

放射物理与防护

肇庆医学高等专科学校

梁淼林

2020/8/15



第三节 磁共振

一、核磁矩在静磁场中的进动

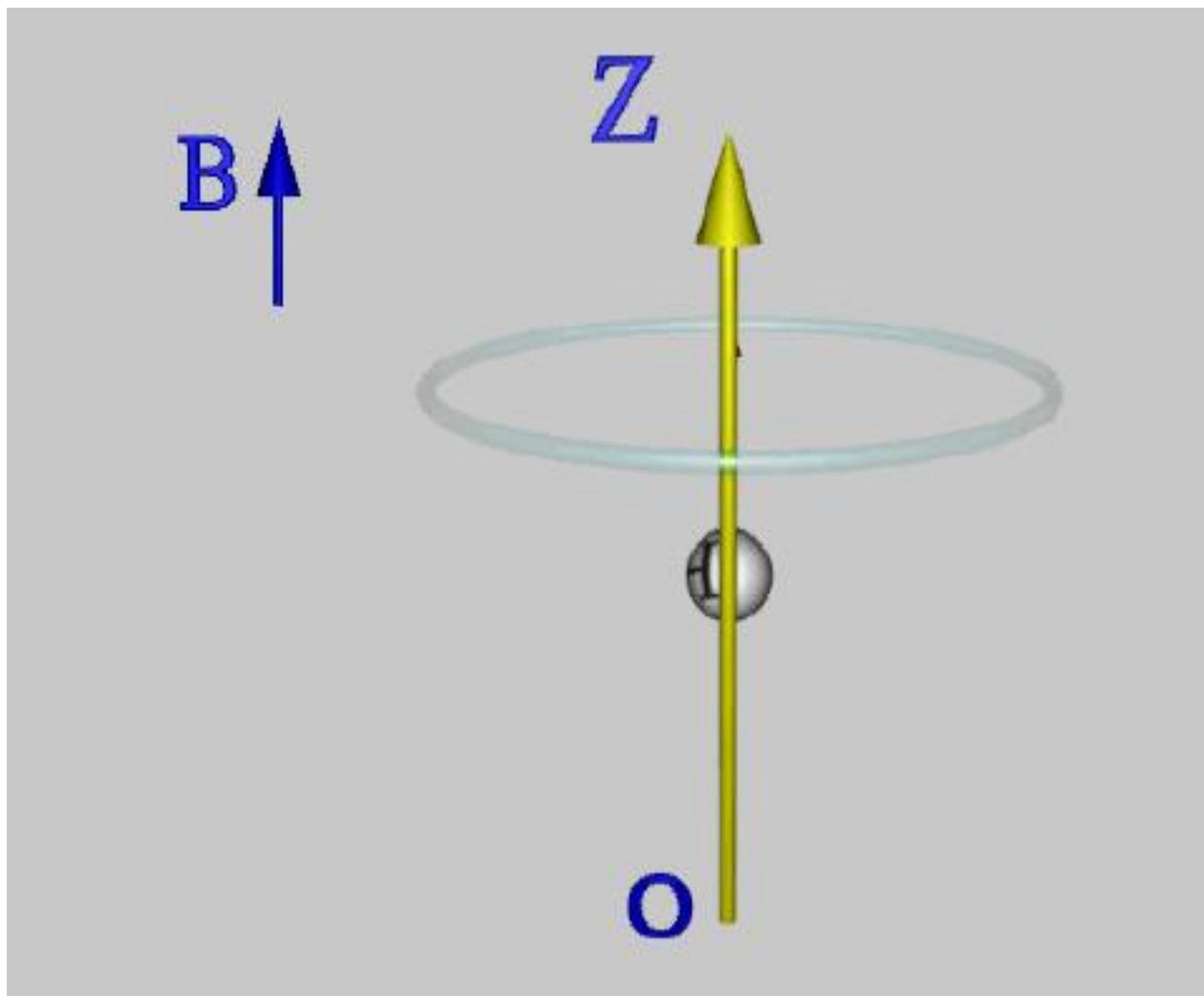
1、进动(或旋进)

自旋核有一定的自旋角动量和核磁矩,当自旋核处于磁感应强度为 B_0 的静磁场中时,它的轴向将与磁场方向成一角度 θ ,在磁力矩的作用下,核子在自身旋转的同时,又以 B_0 为轴进行进动,又称旋进.

$$(1) \text{磁力矩: } \vec{M} = \vec{\mu} \times \vec{B}_0 \begin{cases} \text{大小: } M = \mu B_0 \sin \theta \\ \text{方向: 右手螺旋} \end{cases} \quad (1-27)$$

