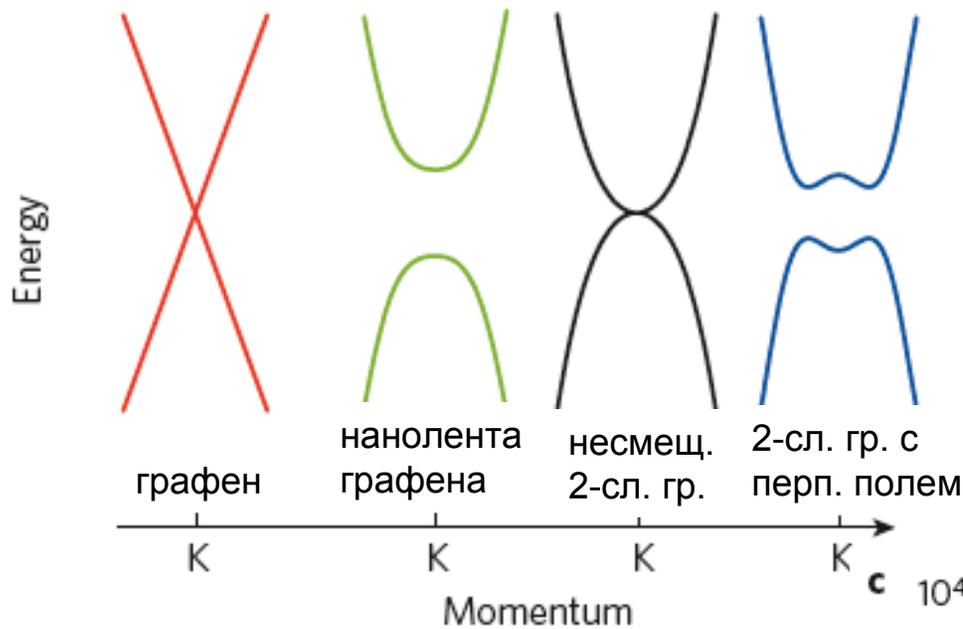
1. Наноленты
2. Посадить графен на подложку

Основные типы краев: «зигзаг» и «кресло»



