

微等离子体

MICROPLASMAS

约翰·J·博林杰 戴维·J·瓦因兰

本文作者约翰·J·博林杰 (John J. Bollinger) 和戴维·J·瓦因兰 (David J. Wineland) 是美国国家标准和技术研究所的物理学家。他们关于微等离子体的研究是在发展储存离子高分辨率光谱技术中逐渐形成的。

获物理学诺贝尔奖的“容器”

1973年,曾建立了一个能捕获单个电子的由电场和磁场构成“器壁”的“容器”。1980年,一个类似的装置曾约束过单个原子。这种技术使物理学家能极为深入详尽地测量电子和原子的性能。首倡这些实验的汉斯·G·德梅特 (Hans·G·Dehmelt, 美国华盛顿大学) 和沃尔夫冈·保罗 (Wolfgang Paul, 联邦德国波恩大学) 共同获得了1989年度物理学诺贝尔奖。利用上述装置控制原子的温度和位置,通过捕获多达15 000个离子的实验,我们正在研究原子结构的基本理论。我们称这一带电粒子系统为微等离子体。

微等离子体是将电磁场首先施加于离子,把离子约束到一个特定的空间区域而产生的。然后,利用激光冷却技术可以把捕获的离子冷却到低于 10^{-2}K 的低温。由于微等离子体实际上可以通过一次加一个离子的方式组成,因此它为研究亚微观系统 (mesoscopic system) 提供了机会。这是因为,这一系统所含的离子数比起宏观系统来太小,不足以显示人们熟悉的宏观系统的特性;而比起单个粒子来,这个系统又过于复杂,其性质不能与单粒子行为等同。此外,微等离子体可以作为天体中稠密等离子体的模型。

在某些冷微等离子体中的离子,可以像液体中

的原子一样通过稍呈有序化的状态进行扩散。在另一些情况下,离子可能类似固体中的原子,很缓慢地通过晶格点阵扩散。然而微等离子体的性质与一般的液体和固体很不相同。一般的液体和固体,每立方厘米大约有 10^{23} 个原子,而微等离子体的浓度每立方厘米只有约 10^8 个离子。因此微等离子体中各离子之间的平均距离比一般液体和固体中的原子之间的距离大约大10万倍。此外,一般的液体和固体维持在一起靠的是原子之间的内部吸引力,而使捕获的离子微等离子体保持在一起的则是外加电场和磁场。实际上,所有带同样电荷的离子彼此是排斥的,因而往往是分散的微等离子体。

单组元等离子体

对这些冷等离子体的最早研究开始于10多年前。1977年,加利福尼亚大学圣地亚哥分校的约翰·H·马姆博格 (John H. Malmberg) 和托马斯·M·奥尼尔 (Thomas M. O'Neil) 指出,电子或离子在电磁捕获器中的聚集体类似于一种称为单组元等离子体 (one-component plasma) 的物质。在这种等离子体中,一个均匀分布的固定电荷背景 (本底) 约束着游动的带异电荷的同样粒子。单组元等离子体的比热、熔点和其他热力学性能极大地取决于游动粒子的密度和温度。

从粒子的密度和温度可以导出称为耦合参数的无量纲参数,这一表征邻近离子间相互作用强度的参数可以描述单组元等离子体的热力学性能。耦合参数的定义是最邻近的离子之间的库伦势能(Coulomb potential energy)与离子动能之比。库伦势能取决于离子之间的平均距离(密度的函数)和各种离子成份的电荷。动能则为温度乘以波尔兹曼常数。

当库伦势能小于动能(耦合参数小于1)时,单组元等离子体不会有明显的结构而类似于气体。耦合参数大于1的单组元等离子体将呈现某些空间有序结构。在这种强耦合的单组元等离子体中,因为库伦排斥力比热力学大,离子保持彼此远离状态。当耦合参数为2或更大时,等离子体将呈现液体特性。当耦合参数接近180时,单组元等离子体将从液相变为固相,其中的离子按体心立方晶格排列。

单组元等离子体的这些理论预测适用于“无限”系统,即当离子大量增加或减少时其宏观性能不变的那些系统。此外,只要等离子体中的离子呈经典特性,即只要量子力学的影响可以忽略,这种预测就是有效的。正如1934年尤金·P·威格纳(Eugene P. Wigner)首先研究后所指出的,在高密度和低温下量子力学可能是很重要的。

