

三元相图

三元体系

$$f = c - \Phi + 2$$

$$c = 3$$

$$\Phi_{\max} = 5 - f = 5$$

共存的相数最多5相，
最大自由度 $f=4$

相数 Φ	1	2	3	4	5
自由度	4	3	2	1	0
体系类型	四变度	三	双	单	无变度

1. 完全决定一个三元体系的状态需四个参变数 (T, P, C_1, C_2)。
2. 当固定某个参变量 (常为压力) $f=4-\Phi$, 四相平衡共存, **最大自由度 $f_{\max}=3$** 。

恒压条件下三元体系状态图

恒压条件下的三元状态图是一个三维空间图

相区几何形态	立体	曲面	曲线	点
自由度	$f=3$	$f=2$	$f=1$	$f=0$
共存相	单相	双相	三相	四相点

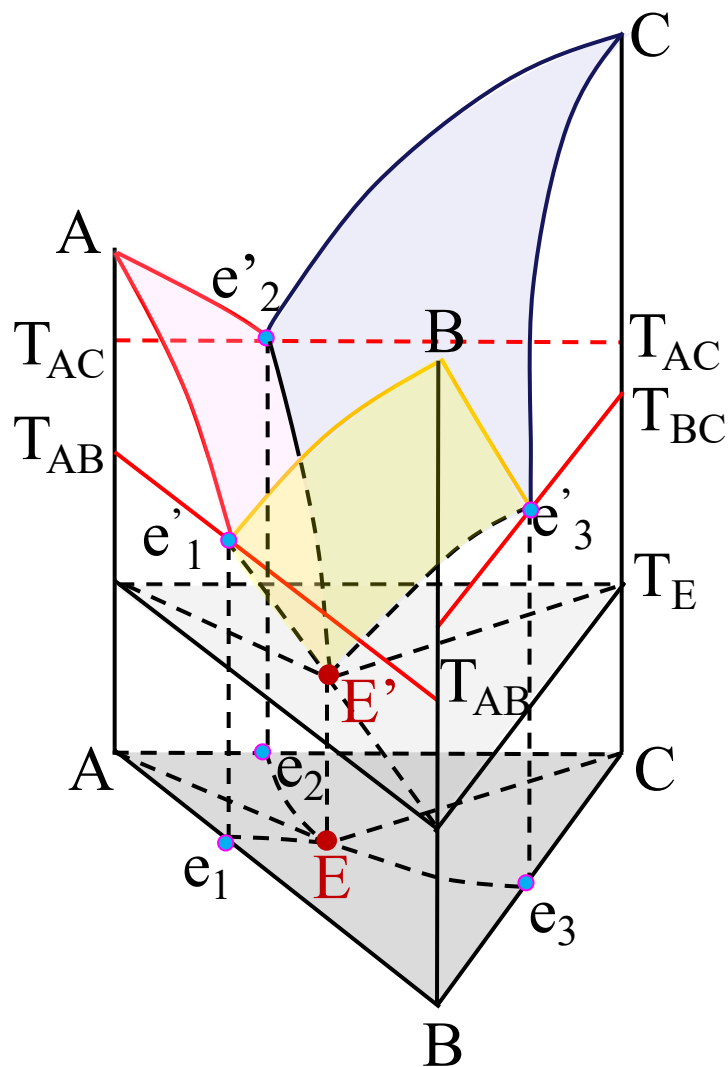
三元体系任何状态图都不是完全的，
而是**等温、等压、等组成图**……

三元相图的主要特点

(1) 是立体图形，
主要由曲面构成；

(2) 可发生四相平
衡转变；

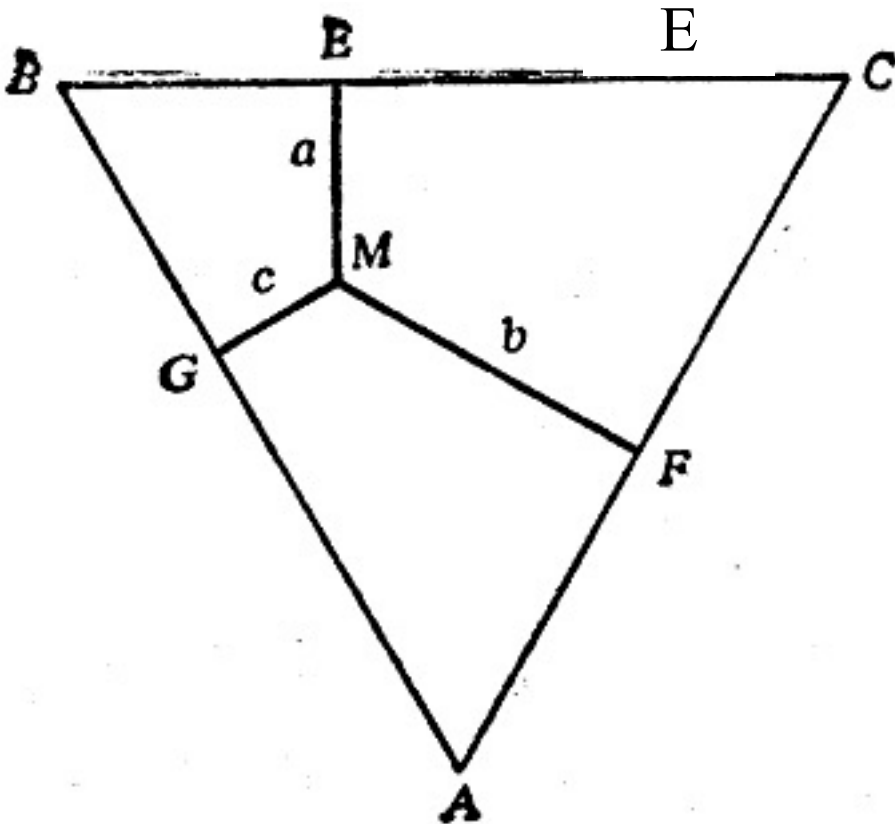
(3) 一、二、三相
区为一空间。



要点：

1. 浓度三角形的规则；
2. 重心、交叉、共轭位置的判定及关系式；
3. 三元相图第一结晶区，第二结晶区，固相面、液相面的立体构型等
4. 投影图和等温截面图
5. 冷却析晶过程及书写
6. 罗策布规则、切线规则等及生成物类型的判定等
7. 复杂三元相图的析晶过程

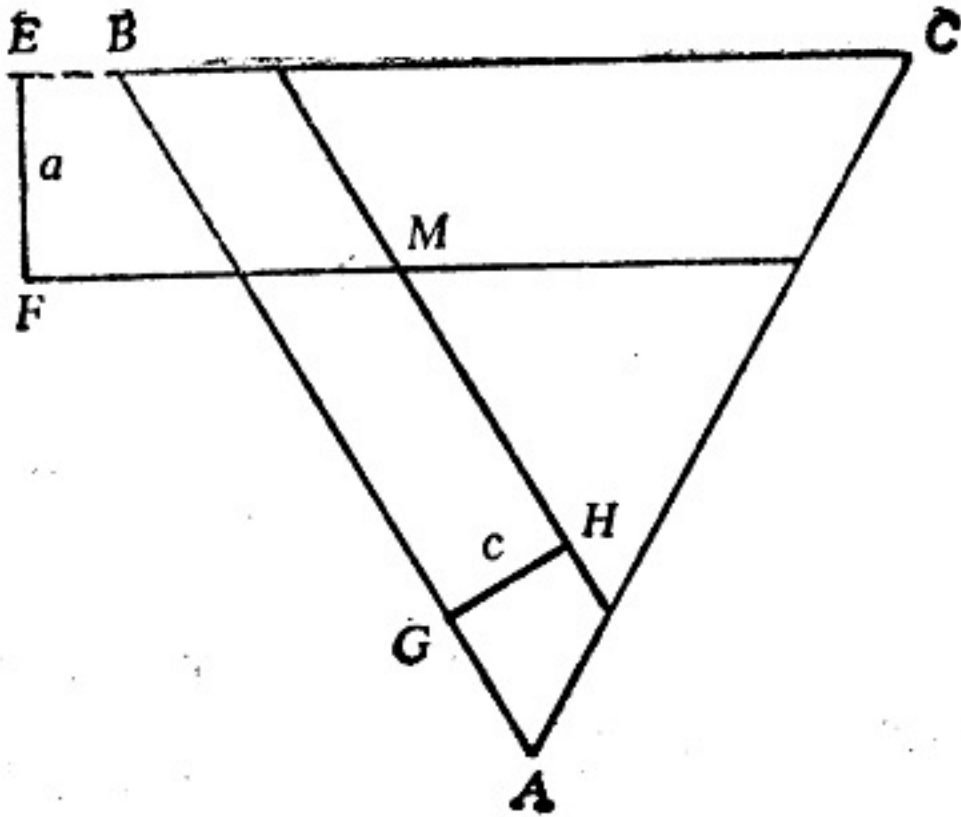
浓度三角形：垂直线



成分三角形中特殊的点和线
(1) 三个顶点：代表三个纯组元；
(2) 三个边上的点：二元体系的成分点；

吉布斯三角形，由M点读出体系组成

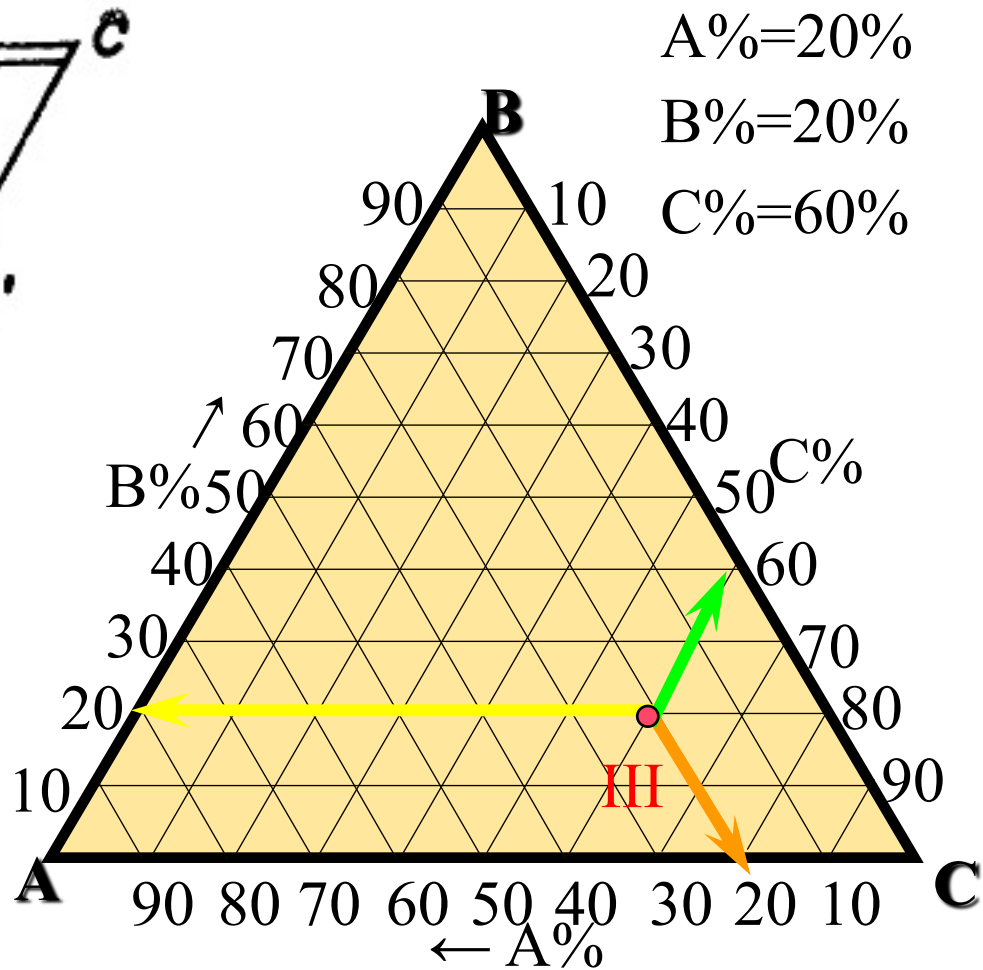
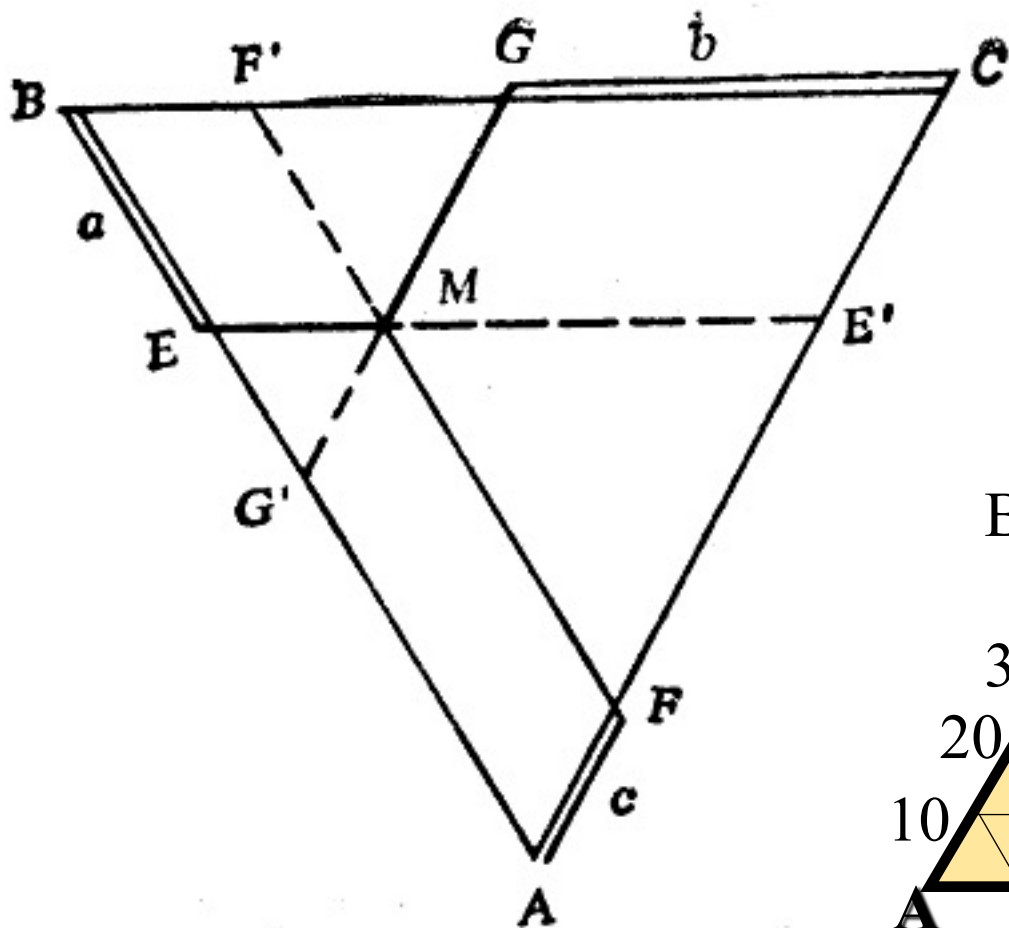
$$c_A = a, \quad c_B = b, \quad c_C = c$$



- (1) 已知点确定成分；
- (2) 已知成分确定点

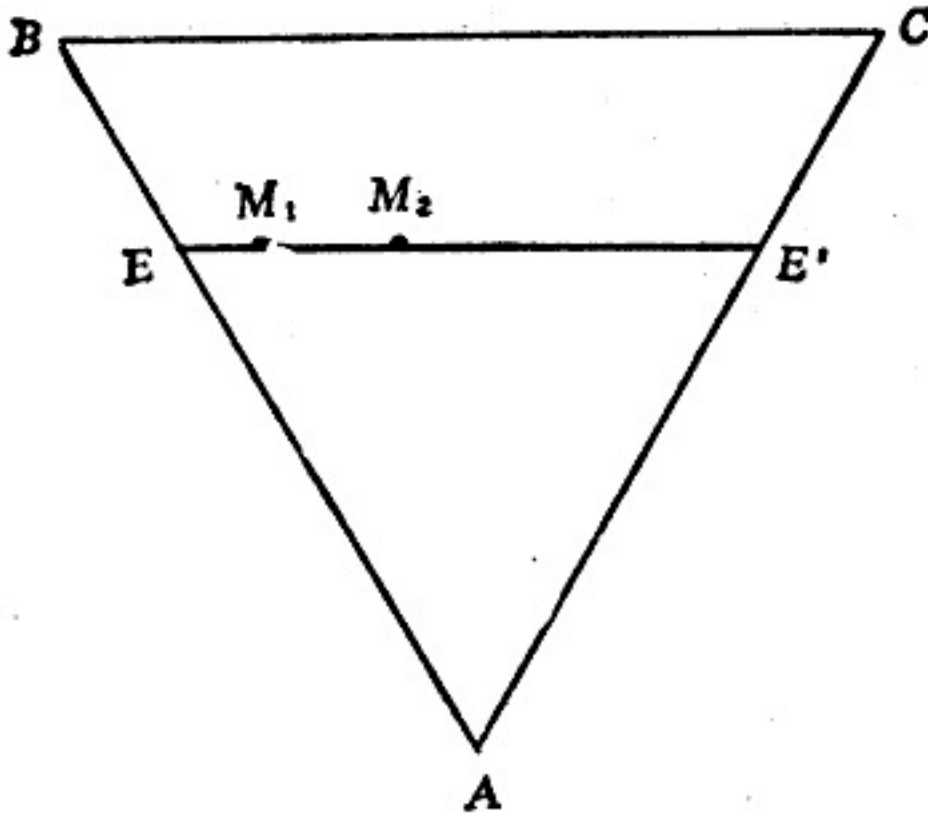
由体系组成画出M点

浓度三角形：平行线



罗策布浓度三角形表示法

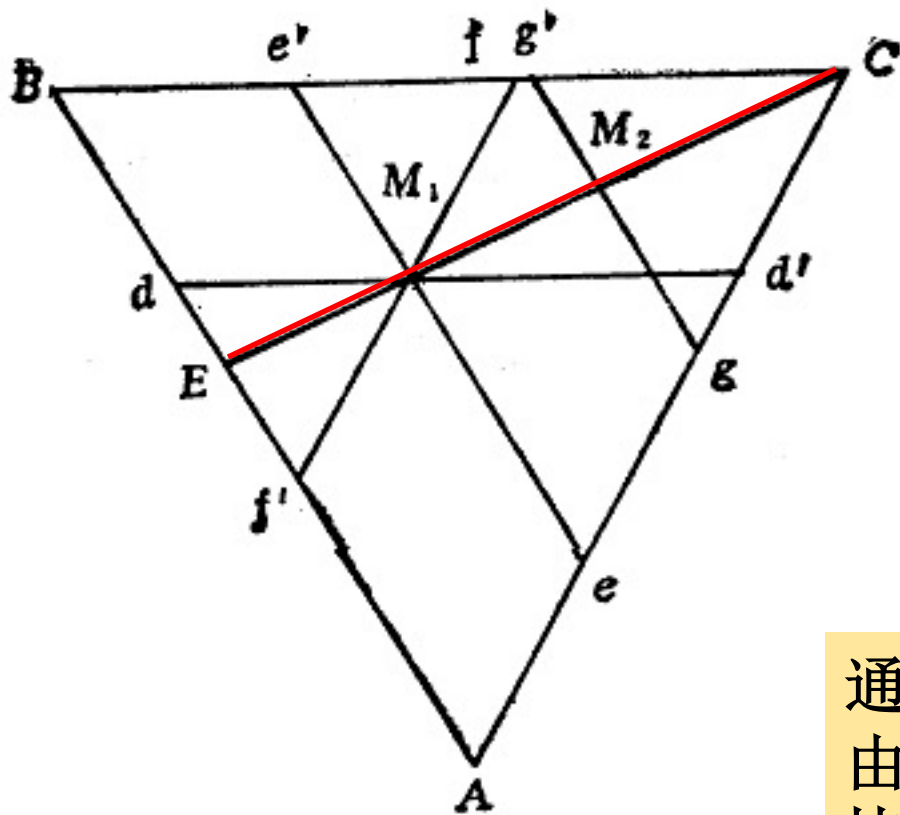
浓度三角形性质：平行线性质



$$\left\{ \begin{array}{l} EE' \parallel BC \\ M_1 \subset EE' \\ M_2 \subset EE' \end{array} \right\} \Rightarrow a_1 = a_2$$

平行于某条边的直线：
其上合金所含由此边
对应顶点所代表的组
元的含量一定

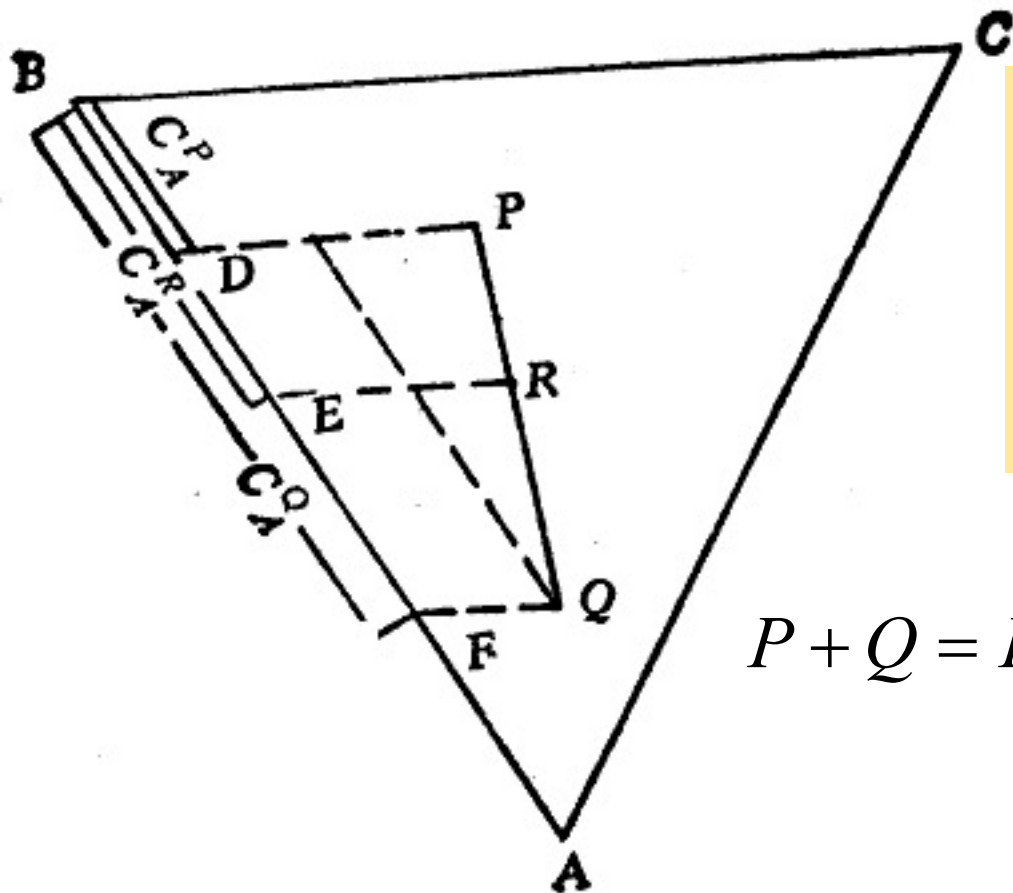
浓度三角形性质：等比例性质、背向规则



$$\left\{ \begin{array}{l} M_1 \subset CE \\ M_2 \subset CE \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2}$$

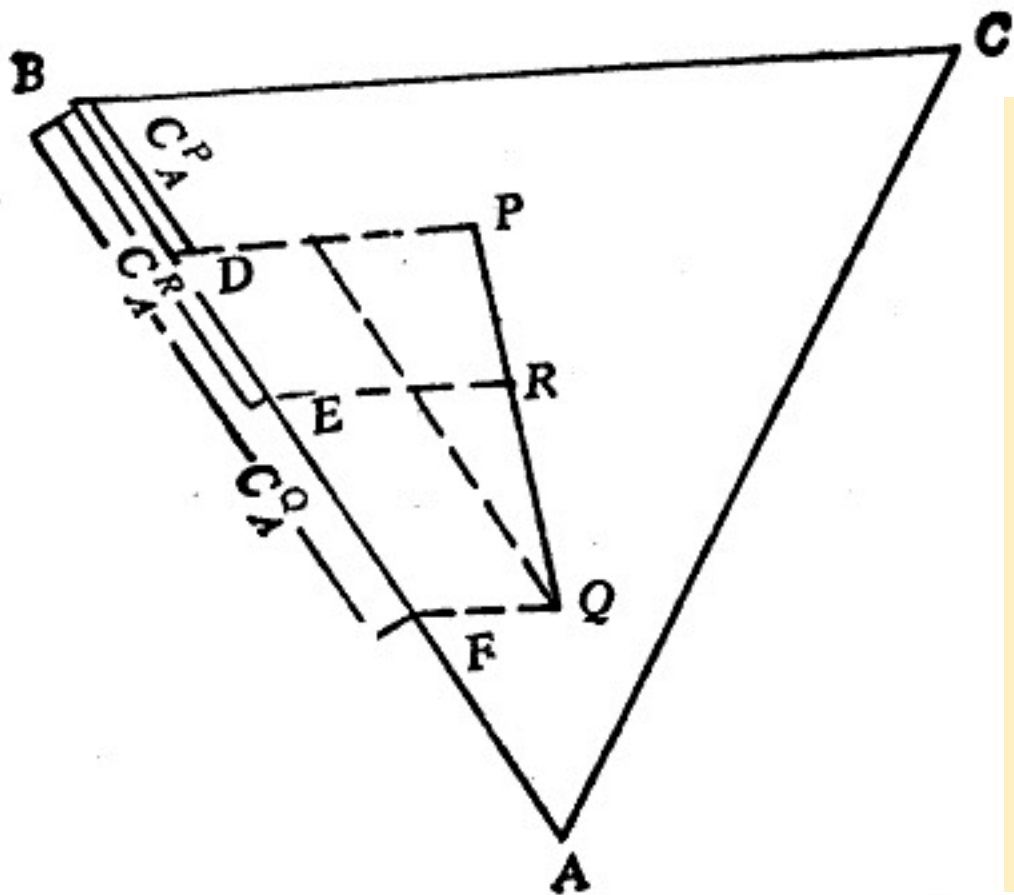
通过某一顶点的直线：其上所含
由另两个顶点所代表的两组元的
比值恒定

共线法则及杠杆原理



共线法则：在一定温度下，三元合金两相平衡时，合金的成分点和两个平衡相的成分点必然位于成分三角形的同一条直线上。

$$P + Q = R \Rightarrow \begin{pmatrix} R \subset PQ \\ W_P \times PR = W_Q \times QR \end{pmatrix}$$



两条推论

(1) 给定组分体系在一定温度下处于两相平衡时，若其中一个相的成分给定，另一个相的成分点必然位于已知成分点连线的延长线上。

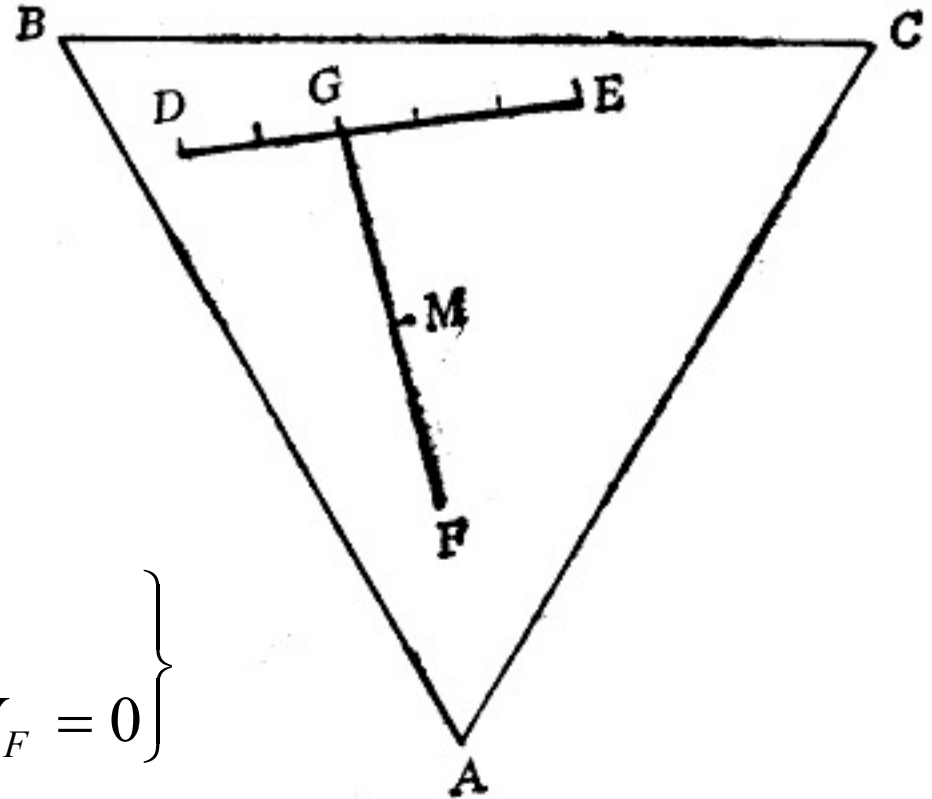
(2) 若两个平衡相的成分点已知，则体系的成分点必然位于两个已知成分点的连线上。

重心规则

在一定温度下，三元体系达到三相平衡时，体系的成分点为三个平衡相的成分点组成的三角形的质量重心。

$$D + E + F = M \Rightarrow$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M \subset \triangle DEF \\ \overrightarrow{MD} \times W_D + \overrightarrow{ME} \times W_E + \overrightarrow{MF} \times W_F = 0 \end{array} \right\}$$



