**22-1 电场** 2020年10月30日10点55分

**什么是物理?**

图22-1显示了两个带正电的粒子.从上一章中我们知道,由于粒子2的存在,静电力作用在粒子1上.我们还知道了力的方向,并给出了一些数据,我们可以计算力的大小.但是,还剩下一个困扰问题.粒子1如何“知道”粒子2的存在?也就是说,由于粒子不接触,粒子2怎样推到粒子1上?如何在远处产生这种作用?

物理学的一个目的是记录关于我们世界的观察,例如对粒子1的推动的大小和方向.另一个目的是对记录的内容进行解释.在本章中,我们的目的是对有关远距离电力这个棘手的问题提供解释.

我们将在这里检查的解释是:即使空间是真空,粒子2也会在周围空间的所有点处建立电场.如果我们将粒子1放置在该空间的任何点上,则粒子1会知道粒子2的存在,因为它受到电场的影响,粒子2已在该点建立.因此,粒子2不会通过触摸来推动粒子1,就像你通过接触来推动咖啡杯一样.相反,粒子2借助已建立的电场推动.

本章的目标是(1)定义电场;(2)讨论如何针对带电粒子和物体的各种排列计算电场;(3)讨论电场如何影响带电粒子(如使粒子移动).

**电场**

科学和工程学中使用了许多不同的场.例如,礼堂的温度场就是我们通过测量礼堂内许多点的温度而发现的温度分布.同样,我们可以定义游泳池中的压强场.这样的场是标量场的示例,因为温度和压强是标量,仅具有幅度而没有方向.

相反,电场是矢量场,因为它负责传递有关力的信息,该力涉及幅度和方向.该场由电场矢量的分布组成,在带电物体周围的空间中,每个点对应一个电场.原则上,我们可以使用以下过程在带电对象附近的某个点(例如图22-2a中的点P)进行定义:在P处,我们放置一个带有小的正电荷的粒子,称为**测试电荷[test charge]**,因为我们使用它来测试场.(我们希望电荷很小,以免干扰物体的电荷分布.)然后,测量作用在测试电荷上的静电力.此时的电场为

由于测试电荷为正,公式22-1中的两个向量方向相同,因此的方向是我们测量的方向.在P点的大小为.如图22-2b所示,我们总是用箭头表示电场,其箭头的尾部锚定在进行测量的点上.(这听起来很琐碎,但是以其他方式绘制矢量通常会导致错误.此外,另一个常见的错误是将力和场混为一谈,因为它们都以字母开头.电力是推拉.电场是由带电对象建立的抽象属性.)从等式22-1,**我们看到电场的SI单位是牛顿/库仑**().

我们可以将测试电荷转移到其他各个点，以测量那里的电场，以便我们可以确定由带电对象建立的电场的分布.该场的存在与测试电荷无关.这是带电物体在周围空间(甚至真空)中建立的东西,而与我们是否碰巧对其进行测量无关.

对于接下来的几个模块,我们确定带电粒子和各种带电物体周围的场.首先,让我们研究一种可视化电场的方法.

**电场线**

看看周围房间的空间.你可以在整个空间中可视化一个矢量场-不同大小和方向的矢量吗? 似乎不可能做到的是,在19世纪介绍了电场概念的迈克尔·法拉第(Michael Faraday)找到了一种方法.他设想了在任何给定带电粒子或物体周围的空间中的线(现在称为**电场线**).

图22-3给出了一个示例,其中一个球均匀地被负电荷覆盖.如果我们在球体附近的任意点放置正测试电荷(图22-3a),则会发现静电力将其拉向球体的中心.因此,在球形周围的每个点上,电场矢量都向内径向指向球形.我们可以用电场线表示该电场,如图22-3b所示.在任何一点,例如所示的一点,穿过该点的磁力线的方向与该点的电矢量的方向匹配.

绘制电场线的规则如下:(1)**在任何一点上,电场矢量都必须与通过该点且方向相同的电场线相切**.(在图22-3中可以很容易地看到直线是直线,但很快就会看到一些曲线.)(2)**在垂直于电场线的平面中,直线的相对密度表示场的相对大小,即相对密度越大,幅度更大**.

如果图22-3中的球体均匀地被正电荷覆盖,则其周围所有点的电场矢量将径向向外,因此电场线也将径向向外.因此,我们有以下规则:

**电场线从正电荷(它们起源的地方)向负电荷(它们终止的地方)延伸**.

在图22-3b中,它们源自未显示的远距离正电荷.

