

苏联 M. I. 扎博全斯基著

吳忠貴 譯



分子振荡器和放大器

人民邮电出版社

М. Е. ЖАБОТИНСКИЙ
МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И УСИЛИТЕЛИ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1958

内 容 提 要

分子振盪器和放大器的主要特点分別是頻率穩定和固有噪聲低，它們是用量子無線電技術制成的。本書簡明扼要地介紹了量子系統，然後以淺淺的方式講述各種分子振盪器和放大器的構造、工作原理和應用。

本書適合想初步了解什麼是分子振盪器和放大器的通信工程技術人員、情報工作者、大專師生及無線電愛好者閱讀。

分子振盪器和放大器

著 者：蘇 聯 М. Е. 扎 博 金 斯 基
譯 者：吳 忠 貫
出版者：人 民 郵 電 出 版 社
北京東四六條13號
(北京市審判出版登記證出字第0448號)
印刷者：北 京 市 印 刷 一 廠
發行者：新 華 書 店

開本 787×1092 1/32 1963 年 3 月北京第一版
印張 1 12/32 頁數 22 1963 年 3 月北京第一次印刷
印刷字數 33,000 字 印數 1—5,150 冊

統一書號：15045·總1331—無350

定價：(10) 0.22 元

目 录

序言.....	1
量子系統.....	4
分子振盪器.....	15
順磁放大器.....	31
参数放大器.....	39
量子无綫电技术的前景.....	41

序 言

实践的需要給科学不断提出日益繁复的任务。而技术的发展又使科学家有可能研究那些先前看来似乎不可逾越的領域，并且把許多好象十分抽象的研究成果运用到实践中去。

这里只談当前科学上的两个任务，即获得頻率非常稳定的电振盪和制造出能够记录极微弱的电振盪的设备。

这两項任务是怎样被提出来的呢？

第一項任务有其深远的历史根源，因为这个任务实质上是和計測時間的任务一致的。古代人們使用沙漏計时器来解决这项任务，就是現今还有时采用这种方法来作粗略的計測。而銅壺滴漏的方法一直沿用到中世紀，才为重錘挂钟所代替。第一批机械钟表的結構十分簡陋，周围环境的溫度、潤滑油的质量、轴承的磨損以及其它各种因素对于这种钟表的运行都有很大的影响。

一直到伟大的伽俐略的观察詳尽地研究了摆的振动定律以后，才有可能提出摆钟的結構。这种钟表由荷兰的大学者惠更斯在十七世紀制成。他还发明了摆輪式钟表，即现代手表与航海精密測时表的原型。但是，尽管現代用于报时台的最完善的电动摆钟（肖尔特种）每昼夜运行誤差为 0.003 秒，仍然不能滿足天文学上日益增长的要求。摆钟的巨大缺点是对于撞击、震动以及外界溫度及压力的变化极其敏感。

继机械钟表和摆钟之后，出現了一种所謂石英钟，这是二十世紀二十年代末无綫电技术的新产儿。現代石英钟每昼夜运行誤差只有万分之一秒。天文学家借助于石英钟发现了地球每昼夜轉动的不均匀性，并且对于这种沿用已久的時間标准的适

用性提出了怀疑。

但是生活提出了更高的新要求。保证现代高速航海、航空交通安全的船舶和飞机无线电导航系统的建立，要求进一步提高時計的准确性。其它一系列科学技术领域也迫切要求更加完善的时间标准。

现在已经很明白，要想进一步提高時計的准确性，就不能使用以摆或石英片之类物体的振动为基础的時計。这些宏观物体（即具有较大的尺寸）由大量的原子组成，它们的尺寸可能发生各种无法控制的微小变化，因而会改变它们的振动周期。更为精确的时间标准只能建立在微观系统的基础上，这就是原子和分子，它们是由数量不多的基本粒子组成的。这些系统服从于量子定律，也就是说它们的性能不可能发生任意的微小变化。换句话说，这些系统不可能有连续的变化，只能作跃正式的变化。因此微观系统具有特有的内部稳定性，这一点正可以利用来建立新的标准。

