

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Ludvík Smrčka

Nobelova cena za fyziku v roce 2010

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 56 (2011), No. 1, 1–8

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141979>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2011

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

Nobelova cena za fyziku v roce 2010

Ludvík Smrčka, Praha

Abstrakt. Nobelovu cenu za fyziku v roce 2010 získali Andre Geim a Konstantin Novoselov. Královská švédská akademie věd zdůvodnila její udělení slovy, jež v originále znějí: „*for groundbreaking experiments regarding the two-dimensional material graphene,*“ tj. za průlomové experimenty týkající se dvojrozměrného uhlíkového krystalu – grafenu.

Úvod

O Nobelově ceně za fyziku jsem psal do Pokroků matematiky, fyziky a astronomie naposledy před téměř pětadvaceti lety.¹⁾ Jejím nositelem se stal (tehdy západoněmecký) experimentální fyzik Klaus von Klitzing za objev kvantového Hallova jevu v polovodičových součástkách s dvojrozměrným elektronovým plynem, ochlazených na teplotu kapalného helia a vystavených působení silných magnetických polí. Tehdy jsem byl přesvědčen, že můj příspěvek přináší pro čtenáře-nespecialisty něco opravdu nového a překvapujícího, co by se jinak nedozvěděli.

Od té doby uplynulo dvacet pět let a svět se poněkud změnil. Cena za rok 2010 byla udělena 5. října. Vzápětí byla ve světovém i v českém tisku zveřejněna řada textů věnovaných jak oběma laureátům, tak podstatě a významu jejich objevu. Ještě více informací přinesly rozhlas a televize a prakticky nevyčerpatelným zdrojem informací je internet. Vřele lze doporučit zejména webové stránky Nobelovy nadace <http://nobelprize.org/>. Otázkou je, zda je účelné ještě něco dodávat. Proto se omezíme jen na shrnutí nejdůležitějších skutečností a pokusíme se v aktivitách kolem výzkumu grafenu vysledovat českou stopu.

Grafen

Grafen (angl. *graphene*) je dvojrozměrná síť vytvořená uhlíkovými atomy uspořádanými do šestiúhelníků, viz. obr. 1. Jejich vzdálenost je 1.42 Å a vazba mezi nimi odpovídá síle vazby v diamantu. Je to první realizovaný případ tak zvaných atomových dvojrozměrných krystalů, jejichž tloušťka dosahuje absolutního dosažitelného minima, rozměru jediného atomu.

¹⁾ L. Smrčka: Nobelova cena za fyziku v roce 1985, PMFA 32 (1987), 37–38.



Obr. 1. Andre Geim, narozen r. 1958 v Soči v Rusku, nyní je profesorem na univerzitě v Manchesteru ve Velké Británii. (© Nobel Prize Foundation)

Pozoruhodné vlastnosti elektronů v grafenu, především lineární závislost energie na vlnovém vektoru, odpovídající tzv. nehmotným Diracovým fermionům, byly teoreticky předpovězeny již roku 1947 [1]. V té době byly intenzivně zkoumány vlastnosti grafitu z úplně jiného hlediska, neboť tehdy byl grafit považován za vhodného kandidáta pro moderování štěpné reakce v jaderných reaktorech. Grafit je vrstevnatý materiál, ve kterém jednotlivé slabě vázané vrstvy tvoří právě grafen. Výpočet elektronové struktury grafenu tedy představoval pouze dílčí výsledek složitějšího výpočtu elektronové struktury grafitu. Pozoruhodné je, že těchto výsledků bylo dosaženo pouze analytickými metodami, bez využití počítačů, jejichž vývoj byl tehdy v plenkách. Výsledek je znázorněn na obr. 5.

Podstatný rozdíl mezi Diracovými fermiony, jejichž pohyb je popsán Diracovou rovnicí, a „obyčejnými“ elektrony v polovodičových krystalech, které se řídí Schrödingerovou rovnicí, je v závislosti energie na rychlosti. U „Schrödingerových“ elektronů roste energie se čtvercem rychlosti, tak jak jsme zvyklí z klasické mechaniky. Diracovy elektrony se v tomto ohledu chovají spíše jako světlo. Pohybují se konstantní rychlostí (která je 300krát menší než rychlost světla) a podobně jako u světla jejich energie vůbec nezávisí na rychlosti, ale je nepřímo úměrná vlnové délce. Se světlem mají společné i to, že jejich „klidová hmota“ se rovná nule. Zde podobnost končí, Diracovy elektrony jsou fermiony, zatímco fotony jsou bosony. Podobnými zákony jako Diracovy elektrony se řídí relativistické elementární částice v kosmickém záření nebo částice studované na

obřích urychlovačích. Již pro tyto vlastnosti, tak odlišné od běžných polovodičů, byl grafen atraktivní jako modelový systém pro experimentální ověřování zákonů jinak platných ve zcela jiné části spektra energií.