再举一个例子,图22-4a显示了无限大的不导电片(或平面)的一部分,在一侧上正电荷分布均匀.如果我们将正测试电荷放置在靠近板的任何一点(在任一侧),我们会发现粒子上的静电力是向外的并且垂直于板.垂直方向是合理的,因为例如向上的任何力分量都被向下的相等分量所平衡,该力分量仅朝外,因此电场矢量和电场线也必须朝外且垂直于表格,如图22-4b和c所示.

因为薄片上的电荷是均匀的,所以场矢量和场线也是均匀的.这样的电场是均匀电场[uniform electric field],这意味着电场在每个点处具有相同的大小和方向.(这比非均匀的场(点到点之间有变化)要容易得多.)当然,不存在无限大的薄板.这只是一种说法,我们正在测量相对于图纸尺寸在靠近图纸的点处的场,而我们不在边缘附近.

图22-5显示了带有相等正电荷的两个粒子的场线.现在,电场线是弯曲的,但规则仍然成立: (1)任何给定点的电场矢量必须与该点的电场线相切且方向相同,如一个矢量所示,以及(2)较小的间距意味着较大的场强.要想象粒子周围场线的完整三维图案,请在脑海中绕对称轴旋转图22-5中的图案,对称轴是穿过两个粒子的垂直线.

**22-2 带点粒子的电场** 2020年10月30日11点30分

点电荷引起的电场

为了找到由于带电粒子(通常称为点电荷)而产生的电场，我们将正测试电荷放置在距离粒子任意点上.根据库仑定律(公式21-4),电荷的粒子对测试电荷的作用力为

如前所述,如果为正(因为为正),则的方向直接远离粒子;如果为负,则直接朝粒子方向.从公式22-1,我们现在可以将粒子(在测试电荷的位置)建立的电场写为

让我们再仔细考虑一下这些方向.的方向匹配正测试电荷上的力的方向:如果为正,则直接远离点电荷,如果q为负,则直接指向点电荷.

因此,如果给定另一个带电粒子,我们只需看一下电荷的符号即可立即确定其附近的电场矢量的方向.通过将公式22-2转换为幅度形式,我们可以找到任意给定距离的幅度:

我们写是为了避免在为负数时获得负的危险,然后认为负号与方向有关.公式22-3仅给出了幅度,我们必须分别考虑方向.

图22-6给出了带正电粒子周围各点的许多电场矢量,但要小心.每个向量代表箭头尾部锚定点的向量数量.向量不是像位移向量那样从“这里”延伸到“那里”的东西.

通常,如果在给定的点上由几个带电粒子建立了多个电场,我们可以通过在该点上放置一个正测试粒子然后写出由于每个粒子而作用在其上的力来找到净场.例如由于粒子1引起的.力遵循叠加原理,因此我们仅将力作为矢量相加:

为了转换为电场,我们对每个单独的力重复使用公式22-1:

这告诉我们电场也遵守叠加原理.如果要由于多个粒子而在给定点处产生净电场,请找到每个粒子(例如由于粒子1引起的)引起的电场,然后将这些场求和为矢量.(与静电力一样,您不能随便增加幅度.)这种增加的场是许多作业问题的主题.

**22-3 偶极子产生的电场** 2020年10月30日11点46分

**电偶极子产生的电场**

图22-8显示了两个具有相同电荷大小但符号相反的粒子的电场线图,这是一种非常常见且重要的布置,称为**电偶极子[Electric Dipole]**.粒子之间的距离为,并沿着偶极轴(即对称轴)旋转,你可以想象绕其旋转图22-8中的图形.让我们将该轴标记为z轴.在这里,我们将关注点限制在沿着偶极轴的任意点P(距偶极中点的距离z)处的电场的大小和方向.

