Historie IV.

Vývoj fyziky v rámci mechanického obrazu světa

Vladimír Štefl

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Předchůdci Newtona

Johannes Kepler - ***Nová astronomie 1609, Harmonia světa 1619***
síla pohybující planetami musí vycházet ze Slunce, podstata magnetická, nepřímo úměrná na vzdálenosti

Evangelista Torricelli 1608 - 1647
planety se odklání od přímočarého pohybu silou, směřující ke středu Slunce r. 1644

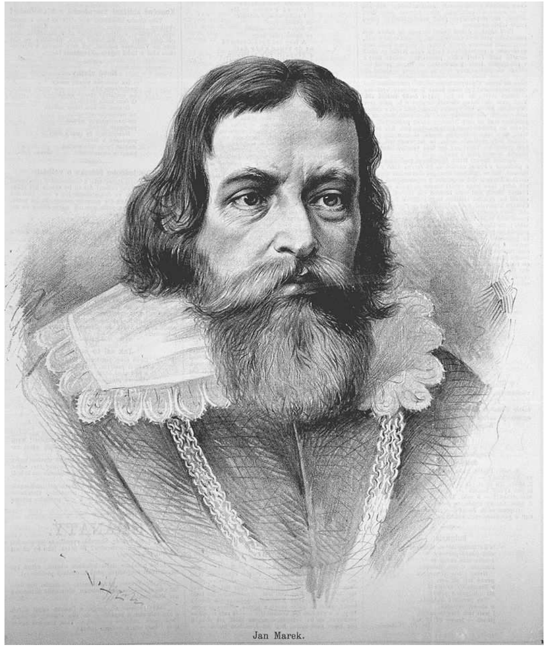
Ismael Boulliau 1605 - 1694, r. 1645, $F \sim {}^{1}/_{r^2}$

Giovanni Alfonso Borelli 1608 - 1679
kromě síly přitažlivosti, která závisí na vzdálenosti, na každou planetu působí ještě i odstředivá síla, jejíž velikost závisí na rychlosti pohybu planet, Obě tyto síly jsou v rovnováze, což určuje eliptickou dráhu planety

Christian Huygens ***Kyvadlové hodiny r. 1673…***

Jan Marek Marci 1595 - 1667

lékař - fysikus, fyzik, matematik,
profesor lékařské fakulty, hlavní hygienik,
rektor univerzity 1662



O úměrnosti pohybu 1639
mechanika, volný pád,
rázy pružných koulí

Kniha o duze nebeské a původu jejích barev 1648
rozklad světla skleněným hranolem, vlastnosti hranolového a duhového spektra, výklad vlastností duhy, zbarvení mýdlových bublin, barevný paprsek vycházející z hranolu se při průchodu dalším hranolem už nemění, každá **barva vykazuje jiný úhel lomu**

Jan Marek Marci

Kniha o duze nebeské a původu jejích barev 1648

Informace o prvním pozorování ohybu světla a vzniku barevného spektra na malých otvorech, překážkách a optické mřížce:

„Jestliže jehla nebo nožík zastíní mezi světelným zdrojem a hranolem libovolnou část zdroje, vidíme okraj stínu barevně. Nebo destička s otvory ve tvaru mřížky či stočená vlákna dají vznik tolika duhám, kolik je otvorů. V obrazu za hranolem , vložíme-li nožík mezi obraz a hranol, vznikne stín s opačnou duhou, ve které při pohybu nožíku mizí hned tyto, hned ony barvy nebo se mění novým míšením barev.“

Jan Marek Marci

O úměrnosti pohybu 1639, první fyzikální kniha sepsaná českým fyzikem

- běžně používá představ o nezávislosti mechanických pohybů a jejich skládání podle pravidla rovnoběžníku,
- udává zákon volného pádu, závislost rychlosti a dráhy na čase,
- udává zákonitosti pohybu po nakloněné rovině v homogenním tíhovém poli a dotýká se i přímočarého pohybu v centrálním poli,
- zdůrazňuje, že všechna tělesa padají touž rychlostí nezávisle na své tíze a případné rozdíly v rychlostech jsou vyvolány odporem prostředí,
- uvádí a snaží se zdůvodnit izochronismus kyvadla a navrhuje jeho použití k přesnému měření času,
- uvádí a zdůvodňuje úměrnost periody kyvadla druhé odmocnině jeho délky,
- rozlišuje přímý a šikmý ráz koulí,
- rozlišuje ráz těles pružných, nepružných a křehkých podle jejich materiálu,
- popisuje průběh pružného rázu koulí jako proces, v němž „impuls" zaniká a opět se rodí,
- formuluje věty o rázu pružných koulí stejných i různých hmotností.

Jan Marek Marci

O úměrnosti pohybu věty – porismata:

Titulní list knihy *O úměrnosti pohybu*

1. *Narazí-li koule na stejnou nehybnou kouli, odrazí ji a zastaví se.*

2. *Narazí-li větší koule na menší nehybnou, odrazí ji a pokračuje v pohybu.*

3. *Narazí-li menší koule na větší nehybnou, přičemž její impuls převáží nad poměrem hmotností, odrazí ji a sama se odrazí nebo zůstane v klidu.*

4. *Narazí-li menší koule na větší nehybnou, přičemž poměr hmotností převáží nad jejím impulsem, zůstane větší koule v klidu a menší se odrazí.*

5. *Narazí-li na sebe v pohybu dvě stejně těžké koule, obě se odrazí.*

6. *Narazí-li větší koule v pohybu na menší, přičemž impuls menší koule převáží nad poměrem hmotností, obě se odrazí.*

7. *Narazí-li větší koule v pohybu na menší, přičemž poměr hmotností převáží nad impulsem menší koule, odrazí ji a pohybuje se dále.*

8. *Narazí-li větší koule v pohybu na menší, přičemž impuls menší koule vyrovnává poměr hmotností, menší se odrazí a větší zůstane stát.*

Christian Huygens (1629 - 1695)

holandský matematik, fyzik, astronom

O nalezení velikosti kruhu r. 1654

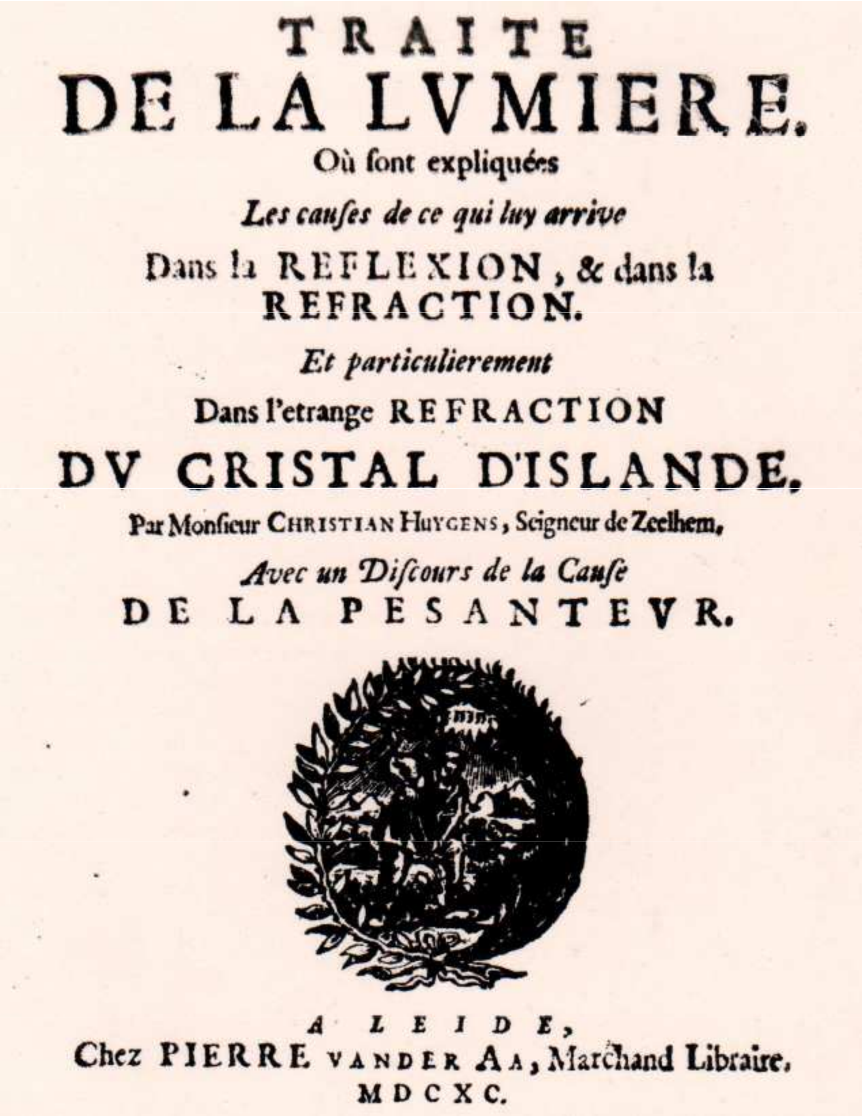
O odstředivé síle r. 1659

Kyvadlové hodiny r. 1673

Traktát o světle r. 1690

Traktát o světle

ve kterém jsou objasněné příčiny toho, co se s ním děje při odrazu a lomu a zvlášť při podivuhodném lomu islandským vápencem



TRAITE
DE LA LVMIERE.
Où font expliquées
Les caufes de ce qui luy arrive
Dans la REFLEXION, & dans la REFRACTION.
Et particulierement
Dans l'etrange REFRACTION
DV CRISTAL D'ISLANDE.
Par Monfieur CHRISTIAN HUYGENS, Seigneur de Zeelhem,
Avec un Difcours de la Caufe
DE LA PESANTEVR.

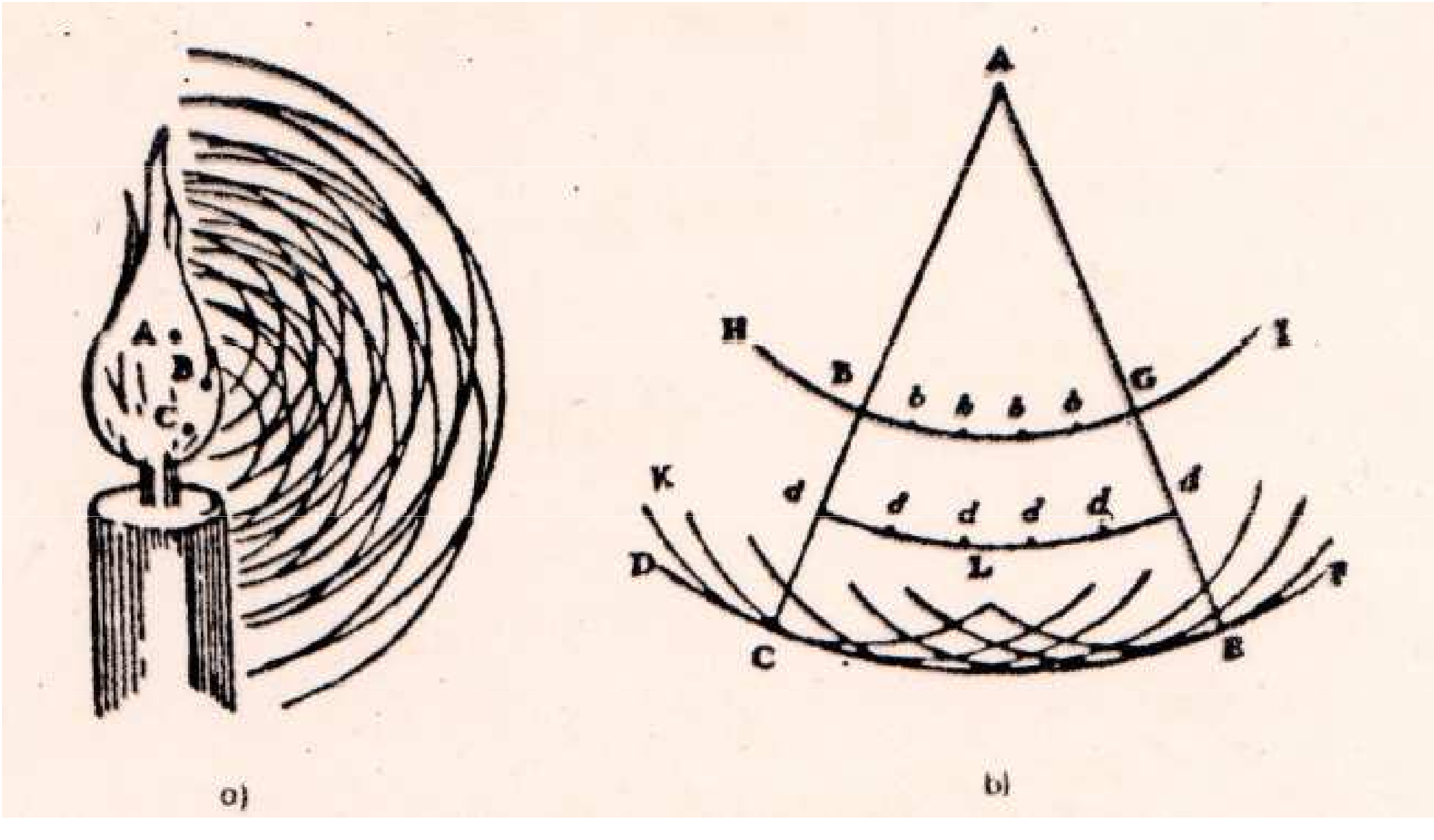
A LEIDE,
Chez PIERRE VANDER AA, Marchand Libraire,
MDCXC.