第二个任务是提高无线电接收机的灵敏度，这一任务是由于雷达发展的结果而产生的，因为它已挖尽了现代电子管的潜力，但又需要接收更加微弱的信号。另外，由于无线电技术的发展而产生的一门新科学——无线电天文学，也有这项要求。无线电天文学研究来自各种天体的微弱电磁辐射。无线电望远镜所能记录的信号愈微弱，那么人类的认识范围就能更为深入地伸展到宇宙的深处。

这两大任务都得在无线电波谱学这门新兴科学的基础上加以解决。无线电波谱学跟一般的光学光谱学相似，它研究原子同分子的波谱，借此获得有关微观世界的构造的资料。但是它和光学光谱学又有差别，光学光谱学研究可见光区域，其宽度约为一个倍频程，而无线电波谱学研究无线电波段内的频

譜，这一波段包括由 $1/10$ 毫米的波长起直到波长相当长的电磁波，占几十个倍頻程的寬度。当然，研究毫米波、厘米波以至波长为几十米、几百米的无綫电波譜学所采用的技术手段是各不相同的。

但是无綫电波譜学的方法繁多，并不单是这点构成的。无綫电波譜学可以分成三个差別很大的分支，其技术手段不同，使用范围也各异。

最老的一个分支是利用原子束与分子束的强度指示研究原子束与分子束中的諧振現象。这一分支产生于二十年前（1938年），由美国学者 E. E. 拉比及其同仁的實驗結果所創立的。这一分支对于建立原子頻率标准曾經起了重大的作用。

第二分支产生于1942年，这时出現了苏联学者 B. Л. 金茲布尔格关于气体中无綫电波吸收方面的理論著作。在这以前只有 K. 克利頓和 H. 維里雅姆斯的孤立的實驗工作，他們于1934年观察了厘米波在氫中的吸收。无綫电波譜学这一方面的迅速发展情况如下：1945年以前有5篇論文談到这方面的問題，1946年有22篇，1947年則有50篇，目前这类論文的数目已上千种了。气体无綫电波譜学这一支发展的結果，創制了单頻无綫电波源——分子振盪器。

第三分支是由 E. K. 扎沃依斯基的工作发展起来的，他在1949年发现了順磁諧振現象，亦即含有性能如同小磁鉄的順磁性离子的固体和液体对无綫电波的諧振吸收。这一分支导致建立寬頻帶可調諧放大器。已經肯定，这种放大器的内部噪声极其微小。

在叙述分子振盪器与放大器的作用之前，必須先簡短的介绍一下微觀世界与我們所习惯了的巨大物体和巨大能量的宏觀世界不同的那些基本特性。

量 子 系 統

我們在日常生活和所有的技術領域里只碰到服從于古典物理學各種定律的大物體。這就是說，象物體的质量、能量與速度等量值，實際上可以為任意數值。德國物理學家蒲郎克在研究電磁輻射同物質的相互作用過程時，首次發現了不符合這些基本定律的現象。他發現能量由場轉移到物質和由物質轉移到場不能以任意的方式進行，只能以完全確定的份量，即以量子的形式轉移。後來，二十世紀最偉大的物理學家愛因斯坦創立了光量子論，這一理論的實質就在於光波中能量是以一定的份量——光量子的形式存在的。此外他還創立了光電效應的量子論，他解釋了光量子同物質相互作用的过程，這個过程導致從物質里擊出電子。不久，丹麥人玻爾又創立了基於原子內能的不連續性質的概念的原子結構論。