图22-9a显示了每个粒子在P处建立的电场.带有电荷的较近粒子在z轴的正方向(直接远离粒子)建立了电场.电荷较远的粒子在负方向(直接朝向粒子)建立了一个较小的电场.我们希望处的净电场如公式22-4所示.但是,由于场矢量沿着相同的轴,因此我们只需用加号和减号简单地指示矢量方向,就像我们通常沿单个轴的力一样.然后我们可以将P处的净场的大小写为

经过一点代数运算后,我们可以将该等式重写为

形成公分母并乘以其项后,我们得出

通常,我们仅对偶极子的电效应感兴趣,该距离仅比偶极子的尺寸大,即这样的距离.在这样大的距离上,我们有.因此,在我们的近似中,我们可以忽略分母中的项,这使我们有

涉及偶极子两个固有特性和的乘积是偶极子电偶极矩矢量量的大小.(的单位是库仑计.)因此,我们可以将公式22-8编写为

如图22-9b所示,的方向取为偶极子的负极到正极.我们可以使用的方向指定偶极子的方向.

公式22-9表明,如果仅在较远的点测量偶极子的电场,就永远不可能分别求出和.相反,我们只能找到它们的乘积.例如,如果加倍,而同时减半，则远处的场将保持不变.虽然公式22-9仅适用于沿偶极轴的远点,事实证明,偶极子的对于所有远点都变化为,无论它们是否位于偶极轴上;在此,是所讨论的点与偶极子中心之间的距离.

查看图22-9和图22-8中的磁力线可以看出,偶极轴上的远点的方向始终是偶极矩矢量的方向.这是正确的无论图22-9a中的点P在偶极子轴的上部或下部.

对公式22-9的检查表明,如果将一个点距偶极子的距离加倍,则该点处的电场下降了8倍.但是,如果将单个点电荷的距离加倍(请参见公式22-3),电场仅下降了4倍.因此,偶极子的电场随距离的减小比单电荷的电场更快.偶极子电场迅速减小的物理原因是,从远处看,偶极子看起来像两个粒子,它们几乎(但不完全)重合.因此,由于它们的电荷大小相等但符号相反,因此它们在远处的电场几乎(但不是完全)相互抵消.

22-4 充电线导致的电场 2020年10月30日16点35分

充电线导致的电场

到目前为止,我们仅处理带电粒子,单个粒子或它们的简单集合.现在,我们转到一个更具挑战性的情况,在这种情况下,诸如棒或环之类的细小(大约一维)物体中会充满大量粒子,这是我们甚至无法计数的.在下一个模块中,我们考虑二维对象,例如电荷分布在表面上的磁盘.在下一章中,我们将处理三维物体,例如电荷在整个体积中扩散的球体.

**当心**.由于种种原因,许多学生认为该模块是本书中最困难的部分.需要采取许多步骤,要跟踪许多矢量函数,然后,我们首先建立然后求解一个积分.但是,最糟糕的是,对于不同的装药安排，该过程可能会有所不同.在这里,由于我们专注于特定的布置(带电的环),因此请注意一般方法,以便您可以处理作业中的其他布置(例如杆和局部圆).

图22-11显示了一个半径为R的细环,沿其圆周均匀分布有正电荷.它由塑料制成,这意味着电荷固定在适当的位置.圆环被电场线围绕着,但是这里我们将兴趣限制在中心轴(穿过圆环中心并垂直于圆环平面的轴)上的任意点P上,距圆心的距离点.

扩展对象的电荷通常以电荷密度而不是总电荷的形式传达.对于一条电荷线,我们使用线性电荷密度(每单位长度的电荷),以每米库仑的SI单位表示.表22-1列出了我们将用于带电表面和体积的其他电荷密度.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **名称** | **符号** | **SI单位** |
| 电荷[Charge] |  |  |
| 线性电荷密度[Linear charge density] |  |  |
| 曲面电荷密度[Surface charge density] |  |  |
| 体积电荷密度[Volume charge density] |  |  |

**第一个大问题**.到目前为止,我们有一个粒子电场的方程式.(我们可以像处理电偶极子一样组合几个粒子的场,以生成一个特殊的方程,但基本上仍使用方程22-3).现在看一下图22-11中的环.显然这不是粒子,因此公式22-3不适用.那么我们该怎么办?

答案是在精神上将环划分为微分的电荷元素,这些电荷很小,以至于我们可以将它们视为粒子.然后,我们可以应用公式22-3.

**第二大问题**. 现在我们知道将公式22-3应用于每个电荷元素(前面的强调电荷很小),并且可以写出其对电场的贡献的表达式(前面的强调贡献很小).但是,每个这样的贡献场矢量在P方向上都是自己的.我们如何将它们相加以获得P处的净场?

答案是将向量分成多个分量,然后分别求和一组分量,然后再求和另一组分量.但是,首先我们检查一下一组是否全部被抵消.(抵消分量可以节省大量工作.)