在宇宙中,特别是在致密天体中,可以找到强耦合单组元等离子体的实例。中子星(大质量恒星爆发后的坍缩体)预料每立方厘米有 $10^{26} \sim 10^{29}$ 个铁原子,即其密度至少比地球表面或内部的任何地方大1000倍。在这种环境中,单组元等离子体是怎样形成的?中子星外层的巨大压力使铁原子分裂为铁原子核和自由电子。铁原子核呈经典表现:即一个带正电荷的原子核完全排斥其相同的邻近的原子核。另一方面,自由电子则遵循量子力学的定律,特别是遵循不相容原理,即每个电子必须处于不同的能态。由于中子星中的电子密度高,电子被迫进入很高的能态。因此电子不受能量低很多的铁原子核运动的影响,从而形成一个密度均匀的负电荷背景。在电子背景内活动的原子核则形成一种单组元等离子体,其耦合参数介于10~1000之间。

为更深入地弄清这种天然等离子体的性质,人们试图在实验室中产生强耦合单组元等离子体。因为单组元等离子体的热力学性能仅和耦合参数有关,所以稀疏的单组元冷等离子体可能和稠密的单组元热等离子体具有相同的性能。迄今为止,在实验室得到的单组元等离子体仍因不够稠密或冷却不足而未能成为强耦合的。例如,在中子星外层的铁

原子核密度大约比离子捕获器(trap)中离子的典型密度大20个数量级。为了产生耦合参数可与中子星的等离子体相当的单组元等离子体,必须把捕获的带电离子冷却到比中子星的温度大约低9个数量级的低温。要想获得足够强的耦合,需要的温度应远低于1K。

除了使耦合参数和天然系统相当外,实验室的单组元等离子体还必须要有足够多的离子数以揭示具有众多离子的天然系统的特性。物理学家最近已在前一方面迈开了第一步,现正为实现第二方面的目标而进行研究。

这两方面的工作都需要电磁捕获(electromagnetic trap)技术。这项技术已有大约30年的历史。1959年,加利福尼亚的汤普森·拉莫-伍尔德里奇(Thompson Ramo-Wooldridge)公司实验室的拉尔夫·F·沃尔克(Ralph F. Wuerker)、海伍德·谢尔顿(Haywood Shelton)和罗伯特·V·兰米尔(Robert V. Langmuir)试验了一种约束带电金属粒子的电磁捕获技术。这一卓越的实验显示了粒子间强耦合引起的各种效应。大约在同时,研究人员开始着手捕获电子和离子的工作。

原则上,电磁捕获器可以是一个简单的均匀地充满负电荷的球体。当带正电荷的粒子放在这个球内时,它就被均匀分布的负电荷吸引至球心。一旦越过球心,正粒子就会受一个大小与它和中心的距离成正比的“恢复”力,又把它拉向球心。只要粒子能通过球体自由运动,它就会以球心为中心点来回振动。如果使正粒子逐渐冷却,即使其动能逐渐减小,则它振动的幅度将逐渐减小,直到稳定在中心位置上。

实际装置可作得接近这种理想捕获器。事实上有两种电磁捕获器(Paul捕获器和Penning捕获器)能产生强耦合的单组元等离子体。

Paul 捕获器

Paul捕获器由三个金属电极组成:一个环形电极和上下端圆头电极。环形电极和发电机连接,其电压以驱动频率作正弦曲线形波动。这些电极安装在真空室内以保证空气分子不致和离子碰撞。

Paul捕获器是怎样约束离子的呢?正弦波动电压在环形电极和两端的圆头电极之间产生一个随时间变化的电场。电场方向交替变化,一个周期内,一半的时间离子被从两端的圆头电极拉开,推向环形电极;另一半时间离子被从环形电极拉开,而推