formulace **vlnové teorie světla**, odvození vlastností světla - přímočarého šíření, odrazu, lomu, při konečné hodnotě rychlosti světla

světlo - postupné podélné **mechanické vlnění elastického éteru**

Traktát o světle

***Huygensův princip** …„každá malá oblast svíticího tělesa, ať již je to Slunce, svíčka…“ …„Soustředné kružnice kolem tří různých bodů A, B, C v plameni svíčky představují vlny, které z těchto bodů pocházejí. A totéž je třeba si představit u každého bodu povrchu i vnitřku plamene.“*



Traktát o světle

Huygensův princip.

V prostředí se šíří kulové vlnoplochy podobně jako vlny na vodě, kde se setkávají se zesilují. Každý bod vlnoplochy je zdrojem druhotných vlnoploch, jejich matematická konstrukce. Světelný paprsek je k vlnoplochám kolmý.

Huygens v úvodu spisu rozebíral Römerovu metodu stanovení rychlosti světla, provedl numerický výpočet, světla potřebuje k uražení 2 200 průměrů Země 22 minut, ***rychlost světla tak činí 212 000 km.s^{-1}***

Huygens znal dílo Jana Marka Marci z Kronlandu

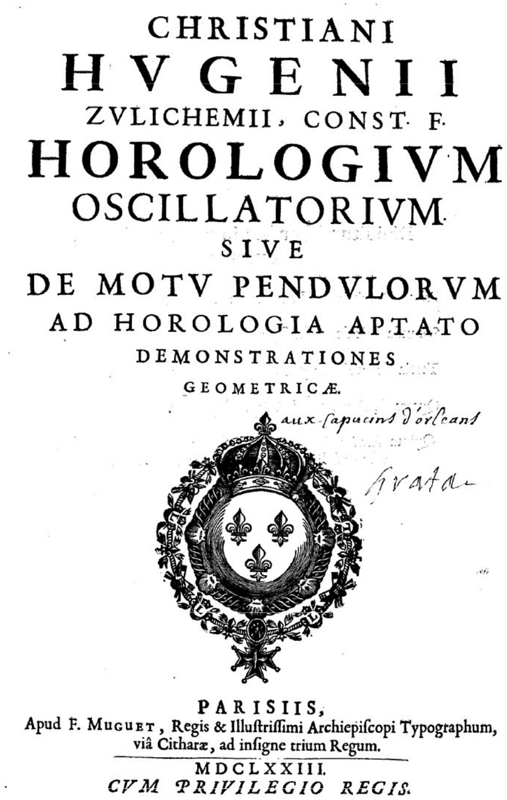
Traktát o světle

v druhé části spisu Huygens zkoumá dvojlom, objevený **R. Bartholinem** (1625-1698)

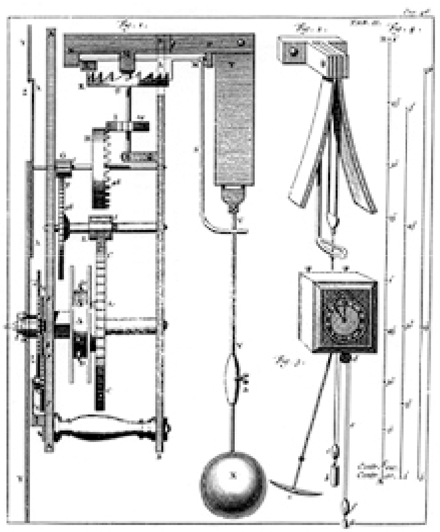
předpokládá, že při dopadu na islandský vápenec vytváří každý element krystalu **sekundární vlnoplochu**, která není kulová, ale sestává ze dvou geometrických útvarů, ze dvou listů
jeden je opět kulová plocha, tomu odpovídají paprsky řádné, druhý list má tvar elipsoidu, je spojen s paprsky mimořádnými, čímž vyložil optické jevy na islandském vápenci

původní Huygensova formulace předpokládala nezávislost a vzájemnou neovlivnitelnost sekundárních vlny, byla geometrickou záležitostí

Kyvadlové hodiny


CHRISTIANI
HVGENII
ZVLICHEMII, CONST. F.
HOROLOGIVM
OSCILLATORIVM
SIVE
DE MOTV PENDVLORVM
AD HOROLOGIA APTATO
DEMONSTRATIONES
GEOMETRICÆ.

PARISIIS,
Apud F. MUGUET, Regis & Illustrissimi Archiepiscopi Typographum, viâ Citharæ, ad insigne trium Regum.
MDCLXXIII.
CVM PRIVILEGIO REGIS.



spis má pět částí,
první - popis principu kyvadlových hodin,
druhá - pohyb závaží matematického kyvadla po cykloidě,
třetí - výzkum vlastností geometrických křivek,
čtvrtá - výpočty redukovaných délek fyzického kyvadla,
pátá - pohyb kruhového kyvadla a vlastnosti odstředivých sil
kyvadlové hodiny - **určování zeměpisné délky**

Mechanika

studoval volný pád, rázy těles, těžiště těles

zákon setrvačnosti: *„Kdyby nepůsobila tíže a vzduch nebránil pohybu, každé těleso uvedené do pohybu by se pohybovalo stálou rychlostí podél přímky.“*

odstředivá síla: tíže je jakési puzení tělesa ke středu Země, existuje podobné puzení opačného směru u těles rotujících kolem osy, puzení nazval odstředivou silou

Mechanika
O pohybu těles při rázu

Hypotéza III. Věta I.

Jestliže s tělesem v klidu se srazí stejné s ním těleso, potom toto těleso přejde do stavu klidu a původně těleso v klidu bude přivedeno do pohybu s rychlostí původně pohybujícího se tělesa.

Představme si loďku pohybující se podél břehu, pasažér na ní drží v pažích A a B dvě stejná na nitích pověšená tělesa E a F. Vzdálenost mezi nimi EF je rozdělena na poloviny v bodě G. Pasažér na loďce pohybuje vstřícně oběma pažemi se stejnou rychlostí vzhledem k sobě a loďce, vyvolá ráz koulí, které se odrazí od sebe se stejnou rychlostí vzhledem k pasažérovi i loďce…“

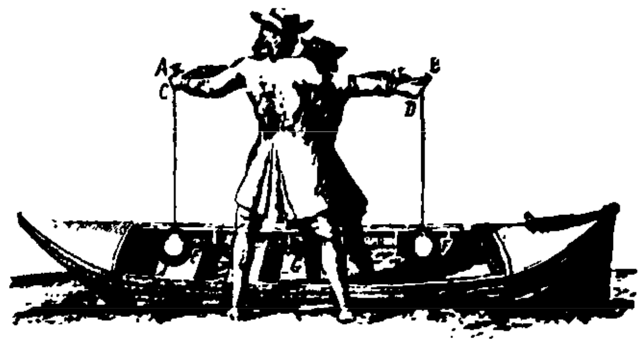
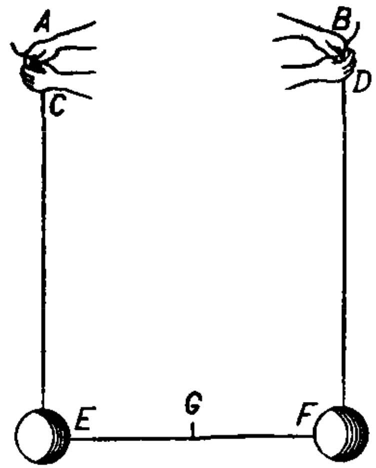
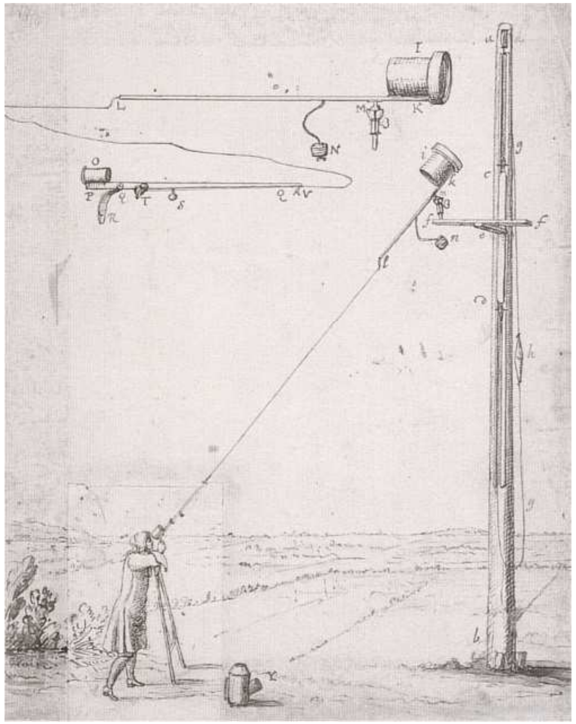


Рис. 36

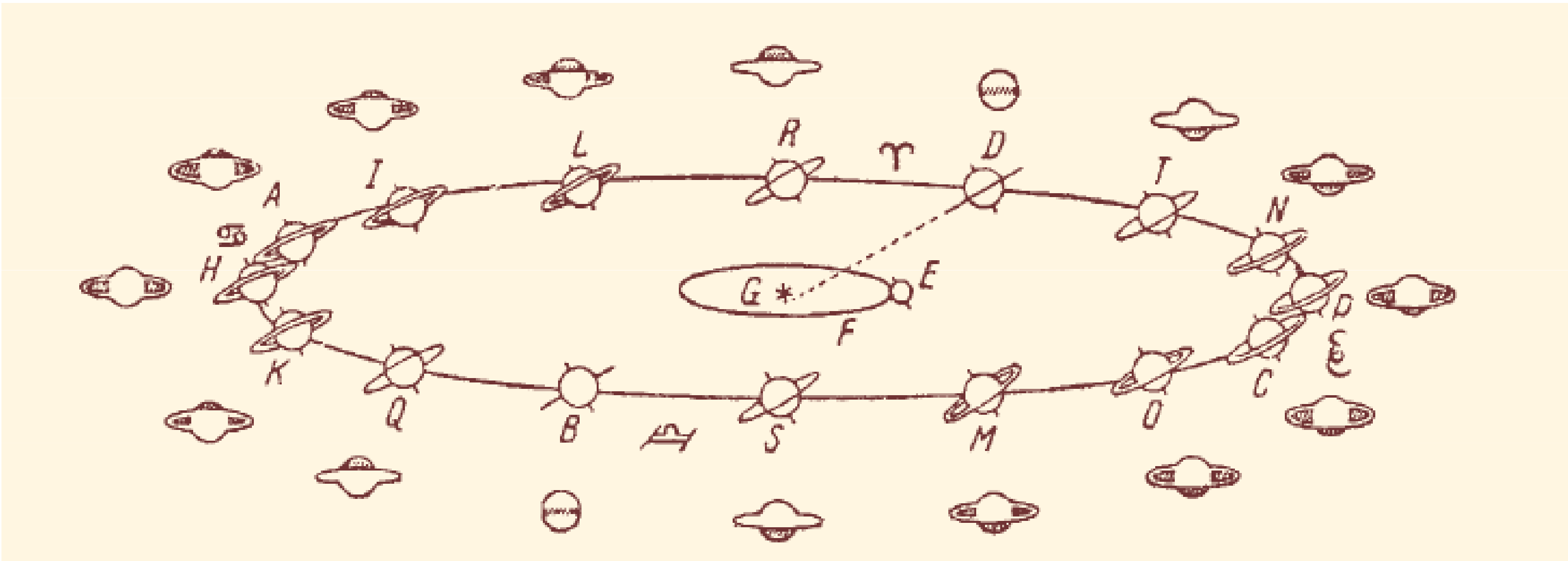


Pozorování nového měsíce Saturnu



r. 1655 refraktor, Z - 90x, f = 70 m, zdokonalený okulár

prstence Saturnu, Slunce *G*, Země *E*, vnější obrázky zachycují vzhled Saturnu ze Země, měsíc Titan, pásy na Jupiteru, polární čepičky na Marsu, mlhovina v Orionu,



