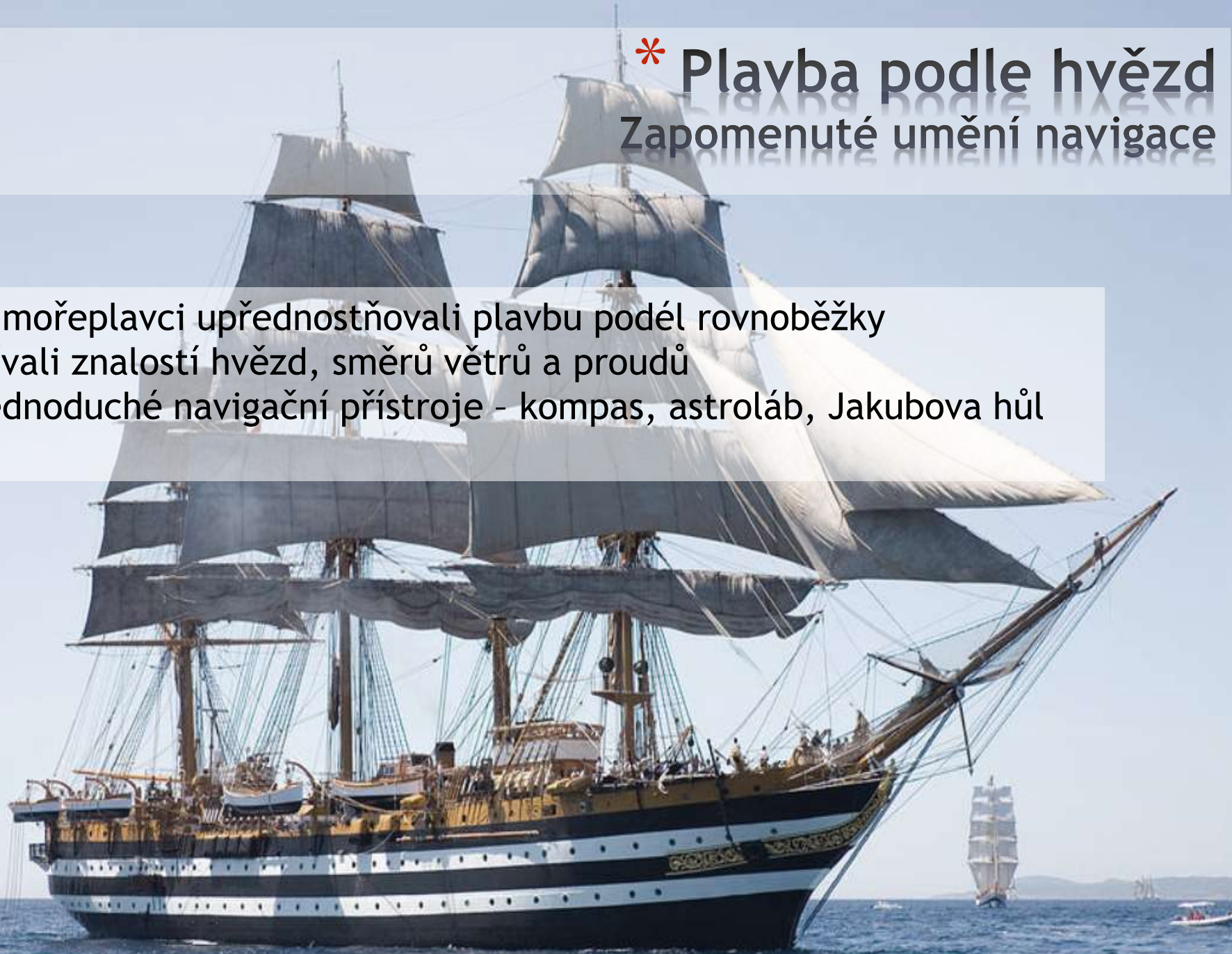


# \* Plavba podle hvězd

## Zapomenuté umění navigace

Staří mořeplavci upřednostňovali plavbu podél rovnoběžky  
Využívali znalostí hvězd, směrů větrů a proudů

- Jednoduché navigační přístroje - kompas, astroláb, Jakubova hůl



# \* Homér. Odysseia (800 př.n.l.)

## \* Plavba z Ogygie k fajácké pevnině

Cesta z Ogygie (Kalypsó, Malta) do země Fajáků (Korfu),  
možná Kréta





při plavbě k Boótu hleděl, jenž zapadá téměř už za tmy,  
k Plejádám, k Medvědu též, jenž nazýván bývá i Vozem,  
točí se na témže místě, zrak upírá na Órióna, ...

Plejády - jasná hvězdokupa s  
mlhovinou v souhvězdí býka



# \* Křišťálová nebeská klenba

Hercules

Draco

**Ekliptika** je průsečnice, v níž rovina dráhy Země kolem Slunce protíná nebeskou sféru.

Lat. *eclipsis* - zatmění, protože právě v nejtěsnější blízkosti ekliptiky nastávají zatmění Slunce a Měsíce

Nebeský rovník je vůči rovině **ekliptiky** skloněný o  $\sim 23.5^\circ$  Nebeský rovník protíná Ekliptiku v bodech rovnodennosti

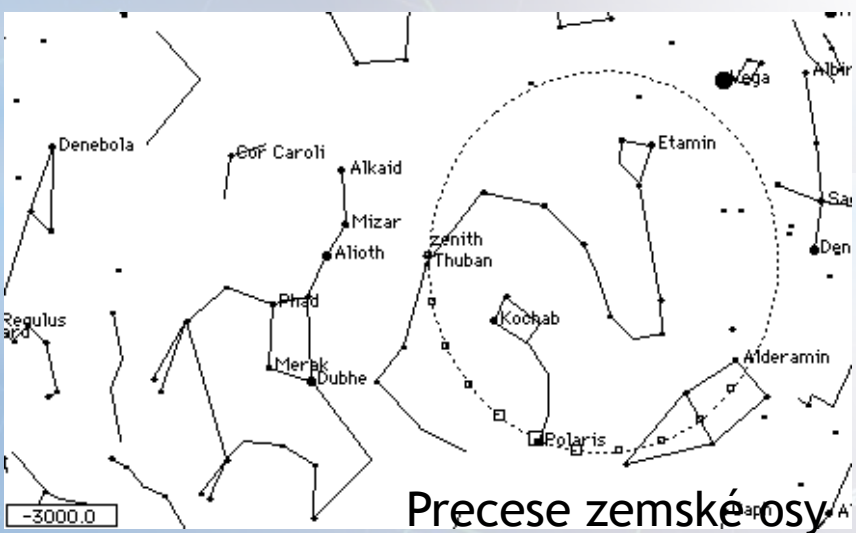
Nyní je Polárka od pólu vzdálena o méně než  $1^\circ$ .

