

Tomáš Rauch; Milan Orlita
Nobelova cena s dobře definovanou topologií

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 62 (2017), No. 2, 102–109

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/146813>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2017

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 s dobře definovanou topologií

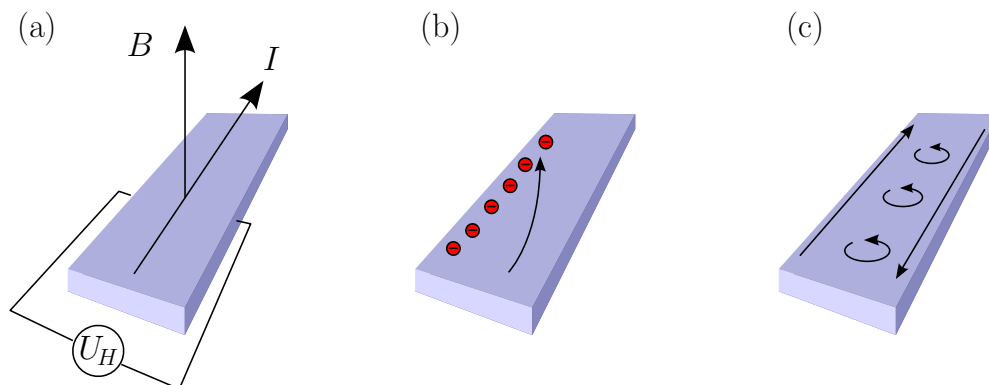
Tomáš Rauch, Halle-Wittenberg; Milan Orlita, Grenoble, Praha

Abstrakt. Od publikace původních teoretických prací Davida Thoulesse, Duncana Haldana a Michaela Kosterlitzze věnovaných topologií ve fyzice pevných látek uplynulo již více než třicet let. Během této doby se studium tzv. topologických materiálů stalo jedním z nejvýznamnějších směrů současné teoretické i experimentální fyziky. A právě v minulém roce se autory těchto prací rozhodla ocenit švédská Královská akademie věd udělením Nobelovy ceny za fyziku. V následujícím textu se pokusíme čtenářům ve zjednodušené podobě přiblížit roli topologie ve fyzice pevných látek i přínos laureátů.

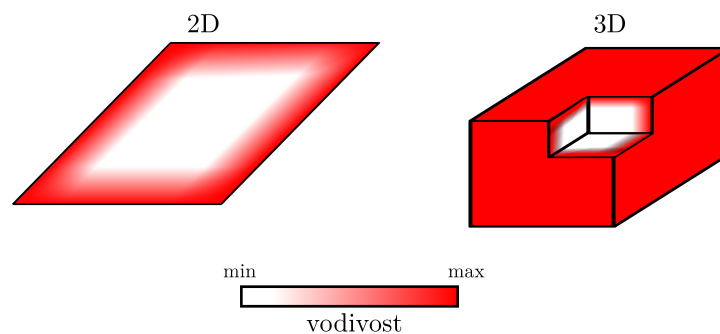
Za první experimentální realizaci systému s netriviální topologií je dnes považován kvantový Hallův jev [16], [21], [2], který počátkem osmdesátých let minulého století objevil Klaus von Klitzing v grenobelské laboratoři silných magnetických polí při studiu elektrických vlastností kovových vrstev s tloušťkou nepřesahující několik nanometrů. Pod vlivem magnetického pole dochází při průchodu proudu takto tenkou vrstvou k vytvoření Hallova napětí (obr. 1a a 1b), které je stejně jako u klasického Hallova jevu přímo úměrné protékajícímu proudu. Příslušná konstanta úměrnosti však u kvantového Hallova jevu nabývá pouze diskrétních hodnot, je tedy kvantována. Toto kvantování dalo vzniknout samotnému názvu tohoto jevu, pro nás však bude důležitější si povšimnout, že elektrický proud vrstvou protéká pouze skrz jednosměrně vodivé kanály vytvořené působením magnetického pole na jejích hranách (obr. 1c). Pokud jsou kraje vzorku zakřivené nebo pokud se na něm vyskytují nepravidelnosti či znečištění, tak se pro elektrický proud nic nezmění — vždy bude přesně kopírovat hranu vzorku.

