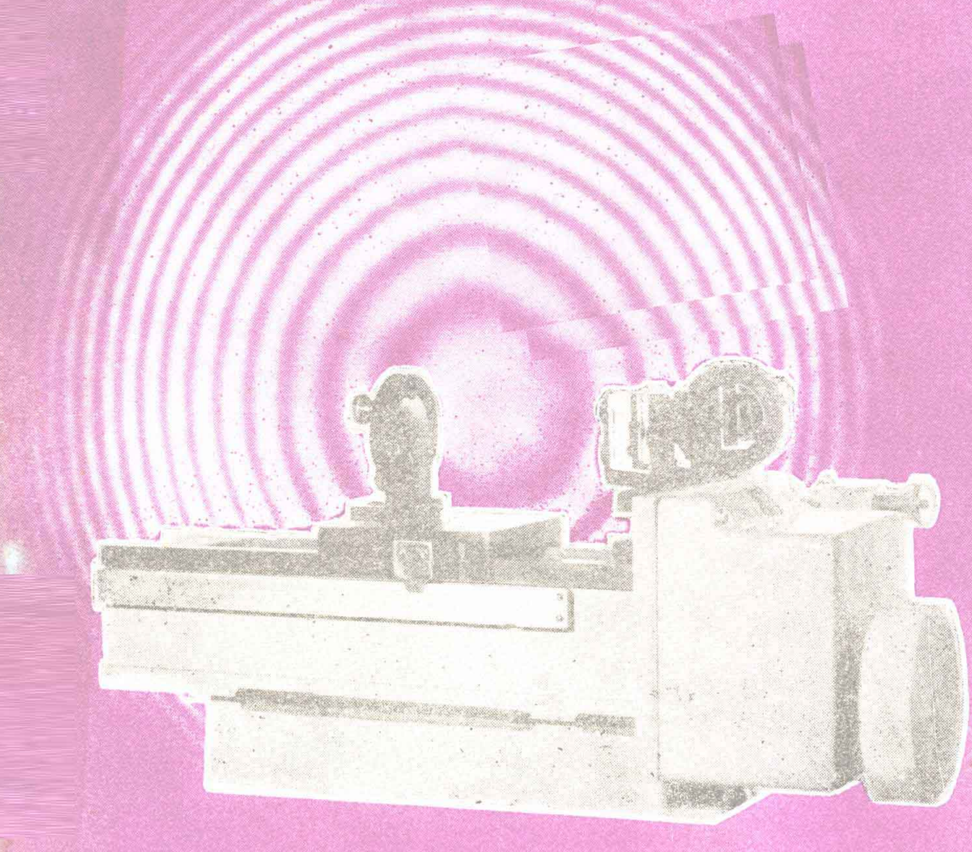
高等学校试用教材

大学物理学

振动、波动与光学

杨仲耆 等编



大学物理学

高等学校试用教材

大学物理学

振动、波动与光学

杨仲耆 等编

人民教育出版社

本书内容有：振动(机械振动和电磁振荡)、简谐波、光的干涉与衍射、光的偏振和非线性光学简介。本书从振动、波动与光学的一些现象入手，对其基本概念、基本规律作了较深入的论述，对某些规律的应用也作了一些介绍。书中例题、习题较多，有助于对基本概念和基本规律的理解。习题附有答案。

本书可作为高等工科院校对物理要求较高的专业的普通物理教材，也可供有关读者参考。

本书由高敦怡等执笔，刘书声修订。

高等学校试用教材

大学物理学

振动、波动与光学

杨仲耆 等编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

黄冈报印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 字数 240,000

1981年5月第1版 1982年2月第2次印刷

印数25,501—35,500

书号13012·0616 定价0.88元

前　言

本书是以天津大学物理教研室历年所编写的讲义为基础，参考国内外先进教材，根据1977年11月西安工科院校物理教材会议讨论过的编写大纲编写的。

编写时我们注意了以下各点：

一、在保证经典理论的基础上，加强了近代理论。对牛顿力学、电磁学和波动过程等经典部分作了适当的选择和安排。将狭义相对论基础知识列于牛顿力学之后。以上各部分共占全书篇幅的3/4，其余1/4篇幅对量子和统计物理基础作了初步论述。

