

Cap. 4

Dinamica del moto dei pianeti

4.1 - Introduzione

Uno dei problemi piú affascinanti della Fisica, e della Meccanica in particolare, é quello di trovare analiticamente la traiettoria dei pianeti, e della Terra in particolare, intorno al Sole.

La teoria fu formulata da Newton nel 1686, e prende il nome di **legge di attrazione gravitazionale**:

La forza che si esercita **fra due masse puntiformi** é direttamente proporzionale al prodotto delle masse ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Essa agisce lungo la retta che unisce i due punti ed é attrattiva:

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \tag{4.1.1}$$

essendo G la costante di gravitazione universale $G = 6.6730 \cdot 10^{-11} (N \cdot m^2/kg^2)$.

4.2 - Il problema dei due corpi

Consideriamo due masse puntiformi m_1 e m_2 individuate dai vettori posizione $\vec{r}_1(t)$ e $\vec{r}_2(t)$ rispetto ad un'origine O . Se le masse non sono puntiformi le dobbiamo supporre ad una grande distanza rispetto alle loro dimensioni oppure che abbiano una distribuzione di massa a simmetria sferica e non si toccano l'una con l'altra. Esse sono sottoposte alla loro forza gravitazionale.

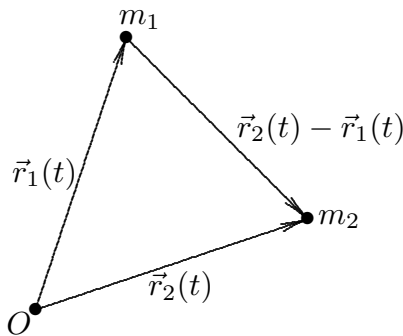


fig.4.2-1

Il loro moto é, quindi, governato dalle seguenti due equazioni:

$$m_1 \ddot{\vec{r}}_1(t) = G m_1 m_2 \frac{\vec{r}_2(t) - \vec{r}_1(t)}{|\vec{r}_1(t) - \vec{r}_2(t)|^3} \tag{4.2.1}$$

$$m_2 \ddot{\vec{r}}_2(t) = G m_1 m_2 \frac{\vec{r}_1(t) - \vec{r}_2(t)}{|\vec{r}_1(t) - \vec{r}_2(t)|^3} \tag{4.2.2}$$

essendo G la costante gravitazionale.

Le (4.2.1) e (4.2.2) si scrivono:

$$\ddot{\vec{r}}_1(t) = Gm_2 \frac{\vec{r}_2(t) - \vec{r}_1(t)}{|\vec{r}_1(t) - \vec{r}_2(t)|^3} \quad (4.2.3)$$

$$\ddot{\vec{r}}_2(t) = Gm_1 \frac{\vec{r}_1(t) - \vec{r}_2(t)}{|\vec{r}_1(t) - \vec{r}_2(t)|^3} \quad (4.2.4)$$

Conoscendo le posizioni e le velocità iniziali delle due particelle, è possibile la conoscenza delle loro traiettorie risolvendo il sistema di equazioni (4.2.3) e (4.2.4).

Tuttavia il caso più importante è quello in cui la massa di una particella è molto più piccola di quella dell'altra. Questo è il caso di un satellite artificiale orbitante intorno alla Terra ed ancora più suggestivo è quello dei pianeti attorno al Sole. Ci accingiamo a studiare questo caso.

Poniamo $m_1 = M$ ed $m_2 = m$; dividendo membro a membro la (4.2.3) per la (4.2.4) si ha:

$$\frac{\ddot{\vec{r}}_1(t)}{\ddot{\vec{r}}_2(t)} = \frac{m}{M} \quad (4.2.5)$$

Nell'ipotesi che $m \ll M$, risulta:

$$\frac{\ddot{\vec{r}}_1(t)}{\ddot{\vec{r}}_2(t)} \ll 1 \quad (4.2.6)$$

ossia l'accelerazione della particella di massa più grande si può ritenere trascurabile rispetto a quella competente alla particella di massa più piccola. Questo significa che la particella di massa più grande non è perturbata dal suo moto per effetto della massa più piccola. Possiamo quindi non considerare nella nostra trattazione il moto della particella più grande.

È conveniente, a questo punto, scegliere come origine del sistema di riferimento la massa M ; porre cioè $\vec{r}_1(t) = 0$. Denominando $\vec{r}_2(t)$ con $\vec{r}(t)$, l'equazione del moto della particella di massa m diventa:

$$\ddot{\vec{r}}(t) = -GM \frac{\vec{r}(t)}{|\vec{r}(t)|^3} \quad (4.2.7)$$

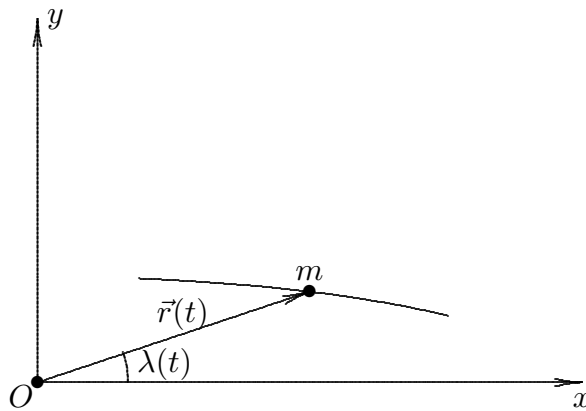


fig.4.2-2

La soluzione della (4.2.7) ci fornisce la legge oraria del moto di una particella di massa m rispetto ad un sistema di riferimento solidale alla particella di massa piú grande M .

Consideriamo il piano formato dal vettore $\vec{r}(t)$ e dal vettore $\dot{r}(t)$, sia esso il piano xy ; dalla (4.2.7) si ha che il vettore accelerazione é colineare con il vettore $\vec{r}(t)$, conseguentemente il moto della particella di massa m é un moto piano e si svolge sul piano xy .

Esprimendo l'equazione (4.2.7) in coordinate cartesiane x e y , si ha:

$$\ddot{x}(t) = -GM \frac{x(t)}{|\vec{r}(t)|^3} \quad (4.2.8)$$

$$\ddot{y}(t) = -GM \frac{y(t)}{|\vec{r}(t)|^3} \quad (4.2.9)$$

Convertiamo le equazioni (4.2.8) e (4.2.9) in coordinate sferiche attraverso le seguenti trasformazioni.

$$\begin{aligned} x &= r \cos \lambda \\ y &= r \sin \lambda \\ \dot{x} &= \dot{r} \cos \lambda - r \dot{\lambda} \sin \lambda \\ \dot{y} &= \dot{r} \sin \lambda + r \dot{\lambda} \cos \lambda \\ \ddot{x} &= \ddot{r} \cos \lambda - 2\dot{r} \dot{\lambda} \sin \lambda - r \ddot{\lambda} \sin \lambda - r \dot{\lambda}^2 \cos \lambda \\ \ddot{y} &= \ddot{r} \sin \lambda + 2\dot{r} \dot{\lambda} \cos \lambda + r \ddot{\lambda} \cos \lambda - r \dot{\lambda}^2 \sin \lambda \end{aligned} \quad (4.2.10)$$

Sostituendo nella (4.2.8) e nella (4.2.9) si ha:

$$\ddot{r} \cos \lambda - 2\dot{r} \dot{\lambda} \sin \lambda - r \ddot{\lambda} \sin \lambda - r \dot{\lambda}^2 \cos \lambda = -GM \frac{\cos \lambda}{r^2} \quad (4.2.11)$$

$$\ddot{r} \sin \lambda + 2\dot{r} \dot{\lambda} \cos \lambda + r \ddot{\lambda} \cos \lambda - r \dot{\lambda}^2 \sin \lambda = -GM \frac{\sin \lambda}{r^2} \quad (4.2.12)$$

che si possono scrivere:

$$\left(\ddot{r} - r \dot{\lambda}^2 + GM \frac{1}{r^2} \right) \cos \lambda + \left(-2\dot{r} \dot{\lambda} - r \ddot{\lambda} \right) \sin \lambda = 0 \quad (4.2.13)$$

$$\left(2\dot{r} \dot{\lambda} + r \ddot{\lambda} \right) \cos \lambda + \left(\ddot{r} - r \dot{\lambda}^2 + GM \frac{1}{r^2} \right) \sin \lambda = 0 \quad (4.2.14)$$

che sono equivalenti a:

$$\ddot{r} - r \dot{\lambda}^2 = -GM \frac{1}{r^2} \quad (4.2.15)$$

$$r \ddot{\lambda} + 2\dot{r} \dot{\lambda} = 0 \quad (4.2.16)$$

Moltiplicando la (4.2.16) per r , si ha:

$$r^2 \ddot{\lambda} + 2r\dot{r} \dot{\lambda} = 0 \quad (4.2.17)$$

che si può scrivere:

$$\frac{d}{dt} (r^2 \dot{\lambda}) = 0 \quad (4.2.18)$$

che comporta:

$$r^2 \dot{\lambda} = h \quad (4.2.19)$$

dove h é una costante del moto.

Eliminando $\dot{\lambda}$ dalla (4.2.15) per mezzo della (4.2.19) si ottiene:

$$\ddot{r} = \frac{h^2}{r^3} - GM \frac{1}{r^2} \quad (4.2.20)$$

Poniamo:

$$r = \frac{1}{u} \quad (4.2.21)$$

Ne segue:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{1}{u^2} \frac{du}{dt} = -\frac{1}{u^2} \frac{du}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dt} = -h \frac{du}{d\lambda} \quad (4.2.22)$$

avendo posto, dalla (4.2.19), $\dot{\lambda} = u^2 h$.

Derivando rispetto al tempo la (4.2.22), si ha:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -h \frac{d}{dt} \left(\frac{du}{d\lambda} \right) = -h \frac{d^2 u}{d\lambda^2} \frac{d\lambda}{dt} = -h^2 u^2 \frac{d^2 u}{d\lambda^2} \quad (4.2.23)$$

Sostituendo nella (4.2.20) si ottiene:

$$-h^2 u^2 \frac{d^2 u}{d\lambda^2} = h^2 u^3 - u^2 GM \quad (4.2.24)$$

$$\frac{d^2 u}{d\lambda^2} + u = \frac{GM}{h^2} \quad (4.2.25)$$

la cui soluzione generale é:

$$u = \frac{GM}{h^2} + c_1 \cos \lambda + c_2 \sin \lambda \quad (4.2.26)$$

ossia:

$$r = \frac{1}{\frac{GM}{h^2} + c_1 \cos \lambda + c_2 \sin \lambda} \quad (4.2.27)$$

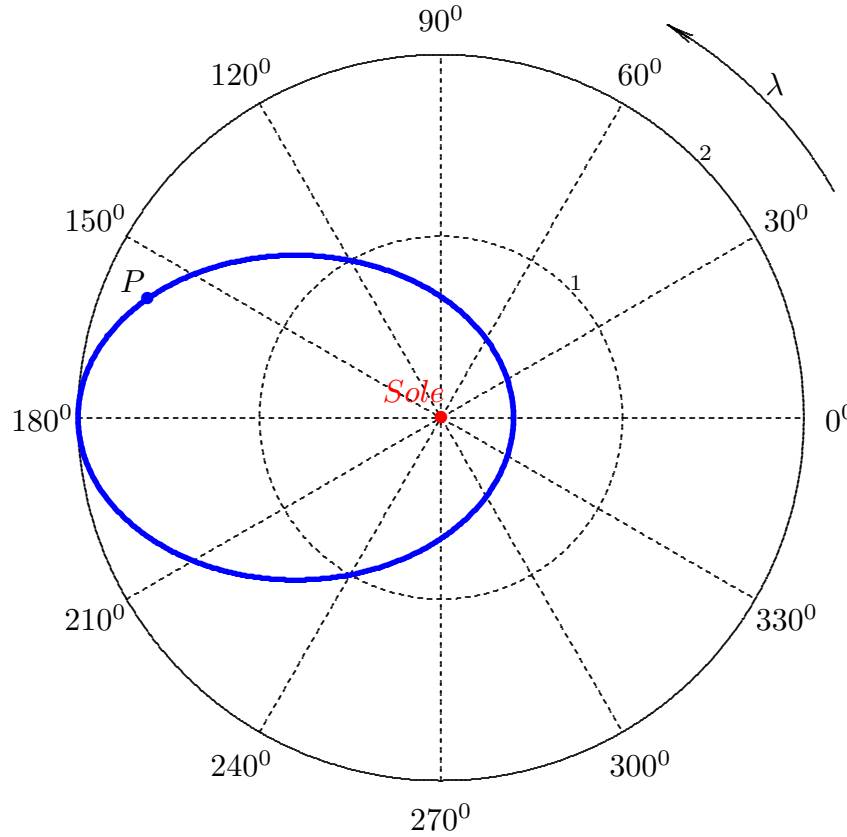
essendo c_1 e c_2 due costanti arbitrarie d'integrazione.

É conveniente esprimere c_1 e c_2 in funzione di due altre costanti A e λ_0 ; per questo poniamo $c_1 = A \cos \lambda_0$ e $c_2 = A \sin \lambda_0$. Infatti quadrando e sommando si può scrivere

$A = \sqrt{c_1^2 + c_2^2}$ e si può scegliere una costante reale λ_0 qualunque siano i valori reali c_1 e c_2 . Con queste posizioni l'equazione dell'orbita si può scrivere:

$$r = \frac{1}{\frac{GM}{h^2} + A \cos(\lambda - \lambda_0)} \quad (4.2.28)$$

Questa é l'equazione polare di una conica con l'origine in uno dei fuochi. Come esempio grafichiamo la (4.2.28), dopo aver posto $\lambda_0 = 0$, $A = 1$ e $GM/h^2 = 1.5$.



λ	r	λ	r	λ	r	λ	r
0°	0.4000	10°	0.4024	20°	0.4099	30°	0.4226
40°	0.4413	50°	0.4667	60°	0.5000	70°	0.5429
80°	0.5975	90°	0.6667	100°	0.7539	110°	0.8636
120°	1.0000	130°	1.1666	140°	1.3625	150°	1.5774
160°	1.7847	170°	1.9410	180°	2.0000	190°	1.9410
200°	1.7847	210°	1.5774	220°	1.3625	230°	1.1665
240°	1.0000	250°	0.8636	260°	0.7539	270°	0.6667
280°	0.5975	290°	0.5429	300°	0.5000	310°	0.4667
320°	0.4413	330°	0.4226	340°	0.4099	350°	0.4024
360°	0.4000						

Confrontando l'equazione (4.2.28) con l'ordinaria equazione di una conica in forma polare:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos(\theta - \theta_0)} \quad (4.2.29)$$

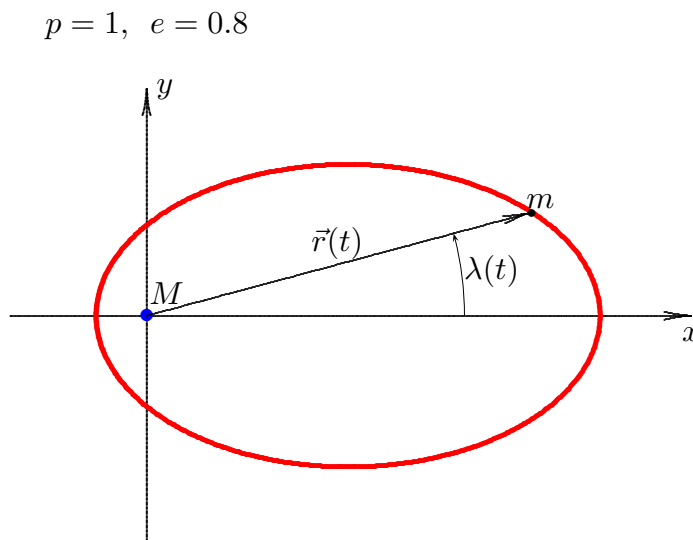
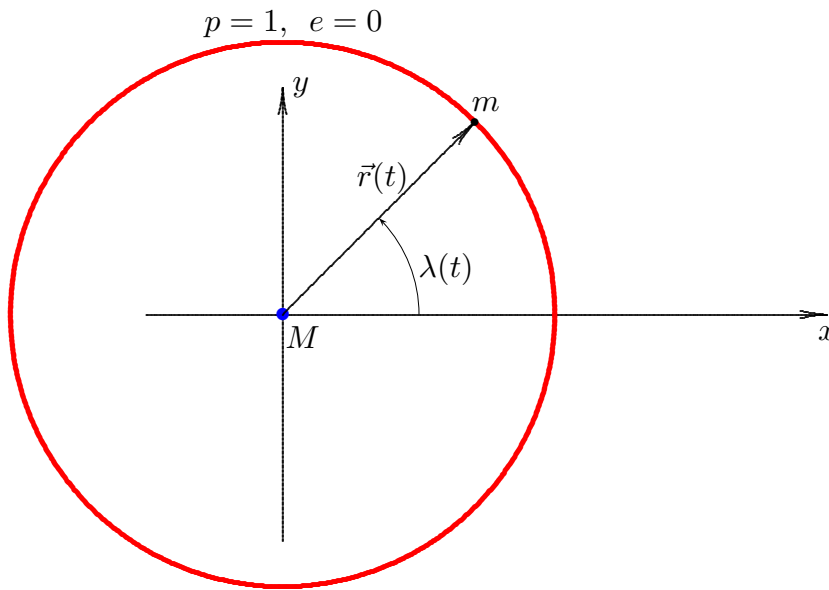
si ottiene:

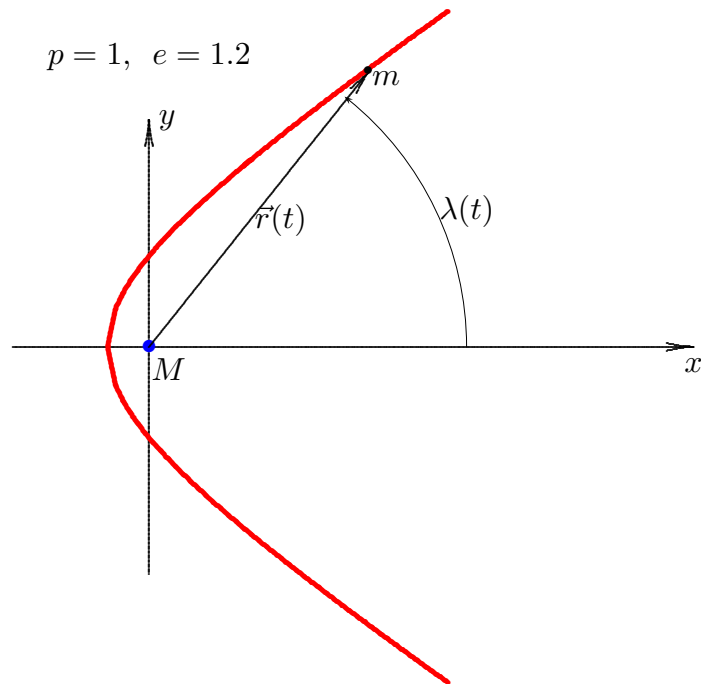
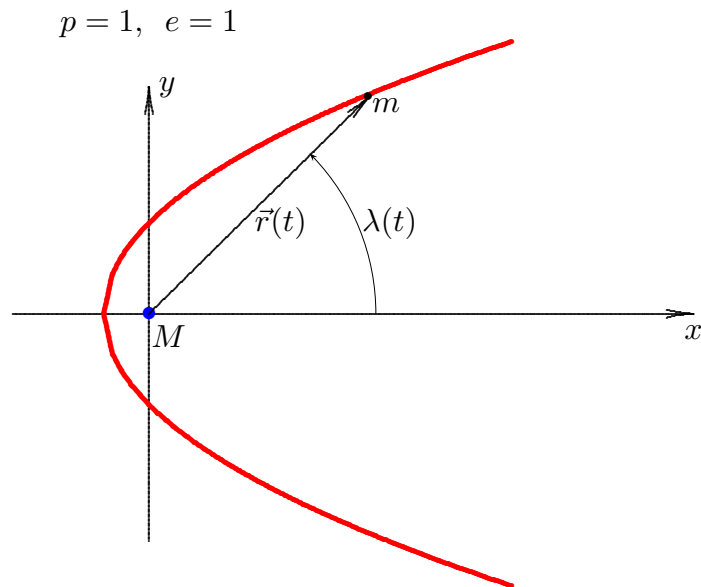
$$\begin{cases} p = \frac{h^2}{GM} \\ e = \frac{h^2 A}{GM} \end{cases} \quad (4.2.30)$$

Le costanti h^2 ed A sono determinate dalle condizioni iniziali ed esse, a loro volta, definiscono p ed e per mezzo della (4.2.30).

Se l'eccentricità e è < 1 , la conica è un'ellisse; se $e=1$ la conica è una parabola; se $e > 1$ la conica è un'iperbole e se $e = 0$ la conica è una circonferenza.

A titolo di esempio grafichiamo l'equazione (4.2.29) nei quattro casi $e = 0$, $e = 0.8$, $e = 1$ e $e = 1.2$.





Per graficare le orbite é stato conveniente sviluppare l'equazione (4.2.29) e scriverla:

$$\cos(\theta - \theta_0) = \left(\frac{p}{re} - \frac{1}{e} \right) \quad (4.2.31)$$

ossia:

$$\theta(t) = \theta_0 \pm \arccos \left(\frac{p}{re} - \frac{1}{e} \right) \quad (4.2.32)$$

Nelle figure, al posto di $\theta(t)$, é stato riportato $\lambda(t)$ come nell'equazione (4.2.28) e si é posto $\theta_0 = 180^0$.

Programma in ambiente MATLAB
ORBITA.m

```
delete(get(0,'children'));
clf;
clear all;
p=1;
e=0.8;
teta0g=180;
teta0=teta0g.*pi./180;
rmax=5;
if e<1
r=p./(1+e):0.001:p./(1-e);
end
if e>=1
r=p./(1+e):0.001:rmax;
end
tetal=teta0+acos(p./r./e-1./e);
tetar=teta0-acos(p./r./e-1./e);
polar(tetal,abs(r))
hold on
polar(tetar,abs(r))
%%%Istruzioni per copiare i dati in formato TEX %%%
x=abs(r).*cos(teta);
y=abs(r).*sin(teta);
B=[x;y];
fid=fopen('pippo.tex','w');
fprintf(fid,'orbita\n');
fprintf(fid,'%5.4f %5.4f %5.4f %5.4f %5.4f %5.4f %5.4f %5.4f %5.4f %5.4f\n',B);
fclose(fid);
```


4.3 - Massa inerziale e massa gravitazionale - Principio di equivalenza

La storia del concetto moderno di massa comincia con Newton e con i suoi *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, in cui vengono enunciate le leggi della dinamica classica. Per Newton, la massa è la costante di proporzionalità fra la forza e l'accelerazione, nella seconda legge della dinamica ($\vec{F} = m\vec{a}$). Più precisamente, questa è la **massa inerziale**, la grandezza che quantifica l'inerzia di un corpo, cioè la sua resistenza alle accelerazioni. Nei Principia la massa compare anche nell'espressione della forza di gravità, come misura dell'intensità dell'attrazione gravitazionale dei corpi, cioè come **massa gravitazionale**. In linea di principio, la massa inerziale e la massa gravitazionale sono grandezze distinte. Tuttavia, il fatto che i corpi cadano tutti con la stessa accelerazione, come osservò per la prima volta Galileo, indica che **massa inerziale e massa gravitazionale sono uguali. Questo è il principio di equivalenza**. Questa uguaglianza, verificata oggi con grandissima precisione (una parte su diecimila miliardi), è, nella fisica classica, un dato di fatto privo di una giustificazione teorica. Una delle motivazioni della relatività generale di Einstein, del 1916, fu proprio quella di spiegare **l'equivalenza di inerzia e gravitazione (il principio di equivalenza)**, unificando i due concetti.

