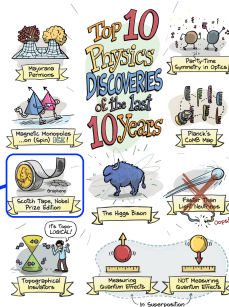
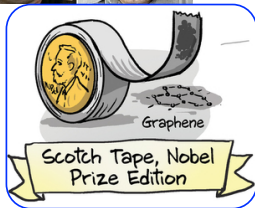
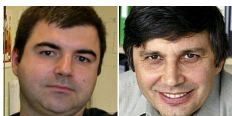


Grafen i jego odkrywcy: Nagroda Nobla z fizyki w 2010 roku

Adam Rycerz

Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego, Uniwersytet Jagielloński



Jorge Cham, *Nature Physics* 11, 799 (2015)

Wykład z cyklu "Granice Nauki", 14 kwietnia 2016



Andriej Gejm

Fizyk

Sir Andre Geim Kt, FRS — fizyk brytyjsko-holenderski pochodzenia niemieckiego, który rozpoczął swą naukę w ZSRR, laureat Nagrody Nobla, znany przede wszystkim jako jeden z odkrywców grafenu.

[Wikipedia](#)

Data i miejsce urodzenia: 21 października 1958 (57 lat), Soczi, Rosja

Wykształcenie: Rosyjska Akademia Nauk, Moscow Institute of Physics and Technology, University of Manchester

Nagrody: Nagroda Nobla w dziedzinie fizyki, Copley Medal, Hughes Medal

Mentor / Mentorka: Victor Petrashev

Dobry Uczeń / Dobra Uczennica: Konstantin Nowosiółow



Konstantin Nowosiółow

Fizyk

Konstantin Siergiejewicz Nowosiółow, ros. Константин Сергеевич Новосёлов – rosyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki.

[Wikipedia](#)

Data i miejsce urodzenia: 23 sierpnia 1974 (41 lat), Niżny Tagił, Rosja

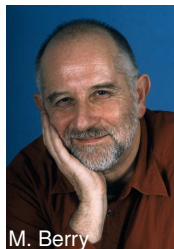
Wykształcenie: Uniwersytet im. Radbouda w Nijmegen, Moscow Institute of Physics and Technology

Nagrody: Nagroda Nobla w dziedzinie fizyki

Mentor / Mentorka: Andriej Gejm

⇒ K. Nowosiółow to najmłodszy laureat nagrody Nobla z fizyki od czasu Briana Josephsona (1973).

(Loading: frog.mpg)

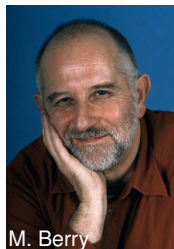


M. Berry



A. Geim

(Loading: strawberry.mpg)



M. Berry



A. Geim



ELSEVIER

Physica B 294–295 (2001) 736–739

PHYSICA B

www.elsevier.com/locate/physb

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

Abstract

Strong magnetic fields allow levitation of apparently nonmagnetic substances due to their weak but not negligible diamagnetic response of about 10^{-5} . Importantly, the diamagnetic force compensates gravity on the level of individual atoms and molecules and, therefore, can be used to mimic a continuous zero-gravity environment that, otherwise, is only achievable on board of a space station. Here we employ this earth-bound low gravity to demonstrate a simple mechanical gyroscope with sensitivity already comparable to that achieved by quantum and military gyroscopes. Our gyroscope can serve as a “shooting range” for the development of precision orbiting gyroscopes that have been a subject of intensive discussions regarding possible tests of general relativity. © 2001 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

Keywords: Levitation; Gyroscope; Diamagnetism

Warunek lewitacji w polu magnetycznym B :

$$F_B = M \nabla B \geq \rho V g,$$

ρ -gęstość, V -objętość, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$.

Moment magnetyczny: $M = (\chi/\mu_0) V B$,



Warunek lewitacji w polu magnetycznym B :

$$F_B = M \nabla B \geq \rho V g,$$

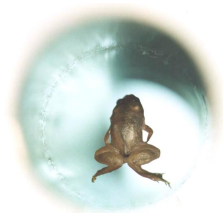
ρ -gęstość, V -objętość, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$.

