

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

外加隨機位能下二維磁通子系統之拓樸長程序的研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2112-M-032-014-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：淡江大學物理系

計畫主持人：陳惟堯

計畫參與人員：北京師範大學物理系教授 馮世平

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 9 月 29 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果精簡報告

外加隨機位能下二維磁通子系統之拓樸長程序研究

Topological long-range order in two-dimensional vortex system with randomly distributed external potential

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC-92-2112-M-032-014

執行期間：92年8月1日至93年7月31日

計畫主持人：陳惟堯

計畫參與人員：北京師範大學物理系教授 馮世平

成果報告類型：精簡報告

執行單位：淡江大學

中華民國93年9月9日

研究計畫中英文摘要：

(一) 中文摘要：

關鍵詞:KT 相變; 拓樸長程序; 束縛拓樸激發對

在二維系統中, N. D. Mermin 已證明並沒有長程序(long-range order)存在, J. M. Kosterlitz 和 D. J. Thouless 則提出一個新的長程序觀念, 亦即拓樸長程序(topological long-range order)。在溫度低於臨界溫度時 ($T < T_{KT}$), 正拓樸荷的拓樸激發, 與負拓樸荷的拓樸激發, 形成束縛態, 也就是在超導系統中之磁通子與反磁通子對(vortex-antivortex pair), 這就是所謂拓樸長程序, 其序參量相關函數(correlation function)成代數衰減。但在高溫時($T > T_{KT}$), 此等束縛態部份被熱擾動所破壞, 其序參量相關函數成指數衰減, 當距離小於相干長度(correlation length)時, 正拓樸荷的拓樸激發, 與負拓樸荷的拓樸激發, 仍形成束縛態, 但當距離大於相干長度時, 即形成個別的自由拓樸激發, 亦即在超導系統中之自由磁通子。

當溫度從低於臨界溫度, 躍遷至高於臨界溫度時, 此種拓樸長程序遭到破壞, 從具有非常稀少的自由磁通子態, 躍遷至一具有非常多的自由磁通子態(其密度與相干長度之平方成反比), 此等拓樸長程序, 與無序之轉變稱為 KT 相變(phase transition)。很多物理量, 在臨界溫度兩側會有完全不同的特性, 像超導薄膜之電阻係數。在低於相變溫度時, 為非線性(non-linear)關係, 但在高於相變溫度時, 即為線性的歐姆(linear Ohmic-type)行為。但在 KT 相變時, 序參量, 及其高階微分, 皆為連續, 故 KT 相變亦被稱為無限階相變。

我們曾研究磁通子動力學, 及當溫度低於 KT 相變臨界溫度下, 隨機分佈之弱釘軋源, 對二維超導薄膜磁通子對之生成(vortex-antivortex pair generation), 以及非線性磁通流動電阻係數(nonlinear flux-flow resistivity)多年, 最近又與北京師範大學物理系馮世平教授合作研究, 有關隨機分佈之弱釘軋源, 及磁通子變形(deformation)對磁通子對之生成(vortex-antivortex pair generation), 及非線性磁通流動電阻係數之影響。本研究計畫則將考慮, 針對任意分佈之外加位能情形下之拓樸長程序、與無序之轉變情形。我們發現集體釘軋重整(renormalizes)基本拓樸激發(elementary topological excitations)之能量及電荷, 因而壓抑拓樸長程序與無序之相變溫度, 及增加序參量相干函數之相干長度。

(二) Abstract :

Keywords: KT phase transition; topological long-range order; bounded topological excitation pair

N.D. Mermin demonstrated that long-range order could not exist in the two-dimensional system. J. M. Kosterlitz and D. J. Thouless propose a new concept about long-range order, namely, the topological long-range order. At temperature lower than the critical temperature ($T < T_{KT}$), the topological excitation with positive topological charge and those with negative topological charge form a bounded pair. These are the vortex-antivortex pairs in two-dimensional superconducting films. The system of bounded pairs is called the topological long-range order. The correlation function of order parameter decays algebraically. At higher temperature ($T > T_{KT}$), parts of these bounded pairs were broken by thermal fluctuation, the correlation function of order parameter decays exponentially. When the distances between the positive and negative topological excitations are less than the correlation length, they still form bounded pairs. However, when the distances between them are greater than the correlation length, they form individual free excitations in two-dimensional superconducting film, these corresponding to free vortices and free antivortices.