Cassiopeia

Pers

Bootes

Ursa Minor



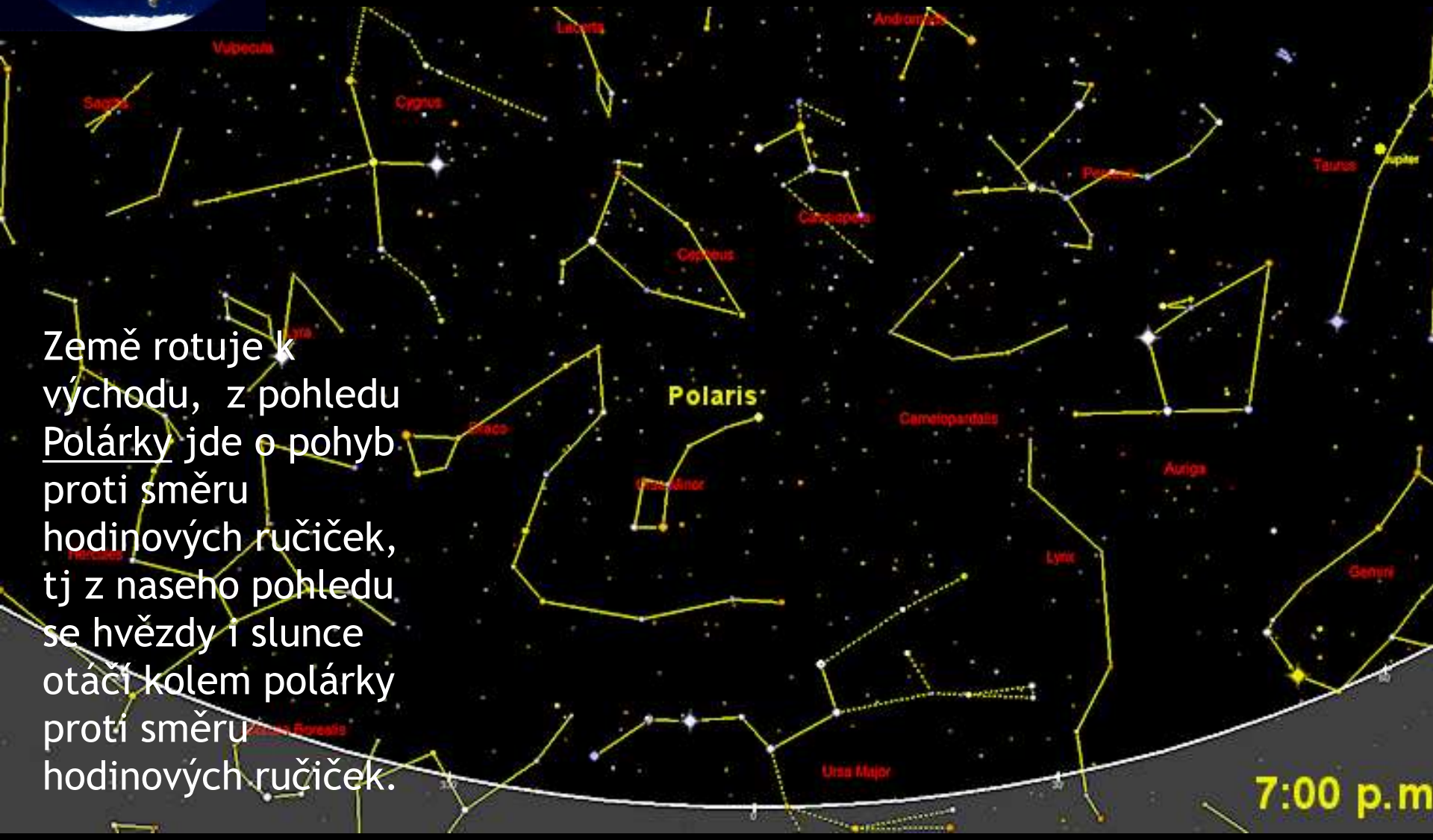
Precese zemské osy





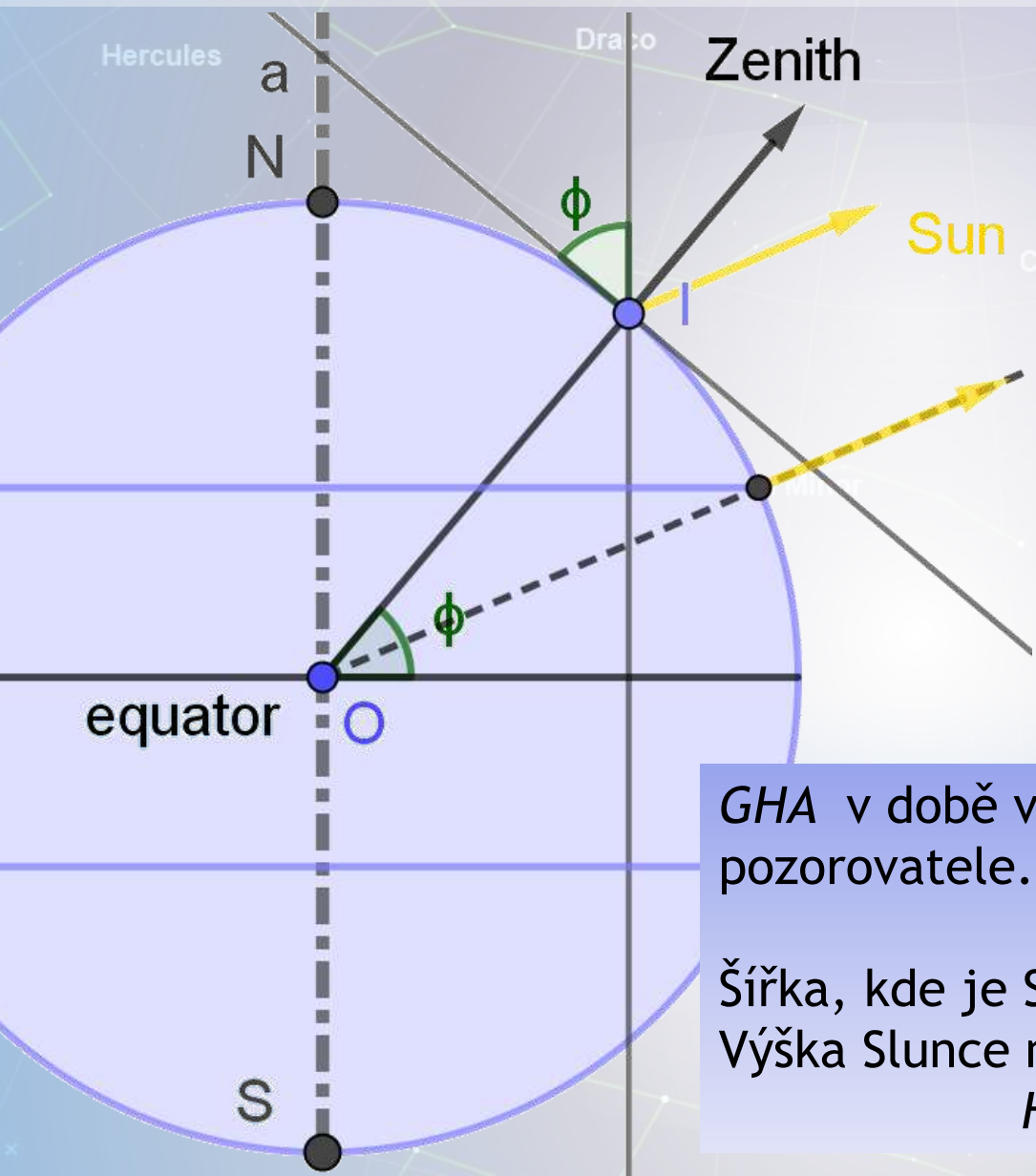
# Cirkumpolární souhvězdí - nikdy nezapadají za obzor. Malý a Velký medvěd, Cassiopeia, Drak, Cefeus, Žirafa, Perseus

Země rotuje k východu, z pohledu Polárky jde o pohyb proti směru hodinových ručiček, tj z naseho pohledu se hvězdy i slunce otáčí kolem polárky proti směru hodinových ručiček.



✧ Polárka

# Metoda kulminace Slunce



Výška Polárky nad horizontem je zem. šířka pozorovatele ( $\phi$ ).

Kolumbus určil zem. šířku u Kuby - chyba  $20^\circ$   
u Haiti - chyba  $15^\circ$ .  
Chyba délky nautickým spočtením byla ještě větší, např. u Jamajky 2,5 hodiny.

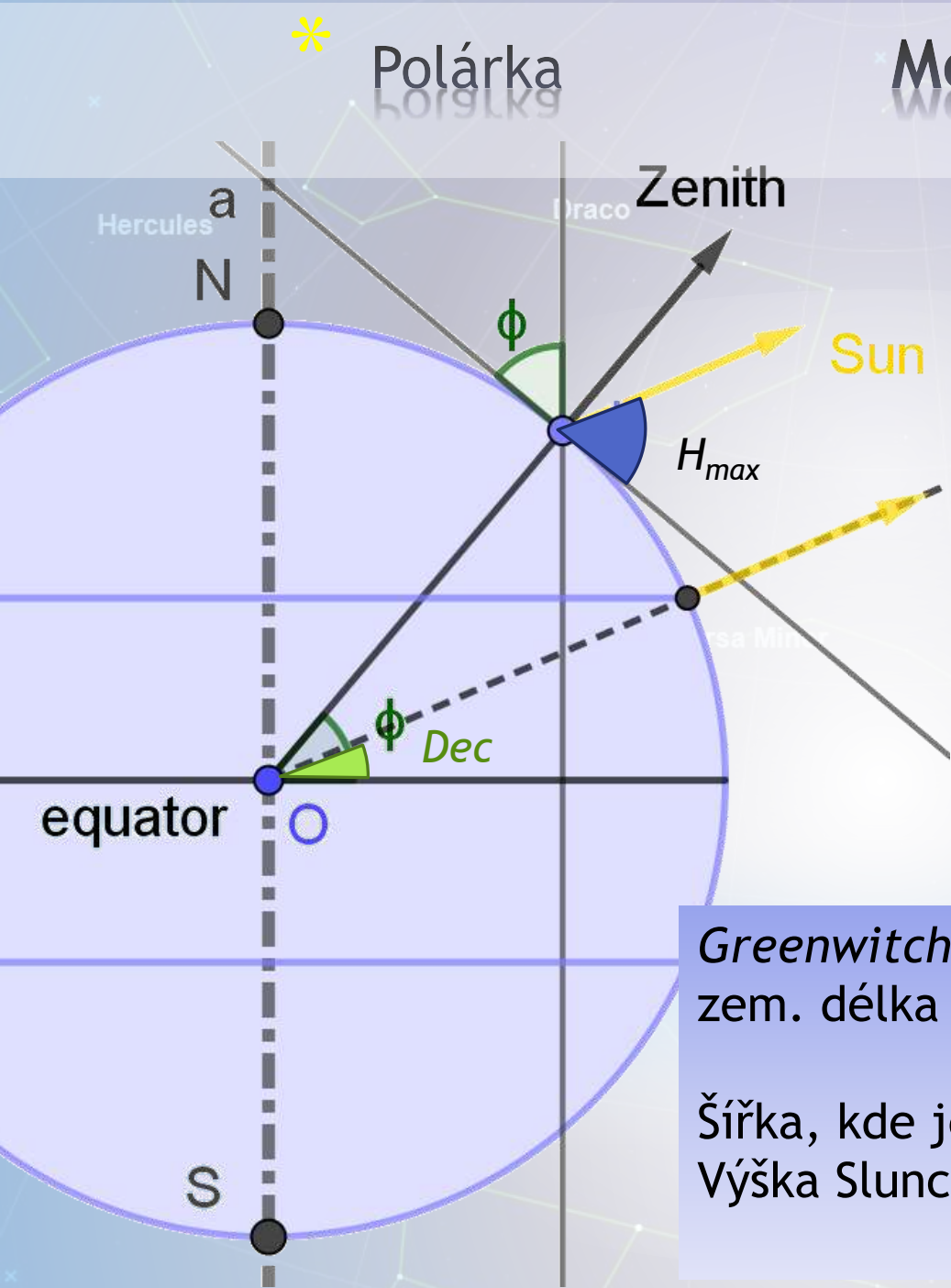
*GHA* v době v době kulminace je zem. délka pozorovatele.

Šířka, kde je Slunce v nadhlavníku  
Výška Slunce nad horizontem

*Dec*  
 $H_{max}$

$$H_{max} = 90^\circ - \phi + Dec$$

# Metoda kulminace Slunce



GHA - Greenwich Hour Angle.

V almanachu nalezneme pro dané datum a zjištěný čas kulminace GHA Slunce

Šířku odvodíme z deklinace Slunce *Dec* (z Almanachu) dosazením do vzorce.

*Greenwitský čas* v době kulminace určuje zem. délka pozorovatele.

Šířka, kde je Slunce v nadhlavníku *Dec*  
 Výška Slunce nad horizontem *H<sub>max</sub>*

$$H_{max} = 90^\circ - \phi + Dec$$



# \* Metoda kulminace Slunce

\* Petr Scheirich: [Základy Astronavigace pro začátečníky](#)

K určení zeměpisné délky  $Lon$  (angl. *Longitude* máme dvě možnosti:

- Známe-li  $GHA$  Slunce v okamžiku pravého poledne  $UT_{tn}$  (označíme jej jako  $GHA_{tn}$ ), pak

$$Lon = -GHA_{tn} \text{ pro } GHA_{tn} < 180^\circ, \quad (11)$$

$$Lon = 360^\circ - GHA_{tn} \text{ pro } GHA_{tn} > 180^\circ. \quad (12)$$

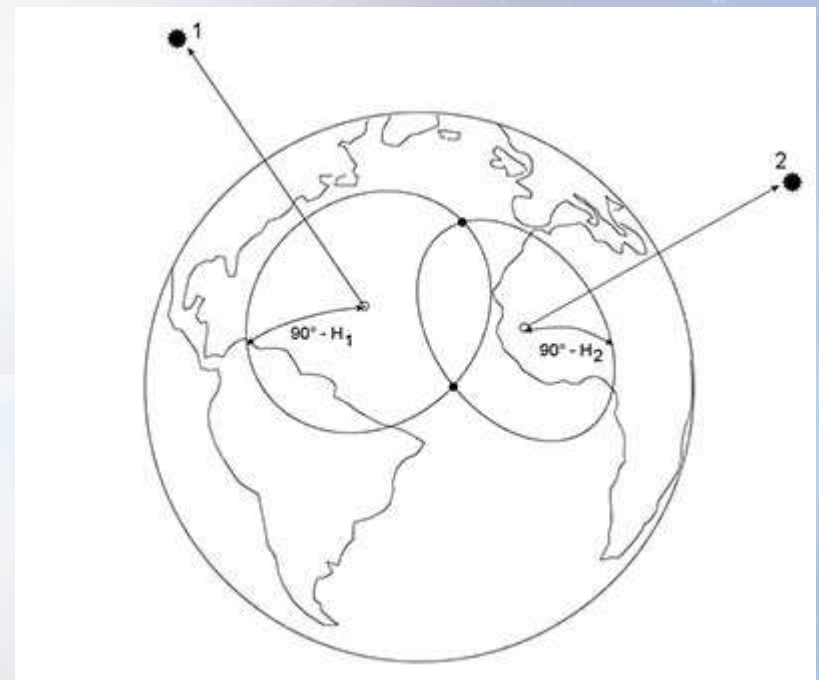
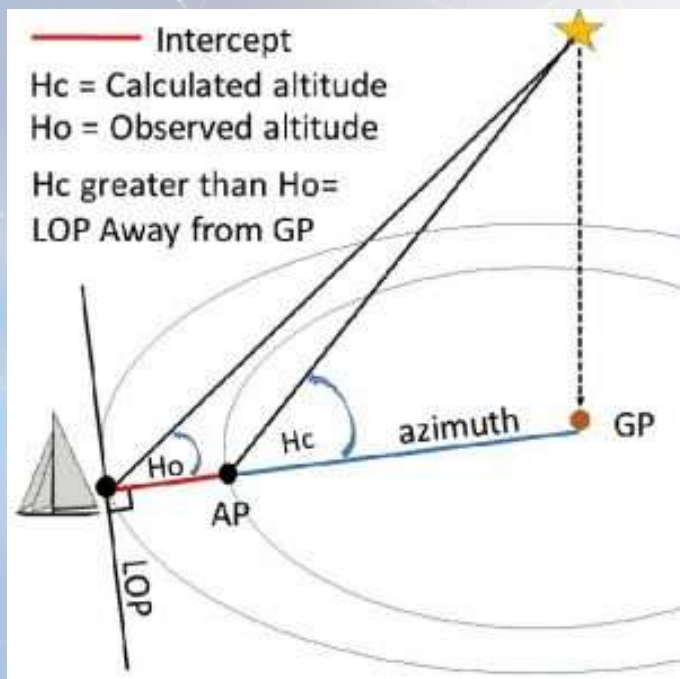
- Známe-li okamžik  $GN$  (*Greenwich Noon*), kdy nastává pravé poledne na nultém poledníku, pak

$$Lon = (GN - UT_{tn}) \cdot 15. \quad (13)$$



# \* Metoda Interceptu

- \* Určíme výšku alespoň dvou objektů, z almanachu zjistíme pro daný čas souřadnice jejich substelárních bodů.
- \* Všechna místa na Zemi se stejnou pozorovací výškou objektu leží na kružnici - tzv. poziční kružnice.



