

Grest^[4] 对自旋玻璃从高温到低温淬火过程中所形成畴的性质进行了研究。淬火之前束团遵从渗流统计学, 淬火后观察到大束团在较大尺度范围内具有渗流特性, 与初始渗流束团有相同的 Hausdorff 维数; 在小尺度范围内束团是稠密的; 在中等尺度范围束团具有明显的分形特性。中等尺度区域对应真实的分形, 换句话说, 分形区对应于从短程稠密区向长程渗流区的过渡与共存, 这与离子束注入导致非晶化过程中分形产生对应于晶相与非晶相的共存观点类似。

最后谈谈自己对分形的极为粗浅和表观的观察: 在 a-Si:H 膜制备中发现 p 型掺杂的膜与玻璃衬底结合不牢, 当样品从样品室取出置于空气中, 膜开始脱落, 膜的脱落由一点逐渐发散开呈树枝状, 具有自相似性, 说明膜的脱落

过程也具有分形特性, 膜的脱落可能是由于应力过大造成的, 这种脱落可看成是应力作用下膜的分形脱落。

- [1] B. B. Mandelbrot, *Fractal Geometry of Nature*, Freeman, San Francisco, (1982).
- [2] F. Family et al. eds., *Kinetics of Aggregation and Gelation*, North-Holland, Amsterdam, (1984)
- [3] 丁菊仁等, *物理*, **19**(1990), 81.
- [4] J. L. Mccaulley, *Phys. Rep.*, **189** (1990), 227.
- [5] D. W. Schaefer, *MRS Symposia Proceedings, Materials Research Soc.*, **79**(1987), 47.
- [6] L. J. Huang et al., *J. Appl. Phys.*, **63**(1988), 2879.
- [7] 丁菊仁等, *中国科学A辑*, No. 11(1990), 1229.
- [8] B. B. Mandelbrot, *Nature*, No. 308 (1984), 721.
- [9] 林鸿溢, *半导体学报*, **11**(1990), 430.
- [10] D. Avnir et al., *Nature*, No. 308(1984), 261.
- [11] D. Romeu et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57** (1986), 2552.
- [12] F. Chaput et al., *J. Non-Crys. Sol.*, **116**(1990), 133.
- [13] G. S. Grest et al., *Phys. Rev. B*, **30** (1984), 5150.

粒子与微粒的电磁和光捕获

张光寅 严向军 张春平

(南开大学物理系, 天津 300071)

本文对粒子和微粒捕获的主要方式: 电动捕获, 磁悬浮, 激光捕获的原理, 装置和应用作了简要介绍。就其特点进行了综合与比较, 同时也对它们的应用前景作了展望。

科学的发展要求对物质世界进行多方位的观察。在微观世界中需要更深入、细致的剖析。而微观物质的运动特性决定了它对实验技术高难度, 多方面的要求。几十年来发展起来同时仍在发展的粒子与微粒捕获技术使得人们越来越方便地对微观世界进行观察。从可见的粒子到肉眼看不见的微粒直到原子都实现了物理捕获和控制操作, 如带电粒子的电场捕获, 金属球的磁悬浮, 原子的激光冷却和捕获等。为更清楚地了解这些实验方法, 扩大视野和应用范围, 我们有必要进行一定的综合与比较。

一、带电粒子的电动捕获

实验中对真空中微尘粒子静电情况的研究导致了以交变电场进行粒子动态捕获方法的发展。直径数微米的带电粒子在交变和静电场中的捕获已实现。

1. 电动捕获原理^[1]

带电粒子在电场中会受到库仑力作用, 一些带电大分子团在电场力和重力共同作用下可以达到平衡, 如密立根实验中电子电量的测定,

但对于直径几个微米的粒子束讲,重力相对于其所受的电场力可以忽略,因而已不可能实现平衡态。那么如何才能实现这些粒子的捕获?