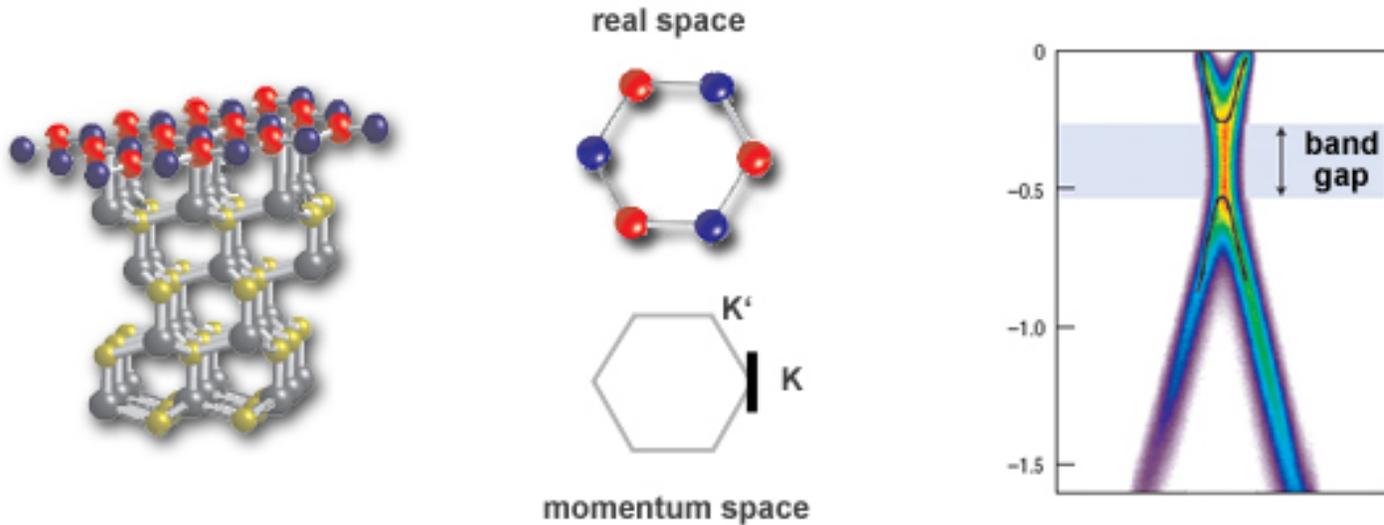
Наноленты





F. Schwierz. Graphene transistors.
Nature Nanotechnology, **5**, 487 (2010)

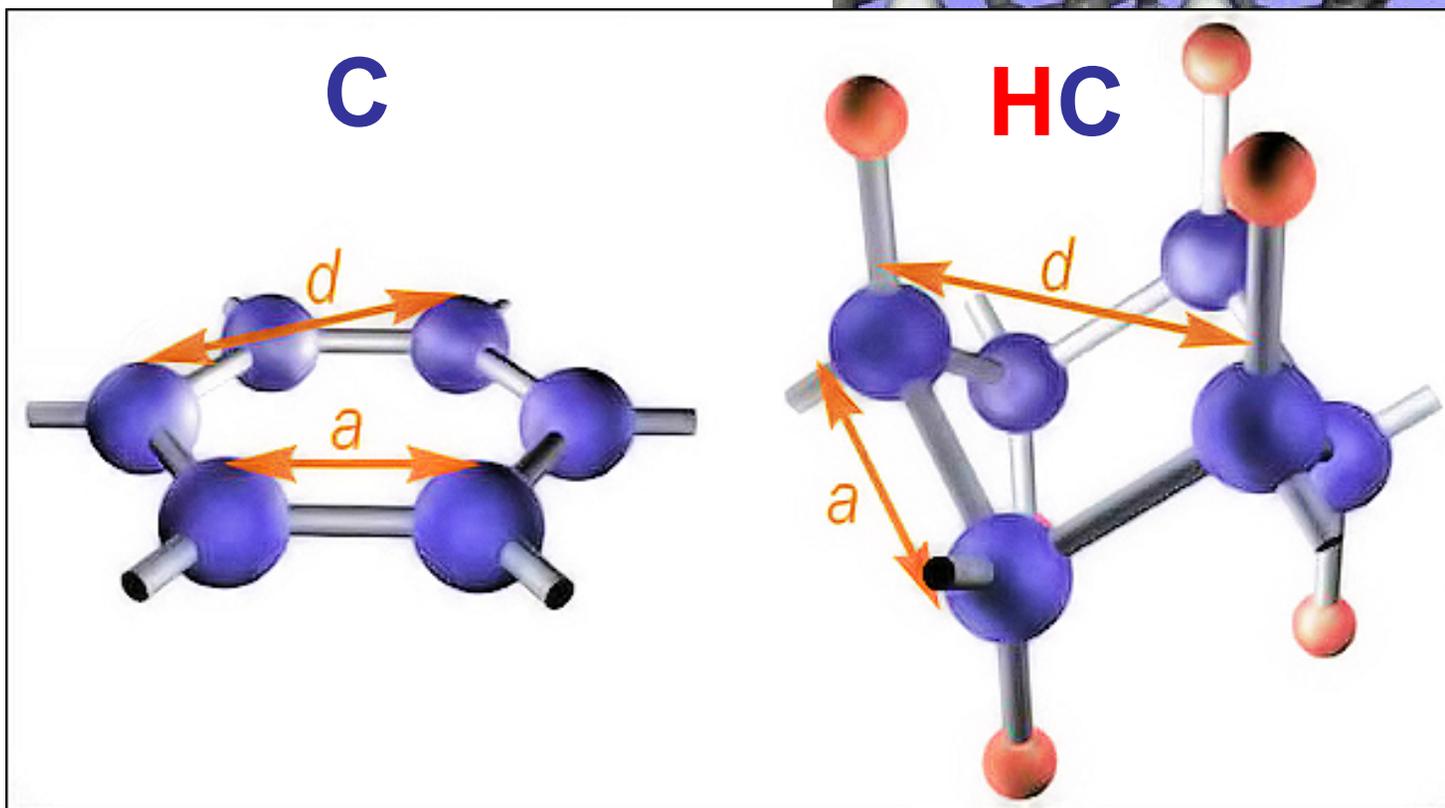
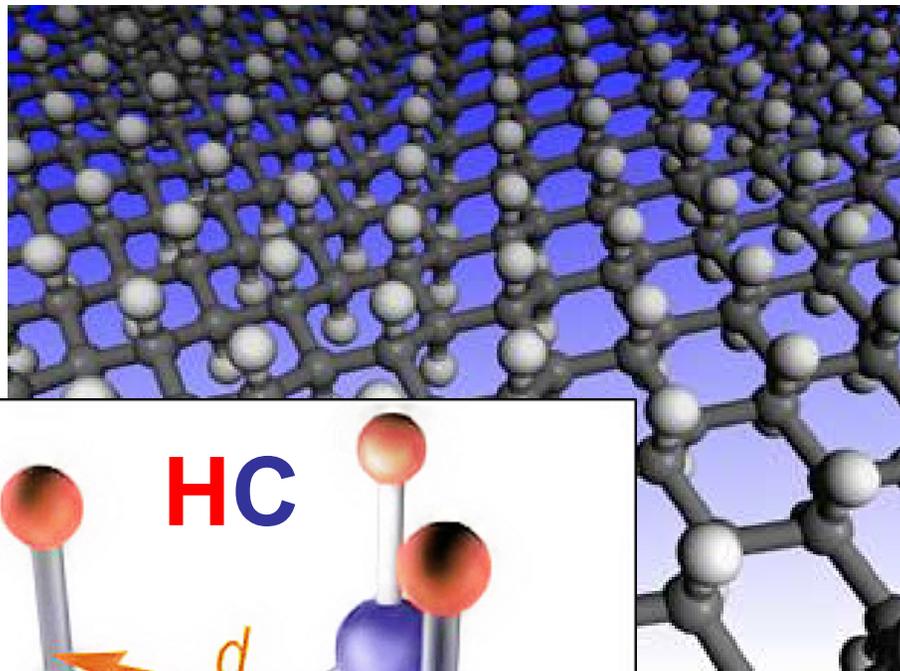
Графен на подложке из карбида кремния



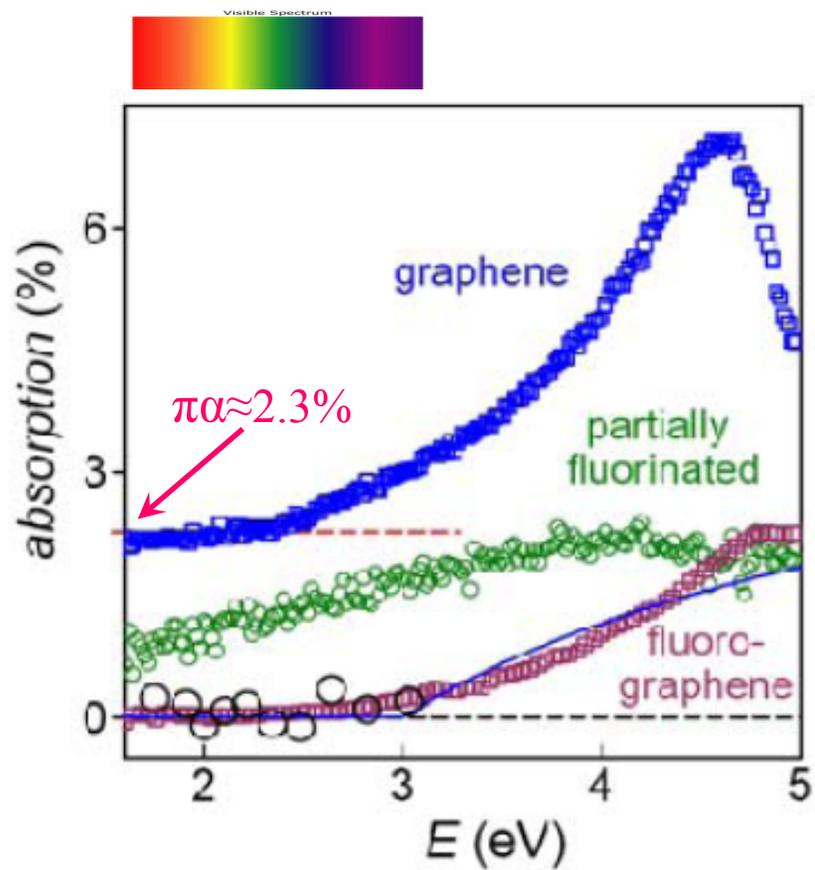
When a graphene layer is grown on a silicon carbide substrate (left), their interaction breaks the symmetry between graphene's sublattices (indicated by alternating red and blue carbon atoms, left and top center). Broken symmetry separates the bands of the sublattices at K and K' in momentum space (bottom center) and opens a gap between the graphene's valence and conduction bands, as shown in the ARPES intensity map (right) representing the black line (bottom center). The band gap raises the possibility of using graphene in electronic devices.

