

The background features a series of overlapping, curved lines in various colors including blue, green, yellow, and orange, set against a solid black background. The lines are arranged in a way that suggests depth and movement, with some lines appearing to curve away from the viewer.

Fotometria

Vaihekäyrät ja valokäyrät

Sisältö

Vaihekäyrät

- H,G järjestelmä
- H, G₁, G₂ ja H, G₁₂ järjestelmät
- Havaintojen suunnittelu

Valokäyrät

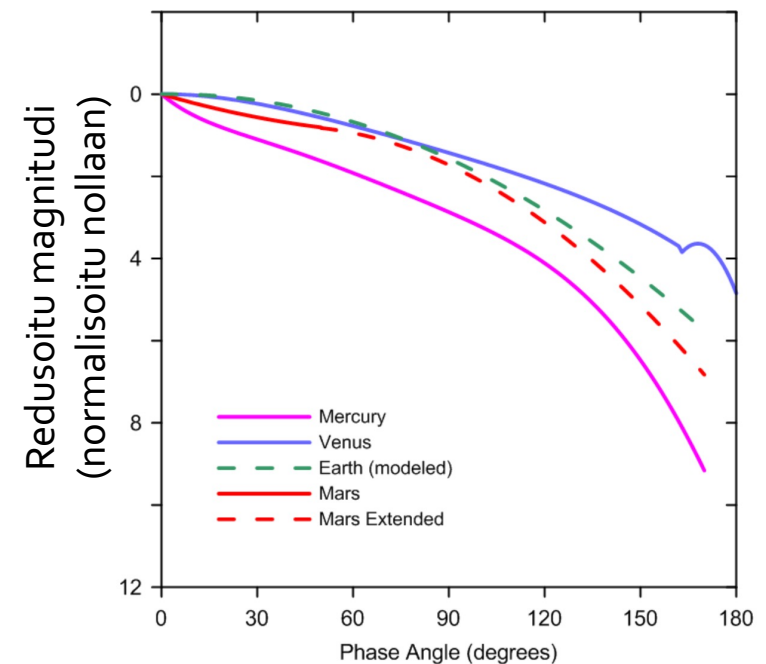
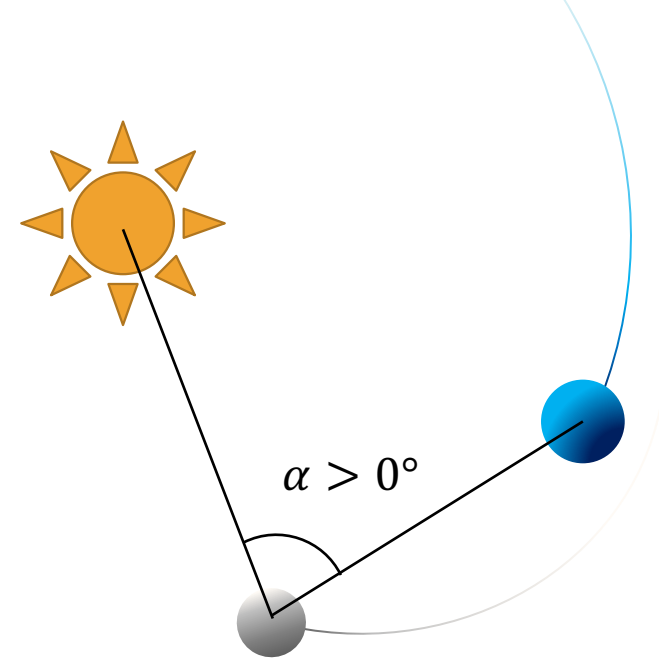
- Pyörimisajat ja -akselit
- Muotoinvertio

