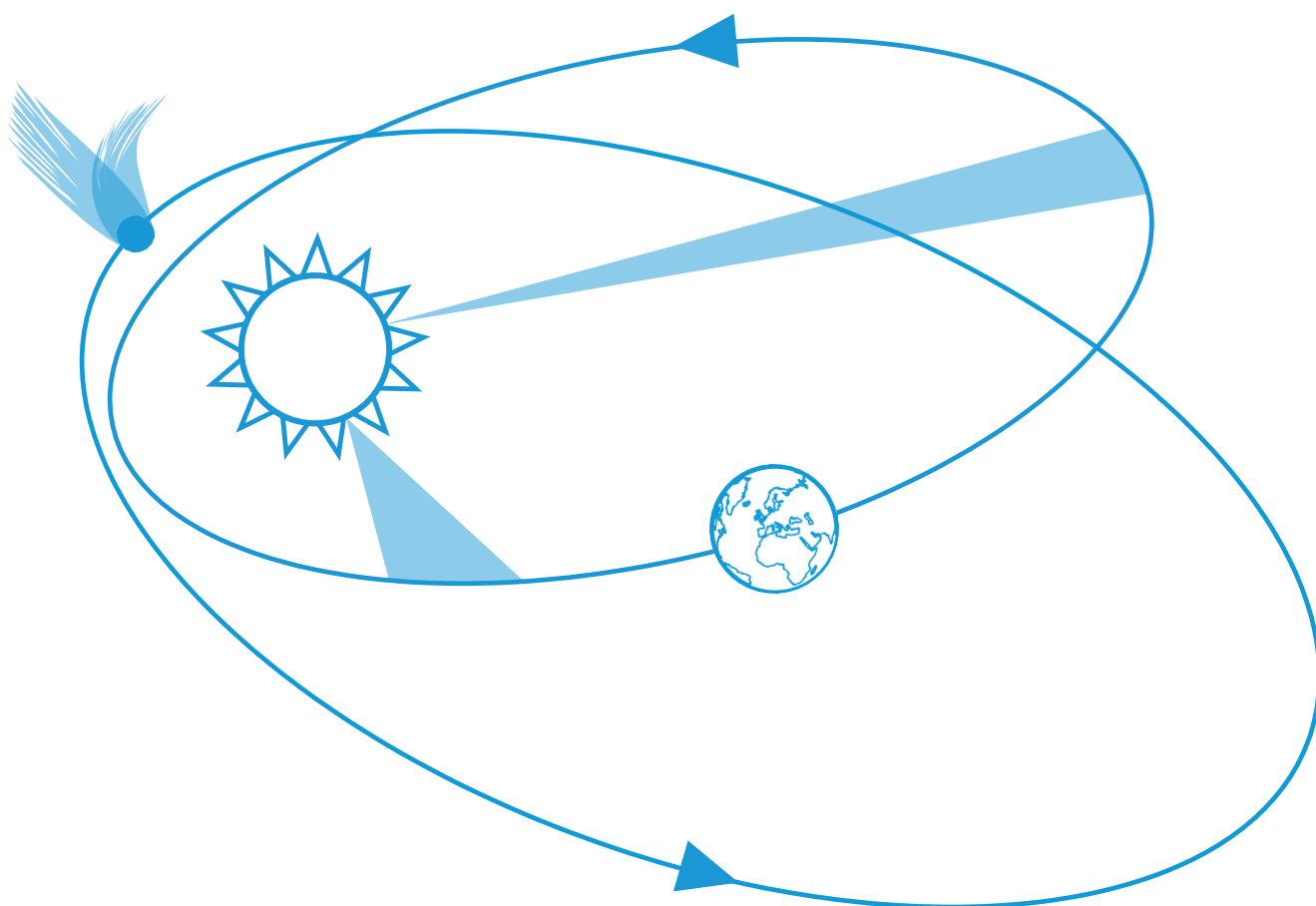


# Kosmos on õpetlik

## → Kepleri seadused

Orbiidil liikuvate kehade kiirus ja aeg



## → Sissejuhatus

Planeetide, komeetide ja teiste taevakehade orbiitide mõistmiseks on vaja uurida, kuidas gravitatsiooni ja objekti kiiruse koosmõjul objekti orbiit kujuneb. Õpilaste hulgas valitseb sageli eksiarvamus, et planetaarsed orbiidid on ringikujulised. Käesolev praktiline töö õpetab objekti kiiruse ajast sõltuvuse graafikuid koostama. See näitab, kuidas Päikese ümber elliptilisel orbiidil liikuva objekti kiirus muutub. Lisaks uurime ellipsite geomeetriat ja nende sõltuvust Päikesesüsteemi füüsikalistest parameetritest.

### SISUKORD

Kuulidega ellipsid. Tutvustus	Lk 3
Taustainfo	Lk 4
Praktiline tegevus - elliptiline tahvel	Lk 12
Täiendav arutelu	Lk 16
Järeldused	Lk 18
Õpilaste tööleht	Lk 19
Kosmiline kontekst @ ESA	Lk 21
Rahvusvaheline kosmosejaam	Lk 23
Lisad	Lk 26
Elliptilise laua juhend	Lk 26
Sõnastik	Lk 33
Viited	Lk 34

**Kosmos on õpetlik – Kepleri seadused**

[www.esa.int/education](http://www.esa.int/education)

Kommentaariid ja tagasiside võib saata [esero@ut.ee](mailto:esero@ut.ee).

Õppematerjalid koostajad on ESA, National Space Academy (UK), illustratsioonid Kaleidoscope Design (NL).

Copyright © European Space Agency 2014

## → Kuulidega ellipsid

### Orbiidil liikuvate kehade kiirus ja aeg

#### Lühiülevaade

**Vanuserühm:** 14 kuni 16 aastat

**Tüüp:** tegevus õpilastele

**Raskusaste:** keskmine

**Õpetaja ettevalmistusaeg:** 1 tund

**Õppetöö kestvus:** 15 minutit kuni 1 tund

**Hind:** madal (vähem kui 10 eurot)

**Asukoht:** (klassi)ruum

**Vahendid:** kuulikesed, joonlauad, vineerist alus

#### Elteadmised

1. Kineetilise energia ja gravitatsioonilise potentsiaalse energia mõisted.
2. Kiirusvektori mõiste.

#### Õpieesmärgid

1. Orbitaalliikumise printsiipide mõistmine, oskus koostada kiiruse ajast sõltuvuse graafikut ja siduda seda kiirenduse ja läbitud tee pikkusega.
2. Mõistmine, kuidas gravitatsioonijõud sõltub sellest, kui kaugel olla planeedist või tähest.
3. Mõistmine, miks planeedi/satelliidi liikumine elliptilisel orbiidil kord kiireneb, kord aeglustub.

#### Töö käigust video



↑ Kuulidega ellipsid video (vt lingid lk 34).

#### Seosed Õppekavaga

##### Füüsika

- Orbiidid
- Satelliidid
- Komeedid
- Planeedid
- Tähed
- Gravitatsioon (gravitatsioonijõu sõltuvus kaugusest)
- Kepleri seadused

##### Matemaatika

- Kiiruse ajast sõltuvuse graafik.
- Graafikualune pindala kui läbitud vahemaa mõõt.
- Gradient võrdub kiirendusega antud graafiku punktis.
- Graafikute koostamine ja nende tõlgendamine.
- Geomeetria: ellipsid, ekstsentrilisus, suur ja väike telg.

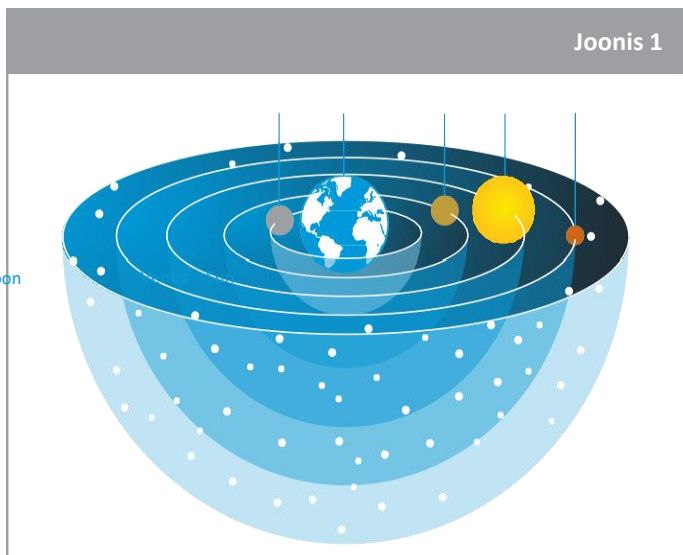
#### Kirjeldus

Selles tegevuses kasutavad õpilased elliptilist tahvlit, et saada elliptilisel orbiidil liikuva keha kiiruse ja teepikkuse andmeid. Tulemused esitatakse graafiliselt kiiruse ja aja teljestikus, et mõista elliptilisel orbiidil liikuva keha (planeedi või satelliidi) kiiruse muutumist gravitatsiooni mõjul.

## → TAUSTAINFO

### Geotsentrismi lühiajalugu

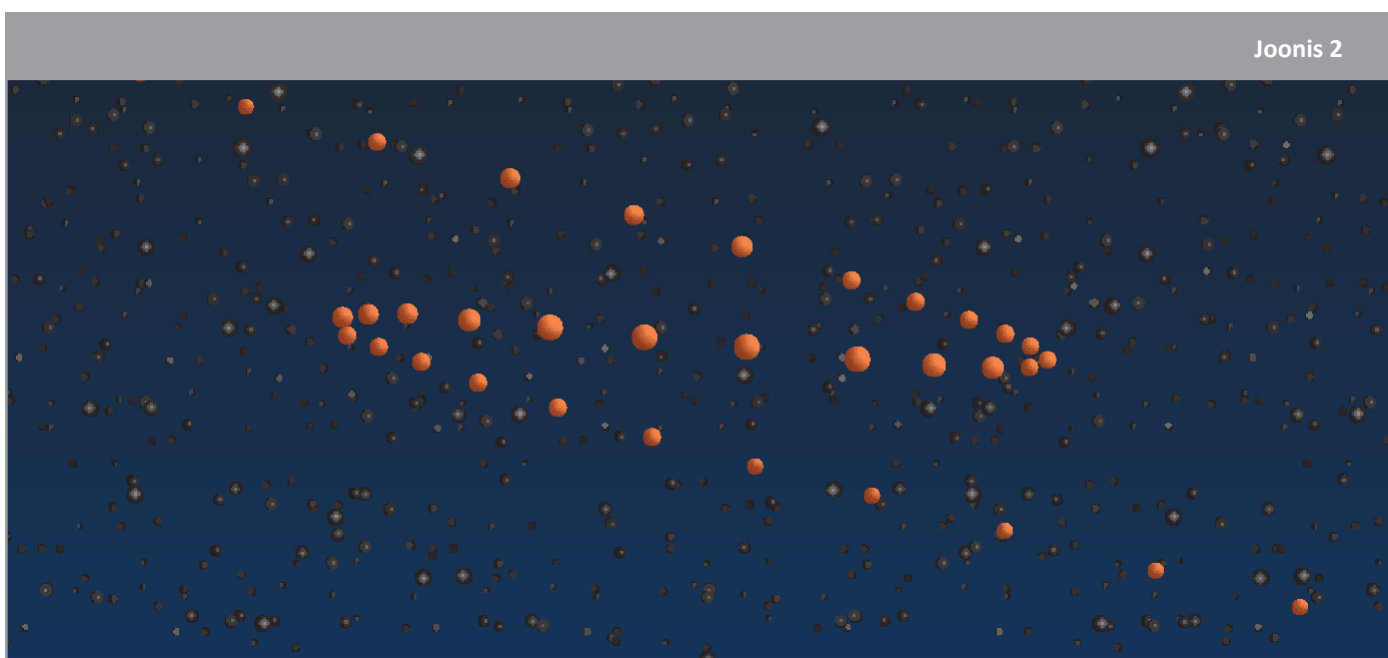
Filosoofid ja astronoomid on aastatuhandeid väidelnud Päikesesüsteemi ja selle ümbruse olemuse ja struktuuri üle. Kujunes välja kaks vastandlikku Päikesesüsteemi mudelit: geotsentriline (Maa keskne) ja heliotsentriline (Päikese keskne) mudel.



Aastal 200 eKr toetas Vana Kreeka astronoom Aristoteles geotsentrilist mudelit (Joonis 1). Ta pakkus välja, et planeedid (ja Päike) liiguvad ühtlaste kiirustega ringorbiitidel ümber Maa, mis on Universumi tsentriks.

Selle mudeliga oli aga probleeme. Nimelt näib Marss aeg-ajalt taevas oma tavapärasele liikumisele (lühiajaliselt) vastassuunas kulgevat (Joonis 2). Seda nähtust geotsentriline mudel ei seleta.

Geotsentriline mudel – Maa on Universumi keskmeks.

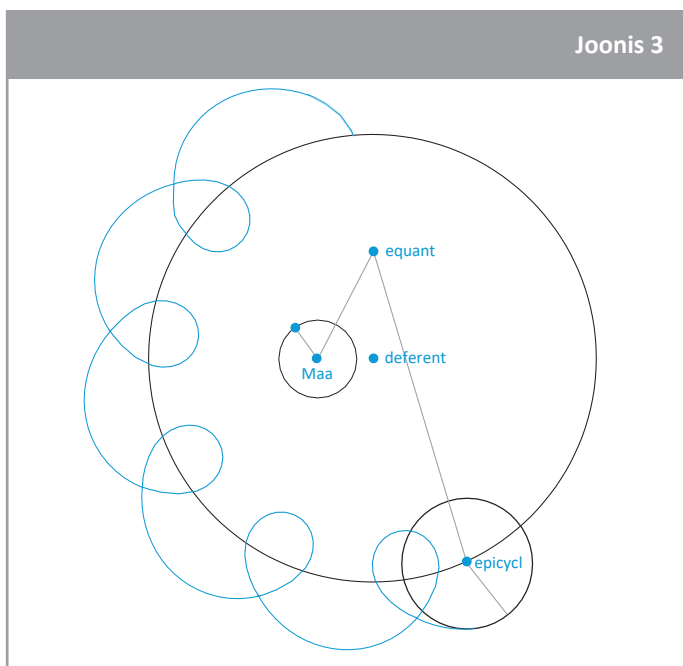


Marsi vastassuunaline liikumine taevas.

