

Cserti József

ELTE, TTK

Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

Bevezetés a grafén fizikájába



Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Téli Iskola a grafénről, Budapest, 2011. február 2-4.

Press release:

The Nobel Prize in Physics 5 October 2010



The Royal Swedish Academy of Sciences
has decided to award the

Nobel Prize in Physics for 2010 to

Andre Geim

University of Manchester, UK

and

Konstantin Novoselov

University of Manchester, UK

“for groundbreaking experiments regarding the two-dimensional material graphene”

Graphene – the perfect atomic lattice

A thin flake of ordinary carbon, just one atom thick, lies behind this year’s Nobel Prize in Physics. Andre Geim and Konstantin Novoselov have shown that carbon in such a flat form has exceptional properties that originate from the remarkable world of quantum physics.

Andre Geim



Dutch citizen. Born 1958 in Sochi, Russia. Ph.D. 1987 from Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia. Director of Manchester Centre for Mesoscience & Nanotechnology, Langworthy Professor of Physics and Royal Society 2010 Anniversary Research Professor, University of Manchester, UK.

Konstantin Novoselov



British and Russian citizen. Born 1974 in Nizhny Tagil, Russia. Ph.D. 2004 from Radboud University Nijmegen, The Netherlands. Professor and Royal Society Research Fellow, University of Manchester, UK.

A Nobel-díjas cikk

22 OCTOBER 2004 VOL 306 SCIENCE www.sciencemag.org

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

3336 Web of Science hivatkozás!!!!!!

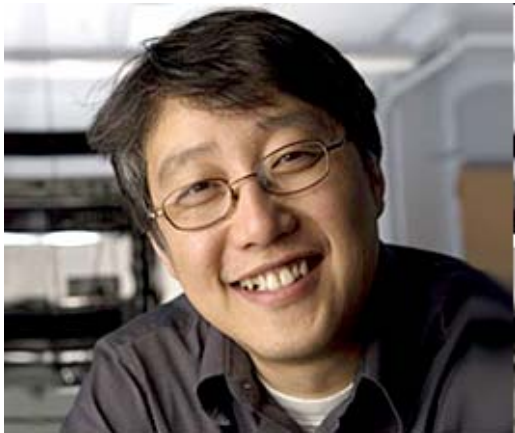
átlagosan naponta 2 cikk
(tegnap)

K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, and A. A. Firsov, *Nature* **438**, 197 (2005).

LETTERS

Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene

Yuanbo Zhang¹, Yan-Wen Tan¹, Horst L. Stormer^{1,2} & Philip Kim¹



Philip Kim
Columbia University

[További fontos cikkek:](#)

K. Novoselov et al., *Nature* **438**, 197 (2005)

Y. Zhang et al., *Phys. Rev. Lett.* **94**, 176803 (2005)

K. Novoselov et al., *Nature Physics* **2**, 177 (2006)

Az első mérések grafénben

22 OCTOBER 2004 VOL 306 SCIENCE www.sciencemag.org

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

nature

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

LETTERS

Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene

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

Vol 438|10 November 2005|doi:10.1038/nature04235

nature

LETTERS

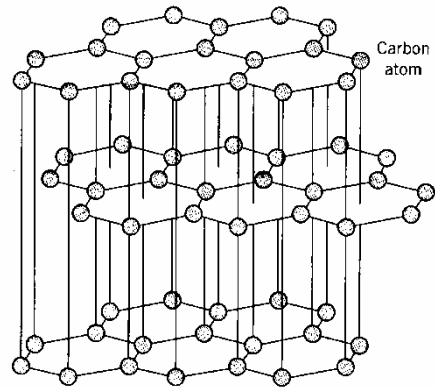
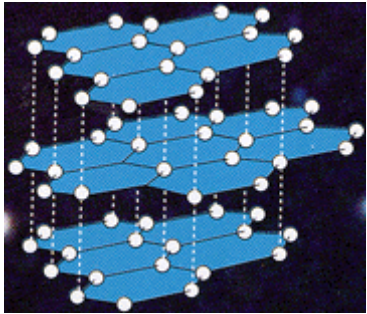
Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene

Yuanbo Zhang¹, Yan-Wen Tan¹, Horst L. Stormer^{1,2} & Philip Kim¹

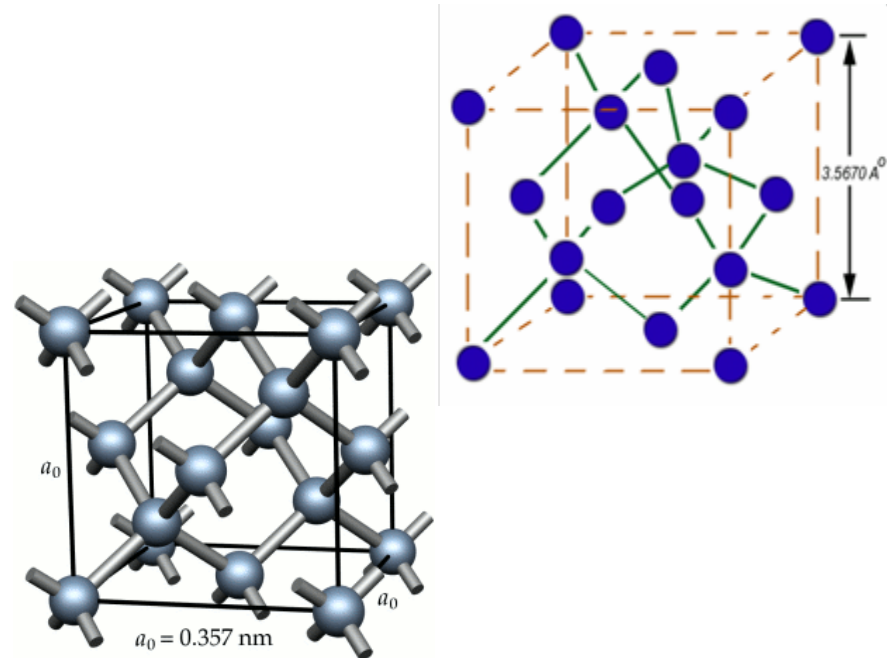
- K. Novoselov et al., Science **306**, 666 (2004)
- K. Novoselov et al., Nature **438**, 197 (2005)
- Y. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 176803 (2005)
- Y. Zhang et al., Nature **438**, 201 (2005)
- K. Novoselov et al., Nature Physics **2**, 177 (2006)

A szén két módosulata

Grafit



Gyémánt



Grafit

Nagyon puha

Átlátszatlan

Elektromosan jó vezető

Nagyon olcsó



Gyémánt

Nagyon kemény

Átlátszó

Szigetelő

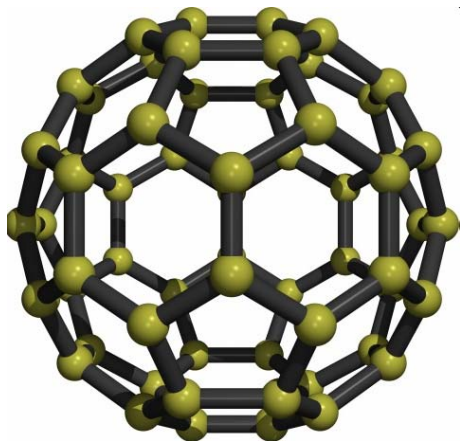
Nagyon drága



A szén további módosulatai

Fullerén, C₆₀

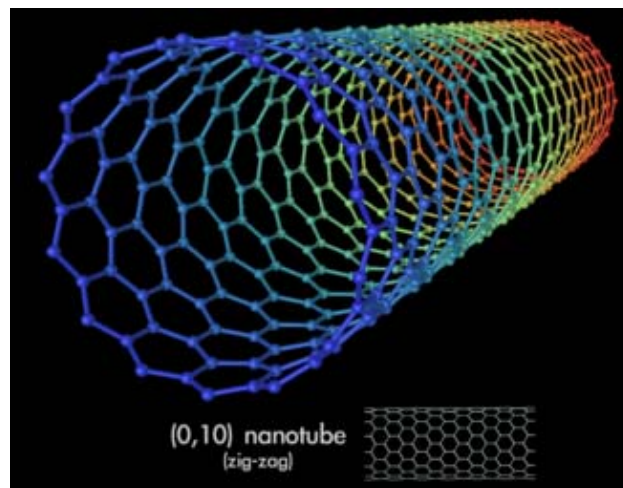
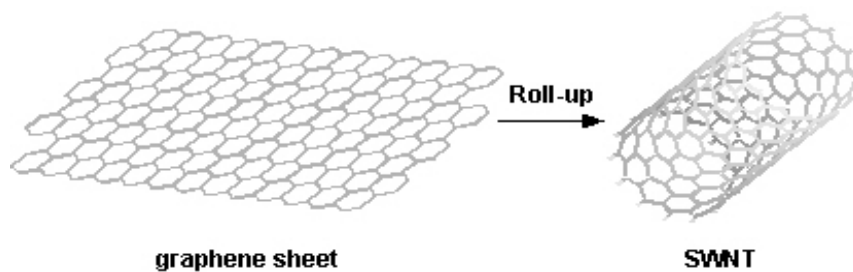
(1985)

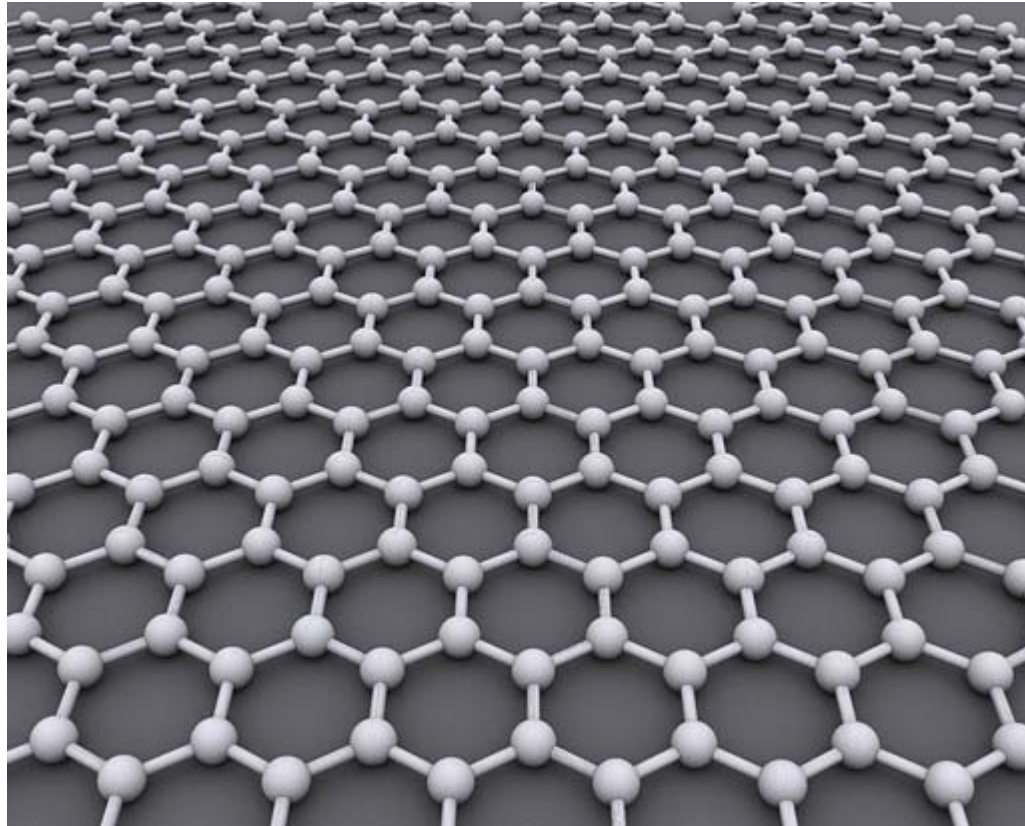


1996. Kémiai Nobel-díj,
Robert F. Curl Jr., Sir Harold W.
Kroto and Richard E. Smalley
"for their discovery of fullerenes".