如果電子、質子及其它基本粒子在空間內自由移動，那麼它們可能具有任意的速度，亦即具有任意的動能。如果把原子和分子看作一個整體，那麼這一點也同樣適用。但如果這些基本粒子彼此間相互作用（例如構成原子，或由原子結合成分子），並且這種複雜系統的各部分之間的相互運動起主要作用，那麼情況便不相同了。這種微觀系統的內能不可能取任意值，只能具有完全確定的數值。這就是所謂能量量子化了。這就意味着，對於每一個系統，存在着完全確定的能量可能值。因此微觀系統的內能變化只能以各種能量可能值之間的躍遷方式進行。這些能量值（能級），既決定於系統本身的內部構造，也決定於其它系統對它的影響，例如過電磁場對它的影響。

在一般的情況下，能量可以很方便地用千瓦小時、千克力

等单位来测量，而在物理計算中則經常采用更小的量值——尔格。

在微观世界里使用另一些能量量度单位更为方便。原子物理学里广泛采用“电子伏特”这种能量单位，等于一个电子在 1 伏特的电场作用下所获得的能量。例如在辐射光量子时原子內能的变化大約有几个电子伏特。厘米波段无线电波电磁量子的能量只有万分之一或十万分之一电子伏特。这个量相当于分子轉动能的变化和实验室条件下一般所采用的磁场中順磁性离子的能量变化。因此，对于无线电波段来说，电子伏特这个能量单位仍嫌过大。

在厘米波段內，便于测量分子系统和原子系统的能量跃迁的单位不是用尔格或电子伏特，而是采用兆赫，这是一点也不足为奇的。为什么能用兆赫这种单位呢？因为能量同电磁波的频率是彼此密切相联系着的。一个系统的能量由 W_2 值变到 W_1 值（以尔格为单位），等于蒲郎克常数 ($h = 6.6 \cdot 10^{-27}$ 尔格·秒) 乘上该系统所辐射的电磁波频率（以兆赫为单位）：

$$W_2 - W_1 = h\nu_{12}.$$

10000 兆赫的能量恰恰相当于我們所感兴趣的分子轉动能变化的跃迁，而 1000 兆赫的能量則相当于一般磁铁磁场中順磁离子的能量。

因而，伴随着吸收或辐射无线电波的原子和分子的能量变化，能够用这种无线电波的频率很方便地表达出来。（图 1）

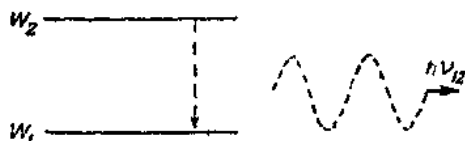


图 1 随着系统內能的减少 ($W_2 - W_1$) 便有一个电磁量子 $h\nu_{12}$ 辐射出来

我們注意到，分子的內能是由几个部分組成的。最大的一部分与电子的运动有关，相当于可見光的輻射与吸收；其次是分子中各原子的振动能，相当于紅外波。而整个分子轉动能的变化則导致无綫电波段內超高频的吸收或輻射。轉动与振动相互作用所产生的一小部分能量相当于数百兆赫的无綫电波。

因此，每一个分子或原子可由完全确定的能量状态来表征。

分子由一种能量状态跃迁到另一种能量状态就会輻射或吸收电磁量子，亦即輻射或吸收电磁波。如前所述，相当于这种电磁波的电磁振盪，其频率只跟分子內能的变化有关。每一次这种跃迁在分子的光譜中产生一定的譜綫，而該分子可能具有的全部跃迁則构成該分子的光譜。对于每一个孤立的分子來說，其光譜仅仅决定于它的內部构造，所以完全不会改变。因而在孤立的分子里，能量的任何自发变化都伴随着輻射频率严格确定的电磁振盪，因而相应的譜綫也必然很狭。这說明孤立分子可以作为理想的频率标准。

但是要从单独的分子获得显著的功率实际上是不可能的。要想取得足以实际应用的功率，就要求有大量的輻射粒子参加，这样往往导致輻射分子彼此之間、輻射分子与周围物体之間以及与电磁場之間发生互作用，并通过电磁場相互发生作用。