向两端的圆头电极。于是离子以驱动频率作正弦振动。

因为驱动力随时间呈正弦变化, 预料离子所受的平均力可能会是零。换句话说, 离子在振荡电场的作用下可能会前后晃荡, 但其振动中心将会保持不变。那么, 靠什么将离子推向捕获器中心? 靠电极的形状, 它使捕获器中心的电场比电极附近的电场要弱。通过一个特殊实例, 可以得到有关场的空间变化如何影响离子运动的基本概念。假定在某一时刻, 一个受迫作正弦振动的离子的振动中心距顶端电极比距底端电极更近。当此离子处于其振动的最高点时, 将受到一个指向捕获器中心的强力, 而当电子处于振动的最低点时, 则受到一个指向顶端电极的较弱的力。因此离子受到的净力是指向捕获器中心的, 这个力就是所谓的有质动力。

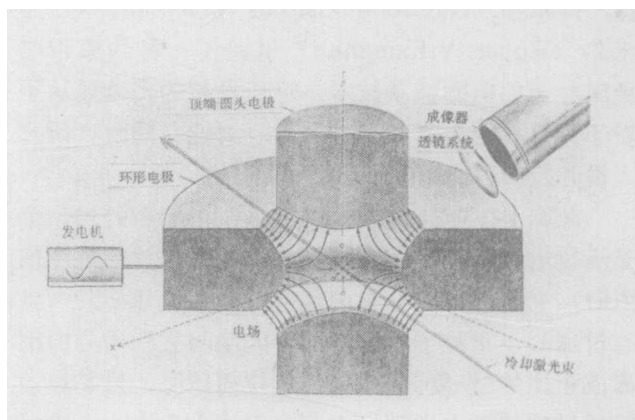


图1 Paul 捕获器 在电极之间建立一个随时间变化的电场(弧线)。发电机在环形电极上加上交流电压, 电场强度和方向改变, 但形状保持不变。得到的有质动力(指向中心的箭头)约束着带电粒子。对准捕获器中心的激光束冷却并探测离子。

同样, 如果离子在捕获器中心之下或在其两侧振动, 也会受到使其向捕获器中心运动的有质动力。垂直方向的有质动力称为轴向力, 水平方向的有质动力称为径向力。

因此, 不论什么时候, 在捕获器中的离子总是受一个驱动力和一个有质动力的作用。已证明轴向有质动力大于径向有质动力。因此, 离子以三种特征频率振动: 驱动频率、径向频率和轴向频率。通常将捕获器设计得使驱动频率比径向和轴向有质动力频率约高 10 倍。因此, 由驱动力引起的小振幅高频振动就叠加在由有质动力引起的以捕获器中心为振动中心的大振幅慢振动上。

如果忽略由驱动力引起的较小而较快的振动, 那么在 Paul 捕获器中的离子就像在带负电荷的球体内那样振动。但是, 由于有质动力在轴向和径向有差别, 把 Paul 捕获器想像成扁椭球(饼状)或长椭球(雪茄烟状)更为合适。为了控制椭球的形状和施加在离子上的合力, 可以在环状与两端电极间加上附加恒定电压。当总的径向力大于轴向力时, 捕获器相当于一个长椭球。相反, 当径向力小于轴向力时, 捕获器就相当于一个扁椭球。因此, Paul 捕获器既可以约束中心的离子, 又可以确定离子团的轴向和径向位置。

用激光冷却离子

1987 年, 我们用 Paul 捕获器研究了强耦合汞离子微等离子体。同时, 由赫伯特·沃塞 (Herbert Wather) 和弗兰克·戴维里奇 (Frank Diedrich) 等人领导的小组用各种离子进行了类似的实验。在开始实验时, 我们允许有少量的汞蒸汽泄漏到包围 Paul 捕获器的真空系统中。在汞原子穿过捕获器时, 用电子束对它们进行轰击。电子束中电子的能量正好足以从任何一个被其轰击的汞原子中分离出一个电子来, 从而使原子电离。

我们用激光冷却技术使离子冷却, 即对离子发出一道频率稍低于易于被离子吸引的频率的激光束。向激光源运动的离子, 由于多普勒效应, 这一频率“看起来”稍有增加。这些离子强烈地吸收光并减低速度。离开激光源运动的离子遇到频率较低的光, 结果它们对光的吸收很弱而加速不大。总的来看这些离子的平均运动减慢, 所以离子被冷却了。

为了观察单个汞离子及它们的空间结构, 我们用紫外线照射这些汞离子, 入射光被汞离子强烈地散射。用一台紫外电视摄像机每秒记录 100 000 个紫外光子, 从而构成被捕获的离子的运动图象。这种摄像机可分辨出小至 1 微米的细节。