Díky tomuto prostorovému vymezení proudu, které je dáno tvarem (tedy topologií) zkoumaného systému, lze tenkou kovovou vrstvu v režimu kvantového Hallova jevu označit za topologický izolátor. Toto pojmenování se dnes ve fyzice pevných látek vžilo pro třídu systémů, které mají podobně jako běžné izolátory zanedbatelnou elektrickou vodivost uvnitř materiálu, zato však dokáží vést elektrický proud svým povrchem (obr. 2). V plochých, dvojrozměrných materiálech mají tyto povrchové vodivé stavy formu jednorozměrných kanálů, přičemž celková vodivost topologického izolátoru je pak dána jejich počtem. A zde právě vstupuje do hry ona topologie, která objekty klasifikuje podle určitých kritérií měnících se pouze skokově. Často používaný příklad je klasifikace geometrických objektů podle počtu děr. Koule a krychle patří do jedné kategorie, nemají žádné díry. Torus podobající se pneumatice spadá do jiné kategorie, protože má jednu díru. Počet děr je v tomto případě topologickým invariantem — veličinou, která zůstává při deformaci daného objektu konstantní. Její hodnota se

Dr. rer. nat. TOMÁŠ RAUCH, Institute of Physics, Martin Luther University Halle-Wittenberg, Německo, e-mail: tomas.rauch@physik.uni-halle.de; RNDr. MILAN ORLITA, Ph.D., Národní laboratoř silných magnetických polí, CNRS, Grenoble, Francie, Fyzikální ústav Univerzity Karlovy, Praha, Česká republika, e-mail: milan.orlita@lncmi.cnrs.fr



Obr. 1. Geometrie měření Hallova jevu v tenkých vrstvách. (a) Magnetické pole B kolmé k povrchu vzorku ovlivňuje protékající elektrický proud I za vzniku příčného Hallova napětí U_H . (b) Při běžném Hallově jevu je proud elektronů odkloněn magnetickým polem, přičemž na kraji vzorku vzniká elektrický náboj. (c) V kvantovém Hallově jevu elektrický proud teče pouze jednosměrnými kanály na kraji vzorku, uvnitř materiálu elektrický proud neprochází.



Obr. 2. Topologické izolátory jsou vodivé pouze podél svého okraje (viz dvojrozměrný případ vlevo) nebo na svém povrchu (trojrozměrný případ vpravo).

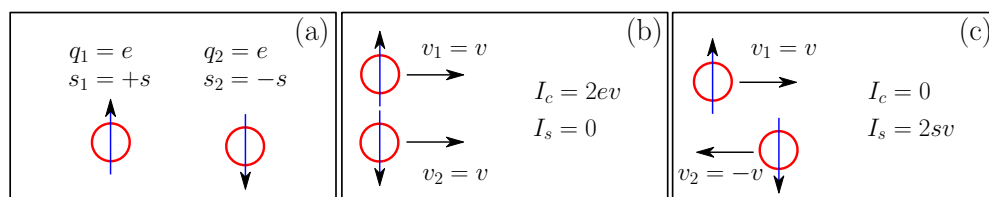
může změnit, pouze když vznikne nová díra (nebo stará zmizí), je však vyloučeno, aby počet děr v daném objektu dosahoval například hodnoty $n = (0.34145 \pm 0.00005)$ [7]. Topologické invarianty tedy nabývají, na rozdíl od řady jiných ve fyzice studovaných veličin, pouze celočíselných hodnot.

V roce 1982 David Thouless se svými kolegy ukázal, že oním topologickým invariantem je v případě kvantového Hallova jevu takzvané Chernovo číslo, celočíselná veličina, kterou je možné stanovit, jsou-li známy vlastnosti elektronů uvnitř studovaného materiálu [23]. Chernovo číslo se při malé změně magnetického pole nemění. Skoková změna jeho hodnoty je možná pouze při větších změnách magnetického pole, čímž se pozorovaný systém přesune do nové topologické kategorie, charakterizované novou celočíselnou hodnotou Chernova čísla. Dále Thouless a kolegové ukázali, že Chernovo číslo je úměrné příčné vodivosti, jejíž kvantování objevil Klaus von Klitzing

