



## Нобеловата награда за физика 2016

Кралската шведска академия на науките реши да присъди Нобеловата награда за физика 2016 наполовина на Дейвид Дж. Тоулес (Фотос 1), проф. емерит. в Университета на Вашингтон, Сиатъл, САЩ, а другата половина – на Дънкан М. Халдейн (Фотос 2), професор по физика в Принстънския университет, Ню Джерси, САЩ, и Майкъл Костерлиц (Фотос 3), професор по физика в Университета „Браун“, Провидънс, Род Айленд, САЩ, *„за теоретични открития на топологичните фазови преходи и топологичните фази на веществото“* („for theoretical discoveries of topological phase transitions and topological phases of matter”).

тата на един непознат свят, в който веществото съществува в странни състояния. Техните открития доведоха до пробив в разбирането на потайностите на веществото и разкриха нови перспективи за разработка на иновативни материали.

Дейвид Тоулес, Дънкан Халдейн и Майкъл Костерлиц използват съвременни математични методи, за да обяснят някои странни явления, наблюдавани в необикновени фази (или състояния) на веществото, като например в свръхпроводниците, свръхфлуидите и тънките магнитни филми. Костерлиц и Тоулес изучават явленията, протичащи в плосък свят – върху повърхности



Фотос 1. Дейвид Дж. Тоулес  
(David J. Thouless)  
Фото: Kiloran Howard



Фотос 2. Дънкан М. Халдейн  
(F. Duncan M. Haldane)  
Фото: Princeton University,  
Comms.Office, D. Applewhite



Фотос 3. Майкъл Костерлиц  
(Michael Kosterlitz)  
Ил.: N. Elmeled. © Nobel Media 2016

### Странни явления в света на двумерните тела<sup>1</sup>

Тазгодишните лауреати Дейвид Дж. Тоулес (род. 1934 г., Беарсен, Великобритания, Ph.D. 1958 г. в Университета Корнел, Итака, Ню Йорк, САЩ), Дънкан М. Халдейн (роден 1951 г., Лондон, Ph.D. 1978 г. в Унив. в Кеймбридж, Великобритания) и Майкъл Костерлиц (род. 1942, Абърдийн, Великобритания, Ph.D. 1969 г. в Оксфордския университет, Великобритания) открихнаха вра-

или във вътрешността на извънредно тънки слоеве. Тези явления може да се разглеждат като двумерни, за разлика от тримерните (имащи дължина, широчина и височина), с които обикновено описваме действителността. Халдейн изучава също вещества, които формират толкова тънки нишки, че е възможно да се разглеждат като едномерни.

Физиката на двумерния свят е твърде различна от онази, която познаваме в света около нас. Въпреки че поведението на всеки отделен атом може да се обясни с помощта на квантовата физи-

<sup>1</sup> Превод на статия от рубриката *Popular science background*, публикувана на страницата на Нобеловия комитет. Повече информация по въпроса може да се намери на адрес <http://nobelprize.org>. (бел. прев.).

ка, неочаквано, когато разстланото в извънредно тънък слой вещество съдържа огромен брой атоми, те проявяват съвсем различни свойства, щом са заедно. В тези двумерни светове непрекъснато се откриват нови колективни явления, което прави физиката на кондензираната материя една от най-бързо развиващите се области на физиката.

За откритията на тримата лауреати решаващо се оказва използването на топологични понятия във физиката. Топологията е раздел от математиката, който изучава скокообразно променящи се свойства. Използвайки съвременната топология като средство, тримата лауреати постигат изненадващи резултати, които разкриват нови възможности за изследване и водят до формулиране на нови и важни идеи в няколко физични области.

### **На студено квантовата физика става видима**

В дълбочина всяко вещество се управлява от законите на квантовата физика. Газовете, течностите и твърдите тела са обикновените фази, в които се намират веществата, а в тях квантовите ефекти се прикриват от случайните движения на атомите. При извънредно ниски температури обаче, близки до абсолютната нула ( $-273$  целзиеви градуси) веществото преминава в странни нови фази и се държи по неочаквани начини. Квантовата физика, която иначе се проявява само в микро-света, изведнъж се оказва видима (Фигура 1).

Когато температурата се променя, обикновените фази на веществото преминават от една в друга. Например подобен фазов преход се наблюдава, когато лед, състоящ се от добре подредени кристали, се нагрява и стапя, превръщайки се във вода – една по-хаотична фаза на веществото. Когато наблюдаваме малко познатите двумерни светове на веществото, откриваме нови негови фази, които все още не са напълно изследвани.