我们知道,带电粒子在交变和静电场中除受库仑力外,还受到交变梯度力的作用。要实现这种悬浮系统操作的条件是要找到一种电极组态,它能提供一个随时间作正弦变化的力,其强度正比于粒子距场原点的距离。显然,一个如下形式的旋转对称的势分布 V 可以满足此要求。

$$V = \left[\frac{V_{dc} - V_{ac} \cos \Omega t}{z_0^2} \right] \left[Z^2 - \frac{r^2}{2} \right], \quad (1)$$

其中 V_{ac} 是角频率 Ω 的交变信号电压最大值, V_{dc} 是同时作用的一个静电场常压。

微分法表明:场强具有特定的空间依赖关系:

$$E_z = 2(-V_{dc} + V_{ac} \cos \Omega t)z/z_0^2, \quad (2)$$

$$E_r = -(-V_{dc} + V_{ac} \cos \Omega t)r/z_0^2, \quad (3)$$

其 $-2:1$ 的系数表明:如果电场在 z 方向上向原点聚焦,则必然在 r 方向上发散,反之亦然。荷质比为 e/m 的粒子在此势场中的微分运动方程为:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z}{dt^2} &= -\left(\frac{e}{m}\right)\left(\frac{2V_{dc}}{z_0^2}\right)z \\ &+ \left(\frac{e}{m}\right)\left(\frac{2V_{ac}}{z_0^2}\right)z \cos \Omega t, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r}{dt^2} &= \left(\frac{e}{m}\right)\left(\frac{V_{dc}}{z_0^2}\right)r \\ &- \left(\frac{e}{m}\right)\left(\frac{V_{ac}}{z_0^2}\right)r \cos \Omega t. \end{aligned} \quad (5)$$

可以看出,在两个方向上粒子运动是相互独立的,而其解除了 $-2:1$ 的比率外,形式上是一样的,故可写为 Mathieu 微分方程:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} + (a - 2q \cos 2x)u = 0, \quad (6)$$

此处 u 可代替 z 或 r , 且有: $x = \Omega t/2$,

$$a_z = -2a, = 8 \left(\frac{e}{m}\right)\left(\frac{V_{dc}}{z_0^2}\right)\frac{1}{\Omega^2}$$

和

物理

$$q_z = -2q, = -\left(\frac{e}{m}\right)\left(\frac{V_{ac}}{z_0^2}\right)\frac{1}{\Omega^2}$$

Mathieu 方程的解为:

$$\begin{aligned} u &= A e^{\mu x} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{2n} e^{i2nx} \\ &+ B e^{-\mu x} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{2n} e^{-i2nx}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 μ 和 C_{2n} 是 a 和 q 的函数。

从解中我们可以看出:如果 μ 取实数或复数,振幅以指数形式增长,粒子不能被稳定限制,只有当 μ 取纯虚数时,粒子被捕获,而达到一种动态平衡。

2. 应用

从前面带带电粒子运动方程的解中可以知道,被捕获的粒子并非完全静止,而是以一定的频率振动 (ω_z 和 ω_r), 通过这些曲线的观察,我们可以了解很多信息。理论确定的 Ω 和 e/m 关系,可以用以制作灵敏的质量分光计的依据。这种关系也确定了多粒子捕获方式,它可以按不同的 e/m 对粒子进行排列,在一定情况下,这种排列可以被拆散,改用更高频的驱动信号,如 300 MHz, 可能实现对电子的捕获。

二、磁悬浮和超导磁悬浮

许多问题要求高离心场的应用。而寻找转子及其一系列需要克服的困难导致人们寻找不同的解决途径。J. W. Beams 等人^[2]在磁悬浮及电磁驱动转子方面作了不少研究。此外,由于超导体诱人的特性和应用前景,早在 50 年代初, I. Šimon 等人便进行了超导磁悬浮方面的研究^[3]。

1. 磁悬浮和超导磁悬浮原理

磁悬浮是应用金属粒子在磁场中受到的力和其自身重力达到平衡来实现的。对于一般的磁悬浮,金属物在磁场中受到垂直方向的力是 $M \left(\frac{dH}{dx}\right)$, 其中 M 是悬浮物的磁动量, dH/dx 是磁场垂直方向上的梯度。当此力同重力平衡