Химические производные графена

Графан (Graphane)



Флюорографен (FG)



Выводы и заключение

Правильную премию дали

Благодарю за внимание



Некоторые обзоры

A.K. Geim and K.S. Novoselov . “The rise of graphene”,
Nature Materials, **6**, 183 (2007)

A.K. Geim, “Graphene: Status and Prospects”
Science, **324**, 1530 (2009)

A.H. Castro Neto et al, “The Electronic Properties of Graphene”
Rev. Mod. Phys., **81**, 109 (2009)

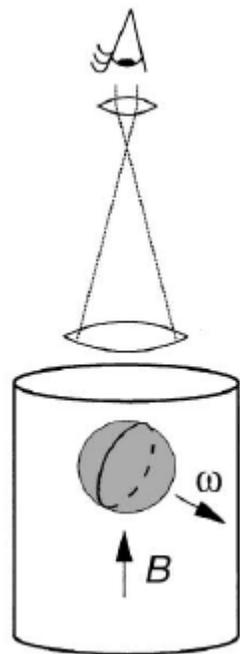
F. Schwierz, “Graphene transistors”
Nature Nanotechnology, **5**, 487 (2010)



Detection of earth rotation with a diamagnetically levitating gyroscope

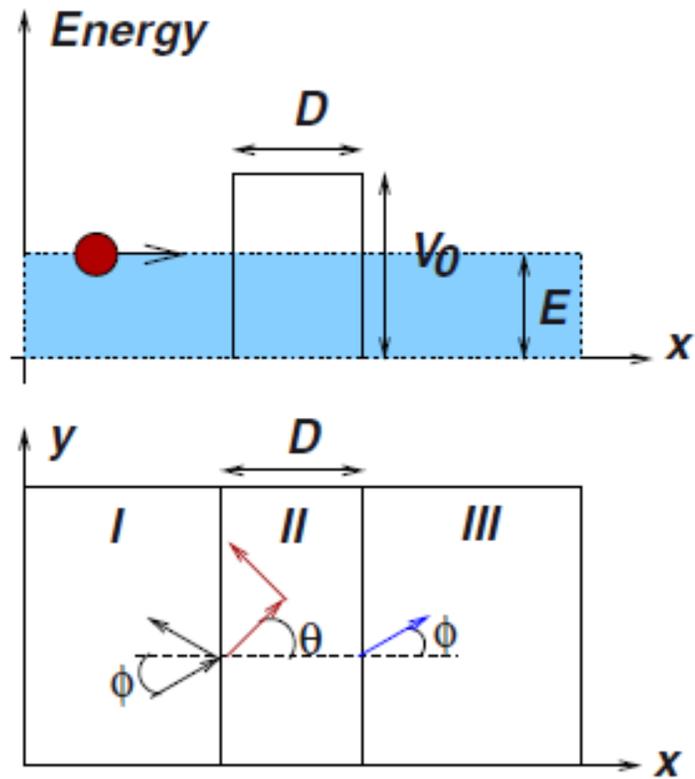
A.K. Geim*, H.A.M.S. ter Tisha

High Field Magnet Laboratory, University of Nijmegen, Toernooiveld 1, 6525 ED Nijmegen, The Netherlands



it should be possible to build a diamagnetic gyroscope with an accuracy of several orders of magnitude better than that promised by other ground-based techniques.

Парадокс Клейна

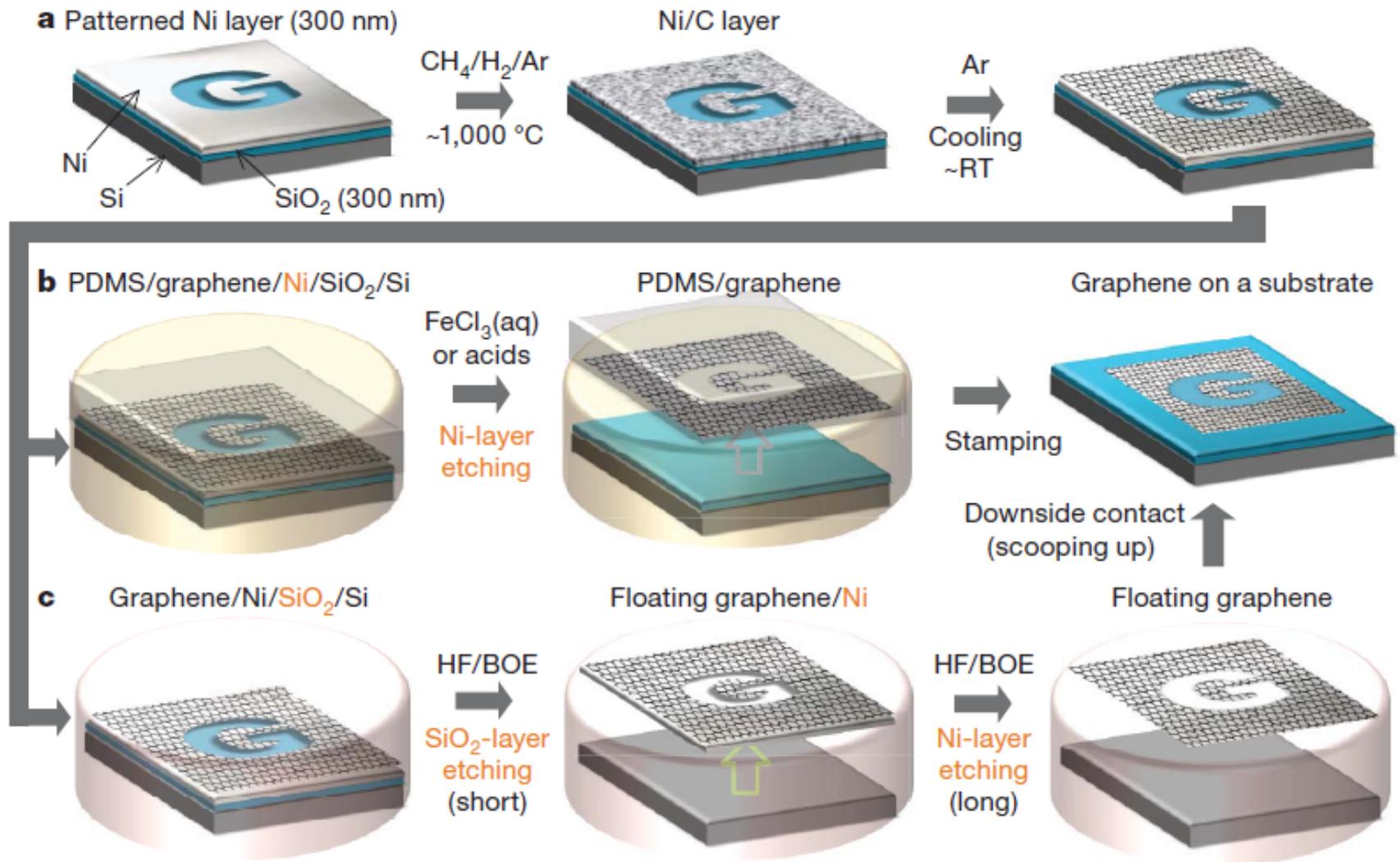


Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene

Vol 438|10 November 2005|doi:10.1038/nature04233

K. S. Novoselov¹, A. K. Geim¹, S. V. Morozov², D. Jiang¹, M. I. Katsnelson³, I. V. Grigorieva¹, S. V. Dubonos²
& A. A. Firsov²