Moment magnetyczny: $M = (\chi/\mu_0)VB$,

a zatem siła: $F_B = (\chi/\mu_0)BV \nabla B = (\chi/2\mu_0) \nabla B^2$.

Ostatecznie:

$$\nabla B^2 \geq 2\mu_0 \rho g / \chi.$$



Warunek lewitacji w polu magnetycznym B :

$$F_B = M \nabla B \geq \rho V g,$$

ρ -gęstość, V -objętość, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$.

Moment magnetyczny: $M = (\chi/\mu_0)VB$,

a zatem siła: $F_B = (\chi/\mu_0)BV \nabla B = (\chi/2\mu_0) \nabla B^2$.

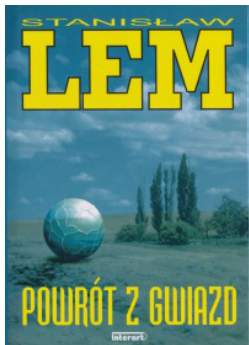
Ostatecznie:

$$\nabla B^2 \geq 2\mu_0 \rho g / \chi.$$

Jeśli przyjąć $\nabla B^2 \sim B^2/l$ i $l = 10 \text{ cm}$, pola $B = 1 \div 10 \text{ T}$ wystarczają dla lewitacji obiektu o $\chi \sim 10^{-5}$.

[Dla nadprzewodnika: $|\chi| = 1$ i $B \sim 0.1 \text{ T}$ wystarczy.]





“Mój ambiwalentny stosunek do tej książki najlepiej widać po tym, że jednak pozwalałem ją tłumaczyć.” S. Lem

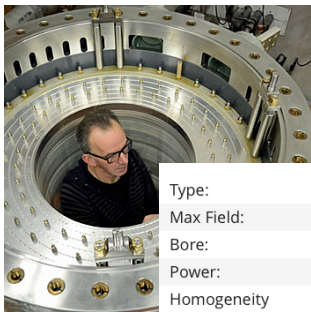
S. Lem, *Powrót z gwiazd*, 1961 :

“Te małe czarne skrzynki musiał mieć każdy bez wyjątku pojazd, każdy statek wodny czy latający; [...] w momencie niebezpieczeństwa — upadku samolotu, zderzenia aut czy pociągów [...] — wyzwalały ładunek \gg grawitacyjnego antypola \ll , które powstając i łącząc się z wytworzoną przez zderzenie [...] bezwładnością, dawało w rezultacie zero. [...] absorbowało cały szok, całą energię wypadku i ratowało w ten sposób nie tylko pasażerów pojazdu, ale także tych, na których inaczej obruszyłaby się jego ślepa masa.”



- ⇒ Pomieszenie pojęć **grawitacji** i **bezwładności**
- ⇒ Znaczenie **różnic** przyspieszeń (*sił pływowych*) oddziałujących na różne części ciała pasażera

“Czarna skrzynka” dla żaby



Type:	Bitter
Max Field:	30.0 tesla
Bore:	Ø 50mm at room temp.
Power:	17 MW
Homogeneity	1×10^{-3} in 1 cm DSV
Location:	North Hall, Cell 1

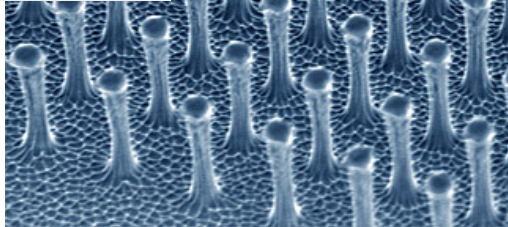
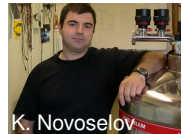
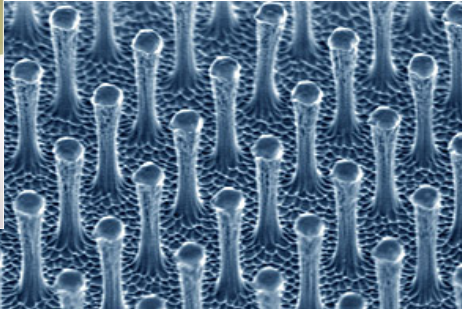
[Current Field Center location and Calibration table.](#)

For old calibration data contact Hung van Luong.