Nei famosi libri *"Dialogo sui massimi sistemi"* e *"Discorsi intorno a due nuove scienze"*, Galileo Galilei espresse i suoi concetti sotto forma di dialogo, che si svolge durante quattro giornate, fra tre personaggi: *Filippo Salviati*, *Francesco Sagredo* e *Simplicio*, scelti con una precisa intenzione.¹⁾

Filippo Salviati (1582-1614) nobile fiorentino, amico ed allievo di Galilei, membro dell'Accademia dei Lincei, su proposta di Galilei, accademico della Crusca. **Galilei affida a lui**, sia nel *Dialogo sui massimi sistemi*, sia nei *Discorsi intorno a due nuove scienze*, **il compito di esporre le sue idee**.

Francesco Sagredo, patrizio veneziano, nato nel 1571, è un personaggio interessante: la sua cultura scientifica lo spinse ad approfondire alcune particolari ricerche naturali come quelle sulle calamite, anzichè dedicarsi alla vita politica e militare come la sua condizione sociale richiedeva; tuttavia, fu console veneziano in Siria. Egli si legò di intensa e cordiale amicizia a Galilei sotto la cui guida compì numerosi indagini e costruì termometri e cannocchiali. Nel Dialogo è affidata a lui la parte del moderatore intelligente ed aperto, fra le due opposte tesi del copernicanesimo e del tolemaicismo.

Simplicio invece è un personaggio immaginario che riprende il nome del medievale commentatore delle opere aristoteliche. Egli sostiene le argomentazioni dell'aristotelismo e della teoria tolemaica, che difende con garbo e cultura.

Nel libro "Discorsi intorno a due nuove scienze" di Galileo Galilei del 1638, durante la prima giornata, si legge:²⁾

Salviati: *Veduto come la differenza di velocità, ne i mobili di gravità diverse, si trova esser sommamente maggiore ne i mezzi più e più resistenti; ma che più? nel mezzo dell'argento vivo l'oro non solamente va in fondo più velocemente del piombo, ma esso solo*

¹⁾ Classici della Scienza UTET - Opere di Galileo Galilei, a cura di Franz Brunetti, 1980, Vol. II, Dialogo sui Massimi Sistemi, pag.18.

²⁾ Classici della Scienza UTET - Opere di Galileo Galilei, a cura di Franz Brunetti, 1980, Vol. II, Discorsi intorno a due nuove scienze (1638), pag.644.

vi scende, e gli altri metalli e pietre tutti vi si muovono in su e vi galleggiano, dove che tra palle d'oro, di piombo, di rame, di porfido, o di altre materie gravi, quasi del tutto insensibile sarà la disegualità del moto per aria, chè sicuramente una palla d'oro nel fine della scesa di cento braccia non preverrà una di rame di quattro dita; veduto, dico, questo, **cascai in opinione che se si levasse totalmente la resistenza del mezzo, tutte le materie discenderebbero con eguali velocità.**

Simplicio: *Gran detto è questo, Sig. Salviati. Io non crederò mai che nell'istesso vacuo, se pur vi si desse il moto, un fiocco di lana si movesse così veloce come un pezzo di piombo.*

.....

Lo stesso concetto si trova da Newton:³⁾

"Questa quantità che intendo in seguito sotto il nome di... massa... è conosciuta con il peso... perchè è proporzionale al peso, come ho scoperto sperimentalmente su pendoli, di fattura molto accurata".....

³⁾ Classici della Scienza UTET - Principi Matematici della Filosofia Naturale, Vol. I a cura di Alberto Pala, 1989, Definizioni - Definizione I, pag.96.

4.4 - Proprietà dei pianeti del Sistema Solare¹⁾

Nella figura seguente riportiamo la disposizione dei nove pianeti del sistema Solare escludendo Plutone. **La distanza dal Sole ovviamente non è in scala mentre le dimensioni dei pianeti rispetto alla dimensione della Terra sono in scala.** Seguono le caratteristiche di ciascun pianeta.

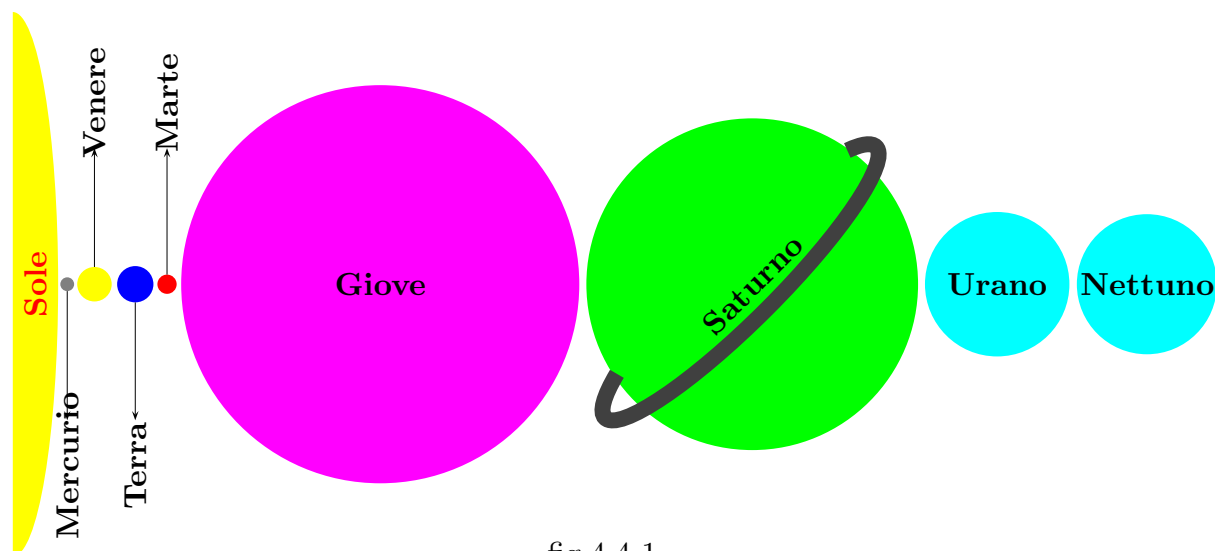


fig.4.4-1

MERCURIO

Diametro medio	4879 km
Diametro medio (rispetto alla Terra)	0.38
Inclinazione dell'asse	$0^{\circ}.034$
Periodo di rotazione siderale	58.6 giorni
Distanza media dal Sole	57.9 milioni di km= 0.387104 UA
Distanza di perielio	46001200 km=0.307499 UA
Distanza di afelio	69816900 km=0.466697 UA
Eccentricità	0.2056
Periodo di rivoluzione siderale	87.97 giorni
Velocità media di rivoluzione	47.36 km/s
Massa (rispetto alla Terra)	0.055
Densità media	5.4 g/cm^3
Gravità alla superficie	3.7 m/s^2
Atmosfera	quasi assente
Pressione atmosferica	$\leq 10^{-15} \text{ bar}$
Satelliti naturali	nessuno

VENERE

Diametro medio	12104 km
Diametro medio (rispetto alla Terra)	0.95
Inclinazione dell'asse	$2^{\circ}.64$

¹⁾ Alle Frontiere del Cosmo: 2. Davide Cenadelli: I Pianeti - Le Scienze.

Periodo di rotazione siderale	243 giorni (retrograda)
Distanza media dal Sole	108.2 milioni di km= 0.723326 UA
Distanza di perielio	107477000 km=0.71843937 UA
Distanza di afelio	108939000 km=0.728213 UA
Eccentricità	0.0068
Periodo di rivoluzione siderale	224.70 giorni
Velocità media di rivoluzione	35.02 km/s
Massa (rispetto alla Terra)	0.815
Densità media	5.2 g/cm ³
Gravità alla superficie	8.87 m/s ²
Atmosfera	96.5% anidride carbonica circa 3.5% di azoto
Pressione atmosferica	92 bar
Satelliti naturali	nessuno

TERRA

Diametro medio	12742 km
Inclinazione dell'asse	23 ^o .44
Periodo di rotazione siderale	23 ore 56 m 4 s
Distanza media dal Sole	149.6 milioni di km= 1 UA
Distanza di perielio	147098074 km=0.9832898912 UA
Distanza di afelio	152100000 km=1.017 UA
Eccentricità	0.01685318
Periodo di rivoluzione siderale	365.26 giorni
Velocità media di rivoluzione	29.78 km/s
Massa	5.97237 · 10 ²⁴ kg
Densità media	5.5 g/cm ³
Gravità alla superficie	9.81 m/s ²
Atmosfera	78.1% di azoto 20.1% di ossigeno 1% di vapore d'acqua altri gas in tracce
Pressione atmosferica	1.01325 bar
Satelliti naturali	1

MARTE

Diametro medio	6779 km
Diametro medio (rispetto alla Terra)	0.53
Inclinazione dell'asse	25 ^o .19
Periodo di rotazione siderale	24 ore 37 m 23 s
Distanza media dal Sole	227.940 milioni di km= 1.524 UA
Distanza di perielio	206644545 km=1.381 UA
Distanza di afelio	249200000 km=1.666 UA
Eccentricità	0.09341233
Periodo di rivoluzione siderale	686.97 giorni
Velocità media di rivoluzione	24.08 km/s

Massa (rispetto alla Terra)	0.107
Densità media	3.9 g/cm^3
Gravità alla superficie	3.72 m/s^2
Atmosfera	95.97% di anidride carbonica 1.93% di argon 1.89% di azoto altri gas in tracce
Pressione atmosferica	0.0064 bar
Satelliti naturali	2

GIOVE

Diametro medio	139822 km
Diametro medio (rispetto alla Terra)	10.97
Inclinazione dell'asse	3 ^o .13
Periodo di rotazione siderale	9.925 ore
Distanza media dal Sole	5.2 UA
Distanza di perielio	740742598 km=4.952 UA
Distanza di afelio	816081455 km=5.455 UA
Eccentricità	0.0484
Periodo di rivoluzione siderale	11.862 anni
Velocità media di rivoluzione	13.06 km/s
Massa (rispetto alla Terra)	317.83
Densità media	1.33 g/cm^3
Gravità alla superficie	24.79 m/s^2
Satelliti naturali	79

SATURNO

Diametro medio	116464 km
Diametro medio (rispetto alla Terra)	9.14
Inclinazione dell'asse	26 ^o .73
Periodo di rotazione siderale	10.561 ore
Distanza media dal Sole	9.539 UA
Distanza di perielio	1349467375 km=9.020 UA
Distanza di afelio	1503983449 km=10.053 UA
Eccentricità	0.0541
Periodo di rivoluzione siderale	29.457 anni
Velocità media di rivoluzione	9.64 km/s
Massa (rispetto alla Terra)	95.16
Densità media	0.69 g/cm^3
Gravità alla superficie	10.44 m/s^2
Satelliti naturali	82

URANO

Diametro medio	50724 km
Diametro medio (rispetto alla Terra)	3.98

Inclinazione dell'asse	97 ⁰ .77
Periodo di rotazione siderale	17.240 ore
Distanza media dal Sole	19.185 UA
Distanza di perielio	2735555035 km=18.286 UA
Distanza di afelio	3066389405 km=20.096 UA
Eccentricità	0.0472
Periodo di rivoluzione siderale	84.02 anni
Velocità media di rivoluzione	6.81 km/s
Massa (rispetto alla Terra)	14.54
Densità media	1.27 g/cm ³
Gravità alla superficie	8.69 m/s ²
Satelliti naturali noti	27

NETTUNO

Diametro medio	49244 km
Diametro medio (rispetto alla Terra)	3.86
Inclinazione dell'asse	28 ⁰ .32
Periodo di rotazione siderale	16.111 ore
Distanza media dal Sole	30.061 UA
Distanza di perielio	4459631496 km=29.81079527 UA
Distanza di afelio	4536874325 km=30.327 UA
Eccentricità	0.0086
Periodo di rivoluzione siderale	164.8 anni
Velocità media di rivoluzione	5.43 km/s
Massa (rispetto alla Terra)	17.15
Densità media	1.64 g/cm ³
Gravità alla superficie	11.15 m/s ²
Satelliti naturali noti	14

Le principali caratteristiche dei pianeti nani

Nome	Perielio (UA)	Afelio (UA)	Periodo Orbitale (anni)	Massa rispetto a Plutone	Diametro medio (km)
Cerere	2.6	3.0	4.61	0.07	939
Plutone	30	49	248	1	2377
Eris	38	97	559	1.27	2326
Makemake	38	53	306	0.24	1430
Haumea	35	52	284	0.31	1560

Osserviamo che **1 UA = 1 Unità Astronomica = 149 597 870 707 m.**

LEGGE DI TITIUS-BODE

Descriviamo, qui di seguito, un metodo mnemonico semplice e sufficientemente approssimato (anche un pò affascinante), per ricordarsi delle distanze dei pianeti fra loro e

dal Sole.^{2),3)} Nel 1766 l'astronomo tedesco Johann Daniel Tietz⁴⁾ scrisse una formula empirica per determinare le distanze dei pianeti dal Sole. Successivamente nel 1772 l'astronomo tedesco Johann Elert Bode⁵⁾ pubblicò una legge analoga senza fare riferimento a Titius. In seguito la legge prese il nome di entrambi gli scopritori: **Legge di Titius-Bode** e talvolta semplicemente **Legge di Bode**.

Si scrive in una linea orizzontale la sequenza di numeri, la cui progressione è evidente:

0, 3, 6, 12, 24, 48, 96, 192

ai quali si aggiungerà 4:

4, 7, 10, 16, 28, 52, 100, 196

Dividendo ciascun numero per 10 si avrà:

0.4, 0.7, 1.0, 1.6, 2.8, 5.2, 10.0, 19.6

che si può sintetizzare con la formula compatta:

$$d_i = 0.4 + 0.3 \cdot 2^i \quad \text{per } i = -\infty, 0, 1, 2, \dots \quad (4.4.1)$$

Confrontiamo questi numeri con le distanze medie dei pianeti dal Sole in UA scritte in neretto nelle tabelle di sopra, che riportiamo:

Mercurio, Venere, Terra, Marte, (Cerere), Giove, Saturno, Urano
0.387 0.723 1.0 1.524 (2.8) 5.2 9.539 19.185

È da notare che sicuramente esiste una buona approssimazione con i valori calcolati. **Inoltre si nota la curiosa circostanza che codesta progressione era stata notata prima della scoperta dei quattro nuovi pianeti Cerere, Pallade, Giunone e Vesta che sono venuti a porsi in questa serie di numeri sotto il posto di 2.8 che era vuoto** (vedi Cerere nella tabella delle principali caratteristiche dei pianeti nani cui sopra).

Il pianetino Cerere è stato scoperto l'1 gennaio 1801 dall'astronomo italiano Giuseppe Piazzi⁶⁾ dall'osservatorio astronomico di Palermo, ad una distanza di 2.76 UA dal Sole e sembrò dimostrare la validità della legge, ma ulteriori osservazioni condussero, nei successivi anni, alla scoperta di altri numerosi pianetini più o meno alla stessa distanza tanto da far ormai ritenere che quel "vuoto" non era occupato da un pianeta ma bensì da una miriade di oggetti, oggi riconosciuti in una fascia di asteroidi che orbitano generalmente

²⁾ François Jean Dominique Arago: "Lezioni di Astronomia professate nell'osservatorio di Parigi da F. Arago tradotte dal francese ed annotate da E. Capocci" - Napoli, Stamperia dell'Iride, 1851, pag.16.

³⁾ Sacchi Corrado: Problemi di Cosmologia e Cosmogonia Planetaria - Collana tecnica Cappelli, 1967, pag.86.

⁴⁾ Johann Daniel Tietz (meglio noto come Johann Daniel Titius): Chojnice (oggi città polacca), 2 gennaio 1729 - Wittenberg (Germania), 11 dicembre 1796.

⁵⁾ Johann Elert Bode: Amburgo, 19 gennaio 1747 - Berlino, 23 novembre 1826.

⁶⁾ Giuseppe Piazzi: Ponte in Valtellina, 16 luglio 1746 - Napoli, 22 luglio 1826, autore del libro: Sulle Vicende dell'Astronomia in Sicilia - Sellerio Editore, Palermo, 1990 - È stato un presbitero e astronomo italiano. Fondatore dell'Osservatorio astronomico di Palermo, conosciuto dal pubblico non specializzato per la sua scoperta del primo pianeta minore, da lui denominato Cerere.

intorno al Sole a distanze comprese da 2.2 a 3.2 UA, con una distanza centrata proprio sul valore di 2.80 UA.

Il pianeta Urano fu scoperto per caso da Sir William Herschel⁷⁾ il 13 marzo 1781, quando notò che un'anonima stellina sembrava spostarsi nel cielo. La sua distanza dal Sole è compatibile con la legge di Titius-Bode scritta anni prima.

Il pianeta Nettuno fu scoperto la sera del 23 settembre 1846 da Johann Gottfried Galle,⁸⁾ con il telescopio dell'Osservatorio astronomico di Berlino, e da Heinrich Louis d'Arrest, uno studente di astronomia che lo assisteva. La distanza di Nettuno dal Sole non è compatibile con la legge di Titius-Bode. Infatti dalla sequenza dei numeri risulta 39.2 UA, mentre nella realtà è **30.061 UA**.

MOTO DI RIVOLUZIONE DELLA TERRA INTORNO AL SOLE

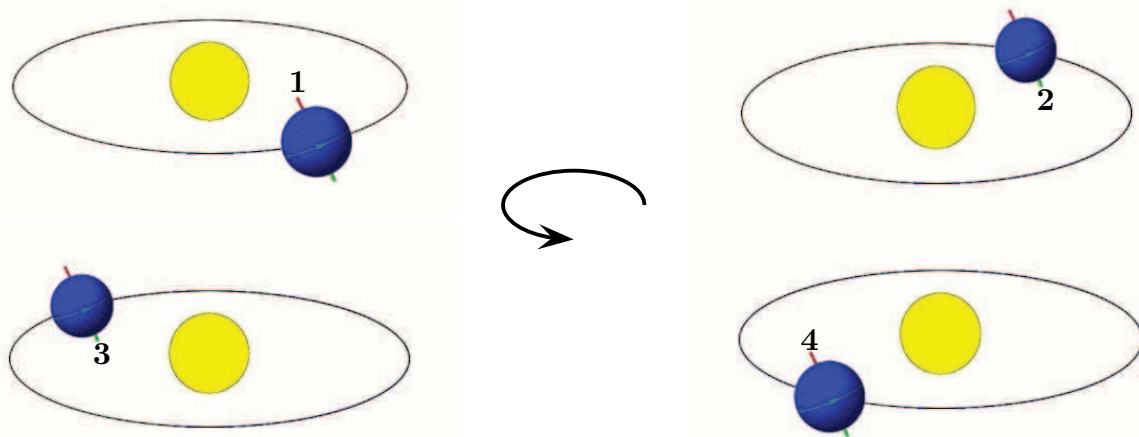


fig.4.4-2

LA TERZA LEGGE DI KEPLERO

La terza legge di Keplero afferma che:

"I quadrati dei tempi che i pianeti impiegano a percorrere le loro orbite sono proporzionali al cubo del semiasse maggiore".

Il rapporto tra il quadrato del periodo di rivoluzione e il cubo del semiasse maggiore dell'orbita è lo stesso per tutti i pianeti. Questa legge può essere espressa in forma matematica nel modo seguente:

$$T^2 = K a^3 \quad (4.4.2)$$

essendo a il semiasse maggiore dell'orbita, T il periodo di rivoluzione e K una costante (a volte detta di Keplero), che dipende dal corpo celeste attorno al quale avviene il moto di rivoluzione. Se si considera il moto di rivoluzione dei pianeti del sistema solare attorno al

⁷⁾ Sir Frederick William Herschel: Hannover (Germania), 15 novembre 1738 - Slough (Regno Unito), 25 agosto 1822 - fisico e compositore tedesco naturalizzato britannico.

⁸⁾ Johann Gottfried Galle: Radis (Germania), 9 giugno 1812 - Potsdam (Germania), 10 luglio 1910 - Astronomo tedesco.

Sole e si misurano le distanze in unità astronomiche e il tempo in anni siderali (come nelle figure seguenti) K vale 1. Dalle proprietà dei pianeti del §4.4 costruiamo i seguenti grafici rappresentanti appunto la terza legge di Keplero.

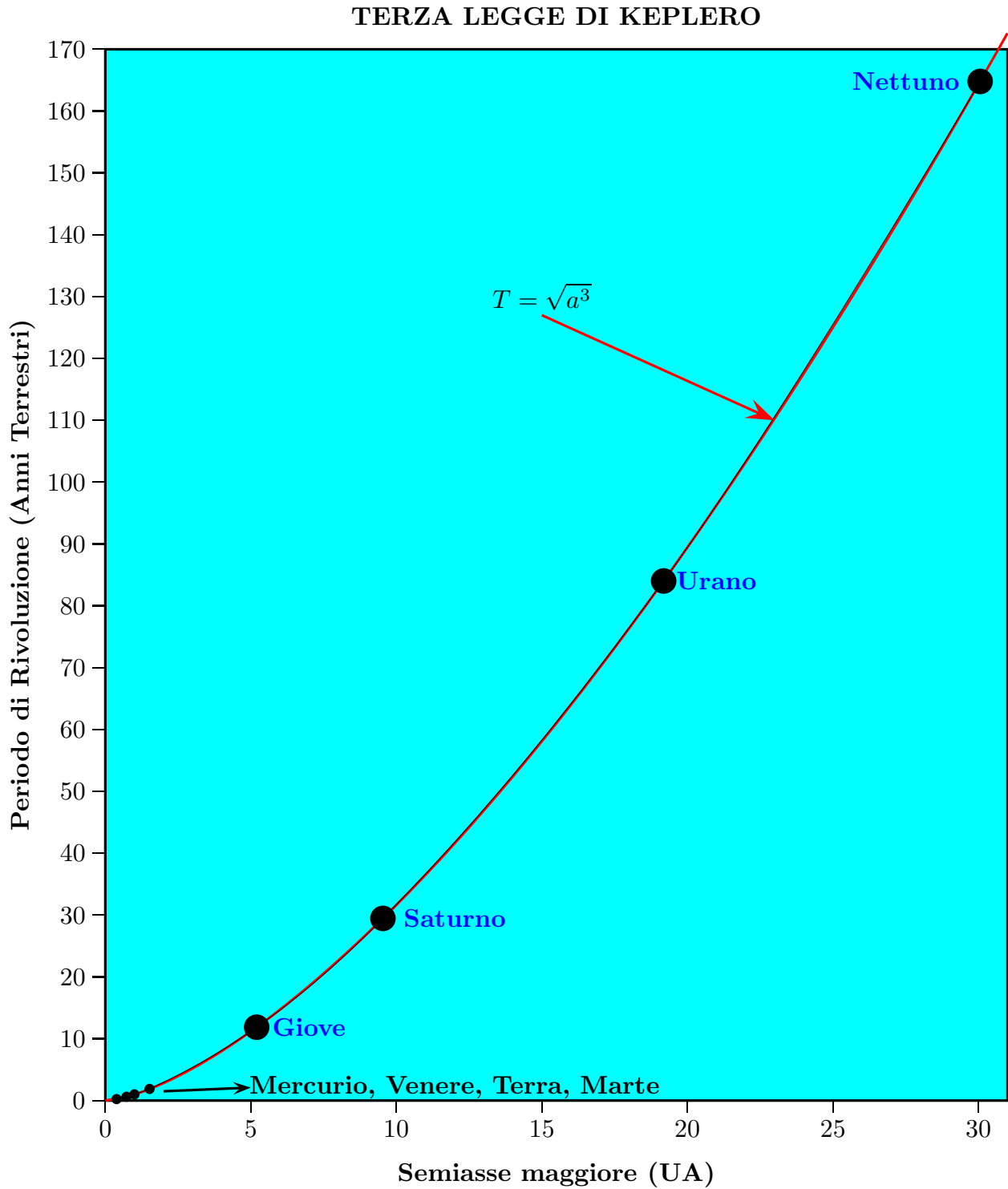


fig.4.4-3

La figura (4.4-4) rappresenta la terza legge di Keplero in scala logaritmica.

