# 行星运动

北京天文馆《天文爱好者》杂志　齐锐

2006,11,2

## 太阳系原定义

## 最新太阳系定义（2006，8）


## 太阳系的中心?

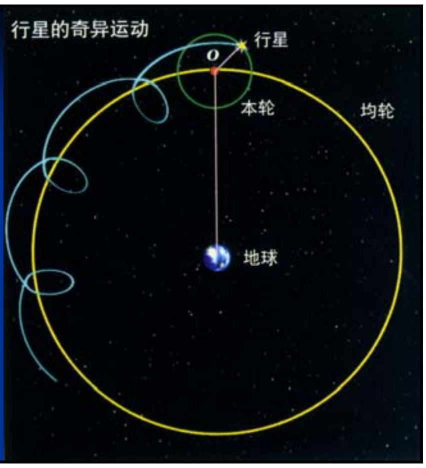
- 太阳?
- 地球?

## 人类认识这一问题的艰难历程

## 托勒密的"地心说"

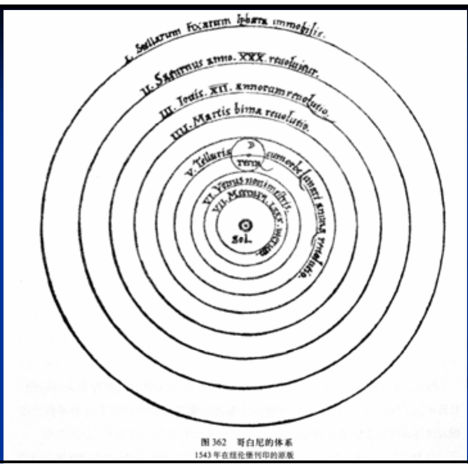
- 托勒密是观测家和天文仪器的发明者
- "地心说"由希腊的"亚里士多德学派"继承而来
- "地心说"以等速圆周运动的理论表示以地球为中心的天体运动

- "地心说"体系无法解释怪异的行星运动
- "地心说"被西方教会利用，作为经典学说之宇宙观统治社会长达1300多年

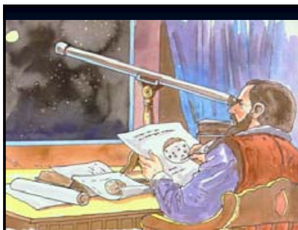


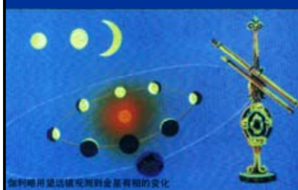

## 哥白尼（波兰1473~1543）日心说

- 哥白尼1543年在《天体运行论》中提出"日心说"
- "日心说"巧妙地解释了行星运动，澄清了现在看来非常简单的事实



## 伽利略
## (意大利,1564~1642)



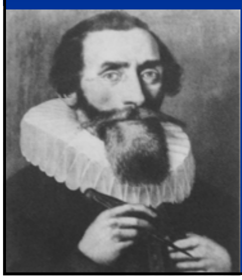


- 创立了动力学
- 为物理学引入了实验方法
- 1609年把望远镜对准天空，结束了人类肉眼观天时代
- 发现木星的四颗卫星(命名为伽利略卫星)、金星的相位、太阳黑子
- 观测事实有力地支持了"日心说"

## 天才的师徒配合

第谷 布拉赫
(丹麦，1546~1601)

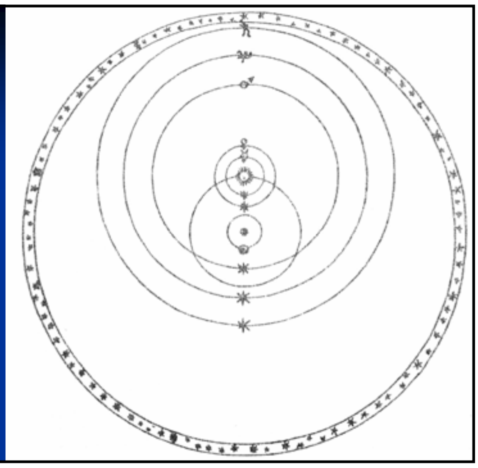
天才的观测家

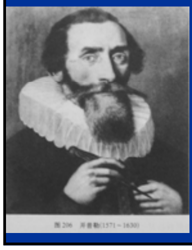


开普勒(德国，1571~1630)