但是这时的能級就不再是固定不变的了。一切外部作用都会“扰乱”它們，使所輻射的电磁波频率发生变化。这时可能使被輻射的譜綫宽度发生变化，或者使譜綫最强处的位置变化，这要看扰乱的性质而定。所以在利用分子系統以获得稳定的振盪时，必須采取措施以減少一切扰乱分子能級的作用。以上所述，对于原子亦然。

每一种系统，其中包括原子或分子，能量最低的状态是最为稳定的状态。所以每一个这样的系统都竭力保持这种状态，如果起先它有剩余的能量，那也会跃迁到低能态上来。这就是说，所有的原子和分子必定都处于最低的能级状态。然而实际上都并非如此。

在分析有大量同样的原子或分子所参与的过程时，必须估计到杂乱热运动的影响。

热运动将一部分分子从能量最低的状态转移到某一些较高的能级上去。原因是：当分子互相碰撞时，一部分热运动的动能可能转变为分子内部运动能，譬如转变为原子相对于分子重心振动的能量。当然也可能产生相反的转变，即由分子的内能转变为前进运动能。这时的情形就跟在地球的重力场内空气分子分布的情形一样。在没有热运动的时候（在温度为绝对零度时），所有的分子都具有最低的位能，因而都集中于地表面。然而实际上空气分子都分布在相当厚的大气层里。很明显，处于地表面附近的分子，其位能都比处于高层空间的分子的位能为低，而且分子的能量随高度的增加而增加。由于杂乱热运动，分子便互相碰撞，并且互相交换所储备的能量。

大家知道，大气层的密度随高度增加而减小。这说明位能高的分子数量比位能低的分子少（图2）。这种分布，在数学上用有名的气压公式来表示。描述分

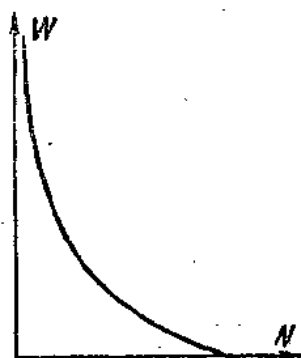


图2 大气层密度随高度而变化。分子位能 W 与海拔成正比，单位容积内粒子的数目 N （密度）在海拔高度每变动约6公里时减少一半

子在不同能态上的分布情形的定律称为波尔兹曼分布律。这一定律在我们所感兴趣的情形里也是适用的。

如果以频率乘蒲郎克常数为单位来测量两个能级之间的能量差，那么两个能级上分子数目的比可用一个非常简单的公式来表示：

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{h\nu_{12}}{kT}}$$

这里 N_1 是内能为 W_1 的分子数目， N_2 是内能为 W_2 的分子数目，恰好使 $W_2 - W_1 = h\nu_{12}$ ， h ——波尔兹曼常数 ($h = 1.38 \cdot 10^{-16}$ 尔格/度)， T ——绝对温度。由此可见，在低温下大多数分子都处于低能量状态，而随着温度的升高，两个状态上的分子数渐趋相等。然而只有当温度无限高时，才可能相等，但这实际上是永远也办不到的(图 3)。

因而，由许多分子所组成的系统自己就会处于由波尔兹曼公式来加以表述的动态热力学平衡状态之中。这一点说明了，当温度尚未改变时，系统里所发生的任何内部过程都不能导致系统偏离这种状态。但如果有一某种外部原因使系统越出了热力学平衡状态，那又会有什么样的结果呢？譬如我们突然降低盛着分子的容器外壳的温度。这时当分子碰撞容器四壁时，它所给予容器壁的平均能量将大于从容器壁所获得的能量。所以分子的平均能量将随时间而减少，经过一些时间以后，系统便进入另一种相当于低温的新的平衡状态。当然，在提高容器外壳的温度时也会发生类似的情形。这一类的变化都是按照一个最简单的定律进行的，可以用指数函数来加以表述。

