

微观云物理学

• 王鹏飞 • 李子华 • 编著 •



• 高
索
索
版
社
•

微观点物理学

第二版 王竹溪 李政道 著 李政道 校



中国科学院图书馆藏

WPF

微观云物理学

王鹏飞 李子华 编著

102

科学出版社

106291

内 容 简 介

全书共八章。第一章介绍本学科的一些背景知识，第三、五章介绍云和降水微物理特征量的表示法及重要观测事实，第二、四、六、七、八是本书的重点，其中前四章介绍了从核化到降水形成的一些基本理论，最后一章专门论述冰雹微物理问题。书中以基础知识为主，同时也介绍了国内外最新研究成果。

本书可作为研究生及本科高年级大学生的参考教材，也可供从事云雾物理和人工影响天气的研究及实际工作人员阅读。对于从事天气学、气候学以及大气探测工作的同志，亦有参考价值。

微 观 云 物 理 学

王鹏飞 李子华 编著

责任编辑 林雨晨

*

气象出版社 出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京市昌平环球科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 15.375 字数 394.6 千字

1989年6月第一版 1989年6月第一次印刷

印数 1—1100 定价 3.50 元

ISBN 7-5029-0214-7/P·0130(课)

序

微观云物理学是研究微尺度的云雾降水物理过程,包括凝结、小滴增长,³冰晶的产生和增长以及降水释放机制等微观物理过程的科学。研究微观云物理,目的在于了解云雨的形成,增长和消散的规律,掌握变化趋势,以便及早做好准备,防避可能出现的天气灾害。

云物理学内容发展很快,已牵涉到许多领域的知识。如果面面俱到,势必不深不透。本书以微观内容为主,从基础知识到近代的最新发展,比较系统地、深入地阐述了云物理学的一些基本问题。

本书在写作中,自始至终遵循了这样一条原则,即兼顾物理意义及数学描述。因为物理意义是本质,数学表述是工具,两者是相辅促进的。重视数学表述忽略物理图景是舍本逐末,重视物理图景忽略数学表述就不能深入物理图景,无法定量研究。书中每讨论一个问题,都尽量讲清物理概念,深入微观本质,并给出比较严密的数学推导。

希望本书问世以后,对攻读大气物理专业的大学生和研究生,对从事云物理和人工影响天气研究的同志们都能有所帮助。

本书系王鹏飞和李子华合作而成。主体部分由王鹏飞所编,在增删整理方面李子华做了许多工作。就由于这种合作,这本书才得以早日完成。

本书承程纯枢同志审阅,十分感谢。在写作过程中,张培昌、顾松山、周文贤、章澄昌等同志给予鼓励和帮助,曾春生等同志为本书绘制大量插图,在此一并致谢。书中的错误和不足之处,衷心希望读者批评指正。

王鹏飞、李子华

1987年6月于南京气象学院

图表使用说明

为方便地统一到法定单位,一些图表中参数乘上了一个系数。
其用法举例如下:

1. 第 18 页,表 1.3, 温度为 0°C 时, $L_{wv}(\text{焦耳/千克}) \times 10^{-6} = 2.501$, 则 $L_{wv} = 2.501 \times 10^6$ 焦耳/千克

2. 第 22 页,图 1.22, 温度为 0°C 时, $\alpha(\text{焦耳/米}^2) \times 10^3 \doteq 76$
则 $\alpha \doteq 76 \times 10^{-3}$ 焦耳/米²

目 录

序

第一章 云雾形成的微观背景知识.....	1
§ 1.1 水的本质	1
§ 1.2 水的相变潜热	15
§ 1.3 水的表面张力能	19
§ 1.4 纯水面的饱和水汽压	23
§ 1.5 溶液的饱和水汽压	29
§ 1.6 蒸凝过程	35
§ 1.7 气溶胶质粒简介	39
第二章 核化理论.....	67
§ 2.1 核化作用	67
§ 2.2 自发核化(同质核化)	67
§ 2.3 异质核化	96
§ 2.4 异质核化成冰的结晶学机制.....	130
第三章 云的微物理特征	152
§ 3.1 一般特征.....	152
§ 3.2 云中比含水量和含水量.....	154
§ 3.3 云滴谱表示法及滴谱特征量.....	169
§ 3.4 积状云和层状云的实际滴谱特征.....	182
第四章 云雾滴凝结(凝华)增长理论	187
§ 4.1 云雾滴的凝结增长.....	187
§ 4.2 冰晶的凝华增大.....	207
§ 4.3 云滴谱的凝结形成(云滴群的凝结生长)	229
第五章 降水的宏微观特征和动力学特性	239
§ 5.1 降水的宏微观特征.....	239