M点被称为三元共晶点或三元低共熔点

平衡相含量的计算：所计算相的成分点、合金成分点和二者连线的延长线与对边的交点组成一个杠杆，合金成分点为支点，计算相的计算方法同杠杆定律。

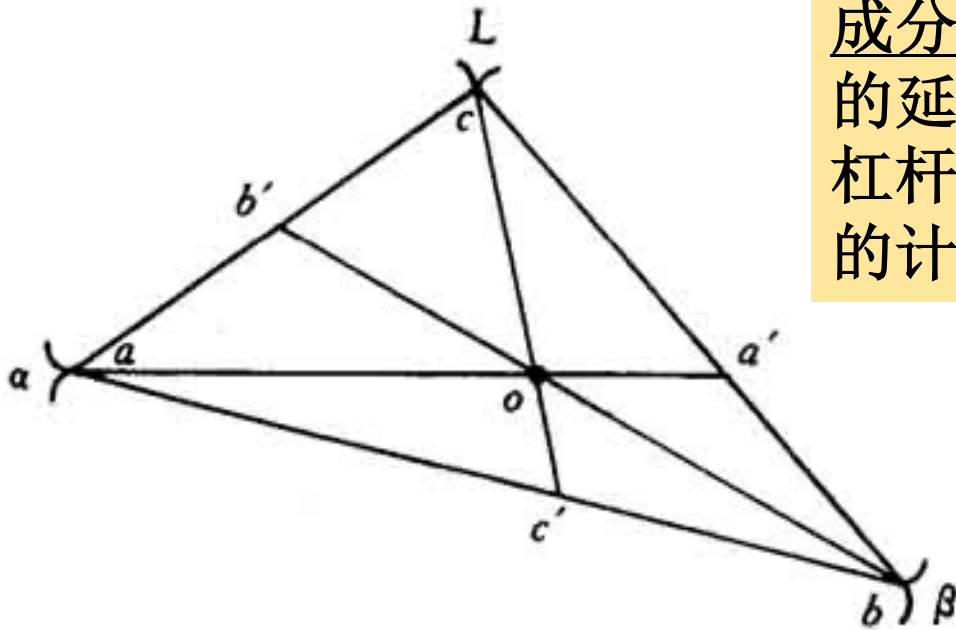


图 5-91 重心法则证明

$$W_{\alpha} = \frac{oa'}{aa'} W_{\text{总}}$$

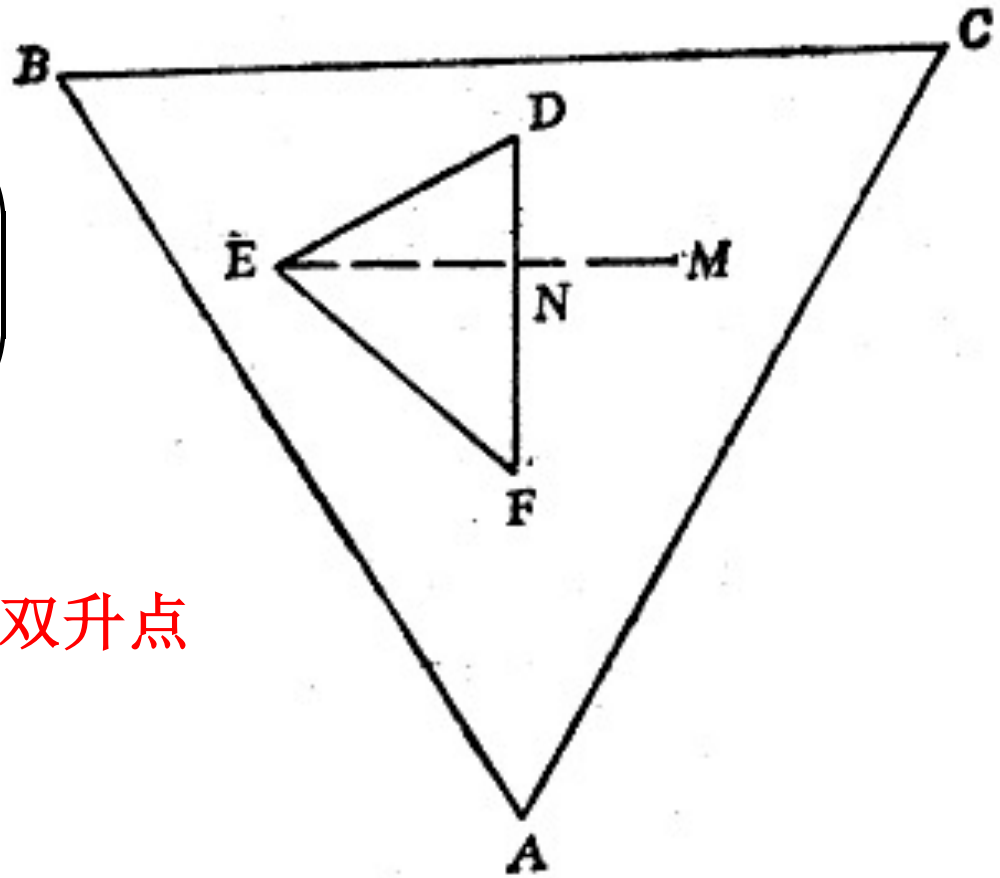
$$W_{\beta} = \frac{ob'}{bb'} W_{\text{总}}$$

$$W_L = \frac{oc'}{cc'} W_{\text{总}}$$

- 已知三种混合物重量和如下：
- M混合物： $a_1=20, b_1=20, c_1=60, G_M=3\text{kg}$
- N混合物： $a_2=60, b_2=20, c_2=20, G_N=2\text{kg}$
- Q混合物： $a_3=20, b_3=60, c_3=20, G_Q=5\text{kg}$
- 求新混合物P的重量及其组成点的位置。

重心规则——交叉位置

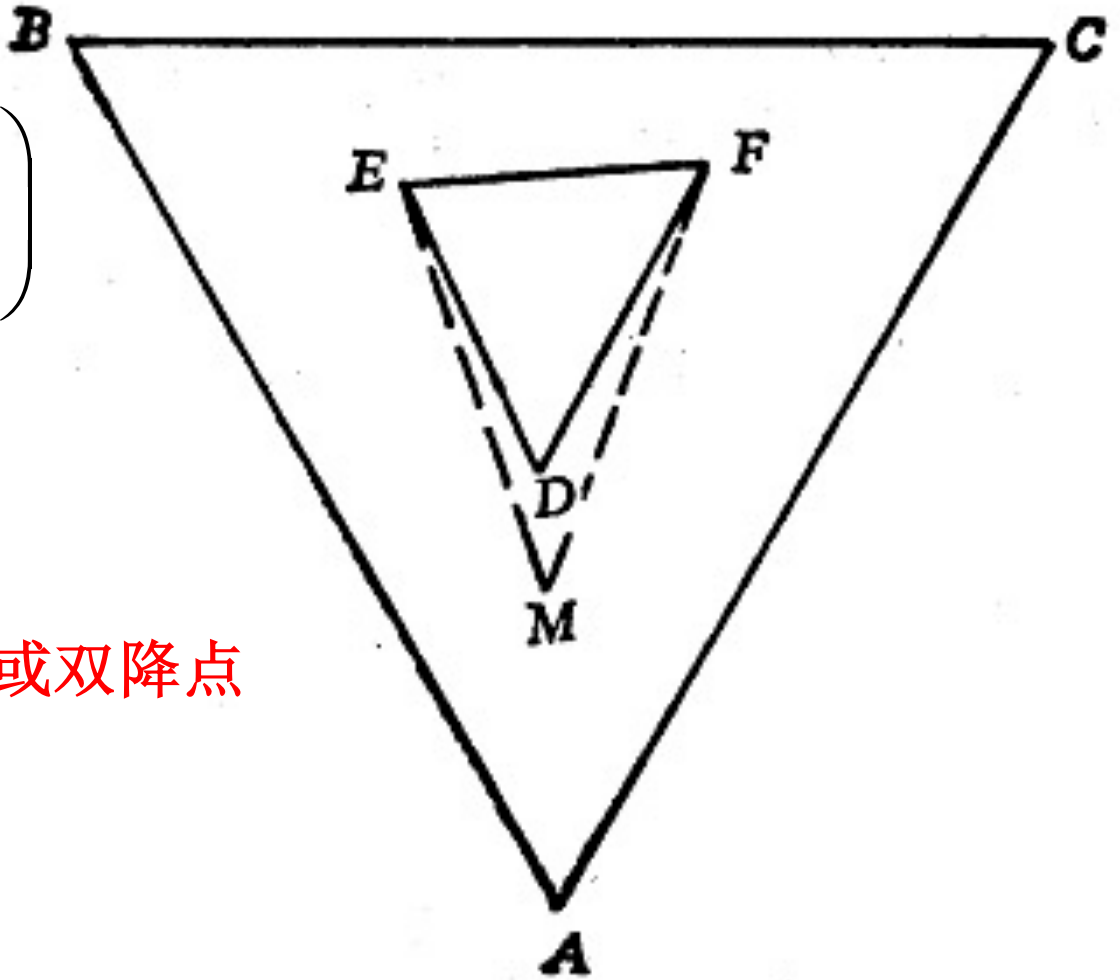
$$\begin{pmatrix} E + M = F + D \\ M = F + D - E \end{pmatrix}$$



M点被称为单转熔点或双升点

重心规则——共轭位置

$$\begin{pmatrix} D = M + E + F \\ M = D - (E + F) \end{pmatrix}$$



M点被称为双转熔点或双降点

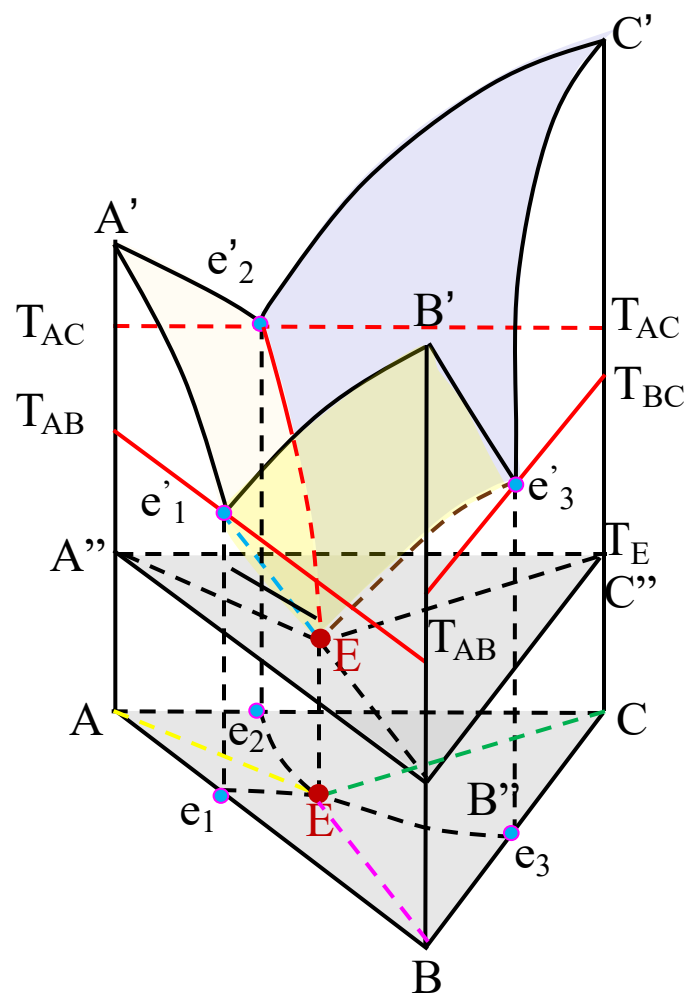
简单三元共晶系

固态互不相溶的共晶相图



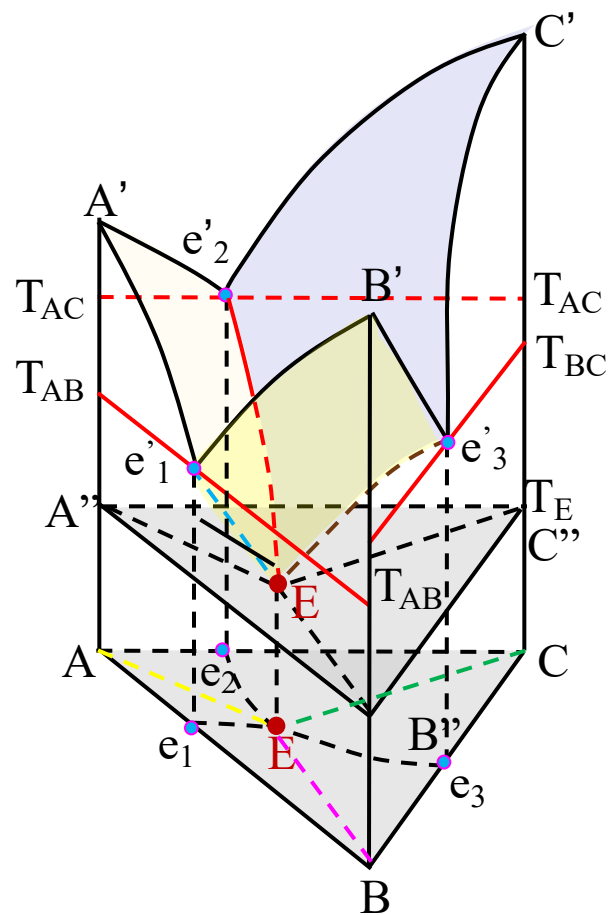
一、相图简介

- 点
 - 熔点;
 - 二元共晶点;
 - 三元共晶点
- 线
 - 二元液相线
 - 界线(三元
 - 低共熔线)
- 面
 - 液相面
 - 固相面
- 区
 - 两相区: 3个
 - 单相区: 4个
 - 三相区: 4个
 - 四相区: 1个



(1) 相图的点：熔点及低共熔点

- 液相面上的A、B、C三点分别为纯物质A、B、C的熔点；
- e_1 、 e_2 、 e_3 分别为AB、AC、BC二元体系的二元低共熔点（三相共存）
- E_1 为ABC三元低共熔点，此点上四相共存，在此点的温度以下，体系全为固相

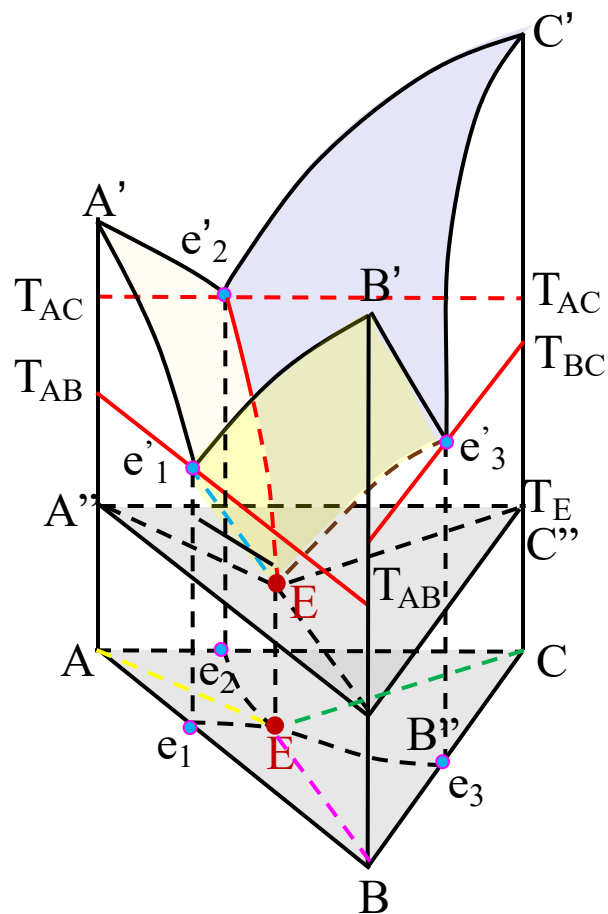


(2) 线：界线或低共熔线

三个液相面两两相交
得到的三条曲线

(e_1E 、 e_2E 、 e_3E)
称为界线，即三元
低共熔线。在界线
上同时饱和两种
固相，呈现液相与
两种固相平衡共存

的状态， $f=1$ 。三元熔体冷却到此时析出两种固相，如 e_1E 线上发生从液相析晶出A和B两种固相的过程。

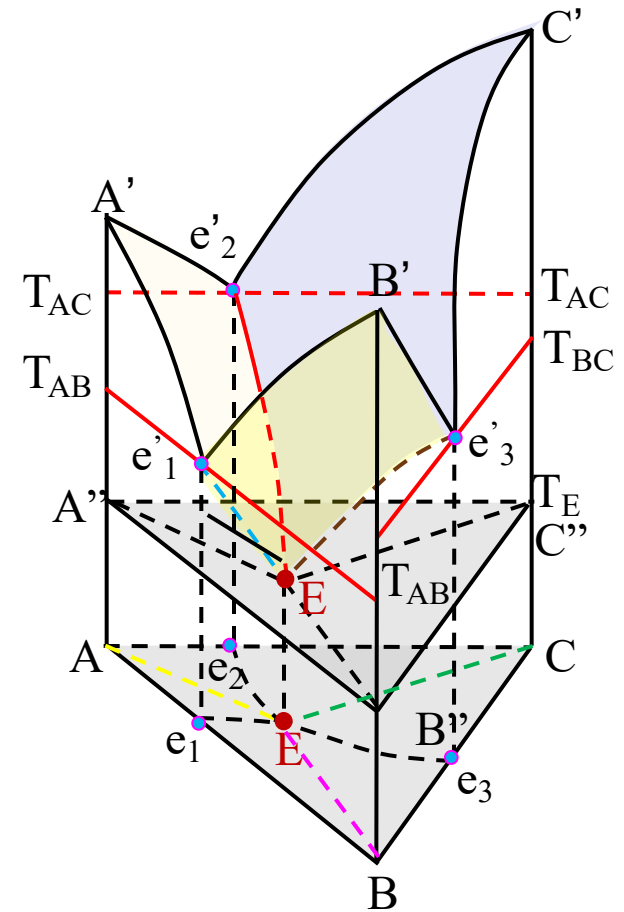


(3) 相图的面：液相面和固相面

液相面

二元体系的液相线在三元体系中发展成**液相曲面**。液相面上进行的过程也仍然是固液两相的平衡共存过程， $f=2$ 。

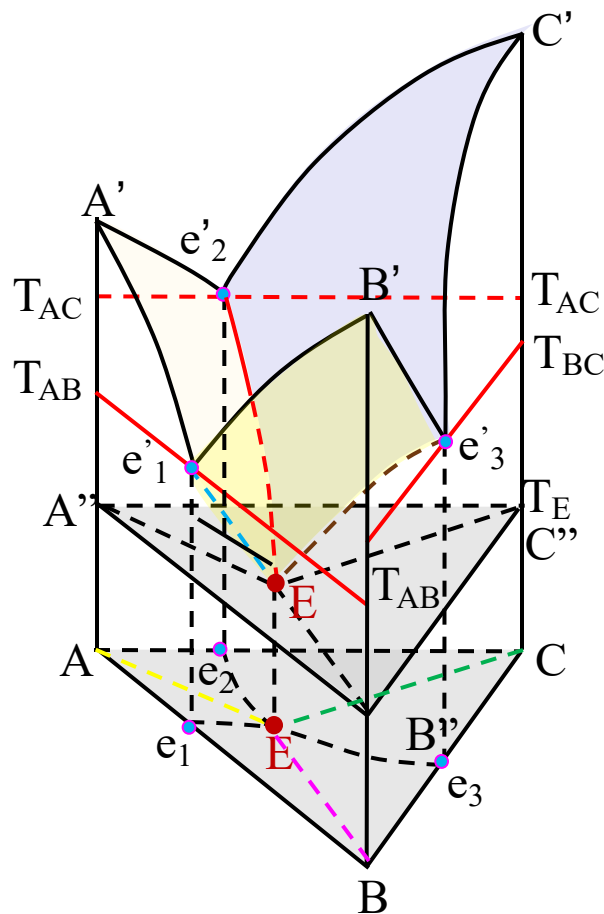
固相面：该面通过最低共熔点E，并平行于底面，任何三元混合物的熔体冷却析晶至此固相面温度时析晶过程均将结束。固相面以下全部都是固相。



三角形A'B'C'为固相面

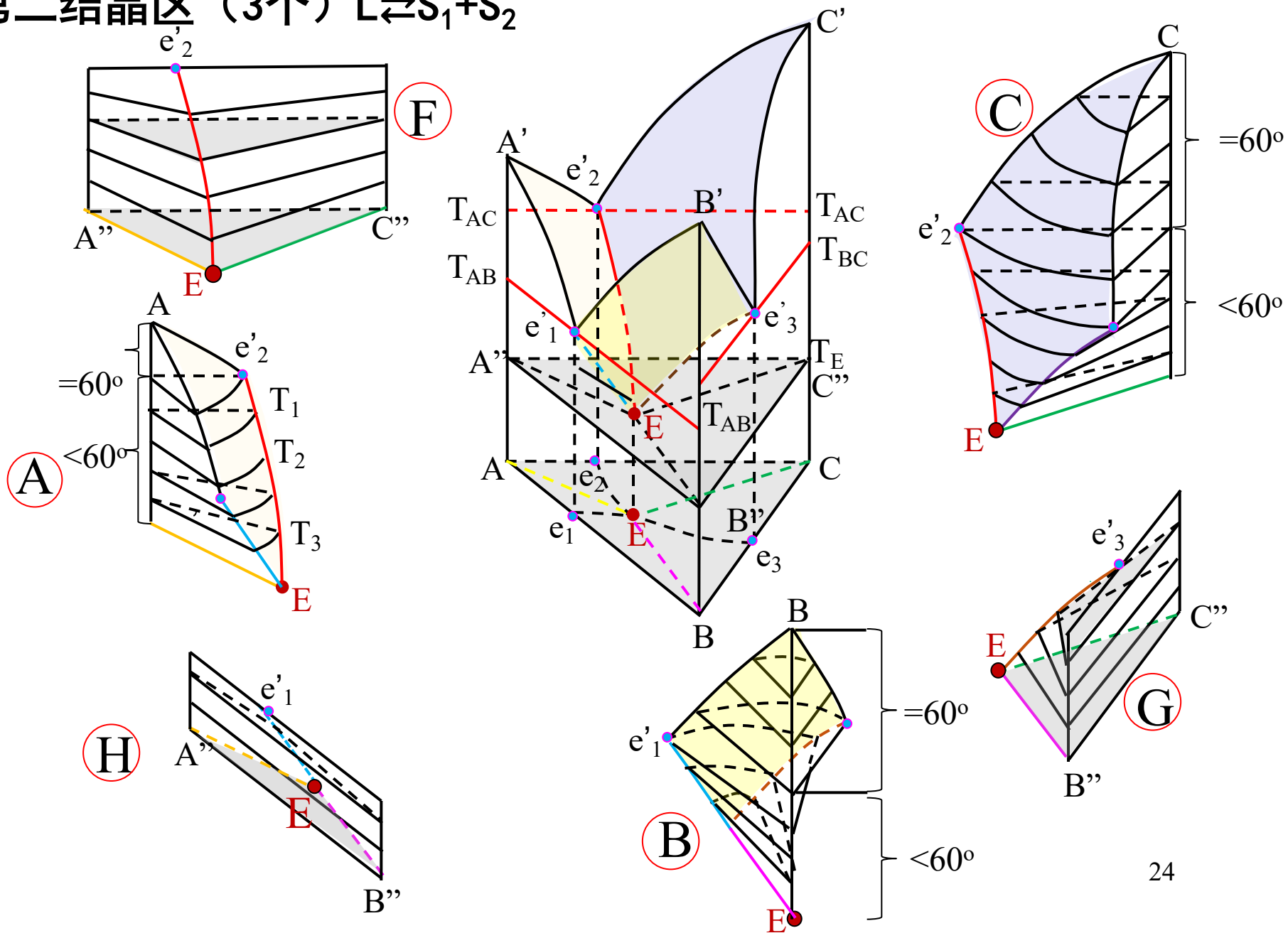
(4) 区域：二相区 与三相区

液相面以上是液相区，固相面以下是固相区。
在液相面与固相面之间存在两种自由度不同的区域。

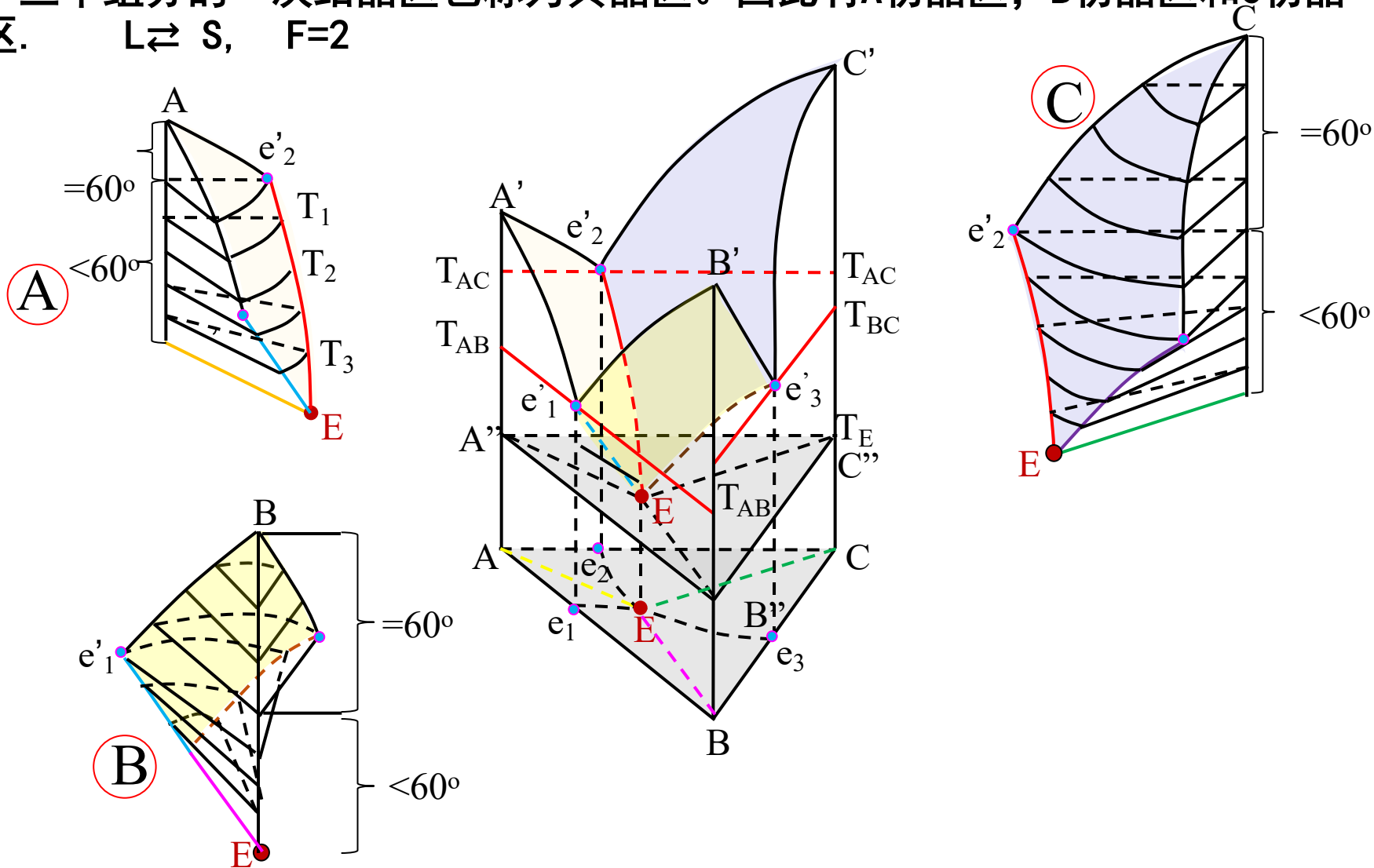


第一结晶区 (3个) $L \rightleftharpoons S$

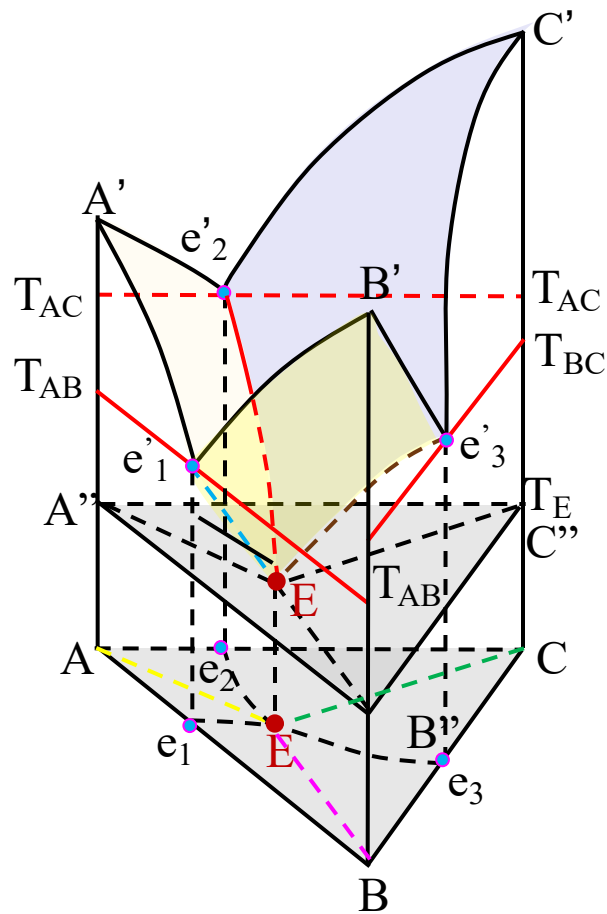
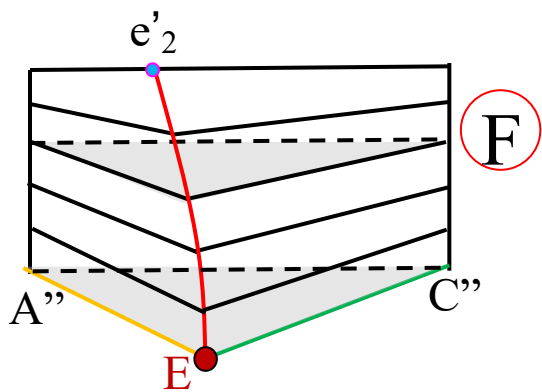
第二结晶区 (3个) $L \rightleftharpoons S_1 + S_2$



