无碰撞激波

近年来，在等离子体动力学的研究领域里，有一个课题一直引起大家的兴趣，这就是无碰撞激波的问题。

这个问题之所以引人注意，其原因是多方面的。第一个原因是在地球物理学的研究中，人造卫星的测量表明，当太阳风的等离子体流绕过地球时，在地球前大约14个地球半径处形成一个弓形激波。平均磁场的突然跃变发生在大约10^3公里的尺度内，这就是激波的厚度，而平均自由程却差不多有10^8公里。这是在自然界中存在的一个无碰撞激波。在天体物理的范围内，也有不少类似的问题，如太阳耀斑现象，就有好几种激波理论来解释它。某些射电源的模型，类星体、脉冲星等，也都包含着激波的形成和传播。

第二个原因是在受控热核反应的研究中，指望用激波来加热等离子体。由于高温、稀薄的等离子体，自由程一般都比较长，因此这时所需要的激波自然也是无碰撞的。

第三个原因是，我们过去所熟悉的气体动力学的激波，分子间的碰撞是起决定作用的。我们知道，激波形成和激波结构的问题中，有两个相互矛盾的因素。一个是非线性因素。压缩波的传播过程里，由于非线性影响，流体速度和传播速度（声速）都与密度有关。密度大的地方，流速和声速大，因此对压缩波来说，后面的波企图超过前面的波，这就使波形越来越陡。另一个因素是耗散。波形越陡，密度、速度、温度的

梯度就越大，这时扩散、粘性和热传导等，就力图使波形变平，梯度减小。这两方面因素的平衡，就形成定常的激波剖面。而无论是声波的传播，还是耗散因素，都离不开分子间的相互作用，分子间的碰撞。有不少人都这么想，没有经典的二体碰撞，根本不可能产生激波。因此，无碰撞激波的结构和它的本质，究竟是什么？这个问题就成为理论上一个十分有兴趣的问题。

从1953年以来，前六、七年时间，比较侧重于理论工作方面。在这以后的后一半时间，实验和观测有很大进展。现在将理论研究情况简单介绍如下。

由于等离子体由离子，电子等带电粒子组成，故流体微元之间发生集体相互作用。带电组元的密度、平均速度的脉动引起电磁场的变化。非平衡等离子体在趋向平衡时，时常生成不稳定脉动，造成湍动电磁场。这些湍动场引起带电粒子的随机散射，从而增加粒子的随机速度，及产生耗散，其尺度与相应的不稳定性有关。

无碰撞激波的结构比一般气动力学激波要复杂，因为等离子体中包含各种各样的小振幅波。不同波长的小振幅波以不同波速传播，因而这些波只在一个短时间内相互靠近，它们产生弱相互作用。和气体动力学不同，等离子体中存在弱湍流状态。而在气体中只有非色散的声波，也即不同波长的波，长时间内彼此靠近，它们产生强相互作用。气体中湍流发展很快，没有各种中间状态。另外，由于等离子体波是多种多样的，所以激波结构的尺度也是多种多样的。

对于激波结构，所要讨论的主要耗散因素是电阻与粘性。在无碰撞等离子体中，热导率不重要。电阻限制电流，即电子与离子间的相对速度，而粘性限制两等离子体间相对的整体速度。一般来说，电阻加热电子，粘性加热离子。对无碰撞等离子体来说，这些耗散机制仍存在，只是，它们并非起因于经典碰撞，而是粒子与湍动电磁场之间的相互作用。

目前，尚无统一的理论说明无碰撞激波的结构，因此，分为以下几个方面介绍。

1. 低马赫数，弱耗散的激波，激波结构取决于色散效应。

对无碰撞等离子体，在某些参数范围内，仍可用连续流体的方程来描述。双流体方程等价于波长大于 R_i（$R_i = c/\omega_{pi}$，即光速除以离子的等离子体频率）的磁流体方程。因此，仍可认为即使在无碰撞等离子体中，压缩波还会变陡。但是，这时不是耗散，而是短波长的色散限制了压缩波的进一步变陡。根据色散特性的不同，这些小振幅波可将能量带往前或往后。激波结构不是象气体动力学激波那样，参数单调变化，而是摆动的，并且具有前缘波列或后缘波列。当耗散因素使波列阻尼时，激波就形成了。

2.高 马赫 数的激波，激波结构取决于湍流耗散。

随着 马赫 数增大，耗散因素也加大。若有足够的耗散，波列中的摆动特性将消失，最终使激波结构成为单调的。耗散产生于等离子体湍流，等离子体湍流则产生于不稳定等离子体波。这些波最终通过各

种途径将能量传给粒子,如通过共振阻尼等等。由于存在各种可能的等离子体波，理论工作者就企图用各种不稳定性解释无碰撞耗散，并已提出许多不稳定性。

下面以垂直激波为例，说明耗散因素如何起作用。对垂直激波，由于无碰撞长度 R_e（$R_e = c/\omega_{pe}$，即光速除以电子的等离子体频率）较小，磁场可能有较大的梯度。流过激波平面的电子流（造成磁场的跃变）产生不稳定的静电等离子体波。若离子与电子间相对流速 V_d 大于电子热速度 c_e 那么，一个强双川流不稳定性可能足以造成等离子体湍流，后者给出“无碰撞”电阻，并使电子加热。这种不稳定性的主要作用是限制流速为电子热速度的量级。

若电子电流小，不能激发双川流不稳定性，这时，只要电子温度 T_e 超过离子温度 T_i，仍可产生不稳定的、静电等离子体波湍流。分析表明，当 $T_e > 5-10\,T_i$ 时，离子与电子间相对漂移大于离子声速 $c_s = \kappa T/m_i$ 就造成离子声波不稳定性。这一不稳定性包括离子等离子体振荡，频率则一直高达 ω_{pi}。上述的双川流不稳定性限制了电子流速，目前的弱离子声波不稳定性却给出随机电场使电子的随机速度与温度增加。

对离子耗散机制有两种看法。一种是静电离子—离子双流不稳定性，主要结果是下游低速离子与上游离子直接作用，并使后者加热。另一种耗散机制是电磁波湍流，是由所谓的嘘波（whistler wave）产生的。

3.临界马赫数

数从2·5到3·0之间，无碰撞激波结构有一个突变。在气动力学激波中也有类似的情况，当马赫数超过某一临界值以后，具有有限热导、但无粘性的气体中不能形成连续激波结构。对等离子体来说，马赫数低于临界值，上述的离子声波湍流给出有效电阻，使电子优先加热。超过临界值，电阻本身不能提供所需要的耗散。这时离子加热的机制是什么，尚未弄清楚。