Nobelovské experimenty

Navzdory tomu byl grafen dlouho považován pouze za umělou hypotetickou konstrukci, vhodnou pouze jako pomůcka pro spřádání teoretických úvah. Dvojměrný krystal má totiž ze všech možných uspořádání atomů to nejméně energeticky výhodné, a proto by neměl podle teorie vůbec existovat. První z průlomových experimentů, za který byla cena udělena, proto představuje především izolace grafenu z grafitu, nejstabilnější fáze, ve které se čistý uhlík vyskytuje. V roce 2004 [2] Geim a Novoselov sejmuli jednu vrstvu grafitu lepicí páskou a umístili ji na křemíkovou podložku s 300 nm tlustou vrstvou oxidu na povrchu. Toto byl patrně klíčový krok, neboť optické vlastnosti materiálů podložky umožnily díky interferenci světla zviditelnit grafenové vločky a pozorovat je pouhým optickým mikroskopem, i když vlnová délka viditelného světla mnohonásobně převyšuje tloušťku jedné vrstvy atomů. Rozměry prvních nalezených vloček byly nejvýše několik desítek mikrometrů. Proto pro přípravu vzorků s elektrickými přírůdky, vhodných pro měření transportních vlastností v magnetickém poli, bylo nutné použít elektronovou litografii. Tento krok již vyžaduje dokonalé laboratorní vybavení. V současné době je však ve vyspělých laboratořích elektronová litografie celkem běžná. Bylo to právě měření kvantového Hallova jevu při nízkých teplotách a ve vysokých magnetických polích, které přineslo rozhodující důkaz o tom, že vločka přenesená na křemíkovou podložku je opravdu jediná vrstva atomů uhlíku a že je to opravdu grafen vykazující exotické vlastnosti připisované Diracovým fermionům.

Kvantový Hallův jev byl objeven v roce 1980 Klausem von Klitzingem a v současné době definuje standard elektrického odporu. Hallův jev v dvojměrném plynu obyčejných „Schrödingerových“ elektronů má schodovitý průběh a hodnota odporu jednotlivých schodů je celočíselným násobkem kvanta odporu h/e^2 . Hodnota tohoto kvanta odporu je z měření Hallova jevu známa s přesností na miliontinu promile. Pro dvojměrný elektronový plyn v kvantových jámách obvyklých polovodičů je tato přesnost zcela univerzální a nezávisí na tvaru vzorků a použitých materiálech. U Diracových fermionů je tomu jinak. Hallův jev je také kvantován, ale sekvence schodů v kvantovaném Hallově odporu je jiná a nejvyšší z nich je pouze polovinou hodnoty h/e^2 . Jelikož Geim a Novoselov prokázali, že je tomu opravdu tak, dokončili tím „nobelovský průlom“. Současně odstartovali obrovskou vlnu zájmu o grafen a Diracovy elektrony a ovšem i exponenciální nárůst počtu publikací věnovaných této problematice.

S exotickými vlastnostmi Diracových elektronů souvisí kromě poločíselného Hallova jevu také tak zvaný Kleinův paradox, nezvyklý způsob tunelování elektronů potenciálovou bariérou, a také velmi malá absorpce světla. Grafen absorbuje pouze 2.3 % světla ve viditelné oblasti. Tato hodnota je podobně jako Hallův odpor vztažena pouze k univerzálním fyzikálním konstantám. Pozoruhodné jsou i další fyzikální vlastnosti



Obr. 2. Konstantin Novoselov, narozen r. 1974 v Nižním Tagilu v Rusku, nyní je profesorem na univerzitě v Manchesteru, ve Velké Británii. (© Nobel Prize Foundation)

grafenu: vysoká elektrická a tepelná vodivost převyšující hodnoty známé u ostatních materiálů, dále pak vynikající pružnost a pevnost. Za zmínku stojí i možnost ovlivňovat vlastnosti grafenu interakcí s okolním prostředím, např. reverzibilní reakce s vodíkem mění vodivý grafen na nevodivý grafan.