二、力图以能量观点、守恒定律、迭加原理和波动特征等基本概念贯穿于全书，以使物理学的基本知识有机的联系起来。

三、注意引导和培养学生运用高等数学分析和解决物理问题的能力。本书宜于第一学年第二学期开课讲授。

四、例题、习题较多，可选择讲授。讲授时间为140—180学时。

本书拟分为力学；电磁学；振动、波动与光学；量子与统计物理基础等四册。

本书初稿经西北工业大学、华中工学院、华南工学院、武汉钢铁学院及我校共三千多名学生试用，他们提了很多宝贵意见；本册修改后承上海交通大学程守洙教授、南开大学赵景员教授、哈尔滨工业大学洪晶教授、北京邮电学院施国钧教授、重庆大学刘之郇教授、华中工学院蒋祺瑞副教授、华东石油学院戈革副教授、华南工学院赵世副教授和华东水利学院陈宏贲副教授等兄弟院校代表的审阅；在编写过程中，我校物理教研室同志从各方面给予了大力帮

助，对此我们一并表示衷心的感谢。参加本书编写的有杨仲耆、倪守正、高敦怡、刘书声、马世宁和陈宜生，廖惕生负责插图设计，杨仲耆统稿。本书尚欠成熟，某些方面仅是初步尝试，有待于在教学实践中逐步提高。限于水平，缺点和错误在所难免，请批评指正。

编　者

1980年9月

目　　录

第三篇　振动、波动与光学

第一章　振动……………………………………………………2
§ 3-1-1　谐振动……………………………………………2
§ 3-1-2　无阻尼电磁振荡……………………………………22
§ 3-1-3　阻尼振动和受迫振动　共振……………………………30
§ 3-1-4　迭加原理……………………………………………45
§ 3-1-5　同方向谐振动的合成…………………………………48
§ 3-1-6　相互垂直方向谐振动的合成……………………………59
*§ 3-1-7　振动的分解　频谱……………………………………65
习题……………………………………………………81
第二章　简谐波…………………………………………………88
§ 3-2-1　机械波的产生　一维简谐行波……………………………88
*§ 3-2-2　金属杆中的纵波　波速…………………………………96
§ 3-2-3　机械波的能量　能流密度………………………………100
§ 3-2-4　惠更斯原理　衍射现象…………………………………103
§ 3-2-5　波的迭加原理　波的干涉………………………………108
§ 3-2-6　驻波………………………………………………113
§ 3-2-7　多普勒效应…………………………………………120
§ 3-2-8　电磁波　坡印廷矢量…………………………………124
§ 3-2-9　电磁波谱* 色散……………………………………143
§ 3-2-10　声波………………………………………………147
习　题…………………………………………………163
第三章　光的干涉与衍射……………………………………168
§ 3-3-1　光的双缝干涉　光程…………………………………169
*§ 3-3-2　时间相干性与空间相干性………………………………179
§ 3-3-3　薄膜干涉……………………………………………187

§ 3-3-4　迈克耳孙干涉仪……206
§ 3-3-5　惠更斯-菲涅耳原理……211
§ 3-3-6　单缝衍射……213
§ 3-3-7　衍射光栅……224
*§ 3-3-8　圆孔衍射……236
§ 3-3-9　伦琴射线的晶体衍射……253
习　题……259
第四章　光的偏振……264
§ 3-4-1　自然光和偏振光　起偏和检偏……264
§ 3-4-2　布儒斯特定律及其应用……267
§ 3-4-3　双折射现象及其应用……274
§ 3-4-4　马吕斯定律　偏振光的干涉……287
*§ 3-4-5　偏振面的旋转……292
习　题……294
***第五章　非线性光学简介**……296
附录　常用的物理常数……307
习题答案……308

第三篇　振动、波动与光学

振动与波动是物质运动的基本形式之一，它们广泛地存在于科学技术的各个领域和人们的日常生活之中。许多机械设备和仪器仪表中的一些部件，如汽缸里的活塞，钟表里的摆轮等都在振动着。人们听到声音的时候，寻找声源，必有物体在振动。深入到物质结构的内部、固体中的分子和原子也在不停地振动着。此外，有一些物理量，它们在某一数值附近随时间作周期性的变化，也属于振动的范畴。例如，激光管中的光在两面反射镜中间往复地运动；在交流电路中电压和电流在振荡着；在交变电磁场中，电场和磁场的强度随时间作周期性的变化。波动是振动的传播过程。例如，声波、地震波是机械振动在弹性媒质中的传播过程；而电磁波（无线电波、光波、伦琴射线、γ 射线等）则是电磁场振荡的传播过程。机械振动、机械波和电磁振荡、电磁波虽然本质不同，但它们却能用同样的数学方程来描述。这反映出自然现象之间有着一定的相互联系。当我们进入微观世界时，会发现微观粒子（如电子射线）还具有某种波动性；微观粒子的波粒二象性导致了量子力学的建立。