第一结晶区，当总组成点落在该区域中时，液相组成必在液相面上，继续降温发生一次凝固析晶作用，体系处于两相平衡，故称第一结晶区。分别相应于三个组分的一次结晶区也称为其晶区。因此有A初晶区，B初晶区和C初晶区。
 $L \rightleftharpoons S, F=2$



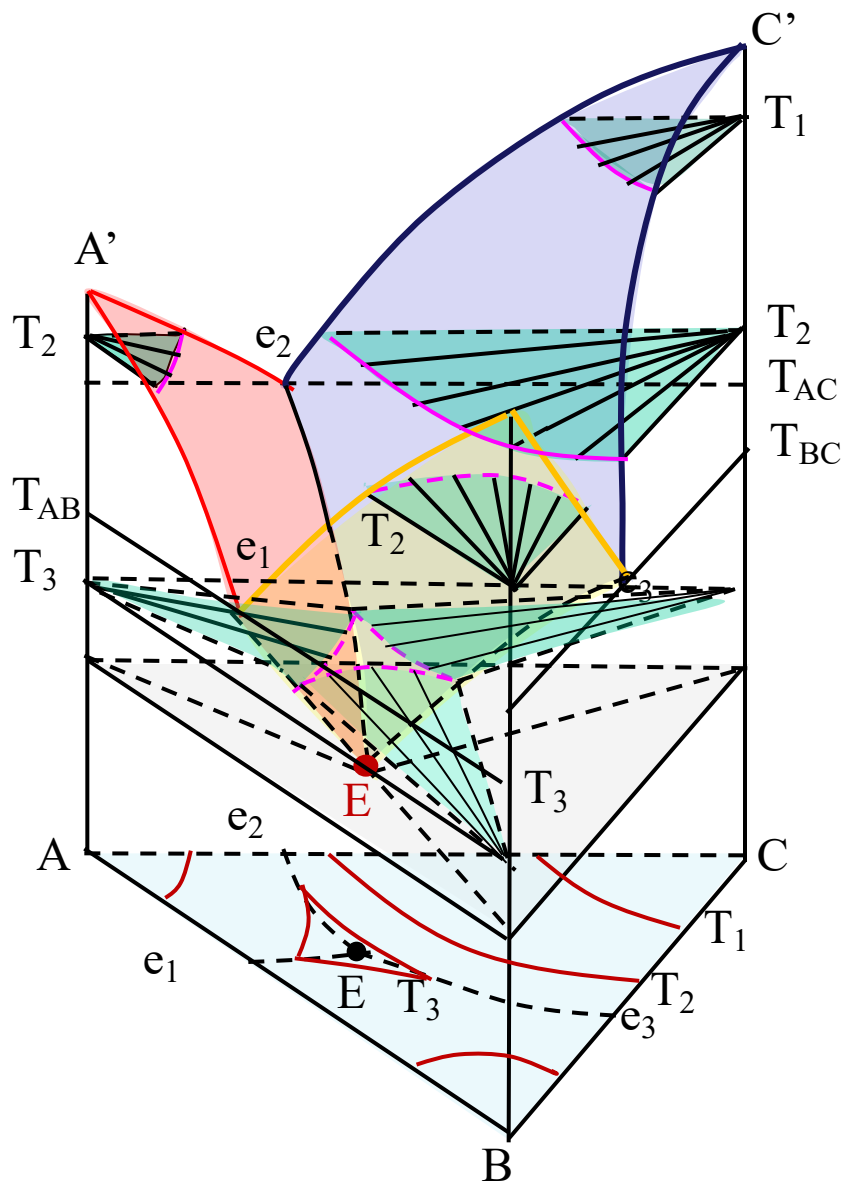
第二结晶区：由许多等温截面下的三角形构成的变温曲面图



二、等温截面与投影图

等温截面的做法：在立体状态图的温度轴上，以一定的温度间隔（如每隔 50°C ）做许多平行于底面的等温平面这些等温面与液相面相交得到一系列等温线，其结线构成一扇面。将等温线投影到底面浓度三角形上就获得等温截面投影图。每一温度都可以得到一个等温截面图。

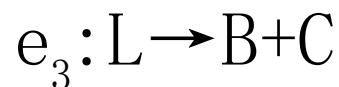
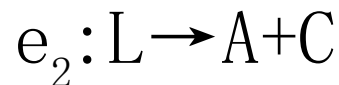
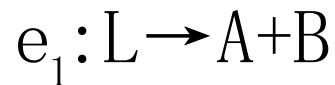
简单共晶三元系立体图



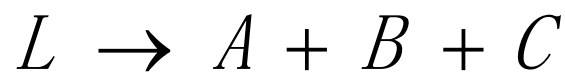
液相线 (6)

液相面 (3) : A、B、C

共晶线 (3) :



四相点 (三元共晶点)



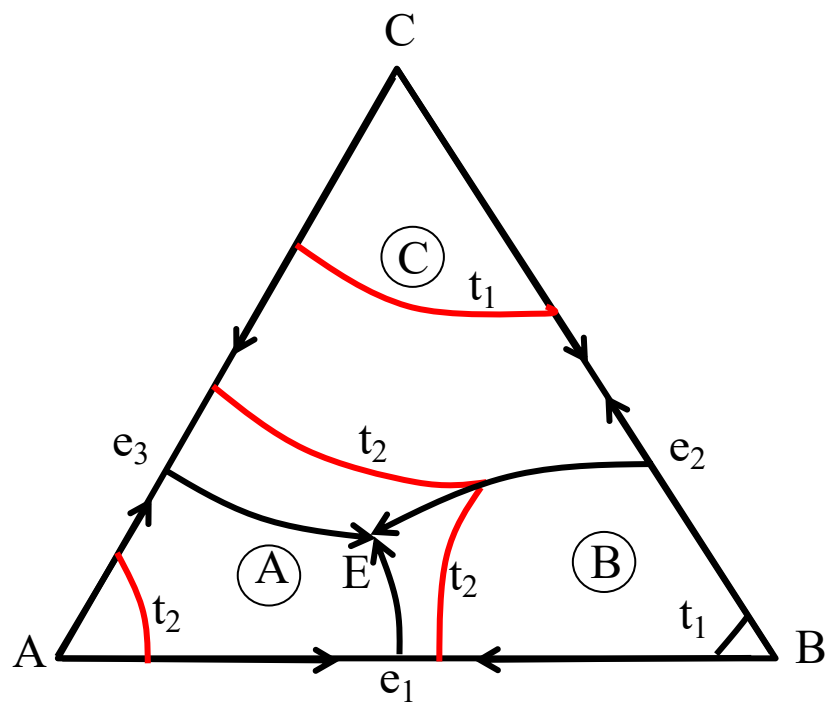
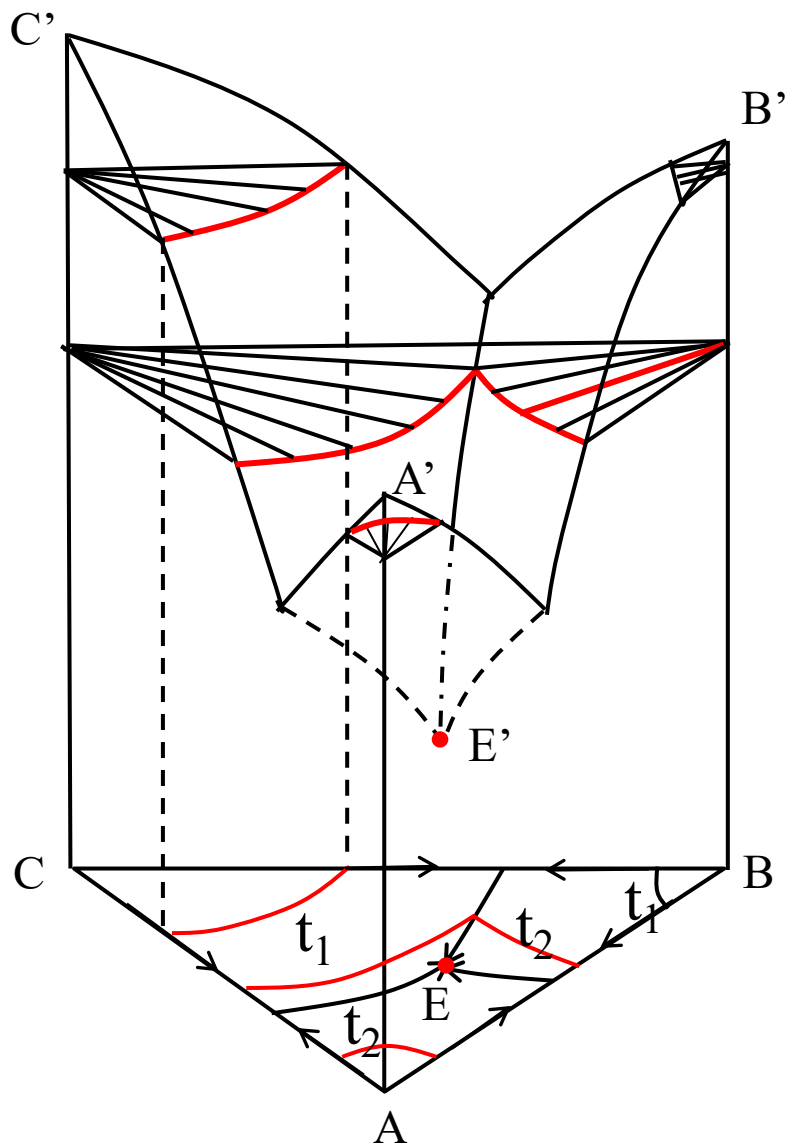
投影图的表示方法

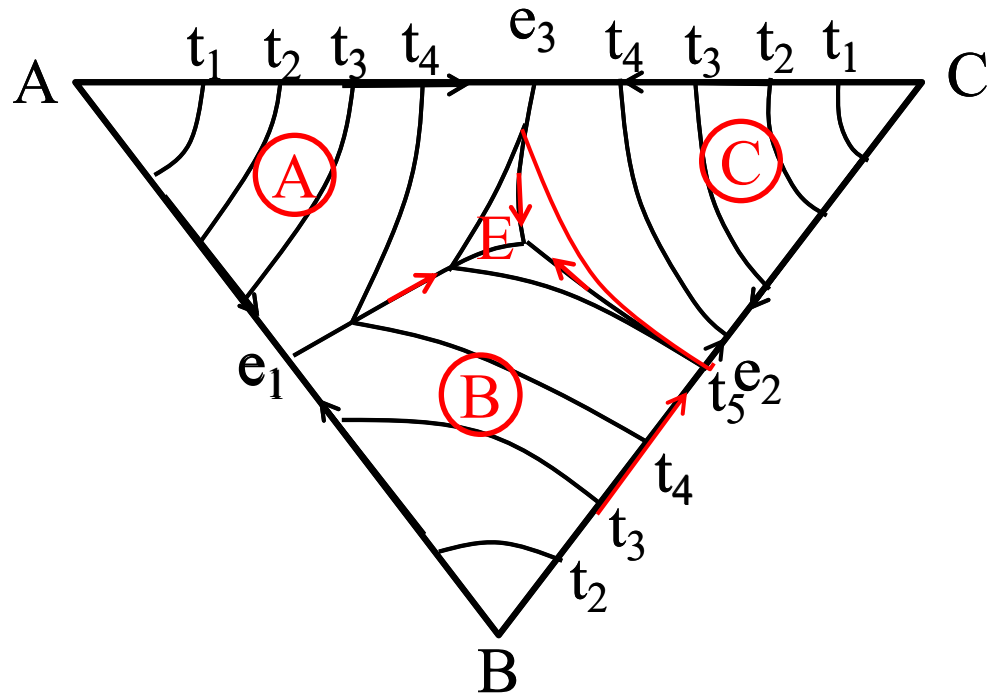
- 特定点（如纯物质、化合物、二元或三元无变点等）直接标注在相图上或列表附在相图旁边；
- 标出ABC各自的初晶区（如C初晶区以标记为©，标在C初晶区上）。
- 界线上用箭头表示温度下降方向；等边三角形各边上的箭头表示二元体系液相线温度下降方向；
- 三角形内部以等温线表示，等温线的疏密不同表示液相面坡度不同，越密，坡越陡

立体状态图

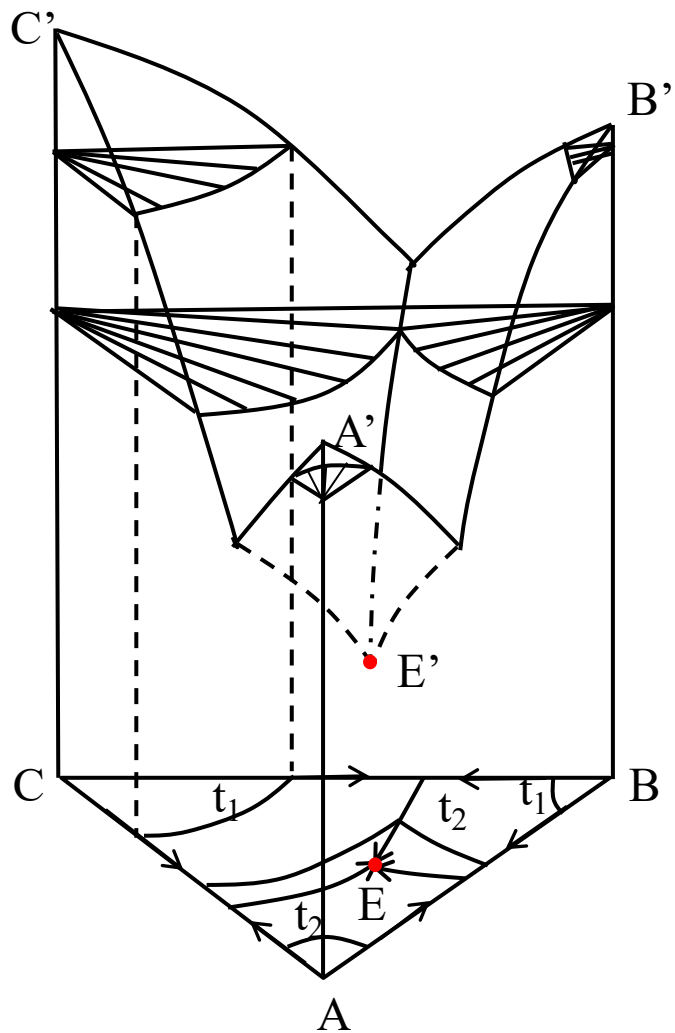


平面投影图

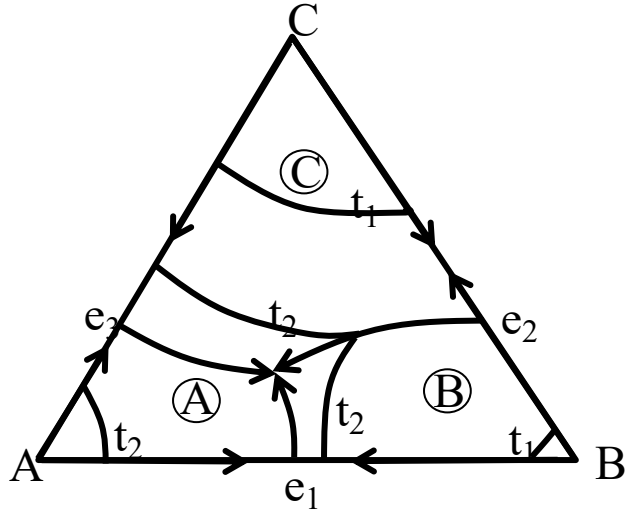




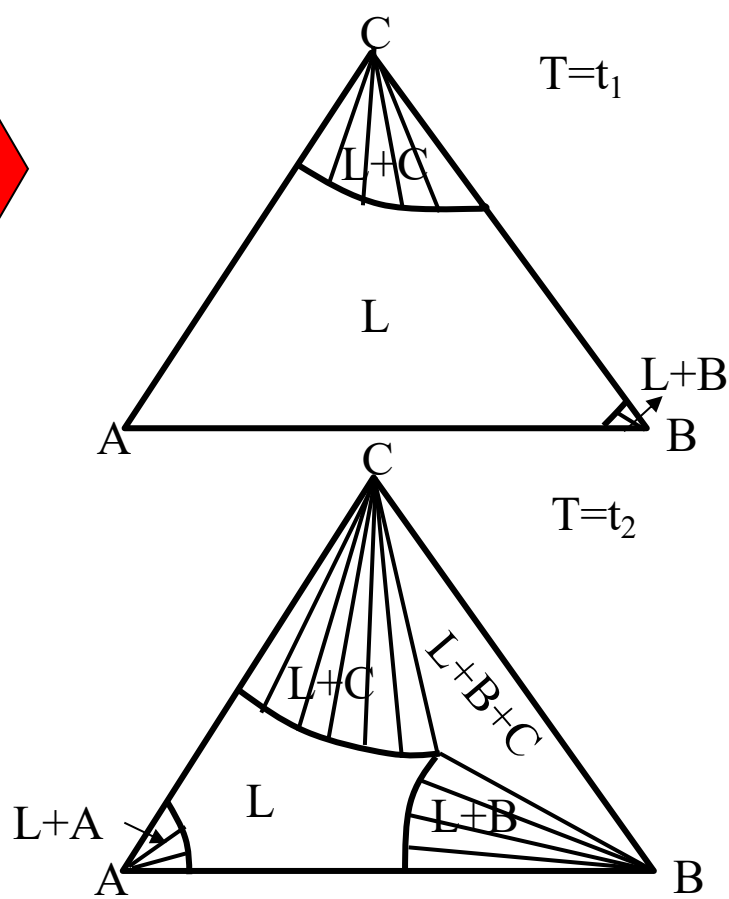
立体图



投影图



等温截面图



注意

- 结线表示顶点纯组元与曲线上的液相相平衡；
- 当等温截面的温度低于某二元低共熔点的温度但高于三元低共熔点温度时，其等温截面图上必存在由液相、及此二元体系构成的三相共存区。在此区域内，自由度为0。

Pb-Sn-Cd等温截面图

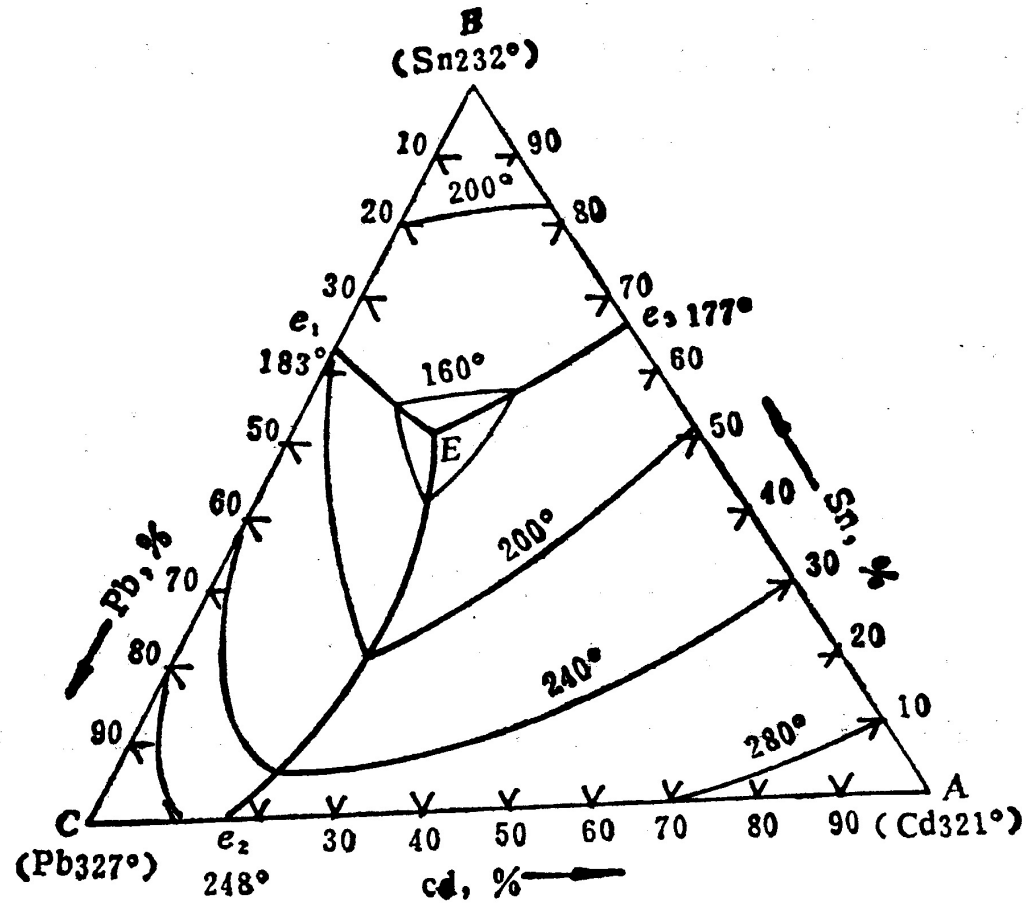
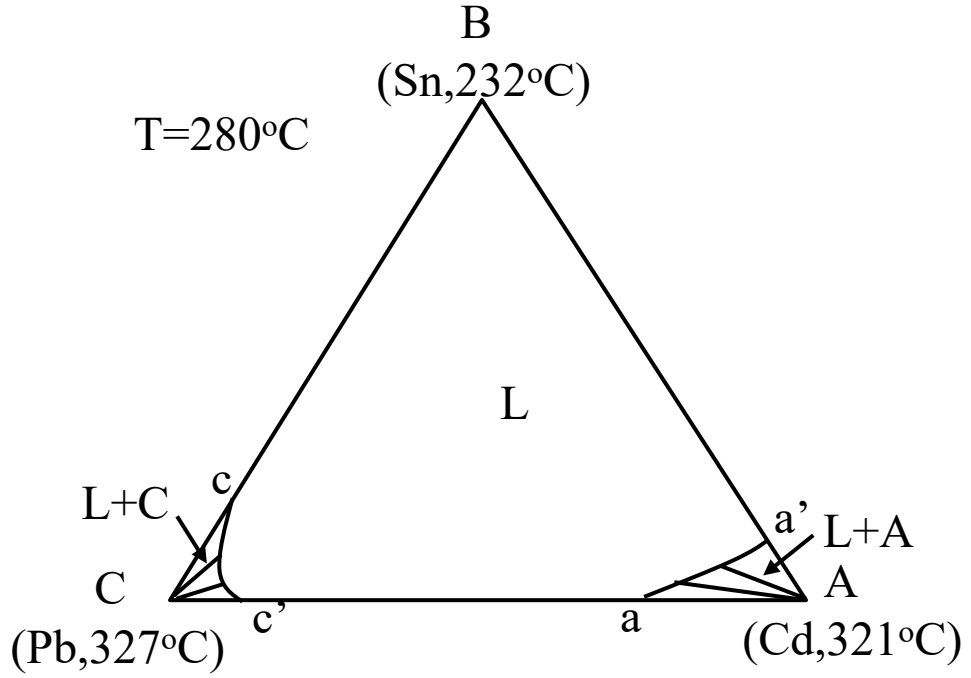
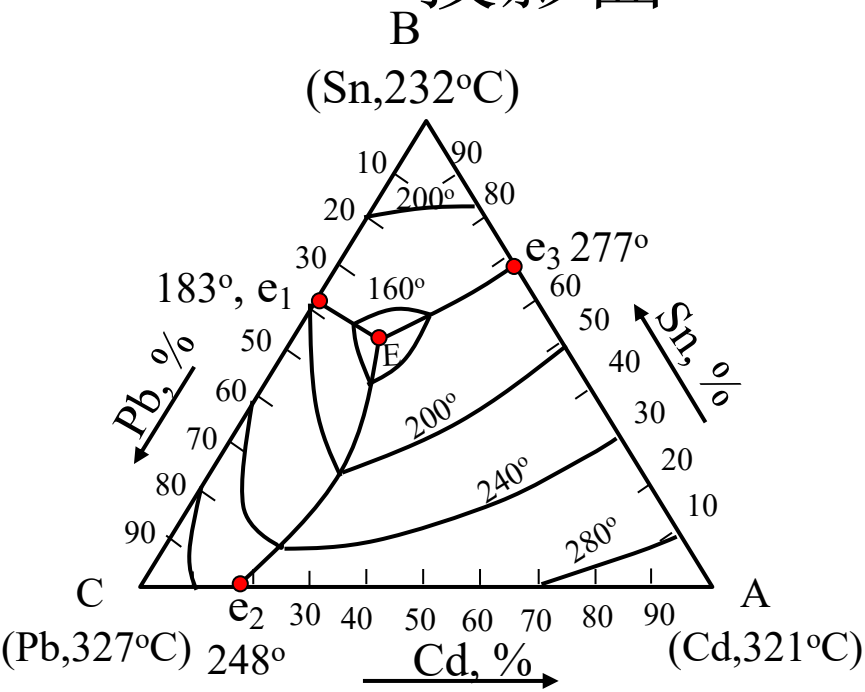


图 3-12 Pb—Sn—Cd三元相图^(Ⅳ)

投影面

等温截面

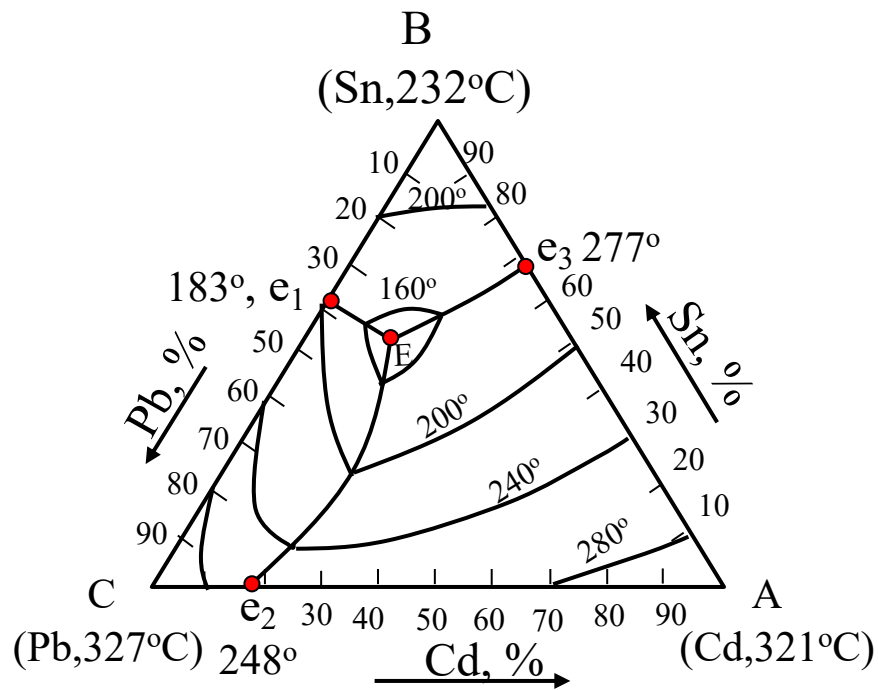
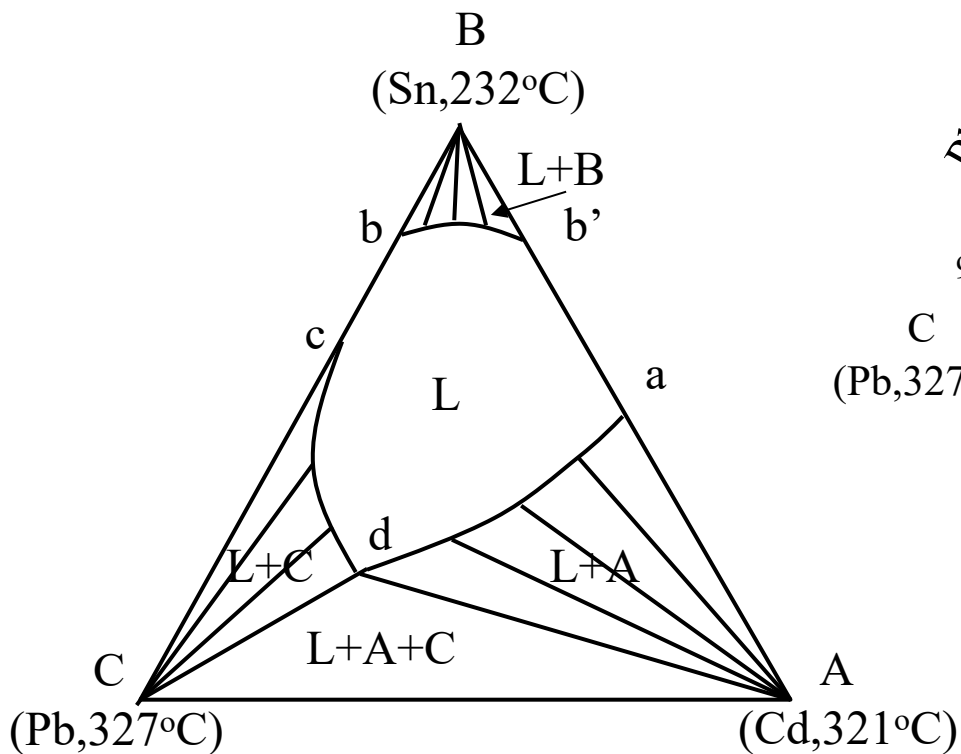


Pb-Sn-Cd三元相图

$$T_E, T_e, T_{m,Sn} < 280^\circ C < T_{m,Pb}, T_{m,Cd}$$

1. 液相线aa',cc';
2. 二相区L+Pb, L+Cd, $f=3-\phi=1$,如果液相Sn含量为m%, 作ml//AC, 可得液相组成l;
3. 结线 Al、Ak