# \* Portolánové (kompasové) mapy

Hercules

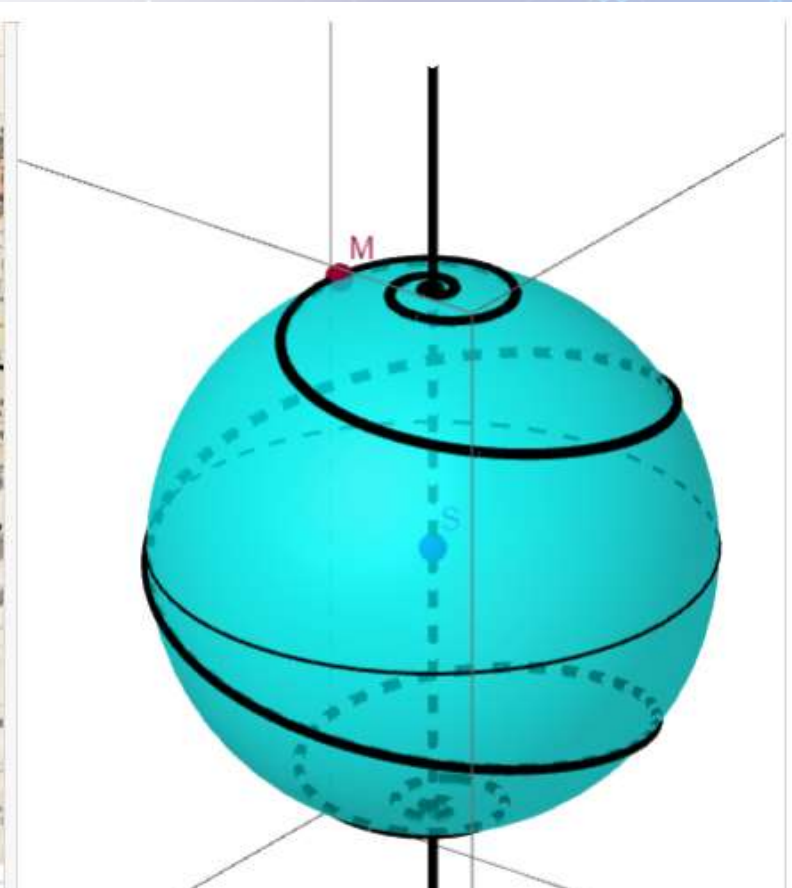
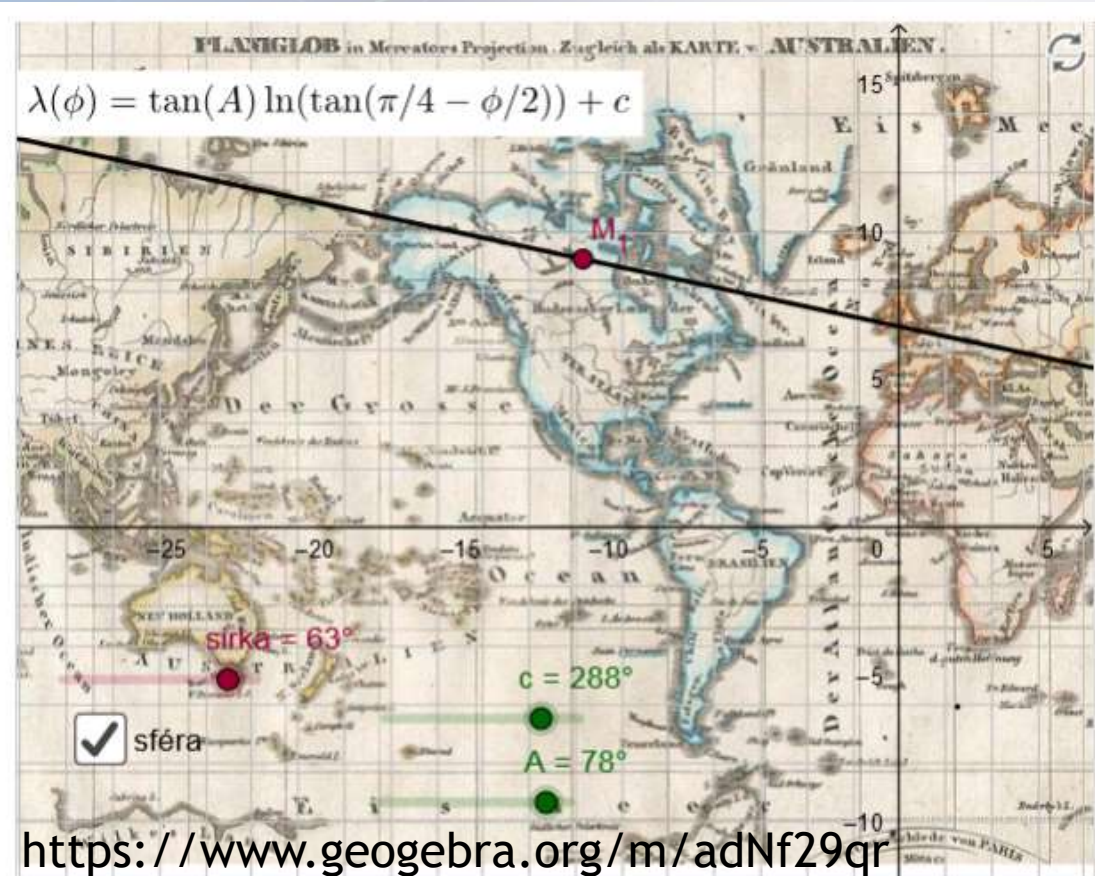
Draco

15°

13. století, Itálie, Katalánsko.

Zpočátku nebyly opatřeny geografickou sítí

Cepheus





# \* Staré navigační pomůcky - Kompas

Hercules

Draco

\* Čína 2. st. př.n.l., první zmínka 9. st. př.n.l.,  
Evropa 11. st.,

\* vyrobeno z magnetitu zasaženého bleskem  
Kompas patří mezi 4 velké čínské vynálezy (+ střelný prach,  
knihtisk, papír)

Boötes

\* Až do 15. století je primární nautické spočtení (měřeno  
logem v uzlech), astronavigace je doplňuje.

Cassiopeia



Ursa Major



Lynx



# \* Staré navigační pomůcky - Kamal

Hercules

Draco

## Určení zeměpisné šířky

- \* Kamal - Vasco de Gamma prý jen pomocí Kamalu doplul až do Indie. Ve své druhé výpravě 1498 kolem Afriky měl již kompas, astroláb, sluneční i přesýpací hodiny.

Boötes

Provázek se chytil do zubů a dřevěnou destičkou se posouvalo tak dlouho až horizont splynul se spodním okrajem a měřená hvězda s horním okrajem destičky. Délka provázku pak určovala zeměpisnou šířku.



Cassiopeia

Ursa Major

15°

# \* Jakubova hůl

Jacob ben Machir ibn Tibbon (1236-1304)?

- \* Židovský astronom (popis kvadrantu)
- \* Přeložil do hebrejštiny arabské texty, Ptolemajův Almagest, Eukleidovy Základy.



Boötes

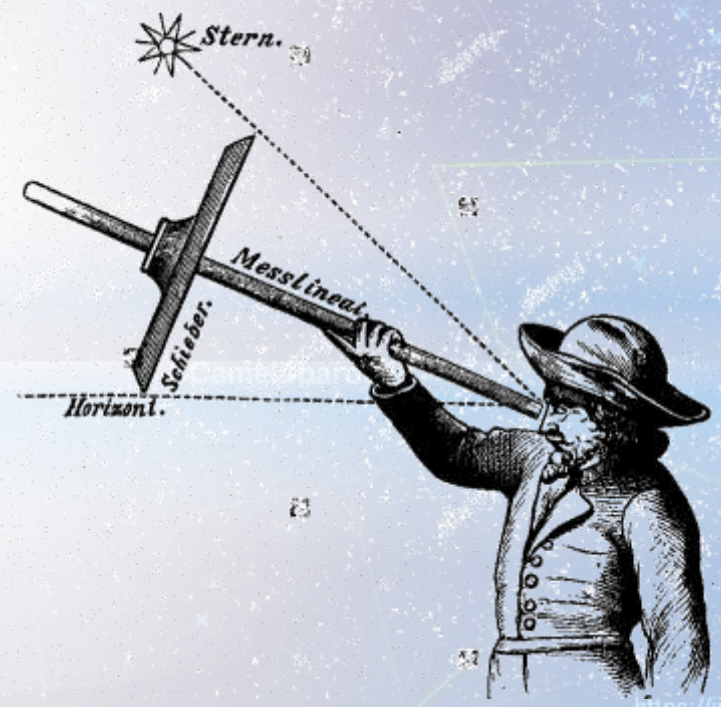
Cepheus

Cassiopeia

Pers



Peter Apian, *Introductio geographica*, 1523





# \* Galileho vojenský a geometrický kompas, 1597

- \* Navigace:
- astrologická
  - radiová
  - satelitní



konstrukce pravidelných mnohoúhelníků,  
výpočet povrchu, objemu, odmocnin,  
kruhové výseče...

Galileo prodal na 60 luxusních kompasů  
spolu se spisem.



# \* Staré navigační pomůcky - Astroláb

Hercules

Draco

## Určení zeměpisné šířky

Boötes

Ursa Minor



? Hipparchos (190-125)

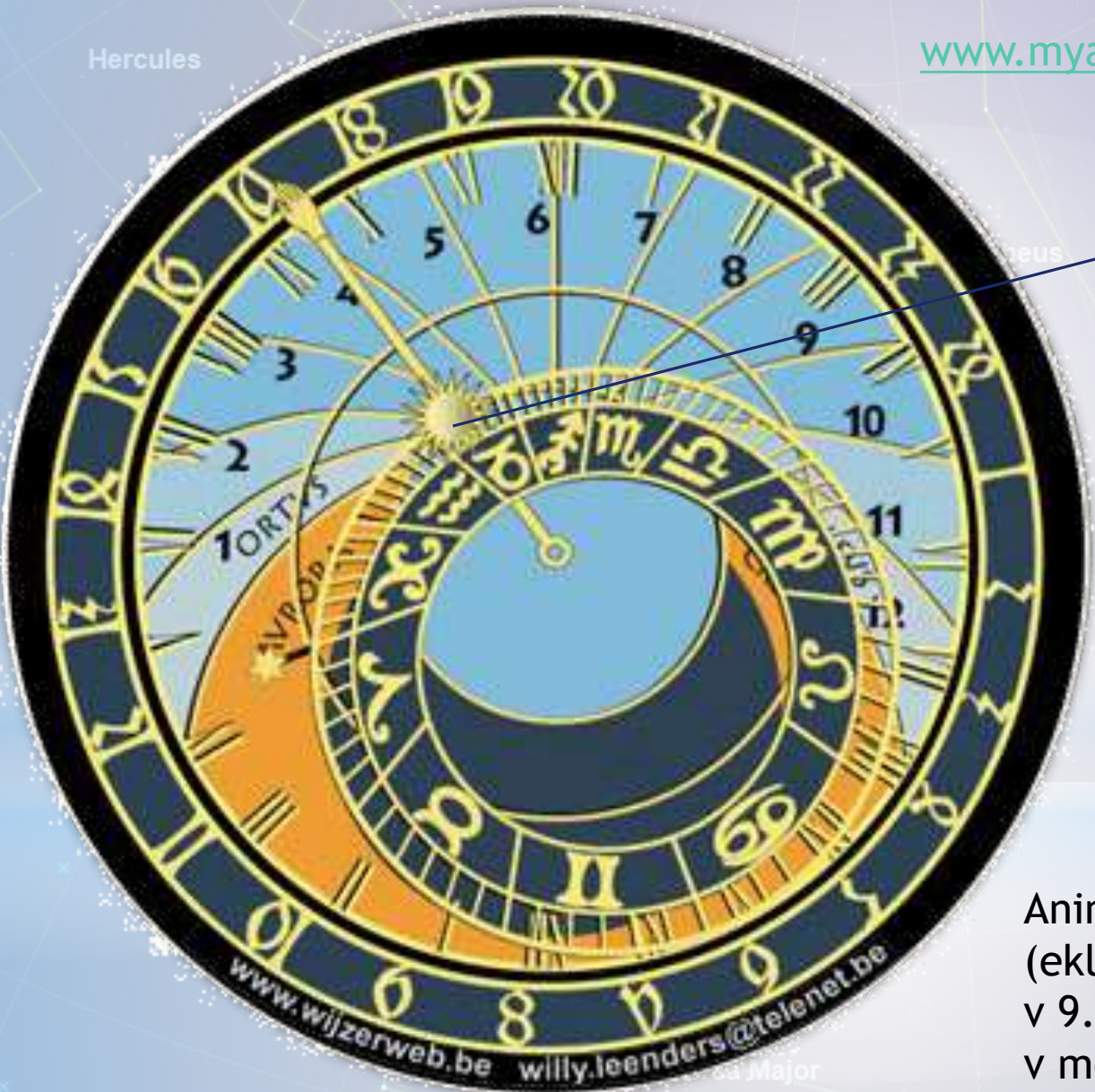
Apollonius z Pergy (262 - 190)