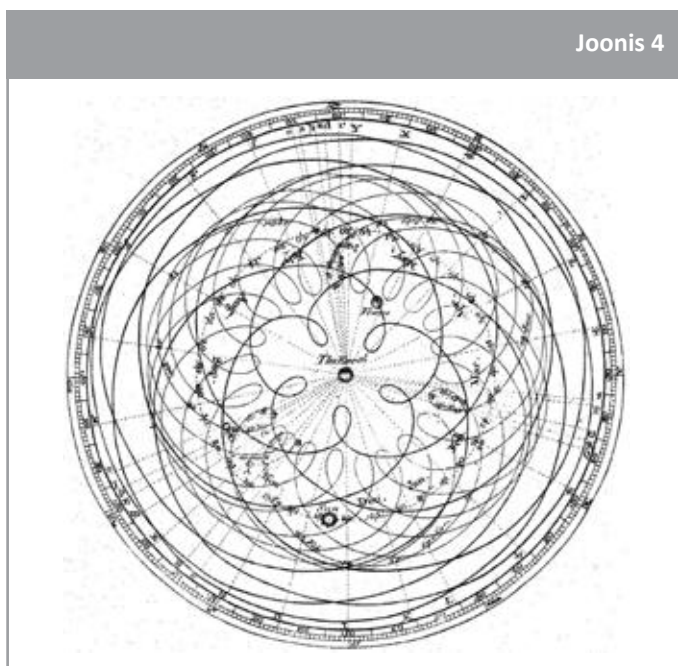
Ligi 400 aastat hiljem pakkus Ptolemaios sellele probleemile lahenduse. Maa jäi endiselt Universumi keskmeks, aga planeedid liikusid lisaks oma põhilistel ringorbiitidel ka mööda sekundaarorbiite – epitsükleid (Joonis 3). See seletaks osaliselt ja lubaks ette ennustada planeetide vastassuunalisi liikumisi.\*

\* **Planeedi vastassuunaline liikumine. Planeedi liikumine öötaevas normaalsele liikumisele vastassuunas.**

Selle süsteemi toimimiseks pidi Ptolemaios konstrueerima rea keerulisi epitsükleid (Joonis 4). Tõendite geotsentriliseks mudeliks sobitamiseks oli tegemist tõepoolest „parandamisega”.



Epitsükliitega saab vastassuunalisi liikumisi seletada.

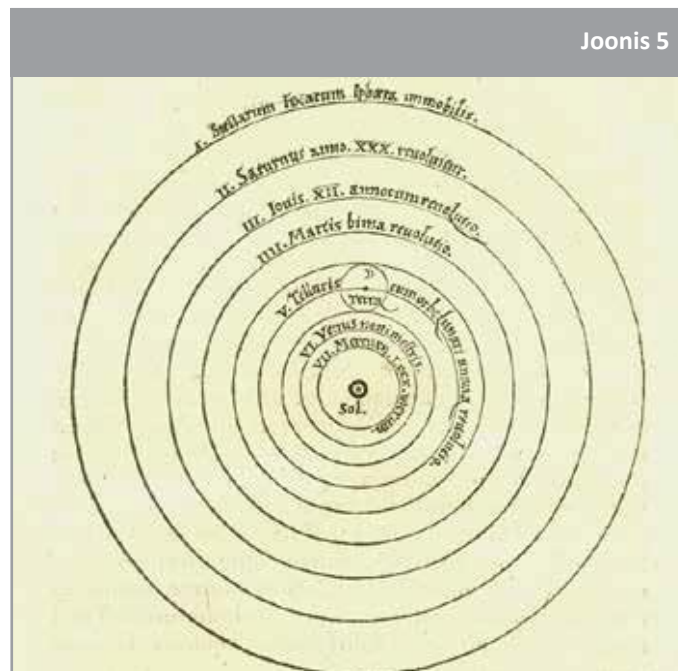


Ptolemaiose täislahendus oli ülikeeruline.

## Heliotsentrismi lühiajalugu

Aastal 1543 avaldas Nicolaus Copernicus töö pealkirjaga “De revolutionibus orbium coelestium” (“Taevasfääride pöörlemisest”), milles ta esitas Universumi heliotsentrilise mudeli (Joonis 5). See sai Koperniku revolutsiooni alguseks. Suured mõtlejad hakkasid tasapisi seda revolutsioonilist mudelit omaks võtma.

Ent üks probleem siiski jäi. Mudeli kohaselt liikusid kõik kehad ringorbiitidel, mis aga ei võimaldanud seletada kõiki planeetide vaatlusandmeid. Näiteks Marsi orbiit ei sobinud ringorbiidi eeldusega.



Päikesesüsteemi heliotsentriline mudel Koperniku järgi.

## Kepleri avastus planeetide orbiitide olemusest

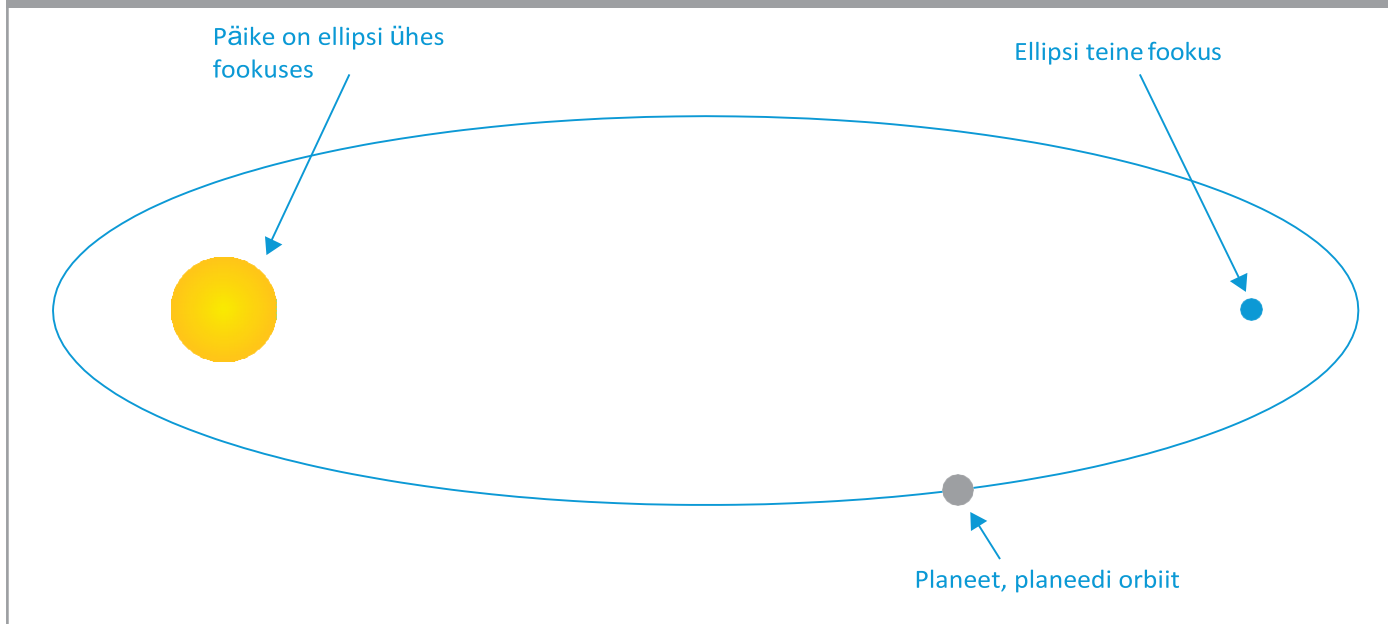
Varastel 1600ndatel aastatel uuendas Johannes Kepler ettekujutust Päikesesüsteemist ja planeetide orbiitidest. Planeet Marsi liikumise põhjalikust uurimisest järeldas Kepler, et planeetide orbiidid peavad olema mitte ringikujulised, vaid elliptilised. Edasise uurimise ja arvutuste põhjal tuletas Kepler kolm seadust, mis kehtivad kõigi orbiidil liikuvate kehade kohta.

### Kepleri seadused planeetide liikumise kohta

1. **Kepleri esimene seadus:** Planeet liigub ümber Päikese elliptilisel orbiidil, mille ühes fookuses on Päike (Joonis 6).
2. **Kepleri teine seadus:** Planeeti Päikesega ühendav sirgjoon katab võrdsete ajavahemikega võrdse pindala.
3. **Kepleri kolmas seadus:** Planeedi orbitaalperioodi\* ruut on võrdeline planeedi orbiidi suure pooltelje kuubiga.

\*Orbitaalperiood: orbiidi läbimiseks kuluv aeg

Joonis 6



Kepler tegi revolutsioonilise avastuse, et planetaarsed orbiidid on elliptilised.

Vaata ka animatsiooni Kepleri seadustest ja ESA ATV-2 õppevideot "Johannes Kepler" (viidete seksioonist).

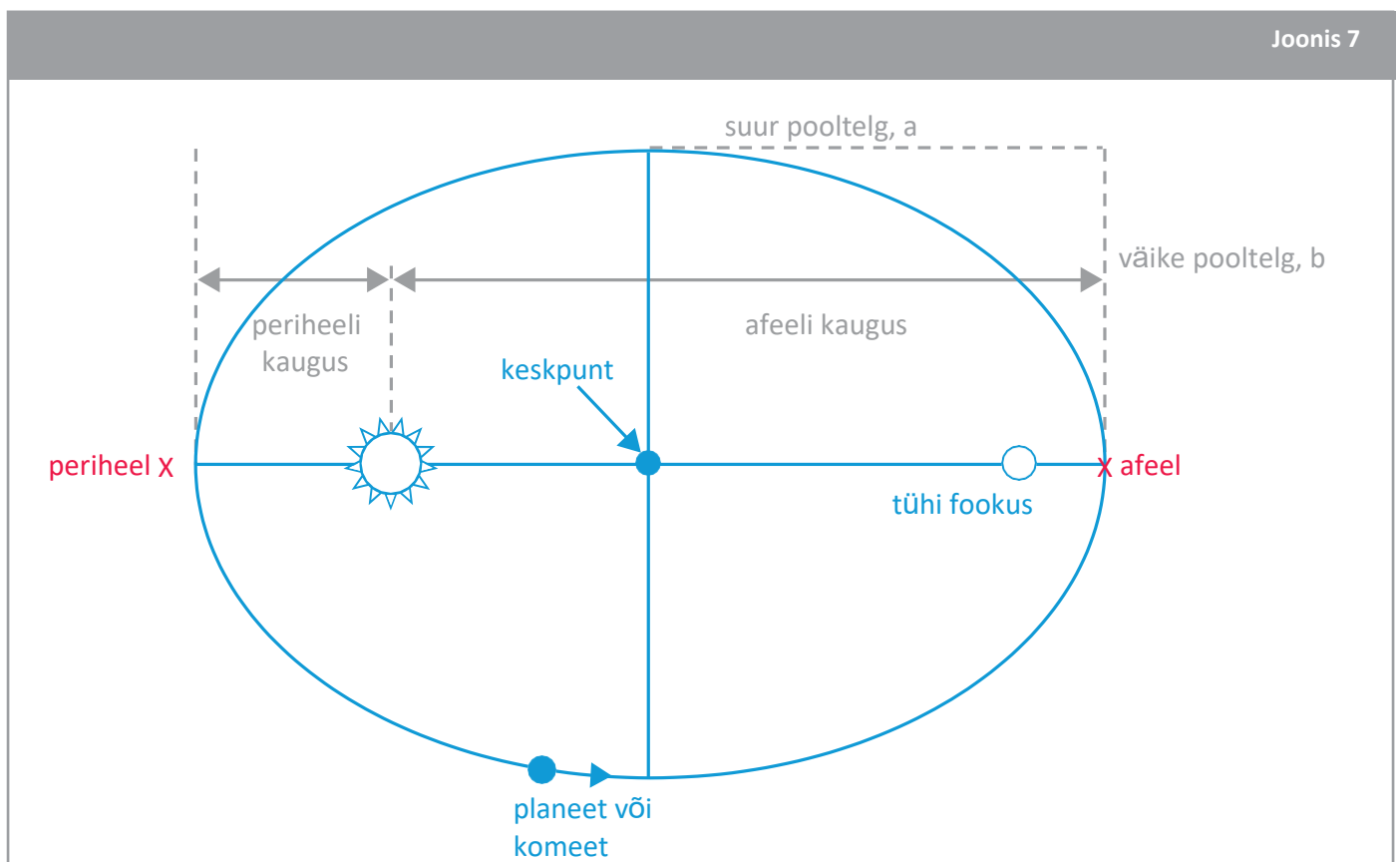
Planetaarsete orbiitide seaduste tähtsust ja Päikesesüsteemi uurimist käsitletakse hiljem "Juhendis".

## Elliptiliste orbiitide omadused

Orbiidil liikuva objekti omaduste efektiivseks analüüsiks ja Kepleri seaduste rakendamiseks tuleb esmalt defineerida põhilised mõisted:

### Teljed

Ellips on tasandil kahte fookuspunkti ümbritsev kõverjoon. Ellipsi mistahes punkti kauguste summa fookustest on konstantne. Seda saab demonstreerida nöörijuhi abil (vt Joonis A1 Tegevuste sektsioonis).



Elliptilise orbiidi omadused: suur ja väike (pool)telg, periheeli ja afeeli asukohad.

Orbiidi mõistmiseks tuleb defineerida selle suur ja väike telg (Joon. 7). Suur telg on ellipsi pikim diameeter, mis läbib kahte fookust ning keskpunkti. Väike telg poolitab suurt telge (ja on sellega risti). Need mõlemad jooned ning objekti asend ellipsil on tähtsad orbiidil liikuva keha kiiruse ja energia analüüsimisel.

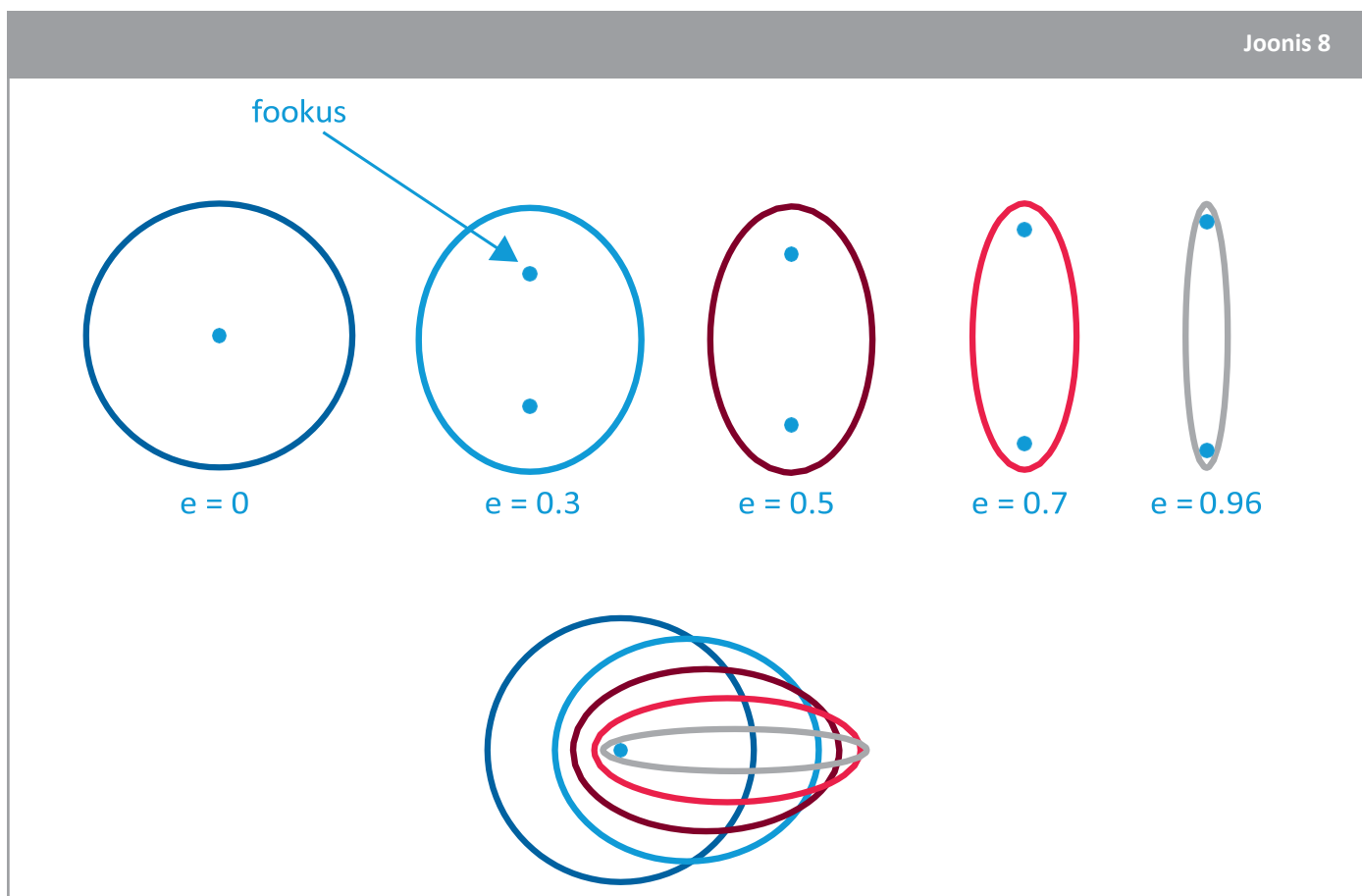
Orbiidi omaduste määramisel kasutatakse ka suure ja väikse pooltelje mõistet (Joonis 7). Suur pooltelg on pool suure telje pikkusest ning väike pooltelg on pool väikse telje pikkusest. Ringjoone poolteljed on võrdse pikkusega ja seda parameetrit nimetatakse ringi raadiuseks.