На студено може да се случат странни неща. Например съпротивлението, което в други случаи изпитват всички движещи се частици, внезапно изчезва. Такъв е случаят, когато електричен ток протича без съпротивление в един свръхпроводник или когато вихър в един свръхфлуид се върти вечно, без да забавя движението си.

Първият човек, систематично изследвал свръхфлуидите през 30-те години на миналия век, е руският учен Пьотр Капица. Той охлажда хелий-4, намиращ се във въздуха, до  $-273^{\circ}\text{C}$  и открива, че течният хелий самоволно пропълзва нагоре през стените на съда, в който е поместен. С други думи, той се държи точно така странно,

както би следвало да се държи един свръхфлуид, когато вискозитетът му изчезне напълно. През 1978 г. Капица бе удостоен с Нобелова награда за физика и оттогава в лабораториите са създадени няколко типа свръхфлуиди. Свръхтечният хелий, тънките свръхпроводящи филми, тънки слоеве от магнитни материали и електропроводящи нано-нишки са няколко от множеството нови фази на веществото, които днес се изучават усилено.

### **Двойка вихри осигурява решението**

Дълго време изследователите вярват, че в плоския двумерен свят дори при абсолютната нула топлинните флуктуации унищожават всякаква подредба във веществото. Ако няма подредени фази, не може да има и фазови преходи. Но в началото на 70-те години на XX в. Дейвид Тоулес и Майкъл Костерлиц се срещат в Бирмингам, Великобритания и поставят под съмнение съществуващата теория. Заедно те се заемат с проблема за фазовите преходи в двумерни системи (както самите обясняват – първият от любопитство, вторият – поради невежество). Това сътрудничество води до едно съвсем ново разбиране на фазовите преходи, което се смята като едно от най-големите теоретични открития на двадесетия век във физиката на кондензираната материя. Нарича се КТ преход (преход на Костерлиц – Тоулес), или БКТ преход, където Б идва от името на Вадим Березински, един починал московски физик-теоретик, който развива подобни идеи.

Топологичният фазов преход не е обикновен фазов преход, подобен на този между леда и водата. Водещата роля в топологичния преход се играе от малки вихри в плоския материал. При ниски температури те образуват свързани двойки. С повишаване на температурата настъпва фазов преход: вихрите внезапно се раздалечават един от друг и отплават в материала самостоятелно (Фигура 2).

Удивителното в тази теория е, че тя е приложима за различни видове нискоразмерни материали: КТ преходът е универсален. Той се превърна в полезен инструмент, който се използва не само в света на кондензираната материя, но също и в други области на физиката като атомната физика или статическата механика. Теорията на КТ прехода бе разработена от своите създатели и също – потвърдена опитно.

### **Тайнствените квантови скокове**

В края на краищата експерименталните разработки доведоха до известен брой нови състояния на веществото, които изискваха обяснение. През

осемте години двамата – Дейвид Тоулес и Дънкан Халдейн, представиха една съвсем новаторска теоретична работа, отхвърляща предишните теории, една от които бе квантово-механичната теория за определяне кои вещества провеждат електричество. Последната първоначално бе развита през 30-те години на миналия век и няколко десетилетия по-късно се смяташе, че тази област от физиката е изяснена добре.

Ето защо беше голяма изненада, когато през 1983 г. Дейвид Тоулес доказва, че предишната картина е непълна и при ниски температури и силни

чение. Тяхната работа послужи като средство за последвалите драматични разработки на теорията на нови фази на веществото.

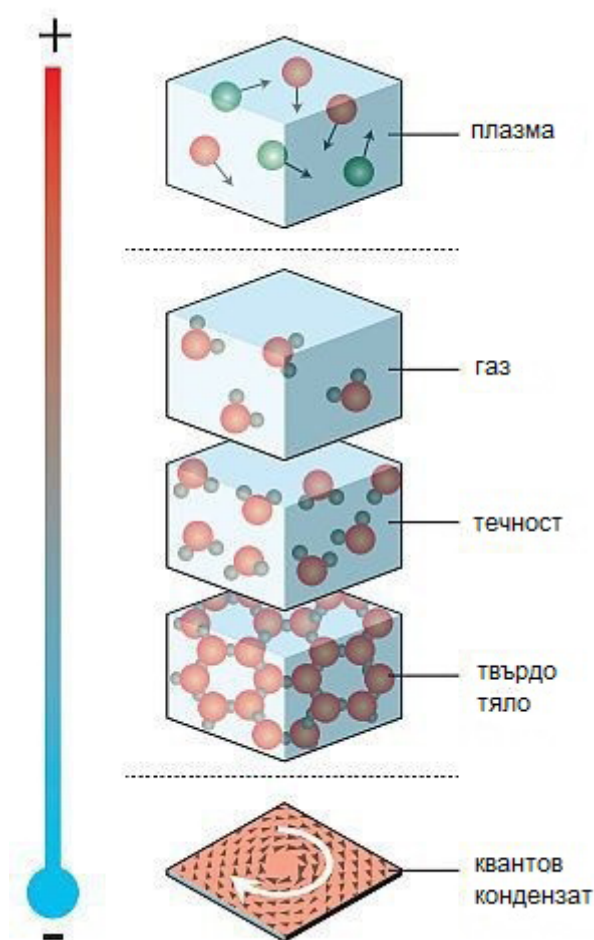
Тайнственото явление, описано теоретично от Дейвид Тулес с помощта на топологията, е квантовият ефект на Хол. Този ефект бе открит през 1980 г. от немския физик Клаус фон Клитцинг, който получи Нобеловата награда за това през 1985 г. Той изследва тънък проводящ слой, намиращ се в силно магнитно поле между два полупроводника, при което електроните са охладени до няколко градуса над абсолютната нула.

