LO GNOMONE ASTRONOMICO

Paolo dal Pozzo Toscanelli, matematico, geografo e astronomo fiorentino, ideò di trasformare il **Duomo di Firenze** in un'enorme **camera oscura**. A tale scopo, posizionò una **piastrina orizzontale di bronzo** dotata di un piccolo foro (detto **foro gnomonico**) sotto il finestrone meridionale del tamburo della cupola, a un'altezza di circa **90 metri**. Questo dispositivo proiettava l'immagine luminosa del Sole sul pavimento della chiesa.

L'esperimento riguardante l'installazione e l'uso dello **gnomone** nella Cattedrale di Santa Maria del Fiore ebbe luogo nel **1475**.

Il 21 giugno (giorno del **solstizio d'estate**), lo gnomone forniva il dato più cruciale per le sue misurazioni:

- lo gnomone del Duomo di Firenze non è un semplice palo, ma un **foro gnomonico** posizionato a circa **90 metri di altezza**, che lo ha reso uno dei più grandi strumenti astronomici a foro stenopeico mai costruiti;
- lo strumento fu progettato per misurare con estrema precisione l'**altezza massima raggiunta dal Sole** nel cielo di Firenze.

Misurando l'altezza meridiana del Sole (l'angolo più elevato che il Sole raggiunge ogni giorno), in particolare in giorni significativi come i solstizi, Toscanelli mirava a determinare:

1. **l'inclinazione dell'asse terrestre ε (*)**

- L'inclinazione dell'asse terrestre (nota anche come **obliquità dell'eclittica**) è l'angolo tra il piano equatoriale terrestre e il piano dell'orbita terrestre (**eclittica**).
- L'angolo ε può essere calcolato con precisione misurando la differenza tra l'altezza del Sole al solstizio d'estate e quella al solstizio d'inverno, o, più semplicemente, dall'altezza del Sole al solstizio d'estate h_{max} e la latitudine φ di Firenze:

$$\varepsilon = 90° - \varphi - h_{max} \qquad (1)$$

La precisione era fondamentale, poiché i piccoli cambiamenti nell'inclinazione assiale hanno un impatto sui calcoli astronomici.

2. **La durata esatta dell'anno solare**

- Misurando con precisione il momento del **solstizio d'estate** e la sua ricorrenza, era possibile stabilire la durata esatta dell'**anno tropico** (il tempo necessario affinché il Sole ritorni alla stessa posizione rispetto all'equinozio di primavera), essenziale per la riforma del calendario (che sarebbe poi avvenuta con il calendario gregoriano nel 1582).

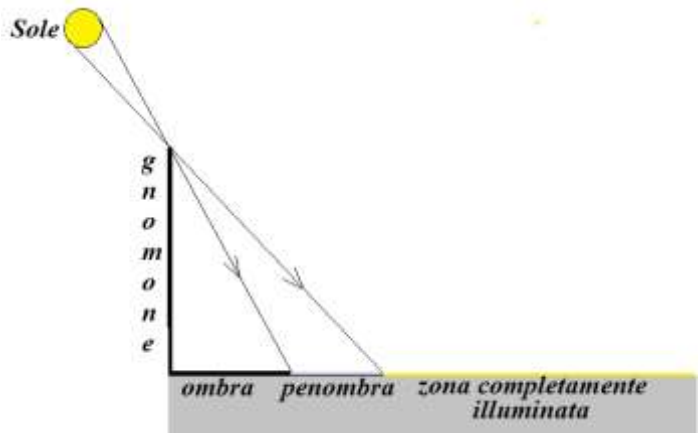
Il ruolo del 21 giugno

Il **21 giugno** (o la data esatta del solstizio d'estate) è il giorno in cui il Sole raggiunge il punto di massima altezza (Zenit più vicino) all'orizzonte per l'emisfero boreale. A mezzogiorno locale, il raggio di luce che passa attraverso il foro gnomonico si proietta sul pavimento della Cattedrale, formando un'immagine circolare che interseca un'apposita **linea meridiana** marcata sul pavimento. La posizione dell'immagine sul pavimento in quel giorno fornisce l'angolo minimo (e quindi l'altezza massima del Sole) necessario per i calcoli.

Nota. Sebbene l'installazione sia di Toscanelli (1475), lo Gnomone fu oggetto di successive e importanti ricalibrazioni e perfezionamenti, in particolare da parte del matematico gesuita **Leonardo Ximenes** nel **1754**, che ne aumentò la precisione e confermò la sua validità come strumento per la ricerca astronomica.