## Ekstsentrilisus

Ekstsentrilisus mõõdab ellipsi erinevust ringjoonest. Joonisel 8 on ekstsentrilisus tähistatud tähega 'e'.

Ringjoon on ellipsi erijuht, mille fookused langevad kokku ning täiusliku ringi ekstsentrilisus on null.

Ellipsi ekstsentrilisuse kasvades parameeter 'e' kasvab jäädes vahemikku  $0 < e < 1$ . Parabooli ekstsentrilisus on 1. Hüperbooli korral on  $e > 1$ .



Erinevate ellipsite ekstsentrilisus. Ekstsentrilisuse kasvades muutub ellips lapikumaks.

## Asukohad orbiidil

Uurides orbiidil liikuva keha kiiruse ja energia muutumist, tuleb arutleda selle üle, kus on kehal kineetilise energia maksimum (ja seega gravitatsioonilise potentsiaalse energia miinimum) ning kus on olukord vastupidine. Seda teemat arendatakse süvendatult Diskussiooni rubriigis ja Joonisel A5.

Orbiidi ja suurtelje Päikesele lähimat löikumispunkti nimetatakse periheeliks (Joonis 7).

Orbiidi ja suurtelje Päikesest kaugeimat löikepunkti nimetatakse afeeliks.



## Komeedid

Üks rühm objekte, mis võivad tiirelda ümber Päikese väga elliptilistel (suure ekstsentrilisusega) orbiitidel on komeedid (Joonis 9). Need väiksed jäised kehad pärinevad põhiliselt kahest Päikesesüsteemi piirkonnast. Lühiperioodilised komeedid (tiirlemisperioodiga alla 200 aasta) pärinevad Kuiperi vööst, mis kujutab endast Päikesesüsteemi tekke jäänukitest koosnevat kettakujulist vööndit, mis asub vahetult Neptuuni orbiidi taga.

Pikaperioodilised komeedid (tiirlemisperioodiga kuni kümneid tuhandeid aastaid) pärinevad arvatavalt Päikesesüsteemi äärealadel paiknevast jäiste kehade sfäärilisest halost, mida tuntakse Oort-Öpiku pilvena. Ulatudes tuhandete astronoomiliste ühikute kaugusele (AU)\*, on Oort-Öpiku pilv vahetuks pildistamiseks liialt kaugel. Seepärast tuleb pikaperioodiliste komeetide päritolu määramiseks nende orbiite tagasi suunas ekstrapoleerida (pikendada) (Joonis 10).



Hale-Bopp komeet pildistatuna Horvaatias

Komeedid tiirlevad Päikese ümber enamasti stabiilsetel orbiitidel. Ent Kuiperi vöö objekte võib mõjutada hiidplaneetide (Jupiter, Saturn, Uraan, Neptuun) gravitatsiooniväli ja Oort-Öpiku pilve objekte teiste/lähedaste tähtede liikumisest tingitud gravitatsioonilised häiritused\*. Need häiritused võivad aeg-ajalt muuta nende väikeste jää-maailmade orbiite, suunates nad Päikesesüsteemi keskosa poole.

Päikesele lähenedes need kehad soojenevad ja jää nendes sublimeerub\*. Komeedi algstruktuuri nimetatakse nüüd “tuumaks”. Tuuma kuumenedes eralduvad sellest gaas ja tolm, mis moodustavad hõreda, ent ulatusliku “atmosfääri”, mida nimetatakse koomaks (Joonis 11).

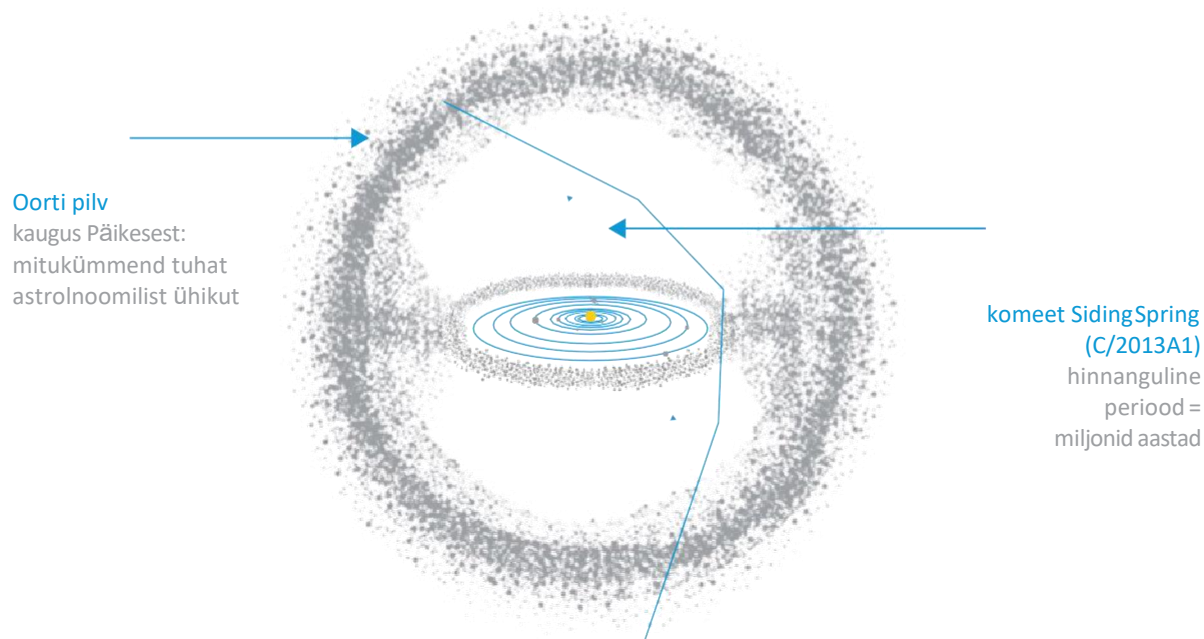
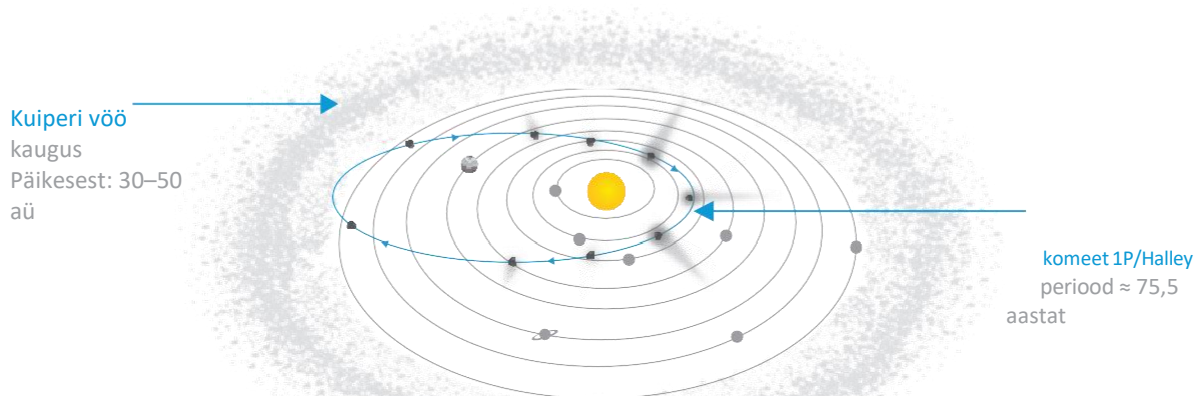
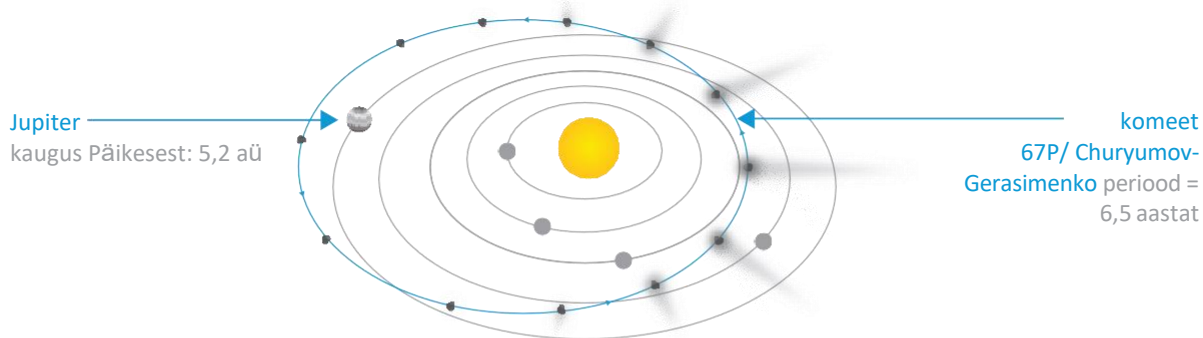
Lähenedes veelgi Päikesele, tekivad komeedi kooma ja Päikese üha tugevneva kiirguse ning päikesetuule\* vastasmõjus suurejoonelised komeedi “sabad”, mis on komeetide iseloomulikuks tunnuseks. Vahel harva on sabad nii heledad, et neid näeb Maalt ka päeval.

\* Astronoomiline ühik (AU): 1 AU on Maa ja Päikese keskmine vahekaugus, ehk siis Maa orbiidi raadius, mis on ligikaudu 150 miljonit kilomeetrit.

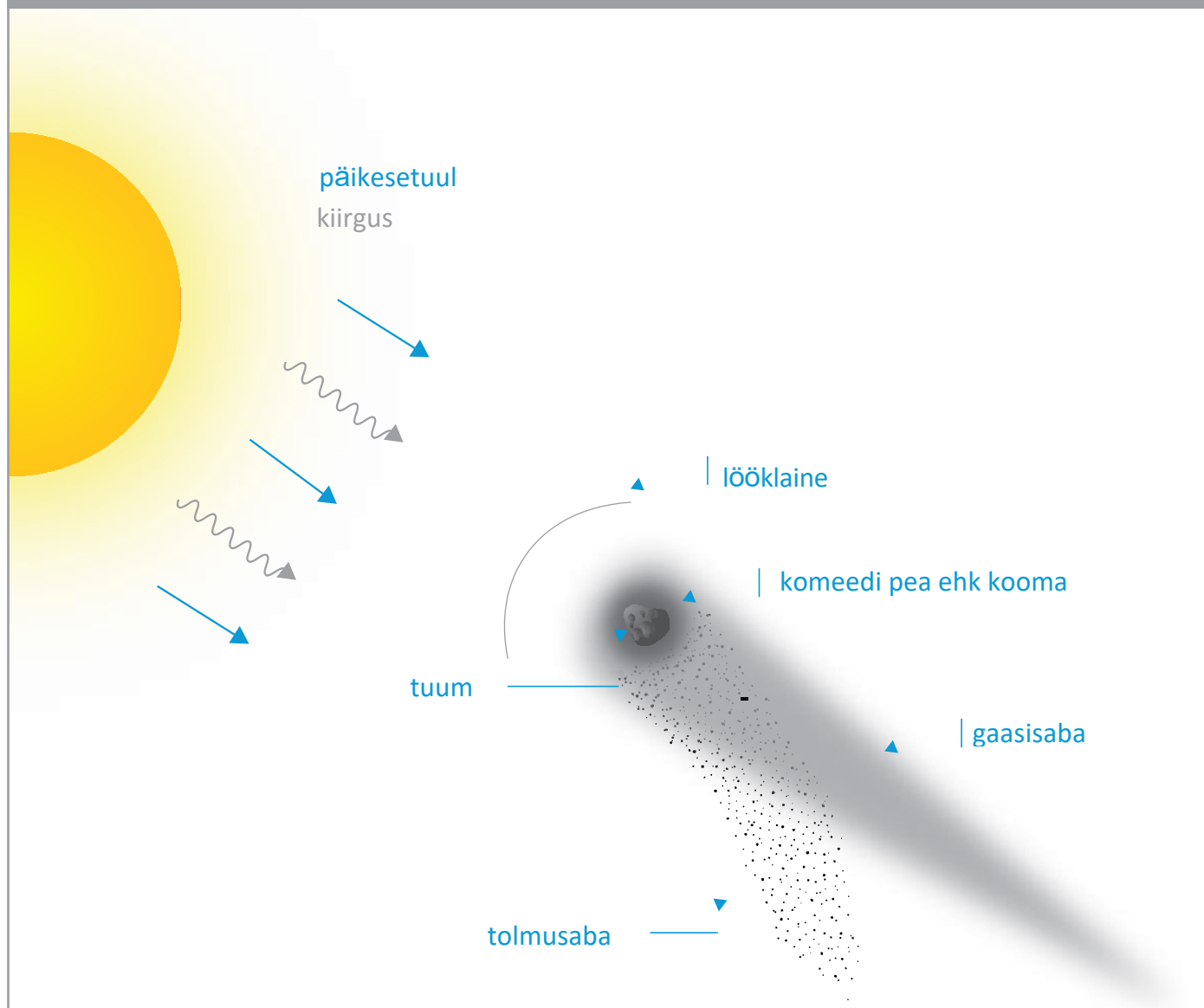
\* Gravitatsioonilised häiritused: taevakeha (näiteks planeedi, komeedi) orbiidi muutumine mõne teise taevakeha (nt hiidplaneet, teised tähed) gravitatsioonivälja toimel.