T=200°C



液相线: cd, df, bb'

二相区: L+Pb

L+Cd

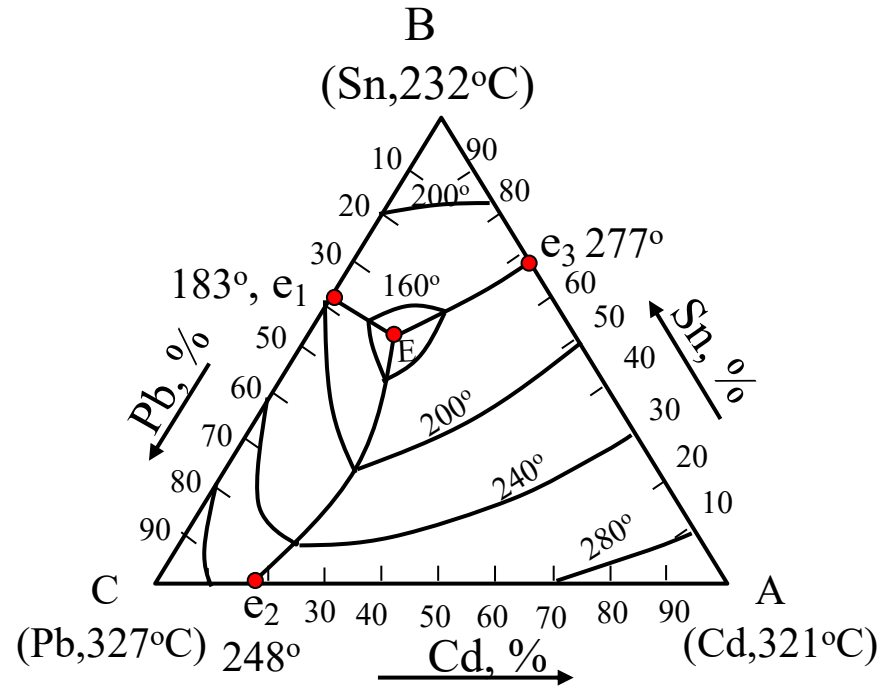
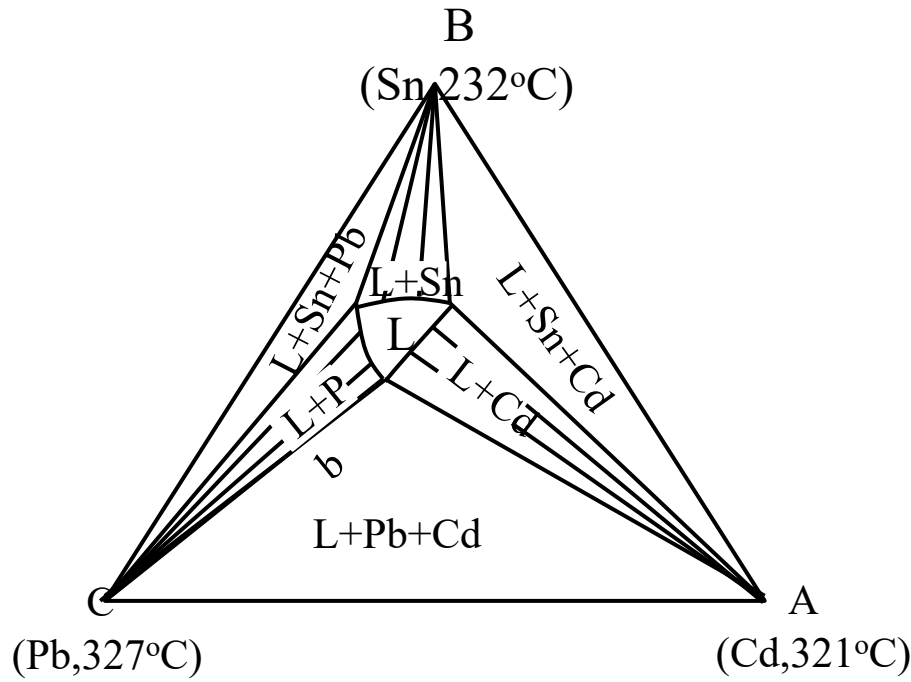
L+Sn

三相区: L+Pb+Cd

f=0, 所以组成一定

$$T_{e1}, T_{e2}, T_E < 200^\circ C < T_{m,Pb}, T_{m,Cd}, T_{m,Sn}, T_{e2}$$

$T=160^{\circ}\text{C}$

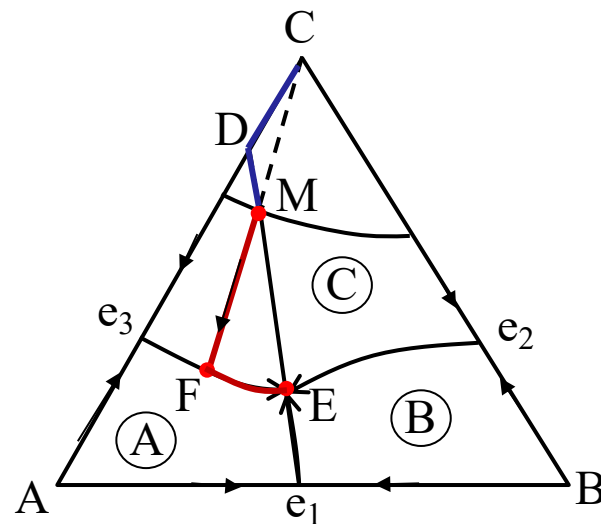
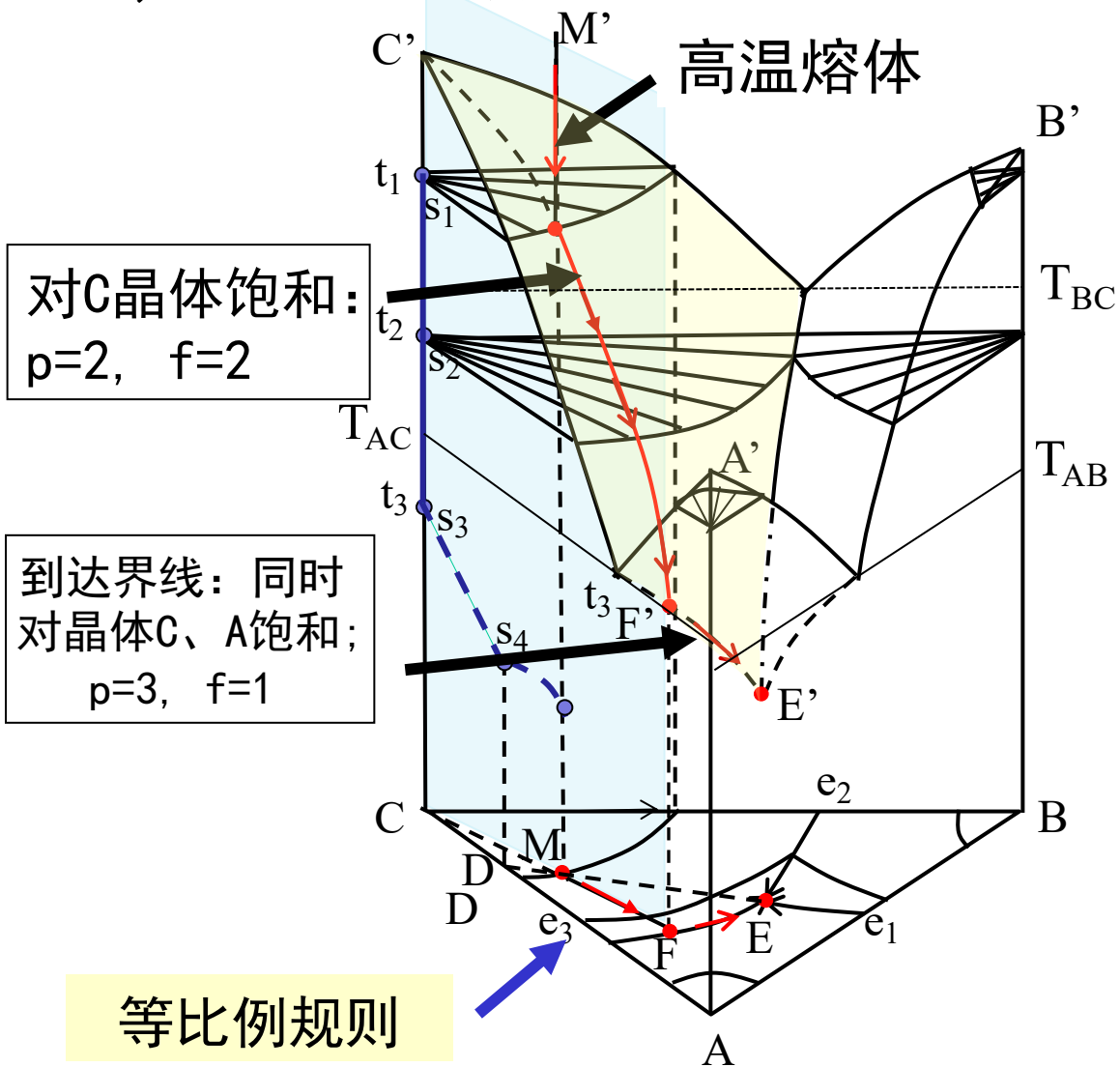


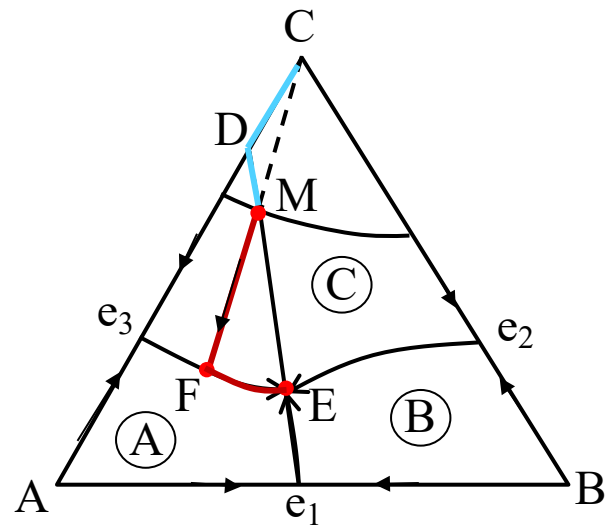
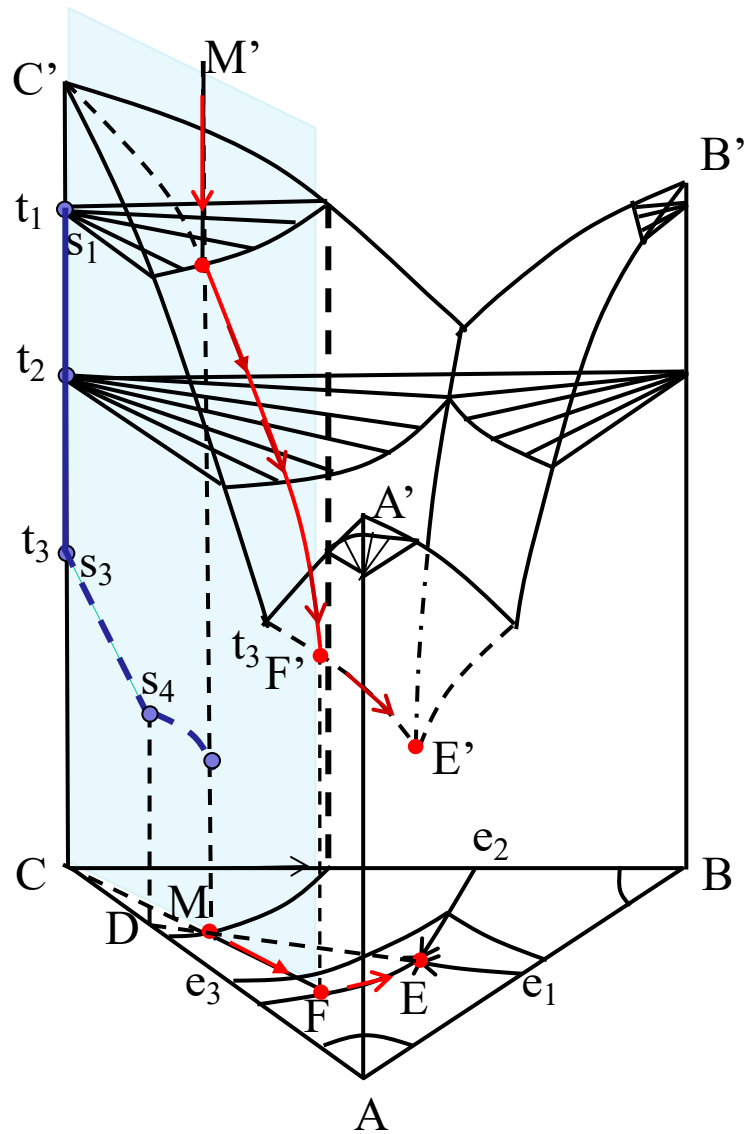
$$T_E < 160^{\circ}\text{C} < T_m, T_e$$

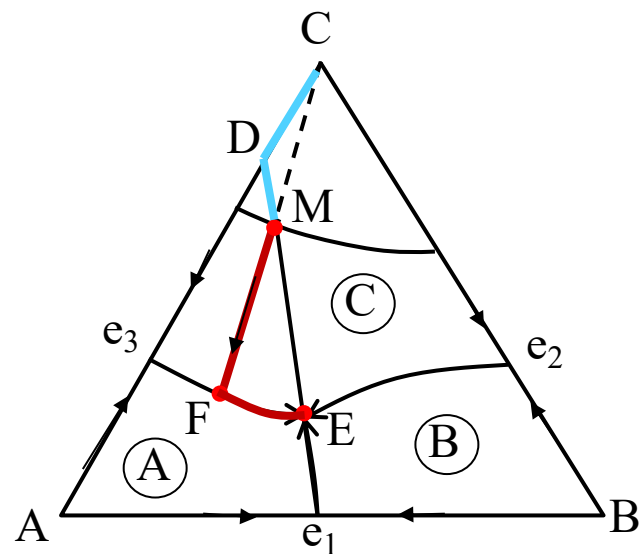
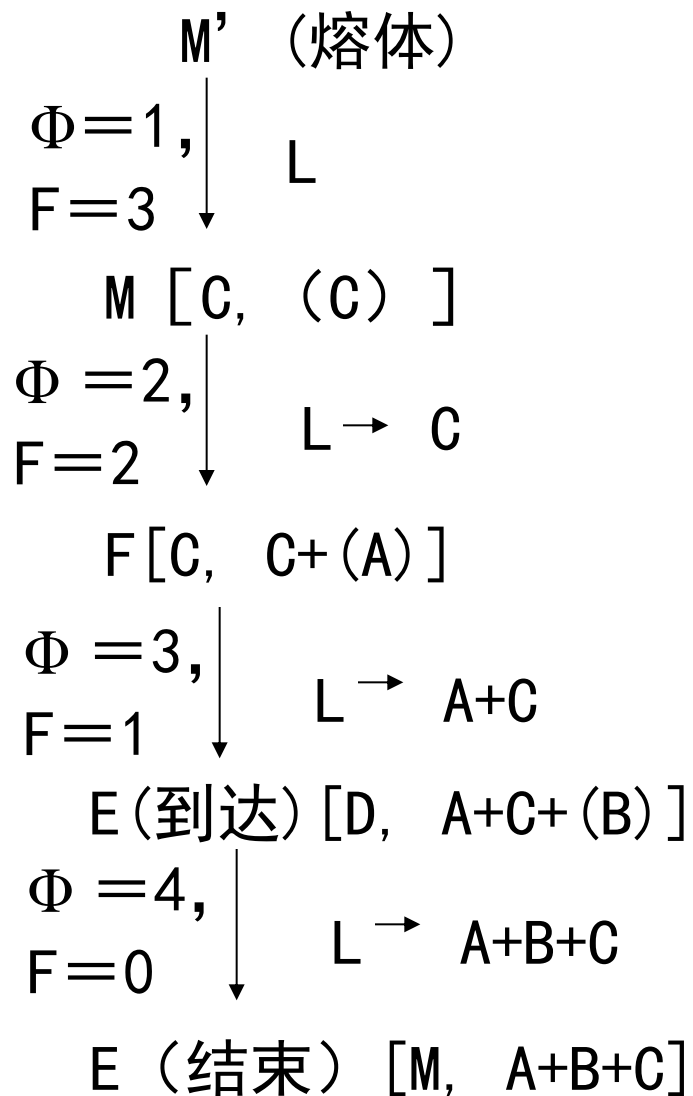
- 二相区 (3)
- 三相区 (3)
- 一相区 (L)

三、平衡冷却析晶过程

三个组分各自从液相中分别析晶，不形成固溶体。不生成化合物，液相无分层现象







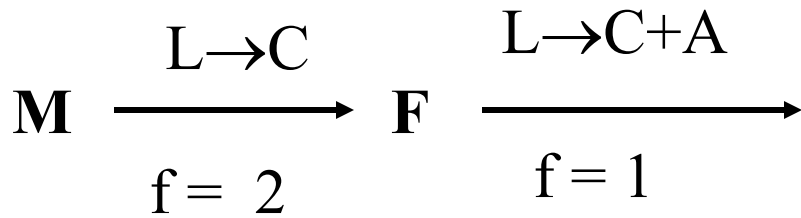
红色为析晶时液相组成在底部三角形的投影；
蓝色为析晶时固体组成在底部三角形的投影。

要点

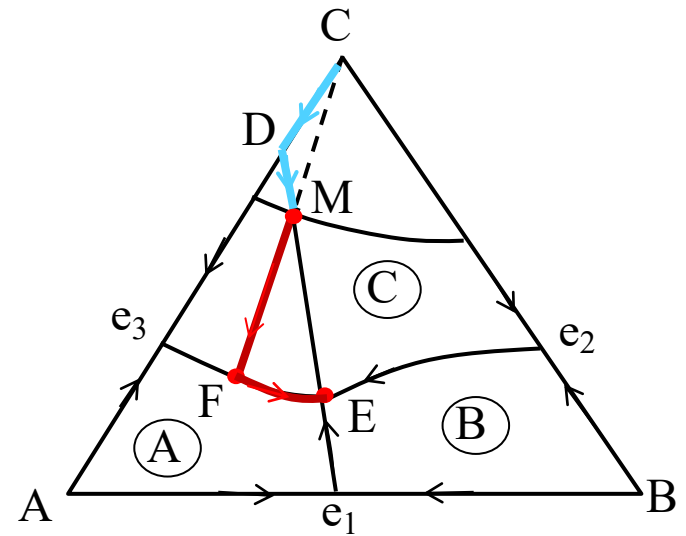
- $M \rightarrow D \rightarrow E$ 等：表示液相的组成变化
- 箭头上表示析晶、熔化或转熔的反应式，箭头下方表示相数和自由度；
- 方括号内表示固相的变化，如 $[C, (C)]$ 表示固相总组成点在C点， (C) 表示晶体c刚析出， $[F, A+C+(B)]$ 则表示固相总组成点在F，固相中已有A和C晶体析出，而B晶体刚要析出

析晶路程也可表示如下：

液相组成



固相组成

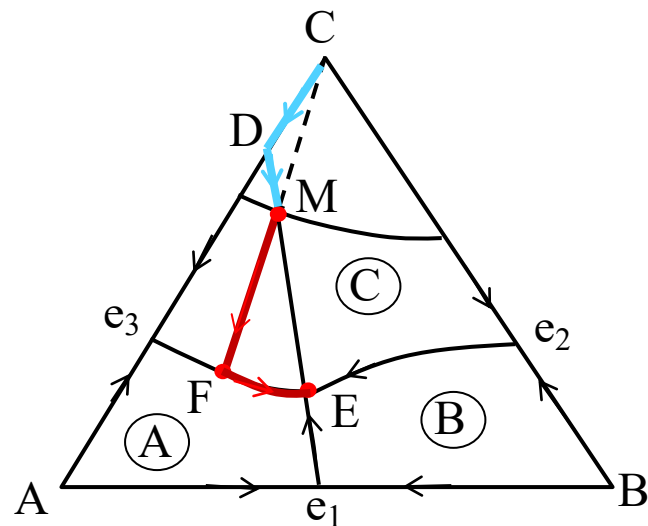


杠杆规则计算液相量和固相量

液相到达D点时：

$$\frac{\text{固相量}}{\text{液相量}} = \frac{MF}{CM}$$

$$\frac{\text{固相量}}{\text{固液总量(原始配料量)}} = \frac{MF}{CF}$$
$$\frac{\text{液相量}}{\text{固液总量(原始配料量)}} = \frac{CM}{CF}$$

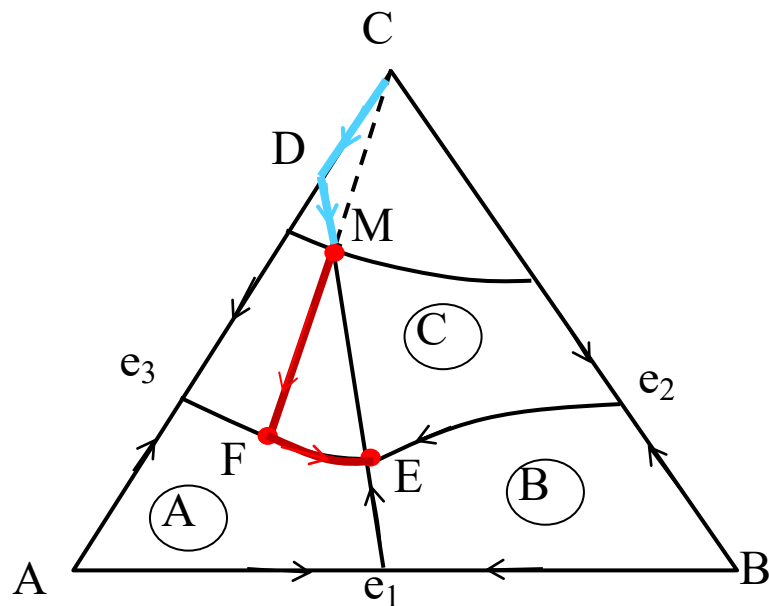


液相刚刚到达E点时：

$$\frac{\text{固相量}}{\text{液相量}} = \frac{ME}{DM}$$

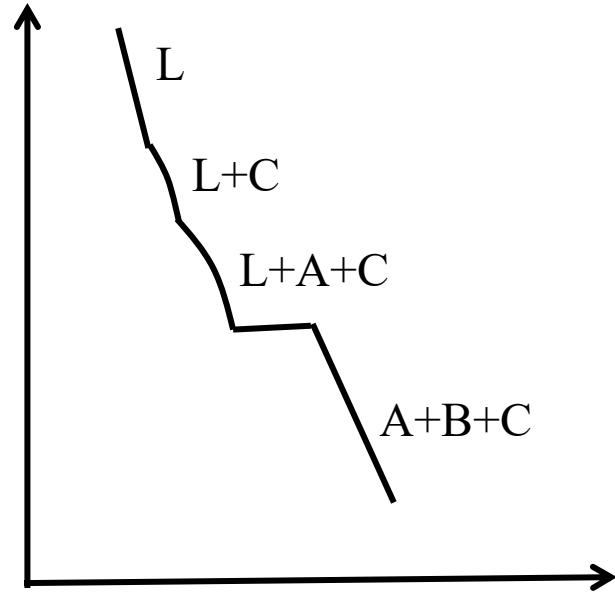
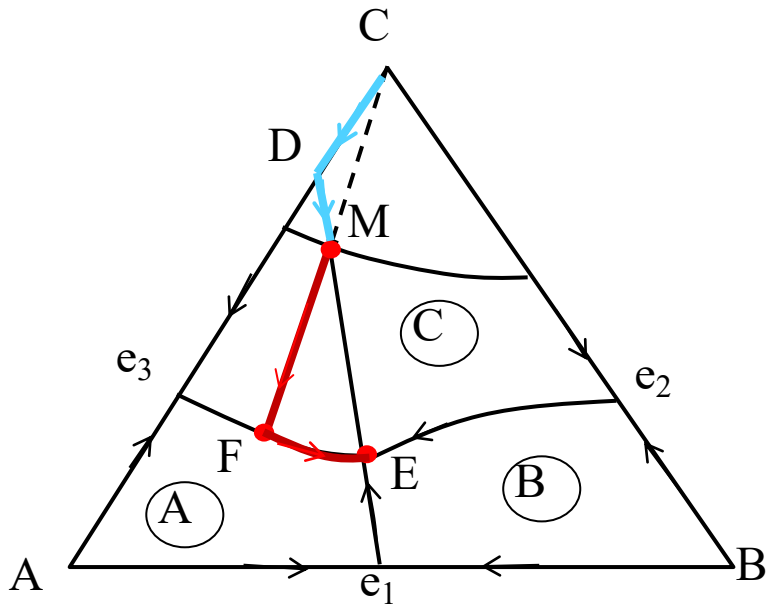
$$\frac{\text{固相量}}{\text{固液总量}} = \frac{ME}{ED}$$

$$\frac{\text{C的固相量}}{\text{固相量}} = \frac{AD}{AC}$$



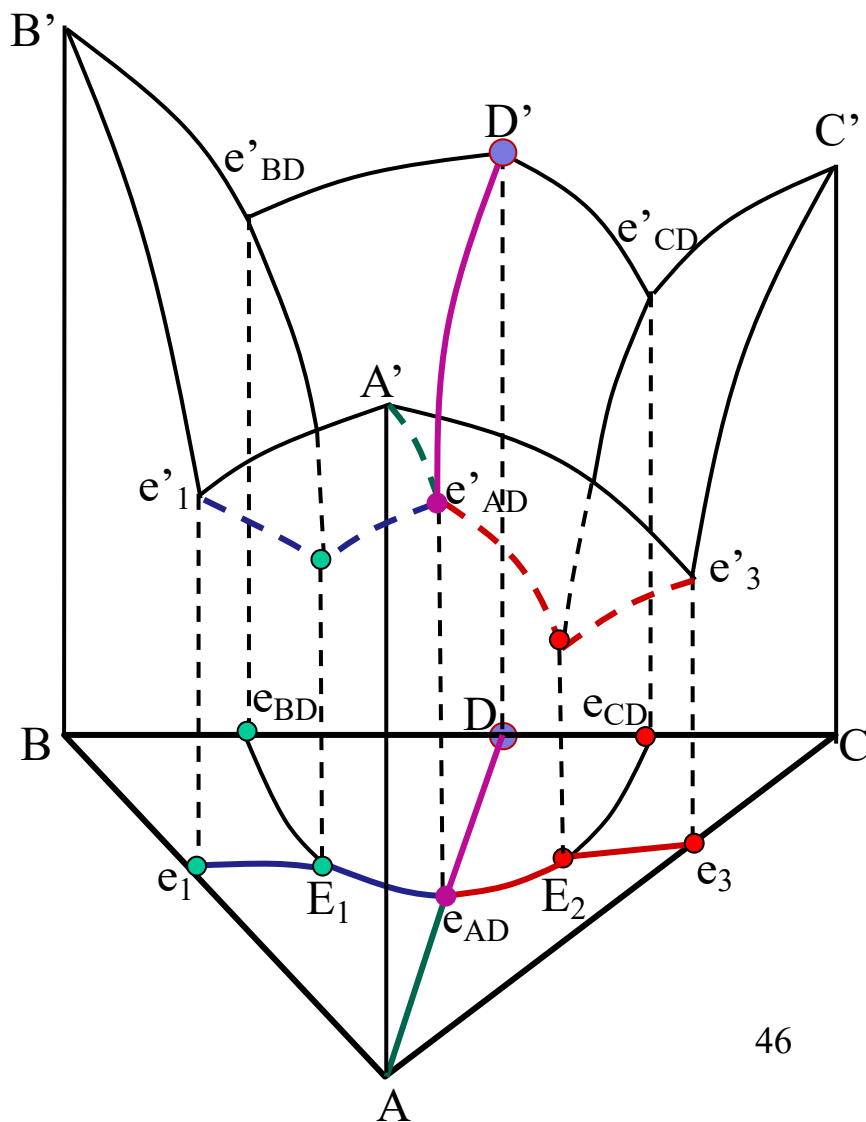
E点析晶结束时，固相点与系统组成点重合

冷却曲线



四、生成一个稳定的二元化合物的三元相图的立体图

相图立体图的三个侧面是由一个具有一致熔化物的二元相图和两个形成低共熔的简单二元相图组成。在实际三元体系中经常出现若干二元化合物和三元化合物, 如果这些化合物同组成熔化, 则和二元体系一样, 可以分解成若干简单的三元系来处理。



生成一个稳定的二元化合物的三元相图

该体系如图所示可以分割
 $\triangle ABD$ 和 $\triangle ADC$ 二个副（亚）
三角形，有两个低共熔点
(E_1 、 E_2)，可应用共晶
体系的冷却规律处理。