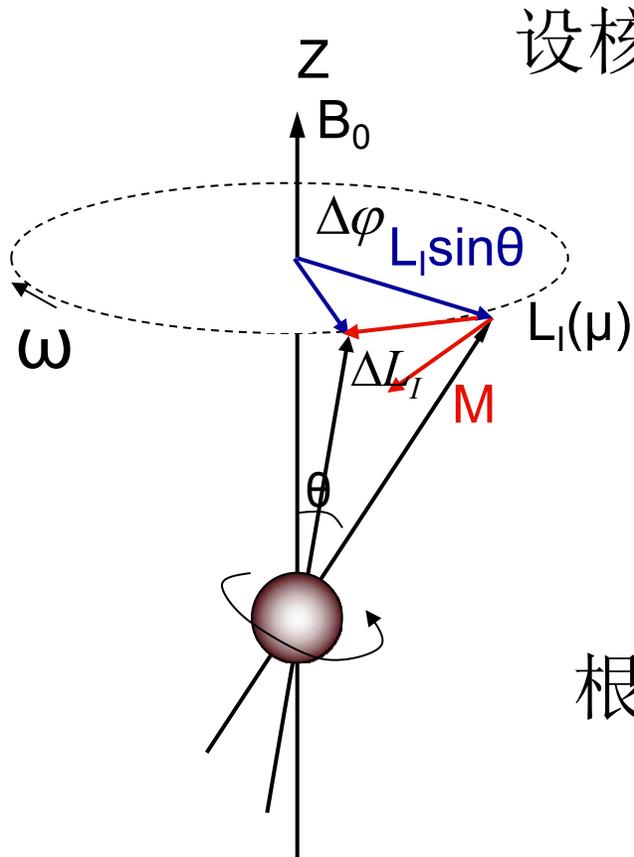


第三节 磁共振





(2)拉莫尔旋进



设核角动量旋进的增量为 ΔL_I

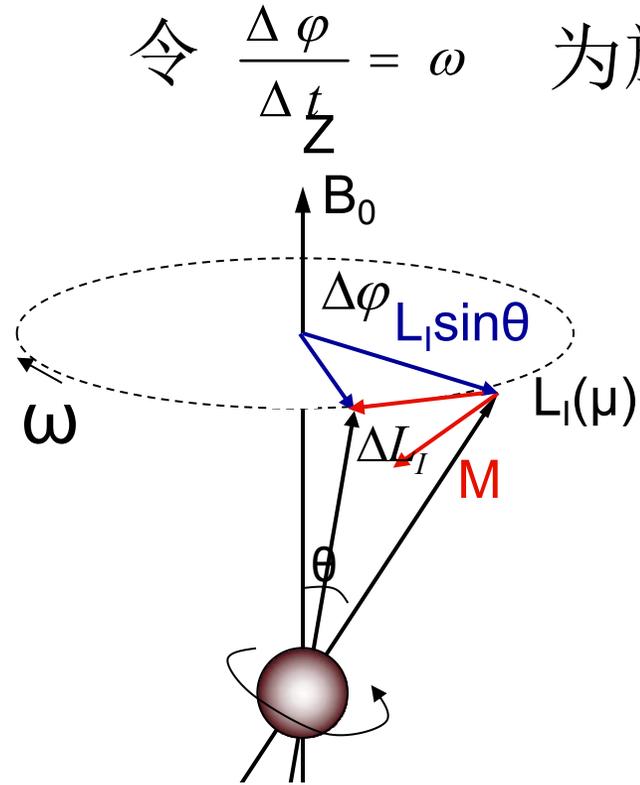
$$\Delta L_I = L_I \sin \theta \cdot \Delta \varphi$$

两边除以 Δt ,得

$$\frac{\Delta L_I}{\Delta t} = L_I \sin \theta \cdot \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$$

根据角动量定理有:

$$\frac{\Delta L_I}{\Delta t} = M = \mu B_0 \sin \theta$$



(3)拉莫尔方程

令 $\frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \omega$ 为进动频率,称为拉莫尔频率

$$\begin{cases} \frac{\Delta L_I}{\Delta t} = L_I \sin \theta \cdot \omega \\ \frac{\Delta L_I}{\Delta t} = M = \mu B_0 \sin \theta \end{cases}$$