开始时, 只在捕获器中用一个汞离子进行研究, 并将其冷却到 10^{-3}K 。有质动力将离子约束到捕获器中心。当使两个离子进入捕获器时, 发现可以有两种结构。如果径向有质动力比轴向力大, 两个离子就排列在轴线方向, 它们与捕获器中心等距。反之, 如果径向有质动力小于轴向力, 两个离子就排列在和捕获器中心等距的径向水平面上。当在捕获器中添加更多的离子时, 对离子位置的直觉就不可靠了。但可用计算机帮助跟踪众多的力和离子。

激光频率的影响

通过约束离子，证实了 Paul 捕获器可以维持单组元等离子体。虽然观察到的空间结构说明这些离子是强耦合的，仍需要测量密度和温度来计算耦合参数。很容易根据图象确定离子的密度，但温度必须间接测量。我们发现（在其他实验中有许多研究小组也同样看到）离子的运动改变了与离子有关的吸收谱（原子或分子的吸收谱表示原子或分子吸收能力最强的辐射线频率）。

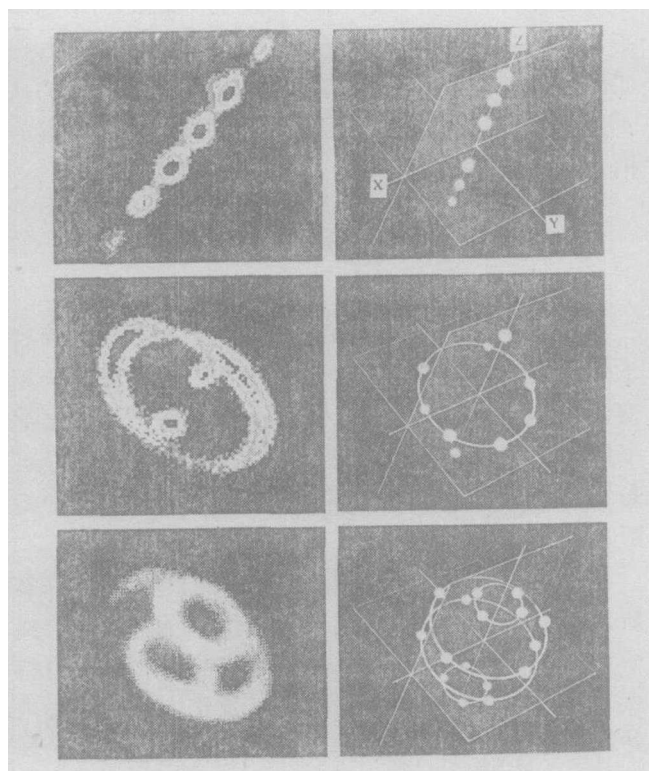


图 2 由 6 个、9 个和 16 个离子组成的微等离子体（分别见左上、中、下图）被约束在 Paul 捕获器中。右图为结构示意图，根据国家标准和技术研究所的韦恩·伊坦诺（Wayne Itano）预测的结果绘制。虽然这些离子保持了相同的相对位置，但它们都绕 Z 轴旋转。

一群完全稳定的离子有很尖锐的吸收谱，表明离子只吸收确定频率的光。相反，如果离子存在某种程度的运动，吸收谱将变模糊。模糊是由离子朝向辐射源或离开辐射源运动引起的。但是，从离子的角度来看，是辐射源向离子运动或离开它们，因此，辐射光的频率由于多普勒效应而改变。于是，向辐射源运动的离子将比静止的离子更有效地吸收稍低频率的辐射光，而离开辐射源运动的离子将吸收稍高频率的辐射光。朝各种方向运动的很多离子的总和具有展宽吸收谱线的作用。展宽的程度就表

示离子的温度。这种技术证明，在我们的捕获器中的离子温度大约为 10^{-2} K，因此，耦合参数高达 500。

这些耦合系数测量是在捕获器中的离子少于大约 25 个时进行的，它表明 Paul 捕获器可以维持强耦合单组元等离子体。但我们发现，当离子数再增加时，就难于产生类似的固态。这是因为离子在驱动力作用下振动造成的。当一个离子在驱动频率下振动时，此离子和邻近离子之间的斥力能影响其他离子的振动。这种附加的干扰在一定的捕获器工作条件下可以使等离子体结构加热到某一转折点（breaking point）。这种现象就是通称的射频加热，因为原子离子的驱动频率和无线电波的频率大致相同。射频加热是伍尔克（Wuerker）、谢尔顿（Shelton）和兰米尔（Langmuir）在实验中首先观察到的。

