

Теоретично предсказване на фазови преходи в двумерни системи

Наум Карчев



Дейвид Дж. Таулес



Ф. Дънкан Холдейн



Дж. Майкъл Костерлиц

Интересът към различните фази в природата и механизъмът на превръщане на материалите от една фаза в друга е много стар. Най-популярен е примерът с феромагнитните материали като желязото например. Тези материали са кристали, във върховете

на решетката на които има атоми или йони с ненулев магнитен момент. Той е следствие от движението на електроните около ядрата (орбитален магнитен момент) или от спина на електроните. При висока температура магнитните моменти са ха-

Нобеловата награда по физика за 2016 г. получиха трима английски учени, работещи в американски университети – Дейвид Дж. Таулес (David J. Thouless, University of Washington, Seattle, WA, USA), Дж. Майкъл Костерлиц (J. Michael Kosterlitz, Brown University, Providence, RI, USA) и Ф. Дънкан Холдейн (F. Duncan M. Haldane, Princeton University, Princeton, NJ, USA) „за теоретично откритие на топологичните фазови преходи и топологичните фази на материята“.

отично насочени и сумарният магнитен момент е нула. Съществува критична температура, която се нарича температура на Curie, под която магнитните моменти, локализирани във върховете на решетката, започват да се подреждат паралелно. При темпе-

ратури, близки до абсолютната нула, всички магнитни моменти са успоредно подредени. Този преход от парамагнитна фаза, в която магнитните моменти са хаотично насочени, в подредена феромагнитна фаза е изследван в пионерските работи на Пиер



Подредена ферромагнитна фаза

Кюри (Curie) в началото на двайцесети век и привлича вниманието и до днес.

По-трудни за изследване са материали, на които върховете на решетката образуват две подрешетки. Магнитните моменти във всяка една подрешетка са успоредни, като магнитният момент на едната подрешетка е антипаралелен на магнитния момент на другата. В резултат магнитният момент на цялата система е нула, което я прави трудна за изучаване. За своите основополагащи теоретични изследвания на антиферромагнитната фаза френският теоретик физик Луи Неел (Louis Néel) получи през 1970 г. Нобелова премия по физика.

Друг пример са материали като олово, живак и други, в които при много ниска температура, около 8 К, токът тече без съпротивление – свръхпроводници. Според теорията на Пол Дрюд (Paul Drude), предложена през 1900 г., отговорни за електричната проводимост са частици (впоследствие наречени електрони), които имат заряд и се движат в материалите. Взаимодействието между тях и много по-тежките, на практика локализирани йони, води до съпротивление, което е основна характеристика на материалите. В свръхпроводниците при намаление на температурата се засилва ролята на вибрациите на решетката, които водят до сила,

сдвояваща електроните. Когато тази сила е по-голяма от силата на Кулоново отблъскване, се формира двойка електрони, наречена двойка на Соопер. Под определена критична температура тези двойки образуват кондензат от 10^{20} на брой заредени частици, които се движат кохерентно без съпротивление. Свръхпроводимостта е открита от холандския физик Камерлинг Онес (Kamerlingh Onnes) през 1911 г. За изключителните си експерименти, довели до създаване на течен хелий и откритието на свръхпроводимостта, той получава Нобелова награда по физика през 1913 г. Теорията, описваща на най-адекватен начин свръхпроводимостта, е създадена през 1957 г. от американските физици Джон Бардъйн (John Bardeen), Лион Купър (Leon Cooper) и Джон Робърт Шрифър (John Robert Schrieffer), за което те получиха Нобелова премия по физика през 1972 г.

Накрая, но не най-маловажен, е фазовият преход флуид – свръхфлуид, открит от руския учен П. Капица през 1934. За изследване на течен хелий при много ниски температури, което е позволило откриването на свръхфлуидността, той получава Нобелова награда по физика през 1978 г.

Краткият обзор показва голямото разнообразие от фази в природата. Причината системите да преминават през фазови преходи също е различна за различните преходи.

Ако се обърнем наново към магнитните материали, там съществена роля имат напрежения на намагнитеността трептения. Те взаимодействат с магнитните моменти и хаотизират ориентацията на магнитните моменти. Тези трептения са силно потиснати при ниски температури, но стават съществени при увеличаване на температурата и водят до разрушаване на общата магнитна наредба и до фазов преход.

При това разнообразие съществен е въпросът кои са общите характеристики на фазите и как се менят те при фазов преход. Решение на този въпрос дава руският физик теоретик Лев Ландау през 1937 г. Основното в неговата теория е, че фазата



Наум Карчев е доцент по физика във Физическия факултет на СУ „Св. Климент Охридски“. Чете лекции по Математични методи по физика, Електродинамика, Квантова теория на полета.