[Dimension drawings of typical bath cryostat setup. \(pdf, 47 kB\)](#)



"Gecko tape": Nature Materials, 2003



U. Fimbriatus



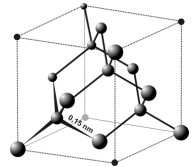
Krystaliczne odmiany alotropowe węgla

$D=0$

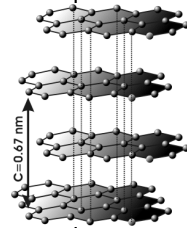
$D=1$

$D=2$

$D=3$



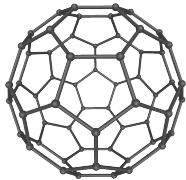
diament



grafit

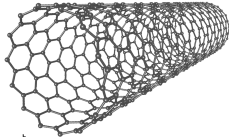
Krystaliczne odmiany alotropowe węgla

$D=0$



fulereny
1985

$D=1$

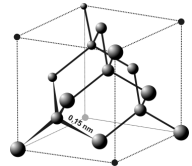


nanorurki
1990

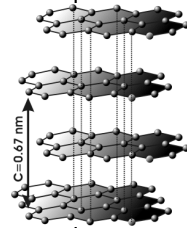
$D=2$

?

$D=3$



diament



grafit

Krystaliczne odmiany alotropowe węgla

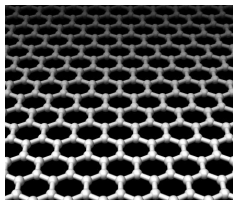
$D=0$

fulereny
1985

$D=1$

nanorurki
1990

$D=2$



grafen
2005

$D=3$

diament
grafit
<1900

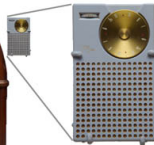
Nano-radio (2007)

Philco vacuum tube radio
(1931)



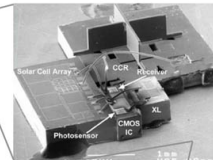
10 cm

Regency TR-1 transistor radio
(1954)

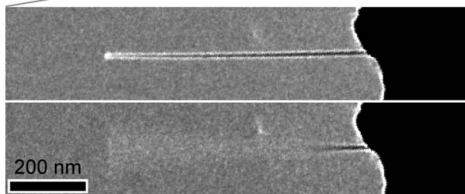


5 cm

Smartdust wireless sensor
(2002)



1 mm



200 nm

Nanotube radio (2007)

Courtesy Zettl Research Group, Berkeley, California

Nano-radio (2007)

(Loading: starwars.mov)

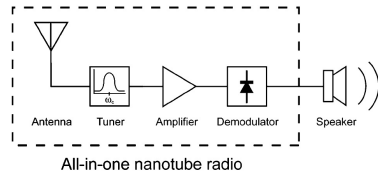
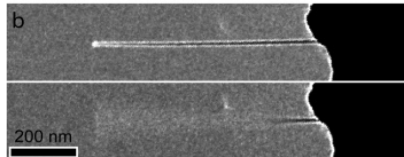
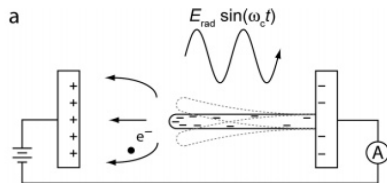
*Courtesy Zettl Research
Group, Berkeley, CA*

Nano-radio (2007)

(Loading: simulation.mov)

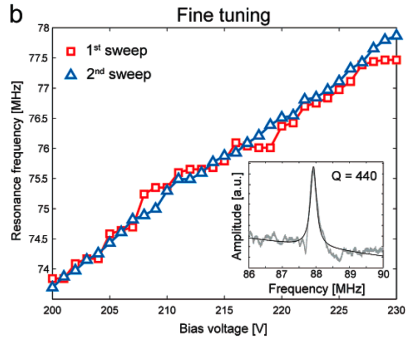
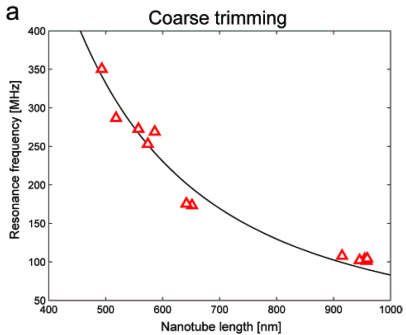
*Courtesy Zettl Research
Group, Berkeley, CA*

Jak to działa?