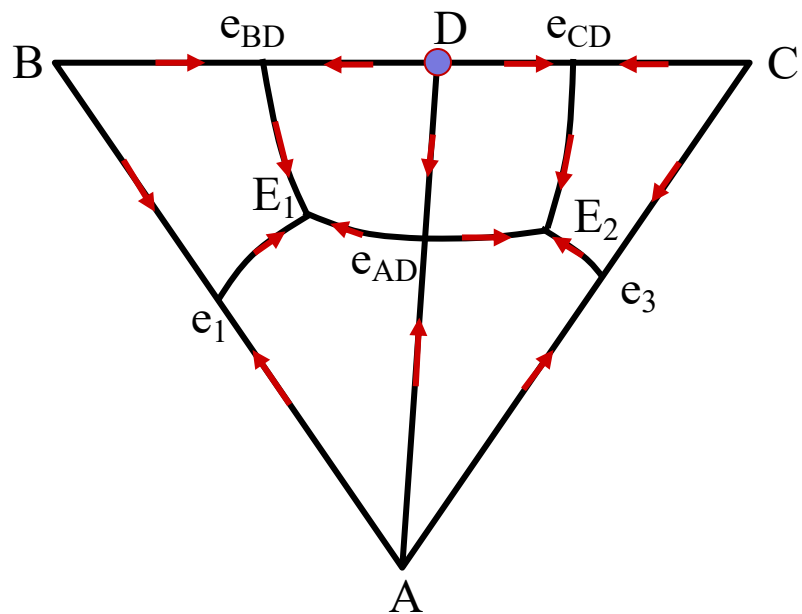
在 E_1 点发生

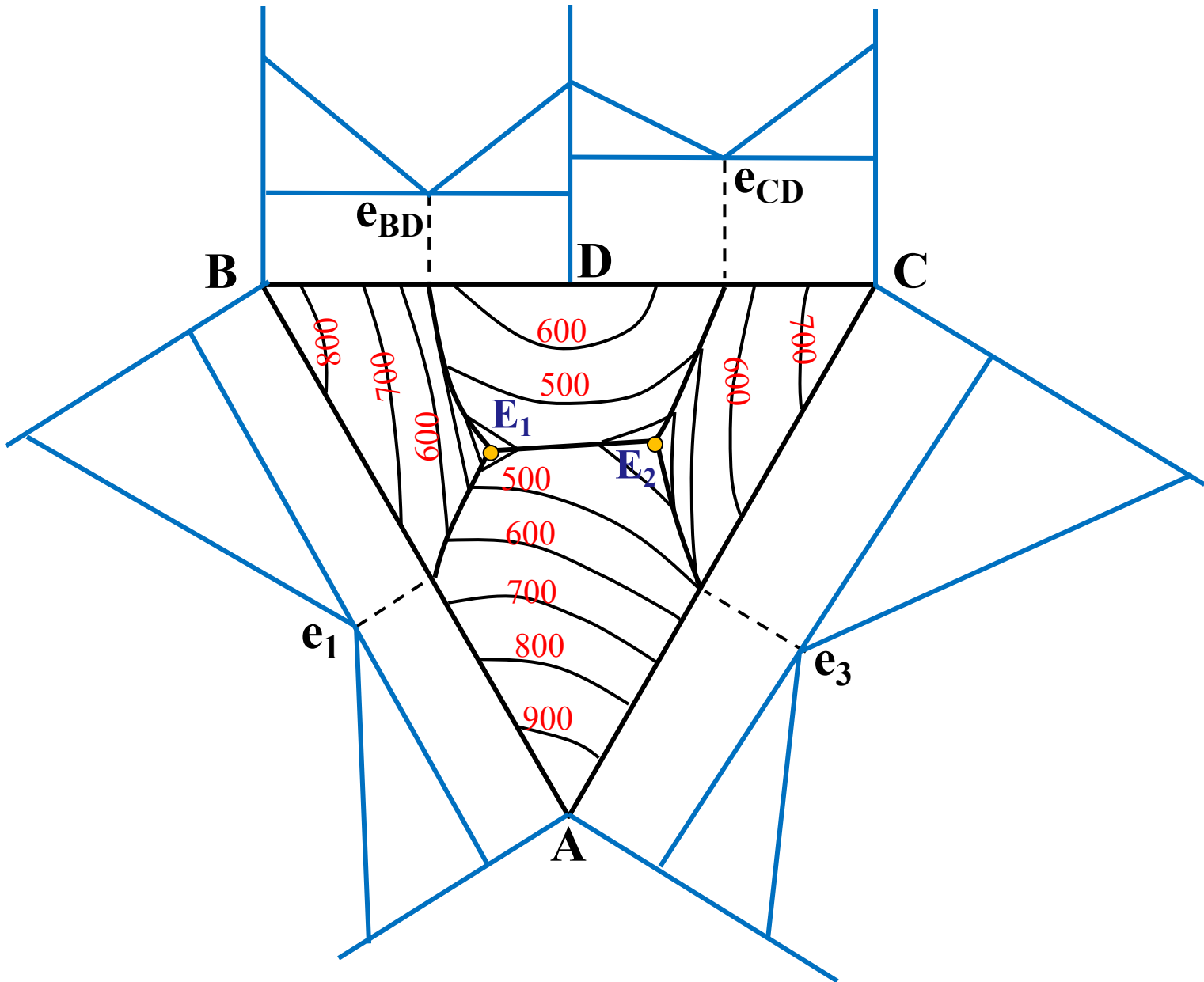


在 E_2 点发生



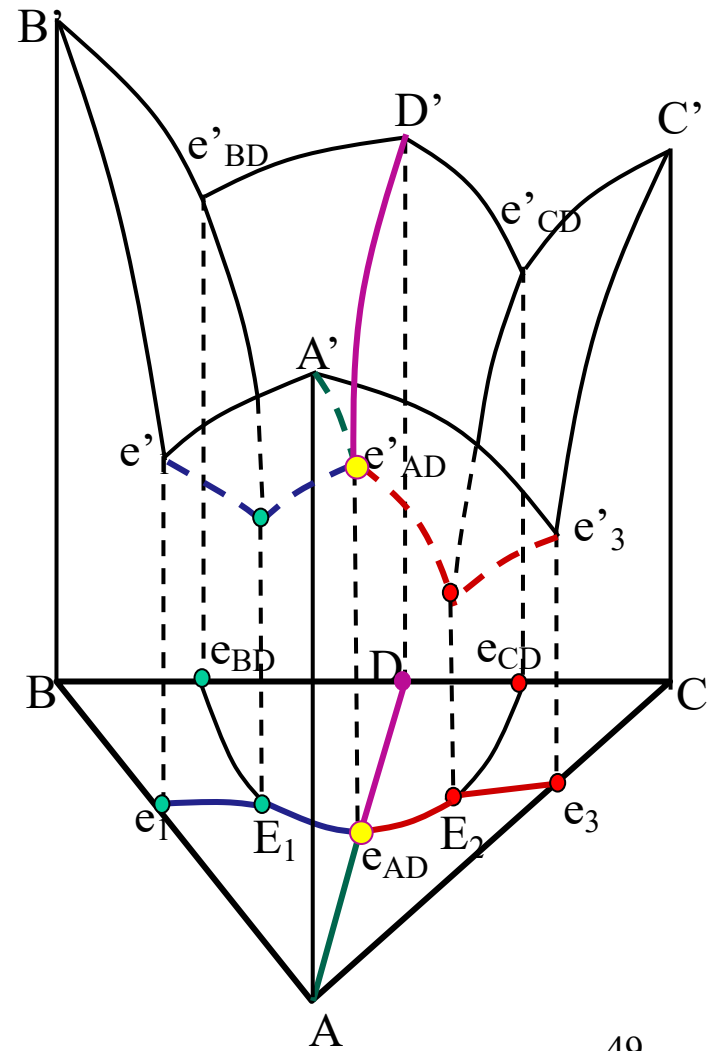
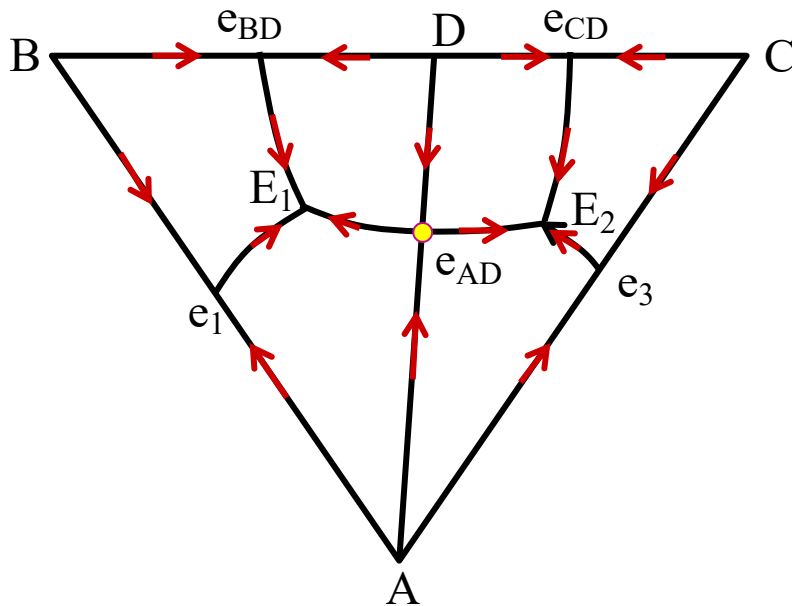
组成点连线A-D与相界线
 E_1E_2 的交点 e_{AD} 是界线上的
最高点，温度向两侧下降。





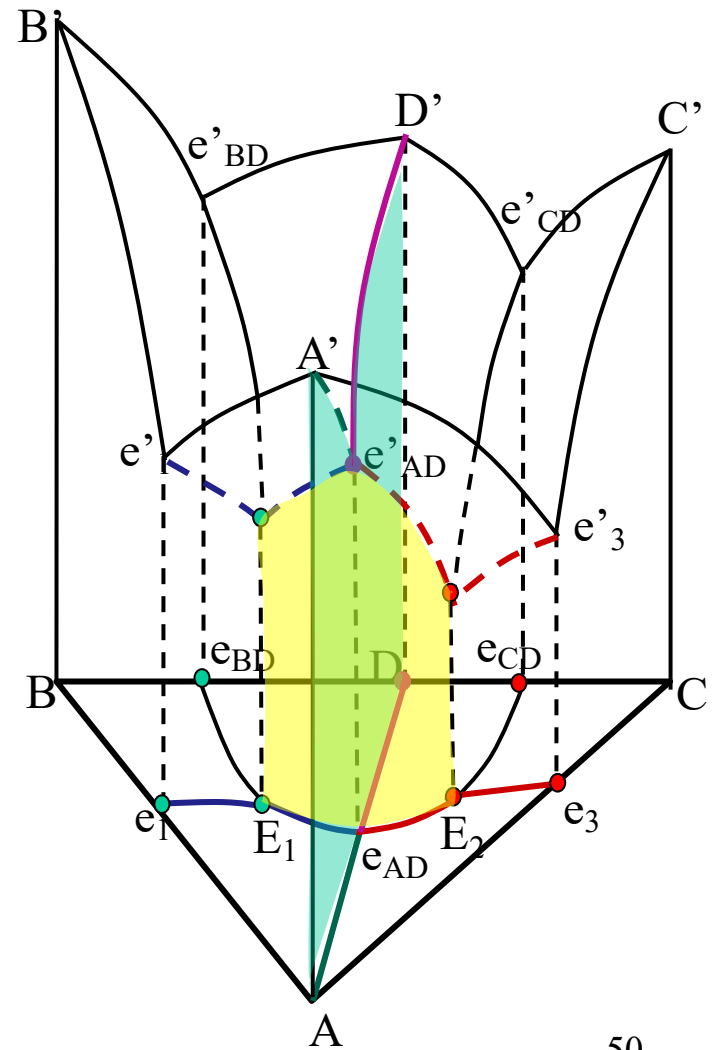
鞍心点 e_{AD}

1. e_{AD} 是分界线 E_1E_2 上温度最高点
2. e_{AD} 是二元共晶系的无变度点，即 AD 线上温度最低点
3. e_{AD} 是鞍心点



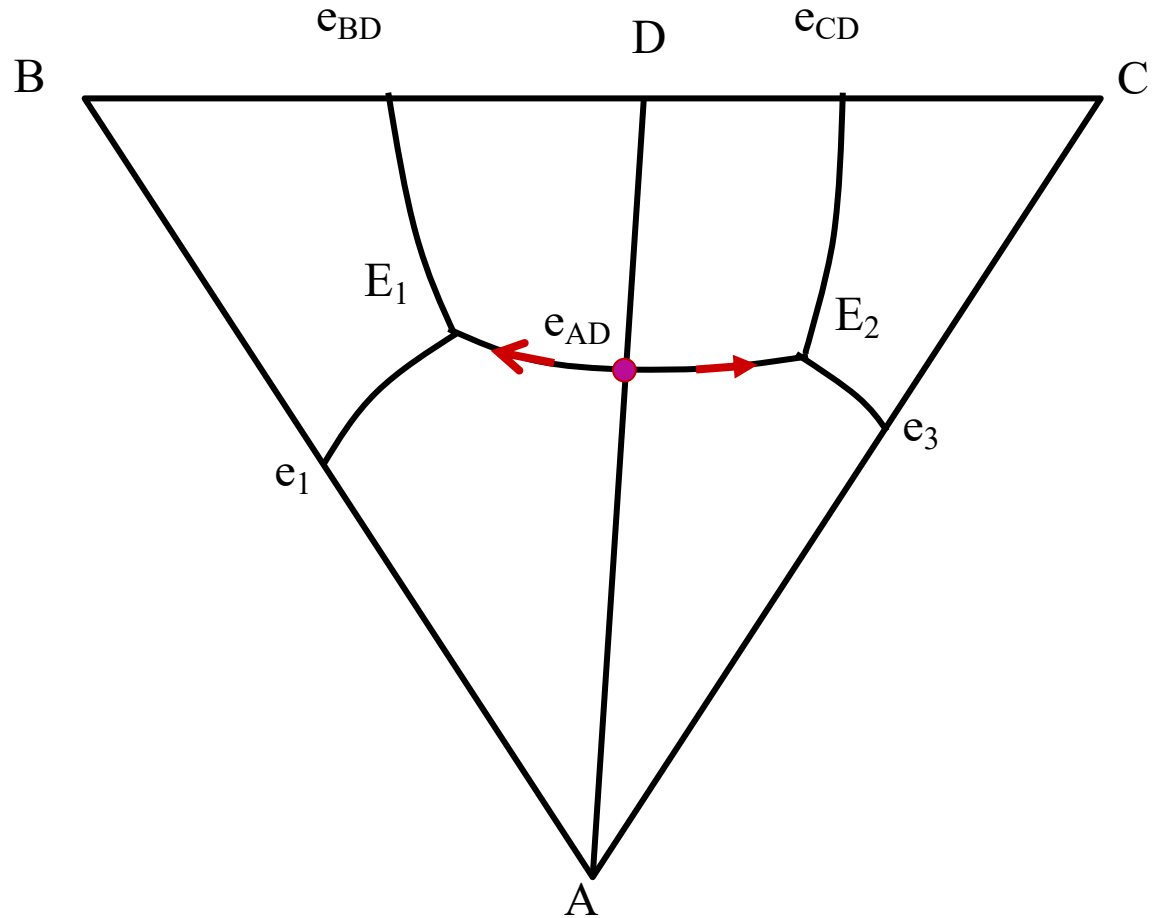
鞍心点 e_{AD}

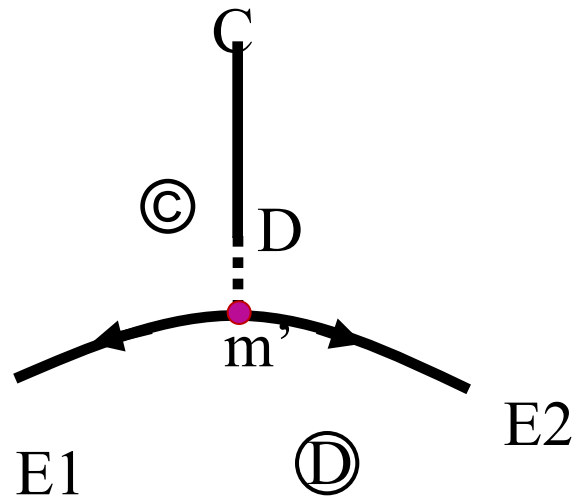
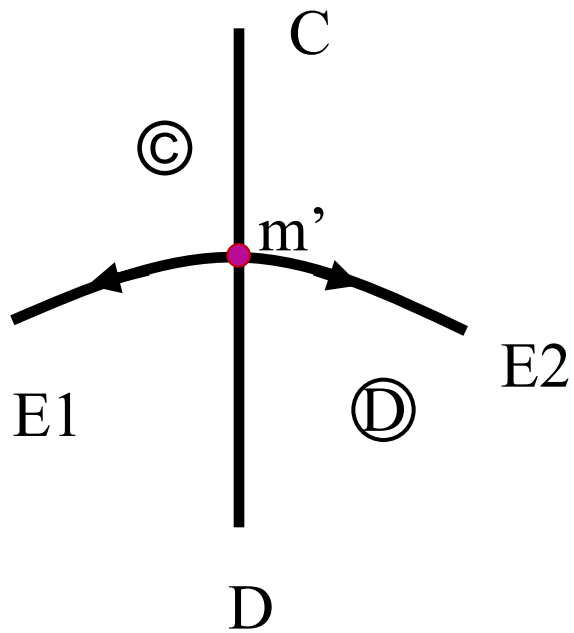
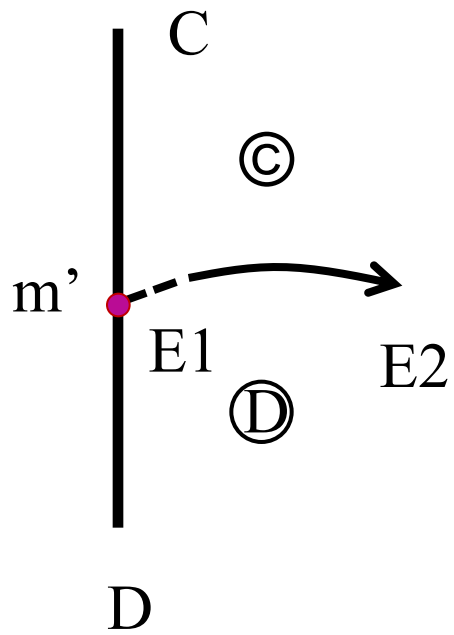
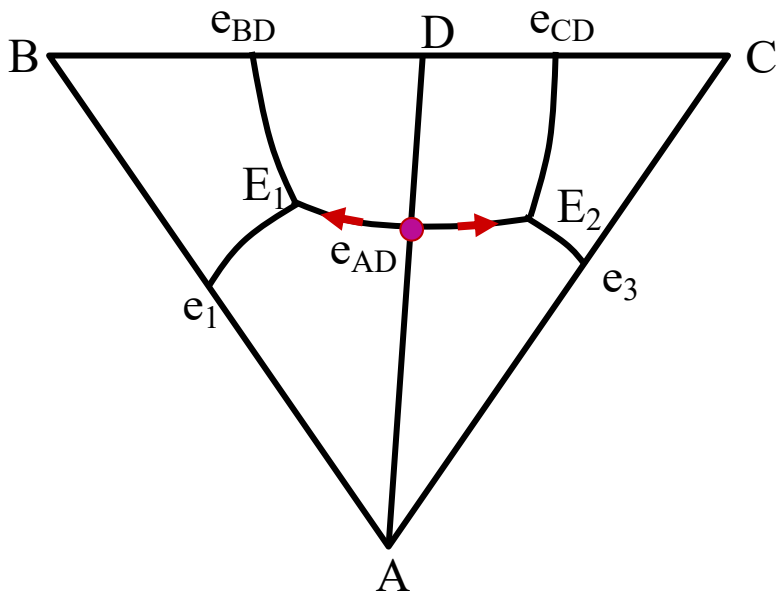
1. e_{AD} 是分界线 E_1E_2 上温度最高点
2. e_{AD} 是二元共晶系的无变度点，即 AD 线上温度最低点
3. e_{AD} 是鞍心点



阿尔克马德规则（罗策布规则）

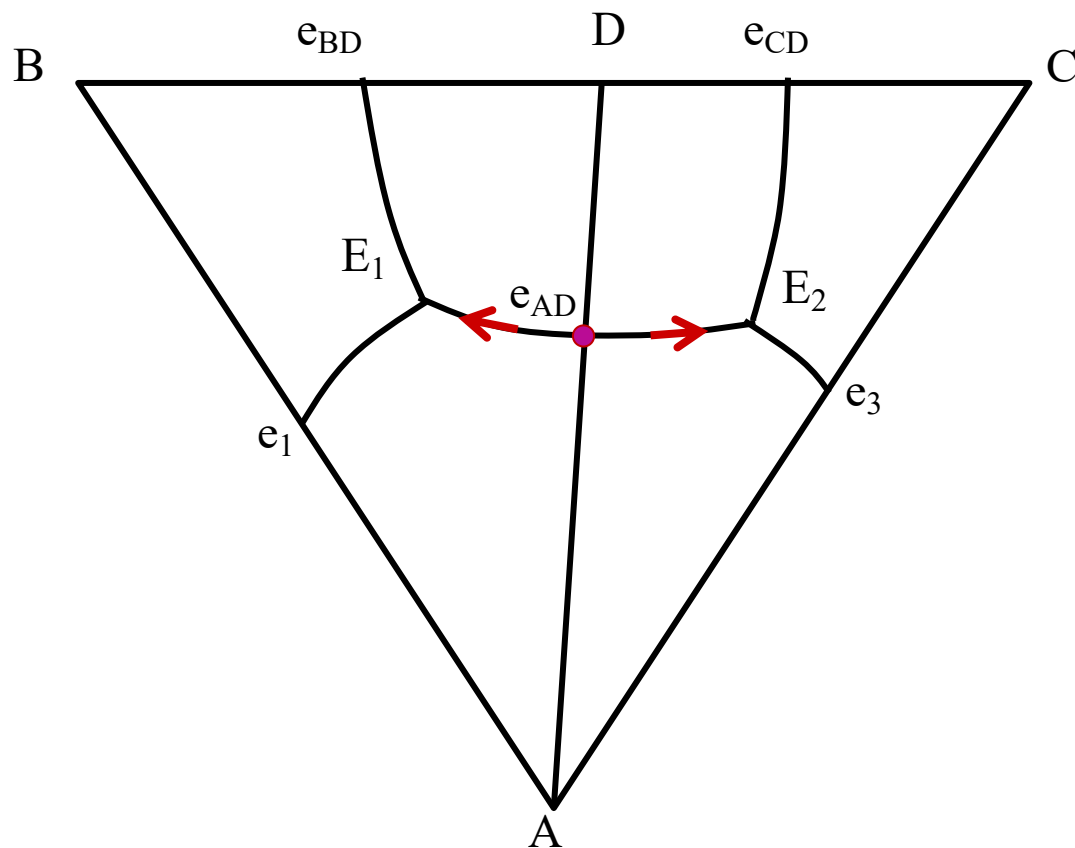
如果联结平衡共存两个相的成分点的连线或其延长线，与划分这两个相的分界线或其延长线相交，那么这个交点就是分界线上的温度最高点。或者说：当温度下降时，液相成分点的变化方向总是沿着界线，向着离开交点的方向。





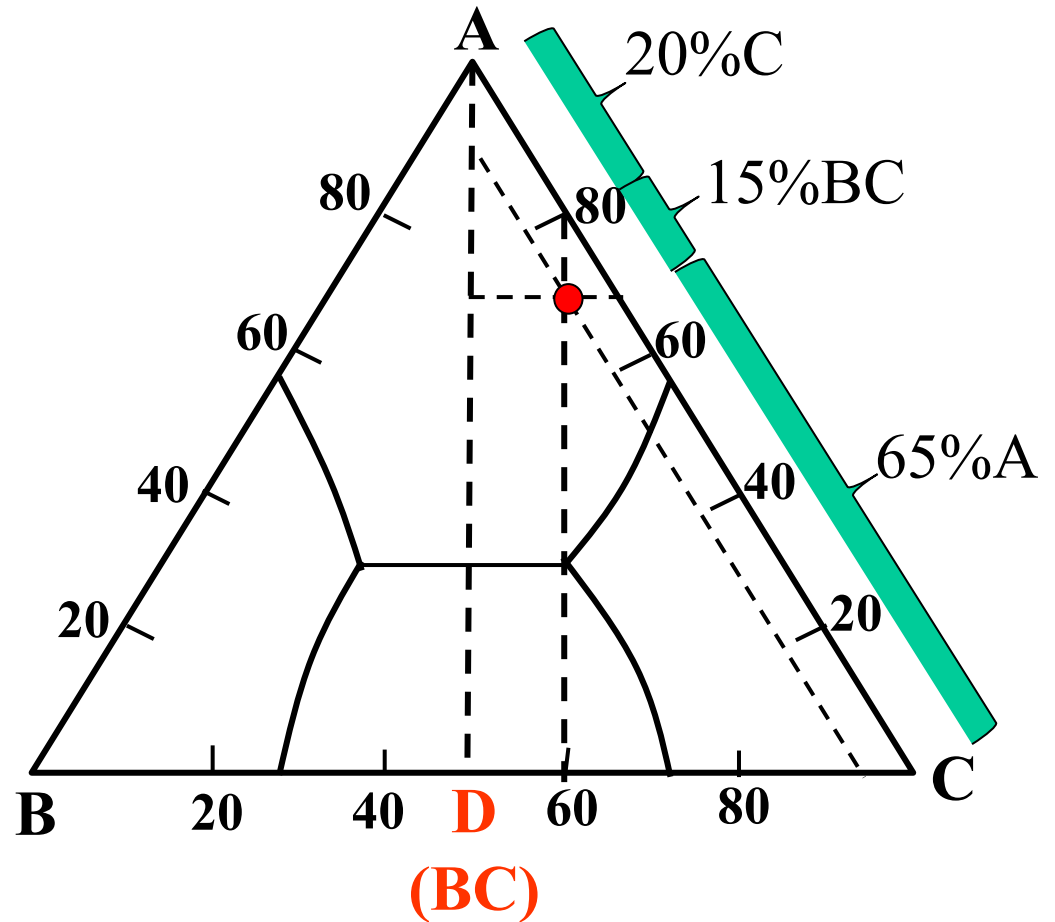
截面AD的性质

1. 截面AD具有二元系性质
2. 截面AD把生成一个稳定二元化合物的三元系分割成两个低共熔子三角形
3. 把复杂的三元系划分成几个类型比较简单的子三元系的方法，叫划分三角形法

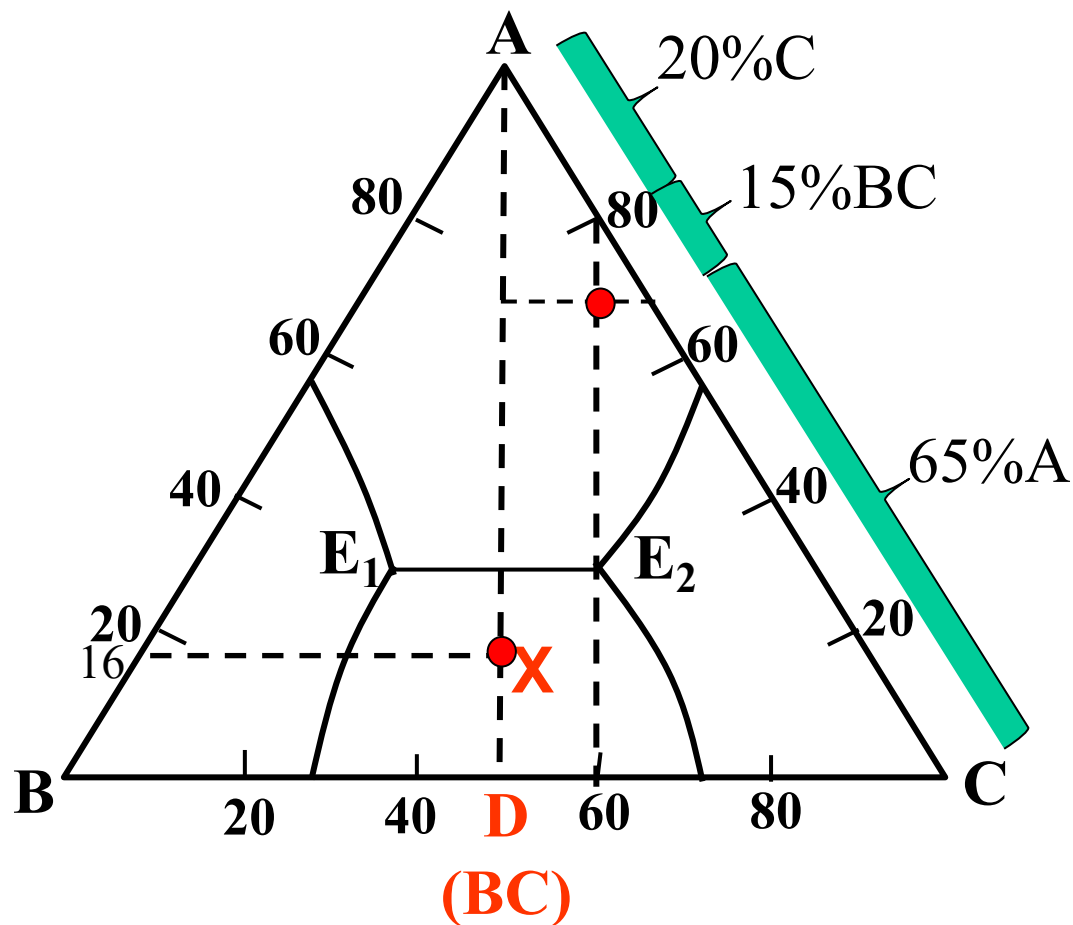


平衡冷却

显然,该体系中熔体Y冷却的终产物是A, D(BC) 和C,因为该体系组成点落在 $\triangle ADC$ 三角形中,如图所示,按杠杆规则熔体Y凝固后含65%的A, 20%的C和15%的二元化合物D(BC)。

