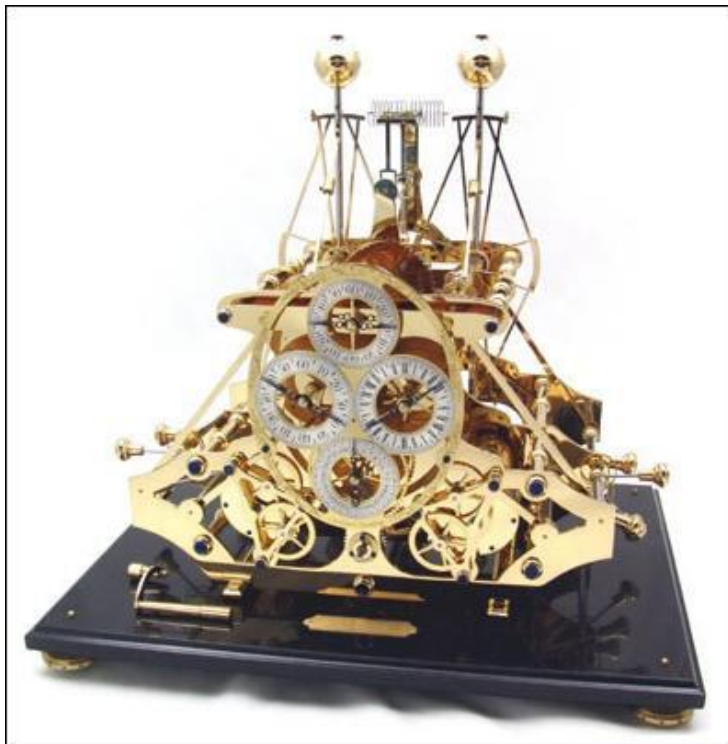


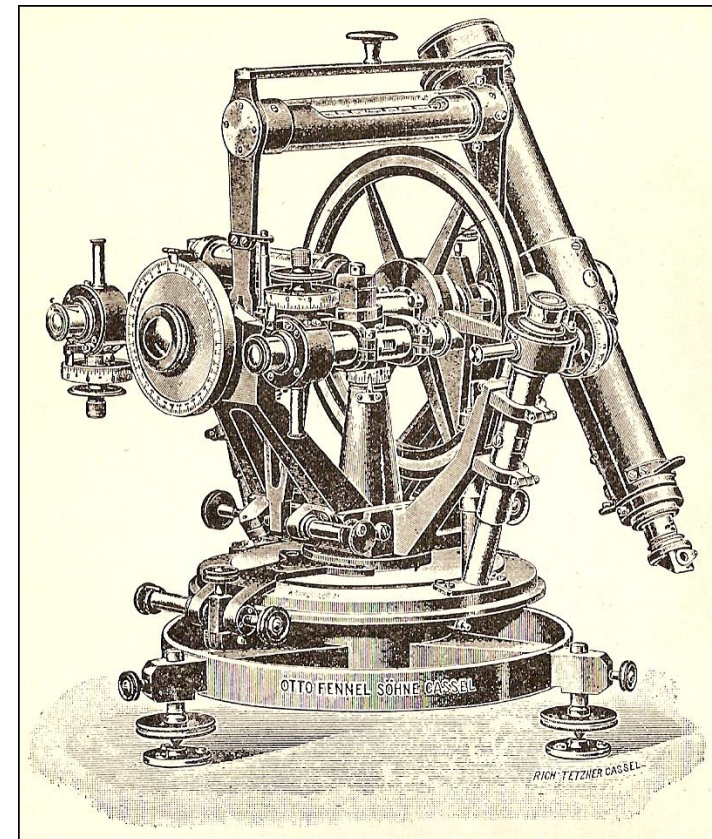


Kuvat: vasemmalla Harrisonin merikello vuodelta 1735, ja oikealla universaaliksi sanottu teodoliitti noin sadan vuoden takaa.

Aika ja paikka

Pasi Laurila

8.1.2021



Ajassa ja paikassa on haastetta

- Aika ja paikka ovat monitasoisia ja haastavia käsitteitä
- Ne liittyvät toisiinsa jo ajan ja pituuden perusyksiköiden, sekunnin ja metrin, määrittelyjen kautta
- Myös ajan ja paikan tekniset vertausjärjestelmät liittyvät suoraan toisiinsa
- Yleinen suhteellisuusteoriakin on vahvasti ajassa ja paikassa mukana
- Suhteellisuusteoria tuo painovoiman mukaan asiakokonaisuuteen: painovoima on ajan ja avaruuden geometrinen ominaisuus
- Aikaa voidaan tarkastella ainakin filosofian, fysiikan, tekniikan ja kokemuksellisuuden näkökulmista
- Aika on teknisten määrittelyjen rinnalla syvästi inhimillinen käsite

Kirjoittajan näkökohtia aiheeseen

- Vuosien varrella olen tehnyt työksi ja harrastanut erilaisia ajan ja paikan asioita; näkökulma on ollut lähinnä matemaattinen ja paikannustekninen:
 - Napapiirin paikan laskenta 1997 alkaen: → juliaaninen päiväluku ja ekliptikan kaltevuus
 - Tähtien paikka ja aika 2002: → aurinkoaika ja tähtiaika, nousut ja laskut
 - Absoluuttinen GPS-paikannus 2006: → kellojen synkronointi
 - Auringon laskut, nousut, korkeus ja suunta 2011 alkaen: → aika- ja koordinaattijärjestelmien yhteensovittaminen
 - Planeettojen ja Kuun paikkalaskut 2015: → rataparametrit, erilaiset koordinaatistot ja paikkalaskut
 - Havaitсийan paikan laskenta Auringon korkeuskulmahavainnoista 2020
- Mitä olen oppinut? 1) aihepiirin käsitteet ovat haastavia, 2) käsitteiden eroja ja yhteyksiä oppii ymmärtämään laskemalla, 3) ajan käsitteet ovat sekä lineaarisia että jaksollisia, 4) aika on välttämätön parametri liikkuvia järjestelmiä tarkasteltaessa, 5) asioita voidaan tarkastella keskimäärin, likimääräisin käsittein, tai sitä tarkemmin, 6) asioiden matematiikkaan sisältyy monenlaisia laskentateknisiä haasteita