本篇论述的内容有：机械振动与电磁振荡的基本规律，机械波与电磁波的基本规律，光的干涉、衍射、偏振等现象和规律，最后对非线性光学也作了简单介绍。

第一章 振　动

物体(或物体的一部分)在平衡位置附近来回地作周期性运动叫做机械振动，简称振动。

振动现象是多种多样的，其中最基本最简单的振动是谐振动。一切复杂的振动都可以分解成为若干个谐振动，或者说是这些谐振动的合成效果。本章将讨论谐振动的基本规律，以及振动的合成与分解问题。

§3-1-1 谐　振　动

一　弹簧振子的谐振动

把一个轻弹簧左端固定，右端系一物体 m，放在摩擦力很小(可略去不计)的水平气垫导轨上，将物体稍微移动后，它就在弹性力的作用下左右来回自由振动。这整个系统叫做**弹簧振子**(图 3-1-1)。

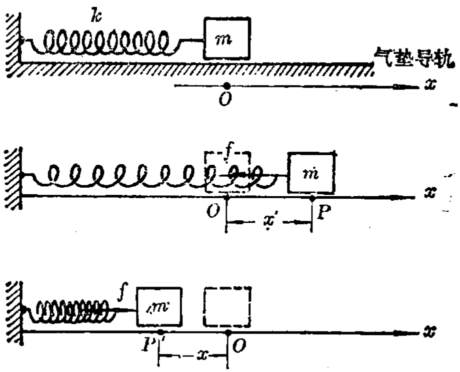


图 3-1-1　弹簧振子

设物体在位置 O 处时，弹簧既没有被拉长，也没有被压缩，这时物体 m 沿导轨不受力的作用，这个位置叫做平衡位置。以这时 O 为坐标原点，以平行于导轨的水平线为坐标轴 x，并设 x 轴的正向向右。

当物体对平衡位置有一位移 x 时，无论是在平衡位置的右方还是左方，物体都将受到一个弹性力的作用，因为此时弹簧被伸长或压缩。根据胡克定律，物体所受的弹性力和位移成正比，且永远指向平衡位置，这个力 f 可表示为

$$f=-kx$$

式中 k 为弹簧的倔强系数；负号表示力和位移的方向相反，即弹性力的方向总是指向原点(平衡位置)(图 3-1-1)。

在运用数学工具分析弹簧振子的运动以前，我们先定性地考察一下它的运动情况。在图 3-1-1 中，把物体拉到平衡位置右方的 P 点，然后放手，它将在弹性力的作用下运动。在物体从 P 点到 O 点的整个运动过程中，弹簧都是处在伸长状态，物体始终受一个指向原点的弹性力，向原点作加速运动。当物体达到原点时，它所受的弹性力为零，加速度也为零，但它的速度则因前面这段加速过程，在此而达到了某个最大值。由于物体的惯性，物体到达原点后并不静止下来，而是向左方继续前进。当物体越过原点到达平衡位置左方时，弹簧被压缩，物体仍受一指向原点的力，这个力阻碍物体向左运动。所以，物体在越过原点后向左的运动是一减速运动，直到最左端的 P' 点，物体速度减小至零。物体达到 P' 点以后，也不可能静止下来，因为此时它受到一个相当大的弹性力要把它推回原点，所以物体要反过来向原点作加速运动。回到原点后，物体速度又达到最大值，故必将越过原点继续向右运动，直到最右端的 P 点，物体的速度减小至零。物体达到 P 点以后，也不可能静止下来，又要在弹性力的作用下反过来向原点作加速运动。如此往复