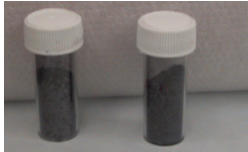
Jensen, Weldon, Garcia, Zettl, Nano Letters (2007)

Jak to działa?

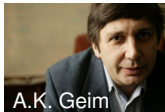
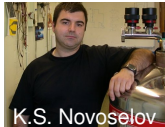
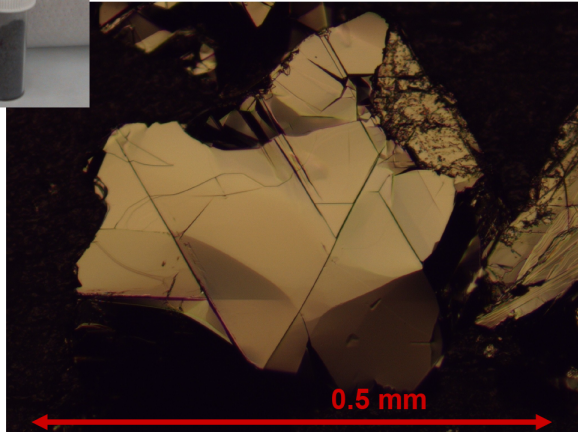


Jensen, Weldon, Garcia, Zettl, Nano Letters (2007)

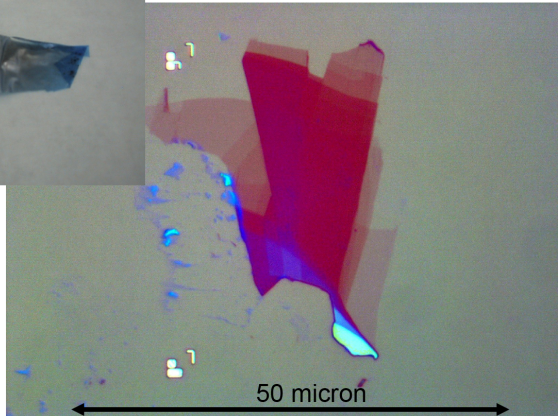
Metoda otrzymywania monowarstw (2005)



Natural graphite



Metoda otrzymywania monowarstw (2005)



K.S. Novoselov



A.K. Geim

*Philip Russell Wallace,
1943-46*



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 found to be about 100 times as great parallel to as across crystal planes. A large and anisotropic diamagnetic susceptibility is predicted for the conduction electrons; this is greatest for fields across the layers. The volume optical absorption is accounted for.

BAND THEORY OF GRAPHITE.

2. ZONE STRUCTURE OF A SINGLE
HEXAGONAL LAYER

Since the spacing of the lattice planes of graphite is large (3.37Å) compared with the hexagonal spacing in the layer (1.42Å), 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.

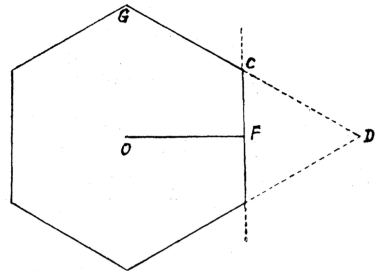
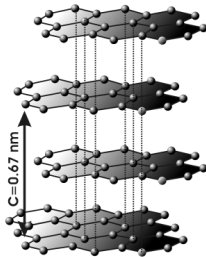
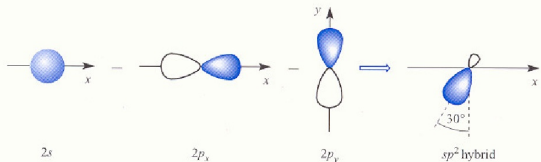
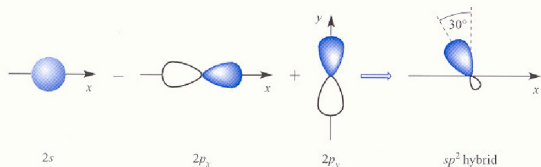
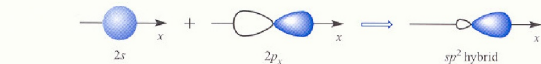
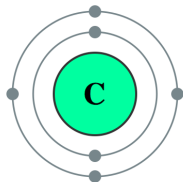