Robert Hooke 1635 - 1703

experimentátor, Hookův zákon úměrnosti deformace a napětí, anemometrem – větroměr, teploměr, mikroskop, zrcadlový dalekohled

Micrographia 1665
konstrukce mikroskopu a pozorování s ním

Kutlerovské přednášky z mechaniky 1667

Pokus zkoumat pohyb Země z pozorování 1674

astronomická pozorování Slunce, Jupiteru, Saturnu, ***oponent a rival Newtona***

Robert Hooke

Předpoklady pro objasnění světové soustavy, 1675

1. Všechna tělesa jsou přitahována k jejich společnému středu, který přitahuje částice tělesa, brání jim v rozptýlení a přitahuje k sobě další tělesa, která se nachází v oblasti jejich vlivu. Tudíž nejenom pouze Slunce a Měsíc mají vliv na pohyb Země, ale také zbývající planety.
2. Všechna tělesa, která někdy získala přímý a jednoduchý pohyb pokračují v přímočarém pohybu, pokud na ně nepůsobí druhá síla, jež změní jejich dráhu.
3. Síly přitažlivosti působí tím silněji, čím blíže se těleso nachází ke středu sil. Co se týče závislosti, s kterou se zmenšuje síla se zvětšováním vzdálenosti, to jsme neprověřoval pokusem, ale pokud to bude zkoumáno, bude to velmi vhodné.

Robert Hooke

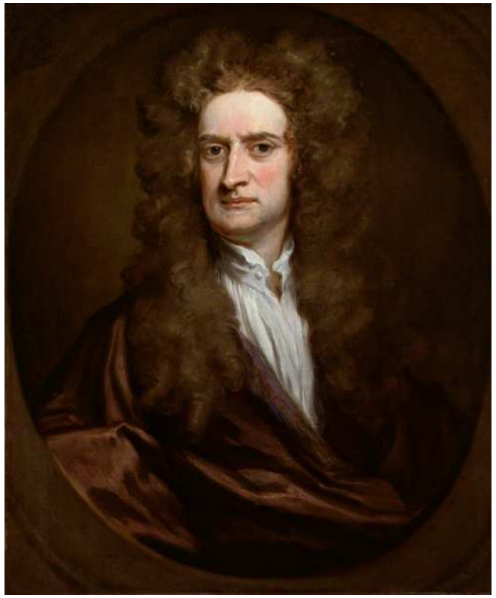
Předpoklady pro objasnění světové soustavy, 1675

S jejich pomocí astronomové převedou všechny pohyby ke známým zákonům, dávám tyto pokyny a instrukce těm, kteří chtějí pracovat v tomto směru. Já sám se zabývám jinou prací.

dopis 6. ledna 1680 Newtonovi: *...„ přitažlivost je vždy nepřímo úměrná vzdálenosti se čtvercem. Takto lze vysvětlit všechny jevy na obloze.“*

Ismael Boulliau (1605 - 1694) ***Astronomia philolaica 1645***
výklad pohybu planet a Měsíce s použitím Keplerových zákonů za pomoci nové a skutečné hypotézy… *„síla směřující ke středu světa se mění v závislosti nepřímo úměrné na čtverci vzdálenosti…“*

Isaac Newton 1643 - 1727



životopis

narozen 25. prosince 1642 podle *juliánského kalendáře*, tedy 4.ledna r. 1643 podle *gregoriánského kalendáře*

r. 1665 bakalář

1665-66, 25 letý - rozklad bílého světla, jeho složení

od r. 1669 lucasovská profesura v Cambridge pro matematiku a fyziku, nesměl se zabývat církevními aktivitami, později po odchodu psal teologické a alchymistické spisy

r. 1696 opustil učitelské místo v Cambridge, přešel do Londýna

od r. 1700 správcem mincovny, r. 1703 prezident Královské společnosti

r. 1705 povýšen do šlechtického stavu

Newtonovy spisy

O pohybu 1684

Teorie světla a barev 1675

Matematické principy přírodní filozofie 1687

Optika 1704

O analýze užívající rovnic s nekonečně mnoha členy 1711

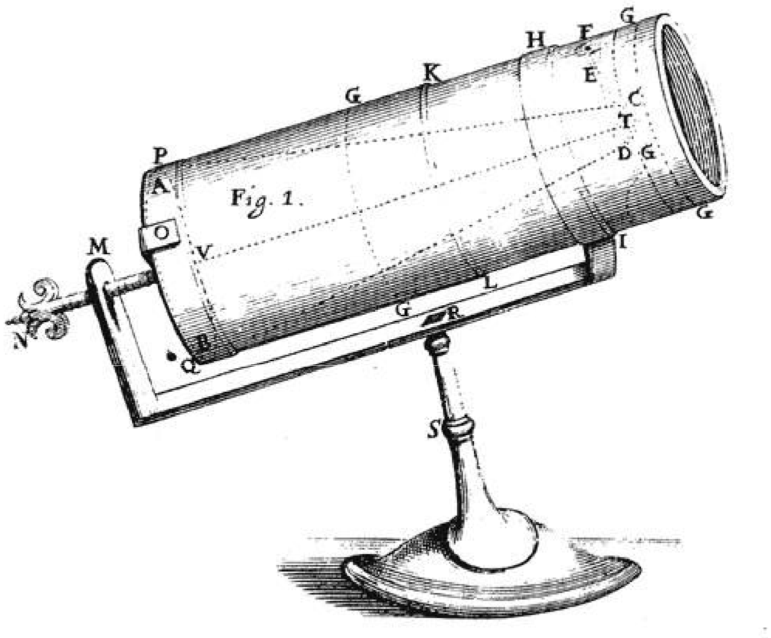
Metoda fluxí a nekonečných řad 1736

pohybové zákony, gravitační zákon, rozklad světla, diferenciální a integrální počet

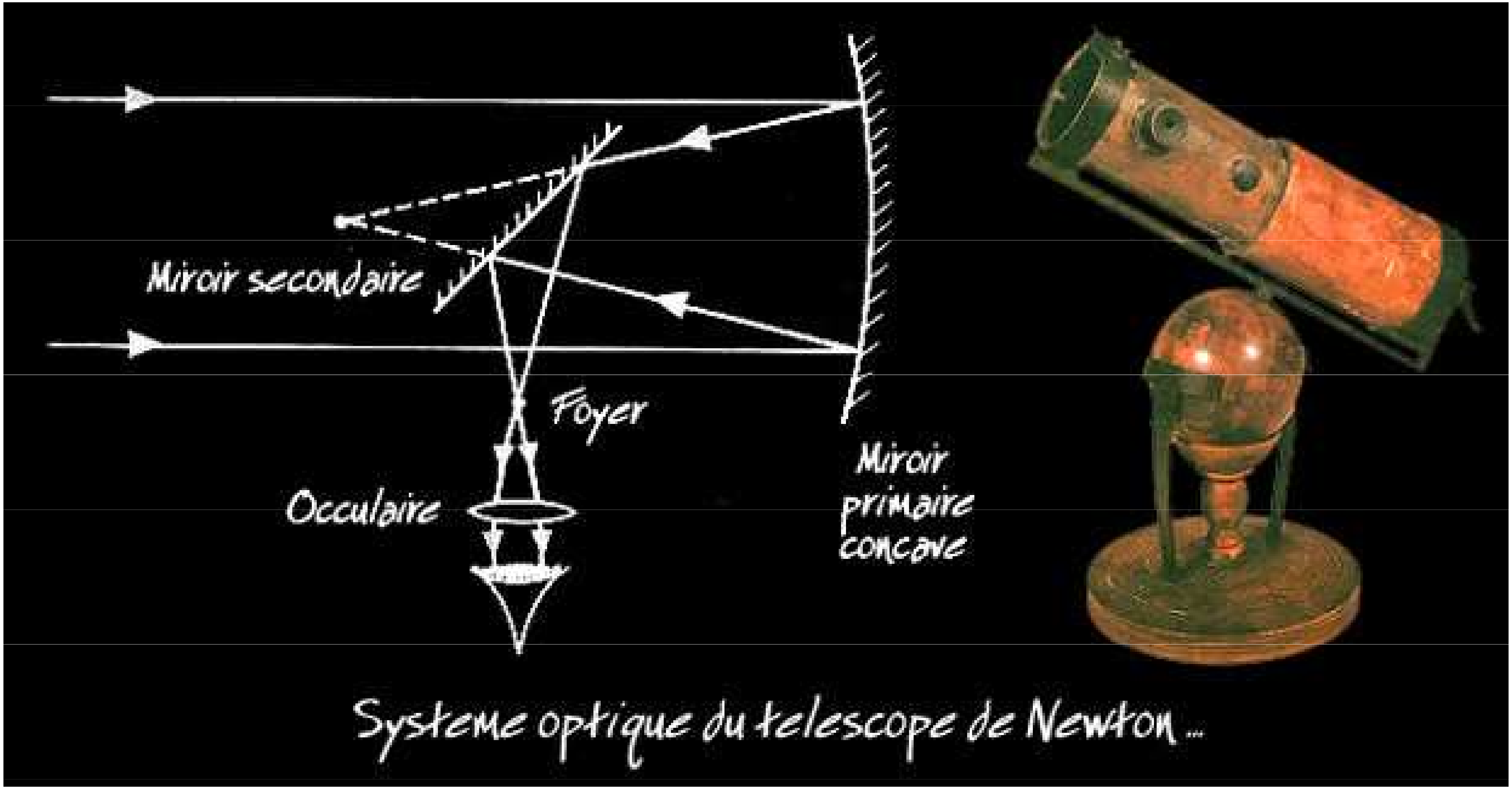
Newton optik

počátky zájmu o optiku od let 1664-65, od roku 1669 přednášel optiku

r. 1668 sestrojil první dalekohled - reflektor, délka 15 cm, zrcadlo poloměr 2,5 cm, zvětšení 40x, postupné zlepšování materiálu zrcadla, značně lepší kvalita, dar Karlu II. 1671.