Tähtenpeitot

- Asteroidit
- Eksoplaneetat

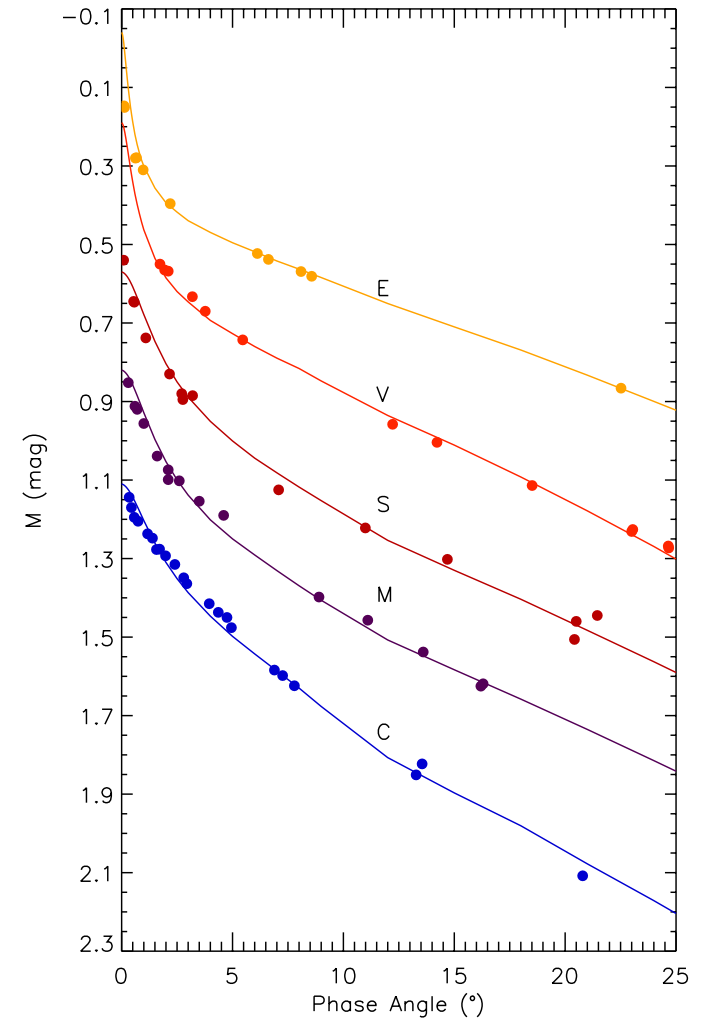
Vaihekäyrät

- Taivaankappaleen näennäinen kirkkaus riippuu sen valaisu- eli vaihekulmasta
- Absoluuttinen magnitudi vaihekulman funktiona tunnetaan vaihekäyränä
- Vaihekäyrän muoto riippuu kappaleen pinnan (tai ilmakehän) fysikaalisista ominaisuuksista, kuten mineralogia, sirottajien kokojakauma ja pakkaustiheys



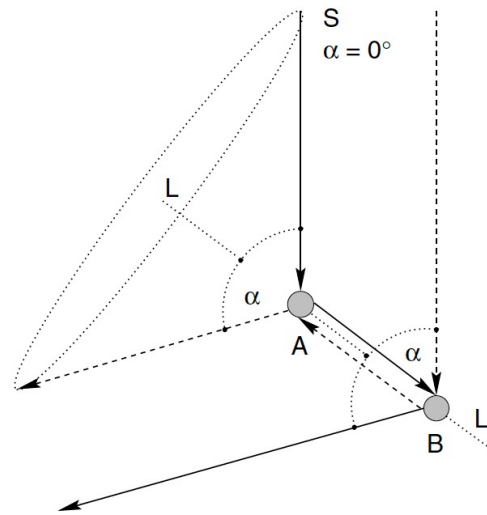
Vaihekäyrät

- Erityyppisille asteroideille, joilla nämä ominaisuudet vaihtelevat, havaitaan erinäköisiä vaihekäyriä ja erisuuruisia albedoita
- Merkittävimmät erot ovat kirkkauspiikin koko pienillä vaihekulmilla ja gradientti jolla magnitudi kasvaa (eli kohde himmenee) vaihekulman kasvaessa
- Kirkkauspiikki tunnetaan oppositioefektinä



Oppositio-efekti

- Oppositiossa joidenkin kohteiden magnitudi kasvaa suuremmaksi kuin vain valaisugeometria sallisi
 - Esimerkkejä: Täysikuu, Merkurius, tietyt asteroidit
- Kaksi vaihtoehtoa selityksenä:
 - Koherentti takaisinsironta
 - Varjostusmekanismi



Hiukkaset sirottavat valoa konstruktivisemmin takaisinsirontasuunnassa (oppositio) kuin muilla vaihekulmilla

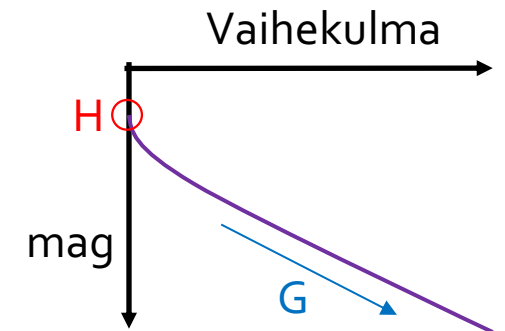


H,G magnitudi-järjestelmä

- Vaihekäyrän muodon mallintamiseksi voidaan tehdä empiirisiä malleja
- Kansainvälinen Tähtitieteellinen Unioni (IAU) standardoi H,G-järjestelmän vuonna 1985
- H on absoluuttinen magnitudi (magnitudi oppositiossa 1 au:n etäisyydellä kohteesta)
- G kuvaa monisironnasta aiheutuvan intensiteetin määrää kokonaisintensiteetistä: jos $I(\alpha = 0) = I_S(0) + I_M(0)$, missä alaindeksi S viittaa yksittäissirontaan (single scattering) ja M monisirontaan (multiple scattering), silloin

$$G = \frac{I_M(0)}{I_S(0) + I_M(0)}$$

Kirjallisuus: Bowell et al. 1989



H,G magnitudi-järjestelmä

- Molemmille intensiteettitermeille voidaan kirjoittaa vaihefunktiot:

$$\Phi(\alpha) = \frac{I(\alpha)}{I(0)} = \frac{I_S(\alpha) + I_M(\alpha)}{I_S(0) + I_M(0)}$$

- Kun kirjoitetaan vaihefunktio G:n funktiona:

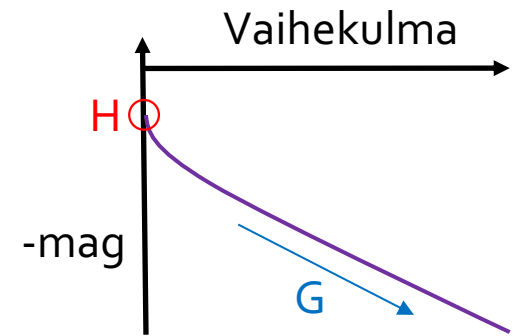
$$\Phi(\alpha) = (1 - G)\Phi_S(\alpha) + G\Phi_M(\alpha)$$