时,即可达到悬浮状态。

超导体在磁场中受的力与前者大致相似,只是由于超导体的完全抗磁性和临界场等特性,而产生了一些新的要求。超导体磁化率 $\chi = -\frac{1}{4}\pi$ (高斯单位制)。当它置于一个非均匀场中时,会受到一个正比于 H^2 的梯度力,其方向指向磁场减弱方向,当超导体足够小,以致不影响 H 的分布时,它严格成立。此外,磁场必须足够弱,否则,超导态可能遭破坏。因而,在场中各处,要求 $H < H_c$ (H_c 是超导体临界场)。

我们可以用电磁理论计算物体受力情况,但考虑到其复杂性,及处于光束中的微粒与一个同样形状的物体在理想流体中行为的相似性,我们可以应用对应性方式,以流体力学原理来解决之。

根据流体动力学原理,物体浸于一束流体中受到的力为

$$F_{\text{流}} = -dk/dx \quad (8)$$

此处 k 为无尽流体流过物体表面所给定的内界面静态能,则有:

$$F_{\text{流}} = -\frac{d}{dx} \iiint_{(V)} \frac{1}{2} \rho v^2 dV.$$

对应到磁场之中,得到 x 方向上力分量:

$$F_{\text{磁}} = -\frac{d}{dx} \iiint_{(V)} \frac{1}{8\pi} \mu H^2 dV. \quad (9)$$

对于一个半径为 a , 流体速度为 $v(x)$ 的系统 $k = \frac{2}{3} \pi \rho a^3 v^2$, 则有:

$$F_{\text{流}} = -\frac{2}{3} \pi \rho a^3 \frac{d(v^2)}{dx},$$

从而:

$$F_{\text{磁}} = -\frac{1}{6} \mu a^3 \frac{d(H^2)}{dx} = -\frac{1}{3} \mu a^3 H \frac{dH}{dx}. \quad (10)$$

从上可以看出:对于均匀场,超导体受力为零,也可以看到超导磁悬浮和一般磁悬浮的共同点。

2. 实验装置

依据悬浮原理及一般磁悬浮和超导磁悬浮的各自特点,可以设计出多种实验方法。在此只对一般磁悬浮装置作一简介,另外给出一种超导磁悬浮装置简图(见图 1)。

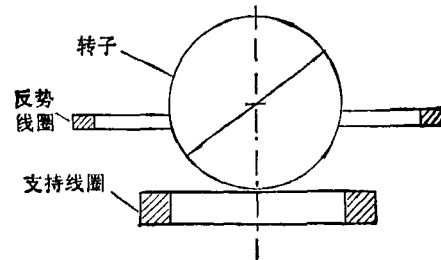


图 1 超导悬浮装置剖面简图

(1) 一般磁悬浮

可以设想一个小的拾波线圈作为一个伺服电路系统的敏感部分,调节通过螺线管的电流而使转子悬浮于期望的高度。转子自动寻找场强最大的地方(在螺线管轴线上),但它被扰动后,将绕轴线振动。因此,让螺线管铁芯以线吊成一个摆,并浸于油中,当转子受到扰动,铁芯将跟随转子水平方向微动而阻止转子脱出控制。

(2) 超导磁悬浮

依据超导磁悬浮原理,要使超导球能悬浮,须提供一个旋转轴对称的非均匀磁场。I. Šimon 等人发现在环形线圈或柱形螺线管提供的场中,球要么向下穿过线圈,要么被向上,向一旁排斥,或者即使能悬浮,也是靠着环或螺线管内壁。这样,就要引入另外一个限制线圈,提供一个小的反向势于合力场中,共同达成稳定的悬浮态。

如图 1 的装置中,大线圈起一个提供小的反向势作用,通过它的电流小;小线圈则起着悬浮支持作用,通过它的电流大。因为要保证球的超导性,球表面磁场 H 应小于超导临界场 H_c 。维持球的平衡通常经过调节两线圈中电流比率而保持支持线圈(小线圈)中电流不变来达到。