Технология производства графена больших размеров

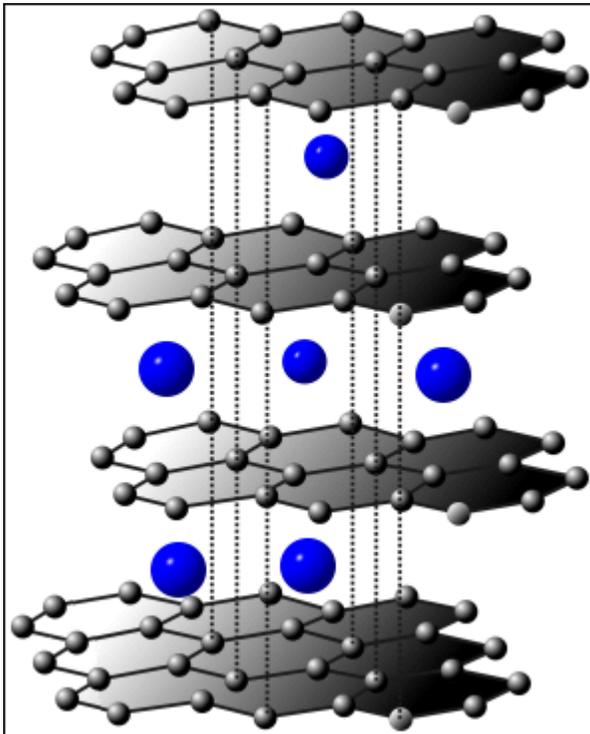


- Идея изучать углерод в 2D состоянии не нова. Графен десятилетия изучался теоретически и использовался как составная часть материалов на основе углерода
- Успешное выделение одного листа графена противоречит модели Ландау, Пайерлса и Мермина, утверждающей, что 2D кристаллы термодинамически неустойчивы.

Химическое отслоение:

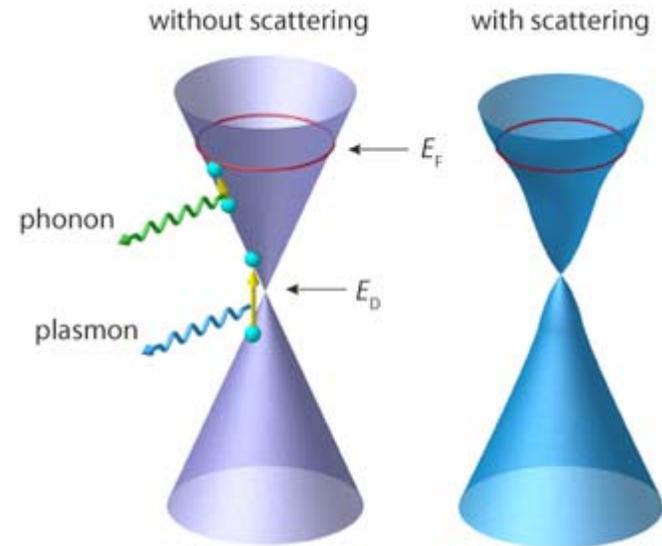
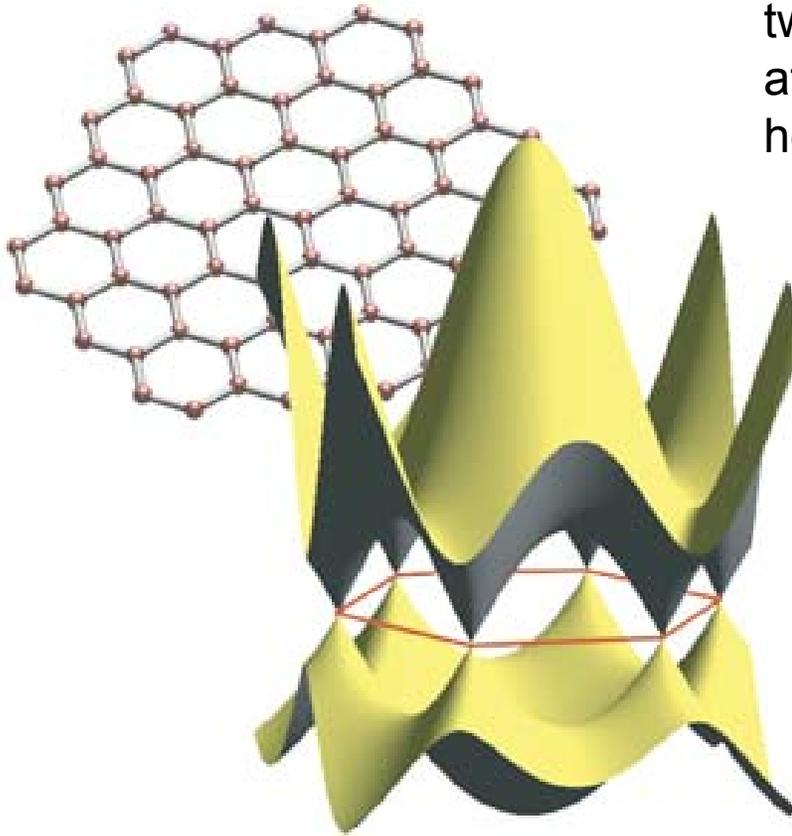
Вставка молекул в графит химическим способом для изменения ван-дер-ваальсовских сил, связывающих вместе монослои углерода.

Не очень успешно: получались restacked and скрученные листки графена.