§ 5.2	雪晶的形状和尺度谱	247
§ 5.3	雪花、霰及雹块谱	267
§ 5.4	雨滴下降末速度	270
§ 5.5	冰雪晶、雪花和霰的下降末速度	289
§ 5.6	冰雹的下降末速度	299
§ 5.7	降水物下降末速总图	310
第六章	降水元增长理论	311
§ 6.1	碰并的研究	311
§ 6.2	云滴的并合增大及互碰破裂	353
§ 6.3	冰质粒融为雨滴	375
§ 6.4	水滴碰冻时间与悬浮冻结时间	380
§ 6.5	过冷却水中冰的生长速率	391
§ 6.6	淞晶、冰粒和霰的形成	395
第七章	空中降水物的繁生	401
§ 7.1	雨滴的繁生	401
§ 7.2	冰质粒的繁生	412
§ 7.3	连锁繁生	417
§ 7.4	云的降水效率	417
第八章	冰雹微物理学	424
§ 8.1	冰雹微物理结构	424
§ 8.2	雹块生长理论	447
§ 8.3	由地面雹块分析空中雹块的增长	467

第一章 云雾形成的微观背景知识

要使云雾滴或冰晶从水汽中形成,并不断增大,直到成为降水物下落,需要一定的微观条件。条件充分,水汽可凝结、凝华成水滴和冰晶,并碰并、碰冻、碰连而增大成降水物;条件不足,云滴和冰晶非但不能形成或增大,而且已存在的滴粒,也将蒸发消失。此外云中还存在各种相变过程,各滴粒间有相互转化和相互作用的机械或化学作用,它们都是在一定的微观背景下存在的。为研究云雾物理,我们必须具有与这些条件有关的微观背景知识,本章就是对这些知识的简单介绍。

§ 1.1 水的本质

构成云雾的最主要原料是水。除尘云和化学云以外,没有一种云雾不是以水为主体的。因此要研究云雾降水物理,必须先对水有充分认识。虽然我们知道水有三种相态,即水汽、水和冰,但迄今我们对于它们的了解,还很有限。

一、孤独水分子的结构

首先我们要研究水分子的结构,因为无论是水汽、水或冰晶,都是以水分子作为基本的砖石。

水分子是由两个氢原子和一个氧原子组成的,可用 H_2O 表示。这三个原子并非连成一条直线,而是以氧原子为基础,按约 105° 度的夹角,与两个氢原子相连。氧带负电,氢带正电,因此形成一个偶极性水分子(如图 1.1

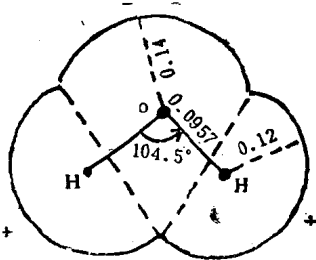


图 1.1 单水分子的两维结构

所示)。其电偶极矩很大, 约为 6.10×10^{-30} 库仑·米。实验指出, O—H 键长为 0.095718 纳米(1 纳米 = 10^{-9} 米)。氧和氢的原子半径分别为 0.14 及 0.12 纳米。而 H—O—H 的键角约为 104.523 度, 但这个键角是可以变化的。如在冰的情况下, 键角就约为 109.467 度, 比液水的情况下要大一些。

水分子为什么有此结构, 是一个很复杂的问题。要解释它需涉及到氢和氧原子的电子结构。任何原子的结构都是由电子围绕原子核运动所组成, 每一电子在绕原子核运动时, 都有许多方式。如果以其所到达位置的几率来看, 有的地方几率小, 有的地方几率大, 因此可作出一个几率球来, 如图 1.2 所示。图中 O 为原子核, 点的密集程度表示电子运动时的在该处附近的几率。这是一个表达几率的剖面图, 是几率球或电子云的剖面。我们沿 OY 方向作一几率曲线。可以看出在接近原子核处, 电子经过的几率很少, 在几率球以外, 几率也少, 只有在某一麻点密集的半径处, 几率最大。这个最大几率的地方可以称之为此电子的最可几轨道, 或简称运动轨道。在图 1.2 中, 将电子云画成球形。其实电子云的图象十分复杂, 不都呈球形。