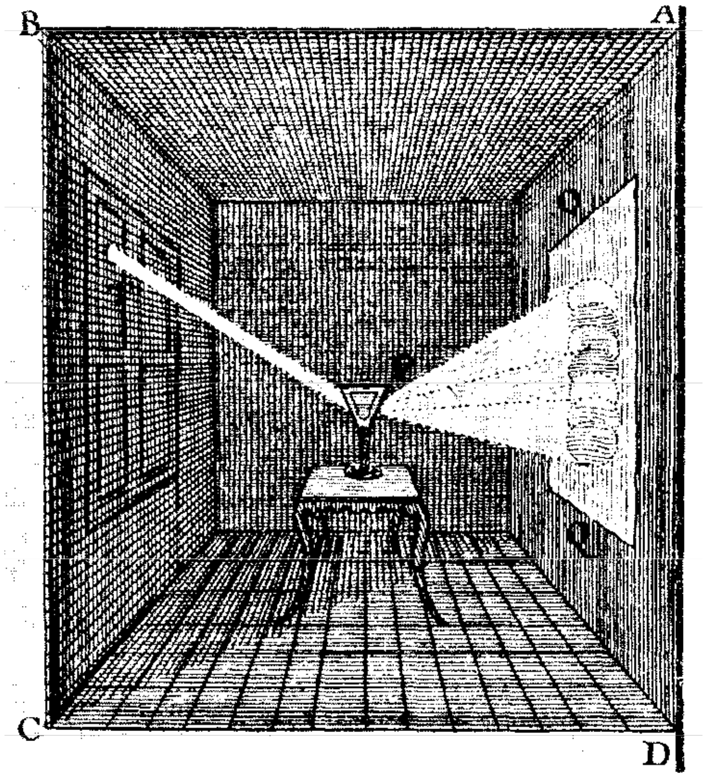


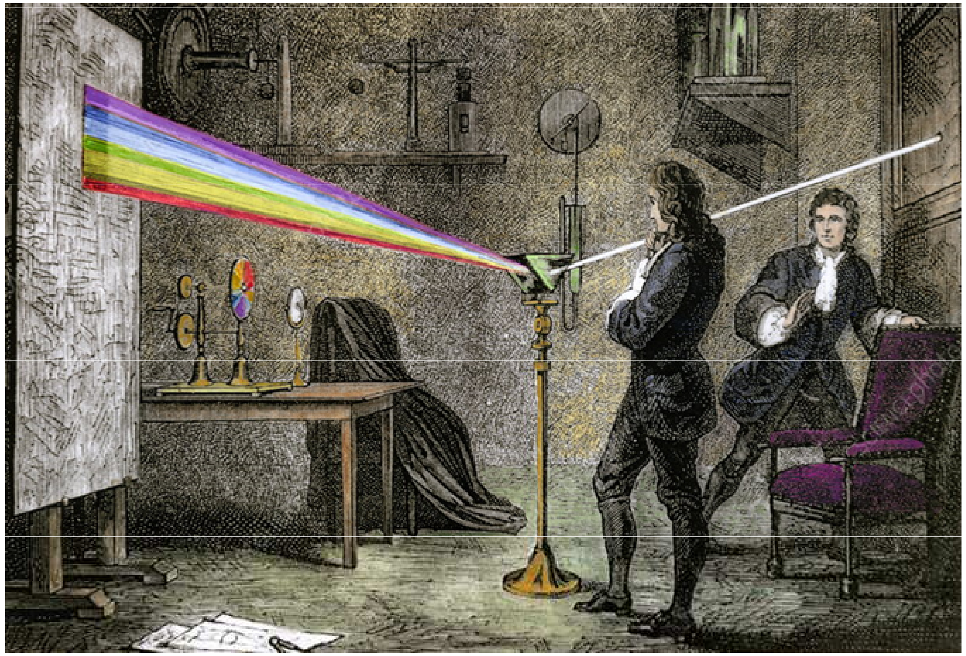
Newtonův dalekohled - reflektor

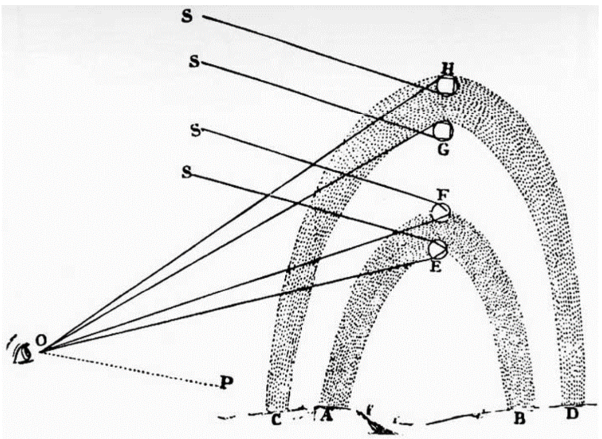


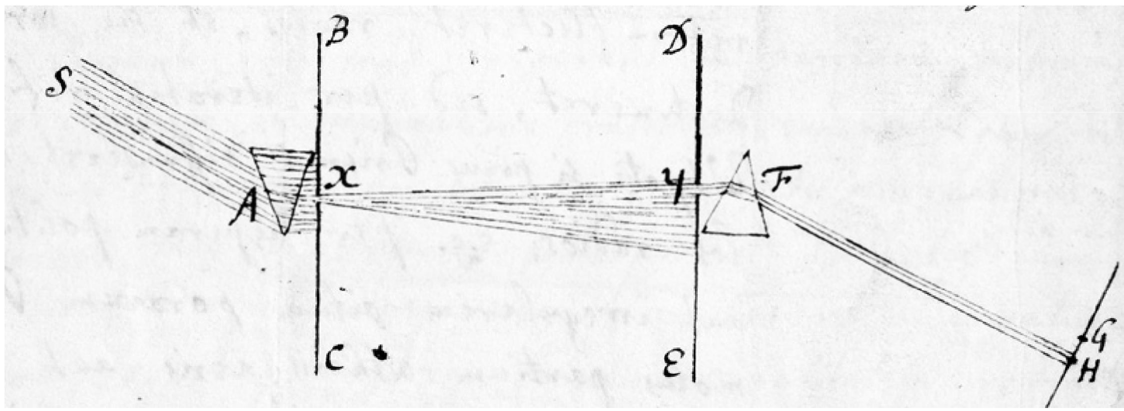
Newton optik

počátky v letech 1664 - 65, rozklad a skládání světla, duha









Newton optik

Teorie světla a barev 1675

formulace **korpuskulární teorie,** ***světlo – substance emitovaná svítícím tělesem ve formě částic, korpuskulí***

při formulaci korpuskulární teorie vycházel z kritiky Hookových představ, které nevyložily řadu jevů
nebyl dogmatickým odpůrcem vlnové teorie, uvedl:
„předpokládám, že světlo je něco, co se různým způsobem šíří ze svítících těles…“ ...„Toto něco, což mohou být částice, se šíří ze svítícího zdroje, přičemž vyvolávají kmity éteru, v hypotetické látce, která proniká celý svět.“

hypotézu lze použít jak pro vysvětlení korpuskulárních i vlnových jevů

Optika

Optika, tři knihy o odrazu, lomu a ohybu světla v barvách

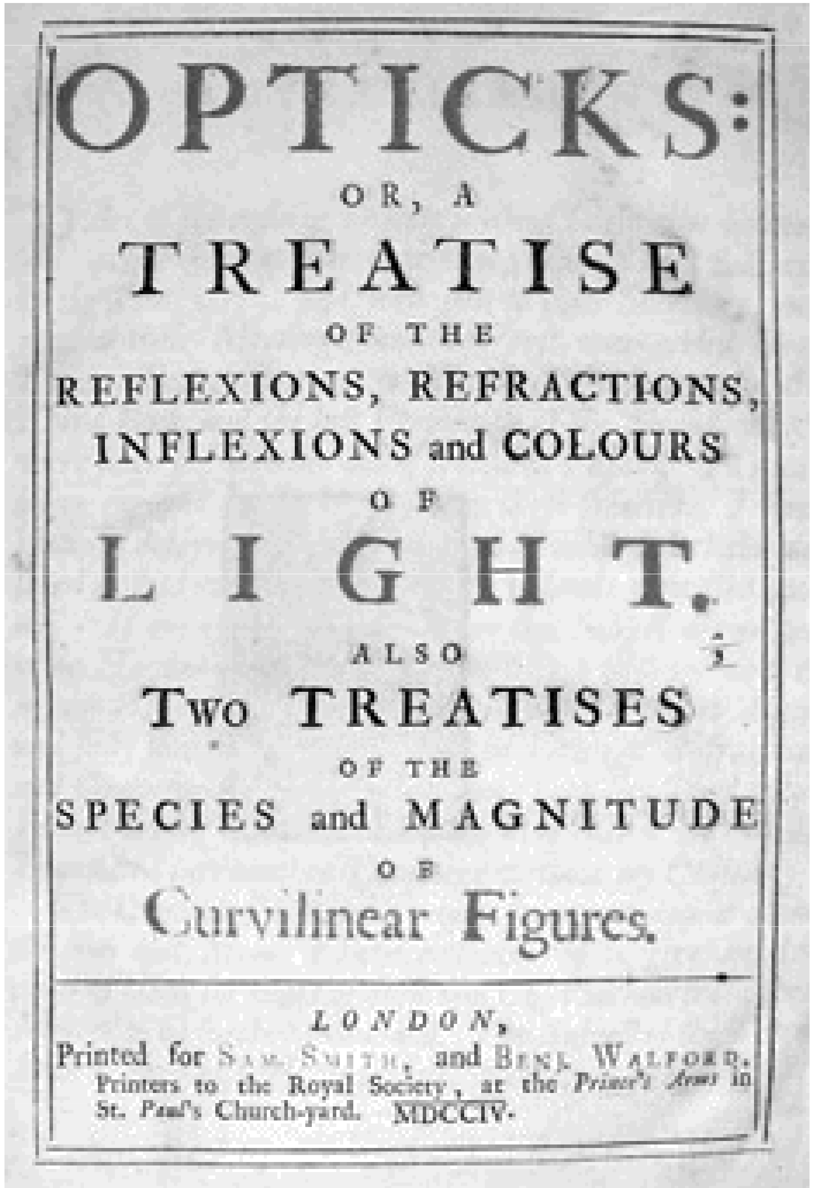
1704 anglicky, 1706 latinsky

rozsáhlé kompendium - tři knihy

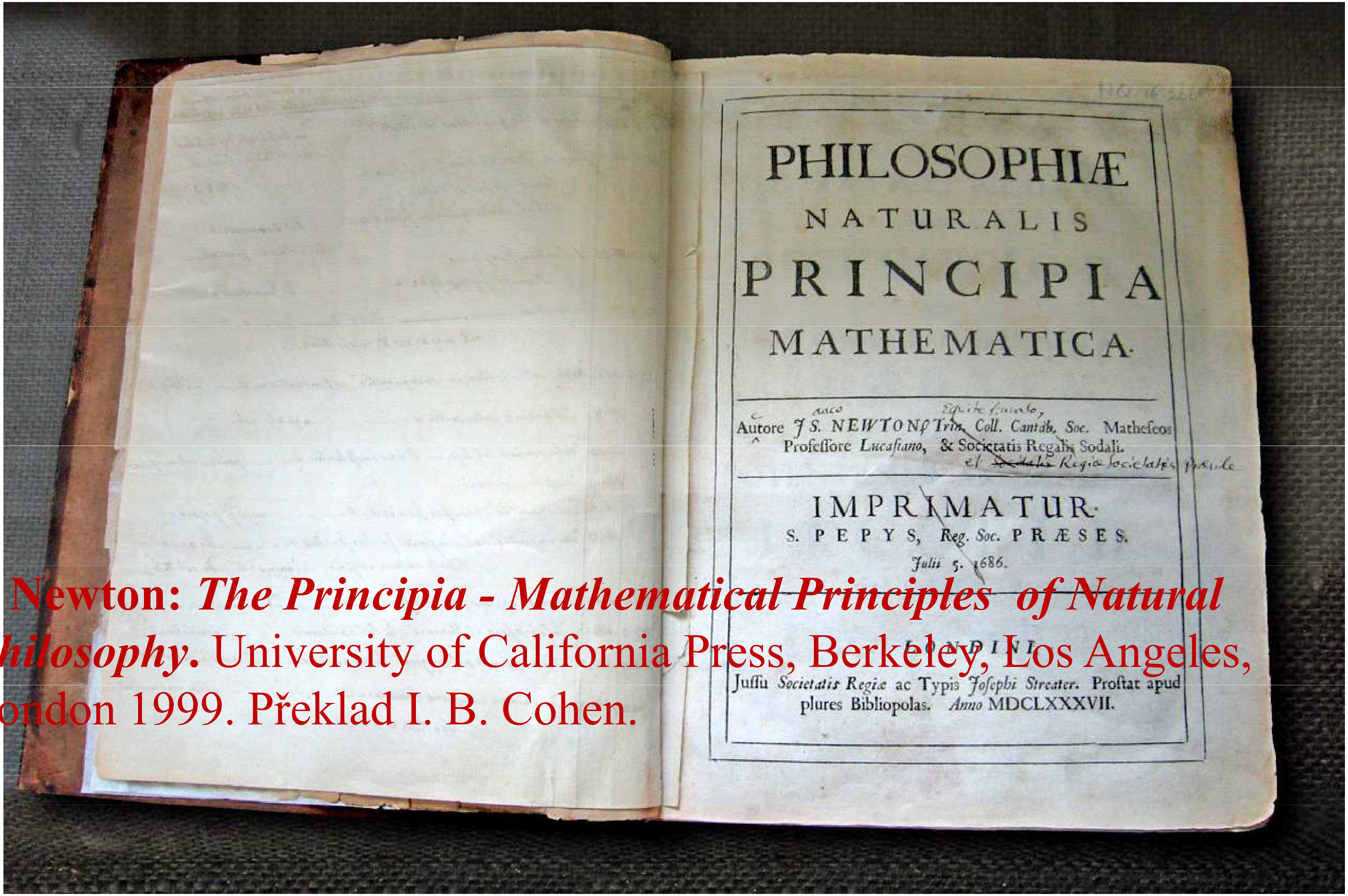
I. kniha - odraz, lom a disperze světla, analýza a syntéza barev, v příloze teorie světla a barev duhy, dalekohledy

II. kniha - barvy tenkých vrstev

III. kniha - experimentální studium difrakce, 31 otázek teoretického charakteru



Matematické principy přírodní filozofie 1687



I. Newton: ***The Principia - Mathematical Principles of Natural Philosophy*****.** University of California Press, Berkeley, Los Angeles, London 1999. Překlad I. B. Cohen.