最近，许多学者非常详细地研究了原子离子的射频加热。这些研究表明，Paul 捕获器系统参数的微小变化就可能引起冷的晶体状态和热的气体状态之间的突变。例如，离子被冷却的速度对用于冷却的激光器的频率非常敏感。如果将激光频率调节到远低于最佳冷却频率之下，那么射频加热就把离子等离子体变成一种热的无规则的状态。如果激光频率增加，激光冷却的速率也增加，直到一个使离子等离子体冷却得非常快的临界频率，从而开始出现某种有序状态。在这一（临界频率）点，射频加热急剧减少，致使离子等离子体突然冻结成有序状态。这种冻结状态非常稳定，即使激光频率重新稍微降低也能维持。射频加热的不规则性使得液-固态的相转变难于研究。

当捕获器中的离子数量增加时，射频加热的问题也变大。当捕获器中有许多离子时，有一些离子被推向驱动力较强的电极区，于是这些离子在驱动频率下以大振幅振动，从而增强了射频加热的影响。这些因素使在 Paul 捕获器中能同时被冷却的离子数目限制在 200 个左右。如果能够克服和射频加热有关的困难，Paul 捕获器就可用来研究液-固相转变和“无限”单组元等离子体的其他性质。

Penning 捕获器

当前，对大尺度强耦合的单组元等离子体来说，Penning 捕获器提供了一种比 Paul 捕获器更有利的实验环境。与 Paul 捕获器中随时间变化的电场不同，在 Penning 捕获器中，约束带电粒子的电场

和磁场是固定的。1988 年, 我们和萨拉·L·吉尔伯特 (Sarah L. Gilbert) 共同建立了一个约束铍离子的 Penning 捕获器, 马姆博格及其同事们也利用 Penning 捕获器约束强耦合的电子等离子体。

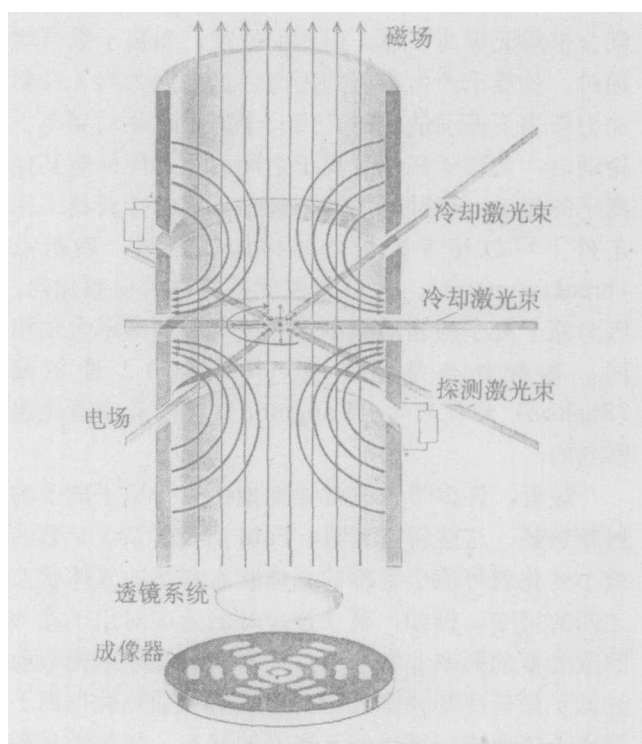


图 3 Penning 捕获器产生的电场(弧线)和磁场(带箭头的直线)形成约束带电粒子的力(黑线), 电场和磁场也使微等离子体旋转, 用两束激光冷却这些粒子。第三束激光作为各种实验仪器的探测光束。磁场由围绕捕获器的螺旋线圈中的电流产生 (螺旋线圈在图上未表示出来)。

我们设计的捕获器由 4 个圆筒形电极组成。4 个电极沿一个公共轴依次衔接。在最上和最下的两个圆筒外电极上加上正电压, 这一电压在每个内电极和邻近的外电极之间产生电场。这些电场可在两个内电极之间的平面附近沿轴线方向捕获离子。