се характеризира с определена симетрия, а фазовите преходи са преходи, при които се мени симетрията. За да опише тези изменения количествено, той въвежда параметър на подреждане, който се преобразува по определен начин при трансформациите на симетрия. Ако в основното състояние този параметър е ненулев, то имаме нова фаза с редуцирана симетрия. Така например при феромагнитите във високотемпературната парамагнитна фаза, където пълният магнитен момент е нула, системата е инвариантна относно въртенията в тримерното пространство. При температури, по-ниски от температурата на Curie, всички магнитни моменти са ориентирани в едно направление и симетрията на системата се редуцира до симетрия при въртения около оста на магнетизация. При свръхпроводниците се нарушава зарядовата симетрия, която системата има в нормално състояние. Причината за нарушение на зарядовата система е образуването на двойки на Cooper, които имат заряд, равен на два заряда на електрона. Те Bose кондензират, което означава, че макроскопичен брой двойки на Cooper заемат най-ниское-

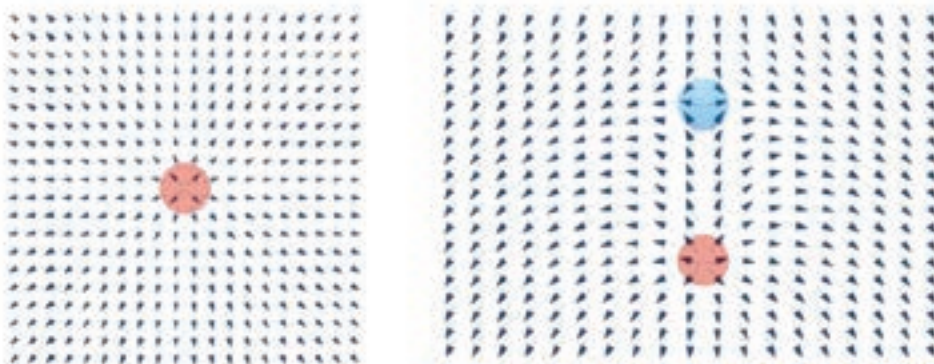
нергетичното, основно състояние на системата. В резултат на това основното състояние не е зарядово инвариантно и зарядовата симетрия се нарушава.

Времето показва, че теорията на Ландау е изключително успешна и той получи Нобелова награда по физика за 1962 г. за приложение на теорията за свръхфлуиден ^4He . Теорията беше приложена от руския физик теоретик Гинзбург за описание на феромагнитния фазов преход и от Гинзбург и Ландау за изключително успешно описание на свръхпроводимостта през 1950 г., за което Гинзбург получи Нобелова премия по физика през 2003 г.

Важна стъпка към разбиране на фазовите преходи беше направена от Н. Д. Мермин (N. D. Mermin) и Х. Вагнер (H. Wagner) през 1966 г. Те формулираха забранителна теорема, която гласи, че едномерните и двумерни системи, описвани с изотропен модел на Heisenberg с обмен на магнитните моменти само на крайно разстояние, не могат да имат феромагнитна или антиферомагнитна фаза при крайна температура. Следователно двумерните и едномерни магнитни системи не допускат фазов преход от типа на Ландау при крайна температура.

Естествено възниква въпросът за природата на фазите и фазовите преходи в плоските или едномерни материали. Решение на този проблем дадоха Дж. Майкъл Костерлиц и Дейвид Дж. Таулес през 1972 г. Те разглеждат вектора на магнетизация като функция на точките в равнината и показват, че има вихрови структури. При висока температура тези вихри са независими, невзаимодействащи и се движат свободно в равнината. При ниски температури, вихър и антивихър образуват силно свързана структура и именно това са обектите, които се движат в равнината.

За да се стигне до това заключение, се използва една много важна характеристика на вихрите **“vorticity”**- ν (завихреност). Тази характеристика показва тенденцията на магнитния момент да се върти. Ако разгледаме вектора на магнетизация като функция на точки от затворена кри-



Вляво – вихър с ядро, отбелязано в розово. Вдясно – силно свързана двойка вихър-анти-вихър с ядра, отбелязани в розово и синьо

ва около центъра на вихъра, то ν е число, което показва колко пъти векторът на магнетизация се е завъртял около центъра на вихъра. Ако въртенето е обратно на въртенето на часовниковата стрелка и вихърът е с ротационна симетрия, то $\nu = 1$. Ако въртенето е по часовниковата стрелка, то $\nu = -1$ и ние имаме антивихър. Силно свързаната система от вихър-антивихър има $\nu = 0$. Стойността на ν оказва голямо влияние при пресмятане на енергията на системата в различните фази. Костерлиц и Таулес показват, че при висока температура енергията на система от свободни вихри е по-малка и следователно се реализира такава система от вихри. При ниски температури енергията на система от силно свързани вихри-антивихри е по-малка и следователно се реализира система от свързани състояния на вихри и антивихри. От баланса на енергиите те определят и критичната температура на прехода. По този начин те доказват съществуването на необичаен фазов преход, при който не се променя симетрията на системата и следователно не е от типа на фазовите преходи, изучавани от Ландау. Това е преход от фаза с една стойност на ν към фаза с друга стойност на ν .