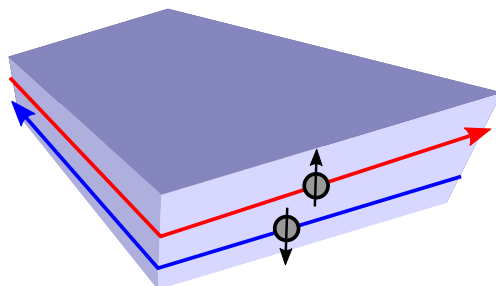
v roce 1980. V následujících letech pak bylo dokázáno, že Chernovo číslo je přesně rovno počtu vodivých povrchových kanálů [9]. Tím se celý kruh uzavírá: měřené skokové hodnoty příčné vodivosti jsou dány Chernovým číslem, které zároveň odpovídá počtu povrchových kanálů. Příčná vodivost v kvantovém Hallově jevu je tedy dána pouze povrchovými kanály, zatímco uvnitř zůstává měřený vzorek izolující. Tento princip, typický pro všechny topologické izolátory, se v anglicky psané literatuře nazývá „bulk-boundary correspondence“ a popisuje propojení elektronových stavů uvnitř materiálu (charakterizovaných Chernovým číslem) s vodivými stavy na jeho povrchu (s daným počtem povrchových kanálů) [8].

Dalším krokem na cestě k dnešním topologickým materiálům byla práce Duncana Haldana z roku 1988, ve které na příkladu zjednodušeného modelu ukázal, že teorie nevyklučuje možnost realizovat kvantový Hallův jev i bez přítomnosti vnějšího magnetického pole [6]. V Haldanově modelu existují malé oblasti se střídajícím se směrem magnetizace. Celková magnetizace ale zůstává nulová, podobně jako u antiferomagnetických materiálů. Haldane ukázal, že u elektronů v jím uvažovaném modelu může Chernovo číslo nabývat pouze hodnot $C = 0, \pm 1$. To znamená, že je tedy buď kompletně izolující (pro $C = 0$), nebo na jeho kraji existuje jeden kanál, ve kterém elektrony obíhají systém v matematicky kladném ($C = 1$) nebo záporném ($C = -1$) směru. Vyneseme-li závislost Chernova čísla na vnitřních parametrech Haldanova modelu, dostaneme topologický fázový diagram, ve kterém jsou jednotlivé oblasti (tzv. topologické fáze) charakterizovány určitou hodnotou Chernova čísla. V dané topologické fázi je studovaný systém vždy uvnitř izolantem a případně má vodivé kanály na svém okraji. Pouze na hranici mezi dvěma topologickými fázemi se během topologického fázového přechodu nakrátko stane vodivým celý systém. Tato vlastnost je opět typická pro všechny druhy pozorovaných topologických izolátorů.

Aktuální směr výzkumu topologických materiálů byl dále ovlivněn poznatkami o novém způsobu přenosu informace — spinu. Zatímco v běžné elektronice se využívá transportu náboje elektronů, který je pro všechny elektrony identický ($q = e$), cílem nového oboru, spintroniky, je využití transportu spinu, který (zjednodušeně) může nabývat hodnot $\pm s$ (obr. 3a). V nemagnetických materiálech je počet elektronů se spinem $+s$ a $-s$ stejný, a pohybují-li se tyto elektrony stejným směrem, vzniká elektrický proud (obr. 3b). Pokud se ale podaří poslat elektrony s opačným spinem do opačných směrů, vznikne spinový proud, zatímco elektrický proud je nulový (obr. 3c). Toho se dá dosáhnout například ve spinovém Hallově jevu, který je obdobou klasického Hallova



Obr. 3. (a) Všechny elektrony nesou stejný náboj e , ale mohou mít různý spin $\pm s$. (b) Dva elektrony s opačným spinem se pohybují stejným směrem. Výsledkem je elektrický proud I_c . (c) Dva elektrony s opačným spinem se pohybují opačným směrem. Výsledkem je spinový proud I_s .



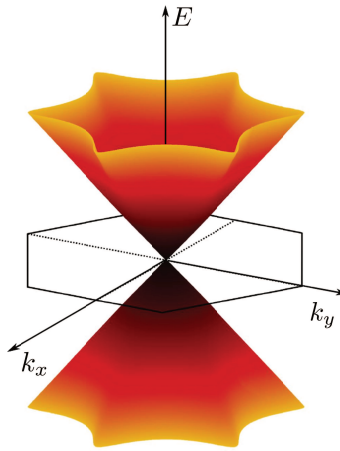
Obr. 4. Kvantový spinový Hallův jev. Elektronové se pohybují po okraji vzorku, směr pohybu závisí na orientaci spinu.

jevu s tím rozdílem, že podélný elektrický proud v tomto případě v tenkém materiálu vyvolává příčný proud spinový [3]. Spinový Hallův jev lze pozorovat v polovodičových strukturách [15], [24], ale také v těžkých kovech, například v mědi nebo platině.