Matematické principy přírodní filozofie 1687, 1713, 1726

tři knihy

I. kniha - O pohybu těles

dynamika pohybu hmotného bodu, tuhých těles, pohybu těles v poli centrálních sil

Kapitoly – O určování eliptických, parabolických, hyperbolických drah při daném ohnisku kuželoseček,
O přitažlivost kulových těles (důkaz slupkového teorému)

II. kniha - O pohybu těles

hydrodynamika, hydrostatika, vlnění, zákony pohybu těles v určitém prostředí

kritika Descartovy teorie vírů

Matematické principy přírodní filozofie

Principia

I. kniha, Pohybové zákony

I. *Každé těleso setrvává ve svém stavu klidu nebo rovnoměrného přímočarého pohybu, dokud není vtištěnými silami donuceno tento svůj stav změnit.*

II. *Změna pohybu je úměrná hybné vtištěné síle a nastává podél přímky, v níž ona síla působí*.

III. *Proti každé akci působí stejná reakce; jinak: vzájemná působení dvou těles jsou vždy stejně velká a míří na opačné strany.*

Principia

Akustika

Fyzikální objevy v historii byly ve skutečnosti téměř vždy doprovázeny tápáním a omyly. Všeobecně známou je Newtonova chybná úvaha při určování rychlosti zvuku ve vzduchu v knize druhé, větě čtyřicáté deváté *Principií* [6]. Střídavé tlakové změny při průchodu akustické vlny vzduchem považoval Isaac Newton (1643–1727) za izotermické děje a rychlost zvuku v dnešních jednotkách určil na $290\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Ve skutečnosti změny probíhají v plynu rychle – adiabaticky –, takže nedochází k tepelnému vyrovnání. Odpovídající rychlost zvuku při adiabatickém ději a průměrné pokojové teplotě činí zhruba $340\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

Principia

III. kniha - O světové soustavě

Kapitoly - O příčinách světové soustavy, O velikosti nepravidelností pohybu Měsíce, O velikosti mořského přílivu, O precesi rovnodennosti, O kometách

4 pravidla vědeckého bádání, 5 jevů, 42 vět a obecného poučení

„V předcházejících knihách jsme vyložil základy filozofie, ne toliko filozofické jako spíše matematické, avšak takové, že na nich mohou být založeny úvahy o fyzikálních otázkách.“

...„zbývá vyložit, vycházeje z těchto základů učení o stavbě světové soustavy“

Principia

III. kniha - O světové soustavě

Čtyři pravidla bádání:

1. K výkladu přirozených věcí se nemají akceptovat jiné příčiny než ty, které jsou pravdivé a k výkladu jevů postačující.

2. Pokud je to vůbec možné, je nutno stejným účinkům přisuzovat stejné příčiny.

3. Ty vlastnosti, které nemohou být ani zvětšeny ani zmenšeny a které přísluší všem tělesům, s nimiž můžeme dělat pokusy, musíme pokládat za vlastnosti všech těles.

4. V experimentální fyzice musíme vždy věty plynoucí ze zkušenosti indukcí pokládat za přesné nebo alespoň velmi přesně platné, dokud se neobjeví úkazy jiné, jimiž se upřesňují nebo podrobují výjimkám.

Principia

III. kniha - O světové soustavě

V jevech Newton uvádí Keplerovy zákony, jejich aplikaci na pohyb Jupiteru, Saturnu a jejich měsíců.

Ve větě IV. zkoumá pohyb Měsíce kolem barycentra soustavy Země-Měsíc a dokazuje, že tíha na povrchu Země a pohyb Měsíce jsou podmíněny stejnou silou.

Na základě studia pohybu měsíců kolem Jupiteru a Saturnu vyvodil závěry:

1. Přitažlivost existuje na všech planetách
2. Přitažlivost směřuje k libovolné planetě, je nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti zkoumaných bodů od jejího středu
3. Všechny planety se vzájemně přitahují

„***Přitažlivost existuje všeobecně u všech těles úměrně hmotám každého z nich.***“

Principia

III. kniha - O světové soustavě

IV. věta

pohyb Měsíce

Měsíc kolem Země, dostředivé zrychlení

$$a = \frac{v^2}{r}$$

p… oběžná doba, dráha $2\pi r$,

pak $$v = \frac{2\pi r}{p}$$

$$\Rightarrow \quad a = \frac{4\pi^3 r}{p^2} = 0{,}00272\ \mathrm{m\,s^{-2}}$$

kde jsme položili $p = 27{,}3$ dne

$r = 60\, R_{\oplus}$

zrychlení ve vzdálenosti Měsíce

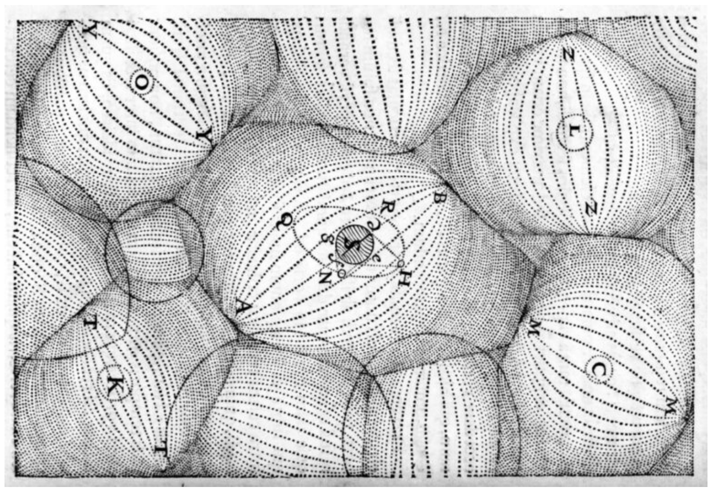
$$a' = \frac{g}{r'^2} = 0{,}00272\ \mathrm{m\,s^{-2}}$$

r'… v relativních jednotkách

Principia

Leibnitz a karteziánci vystoupili s **kritikou pojmu přitažlivost**. Podle jejich názoru jde o uzavřenou v tělesa vlastnost působit na vzdálenost, což podle nich je návrat ke skrytým vlastnostem (scholastická věda).

Proto reakce v dalším vydání Principií. „***Nelze považovat*** *za skrytou příčinu to, co odpovídá pozorování s plnou zřejmostí. Naopak,* ***skrytými jsou příčiny uváděné těmi, jež pohyb planet považují za závisící od neznámo jakých vírů*** *nějaké části smyšlené látky, nepostižitelné smyslům.*“



Newtonův gravitační zákon

zřejmě znal již r. 1665, proč dvacetileté zdržení?

1. Neznalost důkazu, že gravitační pole Země je stejné jako gravitační pole částice o hmotnosti rovné hmotnosti Země nacházející se v jejím středu (středově souměrné rozložení hmotnosti)
2. Neznalost přesných vzdáleností ve Sluneční soustavě a rozměrů Země - stanovení sluneční paralaxy r. 1672, její různé hodnoty ve třech vydáních Principií…
3. Nechuť Newtona publikovat

Dále Newton určil pomocí upřesněného III. Keplerova zákona relativní hmotnosti planet, např. Jupiteru … 1/1067 M_S

Jupiterovy měsíce - pozorování

Satellitum tempora periodica.

1d. 18h. $28'\frac{3}{5}$. 3d. 13h. $17'\frac{9}{10}$. 7d. 3h. $59'\frac{3}{5}$. 16d. 18h. $5'\frac{1}{5}$.

Distantiæ Satellitum à centro Jovis.

Ex Observationibus	1.	2	3	4	
Cassini	5.	8.	13.	23.	
Borelli	$5\frac{2}{3}$.	$8\frac{2}{3}$.	14.	$24\frac{2}{3}$.	
Tounlei *per Micromet-*	5,51.	8,78.	13,47.	24,72.	Semidiam.
Flamstedii *per Microm.*	5,31.	8,85.	13,98.	24,23.	Jovis.
Flamst. *per Eclips. Satel.*	5,578.	8,876.	14,159.	24,903.	
Ex temporibus periodicis.	5,578.	8,878.	14,168.	24,968.	

Hypoth. VI. *Planetas quinque primarios Mercurium, Venerem, Martem, Jovem & Saturnum Orbibus suis Solem cingere.*

Upřesnění III. Keplerova zákona

III. Keplerův zákon v přesném znění

$$\frac{a_1^3}{a_2^3} = \frac{P_1^2}{P_2^2} \cdot \frac{\mathcal{M}_1 + \mathcal{M}_2}{\mathcal{M}_3 + \mathcal{M}_4}$$

$\mathcal{M} \ldots \mathcal{M}_\odot$

$a \ldots$ A.U

$P \ldots$ roky

Určení hmotnosti Jupitera pomocí Kallista

$$\frac{a_1^3}{P_1^2} = \mathcal{M}_S \overset{\gg}{+} \mathcal{M}_Z$$

$$\frac{a_2^3}{P_2^2} = \mathcal{M}_J \overset{\gg}{+} \mathcal{M}_K$$

$$\left(\frac{a_2}{a_1}\right)^3 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^2 \doteq \mathcal{M}_J$$

Pro Kallista:

$$\frac{a_2}{a_1} = 0{,}012585 \qquad \frac{P_1}{P_2} = 21{,}886$$

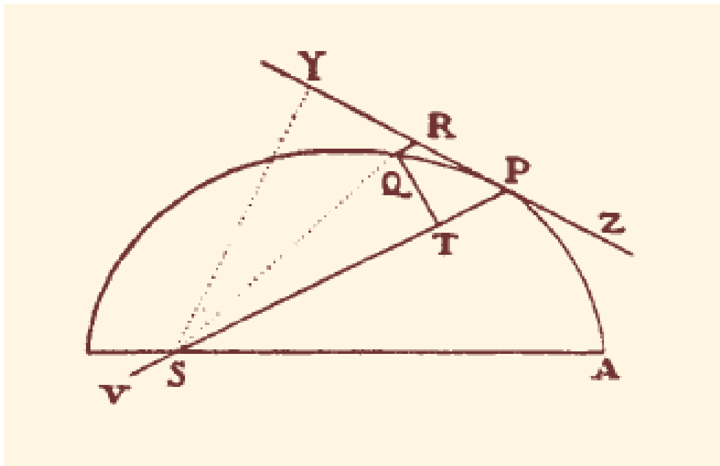
$$\mathcal{M}_J = 0{,}00095476\ \mathcal{M}_S$$

$$\frac{1}{1047}\ \mathcal{M}_S$$

Principia - problém dvou těles

Těleso P (Newton takto označoval rovněž i bod) obíhalo kolem středu S, opisovalo křivku APQ, které se dotýkala v bodě P tečna ZPR. Zavedl kolmici k průvodiči SP vyznačenou QT. Na těleso P působila síla směřující podél přímky SP, závisela pouze na vzdálenosti od S. Pohybující se těleso P by v její nepřítomnosti pokračovalo přímočarým pohybem z P do R. Tudíž v bodě R by se nacházelo tehdy, jestliže by na něj nepůsobila žádná síla. Z bodu Q blízkého k P vedl přímku $QR // SP$, která protínala tečnu v R. Čím více se v limitním přiblížení $P \rightarrow Q$, tím lépe byl předpoklad $QR // SP$ naplňován. Vzdálenost obíhajícího tělesa od tečny ve směru k S v průběhu časového intervalu byla QR. Její velikostí poměřoval Newton velikost působící síly, odchylka QR byla úměrná síle směřující k S a čtverci času, nezbytnému k pohybu od P do Q. Čas byl úměrný ploše Δa (vymezené body SQP), kterou vyjádřil prostřednictvím základny SP a výšky QT. V prvním až pátém důsledku šestého tvrzení Newton postupně odvodil vztah pro centrální sílu, která byla nepřímo úměrná $(SP^2 x\, QT^2)/(QR)$, jestliže v limitní úvaze se bod P přiblížil ke Q. Pro sílu obdržel $F \sim (QR)/(SP^2 x\, QT^2)$, (síla ~ vzdálenost/čtverec času),

V. Štefl: Zákony pohybu planet od Keplera po Newtona.
Čes. čas. fyz. **71** (2021), s. 378.



Obr. 10 Geometrický obrázek pro odvození závislosti centrální síly na vzdálenosti.