Maanpäällisten kohteiden paikka

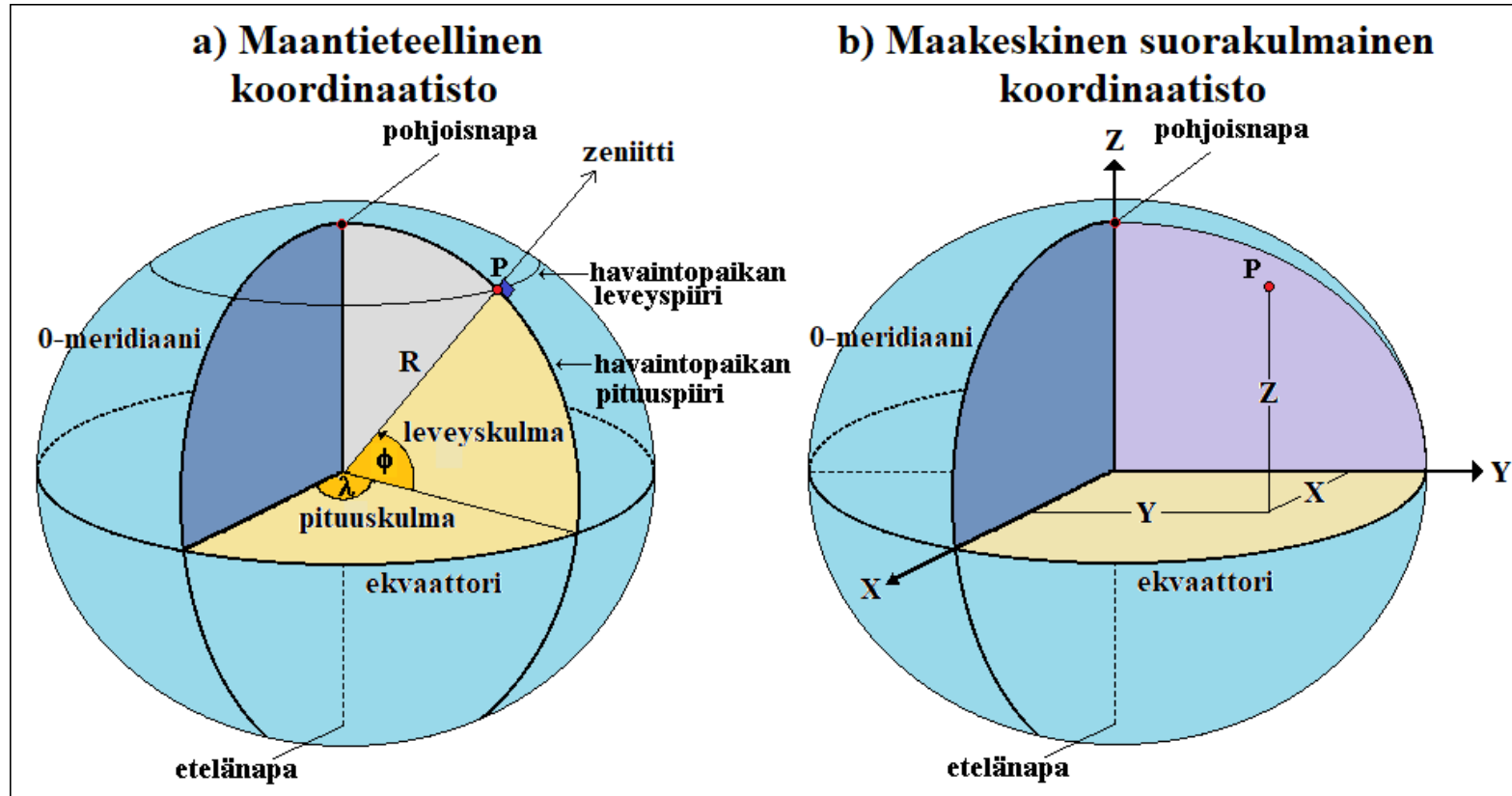
Maanpäällisten kohteiden paikka ilmaistaan maantieteellisessä tai maakeskisessä suorakulmaisessa koordinaatistossa. Koordinaatistojen kiinnityskohtina ovat maantieteelliset navat, päiväntasaaja eli ekvaattori ja 0-meridiaani.

Kulmamittainen
 (ϕ, λ)

Käytetään
yleisesti

meridiaani =
pituuspiiri =
longitudi

leveyspiiri =
latitudi



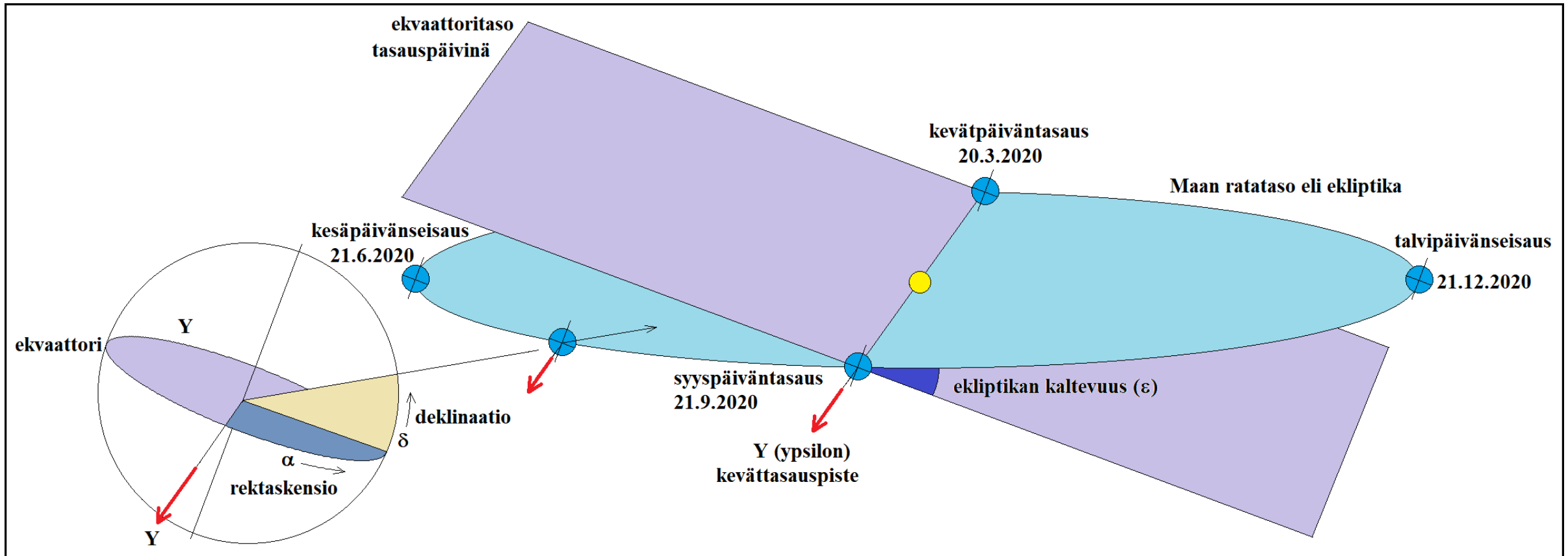
Metrimittainen
 (X, Y, Z)

Käytetään
satelliittipaikan-
nuksessa ja
matematiikassa

Geodeettisissa koordinaattijärjestelmissä Maan muoto on pyörähdysellipsoidi.

