Aristarchos ze Samu

Uvádí se, že **ARISTARCHOS ZE SAMU** (310 - 230 př. n. l.) je autorem knihy *Hypotheses*, v níž tvrdí, že ve středu světa je nehybné Slunce, kolem něhož obíhá Země a planety. Tento „kosmos“ je pak obklopen mnohonásobně větší „sférou stálic“. Tato kniha se ovšem nezachovala, a tak jediným svědectvím o ní je Archimédes, který na základě ní určoval rozměr vesmíru. Aristarchos, tento „ Koperník starověku“, byl nějakým způsobem patrně spjat s alexandrijskou školou a alexandrijskou knihovnou, ale jeho heliocentrická soustava byla ve starověku jeho následovníky odmítána.

Zachoval se jiný spis - *O velikosti a vzdálenosti Slunce a Měsíce* (viz ukázka na obr. 71), v níž autor použil původní metodu výpočtu poměru vzdáleností těchto dvou těles od Země.

Obr. 71

Aristarchos pracoval pod velkým vlivem Eukleida, a proto formuloval základní předpoklady, ze kterých jeho práce a měření budou vycházet.

Podobně vybudoval Eukleides axiomaticky celou geometrii.

Aristarchovy předpoklady tedy jsou:

1. Měsíc získává své světlo od Slunce.
2. Země je v poměru bodu a středu ke sféře, po které se pohybuje Měsíc.
3. Když se Měsíc jeví rozpůlený, pak velký kruh dělící temnou a světlou část je ve směru našeho pohledu.

Ze Země je tedy vidět úplněk nebo nov.

4. Když se Měsíc jeví rozpůlený, jeho vzdálenost od Slunce je rovna kvadrantu zmenšenému o jednu třicetinu.
5. Šířka stínu Země je rovna šířce dvou Měsíců.

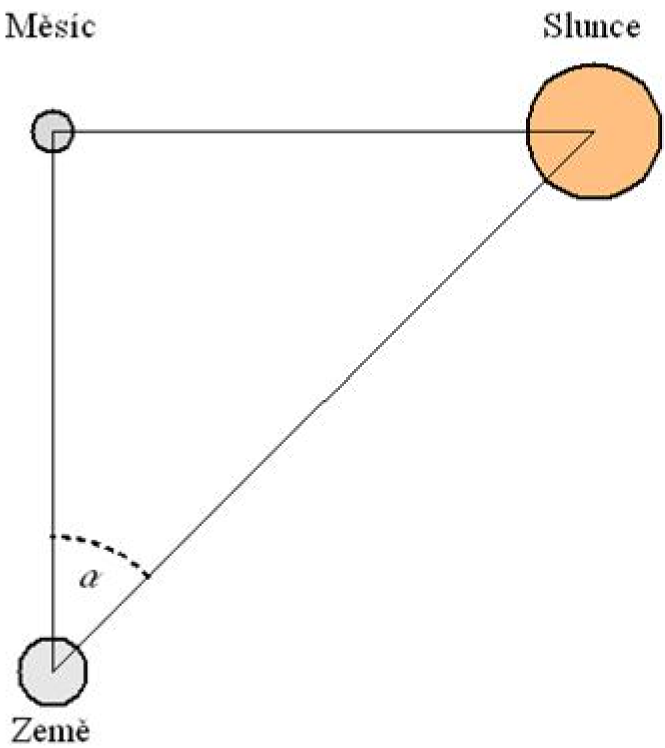
To znamená, že šířka stínu Země ve vzdálenosti Měsíce je rovna dvojnásobku průměru Měsíce

(viz obr. 73). Ve skutečnosti je tato šířka ale přibližně 2,6krát větší, než je průměr Měsíce.

6. Slunce zaujímá patnáctou část jednoho znamení zodiaku.

Správně má být šedesátou část, tj. jednu šedesátinu jednoho znamení zodiaku (zvířetníku). Tento poměr uvádí i Archimédes a chyba v díle Aristarcha vznikla patrně pozdějším přepisem.

Aristarchova metoda určení poměru vzdáleností Slunce od Země a Měsíce od Země je založena na měření úhlu, který svírají spojnice Země - Měsíc a Země - Slunce v okamžiku, kdy je Sluncem osvětlena přesně polovina Měsíce a kdy tedy ze Země vidíme Měsíc v první čtvrti nebo v poslední čtvrti. V tomto okamžiku tvoří Slunce, Země a Měsíc vrcholy pravoúhlého trojúhelníka (viz obr. 72, který není nakreslen ve správném poměru). Pro určení hledaného poměru stačí změřit úhel, které svírají uvedené spojnice těles, a zjistíme poměry stran tohoto trojúhelníka. Aristarchos určil tento úhel α jenom na $87°$ (skutečná hodnota je $89°\,51'$), čímž vzdálenost Slunce od Země velmi podcenil. Při výpočtu totiž využíval poměr, který můžeme v současném zápise psát pomocí goniometrické funkce kosinus. Přitom $\cos 87° \doteq \frac{1}{19}$, ale $\cos 89°\,51' \doteq \frac{1}{382}$; tedy při změně úhlu o necelé tři stupně se hodnota funkce kosinus zmenší přibližně 20krát. Proto Aristarchovi vyšla vzdálenost Země od Slunce pouze 19krát delší, než je vzdálenost Země od Měsíce. Ve skutečnosti je Slunce od Země 390krát dále, než je Měsíc od Země.