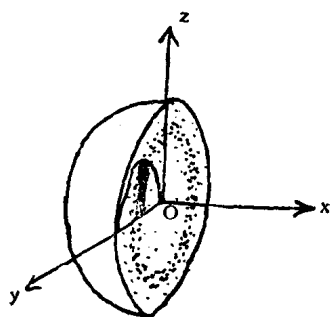


图 1.2 电子云(几率球)

原子有时不止一个电子, 它们分别占据不同的最可几轨道, 这些轨道代表不同的能级。根据量子理论, 可以将轨道处的电子层按从内到外, 分为 *K*、*L*、*M*、*N* 等能级依次增高的层次, 称为“电子层”。也分别叫 $n=1, 2, 3, 4$ 等主能级层。 n 称“主量子数”, 它们决定电子云的大小。每个主能级层最多包含的电子数有一定量, 例如 *K* 层为 2 个, *L* 层为 8 个, *M* 层为 18 个, *N* 层为 32 个。每个主能级层可以次分为一定的电子亚层, 分别称为 *s*、*p*、*d*、*f* 等亚层。这种亚层可描述电子云的形状。每个亚层最多又可次分为 1、3、5、7 个电子轨道。每个轨道最多只能容纳两个转动方向相反的电子。电子层详细结构列于表 1.1。

表 1.1 电子层结构表

电子层	K 层 ($n=1$)	L 层 ($n=2$)		M 层 ($n=3$)			N 层 ($n=4$)			
亚层名	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f
各亚层的 轨道数	1	1	3	1	3	5	1	3	5	7
每层轨道 总数	1	4		9			16			
每层电子 总数	2	8		18			32			

能级大小 低 $\longrightarrow$ 高

一个原子中的电子，一般是先占据较低能级的层次及轨道，在填满了较低的能级层次及轨道后，才向较高级的层次及轨道上排列。

一个电子从较低能级层次向较高能级层次跳去，必须吸收外界供给它的能量。这种由低能级向高能级跳动的过程，称为“跃迁”。促使跃迁的作用称为“激发”。所供应的能量必须至少达到它能到高一能级的能量，否则就不能实行跃迁。如果供应的能量特别大，电子就会脱离原子的最高能级而逸出，这就称为“电离”。被激发的电子往往是不稳定的，它有回复到低能级轨道去的趋势。一旦它回到低能级轨道，它就会放出与能级差相应的能量。这种能量往往以辐射的形式发射出去，例如出现放光现象。

前面说过，电子亚层能决定电子云形状，这对水分子的极性有很大关系。根据研究，s 亚层的电子云呈球形，p 层的电子云均为对称的双瓣叶形，d 层的电子云均为有对称轴的四瓣叶形，f 层的电子云更为复杂。

我们就根据上述知识来说明水分子的极性。

前面指出，水是偶极性分子，其中氢带正电，氧带负电。为什么水分子中氢带正电、氧带负电呢？这是因为水分子中氢与氧中电荷分布不匀所致。从净荷电量来说，水分子中的氢和氧原都是中性的。但氧原子中电荷分布不匀，促使中性氢原子的电荷分布

因感应也变得不均匀,这种电荷分布不均的氢氧,就能互相结合,成为偶极性水分子。为什么氧原子的电荷分布会不均匀呢?我们知道氧原子有8个电子,其核相应地带带有8个正电荷,这8个电子在轨道上的分布是这样的:

在 $1s$ 亚层球形轨道上只能分配两个自旋方向相反的电子,它们在这个轨道上均匀分布,并与核中两个正电荷相对应。在 $2s$ 亚层球形轨道上也只能分配两个自旋方向相反的电子,它们在 $2s$ 亚层轨道上均匀分布,又与核中另外两个正电荷相对应。在 $2p$ 亚层中有三个双瓣形轨道,分别沿互成直角的 x, y, z 三个轴展开,这三个轨道分别称 $2p_x, 2p_y, 2p_z$ 。在 $2p_x$ 轨道上仅能分配两个电子,分别均匀分布于轨道的两瓣,并与核中另两个正电荷相对应。这样,核中尚有两个正电荷,可与剩余的两个电子相对应,使氧原子的净电荷成中性。但这剩余的两个电子须分配到 $2p_x$ 及 $2p_y$ 两个轨道中去,平均每个轨道只能分配一个电子。一个电子在任一瞬间只能分布在一个轨道的一瓣上,这就形成分配不均现象。带电子的一瓣满足带一个负电荷的条件,未带电子的一瓣就因电子不足而必需向外界争夺一个电子,以满足轨道上电子分布均匀的要求。我们将需求电子的一瓣用 $\oplus$ 表示,将带有电子的一瓣用 $\ominus$ 表示。