这一定律还可以表述电容器通过电阻放电的过程。通常这类过程称为弛豫过程。

另外还有一种使系统超出平衡状态的可能。当温度不变

时，某些外部因素（其中一部分无重大作用）能因另一部分的作用而赋予分子附加的能量。这就是说，尽管整个系统的总能量仍然与平衡状态一无差异，但分子的能量分布则将不再保持平衡状态。然而由于能量在系统内部相互交换的结果，它又能重新进入平衡状态。这种过程也称作弛豫过程。

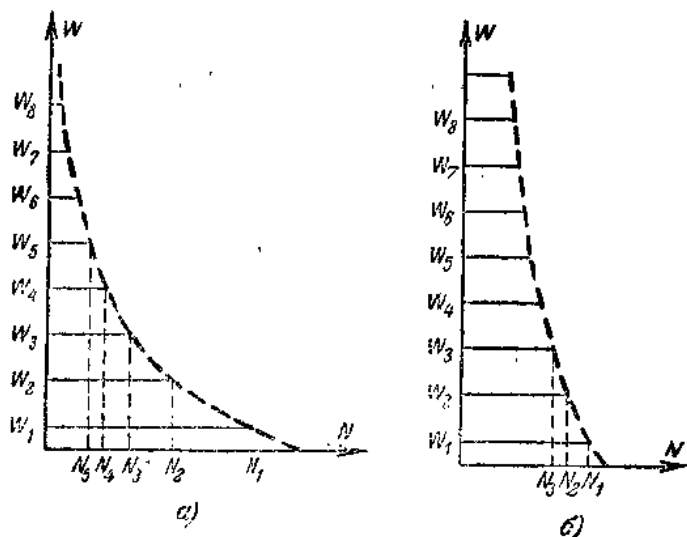


图 3 微观系统中粒子的分布
 a—低温时大多数粒子处于低能级；b—高温时粒子
 在各能级上的分布较为均匀

根据首先由爱因斯坦制定的光量子论所发展的电磁场量子论，场的能量以光子的形式而存在，亦即以一份份能量的形式而存在。对于频率为 ν 的电磁波，每一份能量等于 $h\nu$ ，不可能再少。所以分子同频率为 ν 的电磁波之间的能量交换只有当分子具有能量差为 $W_2 - W_1 = h\nu$ 的能级时方有可能。

分子同辐射场之间的相互作用取决于分子所处的状态。假设

分子有两个能級，其能量差恰恰等于分子所在的場的能量量子数值。設分子最初处于低能級上。这时，互作用的結果只能是分子吸收一个量子，由低能級跃迁到高能級。如果分子最初处于高能級，那么它跟場互作用的唯一結果是輻射一个光子。这时分子的能量减小(跃迁到低能級上去)，而場的能量增加。这一过程称为感应輻射，亦即由場所引起的輻射。

爱因斯坦还漸定，在这种情形下吸收的几率同感应輻射的几率是相等的。这一事实在分子振盪器和放大器里起着基本作用。这表明，如果場內有两个互不相干的分子，其中一个处于高能态，另一个处于低能态，那么同电磁場相互作用的結果，它們將具有同样的几率，第一个分子輻射一个光子，第二个吸收一个光子，結果場能的总平衡状态仍未改变。

除了这两种过程以外，还存在着一种自发輻射过程。这时处于高能态的分子，不以外部場为轉移，輻射出一个光子，而跃迁到低能态上去。但是这种过程对于我們并无重大的意义，因为在无綫电波段里它的几率微乎其微。

另外还必须提到一点，要想使分子能够同場相互发生作用，单单实现頻率的条件还是不够的。問題在于頻率条件实质上只是表达了能量守恒定律，即分子能量的变化必定等于場的能量的变化。滿足这一定律是必不可少的，但这还不足以实现能量跃迁。此外，在实现这种跃迁时还必须滿足其它一些定律，如在宏观世界中发生作用的冲量守恒定律以及微观世界里的一系列专门定律，象对称守恒定律和其它一些导出所謂选择定則（禁阻一系列可能的能量跃迁的定則）的定律。