TERZA LEGGE DI KEPLERO

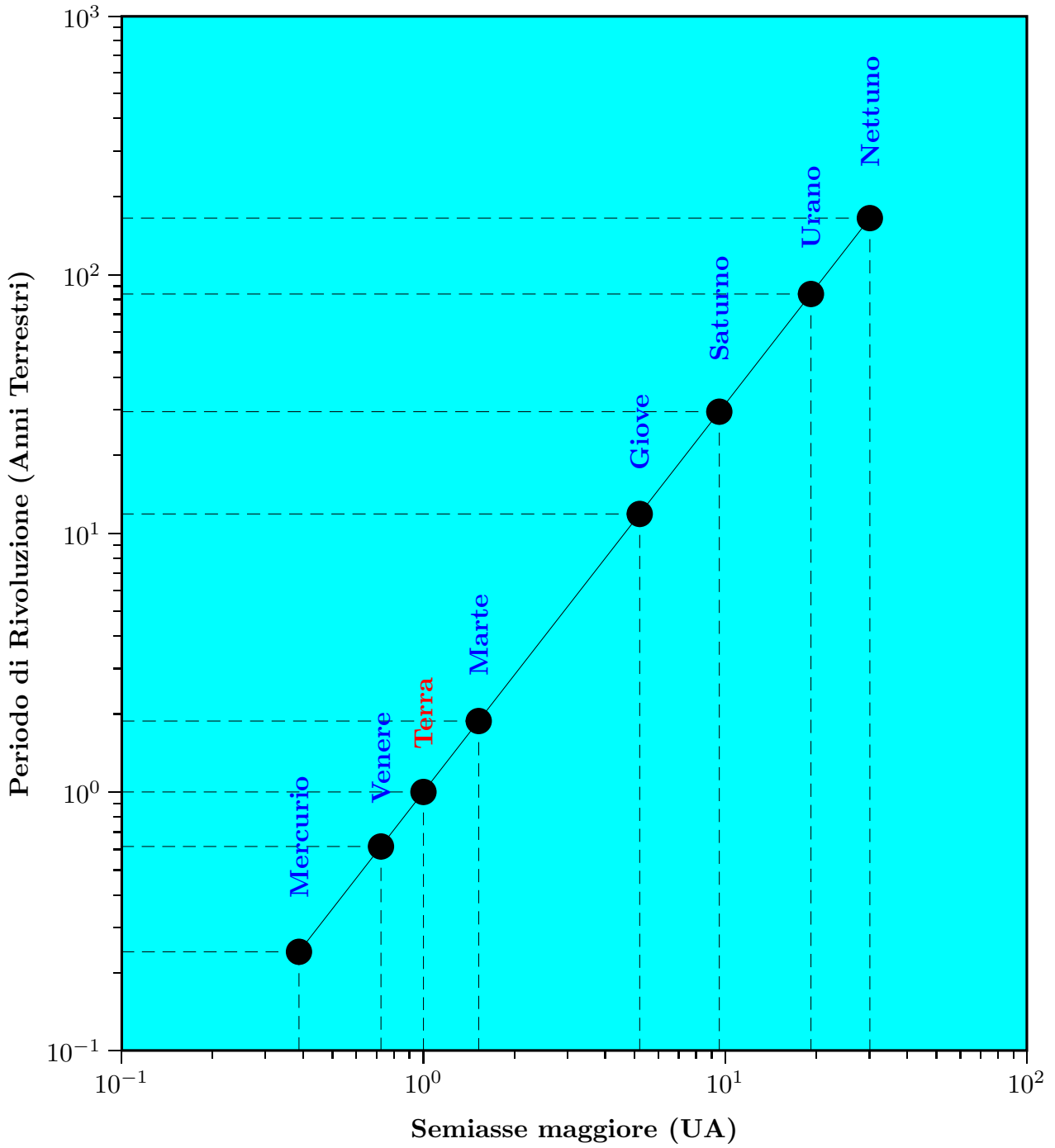
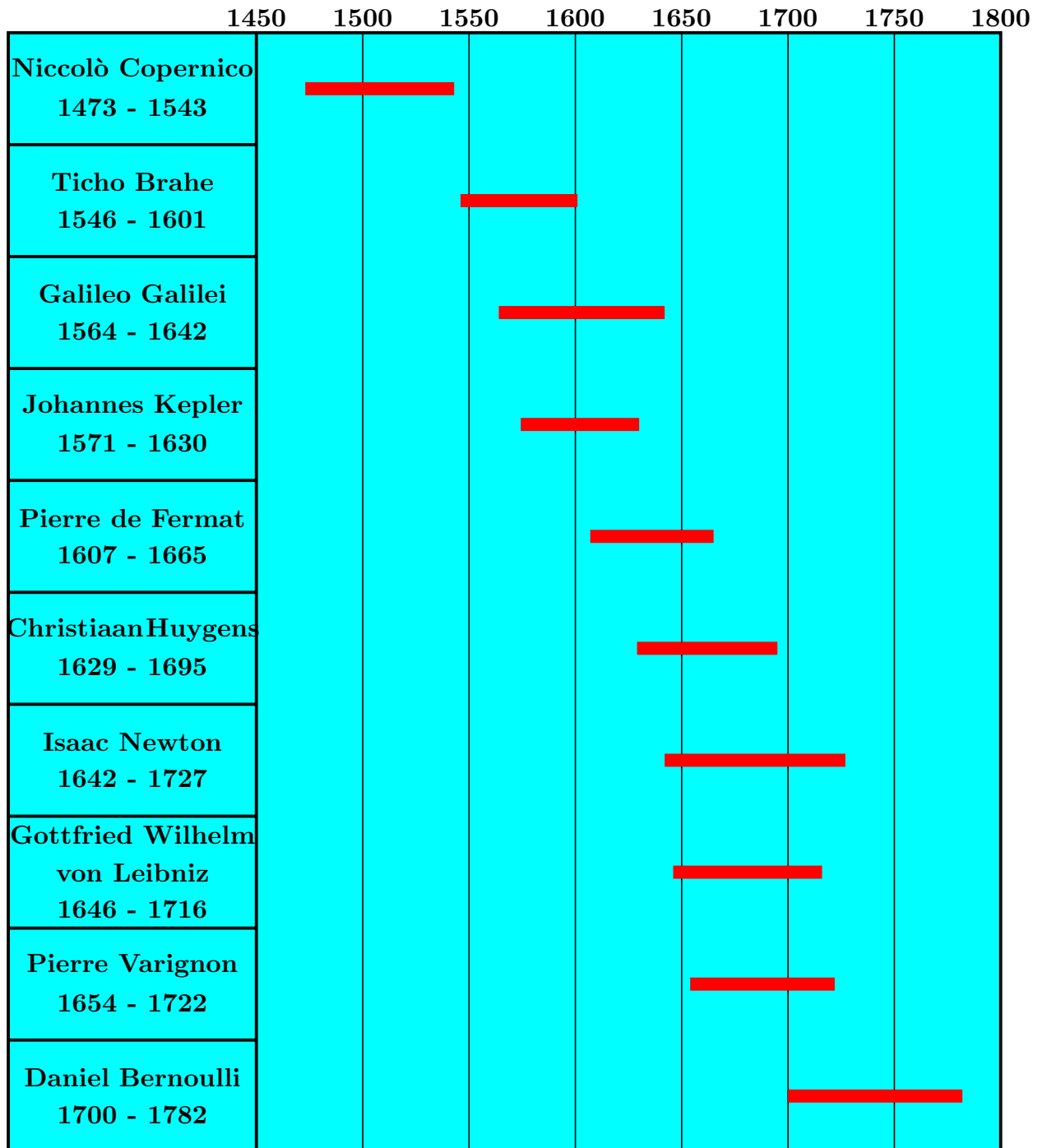


fig.4.4-4

4.5 - Cronistoria della Rivoluzione Copernicana e dei contributi alla Nuova Meccanica Celeste¹⁾



(segue)

¹⁾ <https://matematica.unibocconi.it/articoli/sulle-spalle-dei-giganti>: Conferenza del Prof. Alfonso Cornia, Giovanni Keplero (e altre, tutte bellissime), 2014.

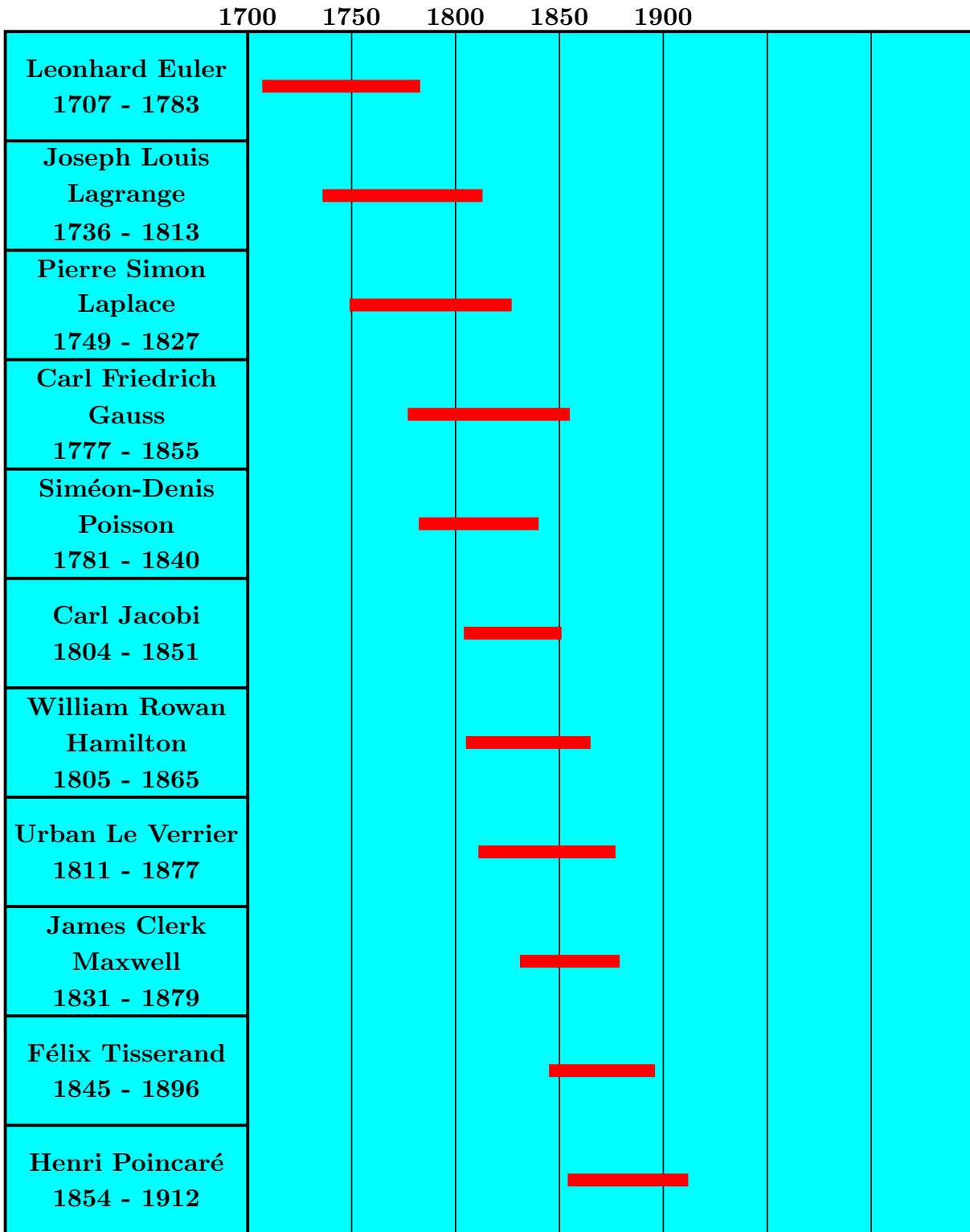


fig.4.5-1

Nel paragrafo successivo, descriviamo la biografia completa di Copernico accennata nel capitolo introduttivo di questo libro.

4.6 - Biografia di Niccolò Copernico¹⁾

- 1473 - 19 febbraio. Niccolò Copernico (in latino: Nicolaus Copernicus; in polacco Mikolaj Kopernik) nasce a Toruń (Polonia, circa 170 km a sud di Danzica), ultimo dei quattro figli di Nicola (Mikolaj), mercante e giudice popolare (scabino) della città, e di Barbara Watzenrode (o Watzelrode). La famiglia del padre era originaria di un villaggio slesiano omonimo (presso Nysa) appartenente ai beni del Vescovado di Wroclaw: i vari rami di questa famiglia erano emigrati nel secolo XIV in altre città slesiane e poi a Cracovia, Lwow (Leopoli, Ucraina) e Toruń. Il padre dell'astronomo proveniva dal ramo di Cracovia, e già nel 1448 era un noto e ricco mercante che commerciava rame con Gdańsk (Danzica): all'inizio della guerra dei tredici anni (1454-1466) delle città prussiane contro l'Ordine Teutonico fu mediatore per un prestito concesso dal cardinale Zbigniew Oleśnicki. Trasferitosi nel 1458 a Toruń, sposò Barbara Watzenrode, la cui famiglia, anch'essa originaria della Slesia, viveva a Toruń dal 1360, ove aveva una posizione di rilievo nel patriziato. Il padre di Barbara, Lukasz, fu un deciso oppositore dell'Ordine teutonico, occupò anche l'incarico di tesoriere della Lega Prussiana, che egli finanziò durante la guerra dei tredici anni. Dei tre fratelli maggiori di Copernico, Andrea (Andrzej) - che fu anche suo compagno di studi e pure lui canonico di Warmia - morì prima del 1518; Barbara (morta dopo il 1517) entrò nel convento delle Benedettine a Chełmno, e Caterina, sposa ad un mercante di Toruń, Bartolomeo Gertner, ebbe cinque figli di cui Copernico si occupò sino alla morte.
- 1473 - 1490 Non si hanno notizie sulla fanciullezza e sugli anni di scuola di Copernico, che visse nella casa paterna (prima in via S.Anna, 71 e poi in piazza del Mercato) sino al 1483, anno della morte del padre, forse frequentando la scuola cittadina presso la Chiesa di San Giovanni. Rimasto orfano passò sotto la tutela dello zio materno Lukasz Watzenrode (nato nel 1447), dapprima canonico di Wloclawek e poi, dal 1489, vescovo di Warmia. Destinato dallo zio, con il fratello, alla carriera ecclesiastica, è probabile che abbia frequentato la scuola dei Fratelli della Vita Comune a Chelmno, o come s'è a lungo ritenuto, la scuola cattedrale di Wloclawek.
- 1491 - Nell'autunno, insieme con il fratello Andrea, si iscrive alla facoltà delle Arti della Università Jagellonica di Cracovia, ove di certo segue corsi su Euclide e di astronomia ed astrologia. Apprende la geometria e la trigonometria piana e sferica, l'astronomia teorica e il calcolo astronomico, come risulta dai libri acquistati da lui a Cracovia e pervenuti sino a noi: gli *Elementi* di Euclide, nell'edizione di Venezia del 1482; l'*Astrologia* di Abenragel (del 1485); le *Tavole Alfonsine* nell'edizione del 1492; le *Tavole delle direzioni e proiezioni*, opera di carattere astronomico-astrologico di Giovanni Müller, il Regiomontano, nell'edizione del 1490. L'Università di Cracovia era allora in un periodo di grande splendore, e Copernico poté ascoltare alcuni dei più noti esponenti della celebre scuola astronomica: Wojciech da Brudzewo, Bernard da Biskupie, Wojciech Krypa da Szamotuly, Jan da Glogów. Anche se a Cracovia Copernico non ha conseguito alcun titolo di studio, risalgono probabilmente a questo periodo il suo atteggiamento critico nei confronti delle due teorie "ufficiali", l'aristotelica e la

¹⁾ Classici della Scienza UTET - Opere di Nicola Copernico a cura di Francesco Barone, 1979, pag.73.

tolemaica, e le sue prime annotazioni scientifiche, conservate fra l'altro nel cosiddetto "Piccolo Prontuario di Uppsala".

- 1495 - Lasciata nella primavera o nell'estate l'Università, si reca nell'autunno presso lo zio Lucasz in Warmia, ove invano viene proposto dallo zio vescovo per un canonicato. Il vescovato di Warmia, creato nel 1243, era il territorio che formava la dotazione demaniale del vescovo, che aveva anche i poteri civili. Dal 1454 la Warmia aveva aderito alla Lega Prussiana, cercando di rendersi indipendente dall'Ordine Teutonico; e con la pace di Toruń del 1466, venne a far parte - come territorio della Prussia Reale - del regno di Polonia.
- 1496 - Nell'autunno parte con il fratello Andrea per l'Italia, ove lo zio desiderava si addottorassero in diritto presso l'Università di Bologna (come già egli aveva fatto nel 1473). Copernico continua tuttavia i suoi studi scientifici, seguendo come assistente le ricerche dell'astronomo Domenico Maria Novara. Appena giunto in Italia acquista e studia l'*Epitome in Almagestum* curata dal Peurbach e dal Regiomontano, uscita nell'estate del 1496 a Venezia.
- 1497 - Il 9 marzo, attraverso l'osservazione della stella Aldebaran nella costellazione del Toro, accertò che, in contrasto con la teoria tolemaica, la parallasse della luna in quadratura è eguale a quella del plenilunio. Per l'insistenza dello zio è nominato canonico del capitolo di Warmia, carica che attraverso i suoi sostituti plenipotenziari assume il 20 ottobre. Non è certo che Copernico abbia preso gli ordini sacri: egli tuttavia (com'è confermato da un documento del 22 novembre 1496) aveva ricevuto gli ordini minori e ciò era condizione sufficiente per il conferimento del canonicato, che dava numerosi vantaggi e prerogative.
- 1498 - 1499 Prosegue oltre ai suoi studi giuridici e scientifici, anche le sue letture di classici, sensibile alla cultura umanistica: seguì probabilmente i corsi del latinista Filippo Beroaldo, del grecista Antonio Urceo detto Codro, del filosofo alessandro Achillini. Ed è probabile che in Cicerone o Plutarco abbia trovato i primi cenni ai pensatori greci, soprattutto ai pitagorici, che non ritennero la terra immobile e al centro del mondo. Alla fine del '99 incontra Bernardo Wapowski, già suo amico dagli anni di Cracovia.
- 1500 Nella primavera si reca a Roma, in occasione del giubileo, e probabilmente fa pratica legale presso la Curia. Continua le sue ricerche astronomiche; secondo una affermazione del Retico tiene a Roma conferenze pubbliche sull'astronomia e sulla matematica. Osserva un'eclisse di luna nella notte fra il 5 e il 6 novembre.
- 1501 - Rientra in Polonia nella primavera; ma già il 28 luglio riceve dal Capitolo un permesso per ritornare in Italia e proseguire i suoi studi, che stavolta, secondo i suoi desideri e le esigenze del Capitolo, riguardano la medicina.
- 1501 - 1503 Segue i corsi di medicina nell'università di Padova. Approfondisce la conoscenza della lingua e della cultura greca: traduce in latino dal greco il manuale epistolare di Teofilatto Simocatta. È assai probabile che sia in questo periodo che si concreta in lui l'idea del passaggio dal geostaticismo all'eliostaticismo. Poco prima di tornare in patria consegue a Ferrara il 31 maggio 1503, la laurea di dottore in diritto canonico. Nel tardo autunno dello stesso anno ritorna in Warmia: ma risulta da un documento stilato a Padova il 10 gennaio 1503 che ancor prima del ritorno Copernico aveva aggiunto al

suo canonicato la scholasteria della chiesa di Santa Croce di Wroclaw, a cui più tardi rinunciò.

- 1504 - 1511 Sin dai primi mesi del 1504 si stabilisce nel castello di Lidzbark accanto allo zio Lukasz di cui è segretario e medico. Benchè non abbia lasciato alcun scritto medico originale, Copernico utilizzò anche in seguito la sua conoscenza della medicina acquisita a Padova: oltre allo zio curò poi anche gli altri vescovi succedutisi in Warmia durante il suo canonicato: F. Luzjański, M. Ferber e J. Dntyszek. Fu in rapporto con illustri medici (come Jan Solfa e Jan Tresler) e per incarico del Capitolo assistette la popolazione durante l'epidemia del 1519. Come segretario dello zio, abile difensore degli interessi della Warmia e della Prussia, apprende l'arte della politica, affrontando problemi ecclesiastici, economici e politici: accompagna il vescovo Lukasz in numerose missioni diplomatiche, i congressi degli stati della Prussia reale ai quali partecipano i re polacchi Alessandro e Sigismondo Jagellone (Toruń e Gdanńsk, 1504; Malbork, 1506; Elblag,1507; Sztum,1512). Probabilmente in questo periodo si reca anche due volte a Cracovia: nel 1507 per l'incoronazione di Sigismondo il Vecchio e alla Dieta del 1509. Ha così modo di rendersi conto dei vantaggi che l'unione alla Polonia ha per la Warmia, sempre minacciata dall'aggressivo Ordine Teutonico. Il 29 novembre 1508 ottiene un indulto papale per altri benefici ecclesiastici, ma rinuncia ad essi. Nel 1509 pubblica a Cracovia la sua versione di Simocatta: *Theophilacti Scholastici Simocatti Epistolae morales, rurales et amatoriae interpretatione latina*. Negli anni 1510-11 fu cancelliere ispettore dei beni terrieri del Capitolo di Warmia, soggiornando a Frombork (Frauenburg a circa 100 km a est di Danzica).
- 1512 - Con la morte dello zio (30 marzo) termina il suo tirocinio politico, e Copernico si stabilisce definitivamente a Frombork ove ottiene dal Capitolo la casa di abitazione (*curia*). Partecipa all'elezione del vescovo Luzjański e assume la carica di amministratore delle aziende per l'approvvigionamento (*magister pistoriae*). Si suppone che, fra gli ultimi anni della residenza a Lidzbark e i primi di quella a Frombork, Copernico abbia composto il *Commentariolus*.
- 1514 - 1520 Nel 1514 Copernico acquista la torre nord-occidentale all'interno delle mura di Frombork e vi impianta uno studio e uno osservatorio astronomico. Pur svolgendo compiti di funzionario, Copernico non trascura la sua ricerca scientifica; già nella prima metà del 1513 compie osservazioni, in occasione del quinto Concilio Laterano per la riforma del calendario, su richiesta di Paolo di Middelburg, vescovo di Fossonbrone. Le osservazioni di Marte, Saturno e soprattutto del Sole (1515) lo portano alla scoperta della variabilità dell'eccentricità nell'orbita della Terra e dello spostamento dell'apogeo solare rispetto alla sfera delle stelle fisse: ciò l'induce ad una revisione del suo sistema (rispetto al *Commentariolus* negli anni 1515-1519, nonostante i gravi impegni politico-amministrativi; è di questi anni la stesura della prima parte del *De Revolutionibus* e del catalogo delle stelle fisse.

Le prove eccellenti date nelle cariche assegnategli dal capitolo aumentarono la fiducia in Copernico: così proprio mentre si inaspriva il contrasto polacco-teutonico per le incursioni dell'Ordine nella Warmia, per due volte (1516-1519 e 1519-1520) Copernico - che prende residenza nella città fortificata di Olsztyn - è nominato amministratore dei beni comuni del Capitolo di Warmia, che comprendevano 120 villaggi e circa 61000

ettari di terreno. La sua attività amministrativa si distinse per il fatto che egli rimise a coltura le terre incolte e assegnò i poderi abbandonati nei villaggi a contadini polacchi trasferitisi dalla Mazuria: buona testimonianza di tale attività è data dai registri "Mansorum desertorum locationes".

L'attività di Copernico, oltre che amministrativa, è tuttavia anche politica: nel 1516, per incarico del Capitolo, scrive una memoria di doglianze al re Sigismondo I di Polonia per le continue scorrerie organizzate dall'Ordine Teutonico in Warmia e in seguito compie numerosi interventi a nome del vescovo Luzjański e del Capitolo. Alla fine del 1519 è di nuovo cancelliere a Frombork e all'inizio del 1520 (4-5 gennaio) partecipa come delegato, con il canonico J. Sculteti alle trattative con il Gran Maestro dell'Ordine, Albrecht di Brandeburgo, per l'occupazione a tradimento di Braniewo (1^o gennaio 1520); nel novembre scoppiata ormai la guerra - terminata poi con l'armistizio del marzo 1521, senza che cessassero le scorrerie - dopo l'attacco a Frombork e l'incendio delle curiae organizza la difesa della città fortificata di Olsztyn, in attesa delle truppe polacche e indirizza una nobile lettera in latino al re Sigismondo: "Vogliamo infatti comportarci come si addice agli uomini buoni, onesti e devotissimi a Vostra Maestà, anche se dovessimo morire" (16 novembre 1520).