Grafén

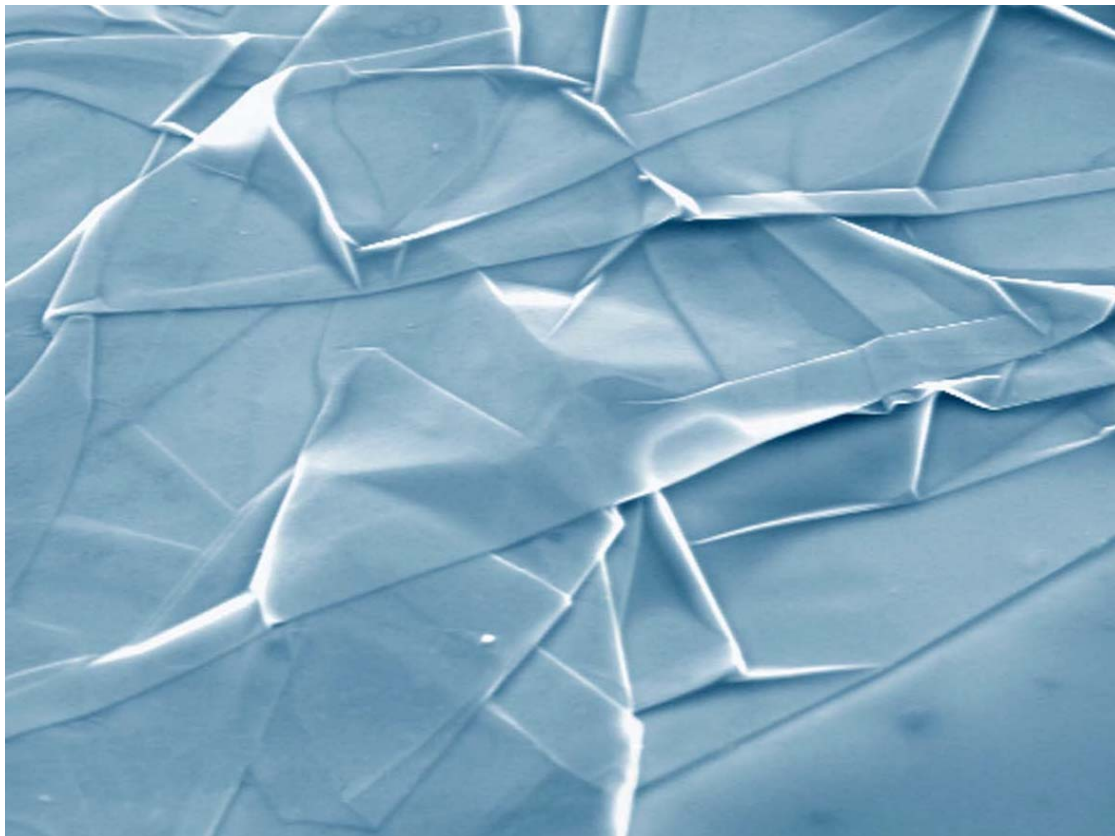
(2004)





Graphene is an atomic-scale honeycomb lattice made of carbon atoms.

Photo: Alexander Alus, licensed by Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0

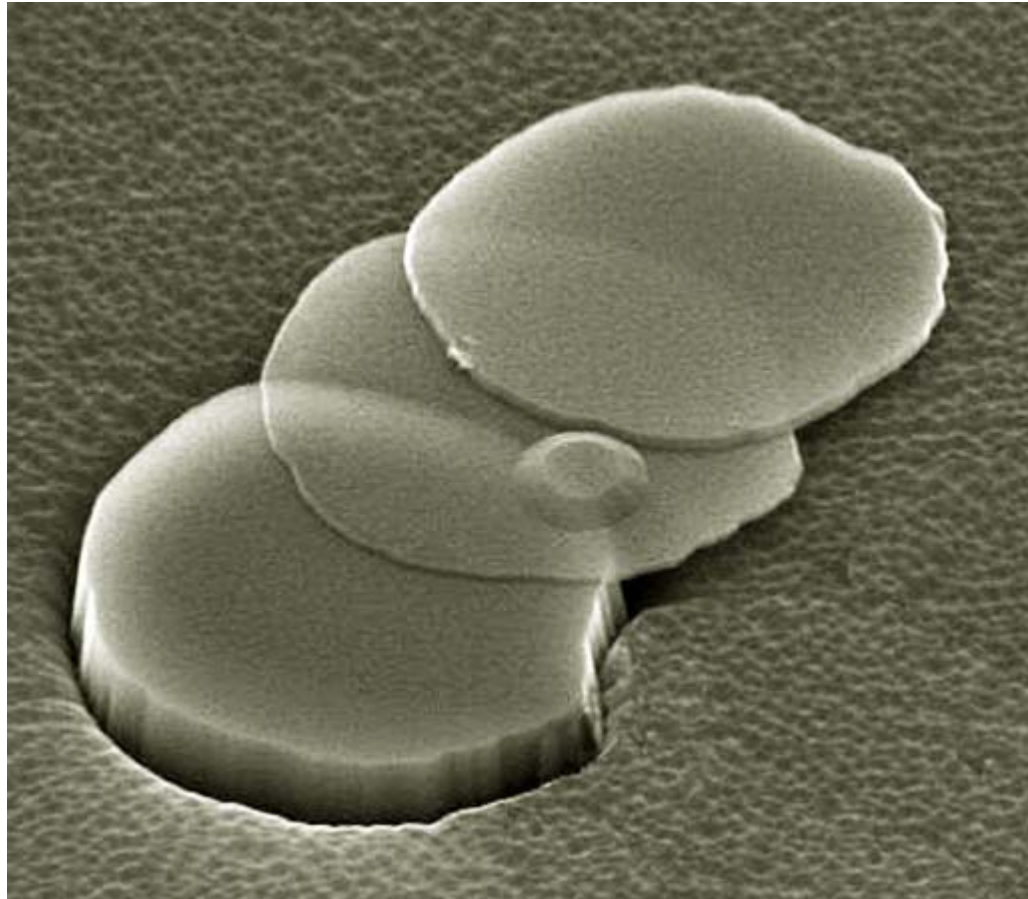


Olyan, mint a selyem ruha.

Szilícium lapon összegyűrődött grafén lapok.

Felvétel: pásztázó elektron mikroszkóppal 5000-szeres nagyítás.

20 mikronos méret.

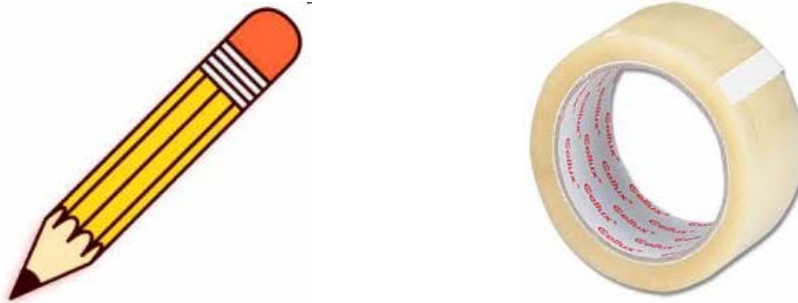


Scanning electron micrograph (SEM) of a fallen mesa of graphite.
This is the way graphene molecules were "extracted" from bulk graphite.
To be reasonably visible in SEM, we show a 10 nm carbon flake (30 layer thick).

University of Manchester, United Kingdom

A grafén előállításának módjai

A *Mermin–Wagner-tétel* szerint kétdimenzióban nem létezik hosszútávú rend, kétdimenziós kristály termodinamikailag instabil.

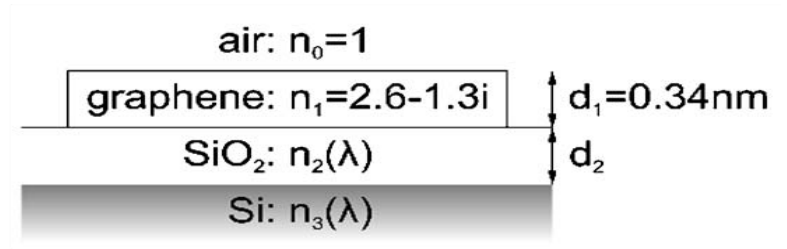


- „Hántolás” grafitból (cellux, Manchester group, 300 nm vastag SiO)

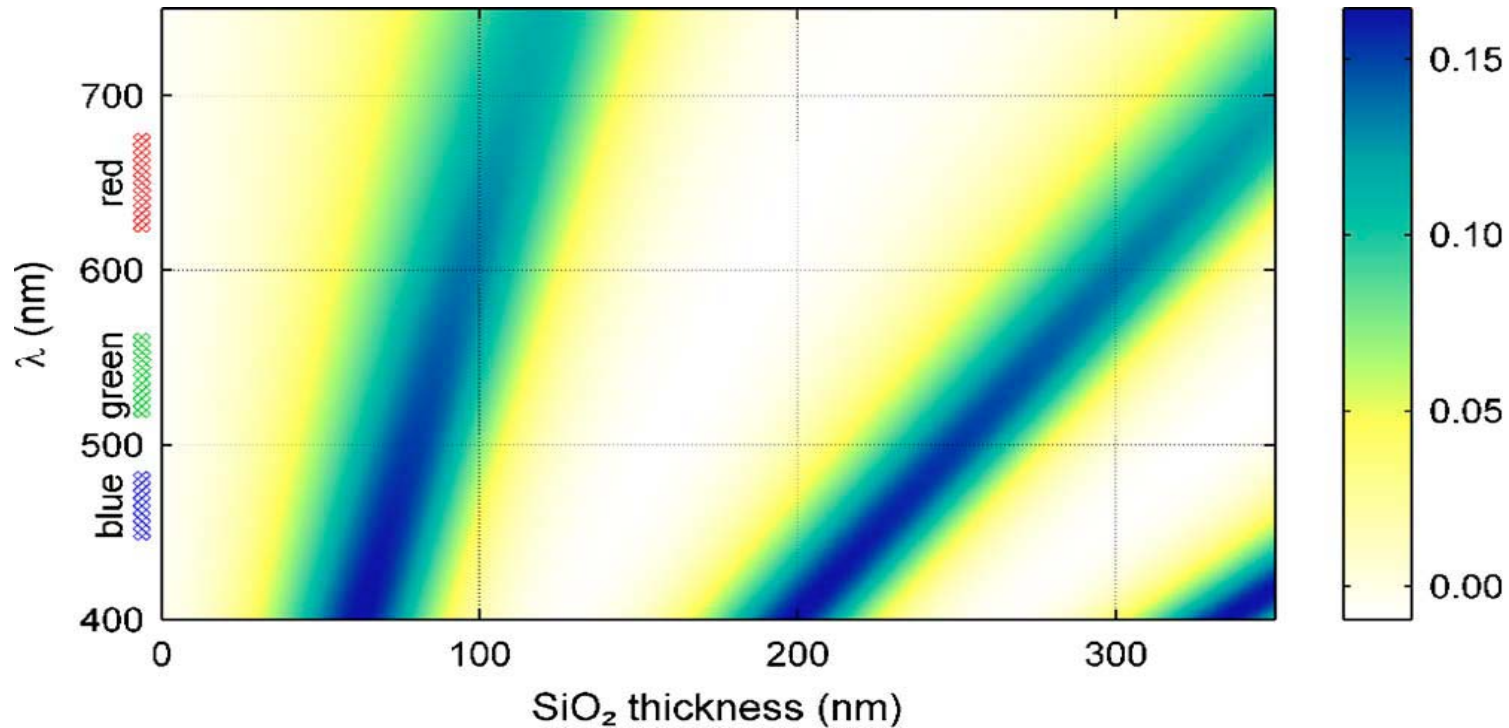
Méret $\sim 1 \text{ mm}^2$

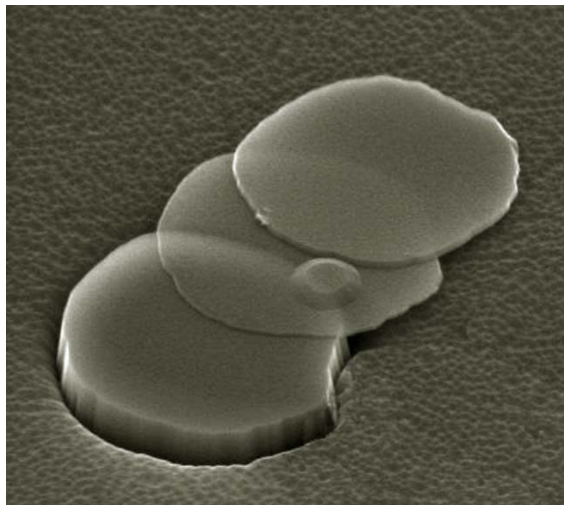
- Kémiai reakcióval
- Szén nanocső felvágása
- Pásztázó elektronmikroszkóp litográfia (MFA, Biró László csoportja)

Making graphene visible

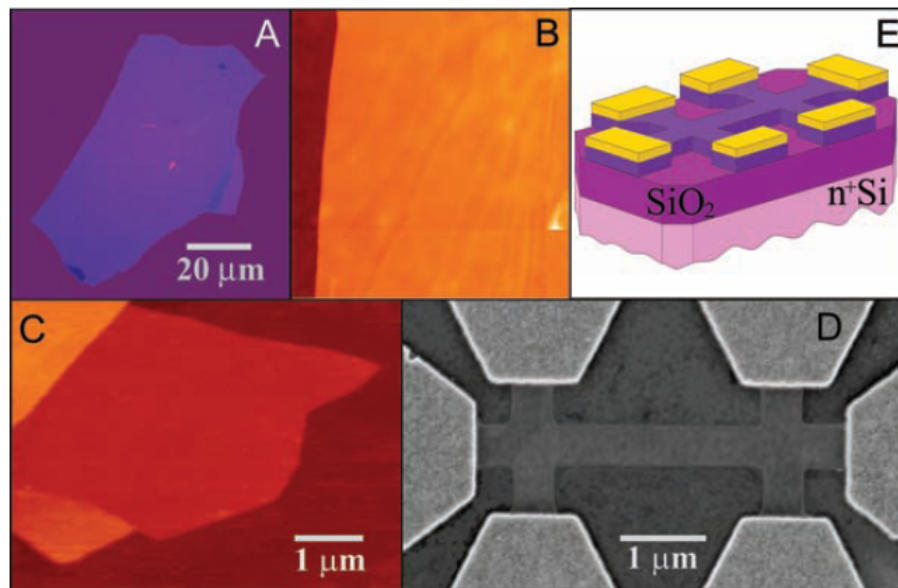


Contrast $C = \frac{I(n_1=1) - I(n_1)}{I(n_1=1)}$





10 nm méretű grafén pikkely (30 réteg)

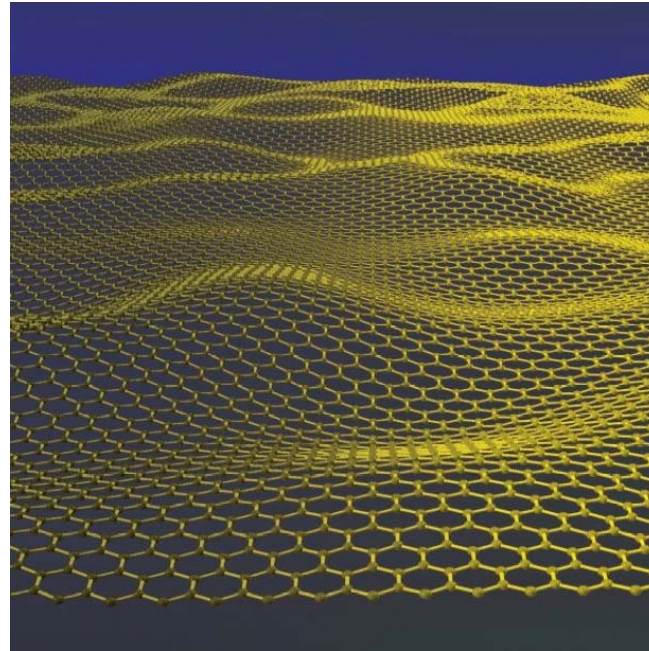


Grafén szilícium-oxid lapkán.
Elektródákat kapcsoltak hozzá.