天才的理论家

## 第谷的体系



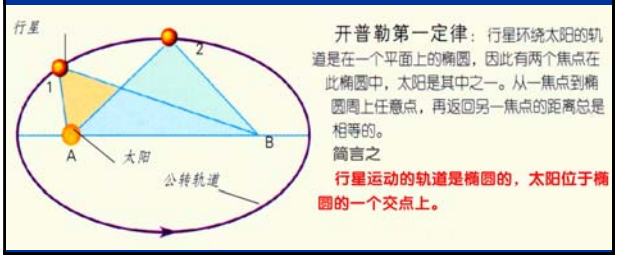


此前人们认为行星作匀速圆周运动。

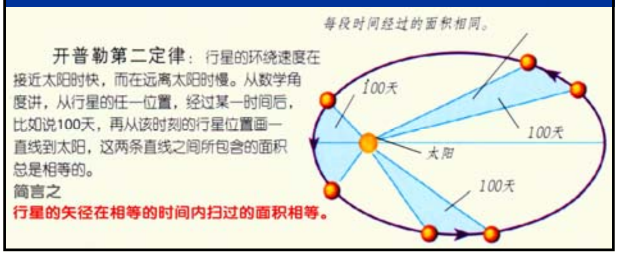
但是开普勒发现无论按照哥白尼的方法，还是托勒密或者第谷的方法，都不能算出和第谷的观测相符合的结果——火星的运动有8‘的误差！

坚信第谷的观测精确性，开始发现新的理论。

## 开普勒行星运动第一定律（1609年）

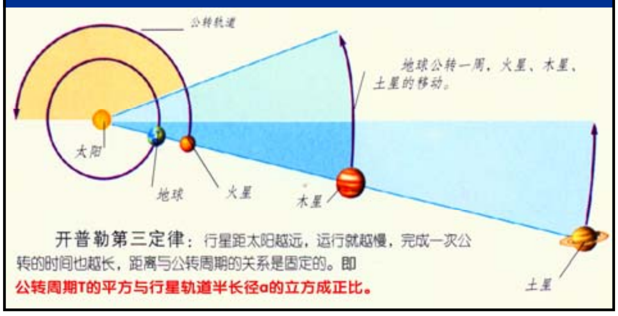



## 开普勒行星运动第二定律（1609年）




## 开普勒行星运动第三定律

$$\frac{T^2}{a^3}=\frac{G(M+m)}{4\pi^2}$$




## 科学的巨匠——牛顿
（英国，1642～1727）

- 天才科学家，擅长数学、天文学和物理学
- 1687年的巨著《自然哲学的数学原理》

行星为什么按开普勒第三定律所描述的那样运动？

牛顿发现万有引力，用数学语言诠释行星绕太阳运行原理。

$$F = G\frac{m_1 m_2}{R^2}$$

$G = 6.670\times10^{-11}$牛顿·米²/千克²

# 行星运动

- 行星的真实运动
- 行星的视运动

参考系不同，观察角度不同

6个轨道根数的物理含义：

1）i：行星轨道面对黄道面的倾角，i＜90°表示行星与地球的轨道运动同向；

2）Ω：升交点黄经，行星轨道面与黄道面的交线叫"交点线"，行星从南到北运动经过交点线的天球点称为"升交点"；从太阳－春分点方向到太阳－行星轨道升交点方向的夹角叫"升交点黄经"。