从以上所述的各种規律中，可以得出一条重要的結論。

因为在平衡状态下，大部分分子总处在所研究的一对能态中的低能态上，而每一个分子吸收和感应輻射的凡事又都是等

同的，所以在这些条件下从場中吸收能量的作用数总比感应輻射的作用数多。这說明为什么在一般条件下物质总吸收电磁波。电磁波愈强，吸收也就愈强。所以在吸收过程中便出現一种破坏热力学平衡的傾向。这种傾向受到力图使系統恢复平衡状态的张弛过程的反作用。

如果电磁波的場很强，那么张弛过程便无法对場的影响产生反作用，結果吸收作用占优势，分子由低能态跃迁到高能态，这两个能級上的分子数实际上便可能达到相等。繼續增加場强，就已經不能再加强吸收的作用了。被吸收的能量不可能比因张弛过程从介质中取得的能量更大。这时我們說达到了飽和状态，这个过程就叫做飽和效应。

我們把剛才談到的关于吸收与感应輻射之間的竞争过程再来重述一遍。因为对于每一个单独的分子这两种过程的几率都是相等的，所以結果总是如下所述：确定处于高能态的分子数，令其等于 N_2 ，再从低能态的分子当中分出同样数目的分子。这时第一組分子的輻射的平均值将被第二組分子的吸收完全补偿，因而这两組全部分子都不参与形成最終的結果。一切都将决定于处于低能态上的分子余数 $N_1 - N_2$ ，正是这些分子实现吸收的过程。

如果場强不大，而张弛过程却足够强，能保持热力学平衡，那么实现吸收过程的分子数很容易計算出来，这个数目等于：

$$N_1 - N_2 = \frac{h\nu}{2kT} N,$$

式中 $N = N_1 + N_2$ ——分子的总数。

因而含有 N 个处于热力学平衡状态分子的气体所吸收的能量，不大于仅含有全部处于低能态的 $\frac{h\nu}{2kT} N$ 个分子的气体所

吸收的能量。

但如果場的作用大大超过弛过程的作用，那么热力学平衡便遭破坏并且場愈强， $N_1 - N_2$ 的差数就愈小。

到现在为止，我們还没有看到由分子系統获得无綫电波輻射的可能性。实际上在处于热力学平衡状态下的系統里，这确实是不可能的，因为这里吸收的作用胜过感应輻射，而自发輻射則小得不起任何作用。

为了获得輻射，就必须找出一种方法，强烈地破坏热力学平衡，使高能态的分子数超过低能态的分子数。这正是建立分子放大器和振盪器所必須解决的一项基本任务(图 4)。

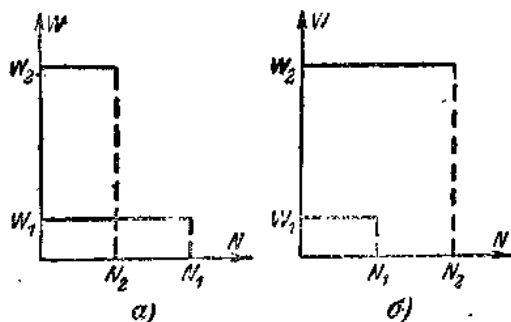


图 4 具有两个能级的量子系統
a—吸收状态($N_1 > N_2$)；b—活化状态($N_2 > N_1$)

如果这项任务得以解决，那么感应輻射就将超过吸收，因而分子系統就能把自己的一部分內能給予电磁場。当电磁波通过这种介质时，其强度就将随着向介质內部深入而增长，而介质則由于与电磁波互作用逐渐趋近于热力学平衡状态。

創立一种能够把自己的能量交給电磁波的量子系統的可能性，亦即用实验方法获得感应輻射的可能性，在 B. A. 法勃里康特的博士学位論文里就首次論証过了。他这篇論文是1939年