Perspektivy výzkumu a aplikací

Rozhodující pro další pokrok ve studiu a využití grafenu je způsob přípravy. Mechanická exfoliace pomocí lepicí pásky z grafitu má alternativu v dělení grafitu na grafenové vločky v lázni organických rozpouštědel pomocí ultrazvuku. V současné době se jako vhodnější pro budoucí technické využití ukazuje buď sublimace křemíku z povrchu monokrystalů karbidu křemíku [3], která za sebou nechává několik vzájemně neinteragujících pootočených grafenových vrstev. Alternativou je chemická depozice grafenu buď na karbid křemíku, nebo na vhodně orientovaný povrch monokrystalů některých kovů. Jako velmi perspektivní se v tomto ohledu jeví měď [4], kde grafen zřejmě roste i na polykrystalických fóliích.

Velikou pozornost vyvolávají možné aplikace grafenu. Jelikož je grafen průhledný, pružný a má vynikající elektrickou vodivost, nejbližší praktické realizaci je využití v dotykových displejích, plochých obrazovkách a jako vodivé vrstvy ve slunečních článcích, zvláště když už se podařilo laboratorně připravit pruhy grafenu 75 cm široké.

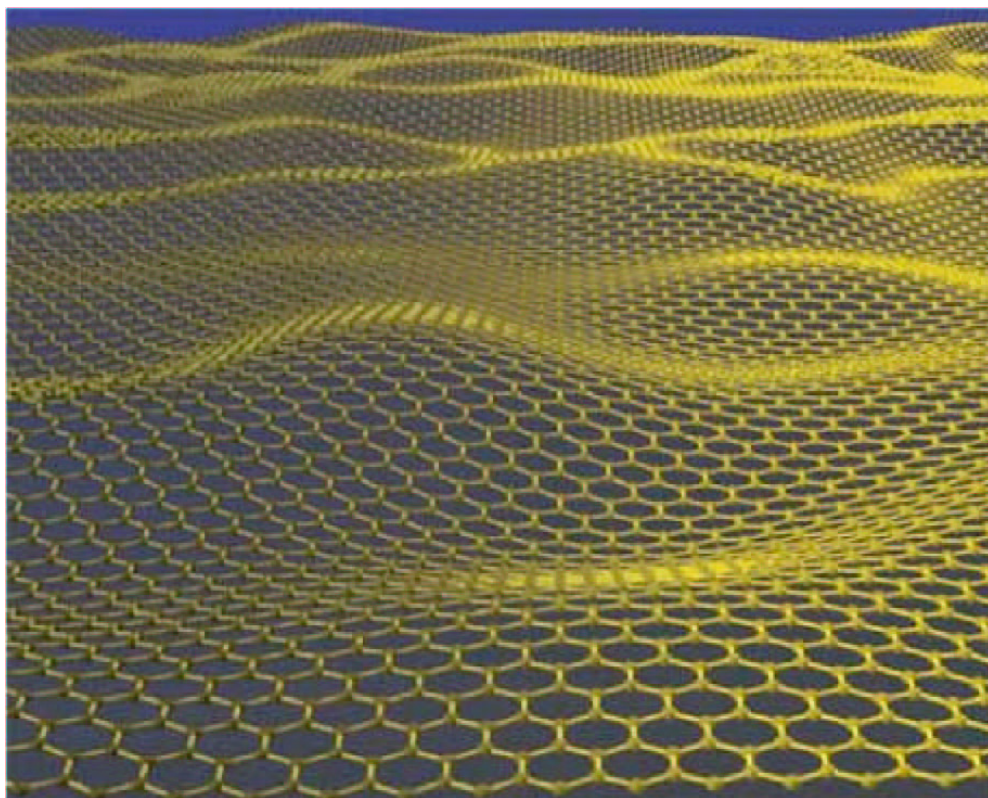
Neobyčejná pevnost grafenových vloček předurčuje využití grafenu jako plniva do superpevných materiálů.

Značné úsilí je věnováno konstrukci grafenových tranzistorů a spekuluje se o tom, že grafen by měl být v elektronice nástupcem křemíku a měl by se uplatnit hlavně v oblasti vysokých frekvencí a při přípravě nové generace integrovaných obvodů.

Námětů, jak využít v budoucnu unikátní vlastnosti grafenu, se v současné době vyojila celá řada a jistá skepse při jejich posouzení je určitě na místě.

Česká stopa

Oba laureáti emigrovali, podobně jako mnoho jejich kolegů, z bývalého Sovětského svazu. Starší z nich, Andre Geim, je v české fyzikální komunitě dobře znám již od počátku devadesátých let minulého století, kdy pobýval na stáži na universitě v Nottinghamu. Společným zájmem byl v té době výzkum transportních vlastností dvojrozměrného elektronového plynu a kvantového Hallova jevu. Proto je pro české čtenáře jistě zajímavé, jak se „grafenománie“ posledních let projevila v Česku, jaká byla podpora tohoto nového oboru a jakých bylo dosaženo výsledků.