Obr. 72

Fakt, že Aristarchos získal řádově špatné výsledky, vyplývá z několika problémů spojenými s použitím právě této metody:

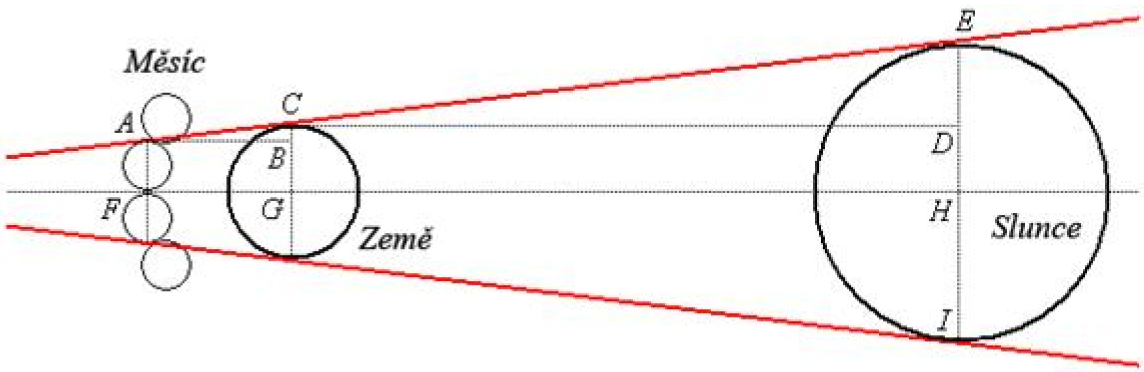
1. Je obtížné určit přesně čas první čtvrti (resp. poslední čtvrti) Měsíce.
2. Je obtížné změřit uvažovaný úhel, protože Země, Měsíc ani Slunce nejsou bodové objekty.

Na základě právě popsaného měření Aristarchos určil i poměr velikostí Slunce a Měsíce. Využil skutečnosti, že úhlové průměry Slunce a Měsíce jsou při pozorování ze Země stejné. Proto jsou absolutní průměry těchto těles ve stejném poměru, jako je poměr jejich vzdáleností od Země. Proto je (podle Aristarcha) i poměr průměrů Slunce a Měsíce roven 19:1.

Úhlový průměr tělesa na obloze určíme tak, že se na dané těleso podíváme jedním okem přes otevřené kružítko. To musí být přitom rozevřené tak, aby se dané těleso právě vešlo mezi „nožičky“ kružítka. Změříme-li úhel mezi takto rozevřenými „nožičkami“ kružítka, známe úhlový průměr daného tělesa.

Pomocí zatmění Měsíce určil Archistarchos také poměr velikostí Země, Měsíce a Slunce (viz obr. 73, který není nakreslen ve správném měřítku). Podle Aristarcha je průměr zemského stínu ve vzdálenosti Měsíce dvakrát větší, než je průměr Měsíce. Usoudil tak na základě toho, že Měsíc vstupuje do Zemského stínu stejnou dobu, po kterou je v tomto stínu a po kterou z něj pak i vystupuje.

Ve skutečnosti je ale průměr zemského stínu ve vzdálenosti Měsíce roven 2,6násobku průměru Měsíce.



Obr. 73

Trojúhelníky *ABC* a *CDE* zobrazené na obr. 73 jsou podobné. Označíme-li poloměr Země r_Z, poloměr Měsíce r_M a poloměr Slunce r_S, pak platí: $|BC| = r_Z - 2r_M$ a $|DE| = r_S - r_Z$. S využitím již popsaných Aristarchových měření a výpočtů můžeme psát $\frac{|FG|}{|GH|} = \frac{|AB|}{|CD|} = \frac{1}{19}$ a $\frac{|FA|}{|IE|} = \frac{2r_M}{2r_S} = \frac{1}{19}$; z posledního vztahu tak dostáváme vztah mezi poloměrem Slunce a poloměrem Měsíce ve tvaru $r_S = 19r_M$. Proto můžeme podobnost trojúhelníků *ABC* a *CDE* popsat vztahem $\frac{|AB|}{|CD|} = \frac{|BC|}{|DE|}$. Po dosazení dostáváme vztah $\frac{1}{19} = \frac{r_Z - 2r_M}{r_S - r_Z}$, který můžeme přepsat ve tvaru $\frac{1}{19} = \frac{r_Z - 2r_M}{19r_M - r_Z}$. Odtud můžeme postupně vyjádřit vztah mezi poloměrem Země a poloměrem Měsíce. První úpravou získáme rovnici $19r_M - r_Z = 19r_Z - 38r_M$ a z ní již získáme hledaný vztah pro poloměr Měsíce $r_M = \frac{20}{57}r_Z \doteq 0,35r_Z$. Nyní je snadné vyjádřit poloměr Slunce: $r_S = 19r_M = \frac{19 \cdot 20}{57}r_Z = \frac{20}{3}r_Z \doteq 6,67r_Z$.