1521 - 1525 Ritorna a Frombork dopo la fine della guerra e nell'estate del 1521 riceve l'incarico di "Commissario della Warmia", attinente alla ricostruzione dopo le devastazioni belliche. Con tale titolo partecipa a Grundziadz al Congresso degli Stati della Prussia Reale e presenta la "Querela Capituli" contro il Gran Maestro Albrecht per le violazioni teutoniche dell'armistizio. Nel marzo del 1522 presenta al Congresso uno dei suoi numerosi scritti sulla moneta, il *De aestimatione monetae*. Alla morte del vescovo Luzjański (30 gennaio 1523), Copernico è eletto amministratore generale della diocesi di Warmia e partecipa alla elezione del nuovo vescovo Maurizio Ferber. Negli anni 1524-1525 è nuovamente eletto Cancelliere del Capitolo, proprio nel periodo che vede gli ultimi atti del contrasto con l'Ordine teutonico e che si conclude nel 1525 con l'omaggio prussiano al re di Polonia.

È probabilmente verso il 1523 che Copernico abbandona lo schema concentrico - bieliciclico del *Commentariolus* per quello eccentrico-epiciclico del *De revolutionibus*, il cui terzo libro dovrebbe essere concluso negli anni 1524-1525. È di questo periodo - 3 giugno 1524 - la lettera all'amico Wapowski, *De octava sphaera contra Wernerum*, che confuta, senza far cenno alle sue idee eliostatiche, la dissertazione *De motu octavae sphaerae* di Giovaanni Werner di Norimberga.

1526 - 1531 È probabile che nel 1526 Copernico abbia collaborato con l'amico Wapowski all'elaborazione della mappa dell'intera Polonia; del resto Copernico ebbe serio interesse per la cartografia, come risulta dalle note su due mappe perdute (del 1510 [preparata da Copernico per il congresso di Poznań e che i Teutonici cercarono di far rubare a Frombork] e del 1519): e nel 1529, assieme allo Sculteti, su richiesta del vescovo Ferber, egli elabora la mappa delle terre prussiane.

L'attività pubblica di Copernico va scemando in questi anni., anche se è del 1528 (o meglio fra il 1526 e il 1528) la redazione più matura dei suoi lavori sulla moneta: *De monetae cudendae ratione*. Egli sostiene le sue idee nel 1528 e nel 1530 ai Congressi di Elblag e Malbork. Nel 1531 è ancora eletto per due anni ispettore dei beni del capitolo

(carico che riavrà nel biennio 1535-37) ed elabora la tariffa del pane per la warmia. L'ultima carica di Copernico sarà, nel 1541, quella di responsabile della cassa per le costruzioni (*magister fabricae*).

- 1532 - 1538 Verso il 1532 il *De revolutionibus* è completato, anche se Copernico non cesserà dal lavorarvi. Nel 1533 il cancelliere austriaco Giovanni Albert Widmanstadt espone al papa Clemente VII in Roma i tratti essenziali della nuova astronomia (forse fondandosi sul *Commentariolus*, senza particolari reazioni. Mentre pare - secondo le note del Brożek (1585-1652), che si servì di lettere ora perdute dell'archivio del Capitolo - che Copernico avesse in quell'epoca vari nemici: intorno agli anni trenta, infatti, il suo amico vescovo Tiedermann Giese scrisse un trattato *Hyperaspistes*, anch'esso perduto, in favore della teoria eliostatica. Il 1^o novembre 1536, l'arcivescovo di Capua, Nicola Schönberg invia tuttavia da Roma una lettera a Copernico, nella quale lo prega di fargli avere, attraverso il canonico Teodorico von Reden, una copia dell'opera con le tavole: doveva essersi quindi diffusa notizia anche dell'opera maggiore che Copernico teneva "chiusa nel nascondiglio". Del resto, su invito dell'amico Wapowski, Copernico stesso aveva elaborato un "Almanacco astronomico" basato su nuove tavole eliocentriche, che tuttavia non venne pubblicato per la morte del Wapowski (21 novembre 1535) ed il cui manoscritto è andato perduto. Ed a Copernico non mancava anche la collaborazione di alcuni noti astronomi di Cracovia (Marcin Biem da Olkuss, Nicola da Szadek e Stanislao Aurifaber-Lubart). Nel periodo fra l'8 settembre del 1537 e il 1^o febbraio del 1538 egli compie osservazioni astronomiche dei pianeti e della luna.
- 1539 - 1542 All'inizio del 1539 è costretto ad allontanare la sua domestica Anna Schilling, per le pressioni del vescovo Dantiscus che stava approntando un processo, contro Copernico e due suoi amici, per oltraggio alla morale. Nel maggio del 1539 giunge a Frombork Giorgio Gioacchino von Lauchen (Retico), un giovane professore dell'Università di Wittenberg, che desiderava conoscere la nuova teoria astronomica: ben accolto da Copernico, il Retico ne acquista pienamente la fiducia e prepara un breve riassunto del *De revolutionibus*. Questo è pubblicato con il titolo di *Narratio prima* a Danzica nel 1540 e l'anno dopo a Basilea, suscitando vivo interesse. Lo stesso Retico convince Copernico a pubblicare il suo capolavoro e, lasciando nel 1541 la Warmia, porta con sé copia del manoscritto. Già nella primavera del 1542 esce a Wittenberg un estratto del libro primo (la parte sulla trigonometria piana e sferica) col titolo *De lateribus et angulis triangulorum*. L'opera completa doveva essere tuttavia pubblicata dall'editore Petreio di Norimberga; e non potendo occuparsene il retico, la cura fu affidata ad Andrea Osiander, che in una lettera a Copernico del 20 giugno 1541 aveva chiesto all'astronomo di presentare la sua teoria come un'ipotesi matematica. Ma Copernico rifiuta e nell'introduzione-dedica al papa Paolo III, inviata al tipografo nel giugno del 1542, fa chiaramente trasparire la sua convinzione circa la realtà cosmologica del suo sistema.
- 1543 - L'opera appare tuttavia a Norimberga nella primavera del 1543 con un'introduzione anonima di Osiander che presenta l'eliocentrismo come semplice ipotesi per semplificare i calcoli e priva di realtà fisica. Il titolo *De revolutionibus* venne inoltre completato ad arbitrio con l'aggiunta delle parole *orbium coelestium*. Secondo la tradizione, il primo esemplare dell'*editio princeps* fu subito spedito a Frombork, ove giunse il 24

maggio del 1543, lo stesso giorno in cui Copernico, già da molto tempo privo di lucidità e malato, spirò per una emorragia. Le sue spoglie furono tumulate nella cattedrale di Frombork.

4.7 - Biografia di Ticho Brahe^{1),2),3)}

La Scania (in svedese Scåne) é una delle 21 contee della Svezia con capitale Malmö. Essa si trova nell'estremità sud-occidentale della Svezia e confina con il mar Baltico a sud e a est e con lo stretto di Öresund, fra la Svezia e l'isola Sjlland (Selandia) dove si trova la città di Copenaghen, ad ovest (c'è un ponte sullo stretto di Öresund lungo 16 km; il treno che collega Malmö a Copenaghen, attraverso il ponte, impiega circa quaranta minuti). Prima del 1658 apparteneva alla Danimarca.

Alla fine della guerra danese-svedese del 1657-1658, in seguito al trattato di Roskilde del 1658, la Scania passò alla Svezia.

Nel comune di Svalöv (45 km a nord di Malmö) nella Scania esiste un castello chiamato "castello di Knutstorps borg". Nel sedicesimo secolo il castello era diventato una solida residenza gentilizia, sede ancestrale della nobile famiglia dei Brahe. **Qui il 14 dicembre del 1546 nacque Ticho Brahe** da Beate Bille moglie del cavaliere danese Otte Brahe. Egli fu il sopravvissuto di due gemelli e fu battezzato Tyge; in seguito avrebbe latinizzato il suo nome in Tycho (in lingua italiana Ticone). Quando aveva due anni di età, i suoi giovani zii, Jørgen Brahe e Inger Oxe lo rapirono dal castello dei suoi genitori e lo portarono nella loro roccaforte di Tostrup nel nord della Danimarca. Dai documenti e dal modo in cui il Tycho maturo comprese questo fatto bizzarro della sua infanzia, non risulta che ci siano state violente proteste da parte di sua madre o di suo padre, o divisioni in famiglia, né alcuno scandalo e alcun tentativo di riprendersi il bambino. Tycho avrebbe scritto semplicemente che lo zio Jørgen "senza che i miei genitori ne fossero a conoscenza, mi portò via mentre ero nella primissima infanzia". Pare che questo fosse tutto ciò che Tycho sapeva. Gli avi di Tyge erano stati per generazioni signori feudali importanti che avevano servito il re di Danimarca con grande abilità e lealtà. Gli avi di Tyge, nella linea paterna, erano sempre stati cavalieri, perfettamente a loro agio negli ambienti militari della corte danese. Il nonno di Tyge era stato fra i primi aristocratici danesi a rifiutare il cattolicesimo, e fra il 1530 e il 1540, durante la riforma in Danimarca, aveva sostenuto con efficacia il re luterano Cristiano III che fu incoronato nel 1537.

Nel 1552 Jørgen fu preposto al comando del castello di Vordingborg, una gigantesca roccaforte medievale sulla costa sud della Selandia (Sjaelland). Tyge aveva quasi sei anni. Poco dopo il trasferimento a Vordingborg, Tyge doveva cominciare la sua istruzione formale. Egli scrisse, in seguito, di essere stato "mandato a scuola di grammatica nel suo settimo anno" e di avere continuato gli studi elementari fino all'età di circa 12 anni, probabilmente in una scuola della cattedrale vicina al castello. Egli studiava grammatica latina e religione, un pò di musica e teatro, e forse greco e matematica elementare. A dodici anni, età in cui a quei tempi non era raro che avessero inizio gli studi universitari, Tyge si allontanò ancora di più da casa per proseguire la sua istruzione all'Università di Copenaghen che era una delle più importanti d'Europa. Potrebbe essersi immatricolato il 19

¹⁾ Kitty Ferguson (Traduzione di Libero Sosio): L'uomo dal naso d'oro - Longanesi & C., 2003.

²⁾ Giacomo Leopardi: Storia della Astronomia dalla sua origine fino all'anno MDCC-CXIII - La Coda di Paglia, 2014, pag.248.

³⁾ Francesco Ongaro: L'uomo che cambiò i cieli - Cairo Editore, 2007, pag.71 e pag.141.

aprile 1559.

Gli studenti universitari stavano a pensione a casa di professori, anzichè di vescovi o di ecclesiastici come alle scuole elementari. Il professore che teneva studenti in pensione sorvegliava anche le letture e la frequenza dei corsi. Oltre allo studio del greco, e forse anche di un pò di ebraico, Tyge acquisì un'istruzione classica, con particolare riguardo alla logica, alla retorica, alla dialettica e all'oratoria, discipline considerate tradizionalmente utili per un giovane che intendeva seguire i suoi avi nei ranghi dell'élite dominante. In università luterane come quella di Copenaghen l'istruzione andava però oltre queste discipline, grazie in gran parte all'influente seguace e amico di Martin Lutero, Filippo Melanctone, teologo e astrologo tedesco (in tedesco Philipp Melanchthon). Questi credeva che la Chiesa potesse riuscire nella sua missione di insegnare la via della salvezza solo se avesse assegnato un'importanza prioritaria all'istruzione. Egli introdusse lo studio dell'aritmetica e della geometria perchè aiutavano a capire l'astronomia considerata la più celeste delle Scienze. Uno dei principali motivi per studiare astronomia e per formare nuovi astronomi era quello di migliorare gli oroscopi. Anche se il suo maestro Martin Lutero disprezzava tali idee, Melanchthon, come altre persone istruite del tempo, pensava che la sorte degli esseri umani fosse strettamente connessa alle stelle e ai pianeti. Fu in un'atmosfera di così vaste ambizioni intellettuali che prese forma l'interesse di Brahe (e di Keplero poi) per l'astronomia.

ECLISSE - L'evento che accese nel tredicesimo Tyge la passione per questa scienza, per la quale provava già un certo interesse, fu un'eclisse di Sole che egli vide il 21 agosto 1560. Egli riguardò l'Astronomia come una **Scienza Divina** e desiderò grandemente di apprenderla.²⁾

Tycho festeggiò il suo quindicesimo compleanno nel dicembre del 1561. Dopo aver frequentato l'università per tre anni era venuto il momento di passare ad una nuova fase della sua istruzione. Per tradizione familiare fu mandato all'estero per frequentare l'università. I suoi zii Jørgen e Inger scelsero l'università di Lipsia in Sassonia, una delle più grandi e prestigiose università europee. La lingua che si parlava allora in tale regione tedesca era quella parlata anche alla corte danese, una forma "pura" dell'alto tedesco. Un quindicesimo non veniva mandato all'estero da solo. Jørgen e Inger scelsero con cura il "prelettore" di Tycho nella persona di Anders Sørensen Vedel. Vedel aveva quattro anni più di Tycho, veniva da una rispettabile famiglia borghese e aveva ottenuto ottimi risultati all'università di Copenaghen. Tycho e Vedel lasciarono la Danimarca il 14 febbraio 1562. Il viaggio durò cinque giorni prima per nave attraverso il Baltico e poi a cavallo lungo le strade che costeggiavano il fiume Elba. A Lipsia Tycho studiò lingue classiche e cultura classica. Le lezioni venivano tenute in latino, come in tutte le università europee. Egli vi continuò anche, dapprima clandestinamente, lo studio dell'astronomia. Egli, in seguito, scrisse di avervi "comprato in segreto libri di astronomia" e di averli "letti di nascosto".

Tredici secoli dopo Tolomeo, sia Copernico, sia Tycho Brahe, osservavano il cielo a occhio nudo, essendo vissuti anch'essi prima dell'introduzione del telescopio. Per gli antichi astronomi il modo migliore per descrivere e spiegare quel che vedevano in cielo a occhio nudo è di pensare che la Terra si trovi al centro e che l'intero cielo ruoti intorno ad essa. Questo modo di concepire le cose funziona ancora mirabilmente ai fini della navigazione. Osservando con grande attenzione il cielo per un certo periodo di tempo,

si notano delle anomalie. Tali anomalie non sfuggirono agli antichi astronomi, che però, nonostante fossero abbastanza significative e costanti da far rifiutare del tutto la visione geocentrica dell'universo per cercare un'altra concezione, ritennero più ragionevole tentare di spiegarle nell'ambito di un sistema geocentrico, come abbiamo scritto nell'introduzione del libro.

Tycho studiò le costellazioni sulle carte celesti disegnate da Albrecht Dürer.⁴⁾ Cominciò a registrare il moto dei pianeti usando un metodo approssimativo consistente nello allineare un pianeta e due stelle e segnando poi le posizioni del pianeta sulla base delle posizioni delle due stelle su un piccolo globo celeste che possedeva allora "non più grande di un pugno". Per quanto imperfetto fosse inevitabilmente questo metodo, Tycho riuscì tuttavia a giungere a una conclusione che lo impressionò moltissimo. Né le *Tavole alfonsine*,⁵⁾ che erano state calcolate nel Duecento usando il modello geocentrico di Tolomeo, né le *Tavole pruteniche*,⁶⁾ fondate sull'astronomia eliocentrica di Copernico e compilate molto più recentemente, erano affidabili nelle loro previsioni circa le posizioni dei pianeti.

Quando nell'agosto del 1563, nella seconda estate del suo soggiorno a Lipsia, il sedicenne Tycho cominciò a tenere conto delle sue osservazioni astronomiche, la prima fu una osservazione di Marte, e la seconda una congiunzione geocentrica dei pianeti Giove e Saturno che si verifica ogni venti anni. Osservando la congiunzione, Tycho trovò in errore tanto la predizione fondata su Tolomeo quanto quella fondata su Copernico. Le tavole Copernicane superarono la prova leggermente meglio di quelle di Tolomeo, che erano sbagliate di un mese intero.

Tycho continuò a registrare le sue osservazioni. Nel maggio del 1565 Tycho e Vedel tornarono in patria e trovarono la Danimarca in guerra contro la Svezia. Sbarcato a Copenaghen, Tycho continuò il suo viaggio fino al Knutstorps Borg, facendo osservazioni e registrando la latitudine a ogni sosta fatta durante il viaggio. Il patrigno di Tycho per salvare il re caduto in acqua morì e Tycho avrebbe dovuto ereditare le grandi ricchezze, purtroppo l'iter burocratico per l'adozione non era stato completato e Tycho non essendo ancor maggiorenne fu affidato ai genitori naturali.

Tycho lasciò di nuovo la Danimarca l'anno dopo nella primavera del 1566. Convinse suo padre a lasciargli continuare la sua istruzione all'estero. Questa volta Tycho andò a

⁴⁾ Albrecht Dürer (Norimberga, 21 maggio 1471 - Norimberga, 5 aprile 1528): Pittore di splendide xilografie del cielo boreale e australe che costituiranno il modello di riferimento per molte mappe e globi celesti del Cinquecento, 1515, Firenze, Gabinetto Disegni e Stampe degli Uffizi.

⁵⁾ Le Tavole alfonsine sono tavole astronomiche in grado di fornire le posizioni del Sole e delle altre stelle e dei pianeti e le date delle eclissi. La compilazione delle tavole fu organizzata dal re Alfonso X di Castiglia e León ed effettuata da circa cinquanta astronomi a Toledo intorno al 1252.

⁶⁾ Tavole astronomiche pubblicate nel 1551 dall'astronomo Erasmus Reinhold. Sono anche note come Tavole prussiane (pruteniche) in onore di Alberto I, Duca di Prussia, che sostenne Reinhold e finanziò la pubblicazione. Reinhold calcolò questa nuova serie di tavole astronomiche basandosi sul *De revolutionibus orbium coelestium* di Niccolò Copernico, epocale esposizione dell'eliocentrismo copernicano pubblicata nel 1543.

Württemberg, dove Anders Vedel stava già preparandosi per conseguire il diploma di *magister artium*. Cinque mesi dopo l'arrivo i Tycho, Württemberg fu colpita da una epidemia e la maggior parte degli studenti fuggì. Tycho si spostò nella cittadina universitaria più settentrionale di Rostock, dove cominciò gli studi in settembre.

Il 10 dicembre Tycho era ospite ad una festa di fidanzamento. Durante il ballo gli accadde di litigare con uno studente danese aristocratico, suo cugino in terzo grado, Manderup Parsberg. La controversia potrebbe essere stata provocata da qualche motivo futile, come una sfortunata predizione astrologica fatta da Brahe quell'autunno. Il 28 ottobre c'era stata un'eclisse di Luna, che secondo Brahe poteva preannunciare la morte del sultano turco Solimano il Magnifico. Con un gusto per il dramma e la poesia che lo avrebbe sempre caratterizzato, Tycho compose una poesia latina che annunciava la sua predizione. Poi arrivò la notizia che il sultano era già morto da sei mesi. Il 29 dicembre Tycho e Parsberg furono di nuovo ai ferri corti e un fendente dello spadone di Parsberg aveva tranciato a Tycho gran parte del naso e per poco non gli era stato fatale. Quando tornò in Danimarca in aprile sperimentò un modo per sostituire il suo naso con una protesi artificiale. Egli conseguì un certo successo nel mescolare insieme oro e argento fusi per ottenere il colore della carne, o nell'uso del rame per una protesi da usare tutti i giorni. Egli fissava il naso finto con una pomata adesiva, che portava sempre con sé in una scatoletta. Nel 1901, tuttavia, all'apertura della tomba di Brahe, furono esaminati i suoi resti, e la cavità nasale era bordata di verde, segno di presenza di rame e non di argento o di oro. Nel dicembre successivo (1567), Tycho ritornò a Rostock.

A Tycho piaceva la vita universitaria, ma in essa non c'era alcun futuro, in quanto la maggior parte delle posizioni nelle università era preclusa ai nobili. C'era, però, un'altra possibilità: il canonicato. In Danimarca e Norvegia, anche dopo il passaggio al luteranesimo, le cattedrali conservavano le loro ricche proprietà terriere. Gli amministratori conferivano la posizione di "*canonici*" dei capitoli (collegi) di tali cattedrali sia a funzionari governativi sia a uomini di cultura. Potevano accedere alla carica di canonico, che comportava una prebenda attinta alla dotazione del capitolo, sia cittadini comuni sia nobili. Per diventare canonico luterano non si richiedeva di prendere gli ordini, di vivere nei locali della canonica annessa alla cattedrale o di condurre uno stile di vita meno secolare. Era una soluzione ideale per chi volesse fare carriera come astronomo e come studioso. C'era un ottimo precedente: Niccolò Copernico era stato canonico del capitolo di una cattedrale. Il 14 maggio 1568 Tycho fu designato dai reali a subentrare, appena il posto di canonico si fosse reso vacante, nel capitolo della cattedrale di Roskilde.

A Rostock Tycho trovò un eccellente ambiente per le sue osservazioni astronomiche ed egli trovò tempo anche per i suoi nuovi interessi di alchimia medica. In settembre dopo aver girovagato per l'Europa arrivò a Basilea dove si immatricolò all'università. Successivamente si recò nella cittadina tedesca di Friburgo in Brisgovia, dove fu impressionato di alcuni modelli planetari secondo le teorie di Tolomeo e di Copernico. Continuando ancora a viaggiare si rese conto che dopo nove anni di università aveva imparato tutto quello che poteva dai professori e dai libri. Era venuto il momento di impegnarsi in un lavoro più indipendente, e di progettare e costruire i propri strumenti di osservazione. Nella primavera del 1569 Tycho arrivò nella bella e antica città imperiale di Augusta (Germania) che trovò molto più congeniale delle altre città in cui era stato in precedenza tanto che vi si

fermò per 14 mesi. Fu ad Augusta che cominciò a dedicarsi seriamente a migliorare i suoi strumenti.

Il primo strumento fu un nuovo sestante in forma di compasso. Esso veniva usato per misurare la distanza angolare fra due stelle, ovvero fra un pianeta o una cometa e una stella vicina. Ad Augusta Tycho incontrò casualmente Paul Hainzel che si interessò al progetto di Tycho di costruire nuovi strumenti e si offrì di sostenerne i costi. Tycho cominciò a lavorare ad un nuovo progetto e assunse gli artigiani necessari alla sua costruzione. Il nuovo strumento denominati "*Quadrans Maximus*" fu completato in un mese e fu il quadrante più grande progettato da Tycho; alto sei metri, richiese quaranta uomini per montarlo nella proprietà di Hainzel, subito fuori Augusta (fig.4.7-1, "*Quadrans Maximus Qualem Olim Prope Augustam Vindellicorum*", tratta dal libro di Tycho: *Astronomiae instauratae Mechanica*, pag.55).

QUADRANS MAXIMUS



fig.4.7-1

Nel maggio del 1571 morì il padre naturale di Tycho. Egli rimase vicino casa a Herrevad nella Scania a pochi chilometri da Knupstorp e nel 1572 sposò Kirsten Jørgensdatter.

Una lapide su un muro a Herrevad commemora un evento astronomico che, più avanti nel corso dello stesso anno, avrebbe anch'esso contribuito a dare a Tycho una forte spinta verso quel futuro. La lapide recita:

"QUI TYCHO BRAHE, LA SERA DELL'11 NOVEMBRE DEL 1572, SCOPRÌ UNA NUOVA STELLA".