První topologický izolátor dnes nejběžnějšího typu, tedy kompletně bez magnetizace nebo vnějšího magnetického pole, byl navržen v roce 2005 Charlesem Kanem a Eugenem Melem [14]. V této důležité práci její autoři navázali na výsledky Duncana Haldana. Zjednodušeně se Kaneův–Meleho model, jak je dnes běžně nazýván, skládá ze dvou kopií Haldanova modelu, z nichž každá popisuje elektrony s opačným směrem spinu. Výsledkem je topologický izolátor, jehož topologické fáze jsou charakterizovány takzvaným \mathcal{Z}_2 topologickým invariantem ν . Symbol \mathcal{Z}_2 značí, že povolené jsou pouze dvě celočíselné hodnoty $\nu = 0$ nebo 1. V případě $\nu = 0$ model popisuje normální izolátor bez speciálních povrchových kanálů. Pro $\nu = 1$ mají elektrony uvnitř systému izolující vlastnosti, avšak na jeho okraji opět existují robustní vodivé kanály, které není možné jednoduše zničit. Na rozdíl od kvantového Hallova jevu zde povrchové kanály vždy existují v párech. Elektrony se spinem $+s$ systém obíhají v jednom směru, zatímco elektrony se spinem $-s$ se pohybují v opačném směru (obr. 4). Je tedy realizována situace z obr. 3c, kde je možné pozorovat spinový proud, zatímco elektrický proud je nulový. V tomto typu topologických izolátorů je tedy prakticky realizován kvantový spinový Hallův jev.

Ještě ve stejném roce Kane a Mele navrhli grafen jako materiál, ve kterém bylo možné tento jev pozorovat [13]. Jejich návrh se však neukázal jako experimentálně schůdný, neboť vyžadoval provedení experimentů za extrémně nízkých teplot, navíc na nereálně kvalitním grafenu. První topologický izolátor existující za nulového magnetického pole tak byl realizován ve zcela jiném systému — v tenkých vrstvách polokovu HgTe při teplotě rovné 30 mK. Podařilo se to na univerzitě ve Würzburgu ve skupině vedené Lauresem Molenkampem [17], která prokázala existenci jednorozměrných vodivých kanálů s vlastnostmi odpovídajícími předpovědím Kanea a Meleho.

Za další milník ve fyzice topologických materiálů lze určitě považovat rok 2007, kdy došlo k zobecnění konceptu topologického izolátoru do tří dimenzí [5], [19]. Topologická klasifikace trojrozměrných materiálů je možná za pomoci čtyř \mathcal{Z}_2 invariantů $(\nu_0; \nu_1\nu_2\nu_3)$. Jsou-li všechny invarianty nulové, jedná se o běžný izolátor bez specifických povrchových stavů. V případě $\nu_0 = 1$ pak obvykle mluvíme o tzv. silném topologickém izolátoru, kdy trojrozměrný materiál nevede žádný elektrický proud svým



Obr. 5. Lineární disperze povrchového stavu v Bi_2Te_3 [20]. Energie E v závislosti na vlnovém vektoru $\vec{k} = (k_x, k_y)$ na povrchu Bi_2Te_3 (pro volné částice je vlnový vektor přímo úměrný hybnosti).

objemem, ale přesto zůstává vodivým na celém svém povrchu (obr. 2 vpravo). Jiné kombinace nenulových invariantů pak mohou dát vzniknout slabému topologickému izolátoru, kdy se vodivé stavy vyskytují pouze na části povrchu. Elektronů nacházející se v těchto povrchových stavech vykazují řadu neočekávaných vlastností. Závislost jejich energie na hybnosti (disperze) není kvadratická, jak je obvyklé v klasické fyzice, ale lineární (obr. 5). Podobně jako v grafenu tak elektrony na povrchu trojrozměrných topologických izolátorů připomínají nehmotné relativistické částice. Na rozdíl od grafenu však není jejich pohyb nezávislý na projekci spinu — elektrony pohybující se opačným směrem vykazují opačnou orientaci spinu. Pravděpodobně nejnámějšími zástupci silných topologických izolátorů jsou polovodiče s relativně úzkým pásem zakázaných energií jako $\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x}$, Bi_2Te_3 a Bi_2Se_3 [10], [25], [28]. Paradoxně se jedná o materiály známé ve fyzice pevných látek minimálně několik desítek let a intenzivně zkoumané kvůli neobvyklým termoelektrickým vlastnostem. Existence jejich zajímavých povrchových stavů však zůstala překvapivě dlouho utajena.