3. 应用

一般磁悬浮中，电磁驱动转子的高速旋转可以提供高的离心场，离心势。在 J. W. Beams 的实验中，转子的直径 10^{-2} — 25 cm，重量 5×10^{-3} — 2.5×10^4 g 都应用过，如此大的范围可以满足不同的需要。如：测量金属的抗张强度，金属膜的抗张强度同厚度关系。而离心高速转子最重要的应用是进行物质的分离以及确定分子的重量，而超离心场的应用不仅可以测定分子重量，而且可以测定分子的重量分布，以及测量淀积率……而超导悬浮的应用似乎更加诱人，随着超导研究日新月异的发展，它的应用越来越简便和现实。

三、辐射压力光悬浮

辐射压力光悬浮的技术性应用源于对微米量级透明小球在液体中的实验观测。实验表明：当一束光密度具有横向梯度的光照射到一个小球时（小球具有高折射率），不仅会产生一个沿光束方向的力，而且会产生一个横向力分量，此力指向光密度最大区域（光轴），我们称这种力为光梯度力，它使得光学势阱的稳定建立成为可能^[4]。A. Ashkin 等人在光压力方面作了大量研究工作，直到目前的聚焦激光捕获粒子，甚至进行生物活体分析。无疑，这是一个有前途的方向。

1. 辐射压力光悬浮原理^[5,6]

首先，我们来看粒子在光束照射下的受力情况。为将问题简化（见图 2），我们设想相对透明的粒子（介质小球）悬于相对透明的介质液中，从而避免了辐射度力（当温度梯度由光引起时，称为光致迁动）。从图中可以清楚看出光对电介质小球的光压力。光线 a 在介质与小球的界面上发生反射和折射，动量有所改变，一部分动量传递给了小球，使其受到反射力 F_R^i ， F_R^o 和折射力 F_D^i ， F_D^o 。对于悬于透明介质中的电介质小球，反射率较透射率小得多，因此反射力比折射力小。这样光线 a 使小球受的四个力的合力方向沿 $+z$ 和 $-r$ 方向。再看与光线 a

对称的光线 b，可知它施予小球的力沿 $+z$ 和 $+r$ 方向。由于 b 处光密度比 a 处小，所以小球受总力沿 $+z$ 和 $-r$ 方向。 $-r$ 方向的力由光密度梯度引起，它使得小球最后到达光束中心轴上，即光密度最大区域； $+z$ 方向的力使小球获得一个沿光束方向的加速度，从而达到捕获粒子目的。

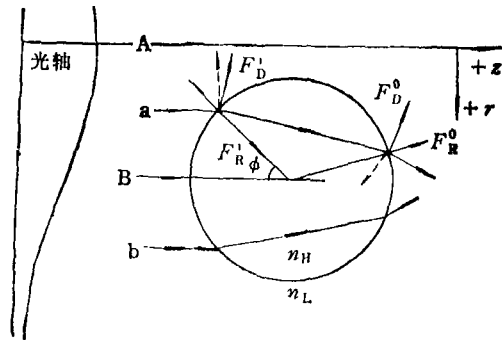


图 2 电介质小球在光束中受力情况

实验表明，上述理论用于光悬浮，要么是单光束同小球重力达到平衡，要么是多光束共同控制达到平衡，这都比较麻烦，且缺乏实用性。后来发现：高聚焦的激光束可以作为理想的粒子捕获光源，操纵灵活，光镊力（即光对粒子的捕获力）由散射力和辐射梯度力共同产生。（见