Зонная структура графена

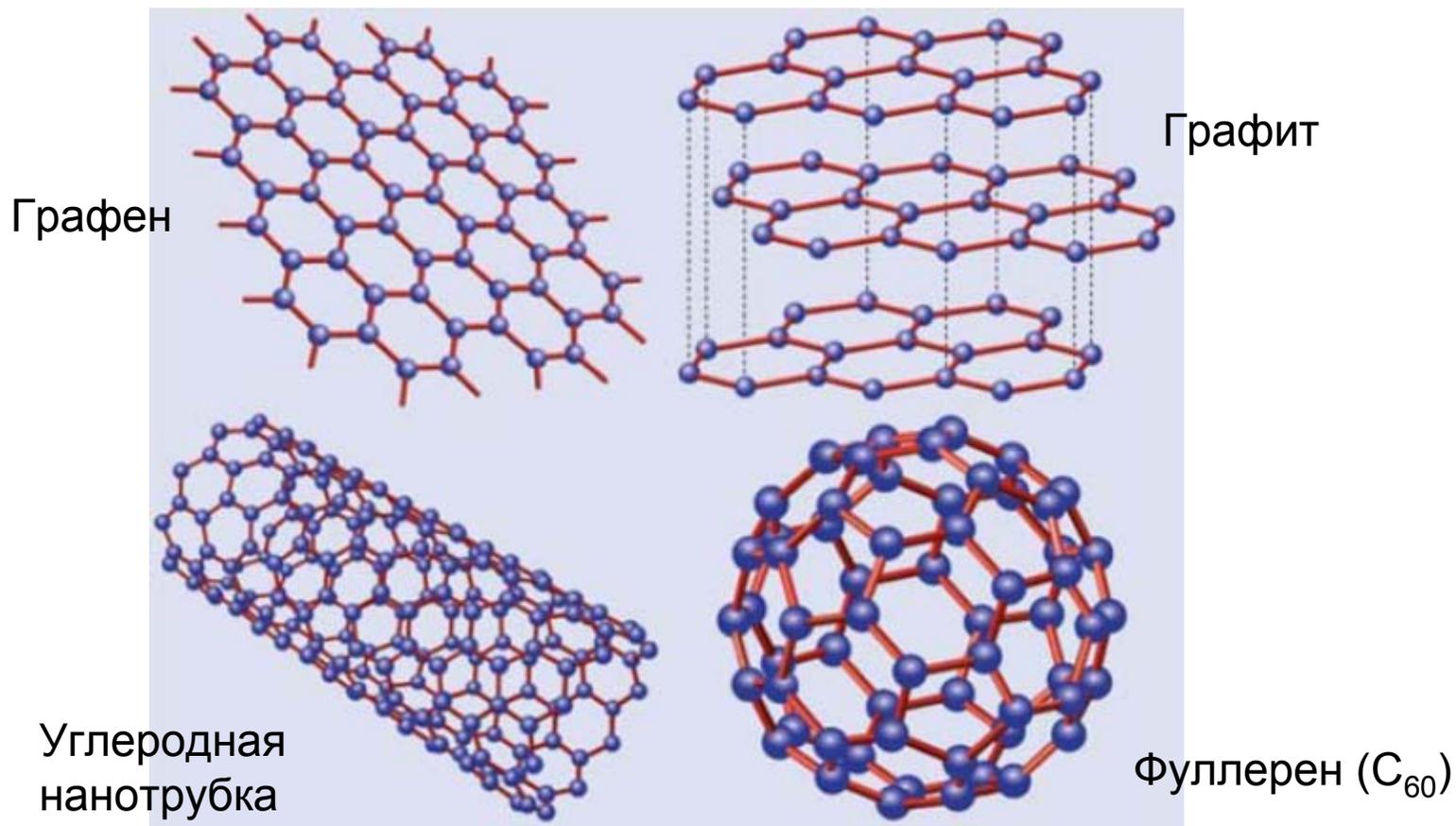
Electronic band structure consists of two bands (yellow) that intersect only at a few points at the corners of a hexagonal Brillouin zone (red).



The band structure near the crossing energy at higher magnification, showing the effect of electron decays on the bands. The purple cones (left) represent the bands in the absence of decays (here carriers decaying by phonon, green, and plasmon, light blue, emissions are shown). The blue cones (right) represent the resulting "kinky" band structure.

A. Bostwick, T. Ohta, Th. Seyller, K. Horn, and E. Rotenberg, "Quasiparticle dynamics in graphene," *Nature Physics* **3**, 36 (2007).

Некоторые





Robert B. Laughlin



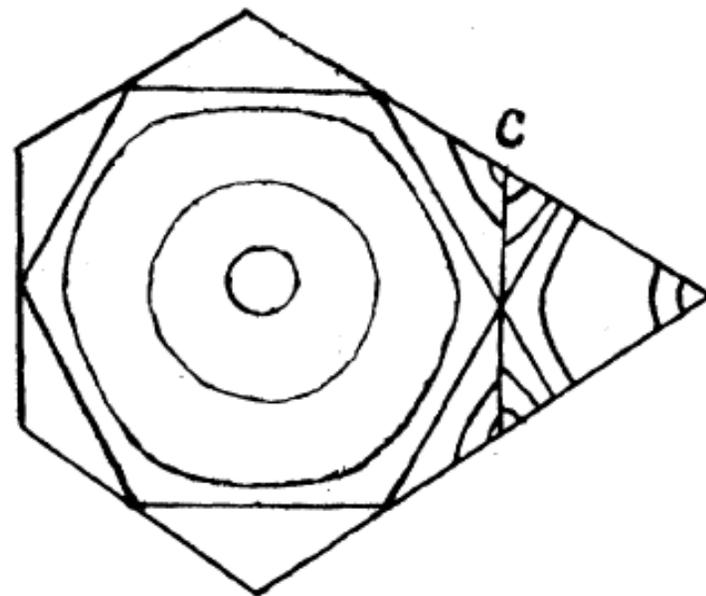
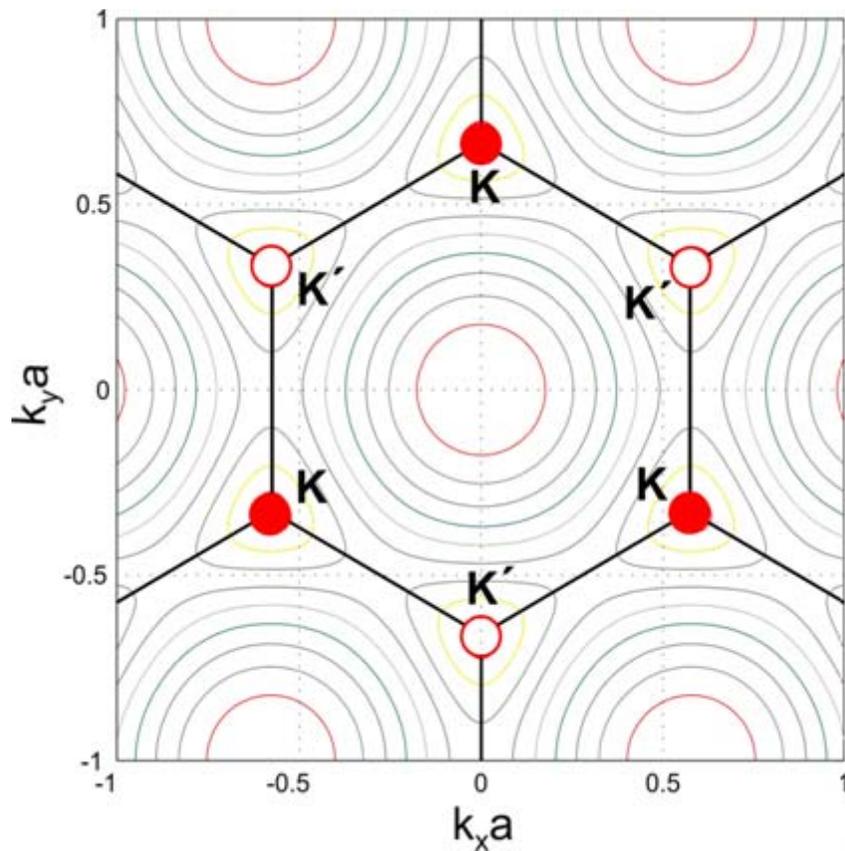
Horst L. Störmer