在电极周围放置一个强磁铁产生沿圆筒轴线方向的均匀磁场。磁场阻止离子从径向逃离捕获器。捕获器中心附近的电场径向力指向离开中心的方向。这一径向力和轴向磁场结合引起离子绕捕获器的轴线旋转。当旋转的离子穿过磁场时, 它们就受劳伦兹力的作用, 劳伦兹力沿径向向内, 从径向约束离子。

除去微等离子体的匀速旋转这点外, Penning 捕获器的约束力与均匀带电球体中的约束力是等价的。因此, 即使离子在 Penning 捕获器中旋转, 它们的性质实际上和单组元等离子体中的离子一样, 特别是具有同样的热力学性能。

我们用类似于 Paul 捕获器中产生汞离子的方法产生铍离子进行实验。这些离子用两束交叉的激光束冷却。第三束激光称为探测激光束, 用于测量离子的温度。由离子散射的光被收集起来形成吸收谱。如同在汞离子实验时一样, 离子的温度可由某些特征谱的模糊程度推算出来。这种技术表明, 被冷却的离子温度在 10^{-2}K 以下。

铍微等离子体的旋转频率也可以由吸收谱推导出来。铍离子在捕获器内以每秒 20 000~200 000 圈的速率转动。因为旋转频率和径向电场直接相关, 从而也就和离子的密度相关, 故可以推算出离子的密度范围为 $5 \times 10^7 \sim 3 \times 10^8$ 个离子/厘米³。根据等离子体的紫外照像, 可以确定被捕获的离子所占据的体积, 从而确定捕获的离子数。当捕获器中的离子数低于 15 000 时, 根据温度和密度的测量得出的耦合参数高达 200~400。

等离子体中的层状结构

我们预料, 对于含有无穷多离子的单组元等离子体, 当耦合参数为 180 时发生从液态向固态的相变。我们测量的耦合值表明, 如果捕获器中有足够多的离子, 捕获的离子将形成结晶状离子固体。可是, 一个捕获 15 000 个离子的系统的特性和一个无限系统会是一样的吗?

近来, 一些计算机模拟解释了这个问题。许多研究人员建立了能容纳多达几千个离子的捕获等离子体的模拟。这种模拟揭示了一些值得注意的特点。当耦合参数超过 1 时, 离子被集中在同心层内并均匀分布。当耦合数大约为 10 时, 处于液态的各层之特点是短程有序, 并在所有方向扩散。当耦合数再增加时, 这些同心层变得更加清晰明确, 离子在各层内扩散快, 而在层与层之间扩散慢。在高耦合参数 (200) 条件下, 层内离子扩散变慢, 离子形成固体状态。等离子体是逐渐从液态向固态发展的, 而不是呈现急剧相变。

实验已证明了这些预料。尽管铍等离子体绕 Penning 捕获器轴线旋转, 但在径向仍保持层状结构, 横切等离子体的激光束的散射光表明, 交替变化的亮带和暗带与层数相符。我们查看了少至 20 个离子, 多至 15 000 个离子的等离子体中的层状结构, 在含 20 个离子的等离子体中, 只清楚地看到了一层; 在含 15 000 个离子的等离子体中, 可分为 16 层。由于等离子体在捕获器中旋转, 至今尚未能发现每一层内有任何截然不同的结构。

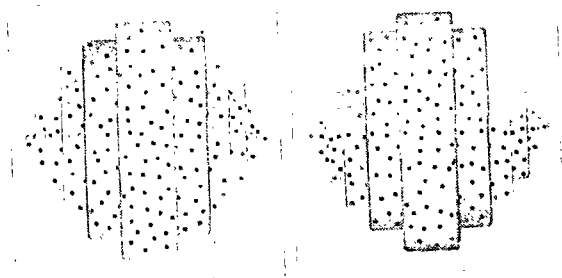


图4 由大约1000个铍离子组成的微等离子体，通过激光束照射而形成的层状结构（左图）。这些示意图描述了整个层状结构及铍离子从某一瞬间（中心）向邻近一层的扩散情况（右图）。微等离子体既像固体又像液体：离子（圆点）只在每层内游动而不在层与层之间游动。