Jedním z nejdůležitějších konceptů, které je potřeba při studiu topologických materiálů zohlednit, je symetrie. V případě výše diskutovaných typů topologických izolátorů se jedná o symetrii obrácení času. Přítomnost magnetického pole tuto symetrii narušuje. Elektron pohybující se v magnetickém poli po kruhové trajektorii se při obrácení času nebude pohybovat po této trajektorii zpět, jak by tomu bylo při zachování této symetrie. Narušení symetrie obrácení času je jednou ze základních podmínek pro existenci kvantového Hallova jevu. Pokud je tato symetrie zachována, potom pro Chernovo číslo vždy dostaneme pouze triviální hodnotu $C = 0$. Zachování symetrie obrácení času je ale podmínkou pro existenci silných a slabých topologických izolátorů. Narušení této symetrie magnetickým polem zruší možnost definovat \mathbb{Z}_2 topologické invarianty. Ukazuje se, že různé symetrie zkoumaného systému jsou pevně spojeny s existencí topologických invariantů, které daný systém topologicky klasifikují. Kromě

symetrie obrácení času se v kontextu topologických izolátorů velmi často diskutují také symetrie krystalické mřížky [4], nejčastěji zrcadlová symetrie, jež umožňuje izolátory klasifikovat podle dalšího topologického invariantu: zrcadlového Chernova čísla [22]. I v případě těchto takzvaných topologických krystalických izolátorů existují na některých jejich povrchích povrchové elektrony se zajímavými vlastnostmi. Jedná se například o relativně jednoduchou možnost narušení krystalických symetrií deformací krystalu. Potom je možné studovat vliv narušení symetrie na topologické vlastnosti a povrchové elektrony topologických izolátorů. Jedním z nejčastěji studovaných zástupců této třídy topologických izolátorů je SnTe [11].

Dalším významným krokem je nedávný objev kovových materiálů s netriviální topologií elektronových stavů, konkrétně trojrozměrných Diracových a Weylových polokovů. Ačkoliv tyto materiály, podobně jako topologické izolátory, vykazují charakteristické povrchové stavy dané jejich topologií, pozornost se soustřeďuje především na elektronové stavy uvnitř těchto krystalů, které jsou na rozdíl od topologických izolátorů schopné vést elektrický proud. Elektrony v Diracových polokovech (např. v Cd_3As_2 nebo Na_3Bi [18], [12]) totiž připomínají nehmotné částice v kvantové relativistické elektrodynamice (analogie je u těchto trojrozměrných systémů výrazně hlubší než u dvojrozměrného grafenu) a jejich pohyb je popsán Diracovou rovnicí. Pohyb elektronů ve Weylových polokovech (např. TaAs nebo NbAs [27, 26]) je naproti tomu popsán rovnicí Weylovou, která v kvantové teorii pole popisuje částice s poločíselným spinem a definovanou helicitou (chiralitou). Takové částice dosud nebyly ve skutečném světě relativistických částic objeveny a jejich realizace v pevné látce přináší překvapivou možnost testování některých specifických teoretických předpovědí kvantové teorie pole (např. chirální anomálie [1]) v laboratořích fyziky pevných látek.

