

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

## 非線性科學在奈米科技(1/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2112-M-009-025-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：國立交通大學物理研究所

計畫主持人：張正宏

計畫參與人員：黃文敏 鄧德明

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 5 月 29 日

## 中、英文摘要

### (A1) 磁偶極棘輪模型:

藉由空間或時間的對稱性破缺，無序擺動的電偶極可以驅動相鄰的電偶極作有序單向旋轉。如何破壞磁偶極(甚至電磁偶極)的對稱性得到相似於電偶極的單向旋轉。

### (A2) 生物馬達效率及 stochastic resonance:

探討不同生物馬達的隨機共振，何種馬達的化學反應算符有高效率，non-Markovian 現象如何從這些簡單的算符中產生，週期性構象變化的傳輸原理是否可被用來設計 quantum pump。

### (B1) 複雜自旋軌道耦合的 spin current 行為:

推導有 strain 自旋軌道耦合系統的自旋行為，解釋最近實驗結果。借助目前在無外磁場 Rashba 耦合的經驗，研究在不同外磁場下及有 strain 系統的自旋流傳輸。

### (B2) 電子自旋原件上的傅立葉分解:

通過雙路徑窄通道的自旋流對外電場有類似 sin 函數的規律振盪。此振盪可實現 Datta 自旋電晶體 0 跟 1 的訊號。多路徑的自旋將如不同 sin 疊加。找尋造出如方波應用上方便的特別路徑。

### (C1) 量子混沌特徵在介觀自旋系統:

探討古典 ergodicity 行為影響介觀自旋系統有多深。在 Rashba 耦合下，可積及隨機系統比混沌系統擁有較長的自旋鬆弛時間。在 Dresselhaus 及更複雜耦合下是否影響仍存在。

### (C2) 自旋回聲存在與否:

Echo 現象涉及系統有無長期記憶。最近 Loshmidt 及 dynamical 回聲在半經典及 supersymmetry 理論框架下被研究。然而都只考慮電子行為。帶有自旋的這兩種回聲以上結果仍一樣嗎?

關鍵詞: 生物馬達，棘輪，隨機共振，non-Markovian 現象，

電子自旋學，Rashba 耦合，strain，自旋流傳輸，Datta 自旋電晶體，

量子混沌特徵，介觀混沌系統，自旋鬆弛，回聲。

### (A1) Magnetic dipole ratchet model:

One of our recent works shows that due to temporal and spatial symmetry breakings, random vibrating dipoles are able to drive their ambient dipoles to rotate unidirectionally. This behavior indicates that proteins with inhomogeniously distributed charges could catch noisy to rotate their ambient proteins. Can this behavior happen between two microscopic systems interacting with magnetic force? How to break the symmetry in magnetic (and even

electric-magnetic) dipoles to obtain unidirectional rotation?

(A2) The efficiency of biological motors and stochastic resonance:

Extend our recent results about stochastic resonance in ion pumps to different kinds of biological motors. Study which kind of chemical reaction operator has high efficiency. Discuss how a non-Markovian effect can come out from these simple operators. Investigate whether it is possible to design quantum pumping using the transport principle of these ion pumps.

(B1) Spin current behavior under complex spin-orbit interactions:

Using perturbation theory or exact derivation to study spin dynamics under complex spin-orbit interactions like those in strained systems. Discuss spin current transport under these interactions subjected to external magnetic fields and compare the results with recently discovered experimental results.

(B2) Fourier expansion in spintronics devices:

Recently it is known that the spin current through narrow double-loop systems exhibits regular oscillations similar to sinusoidal functions, which can be used to realize the 0 and 1 signals in the Datta-Das Spin-FET. For multi-loop systems the oscillation will be like superposition of many sinusoidal functions, similar to Fourier expansion. How to design multi-loop systems to produce special functions is a theoretically interesting question. Its answer also will benefit application, especially if certain simple function like square wave can be produced.

(C1) Signature of quantum chaos in mesoscopic spin systems:

To what extent the ergodicity property of a classical dynamics can affect its quantum spin systems? Recently we have found that under Rashba spin-orbit interaction classically chaotic and stochastic systems have much longer spin relaxation times than integrable systems. Is this behavior general for all kinds of spin-orbit interactions? To understand this question Dresselhaus interaction will be considered first. Different kinds of chaotic and regular billiards will be tested.

(C2) Spin echo exists?