# 轨道倾角i和升交点黄经Ω决定行星轨道面的空间位置。

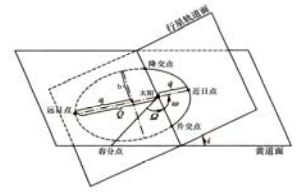
3）a：轨道半长径，它表示椭圆轨道的大小即行星到太阳的平均距离。

4）e：偏心率，焦点到椭圆中心的距离与半长径之比。表示轨道扁平程度即轨道形状。

$(a^2-b^2)^{1/2}/a=e$（b是半短轴）

九大行星轨道的e都很小。

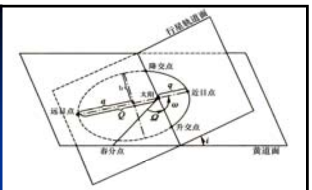
# a、e确定行星轨道大小及形状。




行星轨道根素

5）ω：近日点角距，是从太阳到近日点方向与升交点方向的夹角。它确定行星轨道椭圆长轴的方位。一般常用近日点黄经代替近日点角距。

6）τ：过近日点时刻，可取行星任何一次过近日点的时刻t（t=τ），由它往前后计算行星的位置，可预测行星今后会出现在什么位置。




行星轨道根素

行星运动方程得出的积分解表明行星运行轨道的圆锥曲线是椭圆外，还有抛物线和双曲线两种，所以常用近日距代替轨道半长径作它们的轨道根数。此外还常用另一些量表示行星轨道特征，但它们可以由上述6个轨道根数计算出来，例如：

近日距：　$q=a(1-e)$

远日距：　$Q=a(1+e)$

公转的恒星周期：

$$T=2\pi a^{3/2}/G(m_1+m_2)$$

上式是根据牛顿万有引力修正的开普勒第三定律，如$m_2 \ll m_1$，近似值就是开普勒第三定律。

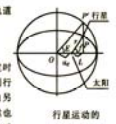
如果已知行星的6个轨道根数，就能回答行星什么时候在天上什么位置问题——天文学上称为计算星历表问题；

反之，根据对行星位置的若干次观测（理论上有三次就够了），可以计算其轨道的6个轨道根数——天文学上称之为定轨问题。

计算星历表问题是这样解决的：

由二体问题微分方程的解，可以得出椭圆轨道上行星位置的极坐标方程(图)

$$r=\frac{a(1-e^2)}{1+e\cos f}$$




行星运动的极坐标方程

式中 a 和 e 都是已知的轨道根数，只要知道给定时刻 t 时的极角 f，就可以计算极半径 r，从而得到行星在轨道上的位置。而轨道在空间的位置是由另几个轨道根数给定的，于是行星的空间位置当然也就可以计算了。偏偏难题出在建立 f 与 t 的关系上。解决这一难题，还需费一些周折。

以椭圆中心 O 为中心，以半长径 a 为半径画圆，从行星位置 P 向长轴作垂线，与圆交于 P'，垂足至太阳的距离为 L，$\overline{OP'}$ 与长轴的夹角 E 称为偏近点角。从几何关系不难看出：$\cos f=L/r$，$\cos E=(ae+L)/a$，于是有

$$r\cos f=a(\cos E-e) \qquad (1)$$

代入极坐标方程可得：

$$r=a(1-e\cos E) \qquad (2)$$

微分方程通解中的一个积分为：

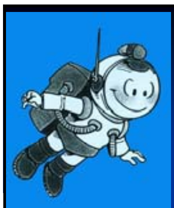
$$E-e\sin E=\frac{2\pi}{T}(t-\tau)$$

式中 t 指任意时刻，τ 为6个轨道根数之一（行星过近日点时刻），T 是行星轨道运动的周期。根据开普勒第三定律，T 可以从半长径 a 计算得到。定义 $M=\frac{2\pi}{T}(t-\tau)$。显然当 $t=\tau$ 时，$M=0$，而且 M 是 t 的线性函数，所以 M 是从近日点起算的一个随时间均匀增加的角度，称为平近点角，于是有：

$$E-e\sin E=M \qquad (3)$$

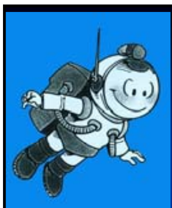
此式称为开普勒方程，它是开普勒最先推导出来的。

计算星历表的过程是：由任意时刻 t 计算 M；由 M 求解开普勒方程(3)得 E；由 E 通过(2)式计算 r；再由 r 和 E 通过(1)式计算 f，问题就得到解决了。