运动，循环不已。

由此可见，这种运动是一个不断重复着的周期性运动。而且，对于这种运动，物体在原点的速度最大，加速度为零，但在左右两个端点则速度为零，加速度为最大。

二 谐振动的运动方程

下面，我们根据牛顿第二定律求出作谐振动物体的运动方程。方法和第一篇中§ 1-3-5 所论述的方法一样，先建立描写物体运动的微分方程。

由于在振动问题中 $f=-kx$，将它代入 $f=ma$，可得

$$ma=-kx \quad 或 \quad a=-\frac{k}{m}x$$

因为 k 和 m 都是正的恒量，所以它们的比值可用另一恒量 ω_0 的平方来表示，即令 $k/m=\omega_0{}^2$，从而可得

$$a=-\omega_0{}^2x$$

由于物体 m 运动的加速度是它的位移对时间的二阶导数，即 $a=d^2x/dt^2$，所以得

$$\boxed{\frac{d^2x}{dt^2}=-\omega_0^2x} \qquad (3\text{-}1\text{-}1a)$$

或

$$\boxed{\frac{d^2x}{dt^2}+\omega_0^2x=0} \qquad (3\text{-}1\text{-}1)$$

这就是**谐振动的微分方程**或叫做**微分方程形式的运动方程**。它是一个二阶线性常系数微分方程，以后在数学中还要详细讨论求解过程。但是，我们现在可以从这个微分方程本身的形式，看出一些它所要求的"解"$x=f(t)$是个什么样的函数。由于此时的 $x=f(t)$ 应该符合式(3-1-1)，即 $d^2f(t)/dt^2=-\omega_0{}^2f(t)$。这就是说 $x=f(t)$ **应具有的性质是**：它对时间的二阶导数将是它的本身(常系数除

外)。从微积分可知，正弦函数或余弦函数有这样的性质，例如 $d(\cos\omega_0 t)/dt=-\omega_0\sin\omega_0 t$, $d(-\omega_0\sin\omega_0 t)/dt=-\omega_0^2\cos\omega_0 t$。如将该函数乘以恒量 A，上述性质并不改变，进一步还可将此函数写成

$$\boxed{x=A\cos(\omega_0 t+\phi)} \tag{3-1-2}$$

式中 A 与 ϕ 为两个恒量(积分常数)，这就是谐振动的运动方程。它的物理意义是比较明显的，为了简单起见，暂先设恒量 $\phi=0$，则式(3-1-2)可写作 $x=A\cos\omega_0 t$，且其图象如图 3-1-2 所示。图中曲线表明，随着时间的推移，物体 m 的位移 x 在数值 $+A$ 与 $-A$ 之间作往复周期性的变化，即振动。A 是振动物体离开平衡位置的最大位移，叫做谐振动的振幅。另外，当 $t=0$ 时，$x=A\cos\omega_0 t=A$，在图 3-1-2 中用 P 点表示；当 $t=2\pi/\omega_0$ 时，$x=A\cos\omega_0\cdot 2\pi/\omega_0=A\cos 2\pi=A$，在图中用 P' 点表示。这正是作振动的物体往复了

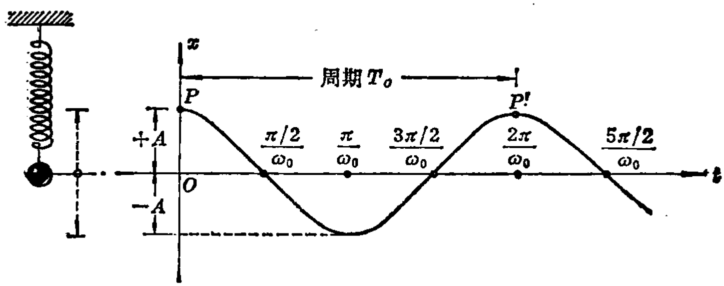


图 3-1-2　$x=A\cos\omega_0 t$

一次。往复一次的时间叫做周期，用 T_0 表示，则周期

$$T_0=\frac{2\pi}{\omega_0} \tag{3-1-3}$$

而频率 ν_0 为

$$\nu_0=\frac{1}{T_0}=\frac{\omega_0}{2\pi} \tag{3-1-4}$$

若周期的单位用秒，则频率的单位为次/秒，又叫赫兹(简称赫)。例如若频率为 2×10^3 赫，就是每秒振动 2×10^3 次。

从式(3-1-4)可知 $\omega_0=2\pi\nu_0$，这就是说 ω_0 与频率只差一个因子 2π，所以 ω_0 与 ν_0 都有频率的意义，其差异在于 ω_0 是频率 ν_0 的 2π 倍，故叫做振动的圆频率，下面讨论参考圆时会进一步明确 ω_0 的意义。