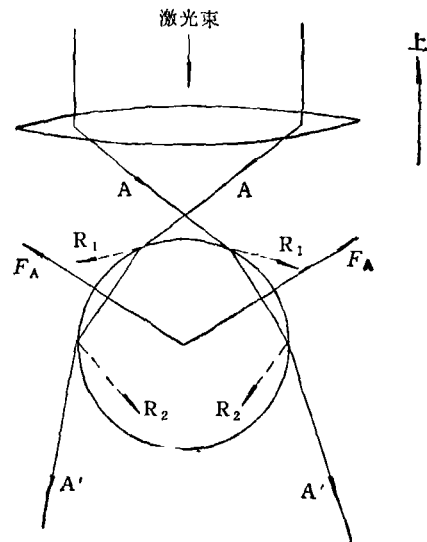


图 3 高聚焦激光同介质小球作用

图 3) 高聚焦激光照射情况下, 轴向梯度力主宰着轴上稳定性。图中力 F_A 有着逆光束传播方向的分力, 它同粒子所处位置有关, 可以最终将小球移到一平衡位置而实现稳定捕获。

2. 实验装置

如图 4 的光悬浮采用功率, 束腰半径均相同的, 方向相对的两束水平激光束。这样垂直方向上的力及水平方向上大小相等方向相反的力共同构成一个光学势阱, 控制小球。

如图 5 光镊: 光束 H 用以将粒子抬离容器底部并送到聚焦激光焦点附近实现捕获, 激光通过高数值孔径 (N. A. 1.25) 物镜聚焦。

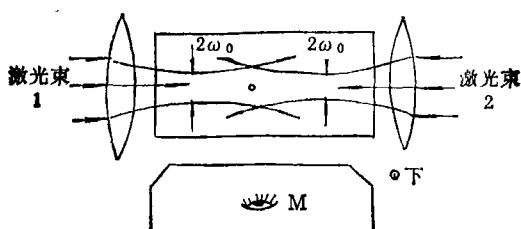


图 4 双光束粒子捕获

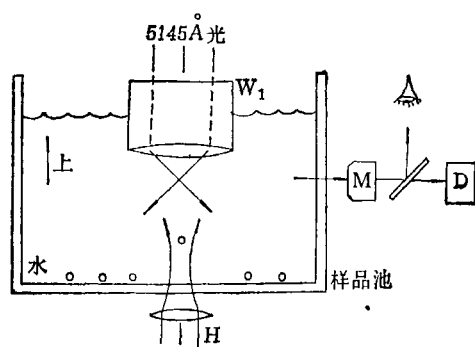


图 5 高聚焦激光粒子捕获(激光光镊)

3. 应用

激光粒子捕获以其独特的优点, 有着很大应用范围。如果阻尼进一步减小, 那么这种对小粒子的微观操纵有可能应用于回旋加速器中, 此外, 它在测量弱光吸收, 绝对光能, 及压力测量等方面均有应用。红外激光进行活体(细胞)分析在生物学中应用前景广阔。

四、原子的激光冷却, 激光捕获和磁场捕获^[7]

原子热运动现象是原子物理学中许多精确测量和观察的障碍, 为克服原子热运动产生的问题, 原子物理学家们找到两条解决途径: (1) 原子热动的减缓, 即冷却; (2) 通过电磁场实现原子限定, 即捕获。

1. 激光冷却

这种方法不是通过原子同冷却壁的碰撞, 而是通过同“冷”激光光子的碰撞来实现。原子吸收光子的能量而跃迁到一个较高激发态, 它亦吸收光子动量, 从而改变其速度。

设想一束激光照射于一原子气, 激光频率稍低于共振吸收频率。当原子吸收了同其反向运动的激光光子后, 会降低其速度。此方式的关键是: 同激光相向运动的原子较其他方向运动的原子对光子有较高的吸收率。因为这些原子迎着激光方向, 经多普勒效应后同激光频率接近于共振吸收。但对于单向激光束来说, 光束方向的所有原子被加速, 原子平均速度将会增长, 这种情况可以通过应用反向传播激光束或将原子置于一个势阱中来克服。

吸收光子后的原子在自发或受激辐射一个光子时会受到反冲。由于受激辐射会抵消原吸收光子的作用, 因而要实现原子冷却, 只能依靠自发辐射(产生辐射压力或称自发力)。在理想情况下, 它是足以胜任冷却原子工作的, 但光抽运和多普勒漂移却阻止这种工作的完成。