## 行星运动三大特性

飞抵太阳系上空，鸟瞰整个太阳系的壮丽景象，那些大行星都在自西向东也就是逆时针围绕太阳转，它们绕太阳转的路线也就是天文学家常说的轨道也挺圆，再看看，它们基本都在一个平面上围绕太阳转悠。这就是行星运动三个主要特性。正因为行星运动具有同向性、近圆性、共面性，才使当年的天文学家在地球上能分辨出它们是太阳系的成员。



# 行星视运动

在太空中看，九大行星都在自己的轨道上按部就班地运动。

但在地球上看其它行星运动，问题有点儿复杂。

我们把在地球上看到的行星相对太阳、相对星空背景的运动叫行星视运动。

## 行星的视运动

（1）相对太阳的视运动
（2）相对星空背景视运动

研究行星视运动首先将行星分为地内行星和地外行星两类，因为地内行星、地外行星视运动表现不同。

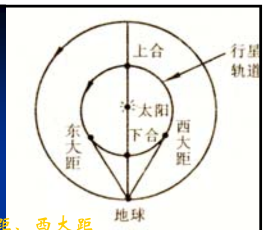
地内行星：水星 金星

地外行星：火星 木星 土星 天王星
海王星 冥王星

地内行星总是在太阳前后徘徊，与太阳的角距离不超过一定的范围，只能在日出前的东方或日落后的西方天空出现。

地外行星与太阳的角距离则不受任何限制可能出现在天空黄道附近的任何方位。

### 地内行星视运动
### （1）相对太阳的视运动

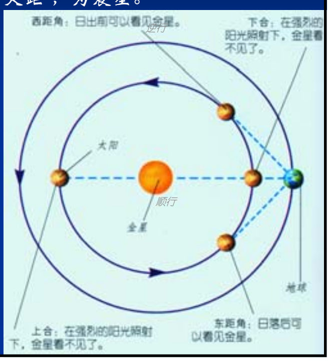



4个特殊位置：上合、下合、东大距、西大距

合：行星与太阳都在同一方位即黄经相等时称为行星合日。
行星在太阳前称为“下合”；行星在太阳后面称为“上合”。
合时，行星与太阳同升同落，我们看不见。

请想一想：
考虑这个问题以什么为参考系？为什么说行星与太阳黄经相等时？

东大距：当行星与太阳角距离达到最大值时，称为“大距”。
行星在太阳之东称“东大距”，为昏星。
西大距：行星在太阳之西称“西大距”，为晨星。




大距时是观测地内行星的最佳时机。

水星的大距角在18度～28度之间。
金星的大距角在45度～48度之间。
半夜时分绝对见不到地内行星。

### 相位变化

1610年，伽利略首次用望远镜发现金星跟月亮一样有盈亏相位变化。与月球不同的是，地内行星相位还随着角径大小显著变化。

- 朔（下合）附近角径最大
- 望（上合）附近角径最小

金星的角径最大时为最小时的6.4倍；　水星为2.6倍。

### 发现意义：

地内行星相位和角径变化的发现是日心说的有力证据之一；说明行星只是反射日光，本身不发光。

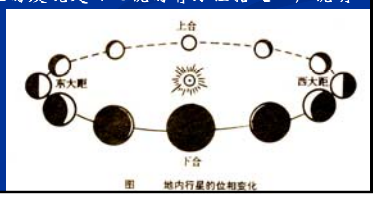
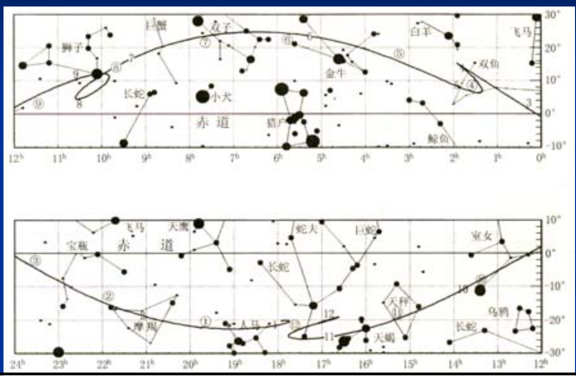