**第三大问题**. 环中有大量的元素,因此即使我们可以取消一组成分,也要累加大量的分量.我们如何添加更多甚至无法计数的组件? 答案是通过积分累加它们.

执行. 让我们做所有这一切(但是,请再次注意一般的过程,而不仅仅是细节).我们任意选择图22-11所示的电荷元件.令为该(或任何其他)元素的弧长.然后,根据线密度(每单位长度的电荷),我们有

单个元素场. 该电荷元件会在距该元件的距离处在P处建立差分电场，如图22-11所示.(是的,我们正在引入问题陈述中未给出的新符号,但是很快我们将用“合法符号”代替它.)接下来,我们根据粒子的形式以新的符号和重写粒子的场方程(方程22-3).但是我们使用公式22-10替换了.由电荷元素引起的场强为

请注意,非法符号是图22-11中显示的直角三角形的斜边,因此我们可以通过重写公式22-替换

由于每个电荷元素具有相同的电荷且距点的距离相同,因此公式22-12给出了每个电荷元素所贡献的场强.图22-11还告诉我们,每个贡献的偏角与中心轴(轴)成角度,因此具有与该轴垂直和平行的分量.

抵消分量. 现在是整洁的部分,我们在其中消除了其中的一组.在图22-11中,请考虑环另一侧的带电元件.它也贡献了场大小,但是场矢量在与来自我们第一个电荷元件的矢量相反的方向上以角度倾斜,如图22-12的侧视图所示.因此,两个垂直分量抵消.围绕环的每个电荷元素及其在环另一侧的对称配对都会发生这种抵消.因此我们可以忽略所有垂直分量.

累加分量. 我们在这里还有另一个大胜利.其余所有分量都在轴的正方向上,因此我们可以将它们加为标量.因此,我们已经可以知道P处的净电场方向直接远离环.从图22-12中可以看到,每个并联分量的大小均为,但是是另一个非法符号.我们可以再次使用图22-11中的直角三角形用合法符号代替来写

将公式22-12乘以公式22-13可得到每个电荷元素的平行场分量:

积分. 因为我们必须对大量的这些分量求和,每个分量很小,所以我们建立了一个积分,该积分沿着圆环从一个点到另一个点从起点(称为)到整个圆周()移动.当我们遍历元素时,只有量变化;公式22-14中的其他符号保持不变,因此将它们移到积分之外.我们发现

这是一个很好的答案,但是我们也可以使用切换到总电量:

如果环上的电荷为负,而不是我们假设的正,则P处的场强仍由公式22-16给出.但是,电场矢量然后指向环而不是远离环.

让我们检查公式22-16的中心轴上的一个很远的点,使得.对于这样的一个点,公式22-16中的表达式可以近似为,公式22-16变为

这是合理的结果,因为从远处看,环“看起来像”点电荷.如果在公式22-17中用r代替z,则实际上确实具有点电荷引起的电场强度，如公式22-3所示.

接下来让我们检查公式22-16中圆环中心的一个点—即z0。在那一点上，公式22-16告诉我们E0。这是一个合理的结果，因为如果我们要放置 在环中心的测试电荷，不会有净静电力作用在环上； 由于环的任一侧上的元件所产生的力将被环的相对侧上的该元件所产生的力所抵消。 根据公式22-1，如果环中心的力为零，那么那里的电场也必须为零.

22-5 带电磁盘的电场 2020年11月6日10点30分

带电磁盘产生的电场

现在,通过检查圆形塑料盘的电场,将其从电荷线切换到电荷表面,该电场的半径为,并且其顶表面具有均匀的表面电荷密度(每单位面积的电荷,表22-1).磁盘在其周围建立了一条电场线图案,但是在这里,我们将注意力集中在中心轴上任意点上(离磁盘中心的距离为处)的电场,如图22-15所示.

我们可以按照前面的模块中的步骤进行操作,但是要建立一个二维积分,以包括顶面上电荷二维分布的所有场贡献.但是,通过使用较早的工作在细环中心轴上的场,我们可以使用简洁的快捷方式节省大量工作.

如图22-15所示,我们在磁盘上以任意半径叠加一个环.该环非常细,可以将其上的电荷视为电荷元素.为了找到其对点电场的微小贡献,我们根据环的电荷和半径重写公式22-16:

环的场指向z轴的正方向.