- \* Mosazný disk (mater)
- \* Stereografická projekce nebeské klenby
- \* Otočná síť ekliptiky se zvěrokruhem
- \* Alhidáda - otočné pravítko pro určení úhlové výšky nebeských těles



# \* Astroláb

[www.myaastrolabe.org](http://www.myaastrolabe.org)



Slunce vzhledem k horizontu i ve zvěrokruhu

Hercules

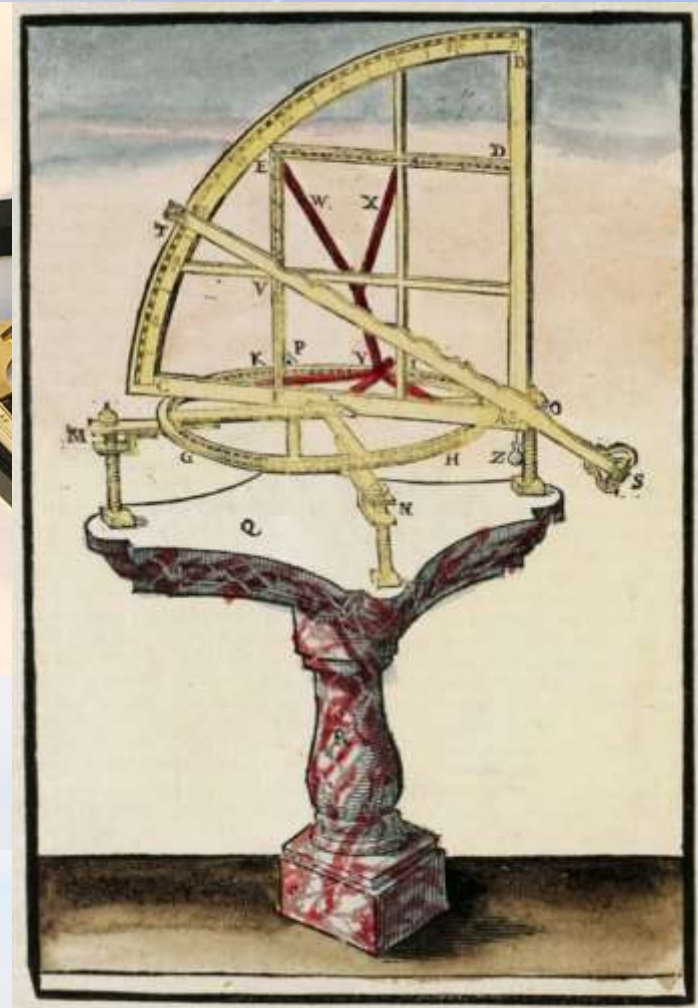
Cassiopeia

Camelopardalis

Animace pohybu zvěrokruhu (ekliptiky) a čtyřadvacetníku v 9.30 dopoledne (skok animace v měsíčních intervalech)



# \* Staré navigační pomůcky - kvadrant



Ptolemaios: *Almagest* 2. st. n.l.,  
John Davis: *Seaman's Secrets* 1594  
Tycho Brahe měřil polohy hvězd stěnovým  
kvadrantem s přesností 1'.

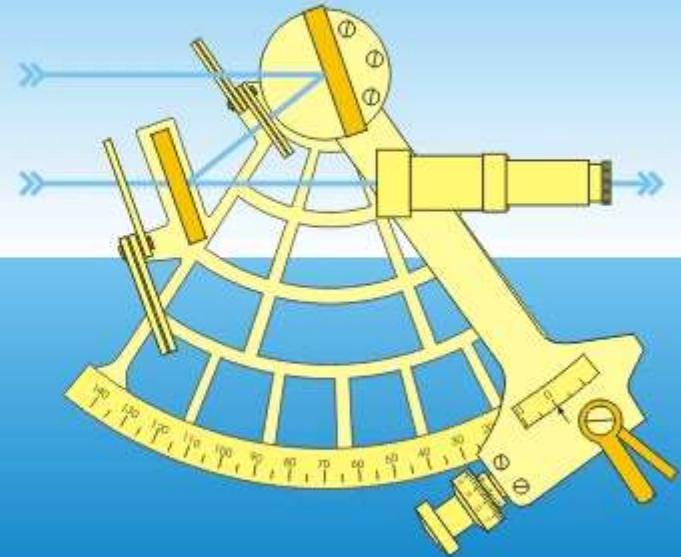
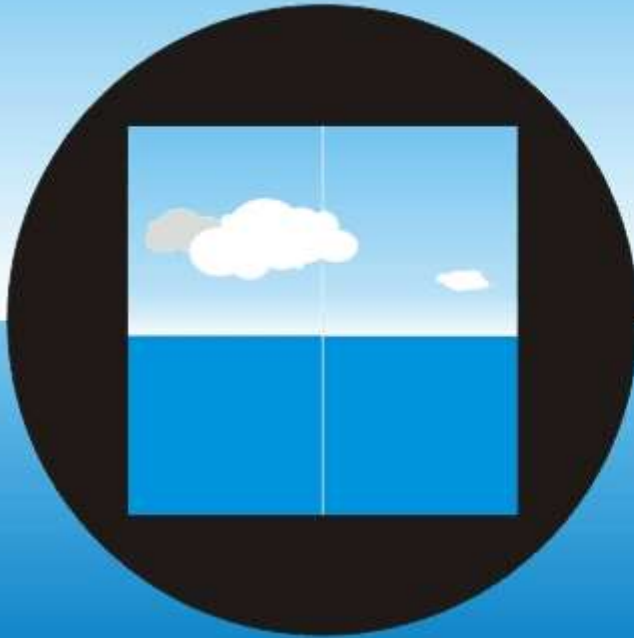
Zrcadlový kvadrant (oktant) i sextant  
- Isaac Newton 1699, John Hadley 1730.  
Přesnost sextantu je asi 30'.

Tycho Brahe, 1580



# \* Sextant

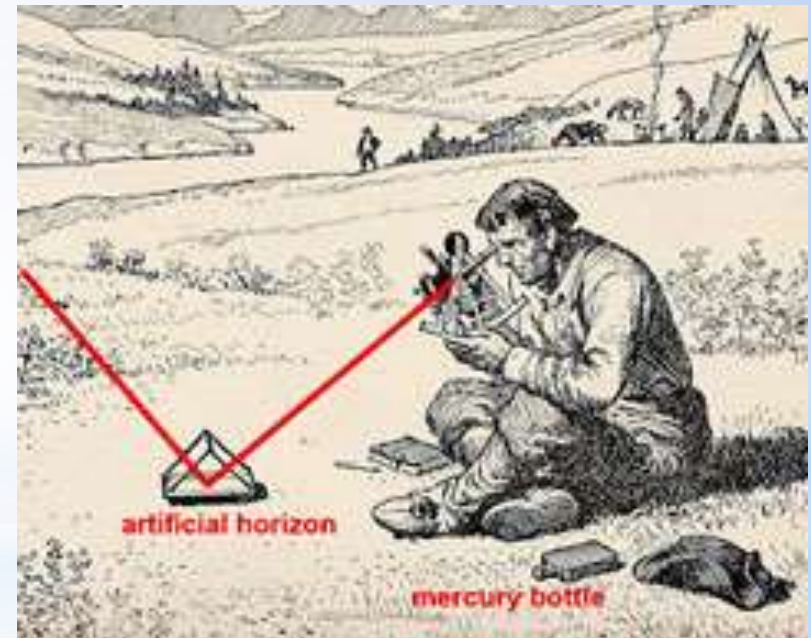
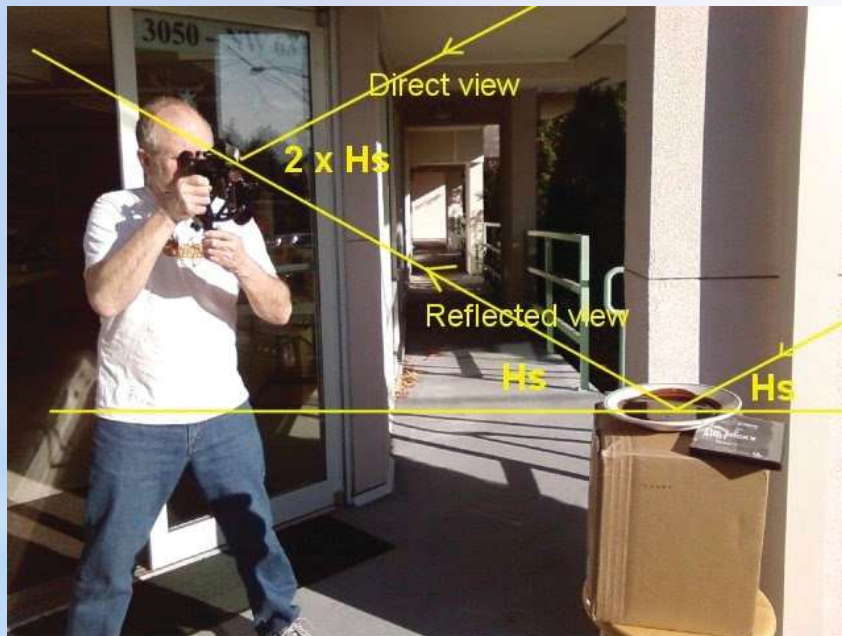
Herc **1** point the sextant to the horizon



Wikipedia, Joaquim Alves Gaspar, CC

překrytí odrazu pozorovaného tělesa v polopropustném zrcadle s obrazem horizontu

\* Metoda umělého horizontu

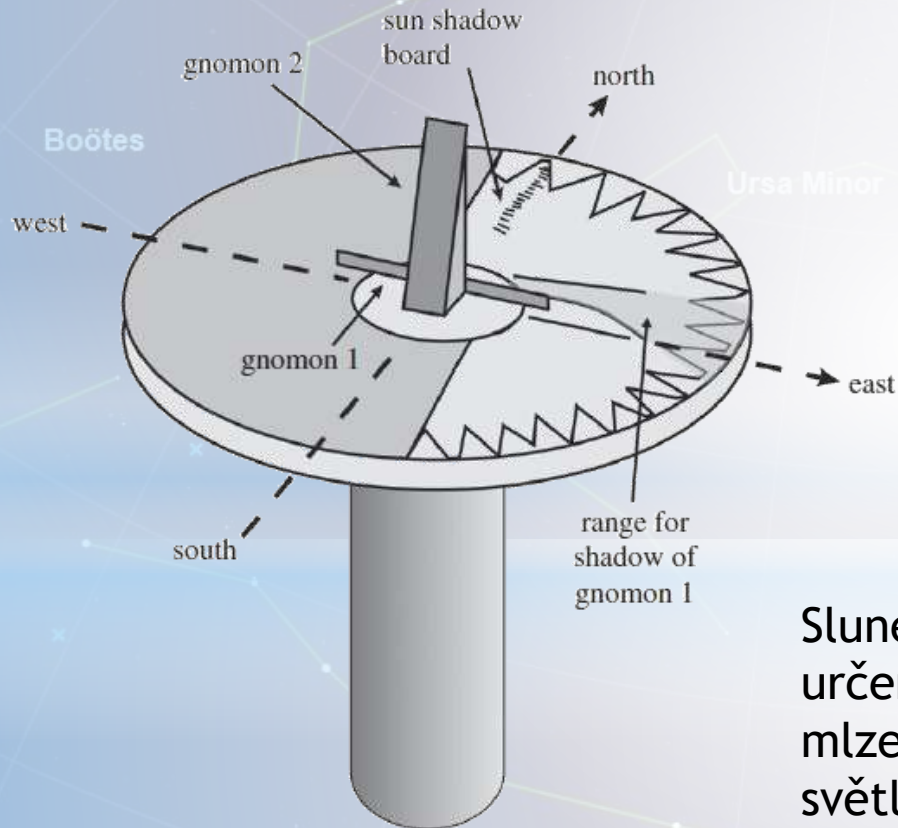


# \* Staré navigační pomůcky

Hercules

Draco

\* Sluneční kompas (Vikingové, 8-11. st.)  
Azimutový kruh (bearing dial)



Sluneční kameny - měly údajně sloužit k určení polohy Slunce za mraky nebo v mlze. Využívaly k tomu polarizovaného světla v atmosféře (turmalín, cordierit).