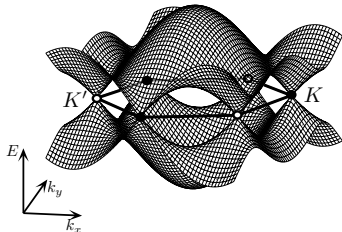
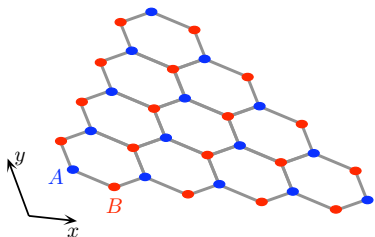
FIG. 2.



Struktura elektronowa grafenu



- 4 elektrony walencyjne; 3 tworzą wiązania chemiczne ($2s + 2p_x + 2p_y = 2sp^2$), 4-ty ($2p_z$) pozostaje.



- **Wallace** 1947: opis grafenu jako półmetal
- **Slonczewski-Weiss-McClure** 1957/8: model struktury pasmowej grafitu i grafenu

Niech $\delta\mathbf{k} = \mathbf{k} - \mathbf{K}$, $|\delta\mathbf{k}|a \ll 1$: $|E| = \hbar v_F |\delta\mathbf{k}|$ gdzie
 $v_F \equiv \frac{1}{2}\sqrt{3}\tau a/\hbar \approx 10^6$ m/s, $a = 0.246$ nm, $\tau \approx 3$ eV.

[**Koncepcja relacji dyspersji – ogólnie:** Elektron w kryształach zachowuje się niemal jak cząstka swobodna; zależność energii od pędu $E = p^2/(2m)$ zastąpiona bardziej skomplikowaną funkcją $E(p)$.]

Efektywne równanie Diraca dla grafenu



PHYSICAL REVIEW LETTERS

24 DECEMBER 1984

NUMBER 26

Condensed-Matter Simulation of a Three-Dimensional Anomaly

Gordon W. Semenoff

*The Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey 08540, and Department of Physics,^(a)
University of British Columbia, Vancouver, British Columbia V6T 2A6, Canada*

(Received 4 September 1984)

A condensed-matter analog of $(2+1)$ -dimensional electrodynamics is constructed, and the consequences of a recently discovered anomaly in such systems are discussed.

PACS numbers: 05.50.+q

“... it may be possible to fabricate a graphite monolayer where the effects which we describe may be observable.”



Czym jest równanie Diraca?

Mechanika kwantowa: Operatory, wartości własne, wektory własne (funkcje falowe)

$$H\Psi = E\Psi, \quad H = \frac{p^2}{2m}, \quad p = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}.$$

Jak *skwantować* relatywistyczny związek energii i pędu

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + (mc^2)^2} \quad ?$$

Pomysł Diraca: Poszukajmy A i B , takich aby

$$\sqrt{p^2 c^2 + (mc^2)^2} = Apc + Bmc^2.$$

Odpowiedź (w 1 wymiarze przestrzennym):

$$A = \sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$



W przestrzeni trójwymiarowej:

$$\sqrt{p^2 c^2 + (m c^2)^2} = \alpha_1 c p_x + \alpha_2 c p_y + \alpha_3 c p_z + \beta m_0 c^2 \equiv H,$$

przykładowa reprezentacja:

$$\alpha_j = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_j \\ \sigma_j & 0 \end{pmatrix}, \quad \beta = \begin{pmatrix} \sigma_0 & 0 \\ 0 & -\sigma_0 \end{pmatrix},$$