Echo can be seen in many nonlinear systems. This phenomenon reflects the fact that some dynamical systems have long time memory. Spin echo is important and is related to the reliability of spin information storage. Recently Loschmidt and dynamical echos are studied in the framework of semiclassical formalism and supersymmetry formalism. But in these studies only echos of spinless particles were considered. Whether particles with spin have spin echos is an interesting problem to study.

關鍵詞(keywords)

Biological motor, ratchet, stochastic resonance, non-Markovian effect, spintronics, Rashba interaction, strain, spin current transport, Spin FET, signature of quantum chaos, mesoscopic chaotic system, spin relaxation, echo。

報告內容：

**(1) 前言：**

此研究為一跨領域的三年計劃。內容包含

(A)生物馬達，(B)電子自旋學，及(C)量子混沌，三個領域。

**(2) 研究目的：**

(A1) 磁偶極棘輪模型：

在巨觀世界我們知道蒸汽機以什麼方式將能量轉成作功。然而，在微觀世界能量如何被利用仍是個了解有限的問題。假使人們對人工機械的研究想往奈米尺度推進，能量傳遞的途徑及效率是個遲早無法逃避的問題。而生物馬達歷經演化篩選，是高效率的奈米尺度機械。它無疑是需要先了解的系統。其中一種能量傳遞的機制是由空間或時間的對稱性破缺來達成[1]。藉由這種破缺，系統可從非平衡環境中的無序噪聲汲取能量來作功。依照這個法則，最近我們發現無序擺動的電偶極可以驅動相鄰的電偶極作有序單向旋轉[2]。磁力是生命體中另一種交互作用。如何破壞磁偶極(甚至電磁偶極)的對稱性，得到相似於電偶極的單向旋轉是我們想要了解的問題。

(A2) 生物馬達的效率及隨機共振：

離子泵浦(ion pump)是個典型的生物馬達。不久前實驗發現電場噪聲對離子傳輸效能可以是建設性的，首度暗示這種生物馬達有隨機共振的特性。這個特性最近被我們的模擬計算證實[3]。除了驗證實驗參數區內的馬達傳輸功能，我們的計算更標示出電場噪聲對此類離子泵浦完整的建設性及破壞性參數區。這項工作將繼續被推展到其它類生物馬達上。此外，生物馬達的共通性是週期性構象變化。此變化可藉由多維動力系統上的演化算符來描述。一個有趣的問題是生物馬達高效率作功能力是此類算符的普遍性質，或是生物體篩選到了合適的算符參數。其次，這種週期性構象變化的傳輸原理是否可被用來設計量子泵浦。這類軟凝態及硬凝態系統間的相似性是另一個有趣方向。最後，假如生物馬達是由這類簡單的演化算符決定，生物系統的非馬可夫(non-Markovian)現象源自何方。

(B1) 複雜自旋軌道耦合的自旋流行為：

電子自旋學的應用被期待為下一波工業革命。然而要實現這個理想，許多領域的技術需要先被克服，包括自旋流的製造(generation)，注入(injection)，傳輸(transport)及自旋資訊儲存(spin information storage)。近來 III-V 族半導體異質結構(heterostructure)成為大家關注的系統。由於可觀的自旋軌道耦合項(spin-orbit interaction)，電子在這類二維系統運動時，自旋的方向能夠被垂直於二維量子井(quantum well)的電場(gate

voltage) 操控。在這類系統，Rashba 項為廣為人知的自旋軌道耦合項。它存在於沒有 strain 的理想系統。假使系統有 strain，自旋軌道耦合將不同於目前認識的型式。最近開始有這類系統的實驗結果。藉助我們過去在無外磁場 Rashba 耦合的經驗[4, 5]，未來將推展到在不同外磁場下以及有 strain 系統的自旋軌道耦合。

(B2) 電子自旋流原件上的傅立葉分解:

幾年前 Datta 及 Das 仿微場效電晶體(MOSFET)，提出一個自旋電晶體(SFET)的構想，如今成為一個廣為討論的題目。在 SFET 裏頭 0 跟 1 的訊號可由通過半導體材料的自旋流方向來決定。最近我們發現通過一個雙路徑窄通道的自旋流自旋方向會對外電場作類似 sin 函數的規律振盪[4]。這種振盪成為實現 SFET 的 0 跟 1 調控的一種可能。然而由實驗觀點而言，振盪太快不易操作。假使振盪函數能變成方波將方便許多。由於電子在平面上運動和它的自旋在單位球面上的運動是一對一對應，控制電子路徑相當於控制自旋方向。多路徑的自旋將形成不同 sin 函數的組合，造成如傅立葉分解疊加的效果。如何組合特別路徑，造出實驗上方便的自旋流振盪將是理論與應用上的有趣題目。