Във физиката не е нещо необичайно да се наблюдават драстични промени при понижаване на температурата; например много материали стават магнитни. Това става, защото всички малки атомни магнитчета във веществото изведнъж се ориентират еднопосочно, пораждайки силно магнитно поле, което може да се измери.

Квантовият ефект на Хол обаче е по-труден за разбиране; изглежда, че електричната проводимост на слоя може да приема само определени стойности, които при това са точно фиксирани – нещо, което е необикновено за физиката. Измерванията дават абсолютно еднакви резултати, дори ако температурата, магнитното поле или количеството на примесите в полупроводника се променят. Когато магнитното поле се промени достатъчно, проводимостта на слоя също се променя, но само скокообразно; намаляването на силата на полето предизвиква първо, точно удвояване на електричната проводимост, след това трикратното ѝ увеличение, четирикратното и т.н. Тези целочислени стъпки не е възможно да се обяснят от физиката, позната по онова време, но Дейвид Тоулес откри решението на тази загадка с помощта на топологията.

### Отговорът на топологията

Топологията описва свойства, които не се променят, когато един обект се разтяга, усуква или деформира, но без да се разкъсва. Топологично една сфера и една паница принадлежат към една и съща категория, тъй като едно сферично парче глина може да се превърне в паница. Един геврек с дупка в средата и една чашка за кафе с отвор на дръжката обаче принадлежат към друга категория; тези тела също могат да се преобразуват едно в друго без разкъсване. Следователно топологичните обекти може да имат една дупка, или две, или три, или четири ... но броят им трябва да бъде цяло число. Оказва се, че това е полезно за описание на електричната проводимост при квантовия ефект



Фигура 1. Фази на веществото

Най-често срещаните фази на веществото са газовата, течната и твърдата. При екстремно високи или ниски температури обаче веществото преминава в други, по-екзотични състояния.

Ил.: ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

магнитни полета е необходима нов тип теория, такава, в която са съществени топологичните идеи. Приблизително по същото време, анализирайки магнитни атомни вериги, Дънкан Халдейн също стигна до подобно, също така неочаквано заклю-



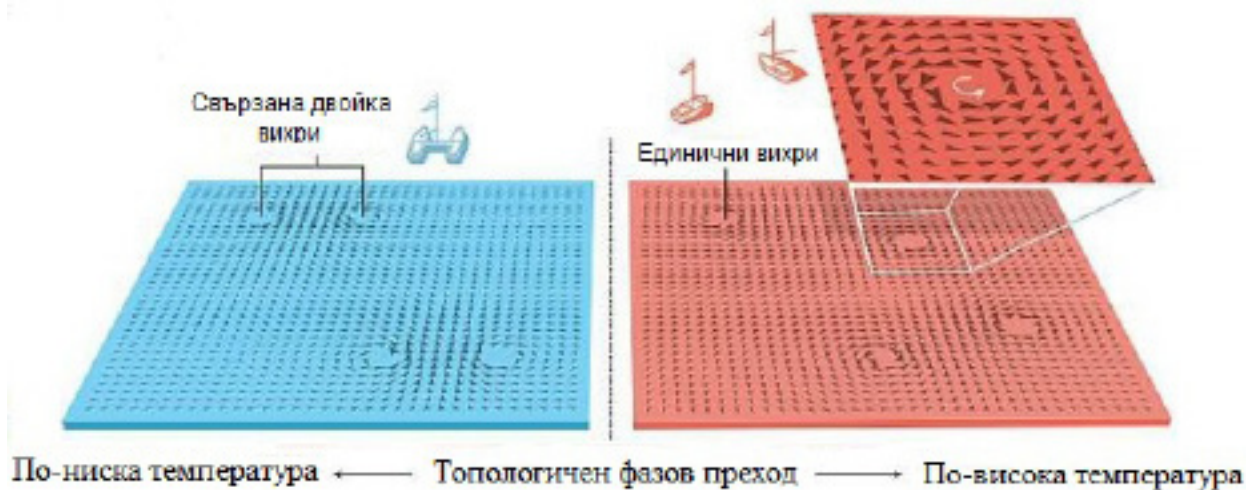
на Хол, която се променя само скокообразно, и то със стойност, която е произведение от едно цяло число и една минимална стойност (Фигура 3).