gdzie

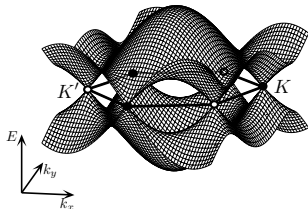
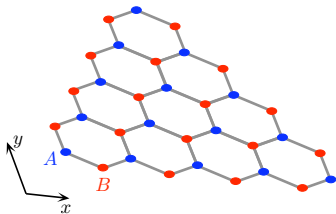
$$\sigma_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Konsekwencje (ogólne): Istnienie *antycząstek*, wewnętrzne stopnie swobody (*spin* elektronu).

Konsekwencje dla fizyki materii skondensowanej:

$m_e c^2 = 511 \text{ keV}$, typowe energie w kryształach $\sim 1 \text{ eV}$ (?!)

Efektywne równanie Diraca dla grafenu



Tight-binding Hamiltonian:

$$\mathcal{H}_{\text{TBA}} = \sum_{\langle ij \rangle} [t_{ij}(\mathbf{A})|i\rangle\langle j| + \text{h.c.}],$$

$$t_{ij}(\mathbf{A}) = -t \exp \left[i \frac{2\pi}{\Phi_0} \int_{\mathbf{r}_i}^{\mathbf{r}_j} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{r} \right],$$

$t \approx 3 \text{ eV}$, and $\Phi_0 = h/e$.

Envelope wavefunction:

$$\Psi(\mathbf{r}) = \begin{pmatrix} \psi_A \\ \psi_B \end{pmatrix} e^{i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}} + \begin{pmatrix} \psi'_A \\ \psi'_B \end{pmatrix} e^{i\mathbf{K}' \cdot \mathbf{r}}.$$

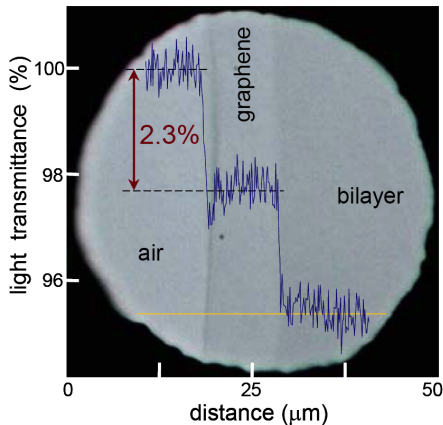
For K -point and $\mathbf{A} = 0$:

$$\frac{\hbar v_F}{i} \begin{pmatrix} 0 & \partial_x - i\partial_y \\ \partial_x + i\partial_y & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_A \\ \psi_B \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} \psi_A \\ \psi_B \end{pmatrix},$$

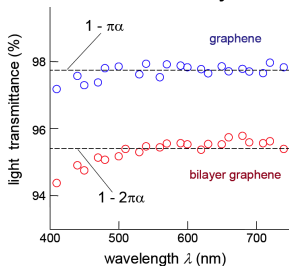
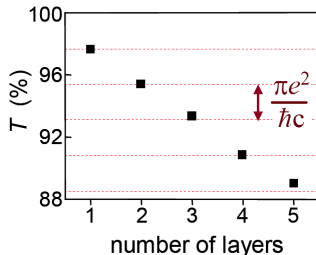
with $v_F \equiv \frac{\sqrt{3}}{2} ta/\hbar \approx 10^6 \text{ m/s}$, $a = 0.246 \text{ nm}$.

A compact form: $H_0 \Psi = E \Psi$, with $H_0 = v_F \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}$, $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y)$,
and $\mathbf{p} = -i\hbar(\partial_x, \partial_y)$. For $B \neq 0$: $\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{p} - \frac{e}{c} \mathbf{A}$.

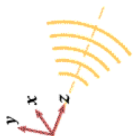
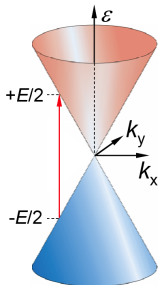
Jak widać elektrony Diraca?



Nair et al., *Science* **320**, 1308 (2008).