- Vaihefunktioiksi S ja M on johdettu empiirisesti:

$$\Phi_S(\alpha) = \Phi_1(\alpha) = \exp\left(-3.33 \tan^{0.63} \frac{\alpha}{2}\right)$$

$$\Phi_M(\alpha) = \Phi_2(\alpha) = \exp\left(-1.87 \tan^{1.22} \frac{\alpha}{2}\right)$$

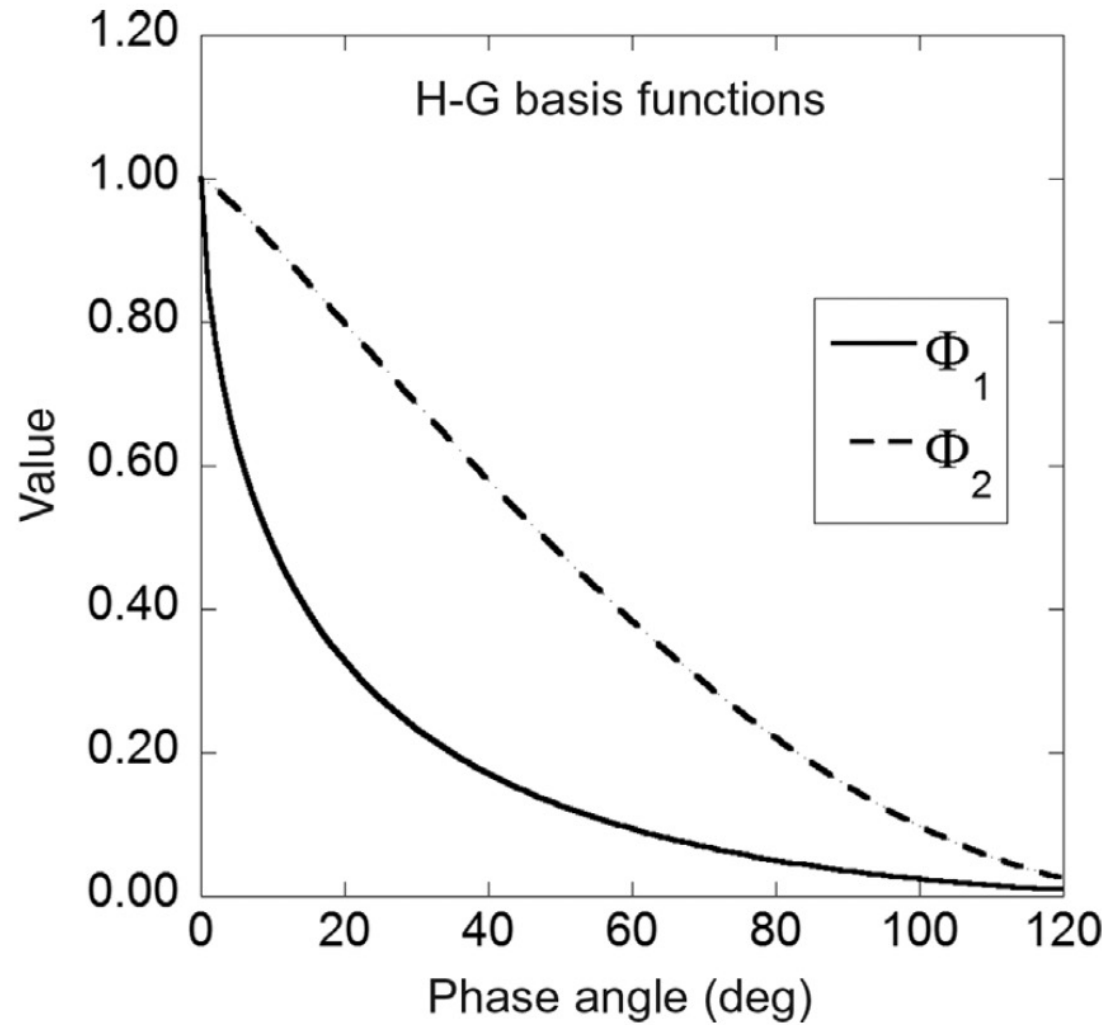
- Asteroideille usein yleistetään arvo $G = 0.15$ silloin, kun kattavaa vaihekäyräinformaatiota ei ole saatavilla
 - G voi olla myös negatiivinen mutta ylläolevat vaihefunktiot pätevät vain kun $0 < G < 1$ ja $\alpha < 120^\circ$



Muistutuksena viime luennolta, vis. magnitudi etäisyydellä 1 au:

$$V(1, \alpha) = H - 2.5 \log_{10} \Phi(\alpha)$$

H,G magnitudi- järjestelmä



Ääriarvot:

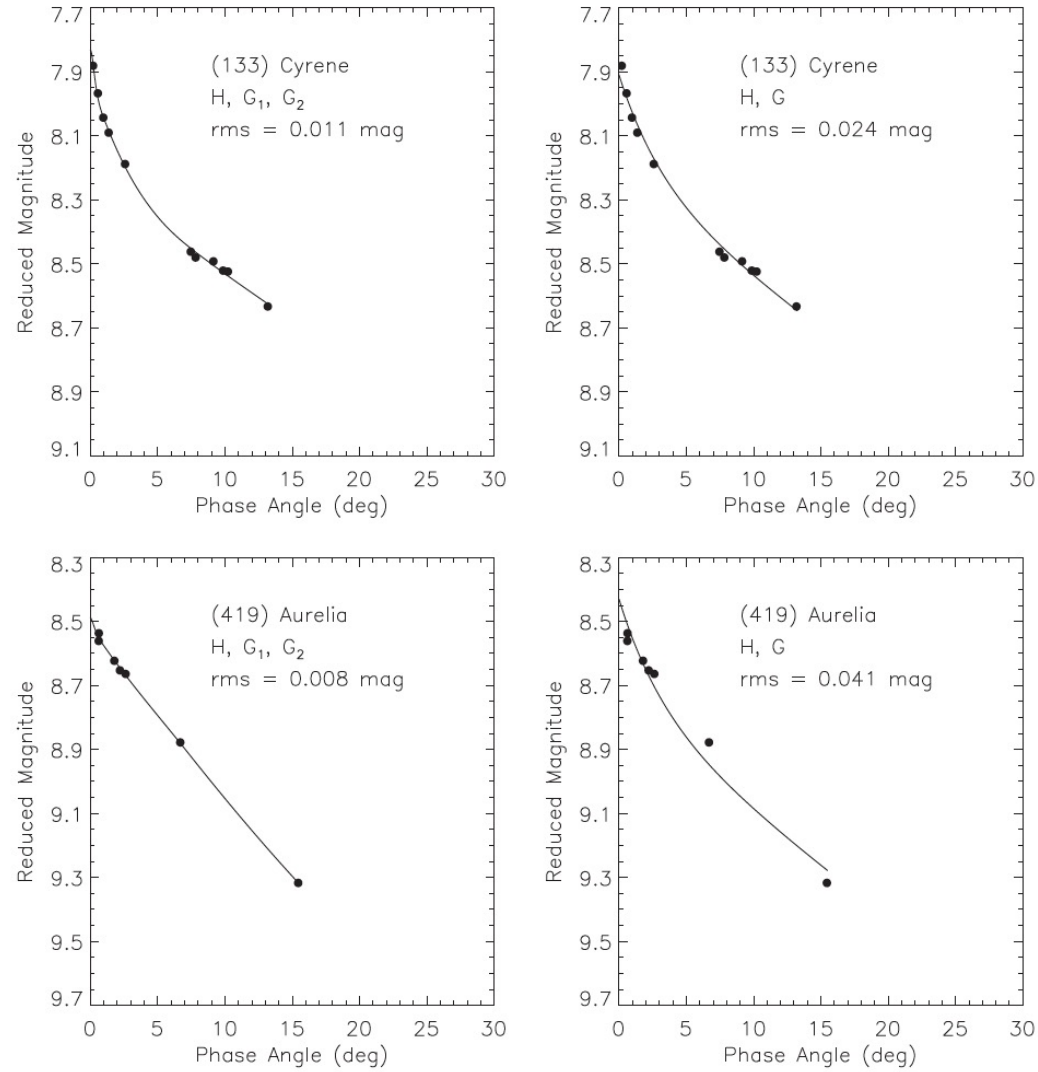
Φ_1 : Yksittäissironna
dominoi, $G \approx 0$

Φ_2 : Monisironna
dominoi, $G \approx 1$

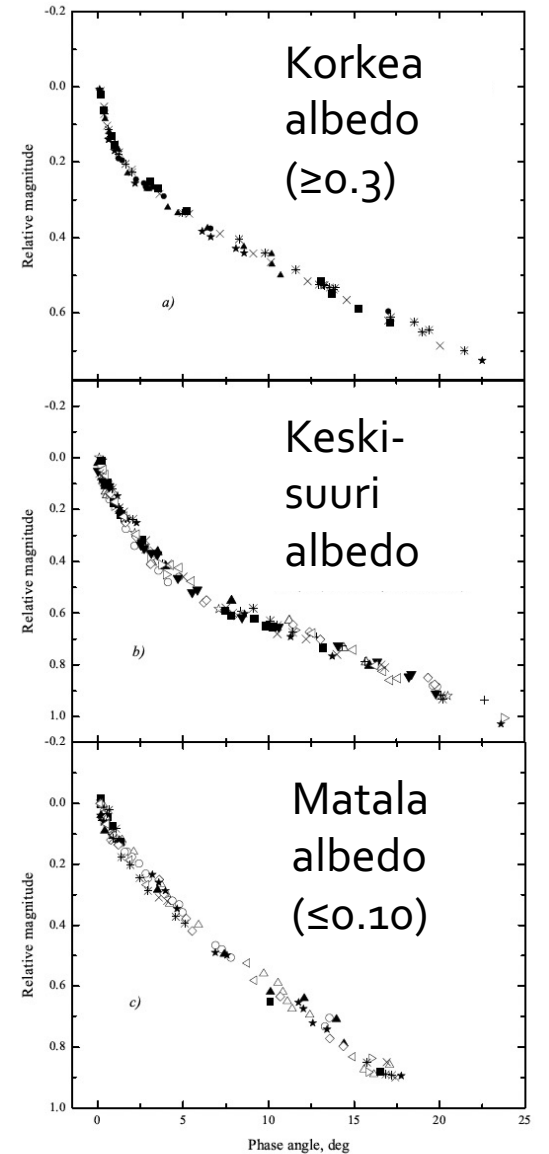
Esimerkiksi
ilmakehällisillä
kappaleilla kuten
kaasuplaneetat,
yksittäissironna
dominoi vahvasti