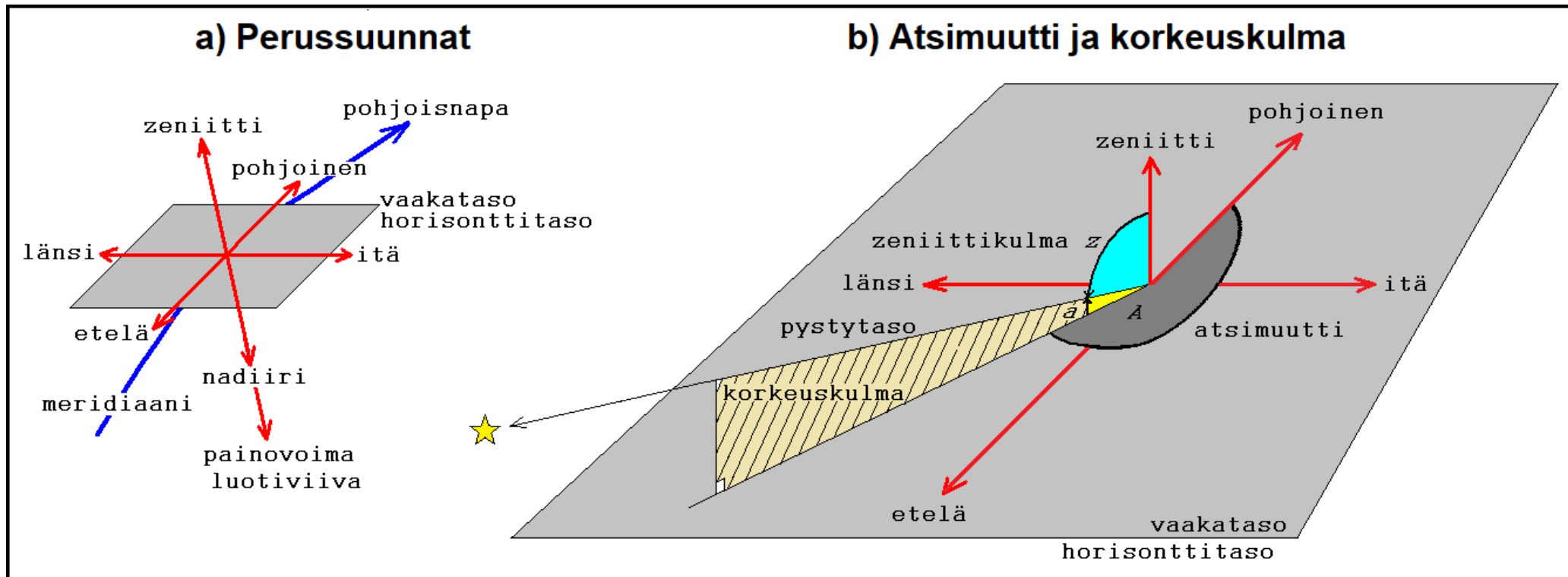
Avaruuden kohteiden paikka

Avaruuden kohteiden paikka ilmaistaan ekvaattorijärjestelmässä. Sen kiinnityskohtina ovat Maan ekvaattoritaso ja kevättasauspisteen suunta. Kulmamittaiset koordinaatit ovat **rektaskensio** (α) ja **dekliinaatio** (δ). Maan asento avaruudessa pitää tuntea, jotta maanpäällisten ja avaruuden kohteiden koordinaatit voidaan yhdistää. Ekliptikan kaltevuus (ϵ) on erityisen tärkeä Maan asentoparametri.



Kohteen paikka horisonttijärjestelmässä

Havaitsija katselee avaruuden kohteita omassa horisonttijärjestelmään. Sen perustaso on painovoiman määrittämä vaakataso. Suunnat lasketaan pituuspiirin eli meridiaanin suunnasta, joko pohjoisesta tai etelästä. Havaitsijasta katsoen kohde näkyy tietyssä suunnassa (**atsimuutti** A) ja tietyllä korkeudella (**korkeuskulma** a).



Tähtitieteessä atsimuutti mitataan usein etelästä, yleisimmin kuitenkin pohjoisesta.

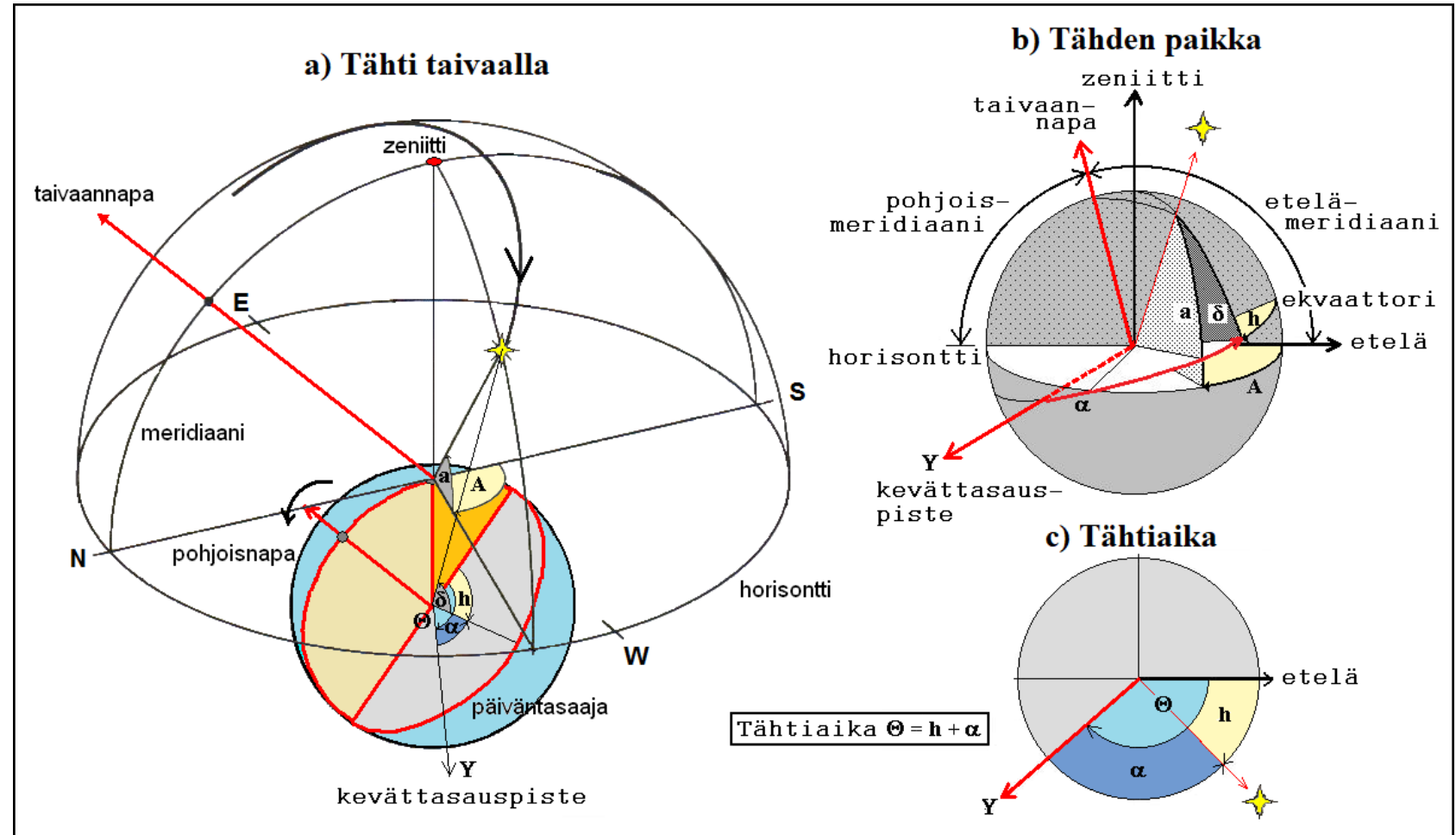
Maan asento ja aika sitovat eri järjestelmien paikat yhteen

Tarkastelussa on mukana erisuuntaisia tasoja: ekliptika, ekvaattori ja havaitsijan horisonttitaso.

→ prekessio, planeettaprekessio, nutaatio, ekliptikan kaltevuus, kevättasauspisteen suunta.

Kaikki osat ovat liikkeessä, minkä vuoksi tarvitaan ajan hallintaa. Ekvaattoritasossa rektaskensio sidotaan tähtiajan ja tuntikulman avulla **eteläsuuntaan**.

→ juliaaninen päiväluku, juliaaninen vuosisata, keskiaurinkoaika, koordinoitu yleisaika, ajantasaus, tähtiaika, tuntikulma.



Ekvaattoritasossa: **tuntikulma** (h) on tarkasteltavan kohteen kulmaetäisyys etelä-meridiaanista myötäpäivään. **Tähtiaika** (Θ) on kevättasauspisteen tuntikulma.

Nutaatio, prekessio ja ekliptikan kaltevuus

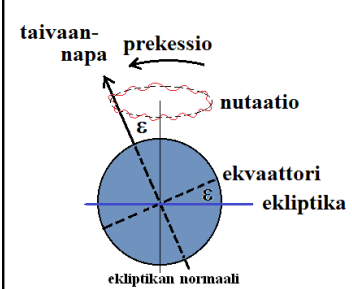
Tähtitaivaan kohteiden koordinaatit (α ja δ) ovat melko pysyvät.

Kuitenkin Kuun aiheuttamat **nutaatio** ja **prekessio** muuttavat tähtien koordinaatteja.

Aurinkokunnan kohteiden koordinaatit muuttuvat koko ajan.

Planeettaprekessio vaikuttaa pitkässä jaksossa Auringon näkymiseen, ja määrittää **napa- ja kääntöpiirien paikat**.