\* Päikesetuul: Päikese atmosfääri väliskihist kõigis suundades välja kiiratud kõrge energiaga osakeste (plasma) voog. See koosneb põhiliselt elektronidest ja prootonitest.

\* Sublimatsioon: kuumutatava aine üleminek tahkest olekust gaasilisse olekusse vedelat olekut vahele jättes. Gaasi taasjahutamisel tekib tavaliselt tahke sete.



Komeetide orbiidid Päikesesüsteemis.



Komeedi anatoomia.

Rohkem üksikasju komeetide orbiitide kohta leiate Diskussiooni rubriigist.

Rohkem infot komeetide ehituse, koostise ja tähtsuse kohta leiab ESA õppematerjalist “ESA teach with space – cooking a comet” (vaata Viidete rubriiki).

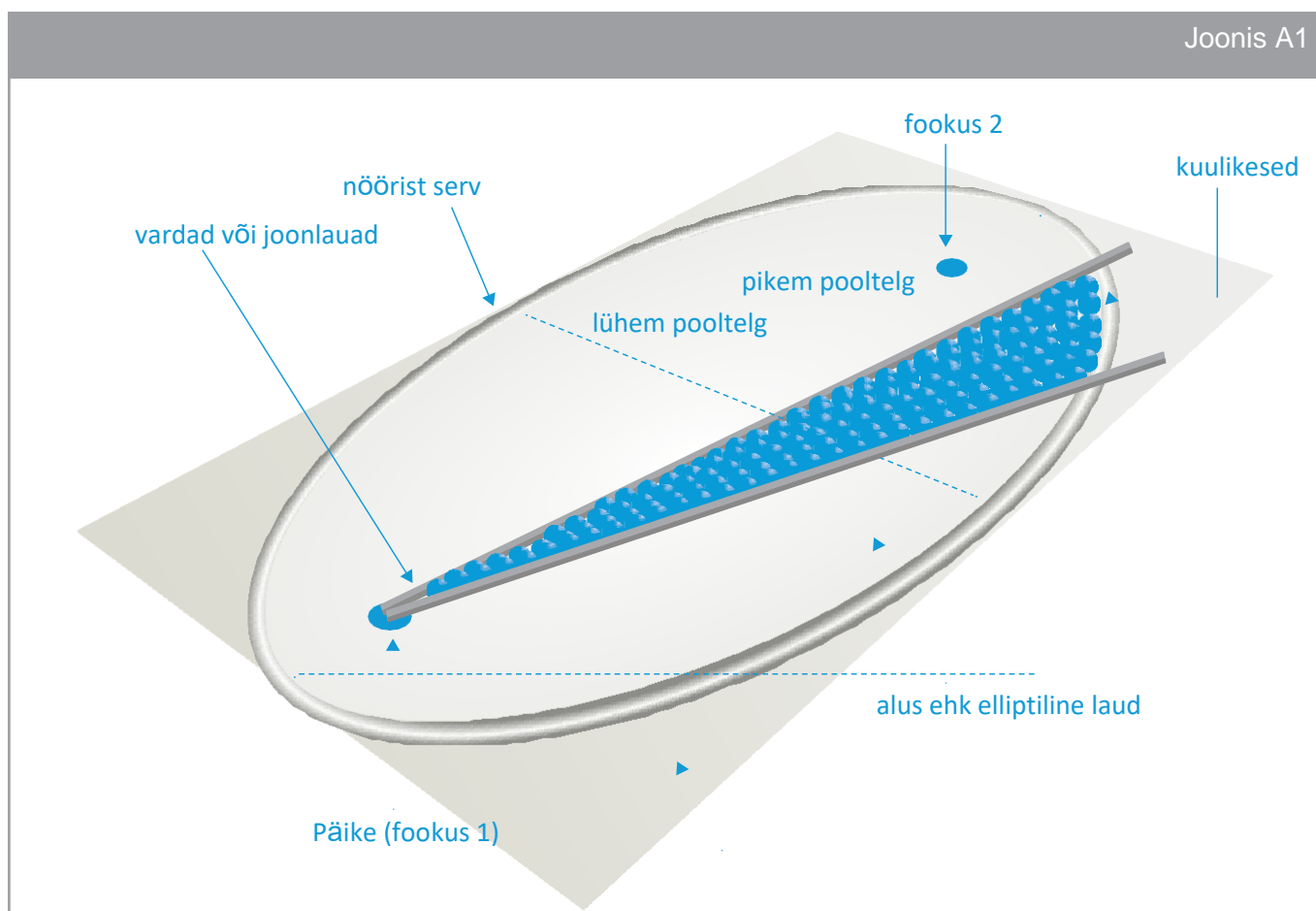
\*lööklaine (ingl *bow shock*): komeedi kooma ionide ja päikesetuule vastasmõju pind. Lööklaine tekib, kuna komeedi liikumiskiirus päikesetuule suhtes ületab helikiirust. Lööklaine moodustub komeedi ees, päikesetuule suunal. Lööklaines kuhjuvad komeedi ioonid, mis laevad Päikese magnetvälja plasmaga. Selle tulemusel kaarduvad väljajooned ümber komeedi, haarates kaasa komeedi ioone ja moodustades gaasi/plasma/ionide saba.

## Kiiruse ja vahemaa mõõtmine elliptilisel laual

Selles tegevuses kasutavad õpilased elliptilist lauda ja määravad elliptilisel trajektoiril liikuva objekti kiirust ja läbitud vahemaad. Tulemused esitatakse graafiliselt kiirus – aeg teljestikus, mille põhjal selgub, kuidas gravitatsioon mõjutab (või muudab) satelliidi kiirust elliptilisel orbiidil. Õpilase tööleht ja juhendid on lisatud Dokumendis.

### Vajalikud vahendid

- Elliptiline laud (tahvel) – eelnevalt valmistatud. Juhendit vaata Lisas: Elliptilise laua juhend.
- Umbes 75 väikest kuulikest (mõned pisikesed kuulid oleksid kasulikud kiilu teravnurga täitmiseks).
- 2 meetripikkust joonlauda või varrast
- 50 cm nõõri
- kustutatav marker



Katse varustus. Laua valmistamisjuhendit vaata lisan: Elliptilise laua juhend.

### Tervis ja ohutus

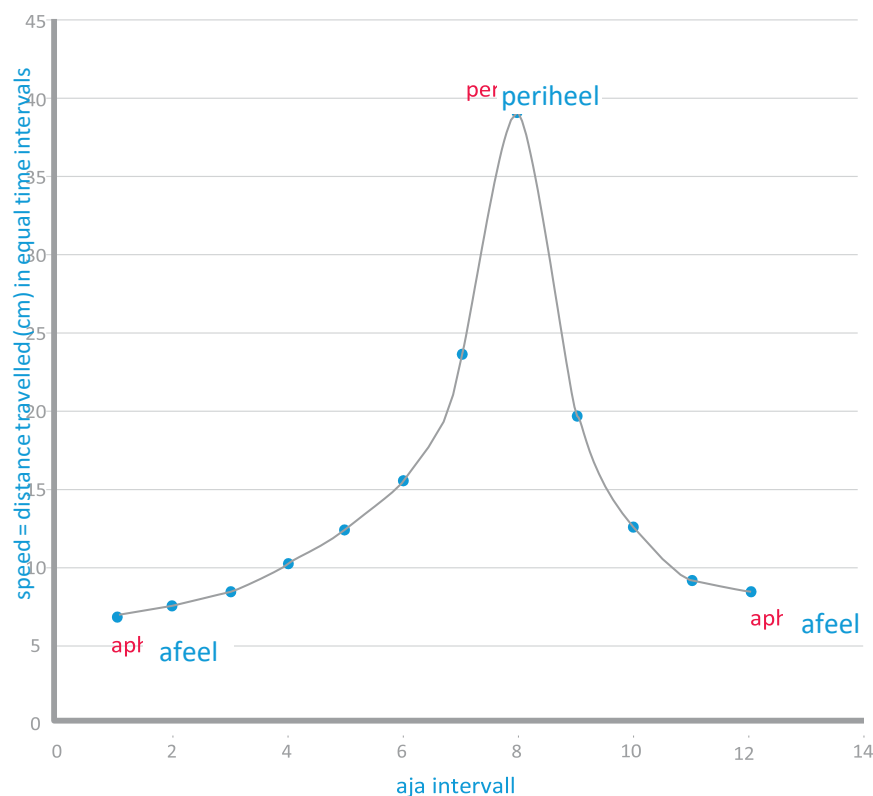
See on väga madala riskiastmega tegevus. Erilisi ettevaatusabinõusid pole vaja rakendada.

**Märkus:** elliptiline laud kujutab endast Päikese ümber liikuva komeedi orbiidi tasandit.

Vaata samuti kaasasolevat ESA õppevideot: kuulikestega ellipsid.

1. Lõika välja töölehe lõpus olev ellipsi šabloon ja kleebi alusele.
2. Kleebi nõör ellipsi äärt mööda alusele.
3. Märki ellipsil kustutatava markeriga võimalikult kaugel punkt Päikesest (fookuses 1) – see on afeel. Aseta joonlaud või varras läbi selle punkti ja Päikese. Seda joonlauda pööratakse eksperimendi käigus ümber Päikese. Vaata Joonis A1.
4. Aseta teine joonlaud/varras (esimese varda lähedale), ühe otsaga Päikesele. Ka seda varrast pööratakse eksperimendi käigus ümber Päikese. Täida varraste vahe kuulikestega. Liiguta teist varrast seni, kuni kuulid täpselt ruumi täidavad. Märki ellipsil teise varda sisekülje positsioon. Pane tähele, et mõõtmiste koguarv oleneb kuulikeste arvust – mida vähem kuule, seda rohkem tuleb mõõtepunkte.
5. Liiguta mõlemat varrast piki ellipsit, nii et esimene varras asetub teise varda algasendisse (teist varrast liiguta esimese varda ees). Teine varras sea nii, et kuulid täidaksid täpselt varrastevahelise ruumi (Joonis A1). Märki taas teise varda sisekülje positsioon ellipsil.
6. Korda punktis 3 kirjeldatud, kuni kogu ellips saab kaetud.
7. Mööda nõöri abil märkide vahekaugused piki ellipsi välisserva. Kanna need andmed tabelisse koos ajavahemikega (mõõdetud pindade järjekorranumbriga – esimene pind on ajaintervall 1, teine pind on ajaintervall 2 jne). Mõõdetud vahekaugused annavad kiiruse, kuna nad näitavad võrdse ajaintervalliga läbitud vahemaid.
8. Koosta graafik kiiruse (mõõdetud vahemaad) ja ajavahemike (intervalli number) teljestikus. Joonisel A2 on esitatud tabeli ja graafiku näidised. Saadud kõverjoone gradient oleneb ellipsi ekstsentrilisusest – ekstsentrilisem (lapikum) ellips annab suurema gradiendi (järsema tõusu), ümaram ellips annab madalama tipu/maksimumi.
9. Pane tähele, et mida elliptilisem on tahvel, seda järsem on kiiruse gradient graafikul.

pindala sektor	vahemaa
1	6,7
2	7,5
3	8,4
4	10,1
5	12,2
6	15,5
7	23,6
8	39,2
9	19,8
10	12,5
11	9,2
12	8,4



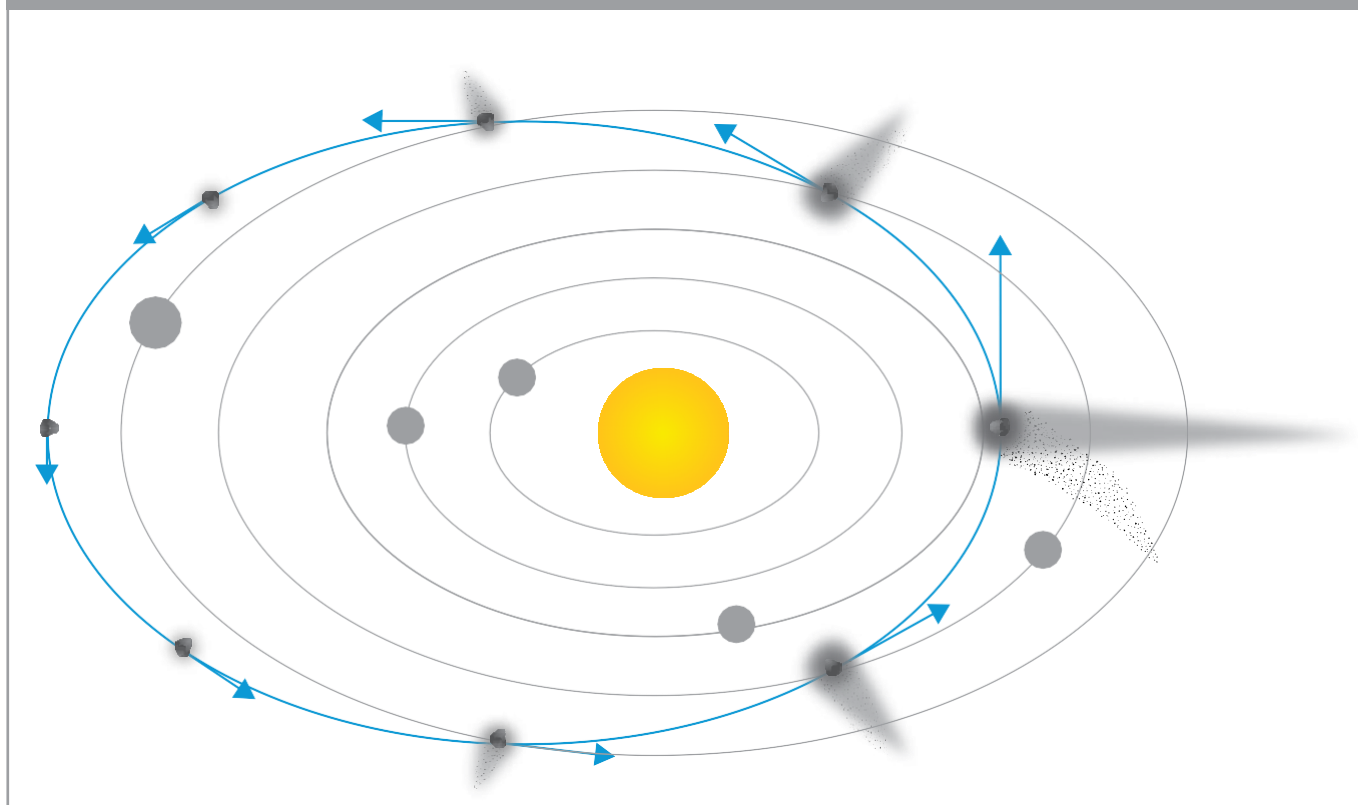
↑ Joonis A2. Tabeli ja graafiku näidis.

## Arutelu

### Komeedi vaatlused ja (tulemuste) seletus

Komeedile mõjub Päikese külgetõmbejõud. Komeedi liikumistrajektor sõltub kahest tegurist – liikumiskiirusest ja algsest liikumissuunast. Komeedi liikumisel ümber Päikese muudab komeedile mõjuv tsentripetaaljõud ehk kesktõmbejõud (jõud, mis mõjub orbiidi fookuses asuva Päikese suunas) pidevalt komeedi liikumist seda kord kiirendades, kord aeglustades (Joonis A3).

