

粒子在聲波中如何運動？

中央大學物理系 伊 林

聲波無所不在，當由眾多粒子組成的介質如固體、液體、氣體、或電漿體被壓縮或舒張時，訊息會以縱波的形式向前傳播。但你瞭解粒子在聲波中的微觀運動嗎？粒子如何與背景波動交互作用？受波動作用的粒子又如何組成與延續波動？在固體，問題似乎不難以許多整齊串連的彈簧想像；但是對於較複雜的多體系統如液體、氣體、或電漿中，在沒有波動時，粒子的運動與相互位置就已十分複雜，遑論波動。

其實我們在普物課本中就已初步建構氣體中聲波的圖像，但是僅限流體力學適用的連續範疇，在波動中展現往復週期運動與密度週期改變的是仍含有巨大分子數目的流體單元(fluid element)，並沒有進入微觀尺度的不連續範疇。另一方面在電漿物理的教科書中[1]，電子或離子的縱向密度波，也是一種典型的聲波，粒子透過較長距離的靜電力，交互作用，支撐波動的傳遞。在電漿波動領域極為重要的 test particle 模型中，粒子在像洗衣板般起伏位能中運動；如同一衝浪者，粒子與波動場可透過交互作用，交換能量，造成粒子速度分佈與波動強度的改變 [1]，但此議題並不能回答前述問題如粒子的微觀運動，如何透過微觀運動支撐波動。

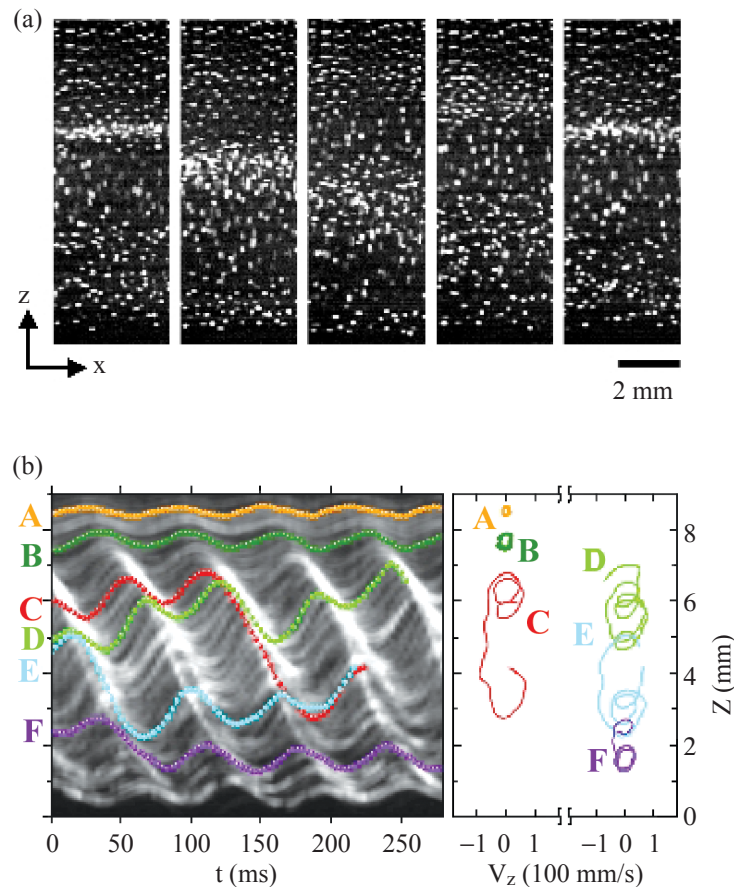
從實驗的觀點，無法回答這些問題，其實與無法直接在微觀尺度觀測到甚小的粒子有關。而近二十年來始為科學家較深度探索的微粒電漿(dusty plasma)系統，倒成為一個提供普適性答案的極佳平台。微粒電漿為具有大量微米尺度微粒懸浮於低壓氣態電漿的多體系統，星際電漿、電離層、土星環、實驗室電漿系統中均可見微粒電漿的蹤跡。因電漿中電子的運動速度遠較離子高，可將微粒充電至大量負電荷（一個微粒約可負載一萬個電子），形成一強耦合的多體系統 [2]。

我們在中大物理系的團隊，於 1994 年首度成功以實驗證實懸浮微粒可自組成晶格、液體、與氣體結構，開啓了強耦合微粒電漿研究的風潮

[2,3]。懸浮微粒的間距約為次毫米，可透過光學顯微鏡與數位影像技術，直接追蹤每一微粒的軌跡，成為一個探索多體系統微觀運動的利器。微粒電漿中，微粒遠較原子或電子大的慣性，強大的庫倫作用力，可支撐數十 Hz 伴隨微粒縱向運動的低頻微粒電漿聲波，是個十數年來重要的議題，但缺乏直接微觀觀測 [2,4-11]。我們的團隊雖在十餘年前領先以實驗證實微粒電漿波的存在[6]，但近年的研究較專注於液態中熱擾動與外剪力下的動力行爲研究[12]，直至去年初，始以新購的高速數位攝影機，對微粒電漿聲波的低頻運動行爲展開研究。