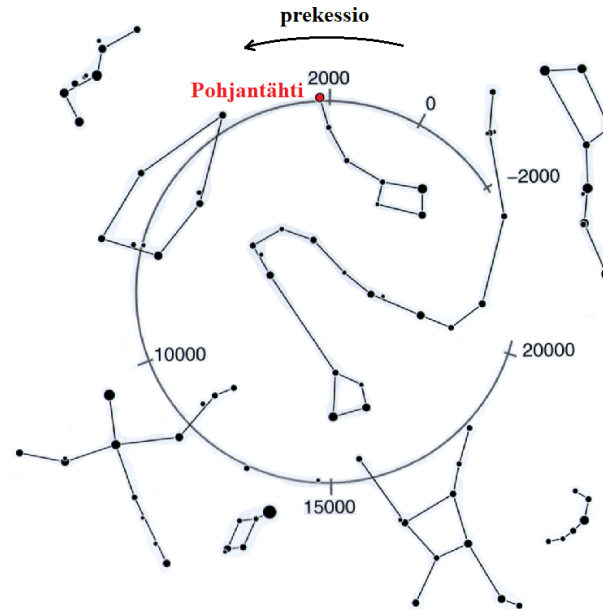
a) Nutaatio ja prekessio



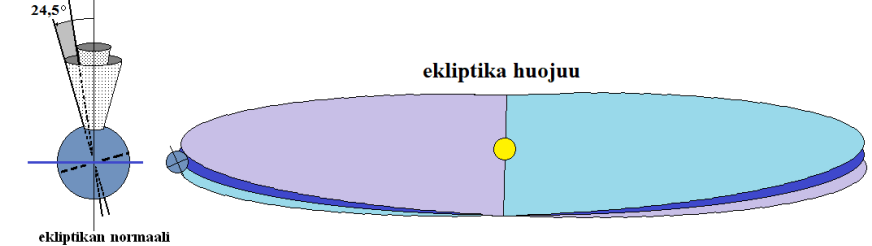
b) Nutaatio muuttaa ekliptikan kaltevuutta 18.6 vuoden jaksossa



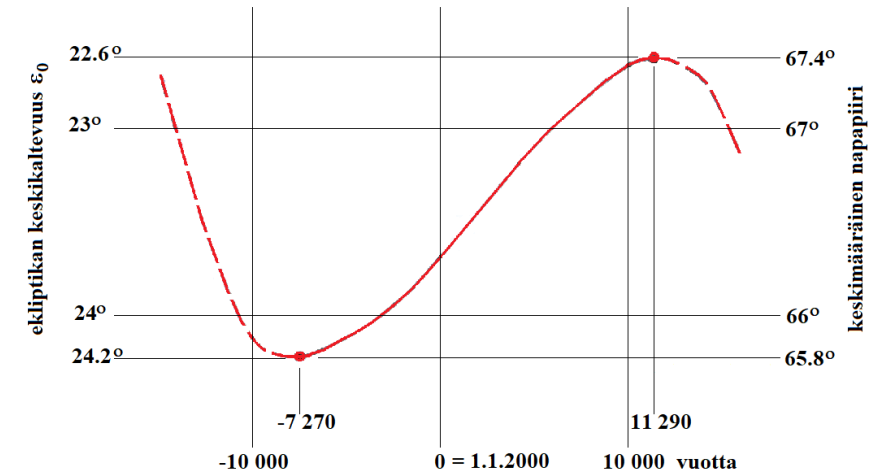
c) Prekessio siirtää taivaannapaa 26 000 vuoden jaksossa



d) Planeettaprekessio muuttaa ekliptikan kaltevuutta 41 000 vuoden jaksossa



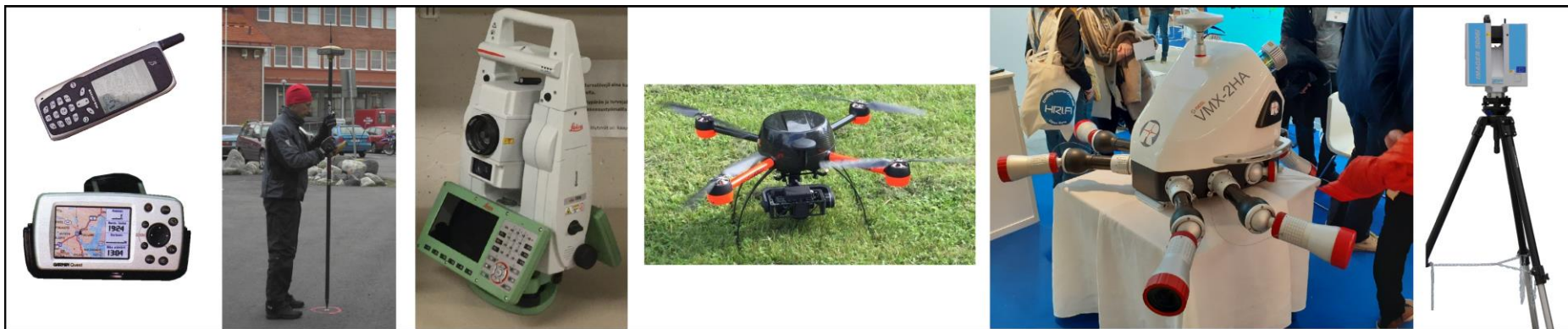
e) Ekliptikan keskikaltevuus



Kuinka tarkkaa paikannusta tarvitaan?

Nykyajan tekniikan näkökulmasta.

Tarkkuustaso	Mittaamisen tarkoitus
10 – 100 m	Halutaan tietää yleisesti missä ollaan
1 – 10 m	Halutaan pysyä reitillä (tie, katu, vesiväylä) ja löytää haluttu osoite
0.1 – 1 m	Halutaan kerätä paikkatietoja ympäristön yleistä kartoitusta ja tutkimusta varten
0.01 – 0.1 m	Halutaan kartoittaa maastoa ja rakennettua ympäristöä tarkasti ja ohjata rakentamista
0.001 – 0.01 m	Halutaan tehdä tarkkoja geodeettisia ja geofysikaalisia mittauksia ja ohjata erityisen vaativien kohteiden rakentamista
0.0001 – 0.001 m	Halutaan tehdä tieteellisiä tutkimuksia ja mitata erityiskohteita



Kuinka tarkkaa ajanmittausta tarvitaan?

Maapallon ympärysmitta: 40 000 000 m vastaa kulmaa 360° , vastaa aikaa 24 h

→ 1 m vastaa kulmaa $0.033''$, vastaa aikaa 0.0022 s

Valonnopeus: $c = 300\,000\,000$ m/s:

→ valo etenee yhden metrin 3.3×10^{-9} sekunnissa eli
3.3 nanosekunnissa (ns)

Jos tavoitteena on vähintään 10 metrin paikannustarkkuus:

- tähtitieteellisessä paikannuksessa havaintohetken aika pitää mitata paremmin kuin 0.02 sekunnin tarkkuudella
- satelliittipaikannuksessa mittaussignaalin kulkuaika pitää mitata paremmin kuin 30 nanosekunnin tarkkuudella