H, G₁, G₂ magnitudi- järjestelmä

- H,G magnitudijärjestelmä on hyvä approksimaatio suurimmalle osalle taivaankappaleita, mutta sen heikkous ovat todella korkeat albedot ja todella matalat albedot
- Vuonna 2012 IAU hyväksyi parannettun version nimeltään H,G₁,G₂-järjestelmä, joka parantaa vaihekäyrien sovituksia erityisesti ääritapauksille
- Tässä järjestelmässä vaihefunktio on:
$$\Phi(\alpha) = G_1\Phi_1(\alpha) + G_2\Phi_2(\alpha) + (1 - G_1 - G_2)\Phi_3(\alpha)$$
- Nyt G₁ ja G₂ parametrien tulkinta on monimutkaisempi
- Kirjallisuus: Muinonen et al. (2010), Oszkiewicz et al. (2012), Shevchenko et al. (2016)...



Muinonen et al. (2010)



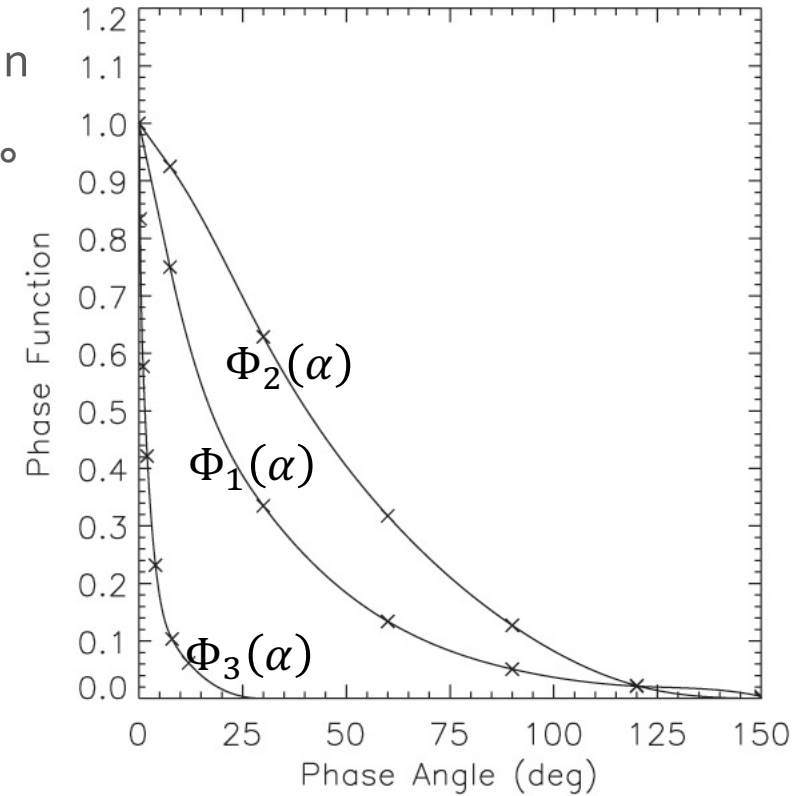
Source: Shevchenko et al. (2019)

H, G₁, G₂ magnitudi- järjestelmä

Fig. 4. As in Fig. 2 for the SR-class Asteroid (133) Cyrene and the F-class Asteroid (419) Aurelia.

H, G₁, G₂ magnitudi- järjestelmä

- H, G₁, G₂ järjestelmässä vaihefunktiot esitetään kuutiollisina splineinä
 - Kaksi ensimmäistä spliniä vaihekulmille $\leq 150^\circ$ ja kolmas kuvaamaan oppositiopiikkiä vaihekulmilla $\leq 30^\circ$ (muilla kulmilla 0)
 - Käyrien derivaatoilla tietyt (empiirisesti määritetyt) vaatimukset:
 - $\Phi_1'(7,5^\circ) = -\frac{9}{5\pi}$ ja $\Phi_1'(150^\circ) = -9,1328612 \times 10^{-2}$,
 - $\Phi_2'(7,5^\circ) = -\frac{6}{\pi}$ ja $\Phi_2'(150^\circ) = -8,6573138 \times 10^{-8}$,
 - $\Phi_3'(0^\circ) = -\frac{6}{\pi}$ ja $\Phi_3'(30^\circ) = -1,0630097 \times 10^{-1}$



α (°)	Φ_1	Φ_2	α (°)	Φ_3
7.5	7.5×10^{-1}	9.25×10^{-1}	0.0	1
30.0	3.3486016×10^{-1}	6.2884169×10^{-1}	0.3	8.3381185×10^{-1}
60.0	1.3410560×10^{-1}	3.1755495×10^{-1}	1.0	5.7735424×10^{-1}
90.0	5.1104756×10^{-2}	1.2716367×10^{-1}	2.0	4.2144772×10^{-1}
120.0	2.1465687×10^{-2}	2.2373903×10^{-2}	4.0	2.3174230×10^{-1}
150.0	3.6396989×10^{-3}	1.6505689×10^{-4}	8.0	1.0348178×10^{-1}
			12.0	6.1733473×10^{-2}
			20.0	1.6107006×10^{-2}
			30.0	0