Určení dráhy komety - problém dvou těles

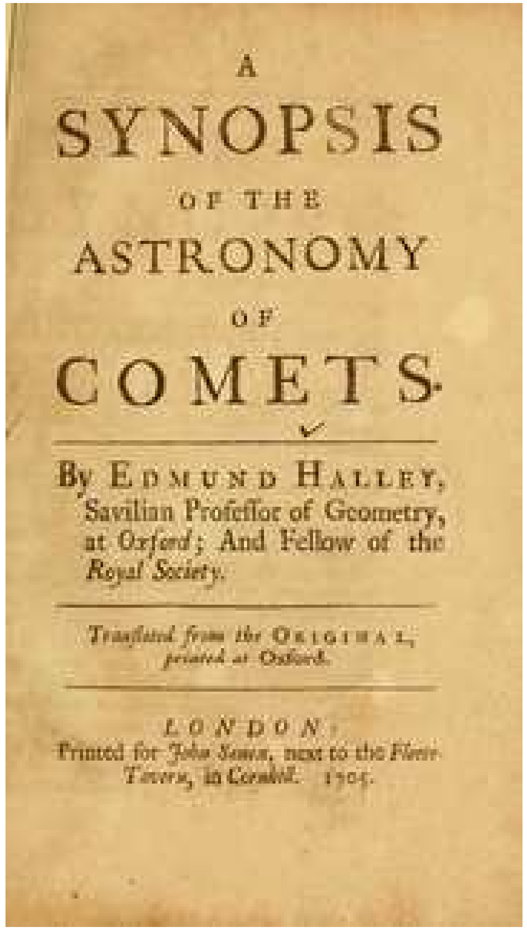
Newton rozpracoval metodu určování parametrů dráhy komety na základě tří pozorování. Řešení je vedeno **grafickými konstrukcemi,** tři pozorování určují směry na kometu ve třech polohách Země. Sestrojil projekci těchto směrů na rovinu ekliptiky, zvolil polohu komety ve středním směru a zkoumal v projekci na ekliptiku **rádius vektor komety** v druhém pozorování a tětivu mezi první a třetí polohou komety. Aproximativně a nesprávně předpokládal, že průsečík rádiusu vektoru a tětivy se pohybuje po tětivě konst. rychlostí, což neodpovídá skutečnosti. Výklad v Principiích je veden prostřednictvím **euklidovské syntetické geometrie,** což je velmi obtížné až nesrozumitelné.

Diferenciální počet a integrální počet v Principiích není použit.

Určení dráhy komety - problém dvou těles

gravitační zákon použit na řešení problému dvou těles, pohybu po kuželosečkové dráze. Newton stanovil původně chybně parabolickou dráhu komety, což neodpovídalo skutečnosti, dráha je eliptická

Edmund Halley 1656-1742
astronom, přítel a sponzor Newtona, použil jeho metodu na výpočet drah 24 komet, předpověděl návrat periodické komety z let 1531, 1607, 1682 – podobné dráhy, spis **1705**, předpověděl její návrat 1758 - 1759



Charles Messier 1730-1817 francouzský lovec komet, v lednu 1759 ji pozoroval, **Messierův katalog**

Principia - pohyb Měsíce

č. 2 Čs. čas. fyz. 59 (2009) 89

Historie výkladu pohybu Měsíce od Hipparcha k Newtonovi

Vladimír Štefl
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, Přírodovědecká fakulta MU, Kotlářská 2, 611 37 Brno

č. 1 Čs. čas. fyz. 61 (2011) 39

Historie výkladu statické teorie slapů na Zemi

Vladimír Štefl
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, Přírodovědecká fakulta MU, Kotlářská 2, 611 37 Brno

Principia - statická teorie slapů

Pro odhalení příčiny slapů - motiv práce nad přitažlivostí, v Principiích uvádí „*Objasnil jsem nebeské jevy a slapy na našich moří na základě síly přitažlivosti*“.

- přitažlivost = univerzální síla působící na vodní masy moří
- analýza působení dvou samostatných sil vyvolaných Měsícem a Sluncem - **změny slapových sil Měsíce a Slunce, jsou důsledkem proměnnosti jejich vzdáleností od středu Země**
- jednoduchý pohyb (nárůst a pokles mořské hladiny) = výsledek sčítání dvou sil vytvářejících slapy

Principia - statická teorie slapů

- změna polohy Měsíce a Slunce vzhledem k Zemi velmi pomalá, v každém okamžiku existuje **rovnovážné rozdělení vodních mas**, povrch vody vždy okamžitě při působení slapových sil zaujímá **rovnovážný tvar**, vnitřní elastické síly rovny slapovým silám

- idealizovaný předpoklad: Země pokryta nestlačitelnou kapalinou – vodou o stejné hloubce
- nepřihlížení ke složité struktuře pobřežní linie či k reliéfu mořského dna atd., i když si tuto souvislost uvědomoval, → vypočítané numerické hodnoty byly nepřesné
- objasnění slapových periodických pohybů moří na základě výkladu vzestupu a snižování hladiny, mezi mořem a dnem žádné tření, neuvažoval hloubku moří, časové zpoždění nástupu přílivu…

Principia - statická teorie slapů

maximální příliv tzv. skočné dmutí - Země, Měsíc a Slunce na jedné přímce (úplněk, nov = syzygie), působení Měsíce je zesilováno Sluncem

minimální příliv tzv. hluché dmutí - Měsíc o 90^{o} vzdálen od Slunce v kvadraturách, vliv Měsíce je zeslabován Sluncem

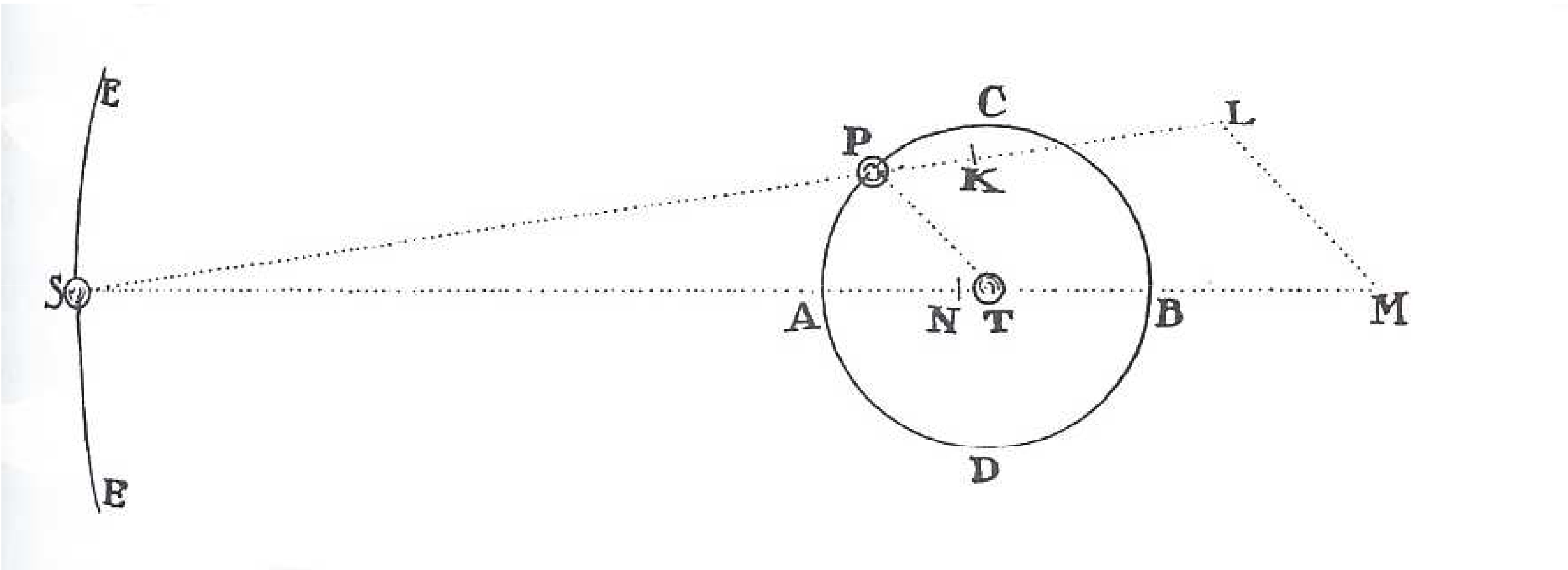
Newton:

v konjunkci a opozici měsíční a sluneční síly působí maximálně vzhledem k sobě navzájem → vysoké slapy, v kvadraturách vliv Měsíce je zeslabován působením Slunce → nízké slapy. Slapové jevy vyvolané Měsícem jsou větší než způsobené Sluncem

Principia, kniha I.

Věta 66, poučka 26

Problém tří těles, působení sil na těleso P (Měsíc): „***První síla*** *směřuje k bodu T (Zemi), jde o sílu vzájemné přitažlivosti Země a Měsíce. Pod působením této jediné síly by Měsíc musel obíhat kolem Země po eliptické dráze, nehybné nebo pohybující se, jejíž ohnisko se nachází ve středu Země a spojnice Měsíc – Země opisuje plochy úměrné časům.*



Principia, kniha I.

Věta 66, poučka 26

***Druhá síla** je přitažlivost LM, rovnoběžná s PT. Skládá se s první silou, její působení nenarušuje zákon úměrnosti ploch a časů. Tato síla neklesá nepřímo úměrně se čtvercem vzdálenosti Měsíc – Země, proto po složení s předcházející silou je výslednicí síla, pro niž neplatí zákon nepřímé úměrnosti čtverci vzdálenosti tím více, čím větší je poměr druhé síly k první při stejných ostatních podmínkách. Protože síla pod působením které těleso opisuje eliptickou dráhu kolem ohniska T musí směřovat k tomu bodu a být nepřímo úměrná kvadrátu vzdálenosti PT k němu, složená síla ve stejné míře ubývá a nutí dráhu PAB se odklánět od eliptického tvaru s ohniskem v bodě T. Tato odchylka bude tím větší, čím větší je poměr druhé síly LM k první při stejných ostatních podmínkách.*

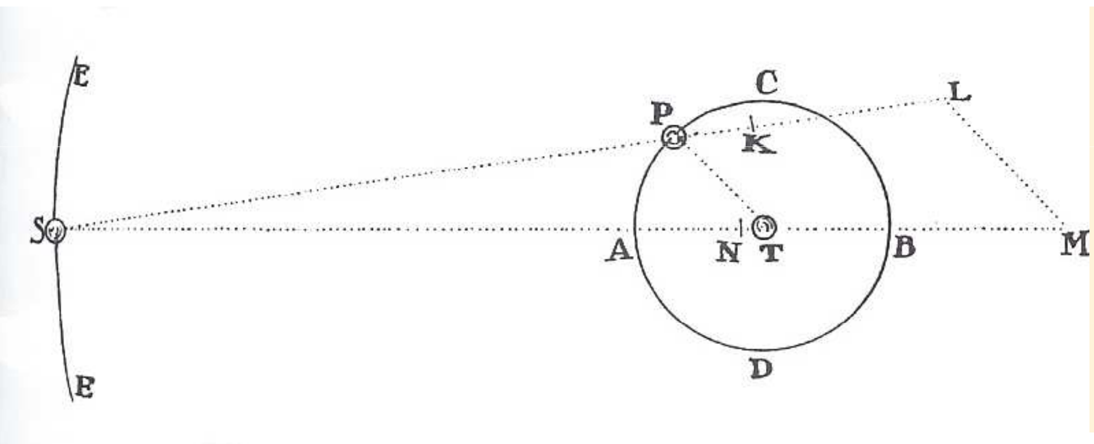
Principia - kniha I.