Era un limpida sera d'autunno, dopo vari giorni di cielo coperto, Tycho, che il mese successivo avrebbe compiuto ventisei anni, stava tornando a casa per la cena dal suo laboratorio di alchimia. Nel cielo che si stava oscurando, il suo sguardo fu colpito da una stella che non aveva mai visto prima, vicina alle tre stelle che formano la metà della **W** della costellazione di Cassiopea. Si fermò stupito, trattenendo il respiro. *"Sapevo perfettamente - poichè fin dalla mia giovinezza conosco tutte le stelle del cielo, cosa che si può imparare senza difficoltà - che nessuna stella era mai esistita prima in quella posizione"*, scrisse Tycho, *"neppure la più piccola, per non parlare di una stella di tale splendore. Era più luminosa di qualsiasi altra stella o pianeta in cielo. Quando finalmente fui convinto che nessuna stella come quella aveva mai brillato prima, fui condotto in tale perplessità dall'incredibilità della cosa da cominciare a dubitare dei miei occhi, e così, rivolto ai servi che mi accompagnavano, domandai loro se essi pure vedessero una stella estremamente luminosa nella posizione che indicai. Immediatamente risposero ad una voce che la vedevano certamente e che era estremamente brillante. Ma, nonostante la loro conferma, rimanendo ancora nel dubbio a causa della novità della cosa, indagai con alcuni contadini, che per caso stavano passando su dei carri, se potessero vedere una certa stella lassù. Ed essi gridarono che vedevano un'enorme stella, che mai avevano vista là in alto"*.

Costellazione di Cassiopea

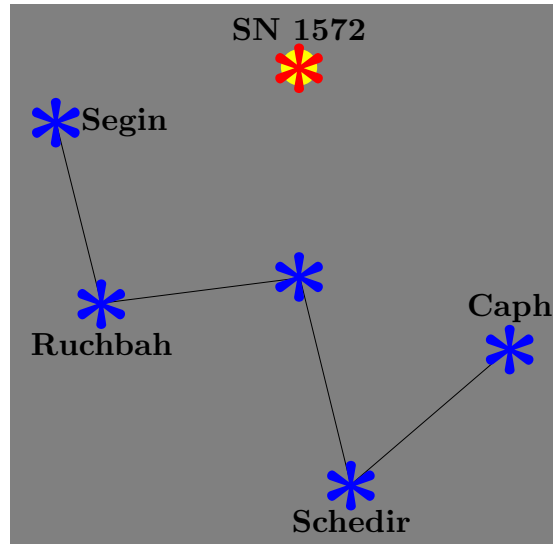


fig.4.7-2

Tycho si rese conto che la stella, lontana dalla fascia zodiacale non poteva essere un pianeta, e pur non avendo mai visto una cometa sapeva dalle letture, che una cometa, diversamente dalla "nuova stella" ha una coda e un aspetto nebuloso. Per esserne certo Tycho osservò la nuova stella per varie notti senza riuscire a discernere alcun mutamento

di posizione. Non era dunque una cometa. Nel 1573 Tycho pubblicò il libro "De Nova et Nullius Aevi Memoria Prius Visa Stella" (Sulla stella nuova e mai vista prima) che fu un punto di svolta importante, dove per la prima volta veniva usata la parola nova (nuova) stella, proprio per descrivere oggetti in grado di apparire nel cielo all'improvviso, come se fossero stelle nuove (oggi sappiamo che era una supernova denominata supernova di Tycho). Nell'estate e autunno del 1573 Tycho fece poche osservazioni, anche a causa degli impegni legati alla pubblicazione del manoscritto. All'inizio di dicembre, però, lui e la sorella Sophie, che aveva quattordici anni, osservarono un'eclisse di luna e scoprirono che alcune correzioni da lui apportate alle *Tavole Pruteniche* (copernicane) per predire quanto si sarebbe verificata esattamente l'eclisse avevano dato un esito ancora migliore di quanto egli avesse sperato. "Non riesco a meravigliarmi abbastanza del fatto che a soli ventisei anni, e senza l'aiuto di un gran numero di osservazioni accurate dei moti del Sole e della Luna, sia riuscito ad ottenere risultati così esatti", esultò Tycho, con un tono di disinvolta autoammirazione.

QUADRANS MINOR



fig.4.7-3

Tycho e Sophie osservarono l'eclisse da Herrvad con un elegante quadrante nuovo

(fig.4.7-3, "Quadrans Minor", tratta dal libro di Tycho: *Astronomiae instauratae Mechanica*, pag.17) costruito su ordinazione da specialisti di Copenaghen.

Il 10 ottobre del 1573 Kirsten diede alla luce una bambina, che fu chiamata Kirsten come la madre.

Nell'estate del 1574 Tycho si trasferì a Copenaghen. In seguito alla pubblicazione del suo libro "*De Stella Nova*" egli divenne una autorità in Astronomia e gli fu affidato un corso di lezioni all'Università, anche se non aveva mai conseguito il titolo di *magister artium*. Egli trattò le teorie del Sole e della Luna secondo i parametri di Copernico e fornì copie di parti delle Tavole pruteniche per coloro che non potevano permettersi di comprarle. Tycho però non aveva rifiutato l'astronomia tolemaica per convertirsi al copernicanesimo. Egli esplorò la possibilità che la teoria copernicana potesse essere interpretata in modo tale da contemplare l'immobilità della Terra.

Nella primavera del 1575 quando venne finalmente risolta la questione dell'eredità del padre di Tycho, egli poté disporre di una rendita annua di circa 650 talleri, circa il doppio di uno stipendio annuo di un professore anziano dell'università di Copenaghen. Tycho si dimise da professore e decise di andare di nuovo all'estero. Kirsten rimase a casa in Danimarca. In realtà egli cercava un luogo in cui stabilirsi per realizzare i suoi interessi scientifici nel migliore dei modi rispetto a Herrevad. Prima tappa Kassel sull'Assia settentrionale dove Guglielmo IV condivideva il suo interesse per l'Astronomia. Successivamente proseguì per Francoforte dove visitò la famosa fiera libraria che si tiene ancora oggi. Proseguì poi verso sud e rivisitò Basilea. Da Basilea scese verso sud, giungendo infine a Venezia, trent'anni prima che Galileo vi stupisse il doge e il senato con la presentazione del cannocchiale. Alla fine dell'estate, prima che la neve chiudesse i valichi alpini, Tycho riprese la via del nord e fece la sua scelta: si sarebbe stabilito a Basilea. Alla fine di dicembre del 1575 tornò in Danimarca e si preparava a liquidare i suoi beni per trasferirsi a Basilea. Tycho riferì a re Federico della sua visita a Guglielmo IV a Kassel e gli descrisse in termini entusiastici questo sovrano che si circondava di studenti e artisti. Il re ricevette Tycho con straordinaria benevolenza e gli offrì un feudo anzi di sceglierne uno fra quattro. Tycho sorprese il re non accettando nessuno di importanti castelli e importanti feudi reali. Il re si preparò a fare a Tycho un'offerta che non avrebbe potuto rifiutare. Lo convocò e gli disse che mentre guardava il mare da una delle finestre gli era caduto lo sguardo sull'isola di Hven un bel luogo isolato che non era sta assegnato in feudo ad alcun nobile e che comportava solo minimi obblighi amministrativi. Federico II avrebbe fatto costruire un istituto di ricerca che poteva indurre Tycho a restare e con il suo lavoro ad Hven avrebbe onorato lui, ma anche il suo re e il suo paese. Il 18 febbraio, sei giorni dopo l'offerta di re Federico, Tycho promise fedeltà alla corona di Danimarca e cominciò a ricevere la sua pensione reale che raddoppiò quasi il suo reddito annuo.

HVEN ISLAND - Il 23 Maggio 1576 Federico II concesse formalmente l'isola a Tycho.

L'isola veniva concessa come feudo per tutta la vita a Tycho Brahe di Knutstorp "*perchè la possenga, ne goda, la usi e detenga per tutta la sua vita, e finchè vivrà e vorrà continuare e perseguire i suoi studia mathematica*". Si chiedeva a Tycho di "*osservare la legge e i diritti dei contadini, e non far loro ingiustizia contro la legge, né gravarli di nuovi obblighi o altre innovazioni non consuetudinari*".

Tycho trascorse gran parte dell'inizio dell'estate del 1576 a riflettere sul sito che aveva scelto per il suo palazzo, misurandolo a passi, studiando teoria architettonica, meditando su progetti. Durante il suo recente soggiorno a Venezia e sulla terraferma veneta ebbe l'opportunità di familiarizzarsi con l'architettura di Andrea Palladio. Egli costruì il suo palazzo seguendo la simmetria palladiana. In quell'autunno, per un'epidemia in Scania, morì la figlia maggiore di Tycho, di quasi tre anni. Egli fece trasferire la moglie e la figlia più piccola in una regione remota più a nord sulla costa orientale dell'Øresund. Egli cominciò a compiere osservazioni sistematiche da Hven. Da dieci a quindici volte al mese usciva a mezzogiorno per osservare il Sole o di sera per determinare la posizione dei pianeti.

ISOLA DI HVEN (VEN)



fig.4.7-4

COMETA - Nelle prime ore della sera di mercoledì 13 Novembre del 1577, al calar del crepuscolo, Tycho stava pescando in uno dei suoi nuovi laghetti artificiali quando guardando il cielo verso occidente, i suoi occhi furono attratti da una stella eccezionalmente brillante. L'unico pianeta presente nel cielo della sera a quell'epoca era Saturno, che però non era mai così splendente. Tycho guardava pietrificato il nuovo oggetto celeste. Mentre

il cielo continuava ad oscurare, la stella sviluppò una lunga coda fiammeggiante. Era una cometa! Dopo la scoperta della nova, cinque anni prima, Tycho aveva sempre ardentemente desiderato di vedere una cometa.

Ticone sostenne che le comete sono veri pianeti, il che era stato già detto dal famoso Apollonio Mindio, da Ippocrate di Chio, da Eschilo, da Artemidoro e da altri e che i cieli al di là della luna sono pieni di una materia sommamente sottile. Egli sottomise di più al calcolo le rifrazioni astronomiche, e fece importanti scoperte intorno al moto della luna.²⁾

Il castello fatto costruire da Tycho, dal 1576 al 1580, fu chiamato Uraniborg in onore di Urania, Musa dell'Astronomia. È stato l'ultimo osservatorio europeo costruito senza il telescopio come elemento-fulcro della costruzione. La prima pietra fu posata l'8 agosto 1576. Esso sorgeva al centro di un quadrato perfetto delimitato da bastioni e terrapieni. Dentro il quadrato altri quadrati più piccoli con frutteti, orti e aiuole fiorite, e poi ancora un grande spazio circolare al centro del quale si elevava il palazzo³⁾ (fig.4.7-5, "Castello di Uraniborg", tratta dal libro di Tycho: *Astronomiae instauratae Mechanica*, pag.85).

CASTELLO DI URANIBORG



fig.4.7-5

Pur tenendo ferma la tesi dell'immobilità della Terra, Tycho non accettò il sistema

tolemaico. In tre lettere scritte nel 1587-1589 dice di essere stato indotto ad abbandonare Tolomeo quando si accorse, in seguito a osservazioni mattutine e serali di Marte in opposizione (tra il novembre 1582 e l'aprile 1583), che questo pianeta era più vicino alla Terra del Sole, mentre secondo Tolomeo dovrebbe essere più lontano. Le numerose osservazioni dei pianeti compiute da Tycho erano destinate a dare, nelle mani di Keplero, l'ultimo tocco all'opera di Copernico, rivelando la vera natura delle orbite planetarie.⁷⁾

La fama di Uraniborg portava sull'isola nuvi studenti, che si aggregavano ai gruppi di ricerca e si trattenevano per settimane, mesi o anni. Visitatori eccellenti giungevano da ogni paese d'Europa, gli studiosi delle università più rinomate mantenevano contatti epistolari con Tycho. Si scambiavano informazioni, suggerimenti, libri; le nuove conoscenze viaggiavano per il mondo più veloci dei loro scopritori.³⁾

Tycho, applicato nei suoi travagli astronomici, consacrato interamente alle scienze, non poteva non chiamare sopra di sé gli sguardi di tutti i dotti. Questi di fatto si portavano presso di lui per consultarlo, mentre i grandi lo visitavano per vedere un raro esempio di amore alle scienze. Nel 1590 Giacomo IV re di Scozia, andato per prendere in isposa la sorella del re di Danimarca, volle con tutta la corte visitare Tycho. Quest'uomo immortale resosi l'oggetto dell'ammirazione di tutta l'Europa, non andò esente dall'invidia, sempre nemica della virtù. Egli occupato nei suoi travagli, intento a sollevarsi sopra se stesso con la contemplazione del cielo, a beneficiare i suoi simili con le chimiche applicazioni e con il dispensare gratuitamente delle medicine, era felice. La sua felicità dispiacque ai cattivi, la loro mente agitata non potè sopportare la sua pace. Morto il re suo protettore nel 1588, la barbarie dei suoi nemici giunse a proibirgli perfino i lavori astronomici e chimici. Tycho abbandonò finalmente la sua patria ingrata. Tutti lo accolsero come uomo raro, vittima della proprio virtù, la quale aveva suscitata l'invidia dei malvagi. Egli per le vive istanze dell'imperatore Rodolfo II si ritirò a Praga, ma dopo quattro anni, dacchè era partito dalla diletta sua isola, morì il 24 di ottobre del 1601 in età di anni 55. È sepolto a Praga nella chiesa di Santa Maria di Týn.²⁾

Le opere principali di Tycho includono *De Nova et Nullius Aevi Memoria Prius Visa Stella* ("Sulla stella nuova e mai vista prima") (Copenaghen, 1573); *De Mundi Aetherei Recentioribus Phaenomenis* ("Riguardo ai nuovi fenomeni nel Mondo etereo") (Uraniburg, 1588); *Astronomiae Instauratae Mechanica* ("Strumenti per l'astronomia restaurata") (Wandsbeck, 1598; inglese tr. Copenaghen, 1946); *Astronomiae Instauratae Progymnasmata* ("Introduttiva Esercizi verso un'astronomia restaurata") (Praga 1602). Le sue osservazioni non sono state pubblicate durante la sua vita. Johannes Kepler li ha usati ma loro rimasero di proprietà dei suoi eredi. Diverse copie in manoscritto circolarono in Europa per molti anni, e una versione molto difettosa fu stampata nel 1666. A Praga, Tycho ha assunto Johannes Kepler come assistente per calcolare le orbite planetarie dalle sue osservazioni. Keplero pubblicò le *Tabulae Rudolphinae* nel 1627. A causa delle accurate osservazioni di Tycho e dell'astronomia ellittica di Keplero, queste tabelle erano molto più accurate di qualsiasi precedente tabella.

I contributi di Tycho Brahe all'astronomia furono enormi. Lui non solo progettò e costruì strumenti, li ha anche calibrati e controllati con precisione periodicamente.

⁷⁾ John Louis Emil Dreyer: *Storia dell'Astronomia da Talete a Keplero*, Casa Editrice Odoya, Bologna, 2016, pagg. 294÷300.

Rivoluzionò così l'astronomia strumentale. Ha anche cambiato profondamente la pratica osservativa. Mentre i primi astronomi si erano accontentati di osservare le posizioni dei pianeti e della Luna in alcuni punti importanti delle loro orbite (ad esempio, opposizione, quadratura), Tycho e il suo cast di assistenti ha osservato questi corpi durante le loro orbite. Di conseguenza, un numero di anomalie orbitali mai notate prima furono rese esplicite da Tycho. Senza queste serie complete di osservazioni di accuratezza senza precedenti, Keplero non avrebbe potuto scoprire che i pianeti si muovono su orbite ellittiche. Tycho fu anche il primo astronomo ad apportare correzioni per la rifrazione atmosferica. In generale, mentre gli astronomi precedenti hanno fatto osservazioni accurate forse di 15 minuti d'arco, quelli di Tycho erano precisi forse a 2 minuti d'arco, e che le sue migliori osservazioni erano accurate fino a circa mezzo arco minuto.

Le osservazioni di Tycho della nuova stella del 1572 e della cometa del 1577, e le sue pubblicazioni su questi fenomeni, sono state determinanti per stabilire il fatto che questi corpi erano al di sopra della Luna e che quindi i cieli non erano immutabili come aveva sostenuto Aristotele e come credevano ancora i filosofi.⁸⁾

⁸⁾ Victor E. Thoren, *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe* (Cambridge: Cambridge University Press, 2006).

4.8 - Biografia di Johannes Kepler¹⁾

Johannes Kepler nasce il 27 dicembre del 1571 a Weil der Stadt nella Svevia,²⁾ una piccola cittadina alle porte di Stoccarda appartenente all'attuale regione Baden-Württemberg del sud-ovest della Germania attraversata dalla foresta nera. L'ambiente familiare della giovinezza di Keplero è quanto di meno idilliaco si possa immaginare. Basterà ricordare parte del giudizio sul padre (un giudizio senza ombra di misericordia): *"un uomo vizioso, inflessibile, attaccabrighe, destinato ad una brutta fine, Venere e arte accrebbero la sua malizia..."* e sulla madre *"bassa, sottile, con una lingua tagliente e sempre in moto, di cattiva disposizione"*. La madre raccoglieva erbe dalle quali ricavava pozioni magiche. Aveva imparato dalla zia finita sul rogo, come sarebbe finita sul rogo lei se Keplero non avesse speso mesi e mesi, tra il 1617 ed il 1620, a preparare la difesa legale di questa donna, ancora litigiosa e sempre in cerca di guai, arrestata perchè accusata di stregoneria. Il suo autoritratto, scritto quando già era un professore, è un documento che rivela la storia di un bambino neurotico che esce da una famiglia piena di problemi, fragile fisicamente, debole spiritualmente, che assume pose aggressive ed arroganti, per nascondere le proprie vulnerabilità e che sente un bisogno dell'approvazione degli altri, un bisogno disperato di uscire dalla solitudine spirituale in cui era cresciuto. Il pezzo autobiografico mostra però anche un uomo onesto e sincero che non si commiserava, un uomo che sta per uscire dall'inferno della sua giovinezza. Un uomo che sta per trarre dai suoi tormenti passati la spinta verso il raggiungimento di mete supreme.³⁾

Nella primavera del 1575 la madre Katharina affidò Johannes che aveva tre anni e il fratellino neonato Heinrich alle cure di certi parenti e partì per seguire il marito Heinrich soldato. In sua assenza Johannes fu sul punto di morire di vaiolo, e fu probabilmente questa malattia a danneggiargli la vista. Nel 1576 il padre di Johannes trasferì la sua famiglia a **Leonberg**, località non molto lontano da Weil.⁴⁾ Fra tanti guai, traspaiono due ricordi luminosi, entrambi legati a fenomeni celesti. Johannes descrive lo stupore che prova a sei anni, nel 1577, quando la mamma lo porta in un "luogo alto" per osservare meglio una cometa. Oppure di quando, il 31 gennaio del 1580, il padre gli mostrò la sua prima eclissi di luna e di come questa si faccia lentamente tutta rossa. Sembra che l'animo del giovane Keplero, ancora ignaro del proprio destino di astronomo, fosse già predisposto a intravedere nei misteri dell'universo un modo per librarsi oltre le meschinità e le tragedie dispensate dalla vita quotidiana.⁵⁾

PRIMA SCOLARIZZAZIONE - C'era anche qualcos'altro che lo distoglieva dalla

¹⁾ Caspar Max: Kepler - Dover Publications, Inc., 1993.

²⁾ Regione storica della Germania meridionale. Fa parte del Baden-Württemberg e della Baviera. Le città principali sono Augusta e Tübingen.

³⁾ Giuseppe Colombo; Giovanni Keplero: Dalla Magia alla Scienza - Accademia Nazionale dei Lincei - Celerazioni Lincee: Giovanni Keplero, Roma, 1972, pag.9.

⁴⁾ Kitty Ferguson (Traduzione di Libero Sosio): L'uomo dal naso d'oro - Longanesi & C., 2003, pag.94.

⁵⁾ a) Anna Maria Lombardi: Keplero, una biografia scientifica, Codice Edizioni, Torino, 2020, pag.5, e b) Collana "I grandi della Scienza", Le Scienze, anno III, n.13, febbraio 2000.

sua sofferenza interiore, suscitava la sicurezza di sé e offriva nutrimento alla sua mente. Quella era la scuola. E fu per sua fortuna che, nel Württemberg, l'istruzione fosse ben sviluppata. Non solo c'erano scuole tedesche ovunque, nelle quali si imparava a leggere, scrivere e far di conto. Inoltre, dopo l'introduzione della Riforma, i duchi di Württemberg avevano disposto l'istituzione in tutte le cittadine anche di scuole di latino, per sostituire le precedenti scuole religiose e per educare una nuova generazione per il clero e per il servizio nell'amministrazione civile.

A Leonberg vi era una tale scuola, divisa in tre classi. In considerazione della importanza del latino, in quel tempo, come lingua degli studiosi e rappresentante di una cultura superiore, l'istruzione di esso era promossa con il massimo zelo, e quindi gli alunni dovevano imparare a leggere, scrivere e parlare il latino fluentemente. Questo insegnamento iniziava sin dal primo anno di frequenza scolastica. Al primo anno veniva insegnata la lettura e la scrittura. Il secondo anno era dedicato all'esercitazione grammaticale e il terzo anno alla lettura di testi classici, commedie di Terenzio in particolare, perchè da questo ci si aspettava uno speciale avanzamento nell'espressione orale.

Era in una tale scuola che Keplero aveva ormai posto le basi per la perfezione stilistica con la quale avrebbe poi potuto esprimere il suo pensiero in lingua latina. Sembra che i suoi genitori lo mandarono prima alle scuole tedesche. Non si può pretendere che abbiano compreso gli scopi della scuola latina. Tuttavia, gli insegnanti della scuola tedesca inviarono volentieri i loro talentuosi allievi alla scuola latina, al fine di spianare la loro strada verso un futuro migliore. Di conseguenza Keplero, che diede presto prova di un acuto intelletto, giunse presto all'istituzione che dovrebbe condurre a obiettivi più elevati. Entrò in prima classe all'età di sette anni. Ma passarono cinque anni prima che completasse le tre classi della sua scuola. Questo non perchè i suoi risultati fossero insufficienti, ma perchè dovette interrompere la frequenza scolastica per mesi, anche anni, a causa del trasferimento dei suoi genitori a Ellmendingen e della loro scarsa comprensione e posizione precaria. Il ragazzo era adibito a lavori agricoli pesanti e doveva provvedere a sé stesso, come meglio poteva, durante queste interruzioni.

SEMINARIO - Che ne sarebbe stato, ora, del ragazzo? La sua costituzione era troppo debole per il pesante lavoro agricolo. Il suo eccezionale talento puntava verso un obiettivo più alto. I consigli degli insegnanti, l'indole pia del fanciullo e anche la considerazione economica possono aver indotto i genitori a destinarlo al clero, scelta alla quale Johannes acconsentì sicuramente di cuore. Il percorso verso questo obiettivo era segnato e agevole. Uno studente che aveva completato la scuola di latino e aveva superato un concorso, vigilato dallo stato, veniva inviato a uno dei seminari, che preparava il suo allievo per ulteriori studi presso l'Universit di Tübingen, dove a sua volta veniva ammesso ad un collegio per gli studi teologici, questo è stato il percorso di migliaia di giovani pieni di speranza nel Württemberg fino ai nostri giorni. Tra loro non pochi si sono successivamente resi famosi in tutto il mondo. Questo percorso ha preso anche Johannes Kepler.

Il 16 ottobre del 1584, il quasi tredicenne candidato Kepler, dopo aver superato l'esame di stato, entrò nel convento-scuola di Aldelberg, che era stato istituito in un monastero dell'ordine dei premostratensi situato vicino al monte Hohenstaufen. Due anni dopo salì più in alto e il 26 settembre 1586 si trasferì nel seminario superiore, che aveva trovato sede nel monastero cistercense di Maulbroun risalente al XII-XIII secolo, famoso per

la sua costruzione artistica e il suo significato storico. Recentemente è stato dichiarato dall'UNESCO patrimonio dell'umanità.