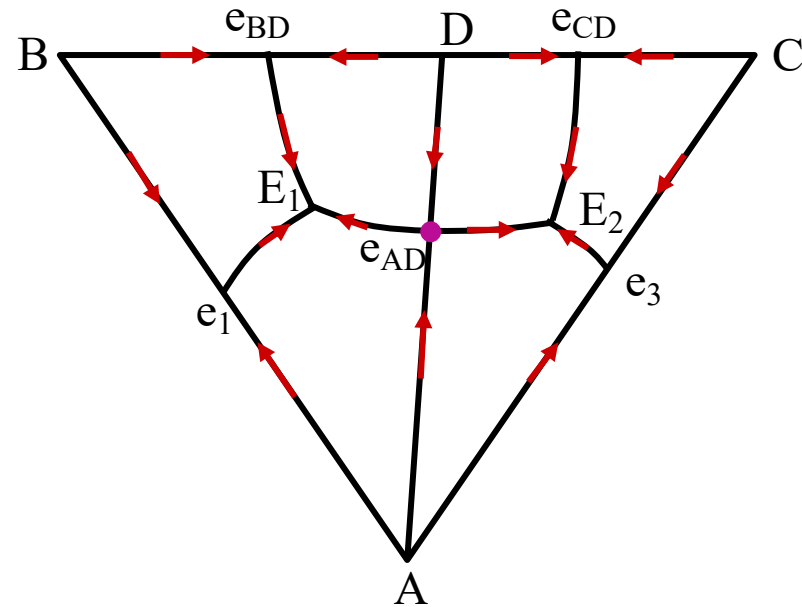


熔体X是落在D的初晶区内，却正好在组成点A与D的联线上，在冷却时，随着D的析出，熔体组成沿AD线向E₁E₂线移动。在温度相应于两线交点m时就会全部固化，固体成分为16%的A和84%的D。A-D完全象一个真正的二元系一样。



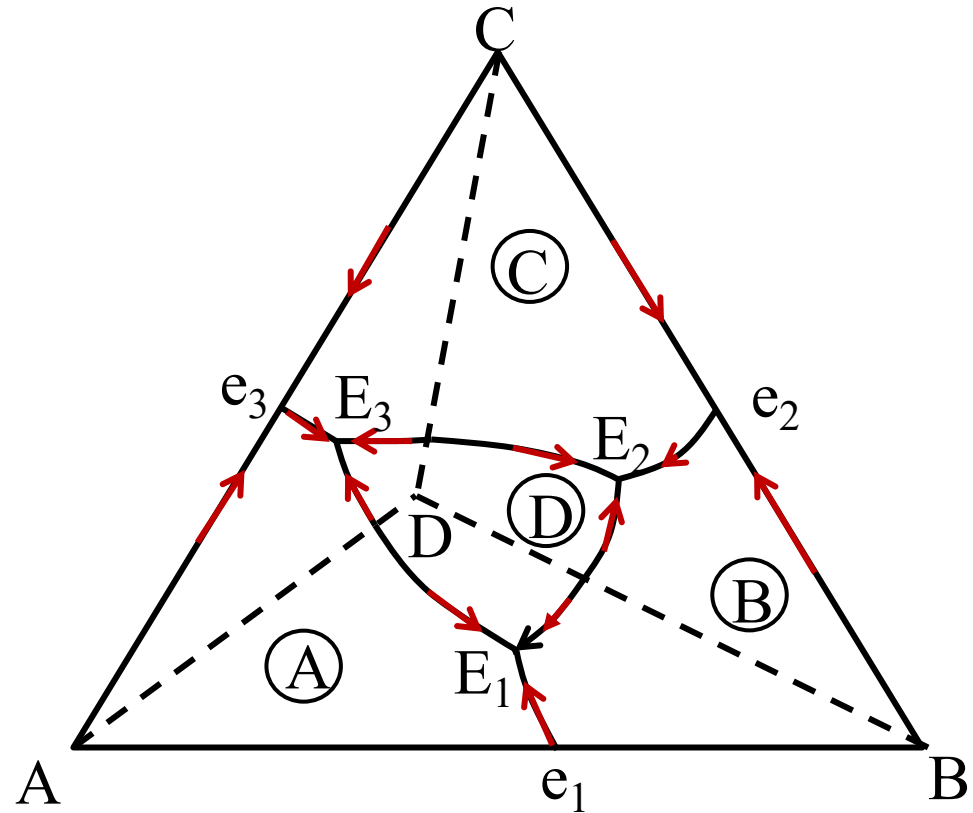
注意事项

1. 与三元简单低共熔体系类似，如原始配料点在副三角形ADC时，则析晶结束点必在ADC三个相区的交点 E_2 结束。
2. 当原始配料落在化合物D初晶区时，则第一析晶出来的必是D晶体
3. AC、AB、BD和DC都是组成点的连接线。因为它们连接的组成点所在的初晶区具有共同的边界；而BC线则不是，因为B与C的初晶区不相邻，中间插入D晶区，所以，B与C没有共同的相界

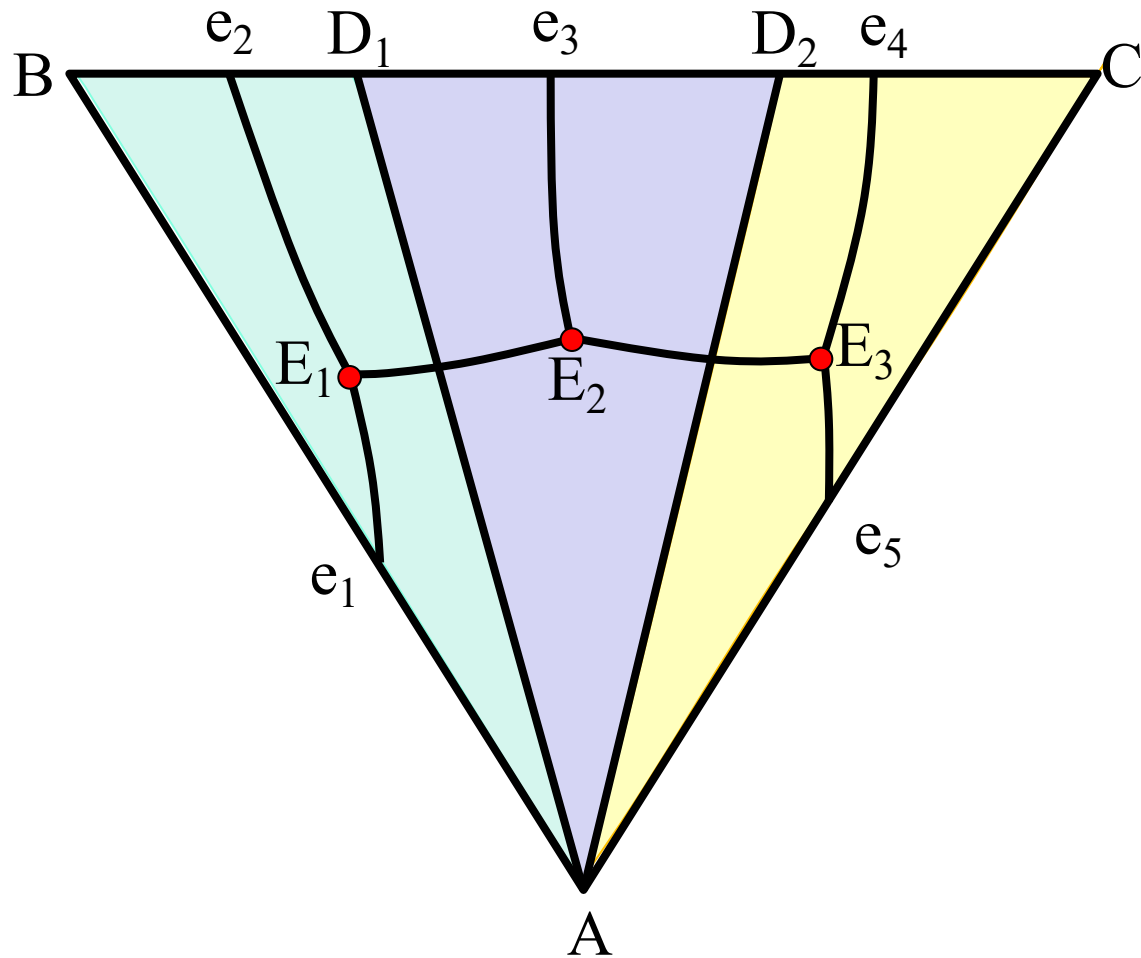


五、生成一个稳定的三元化合物

相图有一个**一致熔的三元化合物D**，其组成点落在D的初晶区内，则D点是三元化合物液相面的**最高点**。因此，该图拥有四个初晶区和六条界线以及三个无变量点，同样可以按连接线规则画出相界线上的温度走向。该体系可以分割成**三个亚三元体系**：**ADC、ADB和CDB**，这三个亚三元系是各自独立的，各有一个无变量点。

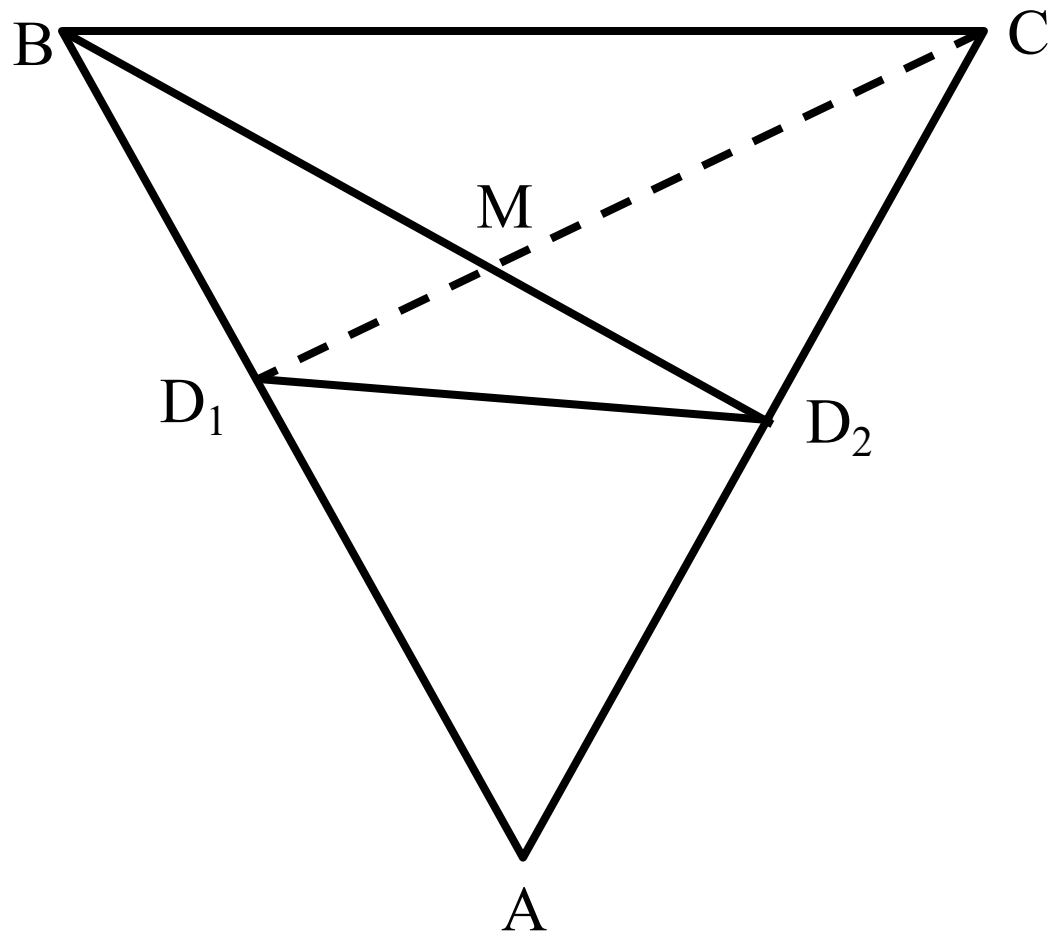


生成两个稳定的二元化合物 (两个化合物在同一边)

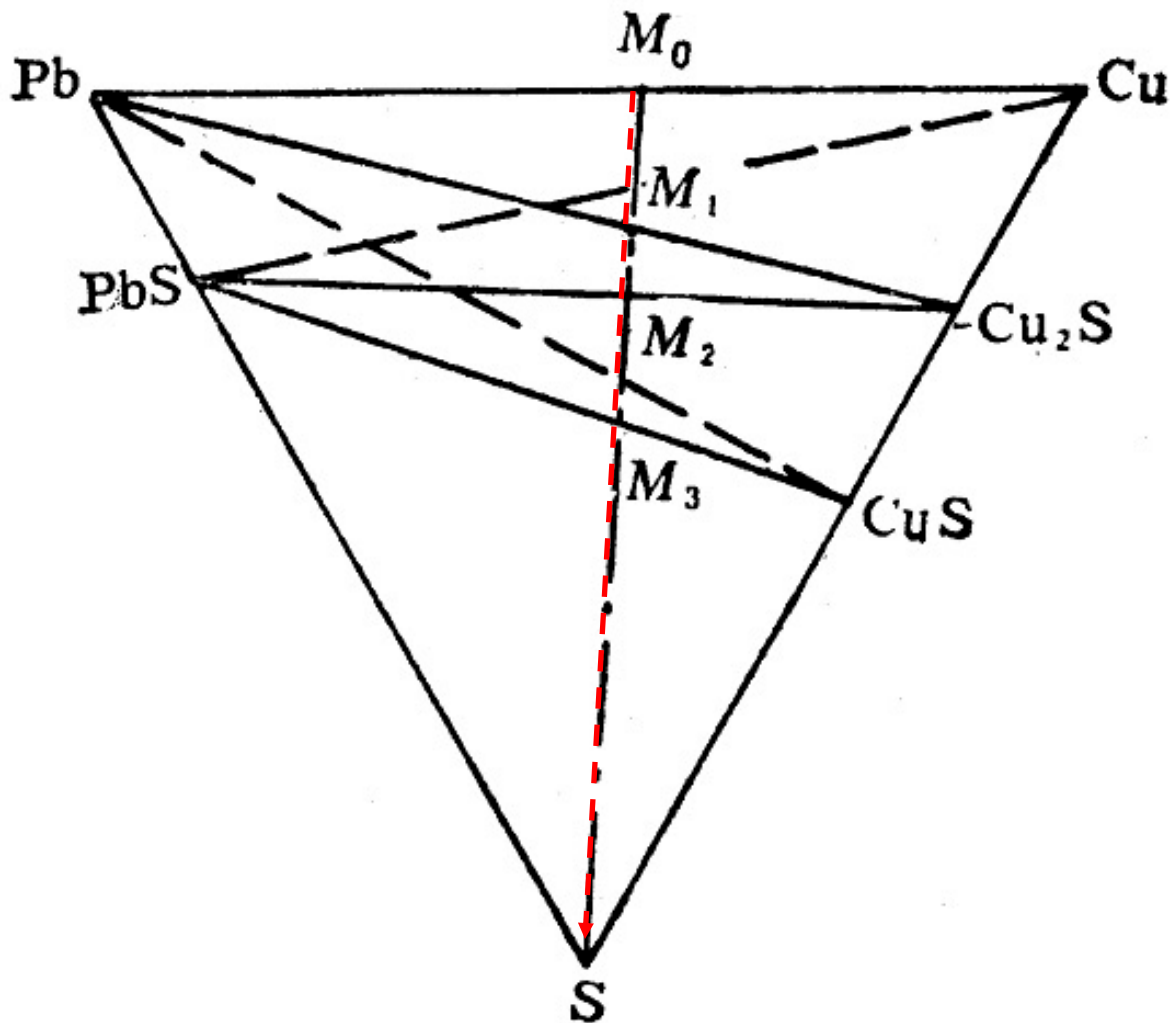
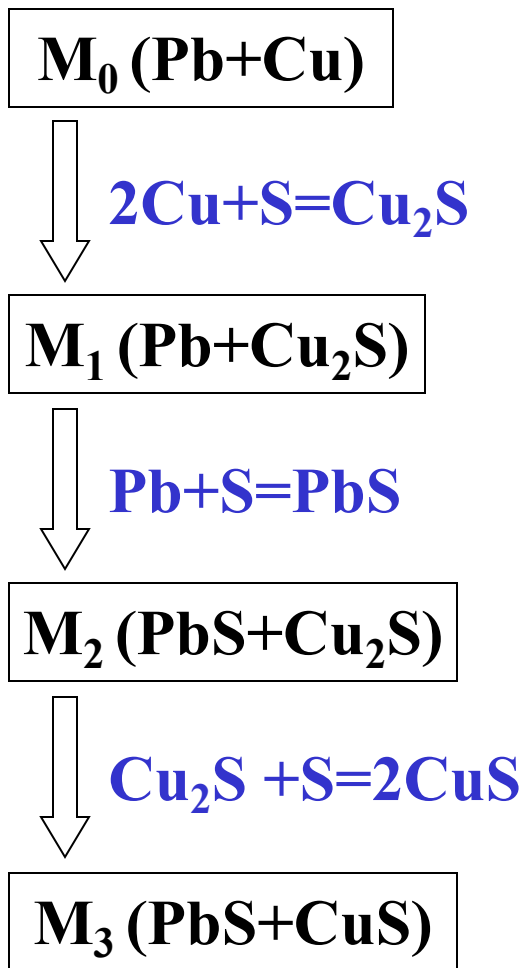


生成两个稳定的二元化合物 (两个化合物不在同一边)

1. D_1 、 C 不可以平衡共存，则联结 D_1D_2 、 D_2B 。
2. D_2 、 B 不可以平衡共存，则联结 D_1D_2 、 D_1C 。
3. 必须用实验来验证，方知道哪种方法正确。

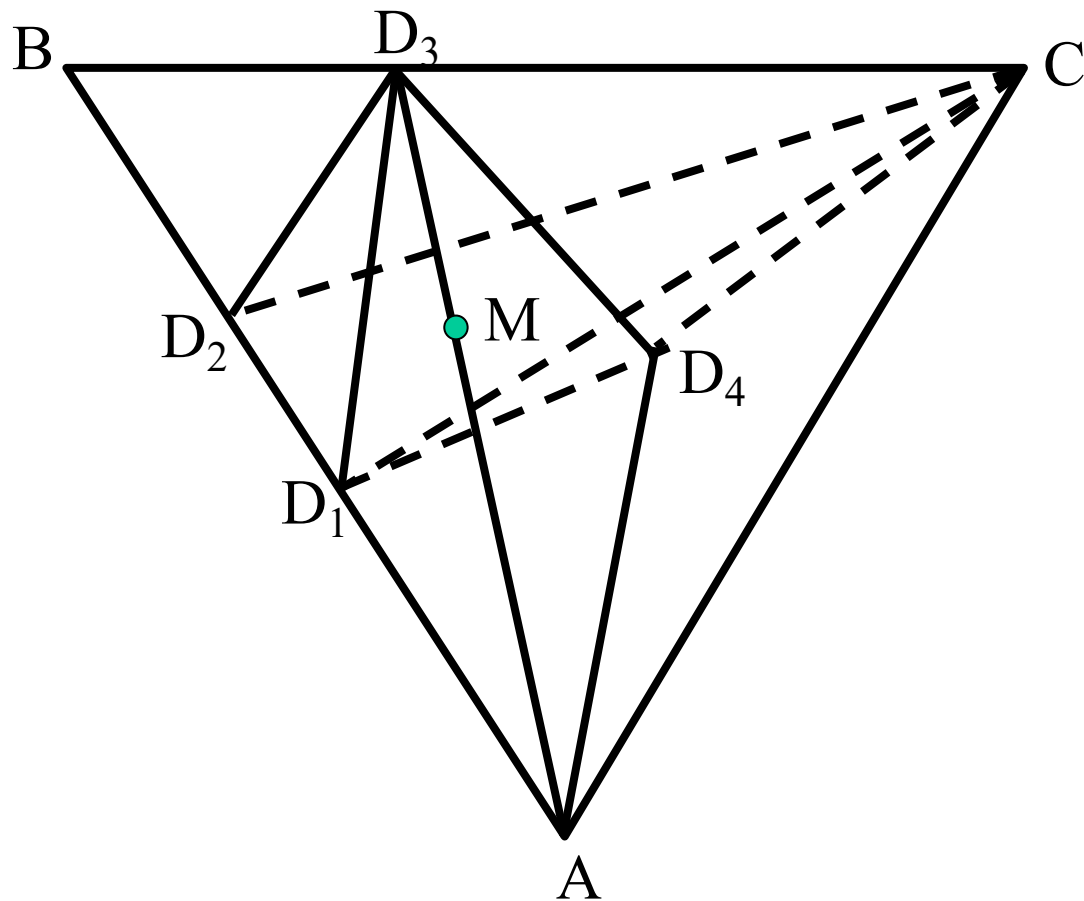


Cu-Pb-S三元系



生成多个稳定的二元和三元化合物

如果选择M点成分，冷却后出现化合物 $D_3 + A$ ，则 D_3A 是二元截面。然后根据二元截面不可能相交原理，就可以确定正确的划分方法。

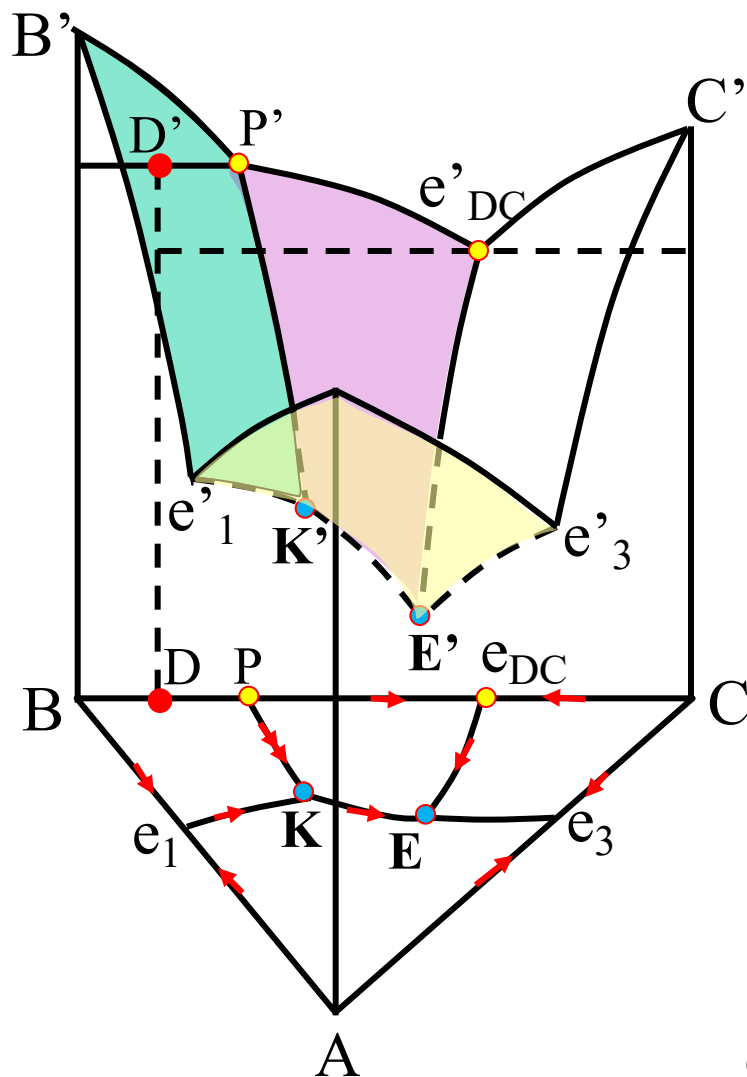


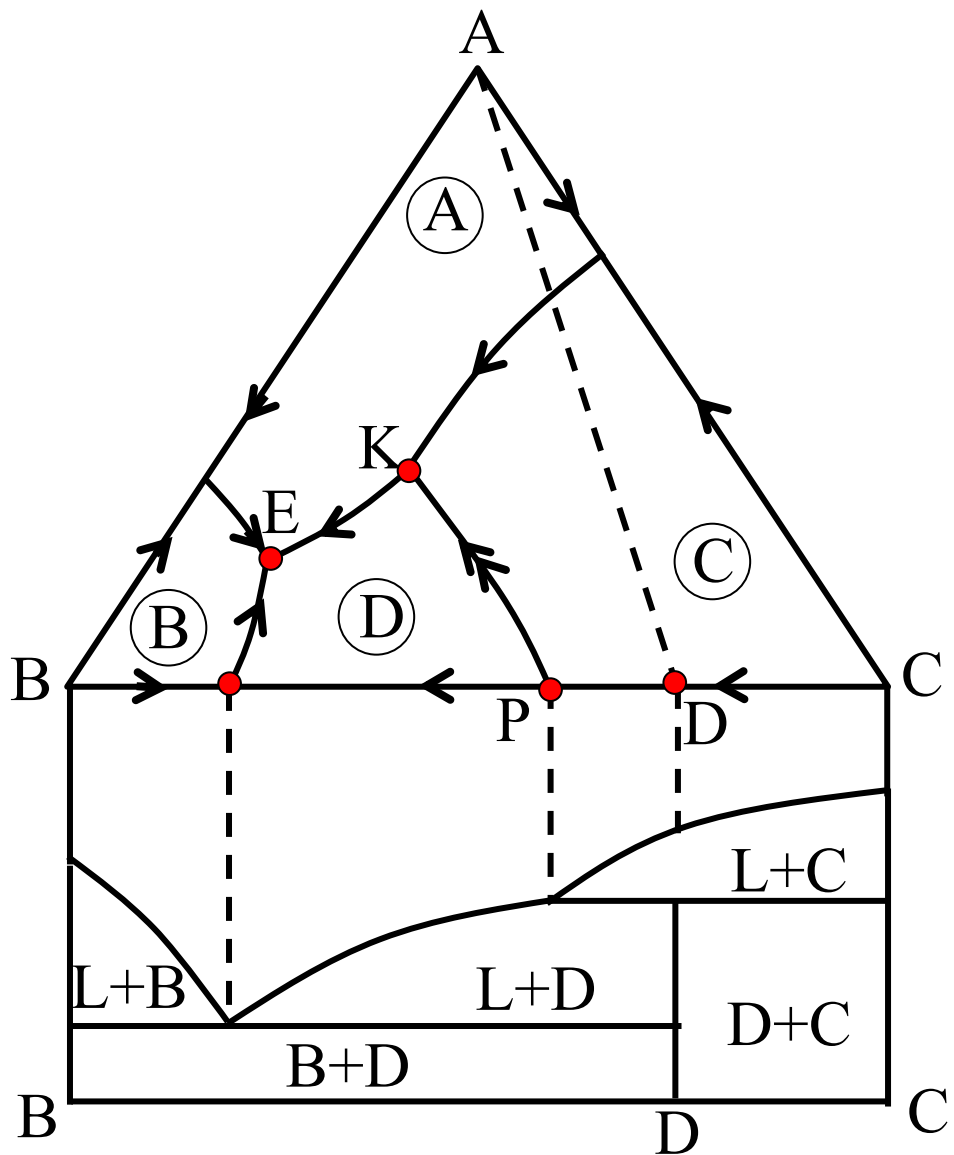
简单三元系的分割法

1. 当三元体系中**只有一个二元化合物时**则可分成二个亚三元系；如果有两个二元化合物, 则可分割成三个简单的三元系来处理；如**b** 为二元化合物的数目, 则无论分割方式如何, 在不存在三元化合物情况下, 体系可分割成独立的亚三元系的数目为： **$n=b+1$**
2. 在**仅存在三元化合物**体系中, 化合物数目为**t**, 则可分割的亚三元系数目为： **$n=2t+1$**
3. 若三元系中**既有二元化合物, 又存在三元化合物时**, 则可分割成简单三元系的数目 **$n=2t+b+1$**
4. 值得注意的是：在三元系中存在的二元或三元化合物数目相同时, 它们的分割方式可以多种多样。实际上, 三元系的正确分割需用实验方法来确定

六、生成一个不稳定二元化合物的三元系(立体图)

1. D为不一致熔化合物，温度 T_p ，发生包晶反应： $L_p + B = D$
2. D、C为共晶体系， $L = D + C$
3. 四个液相面，A、B、C、D
4. 五条分界线（四个为共晶、一个为包晶）
5. 二个四相点 K' 、 E'





具有不一致熔二元化合物的三元体系相图

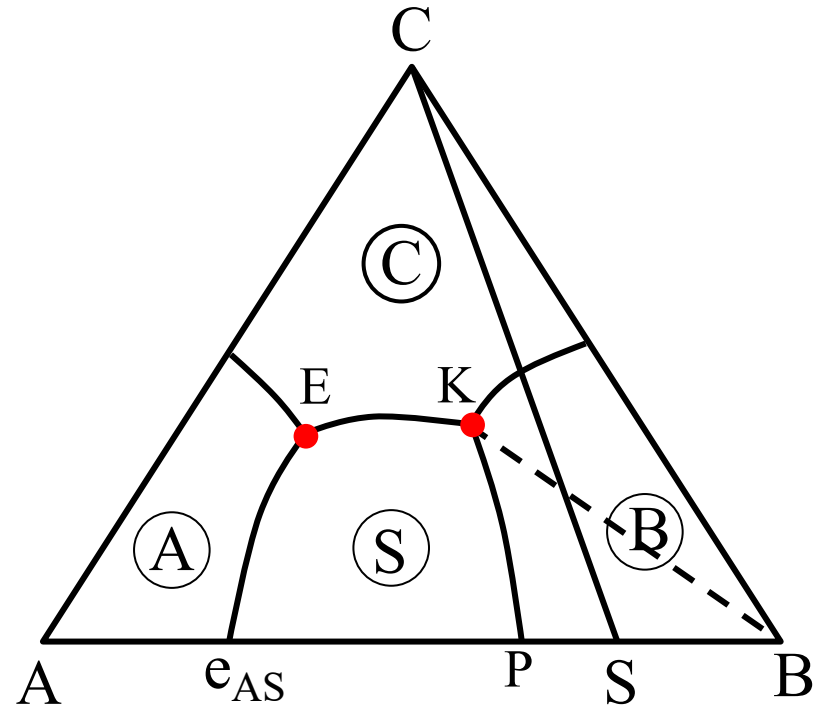
切线规则和重心位置

1. E点是SCA三个相区之交点，其位置处在这三个晶相的组成点围成的副三角形中。而K点是SCB三相区的交点，而其位置处在相应副三角形之外。

2. E点发生共晶反应：

$L = A+B+C$

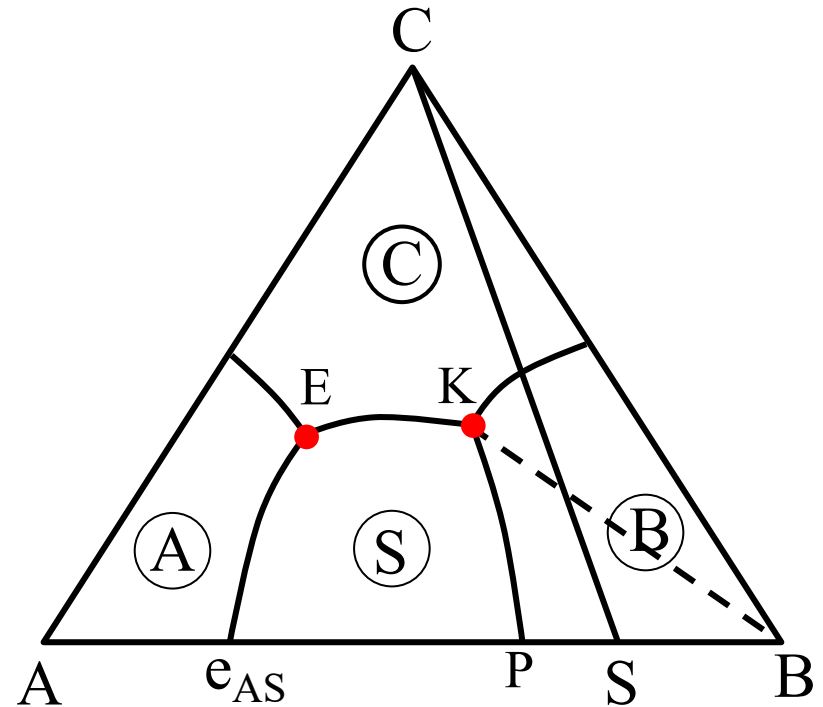
液相所消耗的量是A、B、C三者之和，按杠杆规则，液相组成的位置必在由ASC三角形的重心位置上，因此，E点所处位置称为重心位置，重心位置对应低共熔过程。