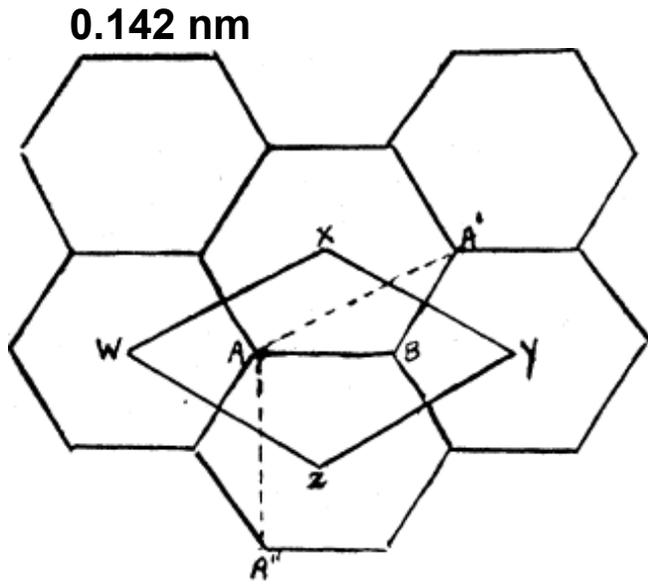
Daniel C. Tsui

The Nobel Prize in Physics 1998 was awarded jointly to Robert B. Laughlin, Horst L. Störmer and Daniel C. Tsui "for their discovery of a new form of quantum fluid with fractionally charged excitations".

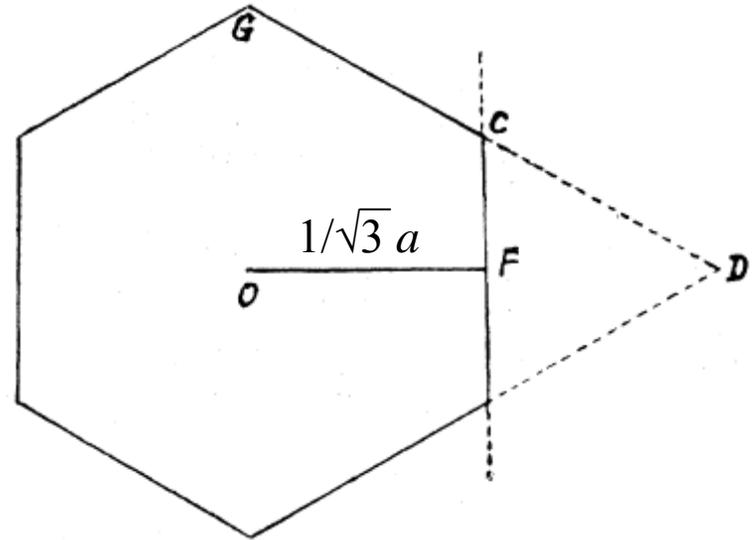




$$E = \pm \sqrt{\gamma_0^2 \left(1 + 4 \cos^2 \pi k_y a + 4 \cos \pi k_y a \cos \pi k_x \sqrt{3} a \right)}$$



Элементарная ячейка WXYZ.
 AA' и AA'' – векторы основных трансляций ($a = 0.246 \text{ nm}$)

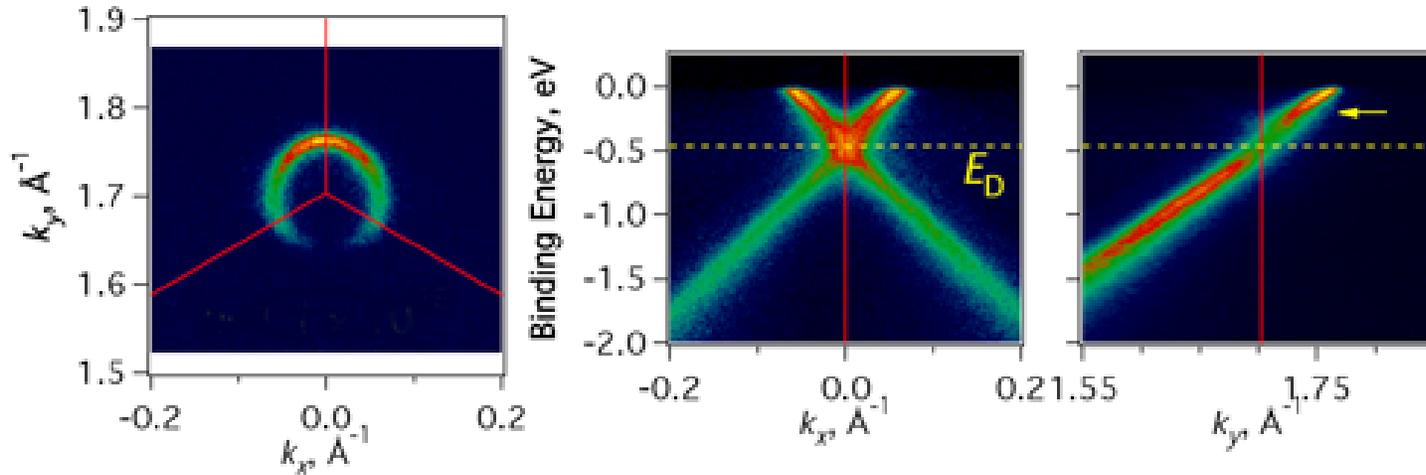


Зона Бриллюэна
 (ячейка обратной решетки;
 область допустимых
 неэквивалентных
 значений квазиимпульса \mathbf{k})

Каковы энергии (стационарные состояния) электрона $E(\mathbf{k})$ в поле типа «медовые соты»?