图 3-1-2 中的余弦曲线叫做振动曲线，它表示振动过程中的 x-t 关系。因而式(3-1-2)也叫振动方程。

谐振动的基本特征

上面的讨论表明，微分方程 $d^2x/dt^2=-\omega_0^2x$ 本身孕育着 $x=A\cos(\omega_0t+\phi)$ 这样一个函数关系(运动方程)。从数学上来说，前者是方程，后者是它的解；从物理上说，前者为因(受力情况)，后者为果(运动情况)。因此，"物体所受的力(或物体的加速度)与位移成正比，而方向相反"是谐振动的基本特征。任何一个质点的运动，只要具有这个特征，即满足方程(3-1-1)，则必定遵循 $x=A\cos(\omega_0t+\phi)$ 这一运动方程而作谐振动。关于 ϕ 的物理意义在下一节再讨论。

由三角学可知，$\cos(\omega_0t+\phi)=\sin(\omega_0t+\phi+\pi/2)$，如果令 $\phi'=\phi+\pi/2$，则式 $\cos(\omega_0t+\phi)$ 可改写成

$$x=A\sin(\omega_0t+\phi') \qquad (3\text{-}1\text{-}2a)$$

式(3-1-2a)和(3-1-2)是等效的，它们都是微分方程(3-1-1)的解，都是谐振动的运动方程，为了初学便利，在本书中一般采用余弦的形式。

谐振动的速度及加速度

正如在第一篇运动学中所述，若知道了质点的运动方程，就能够很容易地求出质点的速度及加速度随时间的变化关系。现已知谐振动的位移是

$$x=A\cos(\omega_0 t+\phi) \qquad (3\text{-}1\text{-}2)$$

则物体运动的速度为

$$v=\frac{dx}{dt}=-A\omega_0\sin(\omega_0 t+\phi) \qquad (3\text{-}1\text{-}5)$$

加速度为

$$a=\frac{d^2x}{dt^2}=\frac{d}{dt}[-A\omega_0\sin(\omega_0 t+\phi)]$$

$$=-\omega_0^2 A\cos(\omega_0 t+\phi) \qquad (3\text{-}1\text{-}6)$$

上式中 $A\cos(\omega_0 t+\phi)=x$，又 $a=d^2x/dt^2$，所以式(3-1-6)可以写成

$$\frac{d^2x}{dt^2}=-\omega_0^2 x \qquad (3\text{-}1\text{-}1a)$$

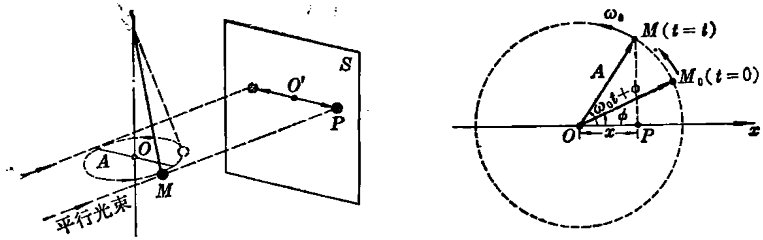
从这个结果可以清楚的看出，运动方程 $x=A\cos(\omega_0 t+\phi)$的确是微分方程(3-1-1a)的解。式(3-1-5)及(3-1-6)说明，物体作谐振动时，不但它的位移随时间作周期性的变化，而且它的速度和加速度也随时间作周期性的变化。

三　参考圆、谐振动的位相和振动曲线

下面我们用另外一种方法——图解法，来研究谐振动方程式 $x=A\cos(\omega_0 t+\phi)$。这也叫做参考圆法，利用它考虑问题可以有很多方便。

参考圆　图 3-1-3(a)是一个锥摆的示意图，小球M在水平面上作半径为A的匀速圆周运动，用一束平行于水平面的平行光把小球M的影子照在屏幕S上，屏幕上的影子P点就作往复的振动。如果屏幕是一张很薄的白纸，在屏幕后面来看影子P点的运动情况尤为明显。可以很容易地证明，小球影子P点的运动规律是符合式 $x=A\cos(\omega_0 t+\phi)$的。