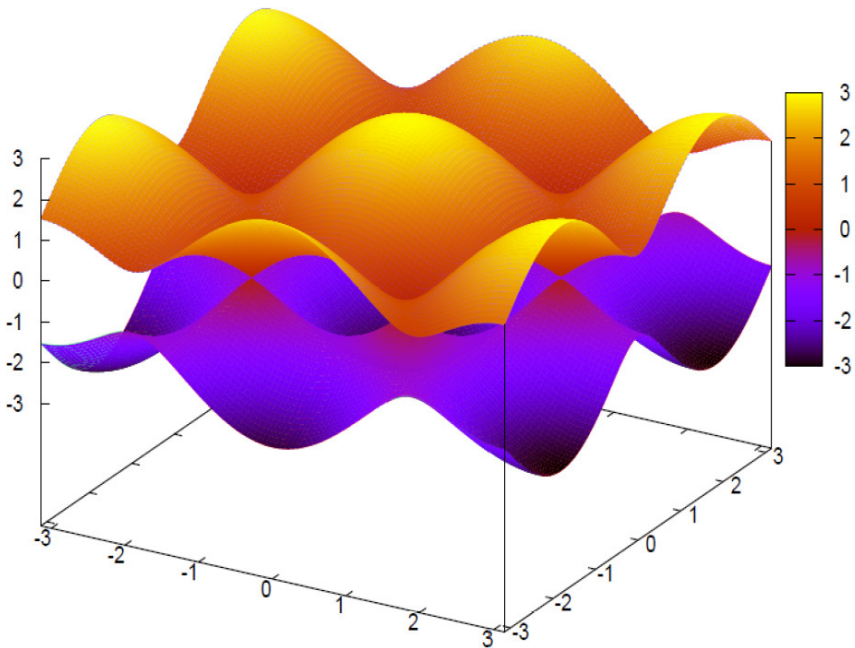
Obr. 3. Hexagonální dvojrozměrná síť znázorňující grafen.



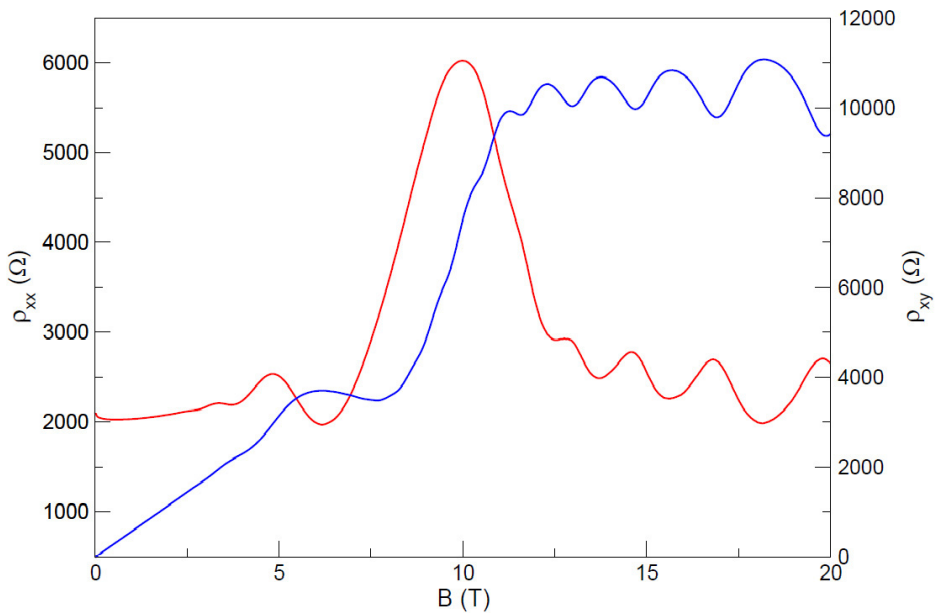
Obr. 4. Přednášky laureátů Nobelovy ceny za fyziku se odehrávají v Aule Magna ve Stockholmu většinou 8. prosince (foto M. Křížek).