有 $L_I \sin \theta \cdot \omega = \mu B_0 \sin \theta$

$$L_I \omega = \mu B_0$$

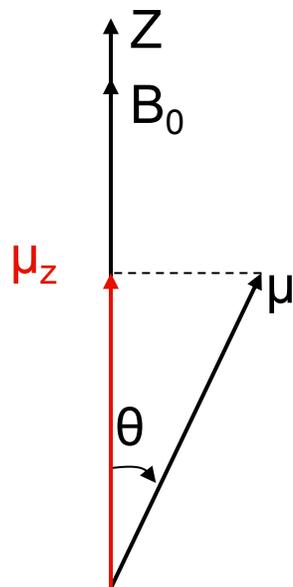
$$\omega = \frac{\mu B_0}{L_I} = \gamma B_0 \quad (1-28)$$

核磁矩在恒定磁场中将绕磁场方向进动,进动的角频率 ω 率取决于核的磁旋比 γ 与磁场的磁感应强度 B_0



二、磁共振现象

(1)原子核的能级 将 $I \neq 0$ 的原子核置于静磁场 B_0 中,磁场对核磁矩的作用力将使核磁矩具有一定的附加能量—势能



$$E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}_0 = -\mu B_0 \cos \theta$$

$$E = -\mu_z B_0 \quad (1-29)$$

根据式(1-26) $\mu_z = \gamma L_{Iz} = \gamma m \hbar$

$$E_m = -\gamma \hbar m B_0 \quad (1-30)$$

核磁矩在静磁场中的能量也是量子化的,这些不连续的能量值称为**原子核的能级**



(2)两相邻能级的能量差

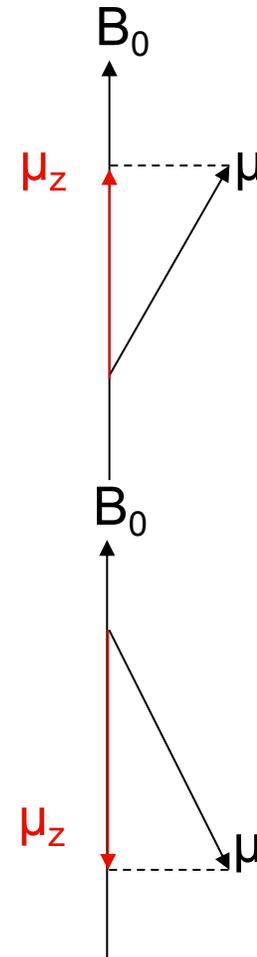
磁场中核的能级数目决定于核自旋量子数 I ,能级总数为 $2I+1$