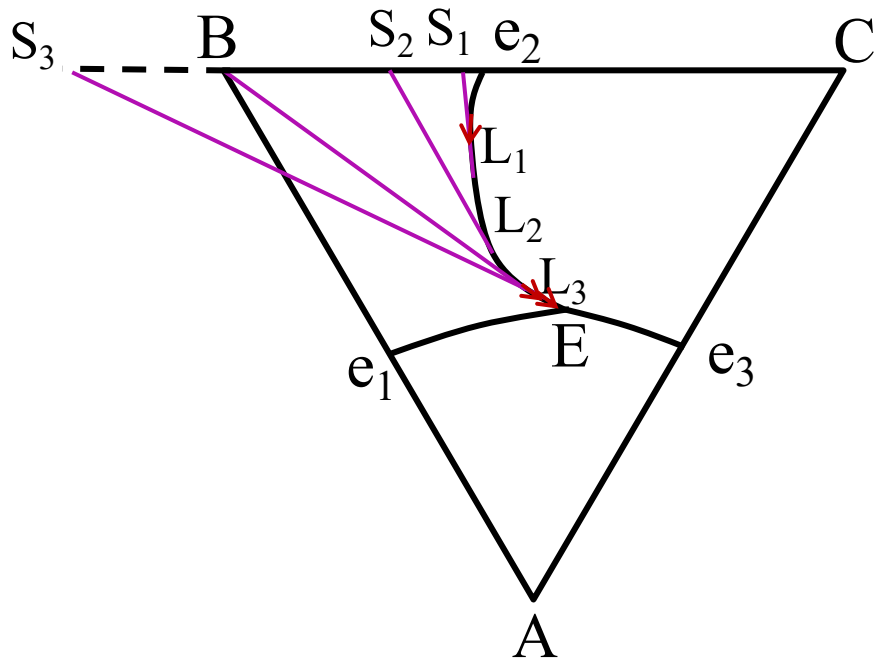
切线规则和交叉位置

交叉位置: 对应转熔过程，P点发生包晶反应， $L_p+B \rightleftharpoons S+C$

CS线与BP线的交点为t，此时按杠杆规则图中的t点既是液相量 L_p 与B量的重心位置， $C+S$ 的重心位置也在t点处。因此转熔过程出现交叉位。



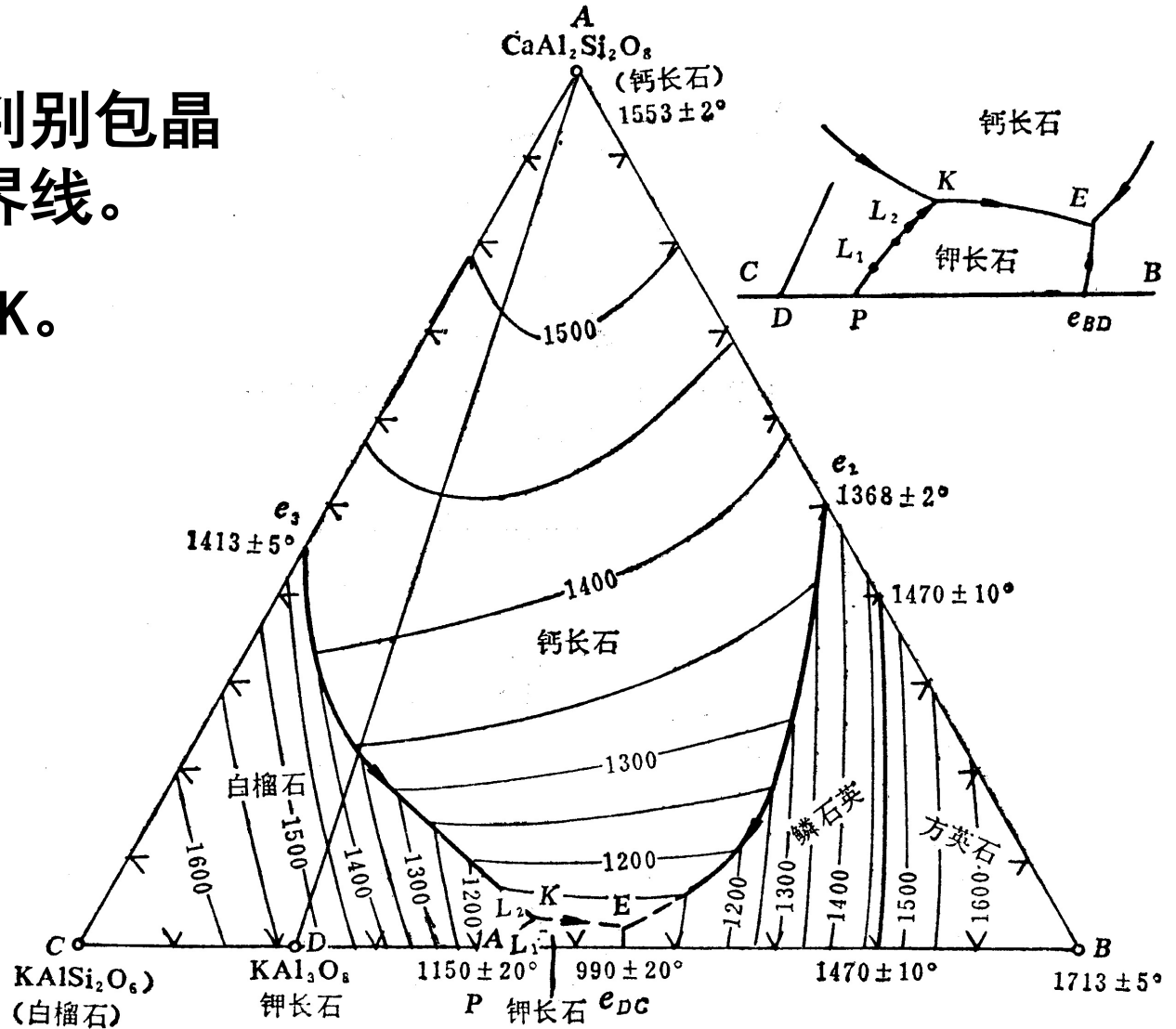
反应类型的判断——切线规则



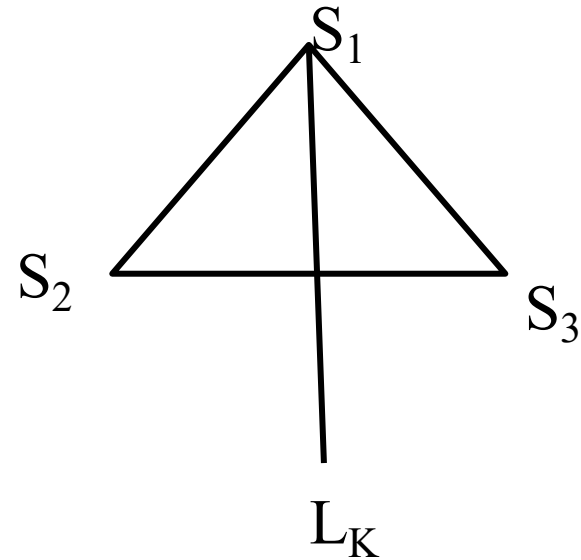
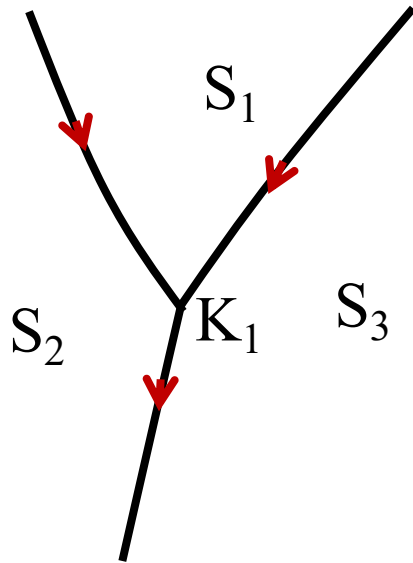
1. 如果 $L=B+C$, L_1S_1 是分界线的切线, 则 S_1 为与液相 L_1 相平衡的固相组成。
2. 切线 L_1S_1 交 BC 上, 则为共晶反应 $L_1=B+C$; 切线 L_3S_3 交 CB 延长线上, 则为包晶反应 $L_3+C=B$ 。
3. 单箭头表示共晶, 双箭头表示包晶。

分界线及零变点的判别

1. 切线规则判别包晶或共晶分界线。
2. 四相点E、K。

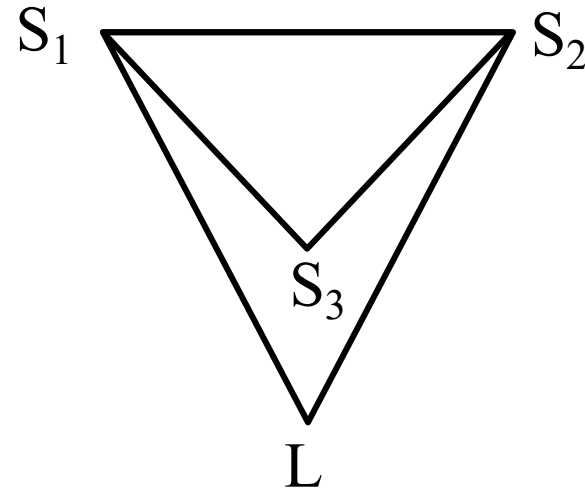
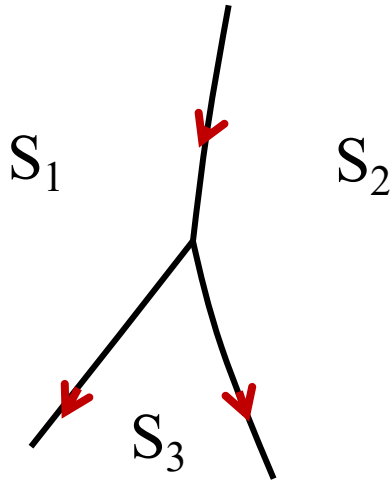


单降点（双升点，单转熔点）



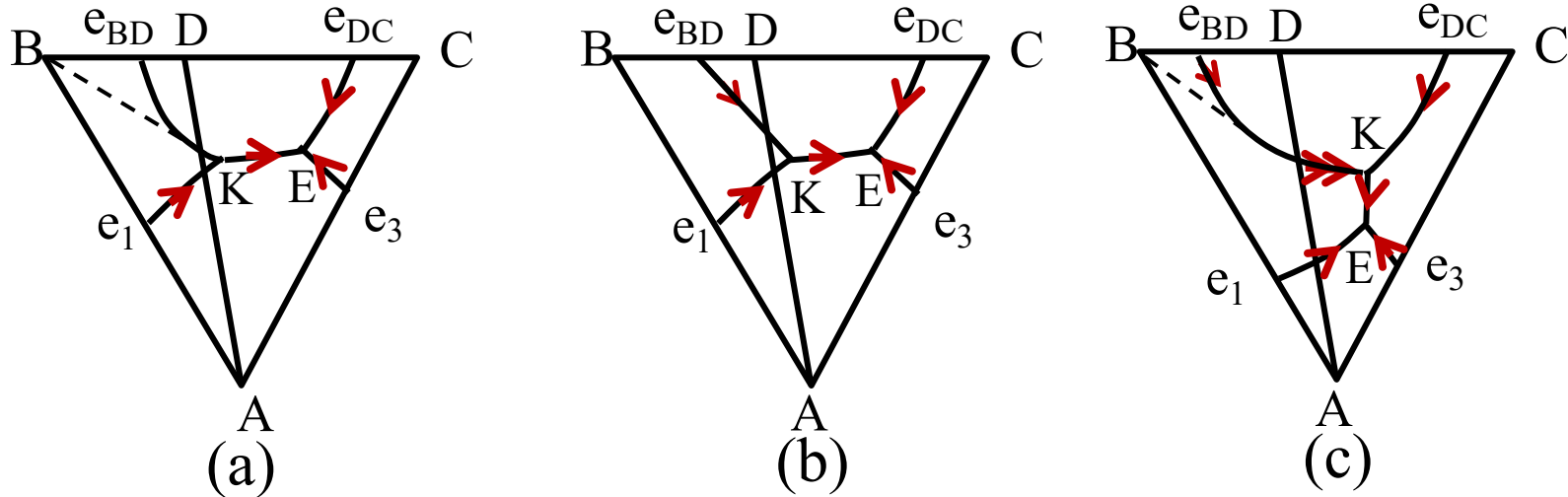
1. 在单降点汇合的三条分界线中只有一条是离开此点温度降低。
2. 平衡各相成分点的配置成交叉位置，即液相成分点位于三个固相成分点所组成的三角形之外
3. 反应： $L + S_1 = S_2 + S_3$

双降点（双转熔点）



1. 在双降点汇合的三条分界线中只有二条是离开此点温度降低。
2. 平衡各相成分点的配置成共轭位置，即液相成分点位于三个固相成分点的对顶位置。
3. 反应： $L + S_1 + S_2 = S_3$

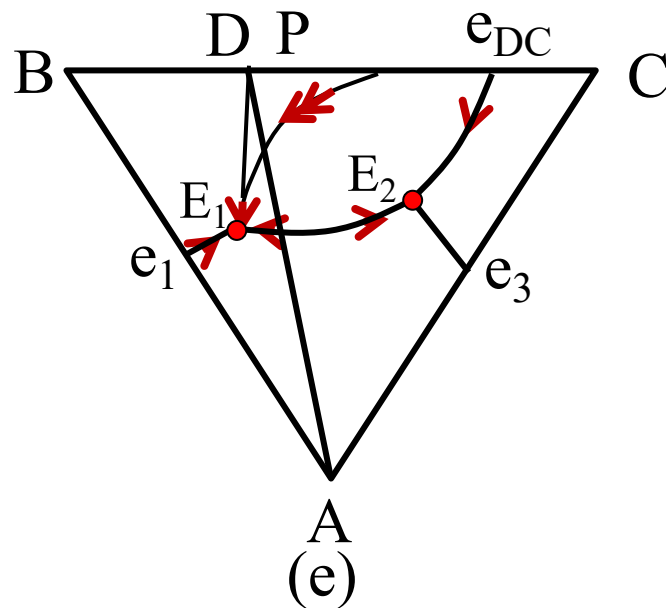
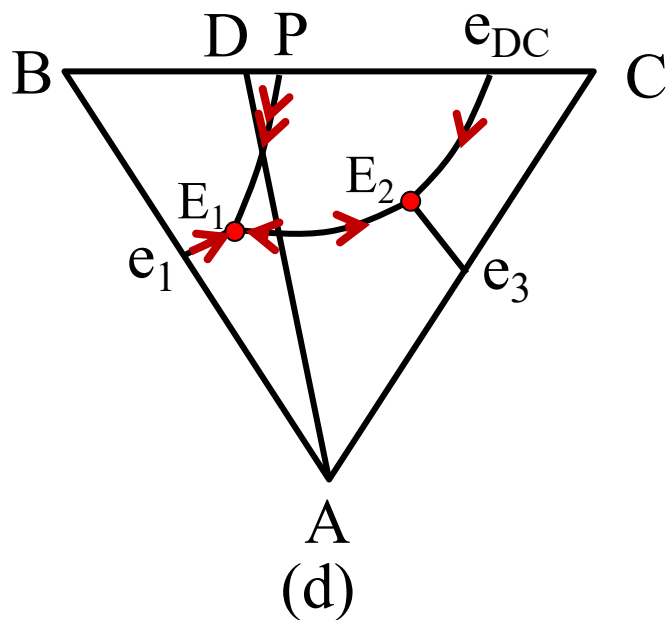
零变点和分界线性质



1. 零变点（四相点）性质取决于该点与平衡各相成分点的相对位置（重心规则）
2. 分界线的性质取决于切线规则，即成分点的相对位置和分界线形状
3. 中间化合物成分点位于液相面之上者为稳定化合物。

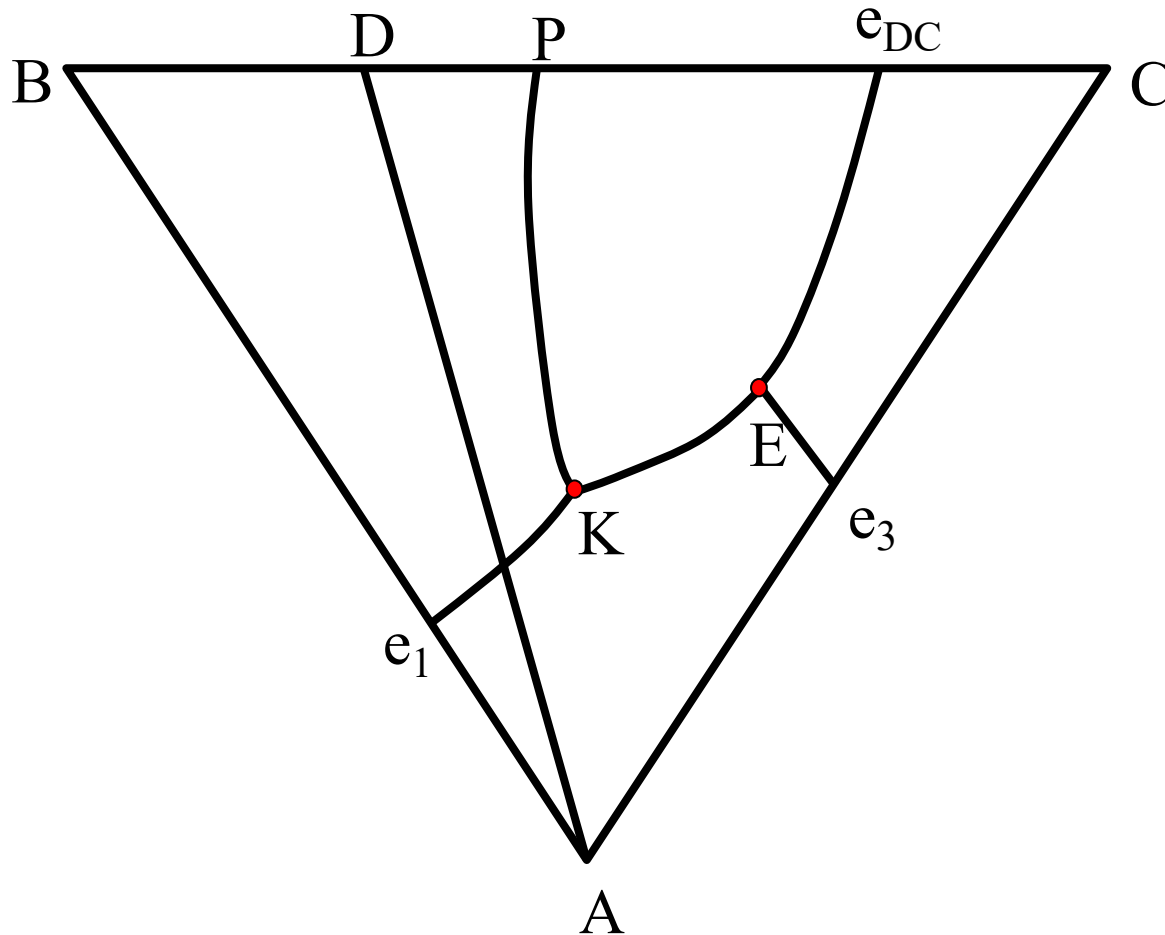
三图中K均为双升点，但BD界线的性质不同，其中（C）图的 $e_{BD}K$ 的前半段为单箭头，后半段为双箭头

零变点和分界线性质2



二图中D均为不稳化合物，但 E_1 均为低共熔点，但BD界线的性质不同，其中（e）图的 eE_1 的前半段为双箭头，后半段为单箭头

生成不稳定二元化合物的结晶过程

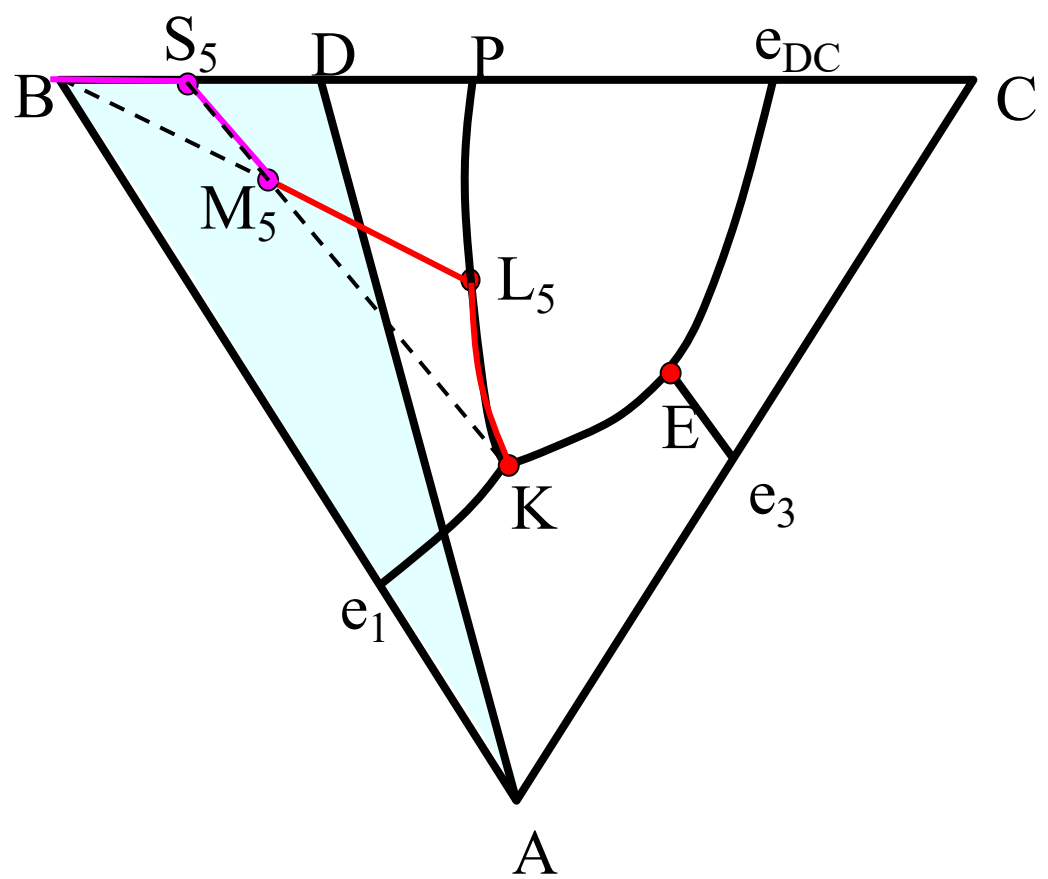


K:
 $L+B \rightarrow A+D$

E:
 $L \rightarrow A+D+C$

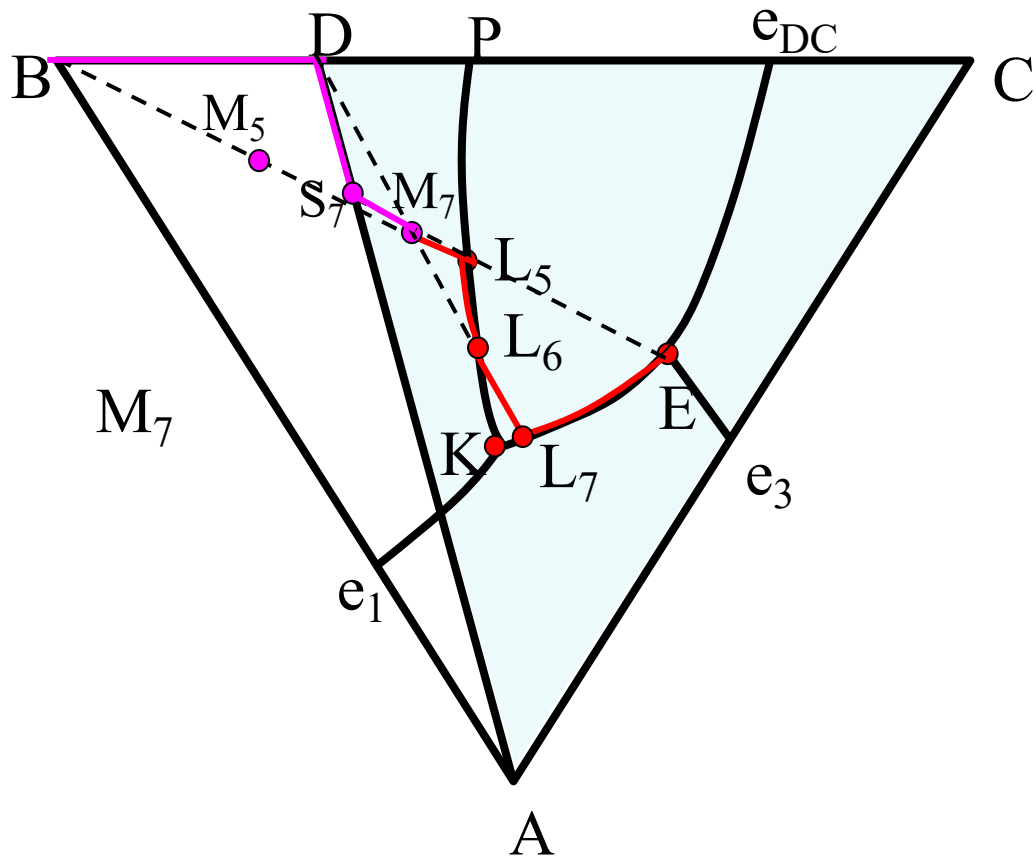
组成点为 M_5 时的析晶过程

M_5' (熔体)
 $\Phi=1, F=3 \downarrow$ L
 M_5 [B, (B)]
 $\Phi=2, F=2 \downarrow$ L \rightarrow B
 L_5 [B, B+(D)]
 $\Phi=3, F=1 \downarrow$ L+B \rightarrow D
 K (到达) [S_5 , B+D+(A)]
 $\Phi=4, F=2 \downarrow$ L+B \rightarrow A+D
 K (结束) [M_5 , A+D+B]



组成点为 M_7 时的析晶过程

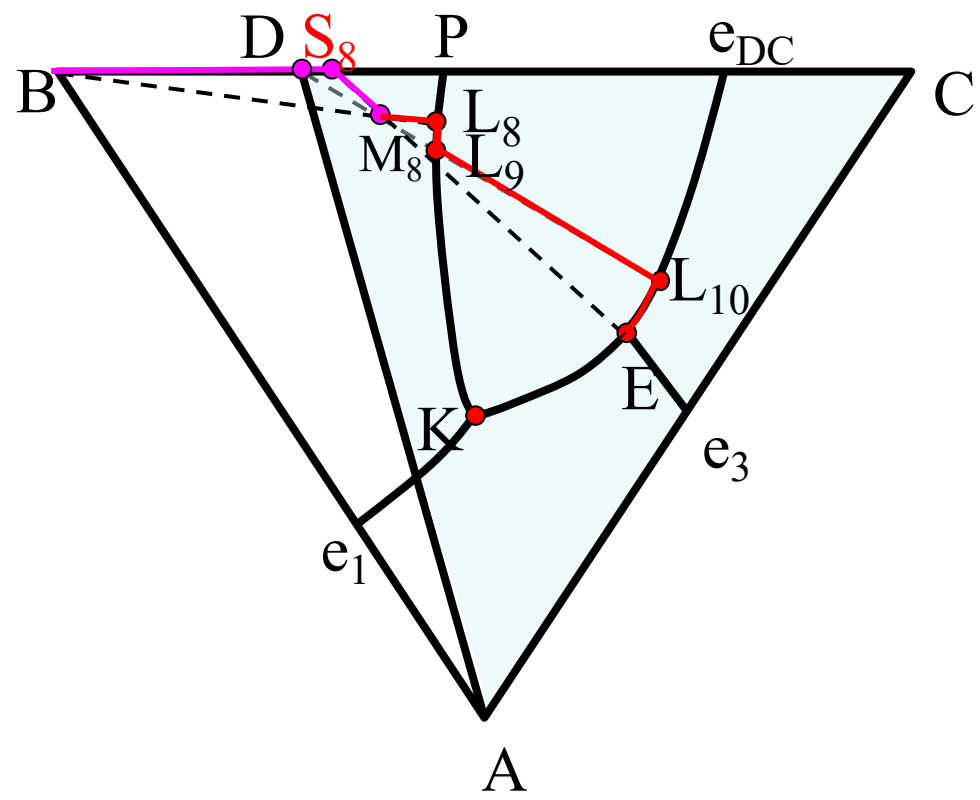
M_7' (熔体)
 $\Phi=1, F=3$ ↓ L
 M_7 [B, (B)]
 $\Phi=2, F=2$ ↓ $L \rightarrow B$
 L_5 [B, B+(D)]
 $\Phi=3, F=1$ ↓ $L+B \rightarrow D$
 L_6 [D, D]
 $\Phi=2, F=2$ ↓ $L \rightarrow D$
 L_7 [D, D+(A)]
 $\Phi=3, F=1$ ↓ $L \rightarrow D+A$