Researchers use electron-beam lithography to microfabricate graphene devices.
Kindly provided by University of Manchester, United Kingdom

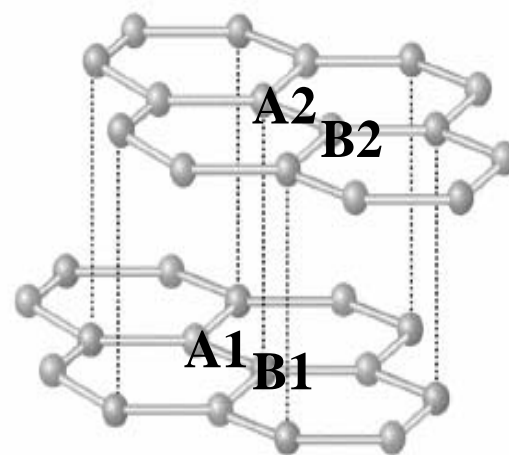
A réteg nem tökéletesen sík



Kétrétegű grafén

(Bilayer graphene)

Bernal stacking (A2 - B1)

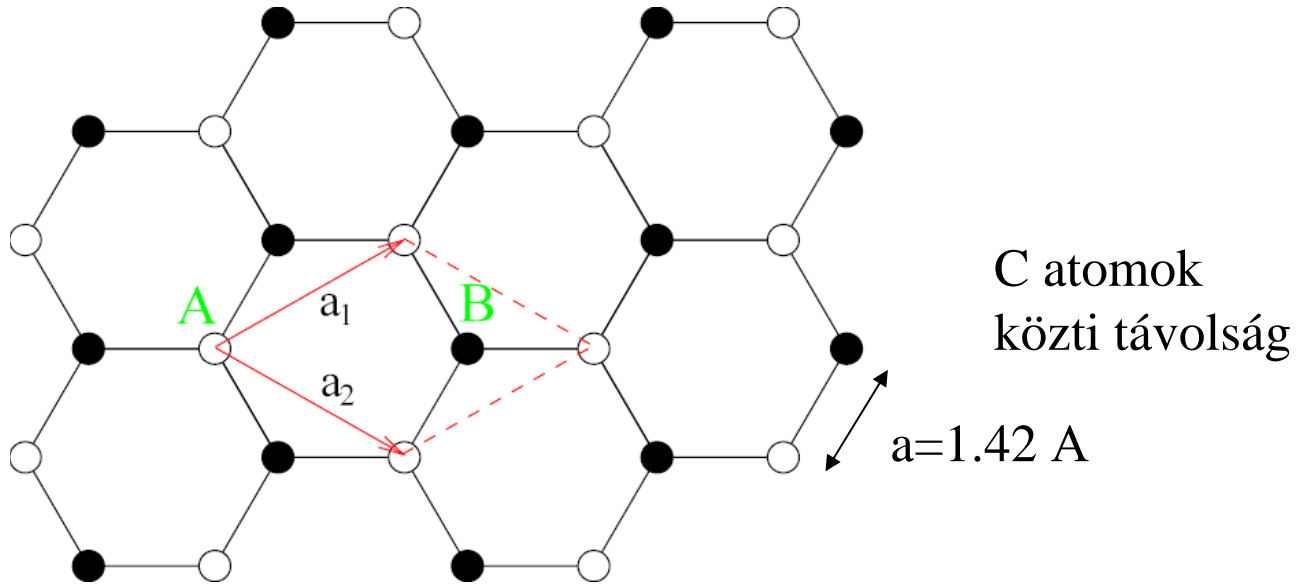


A szénatomok elhelyezkedése grafénben

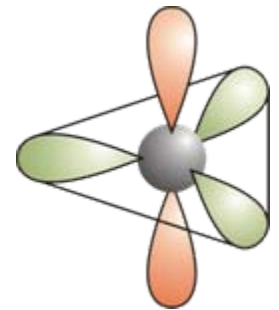
méhsejt-szerű szerkezet

Két alrác

(A,B atomok)




- Szén \rightarrow 4 vegyérték elektron: 3 db. sp^2 kötést alkot. Stabil méhsejt-rács.
- A 4. elektron a p_z pályán van (π band). Ez az elektron vesz részt a transzportban.
- A p_z pálya merőleges a grafén síkjára.



Az elektron hullámfüggvénye, a Bloch-állapot

(síkhulámmal modulált rácспериódikus függvény)

$$\psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{\mathbf{R}} e^{i\mathbf{k}\mathbf{R}} \left[C_A(\mathbf{k}) \varphi_A(\mathbf{r} - \mathbf{R}) + C_B(\mathbf{k}) \varphi_B(\mathbf{r} - \mathbf{R} - \mathbf{d}) \right]$$


$\mathbf{R} = n_1 \mathbf{a}_1 + n_2 \mathbf{a}_2$
rácsvektor

atomi p_z állapot, hullámfüggvények

$\mathbf{d} = (\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2)/3$ B típusú szénatom helye az elemi cellában

$C_A(\mathbf{k})$ és $C_B(\mathbf{k})$ lineárkombinációs együtthatókat
a **Schrödinger-egyenlet** határozza meg:

$$H\psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = E(\mathbf{k})\psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$$

Folytatás, I.

$$\mathbf{H} \begin{pmatrix} C_A(\mathbf{k}) \\ C_B(\mathbf{k}) \end{pmatrix} = E(\mathbf{k}) \mathbf{S} \begin{pmatrix} C_A(\mathbf{k}) \\ C_B(\mathbf{k}) \end{pmatrix}$$

ahol $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} H_{AA} & H_{AB} \\ H_{BA} & H_{BB} \end{pmatrix}$, és $\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{AA} & S_{AB} \\ S_{BA} & S_{BB} \end{pmatrix}$ átfedési integrálokból képzett mátrix

↙
hopping mátrix

$$H_{AA} = H_{BB} = \epsilon_0 + \gamma_1 \sum_{\mathbf{R}_2} e^{i\mathbf{k}\mathbf{R}_2}$$

$$H_{AB} = H_{BA}^* = \gamma_0 \sum_{\mathbf{R}_1} e^{i\mathbf{k}\mathbf{R}_1} + \gamma_2 \sum_{\mathbf{R}_3} e^{i\mathbf{k}\mathbf{R}_3}$$

$$S_{AA} = S_{BB} = 1 + s_1 \sum_{\mathbf{R}_2} e^{i\mathbf{k}\mathbf{R}_2}$$

$$S_{AB} = S_{BA}^* = s_0 \sum_{\mathbf{R}_1} e^{i\mathbf{k}\mathbf{R}_1} + s_2 \sum_{\mathbf{R}_3} e^{i\mathbf{k}\mathbf{R}_3}$$

ahol $\epsilon_0 = \int \varphi_A^*(\mathbf{r}) H(\mathbf{r}) \varphi_A(\mathbf{r}) d^3\mathbf{r}$ a p_z állapothoz tartozó atomi energiaszint (on-site energia), míg a hopping integrálok: $\gamma_0 = \int \varphi_A^*(\mathbf{r}) H(\mathbf{r}) \varphi_B(\mathbf{r} - \mathbf{d}) d^3\mathbf{r}$, $\gamma_1 = \int \varphi_A^*(\mathbf{r}) H(\mathbf{r}) \varphi_A(\mathbf{r} - \mathbf{R}_2) d^3\mathbf{r}$, és $\gamma_2 = \int \varphi_A^*(\mathbf{r}) H(\mathbf{r}) \varphi_B(\mathbf{r} - \mathbf{R}_3 - \mathbf{d}) d^3\mathbf{r}$, illetve az átfedési integrálok: $s_0 = \int \varphi_A^*(\mathbf{r}) \varphi_B(\mathbf{r} - \mathbf{d}) d^3\mathbf{r}$, $s_1 = \int \varphi_A^*(\mathbf{r}) \varphi_A(\mathbf{r} - \mathbf{R}_2) d^3\mathbf{r}$, és $s_2 = \int \varphi_A^*(\mathbf{r}) \varphi_B(\mathbf{r} - \mathbf{R}_3 - \mathbf{d}) d^3\mathbf{r}$. Itt a $*$ a komplex konjugálást jelenti.

Elektronok diszperziós relációja tight-binding közelítésben

(Folytatás, II.)

Elsőszomszéd-közelítésben:
$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \epsilon_0 & f(\mathbf{k}) \\ f^*(\mathbf{k}) & \epsilon_0 \end{pmatrix}$$

ahol
$$f(\mathbf{k}) = \gamma_0 (1 + e^{-i\mathbf{k}\mathbf{a}_1} + e^{-i\mathbf{k}\mathbf{a}_2})$$

\mathbf{H} sajátérték-egyenlete, a **diszperziós reláció**:

$$\begin{aligned} E_s(\mathbf{k}) &= \epsilon_0 + s|f(\mathbf{k})| = \\ &= \epsilon_0 + s|\gamma_0| \sqrt{3 + 2 \cos \mathbf{k}\mathbf{a}_1 + 2 \cos \mathbf{k}\mathbf{a}_2 + 2 \cos \mathbf{k}(\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2)}. \end{aligned}$$

$s = \pm 1$ a sávindexet jelöli

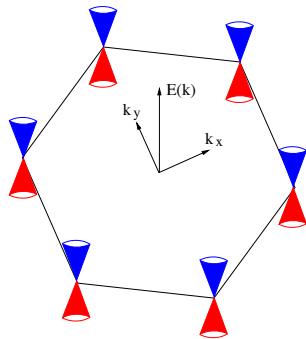
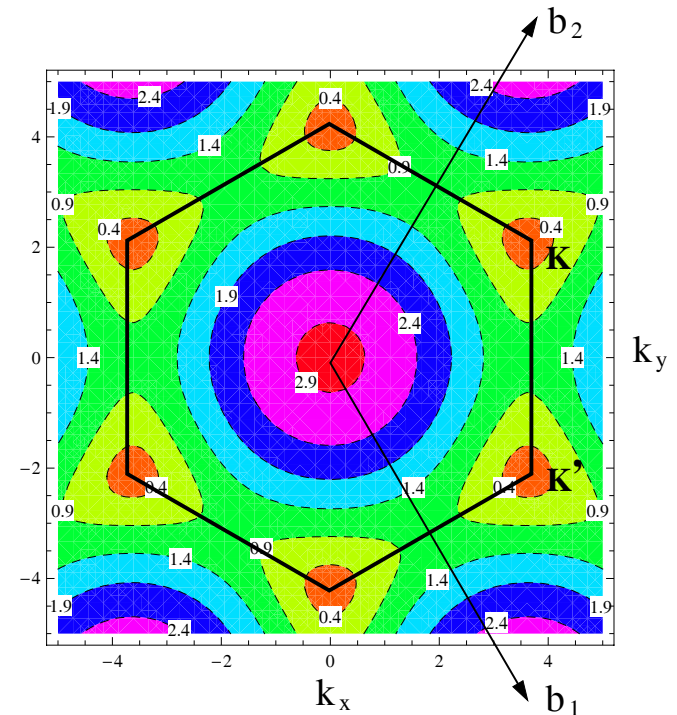
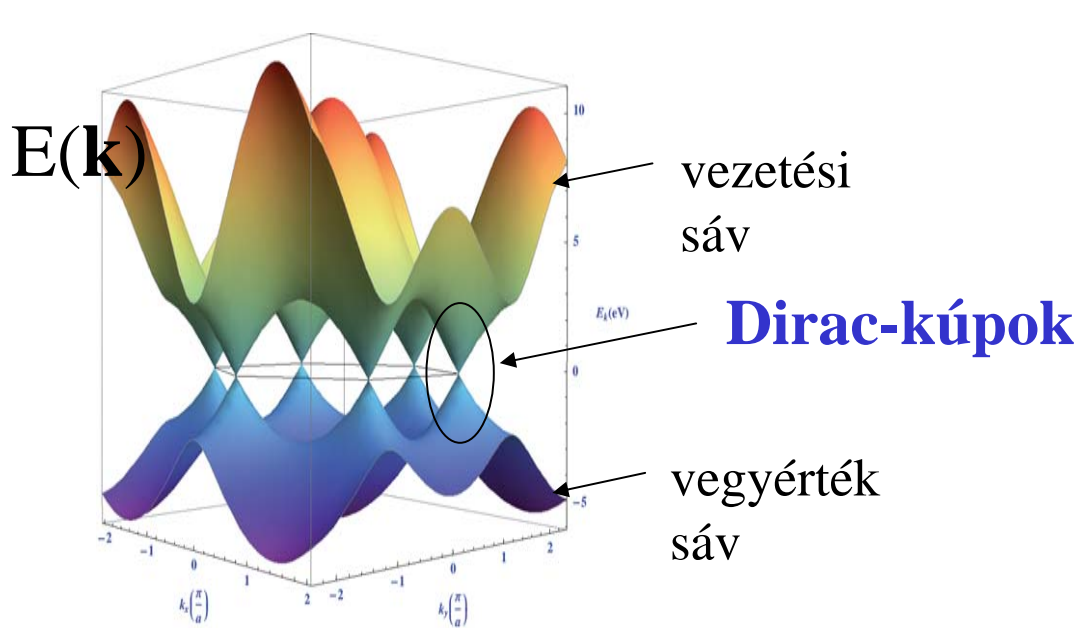
$s = +1$ a **vezetési sávot** (másnéven π sáv),