Päikese külgetõmme kiirendab stabiilsel orbiidil liikuvat komeeti ja komeedi kiirus kasvab kuni periheelini. Pärast periheeli läbimist mõjub Päikese külgetõmme komeedi liikumisele vastassuunas, aeglustades komeedi liikumiskiirust.



Komeedi kiirusvektori (sinine nool) muutumine sõltuvalt komeedi asukohast orbiidil. Kiirusvektori muutusi põhjustab Päikese külgetõmbest tingitud tsentripetaalne kiirendus. Komeedi saba muutmine on samuti näidatud.

Kui komeet liiguks ringorbiidil, siis oleks tsentripetaalkiirendus alati komeedi kiirusvektoriga risti ( $90^\circ$ ). Elliptilisel orbiidil varieerub tsentripetaalkiirenduse ja kiirusvektori vaheline nurk. See tsentripetaalkiirenduse varieerumine tingibki elliptilisel orbiidil liikuva keha kiiruse muutumise.

## Mida ütleb meile Joonisel A2 esitatud sõltuvuse/seose/joone gradiendi muutumine?

Kuna kiirus-aeg sõltuvuse gradient iseloomustab/annab kiiruse muutumise määra/suuruse, siis on joone gradient komeedi kiirenduse mõõduks orbiidi antud punktis. Kiirenduse (gradiendi) maksimum saavutatakse komeedi lähenemisel periheelile, kus komeedi kiirus on suurim. Pärast periheeli läbimist mõjub komeedile maksimaalne aeglustus ja komeedi liikumine aeglustub kuni afeelini, kus tema kiirus on minimaalne.

## Mida ütleb meile graafiku/sõltuvuse alune pindala?

Graafiku alune pindala näitab komeedi poolt läbitud vahemaad. On kerge märgata, et komeedi lähenemisel periheelile kasvab komeedi poolt ajaühikus läbitud vahemaa, kuna komeedi kiirus kasvab. Afeelile lähenemisel liigub komeet aeglasemalt ja läbib ajaühikus lühema vahemaa.



## Arutelu laiendus/jätk

Tegevust saab laiendada/jätkata arutlusega selle üle, mis parameetrid võiksid orbiiti muuta, nagu näiteks keha algkiirus ja liikumissuund, samuti tsentraaltähe ning selle ümber liikuva keha massid.

Lisainfo saamiseks vaata ATV-4 “Albert Einstein” haridusliku videot (vt Viidete sektsiooni).

Õpilased võivad kasutada ka Kepleri kolmandat seadust ja analüüsida komeedi orbitaalperioodi sõltuvust orbiidi suure pooltelje pikkusest.

### Kepleri kolmas seadus

$$T^2 = \left( \frac{4\pi^2}{GM} \right) a^3$$

T = tiirlemisperiood

a = orbiidi keskmise raadius

G = universaalne gravitatsioonikonstant

M = Päikese mass

Mida pikem on orbiidi suur pooltelg, seda pikem on tiirlemisperiood. Seda näeme ka Päikesesüsteemis – mida kaugemal on planeet Päikesest, seda pikem on planeedi tiirlemisperiood.

## Energeetilised kaalutlused ja maalähedased objektid

Komeedi liikumisel elliptilisel orbiidil toimub Päikesele lähenedes pidev gravitatsioonilise potentsiaalse energia kineetiliseks energiaks muundumine ning komeedi Päikesest eemaldudes jällegi vastupidine energia muundumise protsess. Joonis A5 kirjeldab tiirleva keha kineetilise ja gravitatsioonilise potentsiaalse energia muutumist orbiidil.

Kuivõrd komeedi koguenergia peab jääma konstantseks, siis seega:

$$\text{Kineetiline energia (E}_k\text{)} + \text{gravitatsiooniline potentsiaalne energia (E}_p\text{)} = \text{konstant}$$

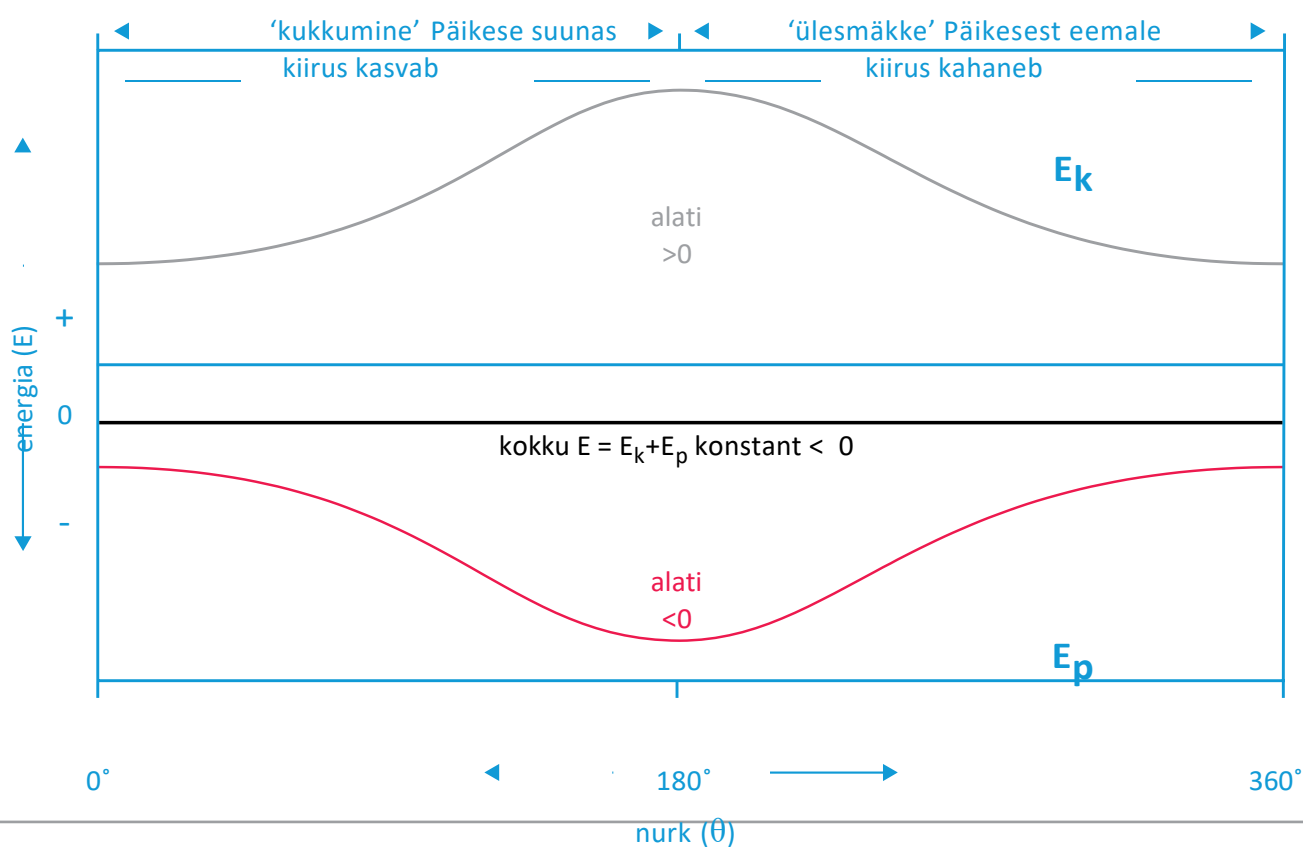
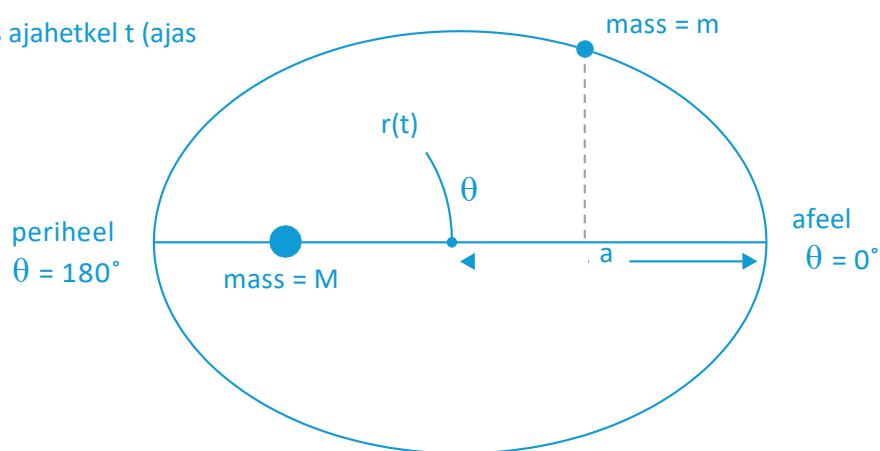
Kasutades seda infot ja võimalust/võimekust arvutada Kepleri seaduste põhjal orbiidi parameetreid, määravad ESA Maalähedaste Objektide Koordinatsioonikeskuse teadlased Rooma lähistel Itaalias komeedi või asteroidi kineetilist energiat selle orbiidi mistahes punktis.

See on tähtis, kuivõrd komeedi või asteroidi elliptiline orbiit võib mõnikord kattuda/lõikuda Maa orbiidiga, mis võib tekitada kokkupõrke ohu. Täiendades Kepleri seadusi gravitatsioonilise potentsiaalse energia ja kineetilise energia võrranditega, saab hinnata kokkupõrke võimalikku mõju.



$a$  = orbiidi pikem pooltelg

$r(t)$  = kaugus ajahetkel  $t$  (ajas muutuv)



Orbiidil liikuva keha kineetilise ja potentsiaalse energia muutumine sõltuvuses keha asendist orbiidil. Koguenergia jääb alati konstantseks.

## → Järeldus

Orbiitide olemuse mõistmine on kriitilise tähtsusega taevakehade vaatluste seletamiseks. Sidudes Kepleri seadused kineetilise ja gravitatsioonilise potentsiaalse energia mõistetega, me mitte ainult oleme võimelised interpreteerima komeetide orbiite ja kokkupõrke võimalikku mõju, vaid me suudame modelleerida ka satelliidi nagu Rosetta keerukat orbiiti, mida see peab läbima, täiendamaks meie kosmosealaseid teadmisi. Käesolev tegevus võimaldab vilunud õpetajal käsitleda ja arendada mitmeid praktilisi oskusi, nagu mõõtmiste täpsus ja korrektsus, tabelite planeerimine, heade jooniste/graafikute koostamine, parima lähendi määramine ja gradientide tähendus.

## Kiiruse ja vahemaa mõõtmine elliptilisel laual

Selles tegevuses te kasutate elliptilist lauda elliptilisel orbiidil liikuva komeedi kiiruse ja teepikkuse määramiseks.

**Vastavalt planeetide liikumise Kepleri teisele seadusele katab planeeti ja Päikest ühendav sirge võrdsetes ajavahemikes võrdse pindalaga alad.**

- Pindalat mõõdab kuulide arv. Pindala peab jääma mõõtmise käigus samaks.
- Sa pead määrama iga mõõtmistsükliga orbiidil läbitud vahemaa.
- Mõõdetav vahemaa tähendab tegelikult komeedi keskmist kiirust. Arvesta, et  $v=d/t$ , kus:  $d$  on vahemaa meetrites (m),  $t$  on aeg sekundites (s) ja  $v$  on kiirus (m/s).
- Kanna oma mõõtmistulemused allolevasse tabelisse. Sul tuleb valida mõõtühikud olenevalt orbiidi tegelikust suuruselt. Näiteks selles katses ütleme, et ajavahemikku mõõdetakse sekundites ja keskmist kiirust cm/s. Mõõtmiste arv võib varieeruda olenevalt kuulikeste arvust. Arvesta umbes kümnekonna mõõtmisega.

Aeg S	Kiirus cm/s

- Koosta graafik kiiruse (y-telg) sõltuvusest ajast (x-telg) - võid kasutada graafilist paberit või töölehte. Märki ära afeeli ja periheeli asukohad.
- Ühenda punktid, joonista kõverjoon, mis seob parimal viisil mõõtepunkte ja kirjeldab komeedi liikumist.
- Loe järgnevaid küsimusi ja siis kirjuta järeldus, mis seletab graafiku kuju, püüdes vastata võimalikult paljudele küsimustele.

## Küsimused

1. Joone gradient on komeedi kiirenduse mõõduks. Allapoole suunatud kalle näitab aeglustust. Kuidas muutub gradient (kogu) orbiidi ulatuses?
2. Joonealune pindala näitab komeedi poolt läbitud vahemaad. Kuidas see vahemaa muutub?
3. Kus liigub komeet kõige kiiremini? Kus liigub ta kõige aeglasemalt? Miks?
4. Gravitatsioon on tugevam Päikese lähedal ja nõrgem Päikesest eemal. Kuidas mõjutab gravitatsioon komeedi kiirust?
5. Millised energia muutused/muundumised leiavad aset orbiidi jooksul?
6. Mis muutub suurema ekstsentrilisusega orbiidil liikuva komeedi korral?
7. Planeedid tiirlevad samuti ümber Päikese ja neil on oma gravitatsiooniväli. Kuidas nad võivad mõjutada komeedi orbiiti?