Velmi správný postup Aristarcha je značně zkreslen předchozími výsledky: ve skutečnosti platí $r_S \doteq 109r_Z$.

Nyní je nutné dát do vzájemné souvislosti velikosti Země, Měsíce a Slunce a jejich vzájemné vzdálenosti. Vyjdeme ze 6. Aristarchova předpokladu, který zní: *Slunce zaujímá patnáctou část jednoho znamení zodiaku.* Jak již bylo výše zmíněno, v předpokladu je chyba a místo *patnáctou* má být *šedesátou*. To znamená, že podél zvířetníku, který se nachází podél ekliptiky a do kterého patří 12 znamení (resp. 12 souhvězdí), lze umístit $12 \cdot 60 = 720$ Sluncí.

Tento pás, který se jen mírně odchyluje od ekliptiky, byl chápán řeckými astronomy jako největší kružnice, která ve vesmíru může být.

Délka pásu zvířetníku (a tedy i délka kružnice, po které se pohybuje Slunce) proto je $720 \cdot 2r_S = 720 \cdot 2 \cdot 6{,}67 r_Z$. Pro poloměr trajektorie Slunce tak dostáváme $\frac{720 \cdot 2 \cdot 6{,}67 r_Z}{2\pi} \doteq 720 \cdot 2r_Z$. To znamená, že vzdálenost Země od Slunce $|ZS|$ je přibližně rovna 720 průměrům Země. Pro vzdálenost Země od Měsíce na základě předchozího Aristarchova měření dostáváme $\frac{720 \cdot 2r_Z}{19} \doteq 38 \cdot 2r_Z$; Měsíc je tedy od Země vzdálen 38 průměrů Země.

Průměr sféry hvězd (tj. sféry, která má střed v Zemi a na které se podle řeckých astronomů nacházejí hvězdy) lze určit na základě dalšího Aristarchova předpokladu: *Poměr průměru Země k průměru vesmíru je roven poměru průměru vesmíru k průměru sféry stálic.* Vyjádříme-li tento předpoklad symbolicky, dostaneme rovnost $\frac{2r_Z}{2|ZS|} = \frac{2|ZS|}{2|SH|}$. Odtud pro poloměr sféry hvězd $|SH|$ dostáváme $|SH| = \frac{|ZS|^2}{r_Z}$. Po dosazení získáme: $|SH| = \frac{(720 \cdot 2r_Z)^2}{r_Z} = 1036800 \cdot 2r_Z$.

„Průměrem vesmíru" je zde myšlena kružnice, po které se pohybuje Slunce. Sféra stálic byla větší.

Nyní byly určeny poměry vzdáleností Měsíce od Země a Slunce od Země a vzájemný poměr poloměrů těchto tří těles. Pro určení absolutních vzdáleností bylo nutné jednu z nich změřit absolutně a ostatní na základě známých poměrů vypočítat. Poloměr Země určil později Eratosthenes.

Absolutní vzdálenost znamená vzdálenost určenou v běžně používaných délkových jednotkách.

Porovnání Aristarchových výsledků se současnými výsledky je zobrazeno v tab. 2.

	Aristarchos	skutečnost
průměr Země	r_Z	r_Z
průměr Slunce	$6{,}67 r_Z$	$109 r_Z$
průměr Měsíce	$0{,}35 r_Z$	$0{,}27 r_Z$
vzdálenost Země - Slunce	$720 \cdot 2r_Z$	$11726 \cdot 2r_Z$
vzdálenost Země - Měsíc	$38 \cdot 2r_Z$	$30{,}2 \cdot 2r_Z$
vzdálenost Slunce - hvězdy	$1036800 \cdot 2r_Z$	$3 \cdot 10^9 \cdot 2r_Z$

tab. 2

Jak vyplývá z popsaného měření, většinu hodnot Aristarchos podhodnotil. Sféru stálic se snažil vzdálit, aby při předpokládaném pohybu Země kolem Slunce bylo zaručeno, že nebudeme pozorovat vzájemné posuny hvězd na obloze.

Tyto posuny nepozorujeme právě proto, že hvězdy jsou od nás velmi vzdáleny a průměr trajektorie Země při jejím pohybu kolem Slunce je oproti této vzdálenosti zanedbatelný.

Úhlová měření vzdálenosti planet založená na podobném principu, byla použita ke stanovení relativních vzdáleností planet od Slunce - a to s dosti velkou přesností. Naopak měření absolutní vzdálenosti Země od Slunce zůstávalo dlouho velmi nepřesné.

Archimédes Aristarchova měření zopakoval a sestrojil si vlastní zaměřovací zařízení. Přitom se snažil co nejvíce vyloučit chyby při určování rozměrů Slunce a Měsíce.