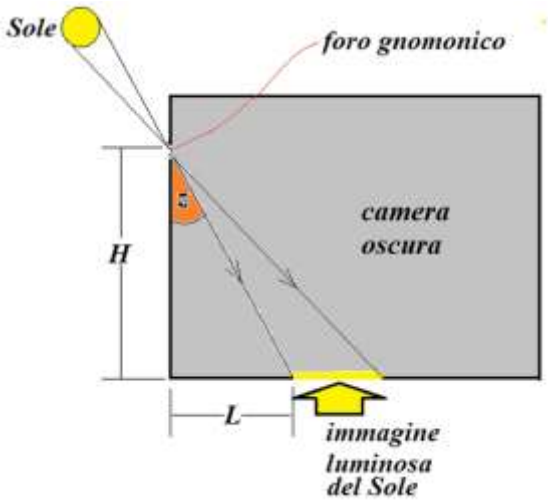
► Uno gnomone, dal greco indicatore, può essere un palo, una colonna o un obelisco, la cui

ombra permette di misurare la posizione del Sole nel cielo.

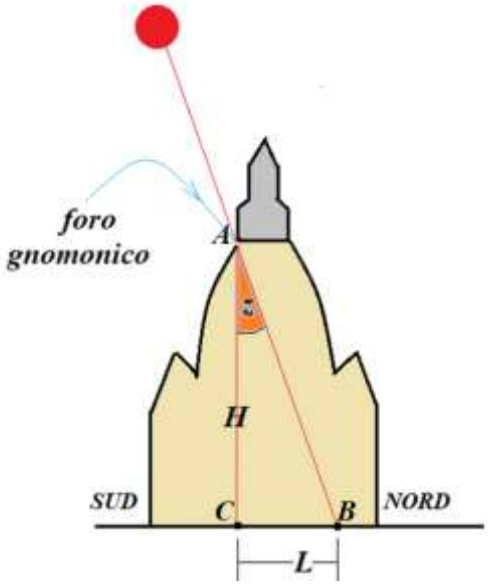


Le misurazioni effettuate con il solo gnomone risultano poco accurate per due motivi principali:

1. **l'altezza necessaria dello gnomone:** per ottenere risultati precisi, lo gnomone dovrebbe raggiungere altezze notevoli;
2. **la natura del Sole:** essendo il Sole una sorgente luminosa estesa (non puntiforme), l'ombra proiettata non è netta, ma è accompagnata da una **penombra** che si attenua progressivamente man mano che ci si allontana dalla base dello strumento. Questa sfumatura rende la determinazione del bordo dell'ombra, e di conseguenza la misurazione, **inesatta**.



Toscanelli ebbe l'ingegnosa idea di trasformare il **Duomo di Firenze** in una gigantesca **camera oscura**. A tale scopo, posizionò una **piastrina orizzontale di bronzo** provvista di un piccolo foro, detto **foro gnomonico**, sotto il finestrone meridionale del **tamburo della cupola**. La piastrina fu collocata a circa **90 metri** d'altezza dal pavimento, permettendo così al raggio di luce solare di proiettare l'immagine del Sole direttamente sulla pavimentazione della cattedrale.



Risolse il triangolo rettangolo *ABC*:

$$\tan z_{max} = \frac{L}{H} ,$$

da cui trovò, con molta precisione, la distanza zenitale meridiana z_{max} ; ricordando che per astri visibili la distanza zenitale e l'altezza sono angoli complementari, Toscanelli ha potuto determinare l'altezza massima del Sole in quel giorno:

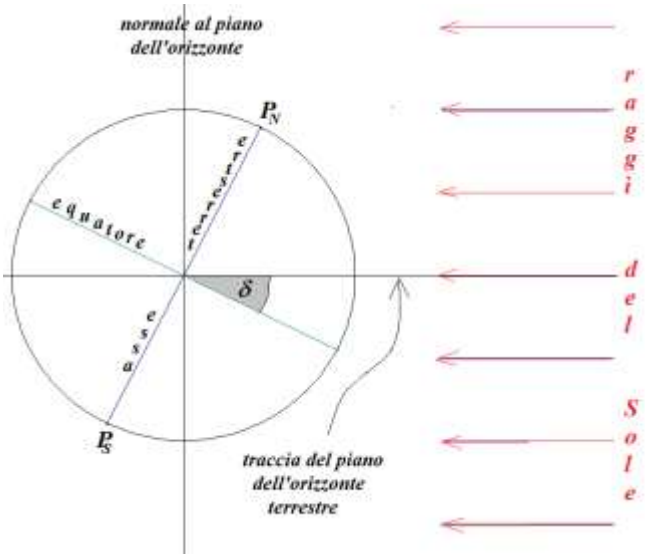
$$h_{max} = 90° - z_{max} ,$$

da cui tramite la (1) ha calcolato **l'inclinazione dell'asse terrestre** ε; questo angolo, di circa 23.5°, produce l'alternarsi delle stagioni nel corso dell'anno.