(C1) 量子混沌特徵在介觀自旋系統:

量子世界沒有古典世界定義下的混沌是廣為人知的現象。雖然量子世界看不到嚴格的混沌現象，然而量子世界裏常存在某些特性，能夠透露我們一個系統的相對應古典系統是混沌與否。這類特性被稱為量子混沌特徵(signature of quantum chaos)。尋找這類古典與量子間的關聯是量子混沌研究領域的重點之一。而介觀物理的尺度是觀察這類關聯的合適環境。最近我們發現，量子點從微觀放大到介觀的過程，古典動力系統的歷遍(ergodicity)行為會開始影響到量子系統的自旋鬆弛[5]。研究告訴我們在 Rashba 耦合下，可積及隨機系統比混沌系統擁有較長的自旋鬆弛時間，甚至有些可積系統在時間無限久之後仍幾乎不鬆弛。介觀物理系統的自旋行為受古典混沌多大影響，最近才剛開始受到注意。這影響有多普遍，是有待探討的問題。例如在 Rashba 自旋軌道耦合下看到的行為是否也適用於 Dresselhaus 自旋軌道耦合及它們的組合。

(C2) 自旋回聲(spin echo) 存在與否:

回聲(echo)是許多非線性系統裏的現象。此現象涉及系統的動力行為會不會回到初始態以及系統有無長期記憶的問題。最近兩種回聲被提出來研究:其一為 Loshmidt 回聲。在半經典理論的框架下，此種回聲強度被證明不受外微擾強度影響。其二為動態系統回聲(dynamical echo)。在超對稱理論的框架下，它被證明存在。然而這些研究都只考慮電子行為，沒涉及自旋。帶有自旋的 Loshmidt 回聲及動態系統回聲是我們將探討的題目。這些問題不但理論上有趣，就應用上也有它們的重要性，因為它直接牽涉到系統自旋資訊儲存可靠性的問題。

### (3) 研究方法及文獻探討:

(A1) 磁偶極及電磁偶極棘輪模型仿照電偶極模型[2]的處理方式。先理論推導整個系統位勢。求出該位勢對系統中旋轉子角度的函數。尋找破壞對稱性的參數，製造棘輪

位勢以獲取單向旋轉。可能遭遇之困難只在於公式的複雜度與長度，非原則上的問題。

(A2) 以算符描述不同生物馬達動態行為。加噪聲到電場如[3]。觀察隨機共振。用外場驅動該常數。尋找機率常數，外場，及最大效率之間的關係。尋找同性質例子。例如粗細不同水管相連的水槽之間的水流，凝體或量子多態系統態間機率的變化。增加或複雜化態間的機率常數，尋找系統受外界刺激的非馬可夫因素。可能遭遇之困難只在於例子簡不簡單。若無定量例子，可取定性例子。

(B1) 延續 Rashba 自旋軌道耦合的結果[4, 6]，加入磁場項，改變古典軌道，觀察磁場對自旋流傳輸的影響。整合各類結果作比對。理論推導有 strain 的自旋軌道耦合。可能遭遇之困難為計算的複雜度。假如計算過程太複雜，可考慮先使用微擾法，對微弱 strain 作展開。

(B2) 先考慮不對稱雙路徑窄通道系統。寫下不同通道的自旋算符，將自旋運動連結上電子運動。由雙路徑系統行為組合合適的多路徑系統。由於正負振盪疊加，自旋流振盪降低可以預期。設計振盪最小的路徑。探討有沒有可能得到方波函數及其他想要的任意函數。沒有特別可能會遭遇的困難。

(C1) 模仿 Rashba 自旋軌道耦合，將 Dresselhaus 自旋軌道耦合放入自旋算符。將電子放入不同的可積及混沌幾何系統，作非交互作用電子 Monte Carlo 計算。求出集體自旋量平均。觀察自旋鬆弛。比較不同系統的鬆弛行為。沒有特別可能會遭遇的困難。

(C2) 仿照 Loshmidt 回聲的半經典理論，將 Green 函數對古典路徑的展開。將自旋算符[4, 5]付上半經典 Green 函數，測試回聲效應。對於混沌及無序系統，仿照不含自旋的 dynamical echo 的超對稱理論證明過程。檢驗相對應的自旋回聲效應存在與否。半經典理論的部分較容易。超對稱理論的部分較複雜，遇困難可和做高能的人討論。

#### (4)文獻:

[1] C.-H. **Chang**,

Ratchet models using driving forces generated by deterministic chaotic maps,  
Phys. Rev. E 66, 015203 (Rapid comm.) (2002).