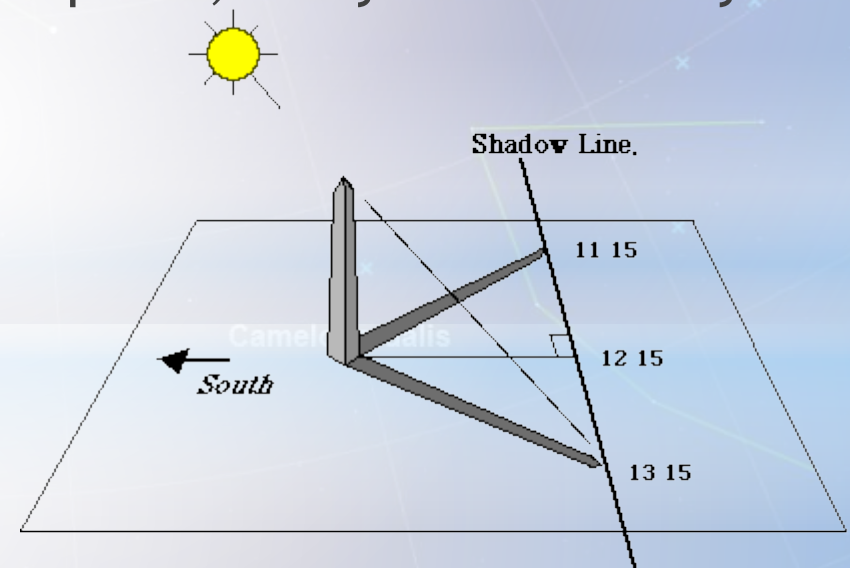
Ursa Major



# \* Staré navigační pomůcky - Gnómon

- \* starořecky ukazatel, indikátor
- \* Svislý obelisk, přesně určí jen poledne
- \* ve starém Egyptě byli obelisky symbolem slunečního boha, zdobily nádvoří slunečných svatyní.
- \* 5000 let př. n. l. Irsko, Babylón, Egypt, Čína
- \* Anaximandros z Milétu - gnómon ve Spartě, který měří všechny hodiny dne, 550 př. n. l

- \* V období rovnodennosti se stín pohybuje po úsečce, jinak po hyperbole. Přesné lokální poledne je dáno nejkratším stínem.



General Example : at Local Noon, - here 1215 - the Sun gives the shortest possible shadow.

# \* Staré navigační pomůcky - Gnómon

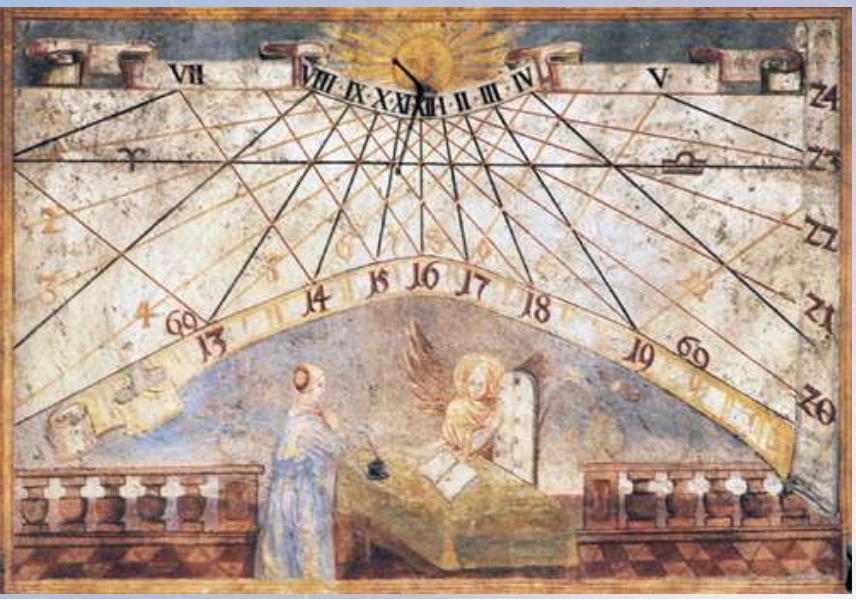
- \* Nejznámější je obelisk na náměstí sv. Petra v Římě (25 m), 330 tun, kam jej nechal dopravit císař Caligula. Obelisk se stěhoval celkem třikrát (Héliopolis → Alexandrie → Circus Neronus → nám. Sv. Petra)





15°

# \* Sluneční hodiny



Boötes

Ursa Minor

Cassiopeia

Pers

Sluneční hodiny ukazující i délku stínu můžeme použít k určení času i světových stran, pokud známe datum. Otáčíme hodinami, dokud se konec stínu nedotkne datumové linie. Pak 12 hodin ukazuje na sever.

Camelopardalis



Konstrukce slunečných hodin [Simopt](#)

Sluneční hodiny ve Stromovce →

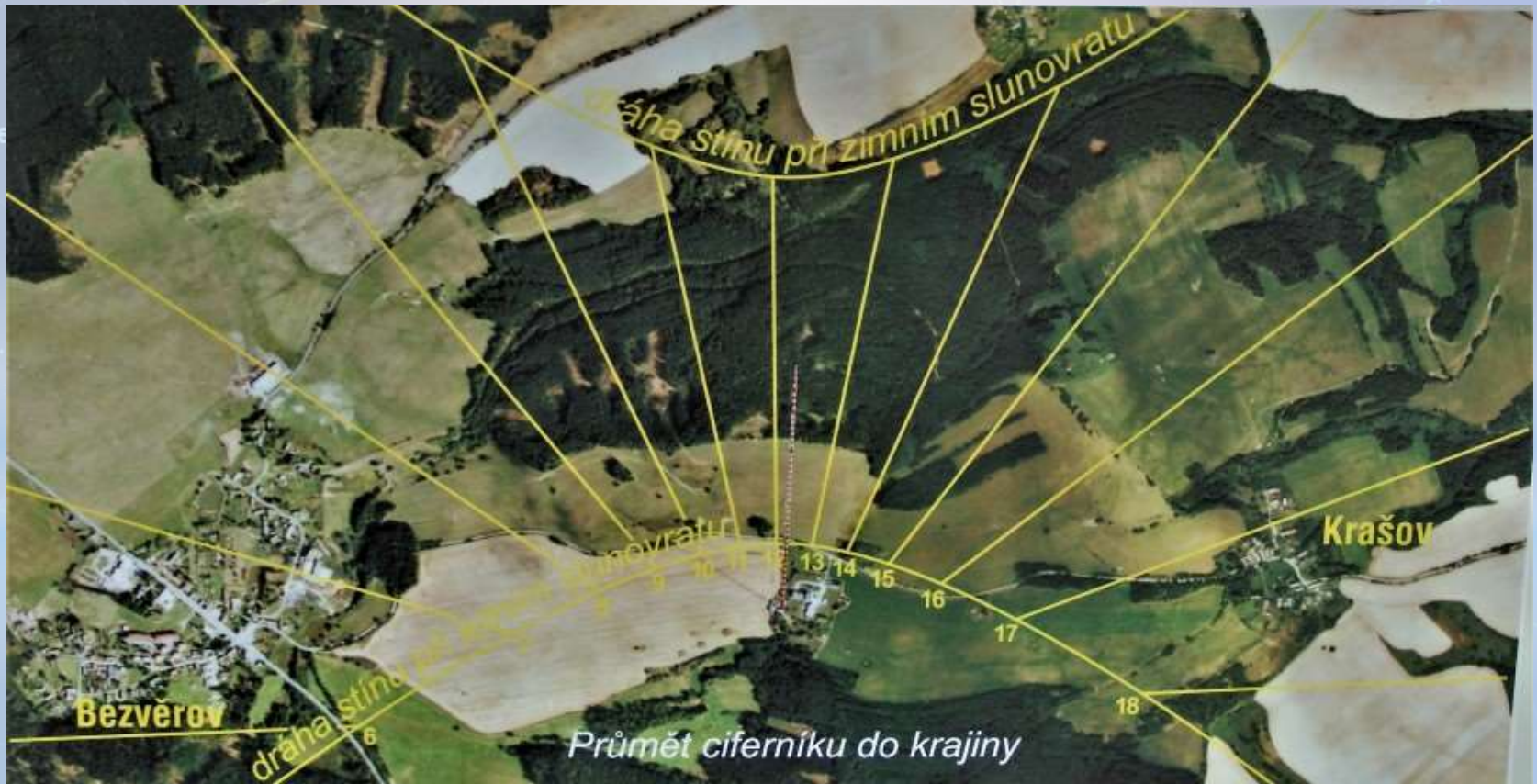
Livny

<https://in-the-sky.org>



# \* Sluneční hodiny

347 m vysoký, 30 km od Plzně  
20. 3. 2018 Sluneční hodiny





# \* Určení hvězdného času Nocturnal

Hercules

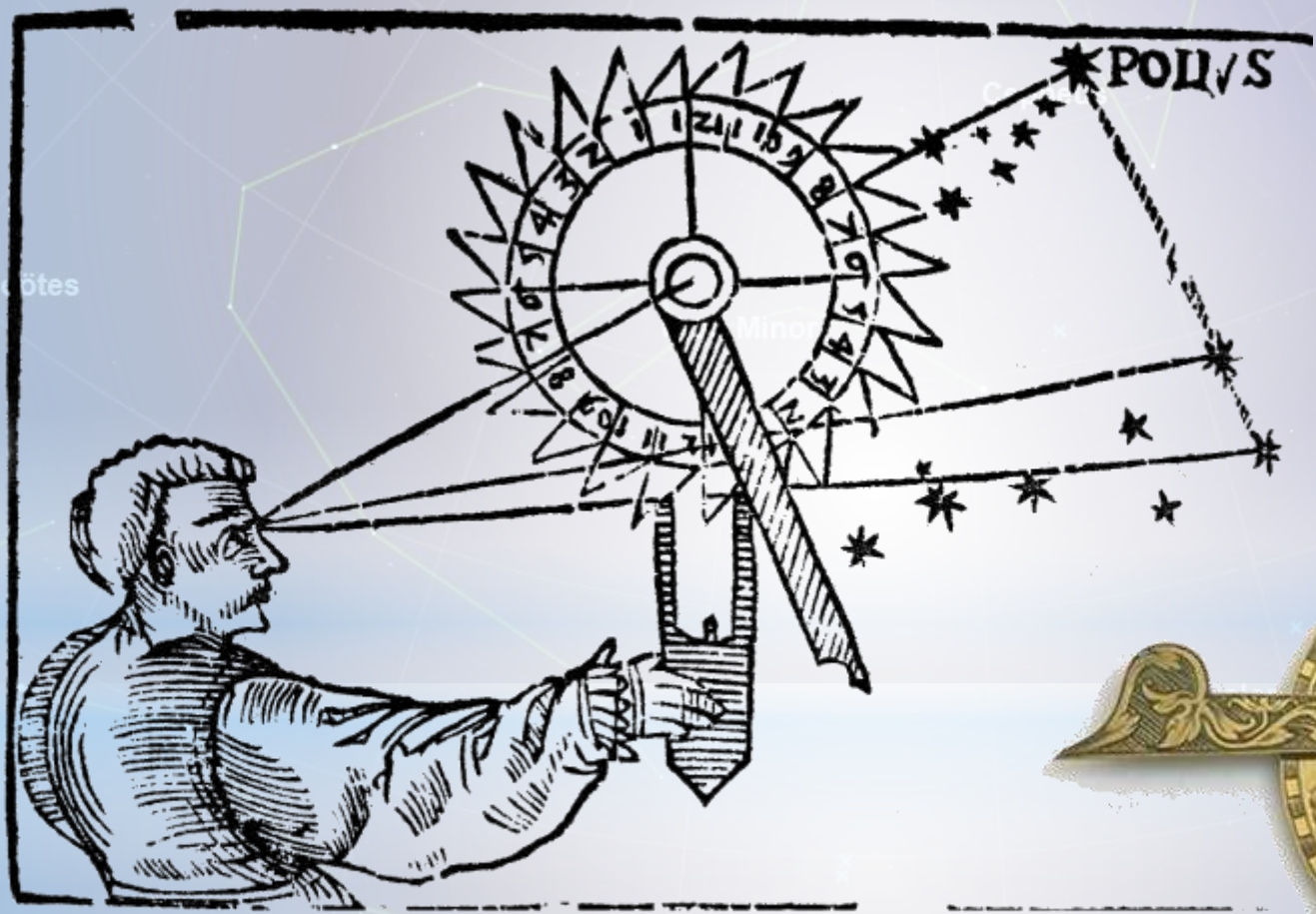
Draco

Boötes

Minor

Cassiopeia

Pers



Dřevoryt ze spisu Petra Apiana (1495 - 1552), ilustrující způsob určení hvězdného času pomocí Polárky a hvězd ve Velkém voze. Tato a další ilustrace jsou převzaty z knihy Vesmír J. Grygara, Z. Horského a P. Mayera (Mladá Fronta, 1979)