Do širšího povědomí české fyzikální veřejnosti pronikla zpráva o objevu grafenu asi v polovině roku 2005 po přednášce Andre Geima na konferenci o dvojrozměrných elektronových systémech EP2DA-16 v Albuquerque. Jelikož jedna z předcházejících „dvojrozměrných“ konferencí EP2DS-14 byla pořádána v Praze, česká účast zde byla poměrně hojná a od té doby je výzkum grafenu v Česku rozvíjen a propagován. První články na toto téma byly publikovány v roce 2008 a od té doby jejich počet utěšeně vzrůstá. Řada publikovaných výsledků je citována v mezinárodních časopisech a čeští vědci byli i spoluautory některých významných objevů. V této souvislosti lze zmínit např. práci M. Orlity a spoluautorů [5], v níž byla magnetooptickými metodami experimentálně prokázána existence grafenových vloček s extrémně vysokou pohyblivostí nositelů náboje (10^7 cm²/Vs) na povrchu grafitu, nebo práci J. Červenky, který je hlavním autorem překvapivého objevu magnetismu na hranicích zrn v grafenu, zveřejněné v prestižním časopise Nature [6]. Nepochybně jsem zde pominul výsledky řady jiných pracovníků, které nejsou dosud publikovány v prestižních časopisech, za což se jim omlouvám. Za zmínku však určitě stojí, že se v Česku začínají rozvíjet obě perspektivní technologie přípravy, jak pěstování na karbidu křemíku, tak i chemická depozice z uhlovodíkových par na mědi.

Pokud je mi známo, z české strany se první oficiální podpory výzkumu Diracových elektronů, grafenu a grafitu dostalo v rámci projektu KAN00100652 „Struktury



Obr. 5. Elektronová struktura grafenu s typickými Diracovými kužely.



Obr. 6. Kvantový Hallův jev měřený na polských vzorcích grafenu na karbidu křemíku v Laboratoři vysokých magnetických polí v Grenoblu. Prosinec 2010.

pro spintroniku a kvantové jevy v nanoelektronice vytvořené elektronovou litografií“ programu „Nanotechnologie pro společnost“. Společný projekt Fyzikálního ústavu AV ČR, v. v. i. (FZÚ), Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy (MFF) a Fakulty elektrotechnické ČVUT (FEL) byl zahájen v polovině roku 2006 a skončil roku 2010. Práce byly též podporovány jako součást výzkumných záměrů uvedených institucí a pozitivní roli sehrály také česko-francouzské projekty Barrande. Od počátku roku 2010 se na MFF řeší projekt P204/10/1020 „Magneto-optická spektroskopie Diracových fermionů“ a od poloviny roku se MFF a FZÚ zúčastní projektu EPIGRAT, který je částí mezinárodního programu EuroGRAPHENE, iniciovaného Evropskou vědeckou nadací. Spolupráce osmi vědeckých týmů z Česka, Švédska, Polska, Francie, Německa a Turecka by měla umožnit zvládnout během tří let celý technologický proces od přípravy grafenu až po výrobu tranzistorů. Jeden z předběžných výsledků je prezentován na obr. 3. Konečně pro léta 2011–13 byl doporučen k financování společný projekt Vysoké školy chemicko-technologické, FEL a FZÚ P108/11/0894 „Růst a zpracování grafenových vrstev na karbidu křemíku“. Podpora tedy existuje, ale vzhledem k významu oboru přichází poněkud pozdě a ne ve zcela dostačujícím rozsahu.

Poznámka: Toto je rozšířená verze textu zveřejněného v Akademickém bulletinu.

L i t e r a t u r a

- [1] WALLACE, P. R. : *The band theory of graphite*. Phys. Rev. 71 (1947), 622–634.
- [2] NOVOSELOV, K. S., GEIM, A. K. MOROZOV, S. V., JIANG, D., ZHANG, Y., DUBONOS, S. V, GRIGORIEVA, I. V., FIRSOV, A. A.: *Electric field effect in atomically thin carbon films*. Science 306 (2004), 666–669.
- [3] BERGER, C., SONG, Z., LI, T., LI, X., OGBAZGHI, A. Y., FENG, R., DAI, Z. GRENET, T., MARCHENKOV, A. N., CONRAD, E. H., FIRST, P. N., DE HEER, W. A.: *Ultra thin epitaxial graphite: 2D electron gas properties and a route towards graphene-based nanoelectronics*. J. Phys. Chem. B 108, 19912 (2004).
- [4] KIM, K. S., ZHAO, Y., JANG, H., LEE, S. Y., KIM, J. M., KIM, K. S., AHN, J.-H., KIM, P., CHOI, J.-Y., HONG, B. H.: *Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes*. Nature 457, 706–710.
- [5] NEUGEBAUER, P., ORLITA, M., FAUGERAS, C., BARRA, A.-L., POTEMSKI, M.: *How perfect can graphene be?* Phys. Rev. Lett. 103, 136403 (2009).
- [6] ČERVENKA, J., KATSNELSON, M. I. FLIPSE, C. F. J.: *Room-temperature ferromagnetism in graphite driven by 2D networks of point defects*. Nat. Phys. 5 (2009), 840.