V nedávné době se stalo neblahým zvykem posuzovat význam vědeckých objevů především dopadem jejich využití v praxi, a to nejlépe v podobě kvalifikovaných odhadů růstu hrubého domácího produktu. Využijme tedy příležitosti a zdůrazněme, že původní práce laureátů Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2016, motivované pouze a jen vědeckou zvědavostí a intuicí, by se tehdy v této optice nutně musely jevit jako zcela nepraktické nebo snad dokonce zbytečné. S odstupem více než třiceti let se však ukazuje, že právě tyto „nepraktické“ výsledky dnes výrazně proměňují náš pohled na pevné látky. Umožnily hlubší pochopení mnohých jejich vlastností a vedly také k objevu řady nových fyzikálních jevů. Bez přehánění tak lze říci, že pochopení topologických vlastností látek bude mít zásadní dopad na budoucí aplikační výstupy fyziky pevné fáze, ať již budou jakékoliv. Ostatně již dnes existují užitečné aplikace topologických materiálů. Snad nejznámějším je realizace etalonu elektrického odporu na základě kvantového Hallova jevu.

L i t e r a t u r a

- [1] ADLER, S. L.: *Axial-vector vertex in spinor electrodynamics*. Phys. Rev. 177 (1969), 2426–2438.
- [2] AVRON, J. E., OSADCHY, D., SEILER, R.: *A topological look at the quantum Hall effect*. Physics Today 56 (2003), 38–42.
- [3] D'YAKONOV, M. I., PEREL', V. I.: *Possibility of orienting electron spins with current*. Sov. Phys. JETP Lett. 13 (1971), 467–469.

- [4] FU, L.: *Topological crystalline insulators*. Phys. Rev. Lett. [online] *106* (2011), paper No. 106802.
- [5] FU, L., KANE, C., MELE, E.: *Topological insulators in three dimensions*. Phys. Rev. Lett. [online] *98* (2007), paper No. 106803.
- [6] HALDANE, F. D. M.: *Model for a quantum Hall effect without Landau levels: Condensed-matter realization of the “parity anomaly”*. Phys. Rev. Lett. *61* (1988), 2015–2018.
- [7] HALDANE, F. D. M.: *Topological states of quantum condensed matter*. Plenary talk at APS March Meeting (2017).
- [8] HASAN, M., KANE, C.: *Colloquium: topological insulators*. Rev. Modern Phys. *82* (2010), 3045–3067.
- [9] HATSUGAI, Y.: *Chern number and edge states in the integer quantum Hall effect*. Phys. Rev. Lett. *71* (1993), 3697–3700.
- [10] HSIEH, D., QIAN, D., WRAY, L., XIA, Y., HOR, Y. S., CAVA, R. J., HASAN, M. Z.: *A topological Dirac insulator in a quantum spin Hall phase*. Nature *452* (2008), 970–974.
- [11] HSIEH, T. H., LIN, H., LIU, J., DUAN, W., BANSIL, A., FU, L.: *Topological crystalline insulators in the SnTe material class*. Nature Comms. [online] *3* (2012), paper No. 982.
- [12] JEON, S., ZHOU, B. B., GYENIS, A., FELDMAN, B. E., KIMCHI, I., POTTER, A. C., GIBSON, Q. D., CAVA, R. J., VISHWANATH, A., YAZDANI, A.: *Landau quantization and quasiparticle interference in the three-dimensional Dirac semimetal Cd₃As₂*. Nature Mater. *13* (2014), 851–856.
- [13] KANE, C. L., MELE, E. J.: *Quantum spin Hall effect in graphene*. Phys. Rev. Lett. [online] *95* (2005), paper No. 226801.
- [14] KANE, C. L., MELE, E. J.: *Z₂ topological order and the quantum spin Hall effect*. Phys. Rev. Lett. [online] *95* (2005), paper No. 146802.
- [15] KATO, Y. K., MYERS, R. C., GOSSARD, A. C., AWSCHALOM, D. D.: *Observation of the spin Hall effect in semiconductors*. Science *306* (2004), 1910–1913.
- [16] KLITZING, K. VON, DORDA, G., PEPPER, M.: *New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance*. Phys. Rev. Lett. *45* (1980), 494–497.
- [17] KÖNIG, M., WIEDMANN, S., BRÜNE, C., ROTH, A., BUHMANN, H., MOLENKAMP, L. W., QI, X.-L., ZHANG, S.-C.: *Quantum spin Hall insulator state in HgTe quantum wells*. Science *318* (2007), 766–770.
- [18] LIU, Z. K., ZHOU, B., ZHANG, Y., WANG, Z. J., WENG, H. M., PRABHAKARAN, D., MO, S.-K., SHEN, Z. X., FANG, Z., DAI, X., HUSSAIN, Z., CHEN, Y. L.: *Discovery of a three-dimensional topological Dirac semimetal, Na₃Bi*. Science *343* (2014), 864–867.
- [19] MOORE, J. E., BALENTS, L.: *Topological invariants of time-reversal-invariant band structures*. Phys. Rev. B [online] *75* (2007), paper No. 121306.
- [20] RAUCH, T., FLIEGER, M., HENK, J., MERTIG, I., ERNST, A.: *Dual topological character of chalcogenides: theory for Bi₂Te₃*. Phys. Rev. Lett. [online] *112* (2014), paper No. 016802.
- [21] STŘEDA, P.: *Kvantové Hallovy jevy*. PMFA *44* (1999), 177–186.
- [22] TEO, J., FU, L., KANE, C.: *Surface states and topological invariants in three-dimensional topological insulators: Application to Bi_{1-x}Sb_x*. Phys. Rev. B [online] *78* (2008), paper No. 045426.