Kwantowanie absorpcji światła widzialnego



Grafen w polu fali elektromagnetycznej:

$$\hat{H} = v_F \vec{\sigma} \cdot \vec{p} = v_F \vec{\sigma} \cdot \left(\hat{p} - \frac{e}{c} \vec{A} \right) = \hat{H}_0 + \hat{H}_{\text{int}}$$

$$\hat{H}_{\text{int}} = -v_F \vec{\sigma} \cdot \frac{e}{c} \vec{A} = v_F \vec{\sigma} \cdot \frac{e}{i\omega} \vec{\Theta}$$

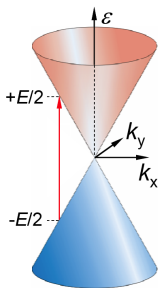
$\vec{\Theta}$ – amplituda pola elektrycznego, ω – częstota

Moc absorbowana: $W_a = \eta \hbar \omega$

Liczba fotonów pochłanianych w jednostce czasu:

$\eta = (2\pi/\hbar) |\langle f | H_{\text{int}} | i \rangle|^2 D(E_f)$, $D(\hbar\omega/2) = \hbar\omega/\pi\hbar^2 v_F^2$
(gęstość stanów końcowych).

Kwantowanie absorpcji światła widzialnego



Grafen w polu fali elektromagnetycznej:

$$\hat{H} = v_F \vec{\sigma} \cdot \vec{p} = v_F \vec{\sigma} \cdot \left(\hat{p} - \frac{e}{c} \vec{A} \right) = \hat{H}_0 + \hat{H}_{\text{int}}$$

$$\hat{H}_{\text{int}} = -v_F \vec{\sigma} \cdot \frac{e}{c} \vec{A} = v_F \vec{\sigma} \cdot \frac{e}{i\omega} \vec{\Theta}$$

$\vec{\Theta}$ – amplituda pola elektrycznego, ω – częstota

Moc absorbowana: $W_a = \eta \hbar \omega$

Liczba fotonów pochłanianych w jednostce czasu:
 $\eta = (2\pi/\hbar) |\langle f | H_{\text{int}} | i \rangle|^2 D(E_f)$, $D(\hbar\omega/2) = \hbar\omega/\pi\hbar^2 v_F^2$
 (gęstość stanów końcowych).

Łącznie, moc absorbowana: $W_a = (e^2/4\hbar) |\vec{\Theta}|^2$,
 wobec $W_i = (c/4\pi) |\vec{\Theta}|^2$, $W_a/W_i = \pi e^2/\hbar c = \pi\alpha$.

Grafen w Manchesterze

- Pierwsze pomiary przewodnictwa właściwego grafenu [Novoselov *et al.*, 2005] $\sigma_{\min} \sim e^2/h = (26 \text{ k}\Omega)^{-1}$
- Połówkowy kwantowy efekt Halla.
- Kwantowanie absorpcji światła widzialnego ($1 - T = \pi\alpha \approx 2.3\%$) [Nair *et al.*, 2008]
- Blokada kulombowska i demonstracja chaosu kwantowego [Ponomarenko *et al.*, 2008]
- Przejście grafen–grafan [Elias *et al.*, 2009]

Grafen w Manchesterze



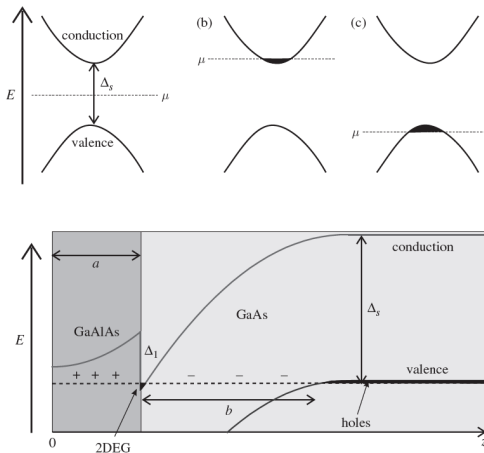
Artist's impression of the NGI

World-leading research into graphene will take place in the new £61 million National Graphene Institute. The new facility will be designed with the goal to be the world-leading research and incubator center dedicated to the development of graphene, helping the UK to remain at the forefront of the commercialisation of this revolutionary material.