[2] C.-H. **Chang** and T.Y. Tsong,

Rotary motor powered by stochastic uncorrelated dipoles,  
Phys. Rev. E 72, 051901 (2005).

[3] C.-H. **Chang** and T.Y. Tsong,

Stochastic resonance in a biological motor under complex fluctuation,  
Phys. Rev. E 69, 021914 (2004).

- [4] C.-H. **Chang**, A.G. Mal'shukov, and K.-A. Chao,  
Spin transmission through quantum dots with strong spin-orbit interaction,  
Phys. Lett. A 326, 436-441 (2004).
- [5] C.-H. **Chang**, A.G. Mal'shukov, and K.-A. Chao,  
Spin relaxation dynamics of quasiclassical electrons in ballistic quantum dots with strong  
spin-orbit coupling,  
Phys. Rev. B 70, 245309 (2004).
- [6] C.-H. **Chang**, A.G. Mal'shukov, and K.-A. Chao,  
A signature of quantum chaos in spin current transport, (in preparation).

## (5) 結果與討論 (含結論與建議)

### 已完成的工作:

- Datta 及 Das 自旋電晶體 (SPIN-FET) 可實現的物理範圍 (B1)。
- Rashba 自旋軌道耦合下 1D 量子線的超慢自旋鬆弛 (B1)。
- Dresselhaus 自旋軌道耦合下的自旋鬆弛 (B1)。
- 電子自旋流原件上的傅立葉分解 (B2)。
- 磁性蛋白質。
- 基因槍內大分子穿透細胞膜機制。

### 部份完成的工作:

- 磁偶極棘輪模型 (A1)。
- 生物馬達的效率及隨機共振 (A2)。
- 量子混沌特徵在介觀自旋系統 (C1) 完成。
- Rashba 自旋軌道耦合下量子雙環。
- 自旋軌道耦合系統的混沌共振腔。

## (6) 計畫成果自評部份

(請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等)

與原計畫相符程度: 除了完成原計劃目標還擴展到其他相關題目。

達成預期目標: 第一年完成三年計劃中的 40%。

是否適合在學術期刊發表: 是。已完成論文及 preprints 如下:

Publications (2005/08-2006/05)

著作名稱	作者	Impact factor	出版年月
Rotary motor powered by stochastic uncorrelated dipoles, Phys. Rev. E 72, 051901, 2005 (SCI)	C.-H. <b>Chang</b> and T.Y. Tsong	2.352	2005/11
Mn,Cd-metallothionein-2: A room temperature magnetic protein. Biochem. Bioph. Res. Co. 340, 1134, 2006 (SCI)	C.-C. Chang, S.-F. Lee, K.-W. Sun, C.-C. Ho, Y.-T. Chen, C.-H. <b>Chang</b> , L.-S. Kan	2.904	2006/02
Noncollinear exchange coupling in a trilayer magnetic junction and its connection to Fermi surface topology Phys. Rev. B, 2006 (SCI)	W.-M. Huang, C.-H. <b>Chang</b> , and H.-H. Lin	3.075	2006/05
Semiclassical Methods for multi-dimensional systems bounded by finite potentials	W.-M. Huang, C.-H. <b>Chang</b> , and C.-Y. Mou		submitted
Two-State Protein Oscillator for Signal Sensing and Energy Transduction by the Brownian Ratchet Mechanism	C.-H. <b>Chang</b> and T.Y. Tsong		submitted
Intracellular delivery can be mediated by bombarding cells or tissues with accelerated molecules or bacteria without the need for carrier particles (submitted)	W.-N. Lian, C.-H. <b>Chang</b> , Y.-J. Chen, R.-L. Dao, Y.-C. Luo, J.-Y. Chien, S.-L. Hsieh and C.-H. Lin		submitted