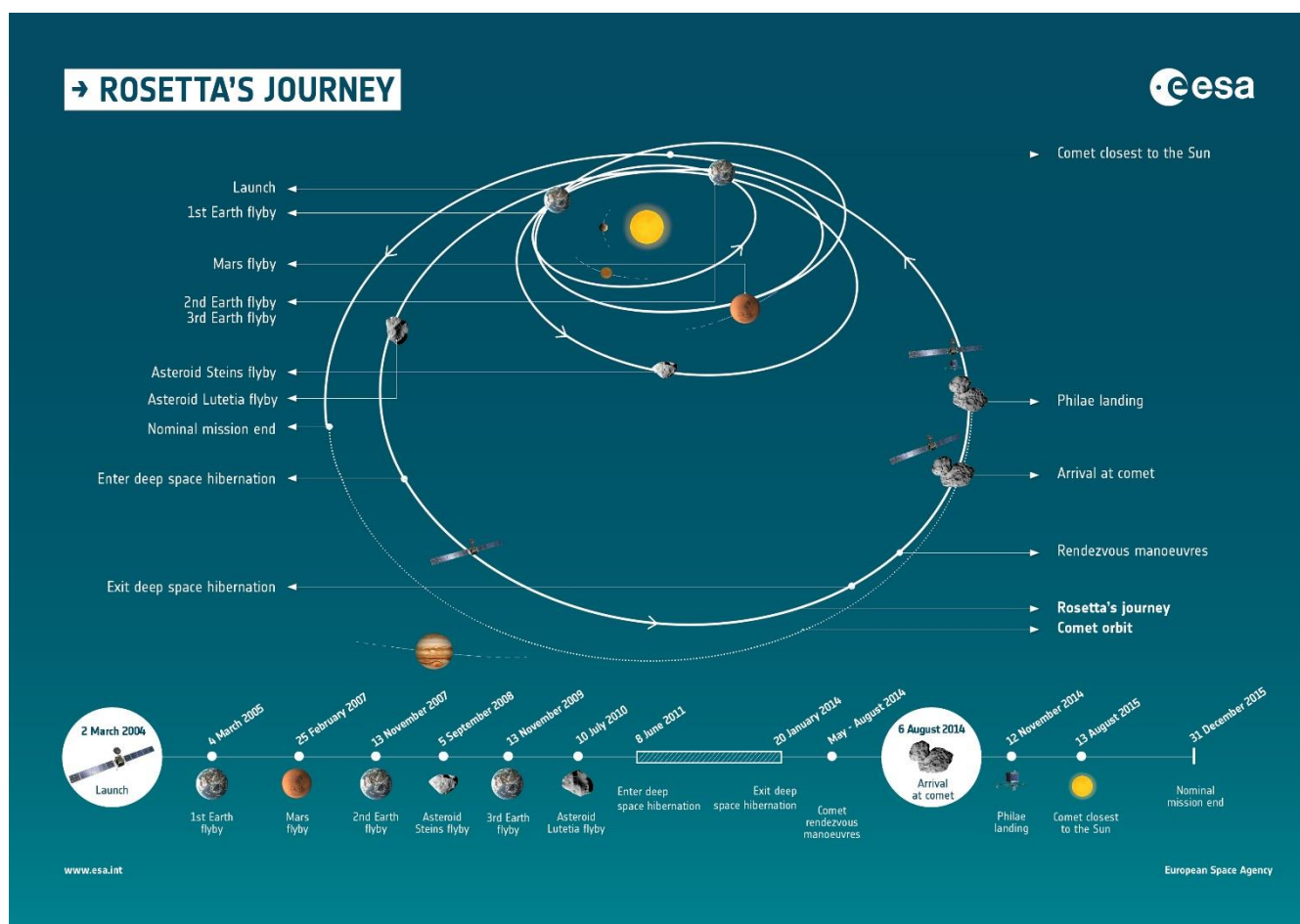
## → KOSMILINE KONTEKST @ ESA

### Rosetta

ESA Rosetta missioon komeedile 67P/Churjumov-Gerassimenko startis 2004. aastal. 10 aastat kestval retkel pidi Rosetta kohtuma komeediga ning laskuma komeedi tuumale.

Rosetta peamine eesmärk on aidata mõista Päikesesüsteemi teket ja evolutsiooni. Komeedi koostis peegeldab Päikese eelse udu/pilve koostist, millest Päike ja Päikesesüsteemi planeedid formeerusid enam kui 4,6 miljardit aastat tagasi. Komeedi 67P/Churjumov-Gerassimenko süvaanalüüs Rosetta ja selle maanduri poolt annab olulist infot Päikesesüsteemi tekke (paremaks) mõistmiseks.

On veenvaid tõendeid selle kohta, et komeetidel oli planeetide evolutsioonis võtmeroll, kuivõrd komeetide pörked planeetidega olid varases Päikesesüsteemis palju tavalisemad/sagedasemad kui tänapäeval. Nii näiteks võisid just komeedid tuua vee Maale. Komeedi 67P/Churjumov-Gerassimenko vee keemilist koostist analüüsitakse ja võrreldakse Maa ookeanide vee koostisega. Komeedid sisaldavad lisaks jääle ja tolmu ka palju keerulisi molekule, ka orgaanilist materjali, mis võis etendada üliolulist rolli elu arengule Maal.



ESA Rosetta kosmosesõiduki teekond sihtkohani.

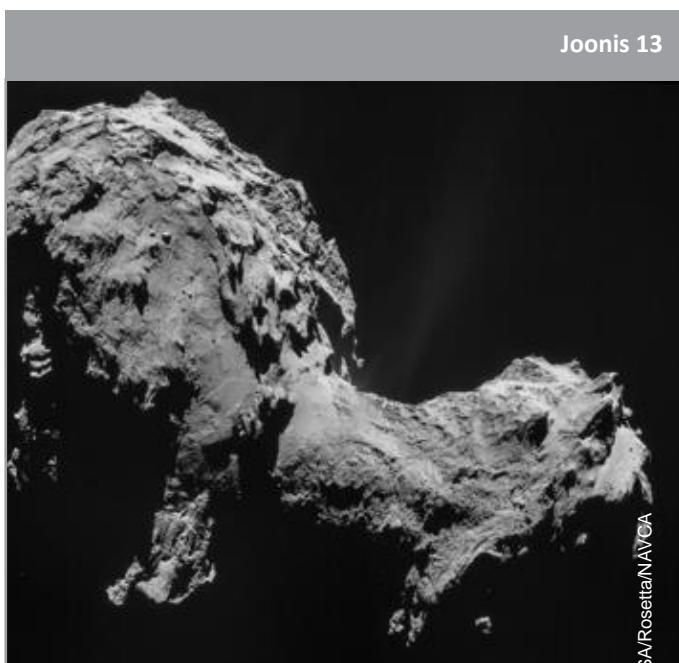
**\*Flyby: kosmosejaama lähimõõdumine planeedist või muust taevakehast. Kui kosmosesond kasutab taevakeha raskusvälja sondi kiirendamiseks ja trajektoori muutmiseks, siis nimetatakse seda lingutamiseks või raskusjõu osalusega manöövriks.**

Komeedini jõudmiseks pidi Rosetta sooritama rea/seeria gravitatsioonilisi “lingutamisi”, mille käigus kasutati sondi kiirendamiseks taevakeha gravitatsiooni (Joonis 12). Rosetta pidi süvakosmosesse jõudmiseks sooritama neli lingumanöövrit, sealhulgas kolm lähimöödumist (fly-bys\*) Maast ja ühel korral Marsist. Iga linguheide muutis Rosetta kineetilist energiat ja seega ka kosmosejaama kiirust ning selle elliptilise orbiidi parameetreid.

Juunis 2011 seati Rosetta “talveunne”, et säästa eelseisval pikal teekonnal energiat ja kütust ning viima opereerimiskulusid miinimumini. Peaaegu kõik Rosetta elektrisüsteemid lülitati välja, välja arvatud arvuti ja mõned soojendid.

2014. aasta jaanuaris äratas Rosetta eelprogrammeeritud sisemine äratuskell hoolikalt kosmosejaama, et valmistuda kohtumiseks komeediga 67P/Churjumov-Gerassimenko. Ärkamise järgselt lülitati sisse ja valmistati ette vaatlusteks 11 põhijaama teadusaparaati ja 10 maanduri instrumenti. Seejärel sooritati kümme kriitilise tähtsusega orbiidi korrigeerimise manöövrit, et kahandada sondi kiirust komeedi suhtes ning viia sond komeedi elliptilisele orbiidile.

Pärast Rosetta jõudmist komeedini 6. augustil 2014, manööverdati jaam orbiidile komeedi tuuma ümber. Sellest positsioonist alustas Rosetta instrumentide komplekt komeedi üksikasjalikku teaduslikku uurimist, analüüsides ja kaardistades komeedi pinda pretsedenditu täpsusega. (Joonis 13).

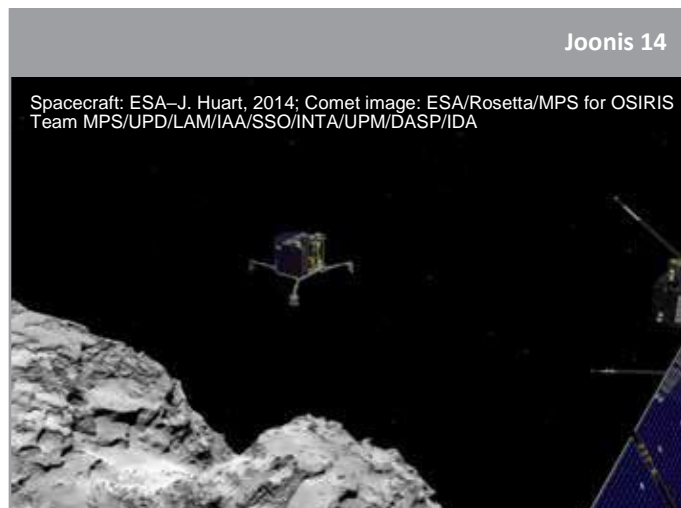


19. septembril 2014. a NAVCAM kaameraga 28,6 kilomeetri kauguselt tehtud fotomosaiik komeedist 67P/Churjumov-Gerassimenko.

Pärast mitme kuu pikkust komeedi tuuma kaardistamist ja analüüsi, kasutab Rosetta 2014. aasta novembris oma maandurit Philae, üritades esmakordset komeedi tuumale laskumist. Kuna komeedi külgetõmme on väga nõrk, kasutab Philae enda pinnale kinnitamiseks harpuune jääkrusid. Joonisel 14 näeme kunstniku kujutluses Philae pinnale laskumas.

Maandur Philae on varustatud 10 instrumendiga, sealhulgas puur pinnase proovide võtmiseks ja spektromeetrid\* komeedi struktuuri ja koostise vahetuks analüüsiks.

Maanduri pinnale laskumise järgselt saadab Rosetta komeeti selle elliptilisel trajektooriga. Rosetta kiirus kasvab koos komeediga Päikesesüsteemi keskosa poole liikudes ja kosmosejaam jälgib lähedalt, kuidas jääne komeedi tuum Päikesele lähenedes soojeneb. Rosetta missioon lõppes 2016. aastal.



Philae maandur hangib pretsedenditu infot komeedi pinna ja sisehituse kohta.

## Rahvusvaheline kosmosejaam & mehitamata transpordilaevad

Partnerluses USA, Venemaa, Jaapani ja Kanadaga osaleb Euroopa kõigi aegade suurimas rahvusvahelises projektis – Rahvusvahelises kosmosejaamas. 360 tonnises Rahvusvahelises kosmosejaamas (inglisekeelse lühendiga ISS, Joonis 15) on rohkem kui 820 m<sup>3</sup> survestatud ruumi, millest piisab kuueliikmelise meeskonna ja arvukate teaduslikeks eksperimentide jaoks. Jaama ehitus algas 1998 aasta novembris Zarja mooduli stardiga Venemaalt. Viimane põhiblokk (AMS-02 instrument) toimetati kosmosejaama kosmosesüstikuga 2011 aasta maikuuks.

Kosmosejaama komplekteerimise lõppedes ja pidevalt mehitatuna kuue astronautiga, on põhitähelepanu pööratud eksperimentidele, mida on võimatu sooritada Maal.

Euroopa põhipanus kosmosejaamas on Kolumbuse moodul, mis on Euroopa projektide põhiliseks uurimislaboriks. Kolumbus moodulis on geneeriline labor, aga samuti spetsiaalselt bioloogia, biomeditsiini ja vedelike füüsika uurimistemadele disainitud sisustus.

Teadusuuringute haare on lai ja eripalgeline: fundamentaalfüüsikast inimpsühholoogiani, uutest sulamitest taimede juurteni. Programm hõlmab ligikaudu 1500 teadlast sadades eksperimentides, aga samuti suurt ja eripalgelist tööstuslike ja rakendusuringute rühma. Rahvusvaheline kosmosejaam pakub seega vajalikku ühist koostöövõimalust uurijatele ja meditsiinala kogukonnale, et läbi viia pikaajalisi uuringuid püsivas mikrogravitatsiooni tingimustes/keskkonnas.

Joonis 15

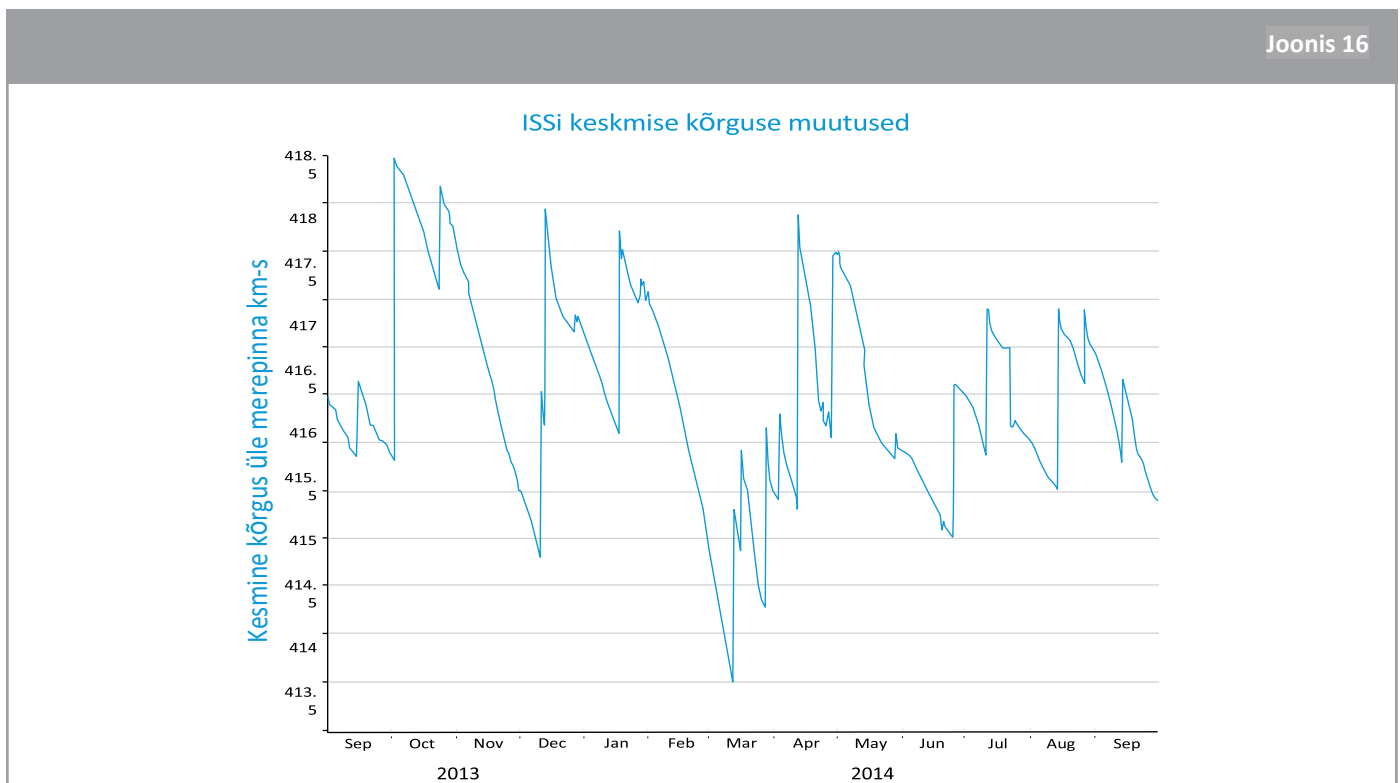


Mehitamata veolaev põkatuna Rahvusvahelise kosmosejaamaga.

Orbiidi erilise kalde tõttu katab Rahvusvaheline kosmosejaam 90% Maa asustatud piirkonnast (75% Maa pindalast), olles seega Maa ja kliima jälgimise väärtuslikuks eelpostiks. Ka Päikese aktiivsus ja kosmiline kiirus on samuti uurimisteedeks tänu kosmoseaama väliste eksperimentide võimekusele.

Ehkki igal kosmosejaama partneril on omad kindlad uuringute eesmärgid, jagavad kõik ühist eesmärki, teaduslike ja inseneeria-alaste teadmiste tõstmiseks, parandamaks elukvaliteeti Maal ja väljaspool.