When the temperature changes from below the critical temperature to above the critical temperature, the topological long-range order is destroyed. The system changes from a state of very few free vortices to a state of many free Vortices (its density is proportional to the inverse square of the correlation length). This kind of transition from topological long-range order state to topological disorder state is called the KT phase transition. Many physical properties have different behavior on both sides of the critical temperature, such as the resistivity of superconducting film at temperature below the critical temperature is highly nonlinear, however, at temperature above the critical temperature, it is linear Ohmic-type behavior. However, the order parameter and its higher order derivatives are continuous at the KT phase transition. Hence, the KT phase transition is also called the infinite order phase transition.

We have worked on the vortex dynamics and the topic of vortex-antivortex pair generation and nonlinear flux-flow resistivity under the influence of randomly distributed of weak pinning sites below the KT phase transition temperature for many years and recently cooperated with, the department of Physics of Beijing Normal University, Professor Shiping Feng on the effect of randomly distributed weak pinning sites and vortex deformations on the vortex-pair generation, and nonlinear flux-flow resistivity below the KT transition temperature.

In this research project, we would like to consider the topological order-disorder phase transition with a random distribution of external potential. We found that the collective pinning renormalizes the energy and charge of the elementary topological excitations, hence, suppresses the topological order-disorder phase transition temperature, and increases the correlation length of the correlation functions of the order parameter.

報告內容:

前言:

磁通子動力學是一相當熱門的研究領域，我們曾針對溫度低於 KT 相變溫度時，隨機分佈之弱釘軋源，對超導薄膜磁通子對之生成(vortex-antivortex pair generation)，以及非線性磁通流動電阻係數(nonlinear flux-flow resistivity)多年，最近又與北京師範大學物理系馮世平教授合作研究，有關隨機分佈之弱釘軋源，及磁通子變形(deformation)對磁通子對之生成(vortex-antivortex pair generation)，及非線性磁通流動電阻係數之影響。本研究計畫則將考慮，針對任意分佈之外加位能情形下之拓樸長程序、與無序之轉變情形。這迄今仍是一個尚未解決的問題，這是一個相當複雜、具挑戰性的問題，在理論及應用上，均極為重要。

本研究計畫”以外加隨機位能下二維磁通子系統之拓樸長程序”(Topological long-range order in two-dimensional vortex system with randomly distributed external potential)則將研究隨機分佈之外加位能情形下之拓樸長程序、與無序之轉變情形，我們將假設此隨機之外加位能為一弱位能，並考慮其它拓樸偶極對(topological dipole pairs)存在的屏蔽效應(screening effect)，對其它拓樸偶極對之影響，在平均場的框架下，討論隨機的外加位能，對 KT 相變臨界溫度，以及介質常數的效應。當然討論此一相當複雜的物理系統，將可能遭遇到一些困難，但我們可利用場論及數學技巧來解決。

研究目的與文獻探討:

雖然 N. D. Mermin [1] 已證明，在二維系統中，並沒有長程序(long-range order)的存在，然而 J. M. Kosterlitz 和 D. J. Thouless [2] 則提出一個新的長程序觀念，亦即拓樸長程序(topological long-range order)。當溫度低於臨界溫度 ($T < T_{KT}$) 時，其正拓樸荷的拓樸激發，與負拓樸荷的拓樸激發，形成束縛態，也就是在超導系統中之磁通子與反磁通子對(vortex-antivortex pair)，此即為所謂的拓樸長程序，而其序參量相關函數(correlation function)係成代數衰減型態。但是當在高溫($T > T_{KT}$)時候，此等束縛態部份被熱擾動所破壞，而其序參量相關函數則呈指數衰減形式，當距離小於相干長度(correlation length)時，正拓樸荷的拓樸激發，與負拓樸荷的拓樸激發，仍能形成束縛態，但當距離大於相干長度的時候，則形成個別的自由拓樸激發，亦即在超導系統中之自由磁通子。

此種拓樸長程序，當溫度從低於臨界溫度，躍遷至高於臨界溫度時，會遭到破壞，從具有非常稀少的自由磁通子態，躍遷到一具有非常多的自由磁通子態(其密度與相干長度之平方成反比)，此等拓樸長程序與無序之轉變，稱為 KT 相變(phase transition)。而很多物理量，會在臨界溫度的兩側，呈現完全不同的特性，像超導薄膜之電阻係數，在低於相變溫度時，為非線性(non-linear)的關係，但是在高於相變溫度的時候，即呈現線性的歐姆(linear Ohmic-type)行為。但在 KT 相變時，序參量，及其高階微分，皆為連續，故 KT 相變亦被稱為無限階相變。

本研究計畫則考慮，針對任意分佈之外加位能(randomly distributed external potential)情形下之拓樸長程序、與無序之轉變情形。這迄今仍是一個尚未解決的問題，這是一個相當複雜、具挑戰性的問題，在理論及應用上，均極為重要。