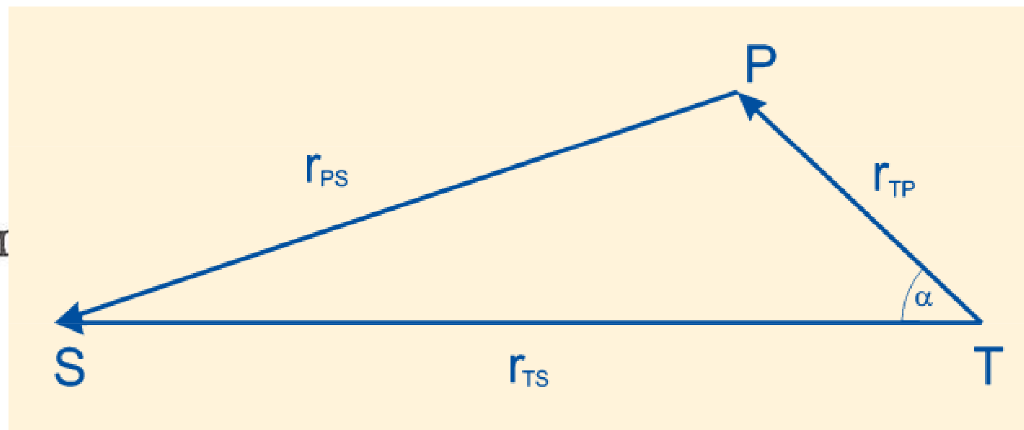
Věta 66, poučka 26

Dále na těleso P (Měsíc) působí ***třetí síla*** *po přímce rovnoběžné s ST. Při skládání s předcházejícími působí stejně, ale již nesměřuje od P k T. Odklání se od tohoto směru tím více, čím je větší poměr této třetí síly k prvním dvěma při stejných ostatních podmínkách. Tudíž při pohybu tělesa P (Měsíce) spojnice PT již nebude opisovat plochy úměrné času a odchylka od této úměrnosti bude tím větší, čím je větší poměr třetí síly k prvním dvěma.“*

vektory nebyly používány…

$$\ddot{\vec{r}}_{TP} + \frac{G(M_T + M_P)}{r_{TP}^3}\vec{r}_{TP} = GM_S\left[\frac{\vec{r}_{TS} - \vec{r}_{TP}}{(r_{TS} - r_{TP})^3} - \frac{\vec{r}_{TS}}{r_{TS}^3}\right],$$





Shrnutí výkladu sil v Principiích

- první popisovanou je **síla gravitační přitažlivosti mezi Zemí a Měsícem,** platí pro ni II. Keplerův zákon – plochy při pohybu opsané Měsícem jsou úměrné časům.
- druhá je **urychlující síla Slunce**, má dvě složky:

a) jedna je rovnoběžná se silou mezi Zemí a Měsícem.

b) další směřuje od Slunce k Zemi.

a) první neklesá nepřímo úměrně s čtvercem vzdálenosti, vnáší tak poruchy do pravidelného měsíčního pohybu kolem Země podmíněného první silou.

b) druhá složka síly v kombinaci s dvěma předcházejícími silami vyvolává odchylky od eliptického tvaru dráhy a II. Keplerova zákona.

výpočet poměru sil Měsíce a Slunce, včetně explicitního uvedení závislosti poruchových sil $\sim 1/r^3$.

Principia, kniha III.

Věta 24, poučka 19

Příliv a odliv moře probíhají v důsledku působení Měsíce a Slunce

…„Působení nebeských těles závisí na jejich vzdálenosti od Země, při menších vzdálenostech je silnější, při větších slabší, přitom v kubickém poměru pozorovaných průměrů. Tedy Slunce v zimě se nacházející ve svém ***perigeu*** *vyvolává větší působení, v důsledku čehož syzygiové přílivy jsou o něco větší (při jinak stejných podmínkách)…obdobně Měsíc každý měsíc je-li v perigeu, vyvolává vyšší přílivy, než za 15 dnů, kdy se nachází v apogeu…“*

Výklad věty 24 ve třech vydáních Principií Newton ***měnil, upřesňoval, zřejmě si nebyl úplně jist výkladem….***

Principia, kniha III.

Věta 24, poučka 19

Příliv a odliv moře probíhají v důsledku působení Měsíce a Slunce

ukázka - stará terminologie perigeum x perihelium

Pendent autem effectus Luminarium ex eorum diſtantiis à Terra. In minoribus enim diſtantiis majores ſunt eorum effectus, in majoribus minores, idque in triplicata ratione diametrorum apparentium. Igitur Sol tempore hyberno, in Perigæo exiſtens, majores edit effectus, efficitque ut æſtus in Syzygiis paulo majores ſint, & in Quadraturis paulo minores (cæteris paribus) quàm tempore æſtivo; & Luna in Perigæo ſingulis menſibus majores ciet æſtus quàm ante vel poſt dies quindecim, ubi in Apogæo verſatur. Unde fit ut æſtus duo omnino maximi in Syzygiis continuis ſe mutuo non ſequantur.

Komentář k Principiím

dynamika slapů způsobená změnami vzdálenosti

eliptická dráha Měsíce, $\varepsilon = 0{,}0549$ vzdálenost v perigeu $r = r_{ZM}(1 - \varepsilon)$, nárůst slapového zrychlení oproti **střední hodnotě**

$$\frac{1}{(1 - 0{,}0549)^3} = 1{,}18 \qquad \uparrow 18\ \%$$

eliptická dráha Země, $\varepsilon = 0{,}0167$, vzdálenost v perihelium $r = r_{ZS}(1 - \varepsilon)$, nárůst slapového zrychlení oproti **střední hodnotě**

$$\frac{1}{(1 - 0{,}0167)^3} = 1{,}05 \qquad \uparrow 5\ \%$$

Principie, kniha III.

Věta 25, úloha 6

Vypočítat sílu Slunce způsobující poruchy v pohybu Měsíce

Věta 36, problém 17

Nalézt sílu, kterou působí Slunce na pohyb moře

Věta 37, problém 18

Nalézt sílu, kterou působí Měsíc na pohyb moře

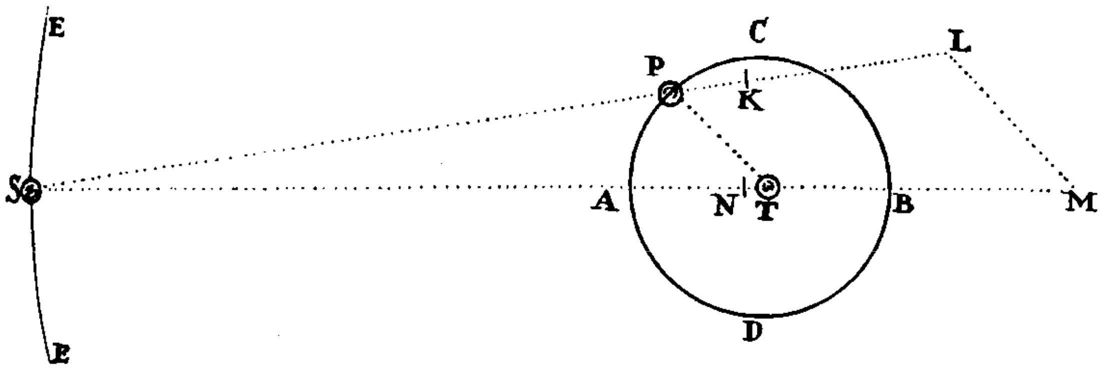
Věta 37, důsledek 2

Protože síla Měsíce pohybující mořem je v poměru k tíhové síle jako 1: 2 871 400, je evidentní, že tato síla je mnohem menší té, kterou sledujeme v pokusech s kyvadlem nebo v pokusech statických či hydrostatických. Pouze v mořských přílivech se tato síla citelněji projevuje

Principie, kniha III.

Věta 25, úloha 6

Vypočítat sílu Slunce způsobující poruchy v pohybu Měsíce



S, T, P, CADB *dráha Měsíce, zvolíme na SP délku SK, rovnou ST, vezmeme SL tak, aby platilo*

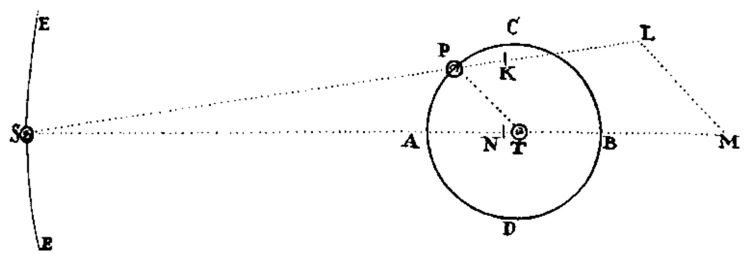
$$\frac{SL}{SK} = \frac{SK^2}{SP^2}$$

Principia, kniha III.

Povedeme LM rovnoběžně s PT; urychlující sílu přitažlivosti Země ke Slunci zachytíme délkou ST nebo SK, potom SL představuje urychlující sílu přitažlivosti Měsíce ke Slunci.
Tato síla se skládá ze dvou sil SM a LM, z kterých LM a část TM síly SM vyvolávají poruchy pohybu Měsíce, jak již bylo vyloženo ve ***větě 66*** *a jejich* **důsledcích***. Jestliže uvažujeme, že Země a Měsíc obíhají kolem společného hmotného středu, pak i pohyb Země je rušen podobnými silami; součet sil vztahujících se k Měsíci je úměrný úsečkám TM a ML. Střední hodnota síly ML se nachází v dostředivé síle, pod jejímž působením by mohl* ***Měsíc obíhat na své dráze kolem Země nacházející se v klidu, v poměru rovném kvadrátu poměru časů oběhů Měsíce kolem Země a Země kolem Slunce,***

Principia, kniha III.

tj. kvadrátů poměrů 27 dnů 7 hodin 43 minut k 365 dnům, 6 hodinám a 9 minutám, tj. v poměru jako 1 000 ku 178725 nebo 1 ku 178 29/40. V IV. úloze III. knihy bylo ukázáno, že jestliže by Země a Měsíc obíhaly kolem společného hmotného středu, pak střední vzdálenost mezi nimi by byla přibližně 60 ½ R_Z. Síla, pod jejímž působením by Měsíc mohl obíhat kolem Země nacházející se v klidu ve vzdálenosti PT, rovné 60 ½ R_Z je k síle, pod jejímž působením by mohla obíhat za stejný čas ve vzdálenosti 60 R_Z jako 60 ½ ku 60. Tudíž střední velikost síly ML je v poměru k tíhové síle na povrchu Země jako 1 . 60 ½ : 60 . 60 . 60 . 178 29/40 tj. jako 1 : 638 092,6. Na tomto základě a poměru úseček TM a ML nalezneme sílu TM; což je podstata síly Slunce, vyvolávající poruchy Měsíce.



Principia, kniha III.

Věta 25, úloha 6

Vypočítat sílu Slunce způsobující poruchy v pohybu Měsíce

shrnutí:

poměr gravitačního působení Slunce - Země ku Země – Měsíc, m = 27,32/365,24

$$\frac{\frac{M_S}{r_{SZ}^2}}{\frac{M_Z}{r_{ZM}^2}} = m^2 \frac{r_{ZM}}{r_{SZ}} \qquad \frac{M_S r_{ZM}^3}{M_Z r_{SZ}^3} = m^2$$

III. Keplerův zákon

Principia, kniha III.

Věta 37, problém 18

Nalézt sílu, kterou působí Měsíc na pohyb moře

Síla Měsíce pohybující mořem musí být vypočítána v proporcionálním srovnání se silou Slunce. Toto srovnání je třeba vypočítat z pohybu moře, který vzniká působením těchto sil. *Před ústím řeky Avon na třetí míli od Bristolu, je na jaře a na podzim celková výše vody při konjunkci a opozici těchto dvou kosmických těles (podle pozorování Samuela Sturma) zhruba 45 stop, při kvadratuře jen 25 stop. První výška odpovídá součtu obou sil, druhá jejich rozdílu. Proto nechť síly Měsíce a Slunce, když jsou na rovníku a na jejich průměrné vzdálenosti od Země, je S a L, potom S + L bude k L - S jako 45 ku 25, nebo 9 ku 5.*

R. Moray: A relation of some extraordinary Tydes in the West Isles of Scotland. Phil. Trans. R. Soc. London, **1**, 53, 1665.

zahájení pravidelných měření slapových úkazů → výšek hladin při vysokých a nízkých přílivech jakož i při odlivech

(53) Numb. 4.