$s = -1$ a **vegyértékkötési sávot** (másnéven π^* sáv) írja le

Két sáv:
vezetési/valencia sáv
elektron/lyuk

Brillouin-zóna, diszperziós reláció

A grafén sávszerkezetét először Wallace tanulmányozta 1947-ben.



$$H = c \sigma p \quad c = c_0/300$$

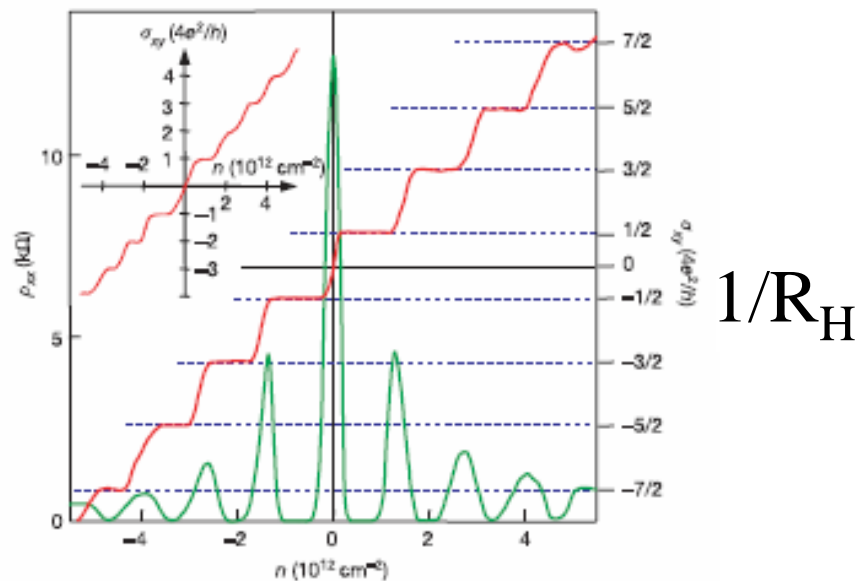
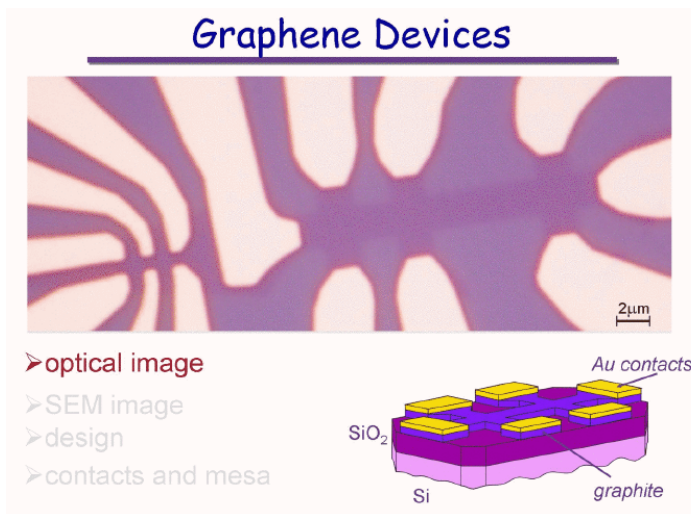
A \mathbf{K} pontok körül lineáris diszperzió.
Nincs gap a \mathbf{K} pontoknál!!!

Relativisztikus, zérus nyugalmi tömegű 2 dimenziós elektron

Kvantált Hall-effektus grafénben

Andre Geim csoportja, Manchester University

Philip Kim csoportja, Columbia University



B

$$R_H = \frac{h}{4 \left(n + \frac{1}{2} \right) e^2}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Grafénban a töltéshordozók mozgékonyága rendkívül nagy,

$$\mu = 15000 \text{ cm}^2/\text{Vs}.$$

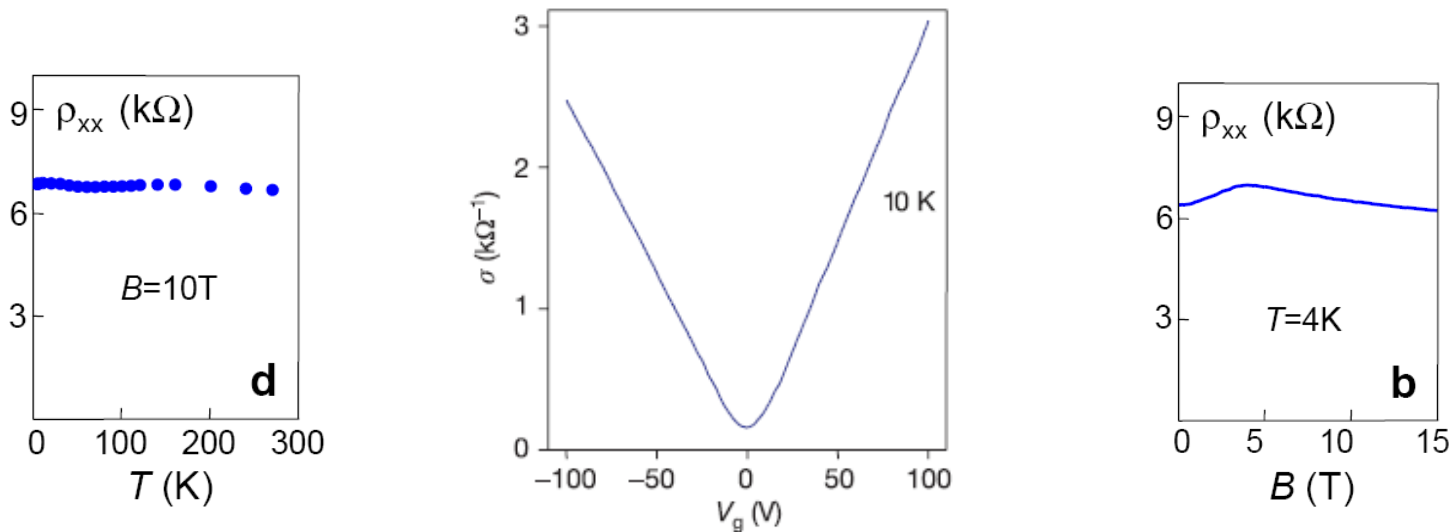
Si-ra $\mu = 1350 \text{ cm}^2/\text{V s}$.

A grafén elektromos transzportja ballisztikus marad akár a szubmikronos skálán (0.3 μm) is.

Minimális vezetőképesség grafénben

(Minimal Conductivity in Graphene)

K. S. Novoselov, E. McCann, S. V. Morozov, V. I. Fal'ko, M. I. Katsnelson, U. Zeitler, D. Jiang, F. Schedin, A. K. Geim, Nature Physics **2**, 177 (2006)



Független a hőmérséklettől és a mágneses tértől.

Mérések szerint közel zérus elektronkoncentrációnál a longitudinális vezetőképesség nagyságrendileg:

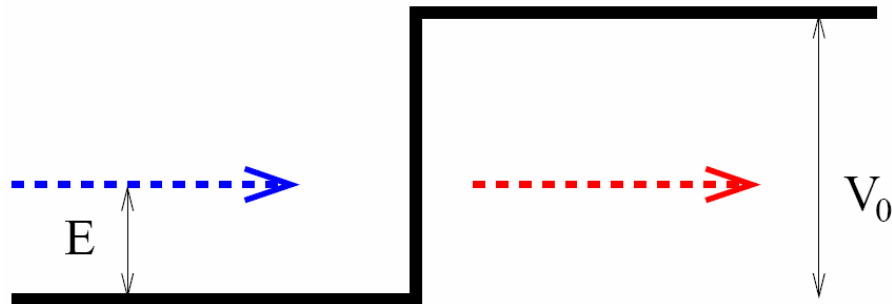
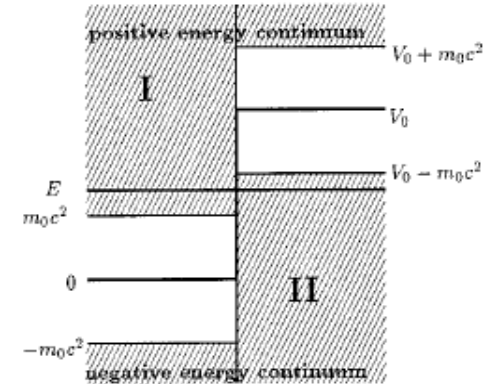
$$4e^2/h$$

Klein-paradoxon

Dirac-egyenletre: F. Constantinescu, E. Magyari: Kvantummechanikai feladatok, Tankönyv Kiadó, Budapest 1972. (354. old. 17. és 18. feladat)

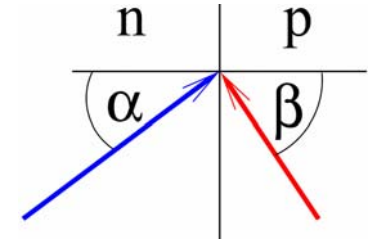
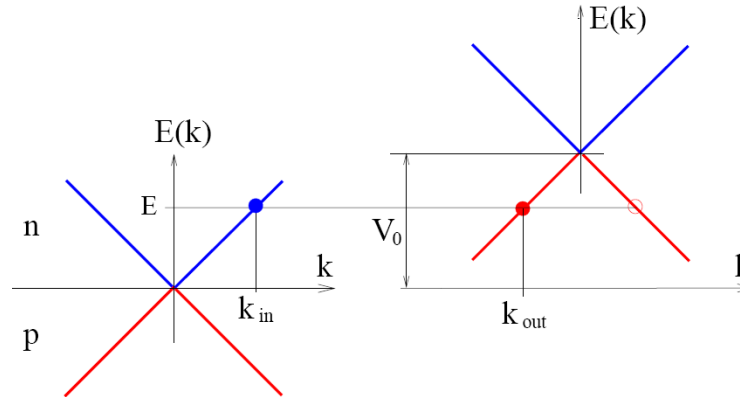
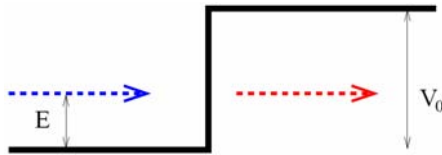
Grafénre: M. I. Katnelson, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, Nature Physics **2**, 620 (2006); cond-mat/0604323

Hamilton-operátor: $H = c \sigma p$



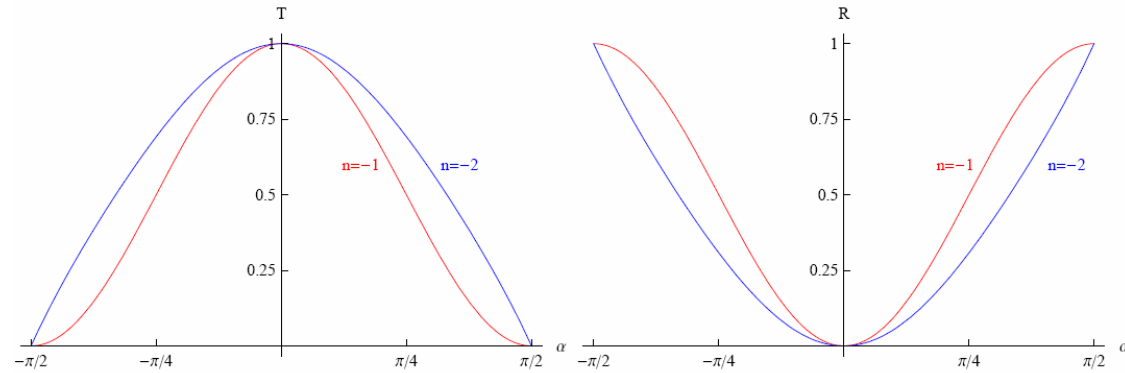
Transzmisszió 1 valószínűséggel!!!

Klein-paradoxon, avagy a Fresnel-formulák grafénben



$$T = \frac{j_{\text{trans}}}{j_{\text{be}}} = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} |t|^2 = \frac{\cos \alpha \cos \beta}{\cos^2 \frac{\alpha + \beta}{2}},$$

$$R = \frac{|j_{\text{refl}}|}{j_{\text{be}}} = |r|^2 = \frac{\sin^2 \frac{\alpha - \beta}{2}}{\cos^2 \frac{\alpha + \beta}{2}},$$



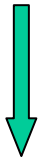
A potenciálgát mindig transzparens kis beesési szögre

Az elektronokat elektrosztatikusan nem lehet bezárni.