Почему потребовалось так много времени, чтобы таким образом выделить и характеризовать графен?

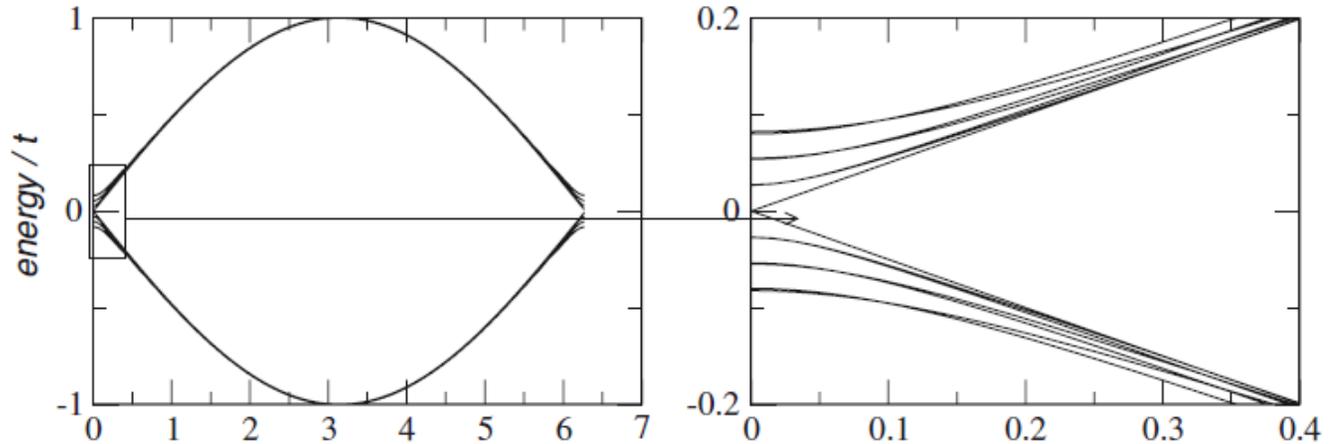
- Эта техника (микромеханическое расслоение) производит всевозможные формы чешуек (хлопьев), среди которых трудно найти монослой.
- Графен не идентифицируется ясно в туннельном электронном микроскопе
- Графен прозрачен для видимого света на большинстве подложек (металл, стекло, ...). Ключом стала подложка из SiO_2
- Длительное время атомный силовой микроскоп (AFM) был единственным инструментом, позволяющим определить число слоев в чешуйке. При этом AFM должен работать на пределе возможностей (с атомным разрешением).



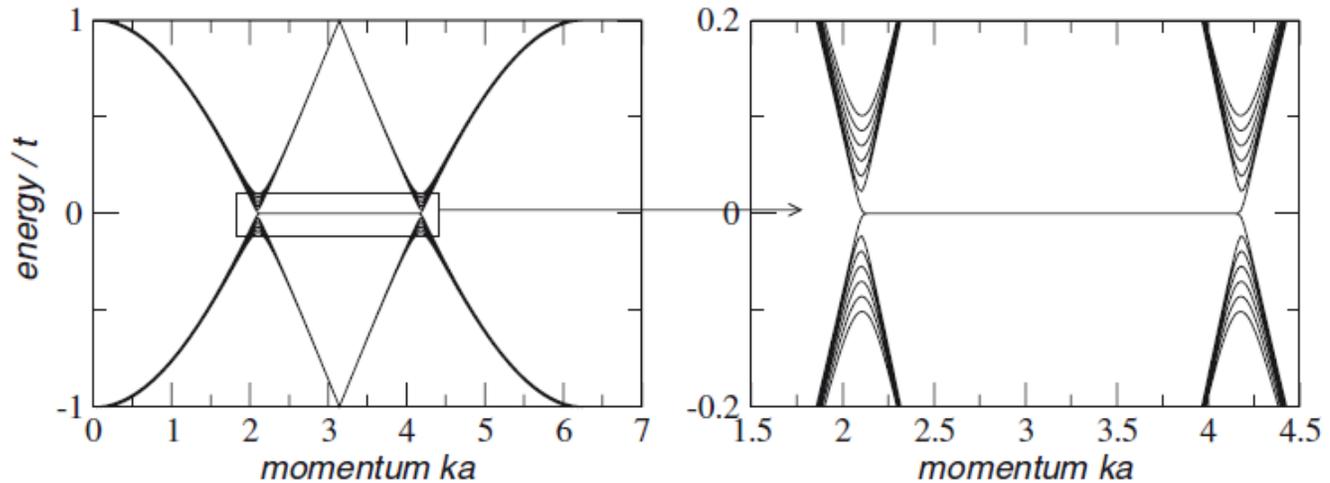
The Fermi surface (left) and horizontal/vertical band-structure cuts (middle/right) of a single monolayer of graphene grown on SiC. The presence of a finite circular Fermi contour shows that the as-grown samples are slightly doped (to about 10^{13} electrons/cm²). The band structure cuts show two kinks, at the Dirac crossing energy E_D and at the optical phonon energy scale (indicated by the arrow), each of which have changes in the line width.