当磁量子数 m 为**正值**的哪些状态,核磁矩 μ 与静磁场 B_0 方向相同,其能量为负值,称为**低能态**

$$E_m = -\gamma\hbar m B_0$$

当磁量子数 m 为**负值**的哪些状态,核磁矩 μ 与静磁场 B_0 方向相反,其能量为正值,称为**高能态**

$$E_m = -\gamma\hbar m B_0$$

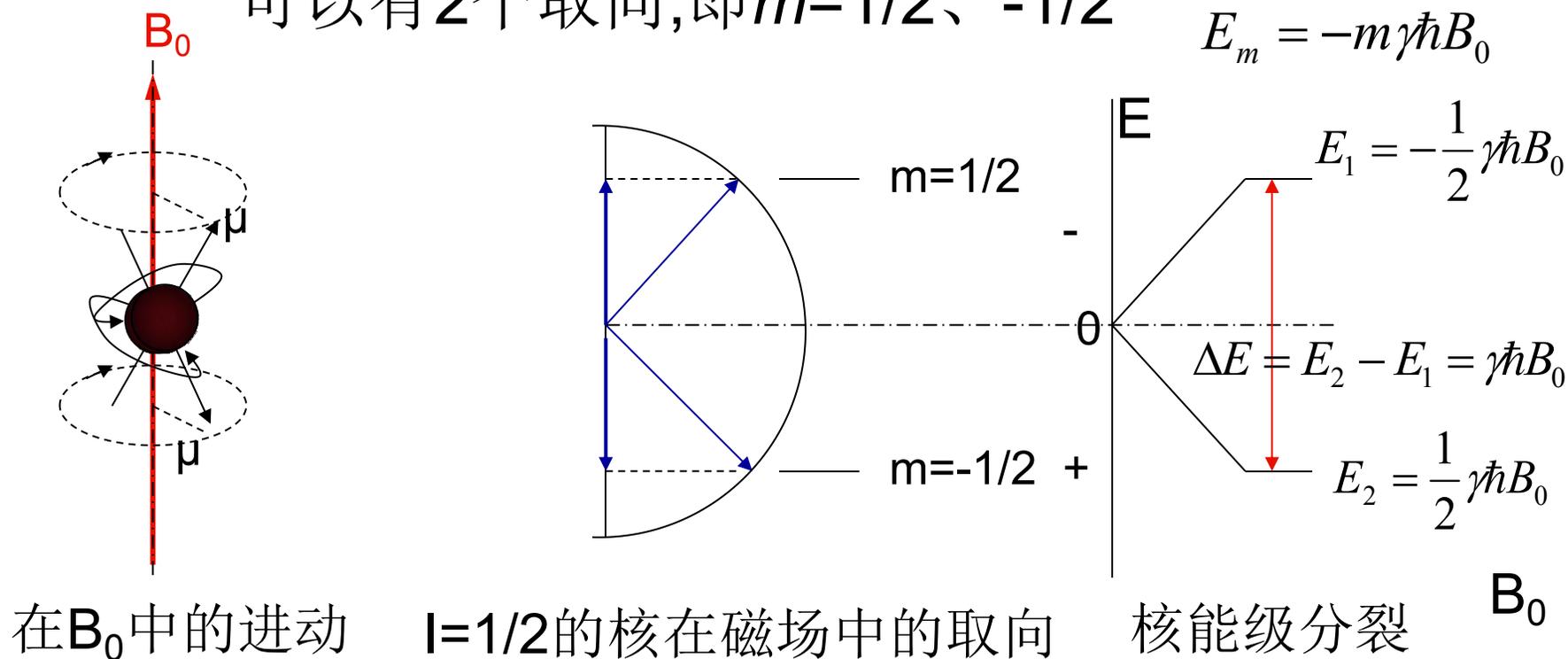




讨论

(1) $I=1/2$ 的氢核 1_1H 磁矩又称质子磁矩

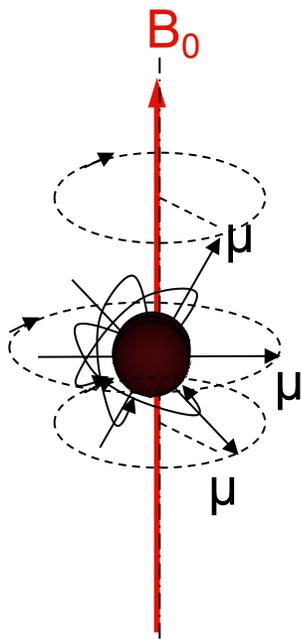
对于 $I=1/2$ 的核,在磁场中的自旋状态可以有2个取向,即 $m=1/2$ 、 $-1/2$



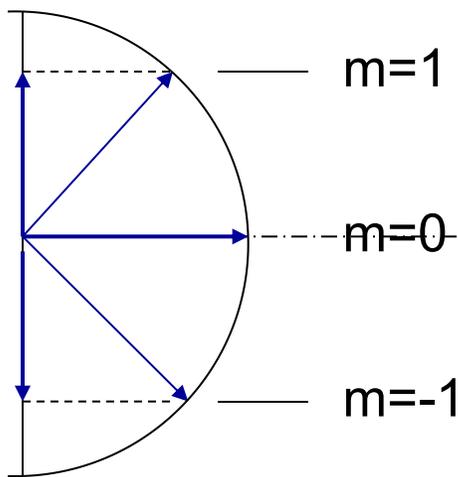


(2) $l=1$ 的氢核 2_1H 磁矩

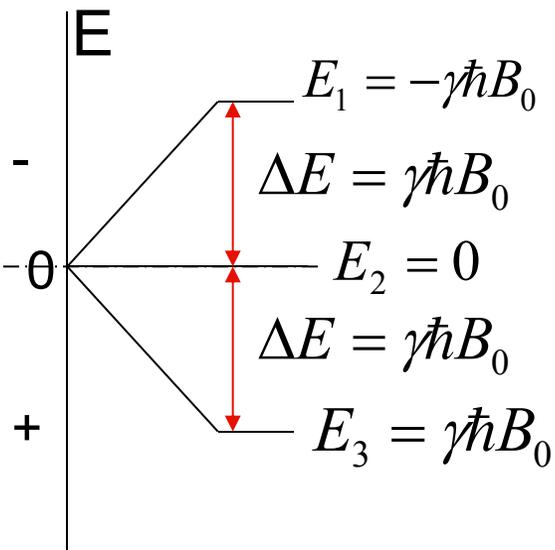
对于 $l=1$ 的核, 在磁场中的自旋状态可以有3个取向, 即 $m=1$ 、 0 、 -1 。



在 B_0 中的进动



$l=1$ 的核在磁场中的取向



核能级分裂 B_0



$$\Delta E = E_{m+1} - E_m = \gamma \hbar B_0 \quad (1-31)$$

只有磁量子数之差(Δm)为 ± 1 时,相邻两能级间的跃迁才是允许的

(3) 核磁共振现象(nuclear magnetic resonance, NMR)