Euroopa teiseks suuremaks panuseks rahvusvahelises kosmosejaamas peale Kolumbus mooduli, on mehitamata veolaev (ATV/MV), mis viiakse orbiidile Ariane-5 raketiga. Veolaev kannab kuni 7 tonnist laadungit: toidumoonat, teaduslikku varustust ja kütust. Põkatuna/dokituna kosmoseaamaga, saab veolaeva mootoriga korrigeerida kosmosejaama orbiidi kõrgust, kompenseerimaks Maa atmosfäärist tingitud (nõrka) pidurdust. Esimene veolaev Jules Verne startis 2008. aastal. Järgnesid veolaevad Johannes Kepler aastal 2011, Edoardo Amaldi aastal 2012, neljandana Albert Einstein aastal 2013. Seeria viies ja viimane (?) veolaev Georges Lemaitre startis 2014 aasta juulis.



The altitude range of the ISS over this period was higher than normal due to the enhanced re-boost capability of the ATV.

**\*Altitude: Kosmoseaparaadi kõrgus merepinnast.**

**\*Attitude: Kosmoseaparaadi ruumaseend.**

**\*Inclination: Kosmoseaparaadi orbiidi tasandi kaldenurk Maa ekvaatori tasandi suhtes.**



Kosmosejaama orbiidi kõrgus on määratud eelkõige turvalisuse ja logistika kaalutlustest. Orbiit peab olema piisavalt madal optimaalsete varustuslendude seisukohalt, aga orbiit peab olema kõrgemal kui 278 km, et vältida atmosfääri langemise ohtu. Kosmosejaama orbiidi kõrguse profiil on valitud ka kütusekulu säästmise ja meeskonna kiiritusdoosi minimeerimise kaalutlustest.

Ligikaudu 400 km kõrgusel tiirlev kosmosejaam langeb atmosfääri pidurduse tagajärjel umbes 100-200 meetrit ööpäevas. Langemise määr on erinev, sõltuvalt atmosfääri väiskihtide tiheduse muutumisest, mis on tingitud Päikese aktiivsuse muutustest.

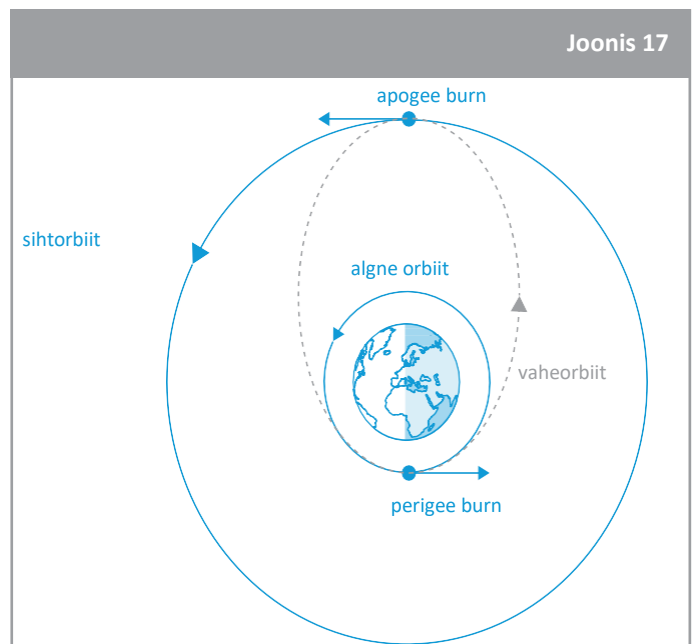
Külastav kosmoselaev/abilaev, olgu siis mehitamata veolaev, Progress või Sojuz, annab võimaluse kosmosejaama kõrguse suurendamiseks, vahel ka ohtliku kosmoseprügi vältimiseks. Jaama vene moodulil on korrektsioonmootorid, mis võimaldavad Jaama kõrgust veidi muuta, juhul kui abilaeva kohal pole. Orbiidi korrektsioon toimub iga 10-80 päeva tagant.

Joonisel 16 on näidatud Jaama kõrguse muutumine vahemikus september 2013-2014.

Iga orbiidi korrektsioon koosneb kahest teineteisele järgnevast raketitõukest vastassuundades ja nii mitu korda järjest (vaata Joonis 17).

Esimene tõuge kasvatab orbiidi ekstsentrilisust, teine tõuge kahandab seda, ent juba suuremal kõrgusel. Lõpptulemuseks on Jaama kõrgem orbiit ja väiksem kiirus vastavalt Kepleri kolmandale seadusele.

Sarnaseid protseduure kasutatakse kokkupõrgete vältimiseks, kusjuures kosmosejaama kõrgust suurendavad tõuked sooritatakse juba varakult, et saavutada turvalist vahekaugust kosmosejaama ja võõra objekti vahel.



Orbiidi korrektsioon/tõstmine on mitme-sammuline protsess, mille igas sammus toimub kaks reaktiivtõuket diametraalselt vastassuundades. Ülemineku trajektoori nimetatakse ka Hohmanni siirdeorbiidiks.

## → LISA

### Elliptilise tahvli valmistamisejuhend

Siinkohal anname juhtnööre tööks vajaliku elliptilise tahvli valmistamiseks.

#### Vajalikud vahendid

- Jäigast papist või puidust tahvel
- kui kasutatakse elliptilist näidistahvlit, peab see olema mõõdetega ligikaudu 75 x 60 cm
- kui ellips tõmmata nii nagu näidatud Joonisel X1, sobib suvaliste mõõdetega tahvel
- Tavaline paber või trükitud/kopeeritud näidisellipsiga paber
  - Tugev liim
  - Pliiats või pastapliiats
  - Nöör ( kui kasutatakse Joonis X1 meetodit)
  - Kaks nõõpnõela
  - Nöör või isoleeritud elektrikaabel (umbes 8 mm jäme sobiks hästi)
- 2 meetrit pikk (kui kasutada näidistahvlit)

#### Juhend 1

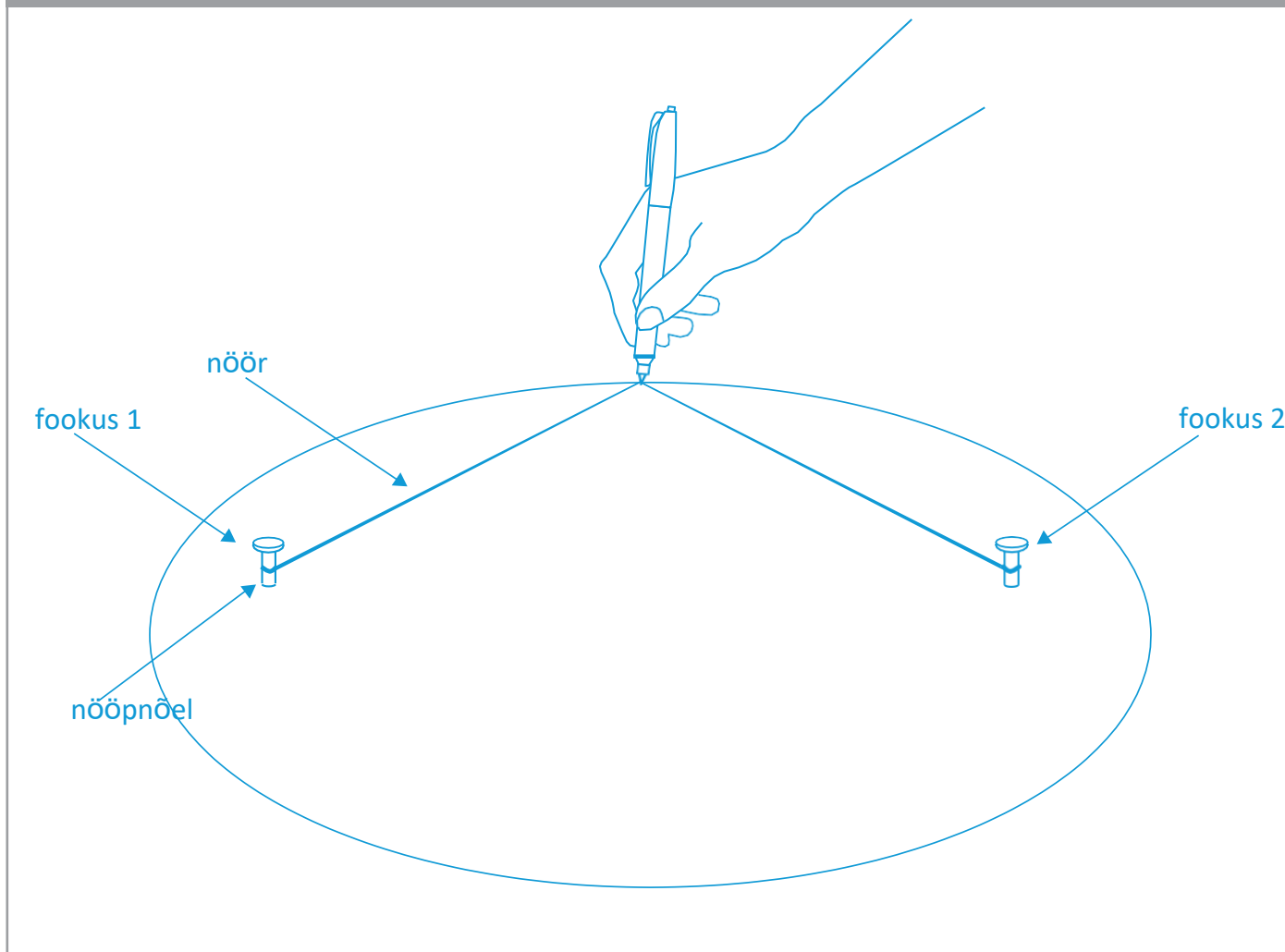
Elliptilise näidistahvli kasutamise korral:

1. Trüki välja (või kopeeri ja skaleeri) leheküljed 29-31 A3 formaadis.
2. Kleebi paberid hoolikalt kokku, nii et tekiks korrapärane ellips.
3. Kleebi nöör või kaabel tahvlile järgides ellipsi kontuuri.

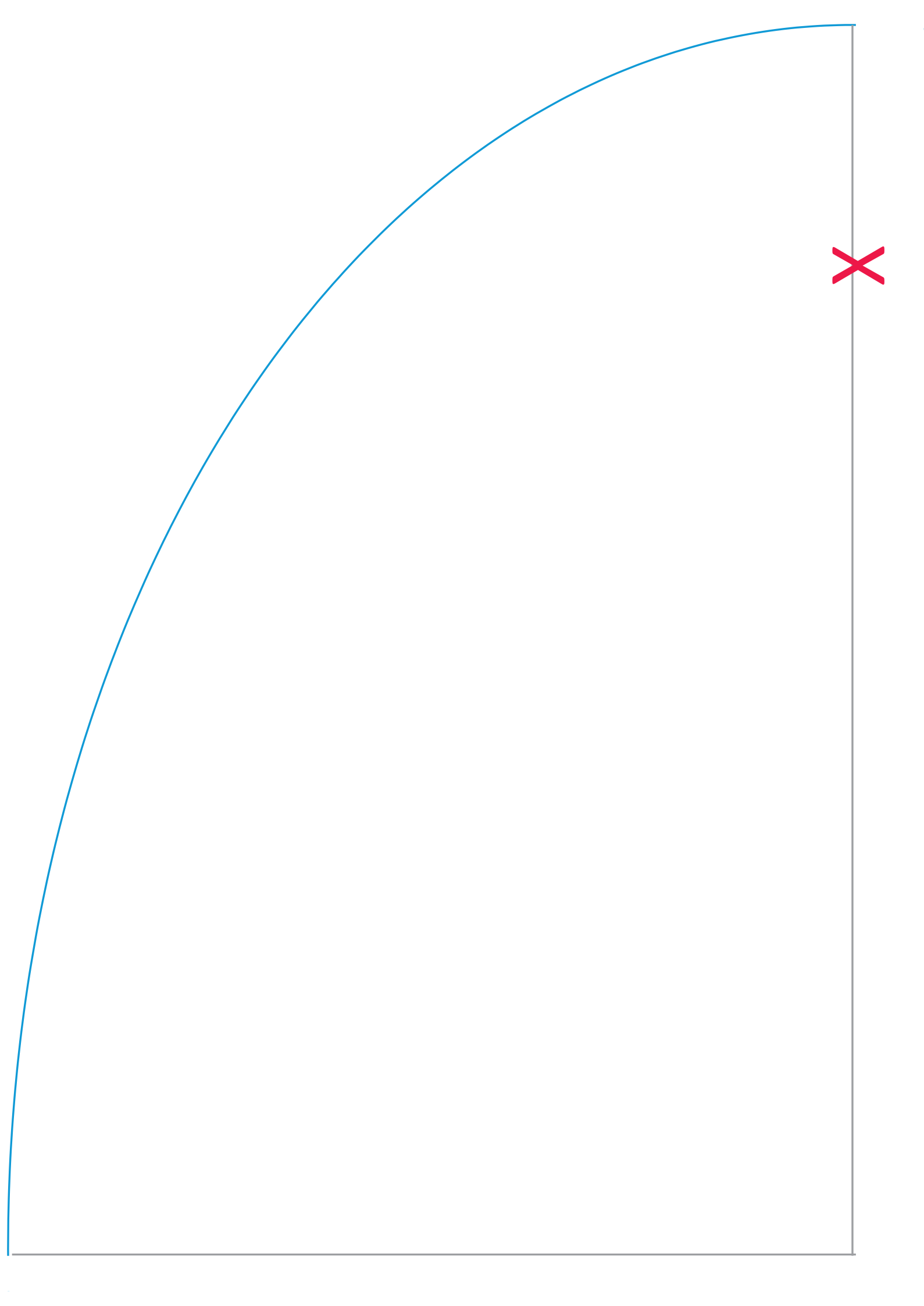
#### Juhend 2

Ellipsi joonistamisel nõõri abil:

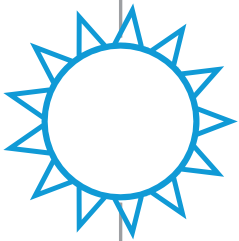
1. Kata tahvel valge paberiga.
2. Võta sobiva pikkusega nöör ja kinnita selle otsad kahe nõõpnõelaga tahvli keskjoone kahes punktis (nagu näidatud Joonis X1).
3. Aseta pliiats või pastakas umbes nõõri keskohta ja tõmba nöör ettevaatlikult pingule.
4. Liiguta pliiatsit piki nõõri, hoides nõõri pingul ja joonista ellipsi kontuur.
5. Liimi nöör või kaabel tahvlile järgides ellipsi kontuuri.