为了找到P处的总场,我们将公式22-22从处的磁盘中心到处的边缘进行积分,以便求和所有的贡献.但是,这意味着我们要针对环的可变半径进行积分.

通过在公式22-22中代入,可将插入表达式.因为环是如此之薄,所以称其厚度为.然后,其表面积是其周长与厚度的乘积.因此,就表面电荷密度而言,

将其代入公式22-22并稍作简化后,我们可以将所有贡献相加为

我们从积分中拉出了常量(包括z).为了解该积分,我们令和来将其转换为形式.对于重铸积分,我们有

因此,公式(22-24)变为

是由平坦的圆形带电磁盘在其中心轴上的点所产生的电场强度.(在进行积分时,我们假设.)

如果在保持z有限的情况下令,则方程式22-26括号中的第二项接近零,并且该方程式简化为

这是由位于塑料等非导体一侧的无限均匀电荷片所产生的电场.这种情况下的电场线如图22-4所示.

如果我们在保持R有限的情况下,使方程22-26中的,则也可以得到方程22-27.这表明在非常接近磁盘的点处,磁盘建立的电场与磁盘在范围上无限大时相同.

22-6 电场中的点电荷 2020年11月6日11点06分

电场中的点电荷

在前面的四个模块中,我们完成了两个任务中的第一个任务:给定电荷分布,以查找在周围空间中产生的电场.在这里,我们开始第二项任务:确定带电粒子处于由其他固定或缓慢移动的电荷建立的电场中时所发生的情况.

发生的是静电力作用在粒子上,如

其中是粒子的电荷(包括其符号),并且是其他位置在该粒子处产生的电场.(该场不是由粒子本身建立的场;为区分这两个场,作用于公式22-28中的粒子的场通常称为外场.带电粒子或物体不受其自身电场的影响)公式22-28告诉我们

如果粒子的电荷为正,作用在位于外部电场中的带电粒子上的静电力的方向为,如果为负,则其方向相反.

**测量基本电荷**

公式22-28在1910-1913年间由美国物理学家罗伯特·米利肯（Robert A. Millikan）测量基本电荷时起了作用.图22-16是他的设备的图示.当微小的油滴喷入腔室A时,在此过程中,其中一些油带正电或负电.考虑一个液滴,该液滴通过板P1中的小孔向下漂移并进入腔室C.让我们假设该液滴具有负电荷q.

如果如图22-16中的开关S所示断开,则电池B对电池室C没有电影响.如果开关B闭合(电池室C和电池的正极端子之间的连接完成),则电池会导致导电板P1上有过量的正电荷,导电板P2上有过量的负电荷.带电的极板在腔室C中建立了向下的电场.根据等式22-28,此电场对恰好在腔室中并影响其运动的任何带电液滴施加静电力.特别是,我们带负电荷的下降趋势将倾向于向上漂移.

通过定时在开关打开和关闭时油滴的运动并由此确定电荷的影响,米利坎发现,的值始终由下式给出：

在其中被证明是我们称为基本电荷的基本常数,即. Millikan的实验令人信服地证明了电荷是量化的,他为此获得了1923年诺贝尔物理学奖.现代的基本电荷测量依赖于各种互锁的实验,而这些实验都比密立根的开创性实验更为精确.

**喷墨印刷**

对高质量，高速打印的需求促使人们寻找冲击式打印的替代方法,例如在标准打字机中.一种这样的选择就是通过在纸上喷射细小墨水滴来建立字母.

图22-17显示了在两个导电偏转板之间移动的带负电荷的液滴,在这两个导电偏转板之间建立了均匀的,向下指向的电场. 墨滴根据公式22-28向上偏转,然后在由的大小和墨滴电荷q所确定的位置撞击纸张.

在实践中,保持恒定,液滴的位置由输送到充电单元中液滴的电荷q决定,液滴必须在进入偏转系统之前通过该电荷.充电单元又由对要打印的材料进行编码的电子信号激活.