通过实验可以推算，当耦合参数大约为100时，在每层内的等离子体具有液体特性，但在两层之间的等离子体具有固体特性。特别是，离子在层内比两层之间的扩散要快。为了证明这种现象，我们将探测激光调制到一个特定频率对离子进行光学“标记”。探测激光抑制离子的光发射，使其进入“暗”能态，在“暗”能态中，它们不会散射冷却激光束的光线。

首先，我们使等离子体的外层变暗，并测量外层的暗离子向内层运动所需的时间，然后把穿过几层的等离子体区变暗，并测量一层中的某一部分暗离子向同一层其他部分运动的时间。这些测量表明，对于中等耦合参数，离子在层间的扩散速度只及层内离子的1/10。

结 束 语

关于微等离子体的许多问题至今仍未解决。例如，什么时候开始出现“无限”系统的特性？系统需

要有多少个离子才呈现明显的相转变？什么时候固态变成体心立方点阵而不是离子层聚集？

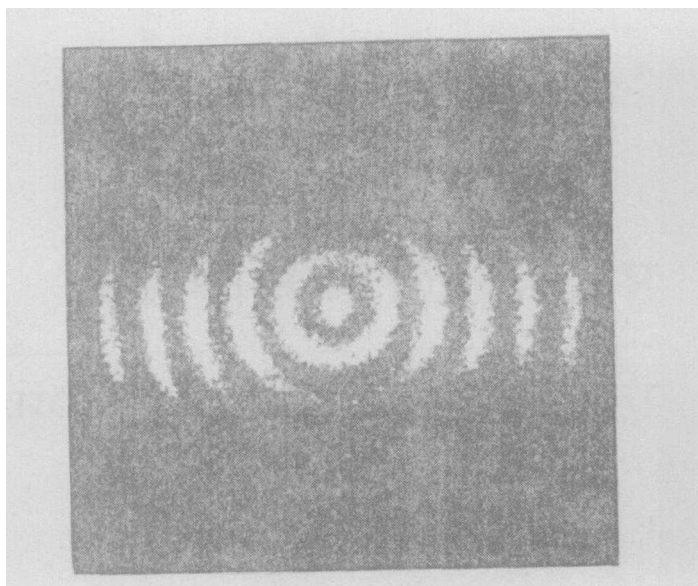


图5 横切等离子体的激光束散射光表明交替变化的亮带和暗带与层数相符。

现在，这些问题甚至在理论上也难以回答。但是，杜宾（Dubin）预言，大概需要有50~60层的层状聚集后，体心立方点阵方可能成为能量上有利的结构。这就需要100万个离子，即比至今建立的最强的耦合微等离子体的离子数大50倍。现代的技术应当能约束这种规模的冷等离子体。如果100万个离子的等离子体可以保持200或更大的耦合参数，我们也许就可能在地球上的实验室内“拜访”中子星的表面了。

陈彦婷 王竞译自《科学美国人》（Scientific American）1990年第1期，刘寄星 校。

（责任编辑 刘先曙）

科技动态

英捷医科专家发现与肺癌有关的遗传缺陷

英国和捷克斯洛伐克的科学家们在英国医学杂志《柳叶刀》上报道，P53基因的一个缺陷似乎与多种形式的肺癌有关。

研究人员戴维·莱恩博士说：“这项成果转化成为新的治疗方法还需要一段时间。但它确实提供了治疗肺癌的一些新途径——也许有可能把变异的基因作为目标，用一种毒物来破坏它，或替换正常的P53产物以恢复控制。”

在这项新的研究中，17例鳞状细胞癌标本中有14例P53基因是异常的，鳞状细胞癌是一种与吸烟有很大关系的肺癌。但是在7例类癌肿瘤（一种少见的已知与吸烟无关的

肺癌）中未发现P53基因有缺陷，在10个正常的肺样中也没发现有此缺陷。另外，还经常发现另外两种常常与吸烟有关的肺癌的P53基因也有缺陷。在9例小细胞癌中有4例的P53基因是异常的。在14例腺癌标本中有8例P53是异常的。

研究人员说，P53基因产生的蛋白质通常控制细胞繁殖，但是当P53基因受损坏时，细胞生长便失去控制，引起肿瘤。

（摘自新华社《世界经济科技》）