Ursa Major

Lvny

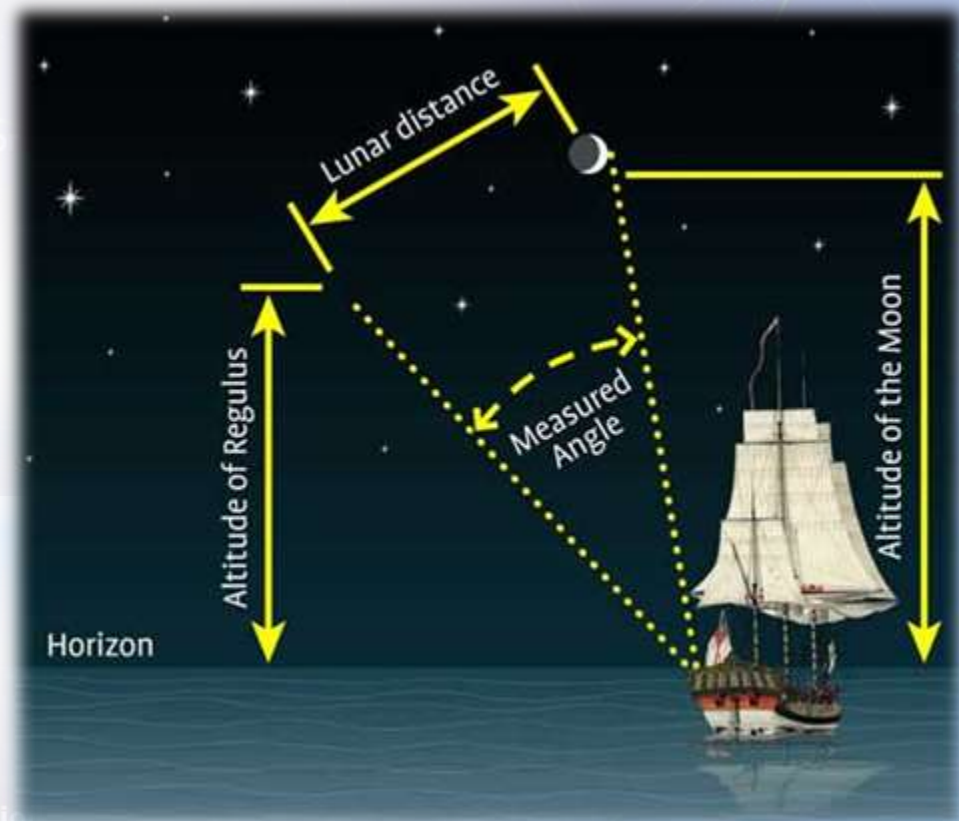
# \* Metoda lunárních vzdáleností pro určení zem. délky

\* Hercules  
Draco  
\* Gemma Frisius 1530

\* Měsíc se pohybuje 27,3 x pomaleji než ostatní hvězdy - vysoké nároky na přesnost.

\* Newton, Euler popsali nepravidelnosti pohybu Měsíce, ale predikce nebyla stále dostatečně přesná.

\* Tobias Mayer, 1755, tabulky s přesností 1`.





# \* Určení času

## Určení zeměpisné délky = určení času

### \* Izochronní kyvadlo

Christiaan Huygens : 1655 netlumený pohyb kyvadla  
1675 patent setrvačky

### \* Chronometr

John Harrison (1693 – 1776)

\* 1714 – Soutěž Britského parlamentu Longitude Act

1784 – uznáno přidělení 20 000 liber

\* 1715 – první model 250 kg

\* 1761 – H4, setrvačka, průměr 12 cm  
nejslavnější hodiny na světě  
James Cook použil na své druhé cestě  
(1772-1775) kopii chronometru H4.



# \* Akustická lokace



- \* 19. stol. - majáky s podvodními zvony
- \* 1916 - použití pro lokalizaci vzducholodě
- \* Vyhodnocení - přímé/nepřímé metody, triangulace **Time Difference Of Arrival**
- \* **Sonar (SOund Navigation And Ranging)** 1912, vývoj zřejmě uspíšen zkázkou Titaniku



Akustická zrcadla, Denge, Anglie



# \* Radar (Radio Detection And Ranging)

- \* 1938 první radiolokátory
- \* Aktivní - ozařuje cíle elektromagnetickou energií a zachycuje odražený signál
- \* Pasivní - pouze přijímá signál z letadla, fungují na principu multilaterace (Time Difference of Arrival)



*Silent Guard / ERA, 2013*



*Vojenský 3D radar z Izraele / 2021*

# \* Radary v ČR



MSSR Buchtův kopec



Vojenský přehledový radiolokátor RL4



Radar NATO u Nepolis na Královéhradecku.

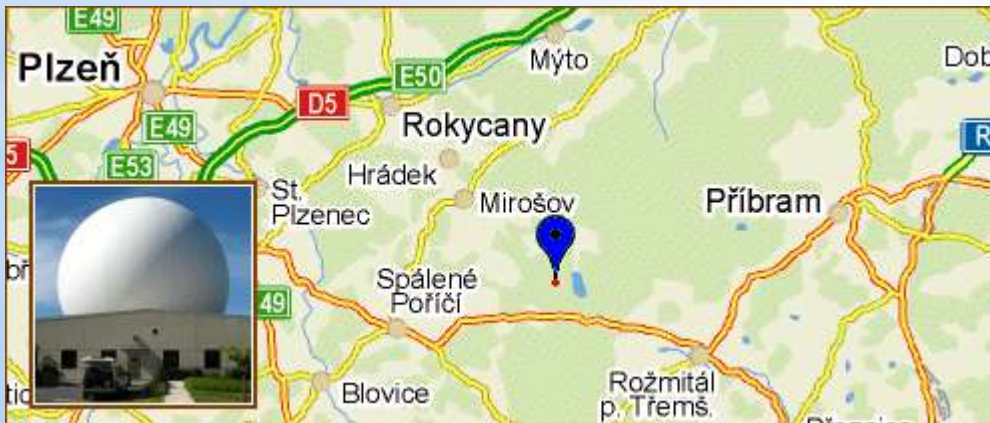
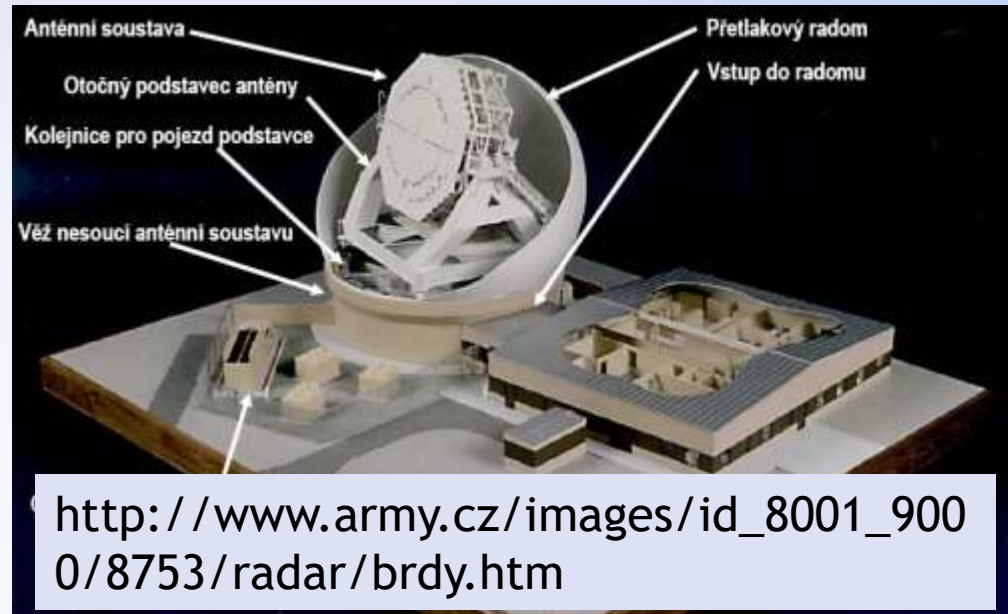


Skalky, Benešov u Blanska



# \* stanice EBR (European Based Radar) vojenský újezd Brdy, kóta 718

- \* Dosah 2000 km  
- impulsní výkon 5 MW  
X deklarovaných 170kW
- \* Sektor snímání 12°
- \* Protiraketová řízená střela



“Hlavní paprsek radiolokátoru nemůže ohrožovat obyvatelstvo, jeho poloha fyzikálně expozici neumožňuje“

# \* Letiště Praha

\* TAR - Primární přehledový radar koncové řízené oblasti (dolní)

\* MSSR - Monopulsní sekundární přehledový radar (horní)  
dosah 300 km

Antény mají společnou osu otáčení

**HOSTIVICE**

\* Sekundární radiolokace je drahá omezené možnosti vývoje a rozšiřování limity v oblasti pokrytí a kapacity obslužených letadel.

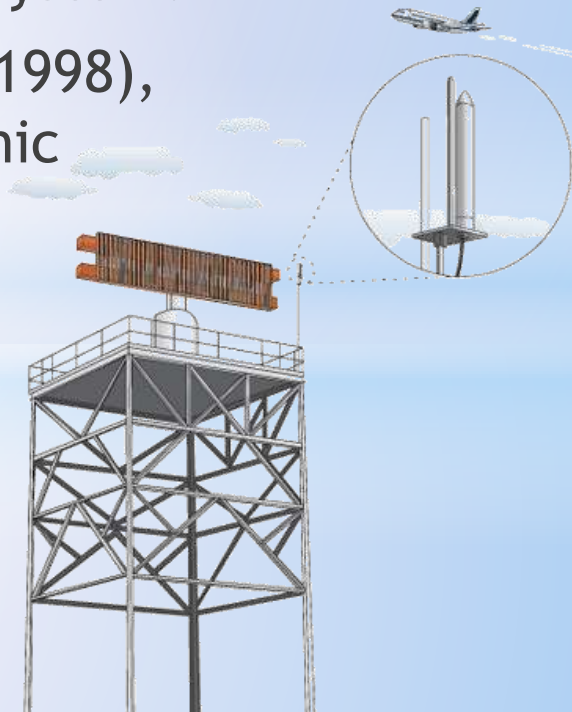
\* Možné překrývání cílů na stejném azimutu





# \* Multilaterace TDOA (Time Difference Of Arrival)

- \* Multilaterační systém určuje polohu cíle časově hyperbolickou metodou (TDOA) na základě příjmu a zpracování signálů sekundární radionavigace.
- \* Letiště Ostrava-Mošnov používá civilní verze PSS Věra, firma ERA Pardubice vyvíjí i "klasický" MLAT systém.
- \* Podnik ŘLP je označen za průkopníky MLAT (1998), dnes má letiště Praha má 15 přijímacích stanic  
<http://www.multilateration.com>
- \* Stanice MLAT má 100 x menší hmotnost než radar (24 kg oproti 2500 kg)
- \* TDOA je zatím nejpřesnější a nejjednoznačnější metoda detekce cíle.