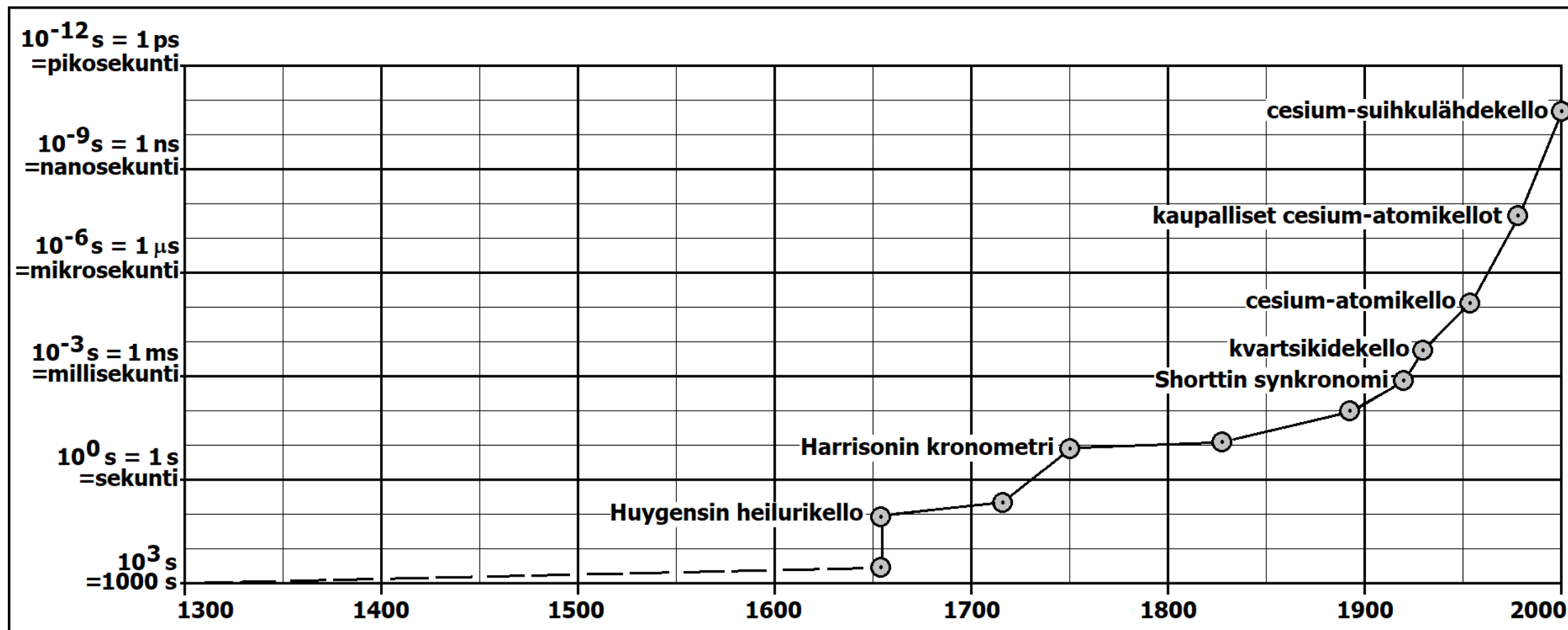
Lisäksi paikannuksen tarkkuuteen vaikuttavat monet muutkin tekijät.

Ajanmittauksen tekniikat

Aika	Teknologia	Käyntivirhe
Kauan sitten	Vaihtelevia tekniikoita: taivaalliset ilmiöt, vesikellot, tiimalasit, kynttilät	Epäluotettavia, arviointia, eivät vertailukelpoisia nykypäivään
1656	Hyugensin heilurikello	Sekunti kahdessa tunnissa
Noin 1750	Harrisonin kronometrit	Sekunti viikossa
1921	Shorttin synkronomi: tyhjiöheiluri	Sekunti vuodessa
1927	Ensimmäinen kvartsikello	Sekunti viidessä vuodessa
1955	Ensimmäinen cesium-atomikello	Sekunti 300 vuodessa
Noin 1980	Kaupalliset cesium-atomikellot	Sekunti 100 000 vuodessa
2005	Cesium-suihkulähdekello	Sekunti 80 miljoonassa vuodessa
2009	Optinen strontium-hilakello	Sekunti 300 miljoonassa vuodessa
Nyt ja tulevaisuudessa	Olemassa olevat tekniikat kehittyvät ja ajanmittaus siirtyy avaruuteen	Tavoitellaan sekunnin käyntivirhettä maailmankaikkeuden iässä

Käyntivirheen kehitys

Kaavio kertoo käyntivirheen sekunteina vuorakokaudessa. Kyse on juoksevaa aikaa ylläpitävistä tekniikoista. Esimerkiksi mittaussignaalien kulkuajojen mittaustekniikat ja tarkkuudet voivat olla jotain muuta.



Aikajärjestelmät

- Maan pyörimisliikkeen perusteella saadaan yleisaika eli **keskiaurinko-aika** (UT, Universal Time) ja tähtiaika
- Maan vuotuinen kierto Auringon ympäri määrittää efemeridiajan (ET), terrestrisen dynaamisen ajan (TDT) ja barysentrisen dynaamisen ajan (TDB)
- Atomikellojen avulla saadaan **kansainvälinen atomiaika** (TAI)
- Kellomme käyvät nykyään **koordinoitua yleisaikaa** (UTC) , joka saadaan kansainvälisestä atomiajasta sovittamalla se **karkaus-sekuntien** avulla keskiaurinkoaikaan
- Eri mailla ja alueilla on omat **vyöhykeaikansa**, ja hyvin yleisesti niissä käytetään **talvi- ja kesäaikoja**

Juliaaninen päiväluku

Käyttämämme **gregoriaanisen kalenterin** vuosi (v), kuukausi (k) ja päivä (p) muunnetaan tasaisesti juoksevaksi päiväluvuksi esimerkiksi seuraavalla kaavalla:

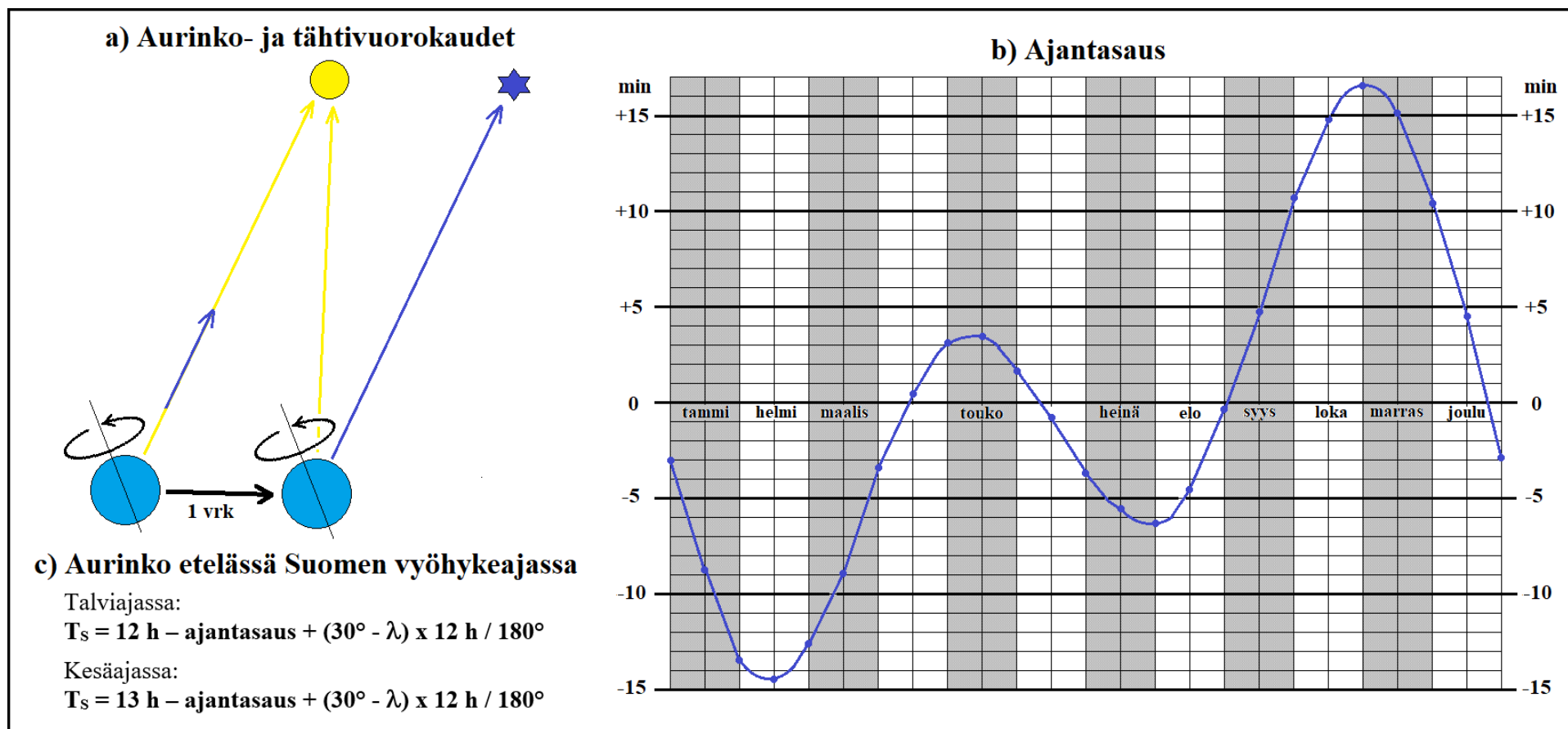
$$J = 367v - (7(v + (k + 9)/12))/4 - (3((v + (k - 9)/7)/100 + 1))/4 + 275k/9 + p + 1721029$$