“Vorticity” (завихреност) е топологична характеристика. Това означава, че ако променяме магнетизацията гладко, то стойността на ν не се променя. Следователно фазовият преход на Костерлиц – Таулес не е непрекъснат както преходът, описван в теорията на Ландау. Той не променя симетрията, но води до промяна на топологичната характеристика. Затова се нарича **топологичен фазов преход**, а фазите – **то-**

пологични фази, защото се определят с топологична характеристика.

Костерлиц и Таулес прилагат теорията си към определен тип магнитни системи, към свръхпроводимостта и към свръхфлуидността. С времето тя доказва своята универсалност. Независимо от тях, по същото време руският физик В. Березинский получава аналогични резултати, поради което този преход се нарича преход на Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT). Березинский умира през 1980 г.

Експерименталното изследване на BKT-фазовия преход е много трудно. Обикновено се разглеждат тънки филми върху подходяща субстанция (която не оказва влияние на изследванията) от свръхфлуиден хелий ^4He или свръхпроводник. Експериментите се извършват при много ниски температури (около -260 градуса по Целзий). Теорията на Костерлиц – Таулес предсказва универсално поведение при критичната температура на прехода, а именно скок в плътността на свръхфлуида. Той е наблюдаван експериментално.

Особен интерес представляват **едномерните вериги от спинове**. Антиферомагнитната верига от спинове, описана с модела на Heisenberg, е точно решаем модел с помощта на математически методи, предложени от Бете. Решението показва, че минималната стойност на енергията като функция на вълновия вектор е нула (системата е gapless). Макар и без доказателства беше общопризнато, че това е вярно и за системи с произволен спин. През 1983 г. в две статии Д. М. Холдейн показа, че има фундаментална разлика между системи с полуцъл спин и системи с цял спин. Неговото твърдение (“Haldane conjecture”) е, че системите с полуцъл спин са gapless, докато за систе-

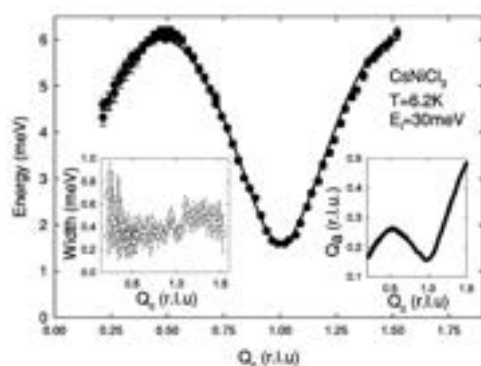
мите с цял спин минималната стойност на енергията като функция на вълновия вектор е по-голяма от нула (gapped системи).

За да достигне до този резултат, Холдейн показва, че моделът на Heisenberg за антиферромагнитна верига от спинове може да се представи като ефективна теория на три свободни безмасови Bose полета. Нетривиалният момент е, че този трикомпонентен вектор е единичен. Това условие е нетривиален начин за реализиране на взаимодействието в теорията, което води до динамично генерирана маса. За да се примири този резултат с резултата от точно решаемия модел на система със спин 1/2, Холдейн прави допълнително изследване, в което показва, че ефективната теория има още един топологичен член, наречен Θ -член. Той е пропорционален на израз, който е топологична характеристика и е специфичен за едномерните системи. За да поясним математическата същност на тази топологична характеристика, ние трябва разглеждаме двумерното пространство-време (една времева координата и една пространствена координата) като сфера в тримерното пространство чрез стереографична проекция. Единичният вектор също може да се разглежда като сфера в тримерното пространство. Тогава зависимостта на единичния вектор от пространство-времето може да се разглежда като изображение на едната сфера върху другата. Много важна топологична характеристика е колко пъти едната сфера покрива другата при това изображение. Холдейн получава в ефективната теория израз, който е пропорционален на тази топологична характеристика. Когато спинът е цял, този член е единица и не е съществен. Следователно за системи с цял спин твърдението на Холдейн, че те са с енергиен процеп, е в сила. Ако спинът е полуцял, този член е съществен и се очаква, че той е отговорен за това минимумът на енергията на системата да е нула. Този резултат не е доказан математически, но вярата в него е всеобща.

Твърдението на Холдейн, че системи със спин 1 имат процеп в енергийния спектър, е показано експериментално. На фигурата е

показана енергията като функция на вълновия момент за материала CsNiCl_3 . Енергийният процеп, т.е. минималната стойност на енергията, се вижда ясно.