Nel settembre 1588, Keplero superò l'esame di "baccalaureat" a Tübingen. Tuttavia, dopo questo primo passo nella terra promessa, dovette tornare a Maulbronn per un altro anno, per completare i suoi studi come "veterano". Il 17 settembre 1589, i cancelli dell'università della città sul Neckar si aprirono finalmente per lui. Aveva raggiunto la meta verso la quale, nei lunghi anni di preparazione, aveva mirato con tanta bramosia nel suo desiderio di conoscenza.

TÜBINGEN - Il seminario, chiamato Stift, che dal 1547 era ospitato nel primo monastero agostiniano, accoglieva i candidati che, assetati di conoscenza, si affollavano da tutte le parti della Svevia. Il corso di istruzione era regolato in modo tale che il nuovo arrivato doveva ascoltare lezioni nella facoltà di *arti* per due anni prima di poter iniziare lo studio della teologia. Le materie di studio sono: **etica, dialettica, retorica, greco, ebraico, astronomia e fisica**. I progressi degli studenti erano attentamente controllati; i voti venivano dati ogni trimestre. Gli studi nella facoltà di *arti* sarebbero terminati con l'esame di master. Successivamente, tre anni erano dedicati all'istruzione nelle discipline teologiche. Terminata questa formazione gli studenti erano costretti a rimanere a vita al servizio ducale e necessitavano dell'esplicito consenso del principe che aveva sostenuto le spese della loro istruzione se volevano accettare un posto in un altro paese.

Un maestro esperto ha saputo risvegliare le forze assopite, guidare i primi passi e piantare nel terreno preparato quel seme che a suo tempo doveva crescere e svilupparsi magnificamente. Era Magister Michael Maestlin,⁶⁾ il professore di matematica e astronomia.

Attraverso Maestlin, Kepler conobbe anche le idee di Copernico, l'uomo di cui sarebbe diventato il profeta. Certo, nelle sue lezioni pubbliche, così come in tutte le edizioni dell'Epitome, il professore di astronomia si schierò completamente con il sistema descritto nell'Almagesto di Tolomeo, perchè la teoria copernicana era severamente vietata tra i suoi colleghi teologi, per la sua presunta contrarietà alla Sacra Scrittura. Di conseguenza, solo con attenta moderazione e in un circolo intimo, raccontava ciò che Copernico aveva insegnato sulla struttura dell'universo.

Più tardi Keplero scrisse: *Già a Tübingen, quando seguii attentamente le lezioni del famoso Magister Michael Maestlin, mi resi conto di quanto goffa sia sotto molti aspetti la nozione finora consueta della struttura dell'universo. Perciò fui molto deliziato da Copernico, che il mio maestro molto spesso citava nelle sue lezioni, che io non solo ho ripetutamente sostenuto le sue opinioni nelle dispute dei candidati, ma ho anche svolto un'attenta discussione sulla tesi che il primo moto (la rivoluzione del cielo delle stelle fisse) risulta dalla rotazione della terra. Mi sono già messo all'opera per attribuire alla terra su basi fisiche o, se si preferisce, metafisiche, il moto del sole, come fa il Copernico su basi matematiche. A questo scopo ho raccolto per gradi - in parte dalla conferenza di Maestlin, in parte da me stesso - i vantaggi matematici che Copernico ha su Tolomeo.*

⁶⁾ Michael Maestlin: Göppingen, 30 settembre 1550 - Tübingen, 20 ottobre 1631, autore del libro "Epitome astronomiae", più volte ristampato (1582-1624), in cui professava la teoria tolemaica.

GRAZ - Gli studi teologici di Keplero dovevano concludersi durante l'anno 1594. Ma prima che ciò avvenisse, nei primi mesi di quello stesso anno, avvenne una svolta decisiva nella sua vita. La morte aveva chiamato Georg Stadius, l'insegnante di matematica del seminario protestante di Graz, capitale della provincia austriaca della Stiria.

I rappresentanti della Stiria hanno quindi chiesto al senato dell'Università di Tübingen di raccomandare un successore. Perché i governanti di Graz si sono rivolti alla lontana Tübingen? La ragione stava nell'importanza di quell'università come uno dei centri principali della vita e dell'attività della riforma. La scelta del senato cadde sul candidato Keplero. Egli rimase stupito quando gli arrivò la chiamata. Deve accettarla? Varie considerazioni lo indussero a riflettere; non poteva accettare così rapidamente. Già si era immaginato vestito da prete sul pulpito e dopo i successi ottenuti fino ad allora negli studi, poteva contare su una onorevole carriera al servizio della Chiesa.

Keplero fu inviato a Graz perchè, sulla base delle sue conoscenze matematiche e astronomiche, era di gran lunga il candidato più adatto per il posto di insegnamento lì, l'unico degno di considerazione e suscettibile di portare onore all'Università di Tübingen. Egli era completamente in pace quando lasciò Tübingen. Dopo che il duca ebbe dato il permesso alla partenza di Keplero e lo ebbe anche ricevuto, il nuovo professore di matematica si congedò dalla sua amata università il 13 marzo 1594, e iniziò il lungo viaggio verso Graz, dove arrivò l'11 aprile del 1594. A Keplero, che insieme al ruolo di insegnante di matematica aveva assunto l'incarico di "Mathematicus della provincia", non venne riservata un'accoglienza molto calorosa.

Keplero per la necessità dell'insegnamento e più ancora per quello di matematico pubblico, nella veste del quale era obbligato a compilare ogni anno il calendario, dovette occuparsi ora a fondo dell'Astronomia e allargare via via le conoscenze che aveva appreso e sviluppato con Maestlin all'Università, dove appunto accanto alle materie teologiche aveva seguito anche le discipline matematiche e l'Astronomia.

Senza che la sua natura e i suoi pensieri perdessero mai quello spirito mistico-medievale che si era radicato in lui durante gli anni di studio, questo avvenimento segnava dunque una svolta decisiva per sua vita e le sue opere, passando dagli studi teologici a quelli matematici ed astronomici.

La compilazione e la pubblicazione del calendario venivano fatte con un certo anticipo sull'anno al quale si riferiva, ma non erano soltanto i fenomeni astronomici che dovevano venire riportati, bensì anche dei pronostici di varia natura, riguardanti avvenimenti meteorologici, agricoli, bellici, pubblici, ecc. Non erano vere e proprie pratiche astrologiche, poichè Keplero non ha mai ritenuto l'Astrologia una cosa seria, e in ogni pronostico egli si teneva cautamente sulle generali e si basava su fatti del giorno.

Se in cuor suo Keplero condannava a ragione l'Astrologia dei pronostici e degli oroscopi, tuttavia egli coltivava un'Astrologia ben diversa, un'Astrologia ad un livello molto elevato; infatti la sua natura intima religiosa e mistica, che incontreremo ad ogni passo nella sua vita prodigiosa, non poteva disgiungere il mondo cosmico, il mondo intorno a noi e l'uomo stesso dall'immagine di un Ente Supremo, creatore di tutto, che egli aveva sempre davanti a sé. La sede e l'ambiente di Graz vide presto Keplero in mezzo alle contempezioni geometriche e astronomiche.

Il sistema planetario, considerato nel suo insieme, da poco diventato elio-

centrico, indusse Keplero a fissare l'attenzione e l'interesse sulla successione delle distanze planetarie dal corpo centrale. Perchè i pianeti sono proprio in numero di sei e non più né meno (allora non si conoscevano ancora i pianeti dopo Saturno) e perchè questi si dispongono con le loro traiettorie circolari a quelle determinate distanze dal Sole? Keplero ha pensato e tentato molto a questo problema prima di arrivare a risultati del tutto soddisfacenti al suo spirito inquieto, risultati che, insieme alla descrizione del faticoso cammino fatto, sono oggetto della prima grande opera il "Misterium Cosmographicum" ossia il Mistero del Mondo.⁷⁾

Opera: Misterium Cosmographicum - In questa opera egli riesce nell'intento di abbracciare e unire in un complesso omogeneo unico l'intero sistema planetario, con una ingegnosa sintesi della geometria col mondo astronomico.

SOLIDI PLATONICI

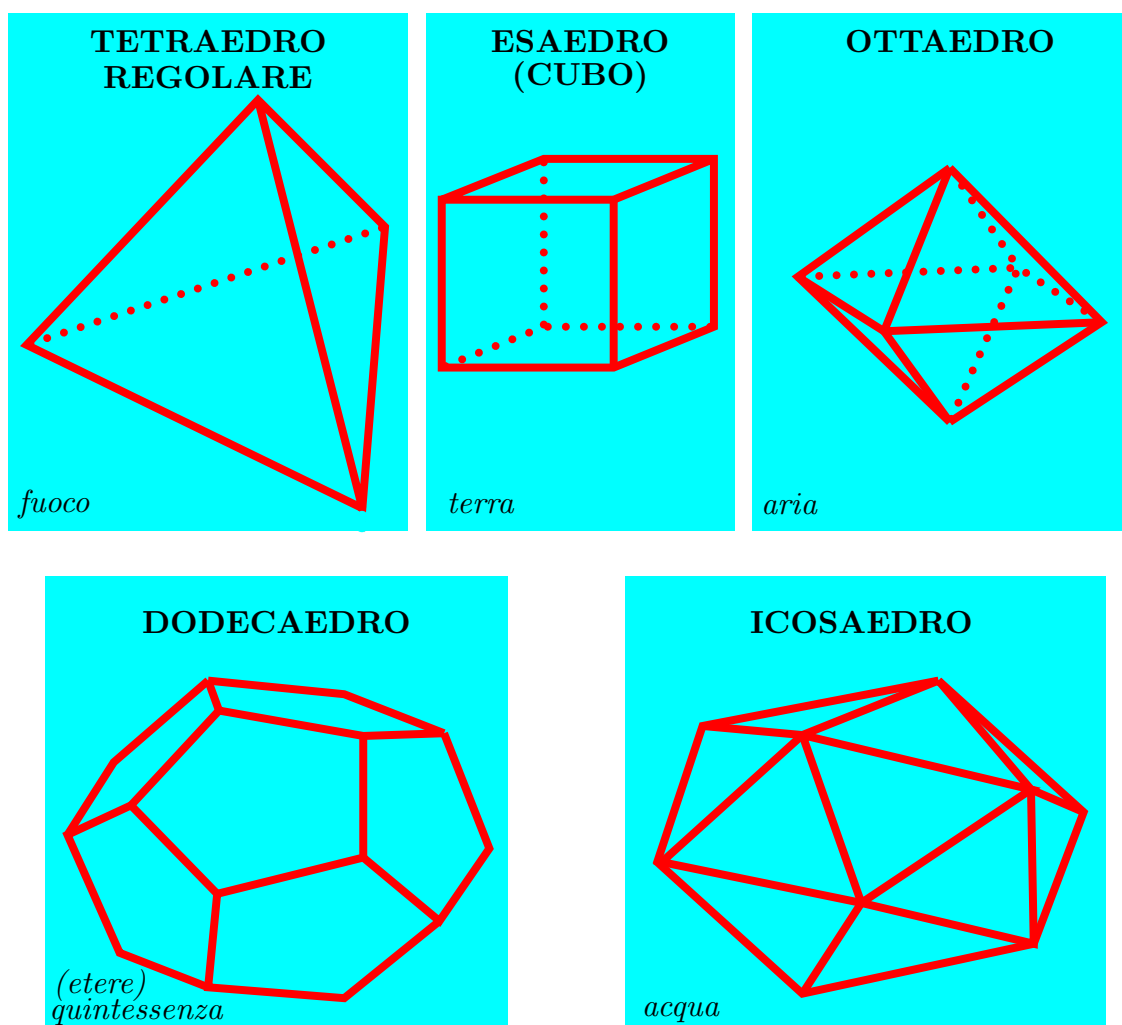


fig. 4.8-1

L'idea che che i corpi geometrici, in particolare i cinque poliedri regolari, di solito chiamati "**solidi platonici**", riportati in figura 4.8-1, avessero qualche significato cosmico,

⁷⁾ Francesco Zagar: L'opera astronomica di Giovanni Keplero - Accademia Nazionale dei Lincei - Celebrazioni Lincee: Giovanni Keplero, Roma, 1972, pag.20 ÷ 23.

venne espressa già nell'antichità da **Pitagora e Platone**,⁸⁾ nell'intuizione che **Dio** avesse basato il mondo su leggi e forme geometriche. **Platone nel suo dialogo, Timeo, associa il tetraedro, l'ottaedro, il cubo e l'icosaedro rispettivamente a quelli che erano allora ritenuti i quattro elementi fondamentali: fuoco, aria, terra e acqua. Il dodecaedro veniva invece associato all'immagine del cosmo intero, realizzando la cosiddetta "quintessenza".**

Dal Timeo di Platone⁹⁾ al §[XX], si legge:

"E prima di tutto, che fuoco e terra e acqua e aria siano corpi, è chiaro ad ognuno. Ma ogni specie di corpo ha anche profondità; e la profondità è assolutamente necessario che contenga in sé la natura del piano, e una base di superficie piana si compone di triangoli. Tutti i triangoli derivano poi da due triangoli, ciascuno dei quali ha un angolo retto e due acuti: e l'uno di questi triangoli ha da ogni parte una porzione uguale di angolo retto diviso da lati uguali, e l'altro due parti diseguali di angolo retto diviso da lati diseguali."

E ancora a pag.402, sempre al §[XX], si legge:

"... E di quattro angoli siffatti si compone la prima specie solida che può dividere l'intera sfera in parti eguali e simili (questa prima specie solida è il tetraedro regolare). La seconda poi si forma degli stessi triangoli, riuniti insieme in otto triangoli equilateri (ottaedro)...La terza specie è poi formata da centoventi triangoli solidi congiunti insieme e di dodici angoli solidi, compresi ciascuno da cinque triangoli equilateri piani, ed ha venti triangoli equilateri per base (icosaedro)...E la figura del corpo risultante (Terra) divenne cubica con una base di sei tetragoni equilateri piani. Restava una quinta combinazione e Dio se ne giovò per decorare l'universo (dodecaedro)."

Infine a pag.404-405 al §[XXI], si legge:

"... alla terra diamo la figura cubica; perchè delle quattro specie la terra è la più immobile, e dei corpi il più plasmabile... e poi all'acqua la forma meno mobile delle altre (icosaedro), al fuoco la più mobile (tetraedro), e all'aria l'intermedia (ottaedro): e così il corpo più piccolo al fuoco, il più grande all'acqua, e l'intermedio all'aria, e inoltre il più acuto al fuoco, il secondo per acutezza all'aria, e il terzo all'acqua..."

Gli antichi filosofi greci immaginarono qualche corrispondenza fra i corpi geometrici e certi fenomeni celesti, come quella, abbastanza intuitiva, tra i cinque corpi geometrici regolari e i cinque pianeti allora conosciuti, **Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno** senza tentare di ricercare il motivo o la natura, più intima di tale corrispondenza.

Al tempo di Keplero i pianeti erano saliti a sei, avendo la teoria copernicana assegnato alla Terra il suo posto fra i pianeti, e in conseguenza la corrispondenza ora detta non aveva più senso (vedi Ref.7, pag.24).

Tornando ai solidi platonici, circa un secolo dopo il Timeo un'autorevole consacrazione della loro importanza venne offerta da **Euclide**, matematico greco, autore di numerosi trattati, che operò attorno al 300 a.C. nella colonia di Alessandria, allora di recente fondazione. Egli è particolarmente noto per un'opera, gli **Elementi**, contenente quelli che

⁸⁾ Pitagora: Samos (isola greca), tra il 580 a.C. e il 570 a.C. - Metaponto (provincia di Matera, Italia), 495 a.C. circa; Platone: Atene, 428/427 a.C. - Atene, 347 a.C.

⁹⁾ Platone: Opere complete 6 Citofonte, La Repubblica, Timeo, Crizia - Biblioteca Universale Laterza, 1990, pag.400 e segg.

erano all'epoca i fondamenti della matematica (soltanto dell'aritmetica e della geometria, dato che i Greci ignoravano l'algebra), presentati in struttura assiomatica.¹⁰⁾

Il libro **Elementi** di Euclide è stato uno dei testi più influenti per lo sviluppo della mentalità scientifica occidentale. esso è costituito da XIII libri. Esaminiamo, per il nostro interesse, soltanto il libro XIII. In esso vi sono 18 proposizioni. Omettendo le primi 11, esse sono:¹¹⁾

Prop.12: Se un triangolo equilatero è inscritto in un cerchio, allora il quadrato del lato del triangolo è triplo del quadrato del raggio del cerchio.

Prop.13: Costruire e circondare con una sfera una **piramide** e dimostrare che il quadrato sul diametro della sfera è una volta e mezzo il quadrato sul lato della piramide.

Prop.14: Costruire e circondare con una sfera un **ottaedro**, come nel caso precedente, e dimostrare che il quadrato sul diametro della sfera è doppio del quadrato sul lato dell'ottaedro

Prop.15: Costruire e circondare con una sfera un **cubo**, come la piramide e dimostrare che il quadrato del diametro della sfera è triplo del quadrato del lato del cubo

Prop.16: Costruire e circondare con una sfera un **icosaedro**, come per le precedenti figure, e dimostrare che il quadrato il lato dell'icosaedro è la retta irrazionale chiamata minore.

Corollario: Il quadrato sul diametro della sfera è cinque volte il quadrato del raggio del cerchio mediante il quale è stato costruito l'icosaedro, e che il diametro della sfera è composto dal lato dell'esagono e di due dei lati del decagono inscritto nello stesso cerchio.

Prop.17: Costruire e circondare con una sfera un **dodecaedro**, come nelle predette figure e dimostrare che il lato del dodecaedro è la retta irrazionale chiamata apotome.

Corollario: Se il lato del cubo è secato nel rapporto estremo e medio, il segmento maggiore è il lato del dodecaedro.

Prop.18: Fissare e confrontare tra loro i lati delle cinque figure.

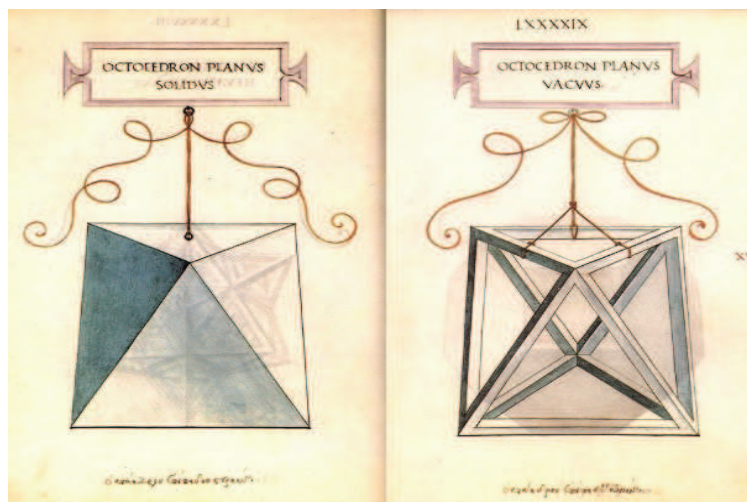
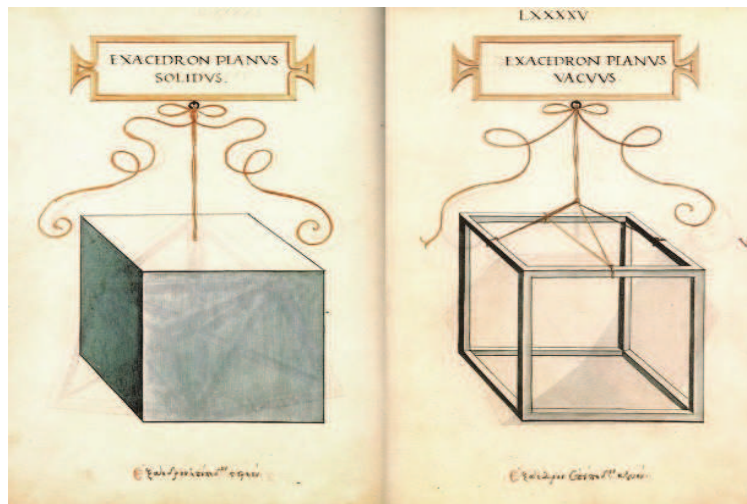
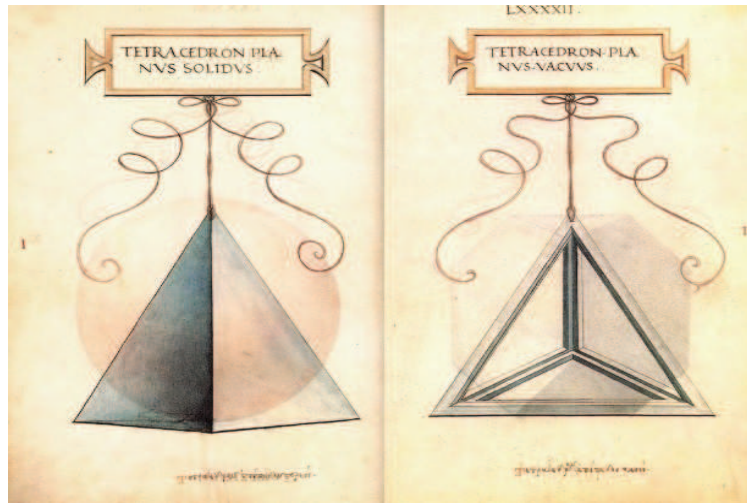
L'interesse per questi particolari tipi di solidi fu particolarmente vivo nel Rinascimento come testimonia per esempio il *De Divina proportione* di Luca Pacioli. Fu il grande **Leonardo da Vinci** a illustrare *De Divina* ideando per la rappresentazione dei solidi platonici una tecnica originale, che li immagina costituiti soltanto dagli spigoli solidi (vedi Ref.5a), pag.26). Riportiamo, di seguito, le figure di Leonardo.¹²⁾

¹⁰⁾ Enciclopedia Treccani alla voce Euclide.

¹¹⁾ Euclide: The thirteen books of the elements (3 volumi I, II, III) - Dover Publications, 1990, volume III, pag.466, e, anche, Comitato per la Edizione Nazionale delle opere di Federico Enriques: Gli elementi di Euclide e la critica antica e moderna. Libri XI-XIII, Zanichelli, Bologna,1935, pag.273 e segg.

¹²⁾ Luca Pacioli (Borgo Sansepolcro, 1445 circa - Borgo Sansepolcro, 19 giugno 1517): De Divina proportione, pagg.186÷198.

SOLIDI PLATONICI DI LEONARDO DA VINCI



SOLIDI PLATONICI DI LEONARDO DA VINCI

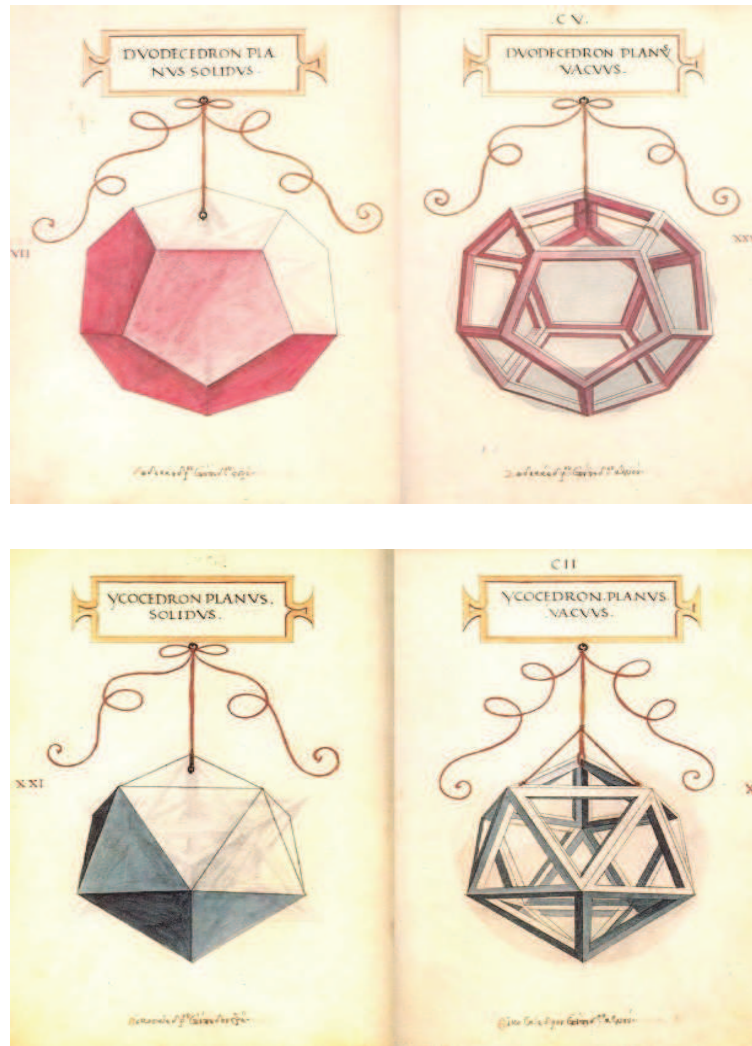


fig.4.8-2

Tornando a Keplero, ora, il suo pensiero si rivolgeva principalmente alle grandi questioni eterne, che da tempo immemorabile sono state poste all'umanità dalla meraviglia dei cieli nella loro misteriosa bellezza.