H, G_{12} ja G_{12}^* magnitudi- järjestelmä

- G_1 ja G_2 parametreilla on negatiivinen korrelaatio, jota voidaan kuvata **lineaaraisella funktiolla G_{12}^*** tai **epälineaaraisella funktiolla G_{12}**

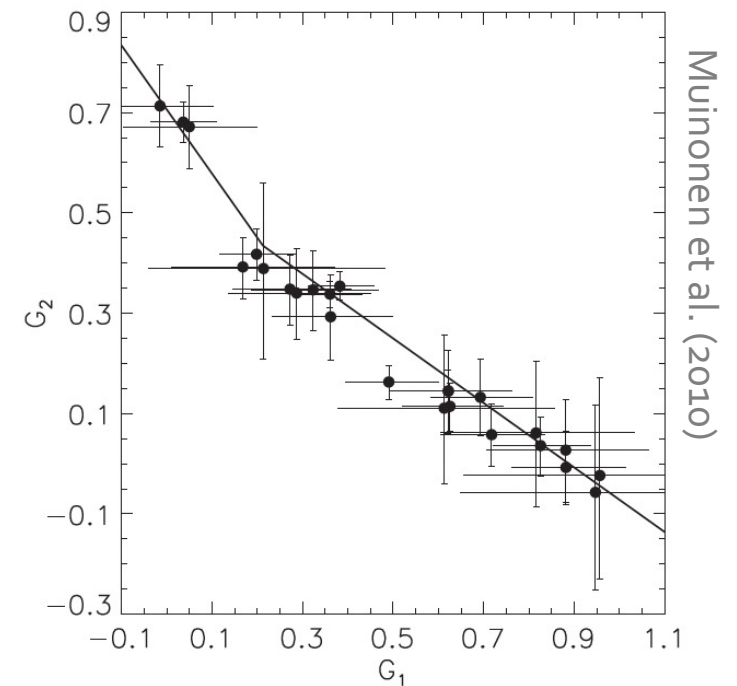
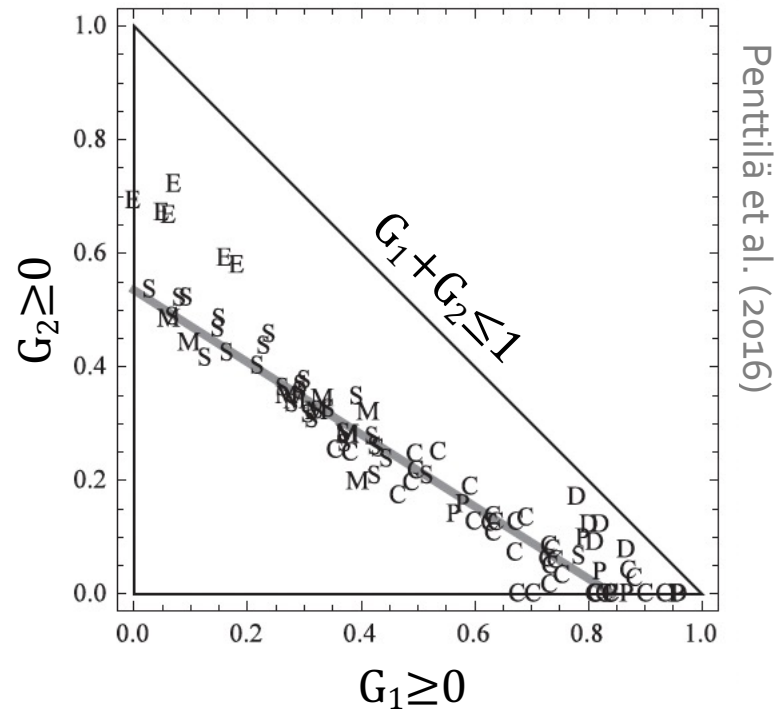
$$G_1 = 0.84293649G_{12}^*$$

$$G_2 = 0.5351335(1 - G_{12}^*)$$

(ei E- ja D-luokan asteroideille)