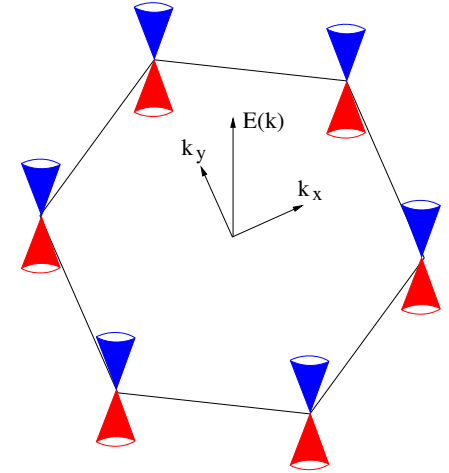
A szennyezőkön való szórás kevésbé játszik szerepet.

Milyen állapotok vezetnek? Az állapotsűrűség

Diszperziós reláció: $E_{\pm}(\mathbf{k}) = \pm \hbar c |\mathbf{k}|$



Állapotsűrűség: $\varrho(E) = \frac{2}{\pi^2} \frac{A_c}{\hbar^2 v^2} |E|$



A Dirac pontban ($E=0$) az állapotsűrűség **zérus !!**

Evaneszens módusok

(evanescent modes)

$$E_{\pm}(\mathbf{k}) = \pm \hbar c |\mathbf{k}|$$

A Dirac pontban ($E=0$)



$$0 = |\mathbf{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$



Ha k_y valós szám

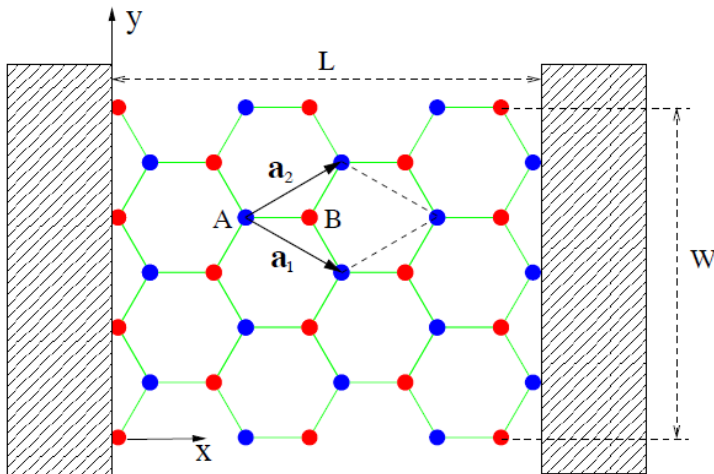


k_x imaginárius,

$e^{ik_x x}$ síkhullám



evanescent módus



Az evanescent módusok véges vezetőképességet eredményeznek.

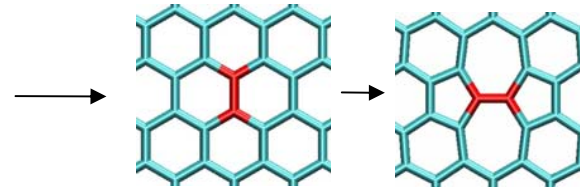
Ballisztikus grafén
minimális vezetőképessége:

$$\sigma_{xx}^{min} = (4/\pi) e^2/h$$

A minimális vezetőképesség okai

Rendezetlenség:

- Abszorbált atomok, molekulák (H, CH)
- Vakanciák
- Topologikus hibák, pl. Stone-Wales
- Nem tökéletes sík
- Minta szélei
- SiO hordozó hatása



Szórési folyamatok:

- Rövidtávú szórócentrumok (short range scattering)
- Coulomb-szórás
- elektron-fonon szórás
- elektron-elektron szórás

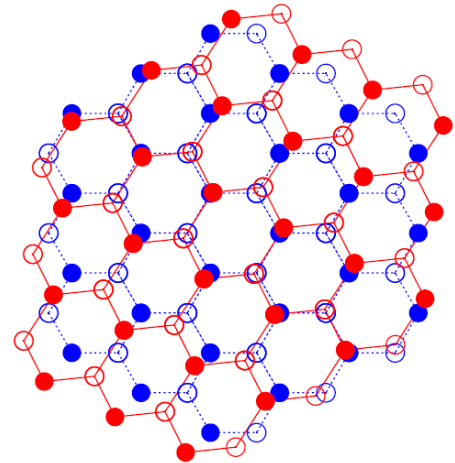
Mechanikailag deformált grafén, nyírás

Szilícium alapú elektronika helyett **grafén alapú elektronika** ???

Gond: **nincs gap** !!!

Hogy lehet gap-et létrehozni?

- Grafén csík
- Periodikus dópolással
- Mechanikai deformációval, a grafén 20 % -ig reverzibilisen deformálható !!!



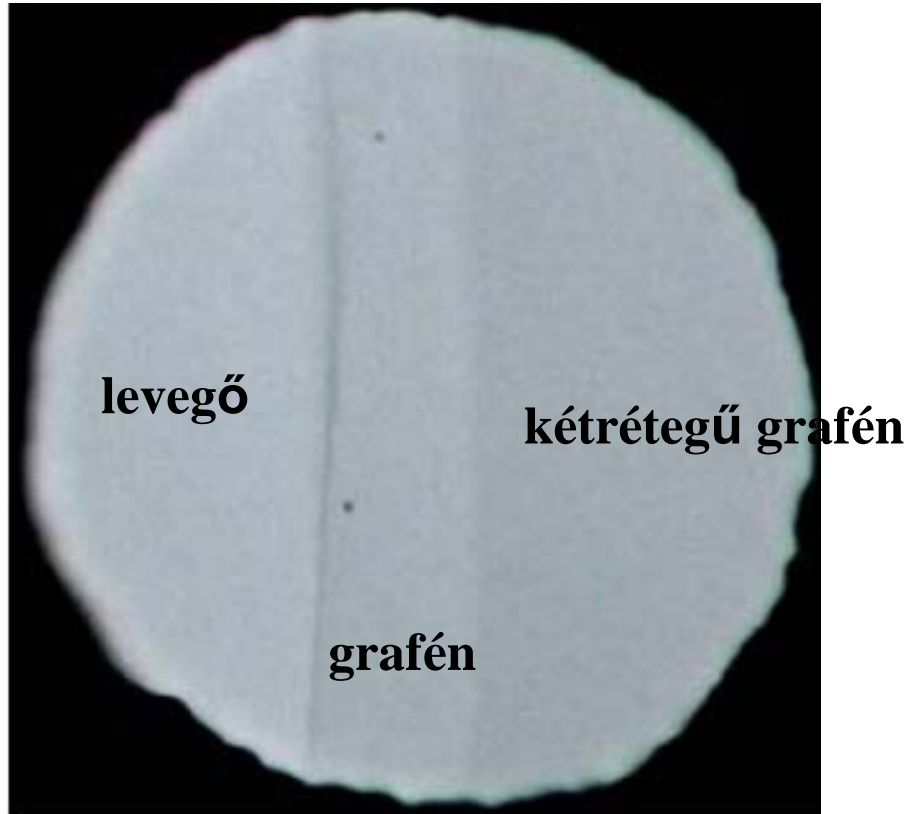
F. M. D. Pellegrino, G. G. N. Angilella, and R. Pucci:

Strain effect on the optical conductivity of graphene, PRB **81**, 035411 (2010).

N. N. Peres: *The transport properties of graphene: an introduction*, arXiv:1007.2849

A grafén fény-áteresztőképessége

Transzmisszió

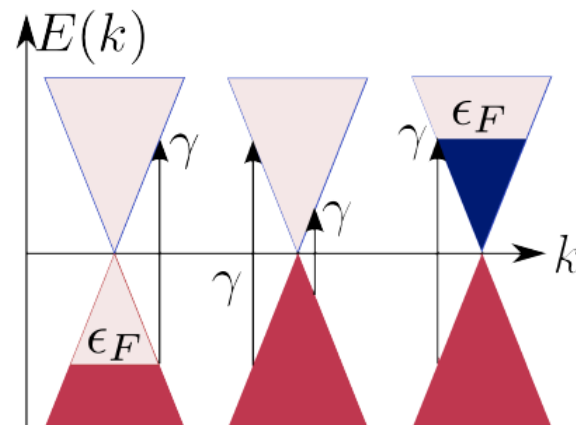


R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. Peres, and A. K. Geim, *Science* **320**, 1308 (2008).

A grafén fény-áteresztőképessége

Transzmisszió

Lehetséges optikai átmenetek:



Egyrétegű grafén transzmissziója (Maxwell-egyenletek alapján) :

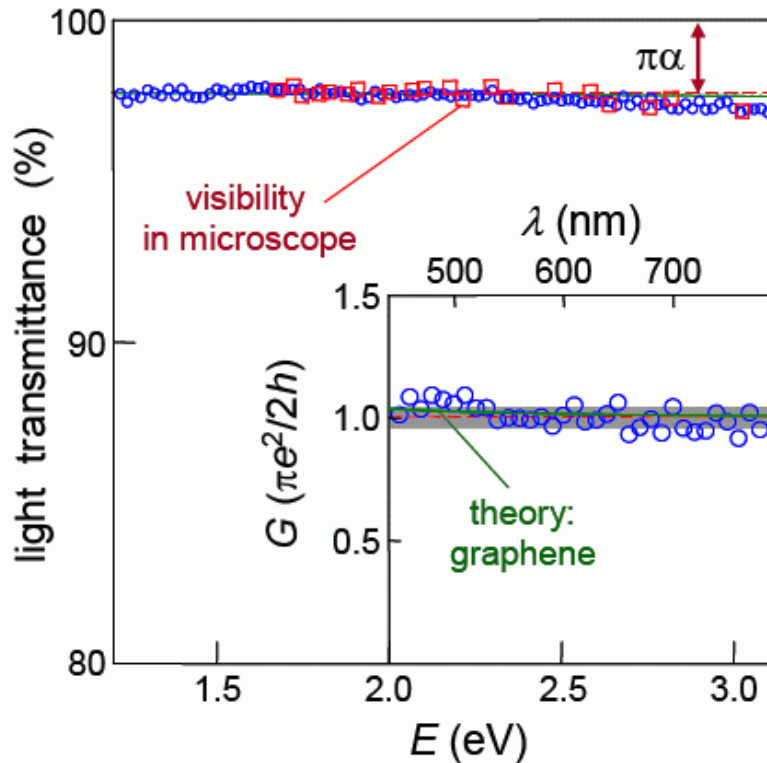
$$T = \left(1 + \frac{\pi}{2}\alpha\right)^{-2} \approx 1 - \alpha\pi \approx 0.977$$

$$\alpha = \frac{1}{137} \quad \text{finomszerkezeti állandó}$$

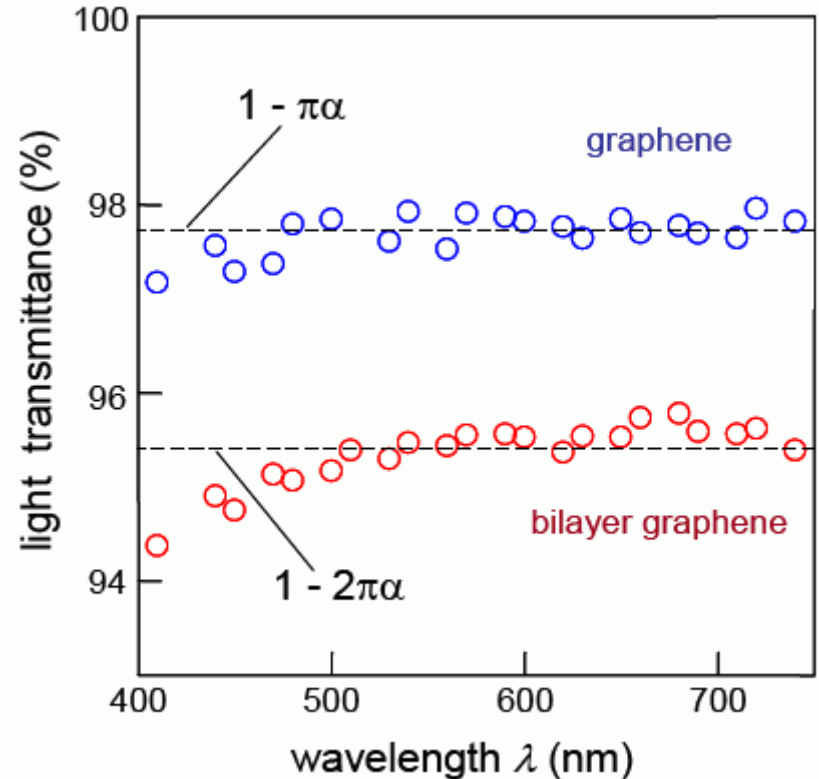
Kétrétegű grafén transzmissziója: $T \approx 1 - 2\alpha\pi$

A transzparens grafén

a)



b)



- (a) Fény transzmissziója standard spektroszkópiával (vörös körök), és optikai mikroszkóppal (kék négyzetek), az ábra-betétben a vezetőképesség látható,
(b) fehér fény transzmissziója egy-, illetve kétrétegű grafénre

Zitterbewegung grafénben

Eredetileg Schrödinger vizsgálta a Dirac-egyenlettel kapcsolatban:

E. Schrödinger, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys. Math. Kl. **24**, 418 (1930).

F. Constantinescu, E. Magyari: Kvantummechanikai feladatok, Tankönyv Kiadó, Budapest 1972.
(353. old. 14. feladat)

A Zitterbewegung **nem** relativisztikus effektus!