Infine, conoscendo la latitudine di Firenze, ha potuto calcolare la declinazione del Sole in quel giorno:

$$\delta = \varphi - z_m \ .$$

Il valore della declinazione del Sole, al solstizio d'estate, corrisponde proprio all' angolo di inclinazione dell'asse terrestre rispetto alla normale al piano della sua orbita.



Toscanelli replicò l'esperienza l'anno seguente, in occasione del solstizio d'estate. Misurando l'intervallo di tempo tra i due eventi, determinò con elevata precisione anche la durata dell'anno.

(*) L'**inclinazione dell'asse terrestre**, nota anche come **obliquità dell'eclittica**, è l'angolo ε formato dall'asse di rotazione della Terra rispetto alla perpendicolare al piano della sua orbita (*eclittica*). È un fattore cruciale che determina l'esistenza e l'intensità delle stagioni.

Il valore attuale è di $\approx 23.5°$.

Più precisamente, il valore ufficiale fornito dall'**U**nione **A**stronomica **I**nternazionale (IAU) per un'epoca recente (es. 1° gennaio 2021) è approssimativamente 23° 26′ 11.570″.

L'**inclinazione dell'asse terrestre ε non è costante** ma varia ciclicamente nel tempo:

- **ciclo di variazione:** l'obliquità oscilla tra un valore minimo di $\approx 22.1°$ e un valore massimo di $\approx 24.5°$;
- **periodo:** questo ciclo di variazione dura approssimativamente $41{,}000$ anni;
- **tendenza attuale:** l'inclinazione sta **diminuendo** (l'asse tende ad avvicinarsi alla perpendicolare al piano orbitale).

La variazione dell'inclinazione è principalmente dovuta alle **perturbazioni gravitazionali** esercitate dagli altri pianeti del Sistema Solare, in particolare da **Giove** e **Saturno**.

Ma, anche la **Luna**, il satellite relativamente grande e massiccio della Terra, svolge un ruolo fondamentale nello **stabilizzare** l'asse terrestre. Senza la Luna, o con un satellite molto meno massiccio, le variazioni di inclinazione sarebbero molto più ampie. Questa stabilizzazione ha contribuito in modo significativo alla relativa stabilità climatica sulla Terra, favorendo lo sviluppo della vita.

OSSERVAZIONE.

Le variazioni di ε sono uno dei tre parametri principali dei **Cicli di Milanković**, che descrivono i cambiamenti a lungo termine nell'insolazione terrestre e sono associati all'alternarsi dei periodi glaciali e interglaciali:

- la **maggiore inclinazione** $\approx 24.5°$ tende a rendere le stagioni più estreme (estati più calde e inverni più freddi), riducendo l'accumulo di ghiaccio e portando a un clima globale mediamente più caldo;
- **minore inclinazione** $\approx 22.1°$ **t**ende a rendere le stagioni meno estreme (estati più fresche e inverni più miti), favorendo l'accumulo di ghiaccio alle alte latitudini e potenzialmente innescando periodi glaciali.

Gli altri due parametri principali dei Cicli di Milanković, che influenzano la quantità e la distribuzione dell'insolazione solare sulla Terra e sono considerati una causa dei cicli glaciali e interglaciali, sono:

1. l'**eccentricità orbitale:** la variazione della forma dell'orbita terrestre attorno al Sole, che oscilla da quasi circolare a più ellittica, con una periodicità principale di circa $100'000$ anni;
2. la p**recessione** (o **precessione degli equinozi**)**:** la variazione dell'orientamento dell'asse di rotazione terrestre nello spazio (come una trottola che oscilla), che influenza il momento in cui la Terra è più vicina o più lontana dal Sole (perielio o afelio) durante le diverse stagioni. Questo ha una periodicità di $\approx 26'000$ anni, ma l'effetto combinato con la rotazione dell'ellisse orbitale ha cicli di circa $\approx 19'000$ anni e $\approx 23'000$ anni.