处于磁场中的氢核磁矩,若同时在垂直于 B_0 的方向施加一个交变电磁场(电磁波)RF,当RF的频率所决定的能量与两相邻能级之间的能量差相等时,氢核磁矩就有可能吸收电磁波的能量,使部分氢核被激发,称为**共振吸收**。停止RF照射,处于激发态的氢核磁矩将会回到低能级、同时**发射RF**,整个吸收和发射的过程称为**核磁共振**。



$$h\nu = \Delta E = \gamma\hbar B_0$$

$h\nu$ 为电磁波辐射能量

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

$$h\nu = \Delta E = \gamma\hbar B_0 = \frac{h}{2\pi} \gamma B_0$$

$$2\pi\nu = \gamma B_0 \qquad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

磁共振条件:

$$\omega = \gamma B_0 \qquad (1-32)$$

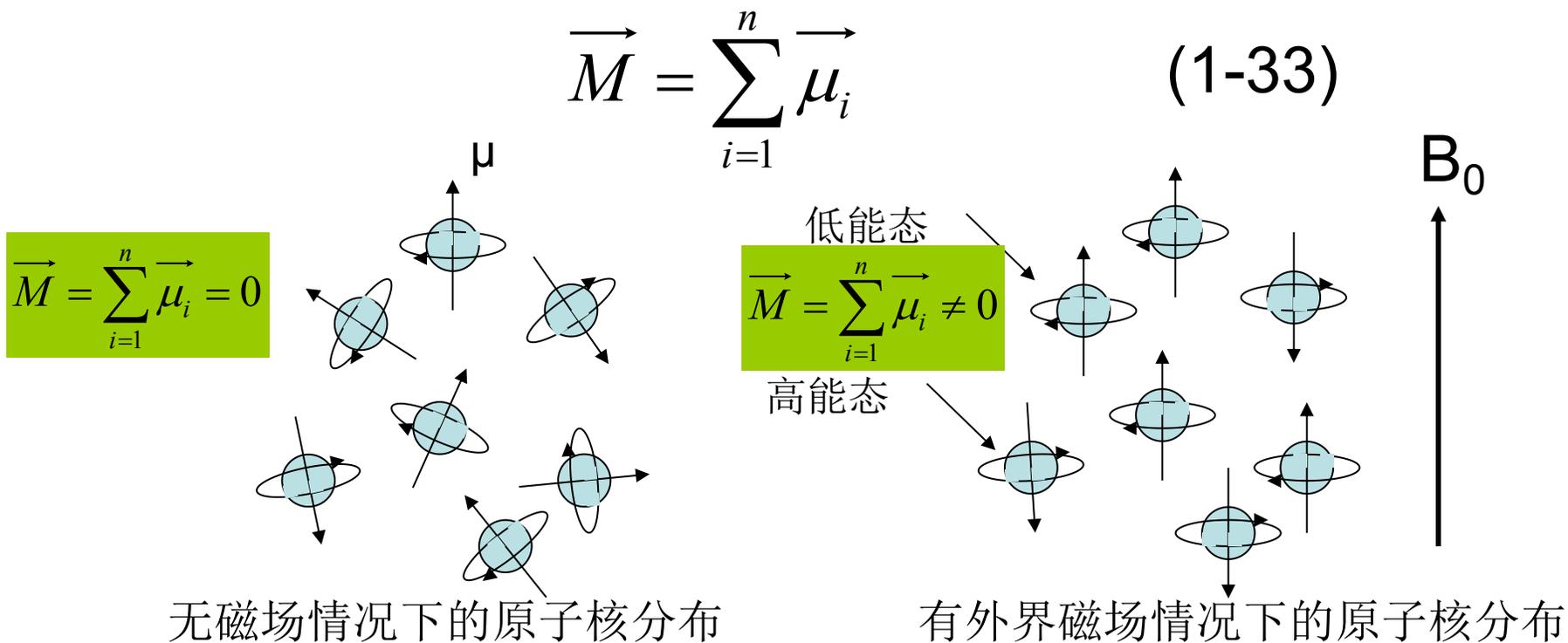
原子核发生共振吸收时的射频场的角频率 ω 等于自旋核在磁场中旋进的角频率.