Spintronic systems: J. Schliemann, D. Loss, and R. M. Westervelt, Phys. Rev. Lett. **94**, 206801 (2005).

Graphene: M. I. Katsnelson, Eur. J. Phys B **51**, 157 (2006).

További részletekről

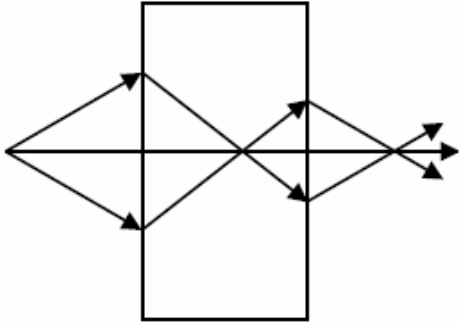
Dávid Gyula és Szécshenyi Gábor

fog beszélni az Téli Iskolán, pénteken.

J. Cs., Gyula Dávid: *Unified description of the Zitterbewegung for spintronic, graphene and superconducting systems*, PRB **74**, 172305 (2006).

Gyula Dávid, J. Cs.: *General theory of Zitterbewegung*, Phys. Rev. B, **81**, (12), 121417 (R), (2010).

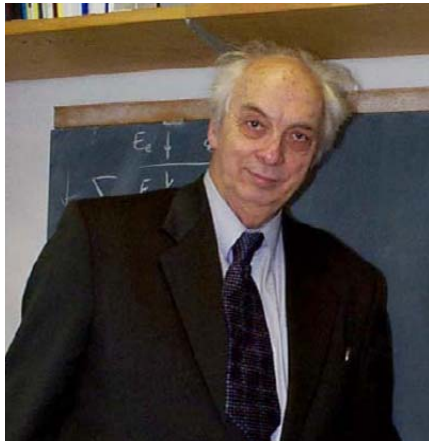
Negatív törésmutató



Negatív törésmutatójú közeg **negatív szögben** töri meg fénysugarat.

Divergens sugarak egy pontban fókuszálódnak.

pl. fotonikus kristályok, lepkeszárny



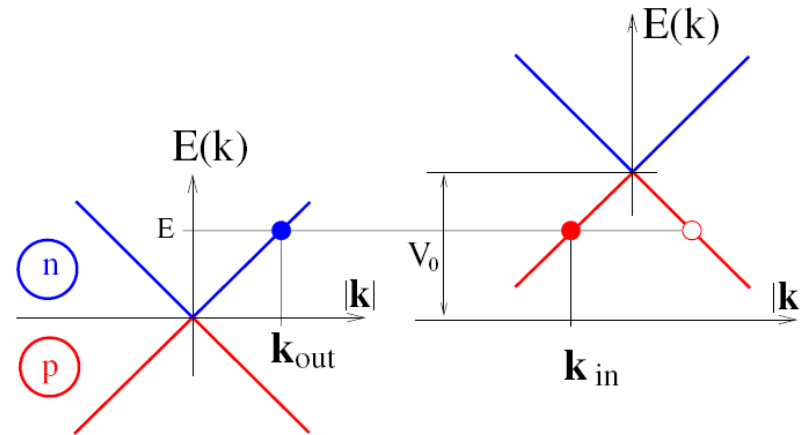
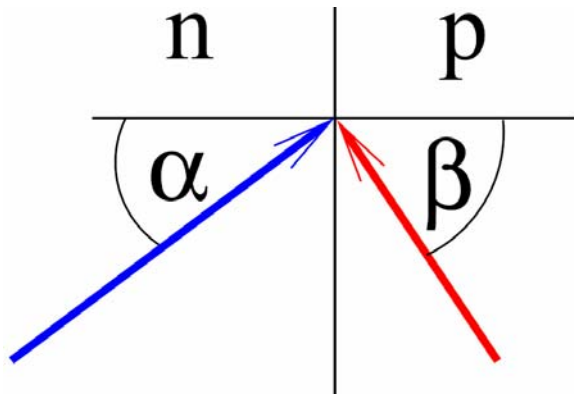
Veselago, Sov. Phys.-Usp., **10**, 509 (1968)



Pendry, Phys. Rev. Lett., **85**, 3966 (2000)

Elektron-optika p-n átmenetű grafénben (negatív törésmutató)

Vadim V. Cheianov, Vladimir Fal'ko, B.L. Altshuler, Science, **315**, 1252 (2007)

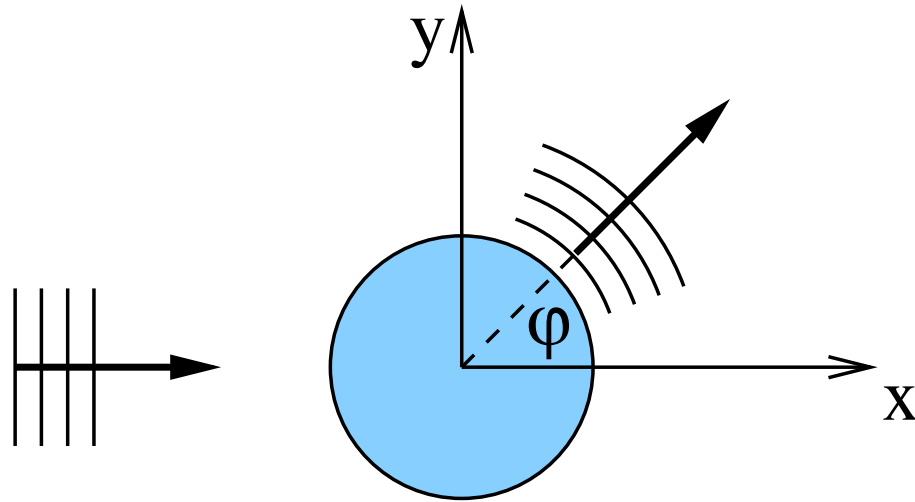


A törősíkkal párhuzamos
(itt a függőleges irány)
impulzus-komponens **megmarad**: $k_{\text{out}} \sin \alpha = -k_{\text{in}} \sin \beta$

Snell-törvény:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n = -\frac{k_{\text{in}}}{k_{\text{out}}}$$

Kör alakú p-n átmenetű grafén: negatív törésmutatójú „lencse”

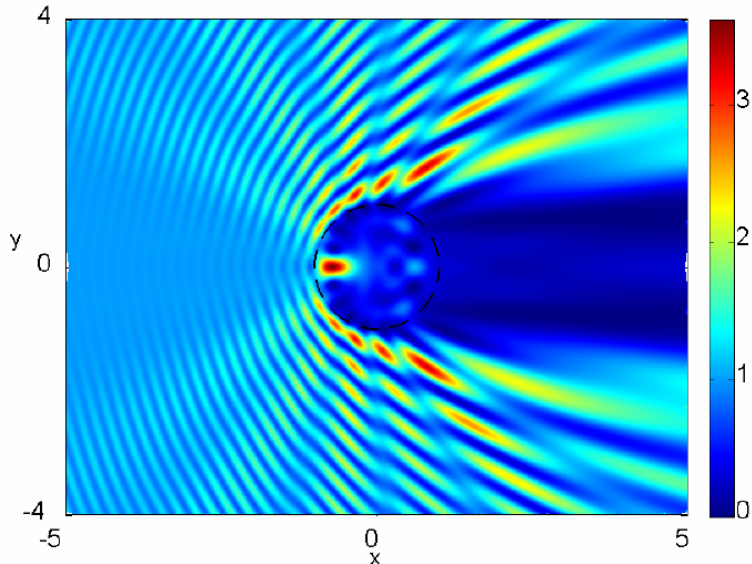


J. Cs., András Pályi and Csaba Péterfalvi, 'Caustics due to Negative Refractive Index in Circular Graphene p-n Junctions', Phys. Rev. Lett. **99**, 246801 (2007)

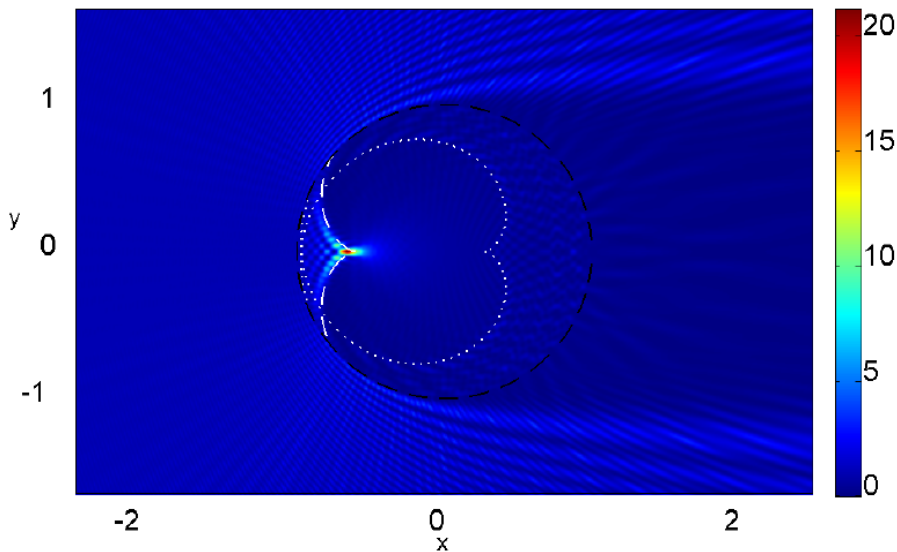
Bejövő síkhullám szóródása

$n = -0.7$

$|\Psi|^2$ $k_{out}=15$ $k_{in}=10$ $n=-0.7$

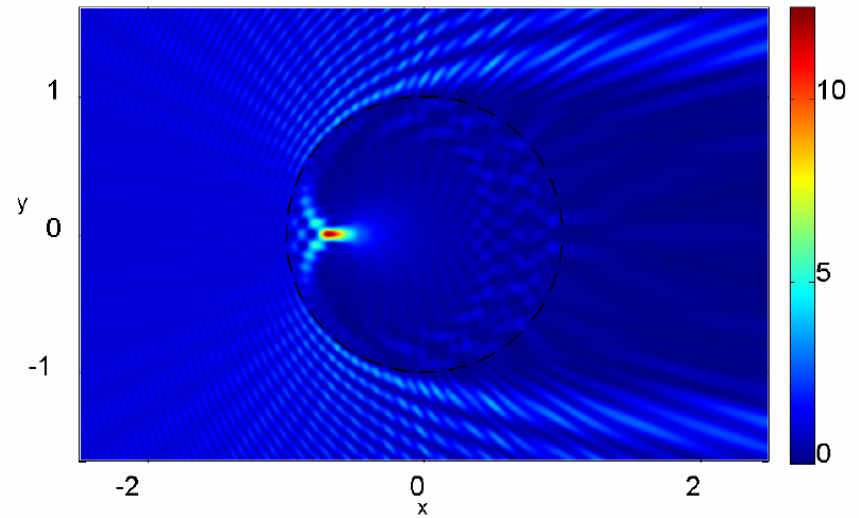


$|\Psi|^2$ $k_{out}=120$ $k_{in}=80$ $n=-0.7$



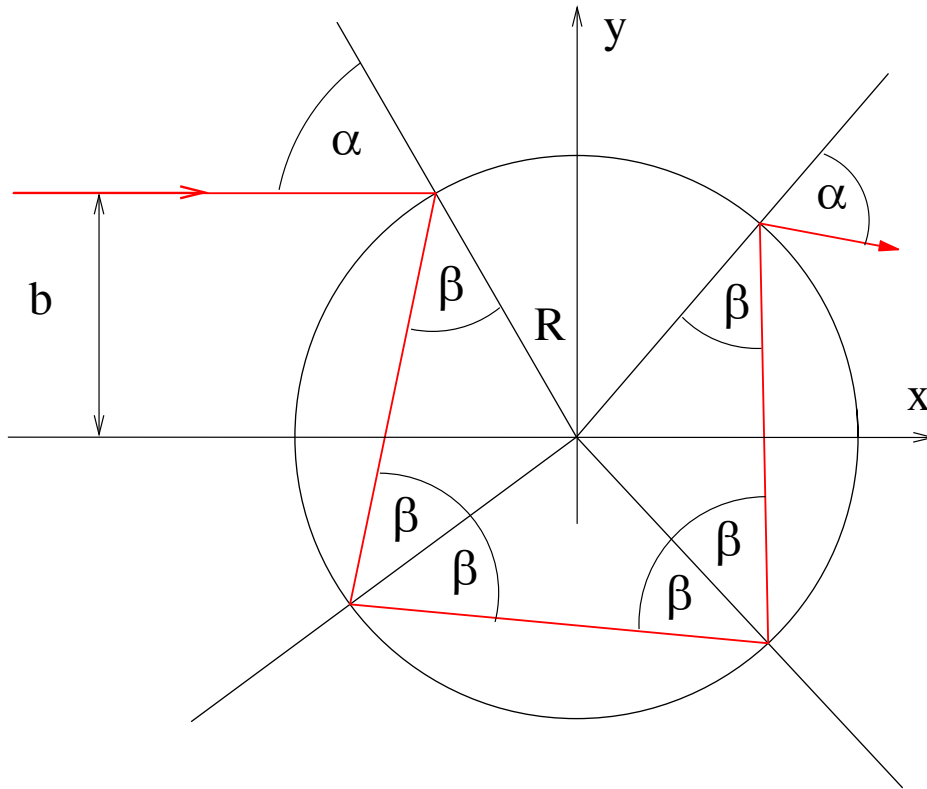
Csökkentve
a hullámhosszt:

$|\Psi|^2$ $k_{out}=60$ $k_{in}=40$ $n=-0.7$



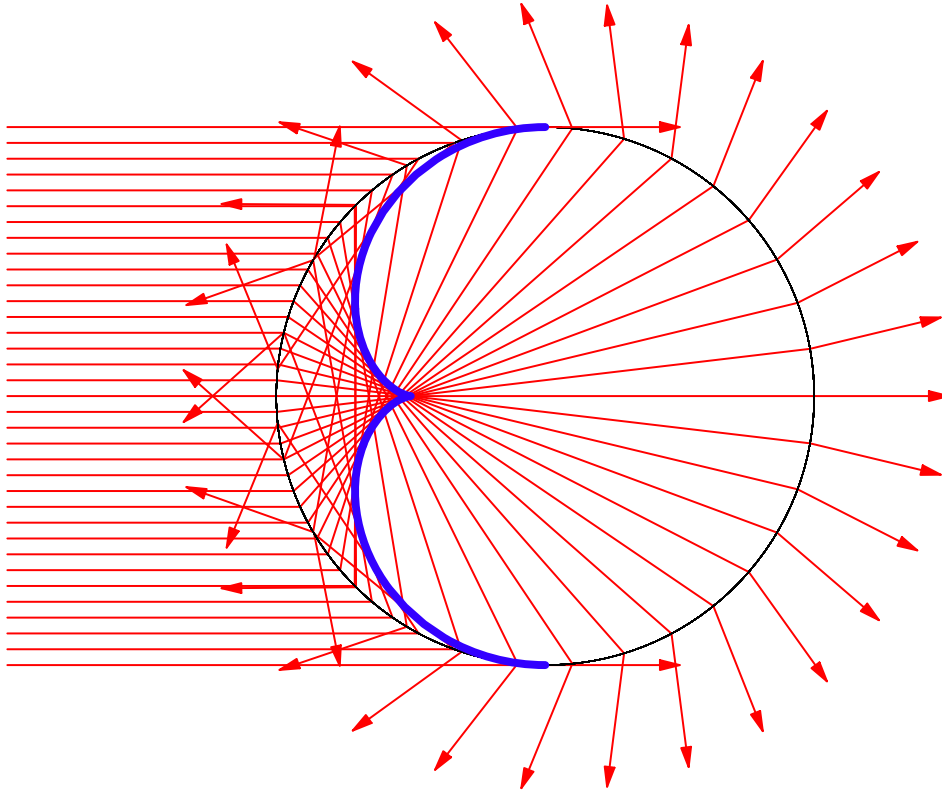
Geometriai optika

($\lambda \rightarrow 0$ határeset)



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n = -\frac{k_{\text{in}}}{k_{\text{out}}}$$

Kausztikák



$$\frac{\mathbf{r}_c(p, \alpha)}{R} = (-1)^{p-1} \left[\begin{pmatrix} -\cos \Theta \\ \sin \Theta \end{pmatrix} + \cos \beta \frac{1 + 2(p-1)\beta'}{1 + (2p-1)\beta'} \begin{pmatrix} \cos(\Theta + \beta) \\ -\sin(\Theta + \beta) \end{pmatrix} \right]$$

$$\Theta(p, \alpha) = \alpha + 2(p-1)\beta,$$

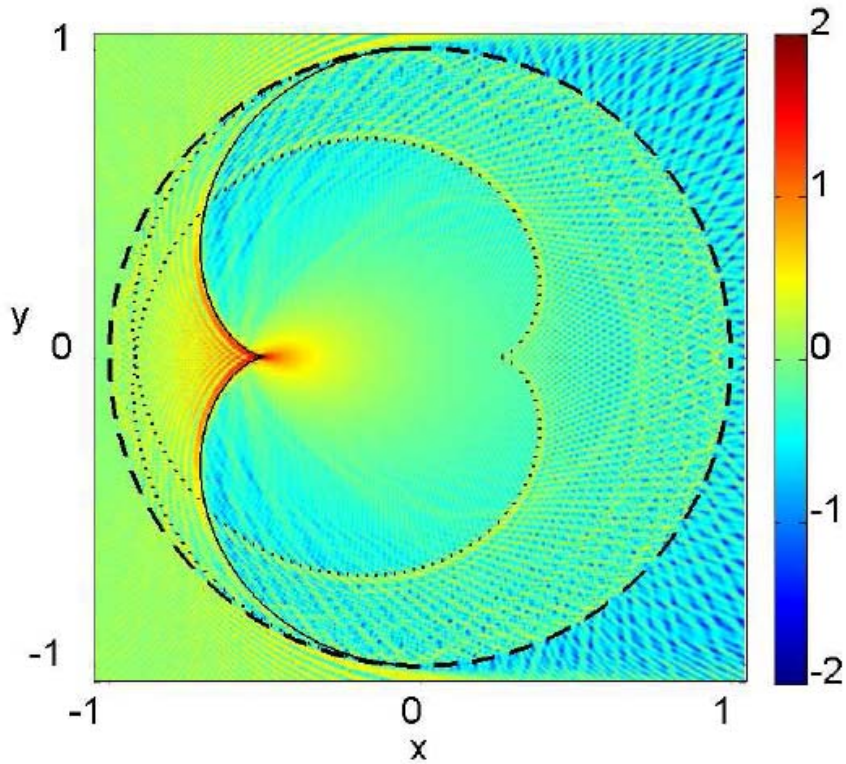
$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{|n|},$$

$$\beta' = \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}.$$

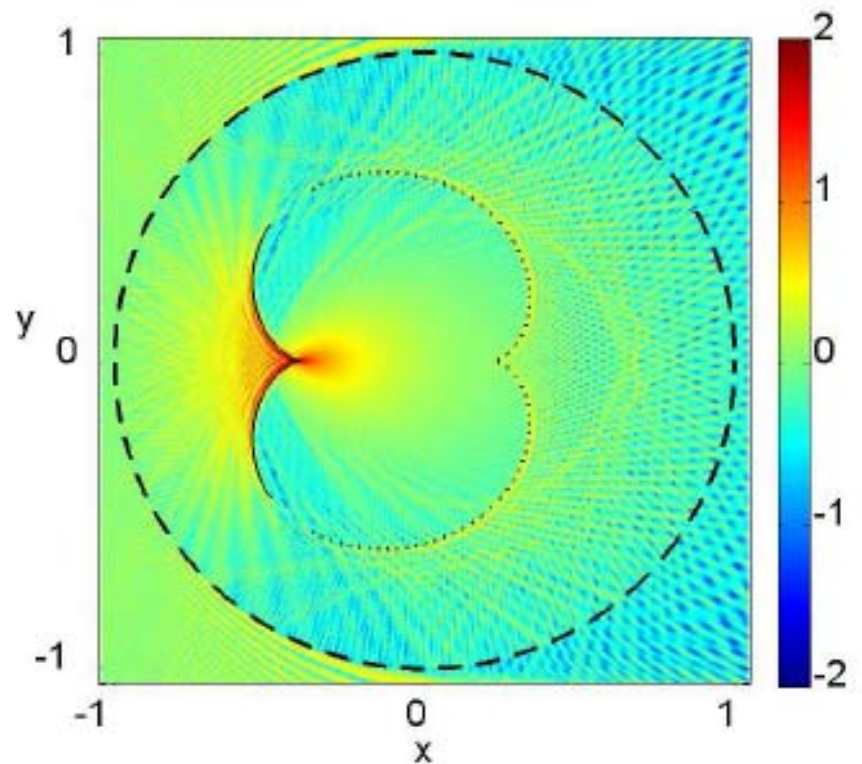
Kausztikák kialakulása

$\lambda \rightarrow 0$ határesetben

n=-1



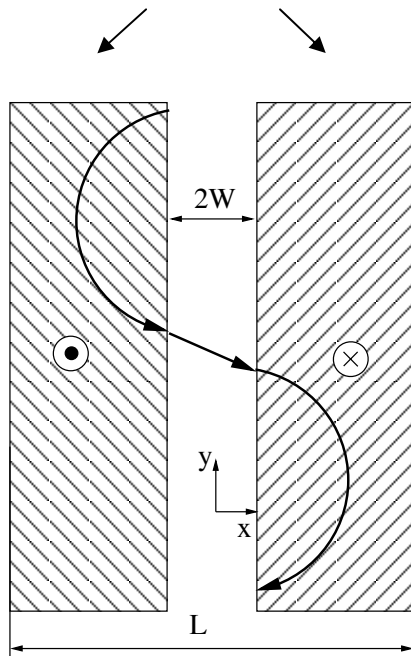
n=-1.5



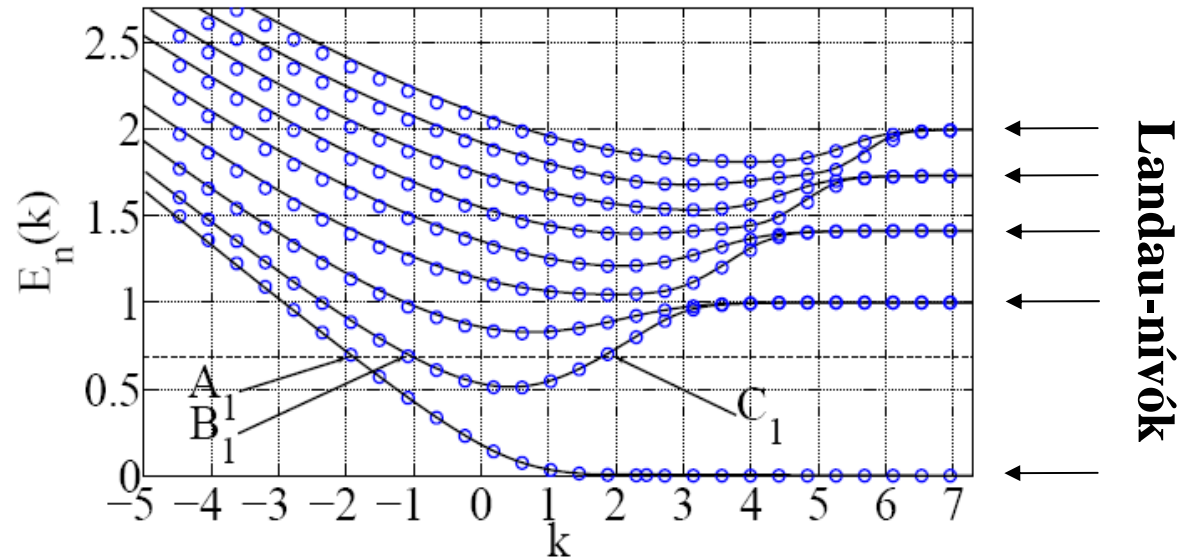
Elektron-dinamika grafénben inhomogén mágneses térben

Kígyó-állapotok (snake states)

A mágneses tér ellentétes irányú



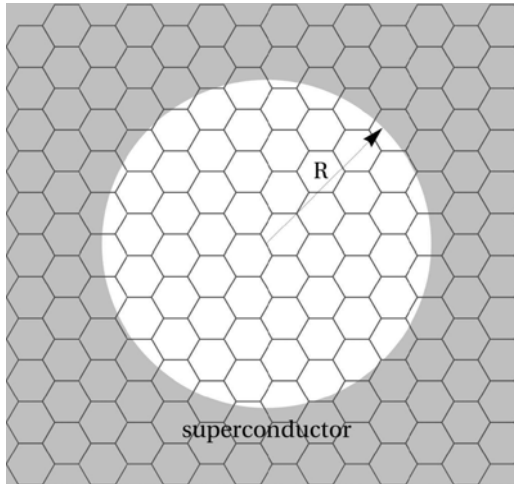
Diszperziós reláció
kontinuum közelítésben
végtelen mintára



László Oroszlány, Péter Rakyta, Andor Kormányos, Colin J. Lambert, J. Cs.,
'Theory of snake states in graphene', Phys. Rev. B. **77**, 081403(R) (2008)

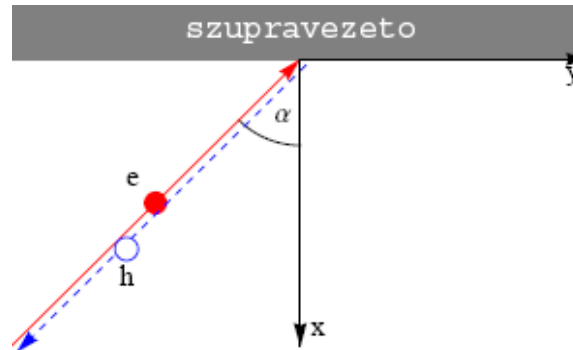
Andor Kormányos, Péter Rakyta, László Oroszlány, J. Cs., 'Bound states in inhomogeneous magnetic field in graphene: Semiclassical approach', Phys. Rev. B. **78**, 045430 (2008).