Експерименталното изследване на едномерни системи е изключително трудно. В последните години успешно се разви изработването на магнитни уловки на атоми с две или три състояния и верижки от такива



уловки, които си взаимодействат. Те могат теоретично да се моделират като едномерни спинови системи със спин 1/2 или 1. Тези експерименти се наричат квантови симулации на едномерни спинови системи и са голямото бъдеще за изследване на едномерни спинови системи, които са много по-различни от тримерните и дори от двумерните.

Фактът, че преходът на Berezinskii-Kosterlitz-Thouless е топологичен преход от фаза с една стойност на топологичната характеристика на фазата в друга фаза с друга стойност на топологичната характеристика, не е осъзнат още в първите основополагащи статии на Костерлиц – Таулес и на Березинский. Това осъзнаване идва по-късно и се разпростира върху цялата физика. Увеличава се броят на статиите, посветени на системи с топологични характеристики в цялата съвременна физика.

В морето от Нобелови премии, удостоверяващи изследвания с пионерски принос във физиката на фазовите преходи, Нобеловата премия, с която са удостоени Дейвид Дж. Таулес, Дж. Майкъл Костерлиц и Ф. Дънкан Холдейн, не е канка в морето, а вълна, която непрекъснато расте. ■

Вредни вещества в домашния прах

Материалният прогрес на човечеството неминуемо е съпроводен с редица рискове, които застрашават здравето на всички нас. Един от тези рискове е увеличаващият се брой на вредни за организма вещества, които се съдържат в околната среда. Тези вещества, които се означават като „ксенобиотици“, сиреч – чужди за земните обитатели химически съединения – замърсяват въздуха, водата и почвата. Важна задача на учените е да изследват възможните причини и последици от проникването на ксенобиотици в пространството, което обитаваме. Нашето списание се старее да информира обществеността за новостите, свързани с разпространението и биологичните ефекти на тези вещества. За един практически неизучен досега аспект от разпространението и действието на ксенобиотиците съобщават учени от Университета „Джордж Вашингтон“ в Съединените щати. Наскоро г-р Ами Зота (Ami Zota) и съавтори от този университет публикуват резултати (в специализираното списание „Environmental Science & Technology“, 2016) от обширно изследване за наличието на различни ксенобиотици в домашния прах, с който практически всеки човек влиза всекидневно в контакт.

Досега се знаеше много добре, че в домашния прах се съдържат много и то най-различни микроорганизми, които могат да предизвикат нежелани ефекти, например алергии. Обаче на съдържащите се в праха ксенобиотици малцина бяха обръщали задълбочено внимание. По този повод Ами Зота отбелязва, че „Нашето изследване е първият обхванен анализ на битови химикали в домашния прах“. В своя труд авторите на публикуваното научно съобщение се основават върху 27 отделни проучвания, в които са анализирани проби прах на домакинства от 14 различни щата на САЩ. В резултат от проучването се е оказало, че в пробите са били открити 45 различни вещества с възможен вреден за човешкия организъм ефект. Сред намерените ксенобиотици са доказани вещества от групите на фталатите, фенолите, поли-

бромираните дифенилетири, перфлуорираните въглеводороди и някои други. Фталатите например, които попадат в домашния прах от някои полимерни материали, могат да достигнат концентрации от 7,7 микрограма на един грам прах. Ще отбележим, че някои фталати представляват потенциални канцерогени, могат да повлияят и върху ендокринната система, както и да повишат риска от възникването на астма при деца. От своя страна, някои феноли, които се използват като съставки в почистващи препарати, също имат канцерогенно действие. Подобен ефект проявяват и перфлуорираните въглеводороди.

Домашният прах и съдържащите се в него ксенобиотици проникват в организма по различен начин. Най-често това става с вдишания въздух, но също и през кожата, най-вече на недобре измитите ръце. Най-рискова група са малките деца, особено онези, които все още си играят на пода.

Ами Зота и съавтори отбелязват в своя труд, че наличието на няколко различни по произход и характер ксенобиотици в праха може да доведе до усилването, до мултиплицирането на тяхния вреден за здравето ефект. Тяхната препоръка за предпазването от вредното влияние на съдържащите се в домашния прах вещества е жилищата, които обитаваме, да се почистват колкото се може по-редовно с ефективни прахосмукачки.

Намерените данни за съдържанието на вредни за здравето вещества в битовия прах очевидно се отнасят до запрашаването на жилища на някои щати в Америка. Вероятно тези резултати ще събудят интерес и към проучвания на замърсен с ксенобиотици прах и в други страни, включително и в Европа. Изводите на американските учени обаче са достатъчно красноречиви. Потвърждава се старата истина, че едно жилище трябва да се поддържа чисто от битов прах не само от естетични, но и от здравословни побуди.

По Environmental Science & Technology