在流向電極的離子流驅動下，微粒電漿波可自組產生。我們發現，隨波動震幅在空間中的增長，液態的微粒電漿，可被加熱成氣態。在液態規律密度波中，微粒進行有序的小震幅運動，但在氣態的規律密度波中，則展現混沌的往復運動。在一個高微粒密度波峰前，微粒逆向駛入波峰，被波峰的巨大排斥力減速，當進入波峰形成波峰的一部份時，與波峰的相對速度甚低，因此與波峰順向運動，最終進入波峰後側，逆向滑入波谷，重獲足夠動能，再次逆向迎向次一波峰。在波峰附近，因幾乎喪失大部分動能，除維持高密度波峰的往前推進外，亦造成停留期的不確定，為前述混沌往復運動的主因（見圖一）。對於那些在波峰處幾乎完全喪失相對動能的粒子，可被波峰推行極長的距離，可視為共振加熱。我們也發現在規律波動中，微粒的速度分佈異於馬克斯威爾分佈，而為雙峰分佈，僅有甚低比例粒子被共振加熱。但在紊流波(turbulent wave)中，分佈則趨向馬式分佈。此等自組密度波中，我們並未觀測到在教科書理論所述的波谷加熱(trough heating)現象[1]。

大尺度的規律波動中，隱含了微觀尺度的混沌運動，如果想瞭解亂序間的奧秘，建立連接聲波中 Euler 與 Lagrange 觀點的微觀動力圖像，不妨一讀我們的論文[13]。



圖一 (a)高速錄影機拍攝的序列照片(六十分之一秒間隔)顯示向下傳播的微粒電漿聲波。(b)不同高度微粒(A至F)在 z - t 圖與 z - V_z 相圖中的運動軌跡。背景圖為沿 z 軸所量測微粒密度的強度圖,較亮白區域相當於波峰。在上端震幅較小的液態密度波中,微粒(A與B)規則週期運動。在中、下區大震幅區微粒(C至F)展現混沌運動。向上運動的微粒受到向下運動波峰的排斥力減速,微粒進入波峰前區成為波峰的一部分向下運動,而後逐漸進入波峰後,受到波峰的排斥力向上運動,在波峰中不確定的極低相對波峰速度造成在波峰區不確定的停留時間,為微粒混沌運動行為的主因。

參考文獻

- [1] F. F. Chen, *Introduction to Plasma Physics* Plenum Press, New York, Chap. 7, p. 199 (1974).
- [2] P. K. Shukla and A.A. Mamun, *Introduction to Dusty Plasma Physics*, Institute of Physics Publishing, Bristol (2002).
- [3] J. H. Chu and Lin I, *Phys. Rev. Lett.*, **72**, 4009 (1994).
- [4] N. N. Rao, P. K. Shukla and M.Y. Yu, *Planet. Space Sci.*, **38**, 543 (1990).
- [5] P. K. Shukla, *Phys. Scr.*, **45**, 504 (1992).
- [6] J. H. Chu, Ji-Bin Du and Lin I, *J. Phys. D*, **27**, 296 (1994).
- [7] A. Barkan, R. L. Merlino and N. D'Angelo, *Phys. Plasmas*, **2**, 3563 (1995).
- [8] V. E. Fortov et al., *Phys. Plasmas*, **10**, 1199 (2003).
- [9] A. Piel et al., *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 205009 (2006).
- [10] P. Kaw and R. Singh, *Phys. Rev. Lett.*, **79**, 423 (1997).
- [11] A. A. Mamun and P. K. Shukla, *Phys. Plasmas*, **7**, 4412 (2000).
- [12] C. H. Chiang and Lin I, *Phys. Rev. Lett.*, **77**, 647 (1996); W. T. Juan and Lin I, *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 3073 (1998); Y. J. Lai and Lin I, *Phys. Rev. Lett.*, **89**, 155002 (2002); L. W.

Teng, P. S. Tu and Lin. I, *Phys. Rev. Lett.*, **90**, 245004 (2003); H. Y. Chu, Y. K. Chu, C. L. Chang and Lin I, *Phys. Rev. Lett.*, **90**, 075004 (2003); W. Y. Woon and Lin I, *Phys. Rev. Lett.*, **92**, 065003 (2004); C. L. Chan, W.Y. Woon and Lin. I, *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 220602 (2004); Chia-Ling Chan and Lin I, *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 105002 (2007).

[13] C. T. Liao, L. W. Teng, C. Y. Tsai, C. W. Io, and Lin I, *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 185004 (2008).

本文由中央大學物理系伊林教授 (E-mail: lini@phy.ncu.edu.tw) 提供。

(此篇轉載於國科會自然處物理研究推動中心網頁 <http://prpc.phys.nthu.edu.tw/>)