在苏联科学院物理研究所答辯通过的，內容于 1940 年出版公布过。但是这篇开路先鋒的著作里所提出的思想經過十五年后才由技术提供了实现的可能性，因此它被人們平白无故地遺忘了。

这种可能性只是过了十年后(1950)才被美国的物理学家普塞尔和潘得用实验証实了，但他們的研究的意义人們并未立即給予充分的評价。他們的实验的实质可簡述如下：許多种原子的核都具有磁性，也就是說在磁場里的性能就跟小磁体一样。这种情形，物理学家就說核具有磁矩。实验是用氟化鋰 (LiF) 晶体进行的。組成这种晶体的氟离子与鋰离子，在空間內形成一定的結構，叫做品格。尽管这时离子間的联系力很强，但氟和鋰的核不仅可以在本身平衡位置的周圍振動，而且还可以在空間內轉動。

在磁場的作用下，核就象小磁針一样，力图轉動，使其磁矩的取向与磁場一致。这相当于在磁場中的最低能态。根据量子力学定律，与核在磁場中取向相連系的能量只能具有完全确定的数值。对于氟核來說，只可能有两种取向——順磁場与逆磁場。而对于鋰的基本同位素的核而言，則有四种取向。

如果氟化鋰晶体的溫度接近絕對零度，那么所有的氟核将逐漸轉向在能量上較為有利的方向——順磁場方向。在較高的溫度下，一部分核从晶体的热能中获取一份多余的能量而轉向逆磁場方向。鋰核也同样根据波尔茲曼定律分布于各种可能的能态上。

如果把氟化鋰晶体置于电磁波場內，电磁波的頻率相应于順磁場方向和逆磁場方向的氟核能量差，那么順磁場方向的核(即低能态的氟核)便会由場中吸收一个能量子，因而轉入逆磁場方向。这样，晶体便吸收了电磁波的能量。鋰核的作用也与

此类似。

現在我們来想象一下这样一种实验：将氟化锂晶体长时间放置于磁场内，实验者突然改变磁场的方向，使与原来方向恰恰相反。但是核的取向不可能变化得如此突然。所以大部分核处于逆磁场方向，亦即处在能量上不利的状态，——具有剩余的能量。如果此后又将与先前频率相同的电磁波作用于晶体，那么晶体将不是由电磁波里吸取能量，而是放出自己多余的能量。

这种实验已经实现了。实际情形当然要复杂得多。实验的结果可记录在纸带上，图5所示即为这种记录带的一段。向上的波峰相当于吸收能量。在箭头所示的瞬间内，作用于晶体的磁场方向突然改变。由此观察到的便不是吸收而是强烈的辐射，但是由于转至顺磁场方向，晶体逐渐趋向平衡状态，因而辐射的强度亦随之逐渐减弱。当两种不同取向的核数目相等时

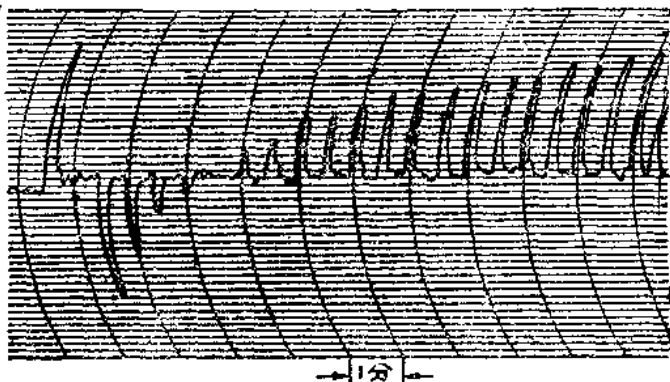


图5 LiF 晶体对电磁能量的辐射和吸收（蒲塞尔与潘得的实验）

左侧波峰是吸收，这时晶体在恒定磁场内处于热力学平衡状态。箭头表示磁场逆转的瞬间。由于逆转的结果，晶体便处于活化状态，把能量给予电磁场。由图中可以看出逐渐向平衡状态过渡。