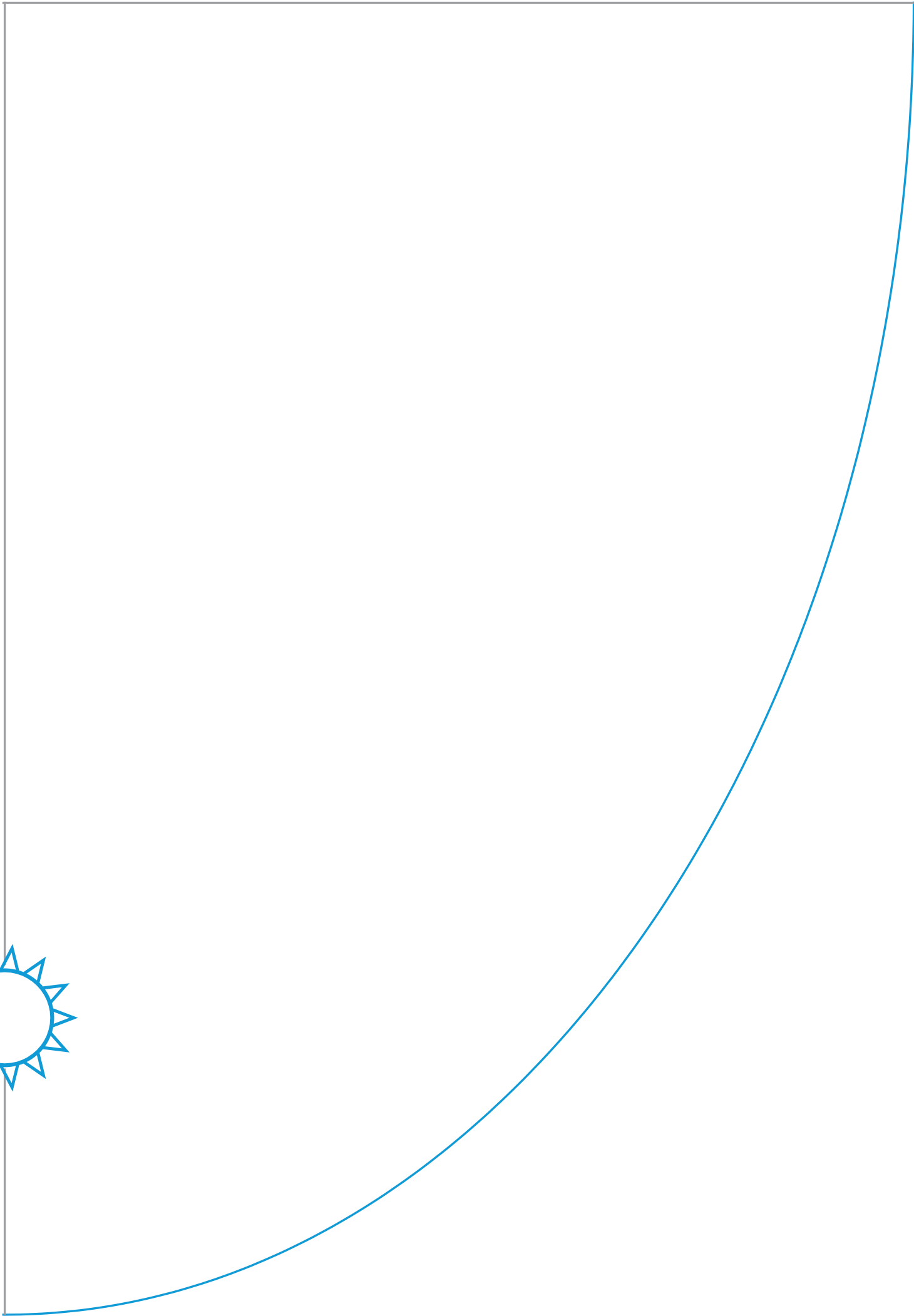
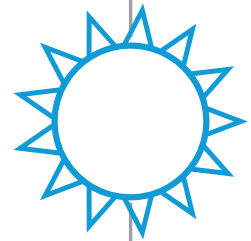


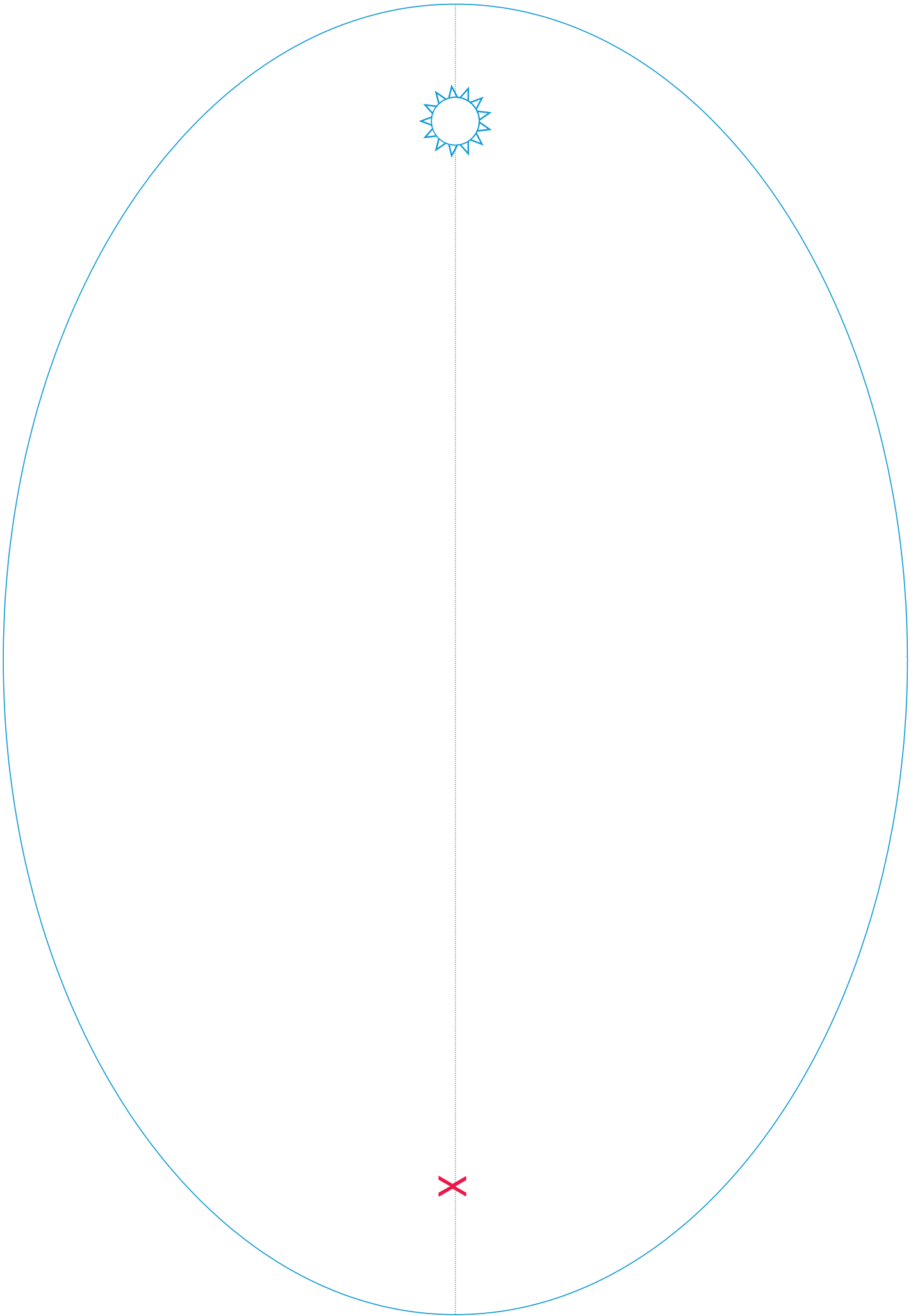
Ellipsi konstrueerimine.













## Sõnastik

**Kõrgus** (*altitude*): Kosmosejaama kõrgus Maa merepinnast.

**Ruumasend** (*attitude*): Kosmosejaama orientatsioon orbiidi suhtes.

**Astronoomiline ühik** (*AU*): 1 AU on Maa ja Päikese vaheline keskmine kaugus, ehk siis Maa orbiidi raadius, mis on umbes 150 miljonit kilomeetrit.

**Lööklaine** (*comet, bow shock*): Päikesetuule ja komeedi kooma ionide vastasmõjupind. Lööklaine tekib, kuna komeedi suhteline orbitaalkiirus päikesetuule suhtes on helikiirusest suurem. Lööklaine tekib komeedi ees, päikesetuule suunal. Lööklaines tekib komeedi ionide kõrge tihedus ja toimub Päikese magnetvälja plasmaga laadimine. Tulemuseks on magnetvälja jõujoonte kaardumine komeedi ümber, mis haaravad kaasa komeedi ioone ja komeedi taha moodustub neist gaasi/plasma/ionide saba.

**Möödalend** (*flyby*): kosmoseaparaadi lähenemine ja möödalend planeedist või muust taevakehast. Kui kosmoseaparaat kasutab taevakeha gravitatsioonivälja jaama kiirendamiseks ja trajektoori muutmiseks, siis nimetatakse seda lingutamiseks või gravitatsiooniliseks manöövriks.

**Gravitatsioonilised häiritused** (*gravitational perturbations*): taevakeha (nagu planeedi, komeedi) orbiidi muutused, mis on tingitud vastasmõjust teiste taevakehade (nagu hiidplaneedid, tähed) gravitatsiooniväljadega.

**Kaldenurk** (*inclination*): Kosmosejaama orbiidi tasandi kaldenurk Maa ekvaatori tasandi suhtes.

**Tiirlemisperiood** (*orbital period*): orbiidil ühe täistiiru tegemiseks kuluv aeg.

**Planeedi vastassuunaline liikumine** (*retrograde motion of a planet*): planeedi normaalsele tiirlemissuunale vastassuunaline näiv liikumine öötaevas.

**Päikesetuul** (*solar wind*): Päikese atmosfääri väliskihetidest kõigis suundades välja kiiratud suure energiaga osakeste (plasma) voog. See koosneb peamiselt elektronidest ja prootonitest.

**Spektromeeter** (*spectrometer*): seade, mis lahutab valguse eri lainepikkusega komponentideks ja võimaldab uurida kiirusallika omadusi.

**Sublimatsioon** (*sublimation*): üleminek aine tahkest olekust gaasilisse olekusse aine kuumutamise teel, jättes vedela oleku vahele. Kui seda gaasi uuesti jahutada, moodustub enamasti tahke sade.

## Viited

### Rosetta

ESA Rosetta vörguleht:

[www.esa.int/rosetta](http://www.esa.int/rosetta)

ESA Rosetta blogi: [blogs.esa.int/rosetta/](http://blogs.esa.int/rosetta/)

Rosetta videod ja animatsioonid: [www.esa.int/spaceinvideos/Missions/Rosetta](http://www.esa.int/spaceinvideos/Missions/Rosetta)

Rosetta pildid: [www.esa.int/spaceinimages/Missions/Rosetta/\(class\)/image](http://www.esa.int/spaceinimages/Missions/Rosetta/(class)/image)

Rosetta infoleht koos missiooni ajakavaga: [www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Rosetta/Rosetta\\_factsheet](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta/Rosetta_factsheet)

The story so far: [www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta\\_the\\_story\\_so\\_far](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_the_story_so_far)

Komeedi jälitamine: [www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Chasing\\_a\\_comet](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Chasing_a_comet)

12-aastane teekond kosmoses: [www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2013/10/Rosetta\\_s\\_twelve-year\\_journey\\_in\\_space](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2013/10/Rosetta_s_twelve-year_journey_in_space)

Rosetta orbit komeedi ümber: [www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta\\_s\\_orbit\\_around\\_the\\_comet](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_s_orbit_around_the_comet)

Kuidas tiirelda komeedi ümber: [www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/08/How\\_to\\_orbit\\_a\\_comet](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/08/How_to_orbit_a_comet)

### Komeedid

Esa lasteartikkel komeetidest:

[www.esa.int/esaKIDSen/SEMWK7THKHF\\_OurUniverse\\_0.html](http://www.esa.int/esaKIDSen/SEMWK7THKHF_OurUniverse_0.html) | [ESA Rosetta website](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta)

(technical): [www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Rosetta](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta)

ESA Giotto website: [sci.esa.int/giotto/](http://sci.esa.int/giotto/)

ESA Kids article on our Universe: [www.esa.int/esaKIDSen/SEMYC9WJD1E\\_OurUniverse\\_0.html](http://www.esa.int/esaKIDSen/SEMYC9WJD1E_OurUniverse_0.html)

### Orbiidid

An animation showing the motion of Mars in the night sky: [www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta\\_s\\_orbit\\_around\\_the\\_comet](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_s_orbit_around_the_comet)

Animation on epicycles: ESA Studio Epicycles: [www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Videos/2014/09/Studio\\_Epicicles](http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/09/Studio_Epicicles)

Animation on epicycles: ESA Studio Retrograde Motion Explanation:

[www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Videos/2014/09/ESA\\_Studio\\_Retrograde\\_Motion\\_Explanation](http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/09/ESA_Studio_Retrograde_Motion_Explanation)

Rosetta's orbit around the comet: [www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta\\_s\\_orbit\\_around\\_the\\_comet](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_s_orbit_around_the_comet)

ESA Kids quiz on orbits: [www.esa.int/esaKIDSen/SEMZPCMVGJE\\_q.html](http://www.esa.int/esaKIDSen/SEMZPCMVGJE_q.html)

Kepler's first law: ESA Studio Law 1: [www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Videos/2014/09/Law\\_1](http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/09/Law_1)

Kepler's second law: ESA Studio Law 2: [www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Videos/2014/09/Law\\_2](http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/09/Law_2)

Kepler's third law: ESA Studio Law 3: [www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Videos/2014/09/Law\\_3](http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/09/Law_3)

Planetary system simulator game: [phet.colorado.edu/sims/my-solar-system/my-solar-system\\_en.html](http://phet.colorado.edu/sims/my-solar-system/my-solar-system_en.html)

Super planet crash simulator game: [www.stefanom.org/spc/](http://www.stefanom.org/spc/)

### Rahvusvaheline kosmosejaam ja mehitamata veolaevad

ESA ATV-2 educational video 'Johannes Kepler': [www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/ATV\\_Johannes\\_Kepler\\_-\\_Orbits\\_and\\_body\\_motion\\_in\\_space](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/ATV_Johannes_Kepler_-_Orbits_and_body_motion_in_space)

ESA ATV-4 educational video 'Albert Einstein': [www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/ATV\\_Albert\\_Einstein\\_-\\_Relativity\\_of\\_space\\_and\\_time](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/ATV_Albert_Einstein_-_Relativity_of_space_and_time)

### Õpetus komosest

ESA teach with space - gravity wells video | VP04: [www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Gravity\\_wells\\_-\\_classroom\\_demonstration\\_video\\_VP04](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Gravity_wells_-_classroom_demonstration_video_VP04)

ESA teach with space - cooking a comet teacher's guide and student activities | P06:

ESA teach with space - cooking a comet video | VP06:

[www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/10/Cooking\\_a\\_comet\\_ingredients\\_for\\_life\\_-\\_classroom\\_demonstration\\_video\\_VP06](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/10/Cooking_a_comet_ingredients_for_life_-_classroom_demonstration_video_VP06)

ESA teach with space - marble-ous ellipses video | VP02: [www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Marble-ous\\_ellipses\\_-\\_classroom\\_demonstration\\_vid](http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Marble-ous_ellipses_-_classroom_demonstration_vid)