Grafén-szupravezető rendszerek

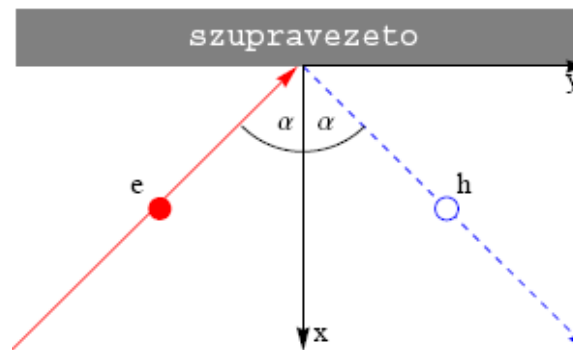


Bogoliubov–de Gennes-egyenlet:

C. W. J. Beenakker, Phys. Rev. Lett. **97**, 067007 (2006)



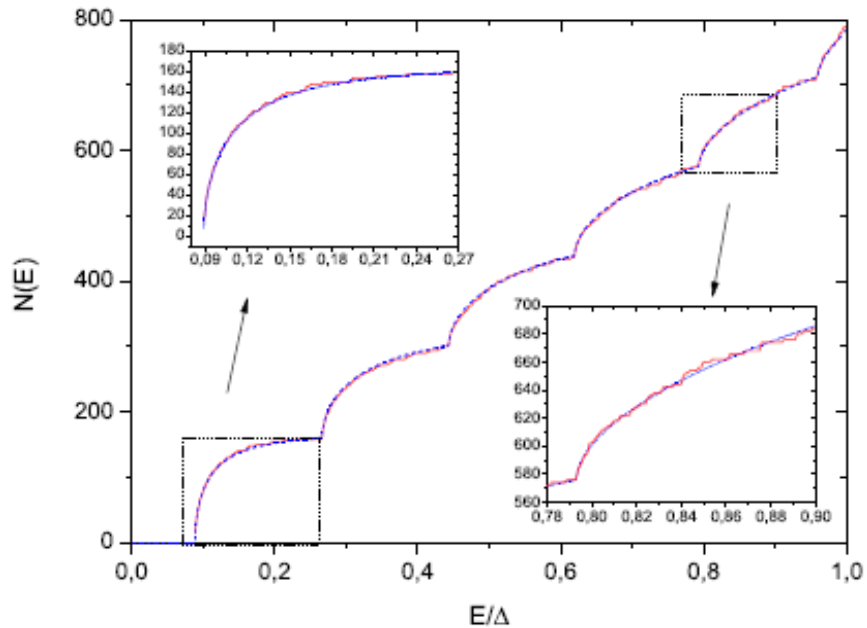
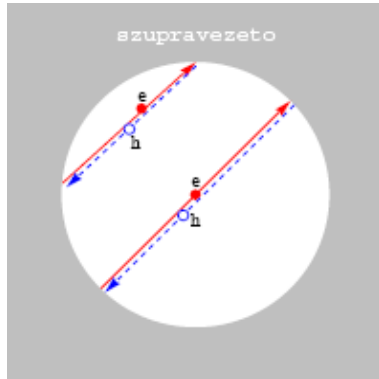
Andreev-retroreflexió



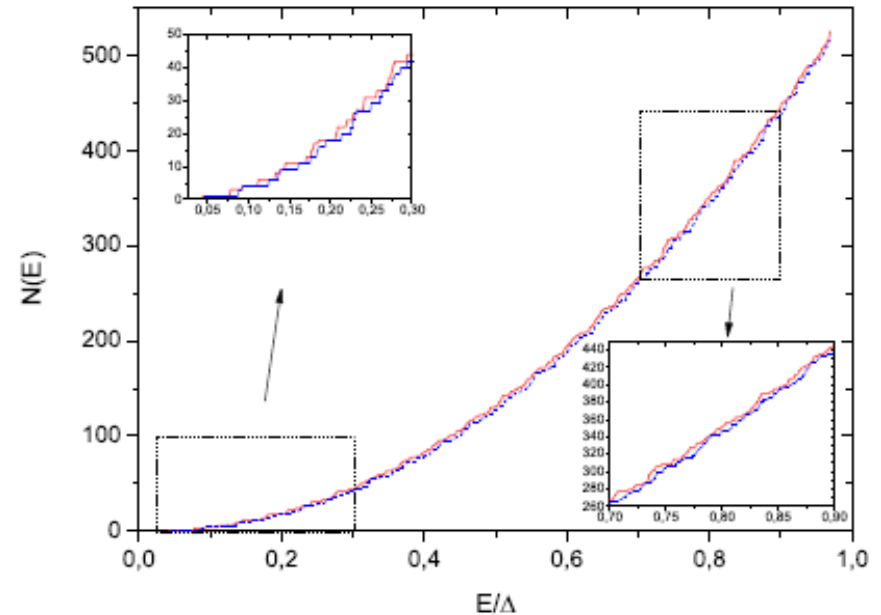
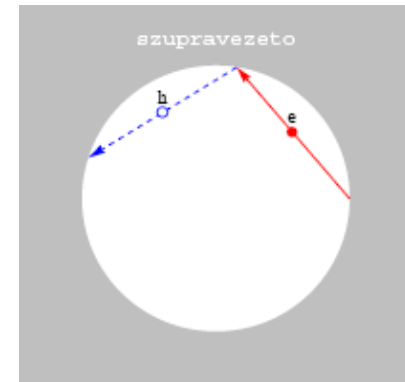
Spekulár
Andreev-reflexió

Állapotsűrűség kvantumos és szemiklasszikus számítása

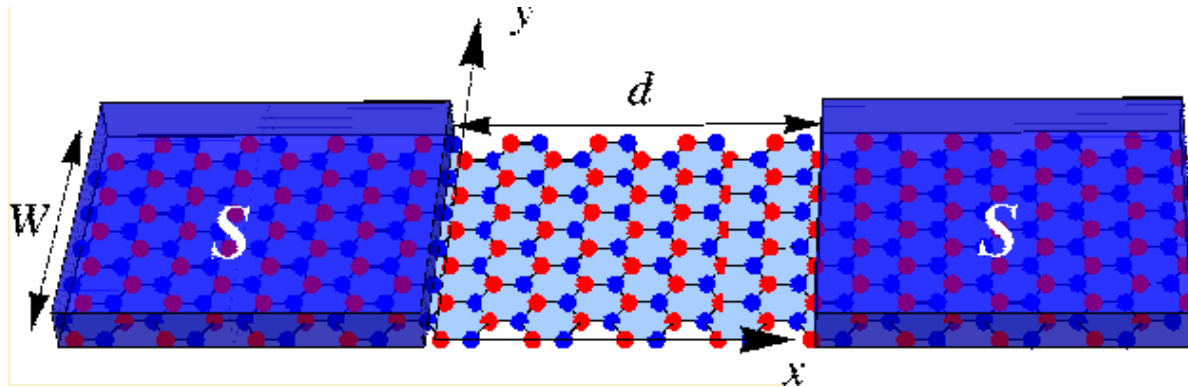
Andreev-retroreflexió



Spekulár Andreev-reflexió



Josephson-áram grafén-szupravezető átmenetben



Imre Hagymási, Andor Kormányos and J. Cs.:

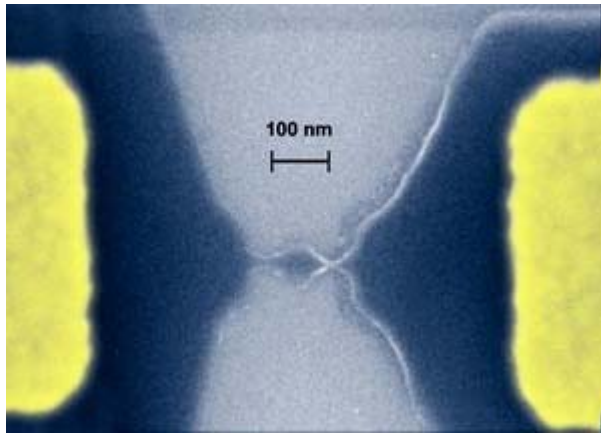
Critical Josephson current in ballistic superconductor-graphene systems,

Phys. Rev. B, **82**, 134516, (2010)

Hagymási Imre: Fizikus Vándorgyűlés, 2010, poszter

Alkalmazások

graphene transistor:



IBM, 2010 február

on and off rate of **100 gigahertz**

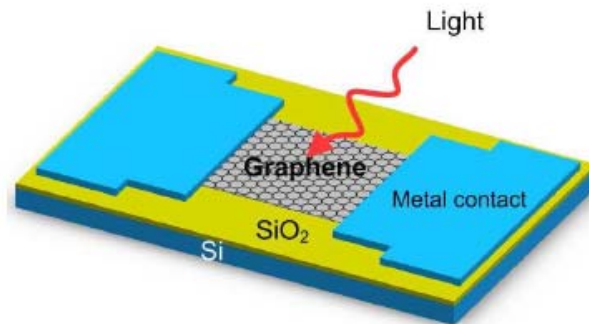
Jobb, mint a szilícium alapú tranzszitor

Bourzac, Katherine (2010-02-05). "*Graphene Transistors that Can Work at Blistering Speeds*". MIT Technology Review.

Grafén fotonika és optoelektronika

F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan, A. C. Ferrari: *Graphene Photonics and Optoelectronics*, arXiv:1006.4854v1

fotodetektor

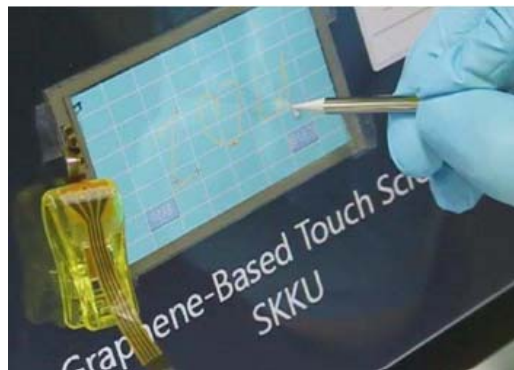


X. Wang, L. Zhi, N. Tsao, Z. Tomovic, J. Li, K. Mullen, *Angew. Chem.* 47, 2990 (2008).

napelem X. Wang, L. Zhi, K. Mullen, *Nano Lett.* 8, 323 (2007).

Z. Liu, Q. Liu, Y. Huang, Y. Ma, S. Yin, X. Zhang, W. Sun, Y. Chen, *Adv. Mater.* 20, 3924 (2008).

érintőképernyő



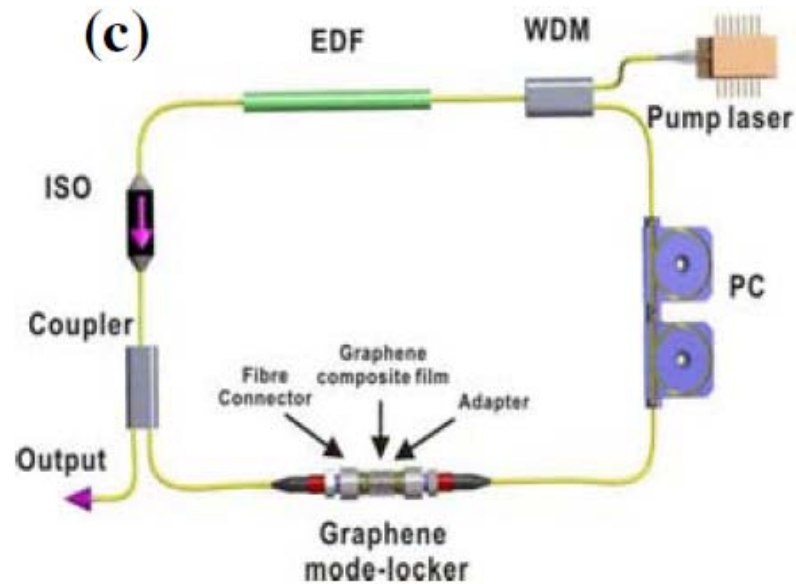
S. Bae, H. K. Kim, X. Xu, J. Balakrishnan, T. Lei, Y. I. Song, Y. J. Kim, B. Ozyilmaz, J.-H. Ahn, B. H. Hong, S. Iijima, arXiv , 0912.5485v1 (2009); *Nat. Nano.* (2010)

Andrea Ferrari csoportja
University of Cambridge
Nanomaterials and Spectroscopy Group



smart window

ultrafast lasers



Sun, Z. Hasan, T. Popa, D. Torrisi, F. Wang, F. Bonaccorso, F. Ferrari, A. C. :
Ultrafast fiber laser mode-locked by graphene based saturable absorber,

További lehetséges kutatási irányok

- Grafén alapú elektronika:
 - p-n átmenet, nagy mozgékonyosság,
 - nagy áram, mechanikailag stabil
 - $\approx 0.3 \mu\text{m}$ szabadúthossz 300 K-en!!!!
 - kapcsolási idő $< 10^{-13}\text{s}$
- Hidrogén tárolás, kémiai szenzor (gáz molekulák érzékelése)
- A grafén nem sík, görbült tér + Dirac-egyenlet
- Sörétzaj
- Tört kvantum Hall-effektus
- Mágneses bezárás
- Spin-pálya kölcsönhatás grafénben
- A kvantumelektrodinamika tesztelése részecskegyorsító nélkül

Csak 6 éve kutatják a grafént!

Köszönet:

Dávid Gyula: ELTE, Atomfizika Tanszék

Csordás András: ELTE, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

Colin Lambert: Lancaster University, Lancaster

Carlo Beenakker: Leiden University, Leiden

Edward McCann: Lancaster University, Lancaster

Vladimir Fal'ko: Lancaster University, Lancaster

Kormányos Andor: volt PhD hallgató, Lancaster University, post. doc.

Pályi András: volt PhD hallgató, Konstanz, post. doc.

Oroszlány László: Lancaster University, post doc.

Péterfalvi Csaba: ELTE, PhD hallgató

Rakya Péter: ELTE, PhD hallgató

Hagymási Imre: ELTE, most végzett diplomamunkásom

Visontai Dávid: Lancaster University, PhD hallgató

Manrique Dávid Zsolt: Lancaster University, PhD hallgató

Széchenyi Gábor: MSc hallgató, ELTE