现在看图 3-1-3(b)，以 Ox 轴的原点 O 为圆心，以 A 为半径作



（a）作圆周运动的小球M在屏幕S上形成作振动的影子　（b）作圆周运动的M点在Ox轴上的投影

图 3-1-3　参考圆

一圆，此圆叫做参考圆。设图中矢径$\boldsymbol{A}$以匀角速度ω_0旋转，那么矢径端点M在Ox轴上的投影P点就在Ox轴上作往复振动。这种情况和图 3-1-3(a)中P点的运动完全一样，只不过是把平行光线造成的影子用几何学上的投影来代替罢了。若在开始的时刻($t=0$)，M点在M_0位置，矢径$\boldsymbol{A}$与Ox轴的夹角是ϕ，那么以后任一时刻t，M点的位置矢径与Ox轴的夹角应为$\omega_0 t+\phi$。

我们暂不去考查M点的圆周运动，而考查它在Ox轴上投影P点的运动。容易看出，在任一时刻t，$\boldsymbol{A}$矢径在Ox轴上的投影是

$$x=A\cos(\omega_0 t+\phi)$$

这正是谐振动的运动方程。这个结果说明图 3-1-3(b)中的P点是在Ox轴上作谐振动。反过来说，任何一个谐振动都可想象为某一个相应的参考圆上M点的投影。M点叫做参考点。

显然，谐振动的振幅在数值上等于它所对应的参考圆的半径，因而矢径$\boldsymbol{A}$又叫做振幅矢量。参考圆上M点绕圆周运动一周所需的时间恰是它所对应的谐振动的周期——即P点往复一次所需要的时间。ω_0在参考圆中代表振幅矢量$\boldsymbol{A}$的角速度，因而圆运动的周期$T_0=2\pi/\omega_0$，这和式(3-1-3)全同。$\omega_0(=2\pi/T_0)=2\pi\nu_0$的本身就标志着谐振动和它所对应的参考圆的关系。等式右方的ν_0代表谐振动的频率(也等于参考点M作圆运动的频率)，等式左

方代表参考圆上M点的角速度，因而圆频率又叫角频率。但必须指出，振动中并不存在角速度问题，但联系参考圆来理解ω_0却是很方便的。

谐振动的位相 振动方程式(3-1-1)和它的速度、加速度方程式(3-1-5)、(3-1-6)都包含有$(\omega_0 t+\phi)$，括号中的整体是一个物理量，具有角度的量纲，叫做位相，又叫周相(或相角)。它的单位是[弧度]。在参考圆中，位相就是振幅矢量$\boldsymbol{A}$与Ox轴的夹角。在振动过程中位相$(\omega_0 t+\phi)$随时间变化着，当位相变化2π，作振动的质点就完成一次全振动。当振幅A为已知时，任一时刻的位相，可以完全决定这一时刻质点的位置和速度。例如对图3-1-1所示的弹簧振子来说，当质点在Ox轴的最右端时，对应的位相为零；在最左端时，位相为π；当质点在平衡位置且向左运动时，位相为$\pi/2$，向右运动时则为$3\pi/2$。

总之，质点作谐振动时每一时刻的位移及速度，都对应一定的位相。整个谐振动的运动状态，完全能够用位相在0和2π之间的变化反映出来。

恒量ϕ是 $t=0$时的位相，叫做初相，它决定开始计时时刻的位移和速度。

当位相是某些确定值时，下表表示与它相对应的振动质点的位移x、速度v及加速度a的数值。表中A、v_m及a_m分别代表振幅、最大速度和最大加速度。

$\omega_0 t+\phi$	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	π	$\frac{4\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{2}$	$\frac{11\pi}{6}$	2π
x	A	$\frac{\sqrt{3}}{2}A$	0	$-\frac{1}{2}A$	$-A$	$-\frac{1}{2}A$	0	$\frac{\sqrt{3}}{2}A$	A
v	0	$-\frac{1}{2}v_m$	$-v_m$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}v_m$	0	$\frac{\sqrt{3}}{2}v_m$	v_m	$\frac{1}{2}v_m$	0
a	$-a_m$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}a_m$	0	$\frac{1}{2}a_m$	a_m	$\frac{1}{2}a_m$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{2}a_m$	$-a_m$