# \* Pasivní radiolokátor Věra



- Věra se skládá nejméně ze tří přijímacích stanic, které zároveň zjišťují polohu letounu
- Dosah až 400 km
- 500 cílů současně

\* Doc. Vlastimil Pech se inspiroval hyperbolickým navigačním systémem LORAN

\* 60. léta Kopáč (korelační pátrač)

\* Ramona, Tamara

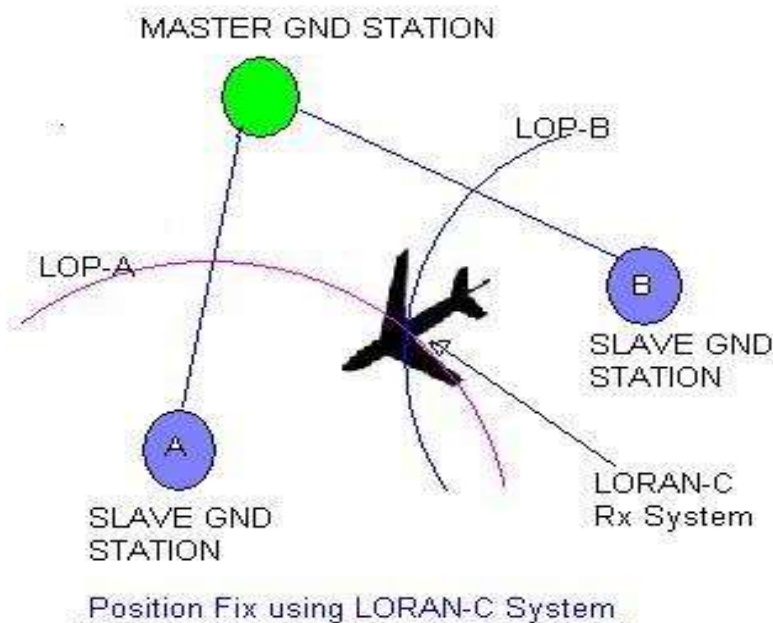


Věra Perlingerová 1931-2018



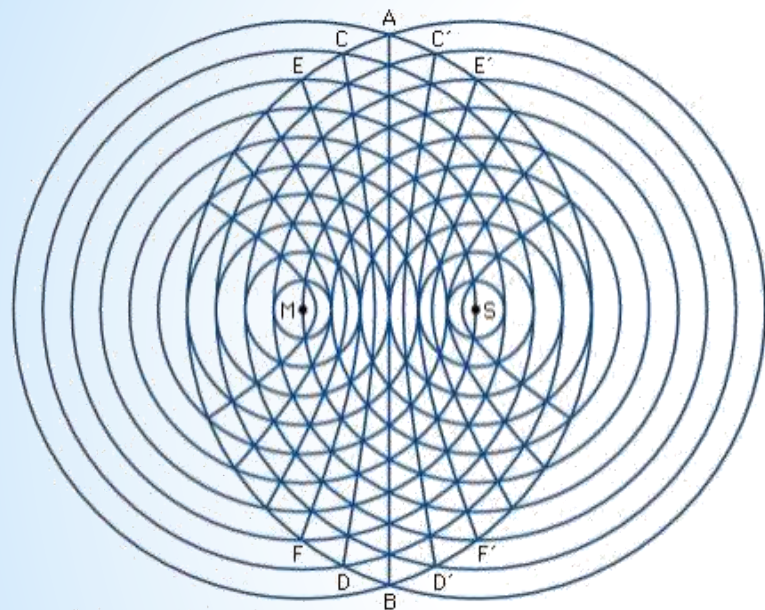
# \* Hyperbolická navigace Long Range Navigation (LORAN)

System založen na rozdílu časů mezi příjmem dvou synchronizovaných pulzních signálů. Časový rozdíl určuje množinu bodů s danou vzdáleností od dvou lokalizovaných míst.

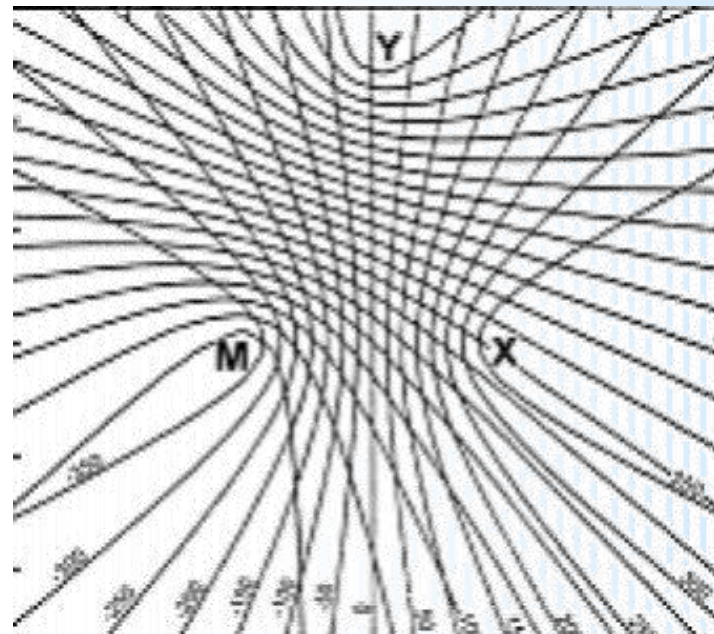


Pro určení 2D pozice letadla je zapotřebí dosahu alespoň tří stanic - jedna master station a alespoň dvě „slave“ stanice.

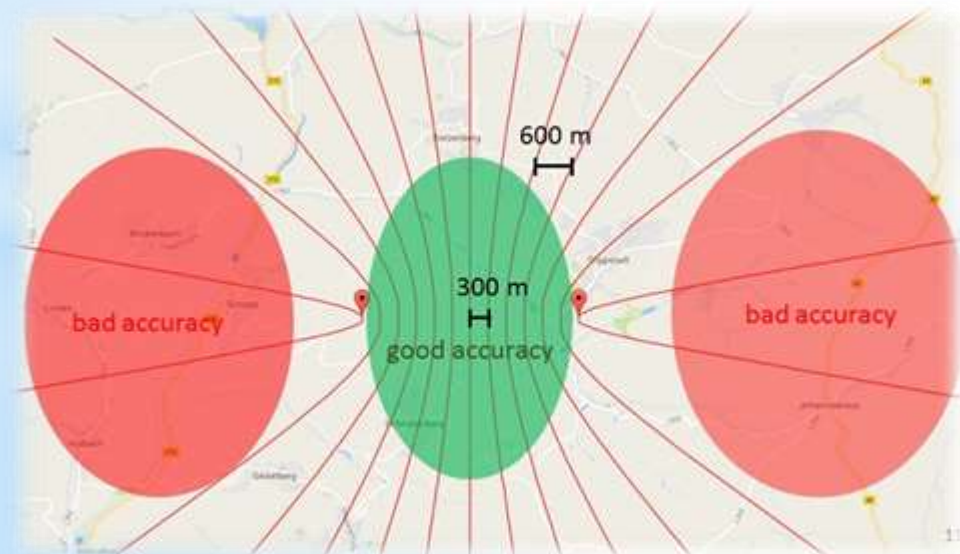
Zakreslení všech poloh pro 10 zpoždění  
v příjmu synchronizovaných pulzů.



©1994 Encyclopaedia Britannica, Inc.



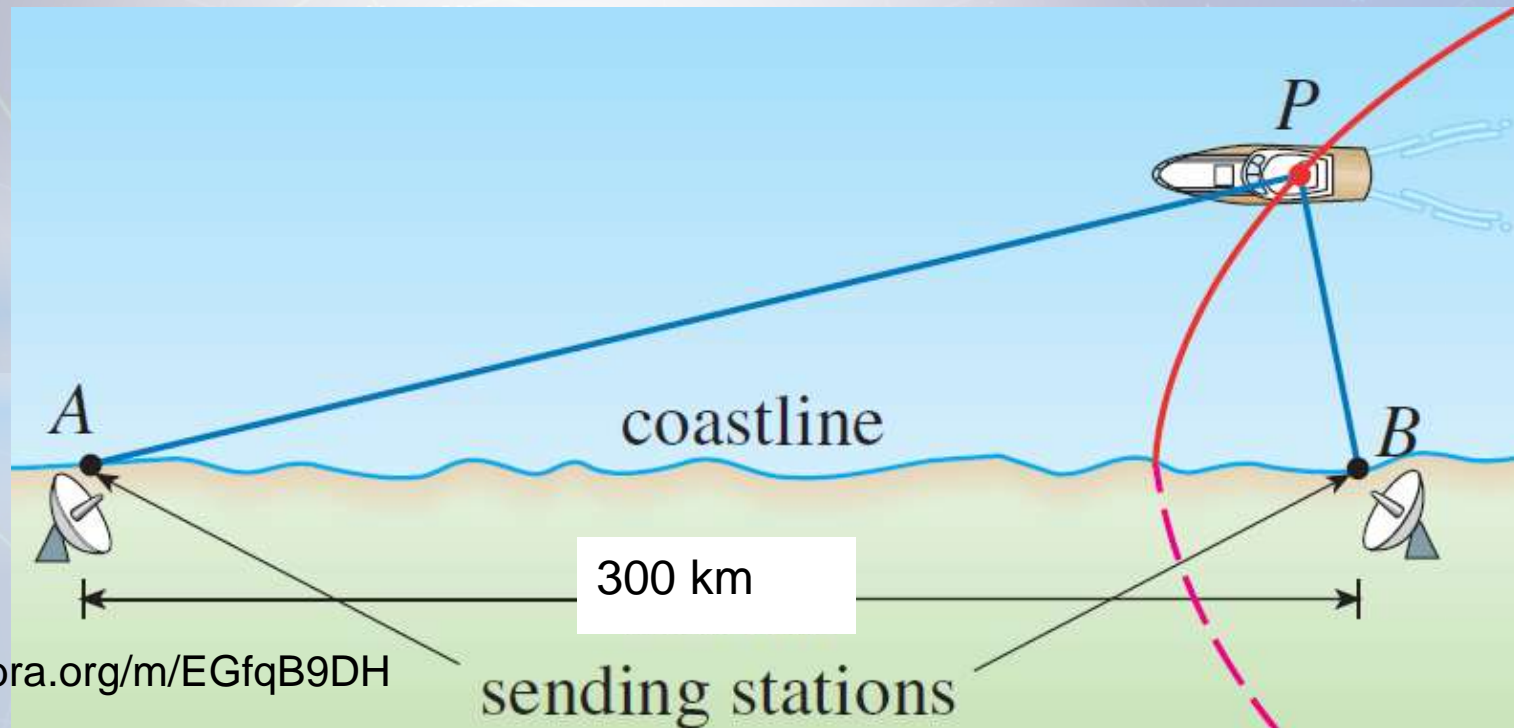
3 přijímače - 2D lokalizace  
4 přijímače - 3D lokalizace,  
všesměrový radar



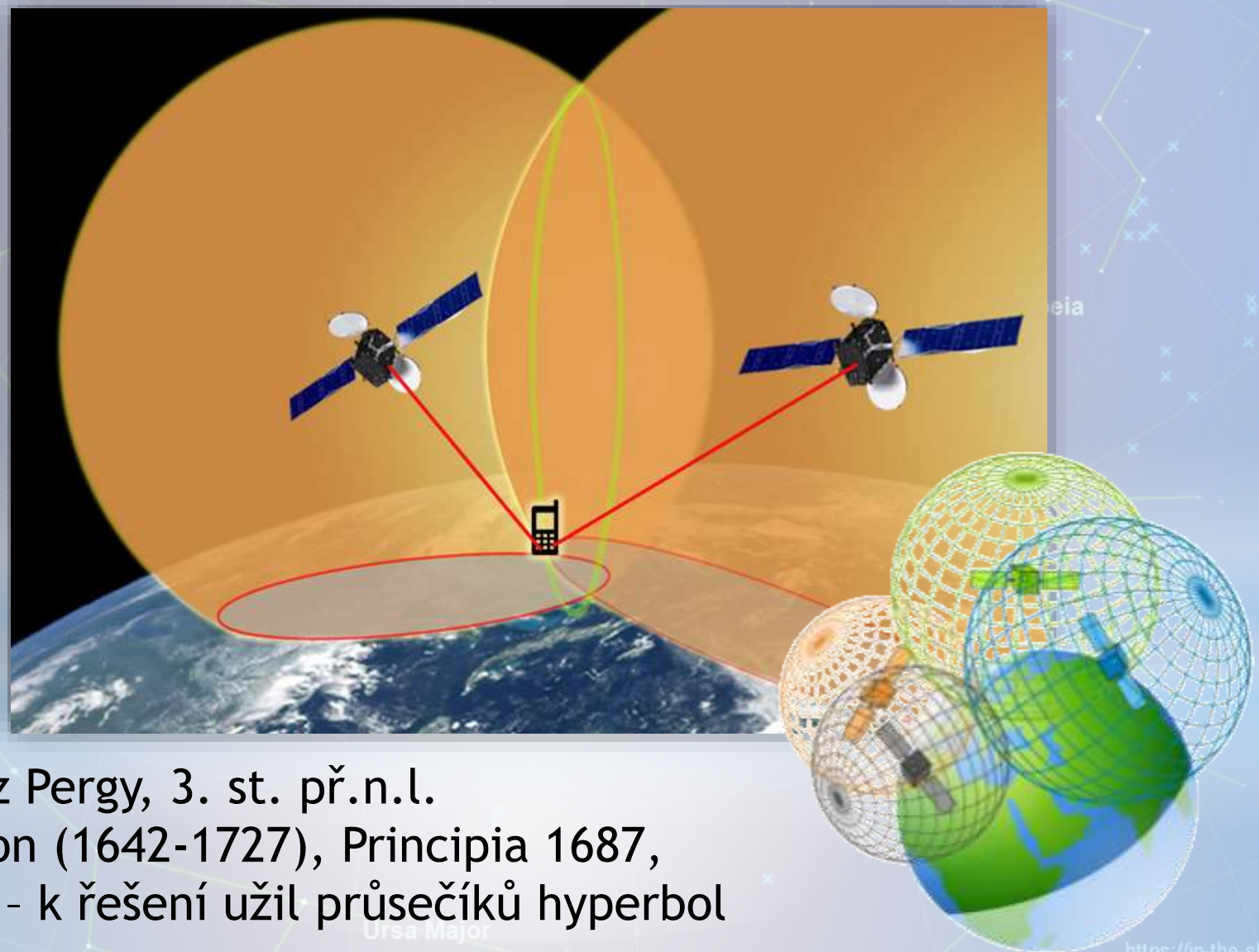


# \* Základní úloha: (LORAN)

Určete lokační křivku lodě, jež přijímá synchronizovaný signál se zpožděním 0.8 ms. Určete vzdálenost lodě od master stanice A, znáte-li azimut směru od stanice A ze sekundárního radaru.