La cosmografia di Copernico, sotto l'incantesimo di cui Keplero era già stato attratto sin dai tempi di quando era studente, gli apparve con maggiore intensità. Quanto più la contemplava e quanto più si assorbiva nei suoi particolari, tanto più chiara, netta, convincente gli appariva, e tanto più luminoso si accendeva il suo entusiasmo. Il sole è stato reso il centro dell'universo. Era il suo cuore, la Regina attorno alla quale le stelle erranti, sei in numero - Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove e Saturno - si muovevano in un ritmo eternamente uniforme. La nuova dottrina offriva un vantaggio molto speciale rispetto a tutte le teorie precedenti perchè permetteva di calcolare, dalle osservazioni, le distanze relative dei pianeti dal Sole.

Consciamente o inconsciamente, i pensieri di Keplero erano connessi con tutto ciò che

aveva letto su Pitagora e Platone, su Agostino¹³⁾ e Nicolaus de Cusa¹⁴⁾ e molti altri grandi uomini del passato. Nella prima metà del 1695 era impegnato con le nuove domande che si vedeva costretto a porre alla Natura.

Cos'è il mondo, si chiese. Perché ci sono sei pianeti? Perché le loro distanze dal sole sono esattamente tali e tali? Perché si muovono più lentamente man mano che si allontanano dal Sole? Con queste domande sulle ragioni del numero, della grandezza e del movimento delle vie celesti, il giovane ricercatore della verità si avvicinava all'immagine del mondo di Copernico. Proprio come quest'ultimo aveva in una certa misura segnato i confini dell'universo, così ora Keplero cercava di dimostrare fisicamente e metafisicamente che questi confini erano il piano del Creatore, il quale nella Sua saggezza e bontà poteva creare solo un mondo bellissimo. Niente al mondo è stato creato da Dio senza un piano; questo era l'assioma principale di Keplero. La sua impresa non fu altro che scoprire quel disegno della creazione, ripensare i pensieri di Dio, perché era convinto che "proprio come un architetto umano, Dio si è avvicinato alla fondazione del mondo secondo l'ordine e la regola e così dosò ogni cosa che si potesse supporre che l'architettura non prendesse a modello la Natura, ma piuttosto che Dio avesse guardato al modo di annientare l'umano futuro". Queste domande presentano la radice del lavoro di tutta la vita di Keplero in astronomia così come rivelano il suo modo di pensare nella sua distinta individualità.

Ha cercato le risposte alle sue domande nella geometria, nella struttura dello spazio. Infatti le figure geometriche hanno il loro fondamento nell'essere divino, e di conseguenza in esse che si devono cercare i numeri e le grandezze che appaiono nel mondo visibile.

Ma quali costruzioni geometriche potevano fornire le relazioni numeriche che cercava? Ha sprecato l'intera estate in questo lavoro difficile. Alla fine, durante un'ora di insegnamento, vide la luce. **"Credo che sia stato per divina ordinanza che ho ottenuto per caso ciò che prima non potevo raggiungere con alcuna pena; Lo credo tanto più facilmente perchè avevo sempre pregato Dio che il mio piano riuscisse, se Copernico avesse detto la verità"**. Il 19 luglio 1595 - conserva per sempre il suo grande giorno registrandone la data - gli venne il pensiero: "Se, per le grandezze e le relazioni delle sei vie celesti assunte da Copernico, cinque figure possedessero certe caratteristiche distintive, allora tutto andrebbe come desiderato".

Ora, la geometria di Euclide non ci insegna già che ci sono esattamente cinque e solo cinque solidi regolari, il tetraedro [a quattro facce], il cubo [a sei facce], l'ottaedro [a 8 facce], il dodecedro [a dodici facce], l'icosaedro [a venti facce]? Questi solidi regolari non permettono forse di essere inseriti tra le sfere dei pianeti in modo tale che ogni volta la sfera di un pianeta sia circonscritta da uno dei solidi regolari che a sua volta è inscritto nella sfera del pianeta immediatamente inferiore?

¹³⁾ Aurelio Agostino d'Ippona (in latino: Aurelius Augustinus Hipponensis; Tagaste (Algeria), 13 novembre 354 Ippona (Algeria), 28 agosto 430) è stato un filosofo, vescovo e teologo romano di origine berbera e lingua latina.

¹⁴⁾ Nicholaus de Cusa (Kues (Germani), 1401 - Todi, Umbria, Italia, 11 August 1464), latinizzato come Nicolaus Cusanus fu un cardinale cattolico tedesco, filosofo, teologo, giurista e matematico.

Immediatamente scrisse la frase: **"La terra è la misura di tutte le altre orbite. Circoscriviamo un solido regolare a dodici lati [dodecaedro] attorno ad essa; la sfera tracciata attorno a questo sarà quella di Marte. Lasciamo che l'orbita di Marte sia circonscritta da un solido a quattro lati [tetraedro]. La sfera che viene tracciata attorno sarà quella di Giove. Lasciamo che l'orbita di Giove sia circonscritta da un cubo. La sfera tracciata attorno sarà quella di Saturno. Ora, posizioniamo una figura a venti facce [icosaedro] all'interno dell'orbita della terra. La sfera inscritta in questo sarà quella di Venere.**

Nell'orbita di Venere posizioniamo un ottaedro. La sfera inscritta in questo sarà quella di Mercurio. Ecco la base per il numero dei pianeti".

Saturno,
cubo,
Giove,
tetraedro,
Marte,
dodecaedro,
Terra,
icosaedro,
Venere,
ottaedro,
Mercurio.

La figura (4.8-3) disegnata dallo stesso Keplero nel suo libro riproduce quanto scritto sopra.

MISTERIUM COSMOGRAPHICUM

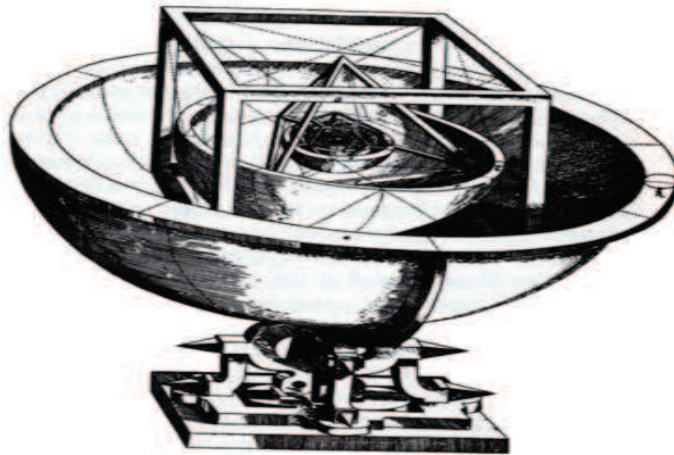


fig.4.8-3

Come riconobbe in seguito, lo studioso entusiasta si sentì come se un oracolo gli avesse parlato dal cielo. **Dopo questa visione, comprese la relazione del numero fornito dai corpi regolari con quelli che Copernico stabiliva per le distanze dei pianeti dal sole e trovò un accordo almeno parziale.** Era estremamente eccitato. Credeva di aver sollevato il velo che nasconde la maestà di Dio e di aver dato uno sguardo alla sua

profonda gloria. L'esperienza ha scatenato un fiume di lacrime. Era stupito che proprio lui, sebbene fosse un peccatore, avesse ricevuto questa rivelazione, soprattutto perchè non aveva intenzione di entrare in tutta la faccenda come astronomo, ma piuttosto aveva intrapreso l'indagine solo per il suo divertimento intellettuale. "Non mi sarà mai possibile descrivere a parole la gioia che ho tratto dalla mia scoperta. Ora non mi lamentavo più del tempo perduto; non mi stancavo più al lavoro; non ho evitato alcun calcolo, non importa quanto difficile. Passavo giorni e notti a calcolare finchè vedevo se la frase formulata in parole concordava con le orbite di Copernico, o se i venti portavano via la mia gioia. Nel caso in cui io, come credevo, avessi afferrato correttamente la questione, ho promesso a Dio l'Onnipotente e Misericordioso che alla prima occasione avrei reso pubblico in stampa questo meraviglioso esempio del suo vento. Sebbene queste indagini non siano in alcun modo terminate e manchino ancora nei miei pensieri fondamentali alcune conclusioni la cui scoperta potrei riservare a me stesso, appena possibile altri, che ne hanno voglia, dovrebbero fare con me quante più scoperte possibili per la glorificazione del nome di Dio e cantiamo all'unanime lode e gloria all'Onnisciente Creatore" (vedi Ref. 1), pagg.60÷64).

Keplero cercava qualche cosa di più di un vago accostamento dei due enti; non solo gli si presentava il problema della successione, cioè in che ordine far seguire i poliedri negli spazi fra Mercurio e Saturno, ma soprattutto egli cercava possibilmente relazioni numeriche o comunque delle ragioni plausibili che giustificassero il complicato connubio. Con tale scopo il passo più promettente evidentemente appariva quello di effettuare delle misure e dei rapporti sui cinque corpi geometrici, ed effettivamente la soluzione tanto cercata si rivelò proprio nei rapporti fra i raggi delle sfere inscritte e circoscritte in ciascun poliedro, rapporti che corrispondono ciascuno al rapporto dei raggi di due orbite planetarie. Ad esempio il raggio dell'orbita di Marte è all'incirca un terzo del raggio dell'orbita di Giove e lo stesso rapporto si trova notoriamente fra i raggi inscritto e circoscritto del tetraedro regolare.

Se si tiene presente che le orbite allora erano tutte ritenute circolari, e, secondo antiche concezioni, contenute ciascuno in una sfera ideale immaginaria, il risultato di questa prima grande scoperta di Keplero può essere enunciata come segue:

Inscrivendo alla sfera di Saturno un primo corpo regolare, e precisamente un cubo, la sfera inscritta a questo cubo è la sfera di Giove; inscrivendo a questa un tetraedro regolare, la sfera inscritta a questo è quella di Marte; così continuando si può inscrivere alla sfera di Marte un dodecaedro regolare che tocca internamente la sfera della Terra, poi analogamente un icosaedro regolare fra Terra e Venere ed infine un ottaedro fra Venere e Mercurio (vedi Ref.7, pag 24).

TYCHO BRAHE - Il libro sul mistero del mondo col titolo lunghissimo che riassume il contenuto, annunciato già nell'ottobre del 1595 nella prefazione al calendario per il 1596, stampato a Tübingen sotto la continua e amorevole sorveglianza del Maestlin durante il 1596, ebbe poi una diffusione molto lenta per le circostanze dell'epoca. Una delle copie arrivò nelle mani del celebre astronomo danese Tycho Brahe (Ticone), che aveva da poco abbandonato il grande Osservatorio da lui costruito sull'isola di Hven in Danimarca per trasferirsi dapprima a Wandsbeck presso Amburgo e poco dopo nel Castello di Benatek presso Praga, alla Corte e al servizio dell'Imperatore Rodolfo II di Asburgo. La natura fredda e positiva di Ticone non poteva elogiare lo scritto troppo speculativo di Keplero,

e glielo scrisse chiaramente, ciononostante riconobbe subito che si trattava di uno spirito eccezionale e lo invitò a Praga. Dopo un primo incontro all'inizio del 1600, e dopo ripetuti inviti, verso la fine di quell'anno Keplero si trasferì a Praga iniziando così un nuovo periodo, il più fecondo della sua vita, quello che doveva vederlo all'apice della gloria (vedi Ref.7, pag.26).

Prima di passar al periodo di Praga, vogliamo ricordare un fatto fondamentale per la sua vita familiare ed un aspetto peculiare della sua attività. Nel 1596 Barbara Muehleck "mise a fuoco il suo cuore". Essa era una ricca vedova, di due anni più giovane di lui, che egli sposò dopo una serie di alti e bassi nelle loro relazioni. La sposò sotto una costellazione di triste presagio ("coelo calamitoso"). L'iniziale felicità finì presto perchè, secondo Keplero, la moglie gli era intellettualmente inadeguata, "confusionaria e di mente molto limitata". La perdita dei due primi figli, le preoccupazioni monetarie anche per la confisca dei beni a Graz, la lontananza dagli ambienti elevati di Graz dopo il trasferimento a Praga, distrusse completamente la mente della donna. Essa muore a 37 anni, dopo aver dato alla luce altri tre bambini di cui due un bambino e una bambina sopravvissero. Nella predizione dei disastri Keplero non sbagliò quasi mai (vedi Ref.3,pag.12).

PRAGA - Ticone lo aveva subito accolto come suo principale collaboratore, affidandogli quello che egli considerava il compito maggiore della sua vita, e cioè il calcolo delle nuove tavole fondamentali per i moti celesti, e con la segreta speranza che il giovane Keplero, che egli stimava già più di ogni altro, giudicasse favorevolmente il suo sistema planetario, che era un sistema intermedio fra quello geocentrico e quello eliocentrico, escogitato non senza fondamento, per superare qualche fenomeno che egli riteneva contrario alla teoria copernicana. Keplero, convinto copernicano, fin dai tempi dei suoi studi col Maestlin, tanto che già il "Mysterium" incomincia con un intero capitolo dedicato alla nuova teoria, evitò di dare un dispiacere al maestro con un giudizio che non poteva essere che negativo; un tale giudizio, dato il carattere autorevole e difficile di Ticone, avrebbe probabilmente portato a una rottura dei loro rapporti, con conseguenze disastrose per Keplero, che già incominciava a trovarsi male in un ambiente ostile. D'altro canto per l'impazienza di Ticone non avrebbe potuto sottrarsi a lungo a questo passo, cosicchè la morte del grande astronomo, avvenuta l'anno dopo, nel 1601, significò per Keplero la fine di questa situazione incresciosa, tanto più che egli venne subito nominato successore del Maestro nel posto di Matematico imperiale, ciò che gli diede piena libertà di dedicarsi al compito lasciategli in eredità da Ticone.

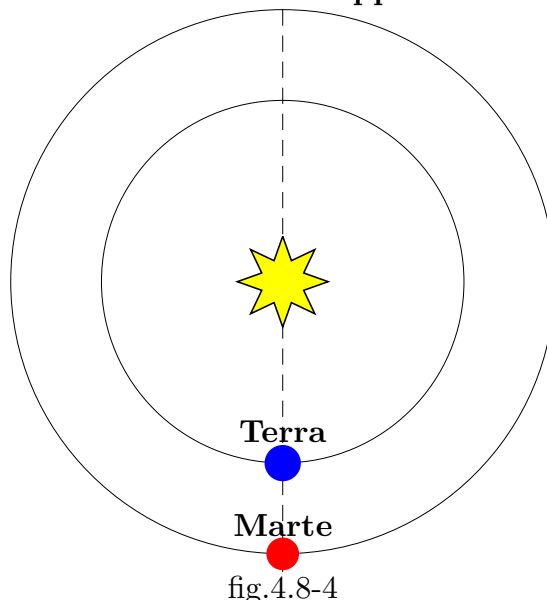
Per la compilazione delle progettate nuove tavole astronomiche Ticone aveva dedicato la massima attività all'osservazione di alcuni pianeti, in primo luogo di Marte, determinando le posizioni in cielo di questo pianeta con la massima precisione allora consentita, con lo scopo di ottenere un copioso materiale che gli permettesse di ricavarne l'esatta orbita di questo pianeta. Il problema era tanto importante e urgente che Keplero sentì il dovere di mettersi subito allo studio dei moti planetari sulla base del prezioso materiale di osservazione raccolto in tanti anni, quasi un quarto di secolo, da Ticone, quindi coi piedi ben saldi a terra, lasciando questa volta da parte le "speculazioni a priori" come gli aveva consigliato Ticone fin dal primo momento.

Per seguire bene Keplero nei suoi studi su Marte occorre ricordare che Copernico aveva stabilito per la Terra un moto uniforme su orbita circolare eliocentrica intorno al

Sole, nel senso platonico della uniformità dei moti circolari, e, in altre parole, con una sola eccentricità, quella appunto del circolo orbitale. Ma siccome questo moto così semplice non si accordava con le osservazioni (del Sole), Copernico fu costretto ad aggiungere un piccolo epiciclo per la Terra - ricordo della teoria tolemaica. Con ciò Copernico aveva salvato il dogma platonico della uniformità circolare del moto (per il centro dell'epiciclo). Tolomeo invece aveva trovato che per il moto della Terra si poteva evitare l'epiciclo coll'introduzione dell'equante, cioè di un punto dal quale il moto risultava angolarmente uniforme, non che risultava non più uniforme il moto orbitale.

Keplero inizia le sue ricerche rotprnando aall'equante, poichè dalle prime prove riconosce la sua utilità. Egli sceglie tra le osservazioni di Ticone quattro opposizioni di Marte (1587, 1591, 1593 e 1595, nelle quali opposizioni le osservazioni sono particolarmente esatte) ed esamina in numerosi tentativi e lunghi calcoli se queste 4 posizioni possono stare su una circonferenza. Con qualche indispensabile premessa, e cioè sulla posizione della linea degli absidi, che viene variata nelle successive prove (in tutto Keplero è costretto a farne 70), egli può stabilire per Marte un'orbita circolare eccentrica con due eccentricità, e cioè quella dell'equante egule a 0.072 e quella del centro uguale a 0.113. Questo primo risultato, che Keplero chiamò in seguito la "Hypothesis vicaria", gli diede subito una grande soddisfazione, ma insieme anche una grande delusione. Altre otto opposizioni di Marte si accordavano infatti con l'orbita stabilita entro errori che non superavano i 2', che stavano cioè entro la precisione delle - per allora eccellenti - osservazioni di Ticone, ma queste osservazioni si trovavano per combinazione tutte o intorno agli absidi, oppure a 90° da questi, e quando Keplero volle estendere il controllo tra teoria ed osservazione ai punti intermedi, scoprì che il divario saliva a 8', valore che non poteva essere considerato come errore di osservazione per le osserzvazioni di Ticone. Questi 8', come vedremo, dovevano portare alla più grande scoperta di tutti i tempi in questo campo, e insieme ad una radicale riforma del pensiero astronomico, meccanico e filosofico.

Pianeta Marte in opposizione



Disorientato, ma non scoraggiato da un tale risultato, conseguito dopo tanto travagliato lavoro e quando già riteneva di essere vicino alla meta, Keplero rivolse la sua atten-

zione al moto della Terra. Perché a questo punto Keplero abbandona Marte e cerca qualche cosa nel moto della Terra? Evidentemente era impressionato dal risultato ora detto, che per la prima volta gli faceva sospettare che il fondamento di tutte le teorie del mondo, e cioè le orbite circolari, potesse non essere valido. Di fronte ad un dubbio di importanza e portata imprevedibile volle assicurare prima le basi del suo procedimento, e cioè stabilire con una maggior esattezza la teoria dell'orbita della Terra, che - pur nella concezione copernicana - era ancora incerta tra l'idea tolemaica dell'equante e quella copernicana dell'epiciclo.

Con un metodo veramente originale, nel quale egli studia il moto della Terra mettendosi idealmente fuori di questa e precisamente sul pianeta Marte, svolgendo tutte le sue prove e i lunghi calcoli sulla base dell'orbita circolare, non trova in questo caso alcuna contraddizione al dogma secolare, ma per il moto della Terra scioglie il dubbio detto poc'anzi trovando che il moto regolato dall'equante corrisponde meglio dell'introduzione dell'epiciclo. Rispetto all'ipotesi vicaria per Marte risulta una maggiore semplicità nel senso che l'equante della Terra dista dal centro dell'orbita quanto il Sole dallo stesso centro, cioè le due eccentricità sono in questo caso eguali, e precisamente uguali a 0.018.

Solo qualche anno più tardi, quando avrà chiuso i suoi lavori su Marte, Keplero si accorgerà che ambedue questi risultati sono errati, che cioè l'orbita della Terra non è esattamente circolare e che la velocità orbitale è regolata da un'altra legge; ma le sue osservazioni, di qualunque tipo e disciplina si tratti, permettono sempre di stabilire un fenomeno o una legge con una determinata approssimazione, e la legge è tanto più attendibile quanto più precise sono le osservazioni che l'hanno rivelata. Nel caso presente Keplero poteva pure dedurre i suoi risultati solo entro una certa approssimazione, e siccome l'orbita della Terra, a differenza di quella di Marte, è effettivamente molto vicina ad un circolo, le osservazioni, anche quelle di Ticone, non erano ancora in grado di mettere in luce la inesattezza del risultato, poichè le discrepanze tra teoria ed osservazione cadevano tutte sotto gli errori di osservazione.

È evidente che anche nelle ricerche intorno all'orbita della Terra il materiale di osservazione lasciato da Ticone a Keplero doveva formare la base del suo procedimento; qui però non si servì delle opposizioni di Marte. Poteva così combinare due posizioni differenti della Terra nella sua orbita con due posizioni coincidenti di Marte, cioè con un punto dell'orbita di Marte e ottenere col Sole un quadrangolo, nel quale poteva calcolare non solo gli elementi di questo, tra cui le due distanze della Terra dal Sole, che servivano per lo studio accennato dell'orbita, ma anche in più una distanza di Marte che doveva servire più tardi per lo studio dell'orbita di questo pianeta. Questa speranza grazie al copioso materiale ticonico, poteva essere ripetuta più volte per ottenere una serie di distanze della Terra ed una serie di distanze di Marte dal sole.

Il risultato ottenuto da Keplero per il moto della Terra, che in sostanza viola il dogma platonico e vuole in certo modo mascherare questa violazione coll'immagine del moto uniforme su un altro circolo, quello appunto che ha per centro l'equante, non turba Keplero, ma lo induce a studiare più da vicino l'andamento delle velocità sull'orbita, ancora nell'intento di sviscerare tutto quanto possibile sulla Terra pria di ritornare all'attacco di Marte che egli già prevede decisivo. Egli trova subito che - nell'ipotesi delle due eccentricità eguali - approssimativamente le velocità estreme, al perielio e all'afelio, sono inversamente proporzionali alle distanze dal Sole. Questo risultato, già non rigoroso per le distanze

estreme e ancor meno valido per le distanze intermedie, viene esteso da Keplero a tutti i punti dell'orbita, egli formula cioè una prima legge, la cosiddetta *legge dei raggi*, secondo la quale la velocità orbitale è in ogni punto inversamente proporzionale alla distanza del pianeta dal Sole.

Sarebbe interessante chiedersi oggi come mai Keplero, spirito mistico e fantasioso in fatto di problemi della vita e in problemi di filosofia generale, ma eminentemente esatto e freddo in fatti e problemi scientifici, mai contento di risultati incerti o poco convincenti, si sia accontentato di questa legge e l'abbia studiata ed applicata alle osservazioni di Marte che aveva a disposizione. Non si può pensare che a una felice intuizione, perchè quell'ipotesi, pur erronea, è stata fecondissima per le considerazioni che egli dovette svolgere successivamente sulle velocità orbitali, e che con un'altra simile intuizione, commettendo una seconda estensione geometricamente inesatta, lo conduce ad una legge validissima ed efficientissima, la ben nota seconda legge Kepleriana.