PHILOSOPHICAL

TRANSACTIONS.

Munday, June 5. 1665.

The Contents.

A Relation of some extraordinary Tydes in the West-Isles of Scotland, *as it was communicated by Sr.* Robert Moray.

IN that Tract of *Isles*, on the West of *Scotland*, called by the Inhabitants, the *Long-Island*, as being about 100. miles long from *North* to *South*, there is a multitude of small Islands, situated in a *Fretum*, or *Frith*, that passes between the Island of *East*, and the *Herris* ; amongst which, there is one called *Berneray*, some three miles long, and

H more

The Royal Society is collaborating with JSTOR to digitize, preserve, and extend access to Philosophical Transactions (1665-1678). www.jstor.org

S. Sturmy: Tides at Hong Road, four miles from Bristol. Phil. Trans. R. Soc. London **3**, 813, 1668.

PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS.

Monday, *Novemb.* 16. 1668.

The Contents.

An Account of some Observations, made this present year by Capt. Samuel Sturmy *in* Hong-road *within four miles of* Bristol, *in Answer to some of the* Queries *concerning the* Tydes, *in* N°. 17 & N°. 18.

1. I Have observed, that our *Annual* Spring-Tydes do happen in *March* and *September*, either at the Tyde next before the Suns Ingress into the Æquinoctial points of *Aries* and

Full Moon, and the Quarters, Mr. *Henry Philipps* hath framed a Table for the rectification of this Error in the River of *Thames*; to be found in Number 34. p. 656, 657. of the *Phil. Transactions*.

7. The water flows nor ebbs equal *spaces* in equal *times*, but its Velocity is strongest at the first both of the Flood and Ebb, and so gradually decreaseth until FullSea or Low water. This is observ'd in Spring-Tydes only, as you may see by the following Table, which I have made from my Observations of our Tydes here. To make them always so near as to half inches, is neither easie, nor material, or usefull. But this hath been likewise observed, that it hath flowed or ebbed at the first of the Tyde one foot in 6. minutes, or that then the Tyde ran out a foot in 6. minutes, or did rise so much in height.

The Tyde-Table by Hour-quarters.

For the flowing of 5. hours.

Hours	& quart.	Feet	Inch
	1	2	7½
	2	2	6.
	3	1	6.
1...		2	6.
	1	2	6.
	2	2	5½
	3	2	5.
2...		2	5.
	1	3	3.
	2	2	3.
	3	2	3.
3...		2	3.
	1	2	2.
	2	2	1.
	3	2	1.
4...		2	1.
	1	1	9.
	2	1	8.
	3	1	8.
5...		1	8.

45. *feet circiter.*

For the Ebbing of 7. hours.

Hours	& quart.	Feet	Inch.
	1	2	7½
	2	1	6.
	3	2	6.
1...		2	6.
2...		9	0
3...		8	0
4...		6	9.
5...		5	0
6...		4	0
7...		3	0

45. *feet circiter.*

The Royal Society is collaborating with JSTOR to digitize, preserve, and extend access to Philosophical Transactions (1665-1678). www.jstor.org

Řeka Avon příliv a odliv v Bristolu

Komentář k Principií

stanovení poměru slapových sil Měsíce a Slunce ze srovnání výšek hladin

$$\frac{M_M}{r_{ZM}^3} : \frac{M_S}{r_{ZS}^3} = h_M : h_S$$

poměr výšek hladin při vysokém a nízkém přílivu v Newtonově označení (L + S) / (L - S) =

$$\left(\frac{M_M}{r_{ZM}^3} + \frac{M_S}{r_{ZS}^3}\right) : \left(\frac{M_M}{r_{ZM}^3} - \frac{M_S}{r_{ZS}^3}\right) = \left(h_M + h_S\right) : \left(h_M - h_S\right)$$

Komentář k Principiím

Newton použil údaje výšek hladin v anglických stopách při vysokých a nízkých přílivech:
- v ústí řeky Avon **Samuel Sturmy** naměřil v roce 1668 při syzygiích v jarní a podzimní rovnodennosti 45 stop - 13,7 m zatímco v kvadratuře pouze 25 stop - 7,6 metru.
- v přístavu v Plymouthu **Samuel Colepresse** obdržel údaje 41 stop – 12,2 m a 23 stop – 7 metrů. Sturmovy údaje Newton převzal:

$L \ldots F_M,\ S \ldots F_S$ $$\left(h_M + h_S\right) : \left(h_M - h_S\right) = \frac{45}{25} = \frac{9}{5}$$

$$\Rightarrow \qquad \frac{F_M + F_S}{F_M - F_S} = \frac{9}{5}$$ po úpravě $$F_M = 3\frac{1}{2} F_S$$

Komentář k Principiím

- později Newtonova korekce na postavení Měsíce, byl v časovém okamžiku odečítání výšky hladiny 30° od postavení v syzygiích, vysoký příliv byl až třetím, obdržel

$$\frac{F_M + 0{,}7986355 F_S}{0{,}857032 F_M - 0{,}7986355 F_S} = \frac{9}{5} \qquad F_M = 4\frac{1}{2} F_S$$

- **správná hodnota poměru sil je**

$$\frac{F_M}{F_S} = \frac{M_M}{M_S}\left(\frac{r_{ZS}}{r_{ZM}}\right)^3 \cong 2{,}2$$

$M_S = 2{,}7.10^7\, M_M$, $r_{ZS} = 395\, r_{ZM}$

- **kde je chyba ?**

- **předpoklad** $\dfrac{F_M + F_S}{F_M - F_S}$ **není zcela přesný**, slapový rytmus vzniká skládání dvou period, výška hladiny závisí na tvaru dna, pobřežní linie….

Relativní hmotnost Měsíce z výšky slapů

při přílivu rovnováha mezi slapovou silou a hydrostatickým tlakem, výška hladiny je úměrná slapové síle, měření na řece Avon v Bristolu - (45 : 25) stop
chyba v Principiích $F_M = 4{,}5\ F_S$, $M_M : M_Z = 1 : 39{,}8$

$$\frac{M_M}{r_{ZM}^3} : \frac{M_S}{r_{sM}^3} = h_M : h_S$$

$$\left(\frac{M_M}{r_{ZM}^3} + \frac{M_S}{r_{SM}^3}\right) : \left(\frac{M_M}{r_{ZM}^3} - \frac{M_S}{r_{SM}^3}\right) = \left(h_M + h_S\right) : \left(h_M - h_S\right)$$

Komentář k Principiím

- hmotnosti Měsíce a Slunce Newton neznal, **nemohl přímo vypočítat sílu**, kterou působí na moře

- odhad vycházel ze **znalosti poměru poruchových sil Měsíce a Slunce určený z poměru velikosti měsíčních a slunečních přílivů**, které jsou projevem těchto sil

- údaje o výšce mořské hladiny při vysokých respektive nízkých přílivech → **stanovení poměru poruchových působících sil Měsíce a Slunce na mořskou hladinu**

Principia, kniha III.

Věta 37, důsledek 3

Protože síla Měsíce pohybující mořem je k obdobné síle Slunce jako 4,4815 : 1 a protože tyto síly (kniha I, věta 66, důsledek 14) jsou úměrné patřičným hustotám Měsíce a Slunce a třetím mocninám jejich pozorovaných průměrů, pak hustota Měsíce je k hustotě Slunce v poměru

$$\frac{4{,}4815}{1}\left(\frac{32'12''}{31'16''\frac{1}{2}}\right)^{3} = 4{,}891$$

Komentář k Principiím

Jak Newton dospěl ke stanovení poměru hustot? Nechť úhlová velikost Měsíce na obloze je θ_M, platí

$$\sin\theta_M = \frac{R_M}{r_{ZM}} \qquad M_M \sim \rho_M R_M^3 \sim \rho_M r_{ZM}^3 \sin^3\theta_S$$

slapové působení Měsíce $$\frac{M_M}{r_{ZM}^3} \sim \rho_M \sin^3\theta_M$$

slapové působení Slunce $$\frac{M_S}{r_{ZS}^3} \sim \rho_S \sin^3\theta_S$$

platí $$\frac{F_S}{F_M} \sim \frac{\rho_S \sin^3\theta_S}{\rho_M \sin^3\theta_M}$$ na obloze přibližně $$\theta_S \cong \theta_M$$

$$\frac{F_S}{F_M} \cong \frac{\rho_S}{\rho_M} \cong \frac{1}{4{,}9}$$ **špatný předp.**

správně $$\frac{\rho_S}{\rho_M} \cong \frac{1}{2{,}4}$$

Principia, kniha III.

Věta 37, důsledek 4

Protože na základě astronomických pozorování je lineární průměr Měsíce k lineárnímu průměru Země jako 100 : 365, potom hmotnost Měsíce je v poměru k hmotnosti Země jako 1 : 39,788.

Věta 37, důsledek 5

Urychlující tíhová síla na povrchu Měsíce je zhruba 3krát menší než na povrchu Země…

Věta 37, důsledek 6

Vzdálenost středu Měsíce od středu Země je v poměru ke vzdálenosti střed Měsíce – hmotný střed soustavy Země - Měsíc (barycentrum) jako 40 788 ke 39 788.

Věta 37, důsledek 7

Střední vzdálenost středu Měsíce od středu Země je přibližně 60 2/5.

Komentář k Principiím

V prvním vydání *Principií* uvádí Newton poměr hmotností v $M_M : M_Z = 1:26$ v druhém vydání poměr upravuje na

$$M_M : M_Z = 1:39{,}788$$

→ Newton:„*Urychlující přitažlivost na povrchu Měsíce bude asi 3krát menší než na povrchu Země*“.

→ 100 % chyba v určení hmotnosti Měsíce → velmi nepřesné stanovení hmotného středu soustavy Země - Měsíc.

Na základě poměru relativních hodnot hmotností Měsíce a Země **propočet polohy hmotného středu – barycentra soustavy Z - M.** Přitom klade vzdálenost středů Měsíce a Země 1 187 379 440 pařížských stop, tedy 60,4 R_Z (1 pařížská stopa = 32,48 cm), průměrná vzdálenost středu Měsíce od barycentra je 1 158 268 534 pařížských stop, tudíž 58,9 R_Z .

Komentář k Principiím

Modelová situaci - dvě tělesa Země a Měsíc, barycentrum v ohnisku eliptické dráhy, pro vzdálenost středu primárního tělesa M_Z k barycentru platí $r_1 = a\frac{M_M}{M_Z + M_M}$, kde $a = r_1 + r_2$

je vzdálenost středů obou těles. Po dosazení **podle Newtona** obdržíme $M_M : M_Z = 1:39{,}8$ hmotný střed (barycentrum) leží mimo Zemi

$$r_1 = 60{,}4\frac{1}{40{,}788} = 1{,}5 R_Z$$

dále $r_2 = a - r_1 = 58{,}9$ což odpovídá Newtonovu výsledku.

Dnes známe M_M: M_Z = 1: 81,3, $r_1 = a\frac{M_M}{M_Z + M_M} = 60{,}4\frac{1}{82{,}3} = 0{,}73 R_Z$ tedy **barycentrum uvnitř Země,** přibližně 1 700 km pod povrchem. **poloha hmotného středu důležitá při interpretaci slapů**

N. Koolerstrom: Newton´s Two Moon Tests. British Journal for history of Science **24,** 1991, 369-72

Newtonovská kosmologie

Zkoumal pojmy **prostor, čas, pohyb rozdělil na absolutní a relativní,** absolutní prostor a čas existují nezávisle, našim smyslům nedostupné, absolutní čas běží rovnoměrně,

Vesmír - nekonečný prostor vyplněn hmotou, jejíž střední hustota je konst., tělesa se vzájemně přitahují, v některých případech se uplatňuje i odpuzování tlakem záření, gravitační síly působí okamžitě na jakoukoliv vzdálenost, kosmická tělesa určitého typu vznikají, vyvíjejí se a zanikají, vesmír jako celek se již nevyvíjí
střídají se v něm generace kosmických těles stejného druhu