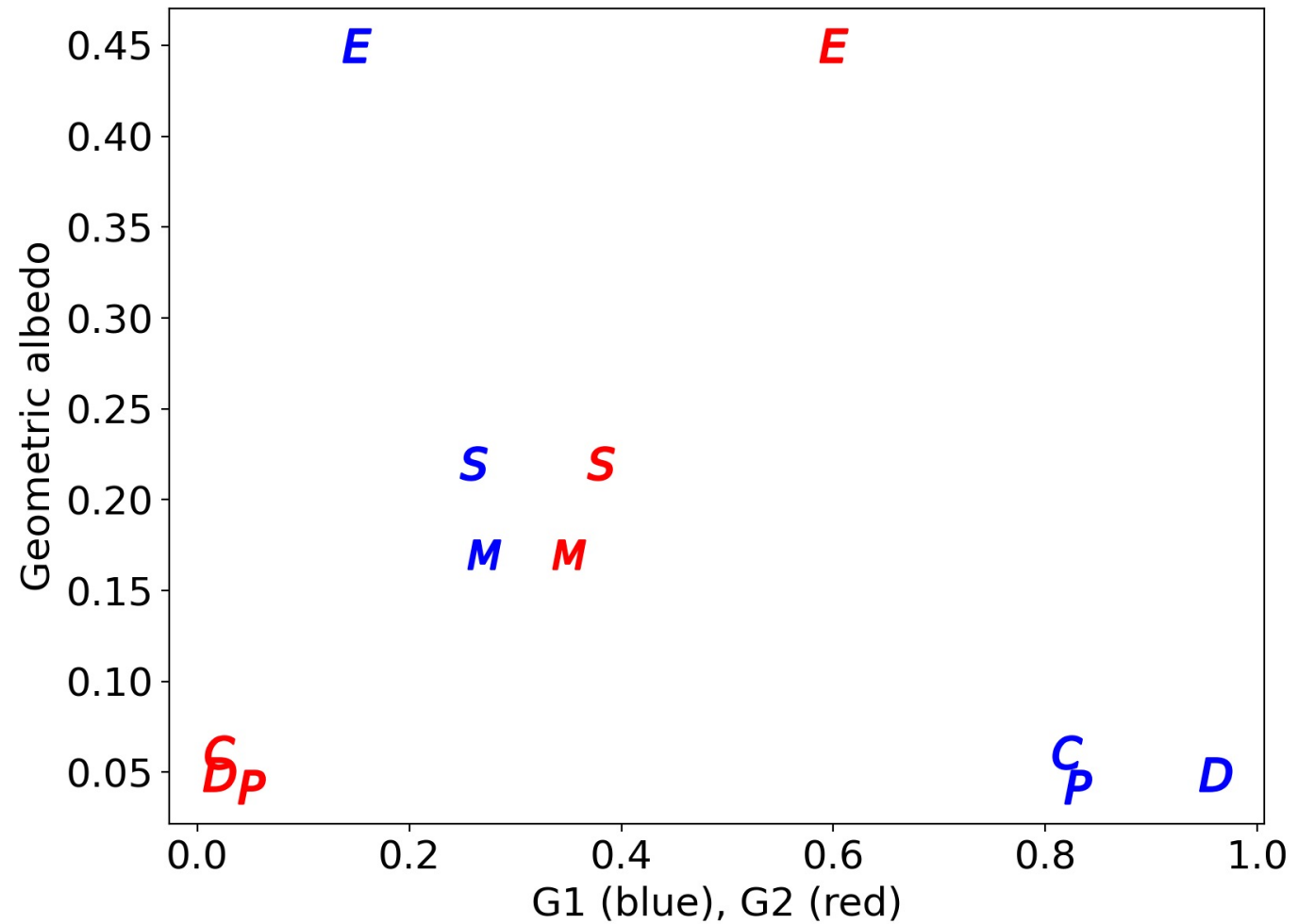
$$G_1 = \begin{cases} 0.7527G_{12} + 0.06164, & G_{12} < 0.2, \\ 0.9529G_{12} + 0.02162, & G_{12} \geq 0.2, \end{cases}$$

$$G_2 = \begin{cases} -0.9612G_{12} + 0.6270, & G_{12} < 0.2, \\ -0.6125G_{12} + 0.5572, & G_{12} \geq 0.2. \end{cases}$$