$2p_x$ 及 $2p_y$ 这两个互成直角的轨道都是双瓣电子轨道,它们各有一个“需求电子瓣 $\oplus$ ”及“有电子瓣 $\ominus$ ”。任何时刻, $2p_x$ 中 $\oplus$ 瓣与 $2p_y$ 中 $\oplus$ 瓣互成直角, $\ominus$ 瓣也互成直角,如图1.3所示。这就是中性氧原子电性分布不均匀的原因。

当这个氧原子与中性氢原子相接近时,氧的轨道的缺乏电子瓣必向中性氢原子争夺电子,使氢原子中电子参加到“需求电子瓣”中与氧公用。这样一来,氢原子中的电子轨道就偏向一方,从而造成了两个后果,一是使中性氢原子显出正电性,一是使中性氧原子显出负电性。关于氢氧结合成水后的偶极性情况如图1.4所示。

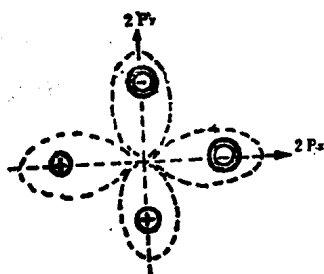


图 1.3 氧原子的 $2p_x$ 、 $2p_y$ 的电性

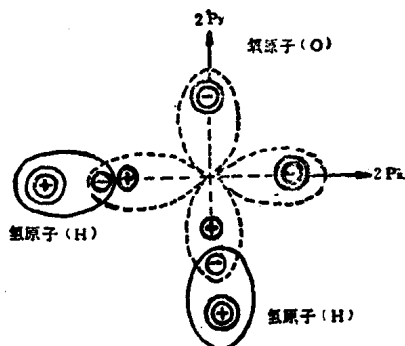


图 1.4 氢氧结合成水后的电性

但这样所造成的水分子极性应当使 $\text{H}-\text{O}$ 键角成 90° (因 $2p_x$ 和 $2p_y$ 正交成 90° 度角), 而这与实际测出的键角 104.5° 不符。如果用两个氢原子的正电荷互相排斥, 造成键角大于 90° 来解释, 还是十分勉强的。L. Pauling 为此提出了“轨道杂化理论”, 解决了这个问题。

按正常情况, 氧原子的 8 个电子分配如下: $1s$ 层——2 个, $2s$ 层——2 个, $2p_x$ ——2 个, $2p_y$ ——1 个, $2p_z$ ——1 个。其中 $2s$ 、 $2p_x$ 、 $2p_y$ 、 $2p_z$ 为外层轨道, 它们是与化合过程直接有关的。根据杂化轨道理论, $2s$ 层及 $2p_x$ 层中并不各分配固定的成对反向旋转的两个电子, 而仅仅是各分配一个电子。这就是说在 $2s$ 、 $2p_x$ 、 $2p_y$ 、 $2p_z$ 这四个轨道中, 均无区别地各分配一个电子, 多余的两个电子是经常任意地随机分配在这四个轨道中的两个轨道上。换言之, 在外层轨道中一个“ $2s$ ”, 三个“ $2p$ ”轨道进行了混合杂化, 称为 sp^3 杂化。这就空出了四个轨道中的四个电子, 以便让氧原子中的两个电子作任意的配合。这四个空出电子的轨道, 由于杂化混合, 已变为四个完全无区别的新轨道, 称为 sp^3 杂化轨道。它们必然按正四面体的方式均匀地指向空间 4 个方向, 下面试求这四个

新轨道的方向间夹角。

设有一正四面体, $PQRS$ 为其四个顶角, 这四个顶角尖之外接球中心为 G , 它是此四面体之重心。自 P 作此四面体之高 PD , 则 D 必在底面等边三角形 QRS 之中心, 且重心 (即球心) G 亦必在此 PD 线上。又作 GR 线及 DR 线, 则因 DR 线在底面中, 故 $PD \perp DR$ 。又因 G 为球心, 故有 $GR = GP$ (图 1.5)。