Infatti per la legge dei raggi si ha per qualunque punto sull'orbita:

$$r_i v_i = k = \text{cost.}$$

Ma questo prodotto può considerarsi come il doppio dell'area di un triangolo di base v_i ed altezza r_i , area che nel moto circolare uniforme, con la velocità normale al raggio, può considerarsi eguale all'area del settore circolare corrispondente. Keplero immagina allora che questo fatto avvenga anche per un'orbita eccentrica, che cioè anche in un'orbita coi raggi partenti non dal centro del circolo, ma dal Sole, le velocità siano normali ai raggi, ipotesi matematicamente insostenibile in generale, ma ammissibile approssimativamente per orbite di piccole eccentricità, tanto più che - come si può facilmente vedere - questa proprietà è verificata intorno al perielio e all'afelio. In tali ipotesi il prodotto $r_i v_i$ rappresenta l'area del settore elementare, uguali in tutti i punti dell'orbita e per un tempo finito τ si ha che l'area descritta dal raggio Sole-Pianeta in questo tempo è $k\tau$, per cui *le aree descritte in tempi diversi sono proporzionali ai tempi impiegati a descriverle*.

Questa legge, stabilita da Keplero per moti circolari con due semplificazioni inammissibili, è rigorosamente esatta solo per le orbite vere dei pianeti, come Keplero troverà più tardi, tuttavia egli non si preoccupa ulteriormente di questo e applica tranquillamente la legge per le ricerche che seguono.

La legge delle aree permette infatti a Keplero di risolvere subito un problema essenziale per lo studio del moto dei pianeti, quello di calcolare per un dato istante t la posizione del pianeta nella sua orbita, cioè le due coordinate orbitali r, v di questo rispetto al Sole e alla linea degli absidi - La linea absidale (o apsidale) o linea degli absidi (o degli apsidali) è la linea che congiunge i punti di perielio e di afelio. Questo problema, noto appunto col nome di problema di Keplero, una volta ammessa la legge delle aree, porta facilmente ad una equazione trascendente che lega una variabile ausiliaria direttamente al tempo t , dalla quale si passa agevolmente a r e v .

Tuttavia Keplero è ancora lontano dalla meta per Marte. E ancora una volta, insoddisfatto dei risultati, nell'intento di approfondire le conoscenze generali nel moto dei pianeti, tralascia la continuazione delle ricerche su Marte e riprende le considerazioni sulle velocità dei pianeti nelle loro orbite, questa volta da un punto di vista ben diverso da quello tenuto fin qui. Infatti alle considerazioni puramente geometriche che hanno formato

la sostanza delle sue ricerche fin qui subentra ora un indirizzo più profondo, fisico, meccanico e filosofico insieme, che darà i frutti più fecondi e impensati, ed aprirà la strada a quella scienza sublime che ha occupato per due secoli i matematici più insigni d'Europa, da Newton a Laplace, da Lagrange a Jacobi, da Charlier a Sundmann, da Le Verrier a Poincarè, e che oggi ha avuto nuovi poderosi impulsi con le necessità astronomiche, voglio dire la Meccanica Celeste.

Keplero conosce fin dai suoi studi per il *Mysterium Cosmographicum* abbastanza bene le distanze dei pianeti dal Sole e le durate delle singole rivoluzioni intorno a Sole, per cui può avere facilmente le velocità orbitali lineari di tutti e sei i pianeti, velocità che vanno decrescendo dall'interno all'esterno, ossia quanto più un pianeta è lontano dal Sole tanto minore è la sua velocità di rivoluzione. I dati oggi conosciuti sono infatti in cifre tonde:

Pianeta:	Velocità	Pianeta:	Velocità
Mercurio:	49 km/sec	Marte:	24 km/sec
Venere:	35 km/sec	Giove:	13 km/sec
Terra:	30 km/sec	Saturno:	10 km/sec

È una circostanza che allora non poteva avere una giustificazione, né matematica, né fisica, tuttavia questo risultato non poteva lasciare indifferent un spirito indagatore acuto come Keplero, che in questa successione vedeva una regolarità sulla quale non si poteva senz'altro sorvolare, tanto più che già nel moto individuale di ciascun pianeta egli aveva trovato qualcosa di analogo con la sua legge sui raggi, e cioè velocità orbitale minore a distanze maggiori dal Sole e viceversa. La ricerca affannosa di una legge che spiegasse questi numeri non diede per ora alcun risultato, ma ormai un nuovo orizzonte si era aperto con questo problema.

Se tutti i pianeti indistintamente erano soggetti a questa che chiameremo una regolarità distanza-velocità, sia singolarmente, sia come insieme, era logico pensare che avessero qualche cosa in comune, che in Keplero mai soddisfatto delle sole risultanze empiriche, e sempre in cerca di ordini e di armonie universali, doveva stimolare il più alto interesse e desiderio di approfondimento. Allo stato del pensiero scientifico e filosofico di allora la concezione più plausibile non poteva essere che quella animistica. *Chi guida* infatti i pianeti nel loro corso perpetuo eterno intorno al Sole, *Chi* regola la loro velocità in ogni punto con la massima esattezza, ch'è il minimo scarto farebbe uscire il pianeta dall'orbita circolare immutabile? La tendenza di assegnare a questi corpi qualche cosa di superiore, capace di agire, un'anima, o come lo chiama Keplero, una *specie*, senza curarsi della natura di questa, era quindi pienamente giustificata.

Dopo ulteriori ragionamenti e pensamenti Keplero, nell'intento di uniformare e semplificare le cose, è indotto ad assegnare anzich'è un'anima a ciascun pianeta, un'anima sola con sede nel Sole, corpo centrale e dominante i sei, costretti a girargli intorno. L'immagine del Sole quale corpo più importante dell'intero sistema conosciuto non era nuova, da quando Copernico aveva detronizzato la Terra, ma nessuno aveva mai pensato al sole quale responsabile dei moti planetari, assegnandogli un potere e un'azione a distanza, diversa da quella già ben conosciuta della luce e del calore.

A questo punto Keplero si chiese come il Sole avrebbe potuto agire sui pianeti a distanza, e immaginando ogni pianeta legato idealmente al sole con un braccio materiale fatto ruotare dal Sole, e immaginando altresì la fatica o lo sforzo fatto dal Sole nel muo-

vere questi bracci, tanto maggiore quanto più lunghe sono queste specie di leve portanti all'estremità i pianeti, ebbe la felicissima intuizione di sostituire alla parola *anima* la parola *forza*, di assegnare cioè al Sole un potere *meccanico*. Il nuovo concetto si era del resto imposto a Keplero anche dal fatto che egli si era molto occupato delle velocità planetarie e a quel tempo velocità e forza erano due entità affini, nel senso che la forza veniva misurata dalla velocità impressa anzichè dalla accelerazione.

Keplero ebbe così fatto il primo e più importante passo per la concezione meccanicistica del mondo. Ma per quanto riguarda l'ulteriore sviluppo di questa innovazione del pensiero, e difficoltà erano pressochè insormontabili. Bisogna ricordare che in campo matematico egli non aveva ancora a disposizione né la Geometria analitica, nè il Calcolo infinitesimale, e in campo fisico non aveva l'esatto concetto dell'inerzia, per cui ad esempio rifiutava l'idea di Copernico che tutti i corpi terrestri, anche le nubi, gli uccelli, ecc., partecipavano al moto della Terra. Tra l'altro, il fatto che il Sole non stava nel centro delle orbite, doveva costituire non poca perplessità. Non deve quindi meravigliare se Keplero si appoggia per analogia ad un recente teoria magnetica del sistema planetario, elaborata intorno al 1600 da William Gilbert, secondo la quale i corpi del sistema solare sono da considerare come immensi magneti che agiscono vicendevolmente. Il Sole in particolare influisce sui pianeti con una specie di fluidi che si estende in forma di vortice circolare intorno al corpo centrale e solo nel piano dell'eclittica, talchè la sua intensità risulta inversamente proporzionale alla distanza, e non al quadrato della distanza, come avviene per la luce e come sarebbe per una propagazione spaziale. Con la rotazione assiale del Sole questo fluido viene trascinato e a sua volta trascina i pianeti. Qualitativamente l'idea è accettabile, ma il curioso si è che l'errata legge della distanza e l'errato concetto di forza che la vuole proporzionale alla velocità, conduce alla legge dei raggi di Keplero alla quale egli si era ancorato con tanto accanimento. Questo spirito inquieto e acuto ancora una volta segue imperturbabile i suoi ragionamenti misteriosi e a volte anche nebulosi per far emergere un risultato che - indipendentemente dal valore e dall'attendibilità matematica - gli dà una intima soddisfazione verso una veduta unitaria del Cosmo.

Dell'azione del Sole sui pianeti, come intesa da Keplero, si è molto discusso anche in tempi recenti; a prima vista l'esposizione di Keplero sembra che ignori una vera e propria attrazione (da non parlare di accelerazione centrale alla quale qualcuno ha voluto paragonarla), inquantochè egli parla di correnti circolatorie intorno al Sole e quindi di trascinamento che agisce solo tangenzialmente. Ma in due opere successive Keplero afferma che il Sole attrae e respinge i pianeti e spiega le maree terrestri coll'azione attrattiva del Sole e della Luna.

Finalmente Keplero si sente abbastanza preparato e in possesso di sufficienti per ritornare al problema dell'orbita di Marte. L'esperienza fatta con l'orbita della terra e una serie di distanze Sole - Marte che egli aveva calcolata in quella occasione, gli permisero anzitutto di rigettare in modo indubbio il secolare dogma dei circoli celesti. La distanza di Marte dal Sole, che nella ricerca sull'orbita della Terra erano soltanto un prodotto secondario, qui divennero lo strumento principale d'indagine. Conoscendo i tempi esatti di queste osservazioni era possibile calcolare anche la direzione ossia la seconda coordinata orbitale e ottenere una serie di punti dell'orbita di Marte, per la prima volta

nella storia senza alcuna ipotesi preventiva sulla forma di questa. Ora, i punti ottenuti non potevano adattarsi ad un circolo, trovandosi tanto più scostati da questo quanto più erano lontani dagli absidi, adattandosi con ciò piuttosto ad una curva somigliante ad un'ellisse il cui asse maggiore coincide con la linea degli absidi del moto circolare (ipotesi vicaria), mentre l'asse minore, dopo molti tentativi e calcoli, risultava accorciato rispetto a quello maggiore nel rapporto 0.996:1, ossia $b = a \cos \phi$, dove $\phi = 5^0 18'$ è un angolo che Keplero aveva già più di una volta incontrato e adoperato nelle sue ricerche su Marte e che corrisponde al valore massimo della cosiddetta equazione ottica della teoria antica, angolo sotto il quale è vista la eccentricità (più precisamente il segmento Sole-Centro del circolo eccentrico) dal pianeta; il predetto valore massimo è legato all'eccentricità dalla semplice relazione $e = \sin \phi$. Questa corrispondenza fu un vero caso di fortuna scoperto da Keplero per combinazione e avrebbe potuto subito aprirgli la strada alla tanto anelata soluzione del problema. Infatti la relazione $b = a\sqrt{1 - e^2}$ [Keplero adoperava la relazione approssimata $b = a \left(1 - \frac{e^2}{2}\right)$]

vale per un'ellisse con e , l'eccentricità numerica,¹⁵⁾ riferita cioè alla distanza *del fuoco* dal centro, ciò che anzitutto fissava la posizione del Sole nel fuoco dell'ellisse e inoltre essa forniva una formula empirica, sia pure arbitraria, per le distanze, molto bene in accordo con quelle dedotte dalle osservazioni. Di qui alla dimostrazione finale del moto ellittico il passo era brevissimo, poichè per la predetta formula per le distanze si ripeteva precisamente quanto era avvenuto per la legge delle aree: quella relazione, infatti, stabilita da Keplero arbitrariamente estendendo a tutta l'orbita una relazione rigorosa solo in una stretta regione, era la relazione rigorosa per le distanze nel moto ellittico.

A questo punto Keplero avrebbe potuto enunciare d alta voce le sue due prime leggi nella loro forma definitiva, come si enunciano oggi in tutti i testi di Astronomia. Per un geometra gli elementi e le prove raccolte sarebbero stati infatti più che sufficienti ed eloquenti per un tale passo, ma Keplero non era soltanto geometra; in quel miscuglio di mentalità razionale e fatalista, cercando sempre una interpretazione e una spiegazione causale più profonda, al di sopra, del puro fenomeno geometrico e cinematico, ritornava ad ogni occasione il dubbioso e l'insoddisfatto, l'uomo della tradizione ferrea, che non poteva dimenticare il ruolo che aveva avuto per millenni il dogma dei moti circolari. Perciò anche quando era pressochè alla meta dei suoi problemi, come nel momento in cui ebbe la chiara visione che l'orbita di Marte era di forma ellittica, si fermò, ripensò alla strada percorsa, e cercò ancora una volta di arrivare ad una costruzione a base di forme circolari. Fece molti tentativi e perse molto tempo, per il quale egli stesso ebbe a rammaricarsi più tardi, ma finalmente, sulla base della relazione soprascritta tra i due semiassi dell'ellisse, egli arriva alla formula ellittica per le distanze, che congiunta ad una per l'anomalia vera, la

¹⁵⁾ Ricordiamo che l'eccentricità di una ellisse è compresa fra 0 e 1 ed è il rapporto della distanza fra i due fuochi $2c$ e la lunghezza dell'asse maggiore $2a$, ossia: $e = \frac{c}{a} =$

$$\frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}.$$

seconda coordinata orbitale, e all'equazione trascendente che porta il suo nome, esprimono analiticamente le sue due prime famose leggi:

I) Ogni pianeta descrive un'orbita ellittica intorno al Sole che occupa uno dei fuochi.

II) Il raggio vettore Sole-Pianeta descrive in tempi uguali aree eguali.

Le tre relazioni predette costituiscono l'intero formulario del moto di un pianeta che segue le due leggi, moto che viene appunto chiamato kepleriano.

Nell'opera su Marte, che può dirsi a ragione la più laboriosa e più intensa opera di Keplero, abbiamo appena accennato alle disposizioni d'animo, alle gioie più intime e alle delusioni più amare che lo hanno accompagnato in questa impresa, descritte fedelmente insieme a tutte le sue ricerche e i suoi ragionamenti fin nei minimi particolari, che mettono in chiara luce i tratti mentali e del carattere di Keplero. Da tutta l'opera abbiamo visto che emergono due principi essenziali che mettono questo ricercatore in primo piano nella storia delle scienze:

I) Il rigoroso controllo di tutti i risultati teorici o empirici, fino al massimo grado di precisione, mediante le osservazioni; e.

II) La indistruttibile fede in un'armonica unione di tutto il Creato, in particolare in un ordine divino nel sistema planetario.

Gli interminabili ragionamenti acuti o tortuosi che egli fece per svelare il segreto della natura più intima dei movimenti planetari, ritornando spesso all'idea animistica, cioè all'azione di un agente misterioso che obbligava i pianeti a descrivere le loro traiettorie, anche se ritardarono il suo cammino sulla via più diretta, furono però sempre condotti nella chiara visione di questi due principi assoluti indiscutibili.

ASTRONOMIA NOVA - Benchè gli studi su Marte fossero conclusi già alla fine del 1606, la pubblicazione contenente fedelmente il resoconto di tutto il lungo e faticoso cammino fino ai risultati riguardanti le due leggi dei moti planetari che portano il nome di Keplero, pubblicazione intitolata "**Astronomia Nova AITIOLOGETOS seu physica coelestis**" uscì soltanto nel 1609 a Heidelberg. È senza dubbio l'opera maggiore di Keplero, la più rivoluzionaria per le nuove scoperte, la più feconda per l'ulteriore progresso dell'Astronomia e della Meccanica celeste. Tuttavia non è la sola opera pubblicata nel periodo di Praga di Keplero; oltre ai soliti calendari annuali e qualche scritto sull'astrologia, è da ricordare una magnifica e fondamentale opera di ottica del 1604, e lo scritto "**De Stella Nova**" del 1606. Il primo esula dalle nostre considerazioni (e la sua importanza verrà autorevolmente illustrata dal Prof. Ronchi), il secondo è uno scritto occasionale come vari altri in questo periodo provocato da un fenomeno celeste insolito.

Nell'ottobre del 1604 si verificava una congiunzione di Marte con Giove, divenuta famosa perchè la sera del 10 gli osservatori videro accanto a questi due pianeti un terzo astro, inatteso e sconosciuto. Splendeva quasi quanto Venere e si mantenne così luminoso fino ai primi del gennaio successivo, dopo di che iniziò un affievolimento che durò fino al gennaio del 1606, quando fu sommerso dai raggi del Sole, e da allora non fu più osservato. Il fenomeno era del tutto simile a quello verificatosi nell'anno 1572, del quale Ticone aveva dato una descrizione molto esauriente. Si trattava di una cosiddetta stella nuova e Keplero ne diede una storia dettagliata della scoperta e delle osservazioni nonchè una descrizione

minuta del fenomeno, comprese le posizioni esatte riferite agli astri vicini; confrontò il fenomeno con quello del 1572, rilevando il fatto, che doveva allarmare gli astrologi, che la stella nuova era improvvisamente apparsa vicina ai due pianeti in congiunzione e che anche Saturno era molto vicino a quel punto, talchè il titolo dello scritto porta la dicitura "Stella Nova in Trigono igneo", cioè in triade o triangolo di fuoco. Le considerazioni generali sulla possibile influenza di un tale fenomeno hanno un notevole fondo astrologico, ed è naturale che in quei tempi tutti aspettassero una spiegazione e una interpretazione di un fatto tanto eccezionale. Ma indipendentemente da ciò egli parla anche della parallasse e in una lunga disquisizione conclude giustamente che la Nuova non può stare tra i pianeti ma appartiene alla sfera delle stelle fisse.

L'invenzione del cannocchiale e le scoperte galileiane in cielo fissano l'attenzione di Keplero per tutto il 1610. Nel marzo pubblica in pochi giorni il celebre opuscolo intitolato "Dissertatio cum Nuncio Sidereo" in risposta al Nuncius di Galileo, uno scritto che da molti è ritenuto un autentico capolavoro di Keplero per la profondità dei pensieri e per la varietà dei problemi trattati. Benchè l'argomento non può essere trattato senza considerare l'opera di Galileo, per cui esso sarà autorevolmente ricordato dal prof. Rosino, non si può in questa rievocazione dimenticare che nella Dissertatio si trovano molte idee originali riguardanti le osservazioni di Galileo in cielo e persino delle anticipazioni, come quelle veramente impressionante che prevede gli odierni corpi celesti artificiali lanciati dall'uomo: Venga un giorno uno che insegni l'arte del volare, allora non mancheranno i colonizzatori della luna e degli altri pianeti; dateci le navi oppure le vele per la brezza celeste e troveremo anche gli uomini che non temono il vuoto spaventoso. E così, in attesa di questi uomini, vogliamo fondare la Nuova Astronomia, io quella della Luna, tu, Galileo, quella di Giove.

Dopo aver concluso e pubblicato nel 1611 una seconda opera fondamentale sull'ottica, anche questo periodo di Praga senza dubbio il più importante periodo della vita di Keplero, doveva chiudersi incresciosamente per la situazione politica minacciosa e per i disagi familiari. Keplero dovette abbandonare Praga alla morte di Rodolfo II nel gennaio del 1612, benchè il successore al trono Mattia volle confermarlo nel posto di matematico imperiale. A pochi mesi di distanza aveva perduto un figlio e la moglie, e le crudeltà della guerra nella città avevano resa vana ogni attività scientifica. Aveva chiesto di ritornare nella sua patria sveva e il Duca reggente con la cancelleria non erano contrari, ma l'autorità ecclesiastica ancora una volta mise il veto. Lo accolsero invece volentieri le autorità della città di Linz sul Danubio (Austria superiore), che lo nominarono, come già a Graz, matematico pubblico regionale (vedi Ref.7, da pagina 26 a pagina 36). Finì così il più fertile e glorioso periodo della vita di Keplero (vedi Ref.3,pag.15).

LINZ - Dal 1612 al 1626 egli vive a Linz, dove si è procurato un lavoro modesto: quello di matematico provinciale di Linz, capitale dell'Austria superiore; lavoro analogo a quello della sua gioventù a Graz. Sembrava un deprimente declassamento, che non si dimostrò così grave come sembrava. Egli continuava ad essere il matematico imperiale e riceveva il suo salario dall'Austria, che gli dava più affidamento nei pagamenti.

Afflitto da solitudine disperata, non ha nessuno con cui discutere, nessuno con cui litigare; trova però modo di farsi scomunicare dalla chiesa luterana perchè si rifiuta di sottoscrivere di credere nella ubiquità del corpo di Cristo e non della sola anima. Inoltre questo è il periodo in cui deve difendere la madre dall'accusa di stregoneria. È sullo sfondo

di questa situazione che egli scrive l'"*Harmonices Mundi*". L'unica cosa che risolleva la vita di Keplero negli ultimi anni è il suo secondo matrimonio che avvenne nel 1613, con Susanna Reuttinger. Un matrimonio molto criticato dal prossimo ma molto ben calcolato da Keplero, non in termini di vantaggi finanziari ma di pace, di armonia familiare. La seconda moglie gli dette sette figli di cui tre morirono nell'infanzia.

HARMONICES MUNDI - Nell'opera che contiene la terza legge, Keplero tenta come Platone, di scoprire i segreti dell'universo inquadrandoli in una sintesi di geometria, musica, astrologia ed astronomia. La terza legge è il frutto di un paziente lavoro di ricerca sistematica.

Nel suo calendario per l'anno 1604 egli diceva: "*Posso dire con sincerità che ogni volta che io considero nei miei pensieri il bell'ordine, come una cosa sorge e deriva dall'altra, allora penso che ho letto un testo divino scritto sullo stesso universo, non con lettere ma piuttosto mediante oggetti essenziali; e nel testo si dice: Uomo, sforza ancora di più la tua ragione, cosicchè tu possa comprendere queste cose*".

L'*Harmonices Mundi*¹⁶⁾ fu completato nel 1618 e pubblicato l'anno successivo quando Keplero aveva 48 anni. Nei rimanenti 11 anni egli continuò a produrre libri, calendari, effemeridi, un libro sulle comete, un libro sulla nuova invenzione del logaritmi; ma le opere maggiori di questo ultimo periodo sono l'*Epitome Astronomiae Copernicanae* e le *Tavole Rudolfine*.

L'*Epitome* rappresenta il lavoro più basilare dell'astronomia, la più sistematica esposizione di Astronomia dopo l'*Almagesto* di Tolomeo.

ULTIMI ANNI - Gli ultimi anni della sua vita sono forse gli anni più duri. Abbandonata definitivamente Linz assediata, Keplero lascia la famiglia a Ratisbon e sta ad Ulm per dieci mesi occupato nella stampa delle *Tavole Rudolfine*. Dopo Ulm si trasferisce a Sagan come astrologo ai servizi del Duca di Wallenstein a cui l'imperatore assieme a Keplero, trasferisce i suoi debiti verso il povero astronomo. Essi ammontavano a 12000 fiorini che Wallenstein non gli diede mai. Keplero finalmente si stabilisce con la sua famiglia, nel 1628, a Sagan nei cui confronti Linz gli sembra essere stato un paradiso.

Egli morì a Ratisbona il 15 Novembre del 1630 e fu sepolto il 19 nel cimitero di San Pietro fuori della città. Il cimitero fu distrutto e le sue ossa furono disperse durante la guerra dei trenta anni. Resta l'epitaffio che aveva scritto lui stesso (vedi Ref.3, pagg.13÷17):

*Mensus eram coelos, nunc terrae metior umbras
Mens coelestis erat, corporis umbra iacet
Misuravo i cieli, ora fisso le ombre della terra
La mente era nella volta celeste, ora il corpo giace nell'oscurità*

¹⁶⁾ Johannes Kepler: *Le armonie del mondo*, Edizione italiana, printed by Amazon Italia Logistica S.r.l. Torrazza Piemonte (TO), Italy, 2023.

Fine del Cap.4