H, G₁, G₂
magnitudi-
järjestelmä

G-parametrien riippuvuus albedosta

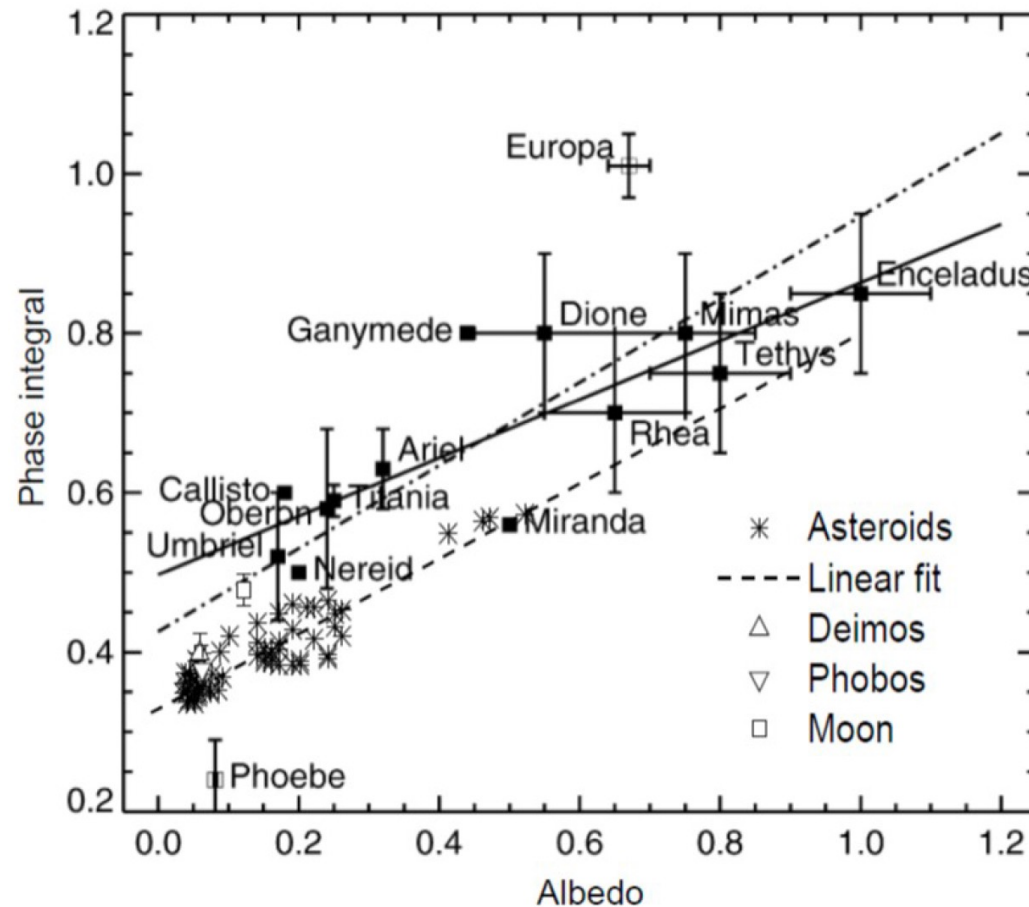


Values from Shevchenko et al. (2016)

H, G₁, G₂ magnitudi- järjestelmä

G-parametrien (ja albedon) riippuvuus vaiheintegraalista:

- $q = 0.290 + 0.684G$
- $q = 0.009082 + 0.4061G_1 + 0.8092G_2$



Shevchenko et al. (2019)

H, G₁, G₂ magnitudi- järjestelmä

Version 2021.08

You can download the [example file with \(44\) Nysa observations](#) for testing this tool. The linear, unconstrained version implements the IAU-adopted system from [Muinonen et al. \(2010\)](#), and the nonlinear, constrained version the extension from [Penttilä et al. \(2016\)](#). For local copies of the articles, see <http://wiki.helsinki.fi/display/PSR/HG1G2+tools>. Please cite if you publish results using this tool.

Inputs

Choose file 1566_Icarus.dat

Name: (1566) Icarus

Angles in degrees radians

Input ready

Compute

Linear, unconstrained fit

Nonlinear, constrained fit

Compute fit

Plot, errors, report

6 values read for target '(1566) Icarus'

angle(°)	magnitude	error
13.7	17.2	0.03
58.5	18.6	0.03
66.2	18.8	0.03
76.5	19.2	0.03
90.3	19.7	0.03
105.6	20.4	0.03

H, G_1, G_2 and H, G_{12} **nonlinear** and **constrained** fits are done in magnitude values. One-parameter H fits always in magnitude values.

The recommended model, according to BIC-value of the fit, is the three-parameter (H, G_1, G_2) model:

H	G_1	G_2	$k (^{\circ})^{-1}$	wRMS	BIC
15.44	0.09501	0.1216	-0.02024	0.1390	-18.30

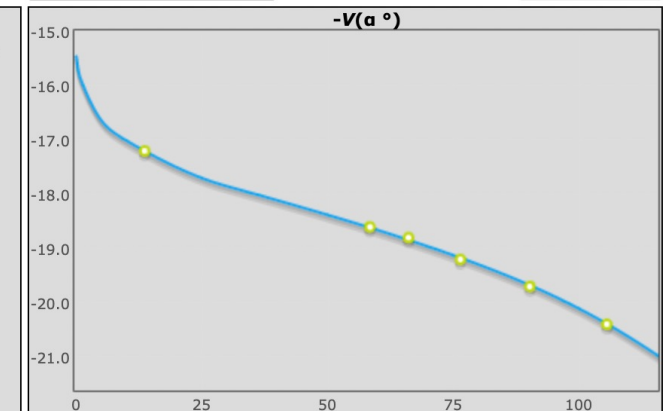
The one-dimensional models suggest that the target '(1566) Icarus' is best explained as **P**-type.

All models in BIC-recommended order:

type	H	G_1	G_2	$k (^{\circ})^{-1}$	wRMS	Δ BIC
<input checked="" type="radio"/> H, G_1, G_2	15.44	0.09501	0.1216	-0.02024	0.1390	0.000
<input type="radio"/> H, G_{12}	16.47	0.5520	0.1902	-0.02735	0.2339	4.451
<input type="radio"/> $H(P)$	16.44	0.8343	0.04887	-0.03204	0.3877	8.722
<input type="radio"/> $H(D)$	16.50	0.9617	0.01645	-0.03294	0.4458	10.40
<input type="radio"/> $H(C)$	16.35	0.8228	0.01938	-0.03280	0.4512	10.54
<input type="radio"/> $H(S/M)$	16.59	0.2588	0.3721	-0.01957	0.4636	10.87
<input type="radio"/> $H(E)$	16.92	0.1505	0.6005	-0.01468	0.6682	15.26

Errors for selected model

Give fit report



Fit error log window

Penttilä et al.
(2016) julkaisivat
myös netissä
toimivan H, G₁, G₂
laskurin: <http://h152.it.helsinki.fi/HG1G2/>

Havaintojen suunnittelu ja raportointi

- Vaihekäyrien mallinnus auttaa mm. havaintojen suunnittelussa, koska se kertoo magnitudin tietyssä vaihekulmassa, mikä on yksi rajoitus havainnoille
- <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html#/>
- Havaintoja tehdään sadoilla teleskoopeilla ympäri maapallon
- Asteroidihavainnot raportoidaan esim. Minor Planet Centeriin: minorplanetcenter.net
 - Kun havaintoja kertyy, niitä voidaan käyttää mm. parempien vaihekäyrämallien tekoon