数学上已经证明, 四面体的重心 G 必分垂线成 $3:1$ 的比例, 即 $PG:GD = 3:1$ 。令所求夹角为 $\angle PGR = \theta$, 则必有 $\angle RGD = (180^\circ - \theta)$ 。由于 $\angle GDR = 90^\circ$, 故在 $\triangle GDR$ 中, 必有

$$\cos(180^\circ - \theta) = \frac{GD}{GR} = \frac{GD}{PG} = \frac{1}{3}$$

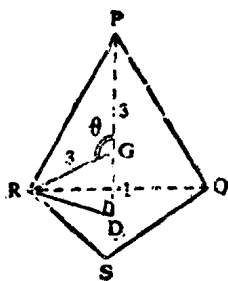


图 1.5 求 θ 角

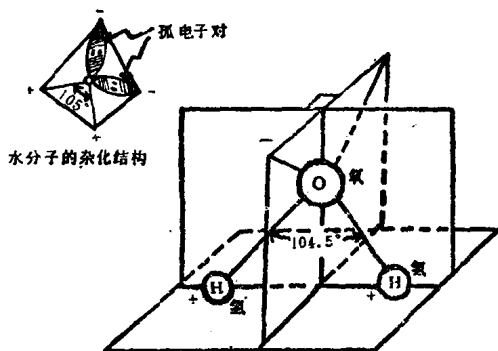


图 1.6 水分子四面体形电性分布 (按杂化轨道理论)

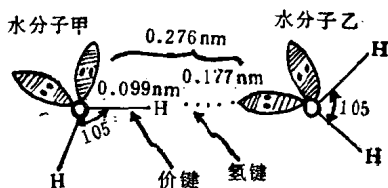
由此可求出 $\theta = 109.47$ 度。这就是正四面体的中心夹角, 亦即四个新轨道中任意相邻两轨道的空间指向夹角为 109.47 度。这四个新轨道在形成水分子时, 有两个轨道是与两个氢的电子相连的, 还有两个是与氧原子中未有所归的两个电子相连的, 前者的两个电子称为“公用电子对” (因为是氢和氧原子公用的), 后者的两个电子称为“孤电子对”。孤电子对的轨道中的两个电子全部在氧原

子中，故电子云较密集，公用电子对中氢的电子云由于有一部分重叠在氧的新轨道上，所以电子云较疏。因此氧原子中两个“孤电子对”因电子云较密集而相互间有较大排斥作用，排斥的结果使孤电子对与氢原子的正电端接近，从而相互间起了吸引作用，这种吸引作用将原来两个公用电子间的键角由 109.47° 度压缩到 104.5° 度，这就与实际情况基本相符了。这样一来，图 1.4 的水分子结构应改为图 1.6 的四面体结构了。图 1.6 中氧的两个负电荷连线与氢的两个正电荷连线是互相垂直的。两个负电荷互相排斥，使之渐处于两个带正电荷的氢原子之间，这就有可能使两个氢原子通过对中间上空的负电荷的吸引而互相接近，从而使键角减少为 104.5° 。可以看出水分子的“孤电子对”一侧是带负电的，而“公用电子对”一侧是带正电的，这样正负电各处一侧的分子称为极性分子或偶极分子。其中正负电荷重心不相重合，可以找到相当于正电荷中心和负电荷中心的两个分离的点，称为分子的两个极。偶极分子极性的强弱，常用偶极矩来衡量。前面说到水的偶极矩为 6.10×10^{-30} 库伦·米。

水分子中 O—H 称为“价键”或“共价键”。此价键中 H 端有多余的作用力，可以吸引别的水分子中电负性较大的原子氧（原子的电负性大，是指它吸引异性电荷能力大。一般以锂的电负性为标准，定为 1。在水分子中，氧的电负性为 3.5，氢的电负性为 2.1）。氢的这种能使分子间相互结合的键，称为“氢键”。在水中两个水分子结合时，氢键与价键结合如图 1.7 所示。

由于分子间有了氢键，就使分子间产生了较强的结合力，从而会影响到化合物的性质。例如会使沸点和融

点显著增大，因为要使液体图 1.7 水分子的价键与氢键之间的结合
 气化或固体融化，必须给予额外的能量去破坏分子中的氢键。而



且蒸发潜热及融解潜热也要加大，表面张力及粘滞力也会比其它液体为大，这些都是因为有氢键的缘故。此外，由于有了氢键，水的比热比别的液体大，因为加热时，一部分热量要用来破坏氢键。氢键又有将离子化合物(例如食盐等)电离的作用，这也是水的重要性质。