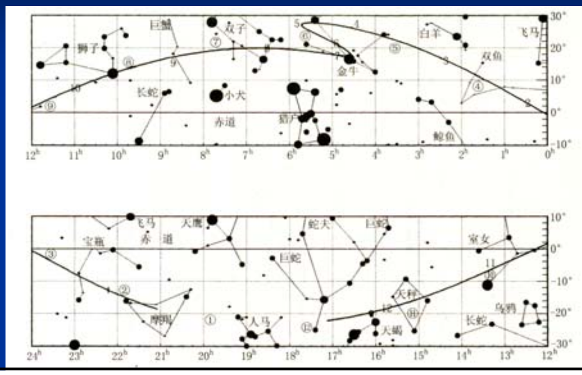


图　地内行星的位相变化

## 地内行星的视运动
## （2）相对星空背景视运动





## 地内行星的视运动
## （2）相对星空背景视运动

特点：

1、行星视运动路径总在黄道附近；

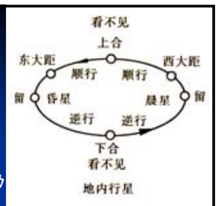
2、行星有时顺行，有时逆行；

3、顺行时间长，逆行时间短；

4、由顺行转为逆行或由逆行转为顺行的转折点称为“留”，行星在“留”前后移动缓慢，好像静止似的；

5、行星视运动都有周期性，各行星的周期长短不同。

## 行星会合周期




- 行星相对星空背景的运动，行星会合周期，
- 行星绕太阳公转一周时间叫“恒星周期”；
- 在地球上看到的相对星空背景的行星运动是行星公转和地球公转的复合运动，叫“会合运动”。
- 行星相邻两次合（或冲）经历的时间叫“会合周期”。
- 地内行星会合周期经历过程：上合－顺行　东大距－顺行　留－逆行　下合－逆行　留－顺行　西大距－顺行　上合
-

## 行星会合周期/公转周期概念不同

水星　公转周期87.969日　会合周期115.88日

金星　公转周期224.701日　会合周期583.92日

行星会合周期

- 行星会合运动方程

$1/S=1/T_{内}-1/E$

$1/S=1/E-1/T_{外}$

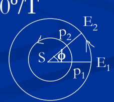
T和E为地内行星和地球的恒星周期，

S为行星会合周期，

地球和行星的平均角速度为360º/E、360º/T

$360^\circ+\phi=(360^\circ/T)\cdot S$

$\phi=(360^\circ/E)\cdot S$　　　两式消 $\phi$



## 地外行星视运动

（1）相对太阳的视运动

4个特殊位置： 合、冲、东方照、西方照。

（地外行星的轨道在地球轨道的外面，所以不会有下合，只有上合，一般称之为“合”。）

冲：行星与太阳黄经相差180度时，称为“冲”。冲时太阳西落行星东升，可以整夜可见。

方照：行星与太阳的黄经相差90度或270度时。

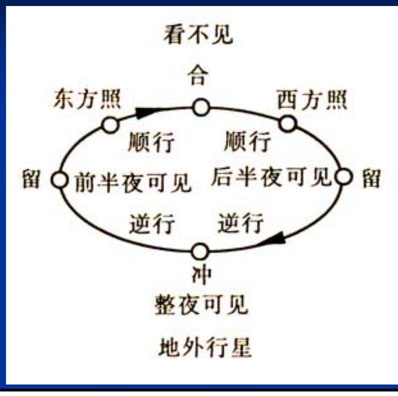
东方照：行星在太阳之东为“东方照”，此时行星中午升起，日落时位于中天附近，上半夜西方天空可见；

西方照：行星在太阳之西为“西方照”，此时行星子夜升起，日出时位于中天附近，下半夜见于东方天空。


图 地外行星相对太阳的视运动

## 地外行星视运动

（2）相对恒星的视运动




## 地外行星视运动

（2）相对星空背景行星视运动图