В квантовия ефект на Хол електроните се движат в слоя между полупроводниците относително свободно и образуват нещо, което се нари-

та нула.

### Нови топологични материали в тръбопровода

В една много по-ранна работа от 1982 г. Дънкан Халдейн прави едно предсказание, което



Фигура 2. Фазов преход

Протича, когато фазите на веществото преминават от една в друга, както когато ледът се топи и става вода. Костерлиц и Тоулес описват един топологичен фазов преход в много тънък слой при много ниска температура. При ниската температура се формират двойки вихри, които внезапно се разделят при фазовия преход. Това е едно от най-важните открития във физиката на кондензираната материя през XX в.

Ил.: ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

ча топологичен квантов флуид. По същия начин, както при събиране в едно на множество частици често се проявяват нови свойства, електроните в топологичния квантов флуид също проявяват неочаквани характеристики. Например, както не може да се установи дали има дупка в чашката за кафе, като се наблюдава само една малка нейна част, по същия начин не може да се определи дали електроните са образували квантов флуид, като се наблюдава случващото се със само някои от тях. Проводимостта обаче описва колективното движение на електроните и заради топологията се променя скокообразно: тя се квантува. Друга характеристика на топологичния квантов флуид е, че неговите граници притежават необикновени свойства. Такива свойства бяха предсказани теоретично и по-късно потвърдени експериментално.

Друго важно събитие се случи през 1988 г., когато Дънкан Халдейн откри, че топологични квантови флуиди – както в квантовия ефект на Хол, може да се образуват в тънки полупроводящи слоеве и в отсъствие на магнитно поле. Той казва, че никога не е мечтал неговият теоретичен модел да се осъществи опитно, но съвсем наскоро – през 2014 г., този модел бе потвърден в експеримент с помощта на атоми, охладени почти до абсолютна-

удивлява дори експертите в тази област. В теоретичните си изследвания на верижки от магнитни атоми, каквито се срещат в някои материали, той открива, че веригите притежават фундаментално различни свойства в зависимост от характера на атомните магнити. В квантовата физика има два вида атомни магнити, четни и нечетни. Халдейн показва, че верига, образувана от четни атомни магнити, е топологична, докато верига от нечетни магнити не е. Както при квантовите флуиди не е възможно да се установи дали една атомна верига е топологична или не е, като се изследва само малка нейна част. И точно както при квантовите флуиди, топологичните свойства се проявяват по ръбовете. Тук това става в краищата на веригата, тъй като квантовото свойство, известно като спин, става два пъти по-малко в краищата на веригата. В началото никой не вярваше в аргументите на Халдейн за атомните вериги; изследователите бяха убедени, че те вече ги разбират напълно. Оказа се обаче, че Халдейн е открил първия пример за нов тип топологичен материал, който днес е активно разработвана област от физиката на кондензираната материя.

Както квантовите Хол-флуиди, така и четните магнитни атомни вериги са включени в тази нова

група от топологични състояния. По-късно изследователите откриха няколко други неочаквани то-

полезни за създаване на нови поколения в електрониката и свръхпроводниците или за бъдещите



Фигура 3. Топология

Този раздел от математиката се интересува от свойства, които се променят скокообразно, подобно на броя на дупките в изображените тела. Топологията представлява ключ към откритията на Нобеловите лауреати и обяснява, защо електричната проводимост в слоевете се променя стъпаловидно.

Ил.: ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

пологични състояния на веществото не само във вериги и тънки погранични слоеве, но също така и в обикновени тримерни материали.

Днес се говори за топологични изолатори, топологични свръхпроводници и топологични метали. Това са примери за области, които през последните десетилетия очертават предните линии в изследванията във физиката на кондензираната материя, не на последно място – заради надеждата, че топологичните материали ще се окажат

квантови компютри. Съвременните изследвания разкриват тайните на веществото в екзотичните двумерни системи, открити от тазгодишните лауреати на Нобеловата премия.

Превод от англ. език:

**проф. д.п.н. Христо Попов,**  
Физически факултет на  
СУ „Св. Климент Охридски“