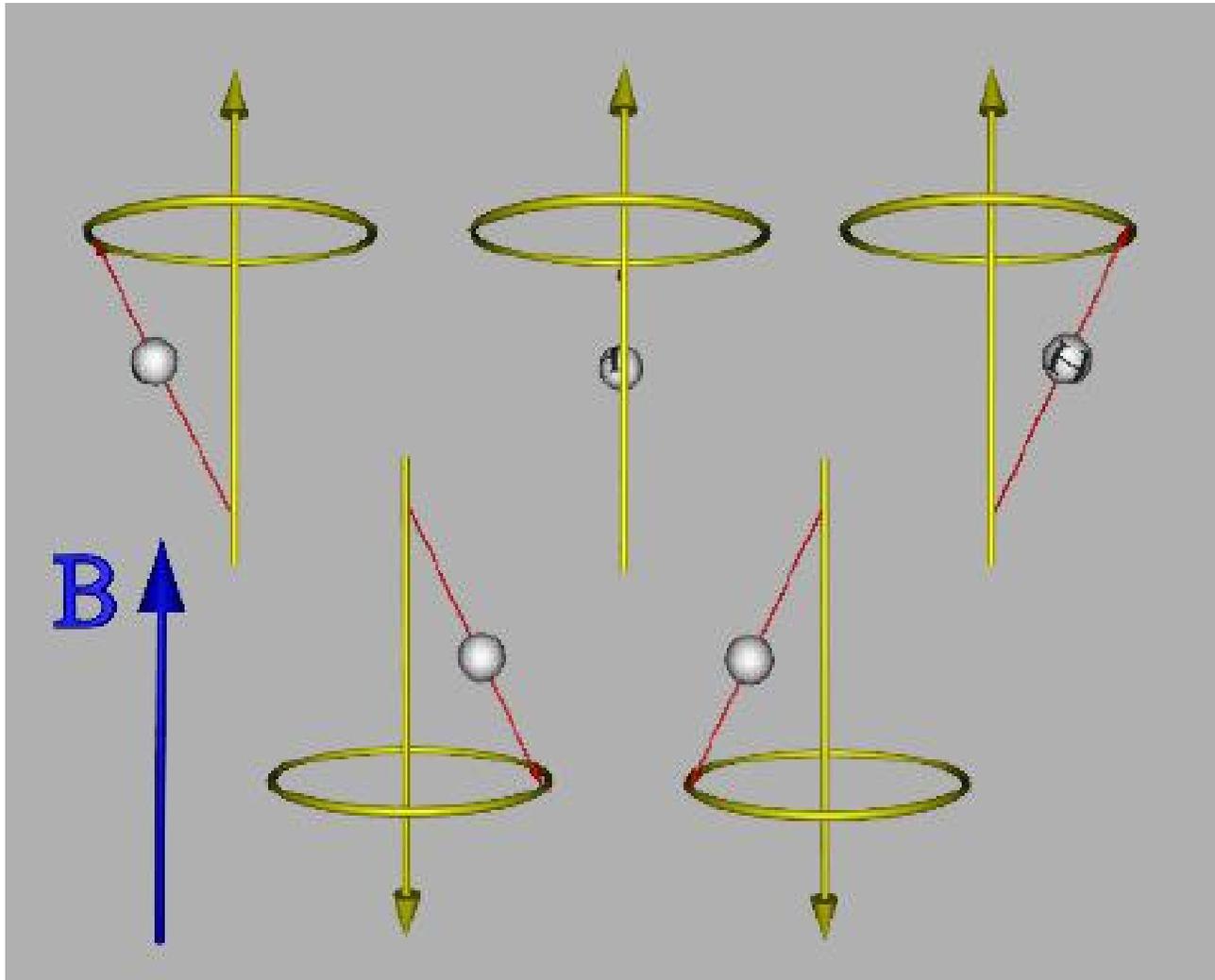


三、核自旋弛豫

1.磁化强度矢量M （宏观磁矩）