光抽运现象使许多原子处于一个相对稳定的原子能级上, 从而只能使少数原子可以被冷却。解决方法有二, ①加另一频率的激光进行反抽运②加磁场使原子角动量的投影成为一个好量子数, 增加跃迁选择定则, 阻止抽运发生。

多普勒漂移则是指当一个原子吸收一些光子后, 其速度改变使其频率漂移出共振区, 而不能达到冷却目的。解决办法是进行补偿: (1) 改变激光频率实现跟踪性冷却; (2) 压缩原子速度分布, 即利用空间变化磁场改变原子共振

吸收频率,保证固定频率激光实现冷却。

利用上述实现“冷却”的途径和解决问题的手段,可进行原子捕获的实验。

2. 激光偶极子捕获

激光偶极子捕获是通过激光的非均匀振荡电场同原子的感生电偶极矩的作用来实现的。强的激光场可克服使原子冷却和休止的辐射压力。当激光频率稍低于原子共振频率时,原子被抓进激光场最强区域。由于其势阱深度仅为 mK (开氏温度)量级,原子首先必须“冷却”。偶极子捕获由一个高聚焦激光束实现,其焦点浸于使原子冷却的光学“黏胶”中,“黏胶”中的慢原子落入阱中并聚集起来,其密度从 10^6 cm^{-3} 直到 10^{12} cm^{-3} 。这是第一个被提出和得到证实的方法。当然,还有其它许多方法也能达到目的。

3. 原子的磁场捕获

这种捕获是通过非均匀磁场作用于一个具永磁矩的原子的力来实现捕获的。对于一个具有 1 个玻尔磁子的原子和 2T 的磁场,它能局域的最大能量为 1K (开氏温度)。对于中性原子,它也必须要有冷却过程。

在“过冷”实验中,原子多数连续地静止于一锥形螺线管末端,当冷却激光关闭,一些未达到管末端的原子进入捕获区,冷却激光重新打开,只要足以使原子速度降下来即可。然后,捕获用的磁场打开,定住慢原子,并抓住它们。

原子的捕获部分由两个共轴线圈组成,其间通以反向电流从而在中心场强为零,且随着距中心距离的增长,磁场强度呈线性增加。在强磁场,大体积和好的真空条件下,原子可停留较长时间。

以上我们简要介绍了几种粒子的捕获方式,电动捕获,磁悬浮和激光捕获的原理及其各自适用范围。它们各有差异,但都有着共同一点:它们都需要造成一种使特定粒子能被捕获的势阱。粒子与微粒的电磁和光捕获极大地丰富了人们观察世界的角度,有着重要的应用和诱人的发展前景,但也还有待进一步的研究。在实际工作中,我们必须根据粒子的性质(电性,磁性或中性)及其大小采用不同的捕获方法或若干方法的结合,而各种方法也并非独立的,它们相互补充,此也是我们一并介绍的目的之一。

- [1] R. F. Wuerker et al., *J. Appl. Phys.* 30(1959), 342.
- [2] J. W. Beams, *SCIENCE*, 120(1954), 619.
- [3] I. Šimon, *J. Appl. Phys.* 24(1953), 19.
- [4] A. Ashkin and J. M. Dziedzic, *Appl. Phys. Lett.*, 19(1971), 283.
- [5] A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.*, 24(1970), 156.
- [6] A. Ashkin et al., *Opt. Lett.* 11(1986), 288.
- [7] William D. Phillips et al., Phillip. L. Gould, Paul D. Lett, *SCIENCE*, 239(1988), 877.

谈谈对地球磁层极光区千米微波辐射的认识

陆全康

李顺祺

(复旦大学物理系,上海 200433) (交通大学出版社,上海 200030)

极光区千米微波辐射是地球磁层发射的功率最强大的辐射。解开这种辐射发生机制的谜对磁层物理性质的了解是极重要的。地球人造卫星和宇宙飞船对这种辐射进行了比较仔细的观察测量。Wu-Lee 模型对辐射的物理机制作出了成功的分析。十余年来,观察测量和理论解释均取得了可喜的进展,成为磁层物理中一个活跃的前沿研究领域。