- [23] THOULESS, D. J., KOHMOTO, M., NIGHTINGALE, M. P., NIJS, M. DEN: *Quantized Hall conductance in a two-dimensional periodic potential*. Phys. Rev. Lett. *49* (1982), 405–408.
- [24] WUNDERLICH, J., KAESTNER, B., SINOVA, J., JUNGWIRTH, T.: *Experimental observation of the spin-Hall effect in a two-dimensional spin-orbit coupled semiconductor system*. Phys. Rev. Lett. [online] *94* (2005), paper No. 047204.
- [25] XIA, Y., QIAN, D., HSIEH, D., WRAY, L., PAL, A., LIN, H., BANSIL, A., GRAUER, D., HOR, Y. S., CAVA, R. J., HASAN, M. Z.: *Observation of a large-gap topological-insulator class with a single Dirac cone on the surface*. Nature Phys. *5* (2009), 398–402.
- [26] XU, S.-Y., ALIDOUST, N., BELOPOLSKI, I., YUAN, Z., BIAN, G., CHANG, T.-R., ZHENG, H., STROCOV, V. N., SANCHEZ, D. S., CHANG, G., ZHANG, C., MOU, D., WU, Y., HUANG, L., LEE, C.-C., HUANG, S.-M., WANG, B., BANSIL, A., JENG, H.-T., NEUPERT, T., KAMINSKI, A., LIN, H., JIA, S., HASAN, M. Z.: *Discovery of a Weyl fermion state with Fermi arcs in niobium arsenide*. Nature Phys. *11* (2015), 748–754.
- [27] YANG, L. X., LIU, Z. K., SUN, Y., PENG, H., YANG, H. F., ZHANG, T., ZHOU, B., ZHANG, Y., GUO, Y. F., RAHN, M., PRABHAKARAN, D., HUSSAIN, Z., MO, Z.-K., FELSER, C., YAN, B., CHEN, Y. L.: *Weyl semimetal phase in the non-centrosymmetric compound TaAs*. Nature Phys. *11* (2015), 728–732.
- [28] ZHANG, H., LIU, C.-X., QI, X.-L., DAI, X., FANG, Z., ZHANG, S.-C.: *Topological insulators in Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 with a single Dirac cone on the surface*. Nature Phys. *5* (2009), 438–442.

Poznámka redakce:

O Nobelově ceně pro D. J. Thoulesse, F. D. M. Haldana a J. M. Kosterlitz je čtenáře informovali v předchozím čísle PMFA v článku J. Rose: *Nobelova cena za fyziku v roce 2016 — podivné jevy v plochem světě*. Příspěvek *Nobelova cena s dobře definovanou topologií* přináší poněkud odlišný úhel pohledu na tzv. topologické materiály. Pochází od autorů, kteří se v problematice dobře orientují: M. Orlita působí jako vědecký pracovník v Laboratoři silných magnetických polí CNRS v Grenoblu a na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy, kde se zabývá experimentálním studiem magneto-optických vlastností materiálů s topologicky netriviální strukturou elektronových stavů. T. Rauch je vědecký pracovník ve Fyzikálním institutu Univerzity Martina Luthera v německém Halle. Pomocí teoretických modelů hledá materiály s netriviálními topologickými vlastnostmi; počítá jejich topologické invarianty, ověřuje existenci povrchových stavů a zkoumá jejich chování při změně okolních podmínek (např. deformace materiálu nebo působení magnetického pole).