Влияние краев на спектры графеновых нанолент

кресло

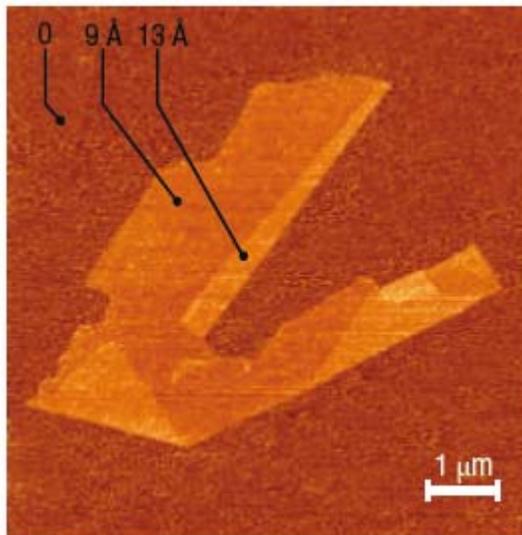
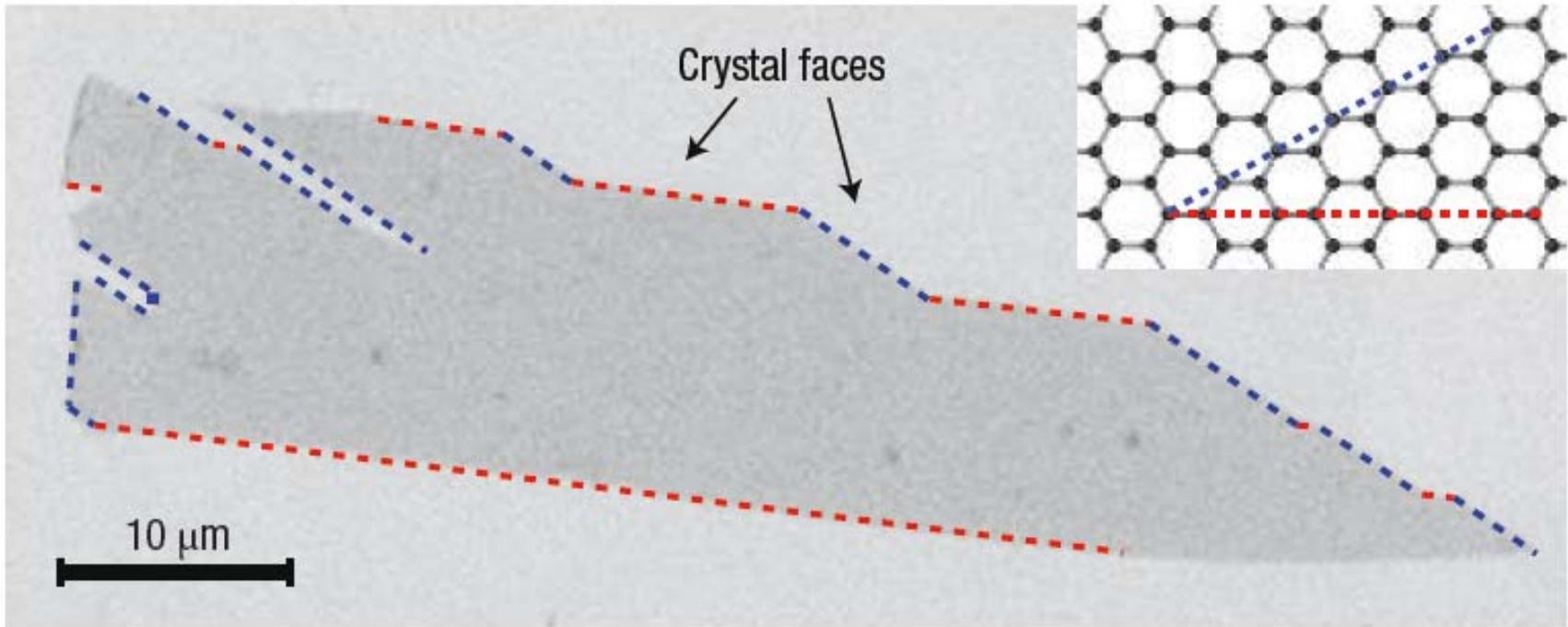


зигзаг



Электронная дисперсия (расчет).

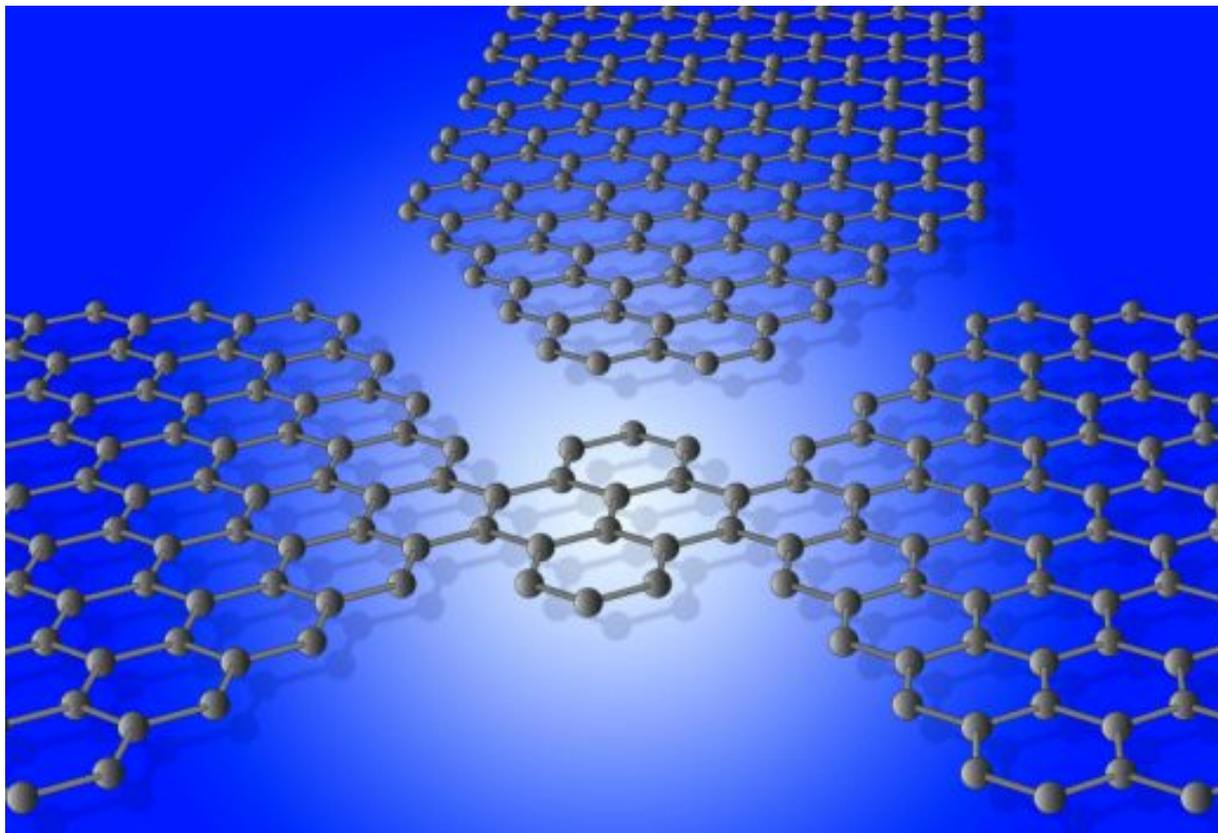
Ширина ленты $N=200$ элементарных ячеек. Показано 14 состояний



Края графена типа «зигзаг» и «кресло»
(сканирующий электронный микроскоп)

A. Geim, K. Novoselov, Nature Materials, **6**, 185 (2007)

K.Novoselov et al Proc. Natl Acad. Sci. USA **102**, 10451 (2005)



Схематическое изображение графенового
"молекулярного транзистора" (квантовая точка)