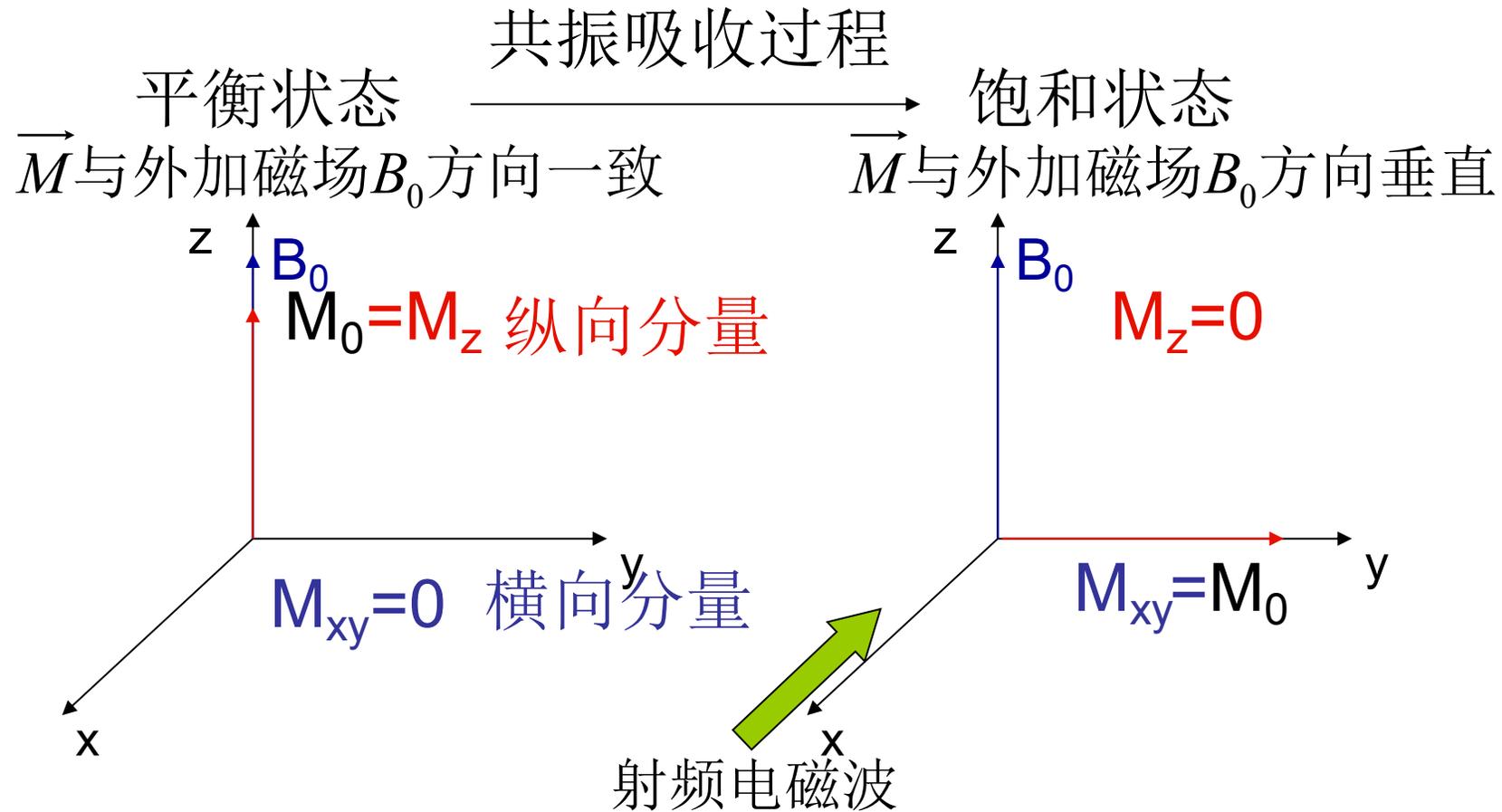
组成物体的大量的原子核磁矩的矢量总和.