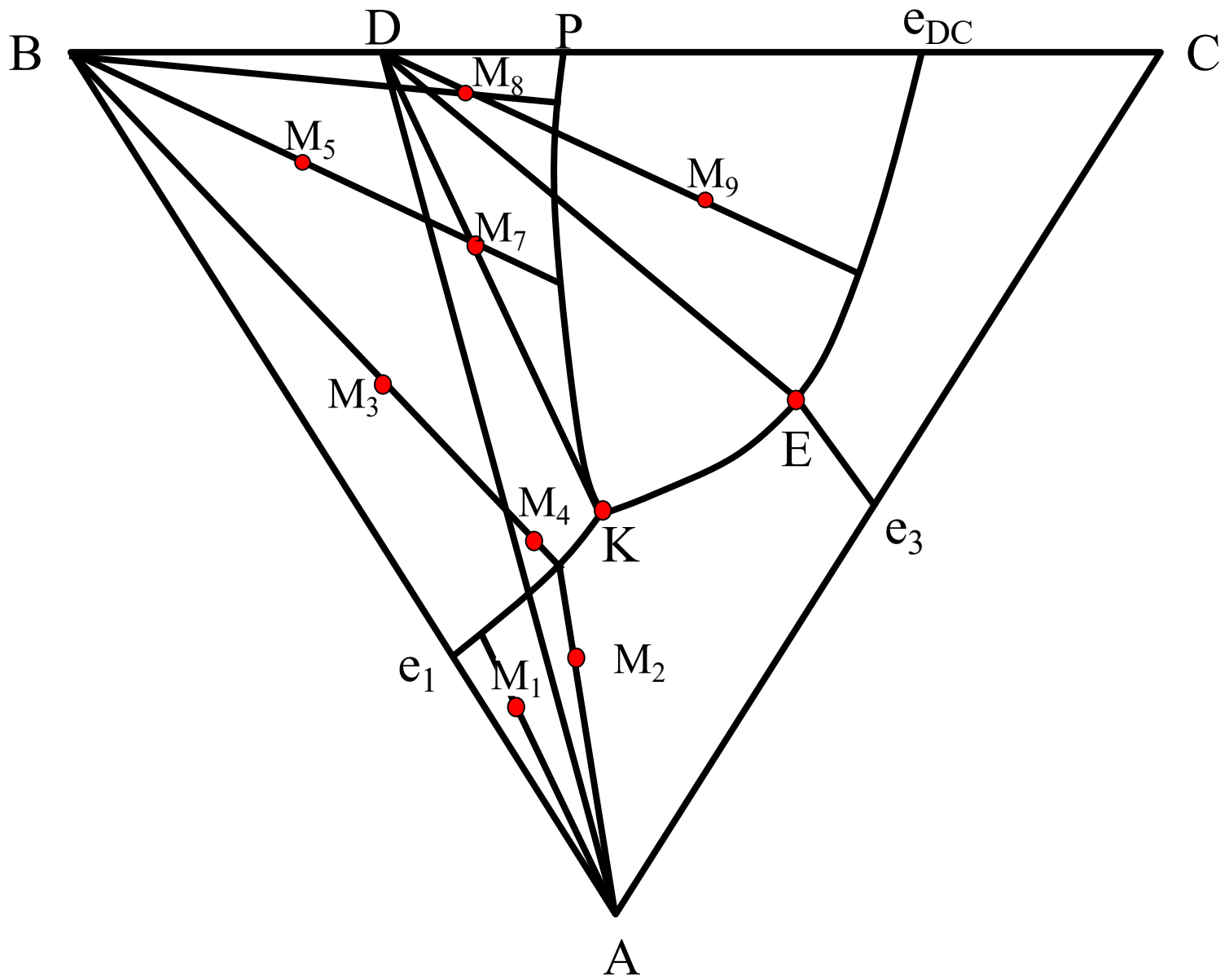
E (到达) [$S_7, D+A+(C)$]
 $\Phi=4, F=0$ ↓ $L \rightarrow A+D+C$
 E (结束) [$M_7, A+D+C$]

组成点为 M_8 时的析晶过程

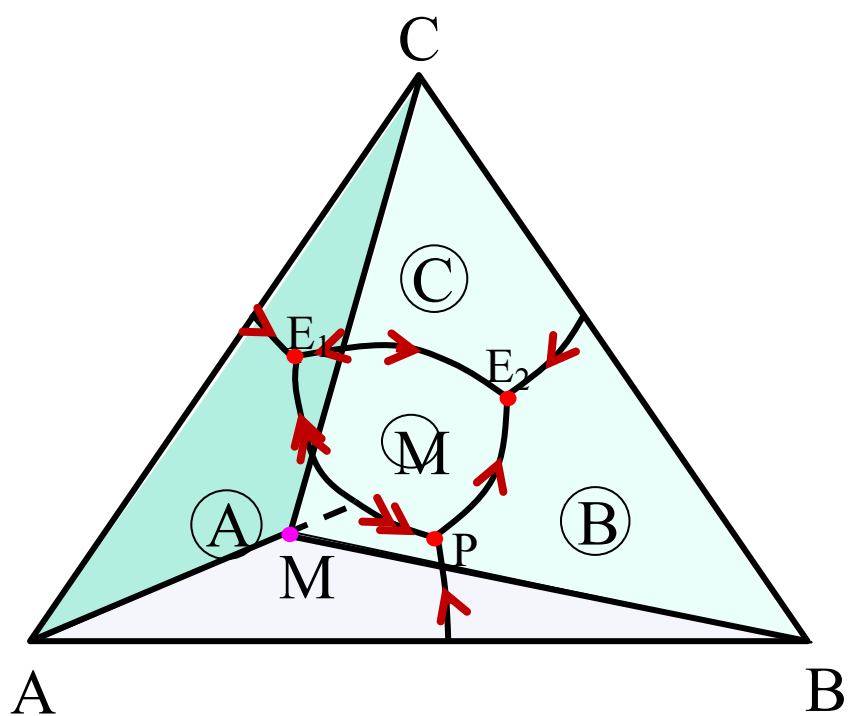
M_8' (熔体)
 $\Phi=1, F=3 \downarrow$ L
 M_8 [B, (B)]
 $\Phi=2, F=2 \downarrow$ L \rightarrow B
 L_7 [B, B+(D)]
 $\Phi=3, F=1 \downarrow$ L+B \rightarrow D
 L_8 [D, D]
 $\Phi=2, F=2 \downarrow$ L \rightarrow D
 L_9 [D, D+(C)]
 $\Phi=3, F=1 \downarrow$ L \rightarrow D+C



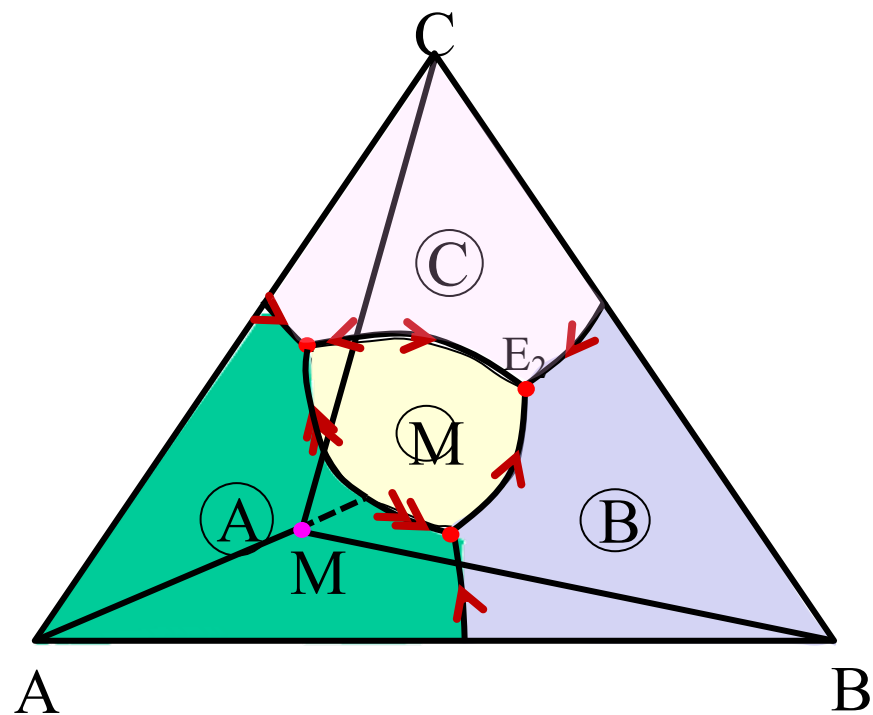
E (到达) [$S_8, D+C+(A)$]
 $\Phi=4, F=0 \downarrow$ L \rightarrow A+D+C
 E (结束) [$M_8, A+D+C$]



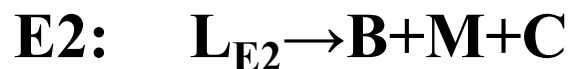
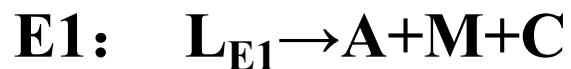
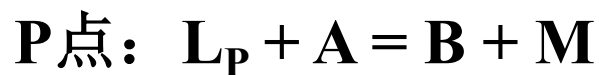
生成一个不稳定三元化合物的三元系—单降点



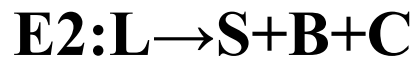
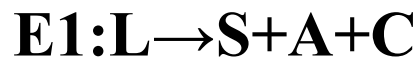
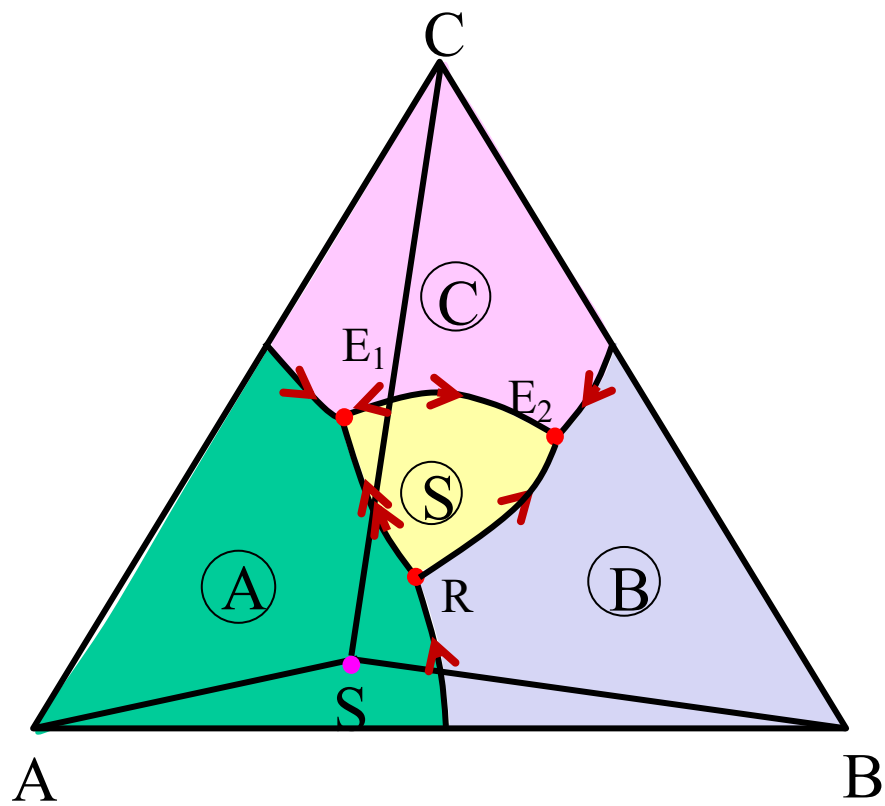
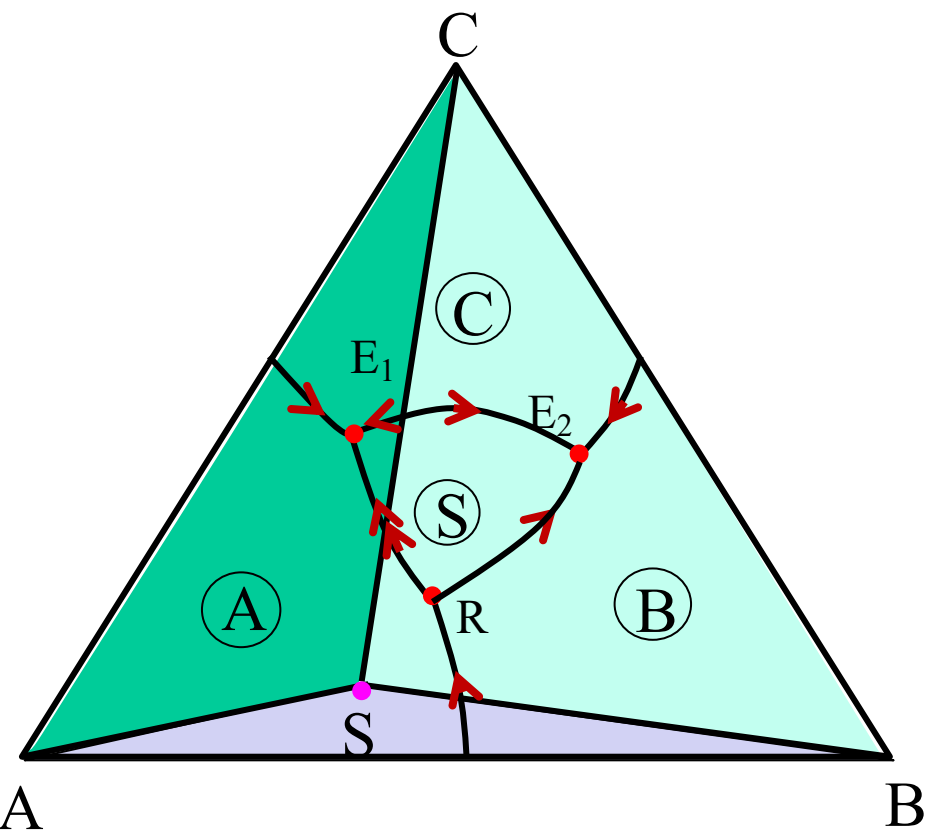
子三角形划分



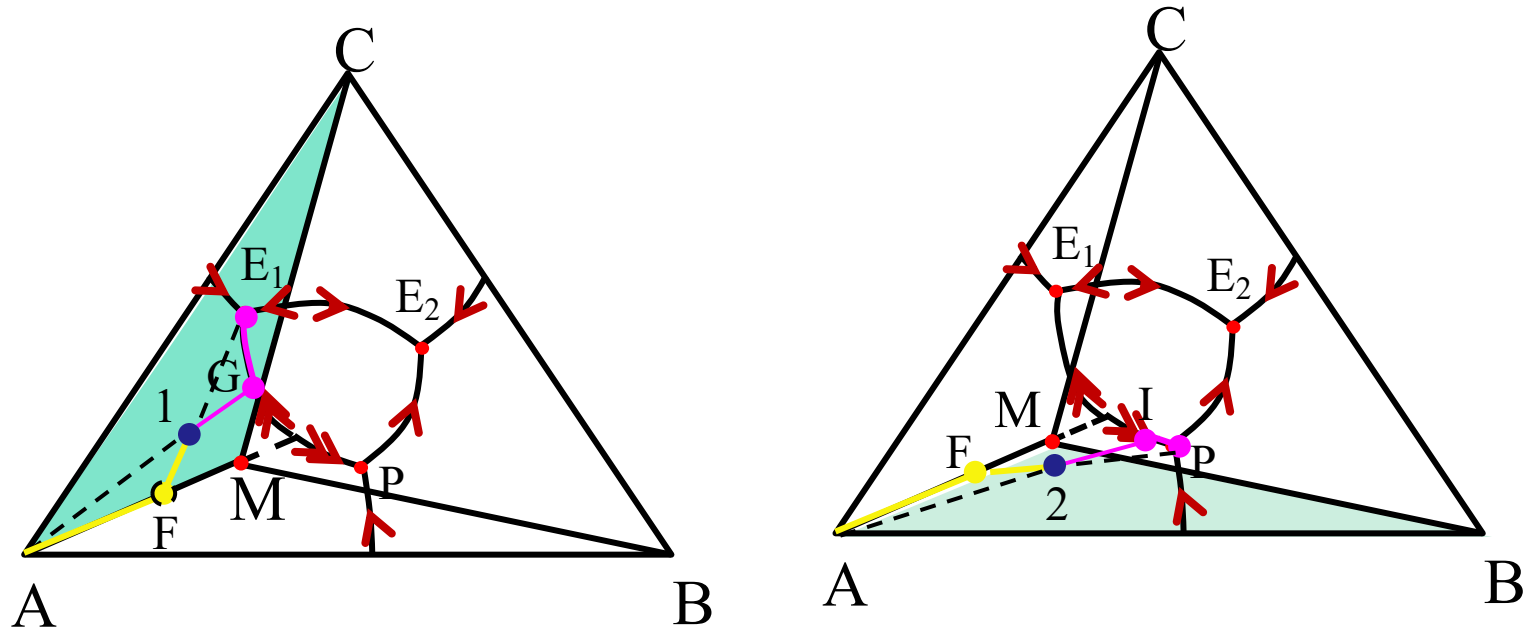
初晶区划分



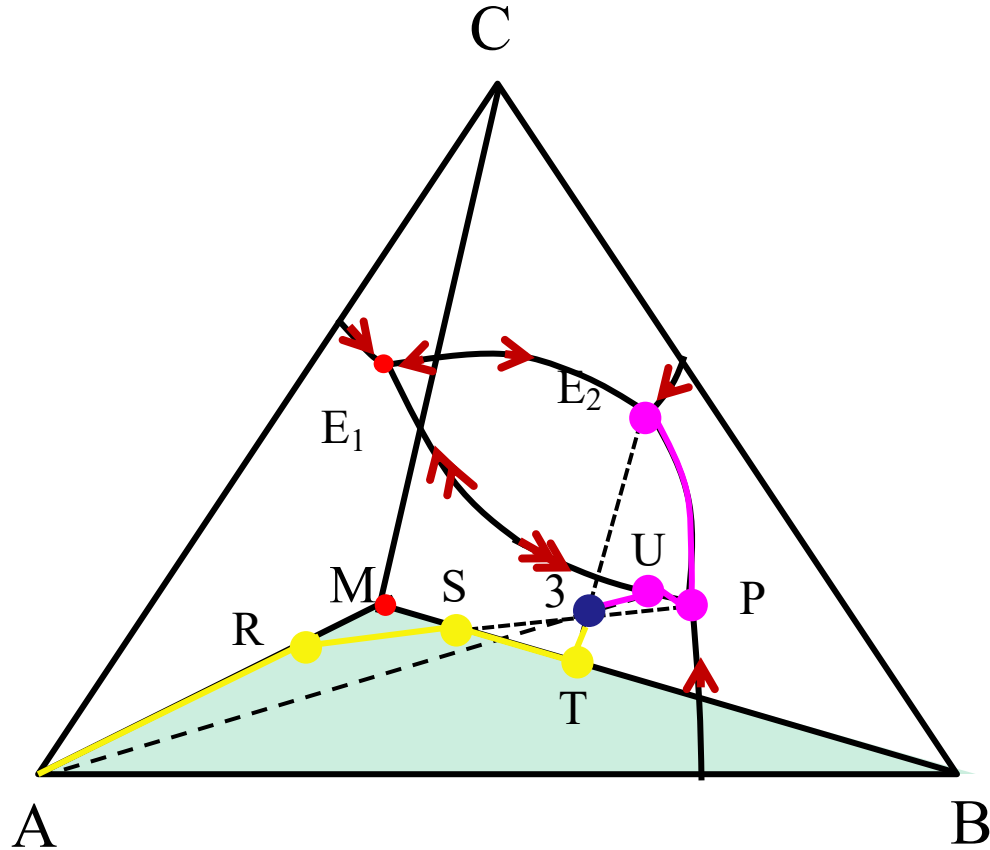
生成一个不稳定三元化合物的三元系—双降点



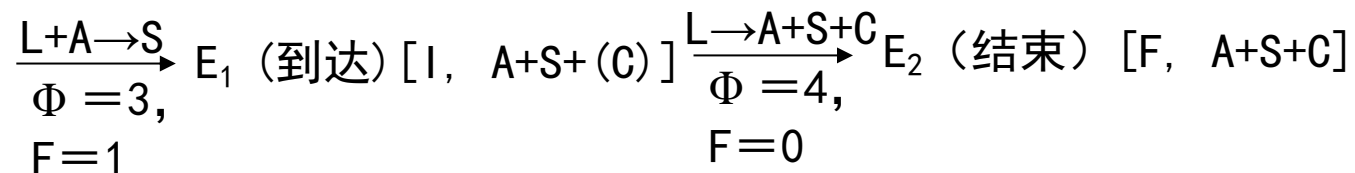
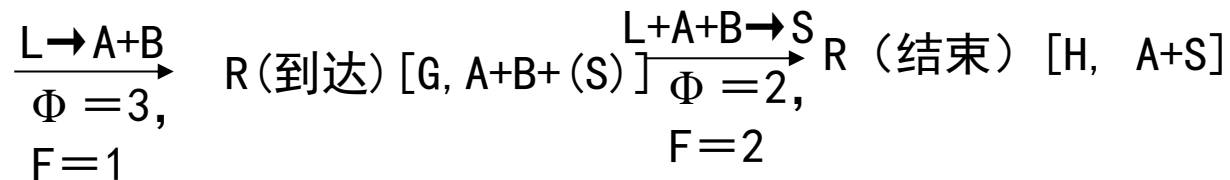
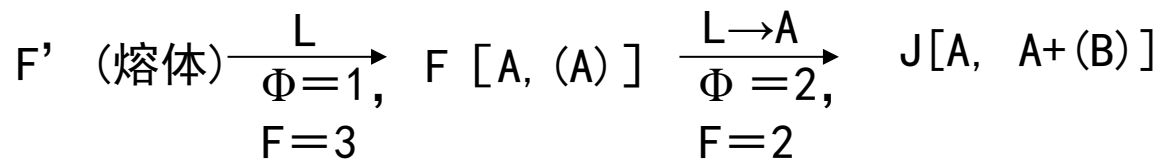
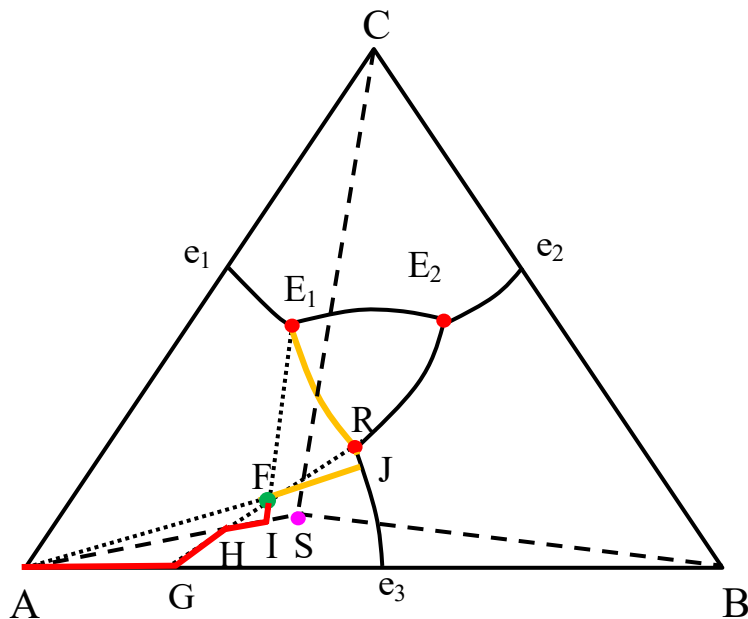
生成一个不稳定三元化合物的三元系的结晶过程



M_3' (熔体)
 $\Phi=1,$
 $F=3$ ↓ L
 M_3 [A, (A)]
 $\Phi=2,$
 $F=2$ ↓ $L \rightarrow A$
 Q [A, A+(M)]
 $\Phi=3,$
 $F=1$ ↓ $L+A \rightarrow M$
 P (到达) [R, A+M+(B)]
 $\Phi=4,$
 $F=0$ ↓ $L+A \rightarrow B+M$
 P (结束) [S, B+M]
 $\Phi=3,$
 $F=1$ ↓ $L \rightarrow M$

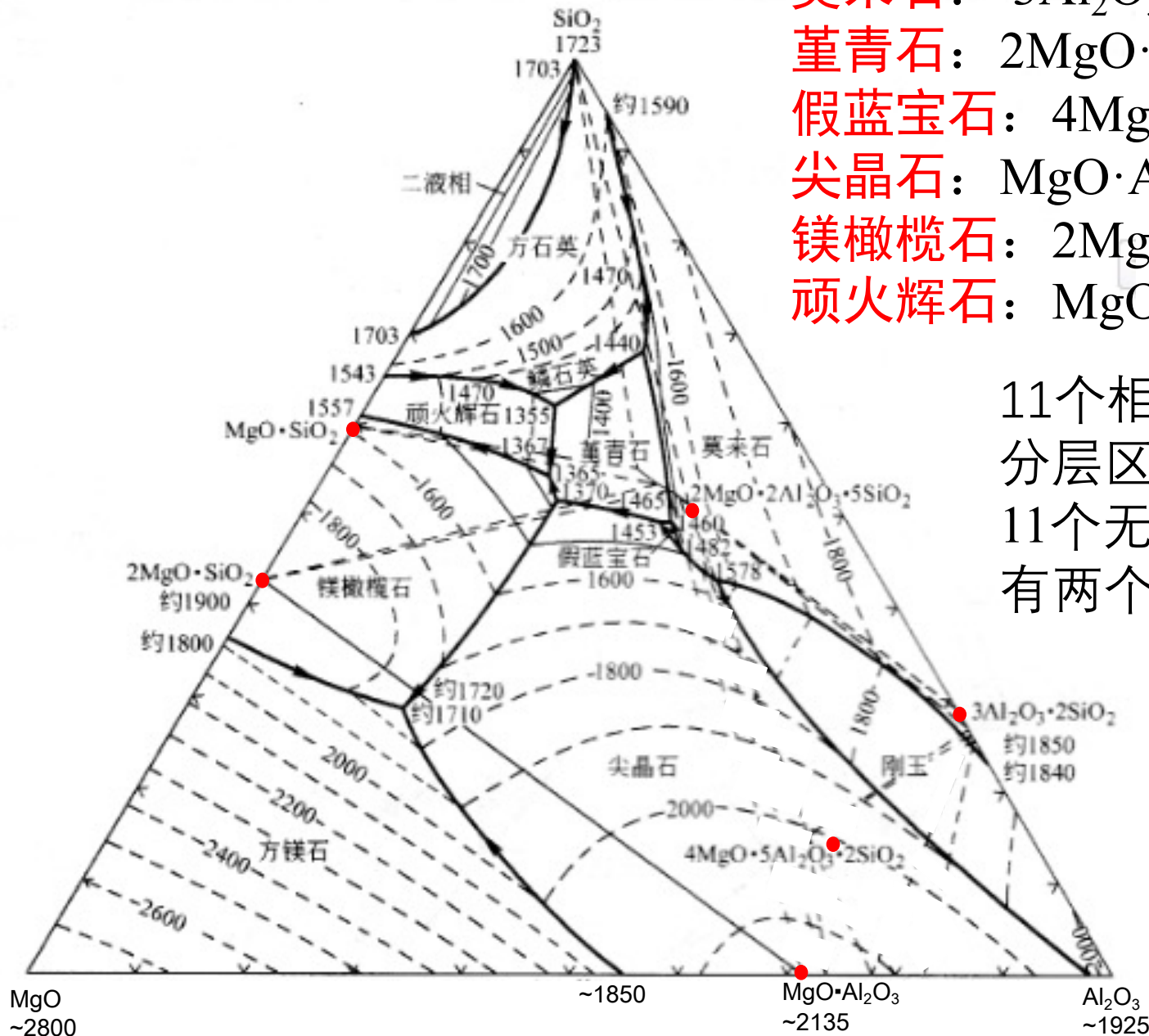


E_2 (到达) [T, B+M+(C)]
 $\Phi=4,$
 $F=0$ ↓ $L \rightarrow B+M+C$
 E_2 (结束) [M_3 , B+M+C]



- 莫来石: $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
- 堇青石: $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$
- 假蓝宝石: $4\text{MgO} \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
- 尖晶石: $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
- 镁橄榄石: $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$
- 顽火辉石: $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$

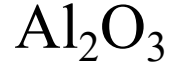
11个相区，包括一个分层区在内。体系有11个无变度点，其中有两个为晶型转变点



堇青石



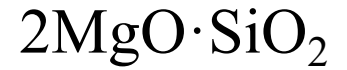
红宝石



水晶



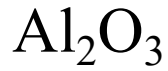
镁橄榄石



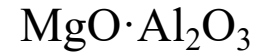
假蓝宝石



蓝宝石



尖晶石



顽火辉石