- Kaavan jakolaskut pitää suorittaa, niin että osamäärät katkaistaan poistamalla desimaaliosat
- Juliaaninen päivä vaihtuu klo 12 UT (0-meridiaanin keskiaurinkoaikaa)
- Juliaaninen päiväluvun nollakohta on 1.1.4713 ennen ajanlaskumme alkua (eaa.) taaksepäin jatkettun **juliaanisen kalenterin** mukaan
- Käyttämäämme gregoriaaniseen kalenteriin siirryttiin Italiassa, Espanjassa, Portugalissa ja Puolassa 15.10.1582
- Ruotsi-Suomessa gregoriaaniseen kalenteriin siirryttiin vasta 1.3.1753

Tähti- ja aurinkovuorokaudet ja ajantasaus

Kun Maa on pyörähtänyt 360 °, näkyvät tähdet samoissa suunnissa kuin vuorokautta aiemmin (→ **tähtivuorokausi**).

Koska Maa on pyörähdynsä aikana liikkunut radallaan, pitää kiertoa jatkaa, jotta Aurinkokin näkyy samassa suunnassa kuin vuorokautta aiemmin (→ **aurinkovuorokausi**). Aurinkovuorokauden pituus vaihtelee Maan elliptisen radan ja ekvaattorin kaltevuuden vuoksi (→ **ajantasaus**).



Pituuskulma oli paikannuksen ongelma

- Maailmaa valloittavat, kartoittavat ja kauppaa käyvät merivallat tarvitsivat alati tarkempaa paikannusta
- Leveyskulma osattiin arvioida ja mitata päivän pituuden, Auringon korkeuden ja tähtien korkeuden perusteella jo pari tuhatta vuotta sitten
- Pituuskulma oli pitkään ongelma, koska sille ei ole luonnollista Maahan ja avaruuteen liittyvää vertailukohtaa
- Suuret merivaltiot etsivät satojen vuosien ajan luotettavaa pituuspiirin määrittämis menetelmää
- **1714 Englannin parlamentti tarjosi 20 000 punnan palkinnon luotettavasti pituuspiirin määrittämis menetelmästä**

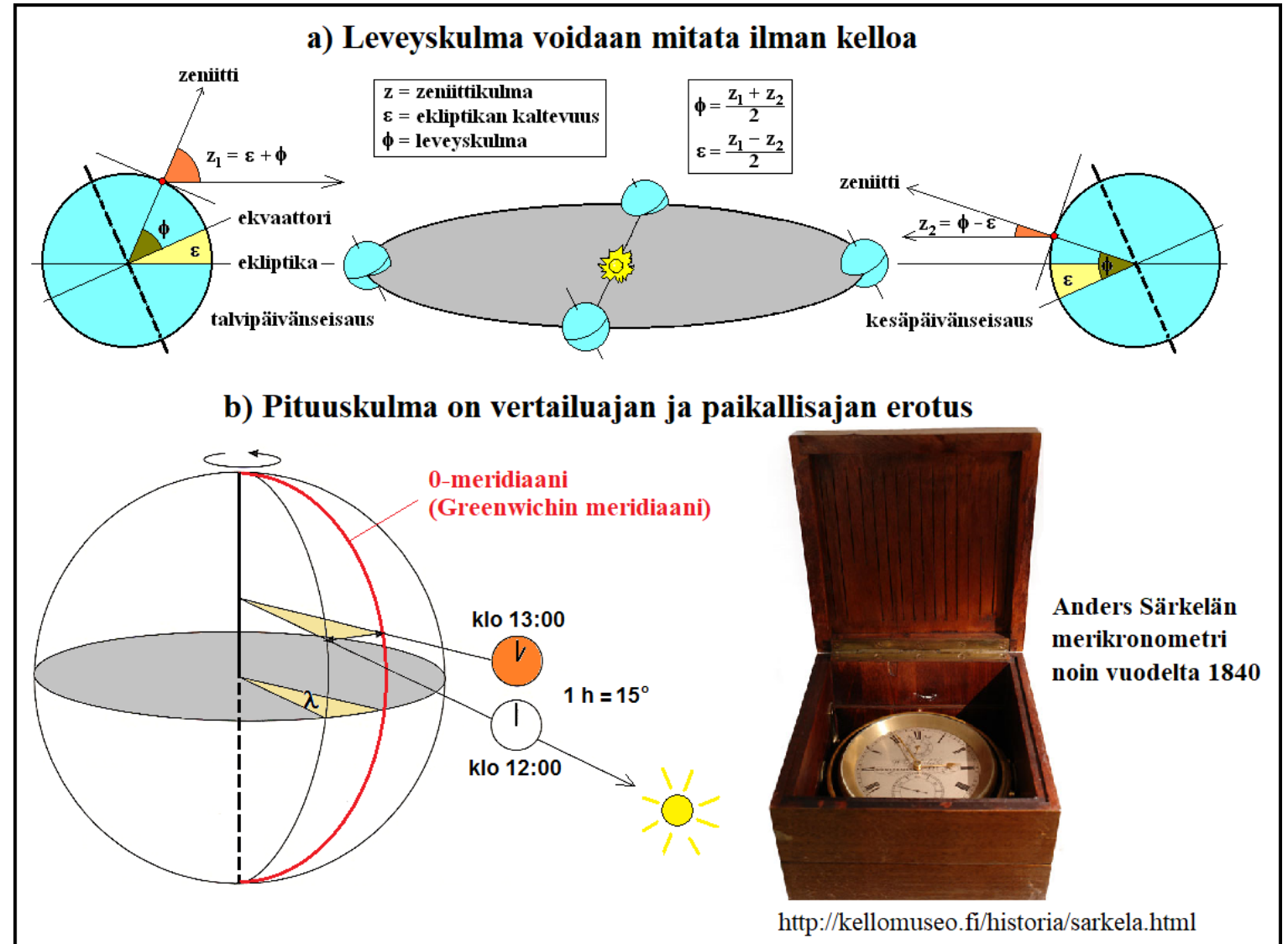
Pituuskulma on aika - aika on pituuskulma

Pituuskulman mittaus tuli mahdolliseksi vasta, kun 1700-luvulla onnistuttiin valmistamaan riittävän tarkkoja ja varmakäyntisiä kelloja.

Kellonrakentaja **John Harrison** (1693-1776) teki ensimmäiset kronometrit eli tarkkuuskellot.

Kellon piti säilyttää vertailupaikan aika purjelaivassa vaihtelevissa sääoloissa. Tavoitteena oli aluksi noin **50 km** paikannustarkkuus.