國內外有關本計畫之重要參考文獻：

1. N. D. Mermin, and H. Wanger, *phys. Rev. Lett.* 17 (1966) 1133.
2. V. L. Berezinskii, *Sov. Phys. JETP* 32 (1971) 493.
3. J. M. Kosterlitz, and D. J. Thouless, *J. Phys. C* 6, (1973) 1181.
4. J. M. Kosterlitz, *J. Phys. C* 7, (1974) 1046.
5. D. R. Nelson, and J. M. Kosterlitz, *Phys. Rev. Lett.* 39 (1977) 1201.
6. P. B. Wiegmann, *J. Phys. C* 11 (1978) 1583.
7. A. M. Kadin, K. Epstein, and A. M. Goldman, *Phys. Rev. B* 27 (1983) 6691.
8. B. I. Ivlev, J. L. Mora'n-Lo'pez and R. S. Thompson, *Phys. Rev. B* 52 (1995) 13532.
9. W. Y. Chen, and M. J. Chou, *Phys. Lett. A* 276 (2000) 145.
10. W. Y. Chen, and M. J. Chou, *Phys. Lett. A* 280 (2001) 371.
No. NSC- 88- 2112-M-032-014.
11. W. Y. Chen, and M. J. Chou, *Phys. Lett. A* 291 (2001) 315.
12. W. Y. Chen, and M. J. Chou, *Supercond. Sci. Technol.* 15 (2002) 1071.
No. NSC 89-2112-M-032-027.
13. W. Y. Chen, M. J. Chou, and Shiping Feng, *Phys. Lett.* 310, 80 (2003).
No. NSC 89-2112-M-032-027.

研究方法:

本研究計畫將考慮，針對任意分佈之外加位能(randomly distributed external potential)情形下之拓樸長程序(topological long-range order)、與無序(disorder)之轉變情形。這迄今仍是一個尚未解決的問題，並且是一個相當複雜、具挑戰性的問題。

我們將假設，此隨機之外加位能為一弱位能，並考慮其它拓樸偶極對(topological dipole pairs)存在的屏蔽效應(screening effect)，對其它拓樸偶極對之影響，在平均場(mean field)的框架下，討論隨機的外加位能，對KT相變臨界溫度，以及介質常數的效應。當然討論此一相當複雜的物理系統，將可能遭遇到一些困難，但我們可應用相關的場論及數學技巧來處理這些問題。

結果與討論:

”以外加隨機位能下二維磁通子系統之拓樸長程序”(Topological long-range order in two-dimensional vortex system with randomly distributed external potential)的研究計畫，經理論計算，這些研究工作的主要內容如下：

一、主要研究工作進展和研究成果：

本計畫研究工作策重於，在二類超導薄膜集體釘軋(collective pinning)對拓樸長程序與無序相變溫度之影響。應用泛函積分，與及場論相關技巧，研究針對於集體釘軋(collective pinning)之雜亂平均(random average)位能，以及雜亂相干強度，及其長度與拓樸長程序與無序(topological long-range order-disorder)相變溫度(phase transition temperature)之相互關係，計算發現集體釘軋重整拓樸激發元之電荷與能量，因而減弱拓樸長程序之相變溫度，並增加序參量之相干函數之相干長度。而當雜亂相干強度增加，或減少其對應之相干長度時，亦將降低其相變溫度。由於研究工作進行非常順利，已發表和待發表的論文共五篇。

二、已發表和待發表的論文目錄：

1. Wei Yeu Chen, Ming Ju Chou, and Shiping Feng, The feature of quantum and thermal fluctuations on collective pinning and critical current in superconducting film, Phys. Lett. A 316, 261 (2003).

2. Wei Yeu Chen, Ming Ju Chou, and Shiping Feng, Effect of deformations due to collective pinning on vortex-antivortex production in superconducting film, Phys. Lett. A 310, 80 (2003).
3. Jianhui He, Shiping Feng, and Wei Yeu Chen, Energy dependence of commensurate neutron scattering peak in doped two-leg ladder antiferromagnet $Sr_{14-x}Ca_xCu_{24}O_{41}$, Phys. Rev. B 67, 094402 (2003).
4. Feng Yuan, Jinong Qin, Shiping Feng, and Wei Yeu Chen, Charge transport in underdoped bilayer cuprates, Phys. Rev. B 67, 134504 (2003).
5. Wei Yeu Chen, Ming Ju Chou, Shiping Feng, The effects of collective pinning on topological order-disorder phase transition in type-II superconducting films (to be published)