The 7,600 square metre building will house state-of-the-art facilities, including two 'cleanrooms' where scientists can carry out experiments and research without contamination.

<http://www.materials.manchester.ac.uk>

Co jeszcze zaskakuje w grafenie?



W heterostrukturach 2DEG domieszki i elektrony przewodnictwa rozdzielone przestrzennie. W grafenie i innych półprzewodnikach 2D: wszystko w jednej warstwie monoatomowej grubości!

Co jeszcze zaskakuje w grafenie?

4 August 1972, Volume 177, Number 4047



SCIENCE

More Is Different

Broken symmetry and the nature of
the hierarchical structure of science.

P. W. Anderson

The reductionist hypothesis may still be a topic for controversy among philosophers, but among the great majority of active scientists I think it is accepted

planation of phenomena in terms of known fundamental laws. As always, distinctions of this kind are not unambiguous, but they are clear in most cases. Solid state physics, plasma physics, and perhaps

What differs graphene from a collection of carbon atoms?

- The valley pseudospin (\Rightarrow *fermion doubling*)
- Time-reversal symmetry breaking at zero magnetic field
- Pseudodiffusive charge transport and more ...

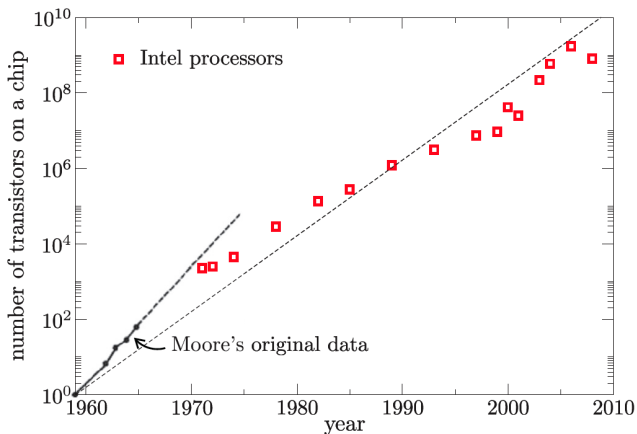
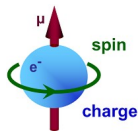


Figure 1.1 – Moore's law on the example of Intel processors (data from www.intel.com/technology/mooreslaw/index.htm), together with Moore's original prediction (from [1]). The long dashed line is a fit to an exponential, doubling every 18 months.

Spintronika i pseudospintronika

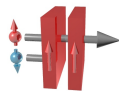
Klasyczna elektronika

- Operuje na **ładunku** elektronu
- *Ograniczenia:* **emisja ciepła**



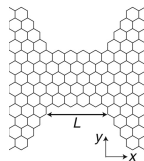
Spintronika

- Operuje na **spinie** elektronu
- *Ograniczenia:* **niska efektywność**

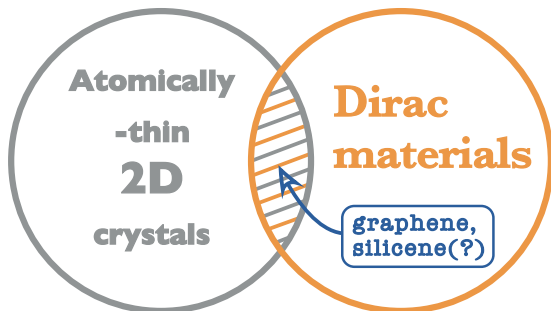


Pseudospintronika?

- Możliwość selektywnego obsadzenia punktu K lub K'
- Dwuwarstwa: *indeks warstwy*



Nie tylko grafen



- h-BN, h-AlN(?)
- MoS₂, HfSe₂, ...
- Black-P
- Artificial graphenes & analogs
- Topolog. insulators: HgTe/CdTe, Bi_{1-x}Sb_x, Bi₂Se₃, Bi₂Te₃, ...
- *d*-wave superconductors
- Weyl semimetals

For a review of the topic, see: [Wehling et al., Adv. Phys. 76, 1 \(2014\)](#)