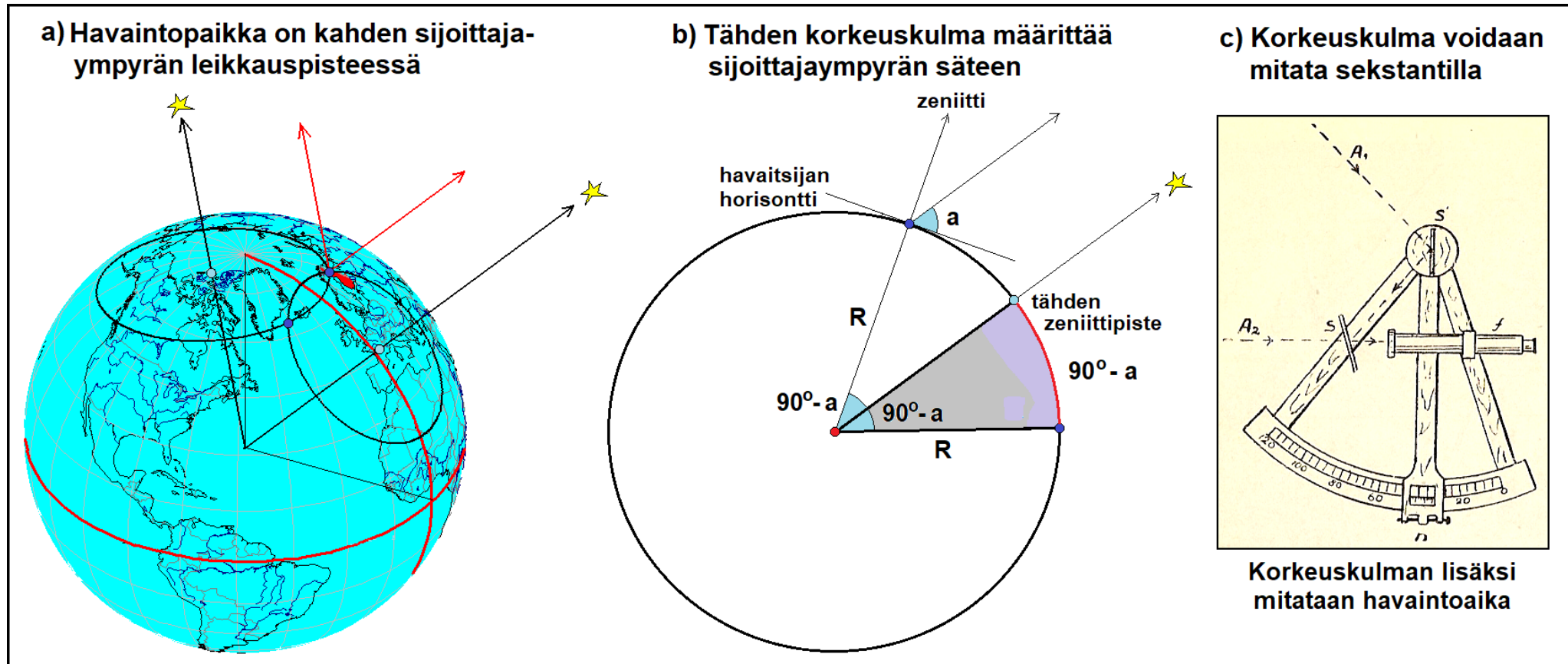
Tarvitaan vertailukohtia: 1884 sovittiin paikan ja ajan vertailukohdaksi Greenwichin meridiaani.



Tieteen käsityöläisten merkitys

- Kellonrakentaja John Harrison (1693-1776) oli yksi tieteen käsityöläisistä
- Hän käytti vuosikymmeniä kokeillen ja rakentaen tarkkuuskellojensa koneistoja
- Yleisesti tieteen käsityöläiset kehittivät ja rakensivat mittauskojeita, ja tekivät muun muassa karttoja, karttapalloja ja tähtipalloja
- Esimerkiksi karttaprojektistaan ja kartoistaan tunnettu Gerhard Mercator (1512-1594) on edelleen tunnettuja tieteen käsityöläisiä
- Teoreettisesti suuntautunut tieteen eliitti ei aina osannut arvostaa käsityöläisiä
- John Harrisonkin alkoi saada yleisempää tunnustusta, muun muassa Englannin parlamentin palkintorahoja, vasta lähellä kuolemaansa

Tähtitieteellisen paikannuksen periaate



Tarkassa **astrogeodeettisessa** paikannuksessa käytetään sekstanttia tarkempia kulmanmittauskojeita, kelloja ja havaintomenetelmiä. Pituuskulma mitataan havaitsemalla tähden ohikulku meridiaanitason yli. Leveyskulma mitataan esimerkiksi Horrebow-Talcottin menetelmällä, jolloin havaitaan useita lähellä zeniittiä kulminoivia tähtiä.

a) Mittausasetelma

b) Ratkaisuun liittyvät suureet

c) Auringon kulku 27.5.2020 ja korkeuskulmahavainnot

d) Ratkaisuun liittyvät pallopinnan viivat ovat isoympyrän kaaria

e) Kaikki suureet ovat kulmamittaisia: asteina tai radiaaneina

f) Auringon zeniittipaikat ovat mittauksen lähtöpisteitä

g) Paikan ratkaisuja on kaksi

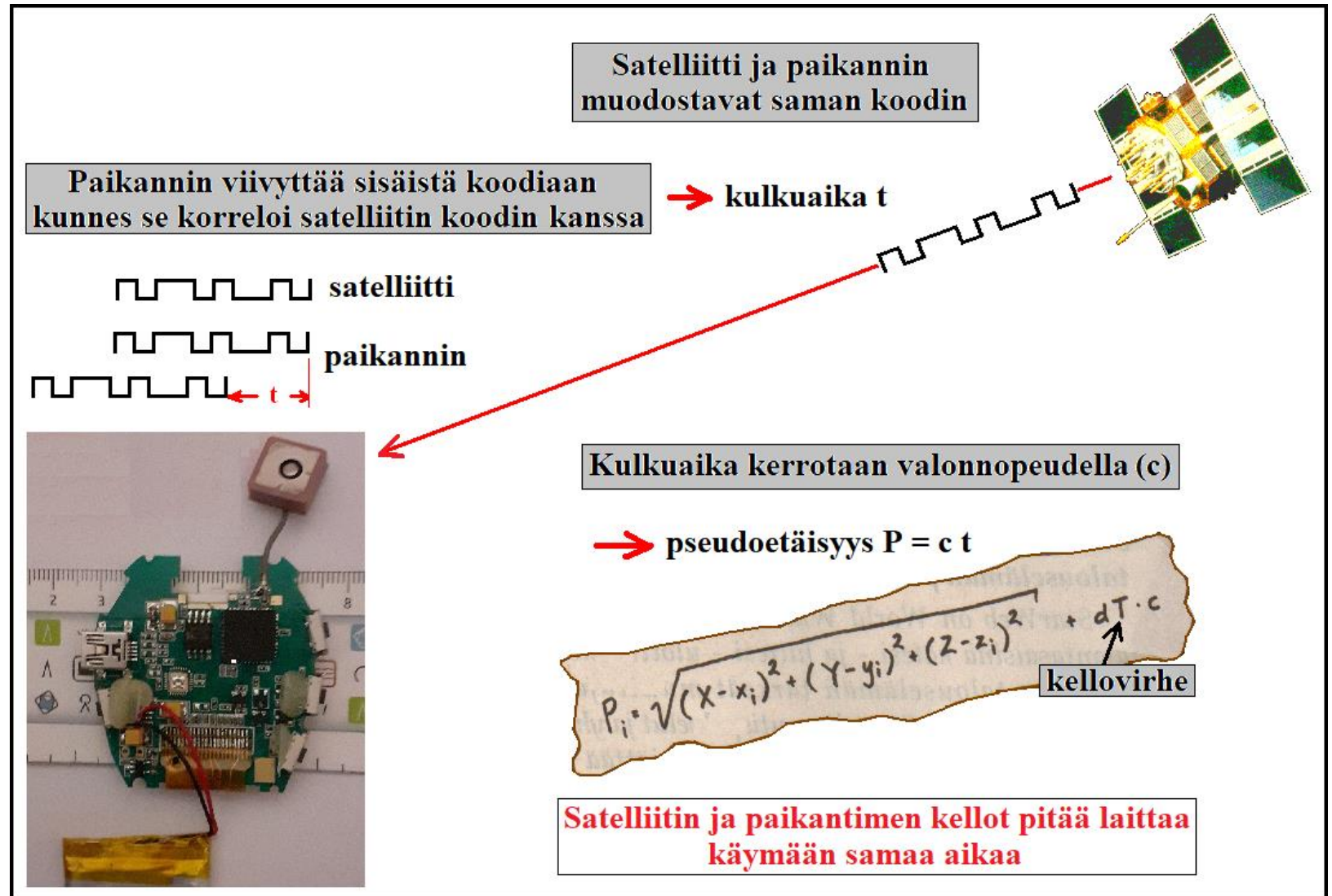
Etäisyys paikannussatelliittiin

Satelliittipaikannin mittaa etäisyyksiä satelliitteihin, ja käyttäjän paikka lasketaan etäisyyksistä.