二、冰中的水分子结构

冰中的水分子是靠氢键而互相固结的。由图 1.6 可看出水分子有四个带电端(两正、两负)，它们向四面体四个角的方向来吸引其它水分子，其中正电端用氢键方式吸引其它水分子中氧的负电端，而负电端接受其它水分子的氢键吸引。这就形成了最基本的

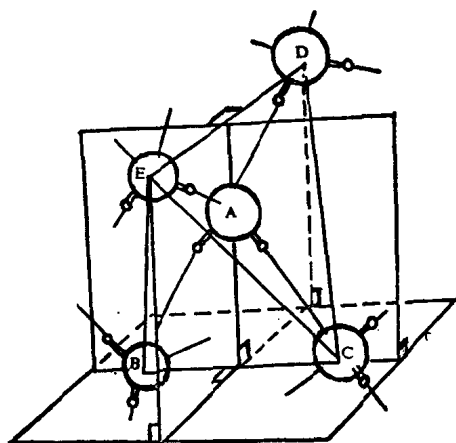


图 1.8 冰胞四面体

冰胞，如图 1.8 所示。图中可以看出，水分子 A 居于四面体的中心，其它 B、C、D、E 四个水分子分居于四面体的四个角。各水分子中，大圈表示氧原子，小圈表示氢原子。双线键表示价键，单线长键为氢键。E、D 两个水分子连线，对下平面的投影是与 B、C 两个水分子连线互相正交的。

这种冰胞是冰的基本结构，冰就是由许多这种冰胞互相结合而成的。为方便计，我们将水分子整体用一个黑团斑表示，以冰胞为基础，画出了冰的结构，如图 1.9 所示。图中水分子 1 是四面体(2、3、4、5)四个水分子的中心。而 2、3、4、5 四个水分子，又分别是(1、11、12、13)、(1、14、16、17)、(1、6、7、15)、(8、9、10、1)各四个水分子组成的四个四面体的中心。可见在冰中每一个水分子都既任冰胞的中心，又任相邻冰胞的角的成员的任务。如果我们按图

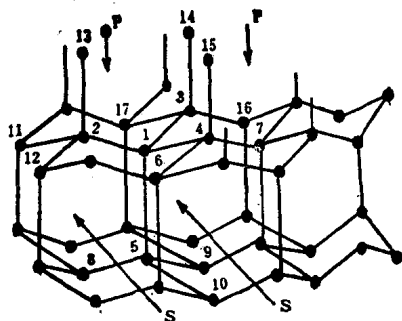


图 1.9 以四面体冰胞为基础构成的冰的结构

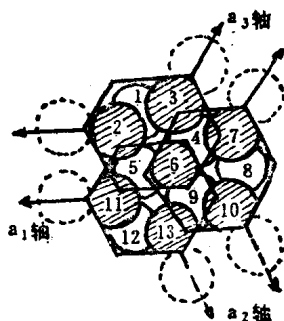


图 1.10 由图 1.9 中方向 P 观测到的冰晶结构

1.9 中两个矢线 S 的方向来看冰，就可以很清楚地看出它的六角形结构。如果我们按 P 的方向俯视冰中水分子的排列，可以看出图 1.10 的情况。图中有斜线的圈是上面一层水分子，白圈为下面一层水分子，它们构成了三个六角形，即 (1、2、3、4、5、6)，(4、6、7、8、9、10)，(5、6、9、11、12、13)。这些六角形都是由三个下层水分子和三个上层水分子所组成，但它们都尚未组成有心的四面体。为了要结构成有心的四面体，首先应以水分子 6 为心，其上方再叠上一个水分子，并在 2、3、7、10、13、11 下方各填上一个水分子(见图中虚圈)，然后再在 2、3、7、10、13、11 正上方各填上一个水分子。这种叠填方式，也就是冰晶渐渐增大的一个方式。可见冰胞的增大，事实上就是有心四面体的不断延伸增长。

一般我们研究冰的结晶时，常取 a_1 、 a_2 、 a_3 、 c 四个轴(参看图 1.11)。其中 c 轴是平行于柱体侧面且通过六角形中心的，而 a_1 、 a_2 、 a_3 三个轴则是以六角形中心为原点，互成 120 度交角的通过角顶的轴线。这四个轴如按冰

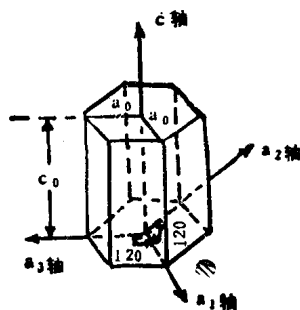


图 1.11 冰晶的轴