**电气故障和火花**

如果空气中的电场强度超过某个临界值Ec，则空气将发生电击穿，该过程将使电场从空气中的原子中去除电子。 空气然后开始传导电流，因为自由电子被电场推动运动。 当它们移动时，它们会与路径中的任何原子碰撞，从而使这些原子发光。 我们可以看到自由电子由于发射的光而采取的路径，通常称为火花。 图22-18显示了带电金属丝上方的火花，这些金属丝引起的电场会引起空气的电击穿。

22-7 电场中的偶极子 2020年11月6日11点39分

我们已将电偶极子的电偶极矩定义为从偶极子的负端指向正端的向量.您将看到,偶极子在均匀外部电场中的行为可以完全用两个向量和描述,而不需要偶极子结构的任何细节.

水()分子是电偶极子;图22-20显示了原因.此处的黑点代表氧核(具有八个质子)和两个氢核(每个具有一个质子).彩色的封闭区域代表电子可以围绕原子核定位的区域.

如图22-20所示,在水分子中,两个氢原子和一个氧原子不在一条直线上,而是形成一个大约105度的角.结果,该分子具有确定的“氧侧”和“氢侧”.而且,分子中的10个电子趋于保持更靠近氧核而不是氢核.如图所示,这使分子的氧侧比氢侧略带负电,并产生了沿分子对称轴指向的电偶极矩.如果将水分子置于外部电场中,则其行为将与图22-9中更抽象的电偶极子所预期的一样.

为了验证这种行为,我们现在考虑在均匀的外部电场中如此抽象的偶极子,如图22-21a所示,我们假设偶极子是一个刚性结构,由两个电荷相反的中心组成,每个中心的电荷为,相距.偶极矩与电场成角度.

静电力作用在偶极子的带电端.因为电场是均匀的,所以这些力沿相反的方向作用（如图22-21a所示），并且具有相同的大小.因为场是均匀的,所以来自场的偶极子上的净力为零,并且偶极子的质心不会移动.但是,带电端上的力确实会在偶极子上绕其质心产生净转矩.质心位于连接带电端部的线上,距一端的距离为,而距另一端的距离为.从等式 10-39（）,我们可以写出净转矩的大小:

我们还可以用电场和偶极矩的大小写出的大小.为此,我们在公式22-32中用代替,用代替,发现的大小为

我们可以将这个方程推广为向量形式为

向量和如图22-21b所示.作用在偶极子上的转矩倾向于将旋转到电场方向,从而减小.在图22-21中,这种旋转是顺时针方向.正如我们在第10章中讨论的那样,我们可以通过在扭矩的大小中包含一个负号来表示产生顺时针旋转的扭矩.使用该符号,图22-21的扭矩为

**电偶极子的势能**

势能可以与电场中电偶极子的方向相关联.偶极子处于平衡方向时,即它的力矩与场对齐时,它的势能最小.因此,偶极子在所有其他方向上都具有更大的势能.在偶极或钟摆旋转到任何其他方向时,它在平衡方向上的最低重力势能处于最低点.

在任何涉及势能的情况下，我们都可以随意定义零势能配置，因为只有势能的差异才具有物理意义.当图22-21中的角度为90度时,选择势能为零,此时我们将偶极子势能表示为外部电场,则表达式最简单.然后,通过计算当偶极子旋转到的那个值时偶极子上的磁场所做的功,可以用公式8-1()求出的任何其他值的偶极子的势能.借助公式10-53（W t du）和公式22-35,我们发现任意角度的势能为

评估积分导致

我们可以将这个方程推广为向量形式为

公式(22-37)和(22-38)告诉我们,当(方向相同)时,偶极子的势能最小().当（方向相反）时,势能最大().

当偶极子从初始方向旋转到另一个方向时,电场对偶极子所做的功为

其中,和用公式22-38计算.如果取向的变化是由施加的扭矩引起的(通常是由于外部因素引起的),则施加的扭矩在偶极子上所做的功就是磁场对偶极子所做的功的负值;即

**微波炉烹饪**

如果食物中含有水,则因为水分子是电偶极子,所以可以在微波炉中加热和烹调食物.当您打开烤箱时,微波源会在烤箱内以及食物内建立一个快速振荡的电场.从公式22-34，我们看到任何电场都会在电偶极矩上产生一个与对齐的扭力.由于烤箱振荡,水分子不断翻转,不断尝试与对齐.

能量从电场转移到水(以及食物)的热能中,三个水分子恰好结合在一起形成一个团.随机场的翻转打破了某些约束.当分子重新形成键时,能量转移到基团的随机运动,然后转移到周围的分子.很快,水的热能就足以烹饪食物.