Peruspaikannuksessa etäisyys satelliittiin mitataan satelliitin lähettämän signaalin kulkuajan perusteella.

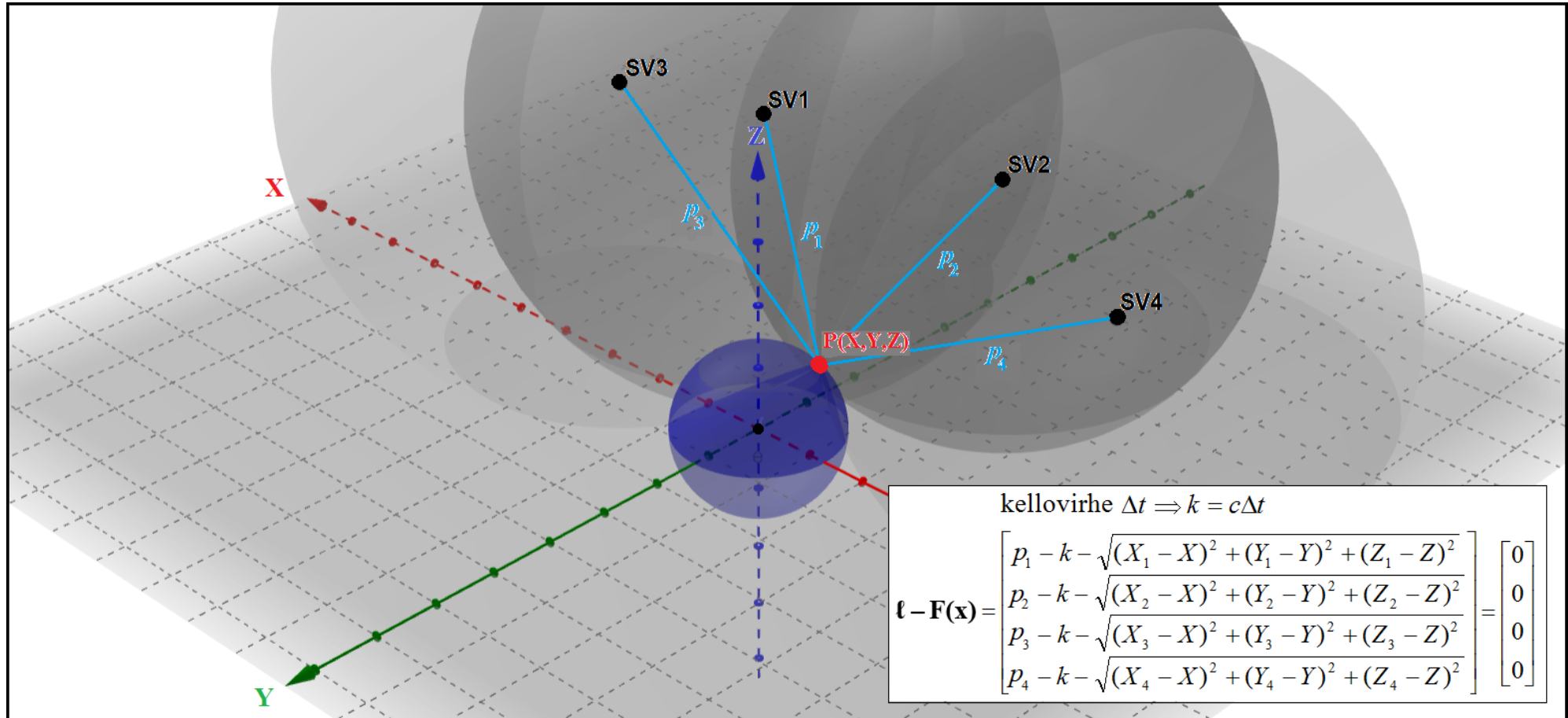
Ajanmittauksen tarkkuuden pitää olla nanosekuntitasolla.

Tarkan kulkuajan mittauksen edellytys on, että **paikantimen kvartsioskillaattori synkronoidaan** käymään samaa aikaa satelliitin atomikellon kanssa.



Kellojen synkronointi satelliittipaikannuksessa

Paikantimen kello synkronoidaan satelliitin kellon kanssa mittaamalla etäisyydet vähintään neljään satelliittiin, ja laskemalla paikkaratkaisun yhteydessä paikantimen kellon käyntivirhe. Tarkka aika tarvitaan sekä etäisyydenmittauksen että satelliittien sijainnin laskennan vuoksi. Peruspaikannuksen **tarkkuus on noin 5 m**.



Painovoima ja aika

- Einsteinin yleisen suhteellisuusteorian mukaan aika kuluu hieman eri nopeudella painovoimakentästä ja liikenopeudesta riippuen
- Painovoiman vaikutus ja liikkeen vaikutus kelloihin huomioidaan esimerkiksi satelliittipaikannuksessa
- Paikannuksen ohella tarkka aika on tärkeää esimerkiksi satelliittien viestinnässä ja tietojärjestelmien ylläpidossa
- Atomikellojen tarkentuessa painovoima on kasvava ongelma, kun kelloja verrataan toisiinsa, ja kellojen tuottamaa aikaa jaetaan eteenpäin ajan tarvitsijoille
- Kun kellot tarkentuvat, niiden avulla mitataan tulevaisuudessa muun muassa painovoimakenttää (geoidia) ja korkeuksia

Lähteet

- Crane, N. 2003. Mercator. Phoenix, London.
- Hart-Davis, A. 2012. Aika. Gummerus, Helsinki.
- Heiskanen, V. A. 1937. Pallotähtitieteen perusteet. WSOY, Helsinki.
- Karttunen, H. & Manner, O. & Tuovinen, P. 1995. Tähtitaivas 2000, kartasto ja käsikirja. Ursa, Helsinki
- Karttunen, H. & Donner, K. J. & Kröger, P. & Oja, H. & Poutanen, M. 2010. Tähtitieteen perusteet. Ursa, Helsinki.
- Koponen, L. 2009. Neiti Aika muuttaa kierto-radalle. Tähdet ja avaruus 5/2009, s. 12-17.
- Laurila, P. 2002. Tähtien paikka ja aika. RAMK, Rovaniemi.
- Laurila, P. 2010. Aika ja paikka. Maankäyttö 3/2010, s. 6-8.
- Nurminen, M. 2015. Maailma piirtyy kartalle. John Nurmisen säätiö, Helsinki.
- Paukku, T. 2010. Jos kapuat jakkaralle, vanhenet 0,00000009 sekuntia. HS 5.10.2010.
- Poutanen, M. 2016. Satelliittipaikannus. Ursa, Helsinki.
- Rantanen, K. 2014. Paljonko kello on Lontoossa? Tekniikan maailma 18/2014, s. 98-101.
- Sobel, D. 1996. Longitudi. Art House, Helsinki.
- The UK Hydrographic Office 2011. The Astronomical Almanac for the Year 2012.
- Whitrow, G. J. 1999. Ajan historia. Art House, Helsinki
- Wikipedia 2020. Atomic clock. Saatavilla: https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_clock. Luettu 3.3.2020.

Kirjoittajan yhteystiedot

Pasi Laurila

Tietokirjailija

Eläkeläinen

Maanmittaustekniikan yliopettaja
1996-2019

Puhelin 0400 976 544

Sähköposti ptlroi1955@gmail.com