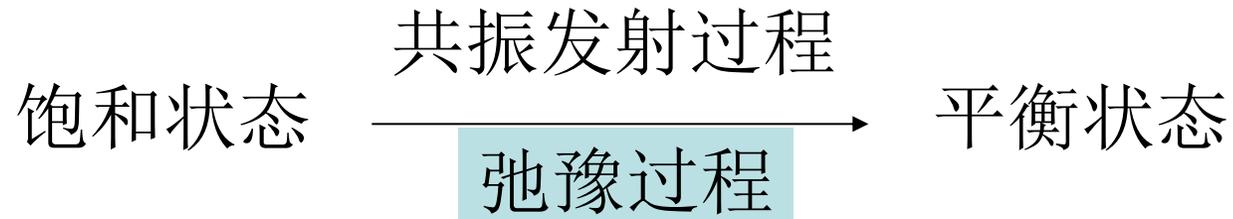




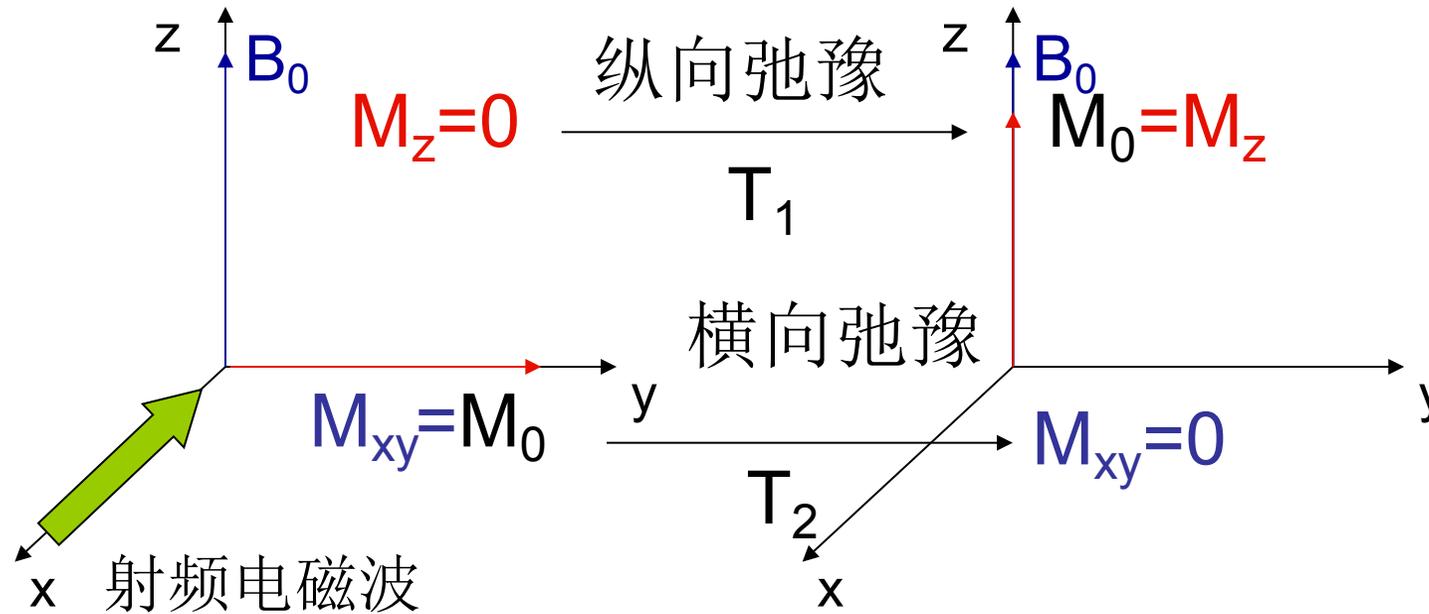


2.磁化强度矢量 \vec{M} 的纵向分量 M_z 和横向分量 M_{xy}





结束电磁波照射





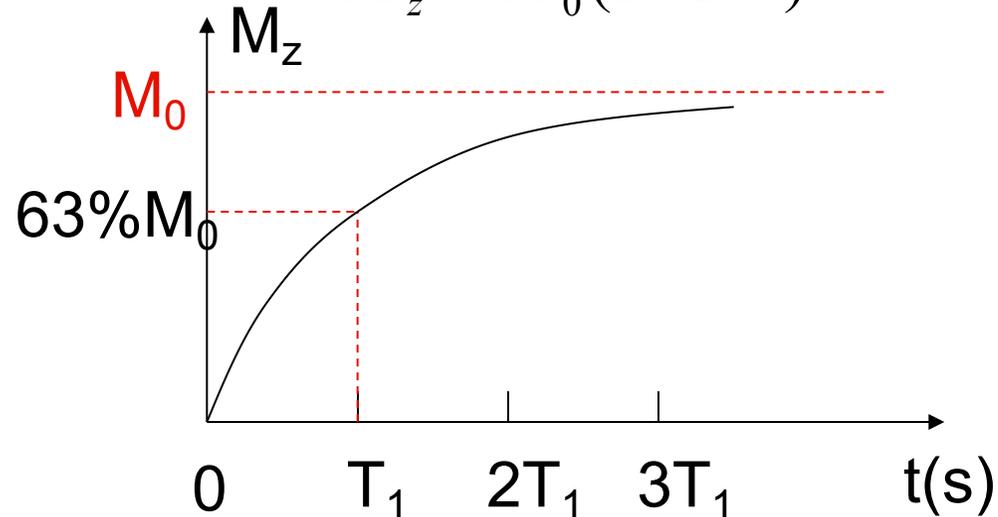
3. 纵向磁化强度矢量 M_z 和横向磁化强度矢量 M_{xy} 随时间变化曲线

纵向弛豫

(1) 纵向弛豫时间 T_1 :

M_z 从零回复到最大值 M_0 的63% 时所需的时间 T_1 .

(2) T_1 弛豫曲线: $M_z = M_0(1 - e^{-\frac{t}{T_1}})$





横向弛豫

(1) 横向弛豫时间 T_2 :

M_{xy} 从最大值减小至最大值 M_0 的 37% 时所需的时间 T_2 .

(2) T_2 弛豫曲线: $M_{xy} = M_0 e^{-\frac{t}{T_2}}$