# \* Satelitní navigace

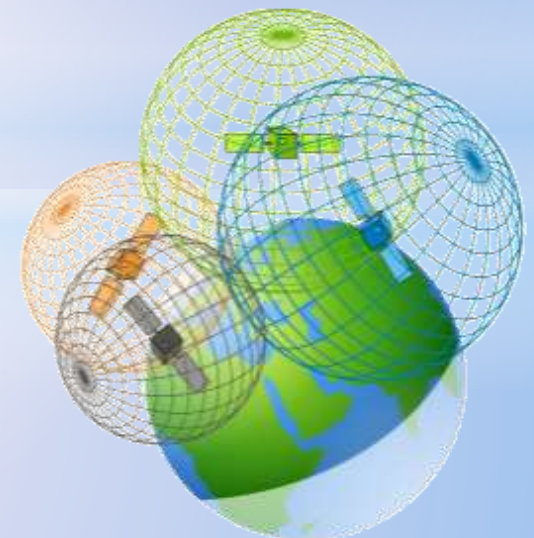
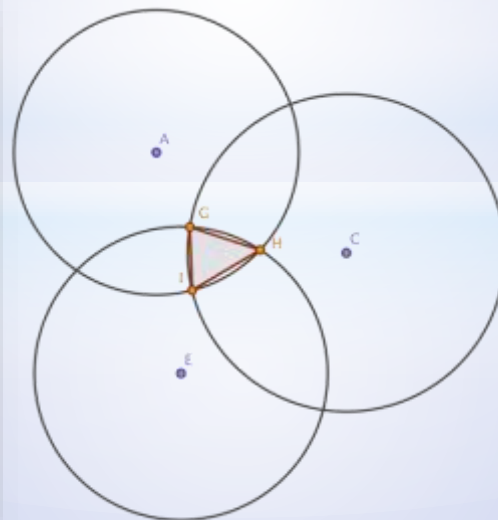
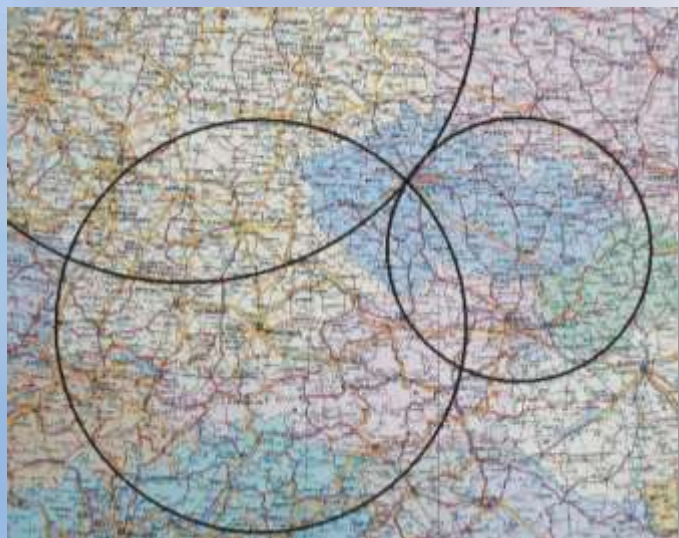


Apollonius z Pergy, 3. st. př.n.l.  
Isaac Newton (1642-1727), Principia 1687,  
Lemma XVI - k řešení užil průsečíků hyperbol



# \*Trilaterace

- Time of Arrival (TOA) - GPS navigace  
čas šíření signálu (z mlhové sirény, radaru, satelitu)  
určuje kružnici na které leží přijímač.  
Hodiny přijímače nejsou shodné s hodinami vysílačů -  
časový offset



# \* Satelitní navigace

## Global Navigation Satellite System

- \* 1964 TRANSIT (USA), 6 družic, původní přesnost lokalizace 800 m se postupně zlepšovala na 5 metrů  
K určení polohy stačil jeden viditelný satelit, doba odezvy někdy i hodina  
ukončen 1996
- \* CYKLON, CIKADA (SSSR), Dopplerovský nav. přístroj
- \* 1972 TIMATION vysílání přesného časového signálu
- \* GLONASS (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система), vývoj započal 1976, celosvětové pokrytí 2011, plná operační schopnost 24 družic
- \* GPS





\* GPS

- \* Vývoj od roku 1973, 1993 třírozměrná navigace, 18 družic
- \* 1995 - Plná operační schopnost nejméně 24 družic plně funkčních
- \* Duální systém : SPS (Standard Positioning Service) - civilní účely  
PPS(Precise Positioning Service) kódovaný pro ozbrojené síly USA
- \* 2000 zrušena "Selective Availability" (Bill Clinton), průměrná přesnost 30cm i pro civilní účely
- \* **Nevýhody**  
nemožnost měření v podzemí  
nepřesnost v hustém prostoru, v úzkých údolích  
nezbytná přímá viditelnost na družice.



- \* 1999 zahájení projektu, 2005 první zkušební satelit, 2016 první otevřené služby - 18 satelitů, 2019 plná operační schopnost
- \* 2020 - celkem 30 družic (27 provozní, 3 náhradní) přesnost 4 m
- \* **Výhody:**
  - Navigace až k zem. šířce  $75^\circ$  - lepší **pokrytí** než GPS, díky vodíkovo-maserovým hodinám přesnější
  - Civilní projekt** - nehrozí výpadek služby při vyhrocených mezinárodních situacích
  - Kompatibilita** s GPS budoucí přijímače budou využívat satelity obou systémů
  - Nezávislost** - při výpadku či závažné chybě jiného GNSS
- \* **Záchranné systémy** - přijímač pro systém Galileo součástí všech typů nově schválených vozidel prodávaných v Evropě a vybavených systémem tísňového volání eCall.





\* **Nevýhody:**

zbytečný, nákladný (10 mld. euro, provoz 800 mil. eur ročně)  
zastaralá technologie

\* Omezený počet telefonů, jenž dokáží systém přijímat (30)  
<https://www.usegalileo.eu/EN/>

\* Vypuštění 5. a 6. satelitu na špatný orbit, (The Guardian, 2014)

\* 2017 - 9 z celkového počtu 72 hodin nefungují

\* Brexit



# \* Užití satelitní navigace v silniční dopravě

- \* Nouzové volání pomoci, sledování odcizených vozidel, sledování tras nebezpečných nákladů
- \* Preference vozidel
- \* Elektronická platba mýtného
- \* Automatické vedení vozidel, reakce na překážku na vozovce
- \* Modelování dopravy - floating car se pohybují v dopravě, data je zpracována a využita pro následnou optimalizaci
- \* Řízení flotily vozidel



# \* Užití satelitní navigace v letecké dopravě

- \* Free Flight, Free Route - let mimo volné tratě, odpovědnost za zajištění rozestupů má posádka, řídicí stanice přebírá zodpovědnost jen v naléhavých případech
- \* Let v koncových oblastech - ILS (Instrument Landing System), některá letiště používají GPS jako záložní systém.
- \* Přibližovací systémy družicové navigace umožní přiblížení až do III. Kategorie
- \* Dle dlouhodobého programu rozvoje technického zabezpečení CNS/ATM (Communication, navigation Surveillance/Air Traffic Management) budou družicové navigační systémy mít přední místo v navigační, komunikační i přehledové fázi.

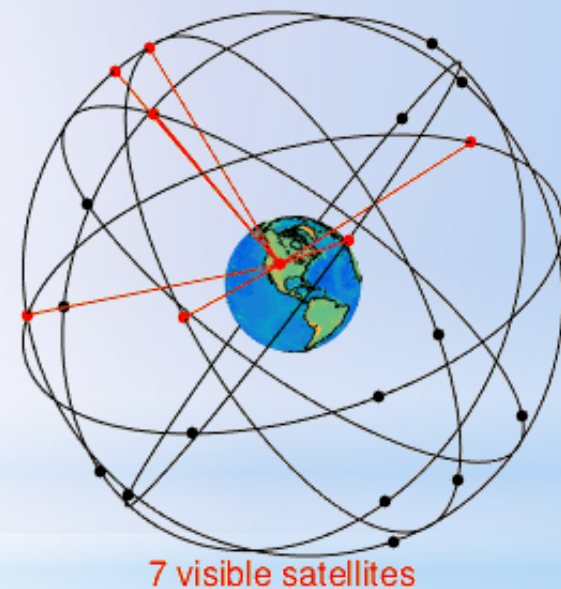
# Požadavky na konstelaci satelitů:

- \* Globální pokrytí.
- \* Minimálně 6 satelitů pod pozorovacím úhlem vyšším než  $5^\circ$ .
- \* Rovnoměrné rozmístění vzhledem k azimutu i výšce nad horizontem.
- \* Robustní vůči selhání některého ze satelitů.

Zpřesňování první aproximace polohy - 30s

Načtení efemerid satelitů - 30s

Aktualizace almanachu - 12 min



Polohy satelitů a jejich viditelnosti z konkrétního místa na Zemi (Wikipedie)



# \* Geometric Dilution of Precision (GDOP)

$$GDOP = \frac{\text{chyba výsledku}}{\text{chyba měření}}$$

$(x, y, z, t)$  souřadnice přijímače

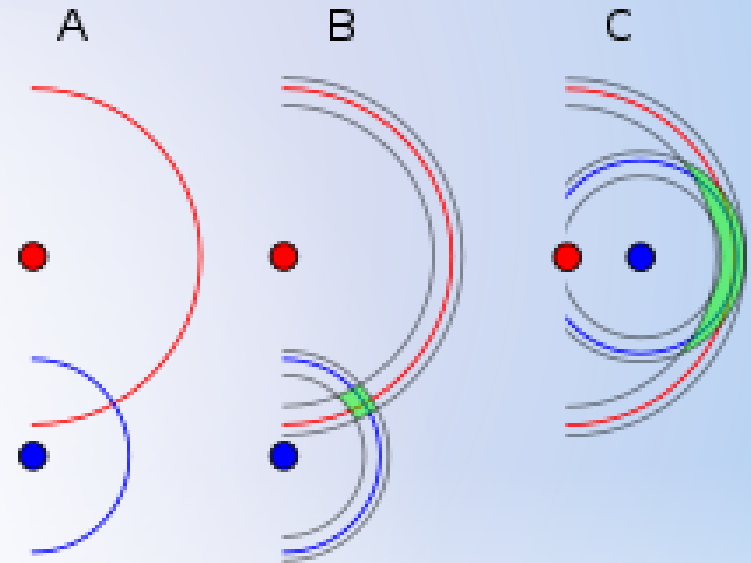
$(x_i, y_i, z_i, t_i)$  souřadnice satelitů

vektory přijímač-satelit:

$$r_i = (x_i - x, y_i - y, z_i - z)$$

$$R_i = |r_i| = c |\tau - \tau_i|$$

Linearizace a řešení metodou nejmenších čtverců



E. D. Kaplan, Ch. J. Hegarty:  
Understanding GPS: Principles and  
Applications, Arctech House, 2006

# \* Geometric Dilution of Precision (GDOP)

$$GDOP = \frac{\text{chyba výsledku}}{\text{chyba měření}}$$

Užitím zákona o šíření chyb a rozkladem kovarianční matice odhadovaných parametrů získáme charakteristiky závislé jen na geometrii přijímače a viditelných satelitů.

